

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.04.006

非均匀温度边界下多孔介质太阳能吸热管内非达西强迫对流传热数值研究

钟家伦^{1,2}, 李培超^{2,3*}

(1. 徐州徐工随车起重机有限公司, 江苏 徐州 221004;
2. 上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620; 3. 上海交通大学 工程热物理研究所, 上海 200240)

摘要:针对太阳能集热器的多孔介质吸热管部件工作时,存在受热不均匀而引起剧烈的温度循环变化和交变热应力所导致吸热管出现疲劳破坏的问题,开展了三维数值模拟。动量方程采用 Brinkman 模型,能量方程采用非局部热平衡下的双方程模型。在入口温度非均匀而壁面恒温(工况1)和入口恒温而壁面温度非均匀(工况2)2种常见工况下,考察多孔介质太阳能吸热管内非达西强迫对流传热过程,并采用无量纲形式对问题进行简化。研究结果表明:无量纲速度参数对吸热管内对流传热过程影响显著, B_i 增大,流体和固体骨架温差减小。通过改变入口和壁面受热条件以及合理的控制参数范围可以有效地降低多孔介质太阳能吸热管内的最大温差,从而改善吸热管的工作效率,延长使用寿命。

关键词:多孔介质太阳能吸热管;非均匀温度边界;非达西;强迫对流传热

中图分类号:TK121 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)04-0030-06

Numerical Simulation of Non-Darcy Forced Convection Heat Transfer in Porous Solar Receiver Pipe under Non-Uniform Temperature Boundary

ZHONG Jialun^{1,2}, LI Peichao^{2,3*}

(1. Xuzhou Xugong Truck Crane Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu 221004, China;
2. School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
3. Institute of Engineering Thermophysics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: 3D numerical simulation was carried out for the fatigue failure in a working porous solar receiver pipe because of temperature cyclic change and alternating thermal stress caused by non-uniform heating. The momentum equation was formulated based on the Brinkman model, and the energy equations were established following the two-equation model under non-local thermal equilibrium. The non-darcy forced convection heat transfer in a porous solar receiver pipe under non-uniform entrance temperature but uniform wall temperature (Case1) and uniform entrance temperature but non-uniform wall temperature (Case2) boundary condition was investigated. The numerical results show that the parameters of dimensionless velocity field have distinct effect on the convection heat transfer process, the temperature difference between fluid and solid phases decreases with B_i number increases. Changing the heating conditions of entrance and wall and controlling the range of parameters reasonably can decrease the maximal temperature difference in porous solar receiver pipe effectively, which can improve the working efficiency of porous solar receiver pipe and extend its service life.

Keywords: porous solar receiver pipe; non-uniform temperature boundary; non-darcy; forced convection heat transfer

太阳能吸热管是太阳能热利用装置的核心部件,其热转换效率直接影响到整个太阳能系统的效率和经济性。由于太阳能在时间上的间歇性与空间上的不均

匀性,吸热管表面热流不断变化,吸热器在运行过程中承受反复的温度变化,从而引起管壁的机械应力。因此,对于周向非均匀温度或热流条件下太阳能吸热管

收稿日期:2018-01-03;修回日期:2018-03-25

基金项目:中石油-中科院重大战略合作项目(2015A-4812)。

第一作者简介:钟家伦(1992),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为多孔介质传热传质。E-mail:allen_zjl8643@163.com

内部的流动和传热研究越来越受到研究者的关注,崔文智等^[1]通过数值模拟的方式对太阳能槽式吸热管内流体和固体的耦合传热行为进行了考察,在此研究中他们设定矩形吸热管壁面热流非均匀分布,结果显示太阳能吸热管在非均匀热流作用下其管壁温度分布不均匀,周向温度梯度在受热和非受热交界面附近的变化较为剧烈。常春等^[2]通过实验研究和数值计算相结合的方式对太阳能高温吸热管内湍流传热特性进行了研究,并拟合出周向非均匀热流边界条件下太阳能高温吸热管内外壁面温度分布规律的余弦函数,结果显示,吸热管外壁的最高温度出现在圆心角为 180° 处,即管壁承受热流的最高位置。

