

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

李亮¹, 张扬^{1,2}, 张海¹

(¹清华大学能源与动力工程系, 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084; ²清华大学山西清洁能源研究院, 山西太原 030032)

摘要: 为了研究多孔介质结构特征对燃烧强化作用的影响, 在孔隙率和孔径基础上, 引入新的结构参数弯曲度表征多孔介质的形态结构特性, 并对不同结构参数条件下多孔介质中低热值 H_2/CO 混合气的燃烧稳定性开展实验研究。结果表明, 多孔介质可提高稳燃上限, 拓宽贫燃极限并降低污染物排放。与孔隙率和孔径对燃烧稳定性的非单调影响特性不同, 实验中弯曲度对燃烧稳定性的影响呈单调变化趋势, 高弯曲度结构具有更强的燃烧增强效果。通过优化结构参数, 可以提高多孔介质燃烧的稳燃范围。此外, 三个结构参数针对不同的燃烧状态也表现出不同的影响, 对于高功率密度燃烧, 采用高孔隙率结构可以实现更低的 CO 排放, 对于极贫燃燃烧则应采用高弯曲度, 低孔隙率的结构。

关键词: 多孔介质燃烧; 多孔介质形态结构; 弯曲度; 低热值气体

中图分类号: TK 16

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-11

Experiments on burning low calorific value H_2/CO in the porous media: Effect of porosity, pore size and tortuosity

LI Liang¹, ZHANG Yang^{1,2}, ZHANG Hai¹

(¹Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Beijing 100084, China; ²Shanxi Research Institute of Huairou Laboratory, Taiyuan 030032, Shanxi, China)

Abstract: To investigate the impact of the porous media structural characteristics on combustion enhancement, a new structural parameter, tortuosity, was introduced to characterize the structural properties of porous media on the basis of two structural parameters, porosity and pore size. Experimental studies were conducted to explore the combustion stability of low calorific value H_2/CO mixture within porous media under varying structural parameter conditions. The results indicate that porous media can augment the upper limit of stable combustion, broaden the lean burn margin, and decrease pollutant emissions. In contrast to the non-monotonic influence exhibited by porosity and pore size on combustion stability, the experimental results reveal that the effect of tortuosity demonstrates a monotonic trend, a structure with higher tortuosity exhibits a more substantial enhancement in combustion performance. By optimizing the structural parameters, the flame stability in porous media can be

收稿日期: 2025-04-26 修回日期: 2025-06-22

通信作者: 张海(1967—),男,博士,教授,haizhang@mail.tsinghua.edu.cn

第一作者: 李亮(1997—),男,博士研究生,ll20@mails.tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(52176116); 华能集团总部科技项目基础能源科技研究专项(三)(HNKJ22-H105)-U22YYJC11 项目

引用本文: 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, DOI: 10.11949/0438-1157.20250444

Citation: LI Liang, ZHANG Yang, ZHANG Hai. Experiments on burning low calorific value H_2/CO in the porous media: Effect of porosity, pore size and tortuosity[J]. CIESC Journal, DOI: 10.11949/0438-1157.20250444

significantly improved. Additionally, the three structural parameters exhibit different impacts depending on the combustion states; in scenarios involving high power density combustion, a structure with high porosity contributes to the reduction of CO emissions, whereas for ultra-lean combustion, a structure with high tortuosity and low porosity is recommended.

Key words: porous media combustion; porous morphology; tortuosity; low calorific syngas

引 言

在使用天然气重整的高温固体氧化物燃料电池(SOFC)系统中,阳极侧产生含有可燃成分为 H_2 和CO的低热值合成气组分气体,这种尾气的成分与温度会随工作状态变化而大幅度波动。实现这种低热值尾气的稳定无害化处理与能量利用具有重要意义,并且面临挑战^[1,2]。

多孔介质燃烧是一种燃烧强化技术,可用于实现低热值富氢气体的稳定低污染燃烧^[3]。燃料与空气预混气在多孔介质孔隙内燃烧,通过多孔固相对导热和辐射的增强作用形成向来流的热量回流,预热未燃气体,从而提高火焰速度并拓展可燃极限^[4]。研究表明,这种固相热量回流燃烧增强机制可形成独特的“超绝热”燃烧状态^[5],同时降低污染物排放^[6],使得多孔介质燃烧在低热值燃料燃烧、热电转换和燃料气化等方面得到大量工业应用^[7-10]。典型的多孔介质燃烧器可以实现当量比为0.275的预混沼气的稳定燃烧^[11],而采用往复流动设计甚至可在当量比低至0.2时实现稳定燃烧^[12]。此外,多孔燃烧器的对温度场的改变有助于同时减少 NO_x 和CO的排放^[13]。关于多孔介质中不同燃料与流动条件下的燃烧特性,已经受到了广泛研究,形成相关综述研究^[10,13-14]与教学书籍^[15]。

对电池尾气这种超低热值气体的稳定燃烧,多孔介质的燃烧增强性能尤其重要。一般研究认为,多孔介质的燃烧增强效果与多孔固相的结构与形态特征紧密相关。目前研究中,通常使用典型多孔形态,包括颗粒堆积、直孔蜂窝、泡沫和纤维丝网等,描述多孔介质的宏观形态差异,并结合孔隙率孔径两个结构参数,表征多孔介质结构特性。其中,颗粒堆积的孔隙率一般为25~50%,即使采用异形或通孔颗粒,其孔隙率也很难超过60%,存在孔隙率的限制。泡沫结构应用最广泛,它能够实现较高的孔隙率和多种孔径。纤维丝网具有最宽的孔隙率和孔径变化范围,但在实际应用中面临着结构强度的挑战。现有研究通常基于强度或孔隙率的

要求对多孔形态进行选取,却很少细致考虑形态差异对燃烧性能的影响。研究表明,泡沫结构相比堆积或直孔蜂窝表现出最高的稳燃上限^[6],但受限于结构选取,缺乏对形态进行独立于结构参数(孔隙率和孔径)的比较。另一方面,即使是同一类形态,细节差异也会导致燃烧增强效果的差异。有研究者在相同孔隙率和孔径的条件下,比较了具有不同重复单元的泡沫结构对燃烧温度的影响^[17],结果表明,扰动效应最强的四开十面体单元的燃烧温度最高。

