



某铁冶炼渣磨矿—磁选—磁悬浮精选 联合流程回收铁试验研究

夏祥生¹, 王永恒¹, 赵 强², 杨 卓², 李 啸², 张 震²

(1. 攀钢集团矿业有限公司, 四川 攀枝花 617063; 2. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205)

摘要: 针对某铁冶炼渣资源堆存与环境污染问题, 在矿石性质研究基础上, 文章开展了高效回收铁的选矿工艺试验。结果表明: 直接磁选仅获 TFe 品位为 72.38%、回收率为 27.26% 的铁精矿, 必须磨矿解离。当磨矿细度 $<45\ \mu\text{m}$ 粒级占比为 92% 时, 弱磁选粗精矿 TFe 品位为 79.31%、回收率为 79.18%; 经磁悬浮精选后, 最终铁精矿 TFe 品位为 80.81%、全流程回收率为 76.91%。推荐采用“球磨机磨矿—筒式磁选机粗选—磁悬浮精选”联合流程, 在磨矿细度 $<45\ \mu\text{m}$ 粒级占比为 92% 以上时, 可获得 TFe 品位 80% 以上、回收率 75% 以上的铁精矿。该工艺科学合理、经济环保, 可为同类冶炼渣中铁资源回收提供参考。

关键词: 铁冶炼渣; 高效回收; 磁选; 精选提质

中图分类号: TD981

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)07-0001-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.07.071

Experimental study on iron recovery from iron smelting slag by combined process of grinding, magnetic separation and magnetic suspension cleaning

XIA Xiangsheng¹, WANG Yongheng¹, ZHAO Qiang², YANG Zhuo², LI Xiao², ZHANG Zhen²

(1. Panzhihua Pangang Group Mining Company, Panzhihua 617063, Sichuan, China;

2. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: To address the storage and environmental pollution issues of iron smelting slag, beneficiation experiments for efficient iron recovery were conducted based on ore property characterization. Results show that direct magnetic separation only obtains an iron concentrate with TFe grade of 72.38% and recovery of 27.26%, indicating that grinding is necessary for mineral liberation. When the grinding fineness of the $<45\ \mu\text{m}$ accounting for 92%, a rough concentrate with TFe grade of 79.31% and recovery of 79.18% is obtained by low-intensity magnetic separation. After magnetic suspension cleaning, the final iron concentrate achieves a TFe grade of 80.81% and a total recovery of 76.91%. The combined process of “ball mill grinding-drum magnetic separator roughing-magnetic suspension cleaning” is recommended. when the grinding fineness of the $<45\ \mu\text{m}$ fraction is above 92%, an iron concentrate with TFe grade over 80% and recovery above 75% can be obtained. This process is scientific, economical and environmentally friendly, providing a reference for iron recovery from similar smelting slags.

Key words: smelting slag; high-efficiency iron recovery; magnetic separation; magnetic suspension cleaning

近年来, 随着现代工业的快速发展, 冶炼技 术也取得了重大进展, 火法冶炼作为金属提取的

收稿日期: 2025-07-03

基金项目: 国家应急管理部重点研发计划资助项目(2024YFB2908800)

作者简介: 夏祥生(1985—), 男, 工程师, 从事采矿、选矿方面的研究工作。

通信作者: 杨 卓(1994—), 男, 工程师, 从事选矿、冶金及固废综合利用方面的研究工作。

核心工艺,在支持现代工业发展的同时,也产生了大量的冶炼渣^[1]。冶炼渣是矿石在火法冶炼过程中形成的固体废弃物,具有成分复杂、污染环境、堆存量大的特点^[2-3]。我国作为冶金大国,每年产生巨量冶炼渣,其累计堆存量已超过数亿吨,且仍以千万吨级规模逐年递增^[4]。冶炼渣中通常含有有价金属,是重要的二次资源,合理开发利用冶炼渣,是保证我国冶炼资源优势的重要途径,也符合我国资源循环利用与可持续发展的要求^[5]。

