文章编号:1007-6735(2014)05-0443-06 DOI:10.13255/j.cnki.jusst.2014.05.007

两种斜翅管表面碳酸钙垢初始阶段结垢特性

盛 健, 张 华, 赵 萍
(上海理工大学 能源与动力工程学院,上海 200093)

摘要:进行了3种强化管在不同碳酸钙溶液浓度和流速下的动态结垢实验,得到碳酸钙浓度、流速和不同管型对碳酸钙析晶垢结垢过程的影响.结果表明,碳酸钙浓度增大,使溶液中均相成核速率和所形成晶核的生长速率增大,使溶液换热表面界面的污垢晶粒浓度和成垢离子浓度均增大,前者使更多的污垢附着换热面,而后者使表面异相成核速率和生长速率增大.流速增大,使光管表面形成的晶核、污垢晶体和污垢热阻均减少,而诱导期延长;使平直和锯齿斜翅管初始成核增多,但诱导期延长,而结垢量和污垢热阻减小.平直和锯齿斜翅管在清洁状态和结垢状态下均具有比光管更大的总换热系数、更小的污垢热阻,尽管结垢量略多.在相同结垢状态下,锯齿斜翅管的结垢量和污垢热阻大于平直斜翅管的,但是,其总换热系数仍大于平直斜翅管.

关键词:斜翅管;碳酸钙;析晶污垢
中图分类号:TK 172 **文献标志码**:A

Characteristics of the Initial Stage of $CaCO_3$ Crystallization Fouling on Two Kinds of Oblique Fin Tube

SHENG Jian, ZHANG Hua, ZHAO Ping
(*School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

Abstract: To investigate the effect of $CaCO_3$ concentration and velocity on $CaCO_3$ scaling fouling process on plain, straight oblique and saw-tooth oblique fin tubes, experiments were done at different $CaCO_3$ concentration, velocity and surface parameter of the three kinds of tubes. The results show that the homogeneous nucleation rate and the growing rate both increase when $CaCO_3$ concentration increases. This makes the scaling particle concentration and fouling ion concentration increase, the former leads to more scaling on tubes and the later enlarges the heterogeneous nucleation rate and growing rate. Higher velocity decreases the nucleation of scaling, scaling crystal and fouling resistance, but it can prolong the induction period. Higher velocity increases nucleation rates on straight oblique fin tube and saw-tooth oblique fin tube, but the induction period extends and the mass of scaling and fouling resistance decrease. Straight oblique fin tube and saw-tooth oblique fin tube have bigger heat transfer coefficient than plain tube under both clean and fouling conditions in despite of smaller fouling resistance and a little more scaling. Under the same condition, saw-tooth oblique fin tubes have bigger heat transfer coefficient and fouling mass than straight

收稿日期:2013-09-26
基金项目:上海市重点学科建设资助项目(S30503)
第一作者:盛 健(1985-),男,实验师.研究方向:强化换热与抗垢技术.E-mail:sjhvac@163.com
通讯作者:张 华(1966-),男,教授.研究方向:制冷及低温技术.E-mail:zhanghua3000@163.com

oblique fin tubes, but the total heat transfer coefficient is bigger than that of straight oblique fin tubes.

Key words: *oblique fin tube*; *calcium carbonate*; *crystallization fouling*

对强化换热管的结垢特性以及在结垢条件下的强化换热效果均进行了研究，但其研究结果却颇为矛盾：就结垢速率、污垢热阻和诱导期而言，Rabas等[1]和徐志明等[2]发现螺旋槽管的结垢速率和污垢热阻大于光管的；而 Sheiholeslami 等[3]、帅志明等[4]和张仲彬等[5]则发现斜翅管具有比光管更小的结垢速率和污垢热阻、更大的换热系数和更长的诱导期；就斜翅管表面参数而言，钱颂文等[6]发现斜翅管槽越深，防垢性能越好；而刘震等[7]发现螺旋槽管参数对污垢热阻有明显影响，螺距最小时具有最小污垢热阻，但当螺距增大时，污垢热阻的增长并未出现单调变化；朱冬生等[8]和 Webb 等[9-10]研究发现，管参数和操作条件对斜翅管的结垢过程有不同程度的影响，结垢速率取决于斜翅管的几何参数；Panchal 等[11]则认为斜翅管结垢与斜翅管的几何参数无关. 可见斜翅管在结垢条件下的换热和结垢现象受很多条件的影响，是非常复杂的过程，需要通过大量而深入的实验来探索和发现其规律.

