doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.08.009

化学氧化法处理高硫铝土矿生产氧化铝实践

刘永轶

(遵义铝业股份有限公司,贵州 遵义 563100)

摘要:某氧化铝厂使用高硫铝土矿生产氧化铝,给生产带来很大影响:氧化铝产品铁含量升高、设备腐蚀加大、沉降效果变差等。针对这些问题开展研究和工业试验,明确了在氧化铝生产的高温溶出过程中添加硝酸钠化学氧化脱硫反应的原理和氧化效果,对搭配使用高硫铝土矿含硫在 0.3%左右时,添加少量硝酸钠可以长期维持氧化铝产品的含铁量在一级品范围内。该技术简单有效且经济,可以在工业生产中推广使用。

关键词:高硫铝土矿;氧化铝;硝酸钠;氧化;脱硫

中图分类号:TF821　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1007-7545(2022)08-0051-08

Plant Practice of Producing Alumina from High Sulfur Bauxite by Chemical Oxidation Method

LIU Yong-yi

(Zunyi Aluminum Co., Ltd., Zunyi 563100, Guizhou, China)

Abstract: A alumina plant uses high-sulfur bauxite to produce alumina, which brings great influence to production: iron content of alumina product increases, equipment corrosion increases, and settlement effect becomes worse. To address these issues, research and industrial tests were carried out. The principle of chemical oxidation desulfurization reaction and oxidation effect with sodium nitrate in high temperature dissolution process of alumina production were clarified. When sulfur content of high-sulfur bauxite is about 0.3%, adding a small amount of sodium nitrate can maintain iron content in alumina products within the range of first-grade products for a long time. This technology is simple, effective and economical, and can be widely used in industrial production.

Key words: high sulfur bauxite; alumina; sodium nitrate; oxidation; desulphurization

遵义某氧化铝厂采用拜耳法生产工艺处理一水硬铝石型铝土矿,260~265 ℃高温溶出。其所在地区高硫铝土矿较多,储量上亿吨,含硫 0.5%~8%,除遵义地区外,仅在贵州省境内的高硫铝土矿就有数亿吨,同时在河南、山西、广西和重庆等地也有数亿吨高硫铝土矿[1-2]。工厂最初生产用铝土矿中混有部分高硫铝土矿,对其危害规律还不清楚,造成产品铁含量超标等问题。为消除其对生产的影响,进行了大量研究分析,发现用于工业生产且简单有效、经济可行的方法还没有。为解决该问题,邀请相关研究院所和大学开展科技攻关,在高硫铝土矿通过搭配低硫铝土矿将含硫量控制到 0.3%左右的情况

收稿日期:2022-05-03

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,硕士,高级工程师

下，在氧化铝生产的高温溶出过程中添加硝酸钠化学氧化的方法，可以消除低价硫对生产的影响，解决产品铁含量超标等问题，为遵义地区及其他地区在搭配使用高硫铝土矿生产氧化铝提供了简单、有效且经济的技术方法。

1 高硫铝土矿在生产中的影响

对工厂生产使用的高硫铝土矿进行成分分析，其中硫主要以黄铁矿及其异构体白铁矿和胶黄铁矿形式存在，其他有少量硫酸盐等。矿石中所含硫矿物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[3-5]，硫主要呈 S^{2-} 进入溶液，其余为 S_2^{2-}、$S_2O_3^{2-}$、SO_3^{2-}、SO_4^{2-}，其中主要是 S^{2-} 进一步与铁反应产生溶于溶液中的化合物，在生产中影响氧化铝产品质量、加剧设备腐蚀，还造成苛性碱的损失等影响，主要反应如下：

$$8FeS_2+30NaOH=4Fe_2O_3+14Na_2S+Na_2S_2O_3+15H_2O \quad (1)$$

$$6FeS_2+22NaOH=2Fe_3O_4+10Na_2S+Na_2S_2O_3+11H_2O \quad (2)$$

$$3FeS_2+8NaOH=Fe_3O_4+2Na_2S+2Na_2S_2+4H_2O \quad (3)$$

随着温度的提高，硫代硫酸钠稳定性降低，在高温溶出中分解：

$$3Na_2S_2O_3+6NaOH=2Na_2S+4Na_2SO_3+3H_2O \quad (4)$$

$$Na_2S_2O_3+2NaOH=Na_2S+Na_2SO_4+H_2O \quad (5)$$

溶液中的 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($Na_2[FeS_2(OH)_2]\cdot 2H_2O$)，拜耳液中 S^{2-} 浓度的增加，有助于羟基硫代铁酸钠的形成和提高其稳定性：

