

纵向带突起内翅片管强化传热研究

吴 峰, 林 梅, 田 林, 王秋旺

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要:通过试验和数值模拟方法对一种带突起内翅片管内的对流换热特性进行了研究,并与直内翅片管的流动与传热特性进行了对比,实验表明带突起内翅片管的换热特性优于直内翅片管,起到了强化传热的作用,但同时其流动阻力相应增加。应用可实现 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型,模拟了带突起内翅片管内的流动与传热过程,计算结果与实验结果符合良好。结果表明:翅片管内周期性的突起改变了其内部流场及温度场的分布情况,相对于直内翅片管而言,产生了有利于强化换热的二次涡流,对流动边界层起到了一定的破坏作用,同时增加了其流场的湍动能,提高了换热壁面附近的温度梯度,强化了传热。

关 键 词:突起内翅片管; 强制对流; 传热特性; 强化传热; 二次涡流

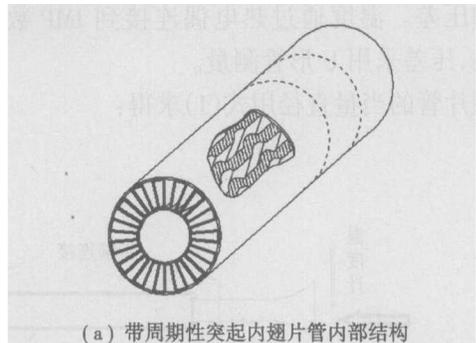
中图分类号: TK124 文献标识码: A

1 引 言

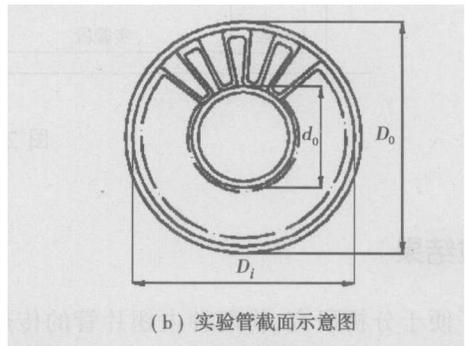
近年来由于能源材料费用的不断增长大大地推动了高效节能换热器的发展,各式各样的强化传热表面及设备不断出现,其中单相强化传热的机理就是增加二次传热表面或破坏原来未强化的流体速度或温度边界层。在强化传热技术中,翅片管由于其不但增加了传热面积,而且减少了热阻而得到广泛的应用^[1]。众所周知,流道截面形状对管内流动和传热有很大影响^[2],在管外侧加翅片是强化管外换热的最普遍方式之一^[3]。相对而言,利用内翅片管强化换热的研究工作开展得比较少^[4~8]。压缩机中冷器是提高多级压缩机整体效率的重要设备,它不仅对传热性能要求很高,而且对阻力损失要求也极为苛刻,因此,研发适合于这种换热设备的高效换热管具有十分重要的意义。

文献[9]对直内翅片管进行了实验及数值研究,研究表明内翅片管的传热特性优于普通光管,这是由于内翅片增加了管内流体的换热面积从而强化了

换热,本文所研究的内翅片管在增加换热面积的同时,翅片上带有周期性的突起(见图 1),相应几何尺寸见表 1。通过实验及数值计算的方法从流动与换热特性上与直内翅片管进行了分析对比。



(a) 带周期性突起内翅片管内部结构



(b) 实验管截面示意图

图 1 带突起内翅片管结构示意图

表 1 翅片管几何尺寸 (mm)

波纹数	管长	翅片展 开长度 l_f	外管外 径 D_o	外管内 径 D_i	芯管外 径 d_o	翅片厚 度 δ	当量直 径 D_h
M	l						
15	400	242.9	28	26	14	0.2	2.15

2 实验装置与数据

处理方法

实验系统装置如图 2 所示。实验中,通过调节

收稿日期: 2005-10-10; 修订日期: 2006-02-28

基金项目: 教育部霍英东教育基金会高等院校青年教师基金资助项目(91056)

作者简介: 吴峰(1978-)男,江西德兴人,西安交通大学博士研究生

变频器来改变电机的转速,从而改变通过翅片管的空气流量。对每根管沿轴向分别在 8 个截面上布置热电偶,每个截面沿周向相互成 120° 布置 3 个热电偶,热电偶沿实验管的轴向位置分别为 0 mm、20 mm、80 mm、140 mm、200 mm、260 mm、350 mm、400 mm,同时在实验管的进出口截面上分别布置 3 个热电偶,用来测量进出口空气的温度。采用恒热流边界条件,用均匀缠绕在管外侧的电加热丝作为加热元件,电加热丝外包装玻璃丝带和海绵以减少散热损失,实验加热段两端装有绝热良好的垫片和绝缘木来减少因轴向导热带来的热损失。

