基于 X 射线分选高效回收白云鄂博稀土矿中的稀土和铁①

王慎正，潘晓光，康穗，张铁柱，金香
（内蒙古科技大学包头师范学院，内蒙古 包头 014010）

摘　要：为提高稀土资源回收率，以白云鄂博稀土矿为研究对象，采用 X 射线分选-弱磁选-浮选联合工艺，对稀土、铁矿物进行回收。结果表明，通过 X 射线分选富集，在适宜的参数条件下获得了稀土品位 9.44%、作业回收率 94.03%、富集比 1.48 的稀土粗精矿以及稀土品位 1.03%的抛废尾矿，抛废率为 5.97%；稀土粗精矿经弱磁选-浮选，获得了产率 19.89%、稀土品位 61.23%、回收率 79.81%的稀土精矿，浮选尾矿铁品位 58.68%、作业回收率 83.27%。该工艺可提高入磨稀土品位、简化浮选流程，为稀土矿高效回收提供了新思路。

关键词：预选抛尾；多金属矿；白云鄂博；稀土矿；X 射线分选；富集比；回收率
中图分类号：TD92；TD95　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.013
文章编号：0253-6099(2025)06-0078-05

Efficient Recovery of Rare Earth and Iron from Bayan Obo Rare Earth Ore Based on XRF Sorting

WANG Shenzheng, PAN Xiaoguang, KANG Sui, ZHANG Tiezhu, JIN Xiang
(*Baotou Teachers' College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: In order to improve recoveries of rare earth resources, Bayan Obo rare earth ore was taken for research, for which a combined process consisting of XRF sorting, low-intensity magnetic separation (LIMS) and flotation was adopted to recover rare earth elements (REEs) and iron minerals therein. With appropriate parameters, a rough concentrate of rare earth was obtained with a REE grade of 9.44%, recovery of 94.03% and an enrichment ratio of 1.48, and the tailings for discarding had a REE grade of 1.03%, presenting a discarding rate of 5.97%. After that, a process consisting of LIMS and flotation was adopted, producing a rare earth concentrate grading 61.23% REE at 79.81% recovery, with a yield of 19.89%, and the tailings with iron grade of 58.68% at 83.27% recovery. It is concluded that such processing technique can improve the REE grade of the feed into the mill and also simplify the flotation flowchart, providing a new idea for efficient recovery of rare earth ore.

Key words: pre-selection for discarding tailings; polymetallic ore; Bayan Obo; rare earth ore; XRF sorting; enrichment ratio; recovery

稀土元素具有独特的光电磁特性，是现代工业及战略储备关键性材料[1-2]。白云鄂博矿是世界主要稀土原料供应地之一，受资源“贫、细、杂”特性影响，稀土综合回收率不足 15%。有价金属资源常随尾矿流失，资源高效回收问题亟待解决[3-5]。而选矿过程中磨矿能耗占生产成本的 75%，破碎阶段预选能去除部分脉石矿物，可降本增效[1,6-8]。本文采用 X 射线预富集技术对矿石进行预选抛废，对比预抛前后矿石品位、有价金属矿物回收率等关键指标，评估 X 射线预富集技术在白云鄂博稀土矿中的应用效果，为多金属矿集约化开发提供新路径，对提升资源利用率具有工程实践价值。

1　原矿性质及试验方法

1.1　原矿性质

试验用原矿为内蒙古包头某稀土选矿厂提供的稀土矿石，矿块粒度 20~150 mm。原矿化学成分分析结

① **收稿日期**：2025-05-30
基金项目：内蒙古自治区自然科学基金(2025LHMS04014)；包头市 2023 年青年创新人才计划项目(011080221/122)
作者简介：王慎正(2004—)，男，内蒙古赤峰人，主要研究方向为矿物加工。E-mail：15548492675@163.com
通信作者：张铁柱(1984—)，男，吉林白城人，博士，高级工程师，主要从事金属矿产资源物理分离技术研究。E-mail：70411@bttc.edu.cn
金香(1979—)，女，辽宁营口人，博士，教授，主要从事稀土固废分离及磁性材料研发。E-mail：jin122120@163.com

