

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2023.04.004

高硫铝土矿脱硫技术研究现状与发展趋势

张歆, 吴泽港, 刘凤琴, 赵洪亮, 谢明壮

(北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要: 面对我国优质铝土矿资源短缺的问题, 开发复杂难选的高硫铝土矿资源, 有助于保障我国铝土矿资源战略安全, 赋能氧化铝工业的可持续发展。我国高硫铝土矿储量丰富, 但因硫对拜耳法生产过程造成危害而无法高效利用。综述了浮选法、焙烧法、过程脱硫等高硫铝土矿脱硫方法的研究现状和技术水平, 并展望了今后的研究方向和发展趋势。

关键词: 高硫铝土矿; 脱硫; 氧化铝; 焙烧; 研究现状; 发展趋势

中图分类号: TF821

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2023)04-0020-08

Research Status and Development Trend of High-Sulfur Bauxite Desulfurization Technology

ZHANG Xin, WU Ze-gang, LIU Feng-qin, ZHAO Hong-liang, XIE Ming-zhuang

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In the face of the shortage of high-quality bauxite resources in China, the utilization of complex high-sulfur bauxite resources will help to ensure strategic safety of bauxite resources and sustainable development of alumina industry. The reserves of high-sulfur bauxite are abundant in China, but it cannot be used efficiently because of the hazards of sulfur to the Bayer process. The research status and technical level of high-sulfur bauxite desulfurization methods such as flotation method, roasting method and dissolution desulfurization were summarized, and the future research direction and development trend were prospected.

Key words: high-sulfur bauxite; desulfurization; alumina; roasting; research status; development trend

铝是国民经济发展和国防建设等领域的重要战略金属, 目前我国铝工业正处于稳定发展阶段, 然而国内铝土矿资源供应能力有限, 难以应对氧化铝工业日益增长的需求。中国铝土矿的探明储量约10亿吨, 仅占全球总储量的3%, 且主要为高硅、铝硅比低、伴生元素杂的一水硬铝石型铝土矿, 平均铝硅比(A/S)仅为6左右, 高品位铝土矿资源匮乏的问题日益凸显。2021年我国铝土矿总消费量为13360万吨, 对外依存度68.3%^[1], 存在严重的资源安全保障风险。目前国内高品位铝土矿日益贫乏, 低品位铝土

矿大量进入市场, 作为远期储备资源的高硫铝土矿已需开采利用。

高硫铝土矿为硫含量大于0.7%的铝土矿, 因含硫量较高对生产造成危害而难以通过传统拜耳法进行经济处理。若开发利用国内复杂难处理的高硫铝土矿资源用于氧化铝工业, 可延长我国铝土矿服务年限, 对缓解我国铝土矿资源压力将起到积极作用。本文针对高硫铝土矿的成分特点, 综述了目前该类型矿物典型的脱硫方法的研究和应用现状, 为高效开发利用高硫铝土矿资源提供依据。

收稿日期: 2022-12-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2904401)

作者简介: 张歆(1998-), 女, 壮族, 硕士研究生; **通信作者:** 刘凤琴(1962-), 女, 教授, 博士生导师

1 高硫铝土矿资源分布情况

中国已探明的高硫铝土矿资源量超过 10 亿吨,其储量约占一水硬铝石型铝土矿总资源的 14%,分布在河南(27%)、贵州(22%)、广西(18%)、重庆(10%)、山东(8%)、云南(5%)等地,其余 10%分布在其他地区,其中 A/S>7 的高品位矿占高硫铝土矿的 57.2%。

贵州省的高硫铝土矿资源主要集中于遵义和清镇地区,其储量占全省的 95%以上,矿石特点为高

铝、中低硅、中高铝硅比、高硫。贵州清镇猫场矿区的高硫铝土矿储量为 7 182.23 万吨,铝土矿氧化铝含量为 56%~75%,A/S 为 4~12,硫含量为 0.8%~4%;遵义地区铝土矿氧化铝平均含量为 65%,平均 A/S 为 6.9,平均硫含量在 1.1%以上。河南省的高硫铝土矿资源主要是煤矿开采后剩余的煤下矿,因此含硫和含铁量均较高。广西平果高硫铝土矿的平均氧化铝含量为 64.69%,A/S 为 7~10,硫含量为 1.5%~7%^[2-4]。典型高硫铝土矿的成分见表 1。

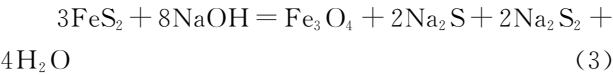
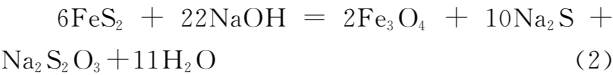
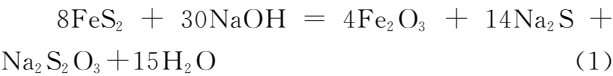
表 1 高硫铝土矿的化学成分

