

管排数对球突翅片管式换热器传热特性的影响

冯丽华, 吴学红, 吕彦力

(郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:通过数值对比研究了不同管排数对球突翅片管式换热器的换热和流动特性的影响. 结果表明:随着管排数的增加, 热量/压降($Q/\Delta P$)和 COP 值逐渐减少, 2排管的 $Q/\Delta P$ 和 COP 值最大. 在 $Re = 1\ 138 \sim 3\ 415$ 范围内, 2排管平均 Nu 数分别比3, 4, 5排管增大11.1%, 21.7%, 23.2%. 流场图显示, 不同管排数均因球突增强了扰动, 而强化了换热, 但4, 5排管的温度场几乎无变化, 说明管排数的增加并不能增强换热. 综上2排管换热综合性能较好.

关键词:球突翅片管式换热器; 管排数; 强化传热

中图分类号:TK124 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.02.021

The effect of tube row number on heat transfer characteristics of the dimpled fin tube heat exchanger

FENG Li-hua, WU Xue-hong, LYU Yan-li

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The effect of different tube row number on heat transfer and pressure drop characteristics of dimpled fin tube heat exchanger was investigated. The results showed that: the ratio of heat transfer rate and pressure drop ($Q/\Delta P$) and COP decreased with the increase of tube row number, $Q/\Delta P$ and COP of two-row tube was the biggest. Compared with the three, four, five-row tube, average Nu number of two-row tube increased by 11.1%, 21.7%, 23.2% at $Re = 1\ 138 \sim 3\ 415$, respectively. The flow field indicated that the arrangement of the dimple could intensify flow turbulence, which enhanced the heat transfer, but when the number of tube rows are 4 and 5, the temperature field changed little, which indicated that the heat transfer didn't change significantly when the number of tube rows increased. So the comprehensive performance of two row tube rows was better.

Key words: dimpled fin tube heat exchanger; tube row number; enhanced heat transfer

0 引言

翅片管式换热器广泛应用于空调、化工、食品

加工等行业中,特别是空调制冷行业.由于翅片管式换热器的热阻主要集中在空气侧,因而强化空气侧的换热非常重要.强化翅片是提高整个换热器性

收稿日期:2013-12-09

基金项目:国家自然科学基金项目(21076200);河南省省院合作项目(092106000013);郑州市领军人才项目(131PLJRC640)

作者简介:冯丽华(1988—),女,河南省西平县人,郑州轻工业学院硕士研究生,主要研究方向为强化传热.

通信作者:吕彦力(1955—),男,河南省确山县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为制冷与低温设备节能技术.

能很有效的方法。

在通道内有关球突的研究, P. Ligrani 等^[1] 研究了一面是球突凹坑、一面是凸起的通道内流体的结构特点及这些凸起对局部流体结构的影响, 并与一面是球突凹坑、一面是光滑壁面做了对比。S. Y. Won 等^[2] 用试验方法研究了 3 种不同球突高度对流体特性的影响。S. Chang 等^[3] 介绍了不同雷诺数 Re 下, 不同凹凸排列方式球突翅片的传热性能。S. D. Hwang 等^[4-5] 研究了在矩形通道内单面凸起和双面凸起排列的换热特性。S. Isaev 等^[6] 分析了 Re 和通道高度与球突直径比值对球突流动和换热的影响。S. Chang 等^[7] 实验研究对比了 2 个有无球突的粗糙通道的 Nu 数、压降系数和热性能因子。这些文献得出球突结构能够产生二次流的结论。因而近些年学者将球突结构运用到翅片管式换热器中, 关于球突翅片, 主要研究有: G. Mahmood 等^[8] 研究了在一定 Re 范围内, 球突表面流体随不同的通道高度与球突直径的比值变化特性。樊菊芳等^[9] 运用适体坐标下同位网格 Simple 算法对具有浅椭球突翅片表面进行了数值模拟和特性分析。Q. Fan 等^[10] 数值模拟了几何尺寸对球突翅片换热的影响。M. A. Elyyan 等^[11] 指出开缝球突翅片通过产生湍流尾流从而强化换热, 但是也产生了较高的阻力损失。宋伟明等^[12] 在空冷器单排管蛇形翅片表面有规律地布置一些球突, 指出球突个数相同时, 又排布置优于顺排。吴学红等^[13-15] 数值模拟了球突翅片的传热流动特性, 得出球突翅片是一种性能优良的翅片的结论, 并开发了一种新型结构。苟秋平等^[16] 对半球突开缝翅片传热特性进行了数值研究。

