

Thermotactic Analysis of Composite Fouling Composed of SiO₂ and IB

Yingyi Lv¹, Nan Li², Ning Zhang²

¹Qingdao Second Middle School of Shandong Province, Qingdao Shandong

²College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao Shandong

Email: iamlinan@foxmail.com

Received: Dec. 2nd, 2017; accepted: Dec. 14th, 2017; published: Dec. 21st, 2017

Abstract

In order to investigate the effects of temperature to composite fouling composed of SiO₂ and IB, and learn about the mechanism of composite fouling in different temperatures of hot fluid loop and cool fluid loop, experiments based on thermal resistance method and weighing method were carried out in different cycle entrance temperatures and cooling entrance temperatures. It is showed that the thermal resistance of composite fouling, which changes in a regular way, is evidently affected by the entrance temperatures of hot fluid loop and cool fluid loop. Increasing the inlet temperature of the thermal cycle, the increase of the thermal resistance of the mixed fouling decreases, and the inlet temperature of the cold cycle is also positively correlated with the increment of the mixed fouling.

Keywords

Thermotactic Analysis, SO₂, IB, Composite Fouling

二氧化硅与铁细菌混合污垢的趋热性分析

吕颖怡¹, 李楠², 张宁²

¹山东省青岛第二中学, 山东 青岛

²青岛大学机电工程学院, 山东 青岛

Email: iamlinan@foxmail.com

收稿日期: 2017年12月2日; 录用日期: 2017年12月14日; 发布日期: 2017年12月21日

摘要

为了研究温度对于二氧化硅和铁细菌混合污垢的影响, 明确二氧化硅和铁细菌混合污垢在不同的热循环

温度和冷循环水浴温度下的结垢特性, 利用热阻法和称重法研究了不同循环工质温度和冷却水温度下二氧化硅和铁细菌混合污垢的结垢情况。结果表明, 混合污垢热阻受热循环入口温度与冷循环水浴入口温度影响明显, 并呈一定规律变化; 增加热循环入口温度, 混合污垢热阻增量减小, 冷循环入口温度与混合污垢增量也呈正相关关系。

关键词

趋热性分析, 二氧化硅, 铁细菌, 混合垢

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着化石能源的日益紧张以及环境污染情况的加重, 开发利用新能源成为人们可持续发展的重中之重。污水源热泵能够利用庞大城市污水资源中的热能为建筑物供能, 受到了人们的广泛关注, 但是污水源热泵的结垢问题一直是制约污水源热泵发展的关键问题。影响结垢的因素众多, 温度更是重要的影响因素之一, 很多学者都对此做了大量研究。Hasan [1]等人研究发现温度对于盐溶液结垢速率有很大影响, 并且壁面温度的升高析晶污垢的结垢速率下降。Al-Otaibi [2]等人研究了温度对于碳钢和钛管表面微咸水的污垢特性, 结果表明升高管壁面温度会使污垢热阻增大。徐志明[3]等人对 Ca^{2+} 环境下的微生物的污垢特性研究发现升高低温循环水进口温度会缩短诱导期以及污垢热阻达到平衡的时间, 污垢热阻渐近值减小, 但对结垢速率没有明显的影响。刘坐东[4]等人发现低温循环冷却水温度对水质参数有较大影响, 微生物污垢热阻随温度升高而降低。陈霄[5]等人研究了城市污水换热设备中铁细菌的生长情况, 研究表明在 $20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 范围内, 温度越高, 铁细菌的生长速度越快, 产生的污垢总量也越多, 但生长周期几乎保持不变。关晓辉[6]等人研究了不锈钢缩放圆管中 IB 等细菌的致垢能力, 发现铁细菌具有较强的致垢能力。温度对于颗粒污垢的生长情况也有较大影响, 徐志明[7]等人为了探讨纳米氧化镁颗粒在交叉缩放椭圆管内部的污垢规律, 对不同工况下进行了实验研究, 结果发现污垢热阻渐近值随着实验管段入口温度的升高而降低, 结垢速率略有加快; 王景涛[8]等人通过改变循环工质入口温度和水浴温度实验研究了温度对于纳米颗粒污垢在交叉缩放椭圆管中的结构特性, 结果表明, 随着循环工质入口温度的升高, 污垢热阻渐近值明显减小, 并且污垢达到渐近值的时间缩短。随着水浴温度的升高, 污垢热阻渐近值也随之减小, 但是达到渐近值的时间略有增加。在混合污垢方面, 张仲彬[9]等人对 CaCO_3 和 Al_2O_3 或 MgO 混合污垢进行试验研究, 结果发现, 水浴温度在实验范围内变化对结垢影响不大。

