

三叶膨胀管管内传热与阻力特性研究

刘世杰, 朱冬生

(1. 中国科学院 广州能源研究所; 2. 中国科学院 可再生能源重点实验室,
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 通过搭建单管换热性能实验装置, 对三叶膨胀管管内传热与阻力特性进行了测试。以实验测试结果为基础, 对数值计算模型的可靠性进行了验证, 采用 FLUENT 软件对不同规格参数的三叶膨胀管管内传热与阻力特性进行了数值研究。模拟计算结果表明, 三叶膨胀管管内的强化传热机理主要是由于管内特殊的螺旋通道, 使得流体呈现出三维纵向旋流的流动形态, 管内产生了垂直于主流方向上的二次流, 二次流主要分布在换热管的3个膨胀区, 二次流的产生促进了流体间的径向混合, 增强了对壁面换热边界层的扰动。在文中研究范围内, 三叶膨胀管的传热性能和摩擦阻力随着扭距的减小而增大, 随着内切圆直径的减小而增大, 随着过渡圆弧直径的减小, 先减小后增大。

关键词: 三叶膨胀管; 强化传热; 数值模拟; 二次流

中图分类号: TK 124 文献标识码: A 文章编号: 1005-9954(2017)08-0017-05

DOI: 10.3969/j.issn.1005-9954.2017.08.004

Research on heat transfer and flow resistance performance of trefoil expansion tube

LIU Shi-jie, ZHU Dong-sheng

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences;
2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

Abstract: An experimental apparatus was established to study the heat transfer and flow resistance characteristic of trefoil expansion tube. Based on the experimental results, the reliability of the computational model was verified, and the performance of trefoil tubes with different structure parameters was investigated by FLUENT software. The simulation results show due to the special spiral shape, the flow pattern is presented as three dimensional longitudinal helical flow. The secondary flow which is perpendicular to the main stream is formed in the tube, and it is mainly distributed in the three expansion areas. The generation of secondary flow promotes the fluid radical mixture, and increases the disturbance of boundary layer, thus enhances the heat transfer. The heat transfer and resistance factor increase with twisted pitch and inscribed circle diameter decreasing, reduce first and then increase with transitional arc diameter decreasing.

Key words: trefoil expansion tube; heat transfer enhancement; numerical simulation; secondary flow

管壳式换热器作为能源转换的通用设备, 大量应用于各工业部门。传统换热器以折流板作为支撑, 壳程流体横向冲刷管束, 流动方向和流通面积发生周期性改变, 存在流动阻力大, 容易产生流动死角, 换热效率低, 管束振动破坏等问题^[1]。有学者指出, 流体在壳程作纵向流动是管壳式换热器中最

理想的流动形式, 壳程纵向流换热器为各工业部门提供了一种可能的高效节能换代新产品^[2]。扭曲管换热器是壳程纵向流换热器的典型代表之一, 依靠特殊的换热元件扭曲管, 达到管束自支撑与强化传热的双重目的, 国内外学者对扭曲管换热器展开了大量的研究^[3-7]。王定标等^[8]在扭曲管的基础

收稿日期: 2016-11-14

基金项目: 高效传热与节能减排集成技术团队(201312N08); 高效紧凑型低低温节能空冷岛(湖北省中科院省院合作专项项目)

作者简介: 刘世杰(1989—), 男, 硕士, 主要从事传热与节能研究, 电话: (020) 37029709, E-mail: 563434605@qq.com; 朱冬生, 男, 博士, 教授, 通信联系人, E-mail: zhuds@ms.giec.ac.cn.

