

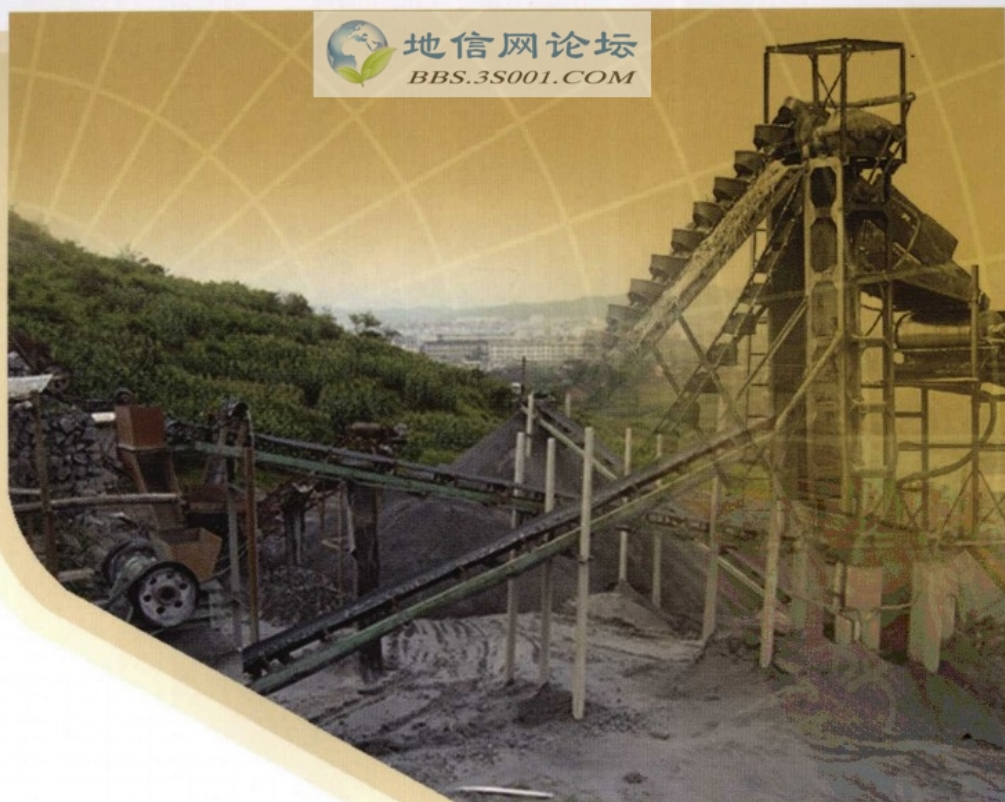


教育部高职高专资源勘查类专业教学指导委员会审查通过  
高职高专院校资源勘查类专业“十一五”规划教材

主 编：任 飞 赵兴东 郝志贤

# 采选概论

CAIXUAN GAILUN



地 质 出 版 社

策划编辑：王章俊 魏智如  
责任编辑：王春庆 王秋芬



## 采选概论

CAIXUAN GAILUN



地信网论坛  
BBS.3S001.COM

ISBN 978-7-116-06147-7



9 787116 061477 >

定价：23.80元



教育部高职高专资源勘查类专业教学指导委员会审查通过  
高职高专院校资源勘查类专业“十一五”规划教材

# 采 选 概 论

主编：任 飞 赵兴东 郝志贤

主审：叶雪均 饶运章



地信网论坛  
BBS.3S001.COM

地 质 出 版 社

· 北 京 ·







## 内 容 提 要

本教材主要包括采矿和选矿两部分。采矿部分主要以井巷工程和采矿方法为核心,兼顾采矿基本概念、矿床开拓设计以及凿岩爆破等基础知识,同时涵盖部分露天开采的基本概念。选矿部分主要讲述了破碎与筛分、磨矿与分级以及各种选矿方法(磁电选矿、重力选矿、浮游选矿、化学选矿等),包括精矿脱水、选矿厂尾矿处理以及选矿过程的取样检查与选厂金属平衡等知识。

本教材具有较强的实用性,可用作高等职业教育、职业培训、在职职工自修的教材,也可以作为采矿和选矿专业技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

采选概论 / 任飞等主编. —北京:地质出版社, 2009. 8

(高职高专院校资源勘查类专业系列教材)

ISBN 978 - 7 - 116 - 06147 - 7

I. 采… II. 任… III. ①矿山开采-高等学校:技术学校-教材②选矿-高等学校:技术学校-教材 IV. TD8  
TD9



地信网论坛  
BBS.3S001.COM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 152701 号

策划编辑:王章俊 魏智如

责任编辑:王春庆 王秋芬

责任校对:杜 悦

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010)82324508 (邮购部); (010)82324514 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:[zbs@gph.com.cn](mailto:zbs@gph.com.cn)

传 真:(010)82324340

印 刷:北京地质印刷厂

开 本:787mm × 1092mm 1/16

印 张:15.5

字 数:370 千字

印 数:1—3000 册

版 次:2009 年 8 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:23.80 元

书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 06147 - 7

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)



# 高职高专院校资源勘查类专业“十一五”规划教材

## 编 委 会

主 任：桂和荣

副主任：王章俊

委 员（以姓氏笔画为序）：

马艳平 马锁柱 刘 瑞 李立志 李 华

李军凯 陈洪冶 罗 刚 肖 松 辛国良

范吉钰 郝志贤 殷 瑛 徐汉南 徐耀鉴

夏敏全 韩运宴 靳宗菊 魏智如

## 编写说明

随着我国社会经济的快速发展,对高技能应用型人才的需求不断增大,我国政府逐年加大了对职业教育的投入。在这一背景下,地学职业教育也取得了长足进展。但是,由于历史原因,我国的地学职业教育起步较晚,基础相对薄弱,一直没有一套比较系统的专业教材。组织编写一套能够满足各校教学需要,特色鲜明的地学类高等职业教育教材成为教育管理部门和广大师生的强烈愿望和迫切要求。

经过深入调研和精心准备,教育部高等学校高职高专资源勘查类专业教学指导委员会(以下简称“教指委”)会同地质出版社,于2006年7月初组织全国分属地矿、冶金、有色、石油、核工业等部门的10所高职高专院校的一线教师,在河南郑州召开了教材编写研讨会。会议决定,先期编写23种急需的资源勘查类、地质工程与技术类专业高职高专教材,以满足各校教学之需。首批编写的教材包括《普通地质学》、《矿物学基础》、《岩石学》、《地球化学找矿方法》、《岩土工程勘察》等,并分别于2007年8月、2008年1月出版。

2008年5月,教指委在湖南长沙组织召开了“全国高等学校高职高专资源勘查类专业教学改革与教材建设研讨会”。会议决定,继续组织编写第二批资源勘查类专业高职高专层次的专业教材。第二批列选的教材共20种,包括:《普通化学》、《晶体光学及光性矿物学》、《区域地质调查工作方法》、《矿山地质学》、《基础工程施工技术》等,分别于2009年8月、2010年1月出版。

本套教材的编写紧扣高等职业教育的培养目标,努力彰显下列特点:

1. 坚持理论够用,注重实践的编写原则。高职高专教育既是我国高等教育又是职业教育的组成部分,并以培养高技能应用型人才为目标。因此,教材内容不仅要具备高等教育的知识内涵,同时还要兼具职业能力与技术培养的要求,以满足学生综合素养和职业素质两方面能力的提升。

2. 教材内容紧跟形势,体现出与时俱进的科学发展观。最近10年来,地学基础研究领域的新理论、新发现、新成果层出不穷,地学应用领域的新技术、新标准、新方法日新月异。将这些最新成果融入教材,使学生所学知识与行业需求紧密结合是教材编写的基本要求之一。

3. 体现系列教材的特点,内容避免重复。由于各校教学大纲及课程设置上的差异,对教材编写立项和取材造成了困难。本套教材以各校教学大纲为参考,内容安排和课时设计遵循从众原则,最大限度地避免了不同教材之间的内容重复。

4. 教材篇幅与课时设计紧密挂钩,内容力求简明精炼。本套教材编写以各校的教学大纲为基础,以专业规范为标准,努力控制篇幅,突出重点。

5. 充分考虑职业教育的特点, 编写体例有所创新, 便于教、学双方使用。为培养学生的实际动手能力和实践认知能力, 多数教材附有实习(实验)指导书, 或以附录的形式附于书末。此外, 每章开篇增加了内容简介、学习目的等导读性内容; 结尾总结本章应掌握的重点、难点等总结性内容; 最后, 针对本章重点列出本章的复习思考题。

本套教材的编写组织严密, 管理到位。教材编写从立项伊始就成立了以教指委主任桂和荣教授为主任委员、以地质出版社副社长王章俊编审为副主任委员的教材编写委员会。编委会积极开展工作, 充分发挥参编院校、教指委、出版社的不同职能, 保证了教材编写、评审、出版过程的有序进行。为保证教材质量, 教指委承担了绝大多数教材的审稿任务, 并分别于2007年4月、2009年5月两次主持召开教材评审会, 对每种教材进行严格的质量评审。

本套教材的编写与出版还得到了中国地质学会教育研究分会的支持和帮助。教材编写过程中, 分会领导提出了许多指导性意见和建议, 并积极推荐知名专家参与教材的审稿把关工作。

这套教材的出版, 从品种上构建了我国资源勘查类专业高等职业教育教材建设的体系和框架, 极大地缓解了这一专业层次教材的短缺和不足。精品教材的诞生有一个反复锤炼的过程, 本套教材的编写虽经多方努力, 问题和不足仍在所难免, 恳请各校师生及广大读者提出宝贵意见, 以便修订时更改和完善。

教材编写委员会

2009年6月



# 目 次

## 前 言

## 第一篇 采矿部分

<b>第一章 金属矿床地下开采基本知识</b> .....	(1)
<b>第一节 基本概念及矿床工业特征</b> .....	(1)
一、矿石和废石的概念 .....	(1)
二、矿石的种类 .....	(1)
三、矿石品位的概念及计算 .....	(2)
四、矿石和围岩的性质 .....	(2)
五、矿体的分类 .....	(5)
<b>第二节 开采单元划分及开采顺序</b> .....	(6)
一、开采单元划分 .....	(6)
二、矿床的开采顺序 .....	(7)
<b>第三节 矿床开采步骤</b> .....	(10)
一、开拓工作 .....	(10)
二、采准工作 .....	(10)
三、切割工作 .....	(12)
四、回采工作 .....	(12)
五、三级矿量及其含义 .....	(13)
<b>第四节 矿石损失与贫化</b> .....	(13)
一、矿石损失、贫化的概念及其产生的原因 .....	(13)
二、损失贫化计算 .....	(13)
三、降低矿石损失、贫化的措施 .....	(15)
<b>复习思考题</b> .....	(15)
<b>第二章 井巷平面设计</b> .....	(16)
<b>第一节 阶段开拓设计</b> .....	(16)
一、阶段开拓平面设计 .....	(16)
二、开拓方式选择 .....	(18)
三、井底车场的基本概念 .....	(22)

四、阶段运输巷道的布置 .....	(25)
第二节 凿岩爆破 .....	(27)
一、凿岩 .....	(27)
二、爆破 .....	(29)
第三节 井巷设计与施工 .....	(33)
一、平巷断面形状及尺寸设计 .....	(33)
二、竖井井筒断面设计 .....	(42)
第四节 天井掘进方法 .....	(50)
一、普通法掘进天井 .....	(50)
二、吊罐法掘天井 .....	(52)
第五节 斜井设计与施工 .....	(57)
一、斜井井筒断面布置 .....	(58)
二、斜井井筒内设施 .....	(60)
三、斜井掘砌 .....	(62)
复习思考题 .....	(66)
第三章 地下采矿方法 .....	(67)
第一节 采矿方法及其分类 .....	(67)
一、采矿方法的定义 .....	(67)
二、采矿方法的分类 .....	(67)
第二节 空场采矿法 .....	(67)
一、空场采矿法概述 .....	(67)
二、房柱法 .....	(68)
三、浅孔留矿法 .....	(72)
四、分段凿岩阶段矿房法 .....	(76)
第三节 充填采矿法 .....	(80)
一、充填采矿法概述 .....	(80)
二、上向水平分层水砂充填法 .....	(81)
三、胶结充填采矿法 .....	(84)
第四节 崩落采矿法 .....	(85)
一、崩落采矿法概述 .....	(85)
二、无底柱分段崩落采矿法 .....	(86)
三、壁式崩落采矿法 .....	(91)
第五节 矿柱回采和空区处理 .....	(95)
一、矿柱回采 .....	(95)

二、采空区处理 .....	(95)
复习思考题 .....	(96)
<b>第四章 露天开采简介 .....</b>	<b>(97)</b>
第一节 露天开采的基本概念 .....	(97)
一、露天开采常用名词术语 .....	(97)
二、露天开采程序 .....	(99)
第二节 露天生产工艺 .....	(99)
一、穿爆工作 .....	(99)
二、采装工作 .....	(102)
三、运输工作 .....	(103)
四、排土工作 .....	(104)
第三节 露天矿床开拓与开采境界确定 .....	(104)
一、露天矿床开拓 .....	(104)
二、露天开采境界的确定 .....	(106)
复习思考题 .....	(108)

## 第二篇 选矿部分

<b>第五章 选矿概述 .....</b>	<b>(109)</b>
第一节 选矿的基本概念 .....	(109)
第二节 选矿的发展简史 .....	(110)
第三节 选矿的任务及其在国民经济中的地位和作用 .....	(111)
第四节 选矿与地质、采矿的关系 .....	(112)
一、选矿与地质的关系 .....	(112)
二、选矿与采矿的关系 .....	(113)
第五节 选矿的基本过程和常用指标 .....	(113)
一、选矿的基本过程 .....	(113)
二、常用指标 .....	(114)
第六节 未来选矿技术的应用与发展 .....	(116)
一、矿物富集、分离与综合利用 .....	(116)
二、矿物提取 .....	(116)
三、矿物材料 .....	(116)
四、矿物化学品加工 .....	(117)
五、选矿计算机技术与矿物经济 .....	(117)
六、非矿物资源的富集与分离 .....	(117)



复习思考题 .....	(117)
<b>第六章 破碎与筛分 .....</b>	<b>(118)</b>
第一节 概述 .....	(118)
一、破碎 .....	(118)
二、筛分 .....	(119)
第二节 破碎与筛分原理 .....	(120)
一、破碎学说 .....	(120)
二、筛分原理 .....	(121)
第三节 破碎与筛分设备 .....	(121)
一、破碎设备 .....	(121)
二、筛分设备 .....	(125)
第四节 破碎与筛分的影响因素及生产率计算 .....	(127)
一、破碎的影响因素 .....	(127)
二、破碎机生产率计算 .....	(127)
三、筛分的影响因素 .....	(128)
四、筛分机生产率计算 .....	(130)
复习思考题 .....	(131)
<b>第七章 磨矿与分级 .....</b>	<b>(132)</b>
第一节 概述 .....	(132)
一、磨矿 .....	(132)
二、分级 .....	(133)
第二节 磨矿与分级原理 .....	(133)
一、磨矿原理 .....	(133)
二、分级原理 .....	(134)
第三节 磨矿与分级设备 .....	(135)
一、磨矿设备 .....	(135)
二、分级设备 .....	(139)
第四节 磨矿与分级的影响因素及生产率计算 .....	(140)
一、磨矿的影响因素 .....	(140)
二、磨矿的生产率计算 .....	(141)
三、分级的影响因素 .....	(143)
四、分级效率的计算 .....	(144)
复习思考题 .....	(145)

<b>第八章 磁电选矿</b>	(146)
第一节 概述	(146)
第二节 磁力分选原理	(147)
一、磁选机的磁场	(147)
二、磁选基本条件	(147)
三、磁力	(148)
第三节 矿物的磁性	(149)
一、物质的磁性	(149)
二、磁选中矿物磁性的分类	(150)
三、强磁性矿物的磁性及其影响因素	(150)
四、弱磁性矿物的磁性及其影响因素	(153)
第四节 磁选设备及操作因素	(153)
一、弱磁选设备	(153)
二、强磁选设备	(157)
三、高梯度与超导磁选设备	(161)
第五节 其他磁分离技术	(163)
一、磁流体静力选矿	(163)
二、磁流体动力选矿	(163)
第六节 电力分选	(163)
一、概述	(163)
二、电选机	(164)
三、影响电选的因素	(165)
复习思考题	(166)
<b>第九章 重力选矿</b>	(167)
第一节 概述	(167)
第二节 重力分选原理	(168)
一、颗粒在介质中的自由沉降	(168)
二、颗粒在介质中的干涉沉降	(171)
三、等降比	(171)
第三节 水力分级和洗矿	(172)
一、水力分级	(172)
二、洗矿	(172)
第四节 重介质分选	(172)
一、概述	(172)

二、重介质选矿设备 .....	(173)
第五节 跳汰分选 .....	(174)
一、概述 .....	(174)
二、跳汰机 .....	(175)
第六节 溜槽分选 .....	(176)
一、概述 .....	(176)
二、溜槽选矿设备 .....	(176)
第七节 摇床分选 .....	(179)
一、概述 .....	(179)
二、摇床类型 .....	(180)
第八节 风力分选 .....	(181)
一、风力摇床 .....	(181)
二、风力尖缩溜槽 .....	(182)
三、风力重介质分选机 .....	(182)
复习思考题 .....	(182)
第十章 浮游选矿 .....	(183)
第一节 概述 .....	(183)
一、浮选的基本概念 .....	(183)
二、浮选过程 .....	(184)
第二节 浮游选矿原理 .....	(184)
一、矿物表面的润湿性 .....	(184)
二、矿粒与气泡附着前后自由能的变化与接触角的关系 .....	(186)
三、矿粒在气泡上附着的牢固度 .....	(187)
第三节 浮选药剂 .....	(188)
一、捕收剂 .....	(188)
二、起泡剂 .....	(194)
三、调整剂 .....	(195)
第四节 浮选设备及工艺 .....	(198)
一、浮选对浮选机的基本要求 .....	(198)
二、浮选机的分类 .....	(199)
三、浮选机的发展趋势 .....	(202)
四、浮选工艺 .....	(202)
复习思考题 .....	(204)



<b>第十一章 化学选矿及其他选矿方法</b>	(205)
<b>第一节 化学选矿</b>	(205)
一、概述	(205)
二、焙烧	(206)
三、浸出	(206)
四、溶剂萃取	(207)
五、离子交换法	(207)
六、离子浮选	(208)
<b>第二节 其他选矿方法</b>	(208)
一、手选	(208)
二、摩擦选矿	(208)
三、粒度选矿	(208)
四、形状选矿	(208)
五、硬度选矿	(208)
六、油膏选矿	(209)
七、磁流体分选	(209)
八、机械拣选（或自动拣选）	(209)
<b>复习思考题</b>	(209)
<b>第十二章 精矿脱水</b>	(210)
<b>第一节 概述</b>	(210)
<b>第二节 沉淀与浓缩</b>	(210)
一、周边传动式浓缩机	(211)
二、倾斜板浓密箱	(211)
<b>第三节 过滤与干燥原理</b>	(212)
一、过滤	(212)
二、干燥	(212)
<b>第四节 过滤与干燥设备及操作</b>	(212)
一、过滤设备	(212)
二、干燥设备	(214)
<b>复习思考题</b>	(215)
<b>第十三章 选矿厂尾矿处理</b>	(216)
<b>第一节 概述</b>	(216)
<b>第二节 尾矿坝及尾矿输送</b>	(216)
一、尾矿坝	(216)

二、尾矿输送 .....	(218)
三、尾矿向沉淀池排入的方式 .....	(219)
四、尾矿输送系统 .....	(219)
第三节 尾矿水的净化与回水再用 .....	(220)
一、尾矿水的净化 .....	(220)
二、尾矿水净化标准 .....	(220)
三、回水再用 .....	(220)
四、回水输送系统 .....	(220)
复习思考题 .....	(221)
第十四章 选矿过程的取样检查与选厂金属平衡 .....	(222)
第一节 选矿过程的取样检查 .....	(222)
一、取样的最小质量 .....	(222)
二、静置料堆的取样 .....	(222)
三、流动物料的取样 .....	(223)
四、矿样的混匀 .....	(224)
五、矿样的缩分 .....	(224)
第二节 选矿工艺过程的可检参数 .....	(225)
一、检测目的 .....	(225)
二、检测主要内容 .....	(226)
第三节 选矿厂的金属平衡 .....	(226)
一、工艺金属平衡 .....	(226)
二、商品金属平衡 .....	(228)
复习思考题 .....	(229)
附 录 .....	(230)
一、试验要点 .....	(230)
二、实习要点 .....	(231)
参考文献 .....	(232)

# 第一篇 采矿部分

## 第一章 金属矿床地下开采基本知识

### 本章导读

了解矿石及其种类、废石的概念，矿石和围岩的物理力学性质；重点掌握损失贫化率，阶段、矿块和盘区、采区的概念以及矿床开采顺序。

### 第一节 基本概念及矿床工业特征

#### 一、矿石和废石的概念

1) 矿物：在地壳中，由于地质作用所形成的天然单质或化合物统称为矿物。矿物是组成岩石或矿石的基本单元。

2) 矿石：指在现有技术经济条件下，能够从中提取有用组分（元素、化合物或矿物）或利用其特性的自然矿物聚集体。包括金属矿石、非金属矿石以及有用的岩石。

3) 矿体：矿石的聚集体称为矿体。一个矿体是一个独立的地质体，具有一定的几何形状，具有一定的空间位置等。

4) 矿床：矿床是矿体的总称。对于某一矿区而言，一个矿床由一个或几个矿体组成，矿床又可分为工业矿床和非工业矿床。在当前技术经济条件下，符合开采和利用要求的矿床称为工业矿床，否则称为非工业矿床。

5) 围岩：矿体周围的岩石称围岩（图 1-1）。位于矿体上部的围岩称上盘围岩，位于矿体下部的围岩称下盘围岩。

6) 夹石：夹在矿体中的岩石称夹石。

7) 废石：在采矿过程中所采出的围岩或夹石，一般称为废石，即矿床周围的围岩以及夹石，根本不含有用成分或者含量过少，当前不宜作为矿石开采。

应当指出，矿石与废石的概念是相对的，它与一个国家的社会制度、科技发展水平、已经掌握的资源情况以及对某种金属的需要量都存在关系。过去的废石，现在有可能成为可开采的矿石。

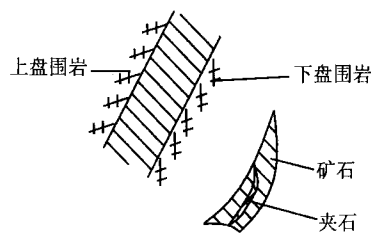


图 1-1 矿体围岩

#### 二、矿石的种类

在自然界中的矿物很多，现在，人们已经知道的矿物有 4000 多种，而有用矿物约有 200 余种。



在地壳中，以自然金属形式存在的矿石是很少的，大量的矿石是以氧化矿、硫化矿等形式存在的。含金属成分的矿石，称金属矿石。

#### 1. 金属矿石按其所含金属矿物的性质、化学成分、矿物组成的分类

- 1) 自然金属矿石：它是以单一元素形式存在的，如金、铂、银等。
- 2) 氧化矿石：矿石成分为氧化物，如赤铁矿 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、赤铜矿 ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) 等。
- 3) 硫化矿石：矿石的成分为硫化物，如黄铜矿 ( $\text{CuFeS}_2$ )、方铅矿 ( $\text{PbS}$ )、辉钼矿 ( $\text{MoS}_2$ )、闪锌矿 ( $\text{ZnS}$ ) 等。
- 4) 混合矿石：是前三种的混合物。

#### 2. 根据所含金属种类的不同对矿石的分类

- 1) 黑色金属矿石：如铁、锰、铬。
- 2) 有色金属矿石：如铜、铅、锌、铝等。
- 3) 稀有金属矿石：如铌、钽等（为相对概念）。
- 4) 放射性矿石：如铀、钍等。
- 5) 贵重金属矿石：如金、银、铂等。
- 6) 非金属矿石：如建筑石材、石膏、滑石等。

### 三、矿石品位的概念及计算

#### 1. 矿石品位的概念

通常把矿石中凡是可供利用的元素或矿物称为有用成分。矿石中所含有用成分的多少用品位来表示。

所谓品位就是：矿石中有用成分的质量与矿石质量之比，常用百分数（%）表示。即

$$\text{品位} = \frac{\text{矿石质量}}{\text{矿石中有用成分质量}} \times 100\%$$

贵重金属（金、铂等）矿石的品位是用  $\text{g/t}$  ( $\text{m}^3$ ) 来表示。

#### 2. 边界品位

指可采矿石有用成分含量的最低界限。它是矿体边界上矿石的最低品位，是划分矿石和废石，圈定矿体范围的标准。在圈定的矿体范围内，任意取样点的品位，一般都不应低于边界品位。

#### 3. 最低工业品位

指以边界品位圈定的矿体范围内，合乎工业开采要求的平均品位的最低值。即根据目前的工业技术水平，当矿石品位低于某个数值时，便没有利用价值，这一数值的矿石品位叫最低工业品位。用边界品位圈定的矿体或矿体中某个块段的平均品位，必须高于最低工业品位才有开采价值，否则无开采价值。

### 四、矿石和围岩的性质

矿石和围岩的性质主要包括有：硬度、坚固性、稳固性、碎胀性、结块性、氧化性、自燃性及含水性等。

### 1. 硬度

矿岩的硬度是指矿岩抵抗工具侵入的性能。矿岩的硬度取决于矿岩颗粒的硬度、形状、大小、晶体结构以及颗粒间胶结的情况等，矿岩的硬度除了对凿岩有很大影响外，往往影响矿岩的坚固性和稳固性。

### 2. 坚固性

坚固性指岩石在破碎时的难易程度。坚固性的大小用坚固性系数表示，也称普氏系数，用 $f$ 表示，单位 MPa。

$$f = R/100$$

式中： $R$  为岩石标准试样的单轴抗压强度，MPa。

通常用的普氏岩石分级法就是根据坚固性系数来进行岩石分级的。如：

极坚固岩石  $f=15 \sim 20$ （坚固的花岗岩、石灰岩、石英岩等）

坚硬岩石  $f=8 \sim 10$ （如不坚固的花岗岩，坚固的砂岩等）

中等坚固岩石  $f=4 \sim 6$ （如普通砂岩、铁矿等）

不坚固岩石  $f=0.8 \sim 3$ （如黄土，仅为 0.3）

矿岩的坚固性也是一种抵抗外力的性质，但它与矿岩的强度却是两种不同的概念。

强度是指矿岩抵抗压缩、拉伸、弯曲及剪切等单向作用的性能；而坚固性所抵抗的外力却是一种综合的外力，如抵抗锹、稿、机械破碎、炸药的综合作用力等，它对爆破及空区的影响较大。

### 3. 稳固性

#### (1) 矿岩稳固性的概念

稳固性是指矿岩在空间允许暴露的面积大小和允许暴露的时间长短的性能。

影响稳固性的因素十分复杂，它与矿岩的成分、结构、构造、节理状况、风化程度以及水文地质条件都有关系，还与矿岩在开采过程中的暴露形状有关，如巷道的方向、开采深度等。稳固性对于采矿方法、支护方法的选择及掘进方式等都有很大影响。

#### (2) 稳固性与坚固性的关系

两者既有联系，又有区别。一般在节理发育，构造破碎的地带，矿岩的坚固性虽然可能好，但稳固性大为下降。因此，稳固性与坚固性不能混同，坚固性不好的，不一定就不稳固。

#### (3) 矿岩稳固性大致可分为 5 类：

1) 极不稳固的：不允许有暴露面积。要求在掘进及开采中必须超前支护，否则会垮落。

2) 不稳固的：允许暴露的面积在  $50\text{m}^2$  以内。亦即允许有较小的暴露面积，随着回采，要立即进行支护。

3) 中等稳固的：允许有一定的暴露面积，即  $50 \sim 200\text{m}^2$ ，一般不支护，或作临时支护，即可安全地进行生产。

4) 较稳固的：允许有较大的暴露面积，为  $200 \sim 500\text{m}^2$ ，一般不支护。

5) 极稳固的：允许有很大的暴露面积，即  $800\text{m}^2$  以上。不必支护，可以长期不垮落。

### 4. 矿岩的碎胀性

矿岩的碎胀性是指矿石和围岩破碎之后体积增大的性质。碎胀性可用碎胀系数来表示

(又称松散系数):

$$\text{碎胀系数} = \frac{\text{破碎后体积}}{\text{破碎前体积}} > 1$$

一般坚硬矿岩石的碎胀系数为 1.2 ~ 1.6。

碎胀系数的大小主要取决于破碎之后矿岩的粒度组成和块度的形状。初装入容器(矿车、箕斗等)内的矿岩块,因矿岩块之间空隙较大,则碎胀系数值可达 1.8 ~ 2.0 (称作二次碎胀)。

### 5. 结块性

结块性是指采下的矿岩遇水受压,经过一定的时间,又结成整块的性质。常见的是粘土矿物、滑石或高硫矿。这些矿石遇水受压,经过一段时间后,易出现结块现象。

结块性对于放矿、装卸、运输等生产环节造成困难,甚至影响某些采矿方法的顺利使用。具有结块性的矿石不宜在采场、井巷中存放时间过长。

### 6. 氧化性

矿石的氧化性是指硫化矿石在水和空气的作用下,变成了氧化矿石的性质。

在硫化矿石中混入氧化矿石后,会降低选矿的回收率。因此硫化矿与氧化矿石不要混在一起。

### 7. 自燃性

自燃性是指高硫化矿石(含硫量在 18% ~ 20%),在其透水性及透气性良好的条件下,发生自燃的性能。

高硫化矿在井下氧化时,放出大量的热,经过一段时间,温度升高,会引起井下火灾,特别是粉状的高硫化矿与空气接触的面积大,更容易引起火灾。因此对于高硫化矿床必须采取快采、快处理的办法来开采,以减少矿石的损失。

### 8. 含水性

含水性是指矿岩裂缝和孔隙中含水的性质。矿岩含水性直接影响到矿石的提升、运输及矿仓内储矿。矿岩含水过多,会使排水费用增加。

### 9. 其他性质

1) 体积密度:是指单位体积原岩的质量。一般岩石的体积密度在  $2.3 \sim 3.0 \text{t/m}^3$  之间。

2) 块度:矿岩崩落后形成的岩块尺寸大小称为块度。块度通常用三个相互垂直方向的平均尺寸来表示,即  $B$ 、 $L$ 、 $H$  的平均值。有时用最大方向的尺寸表示(图 1-2)。

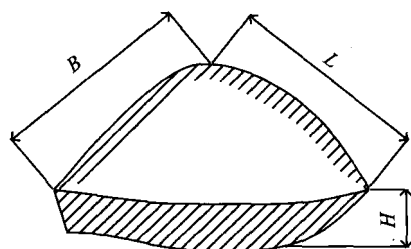


图 1-2 矿石块度

一定的装运、破碎等设备,对矿岩的最大块度有一定的要求。为了保证矿山持续生产,必须使矿石的最大块度与装运等设备的要求相适应。通常用合格块度来表示限制采出矿石的块度,矿石块度超过合格块度时,则要求进行二次破碎。

合格块度即允许的矿石最大块度。通常合格块度在 250 ~ 500mm 之间。它是根据开采及加工的工艺和设备要求来确定的。随着机械化水平的提高,合格块度有增大的趋势。

3) 自然安息角：松散矿岩自然堆积时，其四周将形成倾斜的堆积坡面，自然堆积坡面与水平面相交的最大角度，称为该矿岩的自然安息角。

## 五、矿体的分类

### 1. 矿体的形状

矿体的形状反映了矿体在地壳中的空间外部形态。矿体形态对采矿有直接影响，形状越复杂，开采越困难。按形状不同将矿体分为层状矿体、脉状矿体和块状矿体。

#### (1) 层状矿体

矿体呈层状分布，多源于沉积或变质沉积矿床。特点是：①层状矿床的品位、倾角和厚度变化不大，较稳定；②矿床规模比较大；③多见于黑色金属矿床。

#### (2) 脉状矿体

主要由于热液和气化作用，将矿物充填于地壳的裂隙中生成的矿床。特点是：①矿脉与围岩接触处有蚀变现象；②矿床赋存条件不稳定；③有用成分含量不均匀。

#### (3) 块状矿床

主要是充填、接触交代分离和氧化作用形成的。特点是：①呈不规则的透镜状、棱柱等形状；②矿体大小不一；③矿体与围岩的界限不明显。

### 2. 矿体的埋藏要素

矿体的埋藏要素包括矿体的走向、倾向、倾角、厚度和延深。

#### (1) 厚度

矿体厚度是指矿体的上盘与下盘之间的垂直距离或水平距离（图 1-3）。前者称为矿体的真厚度，后者称为矿体的水平厚度。对于急倾斜矿体，常用水平厚度；对于水平微倾斜、缓倾斜、倾斜矿体常用垂直厚度。

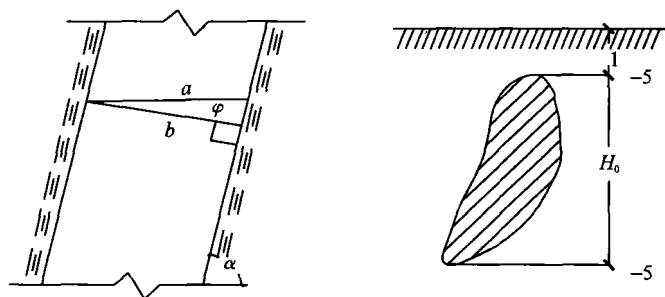


图 1-3 矿体厚度

$a$ —水平厚度； $b$ —垂直厚度； $\varphi$ — $a$ 与 $b$ 夹角； $\alpha$ —矿体倾角

按厚度将矿体分为如下 5 类：

- 1) 极薄矿脉：矿体厚度在 0.8m 以下；
- 2) 薄矿脉：矿体厚度为 0.8 ~ 4.0m 之间；
- 3) 中厚矿体：矿体厚度为 4.0 ~ 10m 之间；
- 4) 厚矿体：矿体厚度为 10 ~ 30m；
- 5) 极厚矿体：矿体厚度在 30m 以上。

## (2) 延深

延深是指矿体在深度上的分布情况，可以用埋藏深度和赋存深度来表示。埋藏深度( $h$ )指矿体上部界线到地表的深度，赋存深度( $H_0$ )指矿体上部界限到下部界限的垂直距离或倾斜距离。

## 3. 金属矿床的特点

金属矿床一般具有以下特点：①矿床赋存条件不稳定；②矿石品位变化大；③地质构造复杂；④矿石和围岩的硬度较大；⑤矿床多具蓄水性。

# 第二节 开采单元划分及开采顺序

## 一、开采单元划分

### 1. 井田、矿田和矿区的概念

在实际采矿企业中，矿务局或公司下面通常设一个或几个矿山；在矿山下面设一个或几个坑口，而每一个坑口都是一个独立的开采系统和生产单位（图1-4）。

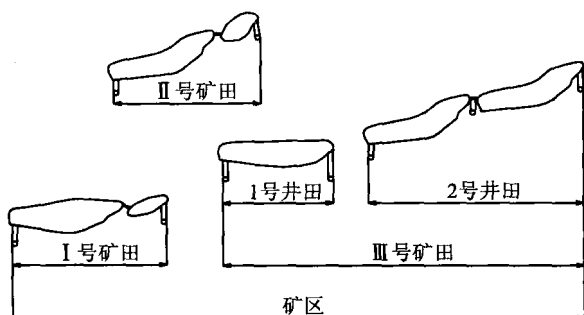


图1-4 井田、矿田和矿区划分示意图

按照这种所属关系划分井田、矿田和矿区如下：

- 1) 划归一个坑口开采的矿体，称为井田；
- 2) 划归一个矿山企业开采的全部矿床或者是一部分，称为矿田；
- 3) 划归一个公司或矿务局开采的矿体，称为矿区。

### 2. 阶段和矿块的概念

#### (1) 阶段

阶段就是在开采缓倾斜、倾斜和急倾斜矿床时，在井田中每隔一定的垂直距离，掘进与走向一致的主要运输巷道，将井田在垂直方向上划分为若干矿段，每个矿段称为一个阶段（图1-5）。

只要条件许可，适当增加阶段高度，可以减少阶段数目，降低开拓、采准工程量，减少矿石损失和贫化。因此，近年来有增加阶段高度的趋势。

#### (2) 矿块

在阶段中沿走向每隔一定距离，掘进天井连通上、下两个相邻的阶段运输平巷，将阶段再划分为独立的回采单元，这样的回采单元称为矿块。

阶段高度是指上、下两个阶段运输平巷之间的垂直距离。阶段高度变化范围较大，对于缓倾斜矿体，阶段高度通常为20~30m；急倾斜矿体，阶段高度通常为50~60m，个别也有的达到80~120m。但是，对于不同的采矿方法，则所需求的阶段高度是不同的。影响阶段高度的主要因素有矿体的赋存条件、所采用的采矿方法及凿岩设备等。

矿床的赋存条件不同，则开采矿块的方法也不同。

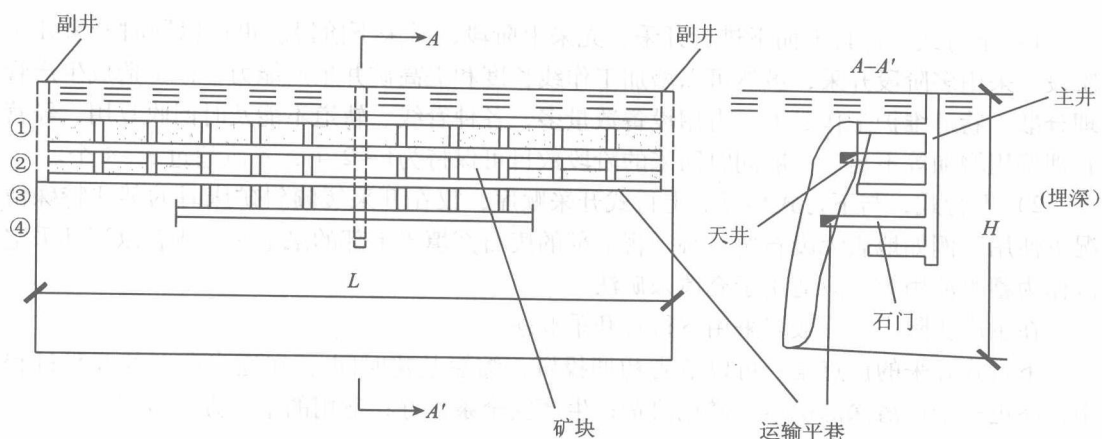


图 1-5 阶段概念

①采完阶段；②回采阶段；③开拓初始阶段；④开拓阶段。 $H$ —高； $L$ —走向长度

### 3. 盘区和采区的概念

#### (1) 盘区

1) 当开采水平和微倾斜矿床时 (即矿体倾角小于  $5^\circ$  的矿床), 如果矿床的厚度不超过允许的阶段高度, 此时, 在井田内不再划分为阶段。

为了工作上的方便, 将井田用盘区运输巷道划分为长方形的矿段, 这种矿段称为盘区。

2) 盘区的范围是以井田边界为其盘区的长度, 而以两个相邻盘区运输巷道之间的距离为其盘区的宽度。

#### (2) 采区

1) 在盘区中沿走向每隔一定距离, 掘进回采巷道连通相邻两个盘区运输巷道, 将盘区再划分为独立的回采单元, 这个独立的回采单元称为采区 (图 1-6)。

2) 采区范围: 上、下以阶段平巷为界, 其高度为阶段高度, 长度以采区天井 (或上山) 为界。长度根据采矿方法不同, 可在  $10 \sim 40\text{m}$  至  $30 \sim 60\text{m}$  之间变化。

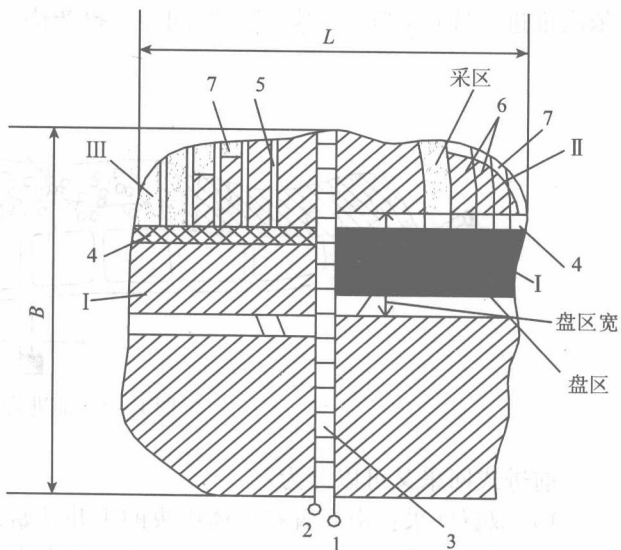


图 1-6 采区示意图

I—开拓盘区；II—采准盘区；III—回采盘区

1—主井；2—副井；3—主运输巷道；4—盘区运输巷道；

5—回采巷道；6—采区；7—切割巷道。 $B$ —矿床的宽

(即井田宽)； $L$ —矿床的长 (井田的长)

## 二、矿床的开采顺序

### 1. 阶段的开采顺序

阶段的开采顺序可有两种方式:

1) 下行式，即自上而下进行开采，先采上阶段，后采下阶段。也可以同时开采几个阶段。采用多阶段开采，虽然可以增加工作线长度和提高矿井生产能力，但也造成生产管理分散，巷道维护工作量大，占用设备数量多，各种管线、轨道不能及时回收复用，经营管理费用增加等不足。一般同时回采的阶段数目可保持为1~2个，不应超过3~4个。

2) 上行式，与下行式相反。上行式开采顺序，仅在开采缓倾斜矿床时的某些特殊情况下使用。例如地表无废石场，必须将上部的废石充填于下部的采空区，或者以深部采空区作为蓄水池用等，只适用于充填采矿法。

在生产实际中，一般多采用下行式开采顺序。

下行式开采的优点是：可以节省初期投资，缩短基建时间；在逐步向下的开采过程中，能进一步探清深部矿体，避免浪费；生产安全条件好；适用的采矿方法范围广。

2. 矿块的开采顺序

阶段中矿块的开采顺序，按照回采工作与主要开拓巷道的位置关系，可分为3种：

(1) 前进式（图1-7）

当阶段运输平巷掘进一定距离后，从靠近主要开拓巷道的矿块开始回采，向井田边界依次推进。优点是矿井初期基建时间短，投产快；缺点是增加了采准巷道的维护费用。

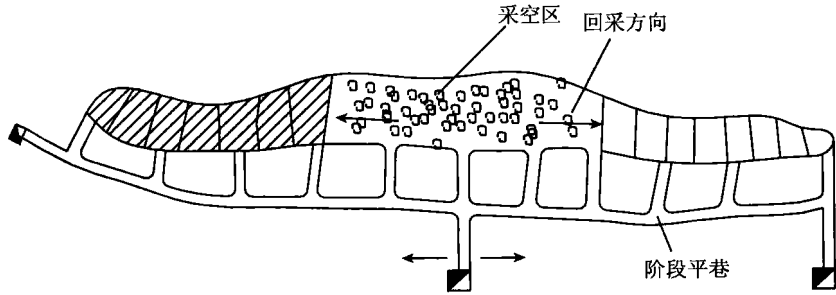


图1-7 前进式回采

前进式回采又可以分为：

- 1) 双翼回采：由布置在矿体中央的主井开始，同时向左右两翼推进，较常用；
- 2) 单翼回采：由主井先向左采完后，再由主井起向右采，少用；
- 3) 侧翼回采：当受到地形限制时，主井布置在矿体一翼，由主井向另一翼推进。

前进式回采顺序通常在矿床赋存条件简单，矿岩稳固，且要求在较早阶段中开展回采工作的情况下采用。

(2) 后退式（图1-8）

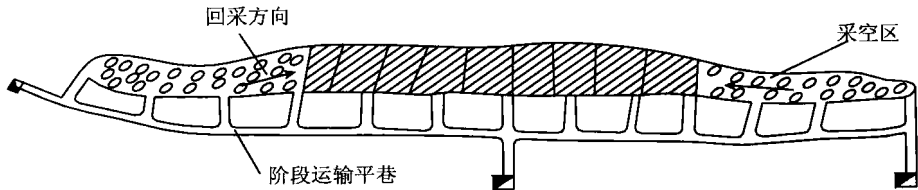


图1-8 后退式回采

阶段运输巷道掘进到井田边界后，从井田边界的矿块开始，向主要开拓巷道方向依次回采（图 1-8）。这种开采顺序也可以分为双翼、单翼和侧翼回采 3 种。

后退式回采的缺点是矿井初期基建时间长，投产慢；优点是巷道维护费用低。

(3) 混合式

混合式回采是指初期采用前进式开采，当阶段运输平巷掘进完毕后，再改为后退式开采，或既前进，又后退同时开采。

优点是兼顾了前两种的优点，缺点是生产管理比较复杂。

3. 相邻矿体的开采顺序

一个矿床如果有许多彼此相距很近的矿体，那么在开采其中一个矿体时，将会影响邻近的矿体。在这种情况下，确定合理的开采顺序，对于生产的安全和资源的回收都有很重要的意义。

1) 当矿体倾角 ( $\alpha$ ) 小于或等于围岩的崩落角 ( $\gamma$  或  $\beta$ ) 时，应当采取从上盘向下盘推进的开采顺序。即先采矿体 II，后采矿体 I，使采空区的下盘围岩不会移动，因而不会影响下盘矿体 I 的开采。若反之，就会影响矿脉 II 的开采（图 1-9a）。

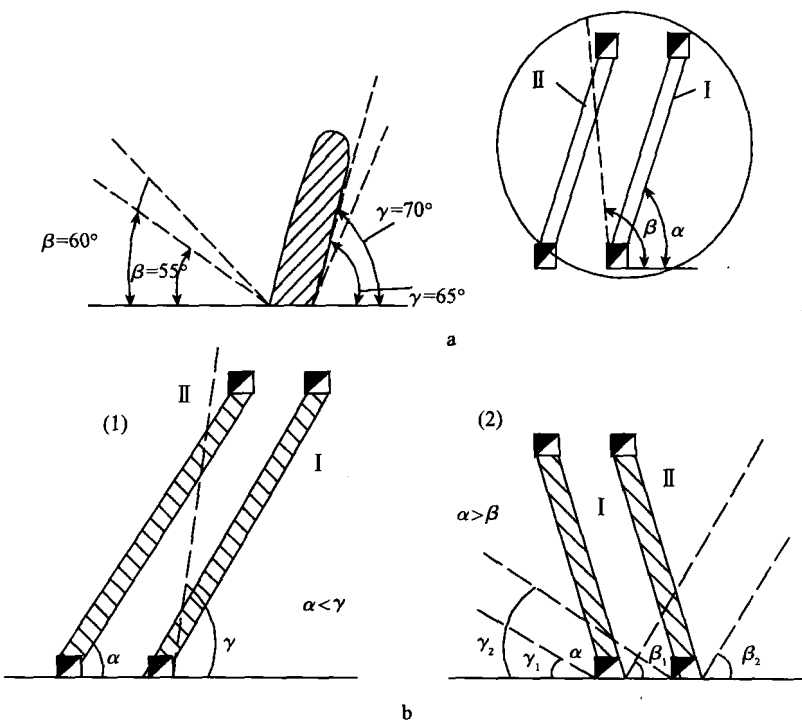


图 1-9 相邻矿体的开采顺序

$\beta$ —上盘移动角； $\gamma$ —下盘移动角； $\alpha$ —矿体倾角

2) 当矿体倾角大于围岩崩落角，两矿体又相距很近时，此时无论先采哪条矿脉，都会因为采空区围岩移动而相互影响。在这种情况下，相邻矿体的开采顺序，应当根据矿体之间夹石层的厚度，矿石和围岩的坚固性，所选取的采矿方法和技术措施而定。一般是先采上盘矿体，后采下盘矿体的开采顺序。如果夹石层不大，采用充填采矿法时，也可以采用由下盘向上盘的开采顺序（图 1-9b）。



3) 当围岩不够稳固时, 为了加快回采强度, 并且为了缩小采空区对围岩的影响, 则往往上盘矿体与下盘矿体同时回采, 即对矿脉群进行平行开采的办法。但是这种方法仅适用于矿脉比较少少的情况。

#### 4. 同一个井田的数个矿体的开采顺序

在野外, 这些矿体往往存在贫富不均, 薄厚不均, 大小不一及开采条件难易不同等复杂条件。在这种情况下, 应遵循的开采原则是: “贫富兼采、薄厚兼采、大小兼采、难易兼采”。否则将会破坏合理的开采顺序, 造成严重的资源损失。

### 第三节 矿床开采步骤

金属矿床地下开采可以分为开拓、采准、切割与回采 4 个步骤, 这些步骤反映了不同的工作阶段。

#### 一、开拓工作

##### 1. 开拓的含义

从地面掘进一系列巷道达到矿体, 使矿体连通地面, 并形成提升、人行、通风、运输、排水、供电、供风、供水 8 大系统。

##### 2. 开拓的目的

把井下将要采出的矿石和废石运到地表; 把废水和污浊的空气排到地表; 把人员、材料、设备运送到井下进行生产。

##### 3. 开拓巷道

为了达到上述开拓目的而掘进的巷道, 称为开拓巷道。例如, 井筒 (竖井、斜井)、平硐、石门、井底车场、井下主要硐室、主要阶段运输巷道、主溜矿井、充填井等, 都属于开拓巷道。

1) 井底车场: 井底车场是井下井口附近一些巷道、硐室的总称 (如水仓、水泵房、井下变电站等)。

2) 石门: 由井筒通向各个需要开采的矿体所掘进的巷道。

3) 井下主要硐室: 指井下火药库、破碎硐室、翻矿硐室、机修硐室等。

#### 二、采准工作

##### 1. 采准的含义

指在已经开拓完毕的矿床里, 按采矿方法的要求掘进采准巷道, 将阶段划分成矿块作为独立的回采单元。并在矿块内创造人行、凿岩、放矿、通风等条件。

##### 2. 采准的任务

主要任务有两项:

1) 划分矿块: 将阶段再划分成矿块, 作为独立的回采单元 (图1-10)。

2) 创造回采条件: 为下一步回采工作创造行人、通风、凿岩、出矿等条件。

### 3. 采准的分段

采准工作是通过开掘一系列巷道来实现的。采准巷道根据方法的不同有所不同，如浅孔留矿法的采准巷道包括漏斗颈，人行通风天井、人行联络道、小川等（图 1-11）。

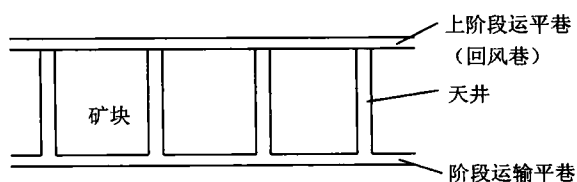


图 1-10 矿块划分

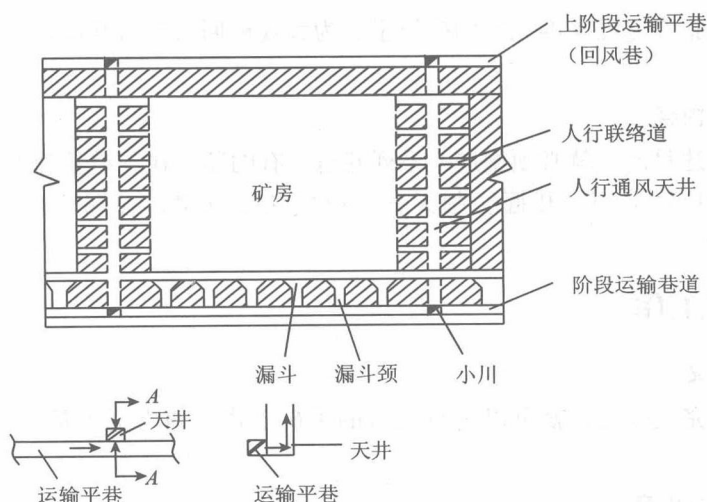


图 1-11 采准分段

### 4. 采准系数及采准比重

由于矿床赋存条件和所用的采矿方法不同，所掘进的采准巷道规格、数量和位置都不同。为了便于比较，通常用采准系数和采准比重两项指标来衡量采准工作量的大小。

#### (1) 采准系数 ( $K_1$ )

指从矿块每采出 1000t 矿石总量所需要掘进的采准、切割巷道的米数，即

$$K_1 = \frac{\sum L}{T} \times 1000$$

式中： $K_1$  为采准系数，m/kt； $\sum L$  为一个矿块中采切巷道的总长度，m； $T$  为一个矿块的采出矿石总量，t。

#### (2) 采准工作比重 ( $K_2$ )

指矿块中采准、切巷道采出矿石量与矿块采出矿石总量的比值，即

$$K_2 = \frac{\sum T_L}{T} \times 100\%$$

式中： $\sum T_L$  为矿块中采切巷道的采出矿石量，t； $T$  为矿块中采出的矿石总量，t。

#### (3) $K_1$ 与 $K_2$ 的比较

采准系数  $K_1$  只反映矿块的采切巷道的长度，而未反映出这些巷道的断面大小（即体积）。采准工作比重  $K_2$  反映了脉内采准巷道和切割巷道，而未反映出脉外的采切巷道工

作量。

$K_1$ 、 $K_2$ 是比较采矿方法优劣的重要指标。在实际生产中，使用  $K_1$  还是  $K_2$  要根据具体情况而定，有时用其中之一表示，有时  $K_1$ 、 $K_2$  同时用，互相补充，使其能反映矿块的采准工作量。

### 三、切割工作

#### 1. 切割的定义

切割工作是指在已经采准完毕的矿块里，为大规模回采矿石开辟自由面和自由空间的工作。

#### 2. 切割工作内容

为了达到上述目的，就必须掘进一系列巷道，有的还要在巷道基础上，加以扩大。如拉底巷道、开辟拉底空间、开掘切割天井，形成切割立槽，在漏斗颈基础上把漏斗劈开等。

### 四、回采工作

#### 1. 回采的定义

当切割工作完成以后，就可以进行大量的采矿工作，通常把大量采矿工作称为回采工作。

#### 2. 回采的具体内容

包括落矿、矿石运搬和地压管理 3 项主要工作。

##### (1) 落矿

以切割空间为爆破自由面，用凿岩爆破的方法崩落矿石。按所采用的采矿方法及凿岩设备的不同，落矿方法可以分为浅孔、中深孔、深孔及药室落矿几种。

浅孔落矿的孔深在 3 ~ 5m，孔径 30 ~ 46mm；中深孔落矿孔深在 15m 以下，孔径 50 ~ 70mm；深孔落矿孔深在 15m 以上，但一般不超过 25 ~ 30m，孔径 90 ~ 110mm；药室落矿是在一定规格的硐室里，装上炸药，直接爆破落矿的方法。由于药室落矿开凿硐室工作困难，作业条件差，易产生大块，通常在回采矿房和矿柱时较少采用。

##### (2) 矿石运搬

指在矿块内，把爆破下来的矿石运到放矿口，并装入矿车中的工作，运搬工作仅仅限于在矿块内（即采场内），采场之外的称为运输。

矿石运搬方法分重力运搬和机械运搬两种。利用矿石的自重从崩落地点运到放矿口称为重力运搬；利用电耙、装运机、铲运机、汽车、皮带动输机等设备运搬矿石的方法称为机械运搬。在矿块回采中，采用哪一种运搬方式主要取决于选用的采矿方法和矿床的赋存条件等。

##### (3) 地压管理

地压是指矿石采出以后，在地下形成采空区，经过一段时间后，矿柱及上、下盘围岩就发生变形、破坏、崩落等现象。这种现象称为地压。

在回采过程中，必须控制地压和管理地压，并且要消除地压产生的不良影响，以保证

生产的安全性。这项工作通常称作地压管理。

地压管理的方法分为留矿柱支撑采空区、用充填料充填采空区、用崩落的围岩来管理地压3种方法。

## 五、三级矿量及其含义

根据地下开采准备程度的不同，将矿石的储量分成开拓矿量、采准矿量、备采矿量3个级别，这3个级别的矿量称为三级矿量。

1) 开拓矿量：指开拓工作已完毕，由开拓巷道控制的矿量称为开拓矿量。

2) 采准矿量：采准矿量是开拓矿量的一部分。凡是在已经开拓的矿体范围内，按采矿方法要求开掘完采准巷道，形成了矿块的外形尺寸，以此范围圈定的矿量称为采准矿量。

3) 备采矿量：备采矿量是采准矿量的一部分。在已经做完采准工作的矿块内，完成所要求的全部切割工作后，可以立即进行回采，这样的矿块所圈定的矿量称为备采矿量。

## 第四节 矿石损失与贫化

在矿床开采过程中，总有少部分矿石丢失和部分废石的混入，出现适当的贫化和损失是不可避免的。但由于矿产资源的不可再生性，要求在采矿过程中将贫化和损失控制在尽可能小的指标内，一方面延长矿山寿命，使矿山企业获得较大的经济效益，同时使国家的矿产资源得到充分利用。

### 一、矿石损失、贫化的概念及其产生的原因

#### 1. 损失、贫化的概念

在矿床开采时，由于种种原因未采下或采下后又丢失的矿石，称为矿石的损失。损失的工业矿量与应采工业矿量之比称为损失率。采出工业矿量与应采工业矿量之比称为回收率。

在开采过程中，由于某些原因，采出矿石品位低于应采工业矿石品位的现象称为矿石的贫化。采出矿石品位的降低值与应采工业矿石品位之比称为贫化率。采出矿石中混入废石量与采出矿量之比称为废石混入率。

#### 2. 损失、贫化产生的原因

矿石损失的原因是：矿山地质、水文地质、埋藏条件复杂；为保护铁路、公路、建筑物等留的保安矿柱；地质勘探不清；回采顺序和采矿方法不合理；装矿运输过程中由于管理不善等。

矿石贫化的原因是：在开采过程中有废石或贫化物的混入；高品位的矿石由于过粉碎而丢失；矿石中的金属具有可溶性，金属溶于矿井水被浸出带走等。在现实生产中，更应该关注其深层次的根源。

### 二、损失贫化计算

#### 1. 损失与贫化的计算

如图1-12所示。

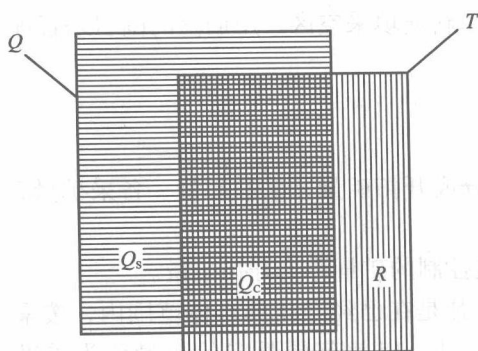


图 1-12 损失贫化的计算

$Q$ —应采工业矿量，工业品位为  $\alpha$ ； $T$ —采出矿石  $\alpha$  得量，采出矿石品位为  $\alpha'$ ； $Q_s$ —损失工业矿量，其品位为  $\alpha$ ； $R$ —混入废石量，混入废石品位为  $\alpha''$ ；

$Q_c$ —采出工业矿量，其品位为  $\alpha$

其中： $Q = Q_c + Q_s$ ， $T = Q_c + R$

1) 矿石的损失率：
$$K = \frac{Q_s}{Q} \times 100\%$$

2) 矿石的回收率：
$$P = \frac{Q_c}{Q} \times 100\%$$

因为  $Q = Q_c + Q_s$ ，所以  $K + P = 1$ ，即损失率与回收率之和等于 1。

3) 矿石的贫化率：
$$\rho = \frac{\alpha - \alpha'}{\alpha} \times 100\%$$

4) 废石混入率：
$$\rho' = \frac{R}{T} \times 100\%$$

因为  $T = Q_c + R$ ，将上式等号两边同乘以

$$T \times \alpha = Q_c \times \alpha + R \times \alpha \quad (1-1)$$

根据金属守恒定律：

$$T \times \alpha' = Q_c \times \alpha + R \times \alpha'' \quad (1-2)$$

用式 (1-1) 减去式 (1-2) 得

$$T(\alpha - \alpha') = R(\alpha - \alpha'') \quad \frac{R}{T} = \frac{\alpha - \alpha'}{\alpha - \alpha''}$$

即 
$$\rho' = \frac{\alpha - \alpha'}{\alpha} \times 100\%$$

如果混入废石品位  $\alpha'' = 0$ ，则  $\rho' = \frac{\alpha - \alpha'}{\alpha} \times 100\%$ ，说明当混入废石品位为 0 时，矿石的贫化率等于废石混入率。

5) 岩石混入率与矿石贫化率的区别：两者在概念上是有原则区别的。岩石混入率是反映在回采过程中岩石混入的程度；而贫化率是反映矿石品位降低的程度。岩石混入是造成矿石品位贫化的原因。不应把两者混同起来。

当混入的岩石中不含品位时，（即  $\alpha'' = 0$  时），在计算数值上贫化率  $\rho = \rho'$ ，但这仅仅是在数值上的关系，在概念上两者是不同的。

## 2. 损失贫化计算中有关参数的确定

### (1) 应采工业矿量及其品位的确定

应采工业矿量：即矿块或台阶的工业矿量，其边界应以生产勘探实际圈定的矿体边界为准。

应采工业矿量品位  $\alpha$ ：指本期采矿地段（矿块、台阶）的工业矿量品位。应根据探矿阶段实际取样品位进行计算，不得采用全矿区或矿体的平均品位。

### (2) 矿石体重的确定

矿石体重应按不同矿石类型分别进行测定，随着矿井的延深或露采台阶的下降，应不断地进行实测修正。

### (3) 采空体积的测定

采空体积应该根据不同的采矿方法而采用不同的方法或手段进行测定。凡是能用直接测量方法测定的采空区，应该用直接法及时测定；不能直接测量的，可以通过对炮孔的验

收等间接方法确定回采范围。

#### (4) 未采下损失工业矿量的计算

未采下损失工业矿量应以生产探矿圈定的矿体边界线，经回采编录和实测后圈定未采范围进行计算。若有整块未采下损失工业矿量，应单独绘出图件进行计算和报审。

#### (5) 采出矿量及其品位的确定

采出矿量及其品位应由专设的计量、取样人员按计量、取样规程，分不同出矿地点、分班进行计量统计和取样化验。

对于副产矿石，应按不同矿块的探矿、采准、切割或不同台阶的剥离、开沟等副产矿石量分别列台账记录，并计入相应的矿块或台阶的采出矿量中，而不得混合计入采出矿量中。

#### (6) 采出工业矿量的计算

采出工业矿量应根据采出矿量（包括副产矿石量），扣除混入废石量求得。

#### (7) 废石品位的确定

应根据矿体中不同块段的地质特征，选用合理的取样方法分别进行取样化验计算，不得采用全矿区或中段、阶段平均值进行计算。

为了保证各类矿石及废石品位的准确性和代表性，在损失贫化计算中，所有矿石及废石平均品位采用加权平均法进行计算。

### 三、降低矿石损失、贫化的措施

降低矿石贫化一般可采取如下措施：①正确地选择适合于矿床赋存条件的开拓方法和采矿方法；②确定合理的矿采开采顺序；③加强探矿工作和矿山企业管理工作；④加强放矿管理工作；⑤建立合理的工艺过程；⑥有计划的回采矿柱及处理空区；⑦建立粉矿回收制度。

## 小 结

本章重点掌握矿床开采的基本概念、矿床开采顺序、矿块回采顺序、矿床开采步骤，矿石损失贫化概念及其计算方法。尤其要深入理解矿床开拓、采准、切割与回采4个步骤。



### 复习思考题

1. 什么是矿石、矿体、矿床？什么是废石？
2. 怎样描述矿体赋存状态？怎样表述矿体埋藏深度？
3. 常见矿体形状有几种？
4. 按矿体倾角分类，矿体怎样划分？按矿体厚度分类，矿体怎样划分？
5. 什么是围岩？什么是矿体的上盘围岩、下盘围岩？
6. 什么是矿体走向及走向长度？

# 第二章 井巷平面设计

## 本章导读

了解阶段平面开拓设计、凿岩爆破、井底车场、平巷竖井、天井以及斜井的基本概念；掌握爆破机理、井底车场布设、平巷和竖井断面设计程序、天井掘进方法。

## 第一节 阶段开拓设计

### 一、阶段开拓平面设计

#### 1. 开拓系统巷道和开拓方法的分类

为开发地下矿床，从地表向地下掘进一系列井巷通达矿体，便于人员出入以及把采矿机械设备、器材等送往各采区工作面，同时把采出的矿石由井下运往地表，使地表与矿床之间形成一条完整的运输、通风、排水、动力供应等生产服务井巷，这些井巷工程的建立称矿床开拓。为开拓矿床而掘进的井巷称开拓井巷，其在平面及空间上的布置系统就构成该矿床的开拓系统（图 2-1）。金属矿床地下开采的步骤可以分为开拓、采准、切割与回采四个步骤，这些步骤反映了不同的工作阶段。

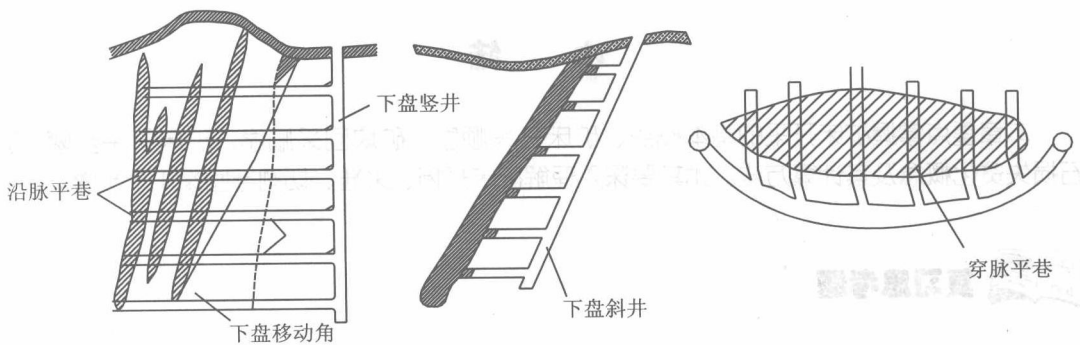


图 2-1 开拓系统

开拓井巷按其在矿床开采中所起的作用，可分为主要开拓井巷和辅助开拓井巷。凡属于主要运输矿石的井巷，无论其地表有无出口，均为主要开拓井巷；采矿时仅起辅助作用的井巷称为辅助井巷（表 2-1）。

表 2-1 开拓井巷分类表

	井筒	水平坑道	硐室
主要开拓井巷	1. 竖井：箕斗井，罐笼井，混合井 2. 斜井：箕斗斜井，串车斜井，胶带输送机斜井 3. 主要溜井 4. 主要斜坡道	1. 主平硐 2. 主要运输石门 3. 主要运输平巷 4. 井底车场	1. 坑内破碎硐室 2. 坑内卷扬机室 3. 坑内卸载硐室 4. 矿仓及转载硐室 5. 主扇风机硐室
辅助开拓井巷	1. 通风井 2. 副井 3. 充填井 4. 专用排水井 5. 专用安全出口	1. 非运矿巷道 2. 通风巷道 3. 充填巷道 4. 排水疏干巷道 5. 地压观测巷道	1. 水泵站及水仓 2. 排泥站及附属设施 3. 变电充电设施 4. 电机车库 5. 调度室 6. 火药库 7. 井下维修硐室 8. 井下各种服务硐室 9. 井下辅风机硐室 10. 井下铲运机无轨设备修理硐室

2. 矿床开拓方法

依据矿床地质赋存特点、地表地形条件、井巷布置的位置和井巷形式的不同等，开拓方法可按两种情况分类。

按井筒与矿床的相对位置可划分为：下盘开拓、上盘开拓及侧翼开拓。

按井巷形式的不同可划分为：平硐开拓、斜井开拓、竖井（立井）开拓、斜坡道（斜井）开拓及联合开拓。

矿床典型开拓方案分类见表 2-2。

表 2-2 矿床开拓分类表

开拓方式分类		井巷形式	典型开拓方案
单一开拓法	平硐开拓法	平硐	沿矿床走向平硐开拓；垂直矿床走向上盘平硐开拓；垂直矿床走向下盘平硐开拓
	斜井开拓法	斜井	脉内斜井开拓；下盘斜井开拓；侧翼斜井开拓
	竖井开拓法	竖井	竖井多水平分区式开拓；竖井阶段分区式开拓
	斜坡道开拓法	斜坡道	直线式斜坡道开拓；螺旋式斜坡道开拓；折返式斜坡道开拓
联合开拓法	平硐与竖井联合开拓法	平硐与竖井或斜井平硐与盲竖井或盲斜井	平硐与竖井开拓；平硐与斜井开拓；平硐与盲竖井开拓；平硐与盲斜井开拓
	明井与盲井联合开拓法	明竖井或明斜井与盲竖井或盲斜井	明竖井与盲竖井开拓；明斜井与盲斜井开拓；明竖井与盲竖井开拓；明斜井与盲斜井开拓
	平硐或斜坡道联合开拓法	平硐、竖井、斜井与斜坡道	平硐与斜坡道开拓；斜井与斜坡道开拓；竖井与斜坡道开拓



### 3. 矿床开拓方案选择

矿床开拓方案的选择是矿山总体设计中重要组成部分之一。它与矿山总体布置、提升、运输、通风、排水、供电等一系列问题有密切关系。选择矿床开拓方案，必须符合国家颁布的有关技术经济等方针政策，其基本要求如下：

- 1) 确保安全生产、创造良好的劳动卫生条件，建立完善的通风、提升、运输、排水、充填等矿山服务系统；
- 2) 技术可靠，满足矿山生产能力的要求，以保证矿山企业的均衡生产并能顾及矿山发展远景；
- 3) 基建工程少，投资省，经济效益好；
- 4) 不留和少留保安矿柱，以减少矿石损失；
- 5) 地表总平面布置应不占或少占农田。

## 二、开拓方式选择

### (一) 单一开拓方式

#### 1. 平硐开拓

##### (1) 平硐开拓适用条件

平硐开拓适用于开采赋存在地表以上的矿体。平硐开拓能充分利用矿石的自重进行溜放，便于通风、排水、多阶段出矿（岩），施工简单易行，建设速度快。

一般小型矿山采用单轨运输，运距大于 1000m 时，中间应加错车道；大中型矿山平硐开拓应用双轨运输。运输坡道 3‰~4‰，重车下坡。

采用双轨运输的平硐开拓矿山，当岩层不稳固或为方便施工和通风，亦可采用单轨双巷。

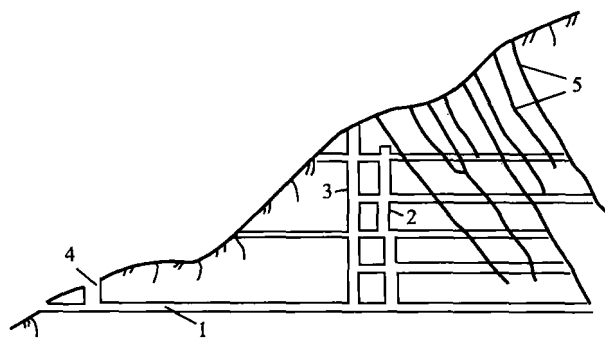


图 2-2 某矿下盘平硐开拓方案示意图

1—主平硐；2—主溜井；3—辅助竖井；  
4—入风井；5—矿脉

##### (2) 平硐开拓的布置方案

1) 垂直矿体走向布置的下盘平硐开拓。当矿脉与地表山坡的倾斜方向相反时，则由下盘掘井平硐穿过矿体。图 2-2 为我国某矿下盘平硐开拓方案示意图。矿山在 598m 水平开掘主平硐 1，各阶段采下的矿石通过主溜井下放至主平硐，再用电机车运出硐外，人员、材料由辅助竖井 3 提升至上部各阶段。为改善通风、人行、运出废石的条件，在 758m 及 678m 水平设辅助平硐通达地表。

2) 垂直矿体走向的上盘平硐开拓。当矿脉与上坡的倾斜方向相同时，则由上盘掘井平硐穿过矿脉。图 2-3 为大庙铁矿上盘平硐开拓方案示意图。V22，V24 表示急倾斜矿体。各水平的平硐穿过矿脉后，再沿矿脉掘进沿脉平巷，各阶段采下的矿石经溜井 2 放到主平硐 3，并由电机车从主平硐运出

地表。人员、材料、设备由辅助盲竖井 4 提升至各阶段。

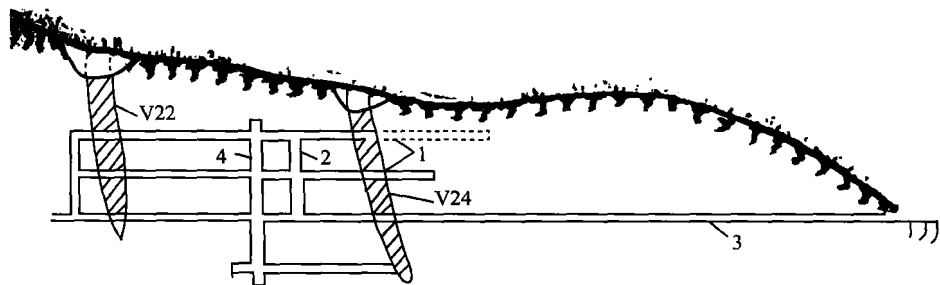


图 2-3 大庙铁矿上盘平硐开拓方案示意图

1—阶段平硐；2—溜井；3—主平硐；4—辅助盲竖井

3) 侧翼（脉内）平硐开拓。矿体倾角从缓倾斜至急倾斜，矿体露出地表，为了加速地质勘探及早期回采，一些小型矿山常用脉内平硐开拓。其方案布置如图 2-4 所示。由 I 阶段采下的矿石经溜井放至 II 阶段，再由 2 号或 1 号主溜井将矿石放至主平硐水平 1 运出地表，人员、材料、设备等由辅助盲竖井 2 提升至各阶段。该法优点是在短期内（基建期）可顺便采出部分矿石，可抵偿部分基建投资，同时还能起到探矿作用。其缺点是脉内平硐维护困难，有时须用后退式开采或增加脉外工程。

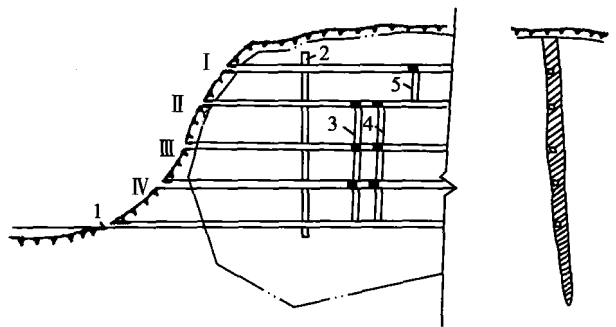


图 2-4 脉内沿脉平硐开拓方案示意图

I、II、III、IV—上部阶段平硐

1—主平硐；2—辅助盲竖井；3—1 号主溜井；

4—2 号主溜井；5—溜井

## 2. 斜井开拓

### (1) 斜井开拓使用条件

近十年来随着高强度胶带输送和钢绳牵引胶带输送机的出现，扩大了斜井的应用范围，不但在国内外一些缓倾斜和急倾斜矿床应采用斜井开拓，而且某些急倾斜的矿床，亦有采用胶带输送机斜井进行矿床开拓的。胶带输送机斜井提升能力很大，它可以用于中型以上矿山。斜井开拓方案（图 2-5）主要有：脉内斜井开拓方案（图 2-5a），下盘斜井开拓方案（图 2-5b）和侧翼斜井开拓方案（图 2-5c）3 种。

按斜井适用设备的不同可分为 3 种提升方式，其使用条件如下。

- 1) 箕斗或台车运输斜井：一般适用范围，斜井倾角大于  $30^\circ$ 。
- 2) 矿车组运输斜井：一般适用范围，斜井倾角小于  $25^\circ \sim 30^\circ$ 。
- 3) 胶带输送机斜井：一般适用范围，斜井倾角小于  $18^\circ$ 。

### (2) 斜井位置的确定

- 1) 在确定斜井位置时，要充分注意到矿体倾角和厚度的变化情况，使所确定的脉内

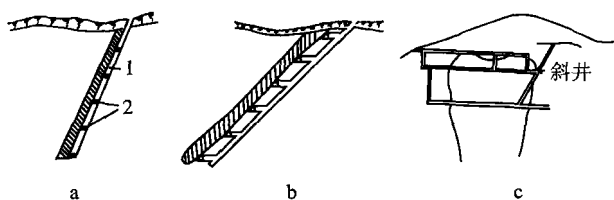


图 2-5 斜井开拓方案  
1—脉内斜井；2—沿脉斜井

或脉外斜井位置保持不变，避免设计的斜井在矿体的上下部交错地通过或偏离矿体，如为脉外斜井必须使斜井与矿体间保持一定的距离，其距离应视矿体下盘情况而定，一般应大于 15m。

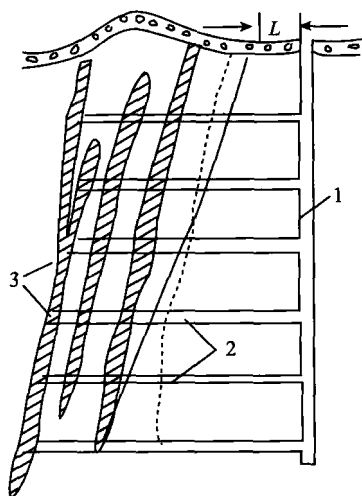


图 2-6 下盘竖井开拓方式  
1—竖井；2—阶段；3—矿体。  
L—滑移带到竖井的安全距离

2) 采用脉内斜井开拓时，在井筒两侧应保留保安矿柱 8 ~ 10m。

3) 对于长斜井须沿斜井线路关键位置布置工程地质钻孔，以查明斜井工程部位的地质情况。

### 3. 竖井开拓

竖井是地下采矿使用最广泛的开拓方法。矿体赋存在地面以下，矿体倾角大于  $15^\circ$  而埋藏较深的矿体，一般多采用竖井开拓（图 2-6）。

选择竖井位置时应综合考虑矿体产状、工程地质条件、地表破碎厂、选厂位置、工业场地及外部运输等因素。其布置原则为：

1) 主副井尽可能布置在矿体厚大部分的中央下盘；在考虑运输功最小的同时，必须注意外部运输流向，减少反向运输量，使内外部运输功最小。

2) 主副井应尽量集中布置，注意不占或少占良田。井口标高应高出当地历史最高洪水位 1 ~ 3m 以上。在中央式主副井之间布置破碎系统时，主副井间距应在

50 ~ 100m 之间。

3) 井筒应避免压矿，并布置在开采后地表移动区之外 20m；当有可能发生山洪和山坡滚石及岩崩危险时，井口要远离上述危险区。

4) 井筒要避免穿过流沙砂层、含水层和断层破碎带，若避不开时，设计上应采取措施。

5) 竖井断面及提升能力的确定，应根据矿山远景储量及服务年限考虑采矿工艺和设备的发展，应留有应变的富余能力。

### 4. 深井开拓

各国对深井划分不一。南非把 1500m 的矿井称深井；俄罗斯划分三级：300 ~ 1000m 为中浅井，1000 ~ 1500m 为深井，2500m 以上为超深井。根据国外一些深井开拓经验，设

计中应考虑下列问题:

1) 当开采深度超过 800m、年产量矿石  $80 \times 10^4 \text{t}$  以上时, 无论矿床的倾角如何, 一般应优先考虑竖井开拓, 但也有少数矿山开采深度在 800m 左右采用胶带输送机斜井开拓的。

2) 深井开拓竖井断面有增大的趋势。目前世界上最大的竖井断面是南非 President Steyn 金矿 4 号竖井, 其断面为  $10.21\text{m} \times 10.97\text{m}$  (椭圆形竖井), 深 2365.2m。该井系箕斗、罐笼混合井。

3) 深井地温随深度而增加, 必须采取降温措施, 深井断面应考虑制冷管道的敷设和增加备用管道的位置。

5. 无轨斜坡道开拓

无轨斜坡道开拓的典型系统如图 2-7 所示。

(1) 无轨斜坡道的应用条件及特点

地下开采使用无轨设备之后, 其开拓方式应作相应的改变, 它的主要变化是要开掘供无轨设备上下通行的斜坡道。斜坡道有两种: 一是与地表相同的主要斜坡道; 另一种是连接阶段间的辅助斜坡道。前者作为地下使用无轨设备出入地表的主要斜坡通道, 后者是无轨矿山生产中几乎必不可少的通道。它既可用于转移铲运机无轨设备, 同时也是凿岩、支护、爆破、检修和加油等无轨车辆运行的通道; 有的还可作为矿岩运搬或深部探矿开拓之用。如果没有辅助斜坡道, 就不能充分发挥无轨设备的机动性、灵活性, 也就不能发挥设备的效能。设置主斜坡道连同地表的必要性, 需视具体情况而定。

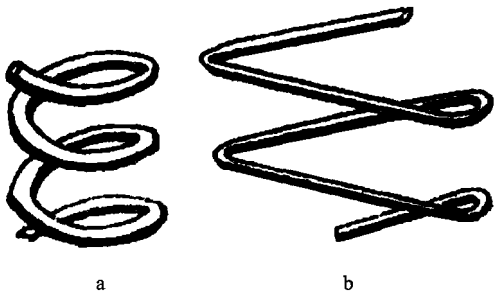


图 2-8 斜坡道形式  
a—螺旋式; b—折返式

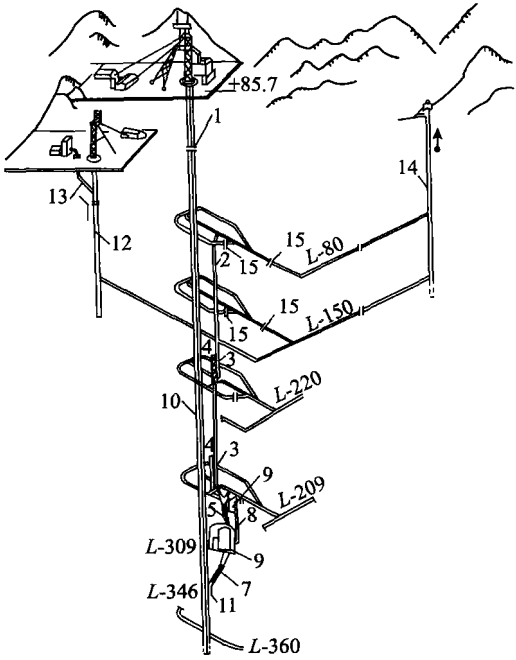


图 2-7 某铁矿斜坡道开拓系统图

- 1—箕斗、罐笼混合井; 2—主溜井; 3—溜井矿仓;
- 4—检查天井; 5—破碎站原矿仓; 6—破碎硐室; 7—箕斗矿仓;
- 8—安全出口与通风道; 9—除尘硐室; 10—除尘管;
- 11—箕斗装矿硐室; 12—西副井; 13—通风机入风道;
- 14—东副井; 15—电动风门

在有其他井筒的矿山, 设置主斜坡道的目的, 是为了无轨车辆出入地表进行大修, 并兼做通风和辅助运输之用; 在没有其他井筒的矿山, 则主斜坡道主要作运输矿岩、兼做无轨车辆出入、通风等用。

(2) 斜坡道的线路形式

直线式斜坡道线路呈直线, 除倾角较缓和不少设轨道外, 与斜井相同。螺旋式斜坡道 (图 2-8a) 的几何形式一般是圆柱螺旋线或圆锥螺旋线, 根据设计的具体需要可设计成规则

螺旋或不规则螺旋线状。不规则螺旋线斜坡道的曲率半径和坡度在整个线路中是变化的。螺旋式斜坡道每隔一定距离为设置缓坡段。折返式（图 2 - 8b）是由直线与曲线段组成的。直线段变高程，曲线段变为方向，便于无轨设备转弯，其坡度变缓或近似水平。

(二) 联合开拓方式

联合开拓的不同方式及其适用条件参见表 2 - 3。

表 2 - 3 联合开拓的不同方式及其适用条件

联合开拓方式	适用条件
平硐与井筒（竖井或斜井）	用平硐开拓的矿山，如果在平硐水平以下尚有一部分的矿体时，则需用竖井或斜井（包括盲竖井或盲斜井）进行下部矿床开拓
明井与盲井联合开拓	主要适用与矿体走向长、厚度大、延伸较深的急倾斜矿体。由于深部开采第一期竖井延伸困难，或因石门过长而另凿一直井与原有竖井接力转载联运
斜坡道与竖井联合开拓	①适用埋藏较深的大中小型矿山；②竖井用提升矿石，斜坡道用于辅助作业；③大中型矿山井下无轨设备较多，为了设备出入地表和井下，以提高作业机械效率和运输人员、材料等，斜坡道可直通地表；④对于某些深井矿山，其竖井井筒直径较大，提升能力有富余时，斜坡道可不必通地表，只在阶段运输巷道之间掘进一条起联络作用的斜坡道

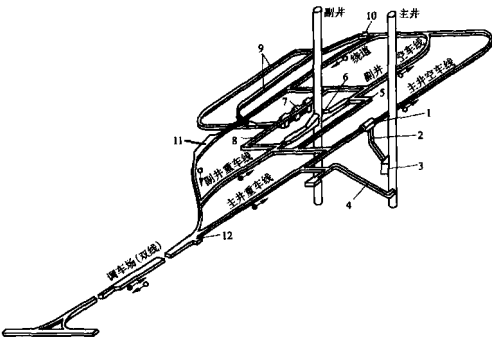


图 2 - 9 井底车场结构示意图

1—翻笼硐室；2—矿石溜井；3—箕斗装载硐室；4—回收撒落碎矿的小斜井；5—候罐室；6—马头门；7—水泵房；8—变电站；9—水仓；10—清淤绞车硐室；11—机车修理硐室；12—调度室

三、井底车场的基本概念

1. 井底车场

井底车场是井筒附近各种巷道、硐室的综合体，它由若干连接和环绕井筒的巷道及辅助硐室组成，是地下运输的枢纽站。它的作用是将井筒与主要运输巷道连接起来，把由运输巷道运来的矿石和废石经此进入主（副）井提至地表，并将地表送下来的材料和设备经由此处进入运输巷道，送至各工作地点，它承担井下矿车卸货、调车、编组等任务，如图 2 - 9 所示。

2. 井底车场的路线组成和硐室

组成井底场的路线和硐室如图 2 - 10 所示。主、副井均设在井田中央，主井为箕斗井（图2 - 10a），副井为罐笼井（图 2 - 10b），两者共同构成一双环形的井底车场。

(1) 储车路线

在其中储放空、重车辆，包括主井的重车线与空车线，副井的重车线与空车线，以及停放材料车的材料支线。

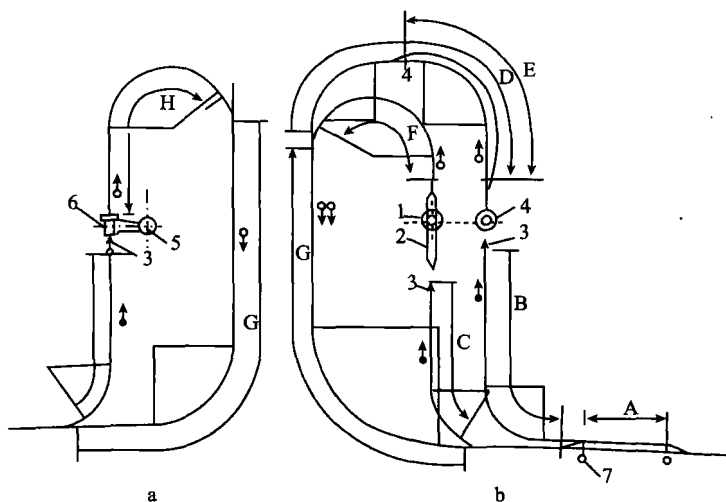


图 2-10 井底车场

A—调车线；B—副井重车线；C—主井重车线；D—副井空车线；E—材料车线；F—主井空车线；  
G—绕到车线；H—箕斗空车线  
1—主井；2—单车阻车器；3—复式阻车器；4—副井；5—箕斗井；6—翻笼；7—警冲标  
→ 重车运行方向      ○ 空车运行方向

## (2) 行车路线

即调度空、重车辆的行车路线，如连接主、副井的空、重车线的绕道，调车支线。行车线还包括供矿车进出罐笼的马头门的线路。此外，还有一些辅助线路，如通达各硐室的线路以及硐室内的线路等。

## (3) 井底车场的硐室

与主井有关的硐室有：翻笼硐室、箕斗装载硐室、清理撒落碎矿硐室和斜巷等。与副井系统有关的硐室有：马头门、水泵房、变电室、水仓及候罐室等。另外还有调度室、电机车库及机车修理硐室等。

## 3. 竖井车场的基本形式

按矿车运行系统可分为尽头式井底车场、折返式井底车场和环形井底车场 3 种，如图 2-11 所示。根据主、副井储车巷道垂直、平行或斜交主要运输巷道（或主要运输石门），环形车场又可分为“立式”，“卧式”及“斜式” 3 种类型。刀把式车场是“立式”车场的一种特殊形式。井底车场按使用的提升设备分为罐笼井底车场、箕斗井底车场和罐笼-箕斗混合井底车场 3 种（图 2-11）：

### (1) 尽头式井底车场

用于罐笼提升。其特点是井简单侧进、出车，空、重车的储车线和调车厂均设在井筒

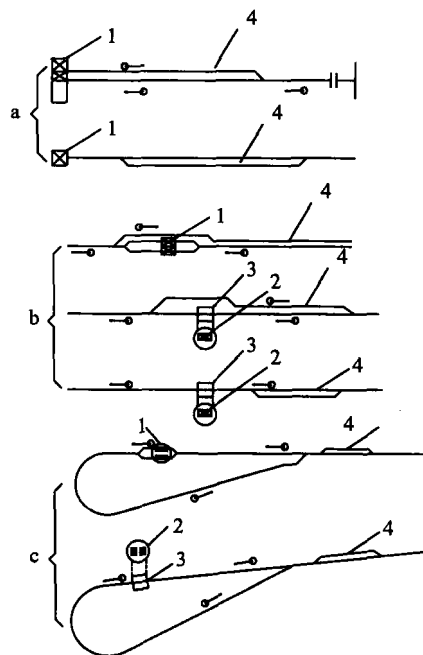


图 2-11 井底车场形式示意图

a—尽头式；b—折返式；c—环形  
1—罐笼；2—箕斗；3—翻车机；4—调车线

的一侧，从罐笼拉出来空车后，再推进重车。通过能力小，故尽头式车场适用于小型矿井或副井。

### (2) 折返式井底车场

它是在井筒或卸车设备（如翻车机）的两侧均敷设线路。一侧进重车，另一侧出空车，空车经过另外敷设的平行线路或从原线路变头（改变矿车首尾方向）返回。当岩石稳固时，可在同一条巷道中敷设平行的折返线路，否则，需另行开设平行巷道。

### (3) 环形井底车场

它也是由一侧进重车，另一侧出空车，但由井筒或卸车设备出来的空车是经由出车线和绕道不变头（矿车车尾方向不变）返回。

生产能力大的选择通过能力大的形式。生产量为  $30 \times 10^4 \text{t}$  以上的可采用环形或折返式车场；年产量为  $(10 \sim 80) \times 10^4 \text{t}$  的可采用折返式车场；年产量为  $10 \times 10^4 \text{t}$  以下的可采用尽头式车场。

在选择井底车场形式时，在满足生产能力要求的条件下，尽量使结构简单，节省工作量，管理方便，生产操作安全可靠，并且易于施工与维护的形式。车场通过能力要大于设计生产能力的 30% ~ 50%。

## 4. 井底车场形式选择

井底车场形式选择，应力求做到：

- 1) 线路结构简单，巷道平直，弯道曲率半径大，调车方便安全，调车时间短。
- 2) 当用罐笼作主、副提升时，一般多采用环形车场。如围岩不稳固运输量较小，能直接在靠近竖井外侧铺设绕道时，可以考虑采用折返式车场。
- 3) 当采用箕斗提升矿石，用侧卸式矿车运输，运量较小时，常用折返式车场；当运输量较大，为减少摘挂时间，可采用环形车场；当采用双卸式矿车双机牵引，而运量不大时，则多采用折返式车场；用固定式矿车运输并利用机车调头推、顶车组卸载时，可采用尽头式车场。
- 4) 辅助提升的罐笼井专用车场，如废石量不大，按提升休止时间考虑能满足提升要求时，可采用尽头式单位车场。
- 5) 罐笼、箕斗混合提升井的井底车场，如井旁卸载线采用环形，在开凿工程增加不大时，可以考虑将罐笼的出车线与上述线路连成环形运输系统。
- 6) 矿井生产能力大的应选用通过能力大的车场形式，对于竖井提升年产量在  $30 \times 10^4 \text{t}$  以上的可采用环形或折返式车场；年产量为  $(10 \sim 30) \times 10^4 \text{t}$  的可采用折返式车场；年产量在  $10 \times 10^4 \text{t}$  以下的可采用尽头式车场。
- 7) 对于斜井提升，环形车场一般适用于箕斗或胶带提升的大、中型斜井，金属矿山，特别是中、小型矿山的斜井多用串车提升，串车提升的车场均采用折返式车场。

