

球形颗粒随机堆积床内甲烷/氢气/空气预混燃烧的数值模拟

刘逸隆, 陆建民, 王浩宇, 杨荟楠, 陈 军

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 甲烷/氢气混合燃烧能有效降低碳排放和提高燃烧效率, 且随机堆积床可进一步促使其温度分布均匀。为此, 基于离散元软件 EDEM 与三维建模软件 SOLIDWORKS 建立随机堆积床模型, 并模拟甲烷/氢气/空气在其中预混燃烧过程, 以及分析不同时刻下随机堆积床内部火焰结构、组分分布与涡量变化等。结果表明: 小球优良的蓄热能力将未燃区温度提升 400 K 以上, 使甲烷/氢气混合燃烧具有较高的稳定性; 提高掺氢气比后, 未燃区温度保持在 600 K 以上, 并进一步提高燃烧的稳定性; 同时小球对混合气的分割扰动作用使火焰表面褶皱且平均涡量增加, 从而使火焰结构和温度分布更加均匀。

关键词: 甲烷/氢气混合燃烧; 随机堆积床; 火焰结构; 组分分布; 涡量变化

中图分类号: TQ 038.1 **文献标志码:** A

Simulation of methane/hydrogen/air premixed combustion in randomly stacked sphere bed

LIU Yilong, LU Jianmin, WANG Haoyu, YANG Huinan, CHEN Jun

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Methane/hydrogen mixed combustion can effectively reduce carbon emissions and improve combustion efficiency, and a randomly packed bed can further promote its uniform temperature distribution. Therefore, a randomly packed bed model was established based on the discrete element software EDEM and the three-dimensional modelling software SOLIDWORKS, and the premixed combustion process of methane/hydrogen/air was simulated, and the flame structure, component distribution and vorticity evolution in the randomly packed bed were analyzed at different moments. The

收稿日期: 2025-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52376161); 上海市曙光计划资助项目(23SG42)

第一作者: 刘逸隆(2000—), 男, 硕士研究生。研究方向: 多孔介质燃烧模拟。E-mail: Liuyilong0527@163.com

通信作者: 陈 军(1980—), 男, 副教授。研究方向: 多相流测量技术。E-mail: j.chen@usst.edu.cn

引文格式: 刘逸隆, 陆建民, 王浩宇, 等. 球形颗粒随机堆积床内甲烷/氢气/空气预混燃烧的数值模拟[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(3): 316-325.

Citation: LIU Yilong, LU Jianmin, WANG Haoyu, et al. Simulation of methane/hydrogen/air premixed combustion in randomly stacked sphere bed[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(3): 316-325.

results show that the excellent heat storage capacity of the spheres raises the temperature of the unburned zone by more than 400 K, which makes the methane/hydrogen mixed combustion more stable. After increasing the hydrogen content ratio, the temperature of the unburned zone stays above 600 K, which further improves the stability of the combustion. Meanwhile, the splitting and perturbation effect of the spheres on the mixed gas makes the flame surface wrinkled and the average vorticity increase, which results in a more homogeneous flame structure and temperature distribution.

Keywords: methane/hydrogen mixed combustion; randomly packed bed; flame structure; distribution of components; vorticity variation

近年来, 随着世界各国经济的快速增长, 人们对传统化石能源需求也将大幅增加。但传统化石燃料的大量使用, 会导致其面临枯竭, 以及二氧化碳排放量大幅增加^[1]。甲烷作为一种传统化石燃料以其广泛分布、低成本和低污染物排放特性成为工业生产和交通运输中的常用燃料^[2]。与甲烷相比, 氢气具有点火能量低、燃烧界限宽、燃烧速度快和燃烧产物为水等优点^[3]。并且氢气与甲烷混合燃烧后, 不仅能提高燃烧速率, 还能显著减少碳排放^[4]。

基于以上优点, 研究者们开始对甲烷与氢气预混燃烧展开了系列研究。研究表明, 由于氢气具有较高的燃烧速度, 甲烷/氢气混合燃烧可以提高燃烧器的热效率, 同时还可以降低燃烧产生的污染物(如 HC、CO、CO₂、NO_x、烟尘)排放^[5]。Du 等^[6]利用三维旋流燃烧器模型, 研究掺氢气体积比为 10% 时甲烷/氢气混合燃烧的特性, 发现掺氢气能够提高燃烧稳定性, 且 NO 的排放量减少了约 36.11%。Pan 等^[7]利用 100 kW 锥形燃烧器模型, 对掺氢气体积比为 0%、10%、20%、30% 的燃料进行燃烧研究, 发现随掺氢气体积比的提高, 燃气轮机出口处的气体温度分布更加均匀, 且 CO 和 NO_x 排放量均会降低约 50%。Cheng 等^[8]通过实验和模拟研究了甲烷/氢气在工业锅炉中的燃烧特性, 结果表明, 体积比为 0~30% 的掺氢气可以提高火焰传播速率燃烧反应速率。并且在相同过量空气系数下, 掺氢气炉膛内燃烧温度提高了 18 K, 同时 CO 的排放量降低 25%。对于纯氢气燃料, 大量研究发现氢气燃料相比其他气体燃料能使发动机具有更宽范的工作范围和更高的动力输出^[9]。王磊等^[10]在点燃式发动机中研究了纯氢燃料的燃烧特性, 发现相比传统燃料, 在点燃式发动机中纯氢气具有更快的燃烧速率和更高的

放热率, 并且发动机产生的 NO_x 排放几乎为 0。Di 等^[11]在转子发动机中研究了氢气作为燃料的燃烧性能, 发现转子发动机在低能耗的工况下, 整体行驶里程提高了 20%, 且没有碳排放。

