基于氧化焙烧钢渣中铁磁选回收

黄伟建[1a]，张晓雪[1b]，冉传有[1a]，王相愚[1a]，郑富强[2]，王洪阳[1a,1c]

（1. 安徽理工大学 a. 材料科学与工程学院；b. 分析测试中心；c. 安徽省煤基固废新材料产业共性技术研究中心，安徽 淮南 232001；2. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205）

摘要：钢渣中铁的提取可实现其高值化利用。本文针对钢渣氧化焙烧及磁选回收铁进行系统研究。结果表明，钢渣中主要物相为 FeO 和 Ca_2SiO_4，且 FeO 的平均粒径为 21.43 μm。热力学计算及氧化焙烧试验证实，钢渣中弱磁性的 FeO 在 CO_2 中焙烧时会定向转变为强磁性的 Fe_3O_4，且焙烧时间延长及温度升高均对 Fe_3O_4 的形成起促进作用。氧化焙烧产物细磨至平均粒径 28.09 μm，在磁场强度为 1 000 Gs 条件下经分选可获得铁品位为 53.12% 和铁回收率为 90.53% 的磁选精矿。

关键词：钢渣；氧化焙烧；磁选；铁回收；高值化利用

中图分类号：TF524；X757 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)03－0112－07

doi：10.13403/j.sjqt.2026.03.053

Magnetic separation recovery from steel slag based on oxidizing roasting

HUANG Weijian[1a], ZHANG Xiaoxue[1b], RAN Chuanyou[1a], WANG Xiangyu[1a], ZHENG Fuqiang[2], WANG Hongyang[1a,1c]

(1. Anhui University of Science & Technology a. School of Materials Science and Engineering; b. Analysis and Testing Center; c. Anhui General Technology Research Center for New Materials from Coal-based Solid Wastes, Huainan 232001, Anhui, China, 2. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: Iron extraction from steel slag can achieve high-value utilization. The oxidizing roasting of steel slag and the recovery of iron from magnetic separation are systematically studied. The results indicate that the main phases in steel slag are FeO and Ca_2SiO_5, with an average particle size of 21.43μm. Thermodynamic calculations and oxidizing roasting test confirm that the weakly magnetic FeO in steel slag is oriented to become strongly magnetic Fe_3O_4 when it is roasted in CO_2, and both extended roasting time and temperature increase promote the formation of Fe_3O_4. The products obtained from oxidizing roasting are finely ground to an average particle size of 28.09 μm. Under magnetic field strength conditions of 1 000 Gs, it is possible to obtain a magnetic separation concentrate with an iron content of 53.12% and an iron recovery rate of 90.53% through separation.

Key words: steel slag; oxidizing roasting; magnetic separation; iron recovery; high-value utilization

钢渣是钢铁冶炼过程中产生的一种主要固体废弃物，我国钢渣年产量在 1.5 亿 t 左右[1]。由于钢渣成分复杂以及游离氧化钙的存在，致使我国钢渣综合利用率仅为 30%~40%[2-3]。钢渣的大量堆存处置不仅占用土地资源，同时对周围环境带来潜在污染。

收稿日期：2025－09－26；**修回日期**：2025－12－02

基金项目：安徽省大学生创新训练项目(S202510361170)；安徽理工大学高层次人才引进项目(2025yjrc0005；2022yjrc25)；中冶长天科研开发基础研究基金项目(2024JCYJ12)

作者简介：黄伟建(2005—)，男，本科在读，从事工业固废资源化研究。

通信作者：张晓雪(1991—)，女，讲师，从事复杂矿石提取与利用研究。

鉴于部分钢渣中铁质量分数约为 30%，高于我国铁矿石开采边界品位的 27%，因此，铁的提取成为其高值化利用的研究方向之一。由于钢渣中的含铁矿物多为弱磁性的氧化亚铁(FeO)，致使采用直接磁选工艺回收时难以获得较好的分选指标[4-6]。HOU 等[7]选用空气流态化为进料方式的新型干式磁选机对钢渣进行分选，最终可获得铁品位为 21.81% 的磁选精矿，比原钢渣中铁品位提高 6.88%。黄阳等[8]以含铁量 34.67% 的攀钢钢渣为原料，通过预先筛分、一粗一精湿式磁选可获得金属铁粒和铁精矿两个产品，但是铁回收率仅为 63.42%。FONIOK 等[9]采用磨矿磁选工艺处理含氧化铁为 30% 的钢渣，所得磁选精矿中氧化铁质量分数为 48%。张朝晖等[10]选用湿式弱磁处理钢渣，可获得铁品位为 60.60% 和铁回收率为 66.99% 的铁精矿。

