



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

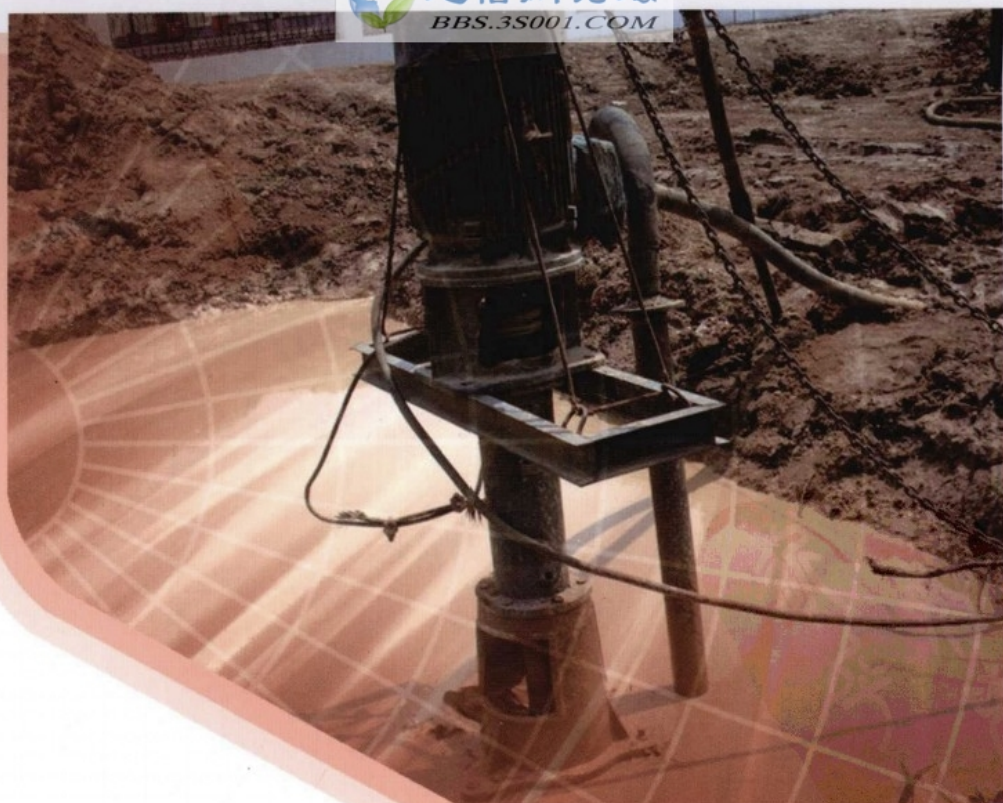
主 编：索忠伟 王 生

钻孔冲洗与护壁堵漏

ZUANKONG CHONGXI YU HUBI DULOU



地信网论坛
BBS.3S001.COM



地 质 出 版 社

策划编辑：王章俊 魏智如

责任编辑：吴宁魁 魏智如



钻孔冲洗与护壁堵漏

ZUANKONG CHONGXI YU HUBI DULOU



地信网论坛
BBS.3S001.COM

ISBN 978-7-116-06171-2



9 787116 061712 >

定价：17.80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

钻孔冲洗与护壁堵漏

主编：索忠伟 王 生

主审：王式杜 黄世华



地信网论坛
BBS.3S001.COM

地质出版社

· 北 京 ·





内 容 提 要

本教材主要包括钻探与岩土工程泥浆概述、配浆材料及处理剂、泥浆的性能、水基泥浆、小口径金刚石钻进用泥浆、泥浆在复杂孔况下的应用、岩土钻挖稳定液技术、固相控制与废浆处理等内容。

本书主要是为高等职业院校钻探专业、岩土工程技术和相关专业本、专科函授学生编写的教材，也可作为钻探工程、岩土工程施工现场技术人员、管理人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

钻孔冲洗与护壁堵漏/索忠伟等主编. —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 978-7-116-06171-2

I. 钻… II. 索… III. ①钻井泥浆-高等学校: 技术学校-教材②钻孔-堵漏-高等学校: 技术学校-教材
IV. P634

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 137044 号

策划编辑: 王章俊 魏智如

责任编辑: 吴宁魁 魏智如

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: zhs@gph.com.cn

传 真: (010) 82324340

印 刷: 北京地质印刷厂

开 本: 787 mm × 1092 mm $1/16$

印 张: 11.5

字 数: 280 千字

印 数: 1—2000 册

版 次: 2009 年 8 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价: 17.80 元

书 号: ISBN 978-7-116-06171-2

(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	

编写院校

安徽工业经济职业技术学院

长春工程学院

重庆科技学院

东北大学

甘肃工业职业技术学院

湖北国土资源职业学院

湖南工程职业技术学院

河北地质职工大学

江西应用技术职业学院

吉林大学

辽宁地质工程职业学院

南京大学

徐州建筑职业技术学院

云南国土资源职业学院

郑州工业贸易学校（郑州地校）

中国地质大学（北京）

主审院校

安徽理工大学

安徽工业经济职业技术学院

北方机电工业学校

长春工程学院

河南理工大学

湖北国土资源职业学院

湖南工程职业技术学院

淮南职业技术学院

吉林大学

江西理工大学

江西应用技术职业学院

昆明理工大学

昆明冶金高等专科学校

克拉玛依职业技术学院

宿州学院

山东胜利职业学院

石家庄职业技术学院

太原理工大学

徐州建筑职业技术学院

云南国土资源职业学院

郑州工业贸易学校（郑州地校）

中国地质大学（北京）

中国地质大学（武汉）

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

前 言

《钻孔冲洗与护壁堵漏》是根据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 2008 年 5 月在长沙召开的“全国高等院校高职高专资源勘查类专业教学改革及教材建设会议”的有关决议编写的。教材内容按 60~70 学时安排。

编者在认真研究了各校现行课程教学大纲的基础上,制定了教材编写计划。全书共八章,主要内容包括:钻探与岩土工程泥浆概述、配浆材料及处理剂、泥浆的性能、水基泥浆、小口径金刚石钻进用泥浆、泥浆在复杂孔况下的应用、岩土钻挖稳定液技术、固相控制与废浆处理。

钻孔冲洗与护壁堵漏是钻探技术和岩土工程技术专业高职高专学生的一门主干专业课。通过本课程的学习,要求学生系统地掌握泥浆功用、类型,粘土矿物基础,泥浆的性能,泥浆材料及其作用原理,泥浆在孔内复杂情况下的应用,岩土钻挖稳定液技术,固相控制与废浆处理等内容。本教材根据钻探专业的需要,对小口径金刚石钻进泥浆作了专门介绍。

《钻孔冲洗与护壁堵漏》是理论性和实践性都很强的教材,因此,任课教师在讲授本课程时,要力求做到理论与实验、实习相结合,并重点加强实践性教学环节,以提高学生的实际应用能力。在本课程讲授前应安排学生进行钻探认识实习或到岩心钻探现场(有条件的学校可到油田)进行参观实习,在实习过程中了解泥浆在钻进中的作用。

本教材由吉林大学应用技术学院主持编写,索忠伟、王生任主编。吉林大学徐克里、黄建国、刘占忠,辽宁省第四地质大队吴晓斌参加了部分内容的编写。教材编写过程中,编者参考了过去编写的相关教材,引用了近年来有关泥浆工艺方面的新成果,得到了行业内专家的大力支持。对此,编者谨表谢意。

教材初稿完成后,安徽工业经济职业技术学院王式杜教授、黄世华副教授作为主审,认真通读了书稿,提出了许多有价值的修改意见。湖南工程职业技术学院申晓春、云南国土资源职业学院廖国平、河北地质职工大学辛国

良等，在本书的编写过程中提出了很好的意见和建议。本教材的编写立项是由湖南工程职业技术学院申晓春老师率先提出的，地质出版社魏智如主任在本书的编写过程，做了大量组织和指导工作。编者谨向上述对本教材出版提供帮助的同仁表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，加上编写时间仓促，书中难免有错误和疏漏，欢迎广大读者批评指正。

编 者

2009 年 6 月于长春

目 次

前 言

第一章 钻探与岩土工程泥浆概述	(1)
第一节 泥浆的功用、类型和组成	(1)
一、泥浆的功用	(1)
二、泥浆的类型	(2)
三、泥浆的组成	(4)
第二节 泥浆的设计与配制	(5)
一、泥浆的一般设计方法	(5)
二、泥浆材料用量计算	(5)
三、泥浆的配制	(6)
复习思考题	(7)
第二章 配浆材料及处理剂	(8)
第一节 粘土	(8)
一、粘土矿物的分类和化学组成	(8)
二、粘土的电性	(9)
三、粘土的水化作用	(11)
四、粘土胶体化学基础	(11)
第二节 配浆用水	(18)
第三节 泥浆处理剂	(19)
一、无机处理剂	(20)
二、有机处理剂	(24)
复习思考题	(39)
第三章 泥浆的性能	(40)
第一节 泥浆的流变性	(40)
一、流体的基本流型及其特点	(40)
二、泥浆流变参数	(44)
三、流变参数的测量与计算	(47)
四、泥浆流变性与钻孔作业的关系	(50)
第二节 泥浆的滤失和润滑性能	(56)
一、泥浆失水量的影响因素	(57)
二、泥浆滤失性能的调整与控制	(61)
三、泥浆的润滑性能	(63)
第三节 泥浆其他性能及测量方法	(68)
一、泥浆密度	(69)

二、泥浆的 pH 值	(69)
三、泥浆含砂量	(70)
四、泥浆固相含量	(71)
五、泥浆中膨润土的含量	(71)
六、泥浆的胶体率和稳定性	(73)
复习思考题	(73)
第四章 水基泥浆	(74)
第一节 细分散泥浆	(74)
一、细分散泥浆的组成	(74)
二、细分散泥浆的特点	(76)
三、泥浆的受侵及其处理	(77)
第二节 粗分散泥浆	(79)
一、钙处理泥浆	(79)
二、盐水泥浆	(85)
第三节 不分散低固相泥浆	(90)
一、概述	(90)
二、聚合物处理剂的主要作用机理	(91)
三、不分散低固相泥浆的配制与维护	(93)
四、聚丙烯酰胺泥浆	(94)
第四节 抗高温深井水基泥浆	(95)
一、深井水基泥浆应具备的特点	(95)
二、高温对深井水基泥浆性能的影响	(95)
三、抗高温泥浆处理剂的作用原理	(99)
四、常用抗高温泥浆体系及其应用	(101)
第五节 其他类型泥浆	(104)
一、乳化泥浆	(104)
二、泡沫泥浆	(105)
复习思考题	(107)
第五章 小口径金刚石钻进用泥浆	(108)
第一节 概述	(108)
第二节 乳状冲洗液	(109)
一、表面活性剂类型	(109)
二、表面活性剂溶液的基本性质和功用	(113)
第三节 乳状液的配制及物化性能测定	(117)
一、乳状液的配制	(117)
二、乳状液的物化性能测定	(119)
第四节 乳状液的破乳问题	(120)
一、乳状液的破乳原因	(120)
二、解决破乳的措施	(121)
复习思考题	(122)
第六章 泥浆在复杂钻孔情况下应用	(123)
第一节 孔壁不稳定的机理和对策	(123)

一、孔壁不稳定地层的类型与孔壁不稳定现象	(123)
二、孔壁不稳定的原因分析	(124)
三、稳定孔壁的技术措施及其确定方法	(129)
第二节 防漏与堵漏	(132)
一、钻孔漏失发生的原因及分类	(132)
二、确定漏层的方法	(135)
三、钻孔漏失的预防	(135)
四、钻孔漏失的处理	(136)
第三节 水泥护壁堵漏	(140)
一、堵漏对水泥性能的要求	(141)
二、钻孔护壁堵漏常用的水泥与外加剂	(142)
三、灌注水泥的准备工作	(145)
四、钻孔水泥浆灌注工艺	(146)
复习思考题	(148)
第七章 岩土钻挖稳定液技术	(149)
第一节 概述	(149)
第二节 反循环泥浆	(151)
第三节 泥浆护壁挖槽法	(152)
一、槽壁的稳定和放置时间	(153)
二、槽壁泥浆的使用方法	(153)
三、对稳定液的要求	(153)
四、泥浆材料的选择	(155)
五、基本配合比的确定	(155)
六、泥浆的制备	(156)
七、泥浆的再生处理与质量控制	(158)
复习思考题	(158)
第八章 固相控制与废浆处理	(159)
第一节 泥浆中的固相	(159)
一、固相对钻速的影响	(159)
二、固相对泥饼的影响	(160)
三、固相对循环系统的影响	(160)
四、固相含量与含砂量的测定	(160)
第二节 泥浆的固相控制技术	(161)
一、降低固相含量的方法	(161)
二、净化的方法	(161)
第三节 固相控制设备	(164)
第四节 工程废浆处理	(169)
复习思考题	(171)
参考文献	(172)

第一章 钻探与岩土工程泥浆概述

第一节 泥浆的功用、类型和组成

一、泥浆的功用

泥浆又叫冲洗介质或冲洗液，是指钻进过程中以其多种功能满足钻孔工作需要的各种循环流体的总称。泥浆的循环是通过泥浆泵来维持的。从泥浆泵排出的高压泥浆经过地面高压管汇、立管、水龙带、水龙头、方钻杆、钻杆、钻铤到钻头，从钻头水眼或水口处流出，然后再沿钻柱与孔壁（或套管）形成的环形空间向上流动，在到达地面后经排出管线流入泥浆池，再经各种固控设备进行处理后返回水源箱，最后进入泥浆泵循环再用。泥浆流经的各种管件、设备构成了一整套泥浆循环系统。

泥浆工艺技术是钻孔工程的重要组成部分。随着钻孔难度的逐渐增大，该项技术在确保安全、优质、快速钻进中起着越来越重要的作用。泥浆最基本的功用有以下几点。

1. 携带和悬浮岩屑

泥浆首要和最基本的功用，就是通过其本身的循环，将孔底被钻头破碎的岩屑携带至地面，以保持钻孔清洁，使起下钻畅通无阻，并保证钻头在孔底始终接触和破碎新的岩层，不造成重复切削，保持安全快速钻进。在接单根、起下钻或因故停止循环时，泥浆又将孔内的岩粉悬浮在泥浆中，使岩粉不会很快下沉，防止沉砂卡钻等情况的发生。

2. 稳定孔壁和平衡地层压力

孔壁稳定、钻孔规则是实现安全、优质、快速钻进的基本条件。性能良好的泥浆应能借助于液相的滤失作用，在孔壁上形成一层薄而韧的泥饼，以稳固已钻开的地层并阻止液相侵入地层，减弱泥页岩水化膨胀和分散的程度。与此同时，在钻进过程中需要通过不断调节泥浆密度，使液柱压力能够平衡地层压力，从而防止钻孔坍塌等孔内复杂情况的发生。

3. 冷却和润滑钻头、钻具

在钻进中钻头一直在高温下旋转并破碎岩层，产生很多热量，同时钻具也不断地与孔壁摩擦而产生热量。正是通过泥浆不断地循环作用，将这些热量及时吸收，然后带到地面释放，从而起到冷却钻头、钻具，延长其使用寿命的作用。由于泥浆的存在，使钻头和钻具均在液体中旋转，因此，在很大程度上降低了摩擦阻力，起到了很好的润滑作用。

4. 传递水动力

冲洗液在钻头水眼或水口处以极高的流速冲洗孔底，从而提高了钻进速度和破岩效率。高压喷射钻孔正是利用了这一原理，即采用高泵压钻进，使冲洗液所形成的高速射流对孔底产生强大的冲击力，从而显著地提高了钻速。如螺杆钻，孔底液动冲击器就是利用冲洗液作为动力传递介质。在使用涡轮钻具钻进时，冲洗液由钻杆内以较高流速流经涡轮

叶片，使涡轮旋转并带动钻头破碎岩石。

5. 其他

除保护岩矿层（目标层外），还有作为孔底信号通道（事故预兆，金刚石绳索取心钻进中的内管到位报信，岩心堵塞报警），还有软化岩石的作用。

但是，钻孔实践表明，作为一种优质的冲洗液，仅做到以上几点是不够的。为了防止和尽可能多的减少对钻孔目的层的损害，现代钻孔技术还要求冲洗液必须与所钻遇的目的层相匹配，满足保护目的层的要求；为了满足地质上的要求，所使用的冲洗液必须有利于地层测试，不影响对地层的评价；此外，冲洗液还应对钻孔人员及环境不发生伤害和污染，对孔内工具及地面装备不腐蚀或尽可能减轻腐蚀。

一般情况下，冲洗液成本只占钻孔总成本的 7% ~ 10%，然而先进的冲洗液技术往往可以成倍地节约钻进时间，从而大幅度地降低钻孔成本，带来十分可观的经济效益。

二、泥浆的类型

随着泥浆工艺技术的不断发展，泥浆的种类越来越多。目前，国内外对泥浆有各种不同的分类方法。其中较简单的分类方法有以下几种：

按其密度大小，可分为非加重泥浆和加重泥浆；

按与粘土水化作用的强弱，可分为非抑制性泥浆和抑制性泥浆；

按其固相含量的不同，将固相含量较低的称为低固相泥浆，基本不含固相的称为无固相泥浆。

然而，一般所指的分类方法是按泥浆中流体介质和体系的组成特点来进行分类的。根据流体介质的不同，总体上分为水基泥浆、油基泥浆和气体型钻孔流体三种类型，近期又出现了一类合成基泥浆。更具体一些，可分为 7 种类型（图 1-1）。

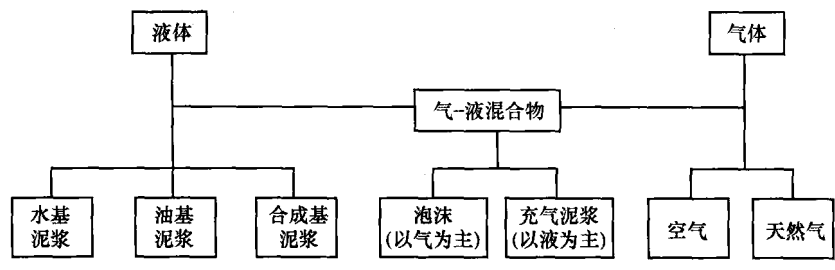


图 1-1 泥浆的分类

由于水基泥浆在实际应用中一直占据着主导地位，根据体系在组成上的不同又将其分为若干种类型。下面是在参考国外泥浆分类标准的基础上，在国内得到认可的各种泥浆类型。

1. 分散泥浆

分散泥浆是指用淡水、膨润土和各种对粘土与岩粉起分散作用的处理剂（简称为分散剂）配制而成的水基泥浆。它是一类使用历史较长、配制方法较简单且配制成本较低的常用泥浆。其主要特点是：

- 1) 可容纳较多的固相，较适于配制高密度泥浆。

2) 容易在孔壁上形成较致密的泥饼, 故其失水量一般较低。

3) 某些分散泥浆, 如以磺化栲胶、磺化褐煤和磺化酚醛树脂作为主处理剂的三磺泥浆具有较强的抗热能力, 适于在深井和超深井中使用。但与其他泥浆类型相比, 也有一些缺点。除抑制性和抗污染能力较差外, 还因其体系中固相含量高, 故对提高钻速和保护矿层均有不利的影响。

2. 钙处理泥浆

钙处理泥浆的组成特点是体系中同时含有一定浓度 (质量浓度) 的 Ca^{2+} 和分散剂。 Ca^{2+} 通过与水化作用很强的钠膨润土发生离子交换, 使一部分钠膨润土转变为钙膨润土, 从而减弱水化的程度。分散剂的作用是防止 Ca^{2+} 引起体系中的粘土颗粒絮凝过度, 使其保持在适度絮凝的状态, 以保证泥浆具有良好、稳定的性能。这类泥浆的特点是, 抗盐、钙污染的能力较强; 并且对所钻地层中的粘土有抑制其水化分散的作用, 因此, 可在一定程度上控制页岩坍塌和井径扩大, 同时能减轻对目的层的损害。

3. 盐水泥浆

盐水泥浆是用盐水 (或海水) 配制而成的。在含盐量从 1% (Cl^- 质量浓度为 6000 mg/L) 直至饱和 (Cl^- 质量浓度为 189000 mg/L) 之前的整个范围内都属于此种类型。盐水泥浆也是一类对粘土水化有较强抑制作用的泥浆。

4. 饱和盐水泥浆

饱和盐水泥浆是指泥浆中 NaCl 含量达到饱和时的盐水泥浆体系。它可以用饱和盐水配成, 亦可先配成泥浆再加盐至饱和。饱和盐水泥浆主要用于其他水基泥浆难以对付的大段岩盐层和复杂的盐膏层。

5. 聚合物泥浆

聚合物泥浆是以某些具有絮凝和包被作用的高分子聚合物作为主处理剂的水基泥浆。由于这些聚合物的存在, 体系所包含的各种固相颗粒可保持在较粗的粒度范围内, 与此同时所钻出的岩屑也因及时受到包被保护而不易分散成微细颗粒。其主要优点表现在:

1) 泥浆密度和固相含量低, 因而钻进速度可明显提高, 对矿层的损害程度也较小。

2) 剪切稀释特性强。在一定泵排量下, 环空流体的粘度、切力较高, 因此, 具有较强的携带岩屑的能力; 而在钻头水眼处的高剪切速率下, 流体的流动阻力较小, 有利于提高钻速。

3) 聚合物处理剂具有较强的包被和抑制分散的作用, 因此, 有利于保持孔壁稳定。自 20 世纪 70 年代以来, 该类泥浆一直在国内外得到十分广泛的应用, 并且其工艺技术不断得到完善和发展。

6. 钾基聚合物泥浆

钾基聚合物泥浆是一类以各种聚合物的钾 (或铵、钙) 盐和 KCl 为主处理剂的防塌泥浆。在各种常见无机盐中, 以 KCl 抑制粘土水化分散的效果为最好, 而聚合物处理剂的存在使该类泥浆具有聚合物泥浆的各种优良特性。因此, 在钻遇泥页岩地层时, 使用它可以取得比较理想的防塌效果。

7. 油基泥浆

以油 (通常使用柴油或矿物油) 作为连续相的泥浆称为油基泥浆。目前含水量在 5% 以下的普通油基泥浆已较少使用, 而主要使用油水比在 (50 ~ 80):(50 ~ 20) 范围内的油

包水乳化泥浆。与水基泥浆相比较，油基泥浆的主要特点是能抗高温，有很强的抑制性和抗盐、钙污染的能力，润滑性好，并可有效地减轻对矿层的损害等。因此，该类泥浆已成功应用于深井、超深井、大位移井、水平井和各种复杂地层中。但另一方面，由于其配制成本较高，以及使用时会对环境造成一定污染，因而，其应用受到一定的限制。

8. 合成基泥浆

合成基泥浆是以合成的有机化合物作为连续相，盐水作为分散相，并含有乳化剂、降滤失剂、流型改进剂的一类新型泥浆。由于使用无毒且能够生物降解的非水溶性有机物取代了油基泥浆中通常使用的柴油，因此，这类泥浆既保持了油基泥浆的各种优良特性，同时又能大大减轻泥浆排放时对环境造成的不良影响，尤其适用于海上钻探。

9. 气体型钻孔流体

气体型钻孔流体主要适用于钻进低压矿层、易漏失地层以及某些稠油油层。其特点是密度低，钻速快，可有效保护矿层，并能有效防止钻孔漏失等复杂情况的发生。通常又将气体型钻孔流体分为以下4种类型：

1) 空气钻孔流体。即钻孔中使用干燥的空气作为循环流体。其技术关键在于必须有足够大的注入压力，以保证能达到将全部岩粉从孔底携带至地面的环空流速。

2) 雾状钻孔流体。即少量液体分散在空气介质中所形成的雾状流体。它是空气钻孔流体与泡沫钻孔流体之间的一种过渡形式。

3) 泡沫钻孔流体。钻孔中使用的泡沫是一种将气体介质（一般为空气）分散在液体中，并添加适量发泡剂和稳定剂而形成的分散体系。

4) 充气泥浆。有时为了降低泥浆密度，将气体（一般为空气）均匀地分散在泥浆中，便形成充气泥浆。显然，混入的气体越多，泥浆密度越低。

10. 保护目的层的泥浆

保护目的层的泥浆是指在矿层中钻进时使用的一类泥浆。当一口井钻达其目的层时，所设计的泥浆不仅应能满足钻孔工程和地质的要求，而且还应满足保护矿层的需要。比如，泥浆密度和流变参数应调整至合理范围，失水量应尽可能低，所选用的处理剂应与矿层相匹配，以及选用适合的暂堵剂等。

本教材主要讲解地质岩心钻探使用的泥浆，其他领域使用的泥浆不作展开介绍。

三、泥浆的组成

水基泥浆是由膨润土、水（或盐水）、各种处理剂、加重材料以及岩粉所组成的多相分散体系。其中膨润土和岩粉的平均密度约为 2.6 g/cm^3 ，通常称为低密度固相；而加重材料常被称为高密度固相。最常用的加重材料为重晶石，其密度为 4.2 g/cm^3 。由于在水基泥浆中膨润土是最常用的配浆材料，在其中主要起提粘、降失水和造壁等作用，因而又将它和重晶石等加重材料称为有用固相，而将岩粉称为无用固相。在泥浆中，应通过各种固控措施尽量减少岩粉的含量，膨润土的用量也应以够用为度，不宜过大，否则会造成泥浆黏度、切力过高，还会严重影响机械钻速，并对保护矿层产生不利影响。

油基泥浆是以水滴为分散相，油为连续相，并添加适量乳化剂、润湿剂、亲油的固体处理剂（有机土、氧化沥青等）、石灰和加重材料等所形成的乳状液体系。

第二节 泥浆的设计与配制

一、泥浆的一般设计方法

较全面的泥浆设计的基本流程是：设计泥浆的密度、流变性、降失水性等主要技术指标；确定泥浆的胶体率、允许含砂量、固相含量、pH 值、润滑性、渗透率、泥皮质量等重要参数；选择造浆粘土和处理剂；进行泥浆处理剂配方设计；计算泥浆材料用量；确定泥浆的制备方法；拟订泥浆循环、净化、管理措施。一般可以按照以下设计程序进行泥浆的全面设计。

1) 按平衡地层压力的要求计算泥浆的密度 γ ，即： $\gamma = P_c / 9.8 h$ 或 $\gamma = P_0 / 9.8 h$ 。 P_c 、 P_0 (kPa) 分别为孔深 h (m) 处的地层侧压力和地层空隙流体压力。究竟是按 P_c 还是按 P_0 计算，要视实际情况下平衡哪一种压力更为重要来定。如果两者都需要平衡，就应该分别计算出两种结果，权衡出介于两者之间的某值。一般钻孔泥浆的密度在 $1.02 \sim 1.40 \text{ g/cm}^3$ 之间。

2) 考虑悬排钻屑、护壁堵漏的要求确定泥浆的流变性。流变性的指标主要是粘度 η 和切力 τ 。 η 和 τ 的调整范围很宽，一般 η 的范围在 $10 \sim 100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 之间， τ 的范围在 $0 \sim 20 \text{ Pa}$ 之间，应视不同钻孔情况具体确定。另外，在一些情况下，还要考虑泥浆的剪切稀释作用和触变性。

3) 泥浆的其他设计指标的参考范围。失水量一般应不大于 $15 \text{ mL}/30 \text{ min}$ ，含砂量不大于 8% ，胶体率不小于 90% ，pH 值视不同泥浆在 $6 \sim 11$ 之间变化，润滑系数必要时应控制在 $0.02 \sim 0.5$ 。

各种钻进情况下的钻进目的、地层特点、钻进工艺方法等差异甚大，因而对钻孔泥浆性能等有明显不同的要求，设计重点也因此而不同。例如，在钻屑粗大及孔壁松散的地层中，泥浆的粘度和切力等流变性指标成为设计重点；在稳定的坚硬岩中钻进，泥浆设计的重点是针对钻头的冷却和钻具的润滑，而此时护壁和排粉等则处于次要位置。又如在遇水膨胀塌孔的地层中钻进，泥浆的设计重点则应放在降失水护壁上；在对压力敏感的地层中，泥浆的密度设计又显得尤为重要。因此，针对特定的钻进情况，在全面设计中找出相应的设计要点，是做好泥浆设计的关键所在。

在泥浆性能设计中可能会遇到一些相互矛盾的情况，满足一些设计指标时，另一些指标则得不到满足。对此，应该抓住主要问题，综合兼顾全面性能。

在一些要求不高的场合，可以酌情精简对泥浆性能的设计，适当放宽对一些相对次要指标的要求，以求得最终的低成本和高效率。

二、泥浆材料用量计算

1. 泥浆总体积的计算

所需泥浆总量 V 是钻孔内泥浆量 V_1 、地表循环净化系统泥浆量 V_2 、漏失及其他损耗量 V_3 的总和：

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (1-1)$$

其中钻孔内泥浆量可近似为钻孔的体积。

地表循环净化系统泥浆量为泥浆池、沉淀池、循环槽和地面管汇的体积之和。漏失及其他损耗量,应根据实际情况确定。

2. 粘土粉用量计算

根据土、水、浆的体积、重量和密度之间的关系进行推导,配制 1 m^3 体积的泥浆所需粘土量 q (kg) 按下式计算:

$$q = \frac{\gamma_1(\gamma_2 - \gamma_3)}{\gamma_1 - \gamma_3} \times 1000 \quad (1-2)$$

式中: γ_1 为粘土的密度, $2.6 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$; γ_2 为泥浆的密度, g/cm^3 ; γ_3 为水的密度, g/cm^3 。

3. 配浆用水量计算

配制 1 m^3 体积的泥浆所需水量 V_w (L) 为

$$V_w = 1000 - \frac{q}{\gamma_1} \quad (1-3)$$

4. 增加比重加土(或重晶石)量的计算

配制加重泥浆时,加重 1 m^3 泥浆所需加重剂的量 W (kg) 为

$$W = \frac{\gamma_B(\gamma_2 - \gamma_0)}{\gamma_B - \gamma_2} \times 1000 \quad (1-4)$$

式中: γ_B 为加重剂的密度, g/cm^3 ; γ_2 为加重泥浆的密度, g/cm^3 ; γ_0 为原浆的密度, g/cm^3 。

5. 降低泥浆密度所需加水量的计算

降低泥浆密度所需加水量 V_w (m^3) 为

$$V_w = \frac{V(\gamma_1 - \gamma_2)}{\gamma_2 - \gamma_3} \quad (1-5)$$

式中: V 为原浆体积, m^3 ; γ_1 为原浆密度, g/cm^3 ; γ_2 为加水稀释后的泥浆密度, g/cm^3 ; γ_3 为水的密度, g/cm^3 。

6. 泥浆处理剂的用量计算

总的来看,处理剂在泥浆中的加量较少,按体积含量计一般只占泥浆总体积的 $0.1\% \sim 1\%$ 。具体数值由不同的配方决定。值得注意的是要澄清处理剂的加量单位,粉剂一般是以单位体积泥浆中加入的重量来计,而液剂则是以单位体积泥浆中加入的体积量来计。在一些特殊情况下,还有以单位粘土粉重量中加入多少处理剂来计算。

三、泥浆的配制

无论是井场制备或泥浆站集中制备供应各井场,制备泥浆的设备有两种:一是用泥浆搅拌机(卧式或立式的);一是用水力搅拌。

勘探岩心钻探用的泥浆搅拌机,卧式的容量一般为 $0.3 \sim 0.5 \text{ m}^3$;立式的一般为 $0.5 \sim 1 \text{ m}^3$ (图 1-2)。搅拌机速度一般为 $80 \sim 200 \text{ r/min}$ ①。

使用粘土粉造浆时,也可以采用水力搅拌器(图 1-3)。粘土粉加入漏斗中,并利用

① $1 \text{ r/min} = \frac{\pi}{30} \text{ rad/s}$ 。

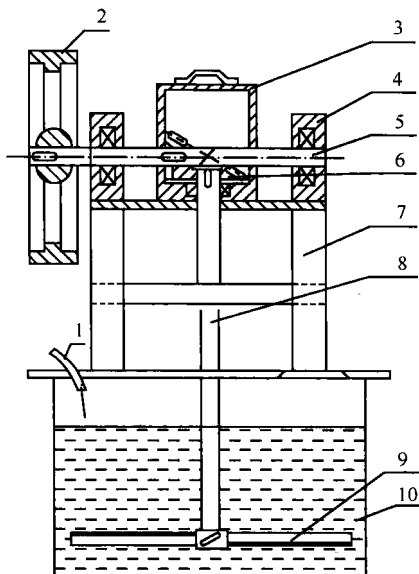


图 1-2 泥浆搅拌机

1—输水管；2—工作轮；3—齿轮箱；4—轴承；5—传动轴；
6—伞齿轮；7—机架；8—搅拌轴；9—搅叶；10—搅拌桶

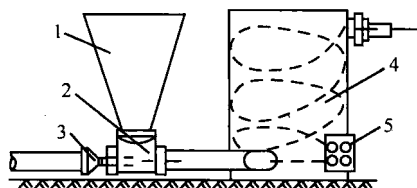


图 1-3 泥浆水力搅拌器

1—漏斗；2—三通管；3—喷嘴；
4—容器；5—钢板

水泵排出管的液流与粘土粉在混合器中混合，混合液在混合器中沿螺旋线上升至容器上部，输出泥浆。反复循环几次后，便可配得所需性能的泥浆。

为使泥浆有较好的性能，用粘土粉配得的泥浆最好在储浆池中陈化一天，然后放入循环系统中，由水泵送入孔内使用。钻孔和岩土工程中的许多辅助性工作（如工程基建等）也需要用到各种浆材。



复习思考题

1. 泥浆的种类有哪些？
2. 试述泥浆的组成与功用。
3. 泥浆配制设备及材料有哪些？

第二章 配浆材料及处理剂

第一节 粘土

粘土作为泥浆的重要组成成分，其晶体构造与性质对泥浆性能有十分重要的影响。钻进过程中孔眼的稳定性、矿层的保护均与地层中粘土矿物类型和特性密切相关。粘土主要是由粘土矿物（含水的铝硅酸盐）组成的。粘土中除含有粘土矿物外，还含有不定量的非粘土矿物，如石英、长石等。许多粘土还含有非晶质的胶体矿物，如蛋白石、氢氧化铁、氢氧化铝等。有人把任何细粒的、天然的、土状的物料都称为粘土，这种提法并不确切。大多数粘土颗粒的粒径小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ ，它们在水中有分散性、带电性、离子交换以及水化性，这些性能都是在处理与配制泥浆时需要考虑的因素。

一、粘土矿物的分类和化学组成

1. 粘土矿物的分类

粘土矿物的分类方法很多，现根据其单元晶层构造的特征进行分类，见表 2-1。表 2-1 的资料说明，粘土矿物按两种晶片的配合比例可分为 1:1 型（一层硅氧四面体晶片与一层铝氧八面体晶片相结合构成单元晶层）、2:1 型（两层硅氧四面体晶片中间夹一层铝氧八面体晶片构成单元晶层）、2:2 型（硅氧四面体晶片与铝（镁）氧八面体晶片交替排列的四层晶片构成单元晶层），以及层链状结构（硅氧四面体组成的六角环依上下相反方向对列）等几类。

表 2-1 粘土矿物的晶体构造分类

单元晶层构造特征	粘土矿物族	粘土矿物
1:1	高岭石族	高岭石、地开石、珍珠陶土等
	埃洛族	埃洛石等
2:1	蒙皂石族	蒙脱石、拜来石、皂石、蛭石等
	水云母族	伊利石、海绿石等
2:2	绿泥石族及其他	各种绿泥石等
层链状结构	海泡石族	海泡石、凹凸棒石、坡缕石

2. 粘土矿物的化学组成

粘土中常见的粘土矿物有 3 种：高岭石、蒙脱石（也叫微晶高岭石、胶岭石等）、伊利石（也称水云母）。它们的化学组成见表 2-2。

表 2-2 几种主要粘土矿物的化学组成

粘土矿物名称	化 学 组 成	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
高岭石	Al ₄ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈ 或 2Al ₂ O ₃ · 4SiO ₂ · 4H ₂ O	2:1
蒙脱石	(Na, Ca) _{0.33} (Al, Mg) ₂ [(Si, Al) ₄ O ₁₀](OH) ₂ · nH ₂ O	4:1
伊利石	K _{<1} Al ₂ [(Al, Si)Si ₃ O ₁₀](OH) ₂ · nH ₂ O	4:1

从表 2-2 中可以看出，不同类型的粘土矿物其化学成分是不同的。如高岭石，其氧化铝含量较高，氧化硅含量较低；而蒙脱石的氧化铝含量较低，氧化硅含量较高；伊利石的特点是含有较多的氧化钾。上述各类粘土矿物化学成分的特点是用化学分析方法鉴别粘土矿物类型的依据。

二、粘土的电性

1. 概述

从电泳现象得到证明，粘土颗粒在水中通常带有负电荷。粘土的电荷是使粘土具有一系列电化学性质的基本原因，同时对粘土的各种性质都发生影响。例如，粘土吸附阳离子的多少决定于其所带负电荷的数量。此外，泥浆中的无机、有机处理剂的作用，泥浆胶体的分散、絮凝等性质，也都受到粘土电荷的影响。

粘土晶体因环境的不同或环境的变化，可能带有不同的电性，或者说带有不同的电荷。粘土晶体的电荷可分为永久负电荷、可变负电荷、正电荷 3 种，它们产生的原因如下。

(1) 永久负电荷

永久负电荷是由于粘土在自然界形成时发生晶格取代作用所产生的。例如，粘土的硅氧四面体中四价的硅被三价的铝取代，或者铝氧八面体中三价的铝被二价的镁、铁等取代，粘土就产生了过剩的负电荷。这种负电荷的数量取决于晶格取代作用的多少，而不受 pH 值的影响。因此，这种电荷被称为永久负电荷。不同的粘土矿物晶格取代情况是不同的。蒙脱石的永久负电荷主要来源于铝氧八面体中的一部分铝离子被镁、铁等二价离子所取代，仅有少部分永久负电荷是由于硅氧四面体中的硅被铝取代所造成的，一般不超过 15%。蒙脱石每个晶胞有 0.25 ~ 0.6 个永久负电荷。伊利石和蒙脱石不同，它的永久负电荷主要来源于硅氧四面体晶片中的硅被铝取代，大约有 1/6 的硅被铝取代，每个晶胞中约有 0.6 ~ 1 个永久负电荷。高岭石的晶格取代很微弱，由此而产生的永久负电荷少到难以用化学分析法来证明。由此看出，伊利石的永久负电荷最多，高岭石的永久负电荷最少，蒙脱石居中。粘土的永久负电荷大部分分布在粘土晶层的层面上。

(2) 可变负电荷

粘土所带电荷的数量随介质的 pH 值改变而改变，这种电荷称为可变负电荷。产生可变负电荷的原因比较复杂，可能有以下几种原因：在粘土晶体端面上与铝连接的 OH 基中的 H 在碱性或中性条件下解离；粘土晶体的端面上吸附了 OH⁻、SiO₃²⁻ 等无机阴离子或吸附了有机阴离子聚电解质等。

粘土永久负电荷与可变负电荷的比例与粘土矿物的种类有关，蒙脱石的永久负电荷最高，约占负电荷总和的 95%，伊利石约占 60%，高岭石只占 25%。

(3) 正电荷

不少研究者指出，当粘土介质的 pH 值低于 9 时，粘土晶体端面上带正电荷。兹逊 (P. A. Thiessen) 用电子显微镜照相观察到高岭石边角上吸附了负电性的金溶胶，由此证明了粘土端面上带有正电荷。粘土端面上带正电荷的原因多数人认为是由于裸露在边缘上的铝氧八面体在酸性条件下从介质中解离出 OH^- 。

粘土的正电荷与负电荷的代数和即为粘土晶体的净电荷数。由于粘土的负电荷一般多于正电荷，因此，粘土一般都带负电荷。

2. 影响粘土阳离子交换容量大小的因素

影响粘土阳离子交换容量大小的因素有 3 方面：粘土矿物的本性，粘土的分散度，分散介质的酸碱度。

(1) 粘土矿物的本性

若粘土矿物的化学组成和晶体构造不同，阳离子交换容量会有很大差异。因为引起粘土阳离子交换的因素是晶格取代和氢氧根中的氢的解离所产生的负电荷，其中晶格取代愈多的粘土矿物，其阳离子交换容量也愈大。

(2) 粘土的分散度

当粘土矿物化学组成相同时，其阳离子交换容量随分散度（或比表面）的增加而变大。特别是高岭石，其阳离子交换主要是由于裸露的氢氧根中氢的解离产生电荷所引起的，因而颗粒愈小，露在外面的氢氧根愈多，交换容量显著增加，见表 2-3。蒙脱石的阳离子交换主要是由于晶格取代所产生的电荷，由于裸露的氢氧根中氢的解离所产生的负电荷所占比例很小，因而受分散度的影响较小。

表 2-3 高岭石的阳离子交换容量与颗粒大小的关系

颗粒大小/ μm	40 ~ 20	10 ~ 5	4 ~ 2	1 ~ 0.5	0.5 ~ 0.25	0.25 ~ 0.1	0.1 ~ 0.05
$\frac{\text{CEC}}{\text{mmol} \cdot (100 \text{ g } \pm)^{-1}}$	2.4	2.6	3.6	3.8	3.9	5.4	9.5

(3) 溶液的酸碱度

在粘土矿物化学组成和其分散度相同的情况下，在碱性环境中，阳离子交换容量变大，见表 2-4。

表 2-4 酸碱条件对阳离子交换容量的影响

矿物名称	CEC	
	pH = 2.5 ~ 6	pH > 7
高岭石	4	10
蒙脱石	95	100

随介质 pH 值增高，阳离子交换容量增加的原因是：铝氧八面体中 Al—O—H 键是两性的，在强酸性环境中氢氧根易解离，土表面可带正电荷；在碱性环境中氢易解离，使土表面负电荷增加；此外，溶液中氢氧根增多，它以氢键吸附于粘土表面，使土表面的负电荷增多，从而增加粘土的阳离子交换容量。

粘土的阳离子交换容量及吸附的阳离子种类对粘土的胶体活性影响很大。例如，蒙脱石的阳离子交换容量大，膨胀性也大，在低浓度下就形成稠的悬浮体，特别是钠蒙脱石，水化膨胀性更高；而高岭石的阳离子交换容量很低，惰性较强。

三、粘土的水化作用

1. 粘土矿物的水分

粘土矿物的水分按其存在的状态可以分为结晶水、吸附水、自由水等3种类型。

1) 结晶水。这种水（矿物中铝氧八面体中的 OH^- 层）是粘土矿物晶体构造的一部分，只有温度高于 300°C 以上时，结晶受到破坏，这部分水才能释放出来。

2) 吸附水。由于分子间引力和静电引力，具有极性的水分子可以吸附到带电的粘土表面上，在粘土颗粒周围形成一层水化膜，这部分水随粘土颗粒一起运动，所以也称为束缚水。

3) 自由水。这部分水存在于粘土颗粒的孔穴或孔道中，不受粘土的束缚，可以自由地运动。

2. 影响粘土水化膨胀的因素

1) 因粘土晶体的部位不同，水化膜的厚度也不相同。粘土晶体所带的负电荷大部分都集中在层面上，于是吸附的阳离子也多。粘土的表面水化膜主要是阳离子水化造成的。在粘土晶体的端面上带电量较少，故水化膜薄。总之，粘土晶体表面的水化膜厚度是不均匀的，其层面上厚，端面上薄。

2) 粘土矿物不同，水化作用的强弱也不同。蒙脱石的阳离子交换容量高，水化最好，分散度也最高。而高岭石阳离子交换容量低，水化差，分散度也低，颗粒粗，是非膨胀性矿物。伊利石由于晶层间 K^+ 的特殊作用也是非膨胀性矿物。

3) 因粘土吸附的交换性阳离子不同，其水化程度有很大差别。如钙蒙脱石水化后其晶层间距最大仅为 $17 \times 10^{-1} \text{ nm}$ ，而钠蒙脱石水化后其晶层间距可达 $17 \times 10^{-1} \sim 40 \times 10^{-1} \text{ nm}$ ，如图2-1所示。所以为了提高膨润土的水化性能，一般都需要将其预水化，使钙膨润土转变为钠膨润土。

不同的交换性阳离子引起水化程度不同的原因是：粘土单元晶层间存在着两种力，一种是层间阳离子水化产生的膨胀力和带负电荷的晶层之间的斥力；另一种是粘土单元晶层-层间阳离子-粘土单元晶层之间的静电引力。粘土膨胀分散程度取决于这两种力的比例关系。如果粘土单元晶层-层间阳离子-粘土单元晶层之间的静电引力大于晶层间的斥力，粘土就只能发生晶格膨胀（如钙土）；与此相反，如果晶层之间产生的斥力大到足以破坏单元晶层-层间阳离子-粘土单元晶层之间的静电引力，粘土便发生渗透膨胀，形成扩散双电层，双电层斥力使单元晶层分离开，如钠土。因此，钠土是配制泥浆的理想材料。

四、粘土胶体化学基础

（一）概述

1. 关于胶体化学的几个基本概念

（1）相和相界面

相是指物质的物理性质和化学性质都完全相同的均匀部分。体系中有两个或两个以上

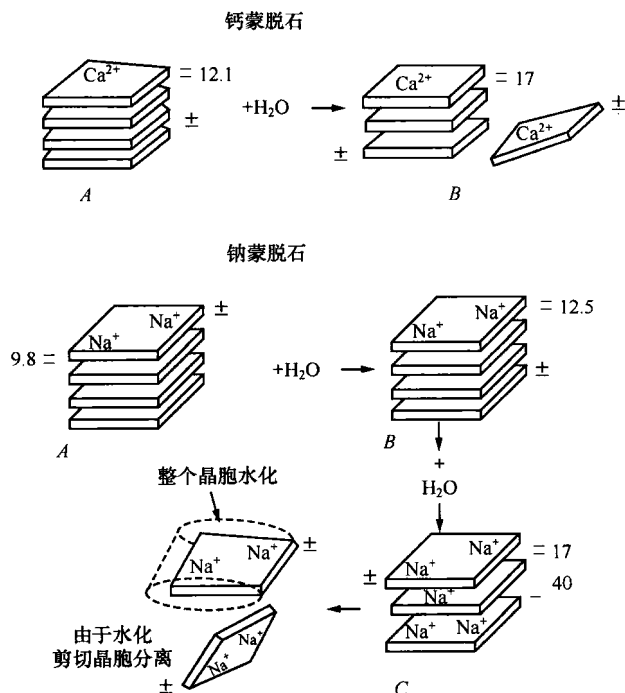


图 2-1 钠土与钙土水化区别示意图

的相，称为多相体系。相与相之间的接触面称为相界面。

(2) 分散相与分散介质

在多相分散体系中，被分散的物质称为分散相。包围分散相的另一相，称为分散介质。例如，水基泥浆中，粘土颗粒分散在水中，粘土为分散相，水为分散介质。

(3) 分散度和比表面

分散度是某一分散程度的量度，通常用分散相颗粒平均直径或长度的倒数来表示。如果用 D 表示分散度，用 a 表示颗粒的平均直径或长度，则分散度可表示为： $D = 1/a$ 。比表面是物质分散度的另一种量度，其数值等于全部分散相颗粒的总面积与总质量（或总体积）之比。可表示为

$$S_{\text{比}} = S/V(\text{m}^{-1}) \quad (2-1)$$

或

$$S_{\text{比}} = S/m (\text{m}^2/\text{kg}) \quad (2-2)$$

式中： $S_{\text{比}}$ 为比表面积，单位为 m^{-1} 或 m^2/kg ； S 为总表面积， m^2 ； V 为总体积， m^3 ； m 为总质量， kg 。

物质的颗粒愈小，分散度愈高，比表面愈大，界面能与界面性质就会发生惊人的变化。所有颗粒分散体系的共性是具有极大的比表（界）面。

按分散度不同，可将分散体系分为细分散体系与粗分散体系。胶体实际上是细分散体系，其分散相的比表面大于等于 $10^4 \text{ m}^2/\text{kg}$ ，其颗粒长度在 $1 \text{ nm} \sim 1 \text{ }\mu\text{m}$ 之间。悬浮体则属于粗分散体系，其比表面大致不超过 $10^4 \text{ m}^2/\text{kg}$ ，分散相的颗粒直径在 $1 \sim 40 \text{ }\mu\text{m}$ 之间。泥浆是复杂的胶体分散体系。水基泥浆基本上是溶胶和悬浮体的混合物，本书中统称为胶体

分散体系。

(4) 吸附作用

物质在两相界面上自动浓集（界面浓度大于内部浓度）的现象，称为吸附。被吸附的物质称为吸附质，吸附吸附质的物质称为吸附剂。按吸附的作用力性质不同，可将吸附分为物理吸附和化学吸附两类。仅由范德华引力引起的吸附，为物理吸附。这类吸附一般无选择性，吸附热较小，容易脱附。若吸附质与吸附剂之间的作用力为化学键力，这类吸附为化学吸附。化学吸附具有选择性，吸附热较大，不易脱附。

2. 沉降与沉降平衡

泥浆中的粘土粒子，在重力场的作用下会沉降。由于粒子沉降，下部的粒子浓度增加，上部的粒子浓度低，破坏了体系的均匀性。这样又引起了扩散作用，即下部较浓的粒子向上运动，使体系浓度趋于均匀。因此，沉降作用与扩散作用是矛盾的两个方面。

3. 粘土-水胶体分散体系中的电动现象

胶体的电动现象包括电泳、电渗、流动电位与沉降电位的产生。

电泳是在外加电场作用下，带电的胶体粒子在分散介质中，向与其本身电性的电极移动的现象。电渗是在外加电场作用下，液体对固定的带电荷的固体表面作相对运动的现象。流动电位是不加外电场而用机械力促使两相间发生相对移动时，由于正负电荷分布不均，两相间就会产生电位。沉降电位是由于胶粒的重力而在介质中下沉所产生的电位。

电动现象的存在，说明了胶粒表面总带有电荷。胶粒表面电荷的主要来源有：电离作用、晶格取代作用、离子吸附作用以及未饱和键等。

4. 胶团结构

溶胶粒子大小在 $1\text{ nm} \sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 之间，所以每个溶胶粒子是由许多分子或原子聚集而成的。例如，用稀 AgNO_3 溶液与 KI 溶液制备 AgI 溶胶时，首先形成不溶于水的 AgI 粒子，它是胶团的核心。研究表明， AgI 也具有晶体结构，它的比表面很大，所以，如果 AgNO_3 过量，按法扬斯（Fajans）法则， AgI 易从溶液中选择吸附 Ag^+ 而构成胶核，被吸附的 Ag^+ 称为定势离子。留在溶液中的 NO_3^- 离子，因受胶核的吸引围绕于其周围，称为反离子。但反离子本身有热运动，结果只有部分 NO_3^- 离子靠近胶核，并与被吸附的 Ag^+ 一起组成所谓的“吸附层”，而另一部分 NO_3^- 则扩散到较远的介质中去，形成所谓的“扩散层”。胶核与吸附层 NO_3^- 组成“胶粒”，由胶粒与扩散层中的反离子 NO_3^- 组成“胶团”。胶团分散于液体介质中，便是溶胶。

组成胶核的分子或原子一般为几百至几千个，反离子的电荷数等于定势离子的电荷数，所以胶团是电中性的。在布朗运动中，胶粒运动，而扩散层的反离子则由于与定势离子的静电引力减弱，不跟随胶粒一起运动。因此，胶粒在介质中运动时显出电性。这就是前面已提到过的电泳与电渗现象产生的原因。

5. 粘土-水界面的扩散双电层

(1) 扩散双电层的成因与结构

由于粘土颗粒在碱性水溶液中带负电荷（在端部则多数带正电荷），那么在它周围必然分布着电荷数相等的反离子，于是在固液界面形成双电层。双电层中的反离子，一方面受到固体表面电荷的吸引，靠近固体表面；另一方面，由于反离子的热运动，又有扩散到液相内部去的能力。这两种相反作用的结果，使得反离子扩散地分布在胶粒周围，构成扩

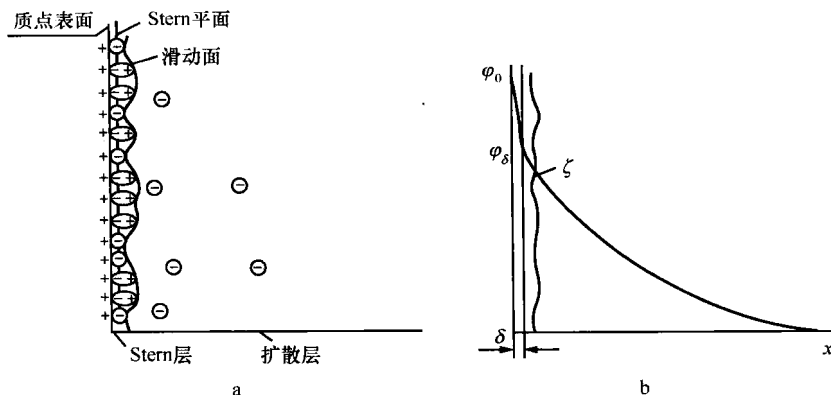


图 2-2 扩散双电层的斯特恩模型

a—扩散双电层模型；b—双电层中的电位

散双电层。在扩散双电层中反离子的分布是不均匀的，靠近固体表面处密度高，形成紧密层（吸附层），如图 2-2 所示。

例如，固体表面吸附的反离子为负离子，随着与界面的距离增大，负离子的分布由多到少，到了正电荷的电力线所不及的距离处，作为反离子的负电荷就等于零。从固体表面到反离子为零处的这一层称为扩散双电层。

反离子是溶剂化（例如水化）的，固体表面上紧密地连接着部分反离子，构成图中的吸附溶剂化层（紧密层）。其余的离子带着其溶剂化壳，扩散地分布到液相中，构成扩散层。当胶粒运动时，界面上的吸附溶剂化层随着一起运动，与外层错开。吸附溶剂化层与外层错开的界面称为滑动面。从吸附溶剂化层界面（滑动面）到均匀液相内的电位，称为电动电位（或 ζ 电位）；从固体表面到均匀液相内部电位，称为热力学电位（ φ_0 ）。热力学电位决定于固体表面所带的总电荷，而电位则取决于固体表面电荷与吸附溶剂化层内反离子电荷之差。

(2) 粘土溶胶、悬浮体双电层的特点

由于粘土矿物晶体层面与端面结构不同，因此，可以形成两种不同的双电层，这就是所谓粘土胶体双电层的两重性。这一点显著区别于其他胶体，下面分别加以讨论：

1) 粘土层面上的双电层结构。正如前面所述，在蒙脱石和伊利石的晶格里，硅氧四面体晶片部分 Si^{4+} 可被 Al^{3+} 取代，铝氧八面体晶片部分 Al^{3+} 被 Mg^{2+} 或 Fe^{2+} 等取代。这种晶格取代作用造成粘土晶格表面上带永久负电荷，于是它们吸附等电量的阳离子（ Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等）。若将这些粘土放到水里，吸附的阳离子便解离，向外扩散，结果形成了胶粒带负电的扩散双电层。粘土表面上紧密地连接着一部分水分子（氢键连接）和部分带水化壳的阳离子，构成吸附溶剂化层；其余的阳离子带着它们的溶剂水扩散地分布在液相中，组成扩散层，如图 2-3 所示。

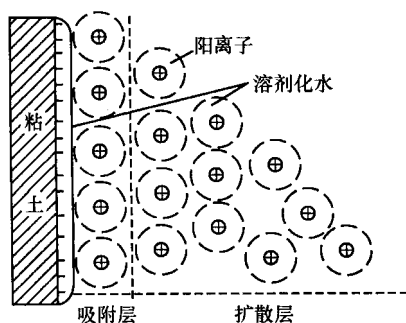


图 2-3 粘土层面上的双电层示意图

2) 粘土端面上的双电层结构。粘土矿晶体端面上裸露的原子结构和层面上不同。在端面, 粘土晶格中铝氧八面体与硅氧四面体原来的键被断开了。八面体处端部表面相当于铝矾土 $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ 颗粒的表面。不少研究者指出, 当介质的 pH 值低于 9 时, 这个表面上 OH^- 解离后会露出带正电的铝离子, 故可以形成正溶胶形式的双电层; 而在碱性介质中, 由于这个表面上的氢解离, 裸露出带负电的表面 ($> \text{Al}-\text{O}^-$)。在这种情况下所形成的双电层, 其电性与层面上相同。

另外, 在粘土硅氧四面体的端面, 通常由于 H^+ 的解离而带负电。但粘土悬浮体中常常有少量 Al^{3+} 存在, 它将被吸附在硅氧四面体的破键处, 从而使之带正电。粘土端面可以形成正溶胶形式的双电层, 这一点与电泳实验中粘土颗粒带负电并不矛盾。因为端面所带的正电荷与粘土层面上带的负电荷数量相比, 是很少的。就整个粘土颗粒而言, 它所带的净电荷是负的, 故在电场的作用下向正极移移。

(3) 双电层中的电位

1) 电动电位 (ζ 电位)。电动电位是扩散双电层的重要特征参数。它是滑动面处与水溶液中离子浓度均匀处的电位差, 电动电位 (ζ) 的数值取决于吸附层滑动面上的净电荷数。其值越高, 表示在扩散层中被吸附的阳离子数目越多。

2) 热力电位 (φ_0)。它是粘土颗粒表面与水溶液中离子浓度均匀处之间的电位差。热力电位的高低取决于粘土颗粒所带的负电量。热力电位越高, 表示在粘土颗粒表面带的负电荷越多, 能吸附的阳离子数目也越多。

(4) 影响双电层厚度与电动电位 (ζ) 的因素

胶体的聚结稳定性与双电层厚度、电动电位大小有密切关系。双电层愈厚、愈大, 胶体愈稳定。根据强电解质的德拜-休格理论, 双电层的厚度主要取决于溶液中电解质的反离子价数与电解质的浓度, 这是因为

$$\frac{1}{K} = \left(\frac{\epsilon K T}{2 n Z^2 e^2} \right)^{1/2} \quad (2-3)$$

式中: n 为电解质浓度; Z 为电解质的离子价数 (系均称电解质, 如 NaCl , MgSO_4 等); e 为电子电荷; ϵ 为介电常数; K 为坡兹曼常数; T 为绝对温度。

由式 (2-3) 可以看出, 随着加入电解质浓度的增加, 特别是离子价数的升高, 离子氛 (即扩散双电层) 厚度下降。

在溶液中加入电解质之后, 扩散双电层厚度下降的原因是此时将有更多的反离子进入吸附层, 结果扩散层的离子数目下降, 这就导致双电层厚度下降, 电动电位随之下降 (即电解质压缩双电层的作用), 如图 2-4 所示。当所加电解质把双电层压缩到吸附溶剂化层的厚度时, 胶粒即不带电, 此时电动电位降至零。这种状态称为等电态。在等电态, 胶体容易聚结。

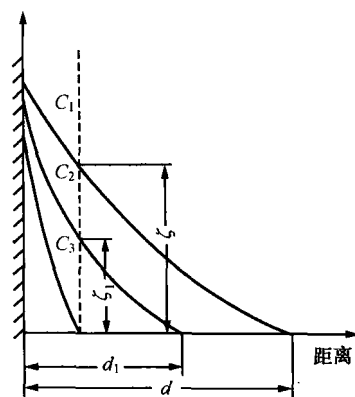


图 2-4 电解质浓度对 ζ 电位的影响
 C_1 、 C_2 、 C_3 代表阳离子浓度, $C_1 < C_2 < C_3$; d — C_1 下扩散双电层的厚度; d_1 — C_2 下扩散双电层的厚度; ζ — C_1 下电动电位; ζ_1 — C_2 下电动电位

粘土溶胶悬浮体的组成和性能比一般胶体复杂，特别是泥浆胶体更为复杂。由于泥浆是由粘土、水、各种处理剂组成的混合体系，故其电动电位受多种因素的影响。除了上述加入电解质对 ζ 电位的影响外，还受pH值、交换性阳离子与吸附的阴离子等因素的影响。

(二) 粘土-水胶体分散体系的稳定性与聚结

胶体的稳定与破坏是胶体化学的核心问题，这是因为胶体是高度分散的多相分散体系，具有很大的比表面和表面能。根据表面能自发下降的原理，胶体质点有自发聚结变大的趋势，以降低表面能。也就是说，胶体是热力学上的不稳定体系。胶体体系的不稳定性是绝对的，稳定性是相对的，有条件的。如金溶胶可以稳定几年或几十年， $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 也可以稳定几个月或一年，但终究是要被破坏的。泥浆是复杂的胶体体系，用各种方法，如加入各种处理剂调整泥浆性能，本质上就是调整胶体的稳定性。那么，哪些因素使胶体具有相对稳定性，胶体稳定与破坏的规律是什么？这就是下面所要讨论的主要内容。

1. 胶体稳定性的概念

所谓胶体的稳定性有两种不同的概念：即动力（沉降）稳定性和聚结稳定性。

(1) 动力稳定性

动力稳定性是指在重力作用下分散相粒子是否容易下沉的性质。一般用分散相下沉速度的快慢来衡量动力稳定性的好坏。例如，在一个玻璃容器中注满泥浆，静止24 h后，分别测定上部与下部的泥浆密度。其差值愈小，则动力稳定性愈强，说明粒子沉降速度很慢。

(2) 聚结稳定性

聚结稳定性是指分散相粒子是否容易自动地聚结变大的性质。不管分散相粒子的沉降速度如何，只要它们不自动降低分散度，聚结度变大，该胶体就是聚结稳定性好的体系。

必须指出，动力稳定性与聚结稳定性是两种不同的概念，但是它们之间又有联系。如果分散相粒子自动聚结变大，那么，由于重量加大，必然引起下沉。因此，失去聚结稳定性，最终必然失去动力稳定性。由此可见，在上述两种稳定性中，聚结稳定性是最根本的。

2. 影响动力稳定性的因素

(1) 重力的影响

重力是动力稳定性的决定因素，因此，首先分析重力对动力稳定性的影响。如前所述，固体颗粒在液体介质中受到的净重力如下式所示：

$$F_1 = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0)g \quad (2-4)$$

由上式可以看出， π 、 g 均为常数，因此，分散相质点在胶态体系中所受的净重力，主要决定于固体颗粒半径(r)的大小，其次决定于分散相与分散介质的密度差($\rho - \rho_0$)。泥浆中用的加重材料必须磨得很细才能悬浮，就是这个道理。

(2) 布朗运动的影响

理论与实践均证明，颗粒半径愈小，布朗运动愈剧烈，因此，布朗运动对于溶胶的动力稳定性起着重要的作用。当直径大于约5 μm 时，就没有布朗运动了，因此，悬浮体是动力学上的不稳定体系。

(3) 介质粘度对动力稳定性的影响

如前所述，根据斯托克斯(Stokes)定律，在液体介质中，固体颗粒下沉的速度如下

式所示：

$$v = 2r^2(\rho - \rho_0)g/9\eta \tag{2-5}$$

从上式可见，固体颗粒下沉速度与介质粘度（ η ）成反比，因此，提高介质粘度可以提高动力稳定性。泥浆要求有适当的粘度，这是其重要原因之一。

3. 影响聚结稳定性的因素

胶体粒子之间的吸力能是永恒存在的。只是当胶体处于相对稳定状态时，吸力能被斥力能所抵消而已。一般说来，外界因素很难改变吸引力的大小，然而改变分散介质中电解质的浓度与价态则可显著影响胶粒之间的斥力位能。

1) 电解质浓度的影响。图 2-5a、b、c 分别表示在低、中、高三种电解质浓度条件下胶体粒子间的作用位能与其距离的关系。从图中可见，在低的和中等浓度电解质存在时，总位能有一个最大值，但随着电解质浓度的升高，斥能峰值降低；而高浓度电解质存在时，除了胶体粒子非常靠近的距离以外，在任何距离上都是吸引能占优势，在这种情况下聚结速度最快（图 2-5c）。在中等电解质浓度下（图 2-5b），由于“远程”斥力能的作用，聚结过程延缓了。在低电解质浓度下（图 2-5a），由于存在明显的“远程”斥力作用，聚结过程很慢，要几周或几个月才发生明显的聚结。

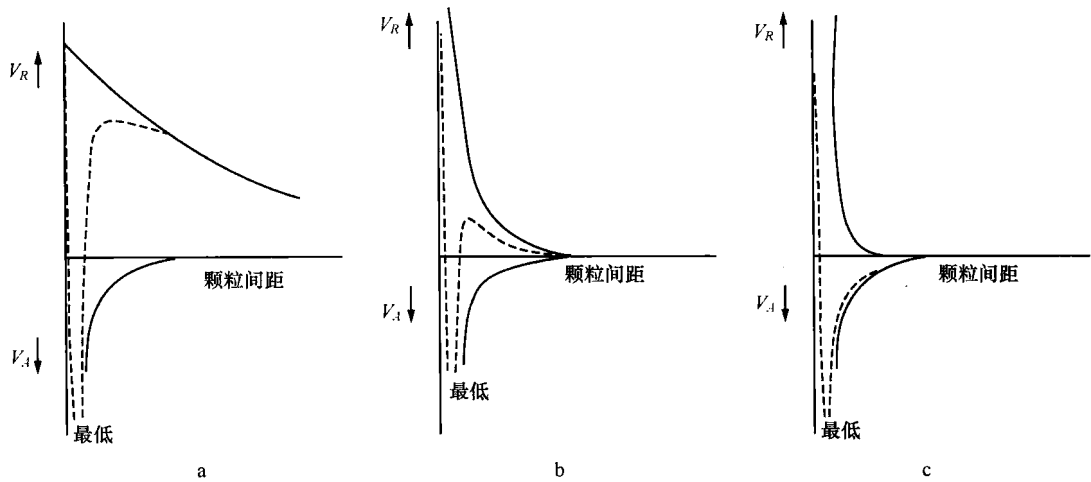


图 2-5 电解质浓度对溶胶稳定性的影响
a—低电解质浓度，b—中等电解质浓度；c—高电解质浓度

2) 反离子价数的影响。通常用聚沉值和聚沉率两个指标定量地表示电解质对溶胶聚结稳定性的影响。能使溶胶聚沉的电解质最低浓度称为聚沉值。各种电解质有不同的聚沉值。该值仅仅是个相对值，它与溶胶的性质、含量、介质的性质以及温度等因素有关。如果各种条件确定，那么电解质对某一溶胶的聚沉值也是一定的。因此，具体来讲，聚沉值（或临界聚沉浓度）是指在指定条件下，使胶体明显聚沉所需的最低浓度，以 mmol/L 表示。聚沉值愈低，说明电解质的聚沉能力愈强。

聚沉率是聚沉值的倒数。聚沉率愈高，电解质的聚沉能力愈强。Schulze-Hardy 分别研究了电解质对不同溶胶的聚沉值。结果表明，电解质中起聚沉作用的，主要是与胶粒带相反电荷的反离子，反离子价数愈高，聚沉值愈低，聚沉率愈高。从大量实验资料总结出如

下规律:

$$M^+:M^{2+}:M^{3+} = 100:1.6:0.3 = (1/1)^6:(1/2)^6:(1/3)^6$$

上述括号中的分母为反离子价数。由此可见, 电解质的聚沉值与反离子价数的 6 次方成反比, 这个规则称为舒采-哈迪 (Schulze-Hardy) 规则。

杰略金和郎台根据胶体粒子间的吸力和斥力导出了电解质对溶胶的聚沉值 (v_c):

$$v_c = [cD^3(KT)^5]/(A^2e^6Z^6) \quad (2-6)$$

式中: A 为哈马克常数 (范德华引力常数); e 为电荷值; Z 为反离子价数; c 为与电解质阴阳离子对称性有关的常数; D 为介质的介电常数; K 为玻兹曼常数; T 为绝对温度。

由此可以看出, v_c 与反离子价数的 6 次方成反比, 即

$$v_c = K/Z^6 \quad (2-7)$$

式中: K 为常数。

式 (2-7) 定量地说明了舒采-哈迪规则。

3) 反离子大小的影响。同价离子的聚沉率虽然相近, 但仍有差别, 特别是一价离子的差别比较明显, 若将各离子按其聚沉能力的顺序排列, 则一价阳离子的排序为: $H^+ > Cs^+ > Rb^+ > NH_4^+ > K^+ > Na^+ > Li^+$; 一价阴离子的顺序为: $F^- > IO_3^- > H_2PO_4^- > BrO_3^- > Cl^- > ClO_3^- > Br^- > I^- > CNS^-$ 。

同价离子聚沉能力的次序称为感胶离子序, 与水化离子半径从小到大的次序大致相同, 这可能是由于水化离子半径越小, 越容易靠近胶体粒子的缘故。对高价离子, 影响其聚沉能力的因素中, 价数是主要的, 离子大小的影响, 相对地就不那么显著了。

4) 同号离子的影响。与胶粒所带电荷相同的离子称为同号离子。一般说来, 它们对胶体有一定的稳定作用, 可以降低反离子的聚沉能力。但有机高聚物离子 (聚电解质) 例外, 即使与胶粒带电相同, 也能被胶粒吸附。

5) 相互聚沉现象。一般情况下, 带相同电荷的两种溶胶混合后没有变化, 当然也有个别例外。若将两种相反电荷的溶胶相互混合, 则发生聚沉, 这种现象称为相互聚沉现象。

由于多数泥浆都是粘土-水胶体分散体系, 因此, 上面介绍的这类体系的稳定和聚结原理对泥浆优化设计和现场应用具有重要的指导意义。

第二节 配浆用水

水质对钻探泥浆及乳状液性能有重要影响。除用淡水配制泥浆外, 有时也用碱水或海水配制泥浆。水中含有各种盐类, 主要有钙、镁、钠、钾的碳酸盐、重碳酸盐、硫酸盐和氯化物。具体反映在水的总矿化度和水的硬度指标上。为此, 要对钻探用水的水质进行分析。也有时需要对泥浆滤液进行分析。具体分析方法可查阅有关资料。

水的总矿化度是指水中离子、分子和各种化合物的总含量。通常可以每升水在 $105 \sim 110^\circ\text{C}$ 下烘干时所得干涸残渣重量来表示。

根据总矿化度的大小, 可将水分 3 类:

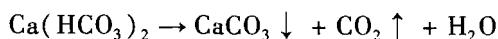
- 1) 淡水。干涸残渣含量 $< 1 \text{ g/L}$;
- 2) 盐水。干涸残渣含量 $1 \sim 50 \text{ g/L}$;
- 3) 卤水。干涸残渣含量 $> 50 \text{ g/L}$ 。

如需再细分，则可将盐水又分为3类：

- 1) 弱矿化水。干涸残渣含量 1~3 g/L；
- 2) 中等矿化水。干涸残渣含量 3~10 g/L；
- 3) 强矿化水。干涸残渣含量 10~50 g/L。

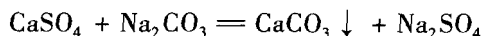
水的硬度，一般指水中钙、镁盐的含量，其中又可分为暂时硬度和永久硬度。

水的暂时硬度是指水中存在钙、镁的重碳酸盐和碳酸盐。当水被加热煮沸后，由于重碳酸盐的分解，而形成沉淀物，可达到去钙、镁的目的。反应式如下所示：



一般锅炉长期使用后，产生结垢，就是这些碳酸钙、碳酸镁的沉淀物。

水的永久硬度是指水中存在钙、镁的硫酸盐和氯化物等。当水被煮沸时，不会产生钙、镁沉淀物。只有往这些水中加入碳酸钠或磷酸钠盐以后，才能使它产生碳酸钙镁或磷酸钙镁的沉淀，达到使水软化的目的。反应式如下所示：



此外，水中含有钠、钾的氢氧化物、碳酸盐及重碳酸盐等，可称为负硬度。

水的硬度单位以 mmol/L 水表示，或以德国度表示。德国度 1° 等于每升水中含 10 mg 氧化钙 (CaO)。经过换算，1 mmol/L 水的钙离子等于 2.8°。简便表示是每升水中含钙、镁的毫克数。

按水的总硬度（暂时硬度与永久硬度之和），可将水区分为如下几种：

- 1) 极软水。水中钙镁离子 < 1.5 mmol/L (< 4.2°)
- 2) 软水。水中钙镁离子 1.5~3.0 mmol/L (4.2°~8.4°)
- 3) 中硬水。水中钙镁离子 3.0~6.0 mmol/L (8.4°~16.8°)
- 4) 硬水。水中钙镁离子 8.0~9.0 mmol/L (16.8°~25.2°)
- 5) 高硬水。水中钙镁离子 9.0~14.0 mmol/L (25.2°~39.3°)
- 6) 超硬水。水中钙镁离子 14.0~21.0 mmol/L (39.3°~59°)
- 7) 极硬水。水中钙镁离子 > 21 mmol/L (> 59°)

