

冶炼工艺

引文格式: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.

高铁赤泥闪速磁化焙烧-弱磁选铁试验研究

杜五星^{1,2}, 郭鑫^{1,2}, 张建强^{1,2}, 张志永^{1,2}, 张楠^{1,2}

(1. 中铝郑州有色金属研究院有限公司, 河南 郑州 450041;

2. 国家铝冶炼工程技术研究中心, 河南 郑州 450041)

[摘要] 赤泥中铁矿物主要以赤铁矿、褐铁矿以及针铁矿的形式存在,直接磁选铁回收率低,且难以获得高品质铁精矿;悬浮磁化焙烧工艺在铁矿资源提取方面具备显著优势,一方面,悬浮焙烧可保证细小粒度赤泥的反应效率,另一方面,闪速磁化焙烧时间短、磁化效果好、能耗低。本文以某企业赤泥(Fe_2O_3 62.15wt%)为原料,采用闪速磁化焙烧-弱磁选铁工艺对其进行了处理,考察了各工艺参数对选铁效果的影响,并通过表征分析探讨了赤泥中物相的重构行为及磁化焙烧的反应机理,得到以下主要结论。在焙烧流化速度0.3 m/s、焙烧温度800℃、焙烧时间2.0 min、CO浓度15%、磨矿细度-0.032 mm含量72%、弱磁选场强0.25 T的条件下,得到的铁精矿产率为67.69%(TFe品位56.21%)、回收率为87.45%,尾矿产率为22.51%(TFe品位为24.26%),可用于制备水泥;表征分析结果显示,原赤泥中弱磁性的赤(褐)铁矿在闪速磁化焙烧过程中被定向还原成了强磁性的磁铁矿,部分一水铝石、三水铝石与一水软铝石脱水转变为 Al_2O_3 ,而石英、金红石等脉石矿物没有变化;磁化焙烧机理主要为:CO与赤泥中赤(褐)铁矿表面 Fe^{3+} 反应,生成 Fe^{2+} , Fe^{2+} 与 Fe_3^+ 反应生成磁铁矿 Fe_3O_4 ,外层的 Fe^{2+} 和电子通过晶格空位向内层 Fe_2O_3 扩散,经过晶格重建,转变为磁铁矿 Fe_3O_4 ,内层 O^{2-} 向外层扩散,与CO作用生成 CO_2 而不断脱去。

[关键词] 高铁赤泥; 闪速磁化焙烧; 弱磁选; 矿相重构; 铁精矿; 反应机理

[中图分类号] TF803.11; X758 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2025)05-0049-09

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2025.05.005

0 引言

赤泥是氧化铝生产过程中产生的固体废弃物,因碱性强、粒度细、性质复杂等特性使其难以利用,

目前普遍采用堆存工艺进行处理^[1-3]。鉴于赤泥中富含铁、钛、锂、镓、稀土等多种有价金属,其堆存过程不仅导致环境污染,还造成了资源的二次浪费^[4-5]。2023年我国赤泥年综合利用率仅为9.80%,离国家发展改革委《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》文件要求综合利用率达到60%以上的目标值仍有巨大差距。钢铁工业作为国民经济的重要支柱产业,我国拥有丰富的铁矿资源储量,然而资源禀赋差,大部分属于低品位且复杂难选的矿石,难以有效满足国内钢铁行业及社会发展的需求,使得我国铁矿进口量逐年增加,

[收稿日期] 2025-04-16

[第一作者] 杜五星(1990—),男,硕士研究生,工程师,研究方向为浮选理论与工艺及资源综合利用。

[通信作者] 郭鑫(1983—),男,博士研究生,正高级工程师,研究方向为铝土矿选矿及资源综合利用。

[基金项目] 国家重点研发计划资助(2022YFC2904400)。

2023年铁矿石进口量已达到11.6亿t,对外依存度超过80%^[6-7]。因此,从赤泥中回收含铁矿物不仅能实现赤泥固废的有序减量化、资源化,降低氧化铝企业环境成本并缓解环保压力,还能为地区钢铁企业提供原料,既满足生态文明建设,还能满足国家工业发展需求,保障铁资源安全供给,意义重大。

高铁赤泥中的铁矿物主要以赤铁矿、褐铁矿以及针铁矿的形式存在,针对从高铁赤泥中回收铁矿物的技术,国内外科研工作者进行了大量研究,提出了直接磁选法、重选-磁选联合法、还原焙烧-磁选法以及磁化焙烧-磁选法等多种工艺^[8-10]。由于赤泥中铁铝矿物共生关系复杂,含有大量铝针铁矿(褐铁矿),且粒度较细,颗粒容易团聚,导致赤泥直接磁选工艺难以获得高品质铁精矿。悬浮磁化焙烧工艺在铁矿资源提取方面具备显著优势,近年来,也被拓展应用于高铁铝土矿、高磷褐铁矿、铁锰矿等复杂矿物的有价成分分离^[11-13]。针对Fe₂O₃含量30wt%以上的高铁赤泥,选用闪速磁化焙烧-弱磁选

