

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.12.014

基于诱导击穿光谱技术的煤质在线分析系统 及其应用研究

Coal quality online detection system based on LIBS and its application

黄海东¹, 梁朋¹, 朱宝森¹, 金从兵²

HUANG Haidong¹, LIANG Peng¹, ZHU Baosen¹, JIN Congbing²

(1. 华电潍坊发电有限公司, 山东 潍坊 261000; 2. 湖北凯瑞知行科技有限公司, 武汉 430000)

(1. Huadian Weifang Power Generation Company Limited, Weifang 261000, China; 2. Hubei Creating Zhixing Technology Company Limited, Wuhan 430000, China)

摘要: 实时准确检测煤工业指标, 对燃煤电厂安全高效运行具有关键性的指导作用。针对工业现场实际情况, 结合现有的煤质在线分析技术, 研发出了基于激光诱导击穿光谱技术的煤质在线分析系统, 实现对煤质的实时快速检测。单个样品检测时间控制在 30 min 以内, 连续检测情况下, 每 3 min 可完成一次检测, 相比传统人工化验方法可极大提高检测效率, 为燃煤电厂的安全生产提供实时指导。经过实际验证, 检测的煤样成分含量指标满足燃煤电厂煤炭的化验精度要求, 从而可以指导燃煤锅炉脱硫、脱硝系统进行优化控制, 避免排放超标, 降低环保运行成本; 指导优化锅炉燃烧效率, 合理减少“碳税”成本。该研究对提高环保效率和电厂运行经济指标具有重要意义。

关键词: 煤质在线分析; 激光诱导; 光谱; 在线检测; 煤炭; 工业指标

中图分类号: TM 621

文献标志码: A

文章编号: 1674-1951(2020)12-0082-06

Abstract: Real-time and accurate detection of coal complying with the industrial index is key to the safe and efficient operation of coal-fired power plants. Based on the situation on-site and existing coal quality online analysis technologies, a coal quality online detection system taking laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) was developed, which realized real-time and swift detection on coal quality. The detection time for a single sample is controlled in 30 min. In the case of successive detection, each sample analysis can be done in 3 minutes. Compared with the traditional manual detection, this system improves the detection efficiency sharply and provides real-time guidelines for thermal power plants. Verified by practical cases, the contents in coal samples can meet the testing precision required by the coal-fired power plant. The test results can guide the optimized control on the desulphurization and denitration systems of coal-fired boilers, avoid the excessive discharge, reduce the environmental protection cost, and lower the "carbon tax" by improving the combustion efficiency of boilers. The research is of great significance for improving environmental protection efficiency and economic index of power plants.

Keywords: coal quality online detection; laser induce; spectrum; online detection; coal; industrial index

0 引言

能源是保障经济稳步健康发展的关键因素, 随着我国经济迅速发展, 发电量也迅速增加。根据国家统计局统计, 我国在 2018 年能源生产总量已达到 377 000 万 t 标准煤, 其中原煤生产总量达到 261 261 万 t 标准煤, 占据总发电量的 69.3%。煤炭中的灰分、挥发分、热值、固定碳、硫分、氢含量等指标是煤

炭化验的重要指标, 也是煤质验收结算和指导锅炉燃烧的主要依据。传统的煤质工业指标分析主要依靠人工取样制样, 再进行化验分析, 过程繁琐, 耗时较长, 无法实时对锅炉燃烧提供指导。而且目前主要的煤质在线检测技术需要使用放射源, 存在一定的安全隐患。

激光诱导击穿光谱 (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS) 技术是一种基于激光诱导等离子体发射光谱分析物质元素成分的方法, 因其具有制样简便、分析迅速、无放射污染、多元素同时分析等优点, 被广泛应用于生物、医疗、食品和土壤等领

收稿日期: 2020-03-09; 修回日期: 2020-07-14

基金项目: 中国华电集团科技项目 (CHDKJ18-02-05)