Table 1 Chemical composition of high-sulfur bauxite									/%
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	LOI	S
61.68	14.02	3.95	2.34	0.35	0.46	0.046	0.56	15.07	1.45
52.64	14.79	8.79	1.92	1.03	0.52	0.044	0.32	16.68	1.33
53.43	14.25	9.84	2.00	0.66	0.44	0.048	0.21	15.72	1.58
57.15	13.02	10.16	2.36	0.36	0.54	0.051	0.43	14.23	1.21

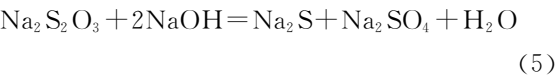
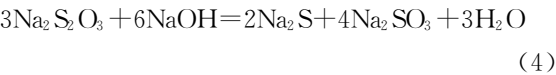
2 高硫铝土矿含硫对氧化铝生产的影响

高硫铝土矿中的硫元素绝大部分以黄铁矿(FeS₂)及其异构体白铁矿、胶黄铁矿等矿物形式存在,其含量占总硫量的 99%以上,还有微量的硫酸盐矿物如石膏(CaSO₄)。在拜耳法生产工序中,这些含硫矿物会发生复杂的氧化还原反应,以 SO₃²⁻、SO₄²⁻、S²⁻、S₂O₃²⁻等形态进入铝酸钠溶液,其中硫化物形式的硫占 90%以上,在蒸发液中主要有 SO₄²⁻。这些离子会对拜耳法各生产过程造成危害,进而影响氧化铝的产品质量^[5-6]。

在溶出阶段,黄铁矿与碱液的反应式为:



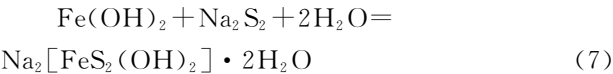
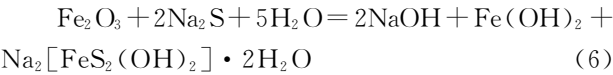
在 230~235 ℃ 的溶出条件下,或在强氧化剂条件下,S₂O₃²⁻继续和碱液发生反应(式 4~5)。而 SO₃²⁻、S₂O₃²⁻、S₂²⁻、S²⁻等低价态的含硫离子会和 O₂ 反应,最终氧化成 SO₄²⁻。



这些含硫物质严重影响了氧化铝生产过程的正

常进行,主要表现在以下方面:

1)生成羟基硫代铁酸钠(Na₂[FeS₂(OH)₂]·2H₂O),导致溶出体系的铁污染,进而影响氧化铝的品位。在高温溶出时,溶液中的 Na₂S 和 Na₂S₂ 易与铁反应生成羟基硫代铁酸钠(式 6~7)。羟基硫代铁酸钠在铝酸钠溶液中的稳定性和溶解度较高,导致氧化铁杂质不形成赤泥,而是溶于铝酸钠溶液,造成溶出体系的铁污染^[7-8],同时使铝酸钠溶液的黏度增加,降低赤泥的沉降性能。



羟基硫代铁酸钠在铝酸钠溶液稀释或冷却时溶解度下降,与氢氧化铝一同沉淀析出,从而导致氧化铝产品铁含量超标,大幅降低产物的白度和纯度^[9]。

2)增加碱耗;导致溶出体系中硫酸盐的富集,进而对氧化铝产品的质量造成影响。含硫矿物在溶出工序中易和碱液发生反应,增加碱的消耗量,铝土矿中每 1 kg 的硫会消耗 1~1.5 kg 的氢氧化钠^[10],同时还会降低氧化铝的溶出率。另外,硫酸盐的富集会导致分解过程中氢氧化铝晶体的生长受到较大的影响,导致无法获得合格的砂状氧化铝产品。

3)侵蚀钢制设施;增加蒸发系统负荷。铝酸钠溶液中的硫会加速各种钢铁设备的腐蚀。如某工厂使用了含硫 0.5%以上的铝土矿,2 个月后套管预热器、过料管、阀门等设备暴发性地出现鱼鳞状腐蚀现

象^[11]。铝酸钠溶液中的硫酸钠含量超过 8 g/L 后,会导致在母液蒸发浓缩过程中过早析出碳酸矾($2\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3$),使蒸发器组和出料系统结疤,进而影响蒸发性能,增加能耗。

3 高硫铝土矿脱硫方法研究现状

目前针对高硫铝土矿的处理方法主要可分为两类:第一类是在拜耳法生产氧化铝前,通过预处理的方式降低铝土矿中的硫含量,如浮选法、焙烧法、微生物法、电化学法;第二类是氧化铝生产过程中的脱硫,将铝酸钠溶液中存在的硫元素去除,主要分为沉淀法和氧化法。

