

DOI: 10.19666/j.rlfed.202305072

# 基于 LIBS 和 NIRS 信号同步采集和融合的 入炉煤发热量测量研究

荏 方<sup>1</sup>, 王庆松<sup>1</sup>, 李承峻<sup>2</sup>, 杨爱勇<sup>1</sup>, 卢伟业<sup>2</sup>, 王 森<sup>1</sup>, 马维喆<sup>2</sup>,  
窠有权<sup>1</sup>, 陈伟泽<sup>2</sup>, 张冬练<sup>1</sup>, 莫爵徽<sup>3</sup>, 卢志民<sup>2</sup>, 姚顺春<sup>2,3,4</sup>

(1. 国能南京煤炭质量监督检验有限公司, 江苏 南京 210018;

2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641;

3. 佛山华谱测智能科技有限公司, 广东 佛山 528313;

4. 广东省能源高效低污染转化与工程技术研究中心, 广东 广州 510641)

[摘 要] 快速准确地对入炉煤发热量进行检测是指导电厂经济安全运行的关键, 然而煤炭成分复杂, 其发热量与元素组成和分子结构都有一定的相关性, 单一分析技术快速准确测量入炉煤发热量比较困难。基于激光诱导击穿光谱 (LIBS) 技术和近红外光谱 (NIRS) 技术, 提出联用 2 种技术检测入炉煤发热量的方法。同步采集输送带上煤炭的 LIBS 和 NIRS 光谱信号, 进行光谱数据预处理后融合 2 种光谱信息, 并结合偏最小二乘 (PLS) 建模方法定量分析煤炭发热量。将该方法用于搭建煤样测量系统, 得出煤样发热量定标集的决定系数为 0.98, 预测集均方根误差为 0.37 MJ/kg, 平均绝对误差为 0.26 MJ/kg, 平均相对误差为 1.09%。表明所提出的在输送带上 LIBS 和 NIRS 信号同步采集方法可快速准确测量入炉煤发热量。

[关 键 词] 煤炭发热量; 输送带; 激光诱导击穿光谱; 近红外光谱; 定量分析

[引用本文格式] 荏方, 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发热量测量研究[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 92-98. CHI Fang, WANG Qingsong, LI Chengjun, et al. Study on the measurement of coal as fired calorific value based on synchronous collection and fusion of LIBS and NIRS signals[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 92-98.

## Study on the measurement of coal as fired calorific value based on synchronous collection and fusion of LIBS and NIRS signals

CHI Fang<sup>1</sup>, WANG Qingsong<sup>1</sup>, LI Chengjun<sup>2</sup>, YANG Aiyong<sup>1</sup>, LU Weiyue<sup>2</sup>, WANG Sen<sup>1</sup>,  
MA Weizhe<sup>2</sup>, DOU Youquan<sup>1</sup>, CHEN Weize<sup>2</sup>, ZHANG Donglian<sup>1</sup>, MO Juehui<sup>3</sup>,  
LU Zhimin<sup>2</sup>, YAO Shunchun<sup>2,3,4</sup>

(1. Nanjing State Energy Coal Quality Supervision and Inspection Co., Ltd., Nanjing 210018, China;

2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

3. Cntest Intelligent Scien-Tech Co., Ltd., Foshan 528313, China;

4. Guangdong Province Key Laboratory of Efficient and Clean Energy Utilization, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Rapid and accurate measurement of the calorific value of incoming coal is the essential to provide

收稿日期: 2023-05-22

基金项目: 国家能源集团科技项目 (GJNY-22-90); 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目 (2019YFE0109700); 国家自然科学基金 (U22B20119); 霍英东教育基金会高等学校青年教师基金 (171047); 广东省自然科学基金杰出青年项目 (2021B1515020071); 广东省能源高效清洁利用重点实验室 (2013A061401005); 佛山市科技创新项目 (1920001000052)

Supported by: National Energy Group Science and Technology Project (GJNY-22-90); National Key Research and Development Program Intergovernmental International Science and Technology Innovation Cooperation Project (2019YFE0109700); National Natural Science Foundation of China (U22B20119); Fok Ying Tung Education Foundation Fund for Young Teachers in Higher Education (171047); Guangdong Provincial Natural Science Foundation Outstanding Youth Project (2021B1515020071); Guangdong Provincial Key Laboratory of Energy Efficient and Clean Utilization (2013A061401005); Science and Technology Innovation Project of Foshan City (1920001000052)

第一作者简介: 荏方 (1989), 女, 硕士, 主要研究方向为煤质检测, 20069214@chnenergy.com.cn.