多孔介质结构常用孔隙率和孔径两个参数表征。Trimis等^[18]提出了著名的基于佩克莱数的多孔介质浸没火焰传播理论,以及小孔径导致火焰熄灭的准则。通常认为大孔有利于多孔介质燃烧,Gao等^[19]比较了颗粒直径在3~13 mm的氧化铝颗粒床的燃烧性能,发现颗粒直径越大,峰值燃烧温度越高。Samoilenko等^[20]对钴铬合金泡沫进行了实验,均匀晶格结构相比孔径随机分布的泡沫结构具有更低的CO排放性能。Hsu等^[21]采用实验和模型方法在0.3~1.5 mm的孔径范围内,探究了孔径对燃烧性能的影响,发现孔径增大会增加辐射的穿透深度,从而提高火焰速度。Masset等^[22]利用直接数值模拟对比了大小两种孔径中的火焰传播,证实大孔径导致更高的火焰速度。总的来说,大部分研究者在应用中选用大孔径(如10 PPI,孔每英寸)^[23-26],最近也有少数研究者选择小孔径,如50 PPI^[27]。

就孔隙率而言,现有研究常用的泡沫陶瓷通常在80%到90%之间^[23-26]。少数学者关注了孔隙率对燃烧的影响,Pan等^[28]通过数值模拟发现在0.3~0.7范围内,孔隙率越高,燃烧温度越高。Tolouei等^[29]数值模拟了孔隙率为0.5~0.9的氨多孔介质燃烧,结果表明多孔介质虽然可提高燃烧温度,但提高效果会随着孔隙率的降低而减弱。Chen等^[30]实验发现孔隙率高达96%的泡沫镍比孔隙率为80%的氧化锆陶瓷的辐射功率范围更广,换热效率更高。现有研究虽然一致认为大孔径和高孔隙率有助燃烧,但一方面,实验研究中所用的形态单一,没有实现相

同结构参数下不同结构特征之间(泡沫结构与颗粒堆积)的比较;另一方面,研究中的参数选取也较为有限,单一参数的实验研究结果较为缺乏,比如缺少低孔隙率(< 50%)与高孔隙率(> 80%)结构在孔径与形态特征相同条件下的燃烧特性比较。

体积平均模型(VAM, Volume-Averaged Model)是应用最广泛的多孔介质建模方法,它通过计算多孔介质结构参数对传热和流动方程的影响,模拟多孔介质中的燃烧反应过程。目前学者们开始认识到,传统的两结构参数多孔介质表征方法对燃烧领域的多孔介质建模存在不足。Bedoya等^[31]在孔径和孔隙率的基础上,采用固相弯曲度,修正了多孔介质燃烧模型中热传导过程的计算。这种修正减小了传统模型忽略多孔介质结构弯曲导致的对固相导热的低估问题。Flores-Montoya等^[32]针对高孔隙率的泡沫结构多孔介质,进一步引入了气相弯曲度,将结构弯曲对燃烧过程中气相导热过程的影响也纳入模型的考虑范围内。事实上,弯曲度所代表的多孔介质结构复杂程度,不仅会影响其中的导热过程,还会通过影响比表面积和流动扰动效果,影响多孔介质中的气固对流与辐射传热过程。过去,这种结构复杂程度是通过形态特征(颗粒堆积或泡沫结构)进行定性区分的,但弯曲度参数使得结构复杂程度对燃烧过程影响的定量分析成为了可能。

综上,本文引入弯曲度作为参数来评价多孔介质形态特征,并在较宽的特征参数范围实验研究形态结构的燃烧稳定性的影响。设计了一种基于陶瓷棒阵列的实验方法,在较大范围实现孔隙率和孔径的独立变化。在此基础上开展不同形态的多孔介质燃烧实验,实现了对弯曲度的独立比较。在实验中,对低热值气体燃烧的稳燃上限、贫燃极限和污染物排放进行了比较,揭示多孔介质结构形态对稳定低污染燃烧流速与当量比范围的影响,寻找针对低热值燃料的多孔介质选型策略。

1 实验方法和材料

1.1 实验系统与方法

实验使用体积分数为80% H₂和20% CO的合成气燃料的贫燃预混燃烧模拟SOFC的阳极尾气燃烧工况,实验中燃烧当量比为0.35~0.14,对应预混气体的低位热值范围为1.4~0.9 MJ/m³。图1为多孔介质燃烧实验系统,由多孔介质燃烧器、供气系统、温

度测量和污染测量等单元组成。

燃烧器结构如图2a所示,主体为由石英管制成的燃烧室。石英管长300 mm,直径52 mm;多孔介质区域长度为30 mm,直径50 mm。燃烧区间由电加热炉包覆,以减少热量损失并提供可控温度边界条件。在进行稳燃上限,贫燃极限,以及污染物测量时,电加热炉内,多孔介质燃烧腔室外的温度 T_{wall} 设定为950K,以最小化壁面散热损失。燃烧室底部安装有烧结金属板,其作用是整流并防止回火,其上布置具有不同孔径的蜂窝陶瓷板。



图1 多孔介质燃烧实验系统示意图

Fig.1 Experimental system of porous media combustion

实验采用陶瓷棒阵列构建孔隙率和孔径独立可控的多孔介质,通过改变阵列密度和陶瓷棒直径,可在大范围内实现对孔隙率和孔径的精确控制。将设计的陶瓷棒阵列置入直孔蜂窝陶瓷中,构建孔隙率和孔径两参数可控的多孔介质燃烧,如图2c所示。再通过比较具有相同孔隙率和孔径的陶瓷棒阵列与泡沫陶瓷(图2d)和堆积颗粒(图2e)的燃烧特性差异,可以获得形态参数弯曲度的影响作用。

