

热阻法管内污垢生长特性试验研究

大连理工大学 张吉礼[☆]

中建国际建设有限公司 曹达君

哈尔滨工业大学 马志先

摘要 简要介绍了热阻法换热管内污垢生长特性试验台及试验原理,详细讨论了试验方案。试验研究了新管道内污垢首次生长特性和经过不同除污措施后管内污垢再次生长特性,发现新管道内污垢呈线性和指数函数渐进性双阶段首次生长特性,除污后管内污垢呈指数函数渐进性再次生长特性。结果表明,在试验水质下,对于新管道,经过 7 d 左右管内污垢就可生长到最大厚度;对于除污后管道,经过 2 d 左右管内污垢即可达到最大厚度。

关键词 热阻法 换热管 污垢生长 试验

Experimental study of growth characteristics of fouling in pipes by thermal resistance method

By Zhang Jili[★], Cao Dajun and Ma Zhixian

Abstract Briefly presents the test-bed and the experimental principle for monitoring the growth characteristics of fouling in heat exchange pipes by thermal resistance method, discusses the experimental scheme in detail. Experimentally studies growth characteristics of fouling both in new pipes and in used pipes treated by different de-fouling means. Discovers two stage of growth characteristics of fouling in new pipes, linearity and exponential, and re-growth characteristics of fouling in used pipes, exponential. The results show that it almost takes 7 days for fouling to grow up to the maximal thickness in the new pipes, but only 2 days to re-grow up to that scale in used tubes under the experimental water quality conditions.

Keywords thermal resistance method, heat exchange pipe, growth of fouling, experiment

[★] Dalian University of Technology, Dalian, China

①

0 引言

软泥、泥垢和硬垢在空调水系统中普遍存在。污垢的存在导致了换热设备传热性能下降,会将人们对换热管所做的任何强化换热的努力都化为乌有^[1-3]。污垢的存在增加了设备的投资,在设计时不得不加大换热面积,一般要加大 30%~40%^[4]。污垢的存在带来了巨大的经济损失,1984 年美国由换热器污垢引起的经济损失高达 80 亿~100 亿美元,占其国民生产总值的 0.28%~0.35%^[5-6]。在我国,每年因为污垢所造成的冷却设备费用增加、水费损失、制冷机运行费用增加总计达到 30 亿元之多^[7-9]。鉴于上述原因,非常有必要研究换热管除污防垢技术。防垢和除垢的前提是对管内污垢生长特性的认知。1959 年, Kern 和 Seaton 用污垢热阻来描述污垢生长特性,提出了污垢分析微分

模型^[10-11],即污垢热阻随时间的变化率取决于沉积率和剥蚀率,该模型为后来污垢特性的研究奠定了理论基础。随后,其他研究者在此模型的基础上,分别针对颗粒污垢、析晶污垢、腐蚀污垢、化学反应污垢、生物污垢、凝固污垢和食品污垢等提出了相应的污垢热阻预测模型,在这些模型中,不同类型的污垢在不同的假设条件下,沉积率和剥蚀率的具体表达式不同^[12]。自 1992 年起, Zubair 和 Sheikh 等人引入概率分析方法,系统地分析了污

