

脉动通道内矩形翼涡流发生器布置方式对颗粒污垢的影响

韩志敏, 刘威, 李江, 陈则齐, 徐志明

(东北电力大学能源与动力工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

Effect of Rectangular Wing Vortex Generator Arrangement on Particulate Fouling in a Pulsating Channel

HAN Zhimin, LIU Wei, LI Jiang, CHEN Zeqi, XU Zhiming

(School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin Province, China)

ABSTRACT: When water is used as the working fluid for heat utilization in heat exchanger equipment, it tends to accumulate some sediments and suspended particles in the channel, thus forming particulate fouling, thereby degrading the heat transfer performance. In order to solve the problem of particulate fouling in the heat exchanger channel, this paper adopts numerical simulation to study the effect of different arrangements of rectangular-wing vortex generators on particulate fouling in the pulsating channel, with a focus on the attack angle and spacing of rectangular wing vortex generators. The results show that compared with the smooth channel, the two pulsating channels show better anti-fouling effect, among which the rectangular wing pulsating channel exhibits the best anti-fouling effect. In the rectangular wing pulsating channel, with the increase of the rectangular wing vortex generator flow angle, the fouling resistance gradually decreases. When the attack angle reaches 90° , the wing attains the best anti-fouling effect of 36.8%. With the increase of the rectangular wing vortex generator spacing, the fouling resistance first decreases and then increases. When the spacing is 360 mm, the wing attains the best anti-fouling effect of 41.22%. This study demonstrates that a rectangular wing at 90° attack angle with 360 mm spacing in the pulsating channel achieves optimal anti-fouling effect. This configuration contributes to improving the anti-fouling performance in heat exchanger channels.

KEY WORDS: pulsating flow; rectangular wing vortex generator; particulate fouling; fouling resistance; numerical simulation

摘要: 当用水作为换热设备热能利用的工质时, 容易在通道内积聚部分沉淀物和颗粒悬浮物, 从而形成颗粒污垢, 使换热性能下降。为解决换热器通道内的颗粒污垢问题, 该文采用数值模拟的方式研究脉动通道内矩形翼涡流发生器不同布置方式对颗粒污垢的影响, 主要分析矩形翼涡流发生器的迎流角度和间距的影响。结果表明: 相较于光滑通道, 两种脉动通道均具有良好的抑垢效果, 且矩形翼脉动通道的抑垢效果更佳; 在矩形翼脉动通道内, 随着矩形翼涡流发生器迎流角度的增大污垢热阻逐渐减小, 当迎流角度为 90° 时抑垢效果最好, 其抑垢效果能达到 36.8%; 随着矩形翼涡流发生器间距增大污垢热阻先减小后增大, 当间距为 360 mm 时抑垢效果最好, 其抑垢效果能达到 41.22%。在该文研究范围内, 当脉动通道内的矩形翼迎流角度为 90° , 间距为 360 mm 时抑垢效果最佳, 有助于提高换热器通道内的抑垢性能。

关键词: 脉动流; 矩形翼涡流发生器; 颗粒污垢; 污垢热阻; 数值模拟

0 引言

能源储备的充盈保障着社会稳定与经济发展, 也为国家的发展战略提供强大支持, 而能源短缺和能源利用效率低下一直是制约我国经济发展的两大难题^[1-4]。Steinhagen 等^[5]对某国家百余企业中的两千多台换热设备使用情况进行一系列研究, 结果表明, 90%以上的换热设备内都存在一定的污垢问题。有时污垢造成的热阻占比可高达总热阻的 80%^[6]。此外污垢的存在可能带来安全风险, 严重影响换热器设备正常运行与使用寿命^[7]。由此可见, 有效的控制换热器污垢就会节约成本, 提高经济效益, 从而实现节能减排。

研究表明, 脉动流在强化传热的同时还可以产

基金项目: 国家自然科学基金项目(52206079); 吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20240139KJ)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52206079); Scientific Research Project of Jilin Provincial Department of Education (JJKH20240139KJ).

生良好的抑垢效果^[8-10]。其中, 黄其等^[11]从涡变化规律的角度研究三角槽内脉动流的传热特性, 结果表明脉动流可以增强传热效果, 达到节能减排的目的。Gillham 等^[12]研究在稳定层流中引入脉冲对清洗的影响, 得出脉动流具有提高壁面剪切力的作用, 从而提高污垢的清洁效果。之后郑小涛等^[13]建立污垢测试实验系统, 研究脉动流对比稳态流下光管内的污垢生长特性, 实验结果表明, 当脉动流频率为 2.0 Hz 时, 污垢热阻值较稳态流时减小 25%, 具有明显的抑垢效果。

近年来, 涡流发生器的研究也已经从强化传热逐渐转向抑垢方面^[14-16]。其中, 杨云等^[17]对具有凹陷涡发生器的传热特性进行模拟研究, 结果表明, 非稳态的涡流动显著地强化了凹陷表面的对流传热性能。Zhang 等^[18]研究具有涡流诱导成分的换热器中的强化传热与污垢沉积, 结果表明, 涡流诱导组分有效提高传热系数的同时还能有效抑制污垢的沉积。之后, Xu 等^[19]数值研究在装有球形涡流发生器的矩形通道下 CaSO_4 的沉积特性, 结果表明, 污垢的沉积量随着涡流发生器布置间距的增加而增加。Wang 等^[20]实验研究 5 种不同 H 形翅片管换热器的结垢性能, 结果表明, 双 H 形翅片管可以有效减少结垢。Li 等^[21]分别研究 5 种不同凹槽布局 and 纵向涡流发生器的双 H 形翅片管换热性能与颗粒污垢沉积特性。研究结果表明, 最佳布局可以提高 12.92%~16.63% 的传热能力, 并降低 21.75%~30.72% 的流阻损失, 并将抑垢率降低 2.4%~23.7%。

