文章编号:1001-2060(2011)06-0681-06

管程组合转子传热及阻力特性的实验研究

杨卫民1,韩崇刚1,李锋祥2,张 震1

(1. 北京化工大学 机电工程学院,北京 100029; 2. 中华人民共和国知识产权局 专利局,北京 100191)

摘 要:借助于实验手段,分别以油和水为管程工质,研究了 管程组合转子的传热及阻力特性,同时将转子自身结构参数 对传热及阻力特性的影响进行了比较分析,分析结果表明, Re 数在 500~8000 的层流区和转捩区内,增大转子螺旋角 度对传热强化的贡献显著; Re 数在 1×10⁴~1×10⁵的旺盛 湍流区内,增大转子外径对传热强化的贡献明显,从而为转 子组合式强化传热装置的工业应用奠定了基础。

关键 词:管程组合转子;强化传热;阻力;结构参数

中图分类号: TK124 文献标识码: A

引 言

管壳式换热设备广泛应用于过程工业的各个领域,而多数管壳式换热设备都存在由于污垢造成的 传热效率低下问题。因此,研究换热表面污垢防止、 自清洁对强化传热、节能降耗、提高经济效益有着十 分重要的意义^[1]。管程组合转子技术具有强化传 热与在线自动清洗功能,其灵活的结构和材料设计 能够满足各种管壳换热器的工况及装配要求,为管 壳式换热设备污垢问题的解决提供了方案。

因此,对管程组合转子的传热及阻力特性展开 研究,具有重要的工程应用价值。本研究借助于实 验手段,研究管程组合转子的传热及阻力特性,同时 比较分析转子结构参数对传热及阻力特性的影响, 从而定量分析其传热效果提升的大小。

1 实验装置和数据处理方法

1.1 实验装置

本研究采用的管程组合转子传热及阻力特性的 实验装置原理如图1所示^[2]。实验装置由冷媒系 统、热媒系统、实验段和测量控制系统组成,实验系 统采用计算机自动控制和自动数据采集。应用基于 模糊自适应方法的自动控制系统,保证实验段进口 流量和温度的稳定可靠,可实现实验段进口流量 ± 2% 和进口温度 ±0.5 ℃的控制精度。



图 1 传热及阻力实验装置原理图 Fig. 1 Schematicdiagram of a heat transfer and resistance test device

为了保证实验测量的准确性,流量测量采用质量流量计(精度0.2级),温度测量采用共同基准测温差的方法。

实验段采用套管式结构,其有效换热管长为 2 m,并可根据需要加长或缩短。套管外管尺寸为 φ45 mm×3.5 mm,实验换热管直径小于 φ32 mm。 管外工作介质为去离子水,管内工作介质可以是去 离子水或 22 号润滑油。

在对 ϕ 27 × 2 黄铜圆管进行验证实验的基础 上,分别在其中安装 14 - 380、15.5 - 380、16.5 -380、19 - 100、19 - 400 共 5 种规格的管程组合转 子,转子代号前面的数字代表转子外径,后面的数字 代表转子导程。改变油温度和传热温差,进行 15 ~ 35 ℃、15 ~ 40 ℃、15 ~ 45 ℃、45 ~ 55 ℃、45 ~ 65 ℃、 45 ~ 75 ℃ 共 6 组温度组合的实验。管内为热媒 (油),管外走冷媒(去离子水)。冷媒入口温度和热 媒入口温度都控制在设定值 ±0.3 ℃。分别对 5 种

收稿日期:2010-11-03; 修订日期:2011-02-23

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(3102023)

作者简介:杨卫民(1965-),男,湖南会同人,北京化工大学教授.

