

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.09.007

碱溶—碳分法生产氧化铝溶出效果研究

王红伟¹, 马科友¹, 张学英¹, 董凯伟², 潘晓林²

(1. 济源职业技术学院 冶金化工系, 河南 济源 459000;

2. 东北大学 冶金学院, 沈阳 110819)

摘要: NaOH 溶液溶出铝土矿是碱溶—碳分法生产氧化铝新工艺的核心技术之一。采用现有拜耳法生产设备进行预脱硅和高压溶出试验, 研究用 NaOH 溶液溶出不同铝硅比(A/S)—一水硬铝石型铝土矿的溶出效果, 确定了适宜的工艺条件, 并与生产现场拜耳法蒸发母液溶出的效果和生产效率进行了对比。结果表明, 矿石的实际溶出率($\eta_{\text{实}}$)随矿石 A/S、苛性碱质量浓度(N_K)、配料分子比($\alpha_{k\text{配}}$)和配料溶出率($\eta_{\text{配}}$)的升高而升高, 随石灰添加量的增加呈先升后降的趋势; 在相同工艺条件下, 现场母液与 NaOH 溶液溶出的效果基本保持在相同水平, 但相同体积的 NaOH 溶液溶出矿石量是现场蒸发母液的 1.71 倍, 循环效率则是现场蒸发母液的 2.16 倍; 碱溶—碳分工艺预脱硅溶出的适宜条件为: 矿石 A/S>4.0、预脱硅温度 98℃、预脱硅时间 6 h、 $N_K=200$ g/L、石灰添加量 11%、 $\alpha_{k\text{配}}=1.3\sim 1.5$ 、 $\eta_{\text{配}}=90\%$ 、溶出温度 273℃、溶出时间 40 min, 此条件下 A/S=8.65 矿石的 $\eta_{\text{实}}$ 可达 87.75%。

关键词: 碱溶—碳分法; 氧化铝; 一水硬铝石; NaOH 溶液; 溶出

中图分类号: TF821

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2021)09-0041-07

Study on Dissolution Effects of Alkali Dissolution-Carbonation Precipitation Process for Producing Alumina

WANG Hong-wei¹, MA Ke-you¹, ZHANG Xue-ying¹, DONG Kai-wei², PAN Xiao-lin²

(1. Metallurgical and Chemical Department, Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan 459000, Henan, China;

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: It is one of core technology for alkali dissolution-carbonation precipitation new process for producing alumina with bauxite leached by NaOH solution. Pre-desilication and high pressure digestion experiments were carried out using the existing productive equipments of Bayer process, and dissolution effects of different A/S diasporic bauxite leached by NaOH solution were investigated. The suitable technological conditions were determined, and dissolution effects and production efficiency were compared with evaporation mother liquor from Bayer process. The results show that actual digestion rate of Al_2O_3 dissolution rises with increase of A/S of bauxite, caustic soda mass concentration N_K , proportioning molar ratio α_k and digestion rate of proportioning dissolution, while actual rate of Al_2O_3 dissolution rises first then drops with increase of lime addition. Dissolution effects leached by NaOH solution and vaporation mother liquor from Bayer process are keeping the same level, but bauxite amount leached by NaOH solution is 1.71 times than the same volume of evaporation mother liquor from Bayer process, and cycle

收稿日期: 2021-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51104041, 22078055)

作者简介: 王红伟(1974-), 女, 河南南阳人, 硕士, 副教授

efficiency is 2.16 times than the same volume of evaporation mother liquor from Bayer process. Actual digestion rate of Al_2O_3 dissolution is 87.75% under the suitable conditions for pre-desilication and digestion of alkali dissolution-carbonation precipitation process including A/S of 8.65, pre-desilication temperature of 98 °C, pre-desilication time of 6 h, N_K of 200 g/L, lime addition of 11%, proportioning molar ratio of 1.3~1.5, proportioning dissolution rate of 90%, digestion temperature of 273 °C, and digestion time of 40 min.