通信作者简介: 姚顺春 (1983), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为能源低碳清洁转化过程的智能感知和调控, epscyao@scut.edu.cn.

guidance for the economic and safe operation of power plants. However, coal has complex components, and the calorific value is correlated with elemental composition and molecular structure, it is difficult to measure coal calorific value quickly and accurately by a single analytical technique. Based on laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS), a method is proposed to detect the calorific value of incoming coal by combining two techniques. The LIBS and NIRS spectral signals of the coal on the conveyor belt are collected simultaneously. Fusion of two spectral information after data pre-processing, coupled with partial least squares (PLS) modeling method to quantify coal calorific value. This method is used in a coal sample measurement system built by lab, it is reached that the coefficient of determination of the calibration set was 0.98, and the root mean square error of the prediction set was 0.37 MJ/kg, with an average absolute error of 0.26 MJ/kg and an average relative error of 1.09%. The results show that the proposed method of simultaneous acquisition of LIBS and NIRS signals can measure coal calorific value rapidly and accurately.

**Key words:** coal calorific value; conveyor belt; laser-induced breakdown spectroscopy; near-infrared reflectance spectroscopy; quantitative analysis

2022 年我国能源消费总量达 54.1 亿 t 标准煤, 其中煤炭消费占比高达 56.2%<sup>[1]</sup>, 我国的能源资源禀赋决定了以煤炭为主体的能源结构将长期占据主导地位。提升煤炭的清洁高效利用水平, 是实现“碳达峰、碳中和”战略目标的关键所在。其中, 火力发电作为高能耗、高碳排行业, 进行节能降耗改造势在必行。然而, 火电机组的优化运行面临燃煤来源复杂多变、多煤种掺烧等现实问题。实时入炉煤发热量信息的缺乏, 很大程度上阻碍了煤炭燃烧利用过程的灵活高效调控, 降低了火电机组运行的安全性和经济性。因此, 煤炭发热量的准确快速检测对推动火力发电厂的低碳清洁灵活智能化运行至关重要。

标准方法检测煤炭发热量虽然准确性高, 但是检测流程繁琐。从采样、制样到最终得到煤炭发热量检测报告一般需要几小时, 无法为实时优化调整锅炉运行提供数据支撑<sup>[2]</sup>。同时, 基于光谱学的快速分析技术被广泛应用于煤质检测领域<sup>[3-6]</sup>。其中, 激光诱导击穿光谱 (laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS) 技术因其具有样品预处理简单、原位检测快速和多元素同步测量等优势, 在煤炭元素分析、工业分析和发热量等指标快速检测上的应用潜力备受关注。

LIBS 技术作为一种原子发射光谱技术, 主要表征的是待测物的元素组成, 常规测量模式下光谱中可观测的分子特征谱带有限。然而, 发热量不仅和煤炭的元素组成相关也和分子结构相关<sup>[7]</sup>, 因此单一 LIBS 技术难以全面表征与发热量相关的化学组成信息。此外, LIBS 技术存在显著的基体效应和较大的光谱信号不确定性, 也会影响发热量定量分析的精确度<sup>[8]</sup>。近年来, 部分研究团队尝试通过数据融合方法将不同分析技术的光谱数据结合使用, 发