综上所述, 采用脉动流或涡流发生器均能起到一定的抑垢效果, 但是将两种方式相结合, 即在脉动流通道内加装涡流发生器的抑垢研究, 目前还不太充分。此外相关学者虽然已经对涡流发生器不同结构进行了相关研究, 但其布置方式对颗粒污垢沉积的影响研究还不太充足。因此, 本文采用数值模拟的方式对比光滑通道、脉动通道以及矩形翼脉动通道对污垢沉积的影响, 并详细分析矩形翼脉动通道内矩形翼的迎流角度和间距两种布置方式的影响。该项研究通过对矩形翼涡流发生器布置方式与流体运动特性之间的相互作用进行深入研究, 有助于全面认识并优化换热设备的抑垢性能。

1 数学模型

1.1 控制方程

本研究中, 流体为无内热源的不可压缩的三维

流动, 同时满足各控制方程, 通用形式^[22]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (1)$$

式中: 广义变量 ϕ 表示变量 u 、 v 、 w 、 T 等; Γ_ϕ 为广义扩散系数; S_ϕ 为广义源项。

1.2 颗粒污垢模型

污垢的沉积率不仅与布朗和涡旋扩散等相关, 还与颗粒运动过程的重力沉积、湍流沉积有关, 当然如果通道内存在不同温差的流动换热时, 热泳沉积也需要考虑。综上, 本文的沉积率^[23]表示为

$$m_d = S_p u_d C_\infty \quad (2)$$

式中: S_p 为黏附概率; C_∞ 为颗粒实际浓度, kg/m^3 ; u_d 为颗粒沉积速率, 如式(3)所示。

$$u_d = -(D_B + \varepsilon_p) \frac{\partial C^+}{\partial y} - C_c \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{g d_p}{C_D} \frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_l} \right)^{1/2} \cdot \cos \theta C^+ - D_T \frac{\mu}{\rho_l T} \frac{\partial T}{\partial y} C^+ - \tau_p \frac{\partial \sqrt{v_{py}^2}}{\partial y} C^+ \quad (3)$$

式中: D_B 为布朗扩散系数; ε_p 为湍流扩散系数; C_c 为 Stokes-Cunningham 滑移修正系数; D_T 为热泳扩散系数; τ_p 为颗粒的弛豫时间。

沉积到壁面上的颗粒污垢会在流体的冲刷或者其他颗粒的碰撞作用下脱离壁面, 剥蚀率的大小与污垢厚度、污垢强度因子、流体剪切力等有关, 由文献[24]可知, 污垢的剥蚀率可以表示为

$$m_r = \frac{\tau_w x_f}{\zeta} \quad (4)$$

式中: x_f 为污垢层厚度, m ; τ_w 为壁面剪切力, Pa ; ζ 为污垢附着强度因子, $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$, 污垢附着强度因子与管道结构, 雷诺数等相关^[25]。

颗粒污垢的沉积和剥蚀是一个动态过程, 当沉积量与剥蚀量平衡时, 污垢层厚度趋于稳定, 污垢热阻达到动态平衡。污垢热阻 R_f 的计算公式^[26]为

$$R_f = \frac{m_f}{\rho_f \lambda_f} \quad (5)$$

式中: m_f 为污垢净沉积质量, kg/m^2 ; ρ_f 为污垢层的密度, kg/m^3 ; λ_f 为污垢层的导热率^[27], $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

本文采用抑垢率 η 表示各个通道的抑垢能力, 计算公式^[28]如下:

$$\eta = \left(1 - \frac{R_f}{R_{f_0}} \right) \times 100\% \quad (6)$$

式中: η 为抑垢率; R_f 为不同通道的污垢热阻; R_{f_0}

为基准通道的污垢热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。

2 数值方法及验证

2.1 物理模型

由于矩形通道具有结构紧凑、换热面积大、临界热负荷高等特点^[29], 所以本研究的物理模型选择矩形通道, 通道长 L 为 1000 mm, 宽 W 为 40 mm, 高 H 为 20 mm, 忽略其管壁的厚度, 其物理模型示意图如图 1 所示。在通道底面加装两列五排的矩形翼涡流发生器, 矩形翼涡流发生器高度 a 与长度 b 固定为 6 与 9 mm, 其中, 横向间距 B 为 8 mm, 进口段距离 L_1 为 140 mm。本文主要针对矩形翼涡流发生器不同布置方式^[30-31](迎流角度 θ 和纵向间距 D) 进行研究, 其中, 矩形翼涡流发生器迎流角为 θ 取值范围为 $30^\circ \sim 90^\circ$, 纵向间距为 D 取值范围为 90~720 mm。