上提出了一种新型换热元件三叶膨胀管,并对其管内换热过程进行了数值模拟,研究结果表明相同雷诺数 Re 下,三叶膨胀管比扭曲椭圆管有着更高的综合传热性能。刘遵超等^[9]利用 FLUENT 软件对超临界二氧化碳在三叶膨胀管内的对流换热特性进行了研究。黄媛媛等^[10]将三叶膨胀管应用于强化油冷却器的换热过程,实验结果表明,三叶膨胀管能有效提高油冷却器的换热效率。

三叶膨胀管作为一种新型强化传热元件,目前的相关文献还较少。本文首先以水为介质,对三叶膨胀管管内换热特性进行了单管实验测试,通过实验所得结果验证了数值计算模型的可靠性。在此基础上,应用 FLUENT 软件对不同进口流速和规格参数的三叶膨胀管进行数值模拟,探讨了其强化传热机理,并分析了不同规格参数对其管内传热与阻力特性的影响。

1 实验测试

1.1 实验装置及方法

实验装置如图 1 所示,以水作为介质。实验装置主要分为两部分:①供水系统,用泵将热水打入套管换热器壳程,热水箱中装设恒温控制系统,冷水通入换热器管程,与热水逆流换热;②测试系统,利用计算机自动采集数据,进出口温度采用康铜 T 型热电偶测得,精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,流量采用电磁流量计测得,精度为 $\pm 0.5\%$,压差采用压差变送器测得,精度为 $\pm 0.1\%$ 。

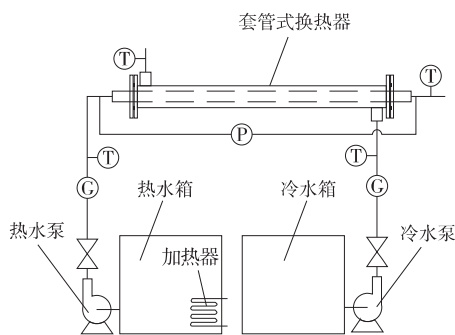


图 1 单管测试平台系统图
Fig. 1 Flow sheet of single tube test system

图 2 为以普通圆管 $\phi 9.52\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 加工得到的三叶膨胀管结构示意图。三叶膨胀管横截面分为 3 个膨胀区,由 3 个 $1/2$ 椭圆、3 个 $1/6$ 圆弧构成,相邻椭圆之间采用圆弧衔接,三叶膨胀管的特征参数包括扭距 P ,内切圆直径 D ,过渡圆弧直径 d ,实验用管的规格参数为 $p = 40\text{ mm}$, $D = 5\text{ mm}$, $d = 2\text{ mm}$, $L = 800\text{ mm}$ 。

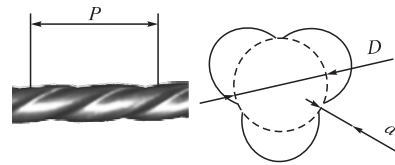


图 2 三叶膨胀管结构示意图
Fig. 2 Sketch of trefoil expansion tube

1.2 数据处理

实验用管为新加工,可不计污垢热阻,总换热系数 K 满足:

$$K = Q / (A_i \Delta T_m) \quad (1)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_i}{d_m} + \frac{d_i}{\alpha_o d_o} \quad (2)$$

式中: Q 为热负荷, W ; A_i 为管内换热面积, m^2 ; ΔT_m 为对数平均温差, K ; α_i 和 α_o 分别为管内外传热膜系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; d_i , d_o , d_m , b 分别为圆管内径、圆管外径、对数平均直径和管壁厚, mm ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

实验中维持壳程水流量不变,通过不断改变管程水流量,采用威尔逊(Wilson)图解法^[11]分离得到管内传热膜系数 α_i ,再使用式(3)计算得到管内努塞尔数 Nu_i ,同时获得管内传热准则关联式。

$$Nu_i = \frac{\alpha_i d_e}{\lambda} \quad (3)$$

$$d_e = 4A_i / C \quad (4)$$

式中: d_e 为水力直径, mm ; C 为湿周, mm 。

由管内压降计算公式 $\Delta p = f \frac{l}{d} \frac{\rho u^2}{2}$,可得到摩擦因子 f_i 的计算公式:

$$f_i = \frac{2\Delta p d_e}{\rho l u^2} \quad (5)$$

式中: l 为换热管长, mm ; u 为流速, m/s ; ρ 为流体密度, kg/m^3 。

假定 $f_i = nRe^m$,根据多组实验数据拟合求得摩擦因子 f_i 计算准则关联式。实验误差分析显示,管内传热膜系数 Nu_i 和摩擦因子 f_i 的相对不确定度分别为 8.5% 、 6.8% 。