通过高温还原可将弱磁性的 FeO 还原为强磁性的金属铁，后续经磨矿磁选可进一步回收金属铁粉[11-12]。YE 等[13]以钢渣为原料研究了还原温度及不同还原剂(无烟煤、石油焦、焦炭)对金属铁回收效果的影响。结果表明，钢渣在 1 300 ℃进行碳热还原后，磁选精矿中铁回收率为 80.3%。ZHOU 等[14]提出了铜渣 - 钢渣共还原，最终可获得铁品位为 92.91% 及铁回收率为 98.63% 的合格产品。还原过程中生物炭的加入对钢渣的还原起促进作用，主要原因是其在还原过程中释放 H_2 和更多的 CO，同时显著降低 CO_2 排放[15-16]。

由于钢渣中的主要含铁物相为弱磁性的 FeO，采用常规磁选工艺难以获得高品位、高回收率的铁精矿。尽管深度还原 - 磁选或熔分工艺可获得优质含铁原料，但其还原焙烧温度较高，能耗较大。韩跃新等[17]在研究菱铁矿氧化分解时发现，分解产生的 FeO 稳定性较差，易被产物 CO_2 氧化为强磁性的磁铁矿(Fe_3O_4)。据此推测，在焙烧过程中通入 CO_2，有望诱导钢渣中的弱磁性 FeO 定向转化为 Fe_3O_4，从而改善其磁选性能。然而，目前关于钢渣选择性氧化的相关研究报道较少。为此，本文基于热力学计算，结合 X 射线衍射仪(XRD)和振动样品磁强计(VSM)等分析手段，系统研究钢渣焙烧过程中的物相演变规律，并通过磨矿 - 磁选工艺实现焙烧产物中含铁矿物的高效回收，以期为钢渣中铁资源的经济提取提供新思路。

1　试验原料与方法

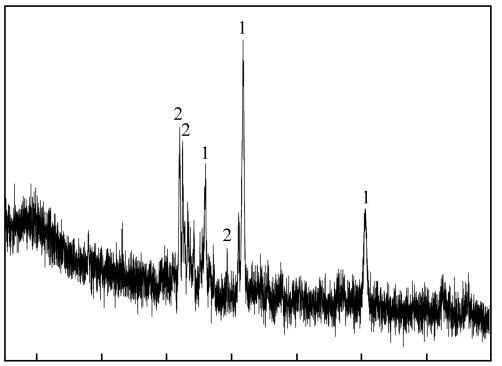
1.1　试验原料

试验所用钢渣取自某钢铁企业，其主要的化学成分与 XRD 分析分别如表 1 与图 1 所示。由表 1 可知，该钢渣主要成分为 CaO、Fe 和 SiO_2，质量分数分别为 32.73%、24.09% 和 12.73%，其中铁含量较高，具有较高的回收价值。由图 1 可知，其主要物相为 FeO 和硅酸二钙(Ca_2SiO_4)。此外，由表 1 可知，钢渣中还含有 6.30% 的 MgO 和 4.62% 的 Al_2O_3，但在 XRD 图谱中未检测到含镁和含铝矿物的特征峰，这可能是由于这些组分以非晶态或结晶度较差的形式存在所致。

表 1　钢渣主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of steel slag　%

Fe	SiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO
24.09	12.72	6.30	4.62	32.73