实验过程中所需测量的物理量为:管内壁面温度、进出口空气温度、加热功率、气体流量,试验段进出口的压差。温度通过热电偶连接到 IMP 数采板上采集,压差采用 U 形管测量。

翅片管的当量直径用式(1)求得:

$$D_h = \frac{\pi(D_i^2 - d_0^2) - 4\delta l_f}{\pi(D_i + d_0) + 2l_f} \quad (1)$$

局部对流换热系数和平均努塞尔数的定义为:

$$h_x = \frac{q}{t_w(x) - t_b(x)} \quad Nu = \frac{hD_h}{\lambda} \quad (2)$$

q 为加热面平均热流密度 (W/m^2), Reynolds 数的定义为:

$$Re = u_m D_h / \nu \quad (3)$$

其中: u_m —来流的平均流速 (m/s), 计算式为:

$$u_m = G / A_s \quad (4)$$

其中: G —体积流量; A_s —翅片管流通面积, 计算得:

$$A_s = \pi(D_i^2 - d_0^2)/4 - \delta l_f \quad (5)$$

阻力系数采用 Darcy 定义:

$$f = \frac{-(dp/dx)D_h}{\rho u_m^2 / 2} \quad (6)$$

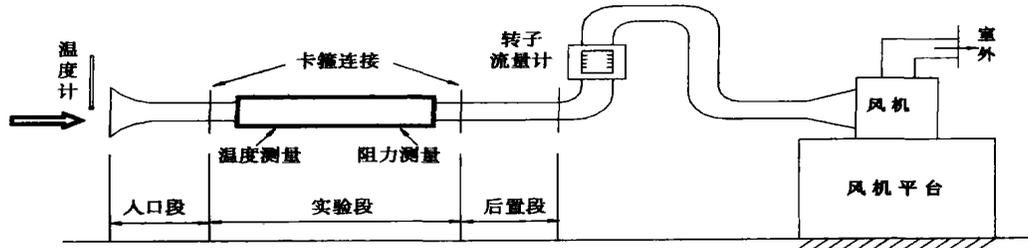


图 2 实验装置系统

3 实验结果

为了便于分析研究,将两种内翅片管的传热与阻力特性进行对比,其中带突起翅内片管为管一,无突起直内翅片管为管二。其传热与阻力特性实验关联式如下:

$$Nu = aRe^b \quad f = \alpha Re^\beta \quad (7)$$

管一与管二传热与阻力特性对比情况如图 3 所示。

由图 3 可知,带突起内翅片管的传热特性优于直内翅片管,但同时也增加了流动阻力。这是由于内翅片管通道中的突起对空气流动的边界层起到了扰动的作用,从而强化了传热,通过数值计算模拟翅片管内的流场及温度场,可以对带突起内翅片管强化传热的机理进行进一步分析。文献[9]对直内翅片管进行了数值模拟,文中将对带突起内翅片管进行数值模拟并与文献[9]结果进行对比分析。

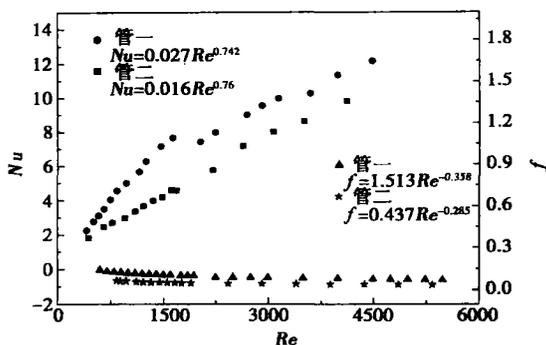


图 3 两种内翅片管对比

4 数值模拟

4.1 物理问题及控制方程

由于内翅片管翅片分布及边界条件的对称性与周期性,另外考虑到管内沿流动方向带有周期性的突起,为便于研究,选择如图 4 所示的单元作为本文

数值计算区域。为便于数值计算时的网格生成, 将计算区域的上边界 ab 弧线近似为直线, 这样计算区域沿流动方向横界面的形状由扇形变成了梯形 (见图 6)。

计算采用三维稳态强制对流湍流模型, 空气的变物性通过线性插值方法处理。其连续性方程、动量方程、能量方程的通用形式如下:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi \quad (8)$$

