DOI：10.19666/j.rlfd.202605009

煤与生物质耦合燃烧过程中钾的释放特性实验研究

丹慧杰[1]，王志超[1]，李昭兴[1]，张向宇[1]，陈端[2]，姚斌[2]

（1. 西安热工研究院有限公司，陕西 西安 710054；
2. 华中科技大学能源与动力工程学院，湖北 武汉 430074）

［摘　　要］【目的】生物质大比例与煤掺混燃烧有助于减少温室气体排放，但燃烧中释放的气相钾会引起积灰结渣等问题。因此，在线检测燃烧过程中释放的气相钾浓度非常重要。【方法】本文搭建了单颗粒燃料燃烧实验台，基于发射光谱技术开展了煤与生物质不同掺混比例的单颗粒燃烧实验，实现燃烧火焰温度、气相碱金属浓度及热辐射能等参数的同步检测，进一步探究了混合燃料的气相钾释放特性。实验中以 0.5 mg 烟煤热量为基准，通过热量配比法混合烟煤与玉米秸秆，并通过油压式液压机在 13 MPa 压力下将混合燃料压制成结构稳定的单颗粒，将单颗粒放置在搭建的专属燃烧实验平台上进行燃烧实验。【结果】实验结果表明，通过气相碱金属浓度及热辐射能变化特征可整体判断出脱挥发分、固定碳燃烧及灰分三个主要燃烧阶段。随着生物质掺混比例从 0%增至 100%，气相钾峰值浓度由 2.59 mg/m^3 显著提升至 16.8 mg/m^3，与挥发分热解持续时间呈相同变化趋势，而固定碳燃烧时间则缩短约 330 s，火焰平均温度下降 237 K，热辐射能下降 31.2%。【结论】生物质掺混燃烧对气相钾的释放具有显著的促进作用，同时会显著改变燃料的整体燃烧特性，包括缩短固定碳燃烧时间、降低火焰温度和热辐射强度。本研究结果可为生物质与煤掺烧锅炉的优化设计、运行参数调整及碱金属相关问题的防控提供重要的实验依据和理论支撑。

［关　键　词］生物质；耦合燃烧；气相钾；温度；释放特性

［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 of potassium release characteristics in co-combustion of coal and biomass

Dan Huijie[1], Wang Zhichao[1], Li Zhaoxing[1], Zhang Xiangyu[1], Chen Duan[2], Yao Bin[2]
(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: [Objective] High-ratio co-combustion of biomass with coal is an effective strategy for reducing greenhouse gas emissions. However, the release of gas-phase potassium during this process frequently induces operational issues such as ash deposition and slagging. These issues not only drastically reduce heat transfer efficiency and increase maintenance costs but also may lead to unscheduled boiler shutdowns and safety hazards. Therefore, it is of paramount engineering importance to develop reliable online detection methods for gas-phase potassium concentration and systematically investigate the potassium release characteristics and combustion behaviors of biomass-coal blended fuels under different mixing ratios. [Methods] In this study, a single-particle combustion experimental setup was established to investigate coal and biomass blends at various ratios using emission spectroscopy. This system achieved the simultaneous detection of flame temperature, gas-phase alkali metal concentration, and thermal radiation energy, thereby facilitating an in-depth analysis of the gas-phase

收 稿 日 期：2026-05-06　修 回 日 期：2026-06-30　接 受 日 期：2026-06-30　网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：支撑能源转型的煤炭清洁高效利用国家科技重大专项（2025ZD1701100，2025ZD1701102）
Supported by：National Science and Technology Major Project for Clean and Efficient Utilization of Coal to Support Energy Transition (2025ZD1701100, 2025ZD1701102)
第一作者简介：丹慧杰（1972），男，硕士，正高级工程师，主要研究方向为煤电低碳化、节能环保、新能源、材料、储能等，danhuijie@tpri.com.cn。
通信作者简介：王志超（1986），男，博士，正高级工程师，主要研究方向为多元清洁燃料掺烧、低碳零碳发电技术研究，wangzhichao@tpri.com.cn。

potassium release characteristics of the blended fuels. Bituminous coal and corn stover were mixed using an iso-calorific method, based on the heat content of 0.5 mg of bituminous coal as a benchmark. The blended fuels were compressed into structurally stable single pellets under a pressure of 13 MPa using a hydraulic press and subsequently combusted on the custom-built experimental platform. [Results]The experimental results demonstrate that the variation characteristics of gas-phase alkali metal concentration and thermal radiation energy can clearly distinguish three distinct combustion stages of the blended fuels: the devolatilization stage, the fixed carbon combustion stage, and the ash stage. Every stage could be distinctly identified through the variation characteristics of gas-phase alkali metal concentration and thermal radiation energy. As the biomass blending ratio increased from 0% to 100%, the peak concentration of gas-phase potassium rose significantly from 2.59 mg/m³ to 16.8 mg/m³, exhibiting a trend consistent with the duration of volatile pyrolysis. Conversely, the char combustion duration shortened by approximately 330 s, the average flame temperature decreased by 237 K, and the thermal radiation energy declined by 31.2%. These findings elucidate the promotional effect of biomass co-combustion on alkali metal release and quantify the significant alterations in fuel combustion characteristics. [Conclusion] Biomass co-combustion exerts a pronounced promoting effect on the release of gas-phase potassium and significantly alters the overall combustion characteristics of the fuel, including accelerating fixed carbon burnout, lowering flame temperature, and reducing thermal radiation output. The findings of this research provide crucial experimental data and theoretical support for the optimal design of biomass-coal co-firing boilers, the adjustment of operational parameters, and the development of effective alkali metal-related problem prevention and control strategies in industrial applications.

