

DOI: 10.19666/j.rlfed.202310166

基于自发辐射分析的高碱煤燃烧炉内 在线监测技术研究进展

陈 装¹, 黄华汉¹, 傅勇强¹, 李华鸿¹, 方顺利², 王志超², 陈 端³,
张 冲³, 王浩帆³, 马 帅³, 姚 斌³, 娄 春³

(1.湛江中粤能源有限公司, 广东 湛江 524000;

2.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

3.华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

[摘 要] 准东煤等高碱煤在新疆地区储量巨大, 但其富含的碱金属元素极易导致炉膛受热面沾污、结渣等问题, 会影响锅炉运行的安全性, 研发高碱煤高效清洁燃烧发电技术对实现“双碳”目标有重要意义。总结了基于自发辐射分析的高碱煤燃烧炉内在线监测技术的研究进展, 重点介绍了发射光谱技术、自发辐射图像处理及成像技术在高碱煤燃烧监测领域的研究现状及应用情况, 进而对其发展趋势和动态进行探讨。发射光谱技术通过对火焰发出的不同波长光谱辐射信号进行处理获取温度与组分, 近期, 已广泛用于测量工业炉膛燃烧火焰温度和气相碱金属质量浓度, 并基于此对炉内结渣趋势进行定性判断。自发辐射图像处理及成像技术具备信号空间分布的解析能力, 利用 CCD、CMOS 等面阵传感器获取炉内自发辐射图像, 基于图像处理与热辐射成像原理, 结合辐射反问题求解方法, 可以获得燃烧场在三维空间的温度分布以及二维壁温分布, 使结渣的三维可视化监测成为可能。未来需基于发射光谱技术、自发辐射图像处理及成像技术对二维或者三维的受热面结渣沾污进行监测, 结合炉内燃烧温度与气相碱金属质量浓度等参数分布, 建立高碱煤燃烧受热面结渣沾污的定量判断指标, 最终达到对受热面结渣沾污在线预测的目标。

[关 键 词] 高碱燃料; 自发辐射分析; 火焰发射光谱; 图像处理; 热辐射成像

[引用本文格式] 陈装, 黄华汉, 傅勇强, 等. 基于自发辐射分析的高碱煤燃烧炉内在线监测技术研究进展[J]. 热力发电, 2024, 53(1): 24-37. CHEN Zhuang, HUANG Huahan, FU Yongqiang, et al. Research progress on online in-furnace monitoring techniques during high-alkali coal combustion based on spontaneous emission radiation analysis[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(1): 24-37.

Research progress on online in-furnace monitoring techniques during high-alkali coal combustion based on spontaneous emission radiation analysis

CHEN Zhuang¹, HUANG Huahan¹, FU Yongqiang¹, LI Huahong¹, FANG Shunli², WANG Zhichao²,
CHEN Duan³, ZHANG Chong³, WANG Haofan³, MA Shuai³, YAO Bin³, LOU Chun³

(1.Zhanjiang Zhongyue Energy Co., Ltd., Zhanjiang 524000, China;

2.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3.State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: High-alkali coal such as Zhundong coal has huge reserves in Xinjiang, in which rich alkali metal elements can easily lead to fouling and slagging problem on heating surface of the furnace, thus to decrease the safety of boiler. It is of great significance to develop efficient and clean combustion power generation technology for high-alkali coal to achieve the “double-carbon” goal. The research progress of the online monitoring technology in high-alkali coal combustion furnace based on spontaneous emission radiation analysis is

收稿日期: 2023-10-10

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ22-H34)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ22-H34)

第一作者简介: 陈装 (1965), 男, 高级工程师, 主要从事火力发电厂生产管理工作, chen Zhuang007@sina.com。

通信作者简介: 方顺利 (1985), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为火电厂燃煤掺配烧系统开发、锅炉燃烧参数监测技术的开发应用, fangshunli@tpri.com.cn。

summarized. The development trend and dynamics are discussed focusing on the research status and application of emission spectrum technology and spontaneous emission radiation imaging and image processing technology in high-alkali coal combustion monitoring. Emission spectroscopy can obtain the temperature and component concentration by processing the spectral radiation signal emitted by the flame at different wavelengths. Recently, it has been widely used to measure the combustion temperature and the gaseous alkali metal concentration in the industrial furnace and judge the slagging trend in the furnace qualitatively. Different from emission spectroscopy technology, spontaneous emission radiation imaging and image processing technology has the ability to analyze the spatial distribution of signals. The technology obtains the spontaneous radiation image in the furnace via CCD, CMOS and other surface array sensors. Based on image processing technology and thermal radiation imaging theory, the temperature distribution of the combustion field in three-dimensional space can be obtained combining with solving radiation inverse problem, which makes it possible to monitor the three-dimensional visual of slagging formation. In the future, monitoring of the fouling and slagging on the heating surface in two or three dimensions should be carried out based on emission spectroscopy technology, spontaneous emission radiation imaging and image processing technology. Combined with the distribution of parameters such as combustion temperature and gaseous alkali metal concentration in the furnace, a quantitative judgmental index of fouling and slagging on the heating surface of high-alkali coal combustion should be established to achieve the goal of online prediction of fouling and slagging on the heating surface.

Key words: high-alkali fuel; analysis of spontaneous emission radiation; flame emission spectroscopy; image processing; thermal radiation imaging

高碱煤中钠(Na)、钾(K)等碱金属元素含量偏高,在燃烧过程极易挥发成气态,所形成的气相碱金属化合物遇到温度稍低的受热面管壁即凝结在管壁上形成白色薄灰层,进而黏结飞灰并继续形成黏结物使灰层增厚,导致锅炉炉膛严重结渣,受热面严重沾污,管壁超温等问题频发^[1-2]。我国高碱煤主要储藏于新疆的准东、哈密等地区,有上万吨,煤电是其主要利用途径。研发针对高碱煤的高效清洁燃烧发电技术,可为“双碳”目标的实现及新型电力系统的构建提供重要科技支撑^[3-5]。

高碱煤燃烧产生的气相钠、钾以及局部火焰温度、气氛是造成高温受热面结渣及超温的关键因素。针对这些因素的在线监测技术,目前研究可分为基于探针取样的接触式取样分析技术,基于激光的主动式检测技术,以及基于燃烧自发辐射的被动式检测技术^[6-12]。例如:基于探针取样的接触式取样分析技术方面,浙江大学根据表面电离法设计了一种探测器探针,对准东煤燃烧时所产生烟气中的气相碱金属进行在线监测,并得到随温度变化时气相钠释放率,证明了将该技术应用于高碱煤燃烧炉中气相碱金属含量在线监测的可行性。基于激光的主动式检测技术方面^[6],澳大利亚阿德莱德大学、瑞典隆德大学、清华大学、浙江大学等^[6]采用激光诱导荧光光谱(PLIF)、激光诱导击穿光谱(LIBS)、差分吸收光谱(DAOS)等技术得到了煤颗粒在实验室燃烧器上燃烧释放的气相钠质量浓度;采用基于声波的声学层析技术、基于激光的可调二极管吸收光谱技术(TDLAS)测量炉内横截面的二维温度

分布、CO气体组分^[7]。但煤粉炉燃烧空间尺寸较大,燃烧火焰中颗粒和气体介质自身释放出强烈的光热辐射,且测量环境恶劣,导致激光信号易被干扰、阻挡,光路复杂难以布置。被动式诊断技术不采用任何外加光源,通过采集、分析燃烧过程中产生的光、热等自发辐射信号即可开展检测,其具有对环境要求较低、系统紧凑且易于实施、信息转换环节少且相对易于标定等优点^[8]。在基于燃烧自发辐射的被动式检测技术方面,英国利兹大学、华中科技大学、西安热工研究院有限公司等^[9]采用基于燃烧自发辐射分析的发射光谱法(FES),实时测量炉内局部区域的气相钠、钾质量浓度及火焰温度,并开展了实验室燃烧器、中试燃烧装置、大型电站锅炉内燃烧火焰中气相碱金属的在线监测。华中科技大学基于燃烧自发辐射分析提出了炉内热辐射成像技术,实现了大型炉膛内燃烧三维温度场可视化测量,并应用于火电、冶金、石化行业^[10-12]。

