

冶炼工艺

引文格式:王相愚,王洪阳,周慧丽,等. 磁化焙烧-磁选工艺强化回收还原拜耳法高铁赤泥尾矿中含铁矿物[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(4): 66-74.

Wang Xiangyu, Wang Hongyang, Zhou Huili, et al. Recovery enhancement of Fe-bearing minerals from high-iron red mud tailing generated in the reductive Bayer process through magnetization roasting-magnetic separation [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(4): 66-74.

磁化焙烧-磁选工艺强化回收还原拜耳法 高铁赤泥尾矿中含铁矿物

王相愚¹, 王洪阳^{1,2}, 周慧丽¹, 高忠林¹, 张晓雪²

(1. 安徽理工大学 材料科学与工程学院, 安徽 淮南 232001;

2. 安徽理工大学 分析测试中心, 安徽 淮南 232001)

[摘 要] 新型还原拜耳法工艺处理高铁铝土矿后,尾矿中仍含有44.93%铁,针对此部分铁资源的回收,本研究采用磁化焙烧-磁选工艺对其进行了强化回收,通过单因素试验考察了工艺参数对产物的影响,且对焙烧产物、磁选精矿和尾矿进行了表征分析,探讨了磁化焙烧行为及磁选行为,得到以下主要结论。该尾矿主要物相为赤铁矿,粒度主要分布在0~10 μm 区间,平均粒径为1.98 μm ;磁化焙烧试验结果表明,焙烧时间延长及焙烧温度升高均对尾矿中赤铁矿定向转变为磁铁矿起促进作用,在600℃且焙烧时间 ≥ 40 min的条件下,产物中主要物相为磁铁矿;在磨矿粒度 $D(90)=16.36 \mu\text{m}$ 和磁场强度1 000 Gs (1 Gs= 10^{-4} T)的条件下,可获得铁品位为52.57%和铁回收率为70.69%的磁选精矿,此时精矿产率达到57.99%,使得还原拜耳法赤泥减排量由55%提高至80%;部分磁铁矿未能回收的原因是在磨矿过程中微细颗粒产生了团聚,造成磁铁矿和铝硅酸盐矿物难以高效分离,后续考虑在磨矿过程中引入分散剂来进一步提高磁选精矿中铁回收率。

[关键词] 还原拜耳法; 高铁赤泥; 磁化焙烧; 磁选; 铁资源回收; 赤泥减排; 颗粒团聚

[中图分类号] TF821; X758 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)04-0066-09

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.04.007

0 引言

拜耳法是提取氧化铝最为经济的方法,因此全球90%以上的氧化铝采用该方法进行生产。铝土

矿中的氧化铝在拜耳法溶出过程中进入溶液,其他元素(铁、硅、钛等)最终进入赤泥。因此,赤泥是拜耳法生产氧化铝过程中产生的主要固体废弃物,具有粒径小、孔隙大、碱性强等特点^[1,2]。据统计,每生产1.0 t氧化铝将产生1.0~1.8 t赤泥^[3]。我国赤泥年产量以1亿~1.05亿t的速度急剧上升,全球库存量已超40亿t,但平均利用率仅为15%^[4,5]。赤泥堆存处置不仅占用土地资源,而且对周边环境造成污染^[6]。

当拜耳法赤泥中铁含量超过30%时,即称之为高铁赤泥,被视为具有很高回收价值的含铁资源^[7]。

[收稿日期] 2026-02-16 [修订日期] 2026-04-08

[录用日期] 2026-04-10 [出版日期] 2026-08-01

[第一作者] 王相愚(2001—),男,河南安阳人,研究生,主要研究方向为工业固废资源化。

[通信作者] 张晓雪(1991—),女,安徽阜阳人,博士,主要研究方向为工业固废资源化。

[基金项目] 安徽理工大学引进人才科研启动基金(2025yjrc0005; 2022yjrc25);国家自然科学基金(52304279)。

从高铁赤泥中提取铁的主要方法有物理法、湿法和火法^[8,9]。由于高铁赤泥中含铁矿物主要以弱磁性矿物形式存在,含铁矿物颗粒细,嵌布结构复杂,采用简单的物理法难以实现含铁矿物与其他矿物的高效分离^[10-13]。虽然采用湿法工艺可以选择性提取高铁赤泥中的铁,但鉴于该方法存在流程复杂、酸溶液难以循环利用以及需要耐腐蚀设备等问题,目前仍以实验室研究为主^[14-16]。通过火法焙烧可增大高铁赤泥中含铁矿物与其他矿物的磁性差异,进一步磁选可实现有效分离^[17-21]。

为实现高铁赤泥的源头治理,中南大学李小斌教授团队提出新型还原拜耳法工艺处理高铁铝土矿。即在拜耳法溶出过程中引入还原剂,在不影响氧化铝溶出过程的前提下将赤铁矿同步转化为磁铁矿,实现铝、铁的协同提取^[22-24]。目前,该技术已在山东魏桥铝电有限公司实现工业化应用,高铁赤泥资源化比例可达到55%。其中铁精矿做炼铁原料使用,然而尾矿依然难以处理。由于还原拜耳法为处理高铁铝土矿的新技术,针对还原拜耳法赤泥尾矿回收利用的研究鲜有报道。本研究通过磁化焙烧-磁选工艺选择性回收尾矿中含铁矿物,进一步提高高铁赤泥的资源化比例,其流程图如图1所示。研究过程借助X射线衍射仪(XRD)、振动样品磁强计(VSM)、扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)对还原拜耳法高铁赤泥尾矿及磁选产物等进行分析,并系统探讨了磁化焙烧反应行为及磁选行为。

