

铜管换热器内颗粒状污垢生长特性试验分析

张吉礼¹, 钱剑峰^{1, 2}, 孔祥兵³, 马良栋¹, 刘志斌¹

(1. 大连理工大学 土木学院, 辽宁 大连 116024; 2. 哈尔滨商业大学 土木与制冷工程学院, 哈尔滨 150028;
3. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要:污水源热泵系统的节能减排效益显著, 污水的管内换热特性急需掌握。基于污垢热阻法建立光滑铜管管内污垢生长特性试验台, 试验得出了人工污水颗粒状污垢管内的生长特性, 并建立了其渐近型污垢积聚预测模型。试验发现, 该人工污水在光滑铜管结垢的诱导期为 21 h, 污垢热阻稳定时间为 95 h, 稳定污垢热阻为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 。

关键词:污水; 铜管; 颗粒状污垢; 热阻法试验

中图分类号: TU831.6 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)05-0060-05

Characteristics of Granular Fouling Growth of Sewage in Copper Pipe Heat Exchanger

ZHANG Ji-li¹, QIAN Jian-feng^{1, 2}, KONG Xiang-bin³, MA Liang-dong¹, LIU Zhi-bin¹

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China;
2. School of Construction & Refrigeration Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, P. R. China;
3. School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China)

Abstract: The merits of the sewage source heat pump system are remarkable on energy efficiency and pollution reduction. Based on the fouling resistance law, the test bench was established on growth characteristics of fouling in copper pipe. The experiment has been carried on and the growth characteristics of fouling in copper pipe were obtained with the asymptotic agglomeration forecast model. It is found that the fouling induction period of the sewage is 21 hours in the smooth copper pipe, the fouling resistance settling time is 95 hours, and the stable fouling resistance is for $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{K/W}$.

Key words: sewage, copper pipe, granular fouling, fouling resistance law experiment

城市污水是一种蕴涵丰富低位热能的可再生热能资源^[1-3], 污水源热泵空调则是以城市污水为建筑供热源和排热汇、解决建筑物冬季采暖、夏季空调和全年热水供应的重要技术^[4-6], 也是城市污水资源化开发利用的新思路和有效途径。

污水源热泵空调在中国、日本等国以及北欧已经得到一定程度的应用^[1-9]。从技术的角度, 在有效地解决了城市污水在取水过程的污染物堵塞问题

后^[7-10], 污水源热泵空调技术在实际应用中已经表现出明显的节能减排效果。当前污水的有效换热成为污水源热泵空调系统高效运行的关键。在污水换热技术上, 中国则刚刚起步, 许多问题亟待解决。首先, 从污水换热器结构设计的角度, 目前在设计污水换热器时只能进行估算, 通常其黏度取清水的 10 倍以上^[10]。其次, 从污泥污垢对换热性能的影响看, 由于污水中小尺度污染物浓度高, 极易在换热管表

收稿日期: 2010-02-10

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20100471447); 大连市优秀青年科技人才基金(2008J23JH024)

作者简介: 张吉礼(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑节能与新能源开发利用研究,

(E-mail) zhangjili@hit.edu.cn。

面形成粘性污泥层,大大降低污水的换热性能^[11]。因此,掌握污水的污泥污垢生长特性将是污水强化换热的研究基础。

通常污垢的形成可能是水垢、污泥、腐蚀产物和生物沉积物等污垢同时作用的结果^[12-13]。由于污垢成因复杂,影响因素颇多,理论分析难度较大,故常采用实验手段。常用的污垢实验监测方法分为热力学法和非热力学法^[14-15]。该文将采用热力学法中的污垢热阻法,主要针对铜管污水换热器管侧的颗粒状污垢的生长规律进行研究。

