

# 组合转子阻垢特性的实验研究

刘鑫 阎华\* 关昌峰 杨卫民

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

**摘要:** 针对在换热器运行中起强化传热与自清洁作用的内插件组合转子进行了实验研究。实验测得光管、内置螺旋两叶片开槽转子和螺旋组带的换热管内单位面积污垢沉积量随时间的变化趋势,并得出内置组合转子的换热管在不同流速和不同水浴温度下的阻垢特性。实验结果表明:相较于光管,螺旋两叶片开槽转子与螺旋组带都具有较好的阻垢特性,而螺旋两叶片开槽转子阻垢性能更优,污垢渐近值为螺旋组带的72%;随着流速的增加,内置组合转子的换热管内污垢渐近值减小,且达到渐近值所需时间延长,阻垢性能增强;水浴温度的提高使污垢渐近值增大,达到渐近值所需时间缩短,阻垢性能减弱。

**关键词:** 阻垢; 组合转子; 螺旋组带; 流速; 水浴温度

**中图分类号:** TK124 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2017.03.013

## 引言

换热设备中的污垢是指流体中的组分或杂质经过起始、输运、附着、剥蚀和老化5个阶段,在与之相接触的换热表面上形成的一层固态或软泥状物质<sup>[1]</sup>。污垢是影响换热器传热性能的重要因素,也会造成巨大的能源浪费与经济损失。据测算,2010年仅凝汽器污垢造成的经济损失就约为80.5亿元<sup>[2]</sup>。因此,研究如何有效解决换热器中的结垢问题具有重要意义和实用价值。

管内插件作为一种最简单方便的强化换热和自清洁技术得到了广泛应用<sup>[3-4]</sup>,其结构形式主要包括螺旋弹簧、螺旋线圈、液轮机、螺旋组带和组合转子等。其中组合转子因其较好的强化传热与自清洁的作用,并且在工业试验中表现出高效率和高可靠性,得到了广泛的工业应用<sup>[5]</sup>,但其性能仍有待改进。范永钊<sup>[6]</sup>以转子和螺旋组带为研究对象进行实验与模拟,结果表明无论是组合转子还是螺旋组带都能够提高装置的换热系数,对装置的节能起到积极作用。文献[7-9]采用实验的方法得到组合转子强化换热机理,并通过模拟得出螺旋叶片转子强化管的抗污垢性能优于光管。赵本华<sup>[10]</sup>通过有机玻璃管实验研究了转子与光管内的污垢随时间变

化情况,对有机玻璃管的照片进行灰度提取处理,结果显示同向转子具有一定的防垢除垢效果。但是此类关于组合转子阻垢除垢性能的研究大部分停留在可视化实验以及数值模拟阶段,因此本文从定量方面采用称重法分析组合转子的阻垢特性,并对不同流速和水浴温度下组合转子的阻垢性能进行研究,为组合转子的结构优化提供更可靠的依据。

## 1 实验部分

### 1.1 实验装置

如图1所示,实验装置由水箱、泵、流量计、阀门、阻垢性能测试段、加热器和温度控制器等主要部件共同组成,各部分以螺纹形式连接形成可循环的闭合回路。阻垢性能测试段包括有机玻璃圆管和水浴加热套管,其有效长度为1 m,有机玻璃圆管内径为24 mm。实验中所用组合转子为螺旋两叶片开槽转子,其在有机玻璃圆管中的安装示意图如图2。

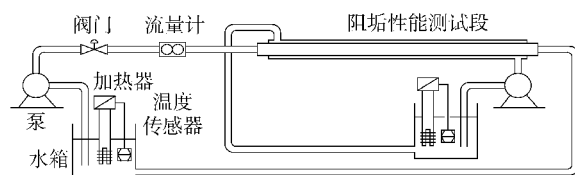


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

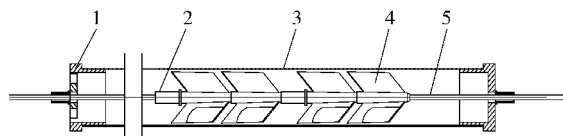
实验过程中,在有机玻璃圆管中分别安装螺旋两叶片开槽转子和螺旋组带进行研究,二者外径均为22 mm,导程为200 mm。实验介质温度由加热器和温度控制器共同控制,采用YSP-AT700控制器,

