高温含铁窑渣在线还原熔分工艺试验

雷贺超，李功璞，刘 超，康 月，郑利佳，李学东
（华北理工大学 冶金与能源学院，河北 唐山 063210）

摘要：高温含铁窑渣是冶金粉尘经回转窑提锌处理后的副产物，因其杂质含量高、难以有效利用，导致产品附加值低，并造成含铁资源的浪费。本文针对该窑渣铁品位高、金属化率高、出渣温度高等特点，提出高温含铁窑渣在线还原熔分工艺，系统研究还原熔分温度、配碳量、恒温时间以及渣系添加剂（二元碱度、镁铝比）对熔分效果及铁回收率的影响规律。结果表明：适宜的还原温度和配碳量可促进铁氧化物充分还原及铁滴聚集。当温度由 1 400 ℃提升至 1 500 ℃时，铁从无法被有效分离提升到铁回收率为 84.41%；当配碳量由 10.37 g 增至 27.63 g 时，铁回收率由 36.84% 升至 90.93%；优化渣系碱度与镁铝比可改善熔渣流动性并抑制铁的二次氧化，适当提高二元碱度和镁铝比有利于提升铁回收率，但继续增大二者则会生成高熔点物相和镁铝尖晶石，恶化渣铁分离效果，导致铁回收率下降。在还原熔分温度为 1 500 ℃、配碳量为 27.63 g、恒温时间为 40 min、二元碱度为 1.5、镁铝比为 0.6 的优化条件下，铁回收率可达 95.92%，所得含铁物料中铁品位为 97.16%。该工艺可实现渣铁高效分离与铁资源的高值化回收，同时充分利用窑渣显热，避免传统选矿工艺中的冷却能耗和铁损失，为冶金固废的绿色低碳处理提供新思路。

关键词：含铁窑渣；还原；熔分；铁回收率；渣铁分离
中图分类号：X705；TF557 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)02－0102－06
doi：10.13403/j.sjqt.2026.02.034

Test on on-line reduction and fusion of high-temperature iron-containing kiln slag

LEI Hechao, LI Gongpu, LIU Chao, KANG Yue, ZHENG Lijia, LI Xuedong
(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan, 063210, Hebei, China)

Abstract: High-temperature iron-containing kiln slag is a by-product of metallurgical dust after zinc extraction treatment by rotary kiln, because of its high impurity content and difficult to use effectively, resulting in low added value of products and waste of iron-containing resources. In view of such characteristics as high iron grade, high metallization rate and high slag discharge temperature, an online reduction fusion process of high-temperature iron-containing kiln slag is proposed, and the effects of reducing fusion temperature, carbon mixing amount, constant temperature time, and slag additives (binary alkalinity, magnesium-to-aluminum ratio) on fusion effect and iron recovery are systematically studied. The results show that the appropriate reduction temperature and carbon distribution could promote the full reduction of iron oxides and the aggregation of iron droplets. When the temperature is increased from 1 400 ℃ to 1 500 ℃, the iron recovery rate is increased from ineffective separation to 84.41%. When the carbon mixing amount is increased from 10.37 g to 27.63 g, the iron recovery rate is increased from 36.84% to 90.93%. Optimizing the slag alkalinity and magnesium-aluminum ratio

收稿日期：2025－06－05；**修回日期**：2025－08－19
基金项目：河北省高等学校科学技术研究项目(CXY2024011&CYZD202504)；唐山市应用基础研究科学计划资助项目(24130210C)
作者简介：雷贺超(2002—)，男，硕士研究生，从事冶金固废资源化处理方面的研究。
通信作者：刘 超(1989—)，男，博士，副教授，从事冶金节能减排与资源综合利用、钢铁制造流程大气污染物控制等方面的研究。

can improve the fluidity of the slag and inhibit the secondary oxidation of iron, and appropriately increasing the binary alkalinity and magnesium-aluminum ratio is conducive to improving the iron recovery, but if the two continue to increase, high melting point phases and magnesium-aluminum spinel will be generated, which will worsen the slag-iron separation effect and lead to a decrease in iron recovery. Under the optimized conditions of reducing fusion temperature of 1 500 ℃, carbon mixing amount of 27.63 g, constant temperature time of 40 min, binary alkalinity of 1.5, and magnesium-aluminum ratio of 0.6, the iron recovery rate could reach 95.92%, and the iron grade in the obtained iron-containing materials is 97.16%. This process can realize the efficient separation of slag and iron and the high-value recovery of iron resources, and at the same time make full use of the sensible heat of kiln slag to avoid cooling energy consumption and iron loss in the traditional beneficiation process, providing a new idea for the green and low-carbon treatment of metallurgical solid waste.

