

换热表面结垢过程及机理的实验研究

陈永昌, 马重芳, 刑晓凯, 陈小砖

(北京工业大学“传热强化与过程节能”教育部重点实验室暨“传热与能源利用”北京市重点实验室, 北京 100022)

摘要: 对水溶液中矿物质离子在换热表面的结垢过程及对换热性能的影响进行了实验研究。根据实验需要,自行配制的各种硬度(CaCO_3)的水溶液作为工质, 测量换热表面的换热系数, 得到换热面的结垢变化规律。考察了各种因素对结垢过程的作用和影响, 分析了结垢过程的工作机理。结果表明, 换热面的温度及流体温度是结垢现象的主要影响因素, 且工质硬度增加, 也促使结垢过程加速进行。

关键词: 换热表面; 结垢机理; 传热

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2005)S-0086-04

在换热设备中结垢作为普遍存在的现象^[1], 一直困扰着人们。各种污垢的存在, 不仅使换热效率大大下降, 导致能源消耗和资源浪费, 而且还会损坏设备, 引起环境污染问题; 因此, 对于结垢问题的研究和治理, 受到各国科学工作者的广泛重视。在 20 世纪 30 年代, 人们就开始了对污垢的研究^[2-4]。1978 年, 第 6 届国际传热大会首次将污垢问题作为大会主题进行讨论^[5], 对污垢的研究起到重要的推动作用。此后, 各国在污垢的形成过程、监测技术以及对策研究方面开展了广泛的实验和理论研究。国外对污垢形成进行了比较深入的实验研究, 结合模型分析, 模拟了污垢形成的一般规律^[6-8]。近年来, 国内包括东北电力学院在内的多家科研机构也积极开展相关研究工作^[9], 在污垢热阻的实时监测方面和阻垢技术研发方面, 取得重要进展。但是, 由于污垢形成机理的极端复杂性, 目前为止, 在污垢特性方面还缺乏系统的实验研究, 特别是定量的实验数据则更少, 这样导致污垢研究的片面性和粗糙性, 一定程度上阻碍了除垢技术的发展。鉴于上述情况, 作者针对工业生产的实际情况, 对换热表面水垢的形成规律进行了实验研究。实验采用不同硬度的水溶液作为工质, 考察了各种主要因素对水垢形成规律的作用和影响。

1 实验装置及方法

整个实验系统如图 1 所示。实验工质由集水箱流出经过流量计和水泵, 进入换热性能测试段, 经电加热, 流体温度升高, 随后经水冷却器冷却至常温, 返回集水箱。

实验工质采用自行配制的不同硬度的水溶液(以 CaCO_3 计), 每个实验工况完成后均先用体积浓度 0.5% 稀盐酸对整个管路系统进行清洗, 再用自来水、去离子水冲洗, 保证系统初始状况一致。实验测试段为内径 14 mm, 壁厚 3 mm 的紫铜管, 总长 1.8 m(其中加热段为 1 m, 入口段为 0.8 m), 并在钢管外壁面安装了 5 个热电偶以监测温度变化。通过热平衡实验来验证系统的可靠性和一致性, 并确定实验测试段的保温性能。结果表明, 热平衡平均偏差为 3.9%, 满足实验要求。

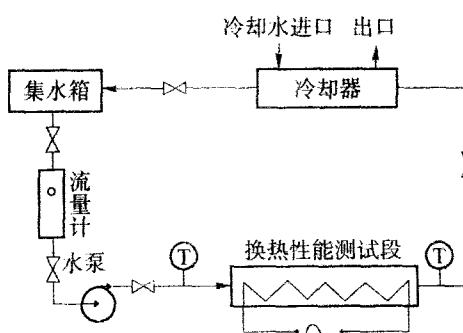


图 1 结垢及传热实验系统

收稿日期: 2004-09-20。

基金项目: 国家“九七三”计划资助项目(2000026304); 教育部留学归国人员科研启动基金(00084)。

换热测试段的壁面温度 t_w 和流体温度 t_f 均采用铜-康铜热电偶测量, 温度测量误差为 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$. 实验中所采用的水硬度单位为美国硬度, 即溶液中碳酸钙的质量浓度为 1 mg/L . 在换热测试段, 通过测量水温和壁面温度, 可以计算得到换热表面的总换热系数, 进而计算出换热表面污垢热阻的大小.

2 实验结果及讨论

作者通过换热性能的测试, 考察了几种主要因素对结垢过程的重要作用和影响. 图 2 所示为流量为 140 L/h , 硬度为 1000 度的流体受热过程中换热系数和污垢热阻的变化情况. 可见, 经过很短的时间(约 $1\sim 2\text{ h}$), 流体在换热表面就开始结垢, 而且结垢速度迅速上升, 随后逐渐缓慢. 在水溶液的流量和初始硬度相同的条件下, 壁面温度具有比较重要的影响, 即壁面温度的略微升高, 导致结垢过程的提前开始, 并且结垢速度明显加快.

