

富高岭石型铝土矿化学脱硅新工艺及其机理

吴艳, 潘晓林, 韩月娇, 于海燕

(东北大学冶金学院, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: 针对富高岭石型铝土矿, 首次提出了采用化学脱硅的工艺路线. 研究了二氧化硅平衡溶解度与氧化铝质量浓度的变化关系, 以及碱液浓度、温度和脱硅时间对矿石预脱硅率的影响. 结果表明, 在 Na_2O 质量浓度为 $230 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的碱溶液中, 90°C 化学脱硅 90 min, 脱硅率可达 70%, 铝土矿的铝硅比由 4.97 提高到 8.5 以上; 矿石预脱硅过程有钠硅渣的生成, 导致了矿石脱硅率的降低和碱的损失; 矿石中高岭石转变成钠硅渣并不会降低脱硅精矿的有效铝硅比.

关键词: 铝土矿; 高岭石; 拜耳法; 化学脱硅; 钠硅渣

中图分类号: TF 111.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2019)10-1424-06

Novel Process and Mechanism for Chemical Desilication from Kaolinite-Rich Diasporic Bauxite

WU Yan, PAN Xiao-lin, HAN Yue-jiao, YU Hai-yan

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: PAN Xiao-lin, E-mail: panxl@smm.neu.edu.cn)

Abstract: For the kaolinite-rich diasporic bauxite, a process route using chemical desilication was firstly proposed. The relationship between the equilibrium solubility of silica and the mass concentration of alumina, and the effect of lye concentration, temperature and time on the chemical desilication ratio of ore were studied. The results showed that the desilication ratio can reach 70% and the $w_{\text{Al}_2\text{O}_3}/w_{\text{SiO}_2}$ of bauxite increases from 4.97 to 8.5 in the alkali solution with Na_2O concentration of $230 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ at 90°C for 90 min. The formation of DSP reduces the pre-desilication ratio and causes the loss of alkali. However, the conversion of kaolinite to DSP does not reduce the effective $w_{\text{Al}_2\text{O}_3}/w_{\text{SiO}_2}$ of desilicated concentrate.

Key words: bauxite; kaolinite; Bayer process; chemical desilication; DSP

中国铝土矿主要为一水硬铝石型铝土矿, 矿石嵌布粒度较细, 铝、硅矿物紧密共生. 因此, 针对中国铝土矿的存在形态, 采用化学脱硅更能有效处理^[1-3].

目前工业应用较多的脱硅技术是溶出前的预脱硅, 是在管道化溶出前进行的, 避免钠硅渣在溶出过程中析出而造成的能耗变大及设备结垢等一系列问题^[4-7]. 然而, 脱硅后得到的钠硅渣随赤泥被丢弃, 有价元素难以被再次利用. 此外, 还有预焙烧-氢氧化钠脱硅技术, 然而, 高岭石分解成活性氧化硅和非活性的氧化铝需要煅烧到

$1\,000^\circ\text{C}$ 以上, 这使得工艺能耗大幅度增加; 同时, 在焙烧分解高岭石的过程中, 含铝物相也发生变化, 由原来的水铝石变为非活性的氧化铝, 这就需要更高温度和更长时间才能使非活性的氧化铝被充分溶出, 使得后续的溶出条件更加苛刻. 此外还有高碱浓度预脱硅、 NaOH 直接溶出-复合场分选脱硅等^[8-15].

因此, 研究从一水硬铝石型铝土矿中直接湿法处理来实现矿石预脱硅的工艺技术具有实际意义. 本文提出了化学脱硅新工艺, 对一水硬铝石型矿石进行预脱硅, 工艺流程见图 1. 主要原理是

根据高岭石和一水硬铝石在碱液中的溶解条件不同,实现高岭石物相的选择性溶解. 分离后的脱硅精矿直接采用拜耳法工艺,脱硅溶液在晶型导向剂的作用下制备 4A 沸石. 本文主要研究预脱硅的具体条件及预脱硅机理,为富高岭石型一水硬铝石铝土矿的化学脱硅提供理论依据.

