

# 双流法预热条件下铝土矿浆中杂质矿物的反应行为<sup>①</sup>

尹中林<sup>1,2</sup>, 顾松青<sup>2</sup>, 毕诗文<sup>1</sup>

(1 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004 2 中国铝业股份有限公司郑州研究院 氧化铝研究所, 郑州 450041)

**摘要:** 对我国两个主要矿区的铝土矿进行了双流法预热条件下矿浆中含硅矿物及含钛矿物反应行为的实验研究, 考察了矿浆固含不同时含硅和含钛矿物反应行为的变化。在较长的预脱硅时间条件下, 随着矿浆固含的增加, 预脱硅效率及矿浆液相中的  $SiO_2$  浓度呈下降的趋势。在矿浆预热过程中, 脱硅效率随着矿浆固含的增加而增加, 当固含增加到一定程度时, 脱硅效率反而下降, 脱钛效率随矿浆固含的变化规律和脱硅效率相同; 矿浆液相中的  $SiO_2$  浓度随矿浆固含的增加而下降。在双流法预热条件下, 矿浆固含越高, 矿浆预热过程中含硅矿物、含钛矿物及含镁矿物的结疤速率越低。

**关键词:** 一水硬铝石型铝土矿; 双流法; 矿浆固含; 矿浆预热; 结疤

中图分类号: TF 802.6 TF 821

文献标识码: A

## Reaction behavior of impurity minerals in bauxite slurry in preheating process condition of two stream process of diasporic bauxite in China

Y N Zhong-lin<sup>1,2</sup>, GU Song-qing<sup>2</sup>, BI Shi-wen<sup>1</sup>

(1 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China

2 Alumina Research Department, Zhengzhou Research Institute,

Aluminum Corporation of China Limited, Zhengzhou 450041, China)

**Abstract** Experimental investigation of reaction behavior of Si-containing and Ti-containing minerals in preheating process of bauxite slurry of two main mining areas in China is carried out under the condition of two stream process. The change of reaction behavior of Si-containing and Ti-containing minerals is investigated with the change of solid content of bauxite slurry. Predesilication efficiency is decreased with the increase of solid content of slurry when the predesilication time is up to a some extent. Desilication efficiency is increased with the increase of solid content of slurry, but is decreased when the solid content of slurry is increased up to a some extent in the preheating process of bauxite slurry. The relationship between reaction efficiency of Ti-containing minerals and solid content of bauxite slurry is as same as that of Si-containing minerals. And  $SiO_2$  concentration in liquor in slurry is decreased with the increase of solid content of slurry in predesilication and preheating process of bauxite slurry. The higher the solid content of bauxite slurry, the lower the scale formation of Si, Ti and Mg-containing minerals in preheating process under the condition of two stream process of diasporic bauxite in China.

**Key words** diasporic bauxite; two stream process; preheating process; reaction efficiency; scale formation

拜耳法是目前生产氧化铝的主要方法。按照拜耳法工艺中铝土矿浆的预热方式来分类, 拜耳法溶

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (G1999064902-2)

收稿日期: 2004-07-20 修订日期: 2004-11-30

作者简介: 尹中林 (1963-), 男, 高级工程师, 博士研究生。

通讯作者: 尹中林, 高级工程师; 电话: 0371-8918291; E-mail: yzln123@263.net

出工艺又可以分为单流法溶出工艺和双流法溶出工艺<sup>[1]</sup>。单流法溶出工艺是指将铝土矿、石灰及循环母液等经磨制、调配成合格矿浆后进入矿浆预脱硅、矿浆预热及溶出系统,完成拜耳法溶出;而双流法溶出工艺是指在矿浆预热系统中将矿浆分为高固含矿浆和纯母液两部分分开预热,预热到一定温度后合流进行溶出,或者合流后再预热到一定温度后进行溶出。在非一水硬铝石型铝土矿的双流法溶出工艺中,有时高固含矿浆不被预热,而预热循环母液,然后再合流进行溶出。目前,处理三水铝石型铝土矿,多采用双流法溶出工艺,处理一水硬铝石型铝土矿,多采用单流法溶出工艺。如何解决拜耳法矿浆预热过程中的结疤问题,是氧化铝行业的一个重点研究领域<sup>[2]</sup>。有关的研究工作涉及到结疤的矿物组成<sup>[3]</sup>、结疤机理<sup>[4-11]</sup>、减缓结疤的工艺方法<sup>[5-6,12]</sup>以及结疤的清理方法<sup>[13-14]</sup>等。双流法溶出技术已用于我国的选矿拜耳法示范工程,对双流法预热条件下铝土矿浆中杂质矿物的反应行为进行研究,揭示双流法条件下矿浆预热过程的结疤规律,对全面提升我国氧化铝工业在国际市场上的竞争能力有着深远的意义。