## 5. 井底车场设计的一般要求

1) 设计的井底车场要留有一定的富裕通过能力，一般情况下应大于矿井或阶段生产能力的 20% ~ 30%，对于具有发展远景的矿山的矿井或阶段，应根据具体情况适当放大，以满足扩大生产的要求。

2) 车场的路线，应包括存车线、行车线和通往坑内各主要硐室的辅助线路。副井车场当采用人车运送人员时，应设置人车专用停车线；同时在长度上还应考虑防水门和风门

布置的要求。

3) 存车线的长度：主井提升的罐前（或卸载站前）重车存车线，一般不小于 2.0 列车长；罐后（或卸载站后）的空车存车线可取 1.5 列车长。副井提升的空、重车线，可分别取 1.0~1.5 列车长。材料库存车线长度：对中、小型矿井，一般可容纳 5~10 辆材料车；对于大型矿井，应按实际需要考虑。

4) 采用罐笼提升时，重车应走直线。

5) 车场内的调车方式，应优先采用拉车，尽量少用顶车，以避免过弯道时发生矿车掉道事故且缩短运行时间。

6) 采用平硐竖井联合开拓时，平硐车场要考虑提升容器进出，吊装和检修的可能性。

7) 当罐笼井的空车线是采用自溜滑行时，线路的坡度既要使空车出马头门时获得的动能足以克服阻力，直接滑行到存车线，又要保证矿车滑行到存车线路终点时的速度趋于零。到达阻车器时的速度在 0.75~1.00m/s 范围内。

8) 设计井底车场纵断面坡度时，须注意排水沟的流向及低洼处排除积水的可能性。

9) 调车线长度通常为列车长度。

## 四、阶段运输巷道的布置

阶段平面开拓设计是矿床开拓的一部分，它主要是确定阶段开拓巷道的布置和井口运输线路的布置等。阶段开拓需要开掘一系列巷道如井底车场、石门、运输巷道及硐室等。将矿块和井筒等开拓巷道连接起来。从而形成完整的运输、通风和排水系统。

阶段运输巷道的布置，就是确定阶段运输巷道的形式、规格、位置和数量。

### 1. 阶段运输巷道布置的基本要求

1) 应满足阶段运输能力的要求，既能保证将矿石运至井底车场，同时阶段运输能力还需保留一定余地，用以满足生产发展的需求。一般当阶段生产能力大时，多采用环形布置，阶段生产能力小时，可用单一沿脉巷道布置。

2) 应满足探采结合的要求，阶段运输巷道的布置，既能满足探矿要求，又能为今后采矿、运输服务。

3) 应符合采矿方法的要求（包括矿柱回采方法），如崩落法一般需设脉外巷道，除要求布置下阶段的崩落线以外，其他采矿方法不一定都要设置脉外巷道。

4) 满足通风要求，布置的巷道应有明确的进风和回风路线，尽量减少转弯。

5) 应符合矿体厚度和矿岩稳固性要求。当矿体厚度小于 4~10m 时，可采用一条沿脉巷道，当矿体厚度在 10~25m 之间时，多采用一条（或两条）下盘沿脉巷道或两条下盘沿脉加联络巷道的布置方法。对于极厚矿体（大于 25m）则采用环形运输。在可能的条件下，阶段运输巷道应布置在稳固的围岩中，这样有利于巷道的维护，矿柱回采和掘进比较平直的巷道。

6) 阶段运输巷道的布置应力求系统简单，工程量小，开拓时间短，运输方便。

满足其他技术要求（如溜井位置的要求）。

### 2. 阶段运输巷道的布置形式

#### (1) 单一沿脉平巷布置

单一沿脉平巷布置按线路布置形式可分为单轨会让式和双轨渡线式两种。



1) 单轨会让式如图 2-12 所示。除会让站外，运输巷道皆为单轨。重车通过，空车待避，或反之，会让站应设在采场集中的地点，矿体集中地点，或石门很长的中间位置，这种布置形式通过能力很小，多用于薄或中厚矿体中。

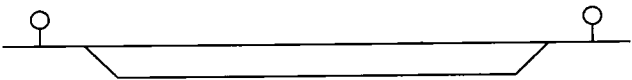


图 2-12 单轨会让式线路布置形式

2) 双轨渡线式如图 2-13 所示。它是在运输巷道中设双轨线路，在适当位置用渡线连接起来。双轨渡线式可用于年产量为  $(20 \sim 60) \times 10^4 \text{t}$  的矿山。

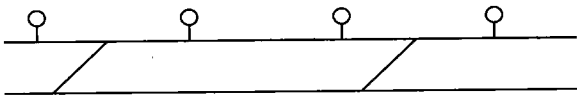


图 2-13 双轨渡线布置形式

单一沿脉巷道布置在脉内还是脉外，视具体情况决定。开在脉内可起探矿作用，装车方便，掘进巷道时可采出一部分矿石，从而可减少掘进费。但当矿体沿走向变化较大时，巷道弯曲多，对运输不利，故此时不宜布置在脉内。当矿石稳固性差、品位高、围岩稳固性好，采用脉外布置较好。对于极薄矿脉，应使矿脉位于巷道断面中央，以利于掘进。若矿脉形态稳定，主要考虑巷道维护时，应将巷道布置在围岩稳固的一侧。

### (2) 沿脉平巷加穿脉布置

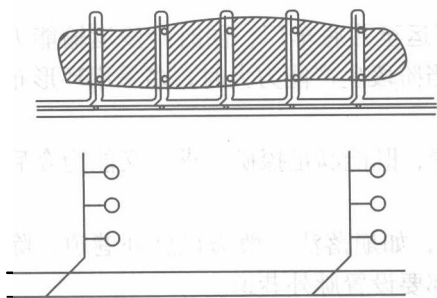


图 2-14 沿脉平巷加穿脉布置形式

沿脉加穿脉布置形式一般多采用下盘脉外平巷和若干穿脉配合而形成。从线路布置上讲，采用双线交叉式，即在沿脉巷道中铺双轨，穿脉巷道中铺单轨，沿脉巷道中双轨用渡线连接，沿脉与穿脉用单开道岔联结，如图 2-14 所示。

沿脉加穿脉布置形式，阶段运输能力大，穿脉装矿生产安全、方便、可靠，可起探矿作用。但掘进工程量较大。适用于阶段年产量  $(60 \sim 150) \times 10^4 \text{t}$  的矿山。

### (3) 环形运输布置

环形运输布置如图 2-15 所示。它分重车线和空车线，列车运行方向始终是一个方向。一般情况下，在环形运输巷道中都布置单轨。在主要运输巷道中，有漏斗装车时，在装车地点铺双轨。如果在单轨巷道中，同时有 4~5 台机车工作时，宜改用双轨。在有色金属矿山多采用单一沿脉和局部环形相结合的布置形式。环形运输布置的最大优点是生产能力可以很大，但掘进工程量也很大。此种布置形式适用于生产能力为  $(150 \sim 300) \times 10^4 \text{t/a}$  的矿山，故多用于规模大的厚和极厚矿体中，也可用于几组平行的矿体中。

当开采规模很大时，也可采用双线的环形布置，如图 2-16 所示。

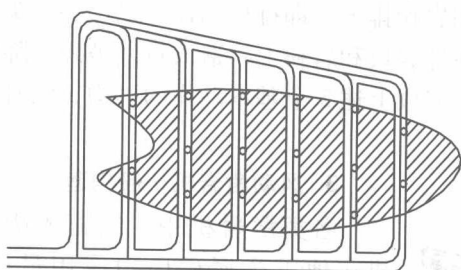


图 2-15 环形运输布置示意图

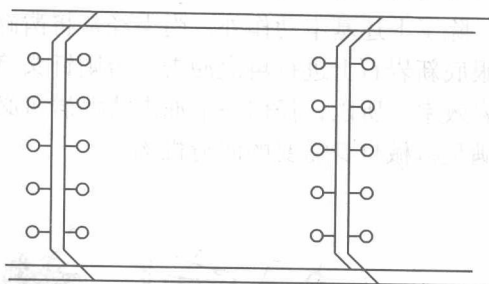


图 2-16 双环形布置形式示意图

## 第二节 凿岩爆破

### 一、凿岩

矿山井巷掘进和矿石回采工作主要采用凿岩爆破的方法，通常需要在岩石和矿石中钻凿不同深度、不同直径的孔眼。根据所钻凿的孔深和孔径的不同，分为浅孔凿岩、中深孔凿岩及深孔凿岩。

一般孔深小于 3 ~ 5m、孔径为 30 ~ 46mm 的称为浅孔，孔深为 5 ~ 15m、孔径为 50 ~ 70mm 的称为中深孔，孔深大于 15m、孔径大于 90mm 的称为深孔。

根据破碎作用的方式不同，机械破碎凿岩又可分为冲击式凿岩、同转式凿岩及回转冲击式凿岩。冲击式凿岩主要应用于坚硬和磨蚀性大的岩石，回转式凿岩主要适用于软岩及磨蚀小的岩石。回转冲击式凿岩兼有两者的优点，适用范围较广泛。对于金属矿山来说，主要是用冲击式凿岩。

#### 1. 凿岩机械

凿岩机根据动力的不同，可分为风动、液压、电动、内燃凿岩机。在地下金属矿山的开采过程中使用压气做动力的风动凿岩机，与内燃、液压、电动凿岩机相比，具有结构简单、安全可靠、坚固耐用以及修理简便等特点，目前被广泛应用。电动、内燃凿岩机在我国已成批生产，多在一些零散工程中使用。

#### 2. 冲击式凿岩的基本动作

仔细观察手锤冲击式凿岩时，可以发现，炮眼形成的过程不外乎是冲击、转钎、排粉 3 个基本动作，如图 2-17 所示。

当手锤第一次冲击钢钎时，在炮眼底部岩石面上形成一条凿痕 A - A'，即冲击动作；但如果在原来的位置继续冲击，则无法形成炮孔。因此必须在每次冲击之后，将钢钎转动一个角度，即转钎动作，然后再

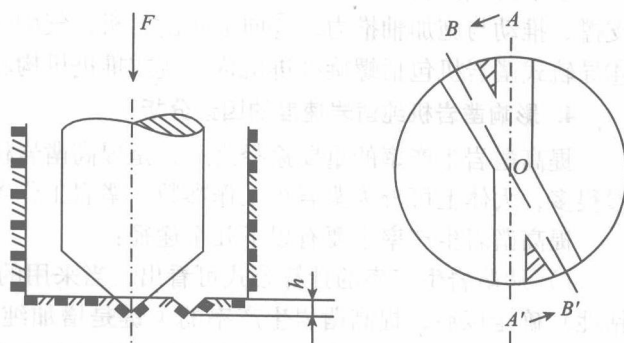


图 2-17 冲击式凿岩时炮眼形成过程

进行第二次冲击。此次冲击后除形成凿痕  $B-B'$  外，还破坏掉  $AOB$ ， $A'OB'$  两块扇形体岩石。除了上述基本动作外，尚需经常将凿碎岩块和岩粉排出，即排粉动作，以保持钎头能在眼底新岩石上进行再次冲击，否则钎头将作用在碎岩块和岩粉上，造成重复破碎，降低凿岩效率。所以，任何一个冲击式凿岩机必须具有完成上述 3 个基本动作的机构，同时要有满足机械自身需要的润滑机构。

### 3. 风动凿岩机一般构造

各类凿岩机中，气腿式凿岩机在地下金属矿山中应用最广，其结构具有代表性。现以 YT-23 型气腿式凿岩机为例，说明风动凿岩机的一般构造。YT-23 型气腿式凿岩机外观如图 2-18 所示，由凿岩机、气腿、气管（包括注油器）、水管、钎子等组成。

YT-23 型凿岩机由柄体 2、缸体 3 和机头 7 等主要部件组成。从安装在柄体 2 上的进气管 12 进入机器的压缩空气，通过操纵阀 14 实现空气的进给、停止以及强力吹扫炮眼。清洗炮眼的水通过进水管 13 进入连接在柄体内的注水机构。柄体、机体、机头三部分用两根长螺杆 8 牢固地连接。在机体的排气口安有消声罩。气缸的下部有气腿连接孔 9 用以同气腿

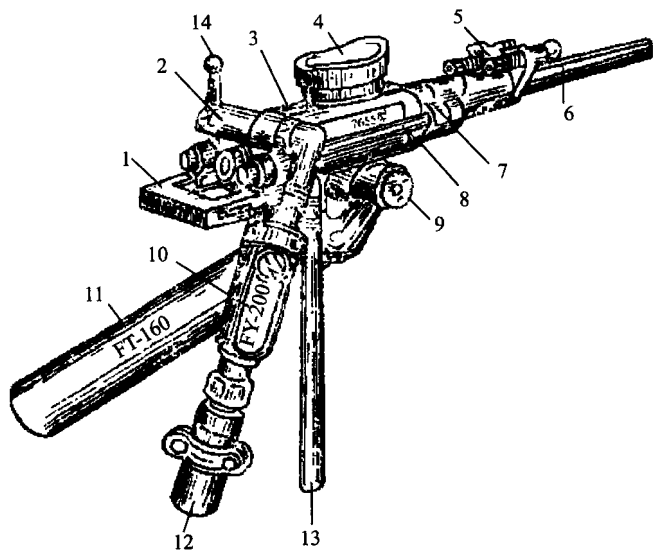


图 2-18 YT-23 型（原 7655 型）气腿凿岩机外形图

1—手柄；2—柄体；3—缸体；4—消声罩；5—钎卡；6—钎子；  
7—机头；8—长螺杆；9—气腿连接孔；10—注油器；11—气腿；  
12—进气管；13—进水管；14—操纵阀

相连。凿岩机工作时，钎子插在机头内的钎尾套中，由钎卡 5 卡住，用以拔钎。在把手柄装有扳机，用以操纵气腿快速缩回。

推进机构按照凿岩机支撑形式和推进机构的不同，可作如下分类。

- ①手持式凿岩机：人力支撑、推进与施加轴推力；
- ②气腿式凿岩机：气腿（活动式）支撑、推动与施加轴推力；
- ③向上式凿岩机：气腿（固定式）支撑、推进与施加轴推力；
- ④导轨式凿岩机包括螺旋推进机构，链式推进机构和钢丝绳推进机构。

### 4. 影响凿岩机纯凿岩速度的因素分析

提高凿岩生产率的重要途径之一，是提高凿岩机的纯凿岩速度。影响纯凿岩速度的因素很多，大体上可分为凿岩机工作参数、凿岩工作条件、凿岩工具 3 个方面。

提高凿岩生产率主要有以下几个途径：

1) 从凿岩生产率的计算公式可看出，当采用的凿岩机类型和凿岩地点（即岩石的可钻性）确定以后，提高凿岩生产率的关键是增加纯凿岩时间。因此，要加强管理，改善劳动组织，建立专业工作队，提高凿岩的操作技术水平。

2) 进一步改善凿岩机的设计使凿岩机能获得最优冲击功、冲击频率、扭矩和回转角

等，以提高纯凿岩速度；并根据岩石可钻性的不同，正确地选择和使用凿岩机。

- 3) 使用凿岩台车，逐步推广应用液压凿岩机。
- 4) 健全凿岩机的维护、修理制度，保证凿岩机的正常运转。
- 5) 提高钎钢质量，研制高效率、高寿命的钎头。
- 6) 加强凿岩技术的研究与开发。

## 二、爆破

爆破是目前采矿工程中应用最广泛最频繁的一种破碎岩石的有效手段。多年来，世界各国众多学者对此进行过探讨并提出了各种理论、学说。然而，由于岩石的不均质和各向异性等自然条件，以及缺乏对高温高压高速等爆炸特征的量测手段，迄今人们对岩石爆破破碎的机理仍然了解得非常不够。

在药包爆轰作用下，岩石破碎的过程包含应力-应变的变化过程，但岩石受力情况极为复杂，而且变化极快，加载速度极高。因此，爆轰过程不仅不属于静力学，而且也不属于一般动力学，而是属于超动态的动力学范畴。再者，从药包开始爆炸到岩石破坏，这个能量的转化、释放、传递和做功的过程也极其短促，只在几十微秒( $\mu\text{s}$ )( $1\text{ms}$ 等于 $1000\mu\text{s}$ )到几十毫秒( $\text{ms}$ )内完成，这样就使研究岩石爆破破碎机理变得异常困难。

近几年来，科技工作者经过长期的生产实践总结出许多经验，并利用高速摄影等测试手段，借助模拟爆破试验和对爆破过程中发生的各种现象（如应力、应变、破裂、飞散等）的观测，取得了一些关于岩石爆破破碎机理研究的成果，提出了种种假说及计算公式。它们或多或少地反映了某些客观规律，对生产实际具有一定指导意义和应用价值。

### （一）岩石爆破破坏原因的几种假说

#### 1. 爆炸气体产物膨胀压力破坏理论

岩石主要是由装药空间内爆炸气体产物的压力作用而被破坏的。炸药包爆破时，爆炸气体产物迅速膨胀，气体以极高压力作用于炮眼壁岩层产生压应力场。这种应力引起的应变，就是应力场内岩石质点的径向位移，而径向位移又产生径向压应力。如果岩石的抗拉强度低于此压应力在切向衍生的拉应力，则将产生径向裂隙。当药包附近存在自由面时，岩石位移的阻力在最小抵抗线方向最小且岩石质点位移速度最高，而在阻力不等的不同方向上不等的质点位移速度必然引起剪切应力。如果剪切应力超过该处岩石的抗剪强度，则岩石产生剪切破坏。当上述破坏发生时，如果爆炸气体产物还具有足够强大的压力，则爆炸气体将推动破碎块作径向抛掷运动。

#### 2. 冲击波引起应力波反射破坏理论

爆破使岩石破坏，主要是自由面上应力波反射转变成的拉应力波造成的。爆轰波传播到炮孔壁岩层，在岩石内引起一股压应力波，这种应力波遇到自由面时便反射回来成为拉应力波。如果这股反射拉伸应力波超过该处岩石的抗拉强度，则岩石便因拉坏而破碎。

#### 3. 爆炸气体膨胀压力和冲击波所引起的应力波共同作用理论

爆破时岩石的破坏是爆炸气体和冲击波共同作用的结果，它们各自在岩石破坏过程的不同阶段起重要作用。这种观点更切合实际情况而为大多数研究者所接受。

如前所述，爆轰波传播到装药空间岩壁时在岩石表层中迅速衰减成为应力波。这股强

烈压缩应力波在药包近区造成岩石的“压碎”，而在压碎区域之外造成径向裂隙。爆炸气体产物的“气楔作用”使开始发生的裂隙继续向前延伸和进一步张开，直到能量的消耗和衰减使岩石停止开裂。这样，尽管动能在爆炸总能量中只占百分之几到百分之十几的微弱比率，然而冲击波在岩石开始破裂的阶段仍是非常重要的因素。

对于不同性质的岩石和不同爆破目的，对爆破作用的应力波强弱和爆炸气体作用时间长短应有合适的要求，以达到较好的技术经济效果。例如，对坚硬的岩石要求爆破后得到较好的破碎效果时，就需要在岩石中造成较高的应力值和一定的气体膨胀作用时间。对于用爆破法采掘煤炭或其他脆性矿石时，不希望煤块或矿石受到过分破碎，因此要求适当地降低应力值并延长爆炸气体膨胀作用的时间。至于在较软岩石中进行抛掷爆破，对岩石破碎块度要求不高而希望抛掷作用较强时，则应尽可能降低应力波峰值而延长爆炸气体膨胀作用时间。

### (二) 单个药包爆破作用分析

#### 1. 爆破的内部作用

药包在无限深的均质岩体小爆破时，随距药包中心距离的不同，药包周围的岩体将承受不同的爆破作用和呈现不同的破碎特征，形成压碎圈、破碎圈和震动圈，如图 2-19 所示。

##### (1) 压碎圈

药包爆炸时，在周围岩体中产生的冲击波向外传播，紧靠药包的岩壁受到爆轰产物的冲击压力可达几万大气压以上，超过岩石动态抗压强度，使药包周围

岩石呈塑性并遭到粉碎，形成压碎圈，其半径一般为药包半径的 2~3 倍。如果炸药威力很低、岩石强度很高或采用不耦合装药，也可以不产生压碎圈；压碎圈消耗很大一部分能量，致使冲击波在此区衰减很快。

##### (2) 破碎圈

当冲击波进入压碎圈以外的岩体时，岩体受到衰减后的应力波的压缩作用而产生径向位移引起切向拉伸。如果拉应力超过岩体的动态抗拉强度，便在岩体内产生放射状的径向裂隙（图 2-20a），裂隙的发展速度约为岩石中纵波传播速度的 0.15~0.4 倍。随着爆炸产生的高压气体挤入裂隙，可促使原有裂隙进一步扩大或延伸。应力波通过后，受压缩的

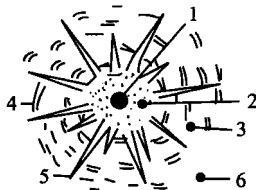


图 2-19 无限介质中的破坏分区  
1—药包；2—压碎圈；3—破碎圈；4—环向裂隙；5—径向裂隙；6—震动圈

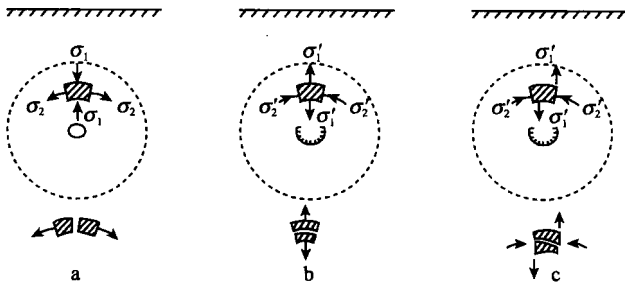


图 2-20 破裂区裂隙形成应力作用示意图  
a—径向裂隙；b—环向裂隙；c—剪切裂隙

岩体因弹性释放，又发生反向的径向运动，产生径向拉应力形成环向裂隙（图 2-20b）。此外还会发生剪切应力超过岩石抗剪强度而引起的剪切破坏（图 2-20c）。剪切裂隙与径向裂隙成  $45^\circ$  角。上述破坏裂隙相互交叉贯通，将岩体破碎，形成破碎圈，其半径在硬岩中约为装药半径的 8~10 倍。

### （3）震动圈

破碎圈以外，应力波的瞬间应力状态和爆炸产物的准静态应力场都不足以引起岩体的破坏，岩体变形属于弹性变形。所以破碎圈之外统称震动圈。该圈的应力波通常称为地震波，可传至很远的距离。

## 2. 爆破的外部作用

地表产生破坏作用。地表附近岩石的破坏，根本原因是自由面处应力的入射反射关系，其中应力应变过程比较复杂。

### （1）由霍金森效应引起的破坏

压应力波传播到自由面，一部分或全部反射回来成为同传播方向正好相反的拉应力波，这种效应叫霍金森（Hopkinson）效应。

有些研究者把爆破时岩石的片落当作岩石破碎的主要过程，但近年来的生产实践和研究试验表明，片落过程并不是岩石破碎的主要过程，而且，在爆破时不总是有一定有片落现象出现。片落现象的产生主要同药包的几何形状、药包的大小和入射波的波长有关。对装药量较大的药室爆破来说，产生片落现象的可能性就比较大；对装药量较小的深孔爆破或炮眼爆破来说，产生片落现象的可能性就比较小。

### （2）由反射拉伸应力波引起径向裂隙的延伸

应当指出，即使发射拉伸应力波已经衰减到不足以引起片落时，也还能在破碎岩石这方面起一定作用。从自由面反射回来的拉伸应力波使原先存在于径向裂隙梢上的应力场得到加强，故裂隙继续向前延伸。当径向裂隙同反射应力波阵面成  $90^\circ$  交角时，反射拉伸效果最好。当交角为  $\theta$  时，存在一个  $\sin\theta$  方向的拉伸分力，促使径向裂隙扩展和延伸，或者造成一条分支裂隙。至于垂直自由面方向的径向裂隙，则完全不会因反射拉伸应力波的影响而继续扩展和延伸。相反，由于反射应力波在切向上引起压缩应力，这就使得垂直自由面方向的径向裂隙不但不会张开，反而重新闭合。

## 3. 爆破漏斗

实际爆破工程中，药包均置于岩石自由面下的一定深度内，由于埋置深度不同，自由面对岩石的爆破作用将产生不同的影响。当一定重量的药包由岩体深部向自由面逐渐靠近时，将由内部作用药包逐渐转变为松动药包。当药包的埋深为某一值时，在爆炸应力波和爆轰气体压力的综合作用下，岩体将被破碎，并使部分岩块被抛掷，形成一个漏斗状的凹坑，称为爆破漏斗，如图 2-21 所示。爆破漏斗的构成要素有最小抵抗线（ $W$ ）、爆破漏斗半径（ $r$ ）、爆破漏斗深度（ $h$ ）。爆破漏斗半径与最小抵抗线之比，称为爆破作用指数（ $n$ ）。 $n < 0.75$  时，

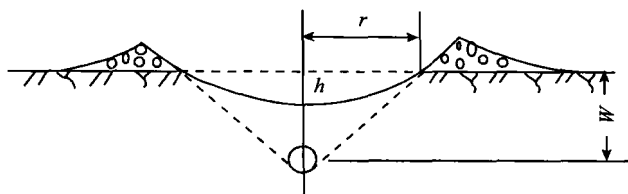


图 2-21 单自由面爆破漏斗

称松动爆破漏斗（图 2-22a）； $0.75 < n < 1.0$  时，称减弱抛掷爆破或加强松动爆破漏斗（图 2-22b）； $n = 1$  时，称标准抛掷爆破漏斗（图 2-22c）； $n = 1 \sim 3$  时，称加强抛掷爆破漏斗（图 2-22d）。 $n$  值的增大意味着炸药量增加或埋置深度减小，因而产生工程爆破中所要求的各种爆破漏斗。

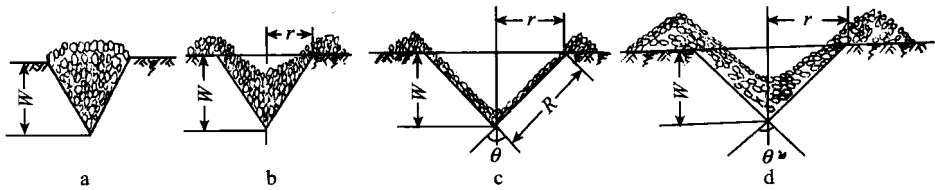


图 2-22 爆破漏斗的四种基本形式

a—松动漏斗；b—减弱抛掷漏斗（松动漏斗）；c—标准漏斗；d—加强抛掷漏斗

爆破漏斗形成过程如图 2-23 所示。

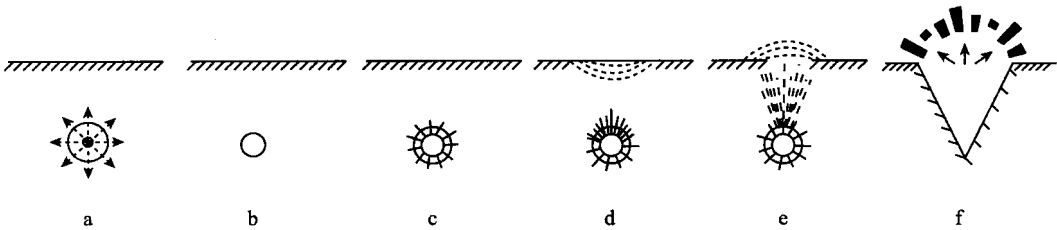


图 2-23 爆破漏斗形成过程示意图

a—炸药爆炸形成的应力场；b—粉碎压缩区；c—破裂区；d—破裂区和片落区；  
e—地表隆起、位移；f—形成爆破漏斗

### （三）两个自由面情况下的爆破

应力波和爆轰气体联合作用爆破理论认为，应力波作用于岩石中的时间虽然极为短暂，然而爆轰气体产物在炮孔中却能较长时间地维持高压状态。在这种准静态压力作用下，炮孔连心线各点上产生切向拉伸应力，最大应力集中于炮孔连心线同炮孔壁相交处，如图 2-24 所示。因而拉伸裂隙首先在炮孔壁，然后沿炮孔连心线向外延伸，直至贯通相邻两炮孔。这种解释很有说服力，而且生产现场也证明相邻齐发爆破炮孔间的拉伸裂隙是从孔壁沿连心线向外发展的。

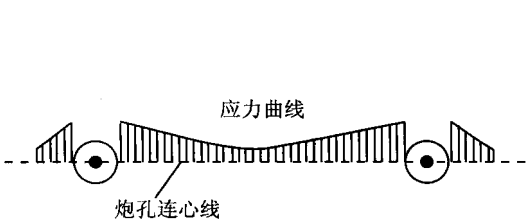


图 2-24 拉伸应力作用

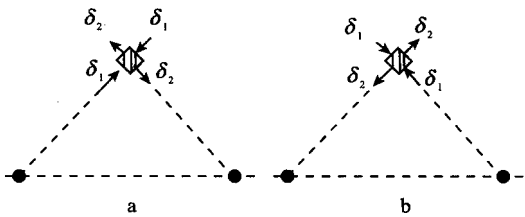


图 2-25 应力降低区分析  
 $\delta_1$ —压应力； $\delta_2$ —拉应力

产生应力降低区的原因，可由图 2-25 作如下解释：由于两相邻药包爆破引起的应力波相遇并产生叠加作用，在相邻两药包的辐射状应力波直角相交处出现应力降低区。先分析左边药包的情况。取某一点岩石单元体，单元体沿炮孔的径向方向出现压应力  $\delta_1$ ，在法线方向上则出现衍生拉应力  $\delta_2$ （图 2-25a）；同样右边的药包爆破也产生类似的结果（图 2-25b）。同排两相邻药包齐发起爆，使所取岩石单元体中由左边药包爆轰引起的  $\delta_1$  正好与右边药包爆轰引起的  $\delta_2$  相互抵消，这样就形成了应力降低区。

由此可见，适当增大相邻炮孔距离，并相应减少最小抵抗线，避免左右相邻药包爆轰所引起的压应力和拉应力相互抵消作用，有利于减少大块的产生。此外，相邻两排炮孔的梅花形布置比矩形布置更为合理，这一点已经被生产中采用大孔距、小抵抗线爆破取得良好效果所证明。

#### （四）多排成组药包的齐发爆破

多排成组药包齐发爆破所产生的应力波相互作用的情况比单排时更为复杂。在前后排各两个炮眼所构成的四边形岩石中，从各炮眼药包爆轰传播过来的应力波相互叠加，造成应力极高的状态，因而岩石破碎效果得到改善。然而在另一方面，多排成组药包齐发爆时只有第一排药包的爆破具有两个自由面的优越条件，而后排药包的爆破则因自由面数较少而受到较大的夹制作用。正是因为这个缘故，多排成组药包齐发爆破效果不好，得不到实际使用。在多排成组药包齐发爆破时，前后排药包间采用延法爆破效果较好，其中尤以采用微差起爆技术可以获得良好的爆破效果。微差起爆时在岩石内造成的应力状态的变化情况，比齐发爆破远为复杂。

### 第三节 井巷设计与施工

井巷设计与施工在地下矿山的生产和建设中，占有极为重要的位置，是开发矿床的基本工程。

巷道断面设计合理与否，直接影响矿山的生产经济效果和生产的安全条件。因此，合理选择与设计巷道断面是采矿设计中很重要的问题，对加快平巷的掘进速度，提高掘进质量，缩短矿山建设周期，保持三级矿量平衡，具有重要意义。

巷道断面设计的基本原则是，在满足安全与技术要求的条件下，力求提高断面的利用率，缩小断面，降低造价并有利于加快施工速度。

#### 一、平巷断面形状及尺寸设计

矿山巷道数量多、类型复杂、用途广，是联系矿山各工作场所的主要通道。巷道断面设计包括巷道断面形状的选择、巷道断面尺寸的确定、巷道支护形式的选择以及巷道内其他设施的布置。

##### （一）平巷断面形状的选择

###### 1. 断面形状

在金属矿山，常用的断面形状是梯形和直墙拱形（如半圆拱形、圆弧拱形、三心拱形等，简称拱形）。在特殊条件下，也有的采用多角形、马蹄形、椭圆形等（图 2-26）。



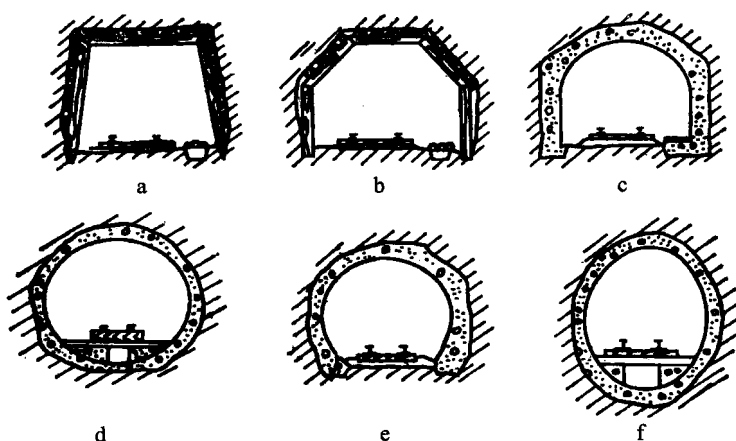


图 2-26 巷道断面形状

a—梯形巷道；b—多角形巷道；c—拱形巷道；d—圆形巷道；e—马蹄形巷道；f—椭圆形巷道

## 2. 断面形状选择时主要考虑的因素

①地压大小；②巷道的用途及服务年限；③支护材料与方式；④巷道施工方法；⑤通风阻力。

上述 5 个因素密切相关，前两个因素起主导作用，但在实际应用中一定要综合考虑，合理选择。

### (二) 平巷净断面尺寸

不同用途的巷道，断面尺寸的设计方法也不同。大多数巷道，依据通过巷道中运输设备的类型和数量，按《冶金矿山安全规程》（以下简称安全规程）规定的人行道宽度和各种安全间隙，并考虑管路、电缆及水沟的合理布置等来设计净断面尺寸，然后用通过该巷道的允许风速来校核，合格后再设计支护结构及尺寸，绘制施工图和工程量表。

专为通风或行人用的巷道断面尺寸，只要满足通风或行人的要求即可。为减少平巷断面规格的类型和数量，往往按净断面的要求，选择标准断面即可，不必单独设计。若需设计，则一般按下述顺序进行。

#### 1. 巷道净宽

拱形巷道的净宽( $B_0$ )，指直墙内侧的水平距离(图 2-27)，可按下列公式计算：

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= 2b + b_1 + b_2 + m(\text{双轨}) \\ B_0 &= b + b_1 + b_2(\text{单轨}) \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中： $b$  为运输设备的宽度（按表 2-4 选取），mm； $b_1$  为运输设备到支架的间隙（按表 2-5 选取），mm； $b_2$  为人行道的宽度（按表 2-6 选取），mm；并要求双轨线路之间及溜矿口一侧禁设人行道；人行道尽量不穿越或少穿越线路；在人行道侧敷设管路（架高敷设除外）时，要相应增加人行道宽度。

设计曲线巷道时，要考虑矿车在弯道运行时，由于车体中心线和线路中心线不相吻合，产生矿车外侧车厢边角外伸和矿车内侧车帮内移现象。所以，按式（2-1）计算出

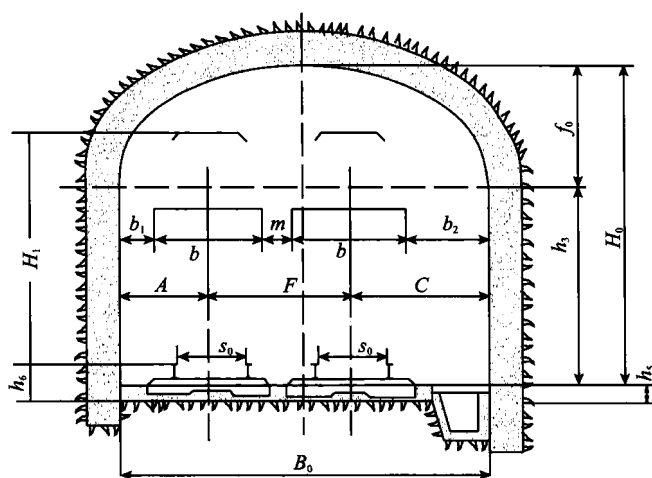


图 2-27 巷道净尺寸计算图

A—非人行道侧线路中心线到支架的距离；F—双轨运输线路中心距离，mm；

C—人行道侧线路中心线到支架的距离

(在任何情况下，应使两列对开列车最突出部分间距  $m$  ( $m$  按表 2-5 选取) 满足安全要求。还要考虑设置渡线道岔的可能性；一般按表 2-4 中选取  $F$  值，然后按通过运输设备最大宽度来验算  $F$  值是否符合要求)

巷道净宽度 ( $B_0$ ) 后，还要适当加宽，按表 2-4 选取加宽值。

表 2-4 金属矿井下运输设备类型规格尺寸 (mm)

运输设备类型			设备外形尺寸			轨距 $S_0$	架线高度 $H_1$	线路中心线 $F$
			长 $l$	宽 $b$	高 $h$			
电 机 车	架	ZK1.5/100	2100	920	1550	600	1600 ~ 2000	1200
				1040		762		1300
		ZK3/250	2700	1250	1550	600	1700 ~ 2100	1500
						762		
	线	ZK7/250	4500	1060	1550	600	1800 ~ 2200	1300
				1360		762		1600
		ZK7/550	4500	1060	1550	600	1800 ~ 2200	1300
				1360		762		1600
	式	ZK10/250	4500	1060	1550	600	1800 ~ 2200	1300
				1360		762		1600
		ZK10/550	4500	1060	1550	600	1800 ~ 2200	1300
				1360		762		1600
车	蓄电池式	XK2.5/48	2100	950	1550	600	—	1200
		XK2.5/48A	2100	950	1550	762	—	1200
				1050			—	1300
		XK6/100	4430	1063	1550	900	—	1300

续表

运输设备类型			设备外形尺寸			轨距 $S_0$	架线高度 $H_1$	线路中心线 $F$
			长 $l$	宽 $b$	高 $h$			
矿          车	固定式 车厢	YGC0.5 (6)	1200	850	1000	600	—	1100
		YGC0.7 (6)	1500	850	1050	600	—	1100
		YGC1.2 (6)	1900	1050	1200	600	—	1300
		(7)				762	—	
		YGC2 (6)	3000	1200	1200	600	—	1500
		(7)				762	—	
		YGC4 (7)	3700	1330	1550	762	—	1900
		(9)				900	—	
	翻转式 车厢	YFC0.5 (6)	1500	850	1050	600	—	1200
		YFC0.7 (6)	1650	980	1200	600	—	1300
		(7)				762	—	
		KC0.9 (6)	1650	1064	1355	600		1300
	单侧曲轨 侧卸式	YCC0.7 (6)	1650	980	1050	600	—	1300
		YCC1.2 (6)	1900	1050	1250	600	—	1300
		YCC2 (6)	3000	1250	1300	600	—	1500
		(7)				762	—	
	底卸式	YDC4 (7)	3900	1600	1650	762	—	1900

## 2. 巷道净高

巷道净高 ( $H_0$ ) 指从道砟面至拱顶内缘的垂直距离。从图 2-27 可知, 拱形断面巷道的净高 ( $H_0$ ) 为

$$H_0 = f_0 + h_3 - h_5 \quad (2-2)$$

式中:  $f_0$  为拱形巷道拱高, mm;  $h_3$  为拱形巷道墙高, mm;  $h_5$  为巷道铺轨道砟厚度, mm。

拱的高度常用高跨比来表示, 即拱高与净宽度之比。选用较高的拱时, 有利于巷道围岩的稳定和支架受力, 相反则不利于巷道围岩的稳定和支架受力, 但前者断面利用不好, 后者断面利用较好。根据理论推导, 结合矿山实际, 通常认为  $f_0 = (0.35 \sim 0.40) B_0$  是合理的拱高范围。目前矿山常用的拱高及拱形的几何参数如下。

### (1) 半圆拱

半圆拱是以巷道净宽为直径作圆, 取其一半作巷道拱部形状。其拱高及拱半径均为巷道净宽之半, 即  $f_0 = B_0/2$ ,  $R = B_0/2$ 。半圆拱拱高较大, 能承受较大的顶压, 但断面利用率低, 金属矿山平巷中较少采用。

### (2) 圆弧拱

圆弧拱是取圆周的一部分构成巷道拱部形状, 承压性能比半圆拱差, 比三心拱好; 断面利用率比半圆拱高; 与三心拱相比, 拱部成型比较容易, 施工也比较方便, 故多用。具体参数见表 2-8。

表 2-5 各种安全间隙 (mm)

运输设备	运输设备之间			设备与支护之间		
	冶金部门	建材部门	化工部门	冶金部门	建材部门	化工部门
小于 $3.5\text{m}^3$ 矿车	$\geq 300$	$\geq 250$	$\geq 300$	$\geq 300$	$\geq 250$	$\geq 300$
小于 $10\text{m}^3$ 矿车	$\geq 300$	$\geq 250$	$\geq 300$	$\geq 600$	$\geq 250$	$\geq 600$
无轨运输皮带				$\geq 400$	$\geq 400$	$\geq 400$

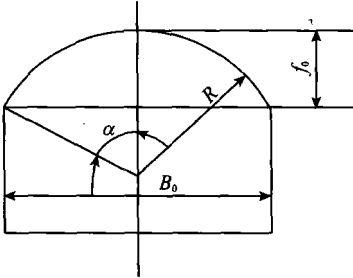
表 2-6 人行道宽度 (mm)

部门	电机车		无轨运输	皮带	人车停车处的巷道两侧	矿车摘挂钩处两侧
	$<14\text{t}$	$\geq 14\text{t}$				
冶金部门	$\geq 800$	$> 800$	$\geq 1000$		$\geq 1000$	
建材部门	$\geq 800$	$\geq 800$	$\geq 1000$	$\geq 800$	$\geq 1000$	$\geq 1000$
化工部门	$\geq 800$	$\geq 800$	$\geq 1000$		$\geq 1000$	

表 2-7 曲线巷道加宽值 (mm)

运输方式	内侧加宽	外侧加宽	线路中心线加宽
电机车	100	200	200
人推车	50	100	100

表 2-8 圆弧拱有关参数系数表

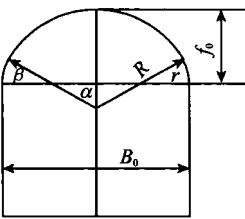
几何形状	参数 $f_0/B_0$	$f_0 (B_0)$	$R (B_0)$	$\alpha$	拱弧长 $P_{\text{弧}} (B_0)$
	1/3	0.3333	0.5417	$67^{\circ}23'$	1.2740
	1/4	0.2500	0.6250	$53^{\circ}8'$	1.1591
	1/5	0.2000	0.7250	$43^{\circ}36'$	1.1035

### (3) 三心拱

取一段大圆弧和两段小圆弧组合而成的新拱形, 由于这个拱有三个圆心故称三心拱。它的承压性能比圆弧拱差, 砸胎加工制作也比圆弧拱复杂, 但断面利用较好。

为简化巷道断面设计, 按表 2-9 的三心拱的几何参数, 可直接绘出三心拱形。

表 2-9 三心拱有关参数系数表

几何形状	参数 $f_0/B_0$	$f_0 (B_0)$	$R (B_0)$	$r (B_0)$	$\beta$	$\alpha$	拱弧长 $P (B_0)$	拱面积 $S_{拱} (B_0^2)$
	1/3	0.3333	0.6920	0.2620	5619	3341	1.3287	0.2620
	1/4	0.2500	0.9044	0.1727	6326	2634	1.2111	0.2000
	1/5	0.2000	1.1290	0.1285	6812	2148	1.6510	0.1600

### 3. 拱形巷道墙高

拱形巷道墙高 ( $h_3$ )，指巷道底板至拱基线的距离 (图 2-27)。通常墙高是根据电机车架线要求计算，再按行人及管道架设要求验算比较，最后选其中最大值。计算过程分述如下。

(1) 按架线式电机车导电弓子顶端两切线的交点与巷道拱壁间安全距离 ( $\geq 250\text{mm}$ ) 计算 (图 2-28)

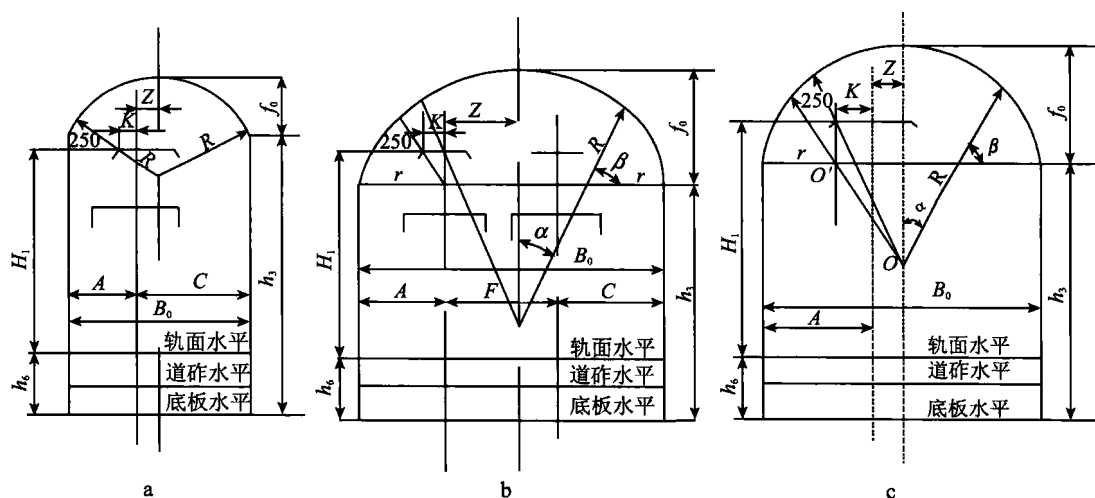


图 2-28 架线式电机车墙高计算图

1) 圆弧拱巷道墙高 (图 2-28a):

$$h_{3\text{圆弧}} = H_1 + h_6 - \sqrt{(R - 250)^2 - (K + Z)^2} + \sqrt{R^2 - \left(\frac{B_0}{2}\right)^2} \quad (2-3)$$

2) 三心拱巷道墙高。当导电弓子进入小圆弧断面内 (图 2-28b),  $\cos\beta = \frac{r - A + K}{r - 250} \geq 0.554$  时, 有

$$h_{3\text{三心}} = H_1 + h_6 - \sqrt{(r - 250)^2 - (r - A + K)^2} \quad (2-4)$$

当导电弓子进入大圆弧断面内 (图 2-28c), 即  $\cos\beta < 0.554$  时, 有

$$h_{3\text{三心}} = H_1 + h_6 - \sqrt{(R - 250)^2 - (K + Z)^2} + R - f_0 \quad (2-5)$$

式中： $H_1$ 为巷道轨面至导电弓子的高度（安全规程规定：①主要运输巷道，电源电压小于500V时，不低于1800mm，电源电压为500V或500V以上时，不低于2000mm；②井下调车场、架线式电机车道与人行道交叉点，电源电压小于500V时，不低于2000mm，电源电压为500V或500V以上时，不低于2200mm；井底车场（至运送人员车站），不低于2200mm）； $h_6$ 为巷道底板至轨面高度（按表2-11选取），mm； $K$ 为电机车导电弓子宽度之半，一般取400mm； $Z$ 为轨道中心线至巷道中心线间距，mm。

上述0.554是指拱高 $f = B_0/3$ 的三心拱小圆的圆心角的余弦值，即是 $\cos 56^\circ 19' = 0.554$ 。当 $\cos\beta \geq 0.554$ 时，表明导电弓子在小圆弧断面内；反之， $\cos\beta < 0.554$ 时，表明导电弓子只在大圆弧断面内。如此可区分式（2-4）与式（2-5）的使用条件。

### （2）按行人要求确定巷道墙高

巷道墙高应保证行人避车靠壁站立时，距壁100mm处的巷道有效净高不小于1900mm（图2-29）。

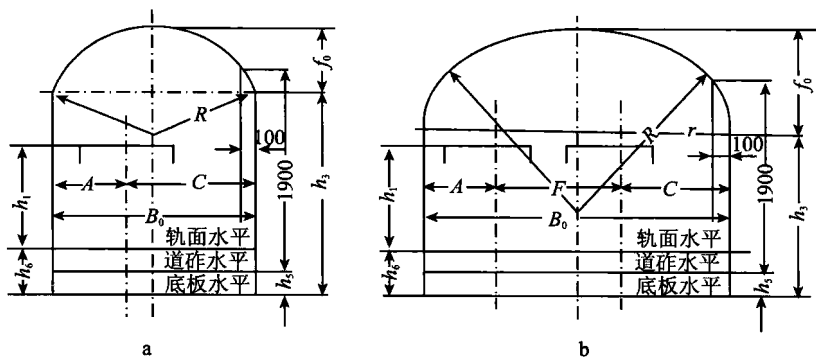


图2-29 按行人高度要求的墙高计算图

1) 圆弧拱巷道墙高（图2-29a），按下式计算：

$$h_{3\text{圆弧}} = 1900 + h_5 + [R - \sqrt{R^2 - (B_0/2 - 100)^2}] - f_0 \quad (2-6)$$

2) 三心拱巷道墙高（图2-29b），按下式计算：

$$h_{3\text{三心}} = 1900 + h_5 - \sqrt{r^2 - (r - 100)^2} \quad (2-7)$$

3) 按架设管道要求确定巷道墙高。要求导电弓子与管道距离不小于300mm，管道最下边应满足1900mm的行人高度。

### 4. 道床参数与水沟

#### （1）道床参数

道床参数指轨道，轨枕和道砟的有关参数，其结构如图2-30所示。

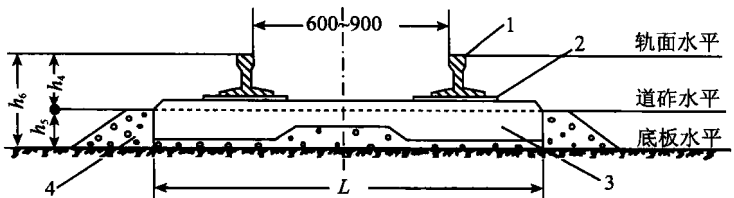


图2-30 矿用道床结构

1—钢轨；2—垫板；3—轨枕；4—道砟

轨道型号按通过该巷道的运输量、电机车类型及矿车容积而定，可按表 2 - 10 选取。轨枕、道砟应与轨道类型相适应，可按表 2 - 11 确定轨道结构尺寸。

表 2 - 10 巷道运输量与机车、矿车及轨道型号规格关系

运输量/10 <sup>4</sup> t	机车重量/t	矿车容重/m <sup>3</sup>	轨距/mm	轨道型号/kg·m <sup>-1</sup>
8 ~ 15	1.5 ~ 3	0.6 ~ 1.2	600	8 ~ 11
15 ~ 30	3 ~ 7	0.7 ~ 1.2	600	11 ~ 15
30 ~ 60	7 ~ 10	1.2 ~ 2.0	600	15 ~ 18
60 ~ 100	10 ~ 14	2.0 ~ 4.0	600 \ 762	18 ~ 24
100 ~ 200	14 ~ 20	4.0 ~ 6.0	762 \ 900	24 ~ 33
> 200	20	> 6.0	900	33

表 2 - 11 轨道结构尺寸参考

轨道型号/kg·m <sup>-1</sup>	钢筋混凝土轨枕		木轨枕	
	<i>h</i> <sub>6</sub> /mm	<i>h</i> <sub>5</sub> /mm	<i>h</i> <sub>6</sub> /mm	<i>h</i> <sub>5</sub> /mm
8	320 (260)	160 (100)	300 (250)	140 (100)
11	320 (270)	160 (100)	320 (260)	140 (100)
15	350	200	320	160
18	350	200	320	160
24	400	250	350	200
33	420	250	360	220

(2) 水沟

巷道一侧均应设置水沟，以排除井下涌水及其他污水（图 2 - 31）。水沟设置应满足下述要求：

1) 除车场外，水沟一般应设在人行道一侧，其坡度与巷道坡度相同，通常 *i* = 3 ‰ ~ 5 ‰。

2) 水沟应加盖板，常用的有钢筋混凝土预制盖板。砌碛巷道的水沟在靠墙一侧应留有 100mm 距离，以便铺设盖板。通常盖板顶面与道砟齐平。

3) 水沟断面形状常采用矩形、对称梯形或不对称梯形。一般开拓和采准巷道中的水沟均要支护，多用现浇或预制混凝土；回采巷道和坚硬的岩石巷道中的水沟可不支护。

4) 水沟中水的最大流速，混凝土支护时为 5 ~ 10m<sup>3</sup>/s，不支护时为 3 ~ 4.5m<sup>3</sup>/s；水沟中水的最小流速应保证泥砂不致沉淀，一般不应小于 0.5m<sup>3</sup>/s。

5) 为简化设计，水沟的各项参数可根据巷道的涌水量以及支护材料、坡度等条件，按表 2 - 12 选取。

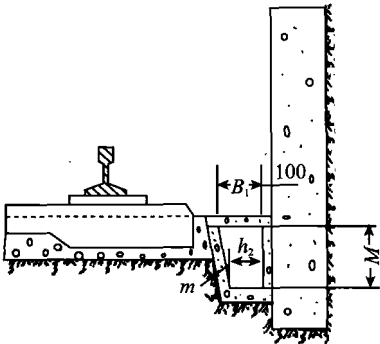


图 2 - 31 水沟示意图

表 2-12 水沟规格尺寸

水沟支护材料	涌水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$		水沟净尺寸/mm			水沟断面/ $\text{m}^2$	
	$i = 3 \text{ ‰}$	$i = 5 \text{ ‰}$	上宽	下宽	深度	净	掘
混凝土	0 ~ 100	0 ~ 120	310	280	200	0.059	0.132
	101 ~ 150	121 ~ 180	330	280	250	0.073	0.161
	151 ~ 200	181 ~ 260	350	310	300	0.099	0.192
	201 ~ 300	261 ~ 340	400	360	350	0.133	0.238
钢筋混凝土	0 ~ 100	0 ~ 160	360	340	200	0.070	0.101
	101 ~ 150	161 ~ 230	360	340	250	0.088	0.122
	151 ~ 200	231 ~ 270	360	340	300	0.105	0.143
	201 ~ 300	271 ~ 400	400	380	350	0.137	0.181
木材	0 ~ 100	0 ~ 120	310	280	200	0.059	0.082
	101 ~ 150	121 ~ 180	330	290	250	0.078	0.103
	151 ~ 200	181 ~ 260	350	310	300	0.099	0.129
	201 ~ 300	261 ~ 400	400	360	350	0.133	0.167
无支护	0 ~ 100	0 ~ 120	380	230	280	0.085	0.085

## 5. 管线布置

按生产要求，巷道内要设置管道和电缆，如压风管、排水管、供水管、动力电缆、照明电缆和通讯电缆等。这些管线的布置要考虑安全，架设与检修的方便。通常应满足下述要求：

1) 管道常设于人行道一侧，也可设在对侧。架设可用管墩、托架或锚杆吊挂的方式。设在人行道侧时，应不影响行人；设在水沟上时，应不妨碍清理水沟。

2) 巷道内如有电机车架线，管道不应沿底板铺设（应采用管墩等），以防电流腐蚀管道。

3) 动力和通讯电缆，不应设在同一侧。如在同侧，则通讯电缆应位于动力电缆之上，并保证有 0.3m 以上的距离，以减少电磁场对通讯的干扰。

4) 电缆与管道设在同一侧时，电缆应在管子上部，其相互间距不应小于 0.3m。

5) 电缆悬挂高度应保证当矿车掉道时不致撞击电缆；电缆坠落时不致掉在轨道或运输机上；电缆悬吊点间距应不大于 0.3m。

## 6. 平巷支护参数的选择

支护参数指石材、混凝土支护、喷射混凝土支护的厚度，木棚子的坑木直径，钢筋混凝土棚子或型钢支架断面等。选定支护形式后，应按围岩性质、地压大小、巷道跨度来确定支护厚度或尺寸。支护参数是计算掘进断面和工程量不可缺少的数据。

## 7. 风速验算

几乎井下所有巷道都起通风作用。当通过该巷道的风量确定后，断面越小，风速越大。风速过大会扬起粉尘，影响工作效率和工人健康。为此，安全规程规定了各种用途的巷道所允许的最高风速（表 2-13）。故设计出巷道净断面后，还必须进行风速验算。若



风速超过允许的最高风速，则应重新修改断面尺寸，满足通风要求。通常按下式验算：

$$V = Q/S_{\text{通}} \leq V_{\text{允}} \tag{2-8}$$

式中： $Q$  为根据设计要求通过该巷道的风量， $\text{m}^3/\text{s}$ ； $S_{\text{通}}$  为巷道通风断面积， $\text{m}^2$ ； $V_{\text{允}}$  为允许通过的最大风速， $\text{m/s}$ ，按表 2-13 确定。

表 2-13 井巷最高风速

井巷名称	最高风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	附注
专用风井、风硐	15	1. 设梯子间的井筒风速不得超过 $8\text{m/s}$ ； 2. 修理井筒时，风速不得超过 $8\text{m/s}$
专用物料提升井	12	
风桥	10	
提升人员和物料的井筒、主要进风巷、回风道、修理中的井筒	8	
运输巷道、采区进风道	6	
采矿场、采准巷道	4	

8. 绘制巷道断面图并编制工程量及材料消耗量表

巷道设计的最终成果，是按比例（1:50）绘制巷道断面图，并附有工程量及材料消耗量表。巷道的施工图发至施工单位，作为指导施工的设计依据。

二、竖井井筒断面设计

井筒工程是矿井建设主要连锁工程项目之一。井筒工程量一般占全矿井井巷工程量的 15% 左右，而施工工期却占矿井施工总工期的 30% ~ 50%；同时井筒是整个矿山建设的咽喉；因此，井筒工程设计与施工，直接关系到矿山建设的成败和生产时期的正常使用。

井筒通常分主井、副井和风井。提升矿石的称主井；提升材料、设备、废石、上下人员、兼作通风排水的称副井；专作通风、并兼作安全出口的称风井；在一个井筒内，同时兼有主、副井功用的称混合井。

整个井筒自上而下是由井颈、井身和井底三个基本部分组成。井颈是指地面出口处井壁需要加厚的一段井筒，由井壁与壁座组成；一般竖井井颈深度为 15 ~ 20m、壁厚 1.0 ~ 1.5m，斜井井颈部分应延深至基岩层内至少 5m。井身是指井颈以下到井底车场水平以上的井筒。井底是指车场水平以下的井筒部分，一般井底深度罐笼井为 10m 左右，箕斗井 35 ~ 75m，斜井 5 ~ 7m。

（一）竖井断面形状与尺寸

竖井井筒横断面形状有圆形、矩形和椭圆形等。竖井多采用圆形断面，这是因为圆形断面既便于施工又易于维护，还可承受较大地压。地压小，服务年限不超过 15 年的小型矿井，有时采用矩形和多边形断面；椭圆形断面一般在改建、扩建旧的矩形断面小井时应用。

竖井断面尺寸的大小决定于井筒的用途、设备和所需要通过的风量。其确定步骤为：根据提升容器、井筒装备和井筒延深方式等因素，先按规定的设备空间尺寸，用图解法或解析法求出井筒的近似直径，然后按 0.5m 晋级（净直径 6.5m 以上井筒按 0.2m 晋级）

初步确定井筒直径，最后按通风要求确定井筒断面尺寸。

在设计竖井井筒前，应收集有关井筒所在位置的地面地下水文及地质条件，井筒内的设备配置情况，井筒的服务年限、生产能力和通过风量等资料。

1. 井筒类型

竖井是整个地下矿山的核心，按用途可以分为提升井和通风井（风井）。井筒断面形状一般为圆形，很少采用方形。圆形断面有利于维护，但断面利用率较低。各种井筒的用途及设备配置情况见表 2-14 和图 2-32。

表 2-14 井筒用途及设备配置

井筒类型	用 途	井内装设情况	图 例
主井（箕斗或罐井）	提升矿石	箕斗或罐笼，有时设管路间、梯子间	图 2-32a
副井（罐笼井）	提升废石，上下人员、材料、设备	罐笼、梯子间、管路间	图 2-32b, c
混合井	提升矿石、废石，上下人员、材料、设备	罐笼、梯子间、管路间	图 2-32d
风井	通风，兼作安全出口	井深小于 300m 时，设梯子间；井深大于 300m 时，设紧急提升设备	
盲井	无直接通达地表的出口，一般作提升井用	根据生产需要装设	

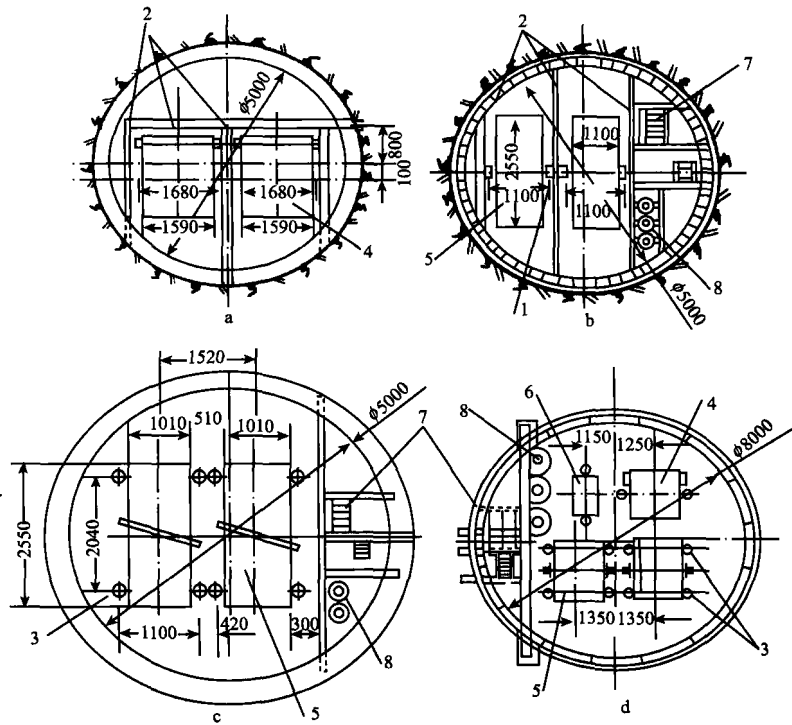


图 2-32 各种井筒内的装设情况

a—箕斗井；b、c—罐笼井；d—混合井

1—刚性罐道；2—罐道梁；3—柔性（钢丝绳）罐道；4—箕斗；5—罐笼；6—平衡锤；7—梯子间；8—管路

2. 井筒内的装备

竖井的主要装备是罐笼或箕斗。罐道、罐道梁、井底支承结构、过卷装置、托罐梁等都是为罐笼或箕斗的稳定、安全、高速运行而设，梯子间则是为井内设备的安装和维修或辅助安全行人通道而设。由于竖井是整个矿山的主要通道，所以风、水、电等管缆也都通过竖井。

(1) 提升容器

首先按照竖井的用途选择提升容器，目前竖井提升容器有罐笼和箕斗。选择提升容器的主要依据是用途和生产能力。罐笼用途多，可以提升矿石、废石、设备、人员，但罐笼的生产能力低，一般用作副井的提升容器。箕斗只用来提升矿石（也可以提升废石），提升速度快，生产能力大，用于产量高的主井。主井生产能力大的用箕斗，生产能力小的用罐笼。罐笼有单层、多层，每层又有单车、多车，罐笼的规格视矿车而定。提升容器的数量有单容器和多容器，根据生产能力确定。

(2) 罐道

罐道分刚性罐道和柔性罐道两类。刚性罐道的类型及性能见表 2 - 15。罐道和罐道梁与提升容器的相对位置有多种方式，罐道可以布置在提升容器的两侧、两端、单侧、对角或其他位置，原则是保证提升容器的稳定高速运行并尽量提高竖井断面的利用率。罐道和罐道梁的选择计算，可以按照静载荷乘以一定的倍数，或按动载应力计算。无论用哪种方式计算，选择的余地并不大，一般在常用的几种类型中选择即可。

表 2 - 15 刚性罐道的类型及性能

罐道类型	规 格	材料特点	适用条件	适用罐 梁层距
木罐道	矩形断面，160mm × 180mm 左右，每根长 6m	易腐蚀，使用年限不长，宜先行防腐处理	井筒内有侵蚀性水，中小型金属矿山	2m
钢轨罐道	常用规格为 380kg/m、33kg/m 或 43kg/m，标准长度 4. 168m	强度大，使用年限长	箕斗井或罐笼井中多采用	4. 168m
型钢组合罐道	由槽钢或角钢焊接而成的空心钢罐道	抵抗侧向弯曲和扭转阻力大，罐道刚性增加	配合弹性胶轮滚动罐耳，运行平稳磨损小，用于提升终端荷载和提升速度大的井中	
整体轧制罐道	方形钢管罐道	具有型钢组合罐道的优点，并优于其性能，自重小，寿命长	用于提升终端荷载和提升速度大的井中	

柔性罐道实质上是用钢绳做罐道，不用罐道梁。在钢绳罐道的一端有固定装置，另一端有拉紧装置，以保证提升容器的正常运行。柔性罐道结构简单，安装、维修方便，运行性能也很好。不足之处是井架的载荷大，要求安全间隙大（增大井筒直径）。

柔性罐道的布置方式与刚性罐道类似，有单侧、双侧、对角布置，另外在提升容器每侧还可以布置单绳或双绳。柔性罐道设计时应选择计算钢绳的直径、拉紧力和拉紧方式。钢绳直径可先按表 2 - 16 中的经验数据选取，然后按式（2 - 9）验算。

$$m = \frac{Q_1}{Q_0 + qL} \geq 6 \tag{2 - 9}$$

式中： $m$  为安全系数； $Q_1$  为罐道绳全部钢丝拉断力的总和，kg； $Q_0$  为罐道绳下端的拉紧力，kg； $q$  为罐绳的单位长度重量，kg/m； $L$  为罐道绳的悬垂长度，m。

表 2-16 罐道绳直径选取经验值

井深/m	终端荷载/t	提升速度/m·s <sup>-1</sup>	罐道绳直径/mm	钢丝绳类型
<150	<3	2~3	φ20.5~25	6×7+1 普通钢丝绳
250~200	3~5	3~5	φ25~32	6×7+1 普通钢丝绳 密封或半密封钢丝绳
200~300	5~8	5~6	φ30.5~35.5	密封或半密封钢丝绳
300~400	6~12	6~8	φ35.5~40.5	密封或半密封钢丝绳
>400	8~12 或更大	>8	φ40.5~50	密封或半密封钢丝绳

罐道绳的拉紧方式参照表 2-17，拉紧力按式（2-10）计算：

$$Q_0 = \frac{qL}{e^{K_{\min}} - 1} \tag{2-10}$$

式中： $Q_0$  为每根罐道绳上的拉紧力，kg； $L$  为罐道绳悬垂长度， $L = \text{井深}(H_0) + (20 \sim 50)$ ，m； $q$  为罐道绳单位长度质量，kg/m； $K_{\min}$  为罐道绳最小刚性系数， $K_{\min} = 45 \sim 65 \text{ kg/m}$ ，一般  $K_{\min} = 50 \text{ kg/m}$ ；对终端荷载和提升速度较大的大型井或深井， $K_{\min}$  应选取大些，反之取小些。

表 2-17 罐道绳拉紧方式

拉紧方式	罐道绳上端	罐道绳下端	特点及适用条件
螺杆拉紧	在井架上设螺杆拉紧装置，上端用此拉紧螺杆固定	用绳夹板固定在井底钢梁上	拧紧螺杆，罐道绳产生张力。拉紧力有限，一般用于浅井中
重锤拉紧	固定在井架上	在井底用重锤拉紧，拉紧力不变，无须调绳检修	因有重锤及井底固定装置，要求井筒底部较深以及排水清扫设施。拉力大，适用于中、深井中
液压螺杆拉紧	在井架上，此液压螺杆拉紧装置将罐道绳拉紧	用倒置的固定装置固定在井底专设的钢梁上	利用液压油缸调整罐道绳拉紧力，调绳方便省力，但安装和换绳较复杂。此方式使用范围较广

(3) 罐道梁

井筒内为固定罐道而设置的水平梁，称为罐道梁（简称罐梁）。最常用的为金属罐梁，也有用钢筋混凝土罐梁的；中小型金属矿山的方井中，个别也用木罐梁。

罐梁与井壁的固定方式有梁窝埋设、预埋件固定或锚杆固定 3 种。

(4) 梯子间

有安全出口作用的竖井必须设梯子间。梯子间除用做安全出口外，平时用于竖井内各种设备检修。梯子间一般布置在罐笼井中，箕斗井中可不设梯子间。梯子间通常布置在井筒的一侧，并用隔板与提升间、管缆间隔开。梯子间的布置，按上下两层梯子安设的相对位置可分为并列、交错、顺列 3 种形式（图 2-33）。梯子倾角不大于 80°；相邻两梯子平

台的距离不大于8m，通常按罐梁层间距大小而定；梯子口尺寸不小于0.6m×0.7m；梯子上端应伸出平台1m；梯子下端离开井壁不小于0.6m，脚踏板间距不大于0.4m；梯子宽度不小于0.4m。梯子的材质可以是金属或木质。

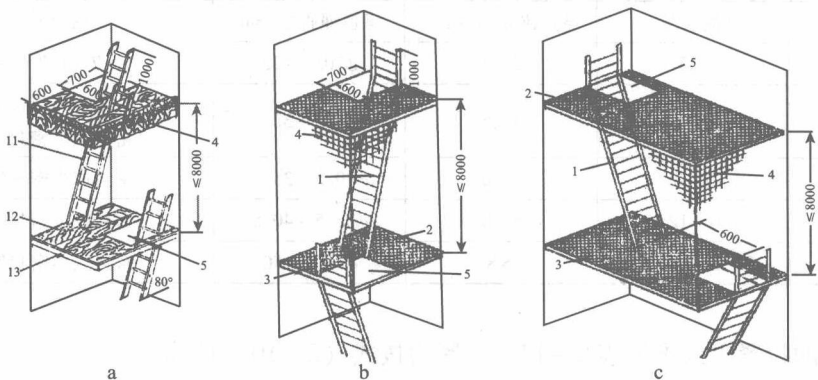


图 2-33 梯子间梯子布置形式

a—并列布置， $S_{小}=1.3\text{m}\times1.2\text{m}$ ；b—交错布置， $S_{小}=1.3\text{m}\times1.4\text{m}$ ；c—顺列布置， $S_{小}=1\text{m}\times2\text{m}$   
 1—梯子；2—梯子平台；3—梯子梁；4—隔板（网）；5—梯子口

(5) 管缆间布置

排水管、压风管、供水管、下料管等各种管路和动力、通讯、信号等各种电缆通常布置在副井中，并靠近梯子间。动力电缆和通信、信号电缆间要有大于0.3m的间距，以免相互干扰。

(6) 提升容器四周的间隙

提升容器是竖井中的运动装置，与其他装置间保持必要的间隙是提升容器安全运行所必需的。绳罐道运行时的摆动量较大，所以间隙应大些。提升容器与刚性罐道的罐耳间的间隙不能太大，钢轨罐道的罐耳与罐道间的间隙不大于5mm，木罐道的罐耳与罐道间隙不大于10mm，组合罐道的附加罐耳每侧间隙为10~15mm。钢绳罐道的滑套直径不大于钢丝绳直径5mm。冶金矿山提升容器与井内装置间的间隙参见表2-18。

表 2-18 提升容器与井内装置间的最小间隙（mm）

罐道和罐梁布置方式		容器和井壁间	容器和容器间	容器和罐梁间	容器和井梁间	备注
一 罐道在容器一侧		150	200	40	150	罐耳和罐道卡之间为200
罐道在容器两侧	木罐道	200		50	200	有卸载滑轮的容器，滑轮和罐梁间隙增加25
	钢轨罐道	150		40	150	
罐道在容器正面	木罐道	200	200	50	200	
	钢轨罐道	150	200	40	150	
钢绳罐道		350	450		350	①

①设防撞绳时，容器之间的最小间隙为250mm，当提升高度和终端荷载很大时，提升容器之间的间隙可达700mm。

3. 竖井断面的布置形式

竖井断面布置形式指竖井内的提升容器、罐道、罐梁、梯子间、管缆间、延深间等设施在井筒断面的平面布置方式。决定竖井断面布置方式的因素很多，如竖井的用途、提升容器数量和类型以及井内其他设施的类型和数量，都对竖井断面的布置有很大影响。所以，竖井断面布置方式变化较大，也比较灵活。这里只列举一些典型的布置形式（图 2-34 和表 2-19）和某些实例（图 2-35 和表 2-20）。

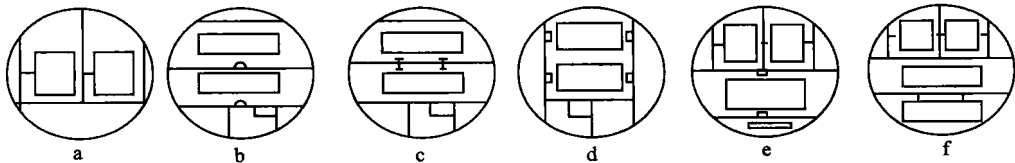


图 2-34 竖井断面布置形式示意图

表 2-19 竖井断面布置形式

竖井断面布置形式示意图	提升容器	竖井设备	备注
图 2-34a	一对箕斗	金属罐道，罐道梁双侧布置，设梯子间或延深间	箕斗主井最常用形式
图 2-34b	一对罐笼	金属罐道梁，双侧木罐道，设梯子间、管子间	罐笼副井常用形式
图 2-34c	一对罐笼	金属罐梁，单侧钢轨罐道，设梯子间	同上
图 2-34d	一对罐笼	金属罐道梁，木或金属罐道端面布置，设梯子间、管子间	
图 2-34e	一对箕斗和一个带平衡的罐笼	箕斗提升为双侧金属罐道，罐笼提升为双侧钢轨罐道或双侧木罐道，平衡锤可用钢丝绳罐道	
图 2-34f	一对箕斗和一对罐笼	箕斗提升为双侧金属罐道，罐笼提升为单侧钢轨罐道	

表 2-20 竖井断面布置实例

实例图	竖井尺寸/m	布置内容		附注
		提升容器	井筒装备	
图 2-35a	4.94 × 2.7	单层单车双罐笼 1080mm × 1800mm	木井框、木罐道、木罐梁	罐梁层间距 1.5m
图 2-35b	4.0	一个 5a 型罐笼配平衡锤 3200mm × 1440mm × 2385mm	双侧木罐道，27 号槽钢罐梁金属梯子间	罐梁层间距 2m
图 2-35c	6.5	一个 1t 矿车双层四车加宽罐笼	悬臂罐梁树脂锚杆固定，球扁钢罐，端面布置，金属梯子间，设管缆间	用于井型 1.8Mt/a 的副井
图 2-35d	6.5	两对 12t 箕斗多绳提升	两根 22 <sup>b</sup> 组合罐梁，树脂锚杆固定，球扁钢罐道，端面布置	用于井型 3.0Mt/a 的主井
图 2-35e	6.0	一对 16t 箕斗多绳提升	钢丝绳罐道，四角布置	用于井型 1.8Mt/a 的主井



4. 竖井断面尺寸

竖井断面尺寸包括井筒净断面尺寸、支护材料及厚度、井壁壁座尺寸等。

(1) 井筒净断面尺寸的确定

净断面尺寸主要按以下步骤确定：选择提升容器的类型、规格、数量；选择井内其他设施；计算井筒的近似直径；按通风要求核算井筒断面尺寸。

(2) 井壁厚度的确定

影响井壁厚度的主要因素是地压，还要考虑井的形状、大小及井内、井口各种设备或建筑物施加到井壁的压力。通常采用工程类比法确定井壁厚度。

1) 整体混凝土井壁厚度：整体混凝土井壁厚度的计算当前还不完善，在实际选择时可参考表 2-21。

表 2-21<sup>①</sup> 井壁厚度参考数据

井筒净直径 m	井壁支护厚度/mm		
	混凝土 <sup>③</sup>	混凝土砖 <sup>②</sup>	料 石 <sup>②</sup>
3.0~4.0	250	300	300
4.5~5.0	300	350	300
5.5~6.0	350	400	350
6.5~7.0	400	450	400
7.5~8.0	500	550	500

①本表适用于  $f=4\sim6$ ；②混凝土砖、料石砌碛时，壁后充填为 100mm；③混凝土标号采用 C20 号。

2) 喷射混凝土井壁支护厚度：岩层稳定时，厚度可取 50~100mm；地质条件稍差，岩层节理发育，但地压不大、岩层较稳定的地段，井壁厚度可取 100~150mm；地质条件较差，岩层较破碎地段，应采用喷、锚、网联合支护，支护厚度 100~150mm。在马头门处的喷射混凝土应适当加厚或加锚杆。

3) 验算：初选井壁厚度后，还要对井壁圆环的横向稳定性进行验算，如不能满足稳定性要求，就要调整井壁厚度。为了保证井壁的横向稳定性，要求横向长细比不大于下列数值：

对混凝土井壁  $L_0/h \leq 24$

对钢筋混凝土井壁  $L_0/h \leq 30$

井壁在均匀载荷下，其横向稳定性可按下列公式验算：

$$K = \frac{Ebh^3}{4R_0^3P(1-\mu)} \geq 2.5 \quad (2-11)$$

式中： $L_0$  为井壁圆环的横向换算长度， $L_0=1.814R$ ； $h$  为井壁厚度，cm； $E$  为井壁材料受压时的弹性模量，MPa； $b$  为井壁圆环计算高度，通常取 100cm； $R_0$  为井壁截面中心至井筒中心的距离，cm； $P$  为井壁单位面积上所受侧压力值，MPa； $\mu$  为井壁材料的泊松系数，对混凝土取  $\mu=0.15$ 。

(3) 井壁壁座

井壁壁座是加强井壁强度的措施之一，在井壁的上部、厚表土层的下部、马头门上部



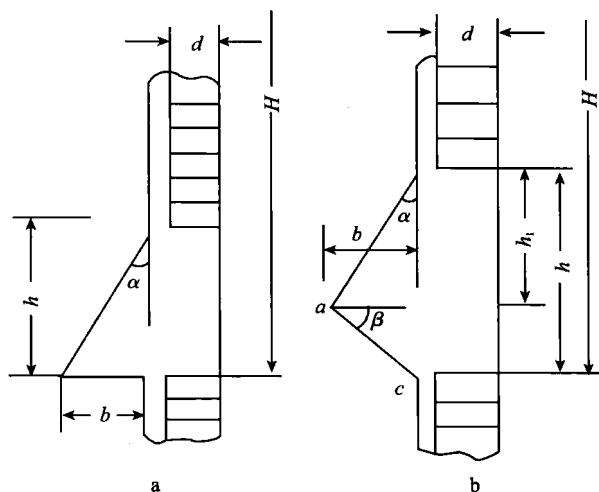


图 2-36 壁座形式  
a—单锥形；b—双锥形

等部位，一般都设有井壁壁座，以加强井壁的支承能力。壁座有两种形式（图 2-36），即单锥形壁座和双锥形壁座。双锥形壁座承载能力大，适合于井壁载荷较大的部位，单锥形壁座承载能力较小，适用于较坚硬的岩层中。壁座的尺寸可根据实践经验确定。一般壁座高度不小于壁厚的 2.5 倍，宽度不小于壁厚的 1.5 倍。通常壁高度  $h = 1 \sim 1.5\text{m}$ ，宽度  $b = 0.4 \sim 1.2\text{m}$ ，圆锥角  $\alpha = 40^\circ$  左右。双锥形壁座的  $\beta$  角必须小于壁座与围岩间的静摩擦角  $\varphi = 20^\circ \sim 30^\circ$ ，以保证壁座不至向井内滑动。

#### 5. 绘制井筒施工图并编制井筒工程量及材料消耗量表

井筒净直径、井壁结构和厚度确定后，即可计算井筒掘砌工程量和材料消耗量，并汇总成表（表 2-22）。

表 2-22 井筒工程量及材料消耗量表

工程名称	断面/m		长度/m	掘进体积/m³	材料消耗			
					混凝土/m³	钢材/t		
	净	掘进				井壁结构	井筒装备	合计
冻结层			108	6264.5	2689	97.2	66	163.2
壁座	33.2	58.1	2.0	159.3	93	1.35	1.14	2.49
基岩段			233.5	10321	2569		139.6	139.6
壁座	33.2	44.2	2.0	132.3	66	1.16	1.14	2.30
合计			345.5	16877.1	5417	99.71	207.88	307.59

## 第四节 天井掘进方法

天井掘进方法有：普通法、吊罐法、爬罐法、深孔爆破法和钻进法。这些方法各有所长，相互补充，使天井掘进技术日益完善，本节重点介绍普通法、吊罐法的设计与施工。

### 一、普通法掘进天井

普通法掘进天井是沿用已久的方法。为了免除繁重的装岩工作和排水工作，采用普通法掘进天井时，都是自下而上进行掘进的。它不受岩石条件和天井倾角的限制，只要天井的高度不太大都可使用。天井划分为两格间，其中一间是供人员上下的梯子间，另一间是

专供积存爆下的岩石用的矸石间，其下部装有漏斗闸门，以便装车（图 2-37）。

### 1. 普通法掘天井工艺

#### (1) 漏斗口的掘进

掘进天井时，首先根据所给的漏斗口底板的标高和天井的中心线，以  $50^\circ$  左右的倾角向上掘 1~2 茬炮，形成架设漏斗口所需的坡度，然后按设计的倾角继续向上掘进，直至掘进到架设漏斗后能容纳一茬炮的岩砧高度为止。在此期间爆下的岩石，直接落入平巷，用装岩机装岩。之后，架设漏斗口、放矿间和梯子间。

#### (2) 凿岩工作台的架设

当漏斗口掘进完毕并安装好漏斗与梯子间、安全棚等之后，在继续向上掘进之前，必须首先在安全棚之上距工作面 2.0~2.2m 处搭设凿岩工作台。凿岩、装药、连线都是在此台上进行的。

凿岩工作台一般由三根直径大于 12cm 的圆木横撑在天井顶底板之间，并在其上铺以厚度 4~5cm 的木板所构成。架设横撑时应先在井壁上凿好梁窝，并以木楔楔紧横撑的一端，以防横撑移动。凿岩工作台在垂直或倾角  $\geq 80^\circ$  的天井中呈水平位置。当天井倾角小于  $80^\circ$  时，为了便于打眼，工作台与水平面成  $3^\circ \sim 7^\circ$  的倾角。放炮时，必须将工作台上的木板拆除，以便放炮后岩石落入矸石间，并保证木板不致损坏，以便重复使用。

#### (3) 凿岩爆破工作

凿岩工作台架设好之后，即可开始凿岩工作。凿岩设备选用 YSP—45 向上式凿岩机。

由于天井横断面不大，为了便于凿岩和加深炮眼，广泛采用直眼掏槽。掏槽眼与空眼之间距离视岩石硬度、空眼数目与起爆顺序等而定。掏槽眼的位置以布置在岩石间上方为宜，这样可减弱对安全棚及梯子间的冲击。其他炮眼布置原则基本上与平巷相同。炮眼深度一般在 1.4~1.8m。起爆方法常用电力起爆，或用非电导爆系统一次点火引爆。

#### (4) 通风工作

由于天井是自下往上掘进的，爆破后产生的有害气体比空气轻，一般积聚在上部工作面附近不易排出。为了加速吹走工作面的有害气体，一般多采用压入式通风。通风机大多安装在天井下部附近的平巷内。风筒应随着安全棚往上移动，及时接上去。

#### (5) 支护工作

当有害气体排除后，即可进行支护工作。首先检查工作面的安全情况，清理浮石，修理被打坏的横撑等，然后才开始支护工作。在不架安全棚的情况下，支柱工的主要任务是在距离工作面 2m 左右的位置，架设凿岩工作台。当工作面往上推进 6~8m 时，则安全棚需要向上移动一次。移动时首先拆除旧安全棚，然后在上面架设新安全棚。安全棚由圆木横撑上铺木板而成，并使其向矸石间倾斜。安全棚的宽度以能遮盖梯子间为准。安全棚架好后，就开始自下而上安装梯子平台和梯子。梯子平台间距根据实际情况决定，一般为 3~4m。安全棚下第一个梯子平台往往兼作放置凿岩机和风水管等之用，因此又称工具

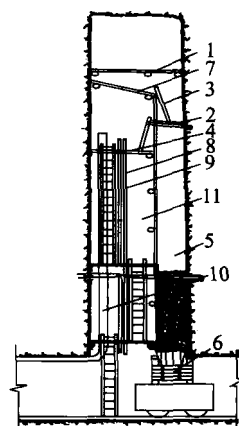


图 2-37 普通法掘进天井示意图

1—工作台；2—临时平台；3—短梯子；  
4—工具台；5—矸石间；6—漏斗口；  
7—安全棚（做成与水平面成  $30^\circ$  左右的  
角度）；8—水管；9—风管；10—风筒；

11—梯子间

台。此外，在安装梯子间的同时，需将矸石间的隔板钉好。

#### (6) 出砬工作

出砬是利用漏斗装车。为了安全起见，应严禁人员正对漏斗闸门操作，以免岩流冲下飞出矿车后发生事故。同时为了保护矸石间隔板和横撑不被打坏，矸石间应经常存有岩石，严禁放空。一般要求每次放出的岩石所腾出的空间以能容纳爆破一次所崩下来的岩砬为准。

#### (7) 工作组织

普通法掘进天井，由于支护与通风所占的时间较多，一般两班一循环或三班一循环，即凿岩爆破一个班，通风一个班，支护和出砬一个班。或者一班凿岩、放炮、通风，另一班进行支护和出砬。为了加快天井掘进速度，缩短采准工作时间，有的矿山采用多工作面作业法，即凿岩爆破和支护工作同时在不同的两条相距不远的天井中作业。

综上所述，采用普通法掘进天井，每个循环都要搭拆工作台，都要搬运设备和器材，每隔几个循环又要搭、拆安全棚，延长管线，装备梯子间和矸石间，因此该方法具有速度慢、工效低、通风差、木材消耗大、工人劳动强度大、安全事故多的缺点。它正在逐步被其他方法取代。就目前施工现状而言，在下述条件下，普通法仍占有一定地位。

#### 2. 普通法掘天井的适用条件

如下条件下可采用普通法掘进天井：

- 1) 不适宜用吊罐法、爬罐法掘进的短天井，盲天井；
- 2) 在软岩和节理裂隙发育的岩层中，需要随掘随支的天井；
- 3) 倾角常变的沿脉探矿天井；
- 4) 掘进溜井时，其下部有一段特殊形状的井筒，不宜采用其他方法施工时，仍可采用普通法掘进。

## 二、吊罐法掘天井

吊罐法掘进天井如图 2-38 所示。它的特点是：用一个可以升降的吊罐代替普通法的凿岩平台，同时，又可作为提升人员、设备、工具和爆破器材的容器，因此简化了施工工序。吊罐法操作方便，效率较高，金属矿山已广泛使用。

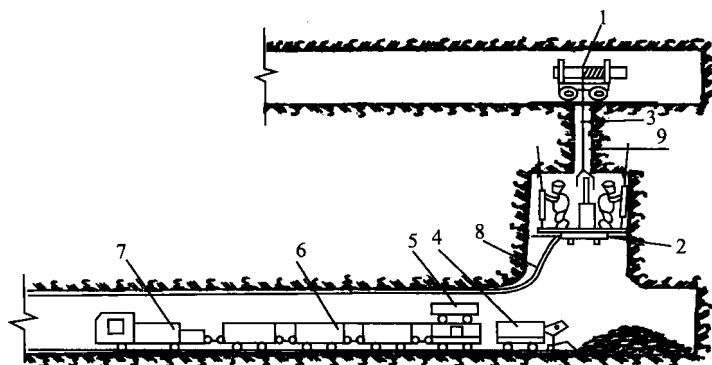


图 2-38 吊罐法掘进天井示意图

1—游动绞车；2—吊罐；3—钢丝绳；4—装岩机；5—斗式转载车；6—矿车；  
7—电机车；8—风水管；9—中心孔

### （一）吊罐法掘进天井所用的设备

吊罐法掘进天井的主要设备有吊罐（直式或斜式）和提升绞车，以及深孔钻机、凿岩机、信号联系装置、局部扇风机、装岩机和电机车等。为了缩短出矸时间，还可使用转载设备。

下面仅对吊罐作简要介绍。

吊罐是吊罐法掘进天井的主要设备。按控制方式有普通吊罐和自控吊罐；按适用的天井倾角有直吊罐和斜吊罐；按结构分有笼式吊罐和折叠式吊罐；按吊罐层数分有单层吊罐和双层吊罐；按下部行走机构分有轨轮式吊罐和雪橇式吊罐。下面仅就几种常用的吊罐加以介绍。

#### 1. 折叠式吊罐

折叠式直吊罐的结构如图 2-39 所示。它由折叠平台 1、伸缩支架 2、保护盖板 3、风动横撑 4、稳定钢丝绳 5、行走车轮 6 和吊架 7 共七部分组成。

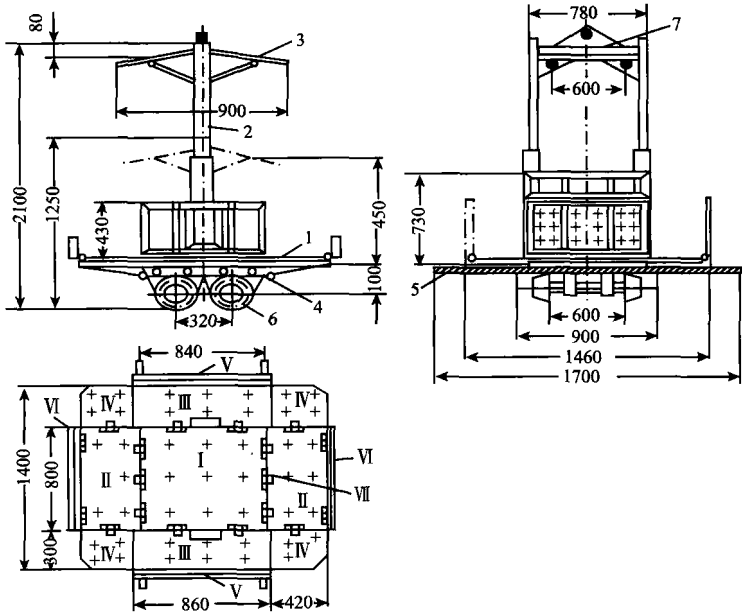


图 2-39 直吊罐结构示意图

1—折叠平台；2—伸缩支架；3—保护盖板；4—风动横撑；5—稳定钢丝绳；6—行走车轮；7—吊架

折叠式直吊罐结构简单，容易制造，体积小，重量轻，坚固耐用，运搬方便。但乘罐人员不能在吊罐上操纵吊罐的升降和停留。它适用于断面为  $1.5\text{m} \times 1.8\text{m} \sim 2.0\text{m} \times 2.0\text{m}$  倾角大于  $85^\circ$  的天井。

#### 2. 斜吊罐

这种吊罐是掘进斜天井用的。它由罐体、吊架、保护盖板三部分组成（图 2-40）。

### （二）吊罐法掘天井工艺

#### 1. 吊罐法掘进天井前的准备工作

##### （1）开凿上下硐室

吊罐法掘进天井时，上中段应有提升绞车硐室，下中段应有吊罐躲避硐室。

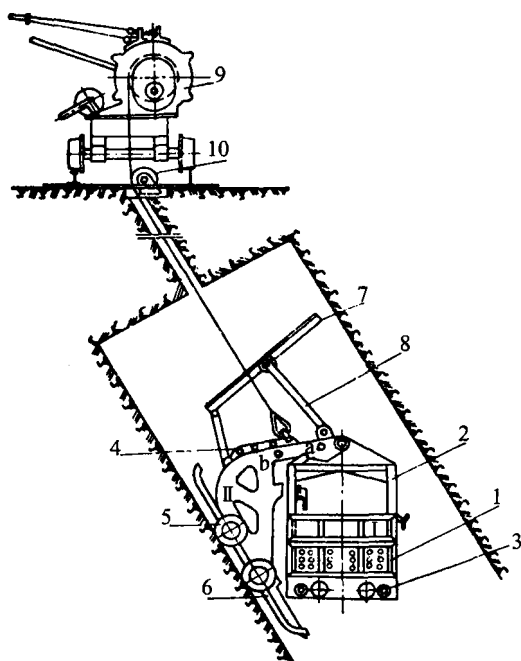


图 2-40 斜吊罐结构示意图

I—罐体；II—吊架

- 1—折叠平台；2—伸缩支架；3—风动横撑；4—悬吊耳环；  
5—行走车轮；6—滑动撬板；7—保护盖板；8—支撑；  
9—游动绞车；10—导向地轮

下部硐室尺寸是根据中心孔钻凿的方向，提升绞车的规格尺寸及操作方便而确定的最小尺寸。采用华—1 型绞车，当同时中心孔由上而下钻凿时，应首先满足钻机钻孔的需要，因此，硐室规格较大，一般为  $3.0\text{m} \times 1.5\text{m} \times 4.5\text{m}$ （长×宽×高）；如果采用自下而上钻进中心孔时，上部硐室的规格只要满足绞车工作所需要的空间即可，一般约为  $3.0\text{m} \times 2.2\text{m} \times 2.0\text{m}$ 。如果上中段联络天井上部的巷道可以满足绞车工作要求，那就不必开凿绞车硐室。

