

考虑多孔介质形态的燃烧模拟研究：孔隙结构和材料的影响

李亮¹ 张瑞方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, 太原 030032)

摘要 多孔介质燃烧可提高燃烧速率和稳定性, 实现预混燃气在极贫/富燃条件下的稳定燃烧, 拓展可燃极限。本文基于多孔介质的体积平均假设, 建立了考虑多种形态特征的多孔介质燃烧模型, 对不同结构与材料参数条件下的多孔介质燃烧特性进行了模型计算。分析表明, 孔隙率、平均孔径、弯曲度、材料热导率和发射率这五个参数通过控制气固换热、导热和辐射过程影响多孔介质中的燃烧状态。由于辐射的作用, 孔隙结构对燃烧速率的影响相比材料更加显著, 较小的孔径和较高的弯曲度会促进气固换热过程并提升燃烧速率, 但气固换热过于强烈将增强辐射热损失, 无法实现稳定燃烧, 出现多孔介质熄火。模型所预测的孔隙结构与材料对多孔介质燃烧特性的影响规律与实验结果一致。

关键词 多孔介质燃烧; 孔隙结构; 模型预测; 燃烧速率

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2025)01-0310-09

Simulation of Porous Media Combustion Considering Morphology: Effect of Cell Structure and Porous Material

LI Liang¹ ZHANG Ruifang¹ ZHANG Yang^{1,2} ZHANG Hai¹

(1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Shanxi Clean Energy Research Institute, Tsinghua University, Taiyuan 030032, China)

Abstract Porous media combustion can improve the burning rate and flame stability, achieve stable flame in ultra-lean/rich conditions, and expand the flammability limit. Based on the assumption of homogeneous porous media, a combustion model considering multiple porous media morphological features is established, and the combustion characteristics in porous media with different structural and material parameters are calculated. The results show that five parameters, namely, porosity, mean pore diameter, tortuosity, material thermal conductivity and emissivity, affect the combustion state in porous media by influencing the gas-solid heat transfer, thermal conductivity and radiation processes. Due to the effect of radiation, the pore structure has a more significant effect on the combustion rate compared to the material parameters, smaller pore diameter and higher tortuosity will improve the gas-solid heat transfer process and enhance the burning rate, while overly intense gas-solid heat transfer will enhance the radiative heat loss, and lead to combustion instability and quenching in porous media. The trend of the cell structure and porous material influence on the porous media combustion characteristics obtained from the model calculations is consistent with the experimental results.

Key words porous media combustion; cell structure; model calculation; burning rate

0 引言

多孔介质燃烧是一种广泛应用的辅助燃烧技术。通常预混燃气在多孔介质孔隙中燃烧, 又称为浸没燃烧。这种燃烧具有独特提升燃烧速率并拓宽可燃极限的优势, 使得极贫/富燃条件下的预混气

体仍能稳定燃烧^[1], 并在近极限条件实现低污染物排放^[2]。多孔介质独特的助燃性能主要是多孔介质对未燃气体有良好的预热效果, 燃烧产生的热量通过多孔介质的导热和辐射作用形成对来流未燃气体

收稿日期: 2023-11-21; 修订日期: 2024-12-23

基金项目: 国家重点研发计划课题 (No.2021YFA0716201); 清华大学山西清洁能源研究院“揭榜挂帅”项目 (No.2023JZ0501001)

作者简介: 李亮 (1997-), 男, 博士研究生, 主要从事火焰与气体燃烧方面的研究。

的热量回流 [3]。

然而, 多孔介质燃烧在实验和模型研究方面都存在挑战。虽然实验中可采用干涉激光 [4] 或 X 射线 [5] 对多孔介质中的火焰进行非侵入式观察, 但难以获得具体可靠的物理量, 比如孔隙中的局部流速和温度, 难以定量描述孔隙尺度复杂的流动和热交换过程。进而研究者开展理论计算 [6] 到三维孔隙尺度 [7] 的模拟, 通过模型分析燃烧过程, 合理预测了多孔介质燃烧的可燃极限、燃烧速度、温度和污染物排放 [8]。由于对孔隙中的燃烧进行模拟需要考虑反应、流动、换热等过程, 而同时考虑复杂孔隙的流动和详细化学反应过程具有过高的计算成本, 为此模型常采用一定的简化, 其中采用体积平均假设的气固两相模型具有较高的计算效率和相对准确性, 被用于多种维度的多孔介质过程模拟。

传统上使用的多孔介质为氧化铝堆积球和碳化硅泡沫陶瓷, 近年来, 随着金属与陶瓷 3D 打印技术的发展, 更多形态、结构与材料的多孔介质得以开发, 包括新型多孔介质比如 CoCr 泡沫 [9] 和金属纤维 [10], 优化的多孔结构和材料物性可以增强多孔介质燃烧中的热传递, 提升燃烧特性。目前, 关于结构和材料的优化集中在实验研究, 亟需采用模型对多孔介质的寻优进行分析与指导。

为了准确预测不同孔隙结构与材料条件下多孔介质中的燃烧特性, 需要关注不同多孔介质结构与材料特性对气固热交换过程的影响, 同时保证化学反应对温度场的敏感性, 以准确预测不同换热状态下的反应过程。虽然已有研究发现辐射在多孔介质燃烧中具有重要作用, 但在模型研究中主要考虑导热和对流 [11] 或采用难以考虑辐射的孔隙尺度模型 [7], 另一方面在模型中也常只用孔隙率和孔密度表征多孔介质的结构 [12,13], 不能准确描述多孔介质的形态。

