

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108358

# 管壳式热交换器结垢故障虚拟感知方法\*

王金江, 孙佳正, 高逸, 张凤丽, 张来斌

(中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院 北京 102249)

**摘要:**随着核电、石油化工等行业需求的增长以及工艺复杂程度的提升,其关键设备状态的安全监测缺少直接、实时、在线的监测手段,难以实现故障的准确诊断与预警。本文选取石化和核电行业关键设备管壳式热交换器作为研究对象,通过分析热交换器换热管外结垢机理及对换热性能影响,应用总传热系数建立换热效率、传热平均温差与结垢厚度间的表征关系,提出了一种管壳式热交换器结垢故障虚拟感知方法,利用热交换器的温度、压力、流量等高精度、易获取运行数据,实现热交换器结垢厚度在线准确感知。最后,通过在热态功能试验台架回路上采用高压容器试验件开展了测试验证。结果表明,基于总传热系数的热交换器结垢虚拟感知模型能够在 30% 误差范围内实现在管径 2.2% 以上的垢层厚度监测。

**关键词:**管壳式热交换器;结垢;虚拟传感;状态监测;总传热系数

中图分类号: TH-81 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4

## A virtual sensing method of fouling fault in shell and tube heat exchanger

Wang Jinjiang, Sun Jiazheng, Gao Yi, Zhang Fengli, Zhang Laibin

(College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** With the growth of demand and the improvement of process complexity in nuclear power, petrochemical and other industries, the safety monitoring of the status of key equipment lacks direct, real-time and online monitoring methods. It is difficult to achieve accurate diagnosis and early warning of faults. In this article, the shell and tube heat exchanger, key equipment in the petrochemical and nuclear power industries, is selected as the research object. By analyzing the fouling mechanism of the heat exchanger and its impact on the heat transfer performance and applying the total heat transfer coefficient to establish the characterization relationship among the heat transfer efficiency, the heat transfer mean temperature differential and the fouling thickness, a virtual sensing method of the fouling of the shell and tube heat exchanger is proposed. The method uses high-precision and easily accessible operation data of the heat exchanger, including temperature, pressure and flow, to realize the online accurate sensing of the fouling thickness of the heat exchanger. Finally, test is implemented by using a high-pressure vessel test piece on the hot state functional test bench circuit. The results show that the virtual sensing model of scale in heat exchanger based on the total heat transfer coefficient can monitor the fouling thickness above 2.2% of the tube diameter within a 30% error range.

**Keywords:** shell-and-tube heat exchanger; fouling; virtual sensing; condition monitoring; total heat transfer coefficient

## 0 引 言

热交换器作为一种通过中间固体表面从一种流体到另一种流体进行有效传热的设备,广泛应用于过程工业<sup>[1]</sup>,但在使用过程中很容易发生结垢腐蚀,据调查 90% 以上的换热设备都存在各种结垢问题<sup>[2]</sup>,不仅降低了热交换器的性能,也增大了泵的负荷能力,污垢沉积厚度达

到一定程度时会使热交换器的效率大大下降,甚至导致循环系统瘫痪,造成能源和材料的浪费,给工业经济带来了巨大的损失。热交换器的健康管理是一个涉及统计学、力学、化学、物理和传热的多学科问题。由于热交换器是石油化工、核电、食品等行业的通用设备,在实际生产中起着重要作用,其能否健康有效地运行是影响工业经济发展的重要因素<sup>[3]</sup>。

收稿日期:2022-08-02 Received Date: 2022-08-02

\* 基金项目:国家重点研发计划(2020YFB1709702)、国家自然科学基金重点项目(52234007)资助

在热交换器结垢故障监测方面,国内外学者分别从水力和热力计算方法等方面做了大量研究。Fguiri 等<sup>[4]</sup>利用基于 Levenberg-Marquardt 技术的逆方法 (inverse method) 实时估算渐进值和渐进时间。Hadad 等<sup>[5]</sup>基于结垢故障热脉冲响应的敏感性构建模型,实现热交换器结垢故障在线检测。Davoudi 等<sup>[6]</sup>利用人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 预测污垢因子趋势,以进行热交换器结垢故障检测与预警。Patil 等<sup>[7]</sup>通过分析炼油厂热交换器几种原油形成污垢的根本原因,并在此基础上利用污染倾向指数 (fouling propensity index, FPI) 指标评估原油结垢倾向。Wallhäußer 等<sup>[8]</sup>从压降指标、传热指标、电气指标等多个方面对热交换器行为特性进行描述,实现对换热器污垢监测。赵国新等<sup>[9]</sup>利用主元分析法和支持向量机对污垢生成过程进行回归拟合。此外,目前更常用的结垢故障检测方法是比较试验温度与早期简化模型间的差异,设定运维阈值来判断故障是否发生<sup>[10-11]</sup>。除了基于传热学本身原理的结垢检测方法外,也有一些更为复杂的方法来检测污垢,如硅传感器<sup>[12]</sup>,超声波,声学 and 光学技术等<sup>[13]</sup>,郑晓亮等<sup>[14]</sup>基于声波法构建线性阵列两步定位方法,实现了故障定位。