Key words: iron-containing kiln slag; reduction; fusion; iron recovery; slag and iron separation

2024 年，我国粗钢产量达 10.05 亿吨，稳居全球首位。钢铁生产过程中，冶金粉尘的产生量通常为钢产量的 8%~12%[1]。据不完全统计，约 25% 的冶金粉尘通过回转窑工艺进行提锌处理，处理后产生的尾渣即为含铁窑渣[2]。含铁窑渣产量巨大，约占处理粉尘量的 50%~60%，我国每年由此产生的含铁窑渣总量约为 1 200 万 ~1 500 万吨[3]。该类窑渣具有含铁量高、显热高的特点，但由于其矿相组成复杂，有价元素在选矿过程中难以被有效分离。大量含铁窑渣未经妥善处理，堆积于冶炼车间，不仅占用大量土地资源，而且其中的重金属随雨水渗入地下，对环境造成长期的严重影响[4-6]。在“双碳”战略背景下，亟需开发高效回收高温含铁窑渣中铁资源的工艺，提高含铁窑渣的资源化利用率，从而缓解我国资源与能源供需矛盾，促进循环经济发展[7-9]。

现阶段，选矿法因工艺成熟、操作简单、成本低廉，已成为冶金粉尘含铁窑渣的主要处理方式。董方等[10]采用“一段预先浮碳—‘一粗两扫两精’浮铜银—‘一粗一精’磁选铁”的联合工艺，对云南某高碳窑渣进行了综合回收利用，所得铁品位和回收率分别达到 66.02% 和 76.33%；彭伟等[11]利用浮选工艺回收窑渣中的铁，在磨矿细度（<0.074 mm 粒级占比）为 89.47%、磁场强度为 106 kA/m 的条件下，获得铁精矿品位为 64.83%、回收率为 68.48%。马娇等[12]采用以干法磁选为主的选矿方法，以某窑渣为原料进行分段磁选，利用强磁选碳、弱磁选铁，使铁精矿中铁品位达 67.68%、回收率达 79.98%，同时使炭粉中碳质量分数为 56.0%、回收率为 61.93%。目前，采用选矿法处理含铁窑渣时，铁资源的回收率约为 65%~80%，铁品位在 65% 左右，综合回收利用水平较低。此外，选矿前需对含铁窑渣进行空冷或水冷处理，不仅浪费大量水资源，还消耗大量热能[13]。

为响应国家“双碳”政策，助力钢铁企业实现“节能降碳、绿色可持续发展”的目标[14-15]，本文基于含铁窑渣高温、高铁的特点，开展在线还原熔分试验。系统研究还原熔分温度、配碳量、恒温时间、二元碱度及镁铝比对渣铁分离效果、铁回收率及产物铁品位的影响规律，确定最优工艺参数，并揭示各因素对铁氧化物还原、铁滴聚集及渣相流动性的作用机制。在充分利用含铁窑渣高显热的同时，提高铁回收率与产品附加值，以期为该资源的综合利用提供参考。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验所用含铁窑渣和焦炭均取自某地区冶金粉尘资源化公司，含铁窑渣的宏观形貌和化学成分分别如图 1 和表 1 所示。由图 1 可知，含铁窑渣的粒度普遍在 3 cm 左右，外观呈灰黑色，形状不规则且硬度较高。由表 1 可知，含铁窑渣中铁的质量分数高达 57.78%，与常规烧结矿的含铁量（通常为 50%~58%）相当[16]，表明该窑渣具有较高的铁资源回收价值。然而，窑渣中仍残存少量锌元素，若直接入炉冶炼，会导致炉料透气性变差、腐蚀炉衬，甚至在高炉内形成锌瘤，进而影响高炉顺行及生产效率[17]。还原熔分所用还原剂为焦炭，其工业分析结果显示：固定碳、挥发分、灰分和水分的质量分数分别为 85.01%、1.58%、12.67% 和 0.74%。

