

研究论文

三角翼涡流发生器纳米氧化镁颗粒污垢特性

徐志明¹, 杨苏武¹, 朱新龙¹, 张一龙², 刘坐东²

(¹东北电力大学能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012; ²华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 为了探究三角翼涡流发生器的纳米氧化镁颗粒污垢特性, 选用粒径为 50 nm 的氧化镁颗粒配制的胶体溶液为研究对象, 研究了在不同水浴温度、颗粒浓度、流速、三角翼间距以及不同布置等工况下三角翼涡流发生器的污垢特性。结果表明: 三角翼涡流发生器具有抑垢特性, 水浴温度、浓度、流速对其抑垢能力及结垢速率均有影响, 水浴温度升高、颗粒浓度降低以及工质流速升高都会导致三角翼的抑垢能力增强。三角翼不同列间距的抑垢能力随着布置方式的改变而改变, 采用均匀分布布置形式时 40 mm 列间距的抑垢能力最强, 而采用同列数布置时 80 mm 列间距的抑垢能力最强。

关键词: 三角翼; 氧化镁; 结垢; 污垢特性; 间距; 胶体; 纳米粒子

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20140962

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2015) 01—0086—06

Characteristics of nanometer magnesia particulate fouling of delta wing vortex generator

XU Zhiming¹, YANG Suwu¹, ZHU Xinlong¹, ZHANG Yilong², LIU Zuodong²

(¹Energy and Power Engineering Institute, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin, China;

²North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of nanometer magnesia particle fouling in delta wing vortex generator, colloidal solutions made of magnesia particles of 50 nm were used in the experiments. The fouling characteristics of the delta wing vortex generator under different conditions were investigated, including water bath temperature, particle concentration, flow velocity, spacing and arrangement of delta wings. The results show that the delta wing vortex generator can inhibit the fouling. The longitudinal vortex and stagnation zone produced by delta wing vortex generator and the characteristics of magnesia colloidal solution have a great influence on the fouling characteristics. Higher water bath temperature, lower magnesia solution concentration, and higher flow velocity can reduce the fouling rate. The fouling characteristics also depend on the arrangement of delta wings, which results in different longitudinal vortexes. With the uniform layout of delta wings, 40 mm spacing is the best for inhibition of dirt. With the same number of columns, 80 mm spacing is the best.

Key words: delta wing; magnesia; fouling; fouling characteristics; spacing; colloid; nanoparticles

引 言

颗粒污垢是换热设备中污垢的一种, 它是指悬

浮在流体中的固体颗粒在换热面上的积聚^[1]。镁垢则是其中比较常见的一种。许多学者对于颗粒污垢的特性进行了研究。顾业梅等^[2]对弧线管以及光管

2014-06-26 收到初稿, 2014-09-02 收到修改稿。

联系人: 杨苏武。第一作者: 徐志明 (1959—), 男, 教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51076205)。

Received date: 2014-06-26.

Corresponding author: YANG Suwu, 1012461@qq.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51076205).

中颗粒污垢诱导期的影响因素进行了实验研究。张冠敏等^[3]从实验与理论两个方面研究了板式换热器颗粒污垢特性。李红霞等^[4]对强化管内氧化铝和氧化铁颗粒污垢的污垢特性进行了实验与模拟。朱华等^[5]研究了螺纹管中实际冷却水污垢和颗粒污垢的特性。王景涛等^[6]从不同颗粒直径、颗粒浓度、工质流速和温度工况这几个角度对纳米氧化镁颗粒污垢在交叉缩放椭圆管内的污垢特性进行了实验研究。

