

## 高温含铁回转窑窑渣在线还原—熔分机理研究

郑利佳, 刘超, 邢宏伟, 康月, 周君

(华北理工大学冶金与能源学院, 河北唐山 063210)

**摘要:**以含铁窑渣高值资源化利用为目标,基于高温含铁窑渣物化性能提出在线还原—熔分工艺,利用 Factsage 热力学软件研究含铁窑渣在线还原—熔分质能匹配规律,基于热力学模拟结果以焦炭为还原剂研究高温含铁窑渣在线还原—熔分机理,探明还原—熔分反应过程物相组成变化规律,获取适宜碳氧质量比、升温速率及熔分温度等参数。结果表明:含铁窑渣还原—熔分过程发生的反应主要为铁氧化物、氧化锌和铁酸锌的还原,以及 CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系的熔分;计算得出在线还原—熔分方法处理高温含铁窑渣能够节省约  $1.76 \times 10^8$  J/t 的热量,在减少焦炭消耗的同时也降低了 CO<sub>2</sub> 的排放;在碳氧质量比为 1.4、升温速率为 15 °C/min、熔分温度为 1 500 °C 的条件下,含铁窑渣的还原—熔分效果较好,金属收得率达到 93.67%。

**关键词:**资源化利用率; 在线还原—熔分; 高温含铁窑渣; 碳氧质量比; 升温速率

中图分类号:TF55;X705

文献标志码:A

文章编号:1000-8764(2025)04-0091-08

doi:10.13403/j.sjqt.2025.04.062

## Research on online reduction-melting mechanism of high-temperature iron-containing rotary kiln slag

ZHENG Lijia, LIU Chao, XING Hongwei, KANG Yue, ZHOU Jun

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Tangshan, 063210, Hebei, China)

**Abstract:** Based on the physical and chemical properties of high-temperature iron-containing kiln slag, the online reduction-melting is proposed based on the physical and chemical properties of high-temperature iron-containing kiln slag, the matching law of online reduction-melting and energy matching law of iron-containing kiln slag is studied by using the Factsage thermodynamic software, the changes law in the phase composition of the reduction-melting reaction process are explored, and the appropriate carbon-oxygen mass ratio, heating rate and melting temperature are obtained. The results show that the reactions of iron-containing kiln slag reduction-melting process are mainly the reduction of iron oxides, zinc oxide and zinc ferrite, and the melting content of CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag system. It is calculated that the online reduction-melting method could save about  $1.76 \times 10^8$  J/t of heat from the treatment of high-temperature iron-containing kiln slag, which not only can reduce coke consumption, but also reduce CO<sub>2</sub> emissions. Under the conditions of carbon-oxygen mass ratio of 1.4, heating rate of 15 °C/min and melting temperature of 1 500 °C, the reduction-melting effect of iron-containing kiln slag is good, and the metal yield can reach 93.67%.

**Key words:** resource utilization rate; online reduction-melting; high-temperature iron-containing kiln slag; carbon-oxygen mass ratio; heating rate

收稿日期: 2024-07-06; 修回日期: 2024-09-13

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金资助项目(U20A20271); 河北省高等学校科学研究专项任务项目(产学研合作)(CX2024011); 唐山市科技计划资助项目(22150219A); 河北省自然科学基金资助项目(E2022209072)

作者简介: 郑利佳(1998—), 男, 硕士研究生, 从事冶金固废回收利用方面的研究。

通信作者: 刘超(1989—), 男, 副教授, 从事冶金固废回收利用方面教学与研究工作。

2024 年我国粗钢产量达到 10.05 亿吨。通常钢铁企业的粉尘产生量为钢产量的 8% ~ 12%<sup>[1-2]</sup>，其中约 25% 的冶金粉尘能够利用回转窑 1 100 ~ 1 300 °C 高温还原提取锌等金属，其残余物经水淬处理得到含铁回转窑窑渣（简称“含铁窑渣”）<sup>[3-4]</sup>。按照回转窑产渣量约为 60% 计算，我国每年回转窑产渣量约为 1 200 万 ~ 1 800 万吨，回转窑出渣温度约为 800 ~ 900 °C，含铁窑渣中铁品位约为 45% ~ 55%，具有较高的资源回收及余热利用价值<sup>[5-6]</sup>，但是含铁窑渣中含有一定量的锌元素限制了其作为高炉冶炼原料的进一步应用<sup>[7-8]</sup>。

