DOI:10.19666/j.rlfd.202605059

基于气相钾检测的耦合燃烧受热面沾污特性试验研究

赖景暖[1]，陈端[4]，王晓晖[1]，廖伟辉[1]，王首仁[4]，毕树茂[4]，
张秀昌[2,3]，文斌[2,3]，刘一[2,3]，姚斌[4]
（1. 广东红海湾发电有限公司，广东 汕尾 516000；
2. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司，四川 自贡 643001；
3. 能源清洁低碳热转化利用技术与装备四川省重点实验室，四川 成都 611731
4. 华中科技大学能源与动力工程学院，湖北 武汉 430074）

［摘 要］【目的】生物质与煤炭耦合燃烧是燃煤电厂低碳转型的关键技术，但其含有碱金属引发的受热面沾污问题严重制约了其大规模应用。传统离线评估方法存在明显滞后性，无法满足工业现场实时监测与精准防控的实际需求。因此，实现煤与生物质混合燃料燃烧时受热面沾污特性的动态评估及预测非常重要。【方法】在5 MW试验炉上开展相关试验研究。通过光学检测设备实时采集火焰温度、气相钾质量浓度等数据，用于对煤与生物质耦合燃烧受热面沾污趋势的动态评估。同时，结合表征炉内沾污管沾污程度的热有效系数变化及观测的沾污管表面沾污状态实际观测情况，对评估结果进行验证。【结果】试验结果表明：炉膛出口氧体积分数每增加1百分点，火焰温度与气相钾质量浓度分别升高约22.5 ℃和2.0 mg/m³；玉米秸秆掺混比例从0增至100%时，气相钾质量浓度最高达15.71 mg/m³，热有效系数从0.9降至0.5左右，沾污管表面沾污程度显著加剧。进一步分析发现，气相钾质量浓度增加幅度与热有效系数衰减幅度呈显著相关关系。【结论】本研究建立的基于火焰温度与气相钾质量浓度的受热面沾污动态评估方法具有良好的有效性，所得试验数据与规律可为高碱燃料燃烧过程中的受热面沾污防控技术开发与运行优化提供重要的理论依据和数据支撑。该方法可有效克服传统离线评估方法的滞后性缺陷，在工业锅炉沾污在线监测领域具有广阔的应用前景。

［关 键 词］生物质耦合燃烧；火焰自发射光谱法；沾污特性；在线检测；气相钾

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电，年，卷(期)：起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation，年，卷(期)：起始页码-终止页码.

Experimental study on fouling characteristics of coupled combustion heating surfaces based on gaseous potassium detection

Lai Jingnuan[1], Chen Duan[4], Wang Xiaohui[1], Liao Weihui[1], Wang Shouren[4], Bi Shumao[4], Zhang Xiuchang[2,3], Wen Bin[2,3], Liu Yi[2,3], Yao Bin[4]
(1. Guangdong Honghaiwan Power Generation Co., Ltd., Shanwei 516000, China; 2. Dongfang Electric Corporation Dongfang Boiler Co., Ltd., Zigong 643001, China;
3. Energy Cleaning and Low-Carbon Thermal Conversion Utilization Technology and Equipment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611731, China;
4. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: [Objective] Co-firing of biomass and coal is a pivotal technology for the low-carbon transformation of coal-fired power plants, as biomass is a carbon-neutral renewable energy source with abundant reserves that can

收 稿 日 期：2026-05-18 修 回 日 期：2026-07-02 接 受 日 期：2026-07-07 网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：国家重点研发计划项目（2022YFB4202000）
Supported by：National Key Research and Development Program (2022YFB4202000)
第一作者简介：赖景暖（1983），男，高级工程师，主要从事火力发电厂生产技术管理工作，18998696380@189.com。

effectively reduce carbon emissions from power generation. However, biomass fuels generally contain high concentrations of alkali metal elements, especially potassium. During combustion, these alkali metals are released into the gas phase in large quantities, condense, deposit and sinter on the surface of boiler convection heating surfaces, causing severe fouling and slagging problems. This reduces the heat transfer efficiency of heating surfaces, increases boiler exhaust heat loss and power generation coal consumption. The traditional offline evaluation method of heating surface scaling has a large lag and cannot meet the actual requirements of real-time monitoring and precise prevention and control of industrial sites. Therefore, it is importance to realize the dynamic evaluation and prediction of the fouling characteristics of heating surfaces during the combustion of coal and biomass blended fuels. [Methods] In this study, the designed relevant experimental tests were carried out on a 5MW pilot furnace. Optical detection equipment was used to collect real-time data, including flame temperature and gaseous potassium concentration. They were applied to dynamically evaluate the fouling trend of heating surfaces during coal-biomass coupled combustion. the evaluation results were verified by combining the changes in the heat effectiveness coefficient and the actual observed fouling status on the surface of the fouling tubes. [Results] The experimental results showed that for every 1% increase in the furnace outlet oxygen concentration, the flame temperature and gaseous potassium concentration increased by approximately 22.5℃ and 2.0 mg/m³. When the blending ratio of corn stover increased from 0% to 100%, the gaseous potassium concentration reached a maximum of 15.71 mg/m³, respectively. The heat transfer effectiveness coefficient decreased from 0.9 to around 0.5, and the surface fouling degree of the fouled tube significantly intensified. There is a significant correlation between the increase amplitude of gaseous potassium concentration and the attenuation amplitude of the heat effectiveness coefficient. [Conclusion] The established dynamic fouling assessment method based on in-situ measurements of flame temperature and gaseous potassium presents favorable prediction accuracy. The obtained experimental findings can provide fundamental theoretical guidance and database for developing anti-fouling technologies and optimizing operational parameters for high alkali fuel combustion. Eliminating the inherent delay of traditional off-line detection techniques, this method possesses promising application prospects for on-line fouling monitoring of industrial boilers.

