

文章编号:1672-3961(2011)05-0021-05



田茂诚,男,1965年10月出生,教授,博士生导师,山东大学能源与动力工程学院院长。主要从事传热强化及节能技术研究,主要涉及强化传热、热力系统优化及控制、换热器理论研究与设计等。共完成科研成果10余项,获11项国家和省部级政府科技奖励,出版著作2部,在国内外重要刊物发表论文60余篇。获国务院政府特殊津贴、山东省有突出贡献的中青年专家、山东省专业技术拔尖人才、山东省十大优秀青年知识分子标兵、山东省第六届青年科技奖、山东大学第二届十大杰出青年等荣誉称号。2005年入选教育部新世纪优秀人才支持计划。

流体诱导新型弹性管束振动强化传热实验

田茂诚¹,姜波²,冷学礼¹,程林¹

(1. 山东大学能源与动力工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东电力研究院, 山东 济南 250002)

摘要:为深入研究不同实验条件下新型弹性管束的传热特性,建立了传热综合实验台,测试并计算得到了管束管外、管内及总传热系数随 Re 的变化曲线图。实验结果表明:新型弹性管束的管外平均表面传热系数基本为同 Re 数下的固定管束的3倍以上,强化传热效果明显。对比不同条件下的实验结果可以得出,汽-水换热条件最好、水-水换热条件次之、恒热流条件最差。原因为管内流体介质对弹性管束的振动特性影响较大,振动特性增强使得传热特性增强。

关键词:振动; 强化传热; 弹性管束; 换热器

中图分类号:TK124 文献标志码:A

Experimental research on heat transfer enhancement characteristics of a new type by flow-induced vibration elastic tube bundle

TIAN Mao-cheng¹, JIANG Bo², LENG Xue-li¹, CHENG Lin¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China)

Abstract: A comprehensive heat transfer experimental platform was set up to investigate heat transfer characteristics of a new type elastic tube bundle under different experimental conditions. In the experiment, variations of the external, internal and overall heat transfer coefficients with Reynolds number were obtained. The experimental results show that the average convective heat transfer coefficient outside the tube for the new type elastic tube bundle is 3 times more than that of the stationary tube bundle at the same Reynolds numbers, which indicates a significant heat transfer enhancement. From comparison of experimental results under different conditions, it can be concluded that the best heat transfer performance can be obtained for the steam-water heat transfer, which is better than that of the water-water heat transfer, and the constant heat flux heat transfer exhibits the poorest performance. The reason is that the fluid medium inside the tube has great influence on vibration characteristics of the new type elastic tube bundle and the intensification of tube bundle vibration leads to the enhancement of heat transfer performance.

Key words: vibration; heat transfer enhancement; elastic tube bundle; heat exchanger

0 引言

振动可以改变传热区域内的流场分布,能够在很大程度上强化传热^[1-3]。近年来,振动强化传热技术已逐渐成为学术界研究的热点。Cheng C H^[4],Gau C^[5],Fu W^[6]在空气中对换热管的振动与传热特性进行研究,结果表明振动能够使换热系数提高40%, Re 数越大, Nu 增加量越小,且其强化效果与振幅、频率成正比。Bronfenbrener L^[7],Lee Y H^[8]则在水中换热管的振动与传热特性进行深入研究,研究结果表明在特定工况下振动可使传热性能提高35%以上,并且 Re_v 数越大, Re 数越小换热越好,其中振幅的作用要高于频率。但在实际换热设备中,如何让换热表面产生振动是一个较难解决的问题,无论是机械振动还是电动机驱动偏心装置振动均存在一个无法回避的问题——高品质能量的损耗问题,即投入与收益的经济性评价问题,而绝大多数情况下这两种激振方式并不具有优势。

流体诱导振动^[9-12]是换热器内普遍存在的一种现象,同时也是换热器研发中的关键问题。在换热器的运行中,流体诱导振动能够产生剧烈的噪声并致使换热元件破坏,特别是换热器内流速较高,而换热管的刚度相对较低,流体诱导振动的问题尤为突出。

