

doi: 10.20237/j.issn.1007-7545.2025.01.008

高硫铝土矿焙烧脱硫及精矿溶出性能研究

武国宝, 韩东战

(中铝郑州有色金属研究院有限公司, 郑州 450041)

摘要: 对某矿区高硫铝土矿进行了不同焙烧方式的脱硫试验, 提出了一种模拟流态化焙烧脱硫过程的静态焙烧试验方法, 进行了系统的焙烧脱硫试验, 确定了较适宜的焙烧脱硫工艺条件, 考察了焙烧过程对精矿溶出性能的影响。在磨矿粒度 250 μm 筛下含量 $\geq 90.84\%$ 、焙烧温度 580~600 $^{\circ}\text{C}$ 、焙烧时间 2 min 的条件下, 精矿中全硫(S_T)含量可降低至 0.50% 左右, S^{2-} 含量不超过 0.10%; 在石灰添加量 10%、溶出温度 265 $^{\circ}\text{C}$ 、溶出液 $\alpha_k = 1.35 \sim 1.39$ 及溶出时间 50 min 的条件下, 精矿的氧化铝溶出率 $> 89\%$, 溶出赤泥 $A/S = 1.31 \sim 1.34$, $N/S = 0.15 \sim 0.16$ 。在相同溶出试验条件下, 与原矿相比, 焙烧精矿溶出性能变化不大。

关键词: 高硫铝土矿; 焙烧; 脱硫; 溶出

中图分类号: TF821

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2025)01-0059-07

Studies on Desulfurization Performance of High-Sulfur Bauxite by Roasting and Digestion Performance of the Concentrate

WU Guobao, HAN Dongzhan

(Zhengzhou Non-ferrous Metals Research Institute Co., Ltd. of Chalco, Zhengzhou 450041, China)

Abstract: Desulfurization experiments on high-sulfur bauxite ore from a certain mining area were carried out with different roasting methods, and a static roasting test method which can simulate the fluidized roasting desulfurization process was proposed. The appropriate technological conditions of desulfurization by roasting were ascertained after systematic roasting desulfurization tests, and the effect of roasting process on the digestion performance of the concentrate was investigated. The total content of sulfur (S_T) in the desulfurized concentrate is about 0.50% and S^{2-} content is $\leq 0.10\%$, under the conditions including the weight percent of the ground bauxite particles passing through 250 μm of $> 90.84\%$, roasting temperature of 580–600 $^{\circ}\text{C}$, and roasting time of two minutes. The alumina digestion rate of the roasted concentrate is 89% above, A/S of the red mud is 1.31–1.34 and N/S of the red mud is 0.15–0.16 under the conditions including lime addition of 10%, digestion temperature of 265 $^{\circ}\text{C}$, α_k of the digestion liquor of 1.35–1.39, and the digestion time of 50 minutes. Compared with the raw high-sulfur bauxite, the digestion performance of the roasted concentrate has been changed little under the same laboratory digestion conditions.

Key words: high-sulfur bauxite; roasting; desulfurization; digestion

铝土矿中的硫是对氧化铝生产危害很大的杂质元素, 通常当铝土矿中的硫含量达到 0.30%, 就会严

重影响氧化铝的生产^[1-2]。近年来随着我国氧化铝工业的快速发展, 国内铝土矿资源供应紧张, 内地的

收稿日期: 2024-07-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2904400)

作者简介: 武国宝(1977-), 男, 正高级工程师; 通信作者: 韩东战(1975-), 男, 正高级工程师

一些氧化铝生产企业开始大量使用高硫铝土矿生产氧化铝。针对氧化铝生产过程中硫的脱除技术难题,目前国内外已经开发出了多种脱硫技术^[3-11]。目前的脱硫技术主要有矿石预处理脱硫和氧化铝生产流程中脱硫。由于氧化铝生产流程中的脱硫技术通常仅适用于硫含量不超过0.50%的中低硫铝土矿^[11],因此要从根本上解决高硫铝土矿经济生产氧化铝的技术难题,必须开发出经济高效的矿石预处理脱硫技术。