域。基于激光诱导击穿光谱技术的全自动煤质在线分析系统是目前较为适合我国电厂煤质分析检测的一项新技术,该技术可以实现煤质实时快速检测,且具有检测成本低,自动化程度高等优点,可以给电厂来煤验收、分类储存、指导锅炉燃烧调整提供实时的分析数据,为电厂的安全经济运行提供保障。

国内外对 LIBS 技术应用于煤质在线检测已经进行了一些研究。早在 1991 年,美国就该技术对煤粉进行在线检测的可行性进行了研究^[1]。2008 年, Gaft 等^[2]评估了一套 LIBS 检测设备对灰分的检测,并与中子活化分析仪进行对比,达到了平均绝对误差为 0.5%。2011 年, Haider 等^[3]分析了孟加拉国煤矿的煤炭样品和印度东部的煤炭,验证了 LIBS 技术多元素同时分析的能力。2014 年, Noll 等^[4]使用手持式 LIBS 检测设备,对煤进行分析。2016 年, Redoglio 等^[5]在实验室模拟了工业环境下煤检测的场景,对 C, H, Al, Ca, Fe, Si 的检测精确度都达到了较高水平。国内对 LIBS 应用于煤质检测也有一些研究,2011 年 Feng 等^[6]对 33 个烟煤的碳元素质量分数进行预测,预测的校正标准差(RMSEC)达到 2.92%。王鑫^[7]、邢涛^[8]、赵忠辉、方全国^[9]、樊炬^[10]、李捷^[11]、刘超^[12]、陈宗辉^[13]、成中豪^[14]等对煤质在线检测工业应用进行了研究,对相关的设备和 LIBS 进行了验证测试。

燃煤电厂煤质分析是用物理和化学的方法对煤样进行化验和测试,一般在实验室完成。批次煤要得到分析煤样需经过初级采样、破碎、缩分、收样、制样等环节。实验室煤质分析要进行若干步骤,每一步骤的过程有长有短,获得最终煤质化验报告的时间较长,一般在 24 h 左右。而电厂燃料管理工作必须严格根据煤质化验报告进行,如煤场分区管理、分类存放、煤场配煤、煤场盘煤、热值差管理、安全经济掺烧、脱硫脱硝、超低排放、正平衡计算煤耗等。目前通过实验室进行煤质分析出报告单的时间严重滞后于入厂煤接卸和入炉煤上仓,传统的解决办法为历史数据平均值替代法,但误差很大,错误很多,不能作为数字化煤场管理实时指导依据,一旦出现煤质异常情况,用管理流程不可逆而无法纠偏和更正。对于煤场管理而言容易导致数字化煤场数据失真,煤场管理失效;对于配煤上仓而言,轻则导致锅炉燃烧不稳,调整频繁、难度大,严重时发生火嘴和一次风管烧坏、制粉系统爆炸等事故。

煤的成分、特性对燃煤电厂安全经济生产及环境保护具有极其重要的影响,多数燃煤电厂的煤炭

质量得不到保证,煤种繁多且经常变化,造成锅炉出力不足及热损失较大,锅炉结焦、积灰、熄火等情况时有发生,入炉煤质对机组运行的安全性和经济性有很大影响,煤的掺烧使得难以准确判断事实入炉煤质。