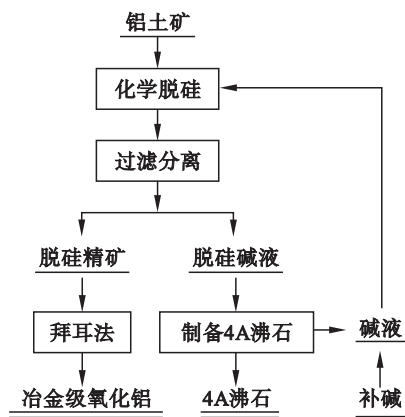


图 1 富高岭石铝土矿化学脱硅工艺流程
Fig. 1 Flow chart of chemical-desilication process for kaolinite-rich diasporic bauxite

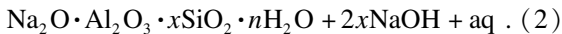
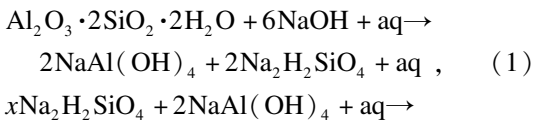
1 实验原料与方法

1.1 实验原料

本实验所用原料,除高岭石外,其余均采用分析纯试剂,纯度高于 98%. 实验中配制溶液采用蒸馏水.

1.2 实验过程

本实验所采用的化学脱硅反应是根据一水硬铝石和高岭石在碱性溶液中的溶解条件不同而进行的. 在常压条件下,高岭石可与碱性溶液发生溶解反应,根据化学反应式(1)生成铝酸钠和硅酸钠进入溶液中,而一水硬铝石不能在常压下溶于碱液中,此外,进入到溶液中的铝酸钠和硅酸钠在一定条件下,又会发生反应(2)生成水合铝硅酸钠沉淀(俗称钠硅渣),使溶解的高岭石又以钠硅渣沉淀的形式返回到固相中. 因此,为了达到预脱硅的目的,既要促进高岭石在碱液中的溶解,又要抑制溶液中铝酸钠和硅酸钠生成钠硅渣沉淀,尽可能将二氧化硅以硅酸钠形式保留在溶液中,以达到铝土矿化学脱硅的目的.



在反应过程中,高岭石的溶解反应和钠硅渣的生成反应是同时进行的,本实验的目的在于寻

找溶解反应和生成反应相耦合的最佳条件,通过控制反应条件,尽可能促进高岭石的溶解反应,同时抑制钠硅渣的生成反应,从而实现化学脱硅,最终提高脱硅精矿的铝硅比.

本实验采用恒温水浴加热,在圆底三口烧瓶中进行. 将圆底三口烧瓶固定于恒温水浴锅中,安装搅拌装置及冷凝回流装置. 首先将一定浓度的苛碱溶液加热至实验所需温度,然后按照液固比将原料(磨细后的高岭石型铝土矿)缓慢倒入三口烧瓶中,打开搅拌装置,开始进行预脱硅反应. 一定时间后反应结束,用布氏漏斗进行液固分离. 分析滤液中氧化铝、氧化钠及二氧化硅的浓度,滤饼用蒸馏水洗至 pH 呈中性,在 90 ℃ 的干燥箱内烘干 8 h 后检测其化学成分.

1.3 原矿及脱硅矿的分析表征

对原矿及脱硅精矿进行 XRD (岛津 XRD - 7000, Cu K_α 靶辐射)、SEM (SHIMADZUSSX - 550)、粒度 (Mastersizer Hydro 3000MU,分散介质为水)和 FT - IR (岛津 IRAffinity - 1 型傅里叶红外变换光谱仪)分析. XRF 分析检测固相中氧化铝、氧化钠、氧化硅含量,计算脱硅精矿的铝硅比 $w_{\text{Al}_2\text{O}_3}/w_{\text{SiO}_2}$,并用式(1)计算矿石脱硅率 η :

$$\eta = \frac{(w_{\text{Al}_2\text{O}_3}/w_{\text{SiO}_2})_1 - (w_{\text{Al}_2\text{O}_3}/w_{\text{SiO}_2})_0}{(w_{\text{Al}_2\text{O}_3}/w_{\text{SiO}_2})_0} \times 100\% . \quad (3)$$

式中: $(w_{\text{Al}_2\text{O}_3}/w_{\text{SiO}_2})_1$ 为脱硅精矿中的铝硅比; $(w_{\text{Al}_2\text{O}_3}/w_{\text{SiO}_2})_0$ 为原矿中的铝硅比.

