

文章编号: 1671-6612 (2025) 05-670-08

催化燃烧红外取暖器的燃烧和供热特性研究

秦铭远 苏 华 徐兰静

(西华大学 成都 610039)

【摘 要】 寒冷室外环境引发的伤亡事件频繁发生, 突显出对高效取暖的迫切需求。研究设计了一种基于自主研发的 1% Pt/Al₂O₃·SiO₂ 催化剂的多孔介质催化燃烧取暖器。通过实验评估了该自然扩散式取暖器的多个关键性能指标, 包括燃烧效率、活性位点、燃烧温度、红外光谱以及供热效果。结果表明, 该催化剂具有较高的活性 ($T_{50}=397.2^{\circ}\text{C}$ 和 $T_{90}=463.2^{\circ}\text{C}$), 微观上活性位点 Pt⁰ 和 Pt⁴⁺ 在反应中动态转化, 体现出良好的氧化还原调节能力。在燃气流量为 1L/min 条件下, 可实现 99.90% 的燃烧效率。其红外峰值辐射波长 (3-10 μm) 与人体皮肤及常见衣物的吸收波段高度匹配, 有助于提升辐射热量的吸收效率与供热效果。研究为取暖提供了切实可行的工程应用前景, 并提出了评估寒冷环境取暖问题的系统方法。

【关键词】 辐射供热; 多孔介质催化燃烧; 红外加热器; 自然扩散

中图分类号 TU833 文献标志码 A

Combustion and Thermal Performance Analysis of a Catalytic Infrared Heater

Qin Mingyuan Su Hua Xu Lanjing

(Xihua University, Chengdu, 610039)

【Abstract】 Casualties caused by exposure to cold outdoor environments occur frequently, highlighting the urgent need for efficient heating solutions. In this study, a porous media catalytic infrared emergency heater was developed based on a self-designed 1% Pt/Al₂O₃·SiO₂ catalyst. The heater operates via natural gas diffusion, and its key performance indicators, including combustion efficiency, active site characteristics, combustion temperature, infrared spectral properties, and heating effectiveness, were systematically evaluated. Experimental results demonstrated high catalytic activity ($T_{50}=397.2^{\circ}\text{C}$, $T_{90}=463.2^{\circ}\text{C}$), with XPS analysis revealing that the active species Pt⁰ and Pt⁴⁺ undergo dynamic transformation during the reaction, indicating strong redox regulation capability. Under a gas flow rate of 1L/min, the heater achieved a combustion efficiency of 99.90%. The infrared radiation emitted predominantly within the 3-10 μm wavelength range aligns well with the absorption bands of human skin and common clothing materials, thereby enhancing thermal absorption and overall heating performance. This work provides a practical engineering solution for emergency heating and proposes a systematic approach to evaluating heating strategies in cold environments.

【Keywords】 Radiation heating; Porous media catalytic combustion; Infrared heater; Natural diffusion

0 引言

户外活动、野外作业以及灾后重建等场景中对

可靠供热设备的需求日益增加。低温环境不仅影响人体热平衡, 也会对生命安全、生产效率和环境适

项目基金: 西华大学人才引进项目 (ZX20250024)

作者 (通讯作者) 简介: 秦铭远 (1996.06-), 男, 博士, 讲师, E-mail: qinmingyuan@xhu.edu.cn

收稿日期: 2025-06-30

应性构成显著威胁。户外供热设备的技术进展相对滞后, 尤其在便携性、安全性与热效能之间缺乏有效平衡。

在能效提升与清洁供热需求不断增强的背景下, 传统户外燃烧装置普遍存在能量利用率低和不完全燃烧带来的污染排放等问题。同时, 明火燃烧方式在户外环境下伴随火灾、爆炸等潜在风险, 进一步限制了其安全性与可靠性。尽管已有研究在室内供暖或工业燃烧系统中取得了一定进展^[1,2], 但针对户外或野外供热场景的研究仍然匮乏, 尤其是针对复杂多变和极端的环境。因此, 亟需发展能够兼顾效率、环保与安全的新型燃烧方式, 为户外复杂环境下的供热提供更优解决方案。

多孔介质燃烧 (Porous Media Combustion, PMC) 作为一种高效、低污染的燃烧方式^[3], 因其良好的火焰稳定性和热回收能力而受到广泛关注。催化燃烧技术 (Catalytic Combustion, CC) 通过在较低温度下实现可控反应, 进一步降低了点火温度并减少污染物排放^[4]。在此基础上, 多孔介质催化燃烧 (Porous Media Catalytic Combustion, PMCC) 作为两者融合形式, 不仅可实现低温清洁反应, 还具备显著的热效率与结构优势^[5]。已有研究表明, PMCC 可有效扩展火焰稳定范围, 提高热利用效率, 并兼顾环保性能。然而, PMCC 在供热场景中的应用尚处于起步阶段, 相关研究仍集中于催化性能、燃烧行为及污染控制等基础层面, 尚缺乏针对户外实际使用环境的系统评估。