Key words: biomass; co-combustion; gaseous potassium; temperature; release characteristics

随着“双碳”政策的提出，燃煤发电机组低碳化改造势在必行。国家发展改革委、国家能源局印发的《煤电低碳化改造建设行动方案》中，将生物质掺烧耦合发电列为重要技术路径。该技术无需对现有锅炉系统进行大规模改造，具有改造成本低、实施周期短、碳减排效果显著等优势，是现阶段最具可行性的煤电低碳化技术之一。

为此，国内外学者在煤与生物质耦合燃烧领域开展了大量基础与应用研究[1-5]。在早期探索阶段周义等[1]阐述了生物质与煤混燃的燃烧特性、结渣特性和污染物排放特性，对比分析了煤粉炉掺烧生物质的技术路线及其改造成本。郭慧娜等[2]总结了燃煤锅炉直接掺烧生物质面临的技术挑战，主要包括高比例掺烧技术不成熟、受热面沾污腐蚀等问题。杨卧龙等[3]指出了煤与生物质耦合直燃发电的优点。王光磊等[4]综述了煤与生物质直燃耦合的积灰、结渣、腐蚀以及污染物排放的研究现状，指出大比例掺烧生物质时，生物质含有的碱金属、氯元素等引起的换热面积灰结渣和腐蚀是当前研究的热点之一。骆仲泱等[5]探讨了制约煤与生物质耦合直燃大规模应用的关键技术，重点梳理了生物质破碎制粉与输送、掺烧方式优化、碱金属影响及掺烧比例在线精准测量等方面的研究进展。部分学者也选用针对生物质直燃技术实施应用，但存在燃料收集运输成本高、燃料供应稳定性差和灰渣沉积与腐蚀等技术问题，为防范风险需要对燃料进行适合的预处理等措施，不利于我国大规模推广应用。目前，从生物质与燃煤耦合发电的研究进展来看，煤与生物质直接耦合燃烧发电是重要发展方向之一。在燃煤锅炉中掺烧较高比例的生物质，有助于降低 CO_2、NO_x、SO_x 等污染物的排放，推动煤电机组的低碳化改造。

现有研究多聚焦于掺烧比例低于 20%时的燃烧特性与污染物排放规律，针对大比例掺烧的相关研究仍较为有限。王一坤等[6]对生物质掺烧质量比开展锅炉热力校核计算，分析了掺烧比例对锅炉效率及 CO_2减排量的影响规律。李美军[7-8]在热分析仪中开展了生物质分别与煤粉的大比例耦合燃烧实验，分析了不同掺混比例下的混燃特性，发现协同作用对着火温度、燃尽特性指数有影响。Pu 等[9]进一步利用平面火焰燃烧器开展单颗粒燃料燃烧实验，探究了煤与板栗壳共燃时协同效应对着火延迟时间及火焰温度的影响。董琨等[10]基于计算流体力学开展了预热解式煤粉工业锅炉内数值模拟，评估了大比例耦合生物质对炉内温度场、气体浓度场、壁面热流的影响。

此外，生物质中含有大量的碱金属元素，其中钾是含量最高、影响最显著的一种。燃烧过程中释放的气相钾易在锅炉受热面沉积，引发积灰、结渣和高温腐蚀等问题，严重威胁锅炉的安全稳定运行[11-12]。对耦合燃烧阶段气相钾的释放行为进行在线动态监测与定量分析，可为耦合燃烧时的沾污结渣倾向提供理论支撑，从而指导燃料的合理选用以及燃烧策略的优化调控。近年来，主要用于燃烧中碱

金属在线监测的技术包括两类：利用激光进行主动探测的光谱分析法和通过分析火焰自发辐射特性的被动检测法[13]。相较于激光诊断技术，基于发射光谱法的被动式诊断技术具有结构紧凑、易于实施、抗干扰强等特点，目前已形成了高碱燃料燃烧中气相钠和钾量的在线测定团体标准[14]，此外，该方法还可以在线检测碳氢燃料燃烧火焰中的温度等信息，有助于理解燃烧过程中的关键参数。这种方法目前用于高碱煤、生物质、城市固体废弃物燃烧\焚烧过程中气相碱金属的在线监测[15-19]。基于已有研究现状，本文搭建了一套可开展煤与生物质大比例掺混燃烧实验的单颗粒燃料燃烧实验台。实验以烟煤与玉米秸秆为原料，采用热量配比法进行均匀掺混，采用发射光谱技术同时检测燃料燃烧时火焰温度、气相碱金属浓度和热辐射能，以系统研究混合燃料中气相钾的释放特性与变化规律。