挥光谱信息互补的优势, 提升煤炭发热量快速分析的准确性。Li 等人<sup>[9]</sup>基于煤炭发热量与有机元素和灰分含量的关系, 提出 X 射线荧光光谱 (X-ray fluorescence spectroscopy, XRF) 技术辅助 LIBS 技术分析煤炭发热量, 并通过主成分分析和多元回归建立预测模型。结果表明, 对煤炭发热量的预测均方根误差 (root mean square error of prediction, RMSEP) 降低到 0.9 MJ/kg。然而, XRF 技术只能表征煤中成灰元素的信息, 作为 LIBS 技术光谱元素信息的补充, 虽然提高了测量的稳定性, 但忽略了同样重要的分子结构对煤炭发热量的影响。Yao 等人<sup>[10-12]</sup>首次尝试将携带有物质分子信息的近红外光谱 (near infrared reflectance spectroscopy, NIRS) 技术与 LIBS 技术联用进行煤质检测。提出了使用 LIBS 和 NIRS 光谱数据结合偏最小二乘 (partial least squares, PLS) 模型优化煤质分析。结果表明, 煤炭发热量的预测均方根误差为 0.192 MJ/kg, 相较于其他光谱联用技术, 测量准确性更高。但该联用方法是以不同的样品形态分别开展 LIBS 和 NIRS 测量, 再进行两者的光谱信息融合。存在需要预先制备不同形态的样品, 且无法实现 LIBS 和 NIRS 信号的同步采集的不足之处, 难以适应煤电机组的实际现场。一些团队尝试模拟实际应用场景, 在输送带上应用光谱测量技术。Xue 等人<sup>[13]</sup>基于 NIRS 技术提出了一种在输送带上对玉米秸秆固定碳、灰分、水分和挥发分含量进行在线分析的方法。何勇超等<sup>[14]</sup>提出一种使用 LIBS 技术直接快速测量输送带上原煤煤质的方法, 并验证了该方法的可行性。Tian 等人<sup>[15]</sup>基于输送带发展了 LIBS 和 XRF 同步测量煤炭的检测系统, 利用输送带将同一煤样先后进行 XRF 和 LIBS 测量。上述研究表明, 输送带上测量煤炭的检测模式不仅符合火电机组应用场景, 且更为快

速便捷,有望迈向现场实际应用。

综上所述,通过联用 LIBS 与 NIRS 技术能够有效提高煤炭发热量快速测量的准确性,但已有的 NIRS 和 LIBS 技术联合测量模式步骤繁琐、检测可靠性不足。因此,本文提出一种基于 LIBS 和 NIRS 技术信号同步采集和融合的入炉煤发热量测量模式,在输送带上同步采集煤样的 NIRS 和 LIBS 光谱,经简单数据预处理后融合 2 种光谱构建煤炭发热量的定量分析模型。本研究为光谱联用检测技术在煤质分析领域从实验模拟研究转向工业实际应用提供了可行性验证。

## 1 实验样品与系统

### 1.1 实验样品

为验证所提出方法的有效性,一共选取 24 种电厂常用煤样,根据《煤样的制备方法》(GB/T 474—2008)<sup>[16]</sup>进行破碎,得到粒径小于 13 mm 的收到基煤样,之后再根据《煤的发热量测定方法》(GB/T 213—2008)<sup>[17]</sup>测定煤样的高位发热量。从上述样品中随机选取 5 个煤样作为预测集,剩余 19 个煤样为定标集。表 1 为煤样高位发热量的参考值。

表 1 煤样高位发热量的参考值  
Tab.1 Quantitative results of higher calorific value of coal samples

煤样编号	发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	煤样编号	发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )
C1	22.86	C11	22.58
C2	23.10	C12	26.43
C3	24.02	C13	20.89
C4	21.96	C14	22.85
C5	19.00	C15	20.54
C6	23.33	C16	26.73
C7	18.73	C17	24.77
C8	21.67	C18	25.64
C9	24.22	C19	26.55
C10	23.72		
V1	23.23	V4	21.70
V2	25.46	V5	22.89
V3	23.90		

### 1.2 实验系统

模拟电厂输煤系统的实际运行情况,本文设计搭建了一套输送带运煤平台,并在此基础上搭建了 LIBS 和 NIRS 测量系统,同步获取煤样的光谱信息。整个测量系统如图 1 所示,由输送带系统、NIRS 和 LIBS 测量系统组成。

输送带系统由电机、料斗、拨料板和输送带组

成。电机带动料斗振动,把煤样抖落在输送带上,煤样随输送带运动通过拨料板使得在整条输送带上厚度保持均匀一致,输送带以 2 cm/s 的速度运行。煤样先后通过 NIRS 和 LIBS 探测系统,根据输送带 2 cm/s 的运行速度和 2 个系统探头之间的距离计算 2 个系统的探测时序差,实现信号同步采集。NIRS 和 LIBS 测量系统均固定在输送带上方,其实物图如图 2 所示。