不同变量 ϕ 的扩散系数 Γ_ϕ 具体形式如表 2 所示。

表 2 不同变量 ϕ 、 Γ_ϕ 的表达式

	ϕ	Γ_ϕ
连续方程	1	0
u 方程	u	$\eta + \eta_t$
v 方程	v	$\eta + \eta_t$
w 方程	w	$\eta + \eta_t$
能量方程	t	$\eta / Pr + \eta_t / \sigma_t$
k 方程	k	$\eta + \eta_t / \sigma_k$
ϵ 方程	ϵ	$\eta + \eta_t / \sigma_\epsilon$

4.2 数值方法及边界条件

由于计算区域中同时存在着固体导热和气体对流换热, 故采用气固耦合计算模型。在这里耦合计算是指在计算中将气体和固体区域作为一个整体全场求解。固体和气体的交界面称为耦合面。采用有限容积法对计算区域进行离散, 采用六面体网格, 计算模型网格划分节点数为 $180(x) \times 38(y) \times 40(z)$ 。

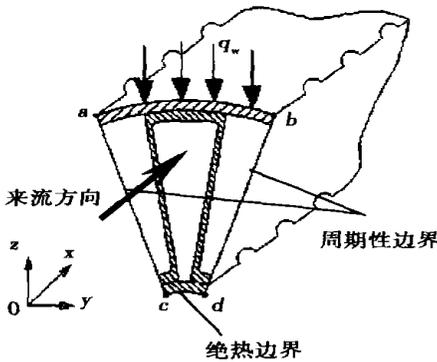


图 4 计算模型区域与边界条件

计算应用可实现 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型^[10], 采用 SIMPLEC 算法处理速度和压力的耦合问题, 对流项的离散格式为 QUICK, 由于计算区域对应圆心角很小, 为了便于建模, 可将计算模型横截面近似为梯形来处理。计算模型边界条件 (见图 4) 定义如下:

- 进口截面: 给定空气流速和温度;
- 出口截面: 局部单向化;
- ac 及 bd : 周期性边界条件;
- 加热面 ab : 给定热流;
- 内壁面 cd : 绝热边界。

4.3 计算结果与分析

计算所得内翅片管 Nu 数及 f 与实验结果对比情况如图 5 所示, 由图可知数值计算结果与试验值结果符合较好, 相对偏差在 18% 以内。

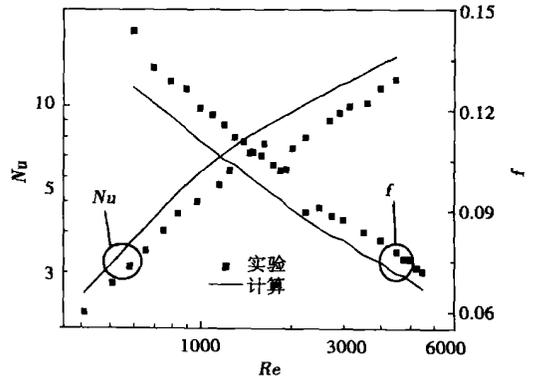


图 5 数值计算与实验值的对比

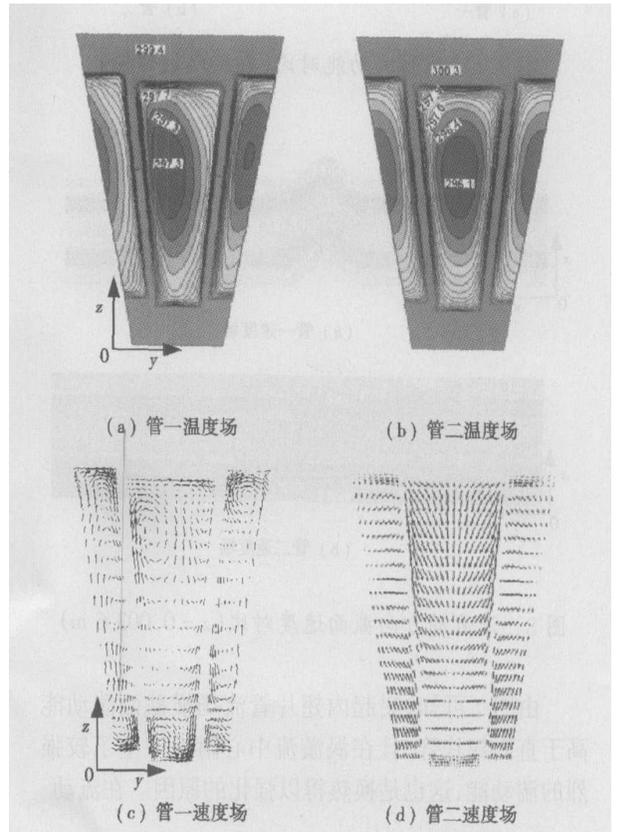


图 6 横截面温度场及速度场对比 (未按比例作图)