斜翅管是在低翅管的基础上沿与管轴向成一定角度将翅片进行分割加工而成，因此，斜翅管具有比低翅管更强的近壁面扰动作用、更大的换热强化比. 根据翅片的不同切割方式，可加工成不同的斜翅管，将翅片分割成等截面直肋的斜翅管称为平直斜翅管(SOFT)，将翅片分割为锯齿状肋片的斜翅管称为锯齿斜翅管(STOFT). 本文对光管、平直斜翅管和锯齿斜翅管在清洁状态和结垢状态的强化换热比、初始阶段结垢速率和污垢热阻变化等特性进行了实验研究.

1 实验方法与装置

根据污垢热阻的定义[12]，采用污垢热阻法来测量污垢的生长和污垢对平直斜翅管强化换热效果的影响.

$$R_f = 1/U_f - 1/U_0 \qquad (1)$$

式中，R_f 为污垢热阻，$m^2 \cdot K/W$；U_f 为结垢状态下的总换热系数，$W/(m^2 \cdot K)$；U_0 为清洁状态下的总换热系数，$W/(m^2 \cdot K)$.

因碳酸钙的浓度极低，碳酸钙水溶液的密度可按蒸馏水来计算，并忽略内管壁厚以及其导热热阻. 需要获得清洁状态和不同时间结垢状态下套管式换热管的总换热系数，即可获得不同结垢时间下的污垢热阻值. 由牛顿冷却公式和热平衡方程式可知，需要测量的物理量有：内管的进口、出口热水温度及流量，套管管间的进口、出口碳酸钙溶液的温度及流量.

实验系统如图1所示，包括实验段5路套管式换热管、热水恒温水箱、碳酸钙恒温水箱、保持恒温的冷却系统和电加热器、循环水泵及循环水管路、Pt100铂电阻温度传感器及 Agilent 数据采集仪和上位机. 实验段由5路同心套管式换热管组成，热水从内管管内流过、碳酸钙水溶液从套管管间逆流流过；内管为实验管，即光管和平直斜翅管，其中，光管的内外壁面均为光滑壁面，平直斜翅管的外壁面为结垢壁面，为平直斜翅片，内壁面为光滑壁面，外管为不锈钢304管. 光管的尺寸为 10 mm×7.6 mm×1 000 mm($D_W \times D_N \times L$). D_W 为外径，D_N 为内径，L 为长度. 平直斜翅管与锯齿斜翅管的尺寸均为 12.7 mm×10 mm×1 000 mm($D_W \times D_N \times L$)，外翅高 0.65 mm，翅数 1 339 个/m(34 个/inch)，翅间距 0.2 mm，螺旋角 45°，只是齿形不同. 实验中采用3种碳酸钙浓度(0.5，1.0，2.0mmol/L)，2种流速(0.04，0.07 m/s)，热水箱温度保持 60 ℃，碳酸钙溶液水箱保持 30 ℃. 为保持碳酸钙水溶液中碳酸钙浓度相对稳定，每 1 h 采用 EDTA 络合滴定法测量 Ca^{2+} 浓度，并加入需要量的 $CaCl_2$ 和 Na_2CO_3 溶液. 每 2 h 关闭一路实验换热管两端的截止阀，并调节热水管路和碳酸钙溶液管路的三通流量调节阀，使余下换热管内流速保持恒定. 取出已做完实验的实验换热管，并在室温下晾干，以便观测其表面结垢形貌. 待实验停止后保存实验数据，以便计算清洁状态和不同结垢时间状态下的总换热系数，进而获得污垢热阻、结垢诱导期等换热和结垢特性. 分别使用 0.001 mol/L盐酸溶液和蒸馏水清洗碳酸钙溶液水箱及其管路，以便下次实验使用.

