

矿石品位在线检测技术发展研究

王怀远^{1,2,3}, 刘政宇^{2,3}, 曲福明^{2,3*}, 王连成^{2,3}, 岳星彤^{1,2,3}, 张兴帆^{2,3,4}, 邵安林³

(1. 鞍钢集团北京研究院有限公司, 北京 102209; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;
3. 北京科技大学矿产研究院, 北京 100083; 4. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110169)

摘要: 矿石品位是衡量矿产经济价值的核心指标, 相应在线检测能力事关矿山企业经济效益、环境影响和生产智能化水平。本文论述了矿石品位在线检测技术的应用价值及分类情况, 从放射性检测、光学检测、电磁检测、机器视觉检测等技术方向出发, 梳理了矿石品位在线检测技术研究与应用进展; 辨识了相关技术发展面临的挑战, 涵盖技术研究层面的精度瓶颈与干扰因素、信号解析与优化难题、模型构建与数据依赖关系, 实际应用层面的辐射安全与成本效益考量、适应多样矿石特性的技术突破、恶劣环境下稳定运行与即时反馈。进一步阐述了矿石品位在线检测技术未来发展方向, 包括多模态融合与智能感知技术前沿探索、智能感知与数据处理算法迭代升级、微型化/远程化/智能化设备研发、实时动态监测网络系统构建与优化等关键技术攻关突破内容, 深度学习促进微观与宏观特征融合分析、量子计算与生物启发算法、智能传感器网络与物联网技术等新兴技术前瞻探索内容。建议在技术创新与设备升级、标准制定与规范建设、“产学研用”合作机制深化、人才培养与队伍建设、国际合作与资源共享等方面积极行动, 以矿石品位在线检测技术提升促进矿产资源开发利用的智能化、高效化发展。

关键词: 矿石品位; 在线检测; 放射性检测; 光学检测; 电磁检测; 机器视觉检测

中图分类号: TD854 **文献标识码:** A

Development of Online Detection Technologies for Ore Grade

Wang Huaiyuan^{1,2,3}, Liu Zhengyu^{2,3}, Qu Fuming^{2,3*}, Wang Liancheng^{2,3}, Yue Xingtong^{1,2,3},
Zhang Xingfan^{2,3,4}, Shao Anlin³

(1. Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Institute of Minerals Research, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China)

Abstract: The ore grade is a core indicator for measuring the economic value of minerals, and its online detection capability is related to the economic benefits, environmental impact, and production intelligence level of a mining enterprise. This study discusses the application value and classification of online detection technologies for ore grade and summarizes the research and application progress of these technologies in terms of the following technical directions: radioactive, optical, electromagnetic, and machine-vision detection. Challenges faced by the development of related technologies are identified at the technical research and practical application levels. Challenges at the technical research level include (1) accuracy bottlenecks and interference factors, (2) difficulties in signal analysis and optimization, and (3) model construction and data dependency. Challenges at the practical application level

收稿日期: 2024-03-26; **修回日期:** 2024-05-10

通讯作者: *曲福明, 北京科技大学土木与资源工程学院副教授, 研究方向为智慧矿山; E-mail: steve_qufm@126.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国矿产资源安全战略研究”(2022-XBZD-27)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

include (1) radiation safety and cost-effectiveness, (2) technological breakthroughs adapted to diverse ore characteristics, and (3) stable operation and real-time feedback in harsh environments. The study further elaborates on the future development directions of online detection technologies for ore grade. Future efforts should focus on breakthroughs in exploring the forefront of multimodal fusion and intelligent perception technologies, iterating and upgrading intelligent perception and data processing algorithms, developing miniaturized/remote/intelligent equipment, and constructing and optimizing real-time dynamic monitoring network systems. Moreover, emerging technologies, such as deep learning for promoting the fusion analysis of micro and macro features, quantum computing and bioinspired algorithms, as well as intelligent sensor networks and the Internet of Things technology, are summarized. Furthermore, active actions are recommended in the following aspects: (1) technological innovation and equipment upgrading, (2) standards formulation and standardization construction, (3) deepening of the industry-education-research-application cooperation mechanism, (4) talent cultivation and team building, and (5) international cooperation and resource sharing, thereby promoting the intelligent and efficient development and utilization of mineral resources.

Keywords: ore grade; online detection; radiological testing; optical testing; electromagnetic testing; machine vision inspection

一、前言

矿石品位指矿石中有价成分（如元素、化合物、矿物）的质量含量，多以百分比形式表示；作为衡量矿石中目标矿物含量的关键指标，决定了矿产资源的经济价值和开采可行性，对于矿山工程、开采工艺、选矿工艺流程等的设计与优化，甚至整个矿业经济运行具有重要意义^[1-11]。对应地，矿冶生产各工程系统的“产物”质量集中体现在品位上。以铁矿石为例，生产地质勘查系统的地质品位、采矿工程系统的采出品位、质量均衡系统的入选品位、选矿工程系统的精矿品位、球团烧结工程系统的入炉品位^[12,13]等是核心指标，需及时掌握以利于生产调节。

现代矿业朝着精细化、高效化方向发展，传统的离线化学检测方式不再满足实时决策、动态调整等需求^[14]，因而矿石品位在线检测技术应运而生。该技术能够实时获取矿石的品位信息，为矿山生产过程提供直接指导，有效提升资源利用率并降低能耗，同步改善经济效益与环境效益；还能够从源头确保产品质量，提高相关企业的市场竞争力。近年来，矿石品位在线检测技术在世界范围内得到了快速发展，各种新型检测手段促进了应用成熟。然而，面对更为复杂的矿产资源条件，更高的开采要求，相关技术面临着一系列挑战，如对样品整洁度要求高，设备探测范围不足、辐射量大、成本较高、精度有限，稳定性与适应性差^[15]。

立足矿石品位在线检测技术发展现状，剖析关键问题、辨识发展趋势、阐明发展方向等兼具学术和应用价值。为此，本文探讨矿石品位在线检测技术发展课题，以推动我国矿石品位在线检测朝着智能、精准、绿色、高效方向发展。

二、矿石品位在线检测技术的应用价值及分类

（一）矿石品位在线检测技术的应用价值

自 2000 年以来，随着信息技术的快速发展，矿石品位在线检测技术取得了显著突破，应用价值明确且成效突出：在技术层面实现了检测效率与准确性的跃升，在产业层面引导了矿业向资源高效、环境友好、智能驱动的现代发展模式转变，对促进世界经济绿色增长、保障关键资源稳定供给具有重要意义。

一是促进资源高效与精准利用。随着新型中子源与探测器系统的研发与应用，中子活化分析方法的精准性与实时性显著增强，为矿产资源在线检测提供了近乎实时的品位数据，使矿山企业能够快速定位高品位矿石区域，据此优化开采策略，避免资源浪费。X 射线荧光（XRF）技术的优化升级、激光诱导击穿光谱（LIBS）技术的兴起，实现了多元素快速检测和微区精确分析，促进了采矿作业的精细化管理，提高了资源回收和利用效率。

二是推动环境友好型矿业发展。近红外光谱技术与化学计量学模型相结合，显著提高了对复杂矿石成分的识别精度，有利于矿产资源科学利用，促进尾矿的合理分类与环保处理，减少对环境的负面影响。磁感应分选、电导率测量等电磁检测技术的进步，提高了检测速度和准确性，减少了不必要的资源开采与加工，推进了绿色矿业的工程实践。

