

从单光谱到多源融合：煤质快速检测技术发展综述

田 浩^{1*}, 张 磊^{1#}, 王光普², 郭晓虎¹, 包 军¹

¹杭州华电双冠能源科技有限公司, 浙江 杭州

²华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2026年9月4日; 录用日期: 2026年9月16日; 发布日期: 2026年10月21日

摘 要

煤质快速检测对燃煤电厂的经济效益、设备安全与环保水平具有重要意义, 传统检测方法耗时长、数据滞后, 单一光谱技术又各有局限, 本文旨在系统梳理煤质快速检测技术从单光谱到多源融合的发展脉络, 明确技术现状与瓶颈。本文综述了瞬发伽马中子活化分析(PGNAA)、激光诱导击穿光谱(LIBS)、X射线荧光光谱(XRF)、近红外光谱(NIRS)及拉曼光谱等主流单光谱技术的原理、研究进展与固有缺陷, 并归纳了多源融合在数据级、特征级与决策级三个层面的融合策略及代表性工作。分析表明, 单一技术难以兼顾全指标、高精度与无辐射风险; 多源融合通过信息互补可有效提升检测全面性与精度, 但当前多数研究仍处于实验室阶段, 在数据异质性、模型泛化能力、长期运行稳定性及可解释性方面面临共性挑战。多源融合是煤质快检的重要发展方向, 未来需在样品前处理、信号处理与智能控制等方面持续突破, 以推动大规模工业应用。

关键词

煤质快速检测, 多源融合, 光谱分析, 融合策略, 工业应用

From Single-Spectral to Multi-Source Fusion: A Review of the Development of Rapid Coal Quality Detection Technology

Hao Tian^{1*}, Lei Zhang^{1#}, Guangpu Wang², Xiaohu Guo¹, Jun Bao¹

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 田浩, 张磊, 王光普, 郭晓虎, 包军. 从单光谱到多源融合: 煤质快速检测技术发展综述[J]. 电力与能源进展, 2026, 14(5): 252-261. DOI: 10.12677/aepe.2026.145026

¹Hangzhou Huadian Shuangguan Energy Technology Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang²Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: September 4, 2026; accepted: September 16, 2026; published: October 21, 2026

Abstract

Rapid coal quality detection is of great significance to the economic benefits, equipment safety and environmental protection of coal-fired power plants. Traditional detection methods are time-consuming with delayed data, while single-spectroscopy techniques each have limitations. This paper aims to systematically review the development of coal quality rapid detection technology from single spectroscopy to multi-source fusion, and to clarify the current status and bottlenecks. This paper reviews the principles, research progress and inherent defects of mainstream single-spectroscopy techniques, including prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA), laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), X-ray fluorescence spectrometry (XRF), near-infrared spectroscopy (NIRS) and Raman spectroscopy. The fusion strategies and representative works of multi-source fusion at data-level, feature-level and decision-level are also summarized. The analysis shows that a single technique cannot simultaneously achieve full-index detection, high accuracy and no radiation risk. Multi-source fusion can effectively improve detection comprehensiveness and accuracy through information complementarity. However, most current studies remain at the laboratory stage and face common challenges such as data heterogeneity, model generalization ability, long-term operational stability and interpretability. Multi-source fusion is an important direction for rapid coal quality detection. Future breakthroughs in sample preparation, signal processing and intelligent control are needed to promote large-scale industrial application.

Keywords

Rapid Coal Quality Detection, Multi-Source Fusion, Spectral Analysis, Fusion Strategy, Industrial Application

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

煤炭质量直接关系到燃煤电厂的经济效益、设备安全与环保水平。煤质指标(全水分、灰分、挥发分、全硫、发热量及碳氢含量)是指导煤炭贸易、配煤掺烧、燃烧优化及碳排放核算的关键依据。传统煤质检测遵循国家标准(GB/T)及行业标准(DL/T)的化学分析流程,虽精度高,但操作繁琐、耗时长(数小时至数天),数据严重滞后,且人工操作易引入误差[1]。