球形颗粒随机堆积床作为多孔介质众多形态中的一种, 相较于其他多孔介质, 其高度可调节和孔隙率可变^[12]。由于具有特殊的孔隙结构, 球形颗粒随机堆积床具有燃烧效率高、传热性能好、燃烧稳定性高、温度分布均匀、燃烧极限宽等优点^[13]。气体、液体和气液混合燃料在随机堆积床中, 无论贫燃还是富燃^[14], 都能高效燃烧和低污染物排放^[15]。Tongbai 等^[16]在大小基本相同的鹅卵石随机堆积床中进行了无雾化柴油燃烧实验, 发现在该随机堆积床中柴油能稳定燃烧, 且 CO 和 NO_x 的排放都较低。尹智成等^[17]在由 3 种不同直径小球组成的随机堆积床中进行了甲烷燃烧实验, 发现大直径小球可以获得更高的火焰温度。Sandu 等^[18]开发了 1 个动态多尺度模型, 用来模拟颗粒随机堆积床中合成气的燃烧过程, 结果表明, 在相同堆积高度下, 较小的粒径会导致较高的堆积密度和较大的颗粒表面积, 从而促进燃烧反应。Jiang 等^[19]利用壁面自适应局部涡黏 (wall-adapting local eddy-viscosity, WALE) 模型和涡破碎-阿伦尼乌斯 (eddy-break-up-Arrhenius, EBU-Arrhenius) 燃烧模型, 对随机堆积床中丙烷/空气预混燃烧过程进行研究, 发现小球堆积结构是影响火焰传播速率的主要因素。Toffolo 等^[20]利用非线性模型对甲烷在大型堆积床中化学循环燃烧 (chemical looping combustion, CLC) 过程进行预测和控制, 使甲烷充分反应。

甲烷/氢气混合燃烧具有低碳排放与高燃烧速率的优点, 同时球形颗粒随机堆积床可使燃烧稳定且温度分布均匀。目前, 随机堆积床内燃烧可

应用于众多领域，包括涡轮机、内燃机、热交换器、石油和天然气提取设备等的经典领域和食品热处理、热电发电机等的现代领域^[21-22]。然而，甲烷/氢气在随机堆积床内混合燃烧实验及模拟研究匮乏。本文采用离散元软件 EDEM 实现球体的重力堆积过程，得到与真实结构相似的随机堆积床几何模型。并使用 WALE 模型和有限速率燃烧模型 (finite-rate/No TCI)，模拟了不同掺氢气体积比 (0%、20%、40%、60%、80% 和 100%) 时，甲烷/氢气/空气在随机堆积床内预混燃烧过程，并对不同时刻下随机堆积床内混合气燃烧的火焰结构、温度分布、组分分布及火焰面平均焓量变化进行了研究。本文工作对于内燃机、热交换器、食品热处理等方面的应用具有工程指导价值。

1 物理模型与计算方法

1.1 几何模型与物理模型

本文通过离散元软件 EDEM 2018 实现球体重力堆积过程，并得到随机堆积床的三维几何模型，再提取所得模型中小球球心坐标并导入 SOLIDWORKS 2022 中建立三维物理模型。首先，建立底面半径为 30 mm、高度为 260 mm 的圆柱体，小球在重力作用下自由下落 (图 1(a))，下落过程中伴随着小球间的碰撞 (图 1(b)) 与接触 (图 1(c))。小球密度、表面粗糙度、硬度等采用真实 Al_2O_3 的物理属性，并与 Dai 等^[23] 的实验保持一致。本文研究采用的颗粒为规则球形，因此，选用较为简单且精度较高的 Hertz-Mindlin 接触模型^[24] 来处理接触面的受力问题，主要包括法向力、切向力和滚动摩擦力的求解。通过随机统计方程计算碰撞后的颗粒轨迹和位置。最后，在下落和碰撞完成后，选择颗粒的最低势能位置作为小球的最终位置。通过以上步骤得到随机堆积床的几何结构，如图 1(d) 所示。

图 2 为三维随机堆积床物理模型示意图 (其管内径为 60 mm)。净流区为冷态流场区域，可使计算易于收敛，入口净流区长度为 120 mm，出口净流区长度为 180 mm，堆积区域长度为 240 mm，小球直径为 8 mm。基于物理模型中堆积区域总体积与球体颗粒总体积计算得到堆积区域内孔隙率为 0.41。

1.2 计算方法

本文采用 WALE 模型和有限速率燃烧模型模

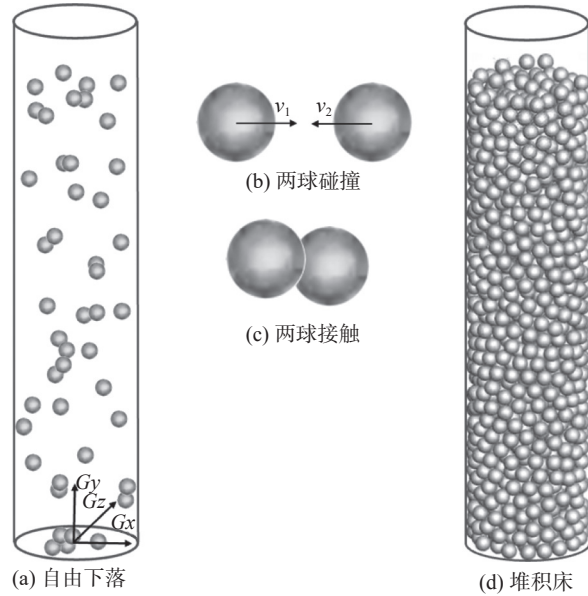


图 1 三维几何模型

Fig.1 Three-dimensional geometric model

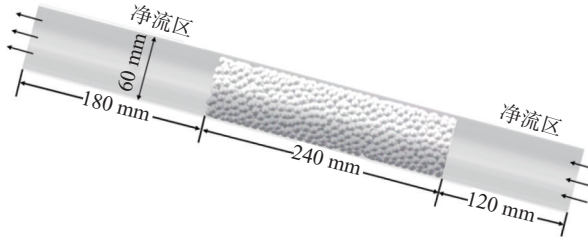


图 2 随机堆积床物理模型

Fig.2 Physical model of the randomly packed bed

拟混合气在随机堆积床中的燃烧过程。流体受到小球的干扰会产生复杂的湍流流动，且随机堆积床中涉及大量的小球壁面使得近壁流体的计算尤为重要。WALE 模型基于速度梯度张量建立，在靠近壁面时可以得到相对准确的涡黏性系数^[25]，因此，本文采用 WALE 模型。又由于湍流的时间尺度通常较短，化学反应的时间尺度则较长，而有限速率燃烧模型只计算阿伦尼乌斯速率而忽略湍流与化学反应之间的相互作用^[26]，适用于本研究中混合气的复杂流动，因此，采用有限速率燃烧模型。本文忽略重力对混合气的影响，并建立随机堆积床内甲烷/空气预混燃烧的控制方程组。