从以上文献可知, 大多数研究是关于球突结构、尺寸方面的, 而对于管排数对换热器性能的影响研究较少, 因而本文将主要就不同管排数对球突翅片换热特性影响的相关数值进行研究, 分析其传热和流动特性差异。

1 物理模型和计算方法

1.1 物理模型和计算区域

本文研究的模型如图 1 所示, 取相邻翅片的中心之间的区域作为计算区域, 入口延伸 1.5 倍的翅片长度, 以保证入口流速分布均匀, 出口延伸 8 倍的翅片长度, 以保证出口处流体无回流。

本文分别计算了 2, 3, 4, 5 排管球突翅片的传热

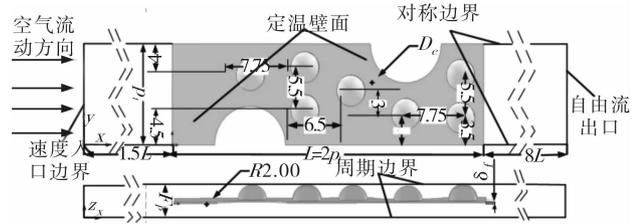


图 1 球突翅片的物理模型及计算区域/mm

特性, 其中翅片间距 F_p 为 5 mm, 横向管间距 P_l 为 13 mm, 纵向管间距 P_l 为 22 mm, 翅片厚度 δ_f 为 0.2 mm, 管外径 D_o 为 10 mm。

在计算时采用不可压缩、稳态、常物性的湍流模型, 动量和能量方程采用二阶迎风格式进行离散, 压力和速度的耦合计算选用 Simple 算法, 忽略黏性耗散、辐射换热。残差、连续性方程、湍流参数和动量方程的收敛标准为 10^{-6} , 能量方程的收敛标准为 10^{-8} 。

1.2 控制方程和边界条件

控制方程: $\text{div}(\rho v \varphi) = \text{div}(\Gamma_\varphi \text{grad} \varphi) + S_\varphi$ 。其中, φ 为通用变量; Γ_φ 为广义扩散系数; S_φ 为广义源项, 与 φ 值相对应。控制方程的各变量如表 1 所示, 其中

$$G_k = \frac{\eta_t}{\rho} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \right\}$$

表 1 控制方程各变量

物理量及方程	φ	Γ_φ	S_φ
质量	1	0	0
x 方向动量	u	$\eta + \eta_t$	$-\partial P / \partial x$
y 方向动量	v	$\eta + \eta_t$	$-\partial P / \partial y$
z 方向动量	w	$\eta + \eta_t$	$-\partial P / \partial z$
湍动能	k	$\eta + \eta_t / \sigma_k$	$\rho G_k - \rho \varepsilon$
ε 方程	ε	$\eta + \eta_t / \sigma_\varepsilon$	$\frac{\varepsilon}{k} (c_1 \rho G_k - c_2 \rho \varepsilon)$
能量方程	T	$\frac{\eta}{P_r} + \frac{\eta_t}{\sigma_T}$	0

边界条件: 管壁温度 35 °C, 空气进口温度 25 °C, 换热管为铜管, 翅片材料为铝; 入口边界条件: 给定速度和温度, 出口为充分发展阶段, 上下面即 z 轴方向为周期性边界条件, 左右面即 y 轴方向为对称边界条件。翅片表面的温度分布由翅片的导热与空气对流换热的耦合求解得到。计算结果的处理方法见文献[16]。

2 结果与分析

2.1 传热和阻力特性分析

本文以 $Q/\Delta P$ 和 $Q/(\Delta P + v)$ 为换热器换热性能的评价标准,其中 Q 为换热量, ΔP 为进出口压降, v 为体积流量, $Q/(\Delta P + v)$ 可以定义为 COP , 它表征换热量与功之间的比值. 图 2 给出了 2,3,4,5 排管的 $Q/\Delta P$ 的变化图,从图 2 中可以看出,随着管排数的增加, $Q/\Delta P$ 逐渐降低,但随着 Re 的增大,降低的幅度逐渐减小. 从图 3 可以看出 $Q/(\Delta P + v)$ 的趋势也是随着 Re 的增大而逐渐减小的,而且在 Re 较大时,2,3,4,5 排管基本趋于一致;就同一管排数而言,随着迎面风速的增大它们的值逐渐减少. 这 2 个参数值越大表明换热越好,显然 2 排管的换热性能最好,然后依次为 3,4,5 排管.