涡流发生器作为一种被动式强化换热装置已得到广泛的应用,它能产生涡旋,减薄边界层,对污垢的沉积能起到一定的抑制作用。三角翼涡流发生器作为涡流发生器中应用得比较广泛的一种,在传热、空气动力学以及抑垢方面都得到了广泛研究。王令等^[7]、田林等^[8]分别对矩形通道内安装纵向涡流发生器强化换热进行了模拟与实验研究。Kwak 等^[9]、Joardar 等^[10]分别对不同换热器内三角翼涡流发生器的换热与压降特性进行了实验研究。Zhou 等^[11]在文献中对矩形翼、三角翼、梯形翼和柱面梯形翼的流动特性以及换热特性进行了论述。Hasan 等^[12]研究了三角翼涡流发生器在交叉流动条件下 Na_2SO_4 析晶污垢的污垢特性,提出需要从抑垢与压降两个方面考虑涡流发生器的设计。刘坐东等^[13]和王宇朋等^[14]分别从模拟与实验两个方面研究了3种翼形涡流发生器的 CaCO_3 污垢特性,研究表明攻角的改变对于三角翼的抑垢变化影响不明显,列间距是一个重要的影响因素。目前国内外对于三角翼在颗粒污垢方面的研究较少,而颗粒污垢是污垢中主要成分之一,国内外许多学者都从各个方面对其进行了大量研究,三角翼目前应用得也十分广泛,因此研究三角翼的颗粒污垢特性是十分必要的。本研究采用颗粒粒径为 50 nm 的纳米氧化镁颗粒配制纯胶体溶液来模拟换热面颗粒污垢的生成,以达到探索三角翼颗粒污垢特性的目的。

1 实验系统简介

1.1 实验系统与装置

实验系统如图1所示,工质由水泵从低位水箱中打入高位水箱,一部分流入实验段,实验段为由厚 0.5 mm、宽 100 mm、长 1000 mm 的 304 不锈钢板制成的换热面以及换热面之间的密封材料构成的一个长 1000 mm、宽 100 mm、高 8.5 mm 的矩形通道。涡流发生器按一定尺寸布置在换热面上。工质在实验段中与恒温水浴进行换热后流回低位水

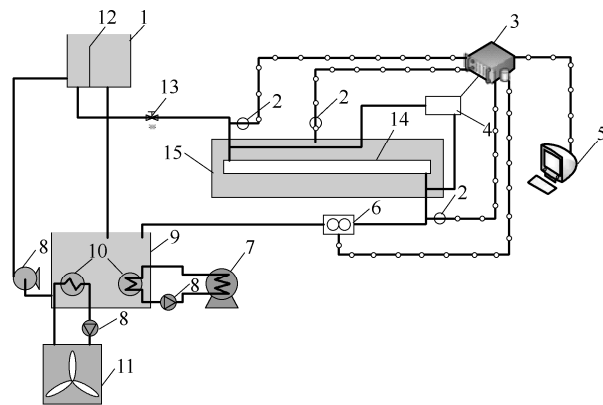


图1 实验系统

Fig.1 Schematic diagram of experimental system

1—high level cistern; 2—thermal resistance; 3—acquisition module; 4—differential pressure gauge; 5—microcomputer; 6—electromagnetic flowmeter; 7—refrigerator; 8—circulating water pump; 9—low level cistern; 10—radiator; 11—fan; 12—overflow plate; 13—flow control valve; 14—experimental section; 15—constant temperature water tank

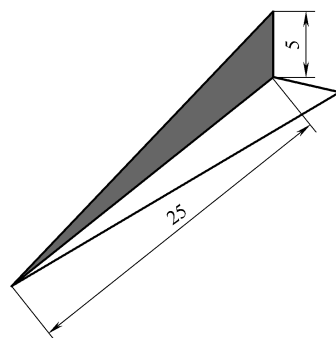


图2 涡流发生器

Fig.2 Schematic diagram of vortex generator

箱进行冷却,另外一部分经过溢流板溢流后直接流入低位水箱。实验的温度由 PT100T 型热电偶采集,其精度为 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 。流量采用型号为 LDE-15SM2F100 的电磁流量计采集。