①[☆] 张吉礼,男,1969 年 10 月生,博士,教授,博士生导师
116024 大连理工大学土木水利学院建筑环境与设备工程研究所

(0411) 84707753

E-mail: zhangjili@hit.edu.cn

收稿日期:2008-03-13

一次修回:2008-07-25

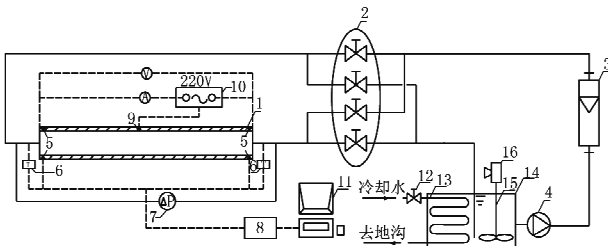
二次修回:2009-09-03

垢热阻随时间的变化规律,将污垢热阻随时间的变化规律归纳为线性、幂律、降幂和渐进四类增长形式,提出了污垢预测概率模型^[13-16]。该模型打破了原来不同种类污垢之间的界限,具有普适性意义,能够直观、形象地描述各类污垢的生长规律。随着我国对空调系统实际运行能效的重视,以及污水源热泵系统在我国推广和应用,研究换热管内污垢生长特性、形成机理和变化规律,对提高我国冷水机组运行能效、有效地防污除垢(不一定是硬垢)具有重要的理论价值和实际意义。

污垢生长特性的监测方法分热力学法和非热力学法,前者包括污垢热阻法和温差监测法,后者包括直接称重法、厚度测量法、压降测量法、放射性技术、光学法、超声脉冲反射法和钙离子浓度法等^[12]。尽管压降测量法是所有污垢监测方法中操作最为简便的,但为便于观察污垢在生长初期及生长过程中的变化,本文拟采用污垢热阻实时监测技术,研究给定污水水质的污垢生长特性,为进一步开发冷凝器换热管内除污防垢技术提供试验和理论研究基础。

1 热阻法管内污垢生长特性试验台及试验原理

热阻法管内污垢生长特性试验台原理如图 1 所示。试验用污水从水箱 14 出来后,经过循环水泵 4、四通换向阀组 2 进入试验段 1,在试验段 1 中被加热后返回水箱。



1 换热管 2 四通换向阀组 3 转子流量计 4 循环水泵 5 管壁测热电偶 6 换热管进出口流体测热电偶 7 U 形管差压计 8 热电偶数据采集器 9 保温层内表面测热电偶 10 温控仪 11 计算机 12 水流量调节阀 13 冷却盘管 14 水箱 15 搅拌器 16 搅拌电动机

图 1 热阻法污垢生长特性试验台原理图

试验管段总长为 4 m,内径为 12 mm,外径为 16 mm,内外均有环形肋片,肋片高度为 0.5 mm,如图 2 所示。换热管外包有绝缘层,然后是电热丝加热层和保温层。

温度测量采用铜-康铜热电偶,通过数据采集器连接计算机,实现温度实时在线监测。采用转子

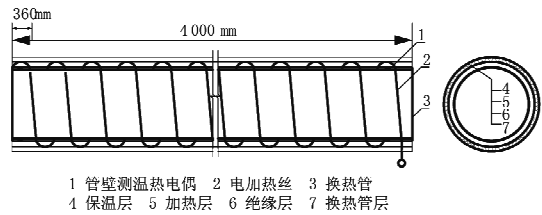


图 2 试验管段结构示意图

流量计测量水流量,采用 U 形管压差计测量试验管段压降,采用 PID 温控仪实现对绝缘层表面温度的安全控制。

污垢形成前后换热管总热阻变化为

$$R_f = \frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_0} \quad (1)$$

式中 K_f 为有垢时换热管总传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; K_0 为无垢时换热管总传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

根据式(1),首先测量出无垢状态下换热管的总传热系数 K_0 ,然后根据换热所要求的工况,监测污垢逐渐形成过程中不同时间换热管的总传热系数 K_f ,即可由式(1)计算出相应工况下的污垢热阻变化量,由此在线测得污垢热阻随时间的变化关系,即在给定工况下的污垢生长特性。采样周期为 5 s,根据采集数据,系统快速计算出污垢热阻值,从而实现了试验过程换热管内污垢热阻实时生长过程的监测和评价。

2 热阻法管内污垢生长特性总体试验方案

管内污垢生长特性试验包括试验污水的配制、污水浓度测量、试验和数据采集等。

考虑到空调冷却水系统实际水质性质,试验用污水采用自来水和黏性较大的黄土配制(试验用污水也可采用实际空调冷却水)。黄土经碾细、筛分后加入自来水中,搅拌均匀。采用扫描电镜对配制污水中颗粒的粒径分布进行了测试,结果见表 1^[17]。