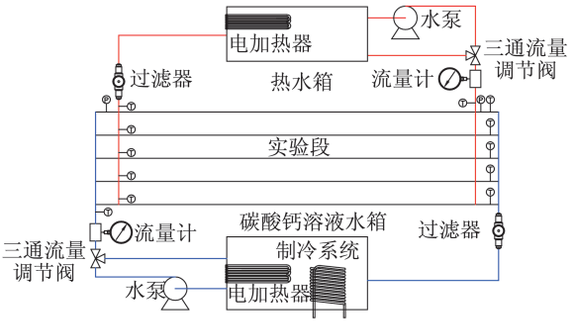


图1 碳酸钙污垢动态实验系统原理图

Fig.1 Experimental setup of $CaCO_3$ scaling

2　实验结果与分析

表 1 为不同工况下的结垢诱导期和污垢热阻。

2.1　碳酸钙浓度对结垢的影响

由图 2～4 可见，碳酸钙浓度增大，会使 3 种换热管表面的结垢诱导期均大幅缩短，对于降低换热器清洗频率和抗垢等是不利的，原因是流体中 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 离子浓度增大时，溶液中均相成核率和换热表面异相成核率均指数级增大，形成更多的晶核并长大，而使污垢热阻更早、更大地呈现，使诱导期缩短. t 为时间.

另外，碳酸钙浓度增大，3种换热管表面初始污垢热阻增大；速率提高，10 h污垢热阻值也增大. 在相同条件下，斜翅管的污垢热阻均小于光管的，且浓度越大，两者之间的差距越大. 锯齿斜翅管的污垢热阻始终略大于平直斜翅管的，说明在较高碳酸钙浓度下，斜翅管比光管具有更好的抗垢性能，且平直斜翅管的抗垢性能优于锯齿斜翅管的.

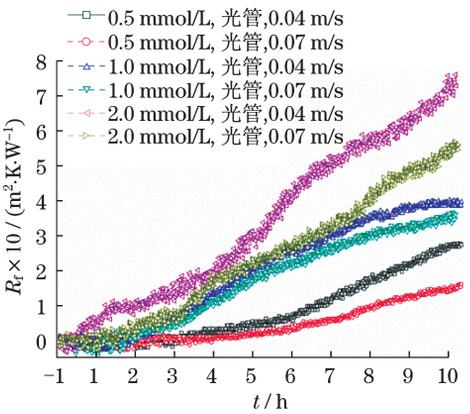


图 2　光管表面污垢热阻变化

Fig.2　Fouling resistance of plain tube

表 1　不同工况下结垢诱导期及污垢热阻

Tab.1　Induction period and fouling resistance under different conditions

实验工况	光管		平直斜翅管		锯齿斜翅管	
	诱导期/h	10 h 污垢热阻/(m² · K · W⁻¹)	诱导期/h	10 h 污垢热阻/(m² · K · W⁻¹)	诱导期/h	10 h 污垢热阻/(m² · K · W⁻¹)
0.5 mmol/L, 0.04 m/s	3.1	0.000 272	3.2	0.000 169	4.0	0.000 169
0.5 mmol/L, 0.07 m/s	4.0	0.000 160	4.4	0.000 107	3.9	0.000 107
1.0 mmol/L, 0.04 m/s	1.8	0.000 395	2.3	0.000 311	2.3	0.000 311
1.0 mmol/L, 0.07 m/s	1.9	0.000 355	3.0	0.000 218	2.5	0.000 218
2.0 mmol/L, 0.04 m/s	0.6	0.000 745	1.2	0.000 569	0.9	0.000 569
2.0 mmol/L, 0.07 m/s	1.5	0.000 559	1.4	0.000 412	0.9	0.000 412

