

高精度激光诱导击穿光谱煤质 在线分析方法研究

蒋涛, 温静, 王征

(山西沁源康伟森达源煤业有限公司, 山西 长治 046000)

摘要 本文提出了一种基于激光诱导击穿光谱 (LIBS) 技术的高精度煤质在线分析方法, 旨在解决传统煤质检测手段存在的操作繁琐、分析速度慢及精度不足等问题。LIBS 技术通过高能激光脉冲在煤样表面激发等离子体, 利用光谱仪收集并分析等离子体发射光谱, 实现对煤中多种元素的快速、无损、同时检测。本文详细阐述了 LIBS 系统的组成、分析方法及优化策略, 并通过实验验证了该方法在煤质在线分析中的高精度与稳定性, 以期为煤炭行业的生产优化和质量控制提供参考。

关键词 激光诱导击穿光谱; 煤质分析; 在线监测; 高精度

中图分类号: TN24; O433; TD94

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)12-0013-03

煤炭作为全球能源结构中的重要组成部分, 其质量分析对于实现煤炭的高效利用和环境保护具有至关重要的作用。然而, 传统的煤质分析方法存在耗时、费力且难以实现多元素同时检测的局限性。因此, 探索一种快速、准确且能同时分析多元素的煤质分析新方法显得尤为重要。激光诱导击穿光谱 (LIBS) 技术作为一种新兴的光谱分析技术, 具有独特的无损检测、多元素同时分析以及实时反馈能力, 为煤质分析提供了新的思路^[1]。

1 研究背景

在当前全球能源结构中, 煤炭依然占据重要地位。然而, 传统的煤质分析方法, 如化学分析法和物理检测法, 存在操作繁琐、分析速度慢、精度不足及破坏煤样等缺点, 难以满足现代工业生产对煤质的实时、高精度、无损检测需求。随着激光技术的快速发展, 激光诱导击穿光谱 (LIBS) 技术作为一种新型光谱分析技术, 因其无损检测、多元素同时分析、实时反馈等优点, 在煤质在线分析领域展现出巨大潜力^[2]。LIBS 技术利用高能激光脉冲激发煤样表面等离子体, 并收集分析光谱, 实现对煤中多种元素的快速、无损、同时检测, 提高了煤质分析的精度和速度, 为煤炭行业的生产优化、质量控制和环境保护提供了新手段。本研究旨在开发基于 LIBS 技术的高精度煤质在线分析方法, 以解决传统检测手段问题, 具有重要理论意义和实践价值。

激光诱导击穿光谱 (LIBS) 作为一种新兴的光谱分

析技术, 因其高效、灵敏且无需复杂样品预处理的优点, 在多个领域的材料分析中得到广泛应用。近年来, 国内学者开始关注 LIBS 技术在煤质分析中的应用, 通过引进和自主研发 LIBS 设备, 对煤样进行光谱采集和分析, 探索了其可行性和优势, 并针对存在的挑战和问题, 如基体效应、光谱信号干扰等, 开展了深入研究, 提出了相应解决方案。

国外方面, 美国、德国等发达国家已开展 LIBS 技术在煤质分析中的应用研究, 实现了对煤中多种元素的快速检测, 并在煤炭分类、燃烧优化等方面取得显著成果^[3]。尽管 LIBS 技术在煤质分析领域已取得一定成果, 但仍存在问题和不足。本研究旨在进一步推动 LIBS 技术在煤质分析领域的应用和发展, 为煤炭行业的生产优化和质量控制提供新的技术手段和解决方案。

2 研究设计与方法阐述

2.1 LIBS 技术原理

LIBS 技术即激光诱导击穿光谱技术是一种基于激光与物质相互作用的光谱分析技术, 其基本原理是: 利用高能激光脉冲照射样品表面, 使样品表面局部区域瞬间蒸发并形成高温高压的等离子体。等离子体在冷却过程中会发射出特定波长的光谱, 这些光谱包含了样品中元素的种类和含量信息。通过收集并分析这些光谱信号, 可以实现对样品中多元素的快速、同时检测。

在煤质分析中, LIBS 技术通过高能激光脉冲照射煤样表面, 激发煤样中的元素形成等离子体, 并发射

出特定的光谱信号。通过收集这些光谱信号并进行解析和处理,可以实现对煤中多种元素的快速、无损、同时检测,为煤炭行业的生产优化和质量控制提供有力支持。

2.2 系统构建与关键组件

为了实现高精度 LIBS 煤质在线分析,本研究构建了一个完整的 LIBS 系统,该系统主要包括以下几个关键组件:

1. 激光器:产生高能脉冲激光,用于激发煤样表面的等离子体。激光器的选择需考虑其脉冲能量、重复频率和波长等参数,以确保能够产生稳定且足够强度的等离子体。例如,Nd:YAG 激光器常被用于 LIBS 技术中,因为它可以提供高达数百毫焦的脉冲能量和纳秒级的脉冲宽度,这对于激发样品表面形成高温高压的等离子体非常有效。

2. 光束聚焦系统:将激光器产生的激光束聚焦到煤样表面上的一个小点,以确保激光能量能够集中在煤样的特定区域,从而激发等离子体。这通常通过透镜或反射镜来实现,它们需要具有高透光率或反射率以及良好的聚焦性能。

3. 光谱收集系统:用于收集等离子体发射的光谱信号。该系统包括透镜、滤光片、光纤等组件,以将等离子体发出的光信号传输到探测器上。透镜负责聚焦光线,滤光片用于选择特定波长范围的光信号,而光纤则作为光信号的传输介质。

4. 探测器:将光谱信号转换为电信号,以便进行后续的数据处理和分析。探测器的选择需考虑其灵敏度、响应速度和动态范围等参数。常用的探测器包括光电倍增管(PMT)、电荷耦合器件(CCD)和互补金属氧化物半导体(CMOS)相机等。

5. 数据处理软件:用于对探测器输出的电信号进行解析和处理,从而提取出煤样中各元素的含量信息。该软件需具备光谱校正、背景扣除、特征谱线提取、定量分析等功能。此外,软件还应支持多种数据格式的导入导出,以及与其他分析工具的集成。

这些关键组件共同构成了高精度 LIBS 煤质在线分析系统,为实现煤中多元素的快速、无损、同时检测提供了有力保障。通过不断优化这些组件的性能和功能,我们可以进一步提高 LIBS 系统的分析精度和效率,满足不同应用场景的需求。

2.3 LIBS 在煤质分析中的应用

LIBS 技术因其快速、非破坏性的分析能力而在煤质分析领域展现出广泛的应用潜力。在煤炭行业,这种技术被用来测定煤炭中的多种成分,包括碳、氢、氧、

氮、硫等元素的浓度^[4]。这些数据对于评估煤炭的类型、热值和燃烧特性至关重要,能够为优化煤炭的使用提供科学依据。

除了基础元素分析,LIBS 技术还被用于检测煤炭中的有害物质,例如汞和砷等重金属。这一应用对于环境保护和资源管理具有重要意义,因为它有助于识别并控制这些潜在有害元素的排放。通过实时在线分析,LIBS 技术能够在煤炭加工和燃烧过程中提供即时的质量控制,从而优化操作参数,提高燃烧效率,降低污染物排放。

此外,LIBS 技术在煤炭领域的应用还扩展到了煤炭的物理特性分析,如水分含量、挥发分以及灰分的快速测定。这些物理参数对于评估煤炭的能量利用效率和环境影响同样重要。例如,水分含量的高低直接影响到煤炭的燃烧热值和运输经济性;而灰分的含量则关系到燃烧过程中矿物杂质的转变,这直接影响到燃烧设备的磨损程度以及飞灰的产生量。

在实际应用中,LIBS 技术可以通过搭建在煤炭输送带旁边的在线分析系统实现对煤炭的实时监控。该系统能够连续工作,自动对通过的煤样进行激光照射、等离子体产生、光谱收集与分析,并在几秒钟内提供详细的煤质分析报告。这种即时的数据分析能力使得煤炭使用企业能够快速做出调整,例如混配不同品质的煤炭以达到理想的燃烧效果,或者及时调整燃烧参数以减少污染物的排放。

由于 LIBS 技术具有无需复杂样品预处理、可实现远程和非接触式操作的特性,它特别适合于恶劣的工业环境。在煤矿或火力发电站等场所,这种技术可以安装在输送带上,对煤炭进行连续不断的监测分析,确保煤炭质量的稳定性,同时减少人工采样的成本和时间。

3 LIBS 方法的创新点与潜在挑战

3.1 创新点

1. 高灵敏度与多元素同时检测。LIBS 技术的一个重要创新点在于其高灵敏度,这主要得益于其能够高效地将样品材料蒸发并形成等离子体,从而产生强烈的光谱信号。该技术检测灵敏度高,可以达到 ppm 甚至 ppb 级别,使得即使是痕量元素也能被准确检测。除了高灵敏度之外,LIBS 还能够实现多元素的同时检测。由于等离子体发射的光谱包含了样品中所有元素的信息,通过一次测量就可以获得多种元素的数据,大大缩短了分析时间,提高了分析效率。

