

微重力甲烷层流射流扩散火焰的 形态和碳烟特征*

朱 凤¹ 李 丹² 王双峰^{1,3} 易 宏^{1,3}

1(中国科学院力学研究所 微重力重点实验室 北京 100190)

2(西安热工研究院有限公司 西安 710054)

3(中国科学院大学工程科学学院 北京 100049)

摘 要 几何形态与碳烟特征是碳氢燃料扩散火焰的基本特性. 微重力下层流扩散火焰特性研究可为揭示扩散燃烧的物理和化学机理以及建立湍流扩散燃烧模型提供重要途径. 本研究利用中国空间站中的燃烧科学实验柜对同轴伴流甲烷层流射流扩散火焰进行了在轨微重力实验, 着重分析伴流条件对微重力火焰形态特征和碳烟特性的影响规律. 实验在常温常压环境下进行, 伴流包含不同氧气浓度的氮氧混合气体以及不同 N_2 和 Ar 稀释比例的空气, 伴流速度/射流速度比值小于 0.5, 产生远场和近场射流火焰的甲烷流量. 研究表明, 基于射流流场相似理论的简化模型能够对射流远场中微重力火焰的形状进行有效预测, 伴流组分通过改变燃烧化学计量关系影响火焰形状; 近场火焰长度与伴流速度无关, 与化学当量混合分数 Z_{st} 成反比, 火焰最大直径与 Z_{st} 倒数的平方根成正比. 用惰性气体稀释伴流空气时, 射流扩散火焰中以碳烟生成反应为主要过程的区域减小、以碳烟氧化反应为主要过程的区域增大, 随着稀释程度的增加, 火焰内的碳烟含量随之减少, 稀释效应和热效应对碳烟生成的影响分别由惰性气体体积分数和火焰温度表征.

关键词 层流扩散火焰, 射流, 伴流, 甲烷, 微重力, 中国空间站

中图分类号 TK16

Shape and Sooting Characteristics of Methane Laminar-jet Diffusion Flames in Microgravity

ZHU Feng¹ LI Dan² WANG Shuangfeng^{1,3} YI Hong^{1,3}

1(Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054)

3(School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Geometric morphology and soot characteristics are fundamental properties of hydrocarbon fuel diffusion flames. Investigating laminar diffusion flame behavior under microgravity conditions pro-

* 中国载人航天工程空间应用系统项目资助

2025-09-23 收到原稿, 2025-11-14 收到修定稿

vides a crucial approach for elucidating the physical and chemical mechanisms of diffusion combustion and for establishing turbulent diffusion combustion models. On-orbit microgravity experiments were conducted on coaxial co-flow methane laminar jet diffusion flames using the combustion science experiment cabinet aboard the Chinese Space Station. The study focused on analyzing the influence of co-flowing gases on morphological characteristics and soot properties of microgravity flames. Experiments were conducted under ambient temperature and pressure conditions. The co-flowing gases comprised nitrogen-oxygen mixtures with varying oxygen concentrations and air diluted with different ratios of N_2 and Ar. The ratio of entrainment velocity to jet velocity was maintained below 0.5, with methane flow rates generating both far-field and near-field jet flames. Results indicate that a simplified model based on jet flow field similarity theory can effectively predict the shape of microgravity flames in the far-field region of the jet. Co-flow composition affects the flame shape by altering the combustion stoichiometry. Near-field flame length is independent of the co-flowing velocity but inversely proportional to the stoichiometric mixture fraction Z_{st} , while the maximum flame diameter is proportional to the square root of the inverse of Z_{st} . When diluting the co-flowing air with an inert gas, the region dominated by soot formation in the jet diffusion flame decreases, while the region dominated by soot oxidation increases. As dilution increases, the soot content within the flame decreases. The effects of dilution and thermal effects on soot formation are characterized by the volume fraction of the inert gas and the flame temperature, respectively. Diffusion flames in microgravity provide an ideal research subject for understanding fundamental combustion processes and mechanisms. The findings of this study offer foundational data for elucidating basic combustion phenomena and advancing combustion theory, holding significant importance.

Key words Laminar diffusion flame, Jet, Co-flow, Methane, Microgravity, China Space Station (CSS)

0 引言

燃料扩散燃烧是指初始状态下相互分离的燃料与氧化剂在特定区域内进行混合和燃烧的过程,作为应用最广泛的燃烧方式之一,其在清洁能源与先进动力领域应用面极广.实际应用中的扩散燃烧处大多处于湍流状态,然而湍流燃烧的复杂性在目前实验技术条件下给基础研究带来了难以攻克的困难,由于复杂的湍流扩散燃烧可通过层流小火焰概念与比较简单的层流扩散火焰建立关联^[1],因此层流扩散火焰的研究成为认识湍流扩散燃烧的重要基础.但获得层流扩散火焰需要低速流动条件,在地面常重力环境下,浮力的影响会变得极为显著,这给实验观测与分析带来巨大困难,不仅在很大程度上限制了对燃烧过程的深入研究,也使实验结果与实际湍流燃烧状态(浮力不起主导作用)存在明显偏差.而微重力环境下,浮力干扰消失,所获得的层流扩散火焰与湍流火焰之间可直接关联,为相关研究提供了理想的实验环境.

微重力均相(气体)层流扩散火焰的研究主要利用轴对称(圆形)射流火焰进行^[2,3].圆形射流扩散火

焰为火焰与流动相互作用提供了简化模型,通过改变射流喷嘴直径、射流与同轴伴流速度,以及其气体组分、温度和环境压力,可对化学反应及输运速率进行系统调控^[2-5],进而深入考察火焰形态、火焰结构、碳烟生成、辐射特性、火焰稳定和熄灭特性等扩散燃烧的核心问题.

微重力层流射流扩散火焰形态的预测建立在Spalding^[6]简化分析的基础上,其主要假设为:火焰呈轴对称二维结构,流体物性(例如密度、扩散系数、黏度)为常数;燃料与氧化剂的化学反应为单步不可逆反应;火焰温度近似为常数(忽略温度梯度对物性的影响),同时忽略辐射和热损失等因素.基于此,Lin等^[7,8]进一步考量了输运参数和碳烟等对火焰形状的影响,结合实验与理论分析,推导得到伴流中的发光(可见)火焰形状计算公式,用于可见火焰长度的预测,其理论预测结果与实验结果吻合良好^[4,7],微重力实验数据包括不同燃料、射流流率、射流喷嘴直径、射流/伴流速度比及环境压力等.