1 研究方法

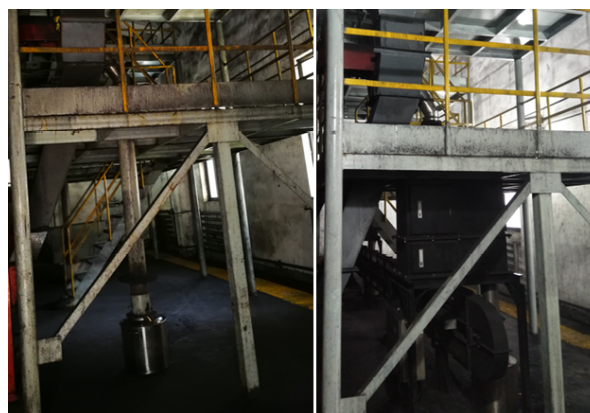
1.1 实施背景

华电潍坊发电有限公司二期装机容量为 2 台 670 MW 机组,锅炉燃烧煤种为贫瘦煤,煤种多,来源地区广,除山东本地兖矿的煤炭外,还有阳泉、白羊墅、泊里、寿阳、清徐、里八庄、阳方口、轩岗、和顺、原平、大保当、红石峡、闫庄则等产地的煤矿,加上内蒙古的煤炭等种类达 40 种之多,配煤掺烧频繁,目前受制于传统的煤质检测手段,煤炭在锅炉燃烧 24 h 后才能知道煤质的特性,经常因煤质稳定性差造成锅炉燃烧效率降低,运行成本高。

针对这一情况,华电潍坊发电有限公司在二期输煤系统皮带机中部采样间实施 LIBS 煤质在线分析系统开发及应用研究,为保障该技术的顺利实施,对现场采样间及相关设备进行了相应的升级改造,同时在原入炉煤采样间边上新建了 LIBS 实验室。

1.2 设备投入及现场布置

基于 LIBS 的煤质在线分析系统主要由取样压饼设备、LIBS 检测设备和控制主机组成。取样压饼设备包括取样设备、烘干设备、研磨设备、压饼设备、传送带和机械手臂。LIBS 检测设备主要包括激光器、光谱仪、位移平台、采集设备和工控计算机。整套系统从原采样系统的缩分出料管处加装取样设备(改造前后对比如图 1 所示),设备流程如图 2 所示。



a 改造前
a Before the reconstruction

b 改造后
b After the reconstruction

图 1 改造前后对比

Fig. 1 Pictures before and after the reconstruction

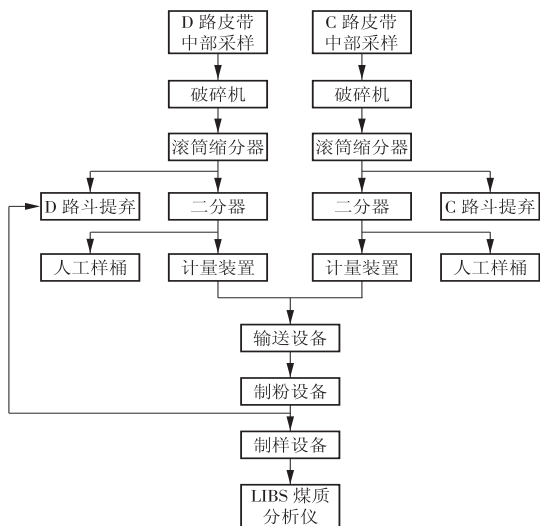


图 2 设备流程

Fig. 2 Working process of the equipment

系统运行时取样设备从原缩分出料管收料,通过送样设备将煤样送入烘干设备中烘干,烘干后的煤样送入研磨设备,煤样研磨成 0.2 mm 粉状后送入压片设备压成饼状,再通过机械手抓取送入检测设备进行检测,检测完的煤饼由机械手抓取并送入包装设备进行包装。单个样品的检测时间控制在 30 min 以内,连续检测的情况下每 3 min 可完成一次检测,相比人工化验方法可极大提高检测效率。