2. 实时在线分析与非接触式操作。LIBS 技术的另一显著优势是其实时在线分析能力。该技术无需复杂

的样品预处理,可以直接对固体、液体或气体样本进行分析,实现真正的在线监测。这种实时性对于工业生产过程中的质量控制尤为重要,可以及时发现生产过程中的异常,及时调整生产参数,保证产品质量。同时,LIBS的非接触式操作意味着样品不会被消耗或损坏,这对于珍贵或不易获取的样品尤为关键。此外,非接触式操作还避免了可能的样品污染问题,保证了分析过程的清洁和安全。

3. 数据处理与定量分析模型。LIBS技术的另一个创新点在于其数据处理和定量分析模型的应用。由于LIBS产生的光谱数据量大且复杂,传统的数据分析方法难以满足快速准确分析的需求。因此,研究者开发了多种数据处理算法,如偏最小二乘回归、支持向量机和人工神经网络等,以提高定量分析的准确性和可靠性。这些高级算法能够有效地处理光谱数据的噪声和基线漂移,提高信噪比,增强模型的预测能力^[5]。通过建立准确的定量分析模型,LIBS技术能够实现未知样品的快速准确分析,极大地扩展了其在工业、环境和科研等领域的应用范围。

3.2 潜在挑战

尽管LIBS技术在煤质分析中具有诸多优势,但在实际应用中仍面临一些潜在挑战:

1. 基体效应:煤样的基体成分复杂多变,可能会对LIBS光谱产生一定的影响,导致元素含量测定的准确性降低。因此,需要采用有效的基体效应校正方法来消除这一影响。

2. 光谱信号干扰:在LIBS光谱采集过程中,可能会受到来自煤样表面粗糙度、激光散射、等离子体自吸收等因素的影响,导致光谱信号产生干扰和畸变。因此,需要采用光谱预处理和特征谱线提取等方法来降低这些干扰。

3. 设备成本与维护:LIBS系统的构建需要高精度的激光器和光谱仪等昂贵设备,且需要定期维护和校准以确保其稳定性和准确性。这可能会增加LIBS技术在煤质分析中的应用成本。

4 结论与展望

4.1 结论

在LIBS技术应用于高精度煤质在线分析的研究中,构建了高效LIBS系统,核心包括激光器、聚焦、光谱收集、探测器及数据处理软件。激光器通过优化脉冲参数激发煤样表面等离子体,确保稳定性与强度。光束聚焦系统精确汇聚激光能量于煤样,提升能量效率

和激发可靠性。光谱收集系统集成透镜、滤光片和光纤,高效传输等离子体光谱至高灵敏度探测器,转换为电信号。数据处理软件则深度解析这些信号,精准提取煤样元素含量,支持多种数据处理与分析功能,满足用户多样化需求。

4.2 展望

随着技术的不断进步和创新,LIBS技术在煤质分析中的应用前景将更加广阔。其一,激光器的性能将得到进一步提升,新型激光器的开发将使得脉冲能量更高、脉冲宽度更短,从而提高LIBS技术的检测灵敏度和分辨率。其二,光束聚焦系统的设计和制造也将更加精细和高效,通过采用更高质量的光学材料和改进光学设计,实现更好的聚焦性能和稳定性。其三,光谱收集系统的组件和技术也将持续优化,以提高光谱信号的采集效率和准确性。例如,新的光学元件将被开发出来,以提高透镜的透光率或反射镜的反射率,同时使用更高灵敏度的滤光片来减少背景噪声。探测器的性能也将不断提升,以满足更高要求的LIBS分析需求。新一代的探测器可能会采用更先进的传感器技术和电子器件,实现更快的数据读取速度和更低的噪声水平。其四,数据处理软件将不断进化和完善,以支持更复杂的数据处理和分析功能。未来的软件可能会集成机器学习算法和人工智能技术,自动识别和分类光谱特征,并提供更准确的定量分析结果。同时,软件的用户界面也将变得更加友好和直观,使得非专业人员也能轻松地进行LIBS分析。总之,通过不断的技术创新和优化,LIBS技术将在煤质在线分析及其他领域发挥更大的作用,为煤炭资源的高效利用和环境保护提供有力支持。

参考文献:

- [1] 韦丽萍.提高LIBS应用于煤质特性分析准确度的方法研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [2] 朱圣恩.基于激光诱导击穿光谱的煤炭成分检测与分析方法研究[D].济南:齐鲁工业大学,2024.
- [3] 廖文龙,李哲,杨玥坪,等.基于激光诱导击穿光谱的瞬态温度测量方法[J].电力工程技术,2024,43(04):202-207.
- [4] 郭凯.快速分析技术在煤质检测中的应用[J].山西化工,2023,43(01):138-139,142.
- [5] 田志辉,王树青,张雷,等.LIBS-XRF联用多光谱煤质分析仪的研制与应用(特邀)[J].光子学报,2023,52(03):144-155.