

· 轻金属原料矿山 ·

# 铝土矿正浮选尾矿沉降试验研究

姜燕清, 王毓华, 杨键, 俞亚文

(中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 采用沉降试验法研究了不同 pH 值及用量下, 不加助凝剂、加无机凝聚剂 ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、PAC 和 PFS) 和有机絮凝剂 PAM 对尾矿沉降的影响规律。结果表明, 颗粒表面电性是影响尾矿沉降的重要因素, 不加助凝剂时调节矿浆 pH=7 左右可实现尾矿的较好沉降。阴离子型 PAM 能显著提高铝土矿浮选尾矿浆的沉降速度, 但亦需先调节矿浆 pH 至 7 左右, pH 过高或过低都不利于尾矿浆的絮凝沉降。PAM 与  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  的组合, 既可得到良好沉降效果, 又可降低 PAM 和  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  的用量, 具有较好的应用前景。

**关键词:** 铝土矿; 尾矿; 沉降; 絮凝剂; 凝聚剂

**中图分类号:** TD92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-1752(2010)12-04-7

## The sedimentation tests on the tailings from bauxite direct - flotation

JIANG Yan - qing, WANG Yu - hua, YANG Jian and YU Ya - wen

(School of Resources Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The influence rules for the settlement of tailings from bauxite direct - flotation were investigated under the different pulp pH and dosage of inorganic coagulants (such as  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , PAC and PFS) and PAM. The results show that the surface static potential of particles is the key effect factor for the settlement of tailings. The good settlement of tailings can be achieved when the pH value of pulp was adjusted to around 7 without any coagulant. Anionic PAM can increase the sedimentation rate of bauxite flotation tailings evidently, but the pulp pH should be adjusted around 7. The settlement will become worse while pulp pH is higher or lower than 7. The combination of PAM and  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  could produce good sedimentation results for tailings, and the dosage of PAM and  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  can also be decreased, so it shows good application prospect.

**Key words:** bauxite; tailing; sedimentation; flocculant; coagulant

我国铝土矿资源丰富, 现已探明 23 亿吨储量中, 大多为中低品位的一水硬铝石型铝土矿。为了提高中低品位铝土矿矿石质量, 使之能直接采用简单且经济的拜耳法工艺生产氧化铝, 我国选矿科技工作者提出了特有的“选矿 - 拜耳法”生产氧化铝新工艺<sup>[1-2]</sup>。目前, 铝土矿浮选脱硅技术已在工业生产中得到广泛应用。

在铝土矿正浮选脱硅过程中, 添加了一定量的 pH 调整剂、矿浆分散剂和一水硬铝石捕收剂, 以保证在矿浆良好分散的情况下使目的矿物形成聚团上浮。因此, 铝土矿在磨矿和浮选过程中, 精矿和尾矿矿浆的物理化学特性会产生较大的变化, 从而严重影响精矿和尾矿的脱水性能<sup>[3-4]</sup>。如不对铝土矿浮选尾矿浆进行处理, 其所含水分将难于实现回用。大量尾矿浆的外排将严重制约铝土矿选矿 - 拜耳法

的规模生产、效益及环境安全。如果将悬浮物含量很高的尾矿水直接返回浮选过程, 将会严重恶化浮选过程, 降低选矿技术指标<sup>[5]</sup>。为此, 本文考察了矿浆 pH 值、无机凝聚剂和有机絮凝剂对铝土矿正浮选尾矿矿浆沉降行为的影响, 以期寻找尾矿浆高效沉降的技术路线。

## 1 试验部分

### 1.1 试样、试剂及仪器

本研究所用尾矿矿浆系在实验室模拟工业正浮选流程所制得, 尾矿矿浆浓度为 5% ~ 6%。对得到的尾矿样品进行了化学分析和 X 射线衍射分析。分析结果见表 1 和图 1。

表 1 尾矿样品的化学成分分析结果, w%

项目	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	TFe	S	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$
含量, %	39.52	28.89	3.12	0.46	0.61	7.31	0.13	4.71	0.82