$$2Na_2S+Fe_2O_3+5H_2O=Fe(OH)_2+2NaOH+Na_2[FeS_2(OH)_2]\cdot 2H_2O \quad (6)$$

$$2NaFe(OH)_4+2Na_2S+2H_2O=Na_4[Fe(OH)_6]+Na_2[FeS_2(OH)_2]\cdot 2H_2O \quad (7)$$

1.1 增加产品杂质铁含量

生产中大量使用高硫铝土矿后，在高温、高碱溶出过程中黄铁矿与苛性碱反应生成的 S^{2-} 进一步与矿石中的铁矿物反应，以及腐蚀设备中的铁，生成羟基硫代铁酸钠[6-7]，溶出矿浆精制后得到的精液(精制的铝酸钠溶液)与其他工厂正常精液相比，溶液不是常规的金黄色而呈墨绿色，铁含量升高。精液在分解工序冷却分解过程中，羟基硫代铁酸钠的溶解度也降低，分解进入氢氧化铝造成污染，氢氧化铝的白度大幅降低，严重时白色的氢氧化铝变为灰绿色。受污染的氢氧化铝焙烧后氧化铝产品中的铁含量升高，严重时产品铁含量超标，生产实践表明，产品中铁含量随铝土矿中硫含量的升高而升高。

1.2 加大设备腐蚀

低价硫会加大设备腐蚀，相关研究表明，低价硫对钢及其合金的腐蚀较为明显[8-11]，S^{2-} 在氧化铝生产流程中对设备的腐蚀主要是通过在金属表面与铁反应形成不具保护性的 FeS 膜，使已形成的 Fe_3O_4 存在缺陷，对金属表面不具有保护性。并随 S^{2-} 浓度及温度的升高，这种作用更明显，铝酸钠溶液中 S^{2-} 与铁作用生成溶解度较大的羟基硫代铁酸钠加剧腐蚀，生产中发现，高温溶出机组内套管弯头处出现明显鱼鳞状的腐蚀小坑；在蒸发器高温、高碱地方的强制效和Ⅰ效经常出现腐蚀泄漏的情况；在分解工序，低价硫对分解槽焊缝及应力大的地方腐蚀后，加剧碱对焊缝的腐蚀，2019—2021 年，工厂分解槽逐步出现了多处焊缝渗碱，严重的还出现了刺料的情况，给生产带来严重的安全环保风险。

1.3 降低蒸发排盐效果

在生产中，由于高硫铝土矿中含有机物也普遍较高，在高硫和高有机物的共同影响下，对碳酸钠的析出特性影响较大[12-16]。工厂强制效蒸发排盐析出的碳酸钠颗粒不像其他工厂粗大容易沉降分离，颗粒非常细小，悬浮在溶液中难以沉降，盐过滤机滤饼薄而黏稠，滤饼厚度只能达到 2 mm 左右，滤饼含水率高达 40%左右。同时，蒸发强制效的换热管束因碳酸盐和硫酸盐以复盐方式在管束表面析出而大幅降低蒸发换热效率，蒸发的苛性碱浓度从正常的 300 g/L 降低到 260 g/L 左右，难以将系统中的碳酸盐排出。

1.4 降低赤泥沉降性能

铝土矿含硫较高时，生产中赤泥压缩性能变差，分离溢流浮游物高，沉降槽产能降低。分离溢流的浮游物升高后，造成叶滤产能大幅降低，滤布碱煮后产能也难以很快恢复，这可能是含硫矿物大量进入后，促进胶体状铁化合物生成，影响赤泥沉降性能。另外，低价态硫能对絮凝剂造成一定的破坏作用，影响絮凝剂对赤泥的絮凝沉降效果。

1.5 减少碳进入赤泥量

根据铝土矿中的硫和碳在高温溶出过程中反应规律的研究结果[12,17-18]，母液中硫酸盐含量对碳酸盐在溶出赤泥(铝土矿在高温溶出提取氧化铝后的

废渣)中的含量影响较大,随溶液中硫含量的增加,赤泥中的无机碳含量可以大幅降低,存在硫优先于碳进入赤泥固相的规律。工厂在生产中配入高硫铝土矿后,生产系统中的硫增加,溶出过程中无机碳进入赤泥排走的量减少,会加剧系统中的碳酸盐含量上升。