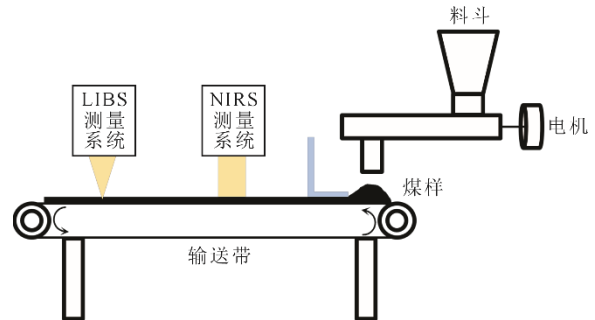


图 1 输送带煤样测量系统示意  
Fig.1 Schematic diagram of coal samples measurement system on coal-conveyor belt

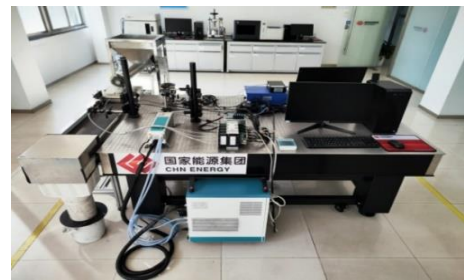


图 2 输送带煤样测量系统实物  
Fig.2 Real diagram of coal samples measurement system on coal-conveyor belt

NIRS 测量系统主要包括近红外系列微型光纤光谱仪(景颐光电科技有限公司, JY-NIR2600)、100 W 卤素灯(景颐光电科技有限公司)和光纤探头(荷兰 Avantes 公司, FCR-7UR400-2-ME)。光谱仪波长范围为 900~2 600 nm, 设置为漫反射模式, 积分时间设置为 100 ms。实验对每个煤样分别收集 1 000 张 NIRS 光谱。

LIBS 测量系统主要包括 Nd: YAG 激光器(北京镭宝光电技术有限公司, Dwa-200)、多通道光谱仪(荷兰 Avantes 公司, AvaSpec-ULS2048)、光机结构和电脑控制模块。激光器能量设置为 75 mJ, 脉宽为 10 ns, 频率为 5 Hz。光谱仪收光延时设置为 1.3 μs, 积分时间为 1.05 ms。实验对每个煤样分别获取 1 000 张 LIBS 光谱数据。

## 2 实验方法与结果

光谱分析技术测量煤炭发热量的关键在于提取和煤炭发热量相关的光谱信息，并通过化学计量学方法反演计算（建立定量分析模型）出煤炭发热量，所以获取尽可能多的相关光谱信息是提升反演计算准确性的有效手段。煤炭是由多种无机物和有机物组分构成的复杂混合物，其发热量不仅与元素组成有关而且和分子结构相关<sup>[8,18]</sup>。从元素组成上来说，煤炭燃烧时组成灰分的矿物质分解吸热，灰分含量越高发热量越低，所以除C、H和O以外，Si、Al、Fe、Ca、Mg和K也是影响煤炭发热量的重要元素。从分子结构上来说，煤炭发热量表征的是煤中脂肪族和芳香族化合物断键释放出来的能量，且煤炭燃烧时水分蒸发会带走部分热量，水分含量越高发热量越低。LIBS技术光谱表征上述提到的C、H、O、Si等元素组成信息，NIRS光谱表征H<sub>2</sub>O、CH<sub>3</sub>、CH<sub>2</sub>、C-C和C-H等分子结构信息。因此，有效融合NIRS与LIBS光谱，利用元素信息和分子信息的互补作用能够提高定量模型对煤炭发热量分析的准确性。

