

平直斜翅管表面碳酸钙污垢初始阶段结垢特性

赵 萍 盛 健 张 华

(上海理工大学 能源与动力工程学院,上海 200093)

摘 要: 进行光管和平直斜翅管在不同碳酸钙浓度和流速下的动态结垢实验,得到碳酸钙浓度、流速和平直斜翅管对碳酸钙析晶污垢结垢过程的影响。结果表明: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;平直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。

关 键 词: 平直斜翅管; 碳酸钙; 析晶污垢; 强化换热比; 结垢速率; 污垢热阻

中图分类号: TK172 文献标识码: A

引 言

换热器是能源、化工等领域中必须使用的换热设备,为提高其换热效果、降低换热温差来提高能源的利用效率,尤其是对低品位能源的利用,强化换热管在换热器中应用的种类越来越多。各种强化管在清洁状态下均具有一定的强化换热作用,但结垢状态下其强化换热比、污垢热阻、结垢量等特性就成为考核强化管优劣的重要方面。

对螺旋槽管、波纹管、弧线管、缩放管、横纹管、管内插物、蛇管和螺纹管等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做了详细的研究,但其研究结果却颇为矛盾: Rabas 和徐志明等人发现螺旋槽管的结垢速率和污垢热阻大于光管;刘金平等人得到螺纹管比光管更易结垢,污垢热阻在一定程度上抵消了螺纹管的强化换热效果^[1~3];刘震、帅志明和张仲彬等人则发现强化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^[4~6];朱冬生和 Webb 等人研究发

现^[7~9],管参数和操作条件对强化管的结垢过程有不同程度的影响,结垢速率取决于强化管的几何参数; Panchal 等人则认为强化管结垢与强化管的几何参数无关^[10]。可见,强化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,需要大量而深入的实验来探索和发现其规律。不同强化管的强化方式和参数对结垢速率、污垢热阻、换热强化比等的影响以及如何改进强化管参数以提高其抗垢性能是强化换热研究的一个重要研究方向。

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。对翅片的不同切割方式可加工成不同斜翅管,将翅片分割成等截面直肋的斜翅管称为平直斜翅管。对光管和平直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^[11],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,即:

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

式中: R_f —污垢热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; U_f —结垢状态下的总换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; U_0 —清洁状态下的总换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

由于碳酸钙的浓度极低,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

收稿日期: 2012 - 11 - 26; 修订日期: 2012 - 12 - 20

基金项目: 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1202); 上海市重点学科建设项目(S30503)

作者简介: 赵 萍(1989 -),女,江苏盱眙人,上海理工大学硕士研究生。

知 需要测量的物理量有: 内管的进出口热水温度及流量, 套管管间的进出口碳酸钙溶液的温度及流量。

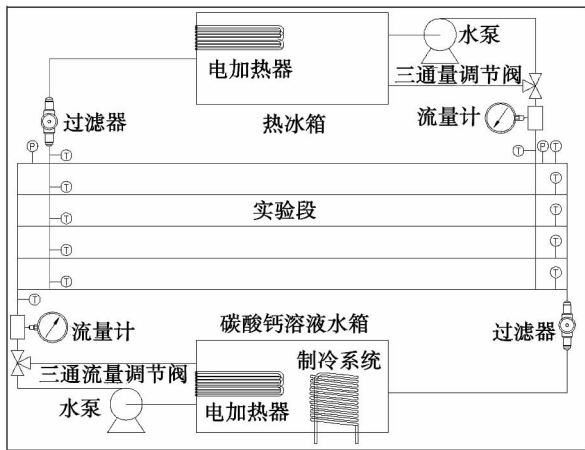


图 1 碳酸钙污垢动态实验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the CaCO₃ fouling dynamic test system

实验系统包括实验段 5 路套管式换热管, 热水恒温水箱和碳酸钙恒温水箱以及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, 如图 1 所示。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 (O. D × I. D × L), 平直斜翅管的尺寸为 12.7 mm × 10 mm × 1 000 mm (O. D × I. D × 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°, 如图 2 所示。