理想气体状态方程：

$$PV_f = \overline{M}RT_f \tag{1}$$

质量守恒方程：

$$\frac{\partial (\rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}_f) = 0 \tag{2}$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \mathbf{v}_f) + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{V}_f \mathbf{v}_f) = -\nabla P + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}) \quad (3)$$

式中: P 为静压; V_f 为混合气体体积; $\bar{M}$ 为混合气体物质的量; R 为通用气体常数; T_f 为混合气体温度; t 为时间; v_f 为混合气体速度; ρ_f 为混合气体密度; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量。

气体能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(T_f \rho_f c_f) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(T_f \rho_f c_f \bar{v}_f \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T_f}{\partial x_i} \right) + S_f \quad (4)$$

$$S_f = h_v(T_s - T_f) + \omega_T \quad (5)$$

式中: c_f 为气相定压比热值; x_i 、 x_j 为直角坐标系参数; S_f 为气体能量源项; h_v 为随机堆积床内气固相间的体积传热系数。

固体能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(T_s \rho_s c_s) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{\text{eff}} + \frac{\partial^2 T_s}{x_i^2} \right) + S_s \quad (6)$$

$$S_s = h_v(T_f - T_s) - \beta(T_s - T_0) \quad (7)$$

式中: c_s 为固相比热值; T_s 为固体温度; ρ_s 为固体密度; λ_{eff} 为有效导热系数, 包括随机堆积床导热系数和氧化铝颗粒的辐射折合导热系数; S_s 为固体源项; $\beta(T_s - T_0)$ 为壁面热损失; h_v 为气固体积传热系数。

a. WALE 模型

在大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 框架下, 对动量守恒方程进行空间密度加权滤波, 所得方程式中的亚格子应力张量表达式为^[27]

$$\tau_{ij} = 2\mu_T \bar{S}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk, \text{SGS}} \quad (8)$$

式中: δ_{ij} 为克罗尼克尔算子, 角标相同时取 1, 不同时取 0; $\tau_{kk, \text{SGS}}$ 为应力张量的迹 (即 $\tau_{11} + \tau_{22} + \tau_{33}$); S_{ij} 为滤波后应变率张量; μ_T 为涡黏性系数, 用以描述湍流漩涡引起的动量耗散^[28]。 S_{ij} 和 μ_T ^[29] 分别定义为

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

$$\mu_T = \rho L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{\frac{3}{2}}}{(S_{ij} S_{ij})^{\frac{5}{2}} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{\frac{5}{4}}} \quad (10)$$

式中: $\bar{u}_i$ 、 $\bar{u}_j$ 为流体速度在 i 和 j 方向上的分量; x_i 、 x_j 为空间坐标在 i 和 j 方向上的分量; 亚格子混合长度 L_s 和速度梯度张量平方的无迹对称部分 S_{ij}^d 定义为

$$L_s = \min(\kappa d, C_w V^{\frac{1}{3}}), S_{ij}^d = \frac{1}{2}(\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ji}^2) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^2,$$

$$\bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$$

式中: κ 为冯卡门常数; d 为网格与壁面的最近距离; V 为网格体积; C_w 为 WALE 常数, 为 0.325; δ_{ij} 为克罗内克尔符号; $\bar{g}_{ij}$ 为速度梯度张量; $\bar{g}_{kk}$ 为不同方向的速度梯度张量; $\bar{u}_i$ 为 i 方向上速度分量; x_j 为 j 方向上长度分量。

b. 有限速率燃烧模型

气体组分质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i \quad (11)$$

$$R_i = \frac{\rho(\xi^*)^2}{\tau^* [1 - (\xi^*)^3]} (Y_i^* - Y_i) \quad (12)$$

式中: ρ 为气体密度; $\mathbf{v}$ 为气体速度; Y_i 为第 i 种物质的质量分数; R_i 为第 i 种物质的化学反应净生成速率; S_i 为自定义源项引起的其他生成速率; ξ^* 为小湍流结构中混合气的体积分数; $\mathbf{J}_i$ 是由浓度梯度导致的第 i 种物质的扩散通量。层流中的扩散通量为

$$\mathbf{J}_i = -\rho D_i \nabla Y_i \quad (13)$$

湍流中的扩散通量为

$$\mathbf{J}_i = -\left(\rho D_i + \frac{\mu}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \quad (14)$$

式中: μ 为湍流黏度; D_i 为组分 i 的扩散系数; Sc_t 为湍流施密特数。

2 网格划分与模型验证

2.1 网格划分及网格无关性检验

模型中存在许多球与球、球与壁之间的切点, 在这些切点附近区域角度极小, 网格单元倾斜度较高^[30], 若直接划分网格, 将无法用于计算求解。考虑到本文小球间切点对流场的影响相对较小, 并且考虑到计算条件限制, 故采取间隙模型^[31]来处理小球间的切点, 即将小球半径缩小了 0.15 mm。由于随机堆积床结构十分复杂, 故采用非结构化网格对该模型的计算域进行网格划分, 结果如图 3 所示, 图 3(a) 和 (b) 为小球表面网格, 图 3(c) 和 (d) 为随机堆积床模型的切面网格。