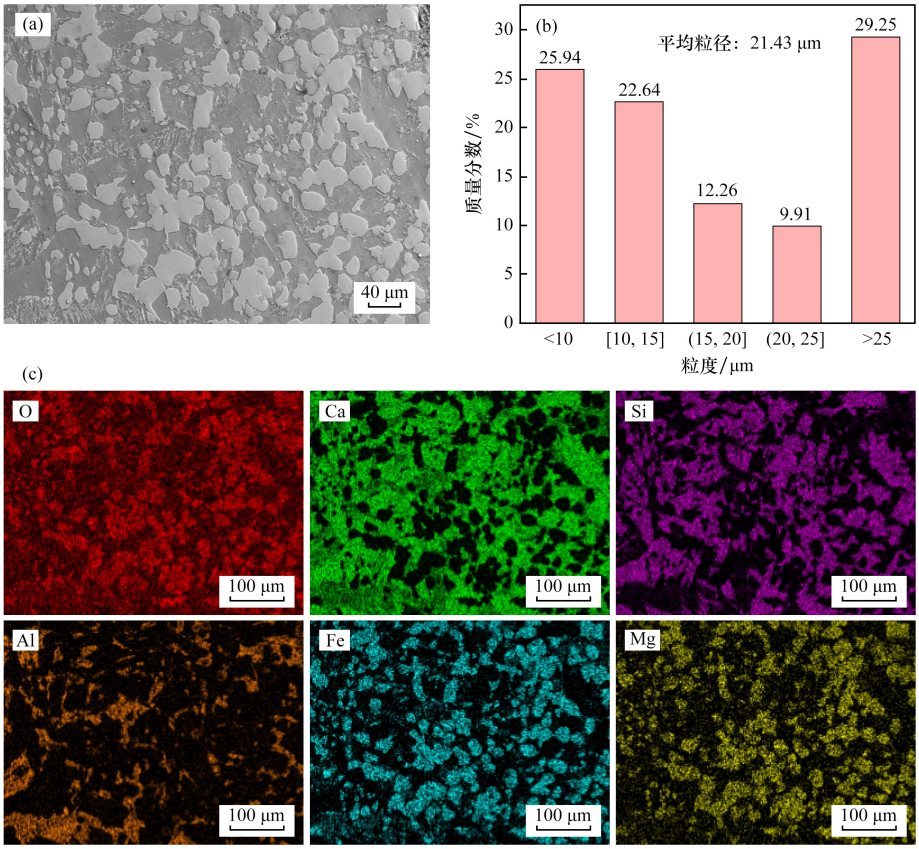


1—FeO；2—Ca_2SiO_4。

图 1　钢渣 XRD 分析

Fig. 1　XRD analysis of steel slag

采用扫描电镜对钢渣中的矿物嵌布关系进行定性分析，结果见图 2。图中灰白色颗粒为 FeO，灰色颗粒为 Ca_2SiO_4。由图 2 可知，钢渣中的 FeO 被 Ca_2SiO_4 所包裹。镁元素的分布与铁元素的分布一致，表明钢渣中的镁主要赋存在 FeO 中。对钢渣中 FeO 的粒度分布进行统计发现，此钢渣中 FeO 的平均粒径为 21.43 μm。粒径 < 10 μm 的颗粒占比为25.94%，[10,15] μm粒级的颗粒占比



（a）钢渣扫描电镜；（b）FeO 粒度分布；（c）元素面扫描

图 2 钢渣中矿物嵌布关系

Fig. 2 Mineral dissemination relationship in steel slag

为 22.64%，对于处于中间粒级（15，20］μm、（20，25］μm 的颗粒占比则分别仅为 12.26% 和 9.91%，而 > 25 μm 的颗粒占比则达到最高的 29.25%。该粒度分布表明，通过物理分选有望实现含铁矿物的选择性富集。

1.2 试验方法

钢渣选择性氧化焙烧试验在卧式管炉中进行：将干燥后的钢渣放置于刚玉坩埚中，待卧式管炉升至设定温度，将刚玉坩埚推入卧式管炉并通入 CO_2。待反应时间结束，将刚玉坩埚推到卧式管炉出料口，并保持 CO_2 持续通入，直至刚玉坩埚冷却至室温。取 50 g 焙烧钢渣和 50 mL 水加入制样粉碎机中密封，通过磨矿时间控制其磨矿粒度。待磨矿时间结束进一步在湿式磁选机中对焙烧钢渣进行分选，分别获得磁选精矿和磁选尾矿，后续经过滤和烘干后用于化学和物相分析。

2 试验结果与讨论

2.1 热力学分析

钢渣在 CO_2 气氛中焙烧时，其中的 FeO 会与 CO_2 反应生成 Fe_3O_4，而 Fe_3O_4 有可能和 CO_2 进一步反应生成 Fe_2O_3，其反应见公式(1)和公式(2)，其标准反应吉布斯自由能随温度的变化如图 3 所示。

$$3FeO(s) + CO_2(g) = Fe_3O_4(s) + CO(g)$$

$$\Delta_r G_m^\theta = [-33\ 310 + 41.45(T/K)]\ J/mol \quad (1)$$

$$2Fe_3O_4(s) + CO_2(g) = 3Fe_2O_3(s) + CO(g)$$

$$\Delta_r G_m^\theta = [42\ 121 + 53.37(T/K)]\ J/mol \quad (2)$$

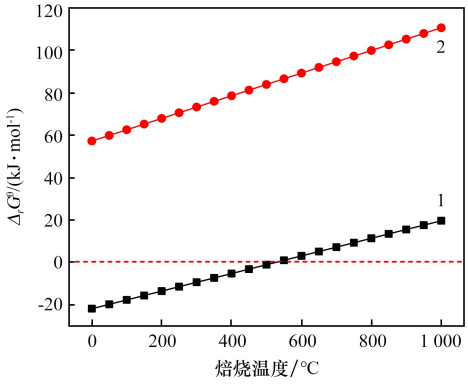
由图 3 可知，随着焙烧温度的升高，反应式(1)和反应式(2)的吉布斯自由能均大于 0，表示该反应难以自发进行。

根据反应等温方程，即

$$\Delta G = \Delta_r G_m^\theta + RT \ln \left[\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}\right] \quad (3)$$

式中：ΔG 为上式实际的吉布斯自由能，kJ/mol；

$\Delta_r G_m^\theta$ 为标准吉布斯自由能，kJ/mol；P_{CO_2} 和 P_{CO} 分别为 CO_2 和 CO 的分压，Pa。



1—反应式(1)；2—反应式(2)。

图 3　$\Delta_r G^\theta$和焙烧温度的关系

Fig. 3　Relationship between $\Delta_r G^\theta$and calcination temperature

当焙烧过程中一直通入 CO_2 时，实际反应过程中还涉及到气体分压的变化。由此可见，该反应能否顺利进行还与体系内 CO_2 和 CO 的分压有关。因此，上式中的K^θ计算方法见式(4)～(5)。

$$\Delta_r G_m^\theta = -RT\ln K^\theta, K^\theta = \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = \frac{\varphi(CO_2)}{\varphi(CO)} \quad (4)$$

$$\varphi(CO_2) = 100 - \varphi(CO) = \frac{\varphi(CO)}{K^\theta} = \frac{100 - \varphi(CO_2)}{K^\theta} \quad (5)$$