Key words: alkali dissolution-carbonation precipitation process; alumina; diasporic bauxite; NaOH solution; digestion

随着国民经济对铝需求的急剧增长和生产技术的日益成熟,我国氧化铝工业发展迅速,并一举成为世界氧化铝生产和消费大国。据统计,2019年我国氧化铝产量达到7 128.4万t,约占全球氧化铝总产量的53.86%^[1]。目前,国内外工业上应用的氧化铝生产方法主要有拜耳法、烧结法和拜耳—烧结联合法。拜耳法流程简单、产品质量好、成本较低,但要求矿石铝硅比高(A/S>8),特别适合处理三水铝石型铝土矿。烧结法适合处理低品位铝土矿(A/S为3~6),但流程复杂、能耗高、成本高、污染大。拜耳—烧结联合法可分为并联、串联和混联三种流程,生产规模较大时采用联合生产流程可以兼有两种方法的优点而消除其缺点,能获得比单一拜耳法或烧结法好的经济效益,并能充分利用矿石资源,但流程复杂、能耗高、两个系统平衡控制复杂^[2]。

国外的铝土矿主要是高铝硅比的三水铝石,其氧化铝生产主要采用拜耳法。而我国的铝土矿资源则以中低品位(A/S<8)的一水硬铝石为主,采用纯拜耳法生产氧化铝综合效果较差^[3],针对我国铝土矿的特点,开发应用了混联法、选矿拜耳法、石灰拜耳法等,最初建设的六大氧化铝厂大都采用烧结法或混联法。

随着铝土矿的不断开采,造成我国矿石品位迅速下降,碱耗和矿耗等指标明显升高、生产成本持续升高^[4-5],使烧结法和混联法面临着被淘汰的境地^[6]。我国在拜耳法基础上开发的选矿—拜耳法和石灰拜耳法仍存在原矿耗量大、氧化铝回收率低等问题^[7]。因此,根据我国铝土矿的特点,对工艺流程进行改进、开发新工艺和新技术,提高生产效率、降低生产能耗和成本对实现我国氧化铝工业持续发展具有重大意义。

拜耳法的基本原理是 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ 体系的三相浓度平衡构成的拜耳循环,即拜耳提出的“铝酸钠溶液晶种分解”和“种分母液循环溶出铝土矿”,由于受 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ 体系平衡的限制,分解率只有50%左右,分解时间长达50 h以上,分解母液循环利用还需要蒸发浓缩,能量消耗大^[8]。烧结法是

将碳酸钠、石灰和铝土矿组成的炉料进行高温烧结,用水或稀碱液溶出,溶出液通入 CO_2 进行碳酸化分解,由于烧结温度高达1 000 °C以上,能耗高,但碳分反应进行彻底,分解时间只需4~5 h,在实际生产中分解率可高达92%^[9-10]。近年来提出的碱溶碳分法氧化铝生产新工艺则综合了这两种方法的优点^[11],由NaOH溶液溶出、 NaHCO_3 分解、分解母液 Na_2CO_3 膜电解再生循环等工序组成,其工艺流程如图1所示。

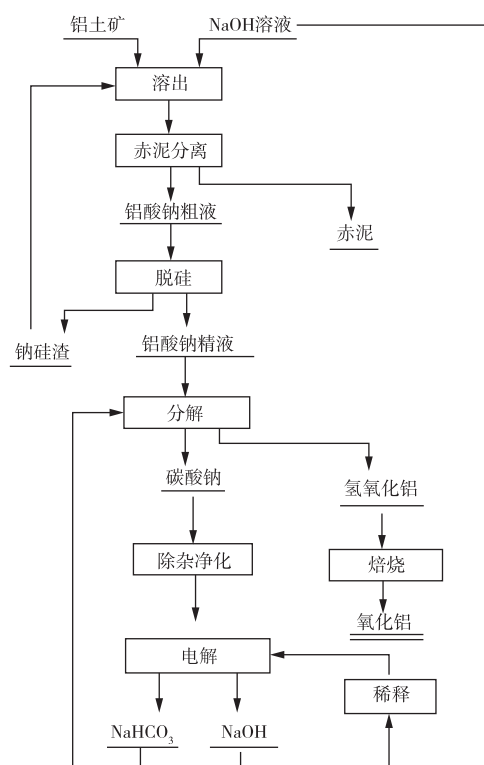


图1 碱溶—碳分生产氧化铝工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of alkali dissolution-carbonation precipitation process