1 实验装置及原理

1.1 单颗粒燃料燃烧实验台

本实验搭建了如图 1 所示的单颗粒燃料燃烧实验台。该平台主要由气体供给单元、燃烧器、样品传输机构及光学检测系统等部分构成。气体供给单元主要由气瓶、气体流量控制器和气体管路等组成，可精确调节进入燃烧器的空气与燃气流量配比。燃烧器为 Hencken 平面火焰燃烧器为单颗粒燃料的点火和燃烧提供均匀稳定的高温环境。样品传动机构主要由高精度直线移动电机平台上（型号：EPSA100，步长分辨率为 20 μm）和耐高温陶瓷棒支架构成。实验前将样品颗粒放置在两根直径为 0.8 mm 的耐高温陶瓷棒的末端，实验时通过上游软件控制的位移平台匀速送进，使颗粒进入燃烧器中心区域。为了能够在固定光路进行精确测量，平移台还控制整个燃烧器组件的垂直定位。光学检测设备为带有光纤探头的光谱仪（型号：Avantes AvaSpec-ULS3648-2-USB2），其光谱检测范围位于 200-900 nm，分辨率为 0.09~0.11 nm。设置光学检测设备的采集间隔时间为 1s，每个工况连续监测 600s。对燃烧热辐射光谱数据的检测方法原理在 1.3 中介绍。

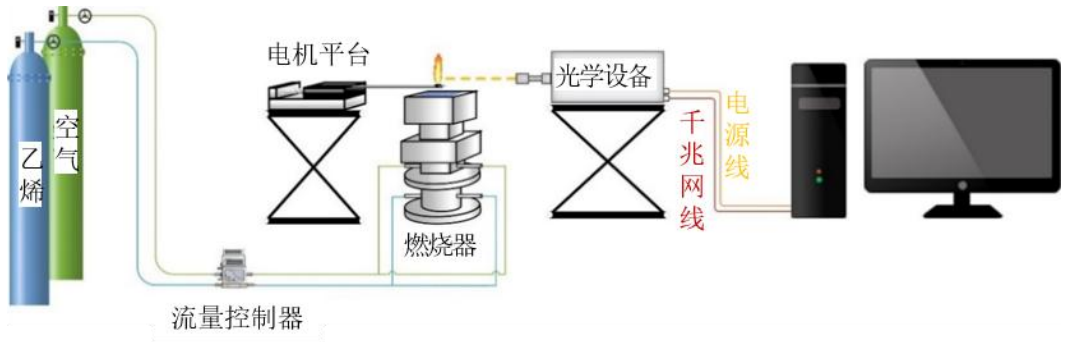


图 1 单颗粒燃料燃烧实验台示意图
Fig.1 Schematic of experimental set-up of single-pellet fuel combustion

1.2 燃烧实验工况

实验选用烟煤与玉米秸秆制备单颗粒混合燃料，燃料特性如表 1 所示。工业分析表明，烟煤具有热值高、燃烧稳定的特点。玉米秸秆挥发分析出快、易引燃，但能量密度较低。元素分析显示，烟煤高碳含量是其高热值的主要原因；而玉米秸秆燃烧过程需氧量更高。此外，玉米秸秆灰分产率约为烟煤的 1.7 倍，实际燃烧中更易引发受热面沾污。

表 1 燃料特性分析
Tab.1 Analysis of fuels

燃料	工业分析/%				元素分析/%					低位发热量/(MJ·kg^{-1})
	w_{ar}(M)	w_{ar}(A)	w_{ar}(V)	w_{ar}(FC)	w_{ar}(C)	w_{ar}(H)	w_{ar}(O)	w_{ar}(N)	w_{ar}(S)	$Q_{net,v,ar}$
烟煤	19.1	4.89	29.00	47.01	58.42	3.14	10.51	0.84	0.26	21.88
玉米秸秆	12.6	8.15	64.25	15.00	38.6	5.21	32.52	2.81	0.1	13.49

混合燃料的制备是以烟煤热量为基准，通过热量配比法掺混烟煤与玉米秸秆。首先，将煤粉、玉

米秸秆原料粉碎过筛，并在 120 ℃恒温干燥箱中干燥；其次，以 50 mg 烟煤原料热值为基准，按表 2 配制不同掺混比例的混合燃料；最后，采用油压式液压机及配套模具，在 13 MPa 压力条件下将混合燃料压制成型，获得直径为 6 mm 高度约为 1 mm 的圆柱状单颗粒。

表 2 燃料热量配比
Tab.2 Calorific ratio of fuels

燃料热量比	颗粒质量/mg
100%烟煤	50.0
85%烟煤: 15%生物质	54.8
70%烟煤: 30%生物质	59.3
50%烟煤: 50%生物质	65.5
100%生物质	81.0

