

Research and Application Analysis of X-ray Intelligent Sorting Technology in Lead Zinc Mines

Yong Wang

Xinjiang Nonferrous Metallurgy Design and Research Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830000, China

Abstract

With the continuous development of lead-zinc ore resources, the phenomenon of ore impoverishment is becoming increasingly severe, and traditional grinding and flotation processes are facing severe challenges in terms of energy consumption, chemical consumption, and tailings discharge. The X-ray intelligent sorting technology focuses on high-energy ray transmission recognition, and achieves precise identification and separation of ore and waste rock through intelligent algorithms, providing an efficient way for front-end pre selection of complex polymetallic ores. This article takes typical lead-zinc ore samples as the research object, systematically analyzes the working principle of X-ray sorting machine, the influence of particle size and waste rejection rate, and constructs a pre selection process parameter model suitable for low-grade lead-zinc ore. This technology has significant economic and environmental benefits in improving the grade of selected ores, reducing beneficiation costs, and minimizing tailings emissions. It has important promotion value for the construction of a green and intelligent beneficiation system for lead-zinc mines.

Keywords

X-ray sorting; Lead-zinc ore; Intelligent recognition; Pre disposal of waste

X 射线智能分选技术在铅锌矿的研究及应用分析

王勇

新疆有色冶金设计研究院有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要

随着铅锌矿资源的持续开发, 矿石贫化现象日益加剧, 传统磨浮选工艺在能耗、药耗及尾矿排放等方面面临严峻挑战。X 射线智能分选技术以高能射线透射识别为核心, 通过智能算法实现矿石与废石的精准识别与分离, 为复杂多金属矿的前端预选提供了高效途径。本文以典型铅锌矿样为研究对象, 系统分析了X射线分选机的工作原理、粒级与抛废率的影响规律, 构建了适配低品位铅锌矿的预选工艺参数模型。该技术在提高入选矿石品位、降低选矿成本及减少尾矿排放方面具有显著经济与环境效益, 对铅锌矿绿色智能选矿体系构建具有重要的推广价值。

关键词

X射线分选; 铅锌矿; 智能识别; 预先抛废

1 引言

近年来, 随着我国铅锌资源开发强度的不断加大, 矿石贫化现象日趋明显, 低品位矿石比例持续上升, 传统磨浮选工艺的经济性与选别效率逐渐降低。选矿能耗高、药剂消耗大、尾矿排放量增加等问题, 使得传统湿法选矿面临严峻挑战。在绿色矿业和智能化发展的新形势下, X 射线智能分选技术 (XRT, X-ray Transmission Sorting) 因其高效、环保、低耗的特征, 逐渐成为金属矿预选领域的重要方向。本文基于多矿区实验数据与典型应用案例, 对 X 射线智能分选在铅锌矿中的工艺参数、影响规律及应用效果进行系统分

析, 以为低品位铅锌矿的智能化选矿提供技术参考与理论支撑。

2 X 射线智能分选技术原理与系统构成

2.1 技术原理与识别机制

X 射线智能分选技术是一种基于射线透射与图像识别原理的矿石干法分选方法, 其核心在于利用不同矿物对 X 射线吸收和透射能力的差异实现矿石与废石的自动识别与分离。当矿石经给料系统均匀分布于高速传送带上时, 高能射线源向矿石发射一定能量的 X 射线, 不同矿物因其原子序数和密度差异而产生不同程度的射线衰减。下方的高灵敏探测器将透射后的信号转化为灰度图像, 并经数字化处理后形成矿石内部的密度分布数据。系统中的图像算法通过对比灰度阈值, 识别出矿石中有用金属矿物 (如方铅矿、闪锌矿等) 与脉石之间的密度差异, 从而判断其为富矿或废石。