铁工艺作为其选铁工艺,一方面,悬浮焙烧可保证以粒度细为特征的赤泥的反应效率,另一方面,闪速磁化焙烧时间短、磁化效果好、能耗低,进一步降低了赤泥处理成本^[14, 15]。已有通过悬浮磁化焙烧清洁利用高铁赤泥的研究实现了铁矿物与赤泥分离,然而尚存在焙烧时间长、工业级设备中局部温度或气体浓度不均易导致过度还原的问题,因此需要结合生产实际,进一步优化赤泥处理的悬浮磁化焙烧工艺^[16-18]。本文重点研究了高铁赤泥“闪速磁化焙烧-弱磁选铁”技术,并探讨了闪速磁化焙烧对高铁赤泥中铁矿物矿相重构行为的影响,旨在为高铁赤泥的减量化与资源化利用提供参考与借鉴。

1 赤泥性质

1.1 赤泥组成分析

高铁赤泥为河南某氧化铝厂的海外铝土矿低温溶出赤泥,对其进行多元素与物相组成分析,为有用矿物的分离富集提供指导,分析结果见表1、表2。

表1 赤泥多元素分析结果(质量分数)

Table 1 The multi element analysis results of red mud(mass percent) %

成分	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TFe	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	灼减
含量	13.48	3.55	62.15	43.51	3.79	0.17	1.22	3.1	0.19	9.96
成分	Cr ₂ O ₃	P	S							
含量	0.19	0.077	0.049							

表2 赤泥物相组成分析结果(质量分数)

Table 2 The phase composition analysis results of red mud(mass percent) %

物相	褐铁矿	赤铁矿	钠硅渣	石英	钙钛矿	金红石	一水软铝石
含量	34.51	35.50	6.85	1.70	3.07	2.13	3.08
物相	水化石榴石	三水铝石	一水硬铝石	方解石			
含量	2.08	5.11	2.03	1.63			

根据表1分析结果可知,赤泥主要有价金属元素为铁,TFe品位为43.51%,属于高铁赤泥;Al₂O₃、SiO₂、TiO₂的品位较高,分别为13.48%、3.55%和3.79%;有害元素硫、磷的品位较低,分别为0.077%和0.049%。由表2物相分析结果可知,高铁赤泥中的有价元素铁主要以赤(褐)铁矿的形式赋存,赤泥中还含有钠硅渣、水化石榴石、三水铝石、一水硬铝石、方解石、金红石、钙钛矿以及石英等脉石矿物;其中褐铁矿占铁矿物的49.29%,且褐铁矿磁性相较于赤铁矿更弱,这一特性直接增加了通过

磁选方式回收含铁矿物的难度。

1.2 赤泥粒度

采用激光粒度分析仪对高铁赤泥样品进行分析,高铁赤泥粒度分布如图1以及表3所示。

根据图1、表3分析结果可知,高铁赤泥的粒径分布呈双峰分布,粒度分布较广,-30 μm 粒径分布体积占总量的37.71%,-10 μm 占20.50%,细粒级分布较多,也有一定的粗粒级分布,+150 μm 占19.29%。由此可知在闪速磁化焙烧过程中需要控制好气体的流化速度以避免细粒级的损失。

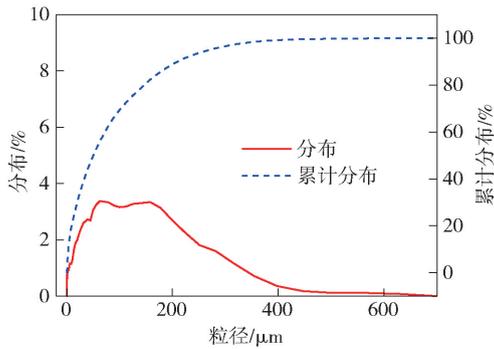


图1 高铁赤泥粒度分布图

Fig. 1 The grain size distribution map of red mud from high-speed railway

表3 高铁赤泥主要粒度分布

Table 3 The main particle size distribution of high iron red mud/%

粒度/ μm	分布占比/%	正累计分布/%	负累计分布/%
+150 μm	19.29	19.29	100
-150 ~ +74 μm	20.00	39.29	80.71
-74 ~ +45 μm	13.68	52.97	60.71
-45 ~ +38 μm	3.99	56.96	47.03
-38 ~ +30 μm	5.33	63.29	43.04
-30 ~ +20 μm	7.75	71.04	37.71
-20 ~ +10 μm	9.46	80.50	29.96
-10 μm	20.50	100.00	20.50

2 试验介绍

2.1 高铁赤泥闪速磁化焙烧-弱磁选铁流程

将烘干的高铁赤泥经过研磨和筛分后,得到入烧原料,在此过程中,以适当的加热速率将闪速磁化炉温度升高到所需温度,当温度达到设定值并保持稳定后,先用 N_2 将焙烧炉内的氧气排空,后将入烧原料从加料口送入闪速焙烧炉中,接着将流化气体 N_2 和还原气体 CO 经流量计计量,以 0.3 m/s 的流化速度通过焙烧炉下端的分布板进入炉腔,进行闪速磁化焙烧,焙烧一定时间后,关闭流化气体和还原气体,打开 N_2 储气罐阀门,将焙烧炉内的物料送入水中冷却,之后将焙烧样进行磨矿和弱磁选,分离出铁精矿与铁尾矿,最后,对铁精矿和铁尾矿进行称量和检测,以分析闪速磁化焙烧-弱磁选铁的效果,试验流程示意图如图2。在试验过程中,采用单因素试

