

横掠周期性密集管束流动换热的数值模拟

余徐飞¹, 王治云¹, 李起耘², 黄文和³, 陆廷安², 杨 茉¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市浦东新区特种设备监督检验所, 上海 200136;

3. 上海市特种设备监督检验技术研究院, 上海 200333)

摘要: 在较宽的雷诺数范围内, 使用 CFD 软件、SIMPLE 算法和 QUICK 格式, 对流体横掠不同管间距的顺排密集型管束, 在周期性充分发展段的流动换热进行了数值模拟。选用几何间距与经验公式中相同的管束模型进行计算, 将数值结果与前人已存在的经验公式和实验结果进行比较, 确保数值模拟方法的正确性。通过分析 3 种不同计算模型的流场、换热系数等, 验证了针对高度密集管束采用周期性边界条件和对称性边界条件的合理性。将其与大间距顺排管束的流动换热特性进行对比, 结果表明, 密集管束换热系数最高可达大间距管束换热系数的 3 倍, 可为工业上换热器管排布置方式提供参考。

关键词: 横掠管束; 密集型; 周期性; 数值模拟

中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Periodically Fully Developed Flow and Heat Transfer in Crossflow over Intensive Tube Banks

YU Xufei¹, WANG Zhiyun¹, LI Qiyun², HUANG Wenhe³, LU Tingan², YANG Mo¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Pudong Institute of Special Equipment Inspection, Shanghai 200136, China;

3. Shanghai Institute of Special Equipment Inspection and Technical Research, Shanghai 200333, China)

Abstract: To investigate the effect of the longitudinal pitch and the transverse pitch on the convective heat transfer in the crossflow over intensive in-line tube banks, an analytical study using the CFD (computational fluid dynamics) code and the SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) algorithm with the QUICK (quadratic upwind interpolation of convective kinematics) scheme was performed. A bundle model with the same longitudinal reduction and transverse pitch as those in the empirical formula was selected in the simulation. By comparison of numerical results with existing empirical formulas and experimental results, the correctness of the numerical simulation method was ensured. Three kinds of bundle models were simulated. By analyzing the results of the flow field and the heat transfer coefficient of tube banks, it indicates that the periodic boundary conditions and the symmetrical boundary conditions given in the model are reasonable. By comparing the flow and heat transfer coefficient characteristics of the intensive and sparse array tube banks, the results show that the heat transfer coefficient of intensive tube bundles is up to three times as big as that of sparse tube banks. The conclusion can provide a reference to the arrangement of industrial heat exchanger tubes.

Key words: tube banks; intensive; periodical; numerical simulation

收稿日期: 2014-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51076105, 51276118, 51306121)

第一作者: 余徐飞(1989-), 女, 硕士研究生。研究方向: 数值模拟。E-mail: yuxufei@163.com

通信作者: 杨 茉(1958-), 男, 教授。研究方向: 流动和换热的非线性特性研究。E-mail: yangm@usst.edu.cn

横掠管束的对流换热在工业上有广泛应用,如电站锅炉省煤器、空气预热器、过热器等的烟气侧传热,都是这种横掠管束对流换热.这种换热的一个比较显著的特点是,在流动方向上,换热通道的几何结构是周期性变化的.当管排足够多时,这种流动换热呈现为所谓的周期性充分发展换热^[1-2],即在流动方向上流动和换热随几何周期发生周期性变化.对于此类外掠周期排列物体的流动换热问题,越来越多的研究者采用数值模拟的方法进行研究.Nobile 等^[3]通过数值模拟对周期性波纹板通道的形状等几何参数进行优化;Korichi 等^[4]对上下壁面均周期性地安装有障碍物的矩形通道内的强化换热进行了数值分析.本文关注应用数值模拟方法研究横掠光管管束在周期性充分发展段的流动换热.早期茹卡乌斯卡斯^[5]对这类光管管束换热进行了实验研究;Paul 等^[6]对大间距横掠管束湍流流动进行了实验验证和数值分析;杨荣等^[7]采用周期性充分发展的概念对横掠管束的流动进行了数值模拟和烟可视化实验;潘维等^[8]采用标准 $k-\epsilon$ 模型对气体横掠顺排和错排管束的流场进行了数值模拟;Khan 等^[9]通过公式推导和数学分析的方法得到横掠顺排和叉排管束的流动换热规律,管束的平均换热系数取决于管束横向纵向间距以及雷诺数 Re 和普朗特数 Pr .