综上,目前已有许多对热交换器结垢状态进行监测的办法。然而这些办法大多集中在对性能的监测上,并不能在线且直接获得故障程度量化结果,而且故障的量化比故障的监测要困难得多,对于结垢故障的最直接表征——污垢厚度监测方面还比较欠缺。针对以上问题与挑战,本文提出了基于虚拟感知 (virtual sensing) 的热交换器结垢故障传感方法,通过仅获取进出口温度、压力、压降、冷热流体流量等易测参量,结合结构参数和物性参数,构建一种数学关联模型,推断、解释和预测系统的真实行为特性<sup>[15]</sup>,实现虚拟感知热交换器污垢厚度。

## 1 结垢机理与影响

1) 污垢分类。结垢通常也被称为污垢,可以根据其工质状态、形成的物理/化学过程、工艺过程、有无相变等进行不同的分类,其中,按污垢形成的最主要过程即物理/化学过程进行分类,可以分为:析晶污垢、化学反应污垢、颗粒污垢、凝固污垢、生物污垢、腐蚀污垢和混合污垢<sup>[2]</sup>。通常在实际换热设备运行当中形成的污垢大多数都是混合污垢。根据污垢沉积理论,循环水热交换器的污垢沉积存在两个相反的机理过程,即污垢的形成以及移除。

2) 结垢机理。污垢的形成取决于循环冷却水中管程热流体与壳程冷流体温差以及壳程工业循环冷却水中钙

离子浓度。目前碳酸钙垢是一种比较常见的污垢,当冷却水中的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  的浓度积大于  $\text{CaCO}_3$  的溶度积时,碳酸钙就会有结垢的趋势,此时的溶液是一种过饱和溶液。但并不是所有的  $\text{CaCO}_3$  的过饱和溶液都会很快结垢,一般从过饱和溶液到第一个垢晶体形成需要一段时间,这段时间就是  $\text{CaCO}_3$  的结垢诱导期。污垢的移除速率主要取决于壳程工业循环冷却水的流速,流速越大,污垢的移除速率越大。理论上两者存在一个平衡点,即临界结垢点,这个形成和移除的关系类似于相平衡。因此这也增大了对于结垢故障程度和污垢厚度分析的难度。

3) 结垢影响。热交换器结垢时会导致管壳程流体换热受到污垢热阻的影响,热侧出口温度会上升,冷侧出口温度会下降,因此导致换热面两侧平均传热温差逐渐升高。其中平均传热温差  $\Delta T_m$  为:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\lg \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}} \quad (1)$$

其中,  $\Delta T_{\max}$  为冷、热两侧进出口温差较大者,单位为  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta T_{\min}$  为冷、热两侧进出口温差较小者,单位为  $^{\circ}\text{C}$ 。

此外,管壳式热交换器换热面结垢还会对壳程压降产生影响,这主要是由于污垢存在改变了换热面的表面粗糙度,并且污垢具有粘弹性等特性,严重时还会减小壳程流体流通截面积,进而导致壳程出口压力下降,壳程压降增大。其中压降可表示为:

$$\Delta P_c = P_{ci} - P_{co} \quad (2)$$

其中,  $P_{ci}$  为壳程进口压力,单位为 Pa;  $P_{co}$  为壳程出口压力,单位为 Pa。

换热效率作为热交换器传热性能重要指标之一,当热交换器发生结垢时,由于污垢热阻的存在,导致热量在换热面间传递受阻,管程热流体传递给壳程冷流体热量降低,导致壳程出口温度下降,管程出口温度上升,进而导致换热效率下降。热交换器的换热效率计算过程为:

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}} = \frac{(t - t'')_{\max}}{t'_1 - t'_2} \quad (3)$$

其中,  $\Phi$  为冷热流体在热交换器中的实际换热量,单位为 W;  $\Phi_{\max}$  为流体在热交换器中可能发生的最大换热量,单位为 W;  $(t - t'')_{\max}$  为冷流体或热流体实际温度差值中的大者,单位为  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t'_1 - t'_2$  为流体在热交换器中可能发生的最大温差值,单位为  $^{\circ}\text{C}$ 。

这些覆盖垢层在传热过程中都表现为附加的热阻 (污垢热阻),对管程内热流体起到了一定“保温”作用,从而导致换热性能下降,热量传递减少,进而由传热方程可知总传热系数下降。传热过程中热量传递的传热方程为:

$$\Phi = KA\Delta T_m \quad (4)$$

其中,  $\Phi$  为冷流体传热过程中传递的热量, 单位为 W;  $K$  为总传热系数, 单位为  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $A$  为换热面积, 单位为  $m^2$ ;  $\Delta T_m$  为平均传热温差, 单位为  $^\circ C$ 。