当前尚无文献系统研究 PMCC 技术在室外或野外供热中的适应性表现, 其热效率、红外辐射特性及对人体热感知的影响机制仍有待探索。为此, 本研究基于自研 Pt 基多孔催化剂, 构建一套自然扩散式 PMCC 加热器, 并围绕其燃烧效率、催化活性、红外波长分布及皮肤热响应等核心指标开展系统实验, 旨在为室外供热装置的结构优化与性能评价提供理论基础和数据支持。

1 取暖器的物化参数

1.1 催化剂性能介绍

本研究的所有核心工作均基于自主研发的催化剂 (1% Pt/Al₂O₃·SiO₂), 其参数详如表 1 所示。

该催化体系以 Al₂O₃·SiO₂ 纤维为载体, 贵金属 Pt 通过浸渍法均匀负载于其表面。

表 1 催化剂的主要参数

编号	名称	参数
1	催化剂单位面积质量	350g/m ²
2	纤维平均直径	5μm
3	催化剂颗粒平均粒径	18nm
4	催化剂比表面积	150m ² /g
5	催化剂孔体积	0.14cm ³ /g
6	催化剂平均孔径	5.25nm
7	催化剂中元素含量	Pt≤1wt%(14g/m ²), Al ₂ O ₃ ≥95wt%, SiO ₂ ≤4wt%
8	使用温度范围	350–480℃

催化活性通过比较两种催化剂样品间的甲烷转化效果进行间接评估: 一种为自主研发催化剂 (E_{Cat}), 另一种为市售催化剂 (U_{Cat})。催化活性主要依据甲烷在不同温度下的转化率来体现, 通常以甲烷初始浓度达到 50% 与 90% 转化时对应的温度 (T₅₀ 与 T₉₀) 作为评估指标^[6]。相对温度越低, 表示转化效率越高, 催化活性越好。甲烷转化率的计算公式如式 (1) 所示。

$$\eta_{conv} = \left(1 - \frac{C_{CH_4-outlet}}{C_{CH_4-inlet}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: η_{conv} 为甲烷转化率; $C_{CH_4-outlet}$ 和 $C_{CH_4-inlet}$ 分别为进出口甲烷浓度。

实验原料气体由高纯度甲烷 (99.99%) 与干燥空气按体积比 1:49 混合 (CH₄:AIR=1:49, $C_{CH_4-inlet}$ =2%, φ =0.19), 在 50mL/min 的流速条件下点火, 催化剂质量统一为 0.4g, 对应质量空速 (WHSV) 为 7500mL/(g·h)。每升高 20℃ (自 200℃ 起), 采用气相色谱仪 (型号: GC9790) 测量出口端甲烷浓度 ($C_{CH_4-outlet}$)。详细的实验流程如图 1 所示。

图 2 展示了随着温度升高, 甲烷在两种催化剂上的转化率变化情况。结果显示, E_{Cat} 与 U_{Cat} 对应的 T₅₀ 值分别为 397.2℃ 和 448.9℃, T₉₀ 值分别为 463.2℃ 和 486.6℃。总体而言, E_{Cat} 表现出比 U_{Cat} 更高的催化活性。

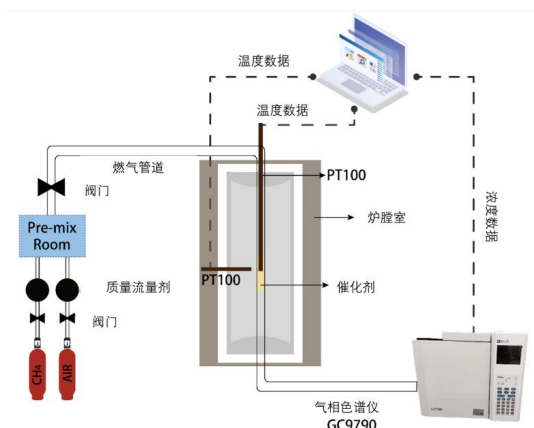
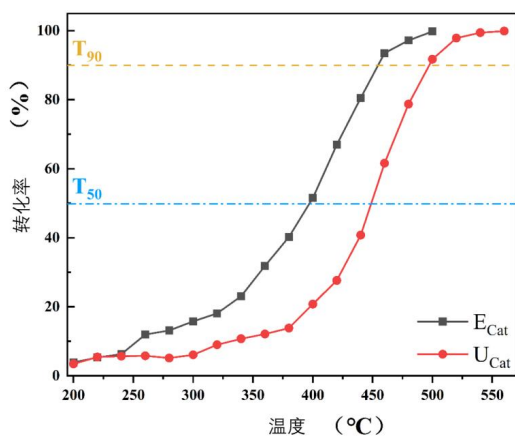