1 试验

1.1 试验原料

本试验选用还原拜耳法高铁赤泥尾矿为山东魏桥铝业提供。采用还原拜耳工艺处理高铁三水铝石矿后,所得还原拜耳法高铁赤泥经物理分选得到铁含量高的精矿和铁含量低的尾矿,其产率分别为55%和45%,其中精矿已做炼铁原料使用。高铁赤泥尾矿的化学成分见表1,铁含量高达44.93%,具有很高的回收价值。氧化铝、氧化硅、氧化钛和氧化钠的含量分别为9.12%、8.59%、6.32%和6.21%,其他元素含量则低于1.00%。还原剂选用重选精煤,其水分、灰分、挥发分和固定碳含量分别为2.05%、10.25%、8.26%和79.44%。

高铁赤泥尾矿的XRD图谱及粒度分布图如图2所示。由图2(a)可知,高铁赤泥尾矿中主要含铁物

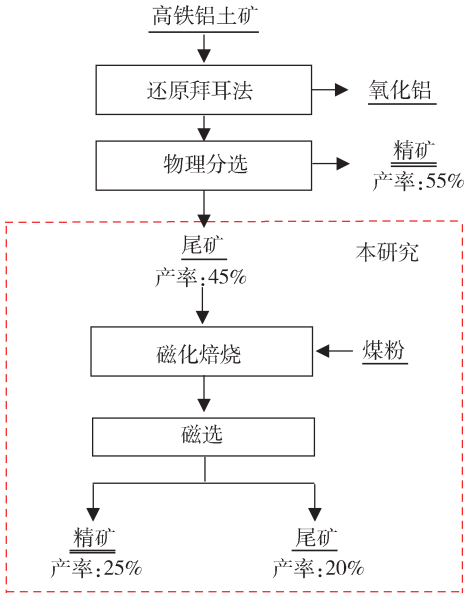


图1 高铁铝土矿资源化利用流程图

Fig. 1 Flowchart of resource utilization of high-iron bauxite

表1 高铁赤泥尾矿的化学组成(质量分数)

Table 1 Chemical composition of high-iron red mud tailing(mass fraction) %

成分	TFe	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Na ₂ O	CaO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	K ₂ O
含量	44.93	9.12	8.59	6.32	6.21	0.70	0.28	0.28	0.10	0.32

相为赤铁矿。为保障还原拜耳法的经济性,还原剂的添加量有限,致使赤铁矿不能完全转变为磁铁矿。此外,高铁赤泥尾矿中还含有少量的磁铁矿和方钠石。由图2(b)可见,高铁赤泥尾矿粒度较细,主要分布在0~10 μm区间,平均粒径为1.98 μm。

对高铁赤泥尾矿进行SEM-EDS分析,结果如图3所示。结合元素面扫描可知,SEM图中白色区域为赤铁矿颗粒。赤铁矿颗粒在10 μm以下,大部分被其他矿物包裹,因此需要通过磨矿才能实现赤铁矿颗粒的单体解离。铝元素和硅元素分布一致,表明高铁赤泥中有微细粒级的铝硅酸盐矿物。

1.2 试验方法

高铁赤泥尾矿的磁化焙烧试验是在马弗炉中进行。高铁赤泥尾矿经干燥研磨后加水制成直径为8~10 mm的小球,然后置于105℃烘箱中干燥。为保障焙烧过程一直处于还原性气氛,首先在100 mL刚玉坩埚中放入约1/3的粒度1~5 mm的精煤,再放入约20 g球团,然后将坩埚装满精煤。待马