1 试验原理

当采用污垢热阻法时,污垢热阻的定义式^[12-13]可写为式(1)。

$$R_f = \frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_c} \tag{1}$$

$$\frac{1}{K_c} = R_{1c} + R_w + R_{2c} \tag{2}$$

$$\frac{1}{K_f} = R_{1c} + R_w + R_f + R_{2f} \tag{3}$$

式中 R_f 为污染状态污垢热阻, $(m^2 \cdot K) / W$; K_c 、 K_f 分别为污染状态与洁净状态总传热系数, $W / (m^2 \cdot K)$; R_{1c} 、 R_{2c} 为洁净状态管外与管内对流换热热阻, $(m^2 \cdot K) / W$; R_{2f} 为污染状态管内对流换热热阻, $(m^2 \cdot K) / W$, 近似认为 $R_{2f} = R_{2c}$; R_w 为壁面的导热热阻, $(m^2 \cdot K) / W$ 。

此时,通过对 K_f 的实时监测,就可知道污垢热阻随时间的变化。污染状态总传热系数如式(4)。只要测出流体的质量流量,流体进、出口温度和管壁进、出口温度,便可以计算出管壁的污垢热阻。

$$K_f = \frac{C_p M (t_o - t_i)}{F \Delta t_m} \tag{4}$$

$$\Delta t_m = \frac{(t'_w - t'_f) - (t''_w - t''_f)}{\ln \frac{t'_w - t'_f}{t''_w - t''_f}} \tag{5}$$

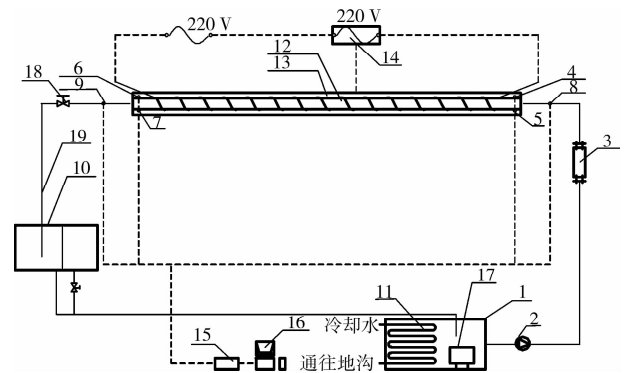
式中 C_p 为水的定压比热, $kJ / (kg \cdot K)$; M 为水的质量流量, kg / s ; F 为换热管内表面积, m^2 ; Δt_m 为换热管体与管壁的对数平均温差, $^{\circ}C$; t_i 、 t_o 为管内进、出水温, $^{\circ}C$; t'_w 为换热管进、出口壁温, $^{\circ}C$; t'_f 、 t''_f 为管外进、出流体温度, $^{\circ}C$ 。

2 试验系统

2.1 试验台水系统

管内污垢生长热阻监测试验台如图1所示。试

验台水系统主要组成为:1) 试验段,试验段是试验台的核心部分,分为入口稳定段、试验测试段和出口段,图中尺寸单位为 mm。试验段包括换热管、绝缘层、加热层和保温层。2) 冷却段,在试验水箱里面放置一段长度 8 m,外径 12 mm 的螺旋状铜管作为试验系统的冷却段,把电加热丝给水的热量换出来,保证实验系统达到热平衡。冷却水来自城市自来水,经过吸热后排向地沟。3) 搅拌装置,为保证在实验过程污水中的淤泥不沉淀,试验污水密度保持均匀,需在水箱内设置搅拌器。实验搅拌器为一小型潜水泵,流量 3 500 L/h,扬程 3.9 m。



1-水箱,2-循环水泵,3-转子流量计,4-进口管壁测温热电偶,5-进口管壁测温热电偶,6-出口管壁测温热电偶,7-出口管壁测温热电偶,8-进水测温热电偶,9-出水测温热电偶,10-流量测试装置,11-冷却铜管,12-换热管,13-换热管保温层,14-温控仪,15-热电偶数据采集仪,16-计算机,17-搅拌装置(潜水泵),18-球阀,19-出水皮管

