

文章编号: 1005-8893(2003)03-0040-04

# 流体弹性诱导振动阻垢技术的研究<sup>\*</sup>

张锁龙<sup>1</sup>, 尤侯平<sup>2</sup>

(1. 江苏工业学院 机械工程系, 江苏 常州 213016; 2. 扬子石化股份有限公司)

**摘要:** 研究开发长期高效运行的换热器一直是化工、炼油、动力、原子能和其他许多工业部门的重要课题, 作者通过对换热器内安置弹性圆形诱导小珠进行了实验研究, 发现这不仅可以防止污垢的产生, 而且对换热器具有自清洁效果, 大大延长了换热器的高效运行时间和使用寿命。

**关键词:** 换热器; 诱导振动; 自清洁; 污垢

**中图分类号:** TK 172.4      **文献标识码:** A

换热设备在工业生产领域中应用广泛, 但在运行中普遍存在污垢沉积问题, 随着污垢层加厚, 设备效率普遍下降, 传热速率降低, 引起垢下腐蚀, 缩短设备寿命, 导致能耗增加。为了维持设备正常运行, 许多大型工业装置必须周期性清洗。目前的清洗技术可分为机械清洗法和化学清洗法两类, 根据设备是否运行又可分为在线清洗和非在线清洗。而机械清洗是靠流体的流动或机械作用提供一种大于污垢粘附力的外力而使污垢从换热面脱落。常用方法有①喷水清洗、喷气清洗; ②喷砂清洗; ③刮刀、钻头或钢丝刷除垢; ④胶球清洗。机械清洗是工业中常用的除垢方法, 它可除去碳化污垢和硬质污垢。但采用机械清洗常常须将换热设备解体, 因而时间较长, 费用较高。化学清洗可不必拆除设备, 能清洗到机械清洗不到的地方, 劳动强度小, 可在现场完成。但是, 当换热器管程和壳程全被污垢堵塞后, 无法用化学清洗; 因使用各种药剂, 对清洗废液需加以处理; 难以除去碳污垢; 一种化学试剂只能处理某一种或几种换热介质, 使用范围狭窄, 而且可能影响产物纯度。据统计, 美国每年因污垢引起的费用大约在 100 亿美元, 英国在换热器结垢方面的费用大约占设备投资的 8%, 因此, 研究换热管中污垢防止与自清洁具有很高的实际应用

价值<sup>[1~3]</sup>。

污垢一般可分为颗粒污垢、结晶污垢、化学反应污垢、腐蚀污垢、生物污垢和凝固污垢。结晶污垢是许多生产中的常见垢, 它是由溶液中的无机盐在过饱和条件下析出并沉积在设备表面所致。其中尤以具有负溶解性的难溶盐, 如  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  等在换热表面的沉积较为普遍。这类污垢坚硬、致密、附着力强。对于成垢机制 Ker-seaton<sup>[4]</sup> 提出的沉积-脱除模型具有普遍意义, 总体结垢率:

$$\Phi = \Phi_d - \Phi_r$$

其中:  $\Phi_d$ —垢质沉积速率,  $\Phi_r$ —垢质去除速率。

式中去除项中  $\Phi_r$  由于流体剪力作用而使垢质从垢质层中移去, 根据 Cleaver 和 Yakes 的流体猝发理论, 垢层的脱除是由不规则周期性和不规则干扰性的湍流猝发引起的, 这些猝发随机作用于结垢表面, 像激流一样冲走沉积物。由于这种猝发是随机的, 无法控制, 作者采用流体诱导技术, 在换热器内侧增设流体诱导构件, 当流体通过该构件时, 产生流体诱导振动增加了湍流度, 提高湍流猝发的机率, 有利于  $\Phi_r$  的提高, 加上该构件不稳定摆动和对管壁的不断碾压作用, 有效阻止了污垢的进一步沉积, 增加了原有的污垢剥落的几率, 达到自清

\* 收稿日期: 2003-08-26

基金项目: 中国石化集团公司资助 (X596038)

作者简介: 张锁龙 (1964-), 男, 江苏丹阳人, 副教授, 主要从事化工设备的教学与研究工作。

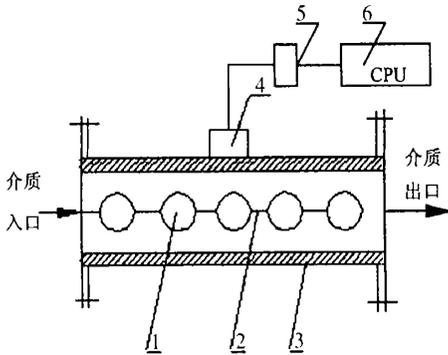
洁效果, 从而有利于换热器的长期高效运行。

## 1 实验装置

为了研究系统的传热特性和流体诱导振动的影响, 在装置中设置了振动测试和温度测试控制系统, 分别测试在有无构件情况下的振动特性和传热特性。

### 1.1 振动测试系统的组成

振动测试系统采用南京汽轮高新公司制造的随机信号与振动分析系统 CRAS V5.0、二路低通滤波器、二通道电荷电压放大振动测试系统及加速度传感器等组成, 分别对内置弹性小珠管和光管在流体诱导作用下管子的振动进行测量。加速度传感器垂直安装在换热管的外表面。在管内流量  $V = 400 \text{ L/h}$  参数下进行了实验, 装置见图 1。