## 2 热交换器结垢厚度虚拟感知

结垢故障不仅直接影响温度、压力、压降等热交换器在线监测参数, 还进一步导致换热效率、总传热系数等性能指标表现异常。通过第一部分对热交换器结垢机理及影响分析, 本文选取总传热系数进一步分析, 以实现结垢厚度的虚拟感知, 模型构建框架如图 1 所示。图 1 中  $T_{hi}$ 、 $T_{ho}$ 、 $T_{ci}$ 、 $T_{co}$  分别为热侧进口温度, 单位为  $^\circ C$ ; 热侧出口温度, 单位为  $^\circ C$ ; 冷侧进口温度, 单位为  $^\circ C$ ; 冷侧出口温度, 单位为  $^\circ C$ ;  $P_{hi}$ 、 $P_{ho}$ 、 $P_{ci}$ 、 $P_{co}$  分别为热侧进口压力, 单位为 Pa; 热侧出口压力, 单位为 Pa; 冷侧进口压力, 单位为 Pa; 冷侧出口压力, 单位为 Pa;  $\Delta P_h$ 、 $\Delta P_c$  分别为热侧压降, 单位为 Pa; 冷侧压降, 单位为 Pa;  $\delta_i$  为换热管壁厚, 单位为 m;  $d$  为换热管直径, 单位为 m。

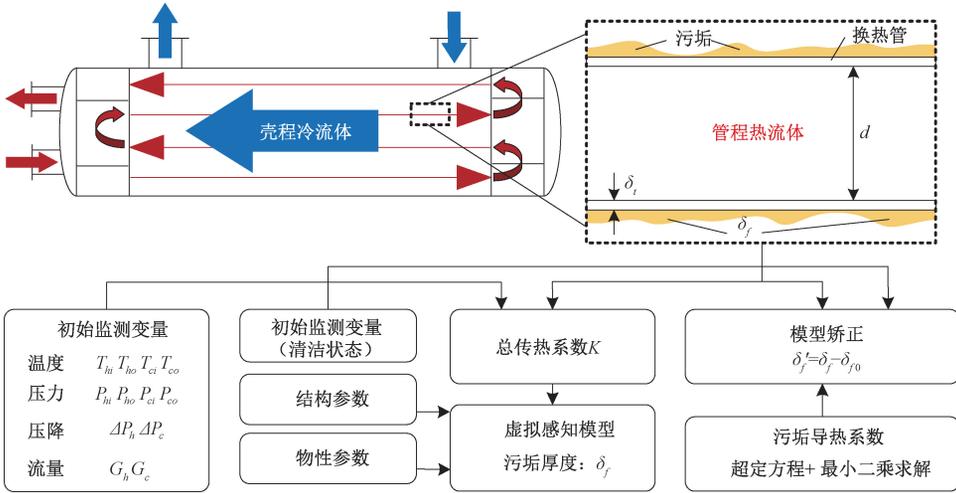


图 1 虚拟感知模型框架

Fig. 1 Framework of the virtual sensing model

当考虑换热面附着污垢影响, 并假设换热管  $d_i$ 、 $d_o$ 、 $d_m$  近似相等, 总传热系数  $K_o$  为:

$$K_o = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_f}{\lambda_f} + \frac{b}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_o}} \quad (6)$$

其中,  $\lambda_f$  为污垢导热系数, 单位为  $W/(m \cdot K)$ ;  $\delta_f$  为垢层厚度, 单位为 m。根据传热公式反推总传热系数为:

$$K_o = \frac{\Phi_l}{A \Delta T_m} = \frac{c G_c \Delta T_c}{A \Delta T_m} = \frac{c \rho_c V_c \Delta T_c}{A \Delta T_m} \quad (7)$$

### 2.1 结垢厚度虚拟感知模型

由于污垢增大了换热热阻, 降低了换热性能, 在构建热交换器结垢厚度虚拟感知模型时, 对热交换器的运行做了如下假设:

- 1) 由于工业冷却水循环系统中管壳式热交换器壳程流通冷流体, 故假设污垢只附着在换热管外侧;
- 2) 结垢均匀附着在换热面;
- 3) 换热管内径与外径比值为 1。以换热管外表面积  $S_o$  ( $S_o = \pi d_o L$ ) 为基准, 热交换器总传热系数  $K_o$  理论计算公式为:

$$K_o = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} \frac{S_o}{S_i} + \frac{b}{\lambda} \frac{S_o}{S_m} + \frac{1}{\alpha_o}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_o}{d_m} + \frac{1}{\alpha_o}} \quad (5)$$

其中,  $L$  为换热管长, 单位为 m;  $\alpha_i$  为管程对流换热系数, 单位为  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $\alpha_o$  为壳程对流换热系数, 单位为  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $S_o$  为换热管外表面积, 单位为  $m^2$ ;  $S_i$  为换热管内表面积, 单位为  $m^2$ ;  $S_m$  为换热管平均面积, 单位为  $m^2$ ;  $b$  为换热管壁厚, 单位为 m;  $\lambda$  为换热管导热系数, 单位为  $W/(m \cdot K)$ ;  $d_o$  为换热管外径, 单位为 m;  $d_i$  为换热管内径, 单位为 m;  $d_m$  为换热管平均直径, 单位为 m。