三是加快矿业智能化进程。基于机器学习、图像识别等技术，开展矿石颜色、纹理等特征的智能解析，提高了品位预测的智能化水平，为矿山自动化、智能化生产提供了支撑。相关技术的融合应用，有利于优化生产流程、提高决策的科学性与响应速度，增强了矿山企业的市场竞争力。

四是促进技术与产业协同发展。矿石品位在线检测技术的发展过程，体现了从单一技术的独立研发到多元技术的创新与集成，标志着矿业技术体系的完善与成熟。这一过程不仅带动了高端装备制造业、数据分析、人工智能（AI）的发展，而且促进了“产学研”深度合作，加速了科研成果转化应用，为矿业升级与可持续发展提供了直接动力。

（二）矿石品位在线检测技术分类

矿石品位在线检测技术作为现代矿业智能化和高效化发展的核心支撑，其技术体系涵盖了多个维度，不仅限于放射性检测、光学检测、电磁检测以及基于机器视觉的品位检测等基础领域，还包括诸多新兴技术和跨界融合的创新应用。典型检测技术见表1。

三、矿石品位在线检测技术研究与应用进展

（一）放射性检测技术

1. X射线荧光检测技术

XRF检测技术通过X射线激发矿石原子，分析释放的特征荧光能量与强度（见图1），据此快速测定元素含量^[16]。近年来，XRF检测技术的分析精确度与应用范围取得了进一步突破。一方面，优化样品制备与矿物效应控制，实现了包括钛铁矿在内的多元素高精度测定；即使粒度减小至74 μm，仍保持较高精度^[17]。在特定矿石的分析过程中，精密配制标准样品，通过XRF检测构建多元素曲线，有效校正基体效应，将测量精度提升至相对标准偏差5.6%以内，尤其适用于硅酸盐矿石^[18]。另一方面，

表1 矿石品位在线检测技术分类

技术类别	传感器类型	分辨机制	典型应用领域	不适用领域	检测速度	探测范围（以中等密度矿石为例）
放射性检测技术	热中子活化（PGNAA）	瞬发中子活化伽马射线能谱信号	Fe、Cu、煤	Li、Be、B等轻元素	数秒~数十秒	穿透（分米级）
	脉冲中子活化	脉冲热中子活化伽马射线能谱信号	Ni、Fe、Cu、钻石、煤	Li、Be、B等轻元素	数秒~数十秒	穿透（分米级）
	X射线荧光	荧光光谱信号	Au、Ag、Cu、Pb、P、稀土	Li、Be、B、Cd	数秒~数分钟	表面（毫米级）
	（双能）X射线透射（XRT）	X射线吸收特性（原子密度）	Pb、Zn、W、U、煤、稀土	Li、Be、B等轻元素	数秒~数十秒	穿透（厘米级）
光学检测技术	激光诱导击穿光谱（LIBS）	等离子体光谱信号	Fe、Al、Cu、Ti、Li、Au	Li、Be、B等轻元素	毫秒级	表面（<1 mm）
	激光诱导荧光（LIF）	荧光光谱信号	P、U、稀土、煤	Fe、Al、Cu、Au	毫秒级	表面（<1 mm）
	近红外光谱（NIR）	近红外波反射、透射、吸收特性	Fe、Cu、Zn、P、煤、稀土	Au、Ag、Pt、石墨、钻石	毫秒级	表面（<1 mm）
	高光谱检测	物质对不同波长电磁辐射的吸收、反射和散射特性	Fe、Cu、Au、煤	含油矿、黏土	毫秒级	表面（<1 mm）
电磁技术	电磁	电导率、磁导率	Fe、Cu、Zn	石英、白云石、长石等不含或含少量导电矿物成分的矿石	毫秒级	穿透（分米级）
	涡电流	金属在高频变化的磁场中产生感应电流	Fe、Cu、Zn	石英、白云石、长石等不含或含少量导电矿物成分的矿石	毫秒级	穿透（厘米级）
机器视觉技术	摄像机	图像识别	金属矿、钻石	花岗岩类矿石、硅酸盐类矿石、一切表面覆盖或风化严重的矿石	毫秒级	表面（<1 mm）

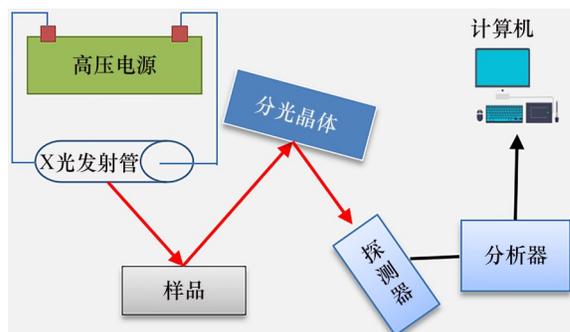


图1 XRF检测流程

XRF 熔片法与 KNN 算法结合应用，提高铁矿石的品位自动化检测能力^[19]；可用于环境监测，可自动有效地检测重金属是否符合土壤污染详查标准^[20]。也要注意，XRF 检测技术仍有一些局限，对轻元素（如 H、He、Li）的检测灵敏度低，细粒或复杂基质矿石可能受遮蔽效应影响而降低检测精度^[21]。

目前，XRF 检测技术因其操作简便、可无损检测的特点，在 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Ni、Co、Fe、稀土等金属矿产，P、煤等多种非金属矿产的品位测定上发挥了重要作用，也在环境样品中的重金属快速筛查方面开展应用。尽管存在特定局限，但通过技术创新与新算法辅助，未来能够拓宽应用边界并提升检测效能。

2. (双能) X 射线透射检测技术

XRT 检测技术的主要原理为：利用不同能量等级的 X 射线穿透矿石样品，矿石中各种元素或矿物质对不同能量 X 射线的吸收特性各异；通过测量 X 射线穿过矿石后的衰减程度差异，推断矿石的粒度分布、矿石类型、有用矿物含量等关键参数^[22,23]。XRT 检测技术广泛应用于金属、非金属矿产的在线检测，以其实时性与高精度著称，但实施时需严格遵守辐射安全规范。

① 在算法与应用创新方面，利用 XRT 检测技术并结合感知器算法构建分类曲线，可有效判断矿石品位，与实际品位高度匹配^[14]。针对钨矿石系列开展细致研究，揭示了矿石品位与矿物缩分系数之间存在正相关性，相应的检测准确率超过 90%^[24]。② 特定矿种检测取得突破，针对铀矿石提出的 SAxVit 算法，具有高效率、高识别率（95.7%）的优势，促进了铀矿品位的快速识别，支持建立了铀元素 L 边 X 射线透射光谱检测体系^[25,26]。③ 在技术融合创新方面，图像处理与 XRT 检测技术相结合，

有效提升了对复杂矿石（含稀土及多金属矿）的识别精度^[27]。针对铅锌矿低品位实际，发展 XRT、三维激光技术的融合预选策略，提高了废石分离效率，减少了金属损失^[28]。

3. 中子活化分析检测技术

中子活化分析检测技术基于核物理原理，可实现元素含量的在线无损测定；分析中子与样品原子核相互作用产生的特征伽马射线，确定特定元素的含量^[29]。① 相比热中子技术，冷中子技术对硅等元素的分析灵敏度显著增强，也提升了对 B、Ca、Ti、S 等元素的检测效果，呈现高灵敏特性^[30]。② 成功应用于 Cu、Ni 等关键金属的品位检测，符合工业标准，可确保现场检测的精度与稳定性^[31]。③ 在煤炭品质控制方面，分析不同地区的煤样，揭示煤炭中有害元素的分布及燃烧变化规律，有利于煤炭清洁利用^[32]。④ 中子活化分析技术拓展至大气、水体的环境监测应用，成功检测出 K、Na、Ca 等 40 余种元素的浓度变化^[33,34]。

