

[文章编号] 1004- 0609(2000)04- 0534- 05

# 一水硬铝石型铝土矿焙烧-碱浸脱硅新工艺( I )<sup>①</sup>

姜 涛, 李光辉, 范晓慧, 黄柱成, 邱冠周  
(中南工业大学 矿物工程系, 长沙 410083)

**[摘 要]** 针对中、低铝硅比的一水硬铝石-高岭石型铝土矿, 以山西铝土矿作原料, 在回转窑上进行了焙烧脱硅工艺研究, 结果表明: 采用回转窑焙烧铝土矿是可行的, 其焙烧工艺条件为: 矿石粒度 0~ 20 mm, 焙烧温度 1 050~ 1 100 ℃, 焙烧时间 15~ 20 min。在碱浸溶出脱硅条件下焙烧矿的脱硅率达 55. 61%, 精矿铝硅比为 9. 92。X 射线衍射分析表明: 焙烧过程中高岭石发生热分解产生的非晶态 SiO<sub>2</sub>, 在碱浸溶出脱硅过程中溶于 NaOH 脱除。高压溶出试验表明: 脱硅铝精矿中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的溶出率比原矿要高。

**[关键词]** 一水硬铝石型铝土矿; 化学选矿; 脱硅

**[中图分类号]** TD927. 2; TD925. 6

**[文献标识码]** A

我国铝土矿资源丰富, 储量达 24 亿吨, 但从矿石的类型来看, 我国的铝土矿主要为一水硬铝石型(约占总储量的 98%), 一般具有高铝、高硅、低铁及含硅矿物多、组成复杂等特点, 且大多数属中、低铝硅比(4~ 7)的矿石, 能满足拜耳法工艺要求的矿石仅占铝土矿资源的 10% 左右<sup>[1]</sup>。由于矿石铝硅比低, 目前我国氧化铝的生产主要采用联合法和烧结法。但这两种方法能耗高、生产流程长、工艺复杂, 使得我国氧化铝工业经济效益低, 国际市场竞争力差。

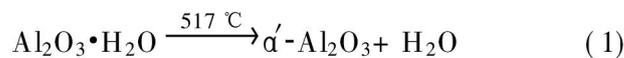
随着世界上铝土矿高压溶出技术的发展和我国对高压溶出设备的引进、研究和开发应用, 不能用拜耳法生产氧化铝原料的一水硬铝石型矿石, 在高压溶出设备中却能顺利溶解, 矿石类型不再是拜耳法生产氧化铝的限制性因素<sup>[2~ 4]</sup>。但是用拜耳法生产氧化铝要获得好的经济效益, 就要求原料铝硅比必须大于 8<sup>[5, 6]</sup>。因此, 研究和开发中低品位铝土矿脱硅新工艺, 提高一水硬铝石型高硅铝土矿的铝硅比, 采用拜耳法工艺生产氧化铝是发展我国氧化铝工业的必由之路。

在各种铝土矿预脱硅方法中<sup>[7]</sup>, 焙烧-碱浸预脱硅法因氧化铝回收率高、易于在现行生产工艺上改造等优点而受到重视。目前铝土矿焙烧预脱硅的研究主要限于理论研究和实验室小型试验<sup>[8~ 13]</sup>。本文作者研究了采用回转窑进行铝土矿焙烧预脱硅的可行性及其焙烧制度。

## 1 铝土矿焙烧-碱浸脱硅原理

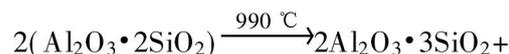
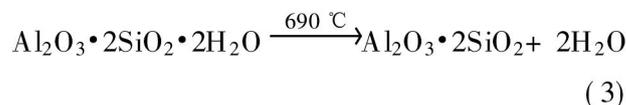
将铝土矿在高温条件下焙烧一定时间后, 使矿石中的某些含铝硅酸盐发生热分解反应, 产生在较低温度条件下可溶于苛性碱的无定型二氧化硅, 焙烧后的矿石用碱处理溶解掉这一部分可溶性二氧化硅, 从而达到脱硅的目的。

