

随机填充型多孔介质的表面燃烧现象

孙颖¹, 王平^{1*}, 姜霖松¹, 尹智成¹, Antonio Ferrante^{1,2}

(1. 江苏大学能源研究院, 江苏 镇江 212013; 2. 燃烧与环境中心, 意大利 巴里 70023)

摘 要: 为研究随机填充型多孔介质尾流区域的流动状态和预混气体在其表面燃烧的火焰特性, 设计一种新型随机填充结构尾流燃烧器以及可视化实验装置, 分析入口流量对填充型多孔介质表面流场的影响, 以及甲烷/空气预混气体在其表面燃烧的火焰形态和排放特性。结果表明: 冷态流场整体平均空气流量增大 20 L/min, 流场平均速度增大, 涡量和应变率随之增大 50% 左右; 靠近填充床表面区域平均轴向速度高且波动幅度大, 远离填充床区域的速度波动幅度减小且趋于均匀分布; 当量比对速度分布影响较大, 但其对火焰传播的影响相对较小; 烟气中 CO 的含量在空气流量 50 L/min、当量比 0.91 时达到最低值。本文的研究结果对于开发多孔介质表面燃烧器有一定的指导作用。

关键词: 多孔介质燃烧器; 随机填充结构; 表面燃烧; 排放特性; 粒子图像测速仪

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2023)03-0078-08

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.4276

Surface Combustion Phenomenon of the Randomly Packed Structures

SUN Ying¹, WANG Ping^{1*}, JIANG Linsong¹, YIN Zhicheng¹, Antonio Ferrante^{1,2}

(1. Institute for Energy Research, Jiangsu University, Zhenjiang 212013 China;

2. Centro Combustione Ambiente Srl, Bari 70023 Italy)

Abstract: To study the flow state in the wake region of a randomly packed structure and the flame characteristics of premixed gas burning on its surface, a new randomly packed structure wake burner and a visual experimental device were designed. The influence of inlet flow rate on the surface flow field of randomly packed structure and the combustion and emission characteristics of methane/air premixed gas on its surface were studied. The results show that the air flow increases by 20 L/min, the overall average velocity of the unreacted flow field increases, and the vorticity and strain rate increase by about 50%. The average axial velocity near the packed bed surface is high and the fluctuation is violent, while the fluctuation far from the packed bed reduce and tends to be uniform. The effect of equivalent ratio on velocity distribution is significant, but its effect on flame propagation is relatively attenuate. Under experimental conditions. The content of CO in flue gas reaches the lowest value when the air flow rate is 50 L/min and the equivalent ra-

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(91741117, 51576092)。

第一作者: 孙颖(1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为多孔介质燃烧。

ORCID: 0000-0002-3928-3867 E-mail: 2585445835@qq.com

*通信作者: 王平(1972—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事湍流燃烧的大涡模拟和实验测量研究。

ORCID: 0000-0003-2854-5566 E-mail: pingwang@ujs.edu.cn

引用格式: 孙颖, 王平, 姜霖松, 等. 随机填充型多孔介质的表面燃烧现象[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2023, 42(3): 78-85.

SUN Ying, WANG Ping, JIANG Linsong, et al. Surface Combustion Phenomenon of the Randomly Packed Structures[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2023, 42(3): 78-85.

tio is 0.91. The experimental results have a certain guiding role for the development of porous media surface burner.

Keywords: porous medium burner; random packed structure; surface combustion; emission performance; particle image velocimetry

多孔介质燃烧技术又称为 PMC (Porous Media Combustion) 技术,是最近十余年国际燃烧领域发展的一种全新燃烧方式^[1],在民用红外线燃烧器、工业废气燃烧净化处理和新型超绝热燃烧技术等领域具有重要的应用前景^[2]。与自由空间燃烧相比,预混合气体在多孔介质中的燃烧具有调节范围广、污染物排放低等优点^[3],但燃烧流场复杂,亟须对其燃烧特性开展深入研究。