中子活化分析检测技术的优势是在不破坏样品的前提下对多种矿物成分进行高灵敏度、准确的测定，尤其适合复杂矿石中多种元素含量的实时在线检测，可提升资源利用效率并简化样品预处理步骤。该技术可同时测定多类元素的品位，对于一些轻元素具有较高的灵敏度，但是设备昂贵、辐射风险较高^[35]。例如，PGNAA 在煤炭品质控制、金属矿产与非金属矿产分析、环境科学和地质勘探等领域中，均展现出良好的适用性和实用性，特别是在铁矿石、铜矿石、煤炭等的品位检测上应用广泛。

(二) 光学检测技术

1. 激光诱导荧光检测技术

LIF 检测采用激光照射待检样品，激发目标元素产生荧光，进而根据荧光的光谱特性和强度推断样品元素含量^[36]。目前，相关技术成功应用于 Er:YAG、Pr: GdVO₄ 单晶中痕量稀土离子识别，具有低浓度下的区分与检测能力，促进了稀土提纯技术的进步^[37]。通过荧光信号差异分析，实现海岸带石油污染物的快速识别、海洋悬浮溢油探测，为环境污染监测提供新途径^[38,39]。

LIF 检测技术主要用于稀土矿石中某些特定元素（如 Eu、Y、Tb 等）、含有机污染物的矿石（如石油矿藏、S、P、氮化合物）的在线检测，对于特

定目标元素具有极高的选择性和灵敏度，有助于开展精细化品位评估；但适用范围较小，仅对具有明显荧光特性的元素或化合物有效，也易受外界光源干扰，需要严格控制实验条件。

2. 激光诱导击穿光谱检测技术

在 LIBS 检测技术应用中，将高强度脉冲激光聚焦于矿石表面并瞬间产生高温等离子体，其中的原子、离子被激发至激发态并发射光谱；分析发射的光谱信息（见图2），可以精确测定矿石中各元素的种类和含量。① 引入机器学习算法，提高检测精度与效率。集成随机森林与变量重要性测量算法，优化稀土矿石中 Sc 元素定量分析，提升开采精度^[40]；利用支持向量机与偏最小二乘回归算法，优化 Fe、Mn、Cr 等矿石分析过程，降低预测误差并提升检测效率^[41]。② 脉冲激光能量调控对光谱信号有着重要影响，优化调整后用于 Si、Mg 等元素的快速精准分析^[42]。③ 引入腔体约束激光诱导击穿光谱技术，结合 AI 算法，克服了传统铝土矿检测的局限性，实现多类元素的同时快速测定^[43]。与其他光谱技术（如拉曼光谱）联合运用，为绿柱石等珠宝材质的无损检测提供了新途径^[44]。

LIBS 检测技术适用于铁矿、铝土矿、铜矿等金属矿石以及含有复杂矿物组合的矿石，具有微区和深度剖析能力，在矿石选别、冶炼过程控制、现场实时监测等方面应用效果良好^[45-50]；检测结果的空间分辨率较高，可对矿石表面进行精细分析，对大部分元素均有较高的灵敏度，表现出较强的适应性。但是，LIBS 检测设备成本较高，在检测一些

痕量元素时性能受限于背景噪声和信号强度。基于 LIBS 检测技术的品位在线检测设备已有广泛应用，如矿浆品位检测仪实现全天候连续自动分析，在显著降低化验成本、及早发现过程干扰的同时，提高回收率并能更好控制精矿质量。

3. 近红外光谱技术

NIR 集中在 780~2526 nm 波长的近红外区域，在此区域内，样品主要通过含氢基团（如—OH、—CH、—NH）的倍频与合频吸收进行分析。NIR 技术在应用时，对矿石发射近红外光（不同成分的分子吸收特定波长的红外光），获取反射或透射后的光谱数据，依据预设模型计算矿石中特定组分的含量。① 在利用 NIR 技术分析前寒武纪沉积物时，成功构建了预测 Cu、Zn 等元素含量的多变量计算模型，再利用偏最小二乘回归多变量校正算法并结合高级光谱处理模型，精确检测地质样品中有机质（如 C、H、S、N、O）的含量^[51,52]。② 集成随机森林与极限学习机算法，结合降维处理，建立铁品位快速评估模型，显著提高了红岭矽卡岩铁矿品位的预测精度^[53]。

NIR 技术尤其适合对有机物及部分无机物的含量测定，具有无需化学处理、非破坏性的优点，可用于含有有机质或水分较高的矿产资源和沉积物、某些铁矿的特定矿物组分无损检测，但对矿物细微结构的识别能力有限。

4. 高光谱检测技术

高光谱技术针对矿物成分特定的分子结构与电子跃迁特性，利用连续窄波段电磁辐射，记录矿石在多种波长下的光谱响应，形成“指纹”图像，揭示内含元素和矿物的独特光谱特征。对比标准矿物光谱库，识别样品中的不同矿物，运用化学计量学方法，从复杂光谱数据中提取与品位相关的化学成分信息，据此精准分析矿石品位。① 针对铁矿石，在特定波段构建与铁含量关联的模型，基于最小二乘法建立反演模型，铁品位检测结果的拟合度达到 0.9885，误差仅为 7.26%^[54]。② 在特定地区的铅锌矿石 Cd 含量测定中，应用高光谱检测和机器学习算法，形成了复杂环境下的无损检测能力^[55]。③ 利用地质—高光谱遥感模型，发现了高品位金矿线索，验证了勘探效率与准确性^[56]。④ 以矿冶科技集团有限公司自主研发的矿浆品位在线检测系统为代表的品位在线检测装备获得广泛应用，可测量从 Ca

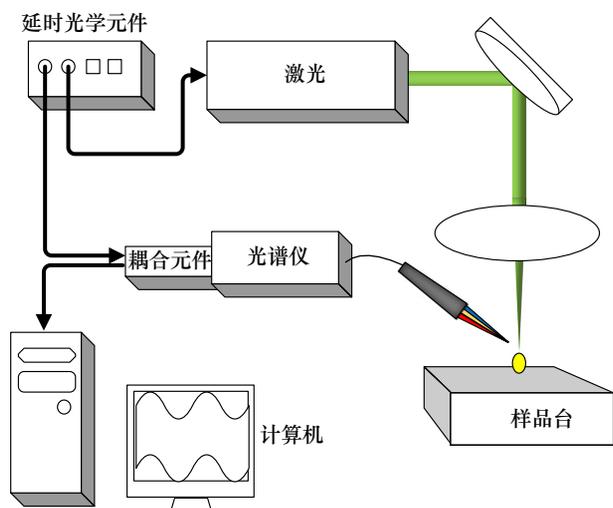


图2 LIBS 检测技术系统原理

到U的元素范围且有较高精度^[57]。

高光谱检测技术在矿石品位检测领域应用广泛，涵盖地质勘查、矿物识别、元素定量分析等环节；可用于多种金属矿和非金属矿，对其中包含的主要及微量元素进行快速无损的含量测定，能够提供丰富的空间分布信息；还可用于矿石物理结构、化学状态及其氧化程度等复杂研究，甚至与遥感成像技术结合，支持开展大面积的矿产资源勘探。