煤质在线分析系统设备布置如图 3 所示。从采样间的缩分出料管开始与系统设备进行对接,将煤样送至 LIBS 实验室进行制样检测。

1.3 LIBS 检测模型的建立

为实现对未知煤样工业参数检测,分析流程如图 4 所示。检测已知煤样并建模,主要为以下 4 步。

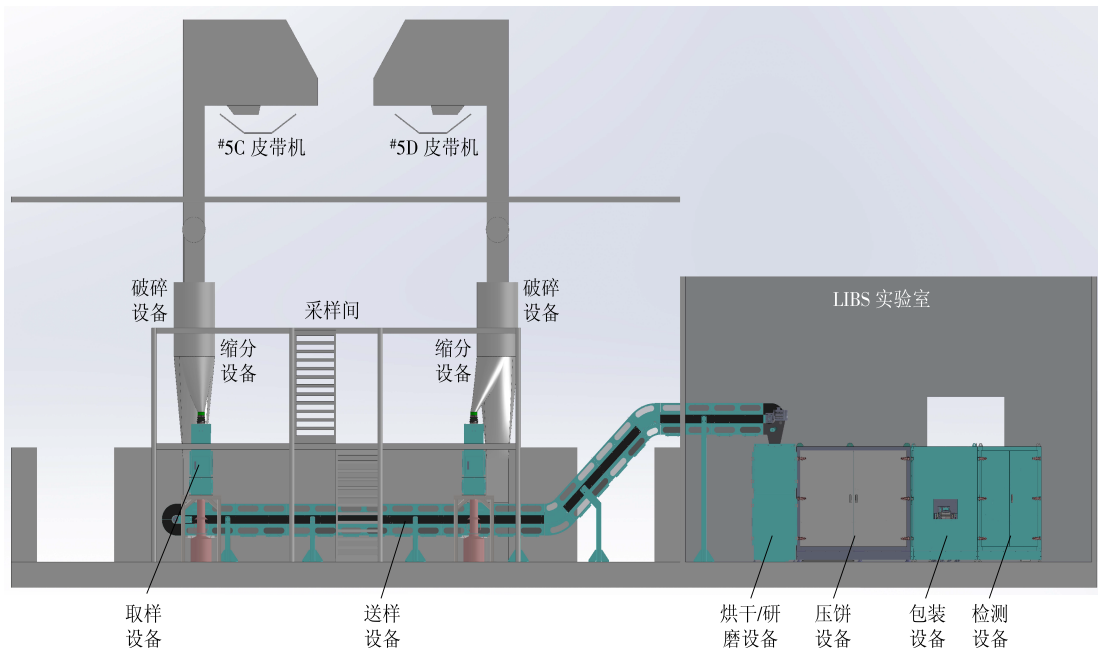


图 3 煤质在线分析系统设备布置

Fig. 3 Layout of the coal quality online detection system

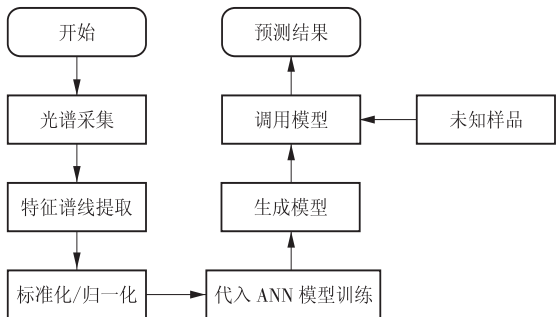


图 4 LIBS 技术煤质分析流程

Fig. 4 Coal quality analysis process taking LIBS

(1)采集已知煤样的等离子光谱并提取相关的元素特征谱线的谱峰值;收集二期入炉煤煤样近

300 个,遵照煤的工业分析方法分析煤质特性指标,包括固定碳、硫、磷、发热量、胶质层指数、黏结指数、全水分、分析基水分、灰分、挥发分、灰熔点等属性的化验分析。

(2)将获取化验数据的煤样在煤质在线设备上完成烘干、制粉、压饼和激光光谱检测,提取煤样的特征谱线,对提取到的煤样特征谱线数据进行标准化和归一化处理。

(3)使用人工神经网络模型(ANN)进行建模。

(4)建立好预测模型后,再采集未知煤样的等离子光谱,采用数据处理方法对光谱进行处理并代入模型得到预测结果,该结果也将通过控制主机输

出,对应煤样的光谱也会相应保存下来。

在实际的工业应用过程中,建模时因为煤含有的元素种类较多,其元素的含量会影响煤各个工业指标,因此筛选了 74 条谱线作为参考,具体见表 1。

表 1 用于定量分析建模的特征谱线
Tab. 1 Characteristic spectral lines for the quantitative analysis modeling