实验中采用 3 种浓度 (0.5、1.0 和 2.0 mmol/L) 2 种流速 (0.04 和 0.07 m/s), 热水箱温度保持 60 °C、碳酸钙溶液水箱保持 30 °C, 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 Ca²⁺ 浓度, 并加入需要量的 CaCl₂ 和 Na₂CO₃ 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。

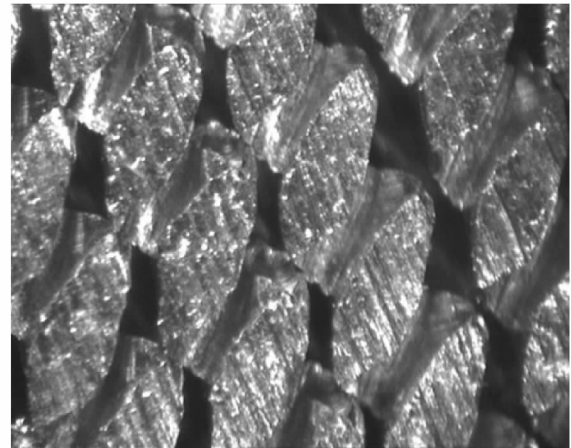


图 2 平直斜翅管

Fig. 2 Straight oblique fin tube

表 1 不同实验工况下结垢诱导期和污垢热阻

Tab. 1 Fouling induction period and fouling heat resistance under various test conditions

| 实验工况 | 诱导期/h | 10 h 污垢热阻 /m ² · K · W ⁻¹ |
|---------------------------|-------|---|
| 光管 0.5 mmol/L 0.04 m/s | 3.1 | 0.000272 |
| 光管 0.5 mmol/L 0.07 m/s | 4.0 | 0.000160 |
| 光管 1.0 mmol/L 0.04 m/s | 1.8 | 0.000395 |
| 光管 1.0 mmol/L 0.07 m/s | 1.9 | 0.000355 |
| 光管 2.0 mmol/L 0.04 m/s | 0.6 | 0.000745 |
| 光管 2.0 mmol/L 0.07 m/s | 1.5 | 0.000559 |
| 平直斜翅管 0.5 mmol/L 0.04 m/s | 3.2 | 0.000169 |
| 平直斜翅管 0.5 mmol/L 0.07 m/s | 4.4 | 0.000107 |
| 平直斜翅管 1.0 mmol/L 0.04 m/s | 2.3 | 0.000311 |
| 平直斜翅管 1.0 mmol/L 0.07 m/s | 3.0 | 0.000218 |
| 平直斜翅管 2.0 mmol/L 0.04 m/s | 1.2 | 0.000569 |
| 平直斜翅管 2.0 mmol/L 0.07 m/s | 1.4 | 0.000412 |

2 实验结果与分析

2.1 浓度对结垢的影响

由图 3 和图 4 可知, 光管表面 0.5 mmol/L 时两种流速下结垢诱导期分别为 3.1 和 4.0 h, 浓度增大

至 1.0 mmol/L 时结垢诱导期分别缩短为 1.8 和 1.9 h, 浓度增大至 2.0 mmol/L 时结垢诱导期分别缩短为 0.6 和 1.5 h; 同样平直斜翅管表面 0.5 mmol/L 时两种流速下结垢诱导期分别为 3.2 和 4.4 h, 浓度增大至 1.0 mmol/L 时结垢诱导期分别缩短为 2.3 和 3.0 h, 浓度增大至 2.0 mmol/L 时结垢诱导期分别缩短为 1.2 和 1.4 h。因此, 浓度增大会使光管和平直斜翅管表面的结垢诱导期均大幅缩短, 这不利于降低换热器清洗频率和抗垢等。这种现象的原因是流体中 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反应出来, 使诱导期缩短。