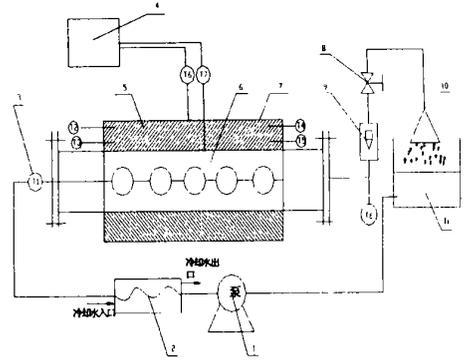
1. 弹性圆珠; 2. 弹性绳; 3. 换热管; 4. 加速度传感器; 5. 低通滤波器; 6. 电荷电压放大振动测试系统

图 1 管子振动测试系统

### 1.2 温度测试和控制系统的组成

为了研究换热管的传热及结垢性能, 设计了如图 2 所示的双管厚壁管电加热传热装置, 分别对碳钢材料  $\phi 25 \times 2.5$  的换热管在光管、放置构件条件下进行对比实验, 利用热电阻做温度传感器, 对实验段温度利用 XMD-20/25 型智能温度巡检仪进行了跟踪检测, 其中采用了  $\phi 80 \times 27.5$  的厚壁管, 有效加热长度为 500 mm, 管内为  $\text{CaCO}_3$  饱和溶液, 套管利用 500 W 电加热套加热, 加热套由 XMT 系列智能温控仪表通过交流接触器进行温度控制。其温度控制误差在  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ , 换热管内放置一串直径为  $\phi 10 \text{ mm}$  的塑料小珠, 珠距为 30 mm, 由软绳均匀串接。换热管壁上用点焊方式焊上热电偶传感器一个, 并在厚壁套管不同半径处分别安装温度传感器。为了提高测量数据的可靠性, 沿轴向、

周向各设置了四个温度传感器。整个装置可拆卸, 换热管进出口流体经冷却器冷却后流入循环槽, 以便循环利用, 流量通过转子流量计测得, 所有温度均用智能温度巡检仪记录, 数据用 Excel 软件处理。



1. 泵; 2. 水冷系统; 3. 测温传感器; 4. XMD-20/25 型智能温度巡检仪; 5. 厚壁管; 6. 换热管; 7. 电加热套; 8. 球阀; 9. 转子流量计; 10. 喷淋器; 11. 循环水槽

图 2 温度测试和控制系统

## 2 振动实验及现象

振动实验即用加速度传感器通过磁吸盘直接吸附在碳钢管上, 测得换热管在确定的流速下管子的机械振动, 利用随机信号与振动分析系统 CRASV5.0 分别对光管和内置珠子管子的振动进行频谱分析。由于流体在管内湍流流动时存在有脉动速度, 其引起的振动虽然很小, 但仍可以通过管子的振动测的; 而放置构件后, 由于在其后方产生边界层脱离而导致额外的流体旋涡振动。换热管内有无构件时的振动频谱曲线如图 3 所示。

由图 3 可知, 光管内的流体虽然处于湍流区 ( $Re=7027$ ), 但对光管的作用激发的频率谱线是不连续的, 也即由若干周期信号组成; 而流体对有内件管, 由于流体通过小球时的  $Re$  达 1687, 在小球后形成卡曼涡街 ( $Re$  达 40 时即可形成卡曼涡街), 导致流体剧烈湍动, 激发起多阶频率, 从而造成其在频谱图上是一段连续的谱线。这说明珠子内件可以激发管子的振动。