Key words: biomass coupled combustion; flame spontaneous emission spectroscopy; fouling characteristics; online detection; gaseous potassium

随着“双碳”政策的提出，我国近年来一直致力于推进能源结构的转型升级[1]。生物质能作为一种重要的清洁可再生能源，因其可再生性、生态友好性及低碳排放特征，在能源转型中展现出独特优势。相较于化石燃料，生物质能利用过程中产生的CO_2可通过植物光合作用重新固定，实现近零碳排放循环，因此被公认为替代化石燃料的核心技术路径之一[2-3]。在此背景下，越来越多的国内电站锅炉采用煤与生物质耦合燃烧的发电策略[4]。然而，生物质燃料普遍含有碱金属钾，其在燃烧时蒸发成气相，并与烟气中存在的二氧化硫反应，形成硫酸盐的粘性涂层。该粘性涂层会促进飞灰颗粒团聚，进而粘附在锅炉受热面表面，最终导致严重的沾污与结渣问题。因此，建立精准的炉膛受热面沾污结渣监测与预测体系则是指导锅炉运行人员采取措施有效控制高碱燃料燃烧过程中产生的灰渣沉积问题的关键因素。

传统的沾污结渣预测方法主要依托离线燃料结渣特性判别指标，主要包括软化温度、碱酸比、硅铝比、铁钙比等[5]。此类方法虽具有简便性优势，但存在指标体系单一、关联维度不足的缺陷[6]。梁波等人[7]发现传统的燃煤锅炉结渣评价指标不完全适用于煤和生物质的混燃锅炉，通过燃料中的灰成分、灰熔融特性和灰黏度 3 个方面综合评价锅炉受热面结渣特性。锅炉实际运行工况复杂多变，负荷波动、掺烧比例调整等动态变化会显著影响受热面沾污结渣过程，传统离线方法无法实时响应这种动态特性。Mohanty 等人[8]使用局部线性小波神经网络模型来预测管壳式换热器在结渣条件下的性能，并将清洁因子作为模型的一个重要输出参数，用于评估该模型预测换热器结渣情况的准确性。Kumari 等人[9]通过非线性自回归外生输入模型来实时监测再热器的清洁因子，并确定吹灰启动的清洁因子临界值，同时提出一个线性函数来近似吹灰持续时间与清洁因子之间的关系。王斌[10]将热有效系数界定为受热面吸热量与辐射到炉壁热量的比值计算式，该参数可表征炉膛受热面的传热效能，同时将其确立为炉膛灰污沉积的量化指标，进而构建了以运行成本最小化为目标的吹灰优化模型。耿欣和林中达[11]阐释了灰污热阻的机理，通过关联灰污热阻与沉积时长，推导了各负荷工况对应的最优吹灰间隔及临界清洁阈值。张翔[12]融合了热力学平衡方程与管

壁多层传热理论，构建对流受热面灰污动态监测机理模型，实现沾污状态的实时追踪。现行监测技术主要通过整合清洁因子、热有效系数和灰污热阻等参数构建动态模型，以提高对锅炉受热面沾污结渣的实时监测能力。但此类方法均基于受热面传热效率的变化进行反向推导，当检测到换热能力下降时，沾污结渣过程已进入沉积层快速增长阶段，导致吹灰调控存在显著的响应滞后，无法实现对灰污结渣生成过程的超前预警。煤与生物质混燃锅炉结渣问题最主要的诱因就是燃烧中碱金属的挥发[7]。因此在线监测气相碱金属浓度可以更有效反映由于碱金属挥发而诱发的沾污结渣情况。

近年来，光学检测技术在燃烧过程在线监测领域的应用日益广泛，目前主流技术主要分为两类：基于火焰自发辐射特性分析的被动检测法和基于激光主动探测的光谱分析法[13]。然而，基于激光主动探测的光谱分析在进行测量时易受到外界环境影响导致激光能量波动，难以实现在线监测。以火焰自发射光谱法（FES）为主的被动式光谱检测技术可应对高温、多尘的工业场景[14]。FES 可实现火焰中气相碱金属的原位在线检测，且具有设备结构简单、维护成本低的优势，更适合在工业锅炉炉膛中开展长期在线监测[15-17]。Lou 等人[18]开发了一种原位 FES 方法，成功区分了煤不同燃烧阶段的 Na 排放特征。Pu 等人[19]将 FES 用于同时在线测量火焰温度、发射率、热辐射和气态碱金属浓度，随后采用成像和 FES 技术相结合的方法，研究了添加高岭土对两种准东煤燃烧行为的影响。现有研究表明，生物质与煤粉耦合掺混燃烧利用可以改善燃烧性[20-22]。

