

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.08.010

非均匀热流边界条件换热管内流场优化研究*

于 萍¹, 耿伟轩², 郭华锋¹

(1. 徐州工程学院 机电工程学院, 江苏 徐州 221018; 2. 江苏省秦淮河水利工程管理处, 江苏 南京 210000)

摘要:针对太阳能集热器换热管的强化换热问题,对在周向非均匀热流边界条件下基于场协同理论管内的流场分布进行了研究。采用了数值模拟的方法,利用变分法构造拉格朗日函数,求出了附加体积力的动量方程;并对纵向涡流和换热管传热系数之间的关系进行了归纳,提出了流场优化强化换热,进而提高太阳能热利用率的方法。研究表明:周向非均匀热流边界条件下换热管内纵向涡流可以明显地强化管内的对流换热,但同时流体流动的阻力也随之增大,并且流动阻力的增加幅度要小于对流换热增强的幅度;纵向涡流流速越大,进口流体雷诺数越小,流体具有更为优良的综合强化换热特征。

关键词:强化传热;非均匀热流;纵向涡;场协同理论

中图分类号:TK124;TK513.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)08-0833-05

Optimization for inner flow field of tube with non-uniform heat flux boundary condition

YU Ping¹, GENG Wei-xuan², Guo Hua-feng¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China;

2. Jiangsu Province Qinhuai River Water Conservancy Project Management Office, Nanjing 210000, China)

Abstract: Aiming at heat transfer enhancement of solar collector tubes, the flow field distribution based on the field synergy principle with circumferentially non-uniform heat flux boundary condition was investigated. The momentum equation with a special additional volume force was calculated with constructing Lagrange function using variational method through the numerical simulation. The relationship of longitudinal vortices and heat transfer coefficient was established. The method of heat transfer enhancement with optimizing the flow field and improving the rate of usage for solar energy was put forward. The results show that under the condition of non-uniform heat flux the longitudinal vortices in the heat exchange tube can enhance the heat transfer markedly and the flow resistance increase is similar to heat transfer enhancement. And the increase range of the flow resistance is less than the heat transfer enhancement. The effect of heat transfer of optimize flow field is much higher with greater longitudinal vortex intensity and larger Reynolds number.

Key words: heat transfer enhancement; non-uniform heat flux; longitudinal vortices; field synergy principle

0 引言

太阳能作为一种清洁能源被认为是未来人类最为重要的能源之一^[1]。目前,太阳能的利用主要在产生生活热水方面,通过真空管式或平板式等类型的集热

器来实现,其性能直接影响太阳能的热利用率^[2-4]。由于太阳光照的方向性,集热器中换热管的周向非均匀热边界条件普遍存在于太阳能热利用过程中。

常春等^[5-6]通过实验,并对周向非均匀热流密度边界条件下吸热管壁面温度的分布规律进行了数值模

收稿日期:2017-12-15

基金项目:江苏省高校自然科学基金面上项目(16KJB470016,17KJB460015);江苏省大型工程装备检测与控制重点实验室开放课题基金资助项目(JSKLEDC201411)

作者简介:于萍(1985-),女,江苏徐州人,博士,讲师,主要从事高效传热传质设备及传热强化技术方面的研究。E-mail:yuping050201@163.com

拟,研究发现周向非均匀热流边界条件下吸热管壁温度分布与截面圆心角余弦呈函数关系,经典 Dittus-Boelter 公式不适用于管壁温度分布计算,为了强化吸热管的传热效果,可以采用内插螺旋纽带的方式进行。基于场协同理论;崔文智等^[7]研究了螺旋管在非均匀热流边界条件下的流动传热过程,研究发现非均匀热流边界条件时,曲率较小的螺旋管传热系数大,且曲率较小的螺旋管内场协同角较小;ROLDAN 等^[8-10]研究了周向非均匀热流边界条件下槽式太阳能接收器的温度分布,研究发现通过改变集热器的外部结构,使用合适的换热管材料以及选择合适的聚光角度均可以有效改变换热管壁面温度分布,提高传热系数减小周向温差;SONG 等^[11]在槽式太阳能集热器换热管内放置螺旋翅片,研究发现螺旋翅片的放置可以有效提高换热效率,减小周向温差;孟继安等^[12]基于场协同理论,实验并数值模拟了不连续双斜向内肋管和交叉缩放椭圆管的传热性能,发现两种换热管相比于圆管均可提高传热系数,并改变管内温度分布。