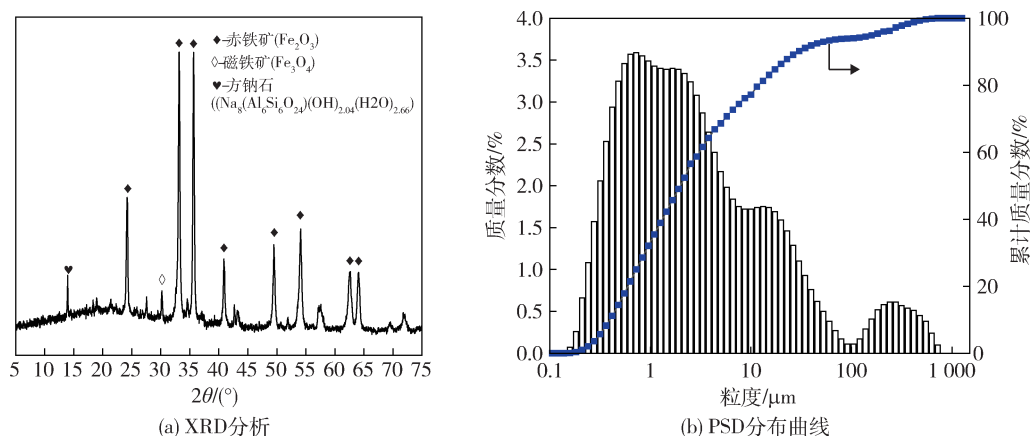


图2 高铁赤泥尾矿的XRD及其PSD分析

Fig. 2 XRD pattern and PSD curve of high-iron red mud tailing

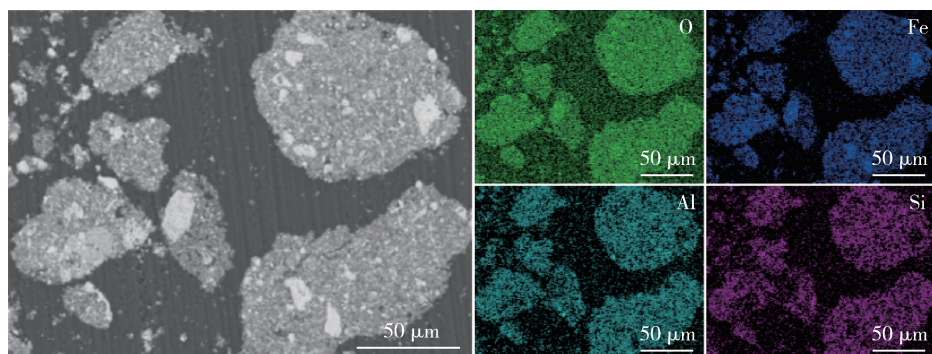


图3 高铁赤泥尾矿的SEM-EDS图

Fig. 3 SEM-EDS images of high-iron red mud tailing

弗炉升至设定温度(400℃, 500℃, 600℃, 700℃), 将装有球团和精煤的刚玉坩埚放入马弗炉磁化焙烧; 反应至设定时间(20 min, 40 min, 60 min, 80 min, 100 min, 120 min)后, 将刚玉坩埚取出并盖上盖子冷却至室温, 得到磁化焙烧产物。取20 g磁化焙烧产物和20 mL水加入制样粉碎机中密封, 通过磨矿时间控制磨矿粒度至设定要求($D(90)=21.48\ \mu\text{m}$, $19.75\ \mu\text{m}$, $16.36\ \mu\text{m}$, $10.81\ \mu\text{m}$); 然后在湿式磁选机中进行磁选(磁场强度=500 Gs, 1 000 Gs, 1 500 Gs, 2 000 Gs)($1\ \text{Gs}=10^{-4}\ \text{T}$), 将获得的磁选精矿和磁选尾矿经干燥处理进行化学分析和物相分析。

1.3 分析测试

高铁赤泥尾矿、磁化焙烧产物及磁选产物成分采用D/MAX-RB型X射线衍射仪进行分析, 微观形貌采用JSM-IT300型扫描电镜和X-MaxN20能谱仪分析。磁化焙烧产物的磁性采用HH-20型振动样品磁强计分析。高铁赤泥尾矿及磨矿产品的粒度采用Mastersizer 2000型激光粒度分析仪分析。采

用CONTRAA-700型原子吸收光谱仪分析主要元素组成。

2 试验结果与讨论

2.1 磁化焙烧反应行为

高铁赤泥尾矿在400~700℃磁化焙烧产物的XRD图谱如图4所示。图4(a)表明, 400℃下磁化焙烧20~60 min产物中主要物相为赤铁矿, 说明赤铁矿在此焙烧条件下比较稳定, 没有发生还原反应。焙烧时间延长至80 min, 焙烧产物的XRD图谱中出现了磁铁矿的衍射峰, 且伴随着赤铁矿衍射峰的减弱。说明此时部分赤铁矿已经被还原为磁铁矿。随着焙烧时间的延长, 焙烧产物中赤铁矿衍射峰逐渐减弱, 而磁铁矿衍射峰强度逐渐增强。因此, 焙烧时间的延长促使赤铁矿转变为磁铁矿。提高焙烧温度至500℃时(图4(b)), 20 min焙烧产物中的主要物相仍然是赤铁矿。在40 min焙烧产物的XRD图谱中开始出现磁铁矿的衍射峰, 且随焙烧时

间延长磁铁矿衍射峰逐渐增强,赤铁矿衍射峰则逐渐减弱。提高焙烧温度至600℃时(图4(c)),20 min焙烧产物中主要物相为赤铁矿和磁铁矿。当焙烧时间延长至40 min时,此时焙烧产物的XRD图谱中赤铁矿衍射峰消失,而磁铁矿衍射峰增强。继续提高焙烧温度至700℃时(图4(d)),20 min焙烧产物中仅发现磁铁矿的存在,继续增加焙烧时间,磁铁矿衍射峰没有明显变化。

通过对比分析图4(a)–(d)可知,相同焙烧时间下焙烧温度的升高有利于焙烧产物中磁铁矿的形成。在400℃下焙烧60 min产物中的主要物相依然是赤铁矿;当焙烧温度提高至500℃时,60 min焙烧产物中除赤铁矿外也出现了磁铁矿;当焙烧温度 $\geq 600^\circ\text{C}$ 时,60 min焙烧产物中仅能发现磁铁矿。由此可知,试验条件下磁铁矿的衍射峰强度随温度升高而不断增强。