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB623701)

作者简介: 姜燕清(1986-), 女, 江西上饶人, 硕士研究生, 主要从事尾矿水处理研究。

收稿日期: 2010-07-09

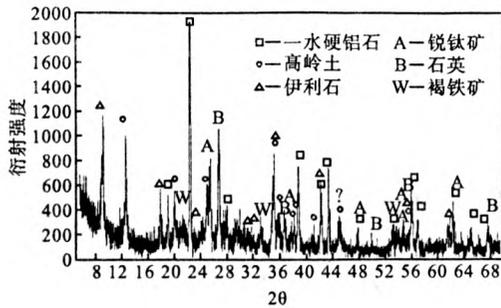


图 1 尾矿样品的 X 射线衍射图

根据表 1 和图 1 的数据可知,铝土矿正浮选尾矿中的主要组成矿物为一水硬铝石、高岭石、伊利石、褐铁矿、锐钛矿和石英等。

对尾矿样品采用激光粒度分析仪进行了粒度分析,分析结果见表 2,尾矿的平均粒度为 25.53 $\mu\text{m}$ 。

表 2 铝土矿尾矿粒度分析结果,  $\mu\text{m}$

质量累积 10%	质量累积 50%	质量累积 90%	质量累积 100%
10.24	20.73	28.96	36.01

试验采用的无机凝聚剂有水合硫酸亚铁 ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )、聚合氯化铝(PAC)和聚合硫酸铁(PFS),均为工业纯。采用的有机絮凝剂为化学纯聚丙烯酰胺(PAM),配制浓度为 0.1%,使用时再稀释至 0.025%。分析纯 HCl 作为矿浆的 pH 调整剂。

### 1.2 试验方法

每次取体积相同的尾矿矿浆,在 500mL 的烧杯中调节 pH 值,然后添加絮凝剂,用 JHS - 1 电子恒速搅拌机在转速 150 r/min 下搅拌 3min,然后将调好的矿浆移入 250ml 沉降量筒中并定容至 250ml,上下均匀摇动 5 次后静置开始读数,在相同的间隔时间内读取上层澄清层界面的高度,以考查尾矿在不同条件下的沉降性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 介质 pH 值对尾矿沉降性能的影响

在铝土矿正浮选过程中,通常加入  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和六偏磷酸钠作为调整剂,因此,尾矿矿浆的 pH 值在 9 左右。已有资料报道<sup>[6]</sup>,一水硬铝石、高岭石、伊利石三种矿物的等电点分别为 pH = 6.2, 4.2, 3.6。由此可见,尾矿浆的 pH 大于主要组成矿物的等电点,因此,尾矿矿浆中矿物表面均荷负电,矿物颗粒

间存在静电排斥力,从而导致固体颗粒难以团聚沉降。为此,采用 HCl 调节矿浆 pH,以考察矿浆 pH 值变化对尾矿沉降性能的影响,试验结果见图 2。

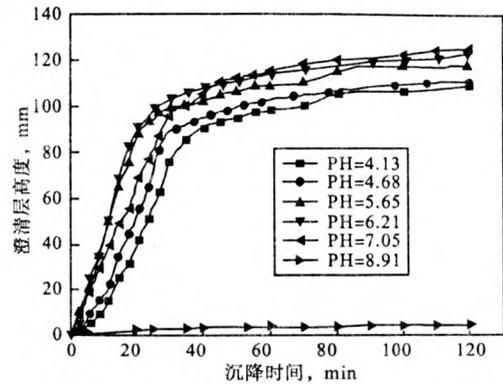


图 2 矿浆 pH 对尾矿沉降性能的影响

由图 2 知,在尾矿浆的自然 pH = 8.9 时,矿物颗粒间存在较强的排斥力,微细颗粒极难沉降,几乎没有出现澄清层。当 pH 值降低至 7 时,尾矿的沉降性能明显得到改善,澄清层高度增加较快,在 30min 时间内基本达到沉降终点,此时的澄清层高度约 100mm 左右。这是因为 pH 降低时,矿物颗粒表面的  $\zeta$  电位绝对值降低,静电排斥作用减小,颗粒间的凝聚增强,沉降速度加快。当 pH 值继续降至 6.21 时,沉降性能的改善不明显,pH 继续降至 4.68 或更低时,尾矿的沉降速度反而略有降低。可能的原因是微细颗粒表面重新荷正电,静电排斥作用逐渐增强,分散性得到提高。