1.3 实验结果

为了验证实验方法的可靠性,首先利用该系统对光滑直圆管进行了测试,并与经典的迪图斯-波尔(Dittus-Boelter)和布劳修斯(Blasius)方程的计算值进行了比较,平均误差均在 10% 以内。说明了该实验方法具有一定的可靠性。采用上述实验方法,得到 $p = 40\text{ mm}$, $D = 5\text{ mm}$, $d = 2\text{ mm}$, $L = 800\text{ mm}$ 的三叶膨

胀管管内换热准则关联式如下。从式(6)~(7)中可以看出,三叶膨胀管具有一定的强化传热效果。

$$Nu_i = 0.071 Re^{0.724} Pr^{0.4} \quad (6)$$

$$f_i = 0.238 Re^{-0.148} \quad (7)$$

2 数值研究

2.1 计算模型与初始条件

本文研究的三叶膨胀管均是由 $\phi 9.52 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的光滑直圆管经过特殊的机械加工制得。根据等周长原则,设计出7种不同规格参数的三叶膨胀管,具体结构参数见表1。

表1 三叶膨胀管的结构参数

Table 1 Structure parameters of trefoil expansion tubes

编号	内切圆直径 D/mm	过渡圆弧直径 d/mm	扭距 P/mm
#1	5	2	40
#2	5	2	60
#3	5	2	80
#4	5	4	40
#5	4	2	40
#6	5	6	40
#7	7	2	40

采用 GAMBIT 对换热管进行网格划分,换热管端面采用结构化四边形网格划分,采用 Cooper 法扫描完成整体网格,根据文献 [12] 推荐值,近壁区网格符合 $y^+ \approx 30$ 的要求,保证计算结果的精度。图3为网格示意图。

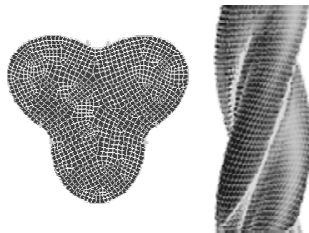


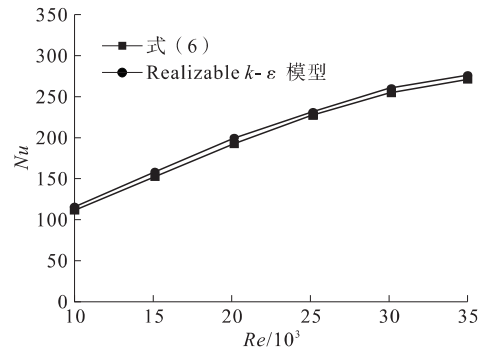
图3 三叶膨胀管网格示意图
Fig. 3 Sketch of the grid system

边界条件及物性:速度入口,给定相应的速度,湍流强度,以及入口温度;压力出口,并给定了相应的回流压力和回流温度;壁面恒定温度,无滑移。控制方程的离散采用二阶迎风格式,压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法,Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型求解,采用标准壁面函数法处理近壁区。管内流体介质为水,物性参数为等效温度下的常量。

