

平直斜翅管污垢特性研究

尤晓宽¹, 周志钢¹, 张华¹, 许华²

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2. 中国人民解放军空军济南航空四站装备修理厂, 山东 济南 250022)

摘要: 通过进行平直斜翅管和光管在不同碳酸钙浓度和流速下的动态结垢实验, 得出碳酸钙浓度、流体流速和管型对碳酸钙结垢过程的影响。实验结果表明: 碳酸钙溶液流速的增加主要造成污垢表面剥蚀的加剧, 从而使得结垢速率和结垢量减小, 流速减小一半, 则渐进污垢热阻值增加一倍多。相对于 0.5 和 2.0 mmol/L 而言, 碳酸钙浓度在 1.0 mmol/L 时管道表面初始结垢速率和结垢量最大, 后期由于溶液中浓度相似, 污垢热阻值逐渐接近。平直斜翅管相对于光管来说, 虽然其换热系数比光管要大, 但其阻垢性能却不如光管, 结垢速率和结垢量更多, 其渐进污垢热阻值约为光管的 1.6 倍。

关键词: 热工学; 碳酸钙; 析晶污垢; 斜翅管

中图分类号: TK 文献标识码: A
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.01.014

引言

相关资料表明, 工业上采用的换热器, 有超过 90% 以上的存在污垢沉积问题^[1]。这对于换热器的危害是相当严重的, 根据保守的估计, 发达国家每年因污垢而造成的损失约占 GDP 的 0.25%^[2]。而我国作为发展中国家工业技术落后, 因污垢而造成的损失更为严重^[3]。因此, 对换热器污垢特性的研究是十分有必要的。

为增强换热, 换热器采用的管型也由最初的光管而逐渐改为多种强化换热管型, 如螺旋槽管、波纹管、弧线管、缩放管、蛇管等多种形式。各种管型在清洁状态下都有较好的增强换热的能力, 而在存有污垢状态下, 各种管的换热性能优劣却需要根据其结垢量、污垢热阻等进行重新考核^[4]。在研究管型的换热特性的时候, 每个人所得的结论却并非总是一致, 甚至有时候研究结果还相互矛盾。Rabas 发现螺旋槽管比光管的结垢速率和污垢热阻都要大^[5], 刘金平也发现波纹管比光管更易结垢^[6], 污垢热阻导致其比光管强化换热作用有所减弱。而徐志明和刘震则发现强化换热管比光管的结垢速率要

低^[7-8], 污垢热阻要小, 也即是说强化换热管的阻垢能力要比光管强。Panchal 认为强化换热管的结垢特性与强化换热管的几何参数没有明显关系^[9], 而 Webb 的却研究发现强化换热管的几何参数会对结垢过程产生相应的影响^[10]。由此可见, 强化换热管结垢特性和换热特性受很多因素的影响, 其具体机理等仍需进行进一步的实验研究, 以期能找出规律, 得出一般性的结论, 指明其发展的方向。

本研究采用蒸馏水作为工质, 通过实验进行了平直斜翅管传热性能的测试, 并采用人工硬水作为工质, 进行了平直斜翅管和光管污垢性能的对比实验。

1 实验系统及原理

实验中所用强化换热管为平直斜翅管, 图 1 是局部放大图。其材料和几何参数如表 1 所示。实验段的管路长度为 1 m。实验系统如图 2 所示, 该系统由实验装置、测量装置和控制装置组成。其中实验装置的主体部分是由同心管路构成的套管换热器管路, 内管可拆卸, 以便更换不同管型进行实验; 管内流动的是热水, 管间流动的是碳酸钙溶液。在进行实验时, 套管管路流动的热水和碳酸钙溶液分别由水泵来驱动, 二者流动方向相反, 为逆流布置, 由于碳酸钙的负溶解度特性, 故析出后沉积在内管外壁面上。热水恒温水箱的温度用电加热器来控制, 碳酸钙恒温水箱温度用电加热器和制冷系统来控制。测量系统由电磁流量计 OPTIFLUX4100C 来测量热水流量和碳酸钙溶液流量。由铂电阻 Pt100 来测量工质的温度。铂电阻分别布置在实验段的内外管路进出口处, 测量的温度信号由数据采集仪 Agilent34970A 送入计算机并进行记录和存储。

