

污水源热泵系统中换热器 污垢热阻的实验研究*

哈尔滨工业大学 徐莹[☆]

中国电子系统工程第二建设有限公司 李鑫

哈尔滨工业大学 伍悦滨 孙德兴

摘要 以换热器中常见的污泥类颗粒污垢为研究对象,通过工程实例进行热阻实验,监测此类污垢在换热管内的生长情况,并建立热阻预测模型。对得到的实验数据进行分析,拟合出了适用于工程实际的污水换热器污垢曲线,对工程设计及污水源热泵系统的控制、运行都有指导意义。

关键词 污水源热泵 换热器 污垢热阻 预测模型

Experimental research of fouling thermal resistance on heat exchangers in sewage source heat pump system

By Xu Ying[★], Li Xin, Wu Yuebin and Sun Dexing

Abstract Taking the sludge particle fouling as the research object, carries out the fouling thermal resistance experiment in an actual project, tests its growth and establishes a prediction model. Analyses the experimental data and obtains the fitting curve of fouling in sewage heat exchangers, which is recommended to be a instructive means in the design and control of the sewage heat pump system.

Keywords sewage source heat pump, heat exchanger, fouling thermal resistance, prediction model

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

1 简介

随着能源消耗和环境保护问题日益严峻,开发利用各类低位可再生能源作为热泵冷热源为建筑物供暖制冷具有重要的节能与环保意义^[1-2]。可再生能源包括太阳能、风能、水能、生物质能和地热能等等,相对这些冷热源,城市污水具有独特优势,是一种理想的低位冷热源。笔者所在课题组从 2002 年开始研究污水源热泵技术以来,在解决污水的阻塞问题方面取得了多项发明专利,并且在多个工程中应用了原生污水源热泵技术,运行情况良好。但在实践的过程中发现,污水对换热器的污染问题逐渐成为原生污水源热泵系统能否成功应用的关键。

2 污垢生长机理概述

按照污垢物质的成分,将壳管式换热器常见污垢分为水垢、污泥、腐蚀产物和生物沉积物 4 种类型。它们的基本特性、形成原因和危害各不相同。水垢通常是指附着

于换热器换热管内表面上的一层不溶性盐类,它们具有质地坚硬、厚实、结晶紧密的特点,通常又被人们称之为硬垢。污泥是指流体中的尘埃颗粒、泥沙、杂草、碎料片等,它们中的有些物质往往是亲水性的,因此很容易在换热管内形成体积庞大、湿而软的片状物,污泥不但自身对换热效果产生影响,而且极易与各种无机盐类沉淀和微生物结合在一起,形成一些混合污垢。腐蚀产物专指换热面材料参与化学反应而产生的腐蚀物,腐蚀产物不仅本身污染换热面,降低传热效率,而且促使其他潜在的污垢组分附着于换热面而形成垢层。生物沉积物是指由细菌、藻类等微生物及其排泄物沉积于固体表面并生长、繁

①☆ 徐莹,女,1981 年 3 月生,在读博士研究生
150090 哈尔滨工业大学(二区)2612 信箱
(0451) 86283783
E-mail: joexying@126.com
收稿日期:2007-09-18
修回日期:2009-04-02

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50578048)

殖而形成的生物黏膜或有机物膜。经调查发现,在壳管式换热器的常见污垢中,以上 4 种污垢所占的比例大约在 90% 以上,且污泥和水垢所占的比例最大,危害最大,是今后除污防垢工作的重点。

3 污垢积聚预测模型

最早的污垢模型是 1924 年由 McCabe 和 Robinson 针对蒸发器水垢提出的^[3]。但最重要的模型是 1959 年 Kern 和 Seaton 提出的微分形式污垢分析模型^[4-5],这一模型为后来污垢研究奠定了理论基础。