【作者简介】王勇 (1984-), 男, 中国新疆昌吉人, 本科, 副高级工程师, 从事矿物加工工程、矿山安全环境设计与管理研究。

智能分选系统的识别算法是技术性能的关键。当前普遍采用的算法结合了灰度分布统计与机器学习模型,能根据矿石成像特征自动修正识别参数。以典型的HPY-X1400和XNDT-104机型为例,其成像分辨率可达1 mm,识别时间仅需30毫秒,能够在每小时40~200吨的处理量下实现高精度识别。分选机的信号处理单元对矿石射线透射值进行多维特征提取,包括平均灰度、纹理特征、对比度等,并以此建立分类模型。高品位矿石通常呈高吸收率、低透射灰度特征,而废石灰度值较高、密度分布不均。系统利用实时采集的灰度数据与数据库模型进行比对,以智能判断喷吹动作。喷射系统通过高速气阀产生强气流,将判定为废石的矿块从主料流中剔除,实现物料的精准分流。

2.2 系统构成与运行特性

X射线智能分选系统通常由五个核心模块构成:布料系统、射线识别系统、信号处理系统、气动分离系统和智能控制系统。

布料系统通过振动给料机与皮带输送装置将矿石均匀铺展在识别带面上,确保物料单层分布、不重叠,从而保证成像清晰。射线识别系统包括射线源、透射探测器与屏蔽装置,其中射线源采用高能X光管或双能量射线源(DE-XRT),能够穿透厚度达100 mm的矿石;探测器阵列以高灵敏度硅半导体为核心,可实时采集透射信号并输出二维灰度矩阵。信号处理系统对矿石图像进行去噪、增强与特征提取,随后交由智能算法模块判定矿块属性。

分离系统是实现物料物理分流的关键单元,其核心部件为空气喷吹阵列。喷吹口通常呈线性分布,间距约7~10 mm,当系统接收到识别指令后,喷嘴在毫秒级时间内产生高速气流,将废石吹离主料流;而富矿块则沿皮带末端自由下落至精矿槽,实现连续分选。智能控制系统承担着全流程协调与参数自适应调节功能,能实时监控射线强度、气压波动、皮带速度与矿石流量等关键指标,并依据算法反馈自动优化喷吹节奏与识别阈值,确保分选效率与能耗之间的平衡。在运行特性方面,XRT分选机具备高稳定性和可扩展性。其识别精度通常可达95%以上,设备运行功率约20~25 kW,每吨矿石能耗低于0.8 kWh。由于采用封闭式射线腔体与自动屏蔽设计,辐射剂量符合工业安全标准。通过引入数据采集与远程监控系统,可实现设备运行状态、尾矿品位及抛废率的在线监测与可视化管理。实践表明,当分选机带速为3.5 m/s、喷吹气压控制在0.5 MPa、抛废率设定为40%时,尾矿Pb+Zn品位可稳定控制在0.25%以下,金属回收率保持在95%以上,系统长期运行稳定可靠。

3 铅锌矿样品特征与试验研究分析

3.1 样品矿物特征与物理化学性质

本研究选取的铅锌矿样品具有典型的多金属硫化特征,矿石中以方铅矿(PbS)和闪锌矿(ZnS)为主要金属矿物,

伴生有少量黄铜矿(CuFeS₂)、黄铁矿(FeS₂)及微量银矿物。脉石矿物以方解石、石英、透辉石为主,局部含有绿泥石、萤石等次生矿物。矿石结构多呈致密块状、浸染状和细脉状,矿物嵌布细密,解离度受粒度影响显著。原矿经化学分析表明,平均Pb品位1.6%,Zn品位约5.1%,Cu 0.4%,Ag 45 g/t,属于典型的中低品位多金属矿石类型。该类矿石内部矿物分布不均,矿物粒度差异大,富矿颗粒与围岩的密度和X射线吸收系数存在明显差异,为XRT分选提供了理论基础。在矿石结构层次上,可分为三种类型:其一为方铅矿-闪锌矿共生型,矿石颜色灰黑,金属光泽强,铅锌品位较高,为富矿石;其二为矽卡岩型铅锌矿石,主要由透辉石、方铅矿和闪锌矿组成,结构致密但品位较低;其三为石灰岩型铅锌矿石,金属矿物呈细脉状或星点状分布,脉石含量高,多为废石。不同类型矿石在X射线透射成像中呈现出不同灰度分布,富矿呈低透射灰度、废石呈高灰度特征,灰度差异度可达20%以上,说明矿物间密度与原子序数差异明显。