其中换热热阻是根据以下等式所计算:

$$\Phi = kA \Delta t_m \quad (1)$$

收稿日期: 2014-09-24; 修订日期: 2014-11-12

作者简介: 尤晓宽(1989-), 男, 河北保定人, 上海理工大学硕士研究生。

式中: Φ —总换热量, W; k —总换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; A —采用管外侧面积, m^2 ; Δt_m —整个传热面积上的平均温差, $^{\circ}C$ 。其中:

$$\Phi = q_m c \Delta t \quad (2)$$

式中: Φ —采用热水侧换热量来计算, 因此 q_m —热水流量, m^3/h ; c —热水温度下的比热容, $J/(kg \cdot K)$; Δt —热水进出口温差。

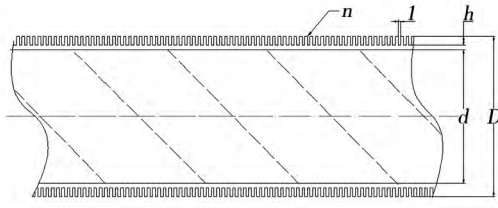


图 1 平直斜翅管

Fig. 1 Straight obliquely finned tube

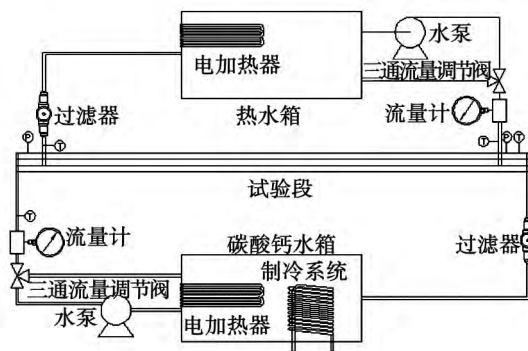


图 2 碳酸钙污垢实验系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of a $CaCO_3$ foul test system

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln \Delta t_{max} / \Delta t_{min}} \quad (3)$$

表 1 平直斜翅管几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of the straight obliquely finned tube

管型	材料	内径 d/mm	壁厚 δ/mm	外径 D/mm	外翅高度 h/mm	翅片数量 n/m	翅片间距 l/mm	螺旋角 $\theta/(^{\circ})$
光管	紫铜	10	1	12				
平直斜翅管	紫铜	10	1.35	12.7	0.65	1339	0.2	45

2 实验结果

2.1 流速对结垢的影响

实验所得平直斜翅管污垢热阻值随时间的变化曲线如图 3、图 4 和图 5 所示, 3 图分别为不同流速同种碳酸钙浓度下的污垢曲线。采用数据拟合方法

式中: Δt_m —逆流平均温差, 其中 Δt_{max} —进出口冷热水温差中的较大值, 而 Δt_{min} —进出口冷热水温差中的较小值。由以上各式即可算得管路换热的总热阻 $\delta = 1/k$, 将结垢时的总热阻 δ_1 ($(m^2 \cdot K)/W$) 减去清洁状态的总热阻 δ_0 即为换热器的污垢热阻 δ_f , 即

$$\delta_f = \delta_1 - \delta_0 \quad (4)$$

因污垢形态的复杂性, 忽略污垢形成而对管外表面积的影响, 在计算的过程中管路的外表面积均采用的是清洁状态时的管外表面积。

实验中采用的是 3 种碳酸钙浓度 (0.5、1.0、2.0 mmol/L), 4 种碳酸钙溶液在管间的流速 (0.05、0.1、0.2、0.3 m/s), 热水箱水温为 $60^{\circ}C$, 碳酸钙水箱溶液温度为 $30^{\circ}C$ 。碳酸钙溶液配比采用一次完全加入的方式, 具体为依次在水箱中加入 Na_2CO_3 和 $CaCl_2$ 溶液, 每隔一段时间采用 EDTA 络合滴定的方式测定碳酸钙溶液的浓度。每次实验停止后将换热管道取出, 在室温下晾干, 来观察其所结污垢的形貌状态, 并保存实验数据以进行后续的计算工作。且每次均用 0.001 mol/L 的盐酸溶液和蒸馏水来依次清洗碳酸钙水箱及相应管路, 以便下次实验使用。

