难选铁尾矿磁化焙烧的影响因素及提质优化试验

朱伊翔[1a]，朱 灿[1a]，郑富强[2]，甘世云[1a]，胡佩伟[1]

（1. 武汉科技大学 a. 资源与环境工程学院；b. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室，湖北 武汉 430081；2. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205）

摘要：采用常规物理方法分选褐铁矿强磁选尾矿，得到的铁精矿存在品位与铁回收率较低、易造成资源浪费等问题。为提高褐铁矿综合利用水平，本文开展褐铁矿类铁尾矿磁化焙烧提质的试验研究，考察焙烧温度、焙烧时间、还原剂用量、预处理温度及磨矿磁选条件等关键参数对铁精矿分选指标的影响；运用 XRD 和热力学分析探讨焙烧过程中物相转变和磁化历程，并通过吉布斯自由能理论计算，明确不同温度段磁化反应的热力学可行性及化学反应。结果表明：采用“高温改性—磁化—弱磁选”工艺可明显提升该类型矿石的分选指标；在空气气氛中经过高温预处理后，铁尾矿中针铁矿相可全部脱羟基转化为赤铁矿相，且颗粒内部孔隙发育促进了磁化还原反应与磁铁矿晶粒的生长。在焙烧温度为 800 ℃、磁化时间为 30 min、还原剂用量为 3%、磨矿细度 <0.045 mm 粒级占比为 45.6%、磁场强度为 111.4 kA/m 的分选条件下，可获得铁品位为 61.59%、铁回收率为 91.38% 的铁精矿指标。本文研究成果可为褐铁矿类复杂尾矿的资源化利用提供重要技术支持。

关键词：铁尾矿；高温预处理；磁化焙烧；磁选；物相变化

中图分类号：TF046；TD926 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)02－0115－08

doi：10.13403/j.sjqt.2026.02.036

Experimental study on influencing factors and quality improvement optimization of magnetic roasting of refractory iron tailings

ZHU Yixiang[1a], ZHU Can[1a], ZHENG Fuqiang[2], GAN Shiyun[1a], HU Peiwei[1]

(1. Wuhan University of Science and Technology a. College of Resources and Environment Engineering; b. Hubei Provincial Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: After the high-intensity magnetic separation tailings of limonite is separated with conventional physical methods, the iron concentrate obtained often has problems of lower grade and lower iron recovery, which is prone to cause problems such as resource waste. To improve the comprehensive utilization of limonite, this paper introduces an experimental study conducted on the magnetizing roasting and quality improvement of limonite-type iron tailings, which investigates the influences of key parameters such as roasting temperature, roasting time, reducing agent consumption, pretreatment temperature, and grinding-magnetic separation conditions on the separation indices of iron concentrate. X-ray diffraction (XRD) and thermodynamic analysis were employed to discuss the phase transformation and magnetization process during roasting, and Gibbs free-energy calculations were conducted to determine the thermodynamic feasibility and chemical reactions of magnetization at different temperature ranges. The results show that the "high-temperature modification-magnetization-low-intensity magnetic separation" process can significantly improve the separation indices of

收稿日期：2025－02－11；**修回日期**：2025－03－10

基金项目：湖南省重点研发计划资助项目(2023SK2079)

作者简介：朱伊翔(1999—)，男，硕士研究生，从事难选铁矿磁化焙烧方面的研究。

通信作者：胡佩伟(1983—)，男，副教授，从事多金属矿物资源综合利用的研究。

this type of ore. After high-temperature pretreatment in an air atmosphere, the goethite phase in the iron tailings can completely dehydroxylate and transform into the hematite phase. The development of internal pores in the particles promotes the magnetization reduction reaction and the growth of magnetite grains. Under the separation conditions of a roasting temperature of 800 ℃, magnetization time of 30 min, reducing agent dosage of 3%, grinding fineness with a particle size of <0.045 mm accounting for 45.6%, and magnetic field intensity of 111.4 kA/m, an iron concentrate with an iron grade of 61.59% and an iron recovery of 91.38% was obtained. The study findings of this paper can provide important technical support for the resource utilization of complex limonite-type tailings.

Key words: iron tailings; high-temperature pretreatment; magnetizing roasting; magnetic separation; application of phase change

铁矿作为钢铁工业的核心原料，对国家经济和工业发展具有至关重要的作用。在全球范围内，铁矿资源开发利用进程加快，优质易选铁矿资源日趋枯竭，而我国作为世界上最大的钢铁生产国，对铁矿的依赖尤为显著。据中国钢铁工业协会统计，2024年我国铁矿的进口量为12.36亿吨。铁矿资源的对外依存度居高不下，资源安全保障面临严峻挑战。在此背景下，充分开发利用国内难选铁矿资源，尤其是储量可观却尚未高效利用的铁矿资源，对降低我国铁矿进口依赖、提高资源自给率、保障钢铁工业高质量可持续发展具有重要意义。褐铁矿作为四大铁矿资源之一，在我国分布广泛，已探明储量约为12.3亿吨。然而，其复杂的矿物结构和晶格中杂质元素对铁元素的替代，使该资源难以得到有效利用[1]。褐铁矿的主要含铁物相为赤铁矿和针铁矿，脉石相矿物为石英、重晶石，使得采用常规磁选方法难以将含铁矿物与脉石矿物分离[2-3]；同时，褐铁矿在磨矿中容易发生泥化，产生大量微细粒级颗粒，造成铁矿物流失，降低磁选效率[4]。突破褐铁矿资源的分选与利用瓶颈，实现其经济高效开发，成为矿物加工领域待解决的关键问题。此外，褐铁矿等难选铁矿资源在开采与选矿过程中往往会产生一定规模的铁尾矿，针对该铁尾矿开展提质回收，不仅有助于利用二次资源，也契合绿色低碳冶金与固废资源化利用的发展方向。

