

光电预选抛废技术在废石回收中的应用现状

卢致明^{1,2,3}, 姚若愚^{1,2}, 童雄^{1,2}, 宋强^{1,2}

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 金属矿尾矿资源绿色综合利用国家地方联合工程研究中心, 云南 昆明 650093; 3. 云南锡业股份有限公司大屯锡矿, 云南 个旧 661000)

摘要: 中国矿产资源储量丰富, 但整体上呈现品位低、嵌布粒度细、成分复杂等特点。随着矿产资源消耗量的增加, 产生的废石量也不断增加, 大量堆积的废石不仅占用了宝贵的土地资源, 还对环境造成了污染。因此, 废石的回收利用是提高资源利用率、节约矿产资源、保护生态环境的有效途径。其中, 提取废石中的有用组分是实现其最大化利用的关键, 而预先抛废则是高效利用废石的重要基础。详细介绍了光电选矿技术在废石预先抛废中的应用, 对比分析了X射线透射、图像色选、X射线表面辐射等不同光电预选技术的优缺点, 展望了光电选矿技术在预先抛废领域的未来发展。

关键词: 废石; 综合利用; 预先抛废; 光电选矿

doi:10.12476/kczhly.202501260010

中图分类号: TD924 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 04-0041-07

引用格式: 卢致明, 姚若愚, 童雄, 等. 光电预选抛废技术在废石回收中的应用现状[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(4): 41-47.

LU Zhiming, YAO Ruoyu, TONG Xiong, et al. Current application status of photoelectric pre-discarded technology in waste rock recovery process[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(4): 41-47.

截至2023年底, 中国已发现173种矿产, 是世界上矿产资源丰富且矿种较为齐全的国家之一, 但中国矿石资源总体呈现“贫细杂”的特点^[1], 共生矿产资源多, 优质资源相对匮乏。随着现代化进程的不断加快, 矿石资源开发强度持续加大, 矿石需求量也持续增长, 导致矿石入选品位越来越低。与此同时, 矿产资源开发不可避免地会产生大量的废石、尾矿等矿山固体废弃物, 不仅对环境造成破坏, 还导致资源的严重浪费。因此, 矿山废石的资源化利用已成为社会发展的必然趋势。

1 矿山废石概况

废石是在矿山开采和选矿过程中产生的固体

废弃物, 主要构成包括采矿剥离废石、预先抛除废石、选矿产生尾矿以及其他各类固体废弃物。其中, 采矿剥离废石是废石的主要来源^[2]。由于中国矿产资源的特性以及开发利用水平的限制, 矿产开采的采剥比相对较大。与非金属矿山相比, 有色金属矿山的采剥比更大, 通常质量比在1:(2~8)之间, 黄金矿山的采剥比甚至可达到1:(10~14), 且随着矿山开采深度的不断加深, 掘进和剥离的围岩数量持续增加^[3]。

截至2024年, 中国非煤矿山每年开采产生的废石量超过 4×10^9 t, 历史累计存量巨大, 堆存点接近6万处, 占地面积超过3 333.33 km²。与此同时, 金属矿山每年产生的废石量约 3×10^9 t, 累计堆存量超过 6×10^{10} t。非金属矿开采(不包括煤

收稿日期: 2025-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52174252); 甘肃省科技重大专项(No. 22ZD6GK065)

作者简介: 卢致明(1984-), 男, 高级工程师, 研究方向为矿产资源综合利用。

通信作者: 童雄(1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向为复杂多金属难处理矿产资源综合利用。

炭) 每年产生的废石量约 $1\times 10^9\text{t}$, 累计堆存量也已突破百亿 $\text{t}^{[4]}$ 。

矿山废石的随意堆放造成了一系列负面影响, 不仅导致土地资源和矿石资源的大量浪费, 还造成了生态环境的破坏^[5]。矿产资源开发产生大量废石, 处置堆放不当可能导致水土流失, 增加泥石流和滑坡的风险; 还会改变局部生态环境, 影响植物生长和动物栖息; 某些矿山废石中可能含有重金属等有毒有害物质, 若不加以处理, 可能对土壤和水体造成污染^[6]。