本文采用数值计算的方法,基于场协同理论,研究周向非均匀热流边界条件下集热器中换热管内流场优化对传热系数和流动阻力的影响。

1 计算模型

1.1 计算模型

以太阳能热水器为背景,本研究截取热水器集热器中部分换热管为研究对象。换热管直径为 20 mm,长度为 160 mm,管壁为铜,换热管内充满了工质水,为了模拟太阳光照的方向性,采用周向非均匀加热,换热管及边界条件示意图如图 1 所示。

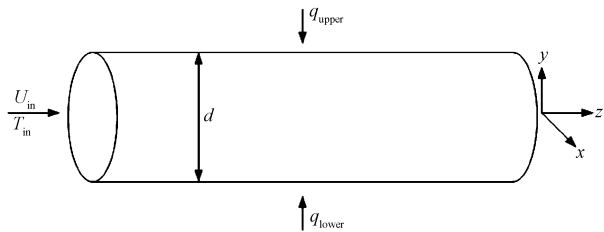


图 1 换热管及边界条件示意图

1.2 数学模型

数学模型成立的假设条件:流动是三维的层流,不可压缩流体,热物性不变。控制方程如下:

根据场协同理论^[13],采用变分法构造拉格朗日函数^[14-16]:

$$J^* = \int_{\Omega} \left\{ \frac{1}{2} \lambda (\nabla T)^2 + C\Phi + A(\lambda \nabla^2 T - \right.$$

$$\left. \rho c_p U \cdot \nabla T) + B \nabla \cdot U \right\} d\Omega \quad (1)$$

式中: Φ —粘性耗散函数; T —温度,K; A, B, C —拉格朗日乘数,其中, C —常数, A, B —速度、温度和空间位置的函数。

$$\Phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (2)$$

根据式(1),分别对温度和速度求变分:

$$-\rho c_p U \cdot \nabla A = \lambda \nabla^2 A - \lambda \nabla^2 T \quad (3)$$

$$\mu \nabla^2 U + \frac{\rho}{2C} A \nabla T + \frac{\nabla B}{2C} = 0 \quad (4)$$

拉格朗日乘数 A 的边界条件为:壁面等温时 $A = 0$,壁面绝热时 $(-\lambda \nabla A) = 0$ 。根据文献^[16]可知, $B = -2CP$,代入式(4)得:

$$\mu \nabla^2 U - \rho U \cdot \nabla U - \nabla P + \left(\frac{\rho c_p}{2C} A \nabla T + \rho U \cdot \nabla U \right) = 0 \quad (5)$$

式(5)相当于有附加体积力的动量方程,体积力 F 使速度场与温度场之间的协同最好,对流换热强度最高。体积力为:

$$F = \frac{\rho c_p}{2C} A \nabla T + \rho U \cdot \nabla U = C_{\phi} A \nabla T + \rho U \cdot \nabla U \quad (6)$$

连续方程为:

$$\nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (7)$$

能量方程为:

$$\rho c_p U \cdot \nabla T = \lambda \nabla^2 T \quad (8)$$

式中: ρ —流体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; μ —流体的动力粘度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; c_p —比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; λ —导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

联合公式(3,5,7,8),可以求出 T, U, A, P 4 个未知变量,进而可以求出动量源项 F 。

1.3 数值模型

本研究截取部分换热管,以其中工质充分发展段为研究对象。网格划分对数值模拟过程中收敛速度和计算精度都有影响,质量好的网格收敛速度快,计算精度高。本文中数值模型采用六面体的结构化网格,局部网格如图 2 所示。

网格独立性验证是计算流体力学对网格划分的基本要求^[17-18]。对计算模型进行 4 种水平的网格划分,当进口流体雷诺数 $Re_{in} = 1\,000.60$ 时,模型出口流体的雷诺数 Re_{out} 的模拟结果如表 1 所示。

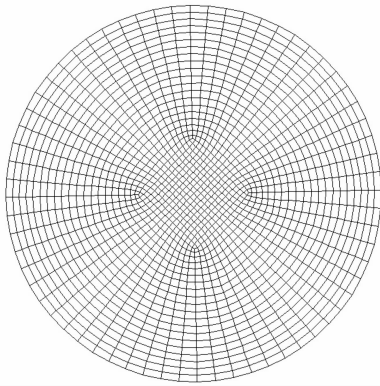


图 2 局部网格

表 1 计算流域网格划分水平

网格水平	单元数	Re_{out}
1	58 560	993. 73
2	245 760	994. 88
3	307 840	994. 94
4	468 480	994. 95

