

◆设备、控制与安全生产◆

光电分选技术在云南高原磷矿选矿中的应用困难及
解决对策研究

袁望生

(云南磷化集团有限公司 晋宁选矿厂分公司, 云南 昆明 650600)

[摘要] 光电分选技术作为一种基于矿物表面特征或内部结构的智能预选抛废技术, 具有高效、节能、环保等优势。云南磷矿储量占全国总储量的比例高, 但矿石普遍呈中低品位, 其高原特殊环境对光电分选设备的稳定运行提出了严峻挑战。系统介绍光电分选技术的原理、发展历程与系统构成, 并结合国内多个成功应用实例, 详细阐述其在提升磷矿品位、降低选矿成本与环境负荷方面的显著效果。重点探讨光电分选机在云南高原地区部署过程中因高海拔环境导致的设备散热困难、压缩空气喷吹力度不足、除尘器风机效率下降、电气绝缘性能降低及设备综合稳定性与维护等核心问题。在此基础上, 提出了包括散热系统优化、压缩空气系统增强、除尘系统高原适应性改造、电气系统强化以及构建智能化运维体系在内的综合性技术与管理对策。

[关键词] 光电分选技术; 磷矿选矿; 高原环境; 设备散热; 压缩空气; 除尘系统

[中图分类号] TQ051 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2026) 02-0118-06

Research on the application difficulties and solutions of photoelectric sorting technology
in phosphate ore beneficiation in Yunnan plateau

YUAN Wangsheng

(Jinning Mineral Processing Plant Branch, Yunnan Phosphate Group Co., Ltd., Kunming 650600, China)

Abstract: As an intelligent pre-selection and waste rejection technology based on the surface characteristics or internal structure of minerals, photoelectric sorting technology has advantages such as high efficiency, energy conservation and environmental protection. Yunnan has a high proportion of phosphorus ore reserves in the country, but the ores are generally of medium and low grade, the special environment of the plateau poses severe challenges to the stable operation of photoelectric sorting equipment. The principle, development history and system composition of photoelectric sorting technology are introduced systematically, and its significant effects in improving the grade of phosphorus ores, reducing beneficiation costs and environmental loads are elaborated based on multiple successful domestic application cases. The core issues are discussed, such as the difficulty of equipment heat dissipation, insufficient force of compressed air blowing, reduced efficiency of dust collector fans, decreased electrical insulation performance and overall stability and maintenance of equipment due to the high-altitude environment during the deployment of photoelectric sorting machines in the Yunnan plateau region. On this basis, comprehensive technical and management countermeasures including optimization of the heat dissipation system, enhancement of the compressed air system, adaptation of the dust removal system to the plateau, strengthening of the electrical system and construction of an intelligent operation and maintenance system are proposed.

Key words: photoelectric sorting technology; phosphate ore beneficiation; plateau environment; equipment heat dissipation; compressed air; dust removal system

0 引言

磷矿是保障国家粮食安全与磷化工产业发展的战略性矿产资源, 是磷基化学品和化肥生产的重要

组成部分^[1-2], 被誉为“生命元素”的储存库。我国磷矿资源储量虽居世界第二, 但资源禀赋差, 以中低品位为主, 全国磷矿平均品位 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 不足

收稿日期: 2025-12-10

作者简介: 袁望生(1990—), 男, 湖北黄冈人, 机械工程师, 主要从事磷矿石选矿设备管理工作。

17%， $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 高于30%的富矿资源仅占总储量的10%左右^[3]。云南作为我国磷矿资源最富集的省份，是滇池、昆阳、海口、晋宁等大型磷矿区的所在地，其磷资源储量在全国占有举足轻重的地位。然而，该地区磷矿石除普遍具有“贫、细、杂”的特征外，其矿床多位于云贵高原及其延伸地带，矿区海拔普遍较高，自然环境独特。传统的“破碎-磨矿-浮选”工艺在处理这类中低品位矿石时，存在能耗畸高、药剂用量巨大、废水处理难度大、尾矿库压力严峻等一系列问题，不仅极大地推高了生产成本，也对高原脆弱的生态环境构成了潜在威胁。

