

强化蒸发管形成碳酸钙污垢的特性研究

王彦坤 张华 尤晓宽 盛健

(上海理工大学 制冷技术研究所, 上海 200093)

摘要: 以强化蒸发管结垢为研究对象, 研究 $\text{CaCl}_2 - \text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液在光管、平直斜翅管和锯齿斜翅管表面的结垢规律。采用确定初始成垢离子浓度的方法, 即该实验是在结垢过程中不再加入成垢离子, 针对几种不同类型的强化换热管及光管分别进行不同温度不同流速下的阻垢效果测试。实验结果表明: 1号平直翅片管形成的污垢最多, 且远远大于光管的污垢值; 2号平直翅片管形成的污垢最少; 锯齿形翅片管的污垢阻值与光管相近, 阻垢类型相似。

关键词: 强化传热; 碳酸钙污垢; 强化蒸发管

中图分类号: TQ051.62 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.05.006

引言

污垢会造成投资增加, 额外燃料费用、运行维护费用也将增加。仅从上述三方面考虑我国电力工业生产费用的增加, 而未考虑产量减少, 占地面积过多、厂房增设、引风机电耗增加, 煤和灰的运输等方面的费用, 则2000年锅炉和凝汽器结垢造成的损失费用就达100.08亿元, 约占GDP的0.11%。在换热设备中, 以强化管代替光管已成为普遍趋势。在表面洁净的状态下, 强化管相对光管来说, 换热系数有大幅提高。但在污垢状态下, 强化管的强化效果有所削弱, 其污垢性能有待研究。解决换热器的污垢问题对于节约能源具有重大意义。

污垢是指在与流体相接触的固体表面上逐渐积聚起来的那层固态或软泥状物质, 通常是以混合物的形态存在。固体表面从洁净状态到被污垢覆盖的过程, 即污垢的积聚过程, 也称为结垢^[1]。污垢的热导率很低, 一般只有碳素钢的十分之一到二十分之一。一旦换热表面形成污垢, 换热过程就会出现污垢热阻, 总换热系数降低, 有时污垢热阻甚至会是换热过程的主要热阻^[2]。为了使换热效果得到提

升, 如何抑制或者除去换热器表面的污垢而不损坏换热器本身, 成为强化换热的一项难题。

本实验对3种斜翅管和光管进行对比实验, 研究不同流体参数(流速、温度)下多种强化换热管对结垢前后强化传热比和污垢热阻以及结垢诱导期的影响, 以求获得更好的强化传热比和抗垢性能。

1 实验原理

将测试的换热管作为换热单元, 实验装置如图1所示。管外流动的是具有一定速度和一定温度的 $\text{CaCl}_2 - \text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液, 管内流动的是具有一定温度的去离子水, 流动方向与管外工质流相反。改变 $\text{CaCl}_2 - \text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液的流速、 $\text{CaCl}_2 - \text{Na}_2\text{CO}_3$ 溶液的温度及热水箱中水的温度, 分别测量得到套管式换热管内外进出口流体的温度以及流量, 并依此进行对比, 记录换热管热阻变化的情况。实验前后用 EDTA ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_8\text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 络合滴定法测量碳酸钙水箱内钙离子的浓度变化情况^[3], 并用 TESCAN VEGA II 扫描电子显微镜观察结垢微观情况。



图1 实验段3D结构图

Fig. 1 Three-dimensional drawing of the structure of the test section

实验中 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 应以等量混合。用蒸馏水分别配制一定量的 Na_2CO_3 溶液和 CaCl_2 溶液, 当热水箱中水到达设定温度且换热器稳定运行40

收稿日期: 2015-06-24; 修订日期: 2015-07-14

作者简介: 王彦坤(1992-), 男, 江西南昌人, 上海理工大学硕士研究生。

min 后先后加入上述两种溶液。

污垢热阻值可以根据测定污垢热阻法测定污垢生长情况:

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_0} \quad (1)$$

式中: U_f —污垢管总换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; U_0 —洁净换热管换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; R_f —污垢热阻值, $m^2 \cdot k \cdot W^{-1}$ 。