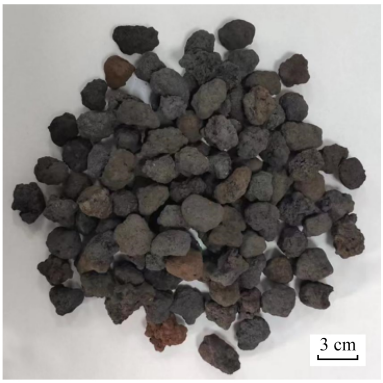


图 1 含铁窑渣宏观形貌

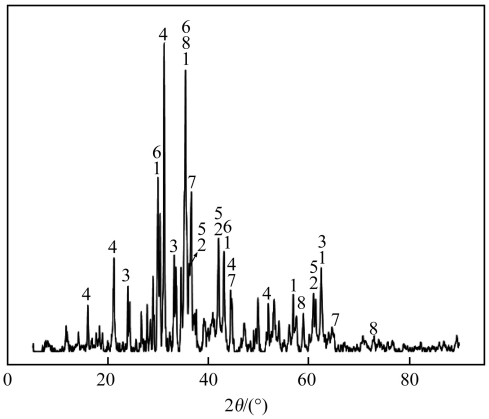
Fig. 1 Macroscopic diagram of iron-containing kiln slag

表 1 含铁窑渣的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main composition of iron containing kiln slag

TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Zn	S
57.78	35.25	7.26	15.16	3.63	8.12	1.30	1.085

为探明含铁窑渣中各元素的赋存形态，采用 X 射线衍射仪(XRD)对其进行物相分析，结果如图 2 所示。由图 2 可知，含铁窑渣的矿物组成较为复杂。其中，铁元素主要以 Fe_3O_4、Fe_2O_3 和 FeO 形式存在；残留的锌元素主要赋存于 $ZnFe_2O_4$ 和 ZnO 中；此外，窑渣中还含有由 Ca、Si、Mg 等元素组成的化合物，如硅酸盐相等。



1—Fe_3O_4；2—FeO；3—Fe_2O_3；4—$Ca_2Mg(Si_2O_7)$；5—ZnO；6—$ZnFe_2O_4$；7—Mg_2SiO_4；8—Al_2SiO_4。

图 2 含铁窑渣 XRD 图谱

Fig. 2 XRD pattern of iron-containing kiln slag

1.2 试验方法

将含铁窑渣原料置于烘箱中烘干，冷却后按设定配比称取含铁窑渣、还原剂及添加剂，混合均匀后置于氧化铝坩埚中，再将坩埚移至立式高温管式炉的恒温加热区。待炉温升至设定温度后，进入恒温阶段，使还原反应充分进行。反应结束后，随炉自然冷却至室温，取出氧化铝坩埚。采用机械破碎与磁选等物理分离方法实现渣铁分离，获得金属铁块和炉渣样品，测定铁块中的铁含量，并计算铁元素的回收率。计算方法如下。

$$\varepsilon = \frac{m_{铁} \times w_{铁}(\mathrm{TFe})}{m_{原料} \times w_{原料}(\mathrm{TFe})} \times 100\% \quad (1)$$

式中：ε 为铁回收率,%；$w_{铁}(\mathrm{TFe})$ 为还原产物中全铁的质量分数,%；$m_{铁}$ 为还原产物中金属铁的质量，g；$m_{原料}$ 为原料的质量，g；$w_{原料}(\mathrm{TFe})$ 为原料中全铁的质量分数,%；

以渣铁分离效果、铁回收率及铁块含铁量为评价指标，通过高温管式炉试验，系统研究还原熔分温度、配碳量、恒温时间、二元碱度及镁铝比等参数对含铁窑渣直接还原熔分过程的影响规律。

2 试验结果与讨论

2.1 还原熔分温度试验

还原熔分温度是影响含铁窑渣渣铁分离效果的最主要因素。基于固定 MgO 质量分数的含铁窑渣 $CaO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3\text{-}MgO$ 渣系四元相图，可知初始渣系组成点对应的熔化温度约为 1 500 ℃。以 1 500 ℃为基准，试验按 50 ℃的梯度设置温度范围为 1 400 ~ 1 550 ℃。