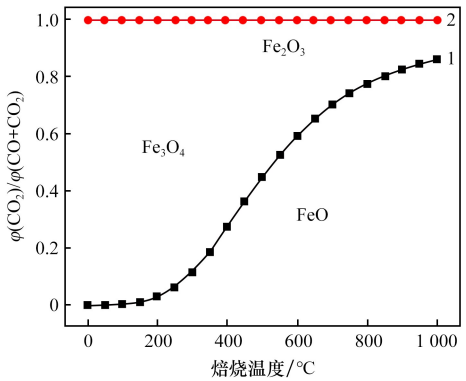
式中：R 为气体常数；T 为绝对温度，K；K^θ为标准平衡常数(无量纲)；$\varphi(CO_2)$、$\varphi(CO)$分别为 CO_2和 CO 的体积分数。

再根据平衡常数和气相成分的关系，可以绘制出反应式(1)和反应式(2)在 CO_2中的平衡相图，其结果见图 4。

根据反应平衡，可将图 4 自上而下分为 3 个区域，分别是 Fe_2O_3、Fe_3O_4 和 FeO 的稳定区域。随着焙烧温度的升高和 CO_2浓度的增加，FeO 会转变为 Fe_3O_4。然而，Fe_2O_3 的稳定区间较小，意味着 Fe_3O_4 很难与 CO_2反应生成 Fe_2O_3。因此，在热力学上通过与 CO_2焙烧可将氧化亚铁定向转变为 Fe_3O_4。