在铝土矿的焙烧过程中发生的化学反应主要是矿石中铝矿物的脱水反应和含硅铝矿物的热分解反应<sup>[11, 12]</sup>。焙烧时矿石中铝矿物(主要为一水硬铝石)发生的反应为



$\alpha'\text{-Al}_2\text{O}_3$  称为活性刚玉, 较  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  原矿更易溶于碱<sup>[14, 15]</sup>。 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  在常压、低温条件下不与碱反应, 而在高压溶出过程中能充分溶出, 属于具有化学活性的刚玉型氧化铝。因此, 要保证焙烧碱浸脱硅过程不造成氧化铝的附加损失, 就必须使一水硬铝石在焙烧时全部转化为  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。

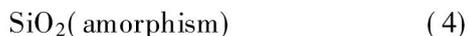
焙烧时矿石中含硅铝矿物(主要为高岭石)发生的反应为



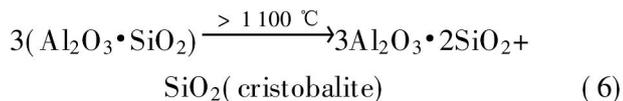
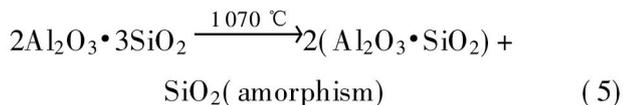
① [基金项目] 国家“973”计划资助项目(G1999064901)

[收稿日期] 1999- 12- 18; [修订日期] 2000- 03- 06

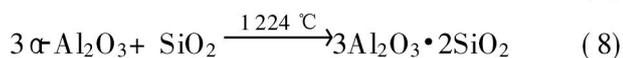
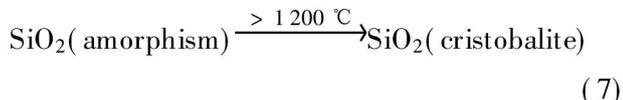
[作者简介] 姜 涛(1963- ), 男, 教授, 博士生导师。



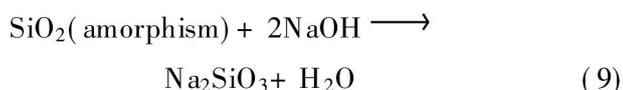
式中  $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$  为松散的假结晶铝硅尖晶石。



式中  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  为富铝红柱石(莫来石),  $\text{SiO}_2$  为方石英。



从式(3)~(8)可以看出,当温度达到  $990\text{ }^\circ\text{C}$  时,铝土矿中的高岭石开始发生分解反应生成无定形的  $\text{SiO}_2$ ,该无定形的  $\text{SiO}_2$  可溶于碱而被脱除,反应为



当温度达到  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  时,开始发生莫来石化反应,生成  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ,莫来石中的  $\text{SiO}_2$  不能溶于  $\text{NaOH}$  而被脱除;当温度大于  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  时,原来生成的无定形  $\text{SiO}_2$  也会发生晶型转化成方石英,使得这一部分  $\text{SiO}_2$  不能被脱除。因此,在铝土矿的焙烧过程中应控制好焙烧温度,以保证高岭石能充分分解而又尽量不生成莫来石。

## 2 实验原料及方法

### 2.1 实验原料

试验中所用的铝土矿为山西铝厂烧结法生产的普铝矿,矿石中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  60.12%,  $\text{SiO}_2$  13.65%, 铝硅比为 4.4, 属中、低铝硅矿石。

铝土矿中物相组成如表 1 所示。铝土矿中硅主要以高岭石和天然的  $\alpha$ -石英两种形式存在。

表 1 铝土矿 X 衍射线定量分析结果

Table 1 X-ray diffraction quantitative analysis of bauxite (%)