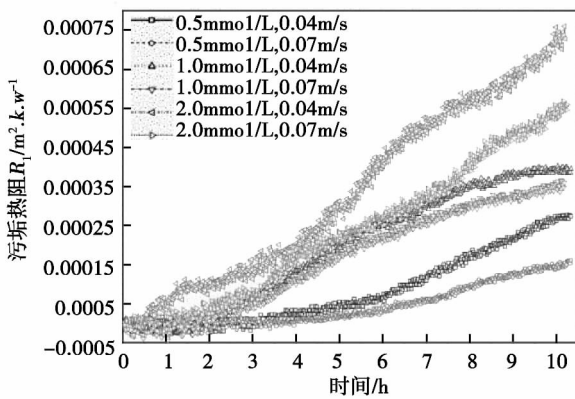


图 3 光管表面污垢热阻变化

Fig. 3 Change of the fouling heat resistance of a bare tube

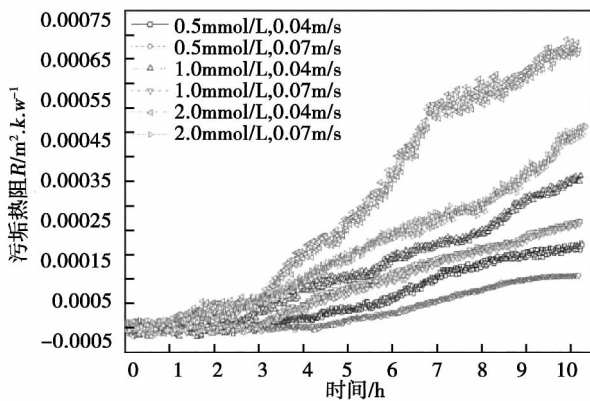


图 4 平直斜翅管表面污垢热阻变化

Fig. 4 Change of the fouling heat resistance of a straight oblique fin tube

另外, 碳酸钙浓度增大, 光管和平直斜翅管表面初始污垢热阻和速率增大, 同时 10 h 污垢热阻值也增大。相同实验条件下平直斜翅管的污垢热阻均小于光管表面, 且浓度越大两者之间的差距越大, 说明在较高碳酸钙浓度下平直斜翅管比光管具有更好的抗垢性能。

低浓度时 (0.5 mmol/L), 图 5 (a) 和 (b) 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^[12~13]; 图 6 (a) 和 (b) 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, 从其它结垢形貌图片可知, 此结垢状态仅相当于 2.0 mmol/L 时 6h 左右的结垢程度; 图 7 (a) 和 (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; 图 8 (a) 和 (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。

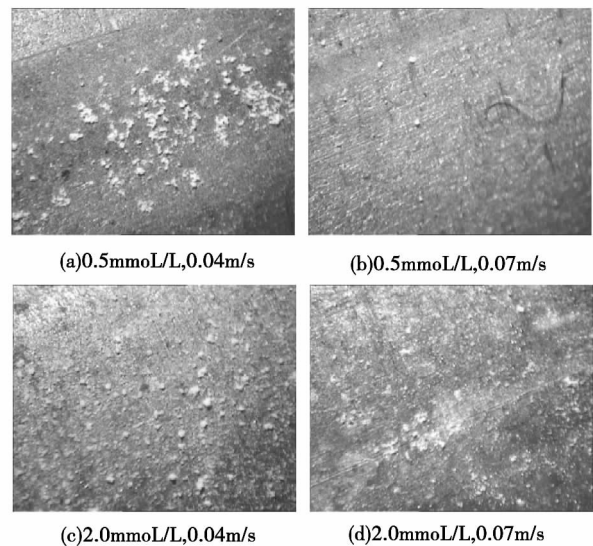


图 5 2 h 光管表面污垢形貌

Fig. 5 Morphology of the foul on the surface of a bare tube after 2 hours

高浓度时 (2.0 mmol/L), 图 5 (c) 和 (d) 可见, 碳酸钙析晶污垢结垢 2h 光管表面形成大量小晶粒, 几乎均匀分布整个表面; 图 6 (c) 和 (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,这是由于致密污垢层改变流体的流通面积,在污垢层周边流速加快,使流体的剥蚀剪力增大,因而先形成的污垢对周边污垢的积聚有抑制作用;图 7(c)和(d)可见,平直斜翅管表面在结垢 2h 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;图 8(c)和(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的小区域的薄污垢层。

2.2 流速对结垢的影响

由图 3 和 4 可见,相同碳酸钙溶液浓度时,碳酸钙溶液流速增大,光管和平直斜翅管表面结垢诱导期延长,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。相同条件下,流速增大使污垢热阻的上升速率减慢并导致 10 h 污垢热阻较小。并且当碳酸钙浓度较大时,流速增大使 10 h 污垢热阻下降较多,但流速对污垢热阻的影响程度小于碳酸钙浓度对污垢热阻的影响。