在污垢的形成过程中,一方面污秽物质会沉积到换热面上,增加热阻;但另一方面污垢组分被流体冲击而剥离,污垢热阻减小。Kern 和 Seaton 根据这一推测,提出以下常微分方程来描述这一过程。

$$\frac{dm_f}{d\theta} = \dot{m}_d - \dot{m}_r \quad (1)$$

式中 m_f 为污垢沉积质量, kg; θ 为污垢热阻增长时间, h; $\dot{m}_d$ 为污垢沉积率, kg/h; $\dot{m}_r$ 为污垢剥蚀率, kg/h。

假设沿换热面和垢层厚度方向,污垢的成分及特性都是均匀分布的,则有污垢热阻的定义式:

$$(R_f)^3 = \frac{m_f}{\rho_f \lambda_f^3} \quad (2)$$

式中 R_f 为单位面积的污垢热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; ρ_f 为污垢的密度, kg/m^3 ; λ_f 为污垢单位长度的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

式(2)还可以表示为

$$\frac{dR_f}{d\theta} = \frac{\dot{m}_d - \dot{m}_r}{\rho_f \lambda_f} = \Phi_d - \Phi_r \quad (3)$$

式中 Φ_d 为沉积率, $\text{m} \cdot \text{K}/(\text{W} \cdot \text{s})$; Φ_r 为剥蚀率, $\text{m} \cdot \text{K}/(\text{W} \cdot \text{s})$ 。

式(3)表明,污垢热阻随时间的变化率是由沉积率和剥蚀率决定的。虽然,目前针对颗粒污垢、析晶污垢、腐蚀污垢、化学反应污垢、生物污垢、凝固污垢和食品污垢等,人们都提出了对应的污垢热阻预测模型,但是各类污垢热阻预测模型的基础仍然是式(3),只不过针对不同类型的污垢,在不同的假设条件下,沉积率 Φ_d 和剥蚀率 Φ_r 的具体表达式不同而已。

直到 20 世纪 90 年代, Zubair 等人在分析污垢热阻随时间的变化规律时,引入概率分析方法,将污垢热阻随时间的变化规律归纳为线性、幂律、降幂和渐进四类增长形式^[6-9],它们的表达式形式分别为

$$R_f(\theta) = B\theta \quad (4)$$

$$R_f(\theta) = B\theta^n \quad (5)$$

$$R_f(\theta) = B \ln \theta \quad (6)$$

$$R_f(\theta) = \dot{R}_f [1 - \exp(-\frac{\theta}{\theta_c})] \quad (7)$$

式(4)~(7)中 B 为常数; n 为幂指数; $\dot{R}_f$ 为污垢热阻稳定值, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; θ_c 为污垢热阻达到稳定值的时间, h。

这一污垢预测概率模型的提出,打破了原来不同种类

污垢之间的界限,具有普适性意义,能够直观、形象地描述各类污垢的生长规律。

4 污垢的监测方法

一般来讲,污垢监测方法分为热力学法和非热力学法,其中热力学法包括污垢热阻法和温差监测法;非热力学法包括直接称重法、厚度测量法、压降测量法、放射性技术法、时间推移电影法、液晶瞬态法、光学法、超声脉冲反射法和钙离子浓度法等。20 世纪 90 年代以来,随着关于污垢的理论研究工作的深入和计算机应用技术的飞速发展,污垢的监测方法、实验装置数据采集系统等方面均有了长足的进步,各式各样的污垢检测方法和实验装置层出不穷,但目前仍以污垢热阻法和压降测量法为主。

4.1 污垢热阻法

污垢热阻法是最传统、最经典的污垢监测模型,其基本定义见下式。

$$R_f = \frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_c} \quad (8)$$

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 为污染状态下的总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; K_c 为洁净状态下的总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

$$\frac{1}{K_c} = R_{1c} + R_w + R_{2c} \quad (9)$$

$$\frac{1}{K_f} = R_{1f} + R_{f1} + R_w + R_{f2} + R_{2f} \quad (10)$$

将式(9)、(10)代入式(8)得

$$R_f = (R_{1f} - R_{1c}) + (R_{2f} - R_{2c}) + R_{f1} + R_{f2} \quad (11)$$

式(9)~(11)中 R_{1f} 、 R_{2f} 分别为污染状态下壁面两侧的对流换热热阻, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$; R_{1c} 、 R_{2c} 分别为洁净状态下壁面两侧的对流换热热阻, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$; R_{f1} 、 R_{f2} 分别为污染状态下壁面两侧的污垢热阻, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$; R_w 为壁面的导热热阻, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 。