Diasporite	Kaolinite	Hematite	Anatase	Quartz
62.15	19.36	6.80	2.86	4.58

### 2.2 实验方法

铝土矿的焙烧是在  $d300 \times 1400\text{ mm}$  回转窑上采用间歇式方式进行的。试验时,每次取铝土矿  $10\text{ kg}$ 。当窑内温度升至  $700\text{ }^\circ\text{C}$  时,即装入试样,调节喷吹用油和空气量,以保证一定的升温速度,将

窑中部温度升至预定值后保持恒温,并计时,恒温保持时间即为焙烧时间。焙烧结束后,卸出矿石,冷却后取样。

焙烧矿的溶出脱硅实验装置为 DY8 群釜。其结构为:钢弹 8 个,钢弹容积为  $150\text{ mL}$ ,最高温度  $200\text{ }^\circ\text{C}$ ,转速为  $20\sim 120\text{ r/min}$ ,采用电热管加热,以工业甘油为加热介质。采用自动控温装置控温,控制精度为  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 。溶出温度  $140\text{ }^\circ\text{C}$ ,溶出时间  $20\text{ min}$ ,液固比为 3,碱浓度为  $100\text{ g/L}$ ,搅拌速度为  $60\text{ r/min}$ 。试验时,将矿粉与碱放入钢弹中,密封;达指定温度后恒温  $5\text{ min}$ ,放入钢弹,  $1\text{ min}$  后开始计时。在规定的搅拌速度下,完成预定时间的溶出过程。试验完毕后,取出钢弹置于温水中冷却,过滤分离,并反复洗涤滤饼,滤液取样化验分析  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量。

## 3 结果与讨论

### 3.1 焙烧制度

#### 3.1.1 入窑原料粒度

试验中考查了  $0\sim 6.3\text{ mm}$ ,  $0\sim 10\text{ mm}$ ,  $0\sim 20\text{ mm}$ ,  $6.3\sim 12.5\text{ mm}$  四个不同粒级的铝土矿在焙烧温度为  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ ,焙烧时间为  $15\text{ min}$  时的焙烧情况,试验结果见表 2。从表 2 可知,四种不同粒级的矿石通过焙烧,焙烧矿的脱硅率差别不大。这是因为用回转窑焙烧铝土矿时,由于在回转窑内矿石受热比较均匀,在适宜的温度下,只要焙烧时间合适,各种粒径的矿石均可获得较好的焙烧效果。另外,用回转窑焙烧铝土矿时,高温条件下,大颗粒块矿在窑内发生爆裂或在反复跌落过程中被摔碎,矿石粒径自动变小,入窑矿石的粒度对铝土矿的焙烧效果影响不大。因此,可采用较粗粒级( $0\sim 20\text{ mm}$ )入窑。

#### 3.1.2 焙烧温度与焙烧时间

焙烧温度和焙烧时间是影响铝土矿焙烧效果的

表 2 入窑原料粒度对焙烧矿溶出脱硅的影响

Table 2 Influence of size on desilication ratio

Size / mm	$\eta_{\text{Al}}$ / %	$\eta_{\text{Si}}$ / %	Composition of concentrate		
			$\text{Al}_2\text{O}_3$ / %	$\text{SiO}_2$ / %	A/S
0~ 20	0.78	55.61	76.97	7.76	9.92
0~ 20	0.75	55.40	76.94	7.79	9.88
0~ 6.3	0.69	55.45	76.95	7.78	9.89
6.3~ 12.5	0.80	54.95	76.88	7.86	9.78

Notes:  $\eta_{\text{Si}}$ ,  $\eta_{\text{Al}}$  refer to desilication ratio and alumina loss ratio, respectively.