2 废石利用现状

尽管中国废石和尾矿的排放量仍持续增长, 但排放量增速已经放缓, 循环利用效率提高^[7]。据相关数据显示, 中国 20 多种矿产资源每年排放废石量达 $1.965\times 10^9\text{t}$, 而年利用废石量为 $3.49\times 10^8\text{t}$, 从“十二五”初期开始的十年间, 平均利用率从 11.76% 提高到了 17.77%, 提升了 6.01%^[4]。具体来看, 石墨、铝土矿、锡矿、锑矿、钨矿、煤炭、萤石、铅矿、硫铁矿和镍矿的废石循环利用率高于全国平均水平, 磷矿、锌矿、金矿、铁矿、锰矿、铜矿、稀土矿和钼矿的废石循环利用率则低于全国平均水平^[8]。

近年来, 在国家政策的引导和技术创新的推动下, 一些大型矿山企业已经开始重视尾矿和废石的资源化利用, 并取得了显著成效。这些企业积极开展综合处理利用工作, 显著提高了资源的综合利用率, 尤其是在排土场生态治理和土地复垦方面, 有效减缓了废石渣土堆存的增长速度。

然而, 由于开采技术和管理水平的限制, 金属矿产资源的整体利用率仍然较低^[9], 许多矿山企业对尾矿和废石的利用依然仅限于采空区回填、井下填充、筑路、制备尾砂砖和水泥等^[10], 不仅使用量有限, 且存在成本高和技术难度大等问题, 与规模化、产业化的经营目标还有一定差距, 资源化综合利用的潜力依然巨大。

3 废石回收工艺

当前, 矿山废石的综合利用已经涵盖了有用组分的提取、废石充填、生产建筑材料和土地复垦等多个方面^[11], 其中有用组分的提取是实现废石资源最大化利用的关键途径, 而预先抛废是回收废石中有用组分的关键环节。

预先抛废技术通过在磨矿作业前筛选并丢弃部分废石或低品位矿石, 实现原矿的预富集, 从而提高入选矿石的品位, 减少后续磨选作业的处理量, 进而显著提升选矿效率, 有效降低成本, 提高经济效益, 并减少环境污染^[12]。从选矿技术和成本效益的角度出发, 采用预先抛废技术, 筛除那些不含有用矿物的部分, 从而为后续的废石回收利用打下坚实的基础。根据矿石中不同矿物颗粒的密度、磁性、导电性、表面性质、颜色及放射性等的差异, 可分为重选抛废、磁选抛废、浮选抛废、光电选矿抛废以及联合工艺抛废^[13], 各预选抛废技术特性见表 1。其中光电预先抛废技术因其高效、低成本和环境友好的特点, 在矿石预抛废领域得到了广泛应用^[14]。

表 1 预选抛废技术特性^[15]
Table 1 Characteristics of preconcentration waste disposal technology

预选抛废技术名称	原理	优缺点	适用范围
手工拣选预选	通过工人目视和手工操作, 将矿石中的废石或低品位矿石挑选出	直观性强, 但分选效率低、人工成本高、工人劳动强度大	矿石外观特征明显、矿石品位差异较大、生产规模较小的矿山
光电预选	利用光电传感器检测矿石的颜色、反射率和透明度等光学特性, 再通过图像处理和模式识别技术实现有用矿物与废石的分离	精度高、节能环保、自动化程度高, 但设备成本高、技术复杂、对矿石表面要求高	矿石外观特征明显、矿石品位差异较大、生产规模较大的矿山, 特别是有色金属、贵金属和部分非金属矿石, 能够处理细粒级的矿石
跳汰预选	垂直交变介质中物料按密度差异进行分离	处理量大、操作简单、成本低, 但分选精度低, 只适用于粗、中粒矿石	密度差异较大的矿石
螺旋溜槽预选	利用水流在螺旋溜槽中的离心力和重力作用, 使矿石按密度差异进行分离	处理量大、操作简单、成本低, 但分选精度低, 只适用于细粒级矿石	适用于密度差异较大且有用矿物单体解离度高的矿石
磁力预选	利用矿物的磁性差异将磁性矿物与非磁性矿物分离	效率高、自动化程度高、成本低, 但矿种的局限性非常强	适用于磁性矿物以及部分有色金属矿石