用容量分析法测定化学脱硅后的滤液中 Na_2O , Al_2O_3 , SiO_2 的质量浓度,分别用 $\rho_{\text{Na}_2\text{O}}$, $\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 和 ρ_{SiO_2} 来表示.

2 矿石原料分析

本实验所用高岭石来源于山西某地区,原矿颗粒粗大,在 100 ℃ 条件下烘干 8 h,破碎后矿石用磨料机磨制 10 min,达到粒度小于 200 μm 的铝土矿样品,其化学成分见表 1,物相分析见图 2.

由表 1 可知,本实验采用的铝土矿主要的化学成分为 Al_2O_3 和 SiO_2 ,二者之和接近 77%, TiO_2 , CaO 和 Fe_2O_3 含量总和小于 10%,烧失量在 15% 左右. 其铝硅比为 4.97,属于高铝高硅低品位铝土矿.

表 1 富高岭石型—水硬铝石型铝土矿的化学成分 (质量分数)

Table 1 Chemical composition of kaolinite-rich diasporic bauxite (mass fraction)					%
Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	LOI
63.85	12.84	2.93	3.64	0.60	14.15

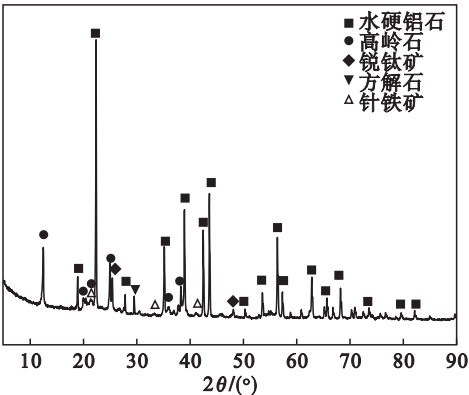


图 2 富高岭石—水硬铝石型铝土矿的 XRD 谱
Fig. 2 XRD pattern of kaolinite-rich diasporic bauxite

由图 2 可知,铝土矿的主要物相为一水硬铝石,其次是高岭石、针铁矿和锐钛矿.结合表 1 化学成分分析,可计算各物相的质量分数,见表 2.

表 2 富高岭石—水硬铝石型铝土矿的主要物相 (质量分数)

Table 2 Main content of kaolinite-rich diasporic bauxite (mass fraction)					%
一水硬铝石	高岭石	锐钛矿	针铁矿	方解石	
62.28	27.61	2.93	4.05	1.00	

本实验所用的富高岭石—水硬铝石型铝土矿的微观形貌如图 3 所示,可知,矿石颗粒尺寸不均匀,层片状的高岭石和块状的一水硬铝石互相嵌布结合在一起,这为从矿石中脱除高岭石带来难度.

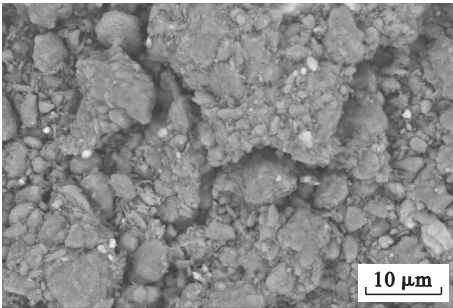


图 3 富高岭石—水硬铝石型铝土矿的 SEM 图像
Fig. 3 SEM image of kaolinite-rich diasporic bauxite

3 结果分析与讨论

3.1 氧化铝对二氧化硅平衡溶解度的影响

在反应温度为 90 ℃,反应时间为 30 min 的

条件下,测试了苛碱质量浓度为 230 g·L⁻¹的铝酸钠溶液中 SiO₂ 质量浓度随 Al₂O₃ 质量浓度的变化规律,如图 4 所示,对 ρ_{SiO₂} 与 ρ_{Al₂O₃} 的变化关系进行数据拟合.