磁化焙烧—磁选工艺是处理难选铁矿的有效途径之一，该方法通过磁化焙烧将弱磁性的铁矿物如赤铁矿、褐铁矿等转化为强磁性的磁铁矿，再经磁选实现铁矿物与脉石矿物的高效分离[5-6]。该方法已在难选铁矿选矿中得到广泛应用[7-8]。对褐铁矿类铁尾矿而言，其湿度大、结晶水含量高，直接入炉后爆裂指数较高且软化熔滴性能较差，严重影响物料焙烧过程的透气性，妨碍炉窑顺行[9-10]。研究表明，矿样中羟基质量分数越高，其爆裂指数越高，而微孔数量和直径的增加可以在一定程度上降低爆裂指数，并且通过在高炉炉料中配加预脱水矿样可以提高炉料的软融温度区间，增强炉料的透气性[11]。因此，在磁化焙烧前对褐铁矿进行高温预处理，一方面可使其发生脱羟反应并伴随孔隙发育，降低爆裂倾向，改善炉料稳定性，为磁化焙烧提供更有利的传热传质条件；另一方面，高温预处理还可以提前去除矿样中易挥发的有害元素，防止有害元素在炉内富集[12]。在实际生产中，高温预处理也常用来降低块矿的爆裂指数，提高软熔性能并去除矿样中的有害元素。

褐铁矿类铁尾矿作为铁矿开采加工的副产品，不仅面临与天然褐铁矿相似的结构问题，还存在含铁品位更低、矿物嵌布更复杂的特点，直接进行磁化焙烧易导致还原不充分、精矿分选指标不佳等问题。基于此，本文以某褐铁矿强磁选后产生的铁尾矿为研究对象，构建“高温改性—磁化焙烧—磨矿—弱磁选”提质流程，以铁精矿品位和回收率为主要技术指标，考察焙烧温度、焙烧时间、还原剂用量、预处理温度以及磨选条件对分选效果的影响，同时对焙烧过程的物相转变与磁化历程进行分析，为褐铁矿类铁尾矿的提质利用提供技术支持。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验使用的铁尾矿来自国内某钢铁厂，采用电感耦合等离子体发射光谱仪(Agilent5800 VDV

ICP-OES)分析试样化学成分。试验结果如表 1 所示。由表 1 可见，该铁尾矿的 Fe_2O_3 质量分数为 55.73%，还含有 17.14% 的 SiO_2 和 10.08% 的 Al_2O_3，有害组分 S 质量分数为 1.43%，烧损为 13.50%。该铁尾矿的碱度系数[w(CaO) + w(MgO)]/[$w(SiO_2)$ + $w(Al_2O_3)$]为 0.020，属于酸性矿石。试验采用生物质炭作为还原剂，其固定碳质量分数为 80.8%、灰分为 3.5%、挥发分为 15.7%、水分为 6.5%。采用不同孔径筛网对铁尾矿进行筛分，得到矿样粒度组成如表 2 所示。由表 2 可见，该尾矿粒度分布较均匀，以 0.074 ~ 1.250 mm 为主要粒级区间，占比达 87.18%。此粒度特征可有效避免焙烧过程中因矿粒过大造成褐铁矿内部磁化不充分，也可防止因矿粒过细引发高温烧结，进而阻碍体系内气体扩散、降低磁化反应效率[13]。

采用 Dandong TD-3500 型 X 射线衍射仪分析试样的物相组成，结果如图 1 所示。由图 1 可见，铁尾矿中的主要含铁物相为针铁矿与赤铁矿，脉石矿物为石英与羟矾石。

1.2　试验方法

称取一定质量的铁尾矿与生物质炭，充分混合后置于带盖铁罐中；待马弗炉升温至设定温度后，将铁罐放入炉内，保温规定时间，取出后立即水淬处理，干燥后得到焙烧矿。将焙烧矿研磨至一定细度后，用 HLXCGS-φ50 型磁选管在设定磁场强度下进行弱磁选，得到铁精矿。进行高温预处理对比试验：将铁尾矿置于马弗炉中，在空气气氛下保温 45 min，制得高温预处理矿，再按照前述磁化焙烧和磁选操作得到预处理矿对应的铁精矿。

TFe 质量分数参照《铁矿石 全铁含量的测定 三氯化钛还原重铬酸钾滴定法(常规方法)》(GB/T 6730.65—2009)，采用盐酸 - 氟化钠分解法测定，根据式(1)、(2)分别计算铁品位和铁回收率。

$$w(\mathrm{TFe}) = \frac{c \times 55.85 \times (V - V_0)}{m \times 1\,000} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta = \frac{m_2 \times w_2}{m_1 \times w_1} \quad (2)$$

式中：w(TFe)为全铁品位,%；c 为滴定所用重铬酸钾溶液浓度，mol/L；V 为滴定所消耗的重铬酸钾溶液体积，mL；V_0为空白样消耗的重铬酸钾标准滴定溶液体积，mL；m 为测铁样品质量，g；η 为铁回收率,%；m_1、m_2分别为原矿与铁精矿的质量，g；w_1、w_2分别为原矿与铁精矿的全铁品位,%。