用纯NaOH溶液代替循环母液溶出铝土矿是碱溶—碳分法生产氧化铝工艺的核心技术之一,矿石及现有拜耳法溶出工序的设备对纯NaOH溶液溶出的适应性是决定其能否工业化应用的关键。本

文采用现有拜耳法溶出工序的生产设备,结合拜耳法生产实践,研究 NaOH 溶液溶出不同种类、不同铝硅比矿石的效果,探索适宜的工艺条件,并与拜耳法循环母液溶出的生产效率进行对比。

1 试验

1.1 试验原料

铝土矿取自氧化铝生产现场,按照试验要求进

行破碎、磨细、取样分析,其化学成分见表 1。其中,1[#]~6[#]矿石取自中铝河南分公司氧化铝生产现场,7[#]矿石为中铝中州分公司选精矿。石灰取自氧化铝生产现场石灰炉皮带廊,经挑选、磨细后密封置于干燥器中备用。其化学成分见表 2。NaOH 溶液采用化学纯 NaOH 配制而成,蒸发母液则取自中铝河南分公司氧化铝生产现场。两种溶液的浓度均根据试验要求调配或配制。

表 1 铝土矿的化学成分

Table 1 Chemical compositions of bauxite									/%
编号	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO _合	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	灼减	A/S*
1 [#]	14.48	7.90	58.20	1.40	2.80	2.09	0.09	12.04	4.02
2 [#]	11.42	9.59	59.80	1.70	2.98	1.13	0.09	13.03	5.24
3 [#]	9.96	8.70	61.80	2.00	3.10	1.01	0.09	13.29	6.20
4 [#]	8.83	9.05	62.40	2.20	3.17	0.09	0.09	13.35	7.07
5 [#]	7.95	5.60	67.20	0.80	3.70	0.94	0.07	14.24	8.45
6 [#]	10.78	7.71	61.40	2.50	2.88	1.52	0.09	13.24	5.70
7 [#]	7.64	7.08	66.10	1.80	3.01	0.99	0.10	-	8.65

注: * 无单位

表 2 石灰的化学成分

Table 2 Chemical compositions of lime								/%
编号	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO _合	MgO	CaO _{有效}	TiO ₂	
1 [#]	1.79	0.28	1.40	80.50	—	64.07	—	
2 [#]	1.69	0.39	0.80	93.50	8.45	74.75	—	
3 [#]	2.87	0.23	1.00	86.70	—	68.06	—	
4 [#]	1.49	0.23	1.20	81.40	4.12	71.80	0.031	

1.2 试验设备与方法

预脱硅和高压溶出试验分别在 XYF-Φ44×8 钢弹电热控温水浴和 XYF-Φ44×6 熔盐炉中进行。设备控温精度均为±1℃。将矿石、石灰及碱液按一定的配料比例加入钢弹中混匀,钢弹上紧后放入预先控温的电热控温水浴中,开动搅拌,进行预脱硅,达到要求的脱硅时间后取出钢弹,将其中一个钢弹水冷降温后过滤,滤饼用热水洗净后烘干,分析滤饼和溶液成分;其余钢弹放入预先控温的熔盐炉中,开动搅拌,计时保温溶出,当溶出反应达到预定时间时,取出钢弹水冷降温后过滤,滤饼经热水洗净后烘干,分析滤饼和溶液成分。

1.3 分析及检测方法^[12]

液相成分采用化学滴定法分析;固相中 Al₂O₃ 和 CaO 的质量分数采用 EDTA 容量法分析, SiO₂、Fe₂O₃ 和 TiO₂ 的质量分数采用 722N 型可见分光光度计分析, K₂O 和 Na₂O 的质量分数采用 6400A 型火焰光度计分析, MgO 的质量分数采用 SpectrAA-220 型原子吸收分光光度计分析。