矿石预处理脱硫技术的优点是可处理硫含量更高的高硫铝土矿,并且生产运行基本不受氧化铝生产过程的影响。矿石预处理脱硫技术可分为湿法预处理脱硫技术和火法预处理脱硫技术,湿法预处理的脱硫技术包括浮选脱硫^[4,8-9]、微生物脱硫^[12]和电化学脱硫^[13]等,其中的浮选脱硫技术已经在开曼铝业和东方希望(三门峡)铝业等多家企业实现了产业化应用,然而用浮选的方法不能完全脱除铝土矿中硫,氧化铝生产过程中仍然需要采取一定的脱硫措施才能确保生产稳定运行。火法预处理脱硫技术中研究最多的是矿石焙烧脱硫技术,具有工艺过程简单、精矿不含吸附水,以及可同时脱除有机物的等独特优势,引起了较多的研究关注,目前已经有多家研究机构进行了流态化焙烧脱硫的扩大试验研究^[14-15],已经有企业正在推进该技术的产业化应用。

本文针对某高硫铝土矿进行了系统的焙烧脱硫试验研究和精矿的溶出试验研究,确定了较适宜的焙烧脱硫工艺条件,为下一步开展中试或工业试验研究提供了基础工艺数据。

1 试验原料

1.1 高硫铝土矿

高硫铝土矿(下文简称高硫矿)由某企业提供,矿石经过烘干、破碎、细磨和均化处理得到不同粒度的高硫矿样品X1~X8。高硫矿的化学成分(质量分数,%): Al_2O_3 67.35、 SiO_2 5.48、 Fe_2O_3 5.93、 TiO_2 3.09、 K_2O 0.83、 CaO 0.37、 MgO 0.44、LOI 15.02、全硫(S_T)1.78、 $\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$ 0.22。矿物组成(质量分数,%):一水硬铝石 74.0、绿泥石3.0、高岭石3.5、伊利石7.0、白云石1.2、菱铁矿3.5、黄铁矿2.9、锐钛矿2.5、金红石0.5%。用激光粒度仪(干法)测定的高硫矿X1~X8的粒度分布曲线见图1。

从图1可以看出,根据 $-250\ \mu\text{m}$ 粒级占比,高硫矿X1~X8可分为四组: X1为第一组, $-250\ \mu\text{m}$

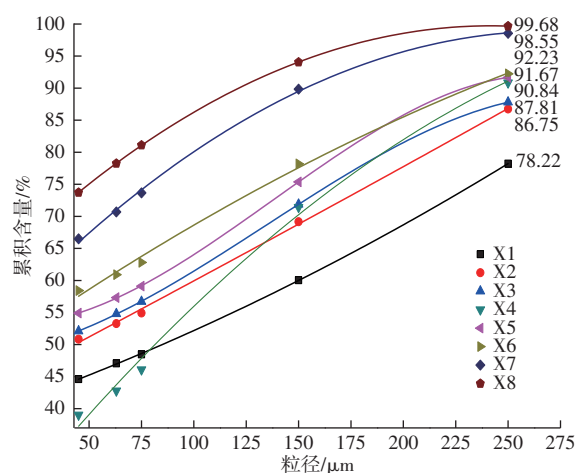


图1 高硫矿X1~X8的粒级分布曲线

Fig. 1 Distribution curves of high-sulfur bauxite X1~X8 with different particle sizes

粒级占比为78.22%; X2、X3为第二组, $-250\ \mu\text{m}$ 粒级占比分别为86.75%、87.81%; X4~X6为第三组, $-250\ \mu\text{m}$ 粒级占比分别为90.84%、91.67%、92.23%; X7、X8为第四组, $-250\ \mu\text{m}$ 粒级占比分别为98.55%和99.68%。

1.2 循环母液

循环母液取自某企业,溶液中 Na_2O_K 与 Al_2O_3 含量的摩尔比用 α_k 表示,溶液中 N_T 284.95 g/L, Al_2O_3 135.90 g/L, Na_2O_K 243 g/L, $\alpha_k=2.94$ 。

