



高铁一水硬铝石矿焙烧预处理溶出赤泥的 沉降性能

张旭华, 张延安, 吕国志, 王小晓, 张伟光, 朱小峰

(东北大学 材料与冶金学院 多金属共生矿生态化利用教育部重点实验室, 沈阳 110819)

摘要: 将高铁一水硬铝石矿进行马弗炉、强磁场焙烧预处理, 分别考察焙烧温度和磁场强度对焙烧矿溶出赤泥沉降性能的影响; 利用 XRD 对焙烧矿溶出赤泥的物相组成变化进行分析, 并进一步探讨焙烧矿赤泥沉降性能变化机理。结果表明: 焙烧预处理对矿物的沉降性能有较大影响, 马弗炉焙烧预处理条件为焙烧温度 550 °C、保温时间 60 min; 强磁场焙烧预处理条件为磁场强度 9 T、500 °C、60 min; 预处理后的焙烧矿赤泥的沉降性能均较原矿有所提高, 且强磁场焙烧矿赤泥的沉降性能优于马弗炉焙烧矿的。

关键词: 一水硬铝石; 强磁场; 溶出性能; 沉降性能

中图分类号: TF803.21

文献标志码: A

Settling performance of red mud generated from Pre-roasted high-iron diasporic bauxite

ZHANG Xu-hua, ZHANG Ting-an, LÜ Guo-zhi, WANG Xiao-xiao, ZHANG Wei-guang, ZHU Xiao-feng

(Key Laboratory for Ecological Utilization of Multimetallic Mineral, Ministry of Education,

School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The diasporic bauxite with high-iron content was pre-roasted in muffle furnace and strong magnetic field, respectively, to investigate the effects of roasting temperature and magnetic field intensity on the settling performance of red mud from roasted diasporic bauxite. The changes of phase composition of the diasporic bauxite with high-iron content were analyzed by XRD, and the change mechanism of the settling performance of the red mud was discussed. The results indicate that pre-roasting has considerable effect on the settling performance of the ore. The suitable pre-roasting conditions by using muffle furnace and strong magnetic field are 550 °C for 60 min and 500 °C for 60 min in 9 T, respectively. Under these conditions, the settling performance of red mud is improved. The settling performance of the red mud treated in the strong magnetic field is better than that of red mud treated in muffle furnace.

Key words: diasporic bauxite; intense magnetic field; digestion performance; settling performance

我国的铝土矿资源绝大部分属于难处理的一水硬铝石型矿, 这类矿结晶完善, 结构致密^[1-3]。含有多种化学成分和矿物成分的一水硬铝石矿在碱液中溶出^[4-7], 是复杂的多相反应过程, 以一水硬铝石为主的铝矿的溶出, 需要比以三水铝石或一水软铝石为主的铝矿要求有更高的温度和苛性碱浓度。

近几年来, 为改善一水硬铝石铝矿的溶出性能, 国内外学者提出了后增溶溶出、微波加热以及机械活化预处理等方法^[8-23]。后增溶溶出赤泥量大, 二段矿物溶出率低, 且增溶溶出工艺采用的后加矿多为三水铝石矿, 我国氧化铝厂需从国外进口, 而进口矿价格昂贵, 使生产成本激增, 所以增溶溶出工艺并不完全

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2012AA062303); 国家自然科学基金联合基金重点项目(U1202274); 国家自然科学基金青年基金项目(51004033, 51204040); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(L2014096)

收稿日期: 2014-04-21; **修订日期:** 2014-10-23

通信作者: 张延安, 教授, 博士; 电话: 024-83687715; E-mail: zta2000@163.net

适用于我国一水硬铝石矿的溶出过程; 机械活化可以改变矿物活性提高溶出性能, 但设备损耗严重, 矿物粒度细化严重, 沉降性能差, 而在氧化铝生产中赤泥的沉降分离是一个非常重要的环节, 它影响着氧化铝的产能、品质及效益; 一水硬铝石矿主要含有铝矿物, 铁矿物和脉石矿物, 这些矿物并不直接吸收微波, 单纯采用微波直接加热一水硬铝石矿, 矿石并不会发生明显变化。王一雍等^[24]在微波焙烧的条件下对一水硬铝石矿溶出性能进行了研究, 考察了微波辐射温度和辐射时间等条件对矿物溶出性能的影响。

国外大部分铝土矿中铁含量均较高, 世界铝土矿资源中 90% 以上为高铁铝土矿^[25], 根据已探测结果, 全国的高铁型铝土矿资源可达 15 亿 t 以上^[26]。由于高铁铝土矿矿石结构的复杂性, 要靠简单的选矿方法实现铝铁分离非常困难, 作为单一铝土矿资源或者单一铁矿资源而言, 都不利于资源的合理利用, 分离回收该类复合型铝土矿资源难度较大。近年来, 针对铝铁复合型资源综合利用的研究, 包括铁铝分离研究, 可将其归纳为主要有 4 种路线, 即先选后冶、先铝后铁、先铁后铝以及酸法处理等^[27-28]。目前对于高铁铝土矿铝铁分离的方法多具有一定的局限性, 尚没有一种方法能够高效、低耗、无污染地实现铝铁分离的效果。