图1 管内污垢生长热阻监测试验台原理图

2.2 试验台测控系统

试验台测控系统主要由测量系统、控制系统和数据监测系统组成。试验测量值包括温度、流量。其中温度有换热管进、出口管壁温度,换热管进、出口流体温度,温度测量装置为铜-康铜热电偶和热电偶数据采集仪。流量测量采用转子流量计。控制系统用温控仪和可控硅组成,控制方式为PID控制,精度 $+1^{\circ}C$ 。数据监测系统用 C++ Builder 程序编制。

2.3 试验用水源

试验初期采用哈尔滨某污水处理厂的真实污水作循环水,总传热系数由图2所示(污水流速 1.0 m/s)。由图可见,试验前几个小时,传热系数随时间呈略下降的趋势,而后一直增长,最后接近清水理论值 $4\ 500\ W / m^2 \cdot K$ 左右。这是由于一定量的污水中含有的污垢量有限,随着试验的进行,污垢沉

积在换热管中,试验后期水接近了清水的状态,故传热系数逐渐增大。为此,试验改用黄泥、自来水兑制相应浓度的污水作试验用水源。

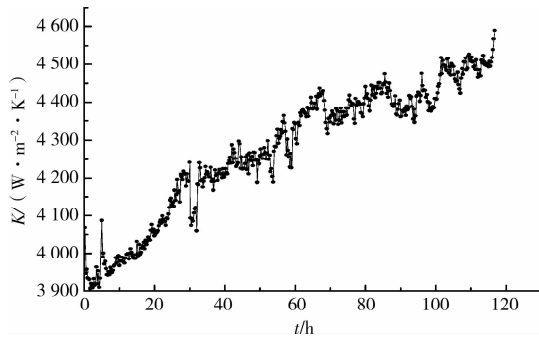


图 2 污水处理厂光滑铜管污水实验

3 试验台误差分析

3.1 热平衡性验证

为确定试验测试段的保温性能,在正式开始试验之前,需要对试验台进行热平衡验证。方法如下:先启动清水试验系统,待试验系统稳定后,测量电加热丝电流;同时,数据采集系统记录换热管进出口水温。进而,通过下式计算出热平衡率。

$$\eta_Q = \frac{Q_s - Q_w}{Q_s} \times 100\% \quad (6)$$

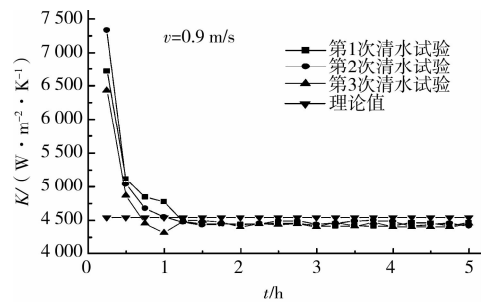
式中: η_Q 为试验台热平衡率; Q_s 为电加热丝的发热功率, kW; Q_w 为水侧的得热量, kW。

采集仪采得进出口水温升平均为 6°C , 流量为 $1.86 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, 则水侧得热量为 4.69 kW。由测得电流为 22.4 A, 可知电加热丝发热功率为 4.9 kW。故热平衡率为 $\eta_Q = \frac{4.9 - 4.69}{4.9} \times 100\% = 4.3\%$, 满足试验要求。

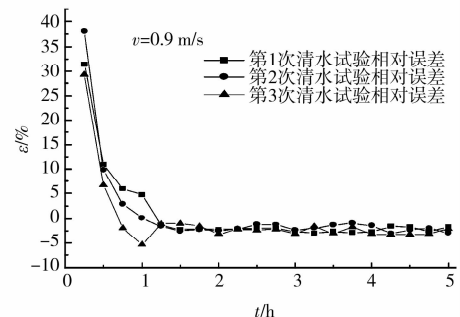
3.2 可靠性验证

污垢热阻数量级一般在 $10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 左右, 为了保证试验数据的可靠性, 试验前需对试验系统清洁状态下传热系数测量。方法如下: 对光滑铜管进行 3 次清水试验, 试验时间 5 h, 水流速 0.9 m/s。忽略光滑铜管的导热热阻, 将试验所得到的总传热系数与由清水管内紊流理论计算值进行比较, 计算两者相对误差。验证结果如图 3 所示。可以看出: 1) 1 h 后试验系统达到稳定状态, 说明冷却段冷却效果满足试验要求。2) 系统进入稳定后, 总传热系数在 $4500 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 左右, 与理论值之间的误差在 $-5\% \sim 0$ 。3) 系统稳定后, 3 次试验所得总传热系

