选矿与原料预处理

某铁尾矿“磁化焙烧—磁选”深度回收工艺

肖 硕，黄自力，郑洁森，刘晓峰，吴纪龙

（武汉科技大学 a. 资源与环境工程学院；b. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室，湖北 武汉 430081）

摘要：针对某铁尾矿易泥化，夹带严重，常规磁选、浮选法回收铁品位不高的问题，本文采用强磁抛尾—磁化焙烧—弱磁粗选—细磨—弱磁精选的选矿工艺流程，探讨了强磁选磁场强度、焙烧配煤量、焙烧温度、焙烧时间、两段弱磁选磁场强度及磨矿细度等试验条件对选矿指标的影响。试验结果表明，最佳选矿条件：强磁选磁场强度为 954.93 kA/m；焙烧配煤量为 8%、焙烧温度为 750 ℃、焙烧时间为 20 min；弱磁粗选磁场强度为 79.58 kA/m，粗选精矿磨矿细度 <38.5 μm 质量分数为 69.27%，弱磁精选磁场强度为 47.75 kA/m。在这一条件下，经过磁化焙烧后，夹带现象明显减弱，最终可获得 w(TFe) 为 61.55% 的铁精矿。

关键词：铁尾矿；赤铁矿；磁化焙烧；磁选

中图分类号：TD926.4；TD951 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)04－0077－06

doi：10.13403/j.sjqt.2024.04.061

A deep recovery process on “magnetization roasting-magnetic separation” of iron tailing

XIAO Shuo, HUANG Zili, ZHENG Jiemiao, LIU Xiaofeng, WU Jilong

(Wuhan University of Science and Technology a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Hubei Province Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: In view of the problem that an iron tailing is easy to mud, entrainment is severe, and the iron grade recovered by conventional magnetic separation and flotation recovery is not high, the beneficiation process of strong magnetic tail throwing-magnetization roasting-weak magnetic rough separation-fine grinding-weak magnetic selection is adopted, and the effects of the test conditions such as the magnetic field strength of strong magnetic separation, the amount of roasting coal blending, the roasting temperature, the roasting time, the magnetic field strength of the two stages of weak magnetic separation and the fineness of grinding are discussed. The results show that the optimal beneficiation conditions are as follows: the magnetic field strength of strong magnetic separation is 954.93 kA/m; the roasting coal blending amount is 8%, the roasting temperature is 750 ℃, the roasting time is 20 min, the magnetic field strength of the weak magnetic coarse separation is 79.58 kA/m, the grinding fineness of the coarse concentrate is <38.5 μm, with a mass fraction of 69.27%, and the magnetic field strength of the weak magnetic separation is 47.75 kA/m. Under above conditions, the entrainment phenomenon is significantly weakened after magnetization roasting, and a concentrate with w(TFe) of 61.55% can be obtained finally.

Key words: iron tailing; hematite; magnetizing roasting; magnetic separation

收稿日期：2023－02－27；**修回日期**：2023－06－24

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51872210)

作者简介：肖 硕(1997—)，男，硕士研究生，从事矿物分选及二次资源综合利用方面的研究。

通信作者：黄自力(1965—)，男，教授，从事矿物加工及二次资源综合利用方面的研究。

随着经济社会的不断进步，我国对铁矿资源的需求量日益加大，随之产生的铁尾矿大部分未经回收利用直接排放堆存。铁尾矿的大量堆积填埋不仅会占用大量土地，消耗物力、人力和财力，而且部分铁尾矿中含有的重金属等有害物质，会对地下水和周围环境造成严重污染[1]。我国现有8 000多个国营矿山和11万多个乡镇集体矿山，堆存的尾矿量近50亿t，年排出尾矿量高达5亿t以上，其中黑色冶金矿山年排放尾矿量达到1.5亿t，综合利用率低于30%[2]。经调查，部分选矿厂实施尾矿二次再选工程后，年经济效益平均在300万元以上，因此我国冶金矿山的尾矿资源仍具有很好的开发潜力[3]。我国铁矿资源中贫矿数量较多，因此其尾矿的选矿难度更大，传统的选矿方法并不能有效地解决劣质难选铁矿资源的分选问题，为了合理利用劣质难选铁矿资源，选矿科技工作者将矿物加工与冶金等相关学科领域相互交叉、渗透与融合，形成了多种难选铁矿选矿新技术。其中，磁化焙烧预处理—磁选技术是处理弱磁性铁矿资源最典型、最有效的方法。磁化焙烧是指将物料或矿石在一定的气氛条件下加热进行化学反应，选择性地使其中的弱磁性铁矿物转变为强磁性的磁铁矿(Fe_3O_4)或磁赤铁矿(γ-Fe_2O_3)，而脉石矿物磁性几乎不变，从而提高铁矿石的可选性[4-5]。