## 3 传热及污垢性能实验

由于沿厚壁管从外到内其传热的速率是一致的, 故可以由厚壁管中不同半径处的温度计算出其传热的速率  $Q_m$ , 即由傅立叶定理

$$Q_m = K_m A_m \Delta T_m$$

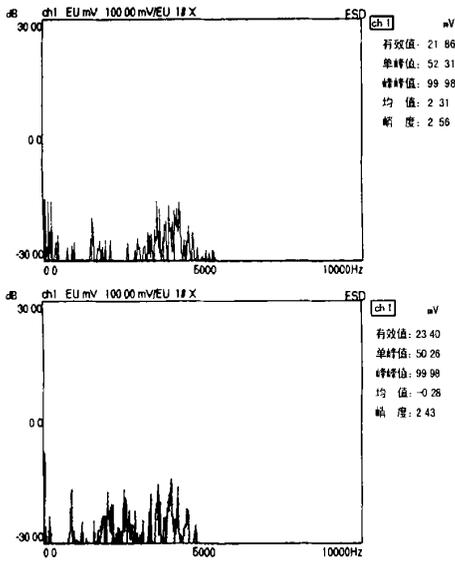


图3 管子振动曲线

式中： $Q_m$ 为厚壁管的传热速率，W； $K_m$ 为厚壁管的导热系数，W/( $m^2 \cdot K$ )； $\Delta T_m$ 为不同半径处的平均温差，K， $\Delta T_m = T_2 - T_3$ ； $T_2$ 、 $T_3$ 为不同半径处的温度，K； $A_m$ 为直径为 $d_m$ 时的总换热面积， $m^2$ ， $A_m = \pi/2 \cdot d_m \cdot L$ ， $L$ 为换热管的长度，m； $d_2$ 、 $d_3$ 为不同测温点的直径，m。

再由换热管外壁温度 $T_o$ 与介质进出口的平均温差计算出换热管的总传热系数 $K_i$ ，即：

$$Q_i = K_i A_i \Delta T_o$$

式中： $K_i$ 为以管内表面积； $A_i$ 为基准的传热系数，W； $A_i$ 为管内表面传热面积， $m^2$ ； $\Delta T_o$ 为平均温差，K， $\Delta T_o = T_o - \frac{T_2 + T_3}{2}$ 。

由 $Q_i = Q_m$ 从而计算出 $K_i = K_m A_m \Delta T_m / (A_i \Delta T_o)$ 。

最后由总传热系数与内外壁热阻的关系计算出内壁热阻，即：

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_i}{\lambda d_{m1}} + \frac{d_i}{d_o} R_o + R_i + \frac{d_i}{\alpha_i d_o}$$

式中： $d_o$ 为换热管外径，mm； $d_i$ 为换热管内径，mm； $d_{m1}$ 为换热管的平均直径，mm； $\delta$ 为换热管的壁厚，mm； $\lambda$ 为换热管材料的导热系数，W/( $m^2 \cdot K$ )； $\alpha_i$ 为管内侧的给热系数，W/( $m^2 \cdot K$ )； $\alpha_o$ 为管外侧的给热系数，W/( $m^2 \cdot K$ )； $R_o$ 为换热管外侧污垢热阻， $m^2 \cdot K/W$ ； $R_i$ 为换热管内侧污垢热阻， $m^2 \cdot K/W$ 。

于是

$$R_i = \frac{1}{K_i} - \left( \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_i}{\lambda d_{m1}} + \frac{d_i}{d_o} R_o + R_i + \frac{d_i}{\alpha_i d_o} \right)$$

因为 $T_o$ 由热电偶在管外壁直接测量，不存在 $R_o$ 和 $\alpha_o$ ，而公式中 $R_i$ 和 $K_i$ 是时间的函数， $\alpha_i$ 可以近似认为不变，所以管内侧热阻为：

$$R_i(t) = \frac{1}{K_i(t)} - \left( \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_i}{\lambda d_{m1}} \right)$$

又考虑到在实验初期 $R_i = 0$ ，即

$$\frac{1}{K_i(0)} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_i}{\lambda d_{m1}}$$

修正后得出公式：

$$R_i(t) = \frac{1}{K_i(t)} - \frac{1}{K_i(0)}$$

污垢实验时，采用具有负溶解性的 $CaCO_3$ 饱和溶液作为换热介质。控制 $CaCO_3$ 饱和溶液的流量为400 L/h，待稳定后，数据由温度巡检仪每隔17 min自动记录一次数据。加热圈温度控制在 $130 \pm 1^\circ C$ ，装置连续运行11 h以上。由以上的表达式进行数据处理，污垢随时间的变化曲线见图4。

