

# X射线荧光光谱分析法在矿石检测中的应用与实践

魏欢 冀佳怡

中国冶金地质总局第三地质中心实验室 山西 太原 030027

**摘要:** X射线荧光光谱(XRF)技术基于X射线激发物质产生特征荧光的原理实现成分分析,具有非破坏性特点。其仪器分波长色散型和能量色散型,近年技术进展显著。XRF在矿石检测中应用广泛,涵盖成分分析、品位评估、勘探资源评估及环境监测等场景。实践需做好样品制备、基体效应校正等工作。通过铜金属矿区、稀土矿分析等案例及便携式XRF实用性验证,表明XRF技术能提升矿石检测效率与精度,降低生产成本,助力矿业发展。

**关键词:** X射线荧光光谱(XRF); 矿石检测; 多元素分析

引言: 矿石检测作为矿业发展的关键环节,其准确性与效率直接影响资源开发利用成效。传统检测方法多依赖化学分析,存在流程繁琐、周期长、成本高等局限。随着科技发展,X射线荧光光谱(XRF)技术凭借非破坏性、多元素快速分析等优势,在矿石检测中崭露头角。本文将系统阐述XRF技术原理与仪器发展,深入剖析其在矿石检测各场景的应用,结合实践案例探讨优化策略,为矿业检测提供技术参考。

## 1 XRF 技术原理与仪器发展

### 1.1 基本原理

XRF技术基于X射线激发物质产生特征荧光来分析成分。高能初级X射线照射样品,使原子内层电子脱离形成空穴,外层电子跃迁填充时释放特征能量的次级X射线,即荧光X射线。检测其能量可确定元素种类,测量强度能计算含量,具有非破坏性。其核心依据是莫塞莱定律,元素特征X射线能量与原子序数平方呈线性关系,为元素定性分析提供理论基础,使精准识别不同元素成为可能。

### 1.2 仪器分类与特点

XRF仪器主要分为波长色散型(WDXRF)和能量色散型(EDXRF)两大类,二者各具鲜明特点。WDXRF通过晶体分光分离不同波长的荧光X射线,具有分辨率高、测量精度高的优势,能有效区分相邻能量的元素特征峰,适合痕量元素和复杂基体样品的精确分析,但仪器体积较大、分析速度较慢,多应用于实验室固定场景。EDXRF采用半导体探测器直接测量荧光X射线能量,结构相对简单、体积小,分析速度快,可实现多元素同时测定,便携式EDXRF更是具备现场检测能力<sup>[1]</sup>。不过其分辨率略低于WDXRF,在高含量元素分析时易受谱线干扰。此外,还有兼顾二者优势的混合型仪器,可根据检测需求灵活切换模式。

### 1.3 技术进展

近年XRF技术进步显著。探测器方面,硅漂移探测器(SDD)广泛应用,提升灵敏度和分辨率,常温下精准探测低能元素,缩短分析时间。光源上,新型微聚焦X射线管实现微区分析,同步辐射光源提供更强激发源。数据处理融入人工智能算法,优化谱图解析,自动识别重叠谱线并校正干扰。仪器小型化突破,便携式仪器重量轻、续航强,配合无线传输,可实时上传数据远程分析,拓展现场应用。

## 2 XRF 在矿石检测中的应用场景

### 2.1 矿石成分分析

XRF技术在矿石成分分析中发挥着核心作用,能快速测定矿石中主量、次量及痕量元素组成。对于金属矿石,可精准检测铁、铜、铅、锌等目标元素含量,同时识别硅、铝、钙等脉石元素分布。在非金属矿石分析中,能有效测定磷矿石中磷含量、石灰石中钙含量等关键指标。该技术无需复杂前处理,可直接分析块状、粉末状等多种形态矿石样品,避免了传统化学分析中酸溶、碱熔等步骤造成的元素损失。例如在铜矿石分析中,可在数分钟内完成铜、硫、铁等元素的同时测定,且检测结果与化学分析法一致性良好。通过元素组成分析还能判断矿石成因类型,为矿石加工工艺制定提供基础数据,提升选矿流程的针对性和效率。

### 2.2 矿石品位快速评估

XRF技术是矿石品位快速评估的关键手段,尤其适用于矿山开采现场的实时检测。在金矿开采中,可直接对开采出的原矿进行检测,快速测定金元素含量,判断矿石是否达到工业开采品位,及时指导开采作业,避免低品位矿石无效开采。对于铁矿,能快速测定全铁含量,结合矿石量计算金属量,为采矿计划调整提供依据<sup>[2]</sup>。相较于传统化学分析需数小时甚至数天的检测周期,XRF技术可将分析时间缩短至数分钟,实现批量样

品的快速筛查。在选矿厂,可对选矿流程中的原矿、精矿、尾矿进行实时检测,监控各环节品位变化,及时调整选矿参数,提升精矿品位和回收率,降低生产成本,为生产过程的动态管控提供有力支撑。

