DOI: 10.19666/j.rlfd.202601078

面向在线量热仪的难燃煤常压堆积燃烧强化方法研究

姜思睿[1,2]，张雪刚[1]，李天智[1]，林志明[1]，金其文[1]，吴学成[1,2]
（1. 浙江大学能源高效清洁利用全国重点实验室，浙江 杭州 310027；
2. 浙江大学宁波国际科创中心，浙江 宁波 315100）

［摘 要］【目的】常压激光点火在线量热仪在低灰分、较高热值的煤种测量中效果良好，但高灰分难燃煤燃尽率不足严重制约了在线量热仪的测量精度，因此亟需探究高效的常压燃烧强化方法提升仪器运行中煤样的燃尽率，并扩展仪器的煤种适应性。【方法】基于本常压在线量热仪搭建常压堆积燃烧实验系统，选取多种煤质参数的煤样，对比研究了氧气流量与流速调节、添加保温层以及主动机械扰动等不同强化手段对煤粉燃尽的影响。【结果】研究表明，常规氧气参数调控与保温方法对煤样燃尽率的提升作用有限。基于坩埚倾斜旋转的主动机械扰动策略通过正交实验优化得出倾斜角度 45°、旋转起始时间 60 s 及转速 30 r/min 的最佳工况。该工况下能有效破坏灰壳结构，显著强化气固接触。【结论】基于坩埚倾斜旋转的机械扰动强化方法，使本常压在线量热仪的适用煤种范围从原有的灰分小于 10%、热值高于 25 000 J/g 的优质煤种，扩展至灰分小于 60%、热值高于 11 000 J/g 的更宽范围的煤种。研究扩展了仪器的煤种适应性，为常压在线量热仪的设计提供了高效可靠的技术路径。

［关 键 词］堆积燃烧；燃烧强化；机械扰动；燃尽特性

［引用本文格式］姜思睿，张雪刚，李天智，等. 面向在线量热仪的难燃煤常压堆积燃烧强化方法研究[J]. 热力发电，2026，55(10): 34. Jiang S R, Zhang X G, Li T Z, et al. Research on intensification methods for atmospheric packed-bed combustion of difficult-to-burn coal for online calorimeters[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(10): 34.

Research on intensification methods for atmospheric packed-bed combustion of difficult-to-burn coal for online calorimeters

Jiang Sirui[1,2], Zhang Xuegang[1], Li Tianzhi[1], Lin Zhiming[1], Jin Qiwen[1], Wu Xuecheng[1,2]
(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Ningbo Global Innovation Center, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

Abstract: [Objective] Online atmospheric-pressure laser-ignition calorimeters perform effectively in measuring high-quality coals with low ash content and relatively high calorific values. However, for high-ash, difficult-to-burn coals, an insufficient burnout ratio severely restricts measurement accuracy. Therefore, there is an urgent need to explore efficient atmospheric combustion intensification methods to improve the burnout ratio of coal samples during instrument operation and expand the fuel adaptability of the instrument. [Methods] Based on the existing calorimeter architecture, an atmospheric combustion experimental testing system was established. A diverse set of pulverized coal samples encompassing various coal quality parameters was selected to comparatively study the effects of different intensification techniques on the combustion and burnout characteristics. The investigated methods included the regulation of the oxygen flow rate and jet velocity, the addition of a thermal insulation layer around the crucible to minimize heat dissipation, and the introduction of a novel active mechanical agitation device.

收 稿 日 期：2026-01-27 修 回 日 期：2026-03-11 接 受 日 期：2026-03-17
基 金 项 目：能源局国家能源煤炭清洁转换利用技术研发（实验）中心能力建设（2024 年度）（GJNY-24-126）
Supported by: Capacity Building for the National Energy Technology R&D (Experimental) Center on Clean Coal Conversion (2024) (GJNY-24-126)
第一作者简介：姜思睿（2001），女，硕士，主要研究方向为煤质在线检测技术，22360461@zju.edu.cn。
通信作者简介：吴学成（1978），男，博士，教授，主要研究方向为复杂多相流动和反应系统测试和诊断、大气污染监测，wuxch@zju.edu.cn。

Specifically for the mechanical agitation strategy, which utilizes a tiltable and rotatable crucible, a multi-parameter coupled optimization was conducted using an orthogonal experimental design to systematically evaluate the interactive effects of critical operating parameters. [Results] The experimental research indicates that conventional approaches, such as oxygen parameter regulation and thermal insulation, yield very limited improvements in the burnout ratio of high-ash coal samples, as they fail to eliminate the oxygen diffusion barrier. In contrast, the active mechanical agitation strategy based on continuous crucible tilting and rotation proved to be highly effective. Through the orthogonal experiment optimization, the optimal operating conditions were precisely determined to be a crucible tilt angle of 45 °, a rotation start time of 60 s, which corresponds to the early stage of the main combustion process, and a rotation speed of 30 r/min. Under these specific conditions, the continuous mechanical tumbling dynamically and effectively disrupts the formation of the dense ash shell structure, thereby significantly intensifying gas-solid contact between the unreacted carbon particles and the oxidizing atmosphere. [Conclusion] The combustion intensification method driven by the mechanical agitation of the tilted and rotating crucible expands the applicable fuel range of this calorimeter from the original high-quality coals (ash content <10%, calorific value > 25 000 J/g) to a much broader spectrum of coals (ash content <60%, calorific value >11 000 J/g). This research significantly enhances the coal type adaptability of the instrument and provides an efficient and reliable technical pathway for the design of atmospheric online calorimeters.