光电选矿技术起源于20世纪初的奥地利，当时人们通过颜色差异对物料进行分选，但因为分选效率低下，其发展受到一定限制^[16]。直到20世纪80年代末至21世纪初，随着电子技术的快速发展，光电选矿技术有了较大突破，许多新型的光电分选机相继问世^[17]。

中国在20世纪60年代开始对光电选矿进行研究但由于当时对光电选矿技术的研究还处于初级阶段，所以并没有在实际生产中得到广泛应用；20世纪90年代后重新开始对光电选矿技术进行深入研究，并取得了一定进展，此后，光电选矿技术逐渐代替人工手选；近年来，随着传感器技术、人工智能等前沿科技的快速发展，光电选矿技术迎来了显著进步和广泛应用，诸如X射线透射、图像色选、激光诱导、X射线表面辐射、微波等技术，均在这一领域取得了突破性的发展^[18-19]。其中，X射线透射技术和图像色选技术因其高效、精准的分选能力，已成为光电分选机领域的主流应用技术^[20]。

光电选矿技术适用于绝大多数矿石的预选抛尾，且与传统的分选工艺相比，具有回收率高、分选精度高、高效节能等优点^[20]，具有广阔的应用前景；然而，该技术也存在如单台设备的处理量相对较低且对技术的依赖性较强等缺点。这些特点使得光电选矿技术在实际应用中需要综合考虑其优势和局限性，以实现较佳的选矿效果和经济效益。

3.1 单一光电预先抛废技术

3.1.1 X射线透射技术

X射线透射技术(XRT)是基于每种元素独有的特征X射线来实现矿废分离。当矿石被X射线照射时，会激发其产生特征X射线，通过测量这些特征X射线的能量和强度即可准确识别出矿石^[21]。一般的X射线透射分选机主要由以下几个系统组成：给料系统、照射探测系统、信号处理系统、分离执行系统、控制系统、安全系统^[22]。给料系统将待分选的物料均匀地输送到传送带上，确保物料能够稳定地单层通过照射和检测区域，当物料通过检测区域时，X射线源发出的X射线穿透物料，被下方探测器接收之后通过信号处理系统对信号进行分析处理，将其转换为矿石的密度、成分等特征信息，从而区分矿石组分或品位间的差异。再根据信号处理系统提供的分

选指令，通过喷吹高压空气或其他分离方式，将有用矿物与脉石矿物高效分离^[23]。

XRT技术可穿透矿石并获取其“全体积”信息，因此不受矿石的表面特征等因素影响，具有较强的普适性和准确性，可用于金、银、铜、铅、锌、钨、铋、钼等大部分低品位、复杂难选金属矿种，此外，对萤石、煤矿、磷矿等非金属矿也有较好的分选效果^[24]。

鲁恒润等^[25]针对某锡多金属矿，为实现对锡、锌、铅、铋等主要金属的预富集并抛除其中的大部分围岩或脉石矿物，采用XRT矿石智能分选机进行预先抛废，获得了抛废率50%，尾矿中Sn品位0.02%、Zn品位0.14%，精矿Sn回收率96%、Zn回收率91%的良好预选指标，有效地实现了预先抛废和主要金属矿物的高效富集。

张建强等^[26]采用XNDT-104智能分选机对云南某低品位白钨矿进行了预选抛废实验，将含 WO_3 平均品位为0.2%的原矿入选粒度控制在15~60 mm并进行水洗，处理量为45 t/h时，获得了抛废率50%以上，尾矿中 WO_3 品位0.04%以下，精矿 WO_3 品位0.3%~0.5%、回收率92%以上的入磨指标。

3.1.2 图像色选技术

色选技术主要借助可见光、紫外线、红外线等光源照射矿石，利用高清相机和探测器探测矿石中不同矿物的颜色、透明度、纹理、光泽、反射率及吸收率等表面特征差异区别矿废^[27]。该技术主要适用于颜色差异较为明显的矿种，如黑钨矿、金铋矿、铜铅矿等金属矿以及石英、萤石等非金属矿^[28]。

顾兆云等^[29]为了提升国外某红土型低品位锰矿石的利用价值，采用图像色选技术进行实验，经过二次光电选别流程，得到的精矿锰品位由22.42%提升至34.82%，锰回收率达到85.43%，抛废率达到43.13%。针对韶关某钨矿分选效率低的问题，冯伯翰等^[30]采用色选法对该钨矿石进行分选。在15~22 mm粒级之间，利用高清图像采集系统对钨矿进行采集和识别，可有效识别原矿中的含钨矿石、纯白色石英矿石和黑色黄岗岩废石并进行分选，准确率可达到99%以上，且分选量可达到2 500 kg/h以上，大幅提高分选效率。