实验中采用红外测温的方式对陶瓷棒阵列多孔介质燃烧状态的中轴线固相温度分布进行了测量,采用热电偶测量气相温度,结果如图3所示,图

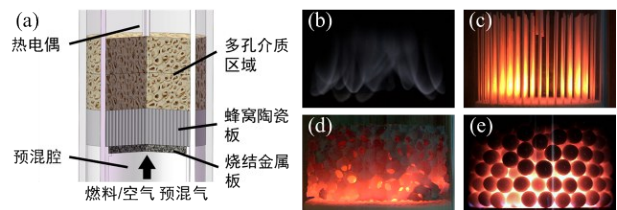


图2 多孔介质燃烧器与结构示意图(左)与不同形态的多孔介质/无多孔介质燃烧状态照片(右)

Fig.2 Schematic of the porous media zone (left) and the flame pictures with and without porous media (right)

中曲线为多孔介质燃烧 VAM 模型^[33]。较为均匀的径向温度分布,和与一维模型计算结果较为吻合的燃烧器中轴线气固两相温度测量结果都表明,实验

可以实现近似于多孔介质中一维火焰的燃烧状态,这有助于我们的实验结果对多孔介质燃烧的实际应用提供指导。

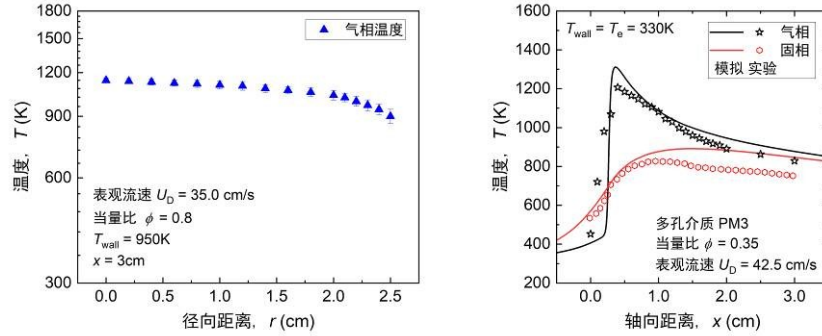


图3 多孔介质燃烧的径向(左)与轴向(右)温度分布

Fig.3 Radial (left) and axial (right) temperature distribution of porous media combustion

1.2 实验结构参数与测量

表1展示了实验使用的由氧化锆制成的多孔介质结构参数。PM1-7为陶瓷棒阵列蜂窝结构(图2c),参数取决于单棒直径和阵列数量,泡沫结构PM8(图2d)和堆积颗粒PM10(图2e)的孔隙结构由分辨率为50 μm的中国三英精密仪器公司的Nano Volex 4000型工业计算机断层扫描设备检测获得。除了孔隙率(ε)和平均孔径(d_m)外,本研究将在只在流动、传热传质中使用的形态参数弯曲度(τ)^[34, 35]应用于描述多孔介质对燃烧特性的影响,将多孔介质

形态参数化。物理上,弯曲度反映了多孔结构对扩散过程的阻碍。其定义如式(1)所示。

$$\tau_g = L_g / L \quad (1)$$

以多孔介质中的气相弯曲度 τ_g 为例,其定义为最短有效通流长度 L_g 与流动方向宏观距离 L 之比,对于蜂窝结构,其气固两相弯曲度数值均等于倾斜角的正割函数。

实际多孔介质结构的弯曲度采用Cooper等^[36]提出的模拟算法获得,孔径分布采用Rabbani等^[37]开发的代码获得。

表1 多孔介质结构参数

Table 1 Structural parameters of the PM used

实验编号	孔隙率 ε	平均孔径 d_m (mm)	弯曲度 τ	单棒直径 d_r (mm)	阵列数量 N_r
PM1	0.974	3.11	1.0	0.6	182
PM2	0.953	2.93	1.0	0.8	182
PM3	0.927	2.16	1.0	0.8	285
PM4	0.927	2.71	1.0	1.0	182
PM5	0.927	3.25	1.0	1.2	126
PM6	0.927	6.78	1.0	2.5	29
PM7	0.895	2.71	1.0	1.2	182
PM8 (泡沫结构)	0.830	3.45	1.19	/	/
PM9 (直孔蜂窝)	0.439	3.92	1.0	/	/
PM10 (颗粒堆积)	0.438	5.00	1.40	/	/

实验中,通过改变气体流速与燃烧当量比,测量了不同结构多孔介质的稳燃上限与贫燃极限特性。表2展示了实验中的工况参数表格。

在实验数据采集过程中,在预设工况下等待多

孔介质燃烧器中的预混火焰稳定30 min以达到稳定燃烧状态。然后,在10 min内测量三次烟气成分,每次持续1 min。采用标准偏差(SD)的三倍作为烟气组分测量的不确定度,数据的平均可重复性

表2 实验工况

Table 2 Operating conditions

功率密度 Q_B (MW/m ³)	当量比 ϕ	表观气体流速 U_D (cm/s)
0.3	0.35	17.2
	0.3	19.7
	0.25	23.2
	0.2	28.5
	0.35	34.4
0.6	0.3	39.4
	0.25	46.4
	0.2	56.9
0.8	0.35	46.4
	0.3	53.0
	0.25	62.5
	0.2	76.7

在均值的4%以内。使用笛管式采样装置在燃烧器出口处对烟气进行采样,采用美国 Thermo Scientific 公司的 Nicolet iG50 Spectrometer 型傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)测量烟气中 CO 浓度并监测 NO、NO₂ 与 CO₂ 的排放水平。污染物浓度的测量结果都已被折算到氧浓度为 3.5% 的干燥空气状态。

2 实验结果与讨论

2.1 燃烧稳定性相图

采用不同结构多孔介质的燃烧器开展了系列燃烧稳定性实验研究,实验工况范围为当量比 0.325~0.14,采用了 0.3/0.6/0.8 MW/m² 三种功率密度,整理出了燃烧稳定性相图,如图 4 所示。

