

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.07.010

# 随机堆积床内甲烷/空气预混燃烧过程的数值模拟

姜霖松<sup>1</sup>, 刘宏升<sup>1</sup>, 吴丹<sup>2</sup>, 解茂昭<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 营口理工学院 机械与动力工程系, 辽宁 营口 115014)

**摘 要:** 通过离散元软件 LIGGGHTS 重现球体的重力堆积过程, 建立三维随机堆积床几何模型. 利用大涡方法结合双温度模型以及 EBU - Arrhenius 燃烧模型, 模拟了甲烷/空气预混气体在堆积床内预混合燃烧过程. 通过将模拟结果与实验数据对比验证了模型的有效性, 在此基础上对随机堆积床内部的火焰分布结构、火焰面形状及温度分布规律等进行了分析. 模拟结果表明: 在燃烧后期, 堆积床内的小球温度要高于同一高度上气体的温度, 这体现了多孔介质良好的蓄热能力; 壁面与轴线间的火焰面高度差远远小于无多孔介质的管内燃烧情况, 表明随机堆积床可以通过分割火焰来提高燃烧的均匀性和稳定性.

**关 键 词:** 堆积床; 随机结构; 预混燃烧; 蓄热能力; 火焰面

中图分类号: TK 16      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2019)07-0962-06

## Numerical Simulation of Methane-Air Premixed Combustion Process in a Randomly Packed Bed

JIANG Lin-song<sup>1</sup>, LIU Hong-sheng<sup>1</sup>, WU Dan<sup>2</sup>, XIE Mao-zhao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Department of Mechanical and Power Engineering, Yingkou Institute of Technology, Yingkou 115014, China. Corresponding author: LIU Hong-sheng, E-mail: lhsh@dlut.edu.cn)

**Abstract:** Three dimensional random geometric structure of pellets packed bed was modeled using the discrete element software LIGGGHTS. Large eddy simulation method, two-temperature model and EBU-Arrhenius combustion model were employed to simulate the premixed combustion process of methane-air in the randomly packed bed. The calculated results are compared with experiment data to verify effectiveness of the model. The structure and the shape of the flame and the temperature distribution in the packed bed were analyzed. The simulation results show that the temperature of solid is higher than that of gas on the same height of the packed bed during the late stage of combustion, which reflects a good thermal storage capacity of the porous medium. The height difference of the fame surface between the tube wall and the center in the packed bed is much smaller than that in tube without porous media, which suggests that the flame is divided by the packed bed and then the uniformity and stability of the combustion within a porous medium are improved.

**Key words:** packed bed; random structure; premixed combustion; thermal storage capacity; flame surface

多孔介质内燃烧是一种工程中较为普遍的燃烧现象, 其在提高燃烧效率、扩展贫燃极限、减少环境污染等方面具有显著优势<sup>[1]</sup>. 近年来, 多孔

介质燃烧技术越来越受到重视并迅速发展, 相关研究工作涉及到火焰稳定性条件<sup>[2]</sup>、火焰传播速度<sup>[3]</sup>、超绝热燃烧特性<sup>[4]</sup>等方面.

自 20 世纪 70 年代以来,国内外学者对多孔介质内燃烧这种特殊的燃烧过程进行了大量研究,其中早期的研究大多以实验研究为主,而后逐渐向模拟研究扩展. Yang 等<sup>[5]</sup>将两种催化剂应用于多孔介质微燃烧器,对正庚烷的燃烧过程进行了实验研究. Rashidian 等<sup>[6]</sup>在堆积床燃烧室中采用导流板控制燃烧中的颗粒排放并起到减少辐射热损失的作用. Karim 等<sup>[7]</sup>研究了多种生物质燃料在堆积床中的燃烧过程,分析了入口速度对火焰特性的影响. Yang 等<sup>[8]</sup>对陶瓷颗粒多孔介质内的预混燃烧过程进行了实验研究,得到火焰传播速度随燃料系数变化的规律. Dayma 等<sup>[9]</sup>对氢氧预混层流火焰速度进行了实验与模拟研究,模拟采用两个详细的氢燃烧化学动力学机理. Chen 等<sup>[10]</sup>对预混甲烷/空气火焰在多孔介质的传播过程进行了大涡模拟研究,观察到了火焰从波纹小火焰区到薄反应区的过渡过程.

