doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.009
引用格式：鲁恒润，杨义红，李翔. 磁选—XRT联合工艺强化低品位铜多金属硫化矿预选抛废[J]. 矿冶，2026，35(1)：59-64.
LU Hengrun, YANG Yihong, LI Xiang. Enhanced pre-concentration and waste removal from low-grade copper-polymetallic sulfide ore using a combined magnetic separation-XRT process[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 59-64.

磁选—XRT联合工艺强化低品位铜多金属硫化矿预选抛废

鲁恒润 杨义红 李 翔
（北矿机电科技有限责任公司，北京 100160）

摘 要：针对某低品位复杂多金属硫化矿石（Cu品位0.195%，Fe品位12.83%），基于其工艺矿物学特征与X射线透射（XRT）成像分析，研究了预选抛废的可选性。结果表明，矿石中有用矿物嵌布粒度较粗，呈团状、条带状结构，且含磁黄铁矿，Cu、Fe元素伴生关系明显，具备预选条件。单一XRT分选试验表明，抛废率30.96%时，尾矿Cu品位降至0.058%，精矿Cu回收率达90.24%，证实其XRT可选性。磁选试验显示，矿石具弱磁性，强磁选可获部分高铜产物，但单一磁选抛废效果有限。进一步开展磁选联合XRT分选试验，Cu回收率提升至93.20%，较单一XRT分选提高约3个百分点，联合工艺能更有效地实现预选抛废与铜元素回收。

关键词：低品位铜矿；X射线透射分选；磁选；预选抛废；联合分选
中图分类号：TD952 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）01-0059-06

Enhanced pre-concentration and waste removal from low-grade copper-polymetallic sulfide ore using a combined magnetic separation-XRT process

LU Hengrun YANG Yihong LI Xiang
(BGRIMM Machinery and Automation Technology Co. Ltd., Beijing 100160, China)

Abstract: This study investigates the feasibility of pre-concentration and waste removal for a low-grade complex polymetallic sulfide ore (with 0.195% Cu and 12.83% Fe) based on its process mineralogy and X-ray transmission (XRT) imaging characteristics. Results indicate that the valuable minerals are coarsely disseminated, exhibiting massive and banded structures. The ore contains pyrrhotite, and a clear association exists between Cu and Fe elements, providing favorable conditions for pre-concentration. Single XRT sorting tests demonstrated that at a waste rejection rate of 30.96%, the Cu grade in the tailings decreased to 0.058%, while the Cu recovery in the concentrate reached 90.24%, confirming the ore's amenability to XRT sorting. Magnetic separation tests revealed the ore's weak magnetic properties; although high-intensity magnetic separation could yield a partial high-Cu product, single magnetic separation alone showed limited effectiveness for waste removal. Further tests employing a combined magnetic separation and XRT sorting process increased the Cu recovery to 93.20%, representing an improvement of approximately 3 percentage points compared to single XRT sorting. The combined process proves more effective for pre-concentration, waste removal, and copper recovery.

Key words: low-grade copper ore; X-ray transmission (XRT) sorting; magnetic separation; pre-concentration and waste removal; combined sorting

收稿日期：2025-02-14
第一作者：鲁恒润，硕士，高级工程师，主要从事智能矿冶装备研发工作。E-mail：l_hengrun@bgrimm.com

铜作为重要的战略性金属，广泛应用于工业、农业与国防等领域，是我国对外依存度较高的矿产之一。我国铜矿资源具有分布集中、规模偏小、类型多样、品位偏低、共伴生组分复杂等特点，其中低品位矿床占比高，铜品位大于1%的储量仅占总量约三分之一，且多数矿床因技术与经济因素难以有效利用[1]。预选抛废技术可在碎磨与浮选前预先剔除废石，实现原矿预富集，具有降低处理量、提升入选品位、节约成本等优势[2]。目前粗颗粒预选方法主要包括人工拣选、光电分选、磁选、重选等。近年来，基于X射线透射（XRT）技术的智能分选设备已成功应用于钨、铅锌、钼等有色金属矿预选，以及煤矸石分离等领域[3-12]，并逐步扩展至磷矿[4]、稀贵金属矿[8,9]及铁矿[11]的抛废作业，为矿石高效预选提供了智能化、环保型解决方案。