图1 甲烷转化实验的设计与流程

Fig.1 Design and procedure of the methane conversion experiment

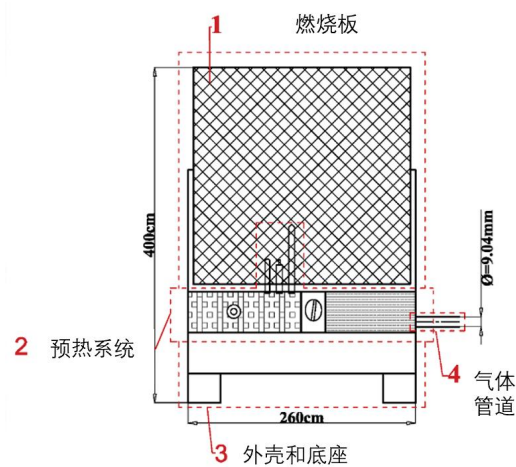
图2 甲烷在自研催化剂（ E_{Cat} ）与市售催化剂（ U_{Cat} ）上的转化率对比Fig.2 Comparison of methane conversion over E_{Cat} and U_{Cat}

1.2 取暖器结构介绍

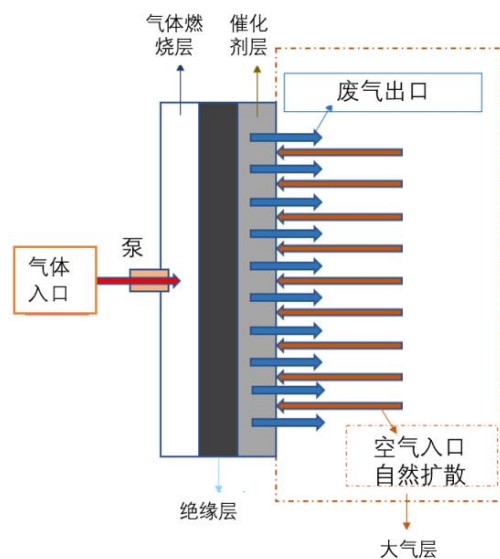
取暖器主要结构包括：燃烧板、预热系统面板、燃气管道、外壳及底座。外观图与平面结构如图3（a）与图3（b）所示。该装置属于一种自然扩散式催化氧化燃气红外辐射取暖器，无需配备专门的送风装置，催化层直接暴露于大气环境中，如图3（c）所示。如图3（d）所示，嵌入外壳的燃烧板尺寸为：长250mm、宽200mm、厚40mm。该燃烧板由四层结构组成，依次为不锈钢网、催化剂层、保温层与背板。不锈钢网的主要作用是保护催化剂层的结构完整性。保温层采用 $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ 材料，兼具阻燃与隔热功能，可有效降低热量传导。背板则采用铝制材料，以减轻整体重量。



(a) 外观图



(b) 平面结构图



(c)