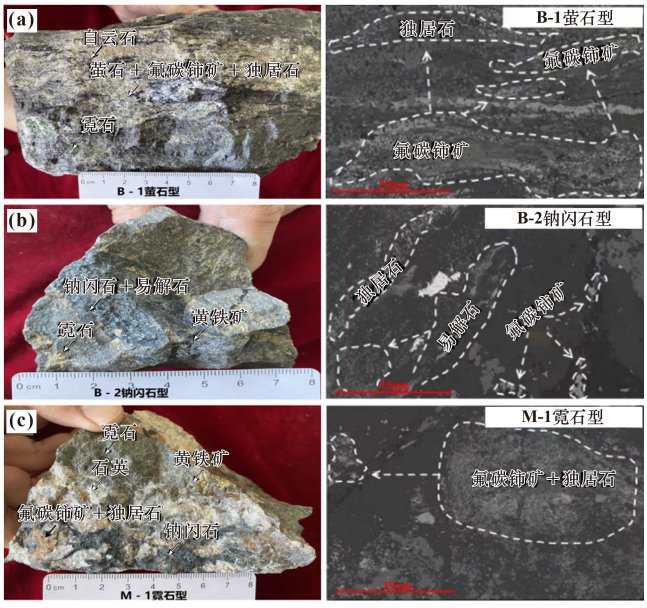
果见表 1。由表 1 可知,稀土矿石 TFe 品位 28.36%、REO 品位 6.05%、Nb_2O_5 品位 0.12%,主要非金属成分为 P、S 和 F。

表 1　原矿化学成分分析结果(质量分数)

Table 1　Chemical composition of raw ore　　%

TFe	REO	Na_2O	MgO	Al_2O_3	K_2O	SiO_2	CaO
28.36	6.05	1.45	1.53	0.21	0.44	3.52	24.74
TiO_2	P	S	F	MnO	Nb_2O_5	BaO	ThO_2
0.65	3.29	6.85	12.58	0.05	0.12	6.96	0.033

原矿主要显微形貌如图 1 所示。由图 1 可知,稀土矿石以独居石、氟碳铈矿为主,铁矿物主要由磁铁矿和赤铁矿组成,含有少量黄铁矿,脉石矿物主要为石英、钠辉石、钠闪石、萤石、白云石等[8]。白云鄂博矿床具有多期热液沉淀成矿的特点,不同类型稀土矿物赋存特征存在差异。在厘米尺度下,稀土与铌矿物呈现集中富集矿化规律,其中稀土与铌矿物类似于条带状分布,稀土矿物呈星散状集中分布,该特征有利于 X 射线分选富集。



(a) 萤石型稀土矿石;(b) 钠闪石型稀土矿石;(c) 霓石型稀土矿石

图 1　原矿主要显微形貌

Fig. 1　Microscopic morphology of raw ore

1.2　试验原理

采用江苏天瑞仪器股份有限公司的 TR2000 系列手持式 X 射线荧光(XRF)光谱仪进行目标元素手工分选及含量检测,并利用俄罗斯 РАДОС 公司的 СРФ-4-150 型 X 射线选矿机进行半工业分选试验。

试验原理为:利用原级 X 射线激发矿物中待激发目标元素,该目标元素产生 X 射线荧光即特征 X 射线,通过计算目标元素特征 X 射线峰面积与无干扰背景面积比值的方式判定目标矿物品位。

由传动装置将块状矿石依次传送至 X 射线辐射区,在线传感器分析收集和处理数据,将其转换为达到目标元素品位等级分选要求的信号,电磁击打装置做出击打反应使矿块掉入富矿槽,反之矿块则进入贫矿槽,完成矿石分选[8]。

1.3　试验试剂及试验方法

试验前先进行原矿中稀土元素之间的共伴生度研究。不同种类矿物稀土元素组成存在差异,稀土元素之间共伴生度越高,越有利于 X 射线分选。同时利用手持式 XRF 光谱仪手工拣选稀土矿石,建立分选富集经验模型,分析 X 射线分选富集稀土矿石的可行性。

1.3.1　试验试剂

试验中用到的试剂均为当前工艺流程中使用的试剂,以保证试验与当前工艺流程具有可比性。主要包括捕收剂芳香族羟肟酸(506E,内蒙古包钢稀土林峰科技有限公司)、抑制剂水玻璃以及起泡剂 2#油。

1.3.2　试验方法

采用 X 射线分选-弱磁选-浮选联合流程进行试验。采用该流程对稀土矿石进行综合回收的主要目的是缩短现有工艺流程、降本增效。X 射线分选用于预先抛除脉石、减少入磨矿量、提高入选矿石稀土品位。浮选试验中,在保证浮选指标前提下,以一粗一精流程取代当前的一粗两精流程。试验原则流程见图 2。