特征谱线种类	特征谱线波长	nm
C	247.85	
H	656.28	
O	777.30,844.70	
N	744.23,746.82,868.08	
C-C	469.64,471.40,473.65	
C-N	386.08,387.03,388.24	
Li	670.75	
Na	588.93,589.56	
Mg	279.52,280.26,285.19	
K	766.40,769.81	
Ca	315.86,317.91,393.34,396.82,422.61,443.49,445.42,610.30,612.14,616.18,643.88,646.24,649.29,854.14,866.17	
Al	226.90,237.34,308.19,309.24,394.41,396.15	
Si	220.79,221.07,221.65,250.67,251.42,251.58,251.89,252.82,288.15	
Ti	334.93,336.05,337.30,338.42,368.46,398.15,398.95,399.89	
Fe	234.34,238.18,239.55,240.48,258.54,259.88,260.64,261.11,273.92,274.89,275.54,271.88,372.00,404.54,438.34	

2 结果与讨论

2.1 煤质在线分析系统的静态精密度测试

为了验证基于 LIBS 技术在线分析系统的稳定性,在工业现场对该系统进行静态精密度测试,取单个煤样进行了 19 次重复检测,其结果见表 2。为了衡量系统的可靠性,将其静态精密度与中子活化型在线分析仪的国家标准进行对比。根据中标准 GB/T 29161—2012《中子活化型煤炭在线分析仪》^[15],灰分测量的静态精密度应小于 1.2%,碳质量分数测量静态精密度应小于 1.2%,氢质量分数测量的静态精密度应小于 0.4%,硫质量分数测量静态精密度应小于 0.3%。对比可知,除灰分外,基于 LIBS 技术的煤质在线分析系统静态精密度均优于中子活化型在线分析仪的检测静态精密度要求。

2.2 LIBS 系统比对动态精密度测试

为了验证基于 LIBS 技术煤质在线分析系统的稳定性,现场对 20 个不同的煤样进行比对动态精密度测试,根据 GB/T 19952—2005《煤炭在线分析仪测量性能评价方法》^[16]计算的空气干燥基下部分煤质指标动态精密度结果见表 3。预测结果和参比值比对如图 5 所示。