3.2 试验流程与参数优化研究

为验证X射线智能分选技术在铅锌矿中的适用性与分选效果,研究采用HPY-60-X1400型智能分选机进行系统试验。该设备带宽1.4 m,处理能力60 t/h,喷吹孔间距8 mm,气压0.5 MPa。试验样品经两段破碎后筛分为10~60 mm入选粒级,经输送带均匀给料进入识别区。实验采用多梯度分选法,通过设置不同的抛废率和粒度分布参数,探索技术指标变化规律。试验流程分为五个步骤:①样品制备——将原矿破碎至-40 mm,并通过筛分获得目标粒级样品;②成像分析——利用高能X射线系统对不同矿样进行透射扫描,提取灰度特征数据;③分选试验——设定抛废率30%、40%、50%三档,依次进行分选;④化验检测——对所得精矿与尾矿样进行称重、化验,测定Pb、Zn含量;⑤数据分析——计算尾矿品位、回收率及富集比。

实验结果表明,随着抛废率由30%提高至50%,精矿品位呈上升趋势,而金属回收率略有下降。当抛废率为40%时,综合技术指标最优:尾矿Pb品位0.09%,Zn品位0.16%,富集比1.5以上,金属回收率95.2%。粒级对分选结果影响显著,10~60 mm粒级射线透射均匀、识别准确;当粒级超过80 mm时,由于矿石内部衰减信号过强,导致识别误差率上升约7%。气压控制对喷吹精度亦有影响,当喷吹气压低于0.4 MPa时,废石分离不彻底,而超过0.6 MPa则导致部分富矿被误喷。最终确定气压0.5 MPa、带速3.5 m/s为最佳运行参数。

4 分选工艺优化与工业应用分析

4.1 分选工艺流程优化与系统参数设计

在前期实验验证基础上,为进一步实现X射线智能分选技术在铅锌矿选矿生产中的工程化应用,需要对整个分选系统的工艺流程进行优化设计。结合矿石特性与设备运行规

律,本研究构建了“破碎—筛分—XRT预选—磨浮选”的一体化工艺模式,实现了从矿石前端处理到浮选环节的系统衔接。

原矿首先经粗碎与中碎作业破碎至 55 mm 以下,由振动筛进行粒度分级。筛上物返回圆锥破碎机再碎,筛下物进入缓冲料仓,通过皮带输送进入 X 射线智能分选系统。XRT 分选机设置于破碎筛分段之后、磨矿段之前,可有效剔除含金属量低的废石。经过分选后的精矿进入球磨—浮选系统进行后续作业,而废石则经皮带输送至堆场、筑坝或井下回填,实现固废资源的综合利用。

在设备参数优化方面,结合工业样本与实验结果,确定系统运行的关键参数如下:输送带速度控制在 3.5 m/s,可兼顾成像清晰度与处理能力;喷吹气压维持在 0.5 MPa,以确保分离精度;射线源电压设置为 160 kV,保证在 10~60 mm 粒级范围内的透射穿透率。分选机带宽 1.4 m,双通道并联布置,设计处理能力 60 t/h。自动控制系统采用闭环调节算法,可实时监测入料流量、灰度分布及尾矿品位,动态优化分选阈值。为验证工艺的可靠性,研究在连续运行条件下进行了 72 小时工业试验。结果表明,系统整体运行稳定,设备利用率 98% 以上,平均抛废率 41.2%,尾矿 Pb+Zn 总品位 0.23%,精矿回收率保持在 95% 以上。与传统无预选