实验采用的涡流发生器为高 5 mm,高宽比为 1:5 的三角翼涡流发生器,材质为 0.3 mm 厚的 304 不锈钢片。涡流发生器如图 2 所示。

1.2 实验原理

实验台能够直接得到实验段进出水口的温度 t_1 、 t_2 ,恒温水浴温度 t_0 ,以及实验中的流量 q_v 。

由传热方程式(1)以及热平衡方程式(2)

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

$$\Phi = \rho q_v c_p (t_2 - t_1) \quad (2)$$

可以得到传热系数 k 的表达式(3)

$$k = \frac{\rho q_v c_p (t_2 - t_1)}{A\Delta t_m} \quad (3)$$

式中, ρ 为流体密度, c_p 为流体比热容, Δt_m 为

对数平均温差

$$\Delta t_m = \frac{t_2 - t_1}{\ln[(t_0 - t_1)/(t_0 - t_2)]}$$

污垢热阻可以由式(4)得到

$$R_f = \frac{1}{k} = \frac{1}{k_0} \quad (4)$$

式中, R_f 为污垢热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$; k_0 、 k 分别为清洁状态下和有污垢状态下实验段的总传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$ 。

2 实验结果分析

实验从水浴温度、流速、纳米氧化镁溶液浓度、三角翼列间距以及不同布置方式这 5 个方面探究了三角翼涡流发生器的纳米氧化镁污垢特性。涡流发生器的布置方式如图 3 所示: 入口稳定段 $S=150 \text{ mm}$, C 为出口稳定段, 前沿间距 $a=20 \text{ mm}$, b 为间距, 迎流攻角 $\beta=90^\circ$, 迎流向布置 2 列 12 排, 箭头方向为工质流动方向。

2.1 水浴温度对三角翼污垢特性的影响

在其他工况相同、不同水浴温度的条件下对光板与三角翼涡流发生器进行了实验。实验的水浴温度分别为 45°C 和 50°C 。

图 4 为实验得到的污垢热阻曲线。从图中可以

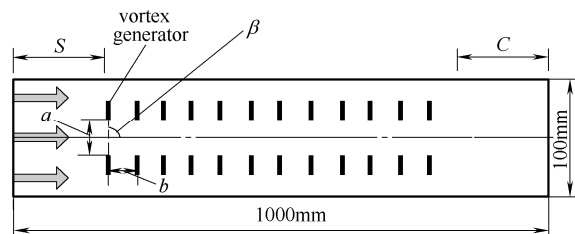


图 3 涡流发生器布置示意图

Fig.3 Vortex generator layout

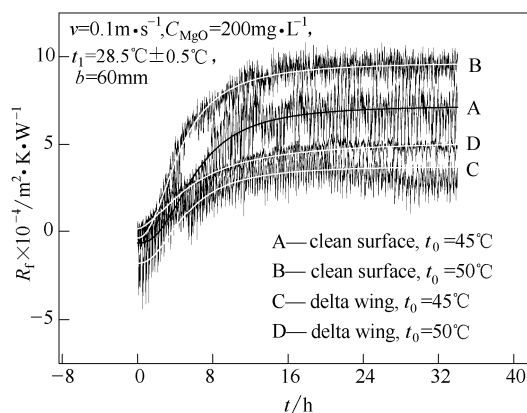


图 4 水浴温度对污垢热阻的影响

Fig.4 Influence of water bath temperature on fouling resistance

看出, 相同工况下加装了三角翼涡流发生器的污垢热阻总是小于光板, 而随着水浴温度的升高, 光板和三角翼的污垢热阻都有所加大且结垢速率也明显加快, 光板 (曲线 A 和 B) 的污垢热阻渐近值增大了约 58%, 而三角翼只增大了约 33%, 三角翼 (曲线 C 和 D) 的抑垢能力随水浴温度升高而增强。