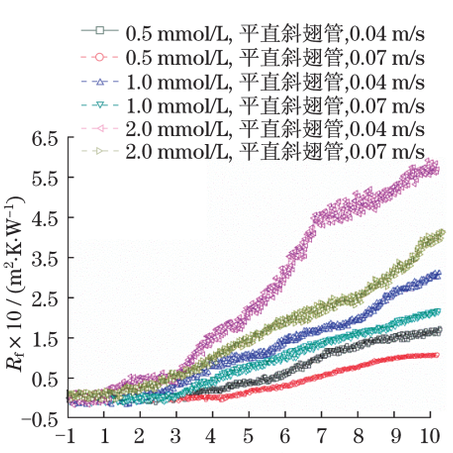


图 3　平直斜翅管表面污垢热阻变化

Fig.3　Fouling resistance of straight oblique fin tube

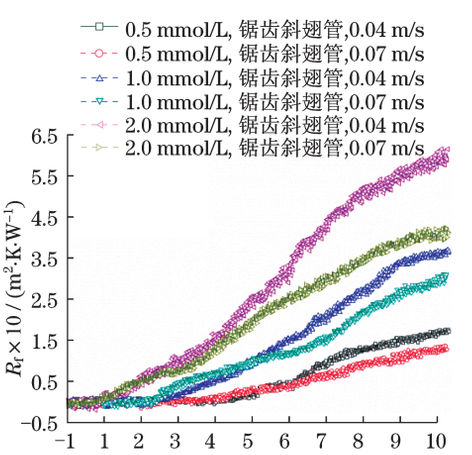


图 4　锯齿斜翅管表面污垢热阻变化

Fig.4　Fouling resistance of saw-tooth oblique fin tube

低浓度时(0.5 mmol/L)，由图 5(a)和 5(b)(见下页)可见，碳酸钙析晶污垢结垢初始阶段(2 h)，光管表面仅形成较少的碳酸钙晶粒，浓度较低，使溶液中碳酸钙的过饱和度较低，进而导致其在换热表面的异相成核速率也较低[13-14]；由图 6(a)和 6(b)(见下页)可见，光管表面10 h形成的污垢还较少，仅少

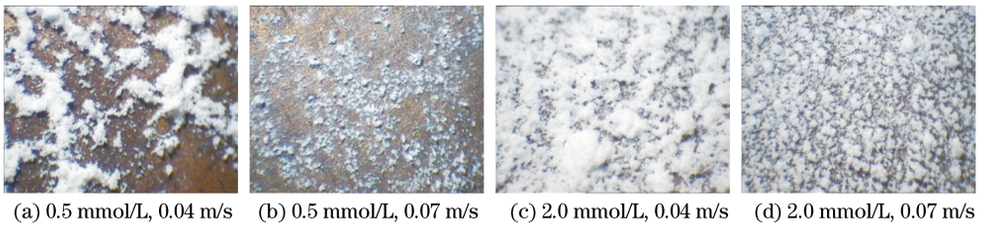
数区域被覆盖，远未形成完整的污垢层；由图 7(a)和7(b)可见，平直斜翅管表面在结垢 2 h 时形成很少的碳酸钙晶粒，主要集中在迎来流方向翅片前侧面，而翅片底部基本保持清洁；由图 8(a)和 8(b)可见，平直斜翅管表面 10 h 形成的污垢主要集中在翅片间的间隙中，并且翅片间隙也只是部分被污垢填充；由图 9(a)和9(b)可见，锯齿斜翅管表面在结垢 2 h 时形成很少的碳酸钙晶粒，锯齿翅片的侧面和翅片底部基本保持清洁；由图 10(a)和 10(b)可见，锯齿斜翅管表面 10 h 形成的污垢主要集中在迎来流方向翅片前侧面，而翅片间隙中污垢较少. 高浓度时(2.0 mmol/L)，由图5(c)和5(d)可见，碳酸钙析晶



(a) 0.5 mmol/L, 0.04 m/s (b) 0.5 mmol/L, 0.07 m/s (c) 2.0 mmol/L, 0.04 m/s (d) 2.0 mmol/L, 0.07 m/s

