

高温圆管内多孔介质耦合换热的辐射作用

陈学, 李洋, 夏新林, 孙创

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 通过数值模拟圆管内填充多孔介质的辐射对流耦合换热, 研究高温固体骨架辐射效应对温度分布及换热的影响。基于局部非热平衡模型分别建立流体和固相能量方程, 采用蒙特卡罗法求解固体骨架的辐射换热; 对不考虑热辐射引起的温度场偏差和管壁发射率以及多孔结构参数的影响进行讨论。结果表明: 多孔固体骨架的辐射效应对入口段温度场的影响明显, 不考虑辐射将导致较大偏差, 壁温为 1500 K 时最大偏差为 16%。管壁发射率对温度场影响较小, 壁温为 1500 K 时影响小于 3%。孔隙率或孔径增大, 壁面辐射热流密度比例增加, 辐射效应体现明显。

关键词: 多孔介质; 耦合换热; 辐射传输; 蒙特卡罗法; 局部非热平衡

中图分类号: V231.1; TK124

文献标志码: A

Effects of radiation on the coupled heat transfer in a high temperature tube filled with porous media

CHEN Xue, LI Yang, XIA Xin-lin, SUN Chuang

(School of Energy Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The effects of radiation from solid matrix on the temperature distribution and heat transfer were numerically investigated by simulating the coupled heat transfer in a tube filled with porous media. The energy equations of fluid and solid phases were built with the local thermal non-equilibrium model. Monte Carlo method was used to solve the radiative heat transfer of solid matrix. The temperature discrepancy and effects of wall emissivity and structure parameters of porous media were analyzed without radiation. The results show that radiation strongly affects the temperature of the entrance region and a substantial discrepancy occurs when the radiation is neglected. The maximum deviation is 16% at the wall temperature of 1500 K. The effect of wall emissivity on the temperature is small, which is less than 3% at the wall temperature of 1500 K. In addition, when the porosity is high and pore diameter increases, the ratio of wall radiative heat flux increases and the effects of radiation become obvious.

Key words: porous media; coupled heat transfer; radiative transfer; Monte Carlo method; local thermal non-equilibrium

多孔介质独有的结构特性使换热得到强化, 广泛应用于各类热能系统, 如紧凑式换热器^[1]、太

阳能热转换^[2]、多孔燃烧器^[3-4]、发汗冷却^[5]等。在高温应用中, 热辐射效应不可忽视^[6], 多孔介质吸

收稿日期: 2015-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(51176308); 基础科研(B2320132001)

作者简介: 陈学(1985—), 男, 重庆人, 博士生, 主要从事辐射传输和多孔介质耦合传热研究。

通讯作者: 夏新林(1966—), 男, 河北阜城人, 教授, 博士, 主要研究方向为多孔材料耦合传热、太阳能高温利用、高温热防护等。

E-mail: xiaxl@hit.edu.cn

收/发射辐射能量和固体骨架导热以及固体骨架与流体的对流换热非线性耦合,该耦合换热过程的研究对高温热能系统的设计、性能预测和优化具有重要意义.目前,针对通道内填充多孔介质未考虑辐射的流动换热问题已展开大量研究^[7-9],但对高温条件下的辐射效应对温度场及换热的影响分析还比较缺乏.Chen等^[10]对高温圆管入口段辐射对流换热的研究表明,多孔的填入使对流强化了35%.Andreozzi等^[11]利用辐射导热系数模型研究平行通道填充泡沫金属的流动换热,指出辐射影响不可忽略.Nield等^[12]采用扩散模型给出了平行通道填充多孔介质的辐射对流换热解析解.然而,上述研究均采用局部热平衡模型.高温固体骨架的辐射换热与流体的对流换热耦合,流体与固体骨架两相之间具有一定温差,应采用考虑流固温差的局部非热平衡模型.另外,多孔介质的辐射求解多采用扩散近似^[13-14]和球形谐波法P1近似^[15-16].

本文针对高温圆管内填充多孔介质的辐射对流耦合换热,采用局部非热平衡模型,利用蒙特卡罗法(Monte Carlo method)求解固体相的辐射传输方程,分析辐射效应对流固温度场的影响.