学者们针对温度对不同污垢形成的影响做了大量研究, 但是一方面大多数研究是针对冷却循环水温度[10]进行研究, 与污水源热泵中污水作为热循环水的情况不相符合; 另一方面, 目前针对温度这一影响因素的研究, 未同时考虑换热器两侧温度对于复杂污垢生长情况的影响, 尤其是污水源热泵中存在大量微生物, 受温度条件影响较大。本文以套管式换热器为实验段, 搭建了污垢热阻在线监测系统, 针对污垢中无机成分颗粒污垢和有机成分微生物污垢在不同的循环工质热循环和水浴冷循环温度下进行实验分析, 并结合混合污垢增量进行综合分析。

2. 实验系统及原理

2.1. 实验系统

实验采用自行搭建的热泵工况污垢热阻在线监测系统实验台(如图 1 所示),并将实验系统置于室温条件下进行实验。其中实验系统包含冷却水循环系统、热流体循环系统和数据采集监测系统三部分。实验段为套管式换热器(如图 2 所示),其中管内为热流体,构成实验系统的热循环部分;套管间隙为冷工质,构成实验系统的冷循环部分。数据采集监测系统采用安捷伦 34972a 数据采集仪,隔一定的时间间隔采集温度传感器、压力传感器和电磁流量计的电流和电压信号,输入 PC 进行数据的转换和采集。

2.2. 实验工质的制备

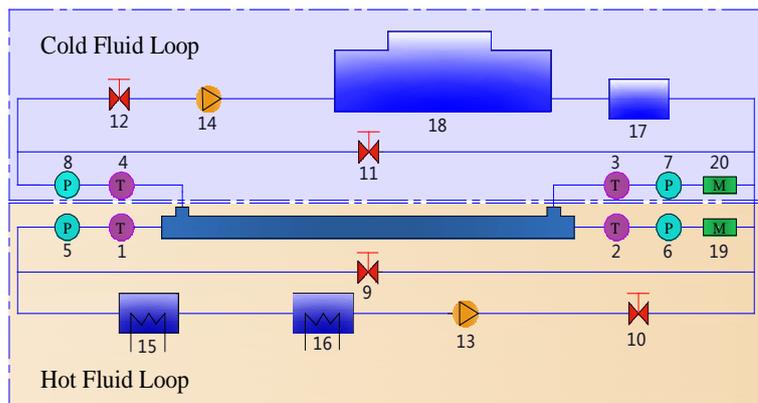
取某污水处理厂城市二级出口污水为样本,在 PH 值为 6.8~7.2 的特定培养基(如表 1 所示)中进行培养,先后经过富集、分离和纯化过程得到铁细菌溶液,待铁细菌溶液的 OD 值大于 0.5 后置于 35℃ 恒温箱中保存,以备使用。

同时,取出适量的铁细菌溶液,进行 16sDNA 检测,检测发现培养基菌落为芽孢杆菌属,为铁细菌种类之一,培养配制的铁细菌溶液符合实验要求。

实验采用人工配制混合溶液 F 模拟流体,将二氧化硅与配置好的铁细菌溶液按比例配制,作为循环工质备用,其成分以及实验工况如表 2 和表 3 所示。

2.3. 实验方法

- 1) 安装实验台,对实验段进行杀菌处理
- 2) 在冷却水循环系统水箱加入清洁水,启动冷却水循环系统循环泵,进行检漏,待冷却水循环系统



1、2、3、4—温度传感器(PT100); 5、6、7、8—压力传感器; 9、10、11、12—调节阀; 13—热流体循环系统循环泵; 14—冷却水循环系统循环泵; 15—级恒温水箱; 16—二级恒温水箱; 17—冷却水循环水箱; 18—冷水机组 19、20—电磁流量计