"洁能芯"转子的传热和阻力特性进行分析,并于光 管进行比较。

然后,将管内介质更换为去离子水,进行 30~ 42 ℃、40~50 ℃两组温度组合的实验。管内为热媒 (去离子水),管外走冷媒(去离子水)。分别对上述 5种"洁能芯"转子的传热和阻力特性进行分析,并 于光管进行比较。

1.2 实验数据处理方法

采用间接拟合的方法确定管外的比例系数。基 于经典的对流传热和热传导理论的关系式:

$$\frac{1}{h_{i}A_{i}} = \frac{1}{KA_{o}} - \frac{1}{h_{o}A_{o}} - R_{w}$$
(1)

$$K = \frac{Q_{\rm i}}{\Delta T_{\rm m} A_{\rm o}} \tag{2}$$

$$Q_{i} = m_{i}c_{p,i}(T_{i,in} - T_{i,out})$$
(3)

$$R_{\rm w} = \frac{\ln(d_{\rm o}/d_{\rm i})}{2\pi\lambda_{\rm w}l} \tag{4}$$

$$\Delta T_{\rm m} = \frac{(T_{\rm i,in} - T_{\rm o,out}) - (T_{\rm i,out} - T_{\rm o,in})}{\ln[(T_{\rm i,in} - T_{\rm o,out}) / (T_{\rm i,out} - T_{\rm o,in})]}$$
(5)

将管程流体流量维持在最大值,改变壳程流体 流量,通过威尔逊图解法获得壳程对流传热系数,其 形式为:

$$h_{o} = C_{1} \frac{\lambda_{o}}{D_{h,o}} Re_{o}^{m} Pr_{o}^{n}$$
(6)

其中, 雷诺数的指数 *m* 为 0.8, 普朗特数的指数 *n* 为 0.4。因此, 可将壳程对流换热系数的威尔逊图 解式写为:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{C_1} \frac{1}{\left(\lambda_o / D_{\rm h,o}\right) Re_o^{0.8} Pr_o^{0.4}} + C_2 \tag{7}$$

式中: *C*₁一式(6)中的系数; *C*₂一换热管管壁热阻与管程对流传热热阻之和,即:

$$C_2 = R_{\rm w}A_{\rm o} + \frac{A_{\rm o}}{h_{\rm i}A_{\rm i}} \tag{8}$$

式(7) 可改写为:

$$Y = \frac{1}{C_1} X + C_2$$
 (9)

其中,
$$X = \frac{1}{(\lambda_o/D_{h,o}) Re_o^{0.8} Pr_o^{0.4}}; Y = \frac{1}{K}$$
。

通过威尔逊图解法计算斜率,获得 C₁ 的值,从 而就确定了壳程的对流传热系数公式。将壳程流体 流量维持在最大值(尽量降低壳程对流热阻),改变 管程流量,进行管程对流传热系数的计算。阻力系 数计算为:

$$f = \frac{2\Delta p}{\rho u^2} \frac{d_i}{l} \tag{10}$$

2 实验结果及分析比较

2.1 以油为工作介质的传热及阻力实验

2.1.1 传热特性

剔除物性影响后,油的传热性能随雷诺数的变 化如图2所示^[3]。

由图 2 可见,5 种规格的"洁能芯"转子的传热 性能均优于光管,尤其是在 Re 数低于 2300 的层流 区,Nu 数提高幅度最高都在 50% 以上;而对于 Re 数大于 2300 的转捩区和湍流区,几种外径较小的转 子(14、15.5、16.5) 传热性能与光管无异。分析其 原因,是随着 Re 的增大,边界层逐渐变薄,转子的叶 片也渐渐脱离边界层直至完全处于流体中心区,从 而转子对边界层的扰动效果从强到弱,甚至消失。



图 2 油实验传热性能比较



2.1.2 阻力特性

将5种"洁能芯"转子的阻力系数与光管进行 比较,如图3所示。

由图3可知,5种规格的"洁能芯"转子的管程 阻力均明显高于光管,均达到了光管的若干倍。阻 力系数的变化趋势与光管相似,层流区、转捩区和湍 流区分别遵循不同的变化趋势。