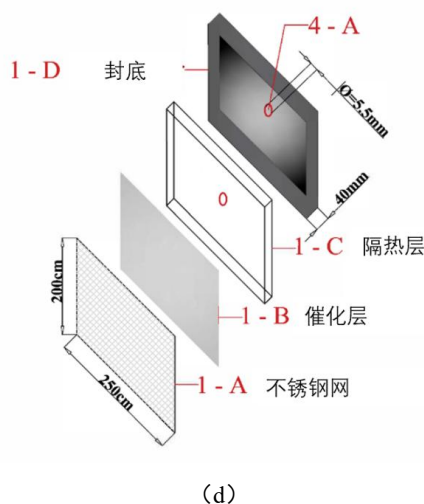


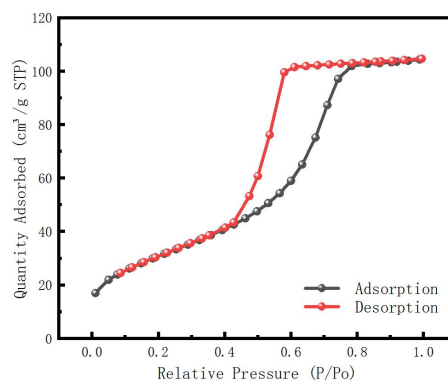
图 3 取暖器的结构组成

Fig.3 Structural composition of the heater

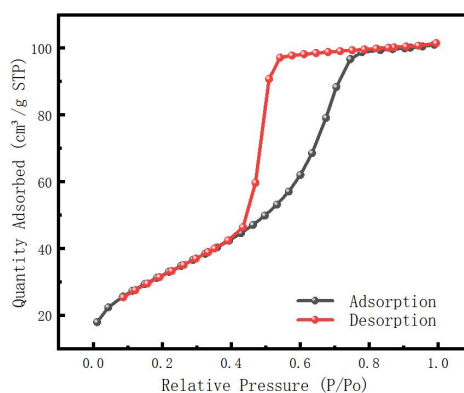
1.3 催化剂孔结构

Brunauer-Emmett-Teller (BET) 孔隙率测试是一种基于气体物理吸附的分析方法, 用于表征材料的比表面积与孔结构特性。本研究采用氮气吸附/脱附等温线, 在 77K (-196℃) 下使用 SIMP-10 比表面积分析仪进行测试。测试前, 样品在 150℃ 真空脱气 12h, 以去除表面水分和吸附杂质。吸附等温线采集于相对压力 (P/P_0) 为 0.01-0.99 的范围内, 单点平衡时间设为 60s。比表面积计算采用 BET 法, 选取 P/P_0 在 0.05-0.35 区间内的数据。孔径分布通过 Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 模型, 基于解吸支线数据进行分析; 总孔体积根据 $P/P_0 \approx 0.99$ 处的吸附量估算; 微孔体积通过 t 图法计算, 中孔特征同样依据 BJH 结果获得。所有参数由仪器配套软件自动计算, 氮气分子横截面积取值为 0.162nm^2 。

根据 BET 测试的结果如图 4 和表 2 所示, 厚度为 0.5cm 的催化剂比表面积为 $112.30\text{m}^2/\text{g}$, 孔体积为 $0.1618\text{cm}^3/\text{g}$, 平均孔径为 4.14nm ; 而 0.8cm 厚度样品的比表面积略高 ($117.76\text{m}^2/\text{g}$), 孔体积略低 ($0.1571\text{cm}^3/\text{g}$), 平均孔径也更小 (3.77nm)。吸附等温线如图 4 所示, 均呈典型的 IV 型等温线与 H1 型滞后环, 表明材料具备均一的介孔结构。进一步显示, 0.8cm 厚样品的孔径分布更为集中, 毛细凝聚发生在更低的相对压力范围内, 进一步佐证其孔径小于 0.5cm 厚度样品, 且整体结构中未观察到明显大孔。



(a) 0.5 厚度



(b) 0.8 厚度

图 4 催化剂吸脱附曲线

Fig.4 Nitrogen adsorption/desorption of the catalysts

表 2 催化剂的 BET 比表面积、孔径和孔体积

Table 2 BET surface area, average pore diameter, and pore volume of catalysts with different thicknesses

样本	S ^a BET/m ² ·g ⁻¹	孔体积 ^b /cm ³ ·g ⁻¹	孔径 ^b /nm
0.5	112.3045m ² /g	0.161806cm ³ /g	4.1352nm
0.8	117.7562m ² /g	0.157062cm ³ /g	3.7704nm

2 燃烧特性分析

2.1 燃烧效率

燃烧效率定义为燃料实际释放的热量与其输入热量之比。换句话说, 燃烧效率衡量的是燃料在燃烧过程中被完全转化为 CO_2 和 H_2O 的程度^[7]。催化燃烧取暖器常用的燃料为液化丁烷。其燃烧效率可表示为:

$$\eta_c = 1 - \frac{\dot{m}_{\text{CO}_2, \text{out}} \times q_{\text{CO}} + \dot{m}_{\text{H}_2, \text{out}} \times q_{\text{H}_2} + \dot{m}_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \times q_{\text{C}_4\text{H}_{10}}}{(\dot{m}_{\text{C}_4\text{H}_{10}})_{\text{in}} \times q_{\text{C}_4\text{H}_{10}}} \quad (2)$$

由于燃烧室是自然扩散的, 燃气体积流量是唯

一变量,本研究通过转子流量计(型号:LZB-3WB)对燃气体积流量进行控制,设定的流量分别为:0.1L/min、0.2L/min、0.4L/min、0.6L/min、0.8L/min与1.0L/min。图5展示了燃气调节系统与尾气收集系统的实验现场布置图。燃烧产生的尾气首先被引入密闭的铝箔收集箱中充分混合,然后抽取至气体采样袋中。所收集尾气的组分浓度由气相色谱仪(型号:GC-9560-HS)进行分析检测。



图5 尾气收集系统

Fig.5 Exhaust gas collection system

基于上述方法,对排放气体中可能出现的未被完全燃烧产物浓度进行测量,包括 C_4H_{10} 、CO和 H_2 。由于催化燃烧条件下不具备热力型、燃料型及快速型氮氧化物的生成条件^[8],排放气体中不会产生上述三类氮氧化物,因此未进行氮元素的检测。测量结果如图6所示。检测限为0.01%,在不同气体流量下均未检测到CO和 H_2 ,表明取暖器在燃烧过程中几乎不存在不完全燃烧产物。随着气体流量的增加,未参与燃烧的 C_4H_{10} 浓度呈下降趋势;相应的,燃烧效率也随之升高。燃料供应充足时,催化燃烧反应更为剧烈,在流量为1L/min时,燃烧效率 η_c 达到最大值(99.901%)。此外,采用逻辑拟合方法,建立了气体流量、 C_4H_{10} 浓度与燃烧效率之间的函数关系,表达式如式(3)式(4)所