在此背景下，预选抛废技术作为从源头实现“减量化、无害化、资源化”的关键环节，受到了矿业界的广泛关注与推崇。其核心在于“能抛早抛，能收早收”，即在矿石入磨前尽可能地将混入的废石和低品位夹石剔除，从而提高入选品位，显著减轻后续碎磨与分选作业的负荷。光电分选技术是近年来取得突破性进展的智能预选抛废技术之一^[4-7]。它基于矿物表面颜色、纹理、光泽，或内部密度、元素组成等物理特性的差异，综合运用高精度传感器、高速图像处理以及人工智能算法，实现对矿石与废石的自动识别与高效分离。该技术具有分选客观、精准高效、节能节水、无需化学药剂、环境友好等突出优势，已在钨、锡、锑、铅、锌等有色金属矿及煤炭、萤石、磷矿等非金属矿中得到成功应用与推广^[8-10]。

云南高原地区平均海拔在1 500~4 000 m，其特有的低气压、低空气密度、低氧含量、强太阳辐射、大昼夜温差以及寒冷冬季等严苛条件，对精密的光电分选设备构成了全方位的考验。设备散热效率、压缩空气动力性能、除尘系统效能、电气元件可靠性以及整体运行稳定性均会受到显著影响。若不能有效解决这些高原适应性难题，不仅无法发挥光电分选技术的优势，而且可能导致设备故障频发、投资效益低下。本文结合国内外最新研究成果与工程实践，特别是国内成功应用案例，深入剖析问题本质，提出光电分选技术的高原适应性解决方案，以推动该技术在云南磷矿产业的规模化、高效化应用。

1 光电分选技术概述及其在磷矿中的应用成效

1.1 技术原理、分类与发展历程

光电分选技术是一种利用矿物物理特性差异进行分选的高科技手段。根据识别原理和检测方式的不同，主要可分为两大类。

图像色选技术：该技术通过高分辨率CCD或CMOS相机，在特定光源（如LED白光、激光）照射下，捕捉矿石表面的颜色、纹理、形状及光泽等视觉特征。随后，运用先进的图像处理算法和人工智能（如深度学习）模型，对采集到的图像进行实时分析，精确区分目标矿物与脉石矿物。此法特别适用于颜色、纹理对比度高的矿石，如某些石英脉型黑钨矿、大理石等。

X射线分选技术：此技术又可细分为X射线透射技术（XRT）和X射线荧光技术（XRF）。XRT技术基于不同矿物对X射线吸收能力（与矿物密度和有效原子序数相关）的差异，X射线穿透矿石后，探测器接收衰减后的信号，通过分析该信号即可识别矿石内部的密度或成分差异，不受表面污染物影响。XRF技术则是利用高能X射线激发矿石中的元素，使其产生特征X射线荧光，通过探测这些荧光光谱来确定元素的种类与含量，从而实现基于元素组成的分选^[11-12]。在磷矿分选中，由于P与主要脉石元素Si、Ca、Mg的原子序数相差不大，双能XRT技术因其更高的分辨能力而更为常用。

光电分选技术的发展历程漫长而富有成效，可以概括为3个主要阶段^[13-14]：

初期阶段（20世纪初至50年代）：始于奥地利科学家基于颜色差异的分选尝试，直至英国索特克斯（Sortex）公司制造出第一台用于种子分选的光电分选机，高速气阀的发明是关键突破。

发展阶段（20世纪60年代至90年代）：X射线和激光技术被引入分选领域。1968年英国研制出第一台XR-21型X射线分选机用于金刚石分选。南非研制了M16型等激光选矿机。我国于1979年自主研发了第一台GXJ型X射线分选机，标志着该技术在国内的起步。

现阶段（21世纪以来）：随着计算机技术、人工智能算法、高速数据处理芯片及高性能传感器的发展，光电分选技术进入了智能化、高效化、大型化的新阶段。国内外涌现出如天津美腾科技股份有限公司（TDS、TGS系列）、北京霍里思特科技有限公司（XNDT系列）、奥地利Redwave公司、挪威陶朗（Tomra）集团等一批知名设备制造商，其产品是分选精度、处理能力和适应性上均实现了巨大飞跃。

1.2 系统构成与工作流程

一套完整的智能光电分选系统通常由4个核心子系统构成。

1) 均匀给料系统：通常由振动给料机或特定

结构的给料槽组成，其核心功能是确保待分选物料呈单层、均匀分布状态，并以恒定速度通过检测区域，为精准识别奠定基础。

2) 高速检测与扫描系统：这是分选设备的“眼睛”。包括光源（X射线管、LED阵列、激光器等）和信号接收器（线阵探测器、高清相机等）。物料在皮带末端抛落或直接在皮带上运行时被快速扫描，获取其内部（XRT）或表面（色选）特征信息。