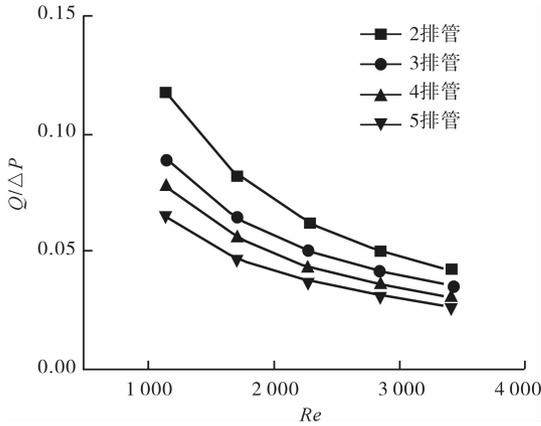


图 2 不同排管数的 $Q/\Delta P$ 变化

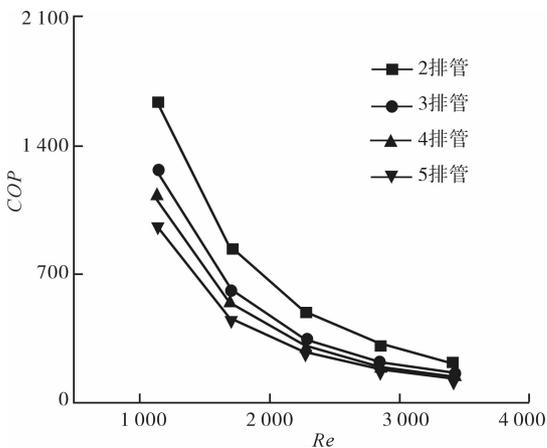


图 3 不同排管数 COP 变化

图 4 给出了努谢尔特数 (Nu) 的变化趋势图,同样该值越大表明换热能力越好,在 $Re = 1\ 138 \sim 3\ 415$ 范围内,2 排管平均 Nu 数分别比 3,4,5 排管增大 11.1%,21.7%,23.2%,这说明管排数的增加

虽然增大了换热面积,但是空气侧的阻力也相对增大,导致空气侧换热性能下降. 而 4 排管与 5 排管的 Nu 基本相同,这说明风速随着管排的增加而减少的量较小,所以空气侧的换热性能变化不明显.

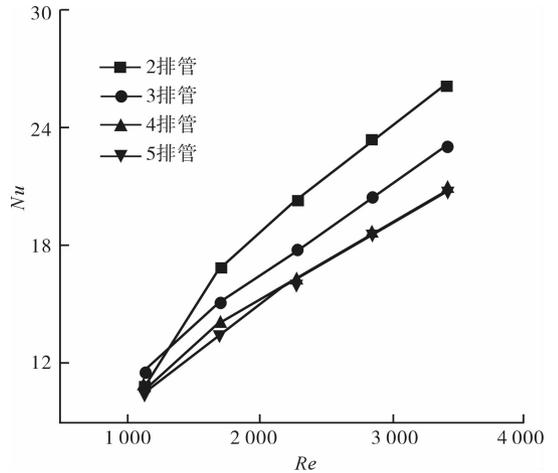


图 4 不同排管数的 Nu 变化

2.2 流场分析

本文选择了速度为 2 m/s 时 2,3,4,5 排管的流场,如图 5 所示. 从图 5 中可以看出,在管后都会形成一个涡,不利于换热,因而在布置球突时应该改变此处的来流方向,增强扰动. 文献[12]提出,叉排布置好于顺排布置,因为此种布置增强了扰动,从而强化换热,而且随着管排数的增加出口温度逐渐增大,这说明总的换热量是增加的. 由上面的计算结果看出,随着管排数的增加, $Q/\Delta P$ 是逐渐降低的,这说明增加的换热量不足以弥补阻力增加. 图 6 给出了不同排管数在速度为 2 m/s 时的 $y-z$ 面的流场图. 从图 6 中可以看出, a), b), c), d) 在球突凹处都产生了马尾辫一样的流动,说明球突增强了扰动,强化了换热,而 c), d) 的温度场基本相同,表明换热基本不增加,因而管排数的增加并不能增强换热.

3 结论

本文就管排数对球突翅片管式换热器的换热特性的影响进行了研究,对计算结果分析可以得出以下结论.