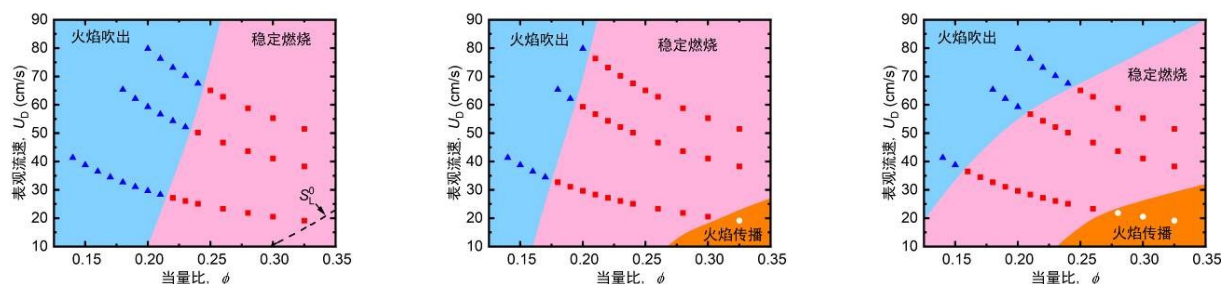


图4 三种不同多孔介质结构状态的燃烧稳定性相图(从左至右依次为:无多孔介质,PM4,PM8)

Fig.4 Stability diagrams of three different porous media structure (From left to right: non-PM, PM4 and PM8)

实验发现,当富氢合成气在陶瓷棒阵列形成的多孔区域中燃烧时,随着当量比的降低,在稳定的浸没燃烧状态和完全火焰吹出的不稳定状态之间会出现火焰部分浸没,部分表面燃烧的状态,此时仅凭观察难以明确界定燃烧状态的稳定边界。因此,我们使用污染物测量结果来帮助评估燃烧稳定性。当烟气中 CO 的残留率达到当前当量比工况条件下的 90% 时,就认为进入了火焰吹出不稳定状态。而当 CO 的残留率在 30% 到 70% 之间时,燃烧器中通常可以稳定地形成多个稳定的反本生灯形火焰,下部为浸没火焰,上部为稳定的表面火焰。随着当量比的增加,火焰将向上游传播。虽然多孔介质上游装有孔径较小的低孔隙率蜂窝陶瓷可以防止回火,但必须尽量避免这种火焰向上游传播的状态,因为这不仅会增加 CO 排放,还会造成燃烧器损坏的风险。

图 4 中显示了三种多孔燃烧器的燃烧稳定性

图,从左至右多孔介质结构的复杂程度(孔隙率降低、孔径变小、弯曲度增加)依次增加。结果表明,与无多孔介质状态相比,添加多孔介质能显著拓宽燃烧器的稳定工作范围,但同时增加火焰向上游传播的倾向。随着多孔结构更加复杂,一方面多孔燃烧器在较低流速下的贫燃极限被拓宽,但另一方面,出现了在较高流速下火焰更容易吹出的不利影响。

对于贫燃极限的拓宽,可以通过多孔介质热量回流的角度进行理解,即复杂的多孔结构(PM8 泡沫结构)相比高孔隙率的直孔结构(PM4)具有更强的对流换热与固相热传导效果,从而实现了更强的热量回流,从而拓宽贫燃极限。而对于稳燃上限的相反影响,可以从实验观察的角度进行理解,实验测量与观察发现,高孔隙率的直孔结构在接近稳燃上限的较高流速下,可以观察到与无多孔介质类似的火焰面倾斜的部分浸没燃烧状态,此时火焰部分

附着在多孔介质中,不同于在通常具有较低孔隙率的复杂的多孔结构中的吹出多孔介质后立即吹熄,这种过渡性的稳定状态提高了稳燃上限,燃烧器中的稳定燃烧气体流速远大于相同状态下的火焰传播速度也验证了这种富氢合成气在多孔介质中的火焰锋面倾斜现象。

2.2 稳燃上限

稳燃上限决定了多孔介质燃烧器的最大功率密度,从而影响低热值合成气的燃烧功率,在设计中希望采用更小的体积实现更大流量的尾气燃烧处理。实验比较了当量比0.2条件下的稳定燃烧吹出上限,分析多孔介质孔隙率、平均孔径和弯曲度这三个参数的影响。实验中数据点表示在对应结构与工况参数条件下多孔介质能实现稳定燃烧状态,同结构参数的最高流速点即对应稳燃上限。

图5显示了在保持平均孔径和弯曲度不变的情况下,孔隙率对于稳燃上限的影响。孔隙率的减小会导致稳燃上限出现先上升后下降的变化,孔隙率对稳燃上限具有显著影响。这种非单调的影响同样可以通过传热和流动两个角度分析。在传热增强角度,孔隙率高的多孔结构导热性差,比表面积低,会抑制辐射和对流,从而阻碍热量回流,降低稳燃上限。在流动角度,低孔隙率的强化传热效果不仅使得径向温度分布更加均匀,同时孔隙率低的多孔结构的有效流动截面积较小,因此在相同的表观速度下具有更高的孔隙流速,更均匀的速度场与温度场都抑制了火焰面倾斜现象的发生,导致容易发生火焰吹出,因此具有更低的稳燃上限。

针对孔隙率的实验结果验证了过去模拟研究得出的结论,即相比常规的多孔介质孔隙率范围($\varepsilon < 0.9$),在一定范围内($\varepsilon < 0.95$)进一步提高孔隙率有助于扩大稳定燃烧范围,这与过去模拟研究中关于孔隙率影响的结论具有一致性。另一方面,实验结果同样表明,针对具有极高孔隙率($\varepsilon > 0.95$)多孔介质的实验结果表明,过高孔隙率下,燃烧增强效果会减弱,这是过去针对孔隙率的模型研究所没有涉及的参数范围。

图6显示了在相同孔隙率和弯曲度条件下,孔径对稳燃上限的影响。孔径增大也会导致稳燃上限先上升后下降。与孔隙率的影响类似,同样从传热和流动两个角度分析,在传热方面,当孔径较小时,较高的比表面积不仅增强了气固传热,导致更高的固体温度,也加强了多孔固体的辐射作用,导

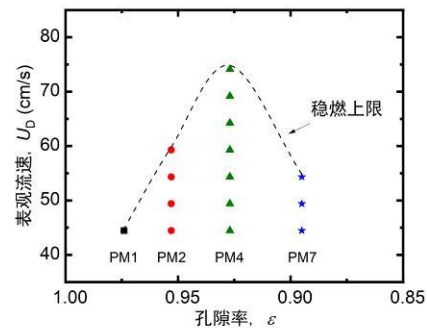


图5 不同孔隙率条件下的稳燃上限(燃烧当量比 $\phi = 0.2$)
Fig.5 Flame stability range with different porosity (equivalence ratio $\phi = 0.2$)