图 2 的试验结果还表明,单一调节矿浆 pH 值,仍无法实现尾矿的快速沉降,其原因是微细粒硅酸盐矿物的沉降速度较慢,为此,在合适的矿浆 pH 值范围内,需添加凝聚剂或絮凝剂,增大微细颗粒的表观尺度,提高尾矿沉降性能。

### 2.2 无机凝聚剂用量试验

凝聚作用是在分散体系中添加无机凝聚剂,中和微粒表面的电性,压缩双电层,降低动电电位,减少微细颗粒间的排斥能,达到凝聚的目的。由于水合硫酸亚铁 ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )、聚合氯化铝(PAC)和聚合硫酸铁(PFS)等无机凝聚剂同样可以降低矿浆 pH,为此在上述 3 种凝聚剂的配制浓度为 5%,用量分别为 600mg/l、1000mg/l、2000mg/l 时,考察了它们对尾矿沉降的影响。

(1) 水合硫酸亚铁 ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) 用量试验

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  用量对尾矿沉降性能影响的试验结果如图3所示。沉降开始时,沉降量筒中矿浆较浑浊,尽管形成了颗粒聚团,但澄清层的界面不明显,10min后沉降速度加快。试验结果表明:添加  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  能加速尾矿的沉降,但其用量超过 600mg/l 后,沉降速度反而下降。

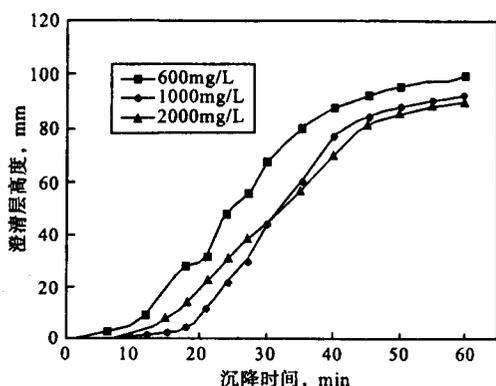


图3  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  用量对尾矿沉降的影响

试验测得  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  用量分别为 600mg/l、1000mg/l 和 2000mg/l 时,上清液的 pH 分别为 7.10、6.95 和 6.73。与图2的结果比较,尽管矿浆 pH 在比较理想的范围,但由于铁离子的含量高,铁离子在矿物颗粒表面的大量吸附,导致矿物颗粒间的静电排斥力增加,产生部分微细粒的“复稳”现象而不利于沉降。

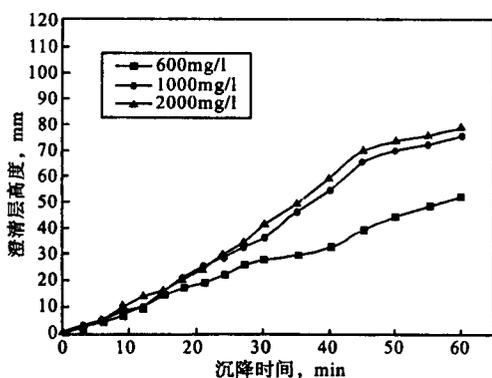


图4 PAC 用量对尾矿沉降的影响

### (2) 聚合氯化铝(PAC)用量试验

PAC 对尾矿沉降性能的影响如图4所示。在沉降开始即可观察到明显的澄清层界面,但随后沉降速度基本不变。随着 PAC 用量的增加,尾矿的沉降性能逐渐变好,当聚合氯化铝用量由 1000mg/l 增加