实验误差来源于传感器造成的信号误差, 以及由于水流波动带来的偶然误差。电磁流量计的精度为 $\pm 0.3\%$, Pt100 的精度为 $\pm (0.15 + 0.002 |t|)^{\circ}C$ 。污垢热阻是流量和管路进出口的内外温度差的函数, 其中, 测量带来的误差占据了绝大部分, 但流体波动的误差也不能忽视^[11]。在达到污垢热阻渐进值的时候, 平直斜翅管的污垢热阻相对误差约为 $\pm 8.7\%$, 而对应的光管的污垢热阻相对误差约为 $\pm 6.1\%$ 。

得到各不同实验条件下的渐进污垢热阻值 R_f 。在流速分别为 0.05、0.1、0.2 和 0.3 m/s 时, 平直斜翅管的渐进污垢热阻值分别为 3.0×10^{-3} 、 1.1×10^{-3} 、 2.2×10^{-4} 和 9.4×10^{-5} ($m^2 \cdot K)/W$ 。随着流速增加一倍, 管道污垢热阻值降低一半以上。而当投放的试剂浓度不同的时候, 平直斜翅管的污垢热

阻渐进值都相近。

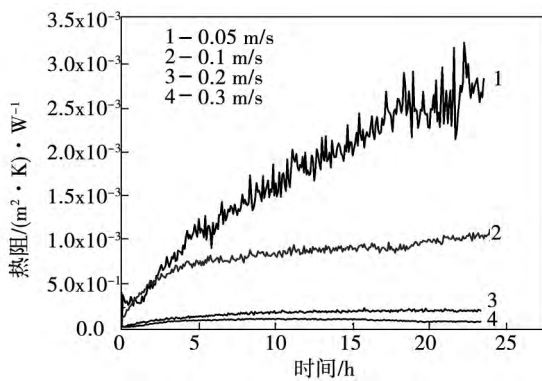


图 3 0.5 mmol/L 浓度下平直斜翅管表面污垢热阻变化

Fig.3 Changes of the fouling heat resistance on the surface of the straight obliquely finned tube at a concentration of 0.5 mmol/L

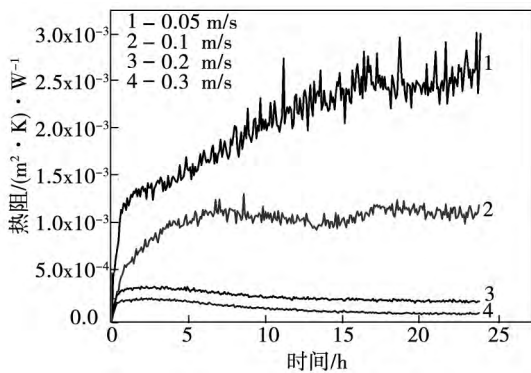


图 4 1.0 mmol/L 浓度下平直斜翅管表面污垢热阻变化

Fig.4 Changes of the fouling heat resistance on the surface of the straight obliquely finned tube at a concentration of 1.0 mmol/L

流速对污垢的形成有两个方面的影响,一是随着流速的增加,会增加溶液中分子的扰动,有利于溶液中的粒子、分子输送到壁面,使得溶液的结垢更为有利;二是随着溶液流速的增加,会增加溶液的冲刷力,即增加了对换热器管道表面污垢层的剥蚀剪切力,从而使得已形成的污垢剥落^[12]。在图3、图4和图5中,随着流速的增加,污垢热阻随之变小,且变化明显。说明此时随着流速的增加,剥蚀剪切力的增加占主导地位。即溶液内的均相成核速率基本不受流速的影响,而随着流速的增加,在换热管道表面的形成碳酸钙晶核的接触角随之变小,从而降低了