Key words: packed-bed combustion; combustion intensification; mechanical agitation; burnout characteristics

中国大力发展可再生能源，以风光为代表的可再生发电装机容量将保持长期增长[1]，但煤炭仍然是中国能源供应的基石，保证可靠的电力来源[2]。热值测量是评估煤粉燃烧性能和优化燃烧控制的关键技术环节，确保燃烧系统在深度调峰条件下实现安全、高效的动态调控[3-4]。传统的煤粉热值测量依赖于实验室分析，结果精确但采样制样、分析的周期长，难以满足实际生产中的实时性要求。在线热值测量技术可以实时监测煤粉热值的动态变化，为燃烧优化提供及时准确的数据支撑。

当前入炉煤热值的测量方法包括基于燃烧法的氧弹量热法；基于光学方法的近红外检测技术、激光诱导光谱技术、火焰辐射光谱技术、太赫兹时域光谱技术；基于软测量技术的烟气成分法、热分析方法、工业/元素分析预测法等，但缺少一种能够兼顾测量速度、精度与在线连续测量的热值测量技术。针对这一需求，王凌珑等[5-6]提出了基于高能连续激光加热的燃料颗粒热值在线测量方案，利用布置在工业现场的机械运动装置自动完成测量过程。装置采用激光点燃煤粉，流动氧气辅助煤粉燃尽并带走热量，计量气体内能变化并对热耗散及未燃尽损失修正得到样品发热量。在此基础上，张雪刚等[7-8]进一步优化了氧气横通速度及多孔保温坩埚结构。成功实现了对灰分小于 10%且热值高于 25 000 J/g 的优质煤种的快速准确测量，验证了该技术的可行性。

然而在实际工业应用中，面对灰分含量高、挥发分低的难燃煤种，现有的常压堆积燃烧模式面临严峻挑战。难燃煤种在燃烧过程中极易在表面形成致密的灰层，严重阻碍氧气向下层焦炭的扩散，导致样品燃尽率下降。未燃尽部分不仅导致仪器无法捕捉全部放热量，低估真实发热量，还会干扰后续对元素分析等指标的判断。并且由于煤种类繁多，不同煤种的物质组成和燃烧特性差异显著，很难针对燃尽率进行结果修正。

基于此，本研究设计了常压堆积燃烧试验系统，探究限制煤粉燃尽的因素，以及氧气流量流速调节、保温、机械扰动等手段对煤粉燃尽率的提升效果。针对常规强化手段的局限性，提出了一种坩埚倾斜旋转的主动机械扰动策略，并采用正交实验分析方法对旋转起始时间、倾斜角度及转速进行多参数耦合优化分析，旨在解决高灰分煤氧气扩散受阻的难题，为常压在线量热仪的煤种适应性扩展提供关键技术支撑。

1 实验系统与方法

1.1 实验装置及流程

为研究常压下煤粉的未燃尽率，在常压在线量热仪的燃烧室基础上构建了图 1 所示的常压下燃烧实验系统。实验系统主要包括燃烧腔体、激光器、热像仪、烟气分析仪、热电偶、分析天平、流量计、氧气瓶等。燃烧腔体由厚度 5 mm 的铝合金上下盖和直径 160 mm 的玻璃外筒制成，上盖中央加装增透 3~5 μm 红外光和 808 nm 激光的红外窗口。采用热像仪、烟气分析仪和热电偶分别监测煤粉样品燃烧过程中煤样表面温度、CO 和 CO_2 浓度以及坩埚底部温度变化。数据经过计算机实时采集，时间分辨率为 0.5 s。

静止工况实验过程主要包括煤样燃烧前后的

称量，激光点火以及数据采集等。称量 1 g 的煤样置于坩埚中，坩埚置于燃烧室。通入纯度为 99.96% 的氧气 30 s，排除装置内的空气。启动激光器点燃样品。采用 808 nm、20 W 的激光对煤粉上表面加热 3 s 使煤粉被点燃，点火后激光器关闭，完全靠煤粉逐层向下传播燃烧。全程采集燃烧过程中煤样表面温度、CO 和 CO_2 浓度以及坩埚底部温度变化。火焰熄灭后，称量并记录剩余物质的质量。

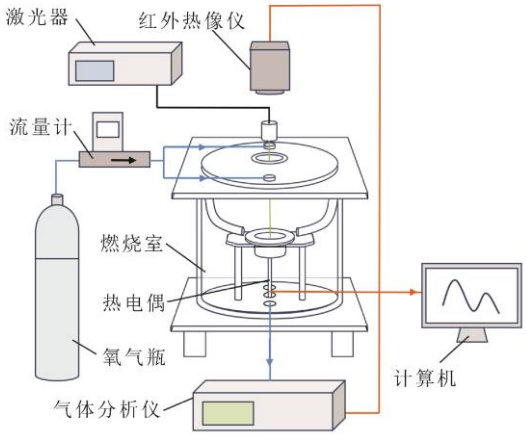


图 1 煤粉燃烧特性实验系统
Fig.1 Schematic of the pulverized coal combustion characteristics experimental system

坩埚可倾斜旋转的燃烧室主要由外壳、微型电机、电机夹具和角度调节板组成。角度调节板可任意调节燃烧室的倾斜角度，在重力作用下辅助堆积的煤粉翻滚。燃烧室内坩埚与调速电机连接，能够以设定的转速进行旋转。坩埚可倾斜旋转燃烧室结构如图 2 所示。

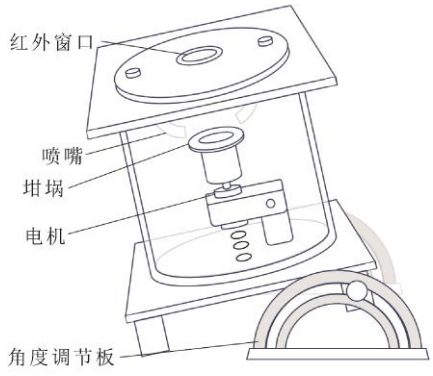


图 2 坩埚可倾斜旋转燃烧室示意
Fig.2 Schematic diagram of the combustion chamber with a tiltable and rotatable crucible