相同工况下, 三角翼涡流发生器具有明显的抑垢效果, 这是由于流体流经涡流发生器会产生纵向涡, 破坏边界层, 对壁面存在磨蚀和剪切作用, 从而降低污垢沉积率, 增大污垢的剥蚀率, 导致污垢热阻减小。随着水浴温度的升高, 污垢热阻渐近值和结垢速率也升高, 这是由于水浴温度的升高会引起换热表面温度的升高, 使边界层内粒子的布朗运动加剧, 这会导致更多的颗粒输运到壁面沉积, 而使污垢热阻与结垢速率升高。而加装三角翼涡流发生器后, 涡流发生器产生的纵向涡对壁面冲刷扰动, 破坏了壁面的边界层, 使壁面附近的流体处于不稳定的状态, 在一定程度上抑制了颗粒向壁面的输运沉积, 从而导致三角翼抑垢能力随水浴温度升高而增强。

2.2 浓度对三角翼污垢特性的影响

在其他工况不变的条件下分别对光板与三角翼进行了不同污垢颗粒浓度的实验研究, 实验采用的浓度为 200 、 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 实验得出的污垢热阻曲线见图 5。从图中可以看出, 随着浓度的升高, 污垢热阻明显升高, 而且结垢速率也明显加快, 三角翼涡流发生器的抑垢能力随浓度上升而有所减弱, $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下三角翼 (曲线 B) 比光板 (曲线 D) 的污垢热阻渐近值减小了约 11%, 而 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下三角翼 (曲线 A) 比光板 (曲线 C) 减小了约 53%。

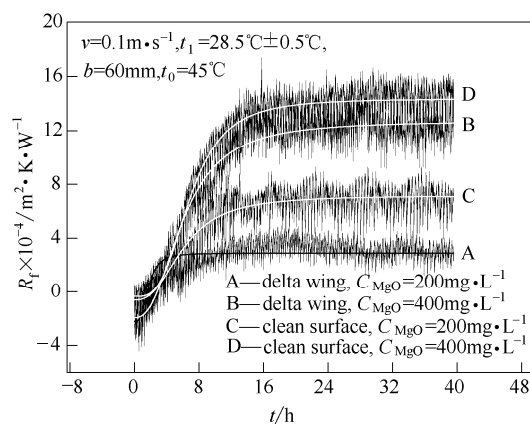


图 5 浓度对污垢热阻的影响

Fig.5 Influence of concentration on fouling resistance

污垢热阻以及结垢速率都随浓度上升而升高,这是由于颗粒浓度越大溶液和换热面的质量浓度梯度就越大,会驱使更多的颗粒向换热表面输运,从而导致结垢速率加快,污垢热阻渐进值增大^[15]。随浓度上升三角翼涡流发生器的抑垢能力减弱,这是由于工质遇到涡流发生器后在其上部多形成横向涡,导致上部形成一个回流滞止区,此区域污垢沉积率较大,而工质浓度升高导致溶液中含有的纳米氧化镁粒子增加,相当于加大了回流滞止区的沉积率,因而导致抑垢能力的减弱。

2.3 流速对三角翼污垢特性的影响

在其他工况不变的条件下对流体不同流速工况下的污垢特性进行了实验研究,实验的流速分别为 0.1 、 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,图6为实验的污垢热阻。从图中可以看出,污垢热阻随流速增大而减小,而且结垢速率随流速升高而降低,三角翼的抑垢能力随流速升高而升高, $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流速下三角翼(曲线A)与光板(曲线B)相比污垢热阻渐进值降低了约11%,而 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流速下三角翼(曲线C)比光板(曲线D)污垢热阻减小了约32%。