尽管对于横掠管束对流换热的研究已有数值模拟结果发表,但模拟技术还存在一些问题,特别是在取不同管间距的时候.对于流动方向上如何取周期性边界条件,文献资料给出的研究成果基本是肯定的.但垂直于流动方向上的上下两个边界条件如何给出,却缺乏确定的研究成果.由于管束中流动会出现交替脱落的、非对称的卡门涡,导致振荡和分岔等各种非线性现象^[10-12],数值模型的上下两个边界处的流场和温度场是否对称还取决于管间距大小,所以模型的上下边界处在数值模拟的间距范围内能否定义为对称边界条件,需进一步探讨.此外,各种文献资料虽然一致认为管间距的变化对流动和换热影响较大,但不同文献所给出的定量结果却很分散,差别较大.文献^[5]给出的实验结果没有体现管间距的变化,而 Grimson^[13]的实验结果与 Zhang 等^[14]的实验结果相比也存在一定的差异.另外,管间距变化时数值模拟结果的可靠性也需要进一步验证.

本文针对密集顺排排列的管束间的流动和传热问题进行数值模拟,探讨在流动方向引入周期性边界条件后横向边界条件的提法,并将数值模拟结果与实验结果比较,最后给出密集管束不同管间距时

流动和换热的数值结果.

1 计算模型和数学描述

1.1 物理模型

图 1 为空气横掠二维正方形排列的顺排管束,即横向间距和纵向间距相等,间距取值为圆管直径 D 的 1.04, 1.08, 1.12 倍.拟计算的区域即为图 1(b) 中阴影区.

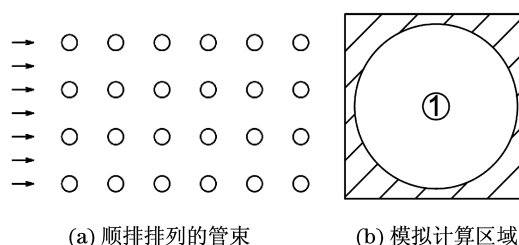


图 1 密集顺排管束的排列方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the arrangement of intensive in-line tube banks

1.2 数学描述

采用标准 $k-\epsilon$ 两方程的湍流、非稳态模型来求解湍流对流换热问题,同时采用增强壁面函数法来处理壁面附近区域的粘性底层流动问题.对模型中每根圆管尾部 y^+ 均进行考核,结果都满足增强壁面函数法的要求.对于低雷诺数时标准 $k-\epsilon$ 湍流模型是否适用的问题,选用层流模型和标准 $k-\epsilon$ 湍流模型分别进行模拟,并将计算结果与格里姆森实验结果进行比较,确定低雷诺数时可选用湍流模型来进行数值模拟.采用 SIMPLE 算法^[15]进行问题的求解,动量和能量方程的离散选用具有三阶精度的 QUICK 格式.

此二维强制对流换热问题的计算基于以下假定:

- 流体不可压缩,忽略温度对物性的影响,假设各项物性为常数;
- 流动与换热均处于周期性充分发展阶段;
- 壁面处流体无滑移;
- 忽略体积力和粘性耗散无内热源.

描述不可压缩流体流动与换热的 $k-\epsilon$ 模型控制方程为

连续性方程

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

k 方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho \epsilon \quad (3)$$

ϵ 方程

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{c_1 \epsilon}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

能量方程

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p T u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\lambda + \frac{c_p \mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

其中

$$\mu_t = c_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

式中: x 为坐标; u 为速度分量; i, j 为张量指标; t 为时间; k 为湍流脉动动能; ϵ 为脉动动能耗散率; T 为温度; ρ 为流体密度; μ 为动力粘度; c_p 为定压比热容; μ_t 为湍流粘度; σ_t 为能量普朗特数, 取值 0.85; σ_k 为脉动动能普朗特数, 取值 1.0; σ_ϵ 为脉动动能耗散率普朗特数, 取值 1.3; 模型系数 c_μ, c_1 和 c_2 分别取值 0.09, 1.44 和 1.92.

