

空调蒸发器用管翅式换热器开缝翅片的数值设计

金巍巍 屈治国 张超超 何雅玲 陶文铨

(动力工程多相流国家重点实验室, 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要 通过三维层流数值模拟, 与平片计算结果对比, 设计了适用于低流速和 Re 数 (迎面风速 $1\sim 3$ m/s, 对应 Re 数 $901\sim 2702$) 下的空调蒸发器用管翅式换热器的开缝翅片形式。研究表明: 在上述迎面风速和 Re 数范围内, 开缝翅片性能曲线和平片性能曲线不可避免地有一个交叉点, 对应 Re 数称为转折 Re 数, 在交叉点前的速度和 Re 数范围内, 平片换热器的综合性能优于开缝翅片, 而在高于转折 Re 数后, 随着迎面风速的增大, 开缝翅片的综合换热性能将越来越优于平片; 依据“前疏后密”原则适当减少开缝翅片换热器开缝的条数, 可以有效降低转折 Re 数, 并显著改善低流速和 Re 数下换热器的综合性能。另外, 再次验证了场协同理论 - 温度场和速度场的协同性与换热器换热量间的必然联系。

关键词 开缝翅片; 数值模拟; 优化设计; 转折 Re 数; 场协同

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2006)04-0688-03

NUMERICAL DESIGN OF SLOTTED FIN OF TUBE-FIN HEAT EXCHANGER USED IN EVAPORATOR OF AIR CONDITIONING

JIN Wei-Wei QU Zhi-Guo ZHANG Chao-Chao HE Ya-Ling TAO Wen-Quan

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, School of Energy & Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an: 710049, China)

Abstract Though 3D numerical simulation of laminar flow and comparison of the simulated results of slotted fin surface with plain plate surface, this paper optimizes the designs of slotted fin of tube-fin heat exchanger used in evaporator of air conditioning under low velocity and Re number (inlet velocity is $1\sim 3$ m/s, and Re number is about $901\sim 2702$). It is found that, within the inlet velocity range studied, the performance curve of slotted fin and plain plate heat exchanger has inevitably a crossing point whose Re number is called turning Re number; if the Re number is lower than this turning Re number, the performance of plain plate surface is better than that of slotted fin surface; however, if the Re number is higher than this turning Re number, the larger the velocity, the better the slotted fin surface performance compared with the plain plate fin surface. Moreover, if the strip numbers of slotted fin surface is decreased according the rule of 'front sparse and rear dense', the performance of heat exchanger can be enhanced effectively and the turning Re number can be decreased evidently. In addition, the results of the present study once again show the consistent relationship between the higher heat transfer rate of the slotted fin surface with their better synergy between velocity and temperature gradient.

Key words slotted fin surface; numerical simulation; optimized design; turning Re number; field synergy principle

1 引言

开缝翅片管翅式换热器广泛应用于制冷、空调等行业中。近年来, 随着对换热器高效、紧凑的迫切需求, 许多研究人员针对开缝翅片管翅式换热器空气侧的换热及阻力特性进行了大量的优化设计方面的试验研究和数值模拟。

Kang 和 Kim^[1] 对管径为 7 mm 的双排翅片管

进行的 4 种不同翅片形式的试验, 研究表明: “前疏后密”的布置综合性能最优。Yun 和 Lee^[2] 对 X 型均匀开缝翅片的 7 种因素进行了试验研究, 认为影响翅片换热和阻力性能的主要因素是翅片间距、翅片缝角与来流的夹角、缝的长度和缝的高度。屈治国等^[3] 利用三维数值模拟结果验证了文献 [1] 的发现。程永攀等^[4] 研究了开缝布置位置对“前疏后密”开缝翅片换热和阻力性能的影响。

收稿日期: 2006-01-19; 修订日期: 2006-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50476046; No.50425620); 教育部博士点基金项目资助 (No.REDP2003698015)