清洁和污染的换热面热阻分布如图 1 所示。

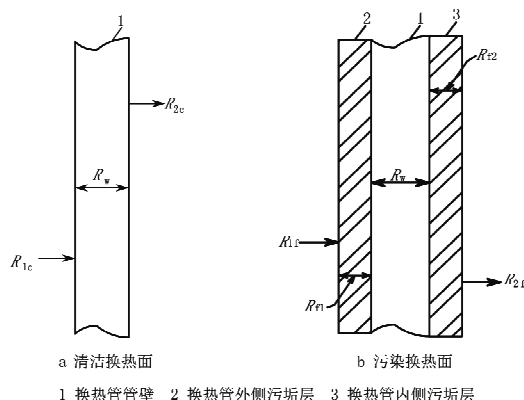


图 1 清洁和有污染的换热面热阻分布示意图

近似认为 $R_{1f} = R_{1c}$, $R_{2f} = R_{2c}$, 因此

$$R_f = R_{f1} + R_{f2} \quad (12)$$

首先测量洁净状态下的总传热系数 K_c , 然后在相同工

况下,监测污染状态的总传热系数 K_f ,即可由式(8)和(12)计算得出对应工况下的污垢热阻。如果可以在线测得 K_f 随时间变化的关系,就可以得到污垢热阻随时间的变化特性。

4.2 压降测量法

压降测量法是所有污垢监测方法中操作最为简便而又行之有效的一种监测手段。只需测量换热管进、出口或换热器进、出口的压差,就可以通过污染前后压降的变化来反映污垢的积聚情况。

换热管进、出口的压差包括沿程阻力和局部阻力。

$$p_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} \quad (13)$$

$$p_m = \zeta \frac{\rho v^2}{2} \quad (14)$$

式(13),(14)中 p_f 为沿程阻力,Pa; λ 为沿程阻力系数; l 为换热管管长,m; d 为换热管管径,m; ρ 为流体密度,kg/m³; v 为换热管断面平均流速,m/s; p_m 为局部阻力,Pa; ζ 为局部阻力系数。

如图2所示,在一般的壳管式换热器中,污垢使换热管内径减小,粗糙度增加,分析式(13),(14)可得:1)由于管内侧的表面粗糙度增加,使得沿程阻力系数加大,引起沿程阻力增加;2)由于换热管内径减小而引起沿程阻力增加;3)由于污物在管内进出口处的长期积聚,使得局部阻力系数加大,引起局部阻力增加。

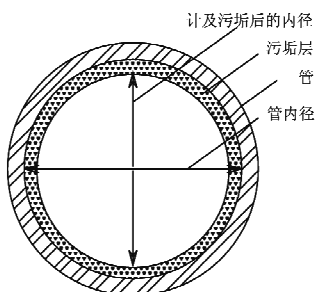


图2 管内污染后流动截面示意图

5 换热器污垢监测的实验方法

如前所述,污垢热阻的求取公式为式(8),式中污染状态下的总传热系数 K_f 可由设计工况下的传热方程求得。

$$K_f = \frac{Q}{A \Delta t_m} \quad (15)$$

$$\Delta t_m = \epsilon_{\Delta t} \frac{(t'_w - t''_f) - (t''_w - t'_f)}{\ln \frac{t'_w - t'_f}{t''_w - t''_f}} = \epsilon_{\Delta t} \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (16)$$

$$Q = c_p m (t'_f - t'_i) \quad (17)$$

式(15)~(17)中 Q 为单位时间内由管壁传给流体的热量,W; A 为总的换热面积即换热管内表面积,m²; Δt_m 为换热器内冷热流体的平均温差,℃; t'_w , t''_w 分别为污水进、出口温度,℃; t'_f , t''_f 分别为中介水进、出口水温,℃; Δt_1 , Δt_2 分别为污水进、出口处冷热流体温差,℃; $\epsilon_{\Delta t}$ 为由流动