近年来,行业内越来越重视冶炼渣的无害化处理和资源化利用,国内外关于冶炼渣中有价金属的回收研究日益增多^[6]。如袁风香^[7]采用预选抛尾—磨矿—弱磁选联合工艺选别铜冶炼渣,可以获得铁品位 56.50%、铁回收率 64.52% 的铁精矿。李晓波等^[8]采用直接还原焙烧—磁选工艺回收铜尾渣中铜铁,最佳条件下可获得铁品位为 90.98%、铁回收率为 90.13%,铜品位为 5.82%、铜回收率为 87.38% 的含铜铁精矿。李学鹏等^[9]采用磁化还原法回收砷铁渣中的砷和铁,可以得到 TFe 品位为 70.65% 的磁选精矿。HOU 等^[10]针对钢渣细粉开发流态化干式磁网分选,说明细粒磁性组分的分散状态和设备结构对分选效率具有重要影响。QIN 等^[11]采用还原焙烧—磁选从铜冶炼渣中提铁,优化后的回收率达 78.84%。CHENG 等^[12]采用焙烧—磨矿—磁选从铅冶炼水淬渣中回收铁获得了铁品位 93.61%、回收率 90.71% 的铁精矿。

开展冶炼渣中选矿回收铁的研究具有重大意义。采用常规磁选工艺回收时,铁精矿品位及回收率均较低,需要进一步精选提质;采用焙烧磁选、直接还原磁选等方法回收时,虽然能获得较高品位和回收率,但能耗高、选矿成本高、环境污染大。基于此,本研究从某冶炼厂的实际情况出发,针对该铁冶炼渣进行化学分析,在矿石性质分析基础上,开展磨矿、磁选粗选及精选提质等试验,明确磨矿细度、磁场强度和精选方式对分选指标的影响,确定兼顾铁精矿品位、回收率和工程经济性的推荐流程,以期可为同类铁冶炼渣中铁资源高效回收提供技术参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 铁冶炼渣化学成分

试验样品为褐色粉末状及结块状,经烘干、碾细、混匀及缩分后分别制得分析检测样和选矿试验样。该铁冶炼渣的主要成分的半定量分析结果见表 1,重点关注元素的化学分析结果见表 2。

表 1 铁冶炼渣主要化学成分的半定量

分析结果(质量分数)								%
Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃	MgO	ZnO	MnO	
65.700	9.860	9.830	4.230	4.170	2.170	0.993	0.726	

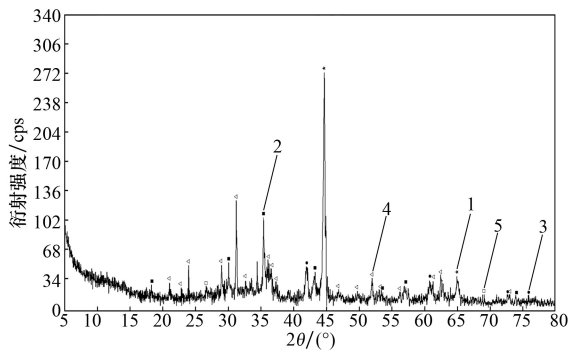
表 2 铁冶炼渣中重点元素化学分析结果(质量分数) %

TFe	S
69.95	1.33

由以上两张表可以看出:该铁冶炼渣中的化学成分较为复杂,Fe₂O₃、CaO、SiO₂、SO₃ 等成分质量分数均较高;该铁冶炼渣中主要有价元素是铁,化学分析结果表明 TFe 品位为 69.95%,可尝试通过磁选富集方法予以回收;S 为杂质元素,化学分析结果表明其质量分数为 1.33%。

1.1.2 矿物组成及铁的物相分析

该铁冶炼渣的 X 射线衍射分析结果如图 1 所示。由图 1 可知,该铁冶炼渣中含有多种矿物成分,包括单质铁、磁铁矿、方铁矿、镁黄长石和石英。其中,含铁物相具有磁性,而镁黄长石和石英没有磁性,初步判断通过磁选可能实现铁矿物与脉石矿物的分离。图 1 中,2 θ 表示衍射角。



1—Fe; 2—磁铁矿; 3—方铁矿; 4—镁黄长石; 5—石英。

图 1 铁冶炼渣的 X 射线衍射分析图谱

进一步对铁冶炼渣中的主要有用元素铁进行

物相分析, 查明其赋存状态, 物相分析结果见表 3。由表 3 可知, 该铁冶炼渣中的含铁物相比较多, 包括游离氧化亚铁、硅酸铁、赤褐铁矿、磁铁矿、硫化铁矿、金属铁等。其中, 金属铁、赤褐铁矿和磁铁矿的质量分数较高, 相对质量分数分别为 70.75%、14.13% 和 6.83%。基于含铁矿物磁性, 通过弱磁选可回收的铁理论回收率约为 78%。虽然物相分析显示金属铁质量分数较高, 但 XRD 图中未呈现显著衍射峰, 推测金属铁可能以细粒分散或非晶态形式存在, 或与其他矿物峰重叠。