2.3 现场样品检测准确度

为了验证基于 LIBS 技术的煤质在线分析系统长期运行的可靠性,现场把人工化验过的 139 个煤样作为检测样品进行检测,预测结果如图 6 所示。

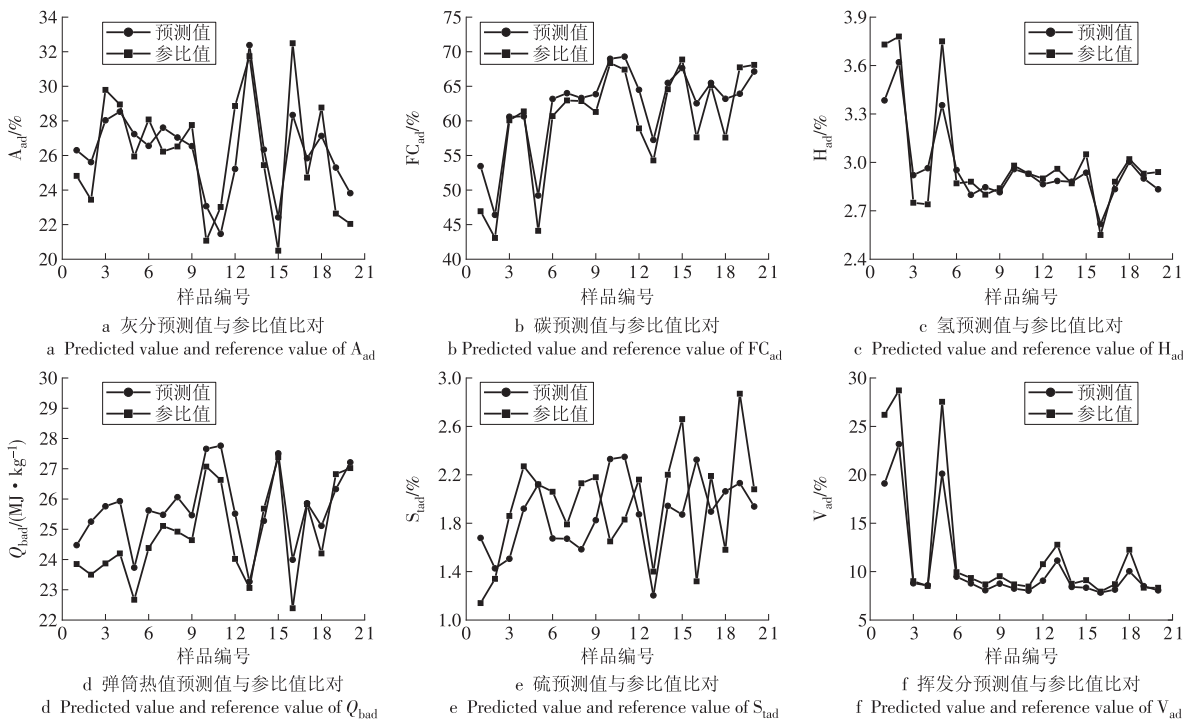


图 5 煤质在线检测系统预测值与参比值对比

Fig. 5 Comparison between predicted values and reference values of the coal quality online detection system

表 2 煤质在线分析系统的稳定性测试

Tab. 2 Stability test of the coal quality online analysis system			
项目	平均值	相对标准差	静态精密度
灰分/%	21.10	2.92	1.29
$\omega(\text{C})/\%$	67.42	0.72	1.01
$\omega(\text{H})/\%$	3.13	0.73	0.05
弹筒热值/($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	27.08	0.57	0.33
$\omega(\text{S})/\%$	1.83	4.00	0.15
挥发分/%	10.26	3.98	0.85

横坐标为煤样在人工化验室进行分析得到的工业指标参考值,纵坐标为利用该煤质在线分析系统得到的工业指标预测值。

其中,空气干燥基灰分(A_{ad})预测的平均相对误差为 2.32%,空气干燥基固定碳(FC_{ad})预测的平均

表 3 煤质在线分析系统比对动态精密度

Tab. 3 Dynamic precision of the coal quality online analysis system						
项目	灰分/%	$\omega(\text{C})/\%$	$\omega(\text{H})/\%$	弹筒热值/($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\omega(\text{S})/\%$	挥发分/%
P_d	4.110	5.575	0.302	1.440	1.009	4.776

注: P_d 为对比动态精密度。

误差为 2.43%,空气干燥基氢元素(H_{ad})质量分数预测的平均误差为 0.14%,弹筒热值(Q_{bad})预测的平均误差为 0.88 MJ/kg,空气干燥基全硫(S_{ad})预测的平均误差为 0.27%,空气干燥基挥发分(V_{ad})预测的平均误差为 1.74%。

