

螺旋折流板三维肋翅片管换热器的传热性能研究

王真勇^{1,2}, 张正国², 高学农²

(1. 佛山神威热交换器有限公司 技术工程中心, 广东 佛山 528000; 2. 华南理工大学 传热强化与过程节能教育部重点实验室, 广东 广州 510640)

[摘要]文章以水和 VG32 液压油为实验换热对象, 研究了其在螺旋折流板低翅片管换热器和螺旋折流板三维肋翅片管换热器壳程的传热与压降性能。在相同的 Re 下, 螺旋折流板三维肋翅片管换热器的 Nu 是螺旋折流板低翅片管换热器的 1.6~2.6 倍。在相同流量下, 螺旋折流板三维肋翅片管换热器壳程压降稍大, 但它的传热流阻性能比是螺旋折流板低翅片管换热器的 1.39~2.15 倍。实验结果表明: 螺旋折流板三维肋翅片管换热器具有最佳的传热、压降和换热量综合性能。文章还对螺旋折流板三维肋翅片管换热器的强化传热的机理进行了分析。

[关键词]换热器; 螺旋折流板; 三维肋翅片管; 低翅片管; 强化传热

The Research on Heat Transfer Performance of Helical Baffled Heat Exchanger with Three-dimensional Rib-finned Tubes

Wang Zhenyong^{1,2}, Zhang Zhengguo², Gao Xuenong²

(1. Technology Engineering Center, Foshan KAMUI Heat Exchanger Co., Ltd., Foshan 528000; 2. Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation of the Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In the paper, the heat transfer and pressure drop performances of helical baffle heat exchanger with low-finned tubes and helical baffle heat exchanger with three-dimensional rib-finned tubes were studied experimentally for the lube oil as the experimental medium and water as the coolant. When at the same Re numbers, the Nu numbers of helical baffle heat exchanger with three-dimensional rib-finned tubes heat-exchanger was 1.6~2.6 times as large as that of the helical baffle heat exchanger with low-finned tubes heat-exchanger, and when at the same oil flow rate, the helical baffle heat exchanger with three-dimensional rib-finned tubes heat-exchanger's shell side pressure drops was larger, but the ratio of shell side heat transfer coefficients to pressure drops of helical baffle heat exchanger with three-dimensional rib-finned tubes heat-exchanger was 1.39~2.15 times as large as that of the helical baffle heat exchanger with low-finned tubes heat-exchanger. Experimental results showed that the helical baffle heat exchanger with three-dimensional rib-finned tubes had the best integrative performances on heat transfer and pressure drop. The mechanism of heat transfer enhancement on helical baffle heat exchanger with three-dimensional rib-finned tubes was analyzed.

Keywords: heat exchanger; helical-baffle; three-dimensional rib-finned tube; screw-finned tube; heat transfer enhancement

[收稿日期] 2008-06-02

[基金项目] 科技部 863 计划(2006AA05Z215)和广东省佛山市科技开发专项(2007A2022)

[作者简介] 王真勇(1975-), 男, 湖北人, 工程硕士, 工程师, 主要从事换热器的设计开发与强化传热研究工作。

螺旋折流板换热器是近几年发展起来的一种新型管间支撑结构换热器,其理想的壳程流道使流体在壳程呈连续柱塞状的流动,流体在流动过程中几乎没有返混现象和流动的死区。与普通的弓型折流板相比,螺旋折流板能使壳程压降更有效地转化为传热系数的提高。近年来有许多学者在这方面作出了深入的研究,P Stehlik 等^[1]对螺旋折流板管壳式换热器进行研究得出,相同条件下与传统弓型折流板换热器相比,换热器的传热系数提高 1.8 倍,流动阻力降低 25 %。强化传热领域的国际权威学者 A.E.Bergles^[2]将三维粗糙元或三维翅片管作为目前最先进的强化技术或第三代传热技术。因此将三维翅片管与螺旋折流板搭配是未来管壳式换热器壳程传热强化的发展趋势。近年来有许多研究也正朝着这一方向开发。例如新开发出的最典型的第三代三维翅片管有针翅管、花瓣管、菱形翅片管等。张正国^[3]比较了螺旋折流板花瓣管油冷却器和螺旋折流板低翅片管油冷却器的传热和压降性能。实验结果表明,螺旋折流板花瓣管油冷却器与螺旋折流板低翅片管油冷却器相比,总传热系数提高 10 % 以上,而压降却降低了 46 % 左右。赵晓曦^[4]以柴油为工质,研究了螺旋折流板菱形翅片管换热器的传热性能,实验结果表明,螺旋折流板菱形翅片管换热器的壳测传