由于常规高温制灰（>815 ℃）易导致碱金属组分显著挥发造成成分偏差，采用低温灰化技术在 550 ℃恒温环境制取灰样。表 3 展示了不同掺混比例燃料的灰成分分析结果。烟煤灰分中 Na_2O、K_2O 含量仅为 0.69%和 1.29%，属典型低碱煤，燃烧过程碱金属释放量较低；其灰分以 SiO_2、Al_2O_3和 Fe_2O_3 为主，三者总占比达 85.3%，以高熔点矿物组分为主，有利于提高灰熔融温度。随生物质掺混比例升高，灰中 SiO_2、Al_2O_3含量逐渐降低，主要源于玉米秸秆中硅铝酸盐矿物含量远低于烟煤；Fe_2O_3含量由 9.36%降至 2.99%，体现生物质低铁特性对烟煤含铁矿物的稀释作用；K_2O 含量由 1.29%升至 8.05%，与生物质掺混比例呈显著正相关，表明玉米秸秆为高碱燃料，燃烧伴随大量气相钾释放；P_2O_5含量由 0.33%升至 3.43%，与植物生长过程中磷元素富集直接相关。

1.3 燃烧中气相碱金属及温度检测原理

单颗粒燃料燃烧中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，故主要检测气相钾浓度，其原理如下：

表 3 不同掺混比例燃料灰成分分析
Tab.3 Analysis of ash from fuels in different blending ratio 单位：%

成分	烟煤	85%烟煤+15%玉米秸秆	70%烟煤+30%玉米秸秆	50%烟煤+50%玉米秸秆	玉米秸秆
SiO_2	54.11	53.19	52.47	51.11	46.74
Al_2O_3	21.83	20.27	17.63	13.85	9.66
Fe_2O_3	9.36	5.08	4.78	4.05	2.99
CaO	6.89	5.62	6.44	6.17	8.28
K_2O	1.29	2.84	4.43	5.20	8.05
MgO	1.12	2.68	3.43	3.80	1.34
TiO_2	0.88	1.01	0.91	0.71	0.47
SO_3	3.30	2.86	3.28	2.05	1.44
Na_2O	0.69	0.96	0.76	0.82	0.83
P_2O_5	0.33	1.46	2.19	2.44	3.43

当气相碱金属浓度较高时，自吸收会显著影响信号，降低方法的精度。火焰光谱发射信号的有效提取和校准是限制该方法的主要问题。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(1)计算。

$$I_K = I(\lambda_K) - I_C(\lambda_K) \tag{1}$$

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，为 W/(m³·sr)。

火焰温度使用多波长法计算，如式(2)所示：

$$T = -C_2\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda+\Delta\lambda}\right) / \ln\left(\frac{I_C(\lambda)}{I_C(\lambda+\Delta\lambda)}\frac{\lambda^5}{(\lambda+\Delta\lambda)^5}\right) \tag{2}$$

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

气相钾浓度通过式(3)可得：

$$C_K = I_K / A_K I_b(\lambda_K, T) \tag{3}$$

式中：C_K 为测得的气相钾浓度，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(2)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/(m³·sr)。

对光学检测设备进行热辐射标定后，为验证标定系数在不同温度下的准确性，选取黑体辐射源在

1 100、1 200、1 300、1 400 ℃ 4 个温度梯度的标定温度点进行实验，通过比较光学设备实际测量光谱辐射强度。基于获取的绝对光谱辐射强度数据，对黑体炉 4 种典型温度工况进行温度反演计算。实测温度与黑体炉设定值的绝对偏差≤10 ℃，相对偏差<1%。该精度验证结果表明，光学设备的标定效果良好。采用火焰光度计开展标定实验获取钾标定公式，标定的目的是建立气相钾浓度与钾特征线光谱强度之间准确的定量关系。在进行标定实验时，采用梯度稀释法，以 10 mg/mL 的 K 标准溶液为母液与符合 GB/T 6682 规定的二级水制取 0.010～1.00 mg/g 的 K 标准溶液系列（包括 0.010、0.100、0.200、0.300、0.400、0.500、0.600、0.700、0.800、1.00 mg/g）[20]。浓度不同的一系列 K 标准溶液并通入雾化器，形成气溶胶并与燃料混合，送入火焰光度计燃烧器中，在燃烧火焰不再波动的稳定状态下，用图 1 中的光学设备检测火焰中气相钾的光谱信号，光谱仪连续采集 30 条光谱，获得每条光谱钠特征谱线强度，并取平均值作为当前浓度所对应的最终结果。在每个浓度实验工况结束时，通入去离子水清洗溶液容器和气体管道，保证下一组的浓度实验结果不受上组实验的干扰。当火焰中气相钾浓度较低时，钾特征谱线强度与气相钾浓度能够保持线性关系。但随着气相钾浓度的增加，钾特征谱线强度结果增幅逐渐降低。其原因主要在于当钾特征光谱从火焰内部向外传播时，因其路径中存在同类钾原子的吸收，导致在光源外部光谱仪所接受光强度减弱，这种现象被称作自吸收，光源路径上钾原子密度越高，自吸收效应越明显。最后，通过 Scheibe-Lomakin 公式来建立光学设备检测到的钾特征光谱辐射强度与燃烧火焰中释放的气相钾金属浓度之间的定量关系，如图 2 和式(4)所示：

