节能环保与综合利用

含铁回转窑尾渣还原熔分的影响因素及工艺参数优化

周 君[1,2]，刘 超[1]，邢宏伟[1]，龙 跃[1]，郑利佳[3]
(1. 华北理工大学 冶金与能源学院，河北 唐山 063210；2. 曹妃甸职业技术学院，河北 唐山 063200；
3. 唐山钢铁集团有限公司，河北 唐山 063000)

摘要： 含铁回转窑尾渣(简称“含铁窑渣”)中含铁品位高、金属化率高，具有高值资源化利用潜力。本文基于含铁窑渣特性，开展还原熔分试验，利用 FactSage 软件绘制不同碱度下的三元渣系相图，系统研究熔分温度、碱度、碳氧比对含铁窑渣熔分效果、铁粒质量和铁回收率的影响规律。结果表明：熔分温度的升高有利于渣铁的有效分离和铁回收率的提高；碱度对熔分效果影响显著，对铁回收率的影响呈现先升高后降低的趋势；碳氧比对熔分效果的影响表现为铁粒质量和铁回收率先降低后升高的趋势。当熔分温度为 1 550 ℃、含铁窑渣碱度为 1.0、碳氧比为 1.4 时，100 g 样品熔分出来的铁粒质量为 43.36 g，此时铁回收率为 94%。本文研究结论可为含铁窑渣的高值资源化利用提供理论依据。

关键词： 含铁窑渣；还原熔分；渣铁分离；铁回收率
中图分类号： X705；TF557 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000－8764(2025)06－0118－09
doi： 10.13403/j.sjqt.2025.06.103

Factors influencing and process parameter optimization for reductive melting-separation of iron-containing rotary kiln tailings slag

ZHOU Jun[1,2], LIU Chao[1], XING Hongwei[1], LONG Yue[1], ZHENG Lijia[3]
(1. School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 2. Caofeidian College of Technology, Tangshan 063200, Hebei, China; 3. Tangshan Iron and Steel Group Co., Ltd., Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: The iron-containing rotary kiln tailings slag (referred to as “iron-containing kiln slag”) has a high iron grade and a metallization rate, and has potential for high-value resource utilization. Based on the properties of iron-containing kiln slag, in the study of this paper the reductive melting-separation test was conducted. Phase diagrams of ternary slag systems under different basicities were drawn with FactSage software to systematically study the influence rule of melting-separation temperature, basicity, and carbon-oxygen ratio on the melting-separation effect, iron particle quality, and iron recovery rate. The results indicate that the increasing the melting-separation temperature facilitates the effective separation of slag and iron and enhances the iron recovery rate; the basicity significantly influences the melting-separation result, and the effect on iron recovery rate shows a tendency of initially increasing and then decreasing. The effect of the carbon-oxygen ratio on the melting effect shows that the iron particle quality and iron recovery first decrease and then increase. Under conditions of a melting-separation temperature of 1 550 ℃, basicity of iron-containing kiln slag of 1.0, and carbon-oxygen ratio of 1.4, the mass of iron particles separated from 100 g of sample was 43.36 g, achieving an iron recovery rate of 94%. The findings of this study can provide a theoretical basis for the high-value resource utilization of iron-containing kiln slag.

收稿日期： 2025－02－21；**修回日期：** 2025－05－09
基金项目： 河北省高等学校科学研究资助项目(CXY2024011&CYZD202504)；唐山市科技计划资助项目(22150219A)
作者简介： 周 君(1988—)，女，博士研究生，讲师，从事冶金固废回收利用方面的研究工作。
通信作者： 邢宏伟(1973—)，男，教授，从事冶金固废回收利用方面的教学与研究工作。

中国知网 https://www.cnki.net

Key words: iron-containing kiln slag; reductive melting-separation; slag-iron separation; iron recovery rate

2024 年我国粗钢产量达到 10.05 亿吨。作为目前主流钢铁冶炼技术之一，高炉炼铁工艺能耗占钢铁生产总能耗的 70% 以上[1]，同时，其大气污染物排放量占钢铁生产总排放量的近 90%[2]。为确保高炉冶炼的正常运行，入炉铁矿通常要求为高品位富矿，其铁品位需在 55% 至 66% 之间。然而，高炉炼铁工艺无法有效处理低品位的多金属复合矿，这给钢铁企业在节能和减排方面带来了很大压力。因此，以直接还原工艺为主的非高炉炼铁工艺，因其原料适应性广泛，受到越来越多研究者的关注。