3.1 预处理脱硫

3.1.1 浮选法

浮选脱硫是较为经济的高硫铝土矿源头阻断提质分选方法,它利用硫化矿与氧化矿在浆液中颗粒表面性质的差异进行分离,不仅符合“浮少抑多”的浮选原则,同时具有流程简单、工艺环保等优势。主要步骤是将矿石破碎筛分后在搅拌器中搅拌,加入浮选药剂后,通过硫、铝矿物表面性质的差异完成分离,获得硫、铝精矿,实现资源的综合利用。影响浮选过程的主要因素有矿石的性质、浮选剂的选择及用量、浮选工艺参数、浮选设备、浮选工艺流程等。

苏联较早地采用浮选法开展实验室研究并进行工业试验^[12]。乌拉尔工学院用浮选法处理含硫 2% 的高硫铝土矿,最终获得含硫低于 0.41% 的精矿,氧化铝回收率为 99.17%。

当使用不同地区、不同成分的高硫铝土矿进行浮选脱硫处理时,硫含量的高低将对浮选过程产生不同程度的影响,则需针对性地调整改善浮选工艺条件。严朕^[13]研究了铝土矿中硫对磨矿浮选过程的影响,矿石硫含量升高会导致磨矿难度增加;在不同浮选温度下矿浆 pH、氧化铝回收率和精矿 A/S 也都随硫含量升高呈现不同程度的下降趋势。

中铝郑州有色金属研究院分别针对山西、贵州、重庆、河南的高硫铝土矿开展浮选试验研究,通过调整浮选药剂种类及工艺参数,在硫含量为 1.5%~2.0% 时,所得铝精矿硫含量小于 0.4%,已在贵州、山西等地投入产业化应用^[14-15]。中南大学、东北大学、贵州大学等^[16-18]对高硫铝土矿浮选脱硫药剂与工艺也开展了相关研究,在原矿含量为 0.96%~2.08% 时,可获得含硫量为 0.22%~0.65% 的铝精矿。

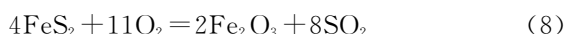
传统浮选法对硫含量小于 2% 的高硫铝土矿可

达到较好的效果,能耗较低。但随着矿石品位降低,硫含量升高,今后浮选法需要进一步解决脱硫效率低、浮选药剂消耗量大、难以高效兼顾脱硫和脱硅、设备腐蚀严重、废水处理、硫精矿品质低、浮选药剂残留等问题^[19-20]。

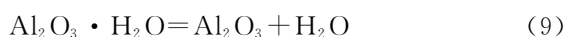
3.1.2 焙烧法

焙烧脱硫是一种高效短流程火法提质技术,是指通过高温焙烧使高硫铝土矿中的含硫矿物分解生成二氧化硫气体,从而实现脱硫的预处理方法。高硫铝土矿在焙烧过程中主要发生下述反应。

黄铁矿脱硫:



一水硬铝石脱水:



成思萌等^[21]对高硫铝土矿开展热红联用分析,结果表明,高硫铝土矿脱硫的温度范围为 388.0~570.4 °C。黄铁矿脱硫的放热能够在一定程度上补偿一水硬铝石脱水的吸热,有利于降低焙烧能耗。

实验室一般选用马弗炉进行焙烧试验。吴鸿飞等^[22]采用马弗炉对低品位高硫铝土矿进行焙烧试验,在焙烧温度 600 °C 和时间 180 s(矿石放入炉中开始升温并计时,升温速率 5 °C/min)时,焙烧后铝土矿中硫含量从 1.20% 降为 0.29%,脱硫率为 75.83%。陈咏梅等^[23]通过适当降低焙烧反应温度、延长反应时间的方式在脱硫的同时抑制一水硬铝石分解脱水,采用 15~20 min 的焙烧时间和 460~470 °C 的焙烧温度,最终焙烧矿的硫含量由 3.8% 降至 0.5% 以下。在静态焙烧的条件下,反应生成的气体难以及时排出,从而影响脱硫反应速率。

焙烧脱硫的工业或半工业化试验最初主要选用回转窑。北京矿冶研究总院(现矿冶科技集团有限公司)^[24]曾采用回转窑对我国一水硬铝石型高硫铝土矿进行焙烧脱硫处理,在焙烧温度和焙烧时间分别为 620 °C 和 30 min 的条件下,铝土矿中以硫化物形式存在的硫由 3.2% 降到 0.1%,但硫酸盐形式的硫由 0.17% 上升到 0.59%。吕国志等^[25]在焙烧温度 750 °C、焙烧时间 60 min 的条件下,铝土矿硫含量由 1.82% 降至 0.7% 以下。在一定程度上,采用回转窑焙烧可氧化大部分的硫,但需要克服焙烧时间长、能耗高、矿粉处于半堆积态而加热不均匀导致“欠烧”或“过烧”的问题^[26]。