其中,  $\Phi_l$  为热交换器壳程换热量, 单位为 W;  $c$  为冷流体定压比热, 单位为  $kJ/(kg \cdot K)$ ;  $G_c$  为冷流体质量流量, 单位为  $kg/s$ ;  $\Delta T_c$  为冷流体进出口温差, 单位为  $^\circ C$ ;  $\rho_c$  为冷流体密度, 单位为  $kg/m^3$ ;  $V_c$  为冷流体体积流量, 单位为  $m^3/s$ 。

则污垢厚度可表示为:

$$\delta_f = \lambda_f \left( \frac{1}{K_o'} - \frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\alpha_o} - \frac{b}{\lambda} \right) = \lambda_f \left( \frac{A \Delta T_m}{c \rho_c V_c \Delta T} - \frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\alpha_o} - \frac{b}{\lambda} \right) \quad (8)$$

管程对流换热系数  $\alpha_i$  计算公式为(应用范围  $Re > 10\ 000$ ):

$$\alpha_i = 0.023 \frac{\lambda_h}{d_i} (Re_h)^{0.8} \left( \frac{C\mu_h}{\lambda_h} \right)^{0.3} \quad (9)$$

壳程对流换热系数  $\alpha_o$  计算公式为(应用范围  $Re = 3 \sim 2 \times 10^4$ ):

$$\alpha_o = 0.23 \frac{\lambda_c}{d_o} (Re_c)^{0.8} \left( \frac{C\mu_c}{\lambda_c} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_c}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (10)$$

其中,  $\lambda_h$  为热流体导热系数,单位为  $W/(m \cdot K)$ ;  $\lambda_c$  为冷流体导热系数,单位为  $W/(m \cdot K)$ ;  $Re_h$  为管程雷诺数;  $Re_c$  为壳程雷诺数;  $C$  为热流体定压比热,单位为  $kJ/(kg \cdot K)$ ;  $\mu_h$  为热流体粘度,单位为  $Pa \cdot s$ ;  $\mu_c$  为冷流体粘度,单位为  $Pa \cdot s$ ;  $\mu_w$  为壁温流体粘度,单位为  $Pa \cdot s$ 。

## 2.2 虚拟感知模型矫正

为了使厚度感知结果更精确,选取一段同工况定长热交换器正常状态(清洁状态)运行数据作为厚度基准  $\delta_{f0}$  对感知厚度进行修正:

$$\delta_{f0} = \lambda_f \left( \frac{A\Delta T_{m, clean}}{c\rho V_c \Delta T_c} - \frac{1}{\alpha_{i, clean}} - \frac{1}{\alpha_{o, clean}} - \frac{b}{\lambda} \right) \quad (11)$$

其中,  $\Delta T_{m, clean}$  为清洁状态平均传热温差,单位为  $^{\circ}C$ ;  $\alpha_{i, clean}$  为清洁状态管程对流换热系数,单位为  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $\alpha_{o, clean}$  为为清洁状态壳程对流换热系数,单位为  $W/(m^2 \cdot K)$ 。

则修正后的结垢厚度  $\delta'_f$  为:

$$\delta'_f = \delta_f - \delta_{f0} \quad (12)$$

## 2.3 污垢导热系数的确定

污垢导热系数是决定结垢厚度感知是否正确的关键参数,由于热交换器实际污垢往往由多物质混合,且污垢存在不同的水合物,因此需要通过最小二乘法解超定方程的方式求得污垢导热系数最优解,以此实现热交换器结垢厚度虚拟感知。

## 3 试验验证

试验验证思路为在热态功能试验台架上,采用高压容器试验件开展测试验证。对高压容器试验件进行正常升温/升压、正常降温/降压,以及具有代表性的异常升温/升压、异常降温/降压瞬态下的功能性试验,通过控制试验的温度和压力变化速率,测试基于总传热系数的热交换器结垢厚度虚拟感知模型的准确性以及确定污垢导热系数数值。

### 3.1 试验台设置

1) 试验台架总体方案。试验测试系统构成原理如图2所示。根据试验的要求,采用由供热部分、测试冷热双回路部分和冷却部分等3个功能模块(包含4个流体回路)组成的试验装置来完成模型测试研究。其中,中间的测试双回路相对独立,以确保结垢测试试验中不会对整套试验台架的加热冷却模块产生过大不利影响。试验过程中,通过热源将载热介质加热,并通过管壳式热交换器将热量传递给测试热回路的热流体;完成测试换热后,热量通过冷回路的板式热交换器带出,并通过冷却塔散热。