3) 智能信息处理与决策系统：这是分选设备的“大脑”。工控机搭载专用的图像处理和分析软件，运用AI（人工智能）算法（见图1）对海量扫描数据进行实时处理、分析与识别，判断每一颗颗粒是矿石还是废石，并生成控制指令。

4) 分选执行系统：这是分选设备的“手”。最常用的是由电磁阀控制的高压气流喷嘴阵列，在

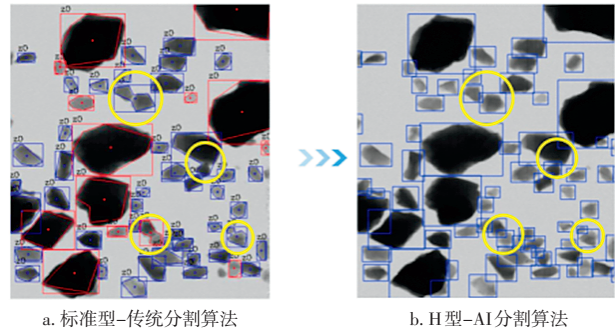


图1 人工智能算法在光电分选技术中的应用

Fig. 1 Application of artificial intelligence algorithms in photoelectric sorting technology

接收到决策系统的指令后，精准、瞬时地喷出压缩空气，改变目标颗粒（矿石或废石）的运动轨迹，使其与其他颗粒分离，分别落入精矿斗和废石斗中。智能光电分选系统原理见图2。

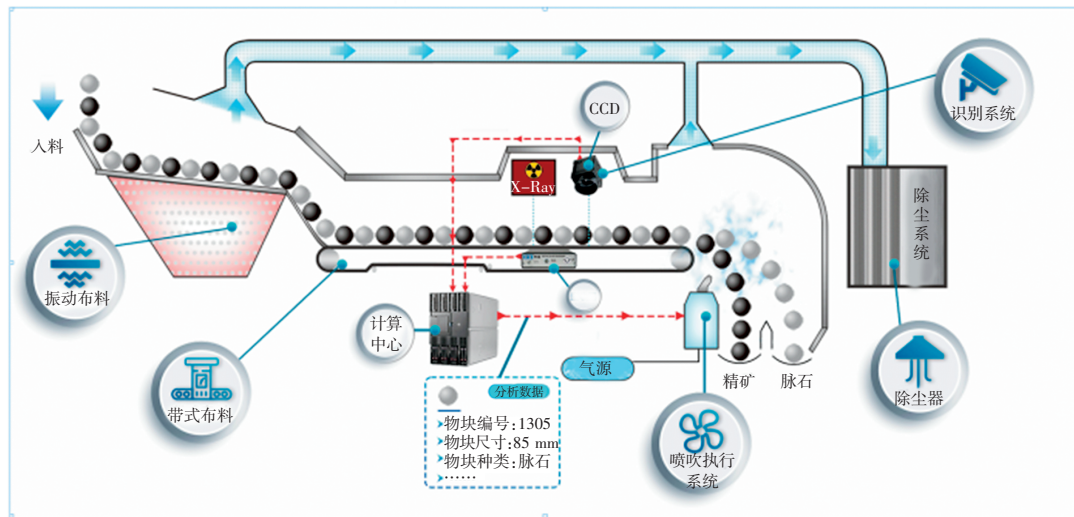


图2 智能光电分选系统原理

Fig. 2 Principle of intelligent photoelectric sorting system

1.3 光电分选在国内磷矿选矿中的应用实例

近年来，光电分选技术在我国磷矿选矿领域取得了令人瞩目的应用成果，多个成功案例充分证明了其技术先进性和经济环保效益。

(1) 云南地区不同类型胶磷矿的适应性应用。魏立军等^[15]针对云南地区代表性的硅质及硅酸盐型、混合型、碳酸盐型中低品位胶磷矿，系统开展了光电选矿试验研究。结果表明，该技术对各类胶磷矿均具有较好的分选效果。对于硅质及硅酸盐型高硅矿，在原矿品位 $w(P_2O_5)$ 为17.36%的条件下，采用“抛废模式”可获得产率为74.48%、品位 $w(P_2O_5)$ 为19.74%的精矿，同时抛除25.52%的废

