

doi:10. 3969/j. issn. 1007-7545. 2021. 07. 005

高硫高碳铝土矿在氧化铝生产中的实践及探讨

刘永轶¹, 李其贵¹, 尹中林²

(1. 遵义铝业股份有限公司, 贵州 遵义 563100;

2. 国家铝冶炼工程技术研究中心/中铝郑州有色金属研究院有限公司, 郑州 450041)

摘要:遵义某氧化铝厂使用高硫、高碳铝土矿,采用拜耳法生产氧化铝,系统中铝酸钠溶液成分复杂,物料黑而黏稠,对生产过程影响明显,造成氧化铝产品铁含量升高、粒度周期性爆发细化、设备腐蚀、循环效率大幅下降、能耗明显升高等一系列问题。在铝土矿含硫量不超过 0.3% 的情况下,在高温溶出过程中添加一定量的硝酸钠氧化低价硫,可保证氧化铝产品铁含量满足一级品要求,生产能稳定运行,并在一定程度上减缓对设备的腐蚀。工业试验结果表明,针对进入流程中的低价硫和有机物,氧气湿法深度氧化脱硫脱碳技术不仅可以氧化系统中的低价硫,同时可实现对有机物的部分氧化,效果和成本比添加硝酸钠更好。

关键词:高硫铝土矿;高碳铝土矿;拜耳法;氧化铝;氧化

中图分类号:TF821

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)07-0021-06

Practice and Discussion of High-Sulfur and High-Carbon Bauxite in Alumina Production

LIU Yong-yi¹, LI Qi-gui¹, YIN Zhong-lin²

(1. Zunyi Aluminum Co., Ltd., Zunyi 563100, Guizhou, China;

2. National Aluminum Smelting Engineering Technology Research Center, Zhengzhou Nonferrous Metals Research Institute Co., Ltd., CHALCO, Zhengzhou 450041, China)

Abstract: High-sulfur and high-carbon bauxite is used in an alumina refinery in Zunyi by Bayer process. Due to its long-term use of this type bauxite, composition of sodium aluminate solution in system is complex, and material is black and viscous, which has a big impact on production, resulting in increase of iron content of alumina products, periodic explosion and refinement of particle size, equipment corrosion and low cycle efficiency. Under the condition that sulfur content of bauxite does not exceed 0.3%, adding a certain amount of sodium nitrate to oxidize low sulfur in process of high temperature dissolution can ensure that iron content of alumina products can meet the requirements of first-grade products, production can run stably, and corrosion of equipment can be reduced to a certain extent. The industrial test results show that oxygen wet deep oxidation desulphurization and decarbonization technology can not only oxidize low sulfur in system, but also realize partial oxidation of organic matter, with better effect and lower cost than adding sodium nitrate.

Key words: high sulfur bauxite; high carbon bauxite; Bayer process; alumina; oxidation

收稿日期:2020-03-03

基金项目:中国铝业股份有限公司重大科技项目(ZB2019002005)

作者简介:刘永轶(1973-),男,贵州遵义人,工程硕士,高级工程师;**通信作者:**李其贵(1966-),男,贵州修文人,高级工程师

遵义地区铝土矿组成复杂,其中高硫铝土矿储量约2 000余万吨,含硫1%~8%,同时该地区还有部分高碳铝土矿和高硫高碳铝土矿。遵义某氧化铝厂采用拜耳法工艺处理一水硬铝石型铝土矿,溶出温度265℃。由于从投产开始就使用了高硫铝土矿和高碳铝土矿,矿石中的含硫矿物、有机碳和无机碳等在高温溶出过程中与铝酸钠溶液中的苛性碱产生复杂反应^[1-3],溶液中同时存在硫化物及硫酸盐、碳酸盐、草酸钠以及其它有机物等,对产品质量、设备防腐、循环效率、能耗以及蒸发排盐^[4-5]等产生了很大影响。本文系统分析了硫、碳对拜耳法氧化铝生产过程的影响,总结了开展科技攻关工作取得的效果和生产实践经验,为高效利用遵义地区乃至国内高硫高碳铝土矿生产氧化铝提供技术支持,并对该研究领域提出优化建议。