如上所述,一方面振动能够较大程度地强化传热元件的换热效果,但难以寻找一种低功耗的振动源装置;另一方面我们又无法有效地抑制换热器内流体诱导振动的产生,至今仍有由于流体诱导振动而使换热器内传热元件破坏的事故^[13]。基于以上两方面考虑,国内学者程林、田茂诚^[14-16]等合作提出了利用流体诱导振动来强化传热的新方法,并基于该方法提出了弹性管束。该管束突破了传统换热器的设计模式,不致力于振动的预防,使其能够自由振动,依靠其自身的特殊结构使振幅通过系统的阻尼得到有效的控制。弹性管束能够充分利用运动流体所具有的能量诱导自身振动,强化传热效果明显,并且振动的加强有利于降低污垢热阻,实现复合强化传热。现阶段在某些领域,弹性管束换热器已经得到了较为广泛的应用。但原有弹性管束换热器也存在单位容积传热面积较低,连接端部受力较大等不足之处。本文围绕改进后的新型弹性管束进行传热实验研究。

1 实验系统

如图1所示,新型弹性管束结构图由4根直径为18mm的紫铜弯管与两碳钢连接体组成。其中,A、B为自由端,主要作用将4根弹性管连接为一体;C、D为固定端,主要作用将弹性管束固定在换热器立管上;自外向内依次为1#、2#、3#、4#弹性管。新型弹性管束与原有弹性管束相比,主要有4点改进:(1)改善弹性管束的端部受力特性,增加管束的安全性能;(2)降低弹性管束的刚性,改善其固有振动特性;(3)提高弹性管束温度场的均匀性,改善其传热性能;(4)增大单位容积内弹性管束的换热面积。

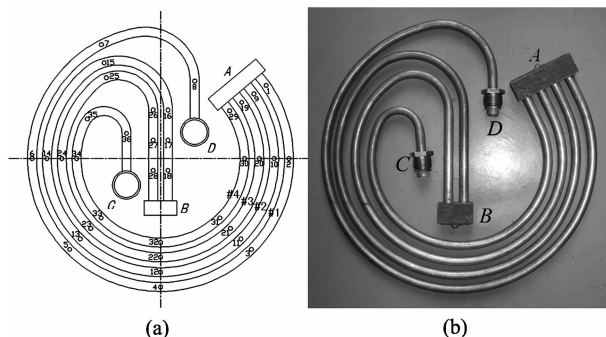
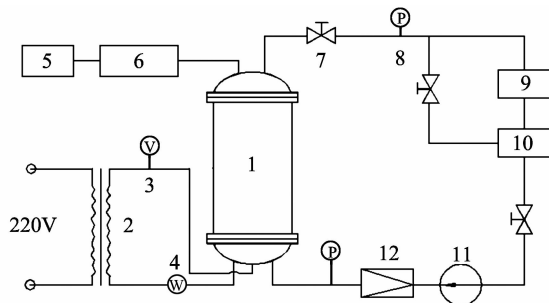


图1 新型弹性管束及其温度测点布置图

Fig. 1 Structure and temperature measuring points of the new elastic tube bundle

新型弹性管束的换热性能测试实验具体包括恒热流实验、水-水实验、汽-水实验3个部分。3部分的实验装置基本相同,不同点即为热侧介质及其输运系统不同,恒热流实验的热源为电加热丝,水-水与汽-水实验则分别为热水与蒸汽。本研究就以恒热流实验为例,简要介绍实验系统,如图2所示,整个实验装置主要由实验段(新型弹性管束换热器)、循环水系统、电加热系统和测量系统组成。



1. 新型弹性管束换热器,2. 变压器,3. 电压表,4. 功率表,5. PC机,6. FLUNKE-NETQ数据采集仪,7. 阀门,8. 压力表,9. 冷却装置,10. 冷水箱,11. 水泵,12. 流量计

图2 电加热恒热流实验系统图

Fig. 2 Schematic diagram of electric heating constant heat flux experiment system