无量纲温度

$$\Theta = \frac{T - T_w}{T_b(X) - T_w}$$

式中: T 为流体温度; T_w 为壁面温度; $T_b(X)$ 是横坐标为 X 的截面上流体平均温度, 代表了截面的平均能量.

模型满足的边界条件如下:

x 方向, 进出口周期性边界条件为

$$u(x=0, y) = u(x=S_1/D, y)$$

$$v(x=0, y) = v(x=S_2/D, y)$$

$$\Theta(x=0, y) = \Theta(x=S_2/D, y)$$

式中: D 为圆管直径; S_1 为沿流向方向前后两根管圆心的距离; S_2 为垂直流向方向上下两根管圆心的距离.

y 方向, 上下界面对称边界条件为

$$y=0, \frac{\partial u}{\partial y} = v=0$$

$$y = \frac{S_2}{D}, \frac{\partial u}{\partial y} = v = 0$$

圆周上采用无滑移固定壁面条件: $u_{\text{wall}} = v_{\text{wall}} = 0, T = T_w$. 式中, $u_{\text{wall}}, v_{\text{wall}}$ 分别为壁面流体在 x, y 方向的分速度.

局部努塞尔数: $Nu = \frac{-\frac{\partial T}{\partial y}|_{\text{wall}} D}{\Delta t_m}$, 其中 Δt_m 为

流体进出口截面温度的对数平均温差; $-\frac{\partial T}{\partial y}|_{\text{wall}}$ 为壁面处的温度梯度.

雷诺数的定义: $Re = \frac{u_{\text{in}} D}{\nu}$. 式中: ν 为动力粘度; u_{in} 为管束入口截面的平均流速^[5].

压差阻力系数的定义: $f = \frac{\Delta p}{\rho u_{\text{in}}^2}$. 式中, Δp 为压差.

2 计算结果和分析

2.1 对称边界条件的验证

由于在管束间流动会形成交替脱落的卡门涡, 严格说图 1(b) 计算区域上下边界的物理条件不是对称的, 但考虑讨论的是密集管束, 管间距很小, 卡门涡的形成受到了抑制, 因此, 笔者认为对这种特殊情况采用对称边界条件不会引起太大的误差.

为了验证采用上下对称性边界条件的合理性, 对单根管模型、竖排 5 根管、横排 5 根管这 3 种模型 (如图 2 所示) 分别进行数值模拟并加以比较. 3 种模型中用来比较验证的换热管分别标示为换热管 ①、②、③.

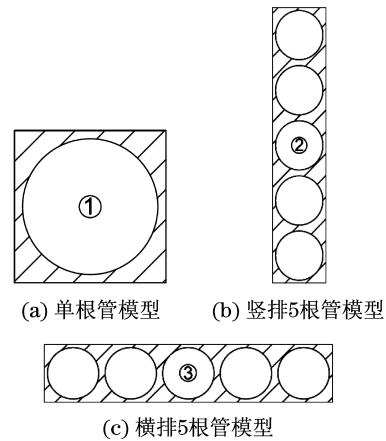


图 2 不同模型的排列方式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the arrangement of different geometries

以布置尺寸为 $S_1/D = S_2/D = 1.12$ 的正方形管束为例, 在 $Re = 5\,000, 30\,000$ 的工况下对这 3 种模型的模拟结果进行比较. 通过对比 3 种模型的流场和温度场的等值线图发现, 在 $Re = 5\,000, 30\,000$ 时, 换热管①, ②, ③周围的流场与温度场无明显差异. 图 3 定量给出了 3 种模型中采用周期性边界条件和对称性边界条件时换热管①, ②, ③所得出的平均努塞尔数 Nu_{avg} , 可以看出 3 种模型的差别极小, 最大偏差不超过 4%, 最小达到 0.3%.