根据热力学计算结果，以 150 g 原料为基准，假设窑渣中的铁单质全部被氧化为 Fe_2O_3(即原料中 Fe_2O_3 质量分数为 22.53%)，同时考虑原料中 FeO(35.25%)和 Zn(1.3%)的完全还原需求，计算得到试验的理论配碳量为 27.63 g，恒温时间为 40 min，二元碱度为 2.0(添加 0.32 g SiO_2 试剂进行调质)，镁铝比为 0.45(采用原料自身镁铝比)。在此条件下，探究不同温度对铁块形貌、质量及铁回收率的影响规律，试验结果如表 2 和图 3 所示。由表 2 和图 3 可见，在 1 400 ℃时，渣铁未能有效分离，铁颗粒分散于熔渣中，表明温度不足导致金属相未能充分聚集。当温度升至 1 450 ℃时，可实现渣铁分离，但铁块质量(60.45 g)明显低于 1 500 ℃(73.16 g)和 1 550 ℃(73.23 g)，说明 1 450 ℃下部分铁仍滞留于渣相。1 500 ℃与 1 550 ℃条件下的铁块质量接近，铁回收率均达

84% 左右，表明温度升至 1 500 ℃后渣铁分离趋于完全。综合考虑能耗与分离效果，确定 1 500 ℃为最佳熔分温度。

表 2　还原熔分试验结果

Table 2　Reduction and fusion experiment results

还原熔分温度/℃	铁块质量/g	铁回收率/g
1 400	—	—
1 450	60.45	69.75
1 500	73.16	84.41
1 550	73.23	84.49



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

图 3　还原熔分产物形貌

Fig. 3　Reduced fused fractional morphology

2.2　还原熔分配碳量试验

配碳量是调控含铁窑渣还原熔分过程的关键参数，适宜的配碳量可提高还原效率，改善金属铁与渣的分离效果。为探究配碳量对还原熔分过程的影响，在还原温度为 1 500 ℃、还原时间为 40 min、二元碱度为 2.0、镁铝比为 0.45 的条件下，基于理论配碳量(27.63 g)及理论最小配碳量(仅考虑还原 FeO 与 ZnO，10.37 g)，考察不同配碳量对含铁窑渣还原熔分效果的影响，试验结果如表 3 所示。由表 3 可知，配碳量对还原熔分效果具有显著影响。当配碳量从 10.37 g 增加至 27.63 g 时，铁回收率由 36.84% 显著提升至 90.93%，铁块质量从 32.82 g 增至 79.67 g，含铁量达到 98.92%。这是由于配碳量不足时，还原剂成为还原熔分的主要限制因素，FeO 无法充分还原，导致铁回收率过低。当配碳量进一步增加至 30 g 和 35 g 时，铁回收率仅在 88.48%～93.23% 的小范围内波动，表明过量配碳不仅不能进一步提升还原效果，反而会造成不必要的资源浪费。因此，选择理论配碳量作为最佳配碳量。

表 3　不同配碳量下还原熔分效果

Table 3　Reduced fusion fractionation effect with different carbon allocation

配碳量/g	铁块质量/g	含铁量/%	铁回收率/%
10.37	32.82	97.29	36.84
15.00	45.80	98.75	52.18
20.00	54.98	98.95	62.77
25.00	71.83	99.04	82.08
27.63	79.67	98.92	90.93
30.00	77.36	99.13	88.48
35.00	81.59	99.03	93.23

2.3　还原熔分恒温时间试验

在还原温度为 1 500 ℃、配碳量为 27.63 g、二元碱度为 2.0、镁铝比为 0.45 的条件下，考察不同恒温时间对含铁窑渣还原熔分过程中铁回收率及含铁量的影响，试验结果如表 4 所示。由表 4 可知，恒温时间对还原熔分效果具有显著影响。当恒温时间由 20 min 延长至 40 min 时，铁块质量由 71.24 g 增至 85.62 g，含铁量无明显变化(约为 97%)，铁回收率由 80.31% 提高至 95.69%。分析原因认为，较长的恒温时间有利于铁氧化物的充分还原以及铁滴的聚集与沉降。进一步延长恒温时间至 50～60 min 时，铁块质量显著下降(分别为 80.45 g 和 78.82 g)，铁回收率相应降至 89.70% 和 87.89%。这是由于还原剂耗尽后，铁单质在高温下长时间停留而发生二次氧化，生成

