

# 传热系数法评定超声波的抗垢作用

任晓光<sup>1</sup>, 李铁凤<sup>1,2</sup>, 宋永吉<sup>1</sup>, 马卿<sup>1</sup>

(1. 北京石油化工学院化工系, 北京 102617; 2. 北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

**摘要:** 通过池动态模拟实验, 利用自动数据采集系统, 以  $\text{CaCO}_3$  污垢溶液为研究对象, 配置了不同浓度的模拟溶液, 在不同的污垢溶液浓度及热通量等工艺条件下引进了超声波清洗, 以减小污垢在金属表面的沉积. 跟踪系统不同点的温度, 采用数学处理方法转换成传热系数, 以此评价阻垢作用. 研究表明, 超声波清洗不仅明显强化了传热效果, 也有效阻止了污垢在加热器表面的沉积, 具有良好的抗垢作用.

**关键词:** 超声波; 污垢; 传热

中图分类号: TK124

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2006)04-0527-04

## 1 前言

全世界每年都因污垢带来重大的经济损失, 尤其是硫酸钙、碳酸钙、硫酸镁等高硬度电解质盐的广泛存在, 给化工、石油、医药、环保等众多部门造成了严重污垢和垢下腐蚀, 严重妨碍了设备的正常运行, 使传热效率降低, 流动阻力增大, 造成能源的巨大损失和浪费. 因此, 污垢早已是传热方面亟待解决的主要难题<sup>[1,2]</sup>.

超声波清洗器由于具有电路简化、体积小、重量轻、功率可调及操作灵活方便等特点, 在高清洁度的清洗对象方面获得了巨大成功<sup>[3-9]</sup>, 然而与传热相结合, 在加热器表面强化传热、阻垢的研究目前报道甚少<sup>[10]</sup>.

本工作在前述研究污垢<sup>[11-13]</sup>的基础上, 将超声波设备与自行研制的池沸腾实验装置联合使用, 在高浓度  $\text{CaCO}_3$  污垢溶液中及不同的工艺条件下, 对超声波的阻垢及抗垢作用进行了实验研究.

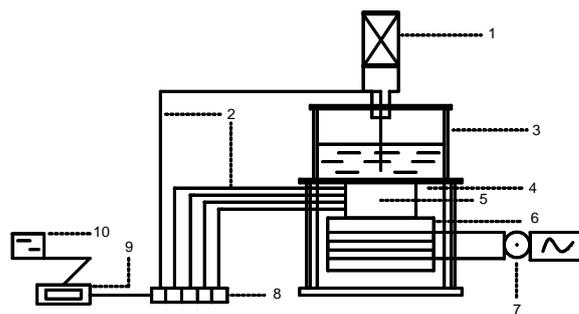
## 2 实验

### 2.1 实验装置

实验装置包括池沸腾设备(加热段和沸腾段)、超声波设备和数据采集系统. 池沸腾设备加热源由紫铜棒(直径 0.07 m, 高 0.1 m)外套不锈钢电加热套组成, 并与测试铜柱相连, 其中测试铜柱为紫铜柱(直径 0.03 m, 高 0.06 m), 其上表面加有聚四氟乙烯绝缘垫, 以防止实验介质渗入铜柱的边缘. 加热器表面积为  $9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ . 实验加热部分外加保温层, 以保证实验件自下而上的传热为一维导热. 在测试铜柱中距加热面 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 m 处等距离安装 4 支铜-康铜热电偶(直径 0.001 m), 同时在加热器表面放置一热电偶, 可以测得

4 个测温点的温度和池内溶液的主体温度, 由测得的各温度通过数据计算得到传热系数. 加热源和测温段外侧和下部加保温材料使热损失可以忽略. 沸腾池由圆柱形透明玻璃桶(直径 0.275 m, 高 0.21 m)和一对不锈钢上、下法兰组成, 上部安装一冷凝管. 加入的液体体积约 8.3 L. 所有密封垫均采用 O 形橡胶圈以保持沸腾池的密闭性. 加热功率通过调压器调节.