所以在无垢状态的总换热系数 U_0 和结垢状态的总换热系数 U_f 需要分别求出。

根据热平衡方程可知:

$$\Phi_0 = U_0 A_0 \Delta t_{m0} \quad (2)$$

$$\Phi_0 = \rho_w q_{c0} A_0 (t_{c00} - t_{ci0}) = \rho_w q_{h0} A_0 (t_{hi0} - t_{ho0}) \quad (3)$$

式中: A_0 —换热面积, m^2 ; Δt_{m0} —洁净管的平均换热温差, K ; Φ —传热量, W ; ρ_w —水的密度, kg/m^3 ; q_{c0} —冷水的质量流量, m^3/s ; t_{c00} —冷水的出口温度, K ; t_{ci0} —冷水的进口温度, K ; q_{h0} —热水的质量流量, m^3/s ; t_{ho0} —热水的出口温度, K ; t_{hi0} —热水的进口温度, K 。

$$\Phi_f = U_f A_0 \Delta t_{mf} \quad (4)$$

$$\Phi_f = \rho_w q_{cf} A_0 (t_{cof} - t_{cif}) = \rho_w q_{hf} A_0 (t_{hif} - t_{hof}) \quad (5)$$

式中: Δt_{mf} —污垢管的平均换热温差, K ; q_{cf} —冷水的质量流量, m^3/s ; t_{cof} —冷水的出口温度, K ; t_{cif} —冷水的进口温度, K ; q_{hf} —热水的质量流量, m^3/s ; t_{hof} —热水的出口温度, K ; t_{hif} —热水的进口温度, K 。

由式可得洁净换热管换热系数:

$$U_0 = \frac{\rho_w q_{h0} \pi d_0 l (t_{hi0} - t_{ho0}) \ln \frac{(t_{hi0} - t_{co0})}{(t_{ho0} - t_{ci0})}}{((t_{hi0} - t_{co0}) - (t_{ho0} - t_{ci0}))} \quad (6)$$

$$U_0 = \frac{\rho_w q_{hf} \pi d_0 l (t_{hif} - t_{hof}) \ln \frac{t_{hif} - t_{cof}}{t_{hof} - t_{cif}}}{((t_{hif} - t_{cof}) - (t_{hof} - t_{cif}))} \quad (7)$$

因此, 通过测量套管式换热器内外管进出口温度及流量, 可以求得无垢状态下的总换热系数和不同结垢时间下的总换热系数。

2 实验方法与装置

本实验采用污垢热阻与流动阻力动态测试台完成, 包括高低温恒温水箱及保持恒温的冷却系统和

电加热系统、循环水泵、三通阀、流量计、Pt100 铂电阻温度传感器及 Agilent 数据采集仪和上位机、过滤器和套管式换热管实验段组成。实验原理如图 2 所示。

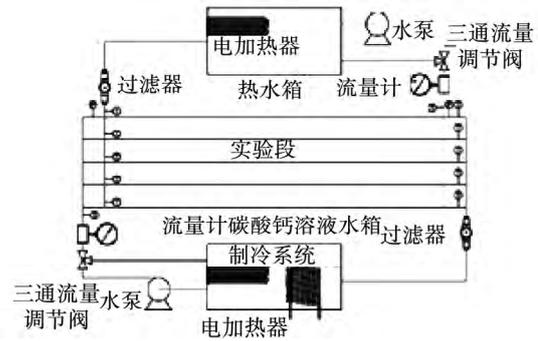


图 2 碳酸钙污垢实验系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of a $CaCO_4$ foul test system

热水箱具有电加热功能, 可以维持水箱内水温恒定, 实验过程中, 热水箱内的热水在水泵作用下流经强化换热管内部, 通过换热管管壁将热量传到管外, 之后回到热水箱内再次加热。