现阶段，国内外相关科研院所及学者针对含铁窑渣资源化利用展开了相关研究和工业化应用<sup>[9-10]</sup>，选矿工艺因资源化成本低、周期短、处理量大等优点成为主流工艺<sup>[11]</sup>。其中，马娇等<sup>[12]</sup>以干法磁选为主对含铁窑渣中的铁和焦炭进行回收利用，采用多段磁选（即弱磁选铁、强磁选炭的工艺流程），使得铁回收率达 79.98%；彭伟等<sup>[13]</sup>对含铁窑渣浮选焦炭后进行研磨再磁选回收铁，铁回收率为 68.42%；李永华等<sup>[14]</sup>对含铁窑渣进行细磨和磁选之后再进一步二段细磨和磁选，铁的回收率达 90% 左右；蒋丰祥<sup>[15]</sup>对金属铁含量较高的含铁窑渣浮选后，再进行一次弱磁选，铁的回收率为 63.91%。综上所述，现有的选矿方法虽然能对部分铁进行回收，但回收率都偏低，同时选矿前需对含铁窑渣进行水淬冷却处理，导致大量显热未被有效回收利用，严重限制了高温含铁窑渣的资源化利用价值<sup>[16]</sup>。

针对含铁窑渣资源化利用工艺存在铁回收率低、余热利用率低、产品附加值低等问题，本文提出高温含铁窑渣在线还原—熔分工艺方法，在高温含铁窑渣显热基础上加入适量还原剂开展还原熔分热力学计算，获取渣铁锌还原熔分条件和所需热量；开展含铁窑渣还原熔分动力学试验，探究碳氧质量比、升温速率和还原熔分温度等因素对渣铁分离效果的影响规律，获取高温含铁窑渣在线还原熔分的适宜工艺参数，达到渣铁有效分离的目的，为高温含铁窑渣高附加值利用提供理论依据。

## 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辽宁某冶金粉尘厂，其冷却前后的形貌如图 1 所示。由图 1 可见：该含铁窑渣颗粒较大，颜色呈灰黑色，形状不规则，硬度较大；其从回转窑排出时的出渣温度约为 800 °C，具有大量显热。含铁窑渣的化学成分、焦炭的工业分析如表 1 所示。由表 1 可看出，含铁窑渣中全铁（TFe）质量分数高达 45.92%，还含有 0.72% 的残碳，其他成分为 Ca、Mg、Al、Si、Zn 等氧化物，因此，含铁窑渣中具有回收利用价值的元素主要为 Fe。经测算，每吨含铁窑渣中有 13 kg 的 Zn 元素，远远超过高炉入炉原料中 0.15 kg/t 的锌负荷标准<sup>[17]</sup>。若将该含铁窑渣直接作为高炉冶炼含铁原料会导致渣比高、碱金属富集，影响高炉顺行；若将含铁窑渣进行直接还原—熔分处理，能够在利用自身显热的基础上实现窑渣的深度富铁。