$$I_K = 91.58C_K,\ R^2 = 0.98 \tag{4}$$

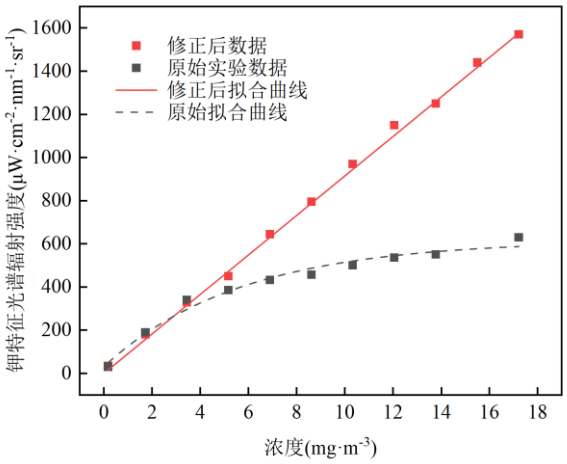


图 2　气相钾标定结果

Fig.2 Calibration results of gaseous potassium

其中，I_k 为光学设备采集到的碱金属特征光谱辐射强度，C_k 为 K 的浓度。气相 K 的拟合相关性评价指标 R^2 为 0.98 说明标定实验标定方法及拟合处理过程可靠。

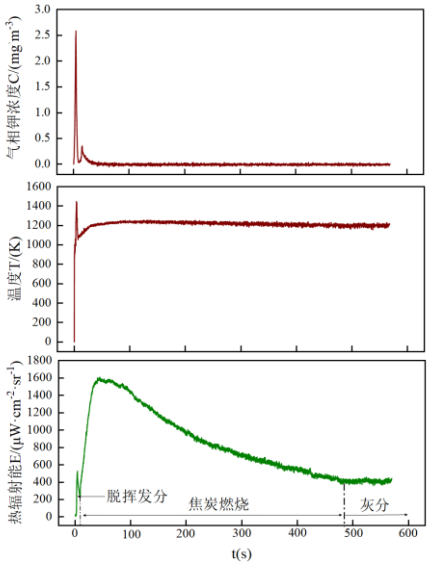
2 实验结果与讨论

2.1 单颗粒燃料燃烧实验结果

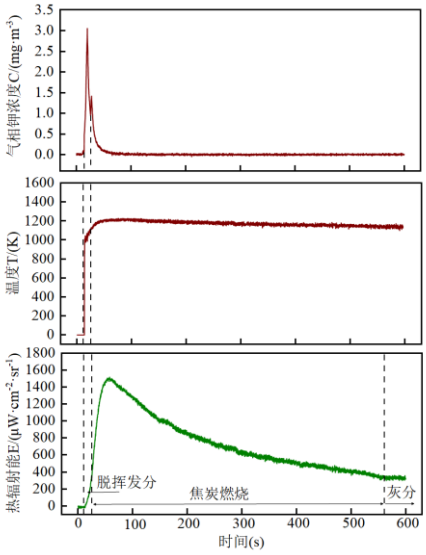
通过采用光学检测设备对煤与生物质不同掺混比例下的颗粒燃烧过程进行持续 600 s 的在线观测，获得了燃烧过程中气相钾释放浓度、火焰温度及热辐射能的动态变化曲线，如图 3 所示。实验中，光谱信号采集区域对应颗粒燃烧位置；颗粒内部挥发分在热解阶段向上迁移并形成扩散火焰时，检测系统仅能捕获火焰基部信号。由于火焰基部区域碳烟生成量较少，导致挥发分析出阶段的火焰温度与热辐射能变化难以被准确捕捉，因此本文实验主要针对固定炭燃烧及灰分阶段进行温度与热辐射能的有效监测。在单颗粒燃烧过程中，有机钾在脱挥发分阶段随可燃组分气化进入燃烧氛围，基于气相钾浓度的在线动态变化，可有效判别脱挥发分阶段的起止时刻。图 3 展示了不同掺烧比例单颗粒燃料燃烧的测量结果。

图 3 中的实验数据表明，当碳氢挥发分剧烈析出时，气相钾呈现同步释放趋势并在特定时间节点达到最大值，随着挥发分燃烧趋于完全，其浓度随即快速下降。挥发分火焰消失后，颗粒进入以固定碳为主导的异相氧化阶段，未燃碳基质经表面氧化反应逐步消耗。此时残留钾元素存在两条转化路径：可溶性钾随碳基质燃烧持续释放直至完全消