致更强的辐射热损失;在流动方面,小孔径多孔介质中具有更加均匀的孔隙分布,充分发展状态的流场具有更加均匀的速度分布,这抑制了火焰面倾斜现象,从而降低稳燃上限,使得多孔介质内火焰在高流速下更容易熄灭并吹出。

相反,当孔径过大时,燃烧状态与无多孔介质整体类似,仅有固相周围存在微弱的附着式火焰面,此时多孔介质对燃烧的增强效果较为微弱。实验结果表明,与过去研究结论类似,在小于5 mm通常孔径范围内,选择较大的孔径有助于提高稳定性上限。根据实验观察,孔径较大的多孔介质能在接近吹熄时实现更大范围的部分浸没火焰状态,从而有助于提高稳燃上限。本实验结果同时证明,采用过高的孔径会抑制燃烧增强效果,这与一般的多孔介质传热分析结果一致。具体多大孔径会导致最高的稳燃上限还有待更进一步的实验研究。

图7显示了弯曲度对稳燃上限的影响。PM8是

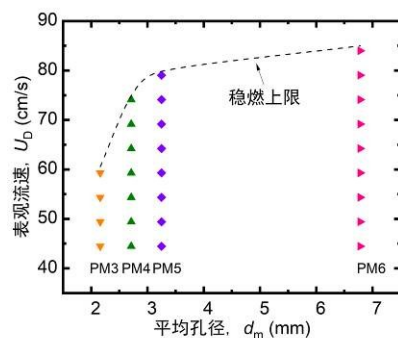


图6 不同平均孔径条件下的稳燃上限(燃烧当量比 $\phi = 0.2$)

Fig.6 Flame stability range with different mean pore diameter (equivalence ratio $\phi = 0.2$)

氧化锆泡沫,在孔隙率较高的条件下实现了一定的结构弯曲度,PM10是氧化锆颗粒堆积,虽然孔隙率很低,但随之实现了较高的结构弯曲度。PM7和PM9均为直孔蜂窝结构,被设为对照组,从而在排除孔隙率和孔径影响的条件下,获得弯曲度对稳燃上限的影响。其中PM9和PM10形成了低孔隙率条件下具有高弯曲度差异的对照实验,但这两者的孔径分别约为4 mm和5 mm。这种孔径差异是为了保证孔隙率的一致性所导致的,如果采用4 mm粒径的颗粒堆积,则会导致孔隙率的较大差异。基于图6结果关于孔径参数影响的比较可以发现,平均孔径

在4~5 mm之间变化只会导致较小(10%以内)的稳燃上限差异。这种差异显著弱于图7(b)所示的弯曲度带来的约三倍的稳燃上限影响。

总的来说,在实验范围内($1.0 < \tau < 1.4$),提高多孔结构的弯曲度,可显著提高稳燃上限。实验结果并没有表现出与传统结构参数——孔隙率与孔径类似的非单调特性,这一方面是因为实验点的缺乏,事实上,在控制孔隙率与孔径的基础上实现弯曲度参数的独立变化,在常规泡沫陶瓷或颗粒堆积这些结构参数具有相关性的结构中是较为困难的。

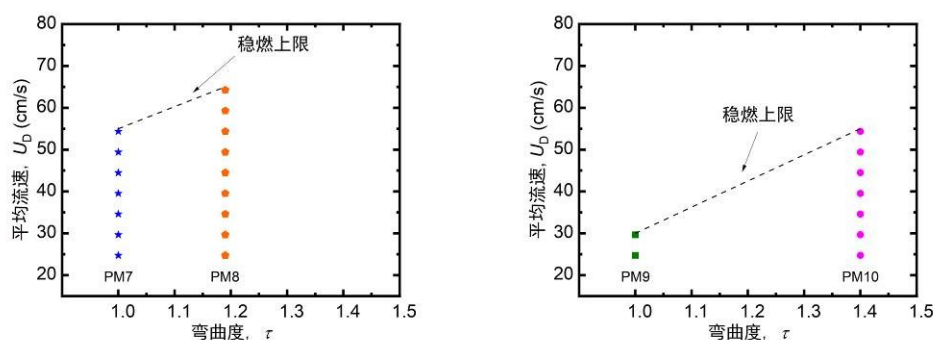


图7 不同弯曲度条件下的稳燃上限(燃烧当量比 $\phi = 0.2$)

Fig.7 Flame stability range with different tortuosity (equivalence ratio $\phi = 0.2$)

另一方面,现有的实验结果也说明,在现有的常规泡沫(图7左)的较高孔隙率与颗粒堆积(图7右)的低孔隙率结构参数条件下,更高的弯曲度确实可以实现更强的燃烧增强效果。这是因为在这些结构参数条件下,传热增强的影响被放大而流动抑制的影响被削弱,使得弯曲度的影响具有单调特性。在较高(图7左)孔隙率的实验参数条件下,较低的固相占比使得弯曲度带来的传热的强化作用更加显著,高弯曲度结构不仅具有更强的气固换热能力,还会改变孔内辐射穿透深度,增强辐射热量传导,从而显著增强了燃烧热量回流效果。在较低(图7右)孔隙率条件下,较高的固相占比使得火焰面倾斜已经得到了足够的抑制,高弯曲度的火焰面倾斜抑制效果不再显著,高弯曲度虽然同样意味着更均匀的径向速度分布和对火焰面倾斜的抑制,但影响被显著削弱了。

2.3 贫燃极限

贫燃极限决定了多孔介质燃烧器的最低稳定燃烧当量比,从而影响其对低热值气体成分变化的适应能力。为了了解结构对贫燃极限的影响,采用

功率密度 0.3 MW/m^3 条件下的稳定燃烧吹出贫燃极限进行比较,探究孔隙率、平均孔径和弯曲度对贫燃极限的影响。实验中数据点表示多孔介质中的稳定燃烧状态,同结构参数的最低当量比点即对应贫燃极限。