由于随机堆积型多孔介质燃烧器结构简单,由小球直接堆积而成,近年来在过滤燃烧领域得到了广泛的应用,学者们对此展开了大量研究。Zhdanok 等^[4]采用实验的方法研究了甲烷/空气预混气体在氧化铝小球随机堆积多孔介质内的燃烧,最终确定了火焰面的传播特性。研究结果表明,实验工况下的火焰可以在多孔介质燃烧器中稳定向前传播,火焰传播速度为 0.1 mm/s 数量级。Bakry 等^[5]研究了预混气体在一种新型多孔惰性介质 (PIM) 燃烧器中的燃烧特性,发现当量比是影响过滤燃烧的一个重要因素,随当量比的增大,峰值温度会降低,高温区域变大,但燃烧波的传播速度会下降。Marbach 等^[6]通过实验研究了甲烷/空气预混气体在碳化硅颗粒随机填充床内的浸没燃烧和表面燃烧特性,发现表面燃烧的燃烧极限更好,且随着碳化硅颗粒直径的增大,浸没燃烧和表面燃烧的火焰稳定性均变差。Devi 等^[7]通过侧向面多孔辐射燃烧器 (SFPRB) 研究了沼气在碳化硅和氧化铝颗粒组成的圆形多孔层中的燃烧,结果表明在所有工况下,燃烧器的热分布都是均匀的,这说明多孔介质燃烧器更适合用于热光伏系统。

在数值模拟方面,郑成航等^[8]采用计算流体力学 (CFD) 方法模拟研究了甲烷气体在二维氧化铝小球堆积床中浸没燃烧的火焰特性,分析了不同入口速度下的火焰形状,发现当预混气体的入口速度较大时,火焰面呈抛物线状,入口速度较小时火焰面轮廓较为平整。Hashemi 等^[9]采用二维模型对甲烷-空气预混气体在两层多孔燃烧器内的火焰稳

定性进行了模拟,发现随着当量比的增加,火焰稳定极限和火焰峰值温度随之升高。

针对填充结构中的流场流动特性,学者们利用不同测量手段进行了实验研究。Lovreglio 等^[10]利用核磁共振成像 (MRI) 技术测量了层流条件下填充床中的速度分布,实验结果与 CFD 模拟结果表现了良好的一致性。Yang 等^[11]利用 MRI 技术对填充床中孔隙尺度流动的 CFD 模拟进行实验验证,结果表明模拟的速度场与实测的速度场相似,而局部速度和速度直方图的比较显示出较大偏差,这主要归因于 MRI 测量的局限性。Wood 等^[12]利用粒子图像测速 (PIV) 技术,对填充床中的速度场进行了测量,由于 PIV 测量技术能够提供更高的速度测量精度,速度测量结果与 CFD 结果吻合度有明显提高。

尽管预混气体在随机堆积型多孔介质内的燃烧研究已经取得很大进展,但对于多孔介质表面的尾流流场研究甚少。因此,本研究组设计并搭建了一种新型的可视化随机填充结构尾流燃烧器,通过 PIV 系统与尾气测量系统相结合的方法,测量了冷态状态下随机填充型多孔介质的尾流流场,研究甲烷/空气预混气体在不同当量比下表面燃烧的火焰形态和 CO 排放情况。本工作的目的在于揭示甲烷/空气预混气体表面燃烧火焰特性,为后续多孔介质表面燃烧器的优化设计提供相应实验依据。

1 实验系统及步骤

1.1 实验系统

图 1 为测量填充型多孔介质表面流场的实验系统示意图,主要分为供气系统、燃烧器和测量系统 3 部分。供气系统由甲烷气瓶、空气气瓶和质量流量控制器组成。通过计算机的控制,分别使用 Horiba 公司的 0~30 L/min 和 0~250 L/min 量程的数字式气体质量流量控制器 (MFC) 来调整甲烷和空气两种气体的体积流量及比例,以得到不同当量比的实验工况。