目前，我国年产冶金粉尘约为 0.9 亿吨，而利用回转窑焙烧冶金粉尘产生的尾渣(TFe 质量分数≥50%)可高达 200 万吨。按照同类原料 800 元/t 的市场价对该尾渣进行回收，预计每年可产生 16 亿元人民币的收益，并且能够减少 450 万吨冶金粉尘排放。含铁回转窑尾渣(简称“含铁窑渣”)是含锌物料在回转窑内高温挥发锌、铅等金属后的残余产物。在回转窑焙烧过程中，由于高温和氧气供应的限制，部分焦炭未能完全燃烧，这些未完全燃烧的焦炭会残留在窑渣中。此外，铁等难以挥发的金属矿物在高温环境下不易气化，它们会与其他物质反应或直接以固态形式积累在窑渣中[3]。因此，窑渣中的铁品位较高，约为45%~55%，该尾渣是一种具有较高价值的二次资源。然而，含铁窑渣中未完全挥发的碱金属限制了其作为高炉冶炼原料的使用[4-5]。目前，国内外相关研究人员对含铁窑渣的资源化利用展开了广泛的研究与工业化应用[6-7]。其中，因资源化成本低、周期短、处理量大等优势，选矿工艺已成为主流处理技术[8]。例如，马娇等[9]采用干法磁选技术回收含铁窑渣中的铁和焦炭，实施多段磁选工艺，采用弱磁选回收铁、强磁选回收炭，最终实现铁的回收率达到 79.98%；彭伟等[10]则采用浮选法先回收炭，再进行研磨和磁选回收铁，使铁的回收率为 68.42%；李永华等[11]通过对含铁窑渣进行细磨和磁选处理后，再进行二段细磨和磁选工艺，最终达到铁的回收率约为 90%；蒋丰祥[12]针对含金属铁较高的含铁窑渣，在浮选过程中先进行一次弱磁选，实现铁的回收率为 63.91%。然而，磁选只能分离出磁性较强的铁物质，对于尾渣中含有的较多非磁性铁矿物(如氧化铁)的分选效果有限。因此，该方法无法高效回收所有铁元素，导致回收率较低。

针对含铁窑渣资源化利用工艺存在铁回收率低的问题，本文对含铁窑渣进行深度还原熔分处理，探讨熔分温度、碱度、碳氧比等工艺参数对铁回收率和熔分效果的影响规律，旨在寻找最佳工艺参数以实现更为理想的渣铁分离效果，并优化冶炼过程中的能源消耗和资源利用率，以期为二次矿产资源的综合利用、环境改善、企业生产效益提升以及社会效益创造提供重要参考和依据。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

1.1.1　化学成分

试验所用含铁窑渣和焦炭来自辽宁某冶金粉尘资源化厂，该含铁窑渣形貌中颗粒较大，颜色呈灰褐色，形状不规则，硬度较大，其表观形貌如图 1 所示。对含铁窑渣的化学成分进行分析，结果如表 1 所示。由表 1 可以明显看出，含铁窑渣中有价值元素主要是铁和碳，其中残碳量为 0.72%，TFe 品位为 45.92%。为了弄清楚含铁窑渣中的主要含铁物相，对原材料进行 X 射线衍射仪(XRD)物相分析，如图 2 所示。由图 2 可以看出，含铁窑渣中主要金属化合物的物相成分为



图 1　含铁窑渣表面形貌

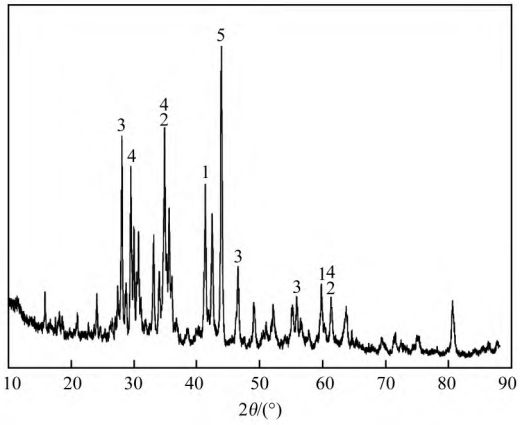
Fig. 1　Surface morphology of the iron-containing kiln slag

中国知网　https://www.cnki.net

表 1 含铁窑渣的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of the iron-containing kiln slag %

TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	TiO_2	C	S	Zn
45.92	13.26	14.48	10.72	3.36	4.90	0.37	0.72	2.68	1.30



1—FeO; 2—Fe_3O_4; 3—FeS; 4—$ZnFe_2O_4$; 5—Fe。

图 2 含铁窑渣 XRD 分析图谱

Fig. 2 XRD analysis spectrum ofthe iron-containing kiln slag

磁铁矿、褐铁矿、铁酸锌等。铁酸锌在还原性气氛下会分解为氧化锌，这限制了含铁窑渣成为高炉炼铁原料。因此，研究含铁窑渣的直接还原熔分对开发非高炉炼铁原料具有显著的现实意义。

1.1.2 矿物组成及显微结构特征

为探明含铁窑渣中含铁矿物的赋存形态，对含铁窑渣进行矿物组成分析。将样品制成光薄片，在 Axioskop A1 透反射两用研究型偏光显微镜下观察和分析样品物相组成。样品的矿物组成如表 2 所示。由表 2 可见，含铁窑渣中含铁矿物相按含量由高到低依次为金属铁、磁铁矿、黄铁矿、RO 相、钙铁辉石、褐铁矿以及少量铁橄榄石。

经偏光显微镜观察，得到回转窑尾渣中各种

表 2 含铁窑渣中矿物组成(体积分数)

