

几种涡流发生器对矩形通道流阻和 传热性能影响的数值模拟

高猛, 周国兵

(华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Numerical Simulations on the Effect of Several Vortex Generators in Rectangular Channel on Flow Resistance and Heat Transfer Performances

GAO Meng, ZHOU Guobing

(School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Numerical simulations were carried out to study the performance of heat transfer enhancement and pressure drop of a pair of single-row vortex generators (VGs) such as oblique-cut semi-elliptic cylinder shells, rectangular winglets, etc. (6 types), which were installed in a rectangular channel, respectively. The Reynolds number (Re) ranged from 7000 to 26800. Then the comprehensive performances of heat transfer enhancement and flow loss of these VGs were analyzed by comparing the comprehensive evaluation factor. The results showed that the oblique-cut semi-elliptic cylinder shell has the highest value of R , which is 11.40%~21.88%, 1.98%~2.11% and 2.53%~3.50% higher than those of rectangular winglet, oblique-cut semi-circular cylinder shell and oblique-cut semi-elliptic cylinder, respectively. The flow loss of oblique-cut semi-elliptic cylinder shell is the lowest due to its smaller frontal surface and streamlined design, which can be 22.45% lower than that of rectangular winglet, and also slightly lower than oblique-cut semi-circular cylinder shell and oblique-cut semi-elliptic cylinder. Oblique-cut semi-cylinder shell is a novel type of VG with lower flow loss and better comprehensive performance.

KEY WORDS: heat transfer enhancement; flow resistance; numerical simulation; oblique-cut semi-elliptic cylinder shell; comprehensive evaluation factor

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研项目(20070079018); 中央高校基本科研业务费专项基金(09MG25); 中国电机工程学会电力青年科技创新项目(2008)。

Project Supported by Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20070079018); Fundamental Research Funds for the Central Universities(09MG25); Research Creation Found for Electric Power Youth of China(2008).

摘要: 在雷诺数 $Re=7000\sim 26800$ 范围内, 对矩形通道分别布置单排一对斜截半圆柱面、矩形小翼等 6 种涡流发生器的强化传热效果和压降特性进行数值模拟, 并用综合评价因子对比分析各涡流发生器强化传热与流动阻力综合性能。结果表明, 斜截半圆柱面综合性能最好, 分别比矩形小翼、斜截半圆柱面、斜截半圆柱体高 11.40%~21.88%、1.98%~2.11%、2.53%~3.50%; 具有较小迎流截面和流线型设计的斜截半圆柱面产生的流阻最低, 最高可比矩形小翼低 22.45%, 比斜截半圆柱面和斜截半圆柱体略低。斜截半柱面是一种具有较低阻力损失和较好综合性能的新型涡流发生器。

关键词: 强化传热; 流动阻力; 数值模拟; 斜截半圆柱面; 综合评价因子

0 引言

涡流发生器是一种被动强化换热元件, 以在换热设备内诱导涡旋产生二次流来减薄或破坏近壁边界层进而实现换热的强化, 结构简单易于实现。涡流强化传热在制冷空调及热电厂空冷器空气侧换热中有广泛研究^[1-7], 最早报道涡流发生器强化传热研究的是 Johnson 和 Joubert^[8], 他们实验研究了带三角形小翼的圆柱体表面垂直冲刷气流传热特性。三角形小翼附近局部换热增强了 200%, 但圆柱体表面整体换热未得到强化。近年来关于涡流发生器强化传热与流阻方面的数值研究有了进一步发展。

翼型涡流发生器由于加工制造方便, 在研究中得到了广泛关注。Wu 等^[1-2]分别研究了冲压矩形小翼和三角形小翼对矩形通道内层流换热的影响。发

现壁面冲压孔洞使得小翼附近区域有较强的强化传热效果和较低的流动摩擦系数。此外通道平均努谢尔特数随小翼距入口距离的增加和翼对前缘间距的减小而下降,但其压力损失基本上没什么变化。Chu等^[3]研究了三角形小翼对翅片椭圆管换热器内层流换热的影响。发现小翼使换热器平均努谢尔特数 Nu 提高了 13.6%~32.9%,压力损失增加了 29.2%~40.6%。Tian等^[4]采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型分析了三角形小翼对波纹翅片管换热器传热和流阻特性的影响。发现纵向涡对顺排管尾迹区翅片表面和下游顺排管换热都有强化作用,在错排管中主要强化圆管尾迹区翅片表面的换热。Joardar等^[5]研究了三角形小翼对顺排翅片管换热器内层流换热的影响。结果表明小翼使换热器传热因子 j 提高了 74%,摩擦因子 f 增加了 41%。Hiravennava等^[9]在研究三角形小翼对矩形通道层流换热影响时发现有限厚度小翼强化传热效果优于零厚度小翼,单个小翼和小翼对分别使通道传热增强了 33%和 67%。