3.1.3 X射线表面辐射

X射线表面辐射(XRF)技术通过测量矿石中

元素的 X 射线荧光来确定其化学成分。当矿石样品被 X 射线照射时, 样品中的元素会发出特征性的 X 射线荧光。通过检测这些特征 X 射线的能量和强度, 可以准确分析矿石的成分^[31]。XRF 技术目前主要应用于矿石品位分析, 在矿石预富集方面应用相对较少, 可用于共生矿物如铜金、铜锌的分离^[32]。XRF 技术具有高效、节能环保、非破坏性等优点, 但也存在容易受共存元素干扰和叠加峰影响, 在实际应用中需综合考虑这些因素, 以获得准确可靠的结果。

张莉^[33]针对甘肃某多金属硫化矿山中的废石进行了有价金属预选回收实验, 采用 XRF 技术可从铜品位约为 0.1%、Zn 品位约为 0.11% 的废石中成功分离出铜品位为 1.10%、锌品位为 1.09% 的矿石, 回收率分别为 82.3% 和 75.6%。灵宝金源矿业股份有限公司对小秦岭金矿区的金—石英—金属硫化物型金矿石开展预富集半工业实验, 采用筛孔孔径 30 mm×30 mm 的破碎机粗碎后筛分, 将筛上物 (150~30 mm) 用 XRF 技术进行预富集后与筛下产物合并, 金尾矿品位由 2.34 g/t 降低至 0.14 g/t, 抛尾率为 32.55%, 金损失率仅为 1.95%, 预选精矿和筛下物合并后金品位提升至 3.40%^[34]。刘明宝等^[35]针对陕西省商洛某钼矿废石进行硫化钼的回收研究, 采用 XRF 技术可从钼品位为 0.048% 的废石中获得钼品位和回收率分别为 0.082% 和 90.28% 的预选精矿产品, 抛尾率为 46.8%, 钼的损失率为 9.72%。

3.1.4 其他类型光电预先抛废技术

近红外射线 (NIR) 技术依据矿石中不同矿物对近红外光吸收特性的差异进行分选。通过测量矿石表面特定区域近红外射线波长的反射率, 就可以检测出功能性化学基团是否存在, 从而实现目的矿物和脉石矿物的分选^[36]。NIR 技术具有快速、无损、高效等优点, 但也存在需要校正和标定、模型建立难度大等缺点。这些特点使得近红外射线技术在食品检测、生物医学、农业等领域具有广泛的应用前景, 但在矿石预先抛废中鲜有应用。

放射性技术主要基于矿物中放射性元素 (如铀、钍、钍等) 的天然放射性。这些元素在发生 α 衰变或 β 衰变时, 会释放出 γ 射线。通过检测这些 γ 射线的强度, 可以区分矿石中的有用矿物和废石^[37]。放射性分选机以其高识别精度、大处理

量和高分选效率等优势, 在铀矿石等放射性矿石的分选中得到了广泛应用。此外, 该设备还可用于分选与铀等元素紧密共生的其他矿石。从 20 世纪 90 年代初, 由于世界核能萧条, 许多铀矿倒闭, 因此对放射性分选机的发展造成了一定影响^[38]。

微波分选技术主要基于微波对不同物质的加热特性差异来实现分选。微波是一种高频电磁波, 其频率范围在 0.3~300.0 GHz 之间。在微波场中, 不同矿物对微波的吸收能力存在差异, 导致其升温速率不同。这一特性可用于区分和分选不同的矿物。具体来说, 通过微波预处理矿石, 使其在微波场中加热, 不同矿物因吸收微波能量的能力不同而产生不同的升温速率, 目的矿物和脉石矿物之间形成明显的局部温差, 这种温度差异有利于有用矿物和脉石矿物分离^[39]。与目前成熟的 XRT 技术相比, 微波可以穿透更深的岩石 (在石英中可超过 3 m), 而 XRT 的穿透深度只有 100 mm, 且微波分选技术成本相对较低, 但微波分选技术仅适用于有价矿物与脉石矿物电磁特性差异大的矿石; 更适合识别集中或局部散射体, 对分散的小散射体识别效果较差。总体而言, 微波分选技术具有潜在的应用价值^[40]。