旋转工况增加了调节坩埚倾斜角度和电机启动时间和转速的步骤。分别进行了不同旋转起始时间、倾斜角度和转速下的煤样燃烧实验。

1.2 样品及数据处理

本研究采用电厂原煤及原煤与煤矸石掺混后的配煤作为研究对象，均经过统一的研磨与筛分处理，选取粒径约 75 μm 的煤粉作为实验样品。电厂原煤与煤矸石参数见表 1，实验样品热值与工业分析见表 2。工业分析的参数中 M、A、V、FC 分别代表水分、灰分、挥发分、固定碳，下标 ad 代表空气干燥基。

表 1 电厂原煤与煤矸石参数
Tab.1 Parameters of raw coal and coal gangue for power plants

编号	热值/(J g^{-1})	工业分析			
		w_{ad}(M)/%	w_{ad}(A)/%	w_{ad}(V)/%	w_{ad}(FC)/%
n1	27 133	1.98	21.21	8.69	68.12
n2	24 647	12.78	10.01	27.12	50.09
n3	30 287	2.59	12.48	7.51	77.42
n4	17 652	1.47	42.26	18.36	37.91
n5	20 246	15.73	15.28	24.67	44.32
n6	4 096	1.30	86.23	3.37	9.10
n7	5 292	1.73	82.05	4.37	11.85
n8	3 723	2.00	80.86	4.59	12.95

表 2 煤粉样品参数
Tab.2 Parameters of pulverized coal samples

编号	热值/(J g^{-1})	工业分析			
		w_{ad}(M)/%	w_{ad}(A)/%	w_{ad}(V)/%	w_{ad}(FC)/%
煤样 1	10 731	4.49	58.56	13.19	23.76
煤样 2	12 401	5.38	52.13	16.14	26.35
煤样 3	20 543	3.65	30.65	25.90	39.80
煤样 4	23 501	2.55	30.12	3.69	63.64
煤样 5	10 945	2.20	62.81	2.88	32.11
煤样 6	15 087	2.22	53.27	3.09	41.42
煤样 7	19 175	2.31	42.54	3.76	51.39
煤样 8	27 133	1.98	21.21	8.69	68.12
煤样 9	30 287	2.59	12.48	7.51	77.42
煤样 10	17 652	1.47	42.26	18.36	37.91
煤样 11	11 581	6.66	47.04	29.86	16.44
煤样 12	20 246	15.73	15.28	24.67	44.32
煤样 13	26 585	2.86	20.89	5.42	70.83
煤样 14	26 606	3.15	18.24	10.47	68.14
煤样 15	25 673	5.85	15.76	15.59	62.80
煤样 16	24 551	9.06	12.62	22.81	55.51

在煤粉燃烧中，未燃尽的成分主要是固定碳，因此这里假设残余物质中仅包含灰分与未燃碳。根据实验记录的煤样燃烧前后质量计算煤粉的燃尽率 φ：

$$m_C = m_r - m_0 \times w_{ad}(A) \tag{1}$$

$$\varphi = \left(1 - \frac{m_C}{m_0 \times w_{ad}(FC)}\right) \times 100\% \tag{2}$$

式中：m_C 为未燃碳质量；m_0 为煤粉样品燃烧前的质量；m_r 为煤粉样品燃烧后的剩余质量。

在数据分析中，燃烧过程中的时间参数称为燃烧特征时间参数，包括：煤样表面最大温度随时间变化曲线的一阶导数最后一次波动的最低值对应的时间（燃烧时间 t）、煤样燃烧时的最大温度在 800 ℃以上维持的时间（剧烈燃烧时间 t_b）、CO_2 浓度达到峰值的时刻（达到最大燃烧速率的时刻 t_m）。燃烧过程中煤样表面温度的最高值定义为燃烧的峰值温度 T_m；T_b 定义为坩埚底部中心温度。CO 质量由气体分析仪输出的 CO 浓度数据积分计算得出。

为保证数据的可靠性，每种工况下的燃烧实验均重复进行 3 次。

2 结果与讨论

2.1 常压堆积燃烧的限制因素分析

为探究热值、灰分、挥发分等煤质参数对燃烧过程及燃尽率的影响，选取了热值为 10 000~30 000 J/g，灰分为 10%~60%，挥发分为 5%~30%共 13 种煤粉样品进行实验分析。不同煤质参数对燃尽的影响如图 3 所示。由图 3 可知，热值及固定碳对燃尽率呈现出正向促进作用。高热值煤粉具有更高的能量密度，在激光点火后能释放大量化学能，维持局部燃烧区域处于高温状态。

灰分含量与燃烧时间及燃尽率均呈显著负相关。随着灰分从 10%增加至 60%以上，燃尽率急剧下降，部分高灰煤样的燃尽率不足 85%。灰分的存在形式及其微观结构显著影响碳基燃料的气化与燃烧特性，高灰分煤种在燃烧过程中易发生灰分团聚与结渣，致密的灰层结构会大幅增加气体扩散阻力[9-10]。在堆积煤样燃烧的过程中下层煤粉仅能在灰层的裂隙中与氧气接触维持燃烧。

煤中挥发分含量与未燃碳存在一定的关联，低挥发分煤更易产生未燃碳[11]，高挥发分的煤样燃尽情况较好。

相比于燃尽率随各煤质参数的变化，气态产物中 CO 质量的波动范围相对较小。主要是由于装置采用富氧通风环境，使逸出的 CO 大部分被迅速氧化为 CO_2，最终检测到的 CO 受煤质影响较小。