石（废石 $w(P_2O_5)$ 为10.42%），极大地减少了入磨矿量。对于混合型胶磷矿，原矿 $w(P_2O_5)$ 17.12%，通过光电分选，抛废率达到30.13%，废石 $w(P_2O_5)$ 为10.93%，分选后的精矿与原生粉矿混合后，综合精矿 $w(P_2O_5)$ 达到19.79%，满足了选厂入选品位要求，使原本难以利用的低品位资源得以盘活。对于碳酸盐型高镁矿（露天混采矿样），光电分选展现出更优的性能。当抛废率为40.63%时，精矿品位 $w(P_2O_5)$ 大幅度提升至27.52%，回收率保持在75.92%，富集比达1.28。这一实例强有力地证明了光电分选在云南复杂磷矿资源预处理中的广泛适用性和高效性。

(2) 四川某硅镁质磷矿的工艺流程革新。余新文等^[16]以四川某 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为19.57%的硅镁质磷块岩为研究对象,进行了开创性的工艺流程对比。采用传统“破碎—磨矿—正浮选—反浮选”工艺,最终获得的磷精矿 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为30.56%,回收率为80.61%。而采用“破碎—X射线分选—磨矿—反浮选”新工艺后,光电预选抛除了大量低品位物料,使得后续磨料浮选工序负荷显著降低。最终获得的磷精矿 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 显著提高至34.58%,回收率稳定在80.52%。尤为突出的是,新工艺中二氧化硅的脱除率高达68.69%,远高于传统工艺的42.59%。这不仅简化了后续浮选流程,降低了药剂消耗,更获得了更高品质的磷精矿产品,体现了光电分选在降本增效和提质方面的巨大潜力。

(3) 湖北宜昌磷矿的工业化成功实践。湖北宜昌地区作为国内重要磷矿基地,其海相沉积型磷矿也成功应用了光电分选技术。李宇新等^[17]介绍了宜昌某磷矿的应用情况,针对下层磷矿,在 $>10\sim 20\text{ mm}$ 粒级范围内,采用X射线智能分选机在实现抛废率30%的情况下,可获得磷精矿 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 约27%、回收率高达87%、尾矿 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 仅8%的优异指标。该指标全面优于传统的重介质旋流器分选,解决了重介质选矿中因磷块岩与白云岩密度接近而分离困难的难题。孙唯衡等^[18]的研究进一步证实,对宜昌地区条带状构造明显的中低品位磷矿,采用XRT/CCD双融合智能光电选机处理 $>8\sim 28\text{ mm}$ 粒级矿石,在抛废率高达45%时,仍能保证磷矿石综合回收率达到85%的良好指标。

(4) 四川马边磷矿的高效预选。杨丘等^[4]的综述中也提及了四川马边磷矿的应用实例。该矿采用X射线全自动智能在线分选机对粒度为 $20\sim 40\text{ mm}$ 的磷矿石进行预选抛废,处理能力达到 50 t/h 。对于 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 约20%的原矿,经分选后精矿品位提升至22.5%以上,废石抛出率稳定在30%左右,为后续磷化工生产提供了优质的原料保障。

AMAR等^[19]的研究表明,采用XRT分选技术后摩洛哥本格里尔矿区磷矿废石减少了5%,提高了矿区经济效益。

光电分选技术在中外主要磷矿区的成功应用,证明了其在中低品位磷矿预选抛废中的卓越效果:显著提高入选品位、大幅度减少入磨矿量和后续处理成本、降低能耗和药剂消耗、减少细粒尾矿产生量、提升最终精矿质量,是实现磷矿资源节约、高效、绿色开发的关键技术途径。

2 光电分选机在云南高原地区部署面临的特殊困难

尽管光电分选技术优势明显,但在云南高原地区进行工业化部署时,必须正视并克服由特殊地理气候环境带来的一系列严峻挑战。

2.1 设备散热困难与性能衰减

高原地区空气稀薄,空气密度和气压随海拔升高而显著降低。根据工程物理原理,空气的对流换热能力与空气密度密切相关。在海拔 $0\sim 5\ 000\text{ m}$ 范围内,每升高 $1\ 000\text{ m}$,外绝缘强度降低 $8\%\sim 13\%$,温度升高 $3\%\sim 10\%$ ^[20]。光电分选机内部的X射线发生器、图像处理工控机、大功率电源模块、高频电磁阀驱动电路等均是高发热元件。在低气压环境下,空气导热和对流散热效率急剧下降,导致设备内部温度极易积聚升高,轻则触发设备过热保护,造成非计划停机,影响生产连续性;重则加速电子元器件老化,缩短其使用寿命,甚至导致永久性损坏,严重威胁设备的长期稳定运行。