微重力下射流扩散火焰中的碳烟过程与常重力环境下的火焰存在显著差异,实验和数值模拟结果表

明^[3,9-13], 微重力环境下扩散火焰的烟点减小, 碳烟停留时间延长, 火焰中碳烟浓度升高, 碳烟颗粒粒径增大, 碳烟生成区域也随之扩大. 针对伴流速度、燃料稀释对烟点的影响, Dotson 等^[14]的研究结果表明, 层流射流扩散火焰的烟点随伴流速度的增加而增大, 且烟点长度与 $d^{-0.91}u_{co}^{0.41}$ 成正比 (其中 d 为喷嘴直径, u_{co} 为伴流速度). 此外, 燃料中掺入惰性稀释剂 N_2 , 会使扩散火焰烟点增大, 同时显著降低碳烟生成量. 伴流气体组分不仅会改变火焰形态, 还会影响碳烟生成过程, 这方面的微重力实验数据目前较为缺乏. Kalvakala 等^[15]通过数值模拟研究了常重力下富氧空气对乙烯、丙烷和丙烯对冲扩散火焰碳烟生成特性的影响, 结果表明, 随着伴流空气中氧浓度的升高, 扩散火焰中碳烟浓度呈下降趋势.

本研究的主要目的是分析伴流组分对射流扩散火焰形态及碳烟规律的影响, 基于中国空间站燃烧科学实验柜, 针对多种伴流条件下的同轴伴流甲烷层流射流扩散火焰开展在轨微重力实验. 实验涵盖高氧浓度气体、空气、 N_2 和 Ar 稀释空气等多种伴流气体, 伴流速度与射流速度比值小于 0.5, 甲烷流量覆盖远场与近场火焰形成区间, 并且实验均在常温常压环境下进行. 研究系统分析了伴流组分与伴流速度对微重力火焰在远场、近场区域形态特征的影响规律, 并探究了惰性气体稀释伴流条件下火焰的碳烟特性.

1 微重力实验

微重力实验在中国空间站梦天舱的燃烧科学实验柜中进行, 文献^[16-19]已对该燃烧科学实验柜的功能与组成进行了详细阐述. 为保证内容完整性, 这里对该实验系统作简要介绍. 燃烧实验柜主要由氧化剂与稀释剂子系统、排气净化子系统、实验插件、燃烧诊断子系统等部分构成. 实验插件安装于容积为 70 L 的燃烧室内, 用于固定燃烧器, 实现点火, 对燃烧过程中的环境温度、压力、氧浓度等参数进行测量, 并对气体燃料流量进行控制. 氧化剂与稀释剂子系统负责氧化气体、稀释气体及惰性气体的储备与输送, 可根据实验流量需求向燃烧器供气. 燃烧诊断子系统包含多种光学测量设备, 能够对燃烧现象进行综合可视化观测. 本文在轨实验采用燃烧诊断系统中的彩色 CCD 相机对可见火焰进行观测, 其分辨率为 1296×1024 pixel, 采样频率为 16 Hz; 同时使用增强

相机 (ICCD, 配备有 425~433 nm 窄带滤波片) 获取激发态自由基 CH^* 辐射发光图像, 该相机分辨率为 1280×1024 pixel, 采样频率为 16 Hz.

利用同轴伴流射流燃烧器开展甲烷层流扩散燃烧实验, 燃烧器中心燃料管内径为 2.6 mm, 长径比为 61, 以确保射流管喷口处的流动充分发展. 伴流管内径为 26 mm, 其上游安装蜂窝器以获得均匀气流. 中心燃料管与伴流管同心共轴布置, 且燃料管高出伴流管 1 mm. 实验所用气体燃料为甲烷, 单次在轨实验过程中燃料流量保持恒定, 标准状态下的体积流量为 $0.12 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 或 $0.05 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 其对应射流出口雷诺数 Re ($Re = u_f d / \nu$, 其中 u_f 为射流出口速度, d 为射流喷口内径, ν 为甲烷气体运动黏度) 为 57.6 或 24.0, 分别用于对射流远场和近场中的扩散火焰进行观测. 单次实验过程中, 伴流流动速度保持不变, 初始伴流气体为体积百分比 21% 氧气与 79% 氮气组成的空气 (Air). 通过逐步加入氩气 (Ar) 或氮气 (N_2) 并降低空气流量的方式, 改变伴流气体组分, 此外, 甲烷射流流量为 $0.12 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 通过增加氧气流量并减小氮气流量的方式, 对高氧浓度伴流环境下的火焰特性进行观测. 实验中, 先在空气伴流中点燃甲烷射流, 再以 12 s 的时间间隔对伴流条件进行调整. 实验观察显示, 伴流组分改变后, 火焰会经历约 5 s 的动态变化阶段, 随后达到新的稳定状态, 因此本实验可获得各工况下稳定的火焰图像. 伴流速度与射流速度的比值小于 0.5, 甲烷射流流量为 $0.12 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 伴流速度设定为 $7.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; 甲烷射流流量为 $0.05 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 伴流速度分别设为 $3.75 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 与 $2.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 以研究伴流速度对近场火焰的影响规律. 微重力实验中的燃料与伴流条件见表 1.

每次实验前, 向燃烧室内充入 100 kPa 的氧/氮混合气 (氧气体积浓度 21%), 环境温度为 300 K. 实验过程中, 燃烧反应消耗氧气并释放热量, 导致燃烧室内环境氧浓度逐渐降低、压力和温度逐渐升高, 但是由于燃烧室容积较大, 压力升高幅度不超过 7 kPa, 温度升高幅度不超过 2 K, 且伴流的存在可使火焰处于稳定的气体组分环境中.