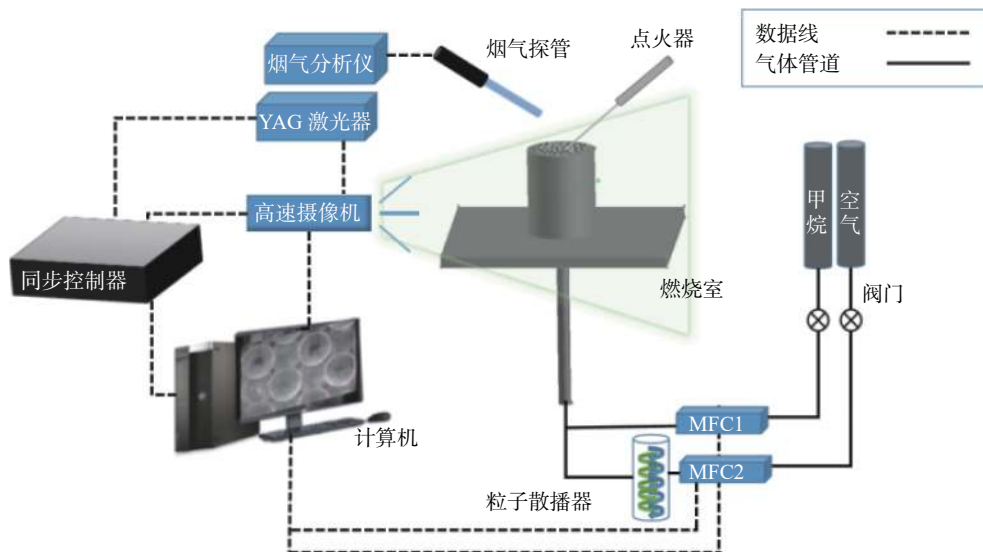


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

燃烧器装置示意图如图 2 所示。燃烧器外径 30 mm, 内径 25 mm, 高 80 mm, 用高温陶瓷胶密封在钢板平面上, 可直接观察到高温气体在多孔介质表面的燃烧情况。气体入口处用高温陶瓷胶沿着内壁均匀固定 4 个等尺寸的拉西环。拉西环材质是氧化铝陶瓷, 外径 10 mm, 内径 5 mm, 高 10 mm。其用于支撑泡沫陶瓷, 在燃烧器下方形成一个自由的扩张空间, 使得预混气体以较均匀的速度进入多孔介质层。泡沫陶瓷的材质是 SiC, 两块泡沫陶瓷的厚度均为 20 mm, 孔隙率分别为 20 ppi 和 10 ppi。双层泡沫陶瓷的作用是预防燃烧过程中的回火现象, 并使混合气体进一步混合均匀。燃烧室内填充有直径 5 mm, 孔隙率为 41.7% 的氧化铝小球。

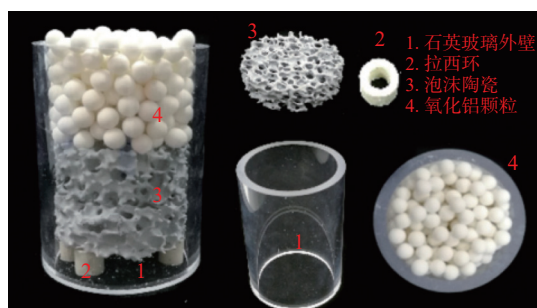


图 2 燃烧器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of burner

测量系统包括 PIV 测量系统和尾气测量系统。其中 PIV 系统主要由双脉冲 YAG 激光器、CCD 相机、同步控制器、粒子撒播器和软件处理系统构成。实验中所用的 YAG 激光器主要参数

为: 波长 532 nm、双脉冲最高激光强度都为 200 mJ、脉冲频率范围 1~15 Hz。CCD 相机分辨率为 2056×2056 像素, 最大帧数可以达到 15 FPS, 灰度 12 bit 用以识别示踪粒子, 实验中根据实际情况光圈可调。同步控制器通过外部触发的方式负责控制 YAG 激光器和 CCD 相机保持同步, 从而实现流场的瞬态测量。通过综合考虑实验测量中示踪粒子的跟随性和散射性以及气态燃烧场的耐高温性, 选取直径为 5 μm 的 TiO_2 粒子。PIV 测量软件中的参数设置如下: 频率设为 10 Hz, 两幅连续图像之间的时间间隔 (曝光时间延迟 Δt) 设为 32 μs , 每次实验采集的图像为 500 对。尾气测量系统由 ecom-J2KN 烟气分析仪和烟气探管构成, 采样探头可承受 1200 $^{\circ}\text{C}$ 的高温, 固定在燃烧器上方 15 cm 处。

1.2 实验步骤

本文涉及的实验分为两个部分, 一个是在不点火的情况下, 通过 PIV 系统对不同空气流量下的尾流流场进行冷态测试。空气经过 MFC 调节到预定流量, 激光器发射激光照射到流场中, 粒子便会发生散射, 这样高速摄像机就能捕捉到粒子在流场中的位置。利用高速摄像机采集图像, 计算速度场。将每对帧划分为 32×32 像素的询问区域, 利用 50% 的重叠计算速度, 得到 7326 个矢量的速度矢量图。

另一种是燃烧态实验。首先调整甲烷与空气的 MFC 的示数分别为 1.4 和 17.65 L/min, 利用点

火器进行点火,产生表面火焰。预热 5 min 后,再调整甲烷与空气的 MFC 示数为实验工况下的流量。利用高速摄像机捕捉瞬时火焰宏观结构,分析不同当量比下的表面火焰特性。同时,通过烟气探针采集烟气,利用烟气分析仪测量其中 CO 含量和流场温度。本研究的实验工况如表 1 所示。

表 1 实验工况
Tab. 1 Experimental conditions

空气流量/(L/min)	甲烷流量/(L/min)	当量比 ϕ
10	0.7	0.67
	0.8	0.76
	0.9	0.86
30	1.9	0.6
	2.1	0.67
	2.3	0.73
	2.5	0.79
	2.7	0.86
50	3.1	0.59
	3.7	0.7
	4.3	0.82
	4.8	0.91
	5.2	1.03

