

三维内肋螺旋管内强化换热实验

李隆键, 辛明道, 崔文智

(重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 采用实验方法测试了三维内肋螺旋管内的流动传热性能。实验用的螺旋管曲率 $\delta=0.0663$, 测试段长 1.15 m, 试验工质为水。对螺旋光管和两种不同结构尺寸的三维内肋管进行了测试, 测量的雷诺数范围约为 $Re=1000\sim 8500$ 。结果表明, 三维内肋对螺旋管内的对流换热仍然有较大的强化效果, 同时流阻也有一定程度的增加。与未加肋的螺旋光管相比, 在测试的流动范围内, 两种三维内肋管的平均换热强化比达 1.71 和 2.03, 热力性能系数为 1.2~1.66。

关 键 词: 螺旋管; 肋化; 强化传热

中图分类号: TK172

文献标识码: A

符号表

D_i —螺旋管内径/m	D_n —狄恩数($= Re \cdot \delta^{1/2}$)
e —肋高/m	f —阻力系数
N —热力性能系数	Nu —努谢尔特数
P —压力/Pa	P_a —三维内肋轴向间距
P_c —三维内肋周向间距	Q —换热量/W
q —热流密度/ $W \cdot m^{-2}$	Re —雷诺数
T —温度/ $^{\circ}C$	W —肋宽/m
δ —曲率	ρ —密度/ $kg \cdot m^{-3}$

1 引 言

由于螺旋管换热器兼具管壳式换热器结构坚固、适应性强、选材范围广、易于制造、生产成本低等优点, 因此被广泛用于制冷与空调、化工、医药等行业。例如, 制冷蒸发器及制冷机中间冷却器、气-液热交换器、冷凝器及中小型分离装置的主换热器、液化器等。在化工厂中, 精馏塔的再沸器以及加热冷却装置也常选用螺旋管换热器。另外, 新型太阳能集热器以及核反应堆蒸发器也采用螺旋管换热器。研究结果显示, 螺旋管内二次流对层流换热的强化效果比较显著, 与直管情形相比, 弯管内层流换热强化比高达 2~4 倍(湍流换热强化比仅有 1.1~1.3)^[1~3]。因此工程实际中使用螺旋管换热器常用于高粘度流体的加热或冷却, 且适用于处理小流量或

者所需传热面积较小的情况。在高粘度、小流量情形下, 管内侧换热系数的提高总是很有限的。较小的管内侧换热系数往往成为制约螺旋管换热器整体换热性能的薄弱环节, 所以对螺旋管内对流换热的强化十分必要。然而, 至今还未见任何采用扩展表面强化方式强化螺旋管内流动换热的有关报道。本文应用三维内肋表面强化螺旋管内的流动换热, 采用实验方法研究新型螺旋管内的流动传热特性。三维内肋表面强化技术首先应用于直管内的强化换热^[4]。性能比较显示, 三维内肋管的换热性能明显优于其它二维粗糙肋管和插入绕丝、绕带等强化方式。此外, 三维内肋兼具加工切削量小, 对管壁破坏较轻, 可加工肋高较大等优点。把三维内肋表面强化方法与离心力引起的二次流强化结合起来的复合强化技术将大大改善螺旋管内的换热性能、改善材料的工作条件及换热系统的热效率, 使设备更加紧凑。这种新型螺旋管换热器突破了传统的螺旋管换热器单纯依靠二次流增强管内对流换热的强化机理, 对螺旋管内强化对流换热的研究是一个新的尝试。本文首先对层流区充分发展三维内肋表面强化螺旋管的单相对流换热进行实验研究。

2 实验装置及实验过程

图 1 为实验装置简图, 本实验系统为开式循环, 实验工质为水。试验段是 $\Phi 16 \times 2$ mm 的紫铜管绕制成直径为 181 mm(管心距)的螺圈两圈, 螺旋节距为 75 mm。Manlapaz & churchill^[2] 以及其他研究者通过对整个层流区的数值解和实验研究得出结论, 螺旋管节距只有大于弯曲直径时才有明显影响。因此, 螺旋管可以按水平弯管近似处理。实验段弯曲螺旋管总长 1 147 mm, 螺旋段前有 500 mm 长的流动稳定段。螺旋管外表面均匀缠绕 4×0.2 mm 的扁形电阻丝实现等热流密度加热。电阻丝套在石棉玻纤