换热管道表面的碳酸钙异相成核速率^[13],因此造成碳酸钙在换热管道表面的结垢速率的下降。

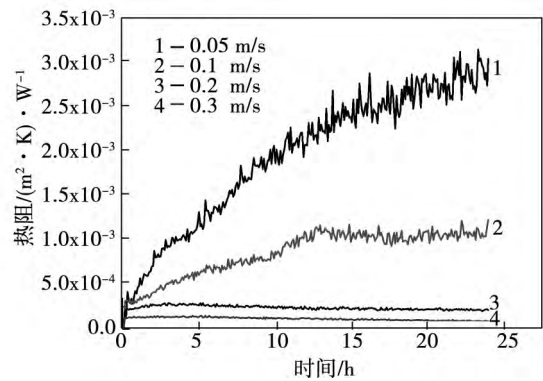


图 5 2.0 mmol/L 浓度下平直斜翅管表面污垢热阻变化

Fig.5 Changes of the fouling heat resistance on the surface of the straight obliquely finned tube at a concentration of 2.0 mmol/L

2.2 浓度对结垢的影响

实验所得平直斜翅管污垢热阻值随时间的变化曲线如图6、图7、图8和图9所示,四图分别为不同碳酸钙浓度同种流速下的污垢曲线。在实验的初始阶段,碳酸钙浓度为1.0 mmol/L时平直斜翅管的结垢速率和结垢量最大,而随着时间的推移,最终3种不同浓度下的平直斜翅管的污垢热阻达到相似的水平。当浓度较高流速也较高时,污垢热阻会有先增大再减小的趋势,而其它情况下污垢热阻一直处于增加状态,直到达到污垢热阻渐进值。

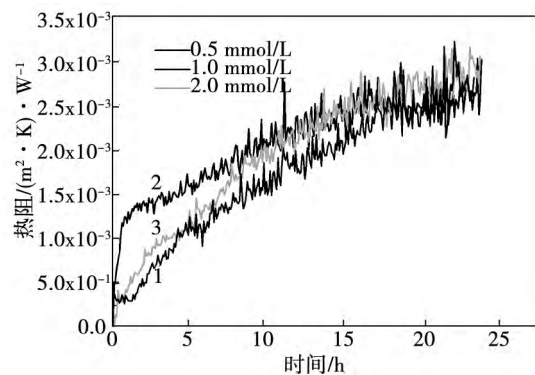


图 6 0.05 m/s 流速下平直斜翅管表面污垢热阻变化

Fig.6 Changes of the fouling heat resistance on the surface of the straight obliquely finned tube at a flow speed of 0.05 m/s

随着碳酸钙浓度的增加,金属表面异相成核数量增多,污垢增多,但表面晶体的尺寸却大幅度减小^[14]。随着碳酸钙浓度的增加,结垢量越多,污垢层越厚,但同时污垢的结构也越松散,越容易被剥落。碳酸钙初始浓度从 0.5 mmol/L 变为 1 mmol/L 的时候,受浓度影响为主,管道表面的初始结垢量增大。而当浓度升高到 2 mmol/L 的时候,形成的污垢层由于结构更加的松散,因此更容易被流体冲刷带走,流体的剥蚀剪切力对污垢的形成占主要因素,故反而此时的初始结垢量小于浓度为 1 mmol/L 时的结垢量。

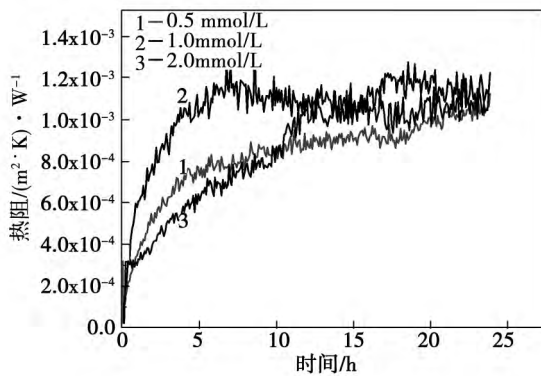


图 7 0.1 m/s 流速下平直斜翅管表面污垢热阻变化

Fig. 7 Changes of the fouling heat resistance on the surface of the straight obliquely finned tube at a flow speed of 0.1 m/s