(a) 冷却前；(b) 冷却后

图 1 含铁窑渣形貌

Fig. 1 Morphological diagram of iron containing kiln slag

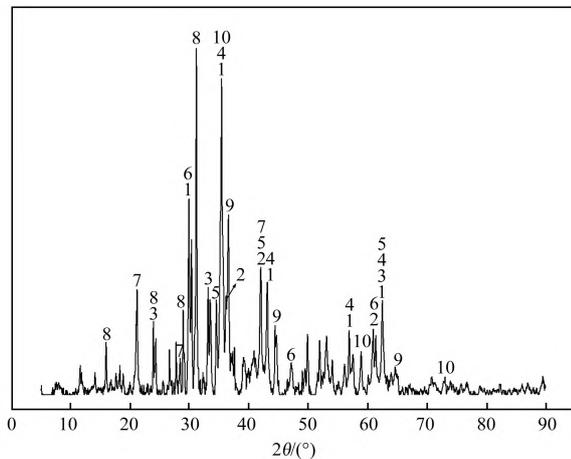
表1 含铁窑渣的主要化学成分及焦炭工业分析(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of iron kiln slag and industry analysis of coke

%

含铁窑渣化学成分								焦炭工业分析						
TFe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	C	S	Zn	固定碳	挥发分	灰分	水分
45.92	13.26	61.23	14.48	10.72	3.30	4.90	0.37	0.72	2.68	1.30	84.76	2.15	12.11	0.98

为探明含铁窑渣中各元素的赋存形态,并针对原料性质制定试验方案,对含铁窑渣进行X射线衍射仪(XRD)物相分析,如图2所示。由图2可见,窑渣主要金属化合物物相成分为Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、FeO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、ZnO,其他化合物有CaO、SiO<sub>2</sub>等,Fe元素赋存形态种类较多且全铁含量高,具有一定的回收价值。



1—Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; 2—FeO; 3—Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4—ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>;  
5—ZnO; 6—CaO; 7—SiO<sub>2</sub>; 8—Ca<sub>2</sub>ZnSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>;  
9—Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>; 10—Al<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>。

图2 窑渣物相组成

Fig. 2 Phase composition of kiln slag

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 含铁窑渣热同步分析试验

为研究还原剂对含铁窑渣中主要氧化物还原效果的影响,明确含铁窑渣焦炭还原较为适宜的条件,开展不同配碳量和升温速率热同步分析试验。含铁窑渣不同配碳量试验方案如表2所示。首先,将含铁窑渣和焦炭破碎至<0.075 mm,并按照不同配碳量混合均匀(配碳量依据碳氧质量比计算,其中, $m(C)$ 为焦炭中固定C的质量, $m(O)$ 为含铁窑渣主要氧化物FeO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZnO和ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>中O的质量);然后将混合料放入热同步分析仪中,以试验方案中预设恒定的加热速率向样品供热,设定还原温度为1450℃;当还原温

度达到预设温度后保温30 min,以确保还原反应的充分进行,且全程通入N<sub>2</sub>保护;待试验结束后分析TG曲线。

表2 不同碳氧质量比方案

Table 2 Different carbon to oxygen ratio schemes

试验方案编号	碳氧质量比	样品质量/mg	配碳量/mg	升温速率/(℃·min <sup>-1</sup> )	恒温时间/min
1#	1.0	20	3.20	5	30
2#	1.2	20	3.84	5	30
3#	1.4	20	4.48	5	30
4#	1.6	20	5.12	5	30
5#	1.8	20	5.76	5	30

为探究升温速率对含铁窑渣熔分的影响,确定适宜含铁窑渣熔分的升温速率,在固定含铁窑渣还原剂与铁氧化物碳氧质量比的条件下改变升温速率进行试验。不同升温速率试验方案如表3所示。

表3 不同升温速率方案

Table 3 Different heating rate schemes

试验方案编号	碳氧质量比	样品质量/mg	配碳量/mg	升温速率/(℃·min <sup>-1</sup> )	恒温时间/min
1#	1.4	20	4.48	5	30
2#	1.4	20	4.48	10	30
3#	1.4	20	4.48	15	30
4#	1.4	20	4.48	20	30
5#	1.4	20	4.48	25	30