管内与管壁面电绝缘。加热段电阻丝连接到三级串联调压器的输出端, 通过调压器调节加热段的加热功率。电阻丝的具体加热功率由一对电压表和电流表读出。电阻丝的外侧包裹玻纤棉然后缠绕厚 30 mm 的玻纤保温材料, 以减少加热段的热损失。实验管壁温度由铆接于管壁上的 0.2 mm 铜-康铜热电偶(实验前经过标定)测量。为了监测管内流动传热是否达到充分发展, 分别在实验段的中间截面和出口截面处周向均匀布置 6 对热电偶, 然后在这两个截面之间螺圈外侧轴向均匀布置 4 对热电偶。冷却水进、出口水温由分别插入进、出口混合室的 3 对热电偶测量。在实验段进出口处分别钻有 $\Phi 4$ mm 的孔, 连接到 U 形水银差压计测量实验段的进出口压差。冷却水流量由称重法测量。为保证流量稳定, 采用一个 10 m 高的高位水箱保证实验回路所需压头。

热电偶温差电动势采用 HP3457A 巡检仪进行数据采集, 该数采系统具有抗结点相互干扰的特点, 精度可达 0.000 1 mV。

实验测试了三根管子的流动传热性能。第一根为螺旋光管, 实验目的主要是测试系统的可靠性, 以及与已有分析和

实验结果进行比较以检验系统的准确性。其余两根试验管为加工有三维内肋表面的螺旋管, 三维内肋肋齿排列方式均为叉排, 如图 2 所示。参照三维内肋直管的实验结果^[4], 按照最佳强化比的原则选用了两种较优的肋型结构尺寸, 如表 1 所示。两种管型的肋宽相同。与 No. 1 管相比, No. 2 管的特点是肋高较大, 轴向肋间距也比 No. 1 管的大。实验管安装前均用稀

硝酸(浓度 5%)浸泡加工表面, 以消除残留金属屑和附加热阻的影响。

实验采用降负荷方式进行, 通过同步调节流量和加热功率实现工况的变化。每个运行工况稳定运行 30 min 后, 同时测量流量、加热功率和试验管壁温。对所有的测量工况, 系统进、出能量偏差最大 6.7%, 最小 3.8%, 平均散热率 4.6%。

表 1 三维内肋管肋型结构尺寸

管号	e/D_i	Pa/e	W/Pa	Pc/W	排列方式
No 1	0.054 17	3.076 9	0.25	6.28	叉排
No 2	0.079 17	4.210 5	0.125	6.28	叉排

3 实验结果和分析

水在螺旋光管内层流充分发展的流动阻力系数的实验结果如图 3 所示。实验的 Re 数范围为 1 900 ~ 8 500。根据前人实验观察和总结出来的结果, 二次流对层流有一个稳定的作用, 螺旋管内从层流到湍流过渡的临界 Re 数远高于在直管内的。Schmidt^[3] 推荐螺旋管内从层流到湍流过渡的临界 Re 数为:

$$Re_{crit} = 2\,300(1 + 8.6 \delta^{.45}) \quad (1)$$

Srinivasan 等人提出的临界 Re 数准则式为^[4]:

$$Re_{crit} = 2\,100(1 + 12 \delta^{.5}) \quad (2)$$

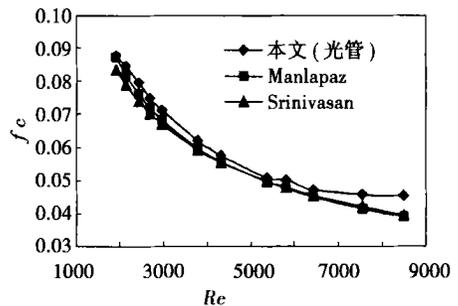


图 3 螺旋管内流动阻力系数

本实验螺旋管的曲率均为 0.066 3。根据以上研究者提出的准则式, 本实验管内从层流过渡到湍流的临界 Re 数依次为: 8 133 和 8 588。可见, 本实验管中的流动为层流。图 3 中同时示出了根据文献 [2] 及文献 [6] 的实验关系准则式绘制的螺旋管内流阻系数随 Re 数的变化曲线。由图 3 可见, 实验结果与以前的实验关联式吻合很好。除了在较高 Re 数时偏差较大外, 在 Re 数小于 8 000 的范围内, 本实验数据与 Srinivasan 等人的结果平均相对偏差为