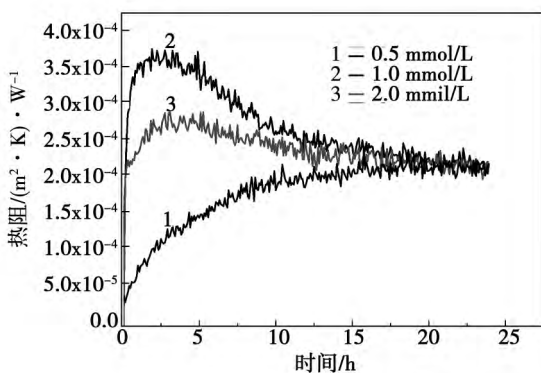


图 8 0.2 m/s 流速下平直斜翅管表面污垢热阻变化

Fig. 8 Changes of the fouling heat resistance on the surface of the straight obliquely finned tube at a flow speed of 0.2 m/s

碳酸钙基本不溶于水,实验所用 3 种人工硬水均已超出碳酸钙溶解度,虽有叶轮在水箱中搅拌,但依然不能全部溶解。投放试剂进入水箱后,碳酸钙初始浓度虽然不同,但均在约 3 h 内,从初始值快速下降到约 0.30 mmol/L,而后随着时间推移而逐渐下降,24 h 后约为 0.26 mmol/L。

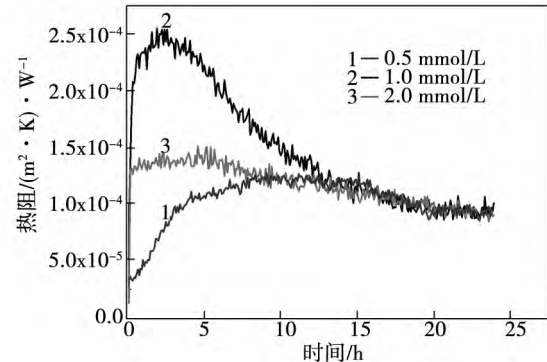


图 9 0.3 m/s 流速下平直斜翅管表面污垢热阻变化

Fig. 9 Changes of the fouling heat resistance on the surface of the straight obliquely finned tube at a flow speed of 0.3 m/s

当流速较低时,如在 0.05 和 0.1 m/s 时,流体对换热器管道表面的剥蚀剪切力较小,碳酸钙溶液浓度虽然在降低,但其结垢速率还是比剥蚀速率大,因此管道表面的污垢热阻值一直在增加,直到结垢速率和剥蚀速率相平衡。在流速较高时,如在 0.2 和 0.3 m/s 时,在实验的初始阶段,当加入 1.0 和 2.0 mmol/L 的碳酸钙试剂的时候,由 Na_2CO_3 和 CaCl_2 反应而大量析出的碳酸钙晶体不断沉积在管道表面,使得污垢热阻持续增加。但这些沉积的碳酸钙的结构并不稳定,很多位于翅片顶端,较易被剥离,而后随着溶液中的碳酸钙浓度迅速降低,碳酸钙的沉积速率急剧下降,低于了污垢的剥蚀速率,出现了污垢从管道表面剥离被流体带走,使得污垢热阻逐渐减小,最后沉积速率和剥蚀速率相平衡,污垢热阻渐趋稳定^[15]。在碳酸钙初始浓度为 0.5 mmol/L 时,其结垢速率一直较低,在肋基处形成较为稳定的污垢,不易被剥蚀,因此剥蚀速率一直较低,直到最后和逐渐下降的沉积速率达到平衡,污垢热阻渐趋稳定。