本文采用磁化焙烧—磁选工艺对某铁矿石常规磁选尾矿深度回收进行了探讨，旨在解决尾矿泥化、夹带严重导致常规选矿中精矿铁品位不高的问题，为该矿石铁尾矿开发利用的可行性评价提供了重要的技术依据。

1 尾矿性能与研究方法

1.1 尾矿主要化学成分

试验用铁尾矿主要化学成分如表1所示。由表1可知：w(TFe)为19.17%，w(MFe)为0.67%，磁性率(MFe/TFe)为3.50%，属于典型的弱磁性铁矿石；该尾矿的碱度系数[w(CaO)+w(MgO)]/[w(SiO_2)+w(Al_2O_3)]=0.064，属于酸性矿石；主要杂质元素为Si，其质量分数达到了29.28%；有害组分元素P质量分数也较高，达到了0.20%，S的质量分数较低，仅为0.090 5%。

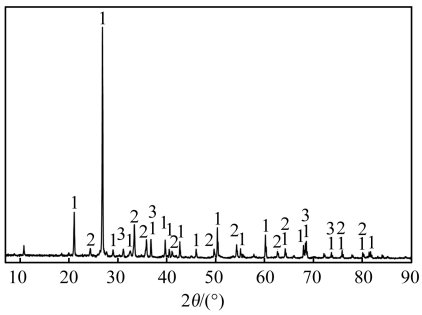
表1 铁尾矿主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical components of iron tailing %

TFe	MFe	S	P	CaO	MgO
19.17	0.67	0.090 5	0.20	1.59	2.475
SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	MnO	
62.64	1.18	0.91	0.795	0.10	

1.2 尾矿主要矿物组成

铁尾矿X射线衍射分析图谱(XRD)如图1所示。由图1可以看出，矿石的成分较为单一，主要成分为石英与赤铁矿，磁铁矿峰强度相对较低，与前述化学成分分析一致。



1—石英；2—赤铁矿；3—磁铁矿。

图1 铁尾矿XRD图谱

Fig. 1 X-ray diffraction pattern of iron tailing

1.3 铁化学物相分析

铁尾矿中铁的化学物相分析结果如表2所示。由表2可知，该铁尾矿含铁矿物以赤铁矿及褐铁矿(赤、褐铁矿)为主，其合计分布率为81.38%；其次为菱铁矿、硅酸铁及磁铁矿，分布率分别为8.82%、5.84%和3.5%；硫化铁含量较少，分布率仅为0.47%。其中赤、褐铁矿和磁铁矿是主要回收矿物。

表2 铁尾矿铁物相检测结果

Table 2 Iron phase detection results of iron tailings

项目	磁铁矿	菱铁矿	赤、褐铁矿	硫化铁	硅酸铁	全铁
质量分数/%	0.67	1.69	15.60	0.09	1.12	19.17
分布率/%	3.50	8.82	81.38	0.47	5.84	100.00

1.4 试验方法

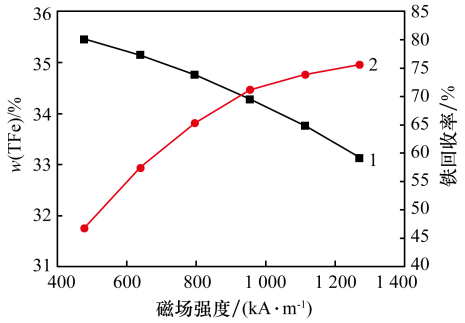
该铁尾矿细度<0.074 mm质量分数为97.02%，粒度较细，故前期不进行磨矿处理，拟采用强磁

抛尾—磁化焙烧—弱磁粗选—磨矿—弱磁精选的工艺流程回收尾矿中的有用铁矿物。采用煤粉作为焙烧还原剂，其固定碳质量分数为 69.31%、挥发分为 10.89%、水分为 0.40%、灰分为 19.36%，<0.074 mm 粒度质量分数为 59.67%。采用 XCSQ-50×70 湿式强磁选机对原矿进行强磁选，富集原矿中的赤、褐铁矿及少量磁铁矿，并抛去大量的尾矿，减少后续焙烧矿量。将强磁精矿和煤粉按比例混匀后放置于陶瓷坩埚中，待马弗炉温度升至设定温度后，将陶瓷坩埚放入马弗炉中，焙烧至设定时间后取出并迅速置入水中冷却[6]。焙烧矿采用粗选—磨矿—精选工艺，用 HLXCGS-∅50 磁选管进行弱磁选，得到铁精矿。