2 实验结果与讨论

2.1 结合 PIV 对尾流流场的分析

2.1.1 云图分析

通过获得的流场图,将各工况下平均场中的涡量(ω)和应变率(s)进行比较。其中, X - Y 平面上 X 轴的速度分量为 V_x , Y 轴的速度分量为 V_y 。由于涡量描述了流体旋转的程度,应变率描述了流体单元变形的速率,除了比较速度,比较流场的涡量和应变率对于了解流动特性也很重要。鉴于本实验中仅测量了两个速度分量,因此根据这两个速度分量计算涡量(ω)和应变率(s),计算式如下^[13]:

$$U = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (1)$$

$$\omega = \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$s = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \quad (3)$$

图 3 表示的是冷态状态时,PIV 系统在不同空气流量下测量的尾流流场平均速度云图及流线

图、涡量 ω 云图和应变率 s 云图。气流从燃烧器出口出来之后,继续向下游发展,由于填充域表面孔隙的存在使得气流在其下游区域形成涡旋。靠近燃烧器表面处,存在一些较小的低速区域。这是由于气流到达燃烧器表面,受到填充颗粒的阻碍产生回流,从而速度降低。如果气流通过填充颗粒之间的孔隙管道直接流入下游,则会形成高速区域。在高速区中,涡量和应变率整体较大,且主要集中于壁面附近和中心轴附近,在壁面达到最大值,说明流体和壁面之间存在很大的摩擦阻力,摩擦损失严重,耗能大^[14]。

整体上,涡量和应变率的大小随着气体流量的增大而增大,冷态流场整体平均空气流量增大 20 L/min,涡量和应变率随之增大 50%。这是因为流量的增加导致球间空隙的流速增大,从而导致了较大的速度梯度。

2.1.2 流场截面速度分析

为了进一步对多孔介质尾流区域的流动特性作出分析,图 4 给出了空气流量 10、30 和 50 L/min 时,冷态状态下尾流流场中的平均轴向速度 U_{mean} 以及平均速度均方根 U_{rms} 沿径向的分布大小。 U_{mean} 和 U_{rms} 使用下面给出的表达式计算。

$$U_{\text{mean}} = \sqrt{V_{x\text{mean}}^2 + V_{y\text{mean}}^2} \quad (4)$$

$$U_{\text{rms}} = \sqrt{V_{x\text{rms}}^2 + V_{y\text{rms}}^2} \quad (5)$$

式中: $V_{x\text{mean}}$ 、 $V_{y\text{mean}}$ 分别是 X 、 Y 方向上速度分量的平均值; $V_{x\text{rms}}$ 、 $V_{y\text{rms}}$ 是 X 、 Y 方向上速度分量的均方根。

靠近燃烧器表面处速度整体呈“波浪形”分布趋势,但速度并非完全呈轴对称。速度分布图中峰出现是因为小球挤压形成的喉道,谷是因为小球的回流,这与图 3 分析一致。填充床表面 U_{mean} 波动幅度最大,这是受到多孔介质填充结构尾端孔隙的影响。远离填充床区域处,轴向截面高度越高,受到结构尾端的扰动越小, U_{rms} 曲线波动幅度越小。在最高截面处,3 种空气流量下的 U_{rms} 曲线趋于水平。3 种空气流量下的最高 U_{mean} 都出现在近壁处,分别为 0.3、0.6 和 0.7 m/s。这是由于近壁处孔隙率较大的原因,也就是常说的近壁效应。在 $Y=60$ mm 截面处,3 种空气流量下的速度波动趋于 0.2、0.25 和 0.32 m/s。