1.6　增加碱的消耗

高硫铝土矿中的硫在高温溶出过程中与溶液中的苛性钠发生一系列的复杂反应,最终将有用的苛性钠变成有害的硫酸钠,硫酸钠与溶出赤泥中的钠硅渣形成复盐进入赤泥固相中,作为废渣排走,造成碱的消耗增加。同时,苛性碱与硫反应后减少在溶出过程中溶出提取氧化铝量,造成氧化铝产量减少、单位能耗增加。

2　高硫铝土矿添加硝酸钠化学氧化工业实践

工厂在最初与多家研究机构开展相关研究,采用添加锌、锰化合物及其他复合添加剂等处理高硫铝土矿试验研究,在实验室得到的效果都很好,但在工业生产试验中得到的效果却差距大,测算下来使用量大、成本高。同时,也采用工厂现场物料用臭氧、双氧水等在实验室进行试验,得到的氧化脱硫效果也明显,但如何大规模工业化应用于生产却鲜有成功方法。后开展科技攻关,发现在高温溶出过程采用硝酸钠作为氧化剂效果也明显,该原料丰富、价格低、添加使用简单,对产品质量及生产没有负面影响,而且硝酸钠氧化低价硫的过程中还会生成生产过程中需要的氢氧化钠,可以代替部分生产中的碱损失,具备工业化应用条件。

2.1　溶出过程添加硝酸钠氧化剂实验室试验

通过在高温溶出过程中添加硝酸钠氧化低价硫试验研究,不论低碱浓度还是高碱浓度,只有温度达到 200 ℃以上时硝酸钠才起到明显的氧化作用,在 100 ℃低温下基本没有任何作用。一水硬铝石溶出温度在 260 ℃以上,在溶出过程中添加硝酸钠,存在如下主要反应:

$$2Na_2S+NaNO_3+3H_2O=Na_2S_2O_3+NH_3\uparrow+3NaOH \tag{8}$$

$$2Na_2S_2O_3+NaNO_3+3NaOH=4Na_2SO_3+NH_3\uparrow \tag{9}$$

$$4Na_2SO_3+NaNO_3+2H_2O=4Na_2SO_4+NH_3\uparrow+NaOH \tag{10}$$

同时硝酸钠还原不彻底时发生如下反应:

$$2Na_2S+4NaNO_3+H_2O\rightarrow Na_2S_2O_3+4NaNO_2+2NaOH \tag{11}$$

NO^{2-} 也能氧化低价态的硫,反应式如下:

$$6Na_2S+4NaNO_2+11H_2O=3Na_2S_2O_3+4NH_3\uparrow+10NaOH \tag{12}$$

$$3Na_2S_2O_3+2NaNO_2+4NaOH+H_2O=6Na_2SO_3+2NH_3\uparrow \tag{13}$$

$$3Na_2SO_3+NaNO_2+2H_2O=3Na_2SO_4+NH_3\uparrow+NaOH \tag{14}$$

溶液中含硫化合物的组成取决于氧化条件,S^{2-}、SO_3^{2-}、$S_2O_3^{2-}$、SO_4^{2-} 浓度与硝酸钠添加量、反应温度、反应时间等有关,S^{2-} 氧化后的最终产物为 SO_4^{2-},硫酸钠在溶出过程中与钠硅渣形成复盐进入赤泥固相排出氧化铝生产流程。

硝酸钠在高温溶出过程中将低价硫 S^{2-} 逐步氧化为高价硫后,减少了羟基硫代铁酸钠的生成,降低高硫铝土矿对产品铁的影响,同时有部分氢氧化钠生成,有利于溶出过程,还可以抵消部分碱耗。在高温溶出试验中添加硝酸钠足够高时,对含硫量大于 0.5%的铝土矿也可以消除低价硫的影响,但氧化效果并不成比例增加,并有部分硝酸钠没有完全参与反应,赤泥固相中的含碱量有所上升,有可能富余的硝酸钠与钠硅渣形成复盐进入赤泥固相造成损失,这需要进一步的机理研究。