热膜系数要比螺旋折流板光滑管换热器提高了 54 %~108 %,随着雷诺数的增加,提高的幅度更大,具有较好的强化传热效果;壳侧流体流动的阻力系数在实验范围内比螺旋折流板光滑管换热器降低了 30 %~50 %,具有优良的传热与流阻性能。

文章采用近年来新开发的三维外肋翅片(错齿型)管与螺旋折流板相搭配,制成了一种新型螺旋折流板三维肋翅片管换热器。并对传热管的布置作出了优化设计,有效避免了流体流动短路现象,并增强了扰流效果。折流板为 35° 角的三维连续螺旋型结构(如图 1),其特点是换热器设有中心管,折流板绕中心管螺旋缠绕。三维肋翅片管属于整体式翅片管(如图 2),即翅片直接在基管上刻切加工而成,不存在基管与翅片之间的热阻问题。肋翅片在管表面呈错齿状排列,在空间上具有三维性。

通过研究螺旋折流板三维肋翅片管换热器的传热与流阻性能,并与螺旋折流板低翅片管换热器的传热与流阻性能进行了对比分析,获得了该新型换热器传热性能提高的数据,并分析了其传热强化机理,为研究该类型换热器的设计、制造与应用打下了良好的基础。

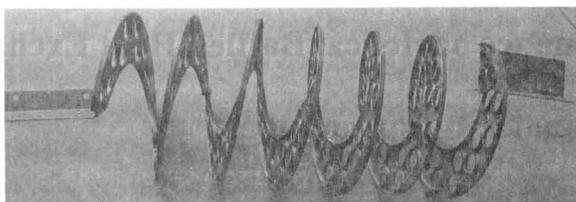


图 1 螺旋折流板图

Fig.1 The drawing of helical baffles

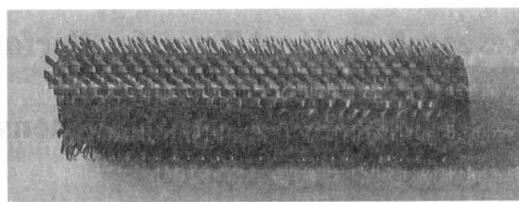


图 2 三维肋翅片管实物图

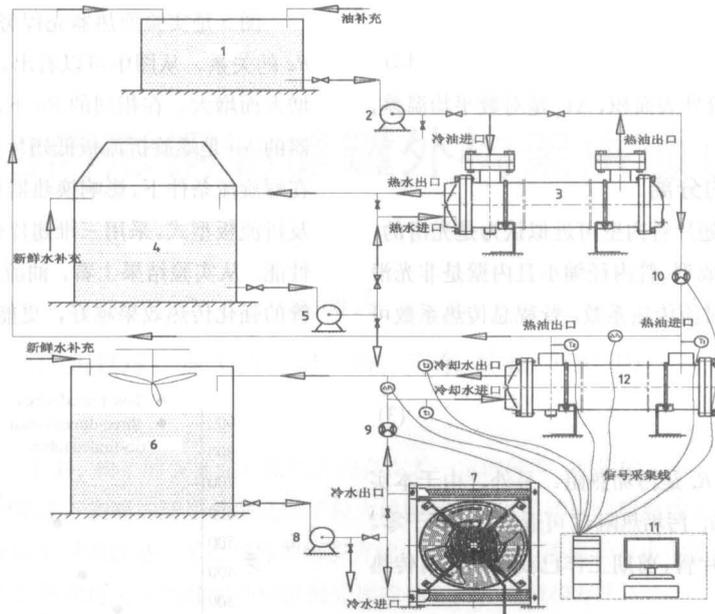
Fig.2 The drawing of three-dimensional rib-finned tube

1 实验装置与方法

1.1 实验装置

本实验系统如图 3 所示,主要是由三大部分组成。第 I 部分为液压油的加热系统。首先油泵从油箱中抽油至辅助换热器 I 壳程加热,加热至恒定温度后热油至待测的换热器。锅炉热水由水泵 I 送至辅助换热器 I 管程,然后再回至锅炉循环加热,用热水流量来控制油加热至恒定温度。第 II 部分为冷却水系统。冷却水由定量水泵 II 从冷却水塔抽送到辅助风冷式换

热器 II,达到规定的温度后冷却水再进入待测的换热器管程,换热后冷却水再回流至水塔。第 III 部分为计算机控制系统。实现控制功能:主要通过温度传感器、压力传感器来控制水泵 I、油泵油流量、辅助风冷式换热器 II 电机转速等变量因素。数据采集功能:这一模块是采集在平衡时各时段的数据,包括油流量、进出口油温度、冷却水流量、冷却水进出口温度、油及水在待测冷却器进出口压力差等数据。实现数据处理:根据计算机里事先编写的程序进行数据计算,得出待测换热器的各主要数据。