然而，铜元素原子序数较低，X射线透射特征不明显，且常与多种矿物紧密共生，增加了分选难度。因此，针对复杂低品位铜矿石，需结合其物理特性（如颜色、纹理、透射性、磁性等）差异，采用单一或组合分选工艺以提升抛废效果。本文研究对象为某低品位铜多金属硫化矿，其品位低、组分复杂，但工艺矿物学研究表明，有用矿物嵌布粒度较粗，结构以团状、条带状为主，并含有磁黄铁矿，铜、铁元素具一定伴生关系，为预选抛废提供了有利条件。为此，本文提出磁选联合XRT的预选抛废工艺，旨在实现铜资源的高效回收。

1 试验部分

1.1 原料性质

试验矿样取自某铜矿山，主要目标回收金属为铜。原矿矿物组成定量检测结果（表1）表明，矿石中含大量黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿等金属硫化物，以及石英和黏土矿物等脉石成分。工艺矿物学分析显示，铜矿物主要与黄铁矿共生，其次与石英、云母等脉石矿物连生，矿石嵌布粒度以中细粒为主。

表1 原矿矿物定量检测结果

Table 1 Quantitative detection results of raw ore minerals

矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
黄铜矿	1.059	黑云母	3.963	石	0.226
铜蓝	0.08	金云母	2.624	钛铁矿	0.004
铜矿	0.017	角闪石	1.171	磁铁矿	0.28
砷铜矿	0.01	阳起石	1.591	褐铁矿	2.946
黄铁矿	24.151	透闪石	1.41	方解石	1.279
磁黄铁矿	4.628	次透辉石	2.105	菱铁矿	0.153
闪锌矿	0.388	透辉石	0.79	白云石	0.213
毒砂	0.016	钙铁榴石	0.998	铁白云石	0.292
方铅矿	0.012	钙铝榴石	2.776	磷灰石	0.132
铅矾	0.031	绿帘石	2.908	纤磷钙铝石	0.01
砷铅铁矿	0.057	沸石	0.386	水磷铝铅矿	0.102
自然	0.012	橄榄石	0.001	黄钾铁矾	0.135
叶碲矿	0.003	绿泥石	4.089	石膏	0.025
白钨矿	0.063	蛇纹石	0.615	萤石	0.046
黑钨矿	0.006	高岭石	0.364	水硬铝石	0.035
辉钼矿	0.004	滑石	0.402	独居石	0.004
石英	20.298	锆石	0.012	磷钇矿	0.001
长石	4.496	金红石	0.069	其他	0.741
白云母	11.674	白钛石	0.097	合计	100.0

原矿经破碎筛分后，分为−12 mm和12~70 mm两个粒级，其中12~70 mm粒级作为预选分选机的给料。粒度分布及主要金属元素品位见表2。12~70 mm矿石占原矿总量的84.97%（本研究仅针对该粒级开展可选性研究），其铜品位为0.195%，铁品位为12.83%，属典型的低品位复杂多金属矿石，开展预选抛废对提高产品质量、实现节能降耗具有重要意义。

图1为矿石的X射线透射图像，其中含金属成分的矿物颗粒呈较低灰度，脉石及废石颗粒则呈较高灰度，二者差异肉眼可辨。结合矿石的工艺矿物学特征可知，该矿石中有用矿物嵌布粒度较粗，结构以团状、条带状为主，这为X射线透射分选提供了有利条件。

表 2　原矿的粒度分布及主要金属元素品位

Table 2　Particle size distribution and main metal element grades of raw ore

粒度/mm	重量/kg	占比/%	品位/%				
			Cu	Fe	Mn	W	S
−12	69	15.03	0.210	18.80	0.043	0.160	−
12~70	390	84.97	0.194	11.78	0.055	0.090	−
全粒级	459	100.0	0.195	12.83	0.530	0.100	14.797

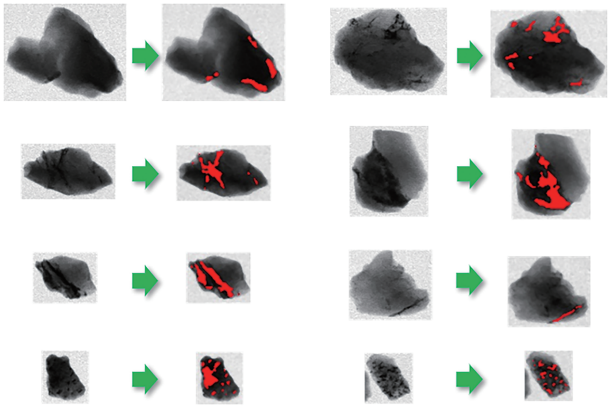


图 1　矿石的 X 射线透射图像

Fig. 1　X-ray transmission images of ore

1.2　试验方法

为系统探讨该低品位铜多金属矿预选抛废的可行性，首先开展了工艺矿物学与 X 射线透射（XRT）图像特征分析。结果表明，矿石在 XRT 图像中呈现出较为明显的矿物斑块特征，具备 XRT 分选的基本条件。此外，矿石中含有磁黄铁矿，且工艺矿物学分析显示铜、铁元素具有一定的伴生关系，因此亦可考虑采用磁选进行预选抛废。