在各煤质参数中，灰分含量是制约煤粉燃尽率的关键因素，当灰分超过 40%时，燃尽率下降至 85%以下，其与燃尽率呈显著负相关。因此在常压在线量热仪的测量场景中，克服高灰分带来的燃烧阻力是提升测量准确性、扩大装置适应性的核心难点。在设计在线量热仪的修正算法或改进结构时，必须优先解决高灰分煤带来的氧气扩散受阻问题。

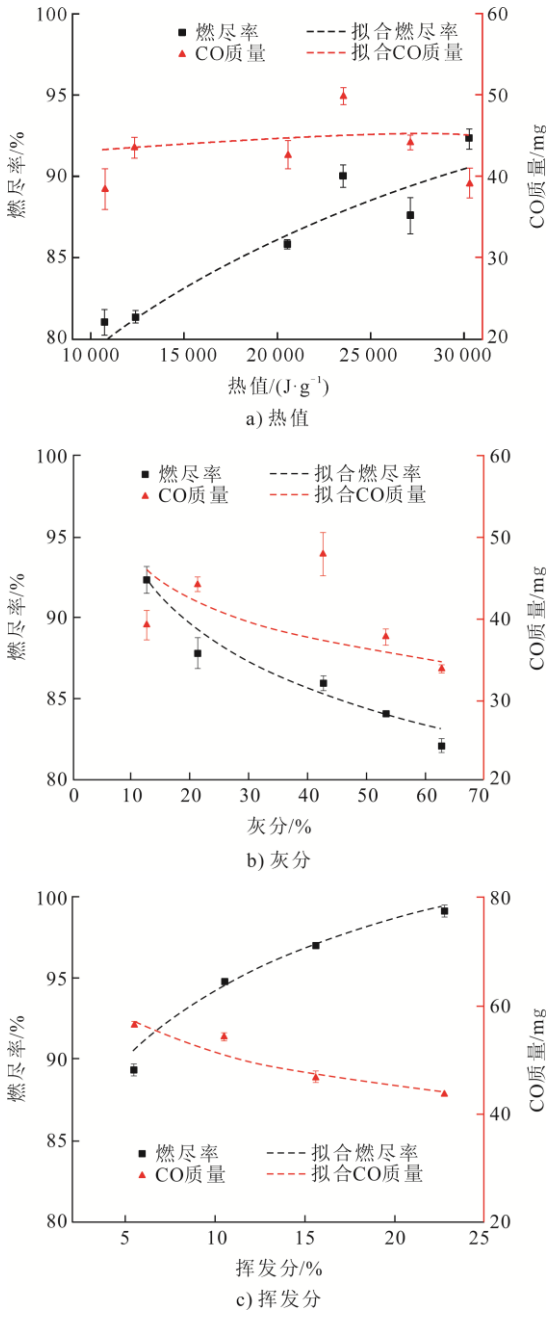


图 3 不同煤质参数下的煤样燃尽率与 CO 质量

Fig.3 Burnout ratio and CO mass of coal samples under different coal quality parameters

2.2 流场调节与保温的强化方法

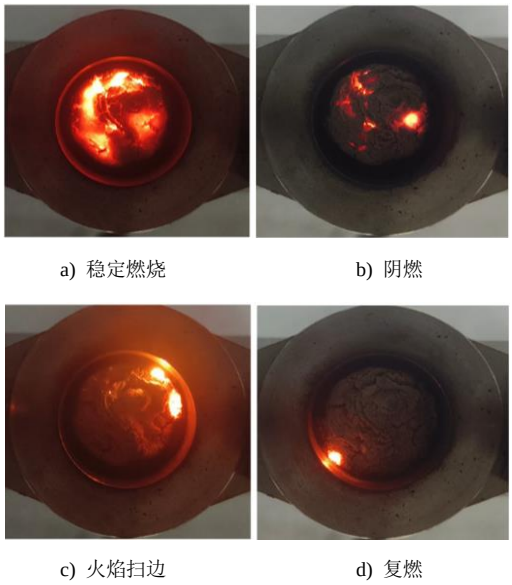
为了克服上层煤样燃烧形成的灰层所导致的氧气扩散阻力问题，从强化氧化剂供给和改善热力环境两方面入手。

2.2.1 氧气流量

实验进行了氧气流量 1~6 L/min 条件下煤样 9、

煤样 10 的堆积燃烧实验，研究氧气供给流量对不同煤种燃烧特性的影响。

低氧气流量下的煤粉燃烧过程如图 4 所示。由图 4 可知，边缘的煤样没有在主要燃烧阶段被点燃，而是在燃烧过程结尾时由一簇火苗沿边缘移动一周完成燃烧。这是由于氧气流量不足、金属坩埚导热引起的边缘煤样温度下降，导致火焰由点火中心向边缘的扩散过程不完全。



a) 稳定燃烧　　b) 阴燃

c) 火焰扫边　　d) 复燃

图 4 低氧气流量下的煤样燃烧形态演变
Fig.4 Evolution of combustion patterns of coal samples under low oxygen flow rate conditions

增加氧气流量能够显著提升燃烧速率，缩短燃烧总时长。氧气流量对燃烧特征时间参数及峰值温度的影响如图 5 所示。为区分不同煤样的测试结果，相关物理量符号采用复合下标进行标注，下标中的数字代表对应的煤样编号。如 t_9、$t_{m,9}$ 分别表示煤样 9 燃烧时间与最大燃烧速率的时刻、$T_{m,9}$ 表示煤样 9 的峰值温度。