Table 2 Mineral composition of the iron-containing kiln slag %

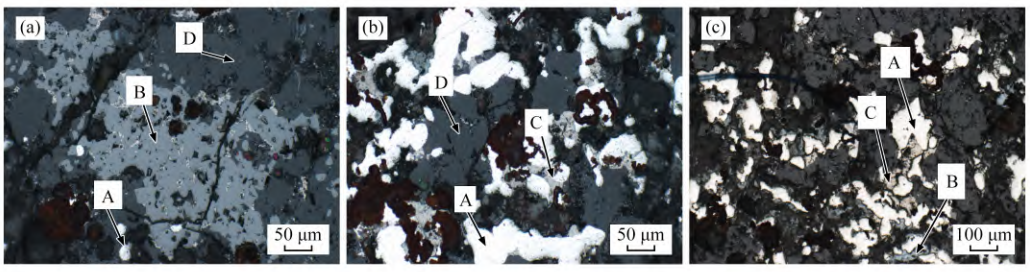
金属铁	磁铁矿	褐铁矿	黄铁矿	RO 相	其他硅酸盐类矿物
20 ~ 30	10 ~ 15	1 ~ 3	10 ~ 15	3 ~ 5	10 ~ 15

矿物呈不均匀分布如图 3 所示。由图 3 可见，金属铁主要存在三种分布形式：① 他形粒状，且粒度较大；② 半自形、他形；③ 星点状，且粒度较小。RO 相呈半自形，粒度分布不均匀。黄铁矿以他形存在，通常分布在金属铁和磁铁矿的周围。磁铁矿主要呈他形粒状，部分为半自形，颗粒之间多通过细小的晶键相连，粒度分布也不均匀。总之，褐铁矿、黄铁矿和 RO 相中铁矿物通常磁性较弱或完全无磁性，导致它们无法通过传统磁选工艺分离。因此，为进一步提高选铁效果，本文通过试验探索对含铁窑渣进行直接还原熔分选铁。

1.2 试验方法

1.2.1 CaO-SiO_2-Al_2O_3 渣系的热力学计算

FactSage 软件以热力学数据为基础，可以预测复杂渣系的相变行为；通过输入不同温度、压力和成分，优化渣中各组分的分配，并计算相的稳定性以及相变点；通过绘制不同渣系的相图，揭示不同组分占比下渣和金属之间的相互关系，辅助找寻合适的冶炼条件；通过模拟不同的炉料配比和反应条件，帮助优化渣的成分，达到降低熔



(a) 100 倍反射光；(b)、(c) 200 倍反射光

A—金属铁；B—磁铁矿；C—黄铁矿；D—RO 相。

图 3 含铁窑渣的矿相显微结构

Fig. 3 Microscopic mineralogical structure of iron-containing kiln slag

中国知网 https://www.cnki.net

点、减少有害杂质等目的，从而提高冶炼效率和产品质量。

含铁尾渣的渣系性能是渣铁分离效果的关键因素之一。本文以含铁尾渣的化学成分组成为基础，在自然碱度条件下使用 FactSage 软件计算含铁窑渣的理论熔化温度，并绘制 CaO-SiO_2-Al_2O_3 三元渣系的热力学相图[13]，如图 4 所示。由图 4 可以看出，在自然碱度下，含铁窑渣的液相线温度超过 1 300 ℃。可知，在较低温度下，要实现含铁窑渣中渣铁分离，需要适当调整熔渣的碱度，这可以通过改变 CaO 含量来控制。此外，在特定范围内，随着 CaO 含量的增加，熔渣的液相线温度呈现一定的变化趋势。因此，可以通过调整渣系碱度，来控制熔化温度以及熔渣在高温下的性能。

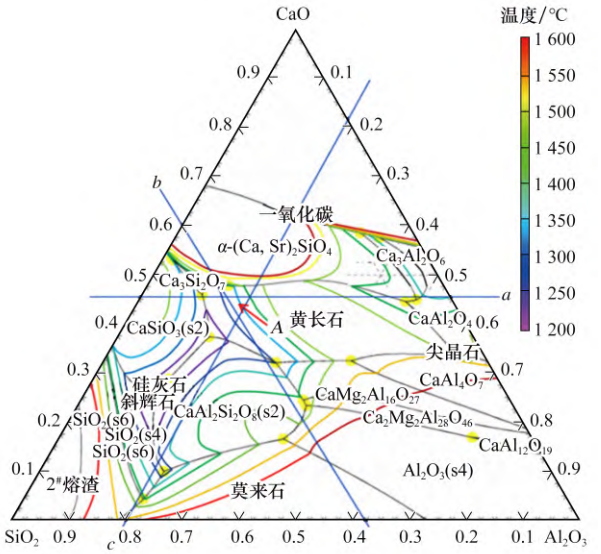


图 4　CaO-SiO_2-Al_2O_3 三元渣系热力学相图

Fig. 4　Thermodynamic phase diagram of CaO-SiO_2-Al_2O_3 ternary slag system

1.2.2　含铁尾渣还原熔分试验

本文旨在深入探讨还原熔分试验中各关键参数的影响机制。为此，采用 FactSage 软件进行热力学计算与分析，并据此设计试验方案。具体而言，试验将含铁窑渣的碱度梯度设置为 0.7、0.8、0.9、1.0 和 1.1，选取 1 400 ~ 1 600 ℃作为熔分温度，每间隔 50 ℃设置一个监测点。同时，为了考察还原条件的影响，试验将碳氧比(碳氧比依据 $m(C)/m(O)$ 计算，其中：$m(C)$ 为焦炭中固定 C 的质量，g；$m(O)$ 为含铁窑渣中主要氧化物 FeO、Fe_2O_3、Fe_3O_4 中 O 的质量，g) 设定为 0.6、0.8、1.0、1.2 和 1.4 五个梯度，利用单因素法分析各因素对熔分效果的影响。