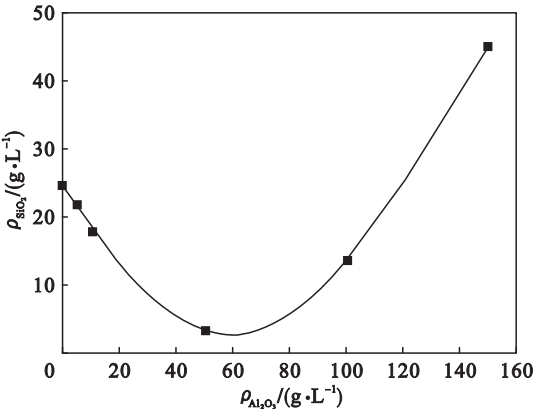


图 4 ρ_{SiO₂} 与 ρ_{Al₂O₃} 的关系
Fig. 4 Relationship between ρ_{SiO₂} and ρ_{Al₂O₃}

由图 4 中数据分散点可以看出,随着初始溶液中氧化铝质量浓度的增大,溶液中二氧化硅质量浓度先下降后上升,在氧化铝质量浓度为 60 g·L⁻¹左右出现最低值,说明氧化铝质量浓度在 60 g·L⁻¹左右有利于钠硅渣的形成.

根据拟合数据发现溶液中 ρ_{SiO₂} 随 ρ_{Al₂O₃} 的增加以高斯函数形式变化,关系式为
$$y = 89.02 - 86.20 \exp[-(x - 59.40)/12164.88]$$
 (4)

式中:y 为 ρ_{SiO₂}, g·L⁻¹; x 为 ρ_{Al₂O₃}, g·L⁻¹.

式(4)为铝酸钠溶液中 SiO₂ 最高亚稳态平衡质量浓度随 Al₂O₃ 质量浓度变化的经验公式,但要注意此公式的使用条件为 90 ℃,苛碱浓度为 230 g·L⁻¹. 同时,此经验关系式只在 ρ_{Al₂O₃} 测试范围内使用.

彭志宏等^[16]对铝酸钠溶液中 ρ_{Al₂O₃} 对 SiO₂ 行为的影响进行了研究.研究表明,在反应温度为 280 ℃,反应时间为 1 h,游离苛碱质量浓度为 40 g·L⁻¹和 80 g·L⁻¹的条件下,随着铝酸钠溶液中 ρ_{Al₂O₃} 的增加,溶液中 ρ_{SiO₂} 呈先下降后上升的趋势,在 ρ_{Al₂O₃} 为 40 ~ 100 g·L⁻¹时出现最低值.

根据研究结果,本实验采用纯氢氧化钠溶液来溶解高岭石.

3.2 化学脱硅单因素实验结果

3.2.1 温度的影响

溶出温度在 80 ~ 100 ℃ 范围内,在液固比为 10, ρ_{Na₂O} 为 230 g·L⁻¹ 的溶液中,富高岭石型铝土矿预脱硅 60 min 时的化学脱硅结果见图 5.