碳酸钙水箱同时具有电加热和降温功能, 实验开始前碳酸钙水箱内去离子水被加热到一定温度, 加入试剂后成为 $CaCl_2 - Na_2CO_3$ 溶液, 在水泵的作用下流经强化换热管外与实验段区域, 同时 $CaCl_2 - Na_2CO_3$ 溶液在强化换热管外壁面开始结垢并吸收由换热管内部传出的热量, 最后 $CaCl_2 - Na_2CO_3$ 溶液回到碳酸钙水箱并被冷却到初始温度。

实验段是一组并联安装的管道, 管道内部可以安装强化换热管, 实验段两端均有一个进水口和一个出水口, $CaCl_2 - Na_2CO_3$ 溶液从右端入口进入实验段在换热管外流动并从左端出口流出, 高温水从实验段左端入口进入在换热管内部流动并从右端流出。

实验开始前, 应清洗干净碳酸钙水箱及其管路, 确保无污垢残留。称量 21.567 g Na_2CO_3 粉末以及 22.586 g $CaCl_2$ 粉末, 分别在烧杯中溶水, 搅拌均匀。向碳酸钙水箱中加入 200 L 去离子水, 向热水箱中加入等量的去离子水, 开启电加热, 等温度达到设定温度, 即热水箱中水温 $60^\circ C$ 、碳酸钙水箱中水温 $30^\circ C$ 时开启碳酸钙水箱制冷系统, 维持水箱温度恒定, 打开实验段两端截止阀, 开启水泵并调节流量至热水 $0.9 m/s$, 冷水流量 $0.3 m/s$ 。

实验开始,通过铂电阻测量被测管两端内外流体温度,并5 min记录一组实验数据。稳定运行40 min后,向碳酸钙水箱中加入已配制好的Na₂CO₃溶液和CaCl₂溶液。运行5 min后,从碳酸钙水箱中移取V mL水置于锥形瓶中,滴加NaOH调制溶液的pH值约为12至13,加入少量钙指示剂,用EDTA标准滴定溶液滴定至溶液由酒红色变为纯蓝色,记录EDTA用量V₁,如此重复3次根据以下关系式可以算出钙离子的含量。

$$C_{Ca^{2+}} = (40.08C_{EDTA} \cdot V_1) / V \cdot 10^3 \quad (8)$$

运行24 h后实验结束,再次测定碳酸钙水箱中钙离子浓度。取出已做完实验的换热管,在室温下晾干,通过电子显微镜观察被测管外表面污垢形貌。保存被测管两端的温度数据以清洁状态和不同结垢状态下的总换热系数计算污垢热阻。分别使用0.001 mol/L的盐酸和蒸馏水清洗碳酸钙水箱及管路。

3 实验结果分析

本实验研究对象平直斜翅管和锯齿斜翅管能够打破和减薄边界层从而增强流体的扰动,因此对于结垢会产生两方面效果:一是促进结垢作用,即界面中成垢粒子浓度和污垢粒子浓度增大;二是抑制结垢作用,即增大换热面的流速梯度,并使水力摩擦系数增大,增强剥蚀剪力^[4]。在结垢的不同阶段,两种作用的强弱发生变化导致结垢速率、结垢诱导期、污垢热阻等参数发生变化。

结垢诱导期是成垢物质在换热管表面形成污垢的第一个阶段^[5]。从溶液与换热表面接触开始到污垢热阻重新回到零值这段时间称为诱导期^[6]。析晶污垢的诱导期包括^[7]:在过饱和溶液中建立拟稳态晶胚分布所需要的时间 t_i 、产生临界核所需的时间 t_n 和临界晶核长大到可测尺寸所需要的时间 t_g ,即 $t_D = t_i + t_n + t_g$ 。诱导期内,碳酸钙析晶污垢在表面附着成核,由于形成很多亚微米级晶核,表面粗糙度增加,对于边界层扰动和破裂有积极影响,在污垢热阻上该阶段会出现负污垢热阻;当晶核数量增大并相互连接时,污垢的生长速率增大,此时污垢自身导热系数对换热系数的影响超过污垢扰动产生的换热系数的影响,污垢热阻再次变为正值,换热效