下部硐室的尺寸主要以便于吊罐的出入和装岩机械的操作方便为原则。如果采用潜孔钻机由下而上钻中心孔，则在天井下部应开凿钻机硐室，其尺寸视选用的钻机和天井倾角而定。

当打斜中心孔或直中心孔时，硐室尺寸分别为  $3.0\text{m} \times 2.5\text{m} \times 3.0\text{m}$  和  $2.5\text{m} \times 2.5\text{m} \times 3.0\text{m}$ 。

如果天井下部硐室要考虑采用漏斗装车，则必须在漏斗上面适当位置开凿存放吊罐及作为人员进出通道的人行井。开凿大型溜井时，溜井下部为了利用漏斗放矿，应开凿放矿闸门硐室；为了存放吊罐，可以在硐室内安装工作台（图 2-41 和图 2-42）。

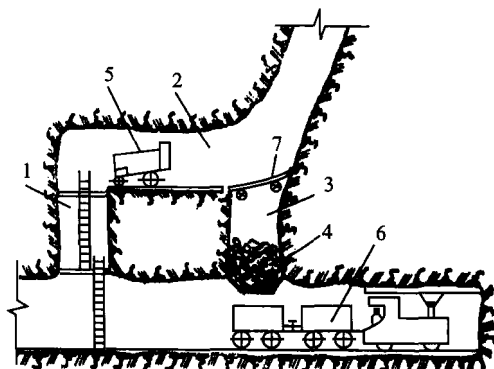


图 2-41 吊罐法掘进天井采用漏斗装岩时天井底部结构示意图

- 1—人行井；2—联络道；3—出渣井；4—漏斗；  
5—吊罐；6—矿车与电机车；7—钢轨（上下罐用）

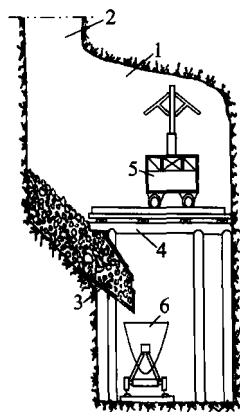


图 2-42 吊罐法掘进大型主溜井时溜井底部结构示意图

- 1—放矿闸门硐室；2—溜井；3—临时漏斗；  
4—板台；5—吊罐；6—矿车

实际上，钻机硐室就是天井的一部分，一般都采用普通方法施工。

## (2) 钻凿天井中心孔

吊罐中心孔直径一般为 100 ~ 130mm。常用的钻孔设备有地质钻机和潜孔钻机：

1) 地质钻机，如 HGY - 100、HGY - 200、HGY - 300 型，适用于自上而下钻进。其特点是破岩时只有回转而无冲击，因此，钻孔偏斜不大，作业条件好。但穿孔速度慢、工效低（一般进尺 2 ~ 8m/班），并需要开凿大硐室。当掘进高天井时，可以采用地质钻机。

2) 潜孔钻机，如 CS - 100 型等，是吊罐法常用的钻孔设备。它的特点是穿孔速度快（中硬岩中，一般钻速为 20 ~ 30m/台班），工效高。自下而上钻进时，钻机硐室是天井的一部分，辅助工程量小，节省开凿费用；其缺点是钻孔偏斜较大，因此不适合 60m 以上的高天井使用。

## 2. 掘进工作

### (1) 凿岩工作

一台吊罐一般配 2 台 YSP - 45 型凿岩机同时凿岩，这样有利于吊罐受力平衡，保持稳定。中心孔还有利于炮眼排列和提高爆破效果，但处理不好会造成中心孔堵塞，影响掘进的正常进行。所以既要获得好的爆破效率，又要防止中心孔堵塞，是天井工作面炮眼排列要充分注意的事项，图 2 - 43 为炮眼排列的几种形式。

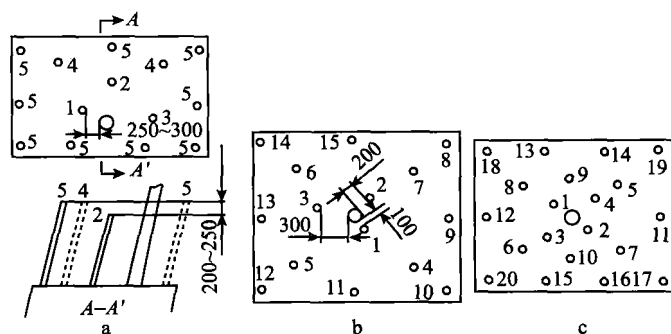


图 2 - 43 炮眼排列

a—斜天井螺旋形掏槽；b—螺旋形掏槽；c—对称直线掏槽

常用的炮眼排列有螺旋形掏槽、对称直线掏槽、三角柱掏槽，不规则桶形掏槽等。具体尺寸要求视岩石情况而定，一般眼深 1.7m 左右。

在掘进斜天井时，为保证吊罐上下运行方便与安全，边眼向外应有  $90^\circ \sim 95^\circ$  的倾角，底板增加 1 ~ 2 个炮眼，并以多打眼少装药的办法获得较好的成型规格。

### (2) 起爆方法

我国金属矿山采用的起爆方法有电雷管起爆和非电导爆管起爆法。为了避免杂散电流的威胁，一般多采用非电导爆管起爆法。

采用普通电雷管或微差电雷管起爆时，应测量工作面的杂散电流。要求杂散电流不超过 30mA，否则必须切断作业地点上下中段 50m 以内的一切电源。只有在杂散电流不超过规定值时，才能起爆。

### (3) 通风防尘

天井掘进时，通风比较困难。吊罐法的中心孔为解决通风问题创造了一定的条件。各

地习惯于采用混合式通风方式，即上中段通过中心孔向下放风、水管，并以高压风、水自上而下吹洗炮烟。同时，在下中段天井附近安设局部通风机，将炮烟抽出。这种方法效果好，10~15min 便可将炮烟全部从天井内排出。

为了减少工作面粉尘，吊罐提至工作面后，可用高压水或喷雾洒水装置将井壁上的粉尘冲洗干净。

(4) 装岩

装岩一般多与凿岩平行作业。我国金属矿山采用吊罐法掘进天井时，用装岩机装入矿车或转载斗车。有的矿山采用漏斗装车。

3. 劳动组织与作业方式

根据我国各矿山组织快速施工的经验，用吊罐法掘进天井时，最好成立专门的吊罐掘进队，下设准备小组和掘进小组，统一指挥。每班配备凿岩工 2 人、绞车工 1 人、装岩工 2 人，既分工又合作，并有专人负责信号系统。每一班配一名机修工，保证设备正常运转。这样的劳动组织能充分利用工时和设备，大大促进掘进速度的提高。

根据多数矿山的经验，单工作面作业时，每班可完成 2~3 个循环，其循环图表参见图 2-44。

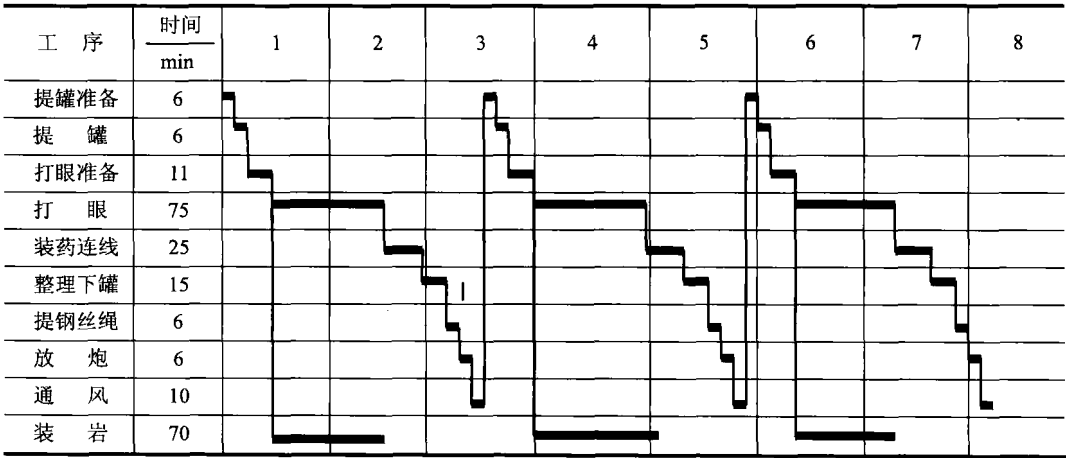


图 2-44 单工作面作业时每班三循环图表

(三) 对吊罐法掘天井的评价

与普通法掘进天井比较，吊罐法掘进天井有如下优缺点。

1. 优点

1) 与普通法相比，吊罐法掘进不搭设工作台、安全棚、梯子平台，不用梯子，材料、设备的上下都不用人工去完成，既节约材料，又减轻劳动强度，改善作业条件。

2) 由于可以利用中心孔进行混合式通风，大大改善通风效果，减少通风所需的时间，杜绝炮烟中毒事故的发生，改善工人的作业环境。

3) 工序较简单，辅助作业时间短。由于可以利用中心孔进行爆破，故爆破效率高，可有效提高天井的掘进速度，提高工效。过去采用普通法掘进时，每月进尺只有

20~30m, 采用吊罐法掘进天井之后, 掘进速度提高5~10倍, 工效可提高2.5倍。

4) 吊罐法所需设备轻便灵活, 使用方便, 结构简单, 制作、维修容易, 因而有利于各矿山推广。

5) 这种方法既节约原材料, 又提高掘进速度和工效, 故掘进每米天井的成本显著降低。据统计, 吊罐法较之普通法可降低成本10%~15%。

## 2. 缺点

1) 吊罐法只适用于中硬以上的岩石, 在松软、破碎的岩层中不宜使用。

2) 天井过高时, 钻孔偏斜的值也大, 在现有设备条件下不宜掘进太高的天井, 一般以30~60m为宜。

3) 不适于打盲天井和倾角小于 $65^\circ$ 的斜天井。

4) 在薄矿脉中掘进沿脉天井时, 由于中心孔的偏斜, 不能确保沿脉掘进, 这样不利于探矿, 还可能给采矿带来贫化和损失。

5) 虽然通风条件比普通法有较大改善, 但凿岩时同样无法减少工作面的粉尘和泥浆, 工人的工作条件仍然不够好。

## 3. 需解决的问题

1) 研制一种重量轻, 又灵活, 效率又高, 偏斜小的钻机, 以确保高速、高质量的钻凿中心孔, 以利于掘进高天井。

2) 进一步改进现有吊罐的结构, 以保证升降与作业时的稳定性。

3) 研究降低粉尘浓度的方法和措施, 进一步改善作业条件, 确保人员的身体健康。

4) 改进现有的信号联系装置, 研制新的信号设施, 确保吊罐作业安全。

# 第五节 斜井设计与施工

斜井是矿山的主要井巷之一。斜井与竖井一样, 按用途分为: 主斜井专门提升矿石; 副斜井提升矸石、升降人员和器材; 混合井兼主、副井功能; 风井通风兼作安全出口。

斜井开挖是介于平硐和竖井之间的一种开挖方法, 当斜井倾角小于 $10^\circ$ 时, 可视为水平硐室开挖; 倾角大于 $45^\circ$ 时, 同于竖井开挖方法。

与平硐相比, 斜井开挖的特点是:

1) 对围岩的扰动范围比同断面的平硐大, 倾角不同, 对围岩稳定性的影响也不同。一般随倾角增大围岩的稳定性降低。

2) 钻孔的作业条件较差, 且只有对钻孔方向要求高, 才能保证坡度的准确。

3) 装岩条件差, 目前装岩机械种类较少, 且适用性较差, 故装岩占用的劳动力较大。

4) 通风、排烟、排水方面, 因开挖方向不同也具有不同的特点。由下向上倾斜开挖时, 通风排烟较为困难; 由上向下倾斜开挖时, 排水困难。

5) 为保证准确成型和贯通, 对测量工作要求高。

6) 斜井掘进时凿岩爆破工作多同于平硐施工, 且斜井所需的孔数和药量较平硐多, 特别是靠底板边的炮孔所需药量更多。



- 7) 底孔有时为水所淹没，必须使用抗水炸药或进行防水处理。
- 8) 为防止斜井底板偏高，要求底孔的倾角较斜井底板坡度大  $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$ ，且底孔深度较其他孔深  $10 \sim 20\text{cm}$ ，一般底孔间距不大于  $30 \sim 40\text{cm}$ 。
- 9) 运岩一般使用提升机提升矿车或箕斗，为了防止提升时发生跑车事故，井口应设置阻车器。

斜井按提升容器又可分为胶带运输机斜井、箕斗提升斜井和串车提升斜井。各种提升方式所能适应的斜井倾角按表 2-23 选取。

表 2-23 斜井井筒适用范围

提升方式	井筒倾角
串车	最好 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ，最大不超过 $25^{\circ}$
箕斗	一般取 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ，个别情况可大于 $35^{\circ}$
胶带运输机	一般不大于 $17^{\circ}$ ，个别情况可达到 $18^{\circ}$

斜井倾角是斜井的一个主要参数，在斜井全长范围内应保持不变，否则会给提升或运输带来不利影响。不但设计时应如此，施工时尤应力求做到坡度基本不变。

斜井上接地面工业广场，下连各开拓水平巷道，是矿井生产的咽喉。斜井可分为井口结构、井身结构和井底结构三部分。

## 一、斜井井筒断面布置

斜井井筒断面形状和支护形式的选择与平巷基本相同，但斜井是矿井的主要出口，服务年限长，因此斜井断面形状多采用拱形断面，用混凝土支护或喷锚支护。

斜井井筒断面布置，系指轨道（运输机）、人行道、水沟和管线等相对位置而言。井筒断面的布置原则，除与平巷相同之外，还应考虑以下各点：

- 1) 井筒内提升设备之间及设备与管路、电缆，侧壁之间的间隙，必须保证提升的安全，同时还应考虑到升降最大设备的可能性；
  - 2) 有利于生产期间井筒的维护、检修、清扫及人员通行的安全与方便；
  - 3) 在提升容器发生掉道或跑车时，对井内的各种管线或其他设备的破坏应减到最低限度；
  - 4) 串车斜井一般为进风井（个别也有作回风井的），井筒断面要满足通风要求。
- 设计斜井断面时，按提升类型分串车斜井、箕斗斜井和胶带机斜井三种情况。

### 1. 串车斜井井筒断面布置

通常断面内有轨道、人行道、管路和水沟等。无论单线或双线，人行道、管路和水沟的相对位置分为图 2-45 所示的 4 种方式：

#### (1) 管路和水沟布置在人行道一侧

此种布置方式，管路距轨道稍远些，万一发生跑车或掉道事故，管路不易砸坏，而且管路架在水沟上，断面利用较好。缺点是出入躲避硐因管路妨碍，不够安全和方便（图 2-45a）。

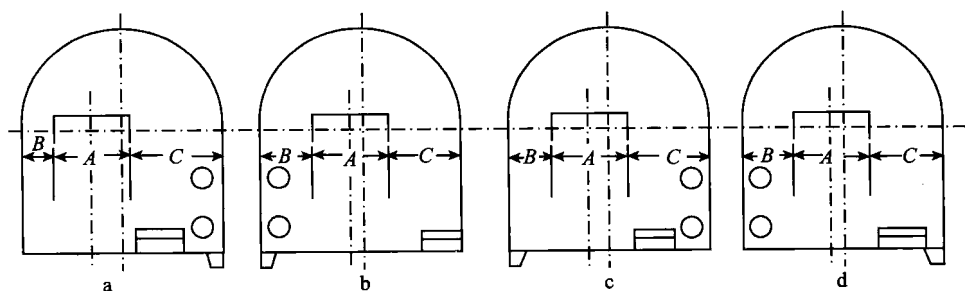


图 2-45 串车斜井井筒断面布置方式  
A—矿车宽度；B—非人行道侧宽度；C—人行道侧宽度

## (2) 管路和水沟布置在非人行道一侧

这种情况下管路靠近轨道，容易被跑车或掉道车所砸坏，但出入躲避硐安全方便（图 2-45b）。

## (3) 管路和水沟分开布置，管路设在人行道侧

它与图 2-45a 相似，需加大非人行道侧宽度用以布置水沟（图 2-45c）。

## (4) 管路与水沟分开布置，管路设在非人行道一侧

它与平巷断面布置相似，但人行道侧宽度应适当加宽（图 2-45d）。

考虑到可能需要扩大生产和输送大型设备，现场常采用后两种布置方式，其缺点是工程量有所增大。

串车斜井难免可能发生掉道或跑车事故，故设计时应尽量不将管路和电缆设在串车提升的井筒中，尤其是提升频繁的主井，更应避免。近年来，有些矿山利用钻孔将管路和电缆直接引到井下。

当斜井内不设管路时，断面布置与上述基本相似，水沟可布置在任何一侧，但多数设在非人行道侧。

## 2. 箕斗斜井井筒断面布置

箕斗斜井为出矿通道，一般不设管路（洒水管除外）和电缆，因而断面布置很简单，通常将人行道与水沟设于同侧。《安全规程》规定箕斗斜井井筒禁止进风，故其断面尺寸主要以箕斗的合理布置（尺寸）为主要依据。斜井箕斗规格参见表 2-24。

表 2-24 金属矿斜井箕斗主要尺寸

箕斗容积 m <sup>3</sup>	最大载重 kg	外形尺寸/mm			适用倾角 (°)	最大牵引力 kN	轨距 mm	卸载方式	自重 kg
		长	宽	高					
1.5	3190	4525	1714	1280	20		900	前卸	1840
2.5		3968	1406	1280	30~35	65.7	1100	后卸	2900
3.5	6000	3870	1040	1400	20~40	73.5	1200	后卸	4050
3.74	7050	6130	1550	1740			1200	前卸	3200

### 3. 胶带机斜井井筒断面布置

在胶带机斜井中，为便于检修胶带机及井内其他设施，井筒内除设胶带机外，还设有人行道和检修道。按照胶带机、人行道和检修道的相对位置，其断面布置有三种方式（图 2-46）。

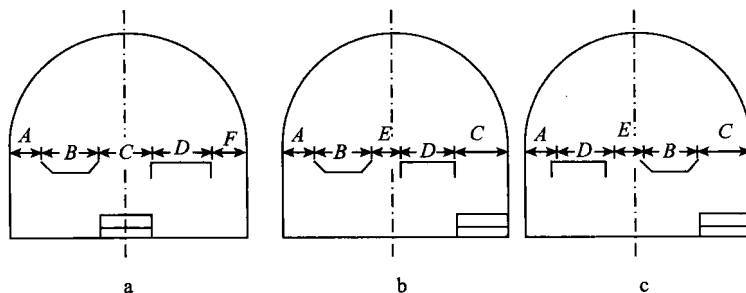


图 2-46 胶带机斜井井筒断面布置形式

a—人行道在中部；b—检修道在中部；c—胶带机在中部

A、F—提升设备至井帮的距离；B—胶带机宽度；C—人行道宽度；D—矿车宽度；

E—人行道在边侧时两提升设备的间距

我国当前多采用图 2-46a 的形式，它的优点是检修胶带机和轨道、装卸设备以及清扫撒矿都较方便。

### 4. 斜井断面尺寸确定

斜井断面尺寸主要根据井筒提升设备、管路和水沟的布置，以及通风等需要来确定：

1) 非人行道侧提升设备与支架之间的间隙应不小于 300mm，如将水沟和管路设在非人行道侧，其宽度还要相应增加。

2) 双钩串车提升时，两设备之间的间隙不应小于 300mm。

3) 人行道的宽度，不小于 700mm，同时应修筑躲避硐。如果管路设在人行道侧，要相应增大其宽度。

4) 运输物料的斜井兼主要行人时，人行道的有效宽度不小于 1.2m，人行道的垂直高度不小于 1.8m，车道与人行道之间应设置坚固的隔墙。

5) 提人车的斜井井筒中，在上下人车停车处应设置站台。站台宽度不小于 1.0m，长度不小于一组人车总长的 1.5~2.5 倍。

6) 提升设备的宽度，应按设备最大宽度考虑，故设人车的井筒，应按人车宽度决定。

在斜井井筒断面布置形式及上述尺寸确定后，就可以按平巷断面尺寸确定的方法来确定斜井断面尺寸。

## 二、斜井井筒内设施

根据斜井井筒用途和生产的要求，通常在井筒内设有轨道、水沟、人行道、躲避硐，管路和电缆等。由于斜井具有一定的倾角，因而无论轨道、人行道、水沟等的敷设均与平巷有别。

## 1. 水沟

斜井水沟坡度与斜井倾角相同，断面尺寸参照平巷水沟断面尺寸选取。通常它比平巷水沟断面小得多，但水沟内水流速度很大，因此斜井水沟一般都用混凝土浇灌。若服务年限很短，围岩较好，井筒基本无涌水，也可不设水沟。

斜井水沟除有纵向水沟外，在含水层下方、胶带机斜井的接头硐室下方以及井底车场与井筒连接处附近，应设横向水沟。总之斜井整个底板不允许作为矿井排水的通道，相反，斜井中的水应逐段截住，引往矿井排水系统内。

## 2. 人行道

斜井人行道与平巷不同，通常按斜井倾角大小的需要，设置人行台阶与扶手。台阶踏步尺寸可按表 2-25 选取。一般在倾角  $30^\circ$  左右时，需要设置扶手。扶手材料常用钢管或塑料管制作，位置应选在人行道一侧，距斜井井帮  $80 \sim 100\text{mm}$ ，距轨道道砟面垂高  $900\text{mm}$  左右处。

表 2-25 斜井台阶尺寸 (mm)

台阶尺寸	斜 井 坡 度			
	$16^\circ$	$20^\circ$	$25^\circ$	$30^\circ$
台阶高度 ( $R$ )	120	140	160	180
台阶宽度 ( $T$ )	420	385	340	310
台阶横向长度	600	600	600	600

有的斜井井筒利用水沟盖板作为人行台阶，既可使井筒断面布置紧凑，减少井筒工程量，又节省材料。利用水沟盖板作台阶有两种方式 (图 2-47)。图 2-47a 施工简单，台阶稳定，效果较好，但混凝土消耗量多；图 2-47b 混凝土消耗量较少，但施工较复杂，预制盖板易活动。

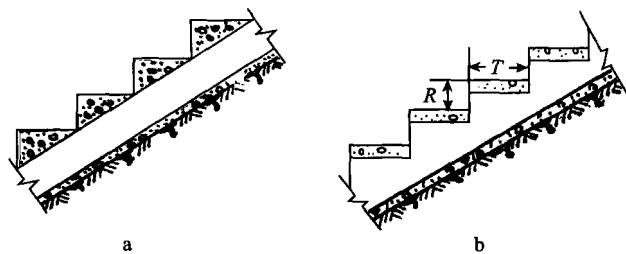


图 2-47 斜井行人台阶示意图

a—预制台阶斜盖板；b—预制台阶平盖板

## 3. 躲避硐

在串车或箕斗提升时，按规定井内不准行人。但在生产实践中，又必须有检修人员插空（提升间隙）检查、维修。为保证检修人员安全，又不影响生产，只好在斜井井筒内每隔一段距离设置躲避硐。

一般躲避硐间隔距离为  $30 \sim 50\text{m}$ ，硐室的规格可采用宽  $1.0 \sim 1.5\text{m}$ ，高  $1.6 \sim 1.8\text{m}$ ，深  $1.0 \sim 1.2\text{m}$ ，位置设于人行道一侧，以便人员出入。

## 4. 管路和电缆敷放

电缆和管路通常设计在副斜井井筒内，主要原因是检修方便；副井比主井提升频率低，安全因素相对要大，对生产影响要小。电缆和管路的铺设要求与平巷相同。

当斜井倾角小、长度大时，为节省电缆和管路，有的矿井采用垂直钻孔直接送至井下。这时应对地面厂房、管线等相应地作出全面规划。

5. 轨道铺设

斜井轨道铺设的突出特点是要考虑防滑措施。这是因为矿车或箕斗运行时，迫使轨道沿倾斜方向产生很大的下滑力，其大小与提升速度、提升量、道床结构、线路质量、底板岩石性质、井内涌水和斜井倾角等密切相关，其中主要因素是斜井倾角。通常当倾角大于 $20^\circ$ 时，轨道必须采取防滑措施，其实质是设法将钢轨固定在斜井底板上。最常见的是每隔 $30\sim 50\text{m}$ ，在井筒底板上设一混凝土防滑底梁，或用其他方式的固定装置将轨道固定，以达到防滑目的。

三、斜井掘砌

斜井井筒是倾斜巷道，其施工方法，当倾角较小时与平巷掘砌基本相同， $45^\circ$ 以上时又与竖井掘砌相类似。下面重点叙述斜井井筒的施工特点。

1. 斜井井颈施工

斜井井颈是指地面出口处井壁需加厚的一段井筒，由加厚井壁与壁座组成如图 2-48 所示。

在表土（冲积层）中的斜井井颈，从井口至基岩层内 $3\sim 5\text{m}$ 应采用耐火材料支护并露出地面，井口标高应高出当地最高洪水位 $1.0\text{m}$ 以上，井颈内应设坚固的金属防火门或防爆门以及人员的安全出口通道。通常安全出口通道也兼作管路、电缆、通风道或暖风道。

在井口周围应修筑排水沟，防止地面水流入井筒。为了使工作人员、机械设备不受气候影响，在井颈上可建井棚、走廊和井楼。通常井口建筑物与构筑物的基础不要与井颈相连。

井颈的施工方法根据斜井井筒的倾角、地形和岩层的赋存情况而定。

(1) 在山岳地带施工

当斜井井口位于山岳地带的坚硬岩层中，有天然的山冈及崖头可以利用时，此时只需进行一些简单的场地整理后即可进行井颈的掘进。在这种情况下，井颈施工比较简单，井口前的露天工程最小。在山岳地带开凿斜井（图 2-49）斜井的门脸必须用混凝土或坚硬石材砌筑，并需在门脸顶部修筑排水沟，以防雨季和汛期山洪水

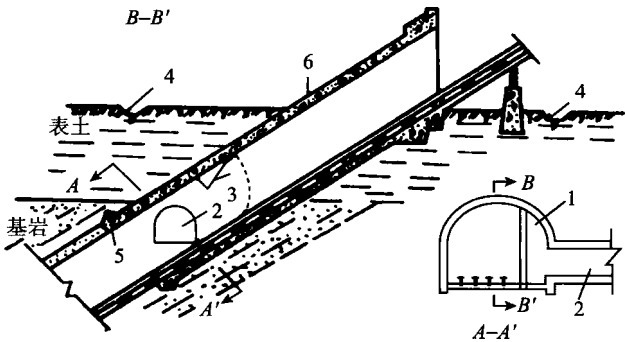


图 2-48 斜井井颈结构

1—人行间；2—安全通道；3—防火门；  
4—排水沟；5—壁座；6—井壁

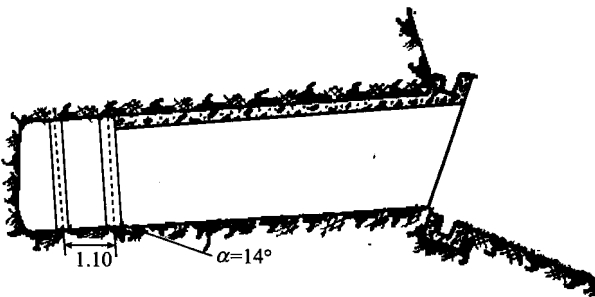


图 2-49 山岳地带斜井井颈

涌入井筒内，影响施工，危害安全。

(2) 在平坦地带施工

当斜井井口位于较平坦地带时，此时表土层较厚，稳定性较差，顶板不易维护，为了安全施工和保证掘砌质量，井颈施工时需要挖井口坑，待永久支护砌筑完成后再将表土回填夯实。井口坑形状和尺寸的选择合理与否，对保证施工安全及减少土方工程量有着直接的影响。

井口坑几何形状及尺寸主要取决于表土的稳定程度及斜井倾角。斜井倾角越小，井筒穿过表土段距离越大，则所需井口坑土方量越多，反之越小。同时还要根据表土层的涌水量和地下水位及施工速度等因素综合确定。直壁井口坑（图 2-50）用于表土层薄或表土层虽厚但土层稳定的情况；斜壁井口坑（图 2-51）用于表土不稳定的情况。

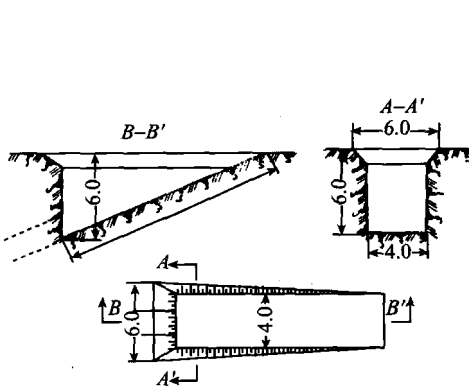


图 2-50 直壁井口坑开挖法示意图

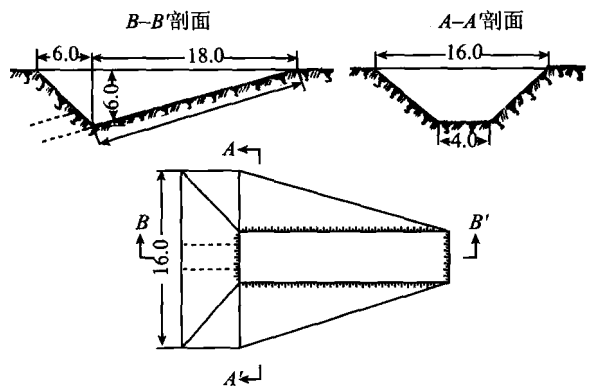


图 2-51 斜壁井口坑开挖法示意图

2. 斜井基岩掘砌

斜井基岩施工方式、方法及施工工艺流程基本与平巷相同，但由于斜井具有一定的倾角，因此就有某些特点，如选择装岩机时，必须适应斜井的倾角；采用轨道运输，必须设有提升设备，以及提升设备运行过程中的防止跑车安全设施；因向下掘进，工作面常常积水，必须设有排水设备等。此外，当斜井（或下山）的倾角大于  $45^\circ$  时，其施工特点与竖井施工方法相近似。

(1) 装岩工作

斜井施工中装岩工序时间占掘进循环时间 60% ~ 70%。如要提高斜井掘进速度，装岩机械化势在必行。推广使用耙斗装岩机，是迅速实现斜井施工机械化的有效途径。耙斗装岩机在工作面的布置如图 2-52 所示。

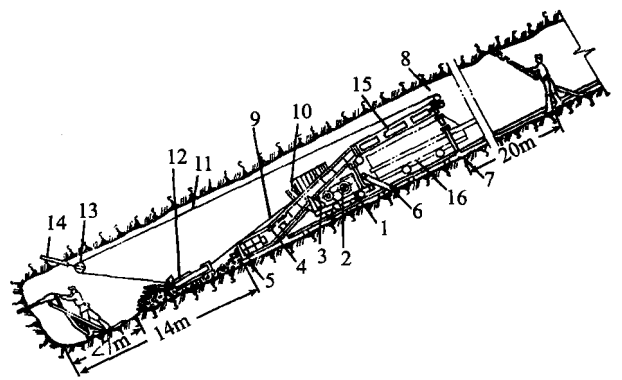


图 2-52 耙斗机在斜井工作面布置示意图

- 1—绞车绳筒；2—大轴轴承；3—操纵连杆；4—升降丝杆；
- 5—进矸导向门；6—大卡道器；7—托梁支撑；8—后导绳轮；
- 9—主绳（重载）；10—照明灯；11—副绳（轻载）；12—耙斗；
- 13—导向轮；14—铁楔；15—溜槽；16—箕斗

我国斜井施工，通常只布置一台耙斗机。当井筒断面很大，掘进宽度超过 4m 时，可采用两台耙斗机，其簸箕口应前后错开布置。

耙斗装岩机具有装岩效率高，结构简单，加工制造容易，便于维修等优点。近几年来我国创造的几个斜井快速施工纪录，无一例外都是使用耙斗装岩机。但它仍有许多缺点，需进一步完善和提高。

正装侧卸式铲斗装岩机，与一般后卸式铲斗装岩机相比，其卸载高度适中，卸载距离短，装岩效率高，动力消耗少。

我国正在试制几种侧卸式装岩机，其中 ZC - 1 型能用于 14° 的斜井，K - 146 型能用于 18° 的斜井，若利用 8kW 风动活塞式绞车还可以在 30° 斜井中使用。

### (2) 提升工作

斜井掘进提升对斜井掘进速度有重要影响。根据井筒的斜长、断面和倾角大小选择提升容器。我国一般采用矿车或箕斗提升方式的较多。箕斗与矿车比较，前者具有装载高度低，提升连接装置安全可靠，卸载迅速方便等优点。尤其是使用大容量（如 4t）箕斗，可有效地增加提升量，配合机械装岩，更能提高出岩效率。

当井筒浅，提升距离在 200m 以内时，可采用矿车提升，以简化井口的临时设施。斜井掘进时的矿车提升，常为单车或双车提升。

我国在斜井施工中常将耙斗机与箕斗提升配套使用。箕斗有 3 种类型：前卸式、无卸载轮前卸式、后卸式等。

### (3) 斜井中安全设施

斜井施工时，提升容器上下频繁运行，一旦发生跑车事故，不仅会损坏设备，影响正常施工，而且会造成人身安全事故。为此，必须针对造成跑车的原因，采取行之有效的措施，以便确保安全施工。

1) 井口预防跑车安全措施：①由于提升钢丝绳不断磨损、锈蚀，使钢丝绳断面减少，在长期变荷载作用下，会产生疲劳破坏；由于操作或急刹车造成冲击荷载，可能酿成断绳跑车事故。为此要严格按照规定使用钢丝绳，经常上油防锈，地滚安设齐全，建立定期检查制度。②钢丝绳连接卡滑脱或轨道铺设质量差，串车之间插销不合格，运行中因车辆颠簸等都可能造成脱钩跑车事故。为此，应该使用符合要求的插销，提高铺轨质量，采用绳套连接。③由于井口挂钩工疏忽，忘记挂钩或挂钩不合格而发生跑车事故。为此，斜井井口应设逆止阻车器或安全挡车板等挡车装置。

2) 井内阻挡已跑车的的社会措施：①钢丝绳挡车帘。在斜井工作面上方 20 ~ 40m 处设可移动式挡车器，它是以两根 150mm 的钢管为立柱，用钢丝绳与直径为 25mm 的圆钢编成帘形，手拉悬吊钢丝绳将帘上提，矿车可以通过；放松悬吊绳，帘子下落而起挡车作用。②悬吊式自动挡车器。是在斜井断面上部安装一根横梁，其上固定一个小框架，框架上设有摆杆。摆杆平时下垂到轨道中心位置上，距巷道底板约 900mm，提升容器通过时能与摆杆相碰，碰撞长度为 100 ~ 200mm。当提升容器正常运行时，碰撞摆动杆后，摆动幅度不大，触不到框架上横杆；一旦发生跑车事故，脱钩的提升容器碰撞摆动杆后，可通过牵引绳和挡车钢轨相连的横杆打开，铁丝失去拉力，挡车钢轨一端迅速落下，起到防止跑车的作用。

### 3. 斜井排水

斜井、竖井施工中，含水层淋水，工作面积水，作业条件恶化，影响工程进度和质量，增加工程成本，尤其是突然大量涌水可能造成淹井事故。因此，在斜井、竖井施工中如何治水便成为非常重要的问题。

水的来源是多方面的，为了综合治水，施工前应详细了解含水层、破碎带、溶洞的位置、水压、渗透系数、涌水量，以及地表河流、湖泊和古河道与井筒的相关位置和影响。必要时应打检查钻孔，以获得必要的资料。

#### (1) 综合治水措施

根据现场实践经验，针对水的来源和大小，采取不同的治理措施，堵截水源，使工作面无积水或积水少，改善作业条件，有利于工作面排水。

井筒位置的选择要尽可能避开含水层。为了防止地表水流入或渗入井筒，设计时必须使井口标高高于最大洪水水位，并在井口周围挖排水沟，及时排水。井筒在靠近含水层与含水溶洞时，或发现某些涌水预兆时，应先打探水钻孔探水或泄水。预先在竖井周围钻出若干个大钻孔，然后用深井泵或气升泵排水，降低水位，井筒处被疏干后再向下掘进；或在井筒掘进过程中采取超前钻孔或超前小井进行辅助排水疏干；或在竖井的下部有平巷时，打钻孔将井筒涌水，泄干下部平巷，将井筒疏干后掘进。采用地面预注浆、工作面预注浆或壁后注浆，封堵涌水。为消除淋帮水对工程质量的影响和对施工条件的恶化，采用截水和导水的方法，如斜井在底板每隔 10 ~ 15m 挖一道横向水沟将水截住，引入纵向水沟汇集后排出。工作面的积水需要根据水量的大小采取不同的排水方式。采用混凝土砌壁支护时，在涌水量集中或水压较大的井壁处要预留放水管。放水管外露端要套上丝扣，以便安装阀门，以后可经放水管向井壁后裂隙和含水层注浆。

#### (2) 排水方法

1) 潜水泵排水。潜水泵有气动和电动两类，其优点是体积小，便于搬移，能排污水，工作可靠；缺点是效率低，扬程不高。所以常配合提升容器排水，或与卧泵配合排水。

2) 水力喷射泵排水。喷射泵由喷嘴、混合室、喉管、扩散器、吸水管、供水管、排水管等部分组成。工作动力由另外一个水泵供给高压水，当高压水经喷嘴以高速射入混合室时，在喷嘴的后面造成负压，工作面的积水借助压力差沿吸水管流入混合室，在混合室中吸入水与高速水流混合获得动能，经过喉管进入扩散器，速度变慢，部分动能变为静压，获得一定扬程。

3) 卧泵排水。当涌水量达 20 ~ 30m<sup>3</sup>/h 时，需在工作面设离心水泵排水。随工作面不断向下延深，离心泵受吸水高度限制，也要不断向下移动，井深时，高差超过一台水泵的扬程，必须分段排水。工作面附近的水泵把水排到一定高度的临时水仓内，经另一台水泵排到地表。

4) 矿车（箕斗）排水。当涌水量不大（5 ~ 7m<sup>3</sup>/h）时，可用气动或电动潜水泵将水排入提砧矿车或箕斗、吊桶中，随同砧石一起提至地面排出。

### 4. 斜井支护

斜井支护施工在井筒倾角大于 45°时，与竖井基本相同；当倾角小于 45°时与平巷基本相同。但因斜井有一定的倾角，要注意支护结构的稳定性。常用斜井永久支护有现浇混



凝土和喷射混凝土两种，料石支护已不多见。

## 小 结

平面开拓设计、井底车场硐室组成及其布置形式、凿岩机理、爆破漏斗形成过程、平巷（竖井）断面设计、普通法及吊罐法掘进天井的特点、斜井施工应注意的事项。



### 复习思考题

1. 矿床开拓的目的是什么？
2. 按井巷形式的不同，矿床开拓方法可以分为几种？
3. 什么是竖井开拓，其布置原则是什么？
4. 什么是井底车场，其线路组成是什么？
5. 试述井底车场的基本形式。
6. 试述阶段运输巷道的布置形式。
7. 试述冲击式凿岩炮眼形成过程。
8. 试述岩石爆破破坏原因的几种假说。
9. 什么是自由面？什么是最小抵抗线？
10. 简述爆破漏斗的形成过程。
11. 简述平巷巷道断面形式选择主要考虑的因素。
12. 简述平巷断面尺寸设计依据。
13. 天井掘进方法包括哪几种？
14. 简述普通法掘进天井和吊罐法掘进天井的优缺点。
15. 简述斜井断面尺寸确定依据。

## 第三章 地下采矿方法

### 本章导读

通过本章的学习，了解采矿方法的分类及三大采矿方法的特点，掌握房柱法、浅孔留矿法、分段凿岩阶段矿房法、水砂充填法、无底柱分段崩落法等典型采矿方法的采准、切割、回采工艺，了解其适用条件和评价。

### 第一节 采矿方法及其分类

#### 一、采矿方法的定义

为了回采矿块中的矿石，在矿块中和围岩中所进行的采准、切割、回采工作的总和，即采准、切割工作在时间上和空间上进行的顺序与回采工作的有机配合，称为采矿方法。

#### 二、采矿方法的分类

按地压管理方法不同，将采矿方法分为3大类，即空场法、充填法及崩落法。

1) 空场法：特点是将矿块划分为矿房和矿柱两步骤回采，先采矿房，后采矿柱。矿房采后出现的空区始终保持敞空，依靠所留矿柱和矿岩本身稳固性支撑地压。包括全面法、房柱法、浅孔留矿法、分段法、阶段矿房法等几种。

2) 充填法：特点是将矿块划分为矿房和矿柱两步骤回采，先采矿房，后采矿柱。随矿房回采出现的空区用充填料充填支撑地压。包括干式充填法、水力充填法、胶结充填法等几种。

3) 崩落法：特点是不再将矿块划分矿房/矿柱，而是单步骤回采。随回采工作面的推进，同时崩落围岩充填采空区，从而达到管理和控制地压的目的。包括壁式崩落法、无底柱分段崩落、有底柱崩落法等几种。

### 第二节 空场采矿法

#### 一、空场采矿法概述

##### 1. 空场采矿法的特点

- 1) 空场法在回采过程中，它是把矿块划分为矿房和矿柱两部分来开采。
- 2) 在回采矿房时，采场以空场形式存在。
- 3) 它是用矿柱和围岩体自身的稳固性来维护采空区。

- 4) 矿房采完以后,要及时回采矿柱,并有计划地及时处理采空区。
- 5) 在回采过程中,采场主要依靠暂留的矿柱或永久矿柱进行自然支撑,有时辅以人工矿柱支撑。

## **2. 空场采矿法的适用条件**

- 1) 适用于开采矿石和围岩都很稳固的矿床。
- 2) 采空区在一定时间内,允许有较大的暴露面积。

空场采矿法目前应用比较广泛的几种方法是:房柱法、全面法、浅孔留矿法、分段采矿法、阶段矿房法等,本节主要介绍房柱法、浅孔留矿法、分段采矿法3种。

# **二、房柱法**

## **(一) 房柱法概述**

房柱采矿法是空场采矿法的一种,它是在划分矿块的基础上,矿房和矿柱互相交替排列的,而在回采矿房时留下规则的或不规则的矿柱来管理地压。如果顶板岩石的稳固性较差时,则可以在顶板岩石中安装杆柱,以增加其稳固性,如果局部不稳固时,则可以在这些局部地区留下矿柱。因而这种采矿方法灵活性比较大。

房柱法留的矿柱,最初是留连续矿柱,并且矿柱一般是不进行回采的,作为永久损失。以后随着采矿技术的发展,将连续矿柱改为不连续矿柱,这样可以提高矿石回收率。

## **(二) 房柱法典型方案**

### **1. 矿房布置及其构成要素**

房柱法的矿房布置可分为两种,一种是用中深孔崩矿,另一种是用浅孔崩矿。我国多数使用浅孔崩矿的房柱法,并大多采用电耙运搬矿石,因而矿房一般是沿倾斜方向布置。

#### **(1) 矿房斜长**

从回采工艺方面考虑,在电耙运搬的方案中,其矿房的最大长度应在电耙的有效耙运距离之内。一般为40~60m。同样使用装运机、汽车等无轨运输设备时,其矿房长度也应当与设备的经济运距一致。如果是独头推进的矿房,其矿房长度还应当考虑到通风条件的限制。

#### **(2) 矿房宽度**

一般为8~20m,矿房宽度主要取决于顶板允许暴露面积大小,同时与矿体的厚度、倾角及回采设备的工作空间也有关系。留永久性间隔矿柱时,矿房宽度应尽可能等于矿房顶板允许暴露的最大安全跨度。

#### **(3) 矿柱尺寸**

矿柱尺寸取决于矿柱的强度,即矿柱能够承受的最大平均压力,与作用在矿柱上面的载荷大小直接有关。此外,矿柱尺寸还与矿柱的作用和矿柱在以后是否要回收有关。如果以后要回收则可以留的大一些,可以留连续矿柱。否则留小一点。

再者是与矿体厚度有关,矿体厚度增大,则留的矿柱尺寸也应当增加。当矿体厚度小于5m时,可以考虑留间断矿柱。当矿体厚度比较大时,应当留大约5m宽的连续矿柱。

一般情况下多用圆形矿柱,矿柱直径3~7m,间距为5~8m。

阶段间柱宽度一般为3~5m,是指顶柱与底柱的统称。

## 2. 房柱法的采准和切割工作

### (1) 阶段运输巷道

阶段运输巷道可布置在脉内，也可在脉外（如图 3-1 所示，布置在脉外）。

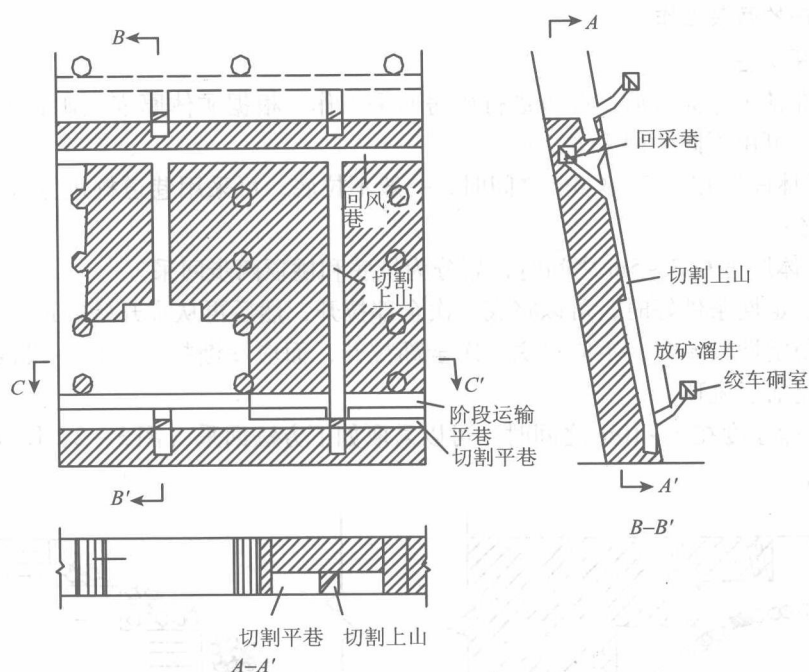


图 3-1 房柱采矿法

脉外采准的优点是：

- 1) 可以在放矿溜井中储存部分矿石，从而减少耙矿与运输平巷运输之间的相互影响；
- 2) 有利于回采矿柱和采场通风；
- 3) 当矿体形状不规则时，可以保持运输平巷的平直，有利于提高运输能力等。

脉外采准的缺点是：增加了岩石掘进工作量。

目前我国金属矿山多采用脉外采准方式。

### (2) 放矿溜井

每个矿房内都开掘一个溜矿井，不放矿的溜矿井可以作通风、行人、送料工作，溜井布置在矿房的中心线位置。溜井的断面为  $2\text{m} \times 2\text{m}$ 。

### (3) 上山

沿矿房中心线并紧贴底板掘进上山（对于缓倾斜矿体，所开天井，一般称为上山）以利于行人、通风和运搬设备及材料，同时作为回采时的自由面。断面为  $2\text{m} \times 2\text{m}$ 。

### (4) 切割平巷

在矿房下部边界处掘进切割平巷，既作为起始回采的自由面，又可作为去相邻矿房的通道，也可以作为电耙道用。

### (5) 联络平巷

各矿房间掘进联络平巷，兼作回风巷道。

### (6) 电耙硐室

在矿房下部的阶段矿柱中，掘进电耙硐室。

## 3. 房柱法的回采工作

### (1) 回采方法

在采切准备工作完成后，即可进行矿房回采工作。根据矿体厚度及矿石围岩（矿岩）稳定性不同，可用不同的回采方法：

1) 当矿体厚度在 2.5 ~ 3.0m 之间时，一般不拉底，可采用巷道掘进方式，一次采全厚，用浅孔落矿。

2) 当矿体厚度在 3 ~ 5m 之间时，划分为拉底和挑顶两步回采。

当矿岩稳定性条件好时，可以将底一次全部拉开，然后再从头开始挑顶。

当矿岩稳定性较差时，不应将底一次全部拉开，而应逐渐拉底，拉一段接着就挑顶，但要求拉底超前于挑顶。

3) 当矿体厚度在 5 ~ 10m 之间时，可以采取如下方法回采（图 3-2，图 3-3）：

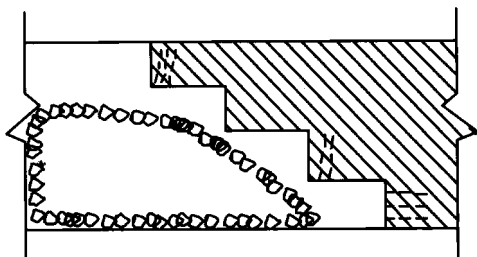


图 3-2 倒台阶回采

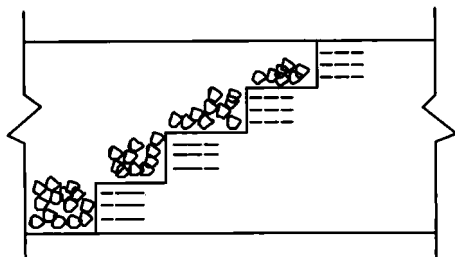


图 3-3 正台阶回采

倒台阶回采：即站在矿石堆上进行凿岩放炮。为使风流贯通，要在采场中先开凿巷道。

正台阶回采：不拉底应先开通风巷道，此巷道可以贴底板沿倾斜掘进，也可以在顶板方向沿矿体倾斜方向掘进。当矿石与顶板岩石界线明显时，使用正台阶比较好。台阶上堆积的矿石可以用电耙向下倒运，在国外也有用自行设备的。另外，这种回采方法顶板管理方便，若顶板稳固性差时，可用锚杆支护。

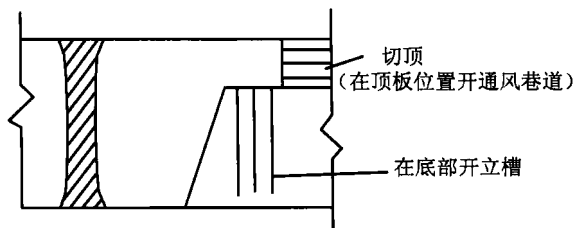


图 3-4 无轨自行设备开采的房柱法

4) 当矿体厚度大于 10m 时，可采用无轨自行设备开采的房柱法（图 3-4）。将大型露天设备（如轮胎式和履带式的凿岩、装载运搬设备等）应用到井下，这样就大大提高了矿房的生产能力和劳动生产率。

### (2) 矿石运搬工作

崩落下来的矿石，用电耙子将矿石

耙到溜井中，再放入阶段运输巷道中装车运走。也可直接（借助于装车台）耙入矿车中。

耙矿与运输巷道的位置关系通常有以下3种：

①运输巷道在脉外，用放矿溜子装车。②运输巷道在脉内，耙道底板与平巷顶板在同一水平。③平巷与耙矿水平在同一水平（装车要架设装车台）。

### （3）通风工作

对于房柱法应当有专门的通风巷道（通风平巷和通风井），一般情况下，新鲜风流从盘区巷道进入矿房，而废风经回风平巷、回风井排出地表。

应当注意，风流方向应当与耙矿方向相反，以保证生产工人少吃烟尘。

### （4）顶板管理工作

顶板管理方法一是留矿柱，二是用锚杆支护。

当顶板岩石稳固性较差时，可以在顶板岩石中安装杆柱，以增加其稳固性。当顶板局部不稳固时，可以在局部地区留下矿柱。当矿房顶板遇到有断层或跨度较大时，可以预留临时矿柱。

锚杆是一种新型的支架，它是利用打入岩层中的杆体来加固岩层，其优点是：安装杆柱工作迅速及时，支护过程可全部实现机械化。成本低、劳动强度低、生产能力高、占据的空间小、利于通风。同时支架材料的运搬、装卸、储存的费用都可降低，无火灾危险。由于优点多，故国内外广为利用。

## （三）房柱法的适用条件

1) 矿石和围岩稳固的水平微倾斜或缓倾斜矿体。

2) 当矿体厚度小于3~4m时，顶板岩石很稳固，且在矿体中夹有局部贫矿或废石，应用全面法更为合适。

3) 当矿体厚度小于8~10m时，可以采用浅孔留矿和电耙出矿的房柱采矿法。

4) 当矿体厚度很大时，可以采用深孔落矿和无轨设备的房柱采矿法。

5) 房柱法在金属矿山主要用来开采沉积式铁矿床和铜、铅、锌、铝土、汞和铀等有色金属和稀有金属矿床。同时也用来开采盐岩、钾盐、石灰石等非金属矿物原料和建筑材料，使用范围很广泛。

## （四）对房柱采矿法的评价

### 1. 主要优点

- 1) 劳动组织简单，矿房生产能力高；
- 2) 采准工作量小（5~7m/kt）；
- 3) 坑木消耗量少，在回采矿房时，几乎不消耗木材；
- 4) 矿石贫化率比较小（4%~5%）；
- 5) 采矿成本低；
- 6) 作业安全，通风良好；
- 7) 有利于实现机械化开采。

### 2. 主要缺点

1) 矿石损失比较大，由于留有许多矿柱，而这些矿柱所占矿量为15%~20%（留间断矿柱时），留连续矿柱时高达40%，而且所留矿柱一般不回收；

- 2) 当矿体厚度比较大时，顶板管理比较困难；
- 3) 很难进行选别回采。

### 三、浅孔留矿法

#### (一) 概述

留矿法在我国占有相当大的比重，根据 1996 年有色金属矿山统计，用浅孔留矿法采出的矿量占总产量的近 40%，居各类采矿方法的首位。

浅孔留矿法具有如下特点：将矿块划分为矿房和矿柱两步骤回采，先采矿房，后采矿柱；将矿房划分成 2m 左右的若干分层，自下而上分层回采，使用浅孔崩落矿石；每次采下的矿石，靠矿石自重从漏斗放出 1/3 左右，留下 2/3 矿石作为下次凿岩爆破工作的临时工作台；当矿房全部采空后，最后进行大量放矿。

#### (二) 典型方案

浅孔留矿采矿法如图 3-5 所示。

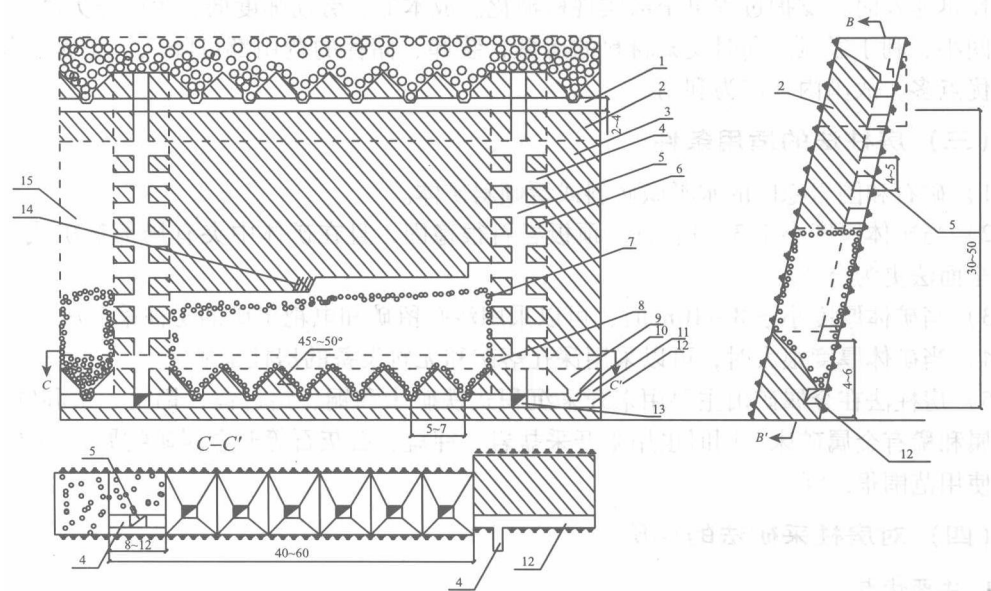


图 3-5 浅孔留矿采矿法

- 1—上阶段运输管道（回风巷道）；2—顶柱；3—采准矿块；4—人行网道；5—人行通风天井；6—间柱；7—崩落的矿石；8—拉底巷道；9—漏斗；10—漏斗颈；11—底柱；12—阶段运输巷道；13—小川；14—炮孔；15—大放矿的矿房；16—上阶段已采矿房

#### 1. 矿块构成要素

##### (1) 阶段高度

应根据矿床勘探类型、围岩的稳固程度、矿体倾角、天井掘进条件等因素综合考虑来确定，一般为 30 ~ 50m。

通常在能够保证安全和顺利回采的条件下，应当采用较大的阶段高度，以增加矿房矿量，从而减少矿石损失。阶段高度越小，矿柱占矿块的矿量相对越大。今后随着机械化程

度的提高，采矿强度加大，阶段高度也在增加。

(2) 矿块长度

主要考虑矿岩稳固程度、电耙有效耙运距因素确定，一般为 40 ~ 60m。

(3) 矿柱尺寸

1) 顶柱厚度：对于薄矿脉，可不留顶柱，若留一般为 2 ~ 3m。对于中厚以上的矿体，一般都要留 3 ~ 6m 顶柱。

2) 底柱高度：底柱高度与底部结构的类型、漏斗间距有关。同时取决于矿体厚度和矿岩的稳固性。当矿体比较薄时，也可采用人工落底来代替矿石底柱。一般薄矿体底柱高度可为 4 ~ 6m，中厚以上留 8 ~ 10m。

3) 间柱宽度：间柱的宽度取决于矿体厚度、矿岩稳固性以及天井的服务期限。也与矿房的跨度有关。中厚的上矿体，当矿岩很稳固，矿房跨度不太大时，间柱宽度在 8 ~ 12m 之间；薄矿体留 2 ~ 6m。

(4) 人行联络道间距

一般为 5m 左右。

(5) 漏斗间距

一般 5 ~ 7m，断面为 1.8m × 1.5m 或 1.8m × 1.0m。

2. 采准工作

浅孔留矿法的采准工作主要包括：阶段运输平巷，通风人行天井，联络道等。

(1) 阶段运输平巷

当矿体比较薄时，阶段运输平巷一般布置在矿体中并靠下盘接触线处；当开采中厚以上矿体时，运输平巷可以掘进在下盘岩石中。采用脉外采准时，运输巷道比较平直，有利于运输工作。

(2) 通风人行天井

天井多布置在间柱中，如图 3 - 6 所示。

也可根据具体情况，将天井布置在岩石中，或一个在矿房中央，另一个布置在矿房一侧的围岩中。

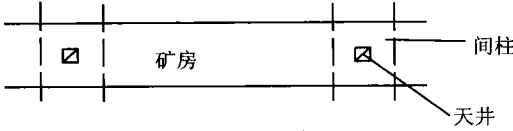


图 3 - 6 天井位置图

对于厚度较小的矿体，天井可分为先进天井和顺路天井（图 3 - 7）。

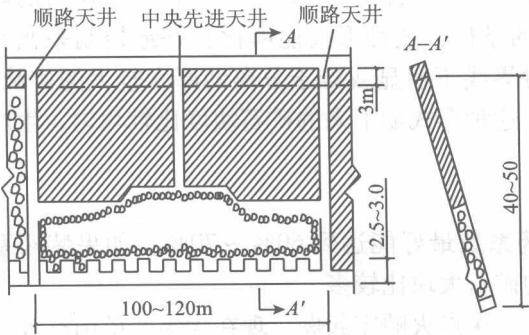


图 3 - 7 先进天井与顺路天井

1) 先进天井：指在矿块回采之前，在矿岩中掘进的天井。

2) 顺路天井：指随着回采在采场内用横撑支柱所架设的天井。

(3) 人行通风联络道

在垂直方向上，在人行天井两侧，每隔 4 ~ 5m 开一条联络道，使天井与矿房贯通。联络道断面可为 1.8m × 1.5m 或 1.8m × 1.8m。

矿房两侧的人行通风联络道可平等布



置，亦可交错布置。但必须保证矿房内有两个安全出口。

### 3. 切割工作

#### (1) 切割工作的主要内容

1) 开掘拉底巷道，形成拉底空间。

2) 开掘漏斗颈，在此基础上，把漏斗劈开，形成喇叭状，便于出矿。

一般沿走向每隔 5~7m 开凿一个，为了减少平场工作量，漏斗应当尽量开在靠矿体下盘侧，以利于减少平场工作量。漏斗颈高度一般为 1.0~2.0m，边坡角应在 45°以上。

3) 拉底高度一般为 2~2.5m，拉底的宽度一般应等于矿体厚度。对于薄和极薄矿脉，为保证放矿顺利，宽度不应小于 1.2m。拉底和劈漏工作往往是联系起来进行施工的。

#### (2) 切割的方法

1) 人工假底底部结构；

2) 不打拉底平巷的劈漏方法；

3) 打拉底平巷的拉底劈漏方法。

### 4. 回采工作

浅孔留矿法的回采工作包括：凿岩、装药爆破、通风、局部放矿、撬毛、平场和大量放矿等。矿房回采是自下而上分层进行的，每一分层的高度一般为 2~3m。采用浅孔崩矿。

#### (1) 凿岩

1) 凿岩方式：分上向孔和水平孔两种。

上向孔：当矿石比较稳固时可采用。优点是凿岩效率高，操纵容易。缺点是工人直接在受震动的矿体下工作，安全性差、劳动条件差。打上向孔一般使用 01-45 型凿岩机，打前倾 75°~85°的炮眼崩矿。

水平孔：当矿石稳固性差些时尽量用水平孔。优点是凿岩爆破后形成的工作面比较平整、光滑，安全性比较好。缺点是凿岩效率比上向孔低；崩落矿石大块比上向孔多。

2) 工作面布置形式：浅孔留矿法的工作面形式分直线式和梯段式两种，常用梯段式。

打上向孔时，梯段长一般为 10~15m，梯段高为 1.2~1.5m。孔深 1.3~1.8m，上向孔一般前倾 75°~85°（便于凿岩）。

打水平炮孔时，梯段长一般为 2~4m（2 倍于孔深长），梯段高为 1.5~2.0m。水平孔的深度为 2~3.5m，水平孔一般上倾 5°~8°（便于排出岩粉）。

3) 炮孔排列形式：分为“一”字形、“之”字形、平行排列、梅花形 4 种。

“一”字形适用于矿石破碎性较好，矿岩分离的条件下。“之”字形适用于矿石的爆破性较好的条件，且用于矿脉厚 0.7~1.2m 的条件，这种形式能够比较好地控制采幅宽度。平行排列用于矿石坚硬、矿体与围岩接触界线不明显或难于分离的厚度较大的矿脉。梅花形布置适用于矿石坚硬、厚度大的矿体，这种形式崩下来的矿石块度比较均匀，生产实际中应用广泛。

#### (2) 装药爆破工作

多用铵油炸药或硝铵炸药。炮眼中的装药系数最好能达到 60%~70%。如果装药系数太小，则炸药在矿石中分布不均匀，崩下的矿石大块比较多。

起爆方法可采用导火线点燃火雷管起爆，一次点火顺序起爆。现在大多数矿山都改用非电导爆管起爆。

(3) 通风工作

爆破以后要加强通风，使炮烟和粉尘能迅速排出工作面。工作面的风量应当保证满足排尘、排烟的需要。为此，要求采掘工作的风速不应低于0.15m/s，空气的含氧量不得少于20%。

矿房的通风系统一般是从上风流方向的天井进入新鲜风流，通过矿房工作面以后，经天井排到上部回风平巷。

电耙道的通风应形成独立的系统，防止污风串入矿房中。

(4) 局部放矿工作

矿石崩落以后，由于矿石碎胀，为了保证有一定的工作空间，必须放出部分矿石。按规定应放出崩落矿石的1/3，凿下2/3作为继续工作的临时工作台。局部放矿时应注意如下两点：

1) 在局部放矿时，不允许人员在放矿漏斗上方作业，以保证人身安全。

2) 局部放矿时，应有计划地进行，使平场工作量减少，防止形成空硐。若一旦发现产生了空硐，应及时处理。

(5) 平撬工作

在局部放矿以后，工人进入采场后，首先就应撬去工作地点的浮石，将爆下的矿堆摊平，否则会直接影响工人的安全生产。

合理地布置漏斗，对减少平场工作量是很重要的。因而，随着矿体倾角变缓，而使漏斗的位置尽量向下盘方向布置。在厚矿体中，每个漏斗的受矿面积最好控制在36m<sup>2</sup>以内，最大不应超过50m<sup>2</sup>。

(6) 大量放矿工作

当矿房内的矿石全部采完后，进行大量放矿工作，把原来留下的2/3矿石全部放出来。

5. 浅孔留矿法的矿房回采工作循环图表

浅孔留矿法的矿房回采工作循环图表参见表3-1。

表 3-1 浅孔留矿法回采工作循环图表

项目	班次 时间	第一班								第二班								第三班							
		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
凿岩准备	1.0	—																							
凿岩	5.0		—	—	—	—	—																		
爆破	20							—	—																
耙矿准备	1.0									—															
耙矿	7.0										—	—	—	—	—	—									
采场安全检查	0.5																	—	—						
洒水	0.5																		—	—					
撬浮石	3.0																		—	—	—				
破碎大块	1.0																				—	—			
平场	2.0																					—	—	—	
凿岩准备	1.0																								—

### (三) 浅孔留矿法适用条件及评价

#### 1. 适用条件

- 1) 适用于开采矿石和围岩稳固的急倾斜薄和极薄矿脉；
- 2) 要求矿石无氧化性，结块性和自燃性；
- 3) 要求矿体产状稳定，形状比较规整（否则会增加矿石的损失贫化）。

#### 2. 评价

##### (1) 主要优点

- 1) 浅孔留矿法结构简单，管理方便，工艺简单，生产技术易掌握。
- 2) 采切工程量比较小，厚矿体 7 ~ 12m/kt，薄矿体 10 ~ 20m/kt。
- 3) 利用普通漏斗重力放矿，采场运搬矿石不需要其他机械设备。
- 4) 矿石损失贫化比较低，无粉矿损失，采矿成本低。

##### (2) 主要缺点

- 1) 所留矿柱的矿量占的比重较大（40% ~ 50%，有的达 60%）。而回采这些矿柱时，损失比较大，有的损失达 50%。
- 2) 当围岩不够稳固时，特别是开采薄矿脉时，贫化率大。
- 3) 平场工作量比较繁重，又不容易实现平场工作的机械化。
- 4) 工人直接在暴露的矿石下工作，安全性较差。
- 5) 对矿石的块度要求均匀，否则容易卡漏（要求浅孔的合格块度小于 350mm）。
- 6) 出矿受到落矿等作业的限制，使日出矿能力低。

### (四) 主要技术经济指标

- 1) 采场生产能力——100 ~ 150t/d；
- 2) 工作面工效——12 ~ 25t/（工·班）；
- 3) 矿石损失率——5% ~ 8%；
- 4) 矿石贫化率——8% ~ 10%；
- 5) 采切工程量——厚矿体：7 ~ 12m/kt；薄矿体：10 ~ 20m/kt；
- 6) 凿岩效率——厚矿体：50 ~ 80t/（台·班）；薄矿体：20 ~ 50t/（台·班）；
- 7) 主要材料消耗——炸药：厚矿体 0.25 ~ 0.4kg/t，薄矿体 0.6 ~ 0.8kg/t；雷管：0.35 ~ 0.5 个/t；导火线：0.3 ~ 0.5 个/t；钎子钢：0.02 ~ 0.03kg/t。

## 四、分段凿岩阶段矿房法

阶段矿房法是用深孔落矿的采矿方法，它也是把矿块划分为矿房和矿柱两部分进行回采，先采矿房，后采矿柱，最后也要有计划地进行矿柱回采和空区处理。根据落矿方式不同，阶段矿房法可分为：垂直深孔落矿的分段凿岩阶段矿房法（简称分段凿岩阶段矿房法）、垂直深孔落矿的阶段凿岩阶段矿房法和水平深孔落矿的阶段矿房法 3 种。在此只介绍分段凿岩阶段矿房法。

#### 1. 特点

分段凿岩阶段矿房法在我国应用的也比较广泛，根据 1996 年有色金属矿山统计，其

使用比重和采出矿量仅次于浅孔留矿法，居第二位。这种方法的特点是：

- 1) 将矿块划分成矿房及矿柱两步骤回采，先采矿房，后采矿柱，采后空区所留矿柱及矿岩靠其本身的稳固性来支撑。
- 2) 把矿房全高用分段巷道划分为若干分段，在分段巷道中向上打垂直扇形中深孔落矿，工作面是垂直的。
- 3) 在回采之前，除了在矿房底部要进行拉底和劈漏之外，还要在矿房中央开切割立槽，并以切割立槽为爆破自由面进行落矿。
- 4) 崩落的矿石借自重落到矿房的底部放出。
- 5) 矿房内不留矿石，保持为一个空场，工人在小断面巷道内工作，不进入采空区内，比较安全。

2. 典型方案（矿块沿走向布置）

分段凿岩阶段采矿法如图 3-8 所示。

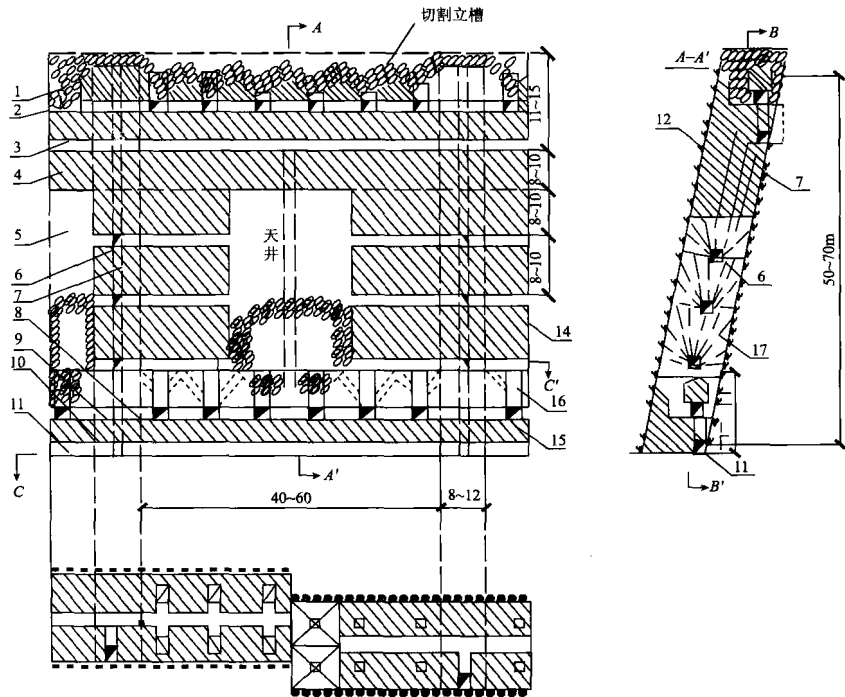


图 3-8 分段凿岩阶段矿房法（单位：m）

1—漏斗；2—斗川；3—上阶段运输巷道；4—顶柱；5—已采矿房；6—分段平巷；7—人行通风天井；8—漏斗；9—电耙道；10—小川；11—阶段运输巷道；12—切割天井；13—崩落的矿石；14—间柱；15—底柱；16—漏斗颈；17—炮孔；18—采准矿块

(1) 矿块构成要素

1) 矿块布置：根据矿体的厚度，矿房的长轴可沿走向布置成垂直走向布置。一般当矿体厚度小于 20 ~ 30m 时，矿房沿走向布置；当矿体厚度大于 20 ~ 30m 时，矿块应垂直走向布置。

2) 阶段高度：一般为 50 ~ 70m。阶段高度受围岩的稳固性，矿体产状稳定程度以及

高天井掘进技术的限制。增加阶段高度可以减少开拓和采准工作量，相应减少了顶底柱矿量，有的降低采矿贫化损失。

3) 矿房长度：矿房长度根据围岩的稳固性和矿体允许的暴露面积来决定。同时与矿体倾角有关，矿体倾角越缓，矿房长度应减小。一般情况下，矿房长为 40 ~ 60m。

4) 矿房宽度：当矿房是沿走向布置时，矿房宽度等于矿体厚度；当矿房是垂直走向布置时，一般为 15 ~ 25m。

5) 分段高度：分段高度与凿岩方式以及所用的凿岩设备能力有关。浅孔凿岩时，分段高度不大于 6m；中深孔凿岩时，分段高度可为 8 ~ 10m；深孔凿岩时，分段高度可为 15 ~ 20m 或更大一些。

6) 矿柱尺寸：

顶柱厚度：由矿岩的稳固性及矿体厚度决定，一般为 6 ~ 10m。

间柱宽度：沿走向布置时，一般为 8 ~ 12m，垂直走向布置时，一般为 10 ~ 14m。

底柱高度：主要取决于底部结构的形式，矿岩的稳固性。当采用电耙底部结构时，取 7 ~ 11m；当由放矿漏斗直接放矿装车时，底柱高度可取 4 ~ 6m。

7) 漏斗间距：一般为 5 ~ 7m。

(2) 采准工作

分段凿岩阶段矿房法的采准巷道包括：阶段运输巷道、分段凿岩巷道、人行通风天井、放矿溜井、电耙道、漏斗颈等：

1) 阶段运输巷道：其位置根据整个阶段运输巷道的布置来决定。一般沿矿体下盘接触线布置。

2) 通风人行天井：多数布置在间柱中。

3) 电耙道：由人行天井掘进电耙道，断面为 2.2m × 2.2m 或 2.5m × 2.5m。

4) 溜矿小井：由运输巷道一侧向电耙道开掘，断面可为 2m × 2m。

5) 分段凿岩巷道：由天井掘进，其断面根据所用凿岩设备来确定。分段巷道的数目及位置要根据矿体厚度、探矿工程需要、矿体与围岩接触的性质以及围岩稳固性而定。每个分段可布置 1 ~ 2 条分段巷道，通常靠下盘布置以减少炮孔深度，提高凿岩效率。当矿体下盘与围岩接触带不够稳固，上盘围岩与矿体不易分离以及需要沿矿体上盘布置探矿巷道时，才沿矿体上盘布置。

6) 漏斗颈：由电耙道开掘，通常一次掘进完毕，断面可为 2m × 2m。

(3) 切割工作

切割工作包括：掘进拉底巷道、切割横巷、切割天井、拉底和劈漏以及开立槽。

1) 切割天井的位置一般布置在矿房的中央，或者是布置在矿房的一侧，应当是矿体最厚的部位，且靠下盘的接触线上（图 3-9）。

2) 拉底巷道、拉底和劈漏工作。在拉底之前先开掘拉底巷道，拉底和劈漏同时进行。由于工作面是垂直的，因此矿房下面的拉底和劈漏工作不能一次完成，而是随着工作的推进，一般拉底劈漏工作超前于回采 1 ~ 2 个漏斗即可。拉底方法一般采用浅孔从拉底巷道向两侧扩帮，劈漏可以从拉底空间向下或从漏斗颈中向上进行。漏斗劈开后，崩下的矿石留一部分，作为分段装药爆破的工作台。

3) 开立槽。形成立槽是回采矿房工作中极为重要的工序，切割立槽的宽度一般为

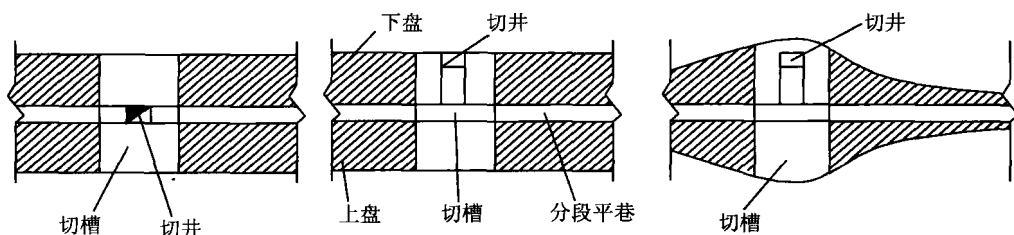


图 3-9 分段凿岩阶段矿房法天井位置

5~8m，必须保证施工质量。

①切割立槽的位置：切割立槽可以位于矿房的中央或一侧。当矿体形状有变化时，切割立槽应位于矿体最厚的部位，以利于创造良好的爆破自由面。当矿块是垂直走向布置时，切割立槽应当开掘在靠上盘的一侧位置，当上盘岩石稳固性比较差时，可开在靠下盘的一侧，使上盘岩石最晚暴露出来，确保安全。②开掘切割立槽的方法有浅孔拉槽法、水平深孔拉槽法和上向深孔拉槽法。

浅孔拉槽法是在拟定开立槽的部位，用浅孔留矿法上采。用切割天井作为通风人行天井，采下的矿石从漏斗溜放到电耙巷道中。大量放矿后形成切割槽。

水平深孔拉槽法是在拉槽部位的底部进行拉底，以切割天井作为凿岩天井，打水平扇形深孔，分次爆破后形成切割立槽。当矿体比较厚时，可以开两个切割天井。

上向深孔拉槽法是先掘进切割平巷，在切割平巷中打上向平行中深孔，以切割天井为自由石，爆破后形成立槽。

#### (4) 回采工作

切割工作完成之后，可以依切割立槽为爆破自由面，在分段巷道中用平柱式凿岩机打上向扇形炮孔，进行正式回采工作。矿房回采工作主要包括落矿、出矿、通风及地质管理工作。

1) 落矿：通常在分段巷道中打垂直向上扇形炮孔，作业安全性好，劳动生产率高。

2) 出矿：崩落的矿石借自重落到底部结构上经漏斗溜放到电耙道，用电耙把矿石耙入溜井，下放到阶段运输平巷装车运走。

3) 通风工作：矿房回采时，必须保证作业地点风流畅通。特别是在分段凿岩巷道和电耙巷道里，应保证风流畅通。多数矿山为了避免上、下风流混淆，大多采用集中凿岩，分次爆破的办法。这样，出矿时的污风不至于影响凿岩工作。

4) 采场地压管理：矿房采完以后，造成很大空区，如果矿岩一旦发生崩落，可能会产生巨大的冲击气浪，造成灾害，故管理地压工作很重要。

地压管理工作主要是指一方面是要选择合理的矿房矿柱尺寸，严格控制采空区的暴露面积和暴露时间。另一方面是要及时处理采空区，以此保证回采工作的顺利进行。

### 3. 评价

#### (1) 适用条件

适用于矿岩稳固的厚和极厚的急倾斜矿体。

#### (2) 主要优点

1) 工人在小断面巷道中工作，回采工作比较安全。

2) 回采强度比较大, 在一个采场内, 工作面比较多, 因此, 用这种采矿方法开采时, 采场可以相对少一些。

3) 工作循环, 比较简单, 通风条件好。

4) 坑木消耗量少, 采矿成本低。

(3) 主要缺点

1) 采准工作量大: 采准比为  $5 \sim 15\text{m/kt}$  (比留矿法大), 在正常情况下, 一个采场大约要开掘  $500 \sim 700\text{m}$  采切巷道, 施工常常要半年左右时间。

2) 在分段巷道内, 不易实现巷道掘进的机械化。

3) 矿柱所占矿量比较大, 且回采矿柱损失、贫化又比较大 (损失率达  $10\% \sim 15\%$ , 甚至可达  $20\%$ , 贫化率达  $10\% \sim 15\%$ )。

4) 采用中深孔落矿, 大块率高, 二次破碎工作量大。

5) 不能进行手选和分采。

(4) 主要技术经济指标

1) 矿块生产能力:  $140 \sim 180\text{t/d}$ ;

2) 凿岩效率: 中深孔为  $40 \sim 60\text{m}/(\text{台} \cdot \text{班})$ ;

3) 运矿效率: 电耙子  $110 \sim 150\text{t}/(\text{台} \cdot \text{班})$ ;

4) 采矿工效:  $30 \sim 50\text{t}/(\text{工} \cdot \text{班})$ ;

5) 贫化率:  $4\% \sim 8\%$ ;

6) 损失率:  $10\% \sim 15\%$ ;

7) 采切工程量:  $6 \sim 8\text{m/kt}$ 。

### 第三节 充填采矿法

#### 一、充填采矿法概述

##### 1. 特点

1) 随着回采工作面的推进, 逐步用充填料充填采空区。

2) 将矿块划分为矿房和矿柱两步骤回采, 先采矿房, 后采矿柱。矿柱回采可用充填法, 也可以考虑用其他方法。

3) 矿房的回采是采一分层, 把矿石运出, 随后充填这一层, 然后再采一层, 再充填一层。依此循环, 直到全矿房采完为止。一采一充或两采一充。

##### 2. 用途

1) 进行地压管理。利用形成的充填体进行地压管理, 控制围岩崩落和地表下沉, 并为回采工作创造方便条件和安全条件, 保护地表建筑物, 缓和大面积地压活动, 恢复安全生产。

2) 杜绝内因火灾。有些矿山用这种方法来预防有自燃性的矿床 (内因火灾或其他灾害)。

3) 为回采矿柱创造条件。矿房采完以后空场能否及时进行充填, 将直接导致矿柱能否进行回采, 由此将直接影响矿山三级矿量的平衡和均衡生产。

4) 为深部开采、水下开采创造条件。

##### 3. 充填材料及其输送方法

1) 充填材料可以是地表堆积的废石、掘进坑道的废石、选矿厂的尾砂, 也可以是冶

炼厂的炉渣、地表采场的采石等。

2) 充填材料的输送方法：可通过矿车或其他机械运输，也可用风力、水力输送。目前用水力输送较广泛。

4. 分类

按充填料不同分为干式充填法、水砂充填法、尾砂充填法、胶结充填法。

按回采工作面的推进方向和回采工艺特点分为上向水平分层充填法、下向水平分层充填法、壁式充填法、支架充填法等。本节仅介绍上向水平分层水砂充填法和胶结充填法。

二、上向水平分层水砂充填法

下面以铜绿山铜矿使用的上向分层水砂充填法（图 3 - 10）为例进行说明。

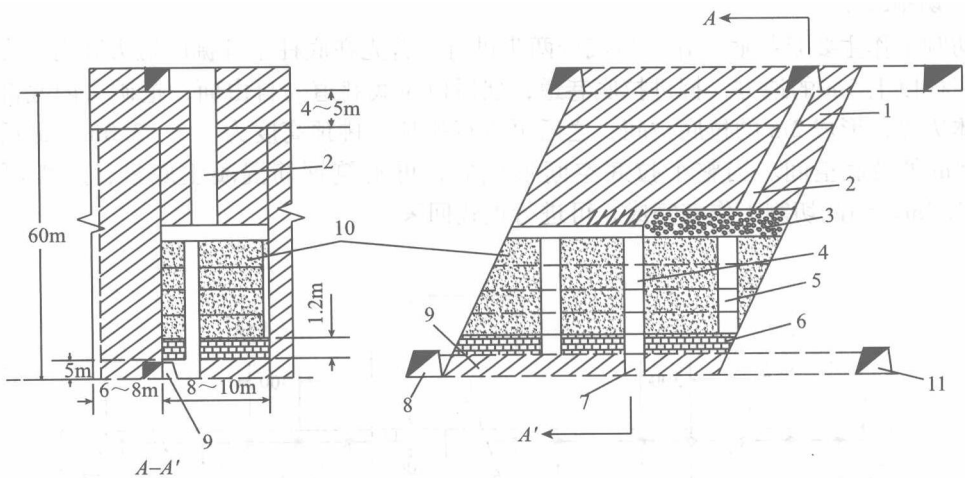


图 3 - 10 上向分层水砂充填法

1—顶柱；2—充填井；3—崩下的矿石；4—人行脱水井；5—放矿留井；6—钢筋；7—人行滤水天井通道；  
8—沿脉巷道；9—穿脉巷道；10—充填体；11—脉外平巷

(一) 开采技术条件

该矿为多金属发生矿床，是以铜铁为主的矽卡岩型厚矿体，平均厚度 40m，最大厚度约 100m，矿体倾角 50° ~ 75°。矿石比较稳固，上、下盘围岩均有破碎带，故均不太稳固。矿床位于湖畔，有些矿体的深部延深到湖底部，地表不允许陷落，矿石品位高，属多金属富矿床。

(二) 具体开采方法

1. 块矿构成要素

矿块构成要素包括下面几种。

- 1) 矿块布置：由于矿体厚度大，上、下盘围岩的稳固性比较差，所以矿块沿走向布置。
- 2) 阶段高度：30 ~ 60m。
- 3) 矿块长度：等于矿体厚。
- 4) 矿房宽度：8 ~ 10m。



5) 矿柱规格：间柱宽 6~8m；底柱高度 5~7m；顶柱宽度 4~5m。

## 2. 采准工作

采准工作主要包括：

1) 阶段运输平巷：该矿体变化大，设计年产量也较大，为适应充填管路的合理性，采用了下盘脉外平巷、上盘脉内平巷的双平巷环形采准系统。

2) 穿脉巷道：每隔 15~20m 开一条穿脉。穿脉布置在矿房与间柱交界处，矿房和间柱共用一条穿脉。

3) 溜矿井：根据矿房长度不同，一个矿房中至少应布置两个溜矿井。

4) 充填井：在矿房中间设一个充填井，断面为 2m×2m，倾角 80°~90°。

5) 人行脱水井：一个矿房设一个顺路人行脱水井，适应泄水要求。

## 3. 切割工作

切割工作主要是拉底工作。拉底分两步进行。首先在底柱中开掘的短天井内，在穿脉平巷底板以上 5m 的地方，掘进拉底巷道，然后以拉底巷道为自由面，把矿房内底部扩大至矿体边界，形成 2m 的拉底空间，之后再行挑顶。挑顶高度为 2.5~3.0m，最后形成 4.5~5m 的拉底空间。当整个拉底空间形成后，再砌筑钢筋混凝土底板，底板厚度为 0.8~1.2m。到此切割工作室完成，可进行正式回采。

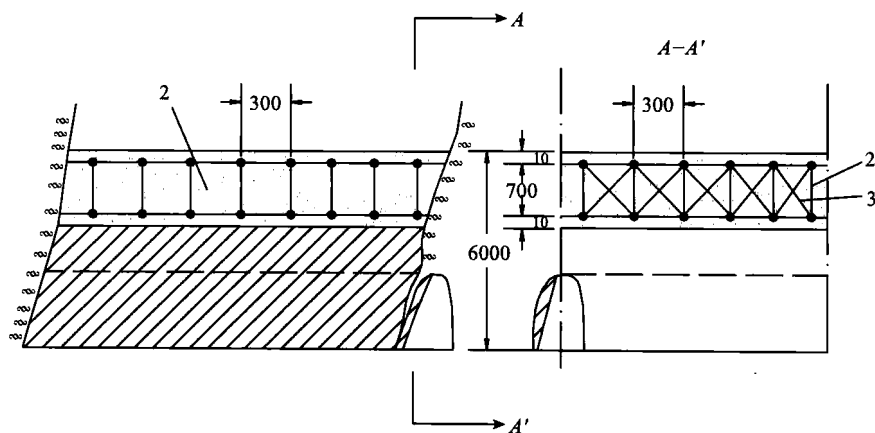


图 3-11 钢筋混凝土底板（隔离层）结构图

1—主钢筋；2、3—副钢筋

## 4. 回采工作

回采工作主要包括 5 个方面。

1) 回采分层高度：1.8~3.0m，一般为 2m。矿石稳固，分层高度可以大一些。若采用“两采一充”时，分层高可达 4~6m。

2) 凿岩工作：打上向孔。若用“两采一充”时，则第二分层打水平孔。这样既增加了落矿高度，又保证了采矿的平整和稳定性。

3) 爆破工作：每一分层的上向孔，分两次爆破。

4) 出矿工作：可用装运机或用电耙出矿。

5) 清理工作：出矿完毕，清理和检查工作面，之后才能进行充填工作。

5. 充填工作

(1) 充填前的准备工作

包括浇注放矿溜井（或加高溜井）、加高人行泄水井、架设隔墙模板、浇注混凝土隔墙、充填前的全面检查工作。检查合格即可将充填料下放到采场进行充填。

1) 浇注溜矿井：溜井内径一般 1.5 ~ 2.0m。多采用钢筋混凝土整体浇注方式。根据阶段高度的不同，井壁厚度取 0.5 ~ 1.0m。

2) 加高人行泄水天井：铜绿山铜矿的人行泄水井是用混凝土预制件砌成的顺路天井。净断面 1.8m × 1.8m，内壁由 3mm 的木模板构成，砌混凝土预制块之间留 0.2 ~ 0.3m 的间隙，在泄水孔处堵上草袋子。

3) 架设隔墙：隔墙常采用浇注方法，隔墙的过去是采用木制的，现用混凝土预制块，规格为 300mm × 200mm × 150mm。模板内浇注 0.5m 厚的混凝土，形成总厚度为 0.8m 的隔墙。

(2) 正式充填采场

准备工作完毕后，可进行正式的采场充填工作。充填料可用尾砂、冶炼厂炉渣等。充填料沿着管径为 100mm 的管道进行水力输送。

采场充填完成后，在充填料上铺一层厚 0.15m 的混凝土作底板，使之便于落矿，减少贫损。当充填料充填完后，即可铺底板。

6. 水力充填的脱水

水力充填后的脱水很关键，脱水的速度大小和质量好坏，直接影响着采矿的效率和数量。脱水的方法有两种，一种是溢流脱水法，另一种是渗滤脱水法。

1) 溢流脱水法：是将充填料自然沉积下来，上部澄清的水经溢流管或溢底孔排出采矿场。

2) 渗滤脱水法：是利用滤水构筑物将水渗滤出采矿的办法。渗滤脱水的构筑物有滤水窗、滤水筒、滤水墙和滤水天井等。滤水用的材料有稻草帘、麻布、荆条、竹席、芦苇等。

(三) 水力充填系统简介

水力充填中，由于采用的材料不同，因而使得系统中一些环节也有差异，但基本的工艺过程是一致的。水力充填系统大致如图 3 - 12 所示。

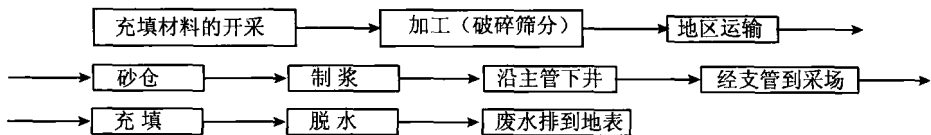


图 3 - 12 水力充填系统流程图

(四) 对水力充填采矿法的评价

1. 主要优、缺点

主要优点是：①对于矿体赋存条件要求不严格，一般矿体均可使用；②充填体比较致

密，抗压能力强；③矿石回收率高，贫化率低；④能开采有自燃性的矿石，可防止内因火灾。

主要缺点是：①回采工艺复杂，采场生产能力和劳动生产率低；②采矿成本高，回采强度低；③需要用大量的充填用水，脱水后需排出，增加了排水费用，恶化了井下环境。

### 2. 适用条件

①用于开采矿体埋藏条件复杂，矿岩不稳固而地表不允许崩落的矿床；②用于开采贵重或高品位的矿床；③用于开采具有自燃性的矿床等。

## 三、胶结充填采矿法

### 1. 概述

胶结充填法是在充填料中适当加入胶凝材料，使松散的充填料凝结成具有一定强度的整体，用以改善矿柱的回采条件，并使回采方案具有较大的灵活性，用以适应复杂的开采技术条件；有利于降低矿石损失和贫化指标，同时能更严格地保护地表。

### 2. 典型方案

#### (1) 矿块划分及矿柱尺寸

胶结充填采矿法把矿体划分成矿房和矿柱，分两步回采，先用胶结充填法回采矿柱（Ⅰ）部分，然后用干式充填或水力充填法回采矿房（Ⅱ）部分。

矿房和矿柱的尺寸，根据矿岩的稳固程度来确定。考虑到胶结充填法成本高，因而在矿岩稳定性允许条件下，只要人工矿柱Ⅰ能保证第Ⅱ部分回采的安全性，则第Ⅰ部分就应采用较小尺寸，第Ⅱ部分都应采用较大尺寸。实际上Ⅰ部分胶结充填法回采后，形成了人工矿柱，为回采第Ⅱ部分创造了条件（图3-13）。