流速对污垢形成的影响十分复杂,在污垢的输运、附着和剥蚀这3个阶段流速都有参与。在污垢刚开始形成的阶段溶液中污垢颗粒浓度较大,流速的增大一方面会为颗粒间的有效碰撞提供能量,导致更多的颗粒有机会相互碰撞团聚^[16](胶体小颗粒之间发生碰撞相互结合成直径更大的颗粒的过程),胶体粒子受到的重力影响可以忽略^[17],但其团聚后由于粒径增大会受到重力影响而沉降,沉降的大颗粒不易输运到壁面上,因而导致结垢速率减慢,污垢热阻降低。另一方面流速的增大也会增大壁面受到的剪切力,导致污垢的剥蚀率升高,从而

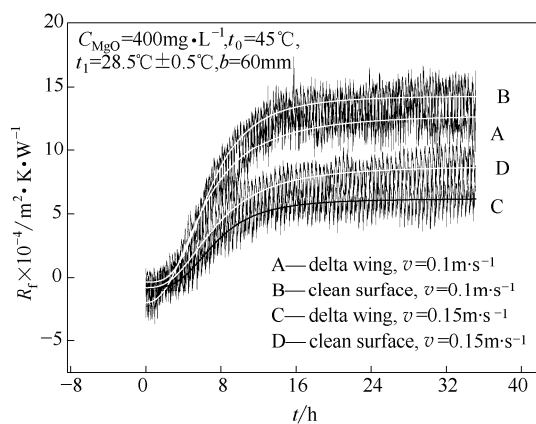


图6 流速对污垢热阻的影响

Fig.6 Influence of velocity on fouling resistance

使污垢热阻减小。三角翼涡流发生器产生的纵向涡会随流速增大而增强,其对壁面的冲刷与剪切效果也增强,从而导致三角翼的抑垢能力随流速升高而增强。

2.4 均匀分布布置不同间距对三角翼污垢特性的影响

其他工况不变,在进出口稳定段近似相等的条件下,采用均匀分布的方式分别将间距为40、60、80 mm的涡流发生器布置在换热面上,它们的排数分别为18排、12排、9排,对这3种布置的涡流发生器进行实验。图7为实验的污垢热阻。从图中可知,均匀分布布置下60 mm(曲线C)间距的污垢热阻最大,80 mm(曲线B)次之,40 mm(曲线A)最小。

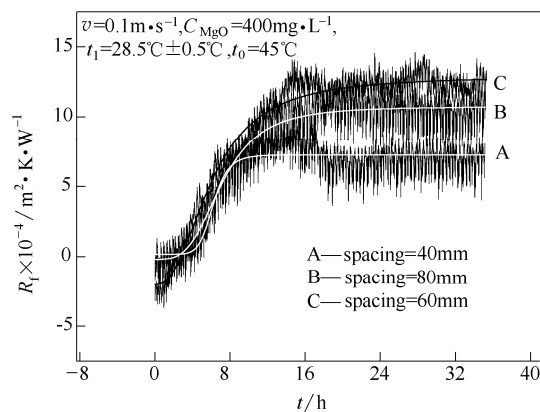


图7 均匀分布下间距对污垢热阻的影响

Fig.7 Influence of spacing under uniform distribution on fouling resistance

这可以从两个方面进行分析。一方面是由于三角翼涡流发生器产生涡旋的传播距离是有限的,当间距为40 mm时,三角翼产生的涡旋能够传递到下一个涡流发生器,从而使涡旋能不断传播下去,加剧了对流体的扰动,加强了对壁面的冲刷能力,导致污垢热阻减小;当间距在60 mm时,上一个涡流发生器产生的纵向涡处于即将平复的状态,而流体流经涡流发生器在迎流方向通常形成横向涡,产生的纵向涡不能传递到下一个涡流发生器,而是在之前与下一个涡流发生器产生的横向涡相遇,互相抵消,加大了涡流发生器前的滞止区,从而导致污垢热阻升高;而当间距为80 mm时,上一个三角翼产生的涡旋已经完全平复,间距成为次要影响因素。另一方面,若在一定尺寸的换热面上均匀分布涡流发生器,间距的减小必然导致排数的增加,从而增加了纵向涡对壁面的影响面积,有利于减小污垢热阻。