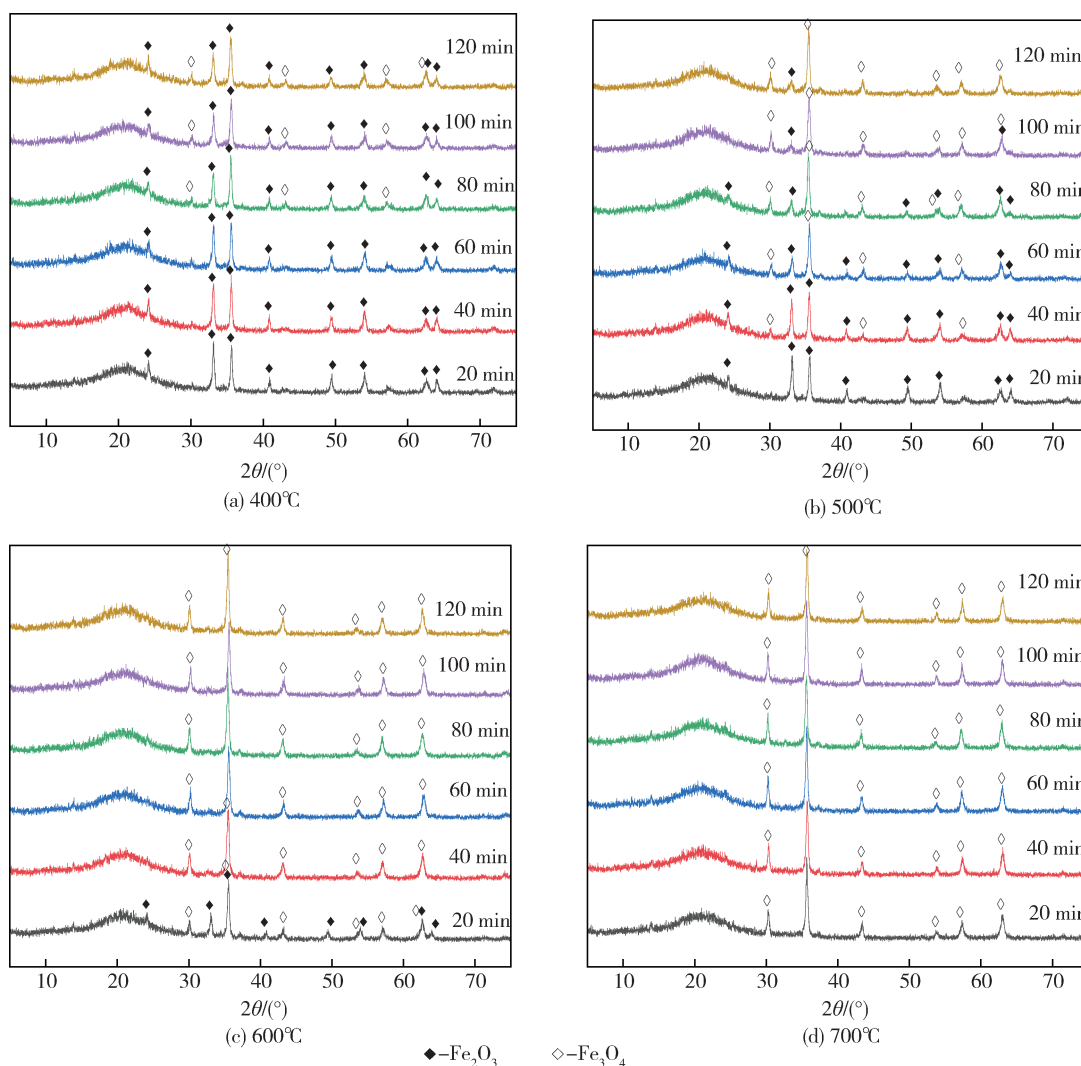


图4 磁化焙烧产物的XRD图

Fig. 4 XRD patterns of magnetized roasted products

鉴于赤铁矿和磁铁矿在磁性上的差异,通过焙烧产物磁性的变化也能表征赤铁矿转化为磁铁矿的程度。因此,对不同温度下焙烧焙烧20 min和60 min的产物进行磁化强度分析,结果见图5。

图5(a)表明,控制焙烧时间为20 min时,400℃和

500℃焙烧产物磁化曲线呈扁平状,且其最大磁化强度分别为 $5.56 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ 和 $6.89 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$;600℃焙烧产物磁化曲线呈“S”形,其最大磁化强度为 $22.9 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$;温度升高至700℃时,焙烧产物的最大磁化强度为 $31.83 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ 。结合图4的结果分析可知,400℃和

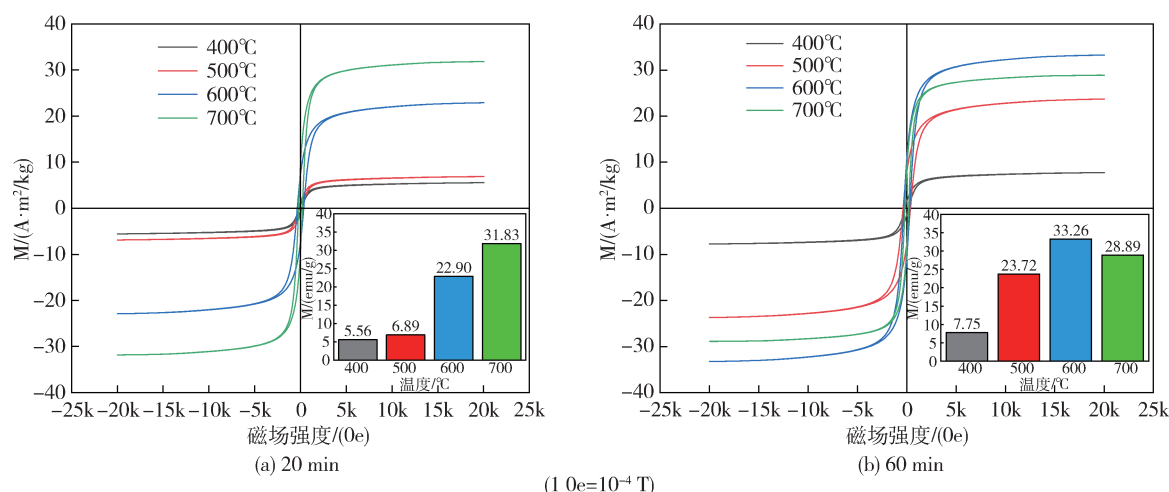


图5 磁化焙烧 20 min 和 60 min 产物的磁化曲线

Fig. 5 Magnetization curves of magnetized products for 20 min and 60 min

500℃下 20 min 焙烧产物中主要物相为赤铁矿,因此其最大磁化强度较低,600℃下 20 min 焙烧产物中开始出现磁铁矿,且 700℃下 20 min 焙烧产物中的主要物相为磁铁矿,因此焙烧产物中的最大磁化强度与磁铁矿含量成正比。

当焙烧时间延长至 60 min 时(图 5(b)),400℃焙烧产物的磁化曲线仍呈扁平状,焙烧温度的升高促使其磁化曲线呈“S”形。焙烧产物中的最大磁化强度由 400℃下的 $7.75 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 升高至 500℃下的 $23.72 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$,700℃下焙烧产物的最大磁化强度为 $28.89 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$,低于 600℃下的 $33.26 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 。结合图 4 结果分析可知,400℃焙烧 60 min 产物中的主要物相依然是赤铁矿,焙烧温度的升高促使赤铁矿转变为磁铁矿,且 600℃和 700℃焙烧产物中的主要物相均为磁铁矿。因此,焙烧产物的最大磁化强度随温度的升高而增加。但是 700℃长时间焙烧会促使磁铁矿进一步转变为氧化亚铁,从而造成焙烧产物做大磁化强度的降低^[25]。