本文进行了多组不同网格划分, 划分得到的网格数分别约为 80、100、120、140、180、200、

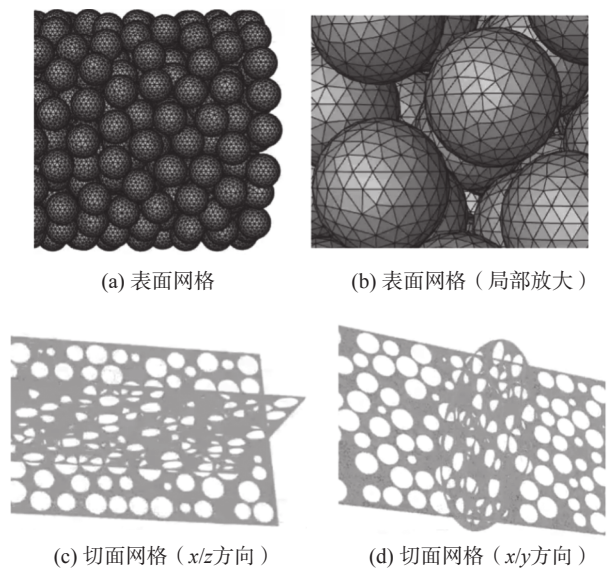


图3 随机堆积床非结构化网格

Fig.3 Unstructured grid for the randomly packed bed

240、26万。结果表明，当网格数高于180万时，在相同工况下，火焰结构和温度分布基本相同；而网格数低于180万时，由于网格质量较差，从而导致计算得到的火焰结构与温度分布相比于网格数高于或等于180万时的有较大偏差。本文考

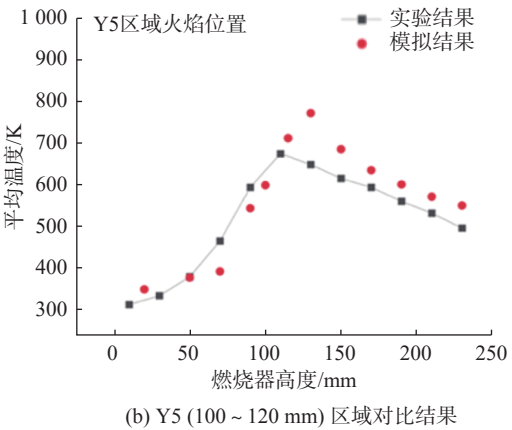
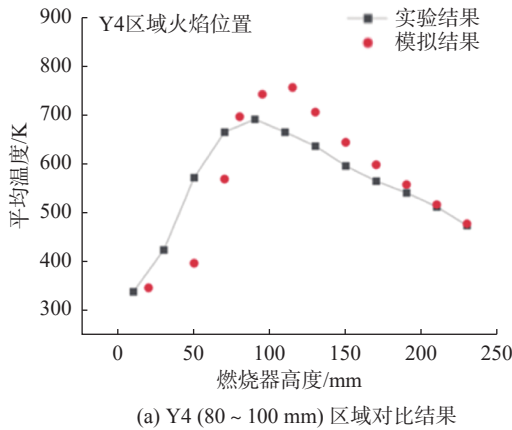


图4 本文模拟结果与 Dai 等^[23] 实验结果对比

Fig.4 Comparison between the simulation results of this article and the experimental results of Dai et al^[23]

需要指出的是，起初沿 z 轴方向对12个区域中每个区域等间距做5个截面，再取这些截面的温度平均值来表示每个区域的体积平均温度。但对模拟数据的处理分析发现，此方法与直接取每个区域中间截面的温度平均值基本相同。考虑到计算时间成本问题，取各区域中间截面的平均温度来与实验中的体积平均温度做比较。

综上所述，本文模拟结果与 Dai 等^[23] 的实验结果吻合较好，本文计算方法和物理模型可有效模拟出随机堆积床中预混燃烧过程以及温度分布趋势。

虑到计算条件以及计算时间成本因素，在确保计算精度的条件下，最终选取的总网格数为1803828，最小正交质量为0.132，平均单元质量为0.821。

2.2 模型验证

为了验证模型的有效性，本文将模拟得到的温度分布与 Dai 等^[23] 的实验结果进行对比，如图4所示。在 Dai 等^[23] 的实验中，甲烷/空气的当量比为0.45，入口速度为0.3 m/s，将 z 轴方向80~100 mm位置区域记为Y4区域，100~120 mm位置区域记为Y5区域。由于实验中数据为随机堆积床不同区域的体积平均温度，故本文将模型沿 z 轴方向每20 mm做一个截面，将堆积部分划分成高度相等的12个区域，接着取各区域中间截面的平均温度代表各区域的体积平均温度，共计12个截面的平均温度。模拟温度变化趋势与实验结果吻合较好，最大误差不超过8.75%。仅在温度最高位置出现了较大的偏差，这是由于模拟中假定管壁是绝热的，而实验中的管壁对周围环境是有一定的散热，与理想绝热壁面是有差异的。随着燃烧过程的进行，壁面热量损失不断增加，这会造成模拟与实验结果的差异。

3 结果与讨论

3.1 掺氢气体积比20%时燃烧特性分析

采用入口压力为20 kPa，掺氢气体积比为0%、20%、40%、60%、80%和100%，并以掺氢气体积比20%为例进行分析。图5是掺氢气体积比为20%条件下随机堆积床内火焰结构图。对堆积区下端40 mm范围内的小球进行1200 K的预热，用于引燃预混气体。并将1300 K以上的温度区域定义为火焰区，且以小球预热完成时刻作为时间零点。

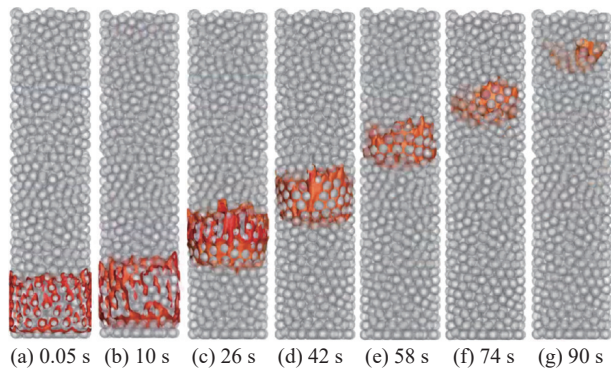


图5 不同时刻随机堆积床内火焰分布云图

Fig.5 Flame distribution cloud maps in the randomly packed bed at different times