1 物理模型与控制方程

如图1所示,壁温为 T_w 的圆管内填充均质多孔介质,入口处单相流体均匀流入,流速和温度分别为 u_{in} 和 T_{in} ,图中 R, L 分别为圆管的半径和长度.本文主要考查辐射效应的影响,将流固物性参数取为常数;多孔介质视为吸收、发射、各向同性散射灰体,流体为非参与性介质,即仅考虑固体骨架的辐射换热.多孔内流动为不可压、稳定层流,采用Darcy-Brinkman-Forchheimer方程描述.流固两相处于局部非热平衡,基本控制方程:

$$\nabla \cdot (\rho_f \mathbf{V}_D) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{\phi} \nabla \cdot \left[\rho_f \frac{\mathbf{V}_D \mathbf{V}_D}{\phi} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\frac{\mu_f}{\phi} \nabla \mathbf{V}_D \right] - \frac{\mu_f}{K} \mathbf{V}_D - \frac{\rho_f C_F}{\sqrt{K}} |\mathbf{V}_D| \mathbf{V}_D \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho_f c_p \mathbf{V}_D T_f) = \nabla \cdot (\kappa_{fe} \nabla T_f) + h_{sf} a_{sf} (T_s - T_f) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\kappa_{se} \nabla T_s) + h_{sf} a_{sf} (T_f - T_s) - \nabla \cdot \mathbf{q}_r = 0 \quad (4)$$

式中 ρ_f 为流体密度; $\mathbf{V}_D$ 为Darcy速度; ϕ 为多孔介质孔隙率; μ_f, p 分别为流体动力黏度和压力; K

为多孔介质的渗透率; C_F 为多孔介质Forchheimer系数; c_p 为比定压热容; T 为温度; κ_{fe}, κ_{se} 分别为流体和固体骨架的有效导热系数,本文采用 $\kappa_{fe} = \phi \kappa_f, \kappa_{se} = (1 - \phi) \kappa_s, \kappa_f$ 和 κ_s 分别为流体和固体骨架材质的导热系数; h_{sf} 和 a_{sf} 分别为界面表面传热系数和比面积; $\mathbf{q}_r$ 为辐射热流密度;下标 f, s 分别表示流体和固体.多孔介质的渗透率 K 和Forchheimer系数 C_F 以及比面积 a_{sf} 和流固界面表面传热系数 h_{sf} 采用经验公式确定^[17]:

$$K = \frac{\phi^3 d_p^2}{150(1 - \phi)^2} \quad C_F = \frac{1.75}{\sqrt{150} \phi^{3/2}} \quad (5)$$

$$a_{sf} = 6(1 - \phi)/d_p \quad (6)$$

$$h_{sf} = (2 + 1.1 Re_d^{0.6} Pr^{1/3}) \kappa_f / d_p \quad (7)$$

式中 d_p 为孔径, $Re_d = \rho_f u_d / \mu_f, u$ 为轴向速度.

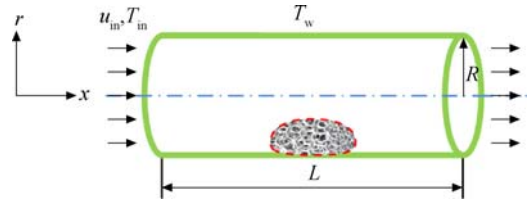


图1 圆管内填充多孔介质示意图

Fig. 1 Schematic map of tube filled with porous media

高温应用中辐射换热的影响极为重要,吸收、发射、散射性介质的辐射传输方程表示为^[18]

$$\mathbf{s} \cdot \nabla I = k I_b - \beta I + \frac{\omega_s}{4\pi} \int_{4\pi} I(\mathbf{s}_i) \Phi(\mathbf{s}_i, \mathbf{s}) d\Omega_i \quad (8)$$

式中 I 为辐射强度,下标 b 表示黑体; $\mathbf{s}$ 为辐射传输方向矢量; Ω 为立体角; Φ 为散射相函数; k, ω_s 和 β 分别为多孔介质的吸收、散射和衰减系数,可通过公式计算得到^[13]

$$k = 1.5 \epsilon (1 - \phi) / d_p \quad (9)$$

$$\omega_s = 1.5(2 - \epsilon)(1 - \phi) / d_p \quad (10)$$

$$\beta = k + \omega_s = 3(1 - \phi) / d_p \quad (11)$$

式中 ϵ 为固相发射率;进而,式(4)中辐射源项可表示为 $\nabla \cdot \mathbf{q}_r = k \left[4\pi I_b - \int_{4\pi} I(\mathbf{s}) d\Omega \right]$.