1.3 石灰

石灰取自某企业生产现场,在一定温度下焙烧后备用,石灰中总CaO含量为94.82%,有效CaO为89.45%。

2 试验方法

2.1 焙烧脱硫试验

焙烧脱硫的目标是控制焙烧脱硫后精矿中的 S^{2-} 不超过0.10%,同时尽可能降低精矿中 S_T 含量。用回转窑和马弗炉两种焙烧方式进行了焙烧脱硫试验。

用实验室小型回转窑进行焙烧脱硫试验时,先将回转窑升温到设定温度,然后用振动式自动加料装置加入铝土矿,加料速度为2~3 g/min。

用抗热振性强的专用马弗炉进行静态模拟流态化焙烧脱硫试验。首先将细磨后的铝土矿均匀平铺在平板耐火砖上,控制矿石颗粒层的厚度不超过1 mm,以确保矿石颗粒尽可能暴露在空气中;其次根据炉膛容积控制每次焙烧时的矿石加入量;控制矿石中黄铁矿氧化的理论氧气消耗量与焙烧温度下与炉

膛容积相同体积空气负载的氧气量的比值 ≤ 0.15 。当炉温升高至比设定温度高 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,打开炉门将载有矿石的耐火砖放入马弗炉,并立即关上炉门,待炉温再次达到设定温度后(温度平衡时间约 2 min)开始计时,达到预期焙烧时间后,打开炉门取出载有矿石的耐火砖,在空气中冷却至室温。

收集焙烧后的矿石,混匀后分析检测其中的 S_T 及 S^{2-} 含量,焙烧试验过程排出的废气用石灰乳吸收净化后外排。

2.2 溶出试验

溶出试验在盐浴加热的钢弹溶出器中进行。在钢弹中加入计量的矿石、石灰和循环母液,密封好钢弹后加入盐浴加热炉,在设定温度下保温搅拌反应至预定的时间。反应结束后,取出溶出浆液过滤后取溶液样分析溶液成分,溶出赤泥洗涤、烘干后送化学成分分析。氧化铝的溶出率 η 用式(1)计算。

$$\eta = \frac{(A/S)_{\text{矿}} - (A/S)_{\text{泥}}}{(A/S)_{\text{矿}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $(A/S)_{\text{矿}}$ 为矿石中 Al_2O_3 和 SiO_2 的质量比; $(A/S)_{\text{泥}}$ 为赤泥中 Al_2O_3 和 SiO_2 的质量比。

计算赤泥 N/S 时将赤泥中 K_2O 等摩尔折算为 Na_2O 。

2.3 分析检测方法

利用PANalytical PW2403型X-射线荧光光谱仪分析铝土矿、溶出赤泥中的 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 及 CaO 的含量;利用Nalytical X'Pert Pro MPD型X射线衍射分析仪分析固相的矿物组成;用化学滴定法分析检测溶液中的 Na_2O_K 、 Al_2O_3 、 Na_2O_T 及石灰中的有效 CaO 含量。

用碳硫分析仪分析测定高硫矿和精矿中的总硫含量 S_T ,用“化学浸出+重量法”测定原矿及焙烧矿中以 SO_4^{2-} 形式存在的硫含量 $S(\text{SO}_4^{2-})$,用 S_T 减去 $S(\text{SO}_4^{2-})$ 得到的矿石中的 S^{2-} 含量。

用英国马尔文MS2000型激光粒度仪(干法)测定矿石的粒度分布。

3 试验结果

3.1 焙烧脱硫试验

3.1.1 焙烧方式的选择

将高硫矿X1用回转窑分别在 600 、 650 、 700 、 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行焙烧,焙烧时间 $10\sim 12\text{ min}$,不同焙烧温度下精矿中的 S_T 和 S^{2-} 含量见表1。

从表1可以看出,焙烧温度在 $600\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,高

表1 不同温度下回转窑焙烧精矿中的 S_T 和 S^{2-}

温度/ $^{\circ}\text{C}$	S_T	$S(\text{SO}_4^{2-})$	S^{2-}
600	0.80	0.52	0.28
650	0.77	0.51	0.26
700	0.74	0.48	0.26
800	0.74	0.48	0.26