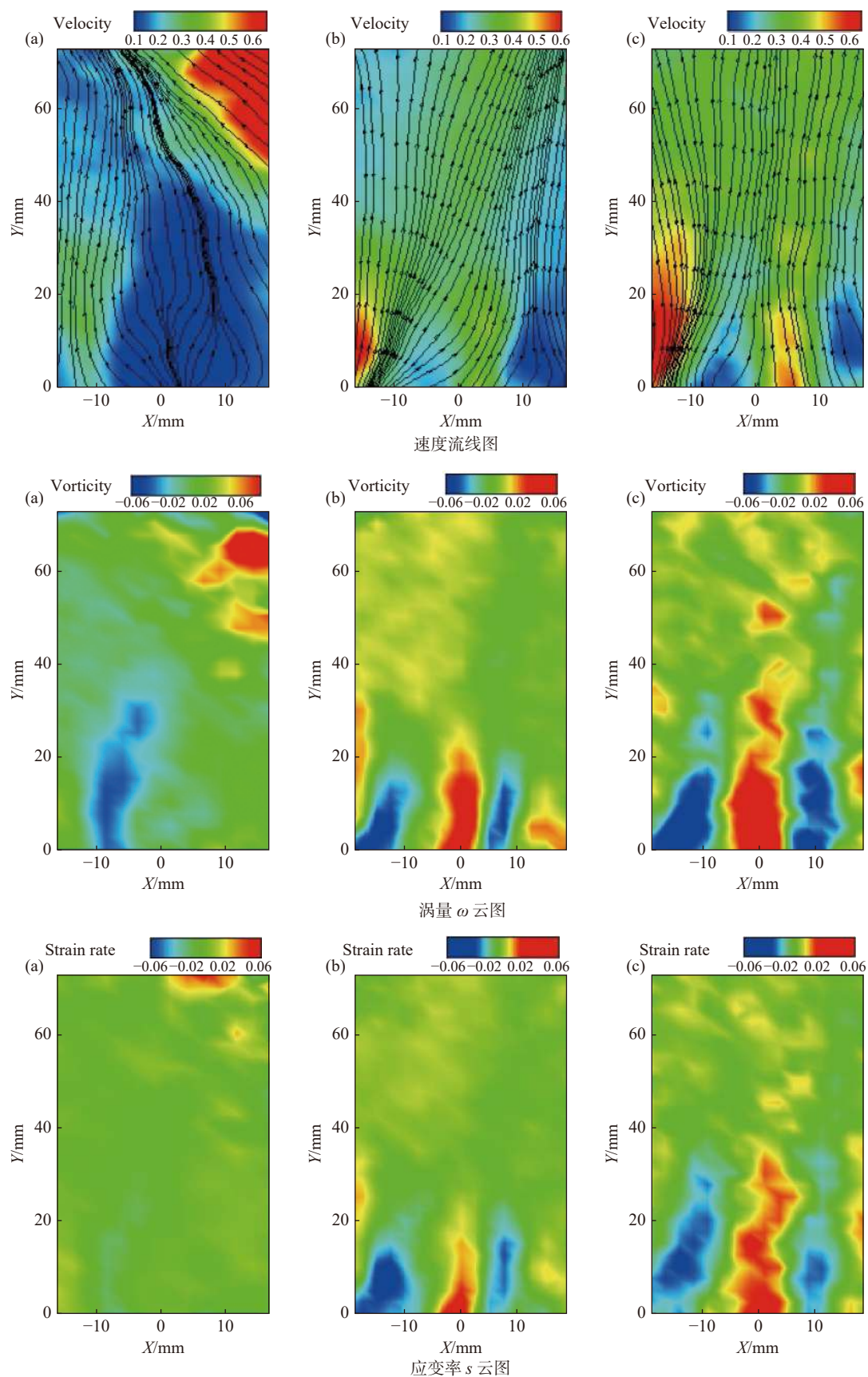


图3 空气流量 10 L/min(a)、30 L/min(b)、50 L/min(c) 时,冷态状态下流场的速度流线图、涡量云图、应变率云图

Fig. 3 The velocity flow diagram, vorticity contour diagram and strain rate contour diagram of the flow field under the unreacted state at the air flow rates of 10 L/min (a), 30 L/min (b), 50 L/min (c)

