

# 煤质在线检测技术研究现状

康永飞<sup>1</sup>, 武增礼<sup>2</sup>, 张博<sup>2</sup>, 杨金祥<sup>2</sup>, 张浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国能包头能源有限责任公司煤炭洗选中心, 内蒙古鄂尔多斯

<sup>2</sup>煤炭科学技术研究院有限公司, 北京

收稿日期: 2025年7月18日; 录用日期: 2025年8月23日; 发布日期: 2025年9月11日

## 摘要

本文聚焦煤质检测技术, 指出其对煤炭高效清洁利用、能源安全及环保的关键作用。煤质检测核心指标包括工业分析(水分、灰分等)和元素分析(C, H, O, N, S), 传统检测方法操作复杂、耗时较长。随着光谱学技术发展, 在线检测技术逐步应用, 涵盖天然 $\gamma$ 射线检测法、X射线检测法、拉曼光谱法和激光诱导击穿光谱法(LIBS)等。其中, 近红外光谱法和激光诱导击穿光谱分析法已成熟, 前者成本低、精度高但受样品状态影响, 后者可全元素分析却面临重复性等问题。这些技术为煤炭工业可持续发展提供了重要支撑。

## 关键词

煤质检测指标, 在线检测技术, 光谱学技术

# Research Status of Coal Quality Online Detection Technology

Yongfei Kang<sup>1</sup>, Zengli Wu<sup>2</sup>, Bo Zhang<sup>2</sup>, Jinxiang Yang<sup>2</sup>, Hao Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Coal Preparation Center of China Energy Baotou Energy Co., Ltd., Ordos Inner Mongolia

<sup>2</sup>Test Branch of China Coal Research Institute, Beijing

Received: Jul. 18<sup>th</sup>, 2025; accepted: Aug. 23<sup>rd</sup>, 2025; published: Sep. 11<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This paper highlights the crucial significance of rapid and accurate coal quality testing technology for the efficient and clean utilization of coal, energy security, environmental protection, and industrial upgrading. It elaborates on the core indicators of coal quality testing, including industrial analysis indicators (moisture, ash, etc.) and elemental analysis indicators (C, H, O, N, S), and points out that traditional testing methods are complex, time-consuming, and unsuitable for modern industry. With the maturity of spectroscopy technology, online coal quality testing technologies have been

applied, such as natural  $\gamma$ -ray detection, X-ray detection, Raman spectroscopy, near-infrared spectroscopy, and laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). Among them, near-infrared spectroscopy and LIBS have become mature technologies. The paper also analyzes the principles, advantages, and limitations of these technologies, which provide technical support for the sustainable development of the coal industry.

## Keywords

Coal Quality Testing Indicators, Online Detection Technology, Spectroscopy Techniques

Copyright © 2025 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

煤炭的高效利用与清洁转化对能源安全、环境保护及产业升级具有关键意义，而快速精准的煤质检测技术是核心支撑。快速检测可优化煤炭分选、燃烧及转化工艺，减少浪费与排放，但传统检测方法操作复杂、准确度有限，难以适应现代工业需求。随着光谱学技术成熟，高效的在线煤质检测技术逐步应用，为行业发展提供了新路径。

## 2. 煤质检测核心指标及其传统检测技术

煤质检测的核心指标，是衡量煤炭品质、划分煤种与评估利用价值的核心标尺，涵盖反映实用特性的工业分析指标和揭示化学组成的元素分析指标。这些指标的检测结果，为煤炭开采、加工、燃烧及环保控制提供了基础数据支撑。

### 2.1. 工业分析指标

煤炭水分是一项核心指标，直接影响煤炭的燃烧效率、加工利用及贸易计价。主要分为附着在煤炭颗粒表面的外在水分，主要来自开采、运输过程中的外部环境，受煤的粒度、环境湿度影响较大和吸附在煤炭内部孔隙中的内在水分。在传统工业检测中，其核心是通过干燥后的失重，计算水分的含量，通常采用烘箱干燥或微波干燥，耗时较长。

灰分是反映煤炭纯净度和矿物质含量的核心指标，直接影响煤炭的燃烧性能、加工利用效率及环保特性。主要指煤炭在完全燃烧后剩余的固体残渣，其成分主要为金属氧化物、少量为硫酸盐和磷酸盐等。在传统工业检测中，其核心是通过灼烧失重后残渣称重，计算煤炭灰分的含量。通常采用马弗炉灼烧重量法，操作麻烦，耗时较长。