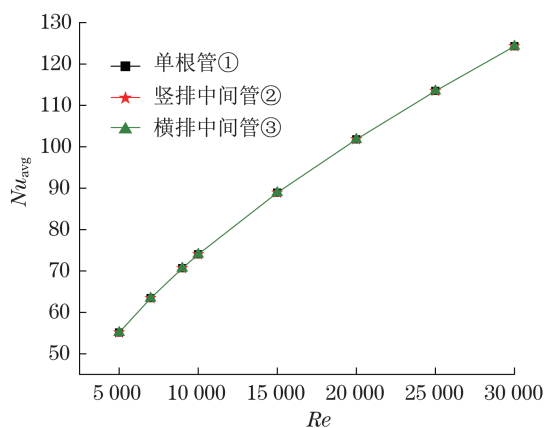


图 3 3 种模型中换热管①, ②, ③的对比图

Fig. 3 Comparative diagram of heat tubes ①, ②, ③ in three kinds of models

从以上分析可知, 采用上下对称性边界条件来简化计算模型是合理的. 以下的计算模型均采用简化后的模型, 因为它可以在保证一定精度的前提下, 大大地减少计算时间.

2.2 模拟结果与公式对比验证

目前已有的关于流体横掠管束的换热公式有很多, 其中传热学中普遍采用的是文献[12]的实验结果和文献[5]的经验公式.

由于 Grimson 的实验关联式: $Nu = BRe^m$, 其适用范围为 $Re_f = 2\,000 \sim 40\,000$, 系数 B, m 在 Grimson 的论文中有详细说明. 故验证的雷诺数在此范围内取值为 2 000, 3 500, 5 000, 7 500, 15 000, 22 500, 30 000, 37 500, 40 000, 在此雷诺数范围内茹卡乌斯卡斯的实验回归公式为

$$Nu = 0.27 Re_f^{0.63} Pr_f^{0.36} (Pr_f/Pr_w)^{0.25}$$

式中: Re_f, Pr_f 按流体的温度确定; Pr_w 按管束的平均壁温确定.

为了与 Grimson 的实验关联式相对比, 选取的大间距参数与其实验时参数一致: 横向间距 S_2/D 恒为 3, 纵向间距 S_1/D 分别为 2 和 3. 将数值计算得到的流体与圆管换热的平均 Nu 数与实验结果和经验公

式同时进行了对比验证, 确定数值模拟的正确性.

通过对 4 种不同间距时平均努塞尔数的模拟值与两种不同经验公式的模拟值对比发现, 数值模拟结果与两个经验公式之间存在较大的误差, 最大误差接近 30%, 并且数值模拟结果更接近 Grimson 的经验公式.

分析其中原因, 笔者认为, 首先 Grimson 的经验公式中并没有考虑物性对换热系数的影响, 而且 Grimson 本人以及 Hausen^[16] 均在最初关联式的基础上提出过不同的修正, 故存在一定误差是可以接受的. 其次, 茹卡乌斯卡斯经验公式并未包含间距对 Nu 的影响, 其仅适用于排列间距 $S_2/S_1 < 2$ 的管束, 因为此经验公式在计算排列紧凑的管束换热时采用的是入口处流速而不是流动截面最小处的最大流速. Khan 等^[9] 在分析结果中便提到这一点, 他得到的分析结果与 Grimson 吻合较好而与茹卡乌斯卡斯相差较大.

Zhang 等^[14] 在横掠管束的实验中也发现: 对于单管的实验结果能与茹卡乌斯卡斯经验公式吻合良好, 误差小于 5%; 而针对管束的实验结果则与 Grimson 和茹卡乌斯卡斯关联式相差很大, 例如 $S_2/D, S_1/D$ 分别为 3 和 1.25 时, 实验模拟结果与两种关联式的误差均超过 40%. 文献[14]给出了 $S_2/D, S_1/D$ 分别为 3 和 1.1 时的模拟结果, 选择与之相同的模型进行了数值模拟并给出结果对比.

图 4 为数值模拟结果与 Zhang 等的实验结果和茹卡乌斯卡斯关联式的对比. 与其他间距下的对比结果相同, 此间距下的数值模拟结果与茹卡乌斯卡斯的结果相差很大, 但与文献[14]的实验结果吻合良好, 由此也证明本文的数值模拟结果是可靠的.