重要因素, 只有通过两者相互配合, 才能取得好的焙烧效果。试验结果见表 3 和图 1~ 3。由图可知, 当温度为 1000~ 1200 °C、时间为 10~ 40 min, 焙烧矿都能取得较高的脱硅率, 溶出精矿的铝硅比均大于 9。从图中也可看出, 在焙烧温度较低(1000~ 1050 °C)时, 随着焙烧时间的延长, 焙烧矿的脱硅率和精矿铝硅比均升高; 而在较高的温度(1200 °C)下, 随着焙烧时间的延长, 焙烧矿的脱硅率和精矿铝硅比均降低。同样, 焙烧时间较短(10 min)时, 随着焙烧温度的升高, 焙烧矿的脱硅率和精矿铝硅比均升高; 而在较长的焙烧时间(40 min)下, 随着焙烧温度的升高, 焙烧矿的脱硅率和精矿铝硅比均降低。因此, 对于本试验所采用的矿样, 适宜的焙烧温度为 1050 °C~ 1100 °C, 焙烧时间为 15~ 20 min。

由表 3 可知, 在各种试验条件下, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的损失率均在 0.6%~ 0.9% 之间, 与未经焙烧处理的铝土矿的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的损失率接近。因此, 除了铝土矿中

表 3 不同焙烧温度和焙烧时间下氧化铝的损失率

Table 3 Alumina loss ratio at different temperature and different time (%)

Time/min	Temperature/°C				
	1000	1050	1100	1150	1200
10	0.88	0.78	0.82	0.79	0.76
15	0.79	0.75	0.78	0.81	0.70
20	0.75	0.73	0.80	0.69	0.72
30	0.77	0.76	0.68	0.74	0.81
40	0.71	0.70	0.80	0.68	0.64

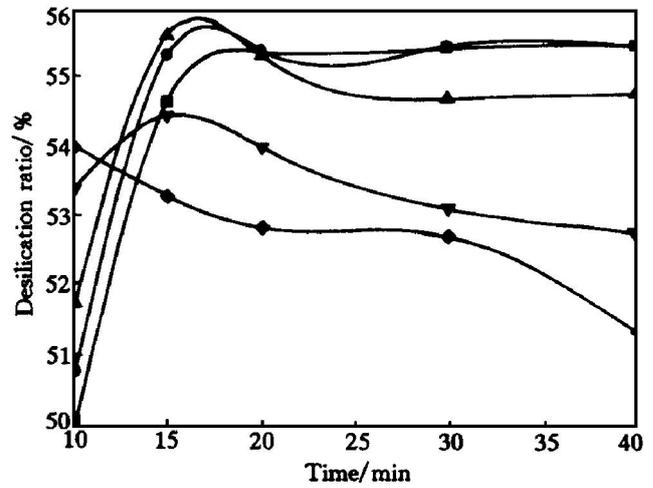


图 2 不同焙烧温度下焙烧时间与焙烧矿脱硅率关系

Fig. 2 Relation between time and desilication ratio at different temperatures

■—1000 °C; ●—1050 °C; ▲—1100 °C;  
▼—1150 °C; ◆—1200 °C

本身存在少量的可溶性 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 外, 焙烧-碱浸脱硅工艺不会带来氧化铝的附加损失。

### 3.1.3 升温速度

回转窑升温速度对铝土矿焙烧效果的影响如表 4 所示。由表 4 可知, 随着回转窑升温速度的加快, 焙烧矿的脱硅率、精矿铝硅比略微下降, 但差别不大这是因为只有当温度达到高岭石开始分解为无定形二氧化硅的温度后, 升温速度才会产生影响, 而从这一温度到焙烧温度的区间内, 升温速度的影响