2.2　溶出过程添加硝酸钠氧化剂工业试验

工厂用一个溶出机组添加硝酸钠氧化剂作为试验组,另一个溶出机组不添加硝酸钠作为空白组,溶出温度均为(260±2) ℃,每 8 小时取样分析一个点样,对溶出液相中各价态硫、吸光度和溶出赤泥固相中硫、碳的变化跟踪分析,共 107 个样。期间生产用铝土矿含硫多数在 0.2%～0.4%,平均 0.3%,考虑生产可承受成本及避免硝酸钠过量产生损失,硝酸钠根据二价硫含量变化按 1.0～1.5 g/L 添加。

2.2.1　溶出试验机组与空白机组液相中各价态硫和赤泥固相中硫含量对比情况

从溶出试验机组与空白机组液相中 S^{2-}、$S_2O_3^{2-}$、SO_3^{2-}、SO_4^{2-} 含量对比的趋势图(图 1～5)来看,S^{2-} 的差异规律比较明显,试验组的趋势曲线整体保持在空白组的下方(图 1),平均值比空白组低 13.1%;其次是 SO_3^{2-},试验组的趋势曲线基本在空白组的上方(图 3),平均值比空白组高 11.3%,分析是低价硫氧化为高价硫造成的;其他各价态硫离子两个组的趋势曲线相互交错,差异规律不明显。从

溶出赤泥固相中的硫含量趋势图(图5)来看,试验组的趋势曲线整体保持在空白组的上方,平均值比空白组高16.2%,表明试验组铝土矿中的低价硫先经反应进入溶出液相中,被硝酸根逐级氧化为硫酸根,硫酸根在溶出过程中以复盐方式进入溶出赤泥固相中,最终随赤泥排出生产流程。

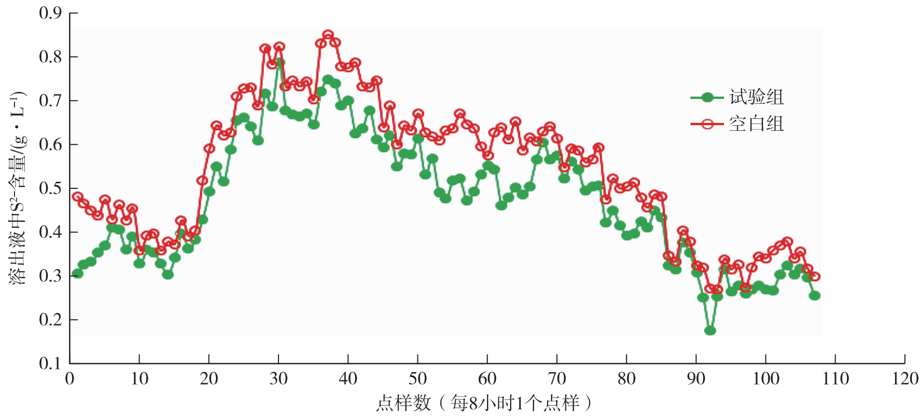

图1 试验组与空白组溶出液相中S^{2-}含量

Fig. 1 Content of S^{2-} in digestion solution of experimental group and blank group

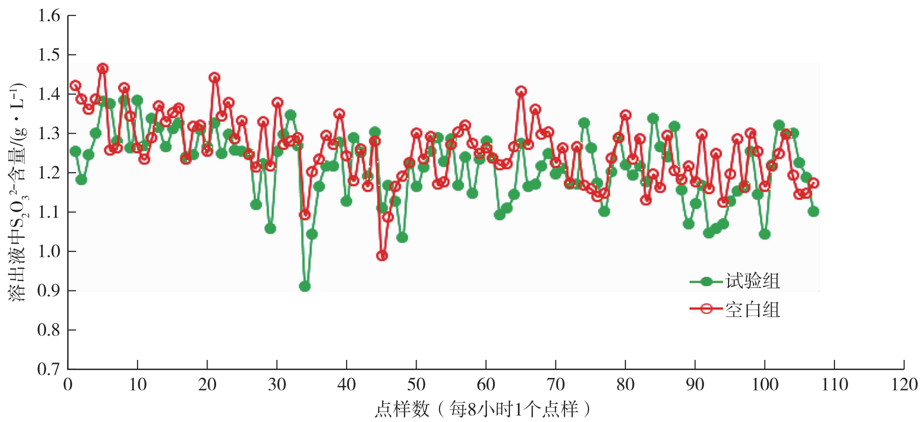

图2 试验组与空白组溶出液相中$S_2O_3^{2-}$含量

Fig. 2 Content of $S_2O_3^{2-}$ in digestion solution of experimental group and blank group