挥发分是反映煤炭化学性质、燃烧特性及煤化程度的核心指标，其高低直接决定煤炭的着火性能、用途适配性及加工利用方向。主要指煤炭在隔绝空气的条件下加热至一定温度时，分解逸出的气态及液态(冷凝后)产物的总和。在传统工业检测中，其核心是隔绝空气加热并称重差减法，计算煤炭挥发分的含量。通常采用密封马弗炉或管式炉隔绝空气加热，操作麻烦。

固定碳是反映煤炭有机质核心成分、燃烧性能及煤化程度的关键指标，其本质是煤中除去水分、灰分和挥发分后的剩余可燃性固体成分。主要成分是碳元素(占 90% 以上)，还包含少量未完全逸出的氢、氧、氮、硫等元素。在传统工业检测中，其核心是固定碳含量 = 100% - 水分含量 - 灰分含量 - 挥发

分含量。其结果为间接计算，由水分、灰分和挥发分推导而来，无法直观得出。

发热量是单位质量的煤在完全燃烧时释放的热量，直接决定煤炭的工业用途、贸易定价及燃烧效率。是指单位质量(或体积)的煤在完全燃烧时释放的总热量，是煤炭热值的直接体现。在传统工业检测中，测定以氧弹量热仪为核心设备，原理是量热法。需要特定的检测仪器，操作步骤复杂。

## 2.2. 元素分析指标

在煤炭检测中，碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)是构成煤炭有机质的主要元素，它们的含量和形态直接决定煤炭的品质、燃烧特性、环保性能及工业利用价值。

碳是煤炭中最核心的可燃元素，含量最高，通常占煤有机质的 50%~98%，以有机碳形式存在，与氢、氧等结合成复杂的芳香族、脂肪族化合物，是煤炭发热量的主要来源；氢是仅次于碳的可燃元素，含量约 2%~6%，以有机氢形式存在(与碳结合成  $\text{CH}$ 、 $\text{CH}_2$  等基团)，少量以结晶水形式存在于矿物质中；氧是非可燃元素，含量变化最大，占比 1%~40%，主要以有机氧形式存在；氮含量较低占比 0.5%~2%，随煤化程度加深略有降低，且受成煤原始植物影响较大，有机氮形式存在(如胺基、吡啶环等)；硫是煤炭中最主要的有害元素，含量 0.2%~10%左右。

碳、氢是煤炭发热量的核心来源，氧、氮、硫(尤其是硫)主要起负面影响。这些元素的含量和形态直接决定煤炭的燃烧效率、环保性能、工艺适应性，因此是煤炭检测中不可或缺的指标。

## 3. 在线煤炭检测技术现状

在线煤质检测为煤炭清洁利用与污染控制提供技术支撑，助力煤炭工业可持续发展。近几十年来，光谱学技术在该领域关注度上升，包括天然  $\gamma$  射线、X 射线、拉曼光谱、近红外光谱及激光诱导击穿光谱分析法等[1]，其中近红外与激光诱导击穿光谱法近年已发展为成熟的在线检测技术。

### 3.1. 天然 $\gamma$ 射线检测法

天然  $\gamma$  射线检测法是比较早实现工业化应用的煤质在线检测技术，其原理是借助探测器捕捉煤中天然放射性元素释放的  $\gamma$  射线，进而计算煤的灰分产率。当  $\gamma$  射线与煤中的矿物质或有机质发生相互作用时，会与元素产生光电反应、康普顿散射、电子对效应等，此时天然  $\gamma$  射线的能量会向低能方向集中，形成的谱线形状和峰面积，与煤中不同有效原子序数元素的分布状态相关，据此可进一步解析出煤的元素组成特征[2]。不过，此方法受环境影响较大，在粉尘环境中使用容易存在污染问题，若仪器表面粉尘厚度  $> 1 \text{ mm}$ ，检测性能会显著下降。而且此方法的检测精度受煤中放射性元素与矿物质含量的相关性影响较大，只有当煤中放射性元素  $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{232}\text{Th}$  和  $^{40}\text{K}$  等与煤中矿物质含量相关性较好时才能反映所检测煤质水平，由于我国煤中放射性元素含量较低，有时甚至仅处于环境本底水平，这使得探测器接收的信号较弱，测量难度较大。