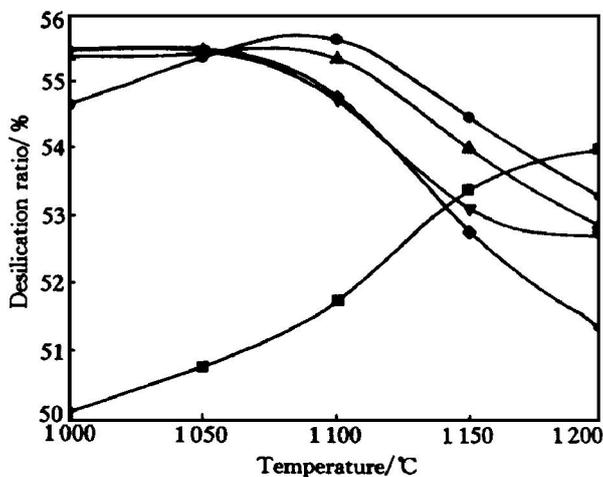


图 1 不同焙烧时间下焙烧温度对铝土矿焙烧效果的影响

Fig. 1 Influence of temperature on the roasting results at different time

■—10 min; ●—15 min; ▲—20 min;  
▼—30 min; ◆—40 min

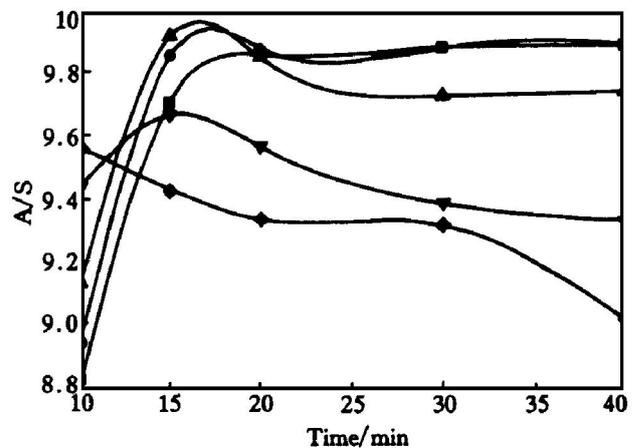


图 3 不同焙烧温度下焙烧时间与精矿 A/S 的关系

Fig. 3 Relation between time and ratio of aluminium to silicon (A/S) concentrate at different temperatures

■—1000 °C; ●—1050 °C; ▲—1100 °C;  
▼—1150 °C; ◆—1200 °C

表 4 升温速度对铝土矿焙烧效果的影响

Table 4 Influence of raising rate of temperature on roasting results

Raising rate of temperature / ( °C·min <sup>-1</sup> )	Roasting terms		Experimental results				
	t / °C	Time / min	Composition of concentrate				
			$\eta_{Al}$ / %	$\eta_{Si}$ / %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / %	SiO <sub>2</sub> / %	A/S
12	1050	20	0.73	55.41	76.94	7.79	9.88
24	1050	20	0.75	54.80	76.86	7.89	9.74

较小。为提高回转窑的生产效率, 可采用较高的升温速度。

### 3.2 铝精矿 X-射线衍射分析

对 1 100 °C 焙烧 20 min 的铝土矿脱硅后的铝精矿进行了 X-射线衍射分析, 其结果如图 4 所示。与原矿的 X-射线衍射分析结果相比: 铝土矿经焙烧-碱浸脱硅后, 高岭石的衍射峰已经消失, 产生了非晶态 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(非晶包) 的衍射峰, 但  $\alpha$ -石英的衍射峰却依然存在, 由此说明, 焙烧-碱浸脱硅过程中, 被脱除的是高岭石热解产生的无定形 SiO<sub>2</sub>, 而矿石中天然存在的石英在溶出脱硅中没有被脱除。另外, 从衍射结果来看, 铝精矿中还出现了莫来石的衍射