示。

$$y = 0.0399 + 2.5361 / (1 + (x / 0.287)^{3.95}) \quad (3)$$

$$y = 99.93 - 2.79 / (1 + (x / 0.285)^{4.02}) \quad (4)$$

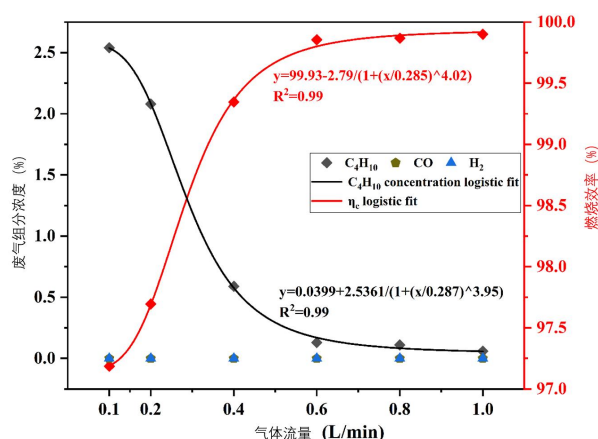


图6 排放气体中不完全燃烧组分与燃烧效率

Fig.6 Exhaust gas components and combustion efficiency

2.2 催化剂活性位点变化规律

X射线光电子能谱(XPS)是一种高表面灵敏度的电子能谱技术,基于光电效应,通过测量样品表面光电子的动能分布,以分析元素的化学状态和结合能。本研究采用Thermo ESCALAB 2001系统对催化剂样品中的Pt元素进行分析。在测试前,样品置于快速装载腔中,确保表面洁净且无污染。系统使用单色化Al K α X射线源(1486.6eV)进行激发,光斑直径设置为500 μ m,通能(pass energy)为30eV,以获取高分辨率的Pt 4f能谱数据。为消除表面电荷积累对能量漂移的影响,采用C 1s信号(结合能为284.8eV)进行电荷中和校正。系统真空维持在 2.0×10^{-10} mbar以下,保证测试精度。

在对催化剂样品进行XPS分析时,清晰识别出Pt 4f 7/2和Pt 4f 5/2两个自旋轨道分量,表明催化剂表面存在Pt的多种化学价态^[9]。检测结果显示,Pt以金属态(Pt^0)和四价态(Pt^{4+})共存,体现出良好的氧化还原特性。作为高效燃烧催化剂,Pt可显著促进燃料分子的活化与氧化过程^[10]。影响Pt价态分布的主要因素包括反应温度、当量比变化、催化剂表面结构重构及其与载体的相互作用。其中,当量比直接决定了燃料与氧气的相对浓度,进而调控催化剂表面的氧化还原环境与Pt的价态转变。实验结果表明,随着当量比的变化, Pt^0 和 Pt^{4+} 之间发生显著的动态转化,这种转化受到反应

环境中当量比的调控。如图 7 所示, 金属态 Pt 含量随当量比变化呈现明显波动, 尤其在当量比约为 0.2 时达到峰值。与此同时, Pt^{4+} ($4f\ 7/2$ 和 $4f\ 5/2$) 含量则表现出相反趋势。具体而言, 在低当量比(富氧条件)下, 表面氧化性增强, 促进 Pt^0 向 Pt^{4+} 的氧化; 而随着当量比升高(富燃环境), 催化剂表面还原性增强, 有利于 Pt^{4+} 向 Pt^0 的还原转变。这种价态转化反映了 Pt 作为活性相在动态氧化还原环境中受到气体组分调控的可逆重构特性。综上, 通过对 Pt 价态分布的分析, 结合催化剂表面氧化物种的转化行为, 可进一步阐明该类催化剂在实际燃烧反应中的作用机制与动态演化特征^[11]。