Figure 1. Fouling resistance online monitor system in heat pump conditions
图 1. 热泵工况污垢热阻在线监测系统图



Figure 2. Sleeve type heat exchanger
图 2. 套管式换热器

Table 1. Culture medium of IB
表 1. 铁细菌培养基成分

成分	含量/(g·L ⁻¹)
MgSO ₄	0.5
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.5
KH ₂ PO ₄	0.5
CaCl ₂	0.2
NaNO ₃	0.5
(NH ₄) ₃ Fe(C ₆ H ₅ O ₇) ₂	10.0

Table 2. Artificial mixed solution F
表 2. 人工配制混合溶液 F

成分	含量
二氧化硅	400 mg/L
铁细菌	2%
水	25L

Table 3. Experimental condition table
表 3. 实验工况情况表

实验序号	内循环温度/°C	外循环温度/°C
①	21	14
②	26	14
③	31	14
④	26	16
⑤	26	18

温度降至 14°C (16°C/18°C), 冷水机组停止工作; 在热工质循环系统的恒温水箱中加入冷却水, 待水箱温度升高至 21°C (26°C/31°C), 启动循环泵, 调节调节阀使流速达到测定值。

3) 向热流体循环系统二级恒温水箱加入 400 mg/L 的二氧化硅颗粒和 2% 的铁细菌培养液, 开启 PC 数据采集仪进行数据采集。

4) 运行 12 h 后停止试验台, 取出实验段的内管水平放置, 并于 10 h 之后对内管进行称量。

5) 重新组装启动试验台, 重复步骤(4)

6) 实验完毕后, 对实验台进行清理, 改变工况参数重复步骤(1)到(5)

2.4. 实验原理

污垢热阻法是指通过测量计算对应工况洁净状态下的热阻 R_0 与运行状态下的热阻 R_f 的差值 R_{f1} , 来反映换热面上污垢生长情况的一种热力学方法。

$$R_{f1} = R_f - R_0 \quad (1)$$

理论上, 热工质循环系统在实验段的换热量 Q_1 与冷却水循环系统在实验段的换热量 Q_2 相等, 即

$$Q_1 = Q_2 \quad (2)$$

但是由于套管式换热器换热过程中外壁等的散热, Q_1 与 Q_2 存在一定差值, 我们取换热的平均值 Q 来忽略散热损失。

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad (3)$$

$$Q_1 = c_{p1} q_{m1} (t_2 - t_1) \quad (4)$$

$$Q_2 = c_{p2} q_{m2} (t_3 - t_4) \quad (5)$$

其中, c_{p1} , c_{p2} 为定压比热容, $\text{KJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; q_{m1} 、 q_{m2} 分别为热流体和冷流体的质量流量, kg/s ; t_1 为热流体出口温度, t_2 为热流体进口温度, t_3 为冷流体出口温度, t_4 为冷流体进口温度, $^\circ\text{C}$ 。

热阻值 R 可以通过以下计算:

$$R = \frac{A \cdot \Delta T}{Q} \quad (6)$$

$$\Delta T = \frac{(t_1 - t_4) - (t_2 - t_3)}{\ln \frac{t_1 - t_4}{t_2 - t_3}} \quad (7)$$

其中, t_1 为热流体出口温度, t_2 为热流体进口温度, t_3 为冷流体出口温度, t_4 为冷流体进口温度, $^\circ\text{C}$; A 为套管式换热器的有效换热面积, m^2 ; Q 为换热量, KJ ;