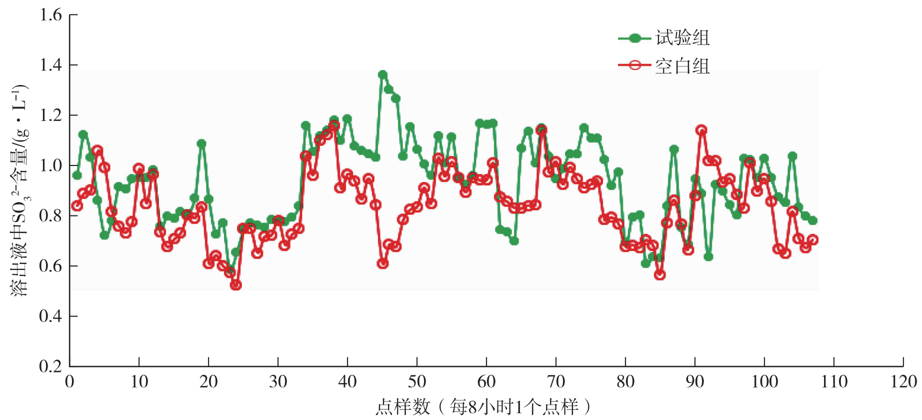

图3 试验组与空白组溶出液相中SO_3^{2-}含量

Fig. 3 Content of SO_3^{2-} in the digestion solution of experimental group and blank group

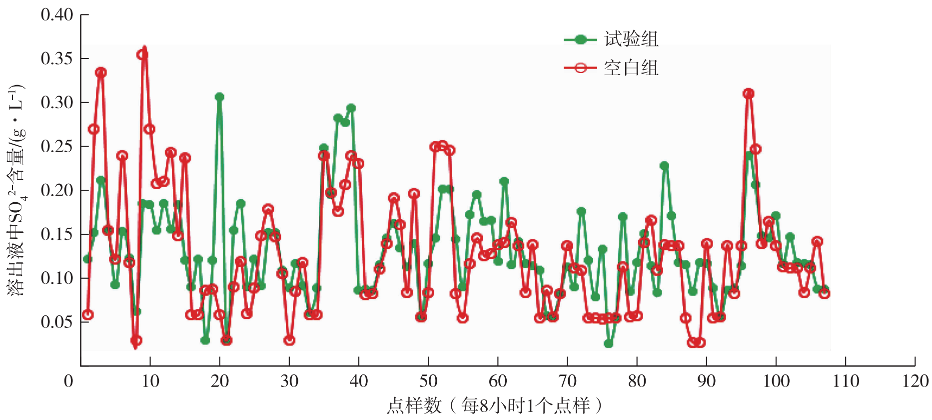

图 4　试验组与空白组溶出液相中 SO_4^{2-} 含量

Fig. 4　Content of SO_4^{2-} in digestion solution of experimental group and blank group

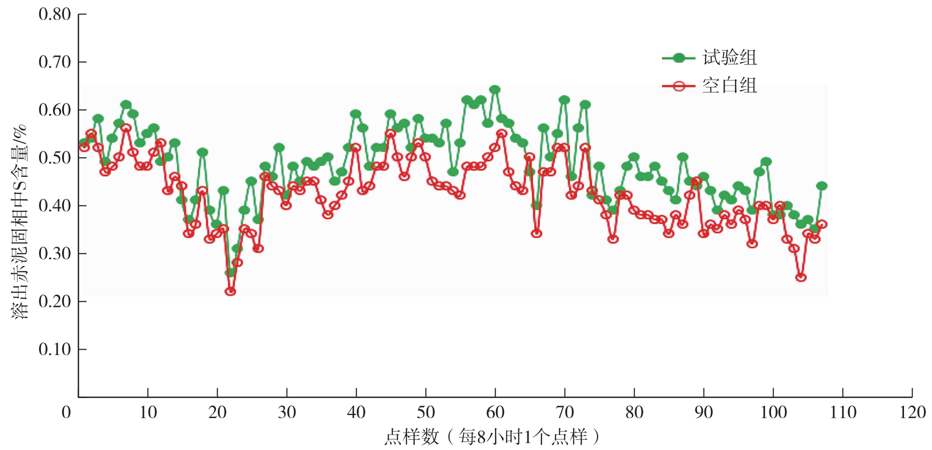

图 5　试验组与空白组溶出赤泥固相中 S 含量

Fig. 5　Content of S in solid phase of dissolved red mud in experimental group and the blank group