至 2000mg/l 时,颗粒的沉降速度几乎相同。试验测得对应其用量为 600mg/l、1000mg/l 和 2000mg/l 时,上清液 pH 值分别为 7.51、7.30、6.56。说明聚合氯化铝对矿浆 pH 值改变很小,主要通过铝离子的作用来增强尾矿的沉降是有限的。

### (3) 聚合硫酸铁(PFS)用量试验

PFS 对尾矿浆沉降性能影响的试验结果如图5所示。沉降开始可观察到有颗粒聚团生成,并出现明显的澄清层界面,沉降速度较快。但从图5的试验结果看,PFS 的用量分别为 600mg/l、1000mg/l 和 2000mg/l 时,尾矿沉降速度的差异不明显,以 1000mg/l 时的沉降最快。试验测得 3 种不同用量下,澄清层对应的 pH 值分别为 6.7、5.80、3.96。对比图2的试验结果,表明聚合硫酸铁对尾矿的沉降仍不及用 HCl 来调矿浆 pH 值。

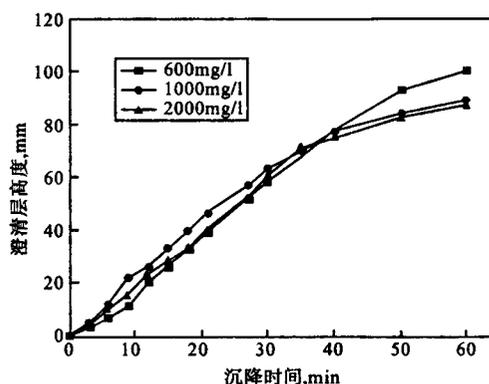


图5 PFS 用量对尾矿沉降的影响

综合以上无机凝聚剂的试验结果,尽管所使用的无机凝聚剂均能降低矿浆的 pH 值,但由于它们同时提供了  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Al}^{3+}$  等反离子,虽然可以压缩颗粒表面双电层的厚度,降低表面  $\zeta$  电位,使尾矿浆比其自然  $\text{pH} = 8.91$  时的沉降速度加快,但仍比用 HCl 调 pH 时的沉降速度慢,一般需要在 40min ~ 50min 之后才进入压缩阶段。单一采用无机凝聚剂,在工业上也难于实现铝土矿正浮选尾矿浆的快速沉降。

### 2.3 聚丙烯酰胺(PAM)对尾矿沉降的影响

由于 PAM 为高分子化合物,具有长碳链及作用强大的活性官能团,可以强烈吸附细微颗粒,并通过长碳链的缠绕在微粒间形成架桥作用,生成较大絮团,从而提高沉降速度。系统的试验表明,阴离子型 PAM 的效果好于阳离子和非离子型 PAM。图6是用量为 8mg/L 时,1400 万的阴离子型 PAM 在不同 pH 条件下对尾矿的沉降结果。试验过程中不同的

现象见表 2。

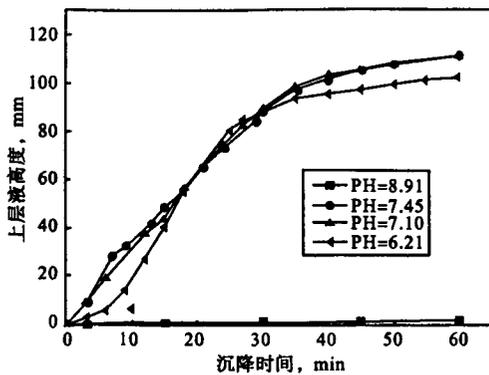


图 6 聚丙烯酰胺在不同 pH 值时对尾矿沉降的影响  
表 2 聚丙烯酰胺不同 pH 值试验

pH	试验现象
8.91	有絮体,粗大颗粒首先沉降,微粒沉降极慢,上层液浑浊
7.45	有絮体,沉降较快,上层液较浑浊,一小时后测上清液固含量 2.04g/l
7.10	有小絮体,沉降较快,上层液较清澈,一小时后测上清液固含量 65mg/l
6.21	有小絮体,沉降稍慢,上层液清澈透明