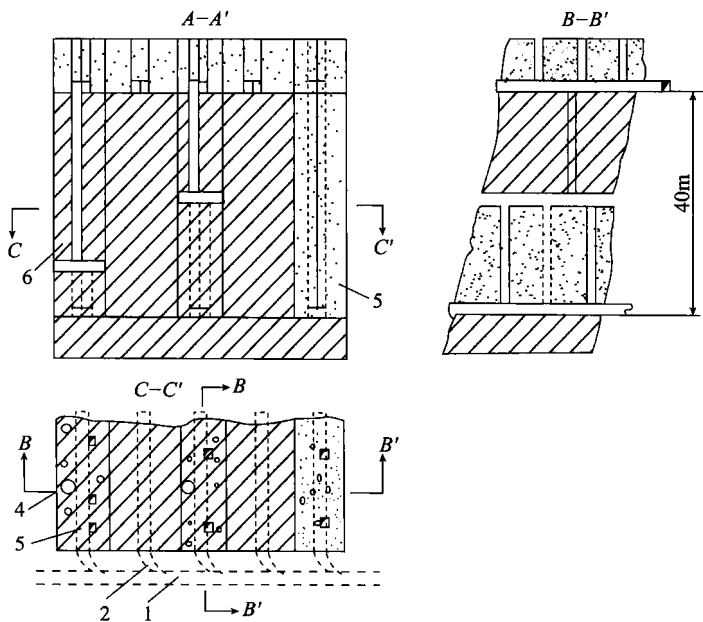


图3-13 胶结充填采矿法典型方案

1—运输巷道；2—穿脉巷道；3—胶结充填体；4—溜矿井；5—人行井；6—充填天井

## (2) 构成要素及采准、切割、回采工艺

胶结充填采矿法的构成要素、采准、切割及回采工艺和水力充填法基本相同，不再重述。下面仅介绍不同处。

1) 不设滤水井：一般不设滤水井。由于胶结充填料中采用了高标号的水泥和胶凝剂，如果再让它滤出大量水分，反而不利于水泥的硬化。胶结充填法主要是靠溢流脱水。

2) 溜井的形成：溜井不必专门砌筑，只要事先打好模板即可，但当采用低标号材料充填时，还要专门砌筑溜井。

3) 当矿块回采时，在阶段运输水平全面拉开，用混凝土砌筑人工巷道和人工底柱。矿块的回采是一直采到上阶段的混凝土底柱为止，不留顶柱。

4) 接顶方法：在许多情况下，要求保护好地表，不允许岩层有较大移动和地表陷落。因而接顶问题成为关键问题之一。

常用的两种接顶方法是人工接顶法和砂浆加压接顶法。

人工接顶法是把最后一个充填分层，分为若干个 1.5m 宽的分条，然后逐个分条浇注。浇注之前，先立好模板，之后随着浇注体的加高而逐渐加高模板。当充填到距顶板只剩下 0.5m 左右时，再用石块或混凝土抹砂浆砌筑接顶，使残余的空间完全填满。

砂浆加压接顶法是用液压泵将砂浆沿管道压入接顶空间，填满接顶空间。

## (3) 胶结充填材料

胶结充填材料主要包括如下几类。

1) 胶凝材料：我国用水泥。由于水泥用量大，水泥费用占到 40% 以上。为了降低成本，可用炉渣、磁硫化铁粉、粉煤灰、石灰等代用品、经过加工制成胶结材料。

2) 粗骨料：碎石、卵石。粒径一般为 5 ~ 50mm，最大不大于输送管径的 1/3。

3) 细骨料：河砂、尾砂。

# 第四节 崩落采矿法

## 一、崩落采矿法概述

崩落采矿法就是以崩落围岩来实现地压管理的采矿方法，即在崩落矿石的同时强制或自然崩落围岩，充填空区，用以控制和管理地压。

### 1. 特点

1) 崩落法不再把矿块划分为矿房和矿柱，而是以整个矿块作为一个回采单元，按一定的回采顺序，连续进行单步骤回采。

2) 在回采过程中，围岩要自然或强制崩落，矿石是在覆盖岩石的直接接触下放矿。因此，这种采矿方法对放矿进行科学管理是十分必要的。

3) 崩落法的开采是在一个阶段内从上而下进行的。与空场采矿法不同。

### 2. 适用条件

一般地，崩落法对矿体赋存条件、矿岩性质等没有严格要求，适用范围比较广。理想的适用条件是：上盘围岩能呈块状自然崩落，矿石中等以上稳固的急倾斜矿体。地表允许塌落是使用这种方法的必要前提。由于这种方法在开采时矿石损失贫化大，因而它不用于

开采高价、高品位的矿床。

3. 分类

常用的几种崩落法是有底柱分段崩落法、无底柱分段崩落法、壁式崩落法、分层崩落法等，本节仅介绍无底柱分段崩落法和壁式崩落法。

二、无底柱分段崩落采矿法

(一) 概述

无底柱分段崩落法是一种采场结构简单、机械化程度高、生产效率高、安全性好的采矿方法。20 世纪 60 年代中期在我国开始使用以来，在金属矿山获得迅速推广，特别是在铁矿山更为广泛，目前已占地下铁矿山矿石总产量的 70% 左右。其主要特点是：

- 1) 在回采过程中，随着矿石的崩落，同时崩落上部围岩及时充填采空区。
- 2) 将阶段划分成 10m 左右的若干个分段，自上而下它是单步骤回采，不分矿房和矿柱，即不再设底柱、间柱和顶柱等。
- 3) 将分段划分成若干分条，在每一分条中掘进回采巷道，在其内开凿上向扇形炮孔，然后分次爆破，每次爆破 1~2 排孔。
- 4) 崩落矿石在覆岩下由回采巷道端部放出，覆盖岩石随着出矿而下落充填采空区。

(二) 典型方案

无底柱分段崩落采矿法如图 3-14 所示。

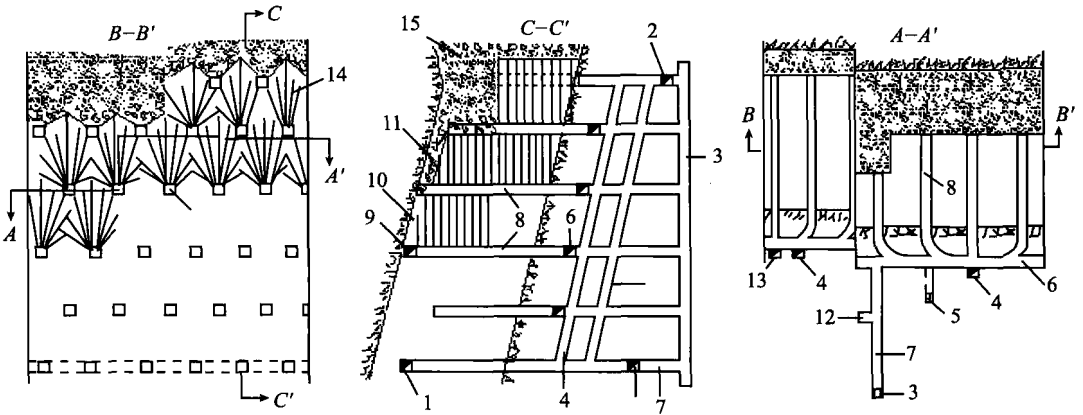


图 3-14 无底柱分段崩落采矿法示意图

- 1—阶段平巷；2—上阶段平巷；3—设备井；4—矿石溜井；5—通风天井；6—分段联络道；7—设备井联络道；  
8—回采巷道；9—切割巷道；10—切割天井；11—切割槽；12—机修硐室；13—废石溜井；14—扇形炮孔；  
15—覆盖岩层

1. 构成要素及阶段采准巷道布置

(1) 阶段高度

一般为 60~70m。当矿体倾角较缓，赋存不规则，矿岩不稳固时，高度可以小一些。

(2) 阶段运输巷道布置

多数布置在脉外，其目的是便于下一阶段回采时，可作为回风巷道用。

### (3) 分段高度

一般为9~15m，常用10m，与运搬设备、凿岩设备和放矿要求多种因素有关。

分段高度大，可以减少采准工作量，降低采准费用。但是它又受到凿岩设备、凿岩爆破工作量，以及放矿时损失贫化指标的限制，这样又使得分段高度不能太高。

分段高度过低，不仅增加了采准工作量，而且还影响回采巷道的稳固性。当矿体不规则时，若分段过低，在矿体边部上下分段难以按菱形布置，采矿贫化损失大。

### (4) 设备井的布置

设备井的用途是为了便于运送设备、材料、人员到各分段方便，同时兼作进风井。设备井并非每个采场都掘一个，一般是沿走向方向每隔150~300m长度，在下盘的崩落界限之外，布置设备井。

### (5) 溜井布置及矿块尺寸

对于无底柱分段崩落法，没有明显的划分矿块的标志。为了生产管理上的方便，一般以一个溜井服务的范围来划分为一个矿块。

溜井平均间距为40~50m，最大不得超过60~80m。通常溜井间距可按4~5条进路布置。溜井间距不宜过大，否则会影响到运搬效率。如果矿体中有大量夹石，或脉外工程量小时，还需要开掘专门的废石溜井。

### (6) 回采巷道布置

回采巷道的间距过大、过小都不合适。回采巷道间距主要取决于矿石的损失贫化指标，一般为8~12m。断面尺寸大小取决于矿石和稳固性，及选用的装矿、凿岩设备等。如选用ZYQ-14装运机和CEE-700型凿岩台车时，则断面可为宽×高=3m×3m或4m×3m。

回采巷道面形状可有短形和拱形断面两种。从放矿角度来看，矩形断面比拱形断面好。从巷道的稳固性来看，拱形的比矩形的好。

回采巷道的布置形式分为沿走向和垂直走向两种布置方式。当矿体厚度大于等于15~20m时，可垂直走向布置进路，反之可沿走向布置。上、下分段的回采巷道应呈菱形交错布置（图3-15b）而不采用平行布置（图3-15a）。

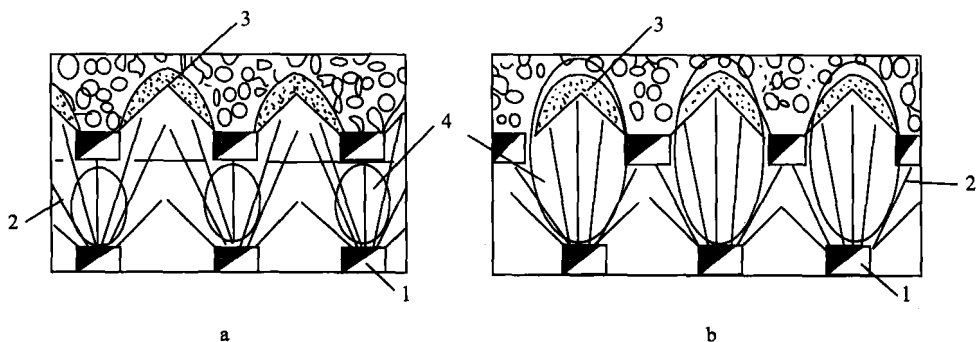


图3-15 回采进路布置图

1—回采进路；2—扇形炮孔；3—脊部损失；4—放出椭球体

因为两个相邻回采巷道之间，放矿至截止品位时总有一部分矿石放不出来，称之为脊部损失。如果上、下分段回采进路呈菱形交错布置，脊部损失的矿石可以在下分段回采时

收回。如果采用平行布置，则脊部损失就难以回收。

### (7) 分段运输联络道

分段运输联络道是用来连接回采巷道与溜井，通风天井和设备井的巷道。断面尺寸与回采进路相同。可采用脉内和脉外两种布置形式，具体根据矿岩稳固性、矿体厚度、使用的装运设备等综合确定。

### (8) 通风天井

通风天井一般多布置在下盘围岩中，数量为1~2个矿块布置1个。

## 2. 切割工作

无底柱分段崩落法的切割工作包括掘进切割平巷，切割天井和形成切割立槽。形成切割立槽的方法有如下3种。

### (1) 切割巷道和切割天井联合拉槽法

当矿体边界比较规则时，往往在回采巷道端部矿体边界处，掘进切割巷道，根据切割平巷的长度，及爆破的需要在适当的位置掘进一个或几个切割天井。在切割巷道内，向上打平行的或扇形孔，以切割天井为自由面后退逐排爆破，形成切割槽（图3-16）。

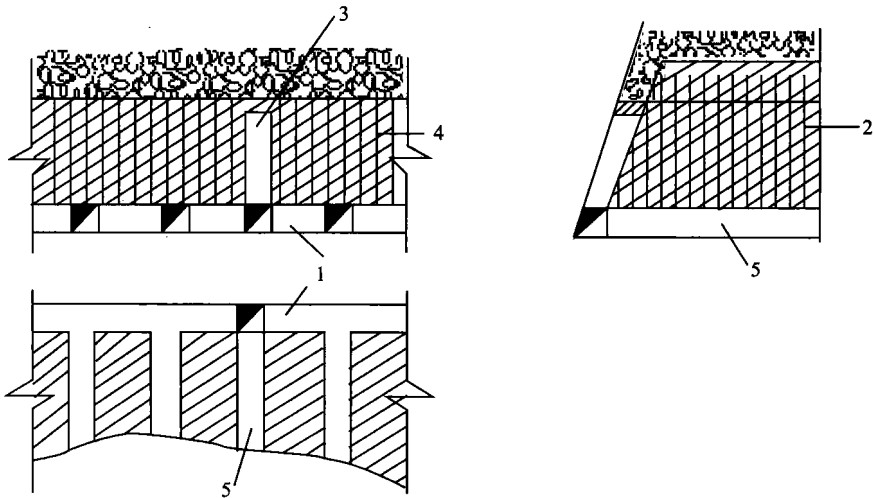


图3-16 规则矿体切巷切井联合拉槽

1—切割平巷；2—回采炮孔；3—切割天井；4—切割炮孔；5—回采进路

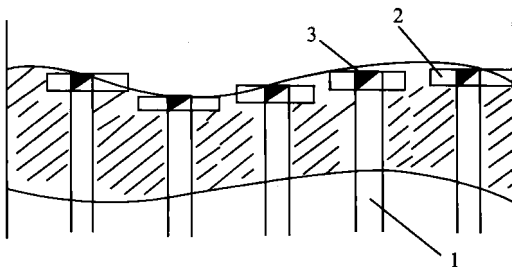


图3-17 不规则矿体切巷切井联合拉槽

1—回采进路；2—切割平巷；3—切割天井

当矿体不规则时，或回采巷道沿走向布置时，则在每个回采巷道的端部都要掘进切割巷道和切割天井。这种拉切割槽的方法质量好，但掘进工程量较多（图3-17）。

### (2) 切割天井和扇形炮孔拉槽法

这种方法是不掘进切割巷道，而是在每个回采巷道的端部掘进切割天井的方法，如图3-18所示。

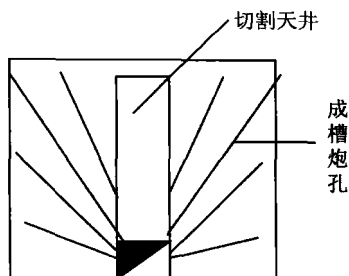


图 3-18 切井与扇形炮孔拉槽

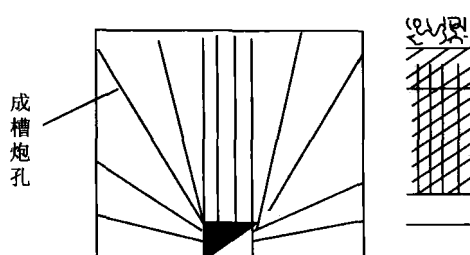


图 3-19 扇形炮孔成槽

### (3) 扇形炮孔成槽法

在回采巷道或切割巷道中，钻凿若干排角度不同的扇形炮孔，分次（或一次）爆破形成切割槽的方法，如图 3-19 所示。

## 3. 回采工作

回采工作主要包括落矿、通风、出矿等工作。

### (1) 落矿工作

落矿工作包括有：凿岩、装药、爆破。

1) 凿岩工作的内容和设备主要是①炮孔布置：无底柱分段崩落法是在分段回采巷道内打向上扇形炮孔。扇形炮孔排面倾角有前倾、垂直、后倾 3 种布置方式。如果矿石不稳固采用前倾布置，有利于防止放矿口上部带炮而崩落；如矿石稳固，大都采用垂直布置形式；由于凿岩困难，国内很少采用后倾布置。②扇形炮孔的边孔角：边孔角的布置有  $5^\circ \sim 15^\circ$ ， $45^\circ \sim 50^\circ$ ，大于  $70^\circ$  三种。生产中常用  $45^\circ \sim 50^\circ$  的边孔角。③凿岩设备：国内主要采用 CZZ-700 型胶轮自行单机凿岩台车，配 YG-80 型凿岩机、BBCC-120F 和 YZ-90 型凿岩机。④爆破参数：钎头直径为 51~65mm；最小抵抗线  $W=1.5 \sim 2.0\text{m}$ ，一般可按  $W=30d$  来计算（ $d$  为孔径）；孔底距  $a_{\text{底}}$  一般等于最小抵抗线  $W$ 。

2) 装药工作：可用人工装药包，也可用压气装药。用压气装药可以提高装药密度，达到  $0.9 \sim 1.0\text{g/cm}^3$ ，而人工装药只能达到  $0.6\text{g/cm}^3$  左右。

3) 爆破工作：在回采巷道中，一次爆破的矿层厚度称为崩矿步距。一般每次爆破 1~2 排孔。在生产中常用的崩矿步距为 1.8~3.0m。最优的崩矿步距要通过生产实践和试验来确定。过大过小都不好，都会使矿石损失贫化加大。

### (2) 通风工作

无底柱分段崩落法的通风条件差，主要是因为分段回采巷道都是独头巷道，数量多、断面大，而且互相贯通，每个回采巷道又都通过崩落区与地表相通。因此，这种采矿方法很难形成贯通风流，管理起来很困难。目前常使用局扇通风。

### (3) 出矿工作

出矿就是用出矿设备把回采进路端部的矿石装运到溜井。目前使用的出矿设备主要是装运机、铲运机。影响出矿效率的因素有矿石块度、运距、弯道半径、路面平整程度。

### (4) 无底柱分段崩落法的回采顺序

阶段内上、下分段之间按自上而下的顺序回采。上分段的回采应超前下分段一定距离



(一般为大于一个分段高度的距离)(图3-20)。

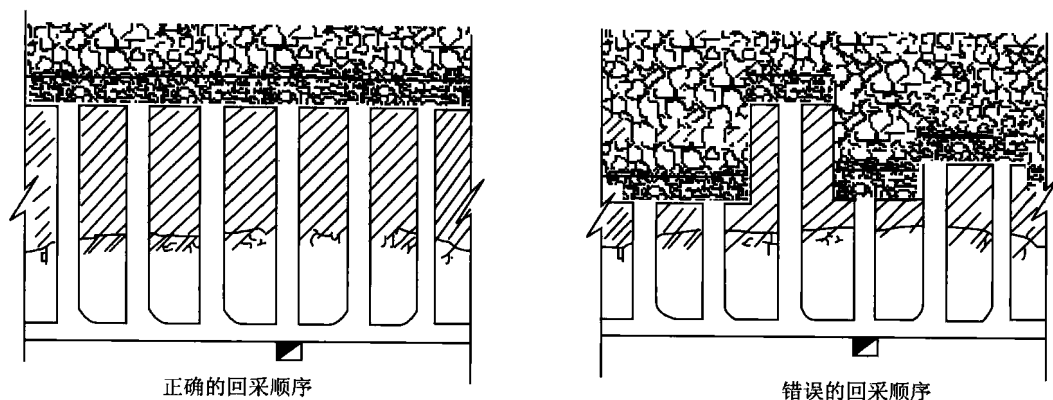


图3-20 进路的回采顺序

同一分段内各矿块的回采巷道,应当保持在一条直线上,以减少矿石与废石的接触面,这样有利于降低矿石的损失和贫化,有利于对回采巷道的维护和增强它的稳固性。

#### (5) 无底柱分段崩落法覆盖岩层的形成

采用无底柱分段崩落法回采矿体时,在其上部一定要形成一定厚度的覆盖岩层,其覆盖岩层的作用一是形成挤压解破条件,用以控制矿石回收和贫化指标;二是利用覆盖岩层,形成安全缓冲垫层,保证生产安全。

形成覆盖层的方法有如下几种:

1) 矿体上部已用其他方法回采,并已处理了空区,后改用无底柱分段崩落法开采。这时已自然形成了覆盖岩层。

2) 上部用露天开采,之后输入地下开采时,则可以利用处理露天边坡或者是剥离的废石形成覆盖岩层。

3) 围岩不稳定的盲矿体,随着矿石回采,围岩可以自然崩落形成覆盖层。

4) 强制放顶形成覆盖岩层,先放顶后回采形成,也可边回采边放顶形成。

### (三) 无底柱分段崩落法的适用条件及评价

#### 1. 适用条件

- 1) 地表和围岩允许崩落;
- 2) 矿石稳固,不需要大量支护,但随着支护技术的发展,对矿石稳固性的要求有所降低,围岩的稳固性不限,但上盘围岩易于崩落对采用这种方法更有利;
- 3) 矿石不很贵重,可选性好,或围岩含有品位,允许有较大的贫化率;
- 4) 急倾斜原矿体或缓倾斜的厚矿体;
- 5) 矿石需要剔出夹石或分级出矿。

#### 2. 主要优点

- 1) 安全性好,各项回采工作都在回采巷边中进行,没有大暴露面的工作空间;
- 2) 结构简单,不留矿柱,一步回采,也没有复杂的底部结构;
- 3) 采准和回采工艺简单,便于采用高效率的机械化设备;

- 4) 采准工作量小, 采准的副产矿石多;
- 5) 回采工作面多, 生产集中, 回采强度大, 管理方便;
- 6) 采准, 凿岩及出矿可以在不同的分段上同时进行, 不干扰;
- 7) 这种方法灵活性大, 易剔除夹石或分级出矿;
- 8) 探采易于结合。

### 3. 主要缺点

- 1) 通风条件差。我国大部分矿山的矿块内未设局扇通风, 主要靠主风流扩散通风, 系统不完整, 措施不得力, 空气质量差, 粉尘浓度大, 生产技术管理较差;
- 2) 出矿落后于落矿, 出矿效率低;
- 3) 矿石损失、贫化大, 采用此方法矿石损失率一般达 20% ~ 30%, 贫化 15% ~ 20%。

### 4. 主要技术经济指标

无底柱分段崩落法的技术经济指标见表 3-2。

表 3-2 无底柱分段崩落法技术经济指标

矿山名称	采用的设备及效率				技术经济指标			
	凿岩设备		出矿设备		采掘比 ( $\text{m} \cdot \text{kt}^{-1}$ )	采矿量 ( $\text{t}/\text{工} \cdot \text{班}$ )	回收率 %	贫化率 %
	型号	效率/( $\text{m}/\text{台} \cdot \text{班}$ )	型号	效率/( $\text{t}/\text{台} \cdot \text{班}$ )				
大庙铁矿	CZZ-700 BBC-120F		ZYQ-14	123	5.5	32.4	80~85	15
梅山铁矿	CZZ-700 YG-80	20~30	ZYQ-14	60~80	4~5		76.4	19.7
镜铁山铁矿	CZZ-700 BBC-120F	30~35	ZYQ-14	75~85	6	18.3	84.3	15.5
程潮铁矿	CZZ-700 YG-80 YQ-100	30~40	ZYQ-14	108	7.1	17.8	75	20~30
弓长岭铁矿	CZZ-700 BBC-120F	27 12	ZYQ-14	60	5~6		78.3	22
板石沟铁矿	CZZ-700 YG-80	20~35	ZYQ-14	80~100	8.2		52	20
符山铁矿	CZZ-700 YG-80	30~40	ZYQ-14	110	10.1	15.3	77.9	15.3
湖北某铁矿	CZZ-700 YG-80		ZYQ-14	60~65		7.9	61.1	30

## 三、壁式崩落采矿法

### (一) 概述

壁式崩落法主要用于开采顶板围岩不稳固, 矿体厚度小于 3~4m 的缓倾斜层状矿体。

特点是它把矿体划分成阶段，按矿体全厚沿走向方向推进。当回采工作面推进到一定距离以后，除了保留回采工作面所需要的空间外，还要有计划地回收支柱，并崩落顶板围岩充填采空区进行地压管理。

按工作面的斜长不同，壁式崩落法可分为：长壁式崩落法和短壁式崩落法两种，下面主要介绍长壁式崩落法。

## (二) 长壁式崩落法典型方案

### 1. 开采技术条件

某矿为浅海沉积赤铁矿床，矿床呈层状；共有 3 层矿体，矿体沿走向长 8600m；矿体倾角  $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ，一般为  $30^{\circ}$ ；矿体由上而下第一层矿体平均厚 1.85m，第二层矿平均 1.35m，第三层矿平均为 0.80m；大部矿石为赤铁矿，少量为磁铁矿。

矿石稳固  $f=8 \sim 10$ 。地质品位：富矿 49.43%，贫矿 41.55%，平均品位为 45.63%。顶板围岩为页岩，底板为石英岩。矿层基本连续，局部有断层。地表为山地，允许陷落。

### 2. 矿块的构成要素及采准巷道布置

如图 3-21 所示，矿块通常沿走向布置。

#### (1) 阶段高度

一般保证工作面斜长为 40 ~ 60m，多数为 30m。阶段高取决于工作面斜长，斜长越大，采准工作量越小，而工作面斜长主要受顶板岩石稳固性、电耗有效运距离的限制。

#### (2) 矿块长度

由于长壁工作面是连续推进的，对矿块长没有严格要求。矿块长度变化范围一般为 50 ~ 100m，最大可达 200 ~ 300m。

#### (3) 阶段运输平巷布置

可布置在矿层中或底板的岩石中，当矿体底板起伏不平，断层等地质破坏的多，地压大时，一般都将运输巷道布置在底板岩石中。

该矿阶段运输巷道采用双巷布置，每隔 150m 用一条联络巷道贯通运输巷道与装车巷。

#### (4) 矿石溜井

沿装车巷道每隔 5 ~ 6m，向上掘进一条矿石溜井，并与采场下部切割平巷贯通。矿石溜井的断面为  $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$  左右，暂时不用的矿石溜井可作为临时通风和行人通道。

#### (5) 安全道

每隔 10m 左右开掘一条安全道，并与上部阶段平巷联通。它是上部行人通风运料的通道，断面为  $1.5\text{m} \times 1.8\text{m}$ 。

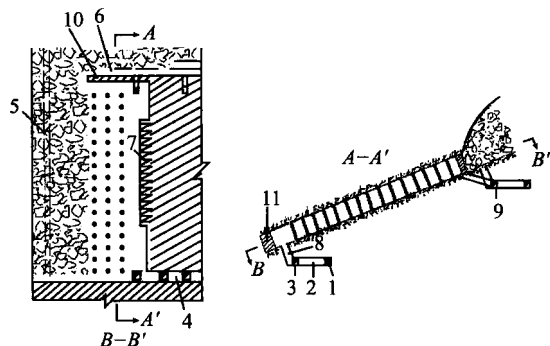


图 3-21 长壁式崩落采矿法

1—阶段平巷；2—联络巷道；3—装矿平巷；4—切割平巷；5—切割天井；6—通风安全道；7—炮孔；8—矿石溜井；9—上阶段装矿平巷；10—顶柱；11—矿体

3. 切割工作

切割工作包括掘进切割平巷和切割天井。

(1) 切割平巷

在采场下部边界沿走向掘进，并且与每个矿石溜井都贯通。切割平巷宽 2m，高等于矿层厚度。一是作为崩矿自由面，二是作为安放电耙绞车和行人、通风的通道。

(2) 切割天井

切割天井又称切割上山，一般位于矿块的一侧，联通下部矿溜子与上部安全道。切割天井宽 2~2.4m，高度等于矿层厚度。

4. 回采工作

(1) 回采工作面形式

工作形式可有二种，即直线式和阶梯式。常用直线式，有利于顶板管理，各个作业面互不干扰，工效较高。

(2) 落矿

壁式崩落法用浅孔落矿，通常用 YT-25，01-30 型等轻型气腿式凿岩机，炮孔深度通常为 1.2~1.8m，最小抵抗线  $W = 0.6 \sim 1.0m$ 。常用硝铵炸药，采用火雷管起爆。

(3) 采场运搬

多数矿山用电耙出矿，电耙绞车安设在切割平巷或硐室中，随着回采工作面的进行，定期移动电耙绞车。

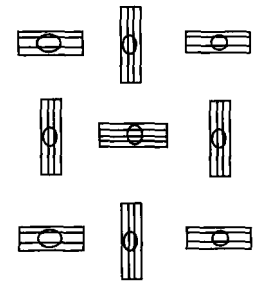


图 3-22 柱帽架设方式

(4) 顶板管理

为了正常回采，防止顶板冒落，在工作面通常采用木支柱支护，立柱直径为 18~22cm 的圆木，柱帽长 0.5m。柱帽的架设方式如图 3-22 所示。也有的采用金属支柱、杆柱、木垛等支护方式。

随着长壁工作面的向前推进，顶板暴露面积逐渐加大，顶压也越来越大，当顶压达到一个危险界限时，就有可能压断大量支柱，使工作面顶板冒落，为了减少工作面顶压，保证回采工作正常进行，当工作面推进到一定距离以后，就应有计划地撤除采空区的支柱，把顶放下来，以破碎膨胀的崩落岩石支撑上部岩层。这项工作称为放顶（图 3-23）。

放顶的步骤如下：

1) 放顶之前，首先沿放顶线

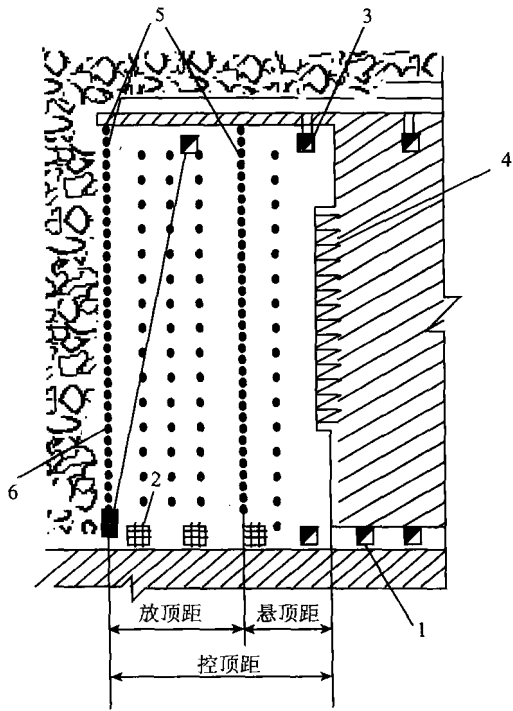


图 3-23 长壁式崩落法放顶工作示意图

1—放矿溜井；2—已封闭溜井；3—安全出口；4—长壁工作面；  
5—密集支柱；6—撤柱绞车钢绳

打一排密集切顶支柱。

2) 局部地方打放顶炮眼。孔深 1.6 ~ 1.8m, 炮孔倾角为 60°左右。装药后, 强制崩落顶板。当顶板能自然冒落时, 可不打放顶炮眼。

3) 撤柱。在放顶区内回收支柱工作, 一般是用上部阶段巷道的回柱绞车回收支柱, 采用功率为 15 ~ 20kW 慢动绞车, 按沿倾斜方向自下而上, 沿走向由远而近的顺序回柱。如果由于地压很大或其他原因, 不能用人工或机械回收支柱, 则用木钻在支柱上钻一小孔装入炸药或直接在支柱上捆绑炸药, 将支柱崩倒。

放顶参数包括如下 5 种。

1) 放顶距: 每次放顶的宽度称为放顶距, 放顶距变化的范围比较大, 一般为支柱棚子的正数倍。大约变化在 2.8 ~ 10m 之间。

2) 控顶距: 当放顶以后, 保证留的能够维持正常回采工作的最大宽度, 称为控顶距。一般为 2 ~ 3 排支柱的距离。

3) 悬顶距: 顶板暴露的宽度称为悬顶距。悬顶距 = 放顶距 + 控顶距。

(5) 通风

长壁工作面的通风条件比较好, 新鲜风流由下阶段平巷经人行井、切割平巷进入到工作面, 清洗工作面以后, 污风经上部安全道排至上部阶段平巷。

### (三) 壁式崩落法的适用条件及评价

#### 1. 适用条件

- 1) 矿体倾角一般小于 35° ~ 40°, 最好小于 30°, 矿体倾角变化不大;
- 2) 矿体厚度一般小于 3 ~ 4m, 多用在小于 2m 的矿体;
- 3) 矿体顶板应易崩落, 底板比较平整, 否则影响耙矿;
- 4) 矿体规模比较大, 连续性较好, 有利于长壁工作面的推进;
- 5) 要求地表及围岩允许陷落;
- 6) 对矿石的稳固性不限。

#### 2. 主要优点

①采准巷道布置简单; ②生产能力大, 劳动生产率高; ③可以及时处理采空区; ④通风条件好; ⑤有可能进行选别回采和手选 (废石丢入采空区); ⑥有利于实现机械化作业。

#### 3. 主要缺点

①木材消耗量大 (每 1kt 矿消耗 10m<sup>3</sup> 以上木材); ②支护工作劳动强度大; ③回采工艺、顶板管理比较复杂; ④当矿床地质构造比较复杂时安全性比较差。

#### 4. 主要技术经济指标

①矿块生产能力: 100 ~ 150t/日; ②炸药消耗: 0.3kg/t; ③坑木消耗: 10 ~ 11m<sup>3</sup>/kt; ④采矿工效: 5 ~ 8t/工·班; ⑤贫化率: 4.6% ~ 5.5%; ⑥损失率: 22% ~ 30%; ⑦采切工程量: 30 ~ 40m<sup>3</sup>/kt; ⑧坑木回收率: 34.6%。

## 第五节 矿柱回采和空区处理

### 一、矿柱回采

#### (一) 矿柱回采的重要性

矿块分两步回采的采矿法中,矿房回采之后残留矿柱矿量占矿块矿量的 20% ~ 50%。若不及时回采,就会导致地压灾害,不仅会造成人员、设备事故,往往也会使几个阶段的资源全部损失,造成资源浪费。因此在回采矿房的同时,就应当有计划地及时回采矿柱。

#### (二) 矿柱的回采方法

回采矿柱的方法,主要依据已采矿房的存在状态来选择。

##### 1. 采完的矿房已充填

此时常用分段崩落法或充填法来回采矿柱。当用充填法回采时,矿柱回采与矿房回采可在同一阶段内进行;当用崩落法回采矿柱时,应考虑围岩崩落的不同影响,与回采矿房同一阶段或落后一个阶段回采矿柱。

一般都是先采顶底柱(指上阶段留下的底柱和本阶段的顶柱),后采间柱。

##### 2. 采完的矿房未充填(敞空矿房)

敞空矿房一般用大爆破方法来回采矿柱,可分为用浅孔大爆破、深孔大爆破和药室大爆破回采 3 种。

##### (1) 浅孔大爆破方法回采矿柱

回采上阶段底柱和本阶段顶柱时,可在上阶段运输巷道中,打上向和下向放射状或扇形炮眼。间柱部分可在天井和联络道中打浅眼。全部炮眼打完后,同时爆破,崩落的矿石借自重,经本阶段的漏斗放出(图 3-24)。

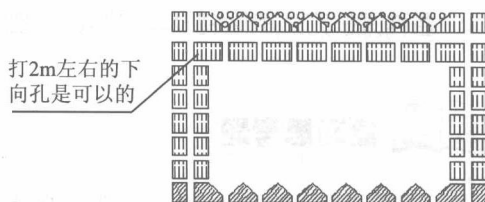


图 3-24 浅孔大爆破方法回采矿柱

##### (2) 深孔大爆破方法回采矿柱

深孔大爆破方法回采矿柱适用于急倾斜厚和极厚的矿体。具有回采强度大,劳动生产率高,施工工艺简单,工作安全等优点。

根据钻孔设备能力,在矿柱中适当的地方补充开掘一些凿岩巷道和凿岩硐室,并在其中打深孔。全部深孔打完后,分段同时爆破。一般上阶段底柱用扇形深孔,间柱用上向扇形深孔或中深孔。

##### (3) 药室大爆破回采矿柱

当没有合适的凿岩条件时,在矿柱中适当的地方开掘装药硐室,在其中安放炸药爆破。

### 二、采空区处理

#### 1. 处理采空区的重要性

随着矿石的采出和空区的形成,岩体的原始应力状态受到破坏,应力重新分布,出现应力集中、应力降低区。如果集中应力超过矿岩的极限强度时,轻则出现围岩移动、巷道变形;严重时将使矿柱压垮、矿房倒塌、巷道破坏,出现大规模的地压活动。同时伴随着

强烈的机械冲击波冲击，轻则影响个别采场或阶段，重则使整个矿山受灾停产。所以对矿房回采后出现的空区必须及时加以处理。

## 2. 处理采空区的方法

处理采空区常用的方法有3种，即崩落围岩法、充填空区法和封闭空区法。

### (1) 崩落围岩法

就是利用崩落下来的围岩充填采空区，使之形成一个缓冲保护岩石垫层，防止上部大量岩石突然崩落时，气浪冲击和机械冲击对巷道设备和人身的危害。

### (2) 充填空区法

依靠充填体支撑围岩，以减缓围岩的移动速度，保持围岩的相对稳定。充填方法可分为干式充填、水砂充填及尾砂充填。

### (3) 封闭空区法（隔绝法）

在通往采空区的巷道中砌筑一定厚度的隔墙，使空区围岩崩落后产生的气浪得到缓冲，以此来防止冲击气浪对人、巷道等的伤亡破坏。

## 小 结

掌握采矿方法的分类及每一大类采矿方法的特点。空场采矿法重点是房柱法、浅孔留矿法、分段凿岩阶段矿房法；充填法重点是水砂充填法；崩落法重点是无底柱分段崩落法。对上述采矿方法的采准工作、切割工作，回采工艺要注意区别，重点掌握。了解上述采矿方法的适用条件和评价。

各种采矿方法的区别及其采准、切割工作内容，回采工艺过程。



## 复习思考题

1. 采矿方法通常依据什么进行分类？分为哪3大类？各自特点如何？
2. 图示矿块沿走向的布置。
3. 试对全面法和房柱法进行比较。
4. 简述浅孔留矿法的开采工艺过程。
5. 浅孔留矿法在矿房内留矿的作用是什么？留矿带来什么后果？
6. 画出分段凿岩阶段矿房法的三视图，并说明其开采过程。
7. 分段凿岩阶段矿房法形成切割槽的方法有哪些？
8. 说明水砂充填法的充填工艺过程。
9. 在水砂充填法中，在充填料上铺设混凝土底板的作用是什么？
10. 对长壁式崩落法，何为放顶？如何放？
11. 简述无底柱分段崩落的特点。
12. 无底柱分段崩落法回采进路通常交错布置，画图说明其原因。
13. 能在工作面进行手选的采矿方法有哪些？
14. 为什么要进行矿柱回收和空区处理？

## 第四章 露天开采简介

### 本章导读

掌握露天开采的常用名词术语及露天开采工艺过程，了解露天开采的开拓方法及露天开采境界中有关剥采比的概念。

当矿体埋藏较浅或在地表有露头时，可以在露天条件下形成露天采场并采出矿石。和地下开采相比，露天开采具有下列优点：

1) 建设速度快。建设一个大型露天矿一般需要1~2年时间，而建设一个相同规模的地下矿需要增加1倍的时间。

2) 劳动生产率高。金属露天矿能采用大型、特大型高效率的机械化采挖机械，作业条件好，劳动生产率一般是地下开采的3~5倍。

3) 开采成本低。露天开采的成本只为地下开采的1/2或更少。但随开采深度的增加，成本会逐渐增大。

4) 矿石损失与贫化小。露天开采损失与贫化一般为3%~9%。而地下开采通常为5%~15%，甚至更高。

5) 作业条件好，生产安全可靠。露天开采在阳光下作业，工作环境、温度、湿度易于控制，通风良好，安全性比地下开采有很大程度的提高。

与地下开采相比，露天开采的缺点是：

1) 初期投资大。露天开采占地面积大，应用大型机械化设备，同时需要剥离大量的岩土，剥离费比较高，增加了初期的投资。

2) 环保条件差。由于露天开采的矿坑面积大，剥离的大量岩土需找地方堆放。因此，露天开采需要占用大面积土地，造成大面积土地植被遭到破坏，特别是剥离的岩土复垦绿化比较困难。

3) 工作条件受气候影响较大。由于是露天作业，工作环境受气候的影响比较大，如暴雨、飓风、严寒等恶劣气候条件，无论对人还是设备都会造成巨大的影响。

总体而言，露天开采无论从技术还是经济上都有明显的优越性。因此，凡具备露天开采条件的矿山，应优先选用露天开采方法。

### 第一节 露天开采的基本概念

#### 一、露天开采常用名词术语

##### 1. 露天采场

采用露天开采的方法开采矿石，在空间上形成的矿坑，是露天开采穿爆、采装及运输



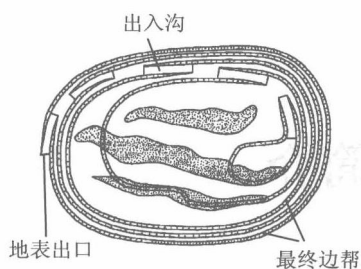


图 4-1 露天开采的露天坑

设备和人员工作的场所。

## 2. 山坡露天矿

矿体赋存于地平面以上或部分赋存于地平面以下，露天采场没有形成封闭的矿坑，位于地平面以上部分的露天采场称为山坡露天矿，如图 4-1 所示。

## 3. 深凹露天矿

露天采场位于地平面以下，形成封闭圈。位于封闭圈以下部分的露天采场称为深凹露天矿，如图 4-2 所示。

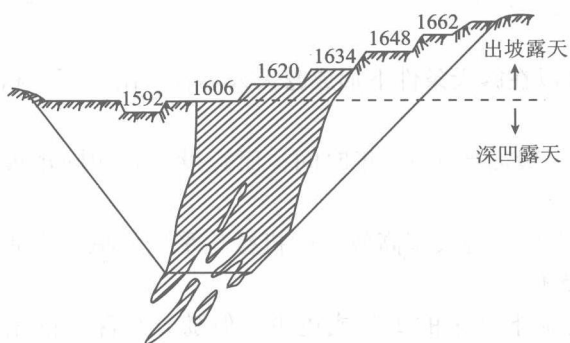


图 4-2 山坡露天和深凹露天示意图

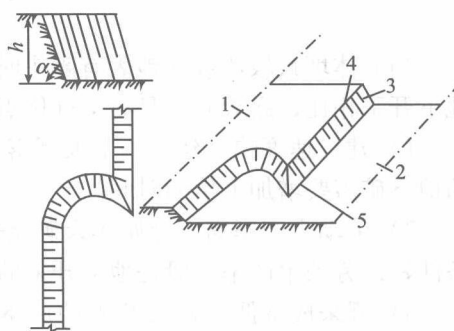


图 4-3 台阶要素图

- 1—上部平盘；2—下部平盘；3—台阶坡面；  
4—台阶坡顶线；5—台阶坡底线  
 $h$ —台阶高度； $\alpha$ —台阶坡面角

## 4. 台阶

露天开采过程中，露天矿场被划分为若干具有一定高度的水平分层，这些分层称为台阶。分层的垂直高度为台阶高度，台阶的上平面称为上部平盘，台阶的下平面称为下部平盘，连接上下平盘的坡面称为台阶坡面，坡面与水平面的夹角称为坡面角。台阶坡面与下部平台的交线称为坡顶线，台阶坡面与下部平台的交线称为坡底线（图 4-3）。

## 5. 露天开采境界

露天矿开采终了时一般形成以一定的底平面、倾斜边帮为界的一个斗形矿坑，即露天境界。露天采境界的底平面称露天矿场的底。露天开采境界四周表面部分称露天矿场边帮（由台阶组成）；位于开采矿体上盘的边帮称为顶帮或上盘边帮；位于开采矿体下盘的边帮称为底帮或下盘边帮，位于两端的称端帮；有工作设备在上进行穿爆、采装作业的边帮称为工作帮，否则称为非工作帮；全面完成工作的边帮称为最终边帮。

## 6. 工作平盘与非工作平盘

工作帮上各台阶的水平部分称为工作平盘，在其上布置穿孔、采装和运输等主要设备；非工作帮上各台阶的水平部分称为非工作平盘，按用途分为清扫平台、安全平台和运输平台。

## 7. 工作帮坡线与工作帮坡角

通过工作帮最上一个台阶和最下一个台阶的坡底线的连线称为工作帮坡线，工作帮坡

线与水平面的夹角称为工作帮坡角。

8. 最终边坡线与最终边坡角

非工作帮上最上一个台阶的坡顶线与最下一个台阶坡底线的连线称为最终边坡线，其与水平面的夹角称为最终边坡角。

9. 采区

采区是指位于工作平盘上的凿岩、采装、运输等设备工作的区域。沿台阶走向将某工作平盘划分为几个相对独立的采区，每个采区又称为采掘带。

二、露天开采程序

从露天采场采出矿石和岩石的工作统称为露天矿山工程。露天矿山工程按施工对象分为剥岩工程和采矿工程，按施工形式分为掘沟工程和扩帮工程。

1. 剥岩工程和采矿工程的进行程序

遵循“采剥并举、剥离先行”的方针，初期要先剥离岩土，后采矿；后期剥离工作和采矿工作同时进行。对同一水平而言，剥离工作在时间和空间上都要超前采矿工作。

2. 掘沟工程和扩帮工程的进行程序

先掘出入沟，即由本水平向下部新水平开挖的一段倾斜的梯形沟段称为出入沟；到达一定深度（台阶高度）再开挖一定长度的梯形段沟称为开段沟（图 4-4）。随着开段沟的形成，接下来开始扩帮。当一个新水平扩帮工程推进到一定距离后，便可进行下一水平的掘沟和扩帮工作。各水平的延深都按开掘出入沟—开段沟—扩帮这样的程序进行，由单一水平向多水平发展，直至露天矿最底部为止。

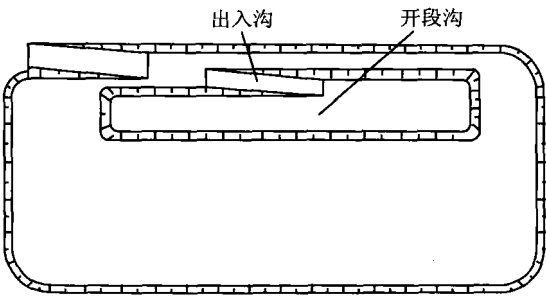


图 4-4 出入沟与开段沟示意图

第二节 露天生产工艺

露天生产工艺主要包括穿爆工作、采装工作、运输工作和排土工作 4 项。

一、穿爆工作

1. 穿孔工作

是露天矿生产工艺的重要环节之一，穿孔速度和炮孔质量对爆破、采装以及破碎等各项作业都有影响。穿孔费用约占矿岩开采成本的 10% ~ 20%。目前露天矿常用的穿孔设备有潜孔钻机和牙轮钻机两类。

(1) 潜孔钻机

潜孔钻机（图 4-5）是一种连续钻进的回转冲击式钻机。它在穿孔过程中风动冲击器跟随钻头一起潜入孔内，称为潜孔凿岩。

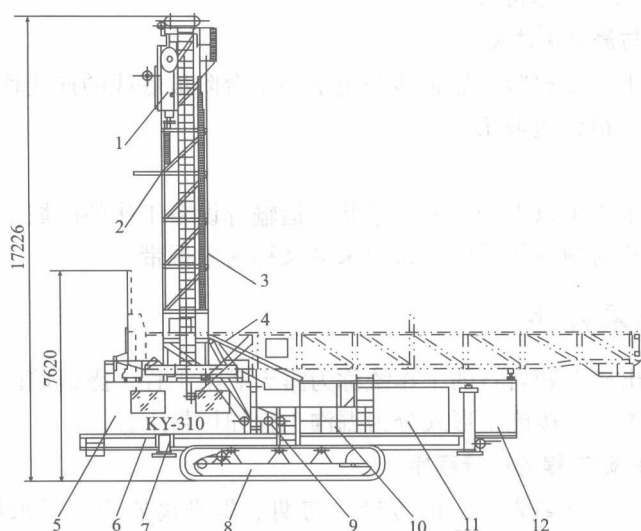


图 4-5 KQ-200 型潜孔钻机

1—钻机装置；2—回转机构；3—加压提升系统；4—钻具；5—空气增压净化装置；6—司机室；  
7—平台；8、10—千斤顶；9—履带行走机构；11—机械室

潜孔钻机按吨位和穿孔直径不同分为：轻型潜孔钻，自重小于 10t，穿孔直径 100mm 左右，多用于中小型露天矿；中型潜孔钻，自重 10~15t，穿孔直径 150mm 左右，适用于中硬或硬岩中穿孔；重型潜孔钻，自重 30t 左右，穿孔直径 200mm 以上，用于硬岩或极硬岩石穿孔，适用于大型露天矿。



图 4-6 KY-310 型牙轮钻机外形

## (2) 牙轮钻机

牙轮钻机（图 4-6）穿孔时，借助推压机构和回转机构向钻头施加轴向压力，使钻头的轮齿压入岩石，在钻具回转时牙轮滚动作用下，使轮齿切削孔底岩石而形成炮孔。破碎的岩石通过钻杆中心孔从钻头中部喷出压气排至孔外。

牙轮钻机能用于各种硬度的矿岩。在软至中硬岩层中，钻头直径为 100~120mm。大型露天矿钻头直径可达 380mm。牙轮钻机还广泛用于地质勘探和水井开凿工程中，以及井下矿井用爆破法掘进天井和垂直漏斗后退式采矿方法中穿凿炮孔。牙轮钻机优点是效率高，比潜孔钻机高 1 倍左右。其缺点是钻头易磨损、寿命短。目前，大型矿山都已大量采用牙轮钻机。

## 2. 爆破工作

露天爆破属于深孔爆破，其爆破参数和爆破规模都比较大。

深孔布置方式分垂直深孔（图 4-7a，交错布

置)与倾斜深孔(图4-7b,平行布置)两种(图4-7)。倾斜深孔在爆破质量及安全性等方面要优于垂直深孔。目前在露天穿孔设备中,只有潜孔钻机可以打倾斜深孔。主要爆破参数如下。

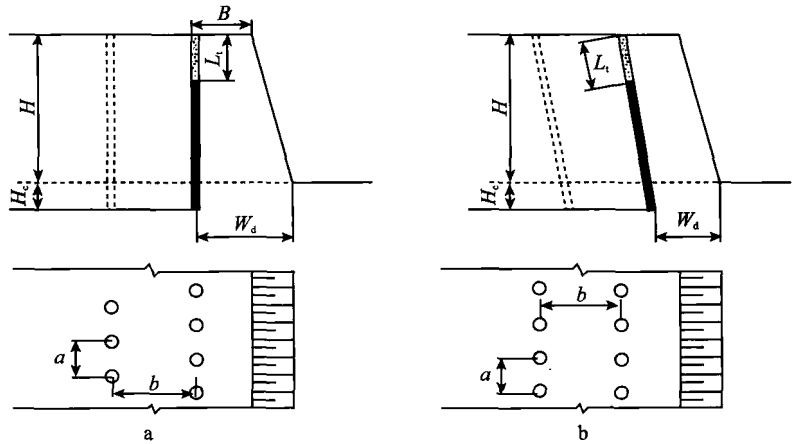


图4-7 露天深孔布置方式  
 $H$ —台阶高度;  $H_c$ —超深;  $W_d$ —底盘抵抗线;  $L_c$ —填塞长度;  
 $b$ —排距;  $B$ —安全距离;  $a$ —孔距

- 1) 炮孔直径  $d$ : 潜孔钻机的直径为 150 ~ 200mm; 牙轮钻机为 250 ~ 310mm。
- 2) 孔深  $L$  和超深  $h_0$ : 炮孔深度  $L = h + h_0$ 。台阶高度  $h$  在矿山设计定型之后是个定值; 超深  $h_0$  是指深孔超出台阶高度的深度, 主要作用是降低装药高度或装药中心, 以克服台阶底部阻力, 避免和减少根底。
- 3) 底盘抵抗线  $W_d$ : 是指炮孔中心至台阶坡底线的水平距离。底盘抵抗线的值过大, 则残留根底将会增多, 也将增加后冲; 过小, 则不仅增加了穿孔工作量, 浪费炸药, 而且作业不安全, 可根据穿孔机安全作业条件或按每个炮孔的装药条件进行计算求得。
- 4) 孔距  $a$  与排距  $b$ : 孔距  $a$  是指同排的相邻两炮孔中心线间的距离; 排距  $b$  是指多排爆破时, 相邻两排炮孔之间的距离。

### 3. 多排孔微差爆破技术

多排孔微差爆破一般是指多排孔各排之间以毫秒级微差间隔时间起爆的爆破。与单排孔齐发爆破相比, 多排孔微差爆破一次爆破量大, 减少爆破次数; 大块率低, 爆堆集中, 根底和后冲减少, 爆破效果好; 降低炸药单耗, 提高每米炮孔崩矿量; 可降低地震效应, 减少爆破对边坡和附近建筑物等的危害。

露天台阶深孔爆破时, 在台阶坡面前方留有一定厚度的渣堆, 一是利用渣堆阻力延缓岩体的运动和内部裂缝张开的时间, 从而延长爆炸气体的静压作用时间; 二是利用运动岩块的碰撞作用, 使动能转化为破碎功, 进行辅助破碎, 从而进一步改善爆破效果。这种爆破技术称为多排孔微差爆破技术。

另外露天矿还应用预裂爆破、光面爆破和缓冲爆破等技术, 在此不作介绍。

## 二、采装工作

### 1. 采装设备

露天矿常用机械方法装载岩矿，常用的装载机械有单斗挖掘机和前端式装载机（图4-8）。

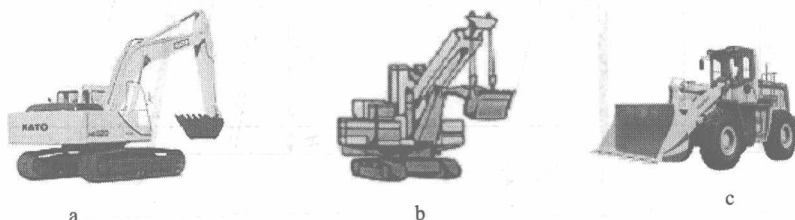


图4-8 露天矿常用采装设备

a—履带式反向电动挖掘机；b—履带式正向电动挖掘机；c—前端式装载机

#### (1) 单斗挖掘机

按铲斗形式分为正铲、反铲、索斗铲；按使用的动力分为电铲、柴油铲和液压铲；按行走机构分为履带式、迈步式和轮胎式。国内金属矿露天矿多采用履带式电动挖掘机。

#### (2) 前端式装载机

是一种多功能的装载设备。除了能向运输容器装载外，还能自铲自运，牵引货载及清理工作面等工作，分为轮胎式和履带式，前者应用最多。

### 2. 采装方式

#### (1) “一爆一采”

即爆破后爆堆全宽由挖掘机一次采装完毕，采掘带宽度即为爆堆宽度（图4-9b）。这种方式每次爆破量小，相应增加了爆破次数，挖掘机避炮和移道时间增多，纯工作时间减少，采掘效率低。

#### (2) “一爆两采”

一次爆破矿岩量大，在爆堆全宽上分为两次采装（图4-9a），从而提高挖掘效率。

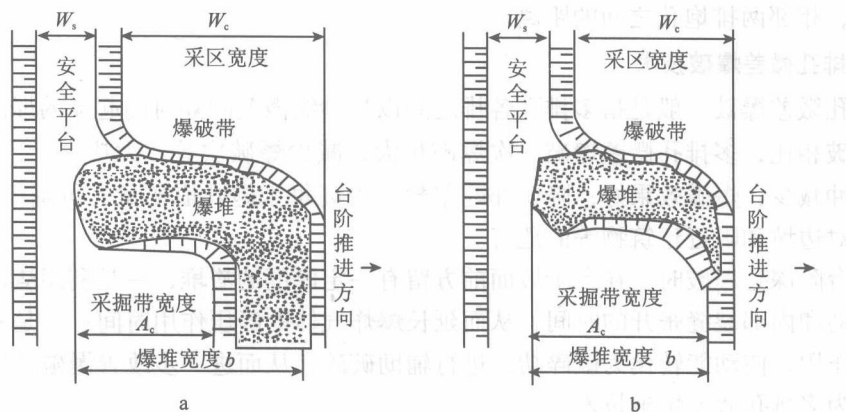


图4-9 采装方式示意图

a——爆两采；b——爆一采

### (3) “一爆多采”

在采用多孔微差爆破时，一次爆破量很大，在爆堆全宽上分成若干个采掘带，分次进行采掘。这种方式能更充分地发挥挖掘机的能力，提高生产能力，因此在多孔微差爆破的露天矿得到广泛应用。

## 三、运输工作

露天矿运输工作是指将露天采场的矿岩分别运送到选矿厂和排土场，同时把所需材料设备运送到采矿场。国内露天矿常用的运输方式有：铁路运输、公路运输、平硐溜井运输、斜坡卷扬运输和架空索道运输。

### 1. 铁路运输

铺设轨道，用电机车牵引矿车在轨道上运行进行运输的方法。

#### (1) 对运输线路的要求

一般大型露天矿用准轨，小型露天矿用窄轨，中型露天矿根据具体情况定。要求线路一要具有一定的通过能力，保证完成运载任务；二要使运输线路的质量和坡度能确保运输工作的正常安全运行。

#### (2) 运输设备

铁路运输设备包括牵引设备和承载设备。牵引设备分为电机车、内燃机车和蒸汽机车，大型矿山常用电机车，小型矿山3种牵引设备都有；承载设备为矿车，准轨铁路运输使用的矿车为载重量为60t和100t的自卸式翻斗车，窄轨铁路矿车类型较多，容积一般为4~10m<sup>3</sup>。

### 2. 公路运输

修筑公路，用汽车进行运输的方法。

#### (1) 公路质量

要求公路坚固，能承受较大的载荷，路面平坦，既有利于汽车运行速度的提高，又能保证轮胎不打滑，公路质量不因酷暑降雨和冰冻而改变，有合理的线路坡度、曲率半径和必须的路面宽度，以保证顺利行车。同时公路要加强养护，以便延长汽车的使用寿命。

#### (2) 公路运输设备

金属露天矿常用的运输设备为机械传动的普通自卸汽车和电力传动的电动轮自卸卡车。我国小型露天矿使用载重量8t以下的普通自卸汽车；大中型露天矿使用8~60t的自卸汽车；大型露天矿使用100~200t的电动轮自卸卡车。

电动轮卡车与普通自卸汽车相比较，传动系统简单可靠，爬坡能力强，运输效率高，运输成本低。因此电动轮卡车在大型露天矿的使用日趋广泛。

#### (3) 与铁路运输的比较

优点是汽车运输与挖掘机比较容易有效配合，灵活性大，能更好地发挥采装设备的生产能力，可使台阶上同时作业的挖掘机台数增加，从而提高矿山生产能力；汽车运输爬坡能力大，适应性强；因公路坡度大，故修建长度比铁路短30%~50%，因而基建时间短，而且单位长度修建费用低，总投资少；免去繁重的线路铺设与移动作业及复杂的运输管理工作，从而减小劳动强度和降低劳动力消耗。缺点是对公路质量要求高，否则会使轮胎磨损严重，缩短汽车寿命；公路运输吨千米运输费用高。

## 四、排土工作

露天矿的剥离量为采矿量的几倍或十几倍，并将剥离的表地土及围岩运送到专门设置的场地进行排弃，在露天开采中接受排放岩土的场所称为排土场。在排土场内堆置岩土的作业称为排土工作。

### 1. 排土场位置的选择

排土场需占用大量土地，产生的粉尘和污水会污染环境。排土场分内部和外部两种：前者设于采场内部，运距短、成本低；后者设于露天开采境界之外，应选择工程水文地质条件好、不妨碍矿山长远发展的地方，尽量靠近采场，少占土地，并位于居民点的下风侧，对将来还可利用的废石，要考虑回收的方便。

### 2. 排土方法

按所用设备的不同，常用的排土方法有以下6种。

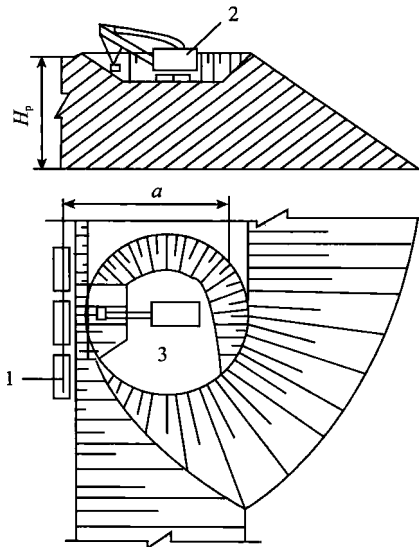


图4-10 挖掘机排土示意图

1—排土列车；2—挖掘机；3—受土坑  
 $a$ —移道步距； $H_p$ —排土台阶高度

1) 推土机排土：公路运输的露天矿中广泛采用。有时也用于铁道运输。工艺简单，堆置高度大，硬岩可达100m以上，推土机推土量一般约占排弃总量的20%~40%。

2) 推土犁排土：用于铁路运输。推土犁由机车牵引沿排土线轨道行驶，张开犁板将列车卸下的废石向外推排。成本低，但移道频繁，线路质量差，排土高度低。

3) 挖掘机排土：挖掘机站在排土台阶的中间平台上，将列车卸下的废石向前、后和外侧转排、堆垒（图4-10）。排土高度最大可达40~50m。排土带宽度接近挖掘机的卸载半径与挖掘半径之和。该法移道步距大，线路质量好，堆置高度大，雨季生产有保证，但设备费用高。

4) 悬臂排土机排土：带式输送机设在可走行的桁架悬臂上，进行上排或下排，排土带的宽度和高度取决于悬臂长和倾角。本法广泛用于连续和半连续开采工艺。

5) 前装机排土：可用于外部排土场。

6) 拖拉铲运机或索斗铲排土：常用于内排土场。

## 第三节 露天矿床开拓与开采境界确定

### 一、露天矿床开拓

露天矿开拓就是自地表挖掘一系列露天沟道至露天矿场地内各个矿体，建立地面与生产台阶的运输联系，从而形成露天采场到选矿厂或碎矿厂、排土场或工业广场之间的运输

系统，以保证剥采工作的正常进行。

根据露天矿的运输方式，将露天矿床开拓方法分为公路运输开拓、铁路运输开拓、联合运输开拓 3 种，联合运输开拓又包括公路—铁路联合开拓、公路（铁路）—胶带输送机联合开拓、公路（铁路）—箕斗联合运输开拓、公路（铁路）—平硐溜井联合运输开拓几种具体形式。

1. 公路运输开拓

最常用的设备是自卸汽车，也称为汽车运输开拓。

与铁路开拓运输相比其优点是坑线形式较为简单，开拓坑线较短，对地形的适应能力强，可以设多个出入口进行分散运输和分散排土，便于采用移动坑线开拓。从而有利于强化开采，提高露天矿的生产能力。缺点是吨千米运输成本高，且随着开采深度的增加，汽车运输成本显著增加。

公路运输开拓的布线形式主要有回返式和螺旋式两种，如图 4-11 和图 4-12 所示。

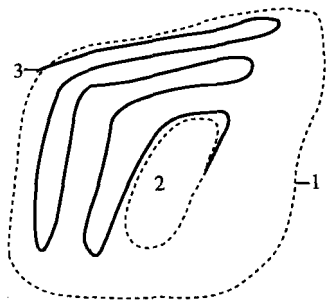


图 4-11 露天矿回返干线开拓

1—上部开采境界；2—底平面；3—回返式公路

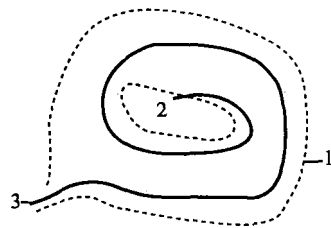


图 4-12 露天矿螺旋干线开拓

1—上部开采境界；2—底平面；3—螺旋式公路

2. 铁路运输开拓

铁路运输开拓线路较为复杂，爬坡能力小，开拓展线比汽车运输长，转弯半径大（大于 100~200m），灵活性低，因而掘沟工程量和露天边帮的附加剥岩量增加，新水平准备时间较长。其优点是设备运输能力大，运输设备坚固耐用，吨千米运输比汽车运输低，约为汽车的 1/4~1/3。

铁路运输坑线常采用如下几种布线方式（图 4-13）。

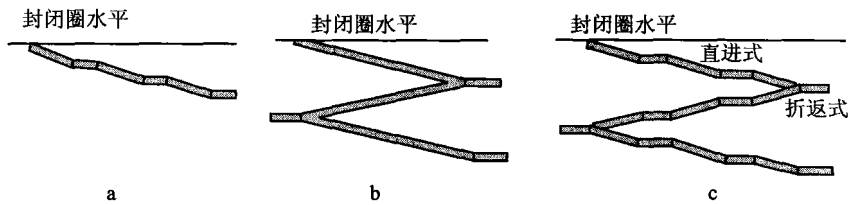


图 4-13 铁路运输坑线布置方式

a—直进式；b—折返式；c—直进折返式



1) 直进式: 直进式是最理想的布线形式, 适宜于开采深度不大, 采场走向长的露天矿。

2) 折返式: 适用于矿体埋藏深, 走向长度短的露天矿。

3) 直进 - 折返式: 几个台阶坑线为直进式, 再折返。改善了列车运行条件, 缩短运行周期, 提高了运输效率。

### 3. 联合运输开拓

公路运输具有开拓机动灵活, 爬坡能力大等优点, 但受到合理运距的限制; 铁路运输开拓往往受到开采深度的限制。为此, 露天矿常采用联合运输开拓。

#### (1) 铁路 - 公路联合运输开拓

一般采场上部采用铁路运输, 而深部采用公路运输。采用铁路 - 公路联合运输开拓时, 其经济效益比单一铁路运输开拓可以提高 13% ~ 16%, 挖掘机效率提高 20% ~ 25%, 从而提高了综合开采强度。

#### (2) 公路 (铁路) - 破碎站 - 胶带输送机联合开拓 (胶带运输开拓)

它是近年来发展起来的一种高效率、连续 (半连续) 运输的开拓方式 (图 4 - 14), 并成为大型露天矿开采的一种发展趋势。它借助设置在露天采场内或露天开采境界外的胶带式运输机, 把矿岩从露天采场运出。

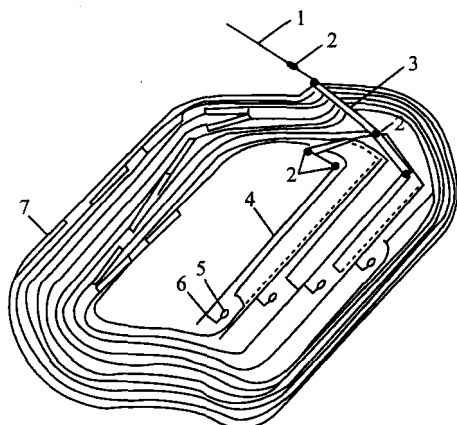


图 4 - 14 胶带运输开拓示意图

1—地面带式输送机; 2—带式输送机转载点; 3—边帮带式输送机; 4—胶带; 5—移动式破碎站; 6—胶带式运输机; 7—露天境界

#### (3) 公路 (铁路) - 箕斗联合运输开拓 (箕斗运输开拓)

该开拓系统包括: 采场内的公路 (铁路) 运输, 转运站, 箕斗斜坡道、地面卸载站和提升装置 (图 4 - 15)。这种开拓方法的优点是能以最短的距离克服较大的高差, 使运输周期大大缩短; 减少投资、建设快、经营费用低; 设备简单、便于维修。缺点是装载站的结构庞大、移动复杂, 矿岩需

要经过几次装载, 管理较复杂。一般用于中小型露天矿。

#### (4) 公路 (铁路) - 平硐溜井联合开拓 (平硐溜井开拓)

这种形式一般在开采山坡露天矿时使用 (图 4 - 16)。矿岩由汽车或机车运送至溜井, 再通过溜井下放到平硐, 从平硐中由放矿机放矿至机车或汽车, 运至卸载地点。

其优点是可利用地形高差自重放矿, 系统地运营费用低; 缩短了与运输距离, 减少了设备的数量, 提高了运输设备的周转率; 溜井有一定的储矿能力, 可以进行生产调节。缺点是放矿管理工作要求严格, 放矿的粉尘影响作业人员健康。

## 二、露天开采境界的确定

露天开采境界的确定, 影响到整个矿山生产与效益。露天矿最终境界一旦确定, 就相

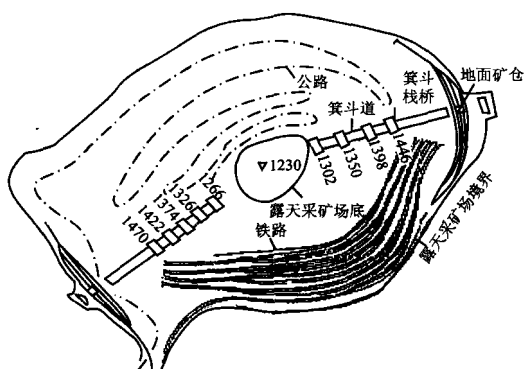


图 4-15 箕斗运输开拓示意图

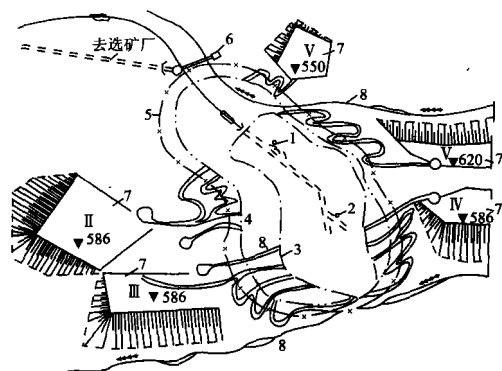


图 4-16 某矿平硐溜井开拓示意图

1—北部溜井；2—南部溜井；3—标高 190m 露天开采境界；4—标高 -2m 露天开采境界；5—爆破安全界限；6—粗破碎；7—排土场；8—小河

应地确定了可采矿量和剥岩量。其对矿山的生产规模和服务年限有重大影响,而且境界的大小还直接与矿山的基建投资、投产与达产时间、人员与设备数量、矿石的成本与效益等技术经济指标密切相关。合理地确定露天开采境界,是露天矿设计的一项重要工作。

露天开采境界确定的影响因素很多,而且对于不同的矿床条件,其影响程度不同,需对自然、技术组织及经济等诸多因素进行综合考虑。常用剥采比来确定露天开采境界。

### 1. 剥采比

剥采比（图4-17）是指露天矿开采过程中，为开采有用的矿物，剥离的废石量和采出的有用矿石量之比，即单位矿石所需剥离的岩石量。它包括：

1) 平均剥采比, 露天开采境界内的岩石总量  $V_p$  与矿石总量  $A_p$  之比。

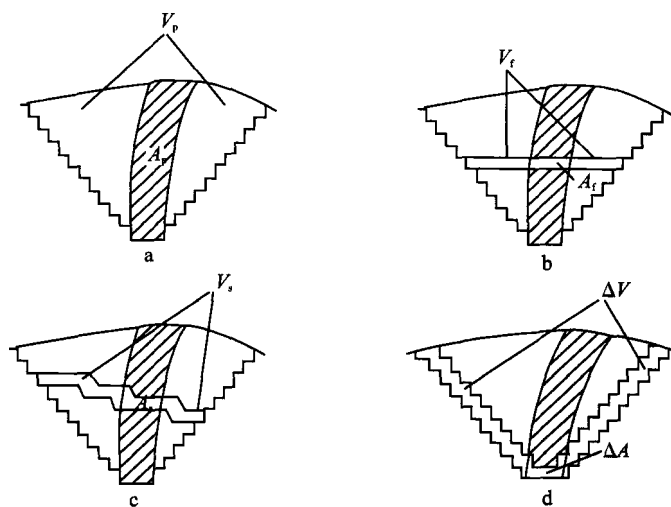


图 4-17 露天矿剥采比

a—平均剥采比; b—分层剥采比; c—生产剥采比; d—境界剥采比

2) 分层剥采比, 露天开采境界内某一水平分层的岩石量  $V_i$  与矿石量  $A_i$  之比。

3) 生产剥采比, 露天矿某一生产时期的剥离量  $V_s$  与所采矿量  $A_s$  之比。

4) 境界剥采比, 露天开采境界稍有增大时, 岩石增量  $\Delta V$  与矿石增量  $\Delta A$  之比。

5) 经济合理剥采比, 经济上允许的最大剥采比。经济合理剥采比  $n_e$  ( $\text{m}^3/\text{m}^3$  或  $\text{t/t}$ ) 可用原矿成本比较法计算, 公式是:  $n_e = (c - a)/b$ 。式中:  $c$  为地下开采的采矿成本或允许成本, 元/ $\text{m}^3$  (元/t);  $a$  为露天开采的纯采矿成本 (不包括剥离), 元/ $\text{m}^3$  (元/t);  $b$  为露天开采的剥离成本, 元/ $\text{m}^3$  (元/t)。

## 2. 露天开采境界的确定

确定露天开采境界的方法有 3 种:

1) 境界剥采比不大于经济合理剥采比。如兼用地下开采, 就要寻找露天开采与地下开采的合理分界, 使全矿床露天开采与地下开采的总经济效益最佳。

2) 生产剥采比不大于经济合理剥采比。如用容许成本控制露天矿开采, 则露天矿开采的经济效果, 在任何时候都不应劣于容许程度。

3) 平均剥采比不大于经济合理剥采比。适用于矿床和地表平行或近于平行的条件。确定露天开采境界的传统方法是: ①按采装、运输设备的规格和操作要求确定露天矿底部宽度。②确定露天矿的最终边坡角, 其大小必须满足边坡稳定和运输要求, 通常根据类似矿山的实测资料或通过边坡稳定性计算求得。③根据上述某一原则确定露天开采境界, 做出露天开采终了平面图。

## 小 结

掌握露天开采的常用名词术语及露天开采工艺过程, 了解露天开采的开拓方法及露天开采境界中有关剥采比的概念。

露天开拓方法及开采境界的确定是本章的难点。



## 复习思考题

1. 如何判定深凹露天和山坡露天?
2. 图示台阶及其构成要素。
3. 露天开采与地下开采相比有哪些优缺点?
4. 简述露天开采程序。
5. 说明露天开采工艺过程。
6. 露天矿爆破常用哪些爆破技术?
7. 简述露天矿开拓方法。
8. 画图说明什么是境界剥采比。

# 第二篇 选矿部分

## 第五章 选矿概述

### 本章导读

选矿是一门什么学科？它是如何形成和发展的？选矿在国民经济的地位和作用是什么？它与地质和采矿有哪些关系？选矿的基本过程和常用技术指标有哪些？选矿未来发展趋势如何？通过本章学习可以了解这些选矿的基本知识。

### 第一节 选矿的基本概念

#### 1. 选矿

选矿就是利用矿物的物理或物理化学性质的差异，借助各种选矿设备将矿石中的有用矿物与脉石矿物分离，达到使有用矿物相对富集的工艺过程，也称矿物加工、物理选矿和机械选矿。选矿学是研究矿物分选的学问，是一门分离、富集和综合利用矿产资源的技术科学。

#### 2. 岩石

岩石就是人们常说的石头，主要由矿物组成，例如花岗岩就是由长石、石英、云母等矿物组成的。因此，岩石是矿物的集合体。

#### 3. 矿物

在地壳中，由于地质作用所形成的天然单质或化合物统称为矿物。矿物是组成岩石或矿石的基本单元。例如，方铅矿（ $\text{PbS}$ ）、赤铁矿（ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）、自然金（ $\text{Au}$ ）等。

#### 4. 矿石

指在现有技术经济条件下，能够从中提取有用组分（元素、化合物或矿物）或利用其特性的自然矿物聚集体。包括金属矿石、非金属矿石以及有用的岩石。例如，磁铁矿石岩主要由磁铁矿和石英组成，若其中的磁铁矿含量超过 45% 时就可以被开采利用，这种磁铁矿石岩就称为铁矿石。

#### 5. 有用矿物

矿物的种类繁多，在众多的矿物中，能为国民经济利用的矿物，即是选矿所要选出的目的矿物，称为有用矿物或矿石矿物。

#### 6. 脉石矿物

那些与有用矿物伴生在一起的，目前国民经济尚不能利用的矿物，即是选矿所要抛弃的无用矿物，则称为脉石矿物。对煤炭而言，不能作为煤使用而以  $\text{SiO}_2$  为主要成分的矿石，称为矸石。

## 7. 矿产

矿产是指产于地壳中的、能被国民经济所利用的矿物资源。矿产实际上是经济学或者是商业上的名称。

## 8. 原矿

从采矿厂运送到选矿厂的矿石称为原矿。

## 9. 精矿

在选矿过程中选出的富集了有用矿物的有价产品，则称为精矿。金属矿物精矿是金属冶炼工业提取的原料，如铁精矿、铜精矿和金精矿等；非金属精矿，如石墨、硫黄、滑石、磷灰石、萤石、重晶石、方解石、长石，是电子、造纸、化工、石油和陶瓷等工业的原料。

## 10. 尾矿

抛弃的无价产品称为尾矿。

## 11. 中矿

在选别过程中得到的中间产品称为中矿。中矿的有用成分含量一般介于精矿和尾矿之间。中矿一般需要返回适当作业地点处理，或者进行单独处理。

## 12. 选煤

将煤和矸石分离，从而获得质量不同的产品的过程，称为选煤。煤的精矿为炼焦煤或燃料煤。

# 第二节 选矿的发展简史

人类利用矿物资源已有数千年历史，如自然金、自然铜、滑石、朱砂等的开采与利用。无论是公元前几千年的古埃及，还是中世纪的罗马帝国时代，或者是中国古代，由于科学技术水平整体落后，社会生产力低，对矿物资源的需求少，人类利用的矿物资源主要是通过手工作业从天然矿石中得到的（图 5-1）。如淘金、人工溜槽、手动跳汰筛、洗矿槽等原始重选方法及鹅毛粘油刮取浮在水面上的金粉等原始浮选方法。我国古代将原始的重选、浮选总结为“澄、淘、飞、跌”。这些手工作业虽然有近代“表层浮选”和“重选”的影子，但还算不上是一门工业技术，这种现象一直延伸到 19 世纪。

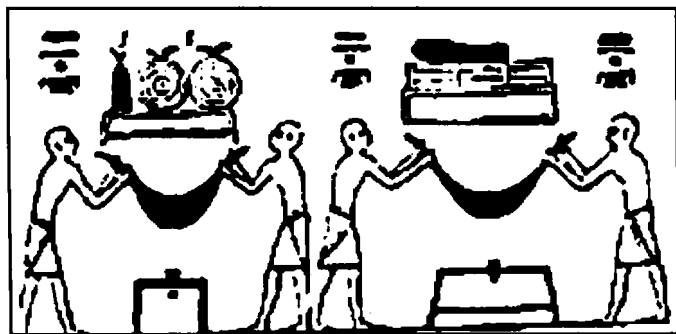


图 5-1 古埃及壁画上的用淘洗法富集黄金

19 世纪末至 20 世纪 20 年代,世界工业生产快速发展,对矿物原料的需求增大,加上 18 世纪产业革命的推动,使机械化成为可能。这就造成了“选矿”技术从古代的手工作业向工业技术的真正转变。近代大部分的选矿工艺与设备都属于这一时期选矿领域的技术发明,如颚式破碎机、球磨机、机械分级机,重选、电磁选的设备与工艺及浮选药剂、工艺与设备等。从那时起,选矿技术已成为一门人类从天然矿石中选别、富集有用矿物原料的、成熟的工业技术,并得到广泛应用。

近几十年来,选矿及相邻学科的科技工作者在选矿学科及交叉学科领域进行了大量的基础理论与工艺技术的研究。而且,由于相邻学科的发展,如电化学、量子化学、表面及胶体化学、紊流力学、生物工程、冶金学、材料科学与工程及计算机科学与技术,在选矿学科领域中的应用,形成许多新的学科方向和各种加工利用矿物资源的新技术。

当今,“选矿”一词已不能涵盖多数新的加工利用矿物资源的科学领域,已被“矿物加工”所替代。矿物加工学科无论从其学科基础,学科领域还是从研究对象方面远比传统选矿学科更广、更深。国外从 20 世纪 60 年代开始,就逐步采用“Mineral Processing”代替“Ore Dressing”。我国于 20 世纪 90 年代在国家教委招生目录上已将“选矿工程”专业更名为“矿物加工工程”专业。但是,在我国的矿山和现场或某些场合,“选矿”一词仍在使用。

### 第三节 选矿的任务及其在国民经济中的地位和作用

由于选矿可使矿石中的金属含量富集几倍至几百倍,而且在大多数情况下与冶炼过程相比,选矿成本低,因此在技术经济上有很大的优越性。通过选矿可以降低冶炼成本。由于脉石被大部分排除,减少了炉渣量,不仅降低了能耗,也相应地减少了炉渣中的金属损失,使冶炼回收率得以提高。选矿技术的应用和发展使矿石的工业品位的下限大幅度降低,这就使大量的原来被抛弃的脉石可变为可利用的资源,相应地增加了金属矿产的回收率。

因此,将矿石中的有用矿物和脉石矿物相互分离,除去有害杂质,充分而合理地利用国家矿产资源,是选矿的主要任务。

选矿在国民经济中占有重要地位。

我国铁矿石的地质储量比较丰富,但贫矿石很多。在仅有的少量富矿石中,约有 5% 的矿石因含杂质过高不能直接冶炼。除了矿石贫之外,其矿物颗粒嵌布细、组分复杂也给矿石的开发利用带来困难。矿石储量大,但“贫、细、杂”的特点决定了我国绝大多数铁矿石要经选矿处理。钢铁工业生产的实践表明,高炉炼铁实行“精料方针”,可以降低焦炭和石灰的用量,提高高炉利用系数。为此,在最佳选、冶经济效益的前提下,铁矿石必须经过选矿,尽量提高铁精矿品位。

在有色冶金工业中,由于有色金属和稀有金属矿产资源的品位大都很低,各种有用矿物与脉石间共生的关系更为复杂,选矿就显得尤其重要。对于难选共生矿的开发利用,为了充分利用有价成分或为下一工序提供理想原料,往往需要多种选矿方法的联合应用和采用选冶联合流程,即以选矿方法处理原矿,得到精矿或中间产品,然后用火法和湿法冶金对选矿产品进一步处理。采用合理的流程结构应能提高选矿、冶炼两个过程总的技术经济

效益。选矿也可作为冶炼工艺中的一个中间过程被采用，即将冶炼中间产品或最终产品（炉渣）用选矿处理。例如，我国金川有色金属公司冶炼厂现有的生产流程是将铜、镍混合精矿用电炉熔炼、转炉吹炼产出高冰镍，经过缓冷后，再破碎磨矿，用浮选法获得铜精矿和镍精矿，用磁选法得到合金，此后分别进入各自的冶炼系统提取金属铜、镍和贵金属。选矿用于其他冶金炉渣的处理方面也有成功的实例。

煤炭的分选是选矿技术在煤炭工业中的重要应用。选煤的主要任务就是除去原煤中的杂质，降低煤炭的灰分和硫分，提高原煤质量，适应用户需要，而且可以降低燃煤对大气的污染，保护环境。有资料表明，精煤灰分每降低1%，焦炭灰分可降低1.33%，而焦炭灰分每降低1%，炼铁焦比可降低2%，高炉利用系数可提高3%，同时，还可提高生铁的质量。

非金属矿物资源是化肥、陶瓷、建材、造纸、纺织、电子等工业部门的原料来源。天然的非金属矿物资源绝大多数也是多种矿物共生，不经过分选提纯也无法直接利用。如高岭土用于高级陶瓷和造纸工业时，对其中铁的含量控制极严，用作化肥原料的磷灰石中，氧化铝和氧化铁的含量一般不宜超过4%。其他供建材、电子等部门使用的矿物原料也都有一定的成分要求。

选矿中的物料分离技术包含有多种高效的方法，近年来已在不少领域推广应用。例如，在固体废料（包括工业和城市垃圾）的处理和金属的再生工业中，高效分离技术日益显示出它的优势；在化纤工业中采用分离技术可排除混入原料中的某些杂质（砂粒、玻璃屑等）；在粮食加工过程中高效分离技术可用于选种、除杂等。特别应当指出的是，目前在环境工程里用浮选法处理废水已卓有成效。

选矿过程离不开设备和检测技术。选矿技术水平和生产实践的发展促进了与之配套的机械仪表工业的发展，形成了一个选矿设备的制造分支。这些先进的仪器、设备用于选矿工业和科研活动又促进了选矿学科和技术的发展。

综上所述，国民经济的许多部门都离不开选矿这门技术科学。它的技术水平对许多经济部门产生较大的影响。选矿技术落后，会造成有用资源的损失浪费，选矿厂的产品成为无法利用的废物。反之，先进的选矿技术可以产生“一矿变多矿，一厂变多厂”的良好局面。随着科学技术水平的提高和各国对原料、能源需求量的增加，选矿学科的技术水平将不断提高，应用的范围将越来越广，发挥的作用也将越来越大。

## 第四节 选矿与地质、采矿的关系

### 一、选矿与地质的关系

在矿产勘查中，矿石的选冶试验研究成果是矿床技术经济评价的主要依据，是制定矿床工业指标的重要基础，是矿产综合利用、开发应用新矿产资源的手段，又是后续选冶试验或工业建厂设计的先导和平台。凡是有用组分品位低、有害组分含量高、工业上不能直接利用的矿产，必须进行选矿或冶金试验研究。此外，对于岩矿鉴定和重砂工作所需的单矿物的分离，选矿也是一个有效的手段。

在国土资源部门，矿产勘查各个阶段对选矿试验的要求也不同。

### 1. 普查阶段

工业上利用已成熟的易选（冶）矿产和工业利用尚未成熟的一般矿产，可以进行类比评价，不作选冶试验；对于组分复杂，矿物粒度细、在国内工业利用尚无成熟经验的难选（冶）矿产，应进行可选（冶）性试验或实验室流程试验。

### 2. 详查阶段

对生产矿山附近的、有类比条件的易选（冶）矿产，可以进行类比评价，不作选冶试验，否则，应进行可选（冶）性试验。一般矿产进行可选（冶）性试验或实验室流程试验。难选矿产如属国家急需，经上级部门同意，必须进行详查阶段工作，还应进行实验室扩大连续试验。

### 3. 勘探阶段

对生产矿山附近的、有类比条件的易选（冶）矿产进行可选（冶）性试验或实验室流程试验。一般矿产进行实验室扩大连续试验，难选矿产进行半工业试验。建设大型矿山必要时还要作工业试验。

## 二、选矿与采矿的关系

一般来说，选矿厂的原矿来自于采矿场，采出的矿石数量、品质决定了选矿厂的生产规模、选矿工艺流程及生产技术管理水平，同时也关系到选矿厂的经济效益。如果矿山是一个整体，那么，选矿和采矿从某种程度上就是“唇齿相依”的关系。

另外，有一些选矿厂的粗碎和中碎作业放在了采矿场，如红透山铜矿；而有些选矿厂的尾矿库的尾矿需要再处理回收时，又设有采矿机械。

选矿厂尾矿回填空穴已有实际案例，就是对矿区的尾矿储存设施进行清除，将尾矿放在采空的露天矿坑中。这在将来也可能是比较经济的方法，尤其是尾矿可能对环境造成破坏（例如酸性废水和含金属废水）时更值得采用。近年来，胶结膏体尾矿也开始用于地下采场的回填，将来也会应用得越来越广。

## 第五节 选矿的基本过程和常用指标

### 一、选矿的基本过程

矿石的选矿处理过程是在选矿厂中完成的，一般包括以下3个基本的工艺过程。

#### 1. 准备作业

在准备作业中包括原矿的破碎、筛分、磨矿、分级等工序。本过程的目的是使有用矿物与脉石矿物达到单体解离，为分选作业创造适宜的条件。

#### 2. 分选作业

是通过重选、磁选、电选、浮选和化学选矿等方法或其联合方法将有用矿物与脉石矿物分离以及有用矿物之间分离的工序。

#### 3. 选矿产品的处理作业

包括各种精矿、尾矿产品的脱水，细粒物料的沉淀浓缩、过滤、干燥和各种水澄清循环利用等，也称辅助作业。



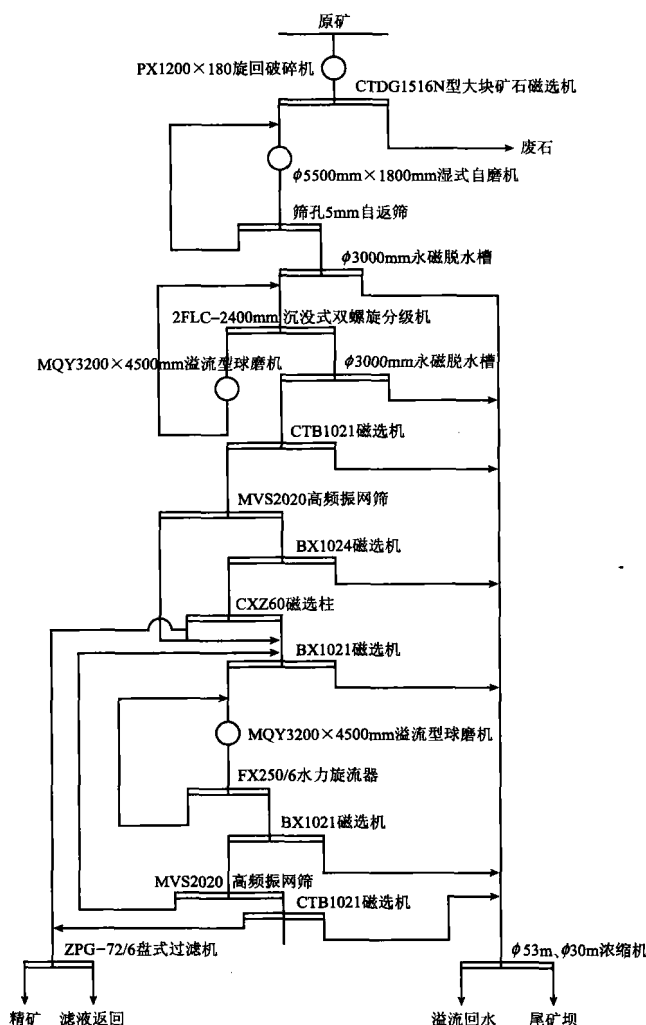


图 5-2 磁铁矿选矿工艺流程图

表示矿石连续加工的工艺过程，称为流程。用线和图表示流程时，称为工艺流程图（图 5-2）。只表示流程的“骨干”，而不记载流程细节的，称为原则流程图（图 5-3）。用主要设备和辅助设备表示的流程图，称为机械流程图或机械联系图（图 5-4）。

## 二、常用指标

### 1. 品位

品位是指原矿和选矿产品中金属或有用成分的重量对于该原矿和选矿产品重量之比，常用百分数表示。例如，铜精矿品位为 15%，即 100t 干精矿中含有 15t 金属铜；金原矿品位为 3g/t，即 1t 原矿石中含有 3g 金属金。

品位是评定原矿和选矿产品质量的指标之一。通常用  $\alpha$  表示原矿品位；用  $\beta$  表示精矿品位；用  $\theta$  表示尾矿品位。