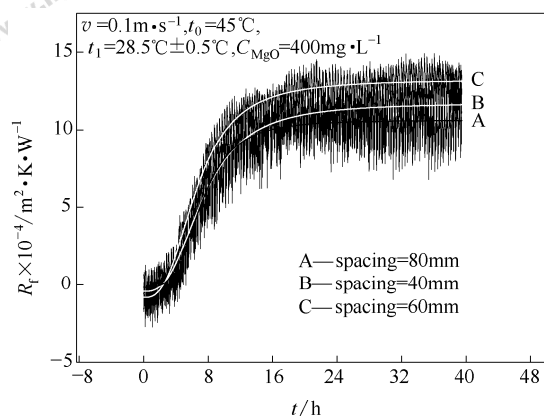


图 8 相同排数下间距对污垢热阻的影响

Fig.8 Influence of spacing under the same row number on fouling resistance

2.5 同排数布置不同间距对三角翼污垢特性的影响

在其他工况不变且不考虑均匀分布即忽略出口稳定段的条件下,采用相同排数(9排)对3种间距进行了实验,结果如图8所示。从图中可以发现,相同列数的工况下,80 mm(曲线A)间距污垢热阻最小,40 mm(曲线B)次之,60 mm(曲线C)最大。

相同排数布置工况下,40 mm间距的污垢热阻略大于80 mm间距,这是由于虽然40 mm间距下产生的纵向涡抑垢能力强,但是在换热面面积足够大的情况下,采用相同排数布置,40 mm间距布置下的涡流发生器产生的纵向涡对整个换热面的影响范围整体来说却比80 mm间距小许多,所以导致其污垢热阻略大于80 mm。而对于60 mm间距,在这种布置情况下,其产生纵向涡的抑垢效果差,对整个换热面的影响范围也小,所以其抑垢能力仍然是最差的。

3 结 论

(1) 换热表面加装三角翼涡流发生器对纳米氧化镁污垢存在抑垢作用,水浴温度的升高会导致污垢热阻升高以及结垢速率加快,三角翼涡流发生器的抑垢能力随之增强。

(2) 纳米氧化镁浓度的升高会导致污垢热阻升高,结垢速率加快,三角翼涡流发生器的抑垢能力随之减弱。

(3) 流速的升高会导致污垢热阻降低,结垢速率也随之降低,三角翼涡流发生器的抑垢能力随之增强。

(4) 在换热面尺寸一定的条件下,采用均匀

分布的布置形式,间距40 mm的排数最多,抑垢效果最好,间距80 mm次之,间距60 mm抑垢能力最差。

(5) 当换热面足够大时,采用相同列数的布置方式,间距80 mm的抑垢效果最好,间距40 mm次之,间距60 mm抑垢效果最差。

(6) 三角翼涡流发生器设计尺寸可能对实验结果存在一定的影响,通过对其进行优化应可以提高其抑垢性能。

符 号 说 明

b —— 涡流发生器间距, mm

C —— 纳米氧化镁胶体溶液浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

k_0, k —— 分别为清洁状态下和有污垢状态下实验段的总传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

