

直接式污水源热泵蒸发器、冷凝器污垢生长测试研究

王智伟¹, 李 扬¹, 孙海洋¹, 曹 伟², 李 鹏²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 四联智能技术股份有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 直接式污水源热泵是用污水作冷热源直接进入热泵机组蒸发器、冷凝器进行换热的系统形式, 相对于使用中间换热器的间接式污水源热泵来说, 减少了换热损失, 但其污垢的生长严重影响了机组的性能. 以西安某污水处理厂直接式污水源热泵为研究对象, 该系统以城镇二级出水为冷热源, 在机组换热器清理维护后对其进行了供暖、供冷两个工况的连续测试. 结果表明由于流动形式和温度条件的不同, 蒸发器和冷凝器内污垢的生长规律有所不同, 作者测试计算得到了二者传热系数随着污垢生长的衰减特性, 拟合出了污垢的生长预测模型, 可为污水源热泵系统的设计和应用提供参考.

关键词: 直接式; 污水源热泵; 二级出水; 污垢热阻; 管壳式换热器

中图分类号: TK121

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)04-0567-05

能源危机在经济飞速发展的今天日渐凸显, 能源利用效率、环境污染等问题使人们必须需求新的能源利用途径. 城市污水源热泵正是利用城市污水这一低位能源的环保型系统, 消耗少量电能利用热泵从污水中获得冷量和热量来实现供冷和供暖. 早在 20 世纪 70 年代, 日本、挪威、瑞典及其他一些发达国家就对污水源热泵展开研究并开始应用^[1]. 污水按水质可以分为原生污水、经物理过滤的一级出水、经生物、化学等处理的二级出水和中水, 其中二级出水以其水质相对较好且使用不需付费等优点可作为污水源热泵理想冷热源.

我国对污水源热泵的研究相对较晚, 主要对污水源热泵进行连续实测或相关实验来研究其相关规律, 并得到了一些重要结论. 其中, 孙德兴等^[2-4]以较多的实际工程为研究对象, 通过测试和实验分析等研究了污水换热器中污垢的生长特性和污水流动特性, 并且讨论了直接式与间接式污水源热泵供热性能的区别等; 史琳等^[5-7]对城镇二级出水进行了连续测试, 得出了二级出水的水温特点并且以工程实例为研究对象对板式换热器中的污垢的生长特性等做了研究与讨论.

然而, 以往所做研究集中于探讨污水在管道内被加热工况下的污垢生长情况, 且实测对象多以间接式污水源热泵为主. 本文以直接式污水源热泵为研究对象, 对机组蒸发器、冷凝器均做了污垢生长的测试, 讨论了不同流动边界条件对污垢生长的影响, 根据测试数据计算得到了机组污水换热器传热系数随污垢生长的衰减特性, 并计算拟合出了污垢生长预测公式, 并根据污水在蒸发器和冷凝器中的不同流动换热方式对二者的区别和污垢生长规律进行了对比. 测试分析结果可为类似污水源热泵的设计、应用、清洗等提供参考.

1 系统简介和测试原理

1.1 系统简介

图 1 为现场测试系统——直接式污水源热泵原理图, 机组供冷和供暖工况的转换通过 8 个阀门的切换来实现. 夏季供冷时, F1、F3、F5、F7 阀门开启, F2、F4、F6、F8 阀门关闭, 冬季供暖运行时, 阀门和夏季开闭情况相反.

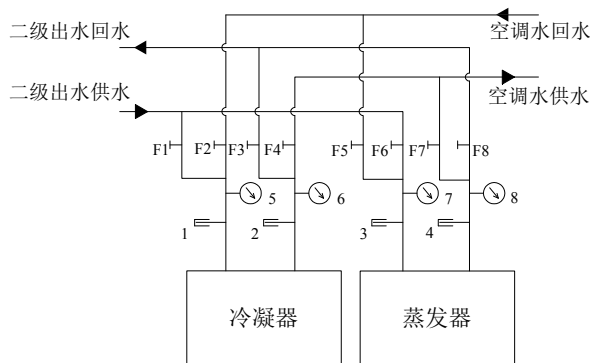
本机组蒸发器和冷凝器均为管壳式换热器. 二级出水在蒸发器、冷凝器中的流动换热方式有所不同. 蒸发器中制冷剂在管内流动, 二级出水在壳侧冲刷管束对流换热; 冷凝器中制冷剂在壳侧流动, 二级出水在管内受迫对流换热.