用纯碱处理泥浆时，有部分纯碱会消耗在使水质软化上。而采用咸水或海水造浆时，一般不专门对水质进行淡化和软化工作，而是采用能抗高含盐、钙的泥浆处理剂来对付。

第三节 泥浆处理剂

处理剂的种类品种繁多。为了使用和研究方便，有必要将它们进行分类。目前主要有以下两种分类方法。

第一类分类方法是按其组成分类。包括无机处理剂、有机处理剂和表面活性剂三大类。其中无机处理剂又可分为氯化物、硫酸盐、碱类、碳酸盐、磷酸盐、硅酸盐和重铬酸盐和混合金属层状氢氧化物（即正电胶）类等。有机处理剂通常可分为天然产品、天然改性产品和有机合成化合物。按其化学组分又可分为腐殖酸类、纤维素类、木质素类、丹宁酸类、沥青类、淀粉类和聚合物类等。

第二类分类方法是按其在泥浆中所起的作用或功能分类。我国泥浆标准化委员会根据国际上的分类法，并结合我国的具体情况，将泥浆配浆材料和处理剂共分为以下 16 类，

即①降滤失剂；②增粘剂；③乳化剂；④页岩抑制剂；⑤堵漏剂；⑥降粘剂；⑦缓蚀剂；⑧粘土类；⑨润滑剂；⑩加重剂；⑪杀菌剂；⑫消泡剂；⑬泡沫剂；⑭絮凝剂；⑮解卡剂；⑯其他类等。

这 16 类处理剂所起的作用各不相同，但在配制和使用泥浆时，并不同时使用这些处理剂，而仅仅根据需要使用其中的几种。有时，一种处理剂在泥浆中同时具有几种作用。例如，有的降失水剂同时兼有增粘或降粘作用，絮凝剂同时兼有增粘剂的作用等。

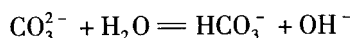
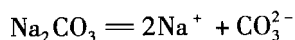
本章将以上两种分类方法结合起来，除介绍常用的配浆原材料和无机处理剂外，重点介绍几类重要的有机处理剂，即降粘剂、降滤失剂、页岩抑制剂、絮凝剂和堵漏剂等。

一、无机处理剂

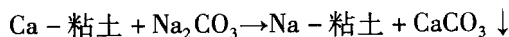
（一）常用的无机处理剂

1. 纯碱

即碳酸钠，又称苏打粉，分子式为 Na_2CO_3 。无水碳酸钠为白色粉末，密度为 2.5 g/cm^3 ，易溶于水，在接近 36°C 时溶解度最大，水溶液呈碱性（pH 值为 11.5），在空气中易吸潮结成硬块（晶体），存放时要注意防潮。纯碱在水中容易电离和水解。其中电离和一级水解较强，所以纯碱水溶液中主要存在 Na^+ 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和 OH^- 离子，其反应式为

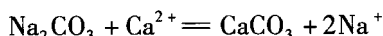


纯碱能通过离子变换和沉淀作用使钙粘土变为钠粘土，即



由于上述反应可有效地改善粘土的水化分散性能，因此，加入适量纯碱可使新浆的失水量下降，粘度、切力增大。但过量的纯碱会导致粘土颗粒发生聚结，使泥浆性能受到破坏。其合适加量需通过造浆实验来确定。

此外，在钻水泥塞或泥浆受到钙侵时，加入适量纯碱使 Ca^{2+} 沉淀成 CaCO_3 ，从而使泥浆性能变好，即



含羧钠基官能团（ $-\text{COONa}$ ）的有机处理剂在遇到钙侵（或 Ca^{2+} 浓度过高）而降低其溶解性时，一般可采用加入适量纯碱的办法恢复其效能。

2. 烧碱

烧碱即氢氧化钠，分子式为 NaOH 。其外观为乳白色晶体，密度为 $2.0 \sim 2.2 \text{ g/cm}^3$ ，易溶于水，溶解时放出大量的热。溶解度随温度升高而增大，水溶液呈强碱性。烧碱容易吸收空气中的水分和二氧化碳，并与二氧化碳作用生成碳酸钠，存放时应注意防潮加盖。烧碱主要用于调节泥浆的 pH 值，与丹宁、褐煤等酸性处理剂一起配合使用，使之分别转化为丹宁酸钠、腐殖酸钠等有效成分。还可用于控制钙处理泥浆中 Ca^{2+} 的浓度等。

3. 石灰

生石灰即氧化钙，分子式为 CaO 。吸水后变成熟石灰，即氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。 CaO 在水中的溶解度较低，常温下为 0.16%，其水溶液呈碱性。并且随温度升高，溶解度降低。在钙处理泥浆中，石灰用于提供 Ca^{2+} ，以控制粘土的水化分散能力，使之保持在适

度絮凝的状态；在油包水乳化泥浆中，CaO 用于使烷基苯磺酸钠等乳化剂转化为烷基苯磺酸钙，并调节 pH 值。但需注意，在高温条件下石灰泥浆可能发生固化反应，使性能不能满足要求，因此，在高温深井中应慎用。此外，石灰还可配成石灰乳堵漏剂封堵漏层。

4. 石膏

石膏的化学名称为硫酸钙，分子式为 CaSO_4 。有熟石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 和无水石膏 (CaSO_4) 两种。石膏是白色粉末，密度为 $2.31 \sim 2.32 \text{ g/cm}^3$ 。常温下溶解度较低（约为 0.2%），但稍大于石灰。40℃ 以前，溶解度随温度升高而增大；40℃ 以后，溶解度随温度升高而降低。吸湿后结成硬块，存放时应注意防潮。

在钙处理泥浆中，石膏与石灰的作用大致相同，都用于提供适量的 Ca^{2+} 。其差别在于石膏提供的钙离子浓度比石灰高一些，此外用石膏处理可避免泥浆的 pH 值过高。

5. 氯化钙

氯化钙的分子式为 CaCl_2 ，通常含有 6 个结晶水。其外观为无色斜方晶体，密度为 1.68 g/cm^3 ，易潮解，且易溶于水（常温下约为 75%）。其溶解度随温度升高而增大。在泥浆中， CaCl_2 主要用于配制防塌性能较好的高钙泥浆。用 CaCl_2 处理泥浆时常常引起 pH 值降低。

6. 氯化钠

氯化钠俗名食盐，分子式为 NaCl ，为白色晶体，常温下密度约为 2.20 g/cm^3 。纯品不易潮解，但含 MgCl_2 、 CaCl_2 等杂质的工业食盐容易吸潮。常温下在水中的溶解度较大（20℃ 时为 36.0 g/100 g 水 ），且随温度升高，溶解度略有增大，见表 2-5。

表 2-5 不同温度下 NaCl 在水中的溶解度 (单位: g/100 g 水)

温度/℃	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
溶解度	35.7	35.8	36.0	36.3	36.6	37.0	37.3	37.8	38.4	39.0	39.8

食盐主要用于配制盐水泥浆和饱和盐水泥浆，以防止岩盐孔段溶解，并抑制孔壁泥页岩水化膨胀。此外，为保护油气层，还用于配制无固相清洁盐水泥浆，或作为水溶性暂堵剂使用。

7. 氯化钾

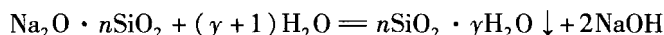
氯化钾的分子式为 KCl ，外观为白色立方晶体，常温下密度为 1.98 g/cm^3 。熔点为 776℃。易溶于水，且溶解度随温度升高而增加。 KCl 是一种常用的无机盐类页岩抑制剂，具有较强的抑制页岩渗透水化的能力。若与聚合物配合使用，可配制成具有强抑制性的钾盐聚合物防塌泥浆。关于 KCl 的防塌机理，将在有关章节中进行讨论。

8. 硅酸钠

硅酸钠俗名水玻璃或泡花碱。分子式为 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ，式中 n 称为水玻璃的模数，即二氧化硅与氧化钠的分子个数之比。 n 值越大，碱性越弱。 n 值在 3 以上的称为中性水玻璃， n 值在 3 以下的称为碱性水玻璃。

水玻璃通常分为固体水玻璃、水合水玻璃和液体水玻璃三种。固体水玻璃与少量水或蒸气发生水合作用而生成水合水玻璃。水合水玻璃易溶解于水变为液体水玻璃。液体水玻

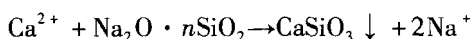
璃一般为黏稠的半透明液体，随所含杂质的不同可以呈无色、棕黄色或青绿色等，现场使用的水玻璃的密度为 $1.5 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ ，pH 值为 $11.5 \sim 12$ ，能溶于水和碱性溶液，能与盐水混溶，可用饱和盐水调节水玻璃的粘度。水玻璃在泥浆中可以部分水解生成胶态沉淀，其反应式为



该胶态沉淀可使部分粘土颗粒（或粉砂等）聚沉，从而使泥浆保持较低的固相含量和密度。水玻璃对泥页岩的水化膨胀有一定的抑制作用，故有较好的防塌性能。

当水玻璃溶液的 pH 值降至 9 以下时，整个溶液会变成半固体状的凝胶。其原因是水玻璃发生缩合作用生成较长的带支键的—Si—O—Si—链，这种长链能形成网状结构而包住溶液中的全部自由水，使体系失去流动性。随着 pH 值的不同，其胶凝速度（即调整 pH 直至形成胶凝所需时间）有很大差别，可以从几秒到几十小时。利用这一特点，可以将水玻璃与石灰、粘土和烧碱等配成石灰乳堵漏剂，注入已确定的漏失孔段进行胶凝堵漏。因此，水玻璃是一种堵漏剂。

此外，水玻璃溶液遇 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Fe^{3+} 等高价阳离子会产生沉淀，与 Ca^{2+} 的反应可用下式表示：



所以，用水玻璃配制的泥浆一般抗钙能力较差，也不宜在钙处理泥浆中使用。但它可在盐水或饱和盐水中使用。研究表明，利用水玻璃这个特点，还可使裂缝性地层的一些裂缝发生愈合或提高孔壁的破裂压力，从而起到化学固壁的作用。

硅酸盐泥浆是防塌泥浆的类型之一，在国内外应用中均取得很好的效果。配制硅酸盐泥浆的成本较低，且对环境无污染。

9. 重铬酸钠和重铬酸钾

重铬酸钠又叫红矾钠，分子式为 $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。其外观为红色或橘红色针状晶体，常温下密度为 2.35 g/cm^3 ，有强氧化性，易溶于水（ 25°C 时溶解度为 190 g/100 g 水）。重铬酸钾又称红矾钾，分子式为 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 。外观为橙红色三斜晶体，常温下密度为 2.68 g/cm^3 ，有强氧化性，不潮解，易溶于水（ 25°C 时溶解度为 96.9 g/100 g 水）。

这两种重铬酸盐的化学性质相似，其水溶液均可发生水解而呈酸性，其化学反应式为



加碱时平衡右移，故在碱溶液中主要以 CrO_4^{2-} 的形式存在。

在泥浆中 CrO_4^{2-} 能与有机处理剂起复杂的氧化还原反应，生成的 Cr^{3+} 极易吸附在粘土颗粒表面，又能与多官能团的有机处理剂生成络合物（如木质素磺酸铬、铬腐殖酸等）。在抗高温深井泥浆中，常加入少量重铬酸盐以提高泥浆的热稳定性，有时也用做防腐剂。但铬酸盐有毒，因而限制了它的广泛使用。

10. 酸式焦磷酸钠和六偏磷酸钠

酸式焦磷酸钠的分子式为 $\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ，代号 SAPP，无色固体，由磷酸二氢钠加热制得。10% $\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 水溶液的 pH 值为 4.8。六偏磷酸钠的分子式为 $(\text{NaPO}_3)_6$ ，外观为无色玻璃状固体，有较强的吸湿性，易溶于水。在温水中溶解较快。溶解度随温度升高而增大，10% $(\text{NaPO}_3)_6$ 水溶液的 pH 值为 6.8。

在泥浆技术发展的早期，磷酸盐类处理剂曾经是用于泥浆的主要稀释剂之一。不仅对高粘土含量引起的絮凝，而且对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 引起的絮凝均有良好的稀释作用。它们遇少量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 时，可生成水溶性络离子；遇大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 时，可生成钙盐沉淀。 $\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 特别对消除水泥和石灰造成的污染有很好的效果，因为用它既能除去 Ca^{2+} ，又能使泥浆的 pH 值适度降低。

磷酸盐类稀释剂的主要缺点是抗温性差，超过 80°C 时稀释性能急剧下降，这是由于它们在高温下会转化为正磷酸盐，成为一种絮凝剂。因此，一般在深部孔段，应改用抗温性较强的其他类型的稀释剂。正是由于这一原因，近年来该类稀释剂已较少使用。

11. 混合金属层状氢氧化物

混合金属层状氢氧化物（简称为 MMH）由一种带正电的晶体胶粒所组成，常称为正电胶。目前，其产品有溶硬、浓胶和胶粉三种剂型。实验表明，该处理剂对粘土水化有很强的抑制作用，与膨润土和水所形成的复合体具有独特的流变性能。

（二）无机处理剂在泥浆中的作用机理

无机处理剂都是水溶性的无机碱类和盐类，其中多数可提供阳离子和阴离子，也有一些与水形成胶体或生成络合物。它们在泥浆中的作用机理可归纳为以下方面。

1. 离子交换吸附

主要是粘土颗粒表面的 Na^+ 与 Ca^{2+} 之间的交换。这一过程对改善粘土造浆性能、配制钙处理泥浆以及防塌等方面都很重要，对泥浆性能的影响也较大。例如，在配制预水化膨润土浆时，常加入适量 Na_2CO_3 。其目的是，通过 Na^+ 浓度的增加，使之能够与钙蒙脱土颗粒表面的 Ca^{2+} 发生交换，从而使粘土的水化和造浆性能提高，分散成更小的颗粒，表现为泥浆的粘度、切力升高，失水量降低；相反，若在分散泥浆中加入适量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CaSO_4 等处理剂，随滤液中 Ca^{2+} 浓度的提高，一部分 Ca^{2+} 会与吸附在粘土颗粒上的 Na^+ 发生交换，致使泥浆体系转变为适度絮凝的粗分散状态，从而控制粘土的水化与分散。

2. 调控泥浆的 pH 值

每种泥浆体系均有其合理的 pH 值范围。然而在钻进过程中，泥浆的 pH 值会因发生盐侵、盐水侵、水泥侵和孔壁吸附等各种原因而发生变化，其中 pH 值趋于下降的情况更为常见。因此，为了使泥浆性能保持稳定，应随时对 pH 值进行调整。添加适量的烧碱等无机处理剂是提高 pH 值的最简单的方法，而使用酸式焦磷酸钠（SAPP）、 CaSO_4 或 CaCl_2 等无机处理剂时，则会使泥浆的 pH 值有所下降。

3. 沉淀作用

如果有过多的 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 侵入泥浆，将会削弱粘土的水化和分散能力，破坏泥浆的性能。此时，可先加入适量烧碱除去 Mg^{2+} ，然后用适量纯碱除去 Ca^{2+} 。这种沉淀作用还可用来使某些因受到污染而失效的有机处理剂恢复其作用。例如褐煤碱液和水解聚丙烯腈，如遇钙侵会分别生成难溶于水的腐殖酸钙和聚丙烯酸钙。此时，可以加入适量纯碱，使上述处理剂恢复其作用效果，这是由于所生成的 CaCO_3 的溶解度比腐殖酸钙和聚丙烯酸钙的溶解度小得多，因而可使处理剂的钙盐重新转变为钠盐。

4. 络合作用

利用某些无机处理剂的络合作用，同样可以有效地除去泥浆中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等污染

离子。例如，在受到钙侵的泥浆中加入足量的六偏磷酸钠，则可通过下面的络合反应除去 Ca^{2+} ：



该反应所生成的络离子 $[\text{CaNa}_2(\text{PO}_3)_6]^{2-}$ 相当稳定，将 Ca^{2+} 束缚起来，相当于从泥浆的滤液中除掉了 Ca^{2+} 。

对于用褐煤碱液或铁铬木质素磺酸盐等处理的泥浆，还可以利用络合反应提高其抗温性能。例如，加入少量重铬酸盐可使上述泥浆的热稳定性明显提高，其中主要作用机理是氧化和络合。通过络合能有效地抑制腐殖酸钠和铁铬木质素磺酸盐的热分解。

5. 与有机处理剂生成可溶性盐

由于许多有机处理剂，如丹宁、腐殖酸等在水中溶解度很小，不易吸附在粘土颗粒上，因而不能发挥其效能。只有通过加入适量烧碱，使之转化为可溶性盐，如丹宁酸钠和腐殖酸钠，才能充分发挥其效能。这也是泥浆应始终保持碱性环境的一个重要原因。

6. 抑制溶解的作用

在钻遇岩盐和石膏地层时，常使用盐水泥浆和石膏处理的泥浆；对于大段的盐膏层，甚至使用饱和盐水泥浆。其目的一是为了增强泥浆抗污染的能力，二是为了抑制和防止上述可溶性岩层的溶解，使井径保持规则。

以上介绍的是无机处理剂最基本的作用机理，它们之间往往是互相联系的。

二、有机处理剂

（一）降粘剂

降粘剂又称为解絮凝剂和稀释剂。泥浆在使用过程中，常常由于温度升高、盐侵或钙侵、固相含量增加或处理剂失效等原因，使泥浆形成的网状结构增强，泥浆粘度、切力增加。若粘度、切力过大，则会造成开泵困难、岩粉难以除去或钻孔过程中激动压力过大等现象，严重时会导致各种孔内复杂情况。因此，在泥浆使用和维护过程中，经常需要加入降粘剂，以降低体系的粘度和切力，使其具有适宜的流变性。泥浆降粘剂的种类很多。根据其作用机理的不同，可分为两种类型，即分散型稀释剂和聚合物型稀释剂。在分散型稀释剂中主要有丹宁类和木质素磺酸盐类，聚合物型稀释剂主要包括共聚型聚合物降粘剂和低分子聚合物降粘剂等。

1. 丹宁类

（1）丹宁的来源和性质

丹宁又称鞣酸，广泛存在于植物的根、茎、叶、皮、果壳和果实中，是一大类多元酚的衍生物，属于弱有机酸。由于从不同植物中提取的丹宁具有不同的化学组成，因此丹宁的种类很多。我国四川、湖南、广西一带盛产五倍子丹宁，云南、陕西、河南一带盛产橡碗栲胶。栲胶是用以丹宁为主要成分的植物物料提取制成的浓缩产品，外观为棕黄到棕褐色的固体或浆状体，一般含丹宁 20% ~ 60%。用天然植物提取、制备的工业用丹宁具有以下性质：

1) 为带色的非晶形固体。可溶于水，也部分溶于丙酮、甘油及乙酸乙酯等溶剂，但不溶于无水乙醇、乙醚、氯仿和苯等溶剂。

2) 丹宁为弱酸（由酚羟基引起），其水溶液呈酸性，味苦涩。与强酸反应时，会使丹宁沉淀而从溶液中析出。

3) 丹宁酸钠在高浓度的 NaCl 、 CaCl_2 、 Na_2SO_4 等无机盐溶液中会发生盐析或生成沉淀。因此，丹宁碱液的抗盐、钙能力较差。

4) 由于丹宁酸含有酯键，在 NaOH 溶液中易于水解。高温下水解加剧，降粘能力减弱。因此，丹宁碱液抗温能力在 $100 \sim 120^\circ\text{C}$ 之间，仅用于浅井或中深井。

5) 丹宁分子在水中有缔合现象，且缔合程度随其浓度的增大而增加。在 1% 的五倍子丹宁水溶液中，其相对分子质量为 2500 左右，相当于二聚物；在 10% 及 20% 的水溶液中，其相对分子质量分别为 4016 和 5450。在丙酮溶液中则以单体形式存在。

6) 丹宁酸在水溶液中也可发生水解，生成双五倍子酸（或称双没食子酸）和葡萄糖。双五倍子酸进一步水解，可生成五倍子酸。

这些水解的酸性产物在 NaOH 溶液中生成双五倍子酸钠和五倍子酸钠，统为丹宁酸钠或丹宁碱液，即丹宁在泥浆中的有效成分，简化符号为 NaT 。

为了提高丹宁酸钠的使用效果，通过丹宁与甲醛和亚硫酸钠进行磺甲基化反应可制备磺甲基丹宁（SMT）。还可再进一步与 $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 发生氧化与螯合反应制得磺甲基丹宁的铬螯合物。这两种产品的热稳定性和降粘性能比丹宁酸钠有明显提高，抗温可达 $180 \sim 200^\circ\text{C}$ 。磺甲基丹宁产品为棕褐色粉末或细颗粒，易溶于水，水溶液呈碱性。在泥浆中一般加 0.5% ~ 1% 就能获得较好的稀释效果。其适用的 pH 值范围在 9 ~ 11 之间。抗 Ca^{2+} 可达 1000 g/L，而抗盐性较差，当食盐量超过 1% 时稀释效果就明显下降。

(2) 丹宁的稀释机理

一般认为，丹宁类降粘剂的作用机理是：丹宁酸钠苯环上相邻的双酚羟基可通过配位键吸附在粘土颗粒断键边缘的 Al^{3+} 处，而剩余的一 ONa 和一 COONa 均为水化基团，它们又能给粘土颗粒带来较多的负电荷和水化层，使粘土颗粒端面处的双电层斥力和水化膜厚度增加，从而拆散和削弱了粘土颗粒间通过端面-面和端-端连接而形成的网架结构，使粘度和切力下降。

因此，丹宁类降粘剂主要是通过拆散结构而起降粘作用的。也就是说，降低的主要是动切力 τ_0 ，而对塑性粘度 μ_p 的影响较小。若要降低 μ_p ，应主要通过加强泥浆固相控制来实现。丹宁酸钠的上述稀释机理是具有代表性的，其他分散型降粘剂的作用机理均与之相似。

由于降粘剂主要在粘土颗粒的端面起作用，因此，与降滤失剂相比，其用量一般较少。当加大其用量时，丹宁碱液也会在一定程度上起降滤失的作用。这是由于随着结构的拆散和粘土颗粒双电层斥力和水化作用的增强，有利于形成更为致密的泥饼。

2. 木质素磺酸盐类

木质素磺酸盐是木材酸法造纸残留下来的一种废液。通常造纸厂供应的纸浆废液是一种已浓缩的黏稠的棕黑色液体，其中固体含量约为 35% ~ 50%，密度为 $1.26 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ 。其主要成分为木质素磺酸钠。

(1) 铁铬盐的制备及化学组成

铁铬木质素磺酸盐俗称铁铬盐，代号为 FCLS。它的制备过程是：在纸浆废液经过发酵提取酒精后，将其浓缩至 $1.25 \sim 1.27 \text{ g/cm}^3$ ，在 $60 \sim 80^\circ\text{C}$ 温度下加入预先配制好的硫

酸亚铁和重铬酸辅溶液，在充分搅拌下经氧化、络合反应约 2 h 后，过滤除去 CaSO_4 ，再经喷雾干燥而制得的产品。

(2) 铁铬盐的性质

1) 由于铁铬盐分子中有磺酸基， Fe^{3+} 和 Cr^{3+} 与木质素磺酸盐又形成了相当稳定的螯合物，所以铁铬盐是一种抗盐、抗钙的有效降粘剂；能用于淡水、海水和饱和盐水泥浆中，并可用于各种钙处理泥浆中。

2) 因为分子中磺酸基的硫原子直接与碳原子相连， Fe^{3+} 和 Cr^{3+} 与木质素磺酸之间有螯合作用（木质素磺酸分子与金属离子络合时，一个分子同时有两个官能团与同一个离子络合称为螯合），所以铁铬盐的热稳定性很高，可以抗 150°C 以上的高温。

3) 铁铬盐的水溶性与其磺化度有关。磺化度越高，水溶性则越大。

4) 铁铬盐具有弱酸性，加入泥浆时会引起泥浆的 pH 值降低，因此，需配合烧碱使用。一般情况下，应将铁铬盐泥浆的 pH 值控制在 9 ~ 11 的范围内。

(3) 铁铬盐的稀释机理及现场应用

铁铬盐对泥浆的稀释作用包括两个方面：一是在粘土颗粒的断键边缘上形成吸附水化层，从而削弱粘土颗粒之间的端面 and 端-端连接，从而削弱或拆散空间网架结构，致使泥浆的粘度和切力显著降低；二是铁铬盐分子在泥页岩上的吸附，有抑制其水化分散的作用，这不仅有利于孔壁稳定，还可以防止泥页岩造浆所引起的泥浆粘度和切力上升。

在过去相当长的一段时期。以铁铬盐为代表的木质素磺酸盐是国内外使用量最大的一类降粘剂。室内试验和现场使用经验表明，其抗温、抗盐和抗钙性能均比丹宁酸类降粘剂要强得多。铁铬盐抗温可达 $150 \sim 180^\circ\text{C}$ 。铁铬盐在泥浆中的加量一般为 0.3% ~ 1.0%，加量较大时兼有降滤失作用。

尽管铁铬盐是一种性能优良的降粘剂，但也存在着某些不足。其主要缺点有：使用时要求泥浆的 pH 值保持较高，这是不利于孔壁稳定的；有时容易引起泥浆发泡，因此，常常需配合使用硬脂酸铝、甘油聚醚等消泡剂；铁铬盐泥浆的泥饼摩擦系数较高，在深井中使用往往需要混油或添加一些润滑剂。还有很重要的一点，即铁铬盐含重金属铬，在制备和使用过程中均会造成一定的环境污染，对人体健康不利。因此，目前国内外都在致力于研制能够替代铁铬盐的无铬降粘剂。

除上述分散型降粘剂外，近年来还研制出多种聚合物型降粘剂。聚合物型降粘剂主要是相对分子质量较低的丙烯酰胺类或丙烯酸类聚合物，主要用于聚合物泥浆。研制和开发聚合物型降粘剂主要出自以下原因：常规的分散型降粘剂只能有效地降低泥浆的动切力（即所谓结构粘度），而不能使塑性粘度降低，因而导致泥浆的动塑比减小，某些分散型降粘剂还会使泥浆抑制岩粉分散的能力削弱；而聚合物型降粘剂能使动切力、塑性粘度同时降低，与此同时还能增强泥浆抑制地层造浆的能力，从而可为聚合物泥浆真正实现低固相和不分散创造条件。下面仅介绍几种比较重要的聚合物型降粘剂。

3. X-40 系列降粘剂

X-40 系列降粘剂产品包括 X-A40 及 X-B40 两种。该处理剂是先在水溶液中经游离基链式聚合制成液态产品，烘干后呈浅蓝色颗粒或白色粉末。其平均相对分子质量为 5000 左右。在泥浆中加量为 0.3% 时，可抗 0.2% CaSO_4 和 1% NaCl ，并可抗 150°C 的高温。

X-40 系列处理剂的之所以具有较强的稀释作用，主要是由其线型结构、低相对分子质量及强阴离子基团所决定的。一方面，由于其分子量低，可通过氢键优先吸附在粘土颗粒上，从而顶替掉原已吸附在粘土颗粒上的高分子聚合物，从而拆散了由高聚物与粘土颗粒之间形成的“桥接网架结构”；另一方面，低分子量的降粘剂可与高分子主体聚合物发生分子间的交联作用，阻碍了聚合物与粘土之间网架结构的形成，从而达到降低粘度和切力的目的。但若其聚合度过大，相对分子质量过高，反而会使粘度、切力增加。

4. XY-27

XY-27 是相对分子质量约为 2000 的两性离子聚合物稀释剂，在其分子链中同时含有阳离子基团、阴离子基团和非离子基团，属于乙烯基单体多元共聚物。其主要特点是，既是降粘剂又是页岩抑制剂。与分散型降粘剂相比，它只需很少的加量（通常为 0.1% ~ 0.3%）就能取得更好的降粘效果，同时还有一定的抑制粘土水化膨胀的能力。XY-27 经常与两性离子包被剂 FA-367 及两性离子降滤失剂 JT-888 等配合使用，构成目前国内广泛使用的两性离子聚合物泥浆体系。同时，它在其他泥浆体系，包括分散泥浆体系中也能有效地降粘。两性离子聚合物稀释剂还兼有一定的降滤失作用，能同其他类型处理剂互相兼容，如可以配合使用磺化沥青或磺化酚醛树脂类等处理剂，以改善泥饼质量，提高封堵效果和抗温能力。

两性离子降粘剂还具有一定的抑制页岩水化的作用，这是因为分子链中的有机阳离子基团吸附于粘土表面之后，一方面中和了粘土表面的一部分负电荷，削弱了粘土的水化作用；另一方面这种特殊分子结构使聚合物链之间更容易发生缔合，因此，尽管其相对分子质量较低，仍能对粘土颗粒进行包被，不减弱体系抑制性。此外，分子链中大量水化基团所形成的水化膜，可阻止自由水分子与粘土表面的接触，并提高粘土颗粒的抗剪切强度。

试验表明，在含有 FA-367 的膨润土浆中，只需加入少量 XY-27，泥浆的粘度、切力就急剧下降，且失水量降低，泥饼变得致密。还发现随其加量增加，泥浆容纳岩粉的能力明显增强。

5. 磺化苯乙烯-马来酸酐共聚物

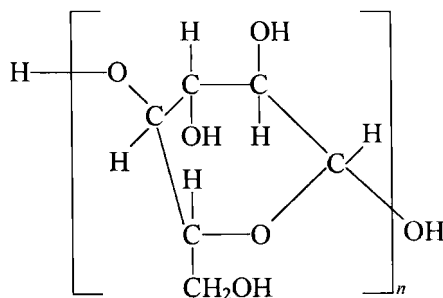
磺化苯乙烯-马来酸酐共聚物是由苯乙烯、马来酸酐、磺化试剂、溶剂（甲苯）、引发剂和链转移剂（硫醇）通过共聚、磺化和水解后制得的，其代号为 SSMA。相对分子质量为 1000 ~ 5000，抗温可达 200℃ 以上。它是一种性能优良的抗高温稀释剂，国外已在高温深井中广泛使用。但这种产品的成本较高，我国也在进行研究和试制。

（二）降滤失剂

降滤失剂又称为滤失控制剂、降失水剂。在钻孔过程中，泥浆的滤液侵入地层会引起泥页岩水化膨胀，严重时导致孔壁不稳定和各种孔内复杂情况，钻遇产油层时还会造成油气层损害。加入降滤失剂的目的，就是要通过在孔壁上形成低渗透率、柔韧、薄而致密的滤饼，尽可能降低泥浆的失水量。降滤失剂是泥浆处理剂的重要剂种，主要分为纤维素类、腐殖酸类、丙烯酸类、淀粉类和树脂类等。由于其品种繁多，下面仅选择每一类中具有代表性的产品进行介绍。

1. 纤维素类

纤维素是由许多环式葡萄糖单元构成的长链状高分子化合物，其结构式可表示如下：



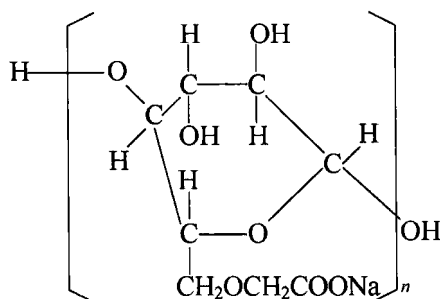
式中： n 为纤维素的聚合度。以纤维素为原料可以制得一系列泥浆降滤失剂，其中使用最多的是钠羧甲基纤维素，简称 CMC。

(1) 钠羧甲基纤维素的制备

先将棉花纤维用烧碱处理成碱纤维，然后在一定温度下与氯乙酸钠进行醚化反应，再经老化、干燥即可制得。在反应过程中，由于分子链降解，纤维素的聚合度 n 会明显降低。

(2) 钠羧甲基纤维素的结构特点和性质

钠羧甲基纤维素的结构式为



在由纤维素制成钠羧甲基纤维素的过程中，除了聚合度明显降低之外，另一变化是将 $-\text{CH}_2\text{COONa}$ （钠羧甲基）通过醚键连接到纤维素的葡萄糖单元上去。通常将纤维素分子每一葡萄糖单元上的 3 个羟基中，羟基上的氢被取代而生成醚的个数称为取代度或醚化度。研究表明，决定钠羧甲基纤维素性质和用途的因素主要有两个：一是聚合度 n ，二是取代度 d 。

聚合度是指组成每个钠羧甲基纤维素分子的环式葡萄糖的链节数。但在同一种 CMC 产品中，各个分子链并不是等长的，所以实际测得的聚合度是平均聚合度。一般棉纤维的平均聚合度约为 1800 ~ 2000。由于制备过程中纤维素发生降解，聚合度要降低至原来的 1/10 ~ 1/3，致使一般 CMC 产品的聚合度在 200 ~ 600 范围内；但仍属长链状大分子。

钠羧甲基纤维素的聚合度是决定其相对分子质量和水溶液粘度的主要因素。在相同的浓度、温度等条件下，不同聚合度的 CMC 水溶液的粘度有很大差别。聚合度越高，其水溶液的粘度越大。工业上常根据其水溶液粘度大小，将 CMC 分为 3 个等级，即

高粘 CMC：在 25℃ 时，1% 水溶液的粘度为 400 ~ 500 mPa · s。一般用做低固相泥浆的悬浮剂、封堵剂及增稠剂。其取代度约为 0.6 ~ 0.65，聚合度大于 700。

中粘 CMC：在 25℃ 时，2% 水溶液的粘度为 50 ~ 270 mPa · s。用于一般泥浆，既起降滤失作用，又可提高泥浆的粘度。其取代度约为 0.8 ~ 0.85，聚合度为 600 左右。

低粘 CMC：在 25℃ 时，2% 水溶液粘度小于 50 mPa · s。主要用做加重泥浆的降滤失剂，以免引起粘度过大。其取代度约为 0.8 ~ 0.9，聚合度为 500 左右。

取代度是决定钠羧甲基纤维素的水溶性、抗盐和抗钙能力的主要因素。从原理上说，葡萄糖环链节上的三个羟基都可以醚化，但以第一羟基的反应活性最强。取代度一般用被醚化的羟基数表示，最大值为 3。如果两个链节上只有一个羟基被醚化了，则取代度为 0.5。取代度小于 0.3 时不溶于水，小于 0.5 时难溶于水，在 0.5 以上时水溶性随取代度增加而增大。通常用做泥浆处理剂的 CMC 的取代度在 0.65 ~ 0.85 之间。取代度为 0.80 ~ 0.85 的高水溶性 CMC 适用于处理高矿化度泥浆。

钠羧甲基纤维素分子中羧钠基（—COONa）上的 Na⁺ 在水溶液中易电离，生成长链状的多价阴离子，故属于阴离子型聚电解质。聚电解质水溶液的许多性质与其分子在溶液中的形态有关，容易受到 pH 值、无机盐和温度等因素的影响。

在 CMC 的浓度较低时，其水溶液的粘度受 pH 值的影响较大。在等当点（pH = 8.25）附近，其水溶液粘度最大。因为此时羧钠基上的 Na⁺ 大多处于离解状态，—COO⁻ 之间的静电斥力使分子链易于伸展，所以表现为粘度较高。当溶液的 pH 值过低时，羧钠基（—COONa）将转化为难电离的羧基（—COOH），不利于链的伸展；当溶液的 pH 值过高时，—COO⁻ 中的电荷受到溶液中大量 Na⁺ 的屏蔽作用，使分子链的伸展也受到抑制。因此，过高和过低的 pH 值都会使 CMC 水溶液的粘度有所降低，在使用中应注意保持合适的 pH 值。

由于外加无机盐中的阳离子阻止—COONa 上的 Na⁺ 解离，因此会降低其水溶液的粘度。而且，无机盐与 CMC 的加入顺序对粘度下降的幅度有很大影响。从图 2-6 的实验结果可以看出，若将 CMC 先溶于水，再加 NaCl，则粘度下降的幅度远远小于先加 NaCl，然后再加 CMC 时下降的幅度。其原因是 CMC 在纯水中离解为聚阴离子，—COO⁻ 互相排斥使分子链呈伸展状态，再者分子中的水化基团已经充分水化，此时即使加入无机盐，去水化的作用不会十分显著，所以引起粘度下降的幅度会小些；与此相反，将 CMC 溶于 NaCl 溶液时，不仅 Na⁺ 会阻止—COONa 上的 Na⁺ 解离，电荷屏蔽作用促使 CMC 分子链发生卷曲，而且在盐溶液中，水化基团的水化受到一定限制，分子链的水化膜斥力会有所削弱，所以随 NaCl 含量增加，溶液粘度迅速下降。

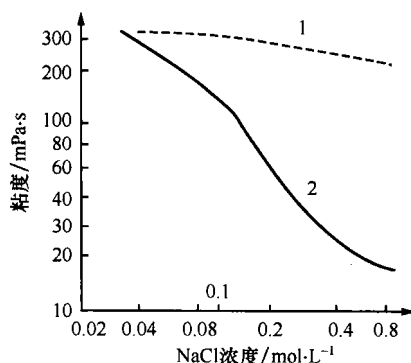


图 2-6 加入顺序对 CMC 溶液粘度的影响
1—NaCl 溶于 CMC 溶液中；2—CMC 溶于 NaCl 溶液中

此外，随温度升高，CMC 水溶液的粘度逐渐降低。这是由于在高温下分子链的溶剂化作用会明显减弱，使分子链容易变得弯曲。

纯净的钠羧甲基纤维素为白色纤维状粉末，具有吸湿性，溶于水后形成胶状液。它是长期以来国内外广泛使用的一种性能良好的降滤失剂。一般可抗温 130 ~ 150℃，若加入抗氧剂可使其抗温能力有所提高。

（3）钠羧甲基纤维素的降滤失机理

CMC 在泥浆中电离生成长链的多价阴离子。其分子链上的羟基和醚氧基为吸附基团，

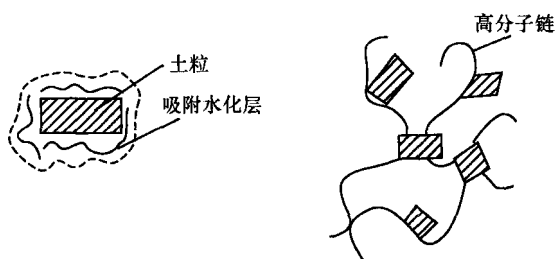


图 2-7 CMC 在粘土颗粒上的吸附方式

多个粘土细颗粒会同时吸附在 CMC 的一条分子链上，形成布满整个体系的混合网状结构，从而提高了粘土颗粒的聚结稳定性，有利于保持泥浆中细颗粒的含量，形成致密的滤饼，降低失水量（图 2-7）。此外，具有高粘度和弹性的吸附水化层对泥饼的堵孔作用和 CMC 溶液的高粘度也在一定程度上起降滤失的作用。

近年来，研究人员在提高 CMC 的抗温、抗盐能力方面做了不少研究工作。一方面在 CMC 的生产或使用过程中掺入某些抗氧化剂。例如常用的有机抗氧化剂有乙醇胺、苯胺、己二胺等，无机抗氧化剂有硫化钠、亚硫酸钠、硼砂、水溶性硅酸盐和硫黄等。这些抗氧化剂复配使用可以将 CMC 的抗温性提高 20 ~ 30℃。另一方面也可在 CMC 分子中引入某些基团。例如，CMC 与丙烯腈反应引入氰乙基后，再加入 NaHSO_3 引入磺酸基，所得产品的抗温、抗盐能力有明显提高。此外，还可使用甲醛使 CMC 适度交联以提高其抗温性等。

除 CMC 外，还有一些其他的纤维素类降滤失剂。如国外产品 Drispac 是一种相对分子质量较高的聚阴离子纤维素，容易分散在所有的水基泥浆中，从淡水直至饱和盐水泥浆均可适用。在低固相聚合物泥浆中，Drispac 能够显著地降低失水量并减薄泥饼厚度，并对页岩水化具有较强的抑制作用。与传统的 CMC 相比，Drispac 的抗温性能和抗盐、钙性能都有明显的提高。据报道，在国外 Drispac 的使用温度已达到 204℃。我国近年来也研制和生产了聚阴离子纤维素，其抗盐、抗钙性能和增粘、降滤失能力均比 CMC 有所增强。

2. 腐殖酸类

(1) 腐殖酸的来源及基本组成

腐殖酸主要来源于褐煤。褐煤是煤的一种，其煤化程度高于泥炭而低于烟煤，密度为 $0.8 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$ 。褐煤中含有 20% ~ 80% 的腐殖酸。

腐殖酸不是单一的化合物，而是一种复杂的、相对分子质量不均一的羟基苯羧酸的混合物。腐殖酸难溶于水，但易溶于碱溶液。它溶于 NaOH 溶液生成的腐殖酸钠是作为泥浆降滤失剂的有效成分。

根据腐殖酸在一些溶剂中的溶解度及其颜色，一般将其分为以下三种组分：可溶于酸、碱和水，呈黄色溶液的部分，称为黄腐殖酸（或富里酸）；可溶于碱和乙醇，但不溶于酸，呈棕色溶液的部分，称为棕腐殖酸（或草木樨酸）；不溶于酸和乙醇，仅溶于碱溶液，呈黑色溶液的部分，称为黑腐殖酸（或胡敏酸）。

组成腐殖酸的元素有 C（55% ~ 65%）、H（5.5% ~ 6.5%）、O（25% ~ 35%）、N（3% ~ 4%）及少量的 S 和 P。据文献报道，腐殖酸的相对分子质量可从几百到几十万。一般认为黄腐殖酸的相对分子质量为 300 ~ 400，棕腐殖酸的相对分子质量为 $2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$ ，黑腐殖酸的相对分子质量为 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$ ，目前对腐殖酸的结构尚未搞清，但可以确定

而羧钠基为水化基团。羟基和醚氧基通过与粘土颗粒表面上的氧形成氢键或与粘土颗粒断键边缘上的 Al^{3+} 之间形成配位键使 CMC 能吸附在粘土上；而多个羧钠基通过水化使粘土颗粒表面水化膜变厚，粘土颗粒表面 f 电位的绝对值升高，负电量增加，从而阻止粘土颗粒之间因碰撞而聚结成颗粒（护胶作用），并且多

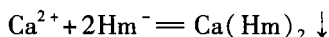
腐殖酸中含有多种含氧官能团，它们对腐殖酸的性质和应用有很大关系。主要的官能团有羧基、酚羟基、醇羟基、醌基、甲氧基和羰基等。由于其中有较多可与粘土吸附的官能团，特别是邻位双酚羟基，同时又含有水化作用较强的羧钠基等水化基团，使腐殖酸钠不但具有很好的降滤失作用，还兼有降粘作用。

(2) 腐殖酸的主要性质

腐殖酸虽难溶于水，但由于含有羧基和酚羟基，其水溶液仍呈弱酸性。褐煤与烧碱的反应生成的腐殖酸钠易溶于水，但腐殖酸钠的含量与所使用的烧碱浓度有关。如烧碱不足，腐殖酸不能全部溶解。但如烧碱过量，又使腐殖酸聚结沉淀，反而使腐殖酸钠含量降低。因此，当使用褐煤碱液作降滤失剂时，必须将烧碱的浓度控制在合适的范围内。

由于腐殖酸分子的基本骨架是碳链和碳环结构，因此其热稳定性很强。据报道，它在232℃的高温下仍能有效地控制淡水泥浆的失水量。

用褐煤碱液配制的泥浆在遇到大量钙侵时，腐殖酸钠会与 Ca^{2+} 生成难溶的腐殖酸钙沉淀而失效，此时应配合纯碱除钙。若用 Hm^- 表示腐殖酸根，则反应式为



但如果是在用大量褐煤碱液处理的泥浆中加入适量的 Ca^{2+} ，所生成的少量的腐殖酸钙胶状沉淀可使泥饼变得薄而韧，失水量也相应地降低。同时对泥浆中的 Ca^{2+} 浓度有一定的缓冲作用，即当 Ca^{2+} 被粘土吸附时，会使以上反应的化学平衡向左移动，从而使钙处理泥浆中的 Ca^{2+} 保持足够的量。因此，褐煤-石膏泥浆和褐煤-氯化钙泥浆都具有抑制粘土水化膨胀，防止泥页岩孔壁坍塌的作用。

(3) 常用的腐殖酸类降滤失剂

1) 褐煤碱液。褐煤碱液又称为煤碱剂，由经过加工的褐煤粉加适量烧碱和水配制而成，其中的主要有效成分为腐殖酸钠。除了起降滤失作用外，还可兼作降粘剂。当主要用做降失水剂使用时，浓度可配制得高一些。当用做降粘剂时，浓度可适当低些。现场常用的配方为：褐煤：烧碱：水 = 15：(1~3)：(50~200)。褐煤碱液降失水量的机理是：含有多官能团的阴离子型大分子腐殖酸钠吸附在粘土颗粒表面形成吸附水化层，同时提高粘土颗粒的 ζ 电位，因而增大颗粒聚结的机械阻力和静电斥力，提高泥浆的聚结稳定性，使其中的粘土颗粒保持多级分散状态，并有相对较多的细颗粒，所以能形成致密的泥饼。此外，粘土颗粒上的吸附水化膜具有堵孔作用，使泥饼更加致密。褐煤碱液是利用天然原料配制的一种低成本的降滤失剂，下面再介绍几种常用的腐殖酸改性产品。

2) 硝基腐殖酸钠。用浓度为 3 N 的稀 HNO_3 与褐煤在 40~60℃ 下进行氧化和硝化反应，可制得硝基腐殖酸，再用烧碱中和可制得硝基腐殖酸钠。制备时，两者的配比为腐殖酸： HNO_3 = 1:2。该反应使腐殖酸的平均相对分子质量降低，羧基增多，并将硝基引入分子中。硝基腐殖酸钠具有良好的降滤失和降粘作用。其突出特点：一是热稳定性高，抗温可达 200℃ 以上；二是抗盐能力比褐煤碱液明显增强，在含盐 20%~30% 的情况下仍能有效地控制失水量和粘度。其抗钙能力也较强，可用于配制不同 pH 值的石灰泥浆。

3) 铬腐殖酸。铬腐殖酸是褐煤与 $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (或 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 反应后的生成物，反应时褐煤与 $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 的质量比为 3:1 或 4:1。在 80℃ 以上的温度下，分别发生氧化和螯合两步反应。氧化使腐殖酸的亲水性增强，同时 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 被还原成 Cr^{3+} ；然后再与氧化腐殖酸或腐殖酸进行螯合。铬腐殖酸在水中有较大的溶解度，其抗盐、抗钙能力也比腐殖酸钠强。

铬腐殖酸也可在孔内高温条件下通过在煤碱剂处理的泥浆中加重铬酸钠转化而得。试验表明，它既有降滤失作用，又有降粘作用。特别是它与铁铬盐配合使用时（常用配比为铬褐煤:铁铬盐 = 1:2），有很好的协同效应。据报道，由铁铬盐、铬腐殖酸和表面活性剂（如 P-30 或 Span-80 等）组成的泥浆具有很高的热稳定性和较好的防塌效果，曾在 6280 m 的高温深井（孔底温度为 235℃）和易塌地层中使用，效果良好。

4) 磺甲基褐煤。褐煤与甲醛、 Na_2SO_4 （或 NaHSO_3 ）在 pH 为 9~11 的条件下进行磺甲基化反应，可制得磺甲基褐煤，其代号为 SMC。所得产品进一步用 $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 进行氧化和螯合，生成的磺甲基腐殖酸铬处理效果会更好。由于引入了磺甲基水化基团，与煤碱剂相比，磺甲基褐煤的降滤失效果更进一步增强。磺甲基褐煤是我国用于深井的“三磺”处理剂之一。其主要特点是具有很强的热稳定性，在 200~230℃ 的高温下能有效地控制淡水泥浆的失水量和粘度。其缺点是抗盐效果较差，在 200℃ 单独使用时，抗盐不超过 3%。但与磺甲基酚醛树脂配合处理时，抗盐能力可大大提高。

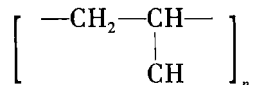
在腐殖酸类处理剂中，还有防塌效果较好的 KCl，其中含有约 55% 的硝基腐殖酸钾，腐殖酸钾也可应用于防塌泥浆体系。此外，由腐殖酸与液氮反应制得的腐殖酸酰胺可用做油包水乳化泥浆的辅助乳化剂。

3. 丙烯酸类聚合物

丙烯酸类聚合物是低固相聚合物泥浆的主要处理剂类型之一。制备这类聚合物的主要原料有丙烯腈、丙烯酰胺、丙烯酸和丙烯磺酸等。根据所引入官能团、相对分子质量、水解度和所生成盐类的不同，可合成一系列泥浆处理剂。这里仅介绍较常用的降滤失剂水解聚丙烯腈及其盐类、PAC 系列产品和丙烯酸盐 SK 系列产品。

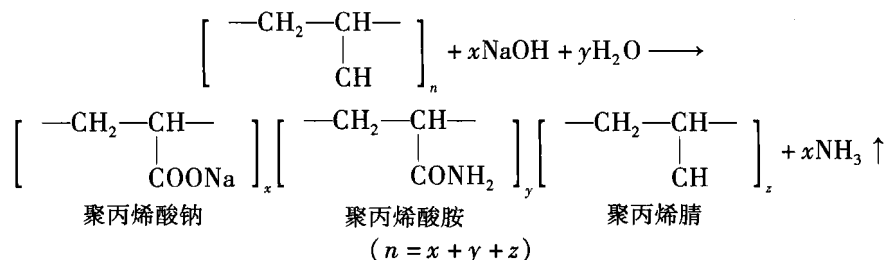
(1) 水解聚丙烯腈

聚丙烯腈是制造腈纶（人造羊毛）的合成纤维材料，目前用于泥浆的主要是腈纶废丝经碱水解后的产物，外观为白色粉末，密度 1.14~1.15 g/cm³，代号为 HPAN。聚丙烯腈是一种由丙烯腈（ $\text{CH}_2=\text{CHCN}$ ）合成的高分子聚合物。其结构式为



式中： n 为平均聚合度，大约为 235~3760，一般产品的平均相对分子质量为 12.5 万~20 万。聚丙烯腈不溶于水，不能直接用于处理泥浆。只有经过水解生成水溶性的水解聚丙烯腈之后，才能在泥浆中起降滤失作用。由于水解时所用的碱、温度和反应时间不同，最后所得的产物及其性能也会有所差别。

在 95~100℃ 温度下，聚丙烯腈在 NaOH 溶液中容易发生水解，生成的水解聚丙烯腈常用代号 Na-HPAN 表示。水解反应式可表示如下：



由上式可见,水解聚丙烯腈可看做是丙烯酸钠、丙烯酰胺和丙烯腈的三元共聚物。水解反应后产物中的丙烯酸单元和丙烯酸胺单元的总和与原料的平均聚合度之比 $(x+y)/(x+y+z)$ 称为该水解产物的水解度。其分子链中的腈基 ($-\text{CN}$) 和酰胺基 ($-\text{CONH}_2$) 为吸附基团,羧钠基 ($-\text{COONa}$) 为水化基团。腈基在孔底的高温 and 碱性条件下,通过水解可转变为酰胺基,进一步水解则转变为羧钠基。因此,在配制水解聚丙烯腈泥浆时,可以少加一点烧碱,以便保留一部分酰胺基和腈基,使吸附基团与水化基团保持合适的比例。实际使用中也证明水解聚丙烯腈的水解接近完全时,降滤失性能下降。所加入的聚丙烯腈与烧碱之比,一般最高时为 2.5:1,最低时为 1:1。

水解聚丙烯腈处理泥浆的性能,主要取决于聚合度和分子中的羧钠基与酰胺基之比(即水解程度)。聚合度较高时,降滤失性能比较强,并可增加泥浆的粘度和切力;而聚合度较低时,降滤失和增粘作用均相应减弱。为了保证其降滤失效果,羧钠基与酰胺基之比最好控制在 2:1 ~ 4:1。

由于 Na-HPAN 分子的主链为 C—C 键,还带有热稳定性很强的腈基,因此,可抗 200℃ 以上高温。该处理剂的抗盐能力也较强,但抗钙能力较弱。当 Ca^{2+} 浓度过大时,会产生絮状沉淀。

除 Na-HPAN 外,目前常用的同类产品还有水解聚丙烯腈钙盐 (Ca-HPAN) 和聚丙烯腈铵盐 (NH_4 -HPAN)。Ca-HPAN 具有较强的抗盐、抗钙能力,在淡水泥浆和海水泥浆中都有良好的降滤失效果。 NH_4 -HPAN 除了降滤失作用外,还具有抑制粘土水化分散的作用,因此,常用做页岩抑制剂。

(2) PAC 系列产品

PAC 系列产品是指各种复合离子型的聚丙烯酸盐 (PAC) 聚合物,实际上是具有不同取代基的乙烯基单体及其盐类的共聚物,通过在分子链节上引入不同含量的羧基、羧钠基、羧胺基、酰胺基、腈基、磺酸基和羟基等共聚而成。该系列产品主要用于聚合物泥浆体系。由于各种官能团的协同作用,该类聚合物在各种复杂地层和不同的矿化度、温度条件下均能发挥其作用。只要调整好聚合物分子链节中各官能团的种类、数量、比例、聚合度及分子构型,就可设计和研制出一系列的处理剂,以满足降滤失、增粘和降粘等要求。其中应用较广的是 PACI41、PACI42 和 PACI43 三种产品。

1) PACI41。是丙烯酸、丙烯酰胺、丙烯酸钠和丙烯酸钙的四元共聚物。它在降滤失的同时,还兼有增粘作用,并且还能调节流型,改进泥浆的剪切稀释性能。该处理剂能抗 180℃ 的高温,抗盐可达饱和。

2) PACI42。是丙烯酸、丙烯酰胺、丙烯腈和丙烯磺酸钠的共聚物。在降滤失的同时,其增粘幅度比 PACI41 小。主要在淡水、海水和饱和盐水泥浆中用做降滤失剂。在淡水泥浆中,其推荐加量为 0.2% ~ 0.4%;在饱和盐水泥浆中,推荐加量为 1.0% ~ 1.5%。

3) PACI43。是由多种乙烯基单体及其盐类共聚而成的水溶性高聚物,其相对分子质量为 150 万 ~ 200 万,分子链中含有羧基、羧钠基、羧钙基、酰胺基、腈基和磺酸基等多种官能团。该产品为各种矿化度的水基泥浆的降滤失剂,并且能抑制泥页岩水化分散。在淡水泥浆中的推荐加量为 0.2% ~ 0.5%;在海水和饱和盐水泥浆中,推荐加量为 0.5% ~ 2%。

(3) 丙烯酸盐 SK 系列产品

该系列产品为丙烯酸盐的多元共聚物。其外观为白色粉末,易溶于水,水溶液呈碱

性。主要用做聚合物泥浆的降滤失剂。但不同型号的产品在性能上有所区别。例如，SK-1 可用于无固相完井液和低固相泥浆，在配合用 NaCl、CaCl₂ 等无机盐加重的过程中，主要起降滤失和增粘的作用。SK-2 具有较强的抗盐、抗钙能力，是一种不增粘的降滤失剂。SK-3 主要用在当聚合物泥浆受到无机盐污染后，作为降粘剂，同时可改善泥浆的热稳定性，降低高温高压失水量。

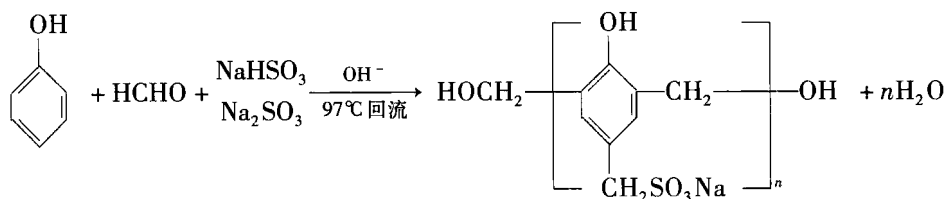
4. 树脂类

该类产品是以酚醛树脂为主体，经磺化或引入其他官能团而制得。其中磺甲基酚醛树脂是最常用的产品。

(1) 磺甲基酚醛树脂

磺甲基酚醛树脂 (SMP-1, SMP-2) 是一种抗高温降滤失剂。其合成路线是：先在酸性条件 (pH=3~4) 下使甲醛与苯酚反应，生成线型酚醛树脂；再在碱性条件下加入磺甲基化试剂进行分步磺化；通过适当控制反应条件，可得到磺化度较高和相对分子质量较大的产品。

它的另一种合成路线是：将苯酚、甲醛、亚硫酸钠和亚硫酸氢钠一次投料，在碱催化条件下，缩合和磺化反应同时进行，最后生成磺甲基酚醛树脂。其反应式为



磺甲基酚醛树脂分子的主链由亚甲基桥和苯环组成，又引入了大量磺酸基，故热稳定性强，可抗 180~200℃ 的高温。因引入磺酸基的数量不同，抗无机电解质的能力会有所差别。目前使用量很大的 SMP-1 型产品可用于矿化度小于 $1 \times 10^5 \text{ mg/L}$ 的泥浆，而 SMP-2 型产品可抗盐至饱和，抗钙也可达 2000 mg/L，是主要用于饱和盐水泥浆的降滤失剂。此外，磺甲基酚醛树脂还能改善滤饼的润滑性，对孔壁也有一定的稳定作用。其加量通常在 3%~5% 之间。

(2) 磺化木质素磺甲基酚醛树脂缩合物 (SLSP)

该产品是磺化木质素与磺甲基酚醛树脂的缩合物，代号为 SLSP。合成 SLSP 的反应一般分两步进行。首先合成磺甲基酚醛树脂，其原料和反应步骤同前，第二步再与磺化木质素缩合得到 SLSP。

SLSP 与磺甲基酚醛树脂有相似的优良性能，但在原来树脂的基础上引入了一部分磺化木质素。所以 SLSP 在降低泥浆失水量的同时，还有优良的稀释特性。该产品的投产还有助于解决造纸废液引起的环境污染问题，成本也有所下降。缺点是该产品在泥浆中比较容易起泡，必要时需配合加入消泡剂。

(3) 磺化褐煤树脂

磺化褐煤树脂是褐煤中的某些官能团与酚醛树脂通过缩合反应所制得的产品。在缩合反应过程中，为了提高泥浆的抗盐、抗钙和抗温能力，还使用了一些聚合物单体或无机盐进行接枝和交联。该类降滤失剂中比较典型的产品有国外常用的 Resinex 和国内常用的 SPNH。

Resinex 是自 20 世纪 70 年代后期以来国外常用的一种抗高温降滤失剂，由 50% 的磺化褐煤和 50% 的特种树脂组成。产品外观为黑色粉末，易溶于水，与其他处理剂有很好的相容性。据报道，在盐水泥浆中抗温可达 230℃，抗盐可达 $1.1 \times 10^5 \text{ mg/L}$ 。在含钙量为 2000 mg/L 的情况下，仍能保持泥浆性能稳定。并且在降滤失的同时，基本上不会增大泥浆的粘度，在高温下不会发生胶凝。因此，特别适合于在高密度深井泥浆中使用。

SPNH 是以褐煤和腈纶废丝为主要原料，通过采用接枝共聚和磺化的方法制得的一种含有羟基、羰基、亚甲基、磺酸基、羧基和腈基等多种官能团的共聚物。SPNH 主要起降滤失作用，但同时还具有一定的降粘作用。其抗温和抗盐、抗钙能力均与 Resinex 相似。总的来看，其性能优于同类的其他磺化处理剂。

5. 淀粉类

淀粉的结构与纤维素相似，也属于碳水化合物，是最早使用的泥浆降滤失剂之一。淀粉从谷物或玉米中分离出来，它在 50℃ 以下不溶于水，温度超过 55℃ 以上开始溶胀，直至形成半透明凝胶或胶体溶液。加碱也能使它迅速而有效地溶胀。其他化学性质与纤维素相似，同样可以进行酯化、醚化、羧甲基化、接枝和交联反应，从而制得一系列改性产品。

在某些泥浆中，加入淀粉不仅可以降低失水量，而且还有助于提高泥浆中粘土颗粒的聚结稳定性。淀粉在淡水、海水和饱和盐水泥浆中均可使用。经过预先胶化的淀粉，在加热时会导致外部的支链壳破裂，于是释放出内部的直链淀粉。直链淀粉更易吸水膨胀，形成类似于海绵的囊状物。因此，淀粉的降滤失机理一方面是它吸收水分，减少了泥浆中的自由水；另一方面是形成的囊状物可进入泥饼的细缝中，从而堵塞水的通路，进一步降低了泥饼的渗透性。

淀粉在使用时，泥浆的矿化度最好大一些，并且 pH 值最好大于 11.5，否则淀粉容易发酵变质。若这两个条件均不具备时，可在泥浆中加入适量的防腐剂。在高温下，淀粉容易降解，效果变差。如果温度超过 120℃，淀粉将完全降解而失效，故它不能用于深井或超深井中。高矿化度体系对细菌侵蚀有抑制作用，国内外在温度较低、矿化度较高的环境下，已广泛使用淀粉作为降滤失剂。在饱和盐水泥浆中，淀粉是经常使用的一种降滤失剂。

羧甲基淀粉是淀粉的改性产品，代号为 CMS。在碱性条件下，淀粉与氯乙酸发生醚化反应即制得羧甲基淀粉。从现场试验情况看，CMS 降滤失效果好，而且作用速度快。在提粘方面，对塑性粘度影响小，而对动切力影响大，因而有利于携带岩粉。并且由于价格便宜，选用它作降滤失剂可降低泥浆成本。尤其是钻盐膏层时，可使泥浆性能稳定，失水量低，并具有防塌作用。改性淀粉也更适于在盐水泥浆中使用，尤其在饱和盐水泥浆中效果最好。

羟丙基淀粉的代号为 HPS。在碱性条件下，淀粉与环氧乙烷或环氧丙烷发生醚化反应，便制得羟乙基淀粉或羟丙基淀粉。由于这种改性淀粉的分子链节上引入了羟基，其水溶性、增粘能力和抗微生物作用的能力都得到了显著的改善。羟丙基淀粉为非离子型高分子材料，对高价阳离子不敏感，抗盐、抗钙污染能力很强。在处理 Ca^{2+} 污染的泥浆对比 CMC 效果更好。HPS 可与酸溶性暂堵剂 QS-2 等配制成无粘土相暂堵型泥浆，有利于保护储层。在阳离子型或两性离子型聚合物泥浆中，HPS 可有效地降低泥浆的失水量。

抗温淀粉 DFD-140 是一种白色或淡黄色的颗粒，分子链节上同时含有阳离子基团和非离子基团，而不含阴离子基团。DFD-140 抗温性能较好，在 4% 盐水泥浆中可以稳定

到 140℃，在饱和盐水泥浆中可以稳定到 130℃，并且可与几乎所有水基泥浆体系和处理剂相配伍。

综上所述，降滤失剂的种类和品种很多，性能和生产成本也各不相同，在进行泥浆配方设计时，必须根据地层情况和钻孔的要求，合理选用降滤失剂。

（三）增粘剂

在“泥浆的流变性”一节将详细阐述泥浆的流变性与携带岩屑的关系。为了保证孔眼清洁和安全钻进，泥浆的粘度和切力必须保持在一个合适的范围。当粘度过低时，一种方法是通过增大膨润土含量来提粘。但在聚合物泥浆中，该法会引起泥浆密度的固相含量增大，不利于实现低固相和提高机械钻速，对储层保护也有不利影响。因此，经常采用添加增粘剂的方法。增粘剂均为高分子聚合物，由于其分子链很长，在分子链之间容易形成网状结构，因此，能显著地提高泥浆的粘度。

增粘剂除了起增粘作用外，还往往兼作页岩抑制剂（包被剂）、降滤失剂及流型改进剂。因此，使用增粘剂常常有利于改善泥浆的流变性，也有利于孔壁稳定。本节介绍两种重要的增粘剂，即 XC 生物聚合物和羟乙基纤维素。

1. XC 生物聚合物

XC 生物聚合物又称为黄原胶，是由黄原菌类作用于碳水化合物而生成的高分子链状多糖聚合物，相对分子质量可高达 5×10^6 ，易溶于水。是一种适用于淡水、盐水和饱和盐水泥浆的高效增粘剂，加入很少的量（0.2% ~ 0.3%）即可产生较高的粘度，并兼有降滤失作用。它的另一个显著特点是具有优良的剪切稀释性能，能够有效地改进流型（即增大动塑比，降低 n 值）。用它处理的泥浆在高剪切速率下的极限粘度很低，有利于提高机械钻速；而在环形空间的低剪切速率下又具有较高的粘度，并有利于形成平板形层流，使泥浆携带岩屑的能力明显增强。

一般认为，XC 生物聚合物抗温可达 120℃，在 140℃ 温度下也不会完全失效。据报道，国外曾在孔底温度为 148.9℃ 的油井中使用过。其抗盐、抗钙能力也十分突出，是配制饱和盐水泥浆的常用处理剂之一。有时它需与三氯酚钠等杀菌剂配合使用，因为在一定条件下，空气和泥浆中的各种细菌会使其发生酶变，从而降解失效。

2. 羟乙基纤维素

羟乙基纤维素（代号 HEC）是一种水溶性的纤维素衍生物。外观为白色或浅黄色固体粉末。它无臭、无味、无毒，溶于水后形成黏稠的胶状液。

该处理剂是由纤维素和环氧乙烷经羟乙基化制成的产品，主要在聚合物泥浆中起增粘作用。其显著特点是在增粘的同时不增加切力，因此，在泥浆切力过高致使开泵困难时常被选用。增粘程度一般与时间、温度和含盐量有关，抗温能力可达 107 ~ 121℃。

（四）页岩抑制剂

概括地讲，处理剂在泥浆中所起的作用主要有两个：一是维持泥浆性能稳定，二是保持孔壁稳定。凡是能有效地抑制页岩水化膨胀和分散，主要起稳定孔壁作用的处理剂均可称为页岩抑制剂，又称防塌剂。本节简要介绍几种重要的有机防塌剂。

1. 沥青类

沥青是原油精炼后的残留物。将沥青进行一定的加工处理后，可制成泥浆用的沥青类

页岩抑制剂，其主要产品有以下几种。

(1) 氧化沥青

氧化沥青是将沥青加热并通入空气进行氧化后制得的产品。沥青经氧化后，沥青质含量增加，胶质含量降低。在物理性质上表现为软化点上升。使用不同的原料并通过控制氧化程度可制备出软化点不同的氧化沥青产品。

氧化沥青为黑色均匀分散的粉末，难溶于水，多数产品的软化点为 $150 \sim 160^{\circ}\text{C}$ ，细度为通过 60 目筛的部分占 85%。主要在水基泥浆中用做页岩抑制剂，并兼有润滑作用，一般加量为 1% ~ 2%。此外，还可分散在油基泥浆中起增粘和降滤失作用。

氧化沥青的防塌作用主要是一种物理作用。它能够在一定的温度和压力下软化变形，从而封堵裂隙，并在孔壁上形成一层致密的保护膜。在软化点以内，随温度升高，氧化沥青的降滤失能力和封堵裂隙能力增加，稳定孔壁的效果增强。但超过软化点后，在正压差作用下，会使软化后的沥青流入岩石裂隙深处，因而不能再起封堵作用，稳定孔壁的效果变差。因此，在选用该产品时，软化点是一个重要的指标。应使其软化点与所处理孔段的井温相近，软化点过低或过高都会使处理效果大为降低。

(2) 磺化沥青

目前使用的磺化沥青实际上是磺化沥青的钠盐，代号为 SAS。它是常规沥青用发烟 H_2SO_4 或 SO_3 进行磺化后制得的产品。沥青经过磺化，引入了水化性能很强的磺酸基，使之从不溶于水变为可溶于水。磺化时应控制产品中含有的水溶性物质约占 70%，既溶于水又溶于油的部分约占 40%。磺化沥青为黑褐色膏状胶体或粉剂，软化点高于 80°C ，密度约为 1 g/cm^3 。

磺化沥青的防塌机理是：磺化沥青中由于含有磺酸基，水化作用很强，当吸附在页岩晶层断面上时，可阻止页岩颗粒的水化分散；同时不溶于水的部分又能起到填充孔喉和裂缝的封堵作用，并可覆盖在页岩表面，改善泥饼质量。但随着温度的升高，磺化沥青的封堵能力会有所下降。磺化沥青还在泥浆中起润滑和降低高温高压失水量的作用，是一种多功能的有机处理剂。

(3) 天然沥青和改性沥青

国内外使用天然沥青和各种化学改性沥青产品稳定孔壁已有多年的历史。不同沥青类产品稳定孔壁的机理不同。沥青粉的主要作用机理是，在钻遇页岩之前，向泥浆中加入该种物质，当钻遇页岩地层时，若沥青的软化点与地层温度相匹配，在钻孔内正压差作用下，沥青产品会发生塑性流动，挤入页岩孔隙、裂缝和层面，封堵地层层理与裂隙，提高对裂缝的粘结力，在孔壁处形成具有护壁作用的内、外泥饼。其中外泥饼与地层之间有一层致密的保护膜，使外泥饼难以被冲刷掉，从而可阻止水进入地层，起到稳定孔壁的作用。

此外，为了提高其封堵与抑制能力，可将沥青类产品与其他有机物进行缩合。如磺化沥青与腐殖酸钾的缩合物 KAHM，俗称高改性沥青粉，在各类水基泥浆中均有很好的防塌效果。

2. 钾盐腐殖酸类

腐殖酸的钾盐、高价盐及有机硅化物等均可用做页岩抑制剂，其产品有腐殖酸钾、硝基腐殖酸钾、磺化腐殖酸钾、有机硅腐殖酸钾、腐殖酸钾铝、腐殖酸铝和腐殖酸硅铝等。

其中腐殖酸钾盐的应用更为广泛，下面作以扼要的介绍。

(1) 腐殖酸钾

腐殖酸钾 (KHm) 是以褐煤为原料，用 KOH 提取而制得的产品。外观为黑褐色粉末，易溶于水，水溶液的 pH 值为 9 ~ 10。主要用做淡水泥浆的页岩抑制剂，并兼有降粘和降滤失作用。抗温能力为 180℃，一般加量为 1% ~ 3%。

(2) 硝基腐殖酸钾

硝基腐殖酸钾是用 HNO₃ 对褐煤进行处理后，再用 KOH 中和提取而制得的产品。外观为黑褐色粉末，易溶于水，水溶液的 pH 值为 8 ~ 10。其性能与腐殖酸钾相似。它与磺化酚醛树脂的缩合物是一种无荧光防塌剂，代号为 MHP，适于在勘探孔中使用。

(3) 防塌剂 K21

防塌剂 K21 是硝基腐殖酸钾、特种树脂、三羟乙基酚和磺化石蜡等的复配产品。为黑色粉末，易溶于水，水溶液呈碱性，是一种常用的页岩抑制剂，具有较强的抑制页岩水化的作用，并能降粘和降低失水量，抗温可达 180℃。

页岩抑制剂类产品还有许多。例如，各种聚合物类和聚合醇类有机处理剂，硅酸盐类、钾盐类、铵盐类和正电胶等无机处理剂都是性能优良的页岩抑制剂。

(五) 堵漏剂

为了处理钻孔漏失，在现场还需使用各种类型的堵漏剂。堵漏剂又称为堵漏材料，通常将其分为以下 3 种类型。

1. 纤维状堵漏剂

常用的纤维状堵漏剂有棉纤维、木质纤维、甘蔗渣和锯末等。由于这些材料的刚度较小，因而容易被挤入发生漏失的地层孔洞中。如果有足够多的这种材料进入孔洞，就会产生很大的摩擦阻力，从而起到封堵作用。但如果裂缝太小，纤维状堵漏剂无法进入，只能在孔壁上形成假泥饼。一旦重新循环泥浆，就会被冲掉，起不到堵漏作用。因此，必须根据裂缝大小选择合适的纤维状堵漏剂的尺寸。

2. 薄片状堵漏剂

薄片状堵漏剂有塑料碎片、赛璐珞粉、云母片和木片等。这些材料可能平铺在地层表面，从而堵塞裂缝。若其强度足以承受泥浆的压力，就能形成致密的泥饼。若强度不足，则被挤入裂缝，在这种情况下，其封堵作用则与纤维状材料相似。

3. 颗粒状堵漏剂

颗粒状堵漏剂主要指坚果壳（即核桃壳等）和具有较高强度的碳酸盐岩石颗粒。这类材料大多是通过挤入孔隙而起到堵漏作用的。

堵漏剂种类繁多，与其他类型处理剂不同的是，大多数堵漏剂不是专门生产的规范产品，而是根据就地取材的原则选用的。堵漏剂的堵漏能力一般取决于它的种类、尺寸和加量。根据试验结果，不同堵漏剂的堵漏能力见表 2-6，可供参考。

一般来讲，地层缝隙越大、漏速越大时，堵漏剂的加量亦应越大。纤维状和薄片状堵漏剂的加量一般不应超过 5%。为了提高堵塞能力，往往将各种类型和尺寸的堵漏剂混合加入，但各种材料的比例要掌握适当。