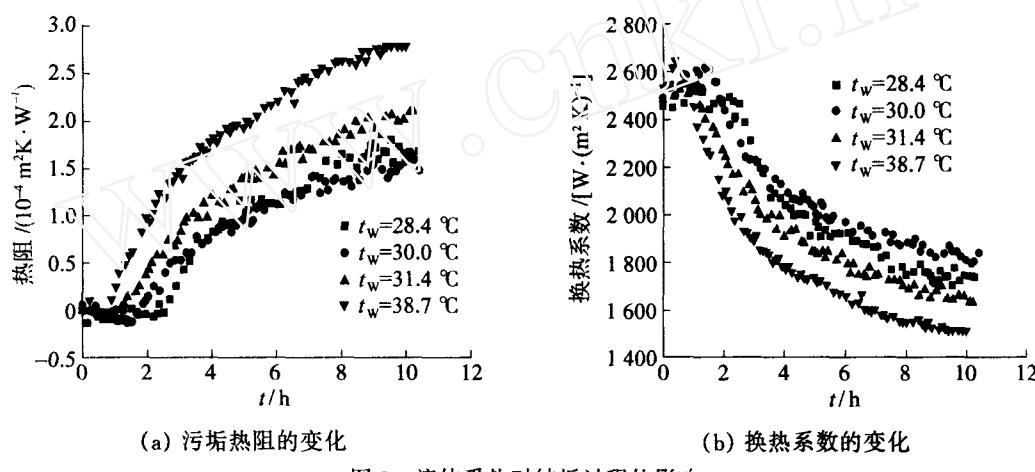


图 2 流体受热对结垢过程的影响

图 3 表示流量 140 L/h , 加热功率 1.2 kW 时, 水溶液硬度的变化对结垢过程的影响. 可以看到, 水溶液硬度的增加, 能够加速结垢过程的进行. 在 6 h 内, 换热系数迅速下降. 与换热面清洁状态相比, 换热系数降低了 40% .

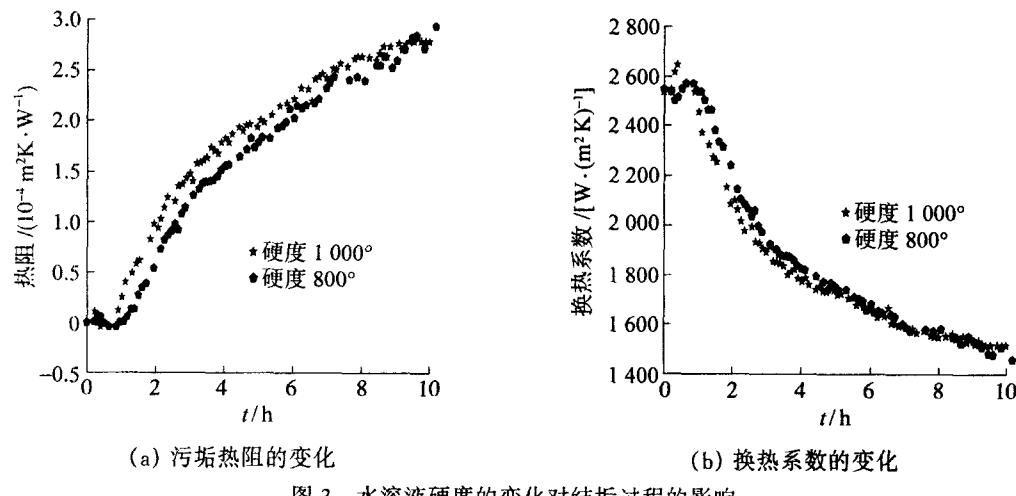


图 3 水溶液硬度的变化对结垢过程的影响

图 4 示出了流量 210 L/h , 加热功率 1.2 kW 时, 硬度 1000 度的流体温度的变化所产生的影响. 在其他条件相同时, 流体温度越高, 结垢过程开始地越快, 污垢热阻迅速增大. 图 5 示出了硬度 1000 度时流体速度的重要作用. 由图可见, 在保持其他条件一致的情况下, 工质的流速对结垢过程具有明显的影响. 流速增大, 在一定程度上减缓了水垢的形成.