图8显示了孔隙率对贫燃极限的影响。不同于对稳燃上限的显著改变,孔隙率对贫燃极限影响较为微弱,但同样呈现非单调的趋势。

图9显示了孔径对贫燃极限的影响。与孔隙率的影响类似,相比对稳燃上限的显著改变,孔径对贫燃极限的影响微弱且同样非单调。我们认为,这种对稳燃上限和贫燃极限的影响差异是多孔介质的燃烧影响机制的差异导致的。孔隙率和孔径除了影响多孔介质的热量回流效果,还通过通流截面积和孔径影响孔隙中的平均流速和速度分布,进而影响多孔介质中的火焰锋面倾斜,因此对稳燃上限这种受到流动状态影响的吹出过程影响更显著,而对贫燃极限这种受热量回流能力主导的过程的影响就相对较弱。

图10显示了弯曲度对贫燃极限的影响,相比于

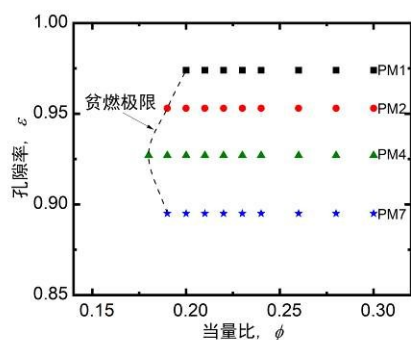


图8 不同孔隙率条件下的贫燃极限(燃烧功率密度 $Q_b = 0.3\text{MW/m}^3$)

Fig.8 Lean-burn limit with different porosity (power density $Q_b = 0.3\text{MW/m}^3$)

孔隙率和孔径,弯曲度对贫燃极限的影响更为显著。不同于孔隙率和孔径,弯曲度的改变不仅会显著增强对流换热和辐射热传导从而强化热量回流,

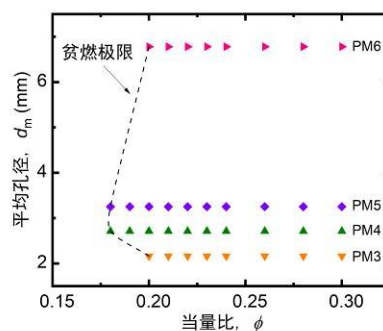


图9 不同孔径条件下的贫燃极限(燃烧功率密度 $Q_b = 0.3\text{MW/m}^3$)

Fig.9 Lean-burn limit with different mean pore diameter (power density $Q_b = 0.3\text{MW/m}^3$)

还可能通过减小轴向孔径一定程度上抑制浸没火焰锋面的倾斜,这使得弯曲度对贫燃极限的拓宽相比稳燃上限的增加更为显著。

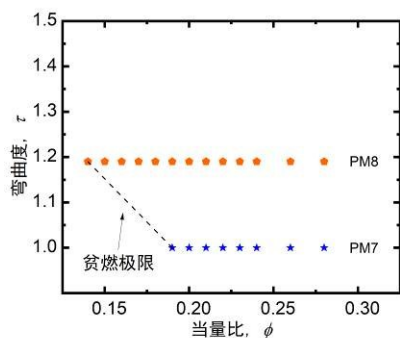


图10 不同弯曲度条件下的稳燃上限(燃烧功率密度 $Q_b = 0.3\text{MW/m}^3$)

Fig.10 Lean-burn limit with different tortuosity (power density $Q_b = 0.3\text{MW/m}^3$)

2.4 污染物排放

合成气中的CO浓度较高,因此CO的燃尽与排放是一个关键问题。图11显示了不同孔隙率的多孔介质与无多孔介质情况下的CO排放量变化趋势对比。在高当量比($0.3 < \phi$)的低CO排放范围内,多孔介质会导致CO排放量增加,而在接近火焰吹出($\phi < 0.25$)的高CO排放范围中,多孔介质则可减少CO排放。无多孔介质的自由火焰燃烧的CO排放量达到个位数 $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$,而随着PM2、PM4和PM7孔隙率的依次降低,最低CO排放量分别为 $10 \mu\text{m}^3/\text{m}^3$ 、 $80 \mu\text{m}^3/\text{m}^3$ 和 $160 \mu\text{m}^3/\text{m}^3$ 。这种CO排放量随着多孔固相的增加而增加的趋势表明,多孔介质孔隙中的燃烧并不均匀,可能分为孔隙中心的预热燃烧和固体表面附近的强散热燃烧,后者可能是一氧化

碳的主要来源。随着固相的增加,近表面散热燃烧的比例增加,导致CO排放增加。在近吹熄条件下,与无多孔介质燃烧相比,多孔介质燃烧仍能保持燃烧稳定和部分的CO燃尽,从而使CO排放量相对较低。在较高当量比的火焰传播边界,CO排放量会随当量比增加而增加,因为火焰倾向于向上游的高孔隙率小孔介质中传播,导致部分原本的孔隙中心预热燃烧转化为贴壁散热燃烧,从而导致CO排放量增加。总体而言,多孔介质会导致CO排放量增加,但同时扩大低CO排放工作范围。因此,将多孔介质燃烧器应用于接近燃烧稳定性极限状态才能取得最优的稳燃与减排效果,在常规强火焰条件下,多孔介质可能导致更强的散热与高CO排放。

为了直观地研究多孔介质结构参数对CO排放

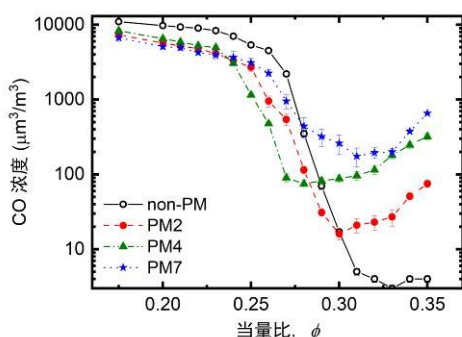


图11 不同孔隙率条件下的CO排放(燃烧功率密度 $Q_B = 0.3\text{MW/m}^3$)

Fig.11 CO emission with different porosity (power density $Q_B = 0.3\text{MW/m}^3$)

