

波纹管传热性能与污垢特性实验

徐建民, 曾 凯, 李智勇, 王俊冕, 刘 康

武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205

摘 要: 采用污垢热阻动态试验法对波纹管 and 光管的流动阻力、污垢性能和传热性能进行实验研究, 用氯化钙和碳酸钠配制硬度为 800mg/L 的硬水, 在流速为 0.25m/s, 水浴温度为 60℃ 的条件下, 对两者析晶污垢进行了对比实验。两套实验系统都在一个恒温水浴内, 设备系统的主体用两根管模拟换热器, 一根为光管, 另一根为波纹管。实验中, 水泵将工作介质由低位水箱送至高位水箱, 高位水箱向实验管分别同时提供水源, 通过溢流式水位调节器保持恒定的水位。结果表明, 波纹管具有良好的抗垢性能, 表现出诱导期长、结构速率慢、污垢热阻小等优点; 其平均传热系数都大于光管, 表现出了良好的强化传热特性。

关键词: 波纹管; 传热; 污垢热阻

中图分类号: TK 172.4

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2014.06.015

0 引 言

波纹管是一种性能较优的强化传热原件, 由波纹管这类换热单元所构成的换热设备系统在炼油、化工、轻工、油田输油加热、城市的集中供暖等领域中都得到了大量的采用^[1], 不论是管程还是壳程, 都表现出较优的传热强化作用, 传热效果突出, 体积小重量轻, 加工简单成本低廉^[2], 因此目前波纹管在换热器上的应用最为普遍, 结合波纹管传热及其污垢特性在以往实验中的研究成果, 在此基础上, 利用对比实验的方法, 分别采用清洁的自来水和人工配制的硬水作为工作介质, 对波纹管和光管的传热特性和抗垢性能进行了分析对比。

1 实验系统及原理

1.1 试验装置及材料

实验采用力学性能、耐腐蚀性能均较好的奥氏体不锈钢波纹管管材, 波纹管结构与几何尺寸如表 1 所示, 外形如图 1 所示。其中 L_1 为波厚, L_2 为连接弧段长度, D_1 为外配合直径, D_2 为波纹管的外径, d 为波纹管的内径(通径), d_2 为波纹管的当量直径, d_a 为波纹管的内表面积等效直径($d_a = \frac{A_i}{\pi L}$), d_v 为管内体积等效直径($d_v = \sqrt{\frac{4V}{\pi L}}$), 其中 V 为实验所用的管内体积, δ 为壁厚。

表 1 实验管段参数

Table 1 Experimental parameters of the pipe section

类型	材料	几何尺寸/mm							
		L_1	L_2	L	D_1	D_2	d	d_a	d_v
光管	不锈钢			2 000			24	24	24
波纹管	不锈钢	20	1	2 000	25.5	28.5		26	26.5

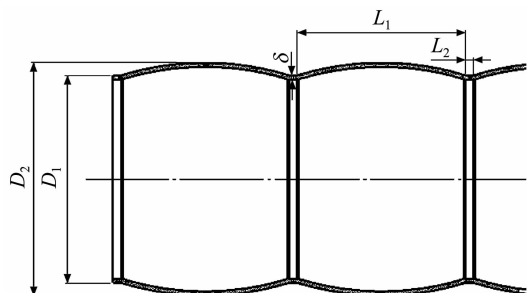


图 1 波纹管局部剖面示意图

Fig. 1 Partial cross-sectional schematic view of a bellows

1.2 实验系统

实验系统如图 2 所示, 设备所模拟的换热器由两根管组成, 一根为实验所要用的波纹管, 另一根为参照对象的当量直径光管, 管内流动的是实验配置好的流体, 管外维持恒温水浴, 水温由温控仪控制以维持水浴温度恒定, 循环水由高位水箱流经实验管段时换热, 随后流入低位水箱, 两个实验管段都配置了 3 个壁温测点, 1 个入口和 1 个出口温度测点, 3 个用来测量水浴温度的测点, 2 个