2.2　焙烧过程中的物相变化

CO_2气氛下钢渣焙烧产物的 XRD 分析见图 5。由图5(a)可知，在600 ℃焙烧20 min时，产物中



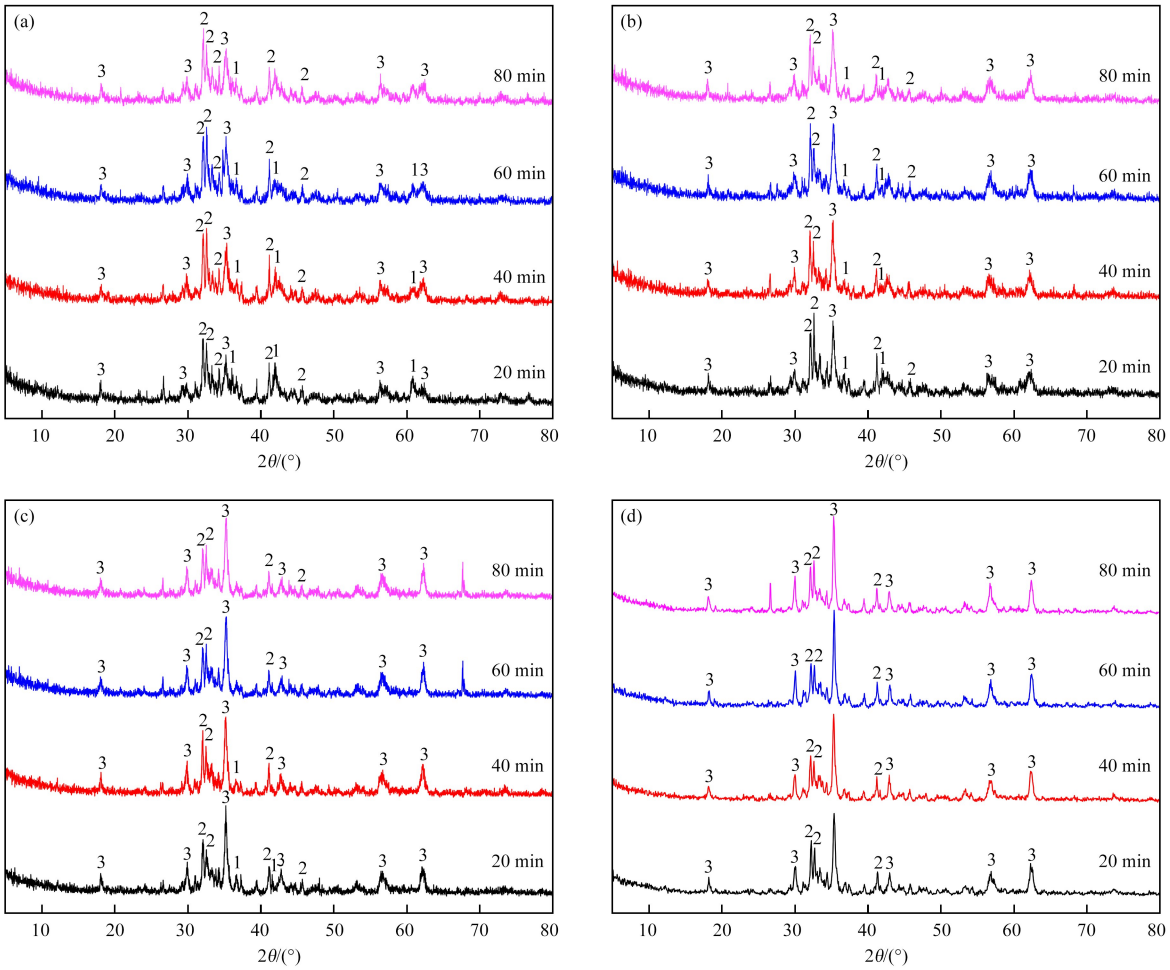
1—反应式(4)；2—反应式(5)。

图 4　FeO 在 CO_2中的平衡相

Fig. 4　Equilibrium phase of FeO in CO_2

除 Ca_2SiO_4 和 FeO 外，还出现了 Fe_3O_4，表明该条件下 FeO 与 CO_2反应生成了 Fe_3O_4。随焙烧时间延长，Fe_3O_4 衍射峰增强，FeO 峰减弱，说明延长时间有利于 Fe_3O_4 形成，但 600 ℃下即使延长至 80 min 仍有 FeO 残留。升温至 700 ℃后，相同时间内发生了 FeO 向 Fe_3O_4 的转变；800 ℃焙烧 60 min 后，FeO 完全消失，产物仅含 Ca_2SiO_4 和 Fe_3O_4；900 ℃时同样仅见这两种物相，且衍射峰强度显著提高。综上，升高焙烧温度可有效促进 FeO 向 Fe_3O_4 转化，并有利于矿物晶体结构的完善。

FeO 为弱磁性矿物，而 Fe_3O_4 为强磁性矿物，进一步采用振动试样磁强计(vibrating sample magnetometer，VSM)对焙烧产物的磁性变化进行分析，其结果见图 6。由图 6 可知，经 600 ℃焙烧 20 min，此时焙烧产物中的比磁化强度达到 3.53 emu/g。当焙烧时间延长至 80 min 时，焙烧产物中的比磁化强度为 5.74 emu/g。结合图 5 的物相分析结果可知，选择性氧化焙烧过程中弱磁性的 FeO 转变为了强磁性的 Fe_3O_4，致使焙烧产物的比磁化强度提高。焙烧时间的延长会促使 FeO 转变为 Fe_3O_4，因此焙烧产物中的比磁化强度随焙烧时间的延长而增大。当固定焙烧时间为 60 min 时，焙烧产物中的比磁化强度由 600 ℃的 4.33 emu/g 快速提高至 800 ℃的 9.39 emu/g，进一步升高至 900 ℃的 10.32 emu/g。从前面热力学及焙烧产物的物相变化可知，焙烧温度的升高不仅促使 FeO 转变为 Fe_3O_4，同时也利于 Fe_3O_4 晶型的完善。总之，焙烧产物的比磁化强度与 Fe_3O_4 含量呈正相关的关系。