收稿日期: 2016-09-09

第一作者: 女,1991年生,硕士生

\* 通讯联系人

E-mail: yanhua999@vip.sina.com



1—挂件; 2—限位件; 3—有机玻璃管; 4—转子; 5—转轴。

图2 组合转子安装示意图

Fig. 2 Installation diagram of the assembled rotors

精度 0.2%, 供电电压 220 V/50 Hz。温度控制器通过热电阻采集水浴温度, 并利用加热器对水浴进行加热, 由 PID 调节控制, 断续输出。水泵扬程 2.5 m, 流量 2000 L/h。流量计流量范围 10 ~ 120 L/min, 计量精度 1%。

实验试片选择厚度为 0.1 mm 的铜片, 实验过程中将铜片固定在有机玻璃圆管尾部, 约占管长的二分之一, 并与管内壁紧密贴合, 以保证铜片底部没有污垢沉积。称量质量所用的仪器为分析天平, 其最大量程为 210.4 g, 测量精度为 0.1 mg。

## 1.2 实验方法

实验采用  $\text{CaCl}_2$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  配制实验介质, 经水泵通过回路循环流动。实验介质流量由阀门和流量计共同调节。实验过程中, 每隔一定时间取出铜片并剪下一段, 烘干、称重、洗净、再烘干称重, 最终计算出单位面积  $\text{CaCO}_3$  析晶污垢的沉积量, 并绘制出单位面积污垢沉积曲线。具体步骤如下:

- 1) 安装铜片 (尺寸为 4.5 mm × 56 mm) 和管内插件 (组合转子或螺旋纽带) 于阻垢性能测试段, 连接管道;
- 2) 接通电源, 启动水泵, 确保回路流通、管内插件和各实验部件运转正常;
- 3) 运转实验装置至介质达到所需温度, 按质量比 1:1.05 加入  $\text{CaCl}_2$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ;
- 4) 在实验运行 2 h 后, 停止运行, 使用切割刀切下一段铜片, 尺寸为 4.5 mm × 8 mm;
- 5) 安装阻垢性能测试段并连接管道, 重新开启装置;
- 6) 将切下的铜片放入干燥箱中, 加温至 100 °C, 干燥后使用分析天平称重, 洗净铜片后再次放入干燥箱中烘干后称重;
- 7) 在后续实验中, 分别于第 6、12、20、28、36、44 h 切下铜片, 重复步骤 6)。

## 1.3 数据处理

### 1.3.1 结果表征

实验采用插片称重法表征实验结果, 单位面积

污垢沉积量公式为

$$M = \frac{m_1 - m_2}{S} \quad (1)$$

式(1)中,  $M$  为单位面积污垢沉积量,  $m_1$  为插片第一次称重质量,  $m_2$  为插片第二次称重质量。

且铜片面积和体积有如下关系

$$S = \frac{V}{h}$$

$$V = \frac{m_2}{\rho}$$

从上述关系可得

$$M = \frac{(m_1 - m_2)\rho h}{m_2} \quad (2)$$

式(2)中,  $\rho$  为铜片密度, 8.9 g/cm<sup>3</sup>;  $h$  为铜片厚度, 0.0001 m。

### 1.3.2 实验误差分析

实验所得数据和被测量的真值之间存在着差异, 这在数值上表现为随机误差。由于随机误差的存在, 等精度测量列中各个测量值一般围绕该测量列的算术平均值有一定的分散, 其分散度说明了单次测量值的不可靠性。在实际应用中, 数据精确度由数据的离散程度表征, 而标准差  $\sigma$  和标准差系数  $V_\sigma$  是反映一组数据离散程度最常用的量化指标。

在等精度测量列中, 单次测量的标准差利用贝塞尔 (Bessel) 公式计算得到, 公式如下

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (3)$$

进一步可得到标准差与均值的比率即标准差系数  $V_\sigma$ , 其计算公式如下

$$V_\sigma = \frac{\sigma}{x} \times 100\% \quad (4)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 螺旋两叶片开槽转子与螺旋纽带的阻垢性能

图3给出了内置螺旋两叶片开槽转子换热管与同条件下光管的单位面积污垢沉积量曲线。从图中可以看出, 前2个小时内光管与加装螺旋两叶片开槽转子换热管污垢沉积量相当, 说明开始阶段换热管材料自身抗垢性能是影响污垢沉积量的主要因素; 随着时间的推移, 光管污垢沉积量迅速增大, 达