表 3 铁冶炼渣中铁物相分析结果(质量分数) %

成分	元素质量分数	矿物相对质量分数
游离氧化亚铁	2.47	3.57
硅酸铁	3.01	4.35
赤褐铁矿	9.77	14.13
磁铁矿	4.72	6.83
硫化铁矿	0.25	0.36
金属铁	48.90	70.75
总铁	69.12	100.00

1.1.3 铁冶炼渣粒度分布

采用一套标准筛对铁冶炼渣原矿进行湿筛, 筛析结果见表 4。由表 4 可知, 该铁冶炼渣整体粒度较粗, 其中 >150 μm 粗粒级产率高达 44.83%, 其 TFe 品位为 68.55%, 明显低于原矿平均值(69.95%); 而 <74 μm 细粒级产率为 22.18%, TFe 品位达到 71.79%。说明粗粒级中含有未解离的含铁连生体矿物, 直接进行磁选可能难以获得高品位铁精矿, 需要通过磨矿使铁矿物充分解离。

表 4 铁冶炼渣粒度筛析结果(质量分数) %

粒级/μm	产率	TFe 品位
>150	44.83	68.55
[74,150]	32.99	70.61
<74	22.18	71.79
合计	100.00	69.95

1.2 试验方法

该铁冶炼渣高效回收工艺试验主要包括直接磁选试验、磨矿磁选条件试验(磨矿细度、磁场强度)、精选提质试验等, 通过对比各条件下的选别指标, 确定最佳选矿工艺流程及参数。首先, 对该铁冶炼渣进行不磨矿直接磁选试验, 根据试验结果论证磨矿的可选性和必要性; 随后, 对该铁

冶炼渣进行不同磨矿细度下的磁选试验, 确定合适的磨矿细度; 在最优的磨矿细度下进行不同磁场强度下的磁选试验, 确定合适的磁场强度, 得到磁选粗精矿; 最后, 对磁选精矿进行不同精选设备下的精选试验, 确定合适的精选设备及工艺参数, 最终获得铁精矿产品。

2 试验结果与讨论

2.1 直接磁选试验

为降低能耗和简化流程, 首先对该铁冶炼渣原矿进行了不磨矿直接磁选试验。试验在磁场强度 1 000 Oe(100 mT) 的条件下进行, 给矿为未经磨矿的原矿(磨矿细度 <74 μm 粒级占比仅为 22.17%), 直接磁选试验流程如图 2 所示, 试验结果见表 5。

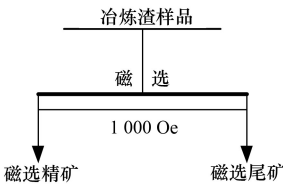


图 2 直接磁选探索试验流程

表 5 直接磁选探索试验结果(质量分数) %

产品名称	产率	TFe 品位	TFe 回收率
精矿	26.34	72.38	27.26
尾矿	73.66	69.08	72.74
原矿	100.00	69.95	100.00

由表 5 可知, 原矿不经过磨矿直接磁选, 仅能获得 TFe 品位 72.38% 的铁精矿, 虽较原矿品位提高了 2.43 个百分点, 但回收率仅为 27.26%。这是由于粗粒级中铁矿物与脉石连生严重, 铁矿物未充分解离, 大量连生体无法被有效富集, 导致精矿品位提升有限、回收率偏低。因此, 要实现铁的高效回收, 必须通过磨矿使铁矿物充分解离, 后续试验采用磨矿—磁选工艺。

2.2 磨矿—磁选条件试验

2.2.1 磨矿细度条件试验

由该铁冶炼渣矿石性质和探索试验结果可知, 该样品整体粒度较粗, 铁矿物未充分解离, 直接磁选效果较差。因此, 首先考查了铁冶炼渣样品磨矿细度对磁选分选效果的影响。考查的磨矿细度 <74 μm 粒级占比分别为 68%、75%、82%、88%、95%, <45 μm