2 结果与讨论

2.1 远场火焰形态特征与模型预测

图 1 为不同组分伴流气体中 $0.12 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 甲烷射

流扩散火焰的可见光图像. 由图 1 可见, 所有实验条件下, 火焰均呈黄色, 碳烟产生的连续黑体辐射主导着火焰的可见光发射特性. 高氧浓度伴流环境中, 火焰亮度更强, 随着氧浓度降低以及伴流中 Ar 或 N₂ 体积分数 (X_{Ar} , X_{N_2}) 的增加, 火焰亮度逐渐减弱, 同时火焰长度 (火焰顶端与射流喷口之间的距离) 和火焰

直径均增大. 相比 Ar 稀释, 伴流中加入 N₂ 对火焰形态的影响更为显著, 在相同 X_{Ar} 和 X_{N_2} 条件下, N₂ 稀释对应的火焰长度和火焰直径更大.

从边界层流动的控制方程出发, 在理论假设与实验数据关联的基础上, Lin 和 Faeth^[7,8] 得到了无浮力同轴伴流的层流射流扩散火焰形状表达式, 有

表 1 微重力实验中甲烷射流和伴流条件的设定
Table 1 Settings of methane jet and coflow conditions in microgravity experiments

甲烷流量/(L·min ⁻¹)	伴流速度 $u_{co}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	伴流气体组分
0.12	7.5	O ₂ /N ₂ : O ₂ 体积分数 (X_{O_2}) 25%, 23%, 21% (Air) Air/N ₂ : N ₂ 体积分数 (X_{N_2}) 0.01~0.12 Air/Ar: Ar体积分数 (X_{Ar}) 0.01~0.12
0.05	3.75	Air/N ₂ : N ₂ 体积分数 (X_{N_2}) 0.05~0.25 Air/Ar: Ar体积分数 (X_{Ar}) 0.05~0.20
0.05	2.0	Air/Ar: Ar体积分数 (X_{Ar}) 0.02~0.34

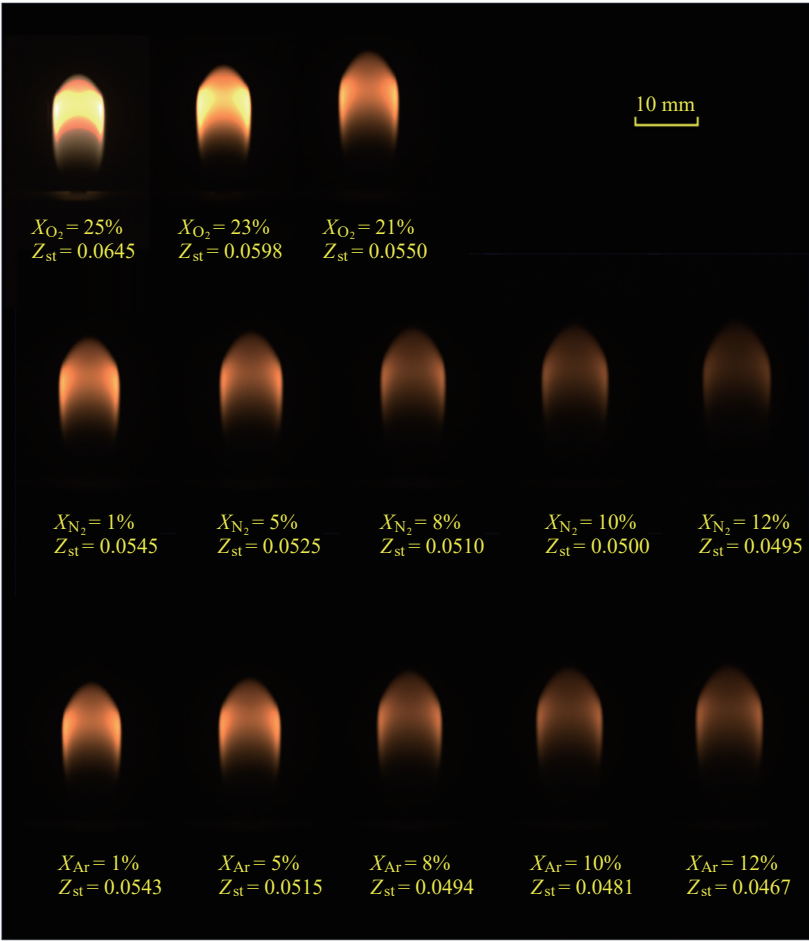


图 1 不同组分伴流气体中甲烷射流扩散火焰的可见光图像 ($\dot{Q}'' = 0.12 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)
Fig. 1 Visible images of methane jet diffusion flames with co-flowing gases in different compositions ($\dot{Q}'' = 0.12 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

$$\frac{(L_f - L_0)}{d} = \frac{C_f Re Sc}{16 Z_{st}}, \quad (1)$$

$$\frac{w}{d} = \sqrt{-\zeta \frac{u_{f,0}}{u_{co,0}} \frac{\ln(\zeta)}{Z_{st}}}. \quad (2)$$

式中,

$$\zeta = \frac{x - L_0}{L_f - L_0}. \quad (3)$$

其中, L_f 和 w 分别为火焰长度和宽度; L_0 为射流虚拟原点距喷口的距离; d 为喷嘴直径, C_f 为修正系数, $C_f = 1$ 表示无碳烟火焰; Re 为射流出口 Reynolds 数; Sc 为 Schmidt 数; Z_{st} 为化学当量混合物分数; $u_{f,0}$ 和 $u_{co,0}$ 分别为燃料射流出口速度和伴流空气射流出口速度; x 为轴向坐标. 利用式 (1) 和 (2) 对火焰轮廓进行预测, 并与实验测量数据进行对比, 结果如图 2 所示 (图中坐标原点位于射流出口中心, r 和 y 分别为径向和轴向距离). 对于不同组分的伴流条件, 简化理论模型可以准确预测射流远场中的火焰形状特征, 在 $y/d > 6.9$ 的区域, 预测结果与实验结果几乎吻合, 而在靠近射流出口的区域, 由于远场近似失效, 预测结果的偏差逐渐增大. 这表明, 该简化理论可以刻画层流射流扩散火焰中的主要混合机制, 能够反映伴流组分

变化对远场火焰形状的影响规律, 伴流组分对火焰形状的影响体现在化学当量混合物分数 Z_{st} 的变化上.