2.3 平直斜翅管和光管的对比

在相同实验条件下,进行了平直斜翅管和光管结垢状况的对比实验。图 10 为平直斜翅管和光管在碳酸钙浓度为 1.0 mmol/L 不同流速下的对比图,

图 11 为图 10 中下面 4 条曲线的放大图。在碳酸钙浓度为 1.0 mmol/L 的工况下,流速为 0.05、0.1、0.2 和 0.3 m/s 时,对应的光管的渐进污垢热阻值分别为 1.8×10^{-3} 、 6.0×10^{-4} 、 1.2×10^{-4} 、 7.1×10^{-5} ($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)/W。污垢热阻均在 18 h 左右达到渐进值。光管和平直斜翅管污垢特性具有相似的规律,流速升高同样会降低光管的污垢热阻。平直斜翅管的污垢热阻值约为光管的 1.6 倍。相对于光管来说,平直斜翅管的阻垢性能要差,其更利于污垢的形成。因为其管道外部的表面积比光管的大,增加了和碳酸钙溶液的接触面积,更有利于碳酸钙在壁面的吸附和沉积,同时斜翅管的表面增加了溶液的扰动,增加了溶液和壁面的粒子交换速率,而其凹陷型的结构更利于污垢的沉积且不易被流体冲刷带走,导致平直斜翅管比光管更易于结垢。

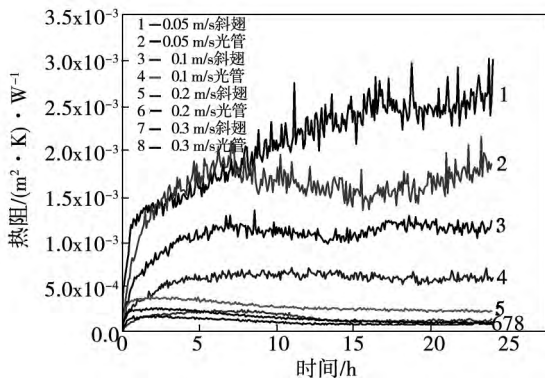


图 10 平直斜翅管和光管污垢热阻对比图
Fig. 10 Chart showing a contrast of the fouling heat resistance between the straight obliquely finned tube and a bare tube

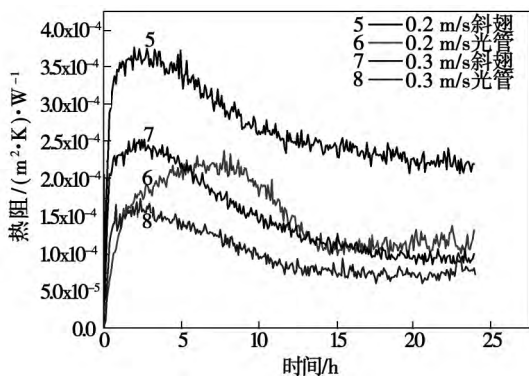


图 11 平直斜翅管和光管污垢热阻对比图
Fig. 11 Chart showing a contrast of the fouling heat resistance between the straight obliquely finned tube and a bare tube

3 结 论

(1) 流速对碳酸钙结垢的影响。流速增大会增加流体的扰动,从而增加碳酸钙向换热管道表面的沉积,但同时流速增大会增加污垢表面的剥蚀力,将污垢冲离管道表面。一般来说,后者作用大于前者,即流速增加会对污垢的形成起抑制作用。实验中流速降低一半,则管道表面污垢热阻值增加一倍多。

(2) 浓度对碳酸钙结垢的影响。实验初始阶段相对于 0.5 和 2.0 mmol/L,碳酸钙浓度为 1.0 mmol/L 时结垢速率和结垢量最大。在实验中后阶段,溶液中的碳酸钙浓度相类似,最后形成的污垢热阻值相接近。

(3) 管型对碳酸钙结垢的影响。相比于光管,平直斜翅管的换热面积增加,使得其初始阶段异相成核速率增加,结垢量增加,并且其凹陷型结构使得污垢更容易在管路上聚积和更难被冲刷,因此其污垢热阻渐进值比光管的大,二者之比约为 1.6。平直斜翅管比光管更易结垢。

参考文献:

[1] Maria Valeria DeBonis, Gianpaolo. Conjugate fluid flow and kinetics modeling for heat exchanger fouling simulation [J]. International Journal of Thermal Sciences. 2009, 48: 2006 - 2012.