表 2-6 各种堵漏剂的堵漏能力

堵漏剂名称	形 状	尺 寸	质量浓度/kg · m ⁻³	最大堵塞缝/mm
坚果壳	颗粒状	5 mm ~ 10 号筛目占 50%	57	5.20
塑料碎片	颗粒状	10 ~ 100 号筛目占 50%	57	5.20
石灰石粉	颗粒状	10 ~ 100 号筛目占 50%	114	3.18
硫矿粉	颗粒状	10 ~ 100 号筛目占 50%	980	3.18
坚果壳	颗粒状	10 ~ 16 号筛目占 50%	57	3.18
多孔隙珍珠石	颗粒状	5 mm ~ 10 号筛目占 50% 10 ~ 100 号筛目占 50%	172	2.69
赛璐珞粉	薄片状	19 mm 薄片	23	2.69
锯 末	纤维状	6 mm 大小	29	2.69
树 皮	纤维状	13 mm 大小	29	2.69
干 草	纤维状	12.5 mm 大小	29	2.69
棉子皮	颗粒状	粉末	29	1.53
赛璐珞粉	薄片状	13 mm 大小	23	1.42
木 屑	纤维状	6 mm 大小	23	0.91
锯 末	纤维状	1.6 mm 大小	57	0.43



复习思考题

1. 简述粘土矿物分类和化学组成。
2. 什么叫粘土的水化作用，影响因素有哪些？
3. 说明动力稳定性与聚结稳定性的关系。
4. 我国的泥浆处理剂按其功能是如何分类的？试写出常见的降滤失剂、增粘剂和降粘剂各三种。
5. 分别以丹宁酸钠和 CMC 为例，阐述降粘剂和降滤失剂的一般作用机理。

第三章 泥浆的性能

第一节 泥浆的流变性

泥浆流变性是指在外力作用下，泥浆发生流动和变形的特性，其中流动性是主要的方面。该特性通常是用泥浆的流变曲线和塑性粘度、动切力、静切力、表观粘度等流变参数来进行描述的。泥浆流变性是泥浆的一项基本性能，它在解决下列钻孔问题时起着十分重要的作用：①携带岩屑，保证孔底和孔眼的清洁；②悬浮岩屑与重晶石；③提高机械钻速；④保持孔眼规则和保证孔内安全。此外，泥浆的某些流变参数还直接用于钻孔环空水力学的有关计算。因此，对泥浆流变性的深入研究，以及对泥浆流变参数的优化设计和有效调控是泥浆工艺技术的一个重要方面。

一、流体的基本流型及其特点

(一) 流体流动的基本概念

1. 剪切速率和剪切应力

液体与固体的重要区别之一是液体具有流动性，就是说，加很小的力就能使液体发生变形，而且只要力作用的时间相当长，很小的力就能使液体发生很大的变形。以河水在水面的流速分布为例，可以观察到越靠近河岸，流速越小，河中心处流速最大，河面水的流速分布如图 3-1 所示。管道中水的流速分布是中心处流速最大，越向周围流速越小，靠近管壁处流速为零。流速剖面形状为抛物线。从立体来看，它像一个套筒望远镜或拉杆天线，如图 3-2 所示。

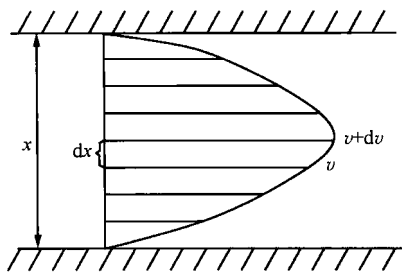


图 3-1 水在河面的流速分布

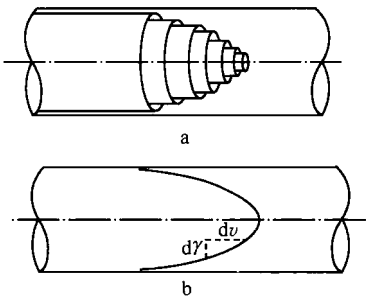


图 3-2 在圆形管路中水的流速分布
a—流速分布示意图；b—流速分布曲线

水中各点的流速不同，可以设想将其分成许多薄层。通过管道中心线上的点作一条流速的垂线，自中心线上的点沿垂线向管壁移动位置，随着位置的变化流速也在发生变化。液流中各层的流速不同这个现象，通常是用剪切速率（或称流速梯度）这个物理量来描

述的。如果在垂直于流速的方向上取一段无限小的距离 dx ，流速由 v ，变化到 $v + dv$ ，则比值 dv/dx 表示在垂直于流速方向上单位距离流速的增量，即剪切速率。剪切速率也可用符号 γ 来表示。若剪切速率大，则表示液流中各层之间流速的变化大；反之，流速的变化则小。在 SI 单位制中，流速的单位为 m/s ，距离的单位为 m ，所以剪切速率的单位为 s^{-1} 。泥浆在循环过程中，由于它在各个部位的流速不同，因此剪切速率也不相同。流速越大之处剪切速率越高，反之则越低。一般情况下，沉砂池处剪切速率最低，大约在 $10 \sim 20 s^{-1}$ ；环形空间 $50 \sim 250 s^{-1}$ ；钻杆内 $100 \sim 1000 s^{-1}$ ；钻头水眼处最高，可达 $10000 \sim 100000 s^{-1}$ 。

液流中各层的流速不同，故层与层之间必然存在着相互作用。由于液体内部内聚力的作用，流速较快的液层会带动流速较慢的相邻液层，而流速较慢的液层又会阻碍流速较快的相邻液层。这样在流速不同的各液层之间会发生内摩擦作用，即出现成对的内摩擦力（即剪切力），阻碍液层剪切变形。通常将液体流动时所具有的抵抗剪切变形的物理性质称为液体的黏滞性。

为了确定内摩擦力与哪些因素有关，牛顿通过大量实验研究提出了液体内摩擦定律，通常称为牛顿内摩擦定律。其内容如下。

液体流动时，液体层与层之间的内摩擦力（ F ）的大小与液体的性质（ μ ）及温度有关，并与液层间的接触面积（ S ）和剪切速率（ γ ）成正比，而与接触面上的压力无关，即

$$F = \mu S \gamma \quad (3-1)$$

内摩擦力 F 除以接触面积 S 即得液体内的剪切应力 γ ，剪切应力可理解为单位面积上的剪切力，即

$$\tau = F/S = \mu \gamma \quad (3-2)$$

以上两式中， μ 是量度液体黏滞性大小的物理量，通常称为粘度。 τ 的物理意义是产生单位剪切速率所需要的剪切应力。 τ 越大，表示产生单位剪切速率所需要的剪切应力越大。粘度是液体的性质，不同液体有不同的 μ 值。 μ 还与温度有关，液体的粘度一般随温度的升高而降低。

在 SI 单位制中， τ 的单位是 Pa ， γ 的单位是 s^{-1} ， μ 的单位是 $Pa \cdot s$ 。由于 $Pa \cdot s$ 单位太大，在实际应用中一般用 $mPa \cdot s$ 表示液体的粘度。例如，在 $20^\circ C$ 时，水的粘度 $\mu = 1.0087 mPa \cdot s$ 。在工程应用中， μ 的常用单位为厘泊（cP）， $1 cP = 1 mPa \cdot s$ 。

式（3-2）是牛顿内摩擦定律的数学表达式。通常将剪切应力与剪切速率的关系遵守牛顿内摩擦定律的流体，称为牛顿流体；不遵守牛顿内摩擦定律的流体，称为非牛顿流体。水、酒精等大多数纯液体、轻质油、低分子化合物溶液以及低速流动的气体等均为牛顿流体，高分子聚合物的浓溶液和悬浮液等一般为非牛顿流体。大多数泥浆都属于非牛顿流体。

2. 流变模式和流变曲线

剪切应力和剪切速率是流变学中的两个基本概念，泥浆流变性的核心问题就是研究各种泥浆的剪切应力与剪切速率之间的关系。这种关系可以用数学关系式表示，也可以作出图线来表示。若用数学关系式表示时，称为流变方程，习惯上又称为流变模式，如式（3-2）就是牛顿流体的流变模式。若用图线来表示时，就称为流变曲线。

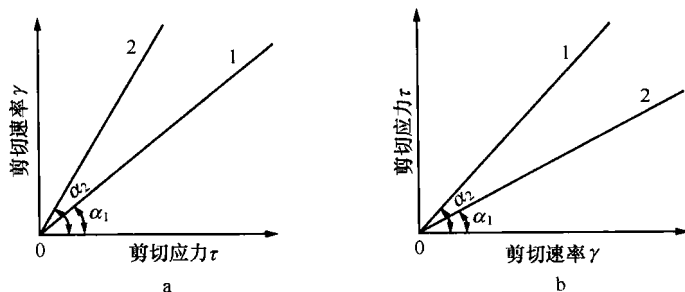


图 3-3 两种牛顿流体的流变曲线

a—剪切速率随剪切应力变化的曲线；b—剪切应力随剪切速率变化的曲线

当对某种泥浆进行实验，求出一系列的剪切速率与剪切应力数据时，即可在直角坐标图上作出剪切速率随剪切应力变化的曲线，或剪切应力随剪切速率变化的曲线。这两种形式是一样的，只是纵、横坐标互换了一下。鉴于目前各种文献著作中，两种表示方法同时存在，所以对它们都应该熟悉。图 3-3a 和 3-3b 分别为两种液体流变曲线的不同表示方法。由于是通过原点的直线，很显然两种液体均为牛顿流体。在图 3-3b 中，直线的斜率 $\tan\alpha = \tau/\gamma = \mu$ ，对某种液体来说， μ 是一个常数，说明在任何剪切速率下，牛顿流体的粘度不变。剪切速率 γ 每增加一倍，剪切应力 τ 也相应地增加一倍。也就是说，只用一个参数 μ 即可描述牛顿流体的流变性。从图中还可看出， α 越大， $\tan\alpha$ 越大，即液体的粘度 μ 也越大。显然，图中液体 1 的粘度比液体 2 的粘度高。

3. 流体的基本流型

按照流体流动时剪切速率与剪切应力之间的关系，流体可以划分为不同的类型，即所谓流型。除牛顿流型外，根据所测出的流变曲线形状的不同，又可将非牛顿流体的流型归纳为塑性流型、假塑性流型和膨胀流型。以上四种基本流型的流变曲线如图 3-4 所示。符合这四种流型的流体分别称为牛顿流体、塑性流体、假塑性流体和膨胀性流体。

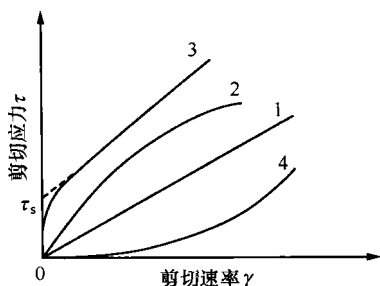


图 3-4 四种基本流型的曲线

1—牛顿流体；2—假塑性流体；

3—塑性流体；4—膨胀流体

前面已提到，牛顿流体是流变性最简单的流体。流变方程为式 (3-2)，其意义是，当牛顿流体在外力作用下流动时，剪切应力与剪切速率成正比。从牛顿流体的流变方程和流变曲线可以看出，这类流体有如下特点：当 $\tau > 0$ 时， $\gamma > 0$ ，因此只要对牛顿流体施加一个外力，即使此力很小，也可以产生一定的剪切速率，即开始流动。此外，其粘度不随剪切速率的增减而变化。

膨胀流体比较少见。从图 3-4 可发现其流动特点是：稍加外力即发生流动；粘度随剪切速率（或剪切应力）增加而增大，静置时又恢复原状。与假塑性流体相反，其流变曲线凹向剪切应力轴。这种流体在静止状态时，所含有的颗粒是分散的。当剪切应力增大时，部分颗粒会纠缠在一起形成网架结构，使流动阻力增大。

因为目前广泛使用的多数泥浆为塑性流体和假塑性流体，因此，下面将重点讨论这两

种类型的非牛顿流体。

(二) 塑性流体

高粘土含量的泥浆、高含蜡原油和油漆等都属于塑性流体。与牛顿流体不同，塑性流体当 $\gamma = 0$ 时， $\tau \neq 0$ 。也就是说，它不是加很小的剪切应力就开始流动，而是必须加一定的力才开始流动，这种使流体开始流动的最低剪切应力 (τ_s) 称为静切应力 (又称静协力、切力或凝胶强度)。从图 3-4 中塑性流体的流变曲线可以看出，当剪切应力超过 τ_s 时，在初始阶段剪切应力和剪切速率的关系不是一条直线，表明此时塑性流体还不能均匀地被剪切，粘度随剪切速率增大而降低 (图中曲线段)。继续增加剪切应力，当其数值大到一定程度之后，粘度不再随剪切速率增大而发生变化，此时流变曲线变成直线 (图中直线段)。此直线段的斜率称为塑性粘度 (表示为 μ_p)。延长直线段与剪切应力轴相交于一点 τ_0 ，通常将 τ_0 称为动切应力 (常简称为动切力或屈服值)。塑性粘度和动切力是泥浆的两个重要流变参数。

引入动切力之后，塑性流体流变曲线的直线段即可用下面的直线方程进行描述：

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma \tag{3-3}$$

此式即是塑性流体的流变模式。因是宾汉首先提出的，该式常称为宾汉模式，并将塑性流体称为宾汉塑性流体。

塑性流体表现上述流动特性是与它的内部结构分不开的。例如，水基泥浆主要由粘土、水和处理剂所组成。粘土矿物具有片状或棒状结构，形状很不规则，颗粒之间容易彼此连接在一起，形成空间网架结构。研究表明，粘土颗粒可能出现如图 3-5 所描述的三种不同连接方式，即面-面、端-面和端-端连接。这是由于粘土颗粒表面的性质 (带电性和水化膜) 极不均匀引起的。片状的粘土颗粒有两种不同的表面，即带永久负电荷的板面 (简称

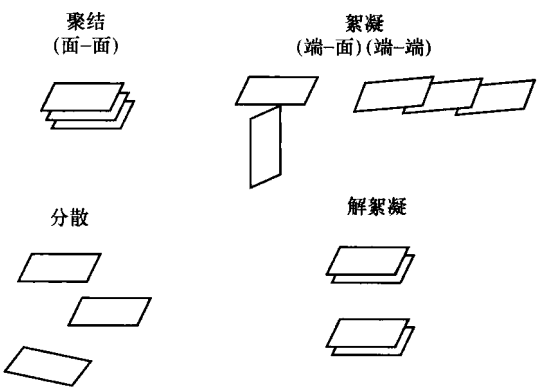


图 3-5 粘土颗粒连接方式

“面”) 和既可能带正电荷也可能带负电荷的端面 (简称“端”)，这样粘土表面在溶液中就可能形成两种不同的双电层。一般说来，粘土胶体颗粒的相互作用受三种力的支配，即双电层斥力、静电吸引力和范德华引力。粘土颗粒间净的相互作用力是斥力和吸力的代数和，因此在不同条件下，会产生以上三种不同的连接方式。例如，当端面带正电荷时，板面与端面就由于静电吸引力占优势而彼此连接；当加入可溶性电解质时，则由于其中的阳离子压缩双电层使 ζ 电位降低，从而降低了双电层斥力，于是引起端-面连接；如果加入的电解质足够多，双电层斥力降至某种程度之后，则会发生面-面连接。

三种不同的连接方式将产生不同的后果。面-面连接会导致形成较厚的片，即颗粒分散度降低，这一过程通常称为聚结；而端-面与端-端连接则形成三维的网架结构，特别是当粘土含量足够高时，能够形成布满整个空间的连续网架结构，胶体化学上称为凝胶结构，这一过程通常称为絮凝。与聚结和絮凝相对应的相反过程分别叫做分散和解絮凝，如

图 3-5 所示。

一般情况下，泥浆中的粘土颗粒都不同程度处在一定的絮凝状态。因此，要使泥浆开始流动，就必须施加一定的剪切应力，破坏絮凝时形成的这种连续网架结构。这个力即静切应力，由于它反映了所形成结构的强弱，因此又将静切应力称为凝胶强度。

在泥浆开始流动以后，由于初期的剪切速率较低，结构的拆散速度大于其恢复速度，拆散程度随剪切速率增加而增大，因此表现为粘度随剪切速率增加而降低（即图 3-4 中塑性流体的曲线段）。随着结构拆散程度增大，拆散速度逐渐减小，结构恢复速度相应增加。因此，当剪切速率增至一定程度，结构破坏的速度和恢复的速度保持相等（即达到动态平衡）时，结构拆散的程度将不再随剪切速率增加而发生变化，相应地粘度亦不再发生变化（图中直线段）。该粘度即泥浆的塑性粘度。因为该参数不随剪切应力和剪切速率而改变，所以对泥浆的水力计算是很重要的。从宾汉模式可以得出： $\mu_p = (\tau - \tau_0)/\gamma$ ，塑性粘度的单位为 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

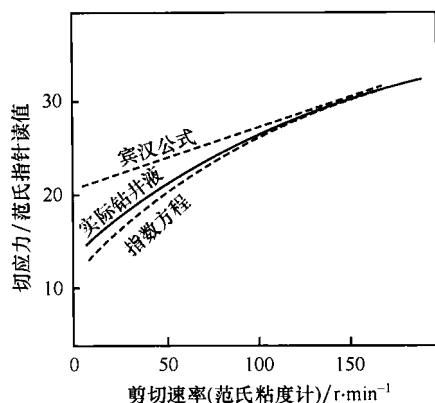


图 3-6 幂律模式和宾汉模式的比较

(三) 假塑性流体

某些泥浆、高分子化合物的水溶液以及乳状液等均属于假塑性流体。其流变曲线是通过原点并凸向剪切应力轴的曲线（图 3-6）。这类流体的流动特点是：施加极小的剪切应力就能产生流动，不存在静切应力，它的粘度随剪切应力的增大而降低。假塑性流体和塑性流体的一个重要区别在于：塑性流体当剪切速率增大到一定程度时，剪切应力与剪切速率之比为常数，在这个范围，流变曲线为直线；而假塑性流体剪切应力与剪切速率之比总是变化的，即在流变曲线中无直线段。

假塑性流体服从下式所示的幂律方程，即

$$\tau = K\gamma^n \quad (3-4)$$

该式为假塑性流体的流变模式，习惯上称为幂律模式。式中的 n （流性指数）和 K （稠度系数）是假塑性流体的两个重要流变参数。

从图 3-6 可以看出，在中等和较高的剪切速率范围内，幂律模式和宾汉模式均能较好地表示实际泥浆的流动特性，然而在环形空间的较低剪切速率范围内，幂律模式比宾汉模式更接近实际泥浆的流动特性。因此，尽管宾汉模式一直是国内外泥浆工艺中最常用的流变模式，但目前认为，采用幂律模式能够比宾汉模式更好地表示泥浆在环空的流变性，并能更准确地预测环空压降和进行有关的水力参数计算。在泥浆设计和现场实际应用中，这两种流变模式往往同时使用。为了进一步提高幂律模式的应用效果，一种经修正的幂律模式，即赫-巴三参数流变模式也已经引入对泥浆流变性的研究中，其数学表达式和各参数的物理意义将在后面讨论。

二、泥浆流变参数

泥浆的流变性能除塑性粘度、动切力、静切力、流性指数和稠度系数外，还包括漏斗

粘度、表观粘度、剪切稀释性、动塑比和触变性等。

1. 漏斗粘度

在钻孔过程中，泥浆的漏斗粘度是需要经常测定的重要参数。由于测定方法简便，可直观反映泥浆粘度的大小，因此该参数已沿用多年，至今几乎每个井队或机台仍配备有漏斗粘度计，如图 3-7 所示。

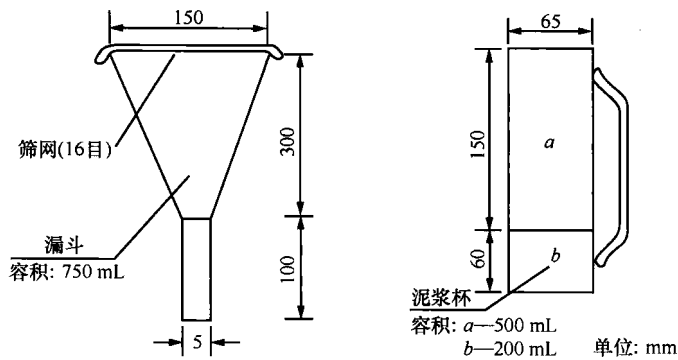


图 3-7 漏斗粘度计

漏斗粘度测定步骤如下：

- 1) 用泥浆量杯的上端（500 mL）与下端（200 mL）准确量取 700 mL 泥浆。将左手食指堵住漏斗口，使泥浆通过筛网后流入漏斗中。
- 2) 将泥浆量杯 500 mL 的一端置于漏斗口的下方，在松开左手食指的同时，右手按动秒表。注意在泥浆流出过程中，应始终使漏斗保持直立。
- 3) 待泥浆量杯 500 mL 的一端流满时，按动秒表记录所需时间。

所记录的时间即漏斗粘度，其单位为 s。漏斗粘度计的准确度常用纯水进行校正。在常温下，纯水的漏斗粘度为 (15 ± 0.2) s。需注意，由于体积计量单位的不同，国外所用漏斗粘度计的尺寸与国内有所区别。国外使用的漏斗称为马氏漏斗，是将 1 夸脱^①泥浆的流出时间称为漏斗粘度。

漏斗粘度只能用来判别在钻孔作业期间各个阶段粘度变化的趋向，它不能说明泥浆粘度变化的原因，也不能作为对泥浆进行处理的依据。即便如此，漏斗粘度至今仍然与其他流变参数结合在一起，共同表征泥浆的流变性。

2. 塑性粘度和动切力

从宾汉模式可知，塑性粘度是塑性流体的性质，它不随剪切速率而变化。塑性粘度反映了在层流情况下，泥浆中网架结构的破坏与恢复处于动平衡时，悬浮的固相颗粒之间、固相颗粒与液相之间以及连续液相内部的内摩擦作用的强弱。

动切力（屈服值）是塑性流体流变曲线中的直线段在 τ 轴上的截距。它反映了泥浆在层流流动时，粘土颗粒之间及高分子聚合物分子之间相互作用力的大小，即形成空间网架结构能力的强弱。因此，凡是影响泥浆形成结构的因素，均会影响 τ_0 值。

① 1 夸脱 (UKqt) = 1.136523 升 (L)。

3. 流性指数和稠度系数

在幂律模式中, 指数 n 表示假塑性流体在一定剪切速率范围内所表现出的非牛顿性的程度, 因此通常将 n 称为流性指数。水、甘油等牛顿流体的 n 值等于 1。泥浆的 n 值一般均小于 1。 n 值越小, 表示泥浆的非牛顿性越强。幂律方程中 K 值则与泥浆的粘度、切力联系在一起。显然, 它与流体在剪切速率为 s^{-1} 时的粘度有关。 K 值愈大, 粘度愈高, 因此, 一般将 K 值称为稠度系数。对于泥浆, K 值可反映其可泵性。若 K 值过大, 将造成重新开泵困难。若 K 值过小, 又将对携带岩屑不利。因此, 泥浆的 K 值应保持在合适的范围内。在 SI 单位制中, K 值的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ 。

一般情况下, 降低 n 值有利于携带岩屑, 清洁孔眼。降低 K 值类似于降低泥浆的粘度, 有利于提高钻速; 提高 K 值类似于增大泥浆的粘度, 这有利于清洁孔眼和消除孔塌引起的孔内复杂情况, 因此, K 值并非越低越好, 有时需要适当提高 K 值。

4. 表观粘度和剪切稀释性

表观粘度又称为有效粘度。它是在某一剪切速率下, 剪切应力与剪切速率的比值, 即

$$\mu_a = \tau / \dot{\gamma} \quad (3-5)$$

式中: μ_a 表示表观粘度。当 τ 和 $\dot{\gamma}$ 的单位分别为 Pa 和 s^{-1} 时, μ_a 的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。由于该单位太大, 使用不便, 因此常使用 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

由宾汉方程, 塑性流体的表观粘度可表示为

$$\mu_a = \mu_p + \tau / \dot{\gamma} \quad (3-6)$$

由幂律方程, 假塑性流体的表观粘度可表示为

$$\mu_a = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3-7)$$

塑性流体和假塑性流体的表观粘度随着剪切速率的增加而降低的特性称为剪切稀释性。例如, 在钻头水眼处, 剪切速率高达 $10000 \sim 100000 \text{ s}^{-1}$, 泥浆变得很稀; 而在环形空间, 当剪切速率为 $50 \sim 250 \text{ s}^{-1}$ 时, 泥浆又变得比较稠。这种剪切稀释特性是一种优质泥浆必须具备的性能, 因为它既能充分发挥钻头的水马力, 有利于提高钻速, 在环形空间又能很好地携带岩粉。如果 μ_a 随 $\dot{\gamma}$ 增加而降低的幅度越大, 则认为剪切稀释性越强。

在泥浆工艺中, 常用动切力与塑性粘度的比值 (简称动塑比) 表示剪切稀释性的强弱。 τ_0 / μ_p 的值越大, 剪切稀释性越强。为了能够在高剪切率下有效地破岩和在低剪切率下有效地携带岩屑, 要求泥浆具有较高的动塑比。

5. 切力和触变性

泥浆的切力是指静切应力。其胶体化学实质是胶凝强度, 即表示泥浆在静止状态下形成的空间网架结构的强度。其物理意义是, 当泥浆静止时, 破坏泥浆内部单位面积上的结构所需的剪切力, 单位为 Pa 。

初切力是泥浆在经过充分搅拌后, 静置 1 min (或 10 s) 测得的静切力 (简称为初切); 终切力是泥浆在经过充分搅拌后, 静置 10 min 测得的静切力 (简称为终切)。其测定方法将在后面介绍。

所谓泥浆的触变性, 是指搅拌后泥浆变稀 (即切力降低), 静置后又变稠的这种性质。一般用终切与初切之差相对表示泥浆触变性的强弱。

对触变性的机理可作如下解释: 在触变体系中一般都存在空间网架结构。在剪切作用下, 当结构被搅散后, 只有颗粒的某些部位相互接触时才能彼此重新粘结起来, 即结构的

恢复要求在颗粒的相互排列上有一定的几何关系。因此，在结构恢复过程中，需要一定的时间来完成这种定向作用。恢复结构所需的时间和最终的凝胶强度（即切力）的大小，可更为真实地反映某种流体触变性的强弱。

钻井工艺要求泥浆应具有良好的触变性，在停止循环时，切力能迅速地增大到某个适当的数值，既有利于岩粉的悬浮，又不致于恢复循环时开泵泵压过高。

三、流变参数的测量与计算

1. 旋转粘度计的构造及工作原理

旋转粘度计由电动机、恒速装置、变速装置、测量装置和支架箱体等五部分组成。恒速装置和变速装置合称旋转部分。在旋转部件上固定一个外筒，即外筒旋转。测量装置由测量弹簧部件、刻度盘和内筒组成。内筒通过扭簧固定在机体上，扭簧上附有刻度盘，如图 3-8 所示。通常将外筒称为转子，内筒称为悬锤。

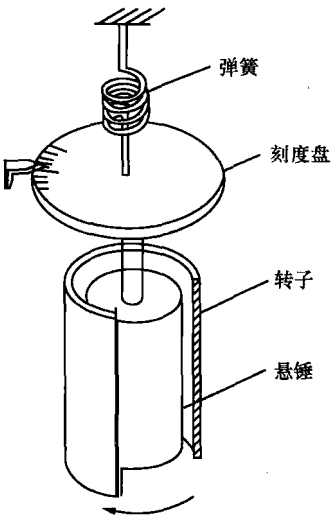


图 3-8 旋转粘度计测量装置示意图

测定时，内筒和外筒同时浸没在泥浆中，它们是同心圆筒，环隙 1 mm 左右。当外筒以某一恒速旋转时，它就带动环隙里的泥浆旋转。由于泥浆的黏滞性，使与扭簧连接在一起的内筒转动一个角度。根据牛顿内摩擦定律，转动角度的大小与泥浆的粘度成正比，于是，泥浆粘度的测量就转变为内筒转角的测量。转角的大小可从刻度盘上直接读出，所以这种粘度计又称为直读式旋转粘度计。

转子和悬锤的特定几何结构决定了旋转粘度计转子的剪切速率与其转速之间的关系。按照范氏（Fann）仪器公司设计的转子、悬锤组合（两者的间隙为 1.17 mm），剪切速率与转子转速的关系为

$$1 \text{ r/min} = 1.703 \text{ s}^{-1} \tag{3-8}$$

旋转粘度计的刻度盘读数 θ （ θ 为圆周上的度数，不考虑单位）与剪切应力 τ （单位为 Pa）成正比。当设计的扭簧系数为 3.87×10^{-5} 时，两者之间的关系可表示为

$$\tau = 0.511\theta \tag{3-9}$$

目前现场使用的旋转粘度计有两速型和多速型两种。两速型旋转粘度计用 600 r/min 和 300 r/min 这两种固定的转速测量泥浆的剪切应力，它们分别相当于 1022 s^{-1} 和 511 s^{-1} 的剪切速率（由式（3-8）计算而得）。但是，仅在以上两个剪切速率下测量剪切应力具有一定的局限性，因为所测得的参数不能反映泥浆在环形空间剪切速率范围内的流变性能。因此，目前国内外已普遍使用多速型旋转粘度计。

Fann35A 型六速粘度计是目前最常用的多速型粘度计，国内也有类似产品。该粘度计的六种转速和与之相对应的剪切速率如下：600 r/min（ 1022 s^{-1} ）、300 r/min（ 511 s^{-1} ）、200 r/min（ 340.7 s^{-1} ）、100 r/min（ 170.3 s^{-1} ）、6 r/min（ 10.22 s^{-1} ）和 3 r/min（ 5.11 s^{-1} ）。为了连续测量各种剪切速率下的剪切应力，NL Baroid 公司又研制出从 1 r/min 至 600 r/min 可连续变速的 286 型粘度计，该粘度计还有一旋钮开关以供选择与 Fann35A 型粘度计相同

的六种转速。对于抗高温深井泥浆，还需测定孔内高温高压条件下的流变性能。为此已研制并生产了专门的仪器，常用的有 Fann 50C 型和 ReoChan 7400 型高温高压流变仪等。

2. 表观粘度的测量与计算

某一剪切速率下的表观粘度可用下式表示：

$$\mu_a = \tau/\gamma = 1000(0.511\theta_N/1.703N) = (300\theta_N)/N \tag{3-10}$$

式中：N 为转速，r/min； θ_N 为转速为 N 时的刻度盘读数； μ_a 为表观粘度，mPa·s。

利用式（3-10），可将任意剪切速率（或转子的转速）下测得的刻度盘读数换算成表观粘度，常用的六种转速的换算系数见表 3-1。

表 3-1 将旋转粘度计刻度盘读数换算成表观粘度的换算系数

转速/r·min ⁻¹	600	300	200	100	6	3
换算系数	0.5	1.0	1.5	3.0	50.0	100.0

例如：在 300 r/min 时测得刻度盘读数为 36，则该剪切速率下的表观粘度等于 $36 \times 1.0 = 36 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ；若在 6 r/min 时测得刻度盘读数为 4.5，则该剪切速率下的表观粘度等于 $4.5 \times 50.0 = 225 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

在评价泥浆的性能时，为便于比较，如果没有特别注明某一剪切速率，一般是指测定 600 r/min 时的表观粘度，即

$$\mu_a = (1/2)\theta_{600} \tag{3-11}$$

使用旋转粘度计测定表观粘度和其他流变参数的试验步骤如下：

- 1) 将预先配好的泥浆进行充分搅拌，然后倒入量杯中，使液面与粘度计外筒的刻度线相齐。
- 2) 将粘度计转速设置在 600 r/min，待刻度盘稳定后读取数据。
- 3) 再将粘度计转速分别设置在 300 r/min、200 r/min、100 r/min、6 r/min 和 3 r/min，待刻度盘稳定后读取数据。
- 4) 计算各流变参数，计算方法将在下面讨论。必要时，通过将刻度盘读数换算成 τ ，将转速换算成 γ ，绘制出泥浆的流变曲线。

3. 宾汉塑性流体流变参数的测量与计算

由测得的 600 r/min 和 300 r/min 的刻度盘读数，可分别利用以下两式求得塑性粘度（ μ_p ）和动切力（ τ_0 ）：

$$\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300} \tag{3-12}$$

$$\tau_0 = 0.511(\theta_{300} - \mu_p) \tag{3-13}$$

以上两式中， μ_p 的单位为 mPa·s， τ_0 的单位为 Pa。

此外，宾汉塑性流体的静切力用以下方法测得：

将经充分搅拌的泥浆静置 10 s（或 1 min），在 3 r/min 的剪切速率下读取刻度盘的最大偏转值；再重新搅拌泥浆，静置 10 min 后重复上述步骤并读取最大偏转值。最后进行以下计算：

$$\tau_{初}(\text{初切}) = 0.511\theta_3(10 \text{ s 或 } 1 \text{ min}) \tag{3-14}$$

$$\tau_{终}(\text{终切}) = 0.511\theta_3(10 \text{ min}) \tag{3-15}$$

式中： $\tau_{初}$ 和 $\tau_{终}$ 的单位均为 Pa。

4. 假塑性流体流变参数的测量与计算

同样地，由测得的 600 r/min 和 300 r/min 的刻度盘读数，可分别利用以下两式求得幂律模式的两个流变参数，即流性指数 (n) 和稠度系数 (K)：

$$n = 3.322 \lg(\theta_{600}/\theta_{300}) \quad (3-16)$$

$$K = (0.511\theta_{300})/511^n \quad (3-17)$$

式中： n 为无因次量； K 的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ 。

需要指出，以上使用 θ_{600} 和 θ_{300} 计算的 n 、 K 值，其对应的剪切速率与泥浆在钻杆内的流动情况大致相当，可称为中等剪切速率条件下的 n 、 K 值。然而，泥浆工程师更关心的是环形空间的 n 、 K 值，因为它们直接影响泥浆悬浮和携带钻屑的能力，并且是计算环空压降和判别流型的重要参数。为此，在实际应用中，有必要分段计算这两个参数。

5. 卡森流变模式

卡森方程及其参数的物理意义。宾汉和幂律模式是广泛应用于泥浆工艺的两个流变模式。随着泥浆工艺和环空水力学理论不断发展，人们感到这两个模式在实际应用中均存在着一定的局限性，特别是不能较好地描述泥浆在高剪切速率下的流变性能。为此，一些研究者提出可以采用一些新的流变模式，卡森模式是其中比较有代表性的一种。

卡森模式是 1959 年由卡森首先提出的，最初主要应用于油漆、颜料和塑料等工业中。1979 年，美国人劳增和里德首次将卡森模式用于泥浆流变性的研究中。研究和应用结果表明，卡森模式不但在低剪切区和中剪切区有较好的精确度，还可以利用低、中剪切区的测定结果预测高剪切速率下的流变特性。

卡森模式是一个经验式，其一般表达式为

$$\tau^{1/2} = \tau_c^{1/2} + \eta_\infty^{1/2} \gamma^{1/2} \quad (3-18)$$

式中： τ_c 为卡森动切力（或称卡森屈服值），Pa； η_∞ 为极限高剪切粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ； τ 为剪切应力，Pa； γ 为剪切速率， s^{-1} 。

该式又称为卡森方程。将式中每一项分别除以 $\gamma^{1/2}$ ，可得卡森模式的另一表达式：

$$\eta^{1/2} = \eta_\infty^{1/2} + \tau_c^{1/2} \gamma^{-1/2} \quad (3-19)$$

式中： η 为某一剪切速率下的有效粘度，单位为 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

如果用平方根坐标系作图，卡森流变曲线是一条直线。其斜率 $\tan\alpha$ 分别为 $\eta_\infty^{1/2}$ 和 $\tau_c^{1/2}$ ，截距分别为 $\tau_c^{1/2}$ 和 $\eta_\infty^{1/2}$ ，如图 3-9 所示。

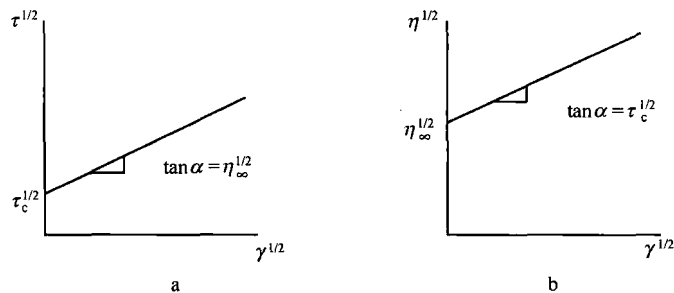


图 3-9 卡森流变曲线的两种形式

卡森方程中两个流变参数的物理意义和影响因素如下。

卡森动切力 τ_c 表示泥浆内可供拆散的网架结构强度。从流变曲线上可看出, τ_c 是流体开始流动时的极限动切力, 其大小可反映泥浆携带与悬浮钻屑的能力。

既然 τ_c 是泥浆网架结构强度的量度, 因此凡是能够影响胶体体系电化学性质的物质(如降粘剂、电解质、絮凝剂等)、体系中的固相含量以及外界条件(如温度、压力)等都可能影响 τ_c 值。高固相含量泥浆的 τ_c 值一般较高, 加入降粘剂和清水可以降低 τ_c , 加入适量电解质和絮凝剂均可以提高 τ_c 值。实测结果表明, τ_c 一般低于宾汉动切力 τ_0 , 而与初始静切力较为接近。

极限高剪切粘度 η_∞ 简称为高剪粘度。它表示泥浆体系中内摩擦作用的强度, 常用来近似表示泥浆在钻头水眼处紊流状态下的流动阻力, 因此, 有的文献中将其称为水眼粘度。从流变曲线来看, η_∞ 在数值上等于剪切速率为无穷大时的有效粘度。然而, 粘度的概念是建立在层流流动基础上的, 因此, 最好将其理解为剪切速率为无穷大时的流动阻力。

流体流动时, η_∞ 值的大小是流体中固相颗粒之间、固相颗粒与液相之间以及液相内部的内摩擦作用强度的综合体现。因此, 固相类型及含量、分散度和液相粘度等都将对 η_∞ 产生影响。从 η_∞ 的物理意义来看, 它类似于宾汉模式中的塑性粘度。但在数值上它往往比塑性粘度小得多, 这主要是由于在高剪切速率范围内, 宾汉模式会出现较大的偏差。试验表明, 降低 η_∞ 有利于降低高剪切速率下的压力降, 提高钻头水马力, 也有利于从钻头切削面上及时地排除岩屑, 从而提高机械钻速。具有良好剪切稀释性能的低固相聚合物泥浆的 η_∞ 值一般较低, 大约为 $2 \sim 6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$; 而密度较高的分散泥浆, 其 η_∞ 值常超过 $15 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

卡森模式的另一特性参数是剪切稀释指数 I_m 。该参数可用下式求得

$$I_m = [1 + (100\tau_c/\eta_\infty)^{1/2}]^2 \quad (3-20)$$

该值为无因次量, 用于表示泥浆剪切稀释性的相对强弱。实际上它是转速为 1 r/min 时的有效粘度 η_1 与 η_∞ 轴的比值。 I_m 越大, 则剪切稀释性越强。分散泥浆的 I_m 一般小于 200, 而不分散聚合物泥浆和适度絮凝的抑制性泥浆的 I_m 值常在 $300 \sim 600$ 之间, 高者可达 800 以上。但 I_m 值过大会使泵压升高, 造成开泵困难。

室内和现场试验均表明, 卡森模式可适用于各种类型的泥浆。该模式的主要特点在于它能够近似地描述泥浆在高剪切速率下的流动性, 从而弥补传统模式的不足。

四、泥浆流变性与钻孔作业的关系

(一) 泥浆流变性与孔眼净化的关系

泥浆的主要功用之一就是清洗孔底并将岩屑携带到地面上来。泥浆清洗孔眼的能力除取决于循环系统的水力参数外, 还取决于泥浆的性能, 特别是其中的流变性能。根据喷射钻孔的理论, 岩屑的清除分为两个过程, 一是岩屑被冲离孔底, 二是岩屑从环形空间被携至地面。岩屑被冲离孔底的问题涉及钻头选型和孔底流场的研究, 属于钻孔工程的范畴, 这里只讨论泥浆携带岩屑的问题。

1. 层流携带岩屑的原理

首先讨论一下泥浆携带岩屑的基本原理。一方面泥浆携带岩屑颗粒向上运动, 另一方

面岩屑颗粒由于重力作用向下滑落。在环形空间里，泥浆携带岩屑颗粒向上运动的速度取决于流体的上返速度与颗粒自身滑落速度二者之差，即

$$v_p = v_f - v_s \tag{3-21}$$

式中： v_p 为岩屑的净上升速度，m/s； v_f 为泥浆的上返速度，m/s； v_s 为岩屑的滑落速度，m/s。

上式两边同除以 v_f ，可得

$$v_p/v_f = 1 - (v_s/v_f) \tag{3-22}$$

通常将 v_p/v_f 称为携带比，并用该比值表示钻孔的净化效率。显然，提高携带比的途径是：提高泥浆在环空的上返速度 v_p ，降低岩屑的滑落速度 v_s 。但如果综合考虑钻孔的成本和效益，上返速度不能大幅度提高。因此，如何尽量降低岩屑的滑落速度对携带岩屑至关重要。研究表明，岩屑的滑落速度除与岩屑尺寸、岩屑密度、泥浆密度和流态等因素有关外，还与泥浆的有效粘度成反比。

为了研究岩屑在孔内上升的过程，曾用玻璃钻孔进行实验观察，实验中用扁平的圆形铝片代替岩屑。结果表明，当泥浆处于不同流态时，岩屑上升的机理是不相同的。片状岩屑在上升时的受力情况如图 3-10 所示。

从图 3-10 可以看出，层流时泥浆的流速剖面为一抛物线，中心线处流速最大，两侧流速逐渐降低，而靠近孔壁或钻杆壁处的速度为零。这样，片状岩屑在上升过程中各点受力是不均匀的。中心处流速高、作用力大；靠近两侧流速低、作用力小。正如图中所示，力 $F_4 > F_2$ 、 $F_3 > F_1$ ，致使有一个力矩作用在岩屑上，使岩屑翻转侧立，向环空两侧运移。此时，有的岩屑贴在孔壁上形成厚的“假泥饼”，有的向下滑移。由于两侧液面的阻力，岩屑下滑至一定距离后又会进入流速较高的中心部位而向上运移。如此周而复始，岩屑经过曲折的路径才被带出井口（图 3-11）。显然，岩屑的这种转动现象对携带岩屑是不利的。不仅延长了岩屑从孔底返至地面的时间，而且容易使一些岩屑返不出地面，造成起钻遇卡、下钻遇阻、下钻下不到孔底等复杂情况。实验表明，岩屑翻转现象与岩屑的形状有关，当岩屑厚度与其直径之比小于 0.3 或大于 0.8 时才会出现转动，此范围之外的岩屑将会比较顺利地携带出来。实验结果还表明，钻柱转动对层流携带岩屑是有利的，因为钻柱转动改变了层流时液流的速度分布状况，使靠近钻柱表面的液流速度加大，岩屑以螺旋形上升，如图 3-12 所示。此时，岩屑的转动现象仅出现在靠近孔壁的那一侧。

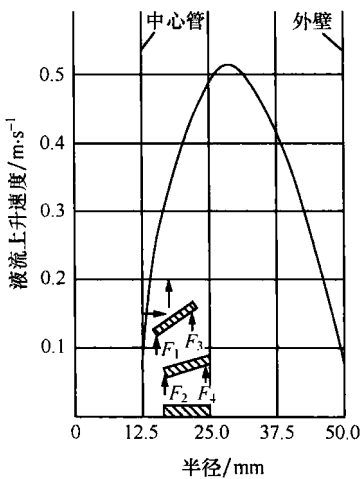


图 3-10 片状岩屑在上升时的受力情况

2. 紊流携带岩屑的原理

如图 3-13 所示，泥浆在作紊流流动时，岩屑不存在转动和滑落现象，几乎全部都能携带到地面上来，环形空间里的岩屑比较少。但是紊流携带岩屑也有一些缺点，主要表现在：

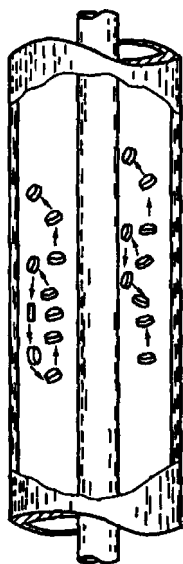


图 3-11 片状岩屑在层流时
上升的情况（钻柱不动）

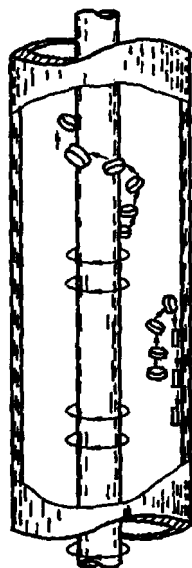


图 3-12 旋转钻柱对片状岩屑
在层流中上升的影响

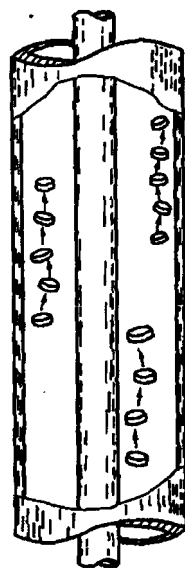


图 3-13 片状岩屑在紊流时
上升的情况（钻柱不动）

1) 岩屑在紊流时的滑落速度比在层流时大，这就要求泥浆的上返速度高，泵的排量。但这要受到泵压和泵功率的限制，特别是当孔眼尺寸较大、孔较深以及泥浆粘度、切力较高时，更加难以实现。

2) 由于沿程压降与流速的平方成正比，功率损失与流速的立方成正比，所以用紊流携带岩屑还会使钻头的水马力降低，不利于冲洗孔底。

3) 紊流时的高流速对孔壁冲蚀严重，不能很好地形成泥饼，容易引起易塌地层孔壁垮塌。

因此，紊流携带岩屑常常受到各种条件的限制，不是随便可以采用的。紊流携带岩屑的这些限制条件促使人们重新思考如何在层流状态下解决携带岩屑的问题。显然，其技术关键在于如何消除上述的岩屑转动现象。既然造成岩屑转动的原因是层流时过水断面上的尖峰形流速分布，那么解决问题的途径则是设法改变这种流速分布。研究表明，当塑性流体从塞流向层流逐渐转化时，中间要经过一种平板型层流。在这种流态下，液流周围呈层流流动状态，中央是一个速度剖面较为平齐的等速核，即流核。于是，用平板型层流来代替尖峰型层流即可达到上述目的（图 3-14）。

相对于尖峰型层流和紊流来说，平板型层流具有以下特点：

1) 可实现用环空返速较低的泥浆有效地携带岩屑。现场经验表明，在多数情况下，即便是使用低固相泥浆，将环空返速保持在 $0.5 \sim 0.6 \text{ m/s}$ 就可满足携带岩屑的要求。这样既能使泵压保持在合理范围，又能够降低泥浆在钻柱内和环空的压力损失，使水力功率得到充分、合理的利用。

2) 解决了低粘度泥浆能有效携带岩粉的问题，为普遍推广使用低固相不分散聚合物泥浆提供流变学上的依据。尽管粘度较低，但只要保证 τ_0/μ_p 较高，使环空液流处于平板

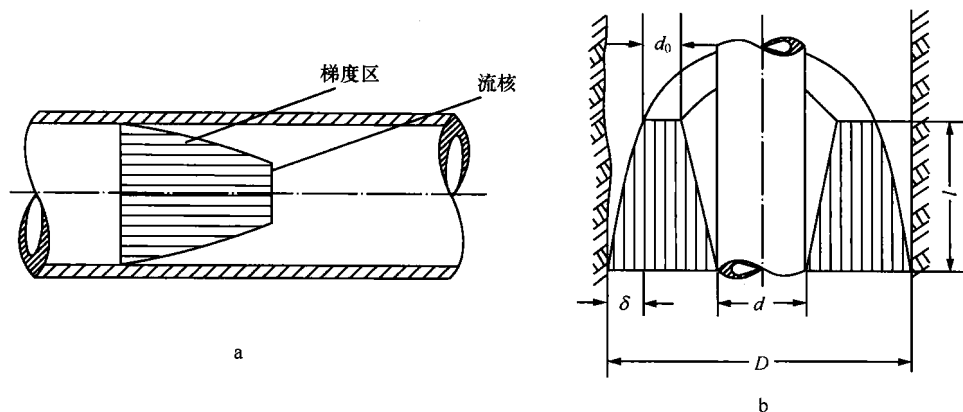


图 3-14 泥浆的平板型层流流动状态

a—管柱内；b—孔眼环形空间

型层流状态，再加上具有一定的环空返速，在一般情况下便能做到有效地携带岩屑，保持孔眼清洁。

3) 避免了泥浆处于紊流状态时对孔壁的冲蚀，有利于保持孔壁稳定。

一般认为，就有效地携带岩屑而言，将泥浆的 τ_0/μ_p 保持在 $0.36 \sim 0.48 \text{ Pa}/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ (若采用英制单位，则为 $0.75 \sim 1 \text{ lb}/(100 \text{ ft}^2 \cdot \text{cP})$) 或 n 值保持在 $0.4 \sim 0.7$ 时是比较适宜的。如 τ_0/μ_p 过小，会导致尖峰型层流；如该比值过大，往往会因 τ_0 值的增大引起泵压显著升高。 τ_0/μ_p 超过 $0.48 \text{ Pa}/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ 之后， d_0 的增值亦变得十分有限了。将 n 值的适宜范围定为 $0.4 \sim 0.7$ ，也是同样的道理。当然，为了减小岩屑的滑落速度，泥浆的有效粘度也不能太低。对于低固相聚合物泥浆，将其保持在 $6 \sim 12 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 是较为适宜的。

为了使泥浆的 τ_0/μ_p 达到 $0.36 \sim 0.48 \text{ Pa}/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ 的要求，常采取以下措施和方法：

1) 选用 XC 生物聚合物、HEC、PHP 和 FA367 等高分子聚合物作为主处理剂，并保持其足够的浓度。它们在体系中所形成的结构使 τ_0 值增大，泥浆的液相粘度也会相应有所增加（即 μ_p 值同时有所增大），但由于 τ_0 值的增幅往往要大得多，故有利于动塑比的提高。

2) 通过有效地使用固控设备，除去泥浆中的无用固相，降低固体颗粒浓度，以达到降低 μ_p 、提高 τ_0/μ_p 的目的。

3) 在保证泥浆性能稳定的情况下，通过适量地加入石灰、石膏、氯化钙和食盐等电解质，以增强体系中固体颗粒形成网架结构的能力，因为凡是有利于空间网架结构增强的物质都能使动切力 τ_0 值增大。

需要注意，提高动塑比的目的主要是为了解决岩屑转动问题，同时可增强泥浆的剪切稀释性能。但如果遇到井下情况比较复杂或出现井塌时，还是需要适当提高泥浆的有效粘度并加大排量，因为根据式 (3-21)，这样才能有效地降低岩屑滑落速度 v_s ，提高泥浆环空返速 v_f ，从而提高岩屑的净上升速度 v_p 。

通过控制 τ_0/μ_p 使环空液流处于平板型层流的方法只适用于层流状态，这是因为 τ_0

和 μ_p 都是反映泥浆在层流流动时的流变参数。如果通过计算,得知环空液流处于紊流状态时,则应首先考虑通过降低环空返速或同时提高粘度、切力,使泥浆从紊流状态转变为层流状态,然后再考虑如何通过控制 τ_0/μ_p 使其转变为平板型层流。

(二) 泥浆流变性与孔壁稳定的关系

紊流液流对孔壁有较强的冲蚀作用,不利于孔壁稳定。其原因是紊流时液流质点的运动方向是紊乱的和无规则的,而且流速高,具有较大的动能。因此,在泥浆循环时,一般应保持在层流状态,而尽量避免出现紊流。要做到这一点,需要比较准确地计算泥浆在环空的临界返速。对于非牛顿流体,一般采用综合雷诺数 Re 来判别流态。将泥浆作为塑性流体考虑,当综合雷诺数 $Re > 2000$ 时为紊流。因此,如按 $Re = 2000$,即可推导出计算临界返速的公式,即

$$v_c = \frac{100\mu_p + 10 \sqrt{100\mu_p^2 + 2.52 \times 10^{-3} \rho \tau_0 (D - d)^2}}{\rho (D - d)} \quad (3-23)$$

式中: v_c 为临界返速,cm/s; μ_p 为塑性粘度,Pa·s; τ_0 为动切力,Pa; ρ 为泥浆密度,g/cm³; D 为井径,cm; d 为钻杆或钻铤外径,cm。

计算出临界返速之后,则可对泥浆的流态进行判断。若实际环空返速大于临界返速为紊流,反之则为层流。

从式(3-23)可以看出,临界返速在很大程度上受泥浆的密度、塑性粘度和动切力的影响。以三种不同密度的泥浆为例,由该式所求得的临界返速见表3-2。计算结果表明,随着泥浆密度、塑性粘度和动切力的减小,临界流速明显降低,即更容易形成紊流。因此,在调整泥浆流变参数和确定环空返速时,既要考虑携带岩屑问题,同时又要考虑到泥浆的流态,使孔壁保持稳定。

表 3-2 泥浆密度和流变参数对临界返速的影响

D/cm	d/cm	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\mu_p/\text{mPa} \cdot \text{s}$	τ_0/Pa	$v_c/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
21.59	12.7	1.20	23	60	3.76
21.59	12.7	1.09	9.4	26	2.55
21.59	12.7	1.06	6	20	2.25

(三) 泥浆流变性与悬浮岩屑、加重剂的关系

钻进过程中,在设备出现故障时,泥浆会多次停止循环。此时,要求泥浆体系内能迅速形成空间网架结构,将岩屑和加重剂悬浮起来,或以很慢的速度下沉;而开泵时,泵压又不能上升太高,以防憋漏地层。提供悬浮能力的决定因素是泥浆的静切力和触变性。

悬浮岩屑和加重剂所需要的静切力可以用以下方法进行近似计算。假设岩屑和加重剂颗粒为球形,根据它们的重力与泥浆对它们的浮力和竖向切力相平衡的关系,可以得到

$$(1/6)\pi d^3 \rho_{\text{岩}} g = (1/6)\pi d^3 \rho g + \pi d^2 \theta \quad (3-24)$$

式中： d 为岩屑或加重剂颗粒的直径，m； $\rho_{\text{岩}}$ 为岩屑或加重剂的密度， kg/m^3 ； ρ 为泥浆的密度， kg/m^3 ； θ 为泥浆的静切力，Pa； g 为重力加速度，取 $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

所以，需要的静切力为

$$\theta = [d(\rho_{\text{岩}} - \rho)g]/6 \quad (3-25)$$

(四) 泥浆流变性与孔内液柱压力激动的关系

所谓孔内液柱压力激动是指在起下钻和钻进过程中，由于钻柱上下运动、泥浆泵开动等原因，使得孔内液柱压力发生突然变化（升高或降低），给孔内增加一个附加压力（正值或负值）的现象。

1. 起下钻时的压力激动

由于钻柱具有一定的体积，当钻柱入井时，孔内泥浆要向上流动；起出钻柱时，孔内泥浆便向下流动以填补钻柱在孔内所占的空间。泥浆向上或向下流动，都要给予一定的压力以克服其沿程的阻力损失。这个压力是由于起下钻所引起的，它作用于孔内泥浆，使它能够流动；与此同时也通过孔内液柱作用于孔壁和孔底，这种突然给予孔内的附加压力就是起下钻引起的压力激动。下钻时压力激动为正值，起钻时则为负值。起下钻压力激动值的大小主要取决于起下钻速度、孔深、孔眼尺寸、钻头尺寸和泥浆的流变参数（主要是粘度、切力和触变性）。压力激动值在 1500 m 时可能达到 2~3 MPa，在 5000 m 时可能达到 7~8 MPa，因而对此是不能忽视的。

2. 开泵时的压力激动

由于泥浆具有触变性，停止循环后，孔内泥浆处于静止状态，其中粘土颗粒所形成的空间网架结构强度增大，切力升高，开泵泵压将超过正常循环时所需要的压力，造成压力激动。开泵时使用的排量越大，所造成压力激动的值会越高。当泥浆开始流动后，结构逐渐被破坏，泵压逐渐下降。随着排量的增大，结构的破坏与恢复达到平衡。这时泵压便处于比较稳定的工作泵压值。例如，某钻孔某次开泵泵压为 5 MPa，泥浆流动一段时间后，泵压降为 4.4 MPa，最后降到泥浆泵正常工作时的 2.8 MPa，对于这一过程，以排量-压力为坐标的流变曲线如图 3-15 所示。图中 p_s 和 p_0 分别为克服泥浆静切力和动切力所需要的压力； p_1 和 p_2 分别为泥浆静止若干时间（ t_1 、 t_2 ）之后，开泵时克服泥浆切力所需的压力。泥浆的触变性使切力值随静止时间的延长而增大，因此 $p_2 > p_1 > p_s$ 。若以压力 p_1 开泵，压力将沿虚线升至 M_1 点与流变曲线相交；若以 p_2 开泵，则压力沿虚线到达 M_2 点与流变曲线相交。只有循环一段时间之后，压力才恢复到对应于一定排量的稳定工作压力。这就是开泵时的压力激动。开泵时压力激动的值与孔眼和钻具尺寸、孔深、泥浆切力和触变性、开泵时的操作等因素有关。有时因孔底沉砂也会使压力激动加剧。

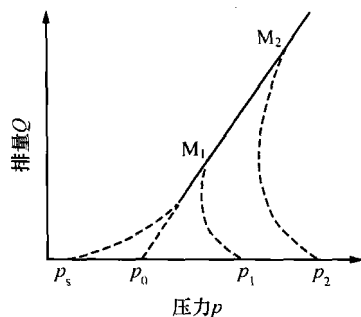


图 3-15 开泵时的泵压变化示意图

压力激动对钻孔是有害的，它破坏了孔内液柱压力与地层压力之间的平衡，破坏了孔壁与孔内液柱之间的相对稳定，容易引起钻孔漏失、井喷或井塌。影响压力激动的因素是多方面的，其中与泥浆的粘度、切力密切相关。当其他条件相同时，随着泥浆粘度、切力

增大，压力激动会更加严重。因此，特别是钻遇高压地层、容易漏失地层或容易坍塌地层时，一定要控制好泥浆的流变性，在起下钻和开泵的操作上不宜过猛，开泵之前最好先活动钻具，以防止因压力激动引起的各种孔内复杂情况发生。

（五）泥浆流变性与提高钻速的关系

泥浆的流变性是影响机械钻速的一个重要因素。研究表明，这种影响主要表现为钻头水眼处的紊流流动阻力对钻速的影响。如前所述，有的文献将这种流动阻力简称为水眼粘度。由于泥浆具有剪切稀释作用，在钻头水眼处的流速极高。一般在 150 m/s 以上，剪切速率达到 10000 s^{-1} 以上。在如此高的剪切速率下，紊流流动阻力变得很小，因而液流对孔底冲击力增强，更加容易渗入钻头冲击孔底岩层时所形成的微裂缝中，有利于减小岩屑的压持效应和孔底岩石的可钻强度，从而有利于提高钻速。需要指出，各种泥浆的剪切稀释性存在着很大差别，试验表明，层流时表观粘度（以 θ_{600} 计算）相同的泥浆，在钻头水眼处的紊流流动阻力竟可相差 10 倍。图 3-16 表示表观粘度相同而动塑比不同的 5 种泥浆，其剪切稀释性所存在的差别。如果泥浆塑性粘度高，动塑比小，一般情况下钻头水眼处的紊流流动阻力就会比较大，就必然降低和减缓钻头对孔底的冲击和切削作用，使钻速降低。

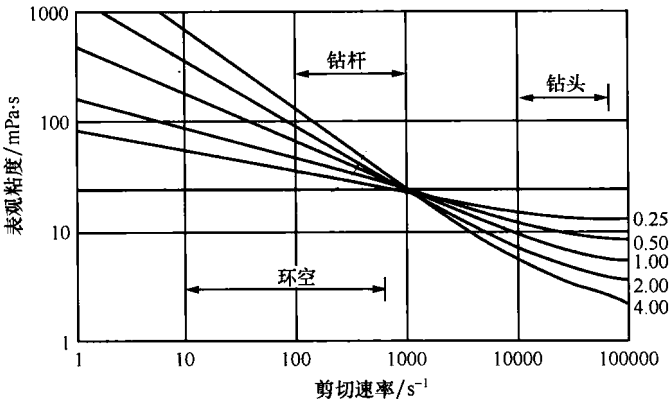


图 3-16 表观粘度相同但动塑比不同的 5 种泥浆的剪切稀释性

由此可见，通过使用剪切稀释性强的优质泥浆，如低固相不分散聚合物泥浆，尽可能降低钻头水眼处的紊流流动阻力，是提高机械钻速的一条有效途径。当泥浆的卡森极限强度接近于清水粘度时，可获得最大的机械钻速。

第二节 泥浆的滤失和润滑性能

泥浆的滤失性能主要是指泥浆失水量的大小和所形成泥饼的质量。润滑性能包括泥浆自身的润滑性能和所形成的泥饼的润滑性能。这两项性能如控制不好将对钻孔和地质工作产生多方面的不利影响。

由于泥浆的滤失性和润滑性都与泥饼的质量有关，因此我们放在同一节中讨论。本节将主要讨论泥浆失水量的影响因素、失水量的测量与控制、调整方法以及泥浆润滑性能的影响因素和测量方法。

一、泥浆失水量的影响因素

(一) 泥浆的滤失与造壁性

泥浆的滤失与造壁性是泥浆的重要性能，它对松散、破碎和遇水失稳地层（如水化膨胀性地层）的孔壁稳定有十分重要的影响。目前，关于泥浆滤失与造壁性的研究，静态下的研究较多，而动态下的研究较少。

1. 泥浆滤失和造壁性的概念

水作为水基泥浆的分散介质，在泥浆中以三种形态存在，即化学结合水、吸附水和自由水。在压力差作用下，泥浆中的自由水向孔壁岩石的裂隙或孔隙中渗透，称为泥浆的滤失作用。通常用失水量或滤失量来表示滤失性的强弱。泥浆滤失的两个前提条件是：存在压力差和存在裂隙或孔隙性岩石。在滤失过程中，随着泥浆中的自由水进入岩层，泥浆中的固相颗粒便附着在孔壁上形成泥饼（细小颗粒也可能渗入岩层至一定深度），这便是泥浆的造壁性。孔壁上形成泥饼后，渗透性减小，阻止或减慢了泥浆继续侵入地层。

若泥浆中细粘土颗粒多，而粗颗粒少，则形成的泥饼薄而致密，泥浆失水量则小。反之粗粒多而细颗粒少，则形成的泥饼厚而疏松，泥浆的失水量则大。而且，泥浆的失水量还和压差、孔内温度及岩石有关。由于不同井位和层位，岩层的孔隙度和渗透率是不同的，因此，即使是同一种泥浆，在不同岩层滤失量是不同的，在孔壁上形成的泥饼厚度也是不一样的（图3-17）。在渗透性大的砂岩、砾岩、裂缝发育的灰岩孔壁会形成较厚的泥饼；而在渗透性小的页岩、泥岩、石灰岩和其他致密岩石的孔壁上只会形成较薄的泥饼，甚至不形成泥饼。

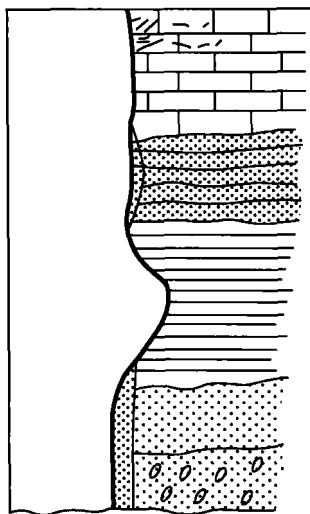


图3-17 孔内泥饼与孔壁岩石的关系

2. 孔内泥浆滤失的全过程

泥浆在孔内发生滤失的全过程由三个阶段组成，与此相对应的三种失水量分别称为瞬时失水量、动失水量和静失水量。

(1) 瞬时滤失

从钻头破碎孔底岩石，形成新的自由面的瞬间开始，泥浆开始接触新的自由面，泥浆中的自由水便向岩石孔隙中渗透，直到泥浆中的固相颗粒及高聚物在孔壁上开始出现泥饼，这段时间的滤失称为瞬时滤失。瞬时滤失的特点是时间很短、孔底岩石表面尚无泥饼、滤失速率很高，亦称初滤失。

(2) 动滤失

紧接着瞬时滤失，在孔内泥浆循环的情况下滤失继续进行并开始形成泥饼，随着滤失过程的进行，泥饼不断增厚，直至泥饼的增厚速度与泥饼被冲刷的速度相等，即达到动平衡。此后泥浆在循环下继续滤失但泥饼不再增厚。这段时间的失水量称为动失水量，其特点是压力差较大，它等于静液柱压力加上环空压力降和地层压力之差，泥饼厚度维持在较

薄的水平, 单位时间的失水量开始较大, 其后逐渐减小, 直至稳定在某一值。

(3) 静滤失

在起下钻或其他原因停止钻进时, 泥浆停止循环, 液流的冲刷作用消失, 此时压力差为静液柱压力和地层压力之差。随着滤失的进行, 泥饼逐渐增厚, 单位时间的失水量逐渐减小。在这一阶段, 因压力差较小, 泥饼较厚, 故大多数情况下单位时间内的失水量比动失水量小。

起下钻结束后, 又继续钻进, 泥浆重新循环, 于是滤失过程由静滤失转为动滤失。但此时的动滤失是在经历一段静滤失后的动滤失, 开始时泥饼被冲刷掉一部分, 随着滤失的进行直至稳定 (泥饼再变薄或增厚)。故这一阶段的动滤失比前一次动滤失要小一些。此后停钻又开始静滤失, 这是新水平上的静滤失。这样交替进行动滤失和静滤失阶段, 便是孔内发生滤失的全过程。

失水量的评价, 国内外通常采用 API 失水量, 即在规定的压力差下以通过一定的渗滤断面 (通常用滤纸作为渗滤介质) 30 min 内的失水量来衡量, 单位为 mL/30 min。

(二) 影响泥浆失水量的因素

孔内泥浆的滤失有三种: 瞬时滤失、动滤失和静滤失。下面依次讨论其影响因素, 重点是静滤失, 因为它与孔内的泥饼厚度有密切关系, 而且研究得较多。

1. 静滤失

泥浆的滤失是一个渗透过程, 静滤失的特点是泥浆处于静止状态。在压差作用下, 作为渗滤介质泥饼的厚度是随时间的延长而增厚的, 是一个变数。同时一般泥饼的渗透率远小于地层的渗透率。

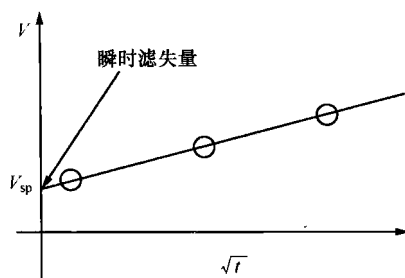


图 3-18 滤失量与时间的关系

(1) 滤失时间对失水量的影响

失水量与渗滤时间的平方根成正比。因此, 如果不考虑瞬时滤失, 绘制出失水量与渗滤时间平方根的关系是通过原点的一条直线。因此, 7.5 min 的失水量将是 30 min 失水量的一半, 通常用 7.5 min 失水量乘以 2 作为 API 失水量。但泥浆实验结果表明, 绘出的直线并不通过原点, 而相交于纵轴上某一点, 形成一定的截距。从图 3-18 可以看出, 在泥饼形成之前, 存在一瞬时失水量 V_{sp} 。如果瞬时失水量大到可以测量的话, 就应根据式 (3-26) 确定 API 标准失水量。最好作一如图 4-3 所示失水量和滤失时间平方根关系的曲线, 用线上的两个点外推出更长时间的失水量并确定瞬时失水量。即

$$V_{30} = 2(V_{7.5} - V_{sp}) + V_{sp} \quad (3-26)$$

实际上, 测量静滤失的过程是由两个滤失阶段组成的, 即从无泥饼到开始形成泥饼的瞬时滤失阶段和泥饼不断增厚的静滤失阶段。

这里所得到的失水量是在时间相对较短情况下的结果, 如果测量时间较长, 滤失总量的增长速度就会减慢, 直至保持不变, 并不保持最初的线性关系。对于某些泥浆, 7.5 min 的失水量乘以 2 明显大于 30 min 的失水量, 所以应对具体泥浆确定相应测量时间。一

般对于失水量较小的泥浆，测量时间应取 30 min，如采用 7.5 min 的失水量乘以 2 则会产生较大的误差。

(2) 压差对失水量的影响

失水量与压差的平方根成正比，压差愈大，泥浆失水量愈大。但实际泥浆失水量不一定与压差成平方根关系。因为，泥浆组成不同，滤失时所形成泥饼的压缩性也不相同。随压差增大，渗透率减小的程度也有差异，因而失水量与压差的关系也不同。通常可表示为 $V_f \propto \Delta p^x$ ，指数 x 因泥浆不同而不同，但总是小于 0.5。

油基泥浆滤失液（一般为柴油）的粘度随压力的增加而增加，因此根据滤失方程可知随粘度增加失水量是减小的。

(3) 滤液的粘度、温度对失水量的影响

滤液粘度愈小，泥浆的失水量愈大。滤液的粘度与有机处理剂的加入量有关，有机处理剂如 CMC，HPAM 等加入量愈大，滤液的粘度愈大。从而可以通过提高滤液粘度达到降低失水量的目的。

温度升高可以几种方式导致失水量增加。首先，温度升高能降低滤液的粘度，温度愈高，滤液的粘度愈小，失水量便愈大。水的粘度与温度的关系见表 3-3。

表 3-3 各种温度下水的粘度

温度/℃	0	12	20	30	40	60	80	100	130	180	230	300
水的粘度/mPa·s	1.729	1.308	1.005	0.801	0.656	0.469	0.356	0.284	0.212	0.150	0.116	0.086

(4) 固相含量和类型对失水量的影响

根据静滤失方程，泥浆的失水量 V_f 与 $[(f_{sc}/f_{sm}) - 1]$ 成正比。也就是说泥浆中的固相含量 (f_{sm}) 愈高，泥饼中的固相含量 (f_{sc}) 愈小，则泥浆的失水量愈小。然而泥浆中的固相含量增大，机械钻速要显著降低，泥饼要增厚，因而通过增大 f_{sm} 值来降低失水量是不可取的。通常的办法是减小 f_{sc} 值。降低泥饼中固相含量的办法是采用优质土造浆和用有机处理剂处理。泥饼中固相含量降低的原因是优质土分散性好、固相颗粒细而多、水化好、溶剂化膜厚，以及形成的泥饼渗透率低的缘故。研究结果表明，当泥浆中的固相含量相同时，随着泥饼中固相含量降低，泥浆的失水量会相应地下降，见表 3-4。一般泥浆中的固相含量为 4% ~ 6%（质量分数）时，泥饼中固相含量为 10% ~ 20%（质量分数）。

表 3-4 泥饼中固相含量与失水量的关系

编号	泥浆配方	相对密度	失水量 mL·30 min ⁻¹	泥饼中固相含量/%			
				60℃烘干	105℃烘干	200℃烘干	平均
1	怀俄明土 + 0.7% CMC	1.03	6.4	11.3	10.6	10.3	10.73
2	Telgel 土 + 0.7% CMC	1.03	5.9	10.1	9.2	9.4	9.57
3	夏子街土 + 0.7% CMC	1.03	6.8	12.7	12.3	11.8	12.27
4	安丘土 + 0.7% CMC	1.03	9.6	16.3	15.8	15.1	15.73

(5) 岩层的渗透性对失水量的影响

岩层的孔隙和裂缝是泥浆滤失的天然通道。岩层有一定的孔隙性，泥浆在压差作用下，才能产生滤失，形成泥饼。岩层的孔隙性和渗透性，在瞬时滤失阶段和泥饼开始形成时，对滤失起重要作用。在形成第二过滤介质——泥饼之后，岩层的孔隙性和渗透性对泥浆的滤失便不起主要作用，这是由于泥饼的渗透性一般远远小于岩层的渗透性。

在滤失过程中，泥浆中的固体颗粒在孔壁岩层中的堆积一般形成三个过滤层(图3-19)，即瞬时滤失渗入层，瞬时滤失时细颗粒渗入深度可达25~30 mm；架桥层，较粗的颗粒在岩层孔隙内部架桥而减小岩层的孔隙度，或称为内泥饼；孔壁表面形成具有一定渗透性的外泥饼。

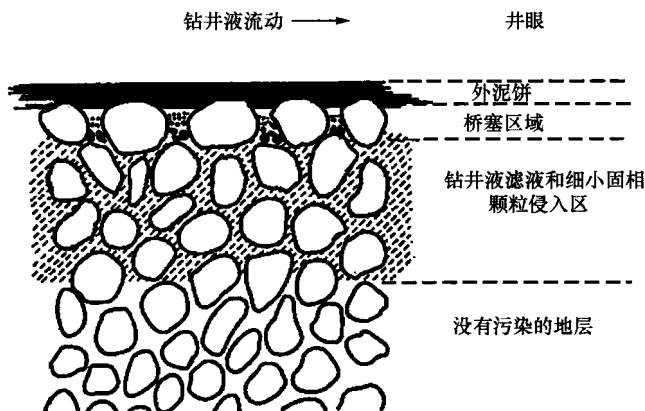


图3-19 泥浆固相侵入可渗透性地层示意图

试验结果表明，当与所钻岩层孔隙相适宜的架桥粒子的量不够时，API 滤失实验可能会给出错误的结果，即滤纸上做出的滤失实验结果可能与孔内渗透性地层差异较大。

(6) 泥饼的压实性和渗透性

失水量测定的结果，往往是泥饼厚失水量大，泥饼薄失水量小，这主要是由于厚泥饼的渗透性大，薄泥饼的渗透性小的缘故。因此，决定因素是泥饼的渗透性。泥饼的渗透性取决于泥饼中固相的种类，固相颗粒的大小、形状和级配，处理剂的种类和含量，以及过滤压差等。