的影响,我们根据多孔燃烧器稳定工作范围内的CO测量值,采用线性内插法划分了CO排放低于 $500\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ 的区域。如图12所示,阴影部分代表无多孔介质条件下的低CO区域。随着孔隙率的降低,低CO区域的流速上限降低,贫燃边界拓宽,整体先扩大后缩小。在低孔隙率PM7的情况下,低CO区域出现了带状结构,此时高当量比条件下火焰传播会导致CO的显著增加。

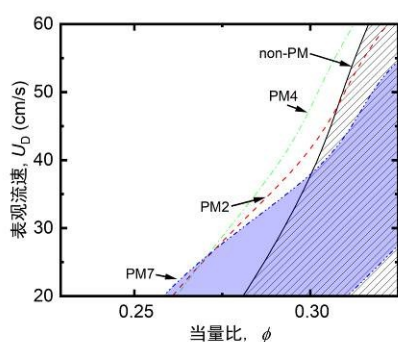


图12 不同孔隙率条件下的低CO排放区域

Fig.12 Low CO emission ranges with different porosity

图13说明了孔径对低CO区域的影响。孔径较小时,多孔介质可以扩大低CO区域;但孔径较大(PM6)时,多孔介质会导致低CO区域显著缩窄。这种现象是因为孔径较大情况下陶瓷支杆的直径较粗,这大大增强了固体表面的贴壁燃烧散热,也阻碍了固相热量回流效率,导致整体CO排放量显著增加。

图14显示了弯曲度对低CO区域的影响,增加弯曲度会带来与减小孔隙率类似的影响,使低CO区域的流速上限降低,贫燃边界拓宽。综合三种结

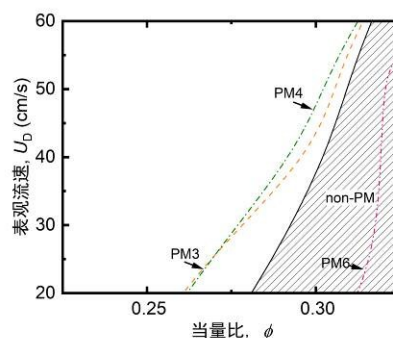


图13 不同孔径条件下的低CO排放区域

Fig.13 Low CO emission ranges with different mean pore diameter

构参数对多孔介质低污染高效燃烧的影响,对于需求高功率密度的燃烧,较高的孔隙率可以在更高的流速下实现低污染燃烧;对于需求超低热值气体的燃烧,更低的孔隙率和更高的弯曲度有助于在更低当量比条件下进行低污染燃烧,但这同时会导致火焰传播风险的增加,对燃烧工况的控制提出了更高的要求。

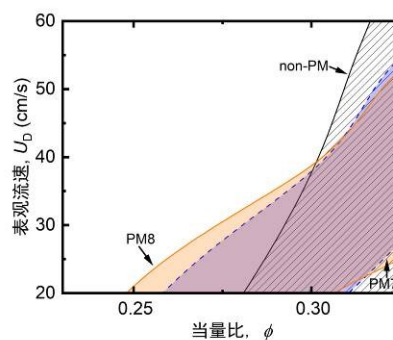


图14 不同弯曲度条件下的低CO排放区域

Fig.14 Low CO emission ranges with different tortuosity

3 结论

实验研究了孔隙率,孔径和弯曲度等三个重要多孔介质结构参数对燃烧特性的影响,并采用稳燃上限和贫燃极限两个指标来评估多孔介质结构对燃烧稳定性的影响。

在较大参数范围(孔隙率0.99~0.40、孔径10~2 mm、弯曲度1~1.4)的实验中观察到了孔隙率和孔径对燃烧稳定性的非单调影响。在孔隙率方面,与常用的选择范围($\varepsilon < 0.9$)相比,一定程度提高孔隙率($\varepsilon = 0.91 \sim 0.93$)有助于扩大燃烧稳定性范围,该现象基本验证了过去的模拟研究结果。实验同时研

究了过去实验缺乏且模型难于预测的极高孔隙率状态($\varepsilon > 0.95$),该状态下多孔介质的燃烧增强效果会降低,稳定燃烧范围缩窄。在孔径方面,与常用的选择范围($d_m = 2\sim 3$ mm)相比,进一步增大孔径($d_m = 4\sim 5$ mm)有助于扩大燃烧稳定性范围。

实验观察与分析表明,孔隙率与孔径的变化不仅会影响多孔固相的热量回流,还会改变孔隙内的流动状态与火焰面倾斜特性,从而更显著地影响工作的稳燃上限。增加弯曲度虽对热量回流具有增强作用,对流动导致的火焰面倾斜强化具有抑制作用,但在通常结构参数条件下,传热强化起主导作用,而流动的影响被抑制,因此高弯曲度对燃烧稳定性的影响通常是单调增强,并且弯曲度对贫燃极限的影响相比稳燃上限更为显著。相比直孔蜂窝,泡沫等具有高弯曲度的复杂结构通常是多孔介质燃烧的更优选择,在控制孔隙率和孔径的前提下提高结构弯曲度是未来多孔介质燃烧增强结构选取的有效策略。

多孔介质燃烧还可提高低热值合成气的CO排放下限,降低NO_x排放上限,同时扩大了低污染物排放的工作范围,影响效果与多孔结构相关。对于高功率密度燃烧,采用较高的孔隙率可以实现更低的CO排放;对于极贫燃状态下的超低热值气体燃烧,则需要采用高弯曲度或低孔隙率的结构。