（三）电磁检测技术

电磁检测技术是一种适用于磁性矿石品位在线实时分析的手段，核心原理为：借助电感传感器生成激励磁场，依据感应线圈在自感与互感作用下产生的信号输出变化来精确表征被测矿物的磁特性强度。主流的磁性测量技术可分为螺线圈检测法和涡流检测法^[58]。

电磁检测技术操作简单、响应迅速，主要用于区分金属与非金属矿物，对于铁矿石等磁性和导电性差异显著的矿石有很好的适用性。针对多种磁性矿石，通过构建精密的数学模型和系统设计，开发了自感式管道矿浆取样检测装置，实现矿石品位的快速无损评估^[59]。结合电容测量与混合介质理论的多电极电容传感系统，在工业磁铁矿品位检测中具有较高的精度（误差<3.3%），在复杂环境下也有较高的可靠性，代表了矿产资源评估领域无损检测技术进步^[60]。

（四）机器视觉检测技术

机器视觉检测技术是矿石品位在线检测方向上的前沿、高效、智能化手段，利用高精度的成像系统捕获矿石表面特征，通过机器视觉算法进行图像预处理、特征提取和模式识别。首先获取矿石的高清图像，然后对图像数据进行降噪、增强对比度等处理；再运用大规模训练样本、物理化学知识构建的分类或回归深度学习模型，从图像中精准识别矿物的颜色、纹理、结构等信息，据此推测矿石品位。

机器视觉检测技术发展需要算法融合创新。Faster R-CNN与VGG16集成，可实现对单一岩石类型优于96%的识别准确率，体现了深度学习框架与特征提取网络整合应用的有效性^[61]。YOLOv4-tiny与特征金字塔网络（FPN）融合，在确保铁矿

石品位高精度识别（准确率>91%）的同时，维持了复杂环境下的稳定识别性能（识别率>80%），显示了实时检测与多层特征学习的优势^[62]。属于迁移学习的Wu-VGG19模型，在黑钨矿识别方面达到99.6%的准确率，还可加速模型训练并提升性能^[63]。

机器视觉检测技术获得了工业生产推广应用。例如，BFIPS-II浮选泡沫图像分析仪在江西铜业集团有限公司德兴铜矿、山东黄金集团有限公司焦家金矿等大型矿山企业获得部署应用，可实时分析浮选泡沫特征，建立品位预测模型，有效提升在线检测的效率^[64]。Metso VisioFroth系列产品、Outotec FrothMaster系统等应用于众多选矿厂，提供了面向速度、尺寸分布、颜色等浮选泡沫参数的在线监测功能，提高了矿物加工的智能化水平。

四、矿石品位在线检测技术面临的挑战

（一）技术研究层面

1. 精度瓶颈与干扰因素

XRF检测技术应用广泛，因其具有无损、快速的检测特性而在金属矿产领域备受青睐，但在轻元素检测上面临挑战，如对H、He、Li等原子序数较小的元素，检测灵敏度较低。这是因为，原子序数较小的元素荧光信号较弱，易被背景噪声淹没，制约了含量的测定精度。此外，在处理具有细小颗粒或复杂结构的矿石样本时，较大颗粒之间的相互遮挡、矿物相之间的相互作用会形成“遮蔽效应”，显著干扰X射线荧光的正常发射与接收，加大品位数据的测量偏差。

XRT检测技术在穿透矿石进行品位检测时也面临技术难题。矿石的组成并不是均匀分布，不同的矿石类型、矿石内部颗粒大小的差异、相对复杂的内部结构，均会导致X射线的吸收和散射特性趋于复杂；不仅影响X射线的穿透能力，还会引起信号衰减的变化，给区分矿石中不同元素带来困难。例如，高密度或大颗粒的矿物可能吸收更多的X射线，使相邻区域的元素信号被掩盖，直接影响检测结果的准确性和分辨力。

2. 信号解析与优化难题

LIF、LIBS等光学检测技术，尽管具有高选择性、高空间分辨率的优势，但在工业环境中易受外部光源干扰是不可忽视的问题。自然光、工厂照

明、其他设备的辐射等，可能与检测所需的荧光或光谱信号重叠，导致信号失真并影响检测结果的准确性和稳定性。开发光隔离技术、信号过滤算法成为提升光学检测技术实用性的关键内容。

LIF、LIBS在处理微弱信号和背景噪声方面也面临技术难题。特别是在矿石样品成分复杂、目标元素含量极低的情况下，从众多干扰信号中提取有用的微弱信号，同时抑制或消除背景噪声，对提高检测灵敏度和准确度至关重要。为此，优化实验条件（如激光能量、检测距离），开发或引入先进的信号处理算法（如自适应滤波、波形匹配、深度学习），才能增强信号识别能力。

NIR技术在识别和定量分析矿石中的有机物和部分无机物方面具有独特优势，但NIR区的宽峰特性限制了对细微矿物结构的解析能力，不利于复杂矿石分析应用。为此，优化数据预处理算法（如多元校正技术、化学计量学方法）以提升信噪比，才能更精确地解析出矿石中细微结构的信息和微量元素的含量。

3. 模型构建与数据依赖关系

数据的质量和数量是核心基础，无论是NIR还是依赖图像识别的算法，都需要大量且多样化的标准样本数据集来训练和校准模型。然而在实际应用中，获取涵盖广泛矿石类型、品位范围、复杂基体效应的数据集极为困难且成本高昂，缺乏具有充分代表性的数据可能导致模型过拟合或欠拟合，影响预测精度和泛化能力。

在电磁检测技术方面，虽然可在不破坏样品的前提下快速提供成分信息，但相应信号解读面临挑战。矿石介质的电磁属性（如电导率、磁导率）随着矿石类型、结构、含水量等变化显著，需要相关检测技术精确解析这些复杂变化以避免信号混淆和误判，对算法的复杂度和计算效率提出了极高要求。关于图像识别检测技术，尽管在自动分类、品位估计方面显示出良好潜力，但在实际采矿环境下，图像质量易受灰尘、湿度、光线变化等因素的影响，导致识别难度加大。此外，深度学习模型依赖大规模的标注数据，可解释性较差，不利于在复杂矿石检测中广泛应用。

模型构建与物理化学原理的结合仍有不足。新兴技术高度依赖数学模型和算法，但对矿石的深入理解（如光谱特征与品位之间的物理化学关联）不

足，是改善模型预测性能的关键方面。更好融合物理化学理论与数据分析技术以提高模型的鲁棒性和精确度，仍是待解的难题。

（二）实际应用层面

1. 辐射安全与成本效益考量

基于放射性源的检测技术，如部分类型的伽马射线或中子活化分析，虽然在元素识别与定量分析方面表现出色，但潜在的安全与经济因素不容忽视。辐射防护法规要求严格，需要专业人员进行操作，定期监测辐射水平、采取有效的屏蔽措施，增加了相应操作的复杂性和综合成本。购置高性能的辐射防护设备、开展定期维护、适时设备更新，都面临着一定的经济负担。为此，在确保检测精度与效率的同时，设计满足辐射安全标准、实现成本效益最大化的解决方案，是行业应用研究的热点课题。探索替代性无辐射或低辐射技术，如先进的电磁或光谱方法，是未来的应用发展趋势。

2. 适应多样矿石特性的技术突破

世界矿产资源的多样性成为品位在线检测技术的突出挑战。不同矿石的物理和化学特性千差万别，富含有机物、水分含量不稳、磁导率变化显著的矿石更是如此，这对品位检测技术提出了极高要求。传统的检测方法可能在某些特定类别的矿石上效果显著，而在面对更广泛的矿石类型时应用效果不佳。为此，开发更加智能和灵活、具有良好适应性的新型检测技术，支持在不损害矿石本身的前提下快速准确地识别和分析各类矿石的组成，才能满足各类矿种的个性化检测需求。

