

多孔介质燃烧的二维数值模拟

姜海, 赵平辉, 徐侃, 陈义良

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230027)

摘要: 利用商业软件 FLUENT6.2 结合用户自定义标量和用户自定义函数, 采用二维稳态模型和简单化学反应机理, 对堆积床内丙烷/空气预混燃烧进行了数值模拟, 并与实验结果进行对比。结果表明, 由于壁面粘性和壁面散热的影响, 多孔介质燃烧火焰呈现明显的二维结构。所以在实际的燃烧器设计中应考虑壁面带来的影响。

关键词: 多孔介质; 预混燃烧; 二维数值模拟

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A

2D simulation of combustion in porous medium

JIANG Hai, ZHAO Ping-hui, XU Kan, CHEN Yi-liang

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: CFD software FLUENT 6.2 was used to simulate propane/air premixed combustion in packed bed with user-defined scalars and user-defined functions. The two-dimensional stabilized model and simple reaction mechanism were adopted. It is concluded that, because of the wall viscosity and wall heat loss, the flame of combustion in porous medium presents an obvious 2D structure. Consequently, it is important to consider the effects of wall in designing actual porous burners.

Key words: porous medium; premixed combustion; two-dimensional simulation

0 引言

多孔介质燃烧, 由于其燃烧效率高、稳定性好、污染物排放少等优点^[1], 成为最近十几年来中的一个研究热点。对多孔介质燃烧的数值模拟, 国内外的学者做过大量工作^[2~4]。Sahroui 等^[5]指出, 当火焰厚度和多孔介质的有效孔径在同一数量级时, 一维体积平均模型无法描述孔内的火焰结构。他们利用规则的多孔结构排列假设, 发展了一套二维数值模型。Fu 等^[6]采用二维轴对称模型和一步化学反应机理对多孔介质辐射燃烧器内燃烧过程进行了数值模

拟。他们以规则的圆柱形管束近似多孔介质结构, 考虑壁面热损, 忽略弥散效应。Malico 等^[7,8]采用二维稳态双温度模型和简化机理对有换热器的燃烧炉进行了研究, 并对多孔介质辐射特性参数进行了敏感性分析。在国内, 大连理工大学的史俊瑞等^[9]在商业软件 FLUENT 的基础上采用二维双温度模型实现了对往复式多孔介质燃烧器的数值模拟, 并对燃烧器结构进行了改进。

本文采用二维轴对称模型, 同时考虑气、固两相的温度变化, 利用商业软件 FLUENT6.2 结合用户自定义标量和用户自定义函数, 对堆积床内丙烷/空

收稿日期: 2008-02-02; 修回日期: 2008-04-07

基金项目: 中国高技术研究发展(863)计划(2007AA05Z236), 中国博士后科学基金(20080440713)资助。

作者简介: 姜海, 男, 1981年生, 博士。研究方向: 小尺度和多孔介质燃烧。E-mail: jianghai@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 陈义良, 教授。E-mail: ylichen@ustc.edu.cn

气预混燃烧进行了数值模拟;通过添加边界函数,考虑壁面散热和进出口散热对燃烧的影响.计算的固体温度与实验结果符合得较好.

1 物理数学模型

简化后的燃烧器模型如图 1 所示.燃烧器主体高 8 cm,内径 4 cm,竖直放置.多孔介质区用直径 3 mm 的惰性氧化铝小球堆积而成.在燃烧器轴向布有 6 根 S 型热电偶测量中心温度.由于堆积床孔隙较小,认为测量温度反映的是固体温度.丙烷和空气通过预混室充分预混后进入燃烧器,在下游出口处点火.具体的实验步骤见参考文献[10].

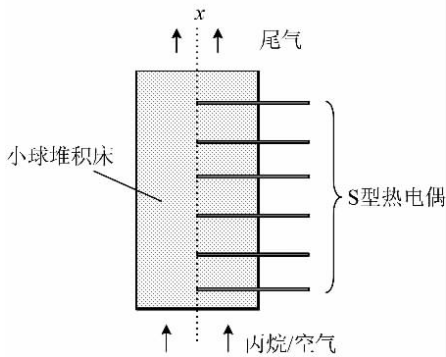


图 1 燃烧器示意图

Fig. 1 Schematic of the burner

数值模拟采用二维轴对称模型,考虑壁面对外散热.半网格如图 2 所示,X 轴为中心轴线,Y 方向为径向,边界网格加密.同时为了简化,我们做如下假设:

(I) 二维稳态层流模型,忽略气体辐射和气体弥散;多孔介质内部的固体辐射传热采用有效导热近似.