2.2 焙烧产物的磁选回收铁

结合图 4 和图 5 的试验结果可知,高铁赤泥在 600℃磁化焙烧 60 min 即可实现赤铁矿向磁铁矿的转变。由于铝硅酸盐矿物不具有磁性,通过磁选可实现磁铁矿的定向富集。磨矿粒度及磁场强度对磁选结果的影响分别见图 6 和图 7。

由图 6 可知,在 1 000 Gs 磁场条件下进行磁选时,随着磨矿细度的增加,精矿中铁品位呈现出逐渐上升的趋势,而铁回收率则呈先上升后下降的趋

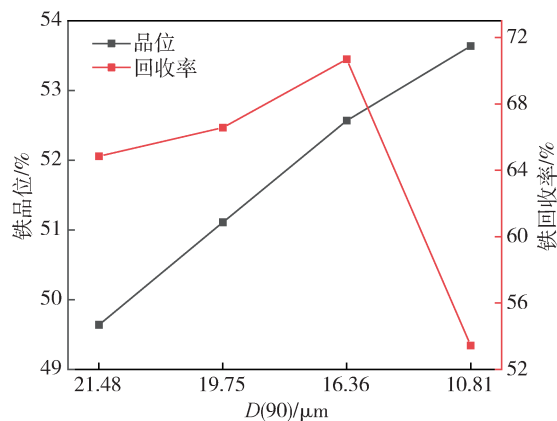


图6 磨矿粒度对磁选指标的影响

Fig. 6 Effect of particle size on magnetic separation results

势。精矿中铁品位由磨矿粒度 $21.48 \mu\text{m}$ 下的 49.64% 逐渐上升至 $10.81 \mu\text{m}$ 的下 53.64%;铁回收率则由磨矿粒度 $21.48 \mu\text{m}$ 下的 64.85% 逐渐上升至 $16.36 \mu\text{m}$ 的下 70.69%,之后降低至 $10.81 \mu\text{m}$ 的下 53.44%。原因在于矿物颗粒细化后,磁性矿物与其他脉石矿物的单体解离度提高,在磁选过程中可实现磁性矿物和弱磁性矿物的有效分离,从而提高精矿中铁品位。粒径变细初期,随着连生颗粒的解离,磁选精矿中磁性矿物较多;当出现过磨现象时,颗粒在矿浆中所受流体阻力增大,易被矿浆流带走,导致不能被磁选回收,使得铁回收率下降。

由图 7 可知,控制磨矿粒度 $D(90)=16.36 \mu\text{m}$,随着磁场强度的增加,磁选精矿的铁品位呈逐渐下

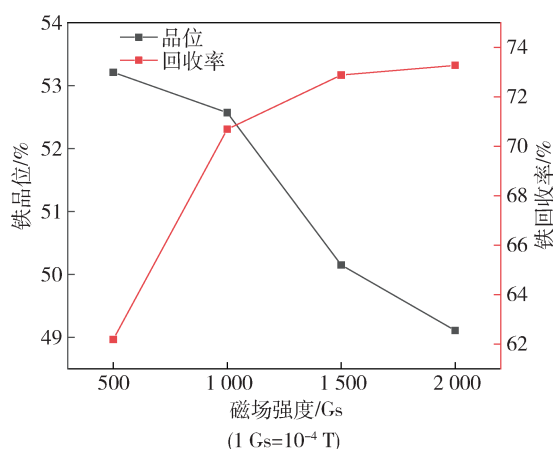


图7 磁场强度对磁选指标的影响

Fig. 7 Effect of magnetic intensity on magnetic separation results

降的趋势。当场强从500 Gs提升至2 000 Gs,铁品位从53.21%降至49.11%。铁品位下降的原因是随着磁场强度的增加,一些含铁矿物与脉石矿物的连生体会被一并回收,从而导致精矿铁品位降低。此外,由于磁场强度增加,精矿中总铁质量增加,铁回收率得到有效提升。当场强从500 Gs升至2 000 Gs,铁回收率从62.19%升至73.27%。故经综合考虑,在磨矿粒度16.36 μm 和磁场强度1 000Gs下,可获得铁品位为52.57%、铁回收率为70.69%的磁选精矿,此时精矿产率为57.99%。因此,采用磁化焙烧-磁选工艺进一步处理,还原拜耳法赤泥减排量由55%升至80%。

2.3 磁选产物分析

前文研究结果表明,通过磁化焙烧可将高铁赤泥中尾矿的赤铁矿定向转变为磁铁矿,但是焙烧产物中部分磁铁矿难以通过磨矿-磁选被分离。

针对磁选产物进行化学分析,其结果见表2。磁选精矿中铁和氧化钛品位明显高于尾矿,而氧化铝、氧化硅和氧化钠含量又低于尾矿,因此,通过磁选可以实现焙烧产物中磁铁矿和铝硅酸盐矿物间的有效分离,但是氧化钛随着磁铁矿进入精矿,致使精矿中铁品位难以进一步提高。