绕流柱(块)体涡流发生器比翼型涡流发生器耗材料多且流阻较大,因此相关的研究比较少。Hemida等^[10]采用大涡模拟观察了小立方块对受热电子器件表面空气对流换热的影响。结果表明小立方块使器件表面平均对流换热系数提高了 16.7%。Ehsan等^[11]用二维层流数值方法分析了圆柱体对圆管换热器传热和流阻特性的影响。发现圆柱体使圆管换热器平均努谢尔特数提高了 12%,压力损失增加了 22%。Nasiruddin等^[12]采用 $k-\omega$ 模型分析了上壁面带可调节挡板涡流发生器的换热器管内二维层流换热效果。结果表明,管内最大、平均努谢尔特数分别比无挡板情况提高了 120%和 70%。

周国兵等^[13]、魏晋等^[14]分别对矩形通道内布置斜截半圆柱体的强化传热和压降特性进行了实验研究与数值模拟。发现斜截半圆柱体是一种具有较好强化换热效果和较低流阻的新型涡流发生器。汪健生等^[15]用高雷诺数(Re) $k-\omega$ 湍流模型对矩形通道内分别布置单列和双列斜截半圆柱体进行了数值研究。发现攻角相同时双列换热效果优于单列;攻角较大的单列换热效果优于攻角较小的双列;流阻产生的主要原因是纵向涡的横向发展。汪健生等^[16]又对放置斜截圆柱体矩形槽道内的流动与传热特性进行了大涡模拟。发现斜截圆柱体附近的局部对流换热系数最大可增加达 105%,平均对流换热系数最大可增加 36%左右。

最近作者所在课题组在已有工作基础上提出了斜截半柱面涡流发生器,初步实验结果^[17]表明,相比翼型、斜截半柱体等涡流发生器,具有较好的流动减阻性能,且结构简单,制作方便。本文采用数值方法对比研究斜截半圆柱面、斜截半圆柱面、斜截半圆柱体、矩形小翼、三角形小翼和梯形小翼诱发的涡旋对矩形通道空气侧传热和压降性能的影响,以进一步理解其物理机制。

1 物理模型

物理模型如图 1 所示, x 正方向为空气流动方向,矩形通道长 $L=860$ mm,宽 $W=240$ mm,高 $H=40$ mm,单排一对斜截角 $\alpha=20^\circ$ 、攻角 $\beta=45^\circ$ 的涡流发生器对称布置在矩形通道底部换热面上,沿流向渐扩式布置,前缘低后缘高,凹面向内,涡流发生器前缘距通道入口距离 $S=100$ mm,2 个涡流发生器前缘间距 $s=20$ mm。图 2^[17]示出了对比研究的 6 种涡流发生器,其类型、尺寸及简称详见表 1,另外用 PZ 表示不布置涡流发生器的平直矩形通道。

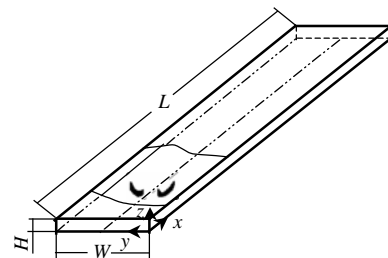


图 1 矩形通道示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rectangular channel

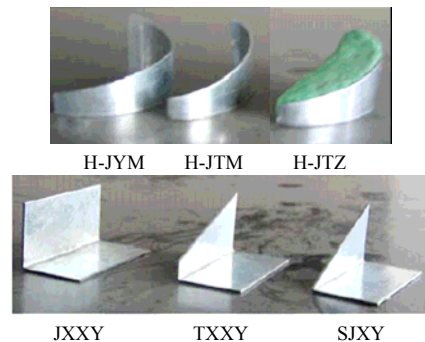


图 2 涡流发生器

Fig. 2 Vortex generators

表 1 涡流发生器类型及尺寸

Tab. 1 Types and dimensions of vortex generators

涡流发生器类型	长/mm	宽/mm	高/mm	斜截角/(°)
三角形小翼 SJXY	40	—	20	—
梯形小翼 TXXY	40	—	20	20
矩形小翼 JXXY	40	—	20	—
斜截半圆柱面 H-JTM	40	10	20	20
斜截半圆柱面 H-JYM	40	20	20	20
斜截半圆柱体 H-JTZ	40	10	20	20

空冷器空气流速通常在 1.5 ~ 5.5 m/s 范围内, 计算矩形通道内空气流速选定为 1.49、2.13、2.77、4.26、5.71 m/s, 对应的雷诺数 Re 分别为 0.7×10^4 、 1.0×10^4 、 1.3×10^4 、 2.0×10^4 、 2.68×10^4 。为确保入口速度均匀及出口无回流, 计算区域在通道入口处向上游延长 400 mm 的距离($x = -400 \sim 0$), 出口处向下游延长 360 mm 的距离($x = 860 \sim 1\ 220$)。