(II) 多孔介质为惰性、各向同性,没有催化作用.

(III) 采用简化的化学反应机理.

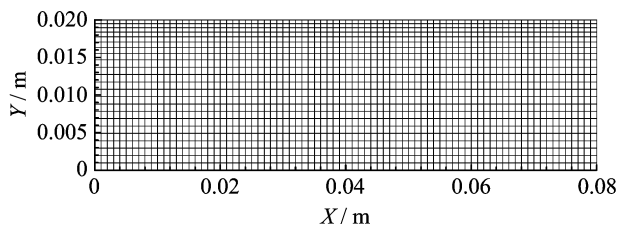


图 2 网格示意图

Fig. 2 Schematic of the mesh

1.1 控制方程

连续方程

$$\frac{\partial(\phi\rho_g u_g)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\phi\rho_g r v_g)}{\partial r} = 0$$

其中, ρ_g 为气体密度; u_g, v_g 是当地速度; ϕ 是孔隙率.

轴向动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\phi\rho_g u_g u_g)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\phi\rho_g r u_g v_g)}{\partial r} = \\ -\phi \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u_g}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial u_g}{\partial r} \right) - R_x \end{aligned}$$

径向动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\phi\rho_g u_g v_g)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\phi\rho_g r v_g v_g)}{\partial r} = \\ -\phi \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v_g}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial v_g}{\partial r} \right) - R_r \end{aligned}$$

对于小球堆积床,由多孔介质引起的流体阻力项^[8]

$$R_i = 180 \frac{(1-\phi)^2}{\phi^3} \frac{\mu u_i}{d_p^2} + 1.8 \frac{1-\phi}{\phi^3} \frac{\rho_g u_i |\nu|}{d_p}$$

其中, d_p 为堆积球直径, $|\nu|$ 为速度向量的模.

气体组分方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\phi\rho_g Y_k u_g)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\phi\rho_g Y_k r v_g)}{\partial r} = \\ -\frac{\partial}{\partial x} (\phi\rho_g Y_k V_k) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\phi\rho_g Y_k r V_k) + \phi\omega_k W_k \end{aligned}$$

其中, V_k, ω_k, W_k, Y_k 分别为第 k 种组分扩散速度, 体积生成速率, 分子量和质量分数.

气体能量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\phi\rho_g c_g u_g T_g)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\phi\rho_g c_g r v_g T_g)}{\partial r} + \\ \sum_{k=1}^K \phi\rho_g Y_k V_k C_{gk} \frac{\partial T_g}{\partial x} + \sum_{k=1}^K \phi\rho_g Y_k V_k C_{gk} \frac{1}{r} \frac{\partial(r T_g)}{\partial r} = \\ \phi \frac{\partial}{\partial x} \left(k_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \phi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_g \frac{\partial(r T_g)}{\partial r} \right) - \\ h_v (T_g - T_s) + \phi \sum_{k=1}^K \omega_k h_k W_k \end{aligned}$$

其中, T_g 和 T_s 分别是气体和固体的温度; h_k 和 C_{gk} 分别是第 k 种组分的生成焓和比热; k_g 和 c_g 是气体的导热系数和比热.堆积床内气、固间的体积对流换热系数

$$h_v = Nu_k k_g / d_p^2,$$

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

$$Re = \rho_g u \phi d_p / \mu^{[11]}.$$

在计算过程中为简化,普朗特数 Pr 取 1.

固体能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x} \left((k_s + k_s^r) \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left((k_s + k_s^r) \frac{\partial (rT_s)}{\partial r} \right) + h_v(T_g - T_s) = 0$$

式中, k_s 为固体有效热传导系数; k_s^r 是由辐射引起的等效热传导系数, 对堆积床可以采用下面经验公式^[12]

$$k_s^r = \frac{16}{3} \left(\frac{0.666\phi}{1-\phi} + 0.5 \right) d_p \epsilon \sigma T_s^3$$

其中, ϵ 为多孔介质发射率; σ 为 Stefan-Boltzman 常数.