随着全烧高碱煤技术研究的推进,基于燃烧自发辐射分析的在线监测技术仍面临诸多的问题和挑战。基于燃烧自发辐射的发射光谱技术仍存在未考虑在监测中光学厚度对标定结果的影响;标定方法中存在检测范围较低,无法对被测火焰沿空间分布的燃烧信息实施检测等问题;自发辐射图像处理技术光谱分辨率较低,无法充分利用光谱检测信息。目前,迫切需要分析高碱煤燃烧锅炉内碱金属质量浓度、火焰温度、局部气氛造成高温受热面结渣及超温的影响规律,并开发煤粉炉受热面结渣及超温的安全管控系统,这对高碱煤燃烧炉内碱金属

迁移转化特性监测、受热面积灰结渣监测、炉内燃烧三维可视化监测提出了更高的要求。对此,本文综述基于燃烧自发辐射分析的发射光谱技术、自发辐射图像处理及成像技术用于高碱燃料燃烧监测的研究及应用现状,进而对其发展趋势和动态进行探讨。

1 基于燃烧自发辐射的发射光谱技术

发射光谱技术是对不同波长下火焰发出的光谱辐射信号进行处理,获取温度、组分等信息并用于燃烧分析与诊断,已广泛用于测量燃烧火焰温度和化学发光信号。针对煤粉炉内高碱煤碱金属迁移转化特性监测,发射光谱技术主要用于同时检测温度及气相钠、钾质量浓度等。

1.1 技术原理及实验室应用

根据原子光谱理论,高温下碱金属元素在特定波长下发出的谱线强度与气相碱金属质量浓度及温度有关^[13]。英国利兹大学 Jones 等人^[14]基于该原理对柳木等生物质颗粒燃烧火焰中钾元素发射光谱进行了定量观测,分析了挥发分燃烧、焦炭燃烧以及成灰 3 个过程中气相碱金属的释放特性;随后, Mason 等人^[15-16]基于发射光谱法测得的生物质燃烧过程中气相钾释放曲线建立了钾元素释放模型,可用于预测气相钾的释放。桂欣扬^[17]、韩雨佳等^[18]测量了实验室煤粉射流火焰气相钠的光谱强度,用于表征钠的相对释放量,进而分析了风温、给粉、煤种对气相钠释放的影响。郭庆华等^[19]开展了多喷嘴对置式气化炉内火焰发射光谱研究,分析了水煤浆、柴油火焰 K 和 Na 的辐射特性及其受原料碱金属含量、火焰温度的影响程度。

近年来, 姜春等^[20-22]提出了从火焰自发发射光谱中同时获得火焰温度和气相钠、钾等碱金属质量浓度的测量方法。首先,从光谱仪获取的高碱燃料燃烧火焰光谱强度 I 分布中,精确分离出火焰热辐射自发发射的连续光谱 I_C 及碱金属受激发射的特征谱线 (I_{Na} 和 I_K 等)^[23],即 $I=I_C+I_{Na}+I_K$;再用多波长法从火焰热辐射连续光谱中计算火焰温度^[24],并依据耦合温度、辐射强度的气相碱金属质量浓度标定曲线,从钠、钾特征谱线强度中获得相应的气相碱金属质量浓度^[25]。图 1 为高碱燃料燃烧火焰发射光谱检测系统^[10]。该方法已用于实验室燃烧器进行准东煤、生物质、城市固体废弃物颗粒燃烧过程中火焰温度和气相碱金属质量浓度的在线测量及释放特性研究^[26-31]。

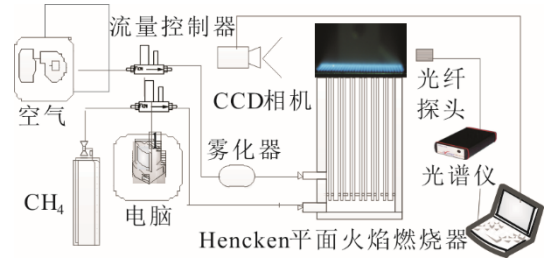


图 1 高碱燃料燃烧火焰发射光谱检测系统
Fig.1 The flame emission spectroscopy detection system in high-alkali fuel combustion setup

图 2 给出了基于燃烧自发辐射分析的发射光谱法 (FES) 和光学诊断技术 (LIBS) 2 种方法测得的五彩湾准东煤颗粒在平面火焰上燃烧时气相碱金属质量浓度随燃烧时间的变化曲线^[22]。FES 方法通入燃烧器的燃料气体甲烷和空气的流量分别为 1.5、35.0 L/min, 以提供稳定的燃烧环境, 以便便携式光谱系统为核心来检测准东煤燃烧时气相 Na 的释放。LIBS 方法通入燃烧器的燃料气体甲烷和空气的流量分别为 0.59、7.06 L/min, 以 LIBS 系统为核心来检测气相 Na 质量浓度, 测量结果 a 和 b 数据分别来自文献[32]和文献[33]。由于 2 次测量不是同时进行, 且燃用的准东煤煤质成分以及实验环境略有不同, 导致 2 个气相 Na 质量浓度测量曲线会有所偏差。由图 2 可见, 2 种方法均能识别挥发分燃烧、焦炭燃烧、成灰 3 个阶段的钠释放。在挥发分和焦炭阶段, 气相钠的释放受温度和热辐射的影响较大; 成灰阶段, 灰分中的硅元素可抑制气相钠的释放。LIBS 与 FES 方法相比: 基于激光的光学诊断技术更加复杂, 在工业应用中测量环境恶劣, 激光信号易被干扰、阻挡, 光路复杂难以布置; 而 FES 方法对环境要求不高, 系统紧凑且易于实施, 信息转换环节少且相对易于标定, 这为中试及工业燃烧装置中开展气相钠在线监测奠定了基础。

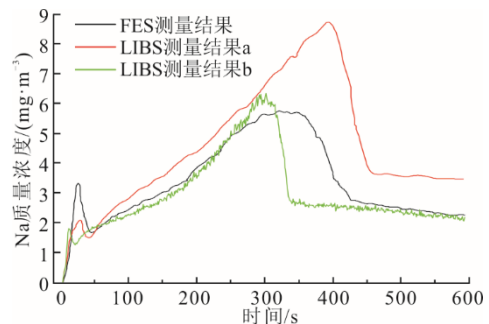


图 2 FES 和 LIBS 测得的准东煤颗粒燃烧钠释放曲线
Fig.2 The release curves of Na measured by FES and LIBS in Zhundong coal particles combustion

1.2 中试及工业应用

发射光谱技术很早就用于中试装置及工业炉膛内温度的测量。针对炉内碱金属的检测，加拿大自然资源部能源技术中心研究人员在 1 台 0.3 MW 中试煤气化炉上安装了光学探头，其检测系统结构如图 3 所示^[33]。将炉内光信号引入 1 台波长 200~800 nm 的可见光光谱仪，采用多波长法计算炉内温度，同时还获得了钠光谱强度随氧量、煤量和蒸汽流量的变化。试验结果证明^[34]，发射光谱技术用于煤气化性能测试的可行性，煤气化炉光谱检测系统由光学探头将光信号传输到光谱仪上并由光谱仪进行采样，响应时间为 1~2 s，采用多波长法对 650~710 nm 波长范围内 3 个测点的温度进行计算，得出温度与相应测点热电偶测得温度偏差分别为 2.7%、2.1%、2.7%，检测精度较高。



图 3 煤气化炉光谱检测系统结构
Fig.3 The structure of flame emission spectroscopy detection system in coal gasifier

近年来，发射光谱技术被用于在线测量液态排渣旋风炉内气相碱金属质量浓度^[35-39]，以检验旋风炉渣膜对高碱煤燃烧产生气相碱金属的吸附情况，从而降低进入炉膛内的气相碱金属质量浓度，以减少锅炉高温受热面发生严重沾污的可能性。张向宇等^[35-36]提出了一种基于主成分分析和辐射率多项式拟合的光谱分析方法（图 4），从 1 台 100 kW 立式旋风炉获得的光谱数据中同时反演火焰温度、辐射率和气相钠质量浓度，发现在旋风炉尾部碱金属由气相向固相迁移，在旋风筒中 3 个不同测点位置处通过发射光谱技术测得的温度与热电偶测得温度误差分别为 2.77%、1.36%、1.95%，检测精度较高。

华中科技大学开发了一套便携式发射光谱检测系统，由光纤光谱仪、平板电脑及专用处理软件组成，检测系统响应时间为 1~2 s，先后用于 20 MW

液态排渣旋风燃烧试验炉及 300 MW 燃煤发电机组液态排渣炉内温度及气相碱金属质量浓度的同时检测^[37-38]。液态排渣旋风燃烧试验炉发射光谱测量系统结构如图 5 所示。对于编号为 FK 和 HSQ 的 2 种准东煤分别在 1 100、1 300 K 和 1 200、1 400 K 工况温度下进行检测，检测结果如图 6 所示^[37]。