图 5 2 h 光管表面污垢形貌

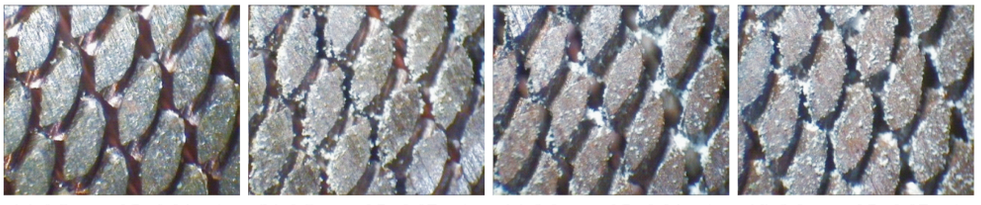
Fig. 5 Scaling morphology on plain tube at 2 h



(a) 0.5 mmol/L, 0.04 m/s (b) 0.5 mmol/L, 0.07 m/s (c) 2.0 mmol/L, 0.04 m/s (d) 2.0 mmol/L, 0.07 m/s

图 6 10 h 光管表面污垢形貌

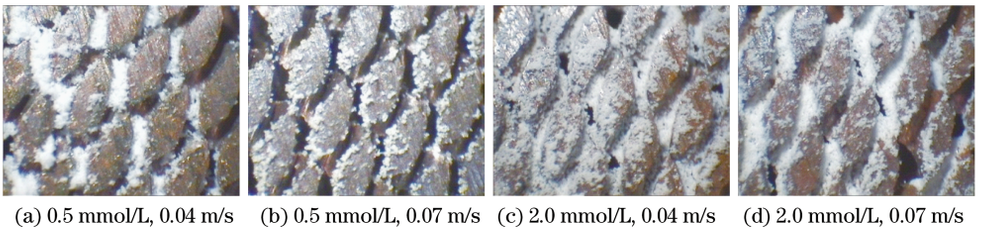
Fig. 6 Scaling morphology on plain tube at 10 h



(a) 0.5 mmol/L, 0.04 m/s (b) 0.5 mmol/L, 0.07 m/s (c) 2.0 mmol/L, 0.04 m/s (d) 2.0 mmol/L, 0.07 m/s

图 7 2 h 平直斜翅管表面污垢形貌

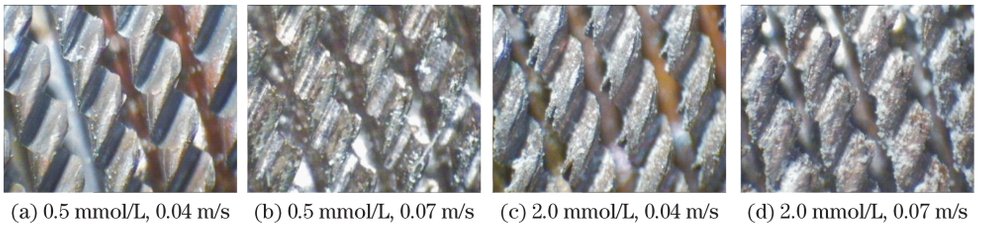
Fig. 7 Scaling morphology on straight oblique fin tube at 2 h



(a) 0.5 mmol/L, 0.04 m/s (b) 0.5 mmol/L, 0.07 m/s (c) 2.0 mmol/L, 0.04 m/s (d) 2.0 mmol/L, 0.07 m/s

图 8 10 h 平直斜翅管表面污垢形貌

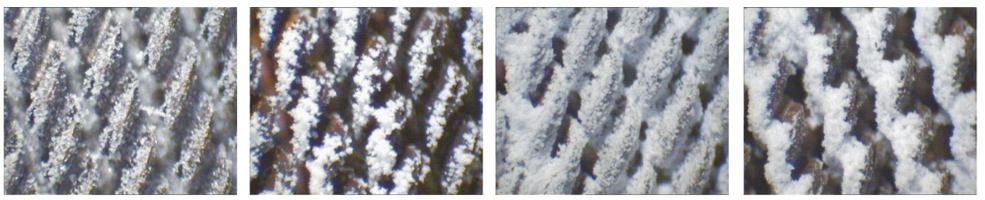
Fig. 8 Scaling morphology on straight oblique fin tube at 10 h