2.1.3 转子结构参数影响

结合实验数据,分别讨论导程和外径对转子传 热与阻力特性的影响。

对于 19 - 100 和 19 - 400 两种外径相同、导程 不同的转子,由图 2 可以看出,无论是在层流区、转 捩区还是湍流区,19 - 100 的传热 Nu 数明显高于 19 - 400 的传热 Nu 数,提高幅度在 30% ~ 100% 之间, 在层流区的效果尤其显著。图 3 显示,19~100 转 子的阻力系数也明显高于 19~400 的转子,高约 20%~60%。可见,流体的阻力压降与其旋流程度 成正相关。



图 3 油实验阻力特性比较



对于 14-380、15.5-380、16.5-380 3 种相同 导程、不同外径的转子,图 2 显示 3 种转子的传热 Nu 数并没有很明显差别,Nu 数大致呈 14-380 < 15.5-380 < 16.5-380 的情形。其主要原因是,3 种转子都可能处于流体中心区,而且转子在油中转 速较低(甚至不转),达不到充分扰动边界层的效 果。图 3 显示,阻力系数f明显呈 14-380 < 15.5-380 < 16.5-380 的情形,也就是说,转子外径的每 一点增大都会带来阻力压降的明显增加。而外径对 传热强化的贡献并不明显,甚至连 19-400 的转子 的传热 Nu 数也仅略高于 16.5-380 的转子。

在层流对流换热情况下^[4],流体的速度分布和 温度分布不像湍流那样平坦,流体与壁面间的温度 降产生在整个流动截面上。因此,对层流换热所采 取的强化措施,是使流体发生强烈的径向混合,使核 心区流体的速度场温度场趋于均匀,壁面及壁面附 近区域的温度梯度增大进而层流换热强化。

2.2 以水为工作介质的传热及阻力实验

2.2.1 传热特性

剔除物性影响后,各种转子的 Nu 数比较如图 4 所示。

5种转子的传热 Nu 数均明显高于光管加管端 挂件和光管经验公式,提高幅度约在 25% ~ 45%。 在光管入口处增设管端挂件,虽然对流体有一定的 扰动作用,但从传热数据看来,在旺盛湍流区,入口 的扰动对传热强化没有明显的贡献。因此,管端挂 件的主要功能是用来在管程定位"洁能芯"装置。





Fig. 4 Comparison of the heat transfer performance of water under the test

2.2.2 阻力特性

将各种转子的阻力系数f比较,如图5所示。





Fig. 5 Comparison of the resistance characteristics of water under the test

5种转子的阻力系数f均明显高于光管经验公式,增大幅度最高可达8倍。值得注意的是,带管端 挂件的光管阻力系数f约为光管经验公式的两倍。 可见,在旺盛湍流区,入口的扰动虽然对传热强化没 有贡献,但却造成明显的阻力压降增加。这充分表 明,应对管端挂件的结构形式进行改进,尽量削弱其 对入口流体的扰动与阻碍。

2.2.3 转子结构参数影响

对于 19-100 和 19-400 两种外径相同、导程 不同的转子,由图 4 可以看出, 19-100 的传热 Nu 数略高于 19-400 的传热 Nu 数,提高幅度不足 3%。可见,在 Re 数较高的旺盛湍流区,各种转子均 具有较高的旋转速度,再增大旋转速度所带来的效 果只能是增强中心流体的径向混合,这对于减薄热 边界层厚度没有明显效果。19-100转子的阻力系 数明显高于19-400的转子,高约50%。可见,转 子转速的增大对传热基本没有影,但却增大了管程 阻力压降。