本文提出的LIBS和NIRS技术同步采集和融合的入炉煤发热量测量流程如图3所示。

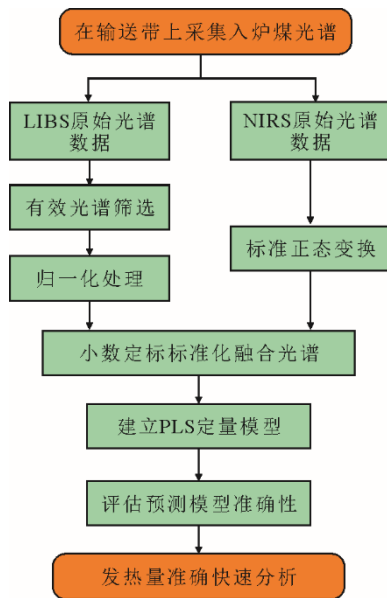


图3 LIBS和NIRS技术测量入炉煤发热量流程  
Fig.3 Flow chart of coal as fired calorific value measurement based on LIBS and NIRS techniques

由于样品的物理特性变化和实验参数波动，测量样品的原始光谱不可避免地存在噪声和无效光

谱，为减少噪声和无效光谱对样品分析的干扰，提高测量稳定性，需要对光谱数据进行预处理，再建立模型分析发热量。

### 2.1 有效光谱筛选

在LIBS测量系统中，系统参数、周围物理环境、样品性质和等离子体形态波动等影响因素会增加信号不确定性<sup>[19]</sup>，在输送带上测量的LIBS光谱信号波动也较大。所以，在采集到的LIBS光谱中存在一部分缺少关键信息的无效击穿光谱。为提高光谱信号的稳定性和定量分析的准确性，使用特征峰标准偏差（standard deviation, SD）方法对无效光谱进行剔除。其原理在Yao等人<sup>[20]</sup>的研究中有详细说明，SD值法计算公式为：

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2} \quad (1)$$

式中： $N$ 为特征峰内像素点的个数； $I_i$ 为特征峰内第 $i$ 个像素点的光谱强度； $\bar{I}$ 为特征峰内 $N$ 个波长点光谱强度的平均值。

$N$ 的取值与光谱仪的分辨率和所选择的特征峰有关。通过对比分析。本文选用碳元素特征谱线C I 247.85 nm计算SD值。将特征峰SD值小于50的光谱定义为无效光谱，予以剔除，保留下来的光谱即为有效光谱数据。

### 2.2 光谱总强度归一化

LIBS光谱具有波动性，其特征谱线的波动主要来源于等离子体空间演化的波动，而等离子体空间演化的波动会影响整体的光谱特征。为了克服LIBS光谱数据波动对定量分析准确性的影响，采用光谱总强度归一化法对LIBS数据进行预处理，其计算公式为<sup>[21]</sup>：

$$I_{total} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (2)$$

$$I_{ti} = \frac{I_i}{I_{total}} \quad (3)$$

式中： $n$ 为整幅光谱包含的谱线数量，本文实验中 $n=8192$ ； $I_i$ 为第 $i$ 条谱线的光谱强度； $I_{total}$ 为整幅光谱总强度； $I_{ti}$ 为光谱总强度归一化后第 $i$ 条谱线的光谱强度。

### 2.3 标准正态变换

标准正态变换（standard normal variate, SNV）是近红外光谱中最常用的预处理方法之一<sup>[22]</sup>。通过

对光谱进行标准正态变换,从而减小由样品形态差异造成的基线变化和散射效应对光谱数据的影响。其转化过程定义为:

$$\bar{I} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m I_i \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (I_i - \bar{I})^2}{m-1}} \quad (5)$$

$$I_{\text{SNVi}} = \frac{I_i - \bar{I}}{S} \quad (6)$$

式中:  $m$  为整幅光谱包含的波长点数目,本实验中  $m=402$ ;  $I_i$  为第  $i$  个波长点的光谱强度;  $\bar{I}$  为所有波长点的平均光谱强度;  $S$  为光谱强度标准偏差;  $I_{\text{SNVi}}$  为经过标准正态变换后第  $i$  个波长点光谱强度。