3. 恶劣环境下稳定运行与即时反馈

实际采/选作业环境较为恶劣，对矿石品位在线检测技术的现场应用能力提出了严苛要求。高温、高湿、粉尘弥漫、强烈振动等极端条件，对检测系统的硬件耐用性、软件稳定性、数据传输能力等均构成一定程度的挑战。提升检测系统的设计标准，强化环境适应性与抗干扰能力，才能保障检测结果的连续性和可靠性。此外，实时数据处理与传输能力是实现快速决策支持的基础，需要优化从传感器数据采集、处理、分析到决策反馈的整个链条，才能达到近乎实时的信息更新速度。这既需要高性能的硬件设备，也离不开高效的数据压缩算法、稳定的无线通信设施、智能的数据处理软件。

五、矿石品位在线检测技术未来发展方向

(一) 关键技术攻关突破

1. 多模态融合与智能感知技术前沿探索

XRF、PGNAA 等技术作为矿石品位在线检测的主流手段,已在世界矿产资源评估中显现应用价值,有效提升了矿石成分分析的准确度与效率。着眼未来发展,将更加侧重相关技术的深度整合与智能化革新。

多模态信息融合策略成为相关技术进步的核心驱动力。打破单一流程界限,将 XRF 的元素识别、PGNAA 的深度分析、NIR 的快速扫描、热红外成像的空间分辨率、拉曼光谱的分子结构解析等技术优势进行融合,构建可同时捕获矿石的化学组成、物理结构、微观特征的综合探测系统。不是技术简单叠加,而是通过先进算法与模型实现信息的互补与增强,使每种模态的数据都在整体分析中充分发挥效用,最终形成矿石品位智能感知系统。

相关系统不仅能够提升检测精度,而且面向长远发展需求还可构建自主适应复杂矿山环境、高效抵抗外部干扰的智慧型平台。未来的多模态融合技术将集成先进的自适应算法与机器学习模型,相关系统能够根据实时环境变化而自动调整参数设置、自动优化检测流程,确保在各类工况下都能获得稳定可靠的矿石品位评估结果。

2. 智能感知与数据处理算法迭代升级

随着 AI 技术的迅速发展,基于深度学习的图像识别技术逐步成为矿石表面特征识别与品位评估的核心手段,可自动学习并识别矿石图像中的细微特征(如颜色、纹理、形状),进而开展复杂矿石样本的快速分类与高精度评估;在不断的学习过程中细化区分标准,增强从宏观到微观的精细化分析能力,为矿产资源的高效开发与利用提供直接支持。

面向未来应用,革新智能感知信号处理算法,更好应对矿石品位检测中的数据复杂性和噪声干扰问题。升级重点在于从海量光谱、图像以及其他类型数据中高效滤除无关噪声,精确捕获与矿物成分直接相关的信号特征。引入先进的统计学方法、频谱分析技术、深度学习模型(如卷积神经网络、循环神经网络),增强信号解析能力,以深度挖掘并精确量化矿石成分。这些算法的优化,有助于提升数据处理的速度和效率,增强在复杂矿石体系中发

现细微差异的能力,实现更精确的品位预测和资源分类。

算法的迭代升级并非孤立进行,而是与硬件设备的更新换代、多源数据的融合分析、云计算平台的集成应用等紧密结合。通过跨领域的协同创新,构建从数据采集、处理、分析到决策支持的闭环系统,确保在任何复杂的检测环境中都能提供可靠、高效的矿石品位分析能力。算法的透明度与可解释性也是未来研究的重点,以确保矿山企业决策的合理性与科学性,推动矿石品位在线检测朝着智能化、可持续方向发展。

3. 微型化、远程化、智能化设备研发

微纳制造、无线通信等技术的兴起,将驱动矿石品位在线检测设备发生深刻变革。未来的检测设备将以精巧形态出现,在保证高性能的基础上实现更低的能耗与更强的便携性。这一趋势不仅反映在设备本身,更预示着矿石品位检测手段的革新。

检测设备趋于微型化后,可以无缝集成到无人驾驶车辆、无人机以及其他智能移动平台上,促成矿山现场数据感知的重大进步。无人移动平台可在预定路线上自动巡检、根据实时数据和算法指令灵活调整路径,更能进入人难以接近或高风险区域进行高精度、无遗漏的矿石品位检测。实时数据回传功能支持采/选作业过程中的矿石品质远程监控,显著提高检测效率并降低现场作业的人力需求和安全风险。

4. 实时动态监测网络系统构建与优化

得益于物联网、第五代移动通信、边缘计算的发展,构建全矿区覆盖的实时动态监测网络系统具有可行性,将推动矿石品位数据的即时采集、海量数据的实时回传,便于企业决策层近实时地获得生产一线的检测结果。

引入边缘计算后,支持数据在靠近数据源的边缘节点上进行预处理和分析,减轻云端的计算压力,提升响应速度并加快数据分析。在此条件下,矿山企业可基于实时品位数据分析结果,即时调整开采计划、优化物流调度,甚至实施紧急干预措施,显著增强运营的灵活性。通过智能算法和机器学习技术,自动识别异常数据,预警潜在的品位下降或资源枯竭情况,为矿山企业的长期规划、资源管理等提供科学依据。未来,矿山企业将构建更高自动化、智能化水平的信息中枢,保障生产经营决

策的精准性和前瞻性。

(二) 新兴技术前瞻探索

1. 深度学习促进微观与宏观特征融合分析

当前，基于图像的机器学习算法广泛应用于地质灾害预警、环境保护、矿物形貌学等领域。未来，矿石品位在线检测将超越传统的单一尺度分析，实现微观矿物特征、宏观矿床系统的深度融合。通过深度学习驱动的微观层面智能解析、地质建模与大数据分析，整合从原子级到矿床级的多尺度信息，构建针对矿石品位的全方位、立体化认知模型；打破矿石品位分析现有技术的局限性，实现从局部到整体、从微观到宏观的跨越，增强矿石品位在线检测的深度与广度。

2. 量子计算与生物启发算法

量子计算有望在计算技术方面驱动矿石品位在线检测的新突破。量子计算的高度并行、高速运算能力，将极大提升复杂矿物成分识别与品位预测的效率，支持实现海量矿石数据的实时分析与精准预测。引入遗传算法、蚁群优化等生物启发算法，模拟自然生态系统中高效的信息处理与优化机制，为矿石品位在线检测提供自适应、智能化的决策支持。

3. 智能传感器网络与物联网技术

在物联网技术及应用快速发展的背景下，未来的矿石品位在线检测将依托分布式智能传感器网络，实现矿石品位的实时远程监测。传感器节点嵌入矿石内部，实时采集矿石品位数据，数据经由无线通信设施上传至云端，支持开展大数据分析 with 智能决策。打破传统检测方式的时空限制，构建矿石品位的全方位、无盲区监测能力，为矿石品位管理提供实时、精准的数据支持。

六、矿石品位在线检测技术发展建议

矿石品位在线检测技术作为矿产资源高效开发利用的关键支撑手段，已在放射性、光学、电磁、机器视觉等技术路径上取得了显著进展，广泛应用于金属及非金属矿产的品位测定。尽管实践应用取得重大突破，但仍面临诸多挑战，需要持续开展技术创新与应用深化研究。