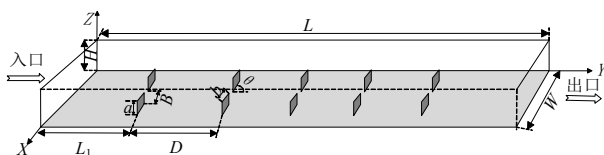


图 1 物理模型

Fig. 1 Physical model

2.2 数值方法及边界条件

本文采用的欧拉-欧拉模型中, 将颗粒相和液相视为两种流体, 认为这些流体存在于同一空间并且相互渗透。解算器采用 Fluent 三维双精度分离式求解器, 通过接入用户自定义函数(user-defined function, UDF)实现对污垢沉积的计算。依据所选工质的流动特性和物理属性, 模拟过程中选择相应的连续性方程、动量方程、能量方程与输运方程共同构成流体流动和沉积的控制方程, 采用 SIMPLE 算法^[32]解决压力和速度的耦合关系问题。对流项采用二阶迎风格式进行离散, 扩散项采用中心差分格式。此外, 压力的离散化由标准方案完成, 连续性、动量、能量方程与组分方程的收敛残差为 10^{-6} 。时间步长为 1 s ^[33]。污垢模型构建首先通过循环函数遍历整个流场与温度场, 然后根据 UDF 提取流场的流动参数, 将其添加到颗粒污垢模型当中, 从而计算得出污垢沉积率 m_d 、剥蚀率 m_f , 最终基于上述参数得出污垢热阻值 R_f , 并将需要的相关参量储存在用户自定义存储区(user-defined memory, UDM)中。物理模型选用 ICEM 软件划分为结构化网格, 由于计算重点区域在管壁附近, 因此对近壁面处的网格做加密处理。7 种不同网格数下的沉积率如

图 2 所示, 发现随着网格数量的增加, 沉积率的变化趋于平稳。综合考虑计算资源和精度, 最终选取 80 万左右网格进行后续计算。

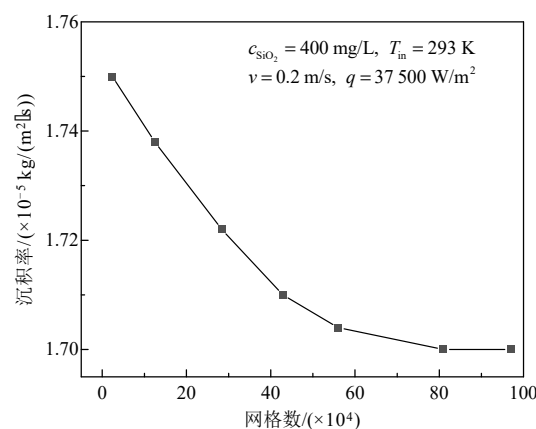


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence verification

在通道入口处, 使用速度入口边界条件, 入口温度 T_{in} 为 293 K, 脉动速度 $v = u_0 + A \sin(2\pi Mt)$ ^[34], 通过使用自定义 DEFINE_PROFILE 宏函数编程实现。其中, 振幅 A 为 0.2, 频率 M 为 1.67 Hz, 则脉动流速 $v = 0.2 + 0.2 \sin(2\pi \times 1.67t) \text{ m/s}$, 其雷诺数 Re 为 5334, 采用重整化群(renormalization group, RNG) $k-\varepsilon$ 湍流模型求解^[35]。以恒定热流密度为 $37500 \text{ W}/\text{m}^2$ 加热壁面方式为边界条件, 在通道出口处, 使用压力出口边界条件, 其他边界条件设为壁面绝热, 假定所有壁面与涡流发生器都无滑移。由于 Si 元素是构成换热器污垢的一种主要成分, 占比较大, 且也有文献将 SiO_2 颗粒作为一种代表性颗粒污垢进行相关研究^[36]。因此, 本文同样以 SiO_2 颗粒作为主要研究对象^[37], 其中, SiO_2 颗粒直径为 $10 \mu\text{m}$, 颗粒浓度为 $400 \text{ mg}/\text{L}$ 。

2.3 模型验证

本文搭建的颗粒污垢沉积实验系统, 如图 3 所示。该实验系统由 3 部分组成, 分别是循环系统、电加热系统与测量系统。循环系统由恒温水箱、循环水泵、球阀、电磁流量计、压力变送器以及实验段组成。携带一定浓度的二氧化硅颗粒流体从恒温水箱中流出, 通过水泵流入实验段, 在通道内进行热量交换的同时进行颗粒沉积, 最后回到恒温水箱中。实验段采用恒定功率的加热方式, 电加热系统通过直流电源直接控制加热功率。测量系统主要由 PT100 热电阻、压力变送器、流量计、数据采集仪组成, 其中, 温度采集使用 PT100 热电阻, 触点布置在底面中心线, 进出口分别布置热电阻, 其触点

布置在流体中心位置用来测量进出口温度。该实验采用均方根法对实验数据进行误差分析,其中污垢热阻的误差来源于多个测量参数的不确定性与误差,这些参数包括但不限于体积流量、温度等,最后得出污垢热阻的相对误差为 1.16%。本文采用微米二氧化硅颗粒和蒸馏水配制实验工质,二氧化硅颗粒相关物性参数如表 1 所示。为了验证本文使用的数值模型的准确性,将实验结果与数值模拟进行对比,如图 4 所示。图 4 选取本文实验台在入口速度 v 为 0.2 m/s,颗粒种类为 SiO_2 ,颗粒直径为 $10\mu\text{m}$,颗粒浓度为 400 mg/L , $q=37\,500\text{ W/m}^2$ 的条件下光滑通道污垢实验数据进行验证。由图 4(a)可知,污垢热阻 R_f 随着时间增加呈现出明显的渐近趋势,尽管在初始阶段模拟与实验之间存在一定误差,但当达到后期稳定阶段,模拟与实验的污垢热阻明显接近。由图 4(b)可知,在污垢热阻达到渐近阶段的过程中,污垢热阻最大误差为 11.9%,平均误差为 5.53%。目前在污垢计算领域,该误差范围是合理