测量系统主要包括温度测量、压力测量、流量测量和电功率测量。其中,温度采用 $\varnothing 0.2\text{ mm}$ 的铜-康铜热电偶测量,测量管束壁面温度最为理想的方法为在其表面布置无穷多个测点,但这在实验中很难实现,并且布置大量的测点后实验段的外部条件将发生较大改变,部分测点会破坏边界层,使真实表面换热条件与实验先前设定发生较大偏差,会在很大程度上影响实验结果的正确性。因此本实验中遵循了适宜数量的均匀布点原则,使外壁测点对管外表面传热系数的影响尽可能小,其测点布置如图1(a)所示。实验中所有的热电偶信号均输入到FLUKE Net-DAQ2640A型数据采集系统进行记录;压力采用精度为0.4级,量程为0.6 MPa的精密弹簧管压力表测量;流量采用LWGY-50A型涡轮流量计和XSJ-30型数字流量积算仪测量;功率则采用PZ200E多功能电力仪表测量。

2 数据处理方法

水的换热量由下式计算:

$$Q = MC_0(t'' - t'), \quad (1)$$

式中, Q 为水的换热量,W; M 为流量,kg/s; C_0 为比热容,J/(kg·K); $C_0 = 4.187\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; t' 、 t'' 分别为水的进出口温度,K。

蒸汽的换热量由下式计算:

$$Q' = M'(h' - h''), \quad (2)$$

式中, Q' 为蒸汽放热量,W; M' 为蒸汽流量,kg/s; h' 为入口蒸汽的焓值,kJ/kg; h'' 为凝结水的焓值,kJ/kg。

管外的平均表面传热系数为

$$h_o = \frac{Q}{F(t_w - t_1)}. \quad (3)$$

管内的平均表面传热系数为

$$h_i = \frac{Q}{F(t_2 - t_w)}. \quad (4)$$

换热器平均传热系数与管内、外传热系数及壁面热阻等的关系可由下式表示:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_o} + R_w + R_f + \frac{1}{h_i d_i}, \quad (5)$$

式中, h_o 为管外被加热水的平均表面传热系数, $(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$; h_i 为管内介质平均表面传热系数, $(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$; t_1 、 t_2 分别为冷、热介质的平均温度,(K); t_w 为管壁的平均温度,(K); F 为传热面积, (m^2) ; R_w 为金属壁面的导热热阻, $(\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W})$; R_f 为污垢热阻, $(\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W})$; d_o 、 d_i 分别为传

热管的外径、内径,(m)。

由于 R_w 较小可忽略,对于新的换热器 $R_f = 0$,可用下式近似计算换热器的平均传热系数:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_i d_i}. \quad (6)$$

3 实验结果分析

图3为恒热流条件下新型弹性管束及固定管束的管外平均传热系数随 Re 的变化曲线图。其中,横掠固定管束的管外平均表面传热系数采用Zukauskas给出的公式计算:

$$Nu = CRe^m Pr^{0.36} (Pr/Pr_w)^p, \quad (7)$$

式中, C 为系数,取决于 Re 数, $Re = 1.6 \sim 10^2$, $C = 0.9$, $Re = 10^2 \sim 10^3$, $C = 0.52$; m 为幂指数,取决于 Re 数, $Re = 1.6 \sim 10^2$, $m = 0.4$; $Re = 10^2 \sim 10^3$, $m = 0.5$; P 为幂指数, $P = 0.25$ 。

图3可以看出,在实验工况下,弹性管束的管外表面传热系数随着 Re 数的增加而显著提高。原因为随着 Re 数的增加,其管外流体介质的速度增加,湍流度增加,换热边界层的平均厚度减薄。同时由于弹性管束的特殊结构,在外界流体速度增加的同时其自身的振动特性也发生改变,振动特性的加强在一定程度上强化了传热效果。弹性管束在管外水流诱导振动下,管外平均表面传热系数基本为同 Re 数下的固定管束的3倍以上,强化传热效果明显。

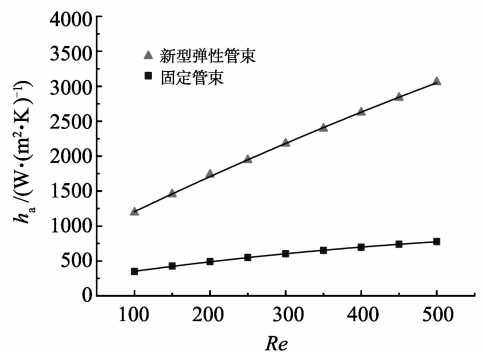


图3 新型弹性管束及固定管束的管外平均传热系数随 Re 的变化曲线图

Fig. 3 Variation of external tube surface heat transfer coefficient with Re of the new elastic tube bundle and the fixed tube bundle