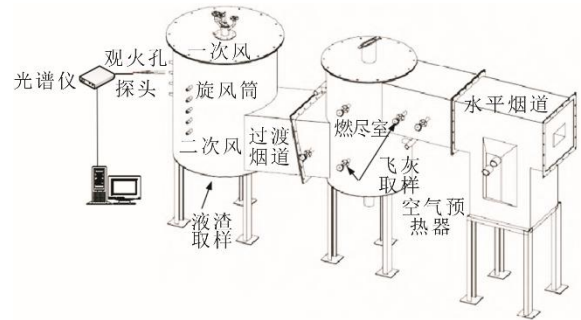


图 4 立式旋风炉发射光谱检测系统结构
Fig.4 The structure of flame emission spectroscopy detection system in cyclone fired furnace

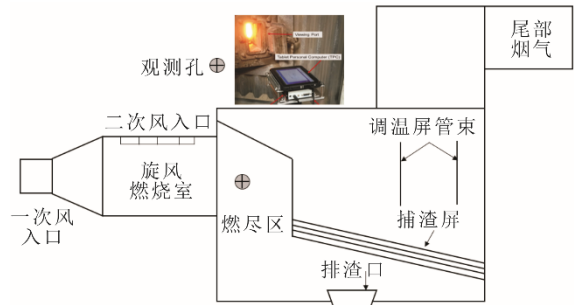


图 5 液态排渣旋风燃烧试验炉发射光谱测量系统
Fig.5 The flame emission spectroscopy detection system in slagging-type cyclone-fired test furnace

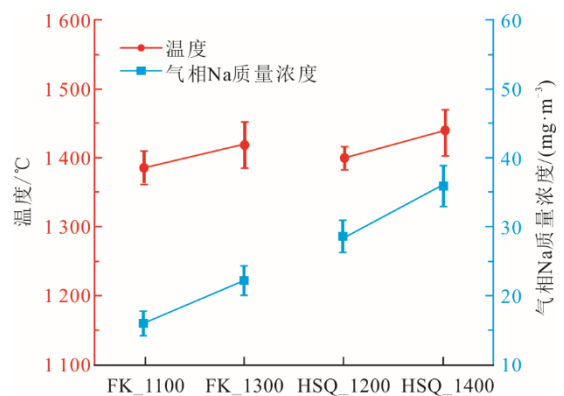


图 6 液态排渣旋风试验炉内气相钠质量浓度和温度
Fig.6 The temperature and gaseous Na mass concentration in slagging-type cyclone-fired test furnace

由图 6 可见，HSQ 煤燃烧过程中释放的气相钠质量浓度高于 FK 煤。一是因为 HSQ 煤中钠质量浓度最高，燃烧过程中释放量较大；二是 FK 煤中硅

和铝元素质量浓度较高,在高温条件下气相水溶性钠会直接与硅、铝反应生成不可溶的硅铝酸盐,而不溶性硅铝酸盐主要留在液渣中,释放到烟气中的气相碱金属钠相对较少。同时,FK 煤和 HSQ 煤燃烧火焰中气相钠质量浓度与旋风筒出口温度的变化呈正相关。

用同样的便携式设备测量了 300 MW 燃煤发电机组塔式液渣炉双 U 型燃烧室内多个位置的局部温度及气相钠质量浓度^[38],测点位置如图 7 所示。测量结果表明:炉内气相钠质量浓度分布不均匀,结合气相钠质量浓度和灰渣样中钠质量浓度建立了碱金属迁移转化的闭环分析路径,在旋风燃烧方式下,随着火焰气相钠质量浓度的增加,飞灰和液渣中钠质量浓度均增大,但钠元素更多的是向飞灰中迁移^[37]。

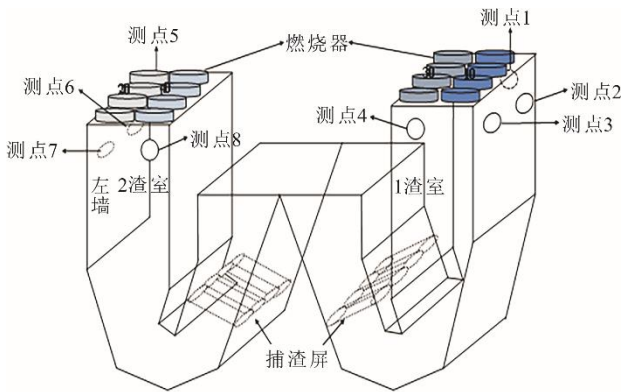


图 7 锅炉及测点示意

Fig.7 Schematic diagram of the boiler and measuring points

蒲响等^[38-39]研发了 1 套炉内燃烧温度\气相钠质量浓度在线监测系统并应用于准东煤发电机组锅炉,连续在线测量炉内局部温度及气相钠质量浓度。炉内燃烧温度\气相钠质量浓度在线监测系统如图 8 所示^[39]。

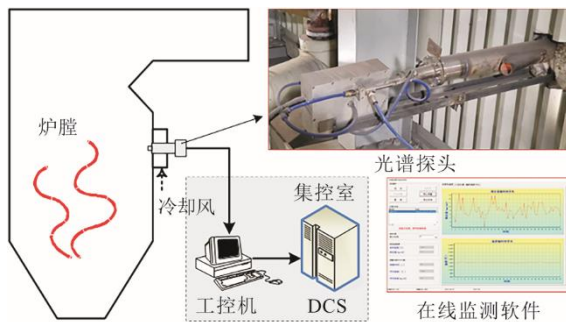


图 8 炉内燃烧温度\气相钠质量浓度在线监测系统

Fig.8 The on-line measurement system of temperature and gaseous sodium mass concentration in coal-fired furnace

在线监测系统包括安装在锅炉折焰角下方的光谱探头、放置在集控室内的工控机及自行开发的在线监测软件。炉内燃烧温度\气相钠质量浓度在线监测系统的相应时间小于 3 s,光谱探头的检测范围为 300~1 000 nm,光谱分辨率为 0.5~0.7 nm,光谱采样时间小于 1 s,工作温度为-10~50 ℃。该系统通过黑体炉对燃烧火焰温度精度进行检定,测得温度与实验给定温度相对误差不超过 1%,测量效果较好;再将雾化标准钠溶液送入火焰中,由在线监测系统对气相 Na 质量浓度进行检测以验证系统气相 Na 质量浓度检测精度,结果表明测量误差小于 1.5%,测量精度较高。

图 9 给出了在线监测系统获得的 660 MW 准东煤发电机组锅炉内 24 h 连续测量结果及与机组负荷、给粉量、总风量的对比^[39]。由图 9 可见,整体上气相钠质量浓度和温度与机组运行参数呈明显的正相关性。随着入炉煤量的增加,炉内钠总质量增加;温度的提高促进气相钠的释放,更多钠以气相形式存在。在线监测结果有助于控制屏底烟温以及判断进入上部炉膛区域内气相钠量,以缓解上部炉膛的过热器、再热器管壁的沾污结渣。

有研究者基于炉内温度\气相钠质量浓度监测结果,结合灰成分分析法^[40-41],通过结渣实验建立归一化气相钠质量浓度和煤灰中 Na₂O 含量的定量关系,进而考虑气相碱金属释放、受热面结渣是随时间的动态过程,提出了一种结渣在线指数,用于对炉内结渣趋势进行判断^[40]。在 DCS 中开发了锅炉结渣预报系统画面,通过计算结渣在线指数,得到不同区域受热面结渣趋势的判断,指导燃煤发电机组运行人员采取燃烧调整、吹灰等结渣防控工作。耦合炉内气相碱金属检测锅炉结渣预报系统界面如图 10 所示^[40]。

1.3 各项技术比较

各项技术比较见表 1。基于燃烧自发辐射的发射光谱技术设备简易,易于携带,价格低廉,对环境要求较低,可同时检测火焰中物质燃烧的状态和信息,如火焰温度、灰度、辐射能等变化规律,适合大型工业现场应用。与自发辐射成像技术、自发辐射图像处理技术 2 种技术相比,基于燃烧自发辐射的发射光谱技术设备不用伸入炉膛内部即可测量,无需考虑耐高温、防沾污结焦等因素,维护成本较低,同时,还可以对火焰中释放的气相碱金属质量浓度进行监测,如 Na、K