由于多孔介质流动和传热现象在自然界存在的普遍性和应用的广泛性,以及其流动和传热机制的复杂性使其一直成为化工、环境、机械、航空和核能等领域长期研究的热点^[3-6]。已有的关于太阳能吸热管的研究大多集中于处理真空状态下管内流动与传热问题^[7-11],而对于多孔介质填充太阳能吸热管的研究相对较少^[12-13],特别是对于吸热管内非达西(Darcy)流动下的研究报道得更少。

在考虑多孔介质太阳能吸热管内流体做非达西(Darcy)流动的前提下,笔者采用非局部热平衡模型,对入口温度非均匀而壁面恒温(工况1)以及入口恒温而壁面温度非均匀(工况2)2种常见工况时吸热管内部稳态强迫对流传热进行了数值模拟,研究流体非达西流动及2种非均匀受热条件对太阳能吸热管内部强迫对流与传热的影响规律,对降低热力循环对多孔介质太阳能吸热管低周疲劳的影响起到了至关重要的作用,有助于延长太阳能集热器的使用寿命。

1 物理问题及数值方法

1.1 控制方程及边界条件

如图1所示,三维多孔介质太阳能吸热管壁面为不可渗透固体壁面,管道内由均匀且各向同性的多孔介质(碳化硅陶瓷)填充,稳态理想流体(空气或水)由吸热管的入口流向吸热管出口。忽略自然对流与辐射换热,忽略热物性随温度的变化,忽略轴向导热,在上述假设下,考察非均匀温度边界下多孔介质太阳能吸热管内的 Brinkman 流动和传热问题,此时在三维圆柱坐标系下的控制方程为:

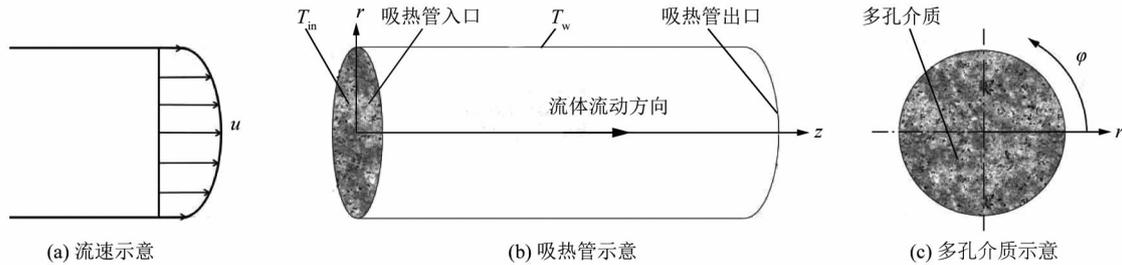


图1 多孔介质太阳能吸热管示意图

Figure 1 Schematic diagram of porous solar receiver pipe

1) Brinkman 动量守恒方程

$$\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \varphi^2} \right) - \frac{\mu}{K} u - \frac{dp}{dz} = 0. \quad (1)$$

2) 固体骨架能量守恒方程

$$k_{s,\text{eff}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial T_s^2}{\partial \varphi^2} \right) + h(T_f - T_s) = 0. \quad (2)$$

3) 流体能量守恒方程

$$k_{f,\text{eff}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial T_f^2}{\partial \varphi^2} \right) - h(T_f - T_s) = \rho c_p u \frac{\partial T_f}{\partial z}. \quad (3)$$

式中: u 为流体流速, p 为压力, μ_{eff} 为流体的有效动力

黏度, μ 为流体的实际动力黏度, K 为多孔介质渗透率, T_s 为固体骨架的温度, T_f 为流体的温度, r , φ 和 z 分别为圆柱坐标系下多孔介质太阳能吸热管的半径、圆周角和轴向长度, h 为多孔介质内流体与固体骨架之间的表面换热系数, $k_{s,\text{eff}}$ 和 $k_{f,\text{eff}}$ 分别为固体骨架和流体的有效导热系数, ρ 为流体的密度, c_p 为流体的比热容。