本研究在 5 MW 试验炉上开展了炉膛出口氧体积分数和燃料掺烧配比调节试验，通过光学检测设备实时获取火焰温度，气相钾质量浓度数据，用于对煤与生物质混合燃料受热面沾污趋势的动态评估，并结合表征炉内沾污管沾污程度的热有效系数变化及观测的沾污管表面沾污状态实际观测情况，对评估结果进行验证。

1 试验装置及原理

1.1 试验对象及工况

5 MW 试验炉如图 1 所示的 L 型炉膛结构，由燃料输送系统、水平单燃烧器燃烧段、竖直切圆燃烧段、烟气降温段、一体化超低排放环保岛（脱硝、脱硫、除尘等）等模块组成。

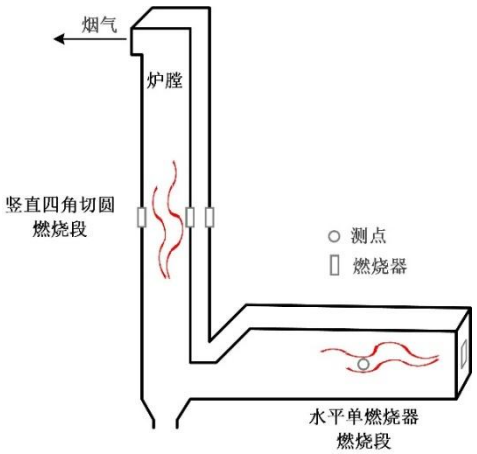


图 1 5 MW 试验炉示意

Fig.1 Schematic diagram of the 5 MW test furnace

试验炉采用中间储仓式制粉系统，粉仓分别储存有煤粉和研磨好的生物质粉，由钢球筒式磨煤机将煤粉和生物质分别通过有制氮机所制氮气来送入煤粉仓和生物质仓。再通过各粉仓相对应的圆盘给料机将煤粉和生物质粉送至指定的煤粉管道中进行混合，并送入到燃烧器中进行共燃。煤粉和生物质的比例可根据需要进行灵活调配，可实现生物质与煤 0~100%燃料切换。点火系统采用天然气点火，利用天然气燃烧对炉膛进行预热，当炉膛温度达到燃料着火燃烧温度后，投运燃料输送装置，借助一次送风气流将煤与生物质燃料粉末送至炉内进行热转化过程，所需的二次风及燃尽风均由二次风机提供，其经回转式空预器，各支路风管送入炉膛参与燃烧。

为了对受热面沾污结渣情况进行评估，在竖直烟道相同高度布置如图 2 所示的两根沾污管。

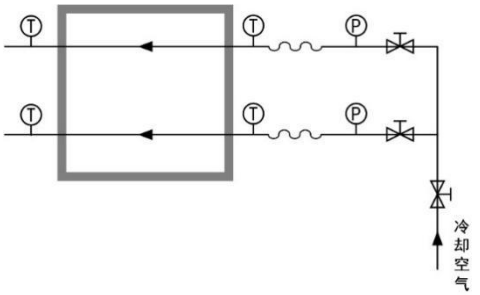


图 2 沾污管及管路示意

Fig.2 Schematic diagram of the fouled tubes and piping

沾污管进口通有冷却空气，与掠过管道的烟气进行充分换热，加速烟气中的熔融飞灰颗粒冷凝在

沾污管壁上，并在出口排出热空气。沾污管进出口和同一高度烟道内安装 K 型热电偶以对进出口空气温度及烟气温度进行测量，并利用数据采集系统来对温度进行不间断接收。

可按式(1)计算空气通过沾污管时的吸热量 Q：

$$Q = C \times M \times (T_{out} - T_{in}) \tag{1}$$

式中：T_{in} 为沾污管进口空气温度，℃；T_{out} 为沾污管出口空气温度，℃；C 为空气平均比热容，J/(kg·K)；M 为空气流量，kg/s。进而可以由式(2)计算传热系数 H：

$$H = Q \Big/ (A \times (T_{g1} + T_{g2}) / 2 - (T_{in} + T_{out}) \tag{2}$$

式中：T_{g1}、T_{g2} 分别为换热前与换热后烟气温度，℃；A 为沾污管换热面积，m²。由于单管换热量较少，T_{g1} 和 T_{g2} 可认为近似相等，以此可将上式简化为：

$$H = Q \Big/ (A \times (T_g - (T_{in} + T_{out}) / 2) \tag{3}$$

式中：T_g 为 K 型热电偶检测得到竖直烟道沾污管高度处的烟气温度，℃；从而可以根据式(4)计算热有效系数 φ：

$$\varphi = \frac{H}{H_0} \tag{4}$$

式中，H_0 为沾污管清洁时的传热系数，W/(m²·K)。以开始采集的前 5 分钟数据平均值作为沾污管清洁时传热系数的数据，后续数据为沾污后数据，可在试验时得到热有效系数连续变化曲线以判断受热面沾污结渣情况，从而为受热面沾污特性指数的预测结果提供数据验证依据。