到渐近值  $1.262 \text{ g/m}^2$ , 而后逐渐稳定。而内置螺旋两叶片开槽转子换热管内单位面积污垢沉积量速率相对缓慢, 最终单位面积污垢沉积量为  $0.695 \text{ g/m}^2$ 。内置螺旋两叶片开槽转子换热管污垢渐近值约为光管的 55%, 且达到渐近值所需时间更短。

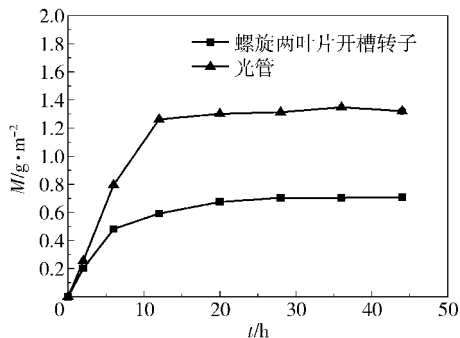


图3 内置螺旋两叶片转子换热管内污垢沉积量曲线

Fig. 3 The fouling deposition curve for a helical blade rotor with grooves tube

图4给出了内置螺旋扭带换热管与同条件下光管的单位面积污垢沉积量曲线。从图中可以看出, 在前2小时光管与内置螺旋扭带强化管污垢沉积量相当, 说明开始阶段换热管材料自身抗垢性能是影响污垢沉积量的主要因素; 内置螺旋扭带换热管内单位面积污垢沉积量增长速率相对缓慢, 渐近值为  $0.9632 \text{ g/m}^2$ 。相较于光管, 内置螺旋扭带强化管污垢渐近值约为光管的 76%, 达到污垢渐近值所需时间更短。

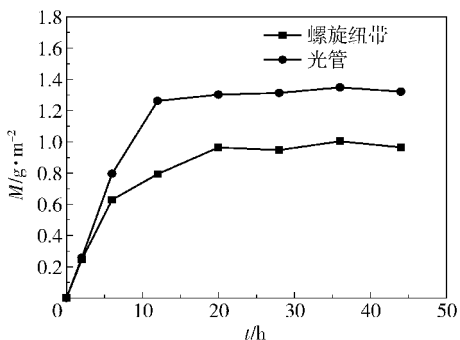


图4 内置螺旋扭带换热管内污垢沉积量曲线

Fig. 4 The fouling deposition curve for a helical twisted stripe tube

观察图5, 对比螺旋两叶片开槽转子和螺旋扭带的阻垢性能, 二者达到渐进值所需时间相近。螺旋两叶片开槽转子污垢渐近值约为  $0.695 \text{ g/m}^2$ , 是光管的 55%; 螺旋扭带污垢渐近值为  $0.9632 \text{ g/m}^2$ , 是光管的 76%。可以得出: 螺旋两叶片开槽转子与

螺旋扭带都具有较好的阻垢除垢效果, 而螺旋两叶片开槽转子的阻垢除垢效果更好, 污垢渐近值为螺旋扭带的 72%。螺旋两叶片开槽转子阻垢性能优于螺旋扭带阻垢性能的原因可能为: 相同材料和结构参数的螺旋两叶片开槽转子流动阻力小、转速大, 扰流加强, 对换热管壁的冲刷作用更强。

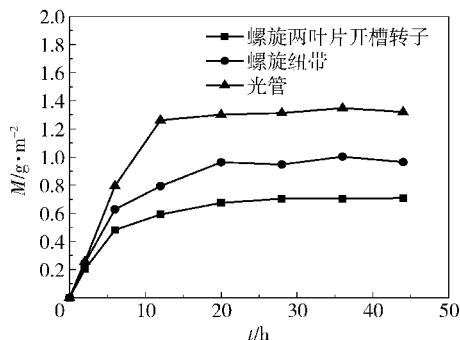


图5 污垢沉积量曲线

Fig. 5 The curve of fouling deposition

## 2.2 流速对螺旋两叶片开槽转子阻垢性能的影响

图6给出了在入口温度  $t_0 = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和介质浓度  $\rho = 1200 \text{ mg/L}$  的实验条件下, 改变流速得到的内置组合转换热管污垢沉积量曲线。从图中可看出, 换热管入口流速为  $0.48 \text{ m/s}$  时, 单位面积污垢沉积量为  $0.9501 \text{ g/m}^2$ ; 当流速为  $0.58 \text{ m/s}$  时, 污垢渐近值为  $0.8921 \text{ g/m}^2$ , 是流速  $0.48 \text{ m/s}$  条件下的 94%; 流速增大至  $0.68 \text{ m/s}$ , 最终达到渐近值  $0.6889 \text{ g/m}^2$ , 为流速  $0.58 \text{ m/s}$  条件下的 77%。随着流速增加, 污垢生长速率减小, 污垢渐近值减小, 且达到污垢渐近值的时间随之延长。其原因可能为: 一是污垢的形成过程中有输运和剥蚀两个过程, 且流速增大, 流体剪切力增大, 污垢的剥蚀过程强于输运过程; 二是流速增大, 转子扰流加强, 能更有效地破坏污垢在壁面沉积、附着和生长的条件。