硫矿经过回转窑焙烧后,精矿中的 S^{2-} 含量仍然高于 0.20% ,并且精矿中的 S_T 含量超过了 0.70% 。上述试验结果表明,回转窑焙烧的方式不适合用于高硫矿的焙烧脱硫,主要原因是物料与空气接触不充分,不利于矿石中黄铁矿的氧化和反应产物 SO_2 气体的扩散。

作者在深入研究焙烧脱硫反应原理的基础上,提出并采用了一种可模拟流态化焙烧过程的静态焙烧试验方法。高硫矿X1用上述静态焙烧试验方法进行焙烧脱硫试验,在焙烧温度 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及焙烧时间 5 min 的条件下精矿中的 S_T 含量为 0.50% , S^{2-} 含量降低到 0.11% ,其脱硫的效果明显优于回转窑,因此后续脱硫试验均采用上述静态焙烧方式。

3.1.2 磨矿粒度的影响

X2、X3、X5、X6、X7和X8六种不同磨矿粒度的高硫矿中 $-250\text{ }\mu\text{m}$ 的粒级含量分别为 86.75% 、 87.81% 、 91.67% 、 92.23% 、 98.55% 和 99.68% 。在焙烧温度 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、焙烧时间 2 min 的条件下,分别用上述6种不同磨矿粒度的高硫矿进行焙烧试验,原矿中 $-250\text{ }\mu\text{m}$ 的粒级含量对精矿中 S_T 和 S^{2-} 含量的影响见图2。

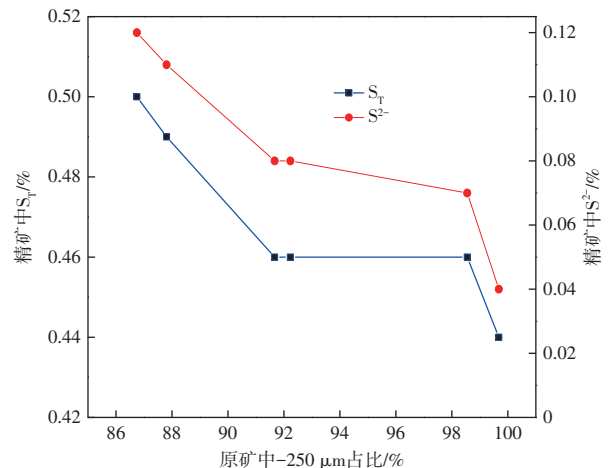


图2 原矿中 $-250\text{ }\mu\text{m}$ 粒级百分含量对精矿中 S_T 和 S^{2-} 含量的影响

Fig. 2 Effects of percent of $-250\text{ }\mu\text{m}$ particles in raw ore on the S_T and S^{2-} content in concentrate

从图2可以看出,随着原矿中-250 μm 粒级含量的升高,精矿中 S_T 和 S^{2-} 含量呈现降低的趋势,当矿石中的-250 μm 粒级含量达到92%左右,精矿中 S_T 含量 $<0.50\%$, S^{2-} 含量 $<0.10\%$ 。

为了进一步确认在-250 μm 粒级含量接近的条件下,矿石中其它粒级含量升高对焙烧脱硫效果的影响,分别用高硫矿X4、X5和X6在温度600 °C及焙烧时间2 min的条件下进行焙烧脱硫试验,高硫矿X4、X5和X6不同粒级的分布曲线见图3,精矿中 S_T 和 S^{2-} 含量见表2。

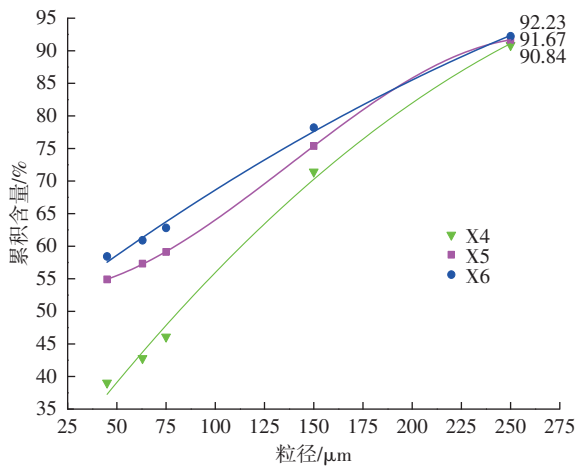


图3 高硫矿X4、X5和X6不同粒级的分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of different particle sizes for high-sulfur ore X4, X5, and X6