收稿日期: 2014-03-13

作者简介: 徐建民(1965-), 男, 湖北武汉人, 教授, 硕士。研究方向: 新型高效化工设备的研究与开发。

用来测量压力降的压差测点,2个流量测点,所有测量得到的数据信号经由电缆导入数据采集器然后再送入计算机进行后期处理^[3]。

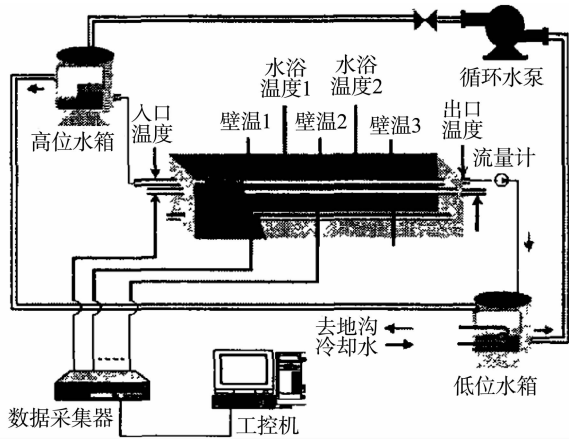


图2 实验系统图

Fig.2 Experimental system

1.3 实验原理

由牛顿冷却公式^[4],单位时间内管壁传给流体的热流量 Φ 为

$$\Phi = \alpha \pi d_a L \Delta t \quad (1)$$

式(1)中 $\Delta t = t_w - t_f$ 。

管内壁内表面的温度 t_w 由3个壁温测点得到

$$t_w = \frac{t_{w1} + t_{w2} + t_{w3}}{3} \quad (2)$$

因为不锈钢导热热阻很低,这里忽略不计,故管内外壁面温度可近似看成一致,而流体的温度 t_f 由流体进口温度 t_{fi} 和出口温度 t_{fo} 得到

$$t_f = \frac{t_{fi} + t_{fo}}{2} \quad (3)$$

由热平衡方程,热流量

$$\Phi = \frac{\pi}{4} d_v^2 u \rho c_p (t_{fo} - t_{fi}) \quad (4)$$

式(4)中, ρ 为工质的密度, c_p 为定压比热, u 为流速,这里流速可由体积流量求得

$$\frac{\pi}{4} u d_v^2 = q_v; u = \frac{4 q_v}{\pi d_v^2} \quad (5)$$

将式(4)带入式(1),求得管内对流换热系数

$$\alpha = \frac{\rho u d_v^2 c_p (t_{fo} - t_{fi})}{4 d_a L (t_w - t_f)} \quad (6)$$

污垢热阻定义式^[5]为

$$R_f = \frac{1}{k} - \frac{1}{k_0} \quad (7)$$

式(7)中 k_0 和 k 分别为清洁状态下和结垢状态下的传热系数,而总传热系数

$$k = \frac{\Phi}{\pi d_a L \Delta t_m} \quad (8)$$

将式(4)带入式(8)得到

$$k = \frac{\alpha d_v^2 u c_p (t_{fo} - t_{fi})}{4 d_a L \Delta t_m} \quad (9)$$

这其中,对数平均温度

$$\Delta t_m = \frac{(t_{sy} - t_{fi}) - (t_{sy} - t_{fo})}{\ln((t_{sy} - t_{fi}) / (t_{sy} - t_{fo}))} \quad (10)$$

式(10)中, t_{sy} 为水浴温度。

2 实验结果

2.1 流动阻力系数比较

流动阻力系数作为一项重要的参数指标可以用来衡量换热元件的性能优劣,在实验前,我们先对实验所用的波纹管流动阻力做了测试,由实验数据得到在两管内流体流动阻力系数随 Re 数变化关系曲线如图3所示。通过图3很容易看出,光管的流动阻力系数明显小于波纹管,随着 Re 数的增大,波纹管的流动阻力系数在显著减小,而光管几乎不随 Re 数的增大产生变化,在实验条件下,波纹管的流动阻力系数大约是光管的6.6倍,分析认为这是因为随着 Re 数的增大,波纹管周期性的缩放结构使流体在缩放结合处产生了较大的回流漩涡,使得局部流体阻力增大。