通过以上(1)至(7)即可计算出污垢热阻值 R_f 。

直接称重法是指对在不同时刻对实验段进行称重, 用称重获得的质量增量来反映污垢生长情况的方法。污垢的质量增量 Δm 从污垢沉积量上反映了污垢特性。

$$\Delta m_n = m_n - m_0 \quad (8)$$

其中, Δm_n 为第 n 次称量相对于光管时的质量增量, g ; m_n 为第 n 次称量实验段的质量, g ; m_0 为实验段为洁净光管时的质量, g ; n 表示称量的次数。

3. 实验结果与分析

3.1. 热循环工质入口温度对于混合污垢的影响

在冷循环流体温度为 14°C , 流速为 0.7 m/s 的条件下, 对流速为 0.2 m/s 的人工配置混合溶液 F 在不同温度(即实验组①②③)下实验, 得出三组数据, 分别如图 3 所示。实验发现, 经过一定的时间不同热循环入口温度条件下污垢热阻均达到渐近值, 并且随着入口温度的不同污垢热阻渐近值与达到污垢热阻渐近值的时间呈一定规律变化。当入口温度为 21°C 时, 污垢热阻渐近值为 $1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{w}^{-1}$, 并经过 60 h 达到污垢热阻渐近值; 入口温度为 26°C 时, 经过 40 h 达到污垢热阻渐近值 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{w}^{-1}$; 入口温度为 31°C 时, 经过 37 h 达到污垢热阻渐近值 $0.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{w}^{-1}$, 故随着热循环入口温度增加, 污垢热阻渐近值减小, 并且达到污垢热阻渐近值的时间缩短, 对于结垢速率的影响可以忽略不计。

随着热循环入口温度的增加, 一方面增加了人工配制混合溶液中铁细菌的生物活性, 使其更易在换热器表面生长繁殖, 增加了混合污垢中的微生物污垢成分; 另一方面, 因为二氧化硅颗粒的存在, 有效降低了人工配制混合溶液的粘度, 使二氧化硅颗粒不易在换热器表面沉积, 减少了混合污垢中的颗粒污垢成分。实验数据表明, 增加入口温度使得污垢热阻渐近值降低, 所以在污垢热阻上温度的增加对于微生物污垢的影响小于颗粒污垢的作用, 总体上使得混合污垢热阻降低, 并且由于混合污垢热阻渐近值降低, 达到污垢热阻渐近值的时间也缩短。

3.2. 冷循环水浴入口温度对于混合污垢的影响

在热循环入口温度为 26°C ，流速为 0.2 m/s 的条件下，对不同冷循环流体入口温度(即实验组②④⑤)下流速为 0.7 m/s 的冷循环流体进行实验，得出三组实验数据如图 4 所示。根据实验数据发现，随着冷循环入口温度增加，达到污垢热阻渐近值的时间增加，而对污垢热阻渐近值影响较小，对于初始的污垢热阻几乎没有影响。

增加冷循环入口温度使冷却侧温度升高，由于微生物对于温度的敏感度高，温度的升高对于微生物生长和依附有较大的影响，铁细菌更易于附着在换热器表面，并且微生物的生长周期增长，故会出现到达污垢热阻渐近值时间延长的现象；然而，只改变冷循环侧温度，对于人工混合溶液中颗粒污垢影响较小，即并未影响混合工质的粘度以及颗粒的运输程度，并且与微生物污垢热阻相比，颗粒污垢热阻较大，所以升高冷循环侧入口温度并没有对混合污垢热阻渐近值表现出明显的规律性影响。