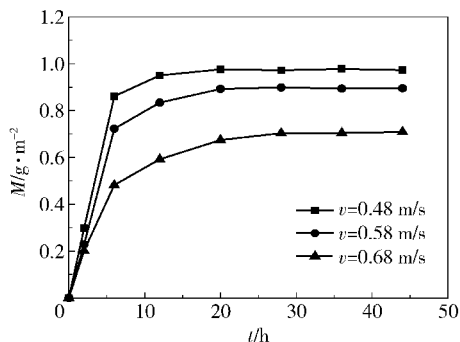


图6 不同速度下的污垢沉积变化曲线

Fig. 6 Fouling deposition curves at different velocities

2.3 水浴温度对螺旋两叶片开槽转子阻垢性能的影响

图 7 为介质浓度  $\rho = 1200 \text{ mg/L}$  和入口流速  $v = 0.68 \text{ m/s}$  的实验条件下, 改变水浴温度得到的内置组合转换热管污垢沉积量曲线。水浴温度为  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 最终单位面积污垢沉积量为  $0.7076 \text{ g/m}^2$ ; 增加温度至  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 污垢渐近值为  $0.7654 \text{ g/m}^2$ ; 当水浴温度为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 污垢渐近值达到  $0.8061 \text{ g/m}^2$ 。随着温度升高, 污垢生长速率增大, 污垢渐近值增大, 且达到渐近值所需时间减小。其原因可能为: 一是  $\text{CaCO}_3$  为反常溶解度的盐类, 温度升高, 流体过饱和度增大, 淀析在加热面上的污垢量增加; 二是有机玻璃试验管对温度变化较为敏感, 由于热应力而产生挠曲变形, 影响转子转动, 扰流减弱。

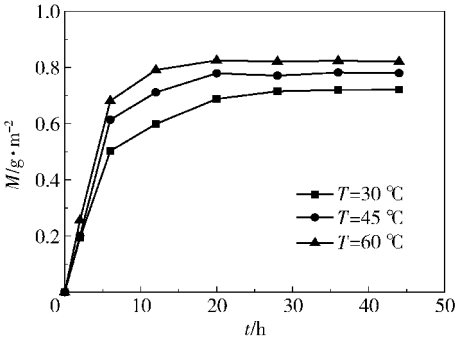


图 7 不同温度下的污垢沉积变化曲线

Fig. 7 Fouling deposition curves at different temperature

2.4 结果的可靠性

在  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1200 \text{ mg/L}$ 、 $0.68 \text{ m/s}$  的实验工况下, 重复 3 次光管实验, 即  $n = 3$ 。表 1 中列出 3 组实验中光管内污垢沉积量和计算得出的标准差和标准差系数。

表 1 光管内污垢沉积量离散程度的分析

Table 1 Dispersive analysis of fouling deposition in the tube

$t/\text{h}$	$M/\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$			标准差	$V_{\sigma}/\%$
	第一组	第二组	第三组		
0	0	0	0	—	—
2	0.2759	0.2563	0.2150	0.031088	12.50
6	0.7286	0.7954	0.8253	0.049509	6.32
12	1.2033	1.2620	1.3214	0.059050	4.68
20	1.2895	1.3016	1.4228	0.073717	5.51
28	1.3056	1.3131	1.3936	0.048786	3.65
36	1.3112	1.3485	1.4053	0.047386	3.50
44	1.3377	1.3211	1.4092	0.046814	3.45

图 8 是标准差系数随时间变化的曲线, 表明在污垢的沉积过程中, 所测污垢沉积量的离散程度。由表 1 和图 8 可看出, 在同一工况下, 各时间点的标准差系数随时间的延长而变小并趋于稳定, 小于 10%。分析结果表明, 实验测得的数据是可靠的。

