

# 山东某长石矿石除铁增白选矿试验

张 鑫<sup>1</sup> 张凌燕<sup>1,2</sup> 洪 微<sup>1</sup> 刘 新<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院,湖北 武汉 430070;  
2. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室,湖北 武汉 430070)

**摘 要** 山东某长石矿石属高含铁量长石矿石,铁赋存于铁矿物、云母、黄铁矿及一些含铁碱金属硅酸盐中。为了从该矿石获得陶瓷工业用高品级钾长石原料,对其开展了除铁增白选矿试验研究。试验根据矿石性质,采用磨矿—按 20 μm 脱泥—高梯度磁选脱除磁性铁—乙黄药浮选脱除黄铁矿—十二胺+煤油浮选脱除云母—ZL-1 浮选脱除含铁碱金属硅酸盐工艺流程,经系统的条件试验,最终获得了产率为 76.24%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 回收率为 80.31% 的长石精矿,其 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 16.05%、K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O 含量为 12.50%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 0.09%、白度为 67.26%,达到陶瓷行业用钾长石精矿一级品质量标准。

**关键词** 高含铁量长石矿石 除铁增白 脱泥 高梯度磁选 浮选

中图分类号 TD973<sup>+</sup>.5 文献标志码 A 文章编号 1001-1250(2014)-08-074-05

## Mineral Processing Experiment on Iron Removal and Whitening of Feldspar Ore in Shandong

Zhang Xin<sup>1</sup> Zhang Lingyan<sup>1,2</sup> Hong Wei<sup>1</sup> Liu Xin<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;  
2. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan 430070, China)

**Abstract** A feldspar ore in Shandong province belongs to high-Fe feldspar ore, and ferrum mainly exists in form of iron minerals, mica, pyrite, and Fe-bearing alkali metal silicate. Experiments of iron removal and whitening were carried out in order to obtain high grade potassium feldspar as raw material for ceramic industry. Based on the ore property, the experiment was carried out through the process of grinding, desliming at 20 μm, magnetic iron removal by high gradient magnetic separation, pyrite removal by flotation using ethyl xanthate as collector, mica removal by flotation using lauryl amine + kerosene as collector, iron content alkali metal silicate removal by flotation using ZL-1 as collector. Through the experiment, feldspar concentrate with yield of 76.24%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> recovery of 80.31%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content of 16.05%, 12.50%, 0.09%, whiteness of 67.26% is achieved respectively, which can reach the first-grade K-feldspar quality standards for ceramic industry.

**Keywords** High-Fe feldspar ore, Iron removal and whitening, Desliming, High gradient magnetic separation, Flotation

长石属典型架状结构碱金属铝硅酸盐矿物,化学性质稳定、耐酸性好。在陶瓷工业中,长石主要用作坯体配料、釉料。经高温熔融后,长石可在坯体中形成黏稠的玻璃熔体,并提供陶瓷所需 K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O,从而促使瓷坯迅速降温,减少能耗<sup>[1]</sup>。此外,高温加工后形成的长石熔融体饱和分布于各晶体颗粒之间,可以增强坯体致密度,降低孔隙率。含铁杂质的含量直接决定陶瓷用长石原料的工业品级。长石矿石中的铁主要赋存在云母、铁矿物、黄铁矿、含铁碱金属硅酸盐(如电气石、角闪石、石榴子石等)中,采用铁介质磨矿过程中也会带入部分机械铁,这些含铁杂质可通

过脱泥、磁选、浮选等技术手段脱除<sup>[2]</sup>。此外,应用于陶瓷领域的长石除需保证致色杂质铁、钛含量较低外,当矿石原料中含有较多碳酸盐类脉石矿物时,也必须进行脱除,以免在陶瓷高温烧结过程中,碳酸盐分解使陶瓷表面产生气孔,影响制品的质量<sup>[3-4]</sup>。

山东某长石矿石含铁矿物含量较高而碳酸盐矿物含量较低,本试验根据矿石性质进行除铁增白选矿试验研究,目标是获得高品级的陶瓷工业用长石精矿,为该矿石的高附加值利用提供依据。