### 2.3 矿区勘探与资源评估

在矿区勘探阶段,XRF技术可高效完成地质样品的多元分析,为矿体圈定和资源评估提供数据支持。勘探人员携带便携式XRF仪器深入野外现场,对岩芯、土壤及矿石样品进行即时检测,快速确定目标元素异常区域,缩小勘探范围,提高钻孔布置的精准度。例如在铅锌矿区勘探中,通过现场检测岩芯样品中铅、锌元素含量变化,可清晰界定矿体边界和延伸方向。在资源评估环节,利用XRF技术对大量勘探样品进行批量分析,测定目标元素平均含量,结合勘探区面积、矿体厚度等地质数据,可快速估算矿产资源量。该技术避免传统实验室分析样品运输和等待周期长的问题,大幅缩短勘探周期,降低勘探成本,提升资源评估的时效性和准确性。

### 2.4 环境监测与污染评估

XRF技术在矿区环境监测与污染评估中应用广泛,能有效检测土壤、水体沉积物中重金属元素含量。矿山开采和选矿过程中产生的尾矿、废水易导致周边土壤受到铅、镉、汞、砷等重金属污染,利用XRF技术可快速筛查污染区域,测定污染物种类和含量。例如在铁矿开采区,可检测周边土壤中铁、锰及伴生重金属含量,评估污染范围和程度。对于尾矿库周边环境,可定期监测土壤重金属含量变化,预警污染扩散风险。该技术无需对样品进行复杂消解处理,能最大程度保留样品原始状态,减少检测过程中二次污染。同时,便携式仪器可实现现场多点检测,形成污染分布图谱,为污染溯源和治理方案制定提供科学依据,助力矿区生态环境修复。

## 3 XRF 分析的实践方法与优化策略

### 3.1 样品制备与处理

样品制备与处理作为保证XRF分析准确性的核心环节,必须依据矿石类型与形态差异,采取精准适配的方法。针对块状矿石样品,要先用砂轮或切割机仔细去除表面氧化层与杂质。这一步至关重要,因为氧化层和杂质会干扰检测结果。同时,要确保检测面平整光滑,最大程度减少表面粗糙度对荧光强度的不良影响,让检测数据更可靠。粉末状样品处理流程更为复杂,需先进行烘干,去除水分,接着研磨、过筛,去除大颗粒杂质。研磨需达到200目以上,如此才能保证样品均匀性,有效避免颗粒度效应对分析的干扰。对于易吸潮或具有挥发性的矿石样品,烘干后要立即开展检测,防止样品成分

发生变化,影响最终分析结果。压片法是常用的处理方式之一。将粉末样品加入适量粘结剂,再用压片机压制成直径30-50毫米的圆片,能显著提高样品密实度。而对于高熔点、难熔矿石,熔融法更为合适。把样品与助熔剂按特定比例混合,经高温熔融制成玻璃熔片,可有效消除颗粒度和矿物效应,大幅提升分析精度,在复杂基体矿石分析中优势明显。

### 3.2 基体效应校正

基体效应是影响XRF分析准确性的主要因素,包括吸收效应和增强效应,需采用科学方法校正。吸收效应指样品中主量元素对目标元素荧光X射线的吸收,增强效应则是主量元素被激发后产生的荧光X射线再激发目标元素。常用校正方法包括经验系数法,通过建立标准样品中目标元素强度与含量的校准曲线,引入基体元素浓度作为经验系数修正误差。理论影响系数法基于X射线荧光产生和传播的物理理论,计算基体元素对目标元素的影响系数进行校正。基本参数法是更精准的校正方式,无需大量标准样品,通过输入样品组成、元素原子序数等基本参数,利用计算机模拟计算基体效应校正系数。对于复杂多元素矿石,可结合多种校正方法,例如经验系数法结合基本参数法,有效降低基体效应带来的误差,提升分析准确性<sup>[1]</sup>。

### 3.3 仪器校准与标准化

仪器校准与标准化是XRF分析的基础工作,需定期开展以保证仪器稳定性和检测精度。校准前需对仪器进行预热,确保X射线管、探测器等核心部件处于稳定工作状态,预热时间通常不少于30分钟。校准需采用国家认可的标准物质,选择与待测矿石基体相似的标准样品,覆盖目标元素含量范围,建立校准曲线。波长色散型仪器需校准晶体角度和探测器位置,确保准确捕捉特征谱线;能量色散型仪器需校准能量刻度,保证元素能量识别的准确性。日常检测前需进行标准化检查,使用监控样品检测,若检测值超出允许误差范围,需重新校准。另外,还需定期对仪器进行维护保养,清洁探测器窗口和样品室,检查X射线管高压和电流稳定性,确保仪器长期处于良好工作状态。