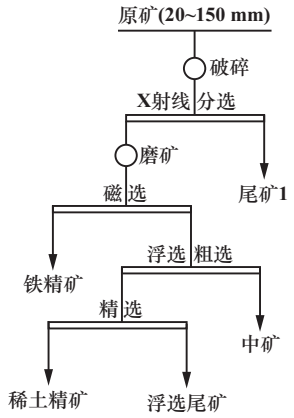


图 2　试验原则流程

Fig. 2　Basic flowchart of test

采用俄罗斯 РАДОС 公司 СРФ-4-150 型 X 射线分选机进行抛尾富集,首先对矿石给料粒度与分选效果进行研究,再进行适宜粒度条件下稀土品位与分选阈值研究,然后将分选矿石进行磁选与浮选处理。破碎阶段筛下产物(-20 mm)以及各类尾矿另行处理。

2 结果与讨论

2.1 稀土元素共伴生度及可选性分析

2.1.1 稀土元素共伴生度

随机选取 100 块样品,经破碎制样后送交包头稀土研究院理化检测中心,开展主要稀土元素(La、Ce、Pr、Nd)赋存状态分析,通过化学分析揭示 La、Ce、Pr、Nd 元素共伴生度。样品中 La、Ce、Pr 和 Nd 元素含量线性关系如图 3 所示。由图 3 可知,稀土矿样中,Ce 与 La、Pr、Nd 的相关系数分别为 0.906、0.953、0.897。稀土各元素之间具有极高的共伴生关系,在采用 X 射线进行分选时,可以采用稀土元素 Ce 的特征峰面积与无干扰背景面积的比值作为分选参考量,利用其高共伴生度,在富集 Ce 的同时共同富集其他稀土元素。

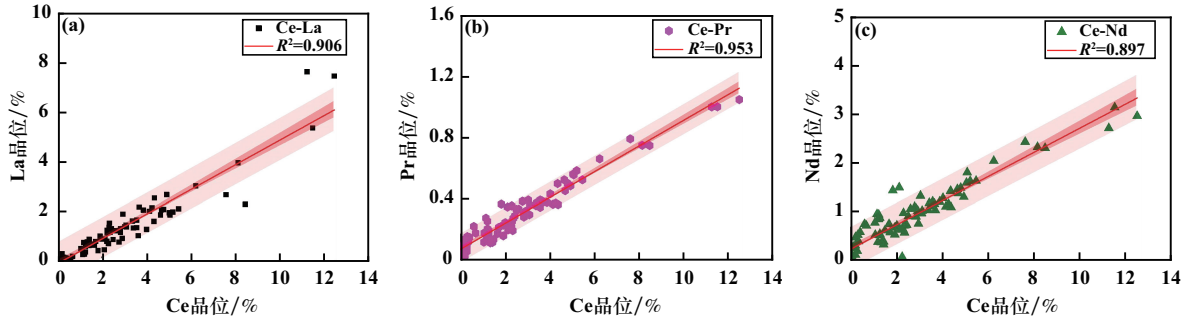


图 3 样品中 La、Ce、Pr 和 Nd 元素含量线性关系

Fig. 3 Linear relationship between Ce and La, Pr, Nd contents in sample

2.1.2 稀土矿石可选性分析

采用 TR2000 型 X 射线荧光仪(经 Ce 标样校准)对 40 件稀土矿石样品进行模拟分选试验,XRF 检测与 ICP 化学分析的 Ce 品位线性关系如图 4 所示。由图 4 可知,XRF 检测与 ICP 化学分析的 Ce 品位线性拟合性高,相关系数为 0.731。通过标样校准后的荧光仪在拣选目标元素方面表现出较高的可信度。

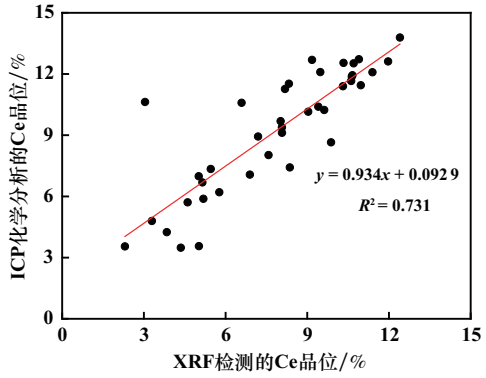


图 4 XRF 检测与 ICP 化学分析的 Ce 品位线性关系

Fig. 4 Linear relationship between XRF measurement and ICP elemental analysis of Ce content