本研究在试验炉上试验包括两种工况，第一组工况如表 1 所示，在维持固定掺烧热量比为 85%烟煤+15%玉米秸秆的条件下，中控系统通过调节二次风量和燃尽风量来改变炉膛出口氧体积分数，实时监测燃烧过程中的火焰温度波动特征、气相钾释放规律以及受热面沾污结渣情况。

表 1 不同炉膛出口氧体积分数试验工况参数设置
Tab.1 Parameter settings of test conditions with different furnace outlet oxygen concentrations

运行参数	参数设置
负荷/MW	4
给煤量/(kg·h⁻¹)	500
给生物质量/(kg·h⁻¹)	169
炉膛出口氧体积分数/%	2/3/4
一次风量/(kg·h⁻¹)	865
总风量/(kg·h⁻¹)	2 761/2 891/3 132

第二组工况如表 2 所示，通过实时监测试验相关数据，研究两种燃料不同掺混比例耦合燃烧时的试验炉受热面沾污特性变化。

表 2 不同燃料掺烧配比试验工况参数设置
Tab.2 Parameter Settings of Test Conditions with Different Fuel Blending Ratios

运行参数	参数设置
负荷/MW	4
给煤量/(kg·h⁻¹)	597/500/417/293/0
给生物质量/(kg·h⁻¹)	0/169/327/545/929
玉米秸秆掺烧配比/%	0/15/30/50/100
炉膛出口氧体积分数/%	3
一次风量/(kg·h⁻¹)	865

1.2 沾污特性在线检测方法

气相碱金属和温度检测方法依据《高碱燃料燃烧中气相钠和钾量的在线测定发射光谱法(T/CEC 873—2024)》，考虑生物质中含有大量的钾元素，故主要检测气相钾质量浓度，其原理如下：

根据光谱检测设备的波长范围及光谱分辨率，选择距离钾的第一共振线特征谱线最接近、强度最高的谱线为测量的钾特征谱线，其谱线波长记为 λ_K，钾的特征谱线辐射强度按式(5)计算。

$$I_K = I(\lambda_K) - I_C(\lambda_K) \tag{5}$$

式中：I_K 为气相钾特征谱线的辐射强度，W/(m³·sr)；$I(\lambda_K)$为未扣除基线辐射强度测量到气相钾的辐射强度，W/(m³·sr)；$I_C(\lambda_K)$为气相钾的基线辐射强度，W/(m³·sr)。

火焰温度使用多波长法计算，如式(6)所示：

$$T = -C_2 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda + \Delta\lambda} \right) / \ln \left(\frac{I_C(\lambda)}{I_C(\lambda + \Delta\lambda)} \frac{\lambda^5}{(\lambda + \Delta\lambda)^5} \right) \tag{6}$$

式中：T 为测量的火焰温度，K；C_2 为普朗克第二常数，值为 1.438 8×10⁻¹⁶，单位为 W/m²；λ 为波长（不包括 λ_K），nm；$\Delta\lambda$ 为波长的增加量，nm。

气相钾质量浓度通过式(7)可得：

$$C_K = I_K / A_K I_b(\lambda_K, T) \tag{7}$$

式中：C_K 为测得的气相钾质量浓度，mg/m³；I_K 为气相钾特征谱线的辐射强度，W/(m³·sr)；A_K 为钾标定系数，通过标定实验可以获得；$I_b(\lambda_K, T)$为在钾特

征谱线与式(6)得到的火焰温度下的黑体辐射强度，可根据普朗克定律计算，W/(m^3·sr)。

基于气相钾检测的光学设备组成主要由准直透镜、光纤、可见光光谱仪组成，通过准直透镜采集火焰光信号，再通过光纤将光信号传输到光谱仪中，由光谱仪进行接收处理，将光信号转换为电信号。

考虑到燃烧时火焰稳定性与信号采集可靠性，试验选定水平燃烧段中心区域作为测点，为保证测点处燃烧剧烈充分，可观察到明亮火焰以确保光谱探头采集到准确的火焰辐射信号，该区域燃烧反应充分，火焰辐射强度稳定，火焰温度可达到 1300 ℃，确保光学检测设备能对燃烧火焰进行准确监测。将光学检测设备安装在测点位置，现场试验装置布置如图 3 所示。