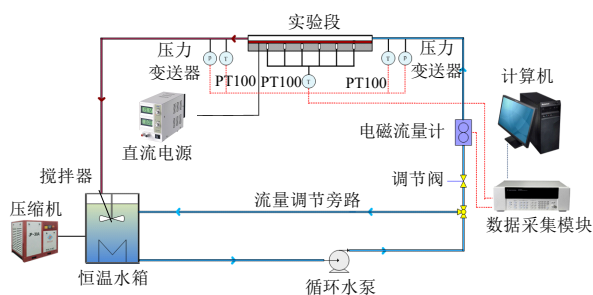


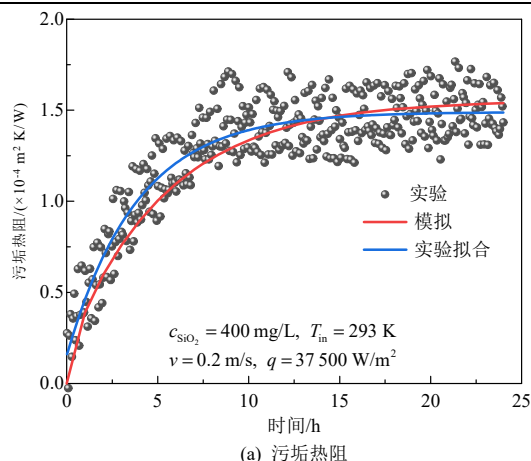
图 3 实验系统图

Fig. 3 Experimental system diagram

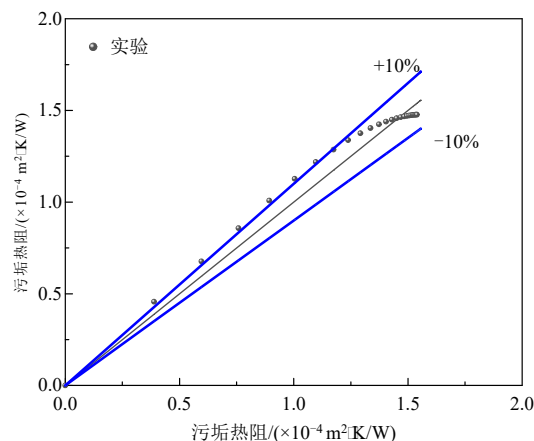
表 1 二氧化硅物性参数

Table 1 Physical parameters of SiO_2

参数	数值
粒径/ μm	10
孔隙率/%	25
密度/ (kg/m^3)	1900
导热系数/ $(\text{W/(m}\cdot\text{K)})$	1.62



(a) 污垢热阻



(b) 误差分析

图 4 污垢数值模型验证

Fig. 4 Validation of fouling numerical model

的。因此,模拟结果与实验结果之间的一致性表明数值模型被认为可行且精度符合要求的。

3 结果分析

3.1 不同通道的颗粒污垢特性

光滑通道、脉动通道和矩形翼脉动通道的污垢对比情况,如图 5 所示。由图 5 可知,不同通道的污垢热阻随着时间的增大呈渐近趋势,3 种不同通道的污垢热阻渐近值的由高到低为光滑通道 ($1.49 \times 10^{-4}\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) > 脉动通道 ($1.33 \times 10^{-4}\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) > 矩形翼脉动通道 ($8.42 \times 10^{-5}\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$)。可以看出,两种脉动通道均具有良好的抑垢效果,且相对于脉动通道矩形翼脉动通道的抑垢效果减小 36.8%,这表明矩形翼脉动通道抑垢效果更好。

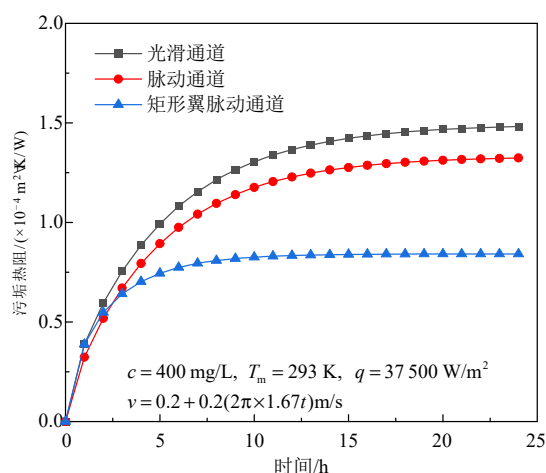


图 5 不同通道的污垢热阻对比

Fig. 5 Comparison of fouling resistance for different channels

图 6 所示为光滑通道、脉动通道以及矩形翼脉动通道在 XY 截面涡量与速度云图对比。由图 6 可知,脉动通道相对于光滑通道流速更大且更均匀,

从而减薄壁面边界层,抑垢效果更佳。此外,相较于脉动通道,矩形翼脉动通道当中的流速大幅提升,促进主流区域与壁面边界层的混合,从而实现更好的抑垢效果。矩形翼脉动通道中的矩形翼两侧与后方产生大量的诱导涡,且两侧与后方产生的纵向涡旋强度更大,这表明矩形翼脉动通道涡流发生器对壁面的剪切作用更强烈^[38],提高了抑制污垢沉积的效果,这也充分解释了图5的结论。