通过手持荧光仪测定 100 件稀土矿石样品中 Ce 品位及矿块质量,计算获得选矿产率、回收率和富集比的关系,如图 5 所示。基于三者的矿物学关系,构建 X 射线分选富集经验模型,揭示分选参数间的量化规律。由图 5 可知,富集比大于 1.0 时,产率和回收率呈下降趋势;回收率总是高于产率。例如,Ce 富集比 1.4 时,产率约 60%,回收率约 80%;Ce 富集比 2.0 时,产率约 20%,回收率约 40%。在实际工业生产中,可以通过调整产率大小,得到理论范围内目标元素任意富集比的富矿产品。

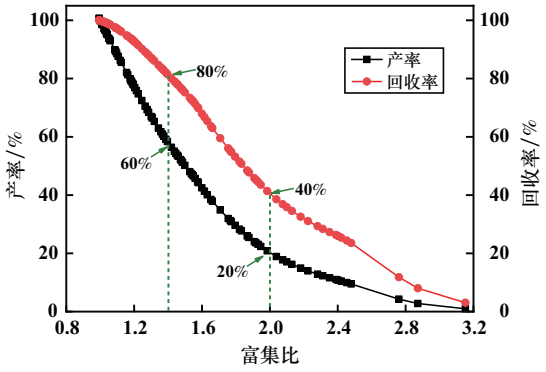


图 5 Ce 元素选矿产率、回收率与富集比的关系

Fig. 5 Relationship between yield, recovery and enrichment ratio of Ce element

2.2 稀土矿石 X 射线分选富集试验

2.2.1 给料粒度对分选效果的影响

试验开始前,对 X 射线分选机各项参数进行了优化调试,确定适宜的参数为:激发电压 45 kV、激发电流 40 mA、给矿频率 30 Hz、分离阈值 0.55。在该参数条件下,选取 20~35 mm、35~55 mm、55~75 mm、75~100 mm、100~150 mm 共 5 个粒级稀土矿块(各 50 块),进行 X 射线分选试验,X 射线分选粒度识别率如表 2 所示。结果表明,在适宜的分选条件下,X 射线分选机

表 2　XRF 分选粒度识别率

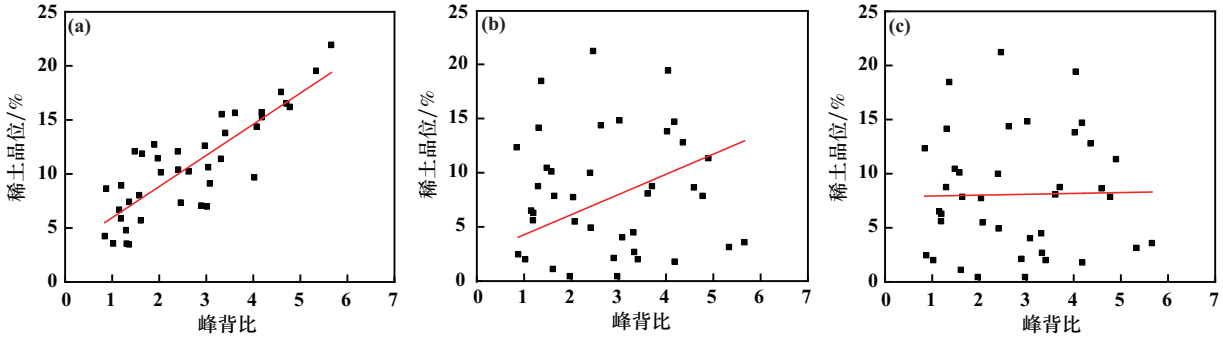
Table 2　Particle size recognition by XRF

粒级/mm	识别率/%
20~35	55
35~55	80
55~75	96
75~100	93
100~150	91

对矿块的识别率随着粒度增大整体呈递增趋势,55~75 mm、75~100 mm、100~150 mm 粒级的矿块识别率均超过 90%。虽然 X 射线分选机的标定识别粒度为 20~150 mm,但实际分选稀土矿石需粒级大于 35 mm 方可获得理想的识别效果。