作为新型的实验手段, 强磁场是一种非接触性的极端物理场, 在其作用下, 物质的性质会发生非常规变化, 同时物质的热力学和运动行为在宏观、介观以及微观尺度上都有可能发生改变。现在, 强磁场被广泛应用于物理、化学、生物、医学以及材料等领域, 并形成多种交叉学科^[29]。在材料领域, 强磁场为新材料的创制提供了新手段, 并成为探测物质机制的基本途径。针对单金属及合金在强磁场作用下的转变已经有了很多研究^[30-33], 强磁场可以极大程度上改变被处理物料的物性。

由于矿物组成复杂, 矿相在强磁场作用下的研究更为困难, 因此, 强磁场这一外场技术用于矿物研究的文献较少。一水铝石矿及针铁矿在晶体结构具有很大的相似性, 这从二者可以生成类质同象状态的铝针铁矿上可以得到证明, 而两种矿相在强磁场中的行为具有一定差异, 由此, 可将强磁场用于高铁铝土矿中铝铁相中进行相关研究, 但相关研究鲜见报道。

在此, 本文作者以国内高铁一水硬铝石铝土矿作为原料, 将强磁场用于矿物预处理的研究, 通过考察常规焙烧和外加强磁场焙烧的焙烧温度、磁场强度对其溶出性能及赤泥的沉降性能的影响, 为强磁场应用于该类型矿物的转型以及实现强化溶出提供参考。

1 实验

1.1 原料

实验所用高铁一水硬铝石铝土矿来自广西, 该矿石主要化学成分见表 1。其烧失率为 14%, 铝硅比 (A/S) 为 6.9044。

采用 XRD 对矿石的物相组成进行了分析, 结果如图 1 所示。由图 1 可知, 该铝土矿主要物相组成为一水硬铝石, 另外还有一定量的锐钛矿和赤铁矿, 含硅矿物主要以高岭石的形式存在。

表 1 高铁一水硬铝土矿化学成分
Table 1 Chemical composition of high-iron diasporic bauxite (mass fraction, %)

Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO
49.09	7.11	26.36	2.99	0.55	0.15

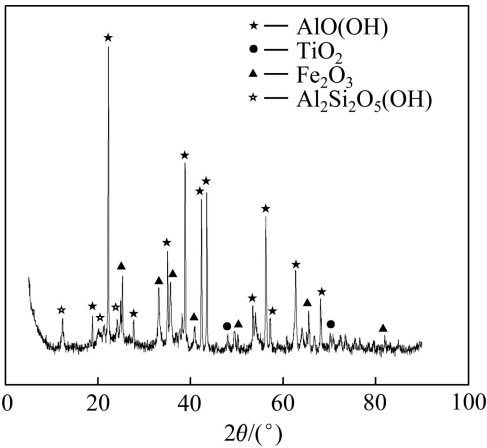


图 1 高铁一水硬铝石铝土矿样品的 XRD 谱
Fig. 1 XRD pattern of high-iron diasporic bauxite sample

实验所用铝酸钠溶液由国内某铝厂的种分母液和氢氧化钠(分析纯)及氢氧化铝(分析纯)配制而成。絮凝剂的配置采用某铝厂提供的 NACLO 絮凝剂, 溶于 3 g/L 的碱液中, 在温度为 30~40 °C 的水浴中加热, 缓慢溶解, 制成所需浓度的 NACLO 溶液。

1.2 实验方法

1.2.1 焙烧实验

矿样经破碎研磨, 粒度小于 0.125 mm, 称量后, 分别使用 SX2-5-12 型马弗炉和超导强磁场系统进行预焙烧实验。超导强磁场系统实验装置如图 2 所示。超导强磁场装置可以产生纵向的静磁场, 其强度可在