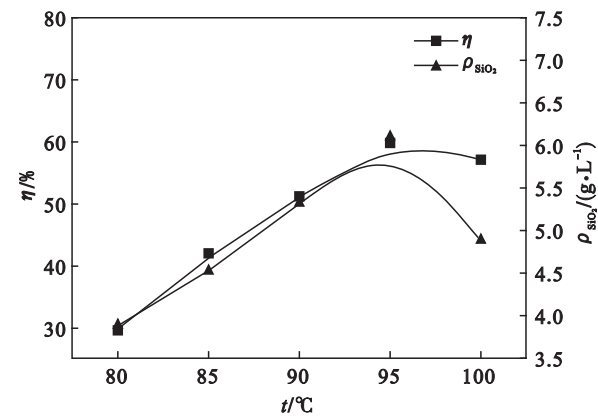


图 5 温度对 η 及 ρ_{SiO_2} 的影响

Fig. 5 Effect of temperature on η and ρ_{SiO_2}

由图 5 可知,随着反应温度的升高,溶液中 ρ_{SiO_2} 和 η 都逐渐升高;说明升高温度有利于铝土矿中高岭石的溶解反应,温度越高,溶解反应驱动力越大,氢氧化钠对高岭石的溶解能力越强. 然后随着溶液中 ρ_{SiO_2} 的不断增加,溶液中的钠硅渣生成反应也在逐渐加大,氢氧化钠溶液对高岭石的溶解能力越强. 然而 η 并不会随着温度的升高而持续提高,当温度为 95 °C 时, η 达到一个极值,继续升高温度, η 开始下降. 溶液中 ρ_{SiO_2} 的变化趋势与 η 的变化趋势是一致的,也在 95 °C 时,有一个最大值. 说明当温度低于 95 °C 时,高岭石的溶解速率大于钠硅渣的生成速率,因此溶液中 ρ_{SiO_2} 不断增加,温度高于 95 °C 时,钠硅渣的生成速率大于高岭石的溶解速率,钠硅渣的生成使溶液中的氧化铝和二氧化硅又以固体的形式进入脱硅精矿中,造成溶液中 ρ_{SiO_2} 和 η 的下降.

3. 2. 2 时间的影响

预脱硅时间在 60 ~ 150 min 范围内,在温度为 90 °C,液固比为 10, $\rho_{\text{Na}_2\text{O}}$ 为 230 g·L⁻¹ 的条件下,富高岭石型铝土矿化学脱硅结果如图 6 所示.

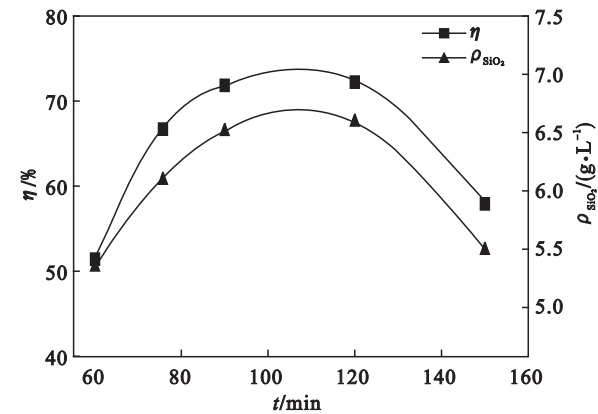


图 6 时间对 η 及 ρ_{SiO_2} 的影响

Fig. 6 Effect of time on η and ρ_{SiO_2}

由图 6 可知,随着反应时间的延长,溶液中 ρ_{SiO_2} 和 η 有相同的变化趋势, η 呈先上升、然后平缓、最后下降的趋势;说明当反应时间少于 90 min,高岭石的溶解速率大于钠硅渣的生成速率,当反应时间在 90 ~ 120 min 之间,高岭石的溶解速率等于钠硅渣的生成速率,当反应时间大于 120 min,高岭石的溶解速率小于钠硅渣的生成速率.

在反应 90 ~ 120 min 内,有一个缓慢的稳定区,在这个稳定区, η 达到了 70%,脱硅精矿铝硅比在 8.5 以上,溶液中硅浓度较高,在这个区域进行液固分离,可以实现较好的脱硅效果.

3. 2. 3 氧化钠的影响

温度为 90 °C,液固比 10,溶出时间在 120 min 时,考察 $\rho_{\text{Na}_2\text{O}}$ 为 200 ~ 260 g·L⁻¹ 时,富高岭石型铝土矿化学脱硅结果见图 7.