为破解这一瓶颈,煤质在线快速检测技术应运而生。理想的煤质快检技术应具备快速(分钟级)、准确、无损、无辐射或低辐射等特点。自 20 世纪 90 年代以来,国内外相继研发了基于双能量 γ 射线、中子活化、X 射线荧光、近红外光谱及激光诱导击穿光谱等原理的在线检测装置[2]。然而,尚无单一技术能完美解决所有煤质参数的同步、精准、快速检测问题。因此,多光谱融合技术结合人工智能算法建立高鲁棒性定量模型,成为当前煤质快检领域的核心研究方向[3]。

2. 主流单光谱煤质快检技术及研究进展

本章节将依次介绍目前国内外应用较广或研究较热的五种煤质在线检测技术：中子活化分析、激光诱导击穿光谱、X 射线荧光光谱、近红外光谱和拉曼光谱，并分析其各自的物理原理、发展历程、技术优势及固有缺陷。

2.1. 中子活化分析技术

瞬发伽马中子活化分析(PGNAA)技术是目前市场上较为成熟的在线元素分析方案之一。其原理是利用中子源(如铀-252 或氡氟中子管)轰击煤样原子核，产生瞬发伽马射线，通过探测其能量和强度确定元素含量[4]，自 20 世纪 90 年代以来，Thermo Fisher、Scantech、Sodern 及东方测控等厂家已推出商业化产品。按安装方式分为穿透式和反射式两种：穿透式将中子源与探测器分置皮带上下方，理论上可分析全煤流截面，但实际受煤流高度、密度、粒度分布等因素影响精度较差；反射式将源与探测器置于皮带同侧，仅分析表层煤样，同样受上述因素制约，且目前仅有少数公司能够生产，穿透式示意图如图 1 所示。

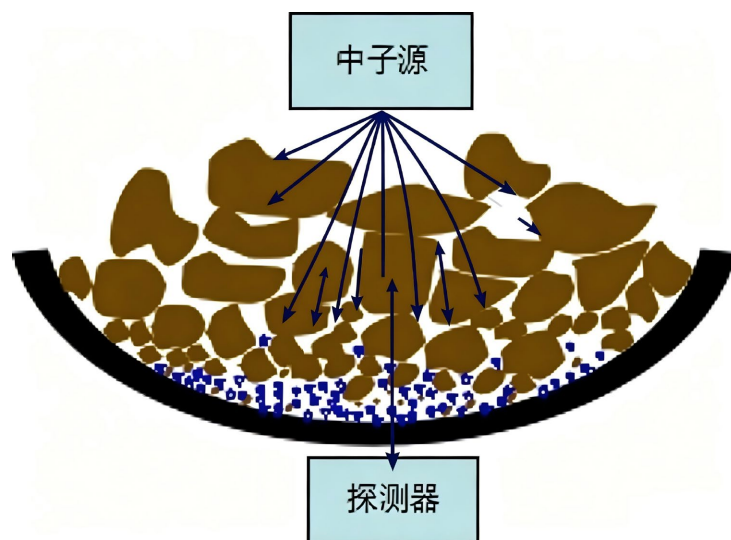


Figure 1. Schematic diagram of a transmissive neutron activation instrument
图 1. 穿透式中子活化仪器示意图

PGNAA 的优点在于可分析煤中几乎所有主要元素。但其缺陷同样突出：

- 1、中子源存在持续核辐射，须取得环保许可且操作人员持证上岗，监管成本极高；
- 2、铀-252 半衰期约 2.6 年，更换放射源费用高昂且需停机校准；
- 3、一套设备仅能监测一条皮带，多皮带场景投资巨大。安全隐患与监管壁垒正促使业界寻求更安全的替代方案。

2.2. 激光诱导击穿光谱技术

激光诱导击穿光谱(LIBS)技术是目前理论上能精确测量煤中碳含量的潜在在线技术[5]。其原理是使用高能脉冲激光聚焦于样品表面，烧蚀激发产生高温等离子体(温度可达 10,000 K 以上)，等离子体冷却时原子、离子跃迁发射特征光谱，通过分析谱线波长和强度确定元素组成[6]，相关技术设备原理如图 2、图 3 所示，LIBS 分析仪示意图如图 4 所示。