表 1 试验污水中颗粒物粒径分布^[17]

$d/\mu m$	N (单位容积中颗粒物个数)/(个/mL)	$d/\mu m$	N (个/mL)
<2.00	2 435.1	12.41~16.11	10.6
2.00~2.60	1 602.1	16.11~20.91	4.8
2.60~3.37	1 021.9	20.91~27.14	2.6
3.37~4.37	476.0	27.14~35.23	1.0
4.37~5.68	164.9	35.23~45.73	0.6
5.68~7.37	67.3	45.73~59.36	0.2
7.37~9.56	38.2	59.36~77.04	0
9.56~12.41	21.0	77.04~100.00	0

从表 1 可以看出,试验用污水颗粒物粒径主要集中在 $0\sim 5.68\ \mu\text{m}$,且大部分在 $3.37\ \mu\text{m}$ 以下。这种杂质性质与空调冷却水杂质性质相近,不含有大的杂质。

随着试验过程中加热系统的持续运行,污水浓度将会逐渐增大。为了保证试验过程中污水浓度的恒定,需要每天测试。测量方法为,每天取污水水样 150 mL,倒入烧杯中加热烘干,然后称量烘干后泥砂的质量,再除以试验污水体积,即为试验污水浓度。表 2 为每日测得的试验污水浓度值^[17]。

表 2 试验周期内每日试验污水浓度值^[17]

测量时间	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	第 5 天	第 6 天
污水质量浓度/ (kg/m^3)	4.30	4.39	4.38	4.39	4.35	4.40
测量时间	第 7 天	第 8 天	第 9 天	第 10 天	第 11 天	第 12 天
污水质量浓度/ (kg/m^3)	4.37	4.37	4.39	4.39	4.38	4.38

注:污水质量浓度平均值为 $4.37\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

为减少试验工作量,控制污水流速为 $0.83\ \text{m}/\text{s}$ 。试验系统全天 24 h 运行,考虑用电安全,数据监测系统随加热系统一起只在 10:00—22:00 运行,即试验系统连续不间断运行,水中的杂质在管路不断沉淀、形成污垢,而仅在给定时间内进行热阻监测。试验中绝缘层表面温度控制在 $250\ ^\circ\text{C}$,试验管段水的进出口温差控制在 $7\ ^\circ\text{C}$ 以上,电加热功率为 $4\ \text{kW}$,温度测量精度为 $0.2\ ^\circ\text{C}$ 。污垢热阻最大相对误差范围为 $13.4\%\sim 13.7\%$ ^[17]。

3 管内污垢首次生长特性试验结果

图 3 为 2006 年 9 月 27 日 10:00 到 10 月 4 日 12:00,试验系统不间断运行 170 h,污垢生长的实际有效时间为 97.25 h 的试验结果^[17]。为便于分析,图 3 横坐标轴的时间为热阻监测时间。

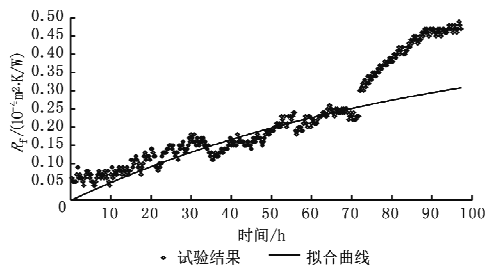


图 3 污垢热阻随时间变化试验结果^[17]

由图 3 可以看出:

1) 试验污水与换热面一经接触,就立即可测量到污垢热阻,其大小约为 $0.06\times 10^{-4}\ \text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ (所用试验管段为新管段,试验前可以认为污垢热

阻为零),这与试验用污水中泥砂浓度较大 ($4.37\ \text{kg}/\text{m}^3$)、水极不干净有关;另外,试验管具有内肋片,在肋间容易形成污垢。