[2] Steinhagen R, Steinhagen H M, Maani K. Problems and costs due to heat exchanger fouling in New Zealand industries [J]. Heat Transfer Engineering. 1993, 14(1): 19 - 30.

[3] 徐志明, 杨善让, 郭淑青等. 电站锅炉污垢费用估算[J]. 中国电机工程学报. 2004, 24(2): 196 - 200.

XU Zhi-ming, YANG Shan-rang, GUO Shu-qing, et al. Estimation of the cost for removing the foul of utility boilers [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2004, 24(2): 196 - 200.

[4] 盛健, 张华, 赵萍等. 不锈钢 304 和 316 表面 CaCO_3 析晶污垢生长特性[J]. 制冷学报. 2013, 34(1): 89 - 93.

SHENG Jian, ZHANG Hua, ZHAO Ping, et al. CaCO_3 precipitation foul growth characteristics on the surface of stainless steel 304 and 316 [J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(1): 89 - 93.

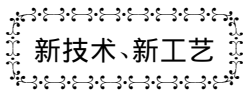
[5] Rabas T J, Panchal C, Sasscer D, et al. Comparison of power plant condenser cooling-water fouling rates for spirally indented and plain tubes [C]//ASME/AIChE/ANS national heat transfer conference. New York: ASME, 1991, 164: 29 - 37.

[6] 刘金平, 刘雪峰. 考虑污垢时内螺纹管冷凝器的经济性分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版). 2005, 33(1): 66 - 69.

LIU Jin-ping, LIU Xue-feng. Cost-effectiveness analysis of an inner

- threaded tube condenser when the fouling is being considered [J]. Journal of South China University of Science and Technology, 2005, 33(1): 66-69.
- [7] 徐志明, 甘云华, 张仲彬 等. 弧线管传热与污垢性能的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2004, 25(3): 496-498.
XU Zhi-ming, GAN Yun-hua, ZHANG Zhong-bin, et al. Experimental investigation of the heat transfer and foul characteristics of an arc tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(3): 496-498.
- [8] 刘震, 陈永昌, 邵兵华 等. 外螺旋槽管污垢特性的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32(1): 93-96.
LIU Zhen, CHEN Yong-chang, SHAO Bing-hua, et al. Experimental investigation of the foul characteristics of outer spirally slotted tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(1): 93-96.
- [9] Panchal C B, Sasser D S. Biofouling and corrosion fouling of plain and enhanced aluminum surfaces [C]//ASME/AIChE/ANS national heat transfer conference, 1991, 164: 9-15.
- [10] Ralph L Webb, Wei Li. Fouling in enhanced tubes using low-velocity cooling tower water part1: long-term fouling data [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(19): 3567-3578.
- [11] T. M. Paakkonen, M. Riihimäki, C. J. Simonson, etc. Crystallization fouling of CaCO₃-Analysis of experimental thermal resistance and its uncertainty [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55: 6927-6937.
- [12] 徐志明, 邱振波, 张仲彬. 钛管 CaCO₃ 污垢特性的实验研究 [J]. 热能动力工程, 2008, 23(5): 523-526.
XU Zhi-ming, QIU Zhen-bo, ZHANG Zhong-bin. Experimental investigation of the CaCO₃ foul characteristics of a titanium tube [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(5): 523-526.
- [13] 赵萍, 盛健, 张华. 平直斜翅管表面碳酸钙污垢初始阶段结垢特性 [J]. 热能动力工程, 2013, 28(5): 553-557.
ZHAO Ping, SHENG Jian, ZHANG Hua. Foul characteristics of the CaCO₃ foul on the surface of a straight and obliquely-finned tube in the initial stage [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2013, 28(5): 553-557.
- [14] 盛健, 张华, 赵萍. 热泵热水器中浓度和 pH 对不锈钢表面污垢生长的影响 [J]. 制冷学报, 2013, 34(4): 69-74.
SHENG Jian, ZHANG Hua, ZHAO Ping. Effect of the concentration and PH in the water heater of a heat pump on the foul growth on the surface of stainless steel [J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(4): 69-74.
- [15] 刘志琨, 王志荣, 陶汉中. 换热设备污垢研究进展 [J]. 化工进展, 2011, 30(11): 2364-2368.
LIU Zhi-kun, WANG Zhi-rong, TAO Han-zhong. Advances in the study of the foul in heat exchange equipment items [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30(11): 2364-2368.