### 1.2.2 含铁窑渣还原—熔分试验

为明确含铁窑渣还原—熔分较为适宜的温度条件,开展不同温度水平的高温热态试验,并根据热同步分析试验结果进行优化。还原—熔分试验方案如表4所示。首先,将尺寸为1~5 cm的含铁窑渣和焦炭粉按照碳氧质量比为1.4混合均匀后装入氧化铝坩埚中;然后将坩埚放入高温管式炉的加热区。高温管式炉温度设置可由程序调整控制,试验过程通入N<sub>2</sub>保护,流量为200 mL/min。试验结束后,物料随炉冷却降至室温,然后取出

称重。

表 4 不同熔分温度试验方案

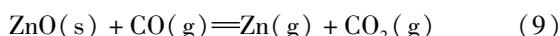
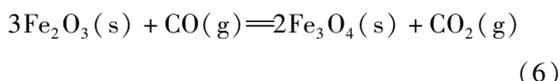
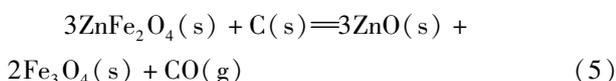
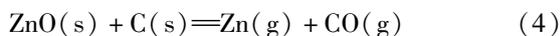
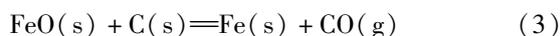
Table 4 Experimental schemes for different melting temperatures

试验方案编号	碳氧质量比	样品量/g	配碳量/g	升温速率/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ )	熔分温度/ $^{\circ}\text{C}$	恒温时间/min
1 <sup>#</sup>	1.4	50	11.2	15	1 300	30
2 <sup>#</sup>	1.4	50	11.2	15	1 400	30
3 <sup>#</sup>	1.4	50	11.2	15	1 500	30
4 <sup>#</sup>	1.4	50	11.2	15	1 600	30

## 2 试验结果与讨论

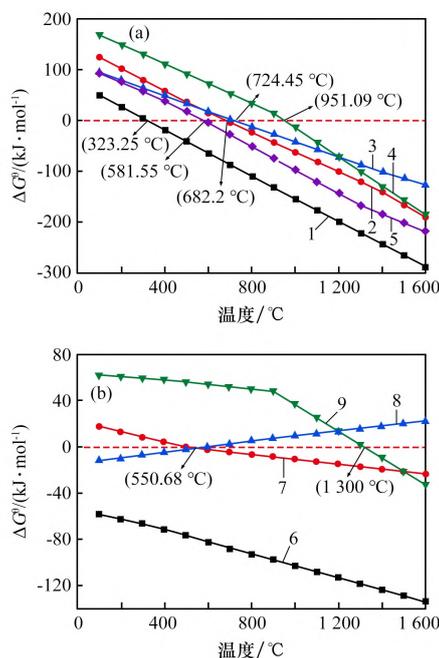
### 2.1 含铁窑渣热力学计算

通过 Factsage 计算含铁窑渣直接还原—熔分过程中可能发生的化学反应，主要包括含锌化合物的还原反应和铁氧化物的逐级还原反应。反应如下所示。



通过热力学计算得出含铁窑渣直接还原反应的吉布斯自由能随温度变化关系，如图 3(a) 所示。由图 3(a) 可看出，含铁窑渣中锌的化合物和铁氧化物直接还原反应的先后顺序： $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{ZnO}$ 。还原含铁窑渣间接还原反应的吉布斯自由能随温度变化关系，如图 3(b) 所示。由图 3(b) 可看出， $\text{Fe}_2\text{O}_3$  与  $\text{CO}$  最先发生反应，其次是  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  和  $\text{FeO}$ ，均在  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右与  $\text{CO}$  发生反应， $\text{ZnO}$  与  $\text{CO}$  的反应温度为  $1\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。上述反应的吉布斯自由能随温度的增加均呈下降趋势，且在一定温度范围内数值由正转负，说明焦炭能将含铁窑渣中铁氧化物、铁酸锌、氧