超声波: 北京金星超声波设备技术有限公司, 功率 200 W, 频率 20 kHz. 超声波每隔 10 min 开启 3 min. 超声波设备由超声波电源(JXD-02)及换能器(JX20T200)组成. 沸腾池上部安装换能器, 用金属片隔离(0.23 m × 0.125 m), 下部是超声波探头(直径 0.030 m, 长 0.19 m), 探头浸入沸腾池溶液中(浸没深度 0.035 m), 实验装置见图 1.



1. Ultrasonic apparatus    2. Thermocouple    3. Boiling pool  
4. Insulated layer    5. Heat conductor    6. Electric heater section  
7. Booster    8. Multi-point switch    9. Data multimeter    10. Computer

图 1 实验装置图  
Fig.1 Experimental apparatus

### 2.2 实验试剂

蒸馏水.

收稿日期: 2005-06-22, 修回日期: 2005-09-21

基金项目: 北京市属、市管高校人才强教计划资助项目—清洁燃料技术开发创新团队基金资助项目(编号: BJJWR20051102)

作者简介: 任晓光(1956-), 女, 辽宁省锦州市人, 博士, 教授, 研究方向为强化传热与阻垢, Tel: 010-86921749, E-mail: renxiaoguang@bipt.edu.cn.

模拟溶液( $\text{CaCl}_2$  和  $\text{NaHCO}_3$ )的钙离子浓度为 300, 600, 900, 1200 mg/L, 碳酸氢根离子浓度为 1.83, 3.66, 5.19, 7.32 g/L, 实验条件下 pH 值为 8.0.

### 3 数据处理

以水溶液为工作介质, 测定热通量、传热系数与传热温差的变化关系. 通过数据采集系统(一种电子装置, 通过与计算机相连, 由数据处理软件收集数据)获得整个池沸腾实验流程的数据.

按一维稳态导热过程处理, 根据傅立叶定律计算热通量:

$$q_i = \frac{\lambda(T_{i+1} - T_i)}{x_{i+1} - x_i}, \quad (1)$$

其中,  $q_i$  为通过第  $i+1$  和第  $i$  个测温点测得的热通量 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $\lambda$  为紫铜的导热系数 [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ],  $T_i$  为距加热器表面第  $i$  个测温点测得的温度 ( $\text{K}$ ),  $x_i$  为第  $i$  个测温点到加热表面之间的距离 ( $\text{m}$ ).

当传热情况稳定时, 测温铜棒轴向温度呈线性分布. 通过所测的 4 点温度应用最小二乘法进行线性回归获得轴向温度分布方程, 进而可以得到温度梯度  $dT/dx$ , 并外推出加热表面温度  $T_s$ , 通过下式计算传热系数  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{q}{T_s - T_1} = \frac{\lambda dT/dx}{T_s - T_1}. \quad (2)$$

## 4 实验运行结果和分析

### 4.1 超声波对无垢质蒸馏水传热的影响

实验测定了无垢质蒸馏水在一定热通量下的传热系数, 结果示于图 2(图中时间是从溶液温度达到  $100^\circ\text{C}$  时开始计时, 下同). 加热功率 150 W, 实验温度  $100^\circ\text{C}$ .

由图可以看出, 由于开启超声的间隔, 传热系数出

现了上下波动. 初始阶段传热系数出现了较快的增加, 这是由于逐渐增加的热通量导致加热器表面气泡的核化数量增加, 因而传热系数增加. 总体来看, 超声波的加入可以使传热系数明显提高. 从机理方面分析, 功率超声是利用振动形式的能量使物质的一些物理、化学和生物特征状态发生改变或使这种改变过程加快的一门技术. 超声波提供的振动能量较大, 使液体分子之间及分子与金属表面之间的结合力减弱, 从而使分子的移动速率加大, 有利于分子之间热量的传递.