2 边界条件及数值计算

建立二维轴对称模型,利用SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)算法数值求解流场与温度场,边界条件设置如下^[19]:

$$x = 0: \quad u = u_{in}, \quad v = 0, \quad T_f = T_{in},$$

$$\partial T_s / \partial x = 0, \quad I = \sigma T_{ci}^4 / \pi;$$

$$x = L: \quad \partial u / \partial x = \partial v / \partial x = \partial T_f / \partial x =$$

$$\partial T_s / \partial x = 0, \quad I = \sigma T_{co}^4 / \pi;$$

$$r = R; \quad u = v = 0, \quad T_i = T_s = T_w,$$

$$I = \epsilon_w I_{bw} + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} \int_{n \cdot s < 0} I |n \cdot s| d\Omega$$

其中 T_{ci} , T_{co} 分别为计算域入口和出口等效黑体温度, 这里取 $T_{ci} = T_{in}$, $T_{co} = T_s(L)$; ϵ_w 为壁面发射率; v 为径向速度; n 为壁面法向矢量; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; I_{bw} 为壁面温度的黑体辐射强度。

采用蒙特卡罗法求解固体骨架的辐射换热, 基本原理见文献[18], 利用归一化的辐射传递系数 R_{ij}^* 及其互易性, i, j 为离散单元序号, 体积为 ΔW_j 的离散单元 j 的辐射换热源项可表示为

$$-\nabla \cdot q_{ij} = \sum_i R_{ij}^* \sigma (T_i^4 - T_j^4) / \Delta W_j \quad (12)$$

3 计算结果分析

3.1 计算可靠性

本文采用的蒙特卡罗法求解辐射对流耦合换热问题的程序已由杜胜华、夏新林等^[20-21]充分验证和使用。采用本文方法对圆管内填充多孔介质的流动问题进行模拟, 图 2 为 $K/R^2 = 10^{-3}$ 充分发展时无量纲速度分布曲线, 与 Morosuk^[22] 结果基本一致。另外, 图 3 为不考虑辐射效应, 采用局部非热平衡模型模拟等壁温边界下圆管内填充多孔介质流动换热的温度结果, 基本参数: $T_i(0, r) = T_s(0, r) = T_{in}$, $\rho_f \phi C_F u_{in} D^2 / (\mu_t \sqrt{K}) = 1$, $K / (\phi D^2) = 10^{-6}$, $h_{sf} a_{sf} D^2 / \kappa_{te} = 0.5$, $\rho_f u_{in} D / (\phi \mu_t) = 10$, $\rho_f c_p u_{in} D / \kappa_t = 10$, $\kappa_{te} / \kappa_{se} = 10$, D 为圆管直径, 计算结果与 Khashan 等^[23] 基本符合, 说明了本文方法的可靠性。

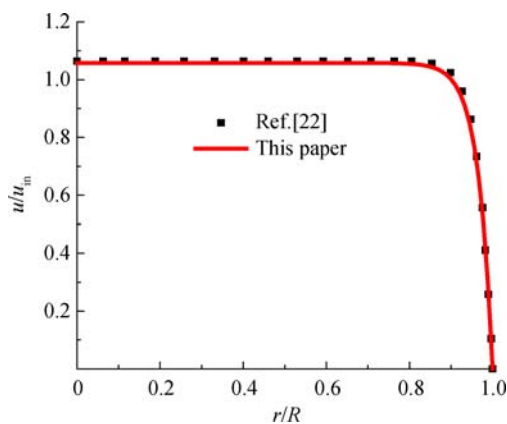


图 2 圆管内填充多孔介质充分发展速度分布
($K/R^2 = 10^{-3}$)

Fig. 2 Fully developed velocity distribution in a tube filled with porous media ($K/R^2 = 10^{-3}$)

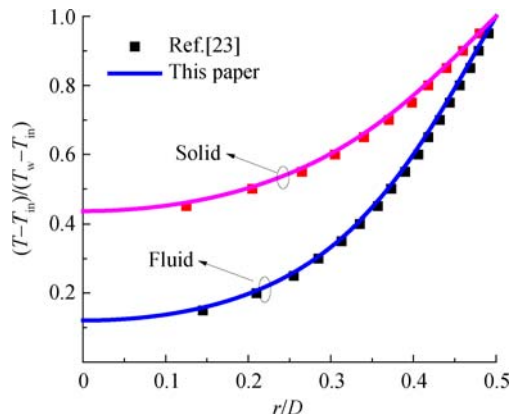


图 3 径向温度分布计算结果与文献[23]比较
($x = 0.2D$, 不考虑辐射效应)