对于14-380、15.5-380、16.5-380 三种相同 导程、不同外径的转子,图4显示,3种转子的传热 Nu数明显呈14-380 < 15.5-380 < 16.5-380 的 情形。可见,转子外径的增大对于强化湍流传热具 有更加明显的效果,这是因为,转子叶片高度的增大 可直接扩展其扰动半径,当其扰动半径触及热边界 层式,其传热强化效果将会更加显著。图5显示,阻 力系数f呈14-380 < 15.5-380 < 16.5-380 的情 形,但其增大幅度并不是很大。可见,转子外径并不 是造成阻力压降的主要因素。由图5可看出,19-400 的转子的阻力系数f与16.5-380 的转子相差 无几,这充分表明,完全可以尽可能增大转子外径, 而通过略微增大其导程保证阻力压降不会增大。

对于湍流,由于流体核心的速度场和温度场都 已经比较均匀,对流换热热阻主要存在于贴壁的流 体粘性底层中。因此,对湍流换热所采取的主要强 化措施是破坏边界层,即增加对边界层的扰动以减 薄层流底层的厚度,使传热温差发生在更加贴近壁 面的流体层中,增强换热能力。

2.3 综合性能比较

强化传热方法很多,目的无非是提高换热系统 的经济性和确保设备的安全运行。要确定一项强化 传热新技术是否先进,必须对其进行评价^[5]。鉴于 本研究的管程组合转子强化技术的主要应用领域, 不考虑不可逆性与能量贬值的影响,采用工程中广 泛应用的 PEC 对其综合性能进行评价,即:

 $PEC = (Nu_e/Nu_s) / (f_e/f_s)^{1/3}$ (11)

 式中: $Nu_e \cdot f_e$ 一强化管的努谢尔数、阻力系数; $Nu_s \cdot f_s$ 一光管(或经验公式)的努谢尔数、阻力系数。

 2.3.1 低雷诺数

以油工质实验的传热和阻力特性数据为基础, 按照式(10)对5种"洁能芯"转子的综合强化性能 进行评价。Re数范围约500-8000,将5种转子的 PEC随雷诺数的变化趋势比较如图6所示。

可以看出,各种转子在 Re = 2000 左右时,具有 最优的综合性能; Re 在 1500 ~ 2300,5 种转子的 PEC 均大于 1; 而在 Re 数小于 1500 的层流区和 Re 数大于 2300 的转捩区,PEC 多小于 1。

为了便于分析转子外径和导程这两个主要结构

参数对其在层流区和转捩区综合性能的影响,将14 -380、15.5-380和16.5-3803种转子的PEC随 雷诺数的变化趋势比较如图7所示;将19-100和 19-400两种转子的PEC随雷诺数的变化趋势比较 如图8所示。由图7可以看出,在Re数较低的层流 区和转捩区,增大转子的外径对于提高其综合性能 是不利的,而当Re数增大到一定程度,这种差别开 始缩小;而图8显示,在Re数较低的层流区和转捩 区,转子导程的增大对于提高其综合性能具有立竿 见影的效果,而当Re数逐渐增大的一定程度,其效 果就不甚明显了。这与前面油工质实验中关于转子 结构参数影响的分析是一致的。



图 6 基于油实验的各种转子的性能评价 Fig. 6 Performance evaluation of various rotors based on an oil test





2.3.2 高雷诺数

以水工质实验的传热和阻力特性数据为基础, *Re* 数范围约1×10⁴~1×10⁵,完全处于旺盛湍流 区,按照式(10)对5种"洁能芯"转子的综合强化性 能进行评价。将 5 种转子的 PEC 随雷诺数的变化 趋势比较如图 9 所示。可以看出,各种转子 Re 在 40000 左右时,具有最优的综合性能;在整个 Re 数 范围内,PEC 均小于1,表明"洁能芯"转子的阻力压 降偏大。



图 8 基于油实验的相同外径转子的性能比较 Fig. 8 Comparison of the performance of the rotors with an identical outer diameter based on an oil test



图 9 基于水实验的各种转子的性能评价 Fig. 9 Performance evaluation of various rotors based on a water test