图4为水-水实验条件下,外流量 $M = 9.6\text{ m}^3/\text{h}$ 时管内外表面传热系数、传热系数随内流量的变化图。图中可以看出,随着管内流量的增加,其管内表面传热系数逐渐升高,但升高的幅度随流量的增加逐渐减小;管外表面传热系数基本无变化,传热系数呈微增趋势。

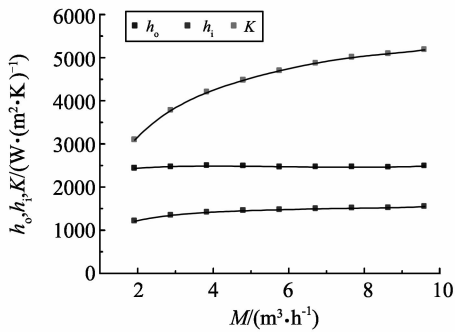


图4 外流为 $9.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 时 h_o 、 h_i 、 K 随流体内流量的变化图

Fig. 4 Variation of h_o 、 h_i 、 K with flow flux inside the tube at $9.6 \text{ m}^3/\text{h}$ outside the tube bundles

图5为换热器入口蒸汽压力 0.18 MPa 时,弹性管束的管外表面传热系数、管内表面传热系数和传热系数随 Re 数的变化曲线图。图中可以看出,随着 Re 数的增加,三者曲线都呈递增趋势,其中,管外表面传热系数曲线变化最为剧烈。在蒸汽压力一定的工况下,蒸汽在管内的表面传热系数随着 Re 数的增加而缓慢增大。原因可能为随着管外冷水流速增加,其管束的随机振动幅度与强度也相应增大,强烈的振动减薄了管内的液膜厚度,降低了传热热阻,从而加大了蒸汽侧的表面传热系数。关于表面振动条件对蒸汽凝结换热的影响,文献[17]等做过研究,结论为表面振动对凝结换热有一定影响,但影响较小,一般凝结换热系数变化在 15% 以内。

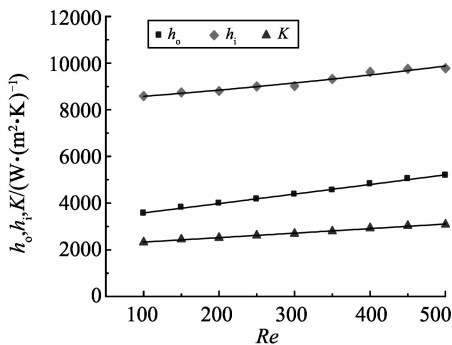


图5 $P=0.18 \text{ MPa}$ 时 h_o 、 h_i 、 K 随 Re 的变化图

Fig. 5 Variation of h_o 、 h_i 、 K with Re when $P=0.18 \text{ MPa}$

与恒热流条件对比,可以发现水-水与汽-水换热条件下的管外表面传热系数有显著提高,三者间的具体优劣关系为汽-水换热条件最好,水-水换热条件次之,恒热流条件最差。这说明管内流体介质对弹性管束的振动特性影响较大,在管内、管外流动介质共同作用下,流体诱导振动强化传热的效果更加明显,其中汽-水换热最为强烈,与同 Re 数下横向冲刷固定管束的管外表面传热系数相比提高了 6 倍以上,蒸汽在冷凝的过程中会给管束造成强

烈的振动,从而强化传热。表1列出了不同条件下管外表面传热系数值以作比较。

表1 不同条件下管外表面传热系数的比较
Table 1 Contrast of surface heat transfer coefficient outside the tube under different conditions

实验条件	固定管束(管外数值计算)	弹性管束(恒热流)	弹性管束(水-水)	弹性管束(汽-水,蒸汽压力 0.18 MPa)
Re	500	500	500	500
$h/(W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1})$	749.43	3 418.76	4 319.46	5 190.47