作者简介: 金巍巍 (1972-), 女, 新疆石河子人, 博士研究生, 主要从事强化传热的研究。

本文通过三维层流的数值模拟,研究了开缝数目减少对“前疏后密”“X型”布置空调蒸发器用较低迎面风速(1~3 m/s,对应 Re 数 901~2702)下的开缝翅片管翅式换热器换热和阻力特性的影响,并用“场协同”原理分析了换热增强的实质。

2 计算区域的选取及其数学描述

对双向开缝翅片进行数值模拟时,由于翅片管换热器几何结构的周期性和对称性,取如图 1 所示的两翅片之间的空间为计算区域。为了保证入口流速均匀以及出口无回流,入口计算区域延长 1.5 倍翅片长度,出口延长 5 倍。数值计算模型控制方程及边界条件的处理可参见文献 [3,4],数值模拟参数可参见表 1。

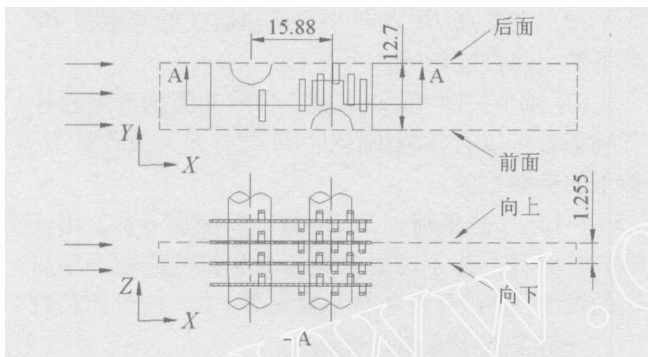


图 1 三维计算区域的示意图

表 1 数值模拟参数

管外径	横向管间距	纵向管间距	翅片厚度	翅片间距
8.31 mm	15.88 mm	12.7 mm	0.11 mm	1.26 mm
缝宽	管壁温度	入口温度	迎面风速	缝高
1.2 mm	283.15 K	299.67 K	1~3 m/s	0.63 mm

本文对六种形式的两排翅片管进行数值模拟,结构尺寸示于图 2 中。六种翅片分别为平片和五种开缝条数依据“X型”“前疏后密”布置原则依次减少的开缝设计方案。本文旨在研究减少缝的条数对开缝翅片在工作流速范围内的传热以及阻力特性的影响。

3 数值计算方法

管壁温度取为常数,翅片温度与流体温度耦合计算,为保证耦合界面上热流密度连续,固体区采用流体区比热容的值,关于耦合问题的求解方法可参见文献 [5]。为了模拟翅片结构,引入一个数组用于标识流体、翅片和圆管区。圆管边界用阶梯边界逼近,非均分网格,翅片区较密,延长区较疏,网格数为 $143 \times 66 \times 24$ 。用有限容积法离散控制方程, SIMPLE 算法实现压力场与速度场的耦合计算。

