

直读光谱仪在钢结构与桥梁用钢成分快速检测中的应用

任 钰 刘秋凤 段超越

河南安钢周口钢铁有限责任公司 河南 周口 466000

摘 要：直读光谱仪凭借快速检测、多元素同步分析及强环境适应性等特性，在钢结构与桥梁用钢成分检测中发挥关键作用。本文阐述直读光谱仪的检测特性，分析钢结构与桥梁用钢成分检测需求，介绍直读光谱仪在检测中的具体应用流程，包括检测前准备、样品处理、检测操作及检测后处理等环节。针对当前应用中的不足，提出检测操作、适配性及应用场景适配的优化方向，为提升直读光谱仪在钢材成分检测中的精度与效率提供参考。

关键词：直读光谱仪；钢结构用钢；桥梁用钢；成分检测；应用优化

引言：钢结构与桥梁工程是现代基础设施建设的关键部分，材料质量关乎结构安全性与耐久性。钢材成分作为决定材料性能的核心要素，精准检测对全流程质量控制意义重大。传统湿法化学分析精度虽高，但存在检测周期长、操作复杂、环境适应性差等问题，难以满足生产线批量检测与施工现场快速筛查需求。直读光谱仪基于原子发射光谱原理，凭借诸多优势，逐渐成为钢材成分检测的主流工具。

1 直读光谱仪的检测特性

1.1 快速检测特性

直读光谱仪通过电火花或电弧激发技术实现样品表面原子化，激发过程仅需数秒即可完成。激发产生的特征光谱经光栅分光系统分离后，由光电倍增管或CCD检测器直接捕获光信号并转换为电信号，整个过程无需化学试剂参与或复杂前处理步骤^[1]。相比传统湿法化学分析需经历溶解、分离、滴定等多环节操作，直读光谱仪将检测周期从数小时缩短至分钟级，尤其适用于生产线批量样品的快速筛查。设备内置的智能控制系统可自动完成激发参数调节与数据采集，操作人员仅需将样品放置于激发腔体并触发启动按钮即可。检测完成后，系统立即生成包含各元素浓度的分析报告，避免了人工计算可能引入的误差。这种“即测即得”的特性使直读光谱仪成为钢材入厂验收、熔炼过程监控等场景中保障生产节奏的关键工具，有效减少了因等待检测结果导致的工序停滞。

1.2 成分检测特性

直读光谱仪基于原子发射光谱原理，可同时检测钢材中从轻元素（如碳、硅）到重元素（如镍、钼）的多种成分。其检测范围覆盖钢结构与桥梁用钢中所有关键合金元素及杂质元素，包括但不限于碳、锰、硫、磷、铬、铜等对材料性能具有决定性影响的元素。通过优化

光栅刻线密度与检测器灵敏度，设备可实现ppm级检测限，满足桥梁用钢对低含量有害元素（如硫、磷）的严苛控制要求。此外，设备配备的智能谱线识别算法可动态区分目标元素特征谱线与背景噪声，即使在高合金钢复杂光谱环境中仍能保持检测精度。

1.3 适配钢结构与桥梁用钢检测的特性

钢结构与桥梁用钢检测对设备环境适应性提出特殊要求。直读光谱仪通过模块化设计实现检测腔体与电子单元的分离，激发腔体采用耐高温、抗腐蚀材料制造，可承受钢材加工现场的粉尘与高温环境。便携式设备进一步集成防震结构与密封设计，满足桥梁施工场景中户外作业的需求，即使在高湿度或温差剧烈条件下仍能稳定运行。针对厚截面钢材成分均匀性检测难题，直读光谱仪通过调整激发能量与积分时间实现不同深度元素的差异化激发。操作人员可通过多点取样方式建立材料截面成分分布模型，为评估轧制工艺合理性提供数据支撑。设备支持非平整表面检测功能，通过自动聚焦技术补偿样品表面凹凸对激发光斑的影响，确保异形构件（如桥梁节点板）检测结果的可靠性。

2 钢结构与桥梁用钢成分检测的需求

2.1 钢结构用钢成分检测需求

钢结构用钢成分检测聚焦于材料力学性能与加工性能的协同控制。碳含量作为影响钢材强度与韧性的核心元素，需严格限定在特定范围以平衡结构承载能力与抗脆断能力。硅与锰作为脱氧剂与合金化元素，其含量波动直接影响钢材的纯净度与淬透性，需通过成分检测确保熔炼过程脱氧工艺的稳定性^[2]。硫与磷等有害元素会显著降低钢材的延展性与焊接性能，尤其在厚板焊接区域易引发层状撕裂，成分检测需达到ppm级精度以控制残余量。需结合钢结构的服役环境与承载要求，针对性调整检测重点，确保成分检测与实际使用需求高度契合，为