对多孔介质内燃烧而言,多孔介质复杂的几何结构对其内部流动、传热和燃烧过程具有重要影响. 如何建立具有实际多孔介质随机几何特征的三维几何模型,已成为目前研究的热点问题之一. 迄今为止,国际上常用多孔介质重构方法有: 物理方法、数值方法、分形理论等. 研究初期所建立的模型多为有序结构,一般采用较为简单的体心立方模型、单立方模型以及面心立方模型<sup>[11]</sup>. 近几年,国内外学者逐渐展开了无序堆积模型的构造研究,主要采用计算流体力学 (CFD) 和离散元模型 (DEM) 相结合的方法. Suárez 等<sup>[12]</sup>基于堆积床内颗粒的密度、接触情况等参数推导了堆积床有效传热系数公式. 目前将随机堆积床结构应用于燃烧数值模拟的研究尚鲜见报道.

本文采用离散元软件 LIGGGHTS,建立三维随机堆积床几何结构模型. 在此基础上,联合大涡方法、双温度模型及 EBU - Arrhenius 燃烧模型,模拟甲烷/空气预混气体在堆积床内预混合燃烧的过程,在模型有效性验证基础上,对堆积床内部火焰分布区域、火焰面形状及温度分布规律等进行了研究,旨在为揭示多孔介质内预混合燃烧机理奠定基础.

# 1 物理模型与计算方法

## 1.1 物理模型

本文通过离散元软件 LIGGGHTS 对球体重力堆积过程进行仿真,得到与实际堆积结构相近的三维几何模型.

图 1 给出了小球在堆积过程中的小球自由下落 (图 1a)、两小球碰撞 (图 1b) 及两小球接触 (图 1c) 的示意图. 首先将小球随机分布在计算域上方的投放区域,并使其在重力作用下自由下落,其中小球密度、表面粗糙度、硬度等物理特性均与给定小球的真实材料相一致; 然后根据球型及球面特征,选择碰撞公式及各种相互作用力公式,再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,选择最低势能的位置,作为小球的最终位置. 通过以上步骤得到由 3 mm 半径小球堆积而成的堆积床几何结构,如图 1d 所示.

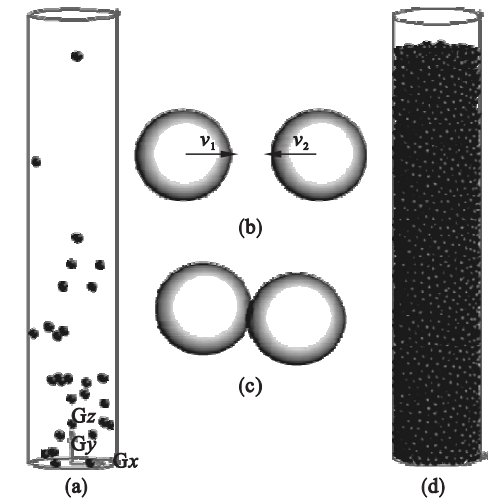


图 1 三维随机堆积床模型  
Fig. 1 Three dimension geometric model of pellets packed bed  
(a) —自由下落; (b) —两球碰撞;  
(c) —两球接触; (d) —堆积床.

图 2 为三维随机堆积床模型的计算区域示意图,其中管内直径为 20 mm,入口净流区长度为 53 mm,出口净流区长度为 102 mm,堆积区域长度为 125.5 mm,三维随机堆积床模型中堆积小球半径为 3 mm,基于几何模型中堆积区域总体积与固体颗粒的总体积计算得到堆积区域内孔隙率为 0.39.

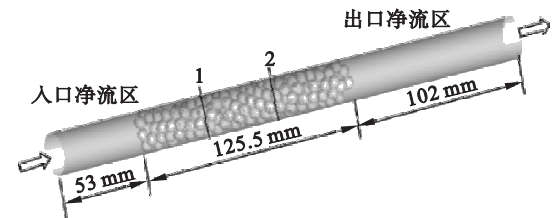


图 2 计算域  
Fig. 2 Computational domain

1.2 计算方法

本文针对堆积床特殊结构,在计算时将随机分布的固体区域划分出来,从而实现了多孔介质内部结构对流动、传热、燃烧影响的研究,而且加入对固体内部辐射换热的考虑,使得在研究中能够对固体材料的蓄热性能进行分析,并可以观察到固体温度变化的规律.考虑到堆积床随机结构的空

- 空间扭曲度和复杂度较高,会导致计算量增加,故提出以下假设:
- 1) 小球为基于重力特性随机堆积的灰体;
  - 2) 多孔介质为惰性、光学厚介质并且固体基质为各向同性;
  - 3) 忽略气体辐射;
  - 4) 燃烧室壁面绝热且无相对滑移.