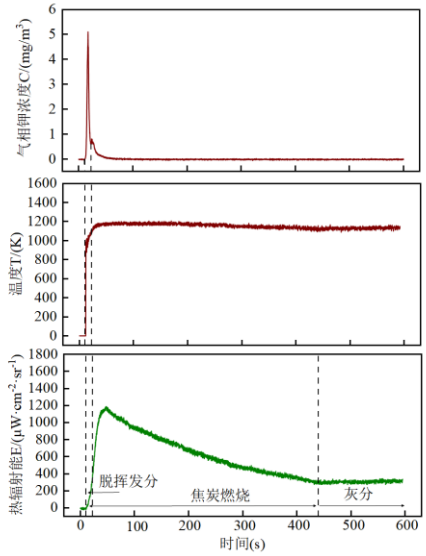
耗，因此纯烟煤颗粒及不同掺混比例燃料颗粒的气相钾浓度均表现出一致的变化规律，即在挥发分完全燃烧后，气相钾浓度再次上升至峰值，并随燃烧过程逐步降低至零；而部分钾则与硅铝矿物发生化学反应，最终以稳定形态固存于灰分产物中[21]。图3e)纯烧玉米秸秆的气相钾浓度变化曲线中并未出现双峰值变化特征。这是由于其挥发分含量高达64.25%而固定碳含量仅为15.00%，脱挥发分过程持续时间有136.8s，焦炭燃烧过程极短，两个阶段在时间上高度重叠。此外，挥发分并非一次性完全释放，而是在整个燃烧过程中持续逸出。在焦炭燃烧阶段，仍有大量挥发分从颗粒内部释放，使得气相钾浓度没有出现明显的第二个峰值，掩盖了两个阶段的差异。同时，秸秆中富含的硅铝元素在固定碳燃烧阶段对钾元素的捕获作用较强，进而抑制了钾以气相形式逸出，进一步使得该阶段未出现明显的气相钾浓度波动特征[22]。从图中可以看出，烟煤颗粒在热解阶段虽能释放气相钾，但受限于其较低的钾含量，这些释放过程在较短时间内完成。相较之下，玉米秸秆因其富钾特性，在与烟煤掺烧过程中，随着玉米秸秆掺混比例提升，气相钾峰值浓度呈现递增趋势，且气相钾释放时段不断延长。同时结合热辐射特性与气相钾浓度曲线的对应关系，除纯烧玉米秸秆工况外，其余颗粒燃烧均能明确辨识出燃烧过程中挥发分析出、固定碳燃烧及灰分的三个主要阶段。这一研究结果与Pu等人[9]关于生物质与煤耦合燃烧特性的研究结论具有良好的一致性，验证了本文实验方法的可靠性。



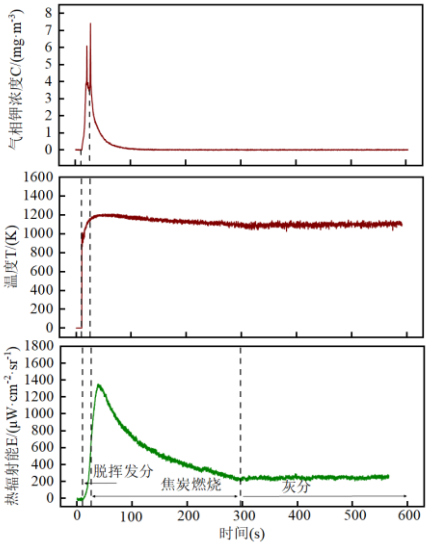
a) 烟煤



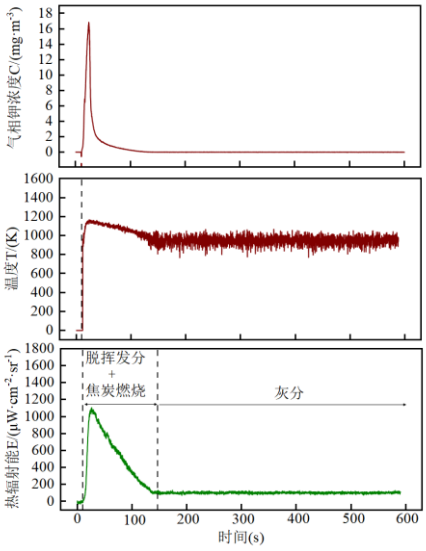
b) 85%烟煤+15%玉米秸秆



c) 70%烟煤+30%玉米秸秆



d) 50%烟煤+50%玉米秸秆



e) 玉米秸秆

图 3 不同掺烧比例单颗粒燃料燃烧的测量结果
Fig. 3 Measurement results under different blending ratio in single-pellet combustion

2.2 实验结果分析与讨论

单颗粒燃烧的实验结果如表 4 所示，表中 t_v 表示脱挥发分阶段持续时长，t_c 表示固定碳阶段持续时长。由于纯烧玉米秸秆工况无法准精确界定挥发分热解与固定碳燃烧阶段的临界点，因此表中纯烧生物质工况只展示脱挥发分起始至固定碳完全燃烧的总时段。

表 4 生物质与煤耦合燃烧的时间参数
Tab. 4 Time parameters in biomass and coal co-combustion

时间参数	玉米秸秆掺烧比例/%				
	0	15	30	50	100
t_v/s	9.4	13.5	12.2	15.6	136.8
t_c/s	459	535	417	252	