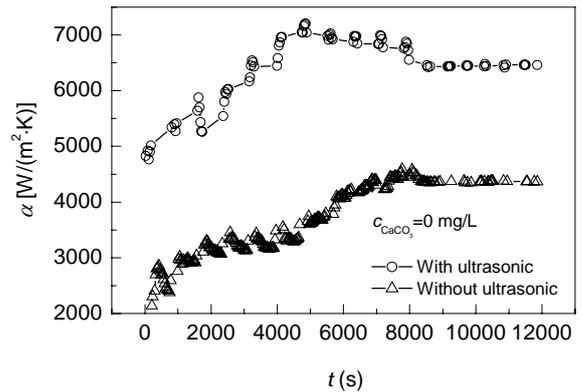


图2 超声波对无垢质蒸馏水传热系数的影响  
Fig.2 Effect of ultrasonic on heat transfer coefficient of distilled water

### 4.2 超声波对含垢质溶液传热系数的影响

在相同的热通量条件下, 在不同的污垢浓度(以  $\text{Ca}^{2+}$  计, 下同)溶液中, 考察了超声波对传热系数的影响, 并与未加载超声波的情况进行了比较. 图 3 给出了部分实验结果. 加热功率为 150 W, 实验温度为  $100^\circ\text{C}$ . 从图可以看出, 在 150 W 加热功率下, 加载与未加载超声波比较, 其传热效果明显不同, 加载超声波后传热系数明显提高. 从化工原理可知, 传热系数提高意味着  $\text{CaCO}_3$

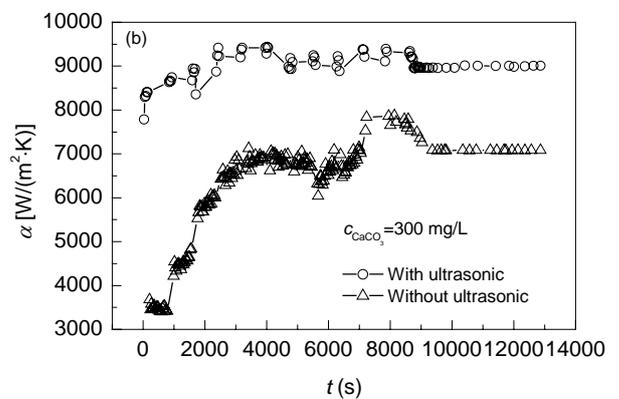
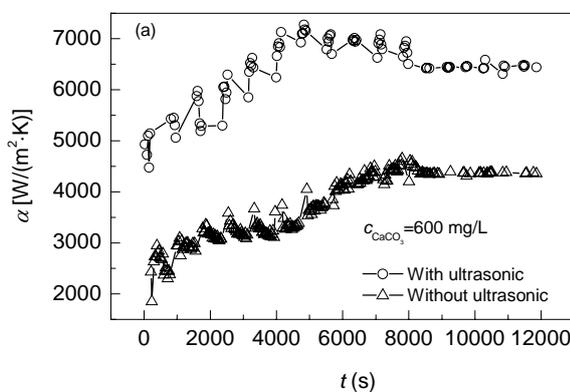


图3 超声波对含垢质溶液传热系数的影响  
Fig.3 Effect of ultrasonic on heat transfer coefficient of fouling-containing water

垢热阻的减小, 表明了  $\text{CaCO}_3$  垢量的减少. 在 300 mg/L  $\text{CaCO}_3$  污垢溶液中, 与未加载超声波相比, 传热系数提高了 1.5 倍左右; 在 600 mg/L  $\text{CaCO}_3$  污垢溶液中, 传热系数提高了 1.2 倍左右. 可见, 超声波清洗效果较好. 从传热系数随时间变化的曲线来看, 超声波具有明显的抗垢性能. 从理论方面分析, 超声波辐射于液体中产生三方面作用而具有抗垢能力: (1) 超声波传播速度随着介质的变化而产生速度差, 从而在界面上形成剪切应力, 导致分子与分子之间、分子与金属表面间结合力减弱, 阻止了污垢晶体附着在金属表面上; (2) 超声波在流体介质中的空化作用所产生的强大压力峰加速了  $\text{Ca}^{2+}$  的析出, 并将已析出的碳酸盐垢及颗粒杂质击碎成细小的颗粒而悬浮于介质中; (3) 超声波在流体中空化所造就的高温高压特殊物理环境加速了化学反应, 改变了垢质的结垢条件.