验法分别考察闪速磁化焙烧温度、焙烧时间、 CO 浓度、磨矿细度以及磁选场强对高铁赤泥中铁矿物回收的影响,以此评估其对闪速磁化焙烧-弱磁选铁指标的影响。

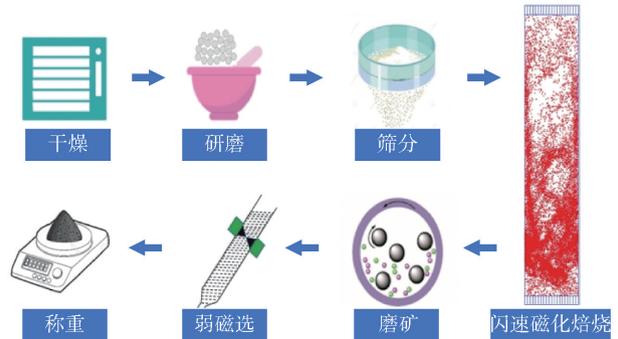


图2 高铁赤泥闪速磁化焙烧-弱磁选铁试验流程示意图

Fig. 2 The high iron red mud suspension magnetization roasting-weak magnetic iron separation test process diagram

2.2 试验设备

试验所用设备主要有 PANalytical X-pert PRO 型 X 射线衍射仪、Zetium 型 X 射线荧光光谱分析仪、Mastersizer-3000 型激光粒度仪、 $\text{XMQ}-\phi 150 \times 50$ 型球磨机、自制实验室悬浮焙烧炉、 $\text{XCGS}-50$ 型磁选管、 $\text{DL}-5\text{C}$ 型盘式真空过滤机(水循环)、 $\text{GZX}-9030\text{MBE}$ 型鼓风干燥箱、 $\text{RK/XPM}-\phi 120 \times 3$ 型三头研磨机、 $\text{BSA}2202\text{S}$ 型电子天平。

2.3 分析及计算方法

1) 全铁(TFe)品位分析方法

采用化学分析法测定各样品的全铁品位。具体步骤如下:首先,将样品研磨至规定细度并充分烘干;然后,使用盐酸、硝酸、氢氟酸和高氯酸等混合酸对样品进行完全消解,使所有铁元素转入溶液;最后,采用重铬酸钾滴定法(即 GB/T 6730.5—2007 铁矿石化学分析方法)或电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-OES)测定溶液中的铁含量,并计算得出样品的 TFe 品位。每个样品平行测定三次,取平均值作为最终结果。

2) 产率的计算方法

弱磁选流程产品产率主要以产品 TFe 品位进行计算,见式(1)。

$$\gamma = (\alpha - \theta) / (\beta - \theta) \times 100\% \quad (1)$$

式中： γ 为精矿产率，%； α 为原矿 TFe 品位，%； β 为原矿 TFe 品位，%； θ 为尾矿 TFe 品位，%。

3) 回收率计算方法

弱磁选铁精矿中铁的回收率(ε)，用于评估铁元素从原矿中回收至精矿中的效率，其计算公式见式(2)。

$$\varepsilon = (\gamma \times \beta) / \alpha \times 100\% \quad (2)$$

3 结果与讨论

3.1 磁化焙烧温度试验

在闪速磁化焙烧过程中，设定流化速度 0.3 m/s、焙烧时间 1.5 min、还原气体 CO 浓度 15%、磨矿细度 -0.023 mm 含量 72.00%、磁选场强 0.20 T，依据图 2 所示流程，探究磁化焙烧温度对高铁赤泥闪速磁化焙烧-弱磁选铁指标的影响，结果见图 3。

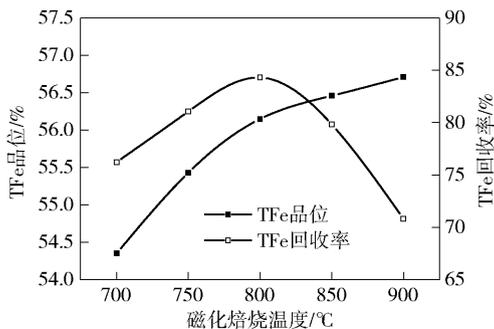


图3 磁化焙烧温度试验结果

Fig. 3 The experimental results of magnetization roasting temperature

由图 3 结果可知，温度对高铁赤泥闪速磁化焙烧-弱磁选指标具有显著影响。铁精矿的 TFe 品位整体上随着闪速焙烧的温度升高而增加，这是由于温度升高加快了赤(褐)铁矿还原生成磁铁矿的反应速率，导致焙烧矿的磁性不断增强，铁精矿 TFe 品位在 54.35%~56.71% 之间波动；而铁精矿 TFe 回收率则随温度升高呈现先升后降的趋势，当磁化焙烧温度超过 800℃ 后，回收率开始大幅下降，这是由于磁化反应生成的强磁性矿物磁铁矿(Fe_3O_4)继续与 CO 反应，生成了磁性相对较弱的 FeO(浮氏体)，导致部分有用矿物在弱磁选尾矿中损失^[9, 11]。综合考虑铁精矿的 TFe 品位、回收率及焙烧成本，发现当温度为 800℃ 时，高铁赤泥的闪速磁化焙烧-弱磁选铁指标较为理想，此时铁精矿的产率为 65.33%、TFe 品位为 56.15%、TFe 回收率为 84.31%。