2 试验结果与讨论

2.1 预脱硅试验结果与讨论

采用表 1 中 3[#] 矿石、表 2 中 1[#] 石灰、NaOH 溶液为原料开展预脱硅试验,在 NaOH 溶液苛性碱浓度(N_K)203 g/L、石灰添加量 11%(按石灰中 CaO_合 占矿石总量的质量分数计,下同)、温度 98℃ 条件下,研究预脱硅时间对预脱硅效果的影响,试验结果见表 3。由表 3 可以看出,随着预脱硅时间的延长,预脱硅率(η_{Si})、预脱钛率(η_{Ti})均呈升高趋势。预脱硅 6 h 与 8 h 的 η_{Si} 、 η_{Ti} 差别不大,因此,预脱硅时间控制在 6 h 为宜。

2.2 溶出试验结果与讨论

矿石溶出是碱溶—碳分法生产氧化铝新工艺的关键环节,溶出效果对氧化铝生产技术经济指标起着决定性的作用。溶出试验采用纯 NaOH 溶液代替传统拜耳法的循环母液,分别对表 1 中 1[#]~7[#] 矿石在 98℃ 进行 6 h 预脱硅,然后在 273℃ 溶出 40 min,研究矿石铝硅比(A/S)、NaOH 溶液苛性碱浓度(N_K)、配料溶出率($\eta_{配}$)、配料分子比($\alpha_{k配}$)、石

表3 预脱硅时间对脱硅效果的影响

Table 3 Effects of pre-desilication

time on pre-desilication

/%

预脱硅时间/ h	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiH*	TiH*	η_{Si}	η_{Ti}
4	9.69	57.2	2.72	2.17	0.11	22.40	4.04
6	9.64	57.6	2.79	2.38	0.12	24.69	4.30
8	9.71	57.2	2.74	2.42	0.12	24.93	4.38

注: * SiH、TiH 是指酸溶硅和酸溶钛,即分析时用酸溶解预脱硅后的固相,溶于酸的硅和钛

灰添加量等因素对溶出效果的影响,并与采用现场蒸发母液溶出的效果和生产效率进行对比分析。

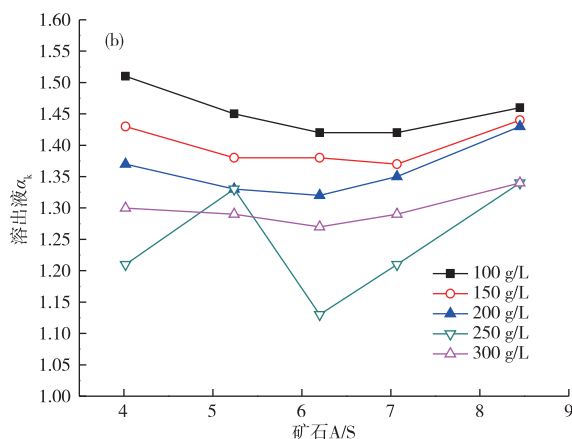
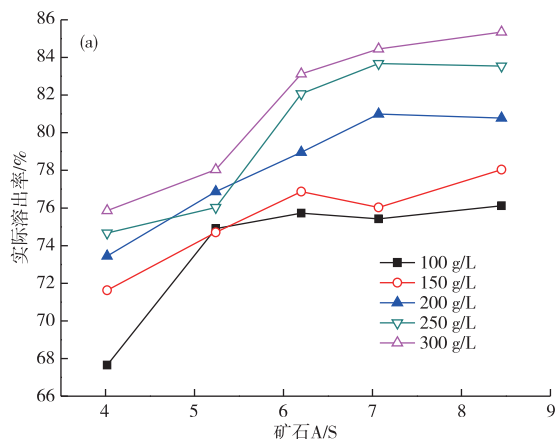
2.2.1 矿石铝硅比和碱液浓度对溶出效果的影响

由于矿石 A/S 和碱液 N_K 对溶出技术经济指标有重要影响,本试验分别以表 1 中 1#~5# 矿石,表 2 中 1# 石灰为原料,按 $\alpha_{k\text{配}}=1.4$ 、 $\eta_{\text{配}}=90\%$ 、石灰添加量 11% 进行配料,开展预脱硅和溶出试验,研究矿石 A/S 和碱液 N_K 对溶出效果的影响,试验结果如图 2 所示。