基于上述分析，设计了 XRT 分选、磁选以及二者联合分选的试验流程，旨在系统比较不同分选技术对该低品位铜多金属矿预选抛废的效果，并验证其技术可行性。

1.2.1　X 射线透射（XRT）分选原理与试验装置

XRT 分选技术主要依据朗伯 - 比尔定律。X 射线的衰减程度与穿透物质的等效原子序数、密度、厚度以及入射 X 射线光子强度等因素相关，其衰减规律可用公式（1）表示：

$$I=I_0e^{-\mu t} \tag{1}$$

式中，μ 为线吸收系数；I_0 为 X 射线初始强度；I 为穿透物质后的 X 射线强度；t 为物质厚度。

分选模型的建立基于伪双能 X 射线透射系统，该系统同步采集矿石的高低能图像信息。通过分析图像数据，提取矿物斑块的大小、形态等特征，并可利用相应算法计算有效原子序数等信息，从而依据矿石组分或品位的差异实现分选。

试验用矿石智能分选机（SmaRay-1200 型）装置示意图如图 2 所示。矿石经振动布料器均匀输送至皮带机，随皮带运动通过射线区域。X 射线组件对通过的矿石进行光谱照射与探测，探测数据传送至核心处理器进行分析与品位判断，最终由执行机构完成有价矿石与废石（脉石或围岩）的分离。

1.2.2　磁选试验装置

磁选试验用永磁筒式磁选机（CT0506）装置示意图如图 3 所示。矿石随皮带运输进入磁场区域，在磁场作用下产生分离：强磁性或高铁含量矿石因受较大磁场力作用，被吸附在磁滚筒皮带表面并随其运转，

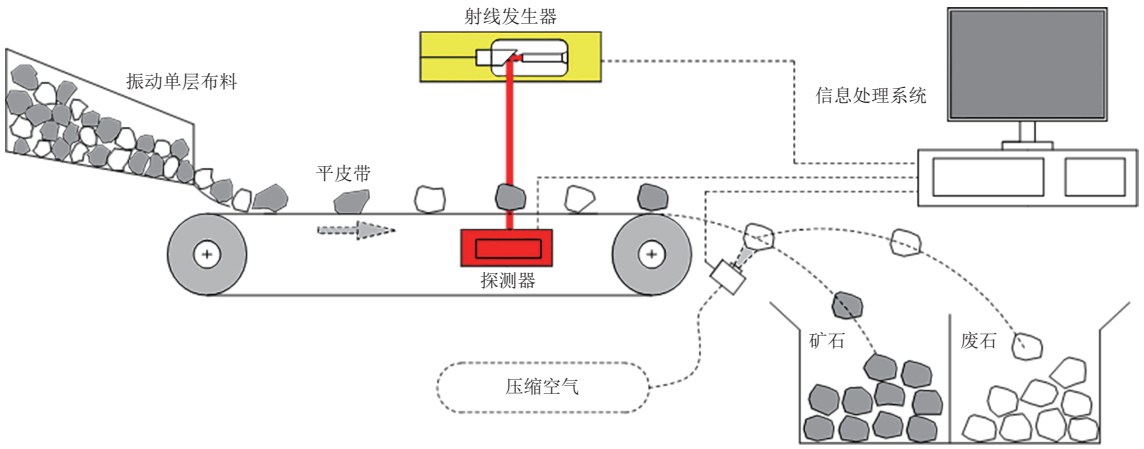


图 2　智能分选机装置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of intelligent sorting machine setup

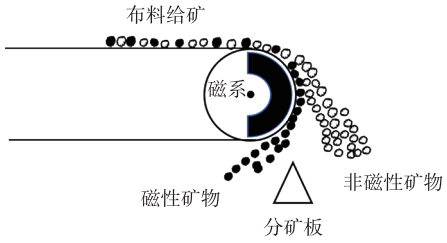


图3 永磁筒式磁选装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of permanent magnetic drum separator