粒级占比为 92%, <38 μm 粒级占比为 90%, 固定磁场强度为 1 000 Oe(100 mT), 磨矿—磁选试验流程如图 3 所示, 试验结果如表 6 所示。

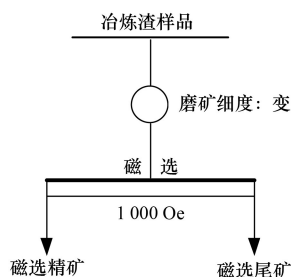


图 3 磨矿细度条件试验流程

表 6 不同磨矿细度下磁选试验结果(质量分数) %

磨矿细度	产品名称	产率	TFe 品位	TFe 回收率
<74 μm 粒级占比 为 68%	精矿	81.35	73.65	85.68
	尾矿	18.65	53.72	14.32
	给矿	100.00	69.93	100.00
<74 μm 粒级占比 为 75%	精矿	78.19	74.55	83.29
	尾矿	21.81	53.63	16.71
	给矿	100.00	69.99	100.00
<74 μm 粒级占比 为 82%	精矿	75.25	75.82	81.50
	尾矿	24.75	52.33	18.50
	给矿	100.00	70.01	100.00
<74 μm 粒级占比 为 88%	精矿	74.03	76.45	80.78
	尾矿	25.97	51.88	19.22
	给矿	100.00	70.07	100.00
<74 μm 粒级占比 为 95%	精矿	72.32	77.91	80.42
	尾矿	27.68	49.56	19.58
	给矿	100.00	70.06	100.00
<45 μm 粒级占比 为 92%	精矿	69.92	79.31	79.18
	尾矿	30.08	48.46	20.82
	给矿	100.00	70.03	100.00
<38 μm 粒级占比 为 90%	精矿	67.72	80.64	77.96
	尾矿	32.28	47.82	22.04
	给矿	100.00	70.05	100.00

由表 6 可知,随着磨矿细度增大,磁选铁精矿品位逐渐升高,回收率逐渐降低。当磨矿细度 <74 μm 粒级占比由 68% 提高至 95% 时,铁精矿 TFe 品位由 73.65% 提升至 77.91%, 回收率由 85.68% 降至 80.42%。进一步增加磨矿细度至 <45 μm 粒级占比为 92%, TFe 品位达 79.31%, 回收率 79.18%; 继续磨至 <38 μm 粒级占比为 90% 时, 品位升至 80.64%, 但回收率降至 77.96%。虽然 <38 μm

粒级为 90% 的品位更高, 但磨矿能耗大幅增加, 且回收率下降明显, 综合考虑技术经济平衡, 推荐磨矿细度 <45 μm 粒级占比为 92%。

2.2.2 磁场强度条件试验

磁力分选过程中, 磁场强度对铁精矿的品位和回收率具有显著影响。因此, 在推荐的磨矿细度下, 继续考查了磁选机磁场强度对铁冶炼渣分选效果的影响。考查的磁场强度分别为 800 Oe(80 mT)、1 000 Oe(100 mT) 和 1 200 Oe(120 mT), 选择磨矿细度 <45 μm 粒级占比为 92%, 磨矿—磁选试验流程如图 4 所示, 试验结果如表 7 所示。

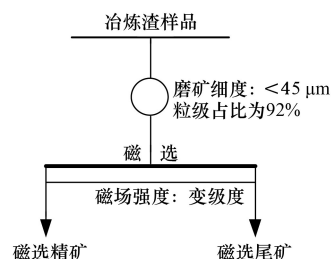


图 4 弱磁选条件试验流程

表 7 不同磁场强度下磁选试验结果 %

磁场强度/Oe	产品名称	产率	TFe 品位	TFe 回收率
800	精矿	68.23	79.86	77.89
	尾矿	31.77	48.79	22.11
	原矿	100.00	69.95	100.00
1 000	精矿	69.92	79.31	79.18
	尾矿	30.08	48.46	20.82
	原矿	100.00	69.95	100.00
1 200	精矿	71.39	78.67	80.17
	尾矿	28.61	48.94	19.83
	原矿	100.00	69.95	100.00