果降低。由此可见,延长结垢诱导期对于有效抗垢和强化传热有着双重意义。

对于强化换热管,在表面洁净的状态下,其换热效果要好于光管。但对于不同管形的强化换热管,由于结垢性能的不同,对传热的影响也各有所异。在碳酸钙水箱温度30℃,热水箱温度60℃工况下,分析四种换热管的换热效果。碳酸钙浓度1 mmol/L,流速为0.1 m/s时,几种管道的污垢热阻变化曲线如图3所示。

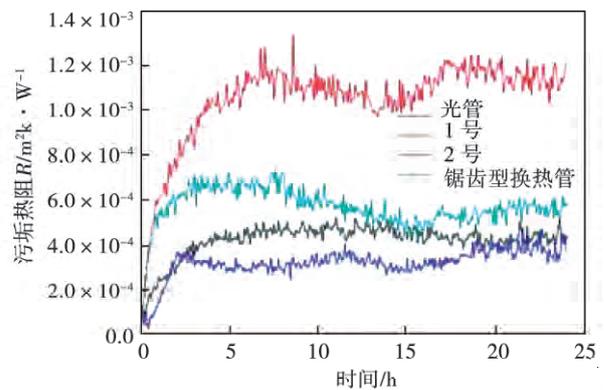


图3 流速为0.1 m/s时不同管型的污垢热阻

Fig. 3 Fouling heat resistance of various type tubes at a flow speed of 0.1 m/s

图4是在碳酸钙水箱温度30℃,热水箱温度60℃,碳酸钙浓度1 mmol/L,流速为0.2 m/s时,几种管道的污垢热阻变化曲线。

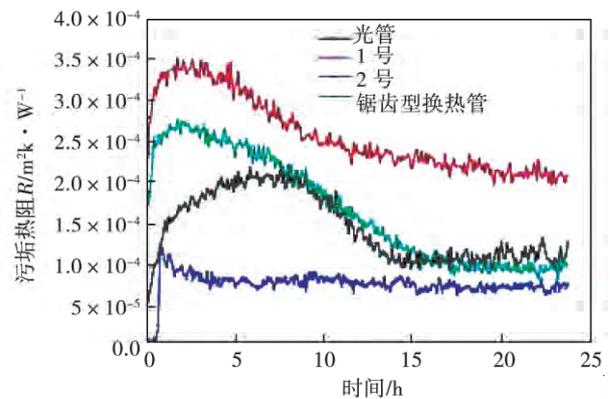


图4 流速为0.2 m/s时不同管型的污垢热阻

Fig. 4 Fouling heat resistance of various type tubes at a flow speed of 0.2 m/s

管型几何参数的不同会影响污垢热阻的变化,其中,肋片的间距是一个十分重要的参数。当肋片

间距过大时, 流体流经肋片后会再次聚集, 此时流体的剪切力会减小, 对污垢的剥蚀效果减弱。而当肋间距过小时, 流体流经肋片时的分离程度同样会缩小, 使得壁面的剪切力降低, 加剧结垢。根据 Eungchan Lee 的实验, 可以发现随着壁面肋片角度的变化, 污垢热阻渐进值也有所变化, 但并无明确的规律^[8]。本实验中 1 号平直翅片管形成的污垢最多, 且远远大于光管的污垢值; 2 号平直翅片管形成的污垢最少; 锯齿形翅片管的污垢阻值与光管相近, 阻垢类似相似。

碳酸钙水箱温度 30 °C、热水箱温度 60 °C、碳酸钙浓度 1 mmol/L、流速为 0.1 m/s 的工况下几种管道的污垢形貌图如图 5 所示。在碳酸钙水箱温度 30 °C、热水箱温度 60 °C、碳酸钙浓度 1 mmol/L、流速为 0.2 m/s 的工况下几种管道的污垢形貌图如图 1 ~ 图 6 所示。