表 4　不同恒温时间下还原熔分效果

Table 4　Reduced fusion fractionation effects at different constant temperature times

恒温时间/min	铁块质量/g	铁回收率/%	含铁量/%
20	71.24	80.31	97.71
30	79.67	89.39	97.24
40	85.62	95.69	96.86
50	80.45	89.70	96.64
60	78.82	87.89	96.64

铁氧化物进入炉渣，从而导致铁块质量和铁回收率下降。综合以上试验结果，确定40 min为最佳恒温时间。

2.4 还原熔分调质试验

2.4.1 碱度调质试验

在还原温度为1 500 ℃、配碳量为27.63 g、恒温时间为40 min、镁铝比为0.45的条件下，考察不同二元碱度对含铁窑渣还原熔分过程中铁回收率及含铁量的影响。当固定配碳量为27.63 g时，焦炭灰分(灰分质量分数为12.67%，其中50%为SiO_2)使体系自然碱度降至1.9，试验在此基础上通过改变SiO_2添加量来调节碱度，结果如表5所示。由表5可知，当碱度从1.1提高至1.5时，铁回收率由92.31%升至95.22%，铁块质量从82.88 g增至85.36 g；继续提高碱度至1.9时，各项指标均呈下降趋势，铁回收率降至92.90%，铁块质量减少至83.02 g。在所有碱度条件下，铁块的含铁量均保持在96.5%以上的高水平，表明碱度主要影响铁回收效率，而非产品品质。分析原因认为：当碱度提高至1.5的过程中，适量的CaO能有效中和渣相中的SiO_2，降低渣相黏度，改善铁滴的迁移与聚集条件；同时CaO与SiO_2结合生成$CaSiO_3$，降低了FeO的活度，从而提高FeO的还原效率。然而，当碱度超过1.5后，过量的CaO会促使高熔点化合物(如Ca_2SiO_4，熔点为2 130 ℃)生成，导致渣相黏度回升；此外，高碱度条件下CaO可能与焦炭发生气化反应[$CaO + C \rightarrow Ca(g) + CO$]，造成还原剂的额外消耗。综合考虑铁回收率(95.22%)、铁块质量(85.36 g)及工艺稳定性，确定最佳二元碱度为1.5。

表5 不同碱度下还原熔分效果

Table 5 Reduced fusion fractionation effect under different alkalinity

碱度	铁块质量/g	铁回收率/%	含铁量/%
1.1	82.88	92.31	96.53
1.3	83.92	93.93	97.01
1.5	85.36	95.22	96.68
1.7	83.72	93.90	97.21
1.9	83.02	92.90	96.98

2.4.2 镁铝比调质试验

在还原温度为1 500 ℃、配碳量为27.63 g、恒温时间为40 min、二元碱度为1.5的条件下，考察不同镁铝比对含铁窑渣还原熔分过程中铁回收率及含铁量的影响，试验结果如表6所示。由表6可知，随着镁铝比增加，铁块质量变化不大(约为85.5 g)。当镁铝比从0.45提高至0.60时，铁回收率由95.17%增至95.92%，含铁量由96.68%提升至97.16%，表明适宜的镁铝比(0.6)可有效调控渣相结构，避免因渣系脱硫能力不足而导致回收金属铁性能下降。当镁铝比超过0.6后，尽管含铁量仍维持在约96.80%的高水平，但铁回收率呈现下降趋势。这是因为镁铝比过高会使渣系中MgO含量增加，易形成高熔点的镁铝尖晶石相(熔点为2 135 ℃)，提高渣相熔点，增大渣黏度，恶化渣流动性，从而降低铁滴的聚合效率。综合上述试验结果，确定最优镁铝比为0.6。

表6 不同镁铝比下还原熔分效果

Table 6 Reduced fusion fraction effect under different magnesium to aluminum ratios

镁铝比	铁块质量/g	铁回收率/%	含铁量/%
0.45	85.32	95.17	96.68
0.50	85.42	95.35	96.75
0.60	85.56	95.92	97.16
0.70	85.50	95.50	96.81
0.80	85.44	95.37	96.74

3 结 论

(1) 采用高温管式炉试验，揭示了高温含铁窑渣在线还原熔分工艺中关键参数(温度、配碳量及添加剂等)对铁还原熔分效果的影响机制。结果表明：适宜的温度、恒温时间及配碳量可有效促进渣铁分离、抑制二次氧化并降低能耗；优化渣系组成(二元碱度、镁铝比)可显著改善熔渣流动性，促进铁滴的迁移与聚集。