以上述假设为基础,建立多孔介质内甲烷/空气预混燃烧的控制方程组:

连续方程为

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0. \tag{1}$$

动量方程为

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} - 2 \frac{\partial}{\partial x_j} \mu_{\text{sgs}} \bar{S}_{ij} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{\sigma}_{ij}}{\partial x_j}. \tag{2}$$

气相能量方程为

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \bar{h})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{h})}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{\text{sgs}} c_p}{Pr_{\text{sgs}}} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} \right) + S_{\text{hg}}. \tag{3}$$

其中: $S_{\text{hg}}$ 为气相能量源项,包括导热源项及化学反应源项, $S_{\text{hg}} = h_v (T_s - T_g) + \omega_T$ .

氧化铝小球堆积床内气固相间的体积传热系数  $h_v$ , 可根据 Henneke 等<sup>[13]</sup> 给出的公式  $h_v = Nu_v \cdot \frac{\lambda_g}{d^2}$  来确定. Wakao 等<sup>[14]</sup> 由传统努赛尔数定义给出了堆积床内努赛尔数关系式:

$$Nu_v = 2 + 1.1 Pr^{1/3} Re^{0.6} n.$$

其中: $Pr$  为普朗特数; $Re$  为雷诺数;系数  $n$  由孔隙水力直径和颗粒直径确定.

固相能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho h = \frac{\partial}{\partial x_i} (k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i}) + S_{\text{hs}}. \tag{4}$$

组分方程为

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \bar{w}_c)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{w}_c)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{\text{sgs}}}{Sc_{\text{sgs}}} \frac{\partial \tilde{w}_c}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \bar{\rho} D \frac{\partial \tilde{w}_c}{\partial x_i} \right) + \bar{R}_c. \tag{5}$$

$$\bar{p} = \bar{\rho} \bar{R} \bar{T}. \tag{6}$$

其中, $\rho$  为气体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $p$  为压强,  $\text{Pa}$ ;  $T$  为温度,  $\text{K}$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $u_i$  为  $i$  方向的速度,  $\text{m/s}$ ;  $x_i$  为直角坐标参数,  $\sigma_{ij}$  为黏性应力张量;  $h$  为焓. 文中涉及的化学反应为甲烷/空气单步不可逆化学反应,  $\omega_T$  为化学反应热,  $w_c$  为物质  $C$  的质量分数,  $R_c$  为燃烧速率,  $D$  为扩散系数, 上标 “ $-$ ” 和 “ $\sim$ ” 分别代表物理空间上的平均和 Favre 过滤法的过滤. 方程 (2), (3), (5) 中的亚格子应力、亚格子组分通量和亚格子焓通量均由亚格子湍流模型进行封闭, 其中亚格子普朗特数  $Pr_{\text{sgs}}$  和亚格子斯密特数  $Sc_{\text{sgs}}$  均为 0.7.

1.2.1 亚格子模型

在堆积床这种特殊结构中, 涉及大量的小球壁面, 故对近壁流体的计算尤为重要, 本文采用壁面动态局部涡黏 (WALE) 模型对亚格子尺度应力张量进行封闭. 在 WALE 模型中, 亚格子黏性定义为

$$\mu_{\text{sgs}} = \rho L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{\frac{3}{2}}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{\frac{5}{2}} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{\frac{5}{4}}}. \tag{7}$$

其中, 亚格子混合长度  $L_s$  和  $S_{ij}^d$  定义为

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

其中: $\kappa$  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, 等于 0.325.

与传统的 Smagorinsky - Lilly (SL) 模型相比, WALE 模型是基于速度梯度张量建立的, 所以即使不使用动态模型, 在靠近壁面时也可以得到相对准确的涡黏度结果; 该模型相较于 SL 模型另外一个优点是, 在层流剪切应力作用下湍流黏度值为零, 这使得在层流区的计算得到更为准确的结果. 然而当采用 SL 模型时层流区湍流黏度并不为零, 这显然是不符合实际的. 而随机堆积结构具有壁面较多的特点, 复杂的结构耦合蒸发与燃烧混合的复杂反应过程, 使得流场中层流和湍流区域掺混, 对近壁区域和层流区域内进行正确的模拟是十分必要的, 综上本文选用 WALE 模型.