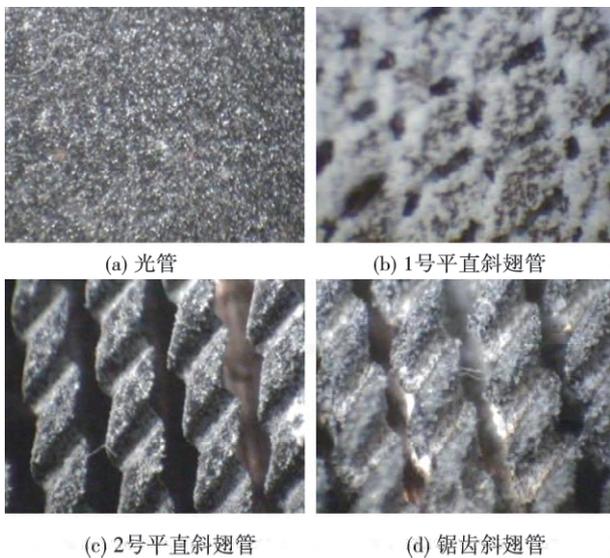


图 5 流速为 0.1 m/s 时不同管型的污垢形貌
Fig. 5 Fouling morphology in various type tubes at a flow speed of 0.1 m/s:

对光管来说, 其表面污垢将其表面全部覆盖, 形成完整的一层污垢薄膜, 较大的增加了热阻。1 号平直斜翅管的结垢最为厉害, 污垢几乎将其全部覆盖, 且形成的污垢颗粒大且致密。2 号平直斜翅管的表面污垢较少, 只以颗粒状散布在表面上, 污垢热阻最小。锯齿斜翅管形成的污垢较多, 平均覆盖在管道表面上, 和光管的污垢热阻相当。

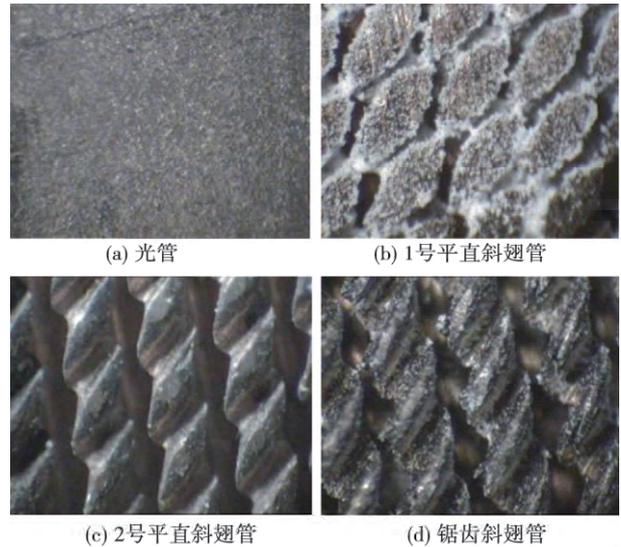


图 6 流速为 0.2 m/s 时不同管型的污垢形貌
Fig. 6 Fouling morphology in various type tubes at a flow speed of 0.2 m/s:

为了研究温度对管道污垢热阻的影响, 将碳酸钙水箱温度维持 30 °C 不变, 而将热水侧温度分别设为 55、60、65、70 °C。随热水侧温度升高, 成垢粒子运动加剧, 同时由于碳酸钙溶液溶解度的大幅降低, 析出的微粒增加。除溶液中的微粒向壁面运动附着成污垢之外, 溶液中的已经析出的微粒晶体也沉积到壁面上形成污垢^[9], 如图 7 所示。

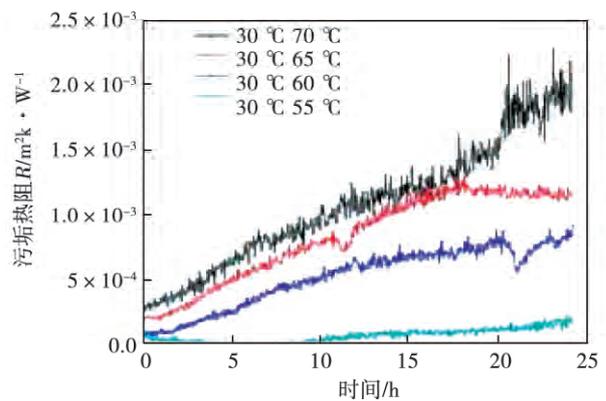


图 7 3 号平直斜翅管在不同温度下的污垢热阻
Fig. 7 Fouling heat resistance of NO. 3 straight oblique finned tube at different temperatures