图 9 显示, Re 在 10000 ~40000 范围内, 5 种"洁 能芯"转子的 PEC 数值均随 Re 数的增大而有所提 高; 在 Re 数大于 40000 的区域, 5 种转子的 PEC 数 值随 Re 数的增大而下降, 甚至下降趋势很明显。可 见,"洁能芯"技术在实际的工程应用中, 在保证换 热负荷的前提下, 可通过调节流动参数获得更优的 综合性能。

为了便于分析转子外径和导程这两个主要结构 参数对其在湍流区综合性能的影响,将14-380、 15.5-380和16.5-3803种转子的PEC随雷诺数 的变化趋势比较如图10所示;将19-100和19-400两种转子的PEC随雷诺数的变化趋势比较如图 11 所示。由图 10 可以看出,在 Re 数很大的旺盛湍流区,增大转子的外径对于提高其综合性能具有很明显的效果,这充分说明:在湍流传热中,应以破坏热边界层为主要的传热强化手段;而图 11 显示,在 Re 数很大的旺盛湍流区,转子导程的增大会显著降低其综合性能,可见,当转子转速达到一定程度后,再增大转速对传热强化的贡献已经很微弱,而所带来的阻力压降却非常显著。这与前面水工质实验中关于转子结构参数影响的分析是一致的。



图 10 基于水实验的相同导程转子的性能比较 Fig. 10 Comparison of the performance of the rotors with an identical lead based on a water test



图 11 基于水实验的相同外径转子的性能比较 Fig. 11 Comparison of the performance of the rotors with an identical outer diameter based on a water test

3 结 论

(1) Re 在 500~8000 的层流区和转捩区内,5 种规格的"洁能芯"管程组合转子可不同程度地提 高对流传热系数和传热 Nu 数,同时也不可避免地 增大了管程阻力压降;增大转子外径对传热强化的 贡献微弱,而阻力系数增大明显;增大转子螺旋角度 对传热强化的贡献显著,同时阻力压降也有较大 增长;

(2) Re 数为在 1×10⁴ ~ 1×10⁵ 的旺盛湍流区 内,5 种规格的"洁能芯"管程组合转子可不同程度 地提高对流传热系数和传热 Nu 数,同时也不可避 免地增大了管程阻力压降;增大转子外径对传热强 化的贡献明显,而阻力系数仅略有增大;增大转子螺 旋角度对传热强化的贡献微弱,却造成阻力压降的 较大增长。

(3)应根据流体的流动情况(层流、过渡流或 湍流)决定"洁能芯"转子的结构参数的改进方向。 强化层流传热,主要是增强管程流体的径向混合;而 强化湍流传热,主要是要加强对管程流体流动边界 层和热边界层的扰动。对于火力发电厂的凝汽器, 其流动多处于旺盛湍流区,在安装条件允许的情况 下,应尽可能选择外径较大(与换热管间隙较小)、 螺旋角度较小(导程较大)的"洁能芯"转子。

参考文献:

[1] 钱红卫,张 琳,龚 莉,等. 换热器自转清洗纽带自动阻垢技
 术的试验研究[J]. 石油机械,2005,33(7):4-5

QIAN Hong-wei, ZHANG Lin, Gong Li, et al. Experimental study of self-rotating washing twisted tape automatic fouling-resistant technology for heat exchangers [J]. Petroleum Machinery, 2005, 33 (7): 4-5.

- [2] MENG J A, LIANG X G, CHEN Z J, et al. Experimental study of heat transfer enhencement with wire coil inserts in laminar – transition-turbulent regimes at different Prandtl numbers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 4640 – 4651.
- [3] 孟继安. 基于场协同理论的纵向涡强化换热技术及其应用
 [D]. 北京:清华大学,2003.
 MENG Ji-an. Synergy theory-based longitudinal vortex intensified heat exchange technology and its applications [D]. Beijing: Tsing-hua University,2003.
- [4] 周森泉. 换热器温差场均匀性原则及其应用[D]. 北京:清华 大学,1995.