本文作者对我国两个主要矿区的铝土矿进行了双流法预热条件下矿浆中含硅矿物及含钛矿物反应

行为的实验研究,系统考察了矿浆固含不同时含硅和含钛矿物反应行为的变化。

## 1 实验

铝土矿矿浆的预热实验在钢弹溶出器中进行。当反应温度低于 170 °C 时,采用油浴加热的低压钢弹溶出器进行,当反应温度高于 170 °C 时,采用熔盐浴加热的高压钢弹溶出器进行。在拜耳法工艺中,矿浆在预脱硅以及预热过程中的脱硅率或脱硅效率  $\eta(\text{Si})$  是指铝土矿中的含硅矿物溶解后并以新的矿物形式析出的  $\text{SiO}_2$  量占矿浆固相中  $\text{SiO}_2$  总量的质量分数;脱钛率或脱钛效率  $\eta(\text{Ti})$  是指铝土矿中的含钛矿物溶解后并以新的矿物形式析出的  $\text{TiO}_2$  量占矿浆固相中  $\text{TiO}_2$  总量的质量分数。

实验用石灰取自工业现场,有效  $\text{CaO}$  含量大于 90%。实验用铝土矿的化学成分列于表 1,矿物成分列于表 2。实验用铝酸钠溶液的化学成分列于表 3。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同固含时矿浆中脱硅效率的变化

表 1 实验用铝土矿的化学成分

**Table 1** Chemical compositions of bauxites used in experiments (mass fraction, %)

Sample No	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	Loss of ignition
1	66.60	12.60	2.50	3.05	1.72	0.06	0.23	0.17	12.80
2	66.80	12.90	1.21	2.69	0.70	0.10	0.73		13.38
3	65.00	12.58	2.05	3.30	1.09	0.07	0.15	0.11	14.06

表 2 实验用铝土矿的矿物成分

**Table 2** Mineralogical compositions of bauxites used in experiments (mass fraction, %)

Sample No	Diaspore	Kaolinite	Illite	Henatite	Anatase	Rutile	Calcite	Pyrophyllite
1	68.0	5.5	20.0	2.0	2.0	0.5	0.4	
2	69.4	4.0	8.1	0.97	2.1	0.5	1.0	10.5
3	65.6	14.0	12.0	1.7	2.5	0.7		

表 3 铝酸钠溶液的化学成分

**Table 3** Chemical compositions of sodium aluminate solutions (g/L)

Sample No	$N_t$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$N_k$	$N_c$	$N_s$	$\alpha_k$
A	259.10	128.80	232.00	27.10	6.88	2.96
B	250.66	134.10	231.00	19.66	3.03	2.83

Note:  $N_t$ —Total soda (as  $\text{Na}_2\text{O}$ );  $N_k$ —Caustic soda (as  $\text{Na}_2\text{O}$ );  $N_c$ — $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (as  $\text{Na}_2\text{O}$ );  $N_s$ — $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (as  $\text{Na}_2\text{O}$ );  $\alpha_k$ —Mole ratio of  $N_k$  to  $\text{Al}_2\text{O}_3$

1号铝土矿在不同固含时的预脱硅效率和矿浆液相中的  $SD_2$  浓度变化结果列于表 4。实验用铝酸钠溶液为溶液 A, 预脱硅温度  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , 预脱硅时间 8 h。石灰添加量为矿石量的 8% (质量分数)。

表 4 不同固含时 1号铝土矿的预脱硅效率和矿浆液相中的  $SD_2$  浓度

**Table 4** Reaction efficiency of Si-containing minerals and  $SD_2$  concentration in liquor in slurry under different solid content of bauxite slurry of No 1

Solid content/( $g \cdot L^{-1}$ )	$\eta(\text{Si}) /(\%)$	$[SD_2] /(\text{g} \cdot L^{-1})$
200	26.30	1.08
732	24.10	0.67
931	24.10	0.63
1 131	23.80	0.68