3.2 磁化焙烧 CO 浓度试验

在闪速磁化焙烧流化速度 0.3 m/s、焙烧时间 1.5 min、焙烧温度 800℃、磨矿细度 -0.023 mm 含量 72.00%、磁选场强 0.20 T 的条件下，按图 2 所示流程考察还原气体 CO 浓度对高铁赤泥闪速磁化焙烧-弱磁选铁指标的影响，结果如图 4 所示。

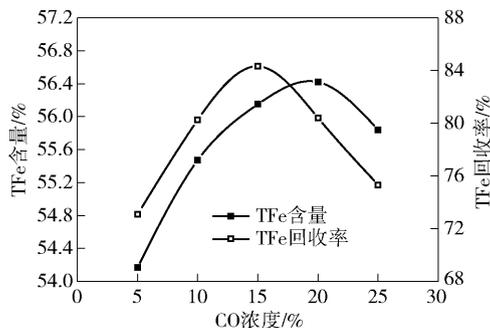


图4 磁化焙烧 CO 浓度试验结果

Fig. 4 The experimental results of CO concentration in magnetized roasting

根据图 4 试验结果可知，随着还原气体 CO 浓度的不断增加，铁精矿 TFe 品位与回收率呈现先升后降的趋势。铁精矿的 TFe 回收率在 CO 浓度超过 15% 以后开始下降，而 TFe 品位在 CO 浓度超过 20% 后开始降低。当 CO 浓度由 15% 提升至 20% 时，铁精矿 TFe 品位从 56.15% 增至 56.42%，而 TFe 回收率则从 84.31% 降至 80.41%；说明 CO 浓度超过 15% 后，反应速率加快，导致过还原现象出现^[19]。综合考虑铁精矿 TFe 回收率和经济成本，确定还原气体 CO 浓度为 15% 较为适宜高铁赤泥闪速磁化反应。

3.3 磁化焙烧时间试验

在闪速磁化焙烧流化速度为 0.3 m/s，焙烧温度为 800℃，还原气体 CO 浓度为 15%，磨矿细度 -0.023 mm 含量为 72.00%，磁选场强为 0.20 T 的条件下，按图 2 所示流程考察磁化焙烧时间对高铁赤泥闪速磁化焙烧-弱磁选铁指标的影响，结果如图 5 所示。

根据图 5 的试验结果可知，焙烧时间对高铁赤泥闪速焙烧-弱磁选铁指标的影响较为显著，随着闪速焙烧时间的不断延长，铁精矿 TFe 品位与回收率呈现先升后降的趋势。当焙烧时间由 1 min 延长至 2 min 时，铁精矿 TFe 品位由 55.84% 提升至 56.32%，TFe 回收率由 78.81% 升至 86.39%，表明

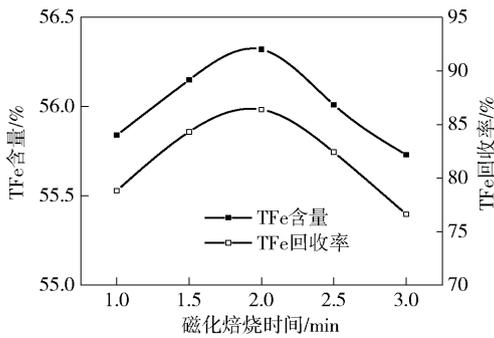


图5 磁化焙烧时间试验结果

Fig. 5 The results of magnetization roasting time test

增加闪速磁化焙烧时间有利于高铁赤泥中弱磁性的赤(褐)铁矿向强磁性的磁铁矿定向转化,从而提升铁精矿 TFe 品位和回收率;当焙烧时间继续延长至 3.0 min 时,铁精矿的 TFe 品位由 56.32% 下降至 55.73%, TFe 回收率由 86.39% 降至 76.61,说明闪速磁化焙烧时间过长,会导致已经磁化还原的强磁性矿物出现过还原,生成弱磁性的 FeO(浮氏体)^[11],进而导致铁精矿的 TFe 品位和铁回收率下降。因此,确定悬浮磁化焙烧时间为 2.0 min,此时铁精矿的产率为 66.74%, TFe 品位为 56.32%, TFe 回收率为 86.39%。

3.4 磨矿细度试验

在闪速磁化焙烧流化速度 0.3 m/s、焙烧时间 2.0 min、焙烧温度 800 °C、还原气体 CO 浓度 15%、磁选强度 0.20 T 的条件下,按图 2 所示流程考察焙烧样磨矿细度对高铁赤泥闪速磁化焙烧-弱磁选铁指标的影响,结果见图 6。