试验在高温井式电阻炉内进行，称取 50 g 含铁窑渣样品放入刚玉坩埚内。试验过程中，采取持续通入高纯 N_2 作为保护气的方法，以确保试验在还原性气氛下进行。当高温井式电阻炉达到预定温度值后，将刚玉坩埚放入炉内，按程序设定的升温速率进行升温，当温度达到试验设定温度后恒温 60 min，至此熔分结束，待电阻炉自然冷却后取出坩埚。对熔分后的熔分渣和铁粒分别进行 XRD 分析和元素检测。熔分铁粒回收率计算方法[14]如式(1)所示。

$$R_e = \frac{m_e}{M_e} \times 100\% \tag{1}$$

式中：R_e 为铁回收率，%；m_e 为熔分后铁粒中金属铁的质量，g；M_e 为含铁窑渣中的全铁质量，g。

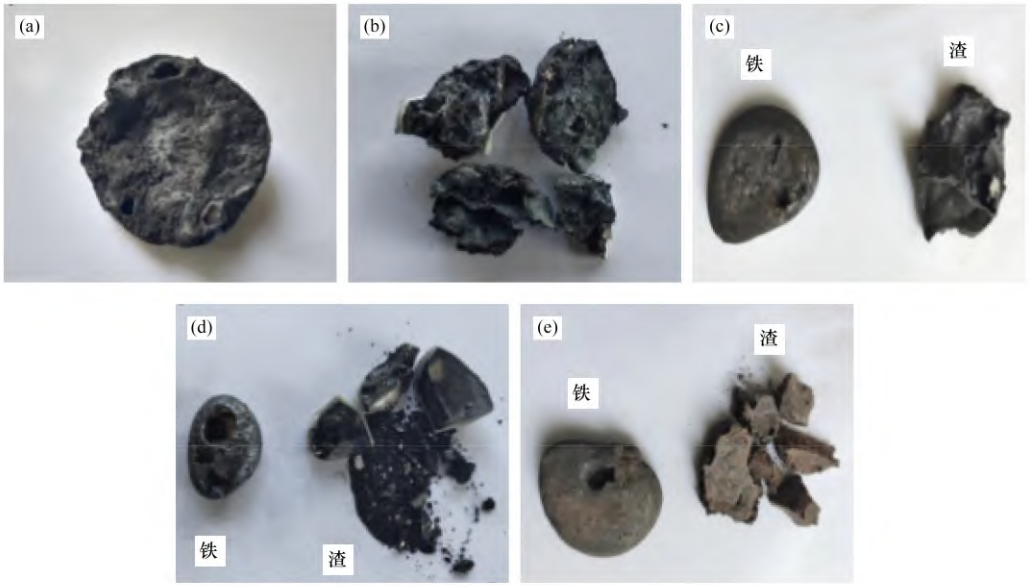
2　结果与讨论

2.1　熔分温度对含铁窑渣熔分效果的影响

试验采用含铁窑渣的自然碱度(0.7)作为基准条件，同时控制碳氧比为 1.0，在熔分 60 min 下探讨熔分温度对含铁窑渣还原熔分过程的影响规律。试验选取 1 400 ~ 1 600 ℃作为研究温度区间，重点考察熔分温度对含铁窑渣熔分行为及铁回收率的影响特性。试验结果如图 5、6 所示。由图 5 可见，随着熔分温度的变化，含铁窑渣的熔分效果呈现出明显的差异。在 1 400 ℃和 1 450 ℃时，含铁窑渣虽然已经熔化，但是未能实现渣铁分离，渣中可见较多铁。在 1 500 ℃的熔分温度下，虽然渣铁实现了有效分离且铁颗粒呈现良好的聚集状态，但其表面光洁度欠佳。当温度升至 1 550 ℃时，渣铁之间不仅保持了优异的分离效果，同时铁颗粒表面变得光滑圆整，熔分界面更加清晰可辨。然而，随着温度的进一步升高，铁颗粒的表面光洁度反而呈现下降趋势。

同时，由图 6 可见，铁的回收率也表现出相同的变化趋势，熔分后铁粒质量及铁回收率也呈现随温度提高先升高后降低的趋势。当熔分温度为 1 400 ℃和 1 450 ℃时，渣铁难以分离，铁粒质量和铁回收率较低。这是由于在低熔分温度点时，

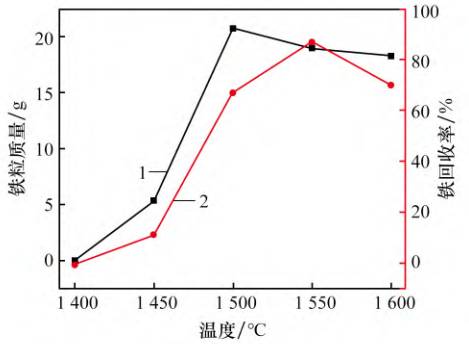
中国知网　https://www.cnki.net



温度/℃：(a) 1 400；(b) 1 450；(c) 1 500；(d) 1 550；(e) 1 600

图 5 不同熔分温度下含铁窑渣还原熔分情况

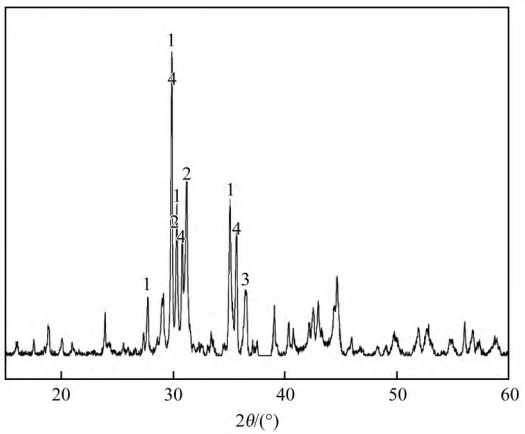
Fig. 5 Reduction and melting of iron-containing kiln slag at different melting temperatures