(7) 絮凝与聚结对泥饼渗透的影响

泥浆的絮凝使得颗粒间形成网架结构，这种结构可使渗透率有一定的提高。滤失压差越高，这种结构就越难以形成，所以孔隙度与渗透率两者都随压力的增加而减小。絮凝的程度越高，颗粒间的引力就越大，其结构就越强，对压力的抵抗能力就越大。若聚结伴随着絮凝，这种结构还会强一些，因此使得泥饼的渗透率增大。

2. 动滤失

(1) 泥浆流动的影响

泥浆在循环流动中的滤失过程称为动滤失。影响动滤失的因素与静滤失相似，不同之处是动滤失还有泥浆流动的影响，表现为剪切速率和泥浆流态对动滤失的影响。在动滤失条件下，泥饼的增长受到泥浆冲蚀作用的限制。当岩层的表面最初暴露时，滤失速率较

高,此时泥饼增长较快,但随着时间的推移,泥饼的增长速率减小了,直到最终等于冲蚀影响的速率。此后,泥饼厚度将不再发生变化。这种情况下,根据达西定律,得到如下动滤失方程:

$$V_f = \frac{KA\Delta pt}{\mu h_{mc}} \quad (3-27)$$

从式(3-27)可以看出,动失水量与泥饼渗透率 K 成正比,与其厚度 h_{mc} 成反比,与渗滤时间 t 成正比。而在静止条件下,泥饼厚度是一个可变量,这也是动、静滤失的一个本质区别。正常情况下,动滤失泥饼与静滤失泥饼的不同点在于静泥饼有一软的表面层,而动泥饼却没有,这种表面层的剪切强度很低,在泥浆的冲蚀作用下,表面层就会被冲蚀掉。然而,当泥浆粘度较大、环空返速较低时,一些在孔内翻转的岩粉会粘附在泥饼表面层上,使泥饼增厚。

(2) 泥浆处理剂的影响

泥浆处理剂的加入对静滤失和动滤失的影响是不同的。用某种处理剂使静滤失达到最小值时,动滤失并不一定达到最小;有些物质(如油类)在降低静滤失的同时,却使动滤失增加。

3. 瞬时滤失

瞬时滤失时间很短,其失水量一般占总失水量的比例不大。但对于固相含量低、分散和水化很好的不分散低固相泥浆,瞬时滤失占的比例则较大。对于相同的泥浆,如果渗滤介质不同,其瞬时失水量也是不同的。

影响瞬时滤失的因素主要有压差,岩层的渗透性,滤液的粘度,泥浆中固相颗粒的含量、尺寸和分布,水化程度以及泥浆在地层孔隙入口处能否迅速形成“桥点”(即被挡在孔隙入口之外)。因瞬时滤失过程时间很短,测定时很难与静失水量分开。

瞬时失水量的大小对机械钻速有较大的影响。研究表明,瞬时滤失发生时,高的滤失速率可使滤液分子迅速进入钻头破碎岩体形成的薄层岩屑底下,可协助将岩屑薄层从岩体上剥离下来并立即冲走,而不会在液柱压差下压实,造成重复破碎;并且高的滤失速率可使破碎岩石的微裂缝扩大,或者使它们不闭合。因而当瞬时失水量较大时,将有利于提高机械钻速。不分散低固相泥浆的钻速高,其原因之一就是因为它瞬时失水量明显大于其他泥浆。

此外,在钻进到孔隙大、裂缝发育的砂岩、石灰岩或白云岩矿层时,瞬时滤失会使较多的泥浆和滤液进入矿层,造成矿层渗透率下降。因此对用于矿层的泥浆,要求其失水量越小越好。

二、泥浆滤失性能的调整与控制

(一) 泥浆滤失性能与钻孔的关系

为了防止地层流体进入钻孔,泥浆的静液柱压力必须大于地层孔隙内流体的压力。因此,在此压差作用下泥浆就有侵入渗透性地层的趋势。为了维持孔眼的稳定以及减少泥浆固、液相侵入地层与损害油气层,就必须控制泥浆的滤失性能,其有效途径是在孔壁上形成薄而致密的泥饼。如果孔内泥浆滤失性控制不当,必然要产生两方面问题,即失水量过大和泥饼过厚。这两者之间既有区别,又是相互联系的。

泥浆循环时，对于孔壁为泥页岩的地层，失水量过大会引起地层岩石水化膨胀、剥落，使井径扩大或缩小。由于井径扩大或缩小，又会引起卡钻、钻杆折断，降低钻进效率，缩短钻头、钻具的使用寿命等问题。对于裂隙发育的破碎地层，滤液渗入岩层的裂隙面，减小了层面间的接触摩擦力，在钻杆的敲击下，碎岩块落入孔内，常引起掉块卡钻等孔内事故。而对于矿层（特别是低渗和粘土含量高的矿层），失水量过大则会引起矿层渗透率的下降。

泥浆循环时，如果在孔壁上形成的泥饼过厚，则会减小井的有效直径，钻具与孔壁的接触面积增大，从而有可能引起各种钻孔问题，如旋转时扭矩增大，起下钻遇阻以及高的抽吸与液动压力，功率消耗增加，甚至引起孔壁垮塌或造成钻孔漏失、井涌等事故。在液柱压力和地层压力作用下，厚的泥饼易引起压差卡钻事故，而处理卡钻事故的费用是相当高的。此外，泥饼过厚会造成测井工具、打捞工具不能顺利下至孔底；同时泥饼过厚，还会影响测试结果的正确性，甚至会影响矿层的发现。

由此可见，泥浆的滤失控制是泥浆工艺中的一个十分重要的问题，这里首要的是控制泥饼的厚度，而泥饼的厚度是随滤失总量的增加而增厚的，故应控制泥浆的失水量。然而，失水量并不是决定泥饼厚度的唯一因素，对于不同的泥浆，泥饼厚度相同，而失水量却不一定相同；反之，失水量相同，泥饼厚度亦可能不同。失水量过大固然不好，但过小的失水量也会造成泥浆成本增加，钻速下降。

需要指出，泥浆滤液矿化度不同，对孔壁岩层稳定性的影响也是不同的。与淡水滤液、碱性强的滤液相比较，高矿化度、碱性弱的滤液和含高聚物（例如聚丙烯酰胺）的滤液不易引起孔壁岩层的膨胀和坍塌。实践证明，即使失水量大些，使用这类泥浆要安全得多。因此，对于孔壁稳定来说，不仅要注意失水量的大小，还要考虑滤液的性质及其对孔壁稳定造成的影响。

综上所述，泥浆形成的泥饼一定要薄、致密、坚韧；而泥浆的失水量则要控制适当，应根据岩石的特点、孔深、孔身结构等因素来确定，同时应考虑泥浆的类型。

（二）对泥浆滤失性能的要求

在确定泥浆失水量指标时应注意以下原则：孔浅时可放宽，孔深时应从严；钻裸眼时间短时可放宽，钻裸眼时间长须从严；使用不分散性处理剂时可适当放宽，使用分散性处理剂时要从严；泥浆矿化度高者可放宽，泥浆矿化度小应从严。总之，要从钻孔实际出发，以孔内情况是否正常为依据，适时测定并及时调整泥浆的失水量。

对泥浆滤失性能的一般要求是：

- 1) 钻遇易坍塌地层时，失水量需严格控制，API 失水量最好不大于 5 mL。
- 2) 对一般地层，API 失水量应尽量控制在 10 mL 以内，HTHP 失水量不应超过 20 mL。但有时可适当放宽，某些油基泥浆体系正是通过适当放宽失水量来提高钻速的。
- 3) 要注意提高滤饼质量，尽可能形成薄、韧、致密及润滑性好的滤饼，以利于固壁和避免压差卡钻。
- 4) 加强对泥浆滤失性能的检测。

室内研究表明，瞬时失水量的适当增加有利于提高机械钻速。瞬时失水量较大时，钻头下面已被破碎的岩石在各个方向上的压力能迅速达到平衡，从而使岩屑能及时地离开孔

底，减轻因压差引起的压持效应。由此看来，在控制总失水量的同时，使泥浆保持一定的瞬时滤失对于钻头碎岩是有益的。

（三）泥浆滤失性能的控制与调整

在影响泥浆滤失的因素中，井温和地层的渗透性是无法改变的，其余的因素则可以人为控制。可以通过改善泥饼的质量（渗透性和抗剪强度），确定适当的泥浆密度以减少液柱压差，提高滤液粘度，缩短泥浆的浸泡时间，控制泥浆返速和流态（形成平板型层流）等方法来减少泥浆的失水量，并形成薄而韧的泥饼。在泥浆工艺中，控制和调整泥浆滤失性能的关键在于改善泥饼的质量，这里既包括增加泥饼的致密程度，降低其渗透性，同时又包括增强泥饼的抗剪切能力和润滑性。主要调整方法是根据泥浆类型、组成以及所钻地层的情况，选用适合的降滤失剂和封堵剂。获得致密性与渗透性小的泥饼的一般方法是：

1) 使用膨润土造浆。膨润土颗粒细，呈片状，水化膜厚，能形成致密的渗透性小的泥饼，而且可在固相较少的情况下满足对泥浆滤失性能和流变性能的要求。一般情况下，加入适量的膨润土可以将泥浆的失水量控制到钻孔和完井工艺要求的范围。膨润土是常用的配浆材料，同时也是控制失水量和建立良好造壁性的基本处理剂。

2) 加入适量纯碱、烧碱或有机分散剂（如煤碱液等），提高粘土颗粒的 ζ 电位、水化程度和分散度。

3) 加入 CMC 或其他聚合物以保护粘土颗粒，阻止其聚结，从而有利于提高分散度。同时，CMC 和其他聚合物沉积在泥饼上亦起堵孔作用，使失水量降低。

4) 加入一些极细的胶体粒子（如腐殖酸钙胶状沉淀）堵塞泥饼孔隙，以使泥饼的渗透性降低，抗剪切能力提高。

我国在泥浆降滤失剂的使用方面已形成自己的特色。在分散型泥浆中，常用的是低粘 CMC；若降失水量的同时还希望提高粘度，可选用中或高粘度的 CMC。聚合物泥浆中使用的降滤失剂均为由单体合成的聚合度相对较低的聚合物，目前其产品种类繁多，并形成系列。如常用的聚丙烯腈盐类（有钠、钙及铵盐等）、聚丙烯酸盐类（有钠、钙及钾盐等），还有近年来推广使用的阳离子和两性离子聚合物等。在深井和超深孔内部孔段，可选用抗温能力强的磺化褐煤（SMC）、磺化酚醛树脂（SMP-1）以及酚醛树脂和腐殖酸缩合物（SPNH）。在饱和盐水泥浆中可选用 SMP-2。另外还经常使用沥青类产品来改善泥饼质量，降低泥饼的渗透性，增强泥饼的抗剪切强度和润滑性，在水基和油基泥浆中均可使用。

三、泥浆的润滑性能

泥浆的润滑性能通常包括泥饼的润滑性能和泥浆这种流体自身的润滑性两方面。泥浆和泥饼的摩阻系数，是评价泥浆润滑性能的两个主要技术指标。泥浆的润滑性对钻孔工作影响很大。

特别是钻进超深井、大斜度井、水平井和丛式井时，钻柱的旋转阻力和提升阻力会大幅度提高。由于影响钻孔扭矩和阻力以及钻具磨损的主要可调节因素是泥浆的润滑性能，因此泥浆的润滑性能对减少卡钻等孔内复杂情况，保证安全、快速钻进起着至关重要的作用。

(一) 泥浆的润滑性能

国内外研究者对泥浆的润滑性能进行了评价,得出的结论是:空气与油处于润滑性的两个极端位置,而水基泥浆的润滑性处于其间。用 Baroid 公司生产的泥浆极压润滑仪测定了三种基础流体的摩阻系数(泥浆摩阻系数相当于物理学中的摩擦系数),空气为 0.5,清水为 0.35,柴油为 0.07。在配制的三类泥浆中,大部分油基泥浆的摩阻系数在 0.08 ~ 0.09 之间,各种水基泥浆的摩阻系数在 0.20 ~ 0.35 之间,如加有油品或各类润滑剂,则可降到 0.10 以下。

对大多数水基泥浆来说,摩阻系数维持在 0.20 左右时可认为是合格的。但这个标准并不能满足水平井的要求,对水平井则要求泥浆的摩阻系数应尽可能保持在 0.08 ~ 0.10 范围内,以保持较好的摩阻控制。因此,除油基泥浆外,其他类型泥浆的润滑性能很难满足水平井钻孔的需要,但可以选用有效的润滑剂改善其润滑性能,以满足实际需要。近年来开发出的一些新型水基仿油性泥浆,其摩阻系数可小于 0.10,很接近油基泥浆,其润滑性能可满足水平井钻孔的需要。

从提高钻孔经济技术指标来讲,润滑性能良好的泥浆具有以下优点:

- 1) 减小钻具的扭矩、磨损和疲劳,延长钻头的寿命;
- 2) 减小钻柱的摩擦阻力,缩短起下钻时间;
- 3) 能用较小的动力来转动钻具;
- 4) 能防粘附卡钻,防止钻头泥包。

泥浆润滑性好,可以减少钻头、钻具及其他配件的磨损,延长使用寿命,同时防止粘附卡钻,减少泥包钻头,易于处理孔内事故等。在钻孔过程中,由于动力设备有固定功率,钻柱的抗拉、抗扭能力以及孔壁稳定性都有极限。若泥浆的润滑性能不好,会造成钻具回转阻力增大,起下钻困难,甚至发生粘附卡钻和断钻具事故;当钻具回转阻力过大时,会导致钻具振动,从而有可能引起钻具断裂和孔壁失稳。

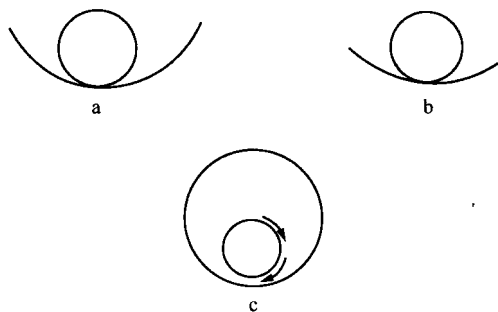


图 3-20 三种不同润滑模式示意图

a—边界摩擦; b—干摩擦或障碍摩擦; c—流体摩擦

(二) 泥浆润滑性的影响因素

1. 钻孔作业中摩擦现象的特点

改善泥浆润滑性能的目的主要是为了降低钻孔过程中钻柱的扭矩和阻力。在钻孔过程中,按摩擦接触表面润滑情况,摩擦可分为以下三种情况(图 3-20):

1) 边界摩擦:两接触面间有一层极薄的润滑膜,摩擦和磨损不取决润滑剂的粘度,而是与两表面和润滑剂的特性有关,如润滑膜的厚度和强度、粗糙表面的相互作用以及液体中固相颗粒间的相互作用。有泥浆的情况下,钻铤在孔眼中的运动等属边界摩擦。

2) 干摩擦(无润滑摩擦):又称为障碍摩擦,如空气钻孔中钻具与岩石的摩擦,或孔壁极不规则情况下,钻具直接与部分孔壁岩石接触时的摩擦。

3) 流体摩擦:由两接触面间流体的黏滞性引起的摩擦。

可以认为,钻进过程中的摩擦是混合摩擦,即部分接触面为边界摩擦,另一部分为流

体摩擦。在高负荷边界面上，塑性表面的边界摩擦更为突出。在钻孔作业中，摩擦系数是两个滑动或静止表面间的相互作用以及润滑剂所起作用的综合体现。

钻孔作业中的摩擦现象较为复杂，摩阻力的大小不仅与泥浆的润滑性能有关，其影响因素还涉及钻柱、套管、地层、孔壁泥饼表面的粗糙度；接触表面的塑性；接触表面所承受的负荷；流体粘度与润滑性；流体内固相颗粒的含量和大小；孔壁表面泥饼润滑性；井斜角；钻柱重量；静态与动态滤失效应等。在这些众多的影响因素中，泥浆的润滑性能是主要的可调节因素。

2. 泥浆润滑性的主要影响因素

影响泥浆润滑性的主要因素有：泥浆的粘度、密度，泥浆中的固相类型及含量，泥浆的滤失情况，岩石条件，地下水的矿化度以及溶液 pH 值，润滑剂和其他处理剂的使用情况等。

(1) 粘度、密度和固相的影响

随着泥浆固相含量和密度的增加，通常其粘度、切力等也会相应增大。这种情况下，泥浆的润滑性能也会相应变差。这时其润滑性能主要取决于固相的类型及含量。砂岩和各种加重剂的颗粒具有特别高的研磨性能。

泥浆中固相含量对其润滑性影响很大。随着泥浆固相含量增加，除使泥饼粘附性增大外，还会使泥饼增厚，易产生压差粘附卡钻。另外，固相颗粒尺寸的影响也不可忽视。研究表明，泥浆在一定时间内通过不断剪切循环，其固相颗粒尺寸随剪切时间增加而减小，其结果是双重性的：泥浆滤失有所减小，从而钻柱摩阻力也有所降低，颗粒分散得更细微，使比表面积增大，从而造成摩阻力增大。可见，严格控制泥浆粘土含量，搞好固相控制和净化，尽量用低固相泥浆，是改善和提高泥浆润滑性能的最重要的措施之一。

(2) 滤失性、岩石条件、地下水和滤液 pH 值的影响

致密、表面光滑、薄的泥饼具有良好的润滑性能。降滤失剂和其他改进泥饼质量的处理剂（比如磺化沥青）主要是通过改善泥饼质量来改善泥浆的润滑性能。在泥浆条件相同的情况下，岩石的条件是通过影响所形成泥饼的质量以及孔壁与钻柱之间接触表面粗糙度而起作用的。孔底温度、压差、地下水和滤液的 pH 值等因素也会在不同程度上影响润滑剂和其他处理剂的作用效能，从而影响泥饼的质量，对泥浆的润滑性能产生影响。

(3) 有机高分子处理剂的影响

许多高分子处理剂都有良好的降滤失、改善泥饼质量、减少钻柱摩擦阻力的作用。有机高分子处理剂能提高泥浆的润滑性能，还与其在钻柱和孔壁上的吸附能力有关。吸附膜的形成，有利于降低孔壁与钻柱之间的摩擦阻力。某些处理剂，如聚阴离子纤维素、磺化酚醛树脂等具有提高泥浆润滑性的作用。不少高分子化合物通过复配、共聚等处理，可成为具有良好润滑性能的润滑材料。

(4) 润滑剂

试验表明，使用清水作泥浆，摩擦阻力是较大的。而往清水中加入千分之一至千分之几的润滑剂（主要是阴离子表面活性剂）后，润滑性能会得到明显改善，表现为钻具回转工作电流下降很多。因此，使用润滑剂是改善泥浆润滑性能、降低摩擦阻力的主要途径。因此，正确地使用润滑剂可以大幅度提高泥浆的润滑性能。泥浆润滑剂品种一般可分为两大类，即液体类和固体类。前者如矿物油、植物油、表面活性剂等；后者如石墨、塑

料小球、玻璃小球等。近年来泥浆润滑剂品种发展最快的是惰性固体类润滑剂，液体润滑剂中主要发展了高负荷下起作用的极压润滑剂及有利于环境保护的无毒润滑剂；由于环境保护的原因，沥青类润滑剂的用量正逐年减少。

目前，常用的改善泥浆润滑性能的方法，主要是通过合理使用润滑剂降低摩阻系数，以及通过改善泥饼质量来增强泥饼的润滑性。

（三）用于泥浆的润滑剂

1. 对泥浆润滑剂的要求

国内外对润滑剂的研究范围较广，其中有各种表面活性剂、高分子脂肪酸及其衍生物等。

泥浆润滑剂的选择应满足下列基本要求：

- 1) 润滑剂必须能润滑金属表面，并在其表面形成边界膜和次生结构。
- 2) 应与基浆有良好的配伍性，对泥浆的流变性和滤失性不产生不良影响。
- 3) 不降低岩石破碎的效率。
- 4) 具有良好的热稳定性和耐寒稳定性。
- 5) 不腐蚀金属，不损坏密封材料。
- 6) 不污染环境，易于生物降解，价格合理，且来源充足。

泥浆润滑剂除了主要提高钻具的寿命及其工作指标外，还应不影响对地层资料的分析和评价。

基于以上要求，一般植物油类，既无毒性，又易于生物降解，且来源较广，较适合作润滑材料。可选用的植物油有蓖麻油、亚麻油、棉籽油等。植物油的主要成分是脂肪酸，而脂肪酸则是润滑剂所需要的表面活性物质。经化学改性后，其表面活性可进一步提高。如磺化棉籽油就可以作为抗温抗挤压的极压润滑剂使用。磺化棉籽油还可增加矿物油的活性，使其润滑效果得以提高。

2. 润滑剂的作用机理

（1）惰性固体的润滑机理

固体润滑剂能够在两接触面之间产生物理分离，其作用是在摩擦表面上形成一种隔离润滑薄膜，从而达到减小摩擦、防止磨损的目的。多数固体类润滑剂类似于细小滚珠，可以存在于钻柱与孔壁之间，将滑动摩擦转化为滚动摩擦，从而可大幅度降低扭矩和阻力。固体润滑剂在减少钻杆、钻具接头的磨损方面尤其有效，还特别有利于下尾管、下套管和旋转套管。固体类润滑剂的热稳定性、化学稳定性和防腐蚀能力等良好，适于在高温、但转速较低条件下使用，缺点是冷却钻具的性能较差，不适合在高转速条件下使用。

（2）沥青类处理剂的润滑机理

沥青类处理剂主要用于改善泥饼质量和提高其润滑性。沥青类物质亲水性弱，亲油性强，可有效地涂敷在孔壁上，在孔壁上形成一层油膜。这样，既可减轻钻具对孔壁的摩擦，又可减轻钻具对孔壁的冲击作用。由于沥青类处理剂的作用，孔壁岩石由亲水转变为憎水，所以，可阻止滤液向地层渗透。

（3）液体润滑剂的润滑机理

矿物油、植物油、表面活性剂等主要是通过金属、岩石和粘土表面形成吸附膜，使

钻柱与孔壁岩石接触（或水膜接触）产生的固-固摩擦，改变为活性剂非极性端之间或油膜之间的摩擦，或者通过表面活性剂的非极性端还可再吸附一层油膜。从而使回转钻柱与岩石之间的摩擦阻力大大降低，减少钻具和其他金属部件的磨损，降低钻具回转阻力。其原理如图 3-21 和图 3-22 所示。

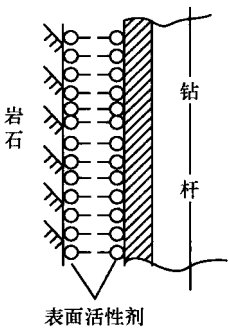


图 3-21 表面活性剂水溶液的润滑机理

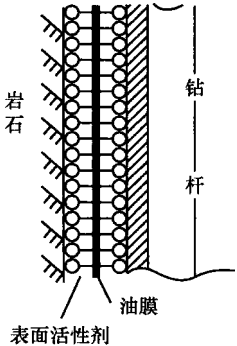


图 3-22 油包水乳化泥浆的润滑机理

极压（EP）润滑剂在高温高压条件下可在金属表面形成一层坚固的化学膜，以降低金属接触界面的摩阻，从而起到润滑作用。故极压（EP）润滑剂更适应于水平钻进中高侧压力情况下，钻柱对孔壁降摩擦阻力的需要。

3. 泥浆中常用的润滑剂

（1）惰性固体润滑剂

该产品主要有塑料小球、石墨、炭黑、玻璃微珠及坚果圆粒等。近几年发展起来的塑料小球用做润滑剂效果很好，其组成为二乙烯苯与苯乙烯的共聚物。该产品具有较高的抗压强度，是一种无毒、无臭、无荧光显示、耐酸、耐碱、抗压的透明球体，在泥浆中呈惰性，不溶于水和油类，密度为 $1.03 \sim 1.05 \text{ g/cm}^3$ ，可耐温 205°C 以上。小球粒度分布为：10~30 目的占 45%~50%，30~120 目的占 50%~55%。该润滑剂一般可降低扭矩 35% 左右，降低起下钻阻力 20% 左右。它可与水基和油基的各种类型泥浆匹配，是一种较好的润滑剂，近年来发展很快。塑料小球虽然效果较好，但成本较高，所以近期又发展了用玻璃小球代替塑料小球，也达到了类似的效果。目前已证明玻璃小球能降低扭矩与阻力。在现场试验中，泥浆中含量为 1.14 kg/m^3 ，直径 $44 \sim 88 \mu\text{m}$ 的玻璃小球能使阻力从 16761 kg 降至 11325 kg。玻璃小球由于可能起到了类似球轴承作用或可能因埋入泥饼，从而降低了泥饼的摩擦系数。塑料小球和玻璃小球这类固体润滑剂由于受固体尺寸的限制，在钻孔过程中很容易被固控设备清除，而且在钻杆的挤压或拍打下，有破坏、变形的可能，因此在使用上受到了一定的限制。

石墨粉作为润滑剂具有抗高温、无荧光、降摩擦阻力效果明显、加量小、对泥浆性能无不良影响等特点。最近一种新的适用于泥浆和水泥浆的多功能固体润滑剂——弹性石墨已在美国路易斯安那州、得克萨斯州、俄克拉何马州、墨西哥湾和北海等地区的 200 多口井中获得了成功的应用。弹性石墨无毒、无腐蚀性，在高浓度下不会阻塞泥浆马达；即使在高剪切速率下，它也不会泥浆中发生明显的分散。此外，它不会影响泥浆的动切力和静切力，与各种纤维质和矿物混合物具有良好的配伍性。弹性石墨的独特结构使其能够用

于各种泥浆中，具有降低扭矩、摩擦阻力和减少磨损的作用。弹性石墨作为固体润滑剂，尤其适用于使用常规液体润滑剂效果不大的石灰基泥浆。

石墨粉能牢固地吸附（包括物理和化学吸附）在钻具和孔壁岩石表面，从而改善摩擦副之间的摩擦状态，起到降低摩擦阻力的作用；同时当石墨粉吸附在孔壁上，可以封闭孔壁的微孔隙，因此兼有降低泥浆失水量和保护矿层的作用。

（2）液体类润滑剂

该类产品主要有矿物油、植物油和表面活性剂等。

液体类润滑剂又可分为油性剂和极压剂，前者主要在低负荷下起作用，通常为酯或羧酸；后者主要在高负荷下起作用，通常含有硫、磷、硼等活性元素。往往这些含活性元素的润滑剂兼有两种作用，既是油性剂，又是极压剂。

性能良好的润滑剂必须具备两个条件，一是分子的烃链要足够长（一般碳链 R 在 $C_{12} \sim C_{18}$ 之间），不带支链，以利于形成致密的油膜；二是吸附基要牢固地吸附在粘土和金属表面上，以防止油膜脱落。许多润滑剂大多属于阴离子型表面活性物质，多含有磺酸基团，如磺化脂肪醇、磺化棉籽油、磺化蓖麻油和其他含硫的润滑剂如硫代烷烃琥珀酸（或酸酐）的唑啉化合物，或含酯的脂肪族琥珀酸（或酸酐）如十八碳烯琥珀酸酐和二硫代烷基醇等化合物。

常用的作为润滑剂使用的表面活性剂有：油酸钠皂、松香酸钠皂、十二烷基苯磺酸钠、磺化妥尔油沥青等。

虽然非离子活性剂同样具有亲水基（如聚氧乙烯链），但它们不能在钻柱表面形成牢固的化学吸附。因此，也就不能在钻柱表面形成牢固的憎水非极性（或油膜）润滑层。相对来讲，润滑效果较差。

如硬水中（含高价阳离子）使用单一阴离子表面活性剂时，往往会由于产生高价盐而失效或破乳。因此，一般采用以阴离子为主、非离子为辅的复合型活性剂配方，可收到了一定的润滑效果，并同时可以减少外界阳离子的影响。阴离子表面活性剂需要在碱性介质中才能保持稳定（但 pH 值过高时也会影响润滑效果），阳离子活性剂则相反，而非离子活性剂使用 pH 值的范围较大。

近年来，极压润滑剂的应用已取得明显效果。该类产品主要有国外生产的磺化妥尔油和国产脂肪烃类衍生物（代号 RH 系列）等。

随着环保意识的增强，无毒可生物降解润滑剂的使用日趋广泛。该类产品主要是不含芳香烃和双键的有机物，如以动物油和植物油为原料而制得的脂类有机物或矿物油类。这类润滑剂无毒或低毒，不污染环境，不干扰地质录井，目前该类产品已在美国路易斯安那州沿海的定向斜井中取得了很好的使用效果。在沿海某口井钻进时，在 91.44 m 孔深处钻杆接头被完全卡住，当加入一种称为 Lu—brikeen 的无毒、可生物降解的润滑剂后，摩擦阻力由 33975 kg 降到 2265 kg，顺利地钻达 4358.64 m 完钻时为止。

第三节 泥浆其他性能及测量方法

按照 API 推荐的泥浆性能测试标准，需检测的泥浆常规性能包括：密度、漏斗粘度、塑性粘度、动切力、静切力、API 失水量、HTHP 失水量、pH 值、碱度、含砂量、固相含

量、膨润土含量和滤液中各种离子的质量浓度等。

一、泥浆密度

泥浆的密度是指每单位体积泥浆的质量，常用 g/cm^3 （或 kg/m^3 ）表示。其英制单位通常为 lb/gal （即磅/加仑，或 PPg ）， $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 等于 $8.33 \text{ lb}/\text{gal}$ 。泥浆密度是确保安全、快速钻孔和保护矿层的一个十分重要的参数。通过泥浆密度的变化，可调节泥浆在钻孔内的静液柱压力，以平衡地层孔隙压力。有时亦用于平衡地层构造应力，以避免孔塌的发生。如果密度过高，将引起泥浆过度增稠、易漏失、钻速下降、对矿层损害加剧和泥浆成本增加等一系列问题；而密度过低则容易发生井涌，还会造成孔塌、井径缩小和携带岩屑能力下降。因此，在钻孔工程设计中，必须准确、合理地确定不同孔段泥浆的密度范围，并在钻进过程中随时进行检测和调整。

泥浆密度是用一种专门设计的泥浆比重秤测得的，比重秤的外观如图 3-23 所示。测定时，首先在泥浆杯中盛满泥浆，盖上计量盖，然后用棉纱擦净从计量盖小孔溢出的泥浆。再将比重秤刀口放置在底座的刀垫上，不断移动游码，直至水平泡位居两条线的中央。此时游码左侧的刻度即表示所测量泥浆的密度。

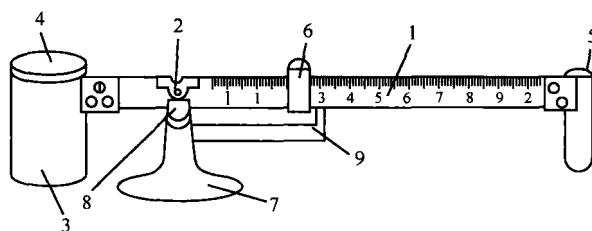


图 3-23 泥浆比重秤构造图

1—秤杆；12—主刀口；13—泥浆杯；4—杯盖；5—校正筒；
6—游码；7—底座；8—主刀垫；9—挡壁

加入重晶石等加重材料是提高泥浆密度最常用的方法。在加重前，应调整好泥浆的各种性能，特别要严格控制低密度固相的含量。一般情况下，所需泥浆密度越高，则加重前泥浆的固相含量及粘度、切力应控制得越低。加入可溶性无机盐也是提高密度较常用的方法。如在保护矿层的清洁盐水泥浆中，通过加入 NaCl ，可将泥浆密度提高至 $1.20 \text{ g}/\text{cm}^3$ 左右。

为实现平衡压力钻孔或欠平衡压力钻孔，有时需要适当降低泥浆的密度。通常降低密度的方法有以下几种：①最主要的方法是用机械和化学絮凝的方法清除无用固相，降低泥浆的固相含量。②加水稀释。但往往会增加处理剂用量和泥浆费用。③混油。但有时会影响地质测井等。④低压地层可选用充气泥浆等。

二、泥浆的 pH 值

通常用泥浆滤液的 pH 值表示泥浆的酸碱性。由于酸碱性的强弱直接与泥浆中粘土颗粒的分散程度有关，因此会在很大程度上影响泥浆的粘度、切力和其他性能参数。图 3-24 表示经预水化的膨润土基浆（其中膨润土含量为 $57.1 \text{ kg}/\text{m}^3$ ）的表观粘度随 pH 值的变化。由图可知，当 pH 值大于 9 时，表观粘度随 pH 值升高而剧增。其原因是当 pH 值升高

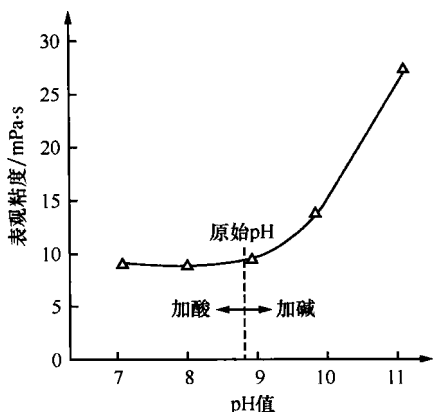


图 3-24 pH 值对膨润土基浆的表观粘度的影响

时,会有更多 OH^- 被吸附在粘土晶层的表面,进一步增强表面所带的负电性,从而在剪切作用下使粘土更容易水化分散。在实际应用中,大多数泥浆的 pH 值要求控制在 8~11 之间,即维持一个较弱的碱性环境。这主要是由于有以下几方面的原因:①可减轻对钻具的腐蚀;②可预防因氢脆而引起的钻具和套管的损坏;③可抑制泥浆中钙、镁盐的溶解;④有相当多的处理剂需在碱性介质中才能充分发挥其效能,如丹宁类、褐煤类和木质素磺酸盐类处理剂等。

对不同类型的泥浆,所要求的 pH 值范围也有所不同。例如,一般要求分散泥浆的 pH 值在 10 以上,含石灰的钙处理泥浆的 pH 值多控制在 11~12 之间,含石膏的钙处理泥浆的 pH 值多控制在 9.5~10.5 之间,而在许多情况下聚合物泥浆的 pH 值只要求控制在 7.5~8.5 之间。

烧碱(即工业用 NaOH)是调节泥浆 pH 值的主要添加剂,有时也使用纯碱(Na_2CO_3)和石灰。在常温下它们的水溶液具有以下 pH 值:10% NaOH 溶液, $\text{pH} = 12.9$; 10% Na_2CO_3 溶液, $\text{pH} = 11.1$; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和溶液, $\text{pH} = 12.1$ 。

通常使用 pH 试纸测量泥浆的 pH 值。如要求的精度较高时,可使用 pH 计。

三、泥浆含砂量

泥浆含砂量是指泥浆中不能通过 200 目筛网,即粒径大于 $74\ \mu\text{m}$ 的砂粒占泥浆总体积的百分数。在现场应用中,该数值越小越好,一般要求控制在 4% 以下。这是由于含砂量过大会对钻进过程造成以下危害:

- 1) 使泥浆密度增大,对提高钻速不利。
- 2) 使形成的泥饼松软,导致失水量增大,不利于孔壁稳定,并影响固井质量。
- 3) 泥饼中粗砂粒含量过高会使泥饼的摩擦系数增大,容易造成卡钻。
- 4) 增加对钻头和钻具的磨损,缩短其使用寿命。

降低泥浆含砂量最有效的方法,是充分利用振动筛、除砂器、除泥器等设备,对泥浆的固相含量进行有效的控制。

泥浆含砂量通常是用一种专门设计的含砂量测定仪进行测定的。该仪器由一个带刻度的类似于离心试管的玻璃容器和一个带漏斗的筛网筒组成,所用筛网为 200 目。测量时将一定体积的泥浆注入玻璃容器中,然后注入清水至刻度线。用力振荡后将容器中的流体倒入筛网筒过筛。筛完后将漏斗套在筛网筒上反转,漏斗嘴插入玻璃容器。将不能通过筛网的砂粒用清水冲入玻璃容器中。待砂粒全部沉淀后读出体积刻度。最后由下式求出泥浆含砂量,即

$$N = (V_{\text{砂粒}} / V_{\text{泥浆}}) \times 100\% \quad (3-28)$$

含砂量用含砂量仪测定,如图 3-25 所示。

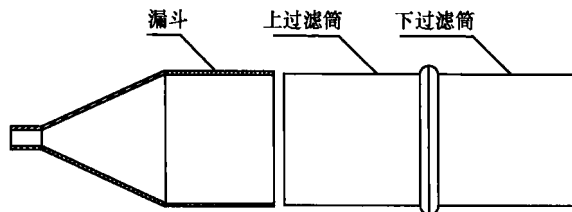


图 3-25 含砂量仪示意图

四、泥浆固相含量

泥浆固相含量通常用泥浆中全部固相的体积占泥浆总体积的百分数来表示。固相含量的高低以及这些固相颗粒的类型、尺寸和性质均对钻进时的孔内安全、钻进速度及矿层损害程度等有直接的影响。因此，在钻进过程中必须对其进行有效的控制。

1. 泥浆中固相的类型

一般情况下，泥浆中存在着各种不同组分、不同性质和不同颗粒尺寸的固相。根据其性质的不同，可将泥浆中的固相分为两种类型，即活性固相和惰性固相。凡是容易发生水化作用或易与液相中某些组分发生反应的称为活性固相，反之则称为惰性固相。前者主要指膨润土，后者包括石英、长石、重晶石以及造浆率极低的粘土等。除重晶石外，其余的惰性固相均被认为是有害固相，是需要尽可能加以清除的物质。

2. 泥浆固相含量的测定

使用泥浆固相含量测定仪，可用蒸馏的方法快速测定泥浆中固相及油、水的含量。实验程序如下：

- 1) 在蒸馏器内注入 20 mL 泥浆，将插有加热棒的套筒连接到蒸馏器上。
- 2) 将蒸馏器的引流管插入冷凝器的孔中，然后将量筒放在引流嘴下方，以接收冷凝成液体的油和水。
- 3) 接通电源，使蒸馏器开始工作，直至冷凝器引流嘴中不再有液体流出时为止。这段时间一般需 20 ~ 30 min。
- 4) 待蒸馏器和加热棒完全冷却后，将其卸开。用铲刀刮去蒸馏器内和加热棒上被烘干的固体。用天平称取固体的质量，并分别读取量筒中水、油的体积。

通常用固相所占有的体积分数表示泥浆的固相含量。需要注意的是，对于含盐量小于 1% 的淡水泥浆，很容易由实验结果求出泥浆中固相的体积分数；但对于含盐量较高的盐水泥浆，被蒸干的盐和固相会共存于蒸馏器中。此时需扣除由于盐析出引起体积增加的部分，才能确定泥浆中的实际固相含量。在这种情况下，泥浆固相含量的计算式如下：

$$f_s = 1 - f_w C_f - f_o \quad (3-29)$$

式中： f_s 、 f_w 和 f_o 分别为泥浆中固相、水和油的体积分数； C_f 为考虑盐析出而引入的体积校正系数，显然它总是大于 1 的无因次常数。在不同盐度下的 C_f 值可使用表 3-5 查得。

五、泥浆中膨润土的含量

前面已提到，膨润土作为泥浆配浆材料，在提高粘度和切力、降滤失等方面起着重要

表 3-5 20℃时不同质量浓度 NaCl 水溶液的密度和 C_f 值

密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	质量分数/%	C_f
0.9982	0	0	1
1.0053	10050	1	1.003
1.0125	20250	2	1.006
1.0268	41100	4	1.013
1.0413	62500	6	1.020
1.0559	84500	8	1.028
1.0707	107100	10	1.036
1.0857	130300	12	1.045
1.1009	154100	14	1.054
1.1162	178600	16	1.065
1.1319	203700	18	1.075
1.1478	229600	20	1.087
1.1640	256100	22	1.100
1.1804	279500	24	1.113
1.1972	311300	26	1.127

作用，但其用量又不宜过大。因此，在泥浆中必须保持适宜的膨润土含量。其测定方法是，首先使用亚甲基蓝法测出泥浆的阳离子交换容量，再通过计算确定泥浆中膨润土的含量。亚甲基蓝是一种常见染料，在水溶液中电离出有机阳离子和氯离子，其中的有机阳离子很容易与膨润土发生离子交换。其分子式为 $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCL} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 。

其试验和计算步骤如下：

1) 用不带针头的注射器量取 1 mL 泥浆，放入适当大小的锥形瓶中，加入 10 mL 水稀释。为消除某些有机处理剂的干扰，加入 1.5 mL 3% 的 H_2O_2 和 0.5 mL 浓度约为 5 N (10 M) 的稀 H_2SO_4 ，缓缓煮沸 10 min，然后用水稀释至 50 mL。

2) 用质量浓度为 3.74 g/L (相当于 0.02 M) 的亚甲基蓝标准溶液进行滴定。每滴入 0.5 mL 亚甲基蓝溶液后旋摇 30 s，然后用搅棒转移一滴液体放在普通滤纸上，观察在染色的泥浆固相斑点周围是否出现绿-蓝色圈。若无此种色圈，继续滴入 0.5 mL 亚甲基蓝溶液，并重复上面的操作。一旦发现绿-蓝色圈时，摇荡锥形瓶 2 min，再放 1 滴在滤纸上，如色圈仍不消失，表明已达滴定终点。此时，所耗亚甲基蓝溶液的毫升数即为泥浆的阳离子交换容量，记作 $(\text{CEC})_m$ 。

3) 按下式计算泥浆中的膨润土含量：

$$f_c = 14.3(\text{CEC})_m \quad (3-30)$$

式中： f_c 为泥浆中的膨润土含量，g/L。

泥浆的阳离子交换容量通常又称为亚甲基蓝容量，其含义是：每 100 mL 泥浆所能吸附亚甲基蓝的毫摩尔数。由于 1 mL 标准溶液中含有 0.01 mmol 亚甲基蓝，因此试验中所消耗标准溶液的毫升数在数值上恰好等于泥浆的亚甲基蓝容量。为便于计算，一般情况下

假定膨润土的阳离子交换容量等于 $70 \text{ mmol}/(100 \text{ g})$ ，于是便得出上面的膨润土含量计算式。

六、泥浆的胶体率和稳定性

泥浆的胶体率是泥浆中粘土颗粒分散和水化程度的粗略表示。其测量方法简单，将泥浆倒入 100 mL 量筒中，静止 24 h ，观察泥浆中析水分层情况。如上部析水 2 mL ，表示泥浆胶体率达 98% 。一般要求，泥浆胶体率达 96% 以上。

其实，这种胶体率高的泥浆，并不等于泥浆中的胶体颗粒多，也不等于泥浆失水量小及其他性能指标都能达到要求。因此，这只是一项粗略指标。

泥浆稳定性表示泥浆中粘土颗粒分散的均匀程度。测量时，将泥浆放入特制量筒（稳定性测定仪）中，静置 24 h 后测量泥浆上、下两层的比重差值来表示泥浆稳定性的好坏。一般规定比重差值小于 0.02 才合格。这种方法也是测定泥浆沉降稳定性的一种表示方法。



复习思考题

1. 泥浆流变性对钻孔有何作用？
2. 常用的流变参数有哪些？
3. 什么叫剪切稀释特性，有何作用？
4. 说明泥浆触变性的作用是什么？
5. 影响泥浆的失水量因素有哪些？
6. 泥浆润滑性的影响因素有哪些？

第四章 水基泥浆

第一节 细分散泥浆

由淡水、配浆膨润土和各种对粘土、岩粉起分散作用的处理剂（简称为分散剂）配制而成的水基泥浆称为细分散泥浆。随着泥浆工艺技术的不断发展，虽然分散泥浆的使用范围已不如过去广泛，但由于它配制方法简便、处理剂用量较少，成本较低，适于配制密度较大的泥浆，某些体系还具有抗温性较强等优点，因此仍在许多地区的一些孔段上使用。特别是在钻进表层时，至今仍然普遍使用。

一、细分散泥浆的组成

1. 膨润土及原浆的配制

通常将以蒙脱石为主要成分的配浆土称为膨润土。膨润土是分散泥浆中不可缺少的配浆材料，其主要作用在于提高体系的塑性粘度、静切力和动切力，以增强泥浆对岩粉的悬浮和携带能力；同时降低失水量，形成致密泥饼，增强造壁性。

膨润土逐渐分散在淡水中致使泥浆的粘度、切力不断增加的过程称为造浆，在添加主要处理剂之前的预水化膨润土浆常称为原浆或基浆。几乎在所有室内实验中，首先都要进行原浆的配制。由于蒙脱石含量和阳离子交换容量各不相同，来自不同产地的膨润土，其造浆效果往往有很大差别。几种典型粘土造浆的曲线如图4-1所示。

由图可见，所有各类粘土的造浆曲线都有一个共同点，即表观粘度较低时，其值随粘土含量的增加增长缓慢；当达到 $15 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 左右时，其值才随粘土含量的增加而明显上升。因此，常将每吨粘土能配出表观粘度为 $15 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的泥浆体积称为粘土的造浆率。通常配浆土的质量是以造浆率来衡量的。从该图还可以看出，配制 1 m^3 表观粘度 $15 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的泥浆只需 57 kg 怀俄明优质膨润土，如使用低造浆率粘土，则需 570 kg ，两者的用量为 $1:10$ 。经换算，用 1 t 优质膨润土可配制出表观粘度为 $15 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的泥浆约 16 m^3 ，而 1 t 低造浆率粘土只能造浆约 1.6 m^3 ，相差亦近 10 倍。使用优质膨润土配浆，泥浆密度仅为 $1.03 \sim 1.04 \text{ g/cm}^3$ 时，表观粘度即可达到 $10 \sim 15 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ；而使用低造浆率粘土配浆，泥浆密度必须增至 $1.35 \sim 1.40 \text{ g/cm}^3$ 时，其表观粘度才能达到同样的数值。因此，尽可能选用优质膨润土配浆，对减少体系中的固相含量，提高钻速有着十分重要的意义。

配制原浆时，还需加入适量纯碱，以提高粘土的造浆率。纯碱的加入量依粘土中钙离子的含量而异，可通过小型试验确定。一般约为配浆土质量的 5% 。加入纯碱的目的是除去粘土中的部分钙离子，将钙质土转变为钠质土，从而使粘土颗粒的水化作用进一步增强，分散度进一步提高。因此，在原浆中加入适量纯碱后，一般会使表观粘度增大，失水量减小。如果随着纯碱加入失水量反而增大，则表明纯碱加过量了。配制一定密度原浆所

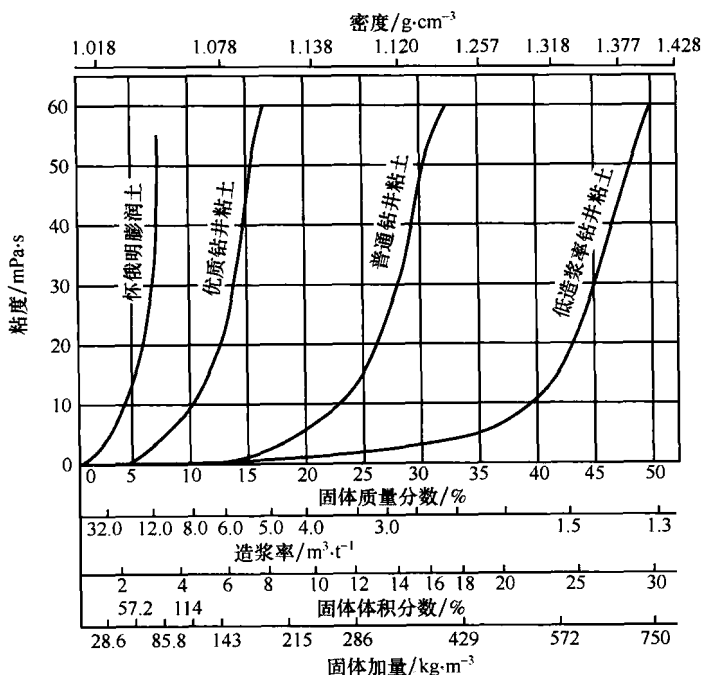


图 4-1 典型粘土的造浆曲线

需的膨润土及水量可由下式求得

$$m_c = [\rho_c V_m (\rho_m - 1)] / (\rho_c - 1) \quad (4-1)$$

$$V_w = V_m \rho_m - m_c \quad (4-2)$$

式中： m_c 为所需膨润土的质量，t； ρ_c 为膨润土密度，g/cm³； V_m 为所配制原浆的体积，m³； ρ_m 为原浆密度，g/cm³； V_w 为所需水量，m³。

2. 分散剂及泥浆的典型组成

目前，国内外用于该类泥浆的分散剂种类很多。主要起降粘作用的分散剂有多聚磷酸盐、丹宁碱液、铁铬木质素磺酸盐、褐煤及改性褐煤等；主要起降滤失作用的分散剂有 CMC 和聚阴离子纤维素等。此外，用于调节 pH 值的 NaOH 也具有较强的分散作用。这类泥浆体系中常用组分的名称、作用及加量见表 4-1 和表 4-2。

表 4-1 密度为 1.06 ~ 1.44 g/cm³ 分散泥浆的典型组成

组 分	作 用	加量/kg·m ⁻³	常用商品名称
膨润土	提粘及失水量控制	42.8 ~ 71.3	Aquagel, Magcogel 等
铁铬木质素磺酸盐	降低动切力和静切力,失水量控制	2.8 ~ 11.4	FCLS, Q-Broxin, VC-10 Spensene 等
褐煤(或配制成褐煤碱液)	失水量控制,以及降低动切力和静切力	2.8 ~ 11.4	NaC·Carbonix, Ligco, Tan-nathin 等
烧碱	调节 pH 值	0.7 ~ 5.7	/
多聚磷酸盐	降低动切力和静切力	0.3 ~ 1.4	SAPP, Magcophos, Barafos 等
CMC	失水量控制,提粘	0.7 ~ 5.7	CMC, Cellex 等
聚阴离子纤维素	失水量控制,提粘	0.7 ~ 5.7	Drispa, Monpac, Poly-pac 等
重晶石	增加密度	0 ~ 499	Baroid, Magcobar, Milbar 等

表 4-2 密度大于 1.44 g/cm³ 分散泥浆的典型组成

组 分	作 用	加量/kg·m ⁻³	常用商品名称
膨润土	提粘及失水量控制	42.8~71.3	Aquagel, Magcogel 等
铁铬木质素磺酸盐	降低动切力和静切力,以及失水量控制	11.4~34.2	FCLS, Q-Broxin, VC-10, Spensene 等
褐煤(或配制成褐煤碱液)	失水量控制,以及降低动切力和静切力	11.4~34.2	NaC·Carbonix·Ligco, Tan-nathin 等
烧碱	分散剂并调节 pH 值	0.7~8.6	/
磺化褐煤和树脂类处理剂	控制 HTHP 失水量,并作为稳定剂	5.7~17.1	SMC, SMP, Resinex, Durenex 等
重晶石或氯化铁粉	增加密度	357~1427	Baroid, Magcobar, Milbar 等

我国常用于深井和超深井的三磺泥浆的典型配方及性能见表 4-3。在这种泥浆中,三种磺化类产品用做主处理剂。其中磺化栲胶(SMT)是抗高温降粘剂,磺化褐煤(SMC)与磺化酚醛树脂(SMP-1)配合使用,具有很强的降滤失作用,添加适量的红矾钾和 Span-80,都是为了增强体系的抗温能力。

表 4-3 分散型三磺泥浆的推荐配方及性能

基 本 配 方		可 达 到 的 性 能	
材料名称	加量/kg·m ⁻³	项目	指标
膨润土	80~150	密度/g·cm ⁻³	1.15~2.00
纯碱	5~8	漏斗粘度/s ⁻¹	30~60
磺化褐煤	30~50	API 失水量/mL	≤5
磺化栲胶	5~15	HTHP 失水量/mL	15 左右
磺化酚醛树脂	30~50	泥饼/mm	0.5~1
SLSP	40~60	塑性粘度/mPa·s	10~15
红矾钾(或钠)	2~4	动切力/Pa	3~8
CMC(低粘)	10~15	静切力(初/终)/Pa	0~5/2~15
Span-80	3~5	pH 值	≥10
润滑剂	5~15	含砂量/%	0.5~1
烧碱	3 左右		
重晶石	视需要而定		
各类无机盐	视需要而定		

二、细分散泥浆的特点

细分散泥浆的主要特点是粘土在水中高度分散,正是通过高度分散的粘土颗粒使泥浆具有所需的流变和降滤失性能。其优点除配制方法简便、成本较低之外,还体现在以下方面:①可形成较致密的泥饼,而且其韧性好,具有较好的护壁性,API 失水量和 HTHP 失水量均相应较低;②可容纳较多的固相,因此较适于配制高密度泥浆,密度可高达 2.00 g/cm³ 以上;③抗温能力较强,比如以磺化栲胶、磺化褐煤和磺化酚醛树脂为主处理剂的

三磺泥浆是我国常用于钻深井的分散泥浆体系，抗温可达 160 ~ 200℃。1977 年，我国陆上最深的一口井关基井就是使用这种体系钻至 7175 m 的。

但是，与后来发展起来的各类泥浆相比，细分散泥浆在使用、维护过程中往往又存在着一些难以克服的缺点和局限性，主要表现在：①性能不稳定，容易受到钻孔过程中进入泥浆的粘土和可溶性盐类的污染。钻遇盐膏层时，少量石膏、岩盐就会使泥浆性能发生较大的变化；②因滤液的矿化度低，容易引起孔壁附近的泥页岩水化、松散、垮塌，并使孔壁的岩盐溶解，即泥浆抑制性能差，不利于防塌；③由于体系中固相含量高，特别是粒径小于 1 μm 的亚微米颗粒所占的比例相当高，因此使用时对机械钻速有明显的影响，尤其不宜在强造浆地层中使用；④滤液侵入易引起粘土膨胀，因而不能有效地保护储层，钻遇储层时必须加以改造才能达到要求。据统计，在经过充分的剪切作用之后，用木质素磺酸盐处理的分散泥浆中亚微米颗粒约占全部固相颗粒总数的 80%，而典型的不分散聚合物泥浆中的亚微米颗粒仅占颗粒总数的 13%。试验表明，亚微米颗粒要比大于 1 μm 的较大颗粒对钻速的影响大 12 倍，可见使用分散性过强的泥浆对提高钻速是十分不利的。

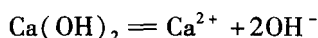
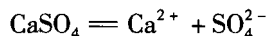
在实际应用中，为了将分散性泥浆中亚微米颗粒所占比例减至最低程度，一方面应控制膨润土的加量，另一方面应通过固控设备的使用，尽可能降低体系的总固相含量。膨润土的含量应随泥浆密度和井温的高低加以调整。密度和井温越高，膨润土含量应该越低。分散剂和 NaOH 的加量亦不宜过高，pH 值一般应控制在 9.5 ~ 11.0 范围内。此外，由于大多数分散剂的抗盐性不够强，故分散性泥浆中应保持较低的无机盐含量。

三、泥浆的受侵及其处理

钻孔过程中，常有来自地层的各种污染物进入泥浆中，使其性能发生不符合施工要求的变化，这种现象常称为泥浆受侵。有的污染物严重影响泥浆的流变和滤失性能，有的加剧对钻具的损坏和腐蚀。当污染严重时，只有及时地对配方进行有效的调整，或者采用化学方法清除它们，才能保证钻进的正常进行。其中最常见的是钙侵、盐侵和盐水侵，此外还有 Mg^{2+} 、 CO_2 、 H_2S 和 O_2 等造成的污染。由于分散泥浆最容易受侵，因此在本节有必要对该问题进行扼要的讨论。

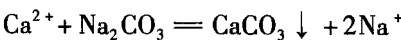
1. 钙侵

Ca^{2+} 可通过以下途径进入泥浆：①钻遇石膏层；②钻遇盐水层，因地层盐水中一般含有 Ca^{2+} ；③钻水泥塞，因水泥凝固后产生氢氧化钙；④使用的配浆水是硬水；⑤石灰用做泥浆添加剂等。除在钙处理泥浆和油包水乳化泥浆的水相中需要一定浓度的 Ca^{2+} 外，在其他类型泥浆中 Ca^{2+} 均以污染离子存在。虽然 $CaSO_4$ 和 $Ca(OH)_2$ 在水中的溶解度都不高，但都能提供一定数量的 Ca^{2+} ，即



试验表明，几万分之一 Ca^{2+} 就足以使泥浆失去悬浮稳定性。其原因主要是由于 Ca^{2+} 易与钠蒙脱石中的 Na^{+} 发生离子交换，使其转化为钙蒙脱石，而 Ca^{2+} 的水化能力比 Na^{+} 要弱得多，因此 Ca^{2+} 的引入会使蒙脱石絮凝程度增加，致使泥浆的粘度、切力和失水量增大。当泥浆遇钙侵后，有两种有效的处理方法。一是在钻达含石膏地层前转化为钙处理泥浆；二是使用化学剂将 Ca^{2+} 清除。通常是根据滤液中 Ca^{2+} 浓度，加入适量纯碱除去

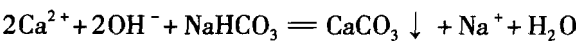
泥浆中的 Ca^{2+} ，其反应式为



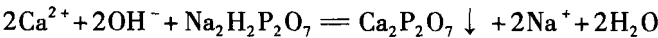
这种处理方法的好处是，既沉淀掉 Ca^{2+} ，多出的 Na^+ 又将钙蒙脱石转变为钠蒙脱石。但注意纯碱不要加量过多，以免引起 CO_3^{2-} 污染。

如果是水泥引起的污染，由于 Ca^{2+} 和 OH^- 同时进入泥浆，致使泥浆的 pH 值偏高。这种情况下，最好用碳酸氢钠 (NaHCO_3) 或 SAPP (酸式焦磷酸钠, $\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$) 清除 Ca^{2+} 。

当加入 NaHCO_3 时，



当加入 SAPP 时，



在以上两个反应中，均既清除了 Ca^{2+} ，又适当地降低了 pH 值。

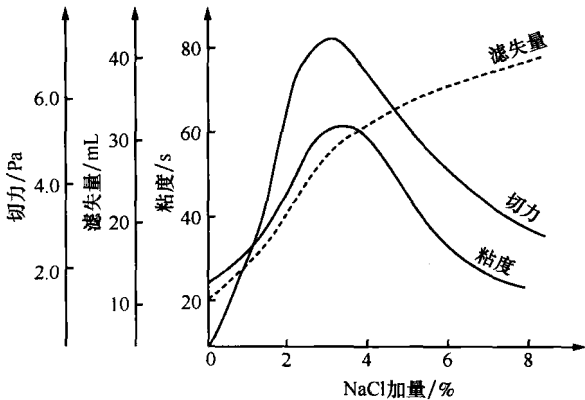


图 4-2 加入 NaCl 后分散泥浆性能的变化

2. 盐侵和盐水侵

当钻遇岩盐层时，由于孔壁附近岩盐的溶解使泥浆中 NaCl 浓度迅速增大，从而发生盐侵；钻达盐水层时，若泥浆的静液压力不足以压住高压盐水流，盐水便会进入泥浆发生盐水侵。由于分散泥浆的矿化度一般很低，不可能有足够的抗盐能力，因此在其受到盐侵或盐水侵之后，泥浆的流变和滤失性能将发生如图 4-2 所示的规律性变化。

泥浆中的粘土矿物由于晶格取代其颗粒表面带有负电荷，吸附阳离子形成扩散双电层。随着进入泥浆的 Na^+ 浓度不断增大必然会增加粘土颗粒扩散双电层中阳离子的数目，从而压缩双电层，使扩散层厚度减小，颗粒表面的电位下降。在这种情况下，粘土颗粒间的静电斥力减小，水化膜变薄。颗粒的分散度降低，颗粒之间端面-端面和端-端连接的趋势增强。由于絮凝结构的产生，导致泥浆的粘度、切力（图中为初切）和失水量均逐渐上升。当 Na^+ 浓度增大到一定程度之后，压缩双电层的现象更为严重，粘土颗粒的水化膜变得更薄，致使粘土颗粒发生面-面聚结，分散度明显降低，因而泥浆的粘度和切力在分别达到其最大值后又转为下降，失水量则继续上升。此时如不及时处理，泥浆的稳定性将完全丧失。从图 4-2 可见，当 NaCl 浓度在 3% 左右时，分散泥浆的粘度和切力分别达到最大值。但需注意，该分数值以及最大值的大小都不是固定不变的，而是依所选用配浆土的性质和用量而异。

盐侵的另一表现是随含盐量增加，泥浆的 pH 值逐渐降低，其原因显然是由于 Na^+ 将粘土中的 H^+ 及其他酸性离子不断交换出去所致。

当泥浆受到盐侵或盐水侵之后，欲采取化学方法除去泥浆中的 Na^+ 是十分困难的，因此目前常用的处理方法是及时补充抗盐性强的各种处理剂，将分散泥浆转化为盐水泥浆。例如，降滤失剂 CMC 的分子链中含有许多羧钠基 ($-\text{COONa}$)。这是一种强水化基团，并且电离后生成的羧基 ($-\text{COO}^-$) 带有负电荷，因而可以使被 Na^+ 压缩双电层所降低的

ζ 电位得到补偿。因此, CMC 的加入可有效地阻止粘土颗粒间相互聚并的趋势, 有助于保持泥浆的聚结稳定性, 使其在盐侵后仍然具有较小的失水量。除 CMC 外, 聚阴离子纤维素、磺化酚醛树脂和改性淀粉等也是常用的抗盐降滤失剂, 铁铬盐 (FCLS) 等是常用的抗盐稀释剂。海泡石和凹凸棒石等抗盐粘土是用于配制盐水泥浆以及对付盐侵、盐水侵的优质材料, 但由于我国受矿源的限制, 至今未广泛使用。

第二节 粗分散泥浆

一、钙处理泥浆

钙处理泥浆是在使用分散性泥浆的基础上, 于 20 世纪 60 年代发展起来的具有较好抗盐、钙污染能力和对泥页岩水化具有较强抑制作用的一类泥浆。该类泥浆体系主要由含 Ca^{2+} 的无机絮凝剂、降粘剂和降滤失剂组成。由于体系中的粘土颗粒处于适度絮凝的粗分散状态, 因此又称之为粗分散泥浆。目前常用的无机絮凝剂主要有三种: 石灰、石膏和氯化钙。用石灰处理者称为石灰泥浆, 用石膏处理者称为石膏泥浆, 用 CaCl_2 处理者称为 CaCl_2 泥浆。为了进一步增强其抑制性能, 采用石灰和 KOH 联合处理, 又发展了一种新型的钾石灰泥浆。这四种钙处理泥浆都是以 Ca^{2+} 提供抑制性化学环境, 使泥浆中的粘土转变为钙土, 从而使粘土颗粒由高度分散转变为适度絮凝。钙处理泥浆可在很大程度上克服细分散泥浆的缺点, 具有防塌、抗污染和在含有较多 Ca^{2+} 时使性能保持稳定的特点。

(一) 钙处理泥浆的配制原理及特点

Ca^{2+} 改变粘土分散度的作用机理, 可以从以下两方面来理解。

一方面, Ca^{2+} 通过 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 交换, 将钠土转变为钙土。钙土水化能力弱, 分散度低, 故转化后体系分散度明显下降。转化的程度取决于粘土的阳离子交换容量和滤液中 Ca^{2+} 的浓度。图 4-3 表示滤液中钙离子的浓度对其在不同类型粘土上吸附量的影响。由图可见, 粘土的阳离子交换容量越高, 所吸附 Ca^{2+} 的量就越大。同时, 通过控制滤液中 Ca^{2+} 的浓度, 可以控制钠土转变为钙土的数量, 从而控制泥浆中粘土的分散度。另一方面, Ca^{2+} 本身是一种无机絮凝剂, 会压缩粘土颗粒表面的扩散双电层, 使水化膜变薄, ζ 电位下降, 从而引起粘土晶片面-面和端-面聚结, 造成粘土颗粒分散度下降。

但是, 如果只加入 Ca^{2+} , 就相当于细分散泥浆受到钙侵, 使其流变和滤失性能均受到破坏。因此, 钙处理泥浆在加入 Ca^{2+} 的同时, 还必须加入 NaT、FCLS 和 CMC 等分散剂。由于这类分散剂的分子中含有大量的水化基团, 当吸附在粘土颗粒表面后, 会引起水化膜增厚, ζ 电位增大,

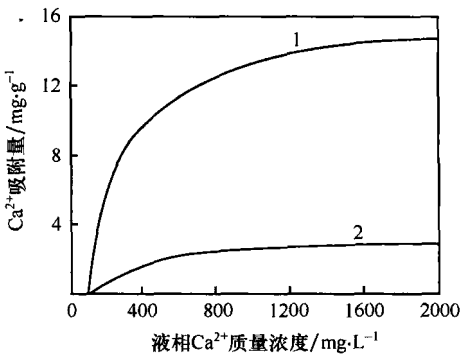


图 4-3 粘土类型和 Ca^{2+} 质量浓度对吸附量的影响
1—膨润土；2—低造浆率粘土

从而阻止粘土晶片之间的聚结和分散度降低。

钙处理泥浆的配制原理，就是通过调节 Ca^{2+} 和分散剂的相对含量，使泥浆处于适度絮凝的粗分散状态，从而使其性能能够保持相对稳定，并达到满足钻井工艺要求的目的。图 4-4 描述了分散泥浆、受到钙侵的分散泥浆和钙处理泥浆在分散状态上的区别及其内在联系。图 4-4 中 a 图表示一般分散泥浆的细分散状态；b 图表示受钙侵后的絮凝状态；c 图和 d 图均表示钙处理泥浆适度絮凝的粗分散状态。不难看出，使泥浆处于适度絮凝的粗分散状态有两条途径：一是在分散泥浆中同时加入适量的钙盐（或石灰）和分散剂，使图 4-4 中 a 图变为 d 图；二是在受钙侵后处于絮凝状态的泥浆中及时加入分散剂，使图 4-4 中 b 图变为 c 图。在适度絮凝的粗分散状态中，其絮凝和分散程度也有所区别，正如图 4-4 中 c 图和 d 图之间的相互转化，加入分散剂可使颗粒变细，絮凝程度降低；反之加钙盐则使颗粒变粗，絮凝程度提高。

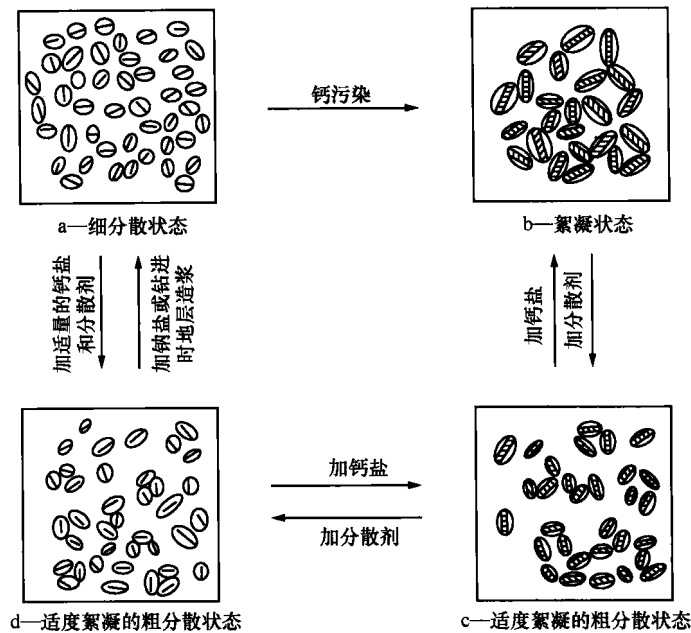


图 4-4 泥浆不同的分散状态示意图

在钙处理泥浆问世之前，曾广泛使用分散泥浆。一旦受到钙污染，分散泥浆便立即失去其良好的流动性，并且失水量剧增，泥饼厚度增加，且结构松散。在处理钙污染的过程中人们发现，与原来的分散泥浆相比，经过处理的钙污染泥浆表现出有许多优越性，如抑制性和抗盐类污染的能力增强等，于是就开始有意识地配制和使用钙处理泥浆。最初使用石灰低钙含量泥浆（ Ca^{2+} 含量为 120 ~ 200 mg/L），后来又相继出现了石膏中钙含量泥浆（ Ca^{2+} 含量为 300 ~ 500 mg/L）和氯化钙高钙含量泥浆（ Ca^{2+} 含量为 500 mg/L 以上）。

与分散泥浆相比，钙处理泥浆的优点主要表现在以下方面：

- 1) 性能较稳定，具有较强的抗钙污染、盐污染和粘土污染的能力。
- 2) 固相含量相对较少，容易在高密度条件下维持较低的粘度和切力，有利于提高钻速。

3) 能在一定程度上抑制泥页岩水化膨胀; 失水量较小, 泥饼薄且韧性好, 有利于孔壁稳定。

4) 由于泥浆中粘土细颗粒含量较少, 对储层的损害程度相对较小。

(二) 石灰泥浆

以石灰作为钙源的泥浆被称为石灰泥浆, 影响其性能的关键因素是 Ca^{2+} 浓度, 而 Ca^{2+} 浓度主要受到石灰溶解度的影响。

1. 石灰溶解度的影响因素

石灰是一种难溶的强电解质。它在水中的溶解度主要受温度和溶液 pH 值的影响。石灰在水中溶解时放热, 因此随温度升高, 石灰的溶解度反而减小, 溶液中 Ca^{2+} 浓度也相应减小 (图 4-5)。表 4-4 给出了饱和石灰溶液中两种离子的浓度与 pH 值的关系。

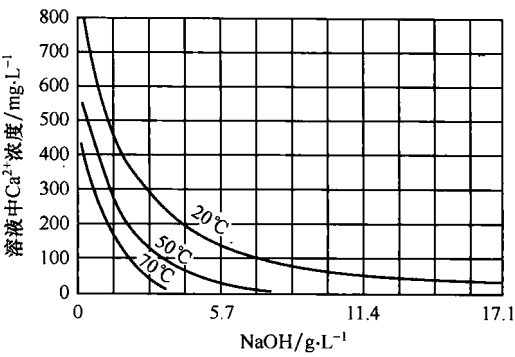


图 4-5 温度和 NaOH 含量对 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶解度的影响

表 4-4 饱和石灰溶液中两种离子的浓度与 pH 值的关系

pH 值	11.0	11.5	12	12.5	13
OH^- 浓度/ $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.0010	0.0032	0.0100	0.0316	0.1000
Ca^{2+} 浓度/ $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	1.3000	0.1300	0.0130	0.0013	0.0001

上表给出的数据是按纯净 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液求得的理论值, 而对于由多种组分组成的泥浆来说, Ca^{2+} 浓度与 pH 值之间的定量关系要复杂得多。但是, 在一定温度下, 随 pH 值增大石灰泥浆中 Ca^{2+} 浓度降低的趋势是成立的。图 4-5 表示在三种不同温度下, 实测的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中 Ca^{2+} 浓度随 NaOH 加量的变化曲线。由图可见, 如不加 NaOH, 常温下 Ca^{2+} 质量浓度可达 800 mg/L; 而加入 5.7 g/L NaOH 之后, Ca^{2+} 质量浓度降至约 130 g/L。因此, 对于石灰泥浆, pH 值对控制泥浆的 Ca^{2+} 浓度起很大作用。一般情况下, 石灰泥浆的 pH 值应控制在 11~12, 使 Ca^{2+} 含量保持在 120~200 mg/L 的范围内。其储备碱度, 即体系中悬浮的石灰含量保持在 3000~6000 mg/L 较为合适。若 pH 值过低, Ca^{2+} 含量增大, 粘度与切力将超过允许范围; 若 pH 值过高, Ca^{2+} 含量很少, 将失去钙处理的意义。

2. 石灰泥浆的推荐配方与性能

石灰泥浆的基本组成除适量的膨润土外, 常用处理剂有铁铬盐、丹宁酸钠、CMC、石灰和烧碱等。其中铁铬盐和丹宁酸钠用做稀释剂, CMC 用做降滤失剂, 石灰为絮凝剂, 烧碱为 pH 值调节剂。目前丹宁酸钠常用抗温性更强的磺化栲胶代替。有时也使用褐煤碱液、聚丙烯腈或淀粉作为降滤失剂。其推荐配方和主要性能指标见表 4-5。

按照石灰用量及 pH 值的不同, 常将石灰泥浆分为高石灰和低石灰泥浆。当遇到有盐、钙污染或在造浆地层钻进时, 经常用高石灰泥浆; 另一方面, 高石灰泥浆在高温下会发生固化, 泥浆急剧变稠, 失去流动性, 因此在深井的深部孔段钻进时, 宜使用低石灰泥浆。国外使用这种泥浆曾钻至孔深 4850 m, 我国大庆油田也顺利钻达 4723 m。