化锌等主要氧化物还原，温度的提高会促进还原反应的进行。



(a) 直接还原反应；(b) 间接还原反应  
1~9—反应(1)~(9)。

图 3 吉布斯自由能随温度的变化关系

Fig. 3 The variation of Gibbs free energy with temperature

### 2.2 含铁窑渣回收利用热量分析

利用 FactSage 软件的平衡模块，基于 FT oxide、FactPS 和 FSstel 数据库，对含铁窑渣加热到  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  时所需的热量进行计算，得到理想状态下在线还原—熔分方法处理每吨高温含铁窑渣的自带热量约为  $1.76 \times 10^8\text{ J}$ 。直接利用窑渣的这部分热量，可大幅度降低熔分铁水的碳消耗，为相关企业或机构带来一定的经济效益，同时减少烟气污染物排放量，助力实现“双碳”战略目标。

### 2.3 含铁窑渣 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 渣系相图绘制

利用 FactSage 软件的相图模块，基于 FT oxide 数据库绘制相图如图 4 所示。图中，a、b、c 分别为折算之后  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  的等成分线<sup>[18]</sup>，含铁窑渣的渣系成分组成大概位于图中 A 区域内。由附近等温线可得含铁窑渣渣系开始熔化温度为  $1\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。由图 4 可知，理想状态下  $1\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度能够使含铁窑渣熔化。后续试验含铁窑渣的熔分温度采用该值。



本被还原；而 20、25 °C/min 升温速率下的失重率曲线仍呈下降的趋势，且试验结束时的失重率远远小于其他三组试验，说明含铁窑渣中的金属氧化物未被完全还原，若想反应完全则需要更长的反应时间。

试验数据显示，升温速率从 5 °C/min 提高到 25 °C/min 过程中样品总失重分别为 6.88、6.82、6.79、6.43 mg 和 5.69 mg。可看出升温速率为 5、10、15 °C/min 时样品的失重相差不大，均在 6.80 mg 左右。在不同的升温速率下，含铁窑渣在同一温度下的反应时间不同，升温速率越快反应时间越短。含铁窑渣中的氧化物在 5、10、15 °C/min 这三个升温速率下基本被还原，表明在这三个升温速率下的还原反应不受时间因素的影响，且 20 °C/min 和 25 °C/min 升温速率未能完全还原含铁窑渣中的金属氧化物。考虑到在 5、10 °C/min 和 15 °C/min 升温速率下样品的总失重基本相同，为了节省时间成本，含铁窑渣的熔分速率选为 15 °C/min。

### 2.6 含铁窑渣熔分结果

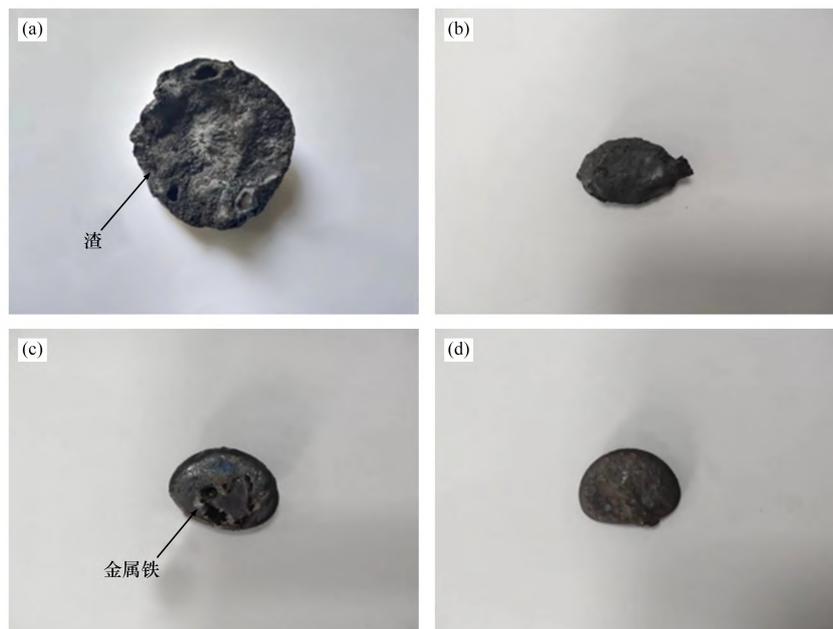
在上述热同步分析得到的较优条件下进行还原—熔分试验。不同熔分温度如表 4 所示，熔分结果如图 7 所示。根据图 4 可知，开始熔化温度