与此同时, 当温度升高到 70 °C 后, 污垢已经几乎布满管道的整个表面, 肋片间隔凹槽间已有显著的污垢形成, 如图 8 所示。



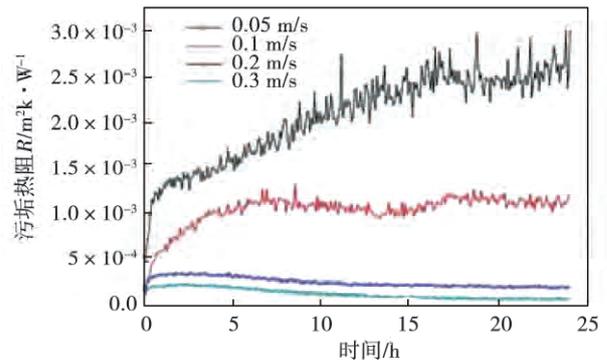
图 8 热水侧温度 70 °C 时 3 号平直斜翅管的污垢形貌

Fig. 8 Fouling morphology of No. 3 straight oblique finned tube at a temperature of 70 °C at the hot water side

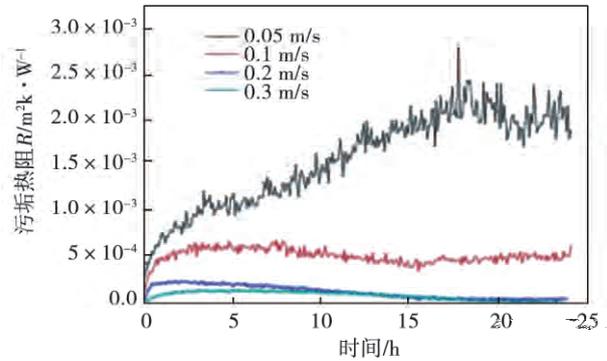
在污垢的形成过程之中,流速所起的作用是双向的。其对于结垢过程的影响较为复杂,在运输、附着、剥蚀这三个阶段,流速都发挥着作用。流速的增加会增加对于微粒的运输,能将较多的颗粒运输到管道表面上去。从这个角度看,流速增加有利于管道的结垢。同时,流速的增加也能增加溶液的扰动,是微粒的运动加大,也更容易附着到管道表面形成污垢。但是,流速的增加还会增加流体对污垢表面的冲刷,增加剥蚀剪切力,使形成的污垢从管道表面剥离。前两种作用和第三种作用相互矛盾,因此不同的流速对污垢的形成起到的作用是不同的^[10]。

对于不同的强化换热管来说,由于其各污垢热阻渐进值不同,污垢生长速率也不同,达到渐进值的时间也不相同;但不同管型对于流速的相应规律却都是类似的,如图 9 所示。当流速的增加时,污垢的线性增长阶段的增长速度都会有所降低,且随着流速的增加,流速对于污垢热阻生长速率的影响逐渐降低。随着流速的增加,污垢热阻渐进值也逐渐降低。因为当流速增加之后,虽然其增大了流体的扰动,使得成垢物质更容易积聚到管道表面上,同时,其增加的剥蚀力也是显著的,导致污垢从换热管道表面剥离。