因此, 本文构建了先进的一维多孔介质燃烧模型, 基于体积平均假设的气固两相模型计入多孔介质中的辐射等效导热和辐射散热作用, 并采用弯曲度 τ 作为多孔介质形态表征, 将蜂窝结构、泡沫结构和颗粒堆积结构的换热经验关系进行统一, 用孔隙率、平均孔径、弯曲度、材料热导率和发射率五个参数对多孔介质进行描述, 重新选取了导热、气固换热和辐射的计算方法。基于开发的模型重点考察了结构与材料特性对燃烧特性的影响, 并进行实验验证。

1 数值模拟方法

1.1 物理模型

模型的研究对象是火焰在固相多孔介质中的燃烧过程, 又称浸没燃烧, 如图 1 所示。

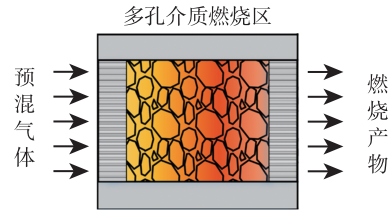


图 1 多孔介质燃烧过程

Fig. 1 Combustion processes in porous media

为了对多孔介质中的燃烧过程进行模拟, 需要考虑气相组分输运、化学反应和气固两相热交换过程, 本文采取体积平均假设构建气相和固相的守恒方程, 对多孔介质中的一维层流火焰面进行模拟。

1.2 数学模型

多孔介质一维层流稳态燃烧反应模型中, 控制方程组如式 (1)~(4) 所示。

质量守恒方程:

$$\frac{d\dot{M}}{dx} = 0 \quad (1)$$

组分守恒方程:

$$\dot{M} \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx} (\rho A \varepsilon Y_k V_k) - A \phi \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad (2)$$

气相能量方程:

$$\begin{aligned} \dot{M} \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_{p,g}} \frac{d}{dx} \left(\lambda A \varepsilon \frac{dT}{dx} \right) + \\ \frac{A \varepsilon}{c_p} \sum_{k=1}^K \rho Y_k V_k c_{p,k} \frac{dT}{dx} + \\ \frac{A \varepsilon}{c_p} \sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k h_k W_k + h_v (T_s - T_g) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

固相能量方程:

$$\begin{aligned} - \frac{1}{c_{p,s}} \frac{d}{dx} \left(\lambda_{s,eff} A \frac{dT_s}{dx} \right) - h_v (T_s - T_g) - \\ \frac{1}{c_{p,s}} \frac{dq_{r,s}}{dx} + q_{r,loss} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, ρ 、 c_p 、 λ 分别是密度、比定压热容和热导率; 下标 g、s 和 k 分别表示气相、固相和特定气体组分, 这些物性参数都取决于当地温度 T 和混合物组分。对任意气体组分 k, W_k 是摩尔分数, Y_k 是质量分数, V_k 是扩散速度, h_k 是摩尔焓值, $\dot{\omega}_k$ 是化学反应摩尔生成速率。计算中不考虑多孔介质或者燃烧器壁面带来的流动阻力, 因此不计算动量方程。 ε 为多孔介质的孔隙率, 表征通流部分在整体体积中的占比。

模型中的多孔介质固相能量方程包括导热、气固换热、固相辐射和辐射散热过程。

导热过程由式 (5)、(6) 表示。考虑陶瓷材料的导热特性, 固相本征导热系数 $\lambda_{s,int}$ 确定方式如式 (5) 所示:

$$\lambda_{s,int}(T) = \lambda_{s,int}(T_0) \cdot \frac{T_0}{T} \quad (5)$$

$\lambda_{s,int}(T_0)$ 是该种陶瓷材料在基准温度 T_0 下的本征导热系数。

Fu 等 [14] 的综述中给出了固相有效热导率的计算方法:

$$\lambda_{s,eff} = \lambda_{s,int} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\tau^2} \quad (6)$$

其中, τ 是多孔结构固相的弯曲度, 表征截面积和截面形态, 对蜂窝结构陶瓷, $\tau = 1$ 。

气固换热过程由式 (7)~(17) 表示。气固对流换热通过体积对流换热系数 h_v 表征, 通常根据实验总结出的体积努塞尔数 Nu_v 和努塞尔数 Nu 经验关系式给出:

$$h_v = Nu_v \lambda_g / d_m^2 \quad (7)$$

$$Nu_v = Nua_v d_m \quad (8)$$

其中, d_m 为多孔介质平均孔径, a_v 为多孔介质比表面积。

为了求解体积努塞尔数 Nu_v , 对于不同形态的多孔介质有不同的经验公式, 对于蜂窝结构的多孔介质, 采用经过实验验证的经验关系式 [15]:

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668 (d_m/L) Re_d Pr}{1 + 0.04 [(d_m/L) Re_d Pr]^{2/3}} \quad (9)$$

$$a_v = 4\varepsilon/d_m \quad (10)$$

其中, Pr 为气相普朗特数, $Re_d = \frac{\bar{v} d_m}{\mu}$ 为基于孔径的雷诺数, \bar{v} 为表观流速, 该公式的适用范围 $Re_d < 2300$ 。

对于泡沫结构的多孔介质, Wu 等 [16] 采用二十面体结构进行了建模仿真, 得出关系式:

$$Nu = 2.0696\varepsilon^{0.38} Re_d^{0.438} \quad (11)$$

$$a_v = \frac{1}{d_m} (15.71 - 52.45\varepsilon + 79.51\varepsilon^2 - 41.5\varepsilon^3) \quad (12)$$

该公式的适用范围 $70 < Re_d < 800$, $0.66 < \varepsilon < 0.93$ 。

对于堆积球形态的多孔介质, Singhal 等 [17] 进行了数值模拟, 给出经验公式:

$$Nu = 2.67 + 0.53 Re^{0.77} Pr^{0.53} \quad (13)$$

$$a_v = \left(12\pi \frac{\pi}{6(1-\varepsilon)}^{\frac{1}{3}} - 8\pi \right) * \frac{3(1-\varepsilon)}{4\pi} \quad (14)$$