目前开展的高硫铝土矿焙烧脱硫研究主要选用流态化焙烧,所用设备一般为沸腾炉、悬浮炉、循环流化床等。北京矿冶研究总院^[27]开展连续沸腾焙

烧试验,在 620 ℃下铝土矿硫氧化率大于 90%,硫化物形式的硫降至 0.10%,但硫酸盐形式的硫由 0.17% 提高到 0.59%,原因是铁、钙在焙烧过程中可能会发生固硫反应,导致焙烧矿中硫酸盐形式的硫含量增加。随后北京矿冶研究总院^[28]在此基础上开展循环流态化焙烧连续试验,在 550~600 ℃的焙烧温度下,焙烧矿中全硫含量由 1.44% 降至 0.27%~0.58%,硫化物形式的硫为 0.10%~0.20%,硫氧化率大于 93%。万平玉等^[29]研究了一种高硫铝土矿的氧化脱硫—磁化除铁预处理方法,使用流态化焙烧炉,在 480~680 ℃、5~30 min 的焙烧条件下,可将硫含量从 1%~5% 降至 0.5% 以下;添加 10%~20% 氧化铝质量的 FeS_2 配矿,可实现自热/半自热氧化焙烧脱硫;控制 O_2/FeS_2 摩尔比在 0.9~2.5,使矿粉中的铁绝大多数转化为磁性的 Fe_3O_4 ,后通过磁选分离 Fe_3O_4 。

悬浮焙烧通常需要较高的温度和较细的矿粉粒度,气固两相反应面积大,因此传热、传质和反应速率更高,几秒内便可完成脱硫反应。陈延信等^[30-31]采用悬浮态焙烧装置开展脱硫试验,在 610~640 ℃的焙烧温度下可实现快速脱硫,焙烧矿中硫化物形式的硫降至 0.16% 以下。

焙烧法在高效脱硫的同时还除去了有机物的干扰,提高氧化铝生产种分的分解率;并且一水硬铝石在高温下脱水,改变晶体的微观结构,改善矿石的溶出性能。但焙烧时间过长不但会增加能耗与成本,而且会使一水硬铝石脱水形成的过渡型氧化铝逐渐转变成形态结构完整的刚玉,不利于提高氧化铝溶出率。氧化焙烧条件的控制是焙烧脱硫方法工业化应用的关键,需要在高效脱硫的同时尽可能降低焙烧能耗和成本,提高焙烧矿质量的稳定性;同时矿石地区差异性对焙烧效果的影响、焙烧过程多相反应热力学与动力学、氧化铝晶型结构转化等问题也值得深入研究。

目前焙烧法相关研究采用的温度多为 600 ℃以上的高温,虽然高温能将硫快速脱除,但不利于节约焙烧能耗与生产成本。为探究低温条件下的焙烧脱硫效果,将硫含量为 1.38% 的高硫铝土矿破碎至 $-0.150+0.270\text{ mm}$ ($-50+100$ 目),在焙烧温度分别为 500、525 ℃的条件下进行焙烧脱硫试验。焙烧装置采用立式管式炉,空气从炉底自下而上通入炉内。试验结果见图 1。从图 1 可知,焙烧前期脱硫反应迅速,硫含量快速下降,500 ℃下焙烧 10 min 后,铝土矿中绝大部分的硫已被脱除,硫含量为 0.37%,脱硫率为 74.45%,10 min 后趋于平稳。

525 ℃的脱硫速率更高,焙烧 7 min 后硫含量为 0.31%,脱硫率为 77.9%,即高硫铝土矿在低温焙烧条件下同样能够实现高效脱硫,同时有利于降低焙烧能耗。

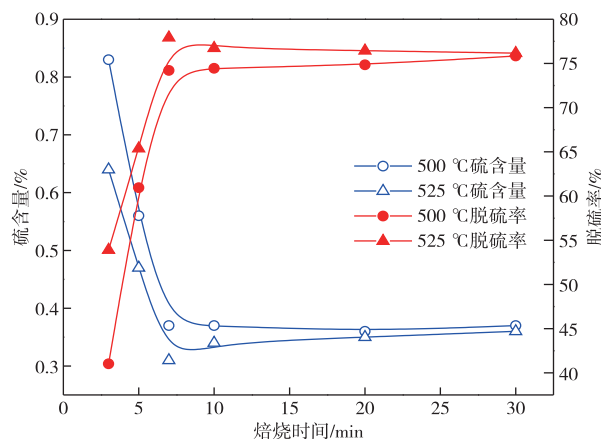


图 1 焙烧矿的硫含量与脱硫率

Fig. 1 Sulfur content and desulfurization rate of roasted ore

3.1.3 微波焙烧

也有研究^[32-34]采用微波焙烧的方式对高硫铝土矿进行脱硫预处理。微波具有选择性加热的特性,即铝土矿中不同矿物成分对微波的吸收能力不同,其中黄铁矿的吸波性能明显高于一水硬铝石和高岭石的吸波性能。在微波焙烧条件下黄铁矿的 Fe-S 键破裂, S^{2-} 不断向表面扩散与氧气接触,实现黄铁矿的快速加热脱硫。