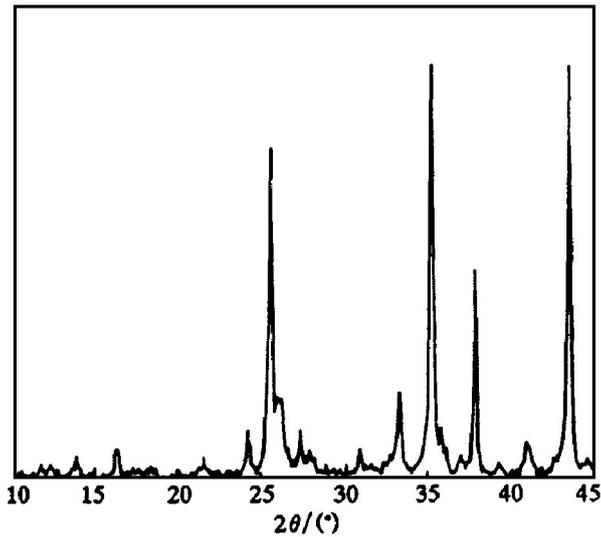


图 4 脱硅铝精矿 X-射线衍射分析图

Fig. 4 X-ray diffraction spectra of concentrate

峰, 这说明在焙烧过程中生成了少量的莫来石。

需要说明一点, 衍射结果中出现的钠硅渣衍射峰是焙烧矿在溶出脱硅过程中生成的, 而不是在铝土矿焙烧时产生的。

### 3.3 铝精矿拜耳法溶出性能

焙烧预脱硅的目的是提高铝土矿的铝硅比以满足拜耳法生产工艺对原料的要求。研究结果表明, 回转窑焙烧后的铝土矿经碱浸溶出脱硅后的铝精矿, 其铝硅比已完全满足拜耳工艺要求。试验分别考查了原矿和铝精矿的拜耳法溶出行为。

试验中循环母液化学组成见表 5。

表 5 循环母液的化学组成

Table 7 Chemical composition of aluminate solution ( g/L )

Na <sub>2</sub> O <sub>K</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>C</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>T</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\alpha_K$	SiO <sub>2</sub>
199.0	23.6	222.6	85.85	3.81	0.35

表 6 为高压溶出试验结果。结果表明, 铝精矿中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的理论溶出率、实际溶出率和相对溶出率较原矿都有大幅度的提高。表明原矿经焙烧后不会影响铝土矿中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的高压溶出性能。

## 4 结论

1) 通过在  $d300 \times 1400$  mm 回转窑上的研究表明, 用回转窑进行铝土矿的焙烧预脱硅是可行的。回转窑焙烧铝土矿的工艺为: 矿石入窑粒度 0~ 20 mm, 焙烧温度 1 050~ 1 100 °C, 焙烧时间 15~ 20 min。焙烧后的矿石经碱浸溶出脱硅, 脱硅率可达 55.61%, 铝精矿铝硅比 9.92。

2) 铝土矿经焙烧后, 高岭石发生热分解产生无定型 SiO<sub>2</sub>, 在碱浸溶出过程中这一部分 SiO<sub>2</sub> 溶于碱液而被脱除。经过焙烧脱硅得到的铝精矿的理论溶出率、实际溶出率和相对溶出率均比原矿高。

表 6 铝土矿高压溶出试验结果

Table 6 Results of digestion by Bayer process

Sample	A/S	Dosage of aluminate solution/ mL	Dosage of lime/ %	Temperature/ °C	Time/ min	Experimental results		
						$\eta_t$	$\eta_a$	$\eta_r$
Raw ore	4.4	100	5	270	60	77.27	64.12	82.98
Concentrate	9.92	100	5	270	60	89.92	88.54	98.47

Note:  $\eta_t$ ,  $\eta_a$ ,  $\eta_r$  refer to theoretical, actual, and relative digestion rate of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> of the concentrate, respectively.