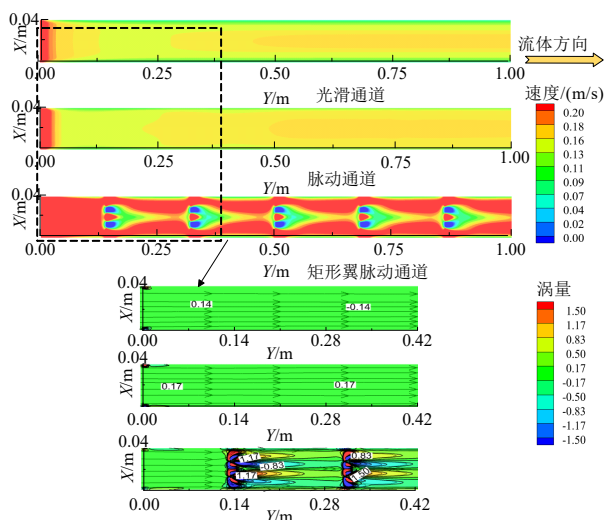
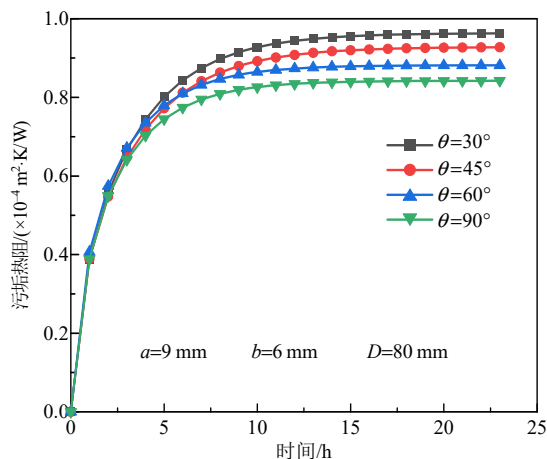


图6 不同通道XY截面涡量与速度云图

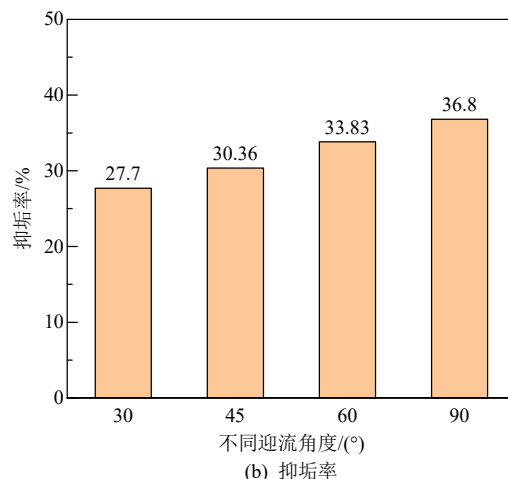
Fig. 6 Vorticity and velocity clouds in XY section of different channels

3.2 迎流角度的影响

当矩形翼涡流发生器间距 D 为 180 mm,迎流角度 θ 取 30° 、 45° 、 60° 、 90° 时,不同迎流角度的污垢热阻对比情况,如图7所示。由图7(a)可知,不同迎流角度污垢热阻随着时间的增大呈渐近趋势,且随着迎流角度的增大而减小。不同迎流角度下污垢热阻渐近值分别为 9.63×10^{-5} 、 9.28×10^{-5} 、 8.81×10^{-5} 、 $8.42 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$,且相对于脉动通道的污垢热阻渐近值 $1.33 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 分别降低 27.7%、30.36%、



(a) 污垢热阻



(b) 抑垢率

图7 不同迎流角度的污垢热阻对比

Fig. 7 Comparison of fouling resistance for different headwater angles

33.83%、36.8%,得到如图7(b)所示抑垢率。这表明随着迎流角度的增加,其抑垢效果逐渐增强。

图8为不同迎流角度下XY截面涡量与速度云图对比。由图8可知,随着迎流角度的增大,低流速区域逐渐减小,从而导致流场的整体流速逐渐增大,当迎流角度达到 90° 时,通道整体流速达到最大,对沉积壁面的剪切效果也达到最大;在涡量云图中,由于涡流发生器附近涡量值不完全相同,因

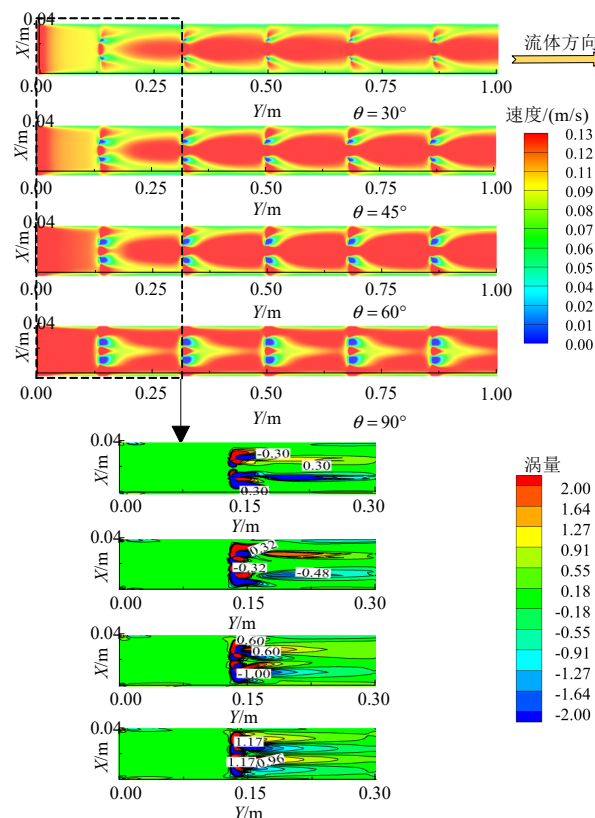


图8 不同角度涡量与速度云图

Fig. 8 Vortex volume and velocity clouds at different angles

此, 采取其附近最大涡量值来衡量剥蚀效果。根据图 8 中涡量值可以看出, 随着迎流角度的增大, 矩形翼涡流发生器与流体接触的迎流面积逐渐增大, 导致产生的涡旋与诱导涡影响的区域变大, 最大涡量值也从 0.3 逐渐增长到 1.17, 这使流场剥蚀效果达到最佳并对边界层产生破坏作用。这也充分解释了图 7 的结论, 且在本文中, 90° 时抑垢效果最好。