为 1 300 °C，但试验结果显示渣铁未有效分离，如图 7(a) 所示。分析原因认为，在理想状态下进行相图计算，得出含铁窑渣开始熔化温度相较试验温度略低。后续熔分试验分别在 1 400、1 500、1 600 °C 的温度下进行，熔分铁块质量分别为 19.23、21.50 g 和 20.34 g，试验结果如图 7(b)、(c)、(d) 所示。可知，在 1 500 °C 的条件下熔分效果较好。由图 7(c) 可知，含铁窑渣表面无熔渣黏连且出现银白色的金属铁。经计算，高温含铁窑渣熔分后的铁元素收得率为 93.67%，样品失重率为 27% 左右，与热同步分析试验中样品的失重率相差 0.6% 左右。

### 3 结论

本文基于高温含铁窑渣物化特性提出在线还原—熔分工艺，利用热力学软件获取含铁窑渣还原—熔分条件，并分析碳氧质量比、温度和升温速率对含铁窑渣还原—熔分效果的影响规律，得出如下结论：

(1) 含铁窑渣中氧化物直接还原的先后顺序： $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ，氧化物与焦炭反应温度分别为 323.25、682.2、724.45、951.09、581.55 °C。



温度/°C：(a) 1 300；(b) 1 400；(c) 1 500；(d) 1 600

图 7 不同温度下熔分结果

Fig. 7 Melting results at different temperatures

(2) 含铁窑渣的出渣温度为 800 ℃ 左右, 利用高温在线还原—熔分工艺处理 1 t 含铁窑渣能够回收的热量约为  $1.76 \times 10^8$  J, 在减少焦炭消耗的同时也降低了 CO<sub>2</sub> 的排放。

(3) 碳氧质量比和升温速率对含铁窑渣的还原效果影响较大, 在碳氧质量比为 1.4、升温速率为 15 ℃/min、熔分温度为 1 500 ℃ 的条件下, 含铁窑渣的还原—熔分效果较好, 铁元素收得率为 93.67%。