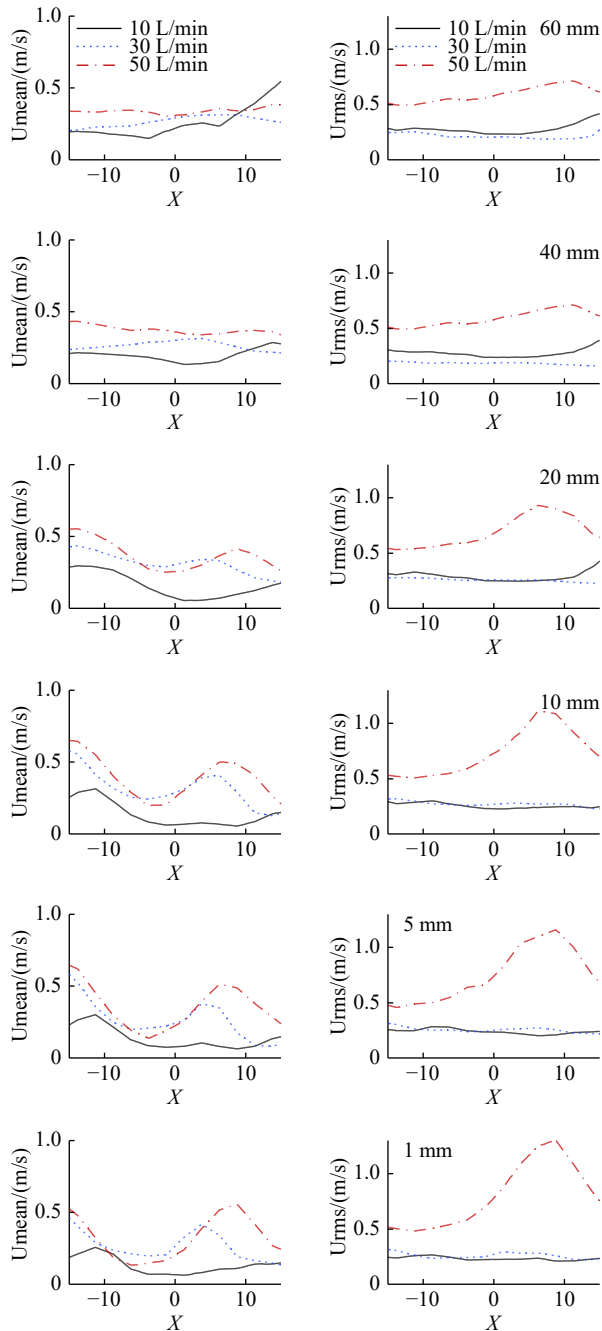


图4 空气流量 10 L/min、30 L/min、50 L/min 时,冷态状态下流场不同截面处的轴向平均速度分布和轴向平均速度均方根

Fig. 4 Axial average velocity distribution and root mean square at different sections of the flow field under the unreaction state at the air flow rates of 10 L/min, 30 L/min, 50 L/min

在不同空气流量下,流场截面处 U_{mean} 变化趋势基本一致。由于增大入口进气量后尾流流场受壁面处孔隙率分布特征影响,近壁区域速度梯度远高于远壁区域。

2.2 不同工况火焰状态分析

本文在空气流量分别为 10、30、50 L/min 时,

不同当量比的情况下,对随机填充型多孔介质表面的火焰结构和燃烧状态进行分析。图 5 所示为空气流量 10 L/min 条件下,高速摄像机捕捉的不同当量比情况下的火焰状态。当量比过低时,无法产生表面火焰。当量比调整到 $\varphi=0.67$ 时,点火后会出现小型锯齿状微弱的淡蓝色火焰。通过对冷态尾流流场的分析,发现在点火过程中,由于靠近填充床区域,流速较高,火焰主要集中于填充床的表面,壁面处无火焰。当量比 $\varphi=0.76$ 时,填充床表面火焰径向长度减小,轴向长度被拉伸,且火焰不稳定,在填充床表面高速尾流的影响下上下浮动。当量比 $\varphi=0.86$ 时,出现回火,表面燃烧不再存在。

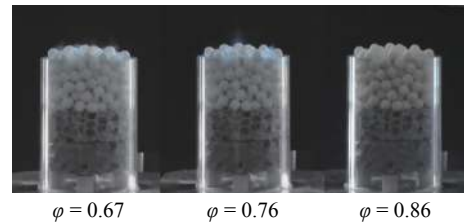


图5 空气流量 10 L/min 时,高速摄像机捕捉的不同当量比情况下的火焰状态

Fig. 5 State of flame captured by high-speed cameras under different equivalent ratios at the air flow rate is 10 L/min

图 6 为空气流量 30 L/min 条件下,高速摄像机捕捉的不同当量比情况下的火焰状态。当量比 $\varphi=0.6$ 时,点火瞬间会产生极少量的蓝色不稳定火焰,且主要跳动在填充床表面的中央位置,这是因为冷态中观察到的近壁区高速流场的影响。随着当量比增加到 $\varphi=0.67$,燃烧趋于稳定,在高流速下火焰沿填充床的中心向壁面延伸,形成上锯齿火焰,火焰高度较为均匀,与冷态中分析到的填充床区域处的轴向速度波动趋势有关。当量比 $\varphi=0.73$ 时,火焰高度缩短,向填充床上游移动,尾流出现少量持续的红色火焰。当量比继续增大到 $\varphi=0.79$ 时,红色火焰范围增大并伴随着噪声的产生,火焰高度进一步缩短。当量比对流速影响大,高当量比情况下,近壁区域开始产生表面火焰。当量比增加到 $\varphi=0.86$ 时,火焰发生回火。

图 7 所示为空气流量 50 L/min 条件下,高速摄像机捕捉的不同当量比下的火焰状态。当量比 $\varphi=0.59$ 左右时,填充结构表面的中心位置出现少量不稳定的微弱蓝色火焰,与图 6 中的 $\varphi=0.6$ 时的工况相似。当量比升高到 $\varphi=0.7$ 时,火焰逐渐趋于稳