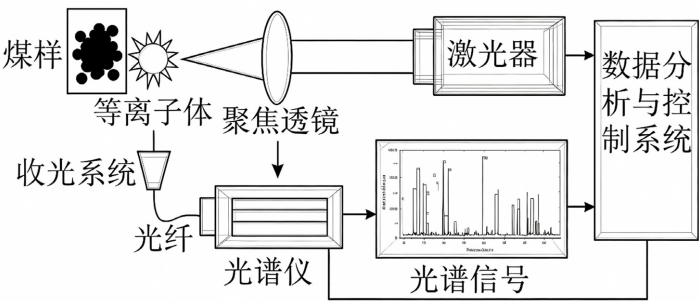


Figure 2. Schematic diagram illustrating the principle of an energy-dispersive spectrometer
图 2. 能量色散型光谱仪原理示意图

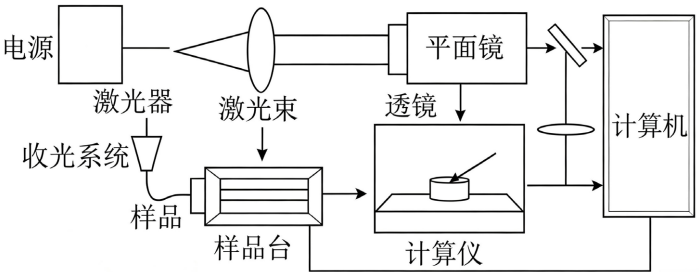


Figure 3. Schematic diagram of the LIBS analyzer's measurement principle
图 3. LIBS 分析仪测量原理图

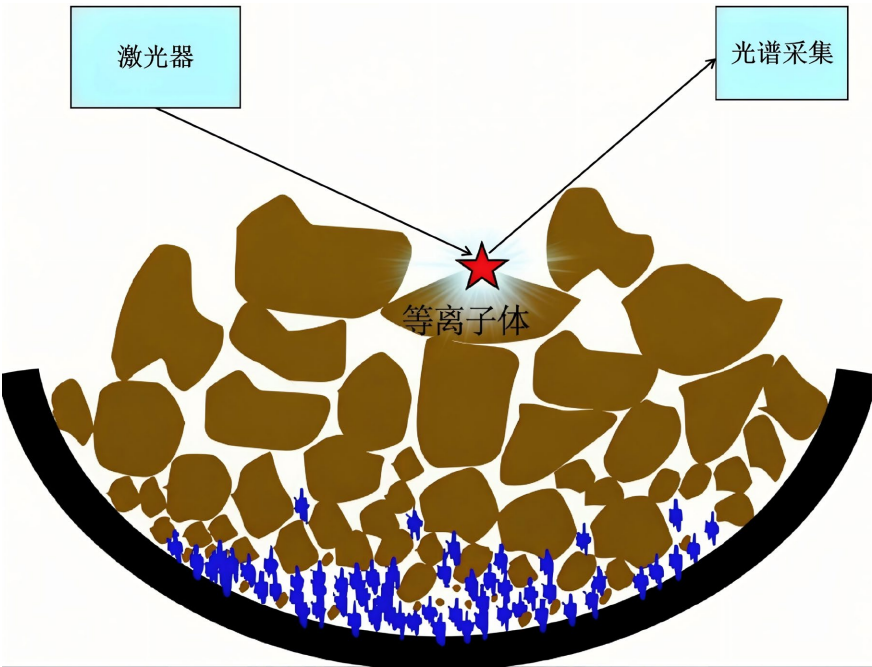


Figure 4. Schematic diagram of a LIBS online analyzer
图 4. LIBS 在线分析仪器示意图

LIBS 技术始于 20 世纪 60 年代。1962 年 Birks 和 Decius 报道激光激发氮原子光谱，1974 年 Cremers 和 Radziemski 系统阐述了其基本原理与实验方法。此后 LIBS 逐步应用于环境、工业材料等领域。近年针对煤质检测的研究主要聚焦于提高重复性、降低基体效应及结合机器学习提升模型精度[7]。

尽管 LIBS 在实验室条件下对 C、H、O 等轻元素检测潜力优异,但其工业在线应用仍面临[8]:

- 1、代表性差——聚焦光斑仅数百微米,对不均匀煤样离散性大,需磨粉压片前处理;
- 2、环境敏感性强——光学系统对粉尘、振动、温度变化敏感,维护成本高;
- 3、定量模型复杂——光谱受激光能量、聚焦距离、基体效应等影响,跨煤种通用模型建立困难;
- 4、硫元素检测能力弱——硫的特征谱线在紫外区衰减严重且易受干扰。

2.3. X 射线荧光光谱技术

X 射线荧光光谱(XRF)技术是无损元素分析手段。其原理基于莫斯莱定律:高能一次 X 射线轰击样品时,原子内层电子被逐出,外层电子跃迁释放具有特征能量的二次 X 射线(荧光 X 射线),通过检测其能量或波长可定性定量分析元素种类与含量[9],X 射线产生原理如图 5 所示。XRF 能有效检测原子序数 ≥ 11 (Na)的元素,但对 C、H、O、N 等轻元素检测能力较差。

在工业在线应用方面,XRF 仪器主要分为两类:一类是扫描式或探头移动式,虽然结构简单,但机械运动部件多,在粉尘环境中故障率高,且测量时间短、温湿度影响大,分析精度较差;另一类是以德国 SOLAS 为代表的固定窗口式在线 XRF 分析仪,其克服了运动部件的缺陷,具备成本适中、寿命长、校准相对容易、精度较高的优点。虽然 XRF 存在 X 射线辐射,但经良好屏蔽后,辐射剂量极低,通常无需环保部门特殊审批。

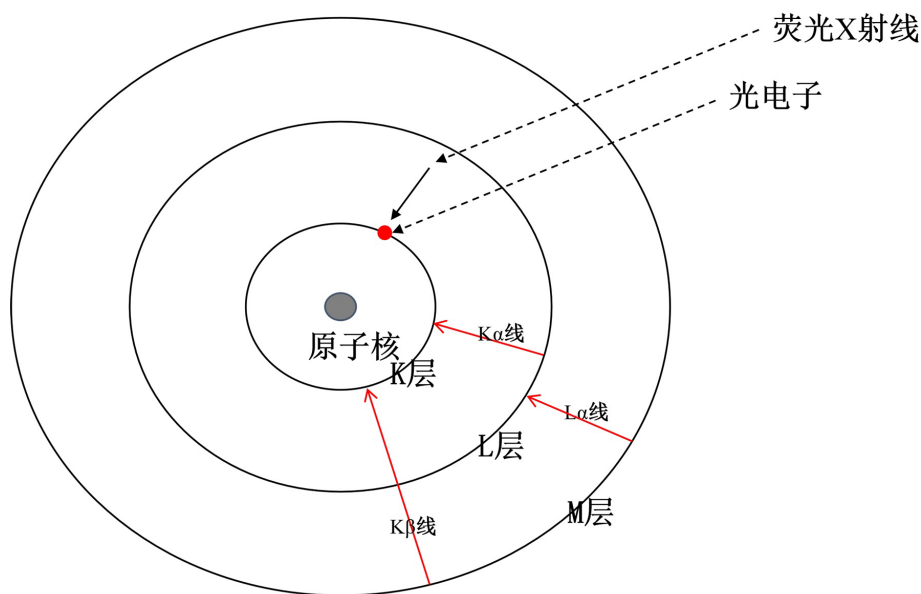


Figure 5. Diagram of X-ray generation
图 5. X 射线产生图

XRF 的优点在于分析速度快、无损、无需复杂样品前处理,且对硫、灰分中的硅铝铁钙等元素测量精度高。然而,其无法准确检测碳含量的缺陷是其应用于煤质分析的“硬伤”。由于碳是煤炭发热量和碳排放核算的核心元素,XRF 技术无法独立完成全煤质分析,通常需要与近红外或 LIBS 技术联用,通过经验公式或模型间接推算发热量和碳含量。

2.4. 近红外光谱技术

近红外光谱(Near-Infrared Spectroscopy, NIRS)技术利用波长在 780~2526 nm 之间的电磁波与样品中

含氢官能团(如 O-H、C-H、N-H、S-H)的倍频和合频吸收特性来分析样品。煤炭中的水分、挥发分、固定碳及发热量等指标与这些含氢基团密切相关。

发展历程: NIRS 在煤质分析中的应用可追溯至 20 世纪中期。1950s~1960s, 人们开始尝试建立煤的近红外光谱与煤质参数的关系。1970s~1980s, 随着光谱库的建立和计算机技术的发展, 多元回归分析被用于定量校正。1990s~2000s, 偏最小二乘法(PLS)等化学计量学方法的引入极大提高了预测准确性。21 世纪以来, 近红外煤质分析技术已实现商业化, 并在矿业和能源领域得到推广[10], 相关设备技术原理如图 6 所示。