q_v —— 流量, $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$

R_f —— 污垢热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

t_1, t_2, t_0 —— 分别为实验段入口温度、出口温度以及恒温水浴温度, $^{\circ}\text{C}$

v —— 实验流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

References

- [1] Yang Shanrang (杨善让), Xu Zhiming (徐志明), Sun Lingfang (孙灵芳). Heat Exchange Equipment Fouling and the Countermeasures (换热设备污垢与对策) [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2004: 15
- [2] Gu Yemei (顾业梅), Li Yun (李云), Zhang Bingqiang (张兵强). Experiment research on effect factor for particulate fouling induction [J]. *Boiler Manufacturing* (锅炉制造), 2011 (2): 19-21
- [3] Zhang Guanmin (张冠敏), Li Guanqiu (李冠球), Li Wei (李蔚), Huang Tao (黄涛), Ren Yucheng (任毓程). Experimental and theoretical investigations about particulate fouling in plate heat exchangers [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2013, 34 (9): 1715-1718
- [4] Li Hongxia (李红霞), Li Guanqiu (李冠球), Li Wei (李蔚). Analysis of in tubes particulate fouling characteristic [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science* (浙江大学学报: 工学版), 2012, 46 (9): 1671-1677
- [5] Zhu Hua (朱华), Zhuang Bo (庄博), Li Wei (李蔚), Zhong Changxiong (钟昌雄). A study of practical cooling water and particulate fouling characteristics in spiral-grooved tubes [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power* (热能动力工程), 2008, 23 (2): 165-169
- [6] Xu Zhiming (徐志明), Wang Jingtao (王景涛), Wang Lei (王磊), Zhang Yilong (张一龙), Liu Zuodong (刘坐东), Jia Yuting (贾玉婷). Experimental analysis on the particulate fouling characteristics of the alternating elliptical axis tube [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展), 2014, 33(4): 831-836
- [7] Wang Ling (王令), Chen Qiuyang (陈秋扬), Zhou Yangeng (周砚耕), Wang Qiuwang (王秋旺), Huang Yanping (黄彦平), Xiao Zejun (肖泽军). Heat transfer enhancement in rectangular narrow channel with

- periodically mounted longitudinal vortex generators on one sidewall [J]. *Nuclear Power Engineering* (核动力工程), 2005, **26** (4): 344-347
- [8] Tian Lin (田林), Bai Wei (柏巍), Xue Shanhu (薛山虎), Huang Zipeng (黄自鹏), Wang Qiuwang (王秋旺). Numerical study of influence of longitudinal vortex generator on flow and heat transfer in rectangular channel [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2013, **34** (2): 324-327
- [9] Kwak K M, Torii K, Nishino K. Simultaneous heat transfer enhancement and pressure loss reduction for finned-tube bundles with the first or two transverse rows of built-in winglets [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005, **29** (25): 625-632
- [10] Joardar A, Jacobi A M. Impact of leading edge delta-wing vortex generators on the thermal performance of a flat tube, louvered-fin compact heat exchanger [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**: 1480-1493
- [11] Zhou G, Ye Q. Experimental investigations of thermal and flow characteristics of curved trapezoidal winglet type vortex generators [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, **37**: 241-248
- [12] Hasan B O, Nathan G J, Ashman P J, *et al.* The use of turbulence generators to mitigate crystallization fouling under cross flow conditions [J]. *Desalination*, 2012, **288**: 108-117
- [13] Xu Zhiming (徐志明), Liu Zuodong (刘坐东), Zhang Yilong (张一龙), Wang Yupeng (王宇朋), Zhang Zhongbin (张仲彬). Numerical simulation about influence of several kinds of winglet vortex generator structures on CaCO_3 fouling characteristics [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2013, **64** (7): 2468-2473
- [14] Xu Zhiming (徐志明), Wang Yupeng (王宇朋), Liu Zuodong (刘坐东), Zhang Yilong (张一龙). Experimental investigation on the characteristic of restraining fouling of wing-type vortex generators [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2012, **33** (11): 1936-1939
- [15] Xu Zhiming (徐志明), Dong Bing (董兵), Du Xiangyun (杜祥云), Wang Binglin (王丙林). Experimental study on particle fouling in plate heat exchangers [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering* (动力工程学报), 2013, **33**(7): 539-543
- [16] Yuan Wenjun (袁文俊), Zhou Yongmin (周永敏). Reasons for aggregation of nanoparticles and solutions [J]. *Materials Review* (材料导报), 2008, **22** (12): 59-61
- [17] Feng Xusheng (冯续胜), Liu Hongguo (刘洪国), Hao Jingcheng (郝京诚). *Colloid Chemistry* (胶体化学) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 63-71