金会心等^[35]对贵州某矿区的高硫铝土矿进行微波焙烧预处理,研究表明,在 600 ℃焙烧 15 min,铝土矿中全硫含量从 2.01% 降低到 0.32%,脱硫率达 85% 左右。杨黔等^[36-37]研究了不同微波焙烧条件下高硫铝土矿的脱硫效果,当焙烧温度由 100 ℃升高到 600 ℃,脱硫率提高约 30%;而焙烧时间由 2 min 延长至 20 min,脱硫率提高约 12%,说明温度对微波焙烧脱硫的影响更显著。但当焙烧温度高于 400 ℃时,焙烧矿出现大量刚玉相,导致氧化铝相对溶出率下降。

微波焙烧具有焙烧温度低、加热速度快、加热均匀、短时高效的优点,具有较好的发展前景。目前微波焙烧脱硫仍处于实验室研究阶段,需要突破工业化成本较高、大批量生产条件下脱硫效果难以保证等条件的限制。

3.1.4 微生物法

一些微生物存在一定的氧化能力,可以将黄铁

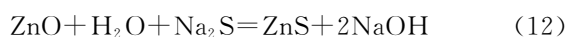
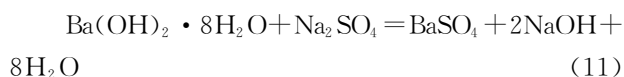
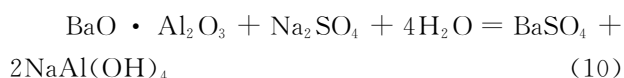
矿中的低价硫离子氧化成 SO_4^{2-} , 从而实现高硫铝土矿的生物氧化脱硫。周吉奎等^[38]使用从高硫煤矿中分离出的3种氧化亚铁硫杆菌对高硫铝土矿进行生物氧化浸出脱硫试验, 3种菌株的对黄铁矿的脱硫率均超过74%, 并使高硫铝土矿的硫含量由3.83%降低到0.69%。李寿朋等^[39]在不同地点选取2种铁硫氧化菌群对高硫铝土矿进行脱硫试验, 结果表明2种菌群的脱硫率分别为50.19%和41.27%, 且矿石驯化对提高脱硫率有正面作用。

微生物脱硫的生产工艺成本和能耗较低, 可以有效减少环境污染, 但目前开展的研究相对较少, 且仍处于试验阶段。要促进微生物脱硫技术市场化, 需要进一步解决筛选特定菌种、生产环境要求较高、过程不易控制、生产周期长、脱硫效果不稳定等问题。

3.2 生产过程中脱硫

3.2.1 沉淀法

沉淀法主要是在铝酸钠溶液中添加钡盐(如铝酸钡、氢氧化钡)、氧化锌、石灰等与溶液中的 SO_4^{2-} 或 S^{2-} 反应形成沉淀脱除^[40-42]。铝酸钡、氢氧化钡、氧化锌的主要脱硫反应如式10~12所示。张念炳等^[43]比较了铝酸钡和氢氧化钡对种分母液的脱硫效果, 结果表明, 氢氧化钡较铝酸钡的脱硫效果更好, 脱硫时间更短, 速率更快。徐颖鹏等^[44]将氧化锌和铝酸钡混合研磨后作为复合脱硫剂, 当铝土矿硫含量为1.1%时, 加入理论添加量14%的氧化锌和40%的铝酸钡, 硫溶出率从18.4%降至9.65%; 氧化锌起到主要脱硫作用, 而铝酸钡起到脱碳的作用, 脱硫效果不明显。



沉淀法具有工艺简单的优点, 然而理论上只能脱除单一形态的硫, 对硫代硫酸根等存在于循环母液中的其他价态的硫去除效果有限, 并且由于钡盐、锌盐等脱硫剂的价格较高, 当铝土矿硫含量较高时脱硫成本也相对增加。

3.2.2 氧化法

氧化法主要是在溶出过程中加入氧化剂(如氧气、硝酸钠), 将铝酸钠溶液中 S^{2-} 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 、 SO_3^{2-} 等低价态硫离子氧化成 SO_4^{2-} , 然后在蒸发工序中析出达到除硫的目的^[45-47]。胡小莲等^[48]采用往高压

釜内通入氧气的湿式氧化法脱除 S^{2-} , 当 S^{2-} 浓度31.2 mmol/L、氧气压力3.0 MPa、反应温度200℃时, S^{2-} 的脱除率达到99%。彭欣等^[49]采用硝酸钠和空气进行脱硫试验, 硝酸钠可以将 S^{2-} 完全脱除, 但无法有效去除 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$; 通入压缩空气仅能将少量 S^{2-} 氧化, 而对 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 、 SO_3^{2-} 没有氧化效果。