### 3.2. X 射线检测法

基于 X 射线的煤质实时在线检测技术，主要包含多能 X 射线吸收法(XAS)和 X 射线荧光法(XRF)。多能 X 射线吸收法的原理是，利用电场加速后的电子轰击金属靶，从而产生人工射线。不同能量范围的射线与每种元素相互作用时，作用截面存在差异：低能射线对 Si、Al、Ca、Fe 等元素敏感度较高，中能射线则对 Ca、Fe 等元素更敏感，而高能射线虽对密度变化敏感，对元素含量变化却不太敏感。通过探测器测量经煤样衰减后的射线能谱，分析三个能量区间的射线强度变化，再依据射线衰减规律建立方程组求解，就能推算出 C 与 Si、Al、Ca、Fe、S 的含量比例，进而得出煤的灰分、硫分和发热量。这种方法能同步检测煤炭的灰分和硫分，且所用射线能量较低，放射源相对容易获得。不过，为确保测量的准确

性,对样品的尺寸有严格规定,在测量前需经过粉碎,研磨等预处理工序[3],一般情况下,要求煤粒粒径小于 13 mm,煤流厚度大于 3 cm,宽度超过 10 cm。

X 射线荧光法是利用 X 射线管发射的入射射线激发样品,不同元素被激发后,会辐射出具有特定能量或波长的二次 X 射线。通过测定这些特征 X 射线的能量值和强度,就能明确样品中元素的种类与含量[4]。但应用该方法时,Al、Si 元素的激发效率较低,且它们的特征 X 射线能量较弱,不仅容易受到空气环境的干扰,对样品的煤层厚度也有较高要求[5]。因此,为保障检测效果,检测前需要对样品进行预处理,将其粒度控制在 0.2 毫米以下。

### 3.3. 拉曼光谱法

拉曼光谱法是一种基于拉曼散射效应的分子振动光谱技术,也是近年来快速发展的碳材料结构快速无损检测手段。其原理是:用特定波长的激光照射样品,光子与样品分子发生相互作用,会引起分子极化率的周期性变化,进而产生与分子振动或转动相关的拉曼散射光。当散射光频率相对于入射光出现改变时,通过测量这种频率变化和强度分布,就能得到拉曼光谱,从而获取分子结构、化学组成及物理状态等信息。在煤质分析中,拉曼光谱法通常采用 785 nm 半导体激光器,功率 50~200 mW,光谱分辨率  $2\sim 4\text{ cm}^{-1}$ ,测量时间 10~30 秒。该方法可用于研究煤中各类官能团(如甲基、亚甲基、芳香环等)的存在及其相对含量。通过分析光谱中特定峰的变化,能够评估煤炭的变质程度;此外,它还能检测煤中的吸附水和结合水,这对煤炭的储存、运输与利用有着重要意义。该方法的优点包括测量速度快、样品制备简便,以及对官能团和化学键的识别能力强。不过,其主要缺点是容易受到荧光干扰,尤其是当样品中含有荧光物质时,这种干扰更为明显;另外,拉曼散射信号本身较为微弱,因此对检测仪器的灵敏度要求较高[6]。