图 1 实验装置系统简图

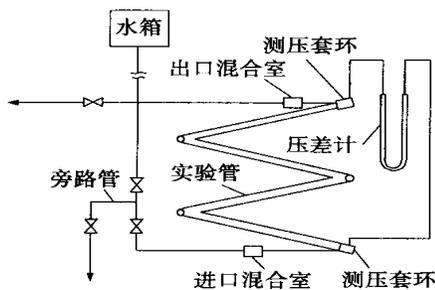
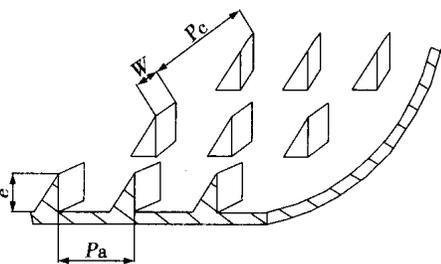


图 2 三维内肋管肋型结构简图



5.48%，最大相对偏差不超过 7%。与 Manlapaz 等人的结果相比，平均偏差 4.25%，最大相对偏差不超过 5.5%。在较大 Re 数时偏差较大，这可能是实际管内流动已接近湍流的缘故。

实验螺旋光管内传热测试结果与已有实验传热经验公式计算结果的比较如图 4 所示。图中同时给出了按文献 [1]、文献 [7] 提出的经验公式计算曲线。

Jassen 等人提出的经验公式为：

$$Nu = 0.7 Re^{0.43} Pr^{1/6} \delta^{0.07} \quad (3)$$

虽然此式的适用范围为 $Pr > 20$ ，但水 ($Pr \approx 5$) 作为工质时仍然具有一定的可比性。Dravid 等人在实验基础上提出了一个广泛适用的经验关系式：

$$Nu = (0.76 + 0.065 \delta D_n^{0.5}) Pr^{0.175} \quad (4)$$

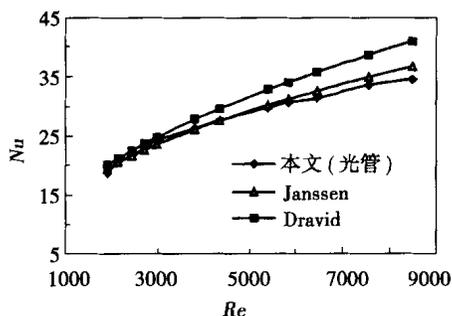


图 4 螺旋管内对流换热特性

此式的适用范围为： $50 < D_n < 2000$ ， $5 < Pr < 175$ 。由图 4 可见，本实验测试螺旋管内层流充分发展， Nu 数稍微偏低，与 Janssen 等人的经验公式的计算值相比，本文的实验结果平均相对偏低 0.7%，最大相对偏差不超过 $\pm 4\%$ 。而在 Re 数小于 8000 的范围内，本实验结果比 Dravid 等人的经验公式计算值平均低 6.88%，最大相对偏差 10% 左右。总的来说，本实验装置的测量系统具有足够的精确度，测试方法是正确合理的，测试结果是可信的。

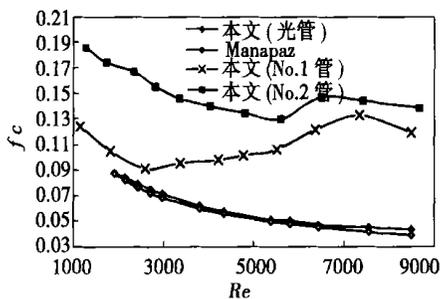


图 5 三维内肋螺旋管内流动阻力系数

特性实验结果分别示于图 5 和图 6 中。本文对两种三维内肋型结构螺旋管进行了测试。图 5 中还同时示出了本文对螺旋光管的测试结果和按 Janssen 等人提出的经验公式计算结果。与 No. 1 管相比，No. 2 管的特点是肋高较大，轴向肋间距也比 No. 1 管的大。由图 5 和图 6 可见，相对肋高对螺旋管内换热和流动阻力的影响很大。随着相对肋高的增加，三维内肋螺旋管内流动阻力系数和换热系数也随之增大。在实验测量范围内，与相同曲率的螺旋光管相比，No. 1 三维螺旋管的换热强化比 ($Nu_{c,1}/Nu_c$) 平均达 1.7，最大达 2.1，而平均阻力系数比为 1.9；No. 2 管的换热强化比平均值为 2，最大可达 2.3，而平均阻力系数比达 2.4 左右。众所周知，在层流区，三维表面上换热的增强主要依靠换热表面的扩展。随着流动的增强，粗糙表面对流体的扰动作用增加，有可能导致流型发生变化，比如从层流向湍流的过渡。螺旋管内二次流虽然对流体有层流化的作用，以至在光滑螺旋管内从层流向湍流过渡的临界 Re 数高达 8500 左右，但在内部肋的扰动作用下，流型的转换或过渡极有可能大大提前。三维内肋螺旋管内的流动十分复杂，其中既有弯曲管内离心力引起的二次流作用，又存在三维肋的扰动，对此复杂流动的理论分析还未见报道。