2.2 压缩空气喷吹系统效能降低

光电分选机的高压喷吹系统,其核心动力源是压缩空气。在高原低气压环境下,大气压力本身较低,空压机在吸气环节吸入的空气质量(即分子数量)少于平原地区。这将直接导致在相同容积下,储气罐内储存的压缩空气的质量和压力都可能达不到平原地区的设计标准。

当电磁阀打开,压缩空气从喷嘴喷出时,由于内外压差减小,气流喷出的初始速度和冲击动量会下降。其直接后果是喷吹力度不足,无法有效、精准地改变较重目标颗粒的运动轨迹,导致分选精度和效率大打折扣,出现“该吹走的没吹走,不该吹走的被误吹”的现象,严重影响分选指标。

2.3 除尘系统效率显著下降

磷矿在被压缩空气喷吹分选的过程中不可避免会产生粉尘。为了保护精密的光学镜头和传感器免受污染,确保识别精度,除尘系统是光电分选机不可或缺的组成部分。除尘风机的工作原理是利用叶轮旋转形成负压,吸入含尘空气。在高原低密度空气中,风机的性能曲线会发生“漂移”,表现为:在相同转速下,风机所产生的全压和风量均低于标准状态。刘志国等^[21]在分析高原设备时也提及,电力设备和风机功率会因空气密度降低而下降。这将导致除尘系统吸力不足,现场粉尘无法被有效抽离,粉尘在检测区内弥漫,附着在镜头表面,造成图像模糊、X射线信号衰减,识别错误率飙升。长此以往,粉尘积聚还可能引发设备内部电路短路等

安全隐患。

2.4 电气设备绝缘性能与可靠性降低

低气压环境对电气系统的安全运行构成直接威胁。空气是常用的绝缘介质，其介电强度随气压降低而下降。这意味着，在高原环境下，电器元件之间、带电部件与接地外壳之间的空气间隙更容易被击穿，引发电弧、短路甚至火灾风险。此外，云南高原强烈的紫外线辐射会加速电缆绝缘层、设备塑料外壳等有机材料的老化、脆化。昼夜温差大（可达20℃以上）则导致材料频繁热胀冷缩，可能引起接线端子松动、焊点疲劳开裂，进一步降低了电气连接的可靠性。

2.5 设备综合稳定性与维护保障难度加大

云南高原地区地形复杂，交通相对不便，专业的设备维护人员匮乏。一旦设备出现故障，响应和修复周期较长。而高原恶劣的环境本身又加剧了设备的故障风险，形成了一个不利的循环。设备若稳定性不足，频繁停机维修，将严重制约选矿厂的连续生产能力，影响经济效益。因此，对设备的平均无故障运行时间（MTBF）和平均修复时间（MTTR）都提出了比平原地区更高的要求。

3 面向高原环境的综合性解决对策与优化方案

针对上述挑战，必须采取一系列主动、前瞻性的综合性技术与管理措施，确保光电分选机在云南高原磷矿选矿厂中“安得了、稳得住、效果好”。

3.1 散热系统的强化与优化设计

1) 强制风冷系统升级。摒弃普通的自然对流散热，采用大功率、高风压的离心风机，并设计合理的导流风道，确保冷空气能够定向、高速地流经主要发热部件。可在关键发热元件上加装高性能散热鳍片，增大散热面积。

2) 引入液冷系统。对于X射线源、中央处理器（CPU/GPU）等核心高热密度部件，优先采用液冷散热方案。通过循环冷却液将热量高效地带走，再通过液-空换热器将热量排放到设备外部，此方式受海拔影响极小，散热效率远高于风冷系统。

3) 智能温控与布局优化。在设备关键点位布置温度传感器，实时监控，并与散热系统联动，实现按需智能启停。设备整体布局应利于通风，避免热量积聚。必要时，可为设备加装隔热遮阳罩，减少太阳辐射带来的额外热负荷。