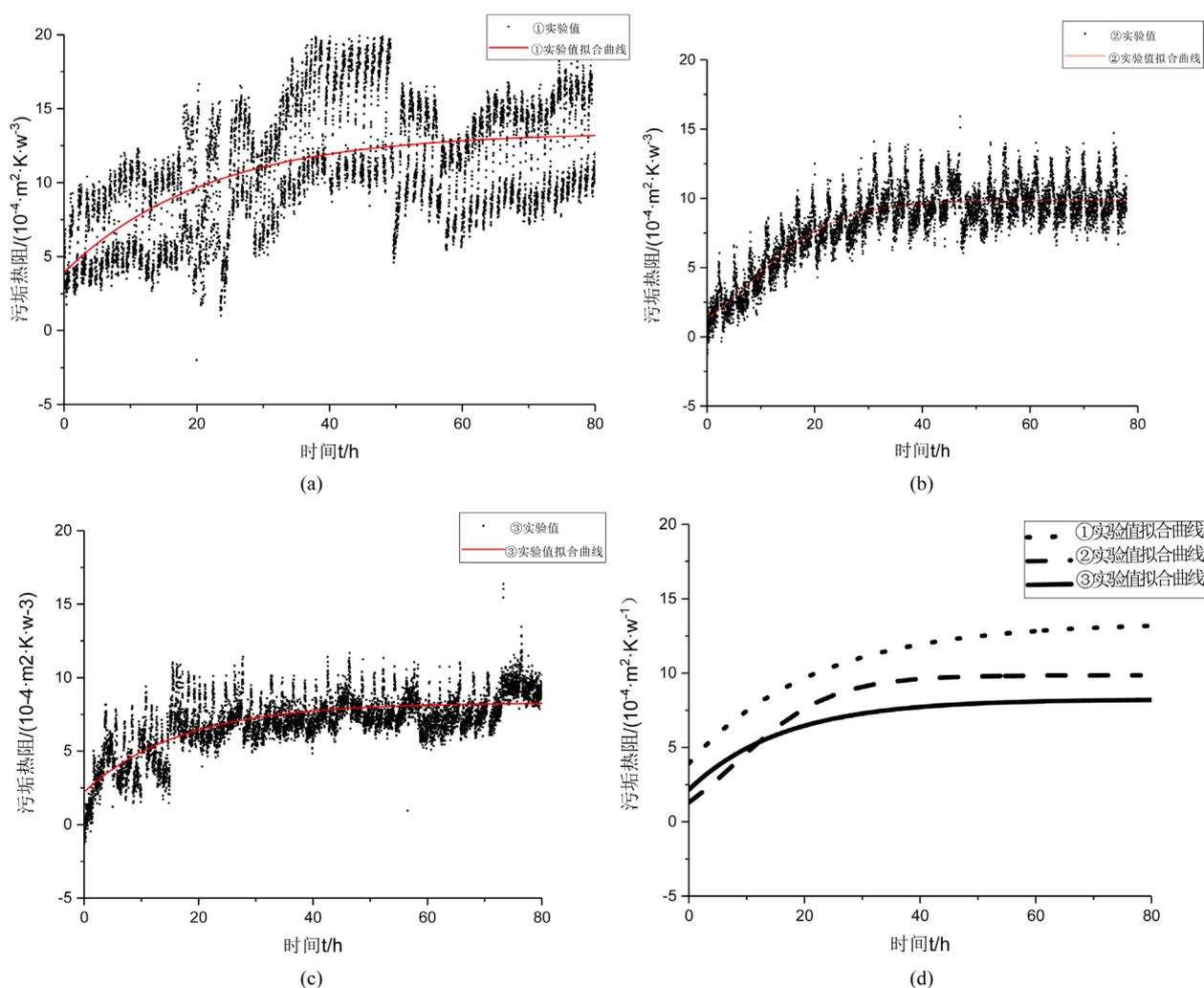


Figure 3. (a) The change of fouling resistance with time when the temperature of the thermal cycle is 21°C ; (b) The change of fouling resistance with time when the temperature of the thermal cycle is 26°C ; (c) The change of fouling resistance with time when the temperature of the thermal cycle is 31°C ; (d) Experimental fitting curve of thermal resistance at different thermal cycle inlet temperature

图 3. (a) 热循环入口温度为 21°C 时污垢热阻随时间变化值; (b) 热循环入口温度为 26°C 时污垢热阻随时间变化值; (c) 热循环入口温度为 31°C 时污垢热阻随时间变化值; (d) 不同热循环入口温度污垢热阻实验拟合曲线