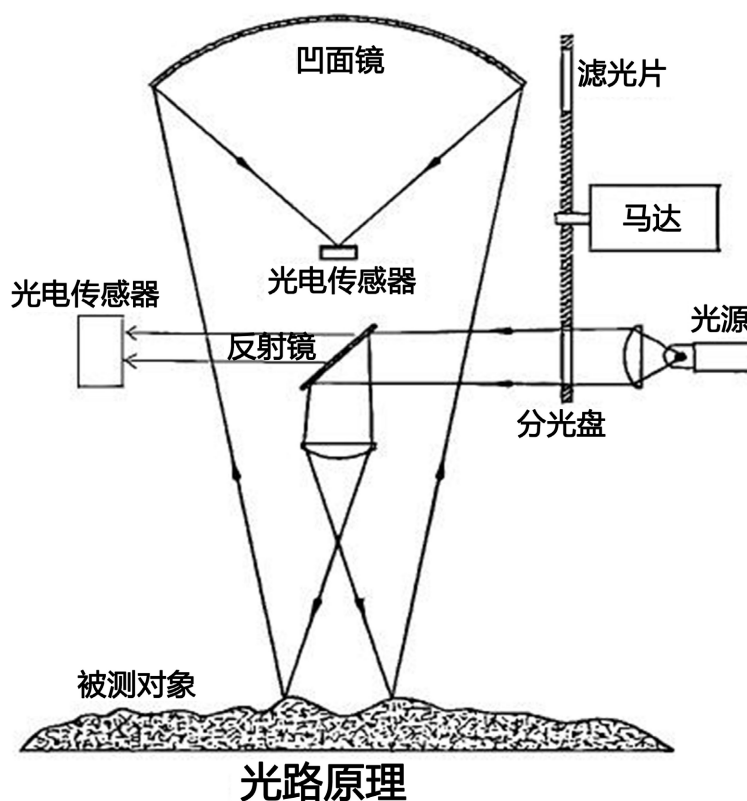


Figure 6. Schematic diagram of a near-infrared online analyzer
图 6. 近红外在线分析仪示意图

NIRS 技术的最大优势在于快速、无损、无需试剂, 且对水分测量尤为敏感。然而, 其局限性包括:

- 1、信号信噪比低, 受粒度、表面光洁度影响大;
- 2、检测深度有限, 仅反映表层信息;
- 3、吸收峰重叠严重, 模型建立需大量代表性样本, 且对煤种变化适应性差, 灰分测量误差较大。

2.5. 拉曼光谱技术

拉曼光谱基于拉曼散射效应——激光照射样品时, 光子与分子发生非弹性碰撞产生频率位移的散射光, 反映分子振动和转动能级信息。该技术对煤中碳的微观有序度(石墨化程度)和缺陷结构敏感, 能有效区分不同煤化程度煤种[11]。随着光纤技术、CCD 探测器和化学计量学发展, 拉曼已具备在线分析硬件基础, 并在石化领域取得应用[12]。

然而, 拉曼光谱在煤质在线检测领域的应用研究相对较少。主要原因包括:

- 1、荧光干扰严重：煤炭中某些有机质和矿物质在激光照射下会产生强烈的荧光背景，淹没了微弱的拉曼信号；
- 2、光谱解析困难：煤的组成极其复杂，拉曼谱峰重叠严重，定量解析难度极大；
- 3、代表性不足：与 LIBS 类似，拉曼分析的探测光斑通常较小，且仅反映样品表层信息。