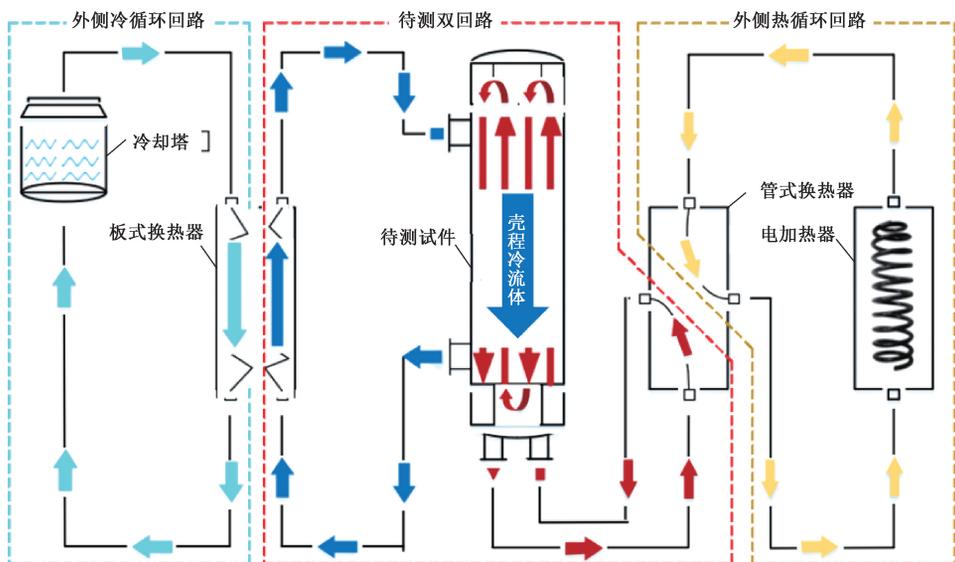


图2 试验测试装置

Fig.2 Test device

2) 试验件结构参数。由于管壳式热交换器换热管直径相对很小,数量众多,容易发生结垢和堵塞且清洗和更换十分困难。因此,试验首先采用特质单壳程双管程小型 U 管卧式热交换器推导污垢导热系数。最后通过单壳程单管程直管立式热交换器进行验证。两种试验件的主要结构参数如表 1 所示。

表 1 两种试验件主要结构参数

Table 1 The main structural parameters of two test pieces

序号	参数	小试验件	大试验件
1	壳体内径/m	0.160(有机玻璃)	0.253
2	壳体厚度/m	0.01(有机玻璃)	0.01
3	换热面积/m <sup>2</sup>	0.78	10.3
4	换热管长度/m	1	2.278
5	换热管外径/m	0.012	0.016 4
6	换热管壁厚/m	0.001 6	0.001 2
7	排列方式	正三角形	正三角形
8	换热管数量	26	108
9	折流板数量	3	10
10	折流板间距/m	—	0.18

3) 数据监测与采集。本实验装置设有 200 kW 电加热器加热控制单元、电加热器水流量和压力控制单元、被测件热侧流体控制单元、被测件冷侧流体控制单元和外循环水控制单元 5 个仪表控制单元。

温度测点 10 个,均采用 PT100 精密温度传感器,精度等级为 0.1。压力测点 6 个,采用我国台湾品牌高可靠性扩散硅压力变送器,精度等级为 0.25,各压力测点同时安排耐震压力表用于现场指示。压差测点 2 个,用于设备动力性能测试和故障监测,选用罗斯蒙特 3051DP 系列高精度压差变送器,精度等级为 0.1。流量测点 4 个,选用国产知名品牌高性能涡轮流量计,精度等级为 0.5。全部监控信号和控制输出均由 PLC 系统完成。

### 3.2 试验内容与结果

为考察污垢厚度对热交换器换热性能的影响,测试虚拟传感模型求解污垢厚度、结垢时间与污垢导热系数关系的能力,评价模型对污垢层感知的鲁棒性和污垢厚度计算的普适性,设计试验内容如下:1)在不同的温度、压力、流量的工况条件下对热交换器试件进行状态监测测试;2)在不同的温度、流量的工况条件下,在介质中加入 Ca<sup>2+</sup>基垢来考察污垢厚度对热交换器的性能的影响、测试模型并求解垢层厚度、结垢时间以及污垢热阻的关系。

相比于 CaCO<sub>3</sub> 溶液, CaSO<sub>4</sub> 在水中溶解度更大,而且溶解性也受温度影响更小,因此在结垢试验中初定采用

CaSO<sub>4</sub> 溶液作为测试液体。结垢动力学原理为:

$$r = kC_A^\alpha \quad (13)$$

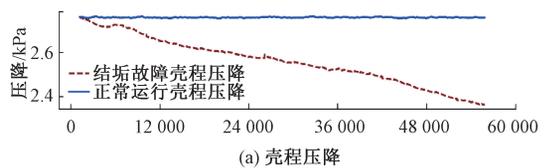
其中,  $r$  为结垢速率,单位为 mol/(L·min);  $k$  为反应速率系数,  $C_A$  为离子浓度,单位为 mol/L;  $\alpha$  为反应级数。