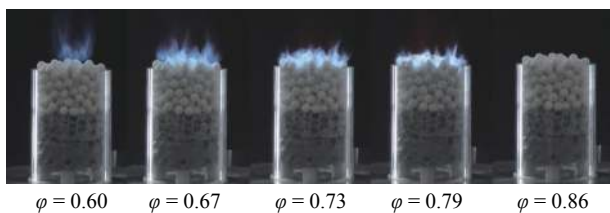


图 6 空气流量 30 L/min 时, 高速摄像机捕捉的不同当量比情况下的火焰状态

Fig. 6 State of flame captured by high-speed cameras under different equivalent ratios at the air flow rate is 30 L/min

定, 可以观察到尾流区域出现蓝色上锯齿状火焰, 蓝色火焰末端出现少量红色火焰。当量比 $\phi=0.82$ 时, 火焰出现分层, 出现上下两层火焰, 火焰区域呈径向扩张, 轴向长度减小, 较高的当量比影响了填充表面区域的速度分布, 表面火焰向壁面延伸。当量比进一步增大, $\phi=0.91$ 时, 仍能观察到双层结构, 下层火焰呈蓝色圆环形, 上层火焰呈暗红色锥形, 在高流速下, 红色火焰沿径向逐渐拉伸, 填充床内部开始出现燃烧现象, 高温区向下移动。当量比 $\phi=1.03$ 时, 此时 ($\phi>1$) 为富燃燃烧, 由于入口速度较高, 不再出现回火。

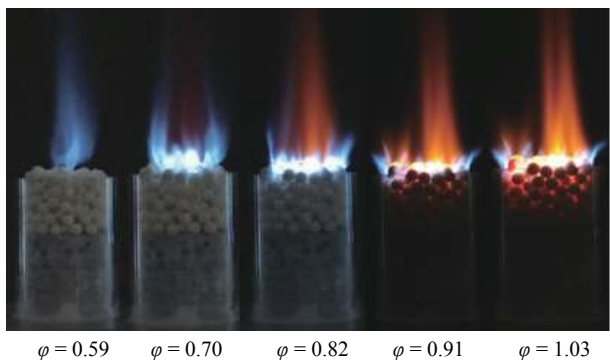


图 7 空气流量 50 L/min, 高速摄像机捕捉的不同当量比情况下的火焰状态

Fig. 7 State of flame captured by high-speed cameras under different equivalent ratios at the air flow rate is 50 L/min

2.3 CO 的排放分析

为了更好地研究尾流流场在不同工况下的变化, 本文利用烟气分析仪测量了不同当量比下的 CO 含量和温度变化。由图 8 可知随着当量比的增大, CO 含量总体呈现波动下降的趋势, 且在空气流量为 50 L/min、当量比为 0.91 时达到最低值。这是因为燃烧温度是 CO 产生的一个非常重要的因素, 在相同空气流量随着当量比的增加, 燃烧温度

逐渐升高, 导致甲烷的燃烧更加充分, 从而减少了 CO 的产生。另一方面, 随着燃烧温度的增加, CO 的可逆反应更加剧烈, 其中 CO 与 OH 的正向反应速率增加导致 CO 的减少。从图中的温度分布情况来看, 温度随着当量比的增加呈现波动上升的趋势, 进一步解释了 CO 浓度总体减少的原因。空气流量 50 L/min, 当量比大于 0.82 的工况中燃烧稳定, 温度变化小, 因此 CO 浓度变化也小。在实验过程中还发现在当量比小于 0.7 时, 3 种空气流量下的燃烧情况均不太稳定, 这也是除了温度之外导致在该当量比范围内 CO 浓度非常高的原因之一。

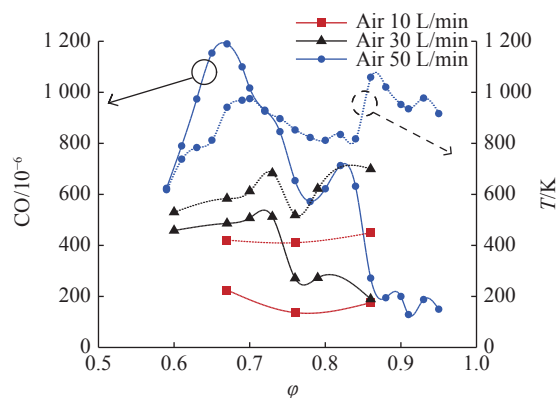


图 8 不同工况下的 CO 分布与温度变化(实线代表 CO, 虚线代表温度)