1 高硫铝土矿对拜耳法氧化铝生产过程的危害

1) 产品中杂质铁含量升高

在拜耳法溶出过程中配入一定高硫铝土矿后,其中的黄铁矿与碱反应生成硫代铁酸钠、二硫化钠、硫代硫酸钠、亚硫酸钠、硫酸钠等含硫化合物,不但造成苛性碱的消耗,这些化合物在生产中主要对氧化铝产品质量产生影响、对生产设备产生腐蚀危害等。

生产中长期使用高硫铝土矿后,铝酸钠溶液中的 S^{2-} 和铁含量升高,铝酸钠溶液呈墨绿色,而不是常规的金黄色,分解出来的氢氧化铝呈灰色,焙烧后氧化铝产品中的铁含量高,并随铝土矿中硫含量的升高而升高,严重时会造成产品铁含量超标。表1为该厂某年连续9个月矿石含硫与产品含铁量情况。

表1 矿石含硫与产品含铁量情况

Table 1 Sulfur content in bauxite and iron content in products /%

月份	铝土矿总硫	氧化铝 Fe_2O_3
2月	0.66	0.020
3月	0.62	0.027
4月	0.30	0.019
5月	0.37	0.018
6月	0.37	0.017
7月	0.37	0.014
8月	0.20	0.012
9月	0.21	0.012

2) 设备腐蚀加剧

在氧化铝生产流程中低价硫的存在会对设备造成腐蚀。研究表明低价硫对合金钢的腐蚀较为明显^[6]。在该氧化铝厂生产中,高温溶出机组内套管

尤其是高温弯头处,会出现鱼鳞状的腐蚀,在蒸发过程中处于高温高碱条件下的强制效经常出现腐蚀泄漏的情况,在分解工序,低价硫会对分解槽焊缝以及应力大的地方造成腐蚀。2019年分解系统曾出现多处焊缝渗碱,严重时还出现了刺料的情况。据报道,在苏联乌拉尔氧化铝厂出现过类似的情况^[7],这给生产带来了严重的安全环保风险。

3) 沉降及叶滤产能降低

矿石含硫高时,赤泥压缩性能变差,影响赤泥分离和赤泥压缩性能,分离溢流浮游物高,沉降槽产能降低,这些浮游物吸附在叶滤机滤布上,造成叶滤机产能下降,滤布碱煮后产能也不能有效恢复。

2 高碳铝土矿对拜耳法氧化铝生产过程的危害

2.1 高无机碳的影响

1) 造成溶出闪蒸乏汽带料

铝土矿中的无机碳以碳酸盐的形式存在,在溶出过程中碳酸盐发生反苛化反应进入氧化铝生产系统。在该氧化铝厂生产中,当母液中碳碱比(N_C/N_T ,碳碱与全碱的比值)升高到11%以上,碳酸钠在溶出机组的后几级闪蒸器内及闪蒸过料管内开始析出^[8],碳碱比升高到15%左右时,溶出机组不能正常运行。

2) 降低分解率

碳碱浓度升高会降低种分分解率^[9-10]。表2是某年5月到10月精液(精制铝酸钠溶液)碳碱比从10.1%升高到14.7%,在精液 N_K (苛性碱)浓度下调了6.5 g/L的情况下,分解率对应从50.6%降低到48.5%,降低了2.1个百分点,如果不下调精液浓度,分解率下降会更明显。

表2 精液碳碱比与分解率

Table 2 N_C/N_T ratio and decomposition rate of sodium aluminate solution

月份	精液 N_K 浓度/(g·L ⁻¹)	精液 N_C/N_T 比/%	分解率/%
5月	157.4	10.10	50.60
6月	157.2	10.20	49.70
7月	156.0	11.40	49.40
8月	154.9	12.50	49.40
9月	153.2	13.80	49.50
10月	150.9	14.70	48.50