(2) 在还原温度为1 500 ℃、配碳量为27.63 g(理论配碳量)、恒温时间为40 min、碱度为1.5、镁铝比为0.6的优化条件下，还原熔分效果最佳，铁块质量为85.56 g，铁回收率达95.92%，含铁量为97.16%。与传统选矿方法(铁回收率65%~80%，铁品位约65%)相比，在线还原熔分工艺的性能显著提升，同时能够直接利用

窑渣显热，避免了传统工艺的冷却能耗。

参考文献：

[1] 刘超,张玉柱,王峰,等. 多源冶金粉尘资源化研究现状及展望[J]. 中国冶金,2022,32(10):38－44.
LIU Chao,ZHANG Yuzhu,WANG Feng,et al. Research status and prospect of multi-source metallurgical dust recycling[J]. China Metallurgy,2022,32(10):38－44.

[2] 邢磊,张良进,杜培培,等. 火法处理钢铁粉尘中有价元素研究现状及展望[J]. 烧结球团,2024,49(3):10－17.
XING Lei,ZHANG Liangjin,DU Peipei,et al. Research status and prospect of valuable elements in pyrotechnic treatment of iron and steel dust[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(3):10－17.

[3] YE H D,ZHENG F Q,LI Q,et al. Low carbon and high efficient utilization of zinc-bearing dust in iron & steel industry by rotary kiln process[J]. Journal of Physics: Conference Series,2024,2738(1):012024.

[4] LI G D,FANG J J,JIANG T G,et al. Experiment on recovery of multi-metal from zinc volatile kiln slag in Xining[J]. Applied Mechanics and Materials,2015,723:901－905.

[5] 曹恩源,杨有智,邹丽萍,等. 锌挥发窑渣中碳、银和铁的综合回收试验[J]. 现代矿业,2022,38(4):146－149.
CAO Enyuan, YANG Youzhi, ZOU Liping, et al. Comprehensive recovery tests of carbon,silver and iron in zinc volatile kiln residue[J]. Modern Mining, 2022, 38(4):146－149.

[6] 吴春香,李国栋. 某锌冶炼回转窑渣回收碳和铁的试验[J]. 矿山机械,2018,46(9):50－54.
WU Chunxiang, LI Guodong. Test for carbon and iron recovery from slag out of rotary kiln in a zinc smelting process[J]. Mining & Processing Equipment, 2018, 46(9):50－54.

[7] 李硕,邵延海,何浩,等. 锌窑渣中有价金属综合回收研究现状及展望[J]. 矿产保护与利用,2019,39(1):138－143;149.
LI Shuo,SHAO Yanhai,HE Hao,et al. Current status and prospects of comprehensive recovery of valuable metals in zinc kiln slag[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2019,39(1):138－143;149.

[8] 王钟建,李岩,唐境言,等. 钢铁产业尘泥资源化回收利用现状与进展[J]. 江西冶金,2023,43(2):87－94.
WANG Zhongjian, LI Yan, TANG Jingyan, et al. Status and progress of resource recovery and utilization of dust and sludge in the steel industry[J]. Jiangxi Metallurgy, 2023,43(2):87－94.

[9] 张家瑜. “双碳”目标下钢铁企业碳减排路径研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2024.
ZHANG Jiayu. Research on carbon emission reduction path of iron and steel enterprises under the goal of “double carbon”[D]. Xi’an: Xi’an University of Architecture and Technology,2024.

[10] 董方,高利坤,陈龙,等. 锌窑渣中碳铜银铁综合回收试验研究[J]. 黄金,2016,37(6):53－57.
DONG Fang, GAO Likun, CHEN Long, et al. Experimental study on comprehensive recycling of carbon,copper,silver,iron from zinc kiln slag[J]. Gold, 2016,37(6):53－57.

[11] 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,2020,41(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, 41(4):137－140;125.

[12] 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 recycle and reuse zinc volatile kiln slag by magnetic separation[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science),2009,28(6):788－791.

[13] 何军,郑伟成,黄权,等. 钢铁尘泥还原与窑渣选铁研究[J]. 冶金动力,2022(1):113－115;119.
HE Jun, ZHENG Weicheng, HUANG Quan, et al. Research on iron and steel dust sludge reduction and magnetic separation from kiln slag[J]. Metallurgical Power,2022(1):113－115;119.