3. 多光谱融合技术研究进展

单一光谱技术各有其适用边界与技术盲区，难以独立完成煤质全指标的精准检测。XRF 对原子序数大于 11 的元素(Si、Al、Fe、Ca、S 等)具有优异的分析能力，但对 C、H、O、N 等轻元素灵敏度低，无法直接提供发热量与含碳量；NIRS 对含氢官能团敏感，但信号信噪比低、检测深度有限，灰分测量误差较大；LIBS 在理论上具备碳元素检测潜力，但取样点极小、基体效应显著，工业现场长期稳定性不足；拉曼光谱可提供分子结构信息，但荧光干扰严重、定量解析困难；微波技术对水分高度敏感，但功能单一。在此背景下，多光谱融合技术通过协同利用多种检测原理的信息互补性，成为煤质快检领域的重要研究方向[13]。

3.1. 多源融合的层级策略

多源融合并非多种技术的简单叠加，而是根据信息抽象层次在不同阶段进行整合。按融合发生的阶段，可划分为数据级融合、特征级融合与决策级融合三种策略。

数据级融合是最低层次的融合，直接对来自不同传感器的原始数据或预处理后的数据进行拼接与联合建模。在煤质检测中，典型做法是将 LIBS 光谱与 NIR 光谱在波长维度上拼接为一张宽谱数据矩阵，或将以 XRF 测得的元素荧光强度与 NIR 测得的分子吸收光谱合并为高维输入向量，再统一送入回归模型。该策略保留了最多的原始信息，但对传感器间的时间同步、空间对齐和量纲一致性要求较高。由于不同光谱技术的采样频率、探测深度和信噪比特性差异显著，直接拼接易引入噪声与冗余变量，对后续建模算法的鲁棒性构成挑战[14]。此外，也有研究通过融合煤样的多维度数据(如产地、粒度、环境参数)与光谱数据，利用卷积神经网络建立更稳健的预测模型[15]。

特征级融合是当前研究的主流策略。其核心思路是先从各单一光谱中提取具有物理或化学意义的特征(如 LIBS 的特征谱线强度、NIR 的吸收峰面积、XRF 的元素净计数率)，再将这些特征进行组合、加权或降维后建立定量模型。特征提取方法包括主成分分析(PCA)、偏最小二乘法(PLS)、小波变换等；特征融合策略包括串联拼接、加权融合与基于注意力机制的动态选择。例如，有研究将 LIBS 提取的 C、H 特征谱线与 XRF 提取的 Si、Al、Fe 元素强度联合输入 PLS 模型，同时预测发热量与灰分，在一定程度上弥补了单一技术对轻元素或重元素检测能力的不足[16]。在 LIBS 与 NIRS 融合方面，研究者提出化学信息引导的多块数据融合策略，将 LIBS 与 NIRS 的光谱块按化学相关性进行加权，有效提升了煤质分析的精度[17]。此外，LIBS 与 NIRS 信号同步采集与融合也被用于入炉煤发热量的在线测量[18]。LIBS-XRF 联用多光谱煤质分析仪的研制，则从硬件层面实现了两种技术的集成，利用 XRF 弥补 LIBS 稳定性不足，同时利用 LIBS 的碳检测能力弥补 XRF 对轻元素的盲区[19]。XRF 辅助 LIBS 的方法也被证明可有效提高煤质分析的重复性。该策略的局限性在于，特征提取过程本身可能丢失对建模有用的微弱信息，且各源特征的权重分配往往依赖经验或交叉验证，缺乏统一的优化准则。

决策级融合是最高层次的融合，各单一技术独立完成预测后，再通过投票、加权平均或贝叶斯推理等方式合成最终结果。该策略对各子模型的独立性要求较高，实现相对简单，但无法利用不同源数据之间的相关性信息，融合增益有限。在煤质检测中，决策级融合多用于水分、灰分等指标的辅助校验，尚少见用于全指标同步检测的报道[20]。

3.2. 代表性工作与局限性

近年来,多源融合在煤质分析领域的研究逐渐增多。在 LIBS 与拉曼融合方面,拉曼提供的碳结构有序度信息被用于辅助 LIBS 对煤化程度的判别,进而改善发热量模型的泛化能力。此外,亦有研究探索 XRF 与微波水分联合测定,以 XRF 元素数据推算干基灰分,以微波数据直接获取全水分,再通过基态换算得到收到基指标。