2　结果与讨论

2.1　热力学分析

褐铁矿磁化焙烧是一个复杂的物理化学反应过程，该过程不仅包括褐铁矿吸热脱除羟基和磁化还原反应，还涉及碳气化反应、铁氧化物、碳氧化物与其他矿物间的反应。褐铁矿碳热还原过程的主要反应及标准吉布斯自由能变如式(3) ~ (10)所示。在预处理阶段，褐铁矿中针铁矿[FeO(OH)]脱羟基转化为赤铁矿(α-Fe_2O_3)。高温预处理结束后，加入还原剂，在还原性气氛下将赤铁矿还原为磁铁矿(Fe_3O_4)，对应反应式为(7) ~ (9)。对各反应方程式 0 ~ 1 000 ℃的 ΔG^θ进行拟合，得到 ΔG^θ随 T 变化的函数关系。当 ΔG^θ关于 T 的函数值为零时，该点的值即为反应的起始温度 T_0。由式(3) ~ (10)可知，针铁矿脱羟基反应可在较低温度下发生；当还原温度达到 697 ℃时，C 开始与 CO_2反应生成 CO；而当还原温度超过 633 ℃时，Fe_3O_4 在 CO 气氛下发生过还原生成 FeO。

表 1　铁尾矿的主要化学成分和烧损(质量分数)

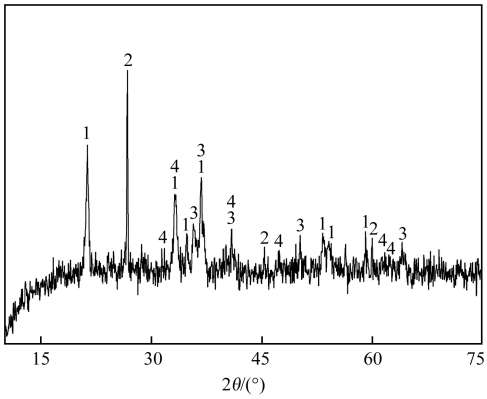
Table 1　Main chemical composition and loss on ignition of iron tailings

TFe	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	S	K_2O	MgO	ZnO	TiO_2	CuO	CaO	烧损
43.32	55.73	17.14	10.08	1.43	0.42	0.36	0.32	0.28	0.27	0.18	13.50

表 2　铁尾矿的粒度组成(质量分数)

Table 2　Particle size composition of iron tailings　　%

<0.054 mm	[0.054,0.074) mm	[0.074,0.154) mm	[0.154,0.5) mm	[0.5,1.25) mm	≥1.25 mm
4.54	4.14	12.29	43.75	27.00	8.28

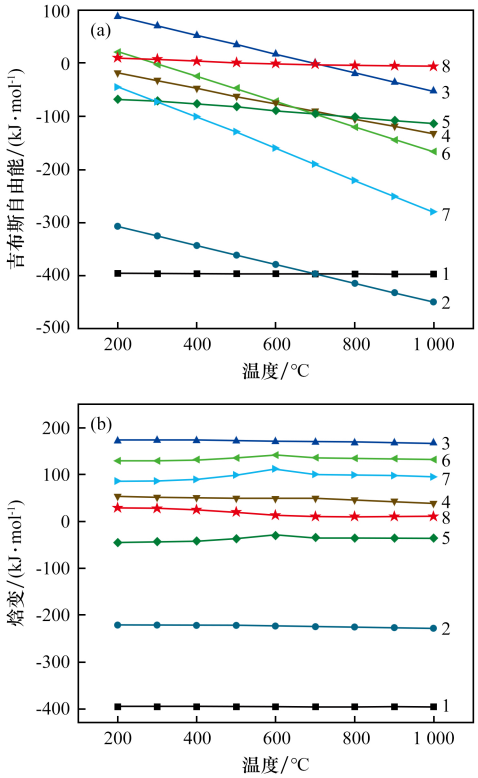


1—针铁矿；2—石英；3—赤铁矿；4—羟矾石。

图 1 铁尾矿的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of iron tailings

利用 HSC6.0 软件对焙烧体系中可能发生的化学反应进行热力学模拟计算，得出各反应标准吉布斯自由能 ΔG^{θ} 与反应标准焓变 ΔH^{θ} 随温度 T 的变化关系，结果如图 2 所示。由图 2 可知，随着反应温度逐渐升高，反应(1)～(8)的 ΔG^{θ} 均逐渐降低，表明温度升高有利于提升反应的热力学自发进行程度。其中，反应(3)、(4)和(7)的 ΔH^{θ} 小于 0，为放热反应；而碳气化反应与其余铁氧化物还原反应的 ΔH^{θ} 均大于 0，表现为吸热反应。