该公式的适用范围 $0 < Re_d < 200$, $0.3 < \varepsilon < 0.5$ 。

为了综合考虑不同多孔介质形态的气固换热过程, 需要构建一个包含三种典型多孔介质结构的换热经验关系式。Zare 等 [18] 的研究表明在柱体颗粒堆积床中, 努塞尔数 Nu 和弯曲度 τ 相关。实际流动过程中, 更高的弯曲度会导致更大的流动阻力和更强的相间热交换。模型采用弯曲度 τ 对多孔介质形态进行描述。

对泡沫结构 [19] 和堆积球结构 [20], 采用基于分析得出的弯曲度计算公式:

$$\tau = 1 + 5.62 \frac{[1 - 0.971(1-\varepsilon)^{0.5}](1-\varepsilon)^{0.5}}{4\varepsilon} \quad (15)$$

(0.68 < ε < 0.98)

$$\tau = 1.23 \frac{(1-\varepsilon)^{4/3}}{\varepsilon S^2} \quad (0.32 < \varepsilon < 0.47) \quad (16)$$

其中, S 为颗粒球形度。

在获得三种典型形态的多孔介质换热经验关系和弯曲度 τ 的基础上, 采用 LM 优化算法得出了一种适用于不同形态和结构多孔介质的对流换热经验关系式:

$$Nu_v = [4.21 + 0.147 Re^{0.77}] \cdot \varepsilon^{\tau-0.36} (1-\varepsilon)^{0.67\tau-0.85} \tau^{5.18} \quad (17)$$

该公式的参数选取范围为 $Re_d < 200$, $0.3 < \varepsilon < 0.95$, $1 < \tau < 1.65$, 优化的公式在该参数空间内 $R^2 = 0.9573$ 。

固相辐射过程由式 (18)、(19) 表示。固体多孔介质内有很强的辐射, 是一种典型的光学厚介质, 光学厚度 $\tau_v = \sigma_e x \gg 1$, 采用 Rossland 扩散近似模型计算固体内的辐射热流:

$$q_{r,s} = A \frac{16\sigma T_s^3}{3\sigma_e} \frac{dT_s}{dx} \quad (18)$$

其中, σ_e 是消光系数, 在 Howell 等 [21] 总结的公式基础上推导得出:

$$\sigma_e = \frac{-\ln(1-\alpha)}{d_m} (1-\varepsilon) \quad (19)$$

其中, α 是多孔介质固相发射率。

辐射散热过程由式 (20) 表示。实验发现, 多孔介质燃烧器具有很强的周向辐射效果, 因此本模型

通过计算多孔介质固相向等温壁面的热量辐射确定多孔介质燃烧的热损失。

$$q_{r,loss} = \frac{D(1-\varepsilon)}{4} \alpha \sigma (T_s^4 - T_{wall}^4) \quad (20)$$

其中, D 是多孔介质燃烧器直径, 壁面温度 T_{wall} 通过实验测量得到, 模型中取 650°C 。

1.3 化学反应动力学机理

计算选取 GRI3.0 反应机理模拟甲烷/空气燃烧。详细的化学反应动力学求解基于美国 Sandia 实验室开发的代码 CHEMKIN。

1.4 边界条件

相比传统的一维层流火焰求解, 多孔介质模型需要对固相边界条件进行考虑, 固相能量方程的求解区域为 $x = -\infty \sim L$:

$$\begin{aligned} x = -\infty : \frac{dT_s}{dx} = 0; \quad x = L : \frac{dT_s}{dx} = 0; \\ q_{r,loss}|_L = \frac{d}{dx} (\alpha \sigma (T_s^4 - T_e^4)) \end{aligned} \quad (21)$$

1.5 参数选取与计算方法

基于多孔介质燃烧模型, 选择的统一计算工况是单位大气压下燃烧当量比 $\phi = 0.5$ 的甲烷/空气燃烧。采用较低当量比的贫燃工况进行模拟, 有助于显示多孔介质对燃烧速率的提升和可能存在的散热熄灭特性。为了说明多孔介质对燃烧速率增强效果, 用计算得出的燃烧速率 S_L^P 和层流绝热自由火焰速度 S_L^0 之比定义相对燃烧速率 β :

$$\beta = S_L^P / S_L^0 \quad (22)$$

模拟计算中, 通过改变孔隙率 ε , 平均孔径 d_m , 弯曲度 τ , 材料基准导热系数 $\lambda_{s,int}$ (300 K) 和材料发射率 α , 探究多孔介质结构、形态、材料对多孔介质燃烧的影响。如图 2 所示为多孔介质模型的参数关系和迭代求解过程示意。该模型采用了美国 Sandia 实验室开发的代码 CHEMKIN 中的 cklink 和 tmlink 程序处理化学反应机理和气相输运参数, 结合多孔介质燃烧过程的守恒方程与边界条件构成的守恒方程进行迭代求解。

2 实验方法

2.1 实验系统与方法

为了验证模型计算结果, 搭建了多孔介质燃烧实验台。图 3 展示了多孔介质燃烧实验系统示意图, 包括多孔介质燃烧室, 供气系统和温度与烟气检测系统。

图 4 展示了多孔介质燃烧器的实物图与结构示意图。空气与燃料在混气室内均匀混合, 经过烧结金属板和氧化铝堆积球层进入多孔介质区域进行燃烧, 堆积球层中布置热电偶以监测回火现象。

本研究主要探究多孔介质对燃烧速率的提升效果, 实验中采用变工况观察的方法判断多孔介质中的燃烧速率。图 5 展示了预混气流速提升导致的燃烧状态变化。实验中, 选择火焰从多孔介质中吹出前的稳定浸没燃烧状态流速作为燃烧速率, 并计算得出相对燃烧速率 β_{exp} 。多孔介质燃烧器外壳为石英玻璃便于观察, 实验测量中, 石英玻璃将被电加热炉包覆并提供保温, 通过热电偶测量包覆层温度以提供模拟中的散热计算参数。