(单丽华 编辑)



新技术、新工艺

小功率供暖锅炉利用富氧供风的技术 - 经济性

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.01.015

据《Энергетика》2013 年 11-12 月刊报道, 白俄罗斯国立技术大学的专家研究和分析了小功率供暖锅炉利用富氧供风所取得的经济效益。

分析表明, 用氧气代替空气供风或大量使用富氧空气使气体燃料燃烧温度提高 500-900 °C, 使火焰的辐射能力增加到原来的 1.5-2 倍, 燃烧产物的体积减少到原来的 1/2-1/3.5, 并相应地使燃烧产物带走的热量减少到原来的 1/2-1/3.5, 进一步提高锅炉装置效率。上述性能数据为燃料在炉内的燃烧过程中广泛应用氧气创造了先决条件。

提供了在热量发生器(例如 HEIZA 装置)炉膛内热力过程的计算模型, 实现了工作空间热交换过程的模拟, 试验数据证明了模型的适用性。

装置的数值模拟结果将可用来估算富氧供风的热效率。

(吉桂明 摘译)

平直斜翅管污垢特性研究 = **Study of the Characteristics of Foul on Smooth and Straight Obliquely-finned Tubes** [刊 汉] ZHOU Zhi-gang ,YOU Xiao-kuan ,ZHANG Hua (College of Energy Source and Power Engineering , Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) ,XU Hua (Equipment Repairing Factory ,Jinan No.4 Aviation Station ,Air Forces of the People's Liberation Army of China ,Jinan ,China ,Post Code: 250022) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(1) . -48 -53

Through a dynamic fouling test of a smooth and straight obliquely-finned tube and bare tube at various calcium carbonate concentrations and flow speeds ,obtained was the influence of the calcium carbonate concentration ,fluid flow speed and tube type on the fouling process of calcium carbonate. The test results show that to increase the flow speed of the calcium carbonate solution will mainly result in an increase of the peeling-off force of the foul on the tube surface ,thus decreasing the fouling speed and amount of foul produced ,when the flow speed will reduces by a half ,the thermal resistance value of the foul will increase by more than a fold. Relative to the calcium carbonate concentration of 0.5 mmol/L and 2.0 mmol/L ,when such concentration is 1.0 mmol/L ,the initial fouling speed and the amount of foul produced on the tube surface will be maximal and afterwards ,because of the similar concentration in the solution ,the thermal resistance value will gradually approach to each other. Albeit the smooth and straight obliquely-finned tube has a bigger heat exchange coefficient than the bare tube ,yet ,its foul-resistant performance is inferior to the latter ,thus resulting to a higher fouling speed and more amount of foul and its progressive foul thermal resistance value is about 1.6 times higher than that of a bare tube. **Key Words:** pyrology ,calcium carbonate ,crystallization foul ,obliquely-finned tube

两级气泡泵泵起现象的实验研究 = **Experimental Study of the Pump Start-up Phenomenon of a Dual-stage Bubble Pump** [刊 汉]JU Xiao-qun (College of Shipbuilding and Oceanological Engineering ,Harbin Institute of Technology (Weihai) ,Weihai ,China ,Post Code: 264200) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(1) . -54 -57

Through the establishment of a test rig ,with water and lithium bromide solution at various concentrations serving as the working medium ,a great deal of experimental study and analysis were conducted of the pump start-up phenomenon of a dual-stage bubble pump. It has been found that to heat by using the lithium bromide steam constitutes a factor to start up the second stage bubble pump and another factor for the starting-up is attributed to the bubbles formed by the pressure reduction and flashing of the intermediate solution. The pump start-up of the dual-stage bubble pump is relevant to the pressure difference of the intermediate solution and the first-stage lithium bromide