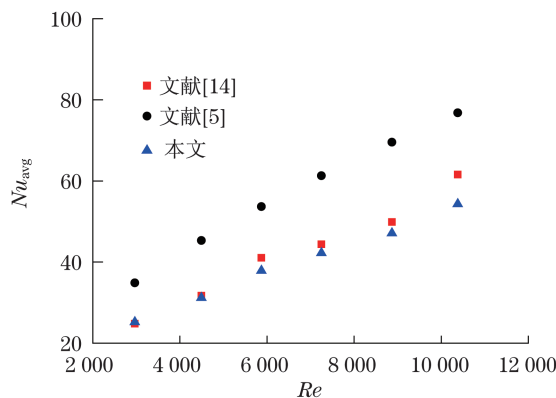


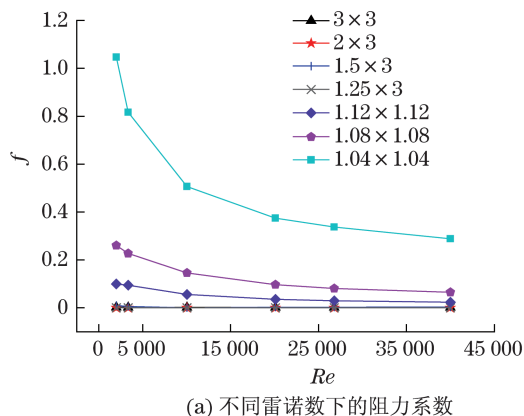
图 4 模拟值与文献[5]及文献[14]的对比图

Fig. 4 Comparison of the numerical and experimental results with those in reference [5] and reference [14]

2.3 间距对流动换热的影响

从流动和换热的两个角度对密集型管束与大间距管束进行对比.图5为 Re 在2 000~40 000范围时,7种不同排列方式($S_1/D \times S_2/D = 3 \times 3, 2 \times 3, 1.5 \times 3, 1.25 \times 3, 1.12 \times 1.12, 1.08 \times 1.08, 1.04 \times 1.04$)的管束流动换热时的阻力系数 f 和 Nu_{avg} 随 Re 的变化曲线.

由图5可以看出,不同间距的 Nu 和 f 随 Re 的



变化趋势一致, Nu 均随着 Re 的增加而增大,而 f 则随 Re 的增加而降低,但下降趋势随着 Re 的增加而降低.当 $Re = 2\,000$ 时, Nu_{avg} 随间距增大而减小且趋于平缓,间距增大到 1.25×3 以后, Nu_{avg} 随间距和 Re 改变而发生的变化很小,即间距和 Re 对 Nu_{avg} 的影响不大;但当 $Re = 40\,000$ 时,情况发生了变化,在密集型排列方式中, Nu_{avg} 随着间距减小而增大, 1.04×1.04 的排列方式最优.

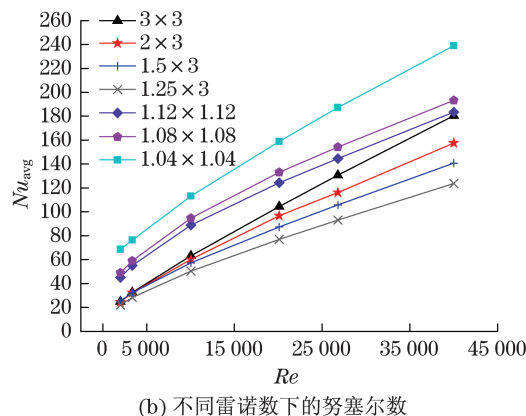


图5 不同间距管束在不同雷诺数下的参数对比图

Fig.5 Resistances and heat transfer coefficients under different arrangements and different Reynolds number

在所选取的 Re 范围内,3种密集型排列的 Nu_{avg} 基本均在大间距排列的 Nu_{avg} 之上.当 $Re = 2\,000$ 和 $40\,000$ 时,最大努塞尔数和最大阻力系数都出现在间距为 1.04×1.04 的管束上,最小努塞尔数和最小阻力系数都出现在间距为 1.25×3 的管束上.当 $Re = 2\,000$ 时,最大努塞尔数是最小努塞尔数的3倍左右;当 $Re = 40\,000$ 时,最大努塞尔数是最小努塞尔数的2倍左右.