表2 高硫矿X4、X5和X6对应精矿中 S_T 和 S^{2-} 含量

Table 2 The content of S_T and S^{2-} in concentrates corresponding to high-sulfur ore X4, X5 and X6

高硫矿	-250 μm 粒级占比	S_T	$S(SO_4^{2-})$	S^{2-}
X4	90.84	0.48	0.43	0.05
X5	91.67	0.48	0.38	0.10
X6	92.23	0.46	0.37	0.09

从图3可以看出,与高硫矿X5和X6相比,高硫矿X4中-250 μm 粒级中大于45 μm 的粗颗粒含量明显更高一些。从表2可以看出,在控制矿石中-250 μm 粒级含量90.84%~92.23%的条件下,原矿中粒度大于45 μm 的粗颗粒含量的升高对精矿中 S_T 和 S^{2-} 含量影响不大。

综上所述,适宜的磨矿粒度为:-250 μm 粒级含量 $\geq 90.84\%$ 。

3.1.3 焙烧温度的影响

用高硫矿X4在560~700 °C进行了焙烧时间1 min的脱硫试验,焙烧温度对精矿中 S_T 和 S^{2-} 含量的影响见图4。

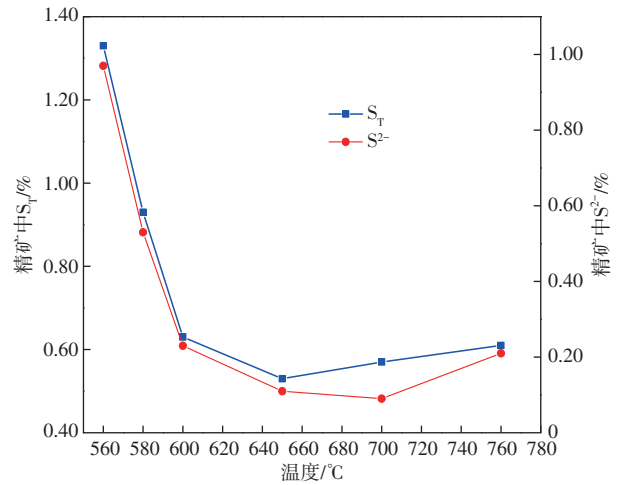


图4 焙烧温度对精矿中 S_T 和 S^{2-} 含量的影响

Fig. 4 Effect of roasting temperature on content of S_T and S^{2-} in concentrate

从图4可以看出,在焙烧时间1 min、焙烧温度560~760 °C时,精矿中 S_T 和 S^{2-} 含量随焙烧温度升高呈现先降低后升高的趋势:焙烧温度在560~650 °C,随着焙烧温度的升高,精矿中的 S_T 含量明显降低;在焙烧温度为650~760 °C时,随着焙烧温度的升高,精矿中的 S_T 呈现升高的趋势;焙烧温度在560~700 °C时,随着焙烧温度的升高内精矿中的 S^{2-} 含量明显降低,当焙烧温度从700 °C升高到760 °C,精矿中的 S^{2-} 含量又开始呈现升高的趋势。产生上述现象的原因是:在焙烧温度不超过650 °C的条件下,随着温度升高,矿石中 FeS_2 被氧化成 SO_2 的反应速度加快;温度在600~800 °C时,焙烧过程中硫酸盐生成速度加快^[16-17],并在一定程度上阻碍了静态颗粒床层内部的黄铁矿被氧化,因而出现了精矿中 S_T 和 S^{2-} 含量随焙烧温度升高而升高的反常现象。

根据上述试验结果,确定较适宜的焙烧脱硫温度为560~650 °C。

3.1.4 焙烧时间的影响

利用高硫矿X4分别在温度560、580、600、650 °C的条件下开展了不同时间的焙烧试验,不同焙烧温度和时间条件下精矿中 S_T 和 S^{2-} 含量见表3。