表 4 中结果表明，相较于纯烧烟煤工况，玉米秸秆掺混比例的增加还明显延长了挥发分热解持续时间，此现象源于实验选取的玉米秸秆挥发分质量分数显著大于烟煤。此外，随着掺烧比例上升，热解阶段释放的可燃气态物质总量递增，导致挥发性可燃物质完全燃尽所需时间相应延长。同时，燃料掺混比例与固定碳燃烧时间呈现负相关关系，纯玉米秸秆工况固定碳燃烧时段较纯烟煤工况缩短约 330 s，这主要源于两方面因素：一是玉米秸秆中固定碳含量远低于烟煤；二是挥发分大量热解并从颗粒中释出，在颗粒内部形成丰富的孔隙结构，有利于氧气在固定碳燃烧阶段更易进入颗粒内部，从而显著提高固定碳与氧气的接触效率。二者协同作用，共同导致随着玉米秸秆占比增加，固定碳燃烧时间相应缩短。

图 4 是不同掺烧比例下气相钾释放的浓度峰值。随着生物质混合比例从 0%提升至 100%，气相钾的峰值浓度从 2.59 mg·m^{-3} 增长到 16.8 mg·m^{-3}。增长了 5.5 倍。且曲线斜率随掺烧比例提高而增大，表明高比例掺烧玉米秸秆会显著加剧气相钾的释放，这一现象源于玉米秸秆本身更高的碱金属含量及更剧烈的燃烧特性。

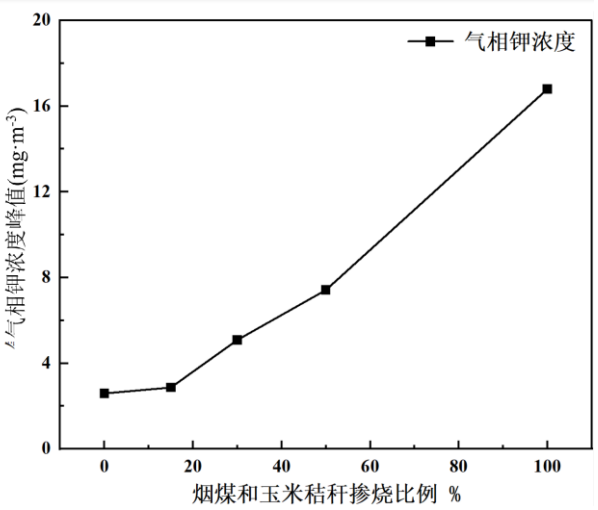


图 4 不同掺烧比例下气相钾释放浓度峰值
Fig.4 Peak concentration of K release under different blending ratios

图 5 展示了不同掺烧比例下固定碳燃烧阶段到燃烧结束时的平均火焰温度和热辐射能峰值。连续监测结果表明，火焰平均温度和热辐射能均随玉米秸秆掺混比例的增加而降低。纯玉米秸秆的火焰平均温度最低，这主要源于其热值低于烟煤，且玉米秸秆中较高的挥发分含量导致燃烧初期挥发分迅速释放、挥发分燃烧阶段前移，从而缩短了高温区的持续时间，最终使整体火焰温度下降。

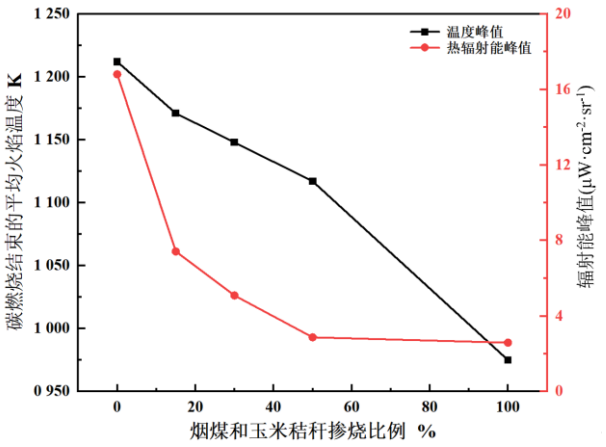


图 5 不同掺烧比例下平均温度和辐射能峰值
Fig.5 Average temperature and radiant energy under different blending ratios

同时，玉米秸秆灰分中钾含量较高，可通过异相催化作用加速碳烟颗粒氧化，减小碳烟粒径，降低颗粒辐射表面积。根据 Stefan-Boltzmann 定律，辐射能与温度的四次方及辐射表面积成正比，因此随着玉米秸秆掺混比例提高，热辐射能亦整体呈下降趋势。