### 3.4 数据分析与软件应用

数据分析与软件应用是XRF分析的关键环节,直接影响检测结果的解读和应用。现代XRF仪器配套专业分析软件,具备谱图采集、解析、数据处理等功能。谱图解析时,软件可自动识别元素特征峰,通过峰面积计算荧光强度,结合校准曲线换算成元素含量。对于谱线重叠问题,软件可采用解谱算法,如非线性最小二乘法分

离重叠峰,提高元素识别准确性。数据处理过程中,软件可自动扣除背景干扰,校正仪器漂移带来的误差。部分高级软件还具备数据统计分析功能,可对批量样品数据进行均值、标准差计算,生成分析报告和元素分布图谱。数据可导出为Excel、PDF等格式,方便数据归档和共享。针对特定矿石分析需求,可定制开发软件模块,例如稀土矿石分析模块,优化重稀土元素的谱图解析算法,提升分析效率。

#### 4 案例分析与实践效果

##### 4.1 铜金属矿区的XRF应用实例

在云南铜金属矿区的开采作业中,引入XRF技术实现了铜矿石检测的全流程管控。勘探阶段,技术人员携带便携式XRF仪器对矿区120个岩芯样品进行现场检测,快速测定铜、硫、铁等元素含量,结合地质数据圈定出3处铜含量异常区域,指导钻孔布置,使勘探钻孔数量减少30%,大幅降低勘探成本。开采阶段,在采矿工作面设置XRF检测点,对开采出的原矿进行实时检测,快速判断铜品位,及时调整开采区域,避免低品位矿石混入。选矿厂利用实验室WDXRF仪器对原矿、精矿、尾矿进行批量分析,每小时可检测40个样品,根据检测结果调整浮选药剂用量,使铜精矿品位从18%提升至22%,回收率提高5%。通过XRF技术的全流程应用,该矿区生产效率提升20%,生产成本降低15%,实现了高效精准开采。

##### 4.2 稀土矿分析中的挑战与解决方案

稀土矿因含有17种稀土元素,且部分元素原子序数相近、谱线重叠严重,XRF分析面临诸多挑战,主要表现为轻稀土与重稀土元素分离困难、痕量稀土元素检测灵敏度不足。针对这些问题,采用多项优化方案:样品处理采用熔融法,将稀土矿样品与四硼酸锂助熔剂按1:10比例混合,在1050℃高温下熔融制成玻璃熔片,消除矿物效应和颗粒度效应。仪器校准选用高纯度稀土氧化物标准物质,配制12个梯度浓度的标准样品,覆盖轻、重稀土元素含量范围,建立专属校准曲线。数据处理采用高级解谱软件,结合蒙特卡洛模拟算法分离重叠谱线,如分离铈和钕的特征峰。同时采用二次激发技术提升痕量稀土元素的荧光强度,提高检测灵敏度。应用这些方

案后,稀土元素检测相对误差小于3%,完全满足稀土矿分析的精度要求。

##### 4.3 现场便携式XRF的实用性验证

为验证现场便携式XRF的实用性,在内蒙古铁矿开展对比试验,选取50个铁矿样品,分别采用便携式XRF仪器现场检测和实验室化学分析法检测,对比全铁含量检测结果。试验结果显示,便携式XRF仪器现场检测每个样品仅需3分钟,50个样品4小时内完成检测;而实验室化学分析法每个样品需2小时,50个样品耗时100小时,XRF检测效率提升25倍<sup>[4]</sup>。检测精度方面,便携式XRF检测结果与化学分析法结果的相关系数达0.98,相对误差均小于5%,满足铁矿品位检测的精度要求。在矿区复杂环境下,便携式XRF仪器表现出良好的稳定性,在-10℃至40℃温度范围内,检测结果波动小于2%。该验证试验表明,便携式XRF仪器在现场检测中具备高效、精准、稳定的特点,完全可替代传统化学分析法用于现场快速检测。

##### 结束语

X射线荧光光谱分析法凭借其独特的技术优势,在矿石检测领域发挥着不可替代的作用。从矿石成分分析到品位快速评估,从矿区勘探到环境监测,其应用场景广泛且成效显著。通过不断优化实践方法,如改进样品制备、校正基体效应等,进一步提升了分析的准确性与可靠性。案例分析也充分证明该技术在实际应用中的高效性与实用性。未来,随着技术持续发展,XRF将在矿石检测领域创造更大价值。

##### 参考文献

- [1]陈振雄.X射线荧光光谱分析法在矿石检测中的应用与实践[J].世界有色金属,2024(2):58-60.
- [2]刘美晨.X射线荧光光谱分析法在检测铁矿石组分中的应用[J].冶金与材料,2020,40(1):112-113.
- [3]赵力颖,程琳,马梦玲,等.探析X射线荧光光谱分析法在矿石检测中的应用[J].中国金属通报,2023(10):176-178.
- [4]郭锐.基于X射线荧光光谱分析的锌冶炼固废金属分析[J].山西冶金,2025,48(6):139-141.