1.2.2 燃烧模型

本文应用 EBU - Arrhenius 燃烧模型来定义燃烧速率  $R_c$ :

$$R_c = \min(R_c^A, R_c^T). \tag{8}$$



其中： $R_C^A$  为 Arrhenius 反应速率； $R_C^T$  为湍流反应速率，定义为涡扩散模型中化学混合限制下的反应速率。这里对于 Arrhenius 反应速率不再赘述，仅给出湍流反应速率的方程为

$$R_C^T = \min(v_C' M_C A \bar{\rho} \tau_{sgs}^{-1} \min(\frac{w_R}{v_R' M_R}), v_C' M_C A B \bar{\rho} \tau_{sgs}^{-1} \frac{\sum w_p}{v_C'' M_C}) . \tag{9}$$

其中： $M_C$  为化学物质 C 的摩尔质量，g/mol； $w_p$  为任一生成物的质量分数； $w_R$  为任一反应物的质量分数；A 和 B 均为经验常数，分别取值 4 和 0.5； $\tau_{sgs}^{-1} = \sqrt{2 S_{ij} S_{ji}}$  为亚网格混合率的时间尺度， $s^{-1}$ ； $S_{ij}$  为张量率的时间尺度， $s^{-1}$ 。

## 2 网格生成与模型检验

图 3a 为计算域初步网格划分情况，由于三维随机结构十分复杂，堆积区域内网格均为非结构化网格，而在大涡模拟中，随网格尺寸不断减小，计算结果不断变化，直到接近于直接数值模拟的结果，故无法进行网格无关性验证，但大涡模拟对网格要求较高，尤其是近壁网格。而堆积床结构壁面较多，故将小球表面网格动态加密（图 3b），已达到大涡模拟对网格的要求，截取切面（图 3c）以后，最终得到如图 3d 所示的网格。

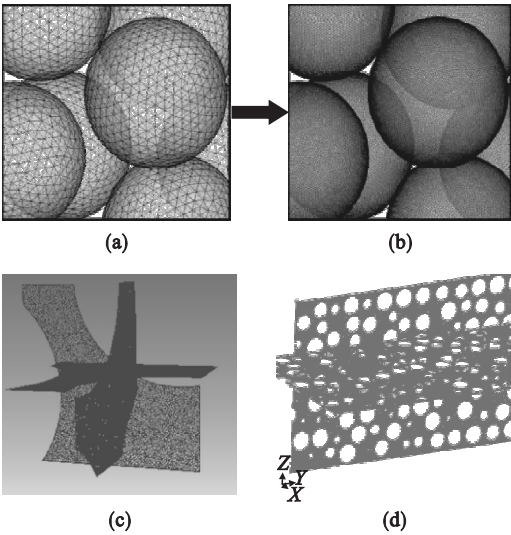


图 3 随机堆积床内的局部计算区域网格  
Fig. 3 Computational grids in local zone of the randomly packed bed  
(a)—初步网格；(b)—加密网格；  
(c)—切面；(d)—切面网格。

由于模型中多孔介质结构截面积变化及燃烧反应会引起压力梯度突变，故压力计算采用 PRESTO 格式，而由于大涡模拟对精度格式要求

较高，其他方程计算均采用具有三阶精度的 QUICK 格式，经过验证，能量方程残差收敛判断标准为  $10^{-8}$ ，其他方程收敛判断标准为  $10^{-4}$  时，对计算结果的影响可以忽略不计。

为验证模型的有效性，将数值模拟的温度分布与实验结果进行了对比。首先在堆积区域沿 y 轴设置 100 个等距平行切面，再将切面上气体部分的温度进行面积平均，得到如图 4 所示的模拟结果，而实验数据则取自于 Wu 等<sup>[15]</sup>在燃空质量比 0.32，入口速度为 0.505 m/s 工况下，燃烧进行到 540 s 时测得的温度分布结果。