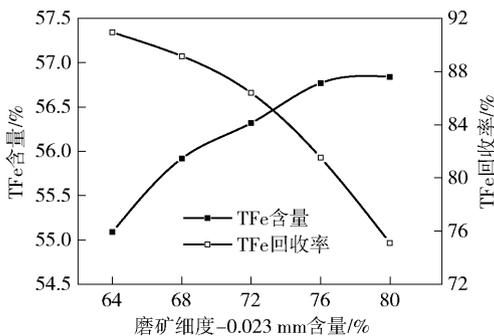


图6 焙烧样磨矿细度试验结果

Fig. 6 The grinding fineness test results of roasted sample

根据图 6 试验结果可知,铁精矿的 TFe 品位随磨矿细度的增加呈现先升后平稳的趋势,而铁精矿的 TFe 回收率随着磨矿细度的增加呈不断降低的趋势。当焙烧后赤泥磨矿细度 -0.023 mm 含量为 72.00% 时,铁精矿的 TFe 品位为 56.32%,继续增加磨矿细度,铁精矿的 TFe 品位继续提高并趋于平稳,而铁精矿的 TFe 回收率则大幅度降低,这是由于磨矿细度过细造成磁铁矿颗粒收到的磁捕获力不足从而损失在尾矿中,因此确定磨矿细度 -0.023 mm 含量为 72.00%。

3.5 弱磁选场强试验

在闪速磁化焙烧流化速度 0.3 m/s、焙烧时间 2.0 min、焙烧温度 800 °C、还原气体 CO 浓度 15%、磨矿细度 -0.023 mm 含量 72.00% 的条件下,按图 2 所示流程考察弱磁选场强对高铁赤泥闪速磁化焙烧-弱磁选铁指标的影响,结果见图 7。

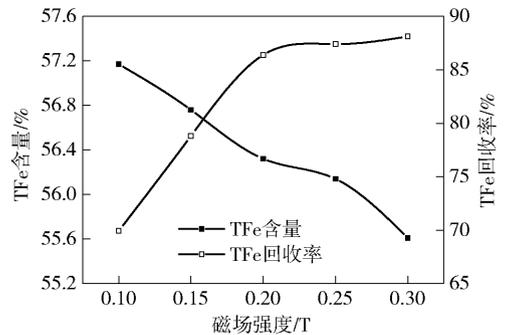


图7 弱磁选磁场强度试验结果

Fig. 7 The field strength test results of weak magnetic separation

根据图 7 试验结果可知,随着磁选场强的不断增加,铁精矿的 TFe 品位逐渐降低,而铁精矿的 TFe 回收率呈现先升高后平稳的趋势。当磁选管磁场强度超过 0.25 T 后,铁精矿的回收率趋于平缓,但是铁精矿 TFe 含量继续下降,且下降幅度比较大,由 56.14% 降到 55.61%。综合考虑铁精矿的 TFe 品位与回收率,确定弱磁选的磁场强度为 0.25 T。

3.6 闪速磁化焙烧-弱磁选铁验证试验

在闪速磁化焙烧流化速度 0.3 m/s、焙烧时间 2.0 min、焙烧温度 800 °C、还原气体 CO 浓度 15%、磨矿细度 -0.023 mm 含量 72.00%、弱磁选场强 0.25 T 的条件下,按图 2 所示流程进行闪速磁化焙烧-弱磁选铁验证试验并对选铁尾矿进行多元素分

析,以考察高铁赤泥“闪速磁化焙烧-弱磁选铁”技术的可行性与可靠性,结果见表4、表5。

表4 高铁赤泥“闪速磁化焙烧-弱磁选铁”验证试验结果/%

Table 4 The verification test results of high iron red mud “Flash Magnetizing Roasting-low intensity magnetic separation” /%

产品名称	产率	TFe 含量	TFe 回收率
铁精矿	67.69	56.21	87.45
铁尾矿	22.51	24.26	12.55
烧失	9.80	—	—
原赤泥	100.00	43.51	100.00

表5 选铁尾矿多元素分析结果(质量分数)

Table 5 The multi element analysis results of selecting iron tailings(mass percent)

成分	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TFe	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	灼减量
含量	32.33	11.26	34.66	24.26	5.43	0.19	1.58	8.09	0.40	5.27

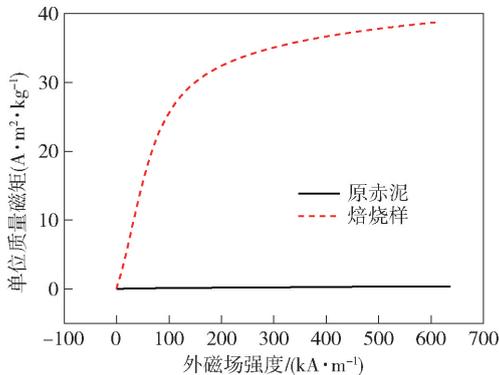


图8 原赤泥与焙烧样磁性曲线

Fig.8 The magnetic curves of original red mud and roasted samples

根据图8可知,整体上原赤泥和焙烧样的单位质量磁矩均与外磁场强度呈曲线关系。随着外磁场强度的增加,原赤泥磁矩随外磁场增长变化并不显著,这表明原赤泥具有弱磁性;而焙烧样在外磁场增加初期,磁矩显著升高,达到某一特定值后,由于磁饱和现象的出现,磁矩趋于平稳,这表明焙烧样展现出强磁性。

3.8 原赤泥与焙烧矿物相分析

为考察高铁赤泥闪速磁化焙烧前后物相变化,对原赤泥以及最优条件下所得焙烧样进行XRD分析和铁化学物相分析,分析结果如图9和表6所示。

从图9与表6的分析结果可知,原赤泥 TFe 品

由表4与表5结果可知,高铁赤泥经“悬浮磁化焙烧-弱磁选铁”工艺处理后,可获得产率为67.69%、TFe含量为56.21%、回收率为87.45%的炼铁用铁精矿,尾矿TFe含量为24.26%,可用来制备硅酸盐水泥^[13],实现了高铁赤泥的高质利用,验证了高铁赤泥“悬浮磁化焙烧-弱磁选铁”工艺的可行性与可靠性,为国内该类型高铁赤泥的产业化利用提供技术参考。