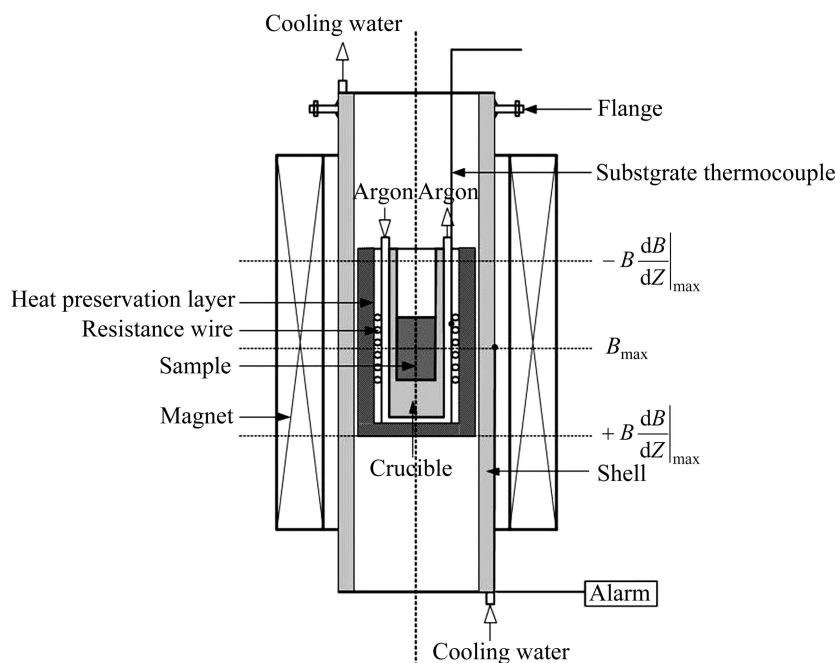


图 2 强磁场发生装置图

Fig. 2 High magnetic field equipment

0~12 T 之间调节。加热炉置于超导强磁体空腔内, 加热温度可达 1200 °C, 加热温度由固定在加热炉内的 R 型热电偶控制, 控温精度为 ± 1 °C。强磁场焙烧时将一定量的矿样装入尺寸为 d 20 mm $\times$ 100 mm 带螺旋塞石墨坩埚中, 密封后, 用特制的刚玉杆送入强磁场发生装置中, 将磁场升至所需磁场强度后开始加热, 采用设置温度函数进行控温。温度函数结束后即可开始降磁, 待温度降至 150 °C 以下且磁场强度降为零后, 即可取出坩埚获得焙烧矿。

1.2.2 高压溶出实验

按照待溶矿样的铝硅比计算出配矿量将母液和矿粉混合, 再添加一定比例的石灰, 使用 WHFS-1 型高压反应釜进行溶出, 溶出过程结束后, 取反应产物的 75%(体积分数)进行沉降实验, 25%(体积分数)用于成分分析, 确定溶出液中的 Al_2O_3 和 Na_2O_k 含量以及赤泥中 Al_2O_3 和 SiO_2 含量。

本研究中焙烧后的铝土矿在高压釜内进行平行溶出实验(210 °C, 60 min, 搅拌转速 270 r/min, 石灰添加量为干矿石的 5%(质量分数), 苛性碱浓度 200 g/L, 母液 Na_2O 与 Al_2O_3 初始摩尔比 3.0, 氧化铝相对溶出率(η)计算公式如下:

$$\eta = \frac{(A/S)_{\text{ore}} - (A/S)_{\text{mud}}}{(A/S)_{\text{ore}} - 1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $(A/S)_{\text{ore}}$ 是铝土矿中 Al_2O_3 与 SiO_2 的质量比; $(A/S)_{\text{mud}}$ 是赤泥中 Al_2O_3 与 SiO_2 的质量比。

1.2.3 赤泥沉降及压缩液固比实验

赤泥沉降实验在 YJ501 超级恒温器的恒温水浴内进行。取 75 mL 溶出浆液倒入 100 mL 量筒中, 向浆液中加入 1.8 mL 絮凝剂充分混合, 将量筒放入 90 °C 的恒温水浴中预热 4 min 取出, 添加蒸馏水至 100 mL, 用搅拌棒搅拌均匀。放入恒温水浴开始计时, 每隔固定时间记录沉降层高度, 测量沉降速率。沉降实验完成后, 取出量筒, 用针管抽出上清液, 称量量筒和赤泥的总质量; 将赤泥抽滤洗涤至中性, 倒入玻璃表面皿中; 将表面皿放入干燥箱内烘干, 烘干后称量表面皿和赤泥的总质量; 计算赤泥的压缩液固比。

2 结果与讨论

2.1 马弗炉焙烧温度对溶出赤泥沉降性能的影响

不同马弗炉焙烧温度下矿石溶出赤泥的沉降性能如图 3 所示。原矿溶出赤泥在开始沉降 10 min 以内无明显分层的上清液产生, 在沉降前 15 min 原矿溶出赤泥沉降情况略优于焙烧温度为 450 和 500 °C 时马弗炉焙烧矿溶出赤泥的。从整体上可以看出, 焙烧温度 550 °C 以上的马弗炉焙烧矿溶出赤泥的沉降速率优于原矿的。焙烧温度为 500、550 及 600 °C 的马弗炉焙烧矿溶出赤泥在 10 min 内的平均沉降速率分别为 0.2、6 以及 4.6 mm/min, 但在沉降前 5 min 的沉降速率较慢,

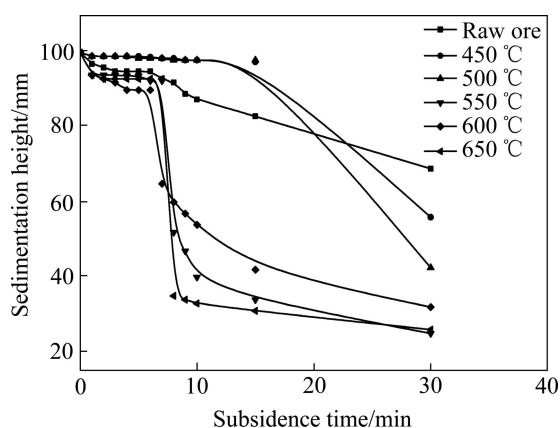


图3 马弗炉焙烧温度对赤泥沉降的影响

Fig. 3 Effect of roasting temperature on settlement of red mud in muffle

分别为 0.3、1.24 和 2 mm/min。在 450、500、550、600 和 650 °C 马弗炉焙烧后, 溶出赤泥 30 min 沉降后的液固压缩比分别为 4.1251、5.3202、3.3934、4.9748 和 4.3464。