3.3 间距的影响

当矩形翼涡流发生器迎流角度 θ 为 90° , 间距 D 取 90、180、360、720 mm 时, 不同间距的污垢对比情况如图 9 所示。由图 9(a)可知, 不同间距的污垢热阻随着时间的增大呈渐近趋势, 且随着间距的增大, 污垢热阻先减小再增大, 当间距为 360 mm 时, 污垢热阻达到最小值。不同间距达到渐近时其渐近值分别为 9.31×10^{-5} 、 8.41×10^{-5} 、 7.83×10^{-5} 、 $8.155 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 且相对于脉动通道的污垢热阻渐近值 $1.33 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 分别减小了 30.08%、36.83%、41.22%、38.8%, 得到如图 9(b)所示抑垢率。这表

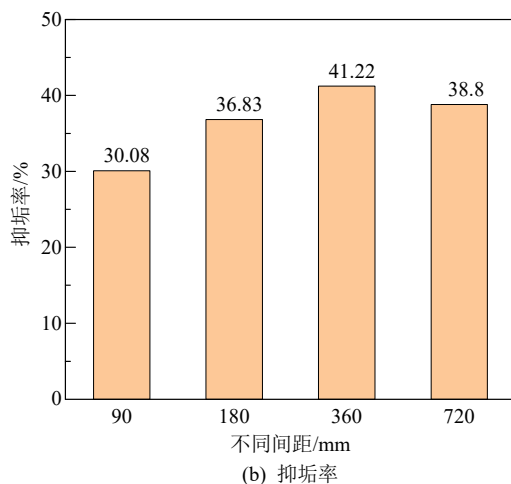
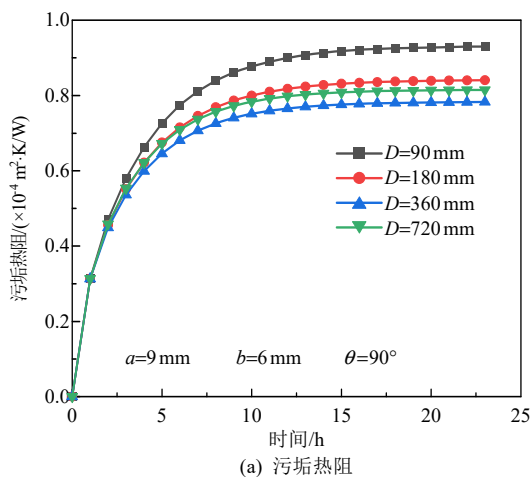


图 9 不同间距的污垢热阻对比

Fig. 9 Comparison of fouling resistance for different spacings

明随着间距的增大, 抑垢效果先增强后减弱。

图 10 所示为不同间距下 XY 截面涡量与 YZ 截面速度云图对比。由图 10 可知, 当间距为 360 mm 时, 整体流速达到最大; 在涡量云图中, 随着间距的增大, 最大涡量值由 0.6 逐渐增大到 1.7 后又逐渐减小, 造成此现象是由于当间距较小时, 矩形翼涡流发生器紧密存在, 相邻涡流发生器之间的纵向涡旋并未充分发展就被下一个涡流发生器所产生的涡旋所干扰, 从而导致产生的涡旋强度相对较弱, 无法有效地对流动造成扰动; 而当间距较大时, 每个涡流发生器所诱导产生的纵向涡都能得到充分发展并延伸至较大区域, 但是从整体通道尺度来看, 这种大间距布局会导致在涡流发生器之间产生的涡旋不能有效地进行叠加, 从而导致这些区域的流体并没有得到有效的扰动与加速, 不利于抑制污垢沉积。此外, 戚美等^[36]从传热角度得出类似的结论, 即涡流发生器的间距过大或过小都会影响其传热效果。故当设计涡流发生器布置方式时, 需要考虑涡旋是否充分发展以及对边界层影响的变化。这也充分解释了图 9 的结论, 且在本文中, 当间距为 360 mm 时, 抑垢效果最好。

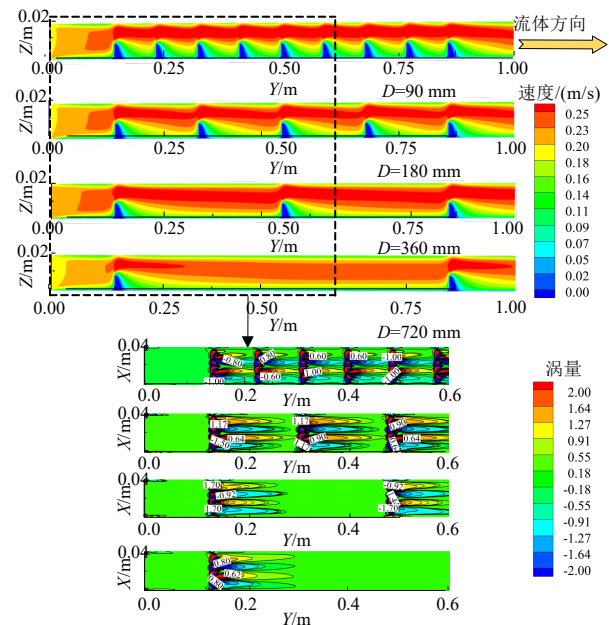


图 10 不同间距下的涡量与速度云图

Fig. 10 Vortex volume and velocity clouds at different spacings

4 结论

本文采用数值模拟方式研究脉动通道内矩形翼涡流发生器不同布置方式对颗粒污垢的影响, 通过实验验证了数学模型的准确性, 并详细分析了矩

形翼涡流发生器的迎流角度和间距对颗粒沉积的影响。主要结论如下:

1) 两种脉动通道均具有良好的抑垢效果,且矩形翼脉动通道内的流速和纵向涡旋强度更大,对壁面的剪切作用更强烈,抑垢效果更佳,其抑垢效果能达到36.8%。

2) 在脉动通道内随着矩形翼涡流发生器迎流角度的增大,污垢热阻逐渐减小,产生的涡旋与诱导涡影响的区域变大,流场剥蚀效果达到最佳,其最佳迎流角度为 90° ,抑垢效果能达到36.8%。

3) 在脉动通道内,随着矩形翼涡流发生器间距的增大,涡流发生器两侧涡旋强度受涡流发生器间距过大或过小的干扰,污垢热阻先减小再增大,其最佳间距为360 mm,抑垢效果能达到41.22%。

参考文献

- [1] 史琳, 咎成, 杨文言. 城镇二级出水换热表面混合污垢的成分及形貌[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(2): 236-239.
SHI Lin, ZAN Cheng, YANG Wenyan. Composition and morphology of composite fouling by municipal secondary effluent on heat transfer surfaces[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2009, 49(2): 236-239(in Chinese).
- [2] 刘晓凯, 成克用, 淮秀兰, 等. 翼型通道换热器在燃机系统中流动换热性能的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7160-7173.
LIU Xiaokai, CHENG Keyong, HUAI Xiulan, et al. Numerical study on flow and heat transfer performance of airfoil channel heat exchanger in gas turbine system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7160-7173(in Chinese).
- [3] 王建勇, 杨军, 雷玟, 等. 管壁局部粗糙对水平超临界二氧化碳湍流传热的影响[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9214-9224.
WANG Jianyong, YANG Jun, LEI Wen, et al. Influence of regional wall roughness on the turbulent heat transfer of horizontal supercritical carbon dioxide flows[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9214-9224(in Chinese).
- [4] 孙金泽, 崔晓松, 徐志明, 等. 铜换热表面 MgO 颗粒与碳酸钙混合污垢沉积特性的分子动力学模拟[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2310-2319.
SUN Jinze, CUI Xiaosong, XU Zhiming, et al. Molecular dynamics simulation of the deposition characteristics MgO particles and calcium carbonate composite fouling on copper heat transfer surfaces[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2310-1319(in Chinese).
- [5] STEINHAGEN R, MÜLLER-STEINHAGEN H, MAANI K. Problems and costs due to heat exchanger fouling in New Zealand industries[J]. Heat Transfer Engineering, 1993, 14(1): 19-30.
- [6] 梁延东, 徐源, 徐雪霏, 等. 交变磁场对换热壁面 CaCO_3 污垢的阻垢特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7913-7921.
LIANG Yandong, XU Yuan, XU Xuefei, et al. Experimental study on the fouling inhibition characteristics of an alternating magnetic field on CaCO_3 fouling of a heat transfer surface[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7913-7921(in Chinese).
- [7] STEINHAGEN R, MÜLLER-STEINHAGEN H, MAANI K. Problems and costs due to heat exchanger fouling in New Zealand industries[J]. Heat Transfer Engineering, 1993, 14(1): 19-30.
- [8] 张亮, 张安龙, 荆宇燕, 等. 波壁管中脉动流动的数值模拟[J]. 东北电力大学学报, 2021, 41(6): 11-16.
ZHANG Liang, ZHANG Anlong, JING Yuyan, et al. Numerical simulation of pulsating flow in wave wall tube[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2021, 41(6): 11-16(in Chinese).
- [9] LI Jun, XU Chao, YE Jingling, et al. Enhanced anti-fouling of forward osmosis membrane by pulsatile flow operation in textile wastewater treatment[J]. Desalination, 2023, 565: 116878.
- [10] 王文毓, 杨冬, 王林, 等. 变负荷工况下并联管内超临界水脉动流动及换热特性[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2710-2717.
WANG Wenyu, YANG Dong, WANG Lin, et al. Flow instability and pulsating heat transfer characteristics of supercritical water in parallel two-channel under variable load condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2710-2717(in Chinese).
- [11] 黄其, 王勋廷, 杨志超, 等. 有序涡旋对三角槽道脉动流强化传热的影响[J]. 化工学报, 2016, 67(9): 3616-3624.
HUANG Qi, WANG Xunting, YANG Zhichao, et al. Influence of vortex on heat transfer enhancement in triangular grooved channel by pulsating flow[J]. CIESC Journal, 2016, 67(9): 3616-3624(in Chinese).
- [12] GILLHAM C R, FRYER P J, HASTING A P M, et al. Enhanced cleaning of whey protein soils using pulsed flows[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 46(3): 199-209.