2.2 近场火焰形态特征

在射流出口附近的势流核心区 ($y < 7d$), 质量和动量扩散机制不同于该区域下游的远场流动区域, 边界层方程不再适用, 因此式 (2) 的简化理论表达式无法有效预测火焰轮廓. 当射流流量较小时, 扩散火焰完全处于近场流动范围内, 目前针对该工况下火焰形态特征的研究仍较为欠缺. 本文实验中设定甲烷流量为 $0.05 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 对近场扩散火焰进行观测, 所有伴流条件下的火焰长度不超过 19 mm , 即火焰完全处于近场流动区域. 在该流量下, 火焰中碳烟含量极低, 并且随着伴流中 Ar 或 N_2 体积分数的增加, 碳烟含量进一步降低直至完全消失, 同时火焰的可见化学发光信号微弱, 难以通过可见光图像准确识别火焰形状. 为此, 这里利用激发态自由基 CH^* 的辐射图像对火焰形态特征进行测量, CH^* 辐射强度与燃烧放热率具有良好的对应关系, 可准确反映扩散火焰反应面的位置^[20-22]. 图 3 给出了典型的火焰 CH^* 辐射图像及火焰最大直径 $D_{f,\max}$ 的定义, 结果表明, 近场扩散火焰的长度与最大直径接近, 与远场火焰大长径比的形态特

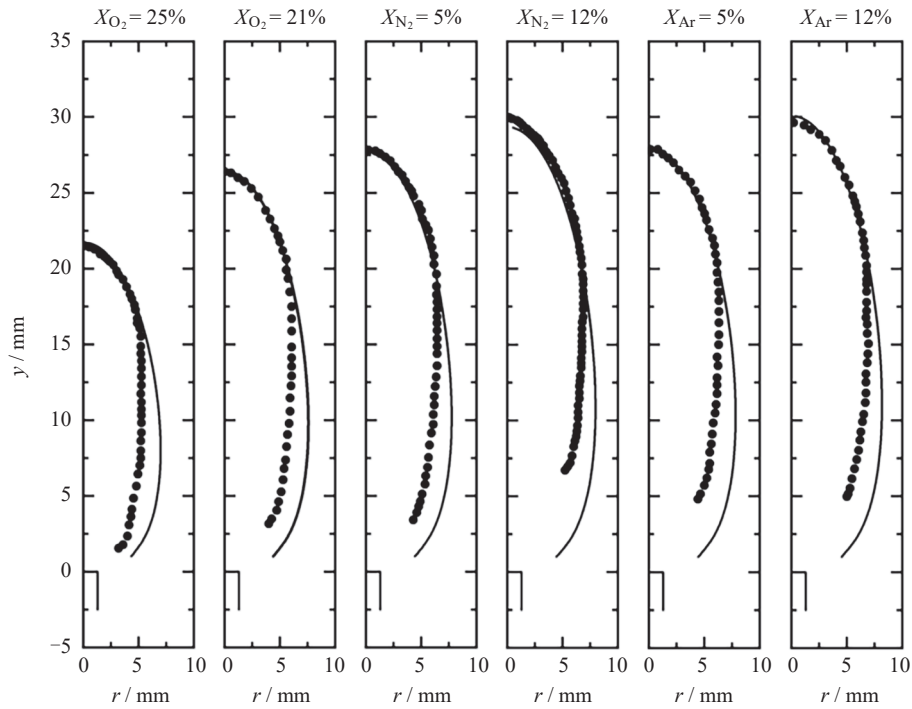


图 2 火焰轮廓的预测和测量结果 ($\dot{Q}'' = 0.12 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)

Fig. 2 Measured and predicted luminous flame shapes for methane laminar-jet diffusion flames burning in co-flowing gases ($\dot{Q}'' = 0.12 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)

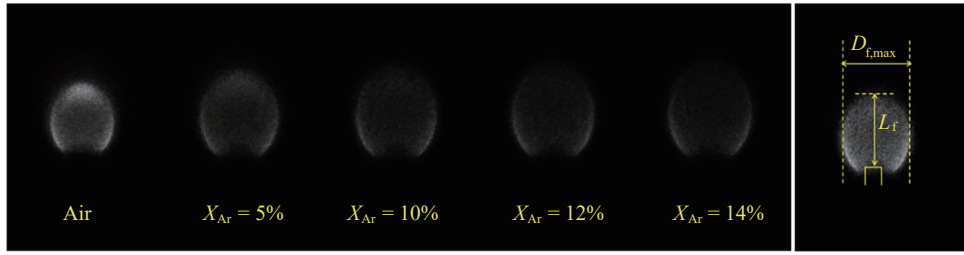
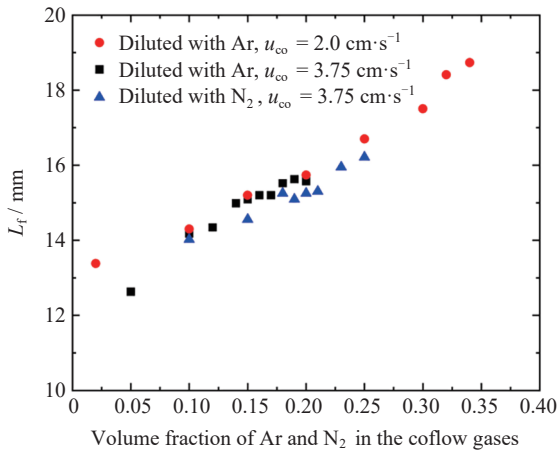


图3 典型的火焰 CH* 辐射图像 (Ar 体积分数为 0.1)