2.2 强磁场焙烧对溶出赤泥沉降性能的影响

2.2.1 磁场强度对溶出赤泥沉降性能的影响

强磁场焙烧条件如下: 焙烧温度 500 °C, 焙烧时间 60 min。不同磁场强度对强磁场焙烧矿溶出赤泥的沉降性能的影响如图 4 所示。实验数据表明, 强磁场焙烧可以明显改善原矿溶出赤泥的沉降性能, 但磁场强度的改变对赤泥沉降的影响并不明显, 经外加 6、8 和 9 T 磁场焙烧后, 溶出赤泥沉降 5 min 内的沉速分别为 13、12.8 和 12.8 mm/min, 明显优于马弗炉焙烧矿溶出赤泥的; 沉降 10 min 后, 平均沉速分别为 7.1、6.9 和 7 mm/min。在磁场强度分别为 6、8 和 9 T 磁场

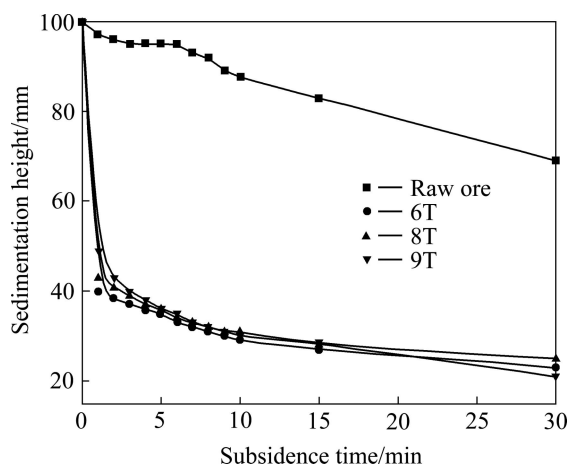


图4 磁场强度对赤泥沉降的影响

Fig. 4 Effect of magnetic field intensity on settlement of red mud

中焙烧后, 溶出赤泥 30 min 后的液固压缩比分别为 3.3934、4.9748 和 4.3464。

2.2.2 强磁场作用下焙烧温度对溶出赤泥沉降性能的影响

强磁场焙烧条件如下: 磁场强度 9 T, 焙烧时间 60 min。经不同焙烧温度强磁场焙烧的矿石溶出赤泥沉降情况如图 5 所示。当焙烧温度为 450、500 和 550 °C 时, 沉降实验 5 min 内得到的赤泥平均沉降速率分别为 1.1、6.4 和 6 mm/min; 沉降实验 10 min 内得到的赤泥平均沉降速率分别为 6.6、7 和 7.55 mm/min; 沉降实验 30 min 内得到的赤泥平均沉降速率分别为 7.3、7.9 和 8.2 mm/min。可见在外加磁场时, 焙烧温度对赤泥沉降性能影响较大, 总体上随着强磁场焙烧温度的升高, 赤泥沉降的效果越来越好。上述 3 个焙烧温度条件下, 焙烧矿溶出赤泥经 30 min 沉降后, 液固压缩比分别为 3.2876、3.0546 和 4.6802。

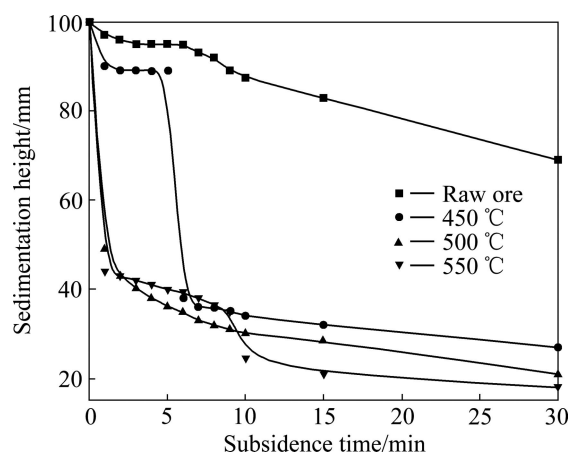


图5 强磁场作用下焙烧温度对赤泥沉降的影响

Fig. 5 Effect of roasting temperature on settlement of red mud in intense magnetic field

2.3 强磁场与马弗炉预焙烧结果比较及机理分析

在焙烧时间 60 min 条件下, 分别考察了焙烧温度为 450~550 °C 下马弗炉焙烧矿以及 450~550 °C 强磁场焙烧矿(磁场强度 9 T)的溶出性能, 原矿与两种焙烧矿同条件溶出结果对比如图 6 所示。其中马弗炉适宜的焙烧条件为焙烧温度 550 °C、保温时间 60 min。

在实验温度范围内, 随着焙烧温度的升高, 马弗炉焙烧矿的溶出率呈先下降后升高的趋势, 经 550 °C 焙烧时, 溶出率达到最高为 95.17%; 强磁场焙烧矿呈先上升后下降的趋势; 在 500 °C 焙烧的情况下, 溶出率达到最高为 67.65%。强磁场焙烧矿的溶出率总体上低于马弗炉焙烧矿的溶出率。