(a) 0.5 mmol/L, 0.04 m/s (b) 0.5 mmol/L, 0.07 m/s (c) 2.0 mmol/L, 0.04 m/s (d) 2.0 mmol/L, 0.07 m/s

图 9 2 h 锯齿斜翅管表面污垢形貌

Fig. 9 Scaling morphology on saw-tooth oblique fin tube at 2 h



(a) 0.5 mmol/L, 0.04 m/s　(b) 0.5 mmol/L, 0.07 m/s　(c) 2.0 mmol/L, 0.04 m/s　(d) 2.0 mmol/L, 0.07 m/s

图 10　10 h 锯齿斜翅管表面污垢形貌

Fig. 10　Scaling morphology on saw-tooth oblique fin tube at 10 h

污垢结垢2 h,光管表面形成大量小晶粒,几乎均匀分布在整个表面;由图 6(c)和 6(d)可见,光管表面结垢 10 h 时形成较为完整的污垢层,但局域较为致密,而致密污垢层的周边结垢较少;由图 7(c)和7(d)可见,平直斜翅管表面在结垢 2 h 时形成的晶粒增多,主要集中在迎来流方向翅片前侧面、翅片顶面和底面;由图 8(c)和8(d)可见,平直斜翅管表面有更多的翅片间隙被覆盖,并且表面也形成了小区域的薄污垢层;由图 9(c)和9(d)可见,锯齿斜翅管表面在结垢 2 h 时形成的晶粒增多,主要集中在迎来流方向翅片前侧面、翅片顶面和底面;由图 10(c)和 10(d)可见,锯齿斜翅管表面有更多的翅片间隙被覆盖,污垢最多的区域为迎来流方向翅片前侧面,以及与同排翅片前侧面污垢连接成一排排污垢层,同排翅片之间的间隙被污垢填充较多,而排间翅片之间的间隙较少被污垢填充.

2.2　流速对结垢的影响

由图 2～4 可见,相同碳酸钙溶液浓度时,流速增大,3 种换热管表面结垢诱导期延长,对光管和平直斜翅管表面结垢诱导期的延长作用强于锯齿斜翅管的,其原因是流速增大并不改变溶液内均相成核速率,但使换热表面的剥蚀剪力增大,导致碳酸钙在换热表面形成的碳酸钙晶核的接触角 θ 减小,进而促使换热表面碳酸钙异相成核速率减小,故流速增大使结垢诱导期延长.

较低流速时(0.04 m/s),由图 5(a)和 5(c)可见,光管表面 2 h 形成更多的碳酸钙晶粒,较大晶粒数量也较多,因为,流速较低,剥蚀剪力较小,碳酸钙污垢向换热面法向生长的阻力较小;由图 6(a)和6(c)可见,光管表面 10 h 形成污垢更多,主要表现为覆盖更多换热面和污垢层更厚;由图 7(a)和 7(c)可见,平直斜翅管表面 2 h 形成的碳酸钙小晶粒较少,尤其翅片底面基本保持清洁;由图 8(a)和 8(c)可见,平直斜翅管表面 10 h 形成的污垢主要填充在翅片间隙中,翅片顶面有很少的污垢形成;由图 9(a)和 9(c)可见,锯齿斜翅管表面 2 h 形成的碳酸钙小晶粒较少,主要在锯齿斜翅管前侧面;由图 10(a)和 10(c)可见,锯齿斜翅管表面 10 h 形成的污垢主要覆盖在锯齿翅片表面,翅片前侧面和后侧面具有较多污垢晶粒形成.较高流速时(0.07 m/s),由图 5(b)和 5(d)可见,光管表面 2 h 形成较少的碳酸钙晶核,基本没有较大晶粒,因为,流速增大造成较大的剥蚀剪力,抑制了污垢向换热面法向生长;由图 6(b)和 6(d)可见,光管表面 10 h 形成的污垢较少,主要表现在覆盖换热面的区域较少和污垢层更薄,因为,流体剥蚀剪力增大使碳酸钙晶粒向换热面法向生长阻力增大;由图 7(b)和 7(d)及图 9(b)和9(d)可见,平直和锯齿斜翅管表面 2 h 形成较多的碳酸钙晶粒,主要集中在迎来流方向翅片前侧面;由图 8(b)和 8(d)可见,平直斜翅管表面 10 h 形成的污垢仍主要填充在翅片间隙中,但被填充的间隙较少,翅片顶面由于剥蚀剪力增大而有较少的污垢形成;由图 10(b)和 10(d)可见,锯齿斜翅管表面 10 h 形成的污垢主要覆盖在迎来流方向翅片的前侧面,在前侧面形成较厚污垢层,并与同排相邻翅片前面污垢相互连接时,后侧面仅有很少污垢.因此,流速增大对光管表面结垢始终是抑制作用,而对平直和锯齿斜翅管是先促进表面碳酸钙异相成核速率而后抑制进一步生长.