在技术创新与设备升级方面，激励科研机构、企业等加大研发投入，开发更高灵敏度和稳定性的

矿物元素探测传感器，掌握深度学习等先进 AI 算法，提高矿石品位实时分析及预测的准确性与可靠性；驱动矿石品位在线检测系统与采矿生产线的高度集成，开展采/选流程的自动化、智能化改造，确保检测数据获取的连续性与一致性，显著降低人工干预需求并提高工作综合效率。

在标准制定与规范建设方面，建立涵盖矿石品位在线检测各个环节的统一标准框架，约束不同厂商各类设备之间的互操作性、数据交换一致性，为矿山企业和行业发展筑牢基础保障；推行严格的检测结果验证程序、完善的质量控制体系，加强在线检测系统的第三方认证和定期校准，确保矿石品位检测数据的公正、准确、有效。

在“产学研用”合作机制深化方面，推动高校和科研院所与矿山企业深度合作，围绕矿石品位快速和精准检测涉及的核心技术、理论难题开展联合攻关，高水平共享研究成果和实验条件；采取政策引导和必要激励，加速前沿技术成果的产业化，引导企业在生产中全面应用在线检测技术，提升全行业的技术水平和市场竞争力。

在人才培养与队伍建设方面，辨识矿石品位在线检测方向的专门需求，培育高层次、复合型的专业人才，设立定向的教育和培训项目，壮大精通矿物学和现代信息技术的高端人才队伍；定期组织行业性研讨会和培训班，推广矿石品位在线检测的新理念、新技术，形成继续教育和专业技术培训模式，促进人员知识结构更新、行业发展紧跟前沿。

在国际合作与资源共享方面，支持国内机构参与国际矿石品位检测技术研发合作项目，积极吸收国外先进技术，着力推广我国自研技术，扩大我国企业的全球市场影响力；倡导并推动建设全球共享的矿石品位大数据资源库、跨地域的信息交流与共享平台，促进各国矿石品位在线检测经验交流、技术互鉴、资源共享，推动全球矿业科技的发展进步。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 26, 2024; **Revised date:** May 10, 2024

Corresponding author: Qu Fuming is an associate professor from the School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing. His major research filed is smart mines. E-mail: steve_qufm@126.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research

on China's Mineral Resources Security Strategy" (2022-XBZD-27)

参考文献

- [1] 王青, 任凤玉. 采矿学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
Wang Q, Ren F Y. Mining science [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [2] 吴良士. 矿产资源评价篇(15) [J]. 矿床地质, 2019, 38(6): 1412–1415.
Wu L S. Evaluation of mineral resources (15) [J]. Mineral Deposits, 2019, 38(6): 1412–1415.
- [3] 宫东峰, 张维宾, 付乐. 无级定价矿石贫化控制法及其应用 [J]. 黄金, 2008, 29(12): 23–26.
Gong D F, Zhang W B, Fu L. Stepless-pricing ore dilution control method and its application [J]. Gold, 2008, 29(12): 23–26.
- [4] 谷存磊. 浅谈露天开采矿石的贫化与损失管理 [J]. 广东化工, 2020, 47(12): 102–103.
Gu C L. Discussion on dilution and loss management of open-pit mining ore [J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(12): 102–103.
- [5] Lan Z Y, Lai Z N, Zheng Y X, et al. Recovery of Zn, Pb, Fe and Si from a low-grade mining ore by sulfidation roasting–beneficiation–leaching processes [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(1): 37–51.
- [6] 潘贵豪, 明世祥, 王艳辉, 等. 矿山技术经济指标动态优化及其应用研究 [J]. 金属矿山, 2008 (11): 5–8, 42.
Pan G H, Ming S X, Wang Y H, et al. Dynamic optimization of mine technical and economical indexes and its application research [J]. Metal Mine, 2008 (11): 5–8, 42.
- [7] 刘松伟. 不同矿石品位矿体采矿方法的选择 [J]. 有色金属设计, 2000, 27(2): 7–10, 39.
Liu S W. Selection of mining methods for ore bodies with different ore grades [J]. Nonferrous Metals Design, 2000, 27(2): 7–10, 39.
- [8] 朱乔乔, 谢桂青, 李伟. 鄂东矿集区矽卡岩型铁矿的叠加富集机制: 来自磁铁矿结构和矿石品位数据的制约 [J]. 岩石学报, 2019, 35(12): 3703–3720.
Zhu Q Q, Xie G Q, Li W. Superposition mechanism of Fe enrichment in skarn deposits of Edong District: Constrains from magnetite texture and ore grade data [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(12): 3703–3720.
- [9] 刘占宁, 宋宇辰, 孟海东, 等. 块体尺寸和估值方法对矿石品位估值的影响 [J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(6): 89–93.
Liu Z N, Song Y C, Meng H D, et al. The influences of block size and estimation methods on the valuation of ore grade [J]. Mining Research and Development, 2018, 38(6): 89–93.
- [10] 鲁挑建. 再论甘肃马泉金矿矿石品位分布特征及品位预测 [J]. 黄金科学技术, 2011, 19(2): 1–7.
Lu T J. The ore grade distribution features and grade prediction of Maquan gold deposit, Gansu Province [J]. Gold Science and Technology, 2011, 19(2): 1–7.
- [11] 李克庆, 牛京考, 袁怀雨, 等. 白云鄂博铁矿磁铁矿石品位指标的优化 [J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(3): 334–337.
Li K Q, Niu J K, Yuan H Y, et al. Optimization of the grade index of magnetite ore in Baiyunebo iron mine in China [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(3): 334–337.
- [12] 邵安林. “五品联动”工程管理模式的创新与实践 [J]. 中国工程科学, 2013, 15(11): 44–48.
Shao A L. Innovation and practice of the “five grades ganged” engineering management mode [J]. Strategic Study of CAE, 2013, 15(11): 44–48.
- [13] 刘文胜, 李铁钢, 李克庆, 等. “五品联动”矿冶工程管理优化决策支持系统研究及应用 [J]. 金属矿山, 2015 (12): 1–4.
Liu W S, Li T G, Li K Q, et al. Research on five-grade linkage optimization decision support system in mining and metallurgical engineering management [J]. Metal Mine, 2015 (12): 1–4.
- [14] 葛丁, 梁殿印. 基于 X 射线透射的矿石品位检测方法研究 [J]. 有色金属(选矿部分), 2019 (4): 87–93.
Ge D, Liang D Y. Research on detection method of ore grade based on X-ray transmission [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019 (4): 87–93.
- [15] Robben C, Wotruba H. Sensor-based ore sorting technology in mining—Past, present and future [J]. Minerals, 2019, 9(9): 523.
- [16] Li L X, Li G Z, Li H Z, et al. Bench-scale insight into the amenability of case barren copper ores towards XRF-based bulk sorting [J]. Minerals Engineering, 2018, 121: 129–136.
- [17] 卜兆杰, 王晓旋, 黄健强, 等. 粉末压片制样—X 射线荧光光谱 (XRF) 法测定钛铁矿中 TFe、TiO₂、SiO₂、Al₂O₃、CaO、MgO 的含量 [J]. 中国无机分析化学, 2018, 8(1): 17–20.
Bu Z J, Wang X X, Huang J Q, et al. Determination of TFe, TiO₂, SiO₂, Al₂O₃, CaO and MgO content in ilmenite by XRF with powder pressed method [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2018, 8(1): 17–20.
- [18] 冯丽丽, 张庆建, 管嵩, 等. X 射线荧光光谱 (XRF) 法测定绿泥石中镁、铝、硅、磷、钾、钙、钛、铁元素含量 [J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(3): 312–317.
Feng L L, Zhang Q J, Guan S, et al. Determination of magnesium, aluminum, silicon, phosphorus, potassium, calcium, titanium and iron in chlorite by X-ray fluorescence spectrometry [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(3): 312–317.
- [19] 王兵, 徐鼎, 秦晔琼, 等. X 射线荧光光谱结合分类算法在铁矿石与含铁物料鉴别中的应用研究 [J]. 中国口岸科学技术, 2024, 6(2): 40–46.
Wang B, Xu D, Qin Y Q, et al. Application of X-ray fluorescence spectroscopy combined with classification algorithm in the identification of iron ore and iron-containing materials [J]. China Port Science and Technology, 2024, 6(2): 40–46.
- [20] 邓述培, 范鹏飞, 唐玉霜, 等. X 射线荧光光谱 (XRF) 法测定土壤污染样品中 9 种重金属元素 [J]. 中国无机分析化学, 2019, 9(4): 12–15.
Deng S P, Fan P F, Tang Y S, et al. Determination of 9 kinds of soil pollution of heavy metals elements in samples by X-ray fluorescence spectrometry [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2019, 9(4): 12–15.
- [21] 罗立强, 沈亚婷, 吴晓军. X 射线光谱分析技术发展新趋势与新方向 [J]. 冶金分析, 2021, 41(12): 18–26.
Luo L Q, Shen Y T, Wu X J. Progress and trend of X-ray spectrometry [J]. Metallurgical Analysis, 2021, 41(12): 18–26.
- [22] Mesina M B, de Jong T P R, Dalmijn W L. Automatic sorting of scrap metals with a combined electromagnetic and dual energy X-