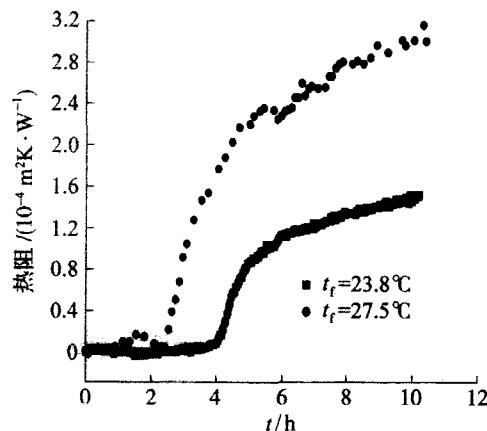


图4 流体温度对污垢热阻的影响

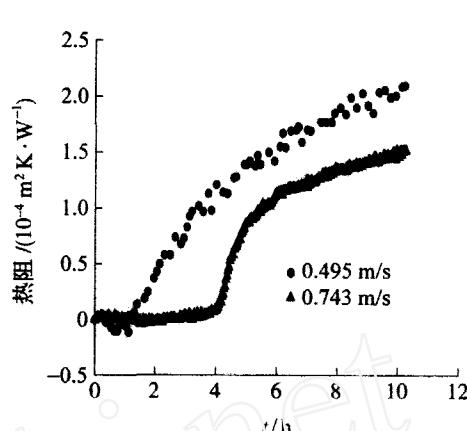


图5 流速对污垢热阻的影响

研究表明,水溶液中的矿物质离子在换热表面易形成晶体垢层,而流体温度对水垢的晶态有重要影响。常温下,水垢主要为方解石晶体,结构松散;温度升高,水垢晶体则以文石型为主,且结构致密坚硬。垢的产生,是矿物质离子和换热表面金属离子静电作用的结果,同时温度、流量和硬度等因素对垢的形成具有重要的影响,因此,有必要在换热设备中采取相应技术措施,减少垢,特别是减少文石型的坚硬垢。

3 结束语

作者对影响换热表面结垢过程的重要因素,如流体和壁面温度、流速、硬度等进行了考察,得到明确的实验结果。其中温度对垢的形成具有最重要的影响,壁面温度和流体温度的升高能够明显加快结垢过程,并使晶态发生变化。在后续的研究中,必须考虑换热表面结垢过程的特点,从而有效地抑制垢的产生和形成。

参考文献:

- [1] 杨善让,徐志明.换热设备的垢与对策[M].北京:科学出版社,1995.
- [2] SIEDER E N. Application of fouling factors in the design of heat exchanger[J]. Heat Transfer ASME, 1935; 82-86.
- [3] KERN D Q, SEATON R E. A theoretical analysis of thermal surface fouling[J]. Chem Eng Prog, 1959, 4; 258-262.
- [4] KERN D Q, SEATON R E. Surface fouling: How to limit[J]. Br Chem Eng, 1959, 55(6); 71-73.
- [5] EPSTEIN N. Fouling in heat exchangers[A]. Proc 6th IHTC[C]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1979 (6); 235-253.
- [6] KIM W T, CHO Y I. Experimental study of the crystal growth behavior of CaCO_3 fouling using a microscope[J]. Experimental Heat Transfer, 2000, 13; 153-161.
- [7] BRAHIM F, AUGUSTIN W, BOHNET M. Numerical simulation of fouling process[J]. Int J of Thermal Sciences, 2003, 42; 323-334.
- [8] SHEIKHOLESLAMI R. Calcium sulfate fouling-precipitation or particulate: A proposed composite model[J]. Heat Transfer Engineering, 2000, 21; 24-33.
- [9] 徐晓宙,罗融.高频电磁场对防水垢机理的实验研究[J].西安交通大学学报,1997, 31(1); 124-126.

Experimental Study of Fouling Mechanism on Heat Transfer Surface

CHEN Yong-chang, MA Chong-fang, XING Xiao-kai, CHEN Xiao-zhuan

(Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education, and Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, Beijing Education Commission, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The influence of the fouling process of CaCO_3 on heat transfer performance was investigated experimentally. Hard water self-made was used as working fluid. More parameters such as temperature, hardness, and fluid velocity etc were measured in the experiment to verify their effect on the fouling process. It was showed that the surface and fluid temperatures were very important to promote fouling process on heat transfer surface. Also, the hardness of water can quicken the fouling forming on the heat transfer surface.

Key words: heat transfer surface; fouling mechanism; heat transfer

(上接第 85 页)

Study on a Self-made Chlorine-removal Agent for High Temperature Gas

LI Yi-li¹, GAO Jin-sheng², WU You-qing², JIN Yu-quan¹, LI Jian¹

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2. Department of Energy Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: A new chlorine-removal agent for high temperature gas was made of a cheap natural mineral and alkali compounds. The sorbent has high breakthrough chlorine content of 37.2% (in the condition of 650 °C, $2\ 500 \text{ h}^{-1}$ space velocity and 1.8 g/m^3 HCl input concentration) and high mechanical strength. Effects of main component proportion, space velocity and temperature on sorbent properties were examined. Adsorption process was found to be influenced mainly by chemical reaction from the kinetics.

Key words: high temperature coal gas; chloride removal sorbent; breakthrough chlorine content; kinetics