2.2.2　溶出试验机组与空白机组液相吸光度对比情况

溶出液中有机物微弱的氧化效果很难通过分析溶液中有机物来区别，但可以通过检测吸光度的变化来表征。从图 6 可以看出，在工业试验添加硝酸钠量不富余的情况下，试验组与空白组的吸光度趋势曲线总体相互交错，看不出差异规律，统计平均值只有 1.3%的降低，说明在此条件下有机物很难被硝酸钠氧化。

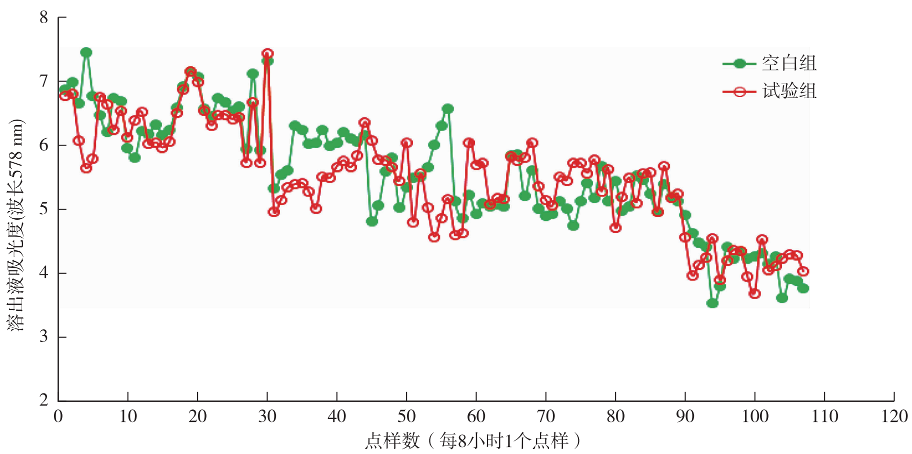

图 6　试验组与空白组溶出液相吸光度

Fig. 6　Absorbance of digestion solution in experimental group and blank group

2.2.3 溶出试验组与空白机组溶出赤泥固相中碳含量对比

从溶出赤泥固相中的碳含量趋势图(图7)来看,试验组的趋势曲线基本保持在空白组的下方,平均值比空白组低9.9%。造成碳进入赤泥固相降低的原因,主要是试验组中硫酸盐以复盐方式进入溶出赤泥固相中的量增加,影响碳酸盐与钠硅渣形成复盐进入赤泥[12]。