考虑到较细的网格可以充分显示流体区域的流动特征,同时考虑到计算机的计算速度,采用了水平 3 的网格划分,单元数 307 840,面数 933 764,节点数 318 297。

数值模型的进口采用速度入口边界条件,进口水温为 295 K,出口为自由出流边界条件,换热管壁面为周向非均匀加热,热流密度 $q_{upper} = 3\ 000\ W/m^2$, $q_{lower} = 0$ 。采用控制容积法对方程进行离散,速度和压力的耦合采用 SIMPLIC 算法,动量和能量方程的离散均采用 QUICK 格式。

2 计算结果与分析

2.1 模型验证

数值模拟值相对误差分布如图 3 所示。

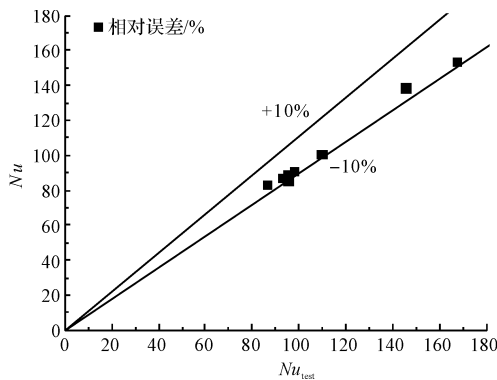


图 3 数值模拟值相对误差分布

本文数值模拟了文献[6]中圆周非均匀热流加热时管内换热情况,并将数值模拟得到的努塞尔数 Nu 与文献中的实验值 Nu_{test} 进行比较。数值模拟值的相对误

差基本分布在 $\pm 10\%$ 以内,证明了该模型的正确性。

2.2 层流对流换热的速度场的优化

流场优化之后的流道横截面速度矢量图如图 4 所示。

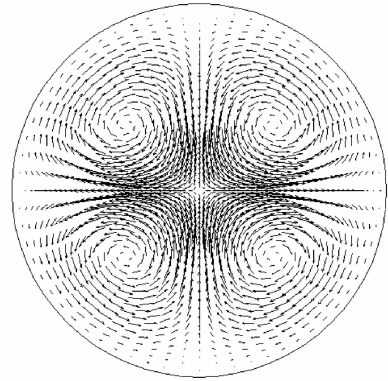


图 4 流场优化之后的流道横截面速度矢量图

流场优化之后的流道横截面温度场如图 5 所示。

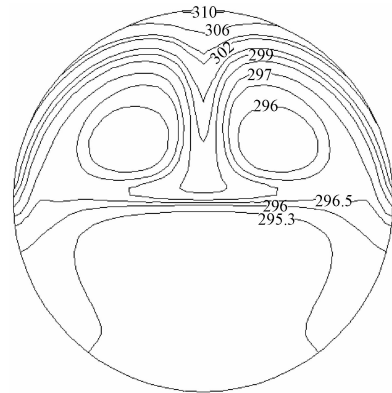


图 5 流场优化之后的流道横截面温度场

流场优化之前的流道横截面温度场如图 6 所示。

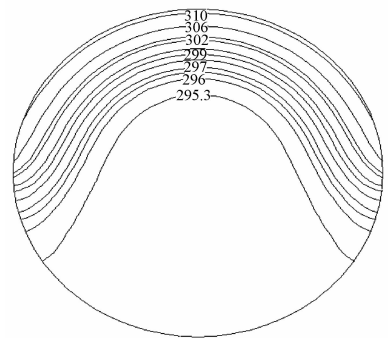


图 6 流场优化之前的流道横截面温度场

数值计算结果表明:基于场协同理论,换热管内存在体积力 F 的作用下产生纵向涡流,相应的温度场也发生了改变,图 4、图 5 是 $C_\phi = 6.95 \times 10^4$, $Re = 100$,轴向截面 $Z = 0.08\ m$ 处的流场优化之后的速度矢量图和温度分布图,与优化之前的图 6 相比较,可以发现管