1—油箱；2—油泵；3—辅助换热器 I (水冷式)；4—热水锅炉；5—水泵 I；6—冷却塔；7—辅助换热器 II (风冷式)；
8—水泵 II；9—水流量计；10—油流量计；11—PC 控制系统；12—待测试的换热器；

图3 实验流程图

Fig.3 Schematic diagram of experimental system

1.2 实验换热器

实验换热器分别为螺旋折流板三维肋翅片管换热器和螺旋折流板低翅片管换热器。换热器外形尺寸均相同，管程双程，壳程单程，传热管数量相同。换热器结构如图4所示，尺寸参数如表1-1所示。

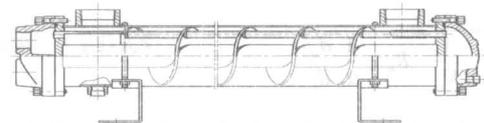


图4 螺旋折流板翅片管换热器

Fig.4 Helical baffle heat exchanger with fin tubes

表1 两种换热器的结构尺寸参数

Tab.1 Structural parameters of heat exchangers

换热器名称	换热器所用管数量/坯管规格	加工后翅片管外径/翅片肋化系数	折流板型式/壳体规格
螺旋折流板低翅片管换热器	20/φ12.7×1.4×675	φ12.7/2.5	35°螺旋折流板/φ115×2.5×757
螺旋折流板三维肋片管换热器	20/φ12×1.0×675	φ16.2/3.9	35°螺旋折流板/φ115×2.5×757

1.3 实验方法

实验约束条件：(1)壳程为热介质为 VG32 液压油；(2)油入口温度在 65 °C 左右；(3)测量最小起始流量 20 L/min，壳程实验以壳程压降达到 100 kPa 左右时的流量为最大流量；(4)管程为冷却水，入口温度稳定在 30 °C 左右，管程流量固定为 60 L/min；在对壳程实验时，通过改变油的流量，来测定油的进出口温度、油进出口压差、冷却水进出口温度，考察油流量的变化对传热系数及流阻性能的影响。

由于测量误差是不可避免的，故水侧和油侧的热负荷并不完全相等，本实验中两者的偏差在 ±5 % 以内。在数据处理中，热负荷 Q 以两者的平均值为准。

$$Q = (Q_i + Q_o) / 2 = 1/2 [V_i \rho_i C_{p0} (t_{i2} - t_{i1}) + V_o \rho_o C_{p0} (t_{o2} - t_{o1})] \quad (1)$$

式中： V_o 为壳程油的流量； V_i 为管程水的流量； ρ_o 为壳程油的密度； ρ_i 为管程水的密度； C_{p0} 为壳程油的定压比热； C_{pi} 为管程水的定压比热； t_{o1} 和 t_{o2} 为壳程进出口油温； t_{i1} 和 t_{i2} 为管程进出口水温。

2 实验数据处理

2.1 总传热系数的计算

总传热系数可表达为：

$$K_o = \frac{Q}{F_o \psi \Delta t_m} \quad (2)$$

其中: F_o 是传热管的坯管外表面积, Δt_m 是对数平均温差, ψ 为温度差校正系数。

2.2 管程对流传热系数的分离

本实验所用的三维外肋翅片管内壁可近似认为是光滑的, 而低翅片管是采用挤压加工成型, 管内径缩小且内壁是非光滑的, 需确定低翅片管的管内对流传热系数。管程总传热系数可以表达为:

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{\alpha_o} + R_w + R_s + \frac{F_o}{F_i \alpha_i} \quad (3)$$

式中: R_w 是管壁热阻, R_s 是污垢热阻。另外, 由于本实验所用的换热器均为新制产品, 污垢热阻 R_s 可近似认为等于零。

对于本实验研究的低翅片管, 前期工作已获得其管内传热系数关联式^[5]:

$$\alpha_i = 0.029 \frac{\lambda}{d_i} Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (4)$$

2.3 壳程对流传热系数的计算

保持管程冷却水流量不变, 改变壳程油流量进行传热实验, 式 3 可变形为:

$$\alpha_o = \frac{1}{\frac{1}{K_o} - R_w - \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_o}{d_i}} \quad (5)$$

对于弓形折流板与螺旋折流板来说, 壳侧 Re 的定义为:

$$Re = \frac{d_e u_o \rho_o}{\mu_o} \quad (6)$$

式中: d_e 为特征尺寸, 取为传热管的外径 d_o ; u_o 为壳程最小截面流速。

而对于壳程最小流通截面面积的计算为:

弓形折流板换热器:

$$A_{ag} = B_g D_o (1 - d_e / P_i) \quad (7)$$

螺旋折流板换热器:

$$A_{al} = 0.5 B_l D_o (1 - d_e / P_i) \quad (8)$$

式 7 及式 8 中: B 为折流板间距; D_o 为壳体的内径; P_i 为传热管平均间距; 弓形折流板换热器的流通截面积是换热器壳程两折流板间壳体中心线上的流动面积, 计算得出的流速 u 是该截面中的平均流速。螺旋折流板换热器壳程流体的螺旋型流动是以 $0.5D_o$ 为基准的流动, 即可以看成是半个壳体空间的流体, 在空间呈螺旋型的运动, 因而在对 A_{al} 的计算中乘以系数 0.5 ^[6]。对于壳程内设有中心管的换热器, D_o 要去除中心管所占用的部分。

3 实验结果及其分析

3.1 壳程传热实验结果

图 5 是实验换热器壳程努塞尔特准数 Nu 与壳程雷诺常数 Re 的关系。从图中可以看出, 换热器壳程的 Nu 均随着 Re 的增大而增大。在相同的 Re 下, 螺旋折流板三维肋翅片管换热器的 Nu 是螺旋折流板低翅片管换热器的 1.6~2.6 倍, 这表明, 在螺旋流条件下, 影响换热器传热系数的主要因素在于传热管及折流板型式, 采用三维翅片管比二维翅片管具有更高的传热性能。从实验结果上看, 油流量越大, 螺旋折流板三维肋翅片管的强化传热效果越好, 更能发挥其强化传热的优势。

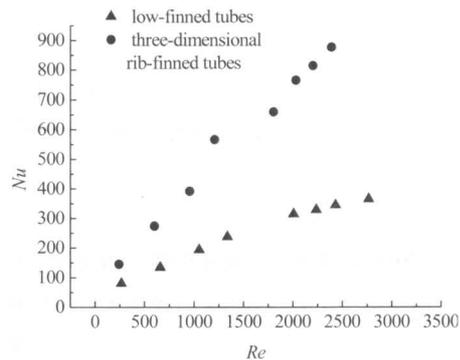


图 5 壳程的传热准数 Nu 与 Re 关系

Fig.5 Relation between Nu and Re in shell side

3.2 换热器的整体性能评价

图 6 是 2 台实验换热器壳程传热流阻性能比 $\alpha_o / \Delta P$ 与壳程 V 的关系。从图中可以看出, 在相同油流量 V 下, 具有三维肋翅片管的换热器的传热流阻性能比高于低翅片管的换热器, 且在低流量下三维肋翅片管换热器的传热流阻性能比更好。在相同油流量下, 三维肋翅片管与低翅片管相比, 在传热强化方面, 传热系数的提高幅度远大于其压降提高的幅度, 因此, 其强化传热效果更显著。

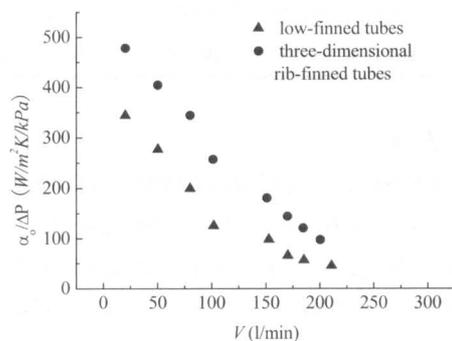


图 6 传热流阻性能比 $\alpha_o / \Delta P$ 与壳程流量 V 的关系

Fig.6 Relation between $\alpha_o / \Delta P$ and V in shell side

(下转第 170 页)

3.7 开展设计性实验

在仪器分析实验课中开展设计性实验,提高学生综合利用所学知识综合分析问题、解决问题,培养学生的创新能力。在我院所有的大型仪器中,学生分组,按照教师给定的课题查阅相关文献,选择合适的仪器,设计合理的方案,实现检测的目的。让学生了解科研实验设计的基本原则,逐步提高对实验研究中各种现象的观察、分析能力和独立思考、独立解决问题的能力,不断提高学生的创造思维能力和从事科学研究的基本素质和技能,促进和深化第一课堂的学习,为毕业论文设计打下坚实的基础。

4 结语

仪器分析课程的教学改革,是一项长期而艰巨的工作。只有不断努力,积极探索,才能使教学质量不断提高,使学生适

应时代的发展。

参考文献

- [1]朱广华,鞠帆先. 仪器分析发展史在大学教学中的应用探讨[J]. 大学化学, 2003, 18(4): 30-32.
- [2]李满秀,赵二劳,张海容,等. 仪器分析研究型开放实验的创新与实践[J]. 大学化学, 2007, 12(6): 28-30.
- [3]魏自民,李成. 现代仪器分析教学改革与实践[J]. 东北农业大学学报, 2007, 5(2): 50-51.
- [4]杨容,刘海燕,周雅璇,等. 仪器分析发展现状及其在农林科学中的应用[J]. 河北农业大学学报, 2004, 6(3): 51-52.