从表3可以看出,在焙烧温度560 °C时,随着焙烧时间的延长,精矿中的 S_T 含量和 S^{2-} 含量呈现逐渐降低的趋势,焙烧时间3 min时精矿中 $S^{2-} < 0.10\%$;焙烧温度580 °C和600 °C时,焙烧时间 ≥ 2 min后,精矿中 $S_T \leq 0.51\%$, $S^{2-} < 0.10\%$;随着焙烧温度升高至600 °C和650 °C;随着焙烧时间延长,精矿中的 $S(SO_4^{2-})$ 含量又开始呈现升高的趋势,其主要原因

表 3 不同焙烧温度和时间条件下精矿中不同形式的硫含量

Table 3 Sulfur content of different form in concentrates under different roasting temperature and time conditions /%

焙烧温度/℃	焙烧时间/min	S _T	S(SO ₄ ²⁻)	S ²⁻
560	1	1.33	0.36	0.97
	2	0.52	0.40	0.12
	3	0.47	0.42	0.05
580	1	0.93	0.40	0.53
	2	0.47	0.42	0.05
	3	0.47	0.42	0.05
600	1	0.63	0.40	0.23
	2	0.48	0.43	0.05
	3	0.51	0.46	0.05
650	1	0.53	0.42	0.11
	2	0.54	0.46	0.08

是矿石中的 Fe₂O₃ 与焙烧烟气中的 SO₂ 及 O₂ 反应后生成了硫酸铁^[7,16]。

考虑到延长焙烧时间,不仅会导致工业生产中焙烧炉体积增大、设备投资费用增加,而且不利于降低精矿中 S_T 含量,因此在焙烧温度 580~600 °C 条件下,较适宜的焙烧时间为 2 min。上述焙烧脱硫试验结果与其他学者使用拟悬浮态^[7,18]焙烧试验装置得到的研究结论基本一致,因此该静态焙烧试验方法对工业流态化焙烧脱硫过程具有较好的模拟性。

3.1.5 精矿的化学成分及矿物组成

用高硫矿 X4 在焙烧温度 580 °C、焙烧时间 2 min 的条件下批量制备精矿,得到的精矿化学成分(质

量分数,%) : Al₂O₃ 68.73、SiO₂ 5.53、Fe₂O₃ 6.02、K₂O 0.87、S_T 0.51、S²⁻ 0.10。精矿的 X 射线衍射分析结果见图 5。从图 5 可以看出:精矿中黄铁矿的特征衍射峰已经完全消失;精矿中 α-氧化铝特征衍射峰强度较弱,焙烧过程中仅有一小部分一水硬铝石转化为 α-氧化铝,精矿中的氧化铝主要以一水硬铝石形式存在;精矿中存在未分解的菱铁矿,可能与静态焙烧过程中的传质和传热效率较低有关。

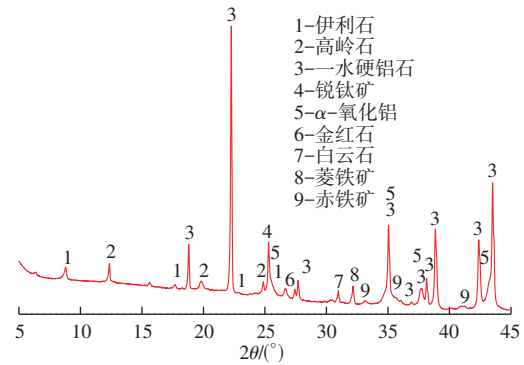


图 5 精矿的 XRD 谱

Fig. 5 XRD pattern of desulfurized concentrate

3.2 精矿溶出试验

在溶出温度 265 °C、溶出时间 50 min 的条件下分别进行了精矿和原矿的溶出试验研究,石灰添加量为 10%,溶出液 α_k 分别为 1.35 和 1.39 左右,精矿和原矿的溶出效果对比结果见表 4。