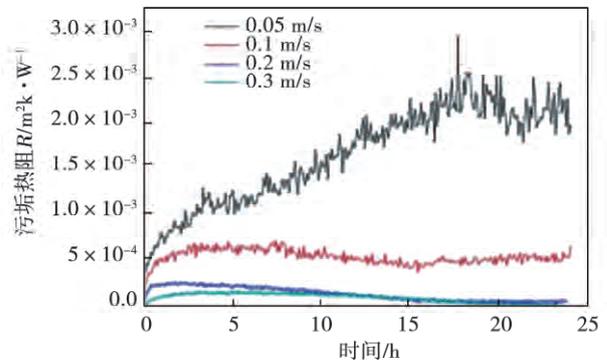
在实验中,流速所带来的对污垢的剥离作用远远大于对污垢的沉积作用,因此,随着流速的增加的,污垢的热阻值逐渐降低。随着流速的增加,流速对于污垢热阻的影响作用逐渐降低,例如,流速增加到 0.2 m/s 后,污垢热阻渐进值已经降得比较低,此时,再继续增加流速到 0.3 m/s,对污垢热阻渐进值的影响不大,但依然有所降低。



(a) 1 号直斜翅管污垢热阻值



(b) 锯齿斜翅管污垢热阻值



(c) 光管污垢热阻值

图 9 1 mmol/L 下不同流速下三种换热管热阻曲线

Fig. 9 Curves of the heat resistance of three types of heat exchange tube at various flow speeds and a concentration of 1 mmol/L

4 结 论

(1) 流速对碳酸钙污垢的影响

随着流速的增加,换热管道表面的污垢热阻初始生长速率加快,最终的污垢热阻渐进值减少。但流速增大到一定值后,对于污垢热阻的影响逐渐减小。高流速时,形成污垢层为致密的薄薄的一层。

低流速时,则更容易形成较厚较蓬松的污垢层。

(2) 温度对碳酸钙污垢的影响

随着热水侧温度的增加,温差在增大,进一步降低了碳酸钙的溶解度,且温度的升高加剧了成垢物质的热运动,因此,碳酸钙污垢热阻也在增加。低温时,管道肋基凹槽处几乎没有污垢,温度升高,污垢逐渐在管道肋基处堆积。

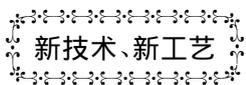
(3) 不同管型之间的比较

在相同的条件下,1号平直斜翅管的阻垢性能最差,形成的污垢最多,远远大于光管的污垢值。2号平直斜翅管的阻垢性能最好,形成的污垢最少,比光管的污垢值低。锯齿斜翅管的污垢热阻值和光管相接近,阻垢性能类似。

参考文献:

- [1] 杨善让,徐志明,孙灵芳. 换热设备污垢与对策(第二版). 北京: 科学出版社, 2004.
YANG Shan-rang, XU Zhi-ming, SUN Ling-fang. Fouls in heat exchange equipment items and countermeasures [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] Somerscales, J. G. Knudsen. Fouling of heat transfer equipment [M]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation 1-25 (1981): 701-734.
- [3] GB/T15452-2009, 工业循环冷却水中钙镁离子的测定 EDTA 滴定法. 北京: 中国标准出版社, 2010.
GB/T15452-2009, Determination of calcium and magnesium in Industrial circulating cooling water-EDTA titration method [S].
- [4] 盛健. 换热器表面表面碳酸钙垢析晶过程与换热的实验研究. 上海理工大学, 2012.
SHENG Jian. Experimental investigation of the crystallization process of the foul formed by calcium carbonate on the surface of a heat exchanger [J]. Journal of Shanghai University of Science and Technology, 2012.
- [5] Epstein, N. Thinking about heat transfer fouling: A 5*5 matrix [J]. Heat transfer engineering, 4(1983): 43-56.
- [6] B. Bansal, H. Müller-Steinhagen. Crystallisation fouling in heat exchangers [J]. ASME J. Heat Transfer 115(1993): 584-591.
- [7] Melia T P. Crystal nucleation from aqueous solution [J]. J Appl Chem 8(1965): 345.
- [8] Eungchan Lee, Jaemyeong Jeon, Hoon Kang, et al. Thermal resistance in corrugated plate heat exchangers under crystallization fouling of calcium sulfate [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 78(2014): 908-916.
- [9] 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. 化工进展, 2014, 33(4): 831-836.
XU Zhi-ming. Experimental analysis of the characteristics of particulate fouls in cross divergent and convergent elliptical tubes [J]. Progress in Chemical Industry and Engineering, 2014, 33(4): 831-836.
- [10] 张仲彬. 换热表面污垢特性的研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
ZHANG Zhong-bin. Investigation of the characteristics of fouls on the surface of a heat exchanger [D]. Baoding: North China University of Electric Power, 2009.
- [11] Müller-Steinhagen H. Heat exchanger fouling [M]. Munich: Publico Publication, 2000.

