

污垢热阻动态监测装置及其传热计算方法的研究

全贞花 陈永昌 王春明 李 兵 马重芳

(北京工业大学环境与能源工程学院“传热强化与过程节能”教育部重点实验室, 北京 100022)

摘 要 介绍了污垢热阻动态监测装置的构成及特点。根据传热学基本原理, 对该套装置进行了光滑管对流换热性能测试, 结果表明两侧流体热平衡最大偏差小于 10%, 实验结果与经验公式计算的 Nu 数相吻合, 其最大偏差小于 10%。用该装置进行换热表面污垢的动态自动监测, 可以得出准确可靠的实验结果。

关键词 污垢热阻; 动态监测; 对流换热

中图分类号: TQ314 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2007)02-0322-03

DEVELOPMENT OF ON-LINE MONITORING APPARATUS OF FOULING THERMAL RESISTANCE AND ITS CALCULATION METHOD OF HEAT TRANSFER

QUAN Zhen-Hua CHEN Yong-Chang WANG Chun-Ming LI Bing MA Chong-Fang

(The Education Ministry Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract In this paper, an on-line monitoring apparatus of fouling thermal resistance is introduced, including its structure and performance. Based on the fundamentals of heat transfer, heat transfer performance was tested using smooth tube. As a result, the heat balance deviations of two sides' water were no more than 10 percent. Experimental turbulent flow heat transfer Nusselt numbers agreed with the predicted values within 10%. Accordingly, the system is reliable to be used to monitor the fouling process of heat transfer surface

Key words fouling thermal resistance; on-line monitoring; heat transfer

符号表

Q	传热量, W	下角标	ρ	密度, kg/m^3
d	传热管直径, m	h	c	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
Δt_m	对数平均温差, $^\circ\text{C}$	o	Re	雷诺数
V	体积流量, m^3/s	w	Nu	努谢尔特数
λ	导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	c	k	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
h	对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	i	L	传热管管长, m
Pr	普朗特数	Cu	t	温度, $^\circ\text{C}$

1 引言

污垢作为换热器普遍存在的问题, 由于其降低传热性能并造成巨大的经济损失, 越来越受到世界范围的普遍重视。污垢的形成是一个有着能量、质量和动量传递的复杂过程, 使得换热表面的污垢特性是多种参数的函数, 而这些参数还要随时间和运行条件的变化而变化^[1], 所以污垢热阻的动态监测

对于污垢特性的研究显得尤为重要。由此, 我们建立了污垢热阻动态监测实验装置, 可以对各种换热表面进行污垢热阻的实时监测, 为换热设备的污垢特性及抗垢技术的研究提供可靠的平台。

2 污垢热阻动态监测装置

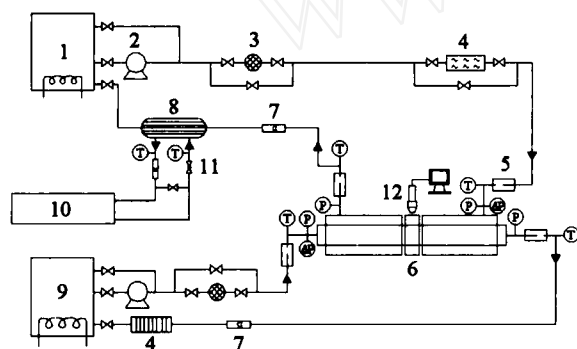
污垢热阻动态监测装置由冷水系统、热水系统、

收稿日期: 2006-12-12; 修订日期: 2007-01-20

基金项目: 国家“九七三”计划资助项目 (No.G2000026304); 北京市优秀人才培养资助项目 (No.20061D0501500186)

作者简介: 全贞花 (1972-), 女, 吉林柳河人, 讲师, 博士生, 主要从事强化传热及其在高技术领域中的应用研究。

实验段、制冷系统和测控装置组成,如图 1 所示。实验装置采用了数据的自动采集和参数的自动控制系统,从而保证了实验段的进口流量和温度的稳定与可靠,可控制流量变化在 $\pm 2\%$, 温度变化在 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 内。实验装置采用精度为 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 的 1/3B 级 Pt100 测温, $\pm 0.5\%$ 精度的压力变送器测压, $\pm 0.25\%$ 精度的差压变送器测实验段压降。实验段采用套管式结构,其有效换热管长 0.7 m, 并可根据需要加长或缩短。内管为热水路, 管套为冷水路。热水箱的最大加热功率为 15 kW, 冷水箱的加热功率为 3 kW, 采用流体大流量回流自搅拌, 可保证箱内介质具有较好的温度均匀性。冷源由北京工业大学热能实验室地源热泵机组提供, 最大制冷量为 15 kW。由电动调节阀自动调节冷冻水的流量来实现实验段冷水入口要求的温度。由可控硅调功柜来实现热水入口的要求温度。冷水温度范围为 $15\sim 50^\circ\text{C}$, 热水温度范围为 $20\sim 95^\circ\text{C}$ 。实验段外套管在中间部分采用透明玻璃管, 实现了结垢过程的可视化, 采用高倍摄影体式显微镜对换热表面的结垢过程进行拍照或摄影, 并通过电脑控制电路进行实时采集。系统自动化程度较高, 可实现长时间运行无人值守。