由图 5 可见，随着氧气流量的提升，燃烧反应将由扩散控制逐步转变为化学反应动力学控制[12-13]。当氧气流量达到 5 L/min 或 6 L/min 的高流量时，煤样的高温氧化过程压缩，整体燃烧在 400~750 s 内便已完全结束，表明强化的对流传质极大提升了燃烧效率。

燃烧区域的峰值温度变化与氧气流量并不呈现简单的单调递增关系。峰值温度在氧气流量 1~3 L/min 内先降后升，在流量 3~6 L/min 内总体上升，仅在流量 6 L/min 处出现轻微下降的趋势。在氧气流量 1 L/min 时，燃烧缓慢但气流极小，对流散热损失极低导致局部热量积聚形成较高温度。流量 6 L/min 时过量的常温氧气对燃烧的煤粉样品产生了更强的对流冷却现象，气流散热速度超过反应产热增速时峰值温度下降。

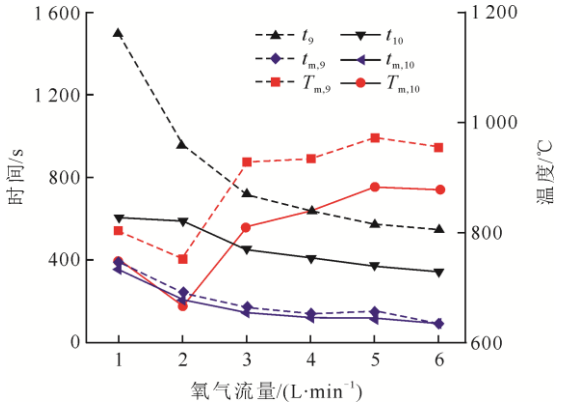


图 5 氧气流量对燃烧特征时间参数及峰值温度的影响
Fig.5 Influence of oxygen flow rate on combustion characteristic time parameters and peak temperature

氧气流量对 2 种煤样燃尽率及 CO 质量的影响如图 6 所示。在 1 L/min 的低流量工况下，燃烧反应受氧气供给限制严重，反应体系处于严重的缺氧状态，大量的碳无法完全氧化为 CO_2。氧气流量 1~3 L/min 工况下随氧气流量增加，煤样 9 和煤样 10 的 CO 质量显著降低，燃尽率上升。当流量超过 3 L/min 后，曲线的斜率明显变缓逐渐趋于水平。

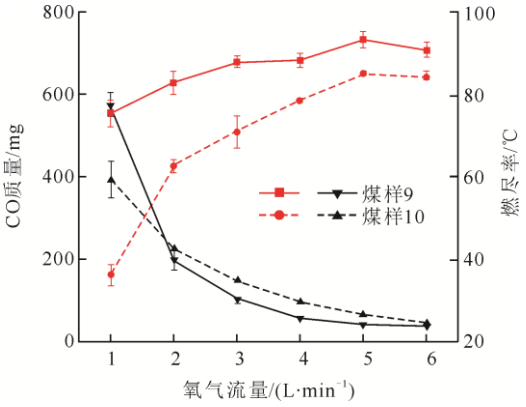


图 6 氧气流量对 2 种典型煤样燃尽率及 CO 质量的影响
Fig.6 Effect of oxygen flow rate on burnout ratio and CO mass of two typical coal samples

在低流量下燃烧受扩散阻力和火焰不稳定性主导，导致严重的未燃尽损失。在高流量下燃烧进入动力学控制区，单纯增加流量收益有限。并且考虑到高流量氧气的冷却效应，兼顾测量准确性和经济性，仪器的工作流量应设定在 3~5 L/min，且对于难燃煤种应确保流量不低于 3 L/min。

2.2.2 氧气流速

为了不增加总气量，在控制热散失的前提下强化对流传质，采用在恒定流量下缩小喷嘴缝隙提高氧气射流速度的方法，提升煤粉的燃尽率。实验中采用的喷嘴如图 7 所示，缝隙宽度从左至右分别为 0.2、0.6、1.1 mm。高速氧气射流具有极强的动量，能够增强气固接触界面的湍流程度。提高射流速度能够显著增强卷吸效应和湍流混合，从而改变煤样的燃烧模式并提升燃烧效率，相关实验研究也证实，优化气流动力场特性能够改善煤粉颗粒的点火与燃尽性能[14-15]。



图 7 3 种氧气喷嘴实物
Fig.7 Photographs of three oxygen nozzles

图 8 展示了在氧气流量为 5 L/min 时，随着喷嘴缝隙宽度从 1.1 mm 减小到 0.2 mm，煤样燃烧特征时间参数的变化。随着喷嘴缝隙变窄，煤样 9 和煤样 10 的燃烧时间均呈现下降趋势。特别是煤样 9，燃烧时间从约 580 s 缩短至近 440 s。达到最大燃烧速率的时刻也随缝隙变窄而提前。剧烈燃烧时间随缝隙宽度的变化幅度较小，曲线相对平缓。

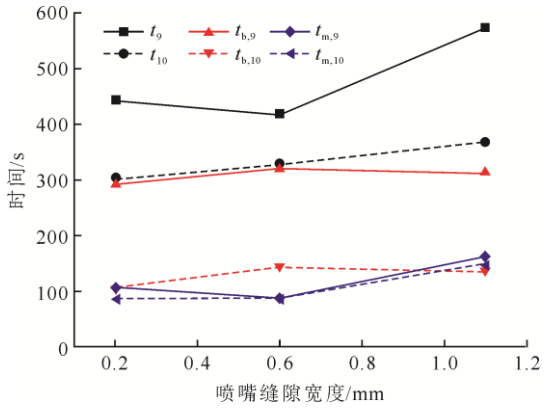


图 8 氧气喷嘴缝隙宽度对燃烧特征时间参数的影响
Fig.8 Influence of oxygen nozzle gap width on combustion characteristic time parameters of coal samples