2号铝土矿在不同固含时的预脱硅效率和矿浆液相中的  $SD_2$  浓度变化结果列于表 5。实验用铝酸钠溶液为溶液 B, 预脱硅温度  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , 预脱硅时间 4 h。石灰添加量为矿石量的 8%。

表 5 不同固含时 2号铝土矿的预脱硅效率和矿浆液相中的  $SD_2$  浓度

**Table 5** Reaction efficiency of Si-containing minerals and  $SD_2$  concentration in liquor in slurry under different solid content of bauxite slurry of No 2

Solid content/( $g \cdot L^{-1}$ )	$\eta(\text{Si}) /(\%)$	$[SD_2] /(\text{g} \cdot L^{-1})$
200	23.30	1.84
466	23.00	1.53
665	22.90	1.50
931	22.10	1.21

从表 4和表 5可以看出, 在一定的时间条件下, 随着矿浆固含的增加, 其脱硅率都呈下降的趋势, 矿浆液相中的  $SD_2$  浓度也都呈下降的趋势。

产生这一现象的原因, 是由于随着脱硅反应的进行, 生成的脱硅产物水合铝硅酸钠越来越多, 所消耗掉的苛性钠越来越多, 即液相中的苛性碱浓度呈降低趋势。矿浆固含越高, 苛性碱浓度的下降程度越大, 反过来又越不利于脱硅反应的进行。所以, 在一定的时间条件下, 矿浆的固含越高, 预脱硅过程的脱硅效率越低。这一规律可以从图 1得到很好的解释。

图 1所示为不同固含的 1号铝土矿矿浆在  $90\text{ }^\circ\text{C}$

和  $100\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下脱硅效率随时间的变化。实验用铝酸钠溶液为溶液 A, 石灰添加量为矿石量的 8%。由图可见, 预脱硅温度为  $90\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 预脱硅时间在 2 ~ 8 h范围内, 固含为 931 g/L的矿浆的脱硅效率高与固含为 200 g/L矿浆的脱硅效率, 8 h时二者较为接近, 10 h左右为分界点, 脱硅时间为 12 h时后者明显高于前者; 预脱硅温度为  $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 在前 4 h固含为 931 g/L矿浆的脱硅效率高与固含为 200 g/L矿浆的脱硅效率, 6 h左右为分界点, 在 8 h以后, 后者明显高于前者。

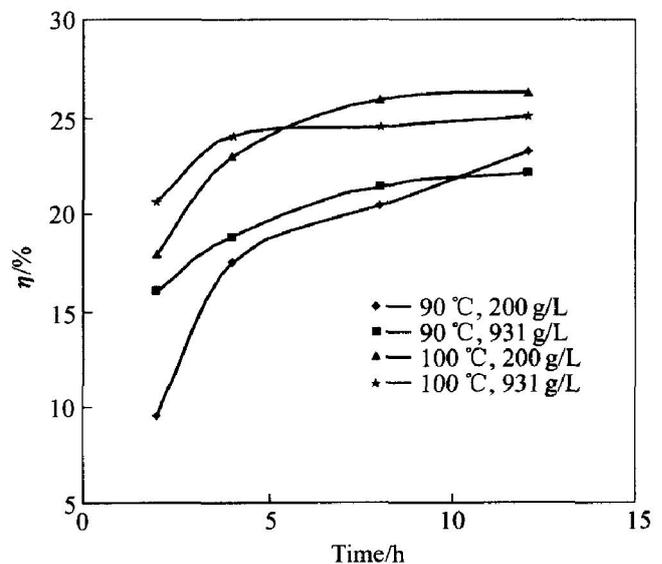


图 1 矿浆不同固含时的脱硅效率随时间的变化

**Fig 1** Variation of reaction efficiency of Si-containing minerals with time under different solid content of slurry

其原因是因为, 高固含矿浆在脱硅过程中由于同样体积的矿浆中有更多的脱硅晶种水合铝硅酸钠, 致使水合铝硅酸钠析出速度较快, 从而导致液相中的  $SD_2$  浓度较低, 进而又造成了矿浆固相中含硅矿物高岭石溶解速度的加快。所以, 其总体结果表现为脱硅效率较高。但随着脱硅过程的进行, 由于高固含矿浆中水合铝硅酸钠的析出量大, 导致矿浆液相中苛性碱浓度的降低速度较快, 从而使得矿浆固相中的含硅矿物高岭石的溶解速度变慢, 进而造成了矿浆的脱硅速度变慢。所以, 在预脱硅时间较长时高固含矿浆的脱硅效率总体较低。