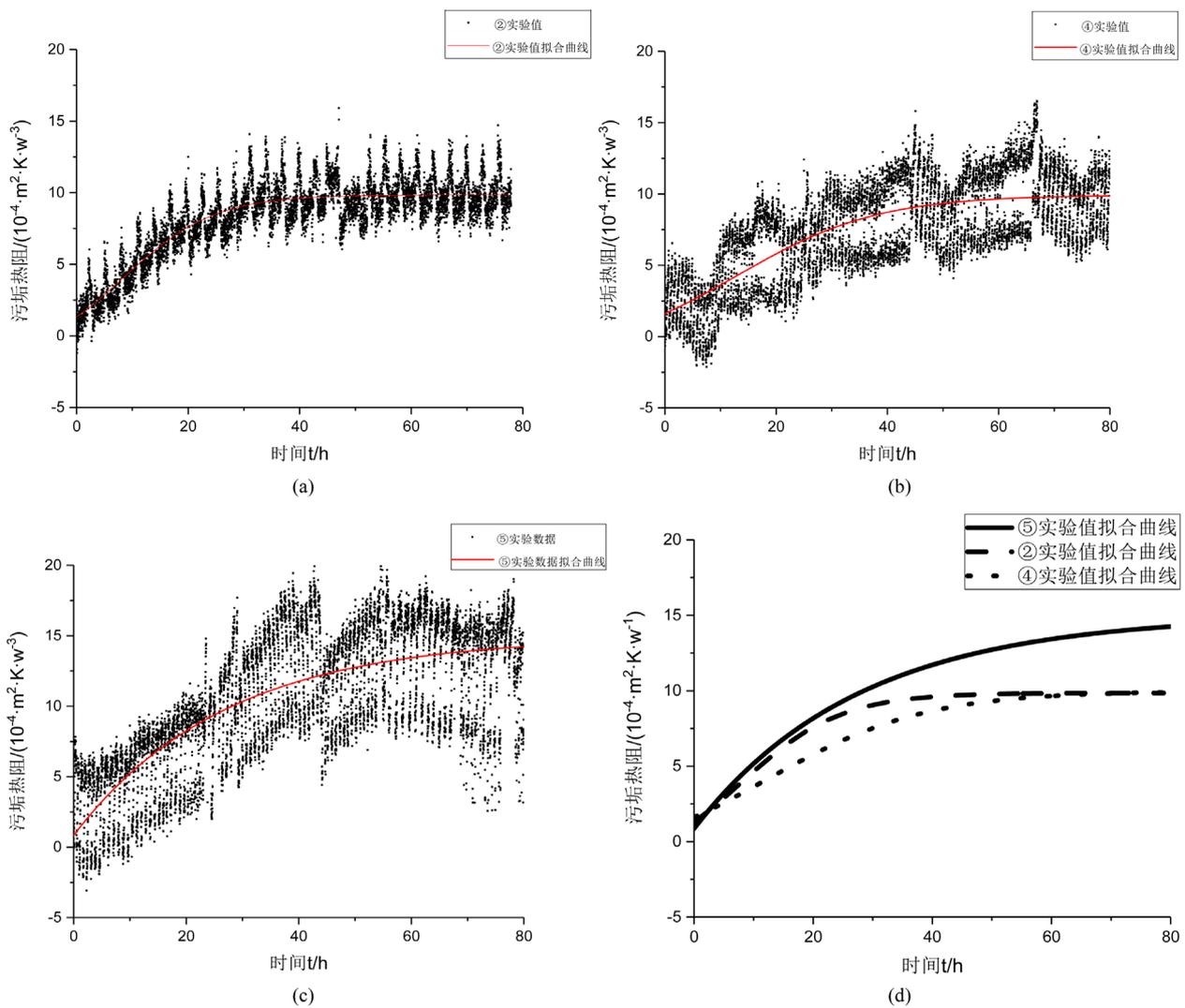


Figure 4. (a) The change of fouling thermal resistance with time when the cold cycle inlet temperature is 14°C; (b) The change of fouling thermal resistance with time when the cold cycle inlet temperature is 16°C; (c) The change of fouling thermal resistance with time when the cold cycle inlet temperature is 18°C; (d) Experimental fitting curve of temperature fouling resistance test at different cold cycle inlet temperature