由表 7 可知, 随着磁场强度增大, 磁选铁精矿 TFe 品位逐渐降低, 回收率逐渐升高。磁场强度从 800 Oe(80 mT) 增至 1 000 Oe(100 mT) 时, 铁精矿品位由 79.86% 降至 79.31% (降低 0.55 个百分点), 回收率由 77.89% 升至 79.18% (提高 1.29 个百分点); 继续增至 1 200 Oe(120 mT) 时, 品位进一步降至 78.67% (降低 0.64 个百分点), 回收率升至 80.17% (仅提高 0.99 个百分点)。可见, 1 200 Oe(120 mT) 较 1 000 Oe(100 mT) 回收率提升幅度明显减小, 而品位下降更为显著, 综合

考虑指标与能耗, 确定最佳磁场强度为 1 000 Oe (100 mT)。

2.2.3 磁选精矿精选提质试验

磨矿—磁选试验确定了最佳磨矿细度 <45 μm 粒级占比为 92%、最佳磁场强度为 1 000 Oe (100 mT)。为进一步提升铁精矿品位, 并验证该细度在精选流程中的合理性, 同时考察更细磨矿 (<38 μm 粒级占比为 90%) 对精选指标的影响, 分别以 <45 μm 粒级占比为 92% 和 <45 μm 粒级占比为 90% 两个细度下获得的磁选精矿为给矿, 开展了磁悬浮精选提质试验。固定上升水流流速为 12 L/min, 试验流程如图 5 所示, 试验结果见表 8。

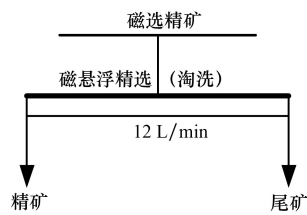


图 5 超细磨磁选精矿磁悬浮精选试验流程

由表 8 可知, 两个磨矿细度下的铁精矿品位有得到进一步提升, 均达到 80% 以上。对于磨矿细度 <45 μm 粒级占比为 92% 的磁选精矿, 可获得铁精矿 TFe 品位为 80.81%、作业回收率为 97.13%、全流程回收率为 76.91% 的分选指标。对于磨矿细度 <45 μm 粒级占比为 90% 的磁选精矿, 可获得铁精矿 TFe 品位为 82.04%、作业回收率为 97.31%、全流程回收率为 75.87% 的分选指标。虽然 <45 μm 粒级占比为 90% 磨矿细度下的磁选精矿品位更高, 但回收率较 <45 μm 粒级占比 92% 磨矿细度下的磁选精矿低了约 1 个百分点, 且磨矿能耗显著增加。综合考虑技术经济平衡,

更推荐采用磨矿细度 <45 μm 粒级占比为 92%、磁场强度为 1 000 Oe (100 mT)、磁悬浮精选的联合工艺流程。

2.3 最终工艺流程推荐

根据试验研究结果, 推荐该铁冶炼渣的最佳分选工艺流程为“球磨机/塔磨机磨矿—筒式磁选机粗选—磁悬浮精选”, 在磨矿细度 <45 μm 粒级占比为 92%、磁场强度为 1 000 Oe (100 mT)、上升水流流速 12 L/min 的最优条件下, 可获得 TFe 品位为 80.81%、回收率为 76.91% 的铁精矿。推荐工艺流程如图 6 所示。

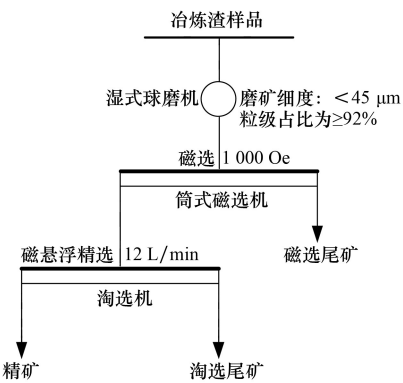


图 6 推荐的铁冶炼渣回收工艺流程

3 结 论

(1) 该铁冶炼渣中主要有价元素是铁, TFe 品位为 69.95%; S 为杂质元素, 其质量分数为 1.33%。该铁冶炼渣中含有单质铁、磁铁矿、方铁矿、镁黄长石和石英等矿物成分。含铁物相包括游离氧化亚铁、硅酸铁、赤褐铁矿、磁铁矿、硫化铁矿和金属铁等, 其中金属铁、赤褐铁矿和磁铁矿的质量分数分别为 70.75%、14.13% 和 6.83%。