焙烧温度/℃：（a）600；（b）700；（c）800；（d）900

1—FeO；2—Ca_2SiO_4；3—Fe_3O_4。

图 5 CO_2 气氛下钢渣焙烧产物的 XRD 分析

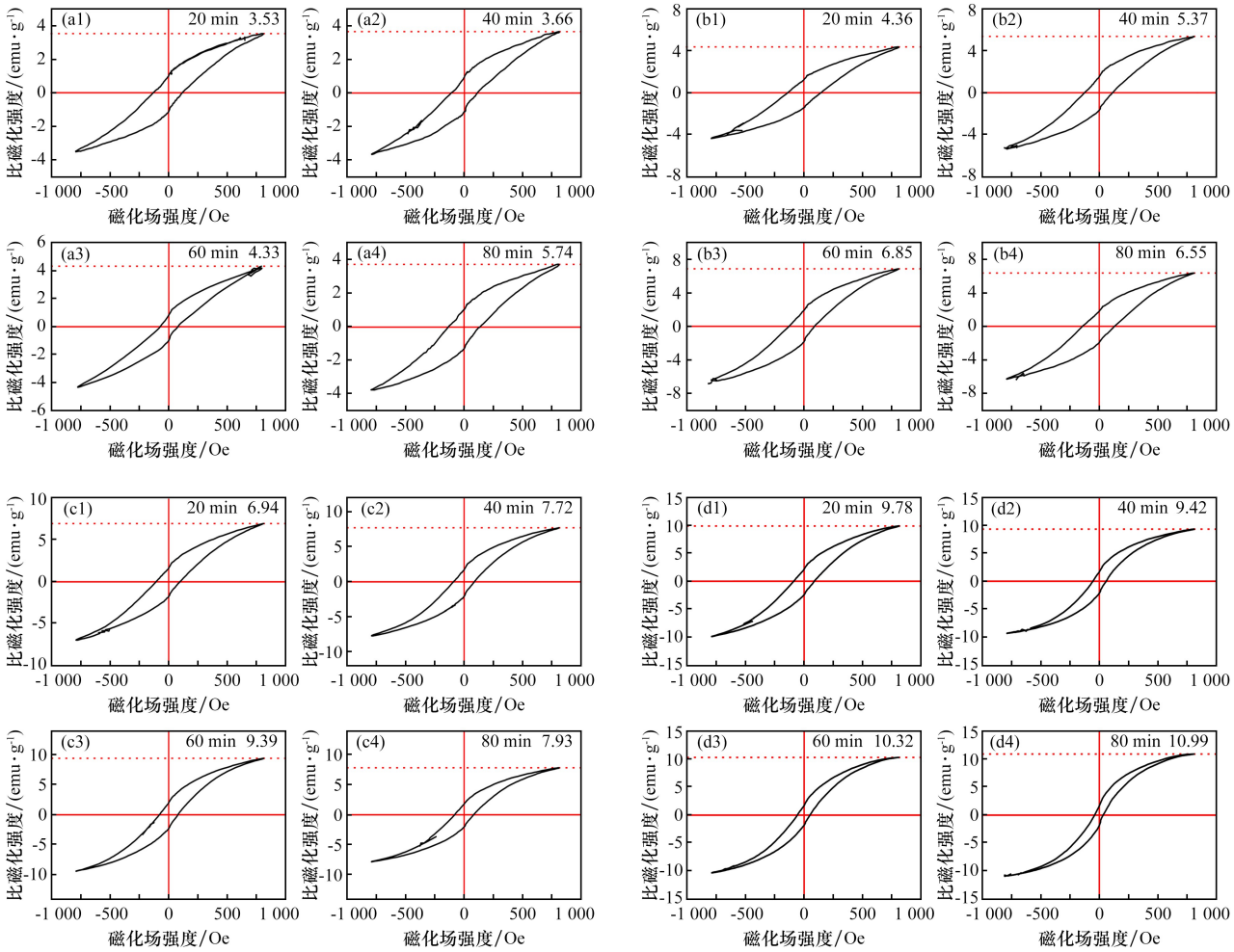
Fig. 5 XRD analysis of calcined products from steel slag under CO_2 atmosphere

2.3 焙烧产物中铁的磁选富集

结合前面焙烧产物的 XRD 及 VSM 分析，经 800 ℃焙烧 60 min 即可实现钢渣中 FeO 定向转变为 Fe_3O_4。由于该过程为固相反应，焙烧前后含铁矿物颗粒的粒度并无明显变化，因此需要经过磨矿处理才能实现焙烧产物中 Fe_3O_4 颗粒的磁选回收。

首先在 1 000 Gs 磁场条件下，考察了磨矿粒度对磁选结果的影响，其结果见图 7。由图 7 可知，随着磨矿产物粒度的降低，磁选精矿中铁品位呈上升趋势，而铁回收率却呈先升高后降低的趋势。当磨矿平均粒径由 34.32 μm 降低至 28.09 μm 时，磨矿粒度的减小有利于磁铁矿颗粒的单体解离，因此磁选精矿中铁品位及铁回收率均呈上升趋势。当磨矿平均粒径达到 27.64 μm 时，此时的磨矿粒径已经接近焙烧产物中磁铁矿颗粒粒级，表明部分磁铁矿颗粒已被细磨，致使磁选精矿中铁品位会进一步提高，但是铁回收率却呈降低趋势。

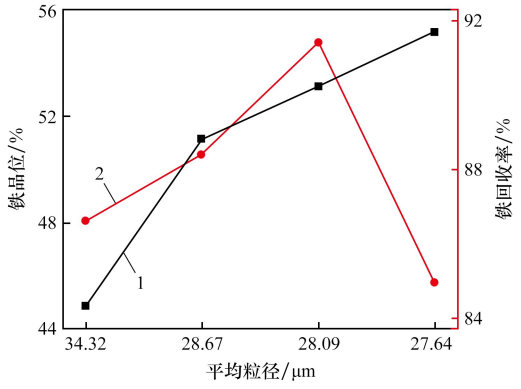
控制磨矿粒径为 28.09 μm，进一步考察磁场强队对磁选结果的影响，其结果见图 8。由图 8 可知，随着磁场强度的增加，磁选精矿中铁品位由 500 Gs 条件下 54.87% 逐渐下降至 2 000 Gs 的 51.14%，而铁回收率由 500 Gs 条件下 83.25% 逐渐提高至 2 000 Gs 的 92.20%。随着磁场强度的增加，产物中除了单体解离的 Fe_3O_4 颗粒被有效回收外，Fe_3O_4 和 Ca_2SiO_4 连生体也被回收，在提高磁选精矿中铁回收率的同时，致使铁品位逐渐降低。需要说明的是，该磁选产物中的铁品位最大仅为 55% 左右。