## [ REFERENCES ]

- [ 1 ] OUYANG Jian(欧阳坚) and LU Shouci(卢寿慈). 我国铝土矿资源特征及选矿加工研究 [ J ]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources(矿产综合利用), 1995 (2): 24- 27.
- [ 2 ] LIU Zifeng and YANG Changshi. Tube digestion technology for the mid-Qian bauxite [ J ]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1996, 6(3): 44- 48.
- [ 3 ] Clerin Ph, Lepetit J and Mordini J. Digestion of diasporic bauxite, utilization of models [ J ]. Light Metals, 1991: 111- 117.
- [ 4 ] ZHANG Xianfeng and CHEN Wan-kun. Intensive digestion technology for diasporic bauxite [ J ]. Light Metals, 1991: 33- 35.
- [ 5 ] Patra A, Panigrajd A K and Satapathy B K. Evaluation of impurities level and their effect across the precipitators in the Bayer's process [ J ]. Light Metals, 1993: 135- 139.
- [ 6 ] Escalona S and Faneitte M. Study of impurities build up on Bayer liquors when processing Pijiguaos bauxite [ J ]. Light Metals, 1991: 17- 22.
- [ 7 ] JIANG Tao(姜涛), QIU Guanzhou(邱冠周), LI Guanghui(李光辉), et al. 中低品位铝土矿选矿预脱硅的新进展 [ J ]. Mining and Metallurgical Engineering (矿冶工程), 1999, 19(2): 3- 6.
- [ 8 ] WANG Furen(王孚恩), MA Chaorjian(马朝建), LU Qirfang(陆钦芳), et al. 选矿拜耳法处理中国高硅铝土矿生产氧化铝的探讨 [ J ]. Light Metals(轻金属), 1996(7): 3- 6.
- [ 9 ] LIU Jin(刘今), CHEN Hanlin(程汉林) and WU Ruorqing(吴若琼). 低铝硅比铝土矿预脱硅研究 [ J ]. Journal of Central South University of Technology(中南工业大学学报), 1996, 27(6): 666- 670.
- [ 10 ] XIE Min(谢珉). 铝土矿的选矿试验 [ J ]. Nonferrous Metals(有色金属(选矿部分)), 1995(6): 12- 16.
- [ 11 ] LIU Yongkang(刘永康). 一水硬铝石型铝土矿化学选矿中焙烧过程的研究 [ D ]. Changsha: Central South University of Technology, 1997.
- [ 12 ] LUO Lin(罗琳). 一水硬铝石型高硅铝土矿化学选矿脱硅与综合利用研究 [ D ]. Changsha: Central South University of Technology, 1997.
- [ 13 ] LUO Lin(罗琳), LIU Yongkang(刘永康) and HE Baquan(何伯泉). 一水硬铝石-高岭石型铝土矿焙烧脱硅热力学机理研究 [ J ]. Nonferrous Metals(有色金属), 1999, 51(1): 25- 29.
- [ 14 ] LI Xiaobin(李小斌), YANG Zhongyu(杨重愚) and LONG Yuanzhi(龙远志). 焙烧过程对一水硬铝石型铝土矿溶出性能的影响 [ J ]. Light Metals(轻金属), 1987(4): 9- 13.
- [ 15 ] LI Xiaobin(李小斌). 铝土矿焙烧过程对溶出性能的影响 [ D ]. Changsha: Central South University of Technology, 1985.

## Desilication from diasporic bauxite by roasting-alkali leaching process ( I )

JIANG Tao, LI Guanghui, FAN Xiaohui, HUANG Zhucheng, QIU Guanzhou  
(Department of Mineral Engineering,  
Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China)

**[ Abstract ]** Using the ore from Sanxi province, the roasting process of the desilication from the diasporic bauxite was studied. It was shown that using rotary kiln as the roasting apparatus is practicable, and the optimum roasting parameters are: grain size 0~ 20 mm, roasting temperature 1050~ 1100 °C, roasting time 15~ 20 min. The alkali leaching results, rate of desilication 55.61% and ratio between aluminium and silicon of the concentrate 9.92, were obtained. By means of XRD analysis, the following conclusions were reached: only Si, existed in kaolinite, could be changed into noncrystalline silica; during the leaching, this kind of silica is dissolved by NaOH solution, but  $\alpha$ -silica does not dissolve, so it is not contributive to desilication. The digestion of the concentrate by Bayer process also showed that the digestion ratio of  $Al_2O_3$  of the concentrate is higher than that of raw ore.

**[ Key words ]** diasporic bauxite; chemical processing; desilicization

(编辑 龙怀中)