1. 冷水箱 2. 离心泵 3. 过滤器 4. 抗垢器
5. 混合段 6. 实验段 7. 流量计 8. 热交换器
9. 热水箱 10. 地源热泵 11. 电动阀 12. 显微镜

图 1 污垢热阻动态监测装置

3 对流换热性能测试

为了验证实验装置及测量方法的可靠性,我们对光滑传热管进行了水-水对流换热性能测试。根据传热学基本原理进行理论计算,然后将实验测量的结果与理论计算的结果进行比较^[2~4]。

3.1 对流换热理论计算方法

当实验段的冷水、热水的入口温度 t_{c1} 、 t_{h1} 及流量 V_c 、 V_h 一定时,由传热方程、冷热水的热平衡方程、紊流换热经验公式-格尼林斯基公式及对流换热的牛顿冷却公式 7 个方程 (公式 (1)~(7)) 可

组成含有 7 个未知数的方程组。通过解非线性方程组可求出 7 个未知数,分别为冷水、热水的出口温度 t_{c2} 、 t_{h2} , 对流换热系数 h_c 、 h_h , 内管内、外表面的温度 t_{wi} 、 t_{wo} 及换热量 Q 。

$$Q = \frac{\pi d_o L \Delta t_m}{\frac{d_o}{h_h d_i} + \frac{\pi d_o}{2\pi \lambda_{cu}} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_c}} \quad (1)$$

$$Q = c_h \rho_h V_h (t_{h1} - t_{h2}) \quad (2)$$

$$Q = c_c \rho_c V_c (t_{c2} - t_{c1}) \quad (3)$$

$$\frac{h_h d_i}{\lambda_h} = 0.012 (Re_h^{0.87} - 280) Pr_h^{0.4} \left[1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{2/3} \right] \left(\frac{Pr_h}{Pr_{wi}} \right)^{0.11} \quad (4)$$

$$\frac{h_c d_c}{\lambda_c} = 0.012 (Re_c^{0.87} - 280) Pr_c^{0.4} \left[1 + \left(\frac{d_c}{L} \right)^{2/3} \right] \left(\frac{Pr_c}{Pr_{wo}} \right)^{0.11} \quad (5)$$

$$Q = h_h \pi d_i L (t_h - t_{wi}) \quad (6)$$

$$Q = h_c \pi d_o L (t_{wo} - t_c) \quad (7)$$

其中,格尼林斯基公式 (4)、(5) 的适用范围为 $1.5 < Pr_f < 500$, $2300 < Re_f < 10^6$, $0.05 < Pr_f / Pr_w < 500$ 。

将 h_h 、 h_c 代入下列公式可计算出以传热管外表面为基准的传热系数 k 及对流换热 Nu 数。

$$k = \frac{1}{\frac{d_o}{h_h d_i} + \frac{\pi d_o}{2\pi \lambda_{cu}} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_c}} \quad (8)$$

$$Nu = \frac{hd}{\lambda} \quad (9)$$

3.2 对流换热实验数据处理方法

通过测量热、冷水的流量及进、出口温度,由公式 (2)、(3) 可计算热水、冷水传热量,从而计算两侧流体热平衡偏差。

实验段总传热系数 (以内管外表面为基准) 由下式计算:

$$k = \frac{Q}{\pi d_o L \Delta t_m} \quad (10)$$

由于没有测量内管壁温,所以传热表面对流换热系数由总传热系数确定,方法如下。

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_c} + \frac{d_o}{h_h d_i} + \frac{\pi d_o}{2\pi \lambda_{cu}} \ln \frac{d_o}{d_i} \quad (11)$$

在测试冷水侧对流换热性能时,认为 h_h 基本不变。则等式右侧的后面两项是常数 B , 就有

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_c} + B \quad (12)$$

对于紊流, 对流换热系数正比于 Re 的 m 次幂, 即

$$h_c = CRe^m \quad (13)$$

所以, 方程 (11) 可写成:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{Re} \right)^m + B = A \left(\frac{1}{Re} \right)^m + B \quad (14)$$