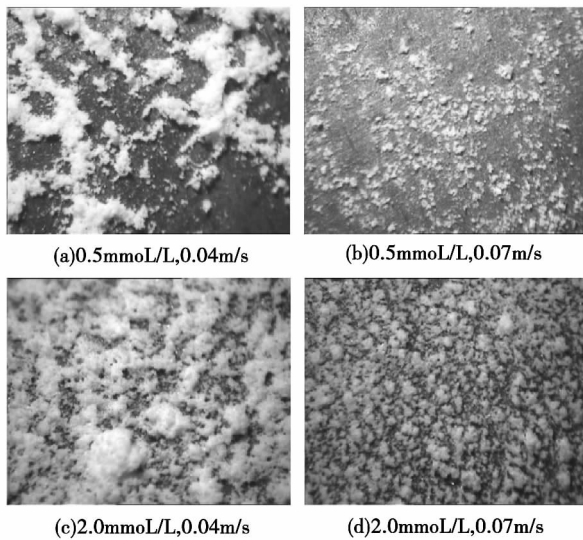


图 6 10 h 光管表面污垢形貌

Fig. 6 Morphology of the foul on the surface of a bare tube after 10 hours

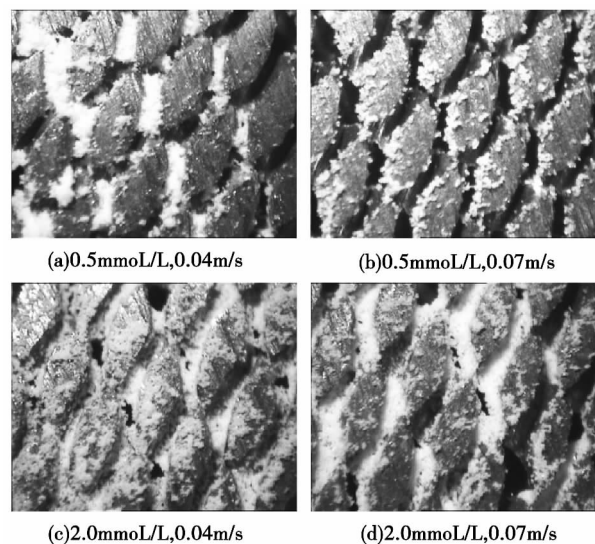


图 8 10 h 平直斜翅管表面污垢形貌

Fig. 8 Morphology of the foul on the surface of a bare tube after 10 hours:

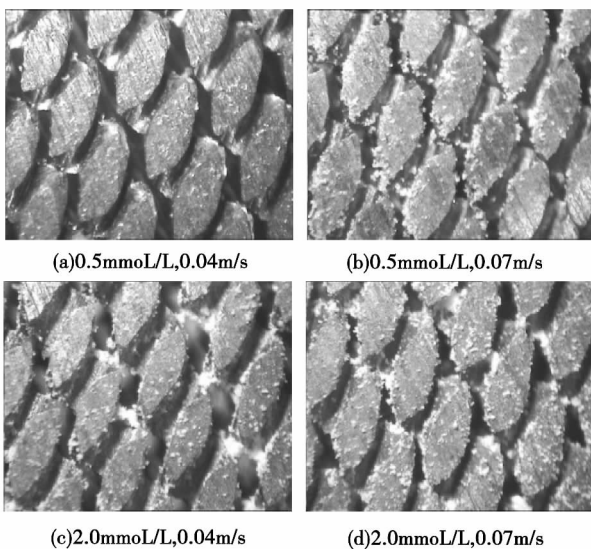


图 7 2 h 平直斜翅管表面污垢形貌

Fig. 7 Morphology of the foul on the surface of a bare tube after 2 hours

较低流速时(0.04 m/s),图 5(a)和(c)可见,光管表面 2 h 形成更多的碳酸钙晶粒,并且较大晶粒数量也较多,主要是因为流速较低,因而剥蚀剪力较低,碳酸钙污垢向换热面法向生长的阻力较小;图 6(a)和(c)可见,光管表面 10h 形成的污垢更多,主要表现在覆盖更多换热面和污垢层更厚,污垢层更厚也是由于流体剥蚀剪力较小而使其向换热面法向生长的阻力较小;图 7(a)和(c)可见,平直斜翅管表面 2h 形成的碳酸钙小晶粒较少,尤其是翅片底面基本保持清洁;图 8(a)和(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。较高流速时(0.07 m/s),图 5