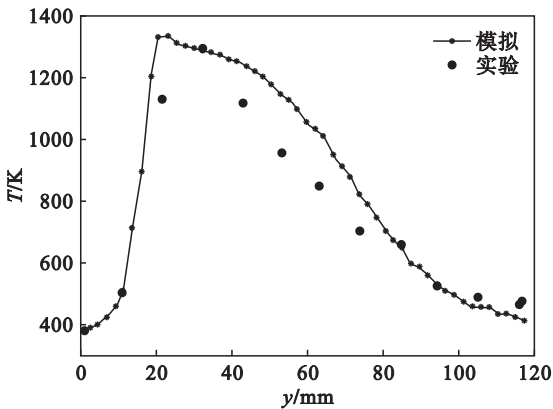


图 4 温度分布的模拟结果与实验对比  
Fig. 4 Comparison between experimental and simulation results for temperature distribution

通过图 4 可以看出，模拟温度分布情况和实验结果吻合较好，仅在 40 ~ 80 mm 范围内出现稍许偏差，主要表现为模拟结果温度较高。这主要由于模拟考虑到实验中的管壁处保温措施比较完善，故将管壁设置为绝热壁面，但实际实验中管壁与绝热壁面还是具有一定差距，同时插入燃烧室的热电偶同样使一些热量流失，导致了实验数据低于模拟结果，但本文模型还是能够基本准确地预测燃烧的最低、最高温度并定量预测温度的分布趋势，是具有有效性的。

## 3 计算结果与讨论

图 5 为入口速度 0.5 m/s，预混气体燃空质量比 0.32 工况下的火焰面云图，将堆积区下端 45 mm 范围内小球以 1 250 K 预热引起燃烧，本文将温度超过 1 300 K 的区域定义为火焰区，并以小球区域预热完成时刻为时间零点。

图 5a 为 0.05 s 时火焰云图，可以看出由于受到低温预混气体影响，净流区与多孔介质区域交界处并不产生火焰，燃烧初期火焰主要集中在预

热区上部. 观察图 5b 可以看出, 燃烧进行 310 s 时, 由于预混气体温度较低, 火焰区上移并变窄, 火焰面逐渐远离小球预热区域, 燃烧产生的热量部分被低温小球吸收, 导致气体温度降低.

由图 5c 可以看出, 燃烧进行到 581 s 时, 火焰区依旧上移并持续变窄. 观察图 5d 可以看出, 燃烧进行到 788 s, 火焰持续上移, 但宽度基本不变. 这是由于经过一段时间的燃烧, 位置较高的低温小球主要受到高温辐射影响, 温度有所提高并储存了部分能量, 故而吸收的反应热减少. 此时燃烧释放的热量与小球吸收的热量达到相对平衡状态, 燃烧趋于稳定, 火焰传播速度约为  $1.25 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ .

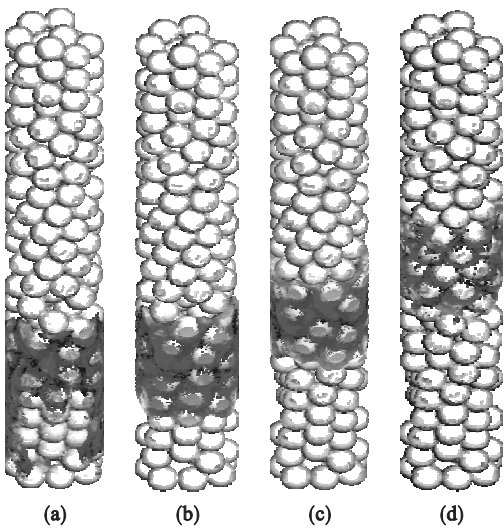


图 5 堆积床内火焰分布云图  
Fig. 5 Flame distributions in packed bed  
(a)—0.05 s; (b)—310 s;  
(c)—581 s; (d)—788 s.

图 6 给出了燃烧进行到 788 s 时的温度云图. 图 6a 为堆积区域的三维温度云图, 其中最高温度达到 1 382.3 K, 可以观察到温度场受到堆积床分割及湍流扰动.

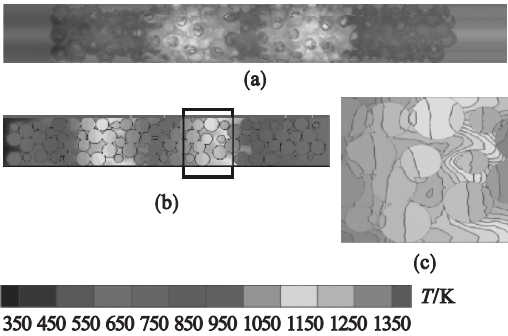


图 6 随机堆积床内局部温度分布  
Fig. 6 Local temperature fields in packed bed  
(a)—温度云图; (b)— $y-z$  切面温度;  
(c)—图 6b 局部放大图.