2.2.2　峰背比对分选效果的影响

35~75 mm、75~100 mm、100~150 mm 粒级稀土品位与峰背比的关系如图 6 所示。稀土品位与峰背比的相关性随着给矿粒度增大显著减弱。35~75 mm 粒级稀土品位与峰背比呈显著线性关系。振动频率恒定时,矿粒尺寸增大,脉石矿物 X 射线荧光信号增强,致使探测器检测误差增大,进而影响检测精度。



(a) 35~75 mm; (b) 75~100 mm; (c) 100~150 mm

图 6　稀土品位与峰背比的关系

Fig. 6　Relationship between rare earth grade and peak-to-background ratio

将总质量约 1 500 kg 的稀土矿石破碎至 35~75 mm,再经筛分、混匀处理并均分为 3 份,进行 X 射线分选试验,结果见表 3。

表 3　X 射线分选试验结果

Table 3　XRF separation results

批次	产品名称	产率/%	REO 品位/%	回收率/%	富集比
1	精矿	63.25	9.44	94.03	1.48
	尾矿	36.75	1.03	5.97	
	原矿	100.00	6.35	100.00	
2	精矿	39.51	10.42	64.31	1.63
	尾矿	60.29	3.79	35.69	
	原矿	100.00	6.41	100.00	
3	精矿	22.76	12.37	43.12	1.89
	尾矿	77.24	4.80	56.78	
	原矿	100.00	6.53	100.00	

X 射线矿石分选富集比调整至 1.48 时,所得精矿 REO 品位适宜且尾矿 REO 含量很低(1.03%)。尽管富集比 1.63 和 1.89 条件下尾矿 REO 含量分别增至 3.79%和 4.80%,但其块状颗粒形态仍满足尾矿堆存及铁/萤石综合回收要求,证实 X 射线分选模型可实现稀土矿高效预富集,尾矿资源化利用路径明确,为工业化应用提供了技术支撑[7]。

2.3　稀土矿物弱磁选-浮选试验

2.3.1　稀土矿物弱磁选试验

以 X 射线分选富集所得 REO 品位 9.44%的稀土粗精矿为原料,磨矿至-0.074 mm 粒级占 95%后,进行弱磁选试验,磁场强度对弱磁选精矿指标的影响如图 7 所示。

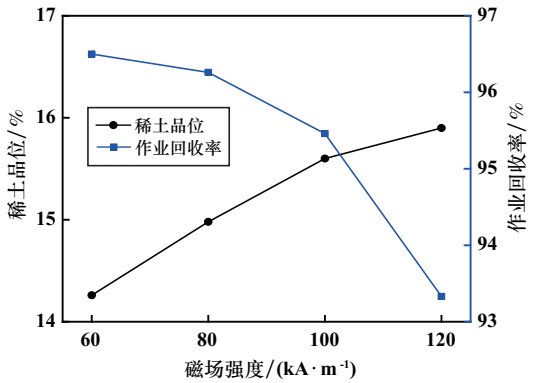


图 7　磁场强度对弱磁选精矿指标的影响

Fig. 7　Effect of magnetic field intensity on LIMS concentrate indicators

稀土品位与磁场强度呈正相关,作业回收率则与磁场强度呈负相关。磁场强度 90~100 kA/m 时,稀土品位和回收率均处于较优平衡区间;磁场强度高于

100 kA/m 后，回收率显著下降，磁场强度低于90 kA/m时，稀土品位位于经济临界值以下。

磨矿细度-0.074 mm 粒级占95%、磁场强度95 kA/m条件下的弱磁选试验结果见表4。该条件下，稀土精矿REO品位和作业回收率分别达到15.33%和96.99%，尾矿REO品位降至0.71%且作业回收率仅3.01%。该磨矿细度条件下稀土精矿适于直接浮选精选。

表4 稀土矿物弱磁选试验结果

Table 4 LIMS results of rare earth minerals

产品名称	产率/%	品位/%		作业回收率/%	
		REO	TFe	REO	TFe
稀土精矿	59.73	15.33	8.03	96.99	16.73
稀土尾矿	40.27	0.71	58.68	3.01	83.27
给矿	100.00	9.44	28.38	100.00	100.00

弱磁选尾矿中TFe品位达58.68%、回收率为83.27%。对该尾矿进行了铁物相分析，结果见表5。

表5 稀土尾矿铁物相分析结果

Table 5 Analysis of iron phase in rare earth tailings

铁物相	含量(质量分数)/%	分布率/%
磁铁矿中铁	44.31	75.51
赤铁矿中铁	9.15	15.59
碳酸铁中铁	2.12	3.61
硫铁矿中铁	0.38	0.65
硅酸铁中铁	2.72	4.64
全铁	58.68	100.00