内出现了 4 个纵向涡,并使温度场发生了较大的变化。总体来看,在速度分量离开壁面的区域,其局域截面近壁温度梯度相当,但是其他壁面,特别是有流体冲向壁面的区域,其近壁温度梯度增加显著。

2.3 涡流强度对对流换热的影响分析

纵向涡作用下对流换热的增强如图 7 所示。

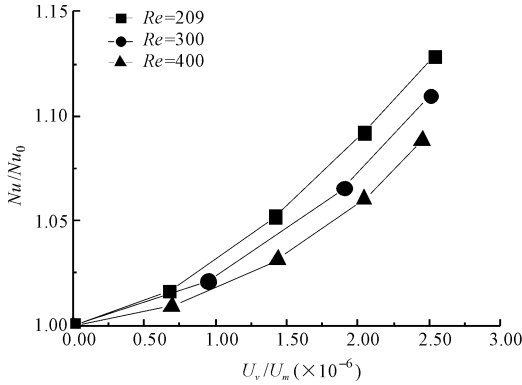


图 7 纵向涡作用下对流换热的增强

图 7 反应了在进口流体雷诺数 Re 不同时,纵向涡流作用下换热管对流换热强度的变化趋势。随着截面平均涡流流速 U_v 增大,纵向涡强度增加。 Nu/Nu_0 (Nu 是流场优化之后的管内平均努塞尔数, Nu_0 是流场优化之前的管内平均努塞尔数) 随着 U_v/U_m (U_v —截面平均涡流流速; U_m —轴向平均速度) 的增大而增大,这是因为流场优化之后产生纵向涡流,而纵向涡流会强化对流换热。从图 7 还可以发现:当 U_v/U_m 相同时,随着 Re 的增大, Nu/Nu_0 是减小的,换热增强的幅度减小。

纵向涡作用下阻力的增加如图 8 所示。

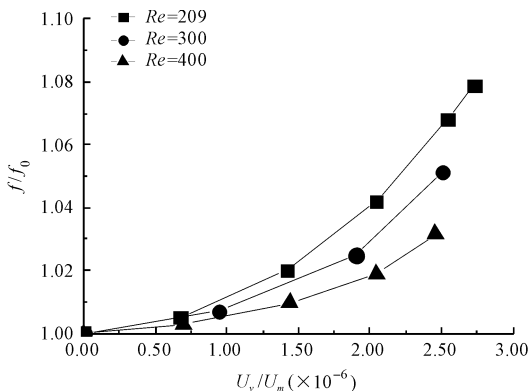


图 8 纵向涡作用下阻力的增加

图 8 反映了在进口流体雷诺数 Re 不同时管内阻力系数 f 随着纵向涡流流速的变化趋势。 f 和换热管进出口的压力差有关,随着截面纵向涡流流速的增大,换热管的沿程损失增大,进而 f 也随之增大,这表明纵向涡的产生会增大流体流动的阻力;并且在 U_v/U_m 相同

时,随着 Re 增大, f/f_0 是减小的,这说明流体流动时受到的阻力增加的幅度随之减小。当 $Re = 209$ 时, U_v/U_m 为 1×10^{-6} 时, Nu 增大了 3.21%, f 增大了 1.17%,说明纵向涡的产生,其对流换热增强的程度要大于流体流动阻力增加的程度。

纵向涡流的产生可以强化管内换热,因此可以通过合适的方法使管内产生多纵向涡流,使换热得到强化而流动阻力不至于增大很多。

2.4 综合性能比较

本研究采用 PEC 作为衡量综合强化传热效果的量,即:

$$PEC = \frac{\frac{Nu}{Nu_0}}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (9)$$

PEC 随 U_v/U_m 变化曲线如图 9 所示。

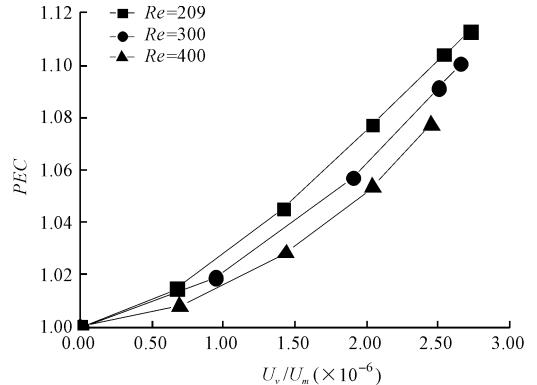


图 9 PEC 随 U_v/U_m 变化曲线

由图 9 可以发现:随着截面纵向涡流流速的增加,综合传热效果提高。当 $U_v/U_m = 2.2 \times 10^{-6}$ 时,雷诺数 Re 为 209、300 和 400 时的 PEC 分别为 1.09、1.07 和 1.06,可以看出雷诺数越小,综合传热效果越好。