图 6b 给出了  $y-z$  截面温度分布图, 图 6c 为图 6b 中黑框区域的放大图. 观察图 6b 可以看出, 小球整体温度分布受整个火焰面形状的影响; 进一步观察图 6c 可以看出, 单个小球内部的受热面形状也与火焰面形状相似, 但是小球与气体温度变化并不同步, 小球温度均高于同一高度上的气体温度. 这是由于固体材料的热容量远大于气体所致, 从而体现了多孔介质蓄热能力强的特点, 同时当热量累积到固体材料中后, 会通过对流以及辐射的方式加热低温预混气体, 从而避免了低温导致的熄火现象, 起到提高燃烧稳定性的作用.

图 7 给出了燃烧进行到 788 s 时的火焰面云图, 本文将温度 1 300 K 的等值面定义为火焰分界面. 由图 7a 可以看出, 受堆积床影响, 火焰面形状没有明显的规律. 图 7b 给出将多孔介质小球剔除以后的火焰面. 可以更直观看火焰面被小球分割后, 火焰尺寸减小, 靠近管壁处的火焰面高度要低于中心处火焰高度, 不同于有序堆积床中火焰面所呈现的类抛物面形状, 而且由于小球的分割, 近壁面与中心的火焰面高度差最高可达到 4.7 mm, 要远小于无多孔介质的管内燃烧情况, 进一步说明堆积床可以通过分割火焰提高燃烧的均匀性和稳定性.

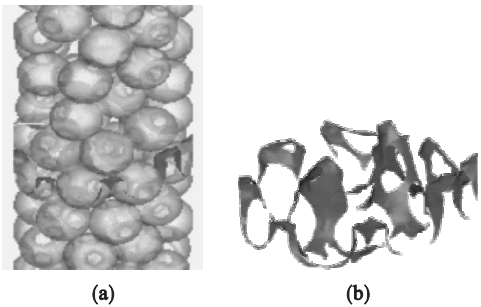


图 7 堆积床内的火焰面分布  
Fig. 7 Local flame surface distribution in packed bed  
(a)—整体火焰结构; (b)—火焰面提取.

图 8 和图 9 分别给出了燃烧过程中火焰面积及火焰面涡量平均值随时间的变化情况. 可以看出火焰面积随时间推移而增大, 火焰面涡量平均值同样随时间变化而增加, 二者近似呈线性关系. 这是由于随着燃烧进行, 剧烈的温度变化导致湍流强度增大(涡量增加), 而高湍流强度会加剧火焰面褶皱, 使火焰面积增大, 进而导致散热面积增大, 而随散热量的增加湍流强度升高, 故火焰与湍流的相互作用产生了图 8 和图 9 的结果.

可以观察到, 虽然火焰面积与火焰面平均涡量随时间均呈上升趋势, 但是其上升规律并不完全相同, 二者之间并不是单调的函数关系. 这是由

于随机堆积床内小球的扰动作用使湍流强度增强,而堆积较为密集的地方也会因为空间受限而抑制湍流的发展;小球壁面黏性力可以起到拉伸火焰面的作用,而球面密集处则因淬熄抑制火焰面发展,故随机结构同样是影响火焰面积及面积处涡量的重要因素,需要在后续工作中进行更深入的探讨。