1.2 边界条件

多孔介质区

$$\text{气相进口: } u = u_0, v = 0, Y_k = Y_{k,0}, T_g = T_0$$

$$\text{气相出口: } v = 0, \frac{du}{dx} = \frac{dY_k}{dx} = \frac{dT_g}{dx} = 0$$

$$\text{固相进口: } (1-\phi)k_s \frac{dT_s}{dx} + (1-\phi)\epsilon\sigma(T_{s,\text{in}}^4 - T_0^4) + (1-\phi)h_s(T_{s,\text{in}} - T_{g,\text{in}}) = 0$$

$$\text{固相出口: } (1-\phi)k_s \frac{dT_s}{dx} + (1-\phi)\epsilon\sigma(T_{s,\text{out}}^4 - T_0^4) + (1-\phi)h_s(T_{s,\text{out}} - T_{g,\text{out}}) = 0$$

h_s 为固体界面与气体的对流换热系数, 由实验一般取 $500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ [4].

燃烧器壁面

相比辐射放热, 壁面和环境间对流换热量较小, 所以在计算中忽略对流换热, 只考虑壁面对外辐射放热

$$\dot{q}_{w} = \epsilon_w \sigma (T_{w0}^4 - T_0^4)$$

其中, ϵ_w 为壁面对外发射率; T_{w0} 为壁面温度, 计算中取为邻近网格内的固体温度.

内壁面为无滑移边界条件: $u = 0, v = 0$

化学反应采用 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{AIR}$ 两步反应机理



1.3 求解方法

本文使用商业软件 FLUENT6.2 求解上面的微分方程. FLUENT 程序中对多孔介质能量方程的求解为单温度模型, 即假设固相和气相处于局部热平衡, 两者温度相等, 这和实际情况不符. 所以我们通过 FLUENT6.2 中的自定义标量和自定义函数, 增加固体能量方程, 将原有的单温度模型改为双温度模型. 边界条件也采用自定义函数加入.

为模拟实际情况, 在求解过程中, 首先求解冷态

流场的稳定解, 然后加入化学反应, 并将多孔介质区域的气体和固体温度设定为预热值 (1300 K). 为了保证收敛, 采用亚松弛迭代. 计算中部分物性参数含义和取值见表 1.

表 1 物性参数表

Tab. 1 Value of the parameters

参数名	取值	参数名	取值
堆积床长度 L/m	0.08	小球直径 d_p/mm	3
多孔介质发射率 ϵ	0.8	孔隙率 ϕ	0.45
壁面对外发射率 ϵ_w	0.9	环境温度 T_0/K	300
固体有效导热系数 k_s $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.156	玻尔兹曼常数 σ $/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$	5.67×10^{-8}

2 结果及分析

2.1 温度分布

图 3 为当量比 0.9, 进口速度 1.35 m/s 反应区的气体温度分布, 图 4 为固体温度分布场, 温度单位为 K . 从两张图可以看出, 在壁面散热的作用下, 气温温度场都呈现明显的二维结构, 在同一横截面上壁面温度值比中心线上的温度低. 同时, 与气体温度的剧烈变化相比, 固体温度的变化要显得平和, 这应该归功于固体较大的比热和导热系数.

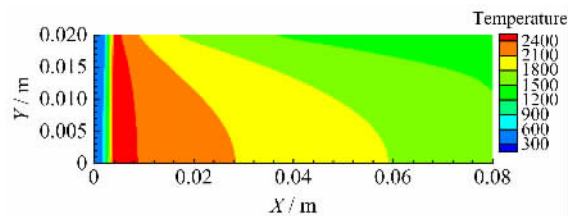


图 3 气体温度分布 (当量比 0.9)

Fig. 3 Gas temperature contours (equivalence ratio 0.9)

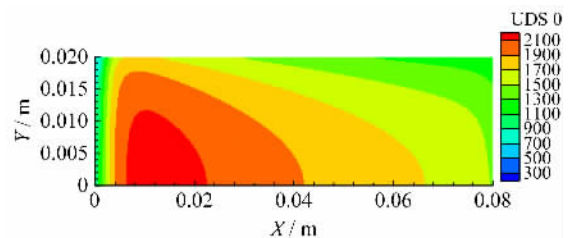


图 4 固体温度分布 (当量比 0.9)

Fig. 4 Solid temperature contours (equivalence ratio 0.9)

为验证模型的有效性, 将数值模拟结果和实验值进行了对比. 图 5 为当量比等于 0.9 时, 中心轴线上的温度计算值和实验值的对比. 其中虚线为计算的气体温度, 实线为计算的固体温度, 黑点为实验测量的固体温度. 从图中可以看出, 火焰面的位置在进