(刘瑶 编辑)



新技术、新工艺

Samsung C&T 将参与建造 2500 MW 发电和海水淡化工程

据《Gas Turbine World》2015年7~8月刊报道: 韩国 Samsung C&T 公司已接到一个合同, 承担卡塔尔最大独立水电工程的建设工作。

Samsung C&T 已被授予 18 亿美元工程总承包合同, 负责该项目的 2500 MW 发电部分, 目前正由日本 Mitsubishi(三菱)公司和 Tepco(东京电力公司)研制。

卡塔尔通用电力和水公司已经订购了联合循环电站生产的 2500 MW 电力和海水淡化厂生产的 590 000 m³/d 淡水。该联合循环电站和海水淡化厂建在多哈以南 15 km 处, 预期在 2018 年 6 月竣工。

Samsung C&T 将获得 24 亿 6 千万美元总包合同中的 18 亿美元。西班牙的 Acciona Agua 公司将研制该项目的海水淡化部分。

(吉桂明 摘译)

temperature rise of the heat pump in the system increases from the temperature rise of 17.6 °C in the traditional heat convertor to 25 °C ,therefore ,enhancing the heat quality ,**Key words:** generator ,jet ejector ,absorption-type heat convertor ,thermodynamic analysis ,heat quality

强化蒸发管形成碳酸钙污垢的特性研究 = Study of the CaCO₃ Foul Characteristics of an Intensified Evaporation Tube [刊 ,汉] WANG Yan-kun ,ZHANG Hua ,YOU Xiao-kuan ,SHENG Jian (Refrigeration Technology Research Institute ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(5) . - 34 ~ 39

With an intensified evaporation tube serving as the object of study ,investigated was the law governing the fouling of CaCl₂-Na₂CO₃ solution on the surface of a bare tube ,a plane and straight obliquely-finned tube and a sawtooth-shaped obliquely-finned tube. A constant initial foul formation ion concentration method was adopted ,i. e. no foul-formation ion was added in the process of foul formation during the test. For several types of heat exchange tube and bare tube ,the foul resistant effectiveness was tested respectively at various temperatures and flow speeds. The test results show that the amount of foul formed on No. 1 plane and straight finned tube is largest ,far larger than that formed on the bare tube. The amount of foul formed on No. 2 straight finned tube is smallest. The fouling resistance of the sawtooth-shaped finned tube is close to that of the bare tube ,thus the types of their foul being also similar.

Key words: intensified heat transfer ,CaCO₃ foul ,intensified evaporation tube

超临界 CO₂ 发电循环特性分析 = Analysis of the Power Generation Cycle Characteristics of Supercritical Carbon Dioxide [刊 ,汉] LIAO Ji-xiang ,ZHENG Qun ,ZHANG Hai(College of Power and Energy Engineering , Harbin Engineering University ,Harbin ,China ,Post Code: 150000) ,LIU Xing-ye(College of Architectural Engineering ,Heilongjiang University of Science and Technology ,Harbin ,China ,Post Code: 150022) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(5) . - 40 ~ 46

Five types of supercritical carbon dioxide power generation cycle were analyzed ,namely ,simple recuperative cycle , recompression cycle ,partial cooling cycle ,pre-compression cycle and subsection expansion cycle. Under the same operating parameters ,the thermal efficiencies of the cyclic systems above mentioned were analyzed and compared. It has been found that both efficiencies of the recompression cycle and the partial cooling one are the highest ,approaching to 45% . However ,the highest efficiency of the partial cooling cycle can result only at a high pressure ratio while the efficiency of the cycle in question at a low pressure ratio has no obvious cutting edge when compared with