Fig. 3 Comparison of the radial temperature distribution between this paper and Ref. [23]
($x = 0.2D$, without radiation)

3.2 辐射效应对温度影响

本文基本计算参数: $R = 0.05 \text{ m}$, $L = 1.0 \text{ m}$, $u_{in} = 1.0 \text{ m/s}$, 基本物性参数见表 1。首先, 讨论不考虑固体骨架辐射效应对温度场引起的偏差, 取管壁为黑体 ($\epsilon_w = 1.0$), $\phi = 0.9$, $d_p = 3.0 \text{ mm}$, $\epsilon = 0.92$, $T_w = 1000 \text{ K}$ 进行数值模拟。如图 4 所示, 多孔介质固体骨架辐射对温度场的影响主要在入口段。由于多孔介质的容积换热性能很强, 流固温差沿轴向逐渐减小, 后段逐步达到热平衡, 固体骨架间温差减小, 辐射换热量变小, 热辐射影响减弱。考虑辐射效应时, 两相温度径向变化梯度减小; 经总体比较发现, 不考虑辐射效应, 固体骨架温度最大偏差为 4.9%, 流体温度偏差最大为 4.7%。

表 1 本文计算基本物性参数

Table 1 Physical properties in this paper

参数	数值	
	流体	固体
$\rho / (\text{kg/m}^3)$	1.205	3200
$c_p / (\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	1005	750
$\kappa / (\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	0.0259	80
$\mu / 10^{-5} (\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}))$	1.81	

不同管壁温度 $T_w = 800, 1000, 1200, 1500 \text{ K}$ 时, 不考虑辐射效应时轴向温度场偏差曲线见图 5, 定义偏差参数 $\xi = (T_r - T_n) / T_r \times 100\%$, T_n , T_r 分别为不考虑辐射与考虑辐射时的温度。由图可知, 在 $x/D = 1$ 附近偏差最大, 4 种壁温条件下最大偏差分别为: 2.4%, 4.9%, 8.6% 和 16%。可