4 结论

本研究建立了传热实验综合试验台,在不同实验条件下对新型弹性管束的传热性能进行了实验研究,得到结论如下:

(1) 新型弹性管束的管外表面传热系数随着 Re 数的增加而显著提高,可以达到同 Re 数下的固定管束的 3 倍以上,强化传热效果明显。

(2) 对比不同条件下的实验结果可以得出,汽-水换热条件下新型弹性管束的换热性能最好、水-水换热条件次之、恒热流条件最差。原因为水-水与汽-水换热条件下,弹性管束的振动特性由管内和管外介质共同诱导产生,管内流体介质及其流动状态对弹性管束的振动特性影响较大,振动特性增强使得传热特性增强。

参考文献:

- [1] JIANG Bo, TIAN Maocheng, LENG Xueli, et al. Numerical simulation of flow and heat transfer characteristics outside a periodically vibrating tube[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(5):629-636.
- [2] 姜波, 田茂诚, 冷学礼, 等. 低频振动管外流动与传热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(5):811-813.
JIANG Bo, TIAN Maocheng, LENG Xueli, et al. Research on flow and heat transfer characteristics outside low frequency vibration tubes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(5):811-813.
- [3] 姜波, 田茂诚, 邱燕, 等. 振动圆管外流场的PIV实验研究及场协同分析[J]. 化工学报, 2009, 60(8):1900-1905.
JIANG Bo, TIAN Maocheng, QIU Yan, et al. PIV experimental study and field synergy analysis of external flow field of vibrating tube[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2009, 60(8):1900-1905.
- [4] CHENG C H, CHEN H N, AUNG W. Experimental study of the effect of transverse oscillation on convection heat transfer from a circular cylinder[J]. Journal of Heat

- Transfer, 1997(119):474-482.
- [5] GAU C, WU J M, LIANG C Y. Heat transfer enhancement and vortex flow structure over a heated cylinder oscillating in the crossflow direction[J]. Journal of Heat Transfer, 1999(121):789-795.
- [6] FU W S, TONG B H. Numerical investigation of heat transfer from a heated oscillating cylinder in a cross flow [J]. International Journal of Heat Mass and Transfer, 2002, 45(11):3033-3043.
- [7] BRONFENBRENER L, GRINIS L, KORIN E. Experimental study of heat transfer intensification under vibration condition[J]. Chemical Engineering and Technology, 2001, 24(4):367-371.
- [8] LEE Y H, KIM D H, CHANG S H. An experimental investigation on the critical heat flux enhancement by mechanical vibration in vertical round tube[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 229(1):47-58.
- [9] GOYDER Hgd. Flow-induced vibration in heat exchangers[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2002, 80(3):226-232.
- [10] LIN Liming, LING Guocan, WU Yingxiang, et al. Nonlinear fluid damping in structure-wake oscillator in modeling vortex-induced vibrations[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21(1):1-11.
- [11] XU Wanhai, WU Yingxiang, ZENG Xiaohui, et al. A new wake oscillator model for predicting vortex induced vibration of a circular cylinder[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(3):381-386.
- [12] GAO Yun, ZONG Zhi, SUN Lei. Numerical prediction of fatigue damage in steel catenary riser due to vortex-induced vibration [J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23(2): 154-163.
- [13] PAIDOUSSIS M P. Real-life experiences with flow-induced vibration[J]. Journal of Fluids and Structures, 2006, 22(6-7): 741-755.
- [14] CHENG Lin, QIU Yan. Complex heat transfer enhancement by fluid induced vibration[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 15(1): 84-89.
- [15] TIAN M C, CHENG L, LIN Y Q, et al. Heat transfer enhancement by crossflow-induced vibration[J]. Heat Transfer-Asian Research, 2004, 33(4): 211-218.
- [16] CHENG L, LUAN T, DU W et al. Heat transfer enhancement by flow-induced vibration in heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(3-4): 1053-1057.
- [17] SARA S, TOMAROY G V, POVAROV O A. Experimental investigation into the flow of liquid film under saturated steam condition on a vibrating surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(4): 593-597.

(编辑:陈燕)