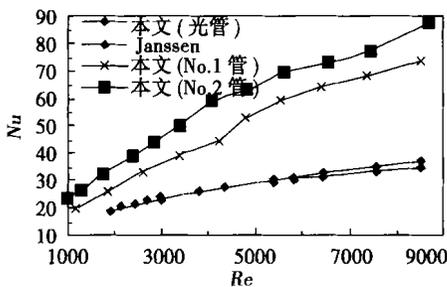
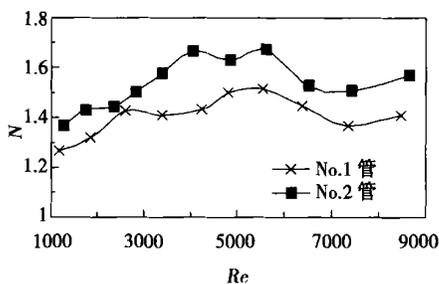


图 6 三维内肋螺旋管内对流换热特性



7 三维内肋螺旋管的热力性能系数

图7示出了两种三维内肋螺旋管的热力性能系数 $N(Nu_{c,1}/Nu_c)(f_{c,1}/f_c)^{1/3}$ 随 Re 数的变化曲线。在本实验测量范围内($Re=1000\sim 8500$), No. 1 管的平均热力性能系数为 1.4 左右,在 $Re=5000$ 左右达到最大值 1.5; No. 2 管的平均热力性能系数达 1.53,在 $Re=4000$ 左右达到最大值 1.66。

4 结 论

(1) 首次将三维内肋用于螺旋管内的流动换热强化,并对螺旋光管和两种不同结构尺寸三维内肋螺旋管内的流动传热性能进行了实验研究。螺旋光管的流阻和传热性能测试结果与已有的实验结果吻合很好。

(2) 三维内肋扩展表面对螺旋管内的流动换热有较好的强化效果。在测试的 $Re=1000\sim 8500$ 的范围内,与光滑螺旋管相比,两种三维内肋螺旋管的平均换热强化比分别为 1.27 和 2.0,流阻系数的增加倍数分别为 1.91 和 2.46,平均热力性能系数分别为 1.40 和 1.53。

(3) 两种三维内肋螺旋管的热力性能相比,相对肋高较大的强化表面性能较优。

参考文献:

- [1] DRAVID A N, SMITH K A, MERRILL E W, et al. Effect on secondary fluid motion of a curved pipe[J]. *AICHE J*, 1971, 17: 1114-1122.
- [2] MANLAPZA R L, CHURCHILL S W. Fully developed laminar flow in a helically coiled tube of finite pitch[J]. *Chem Eng Commun*, 1980, 7: 57-78.
- [3] HOGG G W. The effect of secondary flow on point heat transfer coefficient for turbulent flow inside curved tubes[R]. *Ph D Thesis, Univ of Idaho*, 1968.
- [4] 廖光亚,高川云,王朝素.三维内肋管的换热及流阻的实验研究. *工程热物理学报*, 1990 11(4): 422-425.
- [5] SCHMIDT E F. Wärmeübergang und druckverlust in Rohrschlangen[J]. *Chemie-Ing-Techn*, 1967, 36: 781-789.
- [6] SRINIVASAN P S, NANDAPURKAR S S, HOLLAND F A. Friction factors for coils[J]. *Trans Inst Chem Eng*, 1970, 48: 156-T161.
- [7] JASSEN L A M, HOOGENDOORN C J. Laminar convective heat transfer in helical coiled tubes[J]. *Int Heat Transfer*, 1978 21: 1197-1206.