结果表明,基于 LIBS 技术煤质在线分析系统的预测准确度均达到了较好的水平。

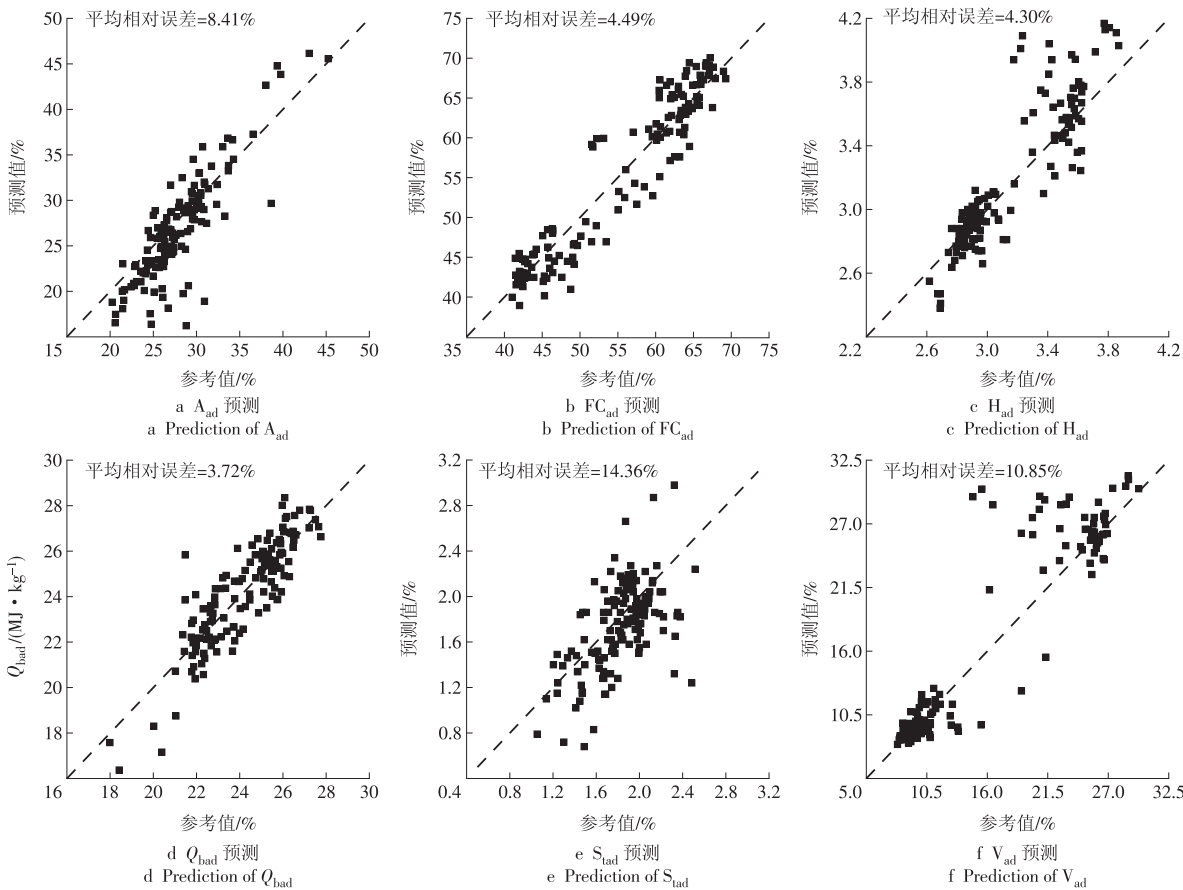


图 6 空气干燥预测值与参考值对比

Fig. 6 Comparison between predicted values and reference values on the dry basis

2.4 经济及社会效益分析

二期工程入炉煤采制样及化验需要按照 10 人编制,每人人工成本 10 万元,则人工成本每年节约 100 万元;采制样及化验设备维护、易损及消耗品每年节约 10 万元。每年可为电厂节约 110 万元。提高锅炉效率,间接降低碳排放,降低发电成本。

2.5 环境保护与安全分析

指导燃煤锅炉的脱硫、脱硝系统进行优化控

制,避免排放超标,降低环保运行成本;指导优化锅炉燃烧效率,合理减少“碳税”成本。

在线检测煤灰熔点变化,避免锅炉结焦,延长锅炉无故障运行时间;通过避免出现高灰分的配煤,减少磨煤机的损耗和耗电量。

3 结束语

华电潍坊发电有限公司二期入炉煤煤质在线

检测系统投入运行以来,结合公司入炉煤煤质特点,在快速、准确实现煤炭中C,H,O,N,S等元素成分煤炭中,Si,Fe,Al,Ca,Mg,Ti,K,Na等元素检测基础上,实现入炉煤水分、灰分、硫分、挥发分的在线测试以及燃煤发热量等影响入炉煤燃烧性能的主要煤质指标的在线测量,建立电厂入炉煤全元素基础数据、安全燃烧及洁净排放的煤质特性指标在线测量数据平台,为锅炉燃烧优化调整、制粉、脱硫、脱硝系统优化运行提供及时、可靠、准确的科学依据。