(本文文献格式:刘英菊,陈实,熊亚红,等. 仪器分析教学改革初探[J]. 广东化工, 2008, 35(7): 168-170)

(上接第156页)

4 螺旋折流板三维肋翅片管换热器的强化传热机理

螺旋折流板三维肋翅片管换热器的强化传热机理主要在于两个方面。(1)螺旋流动的传热强化机理:螺旋导流使流体的流速分布均匀,消除了流体流动的返混现象,减少了流体流动的死区,从而使壳程的压降有效地转变为传热系数的提高;流体在螺旋流道内作非正交绕流,实现了流场和温度场的协同,从而强化了传热。(2)三维肋翅片管强化传热机理:锯齿状肋翅片管是一种具有三维翅片结构的高效强化管,如图2所示。肋翅片是对圆管外表面进行刻切加工而成。肋翅片在圆管周向均匀分布且与相邻的另一圈周向肋翅片错开分布,即在传热管的轴向上肋翅片锯齿排列。肋翅片呈矩形状,按加工方向与管轴向成 $80^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 夹角。管强化传热包括三个方面:一是肋片状翅片有效地增大了传热面积,三维肋翅片管的肋化系数是普通低翅片管肋化系数的1.5倍以上,

油流体与管接触的传热面积得到了很大的提高,能有效提高换热负荷;二是间断的肋翅片错开排列,对管表面流体的边界层进行反复切割、减薄,并使这一过程加速,使油流体在较低的 Re 下就可达到湍流状态,从而达到了提高传热的效果。而低翅片管是一种二维翅片管,油流体在管外流动时很难深入到翅片根部,对油流体边界层的切割作用也不如三维肋翅片管有效。三是肋翅片与管的轴向具有一定的倾斜夹角,在流体径向非匀速绕流过程中,由于存在速度梯度,边界层分离速度加快,提高了肋翅片效率,从而实现了强化传热。

5 结论

实验研究了油在螺旋折流板低翅片管换热器和螺旋折流板三维肋翅片管换热器壳程的传热与流阻性能。实验结果

及分析表明:在相同的 Re 下,螺旋折流板三维肋翅片管换热器的 Nu 是螺旋折流板低翅片管换热器的1.6~2.6倍,这表明三维翅片管比二维翅片管具有更高的传热性能。在壳程压降方面,在相同流量下,螺旋折流板三维肋翅片管换热器压降稍大,但它的传热流阻性能是螺旋折流板低翅片管换热器的1.39~2.15倍。螺旋折流板三维肋翅片管换热器有效地把两种强化传热方式结合,从而真正地达到了高效节能的目标,应用于工业各领域中将会产生巨大的经济效益。

参考文献

- [1]Stehlik P, Nemicansky J, Kral D, et al. W. Comparison of Correction factors of Shell and Tube Heat Exchangers with Segmental or Helical Baffles [J]. Heat Transfer Engineering, 1994, 15(1): 55-65.
- [2] Bergles A. E. Enhancement of Heat transfer. in Proc. 6th Int Heat Transfer Conf. Toronto. 1978, 16: 89-108.
- [3]张正国,方晓明,林培森,等. 螺旋折流板花瓣管冷却器的传热与流阻性能研究[J]. 核动力工程, 2001, 32(11): 443-445.
- [4]赵晓曦,邓先和,陆恩锡. 螺旋折流板菱形翅片管换热器的传热与流阻性能[J]. 化工学报, 2003. 03. 54(8): 388-391.
- [5]Zhang, Z G, Fang, K M Comparison of heat transfer and pressure drop for the helically baffled heat exchanger combined with three-dimensional and two-dimensional finned tubes[J]. Heat transfer engineering, 2006, 27(7): 17-22.
- [6]王良,螺旋折流板换热器传热阻力性能的实验研究[D]. 西安:能源与动力工程学院, 2000.

(本文文献格式:王真勇,张正国,高学农. 螺旋折流板三维肋翅片管换热器的传热性能研究[J]. 广东化工, 2008, 35(7): 153-156)