固体骨架和流体的有效导热系数:

$$k_{s,\text{eff}} = (1 - \phi) k_s, k_{f,\text{eff}} = \phi k_f. \quad (4)$$

式中: ϕ 为多孔介质孔隙率, k_s , k_f 分别为固体骨架和流体的实际导热系数。

考虑多孔介质太阳能吸热管壁面处流体速度无滑移的情况,速度边界条件可以写成

$$u|_{r=r_0} = 0. \quad (5)$$

考虑多孔介质太阳能吸热管入口温度非均匀而壁面恒温的情况,此时的边界条件可以写成:

$$T_f|_{z=0} = T_{in}, T_{in} = f(r, \varphi); \quad (6)$$

$$T_s|_{r=r_0} = T_f|_{r=r_0} = T_w. \quad (7)$$

式中: r_0 为多孔介质太阳能吸热管的实际半径, T_{in} 为吸热管入口流体温度, T_w 为吸热管壁面温度。

考虑多孔介质太阳能吸热管入口恒温而壁面温度非均匀的情况,此时的边界条件可以写成:

$$T_f|_{z=0} = T_{in}, \quad (8)$$

$$T_s|_{r=r_0} = T_f|_{r=r_0} = T_w, T_w = f(\varphi). \quad (9)$$

引入如下无量纲参数定义^[14]:

$$R = \frac{r}{r_0}; Z = \frac{z}{r_0}; U = \frac{\mu u}{r_0^2(-dp/dz)}; \theta_s = \frac{T_s - T_w}{T_0 - T_w}; \theta_f = \frac{T_f - T_w}{T_0 - T_w}; Bi = \frac{hr_0^2}{k_{s,eff}}; Pe = \frac{\rho c_p(-dp/dz)r_0^3}{\mu k_{s,eff}}; \kappa = \frac{k_{f,eff}}{k_{s,eff}}; M = \frac{\mu_{eff}}{\mu}; Da = \frac{K}{r_0^2}. \quad (10)$$

式中: R 和 Z 分别为圆柱坐标系下多孔介质太阳能吸热管的无量纲半径和无量纲轴向长度; U, θ_s 和 θ_f 分别为流体的无量纲速度、固体骨架的无量纲温度和流体的无量纲温度; T_0 为参考温度, Pe 为 Peclet 数, Bi 为 Biot 数, Da 为 Darcy 数, κ 为流体有效导热系数与固体骨架有效导热系数之比, M 为流体有效动力黏度与实际动力黏度之比。

此时无量纲控制方程可以表示为:

$$M(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial U}{\partial \varphi^2}) - \frac{1}{Da}U + 1 = 0; \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \theta_s}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta_s}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial \varphi^2} + Bi(\theta_f - \theta_s) = 0; \quad (12)$$

$$\kappa(\frac{\partial^2 \theta_f}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta_f}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial \varphi^2}) - Bi(\theta_f - \theta_s) = PeU \frac{\partial \theta_f}{\partial Z}. \quad (13)$$

考虑多孔介质太阳能吸热管壁面处流体速度无滑移的情况,速度无量纲边界条件可以写成

$$U|_{R=1} = 0. \quad (14)$$

多孔介质太阳能吸热管入口温度非均匀而壁面恒温无量纲边界条件可以写成:

$$\theta_f|_{z=0} = f(R, \varphi), f(R, \varphi) = 1 + R \cos \varphi; \quad (15)$$

$$\theta_s|_{R=1} = \theta_f|_{R=1} = 0. \quad (16)$$

多孔介质太阳能吸热管入口恒温而壁面温度非均匀无量纲边界条件可以写成:

$$\theta_f|_{z=0} = 0; \quad (17)$$

$$\theta_s|_{R=1} = \theta_f|_{R=1} = f(\varphi), f(\varphi) = 1 + \cos \varphi. \quad (18)$$

1.2 数值方法

为了求解多孔介质太阳能吸热管内的流动和传热问题,采用 COMSOL Multiphysics 中的 PDEs 模块对该问题开展有限元数值模拟,利用了 COMSOL 中的 SIMPLE 算法,求解容差设为 1×10^{-9} ,文中设定多孔介质太阳能吸热管的无量纲半径为 1,长度为 50。将耦合的偏微分方程式(11)~(13)以系数矩阵的形式重新处理并输入到 COMSOL 中,速度和温度边界条件式(14)~(18)采用狄氏边界条件,最后通过 COMSOL 内置的稳态求解器进行计算并获得该问题的数值模拟结果。