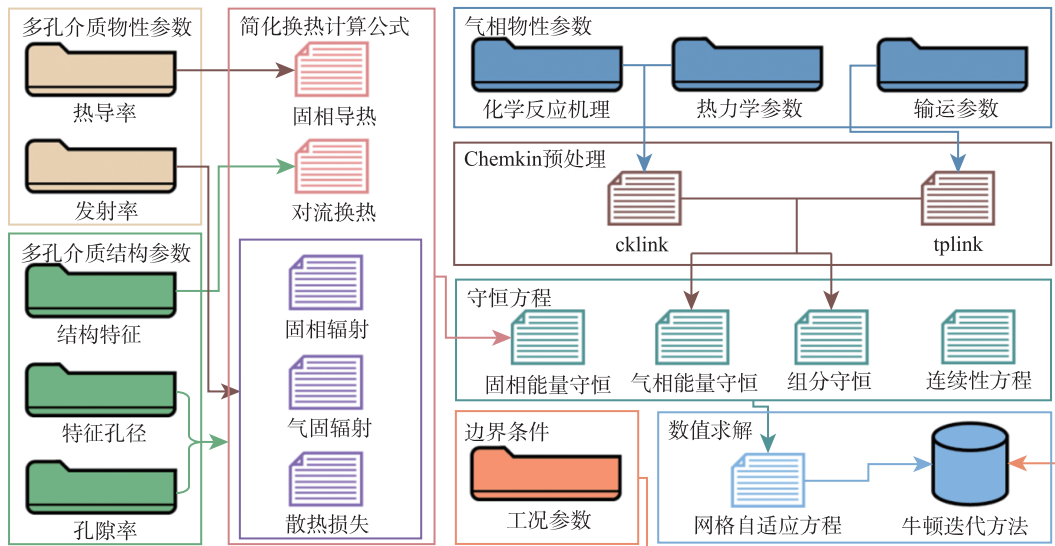


图 2 多孔介质燃烧模型计算流程示意图

Fig. 2 Schematic of the porous media computational model

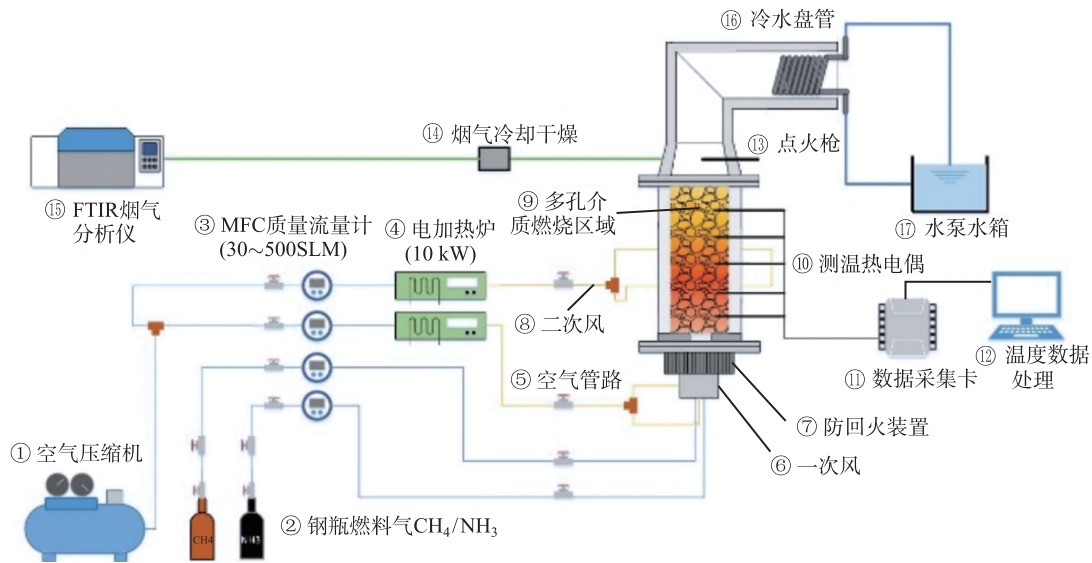


图 3 多孔介质燃烧实验系统示意图

Fig. 3 The experimental system of porous media combustion

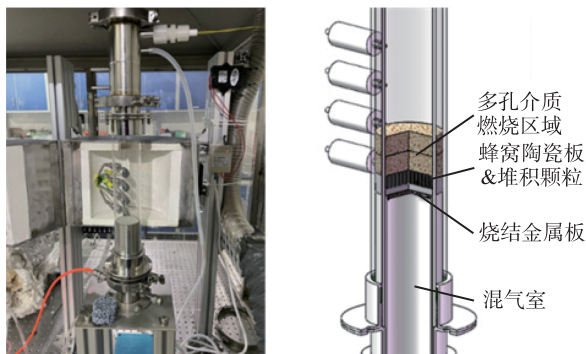


图 4 多孔介质燃烧器实物图 (a) 与结构示意图 (b)

Fig. 4 The picture of the combustion chamber (a) and schematic of the porous media burner (b)



图 5 多孔介质燃烧状态: 低流速浸没燃烧 (左), 高流速浸没燃烧 (中), 吹出 (右)(图示为掺氨甲烷多孔介质燃烧的吹出过程, 本文的模拟和实验都采用纯甲烷作为燃料)

Fig. 5 Flame images of porous media combustion: Low-flow submerged flame (left); High-flow submerged flame (mid); Blow-out (right). (The figure shows the blow-out process for the combustion of NH_3 in porous media; pure CH_4 was used as the fuel for both the simulations and experiments in this paper)