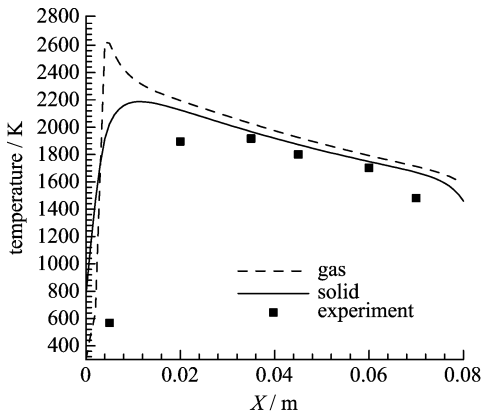


图 5 轴线温度分布

Fig. 5 Profiles of axis temperature

口附近. 在火焰面前, 固体温度高于气体温度, 固体对未燃预混气有预热作用; 火焰面后, 气体温度高于固体温度, 气体向固体传热; 火焰面附近, 气体温度上升得很快, 而固体温度变化相对比较缓慢, 并且可以看到气体有明显的超绝热火焰温度.

与实验值相比, 计算的固体温度值和测量值符合得较好, 但稍有偏差. 主要有两方面的原因: 一是测量的误差, 实验测量温度的最大误差约为 60 K; 二是没有考虑自由对流对壁面散热的影响.

图 6 为半平面不同位置的径向温度分布计算值. 由于壁面粘性和散热的作用, 径向温度中心高、两边低, 呈现抛物线型. 在火焰面前 ($X=0.002$ m), 固体温度明显高于气体温度. 在火焰面后 ($X=0.04$ m), 气体温度高于固体温度, 两者有 50 K 左右的温差.

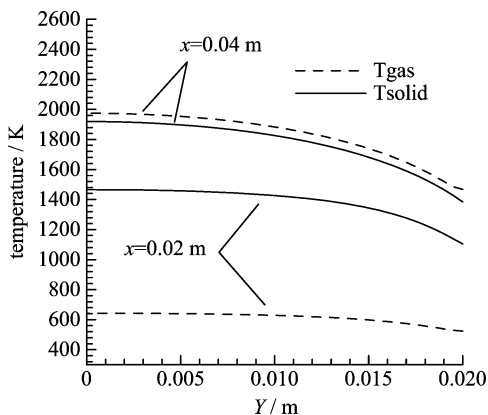


图 6 径向温度分布

Fig. 6 Profiles of radial temperature

2.2 压力和密度分布

图 7 为当量比为 0.9、进口速度 1.35 m/s、稳定

燃烧时多孔介质内压力分布. 图 8 为对应的轴线压力变化曲线, 压力单位为 Pa. 由于堆积球的孔隙率较小, 对流动的影响比较明显, 轴向进出口的压力变化有 4 300 Pa 左右. 轴向压力基本呈线性分布, 达西定律是适用的.

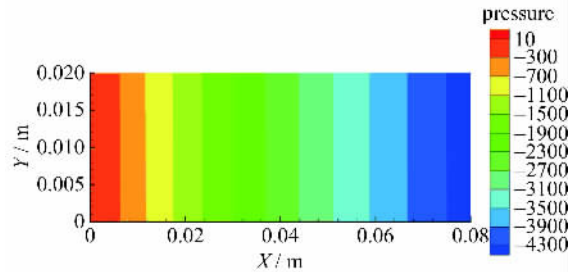


图 7 多孔介质内气体压力场

Fig. 7 Gas pressure contours in porous medium

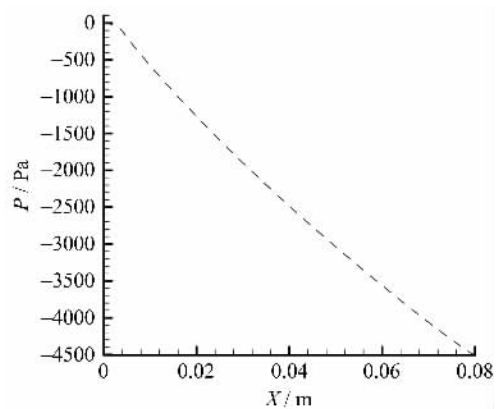


图 8 轴线气体压力分布

Fig. 8 Profiles of axis gas pressure

多孔介质内径向压力几乎没有变化, 这说明相比于多孔介质结构的作用, 壁面粘性对压力的影响很小.