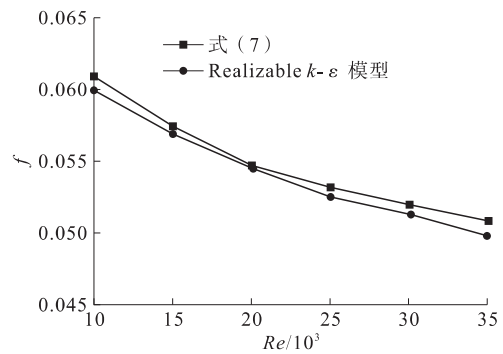
2.2 计算模型可靠性分析

为了验证计算模型的可靠性,首先对上文中实

验用三叶膨胀管进行建模,将数值计算结果与实验拟合得到的换热准则关联式(6)、(7)的计算值进行了比较,结果如图4所示。从图中可以看出数值计算结果与采用准则关联式的计算值接近,可以发现 Nu 与 f 的差别平均在 4.5%、5.2% 之内,证明该计算模型是可靠的。



(a) Nu 随 Re 的变化



(b) f 随 Re 的变化

图4 数值计算结果与实验结果对比

Fig. 4 Comparison of performance between numerical results with experimental results

2.3 数值模拟结果与分析

图5为 $Re = 10^4$ 时,三叶膨胀管一个扭距内的流线分布图,以等距离选取若干换热管切面,切面为速度分布图。通过观察发现,流体在三叶膨胀管内呈现出纵向旋转流动形态,靠近管壁处流体旋转更剧烈,管中心处相对平缓,旋转流体的产生,增加了流体对边界层的扰动,强化了传热。

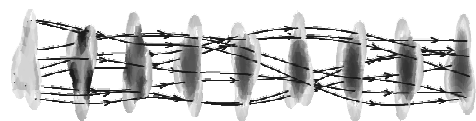


图5 换热管内流线图

Fig. 5 Stream traces of spirally trefoil expansion tube

流体的纵向旋转流动使得流体受到离心力的作用,在管内产生二次流。图6所示为5#换热管出口

位置处截面二次流大小分布,可以发现二次流主要产生在3个膨胀区内。图7所示为流体离开换热管壁面距离与二次流分布情况,从图中可以发现,二次流随着径向距离的增加先增大后减小,流体各质点受到的离心力大小也随着变化,受离心力较大的质点有被甩向壁面趋势,受离心力小的质点则相反,这种情况促进了流体间的径向混合,增强了主流区与近壁区流体的传热传质,提高了换热效率。

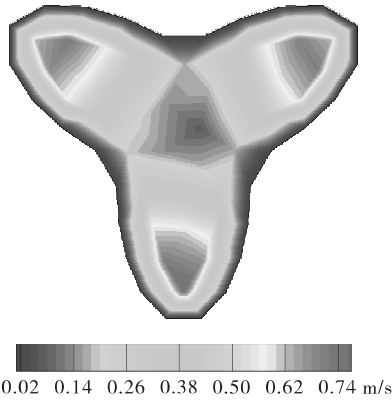


图6 出口二次流分布云图

Fig. 6 Secondary flow distribution of outlet

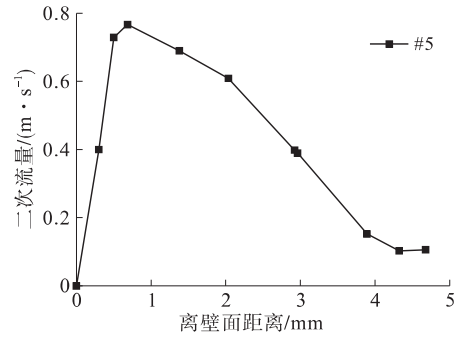
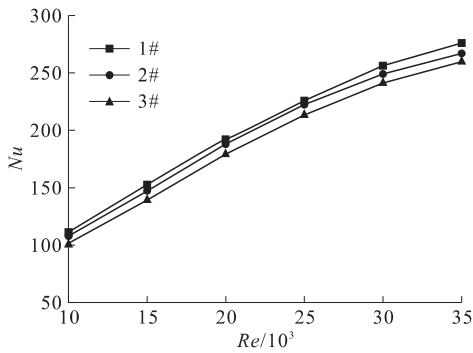