氧化法可将铝酸钠溶液中大部分 S^{2-} 氧化清除, 但对其他形态的硫氧化效果不明显, 未来也需要进一步改善固体氧化剂消耗量大、投资成本高、钢质设备腐蚀、存在安全隐患等问题。

4 结语

为了有效利用高硫铝土矿资源, 缓解我国铝工业的矿产资源压力, 开展高效低成本无污染的高硫铝土矿脱硫新工艺的研究是当前我国氧化铝工业技术进步的一个重要课题。

现有的高硫铝土矿脱硫方法各有优缺点, 方法的选择主要在于其经济性和操作性。对于焙烧脱硫而言, 该方法可以克服资源利用率降低、增加水分蒸发和有机物破坏氧化铝生产等弊病, 脱硫率可达较高水平; 在低温焙烧条件下铝土矿可达到活化效果, 有利于提高溶出性能; 同时研究低温焙烧工艺能进一步降低能耗和成本, 有利于产业化实施应用。

高硫铝土矿中的硫、硅、铁等矿物分布粒度细, 各矿相间赋存关系复杂, 在焙烧和溶出过程等多相多场的复杂体系中, 有价元素与杂质元素解离、富集、分离机制不明。因此对焙烧脱硫过程热力学反应特性和脱水、脱硫反应动力学行为, 不同条件对矿物的物相转化、分离富集效率的影响规律等问题都还值得深入研究。

参考文献

- [1] 刘凤琴, 邱定蕃, 顾松青, 等. 我国铝冶炼工业的竞争力分析及发展趋势[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 561-572.
- [2] LIU F Q, QIU D F, GU S Q, et al. Analysis of competitiveness of China's aluminum industry in the world and its development trend[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(4): 561-572.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 芦东. 高硫铝土矿生产冶金级氧化铝的工艺技术研