数值计算结果表明,带突起内翅片管与直内翅片管相比,流场和温度场均发生了变化。以 $Re=2197.3$ 时,垂直流动方向截取一横截面作来研究,两种内翅片管横截面温度场及速度场的计算结果对比情况如图 6 所示。其中带突起内翅片管(管一)所取的横截面位于相邻两个突起之间。

由图 6 可知,管一横截面的温度场发生了明显的变化,相对于管二而言,其横截面等温线为非椭圆形。此外管一横截面流场内产生了有利于强化换热的二次涡流,涡流靠近壁面,导致壁面温度梯度有了明显的提高,从而对换热起到了显著的影响,增加了其平均换热系数。进一步分析两种内翅片管横截面内湍动能的分布情况如图 7 所示。

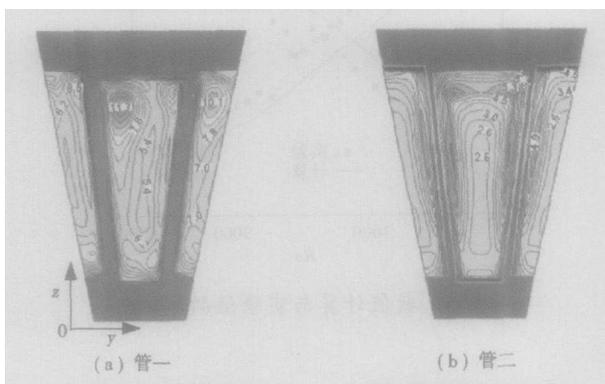


图 7 横截面湍动能对比(未按比例作图)

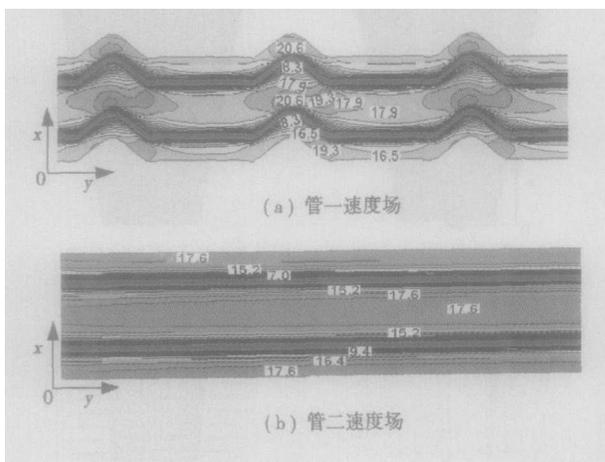


图 8 沿流动方向截面速度对比($z=0.0036\text{ m}$)

由图 7 可知,突起内翅片管流场横截面湍动能高于直内翅片管,且在涡流中心附近产生了较强烈的湍动能,这也是换热得以强化的原因。在流动

区域内垂直于 z 轴作一截面,研究两种内翅片管内流速的分布情况如图 8 所示。

进一步分析沿流动方向的速度分布(见图 8),相对于管二的速度分布而言,管一沿流动方向截面内的流场分布非常复杂,速度分布呈现出 irregularity,其变化也相当剧烈,在内翅片突起附近流速达到了最高,这在一定程度上增加了流动的扰动性,有利于强化换热。

5 结 论

通过实验研究方法得出了一种带突起内翅片管的流动与传热特性,实验表明带突起内翅片管传热特性优于直内翅片管,但同时流动阻力增加。

通过数值计算分析,对比了两种内翅片的温度场及速度场,从数值仿真的角度探究了带突起内翅片管强化换热机理。数值计算表明,内翅片管周期性突起改变了其内部流场及温度场的分布情况,相比较于直内翅片管而言,产生了有利于强化换热的二次涡流,相应增加了其流场的湍动能,提高了换热壁面附近的温度梯度,强化了传热。

参考文献:

- [1] 钱颂文,朱冬生.管式换热器强化传热技术[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [2] SHAH R K, LONDON A L. Laminar flow forced convection in ducts [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [3] 林宗虎. 强化传热及其工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
- [4] 宇波,王秋旺,陶文铨. 波纹内翅片管换热与阻力特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(3): 334-337.
- [5] YU B, NIE JH, WANG Q W, et al. Experimental study on the pressure drop and heat transfer characteristics of tubes with internal wave-like longitudinal fins [J]. Heat and Mass Transfer, 1999, 35: 65-73.
- [6] 贺群武,罗来勤,王秋旺,等. 内翅片波纹管中对流换热与阻力特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(4): 655-657.
- [7] 田林,罗来勤,王秋旺. 两种内翅片管对流换热与阻力特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(3): 471-473.
- [8] 谢公南,王秋旺,罗来勤. 管内强化传热性能的熵产分析与性能评价[J]. 化工学报, 2006, 57(2): 241-245.
- [9] 吴峰,林梅,田林,等. 纵向内翅片管对流换热特性的实验及数值研究[J]. 化工学报, 2005, 56(11): 2065-2068.
- [10] 陶文铨. 数值传热学[M]. (第二版). 西安:西安交通大学出版社,2000.

(渠源 编辑)

R113 Nucleate Boiling under a High Heat-flux Density[刊, 汉]/JIA Tao, DIAO Yan-hua (Postgraduate College of Chinese Academy of Sciences under the Engineering Thermophysics Research Institute of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080)// Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2006, 21(3). — 279 ~ 282

A R113 nucleate boiling experiment was conducted on a transparent ITO glass. During the experiment a high speed CCD (Charge Coupled Device) camera was placed under the ITO glass to take photos of the bubble images. The advantage of such a camera shooting consists in the elimination of the interference to the camera shooting caused by the merging of the fluid and bubbles. By the use of an image edge detection technique these bubble images were processed so that one can clearly see the boundaries of various bubbles in the bubble cluster, thus making it possible to correctly identify the quantity of bubbles. By taking account of the difference between the quantity of bubbles due to their merging and the quantity of nucleation sites under the bubbles, the actual magnitude of nucleation site quantity can be determined. Finally, a curve showing the variation of densities of the nucleation sites with heat-flux densities was plotted. **Key words:** nucleate boiling, image edge detection; nucleation site

纵向带突起内翅片管强化传热研究 = A Study of the Intensified Heat Transfer of Longitudinally Ridged Internal-finned Tubes[刊, 汉]/WU Feng, LIN Mei, TIAN Lin, et al (State Key Laboratory of Power Engineering Multi-phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)// Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2006, 21(3). — 283 ~ 286

Through experiments and numerical simulation methods a study has been conducted of the characteristics of convection heat exchange of ridged internal-finned tubes and a comparison of the above characteristics with the flow and heat transfer characteristics of straight internal-finned tubes performed. The experimental results indicate that the heat exchange characteristics of ridged internal-finned tubes are better than those of straight internal-finned tubes in terms of intensified heat transfer performance, but at the same time there is a corresponding increase in flow resistance. Through the adoption of a turbulent flow model capable of realizing $k-\epsilon$ equation, the flow and heat transfer process of ridged internal-finned tubes have been simulated. The calculation results are in good agreement with the experimental ones. The calculation results indicate that the periodical ridges inside the finned tubes have changed the distribution of the inner-flow fields and temperature ones. Relative to the straight internal-finned tubes a secondary vortex flow has emerged, which is conducive to an intensified heat exchange and plays a definite destructive role to the flow boundary layer. Meanwhile, by increasing the turbulent kinetic energy of the flow field, the temperature gradient in the neighborhood of the heat exchange wall surfaces has been enhanced, contributing to an intensification of heat transfer. **Key words:** ridged internal-finned tube, forced convection, heat transfer characteristics, intensified heat transfer, secondary vortex flow

电站凝汽器铜管的视情更换原则 = Principles for On-condition Replacement of Copper Tubes in Power Plant Condensers[刊, 汉]/CAO Zhong-zhong, GU Yu-jiong, YANG Kun (Education Ministry Key Laboratory of Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control under the North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206)// Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2006, 21(3). — 287 ~ 290

On the basis of RCM qualitative and maintainability analysis a rational maintenance mode is determined for power plant condensers. Through the decision-making of maintenance modes a batch replacement model has been chosen and a model for quantitative analysis of on-condition replacement of copper tubes in power plant condensers established. A study was conducted of the principles for choosing status parameters for the on-condition replacement of copper tubes in condensers. With the N-11220-4 type condenser of a 200 MW unit serving as an object of study a case study has been performed. Relevant proposals for revising maintenance regulations currently in force are put forward. The research results show that