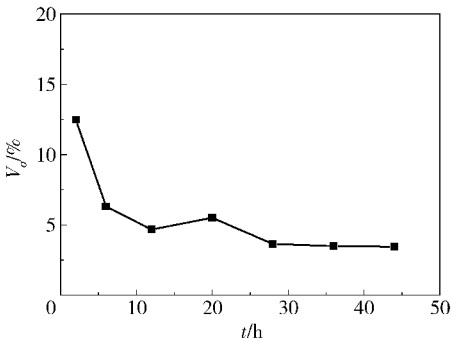


图 8 标准差系数曲线

Fig. 8 The coefficient of standard deviation curve

3 结论

- (1) 螺旋两叶片开槽转子与螺旋纽带都具有较好的阻垢除垢效果, 而螺旋两叶片开槽转子的阻垢除垢效果更好, 污垢渐近值为螺旋纽带的 72%。
- (2) 流速对内置组合转换热管内污垢沉积量影响较大。随着流速增大, 结垢量减少, 结垢速率降低, 阻垢性能增强。
- (3) 水浴温度影响内置组合转换热管内污垢沉积量。当水浴温度升高, 结垢量随之增大, 且结垢速率增高, 阻垢性能减弱。

参考文献:

[1] 杨善让, 徐志明, 孙灵芳, 等. 换热设备污垢与对策 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2004: 1-2.  
Yang S R, Xu Z M, Sun L F. Heat exchanger fouling and strategy [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2004: 1-2. (in Chinese)

[2] 刘志琨, 王志荣, 陶汉中. 换热设备污垢研究进展 [J]. 化工进展, 2011, 30(11): 2364-2368.  
Liu Z K, Wang Z R, Tao H Z. Research progress in heat exchanger fouling [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30(11): 2364-2368. (in Chinese)

[3] Liebenberg L, Meyer J P. In-tube passive heat transfer enhancement in the process industry [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(16): 2713-2726.

[4] Liu S, Sakr M. A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers [J]. Renewable

- and Sustainable Energy Reviews, 2013, 19(1): 64–81.
- [5] 杨卫民, 李锋祥, 陈胜利, 等. 管程转子组合式强化传热装置工业试验研究[J]. 热能动力工程, 2008, 23(4): 378–381.
- Yang W M, Li F X, Chen S L, et al. Commercial and experimental study of a rotor-assembly type intensified heat-transfer device at the tube side[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(4): 378–381. (in Chinese)
- [6] 范永钊. 自转式转子与螺旋扭带的强化传热效果对比研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
- Fan Y Z. Research on the heat transfer enhancement comparing autorotational rotor to twisted tape[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011. (in Chinese)
- [7] Zhang Z, Yang W M, Guan C F, et al. Heat transfer and friction characteristics of turbulent flow through plain tube inserted with rotor-assembled strands[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 38(1): 33–39.
- [8] Zhang Z, Yang W M, Guan C F, et al. Heat transfer enhancement in a tube fitted with helical blade rotors with grooves[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 48(7): 169–176.
- [9] 张震, 关昌峰, 何长江, 等. 螺旋叶片转子强化管抗污垢性能的数值模拟[J]. 化工进展, 2013, 32(11): 2562–2568.
- Zhang Z, Guan C F, He C J, et al. Numerical studies on anti-dirt performance of the enhanced tube with helical blade rotors[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(11): 2562–2568. (in Chinese)
- [10] 赵本华. 换热管内转子旋向对自清洁与强化传热影响研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
- Zhao B H. The research on the effects of rotor hands to the performance of self-cleaning and heat transfer enhancement in shell-and-tube exchanger[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011. (in Chinese)

## Experimental study of the anti-fouling characteristics of assembled rotors

LIU Xin YAN Hua\* GUAN ChangFeng YANG WeiMin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Assembled rotors can enhance efficiency of heating and anti-fouling during the running of heat exchangers. In this work we research the anti-fouling characteristics of assembled rotors. The experimental results show that a helical blade rotor with grooves and a twisted stripe both have better anti-fouling characteristics than a smooth tube, and the anti-fouling characteristics of the helical blade rotor with grooves is better than that of the twisted stripe. The dirt asymptotic value is 72% of the twisted stripe. The dirt asymptotic value of tube decreased with increasing velocity, and longer times are required to attain the dirt asymptotic value, which means the anti-fouling characteristics increased. In addition, the dirt asymptotic value of tube increased with increasing water bath temperature, the less time was required to attain the dirt asymptotic value, which means the anti-fouling characteristics decreased.

**Key words:** fouling; assembled rotor; helical twisted stripe; velocity; water bath temperature

(责任编辑: 汪 琴)