在结垢初始阶段,流速增大时光管表面形成的碳酸钙晶粒较少,但斜翅管表面却形成了更多碳酸钙小晶粒;而结垢 10 h 时,流速增大使光管和斜翅管表面结垢量均减少,且锯齿斜翅管晶粒数量大于平直斜翅管的.因此,流速增大对光管表面结垢始终是抑制作用,而斜翅管则是先促进表面碳酸钙异相成核速率而后抑制进一步生长,其原因是在结垢初始阶段,由于斜翅管表面翅片叉排的影响,使流速增大时并不能造成整个翅片顶面、侧面和底面的剥蚀剪力都增大,反而加强了 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 从主流体扩散至翅片表面,导致在剥蚀剪力较小的翅片表面反而形成更多碳酸钙晶粒;随着污垢生长,最终堵塞翅片间隙,造成剥蚀剪力增大,导致其结垢量减小.光管由于表面光滑,无论在结垢初期还是生长期,流速增大均会导致剥蚀剪力加强,并且加强幅度大于 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 从主流体至表面扩散速率的增强.但对斜翅管,在不同污垢生长阶段的影响不同.

2.3 管表面参数对结垢的影响

由表1和图2～4可见，相同条件下光管的表面结垢诱导期均短于斜翅管的，由图5、图7和图9可见，结垢初始2 h表面形成碳酸钙晶粒数量，锯齿斜翅管的大于平直斜翅管大于光管的.碳酸钙析晶污垢初始阶段成核并生长的污垢晶粒对光管表面总换热系数的影响程度远大于斜翅管的.由图6、图8和图10可见，结垢10 h光管的表面结垢量也略少于斜翅管的，但其污垢热阻却大于斜翅管的.

斜翅管具有更大的结垢速率和结垢量，这是因为在相同材料和公称直径下，斜翅管表面具有更大的与碳酸钙溶液接触的换热面积，可进行异相成核的面积增大，故所形成的碳酸钙晶粒更多.斜翅管增强了碳酸钙溶液与换热表面的扰动，使边界层更薄，并加强 Ca^{2+}、CO_3^{2-} 和溶液中均相成核形成的碳酸钙污垢晶粒从主流体至表面扩散速率，使异相成核速率、成垢离子浓度和溶液污垢颗粒浓度控制的生长速率均增大，因而初始阶段所形成的晶粒增多，之后的生长速率也较大并形成更多污垢，但污垢热阻却较小，因为，斜翅管具有更大的总换热系数，斜翅管的总换热系数 U_q 远大于光管的总换热系数 U_g，斜翅管的总换热热阻 $1/U_q$ 远小于光管的总换热热阻 $1/U_g$，假设形成污垢使两种换热管的总换热系数均下降 ΔU，$R_q = 1/(U_q - \Delta U) - 1/U_q$，$R_g = 1/(U_g - \Delta U) - 1/U_g$，$R_q$ 为斜翅管的污垢热阻，R_g 为光管的污垢热阻.显然 $R_q > R_g$，故斜翅管的表面结垢量略多于光管的，但其污垢热阻却小于光管的.