其中, A 、 B 、 m 由实验数据 $1/Re$ 、 $1/k$ 按幂函数形式拟合得到。

传热管冷水侧实验换热系数由下式求得:

$$h_c = \frac{1}{\frac{1}{k} - B} \quad (15)$$

对流换热 Nu 由公式 (9) 计算。

同理进行传热管热水侧对流换热实验计算。

3.3 对流换热性能测试结果

首先将管内热水流量和入口温度保持恒定, 流量为 800 L/h (对应流速为 1.96 m/s), 入口温度为 $90.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。在冷水入口温度保持恒定在 $23.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 条件下, 变化套管冷水流量, 使流速在 0.31~1.86 m/s 内变化, 对应 Re 为 2300~13400, 进行冷水侧对流换热性能测试。同样方法, 将套管冷水流量和入口温度保持恒定, 流量为 780 L/h (对应流速为 1.20 m/s), 入口温度为 $23.0 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 。在管内热水入口温度保持恒定在 $70.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 条件下, 变化管内热水流量, 使流速在 0.90~2.70 m/s 内变化, 对应 Re 为 25100~75600, 进行热水侧对流换热性能测试。测试结果表明系统冷热水的热平衡误差小于 10%。图 2、图 3 分别给出冷水侧及热水侧的传热性能曲线。经验公式计算的传热 Nu 数与实验结

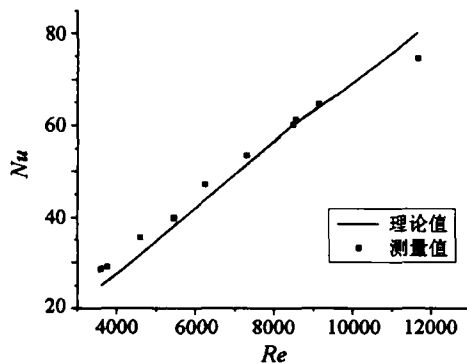


图 2 冷水侧传热曲线

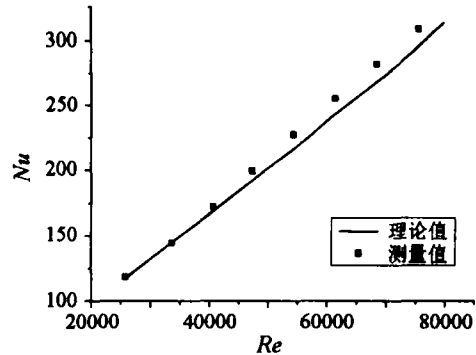


图 3 热水侧传热曲线

果相吻合, 其最大偏差均小于 10%。可见, 该套实验装置具有很好的可操作性和可靠性, 为污垢热阻的动态模拟与监测提供了保障。

4 污垢热阻动态监测

由污垢热阻的定义可知:

$$R_f = \frac{1}{k_t} - \frac{1}{k_c} \quad (16)$$

其中, R_f 为污垢热阻; k_t 、 k_c 分别为换热表面结垢和初始洁净状态下的总传热系数。

由前面所述方法可知, 通过测量洁净状态下各运行参数可得 k_c , 然后监测结垢状态下各运行参数可得 k_t , 按照式 (16) 计算得到污垢热阻。本实验装置能在线测量各运行参数随时间变化的关系, 所以可得到污垢热阻随时间的变化特性。

5 结论

(1) 污垢热阻动态监测装置采用数据的自动采集和参数的自动控制, 具有很好的操作性和可靠度。

(2) 对光滑管进行了水-水强制对流换热性能测试实验。两侧流体热平衡最大偏差小于 10%。实验结果与根据经验公式计算的传热 Nu 数相吻合, 其最大偏差小于 10%。

(3) 通过该装置可以对污垢热阻进行自动监测, 实时而准确地记录换热表面的污垢变化, 并且实现了结垢过程的可视化。

参 考 文 献

- [1] 杨善让, 徐志明, 孙灵芳. 换热设备污垢与对策. 北京: 科学出版社, 2004
- [2] 刘征, 陈泽敬, 孟继安. 异形管管内对流换热性能的测试. 工程热物理学报, 2003, 24(5): 831-833
- [3] 杨世铭, 陶文铨. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1998
- [4] Jun Chen, Hans Muller-Steinhagen, Geoffrey G Duffy. Heat Transfer Enhancement in Dimpled Tubes. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(5): 535-547
- [5] 过增元, 黄素逸, 等. 场协同原理与强化传热新技术. 北京: 中国电力出版社, 2004