3.2 联合预先抛废流程

在进行废石预先抛废时, 选择使用光电选矿技术、重力选矿技术、磁力选矿技术, 还是联合工艺, 主要取决于矿石的特性、粒度分布、处理量需求以及经济性等因素。莫峰等^[41]针对云南都龙采场剥离废石中有用组分的回收进行预先抛废研究, 采用分级分选集成新技术, 将矿山含锡废石破碎筛分成 -120+25、-25+5、-5+0.5、-0.5 mm 四个不同粒级, 再分别对应采用光电预选、粗粒跳汰、中细粒跳汰、细粒螺旋技术进行预富集, 可获得锡富集比 2.74、回收率 56.82%、品位 0.29% 的精矿产品, 该工艺在满足生产要求的同时, 还能提高产品质量和经济效益, 降低生产成本。

4 结论与展望

(1) 由于中国矿业长期处于粗放式生产状态, 大多数企业对废石的回收利用重视不够, 而且由于成本高、技术不足等方面的原因, 目前废石回收利用仍以实验研究为主, 缺乏产业化和规模化开发利用。对于复杂的多元素共生矿、低品位矿和难处理矿, 其选矿工艺复杂、流程繁琐且

成本较高,综合利用率难以达到预期目标。未来应建立健全有关废石回收利用政策法规,积极推进矿山企业加强废石回收利用工作。

(2) 光电预先抛废技术起步较晚,但发展迅速,随着人工智能和图像处理技术的不断进步,这一技术的精度和效率得到显著提升,目前已广泛应用于多种矿石的预选抛尾,其中X射线透射技术和图像色选技术应用最为广泛,已成为废石资源开发的重要手段。虽然光电预先抛废技术具有诸多优势,但在实际应用中仍存在设备购置和维护成本高、技术复杂、适用范围有限等一些挑战,未来相信随着技术的不断创新和完善,光电选矿设备将更加高效、精准,能够处理更多种类和复杂矿石结构的分选需求。

参考文献:

- [1] 任世赢. 中国矿产资源综合利用现状、问题及对策分析[J]. *中国资源综合利用*, 2017, 35(12):78-80.
- REN S Y. The current situation, problems and countermeasures of comprehensive utilization of mineral resources in China[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2017, 35(12):78-80.
- [2] 张广田, 崔彦发, 刘东基, 等. 废石资源化利用发展现状[C]// 中国砂石协会. 第八届中国国际砂石骨料大会论文集. 上海: 2023: 1-9.
- ZHANG G T, CUI Y F, LIU D J, et al. Review on resource utilization of waste rock[C]. 2023: 1-9.
- [3] 姚华辉, 蔡练兵, 刘维, 等. 中国金属矿山废石资源化综合利用现状与发展[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31(6):1649-1660.
- YAO H H, CAI L B, LIU W, et al. Current status and development of comprehensive utilization of waste rock in metal mines in China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(6):1649-1660.
- [4] 鞠建华, 韩见, 冯聪. 中国矿产资源综合利用现状评估与发展路径[J]. *中国矿业*, 2024, 33(6):14-25.
- JU J H, HAN J, FENG C. Evaluation and development path of comprehensive utilization of mineral resources in China[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(6):14-25.
- [5] 曹耀华, 张永康, 刘红召, 等. 铅锌矿废石产酸潜力及模拟强酸雨环境下重金属淋溶规律分析[J]. *矿产综合利用*, 2024, 45(5):204-210.
- CAO Y H, ZHANG Y K, LIU H Z, et al. Acid production potential of lead-zinc waste rocks and analysis of heavy metal eluviating at simulated strong acid rain environment[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024, 45(5):204-210.
- [6] 姜楠. 金属矿山固体废弃物危害及资源再利用[J]. *现代矿业*, 2020(3):117-118.
- JIANG N. Hazards and resource reuse of solid wastes in metal mines[J]. *Modern Mining*, 2020(3):117-118.
- [7] 张利珍, 赵恒勤, 马化龙, 等. 中国矿山固体废物的资源化利用及处置[J]. *现代矿业*, 2012(10):1-5.
- ZHANG L Z, ZHAO H Q, MA H L, et al. Resource utilization and disposal of mine solid waste in China[J]. *Modern Mining*, 2012(10):1-5.
- [8] 宋彬. 新时代中国矿业高质量发展研究[J]. *河南科技*, 2019(19):88-90.
- SONG B. Research on the high quality development of China's mining industry[J]. *Henan Science and Technology*, 2019(19):88-90.
- [9] 龚树峰, 史学伟. 铁矿废石及尾矿的综合利用技术[J]. *金属材料与冶金工程*, 2014, 42(3):49-53.
- GONG S F, SHI X W. Comprehensive utilization of waste rocks and tailings of iron ore[J]. *Metal Materials and Metallurgy Engineering*, 2014, 42(3):49-53.
- [10] 刘文宝, 张昊, 刘文刚, 等. 铁矿废石综合利用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2021, 41(3):118-125.
- LIU W B, ZHANG H, LIU W G, et al. Research progress on comprehensive utilization of iron ore barren rock[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2021, 41(3):118-125.
- [11] 刘淑鹏, 张小伟, 魏芳. 金属矿山固体废弃物危害及资源再利用[J]. *现代矿业*, 2017, 33(2):122-125.
- LIU S P, ZHANG X W, WEI F. Hazards and resource reuse of solid wastes in metal mines[J]. *Modern Mining*, 2017, 33(2):122-125.
- [12] 张岩, 李艳, 赵东芳, 等. 光电-浮选联合处理某堆存低品位萤石矿[J]. *化工矿地质*, 2023, 45(3):278-282.
- ZHANG Y, LI Y, ZHAO D F, et al. A stacked low-grade fluorite mine is processed by photoelectricity-flotation combined method[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 2023, 45(3):278-282.
- [13] 敖顺福, 朱家锐, 徐峰, 等. 预选抛尾技术应用进展[J]. *矿产保护与利用*, 2021, 41(4):157-163.
- AO S F, ZHU J R, XU F, et al. Application progress of preconcentration and discarding technology[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2021, 41(4):157-163.
- [14] 张磊, 吕向东, 展仁礼, 等. 基于实验研究分析金属矿山矿石构造对智能光电预选技术分选效果的影响[J]. *矿产综合利用*, 2024, 45(6):131-134.
- ZHANG L, LYU X D, ZHAN R L, et al. Based on experimental research and theoretical analysis of the effect of ore structure of metal mine on intelligent photoelectric pre-separation[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024, 45(6):131-134.