### 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] 李京社, 朱经涛, 杨宏博, 等. 中国电炉炼钢粉尘处理现状[J]. 河南冶金, 2011, 19(4): 1-4.  
LI Jingshe, ZHU Jingtiao, YANG Hongbo, et al. Status on the treatment of eaf dust in China[J]. Henan Metallurgy, 2011, 19(4): 1-4.
- [3] 赵婷, 张飞虎, 赵立华, 等. 钢铁企业含锌尘泥回转窑处置设计原理及工业实践[J]. 烧结球团, 2024, 49(2): 115-122.  
ZHAO Ting, ZHANG Feihu, ZHAO Lihua, et al. Design principle and industrial practice of rotary kiln on zinc-containing dust sludge disposal in iron and steel enterprises[J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(2): 115-122.
- [4] 戴兴征, 曾鹏, 任锐, 等. 锌窑渣氧化气固相反应过程分析[J]. 四川冶金, 2011, 33(4): 36-39.  
DAI Xingzheng, ZENG Peng, REN Rui, et al. The study of gas-solid reaction process in oxidizing zinc kiln slag[J]. Sichuan Metallurgy, 2011, 33(4): 36-39.
- [5] 陈荣驾. 炼锌窑渣的综合利用[J]. 环境工程, 1985, 3(2): 26-28; 29; 47.  
CHEN Rongjia. Comprehensive utilization of zinc smelting kiln slag[J]. Environmental Engineering, 1985, 3(2): 26-28; 29; 47.
- [6] 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.
- [7] 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, 45(3): 22-25.
- [8] 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.
- [9] 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 flotation recovery of carbon, copper, and silver from zinc kiln slag[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [10] 陈鹤翔. 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.
- [11] 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.
- [12] 马娇, 焦红光, 潘兰英, 等. 干法磁选在锌挥发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] 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.
- [14] 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.
- [15] 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. Research on physical separation technology of valuable mineral resources in zinc kiln residue[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [16] 李静,牛皓,彭金辉,等. 锌窑渣综合利用研究现状及展望[J]. 矿产综合利用, 2008(6): 44 - 48.  
LI Jing, NIU Hao, PENG Jinhui, et al. Present situation and prospect about comprehensive utilization of zinc kiln slags[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2008(6): 44 - 48.
- [17] 马贵生,夏秋雨,张树华,等. 钢厂高炉 Zn 负荷控制与含铁尘泥利用研究[J]. 烧结球团, 2020, 45(5): 77 - 82.  
MA Guisheng, XIA Qiuyu, ZHANG Shuhua, et al. Research on Zn load control and utilization of ferrous dust in blast furnace of steel plant[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(5): 77 - 82.
- [18] 潘向阳,马保良,龙跃,等. MgO 对铁矿粉烧结液相生成特性的影响[J]. 烧结球团, 2018, 43(6): 29 - 33.  
PAN Xiangyang, MA Baoliang, LONG Yue, et al. Effect of MgO on formation characteristics of sintering liquid phase of iron ore fines[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(6): 29 - 33.

(上接第 63 页)

- [11] 雷杰,汪名赫,周江虹,等. 新型复合黏结剂提高生球质量的作用机理及构效关系[J]. 工程科学学报, 2023, 45(1): 91 - 97.  
LEI Jie, WANG Minghe, ZHOU Jianghong, et al. Mechanism and structure-activity relationship of a new composite binder to improve the quality of green pellets[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(1): 91 - 97.
- [12] LI C X, BAI Y, REN R C, et al. Study of the mechanism for improving green pellet performance with compound binders[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2019, 55(1): 153 - 162.
- [13] 张元波,欧阳学臻,路漫漫,等. 腐植酸改性膨润土在铁矿球团中的应用效果[J]. 烧结球团, 2018, 43(4): 27 - 32.  
ZHANG Yuanbo, OUYANG Xuezheng, LU Manman, et al. Application effect of humic acid modified bentonite binder in iron ore pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(4): 27 - 32.
- [14] JIANG T, HAN G H, ZHANG Y B, et al. A further study on the interaction between one of organic active fractions of the MHA binder and iron ore surface[J]. International Journal of Mineral Processing, 2011, 100(3/4): 172 - 178.
- [15] 吴玉东. MHA 黏结剂有机功能组分与铁、钛、硅天然氧化矿物表面的作用研究[D]. 长沙:中南大学, 2014.  
WU Yudong. Research on the interaction of the two component[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [16] 冯惠敏,王勇华. 膨润土在铁矿球团中作用机理[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2009(6): 15 - 18; 30.  
FENG Huimin, WANG Yonghua. Explore mechanism of benonite in iron ore pelletting[J]. China Non-Metallic Minerals Industry Herald, 2009(6): 15 - 18; 30.
- [17] 姜涛. 铁矿造块学[M]. 长沙:中南大学出版社, 2016.  
JIANG Tao. Principle and technology of agglomeration of iron ores[M]. Changsha: Central South University Press, 2016.