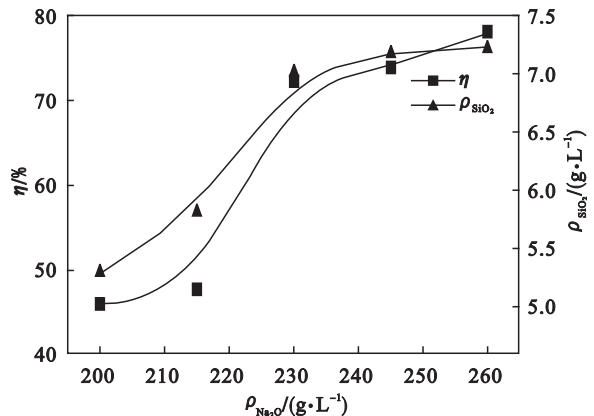


图 7 $\rho_{\text{Na}_2\text{O}}$ 对 η 及 ρ_{SiO_2} 的影响

Fig. 7 Effect of $\rho_{\text{Na}_2\text{O}}$ on η and ρ_{SiO_2}

由图 7 可知,随着 $\rho_{\text{Na}_2\text{O}}$ 的增加, ρ_{SiO_2} 不断增大,说明碱性越大,氧化硅的平衡溶解度越高,因此脱硅矿铝硅比也升高. 当 $\rho_{\text{Na}_2\text{O}}$ 大于 230 g·L⁻¹ 时,继续增加碱浓度并不会明显增加氧化硅的溶解度,也不会明显提高脱硅矿的铝硅比. 同时, $\rho_{\text{Na}_2\text{O}}$ 的增加使溶液的黏度增大,不利于进一步液固分离. 因此建议 $\rho_{\text{Na}_2\text{O}}$ 为 230 g·L⁻¹.

3. 3 化学脱硅过程钠硅渣生成的影响

根据实验原理可知,高岭石的溶出过程和钠硅渣的生成过程是同时进行的,反应的最终结果决定了高岭石在液固两相的走向及分配,也决定了脱硅效果. 铝土矿化学脱硅的目的是促进高岭石的反应和抑制钠硅渣的生成. 钠硅渣的生成不仅降低了脱硅效果,还造成了苛碱的损失,同时,钠硅渣中携带的铝也很难在拜耳法溶出过程中被碱溶出. 因此,在计算脱硅精矿铝硅比的时候,钠

硅渣中的 Al_2O_3 和 SiO_2 不应该计算在内. 本实验对不同时间下脱硅精矿进行钠含量分析. 再根据钠硅渣通用分子式 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 计算出脱硅矿中钠硅渣携带的氧化铝和氧化硅含量, 从脱硅矿中总氧化铝和氧化硅含量中排除钠硅渣, 计算出脱硅矿实际溶出过程中有效铝硅比 $(w_{\text{Al}_2\text{O}_3}/w_{\text{SiO}_2})'_1$, 结果如图 8 所示.

$$(w_{\text{Al}_2\text{O}_3}/w_{\text{SiO}_2})'_1 = \frac{(w_{\text{Al}_2\text{O}_3})_1 - (w_{\text{Na}_2\text{O}})_1 \times \frac{102}{62}}{(w_{\text{SiO}_2})_1 - (w_{\text{Na}_2\text{O}})_1 \times \frac{60 \times 2}{62}} \quad (5)$$

式中: $(w_{\text{Al}_2\text{O}_3}/w_{\text{SiO}_2})'_1$ 为脱硅精矿中有效铝硅比; $(w_{\text{Na}_2\text{O}})_1$ 为脱硅精矿中 Na_2O 的质量分数; $(w_{\text{Al}_2\text{O}_3})_1$ 为脱硅精矿中 Al_2O_3 的质量分数; $(w_{\text{SiO}_2})_1$ 为脱硅精矿中 SiO_2 的质量分数.

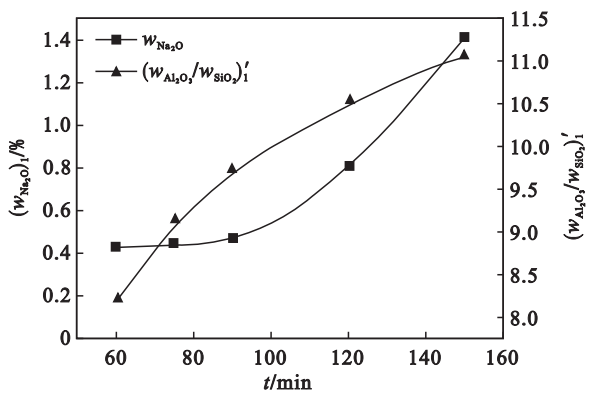


图 8 时间对 $(w_{\text{Na}_2\text{O}})_1$ 及 $(w_{\text{Al}_2\text{O}_3}/w_{\text{SiO}_2})'_1$ 的影响
Fig. 8 Effect of time on $(w_{\text{Na}_2\text{O}})_1$ and $(w_{\text{Al}_2\text{O}_3}/w_{\text{SiO}_2})'_1$

由图 8 可知, 随着反应时间的延长, 钠硅渣生成量增加, 尤其是反应 90 min 后, 钠硅渣生成速度较快, 脱硅矿中钠含量明显增多. 然而, 钠硅渣的生成等于把矿石中的高岭石转变成了不能在拜耳法中溶出的水合铝硅酸钠, 因此并没有降低脱硅精矿中的有效铝硅比, 脱硅精矿中有效铝硅比依然明显增加, 但是随着反应时间的增加, 其增长速度缓慢降低.