#### 2.4 小数定标标准化

经过上述预处理后,LIBS 和 NIRS 光谱数据量级差别仍然较大,因此还需要对 2 种光谱进行标准化。小数定标标准化(decimal scaling)<sup>[23]</sup>,即通过移动数据的小数点位置来进行标准化,小数点移动的范围取决于在一个光谱数据中的最大绝对值,从而使所有数据都落在[-1,1]范围内,其计算公式为:

$$x' = \frac{x}{10^j} \quad (7)$$

式中:  $x'$  为十进制转化后的光谱数据;  $x$  为输入的光谱数据;  $j$  为满足条件  $\max(x') < 1$  的最小整数。

#### 2.5 PLS 定量分析模型

PLS 是一种以因子分析为基础的多元线性回归化学计量方法,被广泛应用于 LIBS 煤质分析的定量建模中<sup>[24]</sup>。本文采用 PLS 方法,把数据预处理后融合的光谱作为模型变量输入,建立煤炭发热量定量分析模型。然而,数据预处理无法完全消除 LIBS 和 NIRS 光谱中的噪声,直接输入会影响模型的分析效果。在输入模型变量之前,采用一种基于数据不确定性的定量分析模型优化光谱数据,该方法已在文献[25]中详细阐述。本研究中对每个样品使用 3 组平均后的光谱数据来表征,作为模型变量输入,以保证一定的光谱数据不确定性。PLS 模型的原理、建模方法和相关参数选择已在过去的工作中详细介绍<sup>[14,26]</sup>,本研究把处理优化后的光谱数据输入 The UNSCRAMBLER 软件(版本 10.4, CAMO)中,进行 PLS 模型定量分析。具体步骤为:1) 将融合后的煤样光谱数据划分为定标集和预测集;2) 将自变量(煤样定标集光谱数据矩阵)和因变量(对

应煤样的发热量参考值)进行 PLS 拟合;3) 把煤样预测集光谱矩阵输入定标集模型中,获得预测集煤样的发热量预测值。此外,为了验证 LIBS 和 NIRS 技术联合同步测量方案对单一 LIBS 技术检测煤炭发热量精确度的提高,同时设置了单一 LIBS 光谱对煤炭发热量定量分析的对照模型,本研究中 2 种 PLS 模型的参数设置完全相同。

#### 2.6 评价指标和结果

常用的评价定量分析模型准确性的指标有决定系数  $R^2$ 、 $\delta_{\text{RMSEP}}$ 、平均相对误差(average relative error, ARE)  $\delta_{\text{ARE}}$  和平均绝对误差(average absolute error, AAE)  $\delta_{\text{AAE}}$ 。其计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

$$\delta_{\text{RMSEP}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{m}} \quad (9)$$

$$\delta_{\text{ARE}} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}}{m} \quad (10)$$

$$\delta_{\text{AAE}} = \frac{\sum_{i=1}^m |y_i - \hat{y}_i|}{m} \quad (11)$$

式中:  $n$  为定标集的样品数量;  $m$  为预测集的样品数量;  $y_i$  为样品发热量的参考值;  $\bar{y}$  为样品发热量参考值的平均值;  $\hat{y}_i$  为样品样发热量的预测值。

单一 LIBS 技术测量与 LIBS 和 NIRS 技术联合同步测量煤炭发热量的定量分析结果如图 4 所示。由图 4 可知,与单独使用 LIBS 光谱数据建立的模型相比,LIBS 和 NIRS 光谱数据融合模型分析发热量的决定系数从 0.94 升高至 0.98,预测均方根误差从 1.07 MJ/kg 降低至 0.37 MJ/kg,平均绝对误差从 0.97 MJ/kg 降至 0.26 MJ/kg,平均相对误差从 4.24% 降至 1.09%。结果表明,LIBS 技术包含的有机元素和矿物质组成元素信息与 NIRS 技术包含的有机分子官能团信息形成互补,能够更全面地表征煤质发热量,从而提高燃煤发热量测量的准确性。此外,本文提出的 LIBS 和 NIRS 技术联用方法除了能有效提升煤炭发热量测量准确性,还满足电厂对入炉煤测量的精度要求。同时,在输送带上同步采集信号的新型测量模式有效简化了 LIBS 与 NIRS 技术联用测量的步骤,也符合电厂运行环境,让 LIBS 和 NIRS 联用测量技术朝着工业实际应用的目标迈进。