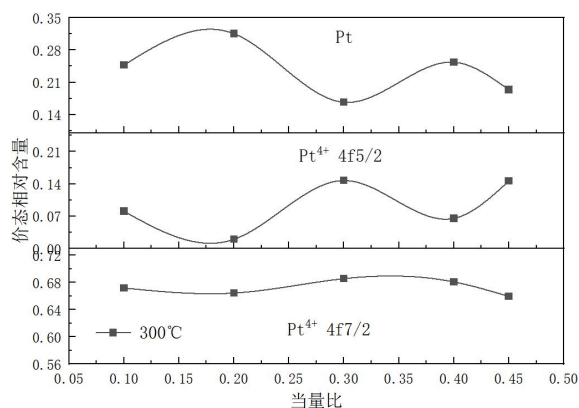


图 7 Pt 元素价态相对含量变化

Fig.7 Variation in the relative proportions of pt oxidation states

2.3 燃烧温度分布

为获取催化燃烧板的温度分布特征, 本研究采用热电偶阵列进行测量。将燃烧板划分为 25×20 个等间距单元格, 在各区域催化层中心插入 K 型热电偶, 借助数字温度显示仪 (KCM-LCD16) 实时记录各点温度数据。测试在丁烷体积流量 $1\text{L}/\text{min}$ 的稳定燃烧工况下进行, 测量结果如图 8 所示。燃烧板表面温度高于 350°C 和 400°C 的区域分别占总面积的 88.67% 和 67.38%, 其中最高温度为 476.9°C , 最低为 279°C 。整体上, 下部区域温度高于上部, 四角区域则表现出明显的温度下降现象。造成上述分布特征的原因包括气体密度差异导致的燃料浓度重力分层以及边缘孔隙结构变化。BET 测试表明, 0.8cm 厚度样品具有更大的比表面积和更均匀的介孔分布, 能够为反应提供更多活性位点, 并改善气体在催化层内部的扩散与传输效率。这种优化的孔结构有助于燃烧热的均匀释放, 从而

降低局部过热或欠燃的发生概率, 是实现温度分布稳定性的重要保障。因此, 微观孔结构的调控对催化燃烧板热场的一致性具有显著提升作用。

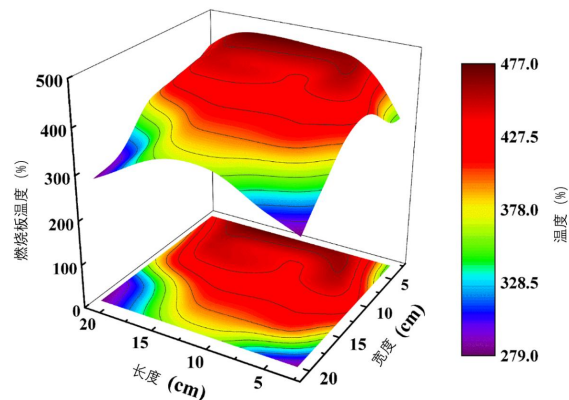


图 8 燃烧板内的温度分布

Fig.8 Temperature distribution inside the combustion plate

2.4 红外波长范围

辐射式燃烧器的辐射效率一直是相关研究的重点^[12]。然而, 高辐射性能并不意味着热量能够被接收端完全吸收。因此, 取暖器的辐射光谱与人体吸收光谱之间的一致性, 即红外波长对人体皮肤组织的生理响应匹配程度具有重要意义。本研究采用傅里叶变换光谱仪 (FTS, 型号: Vertex80) 对取暖器在 $1\text{L}/\text{min}$ 燃气流量下的红外光谱波长进行测量, 表 3 列出了光学测量设置。

表 3 傅里叶光谱仪的光学系统设置

Table 3 Optical system settings of fourier spectrometer

模块	设定参数
分束器	KBr
光圈	4mm
探测器	DTGS($4000\sim 400\text{cm}^{-1}$)
扫描速度	10kHz
内部工作环境	大气环境

图 9 显示了加热器稳态燃烧过程中红外能量主要集中在分布的波长范围。能量主要集中在 $3\sim 10\mu\text{m}$ 之间。由于水分子 (3 、 4.7 、 6 和 $15.3\mu\text{m}$)^[13]、脂肪中的羧基 ($\text{C}=\text{O}$, $5.71\sim 5.76\mu\text{m}$)、蛋白质中的酰胺 ($5.92\mu\text{m}$)^[14]等红外吸收带与上述波峰区域相近, 说明加热器释放的辐射能量对人体皮肤具有高度敏感性。此外, 该波段也与常见纺织品的红外吸收范围高度一致, 如羊毛和丝绸 ($5.88\sim 6.7\mu\text{m}$)、

棉麻 (约 $10\mu\text{m}$)、聚酰胺 ($5.88\sim 16.67\mu\text{m}$) [15], 有利于织物吸收辐射热量并传导至人体。

