

摘要

铜精矿、硫精矿是非煤矿山重要的冶炼原料，其品位及杂质元素含量直接决定矿产品交易结算、冶炼工艺参数调整与矿山生产效益。X 射线荧光光谱法凭借前处理简便、检测速度快、多元素同步测定、适合批量分析等特点，广泛应用于非煤矿山铜硫精矿日常化验工作。但受样品制备、基体效应、粒度水分、谱线干扰、仪器稳定性、人为操作等因素影响，化验结果易出现系统误差与随机误差，影响矿山生产管控的准确性。本文基于非煤矿山铜、硫精矿生产检测实际，阐述荧光化验分析的基本原理，系统梳理化验过程中的主要误差来源，从样品预处理、基体校正、仪器条件优化、干扰消除、全过程质量管控等方面提出误差控制措施与质量提升策略，为非煤矿山铜硫精矿精准化验、选矿工艺优化、矿产品质量监管提供技术参考。

关键词：非煤矿山；铜精矿；硫精矿；X 射线荧光光谱；误差控制；质量提升

引言

在我国矿产资源开发体系中，铜、硫矿产属于关键工业原料，主要来源于非煤矿山开采及浮选选矿作业。铜精矿用于有色金属冶炼，硫精矿是制酸、化工生产的核心原料，二者产品等级严格，对铜、硫主元素及铁、铅、锌、砷、硅、钙等杂质含量有着明确指标要求。非煤矿山选矿生产节奏快、样品数量大，传统化学滴定、原子吸收等湿法检测方法消解流程复杂、耗时长、试剂消耗多，无法满足实时生产监控需求，而 X 射线荧光光谱化验技术可实现快速批量检测，已成为矿山质检实验室主流手段。

铜精矿与硫精矿矿物结构复杂，硫化矿物占比高、基体差异大、伴生杂质元素多，常规荧光检测易受矿物效应、粒度效应、基体吸收增强效应干扰，导致铜、硫主品位及有害杂质检测偏差，不仅影响精矿产品定级与市场交易公平性，还会误导浮选药剂调整、磨矿细度控制等生产决策，造成资源浪费与经济损失。同时部分中小型非煤矿山质检体系不完善，化验操作不规范、质量控制薄弱，进一步加大检测误差。因此，开展铜精矿、硫精矿荧光化验误差控制与质量提升研究，对规范非煤矿山检测流程、提高数据可靠性、实现矿山精细化生产管理具有重要现实意义。

1 荧光光谱法检测铜硫精矿基本原理

X 射线荧光光谱法利用高能 X 射线照射铜精矿、硫精矿样品，激发样品内部元素内层电子跃迁，释放出对应元素特征波长的荧光射线。不同元素荧光能量、波长具有唯一性，仪器通过分光系统分离特征谱线，测定谱线强度，结合标准曲线与基体校正模型，完成铜、硫主元素及铁、铅、锌、砷等次元素的定量分析。

非煤矿山实际检测主要采用粉末压片法和熔融玻璃片法。压片法操作便捷、检测速度快，适用于选矿车间快速筛查；熔融法通过高温熔剂稀释样品，有效消除粒度、矿物效应，检测精

度更高，用于仲裁检验与精准计量。荧光检测无需强酸强碱消解，绿色安全，可一次性完成数十个样品多元素同步分析，大幅提升非煤矿山质检效率。

2 非煤矿山铜硫精矿荧光化验主要误差来源

2.1 样品制备不规范带来的误差

铜硫精矿含水量波动较大，水分会吸收 X 射线，造成检测结果偏低；样品研磨粒度不均，颗粒粗糙会产生粒度效应，影响谱线强度；压片压力不足、样品表面不平整、压片厚度不一致，都会导致信号不稳定。硫精矿硫化物黏性强，研磨分散性差，极易出现制样不均匀，是主要误差来源之一。

2.2 基体效应与谱线重叠干扰误差

铜、硫精矿中铁、硅、钙、铅、锌含量较高，基体元素对铜、硫存在明显吸收- 增强效应；铜元素与铁、锌存在谱线重叠，硫元素受轻元素干扰严重；硫精矿中大量硫化物矿物效应突出，不同矿物形态会改变荧光强度，常规校正方式难以完全消除，造成系统误差。

2.3 仪器参数与标准曲线适配性误差

部分矿山直接使用通用矿物标准曲线，未针对高硫、高铜基体建立专用校准模型；仪器管压、管流、测试时间设置不合理，硫、砷等轻元素检出限偏高；仪器长期运行未进行漂移校正、能量校准，出现基线偏移，导致连续批次样品检测系统性偏差。