3 结束语

本文开展了太阳能集热器换热管在周向非均匀热流边界条件下管内的流场的分析,建立了纵向涡流和换热管传热系数之间的关系,提出了流场优化强化换热的方法,并将优化前后的流场进行了对比,得到以下结论:

(1) 周向非均匀热流边界条件下换热管内纵向涡流可以明显的强化管内的对流换热,但同时流体流动的阻力也随之增大,并且流动阻力的增加幅度要小于对流换热增强的幅度;

(2) 纵向涡流强度越大,对流换热效果越好,随着雷诺数的增加,对流换热增强的幅度减小;



(3) 综合比较强化传热效果指标 PEC 可以发现, 纵向涡流流速越大, 综合强化换热特征越优良。



参考文献 (References):

- [1] 王曙辉, 王红, 余明果, 等. 碟式太阳能聚光器风载仿真[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(12): 4415-4421.
- [2] 颜士峰, 闫崇强, 刘华凯, 等. 典型太阳能集热器热性能研究[J]. 太阳能, 2016(11): 51-55.
- [3] 孙峙峰, 郑瑞澄. 太阳能集热器热性能动态测试方法研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(11): 1194-1199.
- [4] 宋建忠, 张小松. 一种低温太阳能热发电循环系统的理论分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(10): 4075-4080.
- [5] 常春, 李石栋, 李鑫, 等. 周向非均匀热流边界条件下混合熔融盐在太阳能高温吸热管内的强化换热研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(20): 3341-3346.
- [6] 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.
- [7] 崔文智, 尹飞. 非均匀热流边界条件下螺旋管内流动传热的场协同分析[J]. 化工学报, 2014, 65(S1): 229-234.
- [8] ROLDAN M I, VALENZUELA L, ZARZA E. Thermal analysis of solar receiver pipes with superheated steam[J]. *Applied Energy*, 2013, 103(1): 73-84.
- [9] SERRANO-AGUILERA J J, VALENZUELA L, PARRASB L. Thermal 3D model for direct solar steam generation under superheated conditions [J]. *Applied Energy*, 2014, 132(11): 370-382.
- [10] CHENG Z D, HE Y L, CUI F Q, et al. Numerical simulation of a parabolic trough solar collector with nonuniform solar flux conditions by coupling FVM and MCRT method [J]. *Solar Energy*, 2012, 86(6): 1770-1784.
- [11] SONG X W, DONG G B, GAO F Y, et al. A numerical study of parabolic trough receiver with nonuniform heat flux and helical screw-tape inserts [J]. *Energy*, 2014, 77(c): 771-782.
- [12] 孟继安, 过增元, 李志信. 应用场协同理论的多纵向涡强化换热管[J]. 动力工程, 2005, 25(3): 404-407.
- [13] 孟继安. 基于场协同理论的纵向涡强化换热技术及其应用[D]. 北京: 清华大学航天航空学院, 2003.
- [14] 杨东华. 不可逆过程热力学原理及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [15] 曾丹苓. 工程非平衡热动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [16] 李定, 孟祥铠, 李纪云. 核主泵流体动压型圆形深槽密封的热流耦合分析[J]. 流体机械, 2016(12): 16-24.
- [17] 钱伟长. 粘性流体力学的变分原理和广义变分原理[J]. 应用数学和力学, 1984, 5(3): 305-322.
- [18] 李满满. 三角形网格的独立性和有效性研究[D]. 武汉: 武汉科技大学理学院, 2007.

[编辑: 李辉]

本文引用格式:

于萍, 耿伟轩, 郭华锋. 非均匀热流边界条件换热管内流场优化研究[J]. 机电工程, 2018, 35(8):  - .

YU Ping, GENG Wei-xuan, Guo Hua-feng. Optimization for inner flow field of tube with non-uniform heat flux boundary condition [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(8):  - .

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>