(a) 吉布斯自由能；(b) 反应焓变

1～8—式(3)～(10)所示反应。

图 2 褐铁矿的碳热还原反应随温度变化关系

Fig. 2 Function of temperature for carbothermal reduction of limonite

$$C(s)+O_2(g)=CO_2(g)\quad \Delta G^{\theta}=-394.469-0.002T \tag{3}$$

$$2C(s)+O_2(g)=2CO(g)\quad \Delta G^{\theta}=-207.341-0.179T \tag{4}$$

$$C(s)+CO_2(g)=2CO(g)\quad \Delta G^{\theta}=124.128-0.178T(T_0=697\ ℃) \tag{5}$$

$$2FeO(OH)(s)=Fe_2O_3(s)+H_2O(g)\quad \Delta G^{\theta}=11.332-0.145T(T_0=78\ ℃) \tag{6}$$

$$3Fe_2O_3(s)+CO(g)=2Fe_3O_4(s)+CO_2(g)\quad \Delta G^{\theta}=-55.671-0.057T \tag{7}$$

$$3Fe_2O_3(s)+C(s)=2Fe_3O_4(s)+CO(g)\quad \Delta G^{\theta}=68.457-0.234T(T_0=293\ ℃) \tag{8}$$

$$6Fe_2O_3(s)+C(s)=4Fe_3O_4(s)+CO_2(g)\quad \Delta G^{\theta}=12.786-0.291T(T_0=44\ ℃) \tag{9}$$

$$Fe_3O_4(s)+CO(g)=3FeO(s)+CO_2(g)\quad \Delta G^{\theta}=15.834-0.025T(T_0=633\ ℃) \tag{10}$$

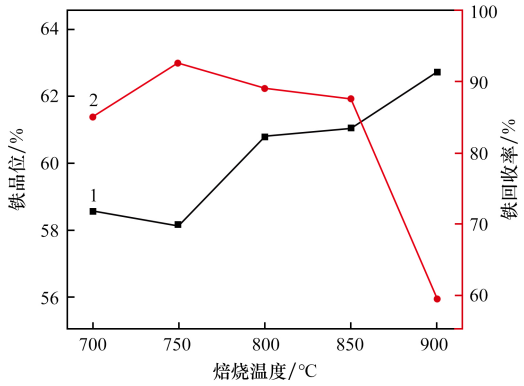
2.2 磁化焙烧条件对铁精矿指标的影响

2.2.1 焙烧温度的影响

在还原剂用量为 3%、焙烧时间为 60 min、磨矿细度 <0.045 mm 粒级占比为 59.5%、磁场强度为 111.4 kA/m 条件下，考察焙烧温度对铁尾矿磁化焙烧效果的影响。结果如图 3 所示。由图 3 可知，当焙烧温度为 700 ℃时，铁品位为 58.59%，铁回收率为 84.96%；当焙烧温度升至 750 ℃时，铁品位基本保持不变，为 58.14%，而铁回收率上升至 92.71%；进一步提高温度，铁精矿品位逐步上升，但铁回收率逐渐下降。当焙烧温度为 900 ℃时，铁品位升至 62.74%，但铁回收率骤降至 59.52%。结合热力学分析结果可知，过高的焙烧温度可能会促使 FeO 的生成，形成浮氏体，从而导致焙烧矿的比磁化系数下降，铁回收率降低。

2.2.2 焙烧时间的影响

在还原剂用量为 3%、焙烧温度为 800 ℃、磨矿细度 <0.045 mm 粒级占比为 59.5%、磁场强度为 111.4 kA/m 条件下，考察焙烧时间对铁尾矿磁化焙烧效果的影响。结果如图 4 所示。由图 4 可知，焙烧时间对磁选铁精矿品位影响较小，铁品

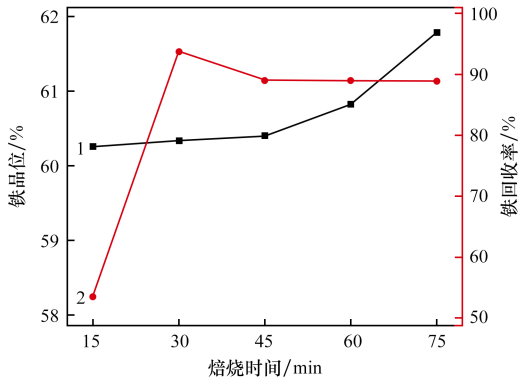


1—铁品位；2—铁回收率。

图 3　焙烧温度对铁尾矿磁化效果的影响

Fig. 3　Effect of roasting temperature on the magnetization of iron tailings

位维持在 60.5% 左右；当焙烧时间为 15 min 时，铁回收率仅为 53.61%，随着焙烧时间延长至 30 min，铁回收率显著提升至 93.75%；当焙烧时间延长至 75 min 时，铁品位达到最高值 61.79%，但铁回收率降至 88.97%。综合考虑，确定适宜焙烧时间为 30 min。