### 3.4. 近红外光谱法

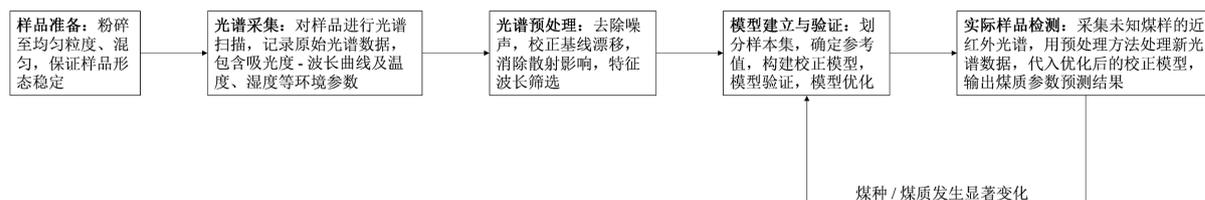


Figure 1. Workflow of near-infrared spectroscopy

图 1. 近红外光谱法工作流程

近红外光谱法是上世纪末发展起来的高效快速分析技术。近红外光是指波长在 780~2526 nm 范围内的电磁波,其吸收谱带主要与 C-H、O-H、N-H 等含氢官能团基频振动的倍频及组合频吸收相对应。不同原子在这一波段有特征吸收峰,且符合朗伯-比尔定律,借助吸光度与原子浓度的关系能够计算出元素含量。该技术在煤质在线检测中,波长范围主要采用 1000~2500 nm,利用傅里叶变换光谱仪,分辨率  $8\text{ cm}^{-1}$ 。该技术借助样品的光谱指纹来识别其物理化学性质,能够分析煤炭的水分、灰分、挥发分等参数。通过构建光谱与煤质参数的定量校正模型,能够快速精准地预测煤质成分;利用不同煤种的特征光谱差异,还能实现煤种的快速识别与分类[7]。通常运用主成分分析、偏最小二乘回归等方法,建立煤样光谱数据与煤质参数的关联模型,近红外光谱法工作流程见图 1。作为近年来成熟的检测技术,它具有成本低、精度高、响应快等突出优势。但是近红外的光谱吸收信号较弱,容易受到样品颜色、颗粒度、表面状态等因素的干扰,进而影响测量精度[8]。此外,模型的建立需要依赖大量标准煤样及其参考数据,校正

样本量至少为 100 个。过程较为复杂；当煤种或煤质发生明显变化时，模型需要重新建立或更新，这可能会降低检测效率[9]。

### 3.5. 激光诱导击穿光谱分析法

激光诱导击穿光谱分析法(LIBS)的原理是，利用高能激光消融样品产生等离子体，通过探测等离子体的辐射辉光光谱来实现元素组成分析。当脉冲激光聚焦在样品表面时，照射区域的物质吸收光子能量，会快速加热、气化并解离，形成包含自由电子及激发态离子或原子的高温等离子体；当激光作用停止后，等离子体冷却过程中，激发态粒子会向低能级跃迁，同时释放出特征谱线[10]。激光诱导击穿光谱分析法工作流程见图 2。LIBS 技术能够同步检测煤中的 Fe、Cu、Al 等金属元素以及 C、H、N、S 等非金属元素，实现煤质的全元素分析。在实际的检测过程中，要求激光能量为 100~500 mJ，脉冲宽度为 5~10 ns，采用 ICCD 探测器，时间分辨率为 10 ns，检测限可达到 0.1%。该方法对煤样的物理形态适应性较强，无论是固体煤样还是煤粉等，都可直接检测，无需复杂的样品前处理。凭借制样简便、分析速度快、可原位检测、支持远程操作以及能同步分析全元素等优势，它已在多个领域得到广泛应用[11]。不过，光谱信号的强度会受到激光能量稳定性、煤样表面状态等因素的影响，导致测量的重复性较差；同时，受基体效应、光谱干扰等因素的限制，定量分析需要建立复杂的校准模型，且对模型的精度和泛化能力要求较高，这成为当前实际应用中的主要技术难题[12]。

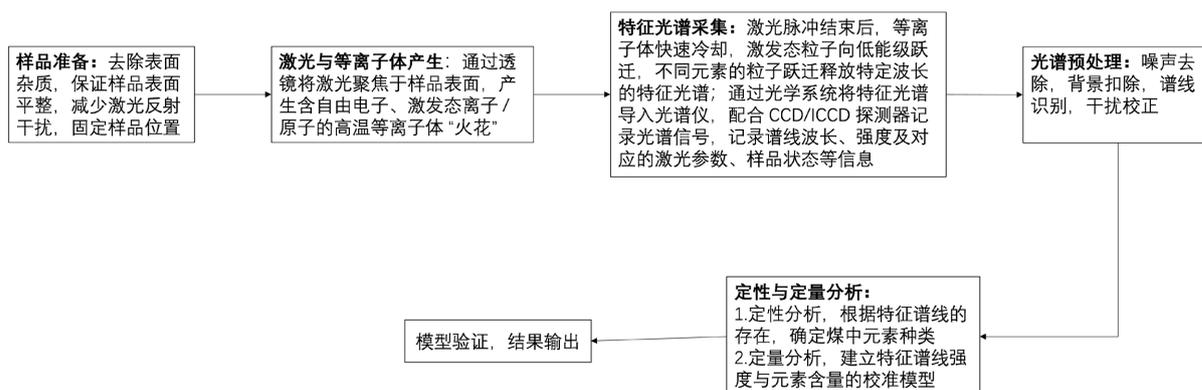


Figure 2. Workflow of laser-induced breakdown spectroscopy

图 2. 激光诱导击穿光谱法工作流程

### 3.6. 在线煤质检测技术对比分析

Table 1. Performance comparison of online coal quality detection technologies

表 1. 在线煤质检测技术性能对比

检测技术	精度	速度	成本	环境与样品适应性	技术成熟度	检测指标	局限性
天然 $\gamma$ 射线法	中	3~5 min	中	块状原煤	高	灰分	信号弱, 依赖放射性元素分布
多能 X 射线吸收法	高	1~2 min	高	需粉碎至固定粒度	中	灰分、硫分、Si、Al 等	样品预处理复杂
X 射线荧光法	高	30 s~1 min	高	粒度 < 0.2 mm	中	Si、Al、Ca、Fe 等矿物质元素	对轻元素(Al, Si 等)灵敏度低