收稿日期: 2013-10-26

修改稿日期: 2014-07-24

基金项目: 陕西省协同创新项目 (2014XT-20); 西安市科技计划项目 (CX12187-①)

作者简介: 王智伟 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究空调系统能效诊断和建筑节能. E-mail: wzhiwei-atu@163.com



1~4 插管式温度计 5~8 压力表 F1~F8 阀门

图1 直接式污水源热泵原理图

Fig. 1 Direct sewage source heat pump schematic diagram

1.2 测试原理

目前,常用的污垢生长监测方法有污垢热阻法、温差监测法、压降测量法等.本次测试采用较为常用的污垢热阻法.污垢热阻法是基于热阻的定义式(1)进行的:

$$R_f = \frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_c} \quad (1)$$

式中 R_f 为污染状态下的污垢热阻, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$; K_f 为污染状态下换热器的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; K_c 为清洗后换热器的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

在机组换热器清洗后初运行时测算 K_c , 然后在相同工况下, 监测记录换热器在污垢再生长过程中的传热系数 K_f , 从而得到传热系数 K_f 随时间的变化规律, 进而可用公式(1)算得污垢热阻随时间的变化特性. 传热系数 K 的计算公式:

$$K = \frac{Q}{F \Delta t_m} \quad (2)$$

式中: Q 为单位时间内污水换热器的换热量, W ; F 为换热管的总换热面积, m^2 ; Δt_m 为换热器冷热流体的对数平均温差, $^{\circ}\text{C}$, 其计算公式为:

$$\Delta t_m = \frac{(t'_f - t_e) - (t''_f - t_e)}{\ln \frac{t'_f - t_e}{t''_f - t_e}} \quad (3)$$

式中: t'_f 为污水供水温度, $^{\circ}\text{C}$; t''_f 为污水回水温度, $^{\circ}\text{C}$; t_e 为蒸发/冷凝温度, $^{\circ}\text{C}$; 单位时间内换热器换热量可由热平衡方程求得, 其计算公式为:

$$Q = c_p m (t'_f - t''_f) \quad (4)$$

式中: c_p 为水的定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; m 为二级出水的质量流量, kg/s . 将式(3)和式(4)代入式(2)中, 化简得:

$$K = \frac{c_p m (t'_f - t''_f)}{F \frac{t'_f - t''_f}{\ln \frac{t'_f - t_e}{t''_f - t_e}}} = \frac{c_p m \ln \frac{t'_f - t_e}{t''_f - t_e}}{F} \quad (5)$$

由(5)式可知, 要监测污水换热器传热系数的变化规律, 只需查得换热器的换热面积并监测二级出水、空调水流量, 二级出水供、回水温度, 空调水供、回水温度及蒸发、冷凝温度即可, 进而可算得污水

侧的污垢热阻。

根据以上公式涉及的相关参数,二级出水供、回水温度和空调水供、回水温度由冷凝器和蒸发器水侧进出口管道温度计读取,精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;蒸发温度和冷凝温度由机组可视化面板温度表读取,精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;压缩机输入功率由机房电表读取,精度为 0.01 kW ;二级出水和空调水流量采用 PORTAFLOW 便携式超声波流量计测量,精度为 $0.2\text{ m}^3/\text{h}$ 。

2 数据处理与结果分析

2.1 数据处理

由热力学第一定律可知,理想状态下污水源热泵机组能量平衡方程为:

$$Q_c = Q_e + P \quad (6)$$

式中: Q_c 为冷凝器换热量, kW; Q_e 为蒸发器换热量, kW; P 为压缩机输入功率, kW。通过以上测量,计算出能量不平衡率 η_Q :

$$\eta_Q = \frac{Q_e + P - Q_c}{Q_e + P} \times 100\% \quad (7)$$

本测试将测得数据不平衡率大于 10% 的数据组剔除,保证了测量结果的可靠性。

2.2 结果分析

本测试分两个阶段进行,第一阶段机组为供暖工况,二级出水进出蒸发器在管外流动冲刷管束与管内制冷剂换热,蒸发器于供暖前进行了全面清理,2012 年 11 月 5 日开始运行,测量时间为 2012 年 11 月 5 日~2013 年 1 月 4 日,共 60 d;第二阶段机组为供冷工况,二级出水进出冷凝器在管内受迫流动与管外制冷剂换热,冷凝器于 2013 年 7 月 20 日进行了全面清理,测量时间为 2013 年 7 月 20 日~2013 年 8 月 9 日,共 21 d,测量时间单位为 1 d。换热器清理后初运行测算得出换热器传热系数认为是 K_c ,每天测得数据可计算出一个污垢热阻,待污垢生长稳定后停止测试。结果整理如下:

第一阶段 污水源热泵供暖工况下测试结果:

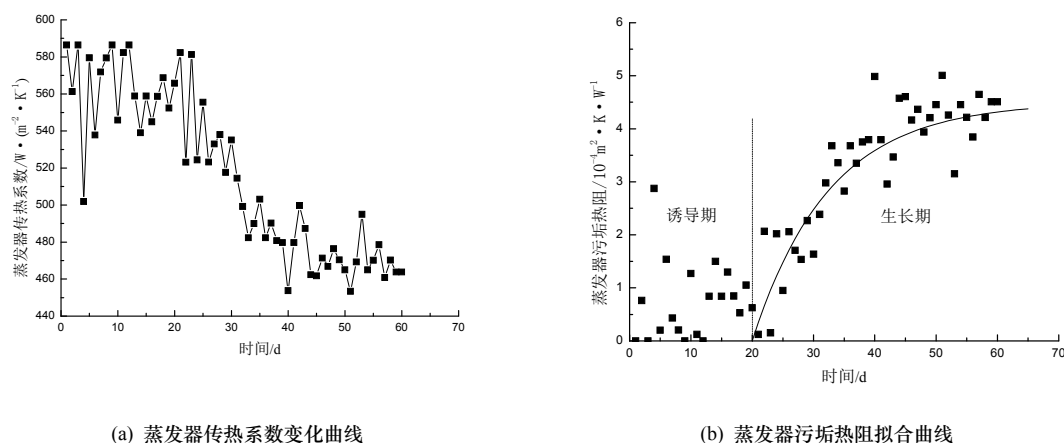


图2 冬季供冷工况下测量结果

Fig.2 The testing result of cooling conditions in winter

由图2可以看出,冬季测试期间,机组蒸发器在清洗后运行时,污垢起初并未明显增加而是存在生长诱导期,约为 20 d,此后污垢生长明显,到 60 d 左右污垢热阻达到基本稳定,约为 $4.5 \times 10^{-4}\text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$,生长期约为 40 d。蒸发器传热系数随污垢生长而降低,由 $590\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 降低至 $460\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,降幅 22%。污垢热阻生长期变化曲线大体接近指数函数曲线,认为热阻增长趋势符合 Zubair 和 Sheikh 等人建立的渐进型污垢预测模型^[9,10],经过数据拟合得到蒸发器管外污水侧污垢热阻变化预测模型为:

$$R_{f1} = 4.5 \times 10^{-4} \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta}{12.52}\right) \right] \quad (8)$$

式中: θ 为天数, d; 下同。

第二阶段 污水源热泵供冷工况下测试结果:

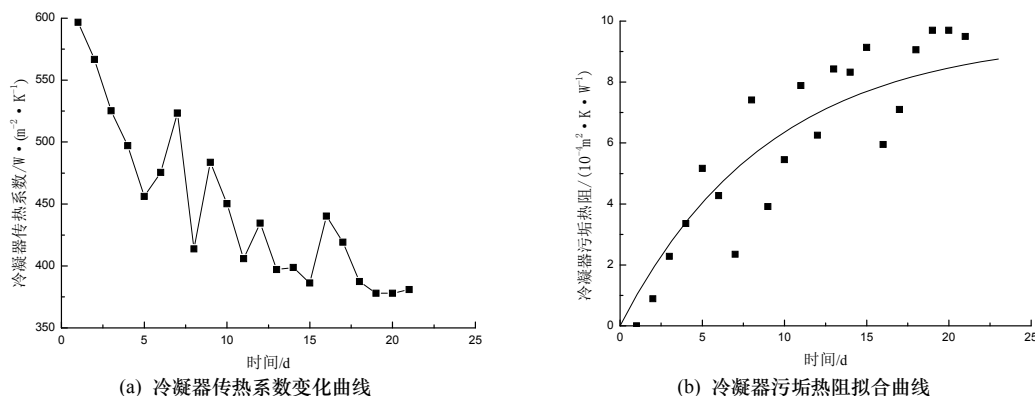


图3 夏季供冷工况下测量结果

Fig.3 The testing result of heating conditions in summer

由图3可以看出,机组冷凝器在清洗后,污垢并没有经过诱导期,而是直接生长且起初增长较快,而后逐渐达到基本平稳,约为 $9.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$,生长期约为 21 d. 冷凝器传热系数随污垢生长降低明显,前 12 d 就由 $600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 降低至 $400 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,降低了三分之一,21 d 后达到稳定,约为 $380 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. 污垢热阻变化规律符合渐进型预测模型,拟合后可得冷凝器管内污水侧污垢热阻预测模型:

$$R_{f2} = 9.5 \times 10^{-4} \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta}{9.04}\right) \right] \quad (9)$$

污垢的整个变化周期是污垢在换热面上附着生长和水流冲刷剥蚀相互作用的结果,影响这个过程的直接因素即为污垢的附着生长和水流的冲刷剥蚀. 从测量结果可以看出,二级出水在蒸发器和冷凝器中的污垢生长规律有所不同,这种换热边界条件的不同将导致污垢的生长附着和剥蚀条件的差异,主要体现在两个方面:

首先,流动换热形式不同. 二级出水在蒸发器中走壳侧,冲刷管束与管束内制冷剂对流换热,而冷凝器中其走管内做受迫流动,与管外制冷剂对流换热,这种换热方式和边界几何条件的不同直接影响污垢的附着与生长. 从换热器中污垢的生长规律可以看出,蒸发器中二级出水冲刷管束换热时,污垢起初并未明显生长,约 20 d 后污垢开始生长并且增长速度较快;冷凝器中二级出水在管内受迫流动,一开始污垢便开始附着并迅速生长,没有明显的诱导期. 可见,冲刷管束换热方式的污垢生长存在较明显诱导期,而管内流动条件下不存在明显诱导期.

再者,污垢生长的温度条件不同. 蒸发器中,制冷剂在管内沸腾吸收管外污水的热量,污垢的生长温度较低,二级出水的实测平均温度约为 17°C ,而冷凝器中,制冷剂在管外凝结换热向管内二级出水释放热量,其平均温度约为 30°C . 由于污水污垢主要为生物污垢,而其最佳的生长温度范围约是 $30 \sim 40^\circ \text{C}$ ^[11],温度过高或过低都会影响污垢的生长. 因此,温度条件的差异直接影响生长期周期,从测量结果看,蒸发器污垢生长较慢,周期较长,生长期约为 40 d,稳定热阻较小,为 $4.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$,冷凝器中污垢生长周期较短,约为 21 d,稳定热阻较大,为 $9.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

3 结论

本文分别连续测量了污水源热泵系统冬夏两个运行工况的相关参数,得到蒸发器与冷凝器传热系数和污垢热阻的变化特性,并对比分析,得到以下结论:

(1) 蒸发器传热系数在其污垢生长周期从 $590 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 降低至 $460 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,降幅 22%;冷凝器传热系数在其污垢生长周期从 $600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 降低至 $380 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,降幅 37%;

(2) 蒸发器内二级出水冲刷管束换热,污垢生长存在诱导期,而冷凝器中二级出水在管内受迫流动,不存在明显诱导期;

(3) 污垢生长期的热阻增长规律均符合指数函数渐进型预测模型. 蒸发器内二级出水污垢生长周期为 60 d,其中诱导期为 20 d,稳定热阻为 $4.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$;冷凝器内二级出水污垢生长周期为 21 d,稳定热阻为 $9.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