### 1 试样性质

XRD 分析和显微镜观察结果表明,矿石中的目

收稿日期 2014-06-12

作者简介 张鑫(1991—),女,硕士研究生。

的矿物为微斜长石、正长石和钠长石,主要杂质矿物为石英、云母、赤铁矿、褐铁矿、磁铁矿、黄铁矿及一些含铁碱金属硅酸盐,此外还有少量碳酸盐矿物和含钛矿物。矿样的化学多元素分析结果见表 1。在光学显微镜下采用线测法<sup>[5]</sup>测定矿物含量,结果见表 2。

表 1 原矿化学多元素分析结果

Table 1 Chemical composition analysis of the raw ore %

成分	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
含量	3.53	8.19	15.24	70.02	1.68	0.44
成分	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	烧失
含量	0.04	0.42	0.01	0.01	0.02	0.38

表 2 原矿矿物含量

Table 2 Mineral contents of the raw ore %

矿物	钾长石	钠长石	石英	云母	方解石	铁矿物	电气石、角闪石	其他
含量	48	30	12	2.5	1	4.5	1	1

从表 2 可以看出,矿石中的主要杂质为含铁矿物、碳酸盐矿物和含钛矿物含量均较低,因此选矿的主要任务是除铁。

## 2 试验流程

针对矿样的性质,拟采用图 1 所示的磨矿—脱泥—高梯度磁选—浮选流程对其进行除铁增白。试验过程中采用 GKF-V 型多元素分析仪和 YQ-Z-48A 型白度仪测定精矿产物的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量和煅烧白度以确定合适的工艺条件。煅烧白度测定用样品的制备方法为:将待测精矿产物研细,用压片机压制出厚约 0.4 cm 片样,在 SX2-8-16 型马弗炉中于 1 220 °C 下恒温煅烧 20 min。

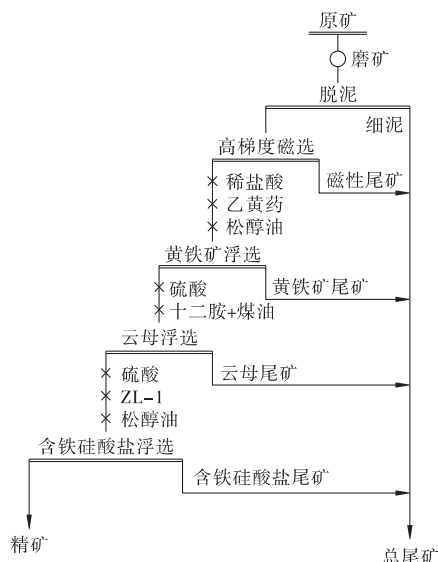


图 1 试验流程

Fig. 1 Experiment flow-sheet

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 磨矿试验

在 XMB-70 型三辊四筒棒磨机上进行磨矿试验,磨筒容积为 2.0 L,以根数比为 16:12:10 的 φ16 mm × 146 mm、φ12 mm × 146 mm、φ8 mm × 146 mm 钢棒为介质,每次给矿量为 250 g,磨矿浓度为 50%。改变磨矿时间分别为 5、6、8、10、12 min,磨矿产品中 -0.074 mm 粒级含量的变化如图 2 所示。

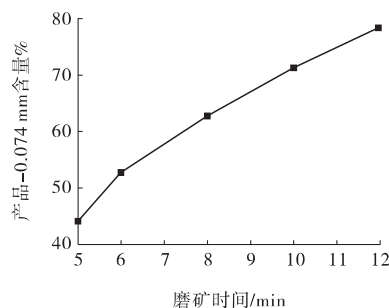


图 2 磨矿曲线

Fig. 2 Grain size curve at different grinding time

在显微镜下观察不同时间磨矿产品中矿物的单体解离情况,初步选取磨矿时间为 8 min,相应的磨矿细度为 -0.074 mm 占 62.75%。

### 3.2 脱泥粒度的确定

磨矿过程中易产生细泥,细泥的存在会恶化浮选过程并导致药剂耗量增大,因此需要通过脱泥来消除细泥对浮选的不利影响。此外,铁介质磨矿产生的机械铁杂质也多在细泥中富集,脱泥可简单有效地将其除去。脱泥粒度过细达不到脱泥效果,过粗则会加大长石的流失,因而脱泥粒度的选择至关重要<sup>[6]</sup>。为确定适宜的脱泥粒度,对细度为 -0.074 mm 占 62.75% 的磨矿产品进行了粒度分析,结果如表 3 所示。