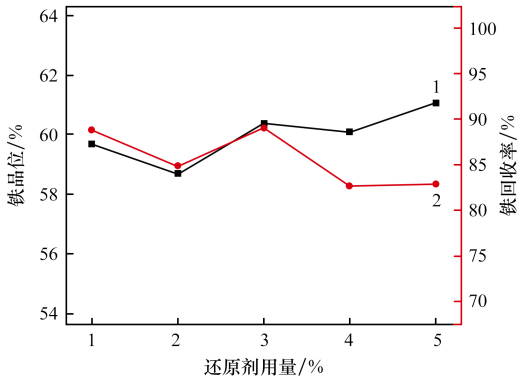
1—铁品位；2—铁回收率。

图 4　焙烧时间对铁尾矿磁化效果的影响

Fig. 4　Effect of roasting time on the magnetization of iron tailings

2.2.3　还原剂用量的影响

在焙烧温度为 800 ℃、焙烧时间为 30 min、磨矿细度 <0.045 mm 粒级占比为 59.5%、磁场强度为 111.4 kA/m 条件下，试验考察还原剂用量对铁尾矿磁化焙烧效果的影响。结果如图 5 所示。由图 5 可知，还原剂用量对铁尾矿磁化的影响弱于焙烧温度和焙烧时间。当还原剂用量为 1%~2% 时，铁品位较低，这是由于还原剂用量不足，难以将铁氧化物充分还原成磁铁矿。当还原剂用量为 3% 时，磁选得到的精矿铁品位为 60.40%，铁回收率为 89.10%，综合分选指标最优。继续提高还原剂用量，铁品位虽然升至 61% 以上，但铁回收率逐渐降低至 82.88%，其原因为过量的还原剂增强了体系的还原性气氛，引发铁氧化物过还原，进而导致磁选铁精矿回收率下降。综合分析，铁尾矿磁化焙烧的适宜还原剂用量为 3%。



1—铁品位；2—铁回收率。

图 5　还原剂用量对铁尾矿磁化效果的影响

Fig. 5　Effect of reductant amount on the magnetization of iron tailings

2.2.4　高温预处理的影响

为进一步提高精矿分选指标，对铁尾矿进行高温预处理：将铁尾矿置于 1 000 ℃、氧化气氛下保温 45 min 后，自然冷却得到预处理矿。分别取等量的铁尾矿与预处理矿，在焙烧温度为 700 ℃和 800 ℃、焙烧时间为 30 min、还原剂用量为 3%、磨矿细度 <0.045 mm 粒级占比为 59.5%、磁场强度 111.4 kA/m 条件下开展对比试验，考察高温改性对铁尾矿磁化焙烧效果的影响。结果如表 3 所示。由表 3 可知，在焙烧温度为 700 ℃时，铁尾矿经高温改性后，精矿铁品位由 58.92% 升至 60.10%，铁回收率由 94.05% 提高至 96.71%；当焙烧温度为 800 ℃时，高温改性对铁品位仍有提升效果，但铁回收率无明显变化。结合前述理化性质分析，这可能是由于铁尾矿中主要含铁矿物为针铁矿，其经高温改性后脱除了羟基并转化为赤铁矿，该过程使矿物结构变得疏松，更利于磁化和晶粒生长。通过不同焙烧温度的对比试验可知，褐铁矿型铁尾矿经高温预处理后，再实施磁化焙烧—磨选，能够有效改善分选效果和精矿指标。

表 3 高温预处理对铁尾矿磁化效果的影响(质量分数)

Table 3 Effect of high temperature pretreatment on the magnetization of iron tailings %

试样	焙烧矿铁品位	精矿铁品位	磁选产率	铁回收率
700 ℃铁尾矿	50.96	58.92	81.35	94.05
700 ℃预处理矿	51.89	60.10	83.50	96.71
800 ℃铁尾矿	52.41	59.82	76.40	87.20
800 ℃预处理矿	54.03	62.12	74.85	86.05

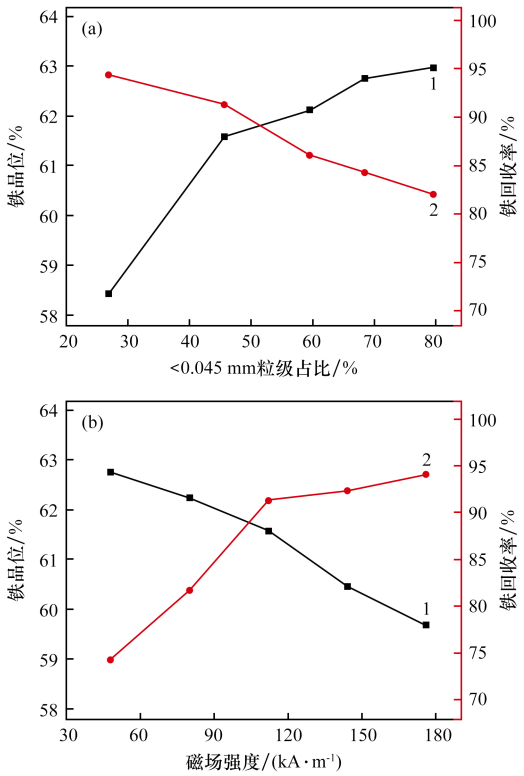
2.2.5 磨选条件的影响

前述经高温改性与磁化焙烧后的铁尾矿，磁选后精矿铁品位可达 62.12%，但铁回收率不足 90%，原因可能是磁铁矿与石英等脉石矿物以连生体的形式赋存在焙烧矿中，实际需要对焙烧产品进行不同磨选条件分选，以提升分选指标[14]。将经高温预处理后的铁尾矿在焙烧温度为 800 ℃、焙烧时间为 30 min、还原剂用量为 3% 的优化条件下制备焙烧矿，并将其分别磨至 <0.045 mm 粒级质量分数为 26.8%、45.6%、59.5%、68.4%、79.6%，考察磨矿细度对磁选分离效果的影响。结果如图 6 所示。