2) 污垢生长过程明显表现为两个阶段特性,一是约前 70 h 内污垢热阻随时间呈线性增长趋势,二是约后 30 h 内污垢热阻随时间呈指数函数上升趋势,且后期增长速度比前期快,并很快达到其最大值,约为 $0.5\times 10^{-4}\ \text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 。

4 除污后管内污垢再次生长特性试验

图 4,5 分别显示了试验管段经过自来水高速反冲洗除污和采用游离式弹簧污水反冲洗除污后管内污垢再次生长的污垢热阻随时间的变化曲线。

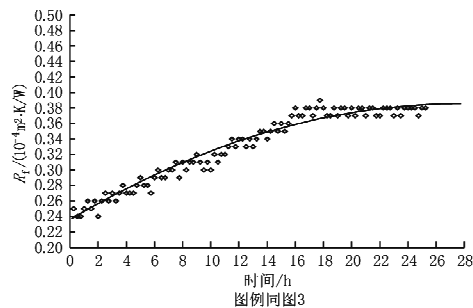


图 4 自来水高速反冲洗后污垢热阻随时间的变化规律

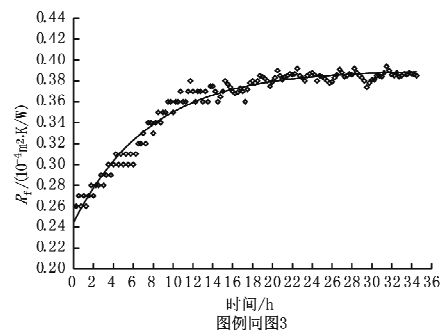


图 5 游离式弹簧反冲洗后污垢热阻随时间的变化规律

由图 4,5 可以看出,采用除污措施后,管内污垢再次生长特性和新管道内污垢首次生长特性有一定的区别,即线性生长过程不明显或已消失,只存在指数函数渐进生长过程。管内污垢层可以看成由易于采用除污措施除掉的附着层和难以除掉的污垢基层构成(二者的分界是模糊的,没有非常明确的分界线),污垢生长的线性特性反映了污垢基层的生长特性和热阻变化过程,指数函数的渐进特性则反映了污垢附着层的生长特性。对于新管道而言,污垢的生长首先是污垢基层的形成,然后是附着层的形成;对于除污后污垢再次生长过程,

主要是污垢附着层的形成过程。

5 结论

5.1 低肋铜质冷凝管新管道内的污垢生长特性呈现线性和指数函数渐进性双阶段首次生长特性,除污后管内污垢生长特性仅呈现指数函数渐进性再次生长特性。

5.2 在试验水质(泥砂浓度较大,为 4.37 kg/m^3)下,新管道约经过 7 d 管内污垢就可生长到最大厚度;对于除污后管道,经过 2 d 左右管内污垢即可达到最大厚度。即 1 台新的冷凝器在实际使用过程中,人们在其换热管传热面上所做的任何强化换热努力,都将因污垢(或泥垢)的存在而在短期内化为乌有,由此可见,空调水系统换热设备除污防垢措施的重要性。

5.3 管内污垢层由易于除掉的附着层和难以除掉的基层构成,污垢生长的线性特性反映了污垢基层的生长特性和热阻变化过程,而指数函数渐进性的生长特性则反映了污垢附着层的污垢生长特性。对于新管道而言,污垢的生长首先是污垢基层的形成,然后是附着层的形成;对于除污后污垢再次生长过程,主要是污垢附着层的形成过程。

另外,尽管管内污垢生长的线性和指数函数渐进性特性可以根据试验结果建立其统计学数学预测模型,但该类预测模型仅适用于给定的试验工况。要获得统一的污垢生长特性预测模型仍需要进行大量的试验研究工作。

参考文献:

- [1] 余德渊. 我国换热器研究及其工业化进程[R]. 北京: 化工出版社, 1988; 3-6
- [2] 雷学军. 中央空调系统清洗消毒与健康与节能的影响[J]. 建设科技, 2006(15): 18-21
- [3] 俞秀民, 俞天兰. 立式水冷器的改造[J]. 化工设计通讯, 1997, 23(2): 33-35
- [4] Thackery P A. The cost of fouling in heat exchanger plant[J]. Effluent and Water Treatment Journal, 1980, 20: 112-115
- [5] Garret-price B A, Smith S A, Watts R L, et al.