方式决定的温差修正系数; c_p 为水的比定压热容,kJ/(kg·K); m 为中介水的质量流量,kg/s。

将式(16)和式(17)代入式(15)中得

$$K_f = \frac{c_p m (t'_f - t'_i)}{A \epsilon_{\Delta t} \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}} \quad (18)$$

由式(18)可以看出,只要测出流体的质量流量,冷热流体进、出口温度,便可以计算出换热器内的传热系数,也就可以得出换热器内的污垢热阻。根据以上监测原理结合实验数据对实际工程中的换热器结构情况进行了监测。

6 实验过程及实验分析

6.1 实验过程

管内污垢生长特性实验的总体方案包括实验工况的确定、系统的运行和数据采集两个方面。

1) 实验工况的确定

本实验在实际工程中进行,污水流量为 110 m³/h。

2) 系统运行和数据采集

系统全天间歇运行,实验数据的采集由测量仪器定期自动记录。数据监测系统的采样周期为 30 min,这样每 30 min 就可以计算出一个 K_f ,从而绘制出传热系数的变化曲线。在实验后期由于污垢厚度已经趋于稳定,变化较缓慢,所以将测量频率变为每 2 min 测量一次温度,以验证污垢是否达到稳态。

6.2 实验结果及分析

图3为换热器内污垢热阻随时间变化的曲线。实验运行时间为2007年1月26日00:30~2月5日13:30,总计253 h。在这段运行期间内热泵机组根据负荷的变化间歇运行,现场观察发现,当1台热泵稳定运行时换热器内中介水的进水温度为6℃左右,当2台热泵同时运行时换热器内中介水的进水温度为3℃左右,所以过高的温度都是在热泵停机或是刚开始运行还未达到稳定时记录下的温度,都应该舍去。符合条件的温度记录都通过计算得出有效的热阻值,然后绘出变化曲线。

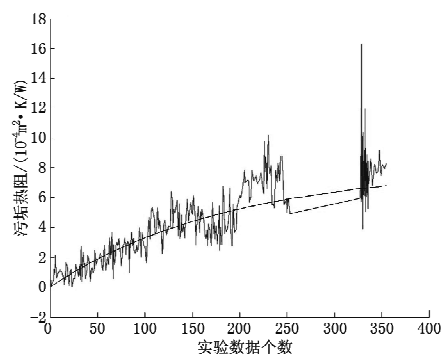


图3 污垢热阻随时间的变化

从图3中可以看出:

1) 测试一开始换热系数就开始波动并有下降趋势,

这说明换热器内污垢生长并没有诱导期,也就是说测试一开始马上就有污垢形成。这与换热器内的水质为污水有关,因为污水中含有较多的污染物,有利于污垢的迅速形成。

2) 图中呈波浪形上升的实测污垢热阻值曲线大体形状接近指数函数曲线,因此可以认为热阻增长趋势与 Zubair 和 Sheikh 等人建立的渐进污垢积聚热阻预测模型具有类似的特性方程式。

3) 污垢热阻在 250 h 以后渐趋稳定,稳定值为 $8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$,称之为稳定污垢热阻。对于颗粒污垢,其稳定污垢热阻受温度(换热管壁温度和流体温度)、颗粒粒径、流体流速、颗粒物浓度、换热管表面粗糙度等多种因素的影响。