- [15] 罗主平. 中国块状合格精矿直接提取工艺研究与实践[J]. *现代矿业*, 2024, 40(8):238-242.
- LUO Z P. Research and practice on direct extraction process of block qualified concentrate in China[J]. *Modern Mining*, 2024, 40(8):238-242.
- [16] 吴志虎. 矿石预选抛废技术与智能光电选矿设备选型要点[J]. *世界有色金属*, 2020(16):202-205.
- WU Z H. Ore pre concentration and discarding waste technology and selection of intelligent photoelectric beneficiation equipment[J]. *World Nonferrous Metals*, 2020(16):202-205.
- [17] 张龙宇, 吴中贤, 申有悦, 等. 铁尾矿中磷灰石旋转摩擦静电分选提纯[J]. *矿产综合利用*, 2024, 45(2):157-164.
- ZHANG L Y, WU Z X, SHEN Y Y, et al. Apatite enrichment from iron ore tailings by rotary triboelectrostatic separator[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024, 45(2):157-164.
- [18] 王乾帅, 陶东平, 赵通林, 等. 辉钼矿干法旋转摩擦电选预抛尾研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(6):179-184.
- WANG Q S, TAO D P, ZHAO T L, et al. Study of molybdenite pre-concentration by dry rotary triboelectrostatic separation[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(6):179-184.
- [19] 王龙, 林兴浩, 王彬. 智能拣选装备在矿物加工中的应用现状与发展趋势[J]. *金属矿山*, 2022(10):113-121.
- WANG L, LIN X H, WANG B. Application status and development trend of intelligent sorting equipment in the field of mineral processing[J]. *Metal Mine*, 2022(10):113-121.
- [20] 魏立军, 夏敬源, 刘鑫, 等. 光电选矿技术在中低品位胶磷矿选别中的应用研究[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(7):217-222.
- WEI L J, XIA J Y, LIU X, et al. Research on the application of optoelectronic beneficiation technology in beneficiation of medium and low grade phosphate ores[J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(7):217-222.
- [21] 王俊杰, 陈艳波, 梁魏峰, 等. 低品位金矿石预选抛尾工艺研究进展与应用探讨[J]. *山东化工*, 2023, 52(11):110-112,116.
- WANG J J, CHEN Y B, LIANG W F, et al. Research progress and application discusses of low grade gold ore preconcentration discarding tailings technology[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2023, 52(11):110-112,116.
- [22] 王泽雷. 光电拣选设备研究与应用进展[J]. *化工矿物与加工*, 2023, 52(5):51-57,65.
- WANG Z L. Research and application progress of photoelectric sorting equipment[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2023, 52(5):51-57,65.
- [23] 李艳, 余媛元, 童晓蕾, 等. X 射线分选技术在磷矿选矿中的应用研究[J]. *矿产综合利用*, 2023(2):100-105.
- LI Y, YU Y Y, TONG X L, et al. Study on the application of X-ray separation technology in phosphate mine dressing[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(2):100-105.
- [24] 第旺平, 吴志虎. 智能光电选矿预选抛废技术研究及应用[J]. *有色金属 (选矿部分)*, 2021(1):117-121.
- DI W P, WU Z H. Preconcentration and discarding technology of intelligent photoelectric dressing equipment[J]. *Nonferrous Metals Mineral Processing Section*, 2021(1):117-121.
- [25] 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.
- [26] 张建强, 赵德志. 云南某钨矿光电预选抛废选矿工业试验研究[J]. *云南冶金*, 2022, 51(4):60-66.
- ZHANG J Q, ZHAO D Z. Industrial experiment study on photoelectric pre-dumping beneficiation of one tungsten deposit in Yunnan[J]. *Yunnan Metallurgy*, 2022, 51(4):60-66.
- [27] 陈明文, 郭珍旭, 宋革, 等. 应用在钾长石智能拣选系统的 LED 光源技术分析[J]. *照明工程学报*, 2016, 27(3):109-115.
- CHEN M W, GUO Z X, SONG G, et al. Technical analysis of LED light source applied in the feldspar photoelectric configured picker[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2016, 27(3):109-115.
- [28] 叶鑫, 叶岑沁. 色选机选矿在萤石矿的应用[J]. *内燃机与配件*, 2018(8):237-238.
- YE X, YE Q Q. Application of color separator in fluorite ore[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2018(8):237-238.
- [29] 顾兆云, 陈经华, 魏盛耀. 基于光电技术的国外某红土型低品位锰矿选别试验研究[J]. *现代矿业*, 2022, 38(3):129-132.
- GU Z Y, CHEN J H, WEI S Y. Experimental study on separation of a Lateritic low-grade manganese ore abroad based on photoelectric technology[J]. *Modern Mining*, 2022, 38(3):129-132.
- [30] 冯伯翰, 周泽湘, 武秀琪. 基于色选法的钨矿石分选技术[J]. *机电工程技术*, 2023, 52(3):138-140.
- FENG B H, ZHOU Z X, WU X Q. Tungsten ore sorting technology based on color separation[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2023, 52(3):138-140.
- [31] 印万忠, 吴尧, 韩跃新, 等. X 射线辐射分选原理及应用[J]. *中国矿业*, 2011, 20(12):88-92.
- YIN W Z, WU Y, HAN Y X, et al. The theory and application of X-ray separation technology[J]. *China Mining Magazine*, 2011, 20(12):88-92.