3 结 论

管束的排列方式对管束绕流流动换热有很大影响,为了系统地认识管束流动换热随间距的变化情况,在 $Re = 2\,000 \sim 40\,000$ 的范围内对不同排列间距下的管束进行了数值模拟研究,得出的结论如下:

a. 对于绕流稀疏排列和密集排列的顺排管束对流换热,采用前后周期性边界条件和上下对称性边界条件获得的数值结果是可靠的.

b. 雷诺数较大($Re = 40\,000$)时,密集管束与大间距管束的换热规律不同.在密集型排列方式中 Nu_{avg} 随着间距减小而增大,顺排 1.04×1.04 的排列方式最优,而在大间距的排列方式中 Nu_{avg} 随着纵向间距增大而增大,顺排 3×3 的排列方式传热性

能最优.

c. 密集型的排列方式有助于强化流体绕流管束的换热效果.密集管束换热系数最高可达大间距管束换热系数的3倍.

参考文献:

- [1] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,2001.
- [2] Patankar S V, Liu C H, Sparrow E M. Fully developed flow and heat transfer in ducts having streamwise-periodic variations of cross-sectional area[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1977, 99(2): 180 - 186.
- [3] Nobile E, Pinto F, Rizzetto G. Geometric parameterization and multiobjective shape optimization of convective periodic channels[J]. Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals; An International Journal of Computation and Methodology, 2006, 50(5): 425 - 453.
- [4] Korichi A, Oufer L. Heat transfer enhancement in oscillatory flow in channel with periodically upper and lower walls mounted obstacles[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28(5): 1003 - 1012.
- [5] 茹卡乌斯卡斯.换热器内的对流传热[M].北京:科学出版社,1986.

(下转第576页)

- nephropathy and aging-related diseases [J]. The Journal of Medical Investigation, 2007, 54(3/4): 359 - 365.
- [9] Zhang Y, Papasian C J, Deng H W. Alteration of vitamin D metabolic enzyme expression and calcium transporter abundance in kidney involved in type 1 diabetes-induced bone loss[J]. Osteoporosis International, 2011, 22(6): 1781 - 1788.
- [10] Joshi A, Varthakavi P, Chadha M, et al. A study of bone mineral density and its determinants in type 1 diabetes mellitus [J]. Journal of Osteoporosis, 2013, 2013: 397 - 814.
- [11] 冯玉欣, 逢力男. 糖尿病与骨质疏松的研究进展[J]. 国外医学内分泌学分册, 1999, 19(3): 132 - 133.
- [12] 谈志龙, 任海龙, 白人晓, 等. 骨质疏松症与骨代谢生化测定指标[J]. 中国骨质疏松杂志, 2006, 12(1): 92 - 96.
- [13] 邱明琪, 姜欣. 内分泌代谢疾病与骨质疏松研究进展[J]. 实用临床医学, 2006, 7(9): 164 - 168.

(编辑: 丁红艺)

(上接第 567 页)

- [6] Paul S S, Rimiston S J, Tachie M F. Experimental and numerical investigation of turbulent cross-flow in a staggered tube bundle [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(2): 387 - 414.
- [7] 杨莱, 叶建军, 邹宽, 等. 横掠管束非稳态周期性充分发展流动的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(11): 1122 - 1125.
- [8] 潘维, 池作和, 斯东波, 等. 匀速流体横掠管束的流场数值模拟[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(8): 1043 - 1046.
- [9] Khan W A, Culham J R, Yovanovich M M. Convection heat transfer from tube banks in crossflow: analytical approach[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(25/26): 4831 - 4838.
- [10] 杨莱, 黄夫泉, 章立新, 等. 水平板自然对流换热的非线性特性[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(2): 275 - 277.
- [11] 王治云. 开口腔内耦合换热的模拟及其解的非线性分析[D]. 上海: 上海理工大学, 2011.
- [12] 张昆. 圆筒内开缝圆筒自然对流及非线性特性[D]. 上海: 上海理工大学, 2011.
- [13] Grimson E D. Correlation and utilization of new data on flow resistance and heat transfer for cross flow of gases over tube banks[J]. Transactions of the ASME, 1937, 59: 583 - 594.
- [14] Zhang Y W, Chen Z Q. The effect of a gap between layers on the heat transfer performance of aligned tube banks[J]. Heat Transfer Engineering, 1992, 13(2): 33 - 41.
- [15] 申春赞, 杨莱, 王津, 等. 圆内开缝圆不同开缝方向自然对流换热[J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(5): 425 - 429.
- [16] Hausen H. Heat transfer in counterflow, parallel flow, and cross-flow[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1983.

(编辑: 丁红艺)