3.7 原赤泥与焙烧样磁性特征分析

为研究高铁赤泥闪速磁化焙烧前后的磁性变化,对原赤泥以及最优条件下所得焙烧样进行磁性分析,分析结果见图8。

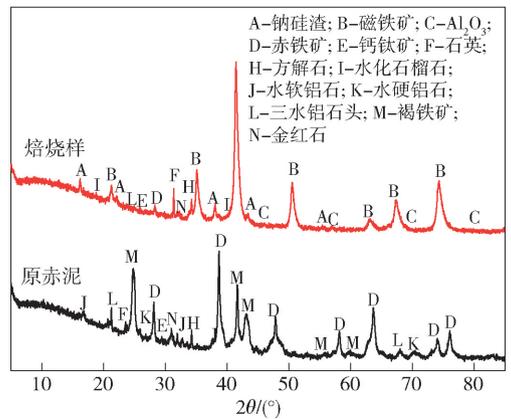


图9 原赤泥与焙烧矿的XRD分析

Fig.9 The XRD analysis of raw red mud and roasted sample

位为43.51%,铁矿物主要以赤(褐)铁矿的形式存在,其分布率达97.63%;相比之下,闪速磁化焙烧样TFe品位为48.61%,铁矿物主要以磁铁矿的形式存在,磁铁矿占比达到含铁矿物的95.60%。由此可以说明,高铁赤泥在闪速磁化焙烧过程中实现了铁矿物的矿相重构,即弱磁性的赤(褐)铁矿被定向还原为强磁性的磁铁矿,此外,根据XRD分析结果发现,部分一水铝石、三水铝石与一水软铝石经过闪速磁化焙烧脱水转变为氧化铝,而石英、金红石、钙钛矿以及钠硅渣等矿物则未发生明显变化,含铁矿物与脉石矿物磁性差异的扩大,为后续弱磁选从

表6 焙烧样中铁化学物相分析结果/%

Table 6 The results of iron chemical phase analysis in roasted samples /%

分析样	参数项	磁铁矿中的铁	碳酸铁中的铁	赤(褐)铁中的铁	硫化铁中的铁	硅酸铁中的铁	总计
原赤泥	含量/%	0.19	0.28	42.48	0.12	0.44	43.51
	分布率/%	0.44	0.64	97.63	0.28	1.01	100.00
焙烧样	含量/%	46.47	0.22	1.35	0.13	0.44	48.61
	分布率/%	95.60	0.45	2.78	0.27	0.91	100

焙烧样中回收高品位铁精矿奠定了基础。

3.9 赤泥闪速磁化焙烧反应机理

根据赤泥闪速磁化焙烧-弱磁选铁试验结果与原赤泥、焙烧样物相分析结果以及原赤泥、焙烧样磁性特征分析结果,可以认为高铁赤泥中的赤(褐)铁矿在闪速磁化焙烧过程中生成磁铁矿的反应主要经历以下四个环节:①赤泥颗粒在热的还原气流中悬浮加热;②达到反应温度时,CO向赤(褐)铁矿表面扩散、吸附,与赤(褐)铁矿表面反应,生成磁铁矿 Fe_3O_4 及 CO_2 ;③CO在表面继续吸附,外层的 Fe^{2+} 和

电子通过晶格的空位向内层 Fe_2O_3 扩散,经过晶格重建,转变为磁铁矿 Fe_3O_4 ;而内层 O^{2-} 向外层扩散,与CO作用生成 CO_2 而不断脱去;④前一过程深入进行,反应不断向内层推展,最终颗粒完全被还原生成磁铁矿颗粒,从而完成高铁赤泥中含铁矿物的矿相重构,反应见式(3)~(5),高铁赤泥中赤(褐)铁矿磁化反应的过程见图10。

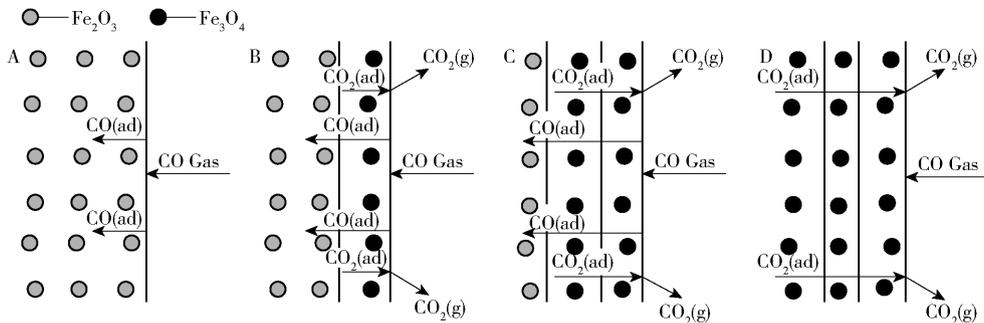
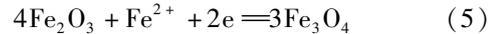
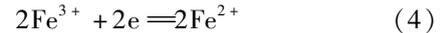
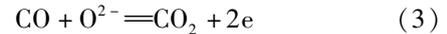