- 究[D]. 沈阳:东北大学,2018.
- LU D. technical research on metallurgical grade alumina production by using high-sulfur bauxite[D]. Shenyang: Northeastern University,2018.
- [4] 张伦和. 铝土矿资源合理开发与利用[J]. 轻金属,2012(2): 3-11.
- ZHANG L H. Reasonable development and utilization of bauxite resource[J]. Light Metals,2012(2):3-11.
- [5] 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.
- [6] 宋超,彭志宏,魏欣欣,等. 黄铁矿在拜耳法溶出过程中的反应行为研究[J]. 有色金属科学与工程,2011,2(5): 1-5.
- SONG C, PENG Z H, WEI X X, et al. The reaction behavior of pyrite in process of Bayer digestion[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2011,2(5): 1-5.
- [7] 陈文汨,陈学刚,郭金权,等. 拜耳液中铁的行为研究[J]. 轻金属,2008(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, 2008(4):14-18.
- [8] 刘永铁,李其贵,尹中林. 高硫高碳铝土矿在氧化铝生产中的实践及探讨[J]. 有色金属(冶炼部分),2021(7): 21-26.
- LIU Y Y, LI Q G, YIN Z L. Practice and discussion of high-sulfur and high-carbon bauxite in alumina production[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(7):21-26.
- [9] 胡小莲. 高硫铝土矿中硫在溶出过程中的行为及除硫工艺研究[D]. 长沙:中南大学,2011.
- HU X L. Study on the behavior of sulfur during the digestion process of high sulfur-containing bauxite and on the process of sulfur removal[D]. Changsha:Central South University,2011.
- [10] 王如凯,李军旗,陈朝铁. 高硫铝土矿脱硫浅析[J]. 广州化工,2014,42(22):33-35.
- WANG R K, LI J Q, CHEN C Y. Analysis on desulfurization of high-sulfur bauxite[J]. Guangzhou Chemical Industry,2014,42(22):33-35.
- [11] 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,2017,31(3):84-93,105.
- ZHENG L C, XIE K Q, LIU Z W, et al. Review on desulfurization of high-sulfur bauxite [J]. Materials Reports,2017,31(3):84-93,105.
- [12] 谢珉. 论铝土矿选矿的必要性和可行性[J]. 国外金属矿选矿,1991(7):69-76.
- XIE M. The necessity and feasibility of bauxite ore dressing[J]. Metallic Ore Dressing Abroad,1991(7): 69-76.
- [13] 严朕. 铝土矿磨浮过程中硫的危害及其脱除研究[D]. 郑州:郑州大学,2019.
- YAN Z. Study on the harm and removal of sulfur in bauxite grinding and flotation processing[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University,2019.
- [14] 吴国亮,郭鑫,田应忠,等. 一种高硫铝土矿资源综合利用的方法:202010307075. X[P]. 2020-07-17.
- WU G L, GUO X, TIAN Y Z, et al. A method for comprehensive utilization of high sulfur bauxite resources: 202010307075. X[P]. 2020-07-17.
- [15] 吴国亮,张建强,杜五星. 西南某铝土矿同步脱硫脱硅浮选试验研究[J]. 矿产保护与利用,2020,40(1): 93-98.
- WU G L, ZHANG J Q, DU W X. The experimental study on synchronous desulfurization and desilication flotation for the bauxite in southwest China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(1): 93-98.
- [16] 王晓民,张延安,吕国志,等. 高硫铝土矿浮选除硫的工艺[J]. 稀有金属,2009,33(5):728-732.
- WANG X M, ZHANG T A, LYU G Z, et al. Flotation process for desulfurization of high sulfur bauxite[J]. Chinese Journal of Rare Metals,2009,33(5):728-732.
- [17] 陈文汨,谢巧玲,胡小莲,等. 高硫铝土矿反浮选除硫试验研究[J]. 矿冶工程,2008,28(3):34-37.
- CHEN W M, XIE Q L, HU X L, et al. Experimental study on reverse flotation technique for desulfurizing of high-sulfur bauxite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2008,28(3):34-37.
- [18] 王驰. 矿浆流变特性对铝土矿浮选脱硫的影响研究[D]. 贵阳:贵州大学,2020.
- WANG C. Effect of pulp rheology on desulfurization of bauxite flotation [D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [19] 武国宝. 氧化铝生产脱硫技术研究进展[J]. 世界有色金属,2020(20):8-10.
- WU G B. Research progresses on desulfurization technologies for alumina production[J]. World Nonferrous Metals,2020(20):8-10.
- [20] 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.
- [21] 成思萌, 酒少武, 李辉, 等. 热红联用研究高硫铝土矿的氧化焙烧[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(9): 2730-2734.
- CHENG S M, JIU S W, LI H, et al. Study on the oxidation roasting of high-sulfur bauxite by DSC-TG-FTIR coupling[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(9): 2730-2734.
- [22] 吴鸿飞, 夏飞龙, 李军旗, 等. 低品位高硫铝土矿静态焙烧脱硫及溶出性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(5): 1163-1173.
- WU H F, XIA F L, LI J Q, et al. Desulfurization and digestion performance of low grade high-sulfur bauxite by static roasting[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(5): 1163-1173.
- [23] 陈咏梅, 李江江, 许鑫, 等. 高硫铝土矿氧化焙烧脱硫的节能条件优化[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2014, 44(3): 286-291.
- CHEN Y M, LI J J, XU X, et al. The optimized energy-saving conditions for desulfurization of bauxite by oxidizing roasting [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2014, 44(3): 286-291.
- [24] 周立杰, 赵磊, 李相良. 高硫铝土矿氧化焙烧脱硫的试验研究[J]. 中国资源综合利用, 2013, 31(11): 25-27.
- ZHOU L J, ZHAO L, LI X L. Study on the desulfurization for high sulfur bauxite by using oxidizing roasting[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2013, 31(11): 25-27.
- [25] 吕国志, 张廷安, 鲍丽, 等. 高硫铝土矿的焙烧预处理[J]. 过程工程学报, 2008, 8(5): 892-896.
- LYU G Z, ZHANG T A, BAO L, et al. Roasting pretreatment of high-sulfur bauxite[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(5): 892-896.
- [26] 王仕愈, 陈朝铁, 李军旗, 等. 高硫高硅铝土矿的研究现状与发展趋势[J]. 轻金属, 2018(12): 1-4.
- WANG S Y, CHEN C Y, LI J Q, et al. Research status and development trend of high-sulfur and high-silicon bauxite[J]. Light Metals, 2018(12): 1-4.
- [27] 赵磊, 李相良. 高硫铝土矿沸腾焙烧脱硫试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(1): 11-13.
- ZHAO L, LI X L. Desulfurization of high-sulfur bauxite with fluidized bed roasting [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(1): 11-13.
- [28] 赵磊, 孙留根, 李相良. 高硫铝土矿循环流态化焙烧脱硫半工业试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(11): 25-27.
- ZHAO L, SUN L G, LI X L. Semi-industrial test of desulfurization of high-sulfur bauxite with fluidized bed roasting[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(11): 25-27.
- [29] 万平玉, 钮因键, 顾松青, 等. 一种高硫铝土矿的氧化脱硫-磁化除铁预处理方法: 201210278252.1[P]. 2012-12-12.
- WAN P Y, NIU Y J, GU S Q, et al. A pretreatment method of oxidation desulfurization-magnetization iron removal for high sulfur bauxite: 201210278252.1[P]. 2012-12-12.
- [30] 陈延信, 赵博, 酒少武, 等. 高硫铝土矿悬浮态焙烧脱硫[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2577-2583.
- CHEN Y X, ZHAO B, JIU S W, et al. Desulfurization roasting of high sulfur bauxite in suspended state[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(8): 2577-2583.
- [31] 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, 25.
- 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, 25.
- [32] 梁佰战, 陈肖虎, 冯鹤, 等. 高硫铝土矿微波脱硫溶出试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(3): 23-26.
- LIANG B Z, CHEN X H, FENG H, et al. Test of desulfurization by microwave and digestion of high sulfur bauxite [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2011(3): 23-26.
- [33] 张念炳, 白晨光, 邓青宇. 高硫铝土矿微波焙烧预处理[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(1): 81-85.
- ZHANG N B, BAI C G, DENG Q Y. Microwave roasting pretreatment of high-sulfur bauxite [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(1): 81-85.
- [34] 黎氏琼春. 微波强化焙烧—水硬铝石矿提取氧化铝基础研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- LE T Q X. Basic research on microwave enhanced roasting of diaspore ore for alumina extraction[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [35] 金会心, 吴复忠, 李军旗, 等. 高硫铝土矿微波焙烧脱除黄铁矿硫[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(10): 2707-2718.
- JIN H X, WU F Z, LI J Q, et al. Desulfurization of pyrite in high-sulfur bauxite with microwave roasting process[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(10): 2707-2718.