图 4. (a) 冷循环入口温度为 14°C 时污垢热阻随时间变化值; (b) 冷循环入口温度为 16°C 时污垢热阻随时间变化值; (c) 冷循环入口温度为 18°C 时污垢热阻随时间变化值图; (d) 不同冷循环入口温度污垢热阻实验拟合曲线

3.3. 温度对于污垢质量的影响

对人工配制溶液 F 在不同热循环工质温度条件下实验段的质量 m_n 进行称量, 可以得到实验段不同条件下的污垢增量 Δm_n , 污垢增量 Δm_n 随时间变化柱状图如图 5(a) 所示。由图发现, 循环温度越高, 达到污垢增量平衡所需时间越短, 污垢增量越少, 这是因为升高温度增加了混合工质中颗粒成分的流动性, 使得混合污垢中颗粒污垢成分减少, 微生物成分增加, 但是由于颗粒污垢与微生物污垢相比密度较大, 从污垢增量即表现出总增量 Δm_n 减小的趋势。

对人工配制溶液 F 在不同冷循环温度条件下实验段的质量 m_x 进行称量, 可以得到实验段不同条件下的污垢增量 Δm_x , 污垢增量 Δm_x 随时间变化柱状图如图 5(b) 所示。由图可知, 较高的水浴温度可以增加达到污垢增量渐近值的时间, 与根据污垢热阻法得出的结论大体一致; 并且水浴温度主要通过影响混合