[14] WANG H F, PING X D, LU L J, et al. Development trends of low-carbon technologies of Chinese steel industry to achieve carbon peaking and neutrality goals [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2468(1):012146.

（下转第 131 页）

[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020.
XU Shuxiang. Study on vacuum carbothermal reduction process and mechanism of zinc-containing electric furnace dust[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2020.

[11] 李航宇,王定政,朱德庆,等. 高强度含锌粉尘内配碳球团制备工艺[J]. 烧结球团,2025,50(2):63 – 71.
LI Hangyu, WANG Dingzheng, ZHU Deqing, et al. Preparation process of carbon-burdened pellets in high-strength zinc-containing dust[J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(2):63 – 71.

[12] 李信. 铁合金冶炼用高强度兰炭制备基础研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2024.
LI Xin. Basic research on the preparation of high-strength semi-coke for ferroalloy smelting[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2024.

[13] 杨涛,雷杰,任晓健,等. 转底炉用含碳球团制备及生产工艺优化[J]. 钢铁,2023,58(4):157 – 166.
YANG Tao,LEI Jie,REN Xiaojian,et al. Preparation and production process optimization of carbon-bearing pellets for rotary bottom furnace[J]. Iron and Steel, 2023, 58(4):157 – 166.

[14] 李骞,马永和,唐银华,等. 铁矿球团用有机黏结剂研究进展[J]. 钢铁,2022,57(11):11 – 21.
LI Qian, MA Yonghe, TANG Yinhua, et al. Research progress of organic binder for iron ore pellets[J]. Iron & Steel,2022,57(11):11 – 21.

[15] 刘征建,陈龙智,张建良,等. 冶金竖炉反应器处理垃圾焚烧飞灰工艺[J]. 钢铁研究学报,2020,32(7):601 – 609.
LIU Zhengjian,CHEN Longzhi,ZHANG Jianliang,et al. Metallurgical treatment for municipal solid waste incineration fly ash[J]. Journal of Iron and Steel Research,2020,32(7):601 – 609.

[16] 杨正华,张朝晖,李新涛,等. 黏结剂在转炉造渣剂中的应用研究[J]. 矿冶工程,2019,39(3):99 – 102.
YANG Zhenghua, ZHANG Zhaohui, LI Xintao, et al. Utilization of binders in slagging agent for converter[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(3): 99 – 102.

[17] 韩凤光,杨涛,赵贺喜,等. 复合黏结剂对球团高温固结的影响及机理[J]. 工程科学学报,2023,45(9):1450 – 1458.
HAN Fengguang, YANG Tao, ZHAO Hexi, et al. Effects and mechanism of composite binder on high-temperature consolidation of pellets[J]. Chinese Journal of Engineering,2023,45(9):1450 – 1458.

[18] 段德丹,廖洪强,王佳娜,等. 固废基建筑室内用腻子粉的制备及性能研究[J]. 电镀与涂饰,2020,39(22):1578 – 1582.
DUAN Dedan, LIAO Hongqiang, WANG Jiana, et al. Preparation of solid-waste-based putty powder for building interiors and study on its properties[J]. Electroplating & Finishing,2020,39(22):1578 – 1582.

[19] MA S B,ZHANG Z H,XU S X,et al. Recovery of zinc from electric arc furnace dust by vacuum carbothermal reduction[J]. Metallurgical Research & Technology, 2021,118(4):415.

(上接第 107 页)

[15] LI C G. Current status and future trends of green metallurgical technology[J]. Scientific and Social Research,2024,6(7):119 – 126.

[16] 吉伟,冯二莲. 烧结矿转鼓强度和冶金性能研究[J]. 河北冶金,2024(5):14 – 23;34.
JI Wei, FENG Erlian. Research on drum strength and metallurgical properties of sinter ore[J]. Hebei Metallurgy,2024(5):14 – 23;34.

[17] 周磊,卜昭晨. 锌对高炉的危害及应对措施[J]. 天津冶金,2019(2):16 – 18.
ZHOU Lei,BU Zhaochen. Harm of zinc to blast furnace and countermeasures[J]. Tianjin Metallurgy,2019(2):16 – 18.