- [32] 王泽红, 陈晓龙, 韩跃新, 等. 用 X 射线辐射分选机预选某金铜共生矿石[J]. [金属矿山](#), 2013(7):75-78.
- WANG Z H, CHEN X L, HAN Y X, et al. Pre-concentration of a Au-Cu associated ore with X-ray radiation separator[J]. [Metal Mine](#), 2013(7):75-78.
- [33] 张莉. 甘肃某多金属硫化矿废石高效选矿技术研究[J]. [矿产综合利用](#), 2021(6):173-178.
- ZHANG L. Efficient beneficiation technique for a polymetallic sulfide ore in Gansu province[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2021(6):173-178.
- [34] 李建政, 肖健锋, 王军强, 等. X 射线荧光分选机及其应用[J]. [黄金](#), 2022, 43(2):81-84.
- LI J Z, XIAO J F, WANG J Q, et al. X-ray fluorescence separator and its application[J]. [Gold](#), 2022, 43(2):81-84.
- [35] 刘明宝, 耿西侠, 王哲文. 钼矿废石中硫化钼的高效回收技术研究[J]. [商洛学院学报](#), 2022, 36(4):49-54,82.
- LIU M B, GENG X X, WANG Z W. High-efficient recovery technique for MoS from the waste rock of a molybdenum mine[J]. [Journal of Shangluo University](#), 2022, 36(4):49-54,82.
- [36] 成磊, 尚红亮, 朱道遥. 基于传感器的矿石拣选技术研究现状与发展趋势[J]. [有色金属 \(选矿部分\)](#), 2017(z1):160-163.
- CHENG L, SHANG H L, ZHU D Y. Current research and development tendency of ore sorting technology based on sensor[J]. [Nonferrous Metals Mieral Processing Section](#), 2017(z1):160-163.
- [37] 刘志超, 马嘉, 李春风, 等. 铀矿石预先抛尾-两段放射性分选试验研究[J]. [湿法冶金](#), 2021, 40(4):267-271.
- LIU Z C, MA J, LI C F, et al. Separation of uranium ore by elective tailing discarding-two-stage radiometric sorting[J]. [Hydrometallurgy of China](#), 2021, 40(4):267-271.
- [38] 张晨, 侯鲜名, 侯江. 矿石形状对放射性分选探测效率的影响[J]. [铀矿冶](#), 2025.
- ZHANG C, HOU X M, HOU J. Influence of ore shape on the efficiency of radioactive sorting and detection[J]. [Uranium Mining and Metallurgy](#), 2025.
- [39] 徐国印. 微波辅助技术改善矿物分选理论及应用研究[J]. [现代矿业](#), 2014(6):166-168.
- XU G Y. Theory and application of microwave-assisted technology to improve mineral sorting[J]. [Modern Mining](#), 2014(6):166-168.
- [40] DUAN B, BOBICKI E R, HUM S V. Application of microwave imaging in sensor-based ore sorting[J]. [Minerals Engineering](#), 2023, 202:108303.
- [41] 莫峰, 曹阳, 蓝卓越, 等. 都龙采场剥离废石中锡石高效预富集新技术[J]. [有色金属工程](#), 2022, 12(9):92-100.
- MO F, CAO Y, LAN Z Y, et al. New technology for efficient pre-concentration of cassiterite in waste rock of mining stripping in Yunnan Dulong[J]. [Nonferrous Metals Engineering](#), 2022, 12(9):92-100.

Current Application Status of Photoelectric Pre-discarded Technology in Waste Rock Recovery Process

LU Zhiming^{1,2,3}, YAO Ruoyu^{1,2}, TONG Xiong^{1,2}, SONG Qiang^{1,2}

(1.Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 2.National and Local Joint Engineering Research Center for Green Comprehensive Utilization of Metal Mine Tailings Resources, Kunming, Yunnan 650093, China; 3.Datun Tin Mine, Yunnan Tin Industry Co., Ltd., Gejiu, Yunnan 661000, China)

Abstract: Our country boasts abundant mineral resources, but they are of a low grade, with a fine distribution and complex composition. With the increase of the consumption of mineral resources, the amount of waste rock generated is also increasing. The large accumulation of waste rock not only occupies valuable land resources but also causes environmental pollution. Therefore, the recycling and utilization of waste rock is an effective way to improve resource efficiency, conserve mineral resources, and protect the ecological environment. Extracting valuable components from waste rock is key to maximizing its utilization, and pre-discarded is an important basis for the efficient utilization of waste rocks. This paper introduces the application of photoelectric beneficiation technology in pre-discarded of waste rock, compares and analyzes the advantages and disadvantages of different photoelectric beneficiation technologies such as XRT, image color separation, and XRF, and looks forward to the future development of photoelectric beneficiation technology in the field of pre-disposal.

Keywords: waste rock; comprehensive utilization; pre-discarded; photoelectric beneficiation