2 结果与分析

2.1 无量纲速度的参数分析

图 2(a) 为多孔介质太阳能吸热管内流体的速度随 Da 数的变化规律,无论 Da 数如何变化,无量纲速度都随着半径的增大而减小,且最终都趋于 0;此外,当 Da 增大时,多孔介质渗透能力增强,流体可以快速地多孔介质吸热管中流动;当 $Da = 0.01$ 时,无量纲速度几乎不随半径发生变化且接近于 0,此时流体在多孔介质吸热管中流动非常缓慢。图 2(b) 表示流体有效动力黏度与实际动力黏度之比 M 对无量纲速度的影响。无量纲速度随着 M 的增大而减小,当 $M = 10$ 时,无量纲速度几乎为 0,这是由于此时流体自身的内摩擦阻力过大,阻碍了流体的运动,从而造成无量纲速度过小的现象。而在强迫对流进程中,流体流动速度对于温度场的影响是巨大的,故速度无量纲参数的选取对于吸热管内流体流动乃至对流传热过程起到十分关键的作用。

2.2 无量纲温度的参数分析

在 2 种非均匀温度边界影响下,考察多孔介质太阳能吸热管内流体和固体骨架的无量纲温度周期变化的情况,此时取 $Da = 1, M = 0.1, Bi = 10, Pe = 50$ 以及 $\kappa = 0.5$ 。图 3(a) 表示工况 1 下无量纲温度随圆周角 φ 的变化情况。当入口温度非均匀而壁面恒温的情况下,多孔介质太阳能吸热管内固体骨架和流体无量纲温度随圆周角 φ 的变化情况主要取决于流体的入口温度,由于入口温度函数为余弦形式,故此时流体和固体骨架无量纲温度分布也呈现周期性余弦变化。图 3(b) 表示工况 2 下无量纲温度随圆周角 φ 的变化情况。类似地,此时无量纲温度与壁面温度函数直接相关。同时注意到,由于工况 1 中入口流体温度高于壁

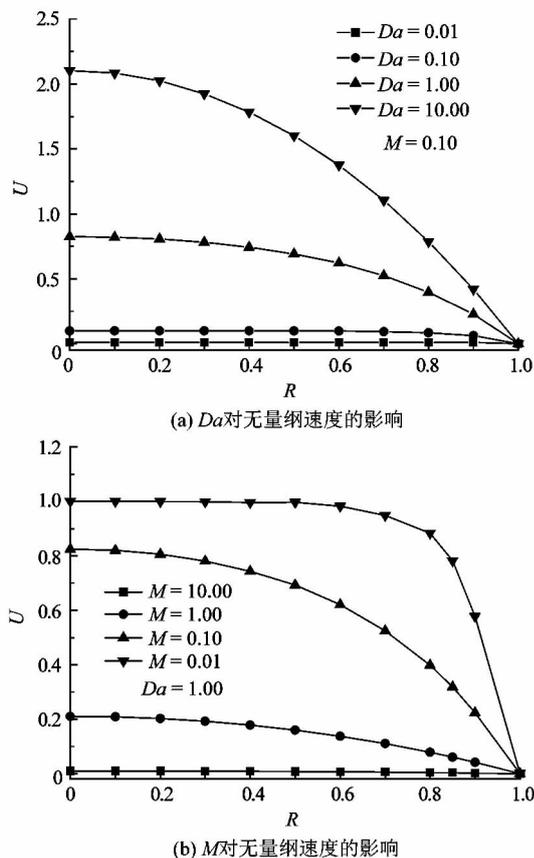


图2 无量纲速度的影响因素
Figure 2 Influencing factors of dimensionless velocity

面温度,吸热管内流体的温度也较固体骨架温度更高,工况2则相反。工况1最高和最低温度间的温差较工况2小,吸热管承受的温差越小,温度变化越平缓,受到的循环热应力影响越弱,对于吸热管造成的疲劳破坏程度也越小,故工况1下太阳能集热器的使用寿命较工况2更长。

图4(a)给出了 Da 数对于2种边界条件下固体骨架和流体无量纲温度分布的影响。由图5(a)可以看出,工况1中无量纲温度随 Da 数的增大而增大;工况2中无量纲温度随 Da 数的增大而减小,这说明随着多孔介质渗透能力增强。2种工况下流体和固体骨架无量纲温度随 Da 数的变化呈现相反的趋势,且在 $Da < 3$ 时变化较为明显。图4(b)表示了 M 对于2种边界条件下固体骨架和流体无量纲温度分布的影响。从图中可以看出,当 M 增大时,工况1的无量纲温度减小而工况2的无量纲温度增大,且在 $M < 1$ 的范围内变化较为明显,在 $M > 1$ 的范围内,无量纲温度都几乎不再变化且趋于各自的渐进值。