表 6所列为不同矿浆固含时 2号铝土矿在  $150\text{ }^\circ\text{C}$ 的脱硅率  $\eta(\text{Si})$ 、脱钛效率  $\eta(\text{Ti})$ 和矿浆液相中  $SD_2$  浓度的变化结果。实验用溶液为溶液 B, 石灰添加量为矿石量的 8%, 反应时间 30 min。

表 7所列为不同矿浆固含时 3号铝土矿在  $150\text{ }^\circ\text{C}$

表 6 不同固含时 2 号铝土矿的脱硅效率、脱钛效率和矿浆液相中的  $SD_2$  浓度

**Table 6** Reaction efficiency of Si-containing minerals, Ti-containing minerals and  $SD_2$  concentration in liquor in slurry under different solid content of bauxite slurry of No. 2

Solid content/ (g·L <sup>-1</sup> )	$\eta(\text{Si})/\%$	$\eta(\text{Ti})/\%$	$[\text{SD}_2]/$ (g·L <sup>-1</sup> )
204	34.00	8.00	1.43
800	36.50	13.40	1.02
1 000	39.80	17.90	0.85
1 200	37.70	13.70	0.88

表 7 不同固含时 3 号铝土矿的脱硅效率、脱钛效率和矿浆液相中的  $SD_2$  浓度

**Table 7** Reaction efficiency of Si-containing minerals, Ti-containing minerals and  $SD_2$  concentration in liquor in slurry under different solid content of bauxite slurry of No. 3

Solid content/ (g·L <sup>-1</sup> )	$\eta(\text{Si})/\%$	$\eta(\text{Ti})/\%$	$[\text{SD}_2]/$ (g·L <sup>-1</sup> )
209	48.70	11.50	0.95
800	56.30	7.40	0.69
1 000	58.50	6.90	0.66
1 200	55.70	6.00	0.64

℃的脱硅效率  $\eta(\text{Si})$ 、脱钛效率  $\eta(\text{Ti})$ 和矿浆液相中  $SD_2$  浓度的变化结果。实验用溶液为溶液 B，石灰添加量为矿石量的 8%，反应时间 30 min。

从表 6 可见，在 150℃ 的反应温度下，在矿浆固含为 204~1 000 g/L 范围内，随着固含的增加，脱硅率呈上升趋势。当固含增加到 1 200 g/L 时，其脱硅效率反而有所降低，脱钛效率随固含的变化情况和脱硅率的变化情况完全相同。从表 6 还可以看出，随着矿浆固含的增加，矿浆液相中的  $SD_2$  浓度呈逐渐下降的趋势。

表 7 中脱硅效率和矿浆液相中的  $SD_2$  浓度随矿浆固含的变化规律和表 6 完全相同。表 7 中脱钛效率随固含的增加而逐渐下降，这一规律和表 6 中的规律并不完全相同。

表 6 和表 7 中脱钛效率随矿浆固含的变化规律不完全相同，其原因是由于尽管 2 号铝土矿和 3 号铝土矿中  $SD_2$  含量基本相同，但是易于预脱硅的高岭石含量不同，以至于反应过程中脱硅率不同进而导致脱硅过程所消耗的苛性碱浓度不同所造

成的。

铝土矿中含硅矿物在矿浆预脱硅过程中反应后新析出的含硅矿物为水化石榴石  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SD}_2 \cdot (6-2x)\text{H}_2\text{O}$  和钠硅渣 (水合铝硅酸钠)。水化石榴石的生成量由石灰添加量确定，分子中  $SD_2$  的饱和系数  $x$  随反应条件的不同而变化。在本实验条件下，石灰添加量相同，反应条件相同，则预脱硅后 2 号铝土矿和 3 号铝土矿所生成的水化石榴石中结合的  $SD_2$  量相同。预脱硅过程中 3 号铝土矿中易发生反应的高岭石所占比例较大，所以在同样的反应条件下，3 号铝土矿的脱硅效率就高，也就是说预脱硅后，3 号铝土矿所生成的钠硅渣量大，由此所造成的苛性碱浓度损失也大，所以随着矿浆固含的增加，铝土矿所造成的苛性碱浓度的下降幅度也大，使得其脱钛效率随着矿浆固含的增加呈明显的下降趋势。