3 结论

本文搭建了一套单颗粒燃料燃烧实验台，通过对光学检测设备进行标定实验，实现了对燃烧火焰中气相碱金属浓度、火焰温度及热辐射能的多参数同步解析。对烟煤与玉米秸秆不同掺混比例燃料的燃烧特性分析，揭示了气相碱金属释放规律及其与燃烧参数的动态关联机制。实验结果表明，结合气相钾浓度及热辐射能变化曲线可整体判断出脱挥发分，固定碳燃烧及灰分 3 个主要燃烧阶段。随着生物质掺混比例从 0%增至 100%，气相钾峰值浓度由 2.59 mg/m^3 显著提升至 16.8 mg/m^3，与挥发分热解持续时间呈相同变化趋势，而固定碳燃烧时间则缩短 330 s，火焰平均温度下降 237 K，热辐射能下降 31.2%，表征了生物质掺烧对碱金属释放的促进作用并显著改变燃料燃烧特性。值得注意的是，气相钾浓度的显著升高，意味着实际工程应用中需重点关注其可能引发的受热面腐蚀、燃烧颗粒聚团及结渣积灰等问题。研究结果可为生物质掺烧锅炉的掺混比例优化、运行参数调整、碱金属问题防控、燃料选型及在线监测系统开发提供科学依据，将有力推动大比例生物质掺烧技术的安全高效应用，为煤电行业低碳转型提供技术支撑。

[参 考 文 献]

[1] 周义, 张守玉, 郎森, 等. 煤粉炉掺烧生物质发电技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(6): 26.
Zhou Y, Zhang S Y, Lang S, et al. Research progress of biomass blending technology in pulverized coal furnace for power generation[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(6): 26.

[2] 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.

[3] 杨卧龙, 倪煜, 雷鸿. 燃煤电站生物质直接耦合燃烧发电技术研究综述[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 18.
Yang W L, Ni Y, Lei H. Biomass direct coupled combustion power generation technology for coal fired power station: a review[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 18.

[4] 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.

[5] 骆仲泱, 王霄焕, 李浦, 等. 生物质与煤直接耦合燃烧技术的应用与研究进展[J]. 能源工程, 2025, 45(6): 3.
Luo Z Y, Wang X H, Li P, et al. Application and research progress of biomass-coal direct co-combustion technology[J]. Energy Engineering, 2025, 45(6): 3.

[6] 王一坤, 邓磊, 贾兆鹏, 等. 燃煤机组大比例直接耦合生物质发电对机组影响研究[J]. 热力发电, 2021, 50(12): 80.
Wang Y K, Deng L, Jia Z P, et al. Influence of large-scale direct coupled biomass power generation on coal-fired units[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(12): 80.

[7] 李美军. 煤粉大比例掺混不同生物质的混燃特性研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(2): 86.
Li M J. Study on co-combustion characteristics of pulverized coal and different biomass at large mixing ratios[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(2): 86.

[8] 李美军. 高掺混比例下不同生物质与煤粉混燃试验[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(5): 80.
Li M J. Experiment of co-combustion characteristics of different biomass and pulverized coal at high blending ratio[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(5): 80.

[9] 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.

[10] 董琨, 张瀚霖, 谭厚章, 等. 预热解式煤粉工业锅炉大比例直燃耦合生物质的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(3): 1395.
Dong K, Zhang H L, Tan H Z, et al. Numerical simulation of biomass high-ratioco-firing in a pre-pyrolysis pulverized coal industrial boiler[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(3): 1395.

[11] 孙宏伟, 吕薇, 李瑞扬. 生物质燃烧过程中的碱金属问题研究[J]. 节能技术, 2009, 27(1): 24.
Sun H W, Lü W, Li R Y. Study on problems of alkali metal during straw combustion[J]. Energy Conservation Technology, 2009, 27(1): 24.

[12] Niu Y Q, Tan H Z, Hui S E. Ash-related issues during biomass combustion: alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2016, 52: 1.

[13] 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.

[14] T/CEC 873—2024 高碱燃料燃烧中气相钠和钾量的在线测定 发射光谱法[S].
T/CEC 873—2024 Online measurement of sodium and

potassium in gas phase during combustion of high alkali fuel by emission spectrometry[S].
[15] 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.
[16] 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.
[17] He J J, Li J Y, Huang Q X, 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.
[18] 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.
Xu Z Q, Li D Y, Liu X P, 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.
[19] 赵京, 杨本超, 魏小林, 等. 基于 FES 技术的 O_2/CO_2 燃烧气氛下准东煤中不同类型碱金属盐的释放特性[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3216.
Zhao J, Yang B C, Wei X L, et al. Release characteristics of different alkali metal salts in Zhundong coal under O_2/CO_2 combustion atmosphere based on FES technology[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3216.
[20] 郭丽, 贾广成, 李显, 等. 燃烧中碱金属浓度及温度的在线检测标准化研究[J]. 中国测试, 2024, 50(增刊 2): 1.
Guo L, Jia G C, Li X, et al. On-line detection of alkali metal concentration and temperature in combustion and standardization[J]. China Measurement & Test, 2024, 50(S2): 1.
[21] 周骏. 生物质混煤燃烧过程中 K 元素的迁移转化规律[D]. 南京: 东南大学, 2021.
Zhou J. Migration and transformation of K element in the process of biomass blended coal combustion[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
[22] Zhao H B, Wakil M A, Viljanen J, et al. In situ measurement of potassium release during biomass combustion using laser-induced breakdown spectroscopy: effect of silicate on potassium release[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(3): 3262-3271.

（责任编辑 李园）