表 1 各在线监测系统比较
Tab.1 Comparison of various on-line measurement systems

系统名称	开发时间	系统组成	监测变量	应用场景	优点
煤气化炉光谱检测系统	2014 年	光纤、光谱仪、光学探头、计算机等	火焰温度	煤粉气化炉	精确度高、设备运行稳定、适用性好
立式旋风炉发射光谱检测系统	2021 年	光谱仪、探头、光纤、计算机等	火焰温度、气相钠盐质量浓度、辐射率	100 kW 立式旋风炉	精确度高、设备便携、运行稳定、适用性好
液态排渣旋风燃烧试验炉发射光谱测量系统	2022 年	光纤、准直透镜、平板电脑等	碱金属质量浓度、火焰温度	液态排渣旋风试验炉	实时监测数据更新间隔短、灵敏度、功耗低
炉内燃烧温度\气相钠质量浓度在线监测系统	2022 年	光谱探头、工控机、通信线缆、在线监测软件等	气相钠质量浓度、火焰温度	660 MW 准东煤电发电机组锅炉	稳定性好、光谱采样时间短、灵敏度高、响应速度快
耦合炉内气相碱金属检测的锅炉结渣预报系统	2023 年	光学探头、信号线缆、控制盒、计算机系统、专用监测软件等	碱金属质量浓度、火焰温度、结渣程度	350 MW 机组燃煤锅炉	稳定好、光谱采样时间短、可在线对结渣趋势进行判断、系统操作简便

2 自发辐射图像处理及成像技术

发射光谱技术接受信号来自炉内某区域沿视线方向累积的自发辐射信息，不具备信号在空间分布的解析能力。随着半导体技术的发展，CCD、CMOS 等面阵传感器被用于获取炉内自发辐射图像，对图像信号进行处理，获得的检测结果具有二维空间的分辨率。根据热辐射成像原理，燃烧火焰图像可表征三维空间中局部燃烧介质和壁面发出的热辐射经过介质吸收、散射及壁面吸收、反射后到达面阵传感器上形成的二维分布，结合辐射反问题求解方法，还可获得燃烧场在三维空间的温度分布。针对高碱煤炉内气相碱金属、受热面积灰结渣监测及燃烧三维可视化监测，自发辐射图像处理及成像技术也得到了较多应用。

2.1 自发辐射图像处理原理及应用

煤粉炉是由炉壁表面及其包围的颗粒、气体介质构成的三维空间系统。炉内发出的自发辐射覆盖了紫外-可见光-红外的宽波段范围。可见光和近红外的波段范围包含炉内颗粒（如碳烟和焦炭）以及炉膛壁面发出的类似于黑体辐射的连续光谱；红外波段范围包含炉内气体（如二氧化碳和水蒸气等发出的带状光谱）；紫外和可见光波段范围包含炉内燃烧过程中自由基（OH、CH 和 C₂ 等）化学发光发出的线状光谱；炉内碱金属元素（钠和钾等）受高温激发发出的线状光谱，位于可见光波段。结合具有不同光谱响应波段的面阵传感器，可以获得炉内自发辐射在某个宽波段内的图像，也可以在面阵传感器前加单色滤色片来获得单个波长或者窄波段内的光谱辐射图像。

1) 光谱图像检测

华东理工大学于广锁团队^[42-45]针对煤气化、燃烧炉内碱金属光谱辐射特性开展了检测研究。多喷嘴对置式气化炉光谱图像检测系统如图 11 所示^[42]。

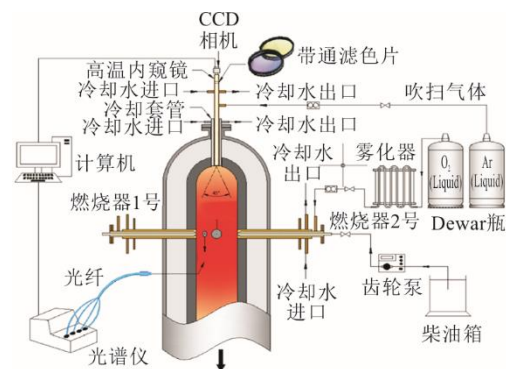


图 11 多喷嘴对置式气化炉光谱图像检测系统
Fig.11 Spectral image detection system in opposed multi-burner gasifier

该检测系统在 1 台多喷嘴对置式气化炉实验炉顶部安装了光学内窥镜，采用高分辨率 CCD 相机结合带通滤色片（580、590、600、760、770、780 nm）分别获取炉内 Na、K 的发射光谱强度图像（主要集中于撞击区域中心）。结果显示：水煤浆火焰的碱金属光谱强度及分布面积明显高于柴油火焰，其主要取决于原料碱金属的含量以及火焰的温度^[39]。对于煤粉颗粒在可视化滴管炉内燃烧过程，采用波长 400~1 000 nm 的线阵 EM-CCD 高光栅相机同时获取煤颗粒下落燃烧时沿炉膛轴线上 125 个波长的光谱图像，光谱分辨率约为 1.021 nm，相机捕捉煤粉颗粒燃烧光谱信号的测量时间为 50 ms，其曝光时间设置为 10 ms，可以获得 5 个不同燃烧时刻下位于可见光波段 590、770 nm 处 Na

和 K 特征谱线^[40]。检测结果表明: 1) Na 和 K 的特征谱线强度随含氧量的增加而增加, O_2/N_2 气氛下的谱线强度高于 O_2/CO_2 气氛, 且与火焰温度呈正相关^[41]; 2) 单颗粒煤粉燃烧中碱金属在火焰外层释放强度较大^[42]。此外, 瑞典隆德大学翁武斌等^[43-48]也是采用加滤色片的 ICCD 增强型电荷耦合器件相机获取了生物质颗粒在 Mckenna 平面火焰燃烧器上燃烧的光谱辐射强度图像。Mckenna 平面火焰燃烧器由 1 个不锈钢圆筒组成, 该圆筒包裹着直径为 60 mm 的水冷青铜多孔烧结基体。通过 2 个质量流量控制器向燃烧器中心孔处输入燃料气体, 冷却水通过铜管输送至燃烧器, 燃烧器上方内径为 70 mm、高度 500 mm、厚度 2 mm 的优质熔融石英, 限制气体流动, 避免夹带环境空气, 同时提供光学通道。结果表明, Na、K 信号在燃烧过程中持续存在, 且在挥发分燃烧阶段结束前与 CH、 C_2 的信号变化相同。

2) 监测炉内受热面壁温

自发辐射图像处理技术还被用于直接监测炉内受热面壁温, 从而对炉内积灰结渣情况进行判断。基于红外图像处理及标定的测温仪器常被用于固体表面温度测量^[8], 但高温下炉内燃烧火焰中的颗粒及气体介质也会在红外波段发出强烈热辐射, 叠加在炉膛受热面发出的红外辐射上对壁温检测结果带来较大影响, 甚至会完全遮挡来自壁面的红外热辐射信号。对此, 美国 FLIR 公司采用碲化铟 (InSb) 面阵传感器及滤光片仅获取 3.80~4.05 μm 波长范围的红外热图像, 试图滤掉火焰热辐射实现“穿透火焰”监测炉膛受热面温度, 从而判断受热面氧化、结渣情况。美国 Advanced Energy 公司则是采用 3.9 μm 滤光技术配合中波红外图像探测器, 试图“透过火焰”观察锅炉、熔炉、窑炉或焚化炉内的情况。但从实际应用效果来看, 这种方式只适合于监测燃气锅炉或者燃煤锅炉折焰角以上过热器、再热器区域的管壁温度, 330 MW 机组燃煤锅炉过热器红外热图像如图 12 所示^[49]; 而对于燃煤锅炉折焰角以下燃烧火焰区域的水冷壁受热面则难以清晰观测, 所得到的红外热图像中受燃烧火焰辐射的影响较大, 该锅炉水冷壁红外热图像如图 13 所示^[49]。其原因是煤粉炉内燃烧生成的焦炭、碳烟、飞灰等颗粒在高温下发出的热辐射在红外波段仍然有很强的信号, 采用滤光片虽然能过滤掉炉内气体的红外热辐射, 但不能完全消除颗粒的热辐射影响。