3) 降低氧化铝循环效率

为克服闪蒸带料问题,一是给闪蒸器注水,稀释闪蒸器内溶出矿浆,避免碳碱析出;二是降低循环母液浓度。由于循环母液浓度的降低以及分解率的降

低,循环效率从 149.2 kg/m³ 降低到 139.2 kg/m³,降低了 6.7%,具体情况如表 3 所示。

表 3 精液碳碱比与循环效率
Table 3 N_C/N_T ratio and cycle efficiency
of sodium aluminate solution

月份	循环母液浓度/ (g·L ⁻¹)	精液 N _C /N _T 值/ %	循环效率/ (kg·m ⁻³)
5 月	237.1	10.10	149.2
6 月	236.6	10.20	146.2
7 月	235.6	11.40	143.3
8 月	234.4	12.50	141.9
9 月	232.1	13.80	145.0
10 月	231.2	14.70	139.2

4)增加生产能耗
溶出机组闪蒸乏汽带料后,会造成换热效率大

幅下降,吨氧化铝溶出能耗升高 3%左右^[8]。若运行强制效排盐和碳碱苛化工序,蒸汽消耗同比升高约 10%,同时还会增加苛化过程中的石灰消耗和氧化铝损失。

2.2 高有机碳的影响

1)影响产品粒度

生产流程中有机碳大部分随高硫铝土矿一同进入流程,部分有机碳在生产过程中以草酸盐和非草酸盐的形式进入溶液。草酸钠会不断累积后爆发析出,微观形貌为针状,造成分解成核爆发性增长,产品粒度频繁大幅波动,−43 μm 含量达到 30%左右,最高的达到 40%。如图 1a 为没有草酸钠析出的氢氧化铝 SEM 形貌,图 1b 为有大量草酸钠析出的氢氧化铝 SEM 形貌。

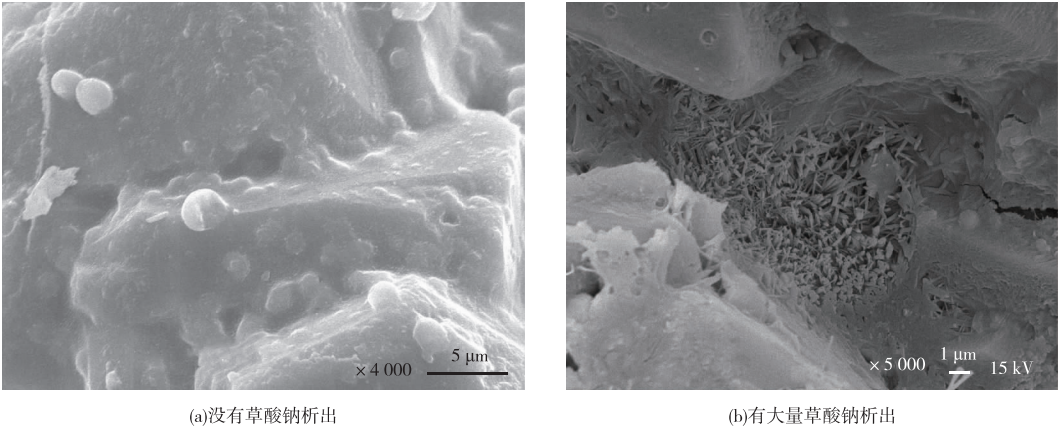


图 1 氢氧化铝 SEM 形貌

Fig. 1 SEM morphologies of aluminum hydroxide with/without sodium oxalate precipitation

表 4 为工厂某年 9 月开始出现爆发析出前后分解 3.5 μm 成核频数及对应氧化铝产品粒度月平均变化情况,且产品粒度长期呈现周期性爆发细化。

表 4 出现爆发性细化前后产品粒度变化情况
Table 4 Particle size of products before/after
periodic explosion and refinement