## 2.2 矿浆预热过程中脱硅率和脱钛率随固含的变化

在矿浆预热过程中 1 号铝土矿在不同固含时的脱硅效率随固含的变化如图 2 所示，脱钛效率随固含的变化如图 3 所示。温度为 100℃ 时矿浆的脱硅效率及脱钛效率为在 100℃ 条件下预脱硅 4 h 的结果，其他温度下的数据为矿浆经 100℃ 预脱硅 4 h 后再在该温度下反应 10 min 所得到的结果。

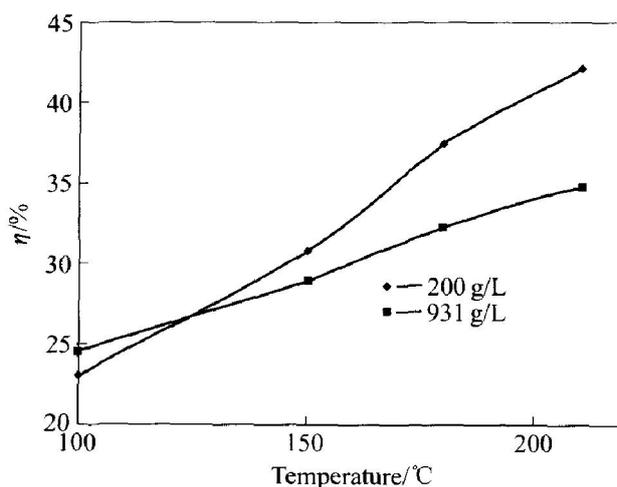


图 2 预热过程中脱硅效率随矿浆固含的变化  
**Fig 2** Variation of reaction efficiency of Si-containing minerals in slurry with solid content of bauxite slurry of No. 1

从图 2 可以看出，在实验温度范围内，随着温度的提高，较低固含的矿浆其脱硅效率的增加速度较快，而较高固含矿浆的脱硅效率的增加速度相对

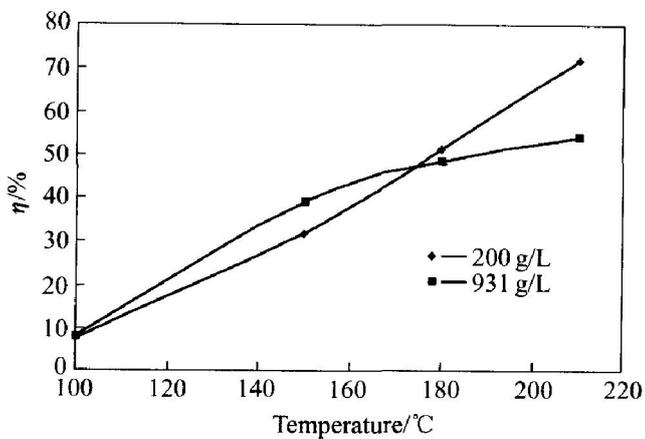


图 3 矿浆在预热过程中脱钛效率随固含的变化

Fig 3 Variation of reaction efficiency of Ti-containing minerals in slurry with solid content of bauxite slurry of No 1

较慢。从图 3 可以看出,随着预热温度的提高,脱钛效率随固含的变化规律和脱硅效率的变化规律相同。

### 2.3 高固含矿浆双流法预热过程中含硅含钛矿物的结疤规律

上述研究结果表明,矿浆固含较高时,预脱硅后的矿浆在预热过程中随着预热温度的升高,脱硅效率和脱钛效率的增加趋势较缓,同时矿浆固含越高,预热过程中矿浆液相中的  $SiO_2$  浓度越低。在适宜的矿浆流速条件下,矿浆预热过程中含硅矿物及含钛矿物结疤主要是由于器壁处矿浆液相中的相关离子发生的析出反应所造成的<sup>[5-6]</sup>。所以,矿浆固含越高,在同样的预热温度条件下,含硅矿物及含钛矿物的结疤速度越低。