2.2 实验装置与材料参数

计算模型基于多孔介质燃烧器的实际参数构建。表 1 展示了多孔介质燃烧器对应的物理参数

和多孔介质材料物性参数, 数据来源于在线材料物性参数数据库 [22]。

表 1 多孔介质燃烧器与材料物理参数
Table 1 Porous media burners and porous material physical parameters

物理参数	数值	
多孔介质材料直径 D/mm	50	
多孔介质特征厚度 L/mm	25~30	
孔密度/PPI	5~15	
孔隙率 ϕ_s	0.8~0.9	
雷诺数 Re_d	30~200	
导热系数 $\lambda_{s,int} (300 \text{ K})/$ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	SiC	25~30
	Al_2O_3	12~20
	CoCr	14
材料发射率 α	SiC	0.7~0.8
	Al_2O_3	0.45~0.7
	CoCr	0.18

3 结果与分析

3.1 多孔介质燃烧特性

多孔介质燃烧利用固相高导热、高比热、高发射率的特性, 增强气体燃烧的传热、蓄热、辐射特性, 燃烧过程中传热的增强是多孔介质实现高燃烧速率的主要原因, 强化传热对燃烧速率的提高主要通过两种机制。如图 6(a) 所示, 此时多孔介质气固两相存在显著温差, 在火焰面下游, 燃烧后的高温烟气通过对流加热多孔固相, 热量在固相中通过导热传递至上游未燃气体区域, 最后预热未燃混合气。这种预热燃烧状态一方面导致了燃烧温度峰值的提高, 相比自由火焰温度提高了 100 K 以上; 另一方

面提高了未燃气温度, 从而提高了燃烧速率。当采用更高的对流换热系数 h_v , 如图 6(b) 所示, 多孔介质气固两相的温差不再显著, 相比预热燃烧, 具有更低燃烧温度峰值, 但实现了更高的燃烧速率提升。此时气固两相之间换热充分, 可以视为一个均匀的混合相, 该气固混合相在固相加入后相比气相具有了极高的热导率提升, 提高了燃烧的刘易斯数 Le , 进而增强燃烧速率, 此时燃烧速率的提升主要受材料热导率的影响, 与气固换热和辐射散热过程几乎无关。

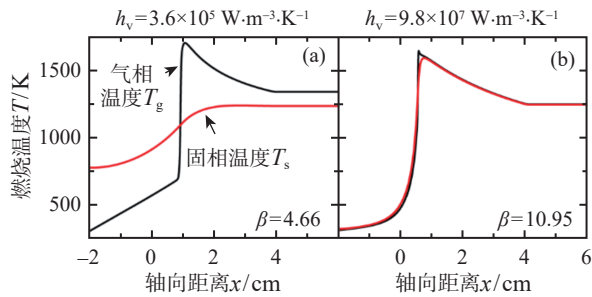


图 6 不同气固换热条件下多孔介质的气固温度分布和相对燃烧速率 ($\varepsilon = 0.8, \tau = 1, \lambda_{s,int}(300\text{ K}) = 30\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \alpha = 0.7$)

Fig. 6 Gas-solid temperature distribution and relative porous media flame speed in different gas-solid heat transfer conditions

基于换热经验公式的计算, 泡沫、堆积球和蜂窝陶瓷等常规多孔介质中的燃烧状态都处于预热燃烧状态。在预热燃烧状态中, 对流换热、导热和辐射过程都对多孔介质预热量和燃烧速率提升有着重要的影响, 接下来具体讨论结构与材料对这些过程的影响和对燃烧速率的影响。

3.2 平均孔径对燃烧速率的影响

平均孔径一方面作为特征尺度影响气固对流换热, 平均孔径越小, 对流换热越强烈; 另一方面通过改变消光系数影响辐射等效导热, 平均孔径越小, 辐射等效导热越弱。图 7 展示了平均孔径和孔隙率对多孔介质燃烧速率影响的计算结果, 结果显示, 随着平均孔径的减小, 燃烧速率增加, 这说明孔径的改变主要通过强化换热增强燃烧速率。

在 $d_m = 6 \sim 3\text{ mm}$ 范围内, 燃烧速率随着孔径减小快速增加, 当孔径进一步降低到 2 mm , 燃烧速率开始降低, 当孔径为 1 mm 时, 模型无法获得达到燃烧温度的火焰解。经过分析, 随着孔径降低, 多孔介质进入气固换热剧烈而导热微弱的状态, 极高的固相温度导致了极高的辐射散热损失, 从而无法经过迭代计算获得稳定反应的高温火焰面。随着孔隙率的减少, 热导率增加, 最终在 $d_m = 1, \varepsilon = 0.4$

时获得了稳定火焰解。该现象印证了 Hsu 等^[1] 采用的火焰贝克利数判别准则 $Pe = \frac{S_L d_m \lambda}{\rho c_p}$, 当 Pe 足够小, 孔径足够小时火焰无法在多孔介质内传播。

图 7 中给出了 $\beta = 1$ 的分割线, 结果表明, 高孔隙率的多孔结构基本都可以实现燃烧速率的提升, 而低孔隙率的结构需要足够强的换热才能平衡固相带来的流动阻碍效果, 提升燃烧速率。

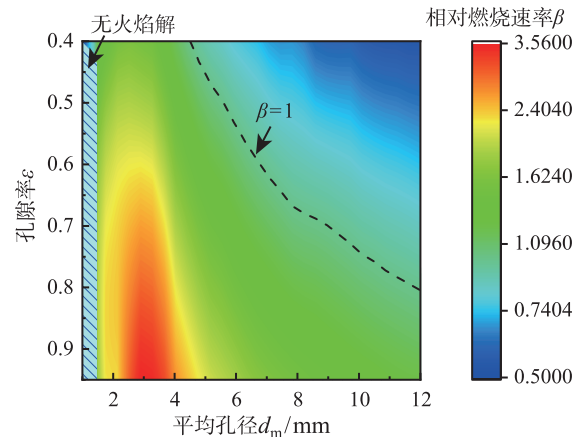


图 7 平均孔径和孔隙率对多孔介质燃烧速率的影响 ($\tau = 1, \lambda_{s,int}(300\text{ K}) = 30\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}, \alpha = 0.7$)