从图 2a 可以看出,在碱液 N_K 一定的情况下,随着矿石 A/S 的升高,实际溶出率($\eta_{\text{实}}$)明显呈现升高

趋势。 N_K 为 150 g/L 时, A/S=5.24 的矿石 $\eta_{\text{实}}$ 仅为 74.70%, 而 A/S=8.45 的矿石 $\eta_{\text{实}}$ 可达 78.04%, 相差 3.34 个百分点; N_K 为 250 g/L 时, A/S=5.24 的矿石 $\eta_{\text{实}}$ 为 80.11%, 而 A/S=8.45 的矿石 $\eta_{\text{实}}$ 达到 83.54%, 相差 3.43 个百分点。随着 N_K 的升高, $\eta_{\text{实}}$ 呈现升高趋势。 N_K 为 100 g/L 时, 5 种不同 A/S 矿石中, A/S=8.45 的 $\eta_{\text{实}}$ 最高, 但也只有 76.12%, 而当碱液浓度升高到 300 g/L 时, A/S=4.02 的矿石 $\eta_{\text{实}}$ 就可以达到 75.86%, A/S=8.45 的矿石 $\eta_{\text{实}}$ 可以达到 85.35%。但是当 $\alpha_{k\text{配}}$ 一定时, 随着碱液 N_K 升高, 配料矿浆固含会大幅升高, 根据矿石添加量结果粗略推算, 碱液 N_K 为 250 g/L 时, A/S=8.45 矿石的配料矿浆固含约为 590 g/L, A/S=4.02 矿石的配料矿浆固含则升至 718 g/L 左右, 在实际生产中, 高固含矿浆的输送存在较多的问题, 结合生产设备实际情况, 碱液 N_K 应控制在 200 g/L 左右, 此时配料固含约为 472 g/L。

从图 2b 可以看出, 随着矿石 A/S 和溶出碱液 N_K 升高, 溶出液分子比(α_k)基本呈降低趋势。 N_K 为 250 g/L 时, 5 个不同 A/S 矿石的溶出液 α_k 数值均较低, 其中 A/S=6.20 的矿石溶出液 α_k 仅为 1.13, 溶出的液相指标较好。

图2 矿石 A/S 和碱液 N_K 对实际溶出率(a)和溶出液 α_k (b)的影响Fig. 2 Effects of A/S of bauxite and N_K on actual digestion rate of Al_2O_3 dissolution(a) and α_k of digested solution(b)

2.2.2 配料分子比和配料溶出率对溶出效果的影响

以表 1 中 7# 选精矿(A/S=8.65)、表 2 中 4# 石灰为原料,分别按 $\alpha_{k\text{配}}$ 为 1.3、1.4、1.5, $\eta_{\text{配}}$ 为 85%、90%,石灰添加量 11% 进行配料,在 N_K 为 200 g/L 条件下开展预脱硅和溶出试验,研究 $\alpha_{k\text{配}}$ 、 $\eta_{\text{配}}$ 对溶出效果的影响。试验结果如图 3 所示。

从图 3a 可以看出,随着 $\alpha_{k\text{配}}$ 升高, $\eta_{\text{实}}$ 呈明显的升高趋势。 $\alpha_{k\text{配}}$ 为 1.3、 $\eta_{\text{配}}$ 为 85% 时, A/S=8.65 矿

石的 $\eta_{\text{实}}$ 仅为 76.99%, 而 $\alpha_{k\text{配}}$ 升至 1.5 时, 相同条件下矿石的 $\eta_{\text{实}}$ 可达 87.63%, 相差 10.64 个百分点。配料 α_k 一定时, 提高 $\eta_{\text{配}}$, $\eta_{\text{实}}$ 有所升高。 $\alpha_{k\text{配}}$ 为 1.4 时, $\eta_{\text{实}}$ 由 78.84% 升高到 81.85%, 升高了 3.01 个百分点; $\alpha_{k\text{配}}$ 为 1.3、1.5 时, $\eta_{\text{实}}$ 略有上升。

从图 3b 可以看出, $\alpha_{k\text{配}}$ 对溶出液 α_k 的影响不大, 溶出液 α_k 基本保持在 1.35 左右; 只有 $\eta_{\text{配}}$ 为 90%、 $\alpha_{k\text{配}}$ 为 1.5 时, 溶出液 α_k 升至 1.47。