#### 4.3 污垢溶液浓度对传热系数的影响

对于未加载超声波的条件下, 可以肯定污垢溶液浓度愈高, 对传热愈不利, 但加载超声波之后, 传热效果大不相同. 本研究在较高和较低浓度的污垢溶液中超声波的抗垢效果较好, 见图 4. 加热功率 150 W, 实验温度 100 °C.

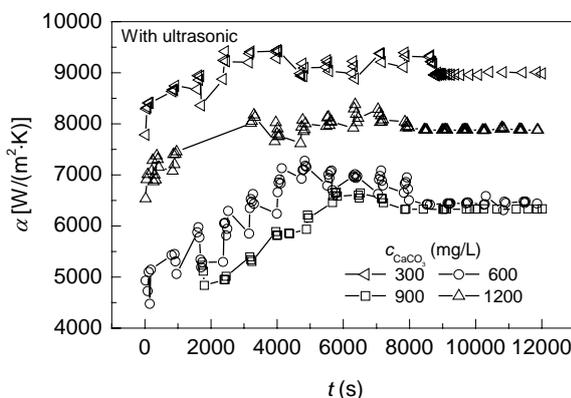


图4 污垢溶液浓度对传热系数的影响  
Fig.4 Effect of concentration of fouling-containing solution on heat transfer coefficient

由图可以看出, 在  $\text{CaCO}_3$  污垢溶液浓度为 300 和 1200 mg/L 时, 其传热系数较高, 而在浓度为 600 和 900 mg/L 时传热系数较低. 分析认为, 当溶液浓度较高时, 超声波极大地提高了过饱和溶液 [291~298 K 时  $K_{sp}(\text{CaCO}_3)=8.35$ ] 的成核速率, 有利于在溶液中形成大量的小沉淀颗粒, 从而消除了溶液的过饱和度, 缓解了固体表面成垢的压力.

同时, 水解产生的 H·自由基的寿命比较长, 它产生还原作用, 可以使生成的积垢剥落下来. 超声辐射便

被处理溶液直接产生大量的空穴和气泡, 当这些空穴和气泡破裂或互相挤压时, 产生一定范围的强大压力峰破坏已生成的垢层, 使其易于脱落.

溶液浓度越高, 过饱和度越高, 成垢越多. 同时超声波对成核速率的增强作用越大, 对溶液的辐射作用越强, 使更多的垢层脱落. 当达到某个临界点时, 超声波使传热系数增大的作用超过了  $\text{CaCO}_3$  垢使传热系数降低的作用, 因此在溶液浓度较高时, 传热系数出现了增大的趋势.

#### 4.4 热通量对传热系数的影响

在加载超声波的相同条件下, 分别考察了污垢浓度为 1200 mg/L 的溶液在不同热通量(加热功率)下传热系数随时间的变化, 结果见图 5. 实验温度为 100 °C. 可以看出, 在相同的污垢浓度下, 加热功率由 150 W 提高到 180 W 时, 可使传热系数提高 1.3 倍左右. 这是由于在高的热通量下, 活化核位增加, 产生了更多的活性气泡, 传热系数明显增大. 实验还表明, 热通量的改变对传热初期的效果更显著. 在较高的热通量下, 传热系数显示了较高的数值, 但最终仍将稳定在较低的数值上.

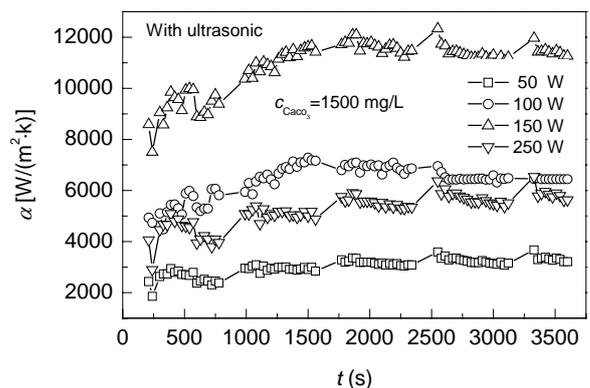


图5 热通量对含垢质溶液传热系数的影响  
Fig.5 Effect of heat flux on heat transfer coefficient of fouling-containing water

## 5 结论

(1) 无论是含有垢质的溶液中, 超声波的使用明显强化了加热器表面的传热效果, 热通量的提高使传热系数提高, 但对传热初期的效果更显著.