Fig. 7 Influence of mean pore diameter and porosity on porous media flame speed

3.3 弯曲度对燃烧速率的影响

弯曲度对预热过程也存在两方面影响, 一方面影响气固对流换热, 弯曲度低的如蜂窝陶瓷结构通常具有较差的对流换热特性, 弯曲度高的泡沫陶瓷具有较强的对流换热, 同时弯曲度也影响对流换热随着孔隙率的变化趋势, 总体上, 弯曲度越高, 对流换热越强。另一方面弯曲度也影响固相导热过程, 弯曲度越高, 热量在固体骨架中的传导越曲折, 有效热导率越低, 导热越弱。

图 8 展示了弯曲度和孔隙率对多孔介质燃烧速率影响的计算结果, 结果显示, 在 $\tau = 1 \sim 1.2$ 范围内, 燃烧速率随弯曲度提高, 在 $\tau = 1.2 \sim 1.6$ 范围内, 燃烧速率随着弯曲度提高而减小, 直到达到无解区域。这种非单调现象与平均孔径的影响类似, 但弯曲度增加对导热的阻碍作用更显著, 因此低燃烧速率和无解区域相对更大。

图 8 中结合燃烧速率求解结果, 标注了四种典型多孔介质形态对应的孔隙率和弯曲度范围。计算结果表明, 在四种多孔介质形态中, 泡沫结构具有最强的燃烧速率提升效果, 这解释了多孔介质燃烧实验研究中泡沫陶瓷和泡沫金属采用频率增加的现象。蜂窝结构具有较低的弯曲度, 颗粒堆积结构具

有较低的孔隙率范围, 这些参数范围特性限制了他们对燃烧速率的提升效果, 也限制了在多孔介质燃烧研究中的应用。纤维丝网结构具有较自由的弯曲度范围, 也可以实现极高的孔隙率, 具有较高的应用潜力, 不仅可以实现较高的燃烧速率, 在高弯曲度条件下也可以起到防止回火的作用。

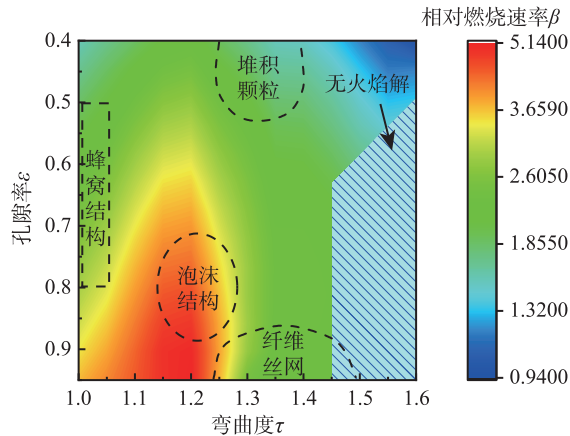


图 8 弯曲度和孔隙率对多孔介质燃烧速率的影响 ($d_m = 3 \text{ mm}$, $\lambda_{s,int}(300 \text{ K}) = 30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $\alpha = 0.7$)

Fig. 8 Influence of tortuosity and porosity on porous media flame speed ($d_m = 3 \text{ mm}$, $\lambda_{s,int}(300 \text{ K}) = 30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $\alpha = 0.7$)

3.4 孔隙率对燃烧速率的影响

孔隙率主要通过控制固相导热影响预热过程, 更小的孔隙率会导致更高的预热程度, 但同时孔隙率也通过影响多孔介质通流能力限制燃烧速率的增加。图 9 展示了孔隙率对燃烧速率影响的计算结果, 对可能存在的更高的孔隙率进行的模拟计算。计算结果表明, 燃烧速率会在 $\epsilon > 0.95$ 的范围内达到最高值, 此前固相增加带来的导热增加效应占主导, 此后燃烧速率单调下降, 固相增加带来的通流下降占主导。

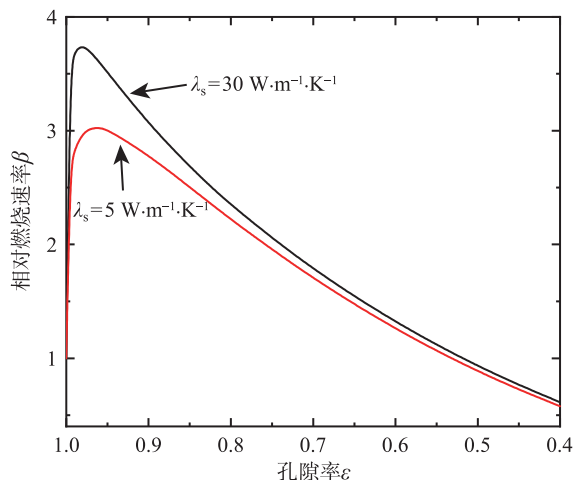


图 9 孔隙率对燃烧速率的影响 ($d_m = 3 \text{ mm}$, $\tau = 1$, $\alpha = 0.7$)
Fig. 9 Influence of porosity on porous media flame speed ($d_m = 3 \text{ mm}$, $\tau = 1$, $\alpha = 0.7$)