表 3 磨矿产品粒度分析结果

Table 3 Particle size distribution of the grinding products

粒级 /mm	产率 /%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量 /%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 分布率 /%
+0.425	6.04	0.42	1.54
0.425 ~ 0.150	11.07	0.89	5.99
0.150 ~ 0.074	20.14	0.95	11.64
0.074 ~ 0.045	23.84	1.78	25.81
0.045 ~ 0.030	20.01	1.94	23.61
0.030 ~ 0.020	8.96	2.45	13.35
0.020 ~ 0.015	4.28	2.88	7.50
0.015 ~ 0.010	3.60	2.94	6.44
-0.010	2.06	3.28	4.12
合计	100.00	1.64	100.00

从表 3 可以看出,粒度级别越小,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量越高,特别是粒度级别小于 30 μm 时,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的富集尤

其明显。但若脱去 -30 μm 粒级,产率损失将达到近 20%,且 +20 μm 粒级中铁质的脱除通过高梯度磁选、浮选也可以实现,因而选定脱泥粒度为 20 μm。

### 3.3 高梯度磁选试验

将原矿磨至 -0.074 mm 占 62.75%,采用沉降法按 20 μm 脱泥后,在磁介质为 φ3 mm 钢棒的 SLon-100 周期式脉动高梯度磁选机上进行高梯度磁选,以除去磁性铁矿物和剩余的机械铁杂质。试验中固定磁选机脉动冲次为 400 r/min、脉动冲程为 30 mm、给矿浓度为 10%,着重考察了磁感应强度和矿浆流速对除铁效果的影响。

#### 3.3.1 磁感应强度试验

暂取矿浆流速为 0.9 cm/s,依次调整磁感应强度为 0.7、0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 T 进行高梯度磁选,试验结果如图 3 所示。

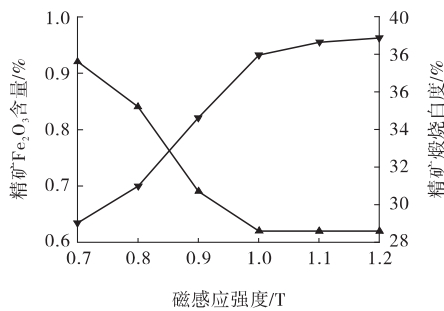


图 3 磁感应强度试验结果

Fig. 3 Test result at different magnetic induction intensity

▲—Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量; —煅烧白度

图 3 表明,磁感应强度越高,对磁性矿物的去除越有利,但当磁感应强度超过 1.0 T 后,精矿 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的下降幅度和精矿煅烧白度的提高幅度均十分有限,因而选定磁感应强度为 1.0 T。

#### 3.3.2 矿浆流速试验

使磁感应强度为 1.0 T,依次调整矿浆流速为 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 cm/s 进行高梯度磁选,试验结果如图 4 所示。

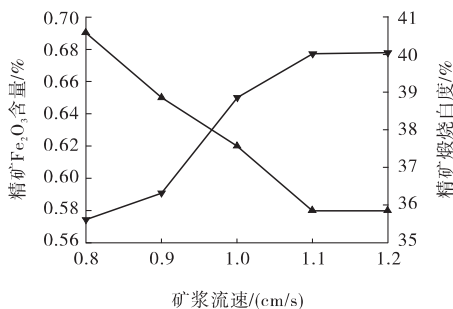


图 4 矿浆流速试验结果

Fig. 4 Test result at different pulp flow rate

▲—Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量; —煅烧白度

根据图 4,选择矿浆流速为 1.1 cm/s。此时所得高梯度磁选精矿的产率为 85.72% (对原矿)、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

含量为 0.58%、煅烧白度为 40.02%。

### 3.4 浮选试验

高梯度磁选精矿中尚残留有非磁性的含铁矿物黄铁矿、云母、电气石、角闪石等,导致其 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量仍高达 0.58%,同时煅烧白度仅为 40.02%,故须通过浮选将这些非磁性含铁矿物除去。其中黄铁矿可在 pH=5~6 条件下采用黄药类捕收剂浮出,云母可在 pH=3~4 条件下采用胺类阳离子捕收剂浮出,含铁碱金属硅酸盐电气石、角闪石等可在 pH=4~5 条件下采用石油磺酸盐类捕收剂浮出<sup>[7-9]</sup>。