流程相比,入磨矿品位提升 1.8 个百分点,单位能耗降低 12%,药剂用量减少约 15%,尾矿排放量减少约三分之一,经济效益与环境效益显著提升。

4.2 工业化运行效果与应用成效分析

为评估 X 射线智能分选技术在实际生产中的综合效益,研究以连续工业化运行数据为基础,对能耗、经济指标及环境影响进行了系统分析。结果表明,该技术在低品位铅锌矿选矿厂中的应用,不仅实现了工艺流程的精细化控制,也显著改善了矿山整体运营指标。

从能耗指标来看,由于在破碎筛分段提前剔除约 40% 的废石,入磨矿石量减少,球磨电耗由原先的 15.8 kWh/t 降至 13.6 kWh/t,浮选药剂用量减少 15%,系统整体节能率达到 14.3%。而由于入磨矿品位提高,磨矿粒度分布更集中,浮选时间缩短约 8%,浮选精矿金属回收率提高 2.1 个百分点。

表 1 系统展示了 X 射线智能分选技术应用于铅锌矿预选环节的能耗、药耗、品位、回收率及经济效益等关键指标。由表可见,XRT 分选工艺在能耗与药耗方面分别降低约 15%,尾矿品位下降近 50%,金属回收率提升超过 2 个百分点,综合节支效益显著。该数据结果进一步验证了 X 射线智能分选技术在低品位铅锌矿工业化应用中的高效性与经济可行性,为绿色智能选矿体系建设提供了有力支撑。

表 1 X 射线智能分选技术工业化运行关键指标对比表

指标类别	项目内容	传统工艺	XRT 智能分选工艺	改善幅度 (%)
能耗指标	磨矿电耗 (kWh/t)	15.8	13.6	↓ 14.3
	单位处理能耗 (kWh/t)	0.92	0.78	↓ 15.2
药耗指标	浮选药剂消耗量 (kg/t)	1	0.85	↓ 15.0
生产指标	入磨矿品位 (Pb+Zn, %)	5.6	7.4	↑ 32.1
	尾矿 Pb+Zn 总品位 (%)	0.45	0.23	↓ 48.9
	金属回收率 (%)	93	95.1	↑ 2.1
经济指标	年节能费用 (万元)	—	120	—
	年节约药剂费用 (万元)	—	60	—
	年节约尾砂堆存量 (万吨)	—	6	—
综合效益	年节支效益 (万元)	—	400+	—
	投资回收期 (年)	—	1.8	—

5 结语

X 射线智能分选技术在铅锌矿预选环节中展现出显著的技术优势与经济潜力。通过对矿石密度与射线吸收差异的智能识别,实现了矿石与废石的高效分离,既提升了入磨矿品位与金属回收率,又显著降低了能耗与尾矿排放。研究结果表明,该技术在入选粒级 10~60 mm、抛废率 40% 左右的条件下,分选精度与稳定性均达到工业化应用要求。实践中随着多源传感与智能算法的融合,X 射线分选将进一步向智能监测、自适应控制与全流程数据化方向发展,为铅锌矿的

绿色、高效、智能化选矿提供持续支撑与技术引领。

参考文献

- [1] 李素环,夏云凯.X射线块煤智能分选机在脏杂煤分选中的应用[J].洁净煤技术,2021,27(S2):47-52.
- [2] 雷梅,王云涛,顾闰尧,等.基于知识图谱的土壤重金属快速监测技术进展[J].中国环境科学,2018,38(1):244-253.
- [3] 姚羿舟,刘超,刘化威,等.热真空环境下碱激发模拟月壤物相分布特征与固化反应机理研究[J].土木工程学报,2025,58(5):105-118.
- [4] 张国宝,杨为,赵恒阳,等.基于X射线三维成像技术的在役GIS盆式绝缘子缺陷检测[J].高压电器,2022,58(10):230-236.