采用具有更高热导率的材料能够提高燃烧速率, 但这种增强具有一定适用范围。将热导率从 $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 增加到 $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 燃烧速率的提升效果只有在 $\epsilon > 0.85$ 的范围内显著。这说明, 只有对于 $\epsilon > 0.85$ 的多孔介质, 比如泡沫陶瓷, 通过采用具有更高固相热导的材料提高燃烧速率是有效的, 而对于孔隙率较低的多孔介质, 只改变材料热导率对燃烧速率几乎没有影响。

3.5 材料物性对燃烧速率的影响

对多孔介质燃烧特性具有显著影响的材料物性参数包括材料导热系数和发射率。发射率影响辐射散热过程的同时, 也影响固相辐射等效导热过程, 更高的材料发射率意味着更强的壁面辐射热交换, 更高的消光系数和更低的等效热导。图 10 展示了两种材料物性对燃烧速率影响的计算结果, 结果表明, 材料物性参数对燃烧速率的影响相对结构参数较小, 材料物性在常规多孔介质选材范围内的改变只能带来 $\pm 5\%$ 程度的相对燃烧速率改变, 更高的材料热导率和更低的材料发射率有助于实现燃烧速率的增加。

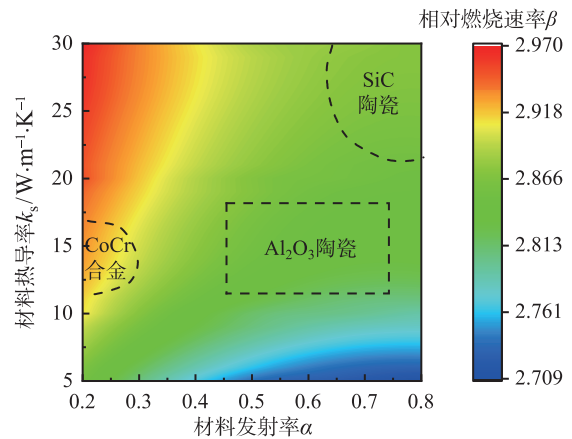


图 10 材料热导率和发射率对燃烧速率的影响 ($d_m = 3 \text{ mm}$, $\tau = 1$, $\epsilon = 0.8$)

Fig. 10 Influence of material thermal conductivity and emissivity on porous media flame speed ($d_m = 3 \text{ mm}$, $\tau = 1$, $\epsilon = 0.8$)

图 10 中比较了三种多孔介质选材对燃烧速率的影响效果, 碳化硅和氧化铝陶瓷材料基本具有相同的燃烧速率特性, 钴铬合金因为较低的材料发射率而具有相对高的燃烧速率。但是 Samoilenko 等^[9]在文章中报道了钴铬合金泡沫结构在燃烧后的表面氧化现象, 考虑到这种氧化很可能极大提高材料的发射率, 因此高温金属材料在多孔介质燃烧中的应用可能无法在性能上超过现有的陶瓷材料。

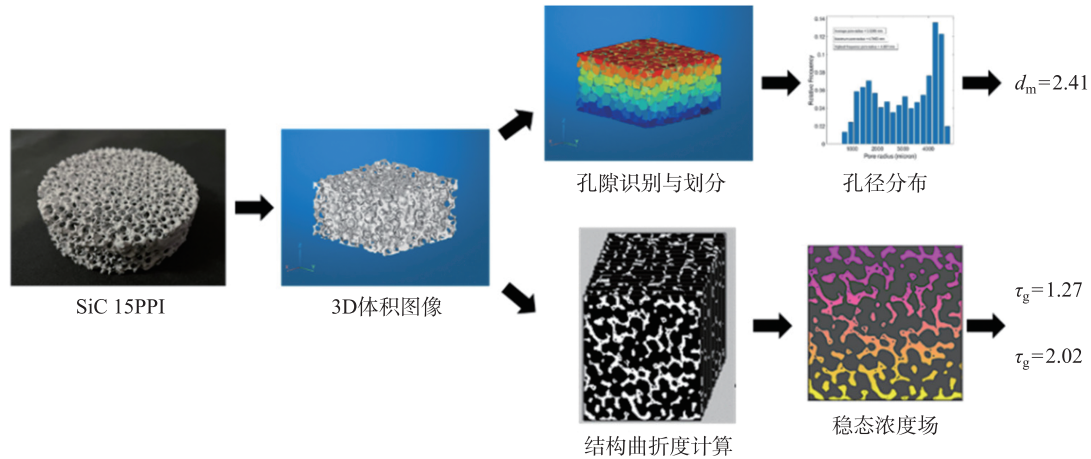


图 11 SiC 泡沫陶瓷结构分析工作流程

Fig. 11 SiC foam ceramic structure analysis workflow

3.6 预测燃烧速率的实验验证

为了印证模型的预测结果, 采用实验进行了初步的实验验证工作, 采用两种材料, 三种孔密度的泡沫陶瓷进行实验。为了提高模型计算的准确性, 需要获得实验用多孔介质的具体结构特性。采用计算机断层扫描技术 (CT) 对多孔介质进行了三维结构重建, 并获取孔径与弯曲度信息, 工作流程如图 11 所示。

根据扫描获取的 3D 体积图像, 基于 Rabbani 等^[23] 采用的代码对多孔介质孔隙进行了识别, 获得孔径分布并计算出多孔介质的平均孔径 d_m 。采用 Cooper 等^[24] 提出的快速模拟计算方法对结构弯曲度进行计算, 得到多孔介质区域的稳态浓度场, 最后得到气固两相的弯曲度 τ 。

基于分析计算得到的孔结构参数进行了模拟计算, 并采用对应的多孔介质开展了燃烧速率实验。结果见表 2, 目前的孔结构分析结果显示, 块状泡

沫陶瓷的孔隙率存在分布不均的现象, 实际平均孔径也与基于孔密度经验公式得到的孔径偏差较大, 从弯曲度角度分析, 泡沫陶瓷可能存在一定程度的各向异性。最后将基于分析的真实孔结构参数输入模型, 比较实验与模拟计算结果, 模型实现了对燃烧速率随结构和材料参数变化趋势的预测, 但对孔径参数的影响预测中仍然存在一定的相对偏差。下一步实验将增加使用的多孔介质, 拓宽实验范围, 并确定多孔介质的材料参数, 用实验进行模型验证。