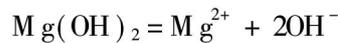
### 2.4 矿浆预热过程中固含对含镁矿物结疤速率的影响

一水硬铝石型铝土矿浆在预热水溶过程中生成的含镁矿物结疤主要为  $Mg(OH)_2$ , 其次为水合铝硅酸镁  $(Mg_{1-x}Al_x) \cdot (Si_{1-x}Al_x)O_{10} \cdot (OH)_8$ 。 $Mg(OH)_2$  结疤在 180 °C 左右的温度区间集中形成,随着预热温度的升高,  $Mg(OH)_2$  的含量逐渐减少,而水合铝硅酸镁的含量有逐渐增加的趋势。

矿浆中  $MgO$  的主要来源是添加剂石灰中含有的  $MgO$ , 石灰中  $MgO$  的含量一般在 1% ~ 5% (质量分数) 之间, 其次是铝土矿本身所带入的  $MgO$ , 铝土矿中  $MgO$  的含量一般在 0.1% 左右。

在矿浆磨制过程中  $MgO$  首先水化生成

$Mg(OH)_2$ ,  $Mg(OH)_2$  少量溶解进入溶液:



根据有关的热力学数据<sup>[15]</sup>得出的铝酸钠溶液中  $Mg(OH)_2$  的平衡浓度随温度的变化<sup>[7]</sup>如图 4 所示。可以看出,温度越高,矿浆液相中  $Mg(OH)_2$  的平衡浓度越低,  $Mg(OH)_2$  的过饱和程度越大。随着预热温度的升高,  $Mg(OH)_2$  的溶解度逐渐变小而析出,若析出反应在器壁表面发生,则形成  $Mg(OH)_2$  结疤。所以,矿浆固含越高,矿浆固相中的  $Mg(OH)_2$  总量越大,而矿浆液相中的  $Mg(OH)_2$  浓度和矿浆固含并无关系,根据结晶学的普遍规律,  $Mg(OH)_2$  自液相中析出时越容易在矿浆固相中的  $Mg(OH)_2$  表面析出,而在预热界面的析出量就会越少,即生成的  $Mg(OH)_2$  结疤越少。

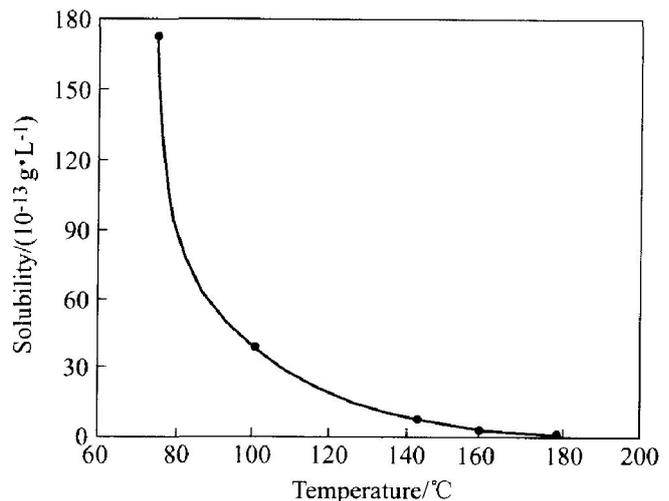


图 4 温度与拜耳法母液中  $Mg(OH)_2$  平衡浓度的关系

Fig 4 Relationship between equilibrium concentration of  $Mg(OH)_2$  in spent liquor of Bayer process and temperature

## 3 结论

1) 在一水硬铝石型铝土矿矿浆的预脱硅过程中,当矿浆固含增加到一定程度时,预脱硅效率会有一定程度的下降。随着矿浆固含的增加,矿浆液相中的  $SiO_2$  浓度呈下降趋势。

2) 在矿浆预热过程中,随着矿浆固含的增加,其脱硅效率会随之增加,当矿浆固含增加到一定程度时,其脱硅效率反而下降。矿浆固含越高,预热过程中液相中的  $SiO_2$  浓度越低。在矿浆预热过程中,随着预热温度的升高,高固含矿浆的脱硅效率及脱钛效率的增加趋势相对较缓。