(2) 在池沸腾装置中, 在较低和较高浓度的污垢溶液中有利于提高传热系数. 传热系数的提高意味着污垢量的减少. 污垢溶液浓度较高时, 超声波在液体介质中的巨大空化作用有利于将已析出的碳酸盐垢击碎成细小的颗粒悬浮于介质中, 阻止污垢晶体附着在加热器表面, 从而缓解固体表面成垢的压力, 减少了污垢的生成.

研究表明, 超声波具有明显的抗垢作用.

#### 参考文献:

- [1] Hans M S, Zhao Q. Investigation of Low Fouling Surface Alloys Made by Ion Implantation Technology [J]. Chem. Eng. Sci., 1997, 52(19): 3321–3332.
- [2] Jamialahmadi M, Blochl R, Hans M S. Pool Boiling Heat Transfer to Saturated Water and Refrigerant 113 [J]. Can. J. Chem. Eng., 1991, 69: 746–754.
- [3] 袁易全. 超声换热器 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1992. 1–2.
- [4] 冯若, 黄金兰. 超声清洗及物理机制 [J]. 应用声学, 1994, 13(1): 42–47.
- [5] 陆海勤, 杨日福, 丘泰球. 功率超声防除换热设备的积垢原理及其工业应用的研究 [J]. 清洗世界, 2004, 20(1): 12–15.
- [6] 吴廷宝, 孙士江, 彭新, 等. 槽外聚能式超声波法清除燃油总管腔内积碳 [J]. 沈阳航空工业学院学报, 2004, 21(4): 20–23.
- [7] 朱杰. 超声波及其在食品科学中的应用 [J]. 食品研究与开发, 2005, 26(2): 101–103.
- [8] 罗究中, 李贵平, 翁良华. 超声清洗领域新拓展—超声防垢 [J]. 清洗世界, 2004, 20(6): 10–14.
- [9] Seryanov Y V, Fomenko L A. A Rate Equation for Ultrasonic Cleaning of a Surface [J]. Theor. Found. Chem. Eng., 2000, 34(6): 521–524.
- [10] Hyun S J, Lee D R, Loh B G. Investigation of Convective Heat Transfer Augmentation Using Acoustic Streaming Generated by Ultrasonic Vibrations [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2005, 48: 703–718.
- [11] 任晓光, 刘长厚, 赵起, 等. 在流动沸腾装置中磁控喷射表面的抗垢性能 [J]. 化工学报, 2001, 52(2): 173–175.
- [12] 任晓光, 刘长厚. 传热表面对电解质溶液中  $\text{CaSO}_4$  结垢过程的影响 [J]. 化工学报, 2001, 52(7): 654–657.
- [13] 任晓光, 李翠清. 在过冷流动沸腾期间硫酸钙污垢形成过程研究 [J]. 化学工程, 2002, 30(5): 20–25.

## Evaluation of the Effect of Ultrasonic on the fouling Inhibition by Heat Transfer Coefficient Measurement

REN Xiao-guang<sup>1</sup>, LI Tie-feng<sup>1,2</sup>, SONG Yong-ji<sup>1</sup>, MA Qing<sup>1</sup>

(1. Depart. Chem. Eng., Beijing Inst. Petrochem. Technol., Beijing 102617, China;

2. College of Chemical Engineering, Beijing Univ. Chem. Technol., Beijing 100029, China)

**Abstract:** Pool boiling in  $\text{CaCO}_3$  solution was performed to determine the heat transfer system through data acquisition system and dynamic experiments. Under the conditions of different  $\text{CaCO}_3$  concentrations and heat fluxes, the ultrasonic was introduced to test its effect on the fouling accumulation on the metal surface. The temperature measurements at the different points on the heating element were transformed to heat transfer coefficient, so that the fouling inhibition function can be evaluated. The results show that the ultrasonic not only enhanced the boiling heat transfer, but also prevented the formation of the fouling on the metal surface, very good fouling inhabiting performance being demonstrated.

**Key words:** ultrasonic; fouling; heat transfer