4 结 论

本文建立了适用于多种孔隙形态、结构与材料的多孔介质燃烧预测模型。采用体积平均模型描述多孔介质中的导热、气固换热和辐射过程, 模拟多孔介质中的一维层流燃烧状态, 对不同孔隙结构与材料条件下的燃烧速率进行了计算, 并采用实验结果对数值模型进行了验证。研究表明:

1) 多孔介质孔径和弯曲度对预热过程具有相似的影响效果, 孔径减小或弯曲度提高一方面增强了气固换热, 另一方面减弱了固相导热。在较低的气固换热条件下, 这种增强可以提高预热, 显著提升燃烧速率; 而在较高的气固换热条件下, 这种增强会强化辐射散热, 使得火焰无法稳定传播。

2) 多孔介质孔隙率的减小在一般情况下 $\varepsilon < 0.95$ 通过减弱通流能力导致燃烧速率的减小, 只有在高孔隙率下 $\varepsilon > 0.85$, 更强的导热可以有效增加燃烧速率。

3) 在常规物性参数范围内, 多孔介质材料的热导率和发射率对燃烧速率影响不大。

表 2 多孔介质结构参数与模拟和实验结果
Table 2 Structural parameters of porous media with simulation and experimental results

	SiC 15PPI	SiC 7PPI	Al ₂ O ₃ 10PPI
孔隙率 ε	0.807	0.813	0.827
平均孔径	2.401	3.919	3.134
d_m/mm			
比表面积	1249	913	1069
a_v/m^{-1}			
固相弯曲度 τ_s	2.02/2.48/2.09	2.16/2.25/2.16	2.35/3.52/3.17
气相弯曲度 τ_g	1.22/1.35/1.58	1.29/1.45/1.5	1.19/1.09/1.23
实验燃烧速率			
$S_{L,\text{exp}}^P/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	23.81	25.52	21.51
模拟燃烧速率			
$S_{L,\text{sim}}^P/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	22.45	20.89	18.71
相对偏差/%	-5.71	-18.14	-13.02

参 考 文 献

- [1] 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(1-4): 149-172
- [2] 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
- [3] Ellzey J L, Belmont E L, Smith C H. Heat Recirculating Reactors: Fundamental Research and Applications [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 72: 32-58
- [4] Kiefer J, Weigl M C, Seeger T, et al. Non-intrusive Gas-phase Temperature Measurements Inside a Porous Burner Using Dual-pump CARS [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 3123-3129
- [5] Dunnmon J, Sobhani S, Wu M, et al. An Investigation of Internal Flame Structure in Porous Media Combustion via X-ray Computed Tomography [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 4399-4408
- [6] Gauthier G P, Bergthorson J M. Effect of External Heat Loss on the Propagation and Quenching of Flames in Small Heat-recirculating Tubes [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 173: 27-38
- [7] 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
- [8] Dobrego K V, Gnesdilov N N, Lee S H, et al. Lean Combustibility Limit of Methane in Reciprocal Flow Filtration Combustion Reactor [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(9): 2190-2198
- [9] 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
- [10] Peng Qingguo, Ye Jiahao, Tu Yaojie, et al. Experimental and Numerical Investigation on Premixed $H_2/C_3H_8/Air$ Combustion and Thermal Performance in a Burner with Partially Filled Porous Media [J]. *Fuel*, 2022, 328: 125227
- [11] Masset P A, Dounia O, Selle L. Combustion Regimes in Inert Porous Media: From Decoupled to Hyperdiffusive Flames [J]. *Combustion and Flame*, 2022, 241: 112052
- [12] 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 Junchun. Research on Low Calorific Value Gas Treatment and Combustion Instability by Porous Media Combustion [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014
- [13] 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 Hai. Experimental and Numerical Study of Premixed Gas Combustion in Porous Media [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008
- [14] Fu J, Thomas H R, Li C. Tortuosity of Porous Media: Image Analysis and Physical Simulation [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 212: 103439
- [15] Li Qing, Bai Fengwu, Yang Bei, et al. Dynamic Simulations of a Honeycomb Ceramic Thermal Energy Storage in a Solar Thermal Power Plant Using Air As the Heat Transfer Fluid [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129: 636-645
- [16] Wu Z, Caliot C, Flamant G, et al. Numerical Simulation of Convective Heat Transfer Between Air Flow and Ceramic Foams to Optimise Volumetric Solar Air Receiver Performances [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(7): 1527-1537
- [17] Singhal A, Cloete S, Radl S, et al. Heat Transfer to a Gas from Densely Packed Beds of Monodisperse Spherical Particles [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 314: 27-37
- [18] Zare M, Hashemabadi S H. CFD Simulation and Experimental Validation of Tortuosity Effects on Pellet-fluid Heat Transfer of Regularly Stacked Multi-lobe Particles [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 361: 1543-1556
- [19] Inayat A, Klumpp M, Lämmermann M, et al. Development of a New Pressure Drop Correlation for Open-cell Foams Based Completely on Theoretical Grounds: Taking Into Account Strut Shape and Geometric Tortuosity [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 287: 704-719
- [20] Lanfrey P-Y, Kuzeljevic Z V, Dudukovic M P. Tortuosity Model for Fixed Beds Randomly Packed with Identical Particles [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(5): 1891-1896
- [21] 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
- [22] Online Material Information Resource - MatWeb [EB/OL]. [2023-08-16]. <http://www.matweb.com/>
- [23] 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
- [24] 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