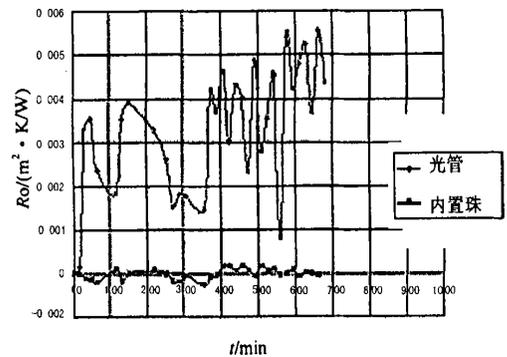


图4 碳钢污垢热阻曲线

由图4可以看出，光管热阻随时间增加，呈上升趋势，且波动较大，即锯齿形上升。曲线的剧烈波动说明污垢在不断地沉积又不断地剥落，但剥落速率小于沉积速率，故总体垢层在不断地增加。而内置圆珠的管内热阻较小，且随时间增加，变化幅度很小，基本上趋于平稳。有时甚至出现负污垢热阻，这是因为流体在内件的诱导下产生卡曼涡街现象，使流道出现有规律的旋涡，破坏了换热管壁面处的层流层，增加了流体与壁面的剪切力，导致刚刚形成长大的污垢层甚至氧化膜脱落，改善了换热特性。随着时间的增加，污垢热阻也有所增加，但总体上趋于平衡。从图中可以看出，内置弹性小珠的换热管随运行时间的延长，污垢热阻一直以较小值稳定下去，这是因为在微细粒上所形成的晶核与微晶以分散游离状态存在，于邻近壁面的溶液中，随着溶液湍流流动而部分被移走，称为自由移去，

另一部分则等待沉积嵌入垢层<sup>[5]</sup>。结垢速率实际上由上述两个过程决定。

由于边界层受到破坏使  $\text{CaCO}_3$  析出速率与  $\text{CaCO}_3$  自由移去速率趋于一致, 垢层不再增加或增长缓慢。与光管相比, 流体在内置圆珠的诱导下污垢热阻稳定值很小, 且波动较小, 污垢不易沉积, 达到了自清洁效果, 从而提高换热效率, 实现了换热器的长期高效运行。

增设内件必然会增加流体的阻力, 阻力降随流量的变化曲线如图 5。从图 5 可以看出, 光管无内件管阻力小, 有内件时阻力增大。这是由于在管内

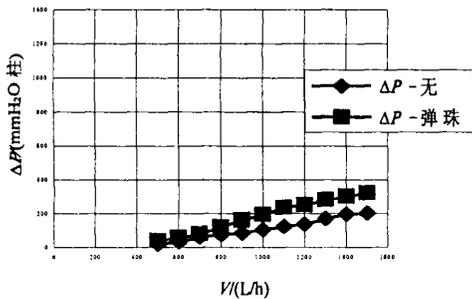


图 5 管内流体阻力降随流速变化图

增加弹性珠子内件, 会增加珠子与流体之间的摩擦力, 又珠子挤占了流道, 在保持流量不变的情况下, 珠子附近的流速明显增加, 致使压力降增加。但在小流量时 (即流量小于 700 L/h), 珠子与壁面接触, 且壁面附近为层流, 故珠子壁面不能 100% 与流体起摩擦作用, 此时的压力降上升不多; 对于中等流量 (即流量在 800 ~ 1 100 L/h), 珠子完全悬浮, 由于振动频率随流量升高, 珠子四周的

流速不均匀, 故阻力降随流量的增加逐渐增加; 当流量超过一定值后 (大于 1 200 L/h), 弹性绳刚化, 珠子完全悬浮于管子的中央, 此时流场分布相对均匀, 压力降差达到最大。

## 4 结 论

(1) 插入圆珠内件使流体出现卡曼涡街现象, 增加流体湍流度, 破坏了壁面附近的层流层, 可限制污垢在壁面沉积, 从而达到控制污垢沉积的目的。

(2) 弹性珠在流体带动下不断与邻近管壁碰撞、冲刷, 诱导管子振动使得附结在管内壁的污垢自行脱落, 达到了自清洁的效果。

(3) 振动对抗垢具有重要意义, 但是过大的振动将会对换热设备提出更高的要求。因此, 在对振动有严格要求的场合受到限制。

## 参考文献:

- [1] 杨善让, 徐志明. 换热设备的污垢与对策 [M]. 北京: 北京科学出版社, 1997.
- [2] 王睿, 丁洁, 沈自求. 换热设备的结垢机理研究现状 [J]. 化工进展, 1999, 32 (4): 31-35.
- [3] 张锁龙, 张新年, 张龙根, 等. 结构对圆形水平管喷膜蒸发传热性能影响的研究 [J]. 江苏石油化工学院学报, 2001, 13 (1): 28-31.
- [4] Somerscale E F C, Knudsen J G. Fouling of Heat Transfer [C]. Washington: Hemisphere, 1978. 235.
- [5] 毛希澜. 换热器设计 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989.

## The Research On Anti-fouling Technology of Flow Induced Vibration in Tube

ZHANG Suo-long<sup>1</sup>, YOU Hou-ping<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Polytechnic University)

**Abstract:** It is important title for petrochemical, power and nuclear industries to research and develop compacted, efficient heat exchanger. The author did the experimental research by setting the round ball inside tube as elastic inducing component in tube, and this not only increased the heat exchanging coefficient, but also had the ability of anti-fouling, prolonged the heat exchanger efficiently running.

**Key words:** heat transfer; elastic vibration; self-cleaning; fouling