月份	3.5 μm 成核频数(×10 ⁵)	−43 μm 占比/%
1 月	3.24	16.8
2 月	2.92	16.0
3 月	3.28	17.3
4 月	3.31	15.8
5 月	2.94	14.9
6 月	2.98	15.9
7 月	2.81	14.8
8 月	3.25	17.9
9 月	9.99	17.6
10 月	7.77	19.6
11 月	3.68	32.6
12 月	2.29	15.7

2)影响排盐效果

在生产过程中由于硫和有机物的共同影响,碳酸钠的析出特性与其他厂差异较大,循环母液苛性碱浓度在强制效蒸至 270 g/L 以上时才开始明显析出颗粒细小的碳酸钠,且难以沉降,盐过滤机滤饼厚度只能达到 2 mm 左右,在碳碱升高时排盐效果差,不能及时将系统中的碳酸盐排出,以消除碳酸钠对生产的不利影响。

3)影响分解槽和立盘正常运行

有机碳在流程中不断转化生成的草酸钠,会在分解槽壁结合氢氧化铝形成大量的结疤,特别在分解槽温度偏低的顶部,形成的结疤不断加厚,影响分解槽的体积,而且还会发生掉落,造成分解槽搅拌卡死沉槽。同时草酸钠爆发析出的时段内,还会吸附在立盘滤布上,大幅降低立盘过滤效率。

2.3 硫和碳对碱耗的影响

高硫铝土矿中的硫最终生成硫酸钠,通过赤泥带走。高碳铝土矿中的无机碳生成碳酸钠通过赤泥带走;有机碳逐步转化成草酸钠,部分与AH一起进入产品带走,部分最终进一步转化为碳酸钠。

3 高硫高碳铝土矿工业试验研究

3.1 高碳铝土矿矿物组成

2020年7月生产系统的碳酸钠含量开始快速上升,对供矿含碳量高的具有代表性的黑色和灰色高碳矿进行分析,具体化学和物相分析如表5~6所示。从物相分析结果可以看出,铝土矿带入的菱铁矿较高,特别是灰色块状矿,而黑色粉矿的有机碳较高。菱铁矿在苛性碱溶液中于常压就能发生分解反应,生成 Na_2CO_3 和 $\text{Fe}(\text{OH})_2$,在溶出过程中 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 被氧化为 Fe_2O_3 或 Fe_3O_4 ,并放出氢气^[11]。

表5 高碳矿化学成分

Table 5 Chemical compositions of high-carbon bauxite /%

组成	灰色块状矿	黑色粉矿
Al_2O_3	47.53	50.74
SiO_2	6.37	11.07
Fe_2O_3	24.35	20.73
TiO_2	2.56	2.26
K_2O	0.35	0.40
CaO	1.10	0.27
MgO	1.25	0.91
C	2.07	0.73
S	0.11	0.04
有机碳	0.076	0.43

表6 高碳矿物相成分

Table 6 Mineral phase of high-carbon bauxite /%

物相	灰色块状矿	黑色粉矿
一水硬铝石	50	48
绿泥石	7	35
高岭石	6	4
伊利石	3	3.5
石英	0.5	/
锐钛矿	2	1.9
金红石	0.5	0.4
白云石	2	/
方解石	1	0.5
菱铁矿	19	3
赤铁矿	8	2

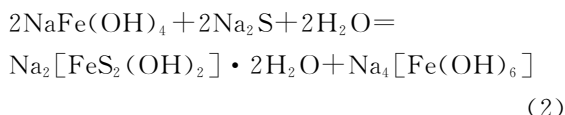
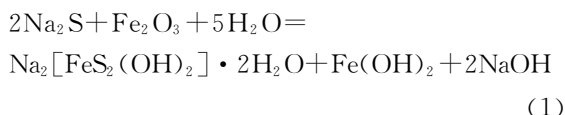
3.2 赤泥中硫和碳的关系