2　结果与讨论

2.1　强磁选磁场强度试验

对原矿采用强磁选富集赤、褐铁矿及磁铁矿，强磁选试验结果如图 2 所示。由图 2 可知，磁场强度提高的过程中铁品位越来越低，铁回收率则不断升高。此作业以富集有用铁矿物为目的，故以回收率为主要参考指标，综合考虑选取磁场强度为 954.93 kA/m，此时铁品位由 19.17% 提升至 34.29%，铁回收率为 71.17%；尾矿铁品位为 9.18%，产率为 60.21%，此时可抛去大量尾矿，减少后续作业给矿量。



1—w(TFe)；2—铁回收率。

图 2　强磁选磁场强度对选矿指标的影响

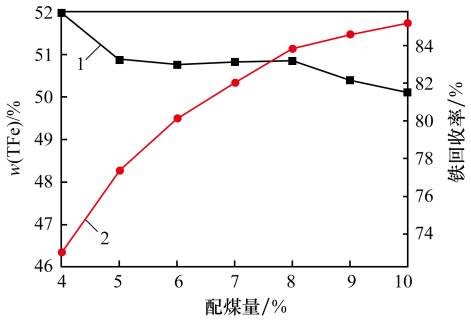
Fig. 2　Influence of strong magnetic field strength on mineral processing index

2.2　磁化焙烧试验

对强磁精矿进行磁化焙烧—弱磁粗选试验，固定弱磁粗选磁场强度为 95.54 kA/m，探究配煤量、焙烧温度及焙烧时间对选矿指标的影响。

2.2.1　配煤量试验

将强磁精矿与煤粉按照不同比例搭配，分别在 700 ℃下焙烧 30 min，配煤量试验结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出，在配煤量从 4% 逐渐增加至 8% 时，铁品位趋于稳定，铁回收率大幅提升；继续增大配煤量，铁品位降低，铁回收率变化趋向平缓，说明在配煤量为 8% 时还原条件已比较充足。故确定焙烧配煤量为 8%。



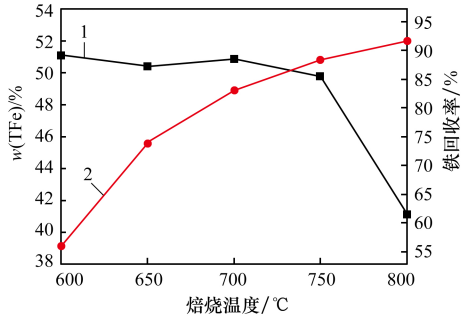
1—w(TFe)；2—铁回收率。

图 3　配煤量对选矿指标的影响

Fig. 3　Influence of coal blending quantity on mineral processing index

2.2.2　焙烧温度试验

固定配煤量为 8%，在不同温度下焙烧 30 min，确定最佳焙烧温度，试验结果如图 4 所示。由图 4 可知，在焙烧温度从 600 ℃逐渐增加至 750 ℃时，铁品位变化不明显，铁回收率不断增加；当温度超过 750 ℃后，会生成 FeO 形成富士体 Fe_3O_4-FeO，从而降低焙烧矿的比磁化系数[7]，此时铁品位急剧下降，铁回收率增长趋于平缓。故选定焙烧温度为 750 ℃，此时作业铁回收率为 88.42%。