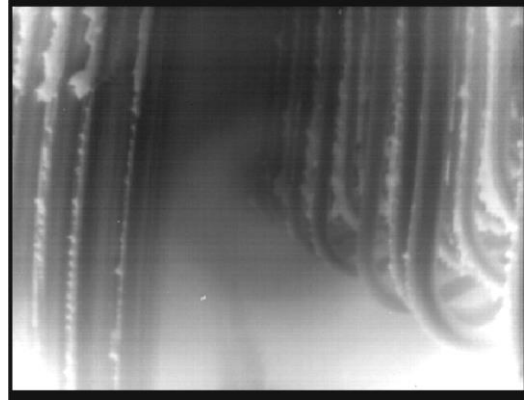


图 12 330 MW 机组燃煤锅炉过热器红外热图像
Fig.12 Infrared thermal image of superheater in a coal-fired boiler of 330 MW unit

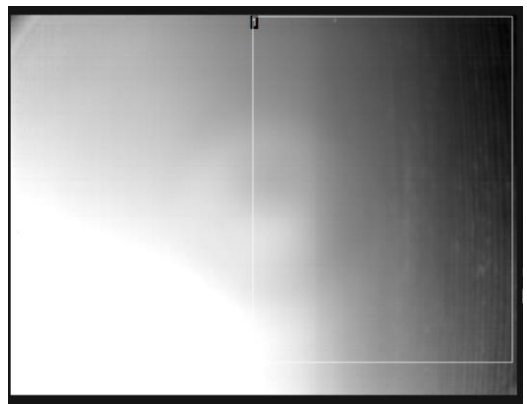


图 13 330 MW 机组燃煤锅炉水冷壁红外热图像
Fig.13 Infrared thermal image of water wall in a coal-fired boiler of 330 MW unit

针对如何消除烟气、颗粒对炉内壁温测量的影响, 国内学者做了深入的理论分析及试验研究^[48-53]。清华大学段源远等^[48]通过对一维炉实验台内不锈钢平板表面温度辐射法进行测量探究, 发现红外温度计上的显示温度与管壁实际温度存在差异, 可以采用小波消噪和温度修正相结合的数据处理方法来提高辐射测温精度。西安热工研究院有限公司张向宇等^[49]则提出同时获取炉内燃烧的可见光图像及红外热图像, 通过辐射成像计算方法求解探测器接收的火焰辐射和壁面辐射份额, 再从红外热辐射图像中扣除火焰辐射, 进而测量出炉膛壁面温度分布。东南大学许传龙团队^[50-53]采用源项多流法对烟气遮蔽下壁面的红外测温进行了模拟, 计算出不同探测角度下进入探测器的能量以及测量的温度, 研究了烟气厚度、温度等因素对红外测温结果的影响规律, 提出了利用反演方法修正红外测温的思路, 并基于中心波长为 10 μm 的红外相机建立了一套壁面温度在线监测系统。壁面温度在线监测系统结构如图 14 所示^[53]。

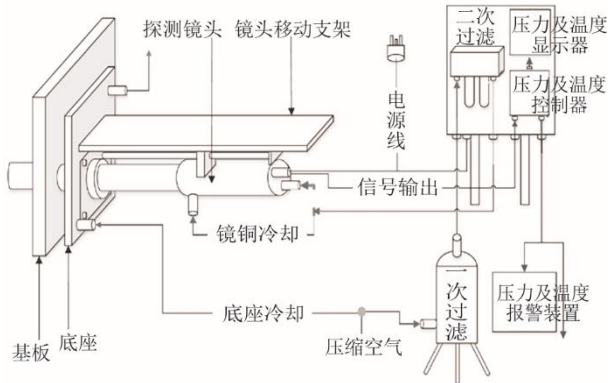


图 14 壁面温度在线监测系统结构

Fig.14 Schematic of wall temperature on-line monitoring system

自发辐射图像处理技术基于三维燃烧火焰发出的光投影至面阵图像传感器上形成图像，有助于得到火焰温度等参数的二维分布。自发辐射图像处

理技术可以获得炉内自发辐射在某个宽波段内的图像，也可以获得单个波长或者窄波段内的光谱辐射图像，并能直接检测炉膛受热面温度进而对受热面的沾污结渣情况进行监测，且设备操作简易，运行状态稳定，易于实施。

但是自发辐射图像处理技术在工业应用中需要将设备伸入到炉膛中，要求设备具有较高的耐高温、防沾污结焦等性能，且需要用面阵传感器，与基于燃烧自发辐射的发射光谱技术相比，设备昂贵，成本较高。同时，自发辐射图像处理技术虽然能提供具有空间分布的图像检测信息，但光谱分辨率较低，未来可将能够提供包含空间和光谱信息的多/高光谱成像设备应用于技术中，图像和光谱相结合，有助于实现同时测量火焰中温度与多种组分体积分数分布。表 2 为各壁面温度在线监测系统比较。

表 2 各壁面温度在线监测系统比较

Tab.2 Comparison of various wall temperature on-line measurement systems

系统名称	开发时间	系统组成	监测变量	应用场景	优点
多喷嘴对置式气化炉光谱图像检测系统	2018 年	高温内窥镜、带通滤色片、CCD 相机、计算机、光纤、光谱仪、热电偶等	火焰温度、碱金属原子光谱特征	对置式多燃烧器气化炉	系统简易，成本低，稳定性好，测量精度较高
Mckenna 平面火焰燃烧器光谱图像检测系统	2018 年	光谱仪、ICCD 相机、带通滤波器、连续波激光器、光电二极管等	光谱辐射强度图像、生物质燃烧颗粒中碱金属光谱特征	Mckenna 平面火焰燃烧器	可定性分析单个粉状固体燃料颗粒的燃烧过程
一维炉内试件表面温度测量实验系统	2011 年	热电偶、红外温度计、专用测量软件等	壁面温度	一维炉	采用多分辨率小波消噪和辐射传递理论温度修正相结合的处理方法，有效提高系统辐射测温精度
锅炉受热面壁温分布直接监测	2022 年	工业 CCD 相机、红外成像仪等	壁面温度	亚临界 330 MW 机组锅炉	可对锅炉受热面壁温可视化监测，壁温测量结果能够准确反映机组工况变化
壁面温度在线监测系统	2019 年	工业 CCD 相机、红外镜头、冷却装置、压力温度报警装置、计算机等	壁面温度	1 000 MW 燃煤发电机组锅炉	系统可在高温环境下维持正常工作温度，避免烟灰颗粒在镜头表面沉积，测量可靠稳定

2.2 热辐射成像原理及应用

煤粉炉内燃烧过程存在明显的三维空间分布特性，受热面结渣、超温是炉膛三维空间中二维炉壁表面发生的现象，与炉内三维分布特性密切相关。因此，具备炉内三维空间解析能力的实时测量技术，有助于对锅炉受热面结渣及超温进行准确预测及全面管控。现有技术中，声学层析技术、可调二极管激光吸收光谱技术 (TDLAS) 以及热辐射成像技术可实现大型炉膛内三维温度场可视化监测^[11]。其中，声学层析可实现燃煤锅炉内横截面的二维温度分布测量。TDLAS 可用于大型炉膛出口横截面的二维温度分布及 CO 等气体质量浓度测

量。周怀春等^[12]提出的热辐射成像技术通过解析三维空间中耦合燃烧介质发射、吸收、散射和炉膛壁面发射、吸收、反射的热辐射成像光束传输过程 (图 15)^[10-12]，实现了大型炉膛内燃烧三维温度场可视化测量，并应用于火电、冶金、石化行业^[12]。

与声学层析技术、可调二极管激光吸收光谱技术以及热辐射成像技术 3 种技术相比，基于燃烧自发辐射分析的热辐射成像技术具有成像过程响应快、三维空间中测量结果的时空分辨率高、系统简易且便于实施等特点，其在高碱煤燃烧炉内三维温度场在线监测中具有明显优势。火焰中心位置在部分程度上反映炉内燃烧工况是否正常，基于炉内燃

烧温度场在三维空间分布，通过重心算法可同时确定火焰中心在炉膛水平及垂直方向的位置。实际应用火焰中心位置监测的结果表明：四角切圆燃烧锅炉内火焰水平中心偏离炉膛横截面几何中心时，会造成火焰刷墙、燃烧不稳定，严重时会引起炉膛灭火事故^[54]；W 型火焰锅炉内的火焰垂直中心上升时，会导致炉膛上部温度过高，缩短煤粉充分燃尽时间，也会让飞灰中的碳含量及减温水量增加^[55]。