图 9 为多孔介质内气体密度的分布, 图 10 为轴线上的气体密度变化, 密度单位为 kg/m^3 . 在火焰面附近, 随着反应的进行, 气体温度的增加, 气体密度

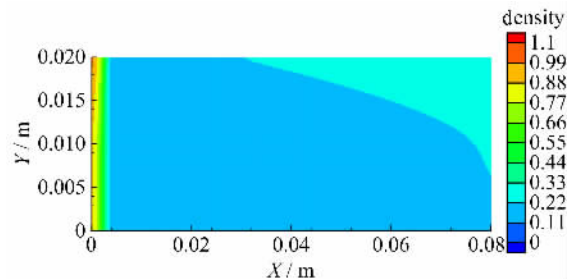


图 9 气体密度分布

Fig. 9 Gas density contours

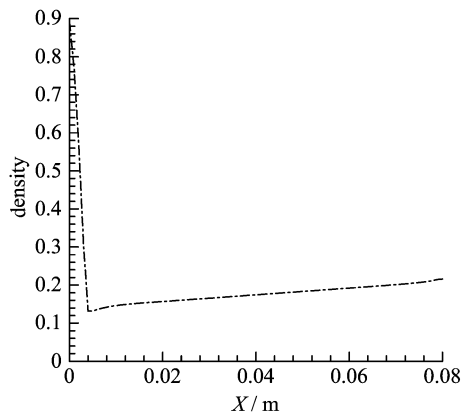


图 10 轴线气体密度变化
Fig. 10 Profiles of axis gas density

迅速减小. 在火焰面后, 随着温度的降低, 气体密度又有缓慢回升的趋势.

2.3 速度场分布

图 11 是轴向速度沿轴线的变化曲线. 在火焰区, 气体受热膨胀, 速度迅速增大. 在进口流速 1.35 m/s 时, 计算的最大轴向速度达到了 11.98 m/s. 火焰面之后随着温度的降低, 速度又缓慢回落. 图 12 为半平面内不同横截面上, 轴向速度沿径向变化曲线, 虚线的位置在火焰面之前, 实线为火焰面之后. 速度场的二维特征非常明显, 壁面边界层的影响是不可忽视的.

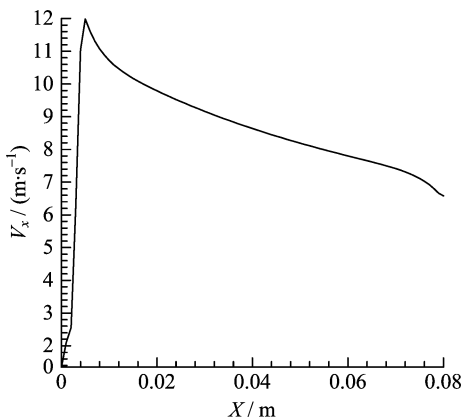


图 11 轴向速度沿轴线变化
Fig. 11 Axial velocity along the axis

2.4 组分质量分数变化

图 13 为各组分质量分数沿轴线变化的曲线. 在火焰区, 随着化学反应的进行, C_3H_8 和 O_2 快速消耗, 反应产生 CO 和大量 CO_2 . 因为当量比为 0.9, C_3H_8 完全反应后还有剩余 O_2 , 部分 CO 和剩余 O_2 继续反应, 所以 CO 的质量分数缓慢减小, 对应着

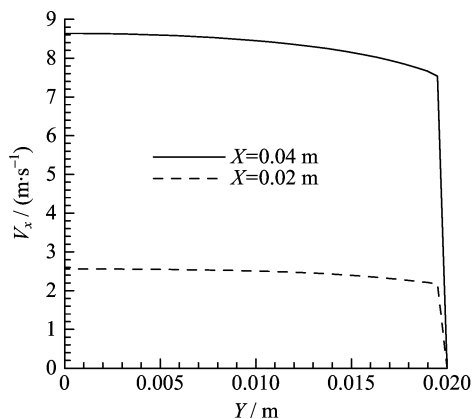


图 12 轴向速度沿径向变化
Fig. 12 Axial velocity along the radius

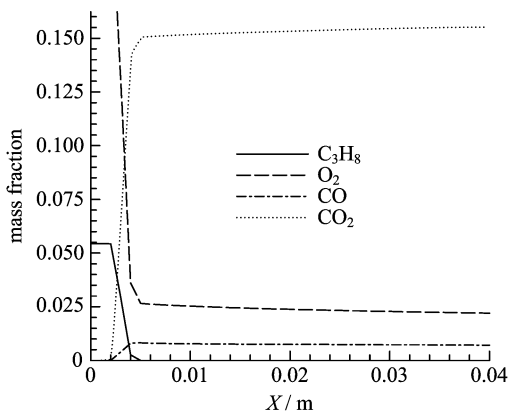


图 13 组分质量分数沿轴线变化
Fig. 13 Mass fractions along the axis

CO_2 的量进一步增加.