(b)和(d)可见,光管表面2h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;图6(b)和(d)可见,光管表面10h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,污垢层更薄也是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;图7(b)和(d)可见,平直斜翅管表面2h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;图8(b)和(d)可见,平直斜翅管表面10h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形成更少的污垢。迎来流方向翅片前侧面结垢较为严重,其原因是流体夹杂成垢离子和已成核微粒撞击前一翅片并从前排翅片间隙绕过,当达到后排翅片前侧面时流通面积急剧扩大而流速急剧减小,因而此处剥蚀剪力更小,故较易附着。

值得注意的是,在结垢初始阶段,流速增大时光管表面形成的碳酸钙晶粒减少,但平直斜翅管表面却形成更多的碳酸钙小晶粒;而结垢10h时,流速增大使光管和平直斜翅管表面的结垢量均减少,可得结论:流速增大对光管表面结垢始终是抑制作用,而对平直斜翅管是先促进表面碳酸钙异相成核速率而后抑制碳酸钙进一步生长。原因是在结垢初始阶段,由于平直斜翅管表面又排翅片的影响,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 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 从主流体扩散至翅片表面,因而导致在剥蚀剪力较小的翅片表面反形成更多碳酸钙晶粒;随着碳酸钙进一步生长,最终堵塞翅片间隙,造成剥蚀剪力增大,导致其结垢量不及低流速时。光管表面由于表面光滑,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。

2.3 管表面参数对结垢的影响

由表1、图3和图4可见,相同条件下光管表面结垢诱导期均短于平直斜翅管,图5和图7显示结垢初始2h光管表面形成碳酸钙晶粒并不比平直斜翅管表面多,甚至较少。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平直斜翅管。图6和8可见,结垢10h光管表面结垢量也略少于平直斜翅管,但其污垢热阻却大于平直斜翅管。这与引言中所述不同学者

获得结论一致,即强化管具有更大的结垢速率和结垢量但污垢热阻却较小。强化管具有更大的结垢速率和结垢量是因为相同材料和公称直径下,强化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;强化管增强了碳酸钙溶液与强化表面的扰动,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,因为强化管具有更大的总换热系数,强化管 $U_{\text{强}0}$ 远大于光管 $U_{\text{光}0}$,强化管总换热热阻 $1/U_{\text{强}0}$ 远小于光管热阻 $1/U_{\text{光}0}$,假设因形成污垢使两种换热管的总换热系数均下降 ΔU ,则 $R_{\text{强}} = 1/(U_{\text{强}0} - \Delta U) - 1/U_{\text{强}0}$, $R_{\text{光}} = 1/(U_{\text{光}0} - \Delta U) - 1/U_{\text{光}0}$,显然 $R_{\text{强}} > R_{\text{光}}$,故强化管表面结垢量略多于光管,但其污垢热阻却小于光管。

碳酸钙浓度为0.5 mmol/L时,光管表面的结垢诱导期和10h污垢热阻与平直斜翅管较为接近,当碳酸钙浓度增大后,两者之间的差距逐渐增大,在较高碳酸钙浓度下平直斜翅管比光管具有更好的抗垢效果。

3 结 论

(1) 碳酸钙浓度对结垢的影响。成垢离子的浓度主要影响溶液中均相成核速率及其生长成碳酸钙晶粒的生长速率;溶液换热表面界面的溶液中均相成核形成的碳酸钙晶粒的浓度所影响下的换热表面污垢颗粒附着速率;溶液换热表面界面成垢离子浓度,换热表面碳酸钙异相成核速率及其生长成碳酸钙晶粒的生长速率。浓度增大使该3个速率均增大,因此浓度增大会使光管和强化管表面形成更多的污垢,诱导期缩短而污垢热阻增大。

(2) 流速对碳酸钙污垢的影响。主要表现为两个作用:一是促进污垢的成核和生长,即流速增大使 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;二是抑制污垢的成核和生长,即流速增大使换热表面流体的剥蚀剪力增大,使污垢难以向换热面法