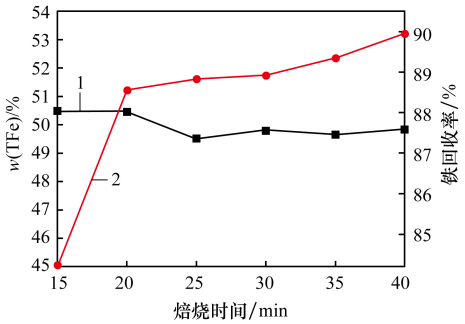
1—w(TFe)；2—铁回收率。

图 4　温度对选矿指标的影响

Fig. 4　Influence of temperature on mineral processing index

2.2.3 焙烧时间试验

将物料按照配煤量 8% 混匀后，在 750 ℃下分别焙烧不同时间，最终焙烧时间试验结果如图 5 所示。由图 5 可知，在焙烧 20 min 时，反应较充分，铁品位及铁回收率达到一个较高的指标。当焙烧时间小于 20 min 时，铁回收率较低，说明此时还原焙烧时间不充足，赤铁矿转化率较低；当焙烧时间大于 20 min 时，矿石中的赤铁矿发生过还原，生成富士体[8-9]，铁品位下降，铁回收率变化很小，表明此时赤铁矿转化较为充分。因此确定焙烧时间为 20 min，在该条件下，作业铁回收率可达到 88.56%，而铁品位提升至 50.47%。



1—w(TFe)；2—铁回收率。

图 5 焙烧时间对选矿指标的影响

Fig. 5 Influence of roasting time on mineral processing index

2.3 弱磁选试验

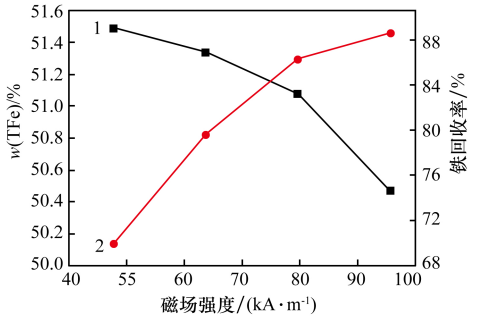
根据磁化焙烧条件试验结果，按照 8% 的配煤量将矿样与煤粉混匀，在 750 ℃下焙烧 20 min 制备焙砂，再对焙砂进行弱磁选条件试验。

2.3.1 弱磁粗选磁场强度试验

在不同磁场强度下对焙砂进行弱磁选，磁场强度条件试验结果如图 6 所示。由图 6 可知，当磁场强度为 79.58 kA/m 时，弱磁粗选精矿铁品位为 51.08%，作业铁回收率为 86.30%，综合指标较好。

2.3.2 粗选精矿磨矿细度试验

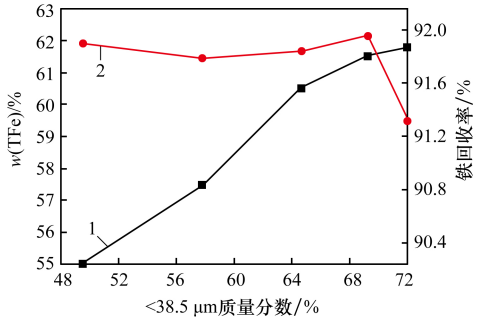
对粗选精矿进行磨矿细度条件试验，精选磁场强度为 47.75 kA/m，试验结果如图 7 所示。由图 7 可知，当磨矿细度 < 38.5 μm 质量分数逐渐增加至 69.27% 时，铁品位逐渐升高，铁回收率几乎不变，表明此时铁矿物解离还不完全；当磨矿细度大于69.27% 时，铁品位变化较小，铁回收率



1—w(TFe)；2—铁回收率。

图 6 弱磁粗选磁场强度对选矿指标的影响

Fig. 6 Influence of weak magnetic coarse magnetic field strength on mineral index



1—w(TFe)；2—铁回收率。

图 7 弱磁精选磨矿细度对选矿指标的影响

Fig. 7 Influence of weak magnetic concentrate grinding fineness on mineral processing index

有所降低，说明此时部分磁性铁出现过磨现象。综合考虑确定精选磨矿细度 < 38.5 μm 质量分数为 69.27%。

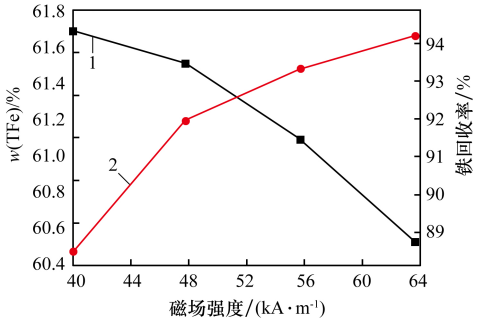
2.3.3 弱磁精选磁场强度试验

对磨矿细度 < 38.5 μm 质量分数为 69.27% 的粗选精矿进行弱磁精选磁场强度条件试验，试验结果如图 8 所示。由图 8 可知，当弱磁精选磁场强度为 47.75 kA/m 时，精矿铁品位为 61.55%，作业铁回收率为 91.96%，综合指标较好。