数非常相近, 波动范围在 $0 \sim 90 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 。上述均表明试验台数据测量可靠性良好。



a) 可靠性验证



b) 相对误差

图 3 试验台可靠性验证

3.3 误差分析

试验主要研究污垢生长特性, 污垢热阻是主要检测值, 且为间接测量值。间接测试的物理量须根据直接测试量, 利用相关函数关系计算得到, 测试结果的总误差取决于各分项误差。试验数据处理作如下简化: 1) 忽略污垢厚度对换热面积的影响, 即整个过程中换热管的内表面积为常值; 2) 一段时间内的平均对流换热系数的平均值作为试验段的对流换热系数。

数据监测系统的采样周期为 5 s, 由测量数据, 根据式(7)可得每 5 s 的总传热系数值 K_{fn} ($n=1, 2, 3 \dots$)。为了进一步提高试验数据的精确度, 尽可能地减小误差, 用来计算污垢热阻的总传热系数值 K_{fn} ($n=1, 2, 3 \dots$) 取为 15 min 内所得传热系数值 K_{fn} 的平均值, 即

$$K_{nf} = \frac{k_{f(n-1) \times 180 + 1} + k_{f(n-1) \times 180 + 2} + \dots + k_{f(n-1) \times 180 + 180}}{180} \quad (7)$$

进出口管壁温度分别由对称布置的 2 个热电偶测量, 管壁温度取进出口管壁温度的平均值。测量原件的有关误差如表 1。

表 1 误差分析统计表

测量参数	仪表或量具	仪表精度或允许误差	测量值
进、出口水温	铜—康铜热电偶	0.2℃	—
进、出口管壁温		0.2℃	—
光滑铜管内径	游标卡尺	0.1 mm	16.00 mm
光滑铜管长度	卷尺	1.0 mm	3 000 mm
污水体积流量	流量测试装置体积	卷尺	20 460 mm ³
	时间	时间计量器	172.695 s
污水密度	质量	电子称	461g
	体积	量筒	459 mL

换热管污垢热阻测量的相对误差为

$$\epsilon = \frac{\delta R_f}{R_f} = \pm \frac{\sqrt{\left(-\frac{1}{K_f^2} \delta K_f\right)^2 + \left(\frac{1}{K_c^2} \delta K_c\right)^2}}{\frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_c}} \quad (8)$$

其中: $\delta R_f = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial R_f}{\partial K_f} \delta K_f\right)^2 + \left(\frac{\partial R_f}{\partial K_c} \delta K_c\right)^2}$,

$$\frac{\partial R_f}{\partial K_f} = -\frac{1}{K_f^2}, \quad \frac{\partial R_f}{\partial K_c} = \frac{1}{K_c^2}$$

传热系数 K_f 的传递误差为

$$\delta K_f = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial K_f}{\partial M} \delta M\right)^2 + \left(\frac{\partial K_f}{\partial F} \delta F\right)^2 + \left(\frac{\partial K_f}{\partial t} \delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial K_f}{\partial t_o} \delta t_o\right)^2 + \left(\frac{\partial K_f}{\partial t_w} \delta t_w'\right)^2 + \left(\frac{\partial K_f}{\partial t_w''} \delta t_w''\right)^2} \quad (9)$$