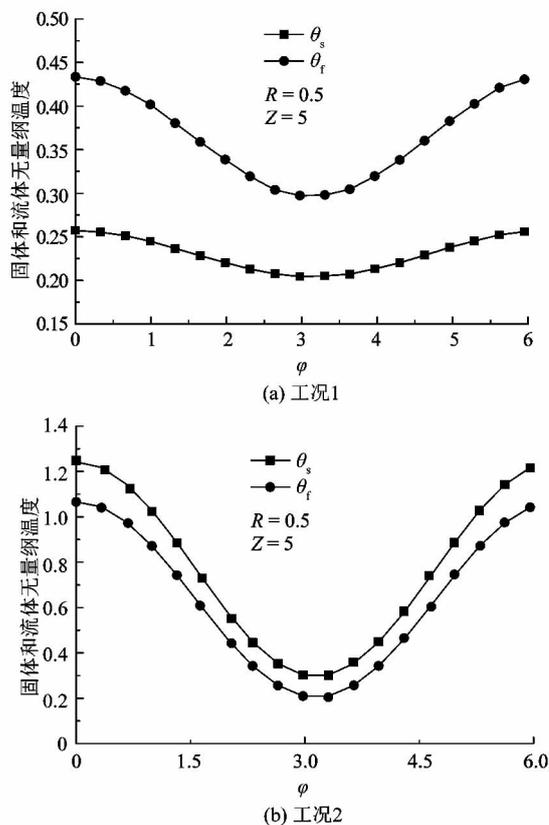
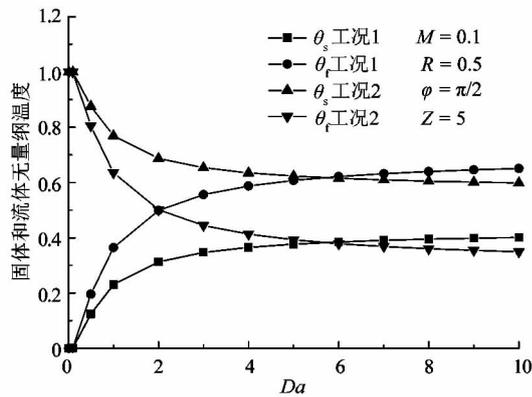


图3 无量纲温度随圆周角 φ 的变化情况
Figure 3 Change of dimensionless temperature with circumference angle φ

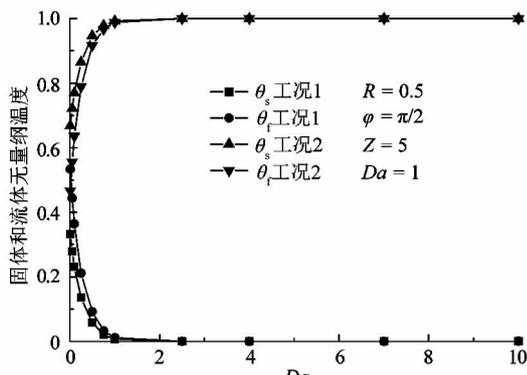
表1给出了 κ 值充分小时对无量纲温度的影响。由表中数据可知,当 κ 很小时,无量纲温度随着 κ 变化幅度非常小;而大量实验和工程实际表明 κ 的取值通常亦很小,也就是说, κ 对于多孔介质太阳能吸热管内温度的影响在多数情况下可忽略不计。 κ 值较大的情况如图5所示。取 $Da = 1$ 以及 $M = 0.1$,可以看出,当 κ 增大时,工况1的无量纲温度减小,工况2的无量纲温度增大,且增减速率都逐渐变缓。

表1 κ 充分小对2种工况下无量纲温度的影响
Table 1 Effect of small κ on dimensionless temperature under two working conditions