见,在壁温 $T_w \geq 1000$ K 时辐射作用开始变得明显,忽略辐射会导致温度场偏差较大。

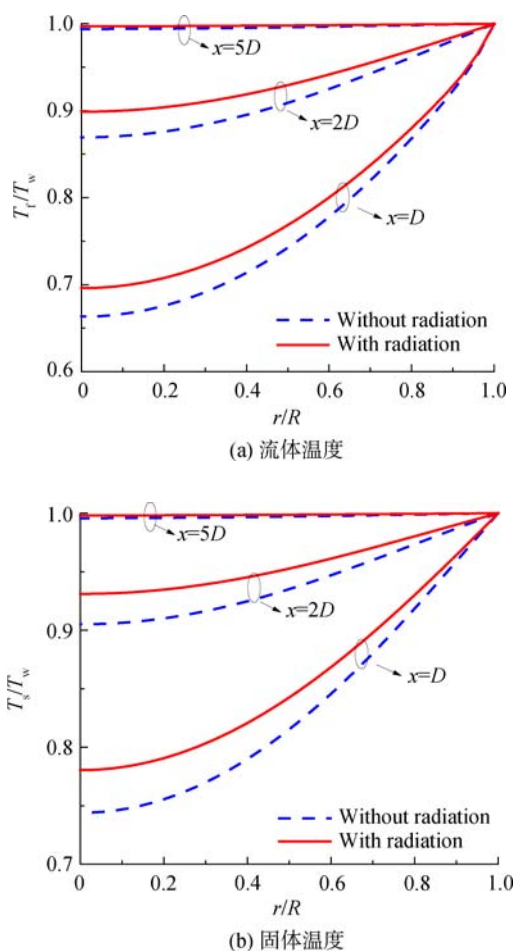


图4 不考虑辐射效应引起温度场的差异

Fig. 4 Temperature discrepancy without radiation

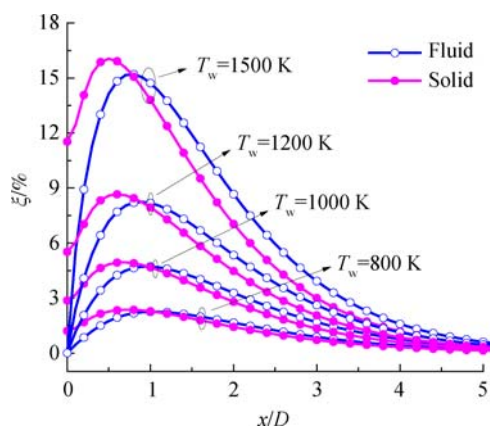


图5 不同壁温条件下不考虑辐射效应引起的轴向温度场偏差

Fig. 5 Axial temperature discrepancy without radiation at different wall temperatures

3.3 壁面发射率影响

图6为 $T_w = 1000$ K, 不同壁面发射率 $\epsilon_w = 0.4, 0.7, 1.0$ 在 $x = D$ 处径向温度场比较, 其中 T 为温度. 可见, 壁面发射率对温度场有单调影响作用, 但其影响不大. 结合图7可以看出, 壁面发射率变大, 壁面对固体骨架的辐射换热增强, 其中 q_r, q_w 为固相壁面辐射热流密度和壁面总热流密度. 发射率增大, 固体骨架温度升高, 由于对流换热性能强, 进而流体温度也升高, 但两相温度总体升高比例均小于1%; 进一步计算发现, 当壁温为1500 K 时其比例小于3%.

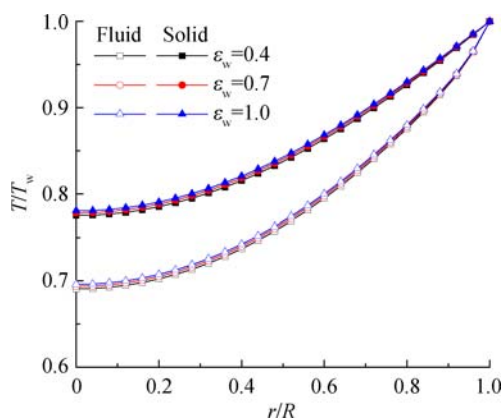


图6 壁面发射率对温度分布的影响 ($x = D$)

Fig. 6 Effects of the wall emissivity on the temperature distribution ($x = D$)

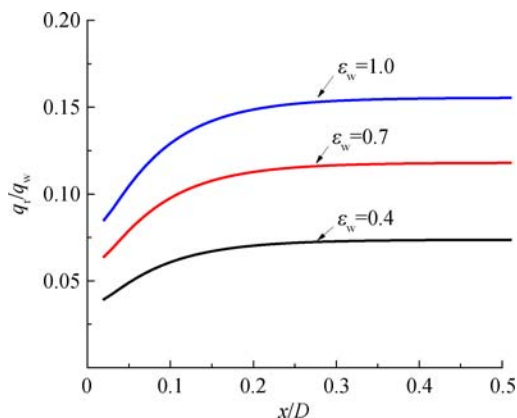


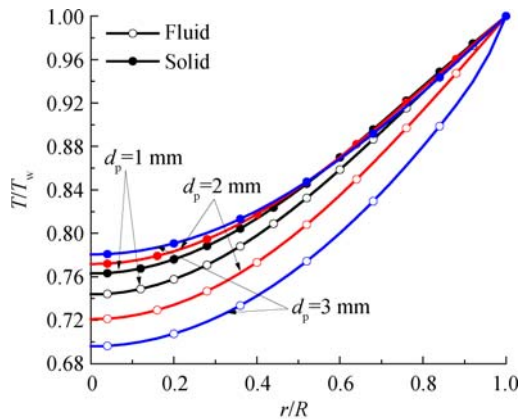
图7 壁面发射率对壁面辐射热流密度所占比例的影响

Fig. 7 Effect of the wall emissivity on ratio of the wall radiative heat flux

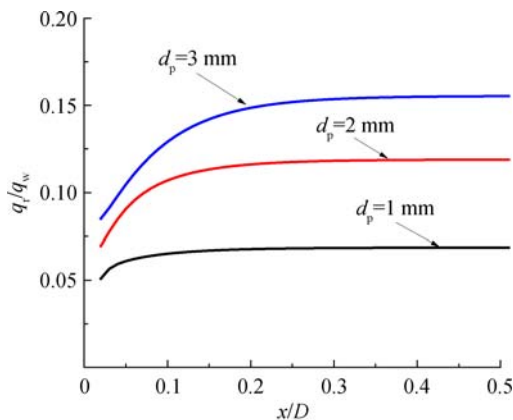
3.4 结构参数影响

多孔介质的孔隙率和孔径对固相辐射的影响主要体现在辐射物性的变化(见式(9)和式(10)). 壁温 $T_w = 1000$ K, 孔隙率 $\phi = 0.9$, 不同孔径 $d_p =$