由图 6(a)可知，随着磨矿细度的增加，精矿铁品位逐渐增高，铁回收率逐渐降低；在磨矿细度 <0.045 mm 粒级占比为 26.8% 时，铁品位为 58.43%，铁回收率为 94.42%；当磨矿细度增加至 45.6% 时，铁品位提升至 61.59%，铁回收率略降至 91.38%。继续提高磨矿细度，铁品位虽有所提高，但铁回收率降至 86.05%，据此确定适宜磨矿细度 <0.045 mm 粒级占比为 45.6%。由图 6(b)可知，随着磁场强度的提高，精矿铁品位逐渐降低，铁回收率逐渐升高。在磁场强度为 0.06 T 时，精矿铁品位最高，为 62.76%，此时铁回收率为 74.33%；当磁场强度提高至 111.4 kA/m 时，精矿铁品位为 61.59%，铁回收率为 91.38%。综合考虑分选效果，确定适宜的磁场强度为 111.4 kA/m。

2.3 焙烧矿表面形貌变化

图 7 为焙烧过程中铁尾矿中的褐铁矿表面形貌的变化。图 7(a)为铁尾矿中的褐铁矿。由图 7(a)可以看出，褐铁矿颗粒截面结构致密，少见孔隙与裂缝。由图 7(b)可见，经 1 000 ℃高温预处理后，褐铁矿颗粒截面出现明显的孔隙与裂纹。进一步对预处理矿进行磁化焙烧，其形貌如图 7(c)所示。由图 7(c)可以发现，在磁化焙烧过程中，褐铁矿颗粒内部的孔隙进一步发育，孔隙之间相互连通，形成大的贯通状裂隙。



(a) 磨矿细度；(b) 磁场强度

1—铁品位；2—铁回收率。

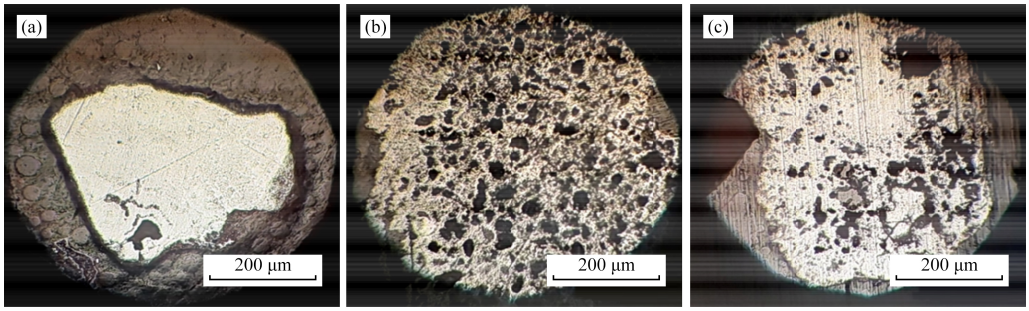
图 6 磨选条件对铁精矿品位和回收率的影响

Fig. 6 Influence of grinding conditions on iron concentrate grade and recovery

这是由于褐铁矿中部分矿物在较高温度下发生热分解反应，产生气体或挥发性物质，造成矿物质量损失，进而诱导裂纹或孔隙萌生。高温环境下，矿石中的成分(如赤铁矿、针铁矿和其他含铁矿物，以及脉石等硅酸盐)会因热膨胀和收缩产生体积变化。同时，由于不同矿物的热膨胀系数不同，高温会导致矿石中的矿物膨胀，产生应力。冷却过程中，矿石发生收缩，但颗粒内部应力可能无法完全承受这种收缩力，从而导致矿石中形成孔隙[15]。此外，不同矿物的热膨胀系数差异会进一步加剧内应力积累，促进裂纹形成和孔隙发育。

2.4 焙烧矿物相转变

图8为焙烧过程中矿样的物相转变规律。高

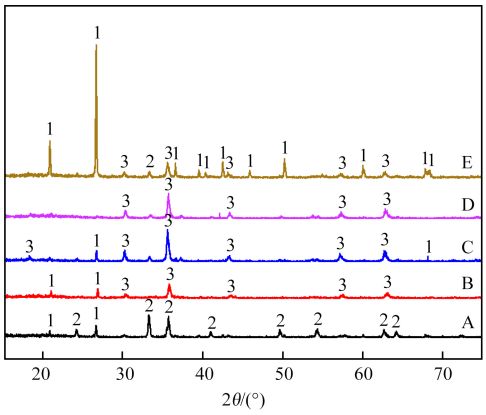


（a）褐铁矿；（b）高温预处理矿；（c）高温预处理—磁化焙烧矿

图 7　铁尾矿中褐铁矿的表面形貌

Fig. 7　Surface morphology of limonite in iron tailings

温预处理后，试样中含铁矿物为赤铁矿，表明高温预处理可使针铁矿充分脱羟基并转化为赤铁矿。样品 B 的赤铁矿衍射峰消失，出现大量磁铁矿的衍射峰，并且样品 B、C 中物相仅为石英与磁铁矿，说明磁化焙烧过程中赤铁矿可被充分还原为磁铁矿。通过对比磁选精矿与尾矿的 XRD 图谱可知，磁选精矿中仅存在磁铁矿的衍射峰，石英的衍射峰消失，表明石英等脉石矿物与铁矿物实现了有效分离，该结果与前述磁选精矿铁品位和铁回收率明显升高的试验结果一致。