向生长、污垢层不易增厚。两者作用的强弱决定流速对碳酸钙析晶污垢结垢的影响,一般来说,抑制作用强于促进作用,但对于强化管在不同污垢生长阶段影响不同。

(3) 平直斜翅管对碳酸钙污垢的影响。由于换热面被强化,一是造成溶液换热界面面积成倍增大,使表面初始异相成核速率增大;二是低肋翅片的扰动作用使更多的成垢离子和溶液中已形成的污垢晶粒扩散至换热表面,使污垢的成核速率和生长速率均增大并形成更多的污垢;三是由于平直斜翅管在清洁状态下总换热系数远高于光管,即使结垢量略多于光管,换热强化比下降,但其总换热系数仍远高于结垢时光管的总换热系数,导致其污垢热阻较小。

参考文献:

- [1] Rabas T J, Panchal C B, Sasser D, et al. Comparison of river water fouling rates for spirally indented and plain tubes [J]. *Heat Transfer Eng*, 1993, 14(4): 58-73.
- [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.
XU Zhi-ming, YANG Shan-rang, GAN Yun-hua. Experimental study of the heat transfer and fouling performance of a spirally-grooved tube [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2003, 2(2): 136-139.
- [3] 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 internally threaded tube condenser when fouling has been taken into consideration [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2005, 33(1): 66-69.
- [4] 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 fouling characteristic of an externally and spirally grooved tube [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(1): 93-96.
- [5] 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.
SHUAI Zhi-ming, FENG Hai-xian, LI Xue-tai. Experimental Investigation of the fouling on spirally grooved tubes [J]. *Proceedings of China Electric Machinery Engineering*, 1994, 14(2): 7-12.
- [6] 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.
ZHANG Zhong-bin, XU Zhi-ming, SHAO Tian-cheng. Experimental investigation of the heat transfer and fouling characteristics of a corrugated tube [J]. *Journal of North China University of Electric Power*, 2007, 34(5): 68-71.
- [7] 朱冬生, 曾力丁, 钱颂文. 轧槽管抗污垢性能及其防垢性能实验研究 [J]. *流体机械*, 2007, 35(4): 9-11.
ZHU Dong-shen, ZENG Li-dong, QIAN Song-wen. Experimental investigation of the fouling characteristics and fouling prevention performance of rolled and grooved tubes [J]. *Fluid Machinery*, 2007, 35(4): 9-11.
- [8] Wei Li, Ralph L. Webb. 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.
- [9] Ralph L Webb, Wei Li. 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 盛健, 张华, 史雪菲, 等. 35℃ CaCO₃ 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.
SHENG Jian, ZHANG Hua, SHI Xue-fei, et al. Surface fouling characteristics of the stainless steel 304 and 316 in CaCO₃ solution at 35℃ [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2012, 27(4): 478-482.
- [13] 盛健, 张华, 史雪菲, 等. CaCO₃ 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.
SHENG Jian, ZHANG Hua, SHI Xue-fei, et al. Fouling characteristics of brass and copper surfaces in CaCO₃ solution [J]. *Journal of Power Engineering*, 2012, 32(5): 399-403.

(陈滨 编辑)

added to prepare several coal ash samples with the Fe_2O_3 powder content being 1.53% ,10% ,20% ,30% and 40% respectively. Firstly ,the pyramid method was adopted to measure the influence of the changes of the Fe_2O_3 powder content on the melting characteristics of coal ash. Afterwards ,the coal ash with different Fe_2O_3 powder contents was laid uniformly and loosely on the surface of the refractory belt plates made from silicon carbide ,high alumina corundum and medium aluminum corundum respectively and placed into a high temperature muffle furnace to calcine for 40 hours at 1 330 °C. Upon the completion of the calcination ,the slagging characteristics of the three kinds of the refractory belt plates were observed and an X-ray diffraction analysis was performed of the coal ash. The test results show that with an increase of the Fe_2O_3 powder content of the coal ash ,all the melting temperatures of the coal ash assume a descending tendency and at the same time ,the slagging extents on the surface of the plates tend to be worsened. However ,when the Fe_2O_3 powder content of the coal ash increases to a given value ,their melting temperatures assume an ascending tendency instead and the slagging extents on the surface of the plates will no longer get increased but somewhat decreased. **Key words:** coal ash ,refractory belt ,melting characteristics ,slagging , Fe_2O_3 Powder