- 1) $Q/\Delta P$ 和 COP 的值随着管排数的增加而逐渐降低,2 排管的 $Q/\Delta P$ 和 COP 值最大,其次依次为 3,4,5 排管.
- 2) 在 $Re = 1\ 138 \sim 3\ 415$ 范围内,2 排管平均 Nu 数分别比 3,4,5 排管增大 11.1%,21.7%,23.2% ;

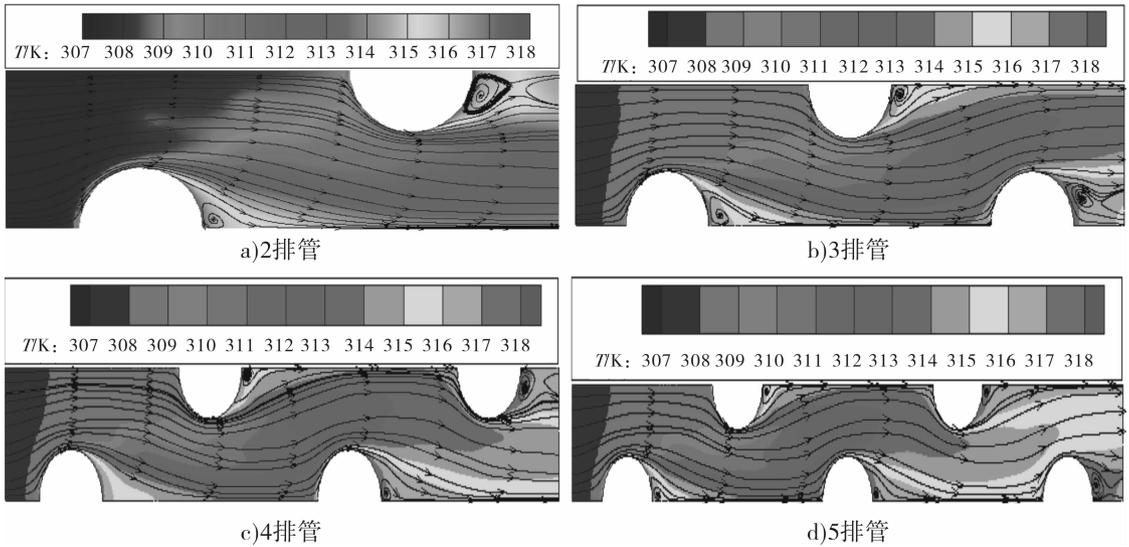


图 5 不同排管数在速度为 2 m/s 时的流场图

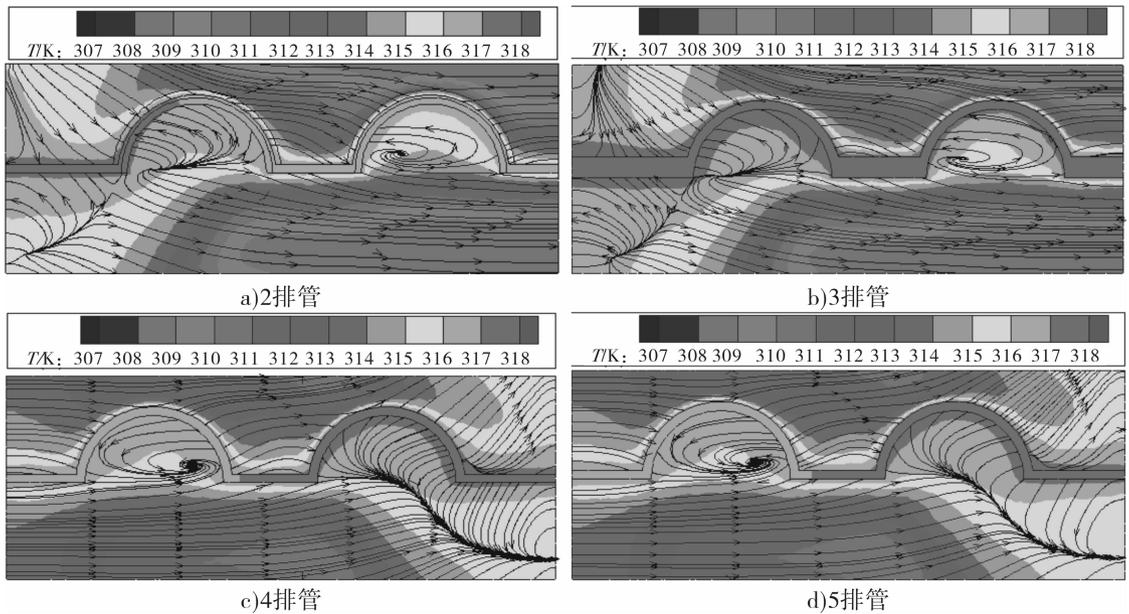


图 6 不同排管数在速度为 2 m/s 时的 y - z 面流场图

4 排管和 5 排管的平均 Nu 数基本相同,说明风速随着管排的减少而增加的量较小,所以空气侧的换热性能变化不明显。

3) 流场图显示,2,3,4,5 排管在球突凹处均产生了马尾辫一样的流动,使得扰动增加从而增强了换热,而 4,5 排管的温度场基本相同,表明换热基本不增加,因而管排数的增加并不能增强换热。

综上 2 排管换热综合性能最好。

参考文献:

[1] Ligrani P, Mahmood G, Harrison J, et al. Flow structure and local nusselt number variations in a channel with

dimples and protrusions on opposite walls [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44 (23): 4413.