图5(a)为在0.05 s时的火焰结构图,此时混合气刚被点燃,火焰较为均匀地分布于随机堆积床下端小球的孔隙中。图5(b)~(g)展示了在10~90 s时的火焰结构,随着时间的推移,火焰由随机堆积床下端传播至上端,火焰范围有所减小。这是因为受到低温来流的预混气体影响,同时随机堆积床上端低温小球吸收了燃烧所释放的部分热量所造成的。但整体燃烧过程中火焰能够稳定传播,未出现熄火,这得益于随机堆积床的特殊孔隙结构。在这样的结构中,固体小球中积累的热量通过对流和辐射传递到新鲜的混合气中,以此将其预热引燃并提高燃烧的稳定性的。

图6展示了不同时刻随机堆积床沿 z 轴方向温度分布,以堆积区域最下端作为 z 轴0点,将 z 轴方向的高度定义为燃烧器高度。可以看出新鲜的混合气在达到燃烧区之前,吸收了小球中积蓄的热量导致温度上升,这体现了随机堆积床中小球优良的蓄热能力。

为了研究随机堆积床的特殊孔隙结构对燃烧过程的影响,在孔隙尺度上分析了 CH_4 、 H_2 的质量分数和温度分布的变化。图7展示了在不同时刻(60、62、64、66、68、70、72 s),以堆积区底面中心为原点所做的 $x=0$ 处截面温度分布。由图7(a1)~(a4)可知,在向上扩散的过程中,球壁附近区域 CH_4 传播速率减缓(红框中)。这是由于 CH_4 受到球的阻挡和球壁附近黏性力作用导致球周围产生了涡流。在图7(a5)~(a7)中, CH_4 气体与小球和壁面的碰撞导致其扩散速率加快。表现为部分 CH_4 先从两球之间穿过(红框处),从而在两球之间产生了涡流。由图6(b1)~(b7)可知, H_2 在扩散过程中也同样受到小球的扰动(红框处),但图6(b1)~(b7)中所展示的区域比图7(a1)~(a7)中

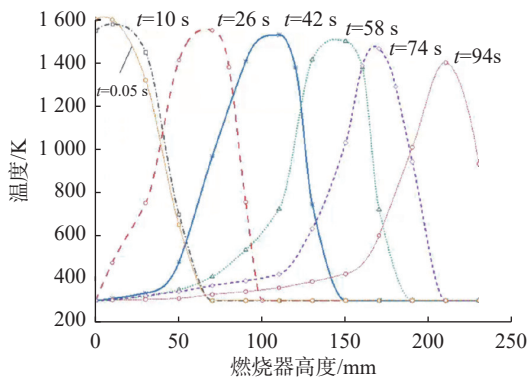


图6 掺氢气体积比20%时随机堆积床内温度分布

Fig.6 Temperature distribution in the randomly packed bed at 20% hydrogen mixing ratio

的更靠近堆积区下端,这是由于 H_2 比 CH_4 拥有更快的燃烧速率, H_2 在随机堆积床中先于 CH_4 完全燃烧。这部分燃烧热积蓄在小球中,为新鲜的混合气进行预热。由图7(c1)~(c7)可知,火焰下方沿 z 轴方向10 mm范围内的小球区域已经具有一定的温度,表明 H_2 在燃烧过程中起到了助燃的作用。并且还可以看出,由于受到小球的扰动,温度分布出现了局部突起(红框处)。

为进一步分析随机堆积床内小球对火焰的扰动作用,沿 z 轴方向100~120 mm区域中的火焰面,选取在42 s时进行分析,将1300 K温度等值面定义为火焰表面,并对涡量变化进行了分析。图8(a)展示了在42 s时随机堆积床中整体火焰结构。如图8(b)所示,火焰为一个复杂的皱褶表面,并紧贴在小球颗粒的壁面上。受到小球的分割扰动,火焰表面被球体隔开,并呈现许多局部突起。火焰表面位置最高处与最低处的高度差约为12.5 mm,远小于无多孔介质的管内燃烧情况。这说明随机堆积床通过分割火焰使燃烧温度分布均匀。再结合图8(c)涡量分布云图可以看出,随机堆积床内复杂的小球堆积结构,使得流场中产生了许多旋转方向相反且大小不同的漩涡,提高了流场的湍流强度。而高湍流强度会加剧火焰表面的皱褶程度,使得火焰面进一步被分割,从而提高燃烧温度及火焰结构的均匀程度。

图9给出了火焰面涡量平均值随时间的变化情况。可以看出,随着时间的推移,涡量不断增大。这是由于混合气在随机堆积床内传播过程中不断受到小球的扰动,湍流强度不断增加而导致的。同时也可以看出,曲线的倾斜角时刻变化,这代表着不同时刻涡量的增幅不相同,这是由于