2.4 全流程试验

经试验，最终确定原矿强磁选磁场强度为 954.93 kA/m；磁化焙烧配煤量为 8%、焙烧温度为 750 ℃、焙烧时间为 20 min；弱磁粗选磁场强度为 79.58 kA/m，粗选精矿最佳磨矿细度 < 38.5 μm 质量分数为 69.27%，弱磁精选磁场强度为 47.75 kA/m为最佳处理条件，并在此条件下进行全流程试验，试验数质量流程如图 9 所示。由图 9 可知，最终精矿铁品位为 61.55%，对原矿铁回收

率为 56.48%，综合尾矿铁品位为 10.12%（可直接抛除）。



1—w(TFe)；2—铁回收率。

图 8　弱磁精选磁场强度对选矿指标的影响

Fig. 8　Influence of weak magnetic magnetic field strength on mineral processing index

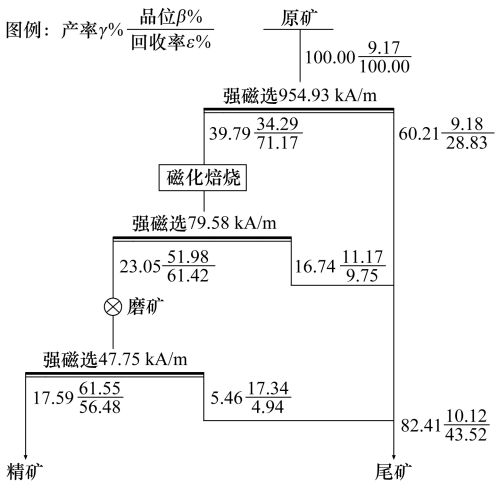
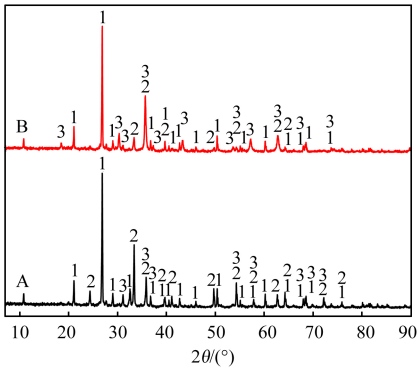


图 9　全流程试验数质量流程

Fig. 9　Quality flow chart of the whole process test number

2.5　磁化焙烧前后矿样物相转变分析

焙烧前（即强磁选精矿）及焙烧后矿样的 XRD 分析、铁物相分析分别如图 10 与表 3 所示。由图 10 可知，焙烧前矿样赤铁矿峰强度相对较高，磁铁矿峰强度相对较低，焙烧后矿样赤铁矿峰强度明显降低，磁铁矿峰强度显著提高，石英相几乎不变，即表明大量赤铁矿转化为了磁铁矿。由表 3 可知，赤铁矿品位由 28.8% 降低至 4.27%，在铁中分布率由 84.61% 降低至 12.58%；磁铁矿品位由 1.87% 提升至 27.70%，在铁中分布率由 5.49% 提升至 81.59%，进一步表明了赤铁矿在磁化焙烧过程中转化为了磁铁矿，且转化率[10]达到了 85.17%。



A—焙烧前；B—焙烧后。

1—石英；2—赤铁矿；3—磁铁矿。

图 10　焙烧前后矿样 XRD 图谱

Fig. 10　X-ray diffraction pattern of the ore samples before and after roasting

表 3　焙烧前后矿样的铁物相对比结果

Table 3　Results of iron relative ratio of ore samples before and after roasting　　%

矿样	变量	磁铁矿	菱铁矿	赤、褐铁矿	硫化铁	硅酸铁	全铁
焙烧前	质量分数	1.87	1.98	28.8	0.08	1.31	34.04
	分布率	5.49	5.82	84.61	0.24	3.85	100.00
焙烧后	质量分数	27.70	0.53	4.27	0.15	1.30	33.95
	分布率	81.59	1.56	12.58	0.44	3.83	100.00

3　结　论

（1）该铁尾矿组成成分较为单一，全铁品位为 19.17%，可回收含铁矿物主要为赤铁矿、褐铁矿及少量的磁铁矿，其在铁中的分布率合计为 84.87%，脉石矿物主要为石英，属于典型的弱磁性铁矿。