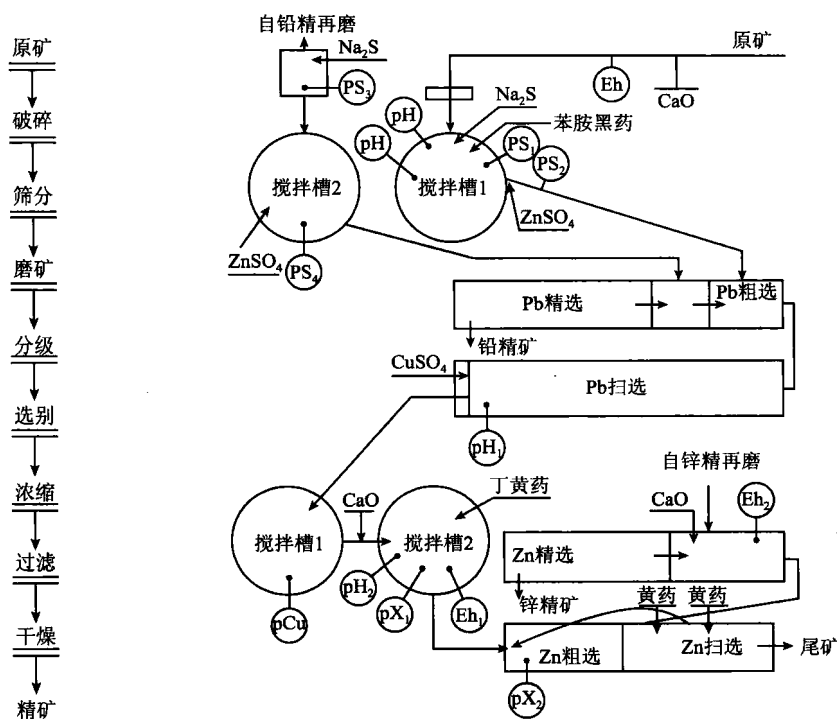


图 5-3 选矿的原则流程图

图 5-4 机械流程图

## 2. 产率

选矿产品重量对于原矿重量之比，称为该产品的产率，用  $\gamma$  表示。例如，选矿厂每天 (24h) 处理原矿石重量 ( $Q_{\text{原矿}}$ ) 为 500t，获得精矿重量 ( $Q_{\text{精矿}}$ ) 30t，则精矿产率 ( $\gamma_{\text{精矿}}$ ) 为

$$\gamma_{\text{精矿}} = \frac{Q_{\text{精矿}}}{Q_{\text{原矿}}} \times 100\% = \frac{30}{500} \times 100\% = 6\%$$

尾矿产率 ( $\gamma_{\text{尾矿}}$ ) 为

$$\gamma_{\text{尾矿}} = \frac{Q_{\text{原矿}} - Q_{\text{精矿}}}{Q_{\text{原矿}}} \times 100\% = \frac{500 - 30}{500} \times 100\% = 94\%$$

或

$$\gamma_{\text{尾矿}} = 100\% - \gamma_{\text{精矿}} = 100\% - 6\% = 94\%$$

## 3. 选矿比

选矿比即原矿重量对于精矿重量之比值，也就是获得 1t 精矿所需处理原矿石的吨数。以上例可知：

$$\text{选矿比} = \frac{Q_{\text{原矿}}}{Q_{\text{精矿}}} \times 100\% = \frac{500}{30} \times 100\% = 16.7\%$$

## 4. 富矿比

富矿比也称富集比，即精矿中 useful 成分含量的百分数 ( $\beta$ ) 与原矿中该有用成分的含量的百分数 ( $\alpha$ ) 之比值，常以  $i$  表示。它表示精矿中 useful 成分的含量比原矿中该有用成分含量增加的倍数。如原矿中铁的品位为 29%，精矿中铁的品位为 66%，则其富矿比为

$$i = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{66\%}{29\%} = 2.3$$

## 5. 回收率

精矿中金属的重量与原矿中该金属的重量之比值,称为回收率,常用 $\varepsilon$ 表示。回收率可用下式计算:

$$\varepsilon = \frac{\gamma\beta}{100\alpha} \times 100\%$$

式中: $\varepsilon$ 为回收率,%; $\alpha$ 为原矿品位,%; $\beta$ 为精矿品位,%; $\gamma$ 为精矿产率,%。

金属回收率是评定分选过程(或作业)效率的一个重要指标。回收率越高,说明分选过程(或作业)回收的金属越多。所以,选别过程中应在保证精矿质量的前提下,力求提高金属回收率。

## 第六节 未来选矿技术的应用与发展

随着世界经济的快速发展,一方面人类对矿物资源的需求不断增加,另一方面,矿物资源中,富矿减少、贫细矿物资源增加,而且矿山、冶炼厂排出的废水、固体废弃物等对环境的污染与治理问题也开始受到重视,传统的选矿技术与理论已不能完全适应解决这些问题,一些高效益、低能耗、无污染的选矿新技术应运而生,在如下领域得到了应用。

### 一、矿物富集、分离与综合利用

以传统选矿学为基础,主要针对复杂贫细矿物资源的处理、矿冶“三废”治理及二次资源的再生利用,开发新的技术、工艺及设备,研究其过程的基础理论,属传统的选矿学科领域,涵盖传统的浮选化学、浮选剂分子设计、复合物理场选矿、复杂贫细矿物资源综合利用等学科方向。在这些传统学科方向上,已开发出的新技术成果的推广应用,将促进传统选矿技术与经济效益的提高。如“电位调控浮选技术”,已开始在硫化矿浮选厂推广。“冷固球团直接还原技术”已开始工业化,将解决冶炼优质钢原料短缺的难题。“煤炭干法选别”技术的推广应用,为我国大部分缺水地区洗煤、选煤提供了全新的途径。

### 二、矿物提取

以选矿学、冶金学、采矿工程学、生物工程学、电化学等为学科基础,形成新的学科领域,主要针对复杂贫细矿物资源、海洋资源的开发利用。矿物提取是不经选别过程直接从矿石中浸出、提取有用成分的。如坑内就地浸出(in-site leaching),生物浸出(bio-leaching)、堆浸、矿浆电解(slurry electrolyte)等。其中较成熟的技术有铜的浸出—萃取—电积技术,采用硫酸溶液将矿石中铜元素溶解,并可采用生物菌催化溶解,含铜溶液经萃取后进行电积,得到高品级铜,取消了传统的选矿和火法熔炼两个高投资、高生产成本的生产环节。

### 三、矿物材料

以选矿学、材料科学与工程、化学与化学工程学为学科基础,针对各种资源的处理,研究不经冶炼,直接从各种资源中加工制备各种材料的新技术与基础理论,如超细矿物粉体材料。超细矿物粉体材料在石油化工行业中,用作填料、催化剂,在电子工业中,用作

电子浆料、磁记录材料、光电波吸收材料，此外，在造纸、农业、航空航天、冶金、医药、食品等行业都有广泛应用。

#### 四、矿物化学品加工

以选矿学、化学与工程为学科基础，针对复杂贫细矿物资源及海洋资源的开发利用，研究不经选冶，直接从矿石中制取化学品的新技术与基础理论。如煤炭的气化、液化；从锰矿石中生产电子级碳酸锰，从煤炭中生产活性炭、炭黑、腐殖酸及腐殖酸肥料等。

#### 五、选矿计算机技术与矿物经济

选矿过程的计算机管理与控制仍是选矿重要的学科方向，需要研究选矿全过程的计算机仿真、模拟与优化设计，建立矿山、选厂的专家系统，进行生产、经营管理。包括各个生产环节的优化、控制，整体生产水平的控制，矿山投资效益、规模效益、产品结构等的经济评估等。

#### 六、非矿物资源的富集与分离

广义上讲，选矿技术是根据待处理物料的物理、化学性质的不同，采用不同的方法进行物料分离与富集，其原理可推广应用于除矿业以外的其他领域，从而可大大拓宽选矿学科领域。如高梯度磁选用于医学上红细胞的分离，生物学中离子的分离，核工业中核原料放射性固体的分离，超导磁选机分离液态氮、氧等。浮选法从纸浆废液中回收纤维素，从废纸上脱油墨、脱炭黑，废旧塑料的回收，医药微生物方面，分选结核杆菌与大肠杆菌等。

### 小 结

本章的重点是掌握选矿的基本概念，基本术语，如什么是选矿？什么是有用矿物和脉石矿物？选矿基本过程包括哪几个阶段？

本章的难点是选矿的几个指标如何区别与计算，如精矿的产率、品位、回收率、选矿比、富矿比等。



#### 复习思考题

1. 简述选矿在国民经济中的地位和作用。
2. 选矿的常用指标有哪些，如何计算？
3. 简述未来选矿技术的应用与发展。

## 第六章 破碎与筛分

### 本章导读

破碎与筛分是选矿厂的重要工段，“多碎少磨”是选矿厂一直奉行的基本原则。本章概述了破碎的三个学说和筛分的简单原理，介绍了各种磨矿机和筛分机的结构和工作过程，说明了影响破碎与筛分的各种因素，提供了破碎与筛分生产率的计算方法。通过本章学习可以了解破碎与筛分的作用及选厂所用的破碎和筛分的设备。

### 第一节 概 述

#### 一、破碎

##### 1. 破碎在选矿中的作用

选别过程所要求的粒度取决于矿石中有用矿物与脉石矿物的嵌布粒度。嵌布粒度越细，要求将矿石粉碎得越细。但合理的破碎粒度必须经过技术、经济上全面比较才能确定。根据目前选矿厂常用粉碎设备的技术性能，欲将采出的矿石（井下开采达 300 ~ 600mm，露天开采达 1000 ~ 1500mm）粉碎、达到单体解离，一般不能一次完成，需连续几次粉碎。通常将最终粉碎产品粒度为 5mm 以上的粉碎过程，称为破碎。

确定合理的破碎粒度和工艺流程，合理选择、使用、维护破碎设备，对于提高生产能力，减少基建投资，节约能耗，降低选矿成本和改善选矿指标，具有重要作用。

##### 2. 破碎方法

针对矿石的机械强度特点实施恰当的破碎方法可以使破碎更有成效。所谓破碎方法，是指破碎力对待破碎物料的作用方式。目前，岩石和矿石的破碎几乎都是采用机械破碎法，破碎机械的施力方式基本上是压碎、劈开、折断、磨剥及冲击等（图 6-1）。就目前采用的破碎与磨矿机械来说，一般都是上述几种方法的联合作用。

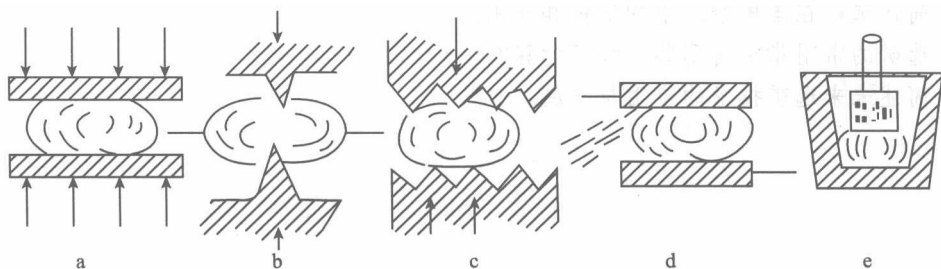


图 6-1 破碎机械对矿石的施力情形

a—压碎；b—劈开；c—折断；d—磨剥；e—冲击

3. 破碎比

破碎比是破碎机的给矿最大矿块尺寸（ $D$ ）与该段破碎机的产品中最大矿块尺寸（ $d$ ）之比，即破碎比  $i = \frac{D}{d}$ 。它的大小，说明矿石经过破碎以后，其粒度缩小的程度，是衡量矿石破碎前后，粒度变化的程度和均衡分配各段破碎机工作的参数。

最大粒度分别由原料及产品中 95% 或 80% 物料过筛计的正方形筛孔宽表示。我国习惯按 95% 过筛计最大粒度，欧美各国习惯按 80% 过筛计最大粒度。

4. 破碎阶段

矿石经过破碎的次数为破碎阶段的段数。生产实践中，大致可分为以下阶段，见表 6-1。

表 6-1 破碎阶段的划分

阶段名称	给矿最大粒度/mm	产品最大粒度/mm
粗碎	1500 ~ 300	350 ~ 100
中碎	350 ~ 100	100 ~ 40
细碎	100 ~ 10	30 ~ 1

每阶段达到的破碎比称部分破碎比，所有各阶段总共达到的破碎比称为总破碎比，总破碎比等于各阶段破碎比的连乘积，即

$$i_{\text{总}} = i_1 \times i_2 \times i_3 \times \cdots \times i_n \tag{6-1}$$

破碎阶段的划分是相对的。它与选矿厂的规模和其他条件有关，随着破碎新设备、新工艺的出现和应用而发生变化。如大型破碎机、自磨合半自磨机的应用，使破碎流程简化、效率提高。又如，处理微细嵌布矿石的一些新工艺的出现，要求要有超细磨技术与之适应，因此，要求研究新的粉碎设备与工艺。

二、筛分

1. 筛分的作用

利用多孔的工作面将颗粒大小不同的混合物料按其颗粒大小进行分级作业称为筛分。多孔的工作面称为筛面。装有筛面的用于物料分级的机械称为筛机（或称筛子）。

筛面是筛机的基本工作部分。多数情况下，筛面是平的，但也有弧形或锥形的等。筛面上的孔眼称为筛孔，筛孔的形状有方形、圆形、长方形和条缝形。筛孔的尺寸以孔边的最小距离来表示。例如，圆孔以其直径、方孔以其边长、长方形孔及条缝孔以其宽度表示等。

在一个筛面上筛分物料时，可得两种产品。通过筛孔的物料称为筛下产品，而留在筛面上的物料称为筛上产品。如筛孔尺寸为 12mm，则筛下与筛上产品分别用 - 12mm 和 + 12mm 表示。用  $n$  个筛面筛分物料则可获得  $n + 1$  种产品。筛分级别的数目和各种级别粒度的上限和下限，是由进行下一步处理的工艺要求及产品标准来决定的。在进行多级筛分时，在一系列筛孔尺寸不同的筛面上，相邻两个筛面筛孔尺寸的比值有一定的数值，这

个比值称为筛比。例如，筛孔分别为 32mm、12mm 和 6mm 的筛孔，其筛比为 2.75 和 2.00。

筛分操作可以在湿式条件下（含较多的水分，向筛面上加水或浸没在水槽中）进行，这种作业称为湿式筛分作业。而目前广泛采用的是不加水的干式筛分作业。

## 2. 筛分的类型

当筛分产品作为最终产品供给用户使用称为独立筛分，如煤、铁矿石、建筑石料的筛分分级。当筛分是为选别提供不同粒级的人选物料时称为准备筛分，如重选和磁选前物料的筛分分级。当筛分与破碎配合使用时称为辅助筛分。如果它用于破碎前将粒度合格的物料预先分出则称为预先筛分，如果用于控制破碎产品的粒度则称为检查筛分，同时，还可以一个筛分作业同时起预先及检查筛分的作用。筛分也可用来脱除物料中的水分或分离矿浆，如选煤和洗矿产物的脱水及重介质选矿物脱除介质等。在某些情况下，筛分产物的质量不同，筛分起到分选有用矿物的作用，这种筛分称为选择筛分。例如目前不少铁矿厂铁精矿再磨循环中的细粒筛分就起选择筛分作用，用细筛来提高铁精矿的品位。随着筛分技术及筛分设备的发展，筛分的用途也在逐渐扩大。

# 第二节 破碎与筛分原理

## 一、破碎学说

从外观形态上看，破碎是一个粒度减小的过程，从力学实质上看，破碎是一个功能转变的过程。加上破碎磨碎过程的能耗很大，人们必然去寻找破碎中能量的消耗规律及其理论，从而寻找降低能耗的途径。目前，选矿界公认的是面积学说、体积学说及裂缝学说。

### 1. 面积学说

面积学说是 1867 年 P. R. 雷廷格提出的。他认为物料破碎时外力所做的功用于产生新的表面积，因此，认为破碎所耗的功  $A_1$  与新生的表面积  $\Delta S$  成正比： $A_1 = k_1 \Delta S$  ( $k_1$  为比例系数)。

面积学说适用于完全均匀的脆性物料以及破碎比大、变形较小（如磨碎）的情况。用于 10 ~ 1000  $\mu\text{m}$  的细磨范围，相当适宜。

### 2. 体积学说

体积学说是 B. Л. 吉尔皮切夫 1874 年及 F. 基克 1885 年提出的。他们认为外力对破碎物体所做的功是用于使物体发生变形，变形到极限时物体即破坏，而物体蓄有的变形能又和体积成正比，故认为破碎物体所耗的功  $A_2$  与物体的体积变形  $\Delta V$  成正比： $A_2 = k_2 \Delta V$  ( $k_2$  为比例系数)。

体积学说较适用于各向同性的脆性物料、产生新生表面不多的粗、中碎，以及作用力为压力时的情况。用于大于 1cm 的破碎较正确。

### 3. 裂缝学说

裂缝学说是 F. C. 榜德 1952 年提出的。简单地说，破碎矿石所需的功，应当考虑变形能和表面能两项。变形能和体积成正比，表面能与表面积成正比。对于单位体积的物

体，破碎矿石所需的功就是与 $\frac{1}{\sqrt{D}}$ （ $D$ 为立方体边长）成比例。

$$W = \frac{10W_i}{\sqrt{P}} - \frac{10W_i}{\sqrt{F}} = W_i \left( \frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right) \quad (6-2)$$

式中： $F$ 、 $P$ 为给矿及产品的80%能通过的方形筛孔宽， $\mu\text{m}$ ； $W$ 为将1短吨（907.18kg）粒度为 $F$ 的给矿破碎到产品粒度为 $P$ 时所耗的功， $\text{kw} \cdot \text{h}$ /短吨； $W_i$ 为功指数，即将理论上不限定的粒度破碎到80%可通过 $100\mu\text{m}$ （或67%可以通过200目筛孔）筛孔宽所需要的功， $\text{kw} \cdot \text{h}$ /短吨。

裂缝学说一般较适用于常规的棒磨合球磨范围。

## 二、筛分原理

碎散物料的筛分过程，可以看作由两个阶段组成：一是小于筛孔尺寸的细颗粒通过粗颗粒所组成的物料层到达筛面，简称穿层或分层；二是细颗粒透过筛孔成为筛下物，简称透筛，同时粗颗粒也排出筛面成为筛上物。为此，物料和筛面之间必须存在相对运动，使粗粒层经常处于松散状态、便于细颗粒穿过粗颗粒之间的空隙，促进细颗粒透筛。同时对筛面上的物料层必须有一定的输送能力。

筛分过程本是一个由颗粒群体参与的错综复杂过程，但是为了便于分析问题，经常以单个颗粒为研究对象来分析其透筛过程。

理论上讲，小于筛孔的颗粒均能通过筛孔而进入筛下，实际筛分过程中由于受多种因素的影响和制约，小于筛孔的细颗粒即使到达筛面与筛孔接触，也不一定能透过筛孔，即筛分过程是一个随机过程。由于影响因素复杂，对单个颗粒透筛的预测是十分困难的，一般以统计的原理来分析颗粒透过筛的可能性。

实践证明，物料粒度小于筛孔 $3/4$ 的颗粒容易透过筛孔，被称为易筛粒；大于筛孔 $3/4$ 的颗粒，因透筛困难，称为难筛粒。

## 第三节 破碎与筛分设备

### 一、破碎设备

#### 1. 颚式破碎机

颚式破碎机俗称老虎口，常用于对矿石进行粗碎。矿石的破碎是在破碎机中两块颚板之间进行的。两块颚板中的一块固定，另一块可动。可动颚板悬挂在固定轴或可动轴上，通过传动装置，时而靠近固定颚板，时而离开固定颚板。向固定颚板靠近时，破碎矿石；离开固定颚板时，矿石靠自身的重力而排出。

根据可动颚板运动的性质，颚式破碎机分为简单摆动式和复杂摆动式两种（图6-2）。

颚式破碎机结构简单，机体重量轻，破碎比较大，可达3~5，价格便宜，适合于破碎坚硬或中硬矿石，特别适用于中、小型选矿厂。

颚式破碎机的规格尺寸，用汉语拼音字母和给矿口的宽度和长度来表示。拼音字母意义：P——破碎机；E——颚式；F——复杂摆动；J——简单摆动。一般有PEF150×250



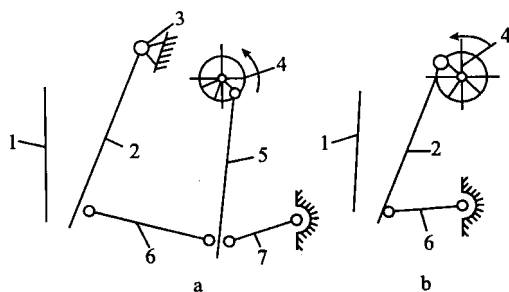


图 6-2 颚式破碎机的主要类型

a—简单摆动式；b—复杂摆动式

1—固定颚板；2—可动颚板；3—可动颚板悬挂轴；

4—偏心轴；5—连杆；6—前肘板；7—后肘板

型至 PEF900 × 1200 型和 PEJ900 × 1200 型至 PEJ1500 × 2100 型的颚式破碎机。例如，PEF150 × 250 型表示给矿口宽 150mm，长 250mm 的复杂摆动颚式破碎机；PEJ1500mm × 2100mm 型表示其给矿口宽为 1500mm，长为 2100mm 的简单摆动颚式破碎机。

为了适应工业生产规模的不断扩大，要求制造更大型的破碎机。目前，世界上颚式破碎机的最大规格是 2100mm × 3000mm，生产能力达 2000 ~ 3000t/h。近年来，液压技术在颚式破

碎机上得到应用，出现了液压式颚式破碎机，即利用液压来调整排料口的大小，以维持产品粒度在给定范围内。

## 2. 圆锥破碎机

圆锥破碎机是这类破碎机的总称，亦是应用广泛的一种破碎机。根据圆锥破碎机的用途，又可分为粗碎、中碎和细碎 3 种类型。它们的破碎作用原理大致相同，只是构造有所区别。

### (1) 粗碎圆锥破碎机（旋回破碎机）

图 6-3 是粗碎圆锥破碎机的结构示意图。可动锥体固定在中轴上，中轴上端悬挂在臂架上，下端置于偏心轴套内，偏心轴套上安有伞齿轮。启动电动机后，经传动轴使伞齿轮转动，插在偏心轴套内的中轴随之作回转运动。可动锥体在转动过程中时而靠近固定锥体，时而离开固定锥体。靠近时物料即被破碎，离开时物料即借助于自身的重力排出。此机是连续碎矿和排矿的，故生产能力较高，破碎比可达 3 ~ 5。

粗碎圆锥破碎机（旋回破碎机）的规格用汉语拼音字母和其给矿口、排矿口宽度表示。拼音字母意义：P——破碎机；X——旋回。常用旋回破碎机有：PX500/75 型至 PX1200/250 型。例如，PX500/75 型表示给矿口宽 1200mm，排矿口宽 75mm 的旋回破碎机。

旋回破碎机适合于坚硬矿石的破碎。在可动锥及固定锥体上，皆镶有耐磨材料制成的衬板，磨损后可以更换。

### (2) 中、细碎圆锥破碎机

中、细碎圆锥破碎机（图 6-4）俗称圆磨。用于中碎的圆锥破碎机为标准圆锥破碎机，用于细碎的为短头圆锥破碎机；居于上述两者之间的为中型圆锥破碎机。它们的工作原理与旋回破碎机基本相同，但结构上有如下区别：

1) 中、细碎圆锥破碎机的可动锥体和固定锥体都是正立的截头圆锥，圆锥形状缓倾，破碎腔中存在一个平行区，可适应控制排矿粒度均匀的要求。而旋回破碎机的可动锥体的圆锥形状是急倾斜的、正立截头圆锥，其固定锥体是倒立的截头圆锥。

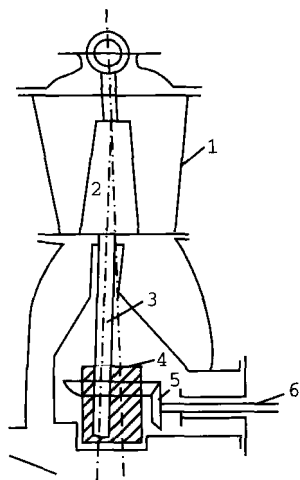


图 6-3 旋回破碎机结构示意图

1—固定锥体；2—可动锥体；3—中轴；  
4—偏心轴套；5—伞齿轮；6—传动轴

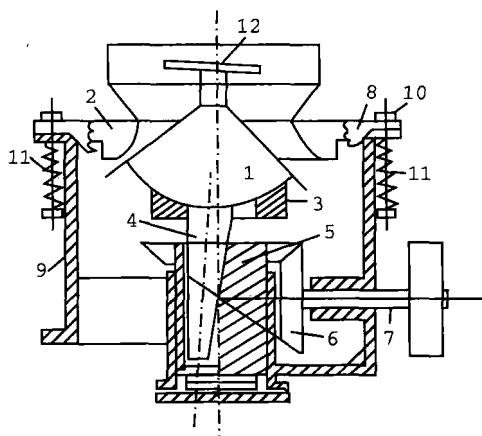


图 6-4 圆锥破碎机结构示意图

1—可动圆锥；2—固定圆锥；3—球面轴承；4—主轴；  
5—偏心轴套；6—伞形齿轮；7—传动轴；8—支撑环；  
9—机体；10—螺栓；11—弹簧；12—分矿盘

2) 中、细碎圆锥破碎机的可动锥体支承在球面轴承上。而旋回破碎机的可动锥体则悬挂在机体上部的横梁上。

3) 中、细碎圆锥破碎机的机架由上、下两部分组成，用螺栓连接，在螺栓上套有弹簧，借助附有手柄的铰杆和铰链，可使固定锥体上升或下降，从而调节排矿口的大小。旋回破碎机利用主轴上端螺帽调整悬挂可动锥体上下，从而调节排矿口的大小。

4) 中、细碎圆锥破碎机有弹簧保险装置，可靠性大，当破碎腔中进入非破碎物时，支承在弹簧上面的固定锥体（调整环）和上部机架（支撑环）同时抬起，使弹簧压缩，排矿口增大，从而使非破碎物从排矿口排出，避免机器损坏。支撑环和调整环借助弹簧的弹力，恢复原位。

5) 中、细碎圆锥破碎机采用水封防尘装置，旋回破碎机采用干式防尘装置。

中碎和细碎圆锥破碎机的结构基本类似，只是标准型给矿口大，平行区短。短头型给矿口小，平行区长。中型则居中。如图 6-5 所示。

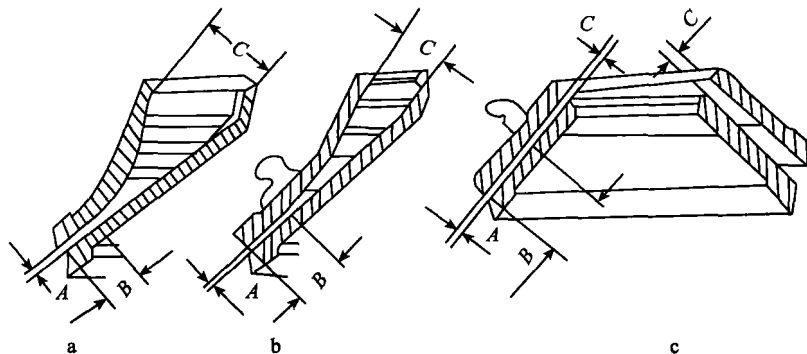


图 6-5 中细碎圆锥破碎机的破碎腔型式

a—标准型；b—中型；c—短头型

A—排矿口宽度；B—平行带长度；C—给矿口宽度

中、细碎圆锥破碎机的规格，均用汉语拼音字母和动锥体底部直径表示。拼音字母意义：P——破碎机；Y——圆锥；B——标准；Z——中型；D——短头。常用圆锥破碎机有：弹簧标准型 PYB - 600 至 PYB - 2200、弹簧中型 PYZ - 900 至 PYZ - 2200、弹簧短头 PYD - 600 至 PYB - 2200。例如，PYB600 表示动锥下部最大直径为 600 mm 的标准型圆锥破碎机。PYZ2200mm 表示动锥下部最大直径为 2200mm 的中型圆锥破碎机。

单缸液压圆锥破碎机规格表示方法与之相同。

中、细碎圆锥破碎机生产能力大，功率消耗低，破碎比大（ $i$  为 4 ~ 5），产品粒度均匀。目前广泛用于各种硬度矿石的中碎和细碎，但不宜处理黏性物料。

### 3. 辊式破碎机

这种破碎机一般用在中、细碎阶段破碎中等硬度的矿石。根据辊的数目来分，有单辊、双辊（图 6-6）和多辊 3 种。其中单辊一般用于破碎煤炭、页岩一类较软的物料。双辊破碎机适用于破碎脆性物料或避免过粉碎的物料。多辊破碎机使用得较少。

辊式破碎机的规格以破碎辊的直径  $\phi$  和长度  $L$  来表示，即  $\phi \times L$ 。

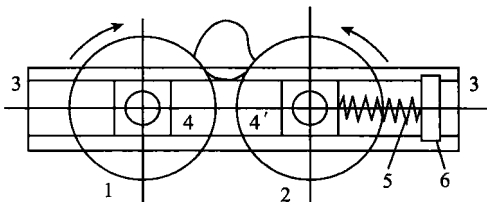


图 6-6 对辊破碎机作用原理图

- 1—固定辊；2—可动辊；3—机架；
- 4—固定辊轴承；4'—可动辊轴承；
- 5—弹簧；6—垫片

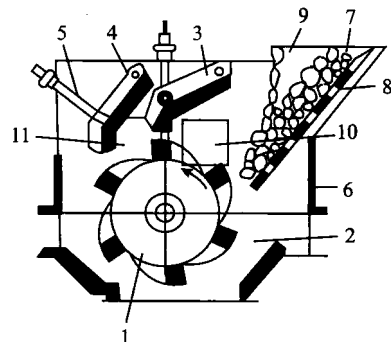


图 6-7 反击式破碎机

- 1—转子；2—锤头；3—第一反击板；4—第二反击板；
- 5—拉杆；6—机体；7—给矿口；8—筛板；9—链幕；
- 10—第一破碎区；11—第二破碎区

### 4. 反击式破碎机

反击式破碎机是一种高效的新型破碎设备，它主要靠冲击方式破碎，目前已广泛用于化工、煤炭、建筑等行业，也逐渐开始用于金属矿山，如图 6-7 所示。

反击式破碎机结构简单，破碎比大（ $i$  为 50 ~ 60），生产能力高，功率消耗低，可以进行选择性破碎，适应性强，故硬性、脆性和潮湿矿石均可用它来破碎。其主要缺点是锤头磨损严重，寿命很短。

反击式破碎机的规格用转子直径和转子长度（ $\phi \times L$ ）来表示。

### 5. 液压破碎机

近代液压技术在破碎设备中得到了应用，设计和生产了液压颚式破碎机、液压旋回破碎机以及中、细碎液压圆锥破碎机。它们的共同特点是应用液压原理，采用液压油缸的保险机构和调整机构，替换了破碎机原有的保险装置和调整装置。从而，克服了常规破碎机排矿口调整比较困难和保险装置可靠性差等缺点。瑞典 Sandvik 集团第三代 H 系列圆锥破

碎机是单缸液压圆锥破碎机的典型代表，芬兰 Metso 公司 HP 系列破碎机是多缸液压圆锥破碎机的代表产品。

## 二、筛分设备

### 1. 格筛和棒条筛

这两种筛子都是固定筛。格筛一般安装在矿仓的上部，以保证粗碎机的人料粒度符合要求。格筛筛上的大块矿石可用于锤或其他方法破碎，使其过筛。固定格筛一般水平安装。

棒条筛由许多棒条组成，筛面与水平呈一定角度，筛分矿石时倾角为  $40^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ，筛分潮湿物料时倾角增大  $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ （图 6-8）。物料从筛子上端给入，大于筛孔尺寸的矿块沿筛面自动下滑，小于筛孔尺寸的矿块，穿过筛孔下落。这种筛子用于筛除粗粒物料时，两棒条之间的间隙通常不小于 50mm，但在个别情况下也可在 25~30mm 之间。

棒条筛的外形与结构如图 6-8 所示。棒条筛的规格以筛面的长×宽表示。

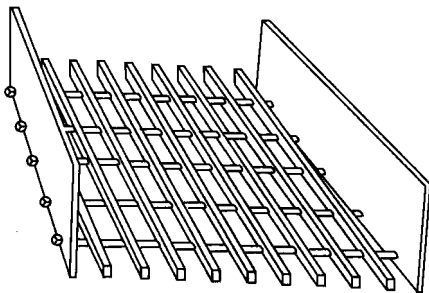


图 6-8 棒条筛示意图

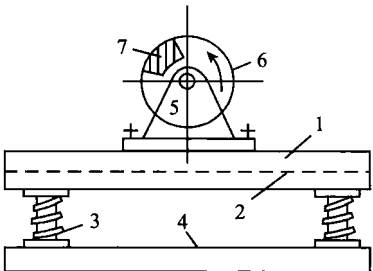


图 6-9 惯性振动筛简图

1—筛框；2—筛网；3—弹簧；4—筛架；  
5—轴承；6—配重轮；7—配重

### 2. 惯性振动筛

这是目前常用的一种筛分机，其结构及工作原理如图 6-9 所示。图中筛框与筛网借助于弹簧被支撑在机架上。筛框上装有两个轴承，轴上靠近轴承处装有两个配重轮，轮上有配重。当传动轴带动配重轮转动时，会产生较大的惯性离心力并作用于弹簧和筛框，而使筛子振动。筛框的运动轨迹为椭圆。筛面上的物料因筛子振动迫使其在垂直方向作上下振动，造成物料松散和分层，同时也使筛孔不易堵塞，从而达到筛分的目的。

筛分机安装时，保持向排矿方向有较小的倾角（一般为  $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ）。这样筛上物料可以借本身的重力作用，自动向前运动，由排矿端排出。

这种惯性振动筛的振幅可借助改变配重来进行调节。其规格以筛网尺寸（宽×长）表示。

### 3. 自定中心惯性振动筛

自定中心惯性振动筛，一般均悬挂在支架上，所以也称万能吊筛，图 6-10 为其结构图。

筛框安在偏心轴偏心部分的轴承上。筛框借弹簧吊挂在固定结构上。飞轮上装有配重，飞轮旋转时配重所产生的离心力和筛框回转时所产生的离心力平衡，此时筛框绕着主

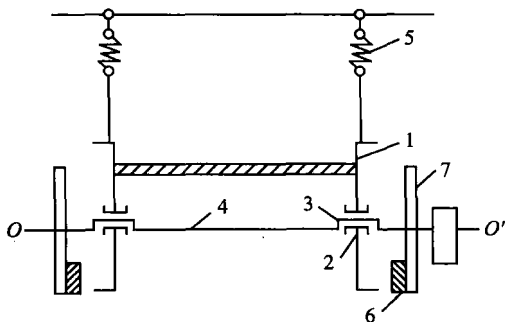


图 6-10 自定中心惯性振动筛结构示意图  
1—筛框；2—轴承；3—偏心轴的轴心部分；4—偏心轴；  
5—弹簧；6—配重；7—飞轮

自流弧形筛如图 6-11 所示，需筛分的物料自流给入受料箱，受料箱里面装有一块倾斜的溢流板，形成一个上宽下窄逐渐收缩的隔槽，矿浆由隔槽的出口沿切线方向均匀分布在弧形筛面上，物料被筛分为筛上和筛下产品。

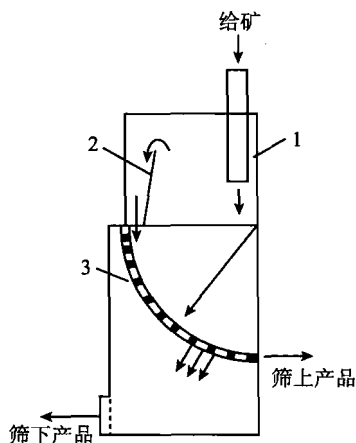


图 6-11 自流弧形筛原理示意图  
1—受料箱；2—溢流板；3—筛面

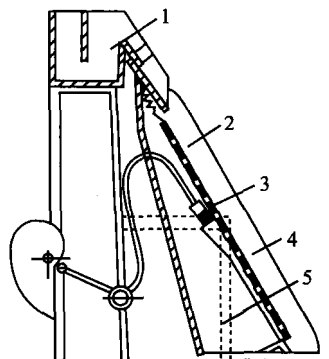


图 6-12 细筛结构示意图  
1—给矿器；2—筛面；3—敲打装置；4—筛框；5—筛体

弧形筛的规格是以筛面的曲率半径（ $R$ ）、筛面宽度（ $B$ ）和弧度（ $\alpha$ ）表示，即  $R \times B \times \alpha$ 。例如， $500\text{mm} \times 700\text{mm} \times 180^\circ$ 。

弧形筛结构简单，工作可靠，分级精度高，产品粒度均匀，单位面积处理量可达振动筛的 10~50 倍。它在选矿厂主要用于选别前的预先筛分和脱水、脱泥作业，效果优于振动筛，主要缺点是筛面磨损快。为增强抗磨性，国内已采用尼龙筛条。

#### 5. 细筛

细筛是一种新型的湿式细粒级（ $0.2 \sim 0.04\text{mm}$ ）筛分（分级）设备，其结构如图 6-12 所示。上部是一个给矿器，下部是由钢板焊接成的筛选体，内装有筛框和筛面，筛框的背面有一敲打装置。给矿器是由一个缓冲箱和匀分器构成。缓冲箱采用阀门控制，以保持箱内恒压和调整给矿量大小。矿浆流到匀分器，均匀地流经筛面，分成筛上和筛下两种产品。

细筛的筛面是一格筛，呈长方孔。由固定筛条和筛箅编成。筛条的排列不是与物料运动同向，而是与物料方向垂直。筛面安装在筛框上，筛框用弹簧悬挂在筛体上，并由筛体与水平支承为一斜度，可以调节。在筛框的背面有一打击板，敲打装置的打击锤周期性地打在打击板上，使筛面产生瞬间振动，以防筛孔堵塞。

细筛的工作原理与一般筛分机械不同，和自流弧形筛的工作原理相似，也可以说细筛是弧形筛的发展。细筛除具有弧形筛的许多优点外，它在筛分过程中还具有富集作用，并且筛孔不易堵塞。其规格以筛面尺寸（宽×长）表示。

国内外的实践表明，采用细筛再磨方法是提高磁铁矿精矿品位的一种经济有效的措施。细筛也是黑色金属选矿厂中很有发展前途的细粒分级设备。

## 第四节 破碎与筛分的影响因素及生产率计算

### 一、破碎的影响因素

概括地讲，破碎过程的影响因素包括物料性质、破碎设备性能和操作条件。

#### 1. 物料性质

这一类影响因素主要包括物料的硬度、密度、平均粒度和结构、含水量、含泥量等。物料硬度越大，越不易破碎；物料的密度越大，按給料计的设备处理能力就越大；当物料的最大粒度一定时，平均粒度越细，需要破碎工作量就越少；结构松弛、节理发育良好的物料易破碎，而含水、含泥量大的物料易粘结，严重时会导致破碎腔堵塞。

#### 2. 破碎设备性能

这一类影响因素主要包括设备的类型、规格、排料口和啮角。破碎设备的类型和规格是决定它能否满足特定作业要求的首要条件，因而在选择破碎设备时，首先要根据待碎物料的性质和数量，确定采用什么类型的设备和规格。就一台具体的设备来说，排料口的尺寸实际上决定着它的工作质量和生产能力。当排料口过大时，大部分物料未经破碎即通过排料口，从而使生产能力很大，但破碎比小；反之，当排料口过小时，虽然破碎比会明显增大，但设备的生产能力却因此严重下降。

破碎设备的啮角是指钳住物料块时，破碎工作部件表面之间的夹角，通常用符号  $\alpha$  表示。根据这一定义，颞式破碎机的啮角就是钳住物料块时，动颞与定颞之间的夹角，而辊式破碎机的啮角则是指物料块与两辊面接触点切线之间的夹角。

破碎设备啮角的大小直接决定着破碎过程是否能安全顺利地进行，是一个非常重要的设备工作参数。

#### 3. 操作条件

影响破碎过程的操作条件主要是給料条件和破碎设备的作业形式。连续均匀地給料既能保证生产正常进行，又能提高设备的生产能力和工作效率。此外，闭路破碎时，破碎机的生产能力可增加 15% ~ 40%。

### 二、破碎机生产率计算

颞式破碎机、旋回破碎机和圆锥破碎机开路破碎时的生产能力可按下式计算：

$$Q = K_1 K_2 K_3 Q_0 \quad (6-3)$$

式中：\$Q\$ 为待计算的破碎机按給料计的生产能力，t/h；\$K\_1\$ 为物料的可碎性系数；\$K\_2\$ 为物料密度修正系数，其计算式为 \$K\_2 = \rho\_0/1600 \approx \rho\_1/2700\$，其中 \$\rho\_0\$ 和 \$\rho\_1\$ 分别是物料的堆密度和密度，单位为 kg/m<sup>3</sup>；\$K\_3\$ 为物料的粒度或破碎比修正系数；\$Q\_0\$ 为标准条件（破碎堆密度为 1600kg/m<sup>3</sup> 的中硬物料）下破碎机开路破碎时的生产能力，t/h，表达式为

$$Q_0 = q_0 b_{\text{排}} \quad (6-4)$$

式中：\$q\_0\$ 为破碎机排料口单位宽度的生产能力，t/(h·mm)；\$b\_{\text{排}}\$ 为破碎机排料口宽度，mm。

当破碎机采用闭路作业形式时，其生产能力计算公式为

$$Q_{\text{闭}} = K Q_{\text{开}} \quad (6-5)$$

式中：\$Q\_{\text{闭}}\$ 为破碎机闭路破碎时的生产能力，t/h；\$Q\_{\text{开}}\$ 为破碎机开路破碎时的生产能力，t/h；\$K\$ 为系数，其值为 1.15 ~ 1.40。

光滑辊面的辊式破碎机的生产能力，可以根据通过两个辊子之间间隙的物料量进行计算，即

$$Q = V \rho_1 / 1000 = 3600 n \pi D L e \mu \rho_1 / 1000 = 11.304 e D L n \mu \rho_1 \quad (6-6)$$

式中：\$Q\$ 为光滑辊面辊式破碎机的生产能力，t/h；\$V\$ 为单位时间通过两个辊子之间的物料体积，m<sup>3</sup>/h；\$\rho\_1\$ 为物料的密度，kg/m<sup>3</sup>；\$n\$ 为辊子的转速，r/s；\$D\$ 为辊子的直径，m；\$L\$ 为辊子的长度，m；\$e\$ 为两个辊子之间的间隙宽度，m；\$\mu\$ 为破碎物料的松散系数，对于中硬物料其值为 0.2 ~ 0.3，对于潮湿的或黏性的物料其值为 0.4 ~ 0.6。

另外，冲击式破碎机的生产能力常常利用如下的经验公式进行计算：

$$Q = 0.36 C (h + a) d b n \rho_1 \quad (6-7)$$

式中：\$Q\$ 为冲击式破碎机的生产能力，t/h；\$C\$ 为打击板的个数；\$h\$ 为打击板的高度，m；\$a\$ 为打击板与反击板之间的间隙，m；\$d\$ 为排料粒度，m；\$b\$ 为打击板的宽度，m；\$n\$ 为转子的转速，r/s；\$\rho\_1\$ 为破碎物料的密度，kg/m<sup>3</sup>。

应该说明的是，上述各个计算公式都不可能包括所有的影响因素，而且待破碎物料的性质又千差万别，所以利用这些公式的计算结果都是近似的，必须用实践资料进行校核。

### 三、筛分的影响因素

#### （一）入筛原料性质的影响

##### 1. 含水率

物料所含水分如达到某一范围，筛分效率急剧降低。这个范围取决于物料的性质和筛孔尺寸。物料所含水分超过这个范围以后，颗粒的活动性又重新提高，并逐渐达到湿筛的条件，换句话说，这时物料与水一起进行筛分了。

##### 2. 含泥量

如果物料含有易结团的混合物（如粘土等），即使在水分含量很少时，筛分也可能发生困难。因为粘土物料在筛分中会粘结成团，使细泥混入筛上产物中，除此以外，粘土也很容易堵塞筛孔。

##### 3. 粒度特性

原料中所含的难筛粒及阻碍粒相对其他粒级较多时，对筛分过程不利；而所含的易筛

粒和非阻碍粒相对其他粒级较多时，对筛分过程有利。

影响筛分过程的粒度特性还包括颗粒的形状。对于三维尺寸都比较接近的颗粒，如球体、立方体、多面体等，筛分比较容易；而对于三维尺寸有较大差别的颗粒，如薄片体、长条体、怪异体等，在其他条件相同的情况下筛分就比较困难。

4. 密度特性

当物料中所有颗粒都是同一密度时，一般对筛分没有影响。但是当物料中粗、细颗粒存在密度差时，情形就大不一样了。若粗粒密度小，细粒密度大，则容易筛分。

(二) 筛子性能的影响

1. 筛面运动形式

筛面运动形式关系到筛上物料层的松散度及需要透筛的细物料相对筛面运动的速度、方向、频率等，因而对分层、透筛过程均有影响。几种典型筛子的筛分效率，见表6-2。

表 6-2 不同运动特性筛面的筛分效果

筛面运动形式	固定不动	筒形转动	摇动	振动
筛分效率/%	50 ~ 60	60	70 ~ 80	≥90

2. 筛面结构参数

(1) 筛面宽度与长度

一般情况下，筛面宽度决定筛子的处理能力，筛面越宽，处理能力就越大；筛面长度决定筛子的筛分效率，筛面越长，效率就越高。对于振动筛，增加宽度常受到筛框结构强度的限制。通常，宽度越大，筛框的寿命就越短。目前，我国筛宽一般在 2.5m 以内，而有的国家筛宽达 5.5m。

筛面长度达到一定尺寸后，筛分效率提高很少，甚至不再提高，此时再增加筛面长度只会增加筛子的体积和重量。筛子的处理能力和筛分效率，是两个相依相存的指标，必须同时兼顾才具有实际意义。一般是在确定筛宽后，再根据长宽比确定筛长。我国矿用振动筛的长宽比多采用 2，煤用振动筛的长宽比为 2.5。

(2) 筛面倾角

筛面倾角对筛分粒度的影响及近似筛分的意义前已述及。为便于排出筛上物，筛面有时倾斜安装。倾角的大小与筛子的生产率和筛分效率有密切的关系，这是因为倾角大，料层在筛面广向前运动的速度就快，生产率就大，但物料在筛面上停留的时间缩短，减少了颗粒透筛机会，降低了筛分效率。

(3) 筛孔的大小、形状及开孔率

筛孔越大，单位筛面积的处理能力就越高，筛分效率也越高。筛孔的大小主要取决于筛分的目的和要求。对于粒度较大的常规筛分，一般是令筛孔尺寸等于筛分粒度；但是当要求的筛分粒度较小时，筛孔应该比筛分粒度稍大些；对于近似筛分，筛孔要比筛分粒度大很多。

圆形和方形筛孔所得到的筛下物的形状较为规则，而片状和条状的颗粒则容易从长方形筛孔中漏下，因此，长方形筛孔一般制作得较小。但是，在筛分潮湿、黏性的物料时，



若把长方形筛孔的长边（通常称为筛缝）顺着筛上物料的移动方向布置，就可减少对筛上物料的阻碍，从而减少堵塞。在一般情况下，筛孔尺寸越大，筛面开孔率就越高。在筛孔尺寸一定时，开孔率越大对筛分越有利，但开孔率常受到筛面强度、使用寿命的限制。

### （三）操作条件的影响

对一定的筛子和筛分原料而言，操作条件主要是指给料的数量和质量。前者即筛子负荷，通常以  $t/(\text{台} \cdot \text{h})$  或  $t/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  为单位，它与筛分效率的关系在前面已经论述；后者是指应保持连续和均匀地向筛子给料，其中均匀性既包括在任意瞬时的筛子负荷都应相等，也包括物料是沿整个筛面宽度上给进。此外，及时清理和维修筛面，也有利于筛分操作。

## 四、筛分机生产率计算

### 1. 固定筛

在生产实践中，固定筛的生产能力一般按下式计算：

$$Q = \varepsilon A s \quad (6-8)$$

式中：Q 为筛分机按给料计的生产能力， $t/h$ ；A 为筛分机的筛面面积， $\text{m}^2$ ；s 为筛孔尺寸，mm； $\varepsilon$  为比生产率，即筛孔尺寸为 1mm 时单位筛面面积的生产率， $t/(\text{mm} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^2)$ 。

### 2. 振动筛

对于振动筛的生产能力，综合考虑影响筛分过程的各种因素，以校正系数的方式将它们引入计算公式，从而得振动筛生产能力的计算公式：

$$Q = A_1 \rho_0 q K L M N O P \quad (6-9)$$

式中：Q 为振动筛按给料计的生产能力， $t/h$ ； $A_1$  为筛分机的有效筛面面积， $\text{m}^2$ ，一般取筛面几何面积的 0.8 ~ 0.9 倍； $\rho_0$  为入筛物料的堆密度， $t/\text{m}^3$ ；q 为单位面积筛面的平均生产能力， $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ；K 为代表细粒影响的校正系数；L 为代表粗粒影响的校正系数；M 为与筛分效率有关的校正系数；N 为代表颗粒形状影响的校正系数；O 为代表湿度影响的校正系数；P 为与筛分方法有关的校正系数。

### 3. 筛分效率

筛分效率是表明筛分工作的质量指标。在筛分过程中，按理说比筛孔尺寸小的细级别应该全部透过筛孔，但实际上并不是如此，它要根据筛分机械的性能和操作情况以及物料含水量、含泥量等而定。因此，总有一部分细级别不能透过筛孔成为筛下产物，而是随筛上产品一起排出。筛上产品中，未透过筛孔的细级别数量愈多，说明筛分的效果愈差，为了从数量上评定筛分的完全程度，要用筛分效率这个指标。

所谓筛分效率，是指实际得到的筛下产物重量与入筛物料中所含粒度小于筛孔尺寸的物料的重量之比。筛分效率用百分数表示：

$$E = \frac{C}{Q \frac{\alpha}{100}} \times 100\% = \frac{C}{Q \alpha} \times 10^4\% \quad (6-10)$$

式中：E 为筛分效率，%；C 为筛下产品重量；Q 为入筛原物料重量； $\alpha$  为入筛原物料中小于筛孔级别的含量，%。

但实际生产中要测定  $C$  和  $Q$  是比较困难的, 因此, 必须改用下面推导出的结果来进行计算。

在图 6-13 中, 设  $Q$ 、 $C$ 、 $T$  分别表示入筛原料、筛下物及筛上物量, 而  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\theta$  分别表示它们中小于筛孔的物料含量 (%)。于是可以得到物料平衡方程式及小于筛孔的细物料的平衡方程式:

$$\begin{cases} Q = C + T \\ Q\alpha = 100C + T\theta \end{cases} \quad (6-11)$$

解联立方程组可得

$$C = \frac{(\alpha - \theta)Q}{100 - \theta} \quad (6-12)$$

将  $C$  值代入公式 (6-11), 得

$$E = \frac{C}{Q\alpha} \times 10^4\% = \frac{(\alpha - \theta)}{\alpha(100 - \theta)} \times 10^4\% \quad (6-13)$$

该公式是在筛下物 100% 均是小于筛孔 ( $\beta = 100\%$ ) 的前提下推导出来的。但当筛网磨损严重时, 常有部分大于筛孔尺寸的颗粒进入筛下物, 出现此种情况时, 筛下物不是  $100C$ , 而是  $\beta C$ , 按此则推导出另一个筛分效率计算公式:

$$E = \frac{\beta(\alpha - \theta)}{\alpha(\beta - \theta)} \times 100\% \quad (6-14)$$

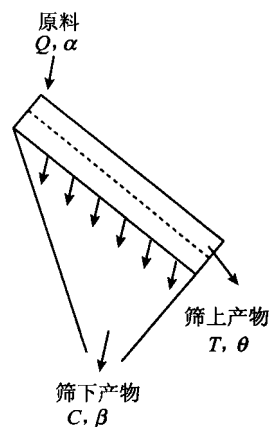


图 6-13 筛分效率的测定

## 小 结

本章的重点是掌握颚式破碎机、旋回破碎机、圆锥破碎机、液压破碎机的结构和工作原理, 能够区分中、细碎圆锥破碎机和旋回破碎机结构特点。

本章的难点是破碎和筛分的生产能力和筛分效率的计算。



### 复习思考题

1. 试说明机械能破碎的 5 种基本方式。
2. 试说明主要破碎设备的类型。
3. 试简述破碎的功耗学说。
4. 按工艺目的的不同筛分作业有哪几种?
5. 中、细碎圆锥破碎机和旋回破碎机结构不同点是什么?
6. 影响破碎效果的因素有哪些? 影响筛分效果的因素有哪些?

# 第七章 磨矿与分级

## 本章导读

磨矿与分级是选矿的重要准备作业，决定着有用矿物的单体解离程度。本章介绍了磨矿与分级的原理，以及磨矿与分级设备的类型与结构，说明了磨矿与分级的影响因素，给出了磨矿与分级的生产率计算方法。通过本章学习，可以进一步了解磨矿与分级在选矿中的作用及应用范围，掌握影响磨矿与分级效果的操作要点。

## 第一节 概 述

### 一、磨矿

磨矿是矿石破碎过程的继续。在选矿工业中，除少数有用矿物单体解离度高的砂矿不需要磨矿外，选矿厂几乎都设有磨矿作业。在湿法冶金厂、水泥厂及许多制备非金属有用矿物的工厂，也采用磨矿作业。

磨矿作业使用最广泛的是圆筒型磨矿机，其磨矿过程是将物料装入连续转动的圆筒中，圆筒内装入一定数量的不同形状的研磨体，如球、棒、短圆柱（磨段）、大块矿石、砾石等。当筒体以一定速度旋转时，这些研磨体则被带动而产生冲击、研磨作用，从而将物料磨碎。因此，筒形磨矿机的粉碎作用是外力施加于研磨体上，传递粉碎力于被磨物料，故又可称研磨体为研磨介质。这种磨碎作用称为介质磨碎。

一般来说，磨矿是为了获得细粒或超细粒产品。除圆筒型磨矿机（或称介质磨机）外，有些设备其磨碎力直接施加于被磨物料，也可获得粒度很细的产品，故也属于磨矿作业范畴，如雷蒙磨、胶体磨、气流磨等。

磨矿作业直接影响选矿厂的技术指标。如有用矿物单体解离度差，会造成精矿品位下降和回收率低。如矿石过磨产生过粉碎，不仅增加电耗、钢耗，而且恶化选别过程，降低选别指标。

磨矿作业动力消耗和金属消耗很大，电耗约占选矿厂电耗 30% 以上，磨矿介质和衬板消耗达 0.4 ~ 3.0 kg/t。另外，磨矿作业的基建投资、维修费用也很高。

根据磨矿产品细度的不同，磨矿过程可分为：

- 1) 粗磨矿，其产品粒度一般为 0.15 ~ 3.0 mm；
- 2) 细磨矿，其产品粒度一般为 0.02 ~ 0.15 mm；
- 3) 超细磨矿，其产品粒度一般小于 10  $\mu\text{m}$ ，甚至达到 0.5 ~ 1  $\mu\text{m}$ 。

根据被磨物料输送方式的不同，磨矿又可分为干式磨矿和湿式磨矿。选矿大多数采用湿式磨矿。因为水对物料有“脆化”、“助磨”、“分散”作用，对细磨有利，并且湿式作业劳动环境也比干式好。

## 二、分级

在介质（水或空气）中，物料按其沉降速度的不同分成若干粒度级别的过程称为分级。分级与筛分的目的相同，都在于将矿粒群分成不同的粒度级别，但它们的工作原理及产品的粒度特性不同。筛分是严格地按几何粒度（筛孔尺寸）分离的，具有严格的粒度界限；而分级则是按沉降速度差分开的，因此，分级产物受密度影响。在同一级别中，密度大的颗粒的粒度将小于密度小的颗粒的粒度，因而使粒度范围变宽，另外矿粒的形状以及沉降条件对按粒度分级的精确性也有影响。

水力分级在选矿中的应用有：

- 1) 与磨矿作业构成闭路作业，及时分出合格粒度产物，以减少过磨；
- 2) 在某些重选作业（如摇床选、溜槽选等）之前，作为准备作业，对原料进行分级，分级后的产物，分别给人不同设备或在不同操作条件下进行分选；
- 3) 对原矿或选后产物进行脱泥或脱水；
- 4) 在实验室内，测定微细物料的粒度组成。

## 第二节 磨矿与分级原理

### 一、磨矿原理

#### （一）磨矿机对矿石的磨矿作用

在磨矿过程中，磨矿机以一定转速旋转，处在筒体内的研磨介质由于旋转时产生离心力，致使它与筒体之间产生一定的摩擦力。摩擦力使研磨介质随着筒体旋转，并到达一定的高度。当研磨介质的自身重力（实际上是重力的向心分力）大于离心力时，研磨介质就脱离筒体抛射下落，从而击碎矿石。同时，在磨矿机转动过程中，研磨介质还会有滑动现象，对矿石产生研磨作用。所以，矿石在研磨介质产生的冲击力和研磨力联合作用下得到粉碎，如图 7-1 所示。

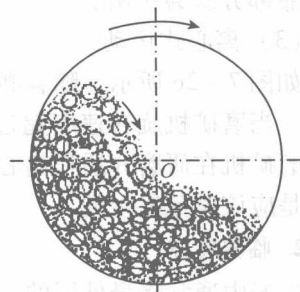


图 7-1 磨矿机对矿石的磨矿作用

#### （二）磨矿机磨矿条件的确定

磨矿机的工作参数包括临界转速、工作转速、装球质量和所需功率等。要合理而经济地选择磨矿机的这些工作参数，提高磨矿效率（每小时单位功耗处理的矿石量）和生产率，就必须研究磨矿机工作时研磨介质在筒体内的运动规律。

##### 1. 研磨介质在磨矿机内的运动规律

研磨介质在磨矿机中的运动状态与筒体转速及筒体衬板的摩擦系数有关。研磨介质在筒体中的运动状态基本上有 3 种（图 7-2）。

##### （1）泻落式运动

如图 7-2a 所示，磨矿机在低速运转时，研磨介质顺筒体旋转方向转一定的角度，自

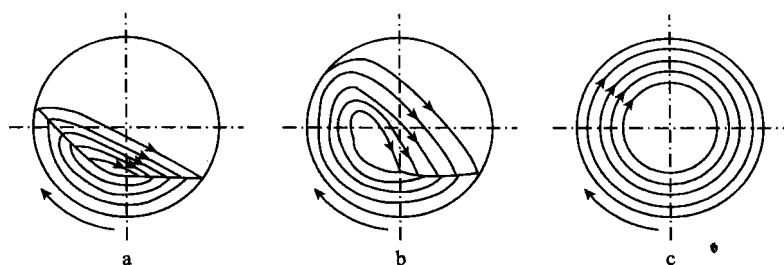


图 7-2 研磨介质的运动状态

a—泻落式运动；b—抛落式运动；c—离心式运动

然形成的各层研磨介质基本上按同心圆分布，并沿同心圆的轨迹升高。当研磨介质超过自然休止角后，则像雪崩似地泻落下来，这样不断地反复循环。

磨矿机在泻落式工作状态下，研磨介质从筒体的上部落到底部时的冲击作用较小，物料主要由研磨介质互相滑动时产生压碎和研磨作用而粉碎。棒磨机和管磨机通常在泻落式运动状态下工作。

### (2) 抛落式运动

如图 7-2b 所示，当研磨介质在高速旋转的筒体中运动时，任何一层研磨介质的运动轨迹都可以分为两段：上升时，研磨介质从落回点到脱离点是绕圆形轨迹运动；下落时，从脱离点到落回点，则按抛物线轨迹下落。以后又沿圆形轨迹运动，反复循环。

磨矿机在抛落式工作状态下，物料主要靠研磨介质群落下时产生的冲击力而粉碎，同时也靠部分研磨作用。

### (3) 离心式运动

如图 7-2c 所示，随着磨矿机旋转速度的进一步提高，研磨介质也就随着筒壁上升得更高。当磨矿机旋转速度超过一定值时，研磨介质就在离心力的作用下不脱离磨矿机筒壁。磨矿机在研磨介质作离心式运动状态下工作，就不产生磨矿作用。因此，离心式运动状态是应该避免发生的。

## 2. 临界转速

生产中通常将最外层的磨矿介质开始“离心运转”时的筒体转速，称为磨机的“临界转速”。“临界转速” $n_0$  (r/min) 为

$$n_0 = \frac{42.4}{\sqrt{D}} \quad (7-1)$$

式中： $n_0$  为磨机的“临界转速”，r/min； $D$  为磨机筒体的有效直径，即筒体规格直径减去两倍衬板的平均厚度，m。

应当指出，式 (7-1) 没有考虑介质和衬板之间存在相对滑动。但是，在工业生产中仍常用此式计算磨机的“临界转速”，并作为衡量磨机工作转速是否合适的比较标准。

目前，国内生产的球磨机的工作转速一般是临界转速的 80% ~ 85%，即  $n_{\text{转}} = (80\% \sim 85\%) n_0$ ；棒磨机的工作转速稍低。

## 二、分级原理

分级过程示意于图 7-3a，沉降末速度大于上升介质流速的矿粒下沉到分级设备的底

部，作为沉砂或底流排出；沉降末速度小于上升介质流速的细粒级产物从上端溢出，成为溢流。如果要得到多个粒级产物，则可将溢流（或沉砂）在依次减小（或增大）的上升水流中继续进行分级。

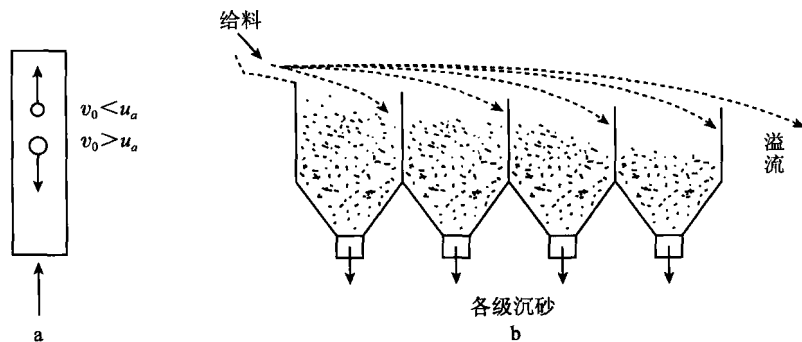


图 7-3 颗粒在垂直介质流及水平介质流中分级示意图

a—垂直上升介质流；b—接近水平的介质流

在接近水平流中进行分级时，颗粒的水平运动速度可认为与水平流速相等，但因颗粒沉降速度的不同，而将有不同的运动轨迹。最粗的颗粒较早地沉降下来，中等及细粒级的颗粒依次沉降下来，故在各分级室可得到不同粒度的沉砂，如图 7-3b 所示。最细粒级由分级室末端溢出。在回转流中，颗粒根据径向速度差分离。介质的向心运动速度是决定分级粒度的基本因素。

### 第三节 磨矿与分级设备

#### 一、磨矿设备

##### （一）圆筒型磨机

###### 1. 球磨机

###### （1）溢流型球磨机

图 7-4 是溢流型球磨机的结构图。它主要由筒体及具有中空轴颈的端盖组成，筒体用两端的中空轴颈安在轴承上。筒体及端盖的内表面镶有衬板。在我国一般使用锰钢衬板，也有的使用铸钢及橡胶衬板。橡胶衬板具有使用寿命长、生产费用低、重量轻、安装时间短、更换安全及噪声小等突出优点，值得推广及应用。

球磨机工作时，筒体内装有不同直径（25 ~ 150mm）的钢球或铸铁球。电动机通过安装在传动轴上的小齿轮和大齿轮带动球磨机转动。被磨物料由给矿器经过给料漏斗进入筒体，经过磨矿后由排矿漏斗排出，球磨机需要更换衬板或需要进入筒体内检修时，待球磨机停车后工人可从入孔进入。这种球磨机由于磨好的物料是从排料漏斗自动溢出，即靠矿浆本身高过中空轴的下边缘自流溢出，所以称为溢流型球磨机。

溢流型球磨机具有构造简单，管理和检修方便，作业率较高等优点。一般在磨矿细度要求高时，宜用该种球磨机。

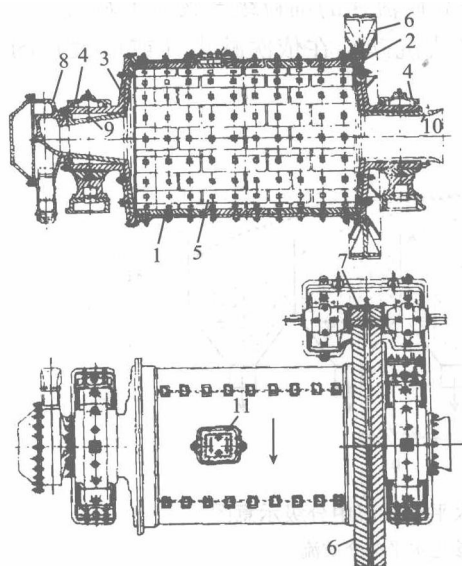


图 7-4 溢流型球磨机结构图

1—筒体；2、3—端盖；4—轴承；5—衬板；6—大齿轮；  
7—小齿轮；8—给料器；9—给料漏斗；10—排料漏斗；  
11—入孔

## (2) 格子型球磨机

这种球磨机的构造与溢流型基本相同。不同的地方是在筒的排矿端装有格子排矿装置，如图 7-5 所示。球磨机的排矿端有格子板，格子板上面有许多小孔，以便排出矿浆。格子板靠近排矿端的一侧，安装有矿浆提升装置，这是一种放射状的棱条，棱条将格子板和端盖之间的空间分成若干个（一般 8 个）通向中空轴颈的扇形室。当球磨机旋转时，放射状棱条起着提升矿浆的作用，将由格子板上小孔排出的矿浆提升到排矿中空轴颈，通过中空轴颈再从球磨机排出。这种排矿方式通常称强迫排矿。由于是强迫排矿，因此排矿速度快，并减少了矿石的过粉碎，而且增加了单位容积产量。这种形式的球磨机比同一规格的溢流型球磨机产量高。由于格子型球磨机有上述许多优点，所以在选矿厂得到广泛应用，特别是当矿石要求粗磨（如要求

磨到 48~6 目），过粉碎对选别产生明显不利影响时，采用格子型球磨机有利。

格子型球磨机的缺点是构造复杂，排矿格子板易于堵塞，而且检修困难，作业率较低。

## 2. 棒磨机

棒磨机从外形及其主要结构来看，与溢流型球磨机基本类似。不同的是它采用钢棒作为磨矿介质，钢棒长度一般比筒体长度短 20~25mm。棒磨机的锥形端盖上敷上衬板后，内表面平直，可防止筒体旋转时钢棒歪斜而产生乱棒现象。

棒磨机以钢棒的“线接触”产生的压碎和研磨作用代替了球的点接触所产生的冲击和剥磨作用，因此，具有选择性地破碎作用，从而减少了矿石的过粉碎。其产品粒度均匀，钢棒消耗量低，但不能得到很细的产品。

棒磨机一般用于第一段开路磨矿作粗磨作业。给矿粒度为 20~30mm，产品粒度为 0.3~3mm。对于脆性、易于泥化的钨、锡矿石或其他稀有金属矿石的重选厂或磁选厂，常采用棒磨机进行粗磨。棒磨机用于开路磨矿，可以代替短头圆锥破碎机进行细碎。

## 3. 砾磨机

砾磨机是古老的磨矿设备之一，从结构形式上讲砾磨机与球磨机没有什么差别，只是采用砾石或卵石作为磨矿介质。因所用介质密度较钢球轻，所以，单位容积的产量也低。

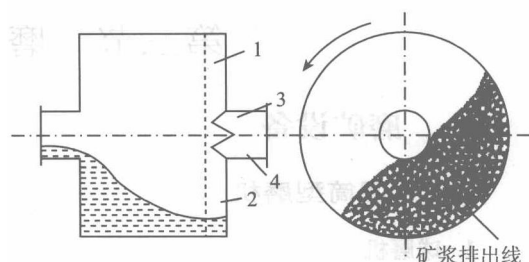


图 7-5 格子型球磨机排料示意图

1—格子板；2—矿浆提升装置；3—锥体；4—排料漏斗

砾磨机通常用于细磨，作为棒磨合自磨的二次磨矿设备，在个别情况下也有用于粗磨。由于砾磨机能耗小，生产费用低，节省金属材料（如磨矿介质），能避免金属对物料的污染等特点，因此，目前在选矿中得到较广泛地应用，特别适用于对物料有某些特殊要求的磨矿。

#### 4. 自磨机

自磨机是以被粉碎物料本身作为磨矿介质的磨矿机。自磨机的应用范围很广，由处理非金属矿石，扩展到处理黑色金属、有色金属和稀有金属矿石等方面。采用自磨机对粗碎后的矿石进行自磨，是有利降低大型选矿厂破碎磨矿车间基建投资的措施。特别是对含泥多、水分大的矿石，或者多雨地区的矿山，应用湿式自磨机进行磨矿，更显得必要。

20 世纪 70 年代以来，在用自磨机处理有色金属矿石时，因为矿石性质不均匀及不稳定，往自磨机中加 6% ~ 10% 的钢球，称半自磨机。半自磨生产率高，单位功耗下降，但钢耗不能节省，甚至比球（棒）磨多。由于钢耗增多可能抵消加钢球带来的好处，所以矿石性质较稳定及自磨过程顺利时一般不宜加钢球。半自磨多见于有色金属矿石自磨，多为湿式。

#### 5. 磨矿设备的发展趋势

目前，磨矿设备正向大型化、高效化、节能化和机电一体化方向发展。对磨矿设备进行结构创新，采用新技术、新材料对传统设备进行改进，提高其可靠性、耐久性，改善性能，提高效率。

近年来，球磨机的发展，以节能降耗为重点，不断改进和完善磨机传动方式，研究衬板和磨矿介质的材料和结构形式，开发磨机机组自动化控制等旨在保证磨矿产品细度的前提下提高磨机处理能力和磨矿效率，降低电耗和钢耗，单位电耗平均下降 20%，钢耗下降 40%，生产能力增加 10%，并开发了大型高效的球磨机。

当今，世界最大规格球磨机已达到  $\phi 8.23\text{m} \times 12.95\text{m}$ ，采用环型电机驱动，功率 18600kW。

球磨机衬板是关系到磨机高效、节能、降耗的关键零件，近年来取得显著的进展。橡胶衬板是抗腐蚀、耐磨损的非金属材料衬板，较锰钢衬板使用寿命长，质量轻，较锰钢衬板轻 85%，安装维修更为方便；能耗低，比锰钢衬板低 10% ~ 15%，产量高，较锰钢衬板高 5% ~ 10%；噪声小，较锰钢衬板低 10% ~ 15%，发展较快，应用较多。目前，世界上有 60 多个国家（包括中国）在各种规格湿式球磨机中使用，均取得显著效果。在橡胶衬板基础上发展起来的复合磁性衬板，是在橡胶衬板内装有永磁体，利用碎裂的废钢球和铁磁性矿料，在复合磁性衬板上形成抗磨保护层，磨矿过程中保护层一边被磨掉一边又重新生成，并达到动态平衡。该衬板在国外以瑞典 SKEGA 公司开发的钢盖式橡胶磁性衬板为典型代表，主要用于二段球磨机和砾磨机上，取得了节能降耗的明显效果。

现在，世界上最大半自磨机的规格已达到  $\phi 12.2\text{m} \times 7.31\text{m}$ 。并且，随着自磨、半自磨大型化发展，结构不断创新，自动控制技术不断完善，在国外老厂改造和新建选矿厂越来越多地被采用，国内也开始受到重视。

### （二）其他类型磨机及超细磨

#### 1. 盘式磨机

盘式磨机是由若干个转动的转子，施力于物料进行磨碎的磨矿设备。根据磨机的结构



形式，可分为圆盘固定式和转动型两类；按照工作辊子的施力方式，又分为悬辊式和弹簧辊式或液压辊式等。目前盘式磨机主要有雷蒙磨机（简称雷蒙磨）、辊式盘磨机和 E 型磨机等。这类设备多用于处理脆的或中等硬度的物料。

雷蒙磨又称悬辊式磨机，是一种中等速度而且带风力分级设备的细磨设备。根据辊子的数目可分为三辊（通称 3R）、四辊（4R）、五辊（5R）3 种。

该设备在非金属矿山应用较多，常用于滑石、膨润土、高岭土、硅灰石、石膏等矿石的磨粉作业，生产 -200 目或 325 目的粉状产品。该设备有时也用于磨碎煤炭、玻璃、陶瓷、水泥、农药和化肥等物料。

## 2. 塔式磨机

塔式磨机是属介质搅拌式磨机类的一种磨机，它实际上是一个垂直圆筒的立式球磨机。垂直圆形筒体内的主（竖）轴上装有螺旋搅拌叶片（或搅拌器），由电动机的驱动装置带动它作快速旋转运动，以此强迫搅拌筒体内的研磨介质和被磨物料强烈旋转，使物料受到研磨作用而粉碎。粉碎产品由磨机流入分级机，再经水力旋流器进行分级，溢流即为磨矿产品，粗粒通过管道返回磨机再磨。

干式塔式磨机除采用旋风吸尘器的空气分离系统与湿式不同外，磨机筒体、螺旋搅拌叶片和主轴驱动装置等部分同湿式塔式磨机完全一样。

塔式磨机的基本磨碎作用是磨剥而没有冲击，因此其给料粒度一般小于 3mm，不应大于 5mm，否则设备处理能力和效率均下降。

塔式磨机的规格以筒体内径和高度表示，即  $D \times H$  表示。

塔式磨机主要用于选厂中矿再磨。此外可用于烟气脱硫过程中石灰石浆的制备，石灰熟化，金矿浸出回路中磨碎和浸出，水—煤及煤油的混合配制，煤和其他物料的超细磨等。我国研制的 MQL-500 型螺旋搅拌塔式磨机有湿、干式两种，如湿式塔式磨机用作浮选金矿的再磨，以满足氰化浸出的要求。

## 3. 胶体磨机

胶体磨机由一个高速（3000 ~ 15000r/min）旋转盘和一个固定盘组成。按胶体磨机的安放位置，分立式和卧式两种。根据其结构，又分为盘式、锤式、透平式和孔口式等类型。旋转盘和固定盘之间的间隙为 0.005 ~ 1.0mm。盘子的形状可为平的、槽形或锥形。给料粒度小于 0.2mm，以料浆形式给入磨机圆盘之间。处在两个盘子中间的料浆由于受到高速旋转盘的剪切、研磨和冲击等作用而被粉碎，其产品粒度可达 1 $\mu$ m 以下。

## 4. 喷射磨机

喷射磨机又称气流磨机。这种磨机的特点是物料利用气体（压缩空气或加热蒸汽）为载能体，通过喷嘴或其他方式射入磨机，气流射入后由于降压或其他原因使物料产生高速（在很多情况下超过声速）运动。在这种高速运动的体系中，物料由于本身之间或与其他器械的碰撞而粉碎。这种粉磨方式不仅能产生极细的颗粒，同时可避免被磨物料受污染。

喷射式磨机目前类型很多，大体有以下 4 类：旋流喷射式、椭圆管喷射式、对流喷射式和冲击板喷射式。

图 7-6 为流态化床气流粉磨机结构示意图。物料由螺旋运输机从料仓给入粉磨室，

然后由对吹的喷嘴使其加速。被加速物料在喷嘴“焦点”处强烈冲击而被粉碎。在“焦点”的周围形成垂直向上的气流，带动被粉碎的物料像“喷泉”样通过分级筛，过筛细物料进入旋流器和滤尘器回收，粗物料返回料层再粉碎。

该设备的特点是高速气流经设在圆周的喷嘴径向喷入粉碎室使物料流态化，高速粒子不会碰撞粉碎室器壁，且物料不通过喷嘴，因而磨损少，可以防止产品污染。另外由于分级等配套设备完善，产品中粗粒含量少。该设备与其他喷射磨机比较，气流状况好，可降低能耗。

该设备目前多用于非金属矿等的超细磨粉碎。

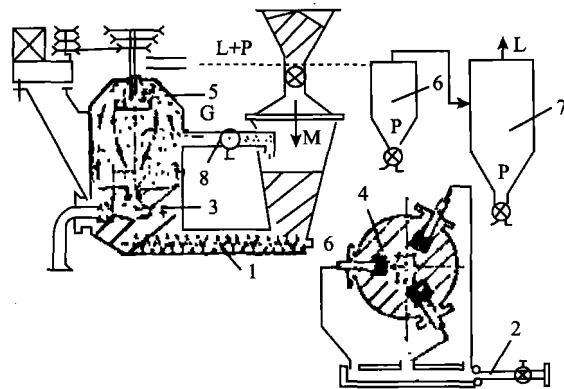


图 7-6 具有流态化床的对射式喷射磨机

1—螺旋输送机；2—压缩空气；3—喷嘴焦点；4—喷嘴；5—分级筛；6—旋流器；7—滤尘器；8—阀门；  
G—循环物料；L—气体；M—原物料；P—产品

## 二、分级设备

### 1. 机械分级机

在众多的水力分级设备中，具有提升运输沉砂机构的分级机称为机械分级机。与所有分级设备一样，机械分级机分级过程是借颗粒在水介质中的沉降速度差进行的。机械分级机主要与磨矿机配合工作进行预先分级和检查分级，还可以用于含泥矿石的洗矿以及进行脱泥、脱水。

根据运输沉砂机构的不同，机械分级机可分为螺旋分级机、耙式分级机和浮槽分级机等。螺旋分级机是利用转动的螺旋连续排出沉砂。它与后两者相比，具有构造简单、操作方便、分级槽的倾斜角度大等优点，便于同磨矿机作自流连接，故生产中一般均采用螺旋分级机。

螺旋分级机根据螺旋数目的不同，可分为单螺旋分级机和双螺旋分级机。根据分级机溢流堰的高低，又可分为高堰式、低堰式、沉浸式 3 种。

螺旋分级机的结构如图 7-7 所示。分级槽 2 呈倾斜安置，倾角一般为  $12^{\circ} \sim 18.5^{\circ}$ ，槽的底部为半圆形。矿浆从槽的中间部位进料口 7 给入，在分级槽下端的分级带完成分级。细粒级经槽子下端溢流堰 8 随水流从溢流排出口 9 排走。粗粒级产物在分级带沉降，然后由螺旋 1 将其运至槽子上端的沉砂排出口 10 排出机外。螺旋安装在中空主轴 3 上，主轴两端由轴承 4 支承，轴的上端设有传动装置 5，轴的下端置于螺旋提升机构 6 之内，

必要时可调节螺旋在槽内的高度。

连续不断给入矿浆，则溢流与沉砂也就连续分别排出。若分级机与磨矿机构成闭路，则分级机的沉砂经溜槽进入磨矿机再磨，送回磨矿机的沉砂称“返砂”。

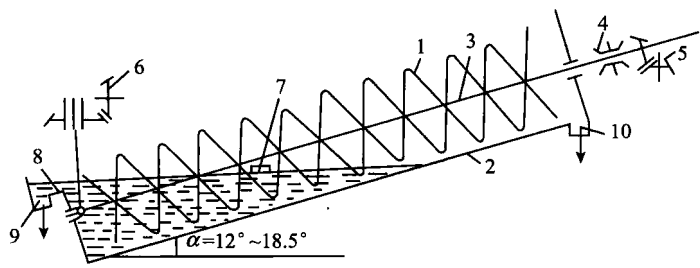


图 7-7 螺旋分级机结构示意图

1—螺旋；2—分级槽；3—螺旋轴；4—轴承；5—传动装置；6—螺旋提升机构；  
7—进料口；8—溢流堰；9—溢流排出口；10—沉砂排出口

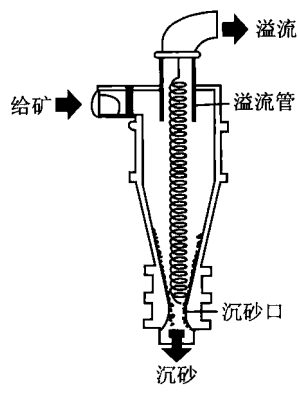


图 7-8 水力旋流器示意图

## 2. 水力旋流器

水力旋流器是一种利用离心力作用的分级设备。其结构形式按矿浆进入旋流室的旋转方向，分为左旋和右旋两种。图 7-8 为水力旋流器示意图，上部呈圆筒形，下部呈圆锥形，矿浆用砂泵以高速沿切线方向给入，因而产生很大的离心力。在离心力的作用下，较粗的颗粒被抛向器壁，以螺旋线的轨迹向下运动，最后由沉砂口排出，较细的颗粒与大部分水一起在锥体中心形成上升的螺旋流，经溢流管排出。

水力旋流器的优点是：构造简单，没有运动部件，体积小，占地面积少，生产率高。缺点是排砂嘴磨损快，工作不够稳定，因此，生产指标容易波动。

水力旋流器除用于磨矿中的分级作业外，还可用于脱水、脱泥以及脱除浮选药剂等。水力旋流器的规格用其圆筒部分的直径表示。

# 第四节 磨矿与分级的影响因素及生产率计算

## 一、磨矿的影响因素

影响磨机效率的因素很多，除了所安装的磨矿设备的类型、规格、材质及处理原矿的性质外，操作也是很重要的因素。制定出合理的操作制度，提高工人的操作水平，及时调整变化了的磨矿操作参数，是获得好的磨矿和选矿指标的重要保证。下面重点介绍一些磨机主要工作（操作）条件。

### 1. 给矿速度

磨矿机的给矿可由人工控制或自动控制。人工控制时，一般用矿仓下面的给矿机和给矿皮带秤控制磨矿机的给矿量。磨矿机转速在一定范围内，给矿速度加快，则物料充填率

增加，磨矿机生产率增大。但是，当溢流型球磨机内的物料量超过磨矿机的通过能力时，将会出现磨矿机排出钢球，吐出大块矿石，因此，磨矿机的给料必须均匀。

## 2. 矿浆浓度

当湿磨时，矿浆浓度影响物料通过磨矿机的时间、生产率和功率。一般来说，在一定范围内，随着矿浆浓度的增大，磨矿机的生产率也随之提高。一般当给矿粒度较大，循环负荷较高时，磨矿浓度以接近 80% 为宜。当原矿含有较多的矿泥时，需用较低的磨矿浓度，以使矿浆有较好的流动性。在第二段磨矿机中由于被磨物料粒度较小，而且需要细磨，矿浆浓度一般为 65% ~ 75%。砾磨比球磨要求更稀的矿浆浓度。当处理给矿粒度粗、密度大的矿石，产品粒度在 0.15mm 以上时，应保持较浓的矿浆，一般为 75% ~ 82%。棒磨机常用于第一段开路磨矿，其矿浆的平均浓度较球磨机低。磨矿机转速较高时，磨矿浓度应较低。当原矿含泥较多时，矿浆的黏性和浓度会增高，为了改善矿浆的流动性和稳定性，在不影响选矿作业（如浮选）的情况下，可以适当地添加分散剂或凝聚剂，如水玻璃、碳酸钠和石灰等。

## 3. 磨矿产品的粒度

磨矿产品的粒度与磨矿机生产能力的关系随着矿石性质的差异而改变。对于非均质矿石，磨矿机的生产能力一般随着磨矿细度增加而减小。因为非均质矿石易于产生选择性磨矿，矿石中的易磨成分在粗磨阶段已经粉碎，细磨时物料中的难磨粒子相对增多，所以产量受到影响。对于均质矿石，磨矿机生产能力随着被磨矿石粒度变细有时增高，因为这种矿石到了磨矿过程的后期，其平均粒度越来越小，故磨机生产能力愈到后期愈增高。

## 4. 磨机的转速

磨机的转速对磨矿生产率的影响，国内外已进行过很多研究工作。一般当装球率保持一定时，磨碎矿石的有用功率随磨矿机的转速率（实际转数与临界转速之比的百分数）不同而变化，因而也相应地影响到磨矿机的生产率。不同类型的矿石对磨矿机的转速率的适应情况是不同的。但总的说来，当前制造厂规定的转速率大致为 66% ~ 85%，多数在 80% 以下，磨机转速稍偏低，很难达到高的生产率。我国某些选矿厂的经验表明，适当提高磨矿机转速，其产量有一定的提高，但增加幅度很小，且能量和衬板的消耗却十分严重，磨矿机的振动也加剧。

棒磨机运转时，机内的钢棒以滚动的方式产生运动。因此，棒磨机的转速应比球磨机转速低些。

## 5. 磨矿介质添加制度

在磨矿机工作过程中，钢球或钢棒的消耗量占磨矿总钢耗的 85% ~ 90%，衬板耗量占 10% ~ 15%。磨矿介质的材质、金相组织状态、尺寸及添加制度对磨矿机的工作效率有着重要的影响。

# 二、磨矿的生产率计算

为了了解磨矿效果的好坏，评价和管理好磨矿过程，常用以下技术指标。

## 1. 磨机运转率（或磨机作业率）

它是指磨机实际工作时数占日历总时数的百分数，即

$$\text{磨机运转率} = \frac{\text{磨机实际运转总时数}(h)}{\text{同期日历总时数}(h)} \times 100\% \quad (7-2)$$

生产中每台磨机每月计算一次。全厂磨机运转率按所有磨机的总平均计算，当磨机中途停止给矿，但未停止运转时，仍按运转时间计算。磨机运转率反映磨机技术状态，它的高低反映了选矿厂的管理水平。借此还可以揭示和分析影响磨矿作业不正常工作的原因，以便采取有效改进措施，提高磨机运转率也就是提高磨矿车间的生产能力。国外球磨机先进的运转率水平高达 98%，我国有些厂球磨机运转率高的月份达 96%~97%。

## 2. 磨机生产能力

### (1) 磨机台时生产能力

它是指在一定给矿和产品粒度条件下，单位时间（h）内磨机能够处理的原矿量，以 t/(台·h) 表示。

只有当磨机的类型、规格、矿石性质、给矿粒度和产品粒度相同时，才可以比较简明地评述各台磨机的工作情况。

### (2) 磨机利用系数

它是指单位时间内每立方米磨机有效容积平均所能处理的原矿量，以 t/(m<sup>3</sup>·h) 表示。其计算公式为

$$q = \frac{Q}{V} \quad (7-3)$$

式中：Q 为给入磨机的原矿量，t/h；V 为磨机的有效容积，m<sup>3</sup>；q 为磨机利用系数，t/(m<sup>3</sup>·h)。

利用系数 q 的大小，只能在给矿粒度、产品粒度均相近的条件下，才能比较真实地反映矿石性质和磨机条件情况。因此，它也只能粗略地评述磨机的工作状况。

### (3) 特定粒级利用系数

它是以单位时间内经过磨矿过程所获得的某一指定粒级含量表示的生产能力，以 t/(m<sup>3</sup>·h) 表示。多数情况下，以磨矿过程中新生成的 -200 目级别含量表示。其计算公式为

$$q_{-200\text{目}} = \frac{Q(\beta_2 - \beta_1)}{V} \quad (7-4)$$

式中：q<sub>-200目</sub> 为按新生成的 -200 目计算的磨机生产能力，t/(m<sup>3</sup>·h)；β<sub>2</sub> 为分级机溢流中（闭路磨矿时）磨机排矿中（开路磨矿时）-200 目级别的含量，%；β<sub>1</sub> 为磨机给矿中 -200 目级别的含量，%；V 为磨机的有效容积，m<sup>3</sup>。

按新生成的 -200 目计算的磨机生产能力，消除了给排矿粒度和容积因素影响，可以较真实地反映磨机工作情况，可以比较不同规格、不同给矿粒度及产品粒度下的磨机工作情况。此法设计部门在新建选厂计算磨机生产能力时常常采用。

### (4) 磨矿效率

它指每消耗 1kW·h 动力所处理的矿量，即磨机单位功耗生产率。可表示为：1kW·h 电能所处理的原矿吨数，每 1kW·h 电能所获得的特定粒级（通常为 200 目）产品吨数。单位功耗生产率能较真实地从耗能观点上反映磨机工作情况，因此，可以把能耗与生产率

联系起来评价磨矿机的工作。磨机单位功耗生产率（指特定级别）在选厂设计时常用来计算及选择磨矿设备。

### (5) 磨机技术效率

它指磨碎所得的合格粒级产品重量与原矿中所含大于合格粒级重量之比。磨矿的目的是使矿石磨到选别要求的粒度，达不到规定的粒级称“磨不细”，磨到选别难于回收的粒级称为“过粉碎”。磨不细及过粉碎都不算合格粒级。因此，磨机技术效率从产品粒度上反映磨矿目的实现的程度。如果  $r$  及  $r_1$  分别为磨机排矿及给矿中小于磨矿粒度的产率（%）， $r_2$  及  $r_3$  分别为磨机给矿及排矿中过粉碎级别的产率（%），则磨机技术效率计算公式应为

$$E_{\text{效}} = \frac{(r - r_1) - \left[ (r_3 - r_2) \left( 1 - \frac{r_3 - r_2}{100 - r_2} \right) \right]}{100 - r_1} \times 100\% \quad (7-5)$$

由式（7-5）可见，当磨机不发生磨矿作用时， $r_1 = r_2$ ， $r_2 = r_3$ ， $E_{\text{效}} = 0$ ；而当全部矿石都磨到过粉碎时， $r_1 = 100\%$ ， $r_2 = 100\%$ ， $E_{\text{效}}$  也为 0。可见，过粉碎严重时磨机的技术效率相当低，只有既磨得细又不产生过粉碎时  $E_{\text{效}}$  才高。

### 6. 磨矿细度

它是选矿厂生产中日常检查磨机磨矿效果的又一质量指标。磨矿细度通常用“标准筛”的 200 目筛子筛分产品，并用筛下量占产品总量的百分数来表示，如磨矿细度为 -200 目占 60%（-0.074mm 占 60%）。筛下量占总量的百分数越大，表示产品越细。

## 三、分级的影响因素

### 1. 螺旋分级机的影响因素

#### (1) 矿石性质

主要指矿石的密度、粒度组成和含泥量。矿石密度几乎正比地影响按质量计的分级机的生产能力，矿石密度越大生产能力也越高。矿石的粒度组成和含泥量的影响，是反映在矿浆的粘度上，粘度增大，矿粒沉降速度减少，处理能力和分级的精确性均降低，因此，当矿泥含量较高时，常采用降低分级浓度的办法，但这又导致处理量的降低。给矿中含有适量的矿泥，对分级并非全然不利，因为借助矿泥增加矿浆的黏性，可以抑制螺旋搅动时引起矿浆紊动的发展。

#### (2) 分级机结构

分级机中矿粒群沉降的液面面积，称为分级面积。分级面积的大小影响分级机处理能力并决定分级细度。增大分级槽的宽度、提高溢流堰的高度或减小槽体的倾角都可以使分级机面积增大。分级机面积增大，按溢流的体积处理能力便增大，分级精度便更细。

螺旋的转速影响波面的搅动程度和运输返砂的能力，转速与螺旋直径成反比。对于粗粒分级可有较大的搅动程度而不致影响颗粒的沉降。对于细颗粒分级则应避免强烈搅动，其螺旋运转速度达到足以将返砂沿外槽运出即可。

#### (3) 给矿浓度

给矿浓度不仅影响分级粒度，而且还影响在该分级粒度下的处理能力。生产中常常通过调节浓度来控制分级粒度。浓度对分级粒度和生产率的影响存在一个临界值。一方面，

增大矿浆浓度，沉降的干涉程度变大，颗粒的沉降速度将变小。这样使一些较粗的颗粒未来得及沉降便被水平流带到溢流中，因而使溢流的粒度变粗。另一方面，当浓度很小时，为了保持一定的按固体计的生产率，溢流流量便会增大，增高的水平流速又会将较粗颗粒带到溢流中，使溢流粒度变粗。

## 2. 水力旋流器的影响因素

影响水力旋流器工作的因素包括结构参数、操作条件和矿石性质等。

### (1) 结构参数的影响

旋流器的直径  $D$ 、给矿口直径  $d_c$  和溢流口直径  $d_y$  是影响处理量  $Q$  和分级粒度  $d_f$  的主要结构参数。矿浆体积处理量与旋流器直径的大致关系为

$$Q \propto D^2 \quad (7-6)$$

随着矿浆流量增加，矿浆的向心流速亦增加，分级粒度变粗。将  $Q$ 、 $d_c$  和  $h$  均换算成  $D$  的比例值，则得

$$d_f \propto \sqrt{D} \quad (7-7)$$

因此，进行粗分级时常选用较大直径旋流器；在细分级时则用小直径旋流器。后者处理能力不够时，可以将多台并联使用。

### (2) 给矿压力 $p$ 对旋流器工作的影响

给矿压力是旋流器工作的重要参数，提高给矿压力，矿浆流速增大，可以提高分级效率和沉砂浓度。通过增大压力来降低分级粒度收效是甚微的，而动能消耗却将大幅度增加，且旋流器特别是沉砂口的磨损将更严重。故在处理粗物料时，应尽可能采用低压力（0.05 ~ 0.1 MPa）操作，只有在处理细粒及泥质物料时，才采用较高压力（0.1 ~ 0.3 MPa）操作。

### (3) 给矿性质对旋流器工作的影响

其中最主要的是给矿粒度组成（包括含泥量）和给矿浓度。给矿粒度组成和对产物的粒度要求影响选用旋流器直径和给矿压力。当旋流器尺寸及压力一定时，给矿浓度对溢流粒度及分级效率有重要影响。给矿浓度高，分级粒度变粗，分级效率亦将降低。