图10 高铁赤泥闪速磁化焙烧反应机理示意图

Fig. 10 The reaction mechanism diagram of magnetization roasting of hematite (limonite) iron ore

4 结论

本研究以河南某氧化铝厂的高铁赤泥为原料,采用“闪速磁化焙烧-弱磁选铁”技术进行资源再利用处理,通过单因素试验考察了最优工艺参数,并对高铁赤泥中物相的重构行为进行了研究,探讨了高铁赤泥磁化焙烧的反应机理,得到以下主要结论。

1) TFe 品位为 43.51% 的高铁赤泥在焙烧流化速度 0.3 m/s、焙烧温度 800 °C、焙烧时间 2.0 min、CO 浓度 15%、磨矿细度 -0.032 mm 含量 72%、弱磁选场强 0.25 T 的条件下进行闪速磁化焙烧-弱磁选铁,得到的铁精矿产率为 67.69%、TFe 品位为 56.21%、回收率为 87.45%;尾矿产率为 22.51%, TFe 品位为 24.26%,可用于制备水泥,实现了赤泥

的高价值综合利用。

2) 通过研究发现,在闪速磁化焙烧过程中,赤泥中的弱磁性赤(褐)铁矿被定向转化为强磁性的磁铁矿,同时,部分一水铝石、三水铝石与一水软铝石脱水转变为 Al_3O_2 ,而石英、金红石、钙钛矿以及钠硅渣等脉石矿物并未发生改变,由此,铁矿物与脉石矿物的比磁化系数差距显著扩大,为通过弱磁选从焙烧赤泥中回收高品位铁精矿奠定了基础。

3) 高铁赤泥中赤(褐)铁矿磁化焙烧机理主要为:CO与赤泥中赤(褐)铁矿表面 Fe^{3+} 反应,生成 Fe^{2+} , Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 反应生成磁铁矿 Fe_3O_4 ;外层的 Fe^{2+} 和电子通过晶格空位向内层 Fe_2O_3 扩散,经过晶格重建,转变为磁铁矿 Fe_3O_4 ;内层 O^{2-} 向外层扩散,与CO作用生成 CO_2 而不断脱去。

[参考文献]

- [1] 王松林. 拜耳法赤泥替代烧结法氧化铝生产中高铁矿石实践[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(4): 67-72.
WANG Songlin. Practice of using bayer process red mud to replace sintering process for high-iron content ore in alumina production [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(4): 67-72.
- [2] WANG SX, JIN H X, DENG Y, et al. Comprehensive utilization status of red mud in China: A critical review [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 289(11): 125-136.
- [3] 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, LÜ 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.
- [4] 杜云鹏, 童雄, 谢贤, 等. 赤泥中钪等有价值金属资源综合利用现状及展望[J]. 中国稀土学报, 2023, 41(2): 256-271.
DU Yunpeng, TONG Xiong, XIE Xian, et al. Current status and prospect of comprehensive utilization of valuable metal resources such as scandium in red mud [J]. 2023, 41(2): 256-271.
- [5] 张婉悦, 余建文, 韩跃新, 等. 高铁赤泥中铝的赋存状态及铝铁分离技术研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(5): 144-152.
ZHANG Wanyue, YU Jianwen, HAN Yuexin, et al. Chemical occurrence state of aluminum and a novel approach for separation of aluminum and iron in high iron bauxite residue [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Part), 2024(5): 144-152.
- [6] U. S. Department of the Interior, U. S. Geological survey. Mineral commodity summaries 2021 [R]. Reston: U. S. Geological survey, 2021.
- [7] ZENG Yijun, ZENG Kui, QUAN Xuejun, et al. Recovery of iron from red mud-rice husk briquettes by microwave roasting [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(5): 1702-1711.
- [8] 吴小华, 李雯雯. 广西高铁赤泥高值化综合利用途径[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(2): 104-115.
WU Xiaohua, LI Wenfen. Path analysis of high-value utilization of iron-rich red mud from Guangxi alumina refinery [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023, 52(2): 104-115.
- [9] 柳晓, 高鹏, 吕扬, 等. 高铁赤泥悬浮磁化焙烧-弱磁选提铁工艺[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 414-421.
LIU Xiao, GAO Peng, LYU Yang, et al. Recovery process of iron from high-iron red mud through suspension magnetization roasting-low intensity magnetic separation technology [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(3): 414-421.
- [10] 邱峰, 李蕾, 王宁. 拜耳法赤泥提铁工艺成套技术的研究与应用[J]. 有色设备, 2022, 36(3): 39-42.
QIU Feng, LI Lei, WANG Ning. Research and application of the technology of extracting iron from red mud by bayer process [J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2022, 36(3): 39-42.
- [11] YUAN S, LIU X, GAO P, et al. A semi-industrial experiment of suspension magnetization roasting technology for separation of iron minerals from red mud [J]. Journal of Hazardous Material, 2020, 394: 122579.
- [12] LIU Xiao, GAO Peng, YUAN Shuai, et al. Clean utilization of high-iron red mud by suspension magnetization roasting [J]. Minerals Engineering, 2020, 157: 106553.
- [13] 杜五星, 张建强, 马俊伟, 等. 一种磁化焙烧赤泥选铁尾渣的综合利用方法: CN202310853290.3 [P]. 2023-11-03.
DU Wuxing, ZHANG Jianqiang, MA Junwei, et al. A comprehensive utilization method for magnetic roasting of red mud iron tailings: CN202310853290.3 [P]. 2023-11-03.
- [14] ZHOU Guotao, WANG Yilin, QI Tianguai, et al. Toward sustainable green alumina production: a critical review on process discharge reduction from gibbsitic bauxite and large-scale applications of red mud [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(2): 109433.
- [15] LIU Xiao, HAN Yuexin, HE Fyu, et al. Characteristic, hazard and iron recovery technology of red mud-A critical review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 420: 126542.
- [16] YUAN Shuai, LIU Xiao, PENG Gao, et al. A semi-industrial experiment of suspension magnetization roasting technology for separation of iron minerals from red mud [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 394: 122579.
- [17] YU Jianwen, LI Yangfeng, LYU Yang, et al. Recovery of iron from high-iron red mud using suspension magnetization roasting and magnetic separation [J]. Minerals Engineering, 2022, 178: 107394.
- [18] LIU Xiao, GAO Peng, YUAN Shuai, et al. Clean utilization of high-iron red mud by suspension magnetization roasting [J]. Minerals Engineering, 2020, 157: 106553.
- [19] WANG Ruofeng, YUAN Shuai, GAO Peng, et al. Application of suspension magnetization roasting as technology for high-efficiency separation of valuable iron minerals from high-iron bauxite. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(7): 2391-2402.

