

钼铁中碳、硅、磷等杂质元素的快速测定技术

刘英英、刘琪

摘要：钼铁是钢铁冶炼中重要的合金添加剂，其纯度直接影响钢铁产品的力学性能和加工性能。碳、硅、磷是钼铁中主要的限制性杂质元素，精准快速测定其含量对钼铁生产质量控制、产品分级及下游应用具有重要意义。本文综述了当前钼铁中碳、硅、磷杂质元素的主流快速测定技术，包括高频-红外吸收法、电感耦合等离子体原子发射光谱法、X射线荧光光谱法及分光光度法，分析了各方法的检测原理、技术特点、应用场景及优化措施，对比了不同方法的检测效率、准确度和适用范围，指出了现有测定技术存在的不足，并对未来快速测定技术的发展趋势进行展望，为钼铁杂质元素快速检测工作提供技术参考和实践指导。

关键词：钼铁；碳元素；硅元素；磷元素；快速测定；杂质检测

1 引言

钼铁作为钼元素的核心载体，广泛应用于合金钢、不锈钢、高速钢及超级合金的冶炼生产，其钼含量直接决定产品牌号和应用价值，而碳、硅、磷等杂质元素的含量则严格限制着钼铁的品质等级。碳会降低钼铁的塑性和韧性，导致钢铁产品出现冷脆现象；硅过量会影响钼铁的冶炼性能，降低合金的焊接性；磷会引发钢铁产品的热脆性，显著恶化材料的力学性能。因此，建立高效、精准的杂质元素快速测定技术，实现钼铁生产过程中碳、硅、磷含量的实时监控，是保障钼铁产品质量、降低生产成本、推动下游钢铁产业高质量发展的关键环节。

2 钼铁中碳、硅、磷杂质元素的快速测定技术

高频-红外吸收法是钼铁中碳元素快速测定的首选方法，具有检测速度快、准确度高、操作简便等优势，广泛应用于钼铁生产现场的质量控制和实验室常

规检测，基于高频感应加热燃烧原理实现碳元素的快速转化与定量检测。检测时，将钼铁样品破碎、研磨至粒度小于 0.125mm 并混匀，精确称取样品置于高频感应炉坩埚中，加入助熔剂，在富氧环境下经高频感应加热至 1500℃ 以上，使碳元素完全氧化为二氧化碳气体，经载气输送至红外检测池，通过检测红外光吸收强度并与标准曲线对比，完成碳元素定量计算。该方法单样品检测时间不超过 3 分钟，检出限可达 ppm 级别，相对标准偏差可控制在 1.0% 以内，还可同步测定硫元素，进一步提升检测效率，其关键在于样品前处理和燃烧条件的精准控制，确保样品完全燃烧、碳元素充分氧化。

电感耦合等离子体原子发射光谱法是多元素同步快速测定技术，具有检出限低、灵敏度高、多元素同时检测等特点，可实现钼铁中硅、磷等多种杂质元素的同步快速测定，已被纳入相关行业标准，是冶金分析领域的主流技术之一。其核心原理是将钼铁样品经硝酸等合适酸体系低温消解，转化为均匀样品溶液，经雾化器雾化后送入高温氩等离子体炬中，硅、磷元素原子被激发并发射特征波长光，通过分光系统分离特征光谱、检测器测定光谱强度，结合标准溶液校准曲线完成定量测定。样品前处理是关键，需确保样品完全溶解，控制酸用量和消解温度以消除基体干扰，检测时选择合适分析谱线，通过干扰系数法消除钼基体光谱干扰。该方法单样品检测时间不超过 10 分钟，检出限可达 0.0003%~0.0072%，相对标准偏差在 0.87%~6.05% 之间，加标回收率为 96.8%~113.6%，可扩展测定铜、砷、锡等其他杂质元素，应用范围广泛。