光滑铜管稳定后污垢热阻的最大极限相对误差范围为 14.6%~15.1%,处于实验可接受范围。

2008 年 5 月 5 日 10:49,总计 134 h。图 4 为光滑铜管内壁污垢热阻随时间变化曲线。

表 2 试验污水粒径分布

$d / \mu\text{m}$	$N / (\text{个} \cdot \text{mL}^{-1})$	$d / \mu\text{m}$	$N / (\text{个} \cdot \text{mL}^{-1})$
$d < 2$	4870.2	$12.41 < d < 16.11$	21.3
$2 < d < 2.60$	3 204.2	$16.11 < d < 20.91$	10.2
$2.60 < d < 3.37$	2 042.6	$20.91 < d < 27.14$	5.3
$3.37 < d < 4.37$	916.0	$27.14 < d < 35.23$	2.0
$4.37 < d < 5.68$	328.6	$35.23 < d < 45.73$	1.2
$5.68 < d < 7.37$	135.2	$45.73 < d < 59.36$	0.4
$7.37 < d < 9.56$	80.1	$59.36 < d < 77.04$	0.0
$9.56 < d < 12.41$	42.0	$77.04 < d < 100$	0.0

4 试验结果

为考察颗粒状污垢在管内的生长特性,试验污水用清洁的自来水和粘性较大的黄土配制而成,污泥质量浓度 4.26%,污水密度 1 004 kg/m³。试验前,用扫描电镜法对试验污水中颗粒的粒径分布进行了鉴别,结果见表 2。可见,试验污水中颗粒物数量分布集中在粒径为 0~5.68 μm 之间,且大部分在 3.37 μm 以下,同时颗粒物的质量分布也集中在粒径为 0~5.68 μm 的粒子。试验工况流速为 0.6 m/s,流体—污垢界面温度约 40℃。

试验运行时间为 2008 年 4 月 29 日 20:50 至

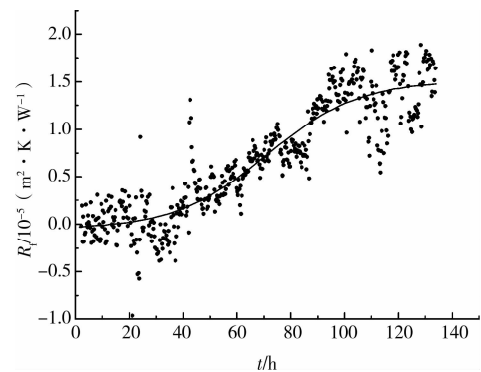


图 4 光滑铜管内污垢热阻随时间变化

由图 4 可以看出:1) 试验污水与换热面接触初期,即实验第 21 h 之前,污垢热阻值接近 0,可认为在这段时间内换热管内并没有污垢生成,该段时间即为污垢生长的诱导期;2) 第 21 h 之后,污垢热阻开始呈波浪型增大直到第 95 h。第 95 h 到第 134 h,污垢热阻值基本保持稳定,稳定值为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$,该值即为稳定污垢热阻;3) 第 21 h 之后的实测污垢热阻值大体接近指数函数曲线。这一点刚好与 Zubair 等和 Sheikh 等提出的渐近型污垢积聚预测模型的理论分析相吻合^[14-15]。因此,主要拟合第 21 h 之后的数据。拟合得到试验光滑铜管内壁污垢生长热阻预测模型式为

$$R_f = 1.5 \times 10^{-5} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{95}\right) \right] \quad (10)$$

另外,由图中可见,在第 24.25 h,42.75 h,66 h,86.5 h,110.25 h 处数据有剧烈的波动,这是由于换冰点前后暂时关闭、开启数据采集软件所致。图 4 中实验数据与拟合曲线之间有一定分散性,这是数据拟合时存在一定精度的缘故。

5 结论

针对某种人工配置污水,基于热阻法实验测试了铜管污水换热器管内颗粒状污垢生长规律,得出如下结论:

1) 试验台热平衡率小于 5%,铜管总传热系数值与理论值误差低于 5%,试验台最大极限相对误差约 15%,因此试验台热平衡性良好、可靠性良好,试验误差合理。

2) 试验污水中的颗粒状污垢生长诱导期为 21h,稳定污垢热阻为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$,稳定开始时间为第 95 h。