3.2 压缩空气系统的动力保障措施

1) 空压机站针对性选型与配置。在高原地区，应选择额定排气压力高于平原需求的空压机，

以补偿高海拔造成的压力损失。考虑增设空气增压泵，或在储气罐后增加压力维持装置，确保喷吹时瞬时压力稳定且充足。

2) 喷嘴与气路优化。与设备供应商密切合作，针对高原工况优化喷嘴的孔径和结构，以提高气流利用率。现场安装调试期间应重复试验，找到对应海拔高度下最适宜的喷吹压力。

3.3 除尘系统的高原适应性改造

1) 风机重新选型与变频控制。根据厂区具体海拔高度，重新计算系统阻力，选用风压和风量裕量更大的高原专用型风机。采用变频器驱动风机，可以根据粉尘浓度实时调节风量，在保证除尘效果的同时实现节能。

2) 增强系统密封性与正压防尘。提高分选机箱体的密封等级，防止粉尘侵入。甚至可以在检测仓室内引入微正压洁净空气，形成气幕，有效阻隔外部粉尘。

3.4 电气系统的高原强化与防护策略

1) 选用高原型电气元件。严格按照国家标准选用绝缘等级更高、电气间隙和爬电距离更大的断路器、接触器、变压器等元件。

2) 完善接地与过电压保护，确保系统接地、屏蔽接地和安全接地规范可靠。加强防雷和操作过电压保护（如加装浪涌保护器SPD），预防雷击和电网波动对精密电子设备的损害。

3) 材料与结构的耐候性设计。设备外壳采用抗紫外线老化材料，电缆选用耐寒、耐热、抗紫外线的特种电缆。关键接线端子采用防松脱设计。

3.5 构建智能化运维与全方位保障体系

1) 实施状态监测与预测性维护。集成物联网技术，对设备的关键参数（温度、压力、振动、电流、图像识别准确率等）进行在线实时监测。利用大数据分析预测潜在故障，变被动维修为主动预警和维护。

2) 建立远程技术支持中心。利用高速互联网，建立与设备制造商技术专家的远程连接，实现故障的远程诊断、程序更新和在线指导，极大缩短故障处理时间。

3) 加强本地化技术培训与备件储备。对选矿厂本地技术人员进行系统性的操作和维护培训。针对易损件和关键部件，在厂内建立合理的备品备件库，确保一般故障能够快速就地解决。

4 结论与展望

光电分选技术作为磷矿预选抛废的先进手段，

其在提升资源利用率、降低选矿成本、减少环境负荷方面的巨大优势,已通过国内云南、四川、湖北等多个磷矿区的成功应用实例得到了充分验证。对于磷矿资源富集但矿石禀赋较差的云南地区而言,推广该技术是实现产业升级和绿色发展的必然选择。然而,云南高原特殊的自然环境——低气压、低空气密度、强辐射、大温差——对光电分选设备的散热性能、动力系统、除尘效率、电气可靠性和综合稳定性构成了现实且严峻的挑战。

本文系统性地分析了这些困难产生的物理根源,并提出了针对性的、可操作的综合性解决方案。通过强化散热设计(风冷+液冷)、保障压缩空气动力(增压与优化)、改造除尘系统(风机重选与密封防尘)、提升电气系统适应性(高绝缘与耐候材料)以及构建智能运维体系(状态监测与远程支持),可以有效地克服高原环境带来的不利影响,为光电分选机在云南高原磷矿选矿中的稳定、高效、长期运行提供坚实保障。

[参考文献]