新技术,新产品

燃气轮机过滤器防冰消音器

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2003年1-2月号报道,燃气轮机在寒冷气候中运行可能导致进口结冰,结冰堵塞静态进口过滤系统,迅速增加通过滤网及其它进口部件的压降、冰积聚在进口导流罩上等,还可能导致性能降低和部件破坏。

法国 Bertin 技术公司设计了一种空气雾化喷嘴,使用这些喷嘴可以防止在燃气轮机过滤器进口处形成冰。把消音器设计成以抽气压力从燃气轮机压气机抽取的高压空气形式,避免了使用时产生高噪声。

空气雾化喷嘴完全由不锈钢(如304 L、316 L和其它不锈钢)制造。给定尺寸喷嘴发出的噪声不取决于空气压力,但主要取决于空气的质量流量。在给定的空气质量流量下,噪声级取决于喷嘴的直径,直径越大,噪声级越小。喷嘴的长度对噪声级影响很小。

(吉桂明 供稿)

三维内肋螺旋管内强化换热实验= **Experimental Research on Intensified Heat Exchange in a Three-dimensional Internally Finned Helical Pipe** [刊, 汉] / LI Long-jian, XIN Ming-dao CUI Wen-zhi (Power Engineering Institute under the Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 270~273

Tests and measurements were performed to investigate the flow and heat transfer performance in a three-dimensional internally finned helical pipe with a curvature of 0.066 3 and measurement section length of 1.15 m. With water serving as a working medium tests were carried out in a spiral bare pipe and a three-dimensional internally finned pipe of two different structural dimensions. The range of Reynolds number is $Re = 1\ 000\text{--}8\ 500$. The test results indicate that a relatively high intensification of convection heat exchange can be achieved in the spiral pipe by the use of three-dimensional inner fins, which is accompanied by a moderate increase in flow resistance. In comparison with bare spiral pipes without fins the average intensification ratio of heat exchange for the two kinds of three-dimensional internally finned pipe within the range of measured flows can reach 1.71 and 2.03 respectively with the thermodynamic performance factor being assessed at 1.2 - 1.66. **Key words:** spiral tube, ribbed tube, intensified heat transfer

大加速度场中层流扩散火焰流场的数值计算= **Numerical Calculation of Laminar Flow Field of a Diffusion Flame in a High Acceleration Field** [刊, 汉] / DONG Zhi-guang (Department of Urban Construction, Hubei Engineering Institute, Handan, China, Post Code: 056038), WU Jin-xiang, LIU Zhi-kai (Department of Thermal Energy Engineering, Hubei Polytechnical University, Tianjin, China, Post Code: 300130), DONG Zhi-hui (Handan Municipal Planning Design Institute, Handan, China, Post Code: 056006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 274~277

A numerical calculation method is proposed for calculating the laminar flow field of a combustor in a high acceleration field and a mathematical model for two-dimensional laminar flow combustion in the high acceleration field was set up. A control equation group was discretised. A SIMPLE algorithm and a staggered grid design were adopted and the relevant program was debugged. On the basis of the successfully debugged program a numerical simulation of the diffusion combustion process was performed of methane and air in the high acceleration field. The results of the calculation indicate that the uniform and high acceleration field along the axis of the combustor will exercise a significant influence on the velocity and temperature fields of the diffusion flame. On the one hand, it has intensified the diffusion/mixing process of the fuel and air, resulting in a length-reduction and thickening of the diffusion flame shape and a rise in flame surface temperature and thus enhancing its combustion speed. On the other hand, due to a floating force action the high-temperature air flow will assume a direction opposite to that of the fuel jet flow, which would produce a unstable flow field structure, triggering a unstable combustion process. **Key words:** high acceleration field, combustion, numerical simulation

微细微量螺旋加料器的试验研究= **Experimental Research on a Micro-particle and Micro-quantity Screw Feeder** [刊, 汉] / ZHANG Jie, GAO Tie-yu, HUI Shi-en (College of Energy & Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 278~280, 291

An experimental study of several types of self-designed micro-particle and micro-quantity solid-particle feeder has resulted in the identification of micro-quantity feeding rod types suitable for materials of different particle diameters. It is found that when carborundum particles have a Sauter mean diameter around 90 μm the pressure screw-feeding rod can accommodate a minimum flow of 0.4 g/min. With the carborundum particles assuming a Sauter mean diameter of 40 μm the two-wire relaxation screw feeder rod can attain a minimum flow rate of 0.6 g/min. A micro-particle and micro-quantity solid particle feeder featuring simple and reliable operation with an accurate quantification can be crucial for a uniform, continuous and stable feeding of powder during the experimental study of gas-solid two-phase flows. **Key words:** gas-solid two-phase flow, screw, feeding rod, relaxation, multi-wire

基于辐射能检测的智能燃烧进化优化系统研究= **A Study of the Optimization System of Radiation Energy Detection-based Intelligent Combustion Evolution** [刊, 汉] / MA Tao, XU Xiang-dong, WANG Xin-xin (Department of