[2] Won S Y, Zhang Q, Ligrani P M. Comparisons of flow structure above dimpled surfaces with different dimple depths in a channel [J]. Physics of fluids, 2005, 17: 45.

[3] Chang S, Chiang K, Yang T, et al. Heat transfer and pressure drop in dimpled fin channels [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 33(1): 23.

[4] Hwang S D, Kwon H G, Cho H H. Heat transfer with dimple/protrusion arrays in a rectangular duct with a low reynolds number range [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(4): 916.

质量,因而 y 方向位置增加较慢;抓斗及负载的摆角在短暂变化后逐渐趋向一个稳定值,而且质量小的最终的摆动角度较大. 仿真结果与预先分析的结果相符合,因此可证明建立的该数学模型方程具有可行性.

3 结论

本文利用选取系统目标控制变量作为坐标系的变量值,运用运动学基本原理分析出小车的坐标位置,然后通过拉格朗日方程,建立起桥式起重机的动力学数学模型,其本质和特性与文献[5]直接利用拉格朗日方程所建立起的数学模型的本质特性具有一致性. 本文所建立的数学模型,在反应起重器抓斗与重物的定位与摆动过程中更具有直观性,更能体现所研究的目标变量,为以后更精确地控制起重器抓斗与重物的定位和防摆奠定了基础,该模型具有简单、直观、效果好等特性.

(上接第90页)

- [5] Hwang S D, Kwon H G, Cho H H. Local heat transfer and thermal performance on periodically dimple-protrusion patterned walls for compact heat exchangers[J]. *Energy*, 2010, 35(12): 5357.
- [6] Isaev S, Kornev N, Leontiev A, et al. Influence of the reynolds number and the spherical dimple depth on turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(1): 178.
- [7] Chang S, Liou T M, Lee T H. Thermal performance comparison between radially rotating ribbed parallelogram channels with and without dimples[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(13): 3541.
- [8] Mahmood G, Ligrani P. Heat transfer in a dimpled channel: combined influences of aspect ratio, temperature ratio, reynolds number, and flow structure[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(10): 2011.
- [9] 樊菊芳,何雅铃,陶文铨. 球突翅片表面的数值模拟和特性分析[J]. *工程热物理学报*, 2008, 29(11): 1921.

参考文献:

- [1] 王晓军,邵惠鹤. 基于模糊的桥式起重机的定位和防摆控制研究[J]. *系统仿真学报*, 2005, 17(4): 936.
- [2] 王克琦. 桥式起重机的定位和防摆控制研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(8): 1799.
- [3] Park H, Chwa D, Hong K. A feedback linearization control of containers cranes: varying rope length[J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2007, 5(4): 379.
- [4] Lee H H. Modeling and control of a three-dimensional overhead crane[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1998, 120: 471.
- [5] 高丙团. 龙门吊车系统的动力学建模[J]. *计算机仿真*, 2006, 23(2): 50.
- [6] 吕志. 基于部分解耦与模糊控制的变绳长三维吊车系统防摆与定位控制研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2011.
- [10] Fan Q, Yin X. 3-D numerical study on the effect of geometrical parameters on thermal behavior of dimple jacket in thin-film evaporator[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(14): 1875.
- [11] Elyyan M A, Tafti D K. A novel split-dimple interrupted fin configuration for heat transfer augmentation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(5): 1561.
- [12] 宋伟明,孟继安,李志信. 空冷器球突翅片换热与不可逆性分析[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2010(7): 1104.
- [13] 吴学红,崔帅,苟秋平,等. 球突翅片的传热流动特性及等效热阻数值分析[J]. *工业加热*, 2012, 41(1): 43.
- [14] 吴学红,崔帅,罗志明,等. 球突翅片传热性能优化设计[C]//中国工程热物理年会,东莞:[s. n.], 2012.
- [15] 吴学红,苟秋平,吕彦力,等. 半球突开缝翅片传热特性模拟及(火积)分析[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(1): 153.
- [16] 苟秋平,吴学红,吕彦力,等. 复合翅片传热与流动特性的数值模拟[J]. *热科学与技术*, 2011, 10(4): 317.