由式(13)可知结垢速率与浓度呈指数关系,对于难溶 Ca<sup>2+</sup>而言,  $\alpha$  介于 1.7~3.2 之间,可以通过增加离子浓度来大幅提升结垢速率。基于此,制备小型卧式 U 管管换热器,以不同浓度的 CaSO<sub>4</sub> 溶液作为冷流体,首先设定 4 个工况点,如表 2 所示,以获得压降、换热效率等性能参数对结垢过程的影响规律。以工况 1 为例,结垢故障对小型试验件换热性能的影响如图 3 所示。

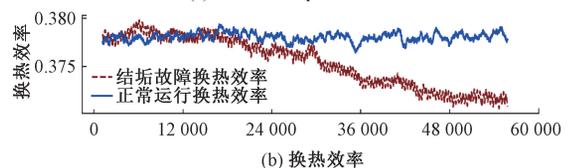
表 2 结垢过程监测模块测试工况

Table 2 Test conditions of fouling monitoring

工况	测试参数	管程	壳程
1	入口温度/°C	60	25
	入口压力/MPa	0.1	0.1
	流量/(m <sup>3</sup> /h)	0.8	0.5
	介质	水	饱和 CaSO <sub>4</sub> 溶液
2	入口温度/°C	70	35
	入口压力/MPa	0.1	0.1
	流量/(m <sup>3</sup> /h)	0.7	0.4
	介质	水	饱和 CaSO <sub>4</sub> 溶液
3	入口温度/°C	80	45
	入口压力/MPa	0.1	0.1
	流量/(m <sup>3</sup> /h)	0.6	0.3
	介质	水	饱和 CaSO <sub>4</sub> 溶液
4	入口温度/°C	75	40
	入口压力/MPa	0.1	0.1
	流量/(m <sup>3</sup> /h)	0.8	0.45
	介质	水	饱和 CaSO <sub>4</sub> 溶液



(a) 壳程压降  
(a) Pressure drop of the shell side



(b) 换热效率  
(b) Heat transfer efficiency

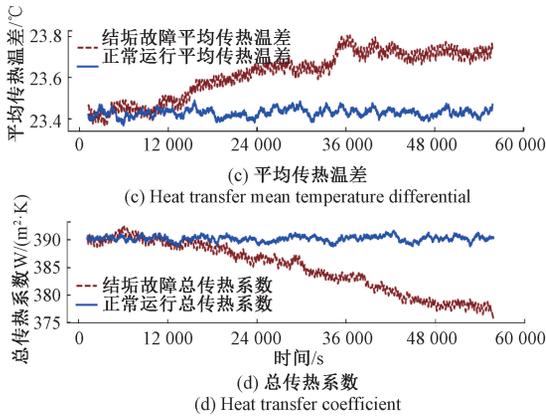


图3 结垢故障对小型热交换器试验件性能的影响

Fig.3 The influence of fouling failure on the small test pieces

由于小型试样方便清洗,因此可通过小型热交换器试样确定污垢导热系数。最后,为了进一步贴合实际验证模型准确性,选取大型热交换器试样进行结垢试验,参考工况如表3所示。结垢故障对大型热交换器试验件换热性能的影响如图4所示。

表3 大试验件结垢过程参考工况

Table 3 Reference conditions for fouling of large test pieces

工况	测试参数	管程	壳程
5	入口温度/℃	75	47
	入口压力/MPa	2.0	0.3
	流量/(m <sup>3</sup> /h)	25	10
	介质	水	饱和 CaSO <sub>4</sub> 溶液

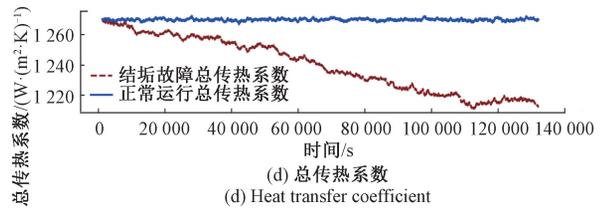
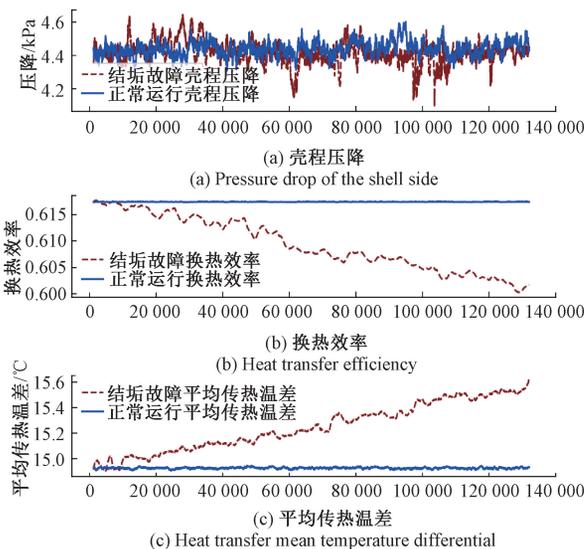