1—铁粒质量；2—铁回收率。

图 6 熔分温度对铁粒质量和铁回收率的影响

Fig. 6 Effect of melting temperature on iron pellet quality and iron recovery rate



1—$Ca(MgAl)(SiAl)_2O_6$；2—$K_6Fe_2O_5$；3—$FeAlO_4$；4—$NaFe(SiO_3)_2$。

图 7 1 600 ℃还原熔分后渣相 XRD

Fig. 7 XRD of slag phase after reduction and melting at 1 600 ℃

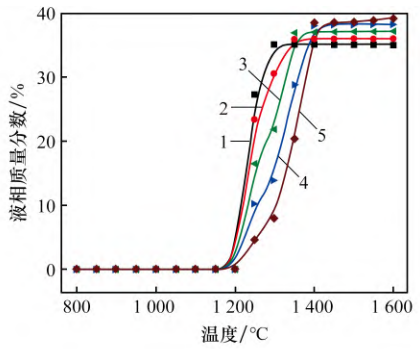
熔渣黏度大，阻碍了铁粒聚集，导致渣铁难以有效分离，进而影响了铁回收率。随着熔分温度的逐渐升高，1 500 ℃时渣铁分离及铁粒聚集效果良好，铁粒质量增大，铁回收率达到 70%。当温度达到 1 550 ℃时，铁粒质量最大，铁回收率达到 87%。但随着温度继续升高，铁粒质量呈下降趋势。采用 XRD 分析熔分渣相，如图 7 所示。由图 7 可见，1 600 ℃的熔分渣中除了含有较多的钙镁硅酸盐之外，还存在少量的铁铝尖晶石 $FeAl_2O_4$ 和锥辉石 $NaFe(SiO_3)_2$ 等含铁结晶相，这些物相附着在铁粒表面，导致铁粒的光滑度下降；同时，这也是造成铁回收率有所降低的主要原因。

2.2 碱度对含铁窑渣熔分效果的影响

对含铁窑渣碱度进行热力学计算，如图 8、9 所示。由图 8 可见，当碱度为 0.7 ~ 1.1 时，随着温度的升高，液相的质量分数增加；碱度越低，液相的开始生成温度越低，含铁窑渣完全融化的温度也越低。由图 9 可知，在 1 550 ℃高温下，液相总质量分数随碱度的升高而升高。

碱度对铁粒质量和铁回收率的影响如图 10 所示。由图 10 可见，随着碱度的增加，铁粒质量呈

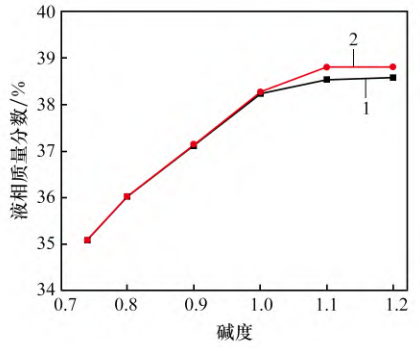
中国知网 https://www.cnki.net



碱度：1—0.7；2—0.8；3—0.9；4—1.0；5—1.1。

图 8　不同碱度含铁窑渣液相含量随温度的变化

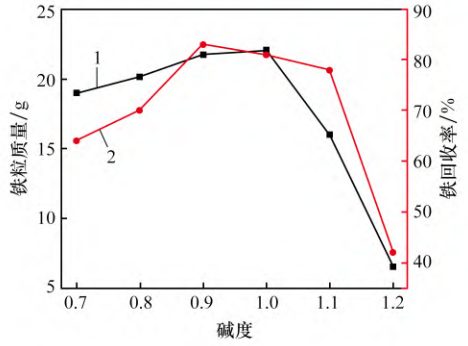
Fig. 8　Changes in liquid phase content of iron-containing kiln slag with different alkalinities and temperature



温度/℃：1—1 500；2—1 550。

图 9　高温下液相总量随碱度的变化

Fig. 9　Changes in total liquid content with alkalinity at high temperature



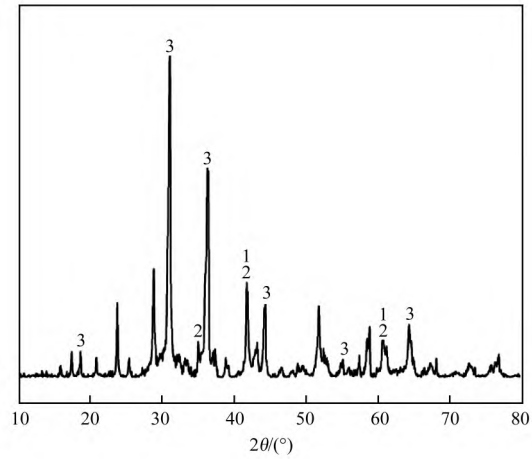
1—铁粒质量；2—铁回收率。

图 10　碱度对铁粒质量和铁回收率的影响

Fig. 10　Influence of alkalinity on iron particle quality and iron recovery rate

现出先上升后下降的变化规律。当碱度为 0.9 时，铁粒质量为 21.77 g，相比碱度为 0.7 时有了较大幅度提升；当碱度达到 1.0 时，所得铁粒质量最高，为 22.06 g；当碱度超过 1.0 后，铁粒质量明显降低，且所得铁粒表面较粗糙，渣铁分离不好。这与热力学分析结果一致，即随着碱度的提高，液相的开始生成温度越高，并且碱度过高，会使加入的高熔点 CaO 弥散在渣中，使渣的黏度升高，进而影响铁珠的聚集长大，使所得铁粒质量减小。