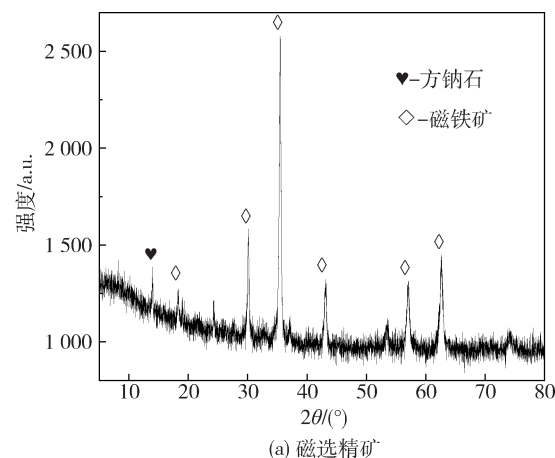
磁选精矿和尾矿的物相分析结果见图8。磁选精矿和磁选尾矿中的主要物相均为磁铁矿和方钠石。通过对比可知,磁选精矿XRD图谱中磁铁矿衍射峰强度明显高于磁选尾矿,而前者方钠石衍射峰强度低于后者。因此,通过磨矿-磁选可实现焙烧

产物中磁性矿物和非磁性矿物间的分离。

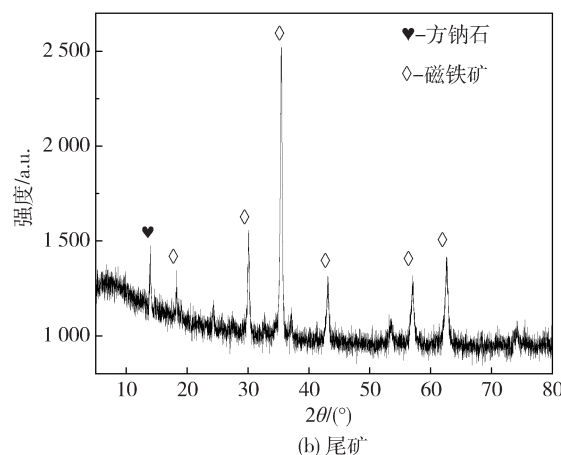
表2 磁选产品的化学分析结果(质量分数)

Table 2 Chemical compositions of magnetic products (mass fraction) %

检测样	TFe	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Na ₂ O
磁选精矿	52.57	6.02	6.21	8.56	3.02
磁选尾矿	38.12	14.85	13.12	3.85	11.11



(a) 磁选精矿



(b) 尾矿

图8 磁选精矿及尾矿的XRD图

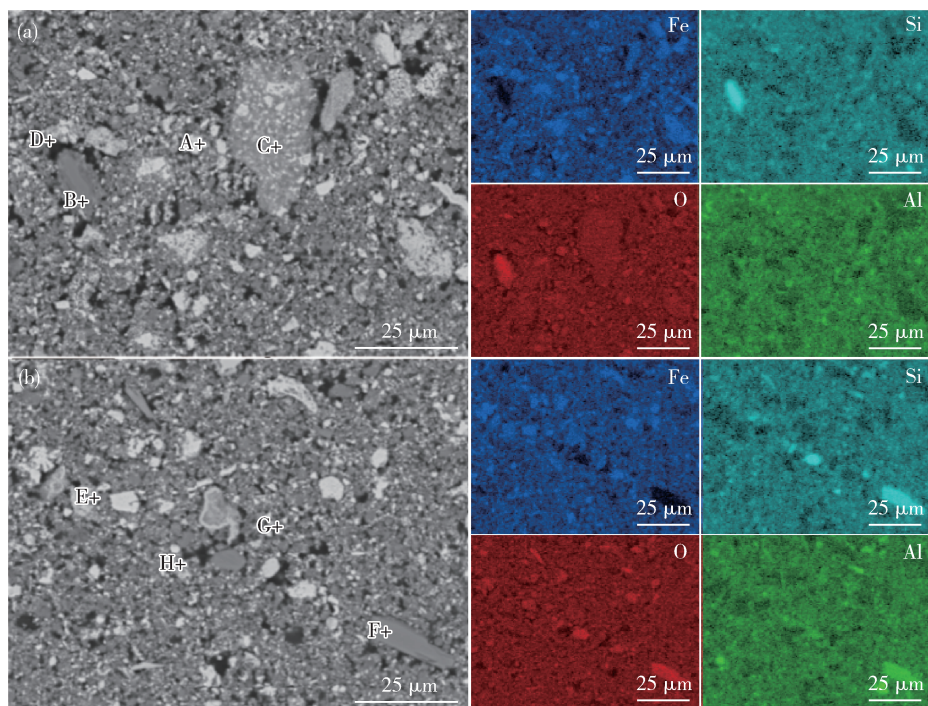
Fig. 8 XRD patterns of magnetic concentrate and tailing

为进一步明确磁化焙烧产物中含铁矿物和铝硅酸盐矿物难以高效分离的原因,对磁选产物进行SEM-EDS分析,其结果见图9和表3。结合能谱分析结果可知,图9中白色颗粒为磁铁矿颗粒,灰黑色颗粒为石英颗粒,而粒度较细的灰色颗粒为铝硅酸盐矿物。精矿中的磁铁矿颗粒尺寸明显大于尾矿中的磁铁矿颗粒,但是磁铁矿颗粒均被铝硅酸盐矿物包裹。其原因为,高铁赤泥粒度较细,在磁化焙

烧过程中仅能实现赤铁矿定向转变为磁铁矿,但是对焙烧产物中的颗粒尺寸无明显影响。后续磨矿过程为实现磁铁矿颗粒的有效解离,需要控制磨矿粒度在 $16.36\text{ }\mu\text{m}$ 。此时会发现微细颗粒间的团聚,致使磁选过程中微细粒的铝硅酸盐矿物随着磁铁矿进入精矿,而粒度较细的磁铁矿因铝硅酸盐矿物的影响而进入尾矿。最终,还原拜耳法高铁赤泥经

磁化焙烧-磁选工艺可以实现部分含铁矿物的定向富集,但是其分离效率有限。

从磁选产物的粒度分析可知,磁化焙烧产物在磨矿过程中微细颗粒团聚是造成磁铁矿和铝硅酸盐矿物难以高效分离的主要原因,后续会在磨矿过程中引入分散剂以抑制微细颗粒的团聚,并进一步提高磁选精矿中铁回收率。