对预脱硅 90 min 和 150 min 的脱硅精矿进行物相分析, 如图 9 所示. 可知, 脱硅精矿主要含铝物相为一水硬铝石, 其次还有未反应的高岭石.

在化学脱硅 150 min 的脱硅矿中可发现新生成物相钠硅渣, 物相分析结果与化学分析结果一致.

预脱硅 90 min 后脱硅精矿的微观形貌如图 10 所示, 可以发现, 矿石颗粒尺寸明显减小, 分散均匀, 与图 3 相比, 原先的嵌布关系被解除. 这为脱硅精矿的后续氧化铝拜耳法溶出带来优势.

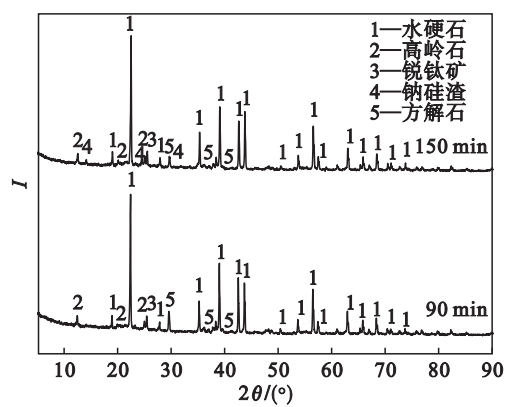


图 9 脱硅精矿的 XRD 谱
Fig. 9 XRD patterns of desilicated concentrate

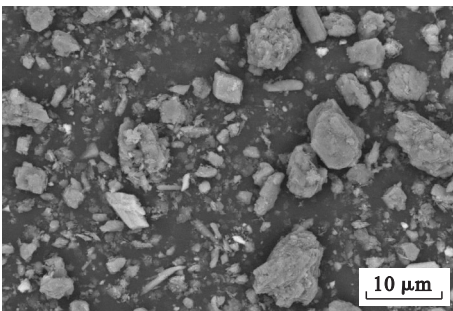


图 10 脱硅精矿的 SEM 图像
Fig. 10 SEM image of desilicated concentrate

4 结 论

1) 提出了针对富高岭石型铝土矿的化学脱硅新方法, 工艺流程简单, 脱硅精矿铝硅比高, 且脱硅过程有利于后续溶出工艺.

2) 研究了铝酸钠溶液中, ρ_{SiO_2} 随 $\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 的平衡溶解度. 确定了采用 $\rho_{\text{Na}_2\text{O}}$ 为 $230 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的纯碱溶液作为预脱硅溶液. 同时确定了矿石预脱硅的适宜条件: $\rho_{\text{Na}_2\text{O}}$ 为 $230 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 脱硅时间为 90 min, 脱硅温度为 90°C , 脱硅率可达到 70% 以上, 脱硅渣中铝硅比为 8.5, 脱硅后一水硬铝石更易溶出.

3) 脱硅精矿的分析表明, 脱硅过程有钠硅渣的生成, 降低了脱硅率, 造成了碱的损失; 但是矿石中高岭石到钠硅渣的转变并没有降低铝土矿的有效铝硅比.

参考文献:

[1] Barnes M C, Jonas A M, Gerson A R. The kinetics of desilication of synthetic spent Bayer liquor seeded with cancrinite and cancrinite/sodalite mixed-phase crystals [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1999, 200: 251–264.
[2] 顾松青. 我国的铝土矿资源和高效低耗的氧化铝生产技术 [J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14 (sup1): 91–97.
(Gu Song-qing. Alumina production technology with high efficiency and low consumption from Chinese bauxite

resource [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14 (suppl) : 91 - 97.)