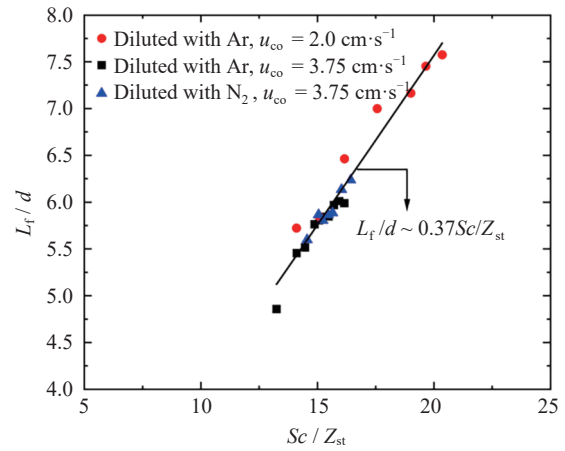
Fig. 3 Typical flame CH* radiation image (the volume fraction of Ar is 0.1)

图4 火焰长度随稀释比的变化 ($\dot{Q}'' = 0.05 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)Fig. 4 Variation of flame length with dilution ratio ($\dot{Q}'' = 0.05 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)

征形成对比。

图4给出火焰长度随伴流中 Ar 或 N_2 体积分数的变化。结果显示, 伴流中 Ar 或 N_2 的体积分数增大时, 火焰长度增加, 相同体积分数下, Ar 和 N_2 稀释对火焰长度的影响效果相近。此外, 与式(1)对远场火焰的预测规律一致, 在本研究的伴流速度/射流速度条件下, 近场火焰长度与伴流速度无明显相关性。

伴流组分通过改变输运参数 Sc 和化学当量混合物分数 Z_{st} 影响火焰长度, 随着 Sc 的减小, 火焰长度减小, 而 Z_{st} 减小 (即伴流中 Ar 或 N_2 体积分数增大) 时火焰长度则呈增大趋势。图5为无量纲火焰长度 L_f/d 随 Sc/Z_{st} 的变化关系。不同惰性气体稀释下的实验数据遵循统一的变化规律, L_f/d 随 Sc/Z_{st} 线性增大, 且 $L_f/d \propto 0.37Sc/Z_{st}$ 。本文实验条件下 Sc 的变化范围比较窄, 火焰长度主要由燃烧化学计量关系所决定, 且与 Z_{st} 成反比关系。对于射流远场中不含碳烟的扩散火焰, 式(1)中的经验火焰长度参

图5 无量纲火焰长度 L_f/d 随 Sc/Z_{st} 的变化 ($\dot{Q}'' = 0.05 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)Fig. 5 Variation of non-dimensional luminous flame lengths with Sc/Z_{st} ($\dot{Q}'' = 0.05 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)

数 $C_f \approx 0.5$, 同一射流雷诺数 Re 下, 式(1)预测 $L_f/d \propto 0.75Sc/Z_{st}$, 与近场火焰实验结果相比, 远场理论预测的火焰长度对 Z_{st} 的变化更为敏感。

图6为火焰最大直径随伴流中 Ar 或 N_2 体积分数的变化规律; Ar 或 N_2 体积分数增大时, $D_{f,max}$ 随之增大; 相同体积分数下, Ar 和 N_2 对 $D_{f,max}$ 的影响几乎相同。与火焰长度的影响机制不同, 火焰宽度受到伴流速度的影响, 对于远场火焰, 从式(2)中可以看出, 火焰宽度与 $(u_f/u_{co})^{1/2}$ 成正比, 而对于近场火焰, 射流速度/伴流速度比值的影响程度相对较小。已有研究表明^[7,8], 层流射流扩散火焰的最大直径由射流喷嘴尺寸、化学计量比和伴流速度决定, 与表征燃料流量和输运性质的 Re 和 Sc 无关。参考式(2), 可将无量纲最大火焰直径 $D_{f,max}/d$ 与 $(1/Z_{st})^{1/2}$ 和 (u_f/u_{co}) 相关联, 考虑伴流速度的微弱影响, 经最小二乘法拟合得到 $D_{f,max}/d = 1.15(u_f/u_{co})^{1/7}/Z_{st}^{1/2} - 1.69$, 拟合关

系与实验数据吻合良好, 结果如图 7 所示.

2.3 火焰碳烟特性

图 8 为常重力下 $0.12 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 甲烷射流火焰的图像, 实验所用伴流气体包括空气、Air/ N_2 和 Air/Ar,

伴流速度以及 Ar 和 N_2 稀释的体积分数均与微重力实验相同. 对比图 8 与图 1 中的火焰图像可知, 常重力火焰中的碳烟集中于火焰顶部, 微重力火焰的碳烟含量则在火焰侧翼达到峰值. 这一现象体现了重力对

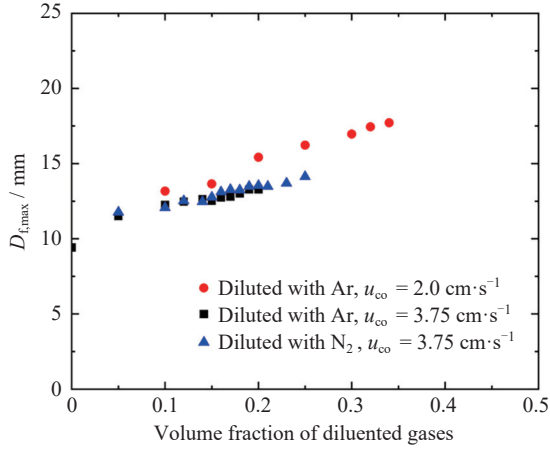


图 6 火焰最大直径随伴流中 Ar 或 N_2 体积分数的变化 ($\dot{Q}'' = 0.05 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)

Fig. 6 Variation of the maximum flame diameter with the volume fraction of Ar or N_2 in the co-flow ($\dot{Q}'' = 0.05 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)