稀土尾矿中铁矿物以磁铁矿、赤铁矿为主(占91.10%)，不可利用铁占9.90%。磁选可高效脱除铁并获得高品位稀土精矿，尾矿中铁经磨矿-磁选或浮选可获得更高品位的铁精矿。

2.3.2 稀土精矿浮选试验

在矿浆浓度(质量分数)40%、矿浆pH值8.0~8.5、温度50 ℃条件下，对磁选精矿进行了开路浮选，结果见表6，试验流程见图8。磁选精矿经一粗一精浮选，可获得产率19.89%、REO品位61.23%、作业回收率79.81%的稀土精矿，较包头某稀土选矿厂当前工艺指标(精矿REO品位50%、回收率55%)显著提升。

表6 开路浮选试验结果

Table 6 Open-circuit flotation test results

产品名称	产率/%	REO品位/%	作业回收率/%
稀土精矿	19.89	61.23	79.81
中矿	67.72	2.79	12.35
浮选尾矿	12.39	12.17	9.84
给矿	100.00	15.33	100.00

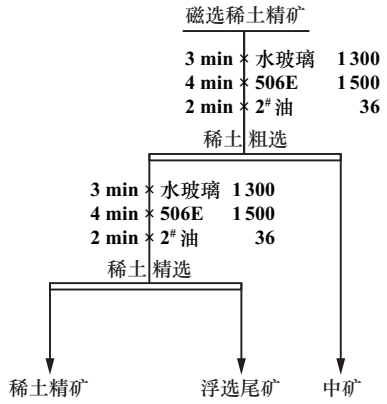


图8 开路浮选试验流程

Fig. 8 Flowchart for open-circuit flotation test

3 结论

1) 白云鄂博深部稀土矿石的REO品位6.05%，TFe品位28.36%，主要脉石矿物为石英、钠辉石、钠闪石、萤石、白云石等，在厘米尺度下，稀土与铌矿物呈现出集中富集矿化规律，稀土与铌矿物以条带状分布或星散状集中分布，矿物的分布特征有利于分选富集。

2) 采用X射线分选，获得了REO品位9.44%、作业回收率94.03%、富集比1.48的稀土粗精矿；该粗精矿经磁选-浮选，获得了产率19.89%、REO品位61.23%、作业回收率79.81%稀土精矿；弱磁选尾矿铁品位58.68%、作业回收率83.27%。

3) 与常规工艺相比，X射线分选-弱磁选-浮选工艺可提高入磨前稀土品位、减少浮选作业流程，有利于降低磨矿量、提高稀土回收率，为稀土矿物的高效利用提供了新思路。

参考文献(References)：

[1] 杨双福，李希明，潘冬泽，等. X射线智能分选机预选新疆某低品位铜矿[J]. 矿冶工程，2022，42(5)：86-87.
YANG Shuangfu, LI Ximing, PAN Dongze, et al. Application of X-ray intelligent sorter in pre-concentration of low-grade copper ore from Xinjiang[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(5): 86-87.

[2] 孙映祥. 我国绿色矿山建设研究现状综述与思考[J]. 中国国土资源经济，2020，33(9)：35-40.
SUN Yingxiang. A summary and reflection on the research status of green mine construction in China[J]. Natural Resource Economics of China, 2020, 33(9): 35-40.

[3] 秦家思，李侠，贾艳，等. 超导高梯度磁选预处理提高白云鄂博矿稀土矿浮选效率研究[J]. 稀土，2021，42(5)：144-151.
QIN Jiasi, LI Xia, JIA Yan, et al. Study on improving the rare earth floatation efficiency in Bayan Obo mine with superconducting high gradient magnetic sepatation[J]. Chinese Rare Earths, 2021, 42(5): 144-151.