图7 流体离开壁面距离与二次流分布的关系

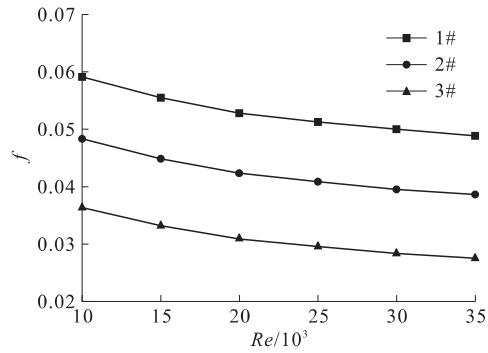
Fig. 7 Relationship between secondary flow distribution with distance away from wall

图8为不同扭距 P 下,三叶膨胀管管内努塞尔数 Nu 与摩擦因子 f 的对比。从图中可以看出,在相同雷诺数 Re 下,扭距 P 越小,三叶膨胀管管内努塞尔数 Nu 越大,同时摩擦因子 f 也随之增大。这表明,三叶膨胀管扭曲得越厉害,强化传热效果越好,但压降也随之增大。

图9为不同内切圆直径 D 下,三叶膨胀管管内努塞尔数 Nu 与摩擦因子 f 的对比。



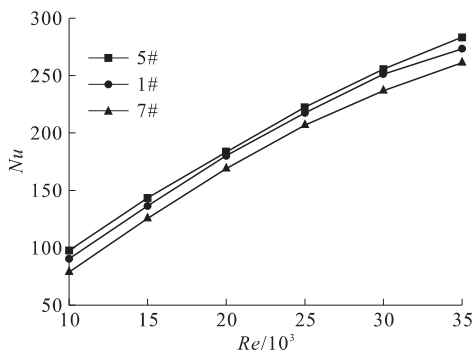
(a) Nu 随 Re 的变化



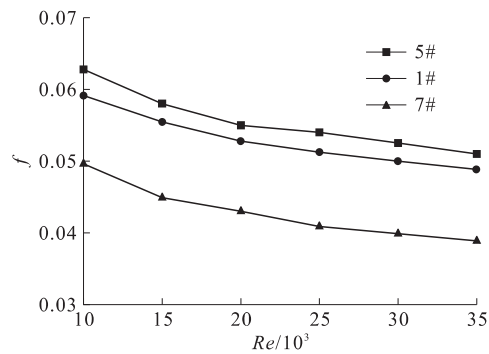
(b) f 随 Re 的变化

图8 扭距 P 对三叶管性能的影响

Fig. 8 Influence of twisted pitch on performance of trefoil expansion tube



(a) Nu 随 Re 的变化



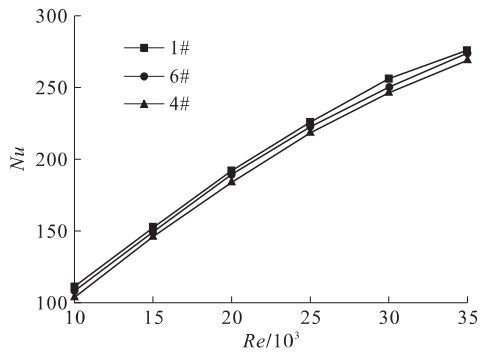
(b) f 随 Re 的变化

图9 内切圆直径 D 对三叶管性能的影响

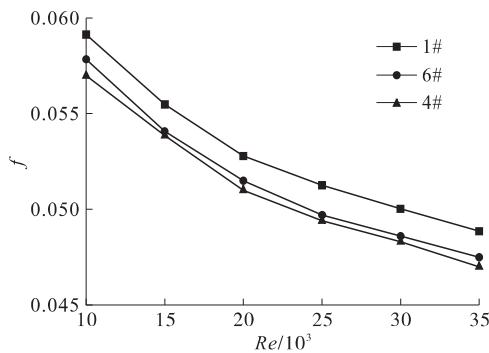
Fig. 9 Influence of inscribed circle diameter on performance of trefoil tube