3 结 论

a. 碳酸钙浓度对结垢的影响.浓度增大使溶液中均相成核速率和晶核生长速率均增大，导致溶液与换热表面界面的污垢晶粒浓度和成垢离子浓度均增大，前者使更多的污垢附着换热面，而后者使表面异相成核速率和生长速率增大.

b. 流速对结垢的影响.第一，促进污垢的成核和生长，即流速增大使成垢离子和溶液中均相成核形成的碳酸钙污垢晶粒从主流体至溶液换热表面界面扩散速率增大，进而使换热面的异相成核速率和污垢的生长速率增大.第二，抑制污垢的生长，即流速增大使换热表面流体的剥蚀剪力增大，抑制污垢向换热面法向生长、污垢层不易增厚.促进和抑制两作用的强弱决定流速对结垢的最终影响，一般抑制作用强于促进作用，但在污垢不同生长阶段影响不同.

c. 斜翅管表面参数对结垢的影响.在相同实验工况下，锯齿斜翅管的结垢诱导期略短于平直斜翅管的，且锯齿斜翅管的污垢热阻大于平直斜翅管的.但在清洁和结垢状态下，锯齿斜翅管的总换热系数大于平直斜翅管的.因为，锯齿斜翅管的翅片间距较大，总换热系数也较大，虽然前期结垢速率大于平直斜翅管的，但总换热系数的下降幅度较小，即使污垢热阻的上升速率慢于平直斜翅管的，当结垢量达到一定值时，即碳酸钙污垢的低导热系数、结垢对翅片间流通面积的减小和对边界层流体扰动的减弱作用达到一定程度时，锯齿斜翅管的污垢热阻上升速率加快，污垢热阻值也逐渐超过平直斜翅管的.

参考文献：

[1] 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]// Chenoweth J M (eds). Fouling and Enhancement Interactions. New York: ASME, 1991, 164: 29－37.

[2] 徐志明，杨善让，甘云华.螺旋槽管传热与污垢性能的实验研究[J].热科学与技术，2003，2(2)：136－139.

[3] Sheikholeslami R. Tube material and augmented surface effect in heat exchanger scaling[M]. New York: University of British Columbia, 1984.

[4] 帅志明，冯海仙，李学泰.螺旋槽管结垢实验研究[J].中国电机工程学报，1994，14(2)：7－12.

[5] 张仲彬，徐志明，邵天成.波纹管传热与污垢特性的实验研究[J].华北电力大学学报，2007，34(5)：68－71.

[6] 钱颂文，马小明，王家中，等.螺旋槽管污垢特性研究[J].制冷，1995(2)：11－13.

[7] 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.

[8] 朱冬生，曾力丁，钱颂文.轧槽管的污垢特性及其防垢性能实验研究[J].流体机械，2007，35(4)：9－11.

[9] Li W, Webb R L. Fouling characteristics of internal helical-rib roughness using low-velocity cooling tower water [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(8): 1685－1691.

[10] Webb R L, Li W. Fouling in enhanced tubes using low-velocity cooling tower water part 1: long-term fouling data [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(19): 3567－3578.

[11] Panchal C B, Sasser D S. Biofouling and corrosion fouling of plain and enhanced aluminum surfaces[J]. Fouling Enhanced Interaction ASME, 1991, 164: 9－15.

[12] Mwaba M G, Golriz M R, Gu J. A semi-empirical correlation for crystallization fouling on heat exchange surfaces[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(4): 440－447.

[13] 盛健，张华，史雪菲，等.35 ℃ $CaCO_3$ 溶液中不锈钢304和316表面结垢特性[J].热能动力工程，2012，27(4)：478－482.

[14] 盛健，张华，史雪菲，等.$CaCO_3$ 溶液中黄铜和紫铜表面结垢特性[J].动力工程学报，2012，32(5)：399－403.

（编辑：石 瑛）