图 9 量化了氧气射流速度对煤样燃尽的影响。由图 9 可知，随着喷嘴缝隙从 1.1 mm 减小到 0.2 mm，煤样的燃尽率提高，其中高灰分的煤样 10 燃尽率提升比煤样 9 更大，且燃烧过程中产生的 CO 明显减少。提高氧气流速对高灰分煤样的燃尽情况改善较为显著。

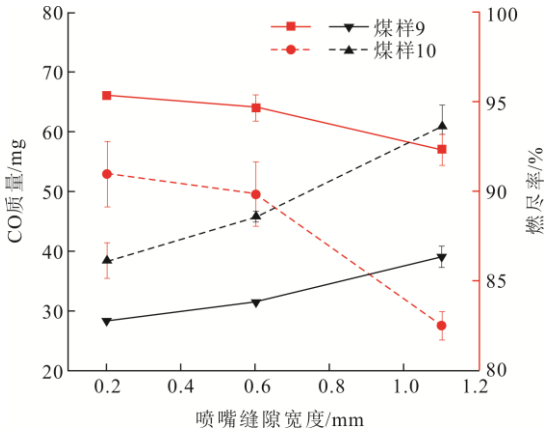


图 9 氧气喷嘴缝隙宽度对煤样燃尽率及 CO 质量的影响
Fig.9 Influence of oxygen nozzle gap width on burnout ratio and CO mass

提高氧气流量和射流速度虽能强化对流显著缩短燃烧时间并提高燃尽率，但效果有限。为了保证仪器对不同煤种，尤其是难燃尽的低热值高灰分煤的测量准确性，需要寻找更有效的手段。

2.2.3 保温

在坩埚外侧增加聚四氟乙烯（PTFE）保温材料减少坩埚通过壁面向外界环境的热量流失，探究燃烧过程中热量损失对煤样燃尽的影响，选取了煤样 9 和煤样 12 进行对比测试。

煤样 9 为高热值、低挥发分、高固定碳的优质煤，其燃烧主要依赖于反应速率较慢的焦炭燃烧阶段；煤样 12 则为中等热值、高挥发分的煤种，其燃烧特性更多地受前期挥发分析出与燃烧过程的影响。

实验结果表明，添加保温层后煤样 9 的燃尽率从 96.63%小幅提升至 97.16%，而煤样 12 的燃尽率则从 88.96%变为 89.04%，基本保持不变。

图 10 对比了煤样有无保温的最高温度和坩埚底部温度曲线变化，图中下标 PTFE 代表有保温层时的温度数据。由图 10 可知，保温层对坩埚的保温效果十分显著，对于煤样点燃和主燃烧阶段的反应温度影响较小。PTFE 保温层有效减少了坩埚通过热辐射和热对流向周围环境的热量散失，能够避免因底部散热过快而导致的局部燃烧熄灭，促进高固定碳煤样的燃尽。

保温对燃尽率的提升效果因煤种而异，不具有普适性。对于煤样 9 这类燃烧后期主要受温度影响的煤种，保温能起到一定作用。对于固定碳较低的

煤样 12，单纯提高固相表面温度对燃尽贡献较小。保温只能通过减缓降温速率来延长反应时间，不能够解决煤样燃烧过程中的其他限制因素。

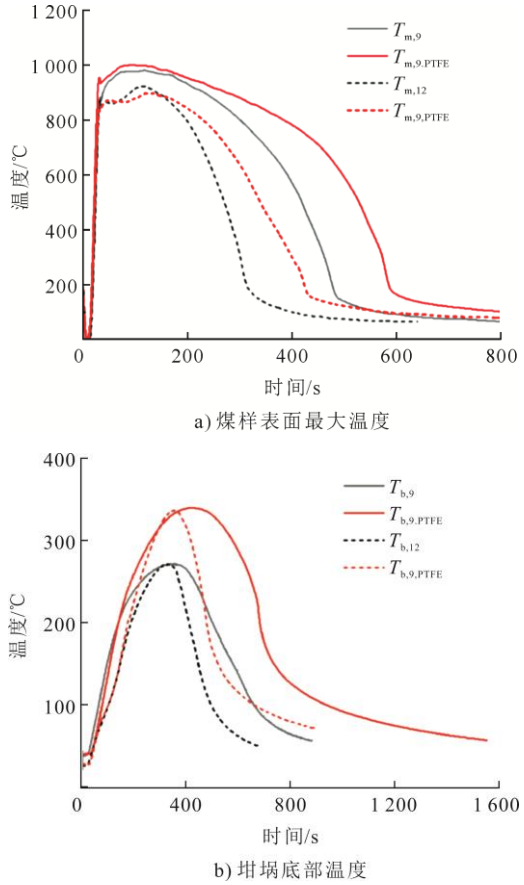


图 10 保温条件对煤样燃烧表面最高温度和坩埚底部温度的影响

Fig.10 Effects of thermal insulation on maximum surface temperature and crucible bottom temperature

2.3 基于机械扰动的主动强化方法

单纯依靠氧气工况调节和保温提升煤样燃尽率存在局限性。因此引入坩埚倾斜旋转方法，通过机械扰动使颗粒床层翻滚，阻碍上层煤粉燃烧后产生的灰形成灰层，促进未反应的焦炭与氧气的接触。通过多参数耦合优化探究旋转起始时间、倾斜角度及转速对燃尽特性的影响规律，并验证该方法的普适性。