表 4-5 石灰泥浆的推荐配方及性能

配 方		性 能	
材料名称	加量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	项目	指标
膨润土	80 ~ 150	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.15 ~ 1.20
纯碱	4 ~ 7.5	漏斗粘度/s	25 ~ 30
磺化栲胶	4 ~ 12	静切力/Pa	0 ~ 1.0/1.0 ~ 4.0
铁铬盐	6 ~ 9	API 失水量/mL	5 ~ 10
石灰	5 ~ 15	HTHP 失水量/mL	< 20
CMC 或淀粉	5 ~ 9	滤饼厚度/mm	0.5 ~ 1.0
NaOH	3 ~ 8	pH 值	11 ~ 12
过量石灰	10 ~ 15	含砂量/%	< 1.0

3. 石灰泥浆的使用要点

石灰泥浆经常是在原有分散泥浆基础上经转化而形成。转化程序为：先加入一定量的水以降低固相含量，然后同时加入石灰、烧碱和稀释剂。以上各组分的加量均需通过室内实验确定，整个处理过程大约在一个循环周期内完成。若需要，再补充适量降滤失剂。在维护工艺上，要特别注意掌握好几个关键指标，包括滤液中 Ca^{2+} 浓度、pH 值。此外，还应注意高温固化问题。当钻达孔底温度超过 135°C 时，泥浆中的各种粘土会与石灰、烧碱发生反应，生成水合硅酸钙等类似于水泥凝固后的物质，导致泥浆急剧增稠。这种情况下，必须将石灰含量、泥浆碱度和固相含量降低，转化为低石灰低固相泥浆。有效地使用固控设备，保持尽可能低的固相含量是将该类泥浆用于高温深井的前提条件。

石灰泥浆可承受的盐侵约为 50000 mg/L 。随着盐的侵入，泥浆的 pH 值降低，石灰溶解度提高，此时应适当加大烧碱的用量，以限制体系中 Ca^{2+} 的浓度，并使用铁铬盐控制流变性能。石膏侵对石灰泥浆的性能一般不会有大的影响。但在钻入大段石膏地层时，泥浆的粘度、切力及失水量都会有所增加。正确的处理方法是，在钻遇石膏层之前可先加适量烧碱进行预处理以维持所需的 pH 值。当钻遇石膏层后，先不急于加石灰，待泥浆的 pH 值开始出现下降时再行加入。此时若流变性和失水量出现较大变化，可通过加入铁铬盐和 CMC 等处理剂进行控制。

（三）石膏泥浆

1. 石膏泥浆的特点

选用石膏作为絮凝剂，分别用铁铬盐和 CMC 作为稀释剂和降滤失剂，维持 pH 值在 9.5 ~ 10.5 范围内，滤液中 Ca^{2+} 含量约为 $600 \sim 1200 \text{ mg/L}$ ，即可配制成石膏泥浆。与石灰泥浆相比较，石膏泥浆具有以下特点：

1) 由于石膏的溶解度比石灰大得多，因而石膏泥浆具有比石灰泥浆更高的 Ca^{2+} 含量。这种情况下，泥浆的絮凝程度必然增大，相应地所需稀释剂和降滤失剂的加量也应有所增加，才能使性能达到设计要求并保持稳定。显然，与石灰泥浆相比，石膏泥浆具有更强的抗盐污染和石膏污染的能力。

2) 与石灰相比，石膏的溶解度受 pH 值的影响较小。这样，石膏泥浆的 pH 值可维持

较低，又由于 Ca^{2+} 含量较高，因而更有利于抑制粘土的水化膨胀和分散，即防塌效果明显优于石灰泥浆。因此，该类泥浆多用于钻厚的石膏层和容易坍塌的泥页岩地层。

3) 石膏泥浆具有比石灰泥浆更高的抗温能力，其发生固化的临界温度在 175°C 左右，明显高于石灰泥浆。据资料报道，它可以在某些 5000 m 以上的孔段使用。

2. 石膏泥浆的推荐配方与性能

在这类泥浆中，石膏粉用做絮凝剂；分散剂的类型与石灰泥浆基本相似，然而在加量上与石灰泥浆有所区别。例如，作为分散剂的铁铬盐的加量明显增加，而烧碱的加量却明显减少。石膏泥浆的推荐配方及性能指标见表 4-6。

表 4-6 石膏泥浆的推荐配方与性能

配 方		性 能	
材料名称	加量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	项目	指标
膨润土	80 ~ 130	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.15 ~ 1.20
纯碱	4 ~ 6.5	漏斗粘度/s	25 ~ 30
磺化栲胶	视需要定	HTHP 失水量/mL	<20
铁铬盐	12 ~ 18	静切力/Pa	0 ~ 1.0/1.0 ~ 5.0
烧碱	2 ~ 4.5	API 失水量/mL	5 ~ 8
CMC	3 ~ 4	滤饼厚度/mm	0.5 ~ 1.0
石膏	12 ~ 20	pH 值	9.5 ~ 10.5
重晶石	视需要定	含砂量/%	0.5 ~ 1.0

除上述以铁铬盐为主要分散剂的石膏泥浆外，我国还成功地研制出一种由褐煤、烧碱、丹宁、纯碱和水组成的混合剂作为分散剂的石膏泥浆。这种泥浆的性能稳定，在四川地区推广应用后，取得了较好的防塌效果。

3. 石膏泥浆的使用要点

与石灰泥浆相似，石膏泥浆也常由分散泥浆转化而成。转化时，首先加入适量淡水，以防止泥浆过稠，所需水量可根据实验确定。然后，在 1~2 个循环周期内加入约 4 kg/m^3 的烧碱、 $10 \sim 15 \text{ kg/m}^3$ 的铁铬盐和 $12 \sim 18 \text{ kg/m}^3$ 的石膏。在添加以上处理剂之后，再在 1~2 个循环周期内加入 $3 \sim 4.5 \text{ kg/m}^3$ 的降滤失剂 CMC。有时若要将高 pH 值泥浆或石灰泥浆转化为石膏泥浆，则需加更多的淡水进行稀释，并将石膏和稀释剂的加量适当提高，此时不必再加入烧碱。

对石膏泥浆进行维护时，除应经常检测滤液中 Ca^{2+} 含量和 pH 值外，还应注意将泥浆中游离的石膏含量控制在 $5 \sim 9 \text{ kg/m}^3$ 范围内。并根据流变参数和失水量的变化，随时对性能进行必要的调整。

(四) 氯化钙泥浆

1. 氯化钙泥浆的特点

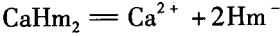
在这类钙处理泥浆中，使用 CaCl_2 作为絮凝剂，一般仍分别选用铁铬盐和 CMC 等作稀释剂和降滤失剂，并用石灰调节 pH 值，使 pH 值保持在 9~10 之间。美国和俄罗斯都使用过这种高钙泥浆，多用于易卡钻、易坍塌的泥页岩地层，其滤液中 Ca^{2+} 浓度一般在

1000 ~ 3500 mg/L 范围内。我国成功地将褐煤碱液应用于该类泥浆中，形成了具有特色的褐煤-氯化钙泥浆体系。

氯化钙泥浆的特点主要表现在：

- 1) 由于体系中 Ca^{2+} 含量很高，因此与前两类钙处理泥浆相比，它具有更强的稳定孔壁和抑制泥页岩坍塌及造浆的能力。
- 2) 由于泥浆中固相颗粒絮凝程度较大，分散度较低，因而流动性好，固控过程中岩粉比较容易清除，有利于维持较低的密度，可对提高机械钻速及保护储层提供良好的条件。
- 3) 另一方面，正是由于 Ca^{2+} 含量高，严重影响了粘土悬浮体的稳定性，粘度和切力容易上升，失水量也容易增大，从而增加了维护处理的难度。

褐煤-氯化钙泥浆体系在组成上有一个突出的特点，即褐煤粉的加量很大。褐煤中含有的腐殖酸与体系中的 Ca^{2+} 发生反应，生成非水溶性的腐殖酸钙（用符号 CaHm_2 表示）胶状沉淀。这种胶状沉淀一方面使泥饼变得薄而致密，失水量降低，提高泥浆的动塑比，其作用与膨润土相似；另一方面，它起着 Ca^{2+} 储备库的作用，使滤液中浓度不至于过大，即



在钻进过程中，当滤液中 Ca^{2+} 消耗以后，电离平衡会自动向右移动，使 Ca^{2+} 及时得到补充，从而保证泥浆的抑制能力和流变性能保持稳定。

2. 褐煤-氯化钙泥浆的典型配方、性能及维护

我国四川地区常用的褐煤-氯化钙泥浆典型配方及性能指标见表 4-7。不难看出，该体系中褐煤碱剂的加量很大，其中褐煤粉占有相当大的比例，相对来讲 CaCl_2 的加量较小。这种体系常用于钻大段含石膏的地层，如四川地区的三叠系含石膏碳酸盐岩地层。其维护要点主要是掌握好泥浆中 CaCl_2 和煤碱剂的比例，经验表明，一般维持在 (1 ~ 1.1):100 为最佳。只要这种比例维持较好，并且固控措施得当，就可以达到如表 4-7 所示的性能指标。

表 4-7 褐煤-氯化钙泥浆的典型配方及性能

配 方		性 能	
材料名称	加量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	项目	指标
膨润土	80 ~ 130	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.15 ~ 1.20
纯碱	3 ~ 5	漏斗粘度/s	18 ~ 24
褐煤碱剂	500 左右	API 失水量/mL	5 ~ 8
CaCl_2	5 ~ 10	滤饼厚度/mm	0.5 ~ 1.0
CMC	3 ~ 6	pH 值	10 ~ 11.5
重晶石	视需要定	静切力/Pa	0 ~ 1.0/1.0 ~ 4.0

注：褐煤碱剂的配比为褐煤:烧碱:水 = 15:(2 ~ 3):(100 ~ 150)。

(五) 钾石灰泥浆简介

钾石灰泥浆是在石灰泥浆基础上发展起来的一种更有利于防塌的钙处理泥浆。由于石灰泥浆存在着一些缺点，如高温下容易发生固化，pH 值较高以及强分散剂的使用不利于

提高泥浆的抑制性等，因此后来将钾离子引入石灰泥浆中，并将配方进行改进，形成了这种新的石灰防塌泥浆体系。该类泥浆在组成上的改进包括以下两方面：

1) 用改性淀粉取代了原石灰泥浆中使用的强分散剂铁铬盐，从而使泥浆中粘土和岩粉的分散程度减弱，改性淀粉在孔壁上的吸附有利于增强防塌效果。由于 pH 值和石灰含量均有所降低，因而克服了石灰泥浆的高温固化问题。

2) 用 KOH 控制泥浆的碱度，而不再使用 NaOH。其优点显然在于通过引入 K^+ ，同时相应地减少了体系中 Na^+ 的含量，提高了泥浆的抑制性。

二、盐水泥浆

(一) 盐水泥浆的定义和分类

凡 NaCl 质量分数超过 1% (Cl^- 含量约为 6000 mg/L) 的泥浆统称为盐水泥浆。一般将其分为以下三种类型。

(1) 一般盐水泥浆

其含盐量自 1% 直至饱和之前均属此类。

(2) 饱和盐水泥浆

指含盐量达到饱和，即常温下浓度为 3.15×10^5 mg/L (Cl^- 含量为 1.89×10^5 mg/L) 左右的泥浆。注意 NaCl 溶解度随温度变化而变化。

(3) 海水泥浆

指用海水配制而成的含盐泥浆。体系中不仅含有约 3×10^4 mg/L 的 NaCl，还含有一定量的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 。

根据含盐量的多少，在国外出版的专著中又将盐水泥浆分为以下几种类型：含盐量在 1% ~ 2% 时为微咸水泥浆，在 2% ~ 4% 时为海水泥浆，在 4% 与近饱和之间时为非饱和盐水泥浆，当含盐量达最大值 31.5% 时则被称为饱和盐水泥浆。

(二) 盐水泥浆的配制原理及特点

在钻进过程中，经常钻遇大段岩盐层、盐膏层或盐膏与泥页岩互层。若使用分散泥浆，则会有大量的 NaCl 和其他无机盐溶解于泥浆中，使泥浆的粘度、切力升高，失水量剧增。同时，盐的溶解还会造成井径扩大，给继续钻进带来困难，并且会严重影响固井质量。有时钻遇高压盐水层时，盐水的侵入对泥浆性能也有很大影响。为了对付上述复杂地层，人们采取了在泥浆中同时加入工业食盐和分散剂的方法，使水基泥浆具有更强的抗盐能力和抑制性。通过大量室内研究和现场试验，盐水泥浆和饱和盐水泥浆已得到不断发展和完善，成为独具特色的泥浆类型。

与钙处理泥浆的配制原理相同，盐水泥浆也是通过人为地添加无机阳离子来抑制粘土颗粒的水化膨胀和分散，并在分散剂的协同作用下，形成抑制性粗分散泥浆的。在使用中要特别注意含盐量的大小，一般应根据含盐的多少来决定所选用的分散剂的类型和用量。盐水泥浆的 pH 值一般随含盐量的增加而下降，这一方面是由于滤液中的 Na^+ 与粘土矿物晶层间的 H^+ 发生了离子交换；另一方面则是由于工业食盐中含有的 $MgCl_2$ 杂质与滤液中的 OH^- 反应，生成 $Mg(OH)_2$ 沉淀，从而消耗了 OH^- 所导致的结果。因此，在使用盐水泥浆时应注意及时补充烧碱，以便维持一定的 pH 值。一般情况下，盐水泥浆的 pH 值应

保持在 9.5 ~ 11.0 之间。

盐水泥浆的主要特点是：①由于矿化度高，因此这种体系具有较强的抑制性，能有效地抑制泥页岩水化，保证孔壁稳定；②不仅抗盐侵的能力很强，而且能够有效地抗钙侵和抗高温，适于钻含岩盐地层或含盐膏地层，以及在深井和超深井中使用；③由于其滤液性质与地层原生水比较接近，故对储层的损害较轻；④由于钻出的岩屑不易在盐水中水化分散，在地面容易被清除，因而有利于保持较低的固相含量；⑤盐水泥浆还能有效地抑制地层造浆，流动性好，性能较稳定。但该类泥浆的维护工艺比较复杂，对钻柱和设备的腐蚀性较大，泥浆配制成本也相对较高。

（三）一般盐水泥浆

一般盐水泥浆主要应用于以下情况：配浆水本身含盐量较高；钻遇盐水层时，淡水泥浆体系不可能继续维持；钻遇含盐地层或厚度不大的岩盐层以及为了抑制强水敏泥页岩地层的水化等。在选择盐水泥浆时，可能只涉及以上某些因素，但也可能包含所有因素。多数情况下盐水泥浆只用于某一特定的孔段。比如，当预先已知在某一深度有一较薄的岩盐层时，可在进入之前有准备地将盐和处理剂一并加入泥浆中，使之转化为盐水体系。当钻过盐层并下入套管之后，又可通过稀释与化学处理，逐步恢复至淡水体系。盐水泥浆中含盐量的多少一般根据地层情况来决定。显然，含盐越多，泥浆的抑制性越强，对岩盐层的溶解量越小，即越有利于孔壁稳定，但护胶的难度亦同时增大，配制成本也会相应增加。因此，确定含盐量是十分重要的。

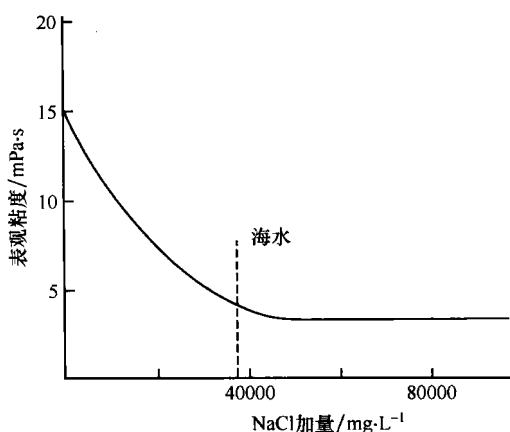


图 4-6 在 57.06 kg/m^3 干膨润土配制的原浆中表观粘度随含盐量的变化

在配制盐水泥浆时，最好选用抗盐粘土（海泡石、凹凸棒石等）作为配浆土，这类粘土在盐水中可以很好地分散而获得较高的粘度和切力，因而配制方法比较简单。若用膨润土配浆，则必须先在水中经过预水化，再加入各种处理剂，最后加盐至所需浓度。图 4-6 表示用 57.06 kg/m^3 干的怀俄明膨润土所配成原浆的表观粘度随含盐量的变化。可以看出，一开始随盐度增加，表观粘度不断降低；但当盐度增至 37000 mg/L 左右时，表观粘度不再随盐度增大而明显降低，最后基本上保持恒定，这表明

膨润土在较高盐度的盐水中已不再容易发生水化，而是类似于一种惰性固体，无法再起到造浆和降滤失的作用。但实验表明，如果先将膨润土在淡水中经过预水化，并在加盐之前用适量分散剂进行处理，情况就完全不同了。此时膨润土仍表现出具有一定的水化性能，从而能有效地起到提高粘度、切力和降滤失的作用。

盐水泥浆中常用的分散剂有铁铬盐、CMC、褐煤碱液和聚阴离子纤维素等。由于各地区使用的配方及对性能的要求不尽相同，因此难以总结出其典型的配方及性能参数。目前国内使用的最简单的体系为铁铬盐盐水泥浆，其基本成分为 1.5% ~ 3% 的膨润土、5% 的

固体食盐、5%的铁铬盐、1.5%的 NaOH 及一定量的重晶石。按以上配方可达到下列性能指标：密度 1.20 g/cm³、漏斗粘度 20~50s、失水量 3~6 mL。另一种体系为 CMC-铁铬盐-表面活性剂盐水泥浆，主要用于孔底温度达 150℃左右的深井中。由南海西部石油公司提供的盐水泥浆配方及性能指标见表 4-8，该配方所用处理剂的种类比较齐全，适于在各种含盐量的情况下使用。

表 4-8 盐水泥浆的配方及性能

配 方		性 能	
材料名称	加量/kg·m ⁻³	项 目	指 标
抗盐粘土	20~30	密度/g·cm ⁻³	1.15~1.20
膨润土（经预水化）	20~30		
聚阴离子纤维素	4~6	塑性粘度/mPa·s	25~30
铁铬盐	30~40	动切力/Pa	7.2~9.6
钠褐煤	15~20	API 失水量/mL	<5
高粘 CMC	1~3	HTHP 失水量/mL	15~20
改性沥青	视需要定	pH 值	9.5~10.5
抗高温处理剂	视需要定	流量指数	0.6 左右

保持所需的含盐量是该类泥浆维护处理的关键之所在。要做到这一点，需经常向泥浆中补充盐或盐水，并用 AgNO₃ 滴定法定时检测滤液中的 NaCl 浓度。在维护过程中，应根据含盐量的高低和泥浆性能的变化及时处理好降粘和护胶这两方面的问题。只有这样，才能使盐水泥浆的流变参数和失水量保持在合理的范围，以满足钻井工程的要求。一般规律是，含盐量越低，降粘问题越突出，含盐量越高，护胶问题越重要。常用的降粘剂有铁铬盐、丹宁酸钠和磺化栲胶等，需要护胶时则选用高粘 CMC、聚阴离子纤维素及其他抗盐聚合物降滤失剂和包被剂。

（四）饱和盐水泥浆

饱和盐水泥浆是指 NaCl 含量达到饱和时的盐水泥浆体系。它主要用于钻大段岩盐层和复杂的盐膏层，也可在钻开矿层时配制成清洁盐水泥浆使用。由于其矿化度极高，因此抗污染能力强，对地层中粘土的水化膨胀和分散有很强的抑制作用。钻遇岩盐层时，可将盐的溶解减至最低程度，避免大肚子孔眼的形成，从而使井径规则。该类泥浆的配制方法是，在地面配好饱和盐水泥浆，钻达岩盐层前将其替入孔内，然后钻穿整个岩盐层。但也可采用另一种方法，即在上部地层使用淡水或一般盐水泥浆，然后提前在循环过程中进行加盐处理，使含盐量和泥浆性能逐渐达到要求，在进入岩盐层前转化为饱和盐水泥浆。

使用饱和盐水泥浆时，需注意以下几点：

1) 如果岩盐层较厚，埋藏较深，在地层压力作用下岩盐层容易发生蠕变，造成缩径。此时，应根据岩盐层的蠕变曲线，确定较合理的泥浆密度，以克服因盐层塑性变形而引起的卡钻或挤毁套管。盐层的蠕变曲线可通过岩石力学实验得到，在某些孔深和井温下

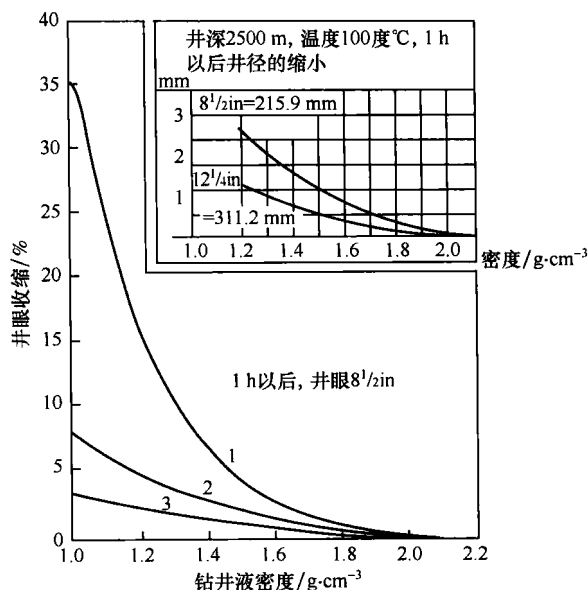


图 4-7 盐层蠕变曲线

1—3600 m, 150℃时的蠕变曲线; 2—3600 m, 120℃时的蠕变曲线; 3—2500 m, 100℃时的蠕变曲线

测得的蠕变曲线如图 4-7 所示。

2) 最好选用海泡石、凹凸棒石等抗盐粘土配制饱和盐水泥浆。如选用膨润土, 则体系中总固相和膨润土含量均不宜过高, 以防止在配制过程中出现粘度、切力过高的情况。膨润土一般应控制在 50 kg/m^3 左右; 若该体系由井浆转化而成, 应在加盐前先将固相含量及粘度、切力降下来。

3) 因盐的溶解度随温度上升而有所增加, 见表 4-9, 故在地面配制的饱和盐水, 当循环到孔底就变得不饱和了。为了解决因温差而可能引起的岩盐层井径扩大的问题, 一种比较有效的方法是在泥浆中加入适量的重结晶抑制剂, 这样在岩盐层孔段的井温下使盐达到饱和, 当泥浆返至地面时, 就可抑制住盐的重结晶。

表 4-9 温度对 NaCl 溶解度的影响

温度/℃	饱和溶液中的含盐量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
26.6	362.3
48.9	368.0
71.1	376.6
93.2	390.9

饱和盐水泥浆有多种不同的配方。国外一般使用抗盐粘土 (如凹凸棒石) 造浆并调整粘度和切力, 用淀粉控制滤失量。但目前倾向于用各种抗盐的聚合物降滤失剂 (如聚阴离子纤维素) 代替淀粉, 以利于实现低固相。用抗盐粘土配制饱和盐水泥浆的步骤如下: ①在每桶 (0.159 m^3) 淡水中加入 125 lb (56.75 kg) 工业食盐, 即可得到密度为 1.13 g/cm^3 的饱和盐水。②在饱和盐水中加入 28 ~ 30 lb (12.7 ~ 13.6 kg) 优质抗盐粘土, 即可配制成漏斗粘度为 36 ~ 38 s 的原浆。③然后加入淀粉, 一定要边加边搅拌。当加入 4 ~ 5 lb (1.8 ~ 2.3 kg) 时可使失水量降至 15 mL 以下; 而加入 4 ~ 10 lb (1.8 ~ 4.5 kg) 时则可使失水量控制在 5 mL 以内。

我国各油田已在钻孔实践中形成了多种适合于本地区特点的饱和盐水泥浆配方, 其中一种较为典型的配方及其性能指标列于表 4-10 中。从表中可见, 所选用的各种处理剂都具有较强的抗盐性, 加入红矾和表面活性剂是为了提高体系的抗温性能。从性能来看, 该体系之所以需保持 1.20 g/cm^3 以上的密度, 是为了克服由于盐层蠕变而引起的塑性变形和缩径。

表 4-10 饱和盐水泥浆的配方及性能

配 方		性 能	
材料名称	加量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	项目	指标
基浆	密度至稀释 $1.10 \sim 1.15 \text{ g/cm}^3$	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	>1.20
增粘剂 (CPA 或 PAC141、SK、K-PAM 等)	3 ~ 6	漏斗粘度/s	30 ~ 55
降滤失剂 (CMC 或 SMP-1、Na-PAN 等)	10 ~ 50	API 失水量/mL	3 ~ 6
		HTHP 失水量/mL	<20
		泥饼厚/mm	0.5 ~ 1
降粘剂 (FCLS 等)	30 ~ 50	切力/Pa	$0.2 \sim 2/0.5 \sim 10$
NaCl	达饱和	塑性粘度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	8 ~ 50
NaOH	2 ~ 5	动切力/Pa	2.5 ~ 15
红矾	1 ~ 3	表观粘度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	9.5 ~ 59
表面活性剂	视需要而定	含砂量/%	<0.5
重结晶抑制剂	视需要而定	pH 值	7 ~ 10

对饱和盐水泥浆的维护应以护胶为主，降粘为辅。由于在该类泥浆中，粘土颗粒不易形成端-端或端-面连接的网架结构，而特别容易发生面-面聚结，变成大颗粒而聚沉，因此需要大量的护胶剂维护其性能，不然在使用中常会出现粘度、切力下降和失水量上升的现象。保持性能稳定对饱和盐水泥浆来说是最关键的问题，一旦出现以上异常情况，应及时补充护胶剂。添加预水化膨润土也能起到提粘和降滤失作用，但加量不宜过大。

（五）海水泥浆

海水泥浆与一般盐水泥浆的不同之处在于使用海水配浆。海水中除含有较高浓度的 NaCl 外，还含有一定浓度的钙盐和镁盐，其总矿化度一般为 $33 \sim 37 \text{ g/L}$ ，pH 值在 $7.5 \sim 8.4$ 之间，密度为 1.03 g/cm^3 。海水中各种盐的含量见表 4-11。

表 4-11 海水的主要盐分

名 称	NaCl	MgCl ₂	MgSO ₄	CaSO ₄	KCl	其他盐类
质量分数/%	78.32	9.44	6.40	3.94	1.69	0.21

显然，海水泥浆工艺技术得以发展的主要原因是为了满足海上钻探的需要。在海上供给足够的淡水不仅难度大，而且成本很高，因此最实际的办法是使用海水配浆。既然海水的主要成分是 NaCl，其矿化度处于不饱和范围，因此海水泥浆的作用原理和配制、维护方法与一般盐水泥浆基本相同。不同之处仅在于体系中 Mg^{2+} 的含量较高，因而会对泥浆性能产生较大影响。此外，一般盐水泥浆的含盐量可随时调整，比如钻穿盐层后可转化为淡水泥浆，而海水泥浆由于受施工条件的限制，其矿化度一般不作调整。

海水泥浆的配方有两种类型。一种是先用适量烧碱和石灰将海水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 清除，然后再用于配浆。其中烧碱主要用于清除 Mg^{2+} ，而石灰主要用于清除 Ca^{2+} 。这种体

系的 pH 值应保持在 11 以上,其特点是分散性相对较强,流变和滤失性能较稳定且容易控制,但抑制性较差。另一种是在体系中保留 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,显然这种海水泥浆的 pH 值较低,由于含有多种阳离子,护胶的难度较大,所选用的护胶剂既要抗盐,又要抗钙、镁,但这种体系的抑制性和抗污染能力较强。

国外过去多使用凹凸棒石、石棉、淀粉配制和维护海水泥浆。而目前倾向于使用黄原胶和聚阴离子纤维素等聚合物。由于聚合物的包被作用,可使孔壁更为稳定。通过合理地使用固控设备,机械钻速也可明显提高。我国使用的海水泥浆配方与一般盐水泥浆相似。比如,较常用的铁铬盐- CMC 海水泥浆的 pH 值在 9 ~ 11 范围内可维持其稳定的性能。当井较深时,可加入适量重铬酸钾以提高泥浆的抗温性能。必要时混入一定量的油品以改善泥饼的润滑性,并可在一定程度上降低失水量。

第三节 不分散低固相泥浆

一、概述

不分散低固相聚合物泥浆的性能指标所谓“不分散”具有两个含义:其一是指组成泥浆的粘土颗粒尽量维持在 1 ~ 30 μm 范围内,不要向小于 1 μm 的方向发展;其二是指混入这种泥浆体系的岩粉不容易分散变细。所谓“低固相”是指低密度固相(主要指粘土矿物类)的体积分数要在钻孔工程允许的范围内维持到最低。通过大量现场实践和深入研究,目前国内外对不分散低固相聚合物泥浆的性能指标要求已有了明确的界定。只有遵循这些指标,才能充分显示出这种泥浆体系的优越性。这些性能指标也基本上反映出这种泥浆的重要特性。

1) 固相含量(主要指低密度的粘土和岩粉,不包括重晶石)应维持在 4% (体积分数) 或更小,大约相当于密度小于 1.06 g/cm^3 。这是核心指标,是提高钻速的关键,应尽力做到。

2) 岩粉与膨润土的比例不超过 2:1。实践证明,虽然泥浆中的固相越少越好,但如果完全不要膨润土,则不能建立泥浆所必需的各项性能,特别是不能保证净化孔眼所必需的流变性能,以及保护孔壁和减轻矿层污染所必需的造壁性能。所以,应含有一定量的膨润土。其加量在保证建立上述各项泥浆所必需性能的前提下越低越好。一般认为不能少于 1%, 1.3% ~ 1.5% 比较合适。

3) 动切力(Pa)与塑性粘度($\text{mPa} \cdot \text{s}$)之比控制在 0.48 左右。这是为了满足低返速(如 0.6 m/s)携带岩粉的要求,保证泥浆在环形空间实现平板型层流而规定的。

4) 非加重泥浆的动切力应维持在 1.5 ~ 3 Pa。动切力是泥浆携带岩粉的关键参数,为保证良好的携带能力,首先必须满足动切力的要求。对加重泥浆应注意保证重晶石的悬浮。

5) 失水量控制应视具体情况而定。在稳定孔壁的前提下,可适当放宽,以利提高钻速。在易坍塌地层,应当从严。进入矿层后,为减轻污染也应控制得低些。

6) 优化流变参数,若采用卡森模式,要求 $\eta_{\infty} = 3 \sim 6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, $\tau_c = 0.5 \sim 3 \text{ Pa}$, I_m (剪切稀释指数) = 300 ~ 600。

7) 在整个钻孔过程中应尽量不用分散剂。比较理想的不分散低固相聚合物泥浆的性能见表 4-12。

表 4-12 不分散低固相聚合物泥浆的典型性能参数

密度 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	固相含量 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	膨润土含量 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	岩屑:膨润土	动切力 Pa	塑性粘度 $\text{mPa} \cdot \text{s}$	动塑比 $\text{Pa} \cdot (\text{mPa} \cdot \text{s})^{-1}$
1.03	57.0	28.5	1:1	1.5	3	0.5
1.04	77.0	34.2	1.3:1	2.0	4	0.5
1.05	96.9	39.5	1.4:1	2.0	6	0.4
1.07	116.9	42.8	1.7:1	2.5	8	0.4
1.08	136.8	45.8	2:1	3.0	10	0.3

二、聚合物处理剂的主要作用机理

1. 桥联与包被作用

聚合物在泥浆中颗粒上的吸附是其发挥作用的前提。当一个高分子同时吸附在几个颗粒上，而一个颗粒又可同时吸附几个高分子时，就会形成网络结构，聚合物的这种作用称为桥联作用。当高分子链吸附在一个颗粒上，并将其包裹时，称为包被作用。桥联和包被是聚合物在泥浆中的两种不同的吸附状态。实际体系中，这两种吸附状态不可能严格分开，一般会同时存在，只是以其中一种状态为主而已。吸附状态不同，产生的作用也不同，如桥联作用易导致絮凝和增粘等，而包被作用对抑制钻屑分散有利。

2. 絮凝作用

当聚合物在泥浆中主要发生桥联吸附时，会将一些细颗粒聚结在一起形成粒子团，这种作用称为絮凝作用，相应的聚合物称为絮凝剂。形成的絮凝块易于靠重力沉降或固控设备清除，有利于维持泥浆的低固相。所以，絮凝作用是泥浆实现低固相和不分散的关键。

根据絮凝效果和对泥浆性能的影响，絮凝剂又可分为两类：一是全絮凝剂，能同时絮凝钻屑、劣质土和蒙脱土，如非离子型聚合物 PAM 就属于此类；二是选择性絮凝剂，只絮凝钻屑和劣质土，不絮凝蒙脱土，如离子型聚合物 PHPA、VAMA 就属于此类。当絮凝剂能提高泥浆粘度时，称为增效型选择性絮凝剂，而对粘度影响不大时称为非增效型选择性絮凝剂。

选择性絮凝的机理是：钻屑和劣质土颗粒的负电性较弱，蒙脱土的负电性较强。选择性絮凝剂也带负电，由于静电作用易在负电性弱的钻屑和劣质土上吸附，通过桥联作用将颗粒絮凝成团块而易于清除；而在负电性较强的蒙脱土颗粒上吸附量较少，同时由于蒙脱土颗粒间的静电排斥作用较大而不能形成密实团块，桥联作用所形成的空间网架结构还能提高蒙脱土的稳定性。图 4-8 是完全絮凝与选择性絮凝示意图。

目前常用的絮凝剂是 PHPA，其相对分子质量和水解度是影响絮凝效果的主要因素。图 4-9 表示 PHPA 相对分子质量和水解度对絮凝能力的影响，其中絮凝能力是用沉降实验中 1/2 沉降高度所对应的时间 $t_{1/2}$ 来表征的。 $t_{1/2}$ 值越小，絮凝能力越强。相对分子质量

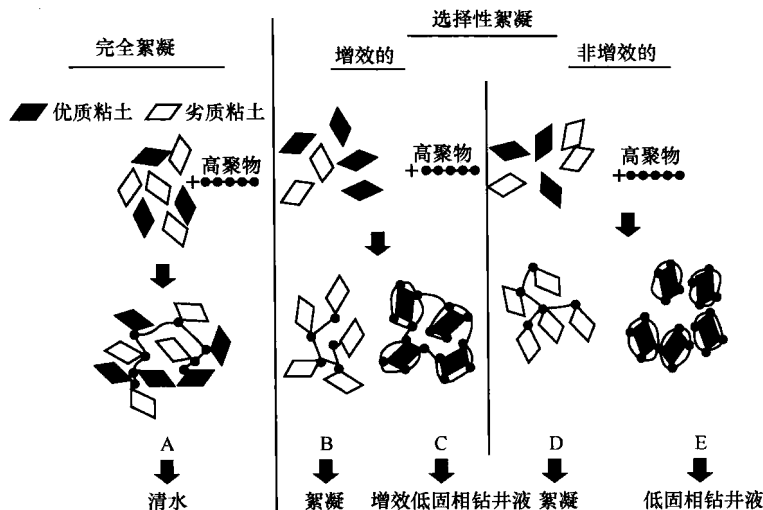


图 4-8 完全絮凝与选择性絮凝示意图

A—高聚物把全部颗粒连接在一起并絮凝；B—劣质粘土连接在一起并絮凝；C—优质粘土连接在一起而不絮凝；D—劣质粘土连接在一起并絮凝；E—高聚物将每个优质粘土粒子包起来而不絮凝

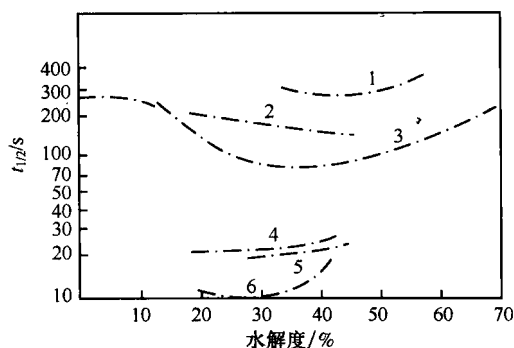


图 4-9 PHPA 相对分子质量和水解度对絮凝能力的影响

曲线 1~6 的相对分子质量分别为 160 万、200 万、220 万、350 万、300 万~600 万、600 万~900 万

越大，分子链的有效链长度越长，絮凝能力越强。其水解度在 30% 左右时絮凝能力最强，这时吸附基团 ($-\text{CONH}_2$) 和水化基团 ($-\text{COO}^-$) 的比例适当，分子链最伸展。

3. 增粘作用

增粘剂多用于低固相和无固相水泥浆，以提高悬浮力和携带力。增粘作用的机理，一是游离（未被吸附）聚合物分子能增加水相的粘度，二是聚合物的桥联作用形成的网络结构能增强泥浆的结构粘度。常用的增粘剂有相对分子质量较高的 PHPA 和高粘度型羧甲基纤维素 (CMC) 等。

4. 降滤失作用

泥浆失水量的大小主要取决于泥饼的质量（渗透率）和滤液的粘度。降滤失作用主要是通过降低泥饼的渗透率来实现的。聚合物降滤失剂的作用机理主要有以下几个方面：

1) 保持泥浆中的粒子具有合理的粒度分布，使泥饼致密。聚合物降滤失剂通过桥联作用与粘土颗粒形成稳定的空间网架结构，对体系中所存在的一定数量的细颗粒起保护作用，在孔壁上可形成致密的泥饼，从而降低失水量。有时为了使体系中固体颗粒具有合理的粒度分布，可加入超细的惰性物质如 CaCO_3 来改善泥饼质量。另外，网络结构可包裹大量自由水，使其不能自由流动，有利于降低失水量。

2) 提高粘土颗粒的水化程度。降滤失剂分子中都带有水化能力很强的离子基团，可

增厚粘土颗粒表面的水化膜，在泥饼中这些极化水的粘度很高，能有效地阻止水的渗透。

3) 聚合物降滤失剂的分子大小在胶体颗粒的范围内，本身可对泥饼起堵孔作用，使泥饼致密。

4) 降滤失剂可提高滤液粘度，从而降低失水量。

5. 抑制与防塌作用

聚合物在钻屑表面的包被吸附是阻止钻屑分散的主要原因。包被能力越强，对钻屑分散的抑制作用也越强。聚合物具有良好的防塌作用，其原因有以下两个方面：一是长链聚合物在泥页岩孔壁表面发生多点吸附，封堵了微裂缝，可阻止泥页岩剥落，二是聚合物浓度较高时，在泥页岩孔壁上形成较为致密的吸附膜，可阻止或减缓水进入泥页岩，对泥页岩的水化膨胀有一定的抑制作用。

6. 降粘作用

聚合物泥浆的结构主要由粘土颗粒与粘土颗粒、粘土颗粒与聚合物和聚合物与聚合物之间的相互作用组成，降粘剂就是拆散这些结构中的部分结构而起降粘作用的。降粘作用的机理主要有以下几个方面：

1) 降粘剂可吸附在粘土颗粒带正电荷的边缘上，使其转变成带负电荷，同时形成厚的水化层，从而拆散粘土颗粒间以“端-面”、“端-端”连接而形成的结构，放出包裹着的自由水，降低体系的粘度。

2) 近期研究发现，当相对分子质量较低的聚合物降粘剂（如 SSMA、VAMA 等）与泥浆的主体聚合物（如 PHPA）形成氢键络合物时，因与粘土争夺吸附基团，可有效地拆散粘土与聚合物间的结构，同时能使聚合物形态收缩，减弱聚合物分子间的相互作用，从而具有明显的降粘作用。

综上所述，聚合物处理剂的作用机理与其他相对分子质量较低的处理剂的作用机理有其共同之处，但也有很大的区别。通过对作用机理的深入研究，一方面可为今后新型处理剂的研制提供理论依据，另一方面可对聚合物处理剂在现场的合理使用起重要的指导作用。

三、不分散低固相泥浆的配制与维护

不分散低固相泥浆使用的聚合物不同，泥浆的性能则不同，在配制和维护措施上也有差异。下面介绍一种常规的配制和维护方法。

1. 不分散低固相泥浆的配制

1) 清洗泥浆罐。配新浆应彻底清除罐底沉砂。

2) 用纯碱除去配浆水中的 Ca^{2+} 。

3) 按以下配方配制基浆：17 ~ 23 kg/m^3 的优质膨润土或用相当的预水化膨润土浆，加 0.02 kg/m^3 的双功能聚合物。

4) 必要时，加入 0.3 ~ 1.5 kg/m^3 的纯碱，使膨润土充分水化。

5) 测定新配制的基浆性能，并调整到下述范围内：

漏斗粘度	30 ~ 40 s	塑性粘度	4 ~ 7 $\text{mPa} \cdot \text{s}$
动切力	4Pa	静切力(10"/10')	(1 ~ 2)/(1 ~ 3)Pa
API 失水量	15 ~ 30 mL		

2. 不分散低固相泥浆的维护与管理

1) 配浆时, 要使膨润土预水化, 即先加水浸泡。如为钙膨润土, 则应用纯碱水对钙膨润土预水化 24 h 以上, 使其完全转为钠膨润土并水化。

2) 使用硬度高的水进行造浆时, 应采用纯碱或碳酸钡等来降低水的硬度, 使正常含钙离子量低于 150×10^{-6} 。钙离子虽不妨碍絮凝, 但却妨碍膨润土造浆、泥浆沉砂作用的发挥, 同时可使泥浆失水量和动切力值达不到要求。

3) 泥浆中不要加入有机分散剂, 以避免削弱絮凝作用, 使泥浆密度上升。降失水的有机处理剂可用非分散性的聚丙烯酸钠或水解聚丙烯腈等。

4) 如岩粉中存在膨润土成分, 使泥浆密度增加时, 可加水稀释, 加入钙盐来絮凝或加入未水解的聚丙烯酰胺来处理, 以减少泥浆中的膨润土含量。

5) 要配合采用机械除砂、除泥装置, 使絮凝颗粒从泥浆中除去。

6) 补加絮凝剂时, 要在泥浆从孔口流出处, 泥浆槽中慢慢加入, 且不要过量。

7) 在有效携带岩屑的前提下, 泥浆的动切力、表观粘度和静切力应尽可能降低, 以利于保持低固相、低密度、净化好和提高钻速。

8) 膨润土消耗时应补充, 但不能依靠增加膨润土含量来调整岩屑与膨润土的比值 (2:1), 而是依靠除去劣质土及岩屑来解决。

如需要用海水或盐水配制低固相泥浆时, 需用抗盐粘土——凹凸棒石粘土来配制, 因膨润土在盐水中是不易分散的。

不分散低固相泥浆同样可以混油乳化和加重。

我国有许多现场, 采用膨润土低固相泥浆作基浆, 以水解度 30% 高分子量 PHP 作絮凝剂, 水解聚丙烯腈 (下脚料) 作降失水剂, 配成不分散低固相泥浆。

四、聚丙烯酰胺泥浆

从总的看, 聚丙烯酰胺泥浆可属于不分散泥浆的体系, 但也有不同之处, 主要是它有时是采用非膨润土造浆, 不能做到选择性絮凝。

一般说, 利用水解聚丙烯酰胺 (PHP) (或有时配合无机絮凝剂), 对泥浆中的粘土颗粒 (特别是岩屑中的粘土颗粒) 进行絮凝, 使泥浆维持较低固相时, 均可称为聚丙烯酰胺泥浆。这种泥浆对抑制粘土质岩石 (泥岩、页岩) 的造浆及防塌有效。可以代替钙处理泥浆和盐水泥浆钻进泥岩。由于是适度絮凝, 油井用的聚丙烯酰胺泥浆的密度往往仍在 $1.1 \sim 1.15 \text{ g/cm}^3$ 之间, 比不分散低固相泥浆的密度仍然高不少。在岩心钻探中用的聚丙烯酰胺泥浆的密度也往往有高达 1.1 g/cm^3 的。

聚丙烯酰胺泥浆, 有利于提高钻速, 不糊钻, 有一些润滑性, 能进行堵漏等, 因而已广泛得到采用, 目前多用来配制低固相泥浆。

岩心钻探中也采用了聚丙烯酰胺泥浆, 如煤系地层, 用它可使泥浆密度降至 $1.08 \sim 1.1 \text{ g/cm}^3$ 左右。小口径金刚石钻探也采用了聚丙烯酰胺低固相泥浆, 泥浆密度可达 $1.03 \sim 1.05 \text{ g/cm}^3$ 左右。泥浆中 PHP 的浓度 (干加量) 在 100×10^{-6} 左右, 也有超过 500×10^{-6} 的。常用分子量为 150 万 ~ 300 万的 PHP, 也有高达 800 万分子量 (絮凝用), 低至 5 万 ~ 7 万分量的 (降失水提粘用)。水解度有 30% 左右的 (絮凝用), 也有 60% ~ 80% 的 (降失水、提粘用)。

第四节 抗高温深井水基泥浆

国际上通常将钻探深度及深井钻速作为衡量钻孔技术水平的重要标志。钻孔实践证明,泥浆的性能对于确保深井和超深井的安全、快速钻进起着十分关键的作用。常用的深井泥浆有水基和油基泥浆两大类,目前国内主要使用水基泥浆钻深井和超深井。

一、深井水基泥浆应具备的特点

由于孔深增加,孔底处于高温和高压条件下,钻进孔段长而且有大段裸眼,还要钻穿许多复杂地层,因此其作业条件比一般井要苛刻得多,于是对泥浆的性能也提出了更高的要求。在高温条件下,泥浆中的各种组分均会发生降解、发酵、增稠及失效等变化,从而使泥浆的性能发生剧变,并且不易调整和控制,严重时将导致钻孔作业无法正常进行;而伴随着高的地层压力,泥浆必须具有很高的密度(常在 2.0 g/cm^3 以上),从而造成泥浆中固相含量很高。这种情况下,发生压差卡钻及钻孔漏失、井喷等孔内复杂情况的可能性会大大增加,欲保持泥浆良好的流变性和较低的失水量亦会更加困难。此时使用常规泥浆已无法满足钻孔工程的要求,而必须使用具有以下特点的深井泥浆。

1) 具有抗高温的能力。这就要求在进行配方设计时,必须优选出各种能够抗高温的处理剂。例如,褐煤类产品(抗温 204°C)就比木质素类产品(抗温 170°C)有更高的抗温能力。

2) 在高温条件下对粘土的水化分散具有较强的抑制能力。在有机聚合物处理剂中,阳离子聚合物就比带有羧钠基的阴离子聚合物具有更强的抑制性。

3) 具有良好的高温流变性。在高温下能否保证泥浆具有很好的流动性和携带、悬浮岩屑的能力至关重要。对于深井加重泥浆,尤其应加强固相控制。并控制膨润土含量以避免高温增稠。当泥浆密度在 2.0 g/cm^3 以上时,膨润土含量更应严格控制。必要时可通过加入生物聚合物等改进流型,提高携带岩屑能力;加入抗高温的稀释剂控制静切力。

4) 具有良好的润滑性。当固相含量很高时,防止卡钻尤为重要。此时可通过加入抗高温的液体或固体润滑剂,以及混油等措施来降低摩擦阻力。

二、高温对深井水基泥浆性能的影响

7000 m 以上的深井,井温可高达 200°C 以上,压力可达 $150\sim 200\text{ MPa}$ 。由于水的可压缩性相对较小,故压力对水基泥浆的密度及其他性能,如流变性、滤失造壁性等均无明显的影响。但是,温度的影响却十分显著,深井水基泥浆的主要问题是抗高温。

1. 泥浆中粘土的高温分散作用

在高温作用下,泥浆中的粘土颗粒,特别是膨润土颗粒的分散度进一步增加,从而使颗粒浓度增多、比表面增大的现象常称为高温分散。实验发现,粘土颗粒的高温分散作用与其水化分散的能力相对应。如钠蒙脱土水化分散能力最强,其高温分散作用亦最为明显。因此高温分散的实质仍然是水化分散,只不过高温进一步促进了水化分散而已。产生高温分散作用的原因,主要是由于高温使粘土矿物片状微粒的热运动加剧,这一方面增强

了水分子渗入粘土晶层内部的能力，另一方面使粘土表面的阳离子扩散能力增强，导致分散双电层增厚， ζ 电位提高，更有利于分散。

影响高温分散的因素主要有：①粘土的种类。在常温下越容易水化的粘土，高温分散作用也越强。②温度及作用时间。显然，温度越高，作用时间越长，高温分散也就越显著。③pH 值。由于 OH^- 的存在有利于粘土的水化，因此高温分散作用随 pH 值升高而增强。④一些高价无机阳离子，如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 、 Cr^{3+} 和 Fe^{3+} 等的存在不利于粘土水化，因而它们对粘土高温分散具有抑制作用。

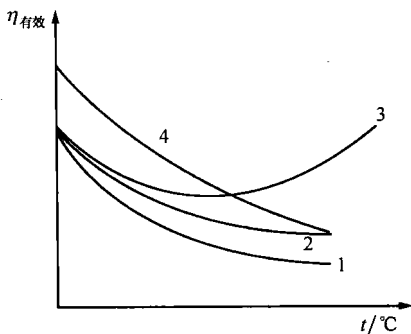


图 4-10 高温分散对泥浆表观粘度的影响

1—理想悬浮体；2、3—高温分散作用的泥浆；4—2 的降温曲线

高温分散作用使泥浆中粘土颗粒浓度增加，因此对泥浆的流变性有很大的影响，而且这种影响是不可逆的和不可恢复的。高温分散对泥浆表观粘度的影响情况如图 4-10 所示。泥浆滤液的粘度是随温度升高而降低的，如果假设粘土颗粒的分散度不受温度的影响，那么按正常规律，其悬浮体（可称为理想悬浮体）的表观粘度应随温度升高而下降（如曲线 1）。但实际情况是，高温分散作用使泥浆中粘土颗粒浓度增加，从而造成泥浆的粘度和切力均比相同温度下理想悬浮体的对应值要高（如曲线 2 和 3）。若由此引起的表观粘度增加值大于升温所引起的理想悬浮体的表观粘度下降值，则可能出现高温下泥浆的粘度高于常温粘度的现象。如果升温后再逐渐降低温度，则可发现降温时的粘-温曲线总比升温时要高，如图 4-10 中曲线 2 和 4 所示。这表明粘土颗粒的高温分散是一种不可逆的变化。若粘土含量越高，高温分散作用越强，则两条曲线偏离越远。

室内实验和现场经验均表明，由于高温分散引起的泥浆高温增稠与泥浆中粘土含量密切相关。当粘土含量大到某一数值时，泥浆在高温下会丧失其流动性而形成凝胶，这种现象被称为高温胶凝。凡是发生了高温胶凝的泥浆，必然丧失其热稳定性，性能受到破坏。在使用中常表现为泥浆在井口的性能不稳定，粘度和切力上升很快，处理频繁，且处理剂用量大。因此，防止泥浆高温胶凝是深井泥浆的一项关键技术。目前有两项措施可有效地预防高温胶凝的发生，一是使用抗高温处理剂抑制高温分散，二是将泥浆中的粘土（特别是膨润土）含量控制在其容量限以下。实验表明，只有当粘土含量超过了容量限，才有发生高温胶凝的可能；而低于此容量限时，泥浆只发生高温表观粘度与温度关系曲线的影响增稠，但不会发生胶凝。对于某一给定的泥浆体系，其粘土的容量限可通过室内实验确定。因此，对于高温深井水基泥浆，在使用中必须将粘土的实际含量严格控制在其容量限以内。

2. 高温对泥浆处理剂的影响

孔内高温除对泥浆中的粘土造成影响外，还对某些处理剂造成以下影响。

(1) 高温降解

高分子有机化合物受高温作用而导致分子链发生断裂的现象称为高温降解。对于泥浆处理剂，高温降解包括高分子化合物的主链断裂和亲水基团与主链连接键断裂这两种情

况。前一种情况会降低处理剂的相对分子质量，失去高分子化合物的特性；后一种情况则会降低处理剂的亲水性，使其抗污染能力和效能减弱。

任何高分子化合物在高温下均会发生降解，但由于其分子结构和外界条件不同，发生明显降解的温度也有所不同。影响高温降解的首要因素是处理剂的分子结构。研究表明，如果处理剂分子中含有在溶液中易被氧化的键，那么这类处理剂一般都容易发生高温降解。例如，在高温下含醚键的化合物就比以碳-碳、碳-硫和碳-氮连接的化合物更容易降解。此外，高温降解还与泥浆的 pH 值以及剪切作用等因素有关。高 pH 值往往会促进降解的发生，强烈的剪切作用也会加剧分子链的断裂。

由于高温降解是导致处理剂失效的一个主要原因，因此一般以处理剂在水溶液中发生明显降解时的温度来表示其抗温能力。一些常用处理剂的抗温能力见表 4-13。需要注意的是，由于降解温度与 pH 值、矿化度、剪切作用、含氧量以及细菌的种类与含量等多种外界条件有关，因此表中数据是相对的、有条件的，各文献、资料中所列数据也不尽相同。

表 4-13 一些常用泥浆处理剂的抗温能力

处理剂名称	抗温能力
丹宁酸钠	130℃
栲胶碱液	80 ~ 100℃
铁铬盐	130 ~ 180℃
CMC	140 ~ 180℃
腐殖酸衍生物	180 ~ 200℃
磺甲基丹宁	180 ~ 200℃
磺甲基褐煤	200 ~ 220℃
磺甲基酚醛树脂	200℃
水解聚丙烯腈	200 ~ 230℃
淀粉及其衍生物	115 ~ 130℃

处理剂的抗温能力与由它处理的泥浆的抗温能力是紧密相关而又互不相同的两个概念。处理剂抗温能力是就单剂而言，而泥浆一般是由配浆土、多种处理剂、岩粉和水组成的完整体系，其抗温能力是指该体系失去热稳定性时的最低温度，显然它除了与各种处理剂的抗温能力有关外，还取决于各种组分之间的相互作用。

高温降解的发生，将给泥浆性能造成很大影响。如果用于调节泥浆某种性能的处理剂降解，那么该性能即被破坏。因此处理剂热降解对泥浆性能的影响涉及所有方面，它可能是增稠、胶凝甚至固化（稀释剂降解），也可能是减稠（高分子增稠剂降解），还可能表现为失水量增大（降滤失剂降解）等。

(2) 高温交联

在高温作用下，处理剂分子中存在的各种不饱和键和活性基团会促使分子之间发生各种反应，彼此相互连接，从而使相对分子质量增大。这种现象常称为高温交联。由于反应的结果使相对分子质量增大，因此可将其看做是与高温降解相反的一种作用。例如，像铁

铬盐、腐殖酸及其衍生物、栲胶类和合成树脂类等处理剂的分子中都含有大量的可供发生交联反应的官能团和活性基团，另外在这些改性和合成产品中还往往残存着一些交联剂（如甲醛等），这样便为分子之间的交联提供了充分的条件。

室内研究和现场试验均表明，高温交联对泥浆性能的影响有好和坏两种可能。如果交联适当，适度增大处理剂的相对分子质量，则可能抵消高温降解的破坏作用，甚至可能使处理剂进一步改性增效。比如，在高温下磺化褐煤与磺化酚醛树脂复配使用时的降滤失效果要比它们单独使用时的效果好得多，则表明交联作用有利于改善泥浆性能。在实验中有时发现，泥浆在经受高温老化后的性能要好于老化前的性能，表现为高温后粘度、切力稳定，失水量下降，这显然是十分理想的一种情况。但是，如果一旦交联过度，形成体型网状结构，则会导致处理剂水溶性变差，甚至失去水溶性而使处理剂完全失效。这种情况下，必然破坏泥浆的性能，严重时整个体系变成凝胶，丧失流动性。

3. 高温对处理剂与粘土相互作用的影响

(1) 高温解吸附作用

实验表明，在高温条件下，处理剂在粘土表面的吸附作用会明显减弱，其原因主要是分子热运动加剧所造成的。高温解吸附会直接影响处理剂的护胶能力，从而使粘土颗粒更加分散，严重地影响泥浆的热稳定性和其他各种性能，常常表现出高温失水量剧增，流变性失去控制。

处理剂在粘土表面的吸附与解吸附是一个可逆的动平衡过程。一旦温度降低，平衡又会朝着有利于吸附的方向进行，因而处理剂又将较多地被粘土颗粒吸附，泥浆性能也会相应地得以恢复。

(2) 高温去水化作用

在高温条件下，粘土颗粒表面和处理剂分子中亲水基团的水化能力会有所降低，使水化膜变薄，从而导致处理剂的护胶能力减弱，这种作用常称为高温去水化。其强弱程度除与温度有关外，还取决于亲水基团的类型。凡通过极性键或氢键水化的基团，高温去水化作用一般较强；而由离子基水化形成的水化膜，高温去水化作用相对较弱。

由于高温去水化使处理剂的护胶能力减弱，因而常导致失水量增大，并且严重时会使高温胶凝和高温固化等现象的发生。

4. 高温引起的泥浆性能变化

综上所述，高温所引起的泥浆性能变化可归纳为不可逆变化和可逆变化两个方面。

(1) 不可逆的性能变化

由于泥浆中粘土颗粒高温分散和处理剂高温降解、交联而引起的高温增稠、高温胶凝、高温固化、高温减稠以及失水量上升、泥饼增厚等均属于不可逆的性能变化。

泥浆在高温条件下粘度、切力和动切力上升的现象称为高温增稠。一般来讲，高温增稠是高温分散所导致的结果，其程度与粘土性质和含量有密切的关系。如前所述，当粘土含量继续增大到一定数值后，高温分散使泥浆中粘土颗粒的浓度达到一个临界值，此时在高温去水化作用下，相距很近的片状粘土颗粒会彼此连接起来，形成布满整个容积的连续网架结构，即形成凝胶。在发生高温胶凝的同时，如果在粘土颗粒相结合的部位生成了水化硅酸钙，则会进一步固结成型，这种现象称为高温固化。例如，据报道，高 pH 值的石灰泥浆发生固化的最低温度为 130℃。

实验还发现,除上述现象外,当泥浆中粘土的土质较差而含量又较低时,会出现高温减稠的现象。此时,尽管仍有粘土高温分散等导致泥浆增稠的因素,但高温所引起的泥浆滤液粘度降低以及固相颗粒热运动加剧使颗粒间内摩擦作用减弱,有可能起主导作用,从而造成泥浆表观粘度降低,即出现了高温减稠。

在高温下某种泥浆的性能究竟会出现什么变化,主要取决于以下因素:粘土类型、粘土含量、高价金属离子存在与否及其浓度、pH 值、处理剂抗温能力,以及温度的高低与作用时间等。显然,如果粘土的水化分散能力强、含量高,很可能出现高温增稠;反之,则很可能出现高温减稠。当粘土含量增至某一临界值时,便会发生高温胶凝。通常将泥浆在某一温度下发生胶凝时所对应的最低土量,称为这种粘土在该温度下的粘土容量限。当粘土含量低于其容量限时,泥浆只发生增稠,而不发生胶凝,高于其容量限时则发生胶凝。一般来讲,若粘土水化分散能力弱、温度低、pH 值低、处理剂抑制高温分散的作用强,则粘土容量限高;反之则低。至于高温固化,只有当粘土含量超过其容量限,有较多 Ca^{2+} 存在, pH 值较高,并且又缺乏有效的抗高温处理剂保护时才会发生。由此可见,做好固相控制,尽可能降低固相含量,并防止膨润土超量使用,对于维持深井水基泥浆的良好性能是何等重要。

(2) 可逆的性能变化

因高温解吸附、高温去水化以及按正常规律的高温降粘作用而引起的泥浆失水量增大、粘度降低等均属于可逆的性能变化。

一般来讲,不可逆的性能变化关系到泥浆的热稳定性,可逆的性能变化则反映了泥浆从井口到孔底,然后再返回到井口这个循环过程中的性能变化。对于抗高温水基泥浆,必须同时考虑这两个方面的问题。为了研究泥浆不可逆的性能变化,需要模拟孔内温度,用滚子加热炉对泥浆进行滚动老化,然后冷却至室温,评价其经受高温之后的性能;为了研究可逆的性能变化,则需要使用专门仪器测定泥浆在高温高压条件下的流变性和失水量,评价其高温下的性能。

三、抗高温泥浆处理剂的作用原理

1. 对抗高温泥浆处理剂的一般要求

根据高温对泥浆处理剂性能的影响,可归纳出对抗高温泥浆处理剂的一般要求是:①高温稳定性好,在高温条件下不易降解;②对粘土颗粒有较强的吸附能力,受温度影响小;③有较强的水化基团,使处理剂在高温下有良好的亲水特性;④能有效地抑制粘土的高温分散作用;⑤在有效加量范围内,抗高温降滤失剂不得使泥浆严重增稠;⑥在 pH 值较低时(7~10)也能充分发挥其效力,有利于控制高温分散,防止高温胶凝和高温固化现象的发生。

2. 抗高温处理剂的分子结构特征

为了能够满足上述要求,抗高温处理剂的分子结构应具备以下特征:

1) 为了提高热稳定性,处理剂分子主链的连接键,以及主链与亲水基团的连接键应为“C—C”、“C—N”和“C—S”等键,应尽量避免分子中有易氧化的醚键和易水解的酯键。

2) 为了使处理剂在高温下对粘土表面有较强的吸附能力,常在处理剂分子中引入

Cr^{3+} 、 Fe^{3+} 等高价金属阳离子，使之与有机处理剂形成络合物，如铬-腐殖酸钠和铁铬盐等。其目的是用这些高价金属阳离子作为吸附基，它们在带负电荷的粘土表面上可发生牢固而受温度影响较小的静电吸附。与此同时，高价金属阳离子的引入对抑制粘土颗粒的高温分散也会起相当大的作用。

3) 为了尽量减轻高温去水化作用，处理剂分子中的主要水化基团应选用亲水性强的离子基，如磺酸基 ($-\text{SO}_3^-$)、磺甲基 ($-\text{CH}_2\text{SO}_3^-$) 和羧基 ($-\text{COO}^-$) 等，以保证处理剂吸附在粘土颗粒表面后能形成较厚的水化膜，使泥浆具有较强的热稳定性。这就是为什么要在丹宁、褐煤和酚醛树脂分子上引入磺甲基的原因。并且，处理剂的取代度、磺化度应与温度和泥浆的矿化度相适应。

4) 为了使处理剂在较低 pH 值情况下也能充分发挥其效力，则要求其亲水基团的亲水性尽量不受 pH 值的影响。相比之下，带有磺酸基的处理剂可以较好地满足这一要求。

3. 常用的抗高温处理剂

(1) 抗高温降粘剂

抗高温降粘剂与一般降粘剂的不同之处主要表现在其不仅能有效地拆散泥浆中粘土晶片以端面 and 端-端连接而形成的网架结构，而且能通过高价阳离子的络合作用，有效地抑制粘土的高温分散。目前国内生产的抗高温降粘剂除铁铬木质素磺酸盐 (FCIS) 外，主要还有：

1) 磺甲基丹宁 (SMT)。简称磺化丹宁，是磺甲基丹宁酸钠与铬离子的络合物。外观为棕褐色粉末，吸水性强，其水溶液呈碱性。适于在各种水基泥浆中作降粘剂，在盐水和饱和盐水泥浆中仍能保持一定的降粘能力，抗钙可达 1000 mg/L ，抗温可达 $180 \sim 200^\circ\text{C}$ 。其加量一般在 1% 以下，使用的 pH 值范围为 $9 \sim 11$ 。

2) 磺甲基栲胶 (SMK)。简称磺化栲胶，为棕褐色粉末或细颗粒，易溶于水，水溶液呈碱性。不含重金属离子，无毒，无污染，抗温可达 180°C 。其降粘性能与 SMT 相似，可任选一种使用。

(2) 抗高温降滤失剂

1) 磺甲基褐煤 (SMC)。简称磺化褐煤，又称为磺甲基腐殖酸，是磺甲基腐殖酸与铬酸盐交联后生成的络合物。为黑褐色粉末或颗粒，易溶于水，水溶液的 pH 值在 10 左右。干剂产品中铬含量 (以 $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 计) 应在 5% ~ 8% 的范围内。它既是抗高温降粘剂，同时又是抗高温降滤失剂。具有一定的抗盐、抗钙能力，抗温可达 $200 \sim 220^\circ\text{C}$ 。一般用量为 3% ~ 5%。

2) 磺甲基酚醛树脂。简称磺化酚醛树脂，分 1 型产品 (SMP-1) 和 2 型产品 (SMP-2)。由于其分子结构主要由苯环、亚甲基和 C—S 键等组成，因此热稳定性很强；又由于含有强亲水基——磺甲基 ($-\text{CH}_2\text{SO}_3^-$)，且磺化度高，故亲水性很强，且受高温的影响较小。试验表明，在 $200 \sim 220^\circ\text{C}$ 甚至更高温度下，不会发生明显降解。并且抗盐析能力强，SMP-1 可溶于 Cl^- 含量为 10 万 ~ 12 万 mg/L 或 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 总含量 2000 mg/L 的盐水中，SMP-2 可溶于饱和盐水，在饱和盐水泥浆中抗温可达 200°C 。

SMP-1 必须与 SMC、FCLS 或褐煤碱液配合使用，才能有效地降低泥浆的失水量，其中与 SMC 复配使用的效果尤为明显。研究表明，这一方面是由于与 SMC 复配后，SMP-1 在粘土表面的吸附量可增加 5 ~ 6 倍，从而使粘土颗粒表面的 ζ 电位明显增大，水化膜明

显增厚，最终导致处理剂护胶能力增强，泥饼质量得以改善，泥饼渗透率和失水量下降（表 4-14）。另一方面，是由于在高温和碱性条件下，SMP-1 和 SMC 易发生交联反应。若交联适度，则会增强降滤失的效果。室内和现场试验均证实，两种处理剂的配比以 1:1 较为合适，一般加量均为 3% ~ 5%。

表 4-14 SMP-1 与 SMC 复配对泥浆失水量和泥饼渗透率的影响

泥 浆 配 方	API 失水量/mL	$K/10^{-6} \mu\text{m}^2$
$\rho = 1.06 \text{ g/cm}^3$ 基浆 + 3% SMP-1	11.6	1.39
$\rho = 1.06 \text{ g/cm}^3$ 基浆 + 3% SMP-1 + 3% SMC	5.6	0.99
$\rho = 1.06 \text{ g/cm}^3$ 基浆 + 3% SMP-1 + 15% NaCl	22.6	3.42
$\rho = 1.06 \text{ g/cm}^3$ 基浆 + 3% SMP-1 + 3% SMC + 15% NaCl	6.8	1.24

与 SMP-2 相比，SMP-1 的应用更为广泛。SMP-1 几乎可与所有处理剂相配伍，并几乎适用于目前国内任何一种泥浆体系。通过 SMP-1 和 SMC 复配，可将各种分散泥浆、钙处理泥浆、盐水泥浆和聚合物泥浆等十分方便地转变为抗温、抗盐的深井泥浆体系。SMP-2 主要用于抗 180 ~ 200℃ 的饱和盐水泥浆和 Cl^- 含量大于 $11 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 的高矿化度盐水泥浆。

国内常用的抗温降滤失剂还有磺化木质素磺甲基酚醛树脂（SLSP）、水解聚丙烯腈（HPAN）、酚醛树脂与腐殖酸的缩合物（SPNH）以及丙烯酸与丙烯酰胺的共聚物（PAC141、PAC142、PAC143）等。为了适应深井钻孔技术的发展，国外也十分重视抗高温泥浆处理剂的研制工作。如美国早期研制的 SSMA（磺化苯乙烯马来酸酐共聚物）是一种相对分子质量为 1000 ~ 5000，抗温可达 230℃ 的稀释剂；Resinex 是一种磺化褐煤树脂，可抗温 220℃ 的降滤失剂；近年来，德国研制的 COP-1 和 COP-2（乙烯基磺酸盐共聚物）不仅抗温可达 260℃，而且抗盐、钙能力极强，受到广泛关注。这些处理剂在分子组成上有一个共同点，即在碳链上都含有磺酸根（ SO_3^- ），看来这是研制抗高温聚合物处理剂所必需的一个官能团。

四、常用抗高温泥浆体系及其应用

我国抗高温深井泥浆技术的发展大致可分为钙处理泥浆、磺化（三磺）泥浆和聚磺泥浆等三个阶段。钙处理泥浆是 20 世纪 60 年代至 70 年代初使用的基本泥浆类型，这部分内容已在本章第二节中讨论。下面着重介绍近 20 年发展起来的后两类深井泥浆体系。

1. 磺化泥浆

磺化泥浆是以 SMC、SMP-1、SMT 和 SMK 等处理剂中的一种或多种为基础配制而成的泥浆。由于以上磺化处理剂均为分散剂，因此磺化泥浆是典型的分散泥浆体系。20 世纪 70 年代后期，四川女基井和关基井分别用此类泥浆钻达 6011 m 和 7175 m。其主要特点是热稳定性好，在高温高压下可保持良好的流变性和较低的失水量，抗盐侵能力强，泥饼致密且可压缩性好，并具有良好的防塌、防卡性能，因而很快得到推广应用。常用的磺化泥浆有以下几种类型：

(1) SMC 泥浆

这种体系主要利用 SMC 既是抗温稀释剂，又是抗温降滤失剂的特点。在通过室内试验确定其适宜加量之后，用膨润土直接配制或用井浆转化为抗高温深井泥浆。一般需加入适量的表面活性剂以进一步提高其热稳定性。该类体系可抗 180 ~ 220℃ 的高温，但抗盐、钙的能力较弱，仅适用于深井淡水泥浆。

其典型配方为：4% ~ 7% 膨润土 + 3% ~ 7% SMC + 0.3% ~ 1% 表面活性剂（可从 AS、ABS、Span-80 和 OP-10 中进行筛选），并加入烧碱将 pH 值控制在 9 ~ 10 之间。必要时混入 5% ~ 10% 原油或柴油以增强其润滑性。

在用膨润土配浆时，必须充分预水化，否则所配出泥浆的粘度、切力过低，不能得到满意的性能。但需注意膨润土切勿过量，若一旦出现膨润土过度分散或含量过高时，可加入适量 CaO 降低其分散度，然后再加入 SMC 调整泥浆性能。在现场维护方面，可以使用与井浆浓度相同的 SMC 胶液（一般 5% ~ 7%）控制泥浆的粘度上升，并保持膨润土含量在 100 ~ 130 g/L 之间。若因膨润土含量过低造成粘度达不到要求，则可补充预水化膨润土浆，并相应加入适量 SMC。四川某基井曾使用该类泥浆顺利钻至 6011 m。

(2) SMC—FCLS 混油泥浆

为了提高磺化泥浆抗盐、钙污染的能力，可将 SMC 与 FCLS 复配使用。试验表明，利用它们之间的相互增效作用，可有效地控制盐水泥浆的流变性和滤失造壁性。并常使用红矾（ $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ）提高 FCLS 的抗温能力，使加重后的盐水泥浆在高温下具有良好的性能。该类体系抗温可达 180℃，最高矿化度可达 $15 \times 10^4 \text{ mg/L}$ ，并能将泥浆密度提高至 2.0 g/cm^3 左右。这种泥浆通常用井浆转化。经试验，膨润土的适宜含量为 80 ~ 100 g/L，SMS 和 FCLS 的加量随体系中含盐量增加而增大。其典型配方为：3% ~ 4% 膨润土 + 2% ~ 7% SMC + 1% ~ 5% FCLS。与此同时，加入 0.1% ~ 0.3% NaOH 调节 pH 值至 9 ~ 10，加入 0.1% ~ 0.2% 红矾以提高抗温性。通常需混入 5% ~ 10% 原油或柴油以降低泥饼的摩擦系数。由于盐水泥浆的 pH 值在钻进过程中呈下降趋势，试验发现，加入 0.2% Span-80 或 0.3% AS 有利于稳定 pH 值，并消除因使用 FCLS 而经常产生的泡沫。

(3) 三磺泥浆

这种体系使用的主处理剂为 SMP-1（或 SMP-2）、SMC 和 SMT（或 SMK，也可用 FCLS 代替）。其中 SMP-1 与 SMC 复配，使泥浆的 HTHP 失水量得到有效的控制；SMT 或 SMK 用于调整高温下的流变性能，从而大大地提高了泥浆的防塌、防卡、抗温以及抗盐、钙侵的能力。试验表明，抗盐可至饱和，抗钙达 4000 mg/L；泥浆密度可提至 2.25 g/cm^3 ；若加入适量 $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ，抗温可达 200 ~ 220℃。该体系中膨润土的允许含量视泥浆密度而定，见表 4-15，所选用处理剂的品种和加量则与泥浆含盐量有关，见表 4-16。

表 4-15 三磺泥浆的密度与膨润土允许含量的关系

泥浆密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	< 1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
膨润土含量/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	45 ~ 80	40 ~ 70	40 ~ 60	35 ~ 50	30 ~ 40