[3] Li X H, Gu S Q, Yin Z L, et al. Regulating the digestion of high silica bauxite with calcium ferrite addition [J]. *Hydrometallurgy*, 2010, 104 (2) : 313 - 316.

[4] Pan X L, Yu H Y, Dong K W, et al. Pre-desilication and digestion of gibbsitic bauxite with lime in sodium aluminate liquor [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2012, 19 (11) : 973 - 977.

[5] Jiang T, Li G H, Qiu G Z, et al. Thermal activation and alkali dissolution of silicon from illite [J]. *Applied Clay Science*, 2008, 40 : 81 - 89

[6] Peter S. The processing of high silica bauxites — review of existing and potential processes [J], *Hydrometallurgy*, 2009, 98 : 162 - 176.

[7] 杨波, 王京刚, 张亦飞, 等. 常压下高浓度 NaOH 浸取铝土矿预脱硅 [J]. 过程工程学报, 2007, 7 (5) : 922 - 927.
(Yang Bo, Wang Jing-gang, Zhang Yi-fei, et al. Pre-desiliconization of a bauxite ore through leaching by high concentration NaOH solution under atmospheric pressure [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2007, 7 (5) : 922 - 927.)

[8] Pan X L, Yu H Y, Tu G F, et al. Effects of precipitation activity of desilication products (DSPs) on stability of sodium aluminate solution [J]. *Hydrometallurgy*, 2016, 165 : 261 - 269.

[9] 姜涛, 李光辉, 范晓慧, 等. 一水硬铝石型铝土矿焙烧碱浸脱硅新工艺 (I) [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10 (4) : 534 - 538.
(Jiang Tao, Li Guang-hui, Fan Xiao-hui, et al. Desilication from diasporic bauxite by roasting-alkali leaching process [J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10 (4) : 534 - 538.)

[10] 刘今, 巩前明, 吴若琼, 等. 低品位铝土矿预脱硅工艺及动力学研究 [J]. 中南工业大学学报, 1998, 29 (1) : 43 - 46.
(Liu Jin, Gong Qian-ming, Wu Ruo-qiong, et al. The technology and kinetics of predigestion desilication by mechanochemical activation [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 1998, 29 (1) : 43 - 46.)

[11] 钱崇梁, 刘永康, 吴恩熙, 等. 铝土矿焙烧和溶出脱硅的 X 射线衍射研究 [J]. 中国有色金属学报, 1997, 7 (1) : 66 - 69.
(Qian Chong-liang, Liu Yong-kang, Wu En-xi, et al. X-Ray diffraction study on desilication of diasporic bauxite by roast and digestion [J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1997, 7 (1) : 66 - 69.)

[12] Li G H, Jiang T, Qiu G Z, et al. Technology and mechanism of desilication from roasted diasporic bauxite in atmosphere [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2002, 12 (1) : 132 - 136.

[13] Peng H, Seneviratne D, Vaughan J. Role of the amorphous phase during sodium aluminosilicate precipitation [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2018, 57 : 1408 - 1416.

[14] 刘桂华, 李小斌, 彭志宏, 等. 铝土矿湿法预处理的研究进展 [J]. 矿冶工程, 2000, 20 (3) : 55 - 58.
(Liu Gui-hua, Li Xiao-bin, Peng Zhi-hong, et al. Advances in wet pretreatment of bauxide [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2000, 20 (3) : 55 - 58.)

[15] 晋艳娥. 铝土矿碱浸脱硅的研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010 : 15 - 18.
(Jin Yan-e. Research of desilication from bauxite by alkali leaching process [D]. Xi ' an: Xi ' an University of Architecture and Technology, 2010 : 15 - 18.)

[16] 彭志宏, 王浩宇, 刘桂华, 等. 二氧化硅在铝酸钠溶液中的反应行为 [J]. 矿冶工程, 2009, 29 (6) : 57 - 60.
(Peng Zhi-hong, Wang Hao-yu, Liu Gui-hua, et al. Reaction behavior of silica in sodium aluminate solution [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2009, 29 (6) : 57 - 60.)