为了获得碱度升高导致铁粒质量下降的原因，对碱度为 1.2 时的还原熔分渣相进行 XRD 物相分析，如图 11 所示。由图 11 可以看出，碱度为 1.2 时熔分渣主要为铁铝尖晶石，此外还有部分 FeO 和其他铁氧化物。这是因为 FeO 在高温下能够稳定存在，铁氧化物逐级反应也会生成新的 FeO，而窑渣中含有的 Al_2O_3 在一定条件下会与未被还原的 FeO 反应生成铁铝尖晶石，进而影响渣铁分离。



1—FeO；2—铁氧化物；3—$FeAl_2O_4$。

图 11　碱度为 1.2 时熔分渣的 XRD 图谱

Fig. 11　XRD pattern of molten slag with alkalinity of 1.2

不同碱度下还原熔分后铁粒的外观形貌如图 12 所示。分析图 12 可知，含铁窑渣的碱度对还原熔分效果有显著影响。当碱度为 0.8、0.9、1.0 时，铁粒尺寸都相对较大，达 20 ~ 30 mm，此时渣铁分离较好；当碱度超过 1.0 时，铁粒表面粗糙，并出现渣附着情况，此时渣铁分离效果较差；当碱度为 1.2 时，铁粒质量最小，渣铁的分离效果最差。

采用扫描电镜对不同碱度条件下形成的熔分铁粒进行微观形貌观察，如图 13 所示。由图 13 可见，当碱度为 0.7 时，铁粒表面存在大量夹杂物，此时渣铁的分离效果欠佳。随着碱度的增加，铁粒的光滑度得到改善，渣铁的分离效果明显增强。当碱度为 1.0 时，铁粒的聚集效果有明显改善，铁粒内夹杂物明显减少。但是当碱度超过1.0

中国知网　https://www.cnki.net

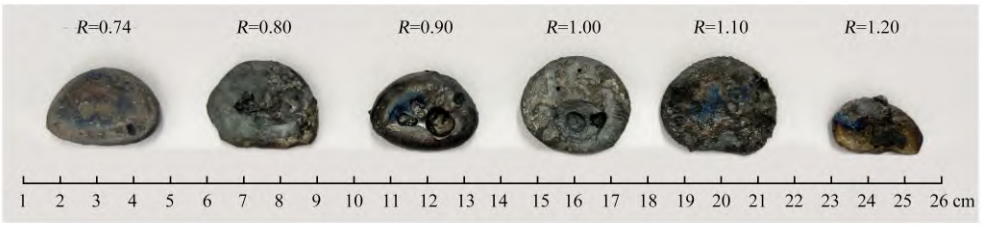
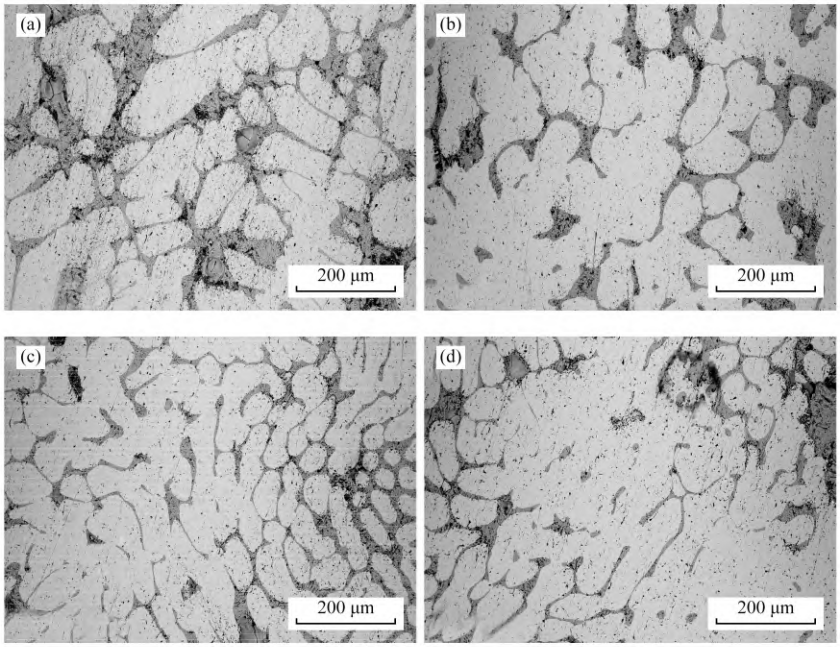


图 12 不同碱度熔分后铁粒的外观形貌

Fig. 12 Appearance and morphology of iron particles after melting with different alkalinity