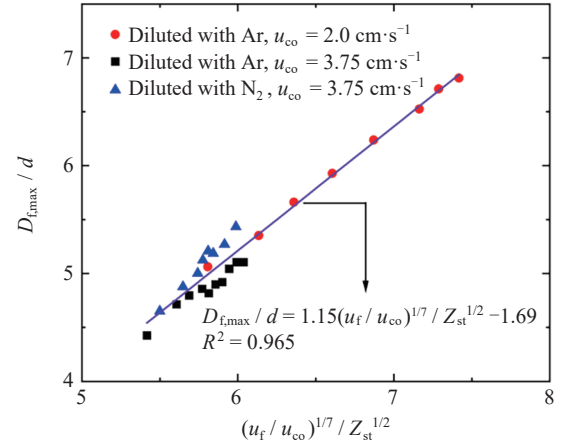


图 7 无量纲最大火焰直径 $D_{f,\max}/d$ 随 $(u_f/u_{co})^{1/7}/Z_{st}^{1/2}$ 的变化 ($\dot{Q}'' = 0.05 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)

Fig. 7 Variation of non-dimensional flame width $D_{f,\max}/d$ with $(u_f/u_{co})^{1/7}/Z_{st}^{1/2}$ ($\dot{Q}'' = 0.05 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)

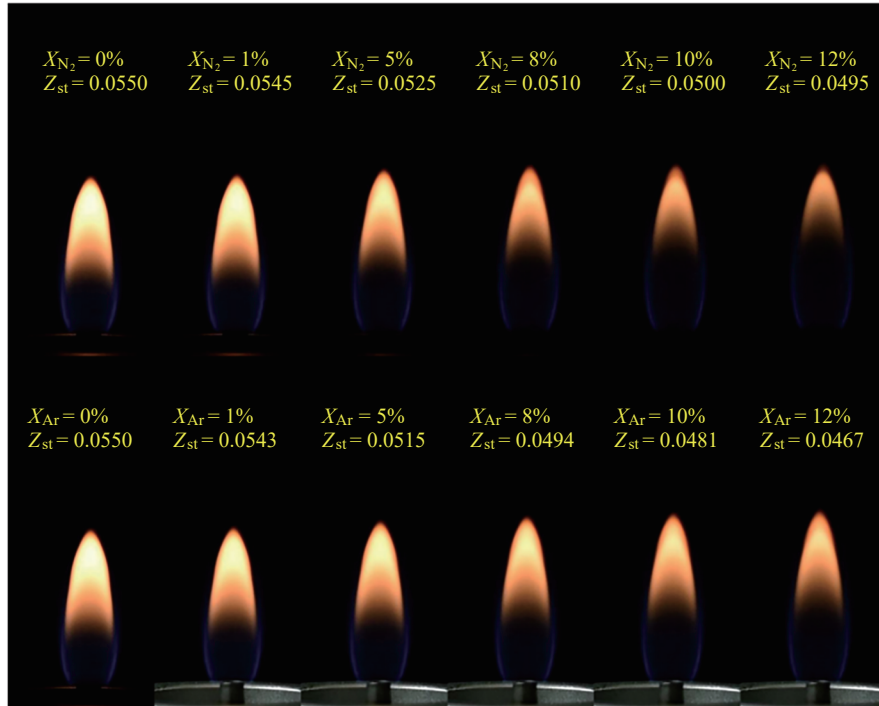


图 8 常重力环境中不同稀释比下的火焰图像

Fig. 8 Luminous methane laminar jet diffusion flames with different dilution ratios in normal gravity environment

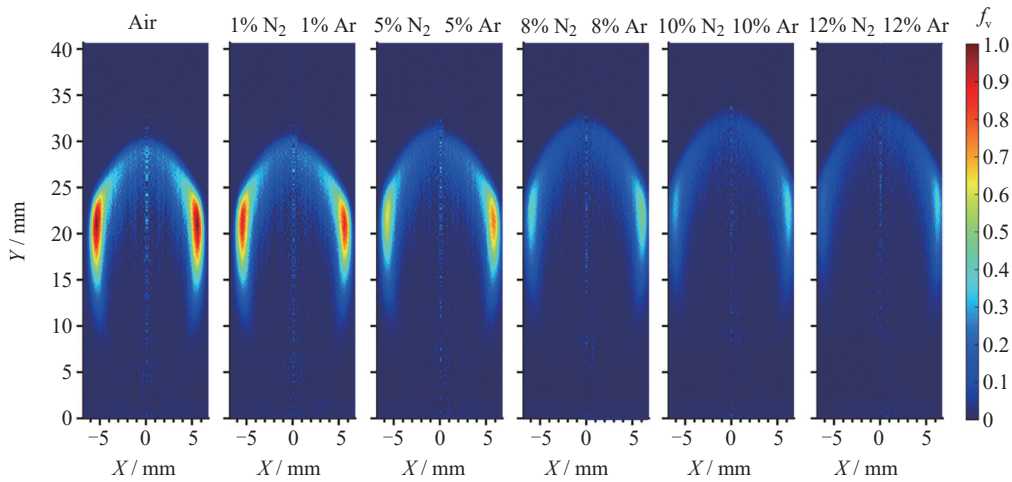


图9 不同伴流(空气、Ar 稀释空气、 N_2 稀释空气)条件下微重力火焰碳烟相对含量 f_v 的分布

Fig. 9 Distribution of relative carbon soot content f_v in microgravity flames under different flow conditions (air, Ar, and N_2 -diluted air)

射流扩散火焰中碳烟生成过程和碳烟路径的一般影响: 常重力下, 浮力使得射流火焰流场加速, 流轴向轴向汇聚, 碳烟形成后随流动向火焰顶端聚集; 微重力下流场减速, 流线向外侧发散, 碳烟随之迁移至远离轴线的位置^[3].