（2）在最佳条件（强磁选磁场强度为 954.93 kA/m、磁化焙烧配煤量为 8%、焙烧温度为 750 ℃、焙烧时间为 20 min、弱磁粗选磁场强度为 79.58 kA/m、粗选精矿磨矿细度为 <38.5 μm 质量分数为 69.27%、弱磁精选磁场强度为 47.75 kA/m）下，经过强磁抛尾—磁化焙烧—弱磁粗选—磨矿—弱磁精选后，最终铁品位由原来的 19.17% 提高至 61.55%，铁回收率为 56.48%；综合抛尾铁品位为 10.12%，抛尾产率为 82.41%。

（3）在最佳磁化焙烧条件下赤铁矿大部分转化为磁铁矿，转化率达到 85.17%，此时再采用弱

磁选，泥化现象得到改善，夹带情况明显减弱，能够较好的将含铁矿物与脉石分离，为该铁尾矿的深度回收利用提供了新指导。

参考文献：

[1] 刘鹏,刘磊,田馨,等. 我国铁尾矿工艺矿物学特性及其资源化技术研究进展[J]. 矿产保护与利用,2022,42(3):169－178.
LIU Peng, LIU Lei, TIAN Xin, et al. Reviews of the process mineralogy characteristics and comprehensive utilization technology of iron ore tailings in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2022,42(3):169－178.

[2] 唐艳东,马北越,邓承继. 铁尾矿的资源化利用研究现状[J]. 耐火与石灰,2021,46(6):23－27.
TANG Yandong, MA Beiyue, DENG Chengji. Research status of resources utilization of iron ore tailing[J]. Refractories & Lime,2021,46(6):23－27.

[3] 李文海. 冶金矿山铁尾矿资源现状及回收利用方法分析[J]. 山西冶金,2020,43(6):190－192.
LI Wenhai. Analysis on present situation and recycling method of iron tailings resources in metallurgical mines[J]. Shanxi Metallurgy,2020,43(6):190－192.

[4] 余建文,韩跃新,李艳军,等. 复杂难选弱磁性铁矿石磁化焙烧技术研究现状与发展前景[J]. 河北冶金,2018(10):1－6.
YU Jianwen, HAN Yuexin, LI Yanjun, et al. Recent advances and development prospect of magnetization roasting of refractory weak magnetic iron ores[J]. Hebei Metallurgy,2018(10):1－6.

[5] 黄柱成,朱顺伟,李依桐,等. 内配煤对低品位微细粒赤铁矿还原与磁选分离的影响[J]. 烧结球团,2017,42(1):14－18.
HUANG Zhucheng,ZHU Shunwei,LI Yitong,et al. Rapid reduction and magnetic separation of low-grade microfine hematite ore[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(1):14－18.

[6] 郭永楠. 某褐铁矿磁化焙烧磁选探索试验[J]. 矿冶工程,2014,34(S1):247－249.
GUO Yongnan. Exploration test of magnetic roasting of limonite[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2014,34(S1):247－249.

[7] 曹永丹,汪倩,程建忠,等. 包钢选矿厂尾矿磁化焙烧—磁选回收铁的试验研究[J]. 矿冶,2014,23(3):5－8.
CAO Yongdan, WANG Qian, CHENG Jianzhong, et al. Magnetic roasting-magnetic separation tests on recovering iron from tailings of Baogang dressing plant[J]. Mining and Metallurgy,2014,23(3):5－8.

[8] 刘明霞,胡超杰,姬志杰,等. 赤泥磁化焙烧—磁选提铁试验研究[J]. 烧结球团,2022,47(2):74－80.
LIU Mingxia, HU Chaojie, JI Zhijie, et al. Experimental research on red mud magnetization roasting-magnetic separation iron extraction process[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(2):74－80.

[9] 柳晓,高鹏,吕扬,等. 高铁赤泥悬浮磁化焙烧—磁选提铁工艺[J]. 东北大学学报(自然科学版),2021,42(3):414－421.
LIU Xiao, GAO Peng, LÜ Yang, et al. Recovery process of iron from high-iron red mud through suspension magnetization roasting-low intensity magnetic separation technology[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2021,42(3):414－421.

[10] 王帅,孙永升,韩跃新,等. 磁化焙烧过程中磁性转化率对磁选影响规律研究[J]. 金属矿山,2022(11):115－119.
WANG Shuai,SUN Yongsheng,HAN Yuexin,et al. Study on the effect law of hematite conversion rate on magnetic separation during magnetization roasting[J]. Metal Mine,2022(11):115－119.

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”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。