然而,上述研究仍存在若干共性问题。其一,多数工作停留在实验室阶段的离线建模,样品经过磨粉压片等前处理,与工业现场直接检测原煤的实际工况存在较大差距[1]。其二,模型泛化能力不足,训练样本多集中于特定矿区或煤种,跨煤种、跨地域的预测精度明显下降。其三,对融合模型的物理解释性关注不够,部分研究过度依赖“黑箱”算法,难以从光谱机理层面阐明融合增益的来源。其四,缺乏统一的评价基准与标准数据集,不同研究之间的结果难以直接比较[21]。

无论采用何种融合策略,多光谱融合技术均面临若干共性挑战。首先是数据异质性问题,不同光谱技术的物理量纲、采样频率与噪声特性差异显著,如何在融合前进行有效的归一化与对齐,是保证模型稳定性的前提。其次是样本代表性与模型可迁移性问题,煤炭作为成分高度不均匀的天然混合物,其光谱特征受煤种、产地、粒度、水分等多因素耦合影响,建立具有广泛适用性的融合模型需要大量覆盖多煤种、多工况的训练样本。再次是长期运行稳定性问题,工业现场的温度波动、粉尘污染、振动干扰等因素均可能导致光谱信号漂移,进而影响融合模型的预测精度,对系统的自校准与自诊断能力提出了较高要求。最后是可解释性问题,多源融合模型的输入维度高、变量间关系复杂,如何从机理层面解释各源数据对最终预测的贡献,仍是亟待深入研究的方向。

3.3. 多源融合在煤质快检中的工程化探索

在上述研究背景下,本研究探索的“燃烧分析 + 光谱分析”多模块集成方案,可视为多源融合技术面向工业现场的一种工程化实现路径。该方案将样品制备、富氧燃烧、红外气体分析、XRF 元素分析与微波水分检测进行系统性集成,在关键指标上采用直接测量替代间接推算:通过富氧燃烧后气体浓度测定 C、H、S,通过 XRF 测定灰分成因元素,通过微波测定全水分。与基于固体煤样直接光谱扫描的融合方案相比,该路径在原理上减少了光谱信号间接建模的误差累积,但其工程适用性、长期运行可靠性及跨煤种泛化能力仍需在实际应用中系统评估。

该方案的潜在技术挑战与误差来源主要包括以下几个方面。其一,燃烧分析模块的碳、氢、硫测定依赖于燃烧产物的完全释放与气路传输的稳定性,燃烧温升曲线受环境温度、氧气流量波动及样品热值差异影响,可能导致发热量预测模型在煤种切换时出现偏差。其二,XRF 灰分模型的预测精度高度依赖于训练样本的煤种覆盖范围与基体校正策略,对未参与训练的矿区煤种,其外推能力尚需验证。其三,微波水分测定结果受煤样密度、粒度分布及装样方式影响,需通过动态密度补偿与标准化装样流程加以控制。其四,系统涉及制样、燃烧、光谱、气路等多模块协同,各模块的长期漂移与校准需求对运维提出了较高要求。其适用边界目前主要面向无烟煤、烟煤和褐煤等动力用煤,在煤种显著变化或煤质极端波动条件下,模型需重新校准。

4. 结语与展望

煤质快速检测技术是推动煤炭行业智能化、清洁化转型的关键共性技术。本文系统综述了 PGNA、LIBS、XRF、NIRS 及拉曼光谱等主流技术的原理、研究进展及技术瓶颈,分析指出单一技术均存在辐射风险、代表性不足、轻元素检测能力弱或环境适应性差等固有局限。

在上述技术分析的基础上,本文进一步梳理了多源融合技术的发展趋势,指出当前研究虽已从单一

光谱向多光谱联合建模演进,但多数工作仍停留在“光谱扫描+经验建模”的范式之内,其跨煤种泛化能力与工业现场适应性仍有待提升。本团队探索的多技术模块集成方案,通过将样品制备、富氧燃烧、气体检测与XRF元素分析相结合,实现了对C、H、S及全水分等关键指标的直接测量,与传统的间接推算方法形成互补。随着样品前处理、信号处理与智能控制等配套技术的持续突破,煤质快检技术有望在近期实现大规模工业应用,为燃煤电厂节能减排与精准碳核算提供有力支撑。