1.0, 2.0, 3.0 mm 时 $x=D$ 径向温度和沿程壁面辐射热流密度分布见图 8。孔径越大, 衰减系数越小, 固相光学厚度减小, 热辐射影响区域增大, 壁面辐射热流密度占比增加; 另外, 孔径增大, 比面积减小, 对流换热强度减弱, 固相和流体的温差变大; 辐射对流两者耦合对温度场起作用。图 9 为孔

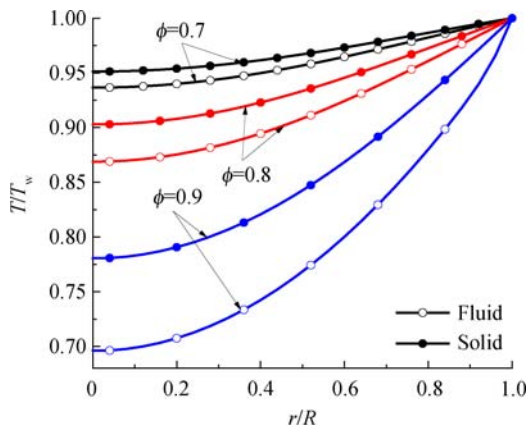


(a) 温度分布

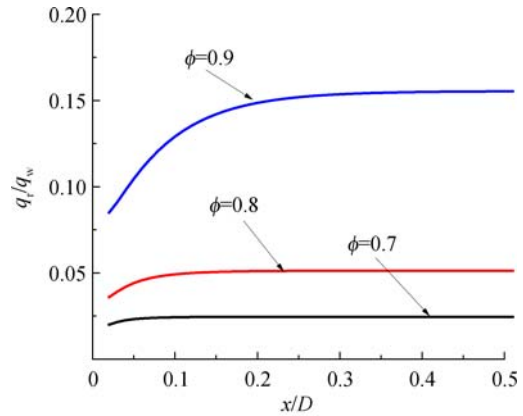


(b) 辐射热流密度分布

图 8 孔径对温度分布和壁面辐射热流密度的影响
Fig. 8 Effects of the pore diameter on the temperature distribution and wall radiative heat flux



(a) 温度分布



(b) 辐射热流密度分布

图 9 孔隙率对温度分布和壁面辐射热流密度的影响

Fig. 9 Effects of the porosity on the temperature distribution and wall radiative heat flux

径 $d_p=3$ mm, 不同孔隙率 $\phi=0.7, 0.8, 0.9$ 的模拟结果。类比孔径影响分析可知, 孔隙率越大, 衰减系数越小, 壁面辐射热流密度占比增大; 另外, 固相和流体的温差也变大。可见, 辐射效应在大孔径和大孔隙率情况体现明显, 与对流相互耦合形成多孔介质温度场。

4 结 论

本文对等壁温边界下圆管内填充多孔介质的辐射对流耦合换热进行了数值模拟, 采用蒙特卡罗法对固体骨架辐射换热进行求解, 分析辐射效应对温度场的影响。由结果分析初步得出以下结论:

1) 多孔介质高温应用中, 固体骨架辐射效应对流动换热影响明显。辐射效应对入口段温度场影响较大, 相对于忽略辐射效应, 流固温度均有所增高; 当壁温为 1500 K 时, 不考虑辐射换热导致的最大温度偏差为 16%。

2) 壁面发射率越大, 壁面辐射热流密度占比增加; 固体骨架和流体温度略有提高, 但温度数值变化较小, 壁温为 1000 K 时发射率对温度影响小于 1%, 壁温为 1500 K 时小于 3%。

3) 多孔结构参数通过辐射物性的改变对辐射换热产生影响。孔径越大或孔隙率越大, 多孔介质的衰减系数减小, 壁面辐射热流密度比例增大, 辐射效应更加明显。

参考文献:

- [1] Wan Z M, Guo G Q, Su K L, et al. Experimental analysis of flow and heat transfer in a miniature porous heat sink for high heat flux application[J]. International Journal of

- Heat and Mass Transfer, 2012, 55(15): 4437-4441.
- [2] Ávila-Marín A L. Volumetric receivers in solar thermal power plants with central receiver system technology: a review[J]. Solar Energy, 2011, 85(5): 891-910.
- [3] Mujeeb M A, Abdullah M Z, 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.
- [4] 张龙, 许全宏, 张弛, 等. 多孔介质表面预混火焰熄灭特性实验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(4): 801-806.
ZHANG Long, XU Quanhong, ZHANG Chi, et al. Experiment of blow-out performance of premixed flame on porous media surface[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(4): 801-806. (in Chinese)
- [5] Liu Y Q, Jiang P X, Jin S S, et al. Transpiration cooling of a nose cone by various foreign gases[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(23): 5364-5372.
- [6] Zhao C Y. Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(13): 3618-3632.
- [7] Xu H J, Qu Z G, Tao W Q. Thermal transport analysis in parallel-plate channel filled with open-celled metallic foams[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011, 38(7): 868-873.
- [8] Ouyang X L, Vafai K, Jiang P X. Analysis of thermally developing flow in porous media under local thermal non-equilibrium conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 67: 768-775.
- [9] Mahmoudi Y, Karimi N. Numerical investigation of heat transfer enhancement in a pipe partially filled with a porous material under local thermal non-equilibrium condition[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 68: 161-173.
- [10] Chen X L, Sutton W H. Enhancement of heat transfer: combined convection and radiation in the entrance region of circular ducts with porous inserts[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(25): 5460-5474.
- [11] Andreozzi A, Bianco N, Manca O, et al. Numerical analysis of radiation effects in a metallic foam by means of the radiative conductivity model[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 49(1): 14-21.
- [12] Nield D A, Kuznetsov A V. Forced convection in cellular porous materials: effect of temperature-dependent conductivity arising from radiative transfer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(13): 2680-2684.
- [13] Wang F Q, Shuai Y, Tan H P, et al. Heat transfer analyses of porous media receiver with multi-dish collector by coupling MCRT and FVM method[J]. Solar Energy, 2013, 93: 158-168.
- [14] Dehghan M, Rahmani Y, Ganji D D, et al. Convection-radiation heat transfer in solar heat exchangers filled with a porous medium: homotopy perturbation method versus numerical analysis[J]. Renewable Energy, 2015, 74: 448-455.
- [15] Wu Z Y, Caliot C, Flamant G, et al. Coupled radiation and flow modeling in ceramic foam volumetric solar air receivers[J]. Solar Energy, 2011, 85(9): 2374-2385.
- [16] Wang F Q, Tan J Y, Shuai Y, et al. Thermal performance analyses of porous media solar receiver with different irradiative transfer models[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 78: 7-16.
- [17] Alazmi B, Vafai K. Constant wall heat flux boundary conditions in porous media under local thermal non-equilibrium conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(15): 3071-3087.
- [18] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射传输的数值计算[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 18-41.
- [19] Öchsner A, Murch G E, de Lemos M J. Cellular and porous materials: thermal properties simulation and prediction[M]. Weinheim, Germany: John Wiley & Sons, 2008: 165-197.
- [20] 杜胜华, 夏新林. 气动加热下高温陶瓷材料的红外辐射机理与特性[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(4): 268-272.
DU Shenghua, XIA Xinlin. Infrared radiation of high temperature ceramics under aerodynamic heating[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2010, 29(4): 268-272. (in Chinese)
- [21] 夏新林, 任德鹏, 董士奎, 等. 管内耦合换热的辐射热流特征及抽样模式比较[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(2): 287-289.
XIA Xinlin, REN Depeng, DONG Shikui, et al. Radiative heat flux characteristics of coupled heat transfer in tubes and comparison of random sampling modes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(2): 287-289. (in Chinese)
- [22] Morosuk T V. Entropy generation in conduits filled with porous medium totally and partially[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(12): 2548-2560.
- [23] Khashan S A, Al-Amiri A M, Al-Nimr M A. Assessment of the local thermal non-equilibrium condition in developing forced convection flows through fluid-saturated porous tubes[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(10): 1429-1445.

(编辑: 陈越)