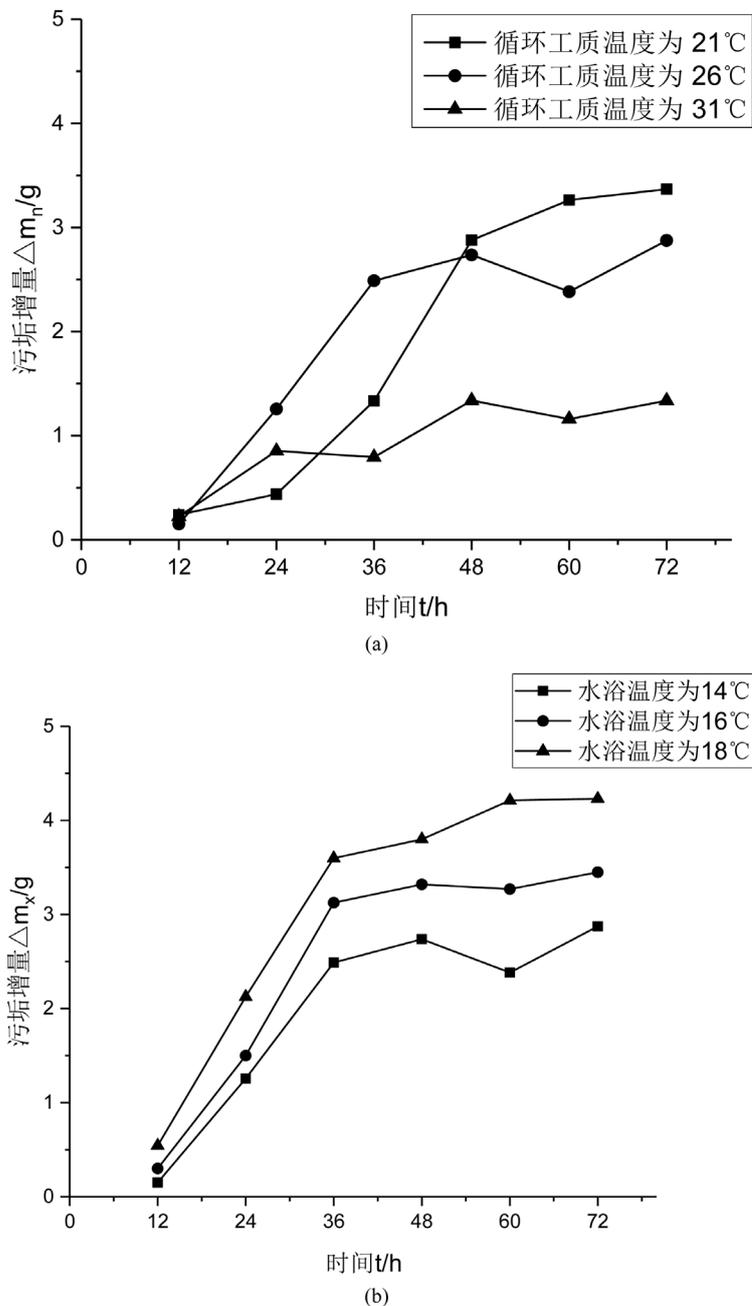


Figure 5. (a) Increment line graph of mixed fouling at different time of different thermal cycle; (b) Increment line diagram of mixed fouling at different time in different cold cycle water bath temperature

图 5. (a) 不同热循环温度下不同时刻混合污垢增量折线图; (b) 不同冷循环水浴温度下不同时刻混合污垢增量折线图

污垢中的微生物成分改变污垢增量, 由于微生物污垢含水量高、密度小, 所以表现为增加循环水温度, 污垢增量的变化量较小。

4. 结论

1) 温度对于以二氧化硅和铁细菌为代表的混合污垢影响明显, 并且呈现一定规律, 尤其是混合污垢热阻渐近值以及达到渐近值的时间, 其中微生物污垢成分在此变化规律中作用明显。虽然热循环温度和

冷循环温度对于混合污垢热阻的影响略有不同, 但均表现出明显的趋热性。

2) 冷热循环温度对于混合污垢增量影响明显, 且与污垢热阻法得出结论大致相同, 但是由于微生物含水量高, 密度较小等因素, 改变冷循环温度对于混合污垢增量影响较小, 因此综合考虑混合污垢中各部分的性质对于混合污垢研究有重要作用。

参考文献 (References)

- [1] Hasan, B.O., Nathan, G.J., Ashman, P.J., *et al.* (2012) The Effects of Temperature and Hydrodynamics on the Crystallization Fouling under Cross Flow Conditions. *Applied Thermal Engineering*, **36**, 210-218. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.027>
- [2] Al-Otaibi, D.A., Hashmi, M.S.J. and Yilbas, B.S. (2014) Fouling Resistance of Brackish Water: Comparison of Fouling Characteristics of Coated Carbon Steel and Titanium Tubes. *Experimental Thermal & Fluid Science*, **55**, 158-165. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.03.010>
- [3] 徐志明, 陈洋, 刘坐东, 等. Ca^{2+} 环境下板式换热器微生物污垢特性[J]. 化工机械, 2015, 42(5): 615-619.
- [4] 刘坐东, 陈洋, 王景涛, 等. Ca^{2+} 环境下水质参数变化对板式换热器铁细菌微生物污垢的影响[J]. 化工进展, 2016, 35(10): 3344-3349.
- [5] 陈霄, 杨启容, 张宁, 等. 城市污水换热设备中铁细菌生长特性实验研究[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2016, 29(4): 34-37.
- [6] 关晓辉, 崔长龙, 曹生现, 等. 不锈钢缩放管中典型致垢微生物致垢能力[J]. 化工进展, 2013, 32(6): 1429-1434.
- [7] 徐志明, 王景涛, 王宇航, 等. 温度对纳米氧化镁颗粒污垢特性的影响[J]. 热科学与技术, 2016, 15(1): 52-58.
- [8] 徐志明, 王景涛, 王磊, 等. 交叉缩放椭圆管颗粒污垢特性的实验分析[J]. 化工进展, 2014, 33(4): 831-836.
- [9] 徐志明, 张仲彬, 孙灵芳, 等. 析晶与颗粒混合污垢的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(5): 853-855.
- [10] 车海燕, 徐章法. 敞开式循环冷却水系统中的微生物及其控制[J]. 上海化工, 2005, 30(6): 4-7.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-6122, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: japc@hanspub.org