#### 3.4.1 黄铁矿浮选试验

由于黄铁矿极易氧化,且强酸性环境易破坏其可浮性,因而其浮选优先进行。所采用的调整剂为稀盐酸(浓度 10%),捕收剂为乙黄药,起泡剂为松醇油。之所以采用稀盐酸而不采用硫酸作为黄铁矿浮选的调整剂,是因为稀盐酸除调节矿浆环境外,还可溶解矿样中的少量碳酸盐矿物。

在稀盐酸调 pH=5.5、松醇油用量为 20 g/t 固定条件下,改变乙黄药用量依次为 80、120、160、200、240、280 g/t (药剂用量均对原矿计,下同)进行黄铁矿的浮选,试验结果如图 5 所示。

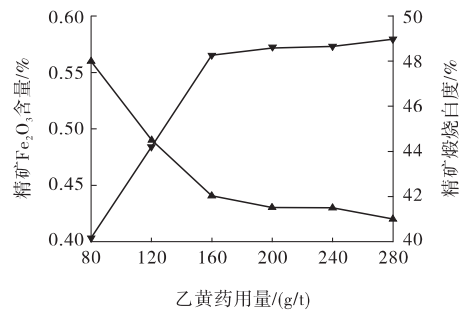


图 5 黄铁矿浮选乙黄药用量试验结果

Fig. 5 Test result on dosage of ethyl xanthate for pyrite flotation

▲—Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量; —煅烧白度

由图 5 可知,适宜的乙黄药用量为 160 g/t,进一步增加乙黄药用量,对铁的脱除和精矿煅烧白度的提升效果微弱。该乙黄药用量下,精矿的产率为 83.07% (对原矿),Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量降为 0.44%,煅烧白度提升至 48.26%。

#### 3.4.2 云母浮选试验

在酸性矿浆中,胺类捕收剂可较好地实现云母与长石的浮选分离。但考虑到胺类捕收剂价格昂贵,故本试验将十二胺与煤油组成复配捕收剂进行云母的浮选。

##### 3.4.2.1 复配捕收剂配比试验

用硫酸调矿浆 pH=3.5,固定复配捕收剂用量为 120 g/t,改变复配捕收剂中十二胺与煤油的质量比

依次为 1:2、1:1、2:1、3:1、4:1、5:1、1:0 进行云母的浮选, 试验结果如图 6 所示。

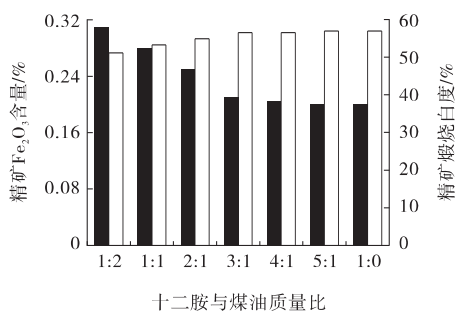


图 6 云母浮选复配捕收剂配比试验结果

Fig. 6 Test result for proportion of compound collector for mica flotation

■—Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量; □—煅烧白度

由图 6 可以看出, 十二胺与煤油的质量比达到 3:1 时, 已可获得良好的除云母效果, 再继续增加十二胺比例, 除云母效果基本保持不变, 因此确定复配捕收剂中十二胺与煤油的配比为 3:1。

### 3.4.2.2 复配捕收剂用量试验

用硫酸调矿浆 pH = 3.5, 固定复配捕收剂中十二胺与煤油的配比为 3:1, 改变复配捕收剂总用量依次为 40、60、80、100、120、160 g/t 进行云母的浮选, 试验结果如图 7 所示。

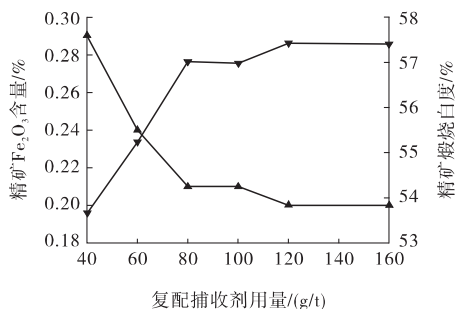


图 7 云母浮选复配捕收剂用量试验结果

Fig. 7 Test result on dosage of compound collector for mica flotation

▲—Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量; —煅烧白度

根据图 7 选择复配捕收剂总用量为 80 g/t, 即十二胺 60 g/t、煤油 20 g/t, 此时精矿的产率为 77.47% (对原矿)、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 0.21%、煅烧白度为 57.01%。