综合图 6 试验结果和表 2 的试验现象,在尾矿浆自然状态(pH = 8.91)下,添加聚丙烯酰胺仍不能实现尾矿的有效沉降(参见图 2 结果)。随着矿浆 pH 值的降低,沉降速度逐渐加快,上清液固含逐渐降低至清澈透明。这一结果表明,表面电性是影响铝土矿浮选尾矿沉降的重要因素。为此,在矿浆 pH = 7 时,进一步考察了 1400 万分子量的 PAM 的用量对尾矿沉降性能的影响,试验结果见图 7。

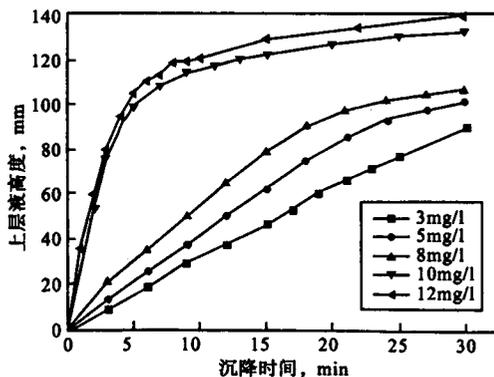


图 7 pH = 7 左右时,聚丙烯酰胺用量对尾矿沉降的影响

图 7 的试验结果表明,在矿浆 pH 为 7 左右时,随着 PAM 用量的增大,尾矿的沉降速度迅速增大,

当用量达到 10mg/l ~ 12mg/l 时,尾矿的沉降速度达到最大,沉降 5min 后进入压缩阶段,上清液清澈透明。与图 2 的试验结果比较可看出,在调节尾矿浆 pH 的同时,辅助聚丙烯酰胺絮凝剂,可使尾矿浆达到良好的沉降效果。

### 2.4 无机凝聚剂与 PAM 组合试验

由于无机凝聚剂也可以达到调节矿浆 pH 的作用,为此试验考察了 PAM 与取无机凝聚剂  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  的组合对尾矿沉降的影响,结果如图 8 示。

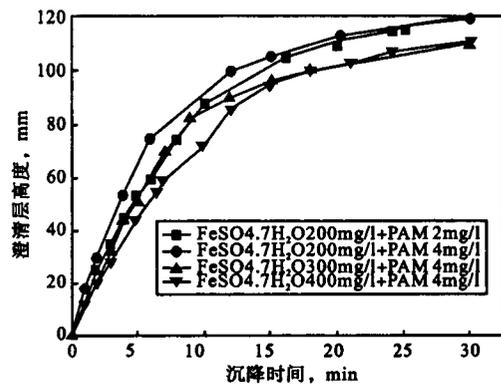


图 8  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  与 PAM 组合使用对尾矿沉降的影响

图 8 表明,  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  与 PAM 组合使用,比单用  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  时对尾矿沉降的效果要好。  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  200mg/l + PAM 4mg/l 组合时,达到最佳的沉降效果,此时  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  及 PAM 的用量分别仅为单独使用时的 1/3,矿浆 pH 为 7.22。与图 7 的试验结果对比,在相同用量 PAM 时,  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  与 PAM 组合使用的效果要好于盐酸与 PAM 组合,可能的原因是,  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  通过降低 pH 和铁离子中和了微粒表面的负电性,压缩了双电层,而 PAM 在起到吸附架桥作用的同时,还可能与微粒表面吸附的铁离子作用,增强了微细颗粒的沉降。

### 3 结语

通过以上试验,可以得到以下基本结论:

(1) 颗粒表面电性是影响尾矿沉降的重要因素,不添加絮凝剂时,调节矿浆 pH = 7 左右就可实现尾矿的良好沉降。

(2) 单用无机凝聚剂时,虽能降低矿浆 pH,但尾矿沉降效果不如用盐酸调 pH。

(下转第 16 页)