3) 诱导期到稳定污垢热阻形成前的污垢热阻增长规律符合渐近型模型,即 $R_f = 1.5 \times 10^{-5} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{95}\right) \right]$ 。

4) 颗粒状的污泥污垢的稳定污垢热阻值数量级很小,占工程实际中污垢热阻 ($0.001 \sim 0.002 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) 的比重较小,下一步需进行其他种类污垢(主要为生物类污垢)的实验对其热阻作深入研究,为城市污水热泵系统的发展作有益参考。

参考文献:

- [1] LINDSTROM H O. Experiences with a 3.3 MW heat pump using sewage water as heat source[J]. Journal of Heat Recovery Systems, 1985, 5(1):33-38.
- [2] CADDET. First DHC System in Japan Using Untreated Sewage as a Heat Source[R]. 1997, 112-125.
- [3] ARASHI NORIO, INABA ATSUSHI. Evaluation of energy use in district heating and cooling plant using sewage and one using air as heat source[J]. Journal of the Japan Institute of Energy, 2000, 79(5): 446-454.
- [4] YOSHII T. Technology for utilizing unused low temperature difference energy[J]. Journal of the Japan Institute of Energy, 2001, 80(8): 696-706.
- [5] FUNAMIZU N, LIDA M, SAKAKURA Y. Reuse of heat energy in waste water: implementation examples in Japan[J]. Water Science and Technology, 2001, 43(10): 277-286.
- [6] QIAN J F, SUN D X. Optimization and analysis of the urban sewage source heat pump system by finite time thermodynamics theory [C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning. Tsinghua University, Beijing, 2007: 923-926.
- [7] BAEK N C, SHIN U C, YOON J H. A study on the design and analysis of a heat pump heating system using wastewater as a heat source[J]. Solar Energy, 2005, 78: 427-440.
- [8] CADDET. Reduced Fouling of Sewage Water Heat Pumps[R]. 1995: 156-188.
- [9] 周文忠. 污水源热泵空调系统在污水处理厂的应用[J]. 暖通空调, 2005, 35(1): 83-86.
ZHOU WEN-ZHONG. Application of sewage source heat pump systems to a sewage treatment plant[J]. HV&AC, 2005, 35(1):83-86.
- [10] 吴荣华, 刘志斌, 黄磊, 等. 污水及地表水地源热泵系统规范化设计研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(12): 63-69.
WU RONG-HUA, LIU ZHI-BIN, HUANG LEI, et al. Research on standardization design of urban sewage and surface water source heat pump system[J]. HV&AC, 2006, 36(12):63-69.
- [11] 钱剑峰, 吴学慧, 孙德兴, 等. 管壳式污水换热器结垢厚度对流动换热的影响[J]. 流体机械, 2007, 35(1): 74-78.
QIAN JIAN-FENG, WU XUE-HUI, SUN DE-XING, et al. Effect of fluxion and heat transfer due to the thickness of soft dirt in shell sewage heat exchanger[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(2):165-169.
- [12] 杨善让, 徐志明. 换热设备污垢及对策[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2004.
- [13] 朱华, 庄博. 螺旋管中实际冷却水污垢和颗粒污垢的特性研究[J]. 热能动力工程, 2008, 23(2): 165-169.
ZHU HUA, ZHUANG BO. A study of practical cooling water and particulate fouling characteristics in spiral-grooved tubes[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(2):165-169.
- [14] ZUBAIR S M, SHEIKH A K, BUDAIR M O, et al. A maintenance strategy for heat-transfer subject to fouling: a probabilistic approach. ASME J Heat Transf. 1997, 119(3): 575-580.
- [15] ZUBAIR S M, BILAL A, QURESHI A. Probabilistic fouling and cost model for plate-and-frame heat exchangers[J]. Energy Research, 2006, 30: 1-17.

(编辑 胡英奎)