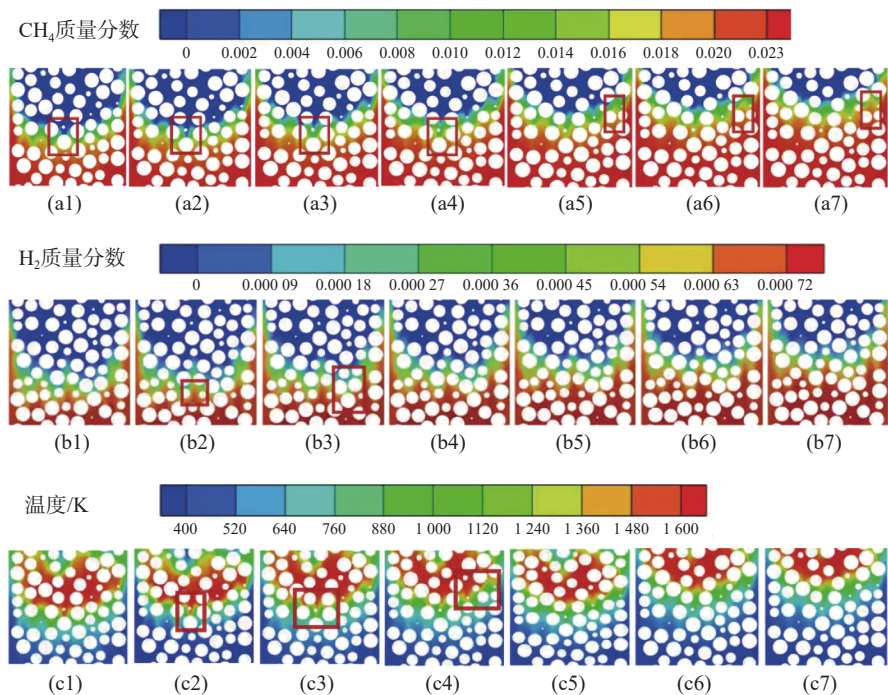


图 7 不同时刻的 CH_4 质量分数 ((a1)~(a7))、 H_2 质量分数 ((b1)~(b7)) 和温度分布 ((c1)~(c7)) 情况

Fig.7 CH_4 mass fraction ((a1)-(a7)), H_2 mass fraction ((b1)-(b7)) and temperature distribution ((c1)-(c7)) at different times

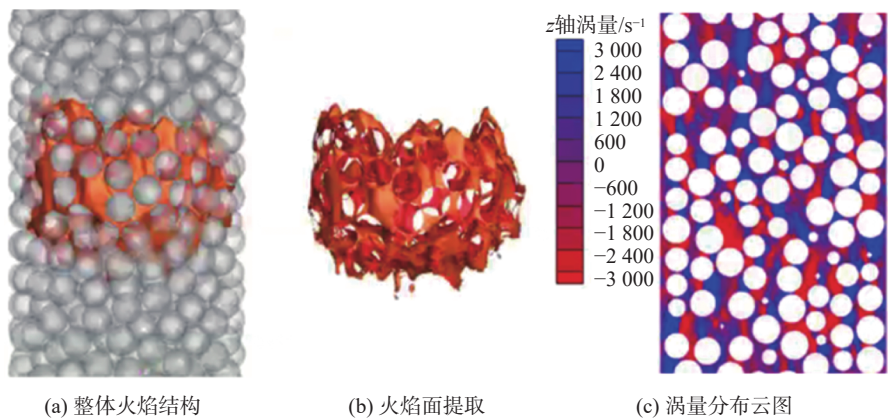


图 8 火焰结构与涡量分布

Fig.8 Flame structure and vorticity distribution

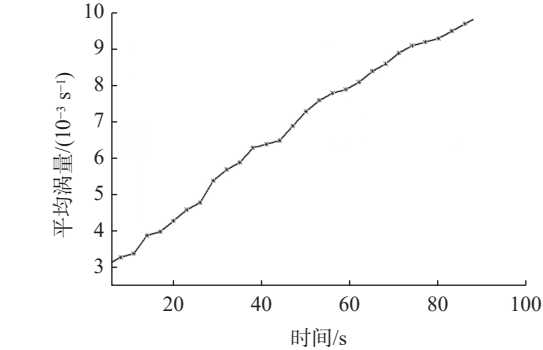


图 9 涡量随时间变化关系

Fig.9 Mean vorticity variations of the flame surface over time

随机堆积床内小球的随机堆积造成的，分布密集区域会由于空间过于狭小而抑制湍流的发展，这

导致部分时刻涡量增幅的减小。

3.2 不同掺氢气体积比对燃烧特性影响研究

本文对不同掺氢气体积比(0%、20%、40%、60%、80%、100%)下的燃烧特性进行了研究。图 10 展示了不同时刻(0.05、10、26、42、58、74、90 s)的结果，由图 10 可知，当掺氢气体积比低于 100% 时，火焰在随机堆积床中表现为稳定上升，火焰下方未燃区温度保持在 600 K 以上。这种现象是由于氢气只有 1 个 H—H 键，活化能为 436 kJ/mol，而甲烷有 4 个 C—H 键，活化能为 414 kJ/mol，氢气参与化学反应所需的活化能比甲烷所需的少，氢气的燃烧反应相对更容易发生。同时，氢气具有更强的扩散能力，故氢气在随机

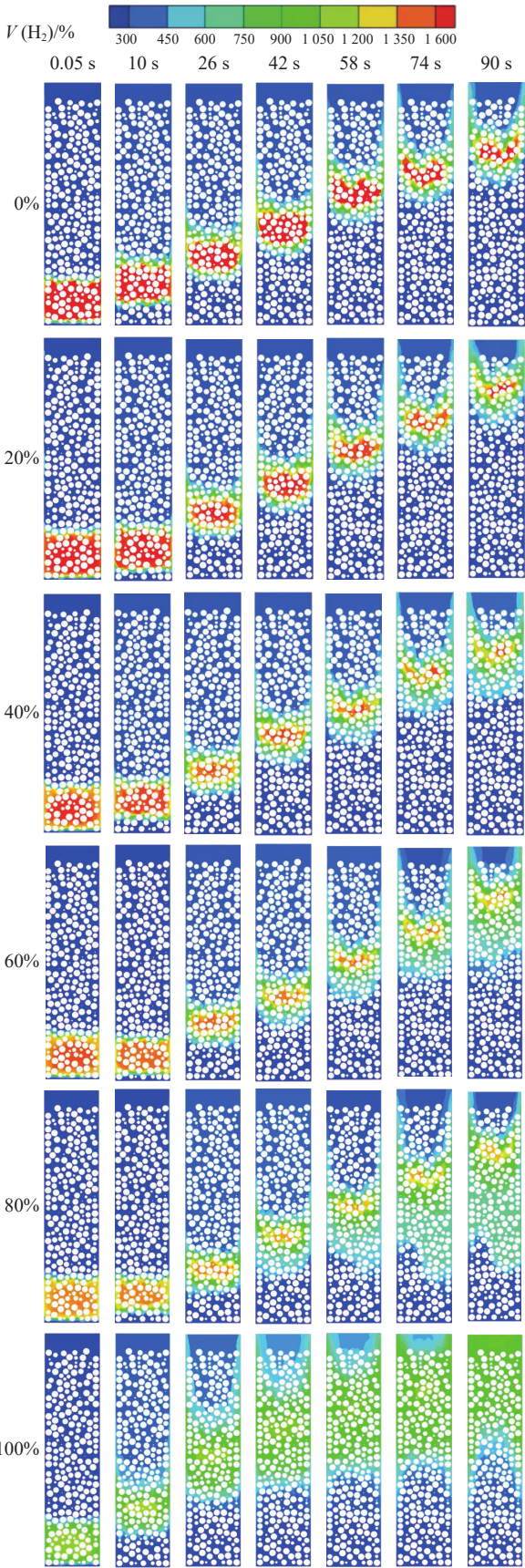


图 10 不同时刻不同掺氢气体积比时的火焰云图

Fig.10 Flame cloud maps at different moments with different hydrogen mixing ratios