基金项目

中国华电集团科技项目:[CHDKJ25-04-02-387]-新型智能煤质快速检测技术研究 with 试验。

参考文献

- [1] 王洪磊,郭鑫,张亦凡,等.煤质煤量全面在线检测技术发展现状及应用进展[J].煤炭科学技术,2024,52(2): 219-237.
- [2] 孙健,王化阳.煤炭在线检测技术研究与应用现状[J].煤炭加工与综合利用,2025(8): 69-74+79.
- [3] 冯晓涵,杜明生,崔柳,等.煤质快速检测分析技术发展与应用[J].煤炭加工与综合利用,2025(8): 116-122.
- [4] 侯宗余,宋惟然,宋玉洲,等.激光诱导击穿光谱煤质在线分析技术现状与展望[J].煤质技术,2023,38(1): 1-12.
- [5] Sheta, S., Afgan, M.S., Hou, Z., Yao, S., Zhang, L., Li, Z., *et al.* (2019) Coal Analysis by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: A Tutorial Review. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **34**, 1047-1082. <https://doi.org/10.1039/c9ja00016j>
- [6] 倪明辉,李燕,易镇鑫,等.激光诱导击穿光谱(LIBS)在煤质检测中的应用现状[J].中国无机分析化学,2022,12(4): 80-88.
- [7] Liu, K., He, C., Zhu, C., Chen, J., Zhan, K. and Li, X. (2021) A Review of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy for Coal Analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **143**, Article 116357. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116357>
- [8] 郭凯.快速分析技术在煤质检测中的应用[J].山西化工,2023,43(1): 138-139+142.
- [9] Revenko, A.G. and Pashkova, G.V. (2024) Study of the Chemical Composition of Coal and Coal Ash by X-Ray Fluorescence Method: A Review. *X-Ray Spectrometry*, **54**, 159-170. <https://doi.org/10.1002/xrs.3444>.
- [10] 于鹏峰,苏攀,刘佳薇,等.基于PL-Raman光谱分析的煤质快速检测方法[J].动力工程学报,2022,42(3): 215-220.
- [11] 程南南,石梦岩,侯泉林,等.拉曼光谱在煤大分子结构表征中的应用[J].煤炭学报,2023,48(3): 1311-1324.
- [12] 李雪萍,曾强.光谱分析在煤结构研究中的进展[J].光谱学与光谱分析,2022,42(2): 350-357.
- [13] 田军.多谱数据驱动的煤质智能分析方法研究[D]:[博士学位论文].徐州:中国矿业大学,2025.
- [14] 尹嘉鑫.NIRS-XRF煤炭质检中多模态粒度校正方法研究及工业控制策略优化[D]:[硕士学位论文].太原:山西大学,2025.
- [15] 中国矿业大学(北京),国电环境保护研究院有限公司.基于多维度数据融合的近红外煤质检测方法[P].中国专利,CN119903475A.2025-04-29.
- [16] Tian, Z., Li, X., Wang, G., Zhang, L., Li, J., Wang, S., *et al.* (2022) Elemental and Proximate Analysis of Coal by X-Ray Fluorescence Assisted Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Plasma Science and Technology*, **24**, Article 084007. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac78ca>
- [17] Ma, W., Li, C., Yang, Q., Qin, H., Lu, Z. and Yao, S. (2026) Chemically Informed Targeted Multiblock Data Fusion for Coal Analysis Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy. *Analytical Chemistry*, **98**, 16282-16295. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6c00824>
- [18] 茆方,王庆松,李承峻,等.基于LIBS和NIRS信号同步采集和融合的入炉煤炭发热量测量研究[J].热力发电,2023,52(7): 92-98.
- [19] 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(3): 144-155.
- [20] Wang, S., Cao, S., Li, S., Zhu, Y., Lin, M., Chang, J., *et al.* (2026) Advances in Rapid Spectroscopic Methods for Coal Analysis: Principles, Key Techniques, and Emerging Measurement Challenges. *Measurement*, **259**, Article 119493. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119493>

-
- [21] Yao, S., Qin, H., Wang, Q., Lu, Z., Yao, X., Yu, Z., *et al.* (2020) Optimizing Analysis of Coal Property Using Laser-Induced Breakdown and Near-Infrared Reflectance Spectroscopies. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **239**, Article 118492. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118492>