## 四、分级效率的计算

分级过程的精确性不但受颗粒的密度和形状的影响，还要受水流紊动及其他一些设备因素的影响，致使一部分粗颗粒进入细粒级别中，一部分细颗粒又进到粗级别中，这样不同颗粒在对立产物中的混杂，反映了分级的不完善性，人们常常采用分级效率来评定这种不完善程度。分级效率的确定，最常用的是算法。下面介绍两种常用的计算公式。

分级量效率  $\varepsilon$  是指按原料中某特定细粒级在溢流产物中的回收率，计算公式如下：

$$\varepsilon = \frac{\beta(\alpha - g)}{\alpha(\beta - g)} \times 100\% \quad (7-8)$$

式中： $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $g$  分别代表原料、溢流、沉砂中小于某特定粒度级别的百分含量。

分级量效率没有考虑粗颗粒混入溢流中对溢流产品质量的影响。分级过程中如果原料全部进入溢流，细颗粒在溢流中的回收率为 100%，即量效率等于 100%，但此时溢流质量最差，原料根本没有得到分级。因此只用量效率评定分级效果显然是不全面的。

分级质效率  $E$  是指溢流中实际得到分级的细级别量占原料中该级别量的百分比。将

进入溢流中的细颗粒量减去与混入的粗颗粒合在一起构成与原料粒度组成相同的那部分细颗粒量，即可得到实际分级的细颗粒量，计算公式如下：

$$E = \frac{100(\alpha - g)(\beta - \alpha)}{\alpha(\beta - g)(100 - \alpha)} \times 100\% \quad (7-9)$$

式中符号意义同上。

## 小 结

本章的重点是掌握球磨机和螺旋分级机、水力旋流器的结构与工作原理，了解磨矿与分级的影响因素。

本章的难点是分级量效率与分级质效率的区别和计算。



### 复习思考题

1. 简述球磨机的基本构造和工作原理。
2. 简述螺旋分级机和水力旋流器的工作原理。
3. 试述球磨机的排料方式及相应的磨机性能。
4. 超细磨设备都有哪些？简述其工作原理。
5. 磨机运转率如何计算，有什么意义？
6. 试说明分级量效率和分级质效率的区别。



## 第八章 磁电选矿

### 本章导读

本章概述了磁电选矿的基本原理及矿物的磁性,介绍了干式和湿式弱磁场和强磁场磁选机以及电选机的类型、结构和工作原理。通过本章的学习,可以了解磁电选矿在选矿中的地位和作用以及应用领域。

### 第一节 概 述

磁选是在不均匀磁场中利用矿物之间的磁性差异而使不同矿物实现分离的一种选矿方法。磁选既简单又方便,不会产生额外污染。磁选法广泛地应用于黑色金属矿石的分选、有色和稀有金属矿石的精选、重介质选矿中磁性介质的回收和净化、非金属矿中含铁杂质的脱除以及垃圾与污水处理等方面。

磁选是处理铁矿石的主要选矿方法。我国铁矿石资源丰富,目前保有的探明储量已达500亿t,居世界前列,但贫矿占90%左右,富矿仅占10%左右,而富矿中又有5%左右因含有害杂质不能直接冶炼,因此铁矿石中有90%以上需要选矿。世界上其他国家的情况也大体如此。铁矿石经选矿后,提高了品位,降低了二氧化硅和有害杂质含量,有益于冶炼过程。根据我国的实践,铁矿品位每提高1%,高炉利用系数可增加2%~3%,焦炭消耗量可降低1.5%,石灰石消耗量可减少2%。

许多有色金属和稀有金属矿物具有不同的磁性。当用重选和浮选不能得到最终精矿时,可用磁选结合其他方法进行分选。例如,用重选得到的黑钨粗精矿中,含有一定量的锡石,利用黑钨矿具有弱磁性而锡石无磁性这一特点,采用磁选法进行处理后,可得到合格的钨精矿。在重介质选煤或选矿时,多采用磁铁矿粉或硅铁作为加重质,由于作为重介质的悬浮液要循环使用,需要用磁选法回收和净化加重质。

非金属原料中一般都含有有害的铁杂质,磁选就成为非金属选矿中重要的作业之一。例如,当高岭土中含铁高时,高岭土的白度、耐火度和绝缘性会降低,严重影响制品质量。一般当铁杂质除去1%~2%,白度可提高2~4个单位。现有的最有效的高岭土除铁方法是高梯度磁选,蓝晶石、红电气石、长石、石英及霞石、闪长岩的分选,很早就使用了干式磁选。

进入选矿厂或选煤厂的原矿中常混有开采时带入的铁器,为保护破碎机等设备,需要在大块物料破碎前用磁选法除铁。

随着人类环境保护意识的提高和资源再生的需要,磁选法被广泛用于废金属的回收与分离,以及污水处理等过程中。医学上还用磁选法来分离血液中的红细胞等。

## 第二节 磁力分选原理

### 一、磁选机的磁场

磁场是物质的特殊状态，并显示在载电导体或磁极的周围。描述磁场大小和方向的物理量有磁感应强度  $B$  和磁场强度  $H$ 。在国际单位制中，磁感应强度  $B$  的单位为特斯拉 (Tesla)，记为 T，量纲为  $\text{I}^{-1}\text{MT}^{-2}$ 。有时用高斯这一单位， $1\text{T}=10000$  高斯。磁场强度的国际单位为安培每米 ( $\text{A/m}$ )，量纲为  $\text{IL}^{-1}$ 。磁感应强度与磁场强度间存在如下关系：

$$B = \mu H \quad (8-1)$$

式中： $\mu$  为物质的磁导率。

当磁介质被置于磁场中时，由于磁场的作用而磁化，从而在介质内产生磁矩。单位体积内的磁矩称为磁化强度，磁化强度是表征磁介质磁化程度的物理量。在一般情况下，磁介质中某点的磁化强度  $M$  与该点的磁感应强度成正比，在国际单位制中表示为

$$M = \kappa B / \mu = \kappa H \quad (8-2)$$

式中： $\kappa$  为物质的体积磁化率。

在磁介质中，磁场中任意点处的磁感应强度，除了原磁场外，还应包括磁介质磁化后产生的附加磁场。因此，在有磁介质的磁场中，任一点的磁感应强度  $B$ 、磁场强度  $H$ 、磁化强度  $M$  之间存在如下关系：

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (8-3)$$

比较式 (8-1)、(8-2) 和 (8-3) 可知：

$$\mu = \mu_0 (1 + \kappa) \quad (8-4)$$

令  $\mu_r = 1 + \kappa$ ， $\mu_r$  称为磁介质的相对磁导率。

$\kappa$  只与磁介质的性质有关。它是表示物质被磁化难易程度的量， $\kappa$  值愈大，表明该物质愈容易被磁化。对大多数物质， $\kappa$  是常数，强磁性物质的  $\kappa$  不是常数。

物质的体积磁化率与其本身密度的比值，称为物质的质量磁化率，或物质的比磁化率 (系数)  $\chi$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )，即

$$\chi = \kappa / \delta \quad (8-5)$$

### 二、磁选基本条件

磁选是在磁选设备所提供的非均匀磁场中进行的。被磁选矿石进入磁选设备的分选空间后，受到磁力和机械力 (包括重力、离心力、流体阻力等) 的共同作用，沿着不同的路径运动，对矿浆分别截取，就可以得到不同的产品，如图 8-1 所示。

因此，对较强磁性和较弱磁性颗粒在磁选机中成功分选的必要条件是：作用在较强磁性矿物上的磁力  $F_1$  必须大于所有与磁力方向相反的机械力的合力，同时，作用在较弱磁性颗粒上的磁力  $F_2$  必须小于相应机械力之和，即

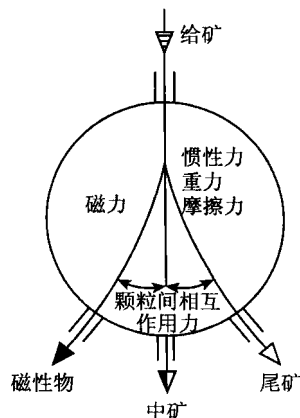


图 8-1 磁选过程模拟图

$$F_1 > \sum F_{\text{机}} \quad (8-6)$$

$$F_2 < \sum F_{\text{机}} \quad (8-7)$$

这一公式说明，磁选的实质是利用磁力和机械力对不同磁性颗粒的不同作用而实现的。进入磁选机的矿石将被分成两种或多种产品，在实际分选中，磁性矿物、非磁性矿物不可能完全进入相应的磁性产品、非磁性产品和中矿中，而是呈一定的随机性。因此，磁选过程的效果可用回收率、品位、磁性产品中磁性物质与给矿中磁性物质之比和磁性产品中磁性物质的含量来表示。

### 三、磁力

磁场有均匀磁场和非均匀磁场之分。磁场的均匀性可以用磁场梯度来表示，即  $\text{grad}H$  或  $\text{grad}B$ 。

作用在磁选机磁场中磁性颗粒上的磁力，可由它在磁化时所获得的位能来确定，其位能可用下式求出：

$$U = - \int_V \frac{\mu_0 \kappa H^2}{2} dV \quad (8-8)$$

式中： $U$  为被磁化颗粒的位能； $\mu_0$  为真空磁导率； $\kappa$  为颗粒的体积磁化率； $dV$  为颗粒的体积元； $H$  为外磁场强度。

根据力学定律，作用在颗粒上的磁力可用颗粒位能的负梯度值来表示，即

$$F_{\text{磁}} = - \text{grad}U = \text{grad} \int_V \frac{\mu_0 \kappa H^2}{2} dV \quad (8-9)$$

当颗粒粒度不大时，可假定颗粒的体积磁化率在所占的体积范围内是个常数，其所占的体积内  $H \text{grad}H$  也近似为常数，则磁力  $F_{\text{磁}}$  为

$$F_{\text{磁}} = \mu_0 \kappa V H \text{grad}H \quad (8-10)$$

式中： $V$  为颗粒体积。

在磁选研究中常用比磁力的概念，它是作用在单位质量颗粒上的磁力。运用比磁力的概念可以消除矿物颗粒中实际存在的空隙对磁力计算的影响。

$$F_{\text{磁}} = F_{\text{磁}} / m = \frac{\mu_0 \kappa V H \text{grad}H}{\delta V} = \mu_0 \chi H \text{grad}H \quad (8-11)$$

式中： $m$  为颗粒的质量， $\text{kg}$ ； $\delta$  为颗粒的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $\chi$  为颗粒的比磁化率， $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

$H \text{grad}H$  称为磁场力，单位为  $\text{A}^2/\text{m}^3$ 。它在数值上相当于  $\mu_0 \chi = 1 \text{Hm}^2/\text{kg}$  时的比磁力。磁场力的定义表明，磁选时，仅仅只有一个适宜的磁场强度是不够的，这个磁场还必须有一定的磁场梯度。这就是在前面强调的磁选是在一个非均匀的磁场中进行的原因。

磁力或比磁力公式均表明，作用在磁选颗粒上的磁力决定于颗粒的磁性和磁选设备的磁场力  $H \text{grad}H$ 。无论是提高磁场力或提高颗粒的比磁化率，都可以提高颗粒所受的磁力。因此，提高磁力公式中的任何一项，都可以达到磁分选的目的。

在公式推导时，假设颗粒所占体积内磁场力  $H \text{grad}H$  近似为常数。这一假定只有当颗粒粒度很小时才成立。当颗粒粒度较大时，该假定就会引起很大的误差。因此，对大颗粒所受的磁力，应用积分的方法来计算，但颗粒形状是不规则的，所以积分计算很难做到，

经验法可以作参考。

当强磁性矿粒紧贴或靠近磁系时，会增加磁极间隙的磁导，使磁场发生很大畸变，致使磁场强度和磁场梯度有所提高，矿粒实际所受到的磁力大于公式计算值。此时，需在公式中引入一个修正系数，该系数考虑了矿粒的平均直径与磁系极距的比值。修正系数见表 8-1。

表 8-1 磁力计算修正系数

矿粒平均直径 $d$ ：极距 $l$	<0.05	0.05 ~ 0.2	>0.2
修正系数	1.1	1.5	2 ~ 2.5

磁性矿粒与非磁性矿粒分离的必要条件是作用在矿粒上的磁力大于机械力的合力，但区分和计算所有的机械力是很困难的，机械力多是根据磁选机的类型并结合经验估算的。

### 第三节 矿物的磁性

#### 一、物质的磁性

磁性可以看成是物质内带电粒子运动的结果，是物质的基本属性之一。自然界中各种物质都具有不同程度的磁性，大多数物质的磁性都很弱，只有少数物质才有较强的磁性。就磁性来讲，物质可以分为三类：顺磁性物质、逆磁性物质和铁磁性物质。

顺磁性物质在磁化场中呈现微弱的磁性。磁化后产生的附加磁场与磁化场方向相同。属于顺磁性的物质很多，有 Na、K、Cr、Mn 以及许多稀土金属、铁族元素的盐类等。

逆磁性物质在磁化场中呈现微弱的磁性，磁化后产生的附加磁场与磁化场的方向相反。但是，只有在磁化场不存在、原子本身磁矩等于零时才显出逆磁性。在其余条件下逆磁性则被顺磁性和铁磁性效应所掩盖。属于逆磁性的物质较多，有色金属 Cu、Zn、Ag、Sb 等，非金属 Si、P、S 等，惰性气体及许多有机化合物等。

铁磁性物质磁化后在磁化场中能产生很强的而且与磁化场方向相同的附加磁场，呈现很强的磁性。铁磁性是由于分布在物质晶格结点上的大量顺磁性原子交换作用的结果，使原子磁矩平行排列。

此外，还存在反铁磁性物质和亚铁磁性物质。反铁磁性物质的原子磁矩反向平行排列，正好相互抵消。亚铁磁性物质是离子磁矩反向平行排列，但由于离子磁矩不相等，所以不能完全抵消，还剩余一部分。铁磁性物质、亚铁磁性物质和反铁磁性物质在一定温度以上表现为顺磁性，这个温度成为涅耳温度。由于反铁磁性物质的涅耳温度很低，所以在常温下可以把反铁磁性物质列入顺磁性物质一类。亚铁磁性物质的宏观磁性大体上与铁磁性物质相类似，从应用角度把它们列入铁磁性物质之中。

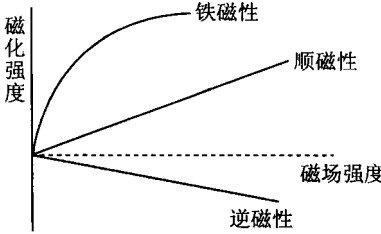


图 8-2 物质的磁化强度和磁场强度间的关系

典型的顺磁性、逆磁性、铁磁性物质的磁化强度和磁场强度间的关系，如图 8-2 所

示。顺磁性物质的上述关系是斜率为正的直线关系；逆磁性物质为负斜率直线关系；铁磁性物质为一渐近曲线，随磁场强度的增大，物质磁化强度开始变化很快，然后趋于平缓，最后达到饱和。值得注意的是，当磁场强度相当小的时候，铁磁性物质磁化强度趋于饱和值。

## 二、磁选中矿物磁性的分类

磁选中矿物磁性的分类不同于物质磁性的物理分类，通常，按比磁化率大小把所有矿物分成强磁性矿物、弱磁性矿物和非磁性矿物。

强磁性矿物物质比磁化率  $\chi > 4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，在磁场强度  $80 \sim 136 \text{ kA/m}$  的弱磁场磁选机中可以回收。这类矿物主要有磁铁矿、磁赤铁矿、钛磁铁矿、磁黄铁矿和锌铁尖晶石等，这类矿物大多属于亚铁磁性物质。

弱磁性矿物比磁化率  $\chi = 1.26 \times 10^{-7} \sim 7.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，在磁场强度  $480 \sim 1840 \text{ kA/m}$  的强磁场磁选机中可以选出。该类矿物较多，如大多数铁锰矿物、赤铁矿、镜铁矿、菱铁矿、褐铁矿、水锰矿、硬锰矿、软锰矿和菱锰矿等；一些含钛、铬、钨的矿物；钛铁矿、金红石、铬铁矿、黑钨矿等；一些造岩矿物，如黑云母、角闪石、绿泥石、绿帘石、石榴子石、橄榄石、辉石等。这类矿物多属于顺磁性物质，也有一些属于反铁磁性物质。

非磁性矿物物质比磁化率  $\chi < 1.26 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，是目前无法用磁选法回收的矿物。这类矿物很多，如部分金属矿物：辉钼矿、闪锌矿、方铅矿、辉锑矿、白钨矿、锡石、红砷镍矿、金等；大部分非金属矿物：煤、自然硫、金刚石、高岭土、石膏、萤石等；大部分造岩矿物：石英、长石、方解石等，这类矿物有的属于顺磁性物质，也有的属于逆磁性物质，如方铅矿、金、辉锑矿和自然硫等。

应当指出，上述分类是建立在当今磁选技术水平上的，各国的具体分类指标也有一定的出入，尤其是弱磁性矿物和非磁性矿物的界限，该界限会随着磁选技术的发展，磁选机磁场力的提高而逐渐淡化，所以这仅仅是一种大致的分类。另外，矿物的磁性还受粒度、形状的影响。因此，对具体矿物，还需通过实际测定，才可以准确得知它的磁性大小。

## 三、强磁性矿物的磁性及影响因素

### 1. 强磁性矿物的磁性

磁铁矿、磁赤铁矿、钛磁铁矿、磁黄铁矿等强磁性矿物，它们的磁性具有共同的特性。磁铁矿是典型的强磁性矿物，又是磁选所处理的主要对象。

磁铁矿属于亚铁磁性物质，是典型的铁氧体。铁氧体的晶体结构主要有 3 种：尖晶石型、磁铅石型和石榴石型。尖晶石型铁氧体的化学分子式为  $\text{XFe}_2\text{O}_4$ ，其中，X 代表二价金属离子，常见的有  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  等，磁铁矿的分子式为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ，还可写成  $\text{Fe}^{2+} \text{Fe}_2\text{O}_4$ ，它是属于尖晶石型的铁氧体。

磁铁矿的磁性特点有：

1) 磁铁矿的磁性不是来自原子磁矩的转动，而是来自磁畴壁移动和磁畴转动，而且磁畴壁的移动起主要作用，因此，磁铁矿的磁化强度和磁化率很大，存在磁饱和现象，且在较低的磁场强度下就可以达到饱和。

2) 磁铁矿的磁化强度、磁化率和磁场强度间具有曲线关系，磁化率不是常数，而是

随磁场强度变化而变化。磁铁矿的磁化强度除与矿石性质有关外，还与磁场强度变化历程有关。

- 3) 磁铁矿存在磁滞现象，当它离开磁化场后，仍保留一定的剩磁。
- 4) 磁铁矿的磁性与矿石的形状和粒度有关。

2. 影响因素

(1) 磁场强度

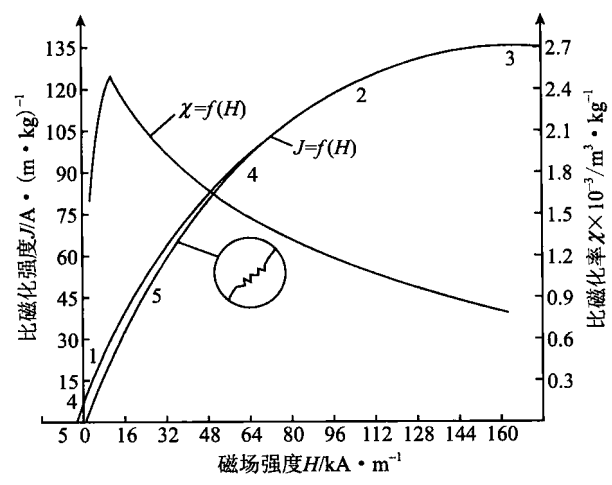


图 8-3 磁铁矿的比磁化强度、比磁化率与磁场强度的关系

图 8-3 是我国某矿山磁铁矿的比磁化强度、比磁化率与磁场强度间的关系，从磁化曲线  $J=f(H)$  看，当磁场强度  $H=0$  时，磁铁矿的比磁化强度  $J=0$ 。随着磁场强度的提高，磁铁矿的比磁化强度  $J$  开始缓慢增加（0—1 段），随后迅速增加（1—2 段），接着又缓慢增加（2—3 段），达到某一特定的值后不再变化，这一特定的点（3）称为磁饱和点，用  $J_{\max}$  表示（ $J_{\max}=10.8\text{MA}/(\text{m}\cdot\text{kg})$ ）。再降低磁场强度  $H$ ，比磁化强度  $J$  随之减小，但并不是沿原来的曲线（0—1—2—3 段），而是沿高于原来的曲线（3—4 段）下降。当磁场强度降为 0 时，比磁化强度  $J$  并没有降到 0，而是保留一定的数值，这一数值称为剩磁，用  $J_r$  表示（约  $400\text{kA}/(\text{m}\cdot\text{kg})$ ）。这种现象称为磁滞现象。如要消除剩磁  $J_r$ ，需要对磁铁矿施加一个反方向的退磁场。随着退磁场逐渐增大，比磁化强度  $J$  沿着曲线（4—5 段）下降，直到  $J=0$ 。消除剩磁  $J_r$  所施加的退磁场强度称为矫顽力，用  $H_c$  表示（ $H_c=1.7\text{kA}/\text{m}$ ）。

从比磁化率曲线  $\chi=f(H)$  看出，磁铁矿的比磁化率不是一个常数，而是随磁场强度  $H$  变化而变化。开始时，随磁场强度增加比磁化率迅速增大，在磁场强度约为  $8\text{kA}/\text{m}$  时达到最大， $2.5\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{kg}$ 。之后，再增加磁场强度  $H$ ，比磁化率下降。不同的矿物，比磁化率不同，达到最大值所需要的磁场强度也不同，它们所具有的剩磁和矫顽力也不同。即使是同一种矿物，如磁铁矿，由于晶格构造、晶格缺陷、类质同象等生成特性的不同，它们的比磁化率、剩磁、矫顽力也不同。

(2) 颗粒形状的影响

不同形状的矿粒，在相同的磁场中被磁化时显示的磁性不同。长条形矿粒的比磁化强

度和比磁化率都比球形矿粒的大。组成相同、含量相同的圆柱形磁铁矿在同一磁场强度作用下比磁化强度和比磁化率与其长度的关系：长度越大的矿粒，比磁化强度和比磁化率也越大。

### (3) 颗粒粒度的影响

强磁性矿粒粒度的大小，对矿粒的磁性有显著影响。随粒度的减小，矿粒的比磁化率也随之变小，矫顽力随之增大。即矿粒粒度越小，则越不易磁化，磁化后又不易退磁，尤其是当粒度小于  $20 \sim 30 \mu\text{m}$  时。

矿石粒度愈细，其磁性愈弱，磁选时就越容易造成损失，所以磨矿时不能过磨。只要目的矿物单体解离就行。但另一方面，粒度细，矫顽力大，使得细粒矿石较牢固地结成磁团或磁链，而磁链要比单个矿粒大得多，其整体磁性也变大，分选过程中，细粒损失相应减小。

磁铁矿在磁选时，很少以单个矿粒出现，绝大多数呈磁团或磁链状态存在。磁团聚现象的存在，可以减少金属流失。但磁团聚会使一部分脉石包裹在磁团或磁链中，从而造成对磁性精矿的污染，另外，当采用阶段磨矿阶段分选的工艺流程时，有些磁团或磁链会作为沉砂去再磨。也有些磁团或磁链，进入分级机溢流，使分组粒度变粗，这都影响下面磨矿分级作业的工艺效果。因此，在分级作业前，需要用脱磁设备对物料脱磁。

### (4) 矿物氧化程度的影响

磁铁矿在矿床中经过长期氧化以后，局部或全部变成假象赤铁矿（结晶外形为磁铁矿而化学成分已变成赤铁矿了）。随着磁铁矿氧化程度的增加，磁性减弱，比磁化率显著减小。磁化率的最大值越来越不明显，曲线越来越接近为一条水平线。

对矿石组成比较简单，铁矿石中硅酸铁、硫化铁、铁白云石等含量小于 3%，主要的铁矿物又为磁铁矿、赤铁矿和褐铁矿，可采用磁性率法即矿石中  $\text{FeO}$  含量和全铁（ $\text{TFe}$ ）含量的百分比来反映铁矿石的磁性。纯磁铁矿的磁性率  $= \text{FeO} / \text{TFe} = (56 + 16) / (56 \times 3) \times 100\% = 42.8\%$ 。铁矿石的磁性率低，说明它的氧化程度高，磁性弱。工业上把磁性率大于 37% 的铁矿石划为磁铁矿石；把磁性率等于 28% ~ 37% 的铁矿石划为半假象赤铁矿石；把磁性率小于 28% 的铁矿石划为假象赤铁矿石。

对矿石组成复杂，铁矿石中的硅酸铁、硫化铁和铁白云石等含量较多，不能采用磁性率法反映铁矿石的磁性。例如，某些铁矿石中含有较多的硅酸铁矿物，它的磁性率很高有时甚至大于纯磁铁矿石的磁性率，但实际磁选效果很差；又如铁矿石中含有较多的磁黄铁矿，它的磁性率不高，但实际的磁选效果很好；再如某些铁矿石中的半假象赤铁矿在弱磁选时也可以被选出，磁选效果仍较好，所以可将它划属磁铁矿石类型之中。遇到这种情况，最好用矿石中磁性铁  $\text{mFe}$  对全铁  $\text{TFe}$  的占有率大小来划分铁矿石类型，该比例可简称为磁铁率，划分标准为： $\text{mFe}/\text{TFe} > 85\%$  为磁铁矿石， $\text{mFe}/\text{TFe} = 15\% \sim 85\%$  为混合矿石， $\text{mFe}/\text{TFe} < 15\%$  为赤铁矿石。

### (5) 强磁性矿物含量的影响

磁铁矿与脉石矿物的连生体，在生产过程中极容易混入磁铁矿中，影响精矿的质量。连生体的磁性、连生体的结构、磁畴强度和分选介质有关。

强磁性矿物的贫连生体，其比磁化率要比弱磁性脉石矿物的比磁化率大得多，而富连生体的比磁化率则更大。因此，在使用恒定磁场的磁选机分选时，连生体进入磁性精矿的

可能性是很大的。分析精矿组成发现，单体脉石含量虽很小，而以连生体形式存在的脉石却很多，所以连生体是影响精矿质量的重要因素。

#### 四、弱磁性矿物的磁性及其影响因素

与强磁性矿物相比，弱磁性矿物的磁性有明显的不同：①弱磁性矿物的比磁化率比强磁性矿物的小得多；②弱磁性矿物的比磁化率大小只与矿物组成有关，为一常数，与磁场强度及矿物本身的形状、粒度等因素无关；③弱磁性矿物没有磁饱和现象和磁滞现象，它的磁化强度与磁场强度间为直线关系；④若弱磁性矿物中混入强磁性矿物，即使少量也会对其磁特性产生一定甚至是较大的影响。

关于弱磁性矿物的磁性，研究较多的是弱磁性铁矿物和弱磁性锰矿物。

对于弱磁性铁矿物：赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿、黄铁矿，可以通过磁化焙烧的方法人为地提高它们的磁性，这样它们就变成了人工强磁性矿物  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  或  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，可以用弱磁场磁选机进行分选。

人工强磁性矿物与天然强磁性矿物的磁性基本相同，但人工磁铁矿的剩磁和矫顽力比天然的大，而比磁化率要小。因而在选矿中磁团聚现象严重，精矿质量和回收率要比天然的低。

### 第四节 磁选设备及操作因素

#### 一、弱磁选设备

##### （一）干式弱磁场磁选机

##### 1. 除铁器

除铁器主要用来从料流中除去夹杂的铁块或铁屑，有电磁和永磁两种。除铁器分固定悬挂式和带式悬挂两种。

固定悬挂式一般悬挂在运料皮带的上方（图 8-4），从料流中检出夹杂的铁块或铁屑，但需人工从磁铁上排除杂铁，故一般用在含铁较少的料流中除铁。磁铁的宽度要与料流的宽度或皮带运输机的宽度相适应。

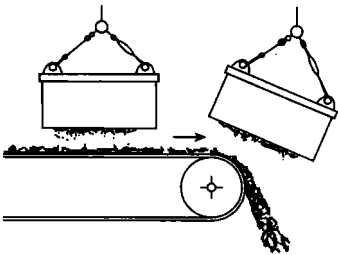


图 8-4 固定悬挂式除铁器

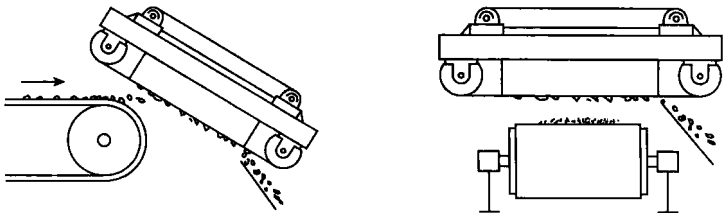


图 8-5 带式悬挂除铁器

带式悬挂除铁器有两种方式，一种与运料皮带成直角交叉，杂铁从运料带的侧边排出；另一种与运料皮带方向一致，杂铁从料流的前端排出，如图 8-5 所示。主要用于从



非磁性料流中检出块状铁质物料，可以用在煤炭、铁渣和钢渣、工业垃圾等物料的除铁或回收铁的作业中。

2. 磁滑轮

磁滑轮，又称磁力滚筒，有电磁和永磁两种。永磁滑轮结构简单，不耗电能，工作可靠，易于维修，应用较广。下面主要介绍永磁滑轮。

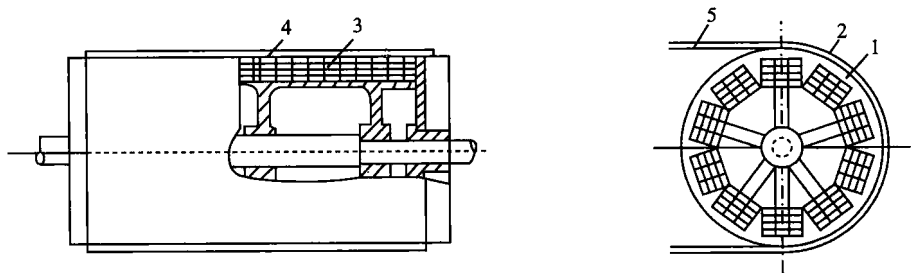


图 8-6 CT 型磁滑轮

1—多极磁系；2—圆筒；3—磁导体；4—铝环；5—皮带

(1) 设备结构

主要由锶铁氧体组成磁包角  $360^\circ$  的多极磁系，套在磁系外面的由非导磁材料制成的旋转圆筒组成，如图 8-6 所示。磁系和圆筒套在一个轴上，作为皮带的首轮。

(2) 磁系和磁场特性

沿物料运动方向磁极有交变的，也有单一的。当处理的物料粒度小于 120 mm 时，采用交变极性有利于提高选矿效率。交变磁场特性如图 8-7 所示，其特点是磁极间隙中间和极面上磁场强度最低，磁极边缘处最高。距极面越远，同距离处磁场强度变化越小。离极面太近的磁场对分选粗粒物料起不了太大作用。

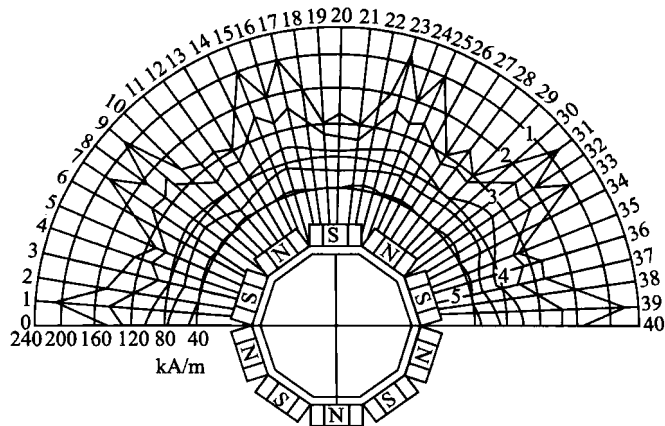


图 8-7 CT 型磁滑轮磁场特性

距磁系表面距离：1—0mm；2—10mm；3—30mm；4—40mm；5—50mm

### (3) 分选过程

矿石均匀地给在皮带上，当矿石经过磁滑轮时，非磁性或者磁性很弱的矿粒在离心力和重力的作用下脱离皮带面，磁性较强的矿粒受磁力的作用被吸在皮带上，并由皮带带到磁滑轮的下部，当皮带离开磁滑轮伸直后，磁性矿粒所受的磁力减弱而落在磁性产品槽中。分选时，产品的产率和质量主要是由装在磁滑轮下面的分离隔板的位置调节的。

### (4) 应用

磁滑轮用于大块（10 ~ 120 mm）强磁性矿石的预选，能分选出混入矿石中的围岩，降低原矿石的贫化。一般可分离出产率占原矿 15% ~ 35% 的废弃尾矿以及再需处理的中间产品，此时磁滑轮多安装在粉碎作业之后。另有一些选矿厂，在细碎作业和磨矿作业之间设置磁滑轮，分出部分废弃尾矿，既可以降低入磨入选矿石量，又可以提高入选矿石的品位。在赤铁矿石的还原焙烧作业中，用磁滑轮控制焙烧质量，使没有充分还原的矿石经过磁滑轮分出，再返回焙烧炉磁化焙烧，磁性强的、质量合格的焙烧矿进入下一道工序。

## 3. 筒式磁选机

筒式磁选机由以下主要部件组成：永磁固定磁系、给料机构（上部或下部给料）、排料机构、传动机构和机架。

### (1) 结构

我国制造的 CTG 型磁选机结构如图 8-8 所示。圆筒用 2mm 玻璃钢制造，表面粘上一层耐磨橡胶。磁系由锶铁氧体永磁块组成，磁系包角  $270^\circ$ ，磁极极性沿圆周方向交变，沿轴向极性一致。圆筒用玻璃钢而不用不锈钢的主要原因是为了防止转速高使滚筒因涡流发热。

磁选机有单筒和双筒两种。单筒机分选带长度可以通过挡板位置调整，双筒机可以通过调整磁系偏角来适应不同分选流程的需要（精选或扫选）。

### (2) 分选过程

磨细的干矿粒由电振给料机先给入到上滚筒进行分选，磁性矿粒吸附在筒面上被带到无极区卸下，从精矿区排出；非磁性矿粒和连生体因重力和离心力共同作用被抛离筒面，进入下滚筒进行分选，非磁性矿粒进入尾矿槽，富连生体同前面选出的磁性矿粒进入精矿槽。分选箱在负压状态下工作，管道和除尘器相连。

### (3) 应用

用于细粒强磁性矿石的干选，也适用于从粉状物料中剔除磁性杂质和提纯磁性材料。在冶金、机械、化工、电力、建材等方面都获得了广泛应用。

国外的干式弱磁场筒式磁选机有前苏联的 CЭ 型筒式磁选机、萨拉-莫特赛（Sala - Mortsell）型磁选机等。

## (二) 湿式弱磁场磁选机

湿式弱磁场磁选机有电磁和永磁两种。鉴于永磁弱磁场磁选机具有明显的优点，所以

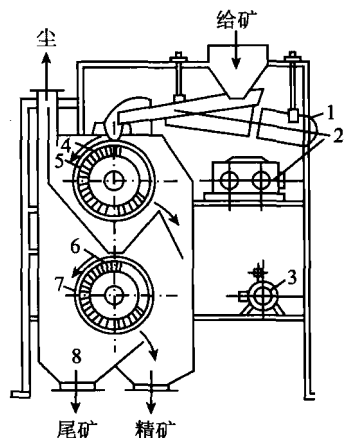


图 8-8 CTG 型磁选机

1—电振给料机；2—无级调速机；  
3—电动机；4—上圆筒；5、7—圆  
缺磁系；6—下圆筒；8—分选箱

比电磁的应用广泛。

1. 永磁筒式磁选机

永磁筒式磁选机是应用很广泛的一种湿式弱磁场磁选设备。该类设备国内外都已系列化，大型化。永磁筒式磁选机广泛用于磁铁矿分选、磁性加重介质回收及为湿式强磁选给矿做准备。

永磁筒式磁选机由圆筒、磁系、分选槽及给料、排料和溢流机构成。磁系排列和磁极数量对分选结构有决定性影响，筒径小的磁选机一般用 5 极，大筒径磁选机常用 7 极磁系。极性沿周边方向交变，沿轴向极性相同。磁系包角  $106^{\circ} \sim 135^{\circ}$ ，磁偏角（磁极中线偏向精矿排出端与垂直线的夹角） $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ，采用铁氧体永磁体，在给定的特殊磁场分布条件下能产生最高的磁场强度，圆筒的作用是运送吸着的磁性颗粒和防止矿浆浸入磁系。圆筒和端盖用非磁性、高电阻率和耐腐蚀材料制造。在磁场中工作的槽体用奥氏体不锈钢制造，并用合成材料衬里防止磨损。排矿室的大小应能调节，以适应处理量的变化。同样，为了控制溢流速度，溢流堰也是可调的。磁选机一般都用齿轮电动机传动。

图 8-9 是直径为 750 mm 和 1050mm 的磁选机的磁场特性。

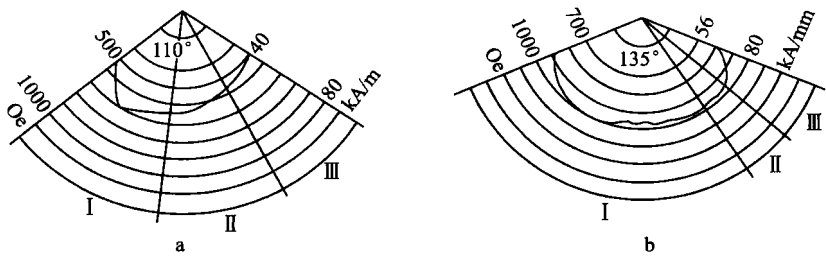


图 8-9 磁选机的磁场特性  
a—直径为 750mm；b—直径为 1050mm  
I—分选区；II—输送区；III—脱水区

为了提高生产能力和分选效果，若在永磁筒式磁选机的主磁极的空隙中增加辅助磁极（图 8-10），磁极表面和分选空间的磁场强度和磁场作用深度都会得到改善。辅助磁极极性应当与相邻主磁极相同，以便降低磁通漏损，从而增加极隙间和极面的磁场强度。

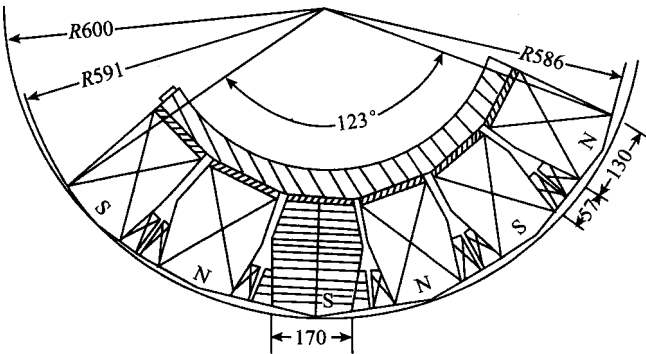


图 8-10 CTB-1218 永磁筒式磁选机 T 形磁极结构示意图

根据磁选机槽体结构形式的不同，湿式圆筒磁选机有三种槽体结构形式：顺流式、逆流式和半逆流式，如图 8-11 所示。国产永磁筒式磁选机对应的型号为 CTS、CTN 和 CTB。

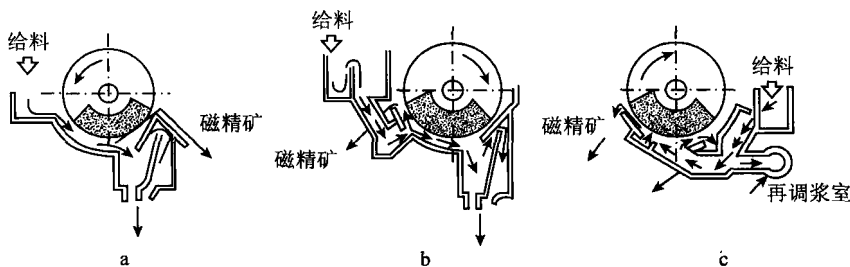


图 8-11 磁选机的三种槽型  
a—顺流式；b—逆流式；c—半逆流式

CTS 永磁筒式磁选机：这种磁选机的槽体结构为顺流型，磁选机的给矿方向与圆筒的旋转方向或磁性产品的移动方向一致。矿浆由给矿箱直接进入圆筒的磁系下方，非磁性矿粒和磁性很弱的矿粒由圆筒下方的两板之间的间隙排出。磁性矿粒被吸在圆筒表面上，随圆筒一起旋转，到磁系边缘的低磁场区排出。

顺流型磁选机常用于处理粒级为 5mm 以下较粗的磁性矿粒的粗选。运转可靠性高，功耗低，但无法获得最大回收率和最佳精矿质量。

CTN 永磁筒式磁选机的槽体结构为逆流型，适用于 0~0.6mm 强磁性矿石的粗选和扫选，以及选煤工业中的重介质回收。该机型能耗高。

CTB 永磁筒式磁选机的槽体结构为半逆流型，可以得到较高的精矿质量和回收率。适用于 0~0.5mm 的强磁性矿石的粗选和精选，尤其适用于 0~0.15mm 的强磁性矿石的精选，入选物料中过粗的矿粒在槽体中能产生沉淀，使分选恶化。

2. 辅助磁力设备

细粒嵌布的铁矿石选矿厂和铁磁性加重介质再生作业，常常采用一些辅助磁力设备：预磁器、脱磁器、磁力脱泥槽、磁力转筒过滤机和选择性磁絮凝器等。

二、强磁选设备

(一) 干式强磁场磁选机

分选弱磁性矿物最早的工业型磁选机是干式的，迄今为止干式强磁选机仍然广泛用于分选锰矿石、铁矿石、海滨砂矿、黑钨矿、锡矿和磷矿石等。现在干式强磁选机有感应辊式、盘式、筒式和永磁辊式 4 类。

1. 感应辊式磁选机

这是一种应用最广的干式强磁选机。图 8-12 是三段感应辊式磁选机的工作原理图。

(1) 结构

全机由电磁系统、分选系统和传动系统组成，为了减少涡流发热和传动功率，辊子用薄的导磁钢片和非磁性圆片交替叠成。

(2) 分选过程

在相邻原磁极的作用下，磁辊表面感生出与相邻磁极极性相反的磁场，并在磁辊齿尖

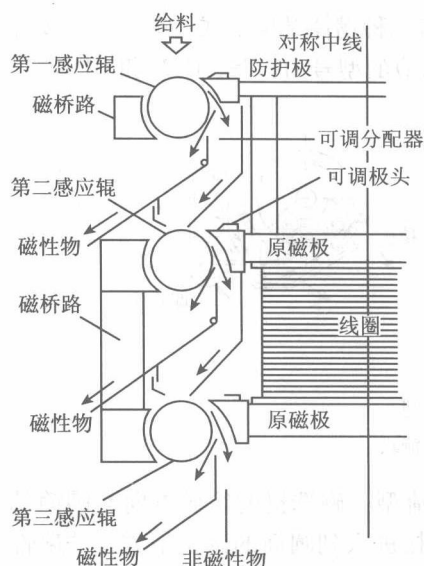


图 8-12 感应辊式磁选机示意图

上产生方向指向磁辊的高的磁场梯度。当欲选物料落到感应辊表面时，磁性物料被辊吸住，随着辊转离磁场后落到接料槽中，非磁性物料沿重力和离心力的合力方向排出。

### (3) 应用

感应辊式磁选机主要应用于回收海滨砂矿的钛铁矿。也用于获得高质量玻璃原料和水泥工业原料，长石、红柱石等矿物的提纯，铬铁矿、独居石、黑钨矿、铁矿石等矿物的分选。

## 2. 盘式磁选机

盘式磁选机有单盘（直径 900mm）、双盘（直径 576mm）和三盘（直径 600mm）3 种。其中，双盘干式强磁场磁选机已经系列化。

### (1) 结构

图 8-12 感应辊式磁选机示意图

双盘磁选机主要由给料斗、永磁分矿筒、偏心振动给矿盘、磁盘传动装置、电磁系统和机架等部件组成(图 8-13),电气控制箱为该机的附属设备。

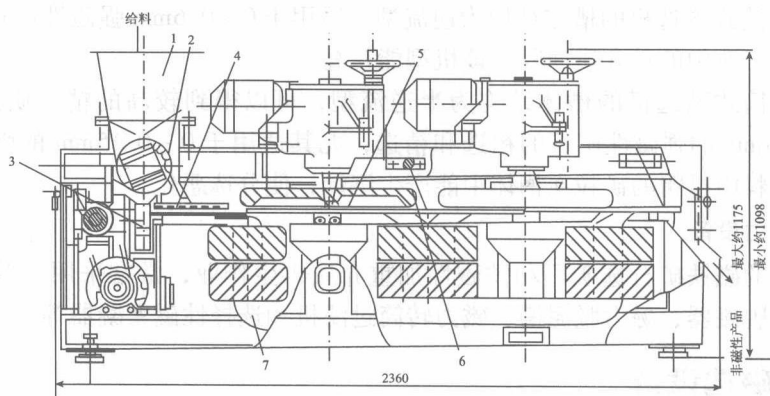


图 8-13  $\phi 576\text{mm}$  干式强磁场双盘磁选机

1—給料斗；2—給料圓筒；3—強磁性產品接料斗；4—篩料槽；5—振動槽；6—圓盤；7—磁系

磁系由“山”字形电磁铁和旋转钢盘构成，盘的边缘制成尖齿状，磁场梯度指向齿尖。

### (2) 分选过程

入选矿石经给矿槽的下部进入永磁分选筒，强磁性矿物被分选出来，其余经斜槽落入首端接矿斗中，弱磁性矿物在重力和离心力的作用下，落到筛子上。筛上物（少量）由筛框一侧排送出其他工序，筛下物（弱磁性矿物）由给矿盘送到回转的磁盘下面的强磁区进行分选，吸到磁盘上的矿物被带到侧面的弱磁区，矿物在重力和离心力的作用下，落到两侧的接矿斗中，未坠落的矿物，由卸矿刷强迫脱落，经磁盘4次分选后，非磁性矿物沿给矿盘，被送入尾矿的接矿斗中。

### (3) 应用

盘式磁选机用于稀有金属（黑钨矿、钛铁矿、独居石及锆英石等）粗精矿的精选。

## (二) 湿式强磁场磁选机

### 1. 湿式感应辊式强磁选机

CS-1 型电磁感应辊式强磁选机是我国研制的双辊湿式强磁选机，目前已成功地用于锰矿石和铁矿石的生产。

#### (1) 结构

该机结构如图 8-14 所示，主要由给矿箱、分选辊、电磁铁芯和机架等组成。磁选机主体部分是由电磁铁芯、磁极头与感应辊组成的磁系。感应辊和磁极头均由工业纯铁制成。两个电磁铁芯和两个感应辊对称平行配置，4 个磁极头连接在两个铁芯端部，感应辊与磁极头组成“口”字形闭合磁路，两个感应辊与 4 个磁极头之间构成的间隙就是 4 个分选带。最高磁场强度可达  $1488\text{kA/m}$ 。

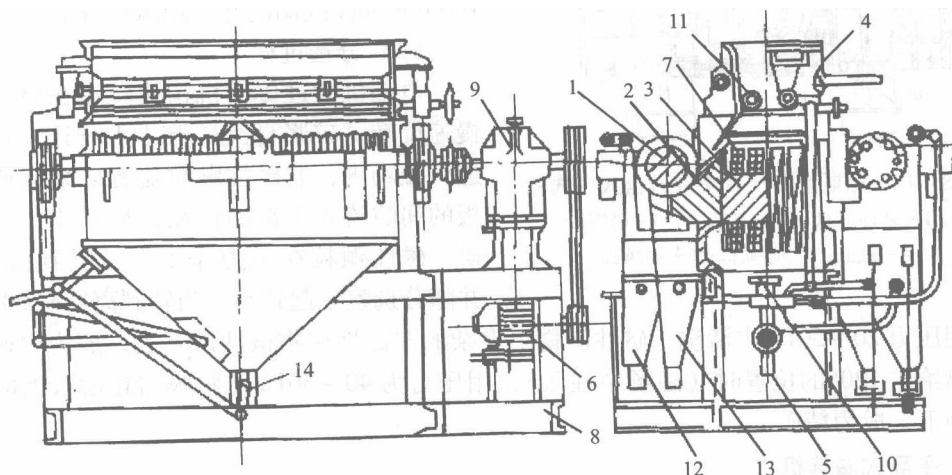


图 8-14 CS-1 型电磁感应辊式强磁选机

1—辊子；2—座板（磁极头）；3—铁芯；4—给矿箱；5—水管；6—电动机；7—线圈；  
8—机架；9—减速箱；10—风机，11—结料辊；12—精矿箱；13—尾矿箱；14—球形阀

#### (2) 分选过程

原矿进入给矿箱，由给料辊将其从箱侧壁桃形孔引出，沿溜板和波形板给入感应辊和磁极头之间的分选间隙之后，磁性矿粒在磁力的作用下被吸到感应辊齿上，并且随感应辊一起旋转，当离开磁场区之后，在重力和离心力的作用下脱离齿辊卸入精矿箱中；非磁性矿粒随矿浆流通过梳齿状的缺口进入尾矿箱内，然后分别从精矿箱、尾矿箱底部的排矿阀排出。

### 2. 琼斯型湿式强磁选机

现代琼斯型湿式强磁选机的特点是采用多层齿板形磁介质及通过分选转盘构成磁路。这种磁选机适用于处理细粒（ $0.03 \sim 1\text{mm}$ ）弱磁性物料。由于该类型磁选机具有单机处理能力大、比能耗低和机器工作可靠性大等优点而被世界各国的选矿厂广泛使用。

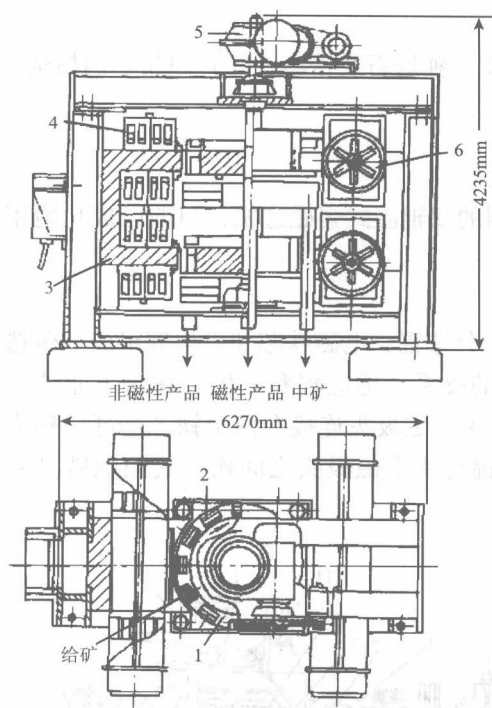


图 8-15 琼斯型 DP-317 双转盘式磁选机

- 1—转环（盘）；2—磁板盒；3—磁轭；  
4—线圈；5—电动机；6—通风机

### (1) 结构

琼斯型强磁选机的类型很多，但是基本结构相同，如图 8-15 所示。由磁导体、密封罩保护的励磁线圈、装有分选箱的转环、给矿和给水装置、精矿的清洗和高压冲洗机构、排矿机构和传动机构组成。它有一个钢制门形框架，在框架上两个“C”形电磁铁和两个带分选箱的转环构成一个闭合磁系，闭合磁系可以减少空气磁阻。分选箱分成若干个分选室，内装不锈钢导磁材料制成的齿形聚磁极板，聚磁极板可以提供较高的磁场强度和磁场梯度，可以大大提高磁选机的处理能力。分选间隙的最大磁场强度为  $640 \sim 1600 \text{ kA/m}$ 。线圈的冷却用风冷或油冷。

### (2) 分选过程

电动机通过传动机构使转盘在磁轭之间慢速旋转。矿浆自给矿点给入分选箱，随即进入磁场内，非磁性颗粒随着矿浆流通过齿板的间隙流入下部的产品接矿槽中，成为尾矿。磁性颗粒在磁力作用下被吸到齿板上，并随分选室一起转动，当转到离给矿  $60^\circ$  的位

置时用压力  $20 \sim 50 \text{ Pa}$  水清洗，磁性矿物中夹杂的非磁性矿物被冲洗下去，成为中矿。当转到离给矿  $120^\circ$  的位置时（磁场中性区），用压力为  $40 \sim 50 \text{ Pa}$  水将吸附在齿板上的磁性矿物冲下，成为精矿。

### 3. 平环式磁选机

平环式磁选机有国产的 SQC-6-2770 型湿式强磁选机、英国的 HIW 型磁选机、德国的 Sol 型磁选机等。

SQC-6-2770 型湿式强磁选机的结构如图 8-16 所示。它主要由给矿装置、分选转环、磁系、精矿和中矿冲洗装置、接矿装置、传动装置等部分组成。该机的特点是采用了环式链状闭合磁路、空心铜管绕制线圈、低电压大电流、水内冷散热降温、齿板作分选介质。

分选过程：带分选室的分选环在传动装置驱动下慢速旋转，当分选室进入磁场后，齿板介质被磁化，物料通过 6 个分选点给到分选室内，非磁性矿粒在重力和矿浆流的作用下通过齿板介质空隙排入尾矿槽中；磁性矿粒受磁力作用被吸附在齿板的尖端上，并随分选环转动，当转到中矿清洗位置时，给入少量清洗水，将磁性矿粒中夹杂的非磁性矿物冲掉排入尾矿槽中；当分选室转到精矿冲洗位置时，被压力为  $0.3 \sim 0.5 \text{ MPa}$  水冲入精矿槽。

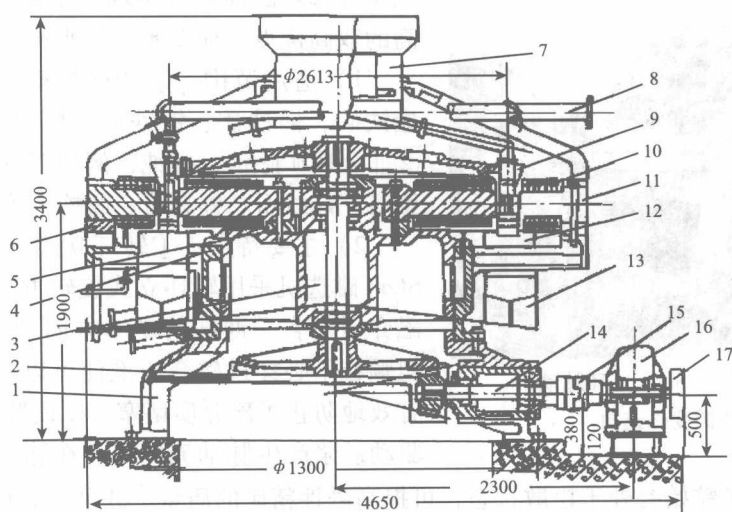


图 8-16 SQC-6-2770 型湿式强磁选机 (单位: mm)

1—下机座; 2—大伞齿轮; 3—内铁芯座; 4—外铁芯座; 5、6—内外铁芯铝垫块; 7—给矿装置; 8—精、中矿清洗装置; 9—分选环; 10—线圈; 11—铁芯; 12—防溅槽; 13—接矿槽; 14—小伞齿轮轴; 15—联轴器; 16—减速箱; 17—皮带轮

### 三、高梯度与超导磁选设备

#### (一) 高梯度磁选机

高梯度磁选机是在上述强磁选机的基础上发展起来的, 它的特点是: 均匀的背景磁场, 细丝状铁磁性磁介质及均匀的料浆流速场, 均匀的磁场在充填了磁介质后, 产生非均匀磁场, 常用的磁介质有导磁不锈钢毛、纤维、细丝、细线、编织网、细拉伸板网等。由于磁介质半径很小, 形成的磁场梯度比琼斯型磁选机的磁场梯度 ( $2 \times 10^3 \text{ T/m}$ ) 高 1~2 个数量级, 达到了  $10^5 \text{ T/m}$ 。从而使磁场力提高 10~100 倍。而由于磁饱和极限, 通过提高磁场强度只能使磁场力提高 2~3 倍。大的磁场力  $H_{\text{grad}H}$  为磁性颗粒提供了强大的磁力来克服流体阻力和重力, 使分选的粒度下限可以降到  $1 \mu\text{m}$ 。

高梯度磁选机分选空间中磁介质的充填率仅为 5%~12%, 而一般强磁选机的介质充填率为 50%~70%, 介质所占空间大为降低, 可以提高分选区的利用率。介质轻, 传动负载轻, 处理量大。

高梯度磁选机的应用, 已经从常规磁选、高岭土提纯等领域扩展到环境保护、生物化学等领域。有人建议用高梯度磁分离这个名词替代高梯度磁选。

根据分离的持续性和连续性, 高梯度磁选机可以分为周期式和连续式两种。

周期式高梯度磁选机最早由瑞典的萨拉 (Sala) 公司制造, 用在美国一家高岭土公司的高岭土提纯上, 并相继在英国、德国、中国、波兰等国得到应用, 主要用在高岭土提纯、钢铁厂水净化等过程中。

SLon 立环脉动高梯度磁选机是目前国内外性能最好、技术最先进的强磁选设备, 该机从根本上解决了平环强磁选机和平环高梯度磁介质容易堵塞这一世界性技术难题, 它具有富集比大、对给矿粒度、浓度和品位波动适应性强、工作可靠、操作维护方便等优点,



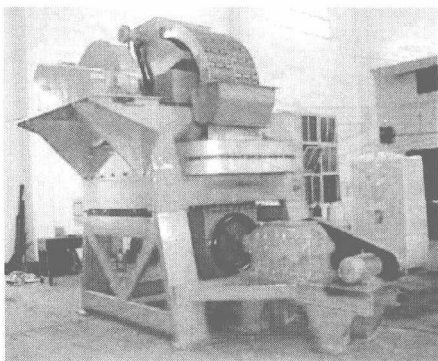


图 8-17 SLon 立环脉动  
高梯度磁选机

该机分选弱磁性矿石实现了精矿品位高和回收率高的双高优点，如图 8-17 所示。

1) 适用范围：①弱磁性矿物的选矿，例如赤铁矿、褐铁矿、钛铁矿、黑钨矿、钽铌矿等。②非金属矿除铁、提纯，例如石英、长石、霞石、萤石、硅线石、锂辉石、高岭土等。

2) 主要特点：①转环立式旋转，反冲精矿。SLon 磁选机采用转环立式旋转方式，对于每一组磁介质而言，冲洗精矿的方向与给矿方向相反，粗颗粒不必穿过磁介质堆便可以冲洗出来，从而有效地防止了磁介质堵塞。②设置矿浆脉动机构，驱动矿浆产生脉动流体力。在脉动流体力的作用

下，矿浆中的矿粒始终处于松散状态，可提高磁性精矿的质量。③平环高梯度磁选机对给矿粒度要求比较严格，由于独特磁系结构及优化组合的磁介质，使 SLon 磁选机给矿粒度上限达到 2.0mm，简化了现场分级作业，具有更为广泛的适应性。

SLon 立环脉动高梯度磁选机已经形成系列化产品，从 SLon-500 到 SLon-3000，该产品具有优异的选矿性能和机电性能，在我国弱磁性矿石选矿工业中得到了广泛应用，成为我国新一代强磁选设备。

## (二) 超导磁选机

磁选机的主要磁性材料——铁磁性物质受磁饱和现象和线圈温度的限制，最大磁场强度通常不超过 1600 kA/m。要突破这一极限，只有把磁性材料由铁磁体改为超导体。

某些物质在温度降至绝对零度时，电阻突然消失，这种现象称为超导电现象，具有超导电现象的物质称为超导体。

根据超导磁选机是否具有磁介质，将其分为高梯度超导磁选机（有磁介质）和开梯度超导磁选机（无磁介质）。

超导磁选机的结构大致可分为 3 个系统：超导磁系、制冷系统和分选系统。虽然已经发现许多能在温度大大高于液氮温度的条件下显示超导行为的材料，但这些材料大都是很复杂的陶瓷晶体结构，目前用它制造磁铁还不太容易。超导磁铁使用的是技术成熟的 Nb-Ti 超导材料。

制冷系统，目前实际使用的超导磁铁都是在 4K（-269°）或 4K 温度以下工作的，一般用液氦进行冷却。为了使液氦能保持在这样的温度，一般用一个闭路制冷系统来实现。以超导磁体作磁源的磁选机和常导磁选机相比有以下突出优点：①高场强。用 Nb-Ti 超导材料制作的磁体其磁场强度可达到 5T。②体积小且重量轻。超导材料的电流密度比铜导线高两个数量级，因此使磁体体积和重量大大减小。③能耗低。比常导磁体节能 90%。④高磁场带来的高磁力使磁选机处理能力大大提高。

鉴于超导磁体的上述优点，20 世纪 70 年代以来，中国、英国、美国、德国、法国、芬兰、奥地利、捷克和苏联等国先后开展了超导磁选机的研制工作，并取得了相当大的进步。现在超导磁选机已经发展到了工业应用阶段。

## 第五节 其他磁分离技术

磁流体选矿是 20 世纪 60 年代发展起来的一项选矿新技术，它分为磁流体静力分选和磁流体动力分选两种。

### 一、磁流体静力选矿

磁流体静力分选，是在不均匀磁场中，以顺磁性液体为工作介质，根据矿物之间密度、比磁化率的不同，分选弱磁性或非磁性矿物的一种分选技术。

磁流体静力选矿的工作介质，是一种顺磁性的液体。磁流体一般有 3 类：①高磁化系数的顺磁性电解质溶液；②铁磁性胶体悬浮液；③液态金属或低熔点金属。

磁流体特性可以概括为以下几点：①磁流体本身是一种磁性介质，犹如一块固体磁铁，在外磁场中恒被吸附在磁通量最大的地方；②磁流体受外磁场作用，力图排开磁通量最大处已被其他弱磁性或非磁性颗粒所占据的空间，这就表现为液体的“加重”现象，或具有某一数值的“视在密度”；③由于磁流体总是存在于外磁场磁通量最大处，所以它可以“悬挂”于开底容器中而不坠落，利用这个特性，可以制成无底的分选槽，以便轻矿物从分选槽上面溢出，重矿物从分选槽下面落出，从而把矿物按密度和磁性分开；④改变外界磁场磁极形状，可以将不同（或相近）密度和比磁化系数的矿物分别在分选槽中定位悬浮，然后再把定位悬浮的各个组分分别提取出来，达到分选多组分矿物原料的目的。

### 二、磁流体动力选矿

磁流体动力分选是在磁场与电场的联合作用下，以强电解质溶液为分选介质，根据矿物之间密度、比磁化率和导电性的不同，分选弱磁性或非磁性矿物的一种选矿技术。

## 第六节 电力分选

### 一、概述

电选是利用各种矿物及物料电性质不同而进行分选的一种物理选矿方法。

电选在工业上的应用始于 1908 年，直到 20 世纪 50 年代末期，才有了新的发展，得到了更为广泛的应用。

电选的内容很广泛，包括电选、电分级、摩擦带电分选、介电分选、高梯度电选、电除尘等方面。

摩擦电选是利用两种矿物互相接触、碰撞和摩擦，或使之与某种材料做成的给矿槽摩擦，产生大小不同而符号相反的电荷，然后给入到高压电场中，由于矿粒带电极符号不同，产生的运动轨迹也明显不同，从而使两种矿物分开。

介电分选是在液体介质或空气介质中进行的，通常大多在液体介质中进行。两种介电常数不同的矿粒或物料，在非均匀电场中，如果某种矿粒的介电常数大于液体介电常数，则该种矿粒被吸引，反之，介电常数小于液体的则被排斥，从而使之分开。

高梯度电选是在介电分选原理的基础上发展起来的一种新方法，它主要是针对微细粒矿物的分选。在介电液体中放入介电体（非导体）纤维或小球，此种介电体受到电场极

化后，在其表面产生极不均匀的电场，从而增加了非均匀电场的作用力。当其中一种矿粒的介电常数大于液体介电常数时，粒子被吸向电场强度及梯度最大区域，反之则被排斥而进入低的电场区域，两种矿粒的运动轨迹也不同，故能使之分开。高梯度电选，很类似于高梯度强磁选，放入分选罐内的纤维或球介质，与高梯度磁选的钢毛或其他介质相似，也是一种捕获介质。

对于磁性、密度及可浮性都很近似的矿物，采用重选、磁选、浮选均不能或难以有效分选，但可以利用它们的电性质差别使之分选。目前除了少数一些矿物直接采用电选外，在大多数情况下，电选主要用于各种矿物及物料的精选。电选前，大多先经重选或其他选矿方法粗选后得出粗精矿，然后用单一电选或电选与磁选配合，得到最终精矿。

除介电分选及高梯度电选是在介电液体中进行外，其余均为干式作业，对缺水地区具有优越性。对一些只适宜于干式分级的物料，电分级具有明显的优点。电选对周围环境不产生污染，因而在一些发达国家，得到了更广泛的应用。

电选的有效处理粒度通常为  $0.1 \sim 2\text{mm}$ ，但对片状或密度小的物料如云母、石墨、煤等，其最大处理粒度则可达  $5\text{mm}$  左右，而湿式高梯度电选机的处理粒度则可下降到微米级。

在大多数情况下，电选都是在高压电场中进行的，除少数采用高压交流电源外，绝大多数均用高压直流电源，将负电输到电极，个别情况下才采用正电。

## 二、电选机

无论是采用静电极或电晕电极，当它们单独使用时，其分选效果都不好。只有将静电极和电晕电极结合起来、形成复合电极，才能获得较好的分选效果。那些单一电极的电选机基本上已处于淘汰状态，目前国内生产的几乎全是复合电场的鼓筒式电选机，因此只介绍复合电场电选机。

### 1. DXJ 直径 $320 \times 900$ 型高压电选机

DXJ $320 \times 900$  型高压电选机结构如图 8-18 所示。

鼓筒直径为  $320\text{mm}$ ，由无缝钢管加工而成，鼓筒可以用电加热器加温至  $50 \sim 80^\circ\text{C}$ ，鼓筒转速用直流马达无级变速并能显示。

电极采用栅状弧形电极，有 1 根静电电极，3~5 根电晕电极，静电电极正好安装在第二根电晕电极上，根据分选的矿物和要求不同，电极不仅能沿水平位置调节，而且可沿鼓面圆弧上下调节，给矿装置由给矿斗、闸门、给矿辊、电磁振动给矿器等组成。毛刷的作用是从鼓内强制刷下被吸住的非导体

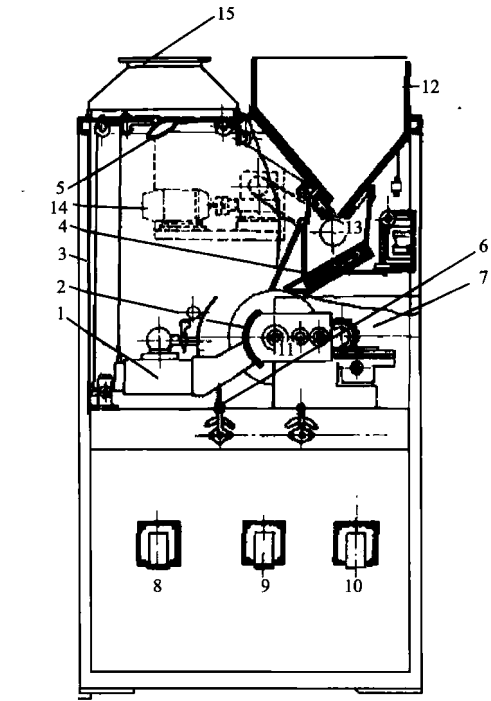


图 8-18 DXJ  $320 \times 900$  型高压电选机

1—电极传动平衡装置；2—转鼓（正极，接地）；3—机壳；4—给矿板；5—照明装置；6—分矿板；7—毛刷传动装置；8—导体排出口；9—中矿排出口；10—非导体排出口；11—入选角和极距调节装置；12—给矿斗；13—给矿辊；14—给矿辊传动装置；15—排风罩

矿物。分矿板的位置可以调节，以适应产出精矿、中矿、尾矿的要求。

矿粒经闸门由给矿辊均匀地排料至振动给矿板上，在给矿板上安装有电加热装置，使矿粒能在此过程中充分加热。然后，矿粒给入鼓筒，由鼓筒带入高压电场，由于采用了多根电晕电极，加之鼓筒直径较大，所以电场的作用区域比较大。从电晕电极上放出的电子也较多、导体矿粒和非导体矿粒都有更多的机会吸附电子，导体矿粒吸附的电荷会很快传走，并因为静电场的感应而带正电，在离心力、重力和电力的综合作用下，从鼓筒的前方落下成为精矿；非导体矿粒获得电荷后，由于其导电性很差，未能迅速传走所获的电荷，剩余电荷多，因而在鼓面产生较大的镜面吸力，被吸在鼓面上，随鼓筒转到后方，被毛刷刷落到尾矿斗中，由振动器排出成为尾矿。

该电选机用于海滨砂矿、白钨矿和锡石分离及钽铌矿的精选。

该电选机的缺点是只设计了一个鼓筒，处理量较小，给中矿再选带来不方便。

## **2. YD 型鼓筒式电选机**

YD-3A、YD-4 型电选机是目前国内最大的电选设备，YD-3A 型为三鼓筒按垂直线上下排列，YD-4 型为两鼓筒平行排列。两类型的鼓筒直径为 300mm，筒长 2m。

这类电选机与其他鼓筒式电选机的不同之处主要是电极结构，电晕电极不采用普通的镍铬电阻丝，而是采用厚度仅为 0.1mm 的薄钢片，也称为刀片电极，共安装 7 片刀片电极。

刀片电极比电阻丝电极的寿命长，生产的精矿品位也高一些，但是回收率较低。

## **3. 美国卡普科高压电选机**

美国卡普科公司是专门生产各种高压电选机的著名公司，已形成了大型多鼓筒、中型单鼓筒及实验研究型等系列产品，主要用于铁矿、海滨砂矿等的精选。

目前世界各国广泛采用的鼓筒式电选机多数是该公司制造的。卡普科公司产品质量高，电极结构也比较特殊，静电电极与电晕电极结合在一起，可以从电极向鼓筒表面产生束状电晕放电，高压电源可用正电或负电，电压最高可达 40kV。

# **三、影响电选的因素**

影响电选的因素很多，可概括为两大类：一是电选机本身的各种因素，二是物料的各种性质。

## **1. 电选机的结构参数**

### **(1) 电极结构及其相对于鼓筒的位置**

电极结构指的是电晕电极根数、位置和偏极的大小等。一般来说，单根电晕电极和一根静电电极选矿时，导体矿物的回收率比较高，但是精矿品位低，分选效率很低。电晕电极根数多，只对提高精矿品位有利，而对导体矿物的回收率不利，电晕电极与鼓筒的相对位置以 45°为宜。

### **(2) 鼓筒转速**

鼓筒转速的大小直接影响入选物料在电场区的停留时间。物料经过电场区的时间应近乎 0.1s，以保证物料能获得足够的电荷，否则分选效率必然降低。转速的大小与入料粒度有关，粒度大，要求转速慢；粒度小，要求转速快。

### **(3) 分矿板的位置**

分矿板的位置也直接影响精矿的质量和数量。因此，应根据作业要求，选择适当位

置。若要求非导体矿物很纯，则鼓筒下分离非导体矿物颗粒的分矿板应当向鼓筒倾斜，使中矿多一些，返回再选；反之，如果要求导体矿物很纯，则分离导体矿物颗粒的分矿板应当更偏离鼓筒，多余的中矿返回再选。

#### (4) 电压

理论和实践均表明，提高电压对分选效果有好处。矿粒获得电荷直接与电场强度有关，电压越高，电场强度越大，从电晕电极逸出的电子越多，越有利于分选。但也不能笼统认为电压越高越好，因为对各种具体矿物所要求的分选电压是不同的。如对钽铌矿，电压太低时，难以与脉石矿物分开；电压过高时，又会影响导体矿物的回收率。

### 2. 物料的性质

#### (1) 物料的粒度组成

电选要求窄级别分选，即粒度越均匀越好，无论何种电选机大都如此，这与它的分选原理有关，如鼓筒式电选机分选矿物时，在电场电压、电极结构已定的情况下，转速与粒度有明显的交互作用。粗粒需要在电场中获得较多的电荷，转速不能太快；细粒则相反，粒度小，质量轻，要求获得的电荷也少，故要求的转速高。粗细粒有不同的分选条件，若混在一起分选，势必影响分选效果。

#### (2) 物料的加温

矿粒含有水分时，会使非导体矿物的导电性提高，容易混进导体产品中，严重影响分选效果。为此，预先加热是非常重要的。加温干燥的目的是除去矿物的表面水分，恢复不同矿物的固有电性，并使物料松散。

#### (3) 矿石表面处理

表面处理指的是采用各种药剂对矿物表面进行处理，以改善电选效果。表面处理包括两方面：一是表面污染物的清理，二是用药剂对矿粒进行表面改性。

## 小 结

本章的重点是弱磁选机和强磁选机的特点、应用范围。难点是磁场的表征、磁场力的计算、磁铁矿的磁化过程。



### 复习思考题

1. 简述磁选分选条件。
2. 磁场力的作用是什么？
3. 简述矿物磁性分类。
4. 简述湿式弱磁场永磁筒式磁选机的基本构造、磁场特性、分选过程和不同槽体结构的优缺点。
5. 简述常见强磁场磁选机和高梯度磁选机的类型和分选对象。
6. 简述强磁性矿物的磁性影响因素。
7. 简述电晕-静电复合电场电选机的结构及工作原理。
8. 影响电选效果的因素有哪些？

## 第九章 重力选矿

### 本章导读

重力选矿历史悠久。本章介绍了水力分级、洗矿、重介质选矿、跳汰选矿、溜槽选矿、摇床选矿的选别原理和选矿设备。通过本章的学习，可以了解不同的重力选矿方法和应用领域。

### 第一节 概 述

不同粒度和密度的矿粒组成的物料在流动介质中运动时，由于它们性质的差异和介质流动方式的不同，其运动状态也不同。在真空中不同性质的物体具有相同的沉降速度，在分选介质，如水、空气、重液（密度大于水的液体或高密度盐类的水溶液）、悬浮液（固体微粒与水的混合物）、空气重介质（固体微粒与空气的混合物）中，由于它们受到不同的介质阻力，形成运动状态的差异。矿粒在静止介质中不易松散，不同密度、粒度、形状的矿粒难以互相转移，即使达到分层亦难以实现分离。

重力选矿又称重选，是根据矿粒间密度的差异，在运动介质中所受重力、流体动力和其他机械力的不同，从而实现按密度分选矿粒群的过程。粒度和形状会影响按密度分选的精确性。

各种重选过程的共同特点是：①矿粒间必须存在密度的差异；②分选过程在运动介质中进行；③在重力、流体动力及其他机械力的综合作用下，矿粒群松散并按密度分层；④分层好的物料，在运动介质的作用下实现分离，并获得不同的最终产品。

重选的目的，主要是按密度来分选矿粒。因此，在分选过程中，应设法创造条件，减少矿粒的粒度和形状对分选结果的影响，以使矿粒间的密度差别在分选过程中能起主导作用。

根据介质运动形式和作业目的的不同，重选可分为如下几种工艺方法：水力分级、洗矿、重介质选矿、跳汰选矿、摇床选矿、溜槽选矿。其中洗矿和分级是按粒度分离的作业，其他属于按密度分选的作业。

由于重力分选是基于不同固体颗粒之间的密度差进行的，所以对物料进行重力分选的难易程度与待分离成分之间的密度差以及介质的密度有着非常密切的关系。综合这些因素，前人曾提出了对物料进行重力分选可行性判断准则  $E$ ，其计算式为

$$E = (\rho_1' - \rho) / (\rho_1 - \rho) \quad (9-1)$$

式中： $\rho_1'$  为被分选物料中高密度成分的密度， $\text{kg/m}^3$ ； $\rho_1$  为被分选物料中低密度成分的密度， $\text{kg/m}^3$ ； $\rho$  为介质的密度， $\text{kg/m}^3$ 。

$E > 2.5$  时, 分选极易进行;  $E = 2.5 \sim 1.75$  时, 容易实现分选;  $E = 1.75 \sim 1.5$  时, 分选难易程度属中等;  $E = 1.5 \sim 1.25$  时, 分选比较困难;  $E < 1.25$  时, 分选极其困难。

重选是当今最通用的几种选矿方法之一, 尤其广泛地用于处理密度差较大的物料。在我国它是煤炭分选的最主要方法, 也是分选金、钨、锡矿石的传统方法。在处理含稀有金属(钍、铀、锆、铌、钽等)矿物的矿石中应用也很普遍。重选法也被用来分选铁、锰矿石, 同时也用于处理某些非金属矿石, 如石棉、金刚石、高岭土等。对于那些主要以浮选法处理的有色金属(铜、铅、锌)等矿石, 也可用重选法进行预先分选, 除去粗粒脉石或围岩, 使其达到初步富集。重选法还广泛应用于脱水、分级、浓缩、集尘等作业, 而这些工艺环节几乎是所有选矿厂和选煤厂所不可缺少的。

## 第二节 重力分选原理

重选的实质概括起来就是松散一分层和搬运一分离过程。置于分选设备内的散体物料, 在运动介质中, 受到流体浮力、动力或其他机械力的推动而松散。被松散的矿粒群, 由于沉降时运动状态的差异, 不同密度(或粒度)颗粒发生分层转移。就重选来说, 就是要达到按密度分层, 通过运动介质的作用达到分离。其基本规律可概括为: 松散一分层一分离。重选理论研究的问题, 简单地说就是探讨松散与分层的关系。松散和搬运分离几乎是同时发生的, 但松散是分层的条件, 分层是目的, 而分离则是结果。

重选的基本原理有: ①颗粒及颗粒群的沉降理论; ②颗粒群按密度分层的理论; ③颗粒群在回转流中分层的理论; ④颗粒群在斜面流中的分选理论。

有关颗粒及颗粒群的沉降理论, 主要是研究颗粒的沉降规律。有关颗粒群按密度分层理论, 最早是从跳汰过程入手研究的, 并提出了不少的跳汰分层学说, 后来又出现一些专门在垂直流中分层的理论。有关回转流中的分选, 尽管介质的运动方式不同, 但除了重力与离心力的差别外, 基本的作用规律仍是相同的。斜面流选矿最早是在厚水层中处理粗粒矿石, 分选的根据是颗粒沿槽运动的速度差。20 世纪 40 年代以后, 斜面流选矿向流膜选矿方向发展, 主要用来分选细粒和微细粒级矿石。流态有层流和紊流之分, 一般认为紊流脉动是松散床层的基本作用力的观点, 在层流条件下则难以做出解释。1954 年拜格诺提出的层间剪切斥力学说, 补充了这一理论上的空白。但同分层理论一样, 斜面流选矿要依靠现有理论进行可靠的计算仍是困难的。尽管重选理论到今天仍未达到完善地步, 但和许多工艺学科一样, 它仍可为生产提供基本的指导, 并可作为数理统计和相似与模拟研究的基础。

### 一、颗粒在介质中的自由沉降

沉降过程中, 最常见的介质运动形式有静止、上升和下降流动三种。单个物体在无限的介质中的沉降, 称为自由沉降。

颗粒在介质中所受重力( $G_0$ )等于它在真空中的重力( $G$ )与浮力( $P$ )之差(此处力的单位均用 dyn(达因)表示,  $1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N}$ , 下同), 即

$$G_0 = G - P \quad (9-2)$$

或 
$$G_0 = V(\delta - \Delta)g \quad (9-3)$$

式中：\$V\$ 为颗粒的体积，\$\text{cm}^3\$；\$g\$ 为重力加速度，\$980 \text{ cm/s}^2\$；\$\delta\$ 为颗粒的密度，\$\text{g/cm}^3\$；\$\Delta\$ 为介质的密度，\$\text{g/cm}^3\$。若颗粒为球体，则 \$V = \frac{\pi}{6}d^3\$（\$d\$ 为颗粒的直径，\$\text{cm}\$），

则

$$G_0 = \frac{\pi}{6}d^3(\delta - \Delta)g \quad (9-4)$$

可见，颗粒在介质中的所受重力与颗粒的尺寸、密度及介质的密度有关。

颗粒在介质中运动时，由于介质点间内聚力的作用，最终表现为阻滞颗粒运动的作用力，这种作用力称介质阻力。介质阻力始终与颗粒相对于介质的运动速度方向相反。由于介质的惯性，运动颗粒前后介质的流动状态和动压力不同，这种因压力差所引起的阻力，称为压差阻力。由于介质的黏性，介质分子与颗粒表面存在黏性摩擦力，这种因黏性摩擦力所致的阻力，成为摩擦阻力。介质阻力由压差阻力和摩擦阻力所组成，这两种阻力同时作用在颗粒上。

最重要的介质阻力公式为牛顿—雷廷智和斯托克斯公式。

当颗粒尺寸或颗粒相对于介质的运动速度（后简称颗粒的相对速度）较大时，压差阻力占优势，摩擦阻力可忽略不计。压差阻力可用牛顿—雷廷智公式来计算：

$$R_{N-R} = \frac{\pi}{16}d^2v^2\Delta \quad (9-5)$$

式中：\$R\_{N-R}\$ 为介质对颗粒的压差阻力，\$\text{dyn}\$；\$\Delta\$ 为介质的密度，\$\text{g/cm}^3\$；\$d\$ 为颗粒的直径，\$\text{cm}\$；\$v\$ 为颗粒的相对速度，\$\text{cm/s}\$。

当颗粒尺寸或颗粒的相对速度较小时，摩擦阻力占优势，压差阻力可忽略。此时，摩擦阻力可用斯托克斯公式计算：

$$R_s = 3\pi\mu dv \quad (9-6)$$

式中：\$R\_s\$ 为介质对颗粒的摩擦阻力，\$\text{dyn}\$；\$\mu\$ 为介质的粘度，\$\text{P}\$（泊）（\$1\text{P} = 0.1\text{Pa} \cdot \text{s}\$）；重选中常用水做介质，\$\mu = 0.01\text{P} = 0.001\text{Pa} \cdot \text{s}\$；\$d\$ 为颗粒的直径，\$\text{cm}\$；\$v\$ 为颗粒的相对速度，\$\text{cm/s}\$。

可见，介质阻力与颗粒尺寸、颗粒的相对速度、介质密度及介质粘度有关。当压差阻力占优势时，介质阻力与颗粒的相对速度平方和直径平方成正比；当摩擦阻力占优势时，介质阻力与颗粒的相对速度和直径的一次方成正比。

介质阻力（单位为 \$\text{dyn}\$）还可以用下列通式表示：

$$R = \varphi d^2 v^2 \Delta \quad (9-7)$$

式中：\$\varphi\$ 为阻力系数；对牛顿—雷廷智阻力范围 \$\varphi = \frac{\pi}{16}\$。

对斯托克斯阻力范围 \$\varphi = \frac{3\pi}{Re}\$。\$Re\$ 表示雷诺数。

颗粒在静止介质中沉降时，颗粒对介质的相对速度即颗粒的运动速度。沉降初期，颗粒运动速度很小，介质阻力也很小，颗粒主要在重力（\$G\_0\$）作用下作加速沉降运动。随颗粒沉降速度的增大，介质阻力渐增，颗粒的运动加速度逐渐减小，直至为零。此时，颗粒的沉降速度达最大值，作用在矿粒上的重力（\$G\_0\$）与阻力（\$R\$）平衡，颗粒以等速度沉降。这个速度为颗粒的自由沉降末速，以 \$v\_0\$ 表示。



颗粒在介质中沉降时，重力与运动加速度将有如下关系：

$$G_0 - R = ma \quad (9-8)$$

式中： $m$  为颗粒的质量， $g$ ； $a$  为颗粒的运动加速度， $\text{cm/s}^2$ ；

若颗粒为球体，则， $m = \frac{\pi}{6}d^3\delta$ 。将  $G_0$ 、 $R$ 、 $m$  代入式 (9-8)，可得

$$\frac{\pi}{6}d^3(\delta - \Delta)g - \varphi d^2v^2\Delta = \frac{\pi}{6}d^3\delta a \quad (9-9)$$

整理后，得

$$a = \frac{\delta - \Delta}{\delta}g - \frac{6\varphi v^2\Delta}{\pi d\delta} \quad (9-10)$$

运动开始的瞬间， $v=0$ ；所以  $a = \frac{\delta - \Delta}{\delta}g$ ，此时的颗粒运动加速度值最大，通常以  $g_0$  来表示，即

$$g_0 = \frac{\delta - \Delta}{\delta}g \quad (9-11)$$

$g_0$  称为颗粒沉降时的初加速度，或颗粒在介质中的重力加速度。在一定的介质中（如水， $\Delta = 1\text{g/cm}^3$ ）， $g_0$  为常数，它只与颗粒的密度  $\delta$  有关。

沉降末速度  $v_0$ （单位： $\text{cm/s}$ ）可从  $G_0 = R$  的条件中导出。

较大尺寸或以较快速度沉降的颗粒，介质阻力以压差阻力为主，故有  $G_0 = R_{N-R}$ ，或

$$\frac{\pi}{6}d^3(\delta - \Delta)g = \frac{\pi}{16}d^2v^2\Delta \quad (9-12)$$

由此可得：

$$v_0 = 51.1 \sqrt{\left(\frac{\delta - \Delta}{\Delta}\right)d} \quad (9-13)$$

式 (9-13) 称为牛顿—雷廷智沉降末速度公式，适用于较粗颗粒的情况。对石英颗粒，适用大于 2mm 的粒度。

同样，较小尺寸（对石英， $d < 0.1\text{mm}$ ）或以较小速度沉降的颗粒，介质阻力以摩擦阻力为主，此时可用斯托克斯沉降末速度公式计算  $v_0$ ：

$$v_0 = 54.5 \frac{\delta - \Delta}{\mu} d^2 \quad (9-14)$$

中间尺寸（对石英， $d = 0.1 \sim 2\text{mm}$ ）颗粒的沉降末速度，可用阿连公式计算：

$$v_0 = 25.8d^3 \sqrt{\left(\frac{\delta - \Delta}{\Delta}\right)^2 \frac{\Delta}{\mu}} \quad (9-15)$$

式 (9-13)、式 (9-14)、式 (9-15) 表明，颗粒的沉降末速度与颗粒的性质 ( $\delta$ 、 $d$ ) 和介质 ( $\Delta$ 、 $\mu$ ) 有关。在一定的介质中，若颗粒的尺寸和密度越大，则沉降末速度也越大。相同尺寸时，密度大的，具有较大沉降末速度。相同密度时，尺寸大的，具有较大沉降末速度。对于形状不规则的颗粒，在使用上述各公式时，必须考虑到形状的影响，而对  $v_0$  公式加以修正；此时， $d$  应该用与颗粒同体积的球体直径（体积等值直径），同时公式应乘一个形状（修正）系数  $x$ 。通常，颗粒的形状系数见表 9-1。

表 9-1 不同形状颗粒的形状系数

颗粒形状	球体	浑圆形	多角形	长方形	扁平形
$x$	1.0	0.8~0.9	0.7~0.8	0.6~0.7	0.4~0.6

## 二、颗粒在介质中的干涉沉降

实际选矿过程中，并非是颗粒单个在无限介质中自由沉降，而是颗粒群在有限介质空间里的沉降。这种沉降，称为干涉沉降。干涉沉降时，颗粒不仅受介质阻力，而且还受到周围颗粒和器壁所引起的机械阻力的作用；即使是介质阻力，也会由于周围颗粒的影响，较自由沉降时大。

颗粒群的干涉沉降一般可用里亚申科公式来近似计算：

$$v_{\mp} = v_0(1 - \lambda)^n \quad (9-16)$$

式中： $v_{\mp}$  为颗粒群的干涉沉降速度，cm/s； $v_0$  为颗粒的自由沉降末速，cm/s； $\lambda$  为固体物料在矿浆中所占的体积百分数，亦称为矿浆的固体容积浓度； $\lambda$  用小数表示时，它与松散度  $\theta$  的关系为： $\theta = 1 - \lambda$ ； $n$  为与颗粒和形状有关的指数，反映了它们对干涉程度的影响； $n$  的准确值应由实验确定。

$\lambda$  是干涉程度的主要标志。 $\lambda$  越大，表示颗粒群越密集，干涉程度越大。实践中，以  $\lambda < 3\%$  时的沉降视为自由沉降， $\lambda > 3\%$  时的沉降视为干涉沉降。

## 三、等降比

沉降过程中，往往存在某些粒度大、密度小的颗粒同粒度小、密度大的颗粒以相同沉降速度沉降的现象，称为等降现象。密度和粒度不同但具有相同沉降速度的颗粒，称为等降颗粒。等降颗粒中，小密度颗粒的粒度与大密度颗粒的粒度之比，成为等降比。常以  $e_0$  表示自由沉降等降比。其表达式可由两个等降颗粒的沉降末速度  $v_{01} = v_{02}$  的关系，推导整理而得。

对于大于 2mm 较粗的两个等降颗粒：

$$e_0 = \frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^2 \frac{\delta_2 - \Delta}{\delta_1 - \Delta} \quad (9-17)$$

对于 0.1~2mm 中间尺寸的两个等降颗粒：

$$e_0 = \frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^3 \sqrt{\left(\frac{\delta_2 - \Delta}{\delta_1 - \Delta}\right)^2} \quad (9-18)$$

对于小于 0.1mm 较细的两个等降颗粒：

$$e_0 = \frac{d_1}{d_2} = \sqrt{\left(\frac{x_2}{x_1}\right)\left(\frac{\delta_2 - \Delta}{\delta_1 - \Delta}\right)} \quad (9-19)$$

上面三式中的  $x_1$ 、 $x_2$  分别表示两个等降颗粒的形状系数。

$e_0$  的大小在一定程度上反映了两个等降颗粒密度差异的大小；同一矿石中不同密度的矿粒的  $e_0$  越大，越易分选。由于  $e_0$  照顾到了不同粒度时介质流态对沉降的影响，因此，衡量矿石按密度分选的难易程度时，用  $e_0$  比用  $E$  来评价更为恰当。另外， $e_0$  越大，意味着可选的粒级范围越大。为提高按密度分选的精确性，在重选前适当分级是必要的。

## 第三节 水力分级和洗矿

### 一、水力分级

水力分级是根据矿粒在运动介质中沉降速度的不同，将粒度级别较宽的矿粒群，分为若干窄粒度级别产物的过程。

按使用介质不同，有水力分级和风力分级。在金属矿选矿厂，最常见的是干涉沉降水力分级。

水力分级作为独立作业，可用于粘土质矿物的洗选；作为辅助作业，可用于磨矿循环的预先分级、检查分级、控制分级，或用于脱水、脱泥；作为准备作业，可用于摇床等选别前的分级；同时，它还是检查细粒物料（ $-0.074\text{mm}$ ）粒度组成的主要手段（如水析）。

用于分级设备主要有机械分级机和水力分级机。

### 二、洗矿

除去矿石中粘土质物料的过程称为洗矿。这个过程实际上包括碎散和分离两个步骤。整个过程是在水流作用和相应的机械中进行的。

影响洗矿效率的因素，除了被洗物料本身的物理机械性质和洗矿设备的机械作用外，还有水流的速度、压力、水量、水温和可能添加的药剂（水玻璃、硫酸、苏打、石灰等）以及洗矿前物料的准备方法（事先浸泡或预先干燥）等。

洗矿设备，按碎散含泥物料的方法，洗矿设备可分为两类：其一是借高压水流的动力作用来碎散含泥物料，如洗矿溜槽、水力洗矿床和各式平面筛等。或者是在低压水流中，借矿块彼此间和矿块与机械表面的摩擦来碎散含泥物料，如圆筒洗矿机，擦洗机等。其二是完全靠设备的机械作用来完成的，如槽式洗矿机，机械分级机和“打击式”洗矿机。

## 第四节 重介质分选

### 一、概述

重介质即是指密度大于水的流体介质，它包括重液和重悬溶液两种类型。在这样的介质中进行的选矿即称为重介质选矿。所用重介质的密度介于待分选的重矿物与轻矿物之间，即  $\delta_2 > \rho > \delta_1$ ，此时在介质内的轻矿物上浮，重矿物下降，分层是依靠浮力原理进行的。颗粒的运动学不再是分层的主要作用因素，介质的性质倒是有重要的影响。

重液因价格昂贵在生产中很少应用，工业用重介质几乎全是重悬浮液，它是由细粉碎的高密度的固体颗粒加重质与水组成的两相流体。

重介质选矿方法通常只能用来除去密度低的单体脉石或采矿过程中混入的围岩，作为预先选别作业使用。这种方法最适于处理有用矿物为集合体嵌布的有色金属矿石，如铅锌矿、铜硫矿等。因这类矿石在中碎以后即有大量单体脉石产出，可用重介质选矿法将其除去，使之不进入磨矿和选别作业，可以大大降低每吨原矿的生产成本，并在实际上提高了