表 4 精矿和原矿的溶出效果对比

Table 4 Comparison of digestion results between concentrate and raw ore

矿石	溶出液 α _k	溶出赤泥				η/%			
		Al ₂ O ₃ /%	SiO ₂ /%	Na ₂ O/%	CaO/%				
原矿	1.33	17.10	13.45	0.59	23.94	1.39	1.27	0.11	89.66
精矿	1.36	17.95	13.43	0.99	24.23	1.61	1.34	0.15	89.25
原矿	1.38	17.02	13.33	0.57	24.17	1.36	1.28	0.11	89.61
精矿	1.41	17.61	13.46	1.09	24.23	1.60	1.31	0.16	89.47

从表 4 可以看出,精矿和原矿的溶出性能差别不大。与原矿相比,精矿的溶出赤泥 A/S 和 N/S 均略有升高,以前的一些研究认为经过焙烧后的矿石更易溶出^[11,19],产生这种偏差的原因可能主要与焙烧方式有关。

4 结论

1) 控制磨矿粒度—250 μm 占比 ≥ 90.84%,在焙烧温度 580~600 °C、焙烧时间 2 min 的条件下,精矿中的 S_T 含量降低至 0.50% 左右, S²⁻ 含量不超过 0.10%。

2) 在石灰添加量 10%、溶出温度 265 °C、溶出液 α_k = 1.35~1.39、溶出时间 50 min 的条件下,焙烧精矿的氧化铝溶出率 > 89%,溶出赤泥 A/S = 1.31~1.34, N/S = 0.15~0.16。

3) 在本文试验条件下,焙烧脱硫精矿与原矿溶出性能无明显差别。

4) 今后需要在流态化焙烧脱硫扩大试验和工业试验中进一步考察确认菱铁矿的脱除效果。

参考文献

[1] 杨权平,吕鲜翠.高硫铝土矿生产冶金级氧化铝的工业实

- 践[J]. 轻金属, 2012(7): 10-12.
- YANG Q P, LYU X C. The industrial practice of producing metallurgical grade alumina from high sulfur bauxite[J]. Light Metals, 2012(7): 10-12.
- [2] 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.
- [3] 黎志英, 张念炳, 何润德. 用高品位高硫铝土矿生产氧化铝时的除硫新方法研究[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2007, 36(2): 29-32.
- LI Z Y, ZHANG N B, HE R D. Research on the new method of desulphurizing in producing alumina with exploitable sulfur-containing and high grade bauxite[J]. Journal of Guizhou University of Technology(Natural Science Edition), 2007, 36(2): 29-32.
- [4] WANG X M, ZHANG T A. Flotation desulfurization of high-sulfur bauxite with ethyl thio carbamate as collector[J]. Advanced Materials Research, 2011, 239/240/24/242: 1515-1519.
- [5] 兰军, 吴贤熙, 解元承, 等. 铝土矿生产氧化铝过程脱硫方法的研究进展[J]. 应用化工, 2008(4): 446-448, 455.
- LAN J, WU X X, XIE Y C, et al. Research advance of desulfurization in production of alumina with bauxite[J]. Applied Chemical Industry, 2008(4): 446-448, 455.
- [6] 张歆, 吴泽港, 刘凤琴, 等. 高硫铝土矿脱硫技术研究现状与发展趋势[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(4): 20-27.
- ZHANG X, WU Z G, LIU F Q, et al. Research status and development trend of high-sulfur bauxite desulfurization technology[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2023(4): 20-27.
- [7] 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.
- [8] 解文康, 周杰强, 陈兴华, 等. 河南某高硫铝土矿浮选脱硫试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(1): 43-45, 73.
- XIE W K, ZHOU J Q, CHEN X H, et al. Study on the flotation desulfurization of high-sulfur bauxite in Henan[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2017(1): 43-45, 73.
- [9] 刘中原, 张建强, 杜五星. 山西某高硫铝土矿脱碳脱硫试验研究[J]. 轻金属, 2022(6): 1-5.
- LIU Z Y, ZHANG J Q, DU W X. Experimental study on decarbonization and desulfurization of the high-sulfur bauxite in Shanxi province[J]. Light Metals, 2022(6): 1-5.
- [10] 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.
- [11] 周剑飞, 赵博, 陈延信, 等. 黔北务正道地区铝土矿焙烧脱硫及溶出性能的提升[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(10): 2394-2402.
- ZHOU J F, ZHAO B, CHEN Y X, et al. Roasting desulphurization and leaching performance promotion of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(10): 2394-2402.
- [12] 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, 40(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, 40(12): 67-69, 90.
- [13] 葛岚, 许鸿雁, 公旭中, 等. 氮气搅拌下高硫铝土矿电解除硫研究[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2014, 24(6): 42-46.
- GE L, XU H Y, GONG X Z, et al. A study on high sulfur bauxite ore electrolysis desulfurization under gas stirring[J]. Journal of Environmental Management College of China, 2014, 24(6): 42-46.
- [14] 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.
- [15] 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): 2577-2582.
- 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): 2577-2582.
- [16] FÖLDVÁRI M. Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice: Vol. 213[M]. Budapest: Geological Institute of Hungary, 2011.
- [17] 赵博, 陈延信, 酒少武, 等. 南川地区高硫铝土矿稀相输