2.4 人为操作与质量管控薄弱

化验人员对基体校正、干扰扣除理解不足，数据处理方式不统一；平行样、空白样、质控样执行不到位；实验室环境温湿度不稳定、粉尘污染光路；缺乏与湿法化学方法比对验证，误差长期累积无法发现，严重影响数据准确性。此外，矿山日常生产中原矿品位波动、选矿药剂残留，也会间接改变精矿基体成分，给荧光检测带来隐性干扰。

3 铜精矿硫精矿荧光化验误差控制与质量提升策略

3.1 规范样品前处理，从源头降低误差

样品在 105℃ 恒温烘干至恒重，彻底去除水分；采用行星式研磨机研磨至 200 目以上，硫精矿可添加少量助磨剂，提升颗粒均匀性；统一压片压力、保压时间，采用硼酸镶边压片，保证样品表面平整致密。仲裁检测采用熔融制样，消除粒度与矿物效应，提升硫、铜低杂质含量检测精度。

3.2 优化基体校正，消除谱线干扰

采用理论 α 系数法结合经验系数法，针对铜精矿、硫精矿高硫高铜基体单独建立校正模型；对铜- 锌、铜- 铁重叠谱线设置重叠校正系数；优化硫元素测试条件，降低轻元素基体吸收

干扰。区分硫化矿与氧化矿样品，分别校正矿物效应，提升结果稳定性。

3.3 优化仪器运行条件，提升设备稳定性

合理设置 X 射线管管压管流，硫、砷等轻元素开启真空模式，适当延长测试时间；定期开展仪器漂移校正、强度校正、能量刻度校准；做好仪器防尘、防潮维护，减少光路污染。针对非煤矿山批量检测，设置快速检测模式与精准检测模式，兼顾效率与精度。

3.4 建立专用标准曲线，完善质量控制体系

选用国家一级标准物质结合矿山实际梯度样品，建立铜精矿、硫精矿专属标准曲线；严格执行平行样测定、空白试验、加标回收试验；定期开展实验室间比对、能力验证，将荧光结果与化学滴定法比对，及时修正系统误差。完善原始记录，实现检测全过程可追溯。

3.5 强化人员管理与实验室标准化建设

加强化验人员专业培训，熟练掌握基体校正、干扰识别、数据处理技能；规范实验室温湿度、洁净度管理，分区存放样品与标准物质；建立矿山化验质量考核制度，将误差控制纳入日常管理，提升整体检测水平。同时搭建简易化验数据台账，对每日、每周检测误差进行统计分析，及时发现检测异常并整改。

4 结语

在非煤矿山铜、硫矿产选矿生产与矿产品贸易中，荧光光谱化验数据是生产调控、质量评价、交易结算的核心依据，误差控制直接关系矿山经济效益与行业规范发展。铜精矿、硫精矿因矿物成分复杂、硫化物含量高、基体波动大，荧光化验易受样品制备、基体效应、仪器条件、人为操作等多重因素影响产生误差。

通过规范样品前处理、优化基体校正与干扰消除、完善仪器参数、建立专用标准曲线、健全全过程质量管控体系，能够有效降低随机误差与系统误差，显著提升荧光化验结果的准确度与稳定性。优化后的检测模式既满足非煤矿山大批量样品快速筛查需求，又保障数据精准可靠，可为选矿工艺优化、生产参数调整、绿色矿山建设提供坚实技术支撑，推动非煤矿山行业向精细化、标准化、智能化方向高质量发展。

参考文献

- [1] 陈立伟, 周伟, 刘军. X 射线荧光光谱法测定铜精矿主次元素的误差控制[J]. 岩矿测试, 2021,40(02):245- 251.
- [2] 李艳, 张凯, 王海涛. 硫精矿 XRF 检测基体效应影响及校正方法研究[J]. 有色金属分析, 2022,42(08):55- 60.
- [3] 赵峰, 孙明, 高晓宇. 非煤矿山铜硫精矿快速检测质量控制要点[J]. 矿产保护与利用, 2023,43(03):98- 103.
- [4] 吴浩, 陈明, 李雪. 熔融制样- XRF 法在铜精矿化验中的应用优化[J]. 冶金分析, 2020,40(09):34- 39.

[5] 王丽娜, 杨杰, 朱磊. 矿山精矿荧光光谱分析误差来源及质量提升对策[J]. 环境监测管理与技术, 2022,34(04):67- 71.