表 4-16 三磺泥浆中处理剂品种、加量与其含盐量的关系

含 盐 量	处理剂品种与加量/%				
	SMC	SMP-1	SMP-2	SMT (或 SMK)	Na ₂ Cr ₂ O ₇
<1 万 mg/L	3~4	1.5~2.0	/	0~1	0.1~0.2
1 万~13 万 mg/L	3~5	1.5~2.5	/	0~2	0.1~0.4
>13 万 mg/L	5~10	/	2~5	0~2	0.1~0.5

配制三磺泥浆时，可先配成预水化膨润土浆，再加入各种处理剂，亦可直接用井浆转化。维护时，通常加入按所需浓度比配成的处理剂混合液。若粘度、切力过高，可加入低浓度混合液或 SMT（SMK 和 FCLS 亦可）；若失水量过高，可同时补充 SMC 和 SMP-1。这类泥浆已在全国各油田广泛应用于深井中。

三磺泥浆的研制成功，是我国在深井泥浆技术上的一大进步。其主要标志是，这三种磺化处理剂均能有效地降低 HTHP 失水量，特别是磺化酚醛树脂效果更为明显，这一特性是使用钙处理泥浆所无法达到的。这样就大大地改善了泥饼质量，减少了深井常出现的坍塌、卡钻等孔内复杂情况，在很大程度上提高了深井钻探的成功率。

2. 聚磺泥浆

聚磺泥浆是在钻孔实践中将聚合物泥浆和磺化泥浆结合在一起而形成的一类抗高温泥浆体系。尽管聚合物泥浆在提高钻速、抑制地层造浆和提高孔壁稳定性等方面确有十分突出的优点，但总的来看其热稳定性和所形成泥饼的质量还不适应于在井温较高的深井中使用。特别是对硬脆性页岩地层，常常需加入一些磺化类处理剂来改善泥饼质量，以降低泥浆的 HTHP 失水量。因此，很自然地逐渐将两种体系结合在一起。聚磺泥浆既保留了聚合物泥浆的优点，又对其在高温高压下的泥饼质量和流变性进行了改进，从而有利于深井钻速的提高和孔壁的稳定。该类泥浆的抗温能力可达 200~250℃，抗盐可至饱和。从 20 世纪 80 年代起，这种体系已广泛应用于深孔作业中。

聚磺泥浆的配方和性能应根据井温、所要求的矿化度和所钻地层的特点，在室内试验基础上加以确定。一般情况下膨润土含量为 40~80 g/L，随井温升高和含盐量、泥浆密度增加，其含量应有所降低。

高相对分子质量的聚丙烯酸盐，如 80A51、FA367、PAC141 和 KPAM 等通常在体系中用做包被剂，其加量应随泥浆含盐量增加而增大，随井温升高而减少，一般加量范围为 0.1%~1.0%。

某些中等相对分子质量的聚合物处理剂，如水解聚丙烯腈的盐类，常在体系中起降滤失和适当增粘的作用，其加量为 0.3%~1.0%。

某些低相对分子质量的聚合物，如 XY-27 等，在体系中主要起降粘、切的作用，其一般加量为 0.1%~0.5%。磺化酚醛树脂类产品，如 SMP-1、SPNH 和 SLSP 等，常与 SMC 复配使用，用于改善泥饼质量和降低泥浆的 HTHP 失水量。前者加量一般为 1%~3%，后者为 0%~2%。此外，1%~3% 的磺化沥青常用于封堵泥页岩的层理裂隙，增强孔壁稳定性和进一步改善泥饼质量。必要时还需加入 0.1%~0.3% Na₂Cr₂O₇ 或 K₂Cr₂O₇，以提高泥浆的热稳定性。

聚磺泥浆大多由上部地层所使用的聚合物泥浆在孔内转化而成。转化最好在技术套管中进行, 可以先将聚合物和磺化类处理剂分别配制成溶液, 然后按配方要求与一定数量的井浆混合, 或者先用清水将井浆进行稀释, 使其中膨润土含量达到一个适宜范围, 然后再加入适量的磺化类处理剂和聚合物。如果在裸眼中进行转化, 则最好按配方将各种处理剂配成混合液, 在钻进过程中逐渐加入井浆内, 直至性能达到要求。

通常使用与配方等浓度的各种处理剂的混合液来对井浆进行维护。若发现井浆性能发生变化, 可适当调整混合液中各种处理剂的配比。

适宜的膨润土含量是聚磺泥浆保持良好性能的关键, 必须严加控制。如果泥饼质量变差, HTHP 滤失基增大, 应及时增大 SMP-1、SMC 和磺化沥青的加量; 若流变性能不符合要求, 可调整不同相对分子质量聚合物所占的比例以及膨润土的含量; 若抑制性较差, 可适当增大高分子聚合物包被剂的加量或加入适量 KCl。

聚磺泥浆所使用的主要处理剂可大致地分成两大类: 一类是抑制剂类, 包括各种聚合物处理剂及 KCl 等无机盐, 其作用主要是抑制地层造浆, 从而有利于地层的稳定; 另一类是分散剂, 包括各种磺化类、褐煤类处理剂以及纤维素、淀粉类处理剂等, 其作用主要是降滤失和改善流变性, 从而有利于泥浆性能的稳定。在深井的不同孔段, 由于井温和地层特点各异, 对两类处理剂的使用情况应有所区别。上部地层应以增强抑制性和提高钻速为主, 而下部地层应以抗高温降滤失为主。目前, 我国泥浆科技人员在聚磺泥浆的现场应用方面已积累了丰富的经验。他们通常将以上两类处理剂分别简称为“聚”类和“磺”类, 提出了深井上部地层“多聚少磺”或“只聚不磺”; 而下部地层“少聚多磺”或“只磺不聚”的实施原则, 其分界点在孔深 2500 ~ 3000 m 之间。

第五节 其他类型泥浆

一、乳化泥浆

乳化泥浆包括水包油型乳化泥浆和油包水型反相乳化泥浆。油包水型反相乳化泥浆属于油基泥浆范畴, 多用于石油钻孔深井中, 此处不予介绍。

小口径金刚石钻进用乳化泥浆, 属水包油型乳化泥浆。它含油量是很少的, 乳化油加量一般为 0.5% ~ 1%, 主要目的是使钻进时能开高转速, 同时对孔壁水敏地层有抑制作用。

油井用混油泥浆, 也属水包油型乳化泥浆。但它加油量大, 混入油量为泥浆体积的 5% ~ 40% (一般是加入柴油), 同时需多加入乳化剂。其目的是防卡、减卡以及深井时提高泥浆稳定性, 抑制孔壁水敏地层分散等作用。

水包油型乳化泥浆的乳化剂多属阴离子型, 如各种脂肪酸钠皂, 十二烷基苯磺酸钠等。小口径金刚石钻进用乳化泥浆, 一般加入乳化油 (皂化溶解油、切削油等), 其中就包含了阴离子型乳化剂, 如油酸钠皂、松香钠皂或氧化石蜡皂等。也可加入非离子型乳化剂, 如聚氧乙烯蓖麻油, OP 乳化剂, 吐温-80 等 (加入非离子乳化剂后, 泥浆润滑性变差)。

许多泥浆处理剂也起乳化剂作用, 如腐殖酸类处理剂, 木质素类处理剂 (铁铬盐、

铬制剂等), 丹宁酸类处理剂及 Na - CMC 等。因为它们有亲水极性基和憎水基 (碳链或碳环)。

粘土粉、页岩粉等固体粉末, 也起固相乳化剂的作用。

乳化泥浆的内部机理, 仍没有很完善的理论加以说明。由于它是比较复杂的多相分散体系, 情况也就比较复杂。如粘土颗粒分散在泥浆中, 油珠也分散在泥浆中, 油珠是否和粘土颗粒相吸附呢? 这些问题值得探讨。

实践证明, 高固相乳化泥浆的润滑减阻性能, 赶不上低固相膨润土乳化泥浆, 即使往前者中多加乳化油, 也是如此。低固相膨润土泥浆, 不加皂化油或切削油时, 摩擦系数还是很大的。加入皂化油后, 摩擦系数降低很多。但超过一定量后, 再增加皂化油, 摩擦系数也就不再继续降低。

钻孔内使用乳化泥浆时的润滑性, 还与泥饼性质有关 (用泥饼黏滞性系数的大小来表示)。这是钻孔中使用乳化泥浆和使用乳化液不同之处。

如采用加入乳化油于泥浆中的方法, 乳化泥浆的配制是很简单的。如混入较多的油, 则需要在搅拌下加入乳化剂进行乳化。

如单加入某些表面活性剂 (乳化剂) 于泥浆中, 而不加入基础油, 也可配成润滑泥浆。如往泥浆中加入磺化妥尔油沥青 (加入量 0.1% ~ 0.6%), 植物动物油脂皂 (加入量 2% 左右), 松香钠皂 (加入量 0.1% ~ 0.5%) 等, 均能增加泥浆的润滑性, 并已在钻孔中使用。

二、泡沫泥浆

充气泡沫泥浆是一种低密度泥浆, 现场使用时, 泥浆密度可降至 0.7 g/cm^3 左右。这种低密度泥浆特别有利于减轻或解决岩心钻探中钻孔漏失问题, 而不需要进行专门堵漏。石油钻孔有时采用充气泥浆, 主要是钻进低压油层的需要。此外, 泥浆密度低还有利于提高机械钻速。

充气方法可用压风机充气。而简单的就是利用搅拌机或回水管、泥浆枪或专门充气装置, 来回冲洗充气法。要注意选择良好的发泡剂或稳泡剂。

发泡剂或稳泡剂也是表面活性剂, 有阴离子型及非离子型两类, 且往往可和乳化剂通用 (发泡剂碳数较低)。

低分子发泡剂易起泡沫, 但稳定性差; 高分子发泡剂的发泡性差, 而稳泡性较好。阴离子发泡剂中, 以十二醇硫酸钠、烷基苯磺酸钠的泡沫最丰富。但阴离子发泡剂遇盐、钙影响时会失效或减效。钻出的岩粉也会大量吸附阴离子发泡剂。非离子发泡剂有 OP-7、OP-10、T-60、EL 等。此外, 在强矿化水条件下, 最好采用抗盐能力强的亚硫酸盐纸浆 (酒精) 废液作发泡剂。许多固体粉末也可作为发泡剂。月桂酰二乙醇胺 (又叫尼纳尔) 和 Na - CMC 是常用的稳泡剂。

我们希望得到的是细泡泥浆而不是粗泡泥浆, 而目前常配的泡沫泥浆, 泡沫颗粒直径往往达 $200 \mu\text{m}$ 。

发泡剂的加量各不相同, 如十二醇硫酸钠、ABS 等只需加入 0.05% ~ 0.1% 即可, 而洗涤剂、皂油等加量为 0.25% ~ 1%。使用亚硫酸盐酒精废液时, 加入量为 0.7% ~ 0.8%, 同时可加入水玻璃 0.5% ~ 0.7% 及食盐 0.3%。

充气泡沫泥浆要求原浆有一定粘度（25 ~ 30 s），且失水较小（不超过 20 mL/30 min）。充气后泥浆粘度和切力还会增加，而密度降低，可以满足钻进要求。由于充气泡沫泥浆有可压缩性，因此要用气压法或真空法（负压法）测定泥浆失水量，用比重瓶或固定体积的瓶子称重法来测定密度。

由于充气泡沫泥浆的可压缩性，用活塞泵泵送时，泵的工作特性会产生变化而受到一定限制。用现有 250/50、200/40 活塞泵，充气泥浆密度不能小于 0.7 g/cm^3 （用压气机充气时，密度还可小），且排量大大降低。用螺杆泵泵送可能效果较好。

表 4-17 中列举了 200/40 活塞泵压送泡沫泥浆时，不同压头、不同密度时的有效排量。表 4-17 是计算值，只作为参考。

表 4-17 不同压头、不同密度时的有效排量（200/40 活塞泵）

泵压/MPa	排量/ $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$			
	$\gamma_0 = 1.0$	$\gamma_0 = 0.9$	$\gamma_0 = 0.8$	$\gamma_0 = 0.7$
0.5	163	125.6	87.7	50.1
1.0	159	117.8	76.9	35.7
1.5	158.2	115.8	73.3	31.0
2.0	157.7	114.7	71.5	28.5
2.5	157.3	114	70.4	27.1
3.0	157.1	113.4	69.9	26.2
3.5	156.9	113	69.5	25.5
4.0	156.7	112.6	69.2	24.9

配制时，先在泥浆搅拌机中配好泥浆，体积为搅拌机容积的 2/3 左右，然后加入发泡剂（稳泡剂），再搅拌 15 ~ 20 min 即可。或者，配好泥浆后，在泥浆池中专门充气。

钻进过程中，由于地下水稀释及岩粉吸附发泡剂等原因，会使泥浆逐渐去气，失去原有性能。因此，每过 1 ~ 2 d 即须进行恢复工作，补充发泡剂及利用泥浆喷枪直接在泥浆池中充气。

泡沫泥浆携带岩粉能力强，但由于粘度较大，净化有些困难。这时，可以加大泥浆槽坡度，使槽中泥浆流速达 $0.3 \sim 0.35 \text{ m/s}$ ，并配合使用除砂器除砂。实践中发现，现场使用泡沫泥浆时，在循环槽中沉砂效果好。这可能是因为泡沫泥浆返出地表后，由于压力的去除，泡沫变粗，密度变小，有利于岩粉的沉淀。

我国岩心钻现场过去用泡沫泥浆很少。近年来有些现场钻进中使用了脂肪醇硫酸钠、十二烷基苯磺酸钠和亚硫酸纸浆废液浓缩液发泡的乳化泥浆，也解决了部分漏失问题，收到较好的效果。国外岩心钻探中许多漏失层是采用泡沫泥浆解决的。这是一种解决漏失层钻进有前途的方法。

当然，要注意其使用范围，孔内水位太低时，用泡沫泥浆恢复循环较困难。同时，对泡沫泥浆机理和配制方法，还应进一步研究。



复习思考题

1. 试述细分散泥浆的组成与功用。
2. 钙处理泥浆配制原理是什么，有哪些特点？
3. 盐侵地层用何种泥浆钻进？说明原因。
4. 深水泥浆应具备哪些特点？
5. 说明乳状泥浆泡沫泥浆的特点及应用。

第五章 小口径金刚石钻进用泥浆

第一节 概 述

小口径金刚石钻进复杂地层时，也往往需要采用泥浆解决部分漏失问题。泥浆和水泥护壁是解决小口径钻进复杂地层的基本措施。

但是，小口径金刚石钻进的许多特点，对泥浆提出了新的要求，分述如下：

1) 泥浆除主要起护壁作用外，又要使钻具能开上高转速，即具有良好的润滑性能。

2) 由于小口径钻进时环状空间的间隙小，冲洗液在环状空间的上返速度高，环状空间的泵压损失大，造成钻孔冲洗时的附加漏失（一般出现部分漏失）。因此，要求泥浆解决这种部分漏失问题。因为这种部分漏失是开泵钻进时才存在，并随泵量或泵压变化而变化。

3) 由于环状空间上返速度高，往往超过 1.5 m/s 以上，使泥饼难以形成，动失水增大，因而对泥浆性能也提出了新的要求。

4) 由于环状间隙小，易造成激动压力，特别是泥浆过稠时影响更大。

5) 泥浆护壁性能要适应不同地层的需要。

根据这些特点与要求，提出如下对泥浆配制与性能的一些要求。

(1) 必须是低固相与低密度

这样才有可能在环状间隙小的情况下，使钻具开上高转速和减少泵压损失。在保证护壁前提下，应尽可能采用更低固相。用膨润土泥浆时，可以做到泥浆固相含量（重量比）4% 以下，即泥浆密度 1.03 g/cm^3 左右。为了在钻进过程中能保持低固相，在钻进水敏性地层时，应尽可能采用不分散低固相泥浆。

(2) 泥浆必须具有良好的润滑性

可采用乳化泥浆或润滑泥浆解决此问题。

(3) 采和低固相泡沫乳化（或润滑）泥浆

为了解决由于环状空间压力损失造成的附加漏失，将泥浆密度进一步降至 $0.8 \sim 1 \text{ g/cm}^3$ 。同时可考虑加入高效增粘剂，配制触变性好的泥浆，也有助于解决地层漏失问题。

(4) 泥浆流变性要好

即要求具有一定的剪切稀释能力。这样有利于金刚石钻头的冷却散热，延长钻头寿命。在保证护壁及防漏的前提下，泥浆粘度不要过高，并具有一定的切力。

(5) 要求泥浆失水量较小

泥饼致密润滑性好，并有利于减少动失水。

因此，根据不同地层要求，可以考虑采用不同类型的泥浆。如膨润土或非膨润土低固相乳化或润滑泥浆，不分散低固相乳化或润滑泥浆，低固相泡沫乳化或润滑泥浆，无固相

冲洗液等。

某地勘单位在钻进非造浆破碎地层时，采用膨润土低固相泡沫乳化泥浆，减少了漏失，解决了护壁和开高转速的问题。使在 1100 m 孔深时能开上 655 r/min；电压 340V 时，工作电流只有 42A，实现了高转速钻进（而使用一般泥浆时，转速要成倍降低）；泵量 45 L/min 时，泵压为 3.5 MPa；以较快速度完成深孔施工任务，台月效率达到 400 m。

此泥浆配方是：黑山膨润土粉 4% ~ 5%（质量分数），纯碱（质量分数）0.2% ~ 0.25%，切削油（体积分数）0.3% ~ 1%，亚硫酸盐纸浆废液浓缩物（体积分数）0.5% ~ 1%。

所得泥浆性能为：密度 0.98 ~ 1 g/cm³，失水量 8 ~ 10 mL/30 min，泥饼 0.5 mm，pH 值 10 ~ 11，漏斗粘度 21 ~ 23 s。

钻进造浆水敏岩层（千枚岩）的配方是：黑山膨润土（质量分数）4%，纯碱加量为粘土质量的 4% ~ 5%，切削油或皂化油（体积分数）0.5%，理论水解度为 60% ~ 80% 的水解聚丙烯酰胺（PHP） 100×10^{-6} （如 PHP 配成浓度为 1% 的水溶液时，每 m³ 泥浆中加入 PHP 量为 10 L）。

所得泥浆性能为：密度 1.2 g/cm³，失水量 11 mL/30 min，泥饼厚 0.2 mm，pH 值 8，漏斗粘度 19 ~ 20 s，塑性粘度 6 mPa·s，表观粘度 6.8 mPa·s，动切力（屈服值）0.8 Pa，摩擦系数 0.0703 ~ 0.101。使用效果良好。

第二节 乳状冲洗液

小口径金刚石钻进要求开高转速，对冲洗液的润滑性提出了高的要求。解决这一问题的方法有三种：

- 1) 使用水包油乳状液（又称为乳化液）作为冲洗液；
- 2) 使用润滑性好的表面活性剂水溶液（或叫无基础油润滑液）作为冲洗液；
- 3) 在钻杆上涂抹润滑脂的方法。

我国目前用得最多的是乳状液，表面活性剂水溶液（润滑冲洗液）也在大力推广，涂润滑脂的方法有时采用。

为了应用好乳状液和表面活性剂水溶液，必须对表面活性剂有一个比较全面的了解。

一、表面活性剂类型

（一）概述

表面活性剂是指那些加量很少就能大大地降低表面张力的化合物。

物体相界面（液-液、液-固、液-气）之间的张力统称为界面张力，其中液-气界面之间的张力叫做表面张力。

如温度 20℃ 时，水的表面张力为 0.073 N/m，加入少量（0.01% ~ 0.1%）表面活性剂后，水的表面张力可降到 0.025 ~ 0.03 N/m，而水油界面张力可降低到 10^{-3} N/m 以下。

表面活性剂用途广泛，如采油、农药、纺织印染、金属净洗、防锈、浮选、建筑、电镀、机械加工、印刷、皮革、造纸、造船、炼油、橡胶、塑料、油漆、涂料、食品、医

药、日用化工及地质钻探、石油钻井等领域中均得到应用。

乳化剂、发泡剂、消泡剂、分散剂、絮凝剂、减摩润滑剂等，均在钻进中广泛采用，它们中许多都属于表面活性剂。

表面活性剂在溶液中的特性是什么呢？表面活性剂最显著的特性是具有亲水端和亲油端的两亲结构。且其分子基本上为线状，亲油端为一定长度（8~20个碳原子）的碳链（部分有碳环），亲水端是一些能电离或不能电离的极性基。

图5-1是阴离子活性剂烷基磺酸钠和非离子活性剂聚氧乙烯烷基醇醚的分子在水中的状况。

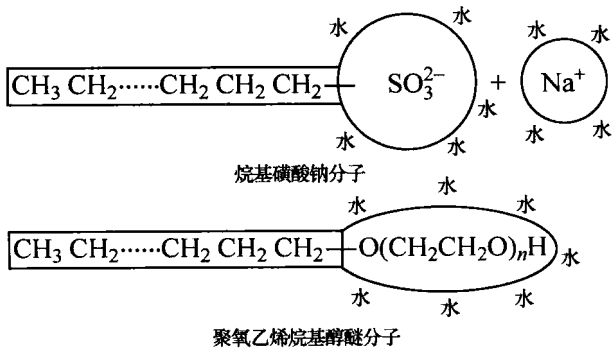


图5-1 表面活性剂分子在水中的状况

亲油基又叫憎水基，它能与油或空气相连接，而亲水基能与水分子相连接。

根据亲水基的不同，表面活性剂分为：

- 1) 离子型表面活性剂：阴离子型、阳离子型及两性表面活性剂；
- 2) 非离子型表面活性剂。

(二) 阴离子型表面活性剂

阴离子表面活性剂是表面活性剂分子的亲水基电离出阳离子后，以阴离子和活性剂的碳链亲油基R相连接的一种活性剂。如图5-1所示，烷基磺酸钠分子的亲水基是磺酸钠，在水中可电离出阳离子——钠离子，剩下磺酸基 SO_3^{2-} 与碳链R相连接。

阴离子表面活性剂是应用最广泛的一种活性剂，它有乳化、发泡等功用。

由于它只含一个官能团，因此不易与粘土颗粒相吸附，不能作为粘土的分散剂和稳定剂。而许多泥浆处理剂也可算作阴离子型活性剂，但它们都是结构较复杂的多官能团化合物，容易和粘土颗粒相吸附。

阴离子活性剂能耐碱性，能在pH值较高条件下工作（但pH值太高时，会影响润滑性）。在水中的溶解度是随温度上升而增加的。缺点是它易受阳离子影响而减效（被沉淀、络合等）。

阴离子活性剂可分为羧酸盐、磺酸盐、硫酸盐（硫酸酯盐）和磷酸盐（磷酸酯盐）等四类，目前用得较多的是前三类，现分述如下。

1. 羧酸盐

羧酸盐的特点是亲水基是羧酸盐，如羧酸钠、钙、镁盐。

羧酸钠盐等一价盐可溶于水，其乳化、减摩润滑等作用较好，可作为水包油乳化剂。它和许多矿物及钢表面有良好的吸附，但易受钙、镁等阳离子置换成为不溶于水的二价盐，使它失去水包油乳化剂的作用。

羧酸钙、镁等高价盐不溶于水，可作为油包水乳化剂等。

依亲油基即碳氢链的不同，羧酸盐又可分为许多品种，常用的如下所列：

(1) 油酸钠

又称钠皂，分子式 $C_{17}H_{33}COONa$ ，它是由油酸 ($C_{17}H_{33}COOH$) 和氢氧化钠中和得到的。油酸是十七烯酸，带不饱和双键；而羧基 ($-COOH$) 具较大活性，羧酸钠 ($-COONa$) 水化力强。因此，油酸钠极易和金属（如钻杆表面）和矿物相吸附，减摩润滑作用好。其碳链的碳数（17 个碳）和矿物油的碳数相当，因此它是良好的水包油乳化剂。

油酸多来源于动、植物油中，日常生活使用的肥皂多属于油酸钠皂（或合成脂肪酸钠皂）。

其三价盐如油酸铝 $(C_{17}H_{33}COO)_3 \cdot Al$ 等，可用作为油包水乳化剂。但单独使用时乳化效率不高，常与其他乳化剂合用。

(2) 松香钠皂

又叫松香酸钠 ($C_{19}H_{29}COONa$)，它是松香中的松香酸用烧碱皂化而成。亲油基部分属杂环结构，而不是直的碳链。它可单独使用或配合油酸皂一起作皂化溶解油的乳化剂（水包油型）。单纯的松香酸钠水溶液也可用于小口径金刚石钻进，它具有较好的润滑作用，能使钻具开上高转速。

(3) 合成脂肪酸钠皂

合成脂肪酸钠皂一般为氧化石蜡钠皂。合成脂肪酸是碳数 5 ~ 20 的混合脂肪酸。目前多用它来制肥皂以代替油酸钠皂。它可作为皂化溶解油的乳化剂，也可直接用其水溶液作冲洗液。

(4) 硬脂酸铝

其分子式为 $(C_{17}H_{35}COO)_3 \cdot Al$ ，是十七酸的三价盐，可作为油包水乳化剂及消泡剂等。它溶于油而不溶于水。

2. 磺酸盐

磺酸盐是亲水基为磺酸基 ($-SO_3H$) 的一价或二价盐（常见产品是钠盐和钙盐），磺酸基比羧酸盐有更强的亲水性。因此，这类阴离子活性剂应用也很广泛。如洗涤用的发泡剂和乳化剂多用磺酸钠盐。依亲油基 R 的不同，它又可分为：

(1) 烷基磺酸盐（代号 AS）

通式是 $R-SO_3Me$ 。式中，R 为 C_{12-18} （即 12 ~ 18 个碳的碳氢链）；Me 代表金属离子。

常用的是十二烷基磺酸钠 ($C_{12}H_{25}SO_3Na$)。它是洗涤剂的活性部分，在碱、中及弱酸性溶液中能保持稳定。除钠盐外尚有钙盐。

(2) 烷基萘磺酸钠

亲油基中含具双环的萘，产品有二丁基萘磺酸钠，又叫粒开粉 RX 或渗透剂 BX，分子式为 $C_{18}H_{23}SO_3Na$ ，它易溶于水，有很好的润湿、扩散及乳化能力。它耐酸碱并能抗硬水。它易受潮，受潮后仍可用。

3. 硫酸盐（硫酸酯盐）

其亲水基为硫酸盐（硫酸酯盐），常见的有：

（1）脂肪醇硫酸钠

通式是 $R-OSO_3Na$ ，式中 R 为 C_{12-18} 。

所用脂肪醇有月桂醇（十二醇）、十六醇、十八醇、油醇等，均可进行硫酸化而得到此类产品。随着碳链增长，溶解度和泡沫将降低，而乳化性能增加。但是，油醇虽碳数高，由于它具有不饱和双键，使它在水中的溶解度变好。此类产品的缺点是，当水溶液呈强酸性时，容易水解，产生原来的高级醇。

（2）硫酸化油、硫酸化脂肪酸酯及硫酸化脂肪酸

含—OH 基及具不饱和双键的脂肪酸及其酯类，经硫酸化后，可得到此类产品。

4. 磷酸盐

有单酯磷酸盐（如十六烷基磷酸钠）和双酯磷酸盐（双十二烷基磷酸钠）等。

（三）非离子表面活性剂

非离子型表面活性剂也是应用很广泛的一类表面活性剂。其乳化、发泡等性能都很好，用量少，能抗硬水（钙、镁）的影响。从目前用非离子乳化液看，由于它和钢表面的吸附不强，因而润滑性较差。但是非离子活性剂在钻孔中的用途是多样的，应予以重视。

目前，非离子活性剂分为醚类和酯类两大类，分述如下。

1. 醚类

此类又叫聚乙二醇型。它主要是由含氢憎水化合物（ $R-OH$ ， $R-COOH$ ， $R-NH_2$ ， $R-CONH_2$ ， $R-SH$ ）与环氧乙烷缩合而成。

常见的醚型活性剂有：聚氧乙烯烷基醇醚、聚氧乙烯烷基酚醚、聚氧乙烯脂肪酸酯、聚氧乙烯蓖麻油、聚氧乙烯聚氧丙烯二醇醚、聚氧乙烯山梨醇酐脂肪酸酯。

属醚类的尚有聚氧乙烯烷基胺，聚氧乙烯脂肪酰胺，聚氧乙烯硫醇醚，聚氧乙烯磷酸烷基酯，聚氧乙烯木糖醇羧酸酯等。

2. 酯类

这里主要指脂肪酸与多元醇缩合物。含有多个羟基（—OH）的醇类，叫多元醇。由于它含多个羟基，故易溶于水。

除羟基外，含— NH_2 或— NH 的氨基醇类（如二乙醇胺）以及带醛基（—CHO）的糖类（葡萄糖等）与脂肪酸缩合也可得到和多元醇相似的活性剂。

常见的酯类有：失水山梨醇脂肪酸酯、烷基醇酰胺。

（四）阳离子和两性表面活性剂

1. 阳离子活性剂

与阴离子活性剂正好相反，阳离子活性剂是电离出阴离子后，阳离子与亲油基相连的一种活性剂。

Na^+ 、 K^+ 等阳离子虽然也是带正电荷的亲水基，但不能和亲油基相连。而同样带正电荷的 NH_4^+ 离子却能与亲油基相连。

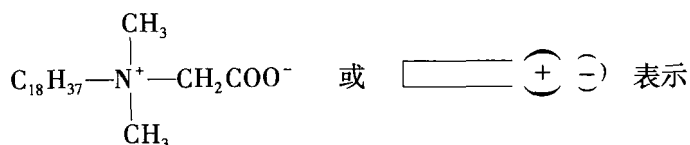
阳离子活性剂具有抗硬水影响的优点，并同样具有乳化、润湿等性能，可以用来配制乳状液。此外，阳离子活性剂也可用作金属缓蚀剂和粘土防膨剂，配制亲油粘土等。此

外，在印染、采油、浮选、农药、润滑脂等部门中得到采用。我国由于阳离子活性剂产品少，目前仍未得到广泛采用。

常见的阳离子活性剂有：脂肪胺盐、季铵盐、咪唑啉类、氮苯（吡啶盐）。

2. 两性活性剂

两性活性剂一般是指同时具有阳离子和阴离子性质的活性剂。即在酸性溶液中呈阳离子性质，在碱性溶液中呈阴离子性质，而在中性溶液中又有类似非离子的性质。如十八烷基二甲基甜菜碱：



广义来说，两性活性剂包括非离子与阳离子，非离子与阴离子结合的两性活性剂。两性活性剂主要用于缓蚀、乳化、杀菌等方面。

二、表面活性剂溶液的基本性质和功用

（一）表面活性剂在溶液表面的吸附和在溶液中的分布特性

表面活性剂分子由于具有两亲结构，易聚集在两相界面层上。如图 5-2 所示，表面活性剂分子（以“O—”表示，“O”表示极性端即亲水基，“—”表示非极性端即亲油基）在水和空气界面（表面）上聚集的情况。非极性端指向空气，极性端指向水。

由于表面活性剂聚集在相界面上，代替了原来表面上的液体分子。而活性剂分子具两亲性，在界面上活性剂分子受到液体内部液体分子对它的吸力比原来界面上液体分子受到的吸力小得多（因空气对表面活性剂也有吸力，即与活性剂的非极性端相吸，而与表面水分子的吸力很小）。因此，表面张力（或界面张力）就显著减小。

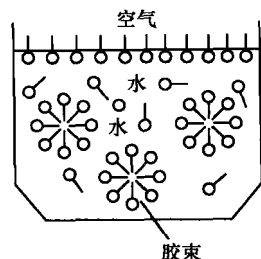


图 5-2 表面活性剂分子在溶液中的分布

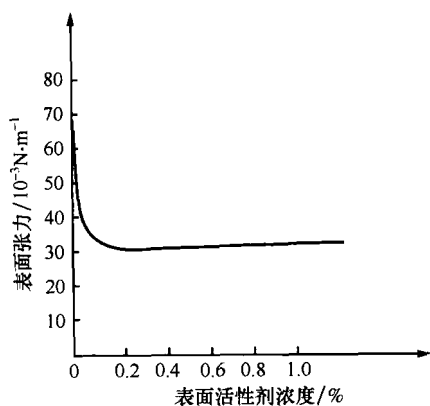


图 5-3 表面活性剂浓度和表面张力的关系曲线

当溶液中表面活性剂分子（水中的表面活性剂浓度）增加时，水溶液和空气界面上便会布满一层活性剂分子，溶液中多余的活性剂分子就会在水溶液中形成“胶束”（图 5-2）。这是由于水分子是极性分子，对非极性分子有排斥作用，因此活性剂的非极性端就相互吸在一起成胶束状。一般，胶束中可包含几十到 100 多个活性剂分子。

各种表面活性剂在水溶液中开始形成胶束的浓度，叫“临界胶束浓度”，以代号 C·M·C 来表示。

图 5-3 表示溶液中加入表面活性剂后，表面活性剂浓度和表面张力间的关系曲线。当加入

活性剂达一定浓度后，表面张力降至最小值，表示界面上已布满活性剂分子。继续增加活性剂浓度时，表面张力再也不会降低了。因此，曲线转折点的浓度值，即表示临界胶束浓度值。

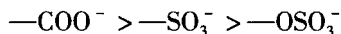
不同用途时，要求表面活性剂溶液的临界胶束浓度是不相同的。如为了增加乳化剂分子的侧向吸力，达到较好的乳化效果，要求乳化剂有较低的 $C \cdot M \cdot C$ 。增溶作用也要求有较低的 $C \cdot M \cdot C$ 。而润湿作用则要求 $C \cdot M \cdot C$ 值较高。

无论是离子型或非离子型活性剂，亲水基相同时，其亲油基的碳氢链越长，活性剂的碳氢链之间相吸越强，则 $C \cdot M \cdot C$ 越低。

一些试验指出，对同一亲水基，增加 2 个碳氢链时， $C \cdot M \cdot C$ 降低为原来的 $1/4$ 。其中，一个苯环的作用只相当于 3.5 个烃基（ $-\text{CH}_2$ ）的作用。

当碳原子数相同时，非离子活性剂的 $C \cdot M \cdot C$ 比离子型活性剂的要小得多（约差 100 倍）。这表示，非离子活性剂的活性比离子型活性剂大。如作为乳化剂，则非离子乳化剂用量要比离子型乳化剂用量小得多。

亲水基种类的变化对 $C \cdot M \cdot C$ 的影响较小。三种阴离子亲水基的 $C \cdot M \cdot C$ 大小次序为：



即羧酸盐最大，硫酸酯盐最小。但离子型活性剂亲水基数如增加一个， $C \cdot M \cdot C$ 浓度会增加几倍。

非离子活性剂的亲水基（ $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O}$ ），由于其亲水性弱，对 $C \cdot M \cdot C$ 的影响更小。但增加此亲水基数（环氧乙烷数）时， $C \cdot M \cdot C$ 也会增大。

活性剂的结构也有影响。如亲水基位置向碳氢链中间移植和碳氢链分支时，都会增加链间距离，减少碳氢链间吸力，因而会使 $C \cdot M \cdot C$ 增加。

温度升高时，溶液中分子热运动加剧，不利于胶束形成，即会使离子型活性剂的 $C \cdot M \cdot C$ 增加，但增加率不大。而对大多数非离子活性剂，情况正好相反。温度升高时，会降低其亲水基的水化作用，即降低其水溶性，使其 $C \cdot M \cdot C$ 降低。至一定温度时，溶液变浑浊（此时温度叫“浊点”）。

电解质的加入会降低亲水基的水化，有利于胶束形成，使 $C \cdot M \cdot C$ 降低。这对离子型活性剂影响较大（对阴离子活性剂是受阳离子影响，对阳离子活性剂是受阴离子影响），而对非离子活性剂影响不大。

长链极性有机物（如醇）也能降低离子型活性剂的 $C \cdot M \cdot C$ ，而对非离子活性剂的影响正好相反。

（二）表面活性剂在固体上的吸附

这是指固体在溶液中吸附表面活性剂的现象，即分析固-液界面上表面活性剂的吸附问题。大致有如下几方面：

- 1) 不论离子型或非离子型活性剂，碳氢链越长越容易在固体表面上吸附。
- 2) 温度升高时，离子型活性剂在固体界面上的吸附量降低（因其溶解度升高），而非离子活性剂则增加。
- 3) 溶液 pH 值升高时，阳离子活性剂的吸附量增多（因 pH 值高时，固体表面常带负电），而阴离子活性剂则减少。

4) 亲油基相同时, 聚氧乙烯链短的非离子活性剂的吸附量比阴离子活性剂的吸附量大。非离子活性剂中, 聚氧乙烯链越长时, 其吸附量越少。

在溶液中, 固体吸附表面活性剂越多, 则分散越好, 越稳定, 即表面活性剂起分散剂的作用。

(三) 表面活性剂的主要功用

表面活性剂的主要功用有润湿作用、乳化作用、发泡和消泡作用、分散作用和增溶作用等方面, 简述如下:

1. 润湿作用

液体能在固体表面扩散, 并使固体表面润湿时, 称为润湿作用。如水可以在许多亲水矿物(如各种硅酸盐矿物)表面润湿, 却不能在石蜡表面润湿, 而在石蜡表面形成滚动的水珠。通常以润湿角口的大小来表示润湿程度(图 5-4)。

当润湿角 θ 接近于 0° 时, 表示完全润湿(图 5-4b 所示), 当 $\theta = 180^\circ$ 时, 表示完全不润湿(图 5-4c); 而 $\theta < 90^\circ$ 时, 表示固体亲水; $\theta > 90^\circ$ 时, 表示固体亲油(憎水)。

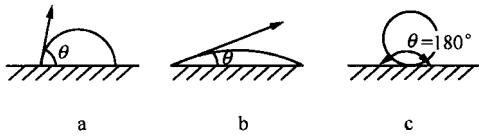


图 5-4 润湿和润湿角

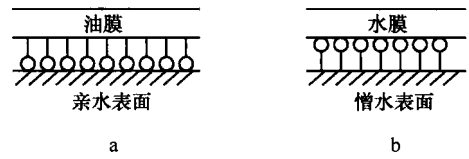


图 5-5 润湿转化作用示意图

但加入表面活性剂后, 原来亲水表面会变为亲油表面(图 5-5a), 原来亲油表面会变为亲水表面(图 5-5b)。

欲使固体表面特性转化, 必须是表面活性剂亲水基的带电性的符号要正好和固体表面带电性相反。如粘土颗粒表面一般是带负电荷的, 只有吸附阳离子活性剂, 才能使其转化为表面亲油。又如钢的表面一般呈阳性(铁-氧化铁与钢不同), 因此吸附阴离子活性剂后, 可使它亲油。这点对研究钻杆的润滑是很重要的。

从润湿作用和表面活性剂结构性质的关系来分析, 碳氢链较短(C_8-12)或带支链的, 亲水基位于碳氢链中间的, 以及临界胶束浓度高的活性剂具有较好的润湿作用。由于润湿作用, 还会产生渗透作用和岩石的“软化”作用。

2. 乳化作用

不加入表面活性剂进行油水混合时, 油水分层。即使强力搅拌后, 还会产生上下分层现象(图 5-6a)。但加入表面活性剂(乳化剂)并强力搅拌后, 由于油珠和水界面上吸附了表面活性剂, 降低了界面张力, 使油珠分散于水中, 即成为水包油乳状液, 这种作用称为乳化作用(图 5-6b)。

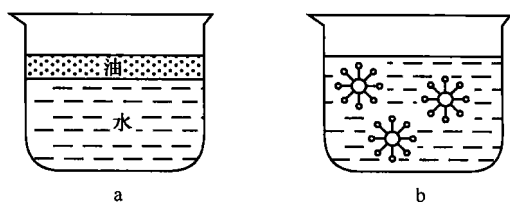


图 5-6 乳化作用示意图
a—油水分层; b—乳化

乳化时，在油水界面的两侧，会形成两个溶剂化吸附层（油溶剂化层和水化层），即形成“界面膜”。界面膜的强度和紧密程度是影响乳状液稳定的重要因素（图 5-7）。对使用离子型活性剂的乳状液来说，还存在双电层稳定的作用。一些研究指出，用复合型乳化剂形成的复合膜，强度更大，更稳定。

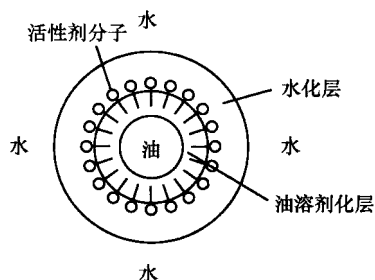


图 5-7 溶剂化层示意

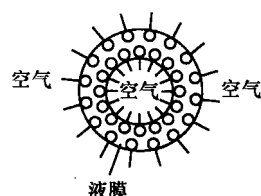


图 5-8 双吸附层气泡示意图

当水是连续相而油是分散相时，称为水包油乳状液（以油/水或 O/W 表示）。反之，当油是连续相而水是分散相时，称为油包水乳状液（以水/油或 W/O 表示）。

3. 发泡和消泡作用

泡沫液是气体分散在液体中的分散体系。通常，通过搅拌带入空气或压入空气于水中，即可以造泡。但要使泡沫稳定，则必须加入发泡剂（稳泡剂）。它们也是具有两亲结构的表面活性剂，可以吸附在空气和水接触的界面上，亲油端指向空气泡，亲水端指向水。而在水面或空气中的气泡，则是为液膜所包围，而活性剂形成双吸附层（图 5-8）。

低分子发泡剂易起泡、稳定性差；高分子发泡剂难起泡，但稳定性高。阴离子活性剂的发泡性和稳定性均比非离子活性剂强。

发泡剂要求活性剂碳链有一定长度（ C_{8-18} ），且亲水基的亲水性也要强（如硫酸基或磺酸基较强）。

与发泡作用相反，消泡作用是破坏液膜吸附层的强度。消泡剂可选用表面张力低、溶解度较小、碳氢链短且分支的化合物。如用醇类、环氧丙烷和环氧乙烷聚合的聚醚型表面活性剂等。

4. 分散作用

即前述固体表面产生吸附活性剂后，使固体分散在溶液中的作用。

5. 增溶作用

表面活性剂使难溶物质的溶解度显著增加的作用，叫增溶作用。如油不溶于水中，但加活性剂后，可使油的“溶解”增加。

这种增溶作用和一般的溶解或乳化均不相同。增溶作用是指溶质分子（如油）集中分布于表面活性剂形成的胶束内部。随着胶束离子浓度增加，增溶作用增强。在油基泥浆中，增溶作用和乳化作用可能同时存在。

由于表面活性剂水溶液也有较好的润滑效果，因此，目前松香钠皂等水溶液在小口径金刚石钻进中得到采用。其润滑机理在第三章中已进行了介绍。

第三节 乳状液的配制及物化性能测定

一、乳状液的配制

(一) 乳状液的类型

根据用途和使用条件不同,需要不同类型的乳状液。在正常情况下,小口径金刚石钻进中采用阴离子水包油乳状液,并多用脂肪酸钠皂作为乳化剂配成的乳状液。这种乳状液(如用皂化油稀释成的)润滑性好,具有良好的防振减阻性能,且来源较易。而在易造成破乳的条件下,则要考虑采用具有一定抗岩粉吸附和抗硬水破乳的复合型乳状液(以阴离子为主,非离子为辅)。采用非离子活性剂为主的乳状液,虽然稳定性高,但由于其润滑减阻性较差而难以采用。

(二) 乳化剂和基础油

1. 乳化剂

选用乳化剂时,应考虑所配乳状液类型的需要。阴离子型乳状液需要合适的阴离子型表面活性剂作为乳化剂。只要亲水亲油平衡值和碳氢链数合适(与基础油相适应),大部分阴离子型表面活性剂均可作为乳化剂。但是,采用与钢钻杆表面有强烈吸附的乳化剂时,可得到较好的润滑效果。因此,像脂肪酸钠(特别是油酸钠)、十二烷基苯磺酸钠、松香酸钠和环烷酸钠等均可作为乳化剂,而以油酸钠效果最好。也可采用合成脂肪酸钠、尼龙下脚料、磺化料等作为乳化剂。

为了配制复合型乳状液,也可采用部分非离子乳化剂,如OP-10、司盘-80与吐温-80配合、聚氧乙烯蓖麻油(EL-40)等。

也可采用农乳0203、0204(它们是聚氧乙烯蓖麻油和十二烷基苯磺酸钙的复合物)代替非离子乳化剂,配制出复合型乳化油。

乳化剂种类不同,共用量也不相同。阴离子乳化剂的用量比非离子乳化剂用量大。考虑到钻进中被吸附消耗的可能性,还要加大乳化剂用量。如一般皂化油中,油酸钠(或合成脂肪酸钠)和松香酸钠的总量,达到整个皂化油量的25%~30%。而单一的非离子乳化油,乳化剂用量可降至1%以下,也能得到稳定的乳状液。

配制复合型乳化油时,即使是乳化剂总量(阴、非离子活性剂总和)少于4%,也能很好地乳化且稳定。但是,如考虑到钻进过程中岩粉的吸附和钙、镁离子的中和成盐而被消耗,乳化剂总用量要适当大一些(如用量为10%~20%不等,其中阴离子活性剂:非离子活性剂=(3~4):1)。

2. 基础油

配制乳状液,必须加入基础油,并多用矿物油作为基础油。过去常用5[#]、10[#]、15[#]机油来配制皂化溶解油。如果考虑到影响乳状液润滑性的主要因素是乳化剂,那么基础油的选择就没有那么重要了。即不论用哪一种基础油,只要乳化剂相同,所得润滑效果相差不多。

因此,可以选择那些来源容易、成本低廉的油作为基础油,如农用柴油(重柴油)、

废机油、柴油等。同理，原油、重油、燃料油等均可作为基础油。但是，由于原油和重油中含有一些高碳组分，乳化就困难一些，应注意选择合适的乳化剂和配制方法才行。

（三）乳化油的配方

配制乳状液时，一般都是先配成浓稠乳状液，或叫乳化油，然后在水中稀释成为钻进用乳状液（按 0.3% ~ 0.5% 计算用量）。

乳化油主要包括前述乳化剂和基础油两项。此外，阴离子乳化油还可加入稳定剂（酒精或三乙醇胺等），目的是提高乳化油稳定性能。

此外，根据乳化油配制方法的不同，自制乳化油是先加水转相乳化成浓稠液的，一般加水量为 10% ~ 40%。

乳化油的具体配方是多种多样的，以下介绍常用皂化溶解油和太古油的配方和配制方法。

1. 皂化溶解油

其基本配方是：油酸 10.5%，松香 97%，浓度为波美度 37°Be' 的烧碱液 5.4%，酒精 2%，亚硝酸钠 0.1%（防锈用），30# 机油（其中 10% 为 0# 柴油）71.4%（或以 20# 机油代替）。

配制方法分两步进行：

1) 乳化剂配制将油酸和松香加热至 80 ~ 100℃，并搅拌使松香均匀溶于油酸中。冷却混合液至 40℃，将 40℃ 的 NaOH 溶液以细流方式边搅边加入混合液中。加完烧碱液后，再搅一定时间，即成为黄红色膏状的钠皂。

2) 皂化溶解油配制：将机油加热至 60 ~ 70℃，加入已制成的乳化剂（钠皂），并不断地搅拌直至混合液呈暗红色，并使皂化泡沫完全消失为止。停止加热，继续搅拌冷却至 40℃ 时，加入酒精，再搅拌半小时即可。

2. 太古油

又名红油，它是蓖麻油在酸性条件下水解，再用浓硫酸磺化（实际上是硫酸酯化），用硫酸钠或食盐溶液洗涤，除去多余硫酸，用烧碱中和至 pH 值为 7 ~ 7.5 配成。

其基本配方是：蓖麻油 70%，硫酸 15%，食盐 15%，用烧碱或纯碱中和。

太古油的亲水基有 $-\text{COONa}$ 及 $-\text{OSO}_3\text{Na}$ 各一个，另有双键一个，属阴离子型乳化油。

（四）乳化油的配制方法和设备

1. 乳化油的配制方法

除上述皂化溶解油配制方法外，配制水包油浓稠乳化油的方法有如下几种：

1) 剂在油中或剂在水中法。即乳化剂先加入油中加热并搅拌下加水进行乳化。或者是乳化剂先加入水中加热并搅拌下加油进行乳化的方法。加热温度可至 80 ~ 100℃。

2) 剂、油、水一次加入后进行搅拌加热，达到乳化的目的。

3) 先配“引子”，然后轮流加油和加水的方法。即先用少量乳化剂、油和水进行乳化，配成少量乳化油作为“引子”。然后，再继续加油、水、剂，扩大乳化油的量，这些都在搅拌加热下进行。使用乳化效率高的浓乳配“引子”时，即使常温和手搅条件也能较好乳化，配出乳化油来。

2. 乳化设备

- 1) 搅拌法。强力搅拌有助于乳化，但也有慢搅拌，甚至手搅拌配成乳化油的。
- 2) 齿轮泵法。用齿轮泵来回循环，达到搅拌乳化的目的。
- 3) 胶体磨法。胶体磨中有定子和转子，转子转速可达 $1000 \sim 20000 \text{ r/min}$ ，产生很大剪切力使之乳化，效果是最好的。但由于设备来源困难，仍少采用。

此外，还可采用超声乳化器、均化器等方法进行乳化。

二、乳状液的物化性能测定

1. 稳定性测定

这是一种简易的测定方法，即在量筒中加入 100 mL 蒸馏水，再加入 10 g 乳化油试样于量筒中，搅拌使乳化油稀释于水中，静置 8 h 。以析出油量不超过 1% 为合格。

也可继续静置 24 h 、 48 h 、 64 h 来观察其析油或分层情况。

有条件时，可用电动离心机的离心力来加速分层，观察其稳定性好坏。

2. 显微镜下观察法

如图 5-9 所示，可用放大 100 倍、 500 倍甚至 1000 倍的显微镜，来观察油珠的颗粒大小及均匀程度。

用此法可看到 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 大小的油珠分布。图 5-9 中，每 1 小分格代表 $1 \mu\text{m}$ 大小。

观察前，要将乳状液（稀液）液滴滴在玻璃片上，再用盖玻片压平，使乳状液压在两玻片之间。然后再放在显微镜下观察。如放大 1000 倍左右时，必须将镜头放在盖玻片上。

这是一种很好的鉴定方法。一些研究指出，为了得到稳定的乳状液，油珠直径最好不要超过 $3 \mu\text{m}$ ，直径越小越稳定。

试验中发现，非离子乳状液的颗粒一般比阴离子乳状液的颗粒细得多，即使非离子乳化剂用量比阴离子乳化剂用量少得多的条件下。

3. 粘度测定

稀释到 0.5% 左右浓度的钻进用乳状液的粘度是不大的，往往只在 $1 \sim 2 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 之间。可采用毛细管粘度计或旋转粘度计来测定其粘度值。

4. 表面张力或界面张力测定

对表面活性剂水溶液来说，应测定其表面张力的变化，并可反映其临界胶束浓度值。对水包油乳状液来说，由于乳状液内部有许多被乳化剂所包围的油珠存在，虽然测定其表面张力的变化，不能反映乳状液内部乳化剂浓度变化的情况。但是，乳状液的表面张力肯定是要比水的表面张力为小。因此，也有人用它来表示乳状液中乳化油浓度变化的情况。

以下介绍用最大泡压法测定表面张力。

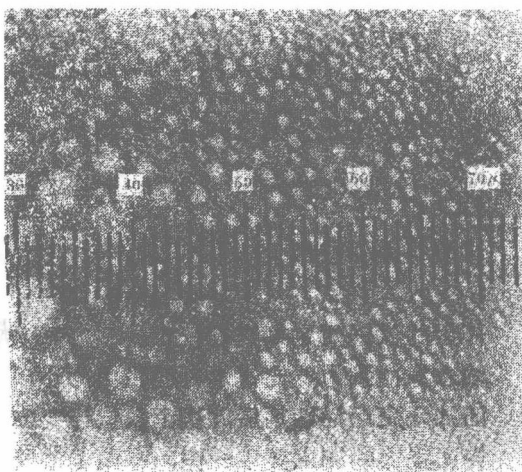


图 5-9 乳状液油珠显微镜下照片

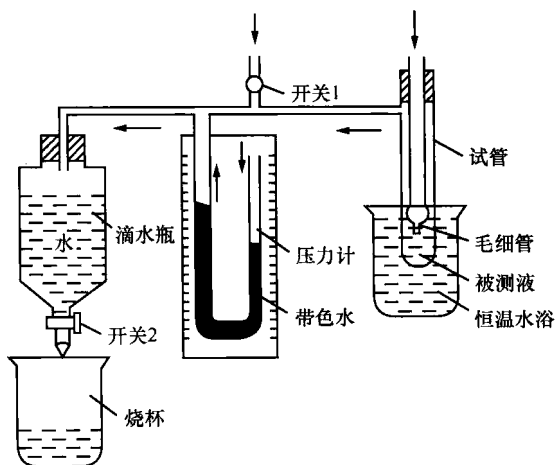


图 5-10 最大泡压法测定表面张力

试验装置如图 5-10 所示，将被测样品装入试管内，放在水浴中保持恒温为 $20 \sim 25^{\circ}\text{C}$ ，将下口内径为 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 的毛细管插入被测液下 1 mm 左右，打开开关 1，调节压力计两侧液面使其处于同一高度，然后关闭开关 1，打开开关 2，使之滴水。由于滴水瓶上部压力降低，使整个系统内压力降低。而毛细管上端又是通大气的，因而在毛细管下端与被测液面接触处即形成气泡。测定时，气泡排出的速度以每分钟不超过 20 个为限。当每个气泡破裂时，系统内外压差达到最大值，可由 U 形管压力计两侧液面的最大高差来表示。

为了便于计算，一般取在某一温度下已知表面张力值的液体（如水在 20°C 时表面张力为 0.073 N/m ）来进行标定，求出仪器常数 K 值。然后根据测得未知液的压差和仪器常数 K ，算出未知液的表面张力。

油水界面张力要比气水表面张力小，如 20°C 时，煤油-水界面张力为 0.048 N/m ，而加入表面活性剂后，这个数值还会降低。

界面张力的测定要难一些，有滴重法及圆环法等，另见有关资料。

第四节 乳状液的破乳问题

一、乳状液的破乳原因

小口径金刚石钻进中使用乳状液冲洗钻孔，往往存在破乳问题。轻度破乳时，乳状液由乳白色变为淡乳白色，即变清了，且在水源箱冲洗液面上形成一层泡沫，中夹岩粉和油，在钻杆或岩心管表面有薄薄一层粘性油泥。严重破乳时，乳状液进入孔内前是正常乳白色，而从孔口返出来则全变为清水，在钻杆或双层岩心管内外有厚厚一层油泥（或叫油垢），甚至造成水路不通和烧钻。此时钻具转速开不上去，或表现工作电流猛增。

关于破乳的原因及其解决的方法，还有不同的看法，一般破乳的原因可从如下几方面来分析。

1. 岩粉对乳化剂的吸附

如图 5-11 所示，几乎大部分亲水岩粉都能吸附阴离子乳化剂，并通过它的非极性端再吸附油。特别是石灰岩、白云岩、炭质页岩等岩粉与乳化剂亲水基的亲合力超过乳化剂亲水基与水的亲合力，因而产生岩粉强烈吸附乳化剂分子的现象。由于乳化剂和油被吸附，因此产生破乳问题。由于这种吸附是对分散度很大，即总表

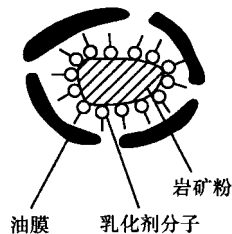


图 5-11 岩粉对乳化剂和油的吸附

面积或比表面很大的岩粉的吸附，其吸附数量是很大的。此外，小口径金刚石钻进时钻具的高速回转，起到强烈的搅拌作用，也会加快这种吸附过程，这是造成破乳的重要原因。这在室内模拟试验中可以得到证实。

产生强烈吸附的岩粉，包括那些容易和阴离子羧酸盐吸附的二价钙、镁矿物的岩石（方解石、萤石、磷灰石、大理岩、石灰岩、白云岩）和含二价以上金属元素（铜、铁、钡、铅）矿物的岩石（黄铁矿、孔雀石、菱铁矿、锰矿、赤铁矿、钨矿等），这和浮选的情况是一致的。在硬水中，这些岩粉的吸附力还要加强，即破乳更为严重。

还有一些岩石矿物的岩矿粉，在软水情况下是不会强烈吸附阴离子乳化剂的（或只有少量吸附），如一般硅酸盐矿物（花岗岩、闪长岩中含石英、长石等矿物），在软水条件下是不会造成严重破乳的。

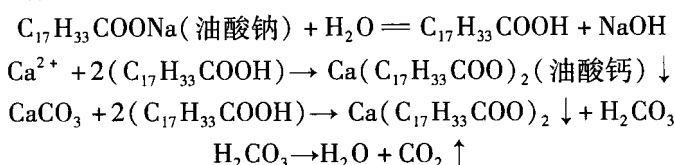
但是，在水质变硬时（如钙离子超过 200×10^{-6} 以上），水中的钙、镁、铁、铝离子会使这些硅酸盐矿物产生表面“活化”。即本来表面带负电亲水的硅酸盐矿物，吸附带正电的二价离子后转变为带正电的表面。因此使它们变为能大量吸附阴离子乳化剂的矿物了，从而造成严重破乳。

这是岩粉性质和水质性质联合影响的结果。如许多现场，当水质较软时，钻进花岗岩、闪长岩中很少破乳现象（少量吸附活性剂还不算破乳），但水质较硬时，情况就完全不一样。如湖北某地勘单位，同样是钻进闪长岩，却产生了严重破乳问题，就是因为其水质较硬， Ca^{2+} 含量达到 200×10^{-6} 左右，引起岩粉活化的结果。

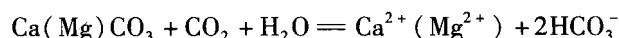
应当说明，如果无岩粉影响，即使水中含 Ca^{2+} 达到 $(200 \sim 400) \times 10^{-6}$ 之间，对一般皂化溶解油也不至于产生严重破乳的。

2. 水质影响

水质很硬时，会产生严重破乳问题。这是由于二价以上的阳离子或钙、镁的碳酸盐存在时，会使脂肪酸钠盐变成钙、镁盐，而产生聚沉，失去乳化作用。其反应式如下。



当水中 CO_2 存在时，会使碳酸盐类岩石在水中溶解，而提供钙、镁离子：



水中 CO_2 越多，溶解 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 也越多。

3. 其他原因

如注水泥后钻水泥塞时，也提供较多钙离子，也会造成严重破乳。而当水泥孔壁固化一定时间后，影响会减少。

二、解决破乳的措施

1. 进行水质的软化工作

软化水的目的是除去水中的钙、镁离子。一般加入纯碱、烧碱、磷酸钠盐等，使之形成钙、镁沉淀，以达到除钙、镁的要求。

其中，用纯碱和磷酸钠盐进行除钙时，pH 值提高不会太大，但要按当量计算好用量。

用烧碱处理，会产生可逆作用，且提高水溶液的 pH 值较快，pH 值过高会使润滑性减弱。

除药物软化水外，还可用高频电场处理（含铁离子少时）及阳离子交换树脂等方法，进行水质处理工作。

2. 碳酸盐岩等岩粉影响的处理

到目前为止，还没有找到很有效的处理方法，用得较多的是采用复合型（阴离子为主，非离子为辅）乳状液。既保持一定润滑性，又防止产生破乳。

如有的地勘单位用聚氧乙烯蓖麻油和十二烷基苯磺酸钠按 1:4 的配比，配成复合型乳化油（乳化剂加量达 20% 左右），稀释成乳状液进行钻进，收到良好效果。也有的单位在皂化油中加入非离子乳化剂（如加入 OP-10 达 1% 左右），可提高抗硬水和抗岩粉破乳的能力。

使用十二烷基苯磺酸钠水溶液钻进灰岩等地层，也收到较好的效果。



复习思考题

1. 什么叫表面活性剂，它有哪些性质和功用？
2. 小口径金刚石钻进对泥浆提出哪些要求？
3. 乳状液破乳的原因是什么，如何解决？

第六章 泥浆在复杂钻孔情况下应用

第一节 孔壁不稳定的机理和对策

孔壁不稳定是指钻进或完井过程中的孔壁坍塌、缩径、地层压裂等三种基本类型(图6-1);前两者造成井径扩大或缩小,后者易造成钻孔漏失。本节主要论述第一、二种孔壁失稳类型的机理和对策,第三种类型将在第二节中阐述。孔壁失稳是钻孔工程中经常遇到的孔内复杂情况之一,严重影响地质资料的获取、钻进速度、质量及成本;部分钻孔还会因孔壁不稳定而无法钻达目的层,延误勘探与开发的速度,影响其经济效益。为了保持孔壁稳定,实现安全钻进,必须搞清孔壁失稳地层的结构特征,孔壁失稳发生的原因以及相关的钻孔工程与泥浆技术措施。

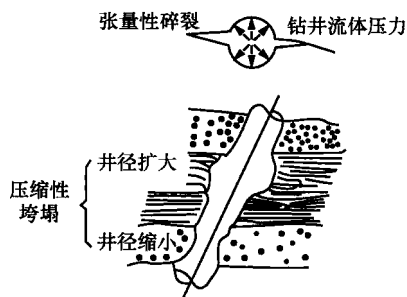


图6-1 孔壁失稳的类型

一、孔壁不稳定地层的类型与孔壁不稳定现象

1. 孔壁不稳定地层的类型

钻孔过程中所钻遇的地层,如泥页岩、砂质或粉砂质泥岩、流砂、砂岩、泥质砂岩或粉砂岩、砾岩、煤层、岩浆岩、碳酸盐岩等均可能发生孔壁不稳定。缩径大多发生在蒙脱石含量高、含水量大的浅层泥岩、盐膏层、含盐膏软泥岩、高渗透性砂岩或粉砂岩、沥青等类地层中。

孔塌可能发生在各种岩性、不同粘土矿物种类及含量的地层中;但严重孔塌往往发生在下述地层中:

- 1) 层理裂隙发育或破碎的各种岩性地层。
- 2) 孔隙压力异常的泥页岩。
- 3) 处于强地应力作用的地区。
- 4) 厚度大的泥岩层。
- 5) 生油层。
- 6) 倾角大易发生井斜的地层等。

2. 孔壁不稳定现象

(1) 孔塌的现象

钻进或完井过程中如发生孔塌会出现以下现象:

- 1) 返出岩粉尺寸增大,数量增多并混杂。

- 2) 泵压增高且不稳定, 严重时会出现憋泵现象, 并可憋漏地层。
- 3) 扭矩增大, 蹩钻严重, 停转盘打倒车。
- 4) 上提钻具遇卡, 下放钻具遇阻; 接单根、下钻下不到孔底, 遇阻划眼, 严重时会发生卡钻或无法划至孔底。
- 5) 井径扩大, 出现糖葫芦孔眼, 测井遇阻卡。

(2) 缩径的现象

当钻进过程中地层发生缩径时, 由于井径小于钻头直径, 会出现扭矩增大、蹩钻等现象, 严重时转盘无法转动, 甚至被卡死; 上提钻具或起钻遇卡, 严重时发生卡钻; 下放钻具或下钻遇阻, 如地层缩径严重, 可使孔眼闭合。

(3) 压裂的现象

当泥浆的循环压力大于地层的破裂压力时, 就会压裂地层, 使地层出现裂缝, 从而导致泵压下降, 泥浆漏入地层, 钻孔中液柱压力下降。如液柱压力降至上部易塌地层的坍塌压力或孔隙压力之下, 就可能发生孔塌或井涌、井喷等孔内复杂情况。

二、孔壁不稳定的原因分析

孔壁不稳定的实质是力学不稳定。当孔壁岩石所受的应力超过其本身的强度就会发生孔壁不稳定。其原因十分复杂, 主要原因可归纳为力学因素、物理化学因素和工程技术措施等三个方面, 但后两个因素最终均因影响孔壁应力分布和孔壁岩石的力学性能而造成孔壁不稳定。

(一) 力学因素

1. 原地应力状态

原地应力状态是指在发生工程扰动之前就已经存在于地层内部的应力状态, 也简称为地应力。它的三个主应力分量是铅垂应力分量、最大水平主应力分量和最小水平主应力分量。

地应力的铅垂应力分量通常称为上覆岩层压力, 主要是由上部地层的重力产生的。水平地应力的大小受上覆岩层压力、地层岩性、埋藏深度、成岩历史、构造运动情况等诸多因素的影响。其中上覆岩层压力的泊松效应和构造应力是主要影响因素。

由于多次构造运动的结果, 在岩石内部形成了十分复杂的构造应力场。根据地质力学的观点, 构造应力大多以水平方向为主, 设两个主构造应力分量分别为 σ'_x 、 σ'_y 。则总的水平主应力分量为上覆岩层压力泊松效应产生的压应力与构造应力之和。

若没有构造运动, 水平地应力仅由上覆岩层压力的泊松效应引起, 为均匀水平地应力状态。一般情况下存在构造运动, 且两个水平主方向上构造应力的大小不等。因此, 在一般情况下, 地应力的三个主应力分量的大小是不相等的。由声发射法、差应变法等室内实验方法和应力释放法、水力压裂法等现场试验方法可以确定出地应力的大小和方向。

2. 地层被钻开后所引起的孔眼围岩应力状态的变化

地层被钻开之前, 地下的岩石受到上覆压力、水平方向地应力和孔隙压力的作用, 孔壁处的应力状态即为原地应力状态, 且处于平衡状态。孔隙压力指地下岩石孔隙内流体压力。在正常沉积环境中, 地层处于正常的压实状态, 孔隙压力保持为静液柱压力, 即为正

常地层压力，压力系数为 1.0。在异常的压实环境中，当孔隙压力大于正常地层压力时称为异常高压地层，压力系数大于 1.0。当孔眼被钻开后，地应力被释放，孔内泥浆作用于孔壁的压力取代了所钻岩层原先对孔壁岩石的支撑，破坏了地层和原有应力的平衡，引起孔壁周围应力的重新分布。进一步的研究表明，孔眼围岩的应力水平与孔眼液柱压力有关。若泥浆密度降低，孔眼围岩差应力（径向应力减小，切向应力增大）水平就升高。当应力超过岩石的抗剪强度时，就要发生剪切破坏（对于脆性地层就会发生坍塌，井径扩大；而对于塑性地层，则发生塑性变形，造成缩径）。相反地，当泥浆密度升至一定值后，孔壁处的切向应力就会变成拉应力，当拉伸应力大于岩石的抗拉强度时，就要发生拉伸破坏（表现为钻孔漏失）。

3. 造成孔壁力学不稳定的原因

钻孔过程中保持孔壁处于力学稳定的必要条件是泥浆液柱压力必须大于地层坍塌压力，且泥浆的实际当量密度低于与地层破裂压力对应的当量泥浆密度。坍塌压力是指孔壁发生剪切破坏的临界孔眼压力，此时的泥浆密度称为坍塌压力的当量泥浆密度。钻孔过程中孔壁出现力学不稳定而造成孔塌的主要原因可归纳为以下几个方面：

（1）钻进坍塌地层时泥浆密度低于地层坍塌压力的当量泥浆密度

孔壁不稳定包括缩径与孔壁坍塌，其实质是力学问题。孔隙压力异常不仅发生在矿层中，而且在我国大量所钻遇的泥页岩地层中也较普遍地存在。在地应力作用地区，非均质的地应力对孔壁稳定会产生很大的影响。长期以来，地质部门设计泥浆密度均依据所钻遇流体层时的压力系数，而未考虑易坍塌地层可能存在异常孔隙压力与地应力，以及所造成的高地层坍塌压力对孔壁稳定的影响。在实际钻孔过程中，同一裸眼孔段部分地层的坍塌压力往往大于流体层的孔隙压力。因此，依据地质设计所确定的泥浆密度在高坍塌压力地层钻进时，钻孔中泥浆液柱压力就不足以平衡地层坍塌压力（对盐膏层和含盐膏泥岩则为发生塑性变形的压力），就会造成所钻地层处于力学不稳定状态，引起孔壁坍塌。

（2）起钻时的抽吸作用造成作用于孔壁的泥浆压力低于地层坍塌压力

在起钻过程中，由于未及时回灌泥浆、泥浆塑性粘度和动切力过高以及起钻速度过快等都会产生高的抽吸压力。这种抽吸作用使泥浆作用于孔壁的压力下降，当其低于地层坍塌压力时就会发生孔塌。此外，在裸眼孔段，如果所钻的上部地层中存在大段含蒙脱石或伊-蒙无序间层的泥岩，而在钻进下部地层时，如钻头在孔内工作时间过长（超过两天以上）又没有起下钻，则含蒙脱石或伊-蒙无序间层的泥岩就会吸水膨胀而造成井径缩小，起钻至此孔段则发生“拔活塞”，环空灌不进泥浆，从而产生很大的抽吸压力并形成负压差，严重时便会抽塌下部地层。

（3）井喷、井涌或钻孔漏失导致钻孔中液柱压力低于地层坍塌压力

钻孔过程中如发生井喷、井涌或钻孔漏失，均会造成钻孔中液柱压力下降。当此压力小于地层坍塌压力时，就会出现孔塌。

（4）泥浆密度过低不能控制岩盐层、含盐膏软泥岩和高含水软泥岩的塑性变形

当岩盐层、含盐膏软泥岩和高含水的软泥岩等地层被钻开后，如所使用的泥浆密度过低，就会发生塑性变形。由于上述地层均是具有塑性特点的地层，当其埋藏较深而被钻穿后，它们的高度延展性能几乎可以传递上覆地层的全部覆盖负荷的重量。若当时的泥浆液柱压力不足以控制住这种作用时，就会引起塑性变形，使井径缩小，这就是上述岩层所具

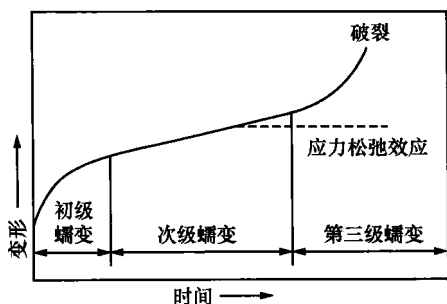


图 6-2 岩石的广义蠕变曲线

有的蠕变特性。所谓蠕变是指材料在恒应力状态下，变形随时间而逐渐增大的一种特性。通常岩石的弹性变形也会引起缩径，但弹性变形的时间较短，且变形量小。岩盐在深部高温高压作用下，由于具有蠕变特性，即使孔壁上的应力仍处于弹性范围，也会导致孔眼随时间而逐渐缩小。根据国内外对岩盐蠕变的研究，可将其分为以下三个阶段（图 6-2）：

1) 初始蠕变（又称过渡蠕变）。此阶段岩石初始蠕变速率很高，随后速率变缓。其原因是应变硬化速度大于材料中晶粒的位错运动速度。

2) 次级蠕变（又称稳态蠕变）。此阶段硬化速度和位错速度达到平衡。对于岩盐层，孔眼的收缩是最重要的蠕变阶段。

3) 第三阶段蠕变（又称不稳定蠕变）。当应力足够大时，会在晶粒界面及矿物颗粒界面发生滑动，这一变形的结果使蠕变曲线向较大变形的一侧反弯，进入不稳定状态，最后使晶界松散、脱落，导致材料的破裂。

一般认为，岩盐层的塑性变形在低温状态是以晶层滑动为主，而在高温下则在滑动面出现多边形结构和再结晶。由于岩盐层的塑性变形（蠕变）引起孔眼缩径，常导致起下钻遇阻卡、卡钻。岩盐层的蠕变或塑性变形是钻进该类地层时造成孔内复杂情况的一个重要原因。

此外，盐膏层中的泥岩即使在上覆盖层压力与井温作用下，粘土表面所吸附的四层水会逐渐被挤出成为孔隙水。由于泥岩表面吸附水的密度可高达 $1.40 \sim 1.70 \text{ g/cm}^3$ ，故当这些层间水变为孔隙水时，体积约增大 $40\% \sim 70\%$ 。若泥岩被盐层所封闭，而盐层不具备渗透性能，水无处可排，因而会导致在两个盐层之间的泥岩孔隙中形成异常压力带。钻开此类地层时，如果泥浆液柱压力低于此类泥岩发生塑性变形的压力，泥岩就会缩径，导致孔内复杂情况。由于此类泥岩含盐，盐在高温高压下所发生的塑性变形亦会对含盐泥岩带来影响。因此，盐膏层塑性变形不仅发生在岩盐中，而且还会发生在含盐泥岩中。

(5) 泥浆密度过高

钻进过程中，如所采用的泥浆密度过高，大大超过地层孔隙压力，就会对孔壁形成较大的压差，从而会有更多的泥浆滤液进入地层，加剧地层中粘土矿物水化，引起地层孔隙压力增加及围岩强度降低，最终导致地层坍塌压力增大。当坍塌压力的当量密度超过泥浆密度，孔壁就会发生力学不稳定，造成孔塌。特别是在钻进高破碎性地层时，如所使用的泥浆密度合适，则围绕孔壁的应力集中，闭合了所有的径向接合面，因此封闭了孔壁，泥浆不能进入到裂隙网内；但如果泥浆密度增高并超过了临界值，径向接合面逐渐由闭合状态变为开启状态，与此同时切向接合面闭合。此时由于泥浆进入，引起地层孔隙压力增高，一部分裂隙网变得易被泥浆侵入，相应的结合面被增压，单元变得松散，这样岩石就容易受到泥浆和孔底钻具组合的冲击而坍塌。由上述原因所引起的孔壁不稳定大多发生在深部地层，与岩性关系不大。