为系统解决碳碱升高影响,开展了高碳铝土矿

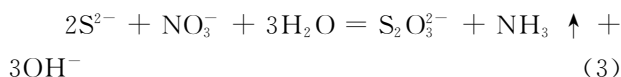
中碳酸盐在高温溶出过程中的行为研究,明确了利于排碳的溶出条件^[12]。同时通过硫与碳在赤泥中含量的关系研究结果表明^[8],母液中硫酸盐含量对赤泥中碳酸盐的含量影响较大,随溶液中硫含量的增加,赤泥中的无机碳含量从0.33%大幅降低到0.07%,赤泥中硫的排除优先于碳的排除。

3.3 添加硝酸钠氧化低价硫研究

黄铁矿与铝酸钠溶液的反应伴随着复杂的氧化还原过程。李小斌、陈文汨等对黄铁矿的反应行为及拜耳液中铁的行为进行了研究^[2,13],结果表明,硫主要呈 S^{2-} 进入溶液,其余为 S_2^{2-} 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 。 S^{2-} 在溶液中与铁作用生成溶解度较大的羟基硫代铁酸钠,拜耳液中 S^{2-} 浓度的增加,促进了羟基硫代铁酸钠的生成。反应式^[14]如下:



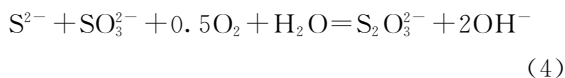
溶液中硫化物离子浓度增加,有助于羟基硫代铁酸钠的形成。在矿浆稀释和铝酸钠溶液冷却分解过程中,羟基硫代铁酸钠的溶解度降低,进而造成氧化铝中铁含量的升高。工厂生产实践也表明,精液中 S^{2-} 含量越高,则精液和产品氧化铝中铁含量越高。通过在高温溶出过程中添加一定量的硝酸钠,可以部分氧化铝酸钠溶液中的 S^{2-} ,其主要反应为:

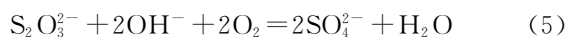


工业试验结果表明,硝酸钠可以降低溶液中的 S^{2-} 约15%,可以满足含硫0.3%左右铝土矿使用,但不能适用于含硫更高的铝土矿,同时硝酸钠对有机物氧化不明显。

3.4 添加氧气湿法深度氧化脱硫脱碳研究

在国内不少院校对高硫铝土矿和有机物去除开展了大量研究^[15-20],如添加脱硫剂、双氧水、臭氧以及浮选脱硫、焙烧脱硫等,在实验室都取得了一定的或较好的效果,但都没有系统的工业试验研究结果。本研究通过在拜耳法过程中通入氧气,并且使氧气迅速分散于高温矿浆中,完成与矿浆溶液中低价硫的氧化反应,同时对有机物、草酸根等也有一定的氧化作用。其氧化低价硫的主要反应^[20]为:





4 高硫高碳铝土矿使用实践

1) 严把矿石入口

根据硫优先于碳进入赤泥带走的研究结论,工厂生产中遇到碳碱升高时,通过采取优先控制高硫矿使用量的方法,严控高硫高碳矿进入流程,优化配矿使用顺序,尽可能使用低硫低碳铝土矿。同时,主要检测、控制含菱铁矿高的铝土矿,控制流程中碳的主要来源。

2) 提高石灰质量,严控硫、碳进出平衡

按照铝土矿碳含量小于0.4%、硫含量小于0.3%配矿,石灰有效钙含量控制大于83%,以实现生产过程中碳的输出大于输入。2019年按此调整5个月就将系统碳碱比从15%恢复到9%左右的水平,分解率从48%升高到50%,分解槽和立盘过滤机稳定运行,实现了拜耳法不排盐的生产方式,年节约排盐苛化运行费用上千万元。

3) 添加硝酸钠氧化剂氧化

通过在溶出过程中按每吨氧化铝5 kg左右添加硝酸钠,使用铝土矿含硫量可以长期保持到0.3%左右,精液中的 S^{2-} 在0.25 g/L以内,保证产品铁含量在0.013%以内,满足氧化铝一级品要求,生产能稳定运行,并减缓对设备的腐蚀。