(a)精矿;(b)尾矿

图9 磁选精矿及尾矿的SEM图

Fig. 9 SEM images of magnetic concentrate and tailing

表3 磁选精矿及尾矿的能谱分析结果(质量分数)

Table 3 EDS analysis results of magnetic concentrate and tailing (mass fraction)

%

检测位点	O	Fe	Na	Al	Si	Ti	Ca	S	Cl	K	Cr
A	23.39	75.54	0.16	0.22	0.38	0.32	—	—	—	—	—
B	48.13	1.43	0.47	0.10	49.87	—	—	—	—	—	—
C	38.69	17.42	2.91	4.67	4.10	1.61	30.35	0.24	—	—	—
D	6.54	39.38	6.41	10.38	13.66	4.74	1.45	1.23	0.70	0.51	—
E	25.43	67.37	0.14	1.39	0.20	4.76	—	—	—	—	0.71
F	43.94	1.47	5.62	14.05	29.58	—	4.89	—	—	0.46	—
G	36.09	15.28	14.98	15.15	0.80	1.57	0.46	0.80	0.22	0.21	—
H	9.26	54.94	7.46	9.50	8.44	7.01	1.35	1.02	1.01	—	—

3 结论

新型还原拜耳法处理高铁铝土矿后,尾矿中仍

然含有44.93%铁,针对此部分铁资源,本研究采用磁化焙烧-磁选工艺进行了强化回收,通过单因素试验考察了工艺参数对产物的影响,且对产物和尾

矿进行了表征分析,探讨了磁化焙烧行为及磁选行为,得到以下主要结论。

1)还原拜耳法高铁赤泥尾矿主要物相为赤铁矿,粒度主要分布在0~10 μm 区间,平均粒径为1.98 μm 。

2)磁化焙烧试验结果表明,焙烧时间延长及焙烧温度升高均对还原拜耳法高铁赤泥中赤铁矿定向转变为磁铁矿起促进作用。在600℃且焙烧时间 ≥ 40 min的条件下,产物中主要物相为磁铁矿。

3)在磨矿粒度 $D(90)=16.36$ μm 和磁场强度1 000 Gs的条件下,可获得铁品位为52.57%和铁回收率为70.69%的磁选精矿,此时精矿产率57.99%;采用磁化焙烧-磁选工艺进一步处理,可使还原拜耳法赤泥减排量由55%提高至80%。

4)部分磁铁矿未能回收的原因是在磨矿过程中微细颗粒产生了团聚,造成磁铁矿和铝硅酸盐矿物难以高效分离,后续考虑在磨矿过程中引入分散剂来进一步提高磁选精矿中铁回收率。

[参考文献]

- [1] 刘洵瑞,李梦飞,黄玉娇,等. 高铁拜耳法赤泥脱铝提铁研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(7): 249-256.
Liu Xunrui, Li Mengfei, Huang Yujiao, et al. Study on de-aluminization and iron extraction from high-iron Bayer process red mud[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(7): 249-256.
- [2] 杜五星,郭鑫,张建强,等. 高铁赤泥闪速磁化焙烧-弱磁选铁试验研究[J]. 中国有色冶金, 2025, 54(5): 49-57.
Du Wuxing, Guo Xin, Zhang Jianqiang, et al. Flash magnetizing roasting-low intensity magnetic separation process for preparing iron concentrate from high-iron red mud[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(5): 49-57.
- [3] Li J T, Li X W, Fischel M, et al. Applying red mud in cadmium contamination remediation: A scoping review[J]. Toxics, 2024, 12(5): 347-362.
- [4] 潘晓林,吕中阳,吴鸿飞,等. 赤泥回收铁铝资源技术研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(11): 3879-3899.
Pan Xiaolin, Lyu Zhongyang, Wu Hongfei, et al. Research status and prospect of iron and aluminum recovery technology from red mud[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(11): 3879-3899.
- [5] 姚雨琦,邓博纳,张静,等. 赤泥资源化利用及有价组分回收工艺研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2026, 55(3): 54-57.
Yao Yuqi, Deng Bona, Zhang Jing, et al. Research progress on resource utilization of red mud and recovery process of valuable components[J]. Industrial Minerals & Processing, 2026, 55(3): 54-57.
- [6] 杨永亮,徐昊. 赤泥选矿过程中有价元素回收技术研究[J]. 冶金与材料, 2025, 45(4): 65-67.
Yang Yongliang, Xu Hao. Research on valuable element recovery technology in red mud beneficiation process[J]. Metallurgy and Materials, 2025, 45(4): 65-67.
- [7] 张小雷,吕国志,张延安,等. 钙化生物质转型法处理高铁赤泥试验研究[J]. 中国有色冶金, 2025, 54(1): 129-137.
Zhang Xiaolei, Lyu Guozhi, Zhang Ting'an, et al. Experimental study on the treatment of high-iron red mud by calcified biomass transformation method[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(1): 129-137.
- [8] 齐川. 赤泥中有价金属提取的进展[J]. 轻金属, 2019(6): 6-10, 49.
Qi Chuan. Progress in extraction of valuable metals from red mud[J]. Light Metals, 2019(6): 6-10, 49.
- [9] 柳佳建,陈伟,周康根,等. 赤泥中铁的回收利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(3): 70-75.
Liu Jiajian, Chen Wei, Zhou Kanggen, et al. Research progress of iron recovery from red mud[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(3): 70-75.
- [10] Rai S, Nimje M, Chaddha M, et al. Recovery of iron from bauxite residue using advanced separation techniques[J]. Minerals Engineering, 2019, 134: 222-231.
- [11] 郑霞. 高铁赤泥旋流器分级提铁工艺研究试验[J]. 中国设备工程, 2024(10): 127-129.
Zheng Xia. Research and test on the classification iron extraction process of red mud cyclone of red mud cyclone for high-speed railway[J]. China Plant Engineering, 2024(10): 127-129.
- [12] 罗丹,刘志华,杨俊,等. 赤泥中铁、铝回收利用技术研究进展[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(31): 177-180.
Luo Dan, Liu Zhihua, Yang Jun, et al. Research progress of iron and aluminum recovery and utilization technology in red mud[J]. Technology Innovation and Application, 2025, 15(31): 177-180.
- [13] Pan X L, Wu H F, Lyu Z Y, et al. Recovery of valuable metals from red mud: A comprehensive review[J]. Science of The Total Environment, 2023, 904: 166686.
- [14] 叶鑫,赵爱春,刘宸嘉,等. 赤泥中有价金属的回收工艺研究进展[J]. 湿法冶金, 2023, 42(3): 229-235.
Ye Xin, Zhao Aichun, Liu Chenjia, et al. Research progress on recovery of valuable metals from red mud[J]. Hydrometallurgy of China, 2023, 42(3): 229-235.
- [15] 黄荃莅,黄魁,卢远桓,等. 草酸浸出和太阳光催化回收赤泥中的铁和铝[J]. 环境工程, 2021, 39(12): 199-205.
Huang Quanli, Huang Kui, Lu Yuanhuan, et al. Recovery of iron and aluminum from red mud by oxalic acid leaching and solar photocatalysis[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(12): 199-205.