分别选取适宜预焙烧条件下的马弗炉焙烧矿和强

磁场焙烧矿进行赤泥沉降实验结果比较如图 7 所示。焙烧温度为 550 °C 的马弗炉焙烧矿溶出赤泥在 10 min 内的平均沉降速率为 6 mm/min。焙烧温度为 500 °C 的强磁场焙烧矿溶出赤泥在 10 min 内的平均沉降速率为 7 mm/min。焙烧预处理整体可以提高一水硬铝石的沉降性能,相较于马弗炉焙烧矿,强磁场焙烧矿溶出赤泥的沉降性能更好。

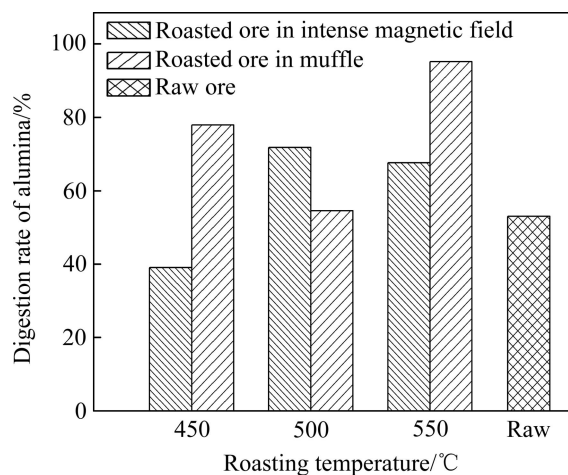


图 6 磁场强度对氧化铝溶出率的影响

Fig. 6 Effect of magnetic field intensity on digestion rate of alumina

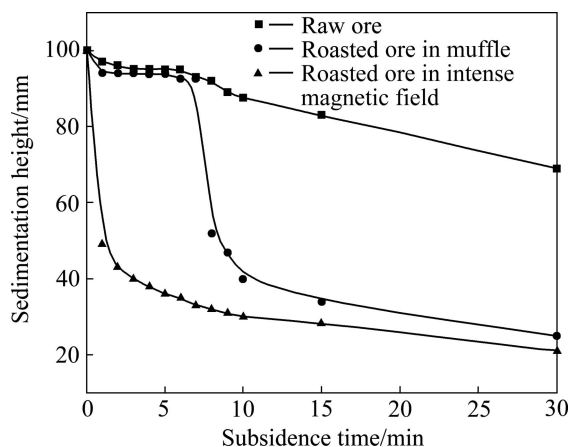


图 7 磁场强度对赤泥沉降的影响

Fig. 7 Effect of magnetic field intensity on settlement of red mud

研究表明^[34-35],焙烧预处理后,焙烧矿中一水硬铝石的结构会发生畸变。满足一定的焙烧条件下,一水硬铝石脱水会导致其晶体的链状结构被切断, $\text{Al}(\text{O},\text{OH})_6^-$ 配位八面体处于悬空状态,晶体结构反应活性变强;八面体顶角的 OH^- 和 O_2^- 的脱除导致八面体中心的 Al^{3+} 裸露出来,晶体结构在此时遭到的破坏

最为严重,铝土矿的溶出性能也因此得以改善。一水硬铝石转化为纯刚玉需要大量能量,条件未能使晶体获得足够的能量时,焙烧矿中始终存在着高活性的中间态氧化铝,这对于改善一水硬铝石矿的溶出性能极其有利。

将溶出率最高的马弗炉焙烧矿和强磁场焙烧矿进行 XRD 分析,物相组成对比如图 8 所示。马弗炉焙烧矿中铝主要以一水硬铝石矿相的形式存在,而强磁场焙烧矿中一水硬铝石已全部转化为的中间态氧化铝,相变过程: $2\text{AlO}(\text{OH}) = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 。由此可见,强磁场作用加速了高铁一水硬铝石型铝土矿中含铝相的晶格转变。

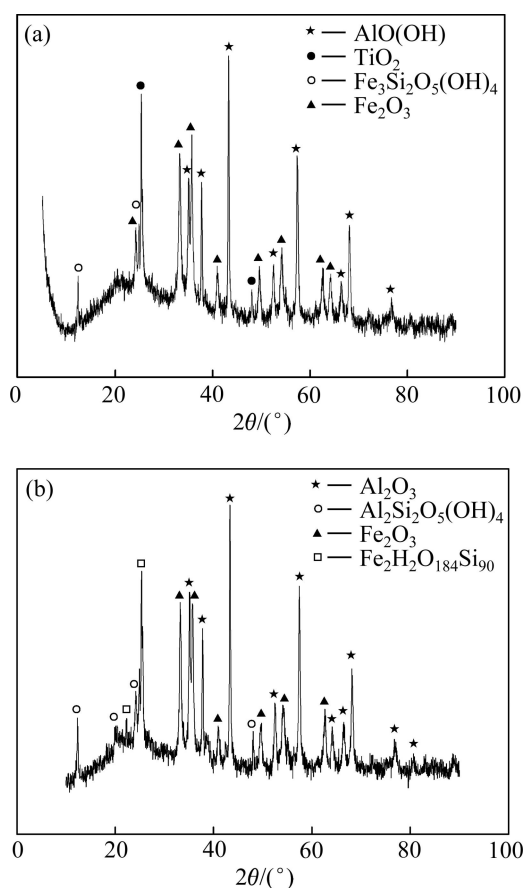


图 8 不同焙烧矿的 XRD 谱

Fig. 8 XRD patterns of roasted ore in muffle and intense magnetic field: (a) Roasted ore in muffle at 550 °C for 60 min; (b) Roasted ore in intense magnetic field at 9 T, 500 °C, 60 min