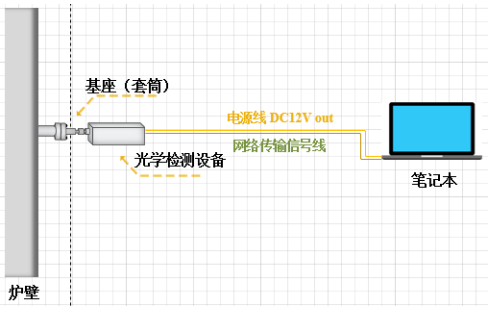


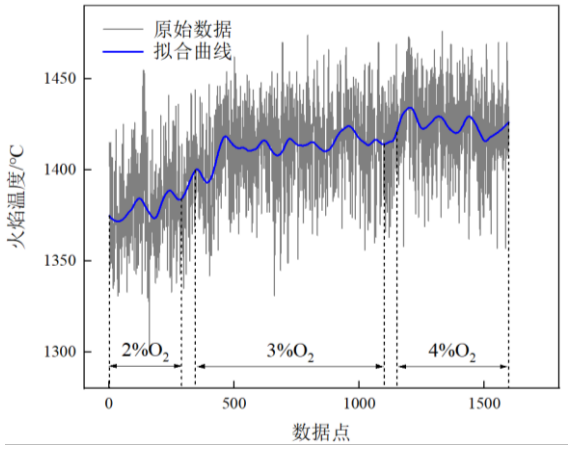
图 3 光学检测设备现场布置图

Fig.3 Field layout diagram of optical detection device

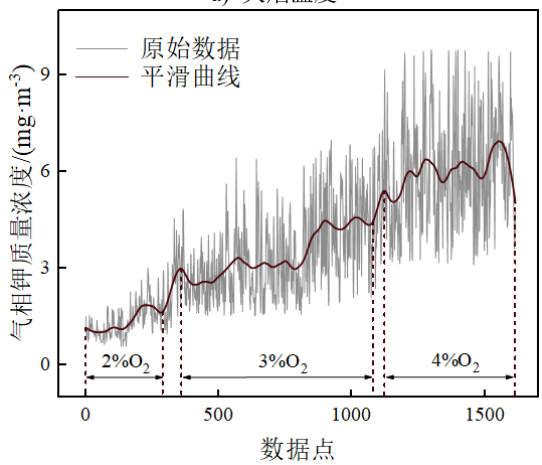
2 试验检测结果及分析

2.1 不同氧体积分数条件下碱金属检测结果及分析

生物质中钾元素主要以有机钾、水溶性无机钾和难溶性硅铝酸盐结合钾 3 种形态赋存，不同形态钾的释放具有显著的温度窗口特征：有机钾主要在300~600℃的热解阶段快速分解释放；水溶性无机钾的挥发温度窗口为 800~1 200 ℃，当温度超过 1 200 ℃时，KCl 释放速率急剧加快；而硅铝酸盐结合钾在 1 400 ℃以下化学性质稳定，难以向气相迁移。在大于 1 000 ℃时，水溶性无机钾在 0.5 s 高温区间内持续大量挥发。在调节炉膛出口氧体积分数试验进行期间，光学检测设备以 5 s 为采样间隔连续记录燃烧火焰相关数据，并持续检测直至试验阶段结束。为了避免工况交替以及燃料燃烧释放碱金属没到达测点产生的影响，各工况之间间隔 250 s。此外，每个工况温度窗口至少保持 1 500 s，及至少采集 300 个数据点。对离散试验数据进行处理后，得到如图 4 所示的试验结果。测点处温度稳定在 1 300~1 450 ℃，恰好处于 KCl 大量挥发的温度窗口上限区间。水溶性无机钾在快速持续大量挥发。从图中可以看出，火焰温度与气相钾质量浓度监测结果在试验期间呈现波动特征。对数据进行平滑，发现在 2% O_2 的低氧条件下，两者数值均处于较低水平。当炉膛出口氧体积分数提升时，监测数据呈现同步明显增长趋势。结合表 3 的对比数据分析可得，炉膛出口氧体积分数每增加 1 百分点，平均火焰温度对应升高约 22.5 ℃，平均气相钾质量浓度上升约 2.0 mg/m^3，两者与氧气供给水平呈现显著的正向关联。这种正向关联性是由于在氧体积分数增加时，燃烧区域内氧气扩散速率加快，促进了混合燃料的完全燃烧，燃烧过程强化，释放更多热量，致使火焰温度显著上升。同时，生物质中赋存的钾元素在高温富氧条件下易以 KCl 或 KOH 形式挥发，温度的提升加速了其热解与气化过程，导致气相钾质量浓度升高。这种趋势与 Yang 等人[23]在 5MW 试验中氧气能促进碱金属释放的结论具有良好的一致性，证明了本节的推断。