A—铁尾矿预处理矿；B—原矿直接磁化矿；

C—高温预处理—磁化矿；D—磁选精矿；E—磁选尾矿。

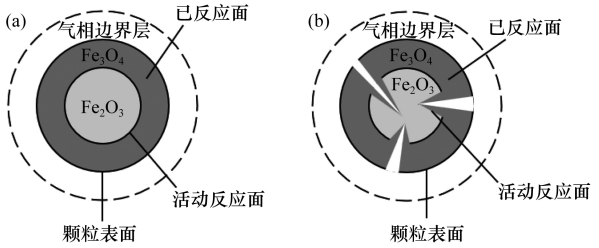
1—石英；2—赤铁矿；3—磁铁矿。

图 8　焙烧样品的 XRD 图谱

Fig. 8　XRD pattern of roasted sample

2.5　高温预处理提高铁精矿品位的作用

磁化焙烧过程中矿物气固反应模型的反应速度主要受矿石理化性质、还原性气体浓度、焙烧温度和焙烧时间等因素影响。其中，矿石的理化性质主要包括矿石粒度、构造和结构以及化学组成等。褐铁矿还原过程的气固反应可采用未反应核模型进行描述。在磁化焙烧过程中，配加的还原剂生物质炭发生气化反应生成还原性气体，还原性气体首先与铁尾矿颗粒表层的 Fe_2O_3 反应产生 Fe_3O_4 并包裹在颗粒表面；随着反应的进行，还原性气体穿过反应面扩散至未反应核心界面，与颗粒内部的 Fe_2O_3 继续发生还原反应，其反应如图 9(a)所示。



（a）原矿磁化；（b）高温预处理—磁化

图 9　磁化焙烧反应示意

Fig. 9　Schematic diagram of magnetization roasting

相比原矿直接进行磁化，经高温预处理后的褐铁矿表面发育有更多的孔隙与裂纹，如图 9(b)所示。这是由于褐铁矿在高温预处理阶段脱羟基[$FeO(OH)\rightarrow\alpha$-Fe_2O_3]转变为赤铁矿[16]，在此过程中，褐铁矿的比表面积和微观孔隙均有所增加。孔隙的增加能够加快 CO 的扩散速率和反应速率，提高热量在整个矿体中传递的效率，并反过来影响焙烧过程中矿石内部的温度分布[17]。同时，孔隙的增加使得还原性气氛能够直接进入颗粒内部，使褐铁矿还原更加充分，缩短了还原反应所需时间。因此，先对褐铁矿进行高温预处理，使其完成第一阶段的脱羟基过程，控制含铁矿物的物相使矿石产生更多孔隙后，再进行还原磁化，可更好地调控褐铁矿在磁化过程中的反应行为与进程。

3 结 论

（1）采用生物质炭为还原剂，该铁尾矿在磁化焙烧温度为800 ℃、还原剂用量为3%、焙烧时间为30 min、磨矿细度 < 0.045 mm 粒级占比为59.5%、磁场强度为111.4 kA/m时，可获得精矿铁品位为60.40%、铁回收率为89.10%的分选指标。高温预处理可有效提升铁精矿选别指标，在相同的磁化条件下，高温改性使铁精矿品位提升约2.3%。进一步优化磨选条件可得，当磨矿细度 < 0.045 mm 粒级占比为45.6%、磁场强度为111.4 kA/m时，精矿铁品位可达61.59%、铁回收率为91.38%。

（2）褐铁矿类铁尾矿经高温预处理，针铁矿可通过脱羟基完全转化为赤铁矿，为后续磁化阶段提供均质含铁物相；同时，该过程使矿物结构变得疏松，更利于磁化还原和晶粒生长；热力学分析结果表明，在适宜温度区间内，褐铁矿可经由赤铁矿还原转变为磁铁矿，有利于后续磁选分离。

参考文献：

[1] ZHANG Q, SUN Y S, HAN Y X, et al. Review on coal-based reduction and magnetic separation for refractory iron-bearing resources[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(12): 2087 – 2105.

[2] TANG Z D, HAN Y X, CAO Y, et al. Clean recycling of low-grade refractory limonitic waste using suspension magnetization roasting coupled with magnetic separation: A semi-industrial approach towards a waste utilization plan[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 173: 61 – 74.

[3] WANG M X, ZHANG Q, SUN Y S, et al. Green iron recovery through hydrogen-based mineral phase transformation using ultrafast air-cooling for heat recycling: A pilot-scale investigation[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 450: 141867.

[4] WU F F, CAO Z F, WANG S, et al. Phase transformation of iron in limonite ore by microwave roasting with addition of alkali lignin and its effects on magnetic separation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 722: 651 – 661.

[5] YU J W, SUN H, LI P Y, et al. A pilot study on recovery of iron from sulfur-bearing hematite ore using hydrogen-based mineral phase transformation followed by magnetic separation[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(5): 110630.

[6] 姜亚雄，黄丽娟，黄恩旭，等. 难选褐铁矿流态化磁化焙烧—弱磁选工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分)，2023(1): 64 – 70.
JIANG Yaxiong, HUANG Lijuan, HUANG Enxu, et al. Study on fluidized magnetizing roasting-low intensity magnetic separation process for refractory limonite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(1): 64 – 70.

[7] WANG R F, GAO P, YUAN S, et al. Precise regulation of the phase transformation for pyrolusite during the reduction roasting process[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(1): 81 – 90.

[8] LI Y J, ZHANG Q, YUAN S, et al. High-efficiency extraction of iron from early iron tailings via the suspension roasting-magnetic separation[J]. Powder Technology, 2021, 379: 466 – 477.