结构安全奠定基础。针对不同应用场景的钢结构,成分检测需求呈现差异化特征。工业厂房用钢则需关注铜、镍等残余元素对耐候性的影响,防止长期暴露于腐蚀环境引发点蚀。此外,钢结构加工过程中的成分漂移检测同样关键,热轧、冷弯等工艺可能引发元素偏析,需通过多点取样分析评估材料均匀性,为后续工艺调整提供依据。

2.2 桥梁用钢成分检测需求

桥梁用钢成分检测需满足极端环境服役条件下的性能稳定性要求。铬、镍、铜等合金元素的添加可显著提升钢材的耐大气腐蚀能力,但成分比例需精确控制以避免形成电偶腐蚀微电池。钼元素的引入能增强钢材在含氯环境中的抗点蚀性能,尤其适用于跨海桥梁建设,成分检测需确保钼含量符合海洋工程用钢标准。桥梁结构长期承受动载荷与静载荷的复合作用,对钢材的疲劳性能提出严苛要求。需重点把控影响疲劳性能的关键元素含量,避免因成分偏差导致钢材疲劳极限下降,保障桥梁长期服役的安全性与稳定性。此外,桥梁用钢的焊接接头性能检测需延伸至热影响区,通过成分分析评估焊缝金属与母材的元素匹配度,确保焊接接头具有与基材相当的力学性能。

2.3 两类用钢成分检测的共性需求

钢结构与桥梁用钢成分检测均需建立全流程质量控制体系。原材料入厂阶段需通过成分检测验证供应商提供的材质证明书,防止不合格材料流入生产环节。熔炼过程需实施在线成分监控,结合炉前快速分析结果调整合金元素添加量,确保钢水成分符合目标配比。成品出厂前需进行最终成分复验,尤其关注边界牌号钢材的成分临界值,避免因成分波动导致材料性能偏离设计要求。两类用钢检测均面临非均匀材料成分分析挑战。厚截面钢材存在元素偏析现象,需通过纵向剖面取样结合多点检测建立成分梯度模型;异形构件因几何形状复杂导致激发条件差异,需采用自适应聚焦技术补偿表面曲率对检测结果的影响。此外,检测数据的可追溯性是两类用钢的共同要求,需建立包含样品信息、检测参数与结果记录的电子化档案,为结构全生命周期健康监测提供基础数据支撑。

3 直读光谱仪在检测中的应用流程

3.1 检测前准备

检测前需对直读光谱仪进行系统性校准。启动设备后,需预热一定时间使光室温度稳定,避免热漂移影响光谱信号稳定性。校准过程包括波长校准与强度校准:波长校准通过激发标准样品产生的特征谱线,调整光栅

转角使检测器接收位置与理论波长匹配;强度校准则采用已知成分的校准样品,建立光强与元素浓度的定量关系曲线。同时,需检查激发腔体清洁度,清除残留金属颗粒或氧化物,防止交叉污染干扰检测结果。操作人员需根据待测钢材类型选择适配的分析程序^[3]。不同牌号钢材的合金元素种类与含量范围存在差异,需从设备数据库调用对应的方法文件,确保检测参数(如激发能量、积分时间)与材料特性匹配。环境条件监控同样关键,若实验室湿度超过设备允许范围,需启动除湿系统;温度波动较大时,应延长预热时间以消除热效应对检测的影响。

3.2 样品处理与放置

样品表面状态直接影响激发效果。需使用砂纸或磨床对检测面进行机械打磨,去除氧化层、锈蚀或涂层等污染层,暴露新鲜金属基体。打磨方向应与钢材轧制方向垂直,避免残留加工痕迹形成检测盲区。对于异形构件,需选择平整区域作为检测面,或通过定制夹具固定样品以保持激发稳定性。样品放置需确保激发点位于检测面中心区域。将样品平稳置于激发腔体载物台,调整位置使激发电极与检测面垂直对准,间隙控制在规定的范围内。对于厚截面样品,需避免激发点靠近边缘,防止边缘效应导致成分分析偏差。放置完成后,需用压缩空气清洁样品表面,防止微小颗粒在激发过程中产生电离干扰。

3.3 检测操作流程

启动检测程序后,设备自动完成激发参数加载与光室环境确认。按下激发按钮,电极在样品表面产生电弧或火花,使局部金属熔化并气化,原子与离子被激发后发射特征光谱。激发过程持续数秒,检测器实时采集光谱信号并传输至分析系统。系统对采集的光谱数据进行预处理,包括背景扣除、谱线重叠校正与噪声滤波。通过比对校准曲线,将光强信号转换为元素浓度值,生成包含各元素含量的初步分析报告。操作人员需审核检测数据合理性,若某元素含量超出预期范围,需重新激发样品进行复测,排除偶然误差影响。