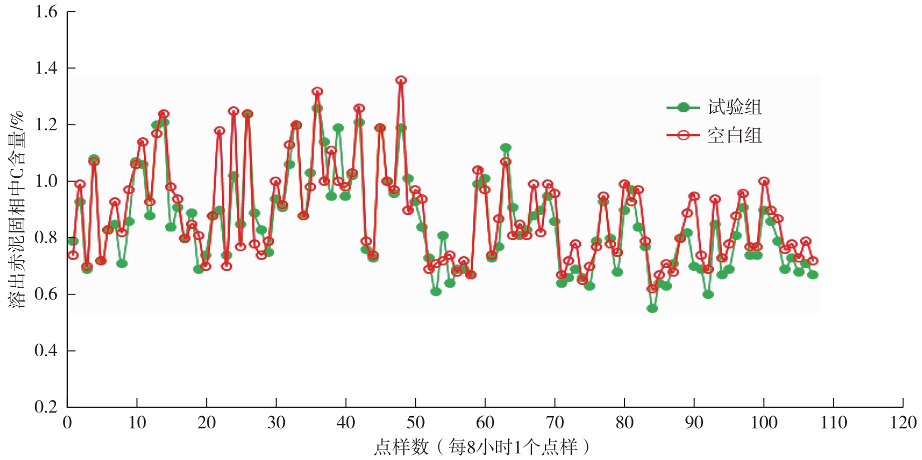

图7　试验组与空白组溶出赤泥含碳量

Fig. 7　Carbon content of dissolved red mud in experimental group and blank group

2.3 工业生产中精液中 S^{2-} 含量与产品铁含量的关系

工业试验分析数据表明,在溶出过程添加硝酸钠氧化高硫铝土矿反应产生的各种低价硫中,试验组与空白组 S^{2-} 的变化趋势差异最明显,也与杂质铁进入溶液的反应最相关,在生产中,工厂确定以跟踪溶出液经稀释精制后的精液(精制铝酸钠溶液)中的 S^{2-} 含量,来管控高硫铝土矿的配用量和产品氧化铝中杂质铁含量。表1为工厂某年连续8个月精液中 S^{2-} 含量与氧化铝产品铁含量(以氧化铁表示)的对应变化情况。

从表1可以看出,随精液中 S^{2-} 含量的升高或降低,产品铁含量同时升高或降低,S^{2-} 含量稳定控制在0.3 g/L以内,产品铁含量可以保持在0.015%以内,满足一级品要求。但需要注意的是,由于各厂铝土矿石中有机物等其他杂质的差异,对 S^{2-} 的稳定性有不同的影响,以及产品铁含量的基准数不同,精液中 S^{2-} 控制的范围要结合自身实际情况确定合适的控制值。

表1　精液中 S^{2-} 含量与氧化铝产品铁含量变化表

Table 1　Changes of S^{2-} content in semen and iron content in alumina products

月份	精液中 S^{2-}/(g·L^{-1})	S^{2-}变化值/(g·L^{-1})	氧化铝产品中Fe_2O_3/%	Fe_2O_3变化值/百分点
第1个月	0.24	/	0.013	/
第2个月	0.26	0.02	0.014	0.001
第3个月	0.36	0.10	0.017	0.003
第4个月	0.31	−0.05	0.015	−0.002
第5个月	0.22	−0.09	0.011	−0.004
第6个月	0.25	0.03	0.012	0.001
第7个月	0.29	0.04	0.013	0.001
第8个月	0.35	0.06	0.014	0.001

注:* 变化值为下一个月与上一个月的差值

3 结论及建议

1)明确了在高硫铝土矿溶出过程中添加硝酸钠化学氧化脱硫的反应原理,添加少量硝酸钠可以实现高硫铝土矿与低硫铝土矿的搭配使用,铝土矿平均含硫量可以长期保持到0.3%左右,产出的氧化铝产品铁含量满足一级品要求,生产能稳定运行,并减缓对设备的腐蚀。

2)在工业生产过程中精液的 S^{2-} 含量与产品铁含量关系规律最为明显,可以作为调整、控制高硫铝土矿配用量和硝酸钠添加量的主要参考依据,一般控制在0.3 g/L以内。在工业生产过程中添加硝酸

钠不过量时,在溶出过程中对有机物基本没有氧化作用,不能实现氧化去除有机物。

3)在工业生产过程中添加硝酸钠试验组的赤泥中硫含量增加,低价硫通过逐级氧化后最终以硫酸根复盐方式进入赤泥固相中排走,不会造成进入溶液的硫增加。但赤泥中硫的进入会减少碳的进入,影响碳的排出。

4)添加硝酸钠化学氧化法解决了搭配部分高硫铝土矿对生产影响的问题,可以在工业生产中推广应用。同时,在工业生产中可以进一步试验处理0.3%～0.7%含硫铝土矿的硝酸钠添加量及技术经济效果,从而大幅增加高硫铝土矿的搭配使用量。

参考文献

[1] 李林松,金会心,刘文纪,等.铝土矿资源状况及高硫铝土矿脱硫方法[J].广州化工,2021,49(17):18-22.
LI L S,JIN H X,LIU W J,et al. Status of high sulfur bauxite resources and desulfurization methods[J]. Guangzhou Chemical Industry,2021,49(17):18-22.

[2] 崔萍萍,黄肇敏,周素莲.我国铝土矿资源综述[J].轻金属,2008(2):55-58.
CUI P P, HUANG Z M, ZHOU S L. Overview of bauxite resources in China[J]. Light Metal,2008(2):55-58.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 吕国志.利用高硫铝土矿生产氧化铝的基础研究[D].沈阳:东北大学,2010.
LYU G Z. Basic research on alumina production by using high-sulfur bauxite[D]. Shenyang: Northeastern University,2010.