综上所述,参照 Zubair 和 Sheikh 等人建立的渐进污垢积聚热阻预测模型式(7)的结构形式,可以得到在北京悦都酒店的实际工程中当污水流量为 $110 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,在换热器内产生的污垢的热阻预测模型式为

$$R_f = 8 \times 10^{-4} \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta}{188}\right) \right] \quad (19)$$

将式(19)与实测的污垢热阻值进行比较,由图 3 可以看出,在前 200 h 内实测值与理论值基本吻合,在 200 h 以后,实测值在一段时间内比理论值明显偏高,但在接下来的一段时间内又开始持续偏低,但一直在预测值的上下波动,这可能是由于 Zubair 和 Sheikh 等人建立的渐进污垢积聚热阻预测模型是针对同一种类的污垢,而具体到某一种的污垢,则会出现一定的偏差,需要加以修正。而且污垢的生长本来就是非线性的,当污垢增长到平衡厚度时其表面的附着力很小,并且底层的生物黏泥由于缺氧等原因也部分开始脱落了,而在脱落的地方污垢的生长速度很快,所以就出现了污垢热阻变化剧烈的情况。

7 结论

7.1 在实际工程状态下,测得换热器内的黏泥污垢热阻生长规律,实际换热器内污垢的生长状态与预测的污垢的生长状态基本吻合,但仍需修正。

7.2 污垢达到稳定状态时,污垢的热阻会呈现围绕平衡热阻较大的波动。

• 简讯 •

《暖通空调》再次入选建筑科学类核心期刊

2008 年 12 月北京大学出版社出版了《中文核心期刊要目总览(2008 年版)》,这是该要目总览的最新版本。参与该项课题的评审专家共有 5 529 位,分别来自 3 283 个单位。暖通空调相关行业知名专家江亿、朱颖心、徐伟、龙惟定、刘加平、李百战、付祥钊、孟庆林、金丽娜、杜垲、张小松等名列

7.3 本次实验的成功证明了热阻法的可行性和有效性,虽然误差可能稍大,但在实际工程允许的范围内,并且实验的数据对以后的工程和具体的换热器计算具有较大的指导意义。

7.4 工程中所使用的是未经处理的原生污水,污垢生长速度快,达到稳定的时间短,所以没有必要对换热器进行频繁的清洗,只要一个供暖期结束后进行清洗即可。

7.5 本实验仅采用了污垢热阻法进行监测,在今后的研究工作中还应采用其他监测方法与此方法进行互相校验,例如之前介绍的污垢压降测量法,以得到可靠的数据,对实际工程进行更准确地指导。

参考文献:

- [1] 吴荣华,张承虎,孙德兴. 城市污水冷热源应用技术发展状况研究[J]. 暖通空调,2005,35(6):31-37
- [2] Stijemstrom. Feeding large heating pumps form sewage water treatment plants[C]//Proceedings of the International Conference on Applications and Efficiency of Heat Pump Systems, 1991:183-192
- [3] McCabe W L, Robinson C S. Thermal surface fouling of evaporator[J]. Chem Eng,1924,20(16):478-479
- [4] Kern D Q, Seaton R E. A Theoretical analysis of thermal surface fouling[J]. Chem Eng,1959, 55(4):258-262
- [5] Kern D Q, Seaton R E. Surface fouling; how to limit[J]. Br Chem Eng, 1959,55(6):71-73
- [6] 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
- [7] 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 Transfer,1997,119(3):575-580
- [8] Bott T R, Melo L F, Panchal C B, et al. Understanding heat transfer fouling and its mitigation[M]. New York: Begell House Inc,1999:393-400
- [9] Zubair, Bilal A Q. A probabilistic fouling and cost model for plate-and-frame heat exchangers[J]. Energy Research,2006, 30(1):1-17

其中。本版将《暖通空调》列为建筑科学类中文核心期刊。这是本刊在 1992 首版和 1996,2000,2004 年各版之后,再次被列入该核心期刊阵列。同时列入的建筑类期刊共 33 种,《暖通空调》是其中唯一的建筑环境与设备工程类专业刊物。

(本刊)