2.3.1 旋转起始时间对燃尽的影响

旋转起始时间直接关系到燃烧稳定性和扰动介入的时效性，是影响控制策略成败的关键变量。在进行多参数耦合优化之前，首先需要确定关键参数的有效工作区间。在固定倾斜角度 45°、转速 30 r/min 的条件下，探究了旋转起始时间对煤样燃尽的影响规律如图 11 所示。

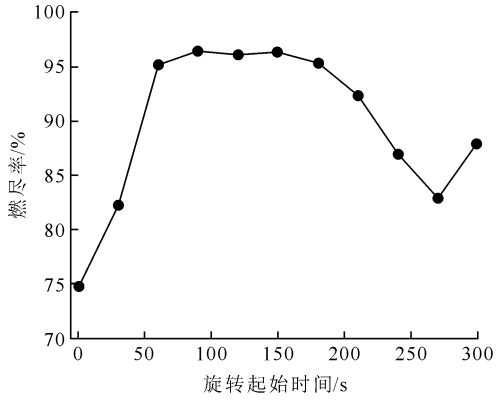


图 11 不同旋转起始时间对煤样燃尽率的影响

Fig.11 Influence of different rotation start times on burnout ratio

在燃烧初期，即点火后 50 s 内启动旋转时，煤样燃尽率显著低于未旋转工况。这是因为燃烧初期煤粉颗粒尚未形成稳定的放热中心，过早的机械扰动使燃烧中的部分煤样热量散失过快，甚至出现火焰熄灭或燃烧中断而后复燃的现象，从而增加了未燃尽损失。

旋转起始时间处于 60~200 s 内时，燃尽率显著提升。这一时间区间对应煤粉的主燃烧阶段，此时稳定的火焰已经形成。坩埚的倾斜旋转有效破坏了颗粒表面生成的灰分层，并且阻碍了上层煤粉燃烧后留下的灰分结成灰壳，将下层未反应的焦炭和煤粉暴露于富氧环境中，显著强化了氧气的扩散与吸附过程。

当旋转起始时间过晚时，大部分燃烧反应已经结束，此时再引入扰动反而会使火焰提前熄灭，燃尽率下降，曲线最终趋近于静止工况下的结果。

为了保证燃烧稳定性并最大化扰动效果，最佳的旋转介入时间应在主燃烧阶段初期。基于此单因素实验结果，后续正交实验将 60、120、180 s 选取为旋转起始时间的 3 个水平，以进一步探究其与其他参数的耦合效应。

2.3.2 关键参数的正交实验优化

在上述单因素探索的基础上，采用 $L_9(3^4)$正交实验设计方法进行分析，以确定各参数的主次顺序及最佳组合。具体的因素水平设计如表 3 所示。

表 3 正交实验因素水平表

Tab.3 Factors and levels for orthogonal experiments

水平	旋转起始时间 *A*/s	倾斜角度 *B*/(°)	转速 *C*/(r·min^{-1})
1	60	35	15
2	120	45	30
3	180	55	45

选用典型高灰分难燃煤样 10 作为测试对象，以燃尽率作为评价指标。正交实验方案及极差分析结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 正交实验方案
Tab.4 Scheme of orthogonal experiments

实验号	*A*	*B*	*C*	燃尽率/%
1	1	1	1	90.66
2	1	2	2	95.83
3	1	3	3	96.64
4	2	1	2	90.87
5	2	2	3	95.83
6	2	3	1	97.20
7	3	1	3	89.87
8	3	2	1	95.39
9	3	3	2	96.41

表 5 极差分析结果
Tab.5 Range analysis results

参数	*A*	*B*	*C*
*K*1	94.38	90.47	94.42
*K*2	94.63	95.68	94.37
*K*3	93.89	96.75	94.11
R	0.74	6.28	0.31

结果表明，坩埚倾斜角度是决定机械扰动效果的主要因素。倾斜角度直接决定了颗粒沿壁面滑落的重力分量大小，是驱动床料翻滚、破坏灰壳的动力。相比之下，在 60~180 s 的稳定燃烧区间内，介入时间与转速的变化对最终燃尽率的影响较小，具有较宽的稳定运行窗口。

各因素的主效应趋势分析表明，随着倾斜角度从 35 °增加至 55 °，计算所得的燃尽率数值呈现上升趋势。但在实验过程中观测到，当倾斜角度达到 55 °时，由于重力分量过大，部分煤粉及灰烬颗粒在旋转过程中滑落并溢出坩埚。根据本研究采用的称重法计算公式，溢出的样品质量会被计入质量损失，导致计算结果中燃尽率升高。而 45 °工况在保证不发生洒料的前提下，能够最大程度地利用重力分量实现颗粒的有效翻滚与气固混合。

综合考虑燃尽强化效果与系统运行的稳定性，本研究确定常压在线量热仪的最佳机械扰动工况为倾斜角度 45 °、旋转起始时间 60 s、转速 30 r/min。该组合在保证不洒料的前提下，最大程度地发挥了机械翻滚对灰层形成的阻碍作用。

2.3.3 不同煤种的适应性验证

为验证上述机械扰动策略对不同难燃煤种的普适性，选取了涵盖灰分约 10%~60%和热值 11 000~30 000 J/g 范围内的 6 种典型难燃煤样，在静止工况与旋转优化工况下进行对比实验。实验结果如图 12 所示。