碱度：（a）0.7；（b）0.9；（c）1.0；（d）1.1

图 13 不同碱度还原熔分铁粒表面扫描电镜

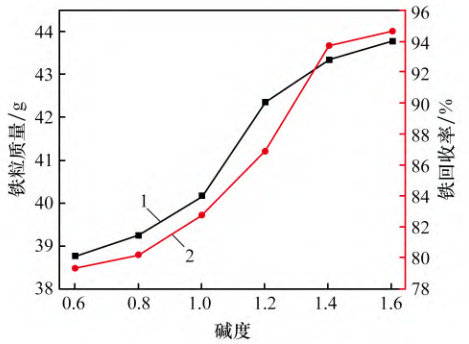
Fig. 13 Scanning electron microscopy of the surface of reduced melting iron particles with different alkalinities

后，随着碱度的提高，渣铁的分离效果有劣化的趋势，这与前述 XRD 分析结果一致。

2.3 碳氧比对含铁窑渣还原熔分效果的影响

为了系统考察碳氧比对含铁窑渣还原熔分效果的影响规律，在含铁窑渣碱度为 1.0、熔分温度为 1 550 ℃、熔分时间为 60 min 的条件下进行试验。结果如图 14 所示。由图 14 可见，随着碳氧比的增加，铁粒质量和铁回收率均呈现上升趋势。当碳氧比为 1.4 时，铁的回收率上升幅度最大。

为深入探究碳氧比对含铁窑渣熔分效果的作用机制，本文对熔分后的铁粒样品进行抛光处理，并采用扫描电子显微镜观察其微观结构变化。结果如图 15 所示。由图 15 可见，当碳氧比为 0.6 时，铁粒的聚集效果不好；随着碳氧比的提高，铁粒聚集效果有所改善，当碳氧比达到1.4时，



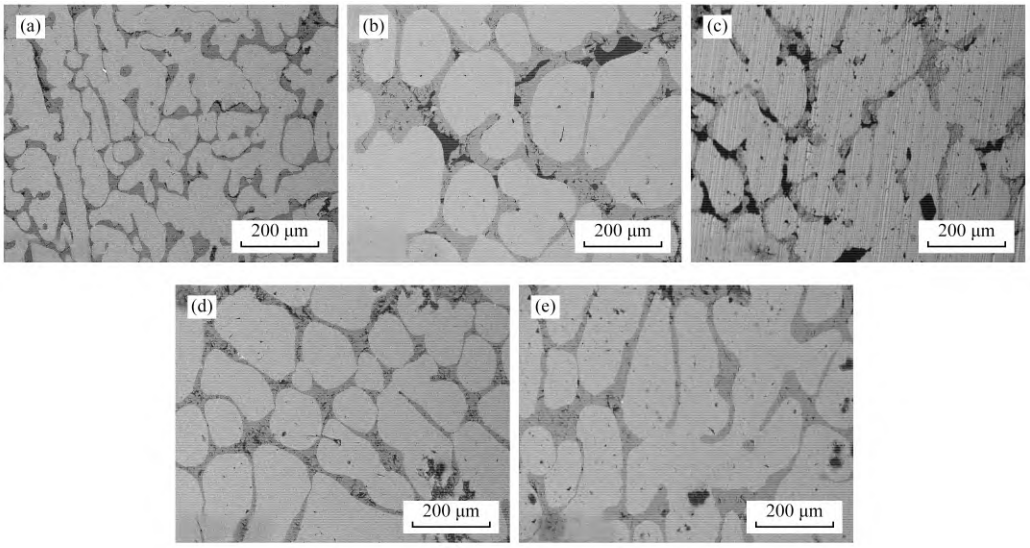
1—铁粒质量；2—铁回收率。

图 14 碳氧比对铁粒质量及铁回收率的影响

Fig. 14 The effect of carbon oxygen ratio on iron particle mass and iron recovery rate

铁粒的聚集效果最好。一般而言，在还原熔分时提高含铁窑渣配碳量可以在回转窑阶段实现，这样既有利于回转窑内还原反应的发生，进而提升

中国知网 https://www.cnki.net



碳氧比：(a) 0.6；(b) 0.8；(c) 1.0；(d) 1.2；(e) 1.4

图 15　不同碳氧比铁粒表面扫描电镜

Fig. 15　Scanning electron microscopy of iron particle surface with different carbon oxygen mass ratios

有价金属元素的回收率，又由于高配碳量可以提高含铁窑渣中残炭含量，在进行还原熔分时可以保证铁和碳充分结合，使得还原效果要优于后期提高配碳量。

3　结　论

(1) 含铁窑渣的渣铁分离效果和铁回收率随熔分温度的变化而变化。铁回收率和铁粒质量在保持其他试验参数不变的情况下，在渣铁分离效果逐步改善的同时，随着熔分温度的提高，呈现出显著的增长趋势。铁粒质量在熔分温度为 1 550 ℃ 时达到顶峰，熔融界面变得更加清晰平滑。这表明，在含铁窑渣碱度不变的情况下，随着熔分温度的升高，炉渣黏度变低，从而为铁粒聚集创造了更为有利的条件，最终促进了渣铁分离的实现。