[9] 吴胜利，许海法，汪国俊，等. 现代高炉合理使用天然块矿的基础研究[J]. 北京科技大学学报，2007，29(3): 320 – 324; 350.
WU Shengli, XU Haifa, WANG Guojun, et al. Basic study of modern blast furnace using natural lump ores rationally[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(3): 320 – 324; 350.

[10] 李金莲，刘万山，李艳茹，等. 热分析技术在褐铁矿结晶水热分解中应用研究[J]. 钢铁，2011，46(5): 19 – 22.
LI Jinlian, LIU Wanshan, LI Yanru, et al. Applied research on thermal decomposition of limonite with crystal water by thermal analysis technology[J]. Iron and Steel, 2011, 46(5): 19 – 22.

[11] 庞焯刚，丁望，于原浩，等. 高炉配加预脱水块矿的炉料软化熔滴性能[J]. 钢铁，2023，58(4): 21 – 29.
PANG Zhuogang, DING Wang, YU Yuanhao, et al. Softening-melting properties of blast furnace charge with pre-dehydrated lump iron ore[J]. Iron and Steel, 2023, 58(4): 21 – 29.

[12] 赵羚伯，赵冰，高鹏，等. 某氰化尾渣预氧化—蓄热还原同步提铁试验研究[J]. 金属矿山，2022(7): 170 – 174.

（下转第148页）

technology of desulfurization and denitrification for strand gas in TISCO[J]. China Metallurgy,2011,21(11):19 – 21;29.

[19] 李文涛,傅国志,黄婷,等. 热解炭基载锰脱硝催化剂的制备及其低温脱硝性能[J]. 化工进展,2024,43(12):7025 – 7032.
LI Wentao, FU Guozhi, HUANG Ting, et al. Preparation of pyrolytic carbon-based denitrification catalyst modified by Mn and its low-temperature denitrification performance[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2024,43(12):7025 – 7032.

[20] 李小海. Cu 掺杂磷钼杂多酸催化剂的低温 SCR 脱硝性能[J]. 化工进展,2019,38(6):2784 – 2790.
LI Xiaohai. Study on low temperature SCR denitration of Cu doped phosphomolybdate catalyst [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2019,38(6):2784 – 2790.

[21] 王涛,潘洋,王平,等. 高炉煤气的 CCPP 发电系统运行特性分析[J]. 冶金能源,2024,43(3):39 – 43.
WANG Tao, PAN Yang, WANG Ping, et al. Study on operational characteristics of CCPP with blast furnace gas [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2024, 43 (3): 39 – 43.

[22] 李继明. 马钢 2 500 m^3 高炉煤气余压发电的自动控制[J]. 自动化仪表,2009,30(5):25 – 26;30.
LI Jiming. Automatic TRT control of 2 500 m^3 blast furnace in Ma'anshan iron&steels[J]. Process Automation Instrumentation,2009,30(5):25 – 26;30.

(上接第 122 页)

ZHAO Lingbo, ZHAO Bing, GAO Peng, et al. Experiment study on synchronous iron extraction of pre-oxidation and heat-retaining reduction for a cyanide tailings[J]. Metal Mine,2022(7):170 – 174.

[13] 饶家庭. 不同粒度褐铁矿对高钛型烧结矿指标的影响[J]. 烧结球团,2011,36(5):15 – 18.
RAO Jiating. Effect of different particle size of limonite on high titanium sinter indexes[J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(5):15 – 18.

[14] 袁晨光,黄自力,刘楚玉,等. 酒钢镜铁矿尾矿中铁矿物再回收试验研究[J]. 烧结球团,2023,48(1):98 – 105.
YUAN Chenguang, HUANG Zili, LIU Chuyu, et al. Experimental research on recovery of iron minerals from specularite tailings in JISCO[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(1):98 – 105.

[15] GAUTAM P K, VERMA A K, JHA M K, et al. Effect of high temperature on physical and mechanical properties of Jalore granite[J]. Journal of Applied Geophysics, 2018,159:460 – 474.

[16] RZEPA G, BAJDA T, GAWEŁ A, et al. Mineral transformations and textural evolution during roasting of bog iron ores[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2016,123(1):615 – 630.

[17] LIU P F, ZHU X R, HAN Y X, et al. Micropores formation and effects in the magnetization roasting of limonite ore[J]. Powder Technology,2024,448:120339.

(上接第 139 页)

[11] 段文军,吕潇峻,李朝. 高炉渣离心粒化法研究进展综述[J]. 材料与冶金学报,2020,19(2):79 – 86.
DUAN Wenjun, LÜ Xiaojun, LI Zhao. A review of research progress of centrifugal granulation of blast furnace slag[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2020,19(2):79 – 86.

[12] 孙瑞靖,康月,丁洪玲,等. 喷吹工艺参数对高炉渣粒化成珠效果的影响[J]. 钢铁,2024,59(7):159 – 168.
SUN Ruijing, KANG Yue, DING Hongling, et al. Influence of injection process parameters on granulation effect of blast furnace slag to beads[J]. Iron & Steel, 2024,59(7):159 – 168.

[13] 刘跃. 高炉熔渣粒化过程熔滴凝固特性研究[D]. 唐山:华北理工大学,2019.
LIU Yue. Study on droplet solidification characteristics of blast furnace slag granulation[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology,2019.

[14] WANG L L, ZHANG Y Z, KE H B, et al. Experimental investigation on granulation characteristics and waste heat recovery of molten slag in gas quenching dry granulation technique[J]. Applied Thermal Engineering,2021,184: 116295.