表 8 超细磨磁选精矿磁悬浮精选试验结果 (质量分数)

样品	产品名称	TFe 品位	作业		全流程	
			产率	TFe 回收率	产率	TFe 回收率
<45 μm 粒级 占比 92% 磁选精矿	精矿	80.81	95.36	97.13	66.67	76.91
	尾矿	49.10	4.64	2.87	3.24	2.27
	合计	79.34	100.00	100.00	69.92	79.18
<38 μm 粒级 占比 90% 磁选精矿	精矿	82.04	95.64	97.31	64.77	75.87
	尾矿	49.68	4.36	2.69	2.95	2.09
	合计	80.65	100.00	100.00	67.72	77.96

(2) 磨矿磁选试验表明, 随磁场强度增大, 磁选铁精矿的 TFe 品位逐渐降低, 回收率逐渐升高; 随铁冶炼渣磨矿细度增大, 磁选铁精矿品位逐渐升高, 回收率逐渐降低。当磁场强度为 1 000 Oe (100 mT) 时, 磨矿细度 $< 45\ \mu\text{m}$ 粒级占比为 92%, 可获得铁精矿产率为 69.92%、TFe 品位为 79.31%、回收率为 79.18% 的分选指标。

(3) 精选提质试验表明, 磁悬浮精选可有效提升铁精矿品位。在上升水流流速 12 L/min 时, 对于磨矿细度 $< 45\ \mu\text{m}$ 粒级占比为 92% 的磁选精矿, 可获得铁精矿 TFe 品位 80.81%、全流程回收率 76.91% 的指标; 磨矿细度 $< 38\ \mu\text{m}$ 粒级占比为 90% 时, 铁精矿 TFe 品位 82.04%、全流程回收率 75.87%。综合考虑, 推荐采用磨矿细度 $< 45\ \mu\text{m}$ 粒级占比为 92% 的磁选精矿进行精选提质。

(4) 对于该铁冶炼渣的高效回收, 最终推荐采用“球磨机磨矿—筒式磁选机粗选—磁悬浮精选”工艺流程。当磨矿细度 $< 45\ \mu\text{m}$ 粒级占比为 92% 以上时, 可获得 TFe 品位 80% 以上、回收率 75% 以上的铁精矿, 实现了铁的高效回收, 为该类型冶炼渣的资源回收提供了参考。

参考文献:

[1] 朱飞. 钢铁厂冶炼废渣处理工艺探讨[J]. 冶金与材料, 2023, 43(12): 1-3.
[2] 周玲君. 复合重金属污染废渣的资源化利用途径[J]. 工程建设, 2018, 50(3): 81-86.

[3] 张俊, 严定鑫, 齐渊洪, 等. 钢铁冶炼渣的处理利用难点分析[J]. 钢铁, 2020, 55(1): 1-5.
[4] 刘令传. 我国钢铁工业固废综合利用产业发展现状及建议[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(1): 113-116.
[5] 宋厚彬, 林荣琪, 杨浩, 等. 铜冶炼渣综合利用技术发展现状及展望[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(4): 7-11.
[6] QIN Z L, XIAO J H, DU T Y, et al. Resource utilization strategy of Fe-bearing smelting slag in China: A review [J]. Minerals Engineering, 2024, 219: 109066.
[7] 袁风香. 某铜冶炼尾渣选铁试验研究[J]. 现代矿业, 2022, 38(11): 117-119.
[8] 李晓波, 许浩, 李国栋, 等. 某冶炼铜渣综合回收铜铁的试验研究[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(4): 123-127; 133.
[9] 李学鹏, 王娟, 常军, 等. 砷铁渣中砷和铁的资源化利用研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(2): 105-108.
[10] HOU K X, ZHAN H. Magnetic separation characteristics of steel slag powder in a fluidized dry magnetic network separator[J]. AIP Advances, 2024, 14: 075128.
[11] QIN Z L, XIAO J H, DU T Y, et al. Eco-friendly iron extraction from Fe-containing copper smelting slag via reduction roasting with coal and magnetic separation: Experimental and mechanism insights [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(5): 114117.
[12] CHENG H, ZHUO R, LI G D, et al. Iron recovery from lead smelting water-quenching slag by “roasting-grinding-magnetic separation” method [J]. Powder Technology, 2024, 439: 119708.

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。