a) 火焰温度



b) 气相钾质量浓度

图 4 检测结果随时间变化

Fig.4 Changes of detection results with time

在试验期间，通过调节炉膛出口氧体积分数，可获得在不同氧体积分数条件下的平均火焰温度和平均气相钾质量浓度如表 3 所示。

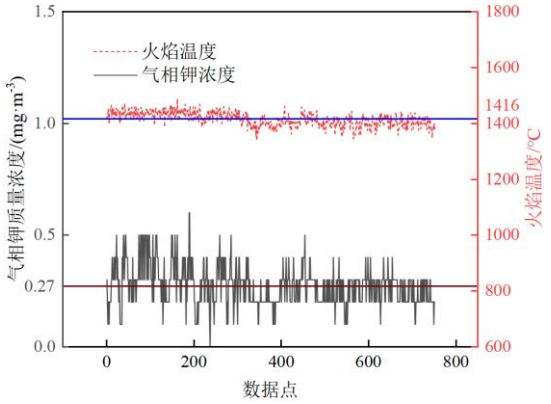
表 3 不同炉膛出口氧体积分数条件数据结果

Tab.3 Data results with different oxygen volume fractions at the furnace outlet

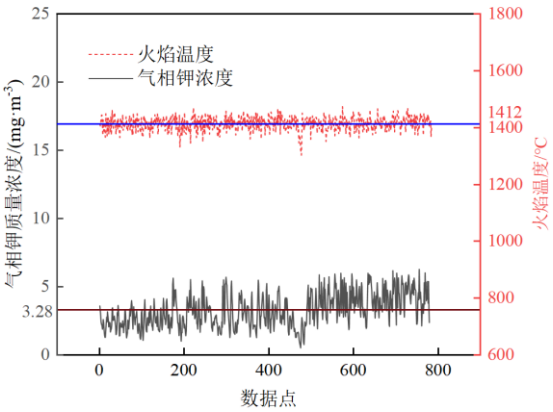
工况	平均火焰温度/℃	平均气相钾质量浓度/(mg·m^{-3})
2%O_2	1379	1.36
3%O_2	1412	3.42
4%O_2	1424	5.37

2.2 不同燃料掺混比例下碱金属检测结果及分析

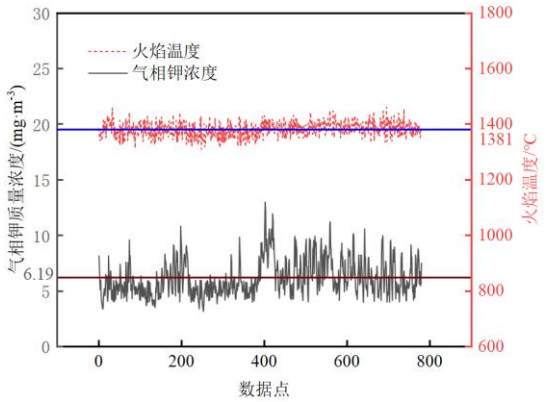
光学检测设备在掺烧不同比例玉米秸秆试验期间的检测结果如图 5 所示。



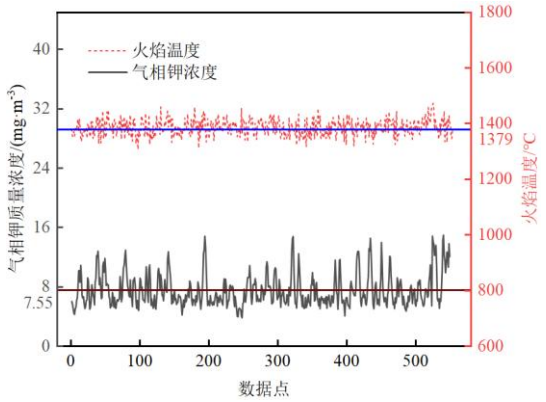
a) 烟煤



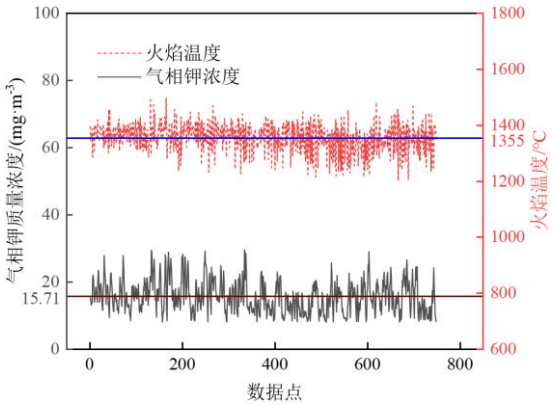
b) 掺烧 15%玉米秸秆



c) 掺烧 30%玉米秸秆



d) 掺烧 50%玉米秸秆



e) 纯烧玉米秸秆

图 5 不同掺烧比例下的检测结果

Fig.5 Detection results at different blending ratios

从图 5 中可以看出，在纯烧烟煤工况下，由于煤质中钾元素含量较低，同时挥发分释放量较少而硅铝成分占比较高，烟煤中大部分的钾元素与硅铝矿物反应形成稳定的硅铝酸盐，导致其难以向燃烧气氛中迁移，所以系统未检出明显气相钾组分，随着玉米秸秆掺混比例从 0 提升至 100%，气相钾释放浓度呈现显著增长趋势，尤其在生物质全比例燃烧时，其平均浓度值达到了 15.71 mg/m^3，是纯烧烟

煤工况下的 58 倍。由于烟煤具有更高的热值和固定比例，在燃烧过程中释放的总热量更多且燃烧持续时间更长，这使得纯烧烟煤时炉内监测点处的平均火焰温度最高，随着燃料中玉米秸秆比例逐步增加，平均火焰温度明显降低，玉米秸秆占比达到100%时，平均火焰温度下降至 1 355 ℃，最低温度甚至只有 1 202 ℃。这一研究结果与 Pu 等人[24]在实验室中生物质与煤耦合燃烧研究结果具有良好的一致性，验证了本文中试试验的延伸性。