采用基于LIBS技术的煤质在线分析系统,对现场采集的入炉煤样进行测试,可以在线快速获得煤质工业指标,从采样间采得的单个样品的检测时间可以控制在30 min以内,系统连续检测的情况下,每3 min可以完成一次检测,时间上相比传统人工化验方法具有显著优势,同时该煤质在线分析系统对燃煤电厂需要的工业指标也达到了较好的检测精度。检测煤样成分含量指标满足燃煤电厂煤炭的化验精度要求,可用于指导燃煤锅炉的脱硫、脱硝系统进行优化控制,避免排放超标,降低环保运行成本;指导优化锅炉燃烧效率,合理减少“碳税”成本。对提高环保效率和电厂运行经济指标都具有重大意义。

参考文献:

- [1] WALLIS F J, CHADWICK B L, MORRISON R J S. Analysis of lignite using laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy*, 2000, 54(8): 1231-1235.
- [2] GAFT M, DVIR E, MODIANO H, et al. Laser induced breakdown spectroscopy machine for online ash analyses in coal [J]. *Spectrochimica Acta Part B-atomic Spectroscopy*, 2008, 63(10): 1177-1182.
- [3] HAIDER A, ROMY M, LUBNA, et al. Detection of multiple elements in coal samples from Bangladesh by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Optics and Laser Technology*, 2011, 43(8): 1405.
- [4] NOLL R, FRICKE B C, CONNEMANN S, et al. Laser-induced breakdown spectroscopy expands into industrial applications [J]. *Spectrochimica Acta Part B-atomic Spectroscopy*, 2014, 93: 41-51.
- [5] REDOGLIO D, GOLINELLI E, MUSAZZI S. A large depth of field LIBS measuring system for elemental analysis of moving samples of raw coal [J]. *Spectrochimica Acta Part B-atomic Spectroscopy*, 2016, 116: 46-50.
- [6] FENG J, WANG Z, WEST L, et al. A PLS model based on dominant factor for coal analysis using laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2011, 400(10): 3261-3271.
- [7] 王鑫. 基于激光诱导击穿光谱煤质分析仪的研制[D]. 太原: 山西大学, 2015.
- [8] 邢涛. 基于激光诱导击穿光谱技术的电厂入炉煤煤质在线检测技术研究[J]. *发电与空调*, 2017, 38(5): 11-15.
- XING Tao. Research on on-line detection technology of coal quality in power plant based on Laser-induced breakdown spectroscopy technology [J]. *Electricity and Air Conditioning*, 2017, 38(5): 11-15.
- [9] 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.
- ZHAO Zhonghui, FANG Quanguo. Present Situation and development trend analysis of on-line detection technology of coal quality [J]. *Coal Technology*, 2017, (4): 18-21.
- [10] 樊炬. 基于激光诱导击穿光谱的煤质工业分析研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2016.
- [11] 李捷. 应用激光诱导击穿光谱进行煤质测量的机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [12] 刘超. 煤质在线分析技术的应用现状探析[J]. *石化技术*, 2015, 22(12): 74.
- LIU Chao. Application of online analysis on coal quality [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2015, 22(12): 74.
- [13] 陈宗辉, 张林渠, 苟进. 火车煤煤质预判系统的开发与运用[J]. *华电技术*, 2019, 41(12): 63-67.
- CHEN Zonghui, ZHANG Linqu, GOU Jin. Development and application of coal quality prediction system for trains [J]. *Huadian Technology*, 2019, 41(12): 63-67.
- [14] 成中豪. 基于激光诱导击穿光谱技术的煤质分析仪研制[D]. 西安: 西安工程大学, 2019.
- [15] 中子活化型煤炭在线分析仪: GB/T 29161—2012[S].
- [16] 煤炭在线分析仪测量性能评价方法: GB/T 19952—2005[S].

(本文责编: 齐琳)

作者简介:

黄海东(1971—),男,山东潍坊人,工程师,从事电力燃煤技术管理方面的工作(E-mail: hhd_009@163.com)。