- [1] GHARABAGHI M, IRANNAJAD M, NOAPARAST M.A review of the beneficiation of calcareous phosphate ores using organic acid leaching[J].Hydrometallurgy, 2010, 103(1-4):96-107.
- [2] MOHAMMADKHANI M, NOAPARAST M, SHAFAEI S Z, et al. Double reverse flotation of a very low grade sedimentary phosphate rock, rich in carbonate and silicate[J]. International Journal of Mineral Processing, 2011, 100(3-4):157-165.
- [3] 董继发, 康鹏鹏, 张彪, 等. 光电预选技术在磷矿选矿中的应用研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2025(8):68-54.
DONG J F, KANG P P, ZHANG B, et al. Research progress on the application of photoelectric pre-concentration technology in the beneficiation of phosphate ore [J]. Industrial Minerals & Processing, 2025(8):68-54.
- [4] ROBBEN C.Characteristics of sensor-based sorting technology and implementation in mining [D].Aachen: RWTH Aachen University, 2014.
- [5] LESSARD J, SWEETSER W, BARTRAM K, et al.Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit[J].Minerals Engineering, 2016, 91:92-99.
- [6] SIVAMOCHAN R, FORSSBERG E.Electronic sorting and other preconcentration methods [J].Minerals Engineering, 1991, 4(7-11):797-814.
- [7] HENCKENS T.Scarce mineral resources: Extraction, consumption and limits of sustainability [J].Resources, Conservation and Recycling, 2021, 169:105511.
- [8] 罗主平, 刘建华, 孙业长, 等. 中国XRT智能预选抛废技术应用研究与实践[J]. 金属矿山, 2024(8):79-92.
LUO Z P, LIU J H, SUN Y C, et al. Application Research and Practice of XRT Intelligent Preselection and Waste Disposal Technology in China [J]. Metal Mine, 2024(8):79-92.
- [9] GÜLCAN E, GÜLSOY Y.Performance evaluation of optical sorting in mineral processing—A case study with quartz, magnesite, hematite, lignite, copper and gold ores [J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, 169:129-141.
- [10] LESSARD J, DE BAKKER J, MCHUGH L.Development of ore sorting and its impact on mineral processing economics [J]. Minerals Engineering, 2014, 65:88-97.
- [11] 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.
- [12] KNAPP H, NEUBERT K, SCHROPP C, et al.Viable applications of sensor-based sorting for the processing of mineral resources [J].ChemBioEng Reviews, 2014, 1(3):86-95.
- [13] 杨丘, 唐远, 郭劲, 等. 光电分选技术进展及其在磷矿选别中的应用与展望[J]. 化工矿物与加工, 2022, 51(9):24-29.
YANG Q, TANG Y, GUO J, et al.The development of photoelectric sorting technology, the application and outlook in beneficiation of phosphate rock [J].Industrial Minerals & Processing, 2022, 51(9):24-29.
- [14] ROBBEN C, WOTRUBA H.Sensor-based ore sorting technology in mining—past, present and future [J].Minerals, 2019, 9(9):523.
- [15] 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.Application Research of Photoelectric Beneficiation Technology in the Separation of Medium and Low Grade Collophosphate [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(7):217-222.
- [16] 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.Application of X-ray Sorting Technology in Phosphate Ore Beneficiation [J]. Industrial Minerals & Processing, 2020, 49(9):31-33, 39.
- [17] 李宇新, 童晓蕾, 李艳, 等. 重介质选矿, X射线分选在宜昌磷矿各矿层选矿的工业应用对比[J]. 化工矿产地质, 2020, 42(1):77-82.
LI Y X, TONG X L, LI Y, et al.Industrial Application Comparison of Heavy Medium Separation and X-ray Sorting in Various Ore Layers of Yichang Phosphate Mine [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 42(1):77-82.
- [18] 孙唯衡, 黄伟雄, 李亮, 等. 宜昌地区某中低品位磷矿光电选矿工艺试验研究[J]. 资源环境与工程, 2024, 38(4):457-462, 471.
SUN W H, HUANG W X, LI L, et al. Experimental Study on Photoelectric Beneficiation Process for a Medium-Low Grade Phosphate Ore in Yichang Area [J]. Resources Environment & Engineering, 2024, 38(4):457-462, 471.
- [19] AMAR H, BENZAAZOUA M, ELGHALI A, et al.Mine waste rock reprocessing using sensor-based sorting (SBS): Novel approach toward circular economy in phosphate mining [J]. Minerals Engineering, 2023, 204:108415.
- [20] 杨世中, 宋春雷, 胡江南. 选矿自动化在高原矿山的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2013(2):59-63, 78.
YANG S Z, SONG C L, HU J N.Application of Beneficiation Automation in Plateau Mines [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2013(2):59-63, 78.
- [21] 刘志国, 王传龙, 康金星, 等. 我国高原选矿技术发展现状[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(3):16-19.
LIU Z G, WANG C L, KANG J X, et al.Development Status of Plateau Mineral Processing Technology in China [J].China Mining Engineering, 2021, 50(3):16-19.