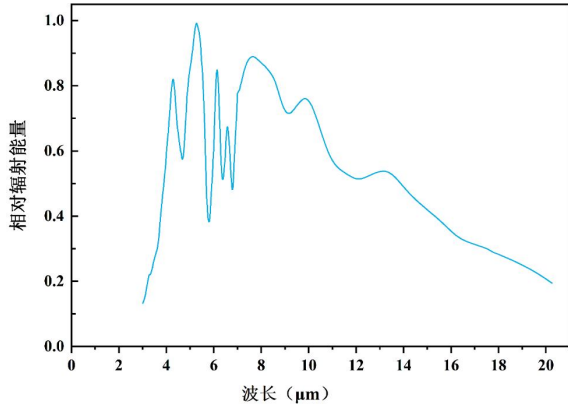


图9 加热器的红外波长分布

Fig.9 Infrared wavelength distribution of the heater

3 供热特性案例分析

在前述研究基础上,本研究进一步开展了热舒适性案例分析以证明该取暖器的供热效果。实验在尺寸为 $290\text{cm}\times 160\text{cm}\times 250\text{cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)的恒温舱内进行。考虑某些户外场景中环境波动大、参数复杂,仅以环境温度评价热暴露强度会存在偏差,因此引入表观温度 (AT) 作为变量,综合考虑室温、相对湿度和风速等影响因素,如式 (5) 和 (6) 所示。实验共设置七组 AT 条件 (-14.8°C 至 12.4°C), 对应工况参数如表 4 所示。

$$AT = T_{in} + 0.33e - 0.7W - 4 \quad (5)$$

$$e = \frac{RH}{100} \times 6.105 \times \exp\left(\frac{17.27T_{in}}{237.7 + T_{in}}\right) \quad (6)$$

表4 环境参数与 AT 之间的关系

Table 4 Correspondence between environmental parameters and AT

恒温箱设置			计算值
环境温度/ $^\circ\text{C}$	相对湿度/%	风速/(m/s)	$AT/^\circ\text{C}$
-10	14.5	1.43	-14.8
-5	20.1	1.43	-9.7
0	29	1.43	-4.4
5	24.5	0.03	1.7
8	24.5	0.03	4.8
11	24.5	0.02	8.1
15	24.5	0.01	12.4

加热装置在燃气体积流量为 1L/min 的工况下稳定燃烧。实验共招募 18 名受试者 (男女各半),

测试过程中所有受试者处于静坐状态 (代谢率约为 1.2met), 且穿着未统一, 以尽量还原真实场景下个体的服装隔热差异 (范围为 $1.16\sim 2.86\text{clo}$)。供热持续时间为 40min , 期间记录受试者的平均皮肤温度 (Mean Skin Temperature, MST), 其计算采用七点加权法, 如式 (7) 所示, 各点权重依据中国人群特征设定。

$$T_{MST} = 0.073T_{\text{forehead}} + 0.373T_{\text{chest}} + 0.14T_{\text{arm}} + 0.052T_{\text{hand}} + 0.15T_{\text{thigh}} + 0.135T_{\text{calf}} + 0.074T_{\text{foot}} \quad (7)$$

实验结果显示如图 10 所示, MST 范围为 $30.5\sim 35.6^\circ\text{C}$, 随 AT 升高而上升, 符合以往文献中关于热舒适中性温度为 $33\sim 34^\circ\text{C}$ 、温暖感为 $35\sim 37^\circ\text{C}$ 、不舒适寒冷感为 $29\sim 33^\circ\text{C}$ 的判断区间 [16]。根据 MST 值与 AT 之间关系, 建立了回归方程, 如图 11 所示。 R^2 为 0.978 , 表明 AT 对皮肤热感具有良好的预测能力。此外, 根据 ASHRAE 55-2017 中静坐工况的代谢率 ($M=70\text{W/m}^2$), 并结合 MST 预测模型, 如公式 (8) 和 (9) 所示, 推算得当前装置在 AT 约为 3.67°C 时达到最佳热舒适感, 该值与实验中“中性”热感区间 ($1.7\sim 4.9^\circ\text{C}$) 高度一致。

综上所述, 实验结果不仅验证了该加热器在低温条件下对皮肤热环境具有正向调节作用, 也与既有的热舒适模型预测结果形成了良好对应, 说明在冷暴露环境中该类设备具备基本的保温与舒适保障能力, 为后续模型修正与取暖设备优化提供了基础数据支持。

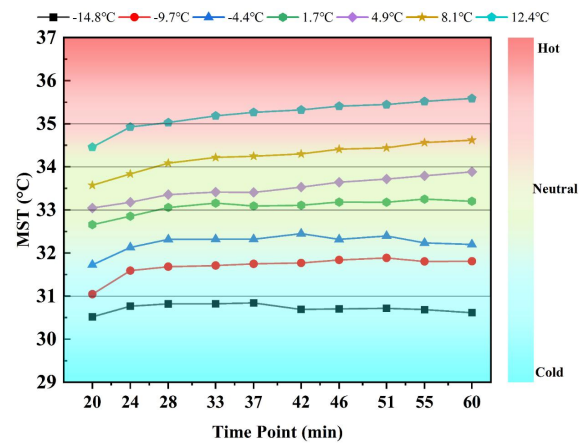


图10 随时间变化的 MST

Fig.10 Time-varying mean skin temperature (MST)