强磁场作用加速高铁一水硬铝石型铝土矿中含铝相的晶格转变的同时,矿物中各主要矿相处于晶格转变过程的无序状态,各主要矿相在强磁场预处理过程会出现一定顺磁性,矿物中多相无序程度越高,顺磁性越强,矿物中多相结合程度越高,铁铝相间的结合

越紧密,矿物比表面积越小,因此,强磁场处理高铁一水硬铝石矿溶出效果不佳。

由于马弗炉焙烧矿较强磁场焙烧矿颗粒疏松,表面含有更多的孔洞和裂纹,溶出赤泥的粒度较强磁场焙烧矿溶出赤泥更低,同时,强磁场焙烧矿经强磁作用产生的顺磁性可以提高矿物中各矿相结合程度,较马弗炉焙烧矿更为稳定,细化程度较马弗炉小(溶出赤泥粒度分布见图9),因此强磁场焙烧矿的沉降性能较马弗炉焙烧矿有所提升。

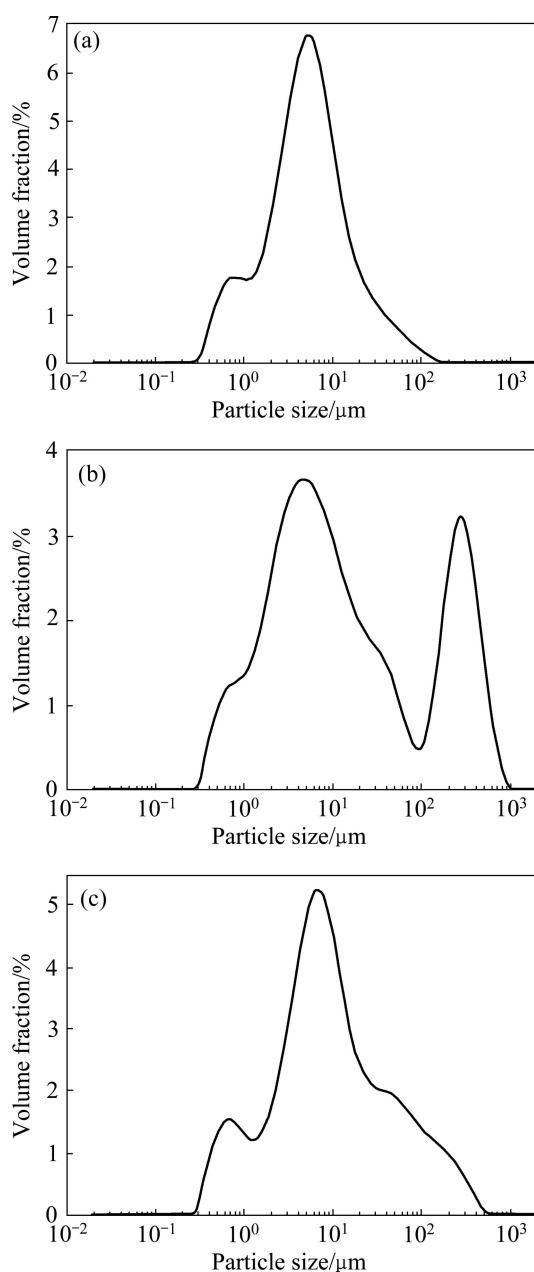


图9 不同矿样溶出赤泥粒度分布

Fig. 9 Particle size distribution of raw ore, roasted ore by muffle and intense magnetic field: (a) Raw ore; (b) Roasted ore in muffle at 550 °C for 60 min; (c) Roasted ore in muffle and intense magnetic field at 9 T, 500 °C, 60 min

3 结论

1) 马弗炉、强磁场焙烧预处理都能改善一水硬铝石型铝土矿的赤泥沉降性能,通过同条件溶出后赤泥沉降速率的对比,可以发现强磁场焙烧矿较原矿和马弗炉焙烧矿溶出赤泥的沉降性能有更为明显的改善,沉降10 min内,平均沉降速率达到7 mm/min,溶出赤泥沉降30 min后,液固压缩比为4.3464。

2) 在相同的焙烧温度和焙烧时间条件下,强磁场焙烧矿的溶出率总体上低于马弗炉焙烧矿的溶出率。

3) 通过考察焙烧温度和磁场强度对焙烧矿的赤泥沉降性能的影响,可以看出,在强磁场焙烧预处理中,焙烧温度对高铁一水硬铝石焙烧矿溶出赤泥沉降的影响较大,在实验考察温度范围内,赤泥的沉降性能总体上随温度升高而变好,而磁场强度对其影响并不明显。