- ray transmission sensor [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2007, 82(4): 222–232.
- [23] Robben C, de Korte J, Wotruba H, et al. Experiences in dry coarse coal separation using X-ray-transmission-based sorting [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2014, 34(3/4): 210–219.
- [24] 包锐. X射线透射方法在矿产品检测中的应用 [J]. *现代工业经济和信*息化, 2023, 13(1): 132–133, 136.
Bao R. Application of X-ray transmission method in mineral product inspection [J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2023, 13(1): 132–133, 136.
- [25] 叶仪铭, 陈锐, 王仁波, 等. 一种基于深度学习的X射线透射铀矿识别算法 [J]. *有色金属(选矿部分)*, 2023 (6): 118–124, 139.
Ye Y M, Chen R, Wang R B, et al. A uranium ore recognition algorithm based on deep learning of X-ray transmission [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2023 (6): 118–124, 139.
- [26] 洪旭, 周建斌, 倪师军, 等. 基于X射线透射谱的铀浓度测量方法 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(11): 3641.
Hong X, Zhou J B, Ni S J, et al. Uranium determination based on X-ray transmission spectrum [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(11): 3641.
- [27] 高航, 王建英, 张雪峰, 等. 双能X射线透射矿物识别系统图像处理设计 [J]. *有色金属(选矿部分)*, 2021 (1): 101–106, 111.
Gao H, Wang J Y, Zhang X F, et al. Image processing design of mineral identification system based on dual-energy X-ray transmission [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2021 (1): 101–106, 111.
- [28] 崔丽娜, 彭雪清. 双能量X射线透射预选用于广西某低品位铅锌矿的试验研究 [J]. *矿业工程*, 2020, 18(4): 30–32.
Cui L N, Peng X Q. Test study on dual energy X-ray transmission Pre-concentration of a low-grade lead-zinc mine in Guangxi [J]. *Mining Engineering*, 2020, 18(4): 30–32.
- [29] 李德红, 苏桐龄. 中子活化分析原理及应用简介 [J]. *大学物理*, 2005, 24(6): 56–58.
Li D H, Su T L. Introduction about principle of neutron activation-analysis and its application [J]. *College Physics*, 2005, 24(6): 56–58.
- [30] Latif S A, Oura Y, Ebihara M, et al. Prompt gamma-ray analysis (PGA) of meteorite samples, with emphasis on the determination of Si [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1999, 239(3): 577–580.
- [31] 宋青锋, 张伟, 龚亚林, 等. 利用瞬发 γ 中子活化分析技术对铜镍矿石进行在线检测的应用研究 [J]. *世界有色金属*, 2014 (2): 72–73.
Song Q F, Zhang W, Gong Y L, et al. Study on on-line detection of copper-nickel ore by prompt gamma neutron activation analysis technology [J]. *World Nonferrous Metals*, 2014 (2): 72–73.
- [32] 侯新生, 马英杰, 方方, 等. 中子活化分析在煤质分析中的应用 [J]. *核技术*, 2001, 24(4): 264–268.
Hou X S, Ma Y J, Fang F, et al. An application of NAA in analyzing the quality of coal [J]. *Nuclear Techniques*, 2001, 24(4): 264–268.
- [33] Baechler S, Kudejova P, Jolie J, et al. Prompt gamma-ray activation analysis for determination of boron in aqueous solutions [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2002, 488(1/2): 410–418.
- [34] 周蓉生, 侯新生, 马英杰. 中子活化分析在大气环境及水环境研究中的应用 [J]. *核技术*, 1999, 22(6): 362–366.
Zhou R S, Hou X S, Ma Y J. The application in atmosphere and hydrology environmental research of neutron activation analysis [J]. *Nuclear Techniques*, 1999, 22(6): 362–366.
- [35] 张兰芝, 倪邦发, 田伟之, 等. 瞬发 γ 射线中子活化分析的现状与发展 [J]. *原子能科学技术*, 2005, 39(3): 282–288.
Zhang L Z, Ni B F, Tian W Z, et al. Status and development of prompt γ -ray neutron activation analysis [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2005, 39(3): 282–288.
- [36] Valeur B. *Molecular fluorescence: Principles and applications* [M]. Hoboken: Wiley-VCH, 2001.
- [37] 臧竞存, 邹玉林. 激光诱导荧光光谱法检测高纯激光晶体中的痕量稀土杂质 [J]. *分析仪器*, 2010 (3): 55–56.
Zang J C, Zou Y L. Determination of trace rare earth impurities in high purity laser crystals using laser-induced fluorescence [J]. *Analytical Instrumentation*, 2010 (3): 55–56.
- [38] 冯巍巍, 王锐, 孙培艳, 等. 几种典型石油类污染物紫外激光诱导荧光光谱特性研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(5): 1168–1170.
Feng W W, Wang R, Sun P Y, et al. The study of fluorescence spectrum using ultraviolet-laser for several typical oil pollutants [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(5): 1168–1170.
- [39] 刘德庆, 栾晓宁, 韩晓爽, 等. 原油样品激光诱导荧光的时间分辨光谱特性研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(6): 1582.
Liu D Q, Luan X N, Han X S, et al. Characterization of time-resolved laser-induced fluorescence from crude oil samples [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(6): 1582.
- [40] 周嘉俊, 李茂刚, 张天龙, 等. 激光诱导击穿光谱结合随机森林的稀土矿石中钷元素定量分析 [J]. *中国激光*, 2024, 51(2): 171–179.
Zhou J J, Li M G, Zhang T L, et al. Quantitative analysis of Sc in Rare? Earth ores via laser? Induced breakdown spectroscopy combined with random forest [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(2): 171–179.
- [41] 邱苏玲, 李安, 王宪双, 等. 基于激光诱导击穿光谱的矿石中铁含量的高准确度定量分析 [J]. *中国激光*, 2021, 48(16): 201–210.
Qiu S L, Li A, Wang X S, et al. High-accuracy quantitatively analysis of iron content in mineral based on laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(16): 201–210.
- [42] 陆运章, 汪家升, 李威霖, 等. 用激光诱导击穿光谱技术定量分析矿石样品中Si和Mg [J]. *中国激光*, 2009, 36(8): 2109–2114.
Lu Y Z, Wang J S, Li W L, et al. Quantitative analysis of Si and Mg in ore samples using laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(8): 2109–2114.
- [43] 杨彦伟. 激光诱导击穿光谱铝土矿快速分选与定量检测方法研究 [D]. 太原: 中北大学(博士学位论文), 2022.
Yang Y W. Study on rapid separation and quantitative detection method of bauxite in laser-induced breakdown spectroscopy [D]. Taiyuan: North University of China (Doctoral dissertation), 2022.
- [44] 王凯, 干福熹, 赵虹霞. 天然绿柱石类宝石化学成分、结构和物相的无损分析 [J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(2): 205–214.
Wang K, Gan F X, Zhao H X. Nondestructive analysis of chemical