(二) 物理化学因素

1. 地层的岩性

孔壁不稳定可以发生在各种岩性的地层中。一般来讲,岩石均由非粘土矿物(如石英、长石、方解石、白云石、黄铁矿等)、晶态粘土矿物(如蒙脱石、伊利石、伊-蒙间层、绿泥石、绿-蒙间层、高岭石等)和非晶态粘土矿物(如蛋白石等)所组成,但不同岩性地层所含的矿物类型和含量不完全相同。对孔壁稳定性产生影响的主要组分是地层中所含的粘土矿物。

2. 泥浆滤液对地层的侵入

当地层被钻开后,在钻孔中泥浆与地层孔隙流体之间的压差、化学势差(取决于泥浆与地层流体之间的活度差和地层的半透膜效率)和地层毛细管力(取决于岩石的表面性质)的驱动下,泥浆滤液进入孔壁地层,引起地层中粘土矿物水化膨胀,导致孔壁不稳定。

通过大量室内试验,目前已证实在使用水基泥浆时,低渗透泥页岩表面的确存在着非理想的半透膜,但其膜效率低于1。其值高低取决于泥浆的组成、地层的渗透率和孔喉尺寸,并随泥浆与岩石接触时间增长而降低。盐水的膜效率仅为1%~10%,聚合醇类水基泥浆具有较高的膜效率。

3. 粘土的水化

地层中的粘土矿物与水接触发生水化膨胀是由两种水化所造成,即表面水化和渗透水化。

(1) 影响水化的因素

影响地层水化作用的主要因素有以下方面:

1) 地层中粘土矿物及其可交换阳离子的类型和含量。由于各种粘土矿物的组构特征不同,其可交换阳离子组成亦各不相同,因而其水化膨胀程度差别很大。如蒙脱石的阳离子交换容量高,易水化膨胀,分散度也较高;而高岭石、绿泥石、伊利石都属于低膨胀型粘土矿物,不易水化膨胀。同种粘土矿物,当其交换性阳离子不同时,水化膨胀特性也不相同,如钠土的膨胀比钙土、钾土大得多。各种粘土矿物膨胀能力的顺序如下:蒙脱石>伊-蒙间层矿物>伊利石>高岭石>绿泥石。

由此看来,地层的水化作用强弱,主要取决于地层中所含粘土矿物及其可交换阳离子的类型及含量。此外,由于地层中非晶态粘土矿物的类型及含量会影响阳离子交换容量的大小,因此它们对地层水化作用亦有较大的影响。

2) 粘土晶体的部位。粘土晶体所带的负电荷大部分集中在层面上,因而吸附的阳离子较多,形成的水化膜较厚;而粘土晶片端面上的带电量较少,故水化膜较薄。

3) 地层中所含无机盐的类型及含量。如地层中含有石膏、氯化钠和芒硝等无机盐,则会促使地层发生吸水膨胀。当地层中含有无水石膏时,由于密度为 2.9 g/cm^3 的 CaSO_4 能通过吸水转变为密度为 2.3 g/cm^3 的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,其体积增加约26%,因而含膏泥岩的膨胀性与其中无水石膏含量有密切关系。

含氯化钠的泥岩的初始膨胀率较高,在5~7 h达到最大值。随着盐的溶解,膨胀率反而下降。

4) 地层中层理裂隙发育程度。地层中存在着层理裂隙,部分微细裂缝在孔内高有效应力作用下会发生闭合。但当与水接触时,水仍然会沿着这些微裂缝而进入,引起地层水

化膨胀。地层中层理裂隙越发育，水越容易沿层理裂隙进入地层深处，使孔壁周围地层中的粘土矿物发生水化，因而孔壁也更容易坍塌。

5) 温度和压力。流体进、出泥页岩是受泥页岩和流体的偏摩尔自由能之差来控制的，而偏摩尔自由能的大小与温度和压力有关。因此，温度和压力对泥页岩的水化膨胀会产生一定影响。随着温度升高，粘土的水化膨胀速率和膨胀量都明显增高。压力增高可抑制粘土水化膨胀。各种粘土矿物的膨胀率均随预负荷或孔眼压力的增大而急剧下降。

6) 时间。粘土水化膨胀随地层中的粘土矿物与泥浆滤液接触时间的增长而加剧。

7) 泥浆的组成与性能。泥浆中所含有机处理剂和可溶性盐的类别及含量、滤液的 pH 值等均会影响粘土的水化膨胀。

(2) 地层水化膨胀对孔壁稳定的影响

钻孔过程中，泥浆与孔壁地层之间的接触会产生非常复杂的物理化学作用。概括起来，泥浆对地层的影响主要表现在以下两个方面：

1) 孔隙压力升高。泥浆滤液进入地层后，由于压力传递和滤液与地层粘土矿物之间通过水化作用产生水化应力，均会引起孔壁地层孔隙压力的升高。

2) 近孔壁地带地层力学性质发生变化。泥浆滤液进入地层后，会引起地层中含水量升高，从而导致地层的力学性质发生一系列的变化。如弹性模量 E 随地层含水量的增大而急剧降低；泊松比值随地层含水量的增大而增加（图 6-3）；地层的强度参数粘聚力 C 和内摩擦角则随地层含水量的增大而下降（图 6-4 和图 6-5）。

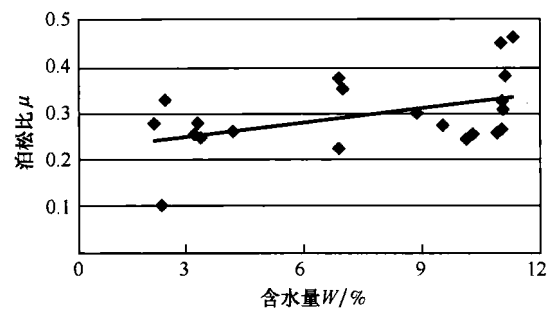


图 6-3 含水量对泥页岩泊松比值的影响

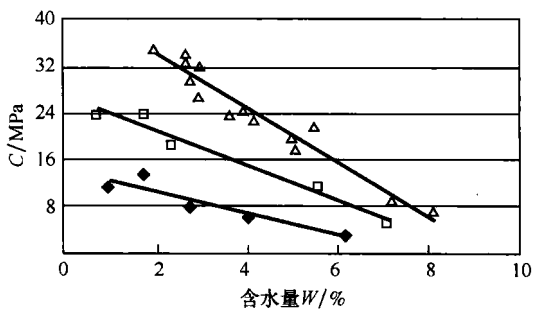


图 6-4 含水量对泥页岩粘聚力的影响

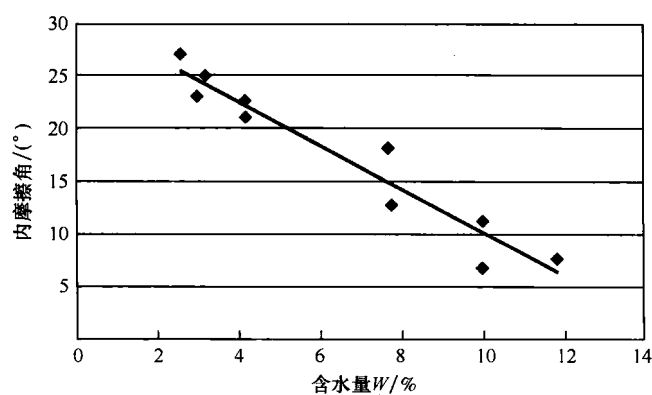


图 6-5 含水量对泥页岩内摩擦角的影响

综上所述，由于地层中所含的粘土矿物吸水发生水化膨胀，产生水化应力，改变了钻孔周围地层的孔隙压力与应力分布，从而引起井壁岩石强度降低，地层坍塌压力发生变化。当孔壁岩石所受到的周向应力超过岩石的屈服强度时，就会发生孔壁不稳定。因此可以说，孔壁不稳定是物理化学因素与力学因素共同作用导致的结果。

（三） 钻孔工程措施

钻孔工程措施也是影响孔壁稳定性的一个重要因素，其影响可归纳为以下几个方面：

1) 孔内压力激动过大。钻进过程中，如果起下钻速度过快、泥浆静切力过大、开泵过猛、钻头泥包等原因，均可能发生强的抽吸作用，产生过高的抽吸压力（表 6-1），从而降低泥浆作用于孔壁的压力，造成孔塌。

表 6-1 抽吸压力与孔深、泥浆性能、起钻速度的关系

孔深/m	钻头直径 mm	φ165 mm 钻铤长度/m	φ127 mm 钻杆长度/m	塑性粘度 mPa·s	动切力/Pa	起钻速度 m·s ⁻¹	抽吸压力 MPa
1200	216	190	1010	25	14.36	0.269	0.62
		190	1010	10	4.78	0.269	0.21
		190	1010	25	14.36	1.495	1.57
		190	1010	10	4.78	1.495	0.56
2500	216	190	2310	20	9.57	0.268	0.76

2) 孔内液柱压力大幅度降低。钻进过程中如果发生井喷、井涌、钻孔漏失或起钻没灌满泥浆均可能造成孔内液柱压力大幅度下降，造成孔壁岩石受力失去平衡而导致孔塌。

3) 泥浆对孔壁的冲蚀作用。如果泥浆环空返速过高，在环空形成紊流，则会对孔壁产生强烈的冲蚀作用。此作用随环空返速增大而加剧。对于含大量蒙脱石或伊-蒙无序间层且成岩程度低、胶结差的软泥岩，钻进过程中会因吸水膨胀而造成井径缩小，此时若提高环空返速，采用紊流钻进，及时冲刷掉缩径的岩石，使井径不至于小于钻头直径，可有效地防止缩径卡钻。但是，当钻进破碎性地层或层理裂隙发育的地层时，如果泥浆的环空返速过高导致形成紊流，则对孔壁的冲刷力有可能超过被泥浆浸泡后的岩石强度，这时就会造成孔壁坍塌。

4) 井身质量不好。如孔眼方位变化大，弯曲度过大，易造成应力集中，加剧孔塌的发生。

5) 对孔壁过于严重的机械碰击。钻进易塌地层时，如转速过高、起钻用转盘或拧管机卸扣，由于钻具剧烈碰击孔壁，从而加速孔塌。

综上所述，在钻进过程中，如果影响孔壁稳定性的一些工程措施不当，有可能降低泥浆作用在孔壁上的压力和岩石强度，导致孔壁不稳定。

三、 稳定孔壁的技术措施及其确定方法

1. 稳定孔壁的技术措施

根据上面对孔壁不稳定的原因分析，目前已在实践中总结出各种稳定孔壁的技术措

施。这些措施可归纳为以下两个方面。

(1) 选用合理的泥浆密度, 保持孔壁力学稳定

为了保持孔壁稳定, 必须依据所钻地层的坍塌压力与破裂压力来确定泥浆密度, 保持孔壁处于力学稳定状态, 防止孔壁发生坍塌或塑性变形。

对于脆性地层 (包括泥页岩、岩浆岩、灰岩等), 依据库仑-摩尔强度准则推导出保持孔壁稳定所需泥浆密度的计算式为:

$$\rho_m = \{ \eta(3\sigma_{h1} - \sigma_{h2}) - 2CK + \alpha p_p(K^2 - 1)/(K^2 + \eta)H \} \times 100 \quad (6-1)$$
$$K = \cot(45^\circ - \phi/2)$$

式中: H 为孔深, m; ρ_m 为泥浆密度, g/cm^3 ; C 为岩石的粘聚力, MPa; η 为应力非线性修正系数; σ_{h1} 为最大水平地应力, MPa; σ_{h2} 为最小水平地应力, MPa; p_p 为孔隙压力, MPa; α 为有效应力系数; ϕ 为内摩擦角。

上式中地层的力学参数 C 、 ϕ 值可用声波、密度和伽马测井资料进行计算, 亦可用岩心的三轴应力试验进行测定; 地应力可用现场水力压裂试验或室内利用岩心进行加载观察声发射的凯塞效应法来求得。利用上式, 可以计算出地层坍塌压力, 并绘制出地层的坍塌压力剖面。

从式 (6-1) 可以看出, 地层的坍塌压力主要与以下因素有关:

1) 地应力的影响。由于地质构造运动等原因使地壳物质产生内应力效应, 这种应力则称为地应力。地应力大小通常可用三个主地应力 (上覆地层压力、最大水平主地应力和最小水平主地应力) 来表示。地应力是造成孔壁岩石破坏的根本力量。孔壁总是沿着最小地应力方向坍塌, 其坍塌压力不仅与地应力大小有关 (随地应力的增大而增大), 而且与地应力的非均匀性有关, 一般总是随着地应力非均匀系数 K ($K = \sigma_{h1}/\sigma_{h2}$) 的增加而增大。

2) 地层强度的影响。地层坍塌是由于孔壁岩石所受到的应力超过岩石强度而引起的, 因而坍塌压力与地层强度密切相关。地层的坍塌压力随地层的强度系数 (即岩石的粘聚力) 和内摩擦角的增大而下降。

3) 孔隙压力的影响。地层的坍塌压力与破裂压力均随着孔隙压力的增加而增大, 但破裂压力的增长速度小于坍塌压力。因此, 随着孔隙压力的增加, 安全钻进的泥浆密度范围变小。

4) 地层渗透性的影响。如是渗透性地层, 泥浆就会向地层渗透而产生渗透压力, 导致孔壁周围的孔隙压力发生变化, 从而引起地层的坍塌压力增大。

5) 井径扩大率的影响。由于式 (6-1) 用于计算维持孔壁稳定所需的泥浆密度, 即假定地层不会发生任何程度的坍塌。如在实际钻孔过程中, 允许地层有一定程度的坍塌, 则所需的泥浆密度可适当降低。

6) 地层破碎程度的影响。地层层理裂隙越发育或越破碎, 则泥浆越容易进入, 且进入深度亦越大。因此, 破碎程度高的地层往往坍塌压力更高, 孔壁更容易坍塌。

7) 井斜角和方位角的影响。当 $\sigma_{h1} > \text{上覆应力} > \sigma_{h2}$ 时, 随着井斜角增大, 坍塌压力减小, 破裂压力增大; 如 $\text{上覆应力} > \sigma_{h1} > \sigma_{h2}$, 则随着井斜角增大, 坍塌压力增大, 而破裂压力减小。坍塌压力随方位角的增大而增大, 但当井斜角为 90° 时, 则坍塌压力随方位角增大而先增大, 然后又略为下降。

8) 泥浆的组成和性能的影响。泥浆的组成和性能对地层的坍塌压力影响很大, 这种影响将在影响孔壁稳定的物理化学因素中讨论。

(2) 优选防塌泥浆类型与配方, 采用物理化学方法来阻止或抑制地层的水化作用
采用物理化学方法来阻止或抑制地层的水化作用的主要技术措施有:

- 1) 提高泥浆的抑制性;
- 2) 用物理化学方法封堵地层的层理和裂隙, 阻止泥浆滤液进入地层;
- 3) 提高泥浆对地层的膜效率, 降低泥浆活度使其等于或小于地层水的活度;
- 4) 提高泥浆滤液的粘度, 降低泥浆高温高压失水量和泥饼渗透率, 尽量减少泥浆滤液进入地层的量等。

上述措施可通过优选泥浆类型和配方来实现。国内外常用的防塌泥浆有以下几种类型: 油基(或油包水)泥浆、饱和盐水泥浆、KCl(或KCl聚合物)泥浆、钙处理泥浆、聚合物(包括聚丙烯酰胺、钾铵基聚合物、两性离子聚合物、阳离子聚合物、聚磺等)泥浆、硅基(或稀硅酸盐)泥浆和聚合醇(或多元醇)泥浆等。

防止孔塌还必须有合理的钻进技术措施, 否则仍然不能使孔壁保持稳定。主要应采取的技术措施包括: 确定合理的孔身结构与孔内钻具结构; 选择合理的泵量, 根据地层特点确定环空流型与返速; 根据地层特点确定各孔段起下钻速度, 起钻过程中及时灌泥浆; 坚持短起下钻, 钻头在孔内工作时间不超过24 h; 尽量不在坍塌孔段中途开泵循环, 不用喷射钻头划眼, 起钻至坍塌孔段, 不用转盘卸扣; 钻至可钻性级别低的极软、软地层、盐层、煤层等类地层时, 应根据孔眼尺寸和环空返速来控制钻速; 对于中深和深孔段, 应尽可能提高钻速, 以降低泥浆浸泡易坍塌孔段的时间等。

2. 稳定孔壁技术措施的确定方法

根据所钻地层特点确定稳定孔壁技术措施的一般程序和方法如下:

1) 作为基础工作, 首先应对所设计区块易发生孔壁不稳定地层的矿物组分、理化和组构特征、地层孔隙压力、坍塌压力、破裂压力和漏失压力等进行比较系统的测试和分析。

2) 在深入调研该地区所发生过的各种孔内复杂情况或事故、钻孔技术措施和泥浆使用情况的基础上, 综合分析该地层可能出现孔壁不稳定的原因及应采取的对策。

3) 利用坍塌层的岩心或岩屑进行室内试验, 采用前面所介绍的各种方法评价泥浆对孔壁不稳定地层的膨胀性、分散性、强度、封堵性能、HTHP失水量和泥饼渗透率等性能的影响, 在以上试验基础上优选稳定孔壁的泥浆类型、配方和性能, 综合评价泥浆稳定孔壁的效果。

4) 确定稳定孔壁的技术措施。首先依据坍塌压力、破裂压力和地应力等三个压力剖面确定合理的泥浆密度, 以保持地层处于力学稳定状态; 然后再根据地层矿物组分、组构特征、已钻孔情况、室内试验结果等来确定与易坍塌地层特性相配伍的泥浆类型、配方和相应的工程技术措施。必须将优选泥浆类型、配方、性能与优选裸眼钻进时间、套管程序、钻孔参数、工艺措施等因素结合起来综合考虑。此外, 还需考虑所选择的技术措施的可行性和经济合理性, 以及是否符合环保要求等。

第二节 防漏与堵漏

钻孔漏失是在钻孔、固井、测试等各种孔内作业中,各种工作液(包括泥浆、水泥浆、完井液及其他流体等)在压差作用下漏入地层的现象。泥浆漏失是钻孔作业中的一种常见的孔内复杂情况。钻孔漏失可以发生在浅、中及深层中,也可以在不同的年代地层如从第四系直到古生界中发生,而且各类岩性的地层中都可能出现。一旦发生漏失,不仅延误钻进时间,损失泥浆,损害矿层,干扰地质测井等工作,而且还可能引起孔塌、卡钻、井涌、井喷等一系列复杂情况与事故,甚至导致孔眼报废,造成重大的经济损失。因此,在钻进过程中应尽量避免井漏发生。

一、钻孔漏失发生的原因及分类

为了提高防漏、堵漏技术的科学性,必须搞清易漏失地层的特征、影响漏失的因素以及漏层的分类。

(一) 易漏失地层的特征

各类岩性的地层均可以发生钻孔漏失。研究漏失地层特征必须搞清漏失地层中漏失通道的形成原因、基本形态和分布规律。

1. 漏失通道的形成

漏失通道按其形成原因可分为两类,一类是自然漏失通道,另一类是人为漏失通道。

(1) 自然漏失通道

一般来讲,泥页岩不容易发生钻孔漏失,但一些埋藏久远的地层的泥页岩,因构造运动形成的裂缝、因风化作用形成的溶孔及其他层间疏松的通道,易发生钻孔漏失;中深孔段和深孔段的泥页岩因成岩作用(脱水收缩)、异常高压和构造运动而形成裂缝,但这种裂缝长度短,宽度小,最大宽度0.5 mm左右,一般为0.05~0.1 mm,不易形成漏失通道,但也有时因裂缝发育,宽度较大,有可能形成漏失通道。

砂砾岩地层的漏失通道按其成因可分为三类。一是浅层、中深孔段未胶结或胶结差的未成岩的砂砾层,其漏失通道主要是大孔隙。由于其连通性好,渗透率高(可达 $10\text{ }\mu\text{m}^2$ 以上),因而易发生漏失;二是中、高渗透砂砾岩,其漏失通道为孔隙型;三是中深孔段、深孔段经成岩作用形成的低孔、低渗的砂砾岩。其漏失通道主要为裂缝型。其裂缝是由于在构造应力作用下,砂砾岩出现破裂而形成的构造裂缝。

石灰岩和白云岩是碳酸盐岩的主要岩石类型,其漏失通道主要是成岩作用与构造运动作用所形成的溶孔、溶洞、较大的裂缝和碳酸盐沉积颗粒所形成的原生孔隙等。

火成岩以熔岩为主,最主要的是玄武岩和安山岩,其次是英安岩、粗面岩、流纹岩和少数火山岩及脉岩类,相伴生的是火山碎屑岩及火山碎屑沉积岩类。火山岩由于岩浆喷发、溢流、结晶、构造运动和风化作用等因素,在熔岩内形成发育的孔隙和裂缝,构成了易发生漏失的通道。

古生代、太古宙、元古宙的变质岩因受变晶、构造运动、物理风化和化学淋溶形成裂缝和孔隙构成漏失通道。

(2) 人为漏失通道

人为漏失通道主要是指诱导裂缝。诱导裂缝又分为两种，一种是由于施加的外力大于地层岩石的破裂压力，造成岩石破碎而形成的裂缝，另一种是外力使天然闭合裂缝开启而形成的裂缝。

地层破裂压力是指在某一地层深度，孔内泥浆液柱压力升高到足以压裂地层，使其原有裂缝张开或形成新的裂缝时的孔内流体压力。地层破裂压力与地层深度之比称为地层破裂梯度。

2. 漏失通道的基本形态

漏失通道的基本形态主要有孔隙型、裂缝型、洞穴型、孔隙裂缝型和洞穴裂缝型等五种类型，后两类是前三类的交叉，如图 6-6 所示。

孔隙型漏失通道是以孔隙为基础，由喉道连接而成的不规则的孔隙体系。孔隙可按其尺寸分为大、中和小，喉道可分为粗、中细和微细。

裂缝型通道的形态具有以下特点：

1) 裂缝在地层中的分布和发育极不均匀，其形状可以是直线，也可以是曲线和波浪形；其表面可以是光滑的，亦可以是粗糙的；裂缝段长可以从几米到几十米。

2) 裂缝在地层中可能以张开状态存在，亦可能以闭合状态存在。按张开裂缝的开度大小，可将裂缝分为大、宽、中、小、细、微细和毛细管裂缝等类别；裂缝按倾角大小可分为垂直裂缝、斜交裂缝、水平裂缝和网状裂缝；裂缝按其成因又可分为构造裂缝和非构造裂缝。裂缝在形成或张开的同时，常常被各种物质所充填。充填物可以是方解石、石英、白云石、泥质和炭质等；按其充填程度可分为无充填、不完全充填和完全充填等类别。

3) 裂缝可分布在各种岩性的地层中，构造裂缝的形成和发育程度主要取决于构造应力场、地层岩性及岩相等。与断层有关的构造裂缝，其发育程度和宽度与断层性质、规模、断距及地层离断层距离等因素有关；一般在断层附近裂缝发育，且宽度大；断距越大裂缝越发育，断层上盘一般比中、下盘裂缝发育。诱导裂缝可以发生在各种岩性地层中，通常沿最大地应力方向发育，大多为垂直裂缝。

洞穴的形态也极不规则，且大小和长度不等。小的可小至 0.2 m，大的可达十几米；洞穴呈网状交织分布，没有明显主通道，也没有固定的延伸方向；洞穴常分布在碳酸盐岩地层中，部分洞穴中有水流，会给堵漏施工带来较大困难。

(二) 发生钻孔漏失的原因

钻孔漏失的发生一般应具备以下必要条件：钻孔对于地层存在正压差，即钻孔中工作液的压力大于地层孔隙、裂缝或溶洞中液体的孔隙压力。并且，地层中存在着漏失通道和

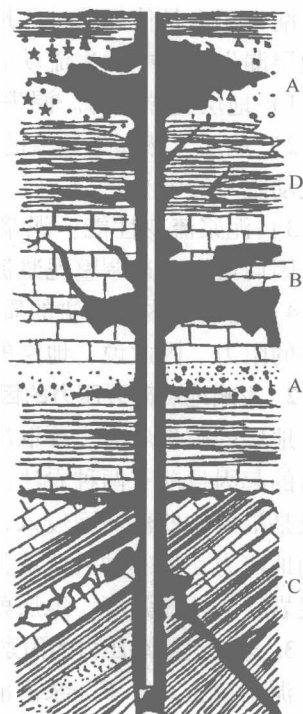


图 6-6 漏失通道的基本形态

A—渗透性很强的非胶结孔隙型地层；
B—孔洞和洞穴地层；C—断层和天然
的裂缝性地层；D—诱导裂缝

较大的足够容纳液体的空间，此通道的开口尺寸应大于外来工作液中固相的粒径。

因此，在钻进和完井过程中，当出现以下两种情况时均会发生钻孔漏失。第一种情况是，当地层存在天然漏失通道时，钻孔中泥浆作用于孔壁的动压力超过地层的漏失压力，即发生钻孔漏失；另一种情况是，当动压力大于地层的破裂压力时，先压裂地层，形成新的漏失通道，然后发生漏失。为了进一步搞清钻孔漏失发生的原因，需分析影响地层漏失压力、破裂压力和动压力的各种因素。

1. 影响地层漏失压力的因素

漏失压力是使泥浆进入地层漏失通道所需的最低压力，其值等于地层孔隙压力与泥浆在地层漏失通道中发生流动的压力损耗之和。漏失压力与以下因素有关：

1) 地层孔隙压力。漏失压力随地层孔隙压力的增大而增高。

2) 地层天然漏失通道的大小、形态及漏层厚度。该因素直接关系到泥浆在漏失通道中流动阻力的大小。

3) 泥浆流变性能。泥浆进入漏失通道的阻力随泥浆塑性粘度、动切力的增加而增大，因而可以通过调整泥浆流变性能来提高地层的漏失压力，防止钻孔漏失的发生。

4) 漏失层内外泥饼的质量。对于孔隙性地层，当泥浆进入漏层时，必须克服内、外泥饼的阻力。因此说，地层的漏失压力随泥饼质量的改善而增高。

2. 影响地层破裂压力的因素

地层的破裂压力主要取决于地层的岩石力学性质和所受地应力的大小。对于地层破裂压力的起因目前有两种看法。一种看法认为地下岩石中存在着层理、节理和裂缝，孔内流体只是沿着这些薄弱面侵入，使其张开，因此使裂缝张开的流体压力只需克服垂直于裂缝面的地应力，另一种看法认为孔内流体压力增大会改变孔壁上的应力状态，当此应力超过地层岩石的抗拉强度，地层就会发生破裂。

3. 影响泥浆动压力的因素

泥浆动压力等于泥浆静液柱力、循环时的环空压耗和所产生的激动压力之和。显然，动压力的大小与以下因素有关：

1) 泥浆静液柱压力。此压力随泥浆密度增加而增大。

2) 泥浆的环空压耗。动压力随泥浆环空压耗增加而增大。

3) 泥浆的激动压力。动压力随泥浆激动压力增加而增大，激动压力取决于开泵泵压、泥浆静切力及静止时间长短、起下钻速度等因素。

对某一特定钻孔，只有在全面分析上述各影响因素基础上，才能确定发生钻孔漏失的主要原因，并采取有针对性的技术对策防止漏失的发生。

(三) 漏失的分类

漏失在各种岩性的地层中均可能发生，如粘土岩、砂砾岩、碳酸盐岩、岩浆岩、变质岩等。发生钻孔漏失的直接表征是泥浆的损失，并且具有一定的漏失速度。但钻孔漏失的特征还与地下孔、缝的性质、孔壁上的漏失面积、泥浆性能和压差等多种因素有关。因此，只有搞清漏层的特征，将漏层按一定方式进行分类，才能确定正确的处理方法。漏层的分类方法很多，这些方法分别从不同的侧面反映漏失的规律。下面仅介绍现场常用的按漏速和漏失地层通道的分类法。

(1) 按漏速分类

按漏速可将漏失分为五类，见表 6-2。对于孔隙型地层，其中微漏和小漏又可称为渗滤性漏失，中漏和大漏又可称为部分漏失，全部失返的情况则称为完全漏失。漏速十分容易测定，依据它可以较直观地了解漏失的严重程度。

表 6-2 按漏速进行分类的准则

漏失级别	1	2	3	4	5
漏速/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	< 10	10 ~ 20	20 ~ 50	> 50	全部失返
程度描述	微漏	小漏	中漏	大漏	严重漏失

(2) 按漏失地层通道分类

按漏失通道形成的原因可将其分为自然漏失通道和人为漏失通道两大类。按漏失通道的形状又可将其分为孔喉、裂缝、洞穴及混合型。

二、确定漏层的方法

确定漏层的位置是堵漏措施中一个非常重要的环节，确定漏层的方法有以下几种。

(1) 观察钻进情况

通过钻进时凭经验观察，可以判断天然裂缝、孔隙或洞穴地层一类漏层的位置。例如，当钻开天然裂缝性岩层时，泥浆通常会突然漏失，并伴随有扭矩增大和蹩跳钻现象。如上部地层没有发生过漏失，则此现象便是漏层在孔底的可靠显示。

(2) 观察岩心和岩粉情况

通过对岩心的观察，可以了解地层的倾角、接触关系、孔隙、溶洞、裂隙及断层等的发育情况；通过岩心收获率可以判断地层的破碎程度；通过对这些观察结果的综合分析，可以了解漏失通道情况，判断漏层层位。

(3) 观察泥浆性能的变化情况

泥浆性能的变化通常能反应孔底岩石性质。以此来判断漏层位置。

(4) 综合分析钻孔过程中的各种资料

综合分析钻孔过程中钻孔参数、泥浆性能、地层压力、地层破裂压力、地质剖面、岩性、原来曾漏失过层位重漏的可能性、附近同层段钻孔情况等资料，判断漏失的位置。

(5) 水动力学测试

采用正反循环测试、从钻杆内外同时泵注泥浆测试、钻孔漏失前后泵压变化测试、最优分割和两分法、立管压力变化测试、注轻泥浆等方法来确定漏失的准确位置。

(6) 仪器测试法

使用专门仪器，通过测试井温、声波、电阻、流量、放射性示踪元素等来判断漏失的位置。

三、钻孔漏失的预防

对付钻孔漏失应坚持以预防为主的原则，尽可能避免因人为失误而引起的钻孔漏失。钻孔漏失的预防主要有以下几种方法。

1. 设计合理的孔身结构

钻孔所遇地层的孔隙压力、漏失压力、破裂压力会有较大的差别。如果同一裸眼孔段中地层存在多压力层系，并且一组地层的孔隙压力高于另一组地层的漏失压力或破裂压力，这时为了平衡高压层的孔隙压力，必须使用高密度泥浆钻进。但这样处理的结果会在低漏失压力或低破裂压力地层处发生钻孔漏失。为了解决上述矛盾，既要防喷又要防漏，则必须设计合理的孔身结构，用套管封隔高压层或漏失层，才能确保钻孔作业的顺利进行。孔身结构设计必须以各种地层压力剖面为依据。

2. 降低钻孔中泥浆的动压力

过高的泥浆动压力是造成钻孔漏失的主要原因之一。一般可在钻进和完井过程中采取以下措施来降低泥浆的动压力；选用合理的泥浆密度与类型，实现近平衡压力钻进；降低泥浆的环空压耗；降低开泵、下钻和下套管过程中的激动压力等。

3. 提高地层的承压能力

地层的漏失压力主要取决于地层特性，因此可以通过采用人工方法来封堵近钻孔的漏失通道，增大泥浆进入漏失层的阻力来提高地层承压能力，以达到防漏的目的。通常采用以下三种方法：

(1) 调整泥浆性能

钻进孔隙型渗透性漏失层时。进入漏层前，可通过适当增加泥浆中的膨润土含量或加入增粘剂等措施来提高泥浆的动切力、静切力，达到提高地层的承压能力。

(2) 泥浆中预加堵漏材料随钻堵漏

对于孔隙-裂缝型漏失层，在进入该层段之前，可在泥浆循环过程中加入堵漏材料。在压差作用下，进入漏层，封堵近钻孔的漏失通道，提高地层的承压能力，起到防漏作用。

(3) 先期堵漏

当所钻下部孔段存在高压地层，其孔隙压力超过上部地层的漏失压力或破裂压力，并且又因受各种条件制约而无法采用下套管封隔上部地层时，为了安全钻进，进入高压层前必须按下部高压层的孔隙压力所确定泥浆密度进行钻进，由此必然引起上部地层漏失。为了防止因上部地层漏失而引起钻孔涌水、卡钻等孔内复杂情况发生，可在进入高压层之前，对上部易漏地层进行先期堵漏，提高上部地层的承压能力。

需要指出，对于存在天然漏失通道的地层，可以通过预先进行循环堵漏或先期堵漏来提高地层的承压能力，但对于天然漏失通道不发育的漏失层，采用上述方法却难以奏效。为了防止压漏此类地层，必须严格控制泥浆的动压力，使其始终低于地层的破裂压力，或通过改变套管程序防漏。

四、钻孔漏失的处理

1. 堵漏原理

当钻进和完井过程中发生钻孔漏失时，为了堵住漏层，必须加入各种堵漏材料（简称堵剂），使之在距钻孔很近范围的漏失通道里建立一道堵塞隔墙，用以隔断泥浆的通道。各种堵漏材料按下述步骤在漏层建立堵塞隔墙：

1) 当堵漏材料到达漏层时，其固相颗粒的形状、尺寸、浆液的流变性能等都要适应漏失通道的复杂形态，这样才能按设计的数量进入漏层。

2) 堵剂进入漏层后,不能让其源源不断进入地层深处。进入地层的堵剂必须能抵御各种流体充填物的干扰。在各种流动阻力的作用下,使之在近钻孔漏失通道的某处发生滞流、堆集而充满一定范围的漏失通道空间。

3) 充满一定范围漏失空间的堵剂,在高温、压差或化学反应等作用下,以机械堆砌或化学生成物的堆集方式,建立具有一定机械强度的隔墙,并与漏失通道有比较牢固的粘结强度才能有效地封堵住漏层,不会发生暂堵现象。

2. 处理钻孔漏失的规程

处理钻孔漏失时应按以下规程进行:

- 1) 分析钻孔漏失发生的原因,确定漏层位置、类型及漏失严重程度。
- 2) 施工前要进行科学的施工设计,精心施工。
- 3) 如果条件许可,应尽可能强钻一段,确保漏层完全被钻穿,以免重复处理同样的问题,增加处理时间。
- 4) 施工时如果能起钻,应尽可能使用光钻具,下至漏层顶部。
- 5) 使用正确的堵剂注入方法,确保 2/3 的堵剂进入漏层近钻孔处。
- 6) 施工过程中要不断地活动钻具,避免卡钻。
- 7) 凡采用桥堵剂堵漏,要卸掉循环管线及泵中的滤清器和筛网等,以防止因堵塞憋泵伤人。

8) 憋压试漏时要缓慢进行,压力一般不能超过 3 MPa,避免造成新的诱导裂缝。

9) 施工完成后,各种资料必须收集整理齐全、准确。

3. 堵漏方法

常用的堵漏方法有以下几种。

(1) 调整泥浆性能与钻孔措施

采用降低泥浆密度、调整流变参数和泵量及改变开泵措施等方法,降低钻孔液柱压力,减小激动压力和环空压耗,改变泥浆在漏失通道中的流动阻力,减少地层产生诱导裂缝的可能性。此方法一般用于封堵渗透性孔隙地层的漏失。

(2) 静止堵漏

静止堵漏是在发生完全或部分漏失的情况下,将钻具起出漏失孔段或起至技术套管内。静止一段时间后,漏失现象即可消除。此项措施的适用范围包括:

- 1) 钻进过程因操作不当,人为憋裂地层而发生诱导裂缝而引起的钻孔漏失。
- 2) 泥浆密度过高,液柱压力超过地层破裂压力而产生的钻孔漏失。
- 3) 深孔孔段发生的钻孔漏失。
- 4) 钻进过程中突然发生钻孔漏失。
- 5) 无论什么原因所发生的钻孔漏失,在组织堵漏实施准备阶段均可采用静止堵漏。

静止堵漏的施工要点是:

1) 发生钻孔漏失时应立即停止钻进和循环泥浆,将钻具起至安全孔段,静止一段时间。静止时间的长短要合适,太短容易失败,太长又容易发生孔内复杂情况。一般控制在 8~24 h 为宜。

2) 如果起至技术套管内静止,静止时间内可以不灌泥浆。但如果在裸眼井中静止,则应定时灌泥浆,保持液面在套管内,以防止裸眼孔段地层坍塌。

3) 在发生部分漏失的情况下, 如果循环堵漏无效, 最好在起钻前先替入堵漏泥浆覆盖于漏失孔段, 然后再起钻, 以增强静止堵漏效果。

4) 再次下钻时, 应控制下钻速度, 尽量避开在漏失孔段开泵循环。如必须在此孔段开泵循环, 应先采用低泵压、小排量开泵循环观察。若不发生漏失即可恢复钻进, 然后再逐渐提高排量。

5) 恢复钻进后, 泥浆密度、粘度和切力不宜立即作大幅度调整。若需调整, 也要逐步进行, 并注意控制加重速度, 防止再次发生漏失。

(3) 桥接材料堵漏法

桥接堵漏是将不同形状(颗粒状、片状、纤维状)和不同尺寸(粗、中、细)的惰性材料, 以不同的配方混合于泥浆中, 直接注入漏层的一种堵漏方法。采用桥接堵漏时, 应根据不同的漏层性质, 选择堵漏材料的级配和质量分数。否则, 会在漏失通道中形不成“架桥”, 或是在孔壁处“封门”, 使堵漏失败。通常桥浆的质量分数为5%~20%, 随基浆密度增高而减少。桥接材料的级配比例一般为, 粒状:片状:纤维状=6:3:2。表6-3为现场使用桥接材料时, 漏层性质与桥接材料的级配和加量的关系。

表 6-3 漏层性质与桥接材料的级配和加量的关系

漏失严重程度	颗粒状 (粗) $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	片状 (细) $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	纤维状 (中) $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	纤维状 (细) $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
渗漏	14	15	11	3
部分漏失	23	9	12	1
完全漏失	26	9	9	9

采用桥接堵漏的施工方法有两种, 即挤压法和循环法。施工前应准确地确定漏层位置; 钻具尽量下光钻杆, 钻头不带水眼(不然应选择合适的桥接材料的尺寸, 以避免堵塞钻头水眼); 钻具一般应下在漏层的顶部, 个别情况可下在漏层中部, 严禁下过漏层施工, 以防卡钻。施工时要严格按照施工步骤进行。堵漏成功后, 应立即使用振动筛筛除井浆中的堵漏材料。特别要提出的是, 对于在试压过程中出现的钻孔漏失, 由于漏失孔段长、位置不清楚, 采用大量桥浆(通常为40~60 m³)覆盖整个裸眼钻孔的堵漏方法, 经常可取得成功。

(4) 高滤失浆液堵漏法

高滤失浆液堵漏法是使用DTR、Z-DTR等高滤失堵漏剂, 采用清水配制成浆液, 将浆液泵入孔内进行堵漏的一种方法。在压差的作用下, 浆液迅速滤失, 形成具有一定强度的滤饼, 封堵漏失通道。此法可应用于渗透性漏失、部分漏失及某些完全漏失的情况, 但一般是在漏层位置比较确定的情况下使用。如果是长裸眼孔段, 漏层位置不能确定, 亦可采用此法进行盲堵, 即利用该堵剂在压差作用下快速建立堵漏隔墙的特点, 在长裸眼孔段自行找漏层封堵。为了提高完全漏失的堵漏效果, 亦可依据漏失通道的特性, 在高滤失堵漏浆液中再加入桥接堵漏剂。

(5) 暂堵法

暂堵法是指应用暂堵材料对油气层进行封堵, 油气井投产后采用相应的解堵剂进行解堵的一种堵漏方法。此法主要用于封堵渗透性和微裂缝地层漏失, 并能有效地减少因钻孔

漏失引起的油气层损害。各油田目前已广泛采用单向压力封堵剂、易酸溶、油溶、水溶的堵剂进行堵漏。例如，除单向压力封堵剂暂堵法外，还有石灰乳-泥浆、PCC 暂堵剂、盐粒、油溶性树脂等暂堵法。

(6) 化学堵漏法

该法是将经过筛选的化学堵剂（如 PMN 化学凝胶、脲醛树脂、ND-1 堵漏浆、水解聚丙烯腈稠浆、硅酸盐和合成乳胶等）注入漏层，形成凝胶，以封堵漏失通道。此堵漏浆液密度较低，凝固时间调节范围大，浆液的渗滤能力较强，滤液亦能固化，可以封堵微孔缝漏失通道。该方法对于含水漏失层具有特殊效果。但此法所用的化学堵剂价格较高，广泛使用受到一定限制。

(7) 无机胶凝物质堵漏法

无机胶凝堵漏物质主要以水泥浆及各种水泥混合稠浆为基础，此法一般用于较为严重的漏失。采用水泥浆堵漏一般均要求漏层位置比较确定，大多用来封堵裂缝性和破碎性碳酸盐岩及砾石层的漏失。堵漏时必须搞清漏失层位置和漏失压力，使用“平衡”法原理进行准确计算，才能确保施工质量和安全。施工时一般必须在钻孔中留一段水泥塞，水泥塞的体积约等于水泥浆总体积的 $1/3$ 。这是为了避免有限量的水泥浆被顶得过远而不能封堵住漏失通道，造成堵漏失败。采用此法要避免泥浆中混入水泥浆，造成所形成的封堵隔墙质量不佳，故施工前应先注入一段隔离液。

采用无机胶凝物质堵漏的施工方法有以下几种：

1) 平衡堵漏法。该堵漏法是将堵漏水泥浆经钻杆泵送至孔内，并顶替至钻杆内外水泥面相等时为止。然后慢慢地上提钻具至安全位置，并将孔内 $2/3$ 体积的水泥浆挤入漏层。其基本原理是保持钻孔内的液柱压力与漏层压力平衡，在此平衡状态下水泥候凝以确保堵漏成功，如图 6-7 所示。此法用于漏层性质单一，并有一定液面，漏速不大的情况，在深孔、浅孔中均可使用。

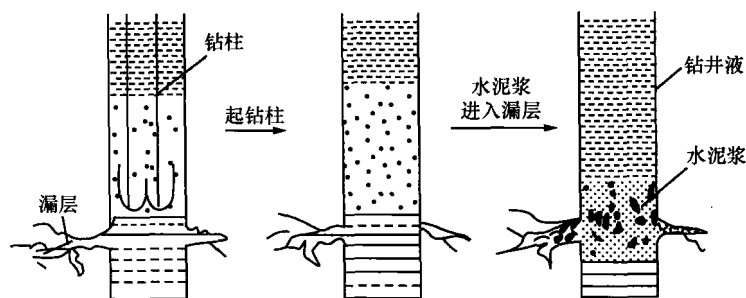


图 6-7 平衡法堵漏示意图

2) 降塞法。降塞法是利用水泥柱超过所替换泥浆的重量，使水泥塞在停泵后降至漏层，大约有 $1/6 \sim 1/3$ 的水泥浆留在孔内，而其余 $2/3 \sim 5/6$ 的水泥浆进入漏层时即达到平衡。此法不适用于孔径大于 312.4 mm ，泥浆密度高于 1.32 g/cm^3 以及注水泥量少于 4 t 等情况。

3) 挤水泥浆法

对于完全漏失井，可采用降塞法使 $2/3$ 水泥浆进入漏层，但对于部分漏失井，水泥浆

到达漏层后，仅有一小部分进入漏层，其余部分则需靠外界压力才能被挤入漏层。

(8) 复合堵漏法

由于漏失类型十分复杂，尤其是水层、气层、长段裸眼、大裂缝和大溶洞的漏失，采用单一的堵漏方法往往成效不大。而采用复合堵漏可提高堵漏的成功率。表 6-4 列出了处理各种严重漏失的复合堵漏方法。

表 6-4 复合堵漏法

序号	复合堵漏方法	适 用 范 围
1	化学凝胶加水泥浆	水层漏失、严重钻孔漏失
2	桥接堵漏加水泥浆	大裂缝漏失
3	水泥浆加桥接剂	大裂缝漏失
4	高滤失堵漏浆液加桥接剂	大裂缝漏失
5	暂堵剂浆液加桥接剂	油气层、大裂缝
6	化学凝胶加桥接剂	水层、大裂缝
7	单向压力封闭剂加桥接剂	一般孔隙性、裂缝性漏失
8	高滤失堵漏浆液加化学膨体	大裂缝漏失
9	单向压力封闭剂加高滤失堵剂	较大孔隙性、裂缝性漏失
10	重晶石塞加桥接堵漏浆液	水层、大裂缝漏失
11	复台堵漏剂（FDJ）	小、中、大裂缝漏失
12	柴油膨润土浆加暂堵剂	低压高孔高渗砂岩、水层漏失
13	正电胶膨润土浆加桥接剂	孔隙型、裂缝型漏失层

(9) 强行钻进下套管封隔漏层

有时，浅部地层存在长段天然水平裂缝及溶洞，钻进过程中发生有进无出的钻孔漏失，而采用以上各种堵漏方法均未能堵住。为了对付这种漏失，可采用清水或轻质泥浆强行钻进，等完全通过漏层后，再下套管封隔。

强行钻进包括清水强钻和轻质泥浆强钻。采用清水强钻必须具备以下五个条件：

- 1) 不是地质的目的层；
- 2) 孔眼稳定，能经受清水长时间浸泡而不塌；
- 3) 无油气水进入孔内；
- 4) 钻头所破碎的岩屑能带入漏层；
- 5) 准备足够量的稠浆，每次起下钻前泵入一定量，用以提高孔壁稳定性，防止沉砂卡钻。

如果漏层以上裸眼孔段存在易塌地层，为了防止孔塌，可在环空回灌防塌泥浆，以确保孔内安全。

第三节 水泥护壁堵漏

水泥是一种良好的胶凝材料，不仅在建筑行业广泛使用，而且早在 20 世纪 40 年代钻

孔工程中就已经开始用水泥护壁堵漏了。用水泥进行护壁堵漏是将水泥浆注入钻孔内，并使其进入所封堵和护壁孔段的漏失、坍塌部位，利用水泥浆的凝固硬化作用，将其堵塞并与岩层胶结为一整体。水泥还可用来进行钻孔封孔、止水、固井、防喷、加固基础等。由于水泥具有货源广、成本低、无毒、使用方便、利于孔内灌注等优点，目前仍然被广泛用作钻孔护壁堵漏的固结材料。

一、堵漏对水泥性能的要求

当钻孔遇到卵砾石层、破碎带、大裂隙、溶洞、厚砂层，用泥浆难以护壁堵漏时，即应采用水泥等固结材料进行护壁堵漏。这时，在工艺上需要停止钻进，从孔内提出钻具，再向孔内灌注水泥浆材，待水泥浆材渗挤、充填到地层空隙中并凝固复杂层段后，再重新下入钻具扫孔钻进成孔。因此，与泥浆随钻护壁堵漏相比，水泥护壁堵漏在工序上增加了专门灌注、候凝固结和重新扫孔时间。

1) 护壁堵漏灌注水泥最常用的方法是用水泵通过钻杆将水泥浆液输送到孔底，然后水泥浆液在孔底能够有效地渗入地层的孔隙裂隙中。这就要求水泥浆液在这一阶段具有良好的流动性。

2) 普通建筑用硅酸盐水泥的候凝固结时间很长，如要达到它们的最终强度往往需要 10 d 以上，这么长的停待时间对钻孔工作来说是难以接受的，因此希望能够尽量缩短水泥的候凝固结时间（如 1~2 d，甚至更短）。

3) 钻孔护壁堵漏对水泥的后期强度并不要求很高，只要满足孔壁稳定和阻塞漏失即可，它一般的抗压强度只需达到建筑用固结体强度的 20%。

所以钻孔护壁堵漏对水泥性能的主要要求可以归结为：初期流动性好，能够快凝早强，后期强度要求不高。可用图 6-8 的曲线来反映这种要求。

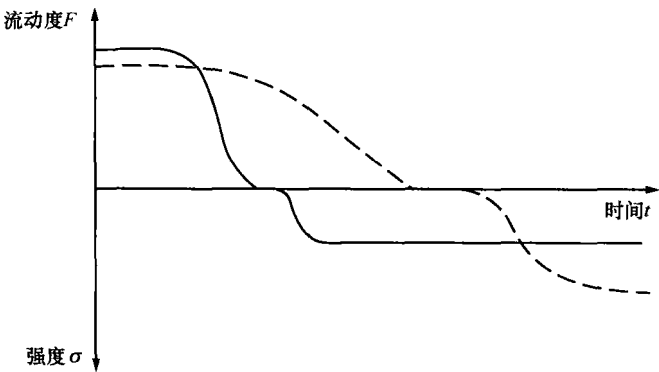


图 6-8 钻孔护壁堵漏水泥特性曲线
实线为钻孔水泥，虚线为普通建筑水泥

另外，在一些特殊情况下，对护壁堵漏水泥还有一些特殊要求。如在低压地层中要求减轻水泥的重度；在高温地层下应该增加水泥的抗温能力；对于要求严格封堵的地层应使水泥具有明显的膨胀性，等等。

二、钻孔护壁堵漏常用的水泥与外加剂

长期以来,普通硅酸盐水泥常用于地质钻探护壁堵漏,由于受其性能的限制,一般需要配用水泥促凝早强剂来调整其性能。护壁堵漏对水泥性能的主要要求是快凝早强,因此,一些具有快凝早强特性的其他品种水泥,是适合护壁堵漏需要的。此外,由于孔内条件的特殊性,如高温、高压、低压、漏失等以及各种工程的施工需要,需选用某些特种水泥。为此,现将有关的水泥外加剂和其他品种水泥作一概括介绍,以便于根据需要加以选用。

(一) 普通水泥的外加剂

钻探施工中,常遇到地层的坍塌、漏失、破碎掉块等复杂问题,需要用水泥进行护壁堵漏。但是,由于普通水泥早期强度低、凝结时间过长、浆液流动性差,就需要使用水泥外加剂来改善和调整各种水泥性能。如需要提高早期强度宜用早强外加剂;需缩短凝结时间,则用速凝剂;若需改善流动性,要用减阻剂等。

水泥外加剂的类型品种很多。用于地质钻探的水泥外加剂依其功用和成分,有不同的分类方法。

1. 按功用分类

- 1) 调节水泥凝结硬化速度的速凝剂和缓凝剂;
- 2) 使水泥早期强度提高的早强剂;
- 3) 降低水灰比、改善浆液流动性能的减阻剂或减水剂、稀释剂;
- 4) 减少浆液的析水和失水的降失水剂;
- 5) 降低水泥浆密度的减轻剂;
- 6) 增强水泥与岩层粘结强度的膨胀剂;
- 7) 防止浆液流失的堵漏剂等。

2. 按化学成分分类

1) 无机化合物类。包括各种无机盐类,一些金属单质,少量氧化物和氢氧化物等。这类物质大多用作早强剂、速凝剂等。

2) 有机物类。这类物质种类很多。其中大部分属于表面活性剂的范畴,有阴离子、阳离子、非离子型以及高分子型表面活性剂等。

为了满足各种工程施工需要,水泥外加剂在改善水泥某些性能的使用中,应考虑以下五个方面:①按水泥品种合理选用外加剂;②选用外加剂应明确改善和调整水泥性能的目的;③选用外加剂合适掺量;④考虑具体施工条件,如气温、孔内温度、压力、灌注方式、灌注工具等;⑤尽可能选用复合外加剂。

(二) 快硬早强水泥

快硬早强水泥按其矿物组分,一般可分为下列四类。

1. 硅酸盐类

水泥熟料以硅酸钙为主要组分,可通过调整矿物的相对含量,如提高硅酸三钙(C_3S)和铝酸三钙(C_3A)的含量,提高水泥的粉磨细度等,可获得快凝早强性能。目前,国内已能大量生产并列入国家标准的有高级水泥、快硬水泥和特快硬水泥三种。这三

种水泥都具有较高的早期强度，可以选用。实际生产中，欲获得快凝早强性能，也可选用高标号 625 硅酸盐水泥。

2. 铝酸盐类

水泥熟料是以铝酸一钙为主要组分，由于铝酸一钙的水化速度较快，因此具有较高的早期强度。目前列入正式产品的有矾土水泥。

以上两类快硬早强水泥，一天强度虽较高，但小时强度还是不高，且凝结时间较长，它们的特点是只快硬不快凝。对于硅酸盐水泥和铝酸盐水泥，要求有较高的小时强度还难以满足，为此，只有配合使用促凝早强剂来达到。

3. 硫铝酸盐类

是以硫铝酸钙（ C_4A_3S ）和硅酸二钙（ $\beta - C_2S$ ）为主要组分，其早期强度较高，是一种以小时计的快凝快硬即“双快”水泥。目前已研制成功并用于生产的有：硫铝酸盐水泥（亦称地勘水泥）、硫铝酸盐超早强水泥和 B_1 水泥等。

4. 氟铝酸盐类

是以氟铝酸钙（ $C_{11}A_7F$ ）和硅酸三钙 C_3S （或 C_2S ）为主要组分，其早期强度可以小时计，亦为快凝快硬水泥。目前已研制成功的有双快型砂水泥、双快抢修水泥等，专门供铸造型砂粘结、机场跑道抢修以及国防军工用。

（三）硫铝酸盐地质勘探水泥

它是以石灰石、矾土、石膏为主要原料，经高温烧结得到，以无水硫铝酸钙和 β 型硅酸二钙为主要组成矿物的熟料，配以适量石膏和混合料共同粉磨制成。是具有早期强度高，初、终凝时间间隔较短，微膨胀等特性的水硬性胶凝材料。它分为 H 型和 R 型两种。H 型强度较 R 型高，而 R 型凝结时间却比 H 型短。见表 6-5，表 6-6。

表 6-5 硫铝酸盐地质勘探水泥各龄期强度对比表

各龄期 强度	抗折强度/MPa				抗压强度/MPa			
	4 h	8 h	1 d	28 d	4 h	8 h	1 d	28 d
H 型		3.5	4.5	6.8		32	45	57.5
R 型	1.8	3.2	3.2	6.3	12	23	36	45.7

表 6-6 硫铝酸盐地质勘探水泥初凝与终凝对比表

型号	水灰比	试验温度	初凝	终凝
			不早于	初凝到达后不迟于
H 型	0.5	$20 \pm 2^{\circ}C$	30 min	30 min
R 型	0.5	$20 \pm 2^{\circ}C$	15 min	10 min

水灰比为 0.5 的水泥净浆，H 型初始流动度不小于 140 mm，R 型不小于 120 mm。

由于此种水泥的需水量比普通硅酸盐水泥大很多（多达 3 倍），因此在钻孔中使用时水灰比较大，可达 0.5 ~ 0.6，同时需加入减水剂，以增加流动性，延长可泵期。

(四) 油井水泥、地热水泥

油井水泥专用于油井、气井等固井工程，又称堵塞水泥。石油地质勘探和开采钻进过程随着孔深的增加，孔底温度和压力相应也不断增加。实践表明，每增 100 m，孔内温度约提高 3℃，压力增加 1~3 MPa。油井水泥的性能要求是：在孔内温度和压力条件下，水泥浆在注入过程中具有一定的流动性、可泵性和合适的稠化时间；水泥浆注入孔内后应能较快凝结，并在短期内具有一定的强度；硬化后的水泥面应有良好的稳定性和抗渗性；在高压气、油井固井中，应具有合适的密度等。根据油井固井的要求和不同孔深温度条件的需要，我国的油井水泥已形成系列，并将油井水泥分为普通油井水泥和高温油井水泥。

由于不同油井水泥适应不同温度和深度要求，根据国家标准规定为：

45℃ 油井水泥 适用孔深在 1500 m 以内

75℃ 油井水泥 适用孔深在 1500 ~ 2500 m

95℃ 油井水泥 适用孔深在 2500 ~ 3500 m

以上三个品种称普通油井水泥或称中深井水泥。对于温度在 120℃ 左右到 180℃，孔深在 4000 ~ 7000 m，可用高温油井水泥。温度为 120℃ 的油井水泥国内已有定型产品。

现将常用的两种油井水泥的性能介绍如下：

1. 普通油井水泥

普通油井水泥是以适当矿物组成的硅酸盐水泥熟料和适量石膏磨细混匀而成。但用于 45℃、75℃ 和 95℃ 油井水泥的熟料，其矿物组成有较大的区别。45℃ 油井水泥，由于适用的温度不高，凝结不快，为了达到具有较高早期强度的目的，可以调整熟料中 C_3S 、 C_3A 的相对含量（提高 C_3S 含量，相应降低 C_3A 含量）。用于 75℃ 的油井水泥，由于孔内温度升高而使凝结加快。因此，应进一步降低熟料中快凝组分 C_3A 的含量（一般要求降至 5% 以下），而且 C_3S 含量亦不宜过分提高。有时为了延缓凝结时间，粉磨时将水泥磨得稍粗些，以减慢其水化速度，延缓凝结时间。对于 95℃ 的油井水泥，由于适用温度更高，凝结更快，则宜选用不含有铝酸盐的贝利特熟料。这种熟料以 C_3S 为主要成分，不含 C_3A 。其矿物组成为 C_3S 18.3%、 C_2S 60.6%、 C_4AF 15.6%、 C_2F 1.87%。试验证明：在高温高压下的水泥强度会随着 C_2S 含量的增加而显著提高。因此，贝利特熟料加适量石膏磨制成的水泥，具有较好的热稳定性。由此分析可见，调整矿物组成可获得性能不同、用途各异的水泥。 C_3A 含量多少是影响油井水泥凝结快慢和适用温度的重要因素。 C_2S 含量则是决定油井水泥强度的关键。

2. 高温油井水泥

高温油井水泥又称深井水泥，一般适用于孔深 4000 ~ 7000 m 的油井固井。对高温油井，由于温度高，必须用专有的高温油井水泥。高温油井水泥是以贝利特熟料为基础，再加入 20% ~ 25% 石英砂组成。这种水泥在温度为 150 ~ 200℃，压力为 40 ~ 80 MPa 下，仍具有较高的强度和良好的热稳定性。其原因是由于石英砂在高温、高压下可以形成 $C-S-H$ (II) 类低碱性水化硅酸钙的缘故，有利于高温高压下强度的提高。

为了适用在 6000 m 以上的所谓超深井的油井固井，可以使用矿渣砂质水泥、石灰砂质水泥、赤泥砂质水泥、石灰火山灰水泥等无熟料水泥。这类水泥在高温、高压条件下可以形成以低碱性水化硅酸钙为主要组成的水泥石。

地热井的钻孔与油井有相近之处,但两者之间存在着地层温度的不同,导致孔内温度变化很大。也就是说,油井中自然地热梯度大体上是 $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,而地热井由于受高温岩浆的影响,温度梯度变化异常,孔内温度高达 200°C 以上,有时甚至达 $200\sim 360^{\circ}\text{C}$,压力高达 50 MPa 。此外,地热区大都处在火山地带,经常要受到硫化氢和亚硫酸气体的影响,有时还会显出较强的酸性。鉴于上述特点,用普通油井水泥显然不能满足要求。因为普通油井水泥只适用于 100°C 左右的条件,温度升高将导致水泥石的强度降低而失效。地热井的开发与利用,需要有特殊性能的地热水泥,即要求不仅具有高的耐温性,而且还具有一定的耐酸性。通常采用二氧化硅含量较高的硅石粉来提高抗温性。对耐酸问题,一方面可减少水泥矿物熟料 C_3A 的含量来提高抗硫酸盐侵蚀能力;另一方面在高温高压下,因 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 能与 SO_2 作用,故使水泥中不含 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 也可使水泥耐酸性提高。

(五) 低密度水泥

在油井的固井工程和地质钻探的护壁堵漏中,由于地下地质情况复杂:有些为严重的漏失层;地下水活动的地层;大型溶洞地层以及低压油气层等。为了在施工过程中防止出现水泥浆的流失,或者因水泥浆密度过大而存在压漏地层,或者因浆液堵塞低压油气层等问题,研制低密度水泥、超轻水泥、泡沫水泥,显然具有现实意义。

目前,降低水泥浆比重通常有以下三种方法:

1) 在水泥中加入高保水材料,增大水灰比。如加膨润土、硅藻土、膨胀珍珠岩和低密度材料如粉煤灰、火山灰、硬沥青等。它们具有成本低、使用方便、材料来源广等特点。但是,在低温下强度过低,高温下强度退化严重,密度只能降至 1.4 g/cm^3 左右。

2) 用空心玻璃微珠或陶瓷球作低密度固相材料。由于球内空心充满气体,密度很小,仅为 $0.5\sim 0.7\text{ g/cm}^3$,将它混入水泥能配出低密度水泥浆。其优点是配水泥浆所需水量远比前者用水量少,故在低温下它的水泥石强度较高,其成本略比前者要高。

3) 用充气泡沫水泥浆。它可将水泥浆密度降至 $0.42\sim 1.68\text{ g/cm}^3$,并在该范围内任意变化调节,这是最大的优点。同时,在相同的密度下其流动性好、强度高,是目前国内外关注的好方法。

三、灌注水泥的准备工作

1) 利用多种探测方法摸清孔内复杂地层的类型、位置、构造特征、岩性特点、漏失层结构及漏失程度、含水层情况以及涌水程度、孔内地层的温度,确定灌注孔深、浆液用量、灌注方法。

2) 根据灌注方法和要求,选用合适的水泥品种和外加剂,并进行室内水泥性能试验,确定水灰比、外加剂剂量的合理配方。

水泥性能试验是确保安全灌注、高质量护壁堵漏的关键,同样的水泥在不同的外界环境下所表现出来的性能差异较大。必须尽可能模拟孔内和现场条件,充分考虑灌注水泥浆的实际操作过程,以水泥浆的流动性、凝结时间、达到的可靠固结强度和所对应的时间为主要指标,进行改变水灰比和外加剂的多种配方的试验,从中遴选出理想配方。所谓理想配方,至少应能满足以下四条基本要求:①灌注阶段水泥浆流动性好,一方面能够有效地渗入近孔壁的地层中;另一方面在钻杆中的流动阻力小,从地面向孔底泵送得动。②从配

成水泥浆到开始发生凝结有足够的安全时间，确保灌注结束直到把钻杆全部提出地表并清洗完泵注设备后水泥浆才开始凝结。③水泥浆经过自动凝结固化，能够达到可护壁堵漏的强度。④水泥成浆至达到可护壁堵漏强度的时间尽可能短。通过试验，能够确定可以重新透孔的时间。

3) 灌注前应准备好并检查灌注系统各部件（动力、水泵管线、钻具、灌注器等）的工作可靠性，避免和消除灌注过程中的各种故障。

4) 进行灌注浆量、替水量的计算，确保所用材料（水、水泥、外加剂等）配齐够用。

5) 孔内准备。包括：①通过分析、判断，确定封堵孔段位置；②进行扫孔、冲孔，保证孔底和充填孔段清洁干净，需中部灌浆应做好架桥工作；③丈量钻具，校正孔深；④测定孔内静、动水位。

四、钻孔水泥浆灌注工艺

向孔内灌注水泥的方法有水泵灌注法、灌注器灌注法、孔口灌注法及干料投放法等。

1. 水泵灌注法

水泵灌注法是最常用的方法，它是通过钻杆将水泥浆用水泵压入孔内漏失或坍塌的岩层，以达到护壁堵漏的目的。此方法适用于灌注量大，不受钻孔深度限制的水泥灌注。在钻孔中部只要架桥后也可适用。用此方法还可实现加压灌注。利用水泵灌注法施工简便，无需特殊设备和工具，但要求水泥浆流动性好，易于泵送。

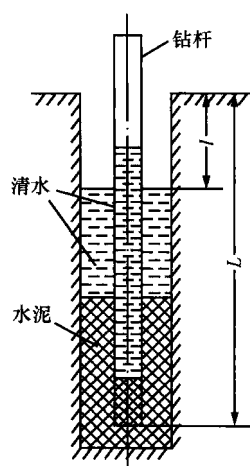


图 6-9 灌注水泥示意图

水泵灌注法的操作过程为：堵漏时，钻具下到预定深度距孔底约 0.3 ~ 0.5 m 时，先泵入清水以检查钻杆内部确实畅通良好时，即可泵入配好的水泥浆。将水泵莲蓬头放入水泥浆桶内即泵送水泥浆。不论堵漏或护壁，刚开泵时应先打开水泵回水管，将吸水管及水泵中的清水排出，喷浆后再打开三通将水泥浆送入孔内。待泵吸水泥浆过程完后，立即将莲蓬头放入准备好的替浆水桶中，开泵替浆。为了使孔底返流均匀，替浆时可适当慢转钻具。替浆的压力应根据孔内水位高低，以达到孔内液柱压力平衡为原则，可按下式进行估计计算（图 6-9）：

$$Q_{\text{压}} = K(L - l)q + Q_{\text{地}} \quad (6-2)$$

式中：\$Q_{\text{压}}\$ 为替水泥浆所需压水量，L；\$L\$ 为钻杆柱长度，m；\$l\$ 为孔内静水位离孔口高度，m；\$q\$ 为每米钻杆内容积，L/m；\$Q_{\text{地}}\$ 为地面管线及水泵容积，L；\$K\$ 为压水系数，浅孔取 0.9，深孔取 0.95。

根据上式计算，当孔内无水或水位很低时，压水量达到机上钻杆后（约 60 ~ 80 L），即应停泵，然后拆开机上钻杆，靠钻杆内外液柱压力差，使水泥浆继续沿钻杆内下降，并从钻具底部返出钻杆外，直至钻杆内外压力达到平衡为止。

当水位很高或返水孔，则压水量接近于钻具内容积加上地面管线容积乘以压水系数，可以保证水不压出钻具底部，这时钻杆外的水泥浆高度比钻具的水泥浆高度会大一些。当提钻时，会向钻杆内回流或填补孔底空间，水泥浆不会被稀释。

替浆完毕即可提钻，应将钻具提离水泥面 10 ~ 15 m 以上（1 ~ 2 个立根）后再冲洗钻

具。提钻速度一定要慢，过快则易发生抽吸作用而使灌注工作失败。为了保证孔内压力平衡，还应考虑在孔口回灌清水。

当机上钻杆卸开以后，应开泵清洗水泵、高压管线和机上钻杆内的残留浆液，以保证循环畅通。

综上所述，水泵灌注法应遵循的技术规程如下：

- 1) 堵漏时，坚持冲孔；护壁时，坚持扫孔到底，保证清除孔内岩屑并检查钻具通畅。
- 2) 钻具下到离孔底 0.3 ~ 0.5 m 或架桥处，以减少水泥浆的稀释。
- 3) 灌注过程或灌浆完毕，不能上提钻具，可转动钻具，待替浆后方能上提钻具。
- 4) 全部浆量应一次灌完，不得中途停泵，防止浆液断开或被水稀释。
- 5) 泵浆前打开回水管，排出清水。
- 6) 应考虑孔内水位高低，准确计算替浆压水量。
- 7) 替浆完提钻应离开水泥面 10 ~ 15 m 方能清洗钻具。
- 8) 提钻速度要慢，防止抽吸作用并及时在孔口回灌清水。
- 9) 尽量减小水灰比，采用水泥减水剂保证浆液可泵性好。
- 10) 坚持探测水泥面强度，合理确定候凝时间。

水泵灌注法还可用在下列特殊情况下：

1) 为了保证水泥浆液能更好地进入所堵漏地层，形成足够的渗流半径，有效地加固孔壁岩石，可采用孔口管上部加密封装置，或在钻杆上加封隔器以封堵漏失层上部，以使灌注时孔内形成高压，迫使水泥浆进入预定地层。

2) 当遇到厚度较大的破碎地带如硬脆碎的松散地层、卵砾石层时，会经常出现遇阻、卡钻或提钻后垮塌现象，这时可采用钻进一段灌注一段的分段灌注法。

3) 当裂隙较大或遇小溶洞时，灌注前最好先投入一定量的惰性材料，起到堵塞、架桥、充填作用。投入后，下钻具进行挤压，然后再进行灌注。这样既可减少流失，又能提高封堵效果。

4) 当遇到较大溶洞时，为了防止水泥浆的大量流失，最好采用网袋注水泥，以控制水泥浆的扩散流失范围（图 6-10）。

2. 灌注器灌注法

当堵塞大的裂隙或溶洞时，为了减少水泥浆的流失，往往选用水灰比较小（0.3 ~ 0.35）、浓度大的水泥浆或速效混合液进行灌注。这时水泵无法吸入泵送，可采用灌注器灌注法。有时当封闭的孔段较短，浆量不多或钻进中遇到多层间断漏失，为了及时处理也可采用此法。此法优点是不受孔深限制，浆液性能不受流动性限制且对水泥浆稀释较少，但需专用灌注器，灌注时要求相当严格。

灌注器的种类较多，目前大多采用水压活塞式灌注器，其工作原理是：灌浆时，将水泥浆装入盛浆管内，然后将灌注器用钻杆下至漏失层位，开动水泵后压力水经钻杆进入灌注器推动水泥浆，上部活塞将灌注器的排浆阀打开，则水泥浆被压出进入漏失层。图 6-11 所示是一种水压活塞式灌注器。其结构简单，操作方便，工作时在水压作用下通过活塞 6 把盛浆管 4 的水泥浆往下挤压，剪断销钉 9，打开活门 8，水泥浆即可排出管外，进入需要封堵的部位。

目前，现场为了加大灌注量，采用不同尺寸的岩心管作为盛浆管，制造简易的岩心管

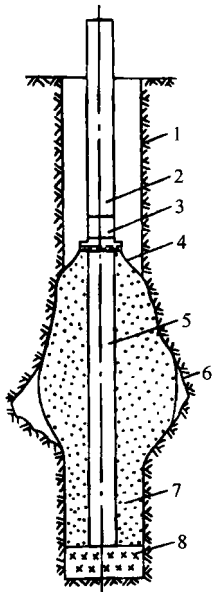


图 6-10 网袋灌注水泥浆示意图

1—钻孔；2—钻杆；3—正反接头；4—布袋；5—带孔眼的钻杆；6—溶洞；7—水泥浆；8—堵塞物

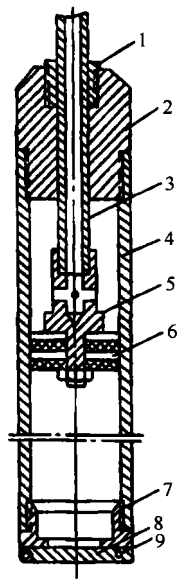


图 6-11 活塞式灌注器

1—压盖；2—滑动接头；3—钻杆；4—盛浆管；5—分水接头；6—活塞；7—接头；8—活门；9—销钉

灌注器，取得了良好的技术经济效益。

3. 孔口灌注法

当钻孔较浅，裂隙宽且孔内水位很低，则可从孔口直接倒入浓度较大的水泥浆，利用孔口与孔内液面高差所产生的位能，将水泥浆压入所封堵层。为了使孔口灌注顺利，也可在孔口插入小尺寸套管至灌注孔段，再从套管中倒入水泥浆，借水泥浆的自重灌入。

4. 干料投放法

将水泥用塑料袋装好，单独送入孔内或随钻具下入孔内，然后用钻具搅拌，利用钻孔内的水搅拌和捣固，使浆液进入裂隙而堵漏。

5. 水泥球投入法

将水泥与少量水混合成水泥球或专门制作具有合适凝固时间和强度的水泥丸，投入孔内后再下入钻具冲击挤压，使其挤入漏失层。



复习思考题

1. 影响孔壁不稳定的因素主要有哪些？
2. 稳定孔壁的技术措施有哪些？列举出三种防塌效果较好的泥浆类型。
3. 列举常用地勘水泥种类及性能。
4. 试阐述发生钻孔漏失的原因和防止漏失的主要措施。

第七章 岩土钻挖稳定液技术

第一节 概 述

基础工程施工中，大口径钻孔桩通常要用泥浆作为排渣循环液和稳定液，深基础中的槽壁式地下连续墙在施工时使用钻掘机械形成深度较大、开挖长度较大的槽，槽壁的稳定也要通过泥浆对墙壁施加液压力来支撑开挖。泥浆具有一定重度，对钻挖形成的新鲜面产生一定静液柱压力，可抵抗作用在孔、槽壁上的侧土压力和水压力，相当于一种液体支撑，可防止孔、槽壁坍塌和剥落，所以，在某种程度上泥浆主要起着稳定孔壁的作用，更多时候泥浆被称为稳定液。随着对地下施工的要求越来越高，较大断面的孔、槽施工也逐年增多，较大断面孔、槽的稳定问题引起了工程人员的重视，岩土稳定液技术正是适应市场需求而形成的一种技术。