焙烧温度/℃：（a1）~（a4）600；（b1）~（b4）700；（c1）~（c4）800；（d1）~（d4）900

图 6　钢渣焙烧产物的 VSM 分析

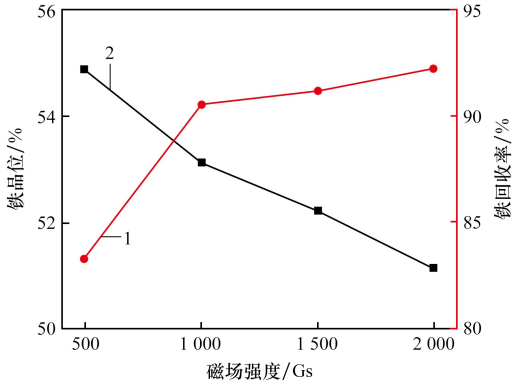
Fig. 6　VSM analysis of calcined products from steel slag



1—铁品位；2—铁回收率。

图 7　磨矿粒度对磁选结果的影响

Fig. 7　Effect of grinding particle size on magnetic separation results



1—铁品位；2—铁回收率。

图 8　磁场强度对磁选结果的影响

Fig. 8　Effect of magnetic field strength on magnetic separation results

对磁选精矿进行化学成分分析，其结果见表 2。由表 2 可知，该磁选精矿中除 w(Fe) 为 53.12% 外，w(MgO) 高达 9.69%。结合图 2 元素面扫描可知，钢渣中镁元素主要以镁铁尖晶石形式赋存，

致使后续氧化磁选过程中镁会跟随磁铁矿进入磁选精矿中。此外，磁选精矿中 $w(CaO)$、$w(SiO_2)$ 和 $w(Al_2O_3)$ 分别为 7.15%、2.79% 和 1.62%。

表 2 磁选精矿主要化学成分(质量分数)

Table 2 Main chemical composition of magnetic concentrate %

Fe	MgO	CaO	SiO_2	Al_2O_3
53.12	9.69	7.15	2.79	1.62

由表2可见，钢渣氧化焙烧产物在磨矿粒径为28.09 μm及磁场强度为1 000 Gs条件下处理后，可获得铁品位为53.12%和铁回收率为90.53%的磁选精矿。由于该精矿中其它元素为MgO、CaO和SiO_2，可作为炼铁原料使用。

3 结 论

(1) 钢渣中铁品位为24.09%，主要物相为FeO和Ca_2SiO_4，且FeO的平均粒径为21.43 μm。

(2) 热力学计算及焙烧试验结果表明，在CO_2中焙烧可将弱磁性的FeO转变为强磁性的Fe_3O_4，且焙烧温度的升高和时间的延长均对Fe_3O_4的形成起促进作用。

(3) 钢渣在CO_2气氛中，经800 ℃焙烧60 min后，控制磨矿粒径为28.09 μm及磁场强度为1 000 Gs，可获得铁品位为53.12%和铁回收率为90.53%的磁选精矿。

参考文献:

[1] 李彦军,刘陈新,曹朝真,等. 钢渣萃取液吸收CO_2的影响因素及产品性能[J]. 烧结球团,2025,50(3):141－148.
LI Yanjun, LIU Chenxin, CAO Chaozhen, et al. Influencing factors of CO_2 absorption and product performance of steel slag extract[J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(3):141－148.

[2] GUO J L, BAO Y P, WANG M. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management[J]. Waste Management,2018,78:318－330.

[3] 刘军,王泽培,曹志众,等. 钢渣在碳捕集领域的研究进展[J]. 烧结球团,2024,49(6):11－20.
LIU Jun, WANG Zepei, CAO Zhizhong, et al. Research progress of steel slag in field of carbon capture[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(6):11－20.

[4] 殷素红,曾丽莎,梁康,等. 不同处理工艺下钢渣的铁相赋存状态及其对磁选粉收得率和尾渣胶凝活性的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2024,52(10):76－86.
YIN Suhong, ZENG Lisha, LIANG Kang, et al. Iron occurrence state of steel slag under different treatment processes and its influence on the yield of magnetic separation powder and the cementitious activity of tailings[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2024,52(10):76－86.

[5] LIU X,WANG D Z,LI Z W,et al. Efficient separation of iron elements from steel slag based on magnetic separation process[J]. Journal of Materials Research and Technology,2023,23:2362－2370.

[6] 钱强. 低品位钢渣磁选粉在烧结工艺中的应用[J]. 烧结球团,2018,43(3):43－46.
QIAN Qiang. Application of low grade steel slag magnetic separation powder in sintering process[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(3):43－46.

[7] HOU X K,WU S S,WANG X F,et al. An air-fluidized magnetic separator and its separation performance for steel slag[J]. AIP Advances,2024,14(3):035302.

[8] 黄阳,王维清,向香源,等. 攀钢钢渣选铁试验研究[J]. 现代矿业,2017,33(8):124－126.
HUANG Yang, WANG Weiqing, XIANG Xiangyuan, et al. Experimental study on separating iron from steel slag of Panzhihua steel[J]. Modern Mining, 2017, 33(8):124－126.