X 射线荧光光谱法是无损快速测定技术，具有样品前处理简单、检测速度快、无需使用化学试剂等优势，适用于钼铁生产现场的快速质量筛查，可实现碳、硅、磷元素同步检测。其原理是利用初级 X 射线照射钼铁样品，激发样品中碳、硅、磷元素产生特征 X 射线，通过测量特征 X 射线的能量、波长及强度，结合标准样品校准曲线，完成各杂质元素定性与定量分析，分为能量色散型和波长色散型，其中能量色散型更适合现场快速检测。样品前处理常用压片法和熔融法，压片法操作简便，单样品前处理时间不超过 5 分钟；熔融法可消除粒度效应和矿物效应，提升检测准确度，适用于高精度检测。该方法单样品检测时间不超过 3 分钟，检测精度虽略低于电感耦合等离子体原子发射光谱法，但完全满足生产现场质量控制要求，且无损检测可实现样品重复使用，降

低检测成本，优化仪器参数和校准方法可进一步消除基体干扰、提升准确度。

分光光度法是经典快速测定技术，基于朗伯-比尔定律，具有设备成本低、操作简便、准确度高的特点，适用于实验室常规检测和中小型企业快速检测需求，主要用于钼铁中硅、磷元素的单一测定。硅元素采用硅钼蓝分光光度法测定，样品经酸消解后，硅元素转化为硅酸根离子，在酸性条件下与钼酸铵反应生成硅钼杂多酸，加入还原剂还原为硅钼蓝，通过分光光度计测定吸光度并结合标准曲线计算含量；磷元素采用磷钒钼黄分光光度法测定，样品经消解后，磷元素转化为磷酸根离子，在酸性条件下与钒钼酸铵反应生成黄色磷钒钼黄络合物，通过测定吸光度完成定量。该方法的关键是控制反应条件，确保样品消解彻底、显色反应完全，避免干扰离子影响检测结果，单样品检测时间约 15 分钟，准确度满足常规检测需求，适合中小型钼铁生产企业和实验室批量检测。

3 不同测定技术的对比与应用选择

不同快速测定技术在检测效率、准确度、适用范围和成本方面存在差异，需根据检测需求合理选择。高频-红外吸收法适合钼铁中碳元素的快速精准测定，可同步测定硫元素，检测效率高，适合生产现场质量控制；电感耦合等离子体原子发射光谱法适合硅、磷等多元素同步测定，检出限低、灵敏度高，适合高精度检测和多杂质全面检测；X 射线荧光光谱法适合无损快速筛查，样品前处理简单，适合生产现场的快速质量控制和批量筛查；分光光度法设备成本低、操作简便，适合中小企业和实验室的常规批量检测。

实际检测过程中，需结合检测目的、检测精度要求、检测批量和成本预算，选择合适的测定技术。对于生产现场的实时质量控制，优先选择高频-红外吸收法和 X 射线荧光光谱法，兼顾检测速度和实用性；对于实验室高精度检测和多杂质同步检测，优先选择电感耦合等离子体原子发射光谱法；对于中小型企业的常规检测，可选择分光光度法，降低检测成本。

4 结论

碳、硅、磷作为钼铁中主要的限制性杂质元素，其快速精准测定对钼铁产品质量控制具有重要意义。高频-红外吸收法、电感耦合等离子体原子发射光谱

法、X射线荧光光谱法及分光光度法是当前主流的快速测定技术，各方法各具优势，适配不同的检测场景。高频-红外吸收法适合碳元素快速测定，电感耦合等离子体原子发射光谱法适合多元素高精度测定，X射线荧光光谱法适合无损快速筛查，分光光度法适合低成本常规检测。

通过合理选择测定技术、优化检测参数和样品前处理流程，可实现钼铁中碳、硅、磷杂质元素的快速精准测定，满足生产质量控制和实验室检测需求。未来，随着检测技术的不断革新，智能化、高精度化、一体化和低成本化将成为钼铁杂质元素快速测定技术的主要发展方向，为钼铁产业的高质量发展提供更有力的技术支撑。

参考文献

[1]肖星,谭卉,赵小元.低碳低硅钛铁中硅、锰、铝、磷、铜元素测定——电感耦合等离子体发射光谱法[J].涟钢科技与管理,2023(3):55-57