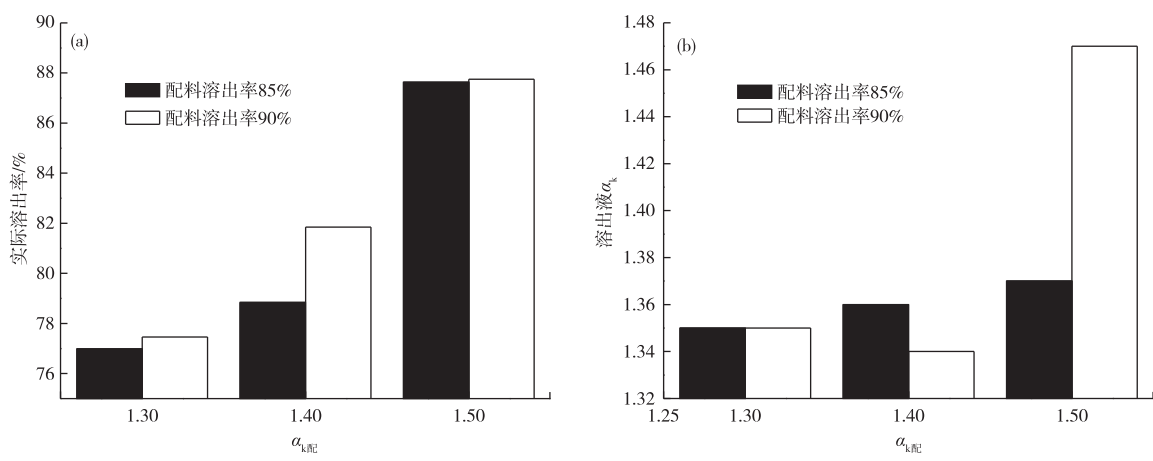


图 3 配料分子比、配料溶出率对实际溶出率(a)和溶出液 α_k (b) 的影响

Fig. 3 Effects of proportioning molar ratio and digestion rate of proportioning dissolution on actual digestion rate of Al_2O_3 dissolution(a) and α_k of digested solution(b)

2. 2. 3 石灰添加量对溶出效果的影响

以表 1 中 6# 矿石(A/S=5.7)、表 2 中 2# 石灰为原料,固定试验条件: $\alpha_{k配}=1.4$ 、 $\eta_{配}=90\%$ 、 $N_K=200\text{ g/L}$,研究石灰量添加量对溶出效果的影响,试验结果见图 4。从图 4 可以看出,当石灰添加量由 9%增加到 13%时,溶出率随石灰添加量的增加呈先升高而后下降的趋势。这主要是因为石灰添加量增大时,可促进赤泥发生有利的相变,加速溶出过程,提高溶出率,如石灰会与矿石中的 TiO_2 作用,生产结晶粗大松脆、易脱离的钛酸钙,可以有效防止 TiO_2 在一水硬铝石表面上生成致密的钛酸钠保护膜,有更多的含水铝硅酸钠转变为易于从矿粒表面脱离的水化石榴石^[13]。但是石灰添加量过大时,会生成大量的水化石榴石,使进入赤泥中的 Al_2O_3 增加,造成 Al_2O_3 的损失增大。结合生产实践,综合考虑多方面因素,石灰添加量选择 11%为宜。

2. 2. 4 生产现场蒸发母液与氢氧化钠溶液溶出效果对比

以表 1 中 2# 矿石(A/S=5.24)、表 2 中 3# 石灰为原料,固定试验条件: $\alpha_{k配}=1.4$ 、 $\eta_{配}=90\%$ 、 $N_K=200\text{ g/L}$ 、石灰添加量 11%,分别采用生产现场蒸发母液和 NaOH 溶液进行预脱硅溶出对比试验,试验结果见表 4。由表 4 可以看出,在相同的预脱硅和高压溶出条件下,分别使用现场蒸发母液和 NaOH 溶液溶出后,溶出液 α_k 和实际溶出率基本保持在相同水平。但是,相同体积的 NaOH 溶液溶出的矿石量是现场母液的 1.71 倍。在碱溶—碳分生产氧化铝工艺中氢氧化铝分解采用碳酸氢钠溶液,获得一级品氧化铝的分解率可达 75%以上,以此推算,