Flash magnetizing roasting-low intensity magnetic separation process for preparing iron concentrate from high-iron red mud

DU Wuxing^{1,2}, GUO Xin^{1,2}, ZHANG Jianqiang^{1,2}, ZHANG Zhiyong^{1,2}, ZHANG Nan^{1,2}

(1. Zhengzhou Non-ferrous Metals Research Institute Co., Ltd., CHALCO, Zhengzhou 450041, China;

2. National Aluminum Smelting Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450041, China)

Abstract: Iron minerals in red mud mainly exist in the form of hematite, limonite and goethite, and the iron recovery rate of direct magnetic separation is low, and it is difficult to obtain high-quality iron concentrate. The suspension magnetization roasting process has significant advantages in the extraction of iron ore resources. On the one hand, suspension roasting can ensure the reaction efficiency of fine-grained red mud; on the other hand, the flash magnetization roasting time is short, the magnetization effect is good, and the energy consumption is low. In this paper, the red mud (Fe_2O_3 62.15 wt%) from an enterprise was used as raw material, and it was treated by flash magnetization roasting-low intensity magnetic separation process. The effects of process parameters on the iron separation effect were investigated, and the reconstruction behavior of the phase in red mud and the reaction mechanism of magnetization roasting were discussed by characterization analysis. Under the conditions of fluidization speed of 0.3 m/s, temperature of 800 °C, roasting time of 2.0 min, CO concentration of 15%, grinding fineness of -0.032 mm content of 72% and magnetic separation field strength of 0.25 T, the yield of iron concentrate was 67.69% (TFe 56.21%), the recovery rate was 87.45%, the tailings yield was 22.51% (TFe 24.26%), which could be used to prepare cement. The results of characterization analysis show that the weak magnetic hematite (limonite) in the red mud is directional reduced into strong magnetic magnetite during the flash magnetization roasting process, and some diaspore, gibbsite and diaspore are dehydrated into Al_2O_3 , while the gangue minerals such as quartz and rutile do not change. The main mechanism of magnetization roasting is that CO reacts with Fe^{3+} on the surface of hematite (limonite) to form Fe^{2+} , and Fe^{2+} reacts with Fe^{3+} to form magnetite Fe_3O_4 ; the outer layer of Fe^{2+} and electrons diffuse to the inner layer of Fe_2O_3 through lattice vacancies; after lattice reconstruction, it is transformed into magnetite Fe_3O_4 . The inner layer of O_2 diffuses to the outer layer and reacts with CO to form CO_2 , which is continuously removed.

Key words: high-iron red mud; flash magnetizing roasting; low intensity magnetic separation; mineral phase reconstruction; iron ore concentrate; reaction mechanism

中国恩菲签订中色大冶铜冶炼智能仿真平台建设合同

近日,中国恩菲工程技术有限公司签订中国有色集团大冶有色金属集团控股有限公司弘盛铜业铜冶炼智能仿真平台建设合同。

该项目是国内首个铜冶炼智能模拟仿真平台,是中国恩菲工程技术有限公司“黑灯工厂”课题技术的拓展应用,通过提供“数据+平台+引擎+模型+应用”解决方案,为铜冶炼工业生产级别的冶炼、制酸、渣选、电解系统提供多物理场耦合仿真、可视化分析及定制化应用支持。

据悉,该项目涵盖工厂核心反应工段“双闪”“非衡态制酸”的专用模型及软件包,可辅助现场确定最优生产策略,优化结构设计改造,降低对人工经验的依赖和操作盲目性,极大地缩短生产摸索时间、降低经济成本、提高生产效益,引领行业加速数字化、智能化转型升级。

(资料来源:中国恩菲)