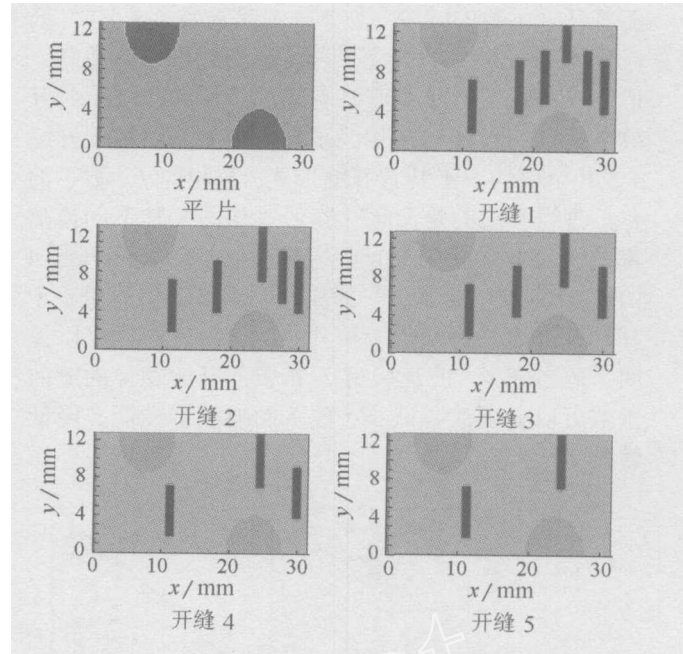


图 2 六种翅片的几何尺寸

4 结果分析与讨论

4.1 相同 Re 数下 j/f 的比较

开缝翅片与平片 j/f 相对 Re 数的变化曲线如图 3 所示。由图可见,当 Re 数从 901 变化到 2702(对应来流速度从 1~3 m/s),五种开缝翅片的 j/f 曲线均分别与平片的 j/f 曲线相交,交叉点的 Re 数称为转折 Re 数。转折点前,平片 j/f 值高于开缝翅片,但 Re 大于转折点后,开缝翅片 j/f 值高于平片;另外,减少“前疏后密”布置的开缝翅片开缝条数,低流速或 Re 数下,开缝翅片的 j/f 值增高,转折 Re 数减小,但在高 Re 数时,条缝数少的开缝翅片的 j/f 值略低于条缝数多的。如: 1 m/s 时,开缝 1~4 的对应 j/f 值从 0.01406 增长到 0.0154 (是平片 j/f 的 98.97%), 转折 Re 数从 2250 减小到 1700, 但 3 m/s 时,开缝 4 的 j/f 值略低于开缝 2 和开缝 3, 略高于开缝 1; 开缝 5, 缝的条数过少,在整个工作流速范围内, j/f 值均小于平片。这充分说明: 适当减少“前疏后密”布置的开缝翅片缝的数目,可以有效减小转折 Re 数并显著改善低 Re 数下的 j/f 值。

4.2 相同泵功下换热量的比较

开缝翅片与平片相同泵功下换热量的比较如图 4 所示。由图可见,它的变化趋势与 j/f 相对 Re 的变化一致。即: 所有开缝翅片相同泵功下的换热量曲线与平片的曲线都分别相交; 交叉点前,平片换热性能优于开缝翅片,交叉点后,随着流速和 Re 数的增高,开缝翅片换热性能越来越优于平片; 开缝 1~4,

随着开缝条数的减少,交叉点显著前移(减小),低流速或 Re 数下,开缝相同泵功下的换热量增高,但高 Re 数下的曲线值略有降低;条缝数较少的开缝 5,仅 1 m/s 时的相同泵功下换热量略高于开缝 4,其余值均小于其它开缝形式,与相同 Re 数下的 j/f 曲线不同的是,此开缝形式相同泵功下的换热量曲线与平片也有一个交叉点(对应 Re 高于开缝 4 的),在此交叉点后,它的相同泵功下的换热量差于其它开缝形式但却优于平片。所以,这同样可以说明:适当减少“前疏后密”布置的开缝翅片的缝的条数可以显著改善低 Re 数下的换热器性能并降低转折 Re 。

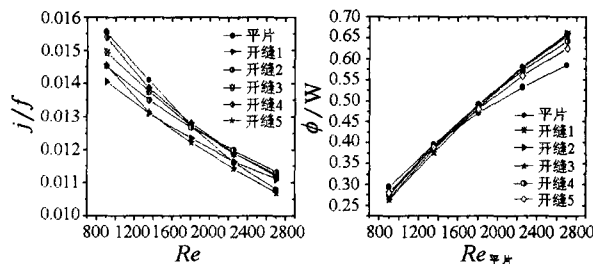


图 3 j/f 的比较 图 4 相同泵功下 ϕ 的比较

4.3 相同流速下换热量的比较

平片与开缝翅片相同流速下换热量的比较示于图 5。由图可见,在所研究的来流速度范围内,开缝翅片的换热量均高于平片,而且随着流速的增大,换热量增长的幅度越大,这就意味着:相同的换热量下,开缝翅片换热器的体积大大小于平片换热器。另外,减少开缝条数,相同流速下的换热量减少,但即使如此,在整个来流速度范围内,仅有两条缝的开缝 5 的平均换热量仍旧比平片高 8.5%。这充分体现了选用开缝翅片换热器的优越性:能够显著减小换热器的尺寸。