- [13] 郑小涛, 徐成, 喻九洋, 等. 脉动流下热交换圆管抑垢实验研究[J]. 石油化工设备, 2013, 42(2): 1-4.
ZHENG Xiaotao, XU Cheng, YU Jiuyang, et al. Experimental research on anti-fouling of heat exchange tube under pulsating flow[J]. Petro-Chemical Equipment, 2013, 42(2): 1-4(in Chinese).
- [14] 叶秋玲, 周国兵, 程金明, 等. 矩形通道中不同涡流发生器对换热和压降的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(11): 86-91.
YE Qiuling, ZHOU Guobing, CHENG Jinming, et al. Influence of different vortex generators on heat transfer enhancement and pressure drop characteristics in a rectangular channel[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(11): 86-91(in Chinese).
- [15] SAINI P, DHAR A, POWAR S. Performance enhancement of fin and tube heat exchanger employing curved trapezoidal winglet vortex generator with circular punched holes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 209: 124142.
- [16] LOTFI B, SUNDÉN B, WANG Q W. An investigation of the thermo-hydraulic performance of the smooth wavy fin-and-elliptical tube heat exchangers utilizing new type vortex generators[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1282-1302.
- [17] 杨云, 张鹏, 饶宇, 等. 凹陷涡发生器非稳态流动与传热分离涡模拟[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(6): 1196-1202.
YANG Yun, ZHANG Peng, RAO Yu, et al. A detached eddy simulation of unsteady flow and heat transfer characteristics of dimple vortex generators[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(6): 1196-1202(in Chinese).
- [18] 张登庆, 张锁龙, 陆怡. 诱导换热管流体弹性振动的换热及结垢性能研究[J]. 化工进展, 2005, 24(7): 773-776.
ZHANG Dengqing, ZHANG Suolong, LU Yi. Study on properties of heat transfer and scaling for induced flow vibration in tube[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2005, 24(7): 773-776(in Chinese).
- [19] XU Yao. Numerical simulation of the CaSO₄ fouling process on protruding sphere vortex generator[J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2122(1): 020037.
- [20] WANG Feilong, TANG Songzhen, HE Yaling, et al. Heat transfer and fouling performance of finned tube heat exchangers: experimentation via on line monitoring[J]. Fuel, 2019, 236: 949-959.
- [21] LI X L, WANG S Q, YANG D L, et al. Thermal-hydraulic and fouling performances of enhanced double H-type finned tubes for residual heat recovery[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 189: 116724.
- [22] 陈巨辉, 王俊乔, 李丹, 等. 自激振荡射流微通道换热特性及热力学分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 6078-6085.
CHEN Juhui, WANG Junqiao, LI Dan, et al. Heat transfer characteristics and thermodynamic analysis of a self-excited oscillating jet micro-channel[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 6078-6085(in Chinese).
- [23] XU Zhiming, FAN Hongbo, HAN Zhimin. The comparison between integral and local calculation methods on the simulation of crystallization fouling[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 171: 107252.
- [24] BOHNET M. Fouling of heat transfer surfaces[J]. Chemical Engineering & Technology, 1987, 10(1): 113-125.
- [25] PAZ C, SUÁREZ E, EIRÍS A, et al. Development of a predictive CFD fouling model for diesel engine exhaust gas systems[J]. Heat Transfer Engineering, 2013, 34(8-9): 674-682.
- [26] EPSTEIN N. Particulate fouling of heat transfer surfaces: mechanisms and models[M]//MELO L F, BOTT T R, BERNARDO C A. Fouling science and technology. Dordrecht: Springer, 1988: 143-164.
- [27] ZHAO Bin, CHEN JiuJiu. Numerical analysis of particle deposition in ventilation duct[J]. Building and Environment, 2006, 41(6): 710-718.
- [28] 韩志敏, 李江, 陈则齐, 等. 脉动流通道内不同纵向涡发生器的颗粒污垢特性[J]. 化工学报, 2024, 75(7): 2486-2496.
HAN Zhimin, LI Jiang, CHEN Zeqi, et al. Particulate fouling characteristics of different longitudinal vortex generators in pulsating flow channel[J]. CIESC Journal, 2024, 75(7): 2486-2496(in Chinese).
- [29] KUMAR S, SINGH S K, SHARMA D. A comprehensive review on thermal performance enhancement of plate heat exchanger[J]. International Journal of Thermophysics, 2022, 43(7): 109.
- [30] WU J M, TAO W Q. Effect of longitudinal vortex generator on heat transfer in rectangular channels[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 37: 67-72.
- [31] WANG Yifan, LIU Peng, SHAN Feng, et al. Effect of longitudinal vortex generator on the heat transfer enhancement of a circular tube[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 1018-1028.
- [32] 周云龙, 邵文斌, 李洪伟, 等. 竖直互连小通道内流动

- 沸腾传热强化机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(12): 4826-4836.
- ZHOU Yunlong, SHAO Wenbin, LI Hongwei, et al. Analysis of heat transfer enhancement mechanism on flow boiling in vertical rectangular interconnected microchannels[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(12): 4826-4836(in Chinese).
- [33] HAN Zhimin, XU Zhiming, YU Xiaoyan. CFD modeling for prediction of particulate fouling of heat transfer surface in turbulent flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 144: 118428.
- [34] NANDI T K, CHATTOPADHYAY H. Numerical investigations of simultaneously developing flow in wavy microchannels under pulsating inlet flow condition[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013, 47: 27-31.
- [35] SHU J I, WANG Yi, QIAN Yu, et al. Analysis of the effect of shoulder cleaning on particle migration within ballast based on a coupled CFD-DEM approach[J]. Transportation Geotechnics, 2022, 37: 100855.
- [36] YANG Qirong, ZHANG Zhenglin, YAO Erren, et al. Experimental study of the particulate dirt characteristics on pipe heat transfer surface[J]. Journal of Thermal Science, 2019, 28(5): 1054-1064.
- [37] ZHANG Ning, WEI Xin, YANG Qirong, et al. Numerical simulation and experimental study of the growth characteristics of particulate fouling on pipe heat transfer surface[J]. Heat and Mass Transfer, 2019, 55(3): 687-698.
- [38] 戚美, 陈文毅, 陈庆光, 等. 纵向涡强化片式散热器换热性能的数值分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(2): 573-579.
- QI Mei, CHEN Wenyi, CHEN Qingguang, et al. Numerical analysis of heat transfer performance of longitudinal vortex enhanced panel-type radiator[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(2): 573-579(in Chinese).



韩志敏

在线出版日期: 2024-12-31。

收稿日期: 2024-07-11。

作者简介:

韩志敏(1988), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为复合强化传热传质技术、换热设备结垢机理与对策、相变储热技术等, hanzm@necpu.edu.cn;

刘威(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为换热设备结垢机理与对策, 2946434907@qq.com。

(责任编辑 胡琳琳)