(2) 碱度对含铁窑渣熔分效果的影响显著。在控制其他变量恒定的试验条件下，随着碱度从较低水平开始增加，铁回收率和最大铁粒质量均呈现上升趋势。碱度为 1.0 时体系达到最优状态，此时铁回收率和最大铁粒质量均达到峰值，同时实现最佳的渣铁分离效果。然而，当碱度超过这一临界值后，铁回收率和最大铁粒质量均出现明显下降。特别是当碱度升至 1.2 时，体系出现严重的渣铁混杂现象，导致分离效果显著恶化。

(3) 碳氧比对含铁窑渣熔分效果也有显著影响。当其他条件固定时，铁粒质量和铁回收率随着碳氧比的增加呈现上升趋势。当碳氧比为 1.4 时，渣铁分离效果达到理想状态，铁粒的聚集效果最好，铁回收率达到 94%。

参考文献：

[1] 董静媚. 2022 年钢铁行业形势分析与 2023 年展望[J]. 中国物价，2023(2)：23－25.
DONG Jingmei. Steel industry situation analysis for 2022 and prospect for 2023 [J]. China Price，2023(2)：23－25.

[2] 董成国，王盟，张玉锋. 传统高炉炼铁流程面临的问题和应对策略[J]. 冶金管理，2020(3)：6；23.
DONG Chengguo，WANG Meng，ZHANG Yufeng. Problems and countermeasures of traditional blast furnace ironmaking process [J]. China Steel Focus，2020(3)：6；23.

[3] 李国栋，邱廷省，邱仙辉，等. 一种从回转窑窑渣中回收铁质原料及尾渣无害化的方法：CN 110965079B[P]. 2020－05－01.
LI Guodong，QIU Tingsheng，QIU Xianhui，et al. A method for recovering iron-based raw materials from rotary kiln slag and for the harmless treatment of tailings：CN 110965079B [P]. 2020－05－01.

[4] 沙星，冯帅，刘志福. 锌对高炉生产的影响及研究[J]. 四川冶金，2023，45(3)：22－25.
SHA Xing，FENG Shuai，LIU Zhifu. Research of zinc on blast furnace production [J]. Sichuan Metallurgy，2023，

中国知网　https://www.cnki.net

45(3):22 – 25.

[5] 高占锋,廉树杰,曾玲. 高锌负荷对高炉生产的影响及应对措施[J]. 江西冶金,2022,42(3):46 – 51.
GAO Zhanfeng,LIAN Shujie,ZENG Ling. Influence and countermeasures of high Zinc load on blast furnace production [J]. Jiangxi Metallurgy,2022,42(3):46 – 51.

[6] 国鑫宇. 浮选回收锌窑渣中碳、铜、银的试验研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2021.
GUO Xinyu. Experimental study on recovery of carbon, copper and silver from zinc kiln slag by flotation [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.

[7] 陈鸽翔. 锌窑渣处理工艺实践[J]. 科技创新导报,2010,7(23):56.
CHEN Gexiang. Practice of zinc kiln slag treatment process [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2010,7(23):56.

[8] 肖鹏,谢克强,马文会,等. 锌挥发窑渣综合回收有价金属实验研究[J]. 矿冶工程,2018,38(6):119 – 123.
XIAO Peng, XIE Keqiang, MA Wenhui, et al. Experimental study on comprehensive recovery of valuable metals from rotary kiln slag [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2018,38(6):119 – 123.

[9] 马娇,焦红光,潘兰英等. 干法磁选在锌挥发窑窑渣综合利用中的应用研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2009,28(6):788 – 791.
MA Jiao,JIAO Hongguang,PAN Lanying,et al. Research on the application of dry magnetic separation in the comprehensive utilization of zinc volatilization kiln slag [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition),2009,28(6):788 – 791.

[10] 彭伟,刘安荣,王振杰,等. 从锌窑渣中选矿回收碳、铁试验研究[J]. 矿产综合利用,2020(4):137 – 140;125.
PENG Wei, LIU Anrong, WANG Zhenjie, et al. Experimental study on recovery of carbon and iron from zinc kiln slag by beneficiation [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2020(4):137 – 140;125.

[11] 李永华,曹明锋,曹树华,等. 锌挥发窑渣提取优质还原铁粉和碳粉的工艺研究[J]. 世界有色金属,2019(8):149 – 151.
LI Yonghua,CAO Mingfeng,CAO Shuhua,et al. Study on extraction of high quality reduced iron powder and carbon powder from zinc volatile kiln slag [J]. World Nonferrous Metals,2019(8):149 – 151.

[12] 蒋丰祥. 锌窑渣中有价矿物资源物理分选工艺研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2017.
JIANG Fengxiang. Study on physical separation technology of valuable mineral resources from zinc kiln slag [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2017.

[13] 郑利佳,刘超,邢宏伟,等. 高温含铁回转窑窑渣在线还原—熔分机理研究[J]. 烧结球团,2025,50(4):91 – 98.
ZHENGLijia,LIU Chao,XING Hongwei,et al. Study on the mechanism of online reduction-melting separation of high-temperature iron-containing rotary kiln slag [J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(4):91 – 98.

[14] 洪陆阔,齐渊洪,孙彩娇,等. 钒钛磁铁矿金属化球团还原熔分试验研究[J]. 钢铁钒钛,2017,38(5):101 – 107.
HONG Lukuo, QI Yuanhong, SUN Caijiao, et al. Experimental study on reduction melting separation of metallized pellets of vanadium-titanium magnetite [J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2017,38(5):101 – 107.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国 – 知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。

中国知网 https://www.cnki.net