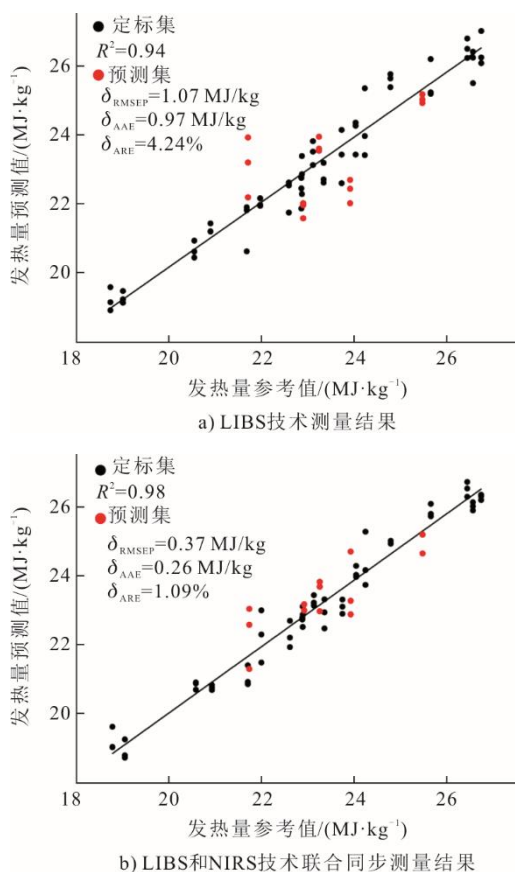


图4 不同测量方案煤质发热量结果  
Fig.4 Coal calorific value results by different measurement schemes

### 3 结 论

1) 本文提出了一种基于 LIBS 和 NIRS 信号同步采集和融合的入炉煤发热量测量方案,首次在输送带上同步采集入炉煤的 LIBS 和 NIRS 光谱信号并融合后,构建 PLS 模型分析煤质发热量。

2) 融合 LIBS 和 NIRS 光谱数据的煤炭发热量定量分析结果优于单独使用 LIBS 技术测量时的结果。相较于单独使用 LIBS 技术,本文提出融合 LIBS 和 NIRS 光谱数据模型定标集的决定系数从 0.94 升高至 0.98,预测集均方根误差从 1.07 MJ/kg 降低至 0.37 MJ/kg,平均绝对误差从 0.97 MJ/kg 降低至 0.26 MJ/kg,平均相对误差从 4.24% 降低至 1.09%。

3) 在输送带上建立的 LIBS 和 NIRS 信号同步采集系统,实现了 2 种技术的高效联用。提升定量分析效果的同时,也有望发展成为一种在线煤质快速检测技术,对电厂现场的入炉煤质进行快速分析,指导煤混和掺配比和锅炉燃烧运行。

#### [参 考 文 献]

[1] 中华人民共和国国家统计局. 2022 年国民经济和社会

发展统计公报 [EB/OL]. (2023-02-28) [2023-05-06]. [https://www.gov.cn/xinwen/2023-02/28/content\\_5743623.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2023-02/28/content_5743623.htm).

National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Statistical bulletin of national economic and social development in 2022 [EB/OL]. (2023-02-28) [2023-05-06]. [https://www.gov.cn/xinwen/2023-02/28/content\\_5743623.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2023-02/28/content_5743623.htm).

[2] 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.

JIE Qiang. Some points on the development of coal testing techniques [J]. Coal Quality Technology, 2020, 35(6): 6-12.

[3] JIA W B, ZHANG Y, GU C G, et al. A new distance correction method for sulfur analysis in coal using online XRF measurement system [J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(1): 39-43.

[4] 龚亚林, 宋青锋, 刘永超, 等. 中子活化分析技术在煤质在线检测中的应用 [J]. 现代矿业, 2019, 35(2): 243-244.

GONG Yalin, SONG Qingfeng LIU Yongchao, et al. Application of prompt gamma-ray neutron activation analysis technique in online coal quality inspection [J]. Modern Mining, 2019, 35(2): 243-244.

[5] GUO L B, ZHANG D, SUN L X, et al. Development in the application of laser-induced breakdown spectroscopy in recent years: a review [J]. Frontiers of Physics, 2021, 16(2): 1-25.

[6] 张辉, 钟志光, 张海峰. 近红外光谱技术在煤质分析中的应用及展望 [J]. 洁净煤技术, 2015, 21(6): 40-42.