### 3.4.3 含铁碱金属硅酸盐浮选试验

含铁碱金属硅酸盐矿物的浮选采用改性石油磺酸盐 ZL-1 作为捕收剂。

用硫酸调矿浆 pH = 4, 固定松醇油用量为 20 g/t 进行 ZL-1 用量试验, 结果见图 8。

图 8 表明, 适宜的 ZL-1 用量为 800 g/t, 此时精矿的产率为 76.24% (对原矿)、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 降低至 0.09%, 煅烧白度提高至 66.84%。

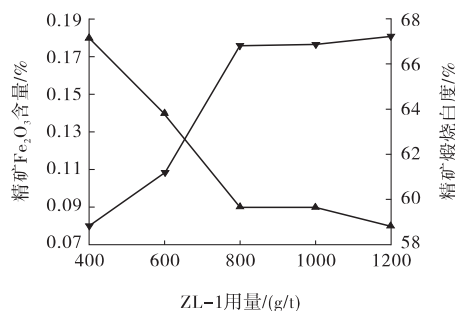


图 8 含铁碱金属硅酸盐浮选 ZL-1 用量试验结果

Fig. 8 Test result on dosage of ZL-1 for iron-bearing alkali metal silicate

▲—Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量; —煅烧白度

### 3.5 磨矿细度校核试验

将原矿依次磨至 -0.074 mm 占 44.10%、55.73%、62.75%、71.30%、78.36% (相应磨矿时间依次为 5、6、8、10、12 min), 分别在上述已确定的脱泥、高梯度磁选和浮选条件下进行全流程试验, 结果如图 9 所示。

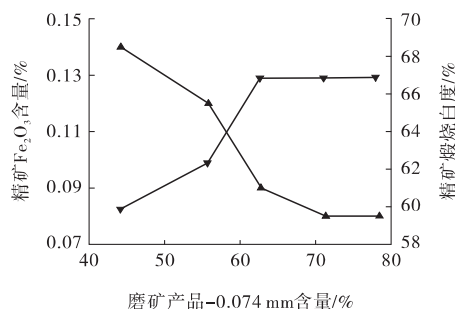


图 9 磨矿细度校核试验结果

Fig. 9 Checking test results of grinding fineness

▲—Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量; —煅烧白度

图 9 显示, 随着磨矿产品粒度变细, 选别效果逐步得到优化, 但磨矿细度达到 -0.074 mm 占 62.75% 时精矿的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量和煅烧白度已达到较理想状态, 再提高磨矿细度, 精矿的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量和煅烧白度变化已不明显, 由此证明先前选取磨矿细度为 -0.074 mm 占 62.75% 是合适的。

### 3.6 精矿指标

通过以上试验, 选定的分选条件为: 磨矿细度 -0.074 mm 占 62.75%, 脱泥粒度 -20 μm, 高梯度磁选时脉动冲次 400 r/min、脉动冲程 30 mm、给矿浓度 10%、磁感应强度 1.0 T、矿浆流速 1.1 cm/s, 黄铁矿浮选时稀盐酸调 pH = 5.5、乙黄药用量 160 g/t、松醇油用量 20 g/t, 云母浮选时硫酸调 pH = 3.5、十二胺 + 煤油用量 60 + 20 g/t, 含铁碱金属硅酸盐浮选时硫酸调 pH = 4、ZL-1 用量 800 g/t、松醇油用量 20 g/t。在此条件下, 所得全流程试验结果如表 4 所示, 精矿的化学多元素分析结果见表 5。

表 4 全流程试验结果

Table 4 Results of the full flow tests %

产 品	产 率	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 品位	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 回收率	煅烧白度
精 矿	76.24	16.05	80.31	67.26
细 泥	11.16			
磁性尾矿	3.12			
黄铁矿尾矿	2.65			
云母尾矿	5.60			
含铁硅酸盐尾矿	1.23			
总尾矿	23.76	12.63	19.69	
原 矿	100.00	15.24	100.00	