续表

拉曼光谱法	中	10 s~30 s	中	固体/粉末	中	官能团、水分、变质程度	易受荧光干扰, 信号弱
近红外光谱法	高	1 s~2 s	低	需表面均匀	高	水分、灰分、挥发分、煤种分类	受颗粒度/颜色影响, 模型需定期更新
激光诱导击穿光谱法	中	5 s~10 s	高	无需预处理	中	全元素	基体效应显著, 定量模型复杂

近红外光谱法和激光诱导击穿光谱分析法作为目前相对成熟的检测方式, 已在工业领域广泛应用, 相较于其他在线检测方式, 近红外光谱和激光诱导击穿光谱法的检测速度快, 检测精度高, 并且这两种方法的检测范围覆盖了大部分煤质检测指标, 适用性更广, 但是其依旧存在一定局限性。不同在线检测技术的对比见表 1。

#### 4. 总结

煤质检测对煤炭高效清洁利用、能源安全及环保意义重大, 传统检测方法操作复杂、耗时久, 难以满足现代工业需求。在线煤质检测技术中, 光谱学技术应用广泛, 包括天然  $\gamma$  射线检测法较早工业化, 因煤中放射性元素少导致信号弱、测量难; X 射线检测法含多能 X 射线吸收法和 X 射线荧光法, 各有检测优势但存在样品条件限制; 拉曼光谱法快速无损, 易受荧光干扰且对仪器灵敏度要求高。

其中, 近红外光谱法和激光诱导击穿光谱分析法已发展为成熟技术。近红外光谱法成本低、精度高、响应快, 但易受样品状态影响, 模型建立复杂且需随煤质变化更新; 激光诱导击穿光谱分析法可全元素分析, 适应性强, 但测量重复性受激光能量稳定性等因素影响, 定量分析需复杂校准模型。这些技术为煤炭工业可持续发展提供了支撑。

#### 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] 程栋, 滕召胜, 黎福海, 等. 基于双能  $\gamma$  射线的煤炭灰分测量模型及其应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(5): 99-105.
- [3] 赵忠辉, 方全国. 煤质在线检测技术现状及发展趋势分析[J]. 煤质技术, 2017(4): 18-21.
- [4] 马克富, 龚婉莉. X 射线荧光光谱技术发展现状及在煤质检测中的应用[J]. 中国矿业, 2024, 33(8): 218-224.
- [5] West, M., Ellis, A.T., Potts, P.J., Strelci, C., Vanhoof, C. and Wobrauschek, P. (2015) 2015 Atomic Spectrometry Update—A Review of Advances in X-Ray Fluorescence Spectrometry and Their Applications. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **30**, 1839-1889. <https://doi.org/10.1039/c5ja90033f>
- [6] 黎国梁, 宋光均, 姚志湘, 等. 拉曼光谱仪在过程监测中的应用[J]. 广东化工, 2008(5): 106-109, 126.
- [7] Lee, S.Y., Cho, W.B. and Kim, H.J. (2017) Thermal Residues Analysis of Plastics by FT-Near Infrared Spectroscopy. *Analytical Science and Technology*, **30**, 234-239.
- [8] 丁友智, 刘峰, 罗玉琳, 等. 红外光谱技术在煤质检测分析中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(6): 38-40.
- [9] He, C., Yang, Z., Huang, G., Chen, L. and Han, L. (2011) A Feasibility Study on Using Near Infrared Spectroscopy to Classify Straw-Coal Blends. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, **19**, 277-284. <https://doi.org/10.1255/jnirs.934>
- [10] Palleschi, V. (2020) Laser-induced Breakdown Spectroscopy: Principles of the Technique and Future Trends. *ChemTexts*, **6**, Article No. 18. <https://doi.org/10.1007/s40828-020-00114-x>
- [11] 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.
- [12] 解强. 关于煤质检验技术的发展思考[J]. 煤质技术, 2020, 35(6): 6-12, 17.