在同样条件下进行溶出,原有拜耳法生产流程的循环效率(以 1 t Na_2O 计)仅为 0.376 t Al_2O_3 ,而碱溶—碳分工艺的循环效率可达 0.812 t,是原来的 2.16 倍。

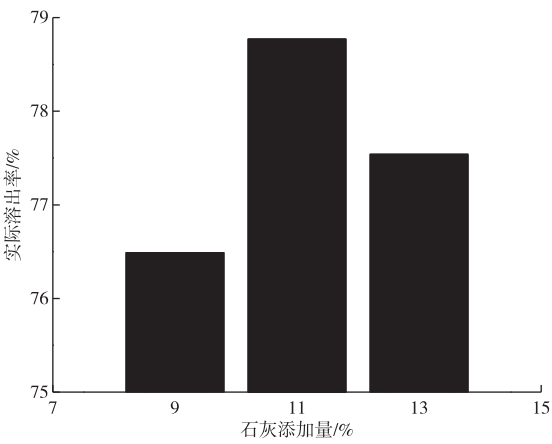


图 4 石灰添加量对实际溶出率的影响

Fig. 4 Effects of lime addition on actual digestion rate of Al_2O_3 dissolution

表 4 生产现场蒸发母液与 NaOH 溶液对铝土矿的溶出效果对比

Table 4 Comparison of dissolution effects leached by NaOH solution and vaporation mother liquor from Bayer process

溶出液	溶出 α_k	实际溶出率/ %	相对溶出率/ %	矿石处理量/ ($g \cdot L^{-1}$) *
NaOH 溶液	1.39	75.19	92.92	282.00
现场母液	1.39	75.76	93.63	481.44

注: * 每升碱液处理的矿石量

3 结论

采用现有拜耳法溶出工序的设备,研究了化学纯 NaOH 配制的碱液溶出不同铝硅比一水硬铝石的溶出效果,确定了适宜的工艺条件,并与拜耳法蒸发母液溶出效果进行对比,可得出以下结论:

1) 预脱硅率和预脱钛率随预脱硅时间的延长而升高,6 h 以后升高不显著。在苛性碱浓度 203 g/L、石灰添加量 11%、温度 98 °C 进行 6 h 预脱硅,预脱硅率为 24.69%,预脱钛率为 4.30%。

2) 矿石的实际溶出率随矿石 A/S 及碱液苛碱浓度的升高而升高,溶出液 α_k 基本呈降低趋势;当碱液浓度升高到 300 g/L 时,A/S=4.02 的矿石实际溶出率就可以达到 75.86%,A/S=8.45 的矿石实际溶出率可以达到 85.35%。但是当 $\alpha_{k配}$ 一定时,随着碱液苛碱浓度的升高,配料矿浆固含会大幅升高,会造成料浆输送困难。

3) 矿石的实际溶出率随着 $\alpha_{k配}$ 和 $\eta_{配}$ 的升高而升高,当 $\eta_{配}$ 为 90%, $\alpha_{k配}$ 由 1.3 升高至 1.5 时,A/S=8.65 矿石的实际溶出率由 77.46% 升至 87.75%。 $\alpha_{k配}$ 对溶出液 α_k 的影响不大,溶出液 α_k 基本保持在 1.35 左右;只有 $\eta_{配}$ 为 90%, $\alpha_{k配}$ 为 1.5 时,溶出液 α_k 升至 1.47。

4) 石灰添加量由 9% 增加至 13% 时,矿石实际溶出率呈先升高后略有降低的趋势。

5) 采用碱溶—碳分法生产氧化铝时,预脱硅及溶出的适宜条件为:矿石 A/S>4.0、预脱硅温度 98 °C、预脱硅时间 6 h、碱液 N_k 浓度 200 g/L 左右、石灰添加量 11%、配料 α_k 为 1.3~1.5、配料溶出率 90%、溶出温度 273 °C 左右、溶出时间 40 min。