2.3 不同燃烧掺混比例下沾污特性结果分析

图 6 的试验数据表明，当玉米秸秆在混合燃料中的占比从 0 提升至 100%，其随玉米秸秆掺混比例增加呈现同步上升趋势，说明玉米秸秆掺烧占比越大，燃料沾污倾向越强，受热面沾污特性越强，热有效系数检测结果发现，纯烧烟煤与掺烧 15%玉米秸秆工况的热有效系数始终维持在 0.9 以上，表明受热面污染轻微，而当掺烧比例提高到 50%时，热有效系数下降至 0.7 左右，在纯烧玉米秸秆时更降至 0.5，且系数变化曲线并未趋于平缓，预示仍存在进一步沾污结渣风险，说明纯烧玉米秸秆工况下的沾污积灰程度严重。

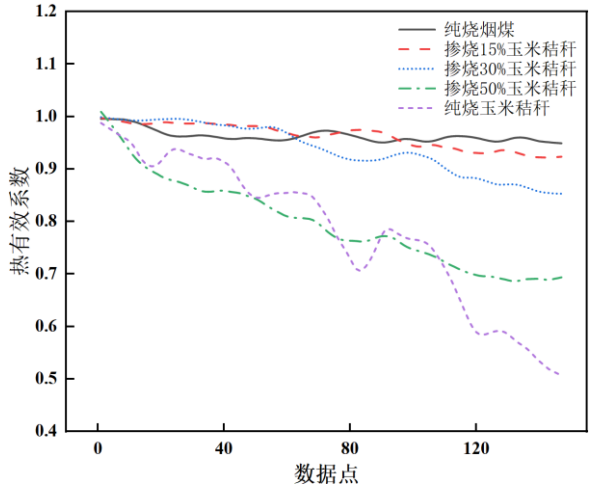
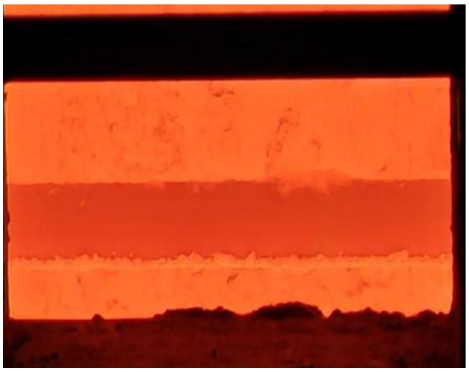


图 6 不同掺混比例下热有效系数检测结果
Fig.6 Detection results of heat effectiveness coefficient under different blending ratios

图 7 为在掺混 15%玉米秸秆燃料与纯秸秆燃料燃烧工况的末期阶段，通过观火孔观测到的沾污管段沾污结渣特征。



a) 掺烧 15%玉米秸秆



b) 纯烧玉米秸秆

图 7 不同工况下管道沾污样貌
Fig.7 Fouling appearance of pipes under different working conditions

从图 7 可以看出，掺烧 15%掺混工况下管壁沾污程度较轻，仅在沾污管下表面形成薄层沉积物。这种现象源于烟道内上升气流的动力学特征，下表面因承受较高流速烟气的直接冲击，促使部分熔融态飞灰颗粒更易在该区域附着。同时该沉积层表面平整且未呈现显著粘结特性，其他区域管壁保持洁净，表明此工况下受热面沾污特性较弱。而在纯烧玉米秸秆工况中，沾污管下表面沉积层厚度显著增加，各区域沉积物相互联结形成连续覆盖层。该现象揭示初始沉积层具有较强粘附特性，能够持续吸附飞灰颗粒并扩展覆盖范围，说明此工况下存在明显的受热面沾污风险，受热面沾污特性显著。通过对观察结果进行分析，证实热有效系数能够有效表征受热面沾污程度。

3 结论

将进行过热辐射和碱金属浓度标定的光学检测设备应用到 5 MW 试验炉中，结合气相钾质量浓度探究了炉膛出口氧体积分数与燃料掺烧比例对燃料燃烧特性参数和受热面沾污结渣的影响。具体

结论如下：

1）当炉膛出口氧体积分数从 2%增加到 4%时，燃烧区域内氧气扩散速率加快，促进了混合燃料燃烧愈发完全，燃烧过程强化，释放更多热量并促进燃料中的钾元素向燃烧环境中迁移，致使燃烧过程中的火焰温度和气相钾质量浓度升高。结果表明，炉膛出口氧体积分数每增加 1 百分点，火焰温度与气相钾质量浓度分别升高约 22.5 ℃和 2.0 mg/m^3。

2）当玉米秸秆掺混比例从 0%增至 100%时，气相钾质量浓度升至 15.71 mg/m^3，沾污管沾污程度明显加剧，热有效系数由 0.9 显著降至 0.5 左右，气相钾质量浓度增加幅度与热有效系数衰减幅度呈显著相关关系。

本研究建立的基于火焰温度与气相钾质量浓度的受热面沾污动态评估方法具有良好的有效性，所得试验数据与规律可为高碱燃料燃烧过程中的受热面沾污防控技术开发与运行优化提供重要的理论依据和数据支撑。

[参 考 文 献]

[1] 金红光, 郭烈锦, 宣益民, 等. "双碳"目标下能源转化与利用科学问题[J]. 中国科学基金, 2025, 39(3): 474.
Jin H G, Guo L J, Xuan Y M, et al. The energy conversion and utilization of scientific problems for achieving "dual carbon" goal[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(3): 474.