(上接第 32 页)

- [2] 何嘉鹏, 王东方, 王克金. 冷库大门的空气幕结构设计计算模型[J]. 南京建筑工程学院学报, 1999(2): 49-52
- [3] 何嘉鹏, 王东方, 韩丽艳, 等. 防烟空气幕二维数学模型[J]. 土木工程学报, 2003, 36(2): 104-107
- [4] 陈涛, 梅秀娟, 张文良. 地下建筑空气幕流量的计算

Fouling of heat exchangers, characteristics, cost, prevention, control and removal[M]. New Jersey: Noyes Publications, 1985

- [6] Van Nostrand W L, Jr Leach S H, Haluska J L. Economic penalties associated with the fouling of refinery heat transfer equipment[M]// Somerscales E F C, Knudsen J G. Fouling of heat transfer equipment. Washington: Hemisphere Publishing Corp, 1981: 619-643
- [7] 蒋少青, 俞秀民, 俞天兰, 等. 我国冷冻机组水冷器污垢经济损失的研究[J]. 中国井矿盐, 2003, 34(1): 38-40
- [8] 彭德其, 俞天兰, 刘跃平, 等. 水冷设备污垢损失和清洗效益的实测评价报告[J]. 株洲工学院学报, 2001, 15(5): 54-56
- [9] 支校衡, 俞秀民, 俞天兰. 水冷机组冷凝器污垢损失问题与在线自动清洗[J]. 化工进展, 2003, 22(7): 747-749
- [10] Kern D Q, Seaton R E A. Theoretical analysis of thermal surface fouling[J]. Chem Eng, 1959, 55(4): 258-262
- [11] Kern D Q, Seaton R E A. Surface fouling: how to limit[J]. Chem Eng, 1959, 55(6): 71-73
- [12] 杨善让, 徐志明, 孙灵芳, 等. 换热设备污垢及对策[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2004
- [13] Zubair S M, Sheikh A K, Shaik M N. A probabilistic approach to the maintenance of heat-transfer equipment subject to fouling[J]. Energy, 1992, 17(8): 769-776
- [14] Zubair S M, Sheikh A K, Budair M O, et al. A maintenance strategy for heat-transfer subject to fouling: a probalistic approach[J]. ASME J Heat Transfer, 1997, 119(3): 575-580
- [15] Sheikh A K, Zubair S M, Younas M, et al. Some remarks on the probabilistic basis for characterizing fouling data[M]// Bott T R, Melo L F, Panchal C B, et al. Understanding heat transfer fouling and its mitigateion. New York: Begell House Inc, 1999: 393-400
- [16] Zubair S M, Bilal A, Qureshi A. Probabilistic fouling and cost model for plate-and-frame heat exchangers[J]. Energy Research, 2006, 30(1): 1-17
- [17] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [18] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [19] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [20] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [21] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [22] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [23] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [24] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [25] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [26] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [27] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [28] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [29] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [30] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [31] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [32] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [33] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [34] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [35] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [36] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [37] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [38] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [39] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [40] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [41] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [42] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [43] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [44] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [45] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [46] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [47] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [48] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [49] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [50] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [51] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [52] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [53] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [54] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [55] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [56] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [57] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [58] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [59] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [60] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [61] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [62] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [63] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [64] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [65] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [66] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [67] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [68] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [69] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [70] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [71] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [72] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [73] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [74] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [75] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [76] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [77] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [78] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [79] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [80] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [81] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [82] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [83] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [84] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [85] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [86] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [87] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [88] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [89] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [90] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [91] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [92] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [93] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [94] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [95] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [96] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [97] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [98] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [99] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006
- [100] 曹达君. 壳管式换热器管内污垢生长及旋转换向反冲洗除污方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006