ZHANG Hui, ZHONG Zhiguang, ZHANG Haifeng. Application of near infrared spectroscopy in coal quality analysis [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(6): 40-42.

[7] 任晓玲. 煤的发热量与水分、灰分的关系研究 [J]. 煤炭技术, 2018, 37(12): 336-337.

REN Xiaoling. Study on correlation between calorific value and moisture and ash content of coal [J]. Coal Technology, 2018, 37(12): 336-337.

[8] SHETA S, AFGAN M S, HOU Z, et al. Coal analysis by laser-induced breakdown spectroscopy: a tutorial review [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2019, 34(6): 1047-1082.

[9] LI X, ZHANG L, TIAN Z, et al. Ultra-repeatability measurement of the coal calorific value by XRF assisted LIBS [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2020, 35(12): 2928-2934.

[10] QIN H Q, LU Z M, YAO S C, et al. Combining laser-induced breakdown spectroscopy and Fourier-transform infrared spectroscopy for the analysis of coal properties [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2019, 34(2): 347-355.

[11] YAO S C, QIN H Q, WANG Q, et al. Optimizing analysis of coal property using laser-induced breakdown and near-infrared reflectance spectroscopies [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 239: 118492.

[12] YAO S C, QIN H Q, XU S X, et al. Coal proximate analysis based on synergistic use of LIBS and NIRS [J]. Atomic Spectroscopy, 2022, 43(2): 154-163.

[13] XUE J J, YANG Z L, HAN L J, et al. On-line measurement of proximates and lignocellulose components of corn stover using NIRS [J]. Applied Energy, 2015, 137: 18-25.

[14] 何勇超, 喻子彧, 师利宝, 等. LIBS 直接测量输送带上

- 原煤煤质可行性研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(5): 124-130.
- HE Yongchao, YU Ziyu, SHI Baoli, et al. Feasibility study of direct measurement of raw coal property on conveyor belt by LIBS[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(5): 124-130.
- [15] TIAN Z H, LI X L, WANG G, et al. Elemental and proximate analysis of coal by x-ray fluorescence assisted laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Plasma Science and Technology, 2022, 24(8): 084007.
- [16] 煤样的制备方法: GB/T 474—2008[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008.  
Preparation method of coal sample: GB/T 474—2008[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2008.
- [17] 煤的发热量测定方法: GB/T 213—2008[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008.  
Method of determining the heat content of coal: GB/T 213 — 2008[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2008.
- [18] MAZUMDAR B K. Theoretical oxygen requirement for coal combustion relationship with its calorific value[J]. Fuel, 2000, 79(2): 1413-1419.
- [19] WANG Z, AFGAN M S, GU W L, et al. Recent advances in laser-induced breakdown spectroscopy quantification: from fundamental understanding to data processing[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2021, 143: 116385.
- [20] YAO S C, ZHANG L F, YIN K J, et al. Identifying laser-induced plasma emission spectra of particles in a gas-solid flow based on the standard deviation of intensity across an emission line[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2018, 33(10): 1676-1682.
- [21] GUEZENOC J L, GALLET-BUDYNEK A, BOUSQUET B. Critical review and advices on spectral-based normalization methods for LIBS quantitative analysis[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2019, 160: 105688.
- [22] BI Y M, YUAN K L, XIAO W Q, et al. A local pre-processing method for near-infrared spectra, combined with spectral segmentation and standard normal variate transformation[J]. Analytica Chemical Acta, 2016, 909: 30-40.
- [23] PATRO S, SAHU K K. Normalization: a preprocessing stage[J]. arXiv Preprint arXiv, 2015: 1503-06462.
- [24] FENG J, WANG Z, LI L Z, et al. A nonlinearized multivariate dominant factor-based partial least squares (PLS) model for coal analysis by using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Applied Spectroscopy, 2013, 67(3): 291-300.
- [25] QIN H Q, YU Z Y, LU Z M, et al. Exploiting data uncertainty for improving the performance of a quantitative analysis model of laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Applied Spectroscopy, 2022, 76(9): 1123-1131.
- [26] 姚顺春. 激光诱导击穿光谱技术在电站运行诊断中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
YAO Shunchun. The application of laser breakdown spectroscopy for diagnosis of power station[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.

(责任编辑 杜亚勤)