REFERENCES

- [1] 陈万坤, 彭关才. 一水硬铝石型铝土矿的强化溶出技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 17-31.
CHEN Wan-kun, PENG Guan-cai. Technical in intensified digestion process for diasopre[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997: 17-31.
- [2] 陈 岱. 国际铝工业对冶金级氧化铝的质量要求和发展趋势[J]. 轻金属, 1996(3): 10-18.
CHEN Dai. Quality requirements and developing trends of international aluminum industry on metallurgical grade alumina[J]. Light Metals, 1996(3): 10-18.
- [3] 杨重愚. 氧化铝生产工艺学[M]. 修订版. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 10-14.
YANG Zhong-yu. Alumina production technology[M]. Revision Edition. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993: 10-14.
- [4] 赵延昌. 有色冶金实验[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993: 99-106.
ZHAO Yan-chang. Ferrous metallurgy experiment[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 1993: 99-106.
- [5] 王一雍, 金 辉, 刘 洋, 李 明, 张志华. 焙烧预处理对一水硬铝石矿溶出性能的影响[J]. 矿产综合利用, 2010(3): 38-41.
WANG Yi-yong, JIN Hui, LIU Yang, LI Ming, ZHANG Zhi-hua. Effect of roasting pretreatment on the digestion of diasopre[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2010(3): 38-41.
- [6] 刘桂华, 张 明, 肖 伟, 彭志宏, 周秋生, 李小斌. 高铁一水硬铝石型铝土矿的低钙比烧结[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(10): 1903-1908.

- LIU Gui-hua, ZHANG Ming, XAO Wei, PENG Zhi-hong, ZHOU Qiu-sheng, LI Xiao-bin. Sintering process of diasporic bauxite with high iron content at low ratio of lime to silica for alumina production[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(10): 1903–1908.
- [7] 李小斌, 孔莲莲, 齐天贵, 周秋生, 彭志宏, 刘桂华. 高铁三水铝石矿拜耳法溶出过程中铝针铁矿的行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(2): 543–548.
- LI Xiao-bin, KONG Lian-lian, QI Tian-gui, ZHOU Qiu-sheng, PENG Zhi-hong, LIU Gui-hua. Effect of aluminogibbsite in Bayer digestion process of high-iron gibbsitic bauxite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(2): 543–548.
- [8] 尹中林, 周海龙, 刘高兴. 采用分步溶出技术处理河南铝土矿和澳大利亚韦帕矿的可行性[J]. 有色金属, 1994(4): 17–19.
- YIN Zhong-lin, ZHOU Hai-long, LIU Gao-xing. The feasibility of treated henan and weipa australia bauxite by step dissolution techniques[J]. Nonferrous Metals, 1994(4): 17–19.
- [9] LI Xiao-bin, PENG Zhi-hong, LIU Gui-hua, ZHOU Qiu-sheng. Intensifying digestion of diasporic and separation of alumina and silica[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(3): 671–678.
- [10] ZHOU Qiu-sheng, LI Xiao-bin, PENG Zhi-hong, LIU Gui-hua. Temperature dependence of crystal structure and digestibility of roasted diasporic[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2004, 14(1): 180–183.
- [11] 佟志芳, 毕诗文, 杨毅宏. 微波加热在冶金领域中应用研究现状[J]. 材料与冶金学报, 2004, 3(2): 117–120.
- TONG Zhi-fang, BI Shi-wen, YANG Yi-hong. Present situation of study on microwave heating application in metallurgy[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2004, 3(2): 117–120.
- [12] 乔红光. 广西贵港高铝浮选金精矿微波预处理氰化浸出试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2005.
- QIAO Hong-guang. Experimentl study on microwave pretreatment with cyanide leaching of gold flotation concentrate containing high arsenic from Guigang, Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2005.
- [13] 赵捷, 乔繁盛. 黄金冶金[M]. 北京: 原子能出版社, 1998: 46–49.
- ZHAO Jie, QIAO Fan-sheng. Gold metallurgy[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1998: 46–49.
- [14] KINGMAN S W, VORSTER W, ROWSON N A. The influence of mineralogy on microwave assisted grinding[J]. Minerals Engineering, 2000, 13(3): 313–327.
- [15] TAVARES L M. Effect of microwave-induced damage on single-particle comminution of ores[C]// Minerals and Metallurgical Processing. Englewood: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, 1984: 198.
- [16] KRUESI W H, KRUESI P R. Microwaves in laterite processing[C]// Extraction and Refining of Nickel. Toronto: Nickel Metallurgy, 1986, 8(1): 17–20.
- [17] 蔡超君. 硫化铜矿物微波辅助焙烧工艺及机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004.
- CAI Chao-jun. Process and mechanism of microwave-aided roasting of copper sulfide minerals[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2004.
- [18] 谷晋川, 刘亚川, 谢矿军. 难选冶金矿微波预处理研究[J]. 有色金属, 2003(5): 55–57.
- GU Jin-chuan, LIU Ya-chuan, XIE Kuang-jun. Microwave pretreatment of refractory gold ores[J]. Nonferrous Metals, 2003(5): 55–58.
- [19] 刘全军, 唐荣. 微波预处理含碳微细粒金矿石的试验研究[J]. 国外黄金参考, 1998(3/4): 36–41.
- LIU Quan-jun, TANG Rong. Experimental study on microwave pretreatment carbonaceous micro-fine gold ore[J]. Gold Abroad Reference, 1998(3/4): 36–41.
- [20] 谷晋川. 难选冶金矿石微波预处理研究[J]. 湿法冶金, 1998(9): 50–52.
- GU Jin-chuan. Microwave pretreatment of refractory gold ores[J]. Hydrometallurgy, 1998(9): 50–52.
- [21] 魏明安, 张锐敏. 微波处理难浸微细粒包裹金的试验研究[J]. 矿冶, 2001(1): 74–77.
- WEI Ming-an, ZHANG Rui-min. Study on Microwave pretreatment of refractory microdimensional gold packaged by pyrite in gold ores[J]. Mining & Metallurgy, 2001(1): 74–77.
- [22] 刘全军, 熊燕琴. 微波在铁矿石选择性磨细中的应用机理研究[J]. 云南冶金, 1997, 26(3): 25–28.
- LIU Quan-jun, XIONG Yan-qin. Mechanism study on application of microwave in elective grinding iron ore[J]. Yunnan Metallurgy, 1997, 26(3): 25–28.
- [23] TAO D P, IU C P. Kinetics of oxidative dearsenication of nicotine ore with microwave radiation[J]. Chinese Journals of Metal Science and Technology, 1992, 8(2): 115.
- [24] 王一雍, 张延安, 陈霞, 鲍丽. 微波焙烧对一水硬铝石矿浸出性能的影响[J]. 过程工程学报, 2007, 7(2): 317–321.
- WANG Yi-yong, ZHANG Ting-an, CHEN Xia, BAO Li. Effects of microwave roasting on leaching behavior of diasporic ore[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2007, 7(2): 317–321.
- [25] 孙娜. 高铁三水铝石型铝土矿中铁铝硅分离的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- SUN Na. Study on iron-aluminium-silicon separation of high iron content gibbsite-tupe bauxite ores[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [26] 张秀峰, 谭秀民, 张利珍, 胡四春. 我国难利用高铁铝土矿的综合利用技术研究现状[J]. 中国矿业, 2011, 20: 100–113.
- ZHANG Xiu-feng, TAN Xiu-min, ZHANG Li-zhen, HU Si-chun. Review of current research status on comprehensive utilization technology of high iron bauxite in China[J]. China Mining Magazine, 2011, 20: 100–113.
- [27] 刘牡丹. 基于还原法的高铝铁矿石铝铁分离基础及新工艺研