Fig. 8 CO distribution and temperature change under different working conditions (solid line represents CO, dotted line represents temperature)

3 结论

本文在自行设计的可视化实验台上, 采用 PIV 系统和烟气测量系统, 研究了冷态状态下填充型多孔介质尾流流场的信息, 以及甲烷/空气预混气体在不同当量比下表面燃烧的火焰形态和 CO 排放, 得到以下主要结论。

1) 冷态状态下, 流场整体平均速度随空气流量的增大而增大, 当冷态流场整体平均空气流量增大 20 L/min 时, 涡量和应变率随之增大 50% 左右。这是由于流量的增加导致间隙内的速度增大, 从而导致较大的速度梯度。

2) 由于近壁效应, 3 种空气流量下 U_{mean} 的最大值均出现在壁面处, 近壁区域速度梯度远高于远壁区域。靠近填充床表面区域 U_{mean} 高且波动幅度

大, 远离填充床区域, U_{mean} 波动趋于稳定。

3) 当量比对速度分布影响较大, 但其对火焰传播的影响相对较小, 孔隙率大且当量比较大容易出现回火, 流速大是不发生回火的原因。

4) 出口烟气的 CO 浓度随着当量比的增加整体波动下降, 在稳定燃烧状态下趋于均匀分布, 并在空气流量 50 L/min、当量比 0.91 时达到最低值。

参 考 文 献

[1] LIU H, DONG S, LI B W, et al. Parametric investigations of premixed methane-air combustion in two-section porous media by numerical simulation[J]. *Fuel*, 2010, 89(7): 1736 – 1742.

[2] BANERJEE A, PAUL D. Developments and applications of porous medium combustion: A recent review[J]. *Energy*, 2021, 221: 119868.

[3] 王波, 薛国程, 张龙, 等. 惰性多孔介质中预混燃烧的究进展 [J]. 节能技术, 2019 (3): 231 – 238.

WANG B, XUE G C, ZHANG L, et al. Research progress of Premixed combustion in inert porous media [J]. *Energy Saving Technology*, 2019(3): 231 – 238.

[4] ZHDANOK S A, KENNEDY L A, KOESTER G. Superadiabatic combustion of methane air mixtures under filtration in a packed bed[J]. *Combustion and Flame*, 1995, 100(1/2): 221 – 231.

[5] BAKRY A, AL-SALAYMEH A, AL-MUHTASEB A H, et al. CO and NO_x emissions in porous inert media (PIM) burner system operated under elevated pressure and inlet temperature using a new flame stabilization technique[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 165(2): 589 – 596.

[6] MARBACH T L, AGRAWAL A K. Experimental study of surface and interior combustion using composite porous inert media[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2005, 127(2): 307 – 313.

[7] DEVI S, SAHOO N, MUTHUKUMAR P. Experimental studies on biogas combustion in a novel double lay-

er inert porous radiant burner[J]. *Renewable Energy*, 2020, 149: 1040 – 1052.

[8] 郑成航, 程乐鸣, 李涛, 等. 多孔介质燃烧火焰面特性数值模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(5): 48 – 53.

ZHENG C H, CHENG L M, LI T, et al. Numerical simulation of flame surface characteristics in porous media combustion [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(5): 48 – 53.

[9] HASHEMI S M, HASHEMI S A. Flame stability analysis of the premixed methane-air combustion in a two-layer porous media burner by numerical simulation[J]. *Fuel*, 2017, 202: 56 – 65.

[10] LOVREGLIO P, DAS S, BUIST K A, et al. Experimental and numerical investigation of structure and hydrodynamics in packed beds of spherical particles[J]. *AIChE Journal*, 2018, 64(5): 1896 – 1907.

[11] YANG X, SCHEIBE T D, ICHMOND M C, et al. Direct numerical simulation of pore-scale flow in a bead pack: Comparison with magnetic resonance imaging observations[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 54: 228 – 241.

[12] WOOD B D, APTE S V, LIBURDY J A, et al. A comparison of measured and modeled velocity fields for a laminar flow in a porous medium[J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 85: 45 – 63.

[13] THAKER A H, KARTHIK G M, BUWA V V. PIV measurements and CFD simulations of the particle-scale flow distribution in a packed bed[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 374.

[14] 潘凤娟, 郭雪岩, 杨帆. 基于大涡模拟方法的旋流过滤器内流场数值模拟 [J]. 轻工机械, 2016(3): 23 – 29.

PAN F J, GUO X Y, YANG F. Numerical simulation of flow field in rotary flow filter based on large eddy simulation method [J]. *Light Industry Machinery*, 2016 (3): 23 – 29.

(编校: 夏书林)