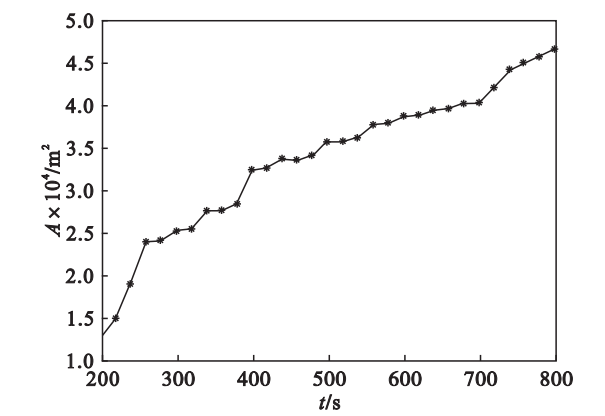


图 8 火焰面积随时间变化  
Fig. 8 Variation of flame surface area with time

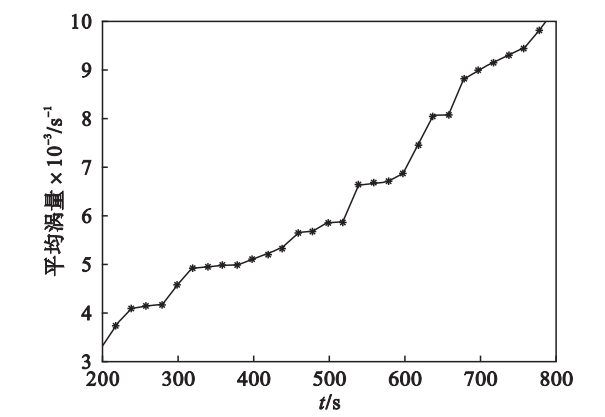


图 9 火焰面上平均涡量随时间变化  
Fig. 9 Variation of mean vorticity on flame surface with time

## 4 结 论

- 1) 燃烧初期火焰主要集中在预热区上部,随着燃烧进行火焰区上移并变窄,进入燃烧后期,火焰持续上移,但宽度基本不变,燃烧趋于稳定,火焰传播速度在  $1.25 \times 10^{-4}$  m/s 左右。
- 2) 燃烧后期小球与气体温度变化并不同步,小球温度均高于同一高度上的气体温度,这体现了固体小球具有非常好的蓄热能力,可以防止温度急剧降低所导致的熄火现象,利于稳定燃烧。
- 3) 区别于有序堆积床中火焰面所呈现的类抛物面形状,在随机堆积床内火焰面形状无明显规律,火焰面被小球分割后火焰尺度相对减小,管

道壁面与中心间的火焰面高度差要远小于无多孔介质的管内燃烧情况,表明堆积床可以通过分割火焰提高燃烧的均匀性和稳定性。

## 参考文献:

[1] Mujeebu M A, Abdullah M Z, Mohamad A A, et al. Combustion in porous media and its applications—a comprehensive survey [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8): 2287–2312.

[2] Djordjevic N, Habisreuther P, Zarzalis N. A numerical investigation of the flame stability in porous burners employing various ceramic sponge-like structures [J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(4): 682–688.

[3] Bubnovich V, Toledo M. Analytical modelling of filtration combustion in inert porous media [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(7): 1144–1149.

[4] Vandadi V, Park C. Analytical solutions of superadiabatic filtration combustion [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 117(2): 740–747.

[5] Yang W, Zhou M, Deng C, et al. Experiments on *n*-heptane combustion with two types of catalyst layouts [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100(5): 325–332.

[6] Rashidian B, Al-Abdeli Y M. Effect of freeboard deflector on the energy in a fixed bed combustor [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 118(5): 62–72.

[7] Karim M R, Ovi I R Q, Naser J. A CFD model for biomass combustion in a packed bed furnace [C]//International Conference on Mechanical Engineering. Dhaka, 2016: 725–754.

[8] Yang S I, Hsu D L. Heat-transfer mechanisms of lean premixed CH<sub>4</sub>/air flame in a ceramic granular bed burner [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(3): 692–703.

[9] Dayma G, Halter F, Dagaut P. New insights into the peculiar behavior of laminar burning velocities of hydrogen-air flames according to pressure and equivalence ratio [J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(9): 2235–2241.

[10] Chen P, Li Y, Huang F, et al. Experimental and LES investigation of premixed methane/air flame propagating in a chamber for three obstacle BR configurations [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 41(5): 48–54.

[11] 杨剑,周觅,李师阳,等. 三维颗粒有序列阵多孔介质湍流方程改进研究 [J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(12): 2447–2451.  
(Yang Jian, Zhou Mi, Li Shi-yang, et al. Modification of turbulence equations in porous media formed by three-dimensional periodic arrays of particles [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(12): 2447–2451.)

[12] Suárez F, Luzzi C D, Mariani N J, et al. Effective parameters for conductive contributions to radial heat transfer in fixed beds under stagnant conditions [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2017, 119(3): 245–262.

[13] Henneke M R, Ellzey J L. Modeling of filtration combustion in a packed bed [J]. *Combust Flame*, 1999, 117(4): 832–840.

[14] Wakao N, Kaguei S. Heat and mass transfer in packed beds [M]. New York: Gordon and Breach Science Publications, 1982.

[15] Wu D, Liu H S, Xie M Z. Experimental investigation on low velocity filtration combustion in porous packed bed using gaseous and liquid fuels [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 36(1): 169–177.