3) 在矿浆预热过程中,采用较高固含的矿浆,

有利于减缓含硅矿物、含钛矿物及含镁矿物的结疤速率。所以,采用双流法预热工艺,即采用较高固含的矿浆进行预热,有利于减缓矿浆预热过程的结疤速率。

## REFERENCES

- [1] 顾松青,尹中林.拜耳法氧化铝生产工艺的强化途径[J].中国有色金属学报,2001,11(S1):31-34  
GU Song-qing Y N Zhong-lin Intensifying method of bayer digestion process of diasporic bauxite in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2001, 11 (S1): 31- 34
- [2] 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,1997.198  
CHEN Wan-kun, PENG Guan-cai Intensive Digestion Technology for Diasporic Bauxite[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1997. 198
- [3] 闫晋刚,刘宏,王建立.管道化溶出实验中结疤相组成的研究[J].轻金属,1999(4):16-17.  
YAN Jin-gang LU Hong WANG Jian-li Research on mineralogical composition of scale formed in tube-digestion process[J]. Light Metals 1999(4): 16- 17.
- [4] Addai Mensah J, Jones R, Zbik M, et al Sodium aluminosilicate scale formation on steel substrates: experimental design and assessment of fouling behavior[A]. Light Metals[C]. Warrendale, Pennsylvania TMS, 2003. 25-34
- [5] 尹中林,顾松青.石灰添加方式对一水硬铝石型铝土矿预热过程结疤的影响[J].中国有色金属学报,2001,11(5):910-914  
Y N Zhong-lin, GU Song-qing Influence of lime adding method on scaling process in bayer preheating process of diasporic bauxite slurry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2001, 11(5): 910- 914
- [6] Y N Zhong-lin, GU Song-qing The influence of lime addition amount on scaling rate in preheating process of diasporic bauxite slurry[A]. Light Metals[C]. Warrendale, Pennsylvania TMS, 2001. 139-142
- [7] 袁华俊,黄芳,袁艺,等.平果铝厂压蒸溶出过程的结疤研究—结疤形成的影响因素(二)[J].轻金属,2002(9):24-28  
YUAN Hua-jun, HUANG Fang, YUAN Yi, et al Research on scale formed in digestion process in pingguo alumina plant—effecting factor of scale formation(2)[J]. Light Metals 2002(9): 24- 28
- [8] Addai Mensah J, Gerson A R, O'Dea A, et al The precipitation mechanism of sodium aluminosilicate scale in bayer plants[A]. Light Metals[C]. Warrendale, Pennsylvania TMS, 1997. 23-28
- [9] Muller-Steinhagen H, Jamialahmadi M. An investigation into the formation of DSP on heat transfer surfaces[A]. Light Metals[C]. Warrendale, Pennsylvania TMS, 1993. 159-165
- [10] Duncan A, Groemping M, Welch B, et al The effect of silica, temperature, velocity, and particulates on heat transfer to spent bayer liquor[A]. Light Metals[C]. Warrendale, Pennsylvania TMS, 1995. 63-70
- [11] Addai Mensah J, Gerson A R, Smart R S C. Continuous plug flow precipitation of sodalite scale on steel heat transfer surfaces[A]. Light Metals[C]. Warrendale, Pennsylvania TMS, 1998. 21-28
- [12] Addai Mensah J, Jones R, Zbik M. Reduction of sodium aluminosilicate scale in bayer plant heat exchangers[A]. Light Metals[C]. Warrendale, Pennsylvania TMS, 2001. 13-34
- [13] 赵清杰,李裕远.河南登封矿拜耳法间接加热强化溶出过程中结疤及其清洗的研究[J].轻金属,1994(6):11-14  
ZHAO Qing-jie, LI Yu-yuan Research on scale and cleaning in direct preheating and intensifying digestion process of dengfeng bauxite in henan[J]. Light Metals 1994, (6): 11- 14
- [14] 冯少波.氧化铝生产过程结疤溶解的研究[J].山西大学学报(自然科学版),2001,24(4):334-337.  
FENG Shao-bo Research on dissolution of scale in alumina production process[J]. Journal of Shanxi University(Nature Science), 2001, 24(4): 334- 337.
- [15] 梁英教,车荫昌.无机物热力学手册[M].沈阳:东北大学出版社,1993.97.  
LIANG Ying-jiao, CHE Yin-chang Handbook of Inorganic Thermochemistry Data[M]. Shenyang: Northeast University Press, 1993. 97. (编辑 陈爱华)