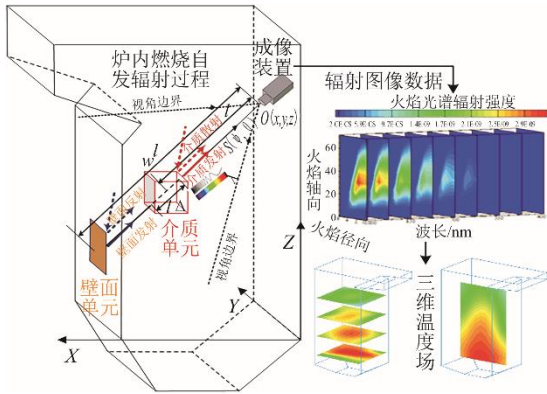


图 15 炉内热辐射成像技术原理
Fig.15 Principle of thermal radiative imaging technique in furnace

炉内热辐射成像过程中已把炉膛三维空间及二维壁面分别离散为 m 和 n 个单元。考虑单元质量流动带来热焓交换的炉内辐射换热，根据空间及壁面单元的能量平衡（式(1)、式(2)）可建立炉内三维温度分布与炉膛容积热负荷分布、壁面辐射热流分布的定量关系式^[56]。

$$E_1 + h_{out} = E_2 + h_{in} + Q_s \tag{1}$$

$$E_3 + Q_{net} = E_4 \tag{2}$$

式中： E_1 为空间单元发出的辐射能量； h_{out} 为因质量流动离开空间单元的焓； E_2 为空间单元吸收的所有单元发出的辐射能量； h_{in} 为因质量流动进入空间单元的焓； Q_s 为空间单元燃烧反应释放的热量（即局部热负荷）； E_3 为壁面单元发出的辐射能量； Q_{net} 为进入壁面单元的辐射净热量（即壁面辐射热流）； E_4 为壁面单元吸收的所有单元发出的辐射能量。

在获得炉内三维温度场结果后，可进一步实现炉膛水冷壁辐射热流分布、炉内燃烧放热量分布及炉内容积热负荷分布的在线监测。200 MW 机组燃煤锅炉壁面热流分布在线监测结果如图 16 所示^[8]。

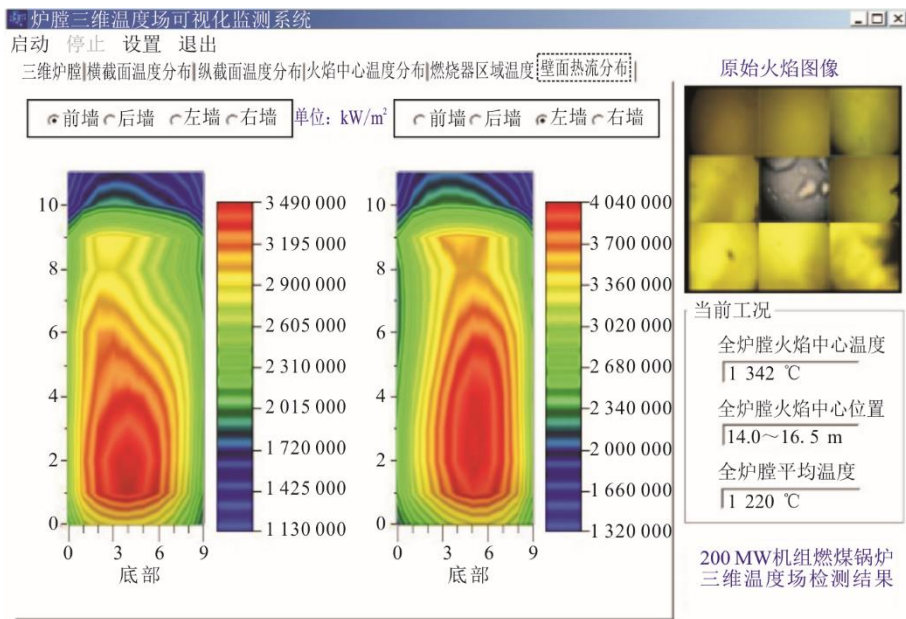


图 16 200 MW 燃煤机组锅炉壁面热流分布在线监测结果
Fig.16 The on-line monitored heat flux distribution of furnace wall in a coal-fired boiler of 200 MW unit

利用炉膛水冷壁二维表面辐射热流分布为边界条件，可以从热力过程机理出发建立锅炉蒸发系统分布参数动态模型。该模型能够反映在蒸发受热面上壁面汽水侧的管壁温度、质量流速等热力参数动态分布，以及汽包压力、水位等动态变化^[57]。图 17 给

出了 1 台 300 MW 燃煤机组锅炉前墙水冷壁在 2 个负荷工况下的汽水侧管壁温度分布^[58]。与热流分布对比可以看出：在相同工况下壁温分布与热流分布的相似度很高，壁面上高热流区域也会有高壁面温度。由此可知，在通常工况下炉内烟气状况是影响

壁面温度分布的根本因素,而锅炉内部过程对壁面温度分布基本没有影响^[58]。运行人员可根据各个壁面辐射热流、汽水侧壁温分布变化,判断水冷壁超温、结渣甚至爆管的可能性,进而采取相应措施。

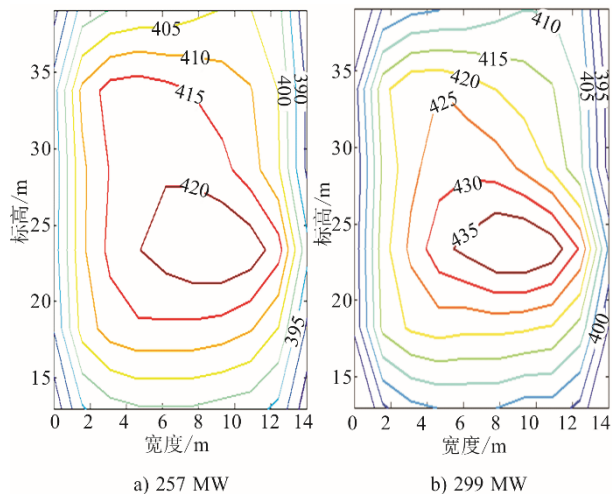


图 17 300 MW 燃煤机组锅炉前墙水冷壁管壁温度分布(°C)
Fig.17 Temperature distributions of tube surface in steam side of front wall in a boiler of 300 MW unit (°C)

自发辐射成像技术与基于燃烧自发辐射的发射光谱技术,自发辐射图像处理技术 2 种技术相比,可对炉内三维温度场进行监测,并且成像过程响应快,三维空间中测量结果的时空分辨率高,系统简易且便于实施。但是自发辐射成像技术也需将设备伸入到炉膛中,对设备耐高温、预防沾污结焦等要求较高,且需用面阵传感器,成本较高。

自发辐射成像技术可以达到千万级像素,可是如何有效充分利用千万级像素光谱检测信息,依然有待研究。同时,燃烧介质非均匀分布也会对温度重建产生影响。未来可以将以人工神经网络开展机器深度学习的方法与自发辐射成像技术高度结合,进而求解具有不适定性的热辐射反问题,从而提高检测的分辨率及精度^[59]。

3 结论与展望

1) 发射光谱技术可获取温度、组分等参数用于燃烧诊断,已建立耦合温度、辐射强度的气相碱金属质量浓度标定曲线,并被用于实验室燃烧器上开展准东煤、生物质、城市固体废弃物颗粒燃烧过程中火焰温度和气相碱金属质量浓度的在线测量及释放特性研究。另外,发射光谱技术已应用于 0.3 MW 煤气化炉、20.0 MW 液态排渣旋风炉等中试实验炉内,便携式与在线式的炉内燃烧温度/气相

钠质量浓度监测系统已被应用于 300、660 MW 机组燃用准东煤锅炉。

2) 自发辐射图像处理及成像技术基于 CCD、CMOS 等面阵传感器获取炉内自发辐射图像,具备信号在空间分布的解析能力。不同响应波段或加单色滤色片的面阵传感器,可获得单个波长或窄波段内的光谱辐射图像。自发辐射图像处理技术被用于监测 Mckenna 平面火焰燃烧器、多喷嘴对置式气化炉、实验炉内的光谱辐射强度图像,同时被应用于直接监测炉内受热面壁温以判断炉内积灰结渣情况,其目的在于消除烟气、颗粒对炉内壁温测量的影响。辐射成像技术将三维炉膛与二维壁面集散为多个单元,根据能量平衡建立炉内三维温度分布与炉膛容积热负荷分布、壁面辐射热流分布的定量关系,目前被应用于 300 MW 机组。