- composition, structure and mineral phase of natural beryl gems [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 43(2): 205–214.
- [45] 杨雅雯, 严承琳, 徐鼎, 等. 激光诱导击穿光谱检测铁矿石应用进展 [J]. *冶金分析*, 2020, 40(12): 14–20.
Yang Y W, Yan C L, Xu D, et al. Progress in the detection of iron ore by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Metallurgical Analysis*, 2020, 40(12): 14–20.
- [46] 闫久江, 李祥友. 新型便携式激光诱导击穿光谱仪器及其应用研究 [J]. *冶金分析*, 2020, 40(12): 66–71.
Yan J J, Li X Y. Research on a new portable laser-induced breakdown spectroscopy system and its application [J]. *Metallurgical Analysis*, 2020, 40(12): 66–71.
- [47] 陈林宇. 基于特征选择的激光诱导击穿光谱方法研究——以铜矿为例 [D]. 绵阳: 西南科技大学(博士学位论文), 2022.
Chen L Y. Study on laser-induced breakdown spectroscopy using feature selection [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology (Doctoral dissertation), 2022.
- [48] 彭书瑶. 激光诱导击穿光谱技术在矿石样品中 Si 和 Mg 检测中的应用 [J]. *化工设计通讯*, 2019, 45(7): 152, 208.
Peng S Y. Application of laser induced breakdown spectroscopy in detection of Si and Mg in ore samples [J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2019, 45(7): 152, 208.
- [49] 刘向前, 安端阳, 张卓昆, 等. 激光诱导击穿光谱结合 RFE-GBDT 算法定量分析稀土矿石中的 Fe 和 Y [J]. *化工矿物与加工*, 2023, 52(3): 20–25.
Liu X Q, An D Y, Zhang Z K, et al. Quantitative analysis of Fe and Y in rare earth ores by laser-induced breakdown spectroscopy combined with recursive feature elimination and gradient boosting decision tree algorithms [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2023, 52(3): 20–25.
- [50] 付洪波, 吴边, 王华东, 等. 激光诱导击穿光谱定量分析锂矿石中锂元素 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(11): 3489–3493.
Fu H B, Wu B, Wang H D, et al. Quantitative analysis of Li in lithium ores based on laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(11): 3489–3493.
- [51] 龙梅, 裴世桥. 近红外反射光谱学在岩石矿物研究中的应用 II. 快速测定地质样品中有机质 [J]. *岩矿测试*, 2004, 23(1): 6–10.
Long M, Pei S Q. Study on application of near-infrared reflectance spectroscopy in rock and mineral analysis II. Rapid determination of organic matter in geological samples [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2004, 23(1): 6–10.
- [52] Malley D F, Williams P C, Stainton M P. Rapid measurement of suspended C, N, and P from Precambrian Shield Lakes using near-infrared reflectance spectroscopy [J]. *Water Research*, 1996, 30(6): 1325–1332.
- [53] 毛亚纯, 温健, 付艳华, 等. 可见光-近红外光谱的矽卡岩型铁矿反演模型 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(1): 68–73.
Mao Y C, Wen J, Fu Y H, et al. Quantitative inversion model based on the visible and near-infrared spectrum for skarn-type iron ore [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(1): 68–73.
- [54] 李孟倩, 韩秀丽, 汪金花, 等. 铁矿粉铁含量的高光谱分析和定量反演研究 [J]. *矿产综合利用*, 2022 (4): 205–210.
Li M Q, Han X L, Wang J H, et al. Study on hyperspectral analysis of iron ore powder and quantitative inversion of iron grade [J]. *Multi-purpose Utilization of Mineral Resources*, 2022 (4): 205–210.
- [55] 赖思翰, 刘严松, 李成林, 等. 铅锌矿石稀散元素镉含量的高光谱反演研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(4): 1275–1281.
Lai S H, Liu Y S, Li C L, et al. Study on hyperspectral inversion of rare-dispersed element cadmium content in lead-zinc ores [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(4): 1275–1281.
- [56] 王瑞军, 董双发, 孙永彬, 等. 典型金矿床地质-高光谱找矿模型构建及应用 [J]. *遥感信息*, 2017, 32(4): 70–82.
Wang R J, Dong S F, Sun Y B, et al. Construction of geology-hyperspectral remote sensing prospecting model of typical gold deposits and its application [J]. *Remote Sensing Information*, 2017, 32(4): 70–82.
- [57] 王庆凯. 智能选矿助力矿业行业高质量发展探讨 [J]. *智能矿山*, 2021, 2(4): 32–36.
Wang Q K. Discussion on intelligent mineral processing helping high-quality development of mining industry [J]. *Journal Of Intelligent Mine*, 2021, 2(4): 32–36.
- [58] Wang C P, Fan M B, Cao B H, et al. Novel noncontact eddy current measurement of electrical conductivity [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(22): 9352–9359.
- [59] 朱思露. 铁精矿铁品位检测装置研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学(硕士学位论文), 2021.
Zhu S L. Research on detecting device for iron grade of iron concentrate [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology (Master's thesis), 2021.
- [60] 熊浩凯. 基于多电极电容检测的铁矿石品位测量方法研究 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学(硕士学位论文), 2023.
Xiong H K. Research on iron ore grade measurement method based on multi-electrode capacitance measuring [D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning (Master's thesis of), 2023.
- [61] Liu X B, Wang H Y, Jing H D, et al. Research on intelligent identification of rock types based on faster R-CNN method [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 21804–21812.
- [62] 何文轩, 荆洪迪, 柳小波, 等. 基于 YOLOv4-tiny 的铁矿石品位识别技术研究 [J]. *金属矿山*, 2021 (10): 150–154.
He W X, Jing H D, Liu X B, et al. Research on iron ore grade identification technology based on YOLOv4-tiny [J]. *Metal Mine*, 2021 (10): 150–154.
- [63] 王李管, 陈斯佳, 贾明滔, 等. 基于深度学习的黑钨矿图像识别选矿方法 [J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(5): 1192–1201.
Wang L G, Chen S J, Jia M T, et al. Beneficiation method of wolframite image recognition based on deep learning [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(5): 1192–1201.
- [64] 梁栋华. BFIPS-II 泡沫图像分析仪软件系统的设计与实现 [J]. *矿冶*, 2011, 20(4): 102–104.
Liang D H. Design and implementation of BFIPS-II froth image analyzer software system [J]. *Mining and Metallurgy*, 2011, 20(4): 102–104.