平直斜翅管表面碳酸钙污垢初始阶段结垢特性 = **Fouling Characteristics of the CaCO_3 Foul on the Surface of a Straight and Obliquely-finned Tube in the Initial Stage** [刊 ,汉] ZHAO Ping ,SHENG Jian ,ZHANG Hua (College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(5) . -523 ~528

A dynamic fouling test was performed of a bare tube and a straight and obliquely-finned tube at different CaCO_3 concentrations and flow speeds to obtain the influence of the CaCO_3 concentration ,flow speed and straight and obliquely-finned tube on the CaCO_3 crystal precipitation fouling process. It has been found that to increase the concentration can make both homogeneous nucleation speed and crystal nucleus growth speed increased and both foul crystal particle concentration on the boundary surface of the solution for heat exchange and foul ion concentration increased. The former makes more foul adsorbed on the heat exchange surfaces and the latter forces the heterogeneous nucleation speed and growth speed increased. To increase the flow speed can make the crystal nuclei and foul crystal formed on the surface of the bare tube and foul heat resistance decreased but the induction period extended and force the initial nucleation of the straight and obliquely-finned tube increased but the induction period extended and the foul quantity and heat resistance decreased. The straight and obliquely-finned tube has a bigger total heat exchange coefficient and a smaller foul heat resistance than the bare tube albeit the foul quantity is slightly more. **Key**

words: thermodynamics ,obliquely-finned tube ,CaCO₃ ,crystal precipitation-caused foul

生物质气化燃气低位热值影响因素的试验研究 = **Experimental Study of the Factors Influencing the Low Heating Value of a Biomass Gasified Fuel Gas** [刊 汉]JI Heng-song ,WANG Qian ,CHENG Shan ,et al(College of Energy Source and Power Engineering ,Jiangsu University ,Zhenjiang ,China ,Post Code: 201013) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(5) . - 529 ~ 534

In the light of the fact that the low heating value of a biomass gasified fuel gas is influenced by multiple factors ,such as gasification temperature ,steam/biomass mass ratio(referred to as mass ratio for short) and equivalent ratio etc. and these factors are interacted ,the orthogonally designed test method was used to study the sensitivity extent of the three dominant factors influencing the low heating value of the biomass gasified fuel gas and the test results were analyzed by using the range and variance analytic method to obtain the significance relationship influencing the lower heating value of the fuel gas and the optimum factor combination level. The test results show that in the range of the test conditions ,the priority order of various factors and their interaction influencing the lower heating value is as follows: equivalent ratio > gasification temperature > mass ratio > interaction of the mass ratio and equivalent ratio > interaction of the gasification temperature and equivalent ratio ,among them ,equivalent ratio ,gasification temperature and mass ratio have a particularly remarkable influence on the lower heating value of the fuel gas. The version optimized for preparing the fuel gas from the gasification of biomass through an analysis of the interaction is given as follows: gasification temperature 750 °C ,mass ratio 0. 75 and equivalent ratio 0. 25. Under such conditions ,the lower heating value of the fuel gas will be the highest(6. 530 MJ/m³) . **Key words:** biomass ,gasification ,low heating value ,influencing factor ,orthogonal test

7 m² 多槽式 CPC 聚光集热装置性能研究 = **Performance Study of a 7 m² Multi-trough Type CPC(Compound Parabolic Collector) Light Concentration and Heat Collector** [刊 汉]MENG Li ,ZHU Yue-zhao ,YANG Mou-cun ,et al(Jiangsu Provincial Key Laboratory on Process Enhancement and New Energy Source Equipment Technology ,College of Mechanical and Power Engineering ,Nanjing University of Technology ,Nanjing ,China ,Post Code: 211816) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(5) . - 535 ~ 539

To combine the merits of the linear Fresnel type and compound parabolic collector and fuse with the heat pipe vacuum tube heat accumulation and heat transfer technologies ,developed was a 7 m² multi-trough type CPC(Compound