表 5 精矿化学多元素分析结果

Table 5 Chemical composition of the concentrate %

成 分	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
含 量	3.57	8.93	16.05	70.89	0.09	0.05
成 分	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	烧失
含 量	0.02	0.13	0.01	0.02	0.01	0.19

由表 5 可知,最终精矿 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 16.05%、SiO<sub>2</sub> 含量为 70.89%、K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O 含量为 12.50%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 0.09%、白度为 67.26% 达到了陶瓷行业用钾长石精矿一级品的质量标准<sup>[10]</sup>。

#### 4 结 论

(1) 针对山东某高铁长石矿石,磨矿后脱去 -20 μm 细泥,然后通过高梯度磁选除去磁性铁矿物和夹杂机械铁,再分别采用乙黄药、十二胺 + 煤油、改性石油磺酸盐 ZL-1 浮选脱除黄铁矿、云母、含铁碱金属硅酸盐矿物,可达到较好的除铁增白效果。

(2) 经磨矿—脱泥—高梯度磁选—浮选,试验所得长石精矿的产率为 76.24%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 回收率为 80.31%,产品质量达到陶瓷行业用钾长石精矿一级品标准。

#### 参 考 文 献

[1] Mohanmed El-Omla, Salah Shata. Recovery of feldspar raw material from granite rocks for ceramic and porcelain industries[J]. *Geology and Resources* 2008, 17(3): 235-240.  
 [2] 高惠民,袁继祖,张凌燕,等.长石除铁试验研究[J].*中国陶瓷*,

2006, 42(4): 46-48.

Gao Huimin, Yuan Jizu, Zhang Lingyan, et al. Experimental research on de-ironing of feldspar[J]. *China Ceramics* 2006, 42(4): 46-48.  
 [3] 方希辉,庄杜娟,张林龙.福建某低品位钾长石矿石选矿试验[J].*金属矿山* 2012(12): 50-54.  
 Fang Xihui, Zhuang Dujuan, Zhang Linlong. Experimental research on beneficiation of a low-grade K-feldspar ore in Fujian[J]. *Metal Mine* 2012(12): 50-54.  
 [4] 姚卫棠,韩效钊,胡波,等.论钾长石的研究现状及开发前景[J].*化工矿产地质* 2002, 24(3): 151-156.  
 Yao Weitang, Han Xiaozhao, Hu Bo, et al. The studied situation and developing prospect of microcline[J]. *Geology of Chemical Minerals* 2002, 24(3): 151-156.  
 [5] Santagosino L M, Alves P R, Shimabukuro N, et al. Applied mineralogy as a tool for mine planning of phosphate rock[J]. *Minerals Engineering* 2001, 14: 1649-1657.  
 [6] 郭保万,张艳娇,赵平,等.某高铁钾长石除铁工艺流程研究[J].*矿产保护和利用* 2000(2): 22-26.  
 Guo Baowan, Zhang Yanjiao, Zhao Ping, et al. Study on iron removal processing of a potash feldspar ores with high iron[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resource* 2000(2): 22-26.  
 [7] 刘建波,高文元.辽宁长石除铁工艺优化的研究[J].*中国陶瓷工业* 2012, 19(2): 4-7.  
 Liu Jianbo, Gao Wenyuan. Optimization of iron removal for Liaoning feldspar[J]. *China Ceramic Industry* 2012, 19(2): 4-7.  
 [8] 张成强,郝小非,何滕飞.钾长石选矿技术研究进展[J].*中国非金属矿工业导刊* 2012(5): 48-51.  
 Zhang Chengqiang, Hao Xiaofei, He Tengfei. Research progress on the potassium feldspar beneficiation technology[J]. *China Non-metallic Mining Industry Herald* 2012(5): 48-51.  
 [9] 任子杰,罗立群,张凌燕.长石除杂的研究现状与利用前景[J].*中国非金属矿工业导刊* 2009(1): 19-22.  
 Ren Zijie, Luo Liqun, Zhang Lingyan. Prospect and present state of impurities separation from feldspar[J]. *China Non-metallic Mining Industry Herald* 2009(1): 19-22.  
 [10] 李小静,张福存,方大文.长石精加工现状及发展趋势[J].*金属矿山* 2003(2): 46-57.  
 Li Xiaojing, Zhang Fucun, Fang Dawen. Present state and development trend of the fine processing of feldspar[J]. *Metal Mine* 2003(2): 46-57.

(责任编辑 孙放)