选厂主选车间的处理能力。某些难以进行细磨选别的氧化铅锌矿石，经过重介质选矿富集，有时亦可达到冶炼的最低品位要求。在我国重介质选矿法还用于处理井下采出的铁矿石和锰矿石，除去混入的围岩，恢复地质品位。此外，重介质选矿法在处理低品位的稀有金属矿石、非金属矿石、甚至在清理城市垃圾中亦均有所应用。

## 二、重介质选矿设备

### 1. 圆锥重悬浮液选矿机

圆锥重悬浮液选矿机的设备结构如图 9-1a 所示，机体为一倒置的圆锥形槽，在它的中心安有空心的回转轴，由电动机带动旋转，空心轴同时又作为排出重产物的空气提升管。中空轴外面有一个穿孔的套管，上面固定有两扇三角形刮板，以  $4 \sim 5\text{r/min}$  的速度转动，借以保持上下层悬浮液密度均匀，并防止矿石沉积。入选原料由上方表面给入。轻产物浮在悬浮液表层经四周溢流堰排出，重矿物沉向底部。与此同时，压缩空气由中空轴的底部给入，在中空轴内重矿物、重悬浮液和空气组成气—固—液三相混合物。

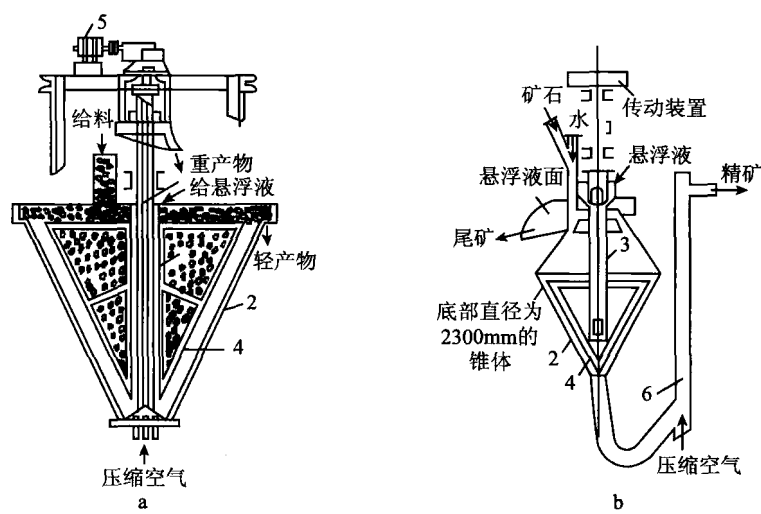


图 9-1 圆锥型重悬浮液选矿机

a—内部提升式单圆锥分选机；b—外部提升式双圆锥分选机

1—回转中空轴；2—圆锥槽；3—套管；4—刮板；5—电动机；6—外部空气提升管

当其综合密度低于外部重悬浮液的密度时，在静压强作用下，即沿管向上流动，从而将重矿物提升到高处排出，重悬浮液是经过套管给入，穿过孔眼流入分选圆锥内。

气管亦可设置在分选圆锥的外部，如图 9-1b 所示。但不管何种配置方式，重矿物的排出位置均应高出分选液面 2m 左右，以便经筛分脱出的悬浮液能自流回到分选圆锥内。

这种分选机槽体较深，分选面积大，工作稳定，适于处理轻产物排出量大的原料。分选精确度较高。主要缺点是要求使用细粒加重质，介质的循环量大，增加了介质制备和回收工作量，而且需要配备专门的压气装置。

该种设备按圆锥直径计为 2~6m，锥角  $50^\circ$ ，给矿粒度范围为 5~50mm。我国柴河铅锌矿选矿厂采用直径 2.4m 圆锥型选矿机进行矿石的预先选别。

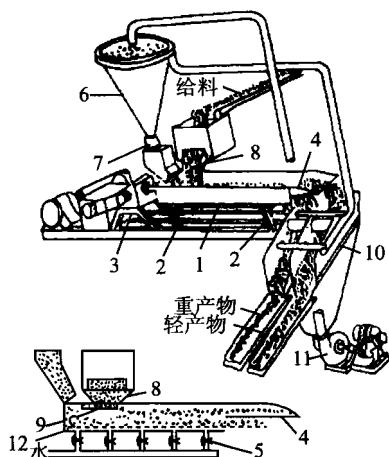


图 9-2 重介质振动溜槽示意图

1—槽身；2—弹簧板；3—曲轴；4—排料分离板；  
5、7—阀门；6—圆锥斗；8—给矿口；9—给矿溜槽；10—脱介筛；11—泵；12—双层冲孔筛板

## 2. 重介质振动溜槽

重介质振动溜槽的构造如图 9-2 所示。它是一个长方形的浅槽，槽身 1 安在向后倾斜  $10^\circ$  的弹簧板 2 上，并由曲轴 3 传动。槽身向排矿方向倾斜  $2^\circ \sim 3^\circ$ ，槽的末端有排料分离板 4，它的位置可以上下调节。槽底为双层冲孔筛板 12，两层筛板间距约 1m，上筛板筛孔较大（10 ~ 12mm）、孔距较小（30mm），下筛板筛孔较小（3mm）、孔距较大（60mm），在筛板下边有五个隔室，每室均有水管，并有阀门 5 可分别调节上升水量，悬浮液从圆锥斗 6 经阀门 7 给入振动槽。

入选物料从给矿口 8 经倾斜的给矿溜槽 9 均匀地给入振动槽后，重矿粒沉下。轻矿粒浮起。轻、重矿粒均被介质流带至排料外，被分离隔板分成轻、重产物，分别排到

脱介筛 10 上，脱除的介质用泵 11 打回圆锥斗。细粒矿泥及杂质在圆锥斗中随溢流流出。

重介质振动溜槽分选机是一种分选效率高的粗粒矿石重介质选矿设备，适宜选别粒度范围为 6 ~ 75mm。该机用于赤铁矿、锰矿等黑色金属矿石的选别，也可用于其他有色金属矿石的选别。

## 3. 重介质旋流器

该设备的构造与各部件名称与普通的水力旋流器相同。入选矿石和分选介质以切线方向高压给入旋流器，经过旋流器分选，重矿粒与部分介质一起从沉砂口排出，轻矿粒与另一部分介质从溢流口排出，分别经过脱介筛脱介，便得到重、轻不同的产品。

重介质旋流器适于处理 20 ~ 30mm 的物料，弥补了一般重介质选矿设备不能处理细粒级的缺欠。国内除用于钨、锡、锰、铅锌矿石的处理外，还用于处理弱磁性贫铁矿石。

# 第五节 跳汰分选

## 一、概述

跳汰选矿是在垂直交变的介质流中进行的一种重力选矿方法。交变介质流可以是空气，也可以是水，以空气为介质的称为干式跳汰或风力跳汰选矿；以水为介质的称为湿式跳汰或水力跳汰选矿。

跳汰选矿多在交变的水流中进行，水流的速度、加速度、位移等特性对选别效果具有重要意义，上述特性与跳汰周期曲线的形状密切相关。所谓跳汰周期，就是水流的速度及方向随时间（角位移）的变化而变化一个循环所需的时间。表示水流的速度及方向随时间的变化而变化的特性曲线称为跳汰周期曲线。交变水流上下运动的最大距离叫水流冲

程。交变水流每分钟变化的次数称为冲次。跳汰周期曲线是影响分选效果的重要因素，跳汰周期曲线的形式有正弦跳汰周期曲线，上升水速大于下降水速、作用时间长的跳汰周期曲线，上升水速大于下降水速、作用时间相等的跳汰周期曲线，锯齿形不对称跳汰周期曲线。此外，还有由两组不同冲程、冲次所产生的复振跳汰周期曲线，以及用于煤的分选中无活塞式跳汰机的上升水速大于下降水速、作用时间短的不对称跳汰周期曲线等。

除了很细的原料以外，跳汰选矿几乎可以处理各种粒度的矿石。只要待分选矿物间有足够的密度差即可。它的工艺操作简单，设备处理能力大，可在一次选别中得到最终精矿或最终尾矿，故在处理粗、中粒矿石中应用广泛。在我国跳汰法主要用来选别不均匀嵌布的钨矿石、锡石硫化矿石，并也用来处理铁矿石、锰矿石、铬矿石以及含金和含稀有金属的砂矿和脉矿。跳汰是选煤的主要方法，也用于处理金刚石等非金属矿石。

## 二、跳汰机

跳汰机的种类很多，目前在重选厂应用最多的是隔膜跳汰机。根据隔膜位置的不同可分为旁动隔膜式、下动隔膜式、侧动隔膜式以及较为先进的新式圆形跳汰机等多种。

### 1. 隔膜式跳汰机

隔膜式跳汰机的构造及工作原理如图 9-3 所示。

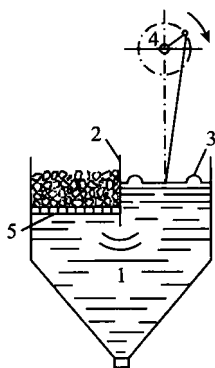


图 9-3 隔膜式跳汰机示意图

1—水箱；2—隔板；3—隔膜；4—偏心轮；5—筛板

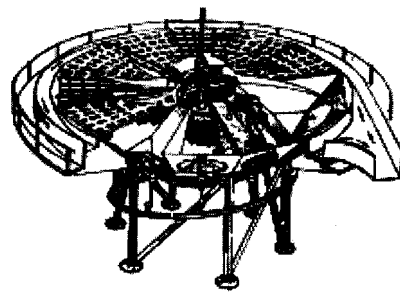


图 9-4 圆形跳汰机

跳汰机的隔板将跳汰机分为两个部分，左侧为跳汰室，右侧为隔膜室，偏心轮旋转时通过连杆带动隔膜做上下往复运动。当隔膜向下运动时跳汰室产生上升水流，当隔膜向上运动时跳汰室产生下降水流。由于偏心轮的不断旋转，跳汰机中将连续不断地产生上升、下降的交变水流，密度及粒度均不相同的非均匀粒群在垂直交变水流的作用下按所受重力不同而分层，可以简单地分为两层，密度大的矿物因受重力较大位于下层，而密度小的矿物位于上层，下层矿物经由筛下或筛上排出即为精矿，上层的矿物经跳汰机末端的排矿溢流堰排出即为尾矿，物料在跳汰机中经过上述过程而完成按密度分选的任务。

### 2. 圆形跳汰机

圆形跳汰机可视为多个梯形跳汰机合并而成（图 9-4）。早在 1940 年开始使用，但因矿石在筛面上分布不均等原因未能广泛推广，后经改进于 20 世纪 60 年代制成了现在的新式圆形跳汰机，现在已被国内外广泛采用。

该机的主要特点是为防止矿砂堆积而安装有转耙，并采用具有特殊结构的凸轮液压装置，跳汰周期曲线为锯齿形。它的处理能力大，分选粒度级别宽，分选效果好，在国际上获得较高评价。

## 第六节 溜槽分选

### 一、概述

溜槽选矿是利用矿粒在斜面运动的水流中运动状态的差异进行选矿的方法。矿粒群给入倾角不大（一般 $3^{\circ}\sim 4^{\circ}$ ，最大不超过 $16^{\circ}$ ）的溜槽内，不同密度的矿粒在水流的流动动力、矿粒的重力（有时还有离心力）、矿粒与槽底间的摩擦力等因素的联合作用下，进行松散、分层与分离。分层的结果是，密度大的矿粒集中在下层，以较低的速度沿槽底向前运动，在给矿的同时排出槽外（这种溜槽称为无沉积型溜槽），或者滞留于槽底（这种溜槽称为沉积型溜槽），经过一段时间后，间断地排出槽外。密度小的矿粒分布在上层，以较大的速度被水带走。由此，不同密度的矿粒，在槽内得到分选。另外，矿粒的粒度和形状对分选过程的精确性也有一定的影响。

溜槽是最早出现的选矿设备，古代用淘洗方法选收重砂矿物，使用的工具就是原始的溜槽。有些粗粒砂金溜槽和砂锡溜槽沿袭至今仍有使用。但是现代的溜槽选矿已经走向机械化和自动化，矿流的运动形式也变成多种多样的了。

按处理的矿石粒度，溜槽可分为3类：①粗粒溜槽，处理粒度在 $2\sim 3\text{mm}$ 以上，最大可达 $100\sim 200\text{mm}$ ；②矿砂溜槽，处理 $2(3)\sim 0.074\text{mm}$ 粒级矿石；③矿泥溜槽，处理小于 $0.074\text{mm}$ 粒级矿石。

溜槽的主要优点是设备结构简单，投资和生产费用低廉，粗、中粒溜槽还有较高的处理能力，缺点是分选精确性较低，因而适合作粗选设备使用。溜槽选矿目前广泛用于处理钨、锡、金、铂、铁及某些稀有金属矿石，尤其在处理低品位砂矿方面应用更多。

### 二、溜槽选矿设备

#### 1. 选金溜槽

选金用粗粒溜槽目前仍是国内外处理砂金矿的主要粗选设备。它的结构简单，生产成本低廉，处理贫砂金矿能有效地排除大量废弃尾矿，因此，不论在陆地上或采金船上，都在广泛应用。

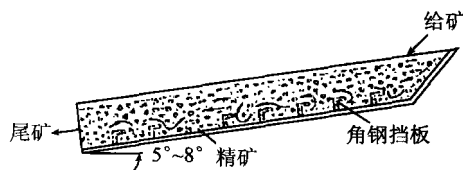


图9-5 选金用粗粒溜槽

图9-5表示选金用粗粒溜槽的工作情况。该溜槽长4m，宽0.4m，高0.35m，用钢板制成。槽底每隔0.4m设50mm×50mm角钢作挡板，角钢边棱逆水流放置，当矿浆由首端给入后，在槽内作快速的紊流流动。漩涡的回转运动不断地将密度大的金粒及其他重矿物转送到底层。在那里水流的紊动作用减弱，容积浓度达到很大。因此

轻矿物的粗大颗粒很难进入，只有细小的重矿物颗粒通过间隙进入底层，形成重矿物层。

重矿物层被挡板阻滞，留在槽内，上层轻矿物被水流推动，排出槽外。

粗粒溜槽均是间断工作。操作中要防止挡板中出现“堆溜”和“掏溜”现象。所谓“掏溜”就是在溜槽中所存有的精矿被矿浆带走，这是由于溜槽底部不平或挡板变形所引起的。所谓“堆溜”则是矿砂堆积于溜槽中，不再松散，失去了选别作用，常是因给矿量大所致，此时应调节给矿量并用耙子耙松床层。耙松床层的工作在正常选别过程中也是必要的，但不必像在选钨、锡溜槽中那样频繁地进行。

选金溜槽的清洗周期随矿石中的含金量及其他重矿物含量的不同而不同。陆地上的大溜槽每间隔 5~10d 清洗一次。采金船上的横向溜槽每天清洗一次，纵向溜槽每 5d 左右清洗一次。每次清洗时间短则 2~3h，长则 4~8h。清洗的方法基本上是预先加水清洗和去掉挡板后集中冲洗两个工序组成。最后获得少量含金的重砂矿物，再送跳汰机或摇床精选。

## 2. 矿砂溜槽

矿砂溜槽是指处理粒度在 2mm 或 3mm 以下的溜槽，工作特点是流膜呈弱紊流，轻、重矿物能够连续排出（即连续工作），在矿浆呈直线流动的溜槽中目前通用的主要是扇形溜槽和圆锥选矿机。这两种设备的分选原理与影响因素基本相同，可看作是同类设备的不同形式。

圆锥选矿机最初用于选别低品位的海滨砂矿，从中回收钛铁矿、金红石、锆英石、独居石、磷钇矿、白钛石、磁铁矿等重矿物。由于它的处理能力大，选别费用低，现已作为经济而有效的粗选设备用于各种脉矿的选别，如钨矿石、锡矿石、赤铁矿、铬铁矿、黄金以及金刚石、煤等。圆锥选矿机还用于从浮选或磁选尾矿中补充回收重矿物，国外还用以处理堆存的老尾矿，尽管原料中重矿物含量低，但因生产费用低廉，仍可有经济效益。

## 3. 矿泥溜槽

矿泥溜槽用于处理小于 0.1mm 微细粒级矿石，流膜很薄，只有 1mm 左右。流态基本属层流。但由于受表面张力和流动的不均匀性影响，表面仍常出现鱼鳞波，产生轻微的紊动，故有人称此为假层流。紊动层作用深度不大，但是以悬浮极微细的颗粒不再沉降。在紊动层的下面，矿粒借剪切分散压维持松散悬浮，并依轻、重矿物的重力压差不同发生按密度分层。进入底层的重矿物颗粒一般停滞在槽面上不动，借助槽面的移动（如皮带溜槽）或间隙地停止给矿清洗，以获得精矿。

目前所用的矿泥溜槽按工作原理可分为 3 类：①借矿浆在槽面上自然流动进行分选的溜槽，有自动溜槽，皮带溜槽等；②借槽面摇动以强化松散分层的溜槽，有振摆溜槽、摇动翻床、横流皮带溜槽以及双联选矿机等；③借助离心力强化分层过程的溜槽，如离心选矿机等。

离心选矿机（又叫卧式离心选矿机，或叫卧式离心溜槽）是旋转型的间歇式溜槽，是我国独创的新型、高效矿泥重选设备，属于在离心力作用下的流膜选矿设备。其构造如图 9-6 所示。整个设备由主机、控制机构和执行机构三大部分组成。其主机主要包括转鼓、给矿嘴、冲矿嘴、接矿槽和分矿器等部分。

矿浆由缝宽 4~6mm、长 140mm 的上给矿嘴和下给矿嘴给到转鼓内壁上，矿浆喷出的方向与转鼓运动方向相同，因而能贴附于鼓面上，由于出口速度低于转鼓线速度，矿浆在鼓壁上存在着滞后运动。滞后运动与矿浆沿鼓面倾斜方向的流动合成为曲线形运动轨迹。转鼓在转动中连续接受给入的矿浆，于是在空间形成螺旋形矿浆带向排矿端推进。如将转鼓面展开，则可见到图 9-7 所示图形。



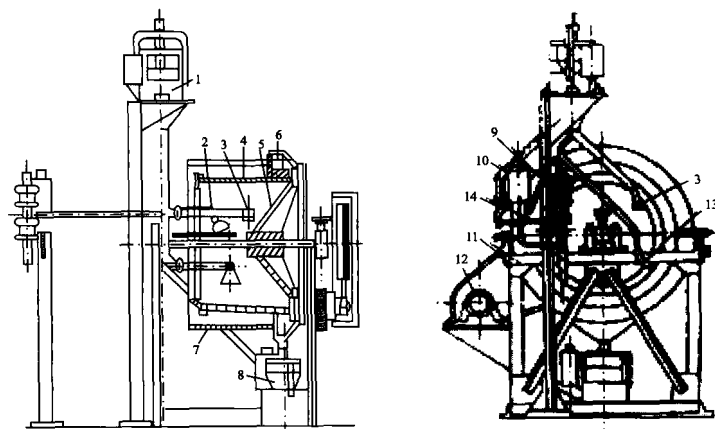


图 9-6 离心选矿机

1—给矿器；2—冲矿嘴；3—上给矿嘴；4—转鼓；5—底盘；6—接矿槽；7—防护罩；8—分矿斗；  
9—皮膜阀；10—三通阀；11—机架；12—电动机；13—下给矿嘴；14—洗涤水扁嘴

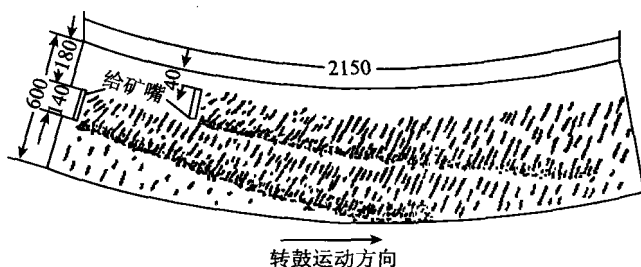


图 9-7 流膜在鼓面上的流动情况

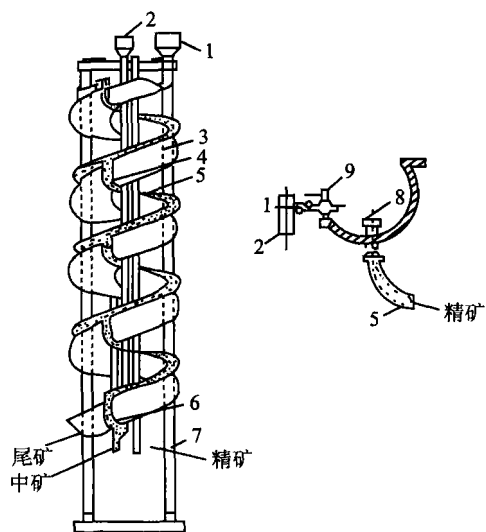


图 9-8 螺旋选矿机

1—给矿槽；2—洗涤水管；3—螺旋槽；4—连接槽段的凸缘；  
5—精矿排出管；6—排矿槽；7—机架；8—截料器；9—洗涤水阀

长期生产实践表明，离心选矿机处理粒度范围为  $0.074 \sim 0.01\text{mm}$ ，回收  $-19\mu\text{m}$  的效果很好。它具有处理能力大、回收粒度下限低、工作稳定、便于操作等优点，是一种高效矿泥重选设备。因此，广泛用于钨、锡矿泥，细粒贫赤铁矿的选别。其缺点是富集比不够高、工作不能连续进行、附属的控制机构易发生故障。目前主要用于微细粒级矿石的粗选作业，大型、连续作业离心机的研制是其发展方向。

#### 4. 螺旋选矿机

螺旋选矿机的构造如图 9-8 所示。设备主体由一个 3 ~ 5 圈的螺旋槽，用支架垂直安装。螺旋槽底在

纵向（沿矿流流动方向）和横向（径向）均有相当的倾斜度。截料器装在螺旋槽内侧，一般从第一节螺旋开始，每隔一定距离装 3~5 个，下接软管，以排出精矿、中矿。冲洗水由水管导入，水量用水阀调节。

螺旋选矿机结构简单，无运动部件，容易制造，占地面积小，单位处理量高，操作维护也较简便，工艺指标较好。该种设备适于处理含泥少的矿砂，给料粒度以 2~0.1mm 为宜。在处理含泥高的脉矿磨矿产品时，应进行脱泥或分级，否则将降低精矿质量和回收率。粒度回收下限一般可到 0.04mm 以下。

## 第七节 摇床分选

### 一、概述

摇床属于溜膜选矿类设备，由平面溜槽发展而来，以后以其不对称往复运动为特征而自成体系。摇床选矿是在一个倾斜宽阔的床面上，借助机械的不对称往复运动和薄层斜面水流冲洗联合作用，矿粒按密度分离的过程，是选别细粒物料应用最广泛的重选法之一。

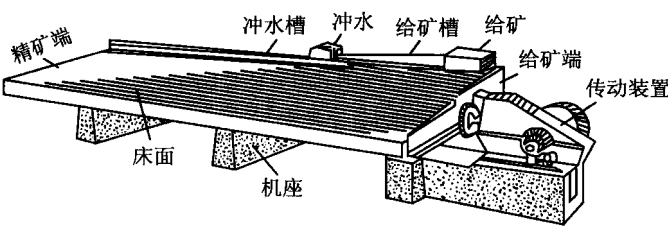


图 9-9 典型的摇床外形图

所有的摇床基本上是由床面、机架和传动机构三大部分组成的，典型的摇床结构如图 9-9 所示。床面近似呈梯形或菱形，在横向有  $1^\circ \sim 5^\circ$  倾斜，在倾斜上方配置给矿槽和给水槽。床面上沿纵向布置有床条（俗称来复条），床条的高度自传动端向侧逐渐降低，

并沿一条或两条斜线尖灭。整个床面由机架支撑（如为悬吊摇床，则床面被吊起），机架上并装有调坡装置。在床纵向靠近给矿槽一端设置传动装置，由它带动床面作往复不对称运动。这种运动使床面前进接近末端时具有急回运动特性，即所谓差动运动。

原料（矿浆或干料）送入给矿槽内，同时加水调配成浓度为 25%~30% 的矿浆，自动流到床面上。矿粒群在床条沟内因受水流冲洗和摇动作用产生松散、分层。分层后的上下层矿粒受到不同大小的水流动压力和床面摩擦力作用，而沿不同方向运动。上层轻矿物颗粒受到更大的水力推动，故沿床面的横向倾斜方向运动较多。横向倾斜面的底侧被称为尾矿侧。位于床层底部的重矿物颗粒直接受床面的差动运动推动移向传动端的对面，该处即为精矿端。矿粒的密度和粒度不同，运动方向亦不同，于是矿粒群从给矿槽开始沿对角线呈扇形展开，如图 9-10 所示。产物沿床面的边缘排出，排矿线很长，故摇床能精确地选出多种质量不同产物。

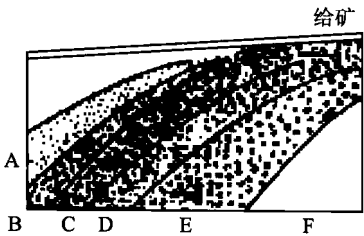


图 9-10 矿粒在床面上的扇形分布

A—精矿；B—中矿 I；C—中矿 II；D—贫中矿；E—尾矿；F—溢流及淤泥

摇床是一种选分精确性很高的细粒、微细粒物料的分选设备。在选分低品位钨、锡矿

石时，富集比可高达 300 倍，选别效率一般较其他细粒重选设备高。原矿经一次选别，可以得到部分最终精矿、最终尾矿和 1~2 种中间产物。平面摇床看管容易，调节方便。主要缺点是设备占用厂房面积大，单位面积处理能力低。

摇床主要用于选别钨、锡、钽、铌、铬和其他有色、稀有金属以及贵金属矿石，也可用来选别铁、锰矿石和煤。选分金属矿石时有效选别粒度范围是 3~0.019mm，选煤时上限粒度可达 10mm。

为了解决摇床占地面积大的问题，床面向着多层化和离心化方向发展。在多层化方面，国内外先后出现了坐落式的双层、四层、六层摇床和悬挂式的多层摇床。离心摇床在工业试验中获得了良好的分选效果，因结构复杂而未获推广。

## 二、摇床类型

摇床的类型很多，分类的方法也很多。按用途来分有：矿砂（2~0.074mm）摇床和矿泥（-0.074mm）摇床，矿砂摇床又可分为粗砂（2~0.5mm）摇床和细砂（0.5~0.074mm）摇床。按处理原料来分有选矿用摇床和选煤用摇床等。按床面层数来分有：单层摇床和多层摇床。按安装方式来分有：坐落式摇床和悬挂式摇床。按床面的配置来分有：左式摇床（站在床头看床面，给矿槽在左侧）和右式摇床（站在床头看床面，给矿槽在右侧）。按选分的主导作用力来分有：重力摇床和离心摇床。目前摇床最通用的分类，是按它的摇动机构和支撑方式区分，因为它们决定了床面的运动特性，关系到应用选择。

### 1. 悬挂式多层摇床

我国于 1977 年后陆续制成选矿用四层悬挂式摇床（8YC 型），选煤用三层悬挂式摇床（9YC 型）及菱形床面的选煤用四层悬挂摇床（XLY-4 型）。这些型号摇床均采用多偏心惯性齿轮式床头，应用差动惯性力带动床面运动，故可将床头与床面用钢丝绳全部悬吊在钢架或房梁上，免去了笨重的基础，且可安装在楼层上面。在固定床面的框架上面有调坡装置，拉动链轮，改变前后钢丝绳的悬吊高度，可整个地改变床面横向倾角。冲程、冲次及差动性可通过多偏心惯性齿轮床头来调节。

多层悬挂摇床的优点是占地面积少，并节约能耗。缺点是不易观察床面分带情况，产品接取不准确，故这种摇床较多地用于粗选。

选矿用四层悬挂式摇床（8YC 型）如图 9-11 所示。

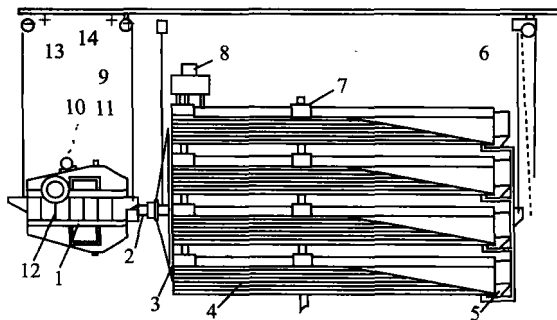


图 9-11 四层悬挂式摇床

1—惯性床头；2—床头床架连接器；3—床架；4—床面；5—接矿槽；6—调坡装置；7—给水槽；8—给矿槽；9—悬吊钢丝绳；10、11—电机及小皮带轮；12—大皮带轮；13—钢绳转向轮；14—屋梁或支架梁

## 2. 离心摇床

离心摇床是在床面作回转运动中借惯性离心力强化选别过程的设备。它的特点是用多块弧形床面（整机为3~4块刻槽床面）围成一个圆筒形，每个床面绕回转中心呈阿基米德螺线展开。因此当圆筒回转时，矿浆及冲洗水能够沿床面横向运动。不同密度和粒度的矿粒在床面上呈扇形展开，在床面搭接的开缝处排出尾矿及中矿。重矿物被推送到精矿端排出。在整个机体外面围以圆筒形罩子。罩子的内表面镶嵌着环形槽。不同密度的矿物进入槽中由底部孔口排出。

离心摇床在我国最早用于从弱磁选的尾矿中补充回收假象赤铁矿等矿物，获得了良好效果，但由于存在着振动强烈、噪声大、杆件焊缝易出现断裂、生产中事故较多等缺点，在金属矿选厂未能获得推广。后在煤炭系统对其进行了改造，将原来的床头只传动一组床面改为两组床面（即改为双头型式），如图9-12所示。在中空轴内安装一根贯穿两床体和软、硬弹簧的调节平衡杆，使振动力自相平衡，同时缩小了长宽比，采用生漆涂层的刻槽床面，用于处理-0.5mm的煤泥，每台设备生产能力达到12~18t/h。该设备定名为SLY-1.8型双头离心摇床，在南桐煤矿选煤厂生产。

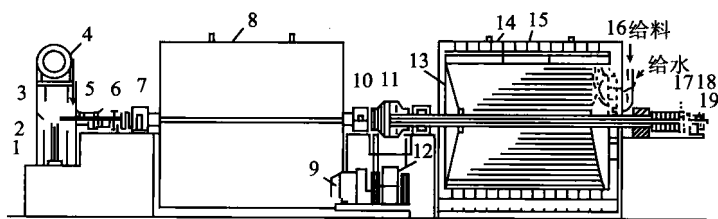


图9-12 SLY型双头离心摇床结构简图

- 1—基础；2—弹簧板；3—偏重轮；4—摇动电机；5—连接板；6—软橡胶弹簧；7—双向滚动轴承；  
8—接矿外罩；9—转动电机；10—中空大轴；11—硬橡胶弹簧；12—减速机；13—支撑圈；  
14—床板；15—料水槽；16—料水环；17—冲程调节螺母；18—调节平衡杆；19—大螺母

实践表明，比原来用浮选法处理煤泥，节省了油药消耗，避免了对环境污染。在技术指标相近的情况下，经济指标比浮选法优越，从而为处理煤泥提供了一种经济而有效的手段。

## 第八节 风力分选

风力选矿设备有风力跳汰机、风力摇床、风力溜槽和风力重介质分选机等。

### 一、风力摇床

在风力摇床床面上矿粒群是借连续或间断鼓入的上升气流悬浮，而不是像水力摇床上那样借斜面水流作用松散。

原料由床面低的一端给入，向高的一端运行，借助鼓入的空气吹动床层松散悬浮，在沿床面移动中分层，位于上层的轻矿物颗粒沿床面的横向倾斜由侧边排出，底层重矿物颗粒受床条阻挡沿床面纵向运行到末端排出。

风力摇床的应用比风力跳汰广泛，设备类型也较多。在选煤工业中用来处理粗粒级煤，最大给矿粒度可达75mm，一般分两级入选（75~10mm，10~3mm）。风力摇床也用于处理各种脉矿石和稀有金属砂矿。

## 二、风力尖缩溜槽

风力尖缩溜槽外形也是一个向排矿端收缩的浅槽，但槽底由微孔材料制成。槽底下面有一个空气室，进入该室的空气通过多孔表面向上流动。原料由槽的上部给入，在气流的吹动下形成沸腾床，在沿槽向下运动中发生分层，到达槽的末端时用分隔板将轻、重矿物切割开来，得到不同密度产物。分选槽也可用电磁铁加以振动，以强化分选过程。

风力尖缩溜槽主要用于矿石分选，亦可作分级设备使用（曾经用重介质在磁铁矿的分级上使用），在选别粗粒锡矿石时，床层的流动性不好，添加等量的硅铁，改善了床层流动性，取得了满意结果。

## 三、风力重介质分选机

为了提高以空气作介质的分选密度，近年研究出了多种重介质分选机。其中以加拿大制成的逆流流化床分选机颇有发展前途。该机利用石灰石或石英与赤铁矿（磁铁矿）混合物作加重质，在分选0.6mm以上粒级煤时，获得了不亚于水力跳汰的结果。

## 小 结

本章的重点是跳汰、溜槽和摇床的工作原理。

本章的难点颗粒的“自由沉降”和“干涉沉降”原理。



### 复习思考题

1. 简述颗粒的“自由沉降”。
2. 何为“等降比”？如何计算？
3. 简述跳汰分选原理。
4. 何为“掏溜”和“堆溜”？

# 第十章 浮游选矿

## 本章导读

本章概述了浮选的基本原理，介绍了各种浮选药剂的名称、化学分子式和作用，说明了各种浮选机的类型、结构和特点以及影响浮选过程的因素。通过本章的学习，能够了解浮选热力学和动力学理论及浮选的工艺和设备。

## 第一节 概 述

### 一、浮选的基本概念

浮选是利用矿物表面物理化学性质（疏水—亲水）的不同，来分选矿物的一种选矿方法。一般而言，从水的悬浮液中（通常称矿物悬浮液为矿浆）浮出固体矿物的选矿过程称为浮游选矿，简称浮选。

浮选发展初期使用全油浮选（用大量的油类进行浮选）与表层浮选（在矿浆表面进行漂浮）。20 世纪初，发展了泡沫浮选法。现代所说的浮选，大都是指泡沫浮选。

浮选是继重选之后发展起来的一种选矿方法。随着矿物原料需求量日益增长，矿产资源愈来愈贫，有用矿物在矿石中的浸染粒度愈来愈细，用重选法处理愈来愈显得困难。浮选可以有效地回收细粒有用矿物、处理细粒浸染的矿石和复杂多金属矿石等。浮选法的应用使许多以往认为无经济价值的矿产资源变为宝藏。因此，人们认为浮选法的出现是矿冶科技发展史中的“奇迹”。

浮选法经过长期的研究、应用、发展，它不仅在矿石（金属矿、非金属矿、煤等）分选方面获得广泛应用之外，并且扩展应用于矿石分选外的许多领域，如用于处理冶金产品铜镍硫、冶炼炉渣、水冶阳极泥及废液中金属回收；化学工业中回收油脂、蛋白质、染料及化工晶体药物的分选；造纸工业中纸浆废液处理及回收纤维素，废纸再生时脱除油墨；农产品及食品工业中从黑麦分出角麦，从牛奶中分出乳酪；在医药生物方面从水中脱除寄生虫卵、分选细菌以及工业废水、废渣的处理等。浮选法在未来开发海洋资源时也具有有良好的应用前景。

随着上述实际应用的扩展及研究工作的深入，先后出现了各种有独特工艺及专有用途的浮选方法，如离子浮选、沉淀浮选、吸附浮选等。因此，浮选发展到今天，较为全面的定义可概括为：利用物料自身具有的或经药剂处理后获得疏水亲气（或亲油）特性，使之在水—气或水—油界面聚集，达到富集、分离和纯化。按照这一定义，浮选涉及的内容范围极为广阔，本章着重对常规矿物泡沫浮选（以后简称浮选）加以介绍。

## 二、浮选过程

现代常规矿物浮选的特点是：矿粒选择性地附着于矿浆中的气泡上，并随之上浮到矿浆表面，达到有用矿物和脉石矿物或有用矿物之间的分离。

浮选过程一般包括下列作业：①矿石细磨，使有用矿物达到解离；②调整矿浆浓度，适合浮选要求；③浮选矿浆加药处理；④充气浮选和矿化泡沫的分离。

矿浆经加药处理后的第一次浮选作业通常称粗选。在粗选所得矿化泡沫中，虽然富集了大量有用矿物，但经常还混杂有脉石矿物及其他杂质。通常还要对这种粗选矿化泡沫进行一次或多次再选，这种粗选泡沫进行再选的作业称精选。最后一次精选作业所得的泡沫产品叫精矿。在粗选作业排出的矿浆中，往往还残留有一定量的有用矿物，需要进行再选回收，这种再选作业称为扫选。精选作业排出的矿浆和扫选作业获得的泡沫产品通常称为中矿。中矿通常返回前面某一浮选作业再选。在特殊情况下，也可单独浮选。粗选一般为一次，精选和扫选可以有多次作业。最后一次扫选作业排出的矿浆称为尾矿。

一般浮选是将有用矿物浮入泡沫产物中，将脉石矿物留在矿浆中，这样的浮选过程称正浮选。反之，浮起的是脉石矿物的浮选过程称反浮选。

如果在矿石中含有两种或两种以上的有用矿物时，其浮选方法有几种：一种称为优先浮选，即将有用矿物依次一个一个地选出为单一的精矿；另一种叫混合浮选，即将有用矿物共同选出为混合精矿，随后再把混合精矿中的有用矿物一个一个地选分开来；还有部分混合浮选和可浮性等方法。

## 第二节 浮游选矿原理

浮选时，空气常成气泡（气相）分散于水溶液（液相）中，矿物（固相）常成大小不同的矿粒悬浮于水中，气泡、水溶液和矿粒三者之间有着明显的边界，这种相间的分界面叫相界面。把气泡和水的分界面称为气—液界面，把气泡和矿粒的分界面叫气—固界面，把矿粒和水的分界面称为固—液界面。通常把浮选过程中的空气矿浆称为三相体系。

在浮选相界面上，发生着各种现象。其中对浮选过程影响较大的基本现象有润湿现象、吸附现象、界面电现象和化学反应等。

### 一、矿物表面的润湿性

#### 1. 润湿现象

润湿是自然中一个常见的现象。例如，在干净的玻璃板上滴一滴水，这滴水很快地沿玻璃表面展开，成为平面凸镜的形状。若住石蜡上滴一滴水，这滴水则力图保持球形，但因重力的影响，水滴在石蜡上成一椭圆形。这两种不同现象表明，玻璃能被水润湿，是亲水性物质；石蜡不能被水润湿，是疏水性物质。这种玻璃易被水润湿，石蜡不易被水润湿的现象，称为润湿现象。

同样，将一滴水滴于干燥的矿物表面上，或者将一气泡给予浸在水中的矿物表面上，如图 10-1 所示，就会发现不同矿物的表面被水润湿的情况是不同的。在一些矿物（如石英、长石、方解石等）表面上水滴很容易铺开，或者气泡较难于在其表面上扩展，而

在另一些矿物（如石墨、辉钼矿等）表面上则相反。表明这些矿物表面的亲水性由图 10-1 从左至右逐渐减弱，疏水性由左至右逐渐增强，矿物表面这种亲水或疏水的性质，主要是由于矿物表面的作用力（键能）性质不同所致。

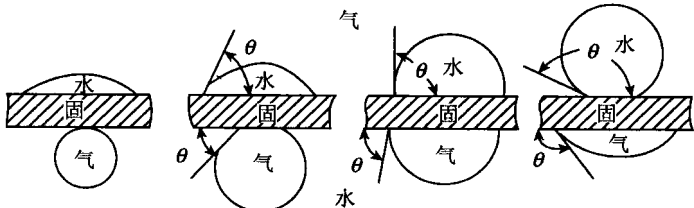


图 10-1 不同矿物表面的润湿现象

## 2. 润湿接触角

为了判断、比较矿物表面亲水或疏水程度，常用接触角  $\theta$  这个物理量来度量。在浸于水中的矿物表面上附着一个气泡（或水滴附着于矿物表面）。当附着达到平衡时，气泡在矿物表面形成一定的接触周边，称为三相润湿周边，如图 10-2 所示。以三相润湿周边上的 A 点为顶点，以固水交界线为一边，以气水交界线为另一边，经过水相的夹角  $\theta$  称为接触角。

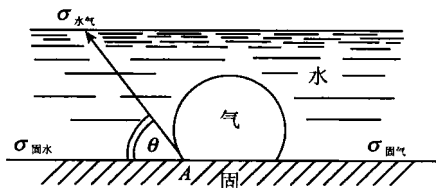


图 10-2 浸于水中的矿物表面所形成的接触角

接触角的形成过程遵守热力学第一定律：在恒温条件下，气泡附着在矿物表面上后，从接触角开始排水并向四周扩展，润湿周边逐渐扩大。这个过程一直自动进行到三相界面自由能（或以表面张力表示） $\sigma_{固水}$ 、 $\sigma_{水气}$ 、 $\sigma_{固气}$  达到平衡为止。所形成的接触角称为平衡接触角（通常称接触角，以后的讨论中提到的接触角，除注明者外，均指平衡接触角）。接触角的大小，由三相界面自由能的相互关系所确定，由物理化学知道，界面自由能是增加单位界面面积所消耗的能量。

因此，又可将它看成是作用在单位长度上的力，就是表面张力。实际上，这两个概念是一致的。于是，在讨论接触角的形成过程时，又可理解为：在固水、水气、固气三个界面上，分别存在三个力（表面张力）。用同样符号固水、水气、固气表示。这三个力都可以看作是从三相交点 A 向外拉的力。当三个力的作用达到平衡时，在  $x$  轴投影方向，可列出力的平衡方程式：

$$\sigma_{固气} = \sigma_{固水} + \sigma_{水气} \cos \theta \quad (10-1)$$

移式简化后，可得

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{固气} - \sigma_{固水}}{\sigma_{水气}} \quad (10-2)$$

式中： $\sigma_{固气}$ 、 $\sigma_{固水}$  和  $\sigma_{水气}$  为固气、固水和液气界面的表面张力（或自由能）； $\theta$  为接触角。

上式表明，接触角的大小取决于水对矿物、空气对矿物亲和力大小的比较（即  $\sigma_{固气} - \sigma_{固水}$  的差值大小）。在一定条件下， $\sigma_{水气}$  值与矿物表面性质无关，可以看成是恒定值。如果矿物表面与水分子的作用活性较高（亲和力强），这种表面与水分子结合后，原来矿物



表面未饱和的作用能会得到很大程度的满足,致使 $\sigma_{\text{固水}}$ 值很低。同时,互相比之下,如果空气对矿物表面的亲和力较弱, $\sigma_{\text{固气}}$ 值就较大,这样, $\sigma_{\text{固气}} - \sigma_{\text{固水}}$ 的值也就较大, $\cos\theta$ 值大,而 $\theta$ 值小,反映出矿物表面有较强的润湿性(亲水性);反之,如果矿物表面与水分子的作用活性较低(亲和力弱),这种表面与水分子结合后,原来矿物表面的未饱和程度,得到比较小的满足,则 $\sigma_{\text{固水}}$ 值较大,与前种情况相比, $\sigma_{\text{固气}} - \sigma_{\text{固水}}$ 的值就较小, $\cos\theta$ 值小,而 $\theta$ 值大,此时反映出矿物表面的亲水性较弱(疏水性强)的性质。极个别的矿物表面甚至出现 $\sigma_{\text{固气}}$ 小于 $\sigma_{\text{固水}}$ 的情况,这表示空气对矿物表面的亲和力比水为大,这时接触角可大于 $90^\circ$ 。

从以上讨论可以看到接触角 $\theta$ 值愈大, $\cos\theta$ 值愈小,这说明矿物润湿性愈小,其可浮性愈好,并且 $\cos\theta$ 值介于 $0 \sim 1$ 之间。于是对矿物的润湿性与可浮性的量度可定义为

$$\text{润湿性} = \cos\theta \quad (10-3)$$

$$\text{可浮性} = 1 - \cos\theta \quad (10-4)$$

由此可见,通过测定矿物的接触角,可以对各种矿物的天然可浮性作出大致的评价。必须指出,不能误认为只有空气对矿物表面的亲和力大于水对矿物表面的亲和力,接触角大于 $90^\circ$ 时,矿粒才能附着于气泡上。实践表明,用乙黄药处理金属矿物(如方铅矿、黄铜矿等)使接触角为 $60^\circ$ 时,就可以成功地进行浮选。

从实验过程中发现,接触角并不立刻达到平衡,并且也不是在任何情况下都会平衡。如果固相表面不光滑或有突起的晶棱,在形成接触角的过程中,三相润湿周边的移动受到不能克服的阻力,这种阻碍或润湿周边在固体表面移动的现象,称为“润湿阻滞”。由于阻滞可以使形成的接触角不等于上述的平衡接触角,这时的接触角称为阻滞接触角 $\theta'$ 。而且阻滞接触角大于平衡接触角。通常润湿阻滞很难避免,故平衡接触角很难测准。

## 二、矿粒与气泡附着前后自由能的变化与接触角的关系

通常测定的接触角,是用小水滴或小气泡在大块纯矿物表面测到的。实际浮选时,是磨细的矿粒向大气泡附着,这时要直接测定其接触角是困难的,因此需要用物理化学的方法进行分析。

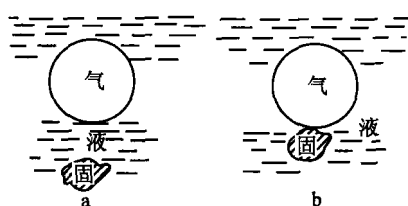


图 10-3 矿粒向气泡附着前后的情况

a—附着前; b—附着后

矿粒向气泡附着前、后的情况如图 10-3 所示。

设 $\sigma_{\text{水气}}$ 、 $\sigma_{\text{固气}}$ 和 $\sigma_{\text{固水}}$ 分别表示相应的界面的自由能( $10^{-7} \text{ J/cm}^2$ );  $S_{\text{水气}}$ 、 $S_{\text{固气}}$ 、 $S_{\text{固水}}$ 分别表示相应的界面的表面积( $\text{cm}^2$ ),附着前(图 10-3a)系统自由能 $G_{\text{前}}$ 为

$$G_{\text{前}} = S_{\text{水气}} \cdot \sigma_{\text{水气}} + S_{\text{固水}} \cdot \sigma_{\text{固水}} \quad (10-5)$$

矿粒向气泡附着后(图 10-3b)系统自由能(假定附着面积为单位面积:  $1 \text{ cm}^2$ )  $G_{\text{后}}$ 为

$$G_{\text{后}} = (S_{\text{水气}} - 1) \cdot \sigma_{\text{水气}} + (S_{\text{固水}} - 1) \cdot \sigma_{\text{固水}} + \sigma_{\text{固气}} \cdot 1 \quad (10-6)$$

附着前后自由能变化值 $\Delta G$ 为

$$\Delta G = G_{\text{前}} - G_{\text{后}} = \sigma_{\text{水气}} + \sigma_{\text{固水}} - \sigma_{\text{固气}} \quad (10-7)$$

由式(10-1)知 $\sigma_{\text{固水}} - \sigma_{\text{固气}} = -\sigma_{\text{水气}} \cdot \cos\theta$ ,代入式(10-7),得

$$\Delta G = \sigma_{\text{水气}}(1 - \cos\theta) \quad (10-8)$$

式(10-8)就是浮选基本行为——矿粒向气泡附着前后的热力学方程式。它表明了自由能的变化与平衡接触角的关系。式中 $\sigma_{\text{水气}}$ 是气水界面的自由能,其数值与水的表面张力相同(常温常压下为 $72 \times 10^{-5} \text{ N/cm}$ 或 $72 \text{ dyn/cm}$ ),这是可以由实验测定的,于是 $\Delta G$ 可以算出。由于水的表面张力为恒定值,因此, $\Delta G$ 与 $\theta$ 值有关。

由式(10-8)可知,当矿物表面完全亲水时, $\theta = 0^\circ$ ,润湿性 $\cos\theta = 1$ ,可浮性 $1 - \cos\theta = 0$ ,则 $\Delta G = 0$ ,此时矿粒不能自动地附着在气泡上,浮选行为不能发生。

当矿物表面疏水性增加时,接触角 $\theta$ 增大,润湿性 $\cos\theta$ 减小,则可浮性 $1 - \cos\theta$ 增大。此 $\Delta G$ 也增大。按照热力学第二定律,在恒温条件下,如果过程变化前的体系比变化后的体系自由能大,即 $\Delta G > 0$ ,则过程有自发进行的趋势。因此愈是疏水的矿物,自发附着于气泡上浮的趋势就愈大。

必须指出,式(10-8)是在一些假定条件下得出的简化近似式。实际上,当气泡与矿粒接触时,界面面积的变化及气泡的变形情况是相当复杂的,曾经有些学者进行过较复杂的推算。但是,由于固-液及固-气界面能难于直接测定,平衡接触角不易测准。特别是在矿粒与气泡间的水化膜的性质变化等,所以这方面的工作尚有待继续研究。不过在实际工作中,可利用 $\Delta G$ 定性地研究矿物的浮选行为。通过对比各种矿物接触角的大小,比较它们与气泡附着前后体系自由能的变化,可粗略地判断它们可浮性的好坏。从理论上分析,可浮的基本条件必须是 $\Delta G > 0$ ,即接触角大于 $0$ ,天然产出的各种矿物,在浮选药剂的作用下,大多数矿物的接触角是大于 $0$ 的。

### 三、矿粒在气泡上附着的牢固度

矿粒与气泡附着的牢固度,应能保证矿化气泡浮升到浮选泡沫层的过程中,矿粒不至于中途脱落,当矿粒附着在气泡上后,能否上浮至矿浆而最终进入泡沫产品,这要看脱落力的大小,现仅就作用在矿粒-气泡聚合体上的主要动力,作粗略的综合分析,以期找出影响受力的主要因素。

设: $\sigma_{\text{水气}}$ 为气水界面上的表面张力; $\theta$ 为接触角; $\Delta$ 为水的密度; $g$ 为重力加速度; $\omega^2 R$ 为离心力场加速度; $\delta$ 为矿粒的密度; $r$ 为润湿周边半径(设矿粒为一圆柱体)。

由图10-4可知,矿粒附着在气泡上的动力学条件,必须满足:

$$\begin{aligned} &\text{在静水中} \quad 2\pi r \cdot \sigma_{\text{水气}} \cdot \\ &\quad \sin\theta > m(\delta - \Delta)g \quad (10-9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{在涡流中} \quad 2\pi r \cdot \sigma_{\text{水气}} \cdot \\ &\quad \sin\theta > m(\delta - \Delta)\omega^2 R \quad (10-10) \end{aligned}$$

即矿粒与气泡之间的附着力 $2\pi r \cdot \sigma_{\text{水气}} \cdot \sin\theta$ 必须大于重力效应(或脱落力效应)。在其他条件不变的情况下(矿粒大小、矿粒的密度、浮选机叶轮转速、 $\sigma_{\text{水气}}$ 为定值),由式(10-9)、式(10-10)可见,矿粒表面疏水

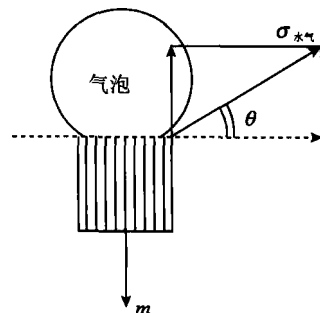


图10-4 作用在矿粒气泡聚合体上的力的分析

性越强（即  $\theta$  越大），矿粒在气泡上的附着力也就越大，就难于脱落。观察气泡从矿粒表面脱落的动力学过程发现，脱落总是从缩小附着面积开始的。在这个过程中，水从附着面积逐渐排挤气体，矿粒表面的疏水性越强，水排气的过程越难实现，矿粒从气泡表面脱落的概率就越小，附着也就越牢固。

### 第三节 浮选药剂

自然界的矿物，除一些矿物（如石墨、自然硫、辉钼矿等）和煤外，绝大多数矿物的天然可浮性是比较差的，有些彼此之间的差别很小，分选时效果很差。因此，为了有效地实现各种矿物浮选分离，必须人为地控制矿物表面的润湿性，扩大矿物间可浮性的差别。即在某种情况下，需要某种矿物浮游，可以人为地提高其可浮性；而在需要抑制它时，则能人为地降低其可浮性。完成这一任务，通常是采用浮选药剂来改变矿物的表面性质，从而达到改变矿物可浮性的目的。浮选法之所以能被广泛地应用于矿物原料加工的各个领域，最主要的原理是该法能通过浮选药剂，灵活有效地控制矿物的浮选行为，从而达到最大限度地回收有用矿物。

#### 一、捕收剂

捕收剂分子的结构中一般都包含两个基：极性基和非极性基，极性基能够活泼地和矿物表面发生作用，使捕收剂固着于矿物表面上，非极性基起疏水作用，所以实践上使用的捕收剂一般来说是一种异极性的有机物质。当然，也有捕收剂起捕收作用的不是离子而是分子。

##### （一）硫化矿捕收剂

硫化矿浮选时，常用硫代化合物类捕收剂。这类捕收剂通常具有二价硫原子组成的亲固基，同时疏水基分子量较小。其主要代表有黄药、黑药、氨基硫代甲酸盐、硫醇、硫脲及它们相应的酯类。

##### 1. 黄药类

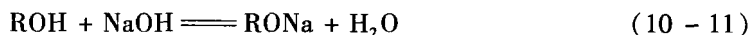
这类药剂包括黄药、黄药酯等。

##### （1）黄药

黄药是工艺上的名称，它的学名称为黄原酸盐，按它的化学组成也称为烃基二硫代碳酸盐。

通式为  $\text{ROCSSMe}$ ，式中  $\text{R}$  为烃基（通常为烷基） $\text{C}_n\text{H}_{2n-1}$ ， $n=2\sim5$ ，个别的  $n=8$ ， $\text{Me}$  为  $\text{Na}$  或  $\text{K}$ ，国产工业品多为  $\text{Na}$ 。

黄药是用醇、氢氧化钠（或氢氧化钾）及二硫化碳制成：



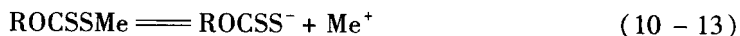
所用原料醇中的烃基不同，可得到各种黄药，如乙黄药  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OCSSNa}$ ，丁黄药  $\text{C}_4\text{H}_9\text{OCSSNa}$ ，异丙黄药  $(\text{CH}_3)_3\text{CHOCSSNa}$ 。黄药有钠盐和钾盐两种。此外，还有戊黄药  $\text{C}_5\text{H}_9\text{OCSSNa}$ 、异丁黄药  $(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{OCSSNa}$ 、仲辛黄药  $\text{CH}(\text{CH}_2)_{14}(\text{CH})\text{OCSSNa}$ 、杂

黄药 (C—C 的烷基黄酸盐) 等。

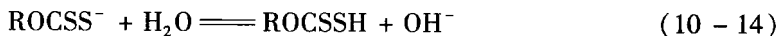
## (2) 黄药的性质

黄药为黄色固体粉末, 有的压成粉笔状。常因含有杂质而颜色较深, 相对密度为 1.3~1.7, 易燃, 具有刺激性臭味, 它分解出的挥发性气体 ( $\text{CS}_2$ ) 对神经系统有害, 应注意防护。黄药易溶于水, 使用时常配成 1% 水溶液。黄药的主要性质如下:

1) 黄药的解离、水解和分解。黄药在水中解离:



黄原酸根又水解生成黄原酸。黄原酸是弱酸, 解离常数在  $10^{-2} \sim 10^{-5}$  之间。



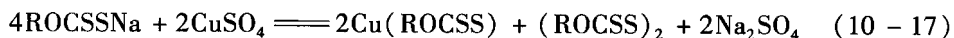
黄原酸易分解, pH 值愈低, 分解愈迅速:



为了防止黄药分解失效, 常在碱性矿浆中使用。低级黄药比高级黄药分解快, 例如, 在 0.1mol 的 HCl 溶液中, 乙黄药完成分解平均时间为 5~10min, 丙黄药 20~30min、丁黄药 50~60min, 戊黄药 90min。因此, 如必须在酸性介质和进行浮选时, 应尽量使用高级黄药。

黄药遇热, 容易分解, 而且温度愈高, 分解愈快。

2) 黄药的氧化。黄药本身是一强氧化剂, 易于氧化。在有  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  同时存在时, 氧化速度比只有  $\text{O}_2$  存在时更快, 黄药氧化产物为双黄药。在黄药水溶液中, 过渡元素离子, 或能与黄药生成难溶性黄原酸的离子, 对黄药的氧化有催化作用, 其反应为



3) 黄药的捕收能力。黄药的捕收能力与其分子中非极性部分的烃链长度和烃基结构有关。黄药固着于矿物表面, 是亲固基与矿物表面金属阳离子相结合, 而其烃基则朝外排水。所以, 黄药疏水性强弱, 亦即捕收能力的强弱, 很大程度上取决于烃基的长度。一般的规律是, 烃基越长 (即碳原子数越多), 则其捕收能力越强。

烃基结构影响主要是烃基支链的影响。对于短烃链的黄药, 正构体不如异构体好, 但是, 烃链增长到一定时 (如  $\text{C}_5$  以上), 异构体不如正构体, 特别是支链靠近极性基者尤为明显。

4) 黄药的选择性。黄药对某种矿物的捕收选择性好坏, 以及捕收能力, 与黄药和某种矿物表面金属离子所形成的金属黄酸盐的溶解度大小有关。黄药离子能与许多重金属、贵金属离子生成难溶性化合物, 所以黄药对含有这些离子的自然金属和硫化矿具有好的选择性和捕收能力, 对碱土金属 (钙、镁、钡等) 离子不能生成难溶性化合物, 故黄药对碱土金属矿 (如萤石  $\text{CaF}_2$ 、方解石  $\text{CaCO}_3$ 、重晶石  $\text{BaSO}_4$  等) 没有捕收作用。

此性质可用来粗略估计黄药对重金属及贵金属矿物 (主要指硫化矿) 的捕收作用顺序。某金属黄原酸盐愈难溶, 则其相应的硫化矿物愈易为黄药所捕收。

了解金属黄原酸盐溶解性质的另一重要意义, 在于用来调节矿浆中的离子组成及药剂间的相互影响。例如, 许多金属 (如铜、铅、锌、铁) 硫化矿的矿石中, 常有次生铜矿, 此时矿浆中就含有  $\text{Cu}^{2+}$ , 而  $\text{Cu}^{2+}$  会与黄原酸离子生成难溶的黄原酸铜, 这样, 会消

耗掉一部分黄原酸离子。

### (3) 黄药酯

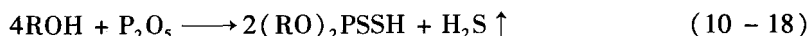
其通式为  $\text{ROCSSR}'$ 。黄药分子中，碱金属被烃基取代生成黄药酯类，可将其看作是黄药的衍生物，这类捕收剂属于非离子型极性捕收剂，它在水中的溶解度都很低，大部分呈油状。对于铜、锌、钼等硫化矿以及沉淀铜、离析铜等的浮选，具有较高的浮选活性，属于高选择性的捕收剂。即使在较低的 pH 值条件下，也能浮选某些硫化矿。

## 2. 黑药类

黑药在硫化矿的浮选中应用已久，其用途之广仅次于黄药，黑药的化学名称为二烷基二硫代磷酸（盐）。

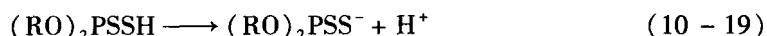
黑药的种类很多，但早期应用的大部分品种为黑褐色液体，故我国通称黑药，实际上二烷基二硫代磷酸盐的纯品并非黑色。黑药按照分子中的 R 基的不同，可分为酸（包括苯酚、甲苯酚等）黑药及醇黑药。按照分子中的阳离子（Me）不同又可分为酸式黑药及黑药的盐〔铵盐（Me 为  $\text{NH}_4^+$ ），钠盐（Me 为  $\text{Na}^+$ ）〕等类别。

黑药的制造是将酚类或醇类与五硫化二磷直接反应：

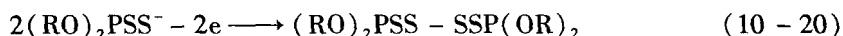


酸式产物为油状黑色液体，中和成钠或铵盐时可制成水溶液或固体产品。

黑药和黄药相同，也是弱电解质，在水中解离：



黑药比黄药稳定，在酸性矿浆中，不像黄药那样容易分解。黑药较难氧化，氧化后生成双黑药，在有  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  或黄铁矿、辉铜矿存在时，也能氧化成双黑药：



双黑药也是一种较难溶于水的非离子型捕收剂，大多数为油状物，性质稳定，可作为硫化矿和沉积金属的捕收剂。

目前我国生产的黑药主要是甲酚类 25 号黑药和丁基铵黑药等。

## 3. 硫氮类

这类药剂包括硫氮和硫氮酯等。

硫氮（二烷基二硫代氨基甲酸盐）捕收剂和黄药的差异在于一个氮原子代替了黄药中的氧原子，而且它有 2 个疏水基。氮原子外层轨道上有 5 个电子，除了 3 个电子分别与相邻的碳原子化合外，还有 2 个电子和别的电子化合。这对电子具有和铜、铅等金属离子形成络合物的能力，因而二烷基二硫代氨基甲酸盐的捕收能力比黄药强。硫氮捕收剂的其他性质和黄药非常接近。

硫氮酯具有捕收兼起泡性能，浮选硫化铜矿时，可代替丁黄药和松醇油，但其凝固点低，约为  $22^\circ\text{C}$ ，添加时需要采取保温措施。

## 4. 硫氮酯

这是国内外广泛应用于硫化矿浮选的非离子型捕收剂。该类捕收剂也是黄药的衍生物，为黄原酸分子中的巯基被烷基氨基所取代而成。

国外著名的牌号为 Z-200 号，我国简称为 200 号或“23 硫氮酯”就是指（异丙）乙硫氮酯。国外也有用 UTK 符号代表的，其中 TK 代表“硫氮酯”类捕收剂。

## 5. 硫醇类

这是一组带硫氢基的苯骈（或萘骈）或杂环结构的捕收剂，已有研究使用的是苯骈噻唑硫醇、苯骈咪唑硫醇等，它们都是良好的硫化矿捕收剂。

## 6. 硫脲衍生物类

二苯基硫脲，我国习惯称为白药（因在外表上它是白色的结晶）。它是氮原子与苯环直接相连的化合物，是由苯胺与  $\text{CS}_2$  反应所得，化学式为  $(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH})\text{CS}$ 。

白药为白色片状晶体，不溶于水，用于铜、铅、锌硫化矿的浮选。它对方铅矿的捕收能力较强，对黄铁矿较弱，选择性较好，浮选速度快。因其难溶，多添加于球磨机中，或以苯胺、对甲苯胺溶剂，配成浓度为 10% ~ 20% 的溶液（称为 TA 及 TT 混合剂）使用。由于白药较黄药贵，应用不便，目前使用较少。

### （二）非硫化矿捕收剂

这类捕收剂通常在其极性基中含有氧、氮等原子，同时非极性基分子量较大。常用的又分为阴离子型和阳离子型两大类，前者多为各种烃基含氧酸，后者主要是有机胺类。

#### 1. 烃基含氧酸（及其盐）类捕收剂

##### （1）羧酸及其皂

分子中带有羧基（ $-\text{COOH}$ ）的有机化合物，都可以称为或属于有机酸类化合物。它一般又分为脂肪族有机酸及芳香族有机酸两大类，在浮选工艺中，芳香酸远不如脂肪酸重要。

脂肪酸羧基中的氢被  $\text{Na}^+$  或  $\text{K}^+$  取代就成为皂。某些高级脂肪酸皂和脂肪酸一样是重要的浮选药剂。

脂肪酸及其皂类在浮选上最重要的用途是作为氧化矿（如赤铁矿、萤石等）的捕收剂。由于脂肪酸只有很活泼的羧基官能团，几乎可以浮选所有的矿物，只是对于易浮矿物用量较少，而对于难浮矿物用量较多而已。一般来说，在溶液中呈阳离子状态的具有离子键的矿物，包括所有的氧化矿，例如赤铁矿、钛铁矿、硫酸盐矿、磷酸盐矿以及萤石等，在溶液中呈阳离子状态的具有金属键的矿物，包括所有的硫化矿以及金、铜等天然金属，具有分子共价键的矿物或有机物，包括石墨、煤、硫黄、辉钼矿和滑石等，都可以用脂肪酸或其皂类作为捕收剂进行浮选。对于大分子共价键化合物，在溶液中呈阴离子状态的，包括石英、长石、石榴子石、粘土、高岭土、云母等硅酸盐类等矿物，不如用胺类捕收剂的效果好。

必须指出，有机酸及其皂可以浮选硫化矿物，但是，实践上不用它，因为硫化矿石中脉石矿物经常也能被它浮选，况且已有更具选择性更有效的捕收剂——含硫氢基捕收剂代替它。

在浮选工艺上引用脂肪酸及其皂类药剂，是选矿工业的重大成就之一，其应用范围之广，也是一般浮选药剂比不上的。但是，这类药剂的最大弱点，是选择性很差，在用量上也较黄药类大。

浮选中常用的脂肪酸捕收剂为油酸及油酸钠（ $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$  及  $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COONa}$ ）。

油酸又名十八烯（9）酸，是天然不饱和脂肪酸中存在最广的一种，可由油脂水解得到。纯油酸为无色油状液体，冷却时得到针状结晶，熔点  $14^\circ\text{C}$ ，相对密度 0.895。油酸容

易氧化变成黄色，并产生酸败的气味。工业用的油酸（及其钠盐），如米糠油酸，豆油酸等，是多种脂肪酸的混合物，以油酸为主，还有亚油酸，亚麻酸等不饱和酸及各种饱和酸等。

油酸不易溶解和分散，实践中常需加溶剂乳化，矿浆温度不应低于  $14^{\circ}\text{C}$ 。它主要用于浮选碱土金属的碳酸盐，金属氧化物、重晶石和萤石等。其缺点是选择性差，不耐硬水，用量较大。

另外，氧化石蜡皂，纸浆废液、塔尔油、环烷酸、碱渣等羧酸类捕收剂都有应用。

### (2) 烃基磺酸（盐）类

这类药剂结构通式为  $\text{R}-\text{SO}_3\text{H}(\text{Na})$ ，R 为烷基、烷基芳基及环烷基，是各种烃类油经浓硫酸作用所得产品。用石油精炼副产物为原料经磺化得到的，通常称为石油磺酸，进一步皂化所得产品称石油磺酸盐，如采用煤油磺化所得产品称为磺化煤油。

石油磺酸和石油磺酸钠按其溶解特性又可分为水溶性和油溶性两大类。

浮选用的石油磺酸盐实质上是长碳链烷基磺酸盐与芳香基磺酸盐的混合物。芳基磺酸盐类药剂最著名的代表是十二烷基苯磺酸钠及丁基萘磺酸盐。十二烷基苯磺酸钠是一种洗涤剂，作为选矿捕收剂可以捕收萤石及石英，浮选软锰矿时作为润湿剂，还可从黄铁矿中浮选重晶石，亦可用浮选钾盐矿。

### (3) 硫酸酯类

这类药剂包括烃基硫酸酯和硫酸化脂肪酸（皂）等。

含碳原子  $\text{C}_{12} \sim \text{C}_{20}$  的烷基硫酸钠盐，是典型的表面活性剂。其主要代表是十六烷基硫酸钠（ $\text{C}_{16}\text{H}_{33}\text{OSO}_3\text{Na}$ ）。它是白色结晶，易溶于水，有起泡性，可作为黑钨矿、锡石、重晶石、钾盐等的捕收剂。它对含钙矿物（如白钨矿、方解石等）的捕收能力较油酸弱，选择性较好，可在硬水中使用。

不饱和脂肪酸（一般是油酸、亚油酸）经浓硫酸作用再皂化，可制得硫酸化脂肪酸皂。它具有两个极性基（羧基— $\text{COO}^-$ ，硫酸基— $\text{OSO}_3^-$ ），既有脂肪酸的强捕收能力，又有烃基硫酸盐的耐酸、耐硬水及选择性良好的优点。

### (4) 肿酸、膦酸类

有机肿酸有许多种，用作浮选捕收剂的主要是苯肿酸类衍生物。国内目前生产的是含有邻、对两种异构体的混合甲苯肿酸，以及苄基、甲苄基肿酸。

混合甲苯肿酸对锡石、黑钨矿、稀土矿和氧化铅矿都有捕收作用；苯乙烯膦酸可用来浮选锡石、黑钨矿、白钨矿、稀土矿等。

### (5) 羧酸类

烷基羧酸是一种新型的螯合浮选药剂，我国沈阳冶金选矿药剂厂已在 1972 年对  $\text{C}_7-\text{C}_9$  烷基羧酸钠组织了生产，昆明冶金研究所、包钢冶金研究所、峨眉矿产综合利用研究所等单位都曾进行过研究。

我国用  $\text{C}_{7-9}$  烷基异羧酸钠作为捕收剂，用于浮选氧化铜矿、锡石、黑钨矿、氧化铁矿、稀土矿、钽铌矿、白钨矿、白铅矿和铅铁矾，从长石中除铁、选铝土矿、钛铁矿等都能获得良好的效果。

## 2. 胺类捕收剂

这类捕收剂解离后产生带有疏水烃基的阳离子，故又称为阳离子捕收剂。胺类捕收剂

是氨 ( $\text{NH}_3$ ) 的衍生物,  $\text{NH}_3$  分子中的氢原子为烃基取代, 便成胺。根据取代数目的不同, 命名为第一胺 (伯胺)、第二胺 (仲胺)、第三胺 (叔胺) 及季胺等。

烃基 R, 可以是烷烃、芳香烃或杂环。浮选常用的是含 8 ~ 20 碳原子的烷基第一胺、烃基的结构, 依所有原料而定。如目前国内用氧化后所得的脂肪酸 (是  $\text{C}_{10} \sim \text{C}_{20}$  的混合脂肪酸) 作原料, 制成的胺称之为混合脂肪第一胺, 简称混合胺、第一胺; 用十二酸 (烃基为  $\text{C}_{12} \sim \text{C}_{13}$  的脂肪酸) 为原料, 制成的胺称之为十二胺。

胺与氨的性质相似, 其水溶液呈碱性。胺难溶于水, 胺和酸 (盐酸或醋酸) 起作用生成胺盐后易溶于水。胺和有机酸捕收剂相似, 浓度增大到一定值后, 在水溶液中可以形成胶囊, 如十二碳第一胺的临界胶囊浓度 CMC 为  $1.3 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ 。

我国最常用的混合胺, 在常温下为淡黄色蜡状体, 有刺激气味, 不溶于水, 溶于酸性或有机溶剂中, 使用时可用盐酸和混合胺以 1:1 配料, 加热水溶化后, 再用水稀释成 1% ~ 0.1% 的水溶液。

阳离子捕收剂的浮选性质与其烃链的长短有关, 碳链较长者, 通常具有较大的捕收能力。另外用各种烃链的伯胺醋酸盐浮选石英时, 其临界 pH 值也不同。

用胺类浮选有色金属氧化矿时, 多在碱性介质中进行, 此时, 有足够的  $\text{RNH}_2$  生成。 $\text{RNH}_2$  中氮原子孤对电子能与矿物表面的  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$  等离子生成络合物, 使矿物表面疏水。当胺阳离子为浮选有效成分时, 若在较酸性介质中 (此时矿物表面带正电) 进行浮选时, 阳离子  $\text{RNH}_3^+$  是起浮选作用的有效成分。

季胺盐类 [如  $\text{R}(\text{R}')_3\text{NCl}$ ] 阳离子捕收剂和其他胺类比较, 其特点是在水中溶解度较高, 选择性强, 无毒。

胺类阳离子捕收剂, 目前主要用于浮选: ①硅酸盐和铝硅酸盐矿物, 如石英、绿柱石、锂辉石、长石、云母等; ②碳酸盐矿物, 如菱锌矿等; ③可溶性盐, 如钾盐等。

### (三) 非极性油类捕收剂

非极性烃油类捕收剂可分为脂肪烷烃 ( $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ )、环烷烃 ( $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ ) 和芳香烃 3 类。分子式中的  $n$  值常在 12 ~ 18 之间, 常温下为液态。它们的化学性质不活泼, 难溶于水, 不能解离, 故称为非极性捕收剂或中性油类捕收剂。

非极性烃油类捕收剂的工业来源有两方面: 一是石油工业产品, 如煤油、柴油、变压器油等烃油类; 二是炼焦化工副产品, 如焦油、重油、中油等。由于炼焦副产品来源不甚广, 成分复杂且不稳定, 常有一定量的酚类, 毒性较大, 故很少使用。

浮选中烃类油特别是煤油、燃料油和柴油, 常作为辅助捕收剂使用。因为, 无论是阳离子或阴离子捕收剂和烃类油混合使用, 常能提高捕收能力, 收到良好效果。例如, 用脂肪酸皂和煤油混用可浮选磷灰石; 用脂肪酸和燃料油混用可浮选氧化铁矿等。硫化矿浮选中使用烃类油辅助捕收剂, 有助于粗粒和连生体颗粒的浮选。

### (四) 其他捕收剂

#### 1. 两性捕收剂

两性捕收剂的特点是, 在碱性溶液中酸根生成盐, 显阴离子性质, 在电场中向阳极移动; 在酸性介质中阳离子起作用, 成为带正电的离子, 在电场中向阴极移动; 在等电点



时，分子呈电中性，在电场中不移动，此时溶解度最小。

含有阴、阳两种功能团的捕收剂，已经研究的有胺基酸、胺基磺酸以及用于浮选镍矿和次生铀矿的胺醇类黄药、二乙胺乙黄药等。

## 2. 络合捕收剂

这类捕收剂的典型代表是8-羟基喹啉。该药剂对多种硫化矿物、氧化矿物都具有捕收作用，将其应用于分选一些稀有金属矿石，已引起人们的极大兴趣。

络合捕收剂的另一代表是镍试剂（二甲二乙醛肪）。该药剂对黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿和孔雀石等铜矿物具有良好的捕收能力。也能有效地捕收其他未经硫化的氧化铜矿物。

## 3. 炔类捕收剂

这类捕收剂不含氯也不含硫，是以高度不饱和的炔基为主体的碳氢化合物。

其他，如有机硅捕收剂，有机氟捕收剂等。对上述这些新型捕收剂的研究，为浮选的发展开辟了新的途径，目前大部分处于研究阶段。

# 二、起泡剂

## 1. 起泡剂的结构和作用

起泡剂一般是能吸附于气—水界面并降低表面张力的异极性有机表面活性物质，其分子中含有极性基，如羟基、羧基、羰基、醚基、胺基、腈基、磺酸基等。在分子的另一端是非极性烃基。浮选中用得最多的是带羟基的醇类和酚类，以及带醚基的一些合成起泡剂，因为它们既能水化又不解离（分子起泡性常比离子好），没有捕收作用。

起泡剂就其结构而言，与异极性捕收剂十分相似，但捕收剂和起泡剂在浮选过程中的作用机理是不相同的，捕收剂的极性基亲固体，非极性基亲空气。起泡剂与水作用时，水的偶极子易于同极性基结合，并使之水化，疏水的非极性基与水不相作用，力图离开水相而移至气相。这两种趋势的大小，取决于分子中极性基与非极性基的强弱。非极性基的成分大，则分子移至水面的趋势大于进入水中的趋势，因而，减少了增加单位面积所需做的功，从而降低了水的表面张力。物质在表面层中自发地富集现象，叫吸附现象。由于起泡剂分子在水气界面上的取向吸附作用，降低了水气界面的表面张力，使水中弥散气泡变得坚韧与稳定。

## 2. 常用的起泡剂

### (1) 天然起泡剂

松油、樟树油和桉树油三种天然起泡剂，目前从全国来看已很少使用，但可结合各地具体经济条件，当来源可靠或合成起泡剂供不应求时，仍可考虑使用。

### (2) 松醇油

又名2号油，是我国浮选厂应用最广泛的一种起泡剂。它是以松节油为原料，经水解反应制取的。它的主要成分为 $\alpha$ -萜烯醇（ $C_{10}H_{17}OH$ ）。

松醇油中萜烯醇含量为50%左右，尚有萜二醇、烃类化合物及杂质。它是淡黄色油状液体，有刺激性作用，相对密度为0.9~0.915，可燃，微溶于水，在空气中可氧化，氧化后，粘度增加。

松醇油起泡性强，能生成大小均匀、粘度中等和稳定性合适的气泡。当其用量过大

时,影响浮选指标。

### (3) 甲酚 (甲酚酸)

甲酚是炼焦副产品,实际上是酚( $C_6H_5OH$ )、甲酚( $CH_3C_6H_4OH$ )和二甲酚 $[(CH_3)_2C_4H_3OH]$ 的混合物。酚易溶于水,但无起泡性。甲酚的三种异构体(邻甲酚、间甲酚和对甲酚)中,间甲酚的起泡性最好,二甲酚能形成稳定的泡沫,但难溶于水。

甲酚酸的起泡性较松油弱,纯的高级甲酚酸能形成较脆的泡沫,选择性好,适于多金属矿石的优先浮选。甲酚酸虽难溶,但因浮选时采用的浓度很低,故可溶于水。它有毒、易燃,使用时应注意皮肤和眼睛的防护,以免灼伤。

### (4) 重吡啶

重吡啶是煤焦油中分离出来的碱性有机混合物,相对密度稍大于1,是一种褐色的油状液体。其主要成分为吡啶、喹啉、芳香胺等。

由油母页岩或煤干馏制得的粗吡啶,通常也称为重吡啶,其中吡啶含量不少于80%。重吡啶有一种特殊的臭味,易溶于水,有一定的捕收能力。有色金属矿石浮选时,重吡啶可代替松油和甲酚使用。

近年来,各国的趋势是应用合成起泡剂。因为合成起泡剂具有纯度高,选择性好,起泡能力强,耗量低等优点,如脂肪醇类、醚醇类、丁醚油、脂肪酸乙酯( $RCOOC_2H_5$ )、硫酸酯和磺酸盐起泡剂等。

## 三、调整剂

### 1. 抑制剂

#### (1) 石灰 ( $CaO$ )

石灰有强烈的吸水性,与水作用生成消石灰  $Ca(OH)_2$ ,是一种强碱,可以使矿浆pH值提高到11~12以上。石灰是黄铁矿、磁黄铁矿的抑制剂。

石灰对方铅矿,特别是表面略有氧化的方铅矿有抑制作用。因此,从多金属硫化矿中浮选方铅矿时,常采用碳酸钠调节矿浆pH值。如果由于黄铁矿含量较高,必须用石灰调节矿浆pH值时,应注意控制石灰的用量。

浮选中当石灰用量很大时,也可作为锌及某些铜矿物的抑制剂。它对金有抑制作用,对硫化银矿不抑制。石灰还可以抑制硫化钠的硫化作用,在阳离子捕收剂时,可抑制硅酸盐类脉石矿物,石灰是石英的活化剂。

石灰对起泡剂的起泡能力有影响,如松醇油类起泡剂的起泡能力,随pH值的升高而增大;酚类起泡剂的起泡能力,则随pH值的升高而降低。

石灰本身又是一种凝结剂,能使矿浆中微细颗粒凝结。因而,当石灰用量适当时,浮选泡沫可保持一定的粘度;当用量过大时,将促使微细矿粒凝结,而使泡沫粘结膨胀,影响浮选过程的正常进行。

使用脂肪酸类捕收剂时,不能用石灰调节pH值。因为这时会生成溶解度很低的脂肪酸钙盐,消耗掉大量的脂肪酸,并且会使过程的选择性变坏。

生产中,石灰常先配制成石灰乳水溶液,再加入浮选矿浆中。

#### (2) 氰化物

实践中常用的氰化物有氰化钠( $NaCN$ )和氰化钾( $KCN$ )。氰化物是闪锌矿、黄铁

矿和黄铜矿的有效抑制剂，氰化物易溶于水，在水中可以水解，生成氢氰酸（HCN）和  $\text{CN}^-$ 。水解产物 HCN 易挥发，有剧毒。在浮选过程中，起抑制作用的是  $\text{CN}^-$ 。在碱性矿浆中，提高  $\text{CN}^-$  浓度，有利于抑制。因此，使用氰化物，必须保持矿浆的碱性。

矿石中含有金、银等贵金属时，最好不用氰化物，因为氰化物能溶解金和银。氰化物易溶于水，使用时可配成 1% ~ 2% 的水溶液加入。

氰化物是剧毒的药剂，近年来由于环境保护的严格要求，我国很多选厂已放弃使用它。多数有色金属矿浮选厂已不用氰化物或仅用少量氰化物，少数选厂由于分离工艺的复杂性，还在使用氰化物。

### （3）硫酸锌（ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ，皓矾）

其纯品是白色晶体，易溶于水，是闪锌矿的抑制剂。硫酸锌只有在碱性矿浆中才有抑制作用，矿浆 pH 值越高其抑制作用也就越强。硫酸锌在碱性矿浆中能生成氢氧化锌  $[\text{Zn}(\text{OH})_2]$  胶粒。

一般认为，硫酸锌的抑制作用，主要是由于生成氢氧化锌的亲水胶粒吸附在闪锌矿表面，阻碍了矿物表面与捕收剂的作用。

单独使用硫酸锌对闪锌矿的抑制作用较弱，实践上常与氰化物联合应用。这样做不仅可加强对闪锌矿的抑制作用，而且可减少氰化物的用量。一般常用的比例为，氰化物：硫酸锌 = 1:2 ~ 1:5。

近代无氰工艺的发展，硫酸锌与氰化物联合应用的药剂制度，已很少采用。目前实践上应用的主要有：在碱性介质中单独应用硫酸锌；硫酸锌与碳酸钠合用；硫酸锌与亚硫酸合用为闪锌矿与黄铁矿的抑制剂。

### （4）二氧化硫、亚硫酸及亚硫酸盐

这类药剂包括二氧化硫气体（ $\text{SO}_2$ ）、亚硫酸（ $\text{H}_2\text{SO}_3$ ）、亚硫酸钠（ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ）和硫代硫酸钠（ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ）等。主要作为闪锌矿和硫化铁的抑制剂。在浮选实践中这类药剂可代替氰化物，所以又称为“非氰”抑制剂。由于这类药剂无毒，避免引起公害，对金、银等贵金属无溶解作用，所以它的应用日益广泛。

### （5）重铬酸盐

重铬酸钾（ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ）或重铬酸钠（ $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ）都是方铅矿的有效抑制剂，对黄铁矿也有抑制作用。在多金属硫化矿浮选中，重铬酸盐主要用于铜铅混合精矿分离时抑铅浮铜。

由于铬盐对环境的污染，目前生产上限制使用。

### （6）硫化钠（ $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ）

在浮选过程中，硫化钠的作用是多方面的，它可作为硫化矿的抑制剂、有色金属氧化矿的硫化剂（活化剂）、矿浆 pH 值调整剂、硫化矿混合精矿的脱药剂等。除硫化钠之外，其他一些可溶性硫化物，如硫氢化钠 NaHS、硫化钙 CaS 等也属此类。

### （7）水玻璃

水玻璃又称硅酸钠，其化学组成通常以  $\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2$  表示，是各种硅酸钠（如偏硅酸钠  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ，二硅酸钠  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ，原硅酸钠  $\text{Na}_2\text{SiO}_4$ ，经过水合作用的  $\text{SiO}_2$  胶粒等）的混合物，成分常不固定。 $m$  为硅酸钠的“模数”（或称硅钠比），一般在 2 ~ 4.5。模数过高不易溶解，分散不好。模数过低，碱性强，抑制作用较弱。选矿上常用的水玻璃的模数为 2 ~ 3。

纯的水玻璃为白色晶体，工业用水玻璃为暗灰色的结块，加水呈糊状。水玻璃为强碱和弱酸构成的盐，在水中可以水解，使溶液呈碱性。

水玻璃在水溶液中的性质随 pH 值、模数、金属离子以及温度而变，如在酸性介质中能够抑制磷灰石，而在碱性介质中，磷灰石几乎不受其抑制。

添加少量水玻璃，有时可提高某些矿物（如萤石、赤铁矿等）的浮选活性，同时又可强烈地抑制某些矿物的浮选（如方解石等）。水玻璃的用量增加，这种选择性降低。

水玻璃在非硫化矿浮选时，广泛地用其为抑制剂，同时也常用它作为矿泥分散剂。为了提高水玻璃抑制作用的选择性，实践上经常采用的措施有：①水玻璃与碳酸钠配合使用；②矿浆加温处理；③水玻璃与多价金属阳离子（ $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 等）配合使用。

#### （8）含氟化合物

浮选中使用的氟化物有氢氟酸（HF）、氟化钠（NaF）、硅氟酸钠（ $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ）等。它们都是石英、硅酸盐矿物的抑制剂。

#### （9）有机抑制剂

许多有机化合物可以作为抑制剂，如糖类（淀粉和糊精）、丹宁类、木素类及纤维素、动物胶等。

### 2. 活化剂

#### （1）硫酸铜及有色重金属可溶性盐

硫酸（ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ，俗称胆矾）可以活化闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿和钴、镍等硫化矿物。其他一些重金属可溶性盐，如  $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Ag}^+$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Pd}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  等金属离子的可溶性盐，也是活化剂，其作用与硫酸铜相似。

#### （2）碱土金属和部分重金属阳离子

属于这类的活化剂有  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  等金属阳离子。这些离子当使脂肪酸类捕收剂时，可以活化石英和其他硅酸盐矿物。例如，未被活化的石英不能被脂肪酸浮选，但石英表面经  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$  等金属离子活化后，石英便可吸附脂肪酸而实现浮选。

#### （3）硫化钠和其他可溶性硫化物

可溶性硫化物有硫化钠（ $\text{Na}_2\text{S}$ ）、硫氢化钠（NaHS）、硫化氢（ $\text{H}_2\text{S}$ ）及硫化钙（CaS）等，实践中最常用的是硫化钠。一般认为，硫化钠对矿物的活化作用，主要是硫化钠水溶液中产生的  $\text{HS}^-$  和  $\text{S}^{2-}$  离子对矿物作用的结果，在矿物表面生成硫化物薄膜。

有色金属氧化矿，如孔雀石、铅矾、白铅矿等，直接用黄药不能浮选，但与硫化钠作用之后，都能很好地用黄药浮选。因此，对于有色金属氧化矿来说，硫化钠是不可缺少的活化剂，或称硫化剂。

#### （4）无机酸、碱

浮选上有时使用硫酸、苛性钠、碳酸钠等作为活化剂。它们的主要作用是清洗掉矿物表面的氧化膜或黏附的矿泥。

#### （5）有机活化剂

聚乙烯二醇或醚，可作为脉石矿物的活化剂，如在多金属硫化矿浮选时，将其与起泡剂一起添加，可选出大量脉石，然后再进行铜铅锌的混合浮选。

工业草酸（ $\text{HOOC}-\text{COOH}$ ），可用于活化被石灰抑制的黄铁矿和磁黄铁矿。

乙二胺磷酸盐，它是氧化铜矿的活化剂。对结合氧化铜和游离氧比铜矿物都有良好的

活化作用，它能改善泡沫状况，降低硫化钠和丁黄药用量。

### 3. 介质 pH 值调整剂

矿物通常在一定的 pH 值范围内才能得到良好的浮选。pH 值调整剂的主要作用在于造成有利于浮选药剂的作用条件、改善矿物表面状况和矿浆离子组成。实践中常用的 pH 值调整剂有石灰、碳酸钠、硫酸和苛性钠等。

### 4. 分散、凝结和絮凝剂

凡能在矿浆中使固体细粒悬浮的药剂都可以称为分散剂。常用的分散剂有碳酸钠、水玻璃、三聚磷酸盐、丹宁、木素磺酸盐等。

常用的凝结剂是一些无机物，有时称为“助沉剂”。有些文献中也将此类药剂包括在絮凝剂分类之中。无机凝结剂主要有：①无机盐类，如硫酸铝、硫酸铁、硫酸亚铁、铝酸钠、氯化铁、氯化锌、四氯化钛等；②酸类，如硫酸、盐酸等；③碱类，如氢氧化钠、氧化钙等。

能够促进絮凝过程的化学药品称为絮凝剂。絮凝剂一般分为有机高分子絮凝剂和天然高分子絮凝剂两类。

目前已经试用作为选择性絮凝剂的有：聚丙烯腈的衍生物（聚丙烯酰胺，水解聚丙烯酰胺、非离子型聚丙烯酰胺等）、聚氧乙烯、羧甲基纤维素、木薯淀粉、玉米淀粉、海藻酸铵、纤维素、黄药、腐殖酸盐等。用选择性絮凝法处理的矿物很多，如氧化铁矿物、方铅矿、锡石、重晶石、一水铝石和硅孔雀石等。

## 第四节 浮选设备及工艺

### 一、浮选对浮选机的基本要求

浮选机是实现浮选过程的重要设备。浮选时，矿浆与浮选药剂调和后，送入浮选机，在其中经搅拌和充气，使欲浮目的矿物附着于气泡，形成矿化气泡，浮到矿浆表面，便形成矿化泡沫层。泡沫用刮板（或以自溢的方式）刮出，即得泡沫产品，而非泡沫产品自槽底排出。浮选技术经济指标的好坏，与所用浮选机的性能密切相关。

根据浮选的工业实践经验、气泡矿化理论研究以及对浮选机流体动力学特性研究的结果，对浮选机提出如下基本要求。

#### 1. 良好的充气作用

在泡沫浮选过程中，气泡是疏水性矿物的一种运载工具。为了增加矿粒与气泡接触碰撞的机会，造成有利于附着的条件，并能将疏水性矿粒及时运载到矿浆表面，而浮选机内必须具有足够大的气泡表面积，气泡亦应有适宜的浮升速度。为此，浮选机必须保证能向矿浆中吸入（或压入）足量的空气，并使这些空气在矿浆中充分地弥散，以便形成大量大小适中的气泡，同时这些弥散的气泡，又能均匀地在浮选槽内分布。

充气量愈大，空气弥散愈好，气泡分布愈均匀，则矿粒与气泡接触碰撞的机会也愈多，这种浮选机的工艺性能也就愈好。

#### 2. 搅拌作用

矿粒在浮选机内的悬浮效率，是影响矿粒向气泡附着的另一个重要方面。为使矿粒与

气泡充分接触，应该使全部矿粒都处于悬浮状态。搅拌作用除了造成矿粒悬浮外，并能使矿粒在浮选槽内均匀分布，从而创造矿粒和气泡充分接触和碰撞的良好条件。此外，搅拌作用还可以促进某些难溶性药剂的溶解和分散。

### 3. 能形成比较平稳的泡沫区

在矿浆表面应保证能够形成比较平稳的泡沫区，以使矿化气泡形成一定厚度的矿化泡沫层。在泡沫区中，矿化泡沫层既能滞留目的矿物，又能使一部分夹杂的脉石从泡沫中脱落。

### 4. 能连续工作并便于调节

工业生产上使用的浮选机，应能连续给矿和排矿，以适应矿浆流在整个浮选生产过程连续性的特点。为此，浮选机上应有相应的受矿、刮泡和排矿的机构。为了调节矿浆水平面，泡沫层厚度以及矿浆流动的速度，亦应有相应的调节机构。

在现代浮选机中，还有一些新的要求，例如，选矿厂的自动化，要求浮选机工作可靠，而且零部件使用寿命长；浮选机要便于操作、控制，其操纵装置必须有程序模拟和远距离控制的能力。由于处理大量低品位原矿，要求有大型化的高效率浮选机与之相适应。

浮选机的处理能力、充气性能、动力消耗、操作、运转、制造和维修等性能，以及选别技术经济指标等，是评价浮选机性能好坏的技术经济标准。

## 二、浮选机的分类

目前国内外浮选机种类很多，按充气 and 搅拌矿浆的方式不同，可分为如下几种基本类型。

### 1. 机械搅拌式浮选机

这类浮选机的共同特点是，矿浆的充气和搅拌都是靠机械搅拌器（转子和定子组，即所谓充气搅拌结构）来实现的。由于各种机械搅拌器的结构不同（如离心式叶轮、棒型轮、笼形转子、星形轮等），故浮选机也有多种型号。机械搅拌式浮选机属于外气自吸式浮选机，在生产中，应用的是上部气体吸入式，即在浮选槽下部的机械搅拌器附近吸入空气。

在我国的浮选厂中，使用的机械搅拌式浮选机有 XJK 型浮选机，米哈诺布尔型浮选机（称 A 型）、棒型浮选机、法连瓦尔德型浮选机等，但使用最广的是国产 XJK 型浮选机（与米哈诺布尔型类同）。在国外还出现了不少具有独特结构的机械搅拌式浮选机，如带有“1+1”充气结构的维姆科型浮选机，带有斜棒轮的瓦曼浮选机（与我国棒型浮选机类同），带有两个叶轮的布斯浮选机（主轴上安装上下两个叶轮，上轮主要用于充气，下轮主要用于搅拌矿浆）以及带有斜圆盘双面叶轮的洪堡特浮选机等。