$$MST = 0.162T_{AT} + 33.11 \quad (8)$$

$$MST = 35.7 - 0.0285M \quad (9)$$

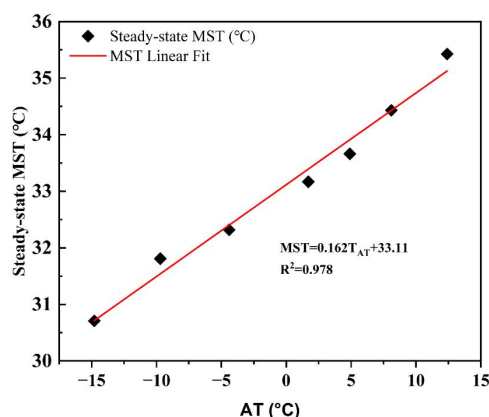


图11 MST和AT的拟合关系

Fig.11 The fitting relationship between MST and AT

4 结论

本研究基于自主研制的 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ 贵金属催化剂,开发了一种自然扩散式多孔介质催化燃烧取暖器,并围绕其结构特性、催化性能、红外辐射响应及供热效果进行了系统实验分析。主要研究结论如下:

(1) 该催化剂具备高催化活性 ($T_{50}=397.2^\circ\text{C}$, $T_{90}=463.2^\circ\text{C}$)。XPS 分析揭示 Pt^0 与 Pt^{4+} 在反应过程中发生动态转化,不仅解释了反应路径,也表现出稳定的氧化还原能力。

(2) 在合理的燃气流量下,取暖器燃烧效率达 99% 以上,且尾气中未检测到 CO 与 H_2 等不完全燃烧产物,展现出良好的清洁燃烧性能。

(3) 红外辐射峰值集中于 $3\text{--}10\mu\text{m}$,良好匹配人体皮肤与衣物吸收带,提升了辐射热量传递效率;热舒适实验结果表明,平均皮肤温度与表观温度呈显著线性相关 ($R^2=0.978$),并在 3.67°C 表观温度下达到最佳热感状态。

综上,该装置在燃烧效率、热辐射性能与人体热响应之间实现了有效平衡,具备在户外、野外及低温区域应用的可行性。未来研究将重点聚焦于燃气供给调控与局部传热优化机制,进一步提升设备的响应能力与能效水平,并推动多孔介质催化燃烧技术在供热领域的工程化应用。

参考文献:

[1] 王帅奇,李琼,张宇峰,等.夏热冬冷地区居住建筑局部取暖设备对老年人热舒适影响的现场研究[J].建筑节能(中英文),2025,53(6):24-33,66.

[2] 吴金顺,邹劲松,袁寅冬,等.基于催化红外技术的高大空间工业建筑辐射供暖设备性能与热舒适研究[J].建筑科学,2025,41(2):146-156.

[3] 李亮,张扬,张海.多孔介质形态与结构对低热值 H_2/CO 混合气燃烧特性影响的实验研究[J].化工学报,2025:1-12.

[4] Edalati-Nejad A, Fanaee S A, Khadem J. The unsteady investigation of methane-air premixed counterflow flame into newly proposed plus-shaped channel over palladium catalyst[J]. Energy, 2019,186:115833.

[5] E J Q, Luo B, Han D D, et al. A comprehensive review on performance improvement of micro energy mechanical system: Heat transfer, micro combustion and energy conversion[J]. Energy, 2022,239:122509.

[6] Ren L, Li Y Z, Liu H H, et al. Intensitive UV-Vis-IR driven catalytic activity of Pt supported on hierarchical ZnO porous nanosheets for benzene degradation via novel photothermocatalytic synergetic effect[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022,10(3):107694.

[7] Cabello A, Abad A, Gayán P, et al. Increasing energy efficiency in chemical looping combustion of methane by in-situ activation of perovskite-based oxygen carriers[J]. Applied Energy, 2021,287:116557.

[8] 宗超.微型燃气轮机宽负荷低排放燃烧特性研究[D].上海:同济大学,2022.

[9] Kondratowicz T, Drozdek M, Michalik M, et al. Catalytic activity of Pt species variously dispersed on hollow ZrO_2 spheres in combustion of volatile organic compounds[J]. Applied Surface Science, 2020,513:145788.

[10] Yang D, Fu S, Huang S, et al. The preparation of hierarchical Pt/ZSM-5 catalysts and their performance for toluene catalytic combustion[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2020, 296: 109802.

[11] 李建飞,吴亚云,付笑盈,等. $\text{Pt}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 表面氢气的吸附、解离和传质的计算[J].功能材料,2021,52(1):1180-1184.

[12] Maznoy A, Kiryashkin A, Pichugin N, et al. Development of a new infrared heater based on an annular cylindrical radiant burner for direct heating applications[J]. Energy, 2020,204:117965.