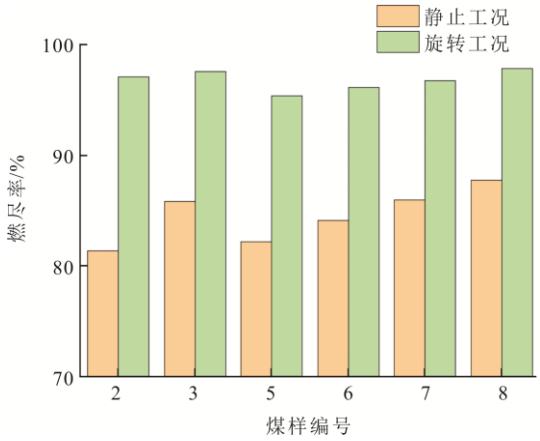


图 12 6 种煤样不同燃烧工况下燃尽率对比
Fig.12 Comparison of burnout ratios for six coal samples under different combustion conditions

实验数据表明，引入坩埚倾斜旋转的机械扰动后，测试煤样的燃尽率均有显著提升。在优化后的旋转扰动工况下，所有测试煤样燃尽率均提升至 95%以上。燃烧效率的提升使得热值测量在修正前的相对误差降低至 4%以内。证实主动机械扰动方法有效消除了高灰分导致的氧气扩散阻力，并且对于不同煤种具有普适性。

该方法成功将常压在线量热仪的有效适用范围从低灰分、高热值、高挥发分的优质煤，大幅扩展至灰分小于 60%、热值高于 11 000 J/g 的区间，显著提升了仪器在复杂工业现场的适应性。

3 结　论

1）在各煤质参数中，灰分含量是制约煤粉燃尽率的关键因素，当灰分超过 40%时，燃尽率下降至 85%以下，其与燃尽率呈显著负相关。

2）常规氧气参数调控与保温方法对燃尽率的提升作用有限。氧气流量存在供氧助燃与对流冷却的平衡，最佳工作区间为 3~5 L/min。保温仅能改善高固定碳优质煤的燃尽，无法解决高灰分煤因氧气扩散受阻导致的难燃尽问题。

3）坩埚倾斜旋转策略有效提升了多种煤样的燃尽率。综合考虑燃尽效果与运行稳定性，确定最优工况为坩埚倾斜角度 45 °，转速 30 r/min，旋转起始时间 60 s。该工况下能有效破坏灰壳结构，显著

强化气固接触，使常压在线量热仪的有效测量范围从原有的灰分小于 10%、热值高于 25 000 J/g 的优质煤种，扩展至灰分小于 60%、热值高于 11 000 J/g 的更宽范围的煤种。

坩埚倾斜旋转策略有效解决了高灰分煤种的氧气扩散受阻问题，显著提升仪器对复杂煤种的适应性，为常压在线量热仪的设计提供了高效可靠的技术路径。未来研究将把该模块集成至新一代的量热仪样机中，重点开展在线量热仪热值测量精度的系统标定与修正算法研究。

[参 考 文 献]

[1] 周念成, 戴旭晖, 池源, 等. 考虑快速变负荷和灵活性供需匹配的耦合系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(1): 117.
Zhou N C, Dai X H, Chi Y, et al. Optimal scheduling of coupled systems considering rapid load adjustment and flexibility supply-demand matching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 117.

[2] Zhang B, Niu N, Li H, et al. Assessing the efforts of coal phaseout for carbon neutrality in China[J]. Applied Energy, 2023, 352: 121924.

[3] Tsuji H, Shirai H, Matsuda H, et al. Emission characteristics of NO_x and unburned carbon in fly ash on high-ash coal combustion[J]. Fuel, 2011, 90(2): 850.

[4] Lai A L, Wang Q W. How coal de-capacity policy affects renewable energy development efficiency? Evidence from China[J]. Energy, 2024, 286: 129515.

[5] Wang L L, Wu X C, Gao X, et al. A method for in-situ measurement of calorific value of coal: a numerical study[J]. Thermochimica Acta, 2021, 703: 179011.

[6] Wang L L, Wu X C, Chen L H, et al. An in-situ calorimeter for coal powder: a numerical investigation[J]. Thermochimica Acta, 2021, 701: 178965.

[7] Zhang X G, Wang L L, Jin Q W, et al. Research on on-site measurement factors and performance of coal calorific value based on laser ignition[J]. Fuel, 2023, 351: 128854.

[8] Wu X C, Zhang X G, Lin Z M, et al. Development of an online dual-cylinder open calorimeter for coal powder: an experimental investigation[J]. Fuel, 2024, 372: 132063.

[9] 张喜来, 王志超, 周广钦, 等. 电站锅炉高碱煤燃用技术发展现状及展望[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 133.
Zhang X L, Wang Z C, Zhou G Q, et al. Present situation and prospect of high-alkali coal combustion technology in power plant boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 133.

[10] Liu L, Jiao Q R, Yang J, et al. Influences of ash-existing environments and coal structures on CO_2 gasification characteristics of tri-high coal[J]. Processes, 2020, 8(11): 1367.

[11] Yilmaz S. The relationship between unburned carbon levels in coal combustion ash and volatile matter content in coal[J]. Combustion Science and Technology, 2021, 193(4): 716.

[12] Chao C Y, Wu K, Du R L, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of pulverized coal and semicoke[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(11): 1532.

[13] Si F Y, Zhang H M, Feng X R, et al. Thermal analysis kinetics study of pulverized coal combustion under oxygen-rich atmosphere[J]. ACS Omega, 2023, 8(37): 33975.

[14] Huang W S, Wu Y X, Feng L L, et al. Effect of jet velocity on the formation of moderate or intense low-oxygen dilution combustion of pulverized coal[J]. ACS Omega, 2023, 8(13): 11999.

[15] 魏小林. 煤粉气流着火机理及最佳煤粉浓度的分析[J]. 燃烧科学与技术, 2022, 28(6): 639.
Wei X L. Ignition mechanism of pulverized coal flow and analysis of optimal pulverized coal concentration[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2022, 28(6): 639.

（责任编辑　邓玲惠）