6) 在相同预脱硅和溶出条件下,采用生产现场蒸发母液与化学纯 NaOH 配制的碱液进行溶出的效果基本保持在相同水平,但是,相同体积的 NaOH 溶液溶出矿石量是现场母液的 1.71 倍,循环效率则是现场母液的 2.16 倍,溶出工效显著提高。

参考文献

[1] 雷显权,潘晓林,莫晓东,等.富云母高岭石铝土矿拜耳法溶出性能研究[J].有色金属(冶炼部分),2021(2):60-66.
LEI X Q, PAN X L, MO X D, et al. Digestion performance of mica-and-kaolinite-rich bauxite by Bayer process[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),

2021(2):60-66.
[2] 王红伟,马科友.铝冶金生产操作与控制[M].北京:冶金工业出版社,2013.
WANG H W, MA K Y. Production Operation and Control of Aluminum Metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.
[3] 李永刚,张涛,俞小花.拜耳法溶出中低品位矿降低碱耗的研究现状[J].云南冶金,2018,47(4):27-32.
LI Y G, ZHANG T, YU X H. The research status of alkali consumption reduction by dissolution of middle and low grade ore by Bayer process [J]. Yunnan Metallurgy, 2018, 47(4): 27-32.
[4] 崔涛,施辉献,袁野,等.低品位铝土矿溶出工艺研究[J].矿冶,2015,24(2):64-68.
CUI T, SHI H X, YUAN Y, et al. The study on digestion process of low grade bauxite[J]. Mining and Metallurgy, 2015, 24(2): 64-68.
[5] 陈滨,肖利,唐炯敏.中低品位贵州铝土矿石灰拜耳法溶出工艺[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(5):1397-1402.
CHEN B, XIAO L, TANG X M. Digestion technology of Guizhou diasporic bauxite with low and medium grades by lime Bayer process[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(5): 1397-1402.
[6] 马科友,李晓乐,王红伟.铝硅比对中低品位铝土矿拜耳法溶出技术经济指标的影响[J].有色金属(冶炼部分),2016(6):47-49.
MA K Y, LI X L, WANG H W. Effect of A/S on technical and economic index of Bayer digestion for lower-medium grade bauxite [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(6): 47-49.
[7] 张彦玲.碱溶碳分法氧化铝生产新工艺碳酸钠电解液中杂质铝的去除方法研究[D].北京:北京化工大学,2013.
ZHANG Y L. The study of remove aluminum of Na_2CO_3 in the new process of alumina production by alkali-dissolution and carbonization-precipitation [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.
[8] 赵峰,余章龙,钮因健,等.膜电解在碱溶碳分法氧化铝生产工艺中的应用[J].北京化工大学学报(自然科学版),2009,36(4):65-70.
ZHAO F, YU Z L, NIU Y J, et al. Application of membrane electrolysis in alumina production by alkali-dissolution and carbonization-precipitation[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2009, 36(4): 65-70.

- [9] 毕诗文. 氧化铝生产工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
BI S W. Alumina Production Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [10] 钮因健, 万平玉, 吕子剑, 等. 一种碱溶碳分法生产氧化铝的工艺: 200710178670. 2[P]. 2008-08-27.
NIU Y J, WAN P Y, LV Z J, et al. A new method of alkali-dissolution and carbonization-precipitation in alumina production: 200710178670. 2[P]. 2008-08-27.
- [11] 仇倩. 碱溶—碳分法氧化铝生产工艺中碳分母液的深度除铝方法[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
QIU Q. Alkali dissolution-carbonation precipitation process for producing alumina: Removal of aluminum from the carbonization liquor [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.
- [12] 王红伟, 马春玉, 马科友, 等. 山西高铁铝土矿溶出工艺试验研究[J]. 材料与冶金学报, 2021, 20(1): 45-49.
WANG H W, MA C Y, MA K Y, et al. Experimental study on dissolving process of high-iron bauxite from Shanxi[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2021, 20(1): 45-49.
- [13] 薛伟姝. 中低品位铝土矿溶出沉降性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2007.
XUE Y S. The dissolving and sedimentation capability of mid-low grade bauxite[D]. Shenyang: Northeastern University, 2007.