流体有效导热系数与固体骨架有效导热系数之比 k	工况1		工况2	
	固体骨架无量纲温度 θ_s	流体无量纲温度 θ_f	固体骨架无量纲温度 θ_s	流体无量纲温度 θ_f
0.001	0.312 5	0.542 6	0.683 7	0.486 7
0.005	0.316 3	0.542 6	0.678 6	0.478 3
0.010	0.318 1	0.540 4	0.675 6	0.472 8
0.050	0.317 3	0.527 8	0.682 7	0.472 2
0.100	0.309 4	0.509 6	0.690 2	0.494 6



(a) Da 对无量纲温度的影响



(b) M 对无量纲温度的影响

图4 速度无量纲参数对无量纲温度的影响
Figure 4 Effect of dimensionless parameters of velocity on dimensionless temperature

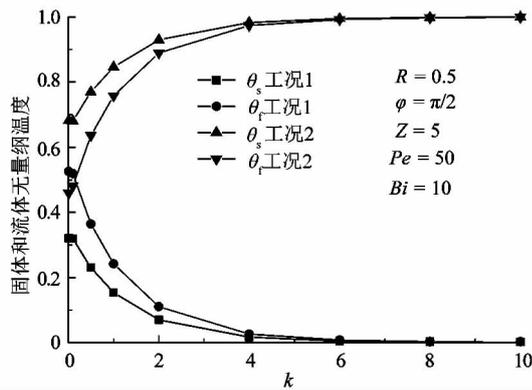


图5 流体有效导热系数与固体骨架有效导热系数之比 κ 对无量纲温度的影响
Figure 5 Effect of ratio of fluid effective thermal conductivity and solid effective thermal conductivity κ on dimensionless temperature

Bi 数为传热学中重要的无量纲参数,表征固体内部单位导热面积上的导热热阻与单位面积上的换热热阻之比。图6给出了 Bi 数对2种工况下吸热管内无量纲温度的影响。从图中可知,2种工况下流体和固

体骨架间的无量纲温差都随着 Bi 数的增大而减小,当 $Bi > 400$ 时,流体和固体骨架无量纲温度已几乎看不出任何差距,这意味着当 Bi 数趋于无穷时,多孔介质太阳能吸热管内流体和固体骨架之间的热交换瞬间完成,非局部热平衡退化至局部热平衡模型。

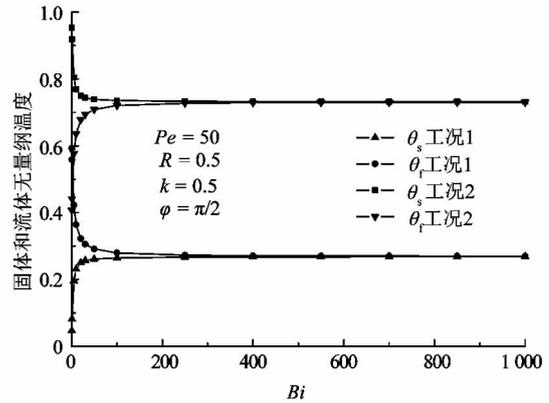


图6 Bi 数对无量纲温度的影响

Figure 6 Effect of Bi on dimensionless temperature

3 结论

在入口温度非均匀而壁面恒温以及入口恒温而壁面温度非均匀2种常见工况下,笔者对多孔介质太阳能吸热管内非达西强迫对流传热问题开展了数值模拟。针对本文研究,可得到以下主要结论:

1) 2种工况下多孔介质太阳能吸热管内无量纲温度随圆周角 φ 呈现余弦形式的周期变化,通过改变入口和壁面非均匀受热的条件可以改善吸热管内最大温差,降低吸热管所受的循环热应力的影响,从而达到延长太阳能集热器使用寿命的目的。

2) 流体速度场的无量纲参数不仅会改变多孔介质太阳能吸热管内流体的流动情况,同时对吸热管内的对流传热过程产生较大的影响。

3) 多数情况下, κ 对于吸热管内温度场的影响可忽略不计, Bi 数趋于无限大时,可以认为流体和固体骨架间不存在温差,非局部热平衡模型退化至局部热平衡模型。

参考文献:

[1] 崔文智,李洪香. 非均匀热流密度下太阳能吸热管的温度特性[J]. 电源技术,2015,39(5):1040.

[2] 常春,张强强,李鑫. 周向非均匀热流边界条件下太阳能高温吸热管内湍流传热特性研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(17):104-109.

[3] VAFAI K,HADIM H A. Handbook of porous media[M]. New York: Taylor & Francis,2005.

(下转第39页)