堆积床中能与氧气先发生反应。因此, 相比于甲烷, 氢气发生反应的区域更靠近堆积区下端。火焰下方未燃区小球吸收了反应所释放的热量, 再通过与气体间的对流及辐射换热, 导致混合气温度上升。通过对图 10 结果的纵向及横向对比, 发现随着掺氢气体积比的提高以及时间的推移, 更多的小球吸收了该部分热量, 以及对新鲜混合气进行预热, 从而起到了助燃的效果, 同时提高了燃烧的稳定性。当掺氢气体积比达到 100% 时, 随机堆积床中火焰范围不断扩大, 最终达到稳定。这是由于氢气具有较高的燃烧速度, 火焰上升的同时又有大量新鲜混合气开始燃烧, 从而火焰范围不断扩大。在 90 s 时, 氢气燃烧时的火焰传播速率与氢气向上运动的速率达到平衡, 此时, 火焰位置不再发生变化。

图 11 为在 42 s 时不同掺氢气体积比下随机堆积床内的温度分布。可以看出, 随着掺氢气体积比的提高, 火焰峰值温度下降。这是由于在相同条件下, 单位体积氢气的热值低于甲烷的, 因此, 火焰温度降低。在掺氢气体积比达到 100% 时, 不再有甲烷燃烧所释放的热, 火焰温度大幅降低。同时, 氢气燃烧火焰范围扩大, 对应图 11 中高度范围扩大, 因此在温度峰值位置处曲线变得平缓。

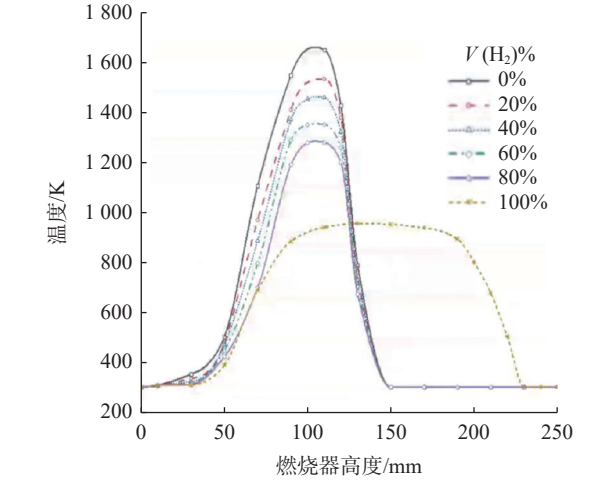


图 11 不同掺氢气体积比时随机堆积床内温度分布

Fig.11 Temperature distribution in the randomly packed bed with different hydrogen mixing ratios

图 12 为不同时刻不同掺氢气体积比下 CO_2 质量分数分布云图。可见, 随着氢气的掺混, 混合气燃烧的碳排放大幅降低。以 42 s 为例, 掺氢气体积比从 0%、20%、40%、60%、80% 至 100% 的条件下, 所对应的 CO_2 质量分数在以堆积区底面中心位置为原点所做的 $x = 0$ 的截面上的面平均值

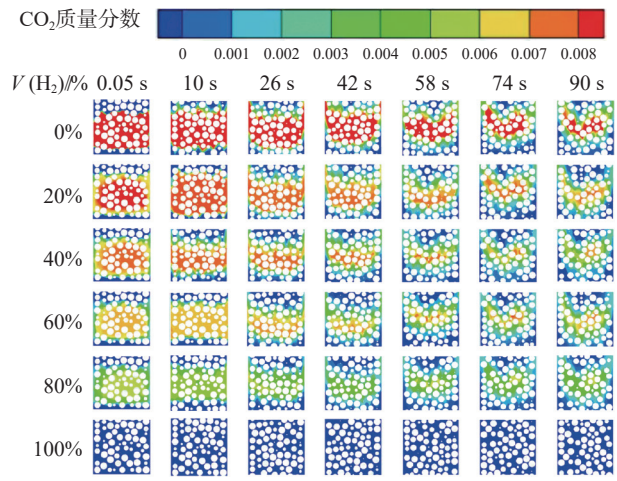


图 12 不同时刻不同掺氢气体积比时的 CO₂ 质量分数
Fig.12 CO₂ mass fraction at different moments with different hydrogen mixing ratios

分别为 0.079、0.060、0.044、0.031、0.014 和 0，CO₂ 质量分数显著降低。

4 结 论

本文采用离散元软件 EDEM 构建随机堆积床三维几何模型。采用 WALE 模型和有限速率燃烧模型，用于模拟随机堆积床内不同掺氢气体积比（0%、20%、40%、60%、80% 和 100%）下的甲烷/氢气/空气的预混燃烧。通过将模拟结果与实验数据进行对比，验证了该方法的有效性。模拟计算了不同时刻和不同掺氢气体积比下的火焰结构、温度分布、火焰面平均涡量和各组分质量分数，并对燃烧过程中火焰结构、温度分布以及提高掺氢气体积比所带来的影响进行分析。根据模拟结果，本文得出以下主要结论：

- a. 燃烧过程中，火焰自堆积区下端向上端传播，火焰范围减小。掺氢气体积比为 20% 时，燃烧区温度从 1601 K 降低至 1402 K。由于吸收了小球积蓄的部分热量，新鲜混合气在达到燃烧区之前已有超过 400 K 的温度提升。这提高了随机堆积床燃烧的稳定性的。
- b. 小球对混合气组分的分割扰动作用导致火焰表面呈现复杂的褶皱，并且提高了火焰面平均涡量，这使随机堆积床内的燃烧温度及火焰分布均匀。
- c. 掺氢气体积比的提高，使更大范围内的新鲜混合气受到预热，并且使未燃区温度均保持在 600 K 以上，这进一步提高了燃烧的稳定性的。掺氢气

体积比达到 100% 时，火焰范围扩大，峰值温度降低，不再有 CO₂ 的产生，且最终在 90 s 时稳定燃烧。

参考文献：

[1] 范志伟, 王式兴, 范俊, 等. 微型燃气轮机综述——发展现状、核心部件和挑战 [J]. 洁净煤技术, 2026, 32(1): 33–55.