微重力环境下, 碳烟的黑体连续辐射是可见光的主要来源, 火焰亮度分布可在一定程度上反映碳烟的相对含量. 为获得火焰截面上的碳烟含量, 先将发光火焰图像(代表沿视线累积的发光强度)转换为灰度图像, 再经 Abel 变换处理, 得到火焰中心截面亮度分布后, 对空气伴流条件下火焰的最大亮度值进行归一化. 不同伴流(空气、Ar 和 N_2 稀释的空气)中微重力火焰碳烟相对含量 f_v 的分布如图 9 所示. 随着伴流中 Ar 和 N_2 的增加, 整体碳烟含量和最大碳烟含量 $f_{v,max}$ 均呈下降趋势, $f_{v,max}$ 的位置向外侧与上方移动, 其中 N_2 的影响更为显著. 进一步可计算沿轴向变化的碳烟载率为

$$F_v(x) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r f_v(r, y) dr. \quad (4)$$

其中, R 取 $X_{N_2} = 0.12$ 时火焰的最大直径(即实验中所有火焰的最大直径). 碳烟载率最大值 $F_{v,max}$ 对应的高度位置标志着碳烟生成与氧化相对重要性发生转换的边界. 在此高度的下方区域, 碳烟生成速率大于氧化速率, 上方区域则相反. 不同伴流条件下 F_v 的计算结果如图 10 所示, 图 10 以实线标注 $F_{v,max}$

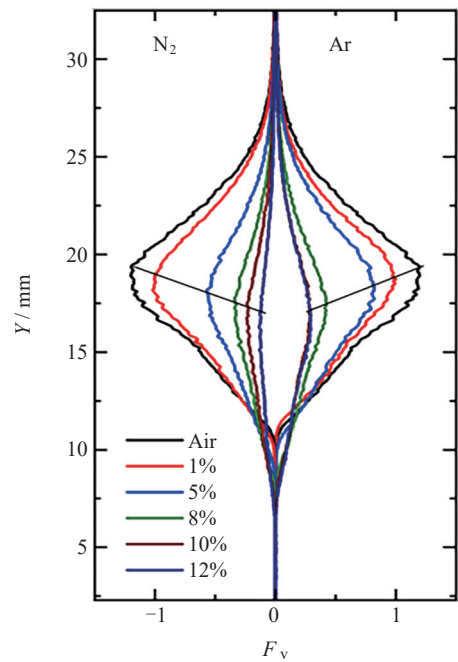


图10 不同伴流(空气、Ar 稀释空气、 N_2 稀释空气)条件下微重力火焰碳烟载率 F_v 随喷口上方高度的变化

Fig. 10 Evolution of the soot load F_v in microgravity flames under different flow conditions (air, Ar, and N_2 -diluted air) as a function of the height above the burner plate

高度位置的变化规律. 伴流中 Ar 与 N_2 体积分数增大时, $F_{v,max}$ 持续减小, 其对应的高度位置也不断降低,

相比而言, N_2 的影响程度更显著. 这一现象直观表明, Ar 和 N_2 稀释伴流时, 火焰中碳烟生成为主的区域被缩小, 碳烟氧化为主的区域则相应扩展.

扩散火焰中的碳烟生成与氧化速率是当地混合物分数和温度的函数^[23,24]. 对于伴流射流扩散火焰, 采用惰性气体对伴流或燃料射流进行稀释, 将改变火焰中的混合物分数和温度分布, 进而影响碳烟特性. 在燃料中添加惰性气体时, 碳烟生成率的降低主要源于两类效应: 一是反应组分占比减少引起的稀释效应, 二是火焰温度降低带来的热效应^[25-27]. Gülder 等^[28] 建议采用如下表达式区分这两种效应对碳烟生成率的影响:

$$f_{v,max} \propto \frac{X_F \sqrt{H}}{L_{max}} \exp\left(-\frac{E_a}{R^0 T}\right). \quad (5)$$

其中, X_F 为稀释气体的体积分数, H 为可见火焰长度, L_{max} 为火焰最大宽度, E_a 为活化能, R^0 为化学反应气体常数, T 为火焰特征温度. 式 (5) 中 X_F 和 T 分别代表稀释效应和热效应对碳烟生成的作用, 前者通过燃料浓度直接产生影响, 后者通过化学反应产生间接影响, 并且与火焰中的混合物分数和温度场分布存在复杂的对应关系. 对伴流空气进行稀释时, 火焰中的混合物分数和温度将会发生变化, 其中热效应的影响与燃料稀释时类似, 稀释效应则相反, 即增加惰性气体 (降低氧浓度) 将使混合物分数减小. 因此, 对于伴流稀释, 可采用添加惰性气体的体积分数 X_{inert} 表征稀释效应, 式 (5) 可写为

$$f_{v,max} \sim (1 - X_{inert}) \exp[-E_a/(R^0 T)].$$

为深入探究伴流稀释对扩散火焰中碳烟生成的影响, 特别是明确稀释效应和热效应的作用条件, 并验证惰性气体体积分数表征稀释效应的表达形式, 需开展进一步实验, 对火焰中碳烟浓度、温度、燃料及氧气分数的分布等参数进行测量.

3 结论

针对多种伴流条件下的轴对称甲烷层流射流扩散火焰进行微重力实验, 分析了伴流组分、伴流速度对射流远场及近场中微重力火焰形态特征的影响规律, 以及惰性气体稀释伴流中火焰的碳烟特性. 主要结论如下.

(1) 基于射流流场相似理论的简化模型, 能够有

效预测射流远场中的微重力扩散火焰形状, 伴流组分的影响主要体现为燃烧化学计量关系的变化.

(2) 近场火焰的长度与化学当量混合物分数 Z_{st} 呈现反比关系, 与伴流速度无关, 火焰最大直径与 Z_{st} 倒数的平方根成正比; 相比远场火焰, 射流速度/伴流速度比值对火焰最大直径的影响程度较小.