- [16] Yang Y, Wang X, Wang M, et al. Recovery of iron from red mud by selective leach with oxalic acid[J]. Hydrometallurgy, 2015, 157: 239–245.
- [17] 胡千, 梅明. 赤泥中铁回收技术研究进展[J]. 广州化工, 2024, 52(7): 21–23.
- Hu Qian, Mei Ming. Research progress on iron recovery technology of red mud[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2024, 52(7): 21–23.
- [18] 孙涛涛, 荣嵘, 洪亚军, 等. 赤泥提铁研究进展[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(2): 22–33.
- Sun Taotao, Rong Rong, Hong Yajun, et al. Research progress on iron recovery from red mud [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(2): 22–33.
- [19] Jin J, Liu X, Yuan S, et al. Innovative utilization of red mud through co-roasting with coal gangue for separation of iron and aluminum minerals [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2021, 98: 298–307.
- [20] Liu X, Gao P, Yuan S, et al. Clean utilization of high-iron red mud by suspension magnetization roasting [J]. Minerals Engineering, 2020, 157: 106553.
- [21] Li Q D, Lyu G Z, Wang S, et al. Summary of research progress on the separation and extraction of iron from Bayer red mud[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2025, 11(1): 1–28.
- [22] 胡志鹏, 张盈, 郑诗礼, 等. 还原拜耳法高铁赤泥碱水热-络合溶解提质工艺研究[J]. 过程工程学报, 2024, 24(10): 1208–1221.
- Hu Zhipeng, Zhang Ying, Zheng Shili, et al. Research on the process of improving the grade of high-iron red mud from the reductive Bayer process by the alkali hydrothermal and complexation dissolution method [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2024, 24(10): 1208–1221.
- [23] Wang Y L, Li X B, Zhou Q S, et al. Reduction of red mud discharge by reductive Bayer digestion: a comparative study and industrial validation[J]. JOM, 2020, 72(1): 270–277.
- [24] Zhou G T, Wang Y L, Qi T G, et al. Comparison of the effects of Ti- and Si-containing minerals on goethite transformation in the Bayer digestion of goethitic bauxite [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(9): 1705–1715.
- [25] Luo L Q, Zhang X X, Wang H Y, et al. Comparing strategies for iron enrichment from Zn- and Pb-bearing refractory iron ore using reduction roasting-magnetic separation [J]. Powder Technology, 2021, 393: 333–341.

Recovery enhancement of Fe-bearing minerals from high-iron red mud tailing generated in the reductive Bayer process through magnetization roasting-magnetic separation

Wang Xiangyu¹, Wang Hongyang^{1,2}, Zhou Huili¹, Gao Zhonglin¹, Zhang Xiaoxue²

(1. School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Center for Analysis and Testing, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: There is still 44.93% of iron in the tailing, which is generated during the treatment of high-iron bauxite by the novel reductive Bayer process. This study adopted a magnetization roasting-magnetic separation process for enhanced recovery of Fe-bearing minerals in the tailing. The effects of process parameters on the products were investigated through single-factor experiments. The roasted products, magnetic concentrate, and tailings were characterized to analyze the magnetization roasting behavior and magnetic separation behavior. The main conclusions are as follows: the main mineral in the tailings is hematite, with particle size mainly distributed in the range of 0~10 μm and an average particle size of 1.98 μm . The magnetization roasting results shows that prolonging roasting time and temperature both promote the directional conversion of hematite into magnetite in the tailing. Under the roasting temperature of 600°C and roasting time of ≥ 40 min, the dominant phase in the product is magnetite. At a grinding fineness of $D(90) = 16.36 \mu\text{m}$ and a magnetic field intensity of 1 000 Gs, a concentrate with yield of 57.99%, iron grade of 52.57% and iron recovery of 70.69% was obtained, which increased the resource utilization ratio of high-iron red mud from 55% to 80%. The incomplete recovery of magnetite is attributed to the agglomeration of fine particles during grinding, which hinders the efficient separation of magnetite from aluminosilicate minerals. In subsequent work, the introduction of a dispersant during grinding is being considered to further improve the iron recovery in the magnetic concentrate.

Key words: reductive Bayer process; high-iron red mud; magnetic roasting; magnetic separation; Fe-bearing minerals recovery; red mud reduction; particle agglomeration