- 究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- LIU Mu-dan. Studies on the fundamental and novel technology of Al-Fe separation of high-aluminium content iron ores based on the reduction method[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [28] 李光辉, 董海刚, 肖春梅, 范晓慧, 郭宇峰, 姜涛. 高铁铝土矿的工艺矿物学及铝铁分离技术[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(2): 235–240.
- LI Guang-hui, DONG Hai-gang, XIAO Chun-mei, FAN Xiao-hui, GUO Yu-feng, JIANG Tao. Mineralogy and separation of aluminum and iron from high ferrous bauxite[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(2): 235–240.
- [29] 王强, 赫冀成. 强磁场材料科学[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1–11.
- WANG Qiang, HE Ji-cheng. High magnetic field-related materials science and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2014: 1–11.
- [30] CHOI J K, OHTSUKA H, XU Y, CHOO W Y. Effect of a strong magnetic field on the phase stability of plain carbon steels[J]. Scripta Materialia, 2000, 43(3): 911–916.
- [31] XU B, LI B Q, STOCK D E. An experimental study of thermally induced convection of molten gallium in magnetic field[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(13/14): 475–485.
- [32] 苑轶, 李英龙, 王强, 刘铁, 高鹏飞, 赫冀成. 强磁场对 Mn-Sb 包晶合金相变及凝固组织的影响[J]. 物理学报, 2013, 62(20): 208106.
- YUAN Yi, LI Ying-long, WANG Qiang, LIU Tie, GAO Peng-fei, HE Ji-cheng. Influence of high magnetic fields on phase transition and solidification microstructure in Mn-Sb peritectic alloy[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(20): 208106.
- [33] 苑轶, 王强, 刘铁, 赫冀成. 强磁场对 Al-Cu 合金凝固组织及溶质分布的影响[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2013, 34(1): 57–61.
- YUAN Yi, WANG Qiang, LIU Tie, HE Ji-cheng. Effects of high magnetic fields on solidified microstructure and solute element distribution in Al-Cu alloy[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2013, 34(1): 57–61.
- [34] 吕国志, 张廷安, 鲍丽, 豆志河, 赵爱春, 曲海翠, 倪培远. 高硫铝土矿的焙烧预处理及焙烧矿的溶出性能[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(9): 1684–1689.
- LÜ Guo-zhi, ZHANG Ting-an, BAO Li, DOU Zhi-he, ZHAO Ai-chu, QU Hai-cui, NI Pei-yuan. Roasting pretreatment of high-sulfur bauxite and digestion performance of roasted ore[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(9): 1684–1689.
- [35] LORETTA Y L, RUTHERFORD G K. Effect of bauxite properties on the settling of red mud[J]. International Journal of Mineral Processing, 1996, 48(3/4): 169–182.

(编辑 龙怀中)