- [36] 杨黔. 高硫铝土矿微焙烧脱硫及碱溶实验研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
YANG Q. Study on microwave roasting desulfurization and dissolution of high-sulfur bauxite [D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [37] 杨黔, 金会心, 殷倩楠, 等. 高硫铝土矿微波焙烧脱硫预处理及焙烧矿高压溶出性能[J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12(5): 39-45.
YANG Q, JIN H X, YIN Q N, et al. Microwave roasting desulfurization pretreatment of high-sulfur bauxite and high-pressure dissolution performance of roasted ore[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2021, 12(5): 39-45.
- [38] 周吉奎, 李花霞. 高硫铝土矿中黄铁矿的细菌氧化试验研究[J]. 金属矿山, 2011, 41(12): 67-69, 90.
ZHOU J K, LI H X. Experimental research on bacterial oxidation of pyrite in high sulfur bauxite [J]. Metal Mine, 2011, 41(12): 67-69, 90.
- [39] 李寿朋, 霍强, 王瑞, 等. 铁硫氧化菌群共同脱除高硫铝土矿中的硫[J]. 矿冶工程, 2017, 37(3): 76-80, 85.
LI S P, HUO Q, WANG R, et al. Bio-desulfurization of high-sulfur bauxite by indigenous sulfur- and iron-oxidizing moderately thermophilic consortia[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(3): 76-80, 85.
- [40] 刘龙, 李军旗, 陈朝轶, 等. 优化条件下氧化锌对高硫铝土矿溶出过程脱硫的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(1): 28-31.
LIU L, LI J Q, CHEN C Y, et al. Effect of ZnO addition on desulfurization process of high sulfur bauxite under optimal conditions[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2017(1): 28-31.
- [41] 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.
- [42] 张念炳, 黎志英, 丁彤. 铝酸钡脱硫过程机理探讨[J]. 有色金属工程, 2012, 2(3): 43-46.
ZHANG N B, LI Z Y, DING T. Discussion on mechanism of barium aluminate desulfurization process[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2012, 2(3): 43-46.
- [43] 张念炳, 黎志英, 丁彤. 铝酸钡与氢氧化钡脱硫过程比较[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012(11): 23-25.
ZHANG N B, LI Z Y, DING T. Comparison of barium aluminate and barium hydroxide desulfurization process[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2012(11): 23-25.
- [44] 徐颖鹏, 李军旗, 陈朝轶, 等. 高硫铝土矿优化溶出过程复合脱硫[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(12): 8-12.
XU Y P, LI J Q, CHEN C Y, et al. Complex desulfurization during optimized digestion process of high-sulfur bauxite[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(12): 8-12.
- [45] 陈文汨, 刘诗华. 用 MnO_2 脱除工业铝酸钠溶液中 S^{2-} 的研究[J]. 轻金属, 2011(10): 20-24.
CHEN W M, LIU S H. A study on removal of S^{2-} from industrial sodium aluminate solution with MnO_2 [J]. Light Metals, 2011(10): 20-24.
- [46] LIU Z W, LI W X, MA W H, et al. Conversion of sulfur by wet oxidation in the Bayer process [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2015, 46(4): 1702-1708.
- [47] 刘永轶. 化学氧化法处理高硫铝土矿生产氧化铝实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(8): 51-58.
LIU Y Y. Plant practice of producing alumina from high sulfur bauxite by chemical oxidation method[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(8): 51-58.
- [48] 胡小莲, 陈文汨. 采用湿式氧化法脱除铝酸钠溶液中硫的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(10): 2911-2916.
HU X L, CHEN W M. Desulfurization from sodium aluminate solution by wet oxidation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(10): 2911-2916.
- [49] 彭欣, 金立业. 高硫铝土矿生产氧化铝的开发与应用[J]. 轻金属, 2010(11): 14-17.
PENG X, JIN L Y. Development and application of bauxite containing high sulfur[J]. Light Metals, 2010(11): 14-17.