(下转第86页)

3 结语

1）与湿式制粉工艺相比，干式制粉简化了工艺流程，可大幅降低项目投资、生产成本和能耗；悬浮磁化焙烧前的干式制粉是绿色、低碳工艺。

2）干式制粉工艺中，高压辊磨工作压力是关键参数，它对料饼形状和紧实状态有直接影响；与单次挤压相比，多次挤压主机电耗明显降低。

3）铁矿石干式制粉稳定试验结果表明，工作压力4 MPa，主机电耗约6.74 kWh/t，循环负荷约330%。

参考文献(References)：

[1] 唐晓玲，陈毅琳，韩跃新，等. 酒钢粉矿悬浮磁化焙烧扩大试验研究[J]. 金属矿山，2019(2)：29-33.
TANG Xiaoling，CHEN Yilin，HAN Yuexin，et al. Expansion experimental study for suspension magnetization roasting in Jiugang powder ore[J]. Metal Mine，2019(2)：29-33.

[2] 魏霞，王星亮. 某企业粉矿悬浮磁化焙烧经济效益分析[J]. 矿业工程，2021，19(5)：25-27.
WEI Xia，WANG Xingliang. Economic benefit analysis of suspended magnetization roasting of fine ore in a certain enterprise[J]. Mining Engineering，2021，19(5)：25-27.

[3] 王晓奇，姜晖. 酒钢悬浮磁化焙烧技术配套工艺及设施浅析[J]. 甘肃冶金，2024，46(1)：11-14.
WANG Xiaoqi，JIANG Hui. Analysis of supporting technology and facilities of suspension magnetization roasting technology in Jiusteel[J]. Gansu Metallurgy，2024，46(1)：11-14.

[4] 王景玉，张珂，胡沿东，等. 高压辊磨—干式分级—弱磁选集成系统工艺技术概述[J]. 金属矿山，2016(6)：101-106.
WANG Jingyu，ZHANG Ke，HU Yandong，et al. Overview on high pressure grinding roll-dry classification-low intenity magnetic separation integration system technology[J]. Metal Mine，2016(6)：101-106.

[5] 张珂，周伟，胡沿东，等. 干式粉磨分选集成系统及其可行性分析[C]//2016(第七届)中国矿业科技大会，2016：288-291.
ZHANG Ke，ZHOU Wei，HU Yandong，et al. Dry grinding and sorting integrated system and its feasibility analysis[C]//2016 (7th China Mining Science and Technology Conference)，2016：288-291.

引用本文：张志荣，陈毅琳，高泽宾. 弱磁性铁矿石干式制粉试验研究[J]. 矿冶工程，2025，45(6)：83-86.
ZHANG Zhirong，CHEN Yilin，GAO Zebin. Experimental study on powder preparation with weakly magnetic iron ore by dry milling[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2025，45(6)：83-86.

(上接第82页)

[4] ROBBEN C，WOTRUBA H. Sensor-based ore sorting technology in mining：Past，present，and future[J]. Minerals，2019，9(9)：523.

[5] 费泽通，袁致涛，孟庆有. 新疆某钛铁矿重选粗精矿工艺矿物学及分选可行性研究[J]. 矿冶工程，2025，45(1)：61-64.
FEI Zetong，YUAN Zhitao，MENG Qingyou. Process mineralogy and separation feasibility of rough concentrate from gravity separation of ilmenite ore from Xinjiang[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2025，45(1)：61-64.

[6] 张倩，陈辰，王文才，等. X射线分选机预选钍矿石的试验研究[J]. 矿冶，2021，30(4)：20-25.
ZHANG Qian，CHEN Chen，WANG Wencai，et al. Experimental study on pre-enrichment of thorium minerals by an X-ray sorter[J]. Mining and Metallurgy，2021，30(4)：20-25.

[7] 何从行，欧也斐，颜顺德. 康家湾铅锌金银矿预选抛废工艺研究及应用[J]. 矿冶工程，2022，42(3)：67-69.
HE Conghang，OU Yefei，YAN Shunde. Pre-concentration process for waste rock discarding in beneficiation of lead-zinc-gold-silver ore in Kangjiawan[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2022，42(3)：67-69.

[8] 罗仙平，宁湘菡，王涛，等. 智能分拣选矿技术的发展及其应用[J]. 金属矿山，2019(7)：113-117.
LUO Xianping，NING Xianghan，WANG Tao，et al. Development and application of intelligent picking technology[J]. Metal Mine，2019(7)：113-117.

引用本文：王慎正，潘晓光，康穗，等. 基于X射线分选高效回收白云鄂博稀土矿中的稀土和铁[J]. 矿冶工程，2025，45(6)：78-82.
WANG Shenzheng，PAN Xiaoguang，KANG Sui，et al. Efficient recovery of rare earth and iron from Bayan Obo rare earth ore based on XRF sorting[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2025，45(6)：78-82.