3) 基于发射光谱技术、自发辐射图像处理及成像技术对二维或者三维的受热面结渣沾污进行监测,结合炉内的燃烧温度与气相碱金属质量浓度等参数分布,建立高碱煤燃烧受热面结渣沾污的定量判断指标,最终实现对受热面结渣沾污在线预测,为“双碳”目标实现做出贡献。另外,基于燃烧自发辐射的被动式诊断技术被测参数耦合因素较多,对于燃烧过程中含碱金属元素中间组分的测量手段较少,信号后续分析复杂。未来需深入研究耦合因素解耦,尽可能获得更多的燃烧参数和中间组分,并进一步发展获取光谱、图像成像器件及软件,提升光谱、图像信号处理算法,加强对射光谱技术、自发辐射图像处理及成像技术的组合应用,提升在线监测技术在工业应用中的普适性和可靠性。

[参考文献]

- [1] 岑可法,樊建人,池作和,等. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理和计算[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1.
CEN Kefa, FAN Jianren, CHI Zuohe, et al. Principles and calculations for preventing fouling, slagging, wear and corrosion of boilers and heat exchangers[M]. Beijing: Science Press, 1994: 1.
- [2] BRYERS R W. Fireside slagging, fouling, and high temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1996, 22(1): 29-120.
- [3] 董明钢. 高钠煤对锅炉受热面结渣、沾污和腐蚀的影响及预防措施[J]. 热力发电, 2008, 37(9): 35-39.
DONG Minggang. Influence of high-sodium coal upon slagging, contamination, and corrosion on the heating surface of boilers[J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(9): 29-120.
- [4] 黄东东,张守玉,常明,等. 高钠煤灰烧结特性研究进展[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 83-94.

- HUANG Dongdong, ZHANG Shouyu, CHANG Ming, et al. Research progress on sintering characteristics of high sodium coal ash[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(1): 83-94.
- [5] 赵勇纲, 王志超, 姚皓, 等. 100%全燃准东高碱煤的600 MW 等级机组锅炉关键参数设计[J]. *热力发电*, 2020, 49(6): 111-117.
- ZHAO Yonggang, WANG Zhichao, YAO Hao, et al. Key parameters design for 600 MW unit boiler firing 100% Zhundong high alkali coal[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(6): 111-117.
- [6] JI J, CHENG L, LIU Y, et al. Direct measurement of gaseous sodium in flue gas for high alkali coal[J]. *Energy & Fuel*, 2019, 33: 4169-4176.
- [7] FATEHI H, WENG W, LI Z, et al. A. Recent development in numerical simulations and experimental studies of biomass thermochemical conversion[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35: 6940-6963.
- [8] 娄春. *工程燃烧诊断学*[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 1.
- LOU Chun. *Engineering combustion diagnostics*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 1.
- [9] 娄春, 张鲁栋, 蒲旸, 等. 基于自发辐射分析的被动式燃烧诊断技术研究进展[J]. *实验流体力学*, 2021, 35(1): 1-17.
- LOU Chun, ZHANG Ludong, PU Yang, et al. Research advances in passive techniques for combustion diagnostics based on analysis of spontaneous emission radiation[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, 35(1): 1-17.
- [10] 黄书益, 白彬, 岑新坤, 等. 燃烧过程中碱金属原位测量技术综述[J]. *热力发电*, 2022, 51(9): 11-20.
- HUANG Shuyi, BAI Bin, CEN Xinkun, et al. Review of in-situ measurement techniques of alkali metal in combustion[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(9): 11-20.
- [11] 闫慧博, 唐广通, 李路江, 等. 热辐射成像法测量大型炉膛内三维温度场的算法新进展[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(5): 97-108.
- YAN Huibo, TANG Guangtong, LI Lujiang, et al. New progress of algorithm for three-dimensional temperature field in large scale furnace measured by thermal radiative imaging[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(5): 97-108.
- [12] 周怀春, 李框宇, 安元, 等. 燃煤电站锅炉及工业窑炉三维燃烧温度分布监测研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(10): 1-14.
- ZHOU Huaichun, LI Kuangyu, AN Yuan, et al. Research progress on monitoring temperature distributions in coal-fired boilers and industrial furnaces[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(10): 1-14.
- [13] EBDON L, EVANS E H, FISHER A, et al. *An introduction to analytical atomic spectrometry*[M]. 1st ed. New York: Wiley, 1998: 1.
- [14] JONES J M, DARVELL L I, BRIDGEMAN T G, et al. An investigation of the thermal and catalytic behaviour of potassium in biomass combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 1955-1963.
- [15] MASON P E, DARVELL L I, JONES J M, et al. Observations on the release of gas-phase potassium during the combustion of single particles of biomass[J]. *Fuel*, 2016, 182: 110-117.
- [16] MASON P E, JONES J M, DARVELL L I, et al. Gas phase potassium release from a single particle of biomass during high temperature combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(2): 2207-2215.
- [17] 桂欣扬, Aymeric Alliot, 杨斌, 等. 煤粉燃烧火焰辐射光谱实验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(11): 3492-3496.
- GUI Xinyang, ALLIOT A, YANG Bin, et al. Research on radiation spectrum of pulverized coal combustion flame[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(11): 3492-3496.
- [18] 韩欣佳, 杨海梅, 许开龙, 等. 准东煤射流火焰碱金属析出在线测量研究[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(6): 1351-1356.
- HAN Yujia, YANG Haimei, XU Kailong, et al. On-line measurement of Alkali metal released from the jet flames of Zhundong coal[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(6): 1351-1356.
- [19] 郭庆华, 卫俊涛, 龚岩, 等. 多喷嘴对置式气流床气化炉内热态行为的研究进展[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 403-413.
- GUO Qinghua, WEI Juntao, GONG Yan, et al. Research progress on hot-model behavior of opposed multi-burner entrained-flow gasification[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 403-413.
- [20] HE Z, LOU C, FU J, et al. Experimental investigation on temporal release of potassium from biomass pellet combustion by flame emission spectroscopy[J]. *Fuel*, 2019, 253(1): 1378-1384.
- [21] HE X, LOU C, QIAO Y, et al. In-situ measurement of temperature and alkali metal concentration in municipal solid waste incinerators using flame emission spectroscopy[J]. *Waste Management*, 2020, 102(1): 486-491.
- [22] LOU C, PU Y, ZHAO Y, et al. An in-situ method for time-resolved sodium release behaviour during coal combustion and its application in industrial coal-fired boilers[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(3): 4199-4206.
- [23] PU Y, WANG H, LOU C, et al. An automatic spectral baseline estimation method and its application in industrial alkali-pulverized coal flames[J]. *Measurement* 2023, 214: 112804.
- [24] SUN Y, LOU C, ZHOU H. A simple judgment method of gray property of flames based on spectral analysis and the two-color method for measurements of temperatures and emissivity[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33 (1): 735-741.
- [25] LI K, YAN W, HUANG X, et al. In-situ measurement of temperature and potassium concentration during the combustion of biomass pellets based on the emission spectrum[J]. *Fuel*, 2021, 289: 119863.
- [26] DONG M, LUO F, HUANG M, et al. Study on the ignition characteristics and alkali release of single coal particles with additional different forms of potassium[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 203: 106385.
- [27] 汪淑军, 任学军, 高国栋, 等. 准东煤燃烧过程中碱金属释放光谱检测研究[J]. *热力发电*, 2021, 50(6): 141-144.
- WANG Shujun, REN Xuejun, GAO Guodong, et al. Spectroscopic investigation on temporal release of alkali metals from combustion of Zhundong coal[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(6): 141-144.
- [28] PAULASKAS R, STRIUGAS N, SADECKAS M, et al. Online determination of potassium and sodium