4) 氧气湿法深度氧化脱硫脱碳

在实验室研究成果的基础上,在国内首次成功开展了氧气湿法深度氧化脱除低价硫和有机物工业试验研究。工业试验研究结果表明,湿法深度氧化技术可以氧化系统中的硫达到40%以上,还可以氧化系统中的有机碳和草酸盐,并还有进一步提升的空间,消耗成本比硝酸钠更低。

5 结论及探讨

1) 遵义某氧化铝厂使用高硫高碳铝土矿生产氧化铝,系统中铝酸钠溶液成分复杂,物料黑且黏稠,造成氧化铝产品铁含量升高、产品粒度周期性爆发细化、加剧设备腐蚀、碳酸钠排除困难、分解率降低及循环效率大幅下降、能耗明显升高等影响。

2) 工业试验实践结果表明,在铝土矿含硫量不超过0.3%的情况下,在高温溶出过程中添加一定量的硝酸钠氧化低价硫,可保证氧化铝产品铁含量满足一级品要求,生产能稳定运行,并在一定程度上减缓对设备的腐蚀。

3) 工业试验实践结果表明,针对进入流程中的低价硫和有机物,氧气湿法深度氧化脱硫脱碳技术

不仅可以氧化系统中的低价硫,同时可实现对有机物的部分氧化,效果和成本比添加硝酸钠更好,氧气湿法深度氧化脱硫脱碳是工业生产高效利用高硫铝土矿可行的技术路线。

参考文献

- [1] 刘洪波,刘安荣,彭伟,等.某高硫铝土矿选择性溶出氧化铝试验研究[J].湿法冶金,2020,39(2):7-11.
LIU H B, LIU A R, PENG W, et al. Selective dissolution of Al_2O_3 from high sulphur bauxite [J]. Hydrometallurgy of China, 2020, 39(2): 7-11.
- [2] 李小斌,李重洋,齐天贵,等.拜耳法高温溶出条件下黄铁矿的反应行为[J].中国有色金属学报,2013,23(3): 829-835.
LI X B, LI C Y, QI T G, et al. Reaction behavior of pyrite during Bayer digestion at high temperature [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(3): 829-835.
- [3] 张念丙,蒋宏石,吴贤熙.高硫铝土矿溶出过程中硫的行为研究[J].轻金属,2007(7):7-10.
ZHANG N B, JIANG H S, WU X X. Research on disposing of sulfur of high grade bauxite containing sulfur in Guizhou [J]. Light Metals, 2007(7): 7-10.
- [4] 贾永真,王家伟,李军旗,等.亚硫酸钠对铝酸钠种分母液排盐的影响[J].有色金属(冶炼部分),2013(10): 20-22.
JIA Y Z, WANG J W, LI J Q, et al. Effect of sodium sulphite on salt discharge from sodium aluminate liquor [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2013(10): 20-22.
- [5] 魏国令,李军旗,陈朝轶,等.硫对含草酸钠铝酸钠溶液蒸发排盐的影响[J].有色金属(冶炼部分),2016(7): 26-29.
WEI G L, LI J Q, CHEN Z Y, et al. Effect of sulfur on salt elimination from NaAlO_2 solution bearing $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(7): 26-29.
- [6] 谢巧玲,陈文汨.铝酸钠溶液中 S^{2-} 对低合金钢腐蚀行为的影响[J].中国有色金属学报,2013,23(12): 3462-3469.
XIE Q L, CHEN W M. Effect of S^{2-} on corrosion behavior of low alloy steel in sodium aluminate solution [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(12): 3462-3469.
- [7] 宁云峰.俄罗斯氧化铝生产的发展和技术进步[J].世界有色金属,2000(4):20-25.
NING Y F. Development and prospect of alumina production in Russia [J]. World Nonferrous Metals,