图4 结垢故障对大型热交换器试验件性能的影响

Fig.4 The influence of fouling failure on the large test piece

综上,随着污垢试验的进行,污垢在换热面逐渐聚积,尽管通过机理研究可知污垢形成中会随着阻变化反复出现剥落现象导致数据可能存在波动,但随着时间推移垢层加厚,最终都会导致热交换器性能随时间逐渐下降。

### 4 讨论

#### 4.1 虚拟感知模型准确性

通过小试验件对不同工况进行反复测试、清洗、称重,利用实际称得的重量计算得到实际污垢厚度。通过式(8)反推出不同工况下污垢导热系数的数值,运行最小二乘解超定方程的方法求解出污垢导热系数  $\lambda_f$  的最优解为 2.087 W/(m·K)。将污垢导热系数带回模型计算得到的厚度虚拟感知结果,如表4所示。

表4 基于总传热系数的结垢厚度计算结果

Table 4 Calculation results of fouling thickness based on total heat transfer coefficient

工况	小试验件				大试验件
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
实际厚度/mm	0.319	0.223	0.265	0.300	0.109
垢层厚度占比/%	2.65	1.86	2.21	2.57	0.78
计算厚度/mm	0.231	0.214	0.235	0.249	0.104
误差/%	27	4	11	19	4.7

将实际厚度与虚拟感知计算厚度进行对比,如图5所示,当垢层厚度占比(垢层厚度与管径的比值)在3%以下时虚拟感知误差都小于30%。

#### 4.2 虚拟感知模型工况鲁棒性

小试验件在不同结垢工况虚拟感知模型输出如图6所示。模型在4种工况下的计算结垢厚度误差不超过30%,具有应对工况变化的能力,鲁棒性较好。

#### 4.3 虚拟感知模型设备普适性及实时性

将虚拟传感模型在不改变模型参数的情况下应用于大型试验件,输入大型试验件的监测参数得到如图7所示的模型输出。由于小型试件与大型试件的结构尺寸与

运行工况皆有很大差别,可知模型具有针对不同结构尺寸管壳式热交换器的普适性。

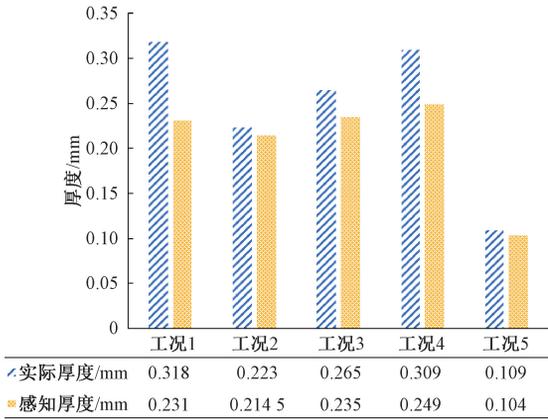


图 5 实际厚度与虚拟感知厚度对比

Fig. 5 Comparison of actual thickness and virtual sensing



(d) 工况4下虚拟传感结垢厚度

(d) Virtual sensing fouling thickness under operating condition 4

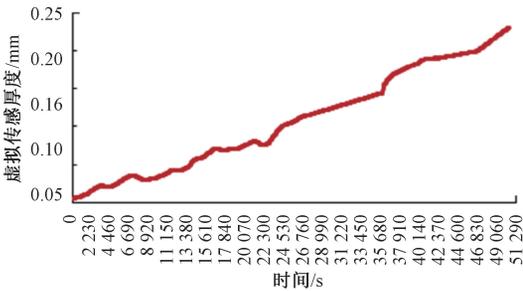
图 6 小型试验件虚拟感知模型输出监测值

Fig. 6 Virtual sensing model output of small test piece



图 7 大型试验件虚拟感知模型输出监测值

Fig. 7 Virtual sensing model output of large test piece



(a) 工况1下虚拟传感结垢厚度

(a) Virtual sensing fouling thickness under operating condition 1



(b) 工况2下虚拟传感结垢厚度

(b) Virtual fouling thickness under operating condition 2



(c) 工况3下虚拟传感结垢厚度

(c) Virtual sensing fouling thickness under operating condition 3

此外,将大试验件内随机取 3 根换热管分别进行清洗、烘干、称重后取平均值,得到实际污垢厚度为 0.109 mm,与将温度、压力、流量等实时监测传感数据接入虚拟感知模型输出厚度 0.104 mm 的误差仅为 4.7%,因此模型具备实时感知结垢厚度的能力,具有一定的应用于实际工程的价值。