(1)由环形支座的应力云图可以确定环形支座各部件的应力无异常现象。

(2)槽体圆筒和锥体连接处由于有加强板和环座的加强,该处的边缘应力不大,受力状态得到比较好的改善。

(3)沉降槽锥体部位在上部变厚度的局部区域附近存在一定的二次应力,但是比较小。由于二次应力的局部性和自限性,这个局部二次应力不会危及沉降槽的安全使用。

(4)在沉降槽圆筒和锥体连接处,加强板与槽壁连接处上下部位产生局部较高的应力集中。由于区域很小,仅局限于几个单元,且小于两倍材料屈服极限。

(5)在环形支座上部立筋与筒体外部连接处尖端也有类似较高的应力集中现象,但是为压应力,不会威胁结构的安全性。

### 3 结 论

通过以上分析计算,我们可以清楚地看到本系统所受的应力情况,认为沉降槽槽体有两处相对薄弱:

(1)槽体环形支座上方槽壁存在较大的压应力,该压应力主要是由于槽体在各种载荷的作用下各部件的变形受到相互限制而形成的,给槽体稳定

性造成一定的威胁;

(2)槽体内壁圆筒和锥体连接处的加强板与槽体相接处存在局部高应力区,该高应力区在沉降槽长期使用过程中易于滋生裂纹。

为了优化结构,可采取以下改进措施:

a. 从提高槽体稳定性角度考虑,建议将支撑板下端延伸至槽体环座的筋板位置以下部位。这样槽体在该位置就不是简单圆筒形状,有了 12 块加强支撑板的改形作用,可以加强槽体的稳定性能;

b. 沉降槽使用过程中,应注意观察无支撑板加强部位的槽体是否有异常或过大的变形现象;

c. 沉降槽使用期间,应定期对槽体内部圆筒和锥体连接处的加强板与槽体相接的高应力区进行探伤检验,以防止产生裂纹,危及沉降槽的安全使用。

#### 参考文献:

[1] 颜云辉, 谢里阳. 结构分析中的有限单元法及其应用[M], 东北大学出版社, 2000.

[2] 余伟炜, 高炳军. ANSYS 在机械与化工装备中的应用[M], 中国水利水电出版社, 2007.

[3] 曾攀. 有限元分析及应用[M], 清华大学出版社, 2004.

[4] Saeed Moaveni. 有限元分析 - ANSYS 理论及应用[M], 电子工业出版社.

[5] 钢制焊接压力容器[S], 全国压力容器标准化技术委员会, 1997.

(责任编辑 张文军)



(上接第 10 页)

(3)阴离子型 PAM 能显著提高铝土矿浮选尾矿浆的沉降速度,但需先调节矿浆 pH 至 7 左右, pH 过高或过低都不利于尾矿浆的絮凝沉降。

(4)PAM 与 FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 的组合,可得到好于 HCl 与 PAM 组合的沉降效果,同时可降低 PAM 的用量,具有较好的应用前景。

#### 参考文献:

[1] 张学英, 常虎成. 絮凝沉降技术在铝土矿选矿尾矿处理过程中的应用[J]. 世界有色金属, 2004(05): 42 - 45.

[2] 张国范. 铝土矿浮选脱硅基础理论及工艺研究[D]. 长沙: 中南

大学博士学位论文, 2001.

[3] 胡岳华, 王毓华, 王淀佐. 铝硅矿物浮选化学与铝土矿脱硅[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 10 - 12.

[4] 刘焦萍, 黄春成. 铝土矿正浮选尾矿浆沉降新工艺研究[J]. 轻金属, 2006, (5): 8 - 13.

[5] 黄春成, 宋江红. 水质对铝土矿浮选指标的影响[J]. 世界有色金属, 2007(1): 13 - 15.

[6] 蒋昊. 铝土矿浮选过程中阳离子捕收剂与铝矿物和含铝硅酸盐矿物作用的溶液化学研究[D]. 长沙: 中南大学博士学位论文, 2004.

(责任编辑 杜雅君)