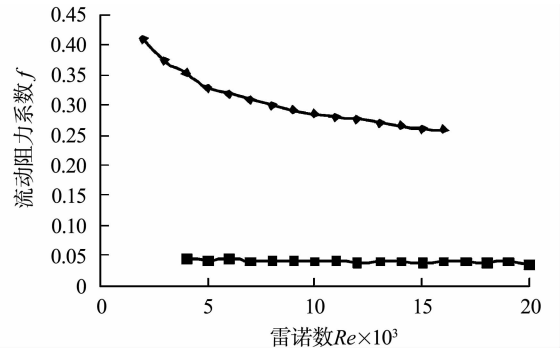


图3 流动阻力系数变化图

Fig.3 Change in flow resistance coefficient

注:◆ 波纹管;■ 光管

2.2 传热特性

由实验所测得的数据,可以算出 α 、 Nu 值,进而可以得到努赛尔数 Nu 与 Re 的关系曲线^[6]如图4所示,由图中不难看出,不论是波纹管还是光管的传热系数都随 Re 数的增大而增大,但随着 Re 数增大,两者换热能力的差距逐步缩小,在 Re 数比较低($Re \approx 10\ 000$)时,波纹管的传热系数比光管提升了约41%,当 Re 数比较大($Re \approx 25\ 000$)时,波纹管与光管的传热系数就已经比较接近,在 Re 数较低时,波纹管周期性的收缩段起到了加速流体的作用,传热得到强化,但是随着流体 Re 的变大,其自身的扰动能力增强,能够有效地破坏流动边界层,换热表面对流体的黏性作用减弱,使传

热能力增强,同时削弱了致垢粒子的沉积速度^[7].

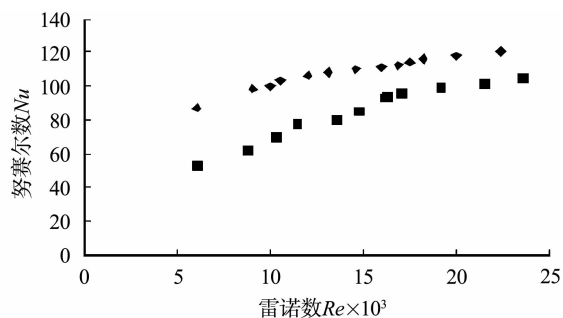


图 4 波纹管与光管传热特性比较

Fig. 4 The result of heat transfer performance between the corrugate tube and the plain tube

注: \blacktriangle 波纹管; \blacksquare 光管

2.3 污垢特性比较

为了比较波纹管与光管的抗垢性能,实验前先配置好模拟人工硬水用作循环工质,硬度设定为 800 mg/L, CaCl_2 和 Na_2CO_3 依据反应所需按摩尔比 1:2 配制而成,在实验过程中,计算机间隔时间自动采集并分析各测点的温度、流量数据.由实验可以得到波纹管与光管的污垢热阻值随时间的变化曲线如图 5 所示.由图可以看出,波纹管的渐进污垢热阻值约为光管的 0.9 倍,而二者的诱导期却相差不大,大约都为 30 h,达到渐进值的时间也都约等于 70 h.总体来说波纹管的阻垢性能较光管占优,但是效果并不明显.

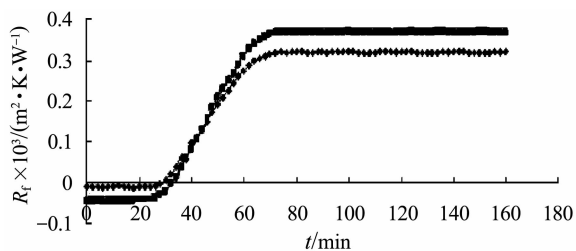


图 5 光管与波纹管污垢特性

Fig. 5 The plain tube and the bellow fouling characteristics

注: \blacktriangle 波纹管; \blacksquare 光管; $t_w=60^\circ\text{C}$; 硬度=800 mg/L; $u=0.25\text{ m/s}$

2.4 结垢前后的传热性能比较

由于污垢热阻的影响,光管与波纹管在结垢前后都会表现出传热性能的变化,为了直观地比较这一点,将实验时间控制在 20 min 左右,在加药之前与实验结束之前,每分钟分别进行一次测量,结果如图 6 所示,结垢之前的强化比(波纹管管内对流换热 Nu_c 与光管管内对流换热 Nu_p 之比)大约为 1:3,结垢之后为 1:7,这说明随着结垢的萌生和发展,两者在传热性能上的差别也越来越大,因此波纹管在强化传热这一方面具有突出的功能.

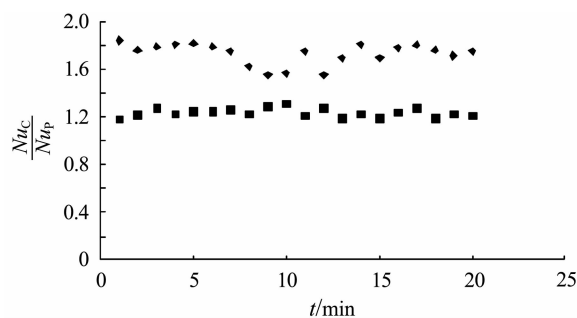


图 6 结垢前后强化比

Fig. 6 Fouling ratio before and after the strengthening

注: \blacktriangle 波纹管; \blacksquare 光管; $t_w=60^\circ\text{C}$; 硬度=800 mg/L; $u=0.25\text{ m/s}$

3 结 语

a. 在清洁状态下,波纹管对光管的传热强化比约为 1:3,表明波纹管在传热性能上具有优势;在污垢状态下,其传热强化比约为 1:7,这说明波纹管相对于光管更适合在脏污环境下使用.

b. 在流体介质与硬度相同的情况下,波纹管的渐进污垢热阻值大约为光管的 0.9 倍,这表明波纹管在阻垢性能方面有优势.