图 10-5 是 XJK 型浮选机的结构示意图。这种浮选机由两个槽子构成一个机组，第一槽（带有进浆管）为抽吸槽或称吸入槽，第二槽（没有进浆管）为自流槽或称直流槽。在第一槽与第二槽之间设有中间室。叶轮安装在主轴的下端，主轴上端有皮带轮，通过电机带动回转。空气由进气管吸入。每一组槽子的矿浆面用闸门调节。叶轮上方装有盖板和空气筒（或称竖管），此空气筒上开有孔，用以安装进浆管、中矿返回管或作矿浆循环之用，其孔的大小，可通过拉杆进行调节。

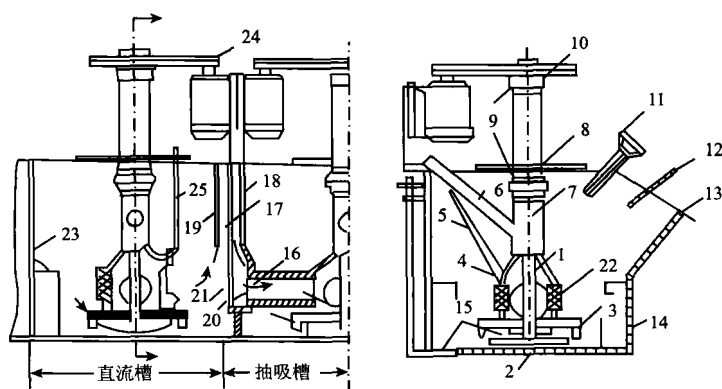


图 10-5 XJK 型浮选机结构示意图

1—主轴；2—叶轮；3—盖板；4—连接管；5—砂孔闸门丝杆；6—进气管；7—空气筒；8—座板；9—轴承；10—皮带轮；11—溢流闸门手轮及丝杆；12—刮板；13—泡沫溢流槽；14—槽体；15—放砂闸门；16—给矿管（吸浆管）；17—溢流堰；18—溢流闸门；19—闸门壳；20—砂孔；21—砂孔闸门；22—中矿返回孔；23—直流槽前溢流堰；24—电动机及皮带轮；25—循环孔调节杆

叶轮是用生铁铸成的圆盘，上面有 6 个辐射状叶片。在叶轮上方 5~6mm 处，装有盖板。当浮选机工作时，矿浆由进浆管给到盖板的中心处，叶轮旋转产生离心力将矿浆甩出，在叶轮与盖板间形成一定的负压，外界的空气便自动地经由进气管而被吸入。在叶轮的强烈搅拌作用下，矿浆与空气得到充分的混合，同时气流被分割成细小的气泡。此外，在叶轮叶片的后方也会从矿浆中析出一些气泡。矿化后的气泡升浮至泡沫区后，用刮板刮出即得泡沫产品。

这种浮选机和旧式法连瓦尔德浮选机相比，具有充气量大，生产能力较大，维修方便等优点。但其最大缺点是叶轮与导向叶片的间隙大小，很难保持固定不变，随间隙的变大，充气量会显著下降。

## 2. 充气搅拌式浮选机

这类浮选机目前的型号，在国内有 CHF-X14m<sup>3</sup> 充气搅拌式（双机构）浮选机，XJC-80 型 8m<sup>3</sup> 充气搅拌式浮选机。在国外有美国的丹佛 D-R 型和阿基太尔型、加拿大的马克思韦尔浮选机、瑞典 BFP 型浮选机和俄罗斯的 ΦΠР 型和 ΠМЖ 型浮选机。

大型 CHF-X14m<sup>3</sup> 充气搅拌式浮选机结构如图 10-6 所示。该机由两槽组成一个机组，每槽容积 7m<sup>3</sup>。两槽背靠背相连，故称为 14m<sup>3</sup> 充气机械搅拌式（双机构）浮选机。

这种浮选机的主要部件是主轴、叶轮、盖板、中心筒、循环筒、钟形物和总气筒等，整个竖轴部件吊装在总气筒（兼作横梁）上。

该机的主要优点：①矿浆通过能力大，浮选速度快；②根据工艺需要可调节充气量，空气量可调范围大；③占地面积小，单位体积重量轻；④搅拌器磨损较轻，矿液面较平稳；⑤易于安装和调整，生产指标较好，便于自动控制。主要缺点是：①需要配备离心式鼓风机和中矿返回的泡沫泵等设备；②机组间配置较复杂。

目前该机被国内一些铜矿、铅锌矿、金矿和石墨矿等矿山采用，使用效果表明，其浮选指标比 6A 和 7A 浮选机要好。

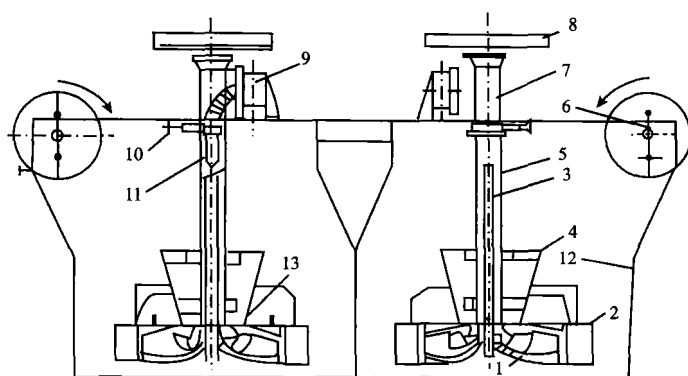


图 10-6 CHF-X14m³ 充气搅拌式浮选机结构图

- 1—叶轮；2—盖板；3—主轴；4—循环筒；5—中心筒；6—刮泡装置；7—轴承座；  
8—皮带轮；9—总气筒；10—调节阀；11—充气管；12—槽体；13—钟形物

### 3. 充（压）气式浮选机

在充（压）气式浮选机中，矿浆的充气和搅拌靠外部鼓风机压入空气来进行。根据压入空气的方式不同可以分为两类：①空气经过导管压入矿浆，称为气升式浮选机；②透过多孔滤布或其他微孔材料将空气压入矿浆，名称随设备特点而异。我国应用的圆柱形充气浮选机，称为浮选柱，属于这一类。

浮选柱上部为一圆柱形筒体，也有方形，底部为圆锥形。锥体与柱体衔接处安设一层充气器。矿浆从上部给入，空气经环形风包和充气导管，再经充气器进入矿浆形成气泡上升，在整个柱体内实现浮选。柱上部形成泡沫层，靠刮板或自流溢到泡沫槽中。从宏观看，矿浆从上部给入从下部排出，气泡从下部压入在上部形成泡沫层，在逆向流动过程中实现矿化。从微观看，矿浆在柱内上下翻腾，运动状态是很复杂的。

柱体高度一般为 4~9m，不低于 4m。直径由 1~2.5m，视生产率而定，柱内充气器是最重要的部件。实践表明，充气器好坏对浮选指标关系最密切，要求它能生成细而多的气泡。我国在试验初期使用帆布带，后来发现结钙现象严重，结钙后充气性能显著恶化。结钙的主要原因是大多数硫化矿浮选使用石灰为 pH 值调整剂。以后换用橡胶带，使用前用人工扎刺密集小孔。由于橡胶带的气眼大，生成的气泡太大，胶带各区域的充气量不等，造成柱体内部翻花剧烈。以后改用微孔塑料，充气性能有所改善。

浮选柱尾矿采用空气提升从锥体排出。调节空气提升的流量来控制尾矿排出的速度，同时也调节了矿浆面的高低。

浮选柱与机械搅拌浮选机相比具有构造简单、制造容易，占地面积小、维修方便，操作容易，节省动力等优点。

### 4. 气体析出式浮选机

气体析出式浮选机属于无机械搅拌器类浮选机。它可分为真空式（减压式）和矿浆加压式两种。而矿浆加压式还可细分为空气自吸式（如我国的喷射旋式浮选机）和压气式（如国外的达夫克拉喷射式浮选机）两类。

国内试制的 XPM 型（喷射旋流式）浮选机结构如图 10-7 所示。它由充气搅拌器、槽体、刮泡器等组成。该机的充气是借加压矿浆  $[(2.0 \sim 2.5) \times 10^6 \text{ Pa}]$  从充气搅拌器



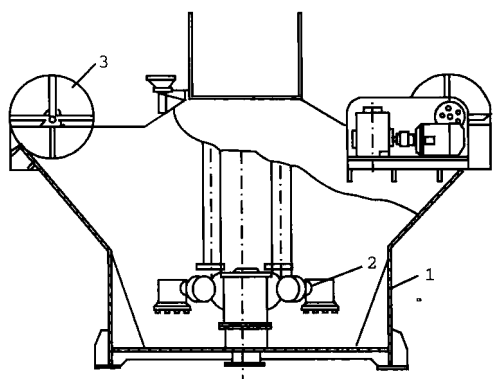


图 10-7 喷射旋流式浮选机结构图  
1—槽体；2—充气搅拌器；3—刮泡器

的喷嘴以 20m/s 左右的高速喷出，使混合室内产生负压，将外界空气经进气管吸入，并由喷射浆流的裹卷而进入旋流器和浮选槽内。

矿浆与药剂在搅拌桶内，经充分搅拌接触后进入浮选机。而矿粒与气泡接触碰撞时，形成矿化气泡上浮，而未黏附在气泡上的矿粒，经槽外循环泵进入充气搅拌器。在充气搅拌器的混合室内，由于矿浆处于负压区内，所以溶解于矿浆中的空气，便有选择性地呈微泡形式在疏水矿粒表面析出，因而强化了气泡的矿化过程，脉石则从浮选槽末端排出。

喷射旋流式浮选机已在国内选煤厂使用，并获得了满意的技术经济效益。

### 三、浮选机的发展趋势

近年来，浮选机的研究发展有以下趋势：

#### (1) 浮选设备的大型化

随着选矿厂日处理量的增大，单槽容积大于 100m<sup>3</sup> 的浮选设备已经大量进入工业应用，目前世界上最大规格的浮选机容积达 300m<sup>3</sup>，最大规格的浮选柱容积达 220m<sup>3</sup>，国内最大规格的浮选机容积达 200m<sup>3</sup>。

#### (2) 浮选设备的节能降耗

通过叶轮结构设计和外加充气等方式，使浮选的效率提高，同时降低浮选机的电耗和减少了浮选机部件的磨损。

#### (3) 浮选设备的多样化

粗粒、细粒浮选设备得到快速的发展，复合力场的引入，大大增强了浮选机对不同可浮性矿物浮选的适应性。

#### (4) 浮选设备的应用领域还在不断扩大

不仅用于分选矿物，还用于冶金、造纸、农业、食品、医药、微生物、环保等行业的许多原料、产品或废弃物的回收、分离、提纯。

#### (5) 自动化控制程度越来越高

能适应浮选设备的特点，如矿浆停留时间短、矿化速度快、波动速度敏感等。目前代表国际上浮选设备研究开发和应用水平的有芬兰的 Outokumpu 公司，美国的 Dorr-OliverEmico 公司，瑞典的 Metso 公司，俄罗斯的国立有色金属研究院，我国的北京矿冶研究总院（BGRIMM）等。

### 四、浮选工艺

#### 1. 磨矿细度

##### (1) 粒度对浮选的影响

粒度又称细度，或磨矿细度。浮选时不但要求矿物单体分离，而且要求磨到适宜的粒

度。矿粒太粗，即使矿物已单体解离，因超过气泡的浮载能力，往往浮不起。各类矿物的浮选粒度上限不同，如硫化矿物一般为  $0.2 \sim 0.25\text{mm}$ ，非硫化矿物为  $0.25 \sim 0.3\text{mm}$ ，对于一些密度较小的非金属矿如煤等，粒度上限还可提高。但磨矿粒度过细，如小于  $0.01\text{mm}$ ，也对浮选不利。

## (2) 粗粒浮选

在矿粒单体解离的前提下，粗磨浮选可以节省磨矿费用，降低选矿成本。在处理不均匀嵌布矿石和大型斑岩铜矿时，在保证粗选回收率前提下，有粗磨后进行浮选的趋势。但是，由于较粗的矿粒比较重，在浮选机中不易悬浮，与气泡碰撞的概率减小，附着气泡后因脱落力大，易于脱落，因此，粗粒矿粒在一般工艺条件下，比较难浮。粒度粗于浮选可浮的粒度上限时，可以采用重选等方法回收粗粒有用矿物。必须用浮选处理粗磨的物料时，实践上可采用以下特殊工艺条件：改进药剂制度；适当地增加矿浆浓度；选择和调整浮选机。

另外，在我国钨锡矿重选厂处理重选粗精矿时，常使用粒浮、台浮设备代替泡沫浮选。

## (3) 细粒浮选

浮选的细粒级矿粒（简称细粒），通常是指小于  $18\mu\text{m}$  或小于  $10\mu\text{m}$  的矿泥。细粒矿泥按其来源可分两种：一是由矿石中的各种泥质矿物，如高岭土、绢云母、褐铁矿、绿泥石、碳质页岩等所产生的矿泥称为原生矿泥；另一种是矿石在采掘、搬运、破碎、磨矿、选别等过程中产生的矿泥称为次生矿泥。从这两类矿泥的可浮性来看，原生矿泥通常比次生矿泥难浮。

实践上为了减轻和防止矿泥的有害影响和强化细粒浮选，常采用以下工艺措施：①消除和防止矿泥对浮选过程的干扰；②选用对微粒矿物具有化学吸附或螯合作用的捕收剂，以利于提高浮选过程的选择性；③应用物理的或化学的方法，增大微粒矿物的外观粒径，提高待分选矿物的浮选速率的选择性；④减小气泡粒径实现微泡浮选。

此外，近年来还研究了其他新的工艺，如控制分散浮选和分支浮选等用于铁矿、黑钨钨泥浮选，均取得良好效果。

## 2. 药剂制度

在浮选工艺过程中，药剂的种类和数量、药剂的配制方式、加药地点、加药顺序、加药方式等总称为药剂制度，简称为药方。药剂制度是浮选过程中重要工艺因素，对浮选指标有重大的影响。

## 3. 矿浆浓度

矿浆浓度是指矿浆中固体矿粒的含量，它是浮选过程中很重要的工艺参数，它直接影响回收率、精矿质量、药剂用量、浮选机生产能力、浮选时间和水电消能。

## 4. 矿浆温度

浮选一般多在常温下进行，但在以下两种情况下，往往需要调节矿浆温度。一是药剂性质要求，有些药剂要求在一定温度下才能发挥其有效作用；二是有特殊工艺，要求提高矿浆温度，才能达到分选矿物的目的。

## 5. 浮选时间

各种矿石最适宜的浮选时间，是通过矿石可选性试验和半工业及工业试验研究过程中确定的。一般规律是：当矿物的可浮性愈好，被浮矿物的含量愈少，浮选给矿粒度适当，

矿浆浓度较小, 药剂作用愈快愈强以及充气搅拌愈强等条件下, 则浮选时间愈短。

浮选时间与浮选指标的关系, 通常是增加浮选时间可使回收率增大, 精矿品位略有下降。回收率在浮选开始增加很快, 以后逐渐转缓, 最后几乎不再增加。

#### 6. pH 值调节

矿浆 pH 值是浮选过程中的一个重要因素。它一方面影响矿物表面的浮选性质; 另一方面又影响各种浮选的作用。

各种矿物在采用各种不同浮选药剂进行浮选时, 都有一个“浮”与“不浮”的 pH 值, 称为临界 pH 值。控制临界 pH 值, 就能控制各种矿物的有效分选。因此, 控制矿浆 pH 值, 是控制浮选工艺过程的重要措施之一。

#### 7. 充气和搅拌

加强浮选机中矿浆的充气和搅拌, 对浮选是有利的, 但是不能过分, 因为过分会产生气泡兼并、精矿质量下降、槽内矿浆容积减小、电能消耗增加、机械磨损加快等缺点。在选煤时, 搅拌过强还会造成煤的过粉碎和泥化增加。因此, 浮选中最适宜的充气和搅拌, 应根据浮选机的类型和结构特点通过试验确定。

#### 8. 水质

浮选是在水介质中进行的, 浮选用水常因时因地而变化。水中含有气体、离子, 有时还含有某些有机物, 这些物质都能影响浮选过程。

## 小 结

本章重点是矿物的润湿性与可浮性的关系, 以及浮选药剂的种类、作用和浮选工艺。

本章难点是矿物浮选热力学原理。



### 复习思考题

1. 简述浮选基本过程。
2. 捕收剂的结构和作用是什么?
3. 常用的捕收剂有哪些, 各用于分选何种矿物?
4. 起泡剂的结构和作用是什么, 与捕收剂有何区别?
5. 调整剂有哪些, 各起什么作用?
6. 简述浮选机的分类, 各种浮选机的主要区别和特点。
7. 概述浮选工艺。

# 第十一章 化学选矿及其他选矿方法

## 本章导读

本章介绍了化学选矿的主要工艺过程及其他选矿方法。通过本章的学习可以认识到焙烧、浸出、离子交换和离子浮选在处理贫、细、杂、难选矿石中的重要性,了解手选、摩擦选矿、粒度选矿、形状选矿、硬度选矿、油膏选矿、磁流体分选以及矿石机械(或自动)拣选等的独特作用。

## 第一节 化学选矿

### 一、概述

随着贫、细、杂、难选矿石的日益增多及工业部门对矿石质量的要求愈来愈高,物理选矿难以满足现代科学技术要求,而化学选矿的地位变得日益重要。

化学选矿是借助化学反应而使矿物中 useful 组分富集或除杂的过程。它包括各种焙烧法、浸出法以及诸如沉淀、吸附、萃取、离子浮选等从溶液中回收有用组分的各种化学方法。

化学选矿目前主要应用于3个方面:①处理难选矿石及废料。如石煤提钒,铀矿石提铀,从海洋锰结核中回收铜、钴、镍等有用组分,从硫铁矿烧渣中回收有色及稀有金属,从定影废液中回收银,从生产钛白粉的硫酸废液中回收钪,处理碳酸盐类磷矿石及各种难选矿或难选中矿,金等贵重金属的回收等;②用于粗精矿的除杂。如非金属矿的除铁,锰矿石的除磷,铬矿石的除铁,铁矿石的除磷、砷、锡、铜、铅及锌等,石墨及金刚石的除杂等;③为物理选矿创造条件。例如,在锂辉石浮选前用 NaOH 选择性地溶解其表面亲水性较强的硅酸盐而强化药剂与矿物的作用;在绿柱石浮选前用 NaOH、硫酸或氢氟酸等溶去绿柱石表面的二氧化硅及金属盐类,使其表面的铝铍离子暴露在外面而提高其可浮性;在磁选铌钽粗精矿时预先采用酸处理以改善其分离效果,预先采用高温结晶法处理含钛炼铁高炉渣,使组成极其复杂、嵌布粒度极细的炉渣结晶成黑钛石(钛富集于其中)和玻璃相,然后采用电选或浮选分离黑钛石和玻璃相而实现富集钛;离析焙烧浮选和焙烧磁选也属这方面的应用。

化学选矿是选矿工程和冶金工程之间的边缘学科,它的某些方法和原理虽然与冶金、化工过程相似,但就整个工艺过程来说仍是不同的。化学选矿处理的对象是天然矿石或不合格的冶金、化工原料及各种废渣和废水,其特点是有价成分含量低、有害杂质多、组成复杂,因而要求工艺过程有更高的选择性。

化学选矿的工艺过程包括:准备作业—焙烧—浸出—固液分离—净化—制取化学精矿。

## 二、焙烧

化学选矿中，物料热处理最常用的方法是焙烧。焙烧是在适宜的气氛中将物料加热到一定的温度（低于物料组分熔点的温度），使其组分发生一定的物理、化学变化，以满足下一步处理作业对原料的要求的工艺过程。经过焙烧的固体物料称为“焙砂”。

物料预先热处理，不仅可以使难溶的物质转变为易溶的物质，而且有时可以通过加热使其有用成分或有害杂质变成气体挥发出去。例如锡矿石中的锡可以变成氯化锡而富集。钨、铁、金的高砷精矿，可以通过焙烧，使其变成三氧化二砷挥发以获得合格精矿。赤铁矿、钛铁矿等弱磁性矿物，可以通过焙烧转化成强磁性的矿物。

根据焙烧过程中各种主要化学反应性质的不同，可将焙烧大致分为以下类型：

1) 氧化焙烧：是在氧化气氛中加热硫化矿，使其中的硫、砷、锑、硒等易挥发的元素变成氧化物部分或全部挥发掉，重金属硫化物则转变为金属氧化物留在焙砂中，这样可以满足下一步工艺处理的需要。

2) 硫酸化焙烧：是氧化焙烧的另一种形式，其不同的是使金属硫化物或氧化物转变成金属硫酸盐，铜、锌、铁等金属的硫酸盐可溶于水。氧化矿进行硫酸化焙烧时，还必须加入一定比例的硫化矿以提供硫酸化所必需的硫。

3) 还原焙烧：是在还原性气氛中使金属氧化物还原成金属或它的低氧化合物。

4) 氯化焙烧：是在氧化或还原性气氛中加热物料，借助氯化剂的作用，使物料中某些成分转变为可溶的金属氯化物或挥发性气态金属氯化物。

5) 氯化离析焙烧：是在特殊的还原条件下的氯化焙烧过程。在这种焙烧过程中，挥发性气态金属氯化物生成后立即在炉中的碳粒表面还原成为金属。

6) 加盐焙烧：在焙烧过程中，加入碳酸钠或硫酸钠、氯化钠等盐类添加剂，使物料中有价组分转变为可溶性的钠盐。

7) 煅烧：是通过加温使碳酸盐、硫酸盐和氢氧化物受热分解，转化为简单氧化物，以脱除部分挥发性气体的过程。

## 三、浸出

浸出就是借助于溶剂从固体中溶解某些组分的过程。它可以从矿石或选别产物中溶解某些有用金属或化合物，也可以从焙砂、冰铜、废合金、阳极泥等冶金半成品中溶解某些组分。因此，浸出可用于从矿石、精矿、尾矿或冶金半成品中回收某些有用成分，也可用于溶解选矿中间产品或低质精矿中的有害组分，使其有用组分进一步得到富集和提纯。

浸出法早已被用来处理矿石。例如金、银矿石的氰化浸出，氧化铜矿石的硫酸浸出及稀有金属矿石的各种浸出等。

浸出的分类方法有多种。如果按浸出剂特点分类时，可分为如表 11-1 所示的酸浸、碱浸、盐浸、细菌浸出、水浸等五类。依浸出温度和压力条件可分为高温高压浸出和常温常压浸出两类。根据浸出剂和浸出对象的接触方式不同，可分为渗滤浸出（如就地浸出、堆浸、槽浸）和搅拌浸出（如机械搅拌浸出、充气搅拌浸出和高压釜搅拌浸出）两大类。一个具体的浸出过程可用联合法命名，以反映其浸出工艺的特点。例如，在常温常压下用硫酸搅拌浸出氧化铜矿石中的铜。

表 11-1 浸出方法按浸出剂特点分类

浸出方法	常用浸出剂
酸浸出	硫酸、盐酸、硝酸、亚硝酸
碱浸出	苛性钠、碳酸钠、氨水、硫化钠
盐浸出	氯化铁、硫酸铁、氰化钠、氯化钠、次氯酸钠
细菌浸出	菌种 + 硫酸 + 硫酸铁（其实质是有细菌作用的酸浸）
水浸出	水

选择浸出剂的原则是热力学上可行、具有选择性、反应速度快、价格便宜、来源广。工业上常用的浸出剂及其应用范围列于表 11-2。

表 11-2 常用浸出剂及其应用

浸出剂	浸出矿石类型	适用范围
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> HCl HF NH <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> S	铜、镍、钴、锌、磷的氧化物 磷、铋氧化矿、钨精矿脱铜、磷、铋等 铌、钽矿 铜、镍、钴矿 白钨矿、铀矿 辉铋矿、辰砂	处理砷、汞、锑等硫化物
NaCN Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 细菌	金、银等贵金属矿石 铜、铅、铋等硫化物 铜、钴、锰、铀、砷等矿	作氧化剂使用
H <sub>2</sub> O	硫酸铜及焙砂	水溶性矿物及焙砂

四、溶剂萃取

溶剂萃取法是利用不相混溶的两个液相，使物质由一个液相转移到另一个液相的物理化学过程。它是在稀有金属提取工艺中应用很广的一种方法。例如，稀土、锆与铪、钽与铌等分离，都广泛地采用这种方法。目前，国产 P<sub>204</sub>〔二（2-乙基己基）磷酸〕、P<sub>350</sub>（甲基磷酸二甲酯）、N<sub>236</sub>（甲基三烷基氯化胺）等磷型及胺型萃取剂在稀有金属工业上已广泛应用。

溶剂萃取法的优点是流程简单，设备少，易于连续生产，生产能力大，自控便利，提取及分离效率高等。但该法往往需要大量的有毒、易然的有机溶剂，给生产和操作带来一定的困难。

五、离子交换法

离子交换法即离子交换色层分离法，是元素及化合物分离、提纯的新技术。

离子交换剂一般都是人工合成的离子交换树脂，通常制成大小不等的鱼子状球形颗粒。离子交换树脂是一些不溶于水和一般溶剂的高分子有机化合物。它由高分子骨架和活性基团两部分组成。其活性基团中有可以电离并能与溶液中离子进行交换的离子。

离子交换树脂的种类很多，最常用的是强酸性树脂、强碱性树脂。此外，还有弱酸性、弱碱性、氧化还原树脂及螯合型离子交换树脂。

例如，用离子交换法提取铀，通常的处理方法是用硫酸加二氧化锰或高铁离子等氧化剂，对整个矿石进行浸出，使铀转入溶液。然后使浸出液通过强阴离子交换树脂，铀可以阴离子[ $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3$ ]<sup>4-</sup>或[ $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3$ ]<sup>2-</sup>的形式被吸附，从而与其他阳离子分离。吸附在

阴离子树脂上的铀，再用氯化物或硝酸盐溶液把它们淋洗下来，成为浓溶液。再用碱性试剂使铀沉淀为高品位的铀浓缩物。

又如，现在为满足化学分析和电子工业对水的要求，还广泛应用离子交换法来制取高纯度去离子水。

## 六、离子浮选

离子浮选是 20 世纪 60 年代初期出现的从稀溶液中回收金属和消除有害离子污染的方法。当向溶液中加入阴离子或阳离子捕收剂时，在一定的条件下，捕收剂与金属离子形成不溶性化合物，可鼓入空气将其浮出，并加以回收。

离子浮选可用处理各种工业废水，也可用于从某些工业废渣中回收有价金属。

海水中含有  $1272 \times 10^{-6}$  的锰、 $400 \times 10^{-6}$  的钙、 $65 \times 10^{-6}$  的硼、 $1.5 \times 10^{-9}$  的铀，还有金、银等许多其他元素。虽然它们的浓度很低，但却能用离子浮选技术加以回收。

## 第二节 其他选矿方法

### 一、手选

手选是一种最简单的选矿方法。它是根据矿石和废石之间的外观特征（颜色、光泽、形状、密度等）的差异，由人工将它们分开的方法。该法可用于从原煤中手选回收黄铁矿，从出窿钨矿石中丢弃废石。对一些非金属矿产，可用手选获得质纯的产品，如手选得高质量光学萤石、结晶透明石英以及宝石等。

### 二、摩擦选矿

摩擦选矿是利用矿石中有用矿物和脉石矿物沿斜面运动时，摩擦系数的差异而分选的方法。摩擦系数大的颗粒，运动速度小，摩擦系数小的颗粒，运动速度大。通过倾斜的工作面（摩擦选矿机）使两种矿物分离。该法主要应用于石棉和云母矿石的分选。

### 三、粒度选矿

由于有用矿物和脉石矿物的强度不同，在开采和碎矿之后，原料中各粒级的矿物组成有很大变化，将原料分成若干粒级，就可得到有用矿物和脉石矿物含量不同的产品。如将采出的原煤，经过筛分处理，可得到符合工业需要的各粒级煤；利用洗矿和筛分，可选分结核状铁矿和磷矿石；含金、铂和其他金属的冲积砂矿，可用筛分来选别等。

### 四、形状选矿

有些矿石其有用矿物和脉石矿物在结构方面不同，使其有不同的矿块形状，如石棉为纤维状，而共生的蛇纹石则为扁平块状，根据它们的形状差异，可在特殊形状的设备（如反溜筛）上将它们分选。云母矿也常按形状进行筛选。

### 五、硬度选矿

矿物硬度的差异也可作为选别的依据。脆而软的矿物破碎时，易于泥化，因此，可在筛分或洗矿过程中与其他矿物分离。

## 六、油膏选矿

该法主要用于金刚石的精选。它是利用金刚石与脉石矿物表面亲油（或疏水）性的差异，在黏性油膏表面实现分选的一种方法。入选原粒一般为5~1mm的金刚石跳汰粗精矿。所用油膏由多种物质配制而成，如湖南601矿所用油膏系机油、沥青、柴油、石蜡，以54:36:7:3配制而成。

## 七、磁流体分选

该法可分为磁流体动力分选（MHDS）与磁流体静力分选（MHSS）两种。

磁流体动力分选是在磁场（均匀或不均匀磁场）与电场的联合作用下，以强电解质溶液为分选介质，根据矿物之间密度，比磁化系数及导电率的差异而使不同矿物分离的一种选矿方法。

磁流体静力分选是在不均匀磁场中，以铁磁性的胶粒悬浮液或顺磁性液体为分选介质，根据矿物之间密度和比磁化系数的差异而使不同矿物分离的一种选矿方法。由于不加电场，在被分选颗粒周围不产生在电场和磁场联合作用下经常发生的特性涡流，故命名为磁流体静力分选。

磁流体分选主要用于分选有色、稀有和贵金属矿石（锡、锆、金矿等）、黑色金属矿石（铁、锰矿等）、煤、非金属矿石（金刚石、钾盐等），从工厂废料中回收有色金属（铝、铜、铅、锌等）；在岩矿鉴定中可代替重液分离；还可以用于浮选厂精矿、尾矿的快速分析等。磁流体分选，对某些矿石在工业上已有所采用，但大规模工业应用，尚需时日。

## 八、机械拣选（或自动拣选）

机械拣选是利用矿物之间的光性、磁性、电性、放射性等拣选特性的差异，使物料呈单层（行）排队，逐一受到检测器件检测，检测信号通过现代电子技术进行放大处理，然后驱动执行机构，使有用矿物（矿石）或脉石矿物（废石）从主料流中偏离出来，从而实现矿物分选的一种方法。按照拣选特性的不同，可分为：①表面光性拣选；②发光性拣选；③磁性拣选；④放射性拣选；⑤射线吸收特性拣选。

## 小 结

本章重点是化学选矿中焙烧的类型和浸出剂的种类与应用。

本章难点是溶剂萃取、离子交换和离子浮选的应用。



### 复习思考题

1. 化学选矿的目的和作用是什么？
2. 焙烧的类型有哪些，各起什么作用？
3. 工业上常用的浸出剂有几种，适用哪些矿石？
4. 简述机械拣选。



## 第十二章 精矿脱水

### 本章导读

本章主要概述了浓缩、过滤和干燥设备的类型、结构及工作原理。通过本章的学习，可以了解精矿脱水的方法。

### 第一节 概 述

精矿含水量是衡量精矿质量的标准之一。湿法选矿得出的精矿含有大量的水分，这对精矿的直接使用或继续加工（如冶炼）都不合适。精矿中的水分还会给运输和装卸造成困难，并且增加运输费用。在水源缺乏的地区，更需要回收选矿产品（精矿和尾矿）中的水返回再用（回水），以减少新鲜水的消耗量。

选矿过程中的某些中间产物，在进行下一步处理之前（如粗精矿再磨前，中矿再磨前以及粗精矿电选前等），都必须排除多余的水。

从选矿产品中除去水分的过程称为脱水。脱水的主要方法有自然排水、浓缩、过滤和干燥。

粗粒物料的脱水比较容易，一般采用自然排水法，即利用水自身的重力作用排泄出来。但是，细粒物料用自然排水的方法，不但脱水过程很缓慢，而且细粒或细泥物料将随水流失。因此，细粒物料的脱水就比较复杂，一般要分几个阶段来完成。例如，欲将浮选精矿中的水分由60%~80%降低至3%~8%，通常要经过三个相连的脱水阶段来完成；首先是浓缩，将水分降低到40%~50%；然后进行过滤，使水分降至10%~20%；最后干燥，得出水分含量为3%~8%的浮选精矿。

在一般情况下，脱水过程由浓缩、过滤和干燥3个作业组成。但对于具体的物料究竟采用什么样的脱水作业，决定于物料的性质（例如粒度、磁性、相对密度以及矿浆黏性等）和对脱水产品水分的要求。例如磁选精矿的第一段脱水采用磁力脱水槽进行浓缩；重选精矿如果粒度较粗，大都不采用浓缩、过滤；浮选精矿一般都要进行浓缩和过滤，个别情况还要进行干燥。

### 第二节 沉淀与浓缩

沉淀浓缩是选矿厂广泛采用的浓缩脱水的主要方法，它是借助矿粒自身重力之作用，从矿浆中沉淀出来的脱水过程。在这一过程中，矿粒沉降速度主要受到的影响因素是矿粒性质；矿浆的粘度和矿浆质量分数（矿浆浓度）。

目前，沉淀浓缩最常用的是耙式浓缩机，依传动方式不同分为中心传动式和周边传动式，前者用于小型浓缩机，后者用于大型浓缩机。

### 一、周边传动式浓缩机

大型浓缩机都采用周边传动式，其结构如图 12-1 所示。它是一个钢筋混凝土的池子，在池子中央有钢筋混凝土柱，用来支承耙子机构的一端及矿浆槽等。耙子机构的另一端借助于传动小车支承在池子用边的环形钢轨上或橡胶轱辘上。为增加牵引力，防止小车轮打滑，在环形钢轨的外缘增设一与其平行的环形齿条，在小车轮轴上增设一个齿轮与环形齿条啮合。传动小车上装有电动机、减速器、小车轮及齿轮等传动部件，借此带动整个耙子机构在池中转动。

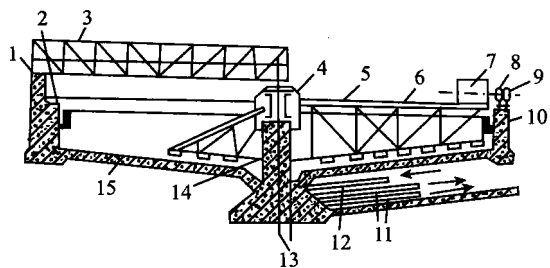


图 12-1 周边传动式浓缩机结构示意图

1—齿条；2—小车轮轨；3—矿浆槽及支架；4—进浆圆筒；5—耙架；6—耙齿；7—传动小车；8—小车轮；9—齿轮；10—溢流槽；11—排料管；12—高压水管；13—沉砂排矿口；14—中心支杆；15—池体

周边传动式浓缩机的优点是：设备简单，操作维护方便，消耗动力小。其主要缺点是占地面积大，处理能力低。

### 二、倾斜板浓密箱

这是一种新型高效率的浓缩设备，其结构如图 12-2 所示。外形为一斜方形箱体，下接一个角锥形漏斗。斜方形箱内装有平行的倾斜板，分上下两层排列。倾斜板的材质为厚玻璃板、硬质塑料板或薄木板等。矿浆沿整个箱的宽度给入到两层倾斜板之间，然后向上流过上层倾斜板的间隙。在此过程中，矿粒在板间沉降析出，故上层倾斜板被称作浓缩板。沉降到板面上的固体颗粒借自重向下滑动，并落在下层板的空隙继续沉降浓缩。下层板的作用主要是减少旋涡搅动，使浓缩过程稳定地进行，故下层板又被称作稳定板。沉砂从锥形漏斗的底口排出，用闸阀或不同直径的排砂嘴调节沉砂排出量和浓度，溢流则由上部溢流槽排出。

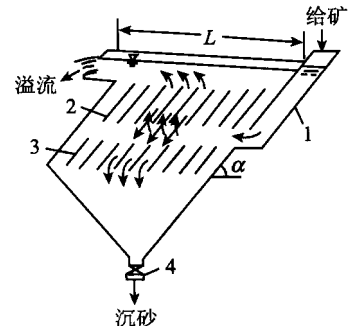


图 12-2 倾斜板浓密箱结构示意图

1—给矿槽；2—倾斜板；3—稳定板；4—排砂嘴

倾斜板浓密箱常用于流程中脱水、脱泥、精矿浓缩等作业。其最大特点是结构简单、浓缩效果好。但排矿口易堵塞，所以，要求产品浓度高的作业一般不宜用。

## 第三节 过滤与干燥原理

### 一、过滤

过滤是矿浆经过多孔的过滤介质（经常是滤布）使物料和液体分离的过程。此时液体（滤液）经过隔板的孔隙流出，而固体颗粒被阻止在滤布的表面上，并形成密实的滤饼。在选矿过程中，过滤一般是脱水的第二阶段，过滤产物（滤饼）的水分一般为10%~20%。

过滤的任务就是要脱去物料中大部分毛细水分，所以必须借助于一定的外力作用。

过滤介质是一种多孔性物质，选矿厂常用滤布作过滤介质，过滤介质上的小孔称为滤孔，滤孔的大小可以大于固体颗粒直径好几倍。由于固体颗粒在滤孔上面能形成一种拱状结构，所以固体颗粒不会从滤孔中穿过去，而水则能顺利地流过去。过滤刚开始时，滤液有点浑浊，但稍后，当滤孔上逐渐形成拱状结构时，滤液就变清澈一些。在生产实践中，通过试验选择适合于物料性质且经济耐用的滤布是十分重要的。

### 二、干燥

干燥是利用热能蒸发固体物料中的水分，从而脱水的作业。干燥能除去残留在物料中的毛细水分、薄膜水分及部分吸湿水分，是一种最彻底的脱水方法。

在选厂的三段脱水流程中，干燥作业消耗大量燃料、动力，干燥费用大，同时干燥过程对设备磨损很大，所以，一般只有在过滤后的精矿水分达不到规定标准，或用户对水分有特殊要求时，才采用干燥作业。

干燥时，物料的加热方法有直接加热法和间接加热法。直接加热是加热的气体既作载热体又作干燥介质，加热气体与干燥物料直接接触时，既向物料传热，又带走从物料中蒸发出来的蒸汽；间接加热是作为载热体不与物料直接接触，其热量是利用器壁的热传导传给物体，而物料中蒸发出来的蒸汽，则借助另外的气体作介质而带动。由于直接加热法效率高，仅在处理特别稀贵的精矿时才采用。

## 第四节 过滤与干燥设备及操作

### 一、过滤设备

选矿厂应用的过滤机种类很多。按照过滤动力的不同，可分为4大类：真空过滤机、压力过滤机、离心过滤机和磁性过滤机。

#### 1. 真空过滤机

选矿厂精矿产品过滤用得最多的是各种真空过滤机，按其结构和操作特点可分为：①圆筒式真空过滤机，包括外滤式、内滤式过滤机、折带式过滤机、磁力过滤机等；②圆盘式真空过滤机；③平面真空过滤机，包括水平带式过滤机、水平盘式过滤机等。

##### （1）折带式真空过滤机

折带式真空过滤机是在筒型真空过滤机的基础上发展起来的。其组成部件除了有筒

体、料浆槽、搅拌器外，还有清洗槽、分展辊、张紧辊、导向辊、清洗水管等构件，其结构如图 12-3 所示。

折带式过滤机的滤布不固定在筒体上，而是通过若干个辊子将其从筒体上引出来绕过卸料辊之后，再经过张紧辊和导向辊而返回到筒体面上，形成一条环形的带子。在工作过程中，滤布与筒体的相接触的区域一起转动，可以延长滤布的使用寿命。

矿浆给入料浆槽内，其中的固体物料被吸附到滤布上，随筒体一同转动。滤布离开料浆槽的矿浆面之后，已被吸附的滤饼继续被抽吸脱水。当滤布运行至（分展）辊时，由于托辊半径很小，滤布改变运行方向，造成滤饼块折裂，继续运行至卸料辊处，由于重力作用滤饼自行脱落到排矿溜槽里。滤布在返到筒体面上以前，受到清水冲洗，清洗液从清洗槽引走，返回到浓缩机内。滤布从导向辊上面绕行后即返回到筒体面上，开始下一个工作循环。

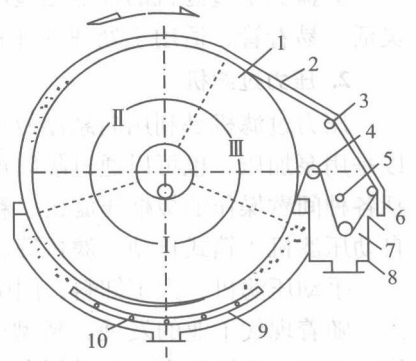


图 12-3 GD 型折带过滤机工作原理图

I—过滤区；II—脱水区；III—死区

1—筒体；2—滤布；3—分展辊；4—导向辊；5—清洗水管；6—卸料辊；7—张紧辊；8—清洗槽；9—搅拌器；10—料浆槽

## (2) 圆盘式真空过滤机

圆盘式真空过滤机的过滤面虽与圆筒过滤机不同，其工作原理则是相同的。其构造如图 12-4 所示。在轴承上回转的水平空心轴固定有钢制的穿孔圆盘，每个圆盘由 12 个扇形片组成，每个扇形片带有圆形管与空心轴的孔相通。滤布制成扇形布袋套在扇形片上，扇形片由隔条和夹板所支承，并有螺丝将两相邻的扇形片夹紧，扇形片的结构如图 12-5 所示。

需过滤的矿浆送入容浆槽中，并常保持在溢流槽的水平，圆盘的一部分浸没在容浆槽中。容浆槽是一个半圆柱形的槽子，另一半为齿形槽。过滤时，滤饼从齿形槽的两侧借刮刀和吹风作用而卸入漏斗。

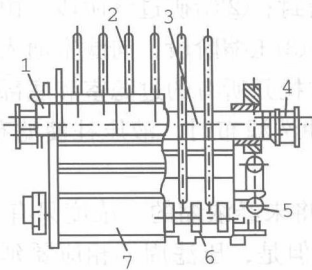


图 12-4 圆盘式真空过滤机

1—瞬时吹风系统；2—过滤盘；3—轴；  
4—分配头；5—传动装置；6—搅拌器；  
7—槽体

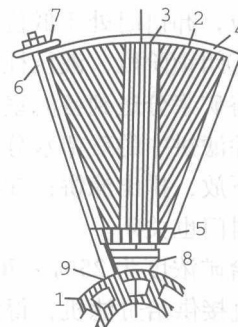


图 12-5 扇形片结构示意图

1—过滤机的空心轴；2—筋条；3—扇形片；4—木条；  
5—空心夹条；6—带螺帽的帽条；7—压板；8—螺钉；  
9—空心轴孔道

圆盘真空过滤机的优点是过滤面积大，占地面积小，生产能力较高，结构紧凑，使用灵活，易看管，适用于处理各种有色金属矿，我国大型的有色金属选矿厂多采用它处理。

### 2. 压力过滤机

压力过滤机是利用向悬浮液和滤饼施加压力作为过滤动力的过滤设备。加压的方式可以用泵加压，也可以通过隔膜加压，或用机械的方法直接压滤饼。压滤机种类很多，包括各种间歇操作的板框压滤机、箱形叶片式压滤机、加压过滤机（筒式、带式等）、板框自动压滤机、箱式自动压滤机等。

手动压滤机，人工卸料，间隙生产，过滤周期长，生产率低，设备笨重，劳动强度大。随着现代工业的发展，新型全自动压滤机相继问世。目前国内外自动压滤机发展很快，类型、规格繁多。现举例介绍国产 BAJZ 型板框式自动压滤机。

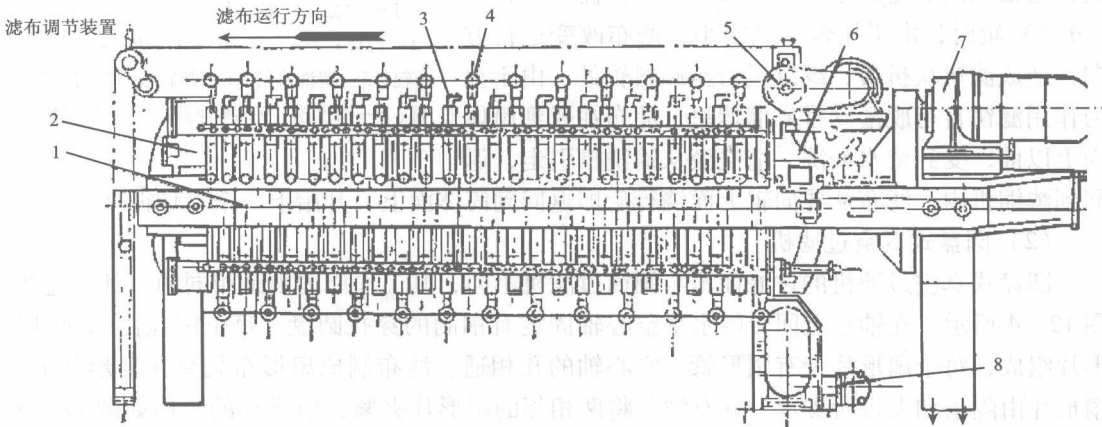


图 12-6 BAJZ 型板框式自动压滤机结构图

1—主梁；2—固定压板；3—滤板；4—滤框；5—滤布  
驱动机构；6—活动压板；7—压紧机构；8—洗刷箱

该设备如图 12-6 所示，它属于水平板框式自动压滤机。每台压滤机由 6~44 副垂直的板框，构成 6~44 个压滤室。滤板内侧有孔供排出滤液和吹气，滤室衬着滤布。滤布在过滤时处于高位，卸饼时处于低位，起落由一些液压柱构成机械手操作。每个压滤周期分为五个阶段：①闭锁阶段，液压柱使滤布提起，过滤板密封；②给矿过滤阶段，由滤室上部的给矿总管将矿浆分送到各滤室，直到其被滤饼充满；③压缩阶段，向滤室通入压缩空气，进一步排除滤饼中的残留水分；④卸饼阶段，液压柱拉开所有的过滤室和底部的卸料门，同时滤布下放，排出滤饼；⑤冲洗滤布阶段，用水冲洗滤布时，液压柱使滤布复位，滤板闭合，卸料门也关闭。

压滤机的给矿浓度为 25%~70%，必要时甚至可以将未经浓缩的，浓度只有 30% 左右的浮选精矿直接供给过滤机，得到含水分 8% 的精矿，但是，压滤周期相应要延长，每次压缩可以生产 4.5~5t 滤饼。

## 二、干燥设备

选矿厂生产应用最普遍的干燥设备是圆筒干燥机。圆筒干燥机是一支在托辊上回转的长圆筒。直接作用式按物料与热风运动方向又分为顺流式与逆流式两种。顺流式圆筒干燥

机如图 12 - 7 所示，圆筒安装略倾斜，以使物料能向排出端移动，圆筒靠电动带动圆筒上的齿圈运动，干燥后的物料从圆筒一端排入漏斗中再运送出去。这种干燥机构造简单、效率高，但干燥细粒精矿时，有大量的干燥物料被废气带走，必须安装集尘设备。

圆筒干燥机的规格以筒体直径和长度来表示，如  $\phi 1\text{m} \times 5\text{m}$ 。

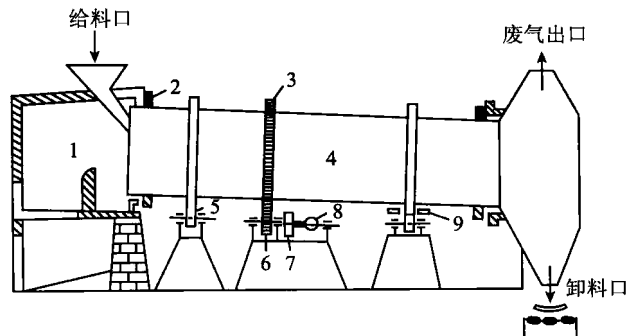


图 12 - 7 圆筒干燥机示意图

1—燃烧炉；2—密封装置；3—齿轮；4—回转圆筒；5—支撑托轮；6—传动齿轮；7—减速机；8—电动机；9—挡轮

## 小 结

本章的重点是掌握周边传动浓密机结构和工作原理以及盘式真空过滤机的构造。  
本章的难点是板框式自动压力过滤机的压滤周期。

### 复习思考题

1. 简述中心传动和周边传动浓密机结构和工作原理。
2. 简述折带式真空过滤机的结构。
3. 简述板框式自动压力过滤机的压滤周期。
4. 简述圆盘式真空过滤机的工作原理。

# 第十三章 选矿厂尾矿处理

## 本章导读

本章简单介绍了选矿厂的尾矿处理系统。通过本章的学习，可以了解尾矿坝类型、容积计算及尾矿输送、尾矿水净化和回水利用等相关知识。

## 第一节 概 述

尾矿的概念是相对的，其中常还含有目前选矿技术水平暂不能回收的有用成分。浮选厂尾矿中经常含有大量药剂，有些甚至是剧毒物质，某些药剂对人体或牲畜、农田极为有害。因此，为了综合利用矿产资源及消除尾矿对环境的污染，选矿厂应当对所产尾矿有计划地处理和储放，并且要加强对尾矿综合利用的研究，变废为宝，化害为利。

处理尾矿的尾矿设施系统，主要由以下几部分组成：

1) 尾矿坝。也称尾矿沉淀池，或称尾矿场，是存放尾矿的场所。由选矿厂排出的尾矿在尾矿池中沉淀，固体尾矿沉于池底积存起来，澄清的水流排入下游的水系中或回收到选矿厂中再用。由于尾矿池的容积较大，尾矿水和空气的接触时间又较长，尾矿水受到天然的净化作用（悬浮物的沉降及有害成分的氧化等），以致使水质提高。

2) 尾矿输送系统。是把尾矿由选矿厂输送到尾矿坝的全套构筑物和设备，其中包括溜槽、管道和砂泵站等。

3) 回水输送系统。是把尾矿池澄清水送到选矿厂或其他用水单位的全套构筑物和设备，与一般供水系统基本相同。

4) 尾矿水净化系统。是将尾矿池排出的澄清水中所含的有害成分进行化学净化的全套构筑物和设备，如调整其 pH 值，使重金属盐沉淀等。

## 第二节 尾矿坝及尾矿输送

### 一、尾矿坝

尾矿沉淀池是尾矿设施最重要的组成部分，占尾矿设施总投资的 50% 左右，有时高达 80%，因此，对尾矿沉淀池的位置和构筑形式，要认真选择和确定。图 13-1 是某选矿厂尾矿设施平面示意图。

#### 1. 尾矿沉淀池的构成形式

尾矿沉淀池的构成形式，按地形可划分为山谷型、山坡型、平地型 3 种。

### (1) 山谷型

其平面形式为三面环山，一面筑坝，即在山谷口筑一横坝形成尾矿沉淀池。优点是容积大，堤坝比较短，坝体工程量小，排放尾矿方便。缺点是三面靠山，汇水面积大，因而需要建筑坚固的和流量大的排水构筑物。

### (2) 山坡型

其平面形式为一面靠山、三面围坝，即在山坡上三面筑坝来形成尾矿沉淀池。优点是汇水面积较小，因而排水量也小，排水构筑物可以简单些。缺点是坝比较长，坝体工程量大，排放尾矿操作和维护也不大方便。

### (3) 平地型

其平面形式为平地起坝，四面筑坝。优点是汇水面积很小，约等于尾矿沉淀池的面积，所以排水量也小，因而排水构筑物也很简单。缺点是四面筑坝工程量大，投资多，操作和维护复杂。

在一般情况下，尾矿沉淀池最好选择山谷型，对小型选矿厂来说，也可采用山坡型或平地型。

## 2. 尾矿沉淀池设施组成

作为尾矿堆积场地的尾矿沉淀池，一般由以下设施组成：①初期坝；②后期堆积坝；③排洪设施；④排渗设施；⑤回水设施；⑥观测设施；⑦其他设施。

一些大型尾矿沉淀池还有简易的检修设施。距选矿厂比较远的尾矿沉淀池，必要时还应设生活福利设施。

## 3. 尾矿沉淀池地址选择

尾矿沉淀池地址的选择，在很大程度上决定尾矿设施基建费和经营费的多寡、选矿厂周围地形情况以及生产中管理工作的繁简等。因此，在选择尾矿沉淀池位置时应综合考虑以下原则：①不占或少占耕地，不拆迁或少拆迁居民住宅；②距选矿厂近，尽可能自流输送尾矿；③有足够容积；④汇水面积应尽量小，以减少排洪工程的规模；⑤尾矿沉淀池优先山谷型，次为山坡型；⑥坝址及池区工程地质及水文地质条件好；⑦处于厂区大的居民点和风景区的下游与常年主导风向的下方；⑧附近有足够建筑材料可供利用。

## 4. 尾矿沉淀池容积计算

在计算尾矿沉淀池容积时，首先要计算出尾矿沉淀池所需要的容积，其次按地形条件及需要容积确定尾矿沉淀池的界限、尾矿坝的高度，并确定初期坝的中心线。图 13-2 为尾矿沉淀池容积计算示例。

尾矿沉淀池所需要的容积可按式计算：

$$V = \frac{Qn}{\delta\varphi} \quad (13-1)$$

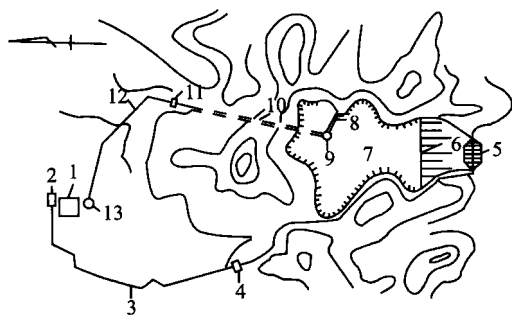


图 13-1 尾矿设施平面示意图

- 1—选矿厂；2—第一砂泵站；3—尾矿管道；4—第二砂泵站；  
5—初期坝；6—堆积坝；7—尾矿库；8—排水斜槽；9—结合井；  
10—隧洞；11—回水泵站；12—回水管道；13—贮水池



式中： $V$ 为选矿厂在生产服务年限内所需尾矿沉淀池总容积， $m^3$ ； $Q$ 为选矿厂每年排入尾矿沉淀池的尾矿量， $t/a$ ； $n$ 为选矿厂生产服务年限， $a$ ； $\delta$ 为尾矿的松散密度（即平均堆积干容重）， $t/m^3$ ； $\varphi$ 为尾矿沉淀池的充满系数。

受某种屏障限定的尾矿沉淀池的容积，可采用切断面的计算法进行计算：

$$V = h \sum_0^n \frac{f_n + f_{n+1}}{2} \tag{13-2}$$

式中： $V$ 为尾矿沉淀池的容积， $m^3$ ； $h$ 为等高线间的垂直距离， $m$ ，一般取 $1.0m$ 或 $0.5m$ ； $f_n, f_{n+1}$ 为 $n$ 和 $n+1$ 等高线限定的外围线所包围的面积， $m^2$ 。

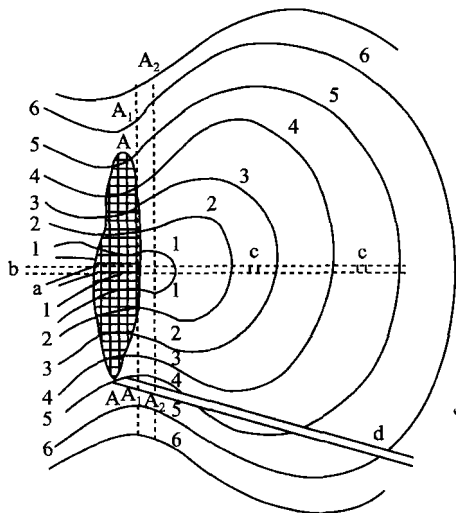


图 13-2 尾矿沉淀池的容积计算示例  
AA—尾矿分送管道的第一位置；A<sub>1</sub>A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>A<sub>2</sub>—第二和第三位置  
a—尾矿坝；b—排水管；c—排水井；d—来自选矿厂的尾矿管道干线

淤积物等。

### 6. 尾矿场的植被

尾矿库停止使用后，能形成一个平坦的场地，有利于复垦，种植作物或种草植树，这样不但可以固结尾砂，而且可以恢复生态，改良土壤，如我国广东板潭锡矿用重选尾矿砂回填造田，不仅消除尾矿的污染而且恢复了土地。

## 二、尾矿输送

选矿厂尾矿处理方式，大体上可分为粗粒干尾矿处理和细粒含水尾矿的处理两种。

### 1. 粗粒干尾矿的输送和堆积

有些选矿厂可产一部分干的或脱水后的（湿的）粗粒尾矿，例如手选废石、跳汰、粗粒溜槽排出的尾矿，以及重介质选矿产出的废石等。这类尾矿的运送和堆积方法有：

- ①利用箕斗或矿车沿斜坡轨道提升运输尾矿，然后弃于锥形尾矿堆；
- ②利用铁路的自动翻车运输尾矿，并将其甩弃于扩展的尾矿堆中；
- ③利用架空索道运输，并将尾矿沿索道线投

### 5. 尾矿沉淀池的度汛与维修

汛期是尾矿沉淀池地表水控制的关键时期，如果这个时期尾矿沉淀池水位控制不当，发生洪水时可能造成洪水漫顶，引起溃坝事故，因此每年汛期前应做好度汛准备和排洪验算。

进行尾矿沉淀池的维修是尾矿沉淀池管理的基本任务之一。每年洪水期和化冰期后，应进行一次全面检查和分析，列出维修项目和补充措施项目，安排维修计划，要求按时完成。如有地震预报，应组织设计和有关部门共同研究，提出尾矿场抗震方案，并抓紧落实。

平时对尾矿场监测，巡回检查发现的问题应及时处理，如填补塌坑、冲沟，修补排水设施，清除排水设施内的

入尾矿场；④利用移动式胶带输送机输送尾矿，并堆置在锥形尾矿场中。

## 2. 细粒含水尾矿的输送和堆积

浮选、磁选等一些湿法选矿厂所产生的尾矿常为矿浆状，对其均采用湿式处理，即借助水力进行输送、充填和堆存。

# 三、尾矿向沉淀池排入的方式

## 1. 尾矿输送到尾矿坝顶部，向尾矿沉淀池内排入

这样可使较粗的颗粒在尾矿坝内坡附近先行沉淀，较细的尾矿则流送到距尾矿坝内坡较远的地方沉淀，因而在尾矿坝内坡附近形成一坚实的人工地层，这样便可以在它的上面修筑堆积坝，以增大尾矿沉淀池的容积。采用这种方式的优点是初期坝较低，可在生产过程中逐渐地用堆积坝来升高（图 13-3）。缺点是排水管较长，并须定期地移动排放管及支架。

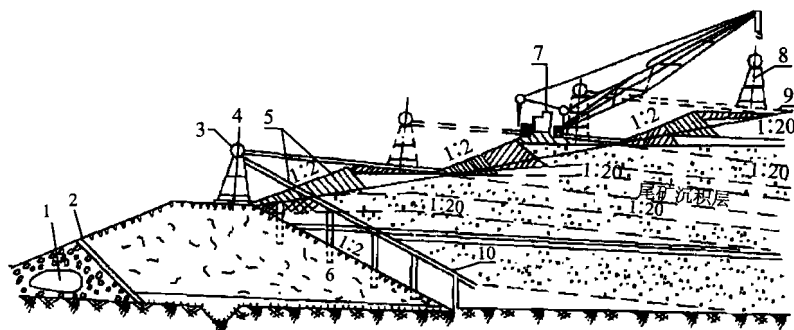


图 13-3 用移动管架排放尾矿的尾矿坝堆积过程图

1—堆石坝；2—反滤层；3—尾矿排矿管；4—尾矿排矿管的中心线；5—尾矿堆积坝；6—土坝；7—用于移动排放管的起重机；8—木支架；9—尾矿堆积坝的总坡度线；10—木溜槽（最初位置）

## 2. 尾矿输送到尾矿沉淀池内部，再向尾矿坝方向分散

使尾矿由尾矿池内部逐渐向尾矿坝的方向堆积。采用这种方式，可使排水管短些，但初期坝要求高些，同时在尾矿坝内坡附近沉淀大量细粒尾矿，对尾矿坝造成不利影响。一般均采用由尾矿坝向尾矿池内部排入的方式。

# 四、尾矿输送系统

## 1. 自流输送

利用选矿厂尾矿排出点和尾矿池之间的地形高差，使尾矿浆自动输送。当水流达到一定流速时，尾矿粒能全部被水带到尾矿池。这种输送方式最简单，只需溜槽和管道即可，不需要任何动力。

## 2. 压力输送

当地形高差不能满足自流输送要求，或者尾矿池的标高高于尾矿排出点的标高，这时就不能利用自流输送，而需在尾矿排出点处或管道中间添加一段或几段砂泵，使尾矿利用砂泵所形成的压力沿着管道送到尾矿沉淀池。此时输送尾矿用的管道要用能承受一定压

力的铁管，不能用木溜槽。

### 3. 自流和压力联合输送

当地形条件不能全部满足自流输送要求，而有部分地段需用压力输送时，可以采用自流和压力联合输送的方式。例如尾矿由选矿厂排出后立即用砂泵扬送到邻近的高地，然后再自流输送尾矿到尾矿池。

## 第三节 尾矿水的净化与回水再用

### 一、尾矿水的净化

尾矿水可以采用以下几种方式净化：

1) 自然沉淀。在尾矿沉淀池将尾矿液中的矿泥颗粒沉淀除去，有时采取一些辅助措施，如加入某些无毒药剂，促使微细粒子凝聚或絮凝沉淀。

2) 物理化学净化。利用吸附材料，将某种有毒物质吸附除去。

3) 化学净化。加入适量的化学药剂，促使破坏有毒物质。

对一个选矿厂，尾矿水要不要净化，采取什么方法净化最有效而且最经济，要通过试验研究后，视情况才能决定。

### 二、尾矿水净化标准

从尾矿池排出的澄清水在排入公共水系时，应严格执行《工业企业设计卫生标准》。若超过标准，则应根据《环境保护条例》采取适当净化措施。

当从尾矿沉淀池回水供选矿厂作生产用水时，如对回水的水质没有任何要求，仅须将排入水系的那一部分加以净化，以减小净化构筑物的压力。

净化构筑物的布置应尽量利用地形，采用自流的高程系统。混合池及沉淀池尽量利用土沟及土堤围成的池子。

### 三、回水再用

为了节约水资源，避免工业同农业争水现象，降低选矿厂生产供水系统的基建经营费用，减少工业废水对下游的影响，尾矿水在选矿生产许可的条件下，应通过技术经济比较，尽可能多回收利用，少向下游排放。

使用回水的方法主要有两种：①尾矿经浓缩机处理，浓缩机溢流作为回水使用；②尾矿沉淀池溢流水作为回水使用。

### 四、回水输送系统

尾矿沉淀池回水的取水构筑物形式一般分固定式泵站和移动式泵站，前者又可分为坝内式、坝外承压式、坝外吸入式，后者又可分为缆车式、围船式。回水管道的设计与一般洪水系统相同。

应当指出，磁选厂或重选厂使用浓缩溢流作为回水，不仅对选矿过程不会产生不良影响，而且可大大降低新鲜水的耗量，经济上是有利的，故磁选厂与重选厂普遍使用回水。

但是浮选厂的情况就比较复杂，由于尾矿水中含有剩余药剂，长期以来普遍不用回水，整个浮选过程使用新鲜水。随着选矿技术的发展，选厂规模的逐渐扩大，环境污染问题的急需解决，使用回水日益被重视。据国内不完全统计，目前少数浮选厂回水利用率已达到60%左右。

## 小 结

本章的重点是尾矿坝的类型和尾矿水的净化。

本章的难点尾矿沉淀池容积计算。



### 复习思考题

1. 尾矿坝的构成形式有哪些，各有什么优缺点？
2. 简述尾矿的输送方式。

# 第十四章 选矿过程的取样检查 与选厂金属平衡

## 本章导读

本章简述了选矿过程的取样方法，可检参数，介绍了选矿厂的金属平衡的计算方法。通过本章的学习，可以知道如何保证选矿过程的取样具有代表性，可以清楚选矿厂应该检测的参数，以及可以简单了解工艺金属平衡和商品金属平衡如何计算。

## 第一节 选矿过程的取样检查

选矿过程取样检查的目的，在于研究原料和选矿产品的组成，观察、分析、调整工艺过程和选矿机械的工作，以对选矿过程进行优化控制与科学管理。

### 一、取样的最小质量

试样的采取和加工过程称为取样。试验时要求试样既能全面地反映矿石中各种成分的含量、矿物组成、化学组成和物理性质等，又能保证试样采取和制备的经济与方便，也就是既不破坏试样的代表性、试样质量又不过大。

试样的最小质量可按下式确定：

$$Q = kd^2 \quad (14-1)$$

式中： $Q$  为试样最小质量，kg； $d$  为试样中最大矿块的粒度，mm； $k$  为矿石性质系数。它的值与金属品位、浸染特性、有用矿物价值及其他物理性质有关， $k$  值可以通过试验确定，最常用的是 0.1~0.2。

### 二、静置料堆的取样

静置料堆的取样包括块状料堆和细磨料堆的取样。

#### 1. 块状料堆取样

##### (1) 舀取法

是在料堆面表布置一定数量的采样点，各点挖坑取样。将从这些点中采出的各部分矿样合并、混匀成为平均试样待用。当物料堆是沿长度方向逐渐堆积时，通过合理地布置取样点即可保证矿样的代表性。当物料是沿厚度方向逐渐堆积，以致物料组成沿厚度方向变化很大时，表层舀取法的代表性将很差。这时只能增加取样坑的深度，然后将挖出的物料缩分出一部分作为试样。

##### (2) 探井法

即在料堆上所布置的采样点挖浅井，从挖出的物料中缩分出一部分作为试样。由于在挖井时对井壁要进行支护，所以取样费用比较大。在矿车中取块状物料，可以用网格法布置若干采样点，用表面攫取法取样。取样点的数目视车厢大小、车厢数目和试样必需的质量而定。在车厢运输过程中易发生摇动和振动，使重矿物逐渐下沉而产生分层现象，此时应采用分层取样法。

## 2. 细粒粉状料堆的取样

### (1) 精矿取样

通常用探管取样。在精矿所占的面积内布点要均匀，布点数目越多，精确性越高，但过多的取样点，工作量增加，耗费过多的人力、物力，所以取样点的数目要视具体情况而定。探管应有足够的长度，每一取样点采取的数量基本相等，表层、底层都能取到。

### (2) 尾矿取样

通常是在尾矿池（库）取样，最常用的方法是钻孔取样。可以是机械钻、也可以是手钻，或者用普通的钢管人工钻孔取样。取样的精度主要决定于取样网的密度。取样点之间的距离通常为 500 ~ 1000mm，一般可沿整个尾矿池（库）表面均匀布置，然后沿全钻孔取样。由于尾矿池（库）面积大，取样点多，取样数量大，对取出的样品，根据其用途不同，均需混匀缩分，得出适当的质量作为试样。

## 三、流动物料的取样

流动物料是指运输过程中的物料，包括用矿车运输的原矿、皮带运输机以及其他各种运输设备上的干矿，给矿机和溜槽中的料流，以及流动中的矿浆。

最常用的采取流动物料的方法是横向截流法，即每隔一定时间，垂直于料流运动方向截取少量物料作为试样。取样的精度主要取决于料流组成的变化程度和截取频率。

### 1. 在运输皮带上取样

对选矿厂的固体松散物料（主要是原矿石），最常用的就是在运输皮带上取样。取样方法一般是人工取样，即按一定长度，每隔一定时间（一般为 15 ~ 30min），垂直于料流运动方向，沿料层全宽和全厚均匀地刮取一份物料，将各次刮取的试样合并混匀作为试样。取样总时间由取样用途和质量而定，可以是几小时、一个班或几个班。

### 2. 矿浆取样

选矿试验和生产过程中流动的矿浆，一般按断流截取法采取，所用设备有人工取样勺和机械取样机。为了保证沿料流的全宽和全厚截取试样，取样点应选择在矿浆的转运处，如分级机的溢流堰口、管道口、溜槽口，严禁直接在管道、溜槽或贮存器中取样。

常用的人工取样勺如图 14 - 1 所示。当用取样勺采取矿浆样时，为了保证采样的精确性，应注意以下几点：

1) 取样勺开口的宽度，至少应为试样中最大矿粒的 4 ~ 5 倍；

2) 取样勺应有光滑的内壁，且容易倾倒；

3) 取样时应使取样勺口垂直于矿浆流，对

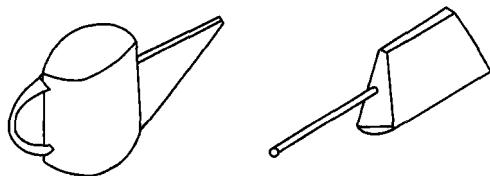


图 14 - 1 人工矿浆取样勺

矿浆流全宽全厚横向等速截取；

- 4) 取样时需经过一定的、相等的时间间隔；
- 5) 取样勺倾倒之后，用清水冲洗，并将冲洗水倒入试样之中；
- 6) 每一取样点应有专用的取样勺；
- 7) 取样勺容积应大于一次截取的矿浆量所需的容积。

另外，在原矿运输中，可以每隔一定车数留取一车矿石作为试样，然后将每班所取的矿石混合拌匀，用四分法取出平均试样。该方法的缺点是原始试样的质量较大。

## 四、矿样的混匀

为了保证试样对原物料的代表性，在缩分前必须将其混匀。常用的混匀方法有环锥法、移堆法、滚移法、机械法等。

### 1. 环锥法

主要应用于质量为 250 ~ 2000kg 的粒度小于 50 ~ 100mm 试样的混匀。其操作过程是用铁铲将试样从四周铲向中心，堆成圆锥形，然后将圆锥中的矿样扒向四周，堆成大环，接着再将试样顺次堆成圆锥及圆环，如此反复几次，即可将试样混匀。

### 2. 移堆法

将矿样向一中心点徐徐倒下，形成一圆锥形矿堆，再将此矿堆沿同一方向从锥底两相对位置将矿样依次铲取放在附近另一中心点，又堆成新的圆锥形矿堆，如此重复数次，即可将矿样混匀，一般混合 3 ~ 4 次为宜。

以上操作可在扫净的水泥地面上或铁板上进行。

### 3. 滚移法

细粒、量又较少的矿样适用于此法混匀。先将矿样堆置在橡胶布的中心，然后提起布的一角，使矿样在橡胶布上滚动。当滚过对角线一定距离后，再提起对应的另一角，使矿样做同样滚移。四个角都轮流提过后，重复数即可。也可以用两手同时提起橡胶布对应的两角做滚动，再提起另外对应的两角做滚动，重复数次即可。

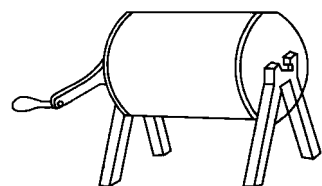


图 14-2 混样机

### 4. 机械法

可以在图 14-2 所示的混样筒内将试样混匀。实验室也可以利用筒形球磨机作为混样用，将球磨机内的球取出，把试样装入转动 5 ~ 15min 即可。

## 五、矿样的缩分

矿样混匀后，要进行缩分，以达到要求的样品质量，常用的方法有以下 3 种。

### 1. 四分法

此法是将混匀的矿样堆成锥形，然后用薄板插至矿堆到一定深度后，旋转薄板将矿堆展平成圆盘状，再通过中心点划十字线，将其分成 4 个扇形部分，取其对角部分合并成一份矿样。如果矿量过大，可照此法再进行缩分，直到符合所需要的质量为止。

## 2. 二分器法

二分器用薄铁皮制成,如图 14-3 所示。此法一般用于矿粒尺寸在 10mm 以下、质量又不大的物料的缩分。为了使物料顺利通过小槽,小槽宽度应大于物料中最大矿粒尺寸的 3~4 倍。使用时,两边先用盒接好,再将矿样沿二分器上端沿整个长度徐徐倒入,从而使矿样分成两份,取其中一份作为需要矿样。如量还大,再进行缩分,直到缩分到所需的矿量为止。

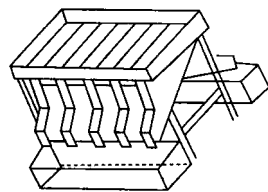


图 14-3 二分器

## 3. 方格法

将试样混匀以后摊平为一薄层,划分为许多小方格,然后用平铲逐格取样。为了保证取样的准确性,必须做到以下几点:一是方格要划匀,二是每格取样量要大致相等,三是每铲都要铲到底。此法一般用于粒度在 5mm 以下的细粒矿样,可同时连续分出多个小份试样,因而常用于取化学分析试样和浮选试样。

# 第二节 选矿工艺过程的可检参数

## 一、检测目的

为了按班、日、旬、月、季、年衡量选矿厂的生产效果,做好金属平衡工作,掌握选矿过程中的数、质量界限;为了检查和了解各个生产环节的技术操作是否符合工艺要求;为了给选矿厂的管理人员、技术人员提供生产中存在的薄弱环节、以便及时发现问题、解决问题,促使生产正常进行,提高管理水平,技术检测工作起着不可缺少的、举足轻重的作用。因此,每个选矿厂都必须进行一系列的生产技术检测工作,并视具体情况设立相应的组织机构,如质量管理科、技术检验科、技术监督站、检测组等。

选矿过程检测包括人工检测和自动检测。人工检测至今仍是我国大部分选厂的主要检测手段,如用浓度壶检查分级溢流浓度、选别作业矿浆浓度、浓缩产品和过滤给料浓度等,用筛子检查碎矿产品粒度、分级溢流粒度、选别产品粒度等,用化学分析方法检验原料和产品的品位等。人工检测的精度受主观因素和方法因素的影响很大,每位操作工的素质和每种检查方法的精度之间都存在着差异,对准确调节和控制选矿过程都有一定影响。

随着科学技术的进步,电子工业的发展,各种检测仪表的出现,20 世纪 60 年代我国部分选厂已逐步使用自动检测代替人工检测。20 世纪 80 年代以后,我国大多数选厂已局部采用自动检测技术,如电磁流量计、超声波粒度计、 $\gamma$ 射线浓度计、电子皮带秤、同位素在线品位分析仪等已用于生产。自动检测的主要优点:①能够消除主观因素对选矿过程的影响,显著地缩减操作工人数,增大多机看管的可能性;②能够获得工艺因素变化的可靠信息,反映过程进行和设备运转的情况,及时指导人工调节或自动调节生产过程;③能够遵守工艺过程规定的操作制度,从而提高选厂的技术经济指标和生产率,节省原料和药剂消耗。

总之,选矿过程检测的目的就是对工艺过程取得定量的结果和数学上的表征,为控制生产过程提供可靠的依据。



## 二、检测主要内容

选矿过程需要检查的内容很多，随着选别方法的不同，其范围略有差异。大致的内容有：进厂原材料（如矿石、药剂及其他消耗材料）及出厂产品数量和质量标准的按期检查；计量设备（包括各种皮带秤、磅秤、天平、仪表、地中衡等）定期校核；主要设备性能及工作状况的检查；药剂用量的检查与控制；工艺操作条件的检查，其中包括：

- 1) 粒度分析。如矿山来的矿石块度、碎矿最终产品粒度、磨矿细度、分级机或旋流器溢流细度、入选矿石及产品的粒度等。
- 2) 矿浆质量分数测定。主要是磨矿质量分数、分级机或旋流器溢流质量分数、入选矿浆质量分数等。
- 3) 水分测定。包括原矿和精矿。
- 4) 品位分析。包括原、精、尾矿取样品位及快速样品位。
- 5) 浮选矿浆酸碱度的测定。

## 第三节 选矿厂的金属平衡

入厂原矿中金属含量和出厂产物中的金属含量之间有一个平衡关系，称之为金属平衡。在分析选矿厂的工作时，金属平衡的计算是很重要的。实践中，将金属平衡分为工艺金属平衡和商品金属平衡。工艺金属平衡系根据矿石和选矿产品的化学分析及矿石的重量编制的。由于它是根据工艺过程某一阶段中产品的取样资料编成的，所以，工艺平衡反映选矿过程的实际状况。从工艺过程检查的观点看，工艺平衡是工艺过程动态的反映，所以，校正工艺过程和查明失调原因，按工艺平衡的资料来进行。商品金属平衡系根据实际所得到的全部选矿产品和商品（原矿、精矿）的重量化学和分析（品位）以及机械损失而编制的金属平衡，所以，商品平衡反映整个工厂的实际生产情况。

由上述得知，两种平衡之间的原则差别就在于，工艺平衡不考虑在不同选矿阶段中产品的机械损失，所以工艺回收率一般要高于商品回收率。仅在理想情况下，商品平衡回收率与工艺回收率才基本接近。工艺回收率有时又称“理论回收率”，商品回收率又称为“实际回收率”或“实收率”。分析二者的差别，可以查明矿石处理过程中的失常，找出金属流失的原因。两者的不协调程度，反映了企业技术水平和生产管理水平的优劣。

### 一、工艺金属平衡

工艺金属平衡不仅用于对工艺过程进行作业检查，而且也反映整个企业生产活动和各生产班的工作情况。

编制工艺金属平衡用的主要资料是：①处理原矿量  $Q$  及原矿取样化验品位  $\alpha$ ；②精矿取样化验品位  $\beta$ ，尾矿取样化验品位  $\delta$ 。

如果具有生产过程各环节的取样资料，则可为任何环节编制工艺平衡。根据工艺平衡可用分析方法确定金属回收率、金属的富集比、产品的产率、工艺损失量及选矿比。

工艺平衡的编制方法，有以下几种情况：

- 1) 由矿石生产两种最终产品，例如，由铜矿石得到铜精矿和尾矿。在此情况下，含

于矿石中的一种金属按两种产品分配。

2) 由矿石得到三种最终产品——两种精矿和尾矿，例如，铅精矿、锌精矿和尾矿或铜精矿、锌精矿和尾矿。含于矿石中的两种金属按三种产品分配。

3) 由矿石得到四种最终产品——三种精矿和尾矿，例如，铜精矿、铅精矿、锌精矿和尾矿。在此情况下，含于矿石中的三种金属（铜、铅、锌）按四种产品分配。

4) 由含  $n$  种金属的矿石得到  $n+1$  种产品， $n$  种金属按  $n+1$  种产品分配。

下面仅对前两种情况加以讨论。

### 1. 由矿石生产两种最终产品——精矿和尾矿

取所处理矿石的重量为 100%， $\gamma_1$  为精矿相对原矿的重量产率； $\gamma_2$  为尾矿的产率； $\alpha$  为原矿中有用金属品位，%； $\beta$  为精矿中有用金属品位，%； $\delta$  为尾矿中有用金属品位，%。

则尾矿产率为  $\gamma_2 = 100 - \gamma_1$ ，矿石和产品中金属的平衡方程式为

$$100\alpha = \gamma_1\beta + (100 - \gamma_1)\delta \quad (14-2)$$

由此得

$$\gamma_1 = \frac{\alpha - \delta}{\beta - \delta} \times 100 \quad (14-3)$$

精矿中金属回收率为精矿中金属量与原矿中该金属量之比的百分数：

$$\varepsilon_1 = \gamma_1 \frac{\beta}{\alpha} \% \quad (14-4)$$

或

$$\varepsilon_1 = 100 \frac{\alpha - \delta}{\beta - \delta} \times \frac{\beta}{\alpha} \quad (14-5)$$

则尾矿中金属的损失率为

$$\varepsilon_2 = 100 - \varepsilon_1 \text{ 或 } \varepsilon_2 = \gamma_2 \cdot \frac{\delta}{\alpha} \quad (14-6)$$

### 2. 由矿石得到三种最终产品——两种精矿和尾矿

例如铜精矿、铅精矿和尾矿，该原矿及选矿产品中所含的金属量（%）如下：

铜 (Cu)	铅 (Pb)
原 矿 $a$	$b$
铜精矿 $a_1$	$b_1$
铅精矿 $a_2$	$b_2$
尾 矿 $a_3$	$b_3$

根据上述资料可列出如下平衡方程式：

1) 矿量平衡

$$\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 100 \quad (14-7)$$

2) 铜金属平衡

$$a_1\gamma_1 + a_2\gamma_2 + a_3\gamma_3 = a \times 100 \quad (14-8)$$

3) 铅金属平衡

$$b_1\gamma_1 + b_2\gamma_2 + b_3\gamma_3 = b \times 100 \quad (14-9)$$

式中： $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$  分别为铜、铅精矿和尾矿的产率。

解上述联立方程式，得出  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ ，而  $\gamma_3 = 100 - \gamma_1 - \gamma_2$ 。

$$\gamma_1 = \frac{(a - a_3)(b_2 - b_3) - (a_2 - a_3)(b - b_3)}{(a - a_3)(b_2 - b_3) - (b_1 - b_3)(a_2 - a_3)} \times 100$$

$$\gamma_2 = \frac{(a_1 - a_3)(b - b_3) - (b_1 - b_3)(a - a_3)}{(a_1 - a_3)(b_2 - b_3) - (b_1 - b_3)(a_2 - a_3)} \times 100 \quad (14 - 10)$$

回收率的计算如下：

铜精矿中铜的回收率为

$$\varepsilon_{\text{Cu}} = \gamma_1 \frac{a_1}{a} \quad (14 - 11)$$

铅精矿中铅的回收率为

$$\varepsilon_{\text{Pb}} = \gamma_2 \frac{b_2}{b} \quad (14 - 12)$$

铜精矿中损失的铅为

$$\varepsilon_{\text{Pb}}' = \gamma_1 \frac{b_1}{b} \quad (14 - 13)$$

铅精矿中损失的铜为

$$\varepsilon_{\text{Cu}}' = \gamma_2 \frac{a_2}{a} \quad (14 - 14)$$

计算后再编制工艺金属平衡表。为简便计算也可采用行列式求解。由矿石生产四种或五种最终产品时，可以用类似于上述的方法，只是计算工作量大一些。

## 二、商品金属平衡

企业的技术经济指标是建立在商品金属平衡的基础上的，所以商品金属平衡应按产品取样和化学分析的精确数据以及产品的重量编制。编制商品金属平衡需要下列数据：①处理的原矿重量；②所生产的精矿重量；③尾矿重量；④在厂产品的盘存量（矿仓、浓缩机内的产品等）；⑤原矿、精矿、尾矿及在厂产品的化验品位；⑥机械损失。

商品平衡一般每月编制一次。编制的计算式可根据收入等于支出的原则进行。

上月遗留下来的盘存金属量 + 本月收入原矿的金属量 = 运出的精矿中的金属量 + 尾矿中的金属量 + 遗留给下月的盘存金属量 + 损失金属量。

用符号表示如下：

$$[Q_{\text{仓}} \cdot \alpha_{\text{仓}} + Q_{\text{浓}} \cdot \beta_{\text{浓}}] + Q_{\text{原}} \cdot \alpha = Q_{\text{精}} \cdot \beta + [Q'_{\text{仓}} \cdot \alpha'_{\text{仓}} + Q'_{\text{浓}} \cdot \beta'_{\text{浓}}] + Q_{\text{损}} \cdot \delta_{\text{损}} \quad (14 - 15)$$

式中： $Q_{\text{仓}}$ 、 $\alpha_{\text{仓}}$ 分别为上月遗留在矿仓中盘存的矿石量，t，及其金属品位，%； $Q_{\text{浓}} \cdot \beta_{\text{浓}}$ 分别为上月遗留在浓缩机中盘存的精矿量（t）及其金属品位，%； $Q_{\text{原}} \cdot \alpha$ 分别为本月进厂的原矿量，t，及其金属品位，%； $Q_{\text{精}} \cdot \beta$ 分别为本月产出的精矿量，t，及其金属品位，%； $Q_{\text{尾}} \cdot \delta$ 分别为本月产出的尾矿量，t，及其金属品位，%； $Q'_{\text{仓}} \cdot \alpha'_{\text{仓}}$ 分别为存留在矿仓中遗留给下月的盘存矿石量，t，及其金属品位，%； $Q'_{\text{浓}} \cdot \beta'_{\text{浓}}$ 分别为留存在浓缩机中遗留给下月的盘存精矿量，t，及其金属品位，%； $Q_{\text{损}} \cdot \delta_{\text{损}}$ 分别为损失的量，t，及其金属品位，%。

损失矿量包括浮选机槽子漏、跑槽、精矿流失及故障时溢出物、浓缩机溢流跑浑，以及皮带运输机掉矿、球磨机给矿处漏矿等。

计算商品金属回收率的公式为

$$\varepsilon_{\text{商品}} = \frac{\text{实产商品金属量}}{\text{实选的矿石所含金属量}} \times 100\% = \frac{Q_{\text{精}} \cdot \beta}{Q_{\text{原}} \cdot \alpha} \times 100\% \quad (14-16)$$

式中： $Q_{\text{精}}$ 为实产精矿吨数（要扣除盘存的）； $\beta$ 为精矿品位，%； $Q_{\text{原}}$ 为实选的矿石吨数（要扣除盘存的）； $\alpha$ 为原矿品位，%。

商品回收率往往要略低于工艺回收率，但对一个选厂而言不能相差太多，一般商品回收率比工艺回收率低1%~3%。如果二者相差太多，表明损失过多或有其他问题，要及时查明原因，采取措施。

## 小 结

本章的重点是选矿过程的取样、混匀和缩分方法。

本章的难点是工艺金属平衡和商品金属平衡的计算。



### 复习思考题

1. 采取试样的最小质量如何计算？
2. 简述静置料堆和流动料堆如何取样。
3. 试样混匀有几种方法？
4. 试样缩分有几种方法？
5. 选矿过程主要检测内容有哪些？

# 附 录

## 一、试验要点

### 1. 试验目的和任务

矿石可选性试验是对矿石进行系统的选矿试验工作，根据试验的结果，判断矿石可选的难易程度，并确定应用的选矿方法、选别条件、选别流程及可能达到的选别指标。

矿石可选性，是指在现阶段选矿技术水平上矿石中各种可能利用的矿物依靠其物理化学性质的差异，相互分选或与脉石分选的难易程度。

根据所完成任务的性质不同，矿石可选性试验可分为：①矿床评价试验，包括试验室试验；②选矿厂设计前的试验，包括试验室试验、扩大的半工业试验和工业试验；③生产现场的选矿试验。

### 2. 选矿试验的程序和计划的编写

矿石可选性试验一般按下列程序进行：

- 1) 试验前的准备，包括查阅有关文献，拟定试验计划，添置和检修试验仪器设备等；
- 2) 试样的采取与制备；
- 3) 矿石物质组成和物理化学性质的研究，并据此拟订试验方案；
- 4) 按照试验计划进行试验；
- 5) 整理试验结果，编写试验报告。

试验计划有以下内容：

- 1) 试验题目、任务和要求；
- 2) 试验方案的选择，可能遇到的问题和达到的结果；
- 3) 试验的内容、步骤和方法以及各项试验的工作量和完成期限；
- 4) 人员组织和所需的物质条件，包括仪器设备、材料和经费；
- 5) 需要其他专业人员配合进行的项目的工作量和要求等，如岩矿鉴定和化学分析计划等。

### 3. 试验内容

#### (1) 重选

重点考查影响跳汰和摇床实验设备效率的工艺因素，通过试验确定适宜的工艺条件，确定合适的选别指标。

#### (2) 磁选

探索最合理的磁选设备，确定选别流程和操作条件，提出可能达到的指标。

#### (3) 浮选

确定选别方法和流程；通过试验分析影响过程的因素，查明各因素在过程中的主次位

置和相互影响程度，确定各工艺因素的最佳条件；提出最终选别指标。

#### 4. 试验报告的编写及要求

试验报告通常由以下几部分组成：

- 1) 封面：报告名称、试验单位，编写日期。
- 2) 前言：对试验任务、试样以及所推荐的选矿方案和最终指标作一简单介绍。
- 3) 简述矿床特性及试样的采取和制备。
- 4) 矿石性质——矿石物质组成研究结果。
- 5) 试验方法和结果。
- 6) 结论：主要介绍所推荐的选矿方案和指标，并给以必要的论证和说明。
- 7) 附录或附件。

## 二、实习要点

### 1. 实习目的

了解某选矿厂的生产过程、选矿工艺及设备以及技术经济指标；了解选矿厂生产一线的生产情况，体验从事选矿专业工作的环境和氛围。

### 2. 实习内容

接受现场的安全教育，考察选矿厂的生产流程、工艺条件和工艺设备、生产指标，编写实习报告。

### 3. 实习报告的编写及要求

实习报告通常由以下几部分组成：

- 1) 封面：接受实习单位名称、所在院校、学院、专业、班级名称。
- 2) 前言：说明实习时间、地点、目的和任务。
- 3) 概述：包括选矿厂的地理位置、气候、建厂历史、规模、生产现状和部门组成等。
- 4) 矿石性质：矿石物质组成研究结果。
- 5) 选矿厂的生产情况：分述各车间的工艺流程、所用设备型号、数量、处理能力、工作过程和工作制度，以及生产工艺条件和技术指标等。
- 6) 实习感想。

## 参考文献

- 《采矿手册》编辑委员会. 1990. 采矿手册. 北京: 冶金工业出版社
- 东北工学院. 1959. 论我国岩石分级. 北京: 煤炭工业出版社
- [苏] 切尔尼亚科 A C, 郑飞译. 1982. 浮选过程物理化学基础. 北京: 中国建筑工业出版社
- [新西兰] 凯利 E G, [美] 斯波帝斯伍德 D J, 胡力行, 等译. 1989. 选矿导论. 北京: 冶金工业出版社
- 陈国山. 2008. 采矿概论. 北京: 冶金工业出版社
- 陈国山. 2008. 露天开采技术. 北京: 冶金工业出版社
- 成清书. 1981. 矿石可选性试验与检查. 北京: 冶金工业出版社
- 胡为柏. 1983. 浮选. 北京: 冶金工业出版社
- 胡岳华, 冯其明. 2006. 矿物资源加工技术与设备. 北京: 科学出版社
- 胡岳华, 王淀佐. 1999. 矿物加工学科的发展——历史、现状与未来. 矿冶工程, 19 (1): 3~6
- 黄礼煌. 1990. 化学选矿. 北京: 冶金工业出版社
- 解世俊. 1979. 金属矿床地下开采. 北京: 冶金工业出版社
- 李宝祥等. 1978. 金属矿床露天开采. 北京: 冶金工业出版社
- 李朝栋. 1981. 金属矿床开采. 北京: 冶金工业出版社
- 李启衡. 1980. 破碎与磨矿. 北京: 冶金工业出版社
- 卢世杰, 李晓峰. 2008. 浮选设备发展趋势. 铜业工程, 2: 1~4
- 卢寿慈. 1990. 矿物颗粒分选工程. 北京: 冶金工业出版社
- 丘继存. 1987. 选矿学. 北京: 冶金工业出版社
- 陶颂霖. 1982. 爆破工程. 北京: 冶金工业出版社
- 汪理会等. 2004. 矿业工程概论. 徐州: 中国矿业大学出版社
- 王长任. 1986. 磁电选矿. 北京: 冶金工业出版社
- 王淀佐, 邱冠周, 胡岳华. 2005. 资源加工学. 北京: 科学出版社
- 魏德洲. 2000. 固体物料分选学. 北京: 冶金工业出版社
- 翁春林, 叶加冕. 2004. 工程爆破. 北京: 冶金工业出版社
- 吴理云. 1985. 井巷硐室工程. 北京: 冶金工业出版社
- 夏立凯. 1988. 采选概论. 北京: 冶金工业出版社
- 夏湘蓉, 李仲均, 王根元. 1980. 中国古代矿业开发史. 北京: 地质出版社
- 谢广元. 2001. 选矿学. 徐州: 中国矿业大学出版社
- 徐小荷, 余静. 1984. 岩石破碎学. 北京: 煤炭工业出版社
- 徐小荷. 1959. 冲击式凿岩及其工具. 北京: 冶金工业出版社
- 杨顺梁, 林任英. 1988. 选矿知识问答. 北京: 冶金工业出版社
- 张强. 1984. 选矿概论. 北京: 冶金工业出版社
- 张钦礼, 王新民, 邓义芳. 2008. 采矿概论. 北京: 化学工业出版社
- 张志雄. 1981. 矿石学. 北京: 冶金工业出版社
- 周昌达. 1979. 井巷工程. 北京: 冶金工业出版社
- 周忠尚. 1984. 选矿厂设计. 北京: 冶金工业出版社
- Hausen D M, Park W C. 1984. 工艺矿物学. 北京: 中国选矿科技情报网