大断面钻掘地层不稳定的因素有：

- 1) 深基础施工一般常在覆盖层较厚时或软弱的冲积层上施工，而且很少有单一土质构成的地层。大多数是由粘土、粉土、砂和砾石等互层构成。对于这样的复合地基，一般是不良地质体，最容易坍塌。
- 2) 施工形成孔、槽断面较大，从力学角度就是不稳定的。大孔径的自拱效应不如小孔径，槽壁的拱效应不如孔壁的圆拱效应，槽壁的稳定分析要比孔壁复杂得多。
- 3) 因为孔、槽的自由空间大，形成的新鲜断面更有吸水膨胀或剥落的机会，特别是页岩、泥岩等吸水后发生显著形变的地层。
- 4) 在钻挖期间，地下水是常常遇到的最棘手的问题之一。开挖中遇到的一些最坏的情况都出现在水位以下。目前对饱和含水砂层的施工是土木工程界的一大难题，极易发生涌水、涌砂等工程灾害。另外，地下潜流较大时，不仅会稀释泥浆，而且也容易引起槽壁坍塌。土质与坍塌性的关系见表7-1。

表 7-1 土质与坍塌性的关系

土 质	坍 塌 性	
	无地下水时	有地下水时
粘土	无	一般无
粉土	一般无	略有
含粉土的砂	略有	有
细砂	有	略大
粗砂	略大	大
砂砾	大	很大
砾石	很大	很大

5) 泥浆在砂砾层、卵石层、漂石层以及裂隙多的土层中会出现流失现象, 很难保持预定的泥浆液面高度, 这种现象就叫做漏浆。一旦出现漏浆, 就会发生泥浆液面下降, 引起孔、槽壁坍塌。

6) 泥浆的动水压力如钻头和抓斗的急速升降易产生压力激动, 造成垮塌。

另外, 深基础施工泥浆易与灌注混凝土接触而引起泥浆性能恶化, 对孔、槽壁的稳定增加了不安定因素。本章着重介绍反循环泥浆和槽壁泥浆, 它们具有一定的代表性。

造成孔、槽壁坍塌掉块或缩径膨胀等不稳定的因素有许多, 归纳起来有: 地层应力作用; 地质因素的影响; 起下钻压力激动; 钻进工艺因素等。

对于圆形钻孔而言, 稳定性分析见前面有关章节。一般来说, 侧压力随孔深增加、孔径增大而相应增大, 从这一点说明, 大口径孔的稳定性相对于小口径孔要差得多。

地层本身的强度不够是造成地层失稳的基本原因, 不稳定地层一般是松散、破碎、胶结性差或松软地层, 其侧压系数一般较大, 故侧压力大, 钻孔形成后极易产生失稳现象。

利用液柱压力来平衡地层压力是维持孔壁稳定的基本方法, 也是稳定液作用的基本机理。

以上简单说明了孔的稳定机理, 对槽壁的稳定而言则相当复杂, 但是槽可以认为是长条形断面, 由经典土力学理论可以得出一些有意义的结论。如假设在没有泥浆时, 槽段开挖使壁面土体的水平方向的主应力发生变化, 直至土体达到塑性平衡状态。因此, 槽壁侧土压力为主动土压力。

当槽内充满泥浆稳定液时, 根据前述的地层压力与稳定液平衡条件得出临界槽深和安全系数:

$$P_a = 0.5\gamma_c H^2 K_a - 2cH \sqrt{K_a} \quad (7-1)$$

式中: γ_c 为土体容重; H 为槽深; K_a 为土压力系数, 对于饱和粘土, $K_a = 1$; c 为不排水抗剪强度。

令 $P_a = 0$, 求得临界槽深 (稳定自立的最大深度):

$$\left. \begin{aligned} H_c &= 4\tau_u / \gamma_c && (\text{无稳定液时}) \\ H_c &= 4\tau_u / (\gamma_c - \gamma_w) && (\text{有稳定液时}) \\ n &= H_c / H && (\text{安全系数}) \end{aligned} \right\} \quad (7-2)$$

式中: $\tau_u = \frac{c}{\sqrt{K_a}}$ 。

由式 (7-1)、式 (7-2) 可知: 由于泥浆的存在, 稳定系数和开挖临界槽深都大大增加, 并且当 γ_w 接近 γ_c 时, 安全系数就与深度无关, 槽壁总是稳定的, 因此施工中使用加重泥浆有利于槽壁的稳定。通常的泥浆密度为 $1.15 \sim 1.25 \text{ g/cm}^3$, 如采用重晶石 ($4.3 \sim 4.5 \text{ g/cm}^3$) 作加重剂, 可以大大提高槽壁稳定性。但过大的泥浆密度影响泥浆的泵吸、泵送和渣土分离。

如果是在地下水位以下的地层中成槽, 地下水位对槽壁的稳定性会产生显著影响, 地下水位离地表越浅, 泥浆对地下水的相对超压力越小, 稳定液的液体支撑作用减少, 槽壁失稳的可能性越大, 因此, 成槽过程中要重视地下水的影响, 尽量提高稳定液的液面, 确保槽壁稳定。

对于无粘性砂土，在无稳定液条件下成槽施工是不可能的，其理论分析和数学模型可根据经典土力学滑动理论来分析讨论。

第二节 反循环泥浆

反循环钻进法在大口径（直径大于 600 mm）钻孔灌注桩中应用广泛，特别是泵吸循环以功率消耗最小和方便实现受到广大工程界的青睐。它与正循环工法相比体现出来的优越性正在于泥浆的使用上：

1) 在大口径钻孔桩的施工中，由于存在较大的环状空间，如果采用正循环就要求有较强的浮渣能力。浮渣能力与泥浆流速和泥浆浓度有直接关系，大口径正循环中泵量一定的情况下提高流速是不现实的，只有靠提高泥浆浓度、密度等指标来增强浮渣能力，而这些指标的提高会导致钻速下降，泥皮增厚，在浇灌混凝土时，这层泥皮是不会去掉的，因此在混凝土桩与原始结构的孔壁间就加了一层如润滑剂一样的滑动层。另外，成孔后要花比较长的时间清孔，由于泥浆的浓度大，孔底是很难清理干净，这将造成桩的承载力下降。而反循环浮渣能力依赖于钻杆内腔大的泥浆流速，大的沉渣和岩屑会从钻杆内腔返回地表，避免了重复破碎，时效大大提高，而且增加了钻头的寿命，这正是反循环的优势。

2) 反循环护壁效果好，泥皮薄。在一般地质条件下，只用清水护壁，自然造浆，只有在地层极不稳定时才用优质泥浆，但密度一般不超过 $1.05 \sim 1.07 \text{ g/cm}^3$ 。正循环需要很大的泵压力才能推动泥浆返流，同时泥浆在大的压力下失水造壁，泥皮增厚。另外，正循环需要的泥浆浓度大，钻具起下钻的抽吸作用大，也不利于保护孔壁。相反，反循环的泥皮薄，清孔容易，桩的承载力提高。泥浆与基本工法对应的基本指标见表 7-2。

表 7-2 泥浆性能基本指标

工艺方法	地层条件	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	粘度/s	胶体率/%	含砂率/%	稠度	pH 值
反循环法	一般地层	1.02 ~ 1.05	16 ~ 18	>95	<4	0.4	7 ~ 8
	松散易塌地层	1.06 ~ 1.10	18 ~ 22	>95	<4	0.5 ~ 0.6	7 ~ 8
正循环法	一般地层	1.10 ~ 1.15	20 ~ 22	>96	<4	0.5	7 ~ 8
	松散易塌地层	1.12 ~ 1.16	24 ~ 28	>96	<4	0.6 ~ 0.7	8 ~ 9
冲击、冲抓法	一般地层	1.15 ~ 1.20	22 ~ 26	>90		0.6	7 ~ 8
	松散易塌地层	1.20 ~ 1.30	25 ~ 30	>90		0.7 ~ 0.8	7 ~ 8

泵吸反循环施工中泥浆一定要注意以下几点：

1) 保持一定的水头高度。特别是地下水位较高时，护筒内水头高度保持 2 m 以上来保护孔壁的稳定性。

2) 一般采用清水护壁，自然造浆，只有在地层极不稳定时，才采用泥浆护壁。设计泥浆时，要以最容易发生坍塌的土层为对象。推荐采用如表 7-3 所示的泥浆。

3) 使地层稳定的泥浆，最经济的是膨润土加增粘剂（一般为 CMC），膨润土粒子可充填孔壁间隙，CMC 是一种纤维素，起胶体保护和隔水作用。见表 7-4。

表 7-3 不稳定地层泥浆推荐表

地质条件	粘土的加量/%	粘度/s	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
水少的砂层	8 ~ 9	25 ~ 30	1.045 ~ 1.05
含水多的砂层	9 ~ 11	30 ~ 40	1.055 ~ 1.06
有大压力地下水砂层	9 ~ 13	30 ~ 60	1.05 ~ 1.07
砾加粘土层	8 ~ 10	25 ~ 35	1.045 ~ 1.055
砂砾层	10 ~ 12	35 ~ 60	1.055 ~ 1.065

表 7-4 经济型 CMC 泥浆

地质条件	CMC 加量/%	膨润土加量/%
以粘土为主的地层	0.02	8 ~ 10
含水少的砂层	0.03	8 ~ 10
含水多的砂层	0.05	8 ~ 10
容易涌出地下水的地层	0.05 ~ 0.1	8 ~ 10

4) 泥浆池的容积一般为单桩桩孔容积的 1 ~ 1.2 倍, 以用砖块砌筑为好, 沉淀池的容积一般为 $6 \sim 20 \text{ m}^3$, 其数量依场地大小设置 2 ~ 3 个, 以轮换使用。

第三节 泥浆护壁挖槽法

所谓泥浆护壁挖槽法, 就是在充满水和膨润土以及 CMC 等其他外加剂的混合液的情况下, 在地基中进行钻孔或挖槽的方法, 通常泥浆的静水压力防止槽壁坍塌或剥落, 并维持挖成的形状不变。成槽之后, 浇灌混凝土把泥浆置换出来, 在地下筑成一道混凝土单元墙段。

使槽壁稳定的泥浆叫护壁泥浆, 由于是使用泥浆护壁进行挖槽, 所以才用“泥浆护壁挖槽法”这个术语。护槽与护孔是不一样的概念, 因为槽壁的稳定要比孔壁复杂得多, 并且槽壁的拱效应不如钻孔的圆拱效应。

泥浆护壁挖槽法方法新颖, 在基本理论以及施工方法上与通常的大不相同, 具有极其独特的特征。该法充分利用其特征, 获得了十分迅速的发展和推广, 以至在地下工程中占有重要地位。泥浆的使用是该法的关键。

混凝土连续墙(以下简称连续墙)表示了一种在充满膨润土泥浆的窄沟里施工地下墙的方法, 用作承载墙或挡土墙等, 如地下通道深基础(地下火车站、隧道、船坞和泵房等)的施工。目前施工深度已达到 100 m 以上。泥浆稳定液在工艺方法中具有至关重要的作用。

就连续墙的施工来说, 首先需要开挖一个 1 m 或更深的沟, 然后建筑导向墙。导向墙起导向、储液、支承施工机械和保持液面高度等作用。

泥浆被导入导向墙里, 并维持尽可能高的水位以提供槽壁最大的液柱压力。通常建议, 沟中泥浆的液面高度必须至少高出附近水位 1.25 m 以上。如果不能实现这一点, 就

得采取一些措施来满足要求：①加高导墙；②降低地下水位；③向泥浆中添加砂或重晶石进行加重。

一、槽壁的稳定和放置时间

所谓放置时间是指挖槽结束时到浇灌混凝土之前的这段时间，一般条件下2~3 d左右。在这段时间内无须采取特别的措施，但要控制泥浆的性质、泥浆液面的高度以及地下水位的变动等，只要没有变化即无问题。

理论上，良好泥浆能与外压力平衡，就可保持槽壁稳定，并与放置时间的长短无关。但实际上泥浆随着沟槽的放置时间的延长，其性质和状态也会发生变化。例如由于悬浮在泥浆中的土渣沉淀减小了上部泥浆的密度；由于阳离子等的作用使泥浆恶化，从而通过泥皮而渗出的水量就会增多，产生泥浆液面下降。因此尽管地基土压力和地下水压力没有变化，但如果长时间地放置，槽壁就会坍塌。

二、槽壁泥浆的使用方法

泥浆的使用方法可根据挖槽方式大致分为静止方式和循环方式，循环方式又可分为正循环和反循环两种。

(1) 静止方式

使用抓斗挖槽属于泥浆静止方式，随着挖槽深度的增大，不断向槽内补充新鲜泥浆，直到浇灌混凝土将泥浆置换出来为止，泥浆一直容贮在槽内。使用泥浆的目的只是为了使槽壁稳定。

(2) 循环方式

使用钻头或切削刀具挖槽属于泥浆循环方式，在槽内有足够泥浆的同时，用泵使泥浆在槽底与地面之间进行循环把土渣排出地面。

三、对稳定液的要求

保持槽壁稳定是泥浆稳定液最重要的一条功能，主要有以下作用：

- 1) 泥浆的静水压力可抵抗作用在槽壁上的土压力和水压力，并防止地下水的渗入。
- 2) 泥浆在槽壁上形成不透水的泥皮，从而使泥浆的静水压力有效地作用在槽壁上，同时防止槽壁的剥落。
- 3) 泥浆从槽壁表面向地层内渗透到一定的范围就粘附在土颗粒上，通过这种粘附作用可使槽壁减少坍塌和透水性。

泥浆具有支承开挖，悬浮岩屑，避免淤泥渣层在开挖底部堆积等作用，同时要求泥浆具有泵送容易的特性，具有被水泥清液置换的能力，对后来的钢筋与混凝土间粘结没有妨碍等。通常，泥浆既要有高粘度，又要具有良好的流动性。其结果是矛盾的，但必须被解决，以便能够得到一个满意的泥浆性能。

确定膨润土在泥浆中的含量（以粘度指标衡量）通常必须综合考虑各方面因素，包括槽壁的支撑，防止损失到邻近地层中，开挖期间抓斗浮力和阻力的减少以及防止过多的土悬浮在泥浆里等。出于槽壁稳定性的考虑，泥浆的粘度越大，稳定性越好。但如果泥浆粘度明显影响开挖速度，这样的泥浆就必须替换。在预制的钢筋笼被放入或混凝土灌注之

前，泥浆也必须替换。

另外，在泥浆静止状态下挖槽，特别是采用大型抓斗上下提拉的挖槽方式很容易使槽壁坍塌，所以要求泥浆粘度要大于采用泥浆循环挖槽方式时的粘度。根据这些条件，为了保证地基稳定所必须的泥浆粘度（漏斗粘度），相关单位分别发表了各自的经验数值。表 7-5 是在静止状态下使用的泥浆粘度实例。表 7-6 是在循环状态下使用的泥浆粘度实例。在地下水丰富或者在施工时槽壁的放置时间较长时（2 d 以上），要参考各表中较大的粘度值。

表 7-5 保持地基稳定的泥浆漏斗粘度（泥浆静止工法）

地 基 条 件	泥 浆 性 能	对 策	漏斗粘度的 经验数值/s
N 为 0 ~ 2，软弱的粘土粉土层，即所谓烂泥地基	泥浆效果不能充分发挥，需增大泥浆密度或水不能浸入的性能	加大膨润土加量，掺加重晶石等	100 以上
N 值较低的粘土层	一般情况下不需要用泥浆，也可用清水。考虑到地下水等，也可以用低密度泥浆	膨润土加量 4% ~ 5%，少量掺加 CMC	20 以下
N 值较高，全部是粘土或粉土	保持最低的粘度和失水量，而粘土或粉土又不会被冲洗掉的程度	膨润土加量 5% ~ 6%，少量掺加 CMC	25 ~ 33
在粘土层中含有较大的砾石层，含砂量较多，但坍塌的可能性小	粘度可以低些，但是要有较小的失水量和较大的屈服值	膨润土加量 6% ~ 8%，稍多掺加一些 CMC	28 ~ 35
全部是 N 值较高的砂层和粉土层的互层	粘度可不用过高，但用 CMC 调节失水量，使屈服值稍大一些	膨润土加量 6% ~ 8%，掺加少量 CMC	28 ~ 35
一般的粉土层，含砂粉土层	粘度、凝胶强度和失水量都不要过高	膨润土加量 7% ~ 8%，掺加较少 CMC	30 ~ 38
全部是 N 值较高的细砂、粗砂层	凝胶强度和失水量都不要过高，粘度不要过低	膨润土加量 7% ~ 9%，掺加 CMC	32 ~ 38
一般砂层	凝胶强度和失水量都用标准质量，泥皮既薄又结实	膨润土加量 8% ~ 10%，掺加 CMC	35 ~ 50
N 值略低的砂层	粘度要稍高，使地基土不被冲刷；使用高粘度的泥浆，降低失水量	膨润土加量 8% ~ 10%，掺加 CMC	30 ~ 60
全部地层 N 值较低，粘土质粉土较多	膨润土浓度较低，增多 CMC，防止洗刷地基土	膨润土加量 7% ~ 9%，掺加较多的 CMC	40 ~ 50
砂砾层	膨润土浓度较高，用 CMC 降低脱水量	膨润土加量 8% ~ 10%，掺加 CMC 稍多	45 ~ 80
有地下水流出或潜流（承压地下水，漏失泥浆预计的坍塌层）	增大泥浆的密度和掺加防漏剂，以提高其粘度	膨润土加量 10% ~ 12%，掺加 CMC、重晶石及其他外加剂	80 以上

注： N 为地基承载力系数。

表 7-6 保持地基稳定的泥浆漏斗粘度（泥浆循环工法）

土质分类	漏斗粘度/s
含砂粉土层	25 ~ 30
砂质粘土层	25 ~ 30
砂质粉土层	27 ~ 34
砂层	30 ~ 33
砂砾层	35 ~ 44

四、泥浆材料的选择

1. 水的选定

若能使用自来水是没有问题的，但在使用地下水、河水或海水等时，要对水质进行检查。对于膨润土泥浆，最好使用钙离子浓度不超过 100×10^{-6} 、钠离子浓度不超过 500×10^{-6} 和 pH 为中性的水。超出这个范围时，应考虑在泥浆中增加分散剂和使用耐盐性的材料或改用盐水泥浆。

2. 膨润土的选定

钠膨润土与钙膨润土相比，其湿胀度较大，但容易受阳离子的影响。对于溶解水中含有大量的阳离子或在施工过程中可能会有阳离子的显著污染时，最好采用钙膨润土。

膨润土的种类不同，泥浆的造浆率、外加剂的种类及掺加量、泥浆的循环使用次数等会有很大的差异，所以要选用性能完好、比较经济的膨润土。

3. CMC 的选定

预计会有海水混入泥浆时，应选用耐盐性 CMC。当溶解性有问题时，要使用颗粒状的易溶 CMC。CMC 的粘度可分为高、中、低三种，越是高粘度的 CMC 价格越高，但是它的防漏效果好。

4. 分散剂的选定

为使泥浆在沉淀槽内容易产生泥水分离，应使用能够减小泥浆凝胶强度及屈服值的分散剂。但在透水性高的地基内，如果对已经变质的、滤失水量增多的泥浆再使用不适当的分散剂，就会进一步增大槽壁坍塌的危险性，所以在这种情况下，最好使用尽管泥浆变质也不会增加滤失水量的分散剂，如碳酸钠或三（聚）磷酸钠等分散剂。

由于膨润土的种类不同。分散剂的效果大不相同，所以要加以注意。

5. 加重剂的选定

一般来说，除重晶石以外，其他加重剂取材较难。

6. 防漏剂的选定

泥浆的漏失通常分为大、中、小三种情况，选用防漏剂时要根据漏失的规模和漏浆层的空隙大小而定。具体选配可参考前面护壁堵漏有关章节。

五、基本配合比的确定

1. 膨润土及 CMC 的掺加量

为保持易坍塌地基的稳定性，需确定必要的漏斗粘度，为获得这个粘度需确定膨润土及 CMC 的掺加量。确定掺加量时可参考表 7-7。

表 7-7 有代表性的配合比实例

地 层	膨润土/%	CMC/%	分散剂/%	其 他
粘性土	6~8	0~0.02	0~0.5	
砂	6~8	0~0.05	0~0.5	
砂砾	8~12	0.05~0.1	0~0.5	防漏剂

2. 分散剂的掺加量

分散剂的加量通常为 0~0.5%。在地下水丰富的砂砾层中挖槽，由于泥浆粘度容易减小，有时也可不用分散剂。但是为使泥浆能形成良好的泥皮而使用分散剂时，对于泥浆粘度的减小，可用膨润土或 CMC 的掺加量来调节。分散剂的种类不同，掺加的效果不同，尽管有的分散剂增大了掺加的量，但在超过一定的量以后，也不再增加分散效果，甚至有时反而会减小分散效果。

3. 加重剂的掺加量

泥浆密度的选择应多少考虑一些安全系数，使其压力比地基压力（有效土压力加水压力）略高一些。

4. 防漏剂的掺加量

从一开始配制泥浆时就决定防漏剂的掺加量是非常困难的。通常是根据挖槽过程中的泥浆漏失状况逐渐改变其加量。

六、泥浆的制备

这里只介绍使用得最多的膨润土泥浆的制备方法。

1. 所需泥浆用量的计算

对施工中所需泥浆数量的计算，要考虑到在施工过程中发生的种种泥浆损失。泥浆损失的主要原因是：①由于泥皮的形成而消耗的泥浆；②由于向地基土内渗透和漏浆而消耗的泥浆；③混在排除的土渣中而被消耗的泥浆；④由于泥浆变质等原因而被废弃的泥浆；⑤由于泥浆溢出墙或飞溅等而消耗的泥浆。

计算泥浆需要量的方法有多种，但均不完善，仅仅是概略的估计而已。本书仅列举一种方法，即按泥浆重复使用次数进行计算的方法。

泥浆的重复使用次数一般用下式求得：

$$n = \frac{\text{设计总挖土方量}}{\text{泥浆总使用量}} \quad (7-3)$$

参考过去在类似的地基和施工条件下泥浆的重复使用次数，由下式求出泥浆总需要量：

$$Q = \frac{V}{n} \quad (7-4)$$

式中：V 为设计总挖土方量，m³；n 为泥浆重复使用次数，次。

这个方法仅考虑泥浆重复使用的次数，但是泥浆重复使用次数不仅由于土质条件和挖槽方式的不同而有差异，而且很多其他因素也会使重复使用次数不同，所以这个方法只能在大概推算时使用。通常的泥浆重复使用次数在 1.2~2.0 之间。

2. 制备泥浆的装置

为了安全且又顺利地进行地下墙工程的施工，在施工过程中必须确保供应优良的泥浆。

一般情况下，膨润土与水混合之后 3h 就有很大的溶胀，可供最低要求的工程施工使用。经过一天的时间之后，可以达到完全的溶胀。而泥浆材料中，有些（如 CMC）是难溶性的材料，所以对泥浆拌制装置的要求是相当严格的。

在选择泥浆搅拌装置时，要充分掌握各种施工条件，特别要注意如下几点：①要能保证必要的泥浆性能；②搅拌效率高，能够在短时间内供给所需用量的泥浆；③便于使用且无故障。

(1) 高速回转式搅拌机

最为常用的是叶片搅拌机，通过高速回转（200 ~ 1000 r/min）叶片，使泥浆产生激烈的涡流，从而把泥浆搅拌均匀，如图 7-1 所示。

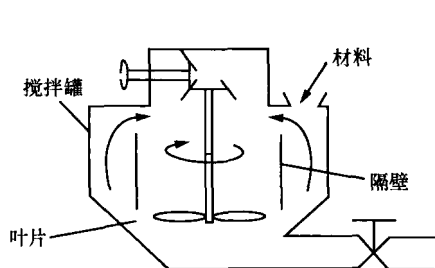


图 7-1 高速回转搅拌机示意图

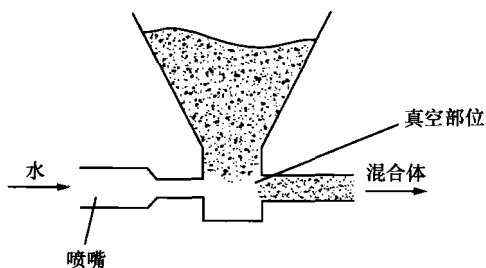


图 7-2 喷射式搅拌机供粉装置

膨润土比较难溶于水，但是如果搅拌机的搅拌叶片回转速度在 200 r/min 以上，不管加料方法如何，都能使膨润土分散在水中。

这类搅拌机是由圆筒形的搅拌罐和搅拌叶片组成，小型搅拌机的泥浆罐容量不超过 1 m³，设置在贮浆槽的上面。大型搅拌机的泥浆罐为 3 m³ 左右，其本身就具有贮浆槽的作用。一般来说，大型和小型的搅拌机在搅拌能力上没有差别，但是为了便于操作和搅拌试验等，常使用便于移动的小型搅拌机。

(2) 喷射式搅拌机

这是一种利用喷水射流的搅拌方式（图 7-2），比高速回转式搅拌机容易进行大容量的搅拌。一般来说，喷射式搅拌机较省电，如果从搅拌机效率来考虑，喷射式搅拌机较为经济。其原理是用泵把水喷射成射流状，通过喷嘴附近的真空吸引力，把粉末供给装置中的膨润土吸出，同时通过射流进行搅拌。

CMC 是很难溶解的一种物质，所以它的溶解方法是一个需要解决的问题。要使 CMC 溶解，可以在泥浆搅拌过程中慢慢地少量地往泥浆中掺加 CMC 粉末，这对增加泥浆粘度是最有效果的方法。若一次过多地掺入 CMC，就容易形成不易溶解的泥团状物体，不能发挥外加剂的作用。也可事先将 CMC 用清水溶解成 1% ~ 3% 的溶液，然后再掺入泥浆里。另外，为了提高 CMC 的溶解效率，最有效的搅拌方法是用喷射式搅拌机，一边自动地一点一点地吸引 CMC 粉末，一边进行喷水射流搅拌。它不需要事先溶解 CMC。

由于其他调节剂或外加剂都比 CMC 易溶于水，所以只要能够充分搅拌膨润土泥浆，

即可一次投放到泥浆中进行搅拌混合。

制备泥浆时，一般搅拌泥浆的顺序为：①水；②膨润土；③CMC；④分散剂；⑤其他外加剂。

由于 CMC 溶液可能会妨碍膨润土的溶胀，所以要在膨润土之后放入。

七、泥浆的再生处理与质量控制

通过沟槽循环或混凝土置换而排出的泥浆，由于膨润土、CMC 等主要材料的消耗以及土渣和电解质离子的混入（最多的污染形式是水泥污染），其性质比原泥浆的性质显著恶化。其恶化程度因挖槽方法、地基条件和混凝土浇灌方法等施工条件而异。失去了原有优良性质的泥浆，就不能发挥其应有的效能，所以要按其恶化程度决定舍弃或进行再生处理。

泥浆中混入大量土渣时，容易出现下述问题：①由于泥浆中混入土渣，所形成的泥皮厚而弱，槽壁的稳定性降低；②难以浇注良好的混凝土；③沉淀于槽底的沉渣增多，不能形成地下墙的良好基底；④泥浆的粘度增大，循环困难；⑤泵和管道等泥浆循环装置和部件的磨损增大。

浇注混凝土所置换出来的泥浆，因与混凝土相接触而变化，当膨润土泥浆中混入阳离子时，阳离子就吸附于膨润土颗粒的表面上，土颗粒就容易相互凝集，增强泥浆凝胶化倾向。在水泥乳状液中含有大量钙离子时，浇注混凝土会使泥浆产生凝胶化。易出现如下问题：①泥浆最重要的性质之一——泥皮的形成性减弱，因而槽壁的稳定性减弱；②粘性增高，土渣分离困难；③在泵和管道内的流动阻力增大。

在制定使用泥浆的计划时，由于制备泥浆的费用较高，而且考虑到环保和不影响交通，泥浆的舍弃颇受限制，所以最好进行再生处理，以便重复使用。再生处理的工序因挖槽方法而异：用泥浆循环挖槽方法时，是以处理含有大量土渣的泥浆和浇注混凝土所置换出来的泥浆为对象的；用直接出渣挖槽方法时，无须在挖槽过程中进行泥浆处理，而只需处理浇注混凝土所置换出来的泥浆。

直接使用恶化了的泥浆，不仅会给各种施工带来不良影响，而且会造成施工精度降低或引起槽壁坍塌，结果将使工程受到重大损失。泥浆质量的控制就是要制备适合地基条件和施工条件的泥浆，而且通过控制，使泥浆在施工过程中保持它的性质。

在适当的时间用适当位置的泥浆试样来检验泥浆的质量，根据试验结果采取对泥浆的舍弃、再生和修正配合比等适当的措施，以提高施工精度、安全性和经济性。



1. 大断面钻掘地层不稳定的因素有哪些？
2. 试述槽壁泥浆的使用方法及对稳定液的要求。

第八章 固相控制与废浆处理

第一节 泥浆中的固相

一般来说，泥浆中的固相物质主要是指配浆粘土、加重物质和其他的固体物质，还有钻进过程中不断进入泥浆的岩屑（包括地层粘土）。固相物质可使泥浆获得所需要的密度、粘度和流动性，以满足悬浮和携带岩屑的要求。由于泥浆向地层的渗滤，固相物质可留在孔壁上形成坚固的泥饼，起保护和稳定孔壁的作用。

泥浆的固相颗粒分成两大类：一类是有用的固相物质，也称必须固相，指维持泥浆性能所必须具有的固相物质，主要指膨润土和化学处理剂，如加重剂（重晶石粉）等。另一类有害的固相物质，又称不必固相，包括岩粉、劣质粘土（组成粘土的成分是复杂的，其中蒙脱石为有效的造浆成分，称有效粘土；而伊利石、高岭石等称无效或低效粘土）等。在不加重的前提下，膨润土只要占到泥浆体积的2%~4%即可满足其流变性和失水等要求，加多了亦能成为有害固相。有害固相越多，泥浆的密度、粘度、动切力、失水、泥饼厚度、流动阻力等越大，不但降低钻速，而且易引起粘附卡钻、钻孔漏失等，从而降低钻孔效率，提高泥浆成本。因而去除有害固相，意义非常重大。

一、固相对钻速的影响

固相含量高，泥浆密度就高，孔底压差增大，提高了液柱对岩石的压持效应，不利于碎岩。另外，固相含量高，粘度增大，切力上升，流变性能变差，降低了水马力的发挥，孔底清洗效果差，钻速大大降低。关于固相类型对钻速的影响，一般认为砂子、重晶石等惰性固相颗粒对钻速的影响较小，岩屑、劣质土的影响居中，优质粘土的影响最大。泥浆的固相含量相同，若粘度不同，对钻速的影响也不同，这主要是因为泥浆中固相颗粒的粒度分布不同造成的，研究试验表明：泥浆中细颗粒的含量越高，对钻速的影响越大。

固相颗粒间、固相与液相间及连续液相的内摩擦反映的是塑性粘度。而影响塑性粘度的主要因素之一是固相含量。固相含量越高，泥浆的密度越大，另外，固相物质颗粒的吸附作用使自由水减少，导致粘度升高。泥浆中各种粒径的固相物质所占比例见表8-1。

从表8-1看出，超细颗粒及胶体物质占整个固相的3/4，根据“在固相总量一定的条件下，粒度越小，比表面积越大，被束缚自由水越多”的原理，这部分小颗粒物质大大提高了固相颗粒间、固相与液相间的摩擦力。是影响塑性粘度的主要因素，因而影响钻速。

表 8-1 某泥浆中各种粒径固相物质所占比例

固相颗粒	粒径/ μm	检测方法	质量分数/%
粗	2000 ~ 10000	10 目筛	0.8 ~ 2
中粗	250 ~ 2000	60 目筛	0.4 ~ 8.7
中细	74 ~ 250	200 目筛	2.5 ~ 15.2
细	44 ~ 74	325 目筛	11 ~ 19.8
超细	2 ~ 44	SUBT 法	56 ~ 70
胶体	2	MBT 法	6.5 ~ 5.5

二、固相对泥饼的影响

泥浆失水量要小，泥饼应薄而韧。泥饼的厚度主要取决于固相颗粒的尺寸、数量、形状及在一定压力下的可塑性。泥饼过厚，一方面会造成起、下钻不畅，产生抽吸或压力激动，诱发孔塌涌水或井喷；另一方面增大钻具与孔壁的接触面，易引发卡钻事故。另外，钻杆会出现泥皮结垢现象，所以要控制固相含量提高泥饼质量。

三、固相对循环系统的影响

固相含量越大，对循环系统的机械磨损就越大。岩粉中有许多砂子硬度超过了金属硬度，能使泥浆泵缸套过早磨损，增加了维修时间，降低了钻孔效率，缩短了钻头寿命，特别是金刚石钻头的寿命。另外，固相含量大。冲击回转钻具、孔底动力钻具如螺杆钻寿命都会降低。值得一提的是，有用固相与有害固相的划分应根据泥浆的种类和使用目的来确定，如细分散泥浆在钻进过程中，由于岩粉的水化、膨胀及冲蚀作用，会继续分散，致使发生泥浆的稠化现象，引起泥浆质量恶化、性能变坏；此时混入的膨润土成分并非有用固相。

四、固相含量与含砂量的测定

1. 泥浆固相含量及其测定

泥浆中所含固相物质的多少称为泥浆的固相含量，一般用体积含量来表示。例如：泥浆的固相含量是 8%，是指泥浆中固相含量的体积占整个泥浆体积的 8%。

泥浆中各种固相含量的数据是固相控制的依据，因而必须对各类固相进行测定和计算。目前，国内外已有多种确定泥浆中各类固相含量的方法，我国现场普遍采用的常规测量方法有蒸馏法和亚甲基蓝试验法。

2. 含砂量

泥浆含砂量是指泥浆不能通过 200 目筛子即直径大于 0.074 mm 的砂子所占泥浆体积的百分数。这些砂子的来源，一方面是造浆用粘土中带来的（原浆中的），另一方面是钻出的岩粉混入泥浆中的。这些砂子是一些非粘土矿物，如长石、石英、氧化铁、灰岩颗粒等。岩心钻探特别是金刚石钻进时岩粉颗粒较细，因此混入的细砂也较多。

泥浆中含砂量高时，对钻探设备（主要指泥浆泵缸套、活塞、阀门、阀门座等）及钻具、钻头磨损很大，并易造成沉砂卡钻，增大泥浆密度，影响泥皮质量，降低钻速。因

此，岩心钻探规定，含砂量应小于泥浆体积的 4%。金刚石钻探中，含砂量应尽可能小，这是因为金刚石钻进时，钻具与孔壁间隙很小（只有几毫米），含砂量大的泥浆，钻进回转阻力大，钻具磨损也更严重。

粘土的类型相同，造浆率不同，含砂量也不同。高岭土泥浆含砂量比膨润土泥浆高，因为同体积泥浆中前者粘土用量多。

测定泥浆含砂量的方法有：

1) 含砂量量杯。它是用水稀释泥浆后，利用泥浆中砂子沉淀方法来测定含砂量的。试验时将 50 mL 泥浆及 450 mL 水灌入量杯内，充分摇动至混合均匀，然后垂直静置 1 min，按斯脱克（Stokes）沉降定律，大于 0.074 mm 直径的砂子可以沉降下来，从量杯下端刻度可以直接读出砂子的体积数。由于是用 50 mL 泥浆测定，因此换算成体积含砂量百分数时应当乘以 2。以前也测静置 3 min 的含砂量，按沉降速度计算，大于 0.025 的颗粒可以沉淀下来。

应当指出，用此仪器时，往往有许多未分散的泥团沉淀，影响读数的准确性。此仪器有玻璃和铁壳两种，铁壳量杯用于现场不易损坏。

2) 筛析法。过滤筒中有 200 目的筛网。玻璃量杯（用于计算泥浆容积及含砂量容积）直径 45 mm，最大容积 200 mL。

测定时，往玻璃量杯中灌入定量（20 ~ 40 mL）泥浆，加水至约 160 mL 处，用手盖住量杯口，将泥浆和水摇匀，慢慢倒入过滤筒内过筛（滤出部分不要），边倒泥浆边用小水冲洗，直至泥浆冲洗干净，筛网上仅留下砂子为止。然后将过滤筒上的砂子经过漏斗用水冲到玻璃量杯中，读出砂子的容积，换算成泥浆体积含砂量的百分数。

第二节 泥浆的固相控制技术

一、降低固相含量的方法

降低固相含量的方法有四种：

1) 稀释法。用大量清水稀释，这种方法不仅处理剂及水消耗大，而且孔内不安全。

2) 替换法。用固相含量低的泥浆替换一部分固相含量高的泥浆，这种方法成本高而且效果不显著。

3) 沉淀法。使岩屑自然重力沉淀，这种方法需要较长的循环系统和较长的时间，且效果不显著。

4) 机械净化法。机械处理法较稀释法及替换法更为经济有效。

二、净化的方法

泥浆钻进过程中，由于岩粉不断进入泥浆中，使泥浆的密度、粘度、含砂量等性能发生变化，泥浆从孔底经钻杆返回地面时，带有大量的岩粉、岩屑，因而需要不断地在地表除去泥浆中的这些无用固相，这就是泥浆的净化工作，有时还要除去泥浆中的气体。

净化的方法有循环槽、沉淀池的重力沉降法净化，机械净化和化学净化三种，目前以重力净化为主。

1. 循环槽、沉淀池的重力沉降法

(1) 循环槽除砂

岩心钻中采用循环槽的断面一般为高 200 ~ 250 mm, 宽 300 mm; 长度依孔深而定, 一般应取长度为 15 ~ 20 m; 循环槽的坡度一般取 1/100。这样, 使泥浆在循环槽中的流速在 15 ~ 18 cm/s 之间, 使泥浆流动时结构受到破坏, 岩粉沉降下来。这时, 流动仍属层流, 而不是紊流, 紊流情况下岩粉不易沉淀下来。坡度越大, 流速越快, 前述充气液除岩粉则要求流速达 30 ~ 35 cm/s。为了更好地破坏泥浆结构, 每隔 1.5 ~ 2 m 需安装挡板一块, 以造成局部涡流, 将岩粉分离出来。

循环槽可用木板、铁板或塑料板制成, 简便的方法就在地面上挖沟也可以达到除砂目的。循环槽布置应根据钻场地盘具体情况安排, 并注意保证其他水源不进入循环槽中以及防寒等问题。

(2) 大池沉淀法

使用大池沉淀法的优点在于成本低且效果好, 无需使用大量固控设备, 固相含量能控制在 3% 以内。根据斯托克斯定律, 影响沉降稳定性的因素是分散相粒子的大小、分散相与分散介质的密度差及分散介质的粘度。一般认为, 泥浆密度越低、粘度越低, 岩粉颗粒越大, 则岩粉沉降速度越快: 沉降法对于清水钻进, 特别是对不分散无固相冲洗液 (如聚丙烯酰胺溶液) 是很有效的, 但对粘度稍大 (如大于 20s) 特别是具有切力的冲洗液来说, 颗粒沉降速度便显著变慢。沉降法有效与否与地层也有关系, 以砂层为主的地层钻进, 这种方法处理简便易行。在一些地层压力较高的地区, 由于必须提高泥浆密度, 不得不提高粘度, 就不适宜用该法了。

沉淀池的宽度以清屑设备抓取岩屑方便为原则。沉淀池用砖或混凝土等砌筑, 为清理方便可分几个池。沉淀的岩屑用抓斗等机器装车, 运至排屑场。

2. 机械净化法

随着人们对泥浆固相认识的不断提高, 净化方法和净化效率问题引起了人们的重视, 先后出现了振动筛、旋流分离器、离心分离机等三类机械式净化设备, 从而告别了大池沉淀的落后局面。根据分离颗粒的尺寸, 旋流分离器又可分为除砂器、除泥器和超级旋流器等三种。

目前固相控制设备常用的是 40 目或 60 目筛、除砂器、除泥器和低速离心机等, 见表 8-2。使用机械设备从表面上看增加了成本, 然而, 清除固相后, 泥浆损耗少, 不必随之加入大量处理剂, 最重要的是加快了机械钻速, 提高了钻孔效果, 因此, 从总体上看, 钻孔成本将大大降低。这类处理方法的主要不足是占用场地较大, 处理量一般不超过 $15 \text{ m}^3/\text{h}$, 不能适应超大量废浆的及时处理。

3. 化学净化法

在钻进过程中, 有时钻速相当快, 机械清除的能力有限, 就有一部分固相得不到清除; 在泥浆循环过程中, 粘土矿物不断分散, 形成超细颗粒或胶体, 即使使用离心机, 对超细颗粒和胶体亦显得无能为力。若将使用固控机械比作治标的话, 提高泥浆的抑制性能, 防止粘土矿物水化分散就是治本, 只有标本兼治, 才能提高固控效率。这种方法即是化学净化法。

表 8-2 固相颗粒和适应的清除方法

颗 粒 分 布			清 除 方 法	
粗	2000 μm	小于 10 目	振动筛	20 目筛
中粗	2000 ~ 250 μm	10 ~ 60 目		40、60 目筛
中细	250 ~ 74 μm	60 ~ 200 目		80 目筛
细	74 ~ 40 μm	200 ~ 325 目		旋流除砂器
特细	44 ~ 8 μm			旋流除砂器
	7 ~ 5 μm			低速离心机
	5 ~ 2 μm			高速离心机
胶体	> 2 μm			化学处理

提高泥浆的抑制性能，以前使用无机盐及高分子聚合物，20 世纪 80 年代出现了阳离子类聚合物，进入 90 年代，出现了正电胶类处理剂。这些物质均取得了较好的效果。

(1) 无机盐

现场使用的无机盐类抑制剂有 Ca^{2+} 、 K^{+} 等。 Ca^{2+} 是通过离子交换，压缩双电层，降低 ξ 电位，使水化膜变薄，将粘土晶层面水化分开的距离大大缩短，钠土在淡水中能达到 120 \AA ，在 Ca^{2+} 作用下至多只能达到 15 \AA ，水化分散能力就大大降低。 K^{+} 的直径与粘土晶层间相对应的两个六角环的间距一致， K^{+} 正好能嵌入其中，嵌入后能阻止水分子的进入，起到抑制分散的作用。

从试验结果看出，加入无机盐类抑制剂能有效抑制粘土水化膨胀，粘土颗粒不易分散，便于清除，然而， Ca^{2+} 、 K^{+} 加入后，对泥浆性能有较大影响，一定要谨慎加入。

(2) 聚合物

有一类高分子聚合物对泥浆内的粘土颗粒起保护作用，对劣质粘土和岩屑起絮凝聚沉作用，称为选择性絮凝剂。絮凝剂能使多个颗粒物质产生桥联而发生絮凝，从而增大团块直径，便于清除，现场常用的絮凝剂有 PHP、PAM 等。包被剂能将粘土颗粒包裹起来，一方面增加颗粒直径，另一方面防止岩粉分散变细。现场常用的包被剂有 FA369 等。

20 世纪 80 年代出现了阳离子类聚合物，主要产品是有机季铵盐类阳离子处理剂。它不仅具有阳离子的优点，还通过聚合物提供的阳离子中和了部分粘土表面的负电荷，从而降低了 ξ 电位，减小了水化膜，可以防止粘土的水化和运移，达到维护孔壁稳定，控制岩粉分散的目的。

但是由于聚合物的分子链长，在较大的剪切力作用下易断裂，聚合物的作用就降低。因而使用水力旋流器或离心机时，往往会造成聚合物的减效，离心机还能去除一些分子量大的聚合物，造成浪费。在现场使用时，我们一定要注意这方面的因素，尽量减少浪费。

(3) 正电胶

正电胶是 20 世纪 90 年代初出现的一种高效抑制剂，有良好的流变性能，它一出现就受到了人们的青睐，现场使用取得了良好效果。

正电胶是一种超细微单分散的多羟基混合金属氢氧化物溶胶，颗粒大约介于 15 ~ 30 nm 之间。当粘土颗粒进入正电胶泥浆后，经过表面瞬时水化后，就与正电胶发生吸附交换作

用,生成由具有较低负 ξ 电位的“正电胶复合体”(后简称复合体)组成的表面凝胶层。由于复合体内电荷密度较高,使复合体内高度水化,“束缚水”固化成“晶体水”,存于表面凝胶层的孔隙结构中,阻止或延缓水分子向粘土矿物内层渗透水化。这个表面凝胶层虽被水化,但并不分散,具有一定的粘弹性,就像一层具有一定强度的弹性膜包裹在颗粒表面,避免了粘土矿物的快速剪切水化分散。

从现场施工情况来看,正电胶对粘土的抑制性优于无机盐类和聚合物类处理剂,且不受水力剪切作用影响,是一种较理想的处理剂,值得去开发和利用。

第三节 固相控制设备

1. 振动筛

振动筛是一种过滤性的机械分离设备(图8-1)。在固相控制过程中,最好的排列顺序是振动筛、沉砂池、除砂器、除泥器和离心机。振动筛具有最先最快分离泥浆固相的特点。没有它的保障,其他设备都会因固相超载而不能正常和连续工作。如果振动筛出了问题,沉砂池也只能对后续设备起一定的临时保护作用。振动筛的处理量也称透液能力,是指单位时间内振动筛处理的泥浆量。它主要取决于四个因素,即振动筛的设计、筛布的目数和类型、泥浆的性能和固相载荷(从孔内返出的岩屑在筛网上沉积的速度)。

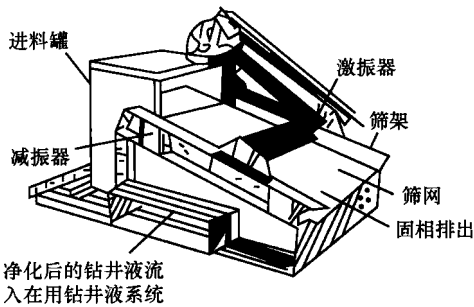


图 8-1 振动筛结构简图

偏心振动筛的筛布一般用 30 目、40 目、60 目、80 目、100 目、120 目、140 目、160 目及 200 目,筛面与水平夹角设计为 $5^{\circ} \sim 18^{\circ}$,一般来说,振动频率越高筛除效果越好,常用设计值为 $1800 \sim 2000 \text{ r/min}$,偏心距为 3 mm,电动机功率为 $2 \sim 3 \text{ kW}$ 。筛除法在石油钻中配合循环槽广泛采用,岩心钻中用得较少,这主要是由于岩心钻中岩粉颗粒较细。

2. 水力旋流器

水力旋流器是除砂器、除泥器和超级旋流器的通用名称,其工作原理是一样的(图8-2),区别仅在于尺寸而已。除泥器的尺寸小、数量多,除砂器尺寸大、数量少。习惯上称 150 mm(锥筒的内径)以上者为除砂器,一些试验样机已达 760 mm; 50 ~ 150 mm 为除泥器,目前使用的除泥器的尺寸范围在 50 ~ 125 mm 之间,其中 100 mm 的最为常用; 50 mm 以下者称为超级旋流器,可分离更细的颗粒($5 \sim 10 \mu\text{m}$)。

含有固相颗粒的泥浆在压力作用下经进液管以切线方向进入液腔作向下的螺旋运动,泥浆以一定的切向速度进入旋流器,重力作用使泥浆向下作轴向运动,周向运动和轴向运动合成的结果使泥浆向下作螺旋运动。从力学角度分析,旋流器中任何一点的流速可分解为三个分速度,即切向速度、轴向速度和径向速度。

(1) 切向速度

在低于溢流管下缘的水平旋流面上,静压力是由周边向中心减少的,并且减少的程度取决于旋流的速度。由于在旋流器的任一半径上静压头和速度头之和是相等的(能量守

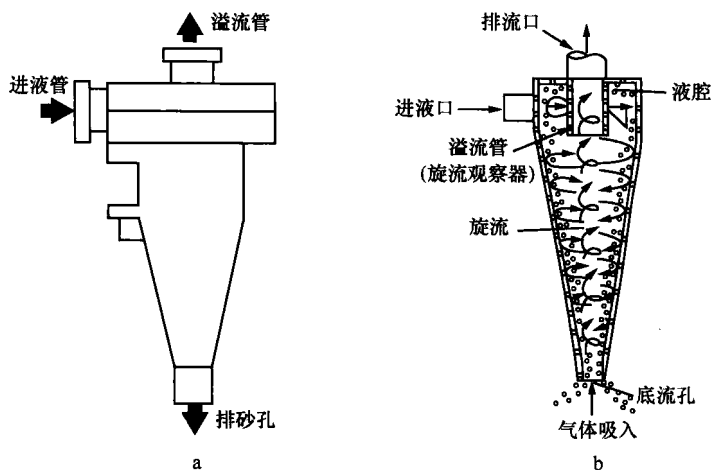


图 8-2 旋流器的结构和工作原理
a—外形图；b—工作原理

恒定律)，所以当静压头随半径减小而减小时，速度头必然增加，故越接近中心周向速度越大，离心力从中心向周边方向剧烈减小。如图 8-3 所示，由于靠近旋流器中心处的液体的周向速度及相应的离心力如此之大，以致使液体发生破裂并沿着中心线形成空气柱。液流中尺寸较大、较重的颗粒在离心力的作用下被甩向旋流器壁，并在重力作用下边旋转边下落，由底流孔排出，小部分液体夹带细颗粒也从底流孔流出，而大部分液体在接近底流孔时又改变方向，呈上升的螺旋流从溢流管排出。这种运动规律与轴向速度有很大关系。

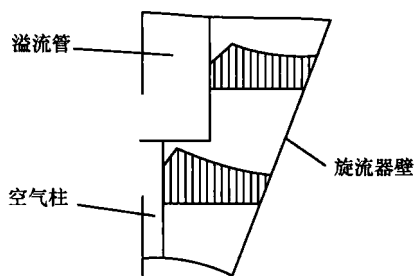


图 8-3 水力旋流器内切向速度的分布

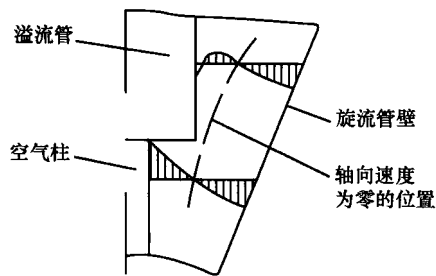


图 8-4 水力旋流器内轴向速度的分布

(2) 轴向速度

轴向速度亦称垂直速度。在水力旋流器内，沿圆柱和圆锥内壁高速向下的液流对旋流器的工作是非常重要的，因为它运送已被分离的颗粒至底流口。在中心区域向下的液流部分地与向上的液流平衡。也就是说，在沿高度的任一水平截面上总存在一轴向速度为零的点，该点的内侧轴向速度为正，该点的外侧轴向速度为负。在旋流器内部轴向速度为零的点的轨迹为一圆锥形的平面，在该平面以内液体向上运动，在其外侧液流向向下运动（图 8-4）。

(3) 径向速度

到目前为止，对径向速度的研究尚不够充分，径向速度通常比其他两个分速度小得多，故在实际计算中可忽略不计。

总之，在旋流器里有两股螺旋运动的流体，一个是夹杂较粗、较重的固体颗粒沿旋流器壁向下作螺旋运动，另一个是携较细、较轻的固体颗粒连同中间的空气柱一起向上作螺旋运动，从溢流管排出。如果底流口调节适当，给旋流器输入纯液体时，液体将全部从溢流口流出。如果液体里含有可分离的固相颗粒，颗粒将从底流口排除，并带着附在它们表面的液膜。当底流口的大小符合上述要求时，那么就规定旋流器内部向上的旋流束的起点为平衡点。如果底流口的开度相对于平衡点所对应的直径太小，那么平衡点和底流口边缘之间的区域将形成“干区”。所谓干区，即平衡点与底流口边缘之间的内壁比较干燥。当较细的颗粒失去它们的水膜企图通过干区时，容易粘附在上面，造成堵塞，这种不合理的调节称为“干底”，干底引起的堵塞称为干堵。如果底流口的开度大于平衡点所对应的直径，将有部分液体从底流口流出，这种不合理的调节称为“湿底”。在实际操作中，理想的平衡点很难调节和保持，同时也无必要。在只有干底和湿底两种选择下，还是宁湿无堵好。若湿底现象不严重，泥浆的损失并不太大。旋流器如操作不当，很容易造成堵塞现象，图 8-5 和表 8-3 为旋流除砂器的四种工作状态的对比。

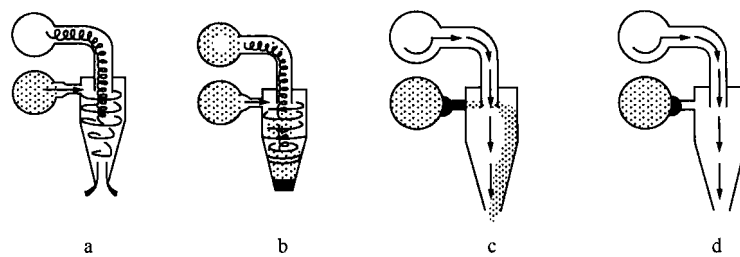


图 8-5 旋流除砂器的四种工作状态

表 8-3 旋流除砂器的四种工作状态

	图 8-5a	图 8-5b	图 8-5c	图 8-5d
状态	正常操作	底流被堵	进口部分被堵	进口完全被堵
进流速度	高	高	低	低
锥体作用	强	强	无	无
固相分离	良好	部分分离	无分离	无分离
底流处的固相	良好	无固体	整个泥浆流失	高压泥浆流失（从其他处返流）
锥体磨损	正常磨损	急剧磨损	无	无
成本	低	高	高	高

旋流器的尺寸取决于泥浆的处理量、粘度、密度和土颗粒的混入率等，可通过调节底流阀门来调节处理效果。如果在泥浆中含有粗粒土，会损伤旋流器的内壁并使阀门堵塞，所以必须事先用振动筛或沉淀池除去粗粒土。另外为了产生大的旋流离心力，喷嘴进口的流速要达到 9 ~ 12 m/s，泵压为 0.25 ~ 0.35 MPa。根据岩心钻探现场用活塞泵排量为

200 ~ 250 L/min 的条件，一般设计喷嘴断面为 4 cm² 左右。圆筒体内径 D 在岩心钻使用时可取 150 ~ 180 mm（目前现场多用 180 mm），可分离更细的砂子（岩粉）。圆筒体高度可取 $(0.5 \sim 1.5) D$ 的范围。溢流管的作用是排出净浆，其内径取 $0.25D$ 左右，它插入圆筒体内的深度取 $(0.65 \sim 1) D$ 范围。

锥形体为沉砂之用，锥体角度一般取 20°，据此角度再计算出其长度。出砂嘴另做成一组可拆零件，出口直径可以变换（6、8、10、12 mm），泥浆粘度高或砂多且粒大时，出口直径应取大的数值，粘度低或砂细且较少时，取小值。工作时下口应敞开，让带砂屑的浓泥浆慢慢流出来（要消耗一部分泥浆）。为了工作方便，也可在出砂嘴下部另做一个储砂器，定期将带砂屑的废浆一次放出。

除砂器可用 2 ~ 3 mm 厚的薄钢板制成。在每班升降钻具时，利用泥浆泵回水管临时和除砂器进浆管连接起来，定期除去泥浆池中的砂屑。

旋流器的处理能力可从两方面来评价，一是允许输入泥浆的能力，二是底流口的排泄能力。可用下面的公式作近似计算：

$$Q = \frac{1}{12} d_i d_o \sqrt{gP} \cdot \frac{1.82}{\alpha^{0.2}} \quad (\alpha < 20^\circ) \quad (8-1)$$

式中： Q 为旋流器能够处理的泥浆量，L/s； d_i 为进液管直径，cm； d_o 为溢流管直径，cm； g 为重力加速度，cm/s²； P 为输入压力，0.1 MPa； α 为锥角，度（ $\alpha < 20^\circ$ ）。

以上是单个旋流器的处理量计算式，根据泥浆的循环流速（即排量），可以确定需要的旋流器的个数，在实际应用中旋流器组的总泥浆处理量要大于排量的 10% ~ 20%，以防旋流器超载。

3. 泥浆清洁器

泥浆清洁器是一组旋流器和一台细目振动筛的组合。上部为旋流器，下部为细目振动筛，如图 8-6 所示。泥浆清洁器处理泥浆的过程分为两步：第一步是旋流器将泥浆分离成低密度的溢流和高密度的底流，其中溢流返回泥浆循环系统，底流落在细目振动筛上；第二步是细目振动筛将高密度的底流再分离成两部分，一部分是重晶石和其他小于网孔的颗粒透过筛网，另一部分是大于网孔的颗粒从筛网上被排出。所选筛网一般在 100 ~ 325 目之间，通常多使用 150 目。由于旋流器的底流量只占总循环量的 10% ~ 20%，因此筛网的“桥糊”和堵塞不是严重问题。

泥浆清洁器主要用于从加重泥浆中除去比重晶石粒径大的岩粉。加重泥浆在经过振动筛的一级处理之后，仍含有不少低密度固体的颗粒。这时如果再单独使用旋流器进行处理，重晶石会大量地流失。使用泥浆清洁器的优点就在于：既降低了低密度固体的含量，又避免了大量重晶石的损失。

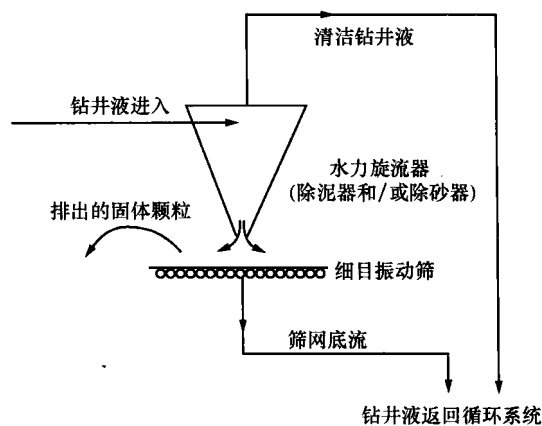


图 8-6 泥浆清洁器的工作原理

4. 离心机

工业用离心机有多种类型，但用于泥浆固控的主要是倾注式离心机，其结构如图 8-7 所示。

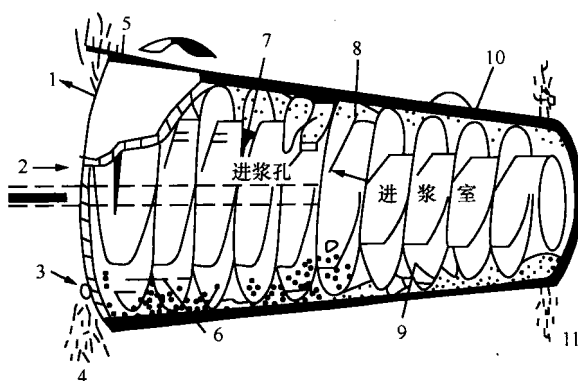


图 8-7 离心机结构简图

1—分离后的泥浆出口；2—泥浆进口；3—溢流口；4—溢流液体；5—外壳旋转产生极高的离心力；6—泥浆池液面由调节出口来控制；7—槽；8—与外壳同方向旋转但较外壳转速略低的输送器；9—泥饼；10—干湿区过渡带；11—底流口

倾注式离心机又称为沉降式离心机，其核心部件有滚筒、螺旋输送器和变速器。离心机工作时，泥浆通过一固定的进浆管进入离心机，然后在输送器轴筒上被加速，并通过在轴筒上开的进浆孔流入滚筒内。由于滚筒的转速极高，在离心力作用下，密度或体积较大的颗粒被甩向滚筒内壁，使固液两相发生分离。其中固体被输送器送至滚筒的小端，经底流口排出；而含有细颗粒的流体以相反方向流向滚筒大端，从溢流口排出。滚筒内液层的厚度靠调节离心机端面上 8~12 个溢流孔来控制。输送器能够连续地推动沉降下来的固体颗粒向小端移动。当移至图中所示的干湿区过渡带时，由于离心力和挤压力的作用，大多数自由水被挤掉，而留在颗粒表面的主要是吸附水。因此，离心机是唯一能够从分离的固相颗粒上清除自由水的泥浆固控装置，它可将液相损失降低到最低程度。变速器的作用是使输送器的转速稍慢于滚筒的转速，一般仅慢 20~40 r/min，其目的在于能连续输送固相。多数变速器的变速比为 80:1，即滚筒每转动 80 转，输送器便少转一转。例如，若滚筒以 1600 r/min 的转速旋转，输送器则以 1580 r/min 的转速旋转，它们之间的转速差为 20 r/min。

离心机可用于处理加重泥浆以回收重晶石和清除细小的岩粉颗粒。在 20 世纪 50 年代初钻孔用离心机问世之前，加重泥浆的固控除使用振动筛外，主要采取加水稀释的方法，这样处理的结果不仅泥浆性能不稳定，而且使泥浆成本大幅度增加。使用离心机的好处是，既降低了加重泥浆中低密度固相的含量，使粘度、切力得到有效的控制，又可大大地减少重晶石的补充量，从而降低泥浆的成本。具体做法是，泥浆用离心机处理后，将底流的固相颗粒回收、而将溢流的流体（主要包含低密度固体）丢弃。需要注意，泥浆清洁器和离心机都可用于从加重泥浆中清除岩粉，并回收大部分重晶石。但是，这两种设备清除颗粒的粒度范围有所不同。从宏观来看，泥浆清洁器清除的岩粉颗粒比重晶石颗粒大，

而离心机清除的钻屑颗粒比重晶石颗粒小。它们的作用可以相互补充，对于密度大于 1.80 g/cm^3 的加重泥浆，最好两种设备同时使用。

离心机还常用于处理非加重泥浆以清除粒径很小的岩屑颗粒，以及对旋流器的底流进行二次分离，回收液相，排除岩屑。

为了提高离心机的分离效率，一般需对输入离心机的泥浆用水适当稀释，以使泥浆的漏斗粘度降至 $34 \sim 38 \text{ s}$ 范围内为宜，稀释水的加入速度为 $0.38 \sim 0.5 \text{ L/s}$ 。离心机的转速对分离颗粒粒度也有很大影响。例如，处理量为 $21.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 的离心机，当工作转速为 3250 r/min 时，对水基泥浆可分离重晶石至 $2 \mu\text{m}$ ，岩屑至 $3 \mu\text{m}$ 而工作转速为 2500 r/min 时，可分离重晶石至 $6 \mu\text{m}$ ，岩屑至 $9 \mu\text{m}$ 。根据斯脱克斯定律，重晶石颗粒可与 1.5 倍于其粒径的低密度固体颗粒同时沉降。在使用离心机时，应注意选择合适的转速和处理量，以取得预期效果。

各种固控设备可分离固体颗粒的大致粒度范围如图 8-8 所示。

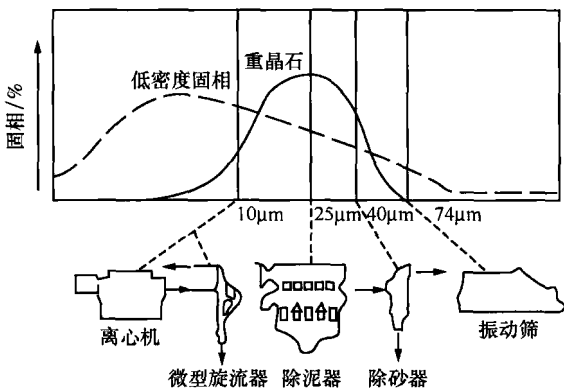


图 8-8 各种固控设备可分离固体颗粒的粒度范围

第四节 工程废浆处理

废泥浆是钻进过程中从孔内排除的含大量泥砂及处理剂的无用泥浆。如果不经处理而任意排放，势必造成水质和环境污染，如土地板结、碱化现象。在城市施工时废浆排放问题尤为显得突出，特别是在易自然造浆的粘土层钻进，往往会产生大量的高粘度高密度废泥浆，加上排出的大量钻屑，处理不当很容易造成城区环境污染，下水道淤积。

废弃泥浆中无机物、有机聚合物、油品、粘土、加重材料、所钻地层的岩屑，此外还含有重金属组分等有毒物质。这些排放物堆在井场或掩埋，或流入农田、河流、海洋，或渗入地层，都会污染环境，影响动植物生长，危及人类生命安全。

目前，使用的泥浆主要有水基和油基两大类。水基泥浆一般由以下三部分组成：

- 1) 固相，主要有膨润土、加重材料和地层岩粉。
- 2) 液相，配制泥浆时加入的水及地层水。
- 3) 化学处理剂，目前共十大类。无机盐，如 NaCl 、 KCl 、 NaOH 、石膏等；有机物如纤维素、腐殖酸类、沥青类、生物高聚物、表面活性剂，以及各种油品（如柴油、润滑油

油及其他各种烃类)等。

废泥浆是一种复杂的多相分散体系,组成极其复杂,因而后续的治理工作比较困难。在评价泥浆毒性方面,美国做了大量的工作。结果表明,在废液中对环境污染最大的物质是高浓度的盐溶液和可交换性钠离子,其次是油类,可溶性重金属(如 Hg、Cr、Cd、Pb、Zn、Ba 等),有机污染物(如多环芳烃、酚类、卤代烃、有机硫化物、有机磷化物、醛类、胺类等),高 pH 值的 NaOH、Na₂CO₃ 溶液,高分子有机物特别是降解后的小分子有机物等。重金属属于国家环境保护局划定的第一类污染物,能在环境或动植物体内蓄积,对人体健康产生长远的不良影响。例如:铬,常见有三价铬和六价铬,六价铬比三价铬毒性高 100 倍,且易为人体吸收并蓄积;汞,属于剧毒物质,有机汞毒性大于无机汞,它们均可在体内蓄积,引起全身中毒;镉,毒性很大,易积累于肾脏,引起泌尿系统功能变化;铅,可在动物或人体内蓄积,引起神经机能失调和肾损伤。废弃泥浆对环境的影响主要是对土壤和植物的影响。

1. 对土壤的影响

目前认为,废液中对土壤和植物造成有害影响的主要成分是过量的盐类和可交换性钠离子。因为它们可造成土壤板结,使植物难以从土壤中吸收水分,不利于植物生长。

废液的有机组分中,油类和木质素磺酸盐对植物毒害最大,虽然它们比起盐类和可交换性钠离子的毒性要小些,但柴油对环境的影响时间长,对植物有潜在危害。木质素磺酸盐的降解产物复杂,其中包括酚类和硫醇等,对植物也具有潜在危害。废泥浆中的杀菌剂因常含有醛和胺,对鱼类、鸟类有毒害,也有潜在毒性。

由于土壤具有一定的自净能力,上述影响可得以减轻或消除。诸如纤维素、淀粉、醇类、油类易降解,但某些添加剂如丙烯酰胺、木质素磺酸盐、黄原胶和沥青等却不易降解。重金属在土壤中可与土壤进行复杂的物理、化学、生物作用,与有机物结合及微生物降解等。

2. 对植物的影响

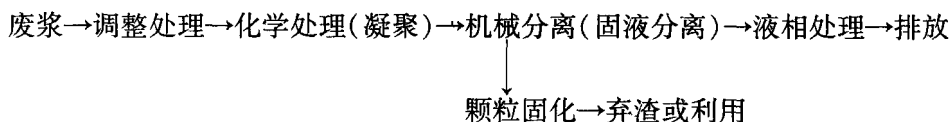
植物对重金属的吸收有一定的选择性,镉、铜、铅、锌可以部分被植物吸收,吸收程度与废泥浆和土壤混合物中的金属含量有关。钡、铬、汞都不能被植物吸收。废液对土壤可能产生三种结果:①改善某些土壤,特别是砂质土壤的肥力,增强其亲水性。将其撒放于贫瘠的土壤中,废液中的钙镁离子有利于植物生长。②降低某些土壤的肥力,特别是含粘土多的土壤。这是因为它降低了土壤的渗透性,还可能造成土壤盐碱化等不利影响。③对土壤几乎无影响。虽然废液中的磷酸盐及其他化学添加剂可作为土壤的养分,有机物降解后可转化为腐殖土,但研究者仍然强烈反对把废液作为肥料,因为其中的营养成分可吸收程度都很低。

废浆净化处理就是采用固液分离方法尽可能将泥浆中的泥砂石等固相成分与水分离,水回收使用或外排(达到环保排放标准),而分离出的固相作回填或车装运到指定地方堆放,以防止污染环境,减少运输量,降低施工成本。

目前国内外常用的废浆处理方法有回填法、土地耕作法(均匀撒在钻孔现场,然后用耕作机械把它们混入土壤,但有害物质含量不允许超过土壤的安全负荷)、泵入孔眼或安全地层法、固液分离法(特别是水基泥浆含水量多在 70% 以上,这样高的含水量仅靠自然蒸发是不现实的,目前主要通过加入混凝剂如铁盐、铝盐等破坏交替稳定性,再用机

械脱水)、化学固化法(加入固化剂如水泥、石灰、水玻璃、氯化钙、脲醛树脂等使废浆固化)。

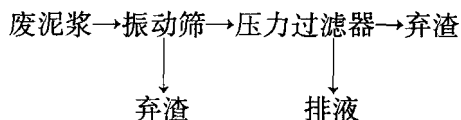
废泥浆的产生量对于直径为 400 mm 的水井钻探孔, 每钻进 1 m 约产生 1 m^3 左右的废浆, 钻孔灌注桩更多。按国家环保规定, 不得向公共水域包括海域排放, 也不得排入地下水道和农田。随着城市建设规模扩大, 废浆处理已迫在眉睫。废泥浆处理的基本流程包括化学处理和机械处理两部分, 大致流程如下:



下面简述几种常用的处置法:

1) 稀释或外运法。向泥浆中添加大量水将其稀释, 然后排放, 或用罐装车将泥浆直接外运排放。此法污染环境或运输成本高。

2) 机械处理法。用于加速固液分离, 常用的方法有压力过滤、真空过滤和离心分离等。压力过滤方式如下所示:



3) 化学处理法。在废浆中加入少量化学处理剂对固相进行絮凝, 使其颗粒变粗而沉淀、分层。此法对稀泥浆有效, 但对浓泥浆沉淀很慢, 且絮凝物松散并含有大量水分不便外运。化学絮凝有无机聚结法和有机高分子絮凝法两种。无机聚结剂如 AlCl_3 、 CaCl_2 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 等高价阳离子无机盐; 有机处理剂是一些长链高聚物, 如聚丙烯酰胺、聚乙烯醇、聚苯乙烯等。试验表明, 同等条件下有机高聚物效果比无机盐好, 且用量少; 高聚物加量对絮凝效果有较大影响, 加量较少时对固相成分有絮凝沉降作用, 当超过一定量后, 长链大分子之间相互缠结使整个泥浆体系形成连续网状结构, 而起分散稳定作用。如分子量 $(600 \sim 900) \times 10^4$, 水解度 10%~30% PHP, 加量 $(10 \sim 30) \times 10^{-6}$ 时效果较好, 一分钟泥浆沉降率达 80% 以上, 加量较大时导致粘土分散而不絮凝。试验也表明, 条件相同时, 随着泥浆密度的增加, 絮凝物的沉降速度和沉降率都显著下降, 当泥浆浓度高达 20% 以上时, 絮凝物沉降很慢, 这是因为絮凝物固相体积相对增大, 延缓了其沉降, 絮凝效果并没有很大影响。

4) 综合法。如中南大学探矿工程研究所曾多次用化学絮凝-筛子过滤-固结法处理废浆, 取得了较好的效果。加入固结剂的目的是使液塑性固相絮凝物形成固态物质, 常用的固结剂如水玻璃、石灰、水泥等。



复习思考题

1. 何为固相含量? 其对钻速有何影响?
2. 如何降低泥浆固相含量?
3. 常用的固相控制设备有哪些?
4. 如何处理工程废浆?

参考文献

- 武汉地质学院主编. 1981. 钻探工艺学. 北京: 地质出版社
- 何远信. 2001. 国内外泥浆材料的现状及发展趋势. 探矿工程 (岩土钻掘工程), (5)
- 黄汉仁, 杨坤鹏, 罗平亚. 1981. 泥浆工艺原理. 北京: 石油工业出版社
- 李健鹰. 1988. 粘土胶体化学. 山东东营: 石油大学出版社
- 李世京. 1990. 钻孔灌注桩施工技术. 北京: 地质出版社
- 李世忠. 1989. 钻探工艺学 (中册) —— 钻孔冲洗与护壁堵漏. 北京: 地质出版社
- 刘灿明, 王日为. 1999. 无机及分析化学. 北京: 中国农业出版社
- 刘广志. 1982. 岩芯钻探事故的预防与处理. 北京: 地质出版社
- 王生. 1998. 钻探工艺与设备. 长春: 吉林科学技术出版社
- 王效祥. 1991. 泥浆工艺原理. 北京: 石油工业出版社
- 王中华. 2004. 泥浆技术现状及发展方向. 断块油气田, (9)
- 乌效鸣, 胡郁乐, 贺冰新等. 2002. 钻井液与岩土工程浆液. 武汉: 中国地质大学出版社
- 夏俭英. 1991. 泥浆有机处理剂. 山东东营: 石油大学出版社
- 鄯捷年. 2001. 泥浆工艺学. 山东东营: 中国石油大学出版社
- 张家义, 于进海, 胡景东等. 2002. 庆阳地区泥浆技术. 泥浆与完井液, (5)
- 张麒麟. 2000. 国内新型泥浆处理剂研究进展. 泥浆与完井液, (5)
- 周珊. 1996. 旋转钻孔与泥浆发展简史. 石油科技论坛, (2)