[6] 周雪娇,谭飞,艾广通,等.高硫铝土矿溶出液中硫离子赋存形态分析[J].轻金属,2022(1):6-9.
ZHOU X J, TAN F, AI G T, et al. Analysis on the occurrence of sulfur ions in the digestion solution of high-sulfur bauxite[J]. Light Metals,2022(1):6-9.

[7] 谢巧玲,陈文汨,杨权平.4 种钢在含硫拜耳液中的腐蚀行为[J].中南大学学报,2014,45(8):2559-2565.
XIE Q L, CHEN W M, YANG Q P. Corrosion behavior of four kinds of steels in sulfide-containing Bayer liquor[J]. Journal of Central South University, 2014,45(8):2559-2565.

[8] 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.

[9] 杨夏琼,陈朝铁,李军旗,等.硫对钢材碱性腐蚀的研究综述[J].表面技术,2015(9):89-95.
YANG X Q, CHEN C Y, LI J Q, et al. Review on sulfur corrosion of steel in alkaline environment[J]. Surface Technology,2015(9):89-95.

[10] 郝文魁,刘智勇,李晓刚,等.16Mn 钢及其热影响区在碱性硫化物环境中的应力腐蚀行为与机理[J].金属学报,2013,49(7):881-889.
HAO W K, LIU Z Y, LI X G, et al. Stress corrosion cracking and its mechanism of 16Mn steel and heat-affected zone in alkaline sulfide solutions[J]. Acta Metallurgica Sinica,2013,49(7):881-889.

[11] 吴志根,闻立昌.钢在铝酸钠溶液中的应力腐蚀开裂[J].中国腐蚀与防护学报,1991,11(4):335-343.
WU Z G, WEN L C. Stress corrosion cracking of steel in sodium aluminate solution[J]. Journal of Chinese Society of Corrosion and Protection, 1991, 11(4):335-343.

[12] 李其贵,刘永铁,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.

[13] 彭志宏,陈科云,李小斌,等.铝酸钠溶液蒸发过程中的结垢与防垢[J].中南大学学报(自然科学版),2008,39(1):69-74.
PENG Z H, CHEN K Y, LI X B, et al. Scaling and anti-scale in evaporation process of sodium aluminate solutions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2008,39(1):69-74.

[14] 王家伟,贾永真,李军旗,等.硫化钠对铝酸钠种分母液蒸发排盐的影响[J].湿法冶金,2014,33(1):32-37.
WANG J W, JIA Y Z, LI J Q, et al. Effect of sodium sulfide on salt removal of sodium aluminate

solution[J]. Hydrometallurgy of China, 2014, 33(1): 32-37.

[15] 魏国令,李军旗,陈朝铁,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 C Y, et al. Effect of sulfur on salt elimination from $NaAlO_2$ solution bearing $Na_2C_2O_4$[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2016(7):26-29.

[16] 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):20-20.
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):20-20.

[17] 李其贵,刘永铁,尹中林.高碳铝土矿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.

[18] 武世鹏,潘晓林,吴鸿飞,等.碳酸盐在铝土矿溶出过程中的脱除行为[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(1):33-39.
WU S P, PAN X L, WU H F, et al. Removal behavior of carbonate in bauxite digestion process[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(1):33-39.

(上接第 44 页)

LU F H. Application of automation technology in nonferrous metallurgy industry[J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11(26):170-172.

[15] 赵汝真,魏琦峰,任秀莲.盐湖提锂的萃取分离研究现状与展望[J].应用化工,2021,50(6):1690-1693,1703.
ZHAO R Z, WEI Q F, REN X L. Research status and prospect of extraction and separation of lithium from salt lake[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(6):1690-1693, 1703.

[16] 王苏,贾永忠,王兴权,等.4-硝基苯并-15-冠醚-5 液液萃取分离锂同位素[J].盐湖研究,2019,27(3):62-67.
WANG S, JIA Y Z, WANG X Q, et al. Separation of lithium isotopes by liquid-liquid extraction of 4-nitrobenzo-15-crown ether-5[J]. Journal of Salt Lake Research, 2019, 27(3):62-67.

[17] 房孟钊,李伟.从污酸中萃取铼的工艺试验研究[J].中国有色冶金,2021,50(6):103-107.
FANG M Z, LI W. Process tests of extracting rhenium from waste acid[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(6):103-107.