- 送床焙烧特征[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(12): 3645-3654.
- ZHAO B, CHEN Y X, JIU S W, et al. Roasting characteristics of Nanchuan high sulfur bauxite in dilute-phase conveying bed[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(12): 3645-3654.
- [18] 刘喜军, 陈延信, 赵博, 等. 高硫铝土矿焙烧脱硫试验研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(2): 112-115.
- LIU X J, CHEN Y X, ZHAO B, et al. Experimental investigation on roasting desulfurization of high-sulfur bauxite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(2): 112-115.
- [19] 赵博, 陈延信, 酒少武, 等. 高硫铝土矿悬浮态焙烧及焙烧矿的溶出性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(9): 2929-2935.
- ZHAO B, CHEN Y X, JIU S W, et al. Suspended roasting of high sulfur bauxite and leaching performance of roasted ore[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(9): 2929-2935.

~~~~~

(上接第 58 页)

- using ethanol as reductant[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(4): 49-54.
- [21] 龙腾发, 金尧, 唐文丽, 等. 基于还原焙烧—酸浸法的电解锰阳极泥中锰铅分离研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(6): 128-132, 138.
- LONG T F, JIN Y, TANG W L, et al. Separation of manganese and lead from electrolytic manganese anode slime by reduction roasting and acid leaching process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(6): 128-132, 138.
- [22] 郑子恩. 电解金属锰阳极泥还原焙烧—酸浸试验研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2022, 50(2): 15-18.
- ZHENG Z E. Experimental research on reduction roasting-acid leaching of electrolytic manganese anode slime[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2022, 50(2): 15-18.
- [23] 黎应芬, 李祥, 叶华, 等. 硫磺还原焙烧—酸浸法提取锰阳极泥[J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(8): 13-15, 24.
- LI Y F, LI X, YE H, et al. Recovery of manganese anode slimes by sulfur reduction roasting-acid leaching process[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2017(8): 13-15, 24.
- [24] 陈泽宗, 毛拥军. 高价态难溶锰资源回转窑还原焙烧技术研究[J]. 金属矿山, 2019, 48(9): 78-82.
- CHEN Z Z, MAO Y J. Studies on rotary kiln reduction roasting technology for the treatment of high valence insoluble manganese ore resources[J]. Metal Mine, 2019, 48(9): 78-82.
- [25] 黄文凤, 杨红梅, 章慧. 电解锰渣煅烧脱硫制硫酸锰资源化技术分析[J]. 中国锰业, 2021, 39(4): 34-37.
- HUANG W F, YANG H M, ZHANG H. Analysis of resource utilization technology for electrolytic manganese residue calcination and desulfurization to produce manganese sulfate[J]. China's Manganese Industry, 2021, 39(4): 34-37.
- [26] ZHANG C M, JIANG L, XU F, et al. New insight into cleaner control of heavy metal anode slime from aqueous sulfate electrolytes containing Mn(II): preliminary characterization and mechanism analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 177: 276-283.