ZHOU Sen-quan. Uniformity principles for the temperature difference field in a heat exchanger and its applications [D]. Beijing: Engineering Mechanics Department of Tsinghua University,1995.

[5] 徐国想,邓先和,许兴友,等. 换热器传热强化性能评价方法分析[J]. 淮海工学院学报,2005,14(2):42-44. XU Guo-xiang, DENG Xian-he, XU Xing-you, et al. Analysis of the methods for evaluating the intensified heat transfer performance of a heat exchanger [J]. Journal of Huaihai Polytechnic College,2005, 14(2):42-44.

(丛 敏 编辑)

润滑油金属颗粒探测器

金属颗粒探测器是在线连续磨损碎片监测器,发出信号告知润滑油中是否存在金属颗粒,提醒运行人员 进行油况检查,确定机械健康状况。及时探测金属颗粒并早期警告即将发生的故障保证可靠的机器状况,降 低运行费用,防止昂贵部件的不必要修理和更换。另外,金属颗粒探测可以证实过滤系统的性能和故障,确 定系统冲洗,探测高腐蚀和磨蚀,排除取样错误并确认正确的维护。

摘译自柴油机和燃气轮机世界 2011 年 9 月刊

inlet and outlet temperature differences of the cold and hot fluid in both single-side and diagonal flow will invariably decrease. Furthermore, such a decreasing tendency of the diagonal flow is bigger than that of the single-side flow while the friction factor f and heat transfer factor j will gradually decrease. The flow and heat transfer characteristics of a single-side flow is superior to that of a diagonal flow. **Key words**: single-side flow, diagonal flow, numerical simulation, flow, heat exchange

管程组合转子传热及阻力特性的实验研究 = Experimental Study of the Heat Transfer and Resistance Characteristics of a Tube-side Combined Rotor [刊,汉]YANG Wei-min, HAN Chong-gang, ZHANG Zhen (Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China, Post Code: 100029), LI Feng-xiang (Patent Bureau, State Intellectural Property Office of PRC, China, Post Code: 100191) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2011, 26(6). –681~686

Tube-side combined rotor intensification technology has its functions to intensify heat transfer and self clean. With the help of the test means and oil and water serving as the working medium respectively in the tube side, studied were the heat transfer and resistance characteristics of a tube-side combined rotor. In the meantime, the influence of the self structural parameters of the rotor under discussion on its heat transfer and resistance characteristics was compared and analyzed. The analytic results show that in the laminar flow and transitional zone where Re = 500-8000, to increase the spiral angle of the rotor can remarkably intensify the heat transfer. However, in the torrent turbulent flow zone where $Re = 10^4 \sim 10^5$, to increase the outer diameter of the rotor can obviously intensify the heat transfer, thus, laying a foundation for application of rotor combination type heat transfer intensification devices in various industries. **Key words**: tube-side combined rotor, intensified heat transfer, resistance, structural parameter

单回路紫铜一水脉动热管传热性能的实验研究 = Experimental Study of the Heat Transfer Performance of a Single-loop Copper-water Pulsation Heat Pipe [刊,汉] SU Lei, ZHANG Hong, DING Lei-jiang, et al(College of Energy Source, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, China, Post Code: 210009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(6). -687~693

Experimentally studied was the law governing the influence of four factors, namely, cooling water flow rate, inclination angle, tube diameter and liquid filling rate, on the heat transfer performance of a single-loop copper-water pulsation heat pipe, including its tube wall temperature at measuring points, mean temperature in the cold and hot section, heat transfer temperature difference, heat transfer resistance and temperature fluctuation. As a result, some measures for enhancing the heat transfer performance were obtained. The research results show that the single-loop pulsation heat pipe arranged horizontally can not be started up with any possible methods and at an inclination angle of over 30 degrees, oscillation may be produced inside the pipe and to increase the inclination angle can lower the heat transfer resistance. At a given thermal power, there exists an optimum value of the cooling water flow rate and