图 14 为半平面内 CO 质量分数沿径向的变化曲线. 可以看出 CO 的质量分数分布同样受到壁面的影响, 呈抛物线型.

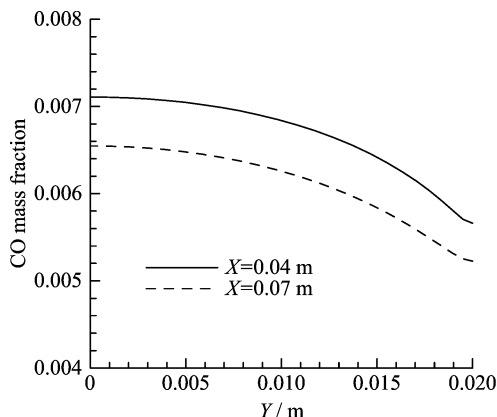


图 14 CO 质量分数沿径向变化曲线
Fig. 14 CO mass fraction along the radius

3 结论

基于商业软件 FLUENT6.2, 利用自定义函数和自定义标量, 对多孔介质稳态燃烧进行了二维的数值研究. 通过结果的比较, 可以得到如下结论:

(I) 多孔介质燃烧中, 由于壁面的影响, 气固温度场都呈现明显的二维结构, 壁面温度值比中心值低.

(II) 与气体温度的剧烈变化相比, 固体温度的变化要显得平和, 这应该归功于固体较大的比热和导热系数.

(III) 除了温度场外, 密度场和速度场等也呈现明显的二维结构. 压力场则近似为一维线性变化, 说明影响压力的主要因素是多孔介质的结构.

总之, 多孔介质燃烧中, 燃烧器壁面的影响是不容忽略的, 在实际的燃烧器设计中应考虑壁面的影响.

参考文献(References)

- [1] Sathe S B, Kulkarni M R, Peck R E, et al. An experimental and theoretical study of porous radiant burner performance[C]//Twenty-Third Symposium on Combustion. The Combustion Institute, 1990, 1 011-1 018.
- [2] 赵平辉, 陈义良, 刘明侯, 等. 化学反应机理和弥散效益对多孔介质内燃烧过程的影响[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(10): 1 051-1 056.
- [3] Jiang Hai, Zhao Ping-hui, Chen Yi-liang, et al. Experimental and numerical study on surface radiation performance of a two-layer porous burner[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2009, 39(3): 315-320.

姜海, 赵平辉, 陈义良, 等. 双层多孔介质燃烧器表面辐射特性的实验和数值研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(3): 315-320.

- [4] Diamantis D J, Mastorakos E, Goussis D A. Simulations of premixed combustion in porous media [J]. Combustion Theory and Modelling, 2002, 6: 383-411.
- [5] Sahraoui M, Kaviany M. Direct simulation vs volume-averaged treatment of abiabatic premixed flame in a porous medium[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1994, 37(18): 2 817-2 834.
- [6] Fu X Y. Modeling of a submerged flame porous burner/radiant heater[D]. Purdue University, 1997.
- [7] Malico I, Pereira J C F. Numerical study on the influence of radiative properties in porous media combustion [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2001, 123: 951-957.
- [8] Malico I, ZHOU X Y, Pereira J C F. Two-dimensional numerical study of combustion and pollutants formation in porous burner [J]. Combustion Science and Technology, 2000, 152(13): 57-79.
- [9] 史俊瑞, 解茂昭, 周磊. 往复流多孔介质燃烧器的二维数值模拟与结构改进[J]. 燃烧科学技术, 2007, 13(3): 280-285.
- [10] 姜海, 赵平辉, 张根焄, 等. 堆积床内燃烧特性的实验研究和数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(Suppl. 2): 157-160.
- [11] Henneke M R, Ellzey J L. Modeling of filtration combustion in a packed Bed [J]. Combustion and Flame, 1999, 117: 832-840.
- [12] Dobrego K V, Kozlov I M, Zhdanok S A, et al. Modeling of diffusion filtration combustion radiative burner [J]. International Journal of heat and mass transfer, 2001, 44(17): 3 265-3 272.