4.4 场协同原理分析

平片和开缝翅片的换热量和速度以及协同角和速度的关系如图 5 和图 6 所示。由图中可见,当来流速度增加,平片和开缝翅片协同角均增加,对应换热量也增加,这说明当来流速度增加时,换热的

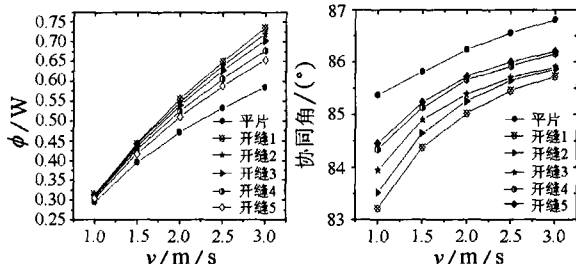


图 5 换热量 ϕ 的比较 图 6 协同角的比较

增强主要是由于流量的增加而引起的,但场的协同性变差;相同 Re 数下,所有开缝翅片的协同角均小于平片,而对应换热量却高于平片,随着开缝条数的减少,开缝翅片的协同角增大,换热量减少。这些变化再次验证了场协同原理的正确性。

5 结 论

(1) 并非在所有来流速度或 Re 数下开缝翅片换热器传热和阻力的综合性能均优于平片。在较低流速范围内,开缝翅片与平片性能曲线相交,交叉点前,平片换热器的综合性能优于开缝翅片,但在交叉点后,随着来流速度的增大,开缝翅片换热器的性能将越来越优于平片。这个交叉点对应的转折 Re 数的大小,依据不同的开缝翅片缝的布置形式的不同而不同,交叉点 Re 数越小,换热器在低流速和 Re 数下的换热性能越好。

(2) 减少按照“前疏后密”方式布置的开缝翅片开缝条数可以有效减小转折 Re 数并显著改善低 Re 数下的换热性能。

(3) 用于较低流速和 Re 数下的空调蒸发器用开缝翅片设计,为了同时兼顾较高和较低流速下换热器的性能,建议开缝条数不宜过多(本文的设计参数下,开缝条数不宜超过 5 条)。

(4) 开缝翅片换热器的综合性能在低流速和 Re 数下差于平片,但通过数值设计可以获得几乎接近于平片性能的开缝设计方案,如开缝 4,但它在整个来流速度和 Re 数范围内的换热量却高于平片,从而有效的减小了换热器的体积。

(5) 本研究再次验证了场协同原理的正确性。

参 考 文 献

- [1] H C Kang, M H Kim. Effect of Strip Location on the Air-Side Pressure Drop and Heat Transfer in Strip Fin-and-Tube Heat Exchanger. *Int. J. Refrig.*, 1998, 22(2): 302-312
- [2] J Y Yun, K S Lee. Influence of Design Parameters on the Heat Transfer and Flow Friction Characteristics of the Heat Exchanger with Slit Fins. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2000, 43(14): 2529-2539
- [3] Z G Qu, W Q Tao, Y L He. Three Dimensional Numerical Simulation on Laminar Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics of Strip Fin Surfaces with X-Arrangement of Strips. *ASME J. Heat Transfer*, 2004, 126(4): 697-707
- [4] Y P Cheng, Z G Qu, W Q Tao, et al. Numerical Design of Efficient Slotted Fin Surface Based on the Field Synergy Principle. *Numer. Heat Transfer A*, 2004, 45(6): 517-538
- [5] 陶文铨. 数值传热学. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001