- 2000(4):20-25.
- [8] 李其贵,刘永轶,尹中林.高硫高碳复杂铝土矿拜耳法不排盐生产实践[J].有色金属(冶炼部分),2020(10):43-47.
LI Q G, LIU Y Y, YIN Z L. Plant practice of Bayer process without salt discharge of high sulfur and high carbon complex bauxite [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(10):43-47.
- [9] 彭志宏,邓永春,周秋生,等.无机盐杂质对铝酸钠溶液晶种分解率的影响[J].矿冶工程,2010,30(2):57-61.
PENG Z H, DENG Y C, ZHOU Q S, et al. Influence of inorganic salt impurities on seed decomposition rate in sodium aluminate solutions [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2010, 30(2):57-61.
- [10] 王鸿雁,李旭光,马华菊.硫酸钠、碳酸钠杂质对铝酸钠溶液晶种分解过程的影响[J].湿法冶金,2013,32(2):44-46.
WANG H Y, LI X G, MA H J. Influence of sodium sulfate and sodium carbonate on seed decomposition of sodium aluminate solution [J]. Hydrometallurgy of China, 2013, 32(2):44-46.
- [11] 毕诗文,于海燕,杨毅宏,等.拜耳法生产工艺[M].北京:冶金工业出版社,2007:98-103.
BI S W, YU H Y, YANG H Y, et al. Bayer Process[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007:98-103.
- [12] 李其贵,刘永轶,尹中林.高碳铝土矿中碳酸盐在溶出过程中反应行为研究[J].轻金属,2020(8):16-20.
LI Q G, LIU Y Y, YIN Z L. Reaction behavior of carbonate in digestion of high carbon bauxite[J]. Light Metals, 2020(8):16-20.
- [13] 陈文汨,陈学刚,郭金权,等.拜耳液中铁的行为研究[J].轻金属,2000(4):14-18.
CHEN W M, CHEN X G, GUO J Q, et al. Research on the behavior of iron in Bayer liquor[J]. Light Metals, 2000(4):14-18.
- [14] 陈万坤,彭关才.一水硬铝石型铝土矿的强化溶出[M].北京:冶金工业出版社,1997:112-114.
CHEN W K, PENG G C. Enhanced Leaching of Diaspore Bauxite[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997:112-114.
- [15] 覃志辉,陈文汨.强化氧化脱除铝酸钠溶液中 S^{2-} 的研究[J].矿冶工程,2016,36(2):101-103.
QIN Z H, CHEN W M. Removal of S^{2-} in sodium aluminate solution with intensified air oxidation [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016, 36(2):101-103.
- [16] 程芳燕,金会心,李阳,等. H_2O_2 去除铝酸钠溶液中腐殖酸类有机物的实验研究[J].过程工程学报,2016,16(12):927-932.
CHENG F Y, JIN H X, LI Y, et al. Experimental study on removal of humic acid organics from sodium aluminate solution by H_2O_2 oxidation[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2016, 16(12):927-932.
- [17] 何润德.工业铝酸钠溶液氢氧化钡除硫[J].有色金属,1996,48(4):63-66.
HE R D. Sulphur removal with barium hydroxide from industrial sodium aluminate solution [J]. Nonferrous Metals, 1996, 48(4):63-66.
- [18] 陈延信,李骏,赵博,等.高硫铝土矿分散态焙烧脱硫试验[J].有色金属(冶炼部分),2016(3):19-21.
CHEN Y X, LI J, ZHAO B, et al. Experiment of dispersion roasting desulfurization of high-sulfur bauxite[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(3):19-21.
- [19] 郭鑫,张志永,田应忠,等.高硫高有机物型铝土矿反浮选同步脱硫脱有机物试验研究[J].轻金属,2020(6):6-10.
GUO X, ZHANG Z Y, TIAN Y Z, et al. Experimental study on simultaneous removal of sulfur and organic matters in high sulfur and high organic bauxite by reverse flotation[J]. Light Metals, 2020(6):6-10.
- [20] 郑立聪,谢克强,刘战伟,等.一水硬铝石型高硫铝土矿脱硫研究进展[J].材料导报,2017(3):84-92.
ZHENG L C, XIE K Q, LIU Z W, et al. Review on desulfurization of high sulfur bauxite [J]. Materials Review, 2017(3):84-92.