[9] FONIOK K, MATĚJKA V, MAIEROVÁ P, et al. Wet magnetic separation of iron from fine-grained steelmaking slags[C]//METAL 2022 Conference Proceedings. Ostrava: Tanger,2022:85－90.

[10] 张朝晖,鲁慧慧,巨建涛,等. 钢渣回收铁的试验研究[J]. 中国矿业,2010,19(6):70－72.
ZHANG Zhaohui, LU Huihui, JU Jiantao, et al. Experimental research on recovery of steel slag[J]. China Mining Magazine,2010,19(6):70－72.

[11] 张博康,罗果萍,郝帅,等. 钢渣碳热还原工艺条件优化研究[J]. 钢铁研究学报,2024,36(6):794－805.
ZHANG Bokang, LUO Guoping, HAO Shuai, et al. Optimization of steel slag carbothermal reduction process conditions[J]. Journal of Iron and Steel Research,2024, 36(6):794－805.

(下转第133页)

ZHAO Xiujuan, JIA Junlong, WANG Qian. Application of life cycle assessment in the sintering process under the background of carbon neutrality[J]. Hebei Metallurgy, 2021(7):78 – 84.

[8] OLMEZ G M, DILEK F B, KARANFIL T, et al. The environmental impacts of iron and steel industry: A life cycle assessment study[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 130: 195 – 201.

[9] 易正明,陈卓,覃佳卓,等. 基于 LCA 方法的铁矿烧结过程环境影响评价[J]. 烧结球团,2022,47(2):88 – 95.
YI Zhengming, CHEN Zhuo, QIN Jiazhuo, et al. Environmental impact assessment of iron ore sintering process based on LCA method[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(2): 88 – 95.

[10] CHEN H T, WANG Z H, XU S, et al. Energy demand, emission reduction and health co-benefits evaluated in transitional China in a 2 ℃ warming world[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264: 121773.

[11] ATES S A. Energy efficiency and CO^2 mitigation potential of the Turkish iron and steel industry using the LEAP (long-range energy alternatives planning) system[J]. Energy, 2015, 90: 417 – 428.

[12] 何志斌,郝英杰,王盼,等. 基于 LEAP 模型的农业活动碳排放情景预测与减排路径分析[J]. 环境科技,2025,38(2):56 – 61.
HE Zhibin, HAO Yingjie, WANG Pan, et al. Scenario prediction and emission reduction path analysis of agricultural carbon emissions based on LEAP model[J]. Environmental Science and Technology, 2025, 38(2): 56 – 61.

[13] BEYLOT A, VILLENEUVE J. Accounting for the environmental impacts of sulfidic tailings storage in the Life Cycle Assessment of copper production: A case study[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 153139 – 145.

[14] JOHNSON E. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2003, 23(1): 129 – 130.

[15] 毛睿昌. 基于 LCA 的城市交通基础设施环境影响分析研究——以深圳为例[D]. 深圳:深圳大学,2017.
MAO Ruichang. Research on environmental impact analysis of urban transport infrastructure based on LCA: A case study of shenzhen[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.

(上接第 118 页)

[12] 安胜利,黄兰,柴轶凡,等. 钢渣处理技术及资源化利用研究进展[J]. 钢铁,2025,60(3):1 – 12.
AN Shengli, HUANG Lan, CHAI Yifan, et al. Research progress of steel slag treatment technology and recycling utilization[J]. Iron & Steel, 2025, 60(3): 1 – 12.

[13] YE G Z, BURSTRÖM E, KUHN M, et al. Reduction of steel-making slags for recovery of valuable metals and oxide materials[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2003, 32(1): 7 – 14.

[14] ZHOU Y, WANG H Y, WANG H C, et al. Mechanism of arsenic distribution and migration during iron extraction by copper slag-steel slag combined reforming: A potential solution to refractory wastes[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 420: 138399.

[15] 胡岩卓,申振中,韩少慧,等. 双碳背景下转炉钢渣还原提质技术的研究现状及展望[J]. 钢铁钒钛,2025,46(3):81 – 91.
HU Yanzhuo, SHEN Zhenzhong, HAN Shaohui, et al. Research status and prospects of reduction and upgrading technology of converter steel slag under the Dual-Carbon background[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2025, 46(3): 81 – 91.

[16] 辛闯,何志军,刘吉辉. 铁矿粉烧结过程配加生物质炭燃料的试验与影响分析[J]. 钢铁,2025,60(9):194 – 203.
XIN Chuang, HE Zhijun, LIU Jihui. Experimental discussion and influence analysis on adding biochar fuel in sintering process of iron ore fines[J]. Iron & Steel, 2025, 60(9): 194 – 203.

[17] 韩跃新,周廷波,高鹏,等. 菱铁矿自磁化反应行为及调控机理[J]. 钢铁,2023,58(9):69 – 80.
HAN Yuexin, ZHOU Tingbo, GAO Peng, et al. Self-magnetization reaction behavior and regulation of siderite[J]. Iron and Steel, 2023, 58(9): 69 – 80.