### 4.4 模型比对分析

根据虚拟感知模型结垢诊断结果与其他传统方法的诊断效果相对比,可以看出本文提出的虚拟感知方法在算法模型的各个方面均有一定的优势,如表 5 所示。

表 5 模型对比分析结果

Table 5 Comparison results of algorithm models

方法	鲁棒性	灵敏性/%	普适性	是否输出结垢厚度
虚拟感知方法	好	0.78	好	是
污垢因子法	好	1	好	否
温差比较法	差	3	差	否

## 5 结 论

针对石化和核电行业热交换器结垢故障监测面临的挑战,本文建立了一种管壳式热交换器结垢故障的虚拟

感知模型,并进行了试验验证,主要结论如下:

1) 结垢故障会导致换热面存在污垢热阻的影响,使换热效率下降、平均传热温差上升、壳程压降下降等。

2) 通过改进总传热系数,推导了反映污垢厚度的虚拟感知模型,实现了在30%误差范围内对管径2.2%以上的垢层厚度监测。

3) 提出了一种通过试验和最小二乘解超定方程相结合的污垢热阻系数计算方法,并计算了在当前试验工况下的污垢热阻值为 $2.087 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

## 参考文献

- [1] 林林. 管壳式换热器结垢和泄漏的传热特性及预测研究[D]. 黑龙江: 东北石油大学, 2014.  
LIN L. Heat transfer characteristics and prediction study on scale and leakage in tube and shell heat exchanger [D]. Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2014.
- [2] 张翠翠. 循环水的结垢监测以及有机污水处理方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.  
ZHANG C C. Study on the scaling monitoring of circulating water and the treatment of organic wastewater [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [3] 鹿林. 电站热交换器的监测与故障诊断研究[D]. 江苏: 东南大学, 2006.  
LU L. Research on condition monitoring and fault diagnosis of heat exchanger for power plant [D]. Jiangsu: Southeast University, 2006.
- [4] FGURI A, MARVILLET C, JEDAY M R. Estimation of fouling resistance in a phosphoric acid/steam heat exchanger using inverse method [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 192: 116935.
- [5] HADAD W, SCHICK V, MAILLET D. Fouling detection in a shell and tube heat exchanger using variation of its thermal impulse responses: Methodological approach and numerical verification [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 155: 612-619.
- [6] DAVOUDI E, VAFERI B. Applying artificial neural networks for systematic estimation of degree of fouling in heat exchangers [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 130: 138-153.
- [7] PATIL P D, KOZMINSKI M, PETERSON J, et al. Fouling diagnosis of pennsylvania grade crude blended with opportunity crude oils in a refinery crude unit's hot heat exchanger train [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(38): 17918-17927.
- [8] WALLHÄUBER E, HUSSEIN M A, BECKER T. Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry [J]. Food Control, 2012, 27(1): 1-10.

- [9] 赵国新, 吴数龙, 陈化淳, 等. 换热器导热管结垢诊断仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2019, 36(7): 427-431, 458.  
ZHAO G X, WU SH L, CHEN H CH, et al. Simulation research on fouling diagnosis of conducting heat tube in heat exchanger [J]. Computer Simulation, 2019, 36(7): 427-431, 458.
- [10] JONSSON G R, LALOT S, PALSSON O P, et al. Use of extended Kalman filtering in detecting fouling in heat exchangers [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2007, 50(13-14): 2643-2655.
- [11] LROT S, GUERRA T M, DAMBRINE M, et al. Fouling detection in a heat exchanger by observer of Takagi-Sugeno type for systems with unknown polynomial inputs [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(8): 1558-1566.
- [12] STENBERG M, STEMME G, KITILSLAND G, et al. A silicon sensor for measurement of liquid flow and thickness of fouling biofilms [J]. Sensors & Actuators, 1988, 13(3): 203-221.
- [13] WITHERS P M. Ultrasonic, acoustic and optical techniques for the non-invasive detection of fouling in food processing equipment [J]. Trends in Food Science & Technology, 1996, 7(9): 293-298.
- [14] 郑晓亮, 王强, 薛生. 输气管道泄漏的线性阵列两步定位方法 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 171-178.  
ZHENG X L, WANG Q, XUE SH. A two-step leakage location method for gas pipelines based on linear array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 171-178.
- [15] 胡瑾秋, 郝笑笑, 张来斌. 基于虚拟传感技术的工业数据错误诊断方法 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 29-36.  
HU J Q, HAO X X, ZHANG L B. Diagnosis of faulty measurements for industrial process based on virtual sensing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 29-36.

## 作者简介



王金江(通信作者), 2005年于山东大学获得学士学位, 2007年于山东大学获得硕士学位, 2014年于康涅狄格大学获得博士学位, 现为中国石油大学(北京)教授, 主要研究方向为安全监测与故障诊断。

E-mail: jwang@cup.edu.cn

**Wang Jinjiang** (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Shandong University in 2005 and 2007, and received his Ph. D. degree from University of Connecticut in 2014. He is currently a professor at China University of Petroleum, Beijing. His main research interests include safety monitoring and fault diagnosis.