[2] WANG J H, CHEN H, LIU B, et al. Study of cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas–hydrogen blends[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(18): 4876–4883.

[3] TÖPLER J, BREGULLA T, STEPHAN A, et al. Fuels – Introduction | Hydrogen as a Fuel[J]. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources (Second Edition), 2025, 6: 140–160.

[4] MA F H, WANG Y. Study on the extension of lean operation limit through hydrogen enrichment in a natural gas spark-ignition engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(4): 1416–1424.

[5] SHAHID I M, RAO A, FARHAN M, et al. Hydrogen production techniques and use of hydrogen in internal combustion engine: a comprehensive review[J]. Fuel, 2024, 378: 132769.

[6] DU W, ZHOU S Q, QIU H C, et al. Experiment and numerical study of the combustion behavior of hydrogen-blended natural gas in swirl burners[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 39: 102468.

[7] PAN W G, KANG L W, CHI Z W, et al. Numerical study on effects of hydrogen doping of natural gas on the combustion characteristics in micro gas turbine combustor[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 255: 123989.

[8] CHENG L, LI W L, PENG S Y, et al. Study of combustion characteristics of hydrogen-doped natural gas in industrial boilers[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 92: 590–604.

[9] 王雅芬, 符鹏飞, 裴鑫岩, 等. 纯氢/混氢碳氢燃料喷嘴技术综述 [J]. 航空发动机, 2024, 50(5): 23–34.

[10] 王磊, 方俊华, 黄震. 纯氢和天然气掺氢燃料发动机的试验研究 [J]. 柴油机, 2009, 31(5): 6–10.

[11] DI ILIO G, BELLA G, JANNELLI E. Performance evaluation of extended-range electric vehicles equipped with hydrogen-fueled rotary engine[C]//Conference on Sustainable Mobility. Catania: SAE International, 2020. https://doi.org/10.4271/2020-24-0011.

[12] KARTHIKEYAN S, VELRAJ R, SENTHIL R. Overview of numerical, experimental and parametric studies on the

- spherical container-based packed bed latent heat storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 102: 114089.
- [13] CHALIA S, NAAGAR M, THAKUR P, et al. An overview of ceramic materials and their composites in porous media burner applications[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(8): 10426–10441.
- [14] TIERNEY C, WOOD S, HARRIS A T, et al. Computational fluid dynamics modelling of ultra-lean porous burners[J]. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 2010, 10(5/6): 352–365.
- [15] GLAZOV S V, KISLOV V M, SALGANSKY E A, et al. Effect of local rearrangements in the particle bed on the stability of filtration combustion of solid fuel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 108: 1602–1609.
- [16] TONGBAI P, KEAWCHART K, KRITTACOM B. Spherical packed-bed porous burner using diesel oil as fuel[J]. *Energy Reports*, 2021, 7(Suppl 5): 1–11.
- [17] 尹智成, 王平, 姜霖松, 等. 随机堆积床内过滤燃烧特性的实验研究[J]. *热能动力工程*, 2022, 37(11): 115–121.
- [18] SANDU V C, CORMOS C C, CORMOS A M. Multiscale CFD modelling of syngas-based chemical looping combustion in a packed bed reactor with dynamic gas switching technology[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(6): 111381.
- [19] JIANG L S, LIU H S, SUO S Y, et al. Simulation of propane-air premixed combustion process in randomly packed beds[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 153–163.
- [20] TOFFOLO K, MEUNIER S, RICARDEZ-SANDOVAL L. Optimal operation of a large-scale packed bed chemical-looping combustion process using nonlinear model predictive control[J]. *Fuel*, 2024, 357: 129876.
- [21] 尹智成, 王平, 姜霖松, 等. 简单立方堆积床内火焰特性的试验研究[J]. *上海交通大学学报*, 2023, 57(3): 326–334.
- [22] BANERJEE A, PAUL D. Developments and applications of porous medium combustion: a recent review[J]. *Energy*, 2021, 221: 119868.
- [23] DAI H M, DAI H C. Efficient lean combustion in a novel porous medium burner with the integrated of pellets and ceramic foam: experimental study of flame propagation and stability[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 244: 112244.
- [24] SHI J P, SHAN Z D, YANG H Q. Research on the macro- and meso-mechanical properties of frozen sand mold based on Hertz-Mindlin with Bonding model[J]. *Particuology*, 2024, 88: 176–191.
- [25] 姜霖松, 刘宏升, 吴丹, 等. 随机堆积床内甲烷/空气预混燃烧过程的数值模拟[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(7): 962–967.
- [26] 刘润之. 湍流燃烧大涡模拟的直接矩模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [27] 赵帅. 典型亚格子模型在小尺度火旋风大涡模拟中的适用性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [28] 洪正, 叶正寅. 不同亚格子模型在亚声速槽道流大涡模拟中的应用对比[J]. *气体物理*, 2019, 4(1): 33–44.
- [29] NICOU D, DUCROS F. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 1999, 62(3): 183–200.
- [30] DIXON A G, NIJEMEISLAND M, STITT E H. Systematic mesh development for 3D CFD simulation of fixed beds: contact points study[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2013, 48: 135–153.
- [31] EPPINGER T, SEIDLER K, KRAUME M. DEM-CFD simulations of fixed bed reactors with small tube to particle diameter ratios[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 166(1): 324–331.

(编辑: 何代华)