作为精矿排出；废石则因运动惯性被直接抛出，从而实现磁性矿物与非磁性矿物的分离。

2 结果与讨论

2.1 XRT 预选抛废

主要考察了在不同抛废率条件下，XRT分选对尾矿品位控制及金属回收能力的影响。试验每次投矿量为100 kg，通过振动给料机以恒定时间向分选机给料。通过调节分选过程参数，实现了不同抛废率的控制。分选所得精矿与尾矿分别经过取样、破碎、制样与化学分析，并计算产率、回收率等指标。

不同抛废率条件下尾矿Cu品位和Cu回收率如图4所示。由图4可知，当抛废率为22.55%时，尾矿Cu品位为0.040%，精矿Cu回收率达94.5%；抛废率为30.96%时，尾矿Cu品位为0.058%，精矿Cu回收率为90.24%；抛废率为38.41%时，尾矿Cu品位升至0.071%，精矿Cu回收率则为90.66%。结果表明，随着抛废率的提高，尾矿Cu品位相应上升，富集比增大。

为进一步探究粒度对分选效果的影响，对抛废率为30.96%的试验所得尾矿进行了粒度分级（分为12~25 mm、25~40 mm、40~70 mm三个粒级）并分别测定其品位，结果如表3所示。由表3可知，尾矿中各粒级分布不均匀，其中40~70 mm粒级占比最高，12~25 mm粒级占比最低。12~25 mm尾矿Cu品位为0.060%，25~40 mm尾矿Cu品位为0.036%，40~70 mm尾矿Cu品位为0.066%。可见，25~40 mm粒级分选效果最好，而40~70 mm粒级尾矿品位较高，表明该粒级分选控尾效果相对偏差。因此，适当降低入料矿石的粒度有助于提升整体分选效率。

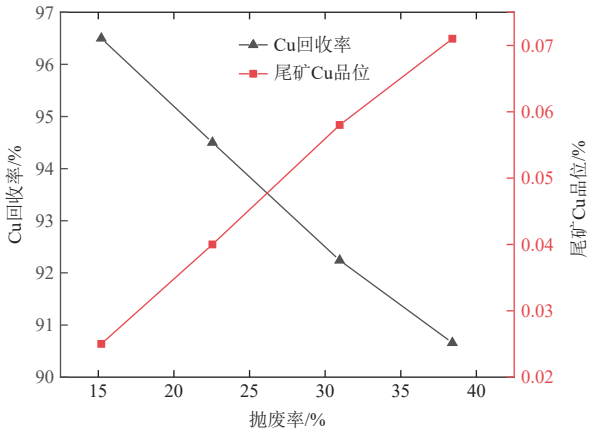


图4 不同抛废率条件下尾矿Cu品位和Cu回收率

Fig. 4 Cu grade and Cu recovery rate of tailings obtained under different waste rejection rates

表3 不同粒级尾矿的品位与回收率

Table 3 Grade and recovery rate of tailings in different particle size ranges /%

产品名称	产率	品位		回收率	
		Cu	Fe	Cu	Fe
尾矿 12~25 mm	4.53	0.060	4.37	1.48	1.74
尾矿 25~40 mm	7.05	0.036	4.58	1.38	2.83
尾矿 40~70 mm	19.38	0.066	5.01	6.96	8.52
尾矿全粒级	30.96	0.058	4.82	9.76	13.09
精矿	69.04	0.293	14.35	90.24	86.91
原矿	100.0	0.220	11.40	100.0	100.0

2.2 磁选抛废

在带速恒定为1.5 $m \cdot s^{-1}$的条件下，对原矿破碎筛分后得到的12~70 mm块矿分别进行了3 000、5 000和8 000 GS（1 Gs=10^{-4} T，下同）三种磁感应强度的磁选试验，结果见表4。由表4可知，当磁场强度由3 000 GS逐步提升至8 000 GS时，精矿产率相应从7.49%增至16.82%，但精矿中Cu品位由0.900%逐步下降至0.650%，同时尾矿中Cu品位由0.197%相应降至0.169%，Cu回收率则从26.95%提升至43.74%。试验表明，磁感应强度的提高虽有助于提高金属回收率和抛废能力，但也会导致精矿品位下降。特别是当磁感应强度从5 000 GS进一步提高至8 000 GS时，精矿产率和回收率的增幅明显放缓，说明单纯依靠提高磁场强度对分选效率的提升作用趋于有限。这进一步印证了矿石中铜、铁元素的密切伴生关系：随着更多弱磁性矿物进入精矿，其铜品位被相应稀释。综合来看，该矿石中的弱磁性矿物含有较高品位的铜，采用强磁选工艺可有效分选出一部分高铜精矿，为预选抛废提供了可行的技术路径。