[2] 汪靖良, 方庆艳, Yin C G, 等. 燃煤机组耦合生物质直燃发电研究进展: 非球形生物质大颗粒气固两相动力学模型[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(9): 14.
Wang J L, Fang Q Y, Yin C G, et al. Research progress on direct-fired biomass power generation in coal-fired units: gas-solid two-phase dynamic model for large non-spherical biomass particles[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(9): 14.

[3] 王光磊, 孙立刚, 赵传进, 等. 燃煤机组直燃耦合与气化耦合发电研究进展[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(1): 17.
Wang G L, Sun L G, Zhao C J, et al. Research advancements in co-firing of coal powder and biomass[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(1): 17.

[4] 郭慧娜, 吴玉新, 王学斌, 等. 燃煤机组耦合农林生物质发电技术现状及展望[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 12.
Guo H N, Wu Y X, Wang X B, et al. Current status of power generation technology of the agriculture and forest biomass co-firing in coal-fired power plants[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 12.

[5] 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与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
Cen K F, FAN J R, CHI Z H, et al. Principles and calculation for prevention of ash deposition, slagging, wear and corrosion in boilers and heat exchangers[M]. Beijing: Science Press, 1994.

[6] Smith A M, Ekpo U, Ross A B. The influence of pH on the combustion properties of bio-coal following hydrothermal treatment of swine manure[J]. Energies, 2020, 13(2): 331.

[7] 梁波, 王永征, 梁艳杰, 等. 煤与生物质混燃锅炉结渣评价指标分析[J]. 热力发电, 2025, 54(4): 51.
Liang B, Wang Y Z, Liang Y J, et al. Analysis on evaluation indicators of slagging in boilers co-firing coal with biomass[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(4): 51.

[8] Mohanty D K, Singru P M. Fouling analysis of a shell and tube heat exchanger using local linear wavelet neural network[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77: 946.

[9] Anitha Kumari S, Srinivasan S. Ash fouling monitoring and soot-blow optimization for reheater in thermal power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 149: 62.

[10] 王斌. 燃煤锅炉灰污监测及吹灰优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
Wang B. Study on fouling monitoring and sootblowing optimization for coal-fired boilers[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.

[11] 耿欣, 林中达. 锅炉灰污在线监测及吹灰优化预测模型的研究[J]. 发电设备, 2011, 25(2): 91.
Geng X, Lin Z D. On-line monitoring of ash fouling in boiler and predictive model for the soot-blowing optimization[J]. Power Equipment, 2011, 25(2): 91.

[12] 张翔. 锅炉受热面积灰监测及吹灰模糊控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
Zhang X. Research on ash fouling monitoring and Soot blowing fuzzy control of boiler heating surfaces[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

[13] He Z L, Lou C, Fu J T, et al. Experimental investigation on temporal release of potassium from biomass pellet combustion by flame emission spectroscopy[J]. Fuel, 2019, 253: 1378.

[14] He X H, 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: 486.

[15] 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.
Lou C, Zhang L D, Pu Y, 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.

[16] 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.
Chen Z, Huang H H, Fu Y Q, 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.

[17] 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.
Huang S Y, Bai B, Cen X K, et al. Review of in-situ measurement techniques of alkali metals in combustion[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 11.

[18] Lou C, Pu Y, Zhao Y G, 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.
[19] Pu Y, Wang H F, Guo L, et al. Effect of kaolin addition on combustion behavior of Zhundong coal pellet using flame emission spectroscopy[J]. Combustion Science and Technology, 2025, 197(8): 1809.
[20] 周巍, 王浩帆, 熊晟熙, 等. 煤与生物质耦合燃烧的协同效应[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(2): 279.
Zhou W, Wang H F, Xiong S X, et al. Synergistic effects of co-combustion of coal and biomass[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(2): 279.
[21] 刘光鹏, 曾洁, 冉燊铭, 等. 煤粉锅炉大比例直燃耦合生物质的影响研究及工程应用[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(增刊 2): 237.
Liu G P, Zeng J, Ran S M, et al. Research and engineering application on the influence of large-scale direct coupled biomass in pulverized coal boiler[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(S2): 237.
[22] Lu G, Yan Y, Cornwell S, et al. Impact of co-firing coal and biomass on flame characteristics and stability[J]. Fuel, 2008, 87(7): 1133.
[23] Yang Z H, Lou C, Bi S M, et al. Experimental investigation on recycled flue gas inhibiting Na release in coal combustion[J]. Fuel Processing Technology, 2026, 289: 108489.
[24] Pu Y, Wang H F, Wang X H, et al. Experimental study of the influence of synergistic effects on the co-firing characteristics of biomass and coal[J]. Journal of the Energy Institute, 2024, 115: 101687.

（责任编辑　李园）