符号说明

T_{wall}, T_c ——分别为燃烧器边界温度控制系统的温度和环境温度, K

参考文献

- [1] Gür T M. Comprehensive review of methane conversion in solid oxide fuel cells: Prospects for efficient electricity generation from natural gas[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2016, **54**: 1–64.
- [2] Ghang T G, Lee S M, Ahn K Y, et al. An experimental study on the reaction characteristics of a coupled reactor with a catalytic combustor and a steam reformer for SOFC systems[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, **37**(4): 3234–3241.
- [3] Francisco R W, Rua F, Costa M, et al. On the combustion of hydrogen-rich gaseous fuels with low calorific value in a porous burner[J]. *Energy & Fuels*, 2010, **24**(2): 880–887.
- [4] Howell J R, Hall M J, Ellzey J L. Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, **22**(2): 121–145.
- [5] Oliveira A A M, Kaviany M. Nonequilibrium in the transport of heat and reactants in combustion in porous media[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2001, **27**(5): 523–545.
- [6] Weinberg F J. Combustion temperatures: the future?[J]. *Nature*, 1971, **233**(5317): 239–241.
- [7] Banerjee A, Paul D. Developments and applications of porous medium combustion: a recent review[J]. *Energy*, 2021, **221**: 119868.
- [8] Ghareghani A, Ghasemi K, Siavashi M, et al. Applications of porous materials in combustion systems: a comprehensive and state-of-the-art review[J]. *Fuel*, 2021, **304**: 121411.
- [9] Kamal M M, Mohamad A A. Combustion in porous media[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2006, **220**(5): 487–508.
- [10] Mujeeb M A, Abdullah M Z, Abu Bakar M Z, et al. Combustion in porous media and its applications – A comprehensive survey[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(8): 2287–2312.
- [11] Habib R, Yadollahi B, Saeed A, et al. Unsteady ultra-lean combustion of methane and biogas in a porous burner – An experimental study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, **182**: 116099.
- [12] Kotani Y, Takeno T. An experimental study on stability and combustion characteristics of an excess enthalpy flame[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1982, **19**(1): 1503–1509.
- [13] Wood S, Harris A T. Porous burners for lean-burn applications[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, **34**(5): 667–684.
- [14] Mujeeb M A, Abdullah M Z, Mohamad A A, et al. Trends in modeling of porous media combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, **36**(6): 627–650.
- [15] 程乐鸣, 岑可法, 周昊, 等. 多孔介质燃烧理论与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
Cheng L M, Cen K F, Zhou H, et al. *Theory and technology of porous medium combustion*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [16] Gao H B, Qu Z G, Feng X B, et al. Combustion of methane/air mixtures in a two-layer porous burner: a comparison of alumina foams, beads, and honeycombs[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, **52**: 215–220.
- [17] Liang X, Li Y W, He Z, et al. The effect of cellular structure on the strength and combustion properties of SiC porous ceramics[J]. *Ceramics International*, 2022, **48**(2): 2538–2545.
- [18] Trimis D, Durst F. Combustion in a porous medium—advances and applications[J]. *Combustion Science and Technology*, 1996, **121**(1/2/3/4/5/6): 153–168.
- [19] Gao H B, Qu Z G, He Y L, et al. Experimental study of combustion in a double-layer burner packed with alumina pellets of different diameters[J]. *Applied Energy*, 2012, **100**: 295–302.
- [20] Samoilenko M, Seers P, Terriault P, et al. Design, manufacture and testing of porous materials with ordered and random porosity: Application to porous medium burners[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, **158**: 113724.
- [21] Hsu P F, Evans W D, Howell J R. Experimental and numerical study of premixed combustion within nonhomogeneous porous ceramics[J]. *Combustion Science and Technology*, 1993, **90**(1/2/3/4): 149–172.
- [22] Masset P A, Duchaine F, Pestre A, et al. Modelling challenges of volume-averaged combustion in inert porous media[J].

- Combustion and Flame, 2023, **251**: 112678.
- [23] Devi S, Sahoo N, Muthukumar P. Combustion of biogas in porous radiant burner: low emission combustion[J]. Energy Procedia, 2019, **158**: 1116–1121.
- [24] 张俊春. 多孔介质燃烧处理低热值气体及燃烧不稳定性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Zhang J C. Study on treatment of low calorific value gas and combustion instability by porous medium combustion[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [25] 姜海. 多孔介质内预混气体燃烧的实验和数值研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- Jiang H. Experimental and numerical study on premixed gas combustion in porous media[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.
- [26] Gentillon P, Singh S, Lakshman S, et al. A comprehensive experimental characterisation of a novel porous media combustion-based thermophotovoltaic system with controlled emission[J]. Applied Energy, 2019, **254**: 113721.
- [27] Li Q Q, Li J, Shi J R, et al. Effects of heat transfer on flame stability limits in a planar micro-combustor partially filled with porous medium[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, **37**(4): 5645–5654.
- [28] Pan J F, Wu D, Liu Y X, et al. Hydrogen/oxygen premixed combustion characteristics in micro porous media combustor[J]. Energy Procedia, 2014, **61**: 1279–1285.
- [29] Tolouei A, Gharehghani A. Numerical investigation of premixed methane-ammonia combustion in a mesoscale porous combustor [J]. Fuel, 2024, **366**: 131427.
- [30] Chen X J, Li J W, Zhao D, et al. Effects of porous media on partially premixed combustion and heat transfer in meso-scale burners fuelled with ethanol[J]. Energy, 2021, **224**: 120191.
- [31] Bedoya C, Dinkov I, Habisreuther P, et al. Experimental study, 1D volume-averaged calculations and 3D direct pore level simulations of the flame stabilization in porous inert media at elevated pressure[J]. Combustion and Flame, 2015, **162**(10): 3740–3754.
- [32] Flores-Montoya E, Masset P A, Schuller T, et al. Flame-front tracking in porous media burners[J]. Combustion and Flame, 2024, **267**: 113597.
- [33] Li L, Zhang R F, Zhang Y, et al. Burning ammonia with methane blending in an air-staged porous media burner[J]. Fuel, 2025, **387**: 134385.
- [34] Berg C F. Permeability description by characteristic length, tortuosity, constriction and porosity[J]. Transport in Porous Media, 2014, **103**(3): 381–400.
- [35] Graczyk K M, Matyka M. Predicting porosity, permeability, and tortuosity of porous media from images by deep learning[J]. Scientific Reports, 2020, **10**(1): 21488.
- [36] Cooper S J, Bertei A, Shearing P R, et al. TauFactor: an open-source application for calculating tortuosity factors from tomographic data[J]. SoftwareX, 2016, **5**: 203–210.
- [37] Rabbani A, Jamshidi S, Salehi S. An automated simple algorithm for realistic pore network extraction from micro-tomography images[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, **123**: 164–171.