(3) 在空气伴流中添加惰性气体, 可以使得射流扩散火焰中碳烟生成为主的区域缩小而碳烟氧化为主的区域扩大, 并且随着惰性气体体积分数的增加, 火焰中碳烟含量降低, 其中 N_2 对碳烟的抑制作用比 Ar 更为显著; 稀释效应与热效应的影响可分别由惰性气体体积分数和火焰温度表征.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] WILLIAMS F A. Progress in knowledge of flamelet structure and extinction[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, **26**(4/5/6): 657-682
- [2] SUNDERLAND P B, FAETH G M. Soot formation in hydrocarbon/air laminar jet diffusion flames[J]. *Combustion and Flame*, 1996, **105**(1-2): 132-146
- [3] URBAN D L, YUAN Z G, SUNDERLAND P B, et al. Structure and soot properties of nonbuoyant ethylene/air laminar jet diffusion flames[J]. *AIAA Journal*, 1998, **36**(8): 1346-1360
- [4] URBAN D L, YUAN Z G, SUNDERLAND P B, et al. Smoke-point properties of non-buoyant round laminar jet diffusion flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, **28**(2): 1965-1972
- [5] JALAIN R, BONNETY J, MATYNIA A, et al. Influence of sub-atmospheric pressure on flame shape and sooting propensity in ethylene laminar coflow non-premixed flame[J]. *Combustion and Flame*, 2024, **259**: 113173
- [6] SPALDING D B. Combustion and Mass Transfer: A Textbook with Multiple-Choice Exercises for Engineering Students[M]. Oxford: Pergamon, 1979: 185-195
- [7] LIN K C, FAETH G M. Shapes of nonbuoyant round luminous laminar-jet diffusion flames in coflowing air[J]. *AIAA Journal*, 1999, **37**(6): 759-765
- [8] LIN K C, FAETH G M, SUNDERLAND P B, et al. Shapes of nonbuoyant round luminous hydrocarbon/air laminar jet diffusion flames[J]. *Combustion and Flame*, 1999, **116**(3): 415-431
- [9] WALSH K T, FIELDING J, SMOOKE M D, et al. Experimental and computational study of temperature, species, and soot in buoyant and non-buoyant coflow laminar diffusion flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, **28**(2): 1973-1979

- [10] DIEZ F J, AALBURG C, SUNDERLAND P B, *et al.* Soot properties of laminar jet diffusion flames in microgravity[J]. *Combustion and Flame*, 2009, **156**(8): 1514-1524
- [11] JEON B H, CHOI J H. Effect of buoyancy on soot formation in gas-jet diffusion flame[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010, **24**(7): 1537-1543
- [12] REIMANN J, KUHLMANN S A, WILL S. Investigations on soot formation in heptane jet diffusion flames by optical techniques[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2010, **22**(4): 499-505
- [13] MA B, CAO S, GIASSI D, *et al.* An experimental and computational study of soot formation in a coflow jet flame under microgravity and normal gravity[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, **35**(1): 839-846
- [14] DOTSON K T, SUNDERLAND P B, YUAN Z G, *et al.* Laminar smoke points of coflowing flames in microgravity[J]. *Fire Safety Journal*, 2011, **46**(8): 550-555
- [15] KALVAKALA K C, KATTA V R, AGGARWAL S K. Effects of oxygen-enrichment and fuel unsaturation on soot and NO_x emissions in ethylene, propane, and propene flames[J]. *Combustion and Flame*, 2018, **187**: 217-229
- [16] ZHANG Zhenzhong, KONG Wenjun, ZHANG Hualiang. Design of combustion science experimental system for China space station[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(1): 72-78 (张振忠, 孔文俊, 张华良. 空间站燃烧科学实验系统设计[J]. *空间科学学报*, 2020, **40**(1): 72-78)
- [17] ZHANG Xiaowu, ZHENG Huilong, WANG Kun, *et al.* Combustion chamber design and analysis of the space station combustion science experimental system[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(2): 301-309 (张晓武, 郑会龙, 王琨, 等. 中国空间站燃烧科学实验系统燃烧室设计与分析[J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(2): 301-309)
- [18] WEN Y Z, LI L F, LI X X, *et al.* Extinction of microgravity partially premixed flame aboard the Chinese space station[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2024, **40**(1-4): 105574
- [19] ZHAO P P, ZHANG X W, FANG Y, *et al.* On-orbit functional verification of combustion science experimental system in China Space Station[J]. *Aerospace*, 2025, **12**(5): 448
- [20] WALSH K T, FIELDING J, SMOOKE M D, *et al.* A comparison of computational and experimental lift-off heights of coflow laminar diffusion flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, **30**(1): 357-365
- [21] PRABASENA B, RÖDER M, KATHROTIA T, *et al.* Strain rate and fuel composition dependence of chemiluminescent species profiles in non-premixed counterflow flames: comparison with model results[J]. *Applied Physics B*, 2012, **107**(3): 561-569
- [22] ZHANG Ting, GUO Qinghua, GONG Yan, *et al.* Luminescent properties of CH_4/O_2 co-flowing jet diffusion flame[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2012, **18**(4): 353-358 (张婷, 郭庆华, 龚岩, 等. CH_4/O_2 同轴射流扩散火焰辐射发光特性[J]. *燃烧科学与技术*, 2012, **18**(4): 353-358)
- [23] KENT J H, HONNERY D R. Soot mass growth in laminar diffusion flames—parametric modelling[M]//BOCKHORN H. Soot Formation in Combustion: Mechanisms and Models. Berlin: Springer, 1994: 199-220
- [24] LAUTENBERGER C W, DE RIS J L, DEMBSEY N A, *et al.* A simplified model for soot formation and oxidation in CFD simulation of non-premixed hydrocarbon flames[J]. *Fire Safety Journal*, 2005, **40**(2): 141-176
- [25] DU D X, AXELBAUM R L, LAW C K. The influence of carbon dioxide and oxygen as additives on soot formation in diffusion flames[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1991, **23**(1): 1501-1507
- [26] LIU F S, GUO H S, SMALLWOOD G J, *et al.* The chemical effects of carbon dioxide as an additive in an ethylene diffusion flame: implications for soot and NO_x formation[J]. *Combustion and Flame*, 2001, **125**(1-2): 778-787
- [27] WANG Q, LEGROS G, BONNETY J, *et al.* Experimental characterization of the different nitrogen dilution effects on soot formation in ethylene diffusion flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, **36**(2): 3227-3235
- [28] GÜLDER Ö L, SNELLING D R. Influence of nitrogen dilution and flame temperature on soot formation in diffusion flames[J]. *Combustion and Flame*, 1993, **92**(1-2): 115-124

作者简介



朱凤女, 1988年9月出生于山东省泰安市, 现为中国科学院力学研究所副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为微重力燃烧。

E-mail: zhufeng@imech.ac.cn



王双峰(通信作者) 男, 1972年2月出生于河南省郑州市, 现为中国科学院力学研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为燃烧基础与应用、微重力燃烧、载人航天器防火安全等。

E-mail: sfwang@imech.ac.cn