致 谢

本文得到武汉工程大学机电工程学院过程装备与腐蚀防护实验室全体人员的帮助和支持,在此表示衷心的感谢.

参考文献:

- [1] 宋景东,徐志明,甘云华,等.波纹管传热与污垢性能的实验研究[J].东北电力学院学报,2003,23(1):6-9. SONG Jing-dong, XU Zhi-ming, GAN Yun-hua, et al. Experimental investigation on the heat transfer and fouling performance of the corrugated tube[J]. Journal Of Northeast China Institute Of Electric Power Engineering, 2003, 23(1): 6-9. (in Chinese)
- [2] 张仲彬,徐志明,张兵强.缩放管传热与污垢特性的实验研究[J].化工机械,2008,35(2):65-68. ZHANG Zhong-bin, XU Zhi-ming, ZHANG Bing-qiang. Experimental investigations on the heat transfer and fouling characteristics of convergent-divergent tubes[J]. Chemical Machinery, 2008, 35(2): 65-68. (in Chinese)
- [3] 徐志明,甘云华,张仲彬,等.弧线管传热与污垢性能的实验研究[J].工程热物理学报,2004,25(3):496-498. XU Zhi-ming, GAN Yun-hua, ZHANG Zhong-bin, et al. Experimental investigation on the fouling characteristics and the heat transfer performances of arcline tube[J]. Chemical Industry And Engineering Pro-

- gress, 2004, 25(3): 496-498. (in Chinese)
- [4] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
- TAO Wen-quan. Numerical heat transfer [M]. XI'AN: XI'AN Jiaotong University Press, 1986. (in Chinese)
- [5] 徐志明, 杨善让, 甘云华. 螺旋槽管传热与污垢性能的实验研究[J]. 热科学与技术, 2003, 2(2): 136-139.
- XU Zhi-ming, YANG Shan-rang, GAN Yun-hua. Experimental investigation on heat transfer and fouling characteristics of spiral-grooved tube[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2003, 2(2): 136-139. (in Chinese)
- [6] 刘震, 陈永昌, 邵兵华, 等. 外螺旋槽管污垢特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(1): 93-96.
- LIU Zhen, CHEN Yong-chang, SHAO Bing-hua, et al. Experimental investigation on fouling characteristic of outer spirally corrugated tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(1): 93-96. (in Chinese)
- [7] 徐建民, 彭坤, 胡小霞, 等. 内置螺旋弹簧换热管内流动与传热三维数值模拟[J]. 化工进展, 2012, 31(12): 2652-2655.
- XU Jian-min, PENG Kun, HU Xiao-xia, et al. 3D numerical simulation of fluid flow and heat transfer in heat exchange tube with helical coil inserts [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(12): 2652-2655. (in Chinese)

Heat transfer and fouling characteristics of corrugated tube

XU Jian-min, ZENG Kai, LI Zhi-yong, WANG Jun-mian, LIU Kang

School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: The flow resistance, the fouling performance and heat transfer performance inside the corrugated tube and the plain tube were studied. The calcium chloride and sodium carbonate were used to prepare the solution with hardness of 800 mg/L, flow rate of 0.25 m/s and water temperature of 60 °C in the experiment. The crystallization fouling of the corrugated tube and the plain tube was compared. Two experimental systems were both in a constant temperature water bath. The main device had two analog heat exchange tubes, one was plain tube, the other was corrugated tube. In the experiment, pumps transported the working fluid from the low water tank to the high water tank. The high water tank provided water to the two tested tubes at the same time. The overflow type water level regulator was used to maintain the water level constant. The experimental results show that the corrugated tube exhibits a good anti-fouling performance. The corrugated tube has advantages of smaller fouling thermal resistance, longer induction period and smaller fouling thermal resistance, and the average heat transfer coefficient of which is also superior to plain tubes, exhibiting a good heat transfer enhancement feature.

Key words: corrugated tube; heat transfer; fouling thermal resistance

本文编辑: 陈小平