从图9中可以看出,在相同雷诺数 Re 下,内切圆直径 D 越小,三叶膨胀管管内努塞尔数 Nu 越大,同时摩擦因子 f 也随之增大。可能主要是由于三叶膨胀区越狭长,驱动流体旋转越剧烈,换热效果越显著。

图10为不同过渡圆弧直径 d 下,三叶膨胀管管内努塞尔数 Nu 与摩擦因子 f 的对比。从图中可以看出,在相同雷诺数 Re 下,三叶膨胀管管内努塞尔数 Nu 和摩擦因子 f 随着过渡圆弧直径 d 的减小,表现为先减小后增大。



(a) Nu 随 Re 的变化



(b) f 随 Re 的变化

图10 过渡圆弧直径 d 对三叶管性能的影响

Fig. 10 Influence of transitional arc diameter on performance of trefoil tube

3 结论

通过搭建单管换热实验平台,测试并得到了三叶膨胀管管内传热与流动准则关联式,以实验所得结果为依据,对数值计算方法的准确性进行了验证,利用FLUENT软件对不同几何参数的三叶膨胀管管内传热与流动过程进行了数值模拟,得到如下结论:

(1) 实验结果显示,相比于光滑圆管,三叶膨胀管具有强化管内传热的效果,但同时管内阻力也有一定的增加。

(2) 三叶膨胀管强化管内传热的机理主要是由于流体产生了垂直主流方向的二次流,二次流主要分布在3个膨胀区内,二次流的产生促进了流体主流区和近壁区的径向混合,增强了对换热边界层的扰动,提高了换热效率。

(3) 数值研究结果表明,三叶膨胀管管内努塞尔数 Nu 以及摩擦因子 f 随着扭距 p 的减小而增大,随着内切圆直径 D 直径的减小而增大,随着过渡圆弧直径 d 的减小,先减小后增大。

参考文献:

- [1] 朱冬生,钱颂文,马小明,等. 换热器技术及进展[M]. 北京: 中国石化出版社, 2008.
- [2] 董其伍,刘敏珊. 纵流壳程换热器[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [3] DZYUBENKO B V. Influence of flow twisting on convective heat transfer in banks of twisted tubes [J]. Heat Transfer Res, 2005, 36(6): 449-459.
- [4] DZYUBENKO B V. Estimation of the thermohydraulic efficiency of heat exchanging apparatuses with twisted tubes [J]. Heat Transfer Res, 2006, 37(4): 349-363.
- [5] 朱冬生,谭详辉,曾力丁. 扭曲椭圆管管内传热与压降性能的研究[J]. 化学工程, 2013, 41(1): 10-14.
- [6] TAN Xianghui, ZHU Dongsheng, ZHOU Guoyan, et al. Experimental and numerical study of convective heat transfer and fluid flow in twisted oval tubes [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2012, 55(17/18): 4701-4710.
- [7] 谭详辉,孙赫,张立振,等. 扭曲椭圆管换热的壳程强化传热特性[J]. 化工学报, 2012, 63(3): 714-719.
- [8] 王定标,王宏斌,梁珍祥. 扭曲三叶管传热与流阻性能的数值研究[J]. 化工学报, 2012, 63(7): 2065-2069.
- [9] 刘遵,超王,珂古新,等. 超临界 CO_2 在三叶管内换热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(9): 2011-2013.
- [10] 黄媛媛,周国彦,钱泰磊,等. 基于三叶扭曲膨胀管技术的油冷器实验分析[J]. 制冷学报, 2015, 36(1): 107-112.
- [11] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 1980: 164-168.
- [12] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.