3.4 检测后处理

检测完成后,需立即关闭激发腔体,防止外界污染物进入。使用专用工具清理腔体内残留金属碎屑,避免下次检测时发生交叉污染。若设备长时间闲置,应覆盖防尘罩并关闭电源,延长光栅、检测器等精密部件使用寿命。分析报告需标注样品编号、检测日期、操作人员等关键信息,确保数据可追溯性。对于异常检测结果,需记录激发条件与环境参数,为后续问题排查提供依据。检测数据应定期备份至独立存储介质,防止因设备故障

导致数据丢失。长期使用的设备需定期进行性能验证,通过检测标准样品确认检测精度与稳定性,保障检测结果可靠性。

4 直读光谱仪应用的优化方向

4.1 检测操作优化

检测操作优化需聚焦激发过程控制与检测流程简化。传统激发方式易受样品表面状态影响,导致光谱信号波动^[4]。通过引入智能激发控制模块,可根据样品导电性、表面粗糙度等特性自动调节激发电压与电流,确保每次激发均能产生稳定的光源。例如,针对高碳钢易产生电弧偏移问题,系统可动态调整电极位置与激发能量,维持激发点稳定性,避免因电弧游走导致的成分分析偏差。检测流程简化需减少人工干预环节。传统操作需手动输入样品信息、选择分析程序并调整激发参数,易因操作失误引入误差。通过开发智能识别系统,利用条形码或二维码自动读取样品编号,结合预设的钢材类型数据库自动加载适配分析程序,实现检测参数一键配置。激发完成后,系统可自动生成包含元素含量与检测结论的报告,减少人工整理数据的时间,提升检测效率。

4.2 适配性优化

适配性优化需解决设备对复杂钢材基体的检测局限。高合金钢中元素种类多、含量范围广,传统光栅分辨率难以满足多元素同时检测需求。通过升级高色散率光栅与优化光路设计,提升设备对相邻谱线的分离能力,避免因谱线重叠导致元素含量误判。例如,针对镍基合金中铬与钼的谱线干扰问题,采用阶梯光栅与交叉色散技术,可实现亚埃级波长分辨率,显著提升复杂基体钢材的检测准确性。设备对异形构件的检测适配性提升需突破传统平面激发限制。传统激发腔体仅能处理规则形状样品,对曲面、管状或小型构件检测存在困难。通过研发柔性激发电极与三维定位系统,使电极能够自动适应样品表面曲率,保持激发点与检测面的垂直关系。对于管状构件,采用环形激发电极设计,通过旋转样品实现周向成分均匀性检测;对于微型零部件,开发微型激发腔体与高精度载物台,扩展设备对小尺寸样品的检测能力。

4.3 应用场景适配优化

应用场景适配优化需强化设备在极端环境下的检测

稳定性。施工现场存在粉尘、振动与温度波动等干扰因素,传统设备易因环境变化导致检测结果漂移。通过采用全封闭光室设计与防震支架,减少外界振动对光谱信号的影响;在光室内部集成温湿度调节模块,维持检测环境稳定性,避免因温度变化引发光栅热膨胀或检测器灵敏度波动。针对熔炼车间高温环境,开发水冷系统与耐高温窗口材料,确保设备在高温条件下持续稳定工作。多场景应用兼容性优化需提升设备对不同检测需求的响应能力^[5]。生产企业与检测机构对检测精度、速度与成本的要求存在差异,需通过模块化设计实现设备功能灵活配置。例如,开发基础版与专业版两种检测模式,基础版满足常规钢材快速筛查需求,专业版则配备高分辨率光栅与智能谱线分离算法,适用于高合金钢或科研级检测。此外,通过云端数据管理系统实现检测参数与校准曲线的云端共享,使现场设备能够快速调用适配分析程序,提升跨场景检测效率。

结束语

直读光谱仪凭借自身特性,在钢结构与桥梁用钢成分检测中优势明显,极大提升了钢材质量控制的效率与可靠性。通过优化检测操作流程,能减少人为误差,提高检测效率;提升设备对复杂基体与异形构件的适配性,可拓展检测范围;强化极端环境下的检测稳定性,能满足不同场景需求。在实践中,需依据钢材类型与检测场景灵活配置设备功能,构建全流程质量控制体系,保障检测数据准确与可追溯,为钢结构与桥梁工程高质量建设提供有力技术支撑。

参考文献

- [1]张仕靖,肖飞.钢结构桥梁检测与加固技术分析[J].运输经理世界,2023(17):94-96.
- [2]李凯.钢结构桥梁检测与加固技术分析[J].运输经理世界,2024(17):60-62.
- [3]娄雪峰,郭涛,朱洪凯.钢结构桥梁检测及评估研究[J].交通世界,2023(17):165-167.
- [4]韩基刚.钢结构桥梁检测与加固技术及其应用[J].黑龙江交通科技,2021,44(2):107-108.
- [5]陈卫.钢结构桥梁检测中的智能化无损检测技术[J].四川建材,2023,49(2):29-30,57.