2.3 磁选联合 XRT 分选抛废

基于磁选试验结果，该矿石中含有一定比例的磁性矿物，且在5 000 GS磁感应强度下可获得较优的分选效果。为进一步提升整体分选效率，设计了

表 4　不同磁感应强度下的磁选试验结果

Table 4　Magnetic separation test results under different magnetic induction intensities

场磁感应强度/GS	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Cu	Fe	Cu	Fe
3 000	精矿	7.49	0.900	20.00	26.95	13.61
	尾矿	92.51	0.197	10.27	73.05	86.39
	原矿	100.0	0.250	11.00	100.0	100.0
5 000	精矿	13.20	0.700	16.17	36.97	19.41
	尾矿	86.80	0.182	10.21	63.03	80.59
	原矿	100.0	0.250	11.00	100.0	100.0
8 000	精矿	16.82	0.650	14.50	43.74	22.18
	尾矿	83.18	0.169	10.29	56.26	77.82
	原矿	100.0	0.250	11.00	100.0	100.0

备注：1 Gs=10^{-4} T。

磁选与XRT联合分选试验，以验证联合工艺的可行性。试验采用“先磁选后XRT分选”的联合抛废工艺，即原矿先经磁选预选，所得尾矿再进入X射线分选机进行二次分选。磁选联合XRT分选试验结果如表5所示。由表5可知，在抛废率为28.41%的条件下，尾矿Cu品位为0.056%，精矿Cu品位为0.305%，Cu回收率达93.20%，表明该联合工艺在适度抛废的前提下，显著提高了铜的回收率，较单一XRT分选效果更为优越。

表 5　磁选联合XRT分选试验结果

Table 5　Test results of combined magnetic separation and XRT sorting　/%

产品名称	产率	品位		回收率	
		Cu	Fe	Cu	Fe
光电尾矿	28.41	0.056	4.62	6.80	12.00
磁选精矿	12.62	0.700	16.17	37.76	18.66
光电精矿	58.97	0.220	12.86	55.44	69.34
总精矿	71.59	0.305	13.44	93.20	88.00
原矿	100.0	0.234	10.94	100.0	100.0

2.4　矿石可选性分析

图5为不同分选方案分选对比结果。如图5所示，相较于XRT分选，磁选精矿产率为13.20%，Cu回收率仅为36.97%，但其精矿Cu品位较高（0.700%），同时尾矿Cu品位仍达0.182%。这表明磁选虽能有效分选出一部分含铜的磁性矿物，但剩余尾矿中仍含有较多铜资源，因此单一磁选工艺难以实现理想的预选抛废效果。在相近抛废率条件下，单一XRT分选与联合分选均能较好控制尾矿中Cu品位，但联合分选的回收效果更优。联合工艺通过磁选先行回收部分高品位铜磁性矿物，再对磁选尾矿进行XRT分选，进一步回收其中的铜，可使Cu回收率从90.24%提升至93.20%，提高约3个百分点，同时Fe回收率也从

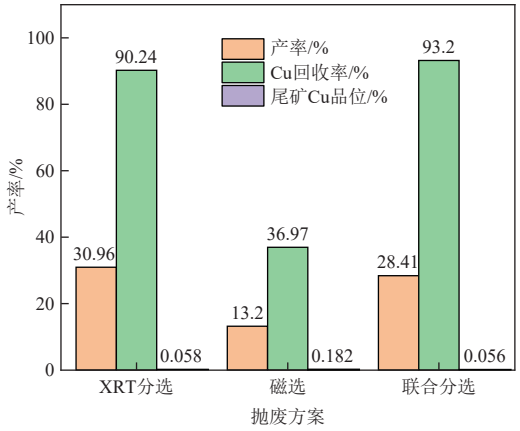


图 5　不同分选方案分选对比

Fig. 5　Comparison of different separation schemes

86.91%提升至88.00%，实现了金属回收效率的协同提升。

3　结论

1）试验用矿石属典型低品位复杂铜多金属矿，Cu品位0.195%，Fe品位12.83%，有用矿物嵌布粒度较粗，多呈团状、条带状分布，且含磁黄铁矿，Cu与Fe具一定伴生关系，具备预选抛废的基础条件。