- release behaviour during single particle biomass combustion by FES and ICP-MS[J]. *Total Environment*, 2020, 746: 141162.
- [29] LI K, YAN W, YU L, et al. Simultaneous determination of Na concentration and temperature during Zhundong coal combustion using the radiation spectrum[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(4): 3348-3359.
- [30] LI X, HAN C, LU G, et al. Online dynamic prediction of potassium concentration in biomass fuels through flame spectroscopic analysis and recurrent neural network modelling[J]. *Fuel*, 2021, 304: 121376.
- [31] HE J, LI J, HUANG Q, et al. Release characteristics of potassium and sodium during pellet combustion of typical MSW fractions using the FES method[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 244: 112233.
- [32] HE Y, QIU K, WHIDDON R, et al. Release characteristic of different classes of sodium during combustion of Zhundong coal investigated by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(22): 1927-1934.
- [33] HE Y, WHIDDON R, LIU Y, et al. Inhibition of sodium release from zhundong coal via the addition of mineral additives: online combustion measurement with laser induced breakdown spectroscopy (LIBS)[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31.2: 1082-1090.
- [34] PARAMESWARAN T, HUGHES R, GOGOLEK P, et al. Gasification temperature measurement with flame emission spectroscopy[J]. *Fuel*, 2014, 134: 579-587.
- [35] 张向宇, 张广才, 陆续, 等. 准东煤旋风燃烧火焰光谱分析方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(16): 5643-5649. ZHANG Xiangyu, ZHANG Guangcai, LU Xu, et al. Spectral analysis method of Zhundong coal combustion flame in cyclone furnace[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(16): 5643-5649.
- [36] 徐志强, 李东阳, 刘玺璞, 等. 新疆高碱煤旋风燃烧火焰中气相碱金属的检测与分析[J]. *热能动力工程*, 2022, 37(7): 111-115. XU Zhiqiang, LI Dongyang, LIU Xipu, et al. Detection and analysis of gaseous alkali metals of Xinjiang high-alkali coal combustion flame in cyclone furnace[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(7): 111-115.
- [37] JING X H, PU Y, LI Z, et al. Experimental investigation of gaseous sodium release in slag-tapping coal-fired furnaces by spontaneous emission spectroscopy[J]. *Energies*, 2022, 15: 4165.
- [38] 蒲旸, 刘洋, 傅培舫, 等. 基于火焰光谱的准东煤旋风燃烧过程中碱金属检测[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(7): 81-87. PU Yang, LIU Yang, FU Peifang, et al. Research on alkali metal measurement during the cyclone combustion process of Zhundong coal base on flame spectrum[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(7): 81-87.
- [39] 范贤, 任学军, 高国栋, 等. 基于自发辐射分析的燃煤锅炉内温度及气相钠同时在线监测[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(增刊 2): 239-244. FAN Xian, REN Xuejun, GAO Guodong, et al. Simultaneously on-line measurement of temperature and gaseous sodium in coal-fired furnace based on spontaneous emission analysis[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(Suppl.2): 239-244.
- [40] 黄书益, 王志超, 白彬, 等. 耦合炉内气相碱金属检测的结渣预报系统研究[J]. *热力发电*, 2023, 52(7): 99-105. HUANG Shuyi, WANG Zhichao, BAI Bin, et al. Investigation of slagging prediction system in boilers coupling measurement of gaseous alkali metal in furnace[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(7): 99-105.
- [41] 郭洋洲, 白新奎, 张喜来, 等. 现役锅炉燃用高碱煤结渣沾污防控技术研究[J]. *热力发电*, 2022, 51(3): 131-140. GUO Yangzhou, BAI Xinkui, ZHANG Xilai, et al. Study on techniques for slagging prevention and ash deposition control in existing boilers burning high-alkali coal[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(3): 131-140.
- [42] HU C, GUO Q, GONG Y, et al. Alkalis atomic emission spectroscopy and flame temperature measurement of diesel impinging flames in an opposed multi-burner gasifier[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 98: 445-453.
- [43] XIE F, WU R, WEI J, et al. Analysis of the single coal particle combustion process under O₂/CO₂ atmosphere based on spectral diagnostics technology: combination of spectroscopic characteristics and flame temperature[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36: 1697-1706.
- [44] 李金云, 谢非, 宋旭东, 等. 基于光学诊断技术的单颗粒煤着火及碱金属辐射特性[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(4): 1727-1735. LI Jinyun, XIE Fei, SONG Xudong, et al. Single-particle coal ignition and alkali metal radiation characteristics based on optical diagnosis technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(4): 1727-1735.
- [45] 谢非, 李金云, 宋旭东, 等. O₂/CO₂和 O₂/N₂气氛下单颗粒煤火焰碱金属光谱辐射特性[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(8): 3100-3109. XIE Fei, LI Jinyun, SONG Xudong, et al. Alkali metal spectral radiation characteristics of single coal particle flames during the O₂/CO₂ and O₂/N₂ atmospheres[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(8): 3100-3109.
- [46] WENG W, COSTA M, LI Z, et al. Temporally and spectrally resolved images of single burning pulverized wheat straw particles[J]. *Fuel*, 2018, 224: 434-441.
- [47] WENG W, COSTA M, ALDEN M, et al. Single particle ignition and combustion of pulverized pine wood, wheat straw, rice husk and grape pomace[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 2663-2671.
- [48] 段远源, 刘东, 杨震. 锅炉过热器炉内壁面温度红外测量信号的波动特征及数据处理方法[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(8): 1-5. DUAN Yuanyuan, LIU Dong, YANG Zhen. Fluctuation characteristics and data processing method of infrared measurement signal of superheaters inner wall temperature in utility boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(8): 1-5.
- [49] 张向宇, 郑树, 周强, 等. 锅炉受热面壁温分布直接监测实验研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(1): 8-13. ZHANG Xiangyu, ZHENG Shu, ZHOU Qiang, et al. Experimental research on direct monitoring of wall temperature distribution of boiler heating surface[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 52(1): 8-13.
- [50] 王伟, 钟万里, 林介东, 等. 电站锅炉高温烟气对壁面红外测温的影响[J]. *仪表技术与传感器*, 2016(1): 87-89. WANG Wei, ZHONG Wanli, LIN Jiandong, et al. Influence of high-temperature flue gas on infrared wall temperature measurement in power plant boiler[J]. *Instrumentation and Sensors*, 2016(1): 87-89.

- WANG Wei, ZHONG Wanli, LIN Jiedong, et al. Effect of utility boiler high temperature flue gas on infrared surface temperature measurement[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(1): 87-89.
- [51] 钟万里, 王伟, 林介东, 等. 烟气覆盖表面红外温度测量的实验分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(2): 218-223.
- ZHONG Wanli, WANG Wei, LIN Jiedong, et al. Experimental analysis on infrared temperature measurement of flue gas covering surface[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(2): 218-223.
- [52] 任建新. 锅炉过热器壁面温度红外图像测量技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2017: 1.
- REN Jianxin. Study of temperature measurement system for boiler superheater wall based on the infrared imaging technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2017: 1.
- [53] 王煜伟, 张禹, 任建新, 等. 过热器管壁温度红外在线测量系统研究[J]. 锅炉技术, 2020, 51(5): 5-10.
- WANG Yuwei, ZHANG Yu, REN Jianxin, et al. Online measurement system for superheater tube wall temperature of boiler based on infrared imaging[J]. Boiler Technology, 2020, 51(5): 5-10.
- [54] 娄春, 周怀春, 吕传新, 等. 电站锅炉炉内三维温度场在线检测与分析[J]. 热能动力工程, 2005, 20(1): 61-64.
- LOU Chun, ZHOU Huaichun, LYU Chuanxin, et al. On-line detection and analysis of the three-dimensional temperature field in a utility boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2005, 20(1): 61-64.
- [55] 汪华剑. W型火焰锅炉燃烧检测与优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010: 1.
- WANG Huajian. Study on coal combustion detection and optimization of arch fired furnace[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010: 1.
- [56] 周怀春. 炉内火焰可视化检测原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 5.
- ZHOU Huaichun. Principle and technology of visual detection of flame in furnace[M]. Beijing: Science Press, 2005: 5.
- [57] 郑树, 周怀春. 三维、动态、实时数字化锅炉技术发展探讨[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(1): 20-35.
- ZHENG Shu, ZHOU Huaichun. Discussion on the development of a 3D, dynamic and real-time digital boiler[J]. Scientia Sinica Technologica, 2016, 46(1): 29-35.
- [58] 初云涛. 基于燃烧检测的电站锅炉分布参数建模与仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 1.
- CHU Yuntao. Research on distributed parameter modeling and simulation for utility boiler based on combustion monitoring[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007: 1.
- [59] 唐广通, 许焯烽, 闫慧博, 等. 基于深度学习与热辐射成像耦合的炉内温度场在线测量[J]. 动力工程学报, 2022, 42(10): 960-966.
- TANG Guangtong, XU Yefeng, YAN Huibo, et al. Research of on-line measurement of temperature field in furnaces based on deep learning coupled thermal radiative imaging[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(10): 960-966.

(责任编辑 杨嘉蕾)