参考文献 References

- [1] 杨善让, 徐志明, 孙灵芳, 等. 换热设备污垢及对策[M]. 2版. 北京:科学出版社, 2004.
YANG Shanrang, XU Zhiming, SUN Lingfang, et al. Fouling and countermeasures of heat exchanger[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] 孙德兴, 吴学慧. 污水冷热源系统污垢类型及其增长特性[J]. 暖通空调, 2012, 42(1):73-76.
SUN Dexing, WU Xuehui. Type and growing characteristics of fouling in sewage cold and heat source systems[J]. HV&AC, 2012, 42(1):73-76.
- [3] 孙德兴, 吴荣华. 热泵冷热源城市原生污水的流动阻塞与换热特性[J]. 暖通空调, 2005, 35(2):86-88.
SUN Dexing, WU Ronghua. Flowing block and heat transfer characteristics of urban sewage as cold and heat source of heat pumps[J]. HV&AC, 2005, 35(2):86-88.
- [4] 钱剑锋, 孙德兴. 直接与间接式污水源热泵系统供热性能分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2009, 36(12):94-98.
QIAN Jianfeng, SUN Dexing. Analysis on Heating Performance of Direct and Indirect Sewage Source Heat Pump System[J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2009, 36(12):94-98.
- [5] 咎成, 史琳, 程邴, 等. 再生水二级出水水温特点与热利用[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(2):31-34.
ZAN Cheng, SHI Lin, CHENG Ye, et al. Temperature characteristics of secondary effluent and its thermal application[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(2):31-34.
- [6] 马秀娟, 咎成, 安青松, 等. 城镇二级出水污垢起始期生长情况的实验研究[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2010, 50(2):274-277.
MA Xiujian, ZAN Cheng, AN Qingsong, et al. Experimental study of the initial period of fouling growth in municipal secondary effluent system[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(2):274-277.
- [7] 史琳, 咎成, 杨文言. 城镇二级出水换热表面混合污垢的成分及形貌[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2009, 49(2):236-239.
SHI Lin, ZAN Cheng, YANG Wenyan. Composition and morphology of composite fouling by municipal secondary effluent on heat transfer surfaces[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(2):236-239.
- [8] 武姿, 付林, 袁卫星. 污水换热器传热性能测试分析[J]. 暖通空调, 2009, 39(2):87-89.
WU Zi, FU Lin, YUAN Weixing. Testing and analysis of heat transfer properties of sewage heat exchangers[J]. HV&AC, 2009, 39(2):87-89.
- [9] ZUBAIR S M, SHEIKH A K, SHAIK M N. A Probabilistic approach to the maintenance of heat-transfer equipment subject to fouling[J]. Energy, 1992, 17(8):769-776.
- [10] ZUBAIR S M, SHEIKH A K, BUDAIR M O, et al. A maintenance strategy for heat-transfer subject to fouling: a probabilistic approach[J]. ASME J Heat Transf. 1997, 119(3):575-580.
- [11] 史琳, 咎成, 欧鸿飞. 温度及流速对板式换热器内城镇二级出水结垢特性的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2009, 49(2):240-243.
SHI Lin, ZAN Cheng, OU Hongfei. Effects of temperature and velocity on fouling by municipal secondary effluent in plate heat exchangers[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(2):240-243.
- [12] ZUBAIR S M, QURESHI B A. A probabilistic fouling and cost model for plate-and frame heat exchangers[J]. Energy Research, 2006, 30:1-17.

Test and research on the fouling in condenser and evaporator of direct sewage source heat pump system

WANG Zhiwei¹, LI Yang¹, SUN Haiyang¹, CAO Wei², LI Peng²

(1. School of Environment, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Silian Intelligence Technology Share Co., Ltd, Xi'an Hi-tech Industrial Park, Xi'an 710075, China)

Abstract: Direct sewage source heat pump system is a form which let sewage goes directly into its condenser and evaporator. It can usually reduce energy loss relative to indirect form which use an intermediate heat exchanger, but fouling influence the energy efficiency of the system a lot. Authors of this article take a direct sewage source heat pump in Xi'an as the research object, the system uses municipal secondary effluent as its cold and heat sources. After cleaning and maintaining the heat exchangers of the system, the consequent tests have been finished under the cooling and heating operating conditions of the system. The result shows that the growth rhythm of fouling in condenser and evaporator is different because of the difference of flow mode and temperature conditions. The authors test and calculate the attenuation characteristics of the heat transfer coefficient of the two heat exchangers, establish and fit the growth prediction model of the fouling, compare and analyze the difference of fouling characteristics in condenser and evaporator, which can be a reference in the design and application of sewage source heat pump systems.

Key words: direct form; sewage source heat pump; secondary effluent; fouling thermal resistance; shell and tube heat exchanger

(本文编辑 桂智刚)