2）XRT分选试验表明，试验用矿石具备良好的XRT可选性，在抛废率30.96%时，尾矿Cu品位为0.058%，精矿Cu回收率达90.24%。磁选试验显示该矿石具弱磁性，但单一磁选难以实现高效抛废。

3）磁选联合XRT分选可进一步提升铜回收效果。联合工艺使Cu回收率从90.24%提高至93.20%，提升约3%。磁选成本低、效率高，XRT分选对非磁性矿物识别效果好，工业应用中可优先考虑采用磁选联合XRT工艺进行该矿石的预选抛废。

参考文献

[1] 尹政道，刘殿文，于星才，等.“磨矿—筛分—筛下浮选”联合工艺回收高品位铜炉渣中的铜[J]. 矿冶，2025，34(2): 280-288.
YIN Z D, LIU D W, YU X C, et al. Integrated grinding-sieving-underflow flotation process for copper recovery from high-grade copper slag[J]. Mining and Metallurgy, 2025, 34(2): 280-288.

[2] 冯梦菲，谢海云，宋紫欣，等. 预选抛废技术发展现状[J]. 矿冶，2024，33(3): 329-338.
FENG M F, XIE H Y, SONG Z X, et al. Development status of preconcentration discarding technology[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(3): 329-338.

[3] 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 X P, NING X H, WANG T, et al. Development and application of intelligent picking technology[J]. Metal Mine, 2019(7): 113-117.

[4] 余新文, 杨敏, 毛素荣, 等. X射线分选技术在磷矿石选矿中的应用研究[J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(9): 31-33, 39.
YU X W, YANG M, MAO S R, et al. Research on application of X-ray separation technology in beneficiation of phosphate rock[J]. Industrial Minerals & Processing, 2020, 49(9): 31-33, 39.

[5] 朱道瑶, 梁殿印, 史佩伟, 等. 矿石拣选技术和设备的研究和进展[J]. 矿山机械, 2016, 44(7): 5-10.
ZHU D Y, LIANG D Y, SHI P W, et al. Research and development of ore sorting technology and equipments[J]. Mining & Processing Equipment, 2016, 44(7): 5-10.

[6] 鲁恒润, 杨义红, 李翔. 基于X射线透射技术的某锡多金属矿预选抛废试验研究[J]. 有色金属工程, 2024, 14(10): 101-106.
LU H R, YANG Y H, LI X. Experimental study on the pre-separation and disposal of a certain tin polymetallic ore based on X-ray transmission technology[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(10): 101-106.

[7] 朱道瑶, 杨义红, 冉红想, 等. SmaRay智能矿石分选机研制与应用研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(3): 130-134.
ZHU D Y, YANG Y H, RAN H X, et al. Development and application of SmaRay intelligent ore sorter[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2022(3): 130-134.

[8] 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 Q, CHEN C, WANG W C, et al. Experimental study on pre-enrichment of thorium minerals by an X-ray sorter[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(4): 20-25.

[9] 欧阳健强, 吴富姬, 吴鸿辉, 等. 智能射线矿石分选机在钨矿预处理中的研究与应用[J]. 中国钨业, 2022, 37(1): 67-72, 78.
OUYANG J Q, WU F J, WU H H, et al. Research and application of intelligent ray ore separator in tungsten ore pretreatment[J]. China Tungsten Industry, 2022, 37(1): 67-72, 78.

[10] 刘承帅, 王晓明. 磁选技术应用进展[J]. 现代矿业, 2017, 33(7): 38-44.
LIU C S, WANG X M. Application progress of magnetic separation technique[J]. Modern Mining, 2017, 33(7): 38-44.

[11] 韩跃新, 张小龙, 高鹏, 等. 中国铁矿石选矿技术发展与展望[J]. 金属矿山, 2024, 53(4): 1-24.
HAN Y X, ZHANG X L, GAO P, et al. Development and prospect of iron ore processing technologies in China[J]. Metal Mine, 2024, 53(4): 1-24.

[12] 徐海阳, 王子扬, 韩呈, 等. 磁选工艺自动化现状及展望[J]. 现代矿业, 2023, 39(3): 113-115.
XU H Y, WANG Z Y, HAN C, et al. Present situation and prospect of magnetic separation process automation[J]. Modern Mining, 2023, 39(3): 113-115.