2 数值方法及验证

计算区域由 GAMBIT 生成四面体混合网格, 并细化通道换热面及涡流发生器附近区域网格, 网格总数约 81 万个。解算器用 FLUENT 三维双精度分离隐式求解器, 压力与速度耦合方法用 SIMPLE 算法, 对流项用一阶迎风格式离散。通道内空气流态为三维常物性不可压缩稳态湍流流动, 计算模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 质量、动量、能量、湍流动能和湍动能耗散率控制方程的通用形式^[18]如下:

$$\text{div}(\rho \mathbf{U} \varphi) = \text{div}(\Gamma_{\varphi} \text{grad} \varphi) + S_{\varphi} \quad (1)$$

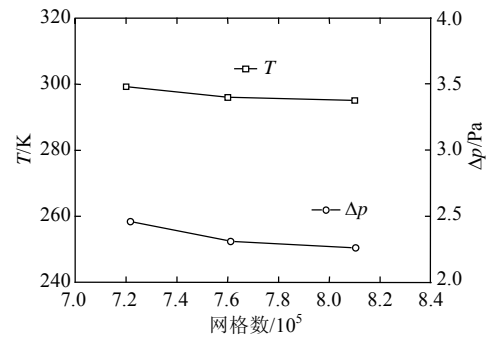
式中: $\varphi = \{u, v, w, T, k, \varepsilon\}$ 为通用因变量; ρ 为流体密度 kg/m^3 ; \mathbf{U} 为速度矢量, m/s ; Γ_{φ} 为广义扩散系数; S_{φ} 为广义源项。相比标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的湍动能耗散率 ε 方程产生项系数 C_1 引入了主流时均应变率 $S_{i,j}$, 修正了湍流黏度, 如式(2), 从而使 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型精度得到提高。

$$\begin{cases} C_1 = 1.42 - [\tilde{\eta}(1 - \tilde{\eta}/\tilde{\eta}_0)/(1 + \beta\tilde{\eta}^3)] \\ \tilde{\eta} = Sk/\varepsilon \\ S = (2S_{i,j}S_{i,j})^{1/2} \\ S_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{cases} \quad (2)$$

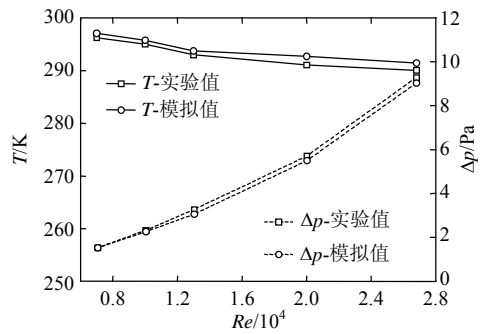
计算中各系数采用默认值 $C_{\mu} = 0.084\ 5$, $C_1 = 1.42$, $C_2 = 1.68$, $Pr_w = 0.85$ 。

计算边界条件: 入口为速度入口条件 $u = u_0$, $v = w = 0$, $T = T_0$; 出口为质量出口条件(流动与换热均达到充分发展); 通道下壁面换热区域为常壁温条件 $T = T_w$; 通道上壁面和两侧壁面、涡流发生器壁面及延长区域边界为速度无滑移绝热条件。

选取布置斜截半椭圆柱面的矩形通道出口温度 T 及进出口压力差 Δp 数值解与实验值^[17]进行对比, 并对其数值解进行网格无关性验证, 以验证计算方法的可行性与结果的正确性。如图 3(a)所示, 在 $Re = 1.0 \times 10^4$ 时, 相比 76 万网格数, 81 万网格数模型数值解相对误差在 5% 以内, 可认为 81 万网格



(a) 数值解网格无关性验证



(b) 数值解与实验值对比

图 3 数值方法验证

Fig. 3 Numerical method validation

数模型数值解为网格无关性解。图 3(b)表明数值解与实验值总体上比较吻合, 出口温度相对误差不超过 2%, 压力损失相对误差不超过 12%, 数值结果比较可靠。分析数值解与实验值的误差原因主要包括两方面, 一方面, 模型边界与实验的差别, 如实验中锅炉供给的恒温热水温度沿流向略有下降, 模拟中将此边界设为恒温的, 及实验通道内壁面粗糙摩擦阻力在模拟中忽略等; 另一方面网格划分、离散格式等数值方法的选择也会带来误差。

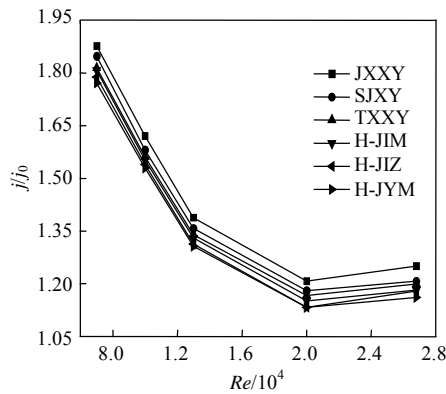
3 结果与分析

3.1 参数定义

采用无量纲量数 $R = (j/j_0)/(f/f_0)^{19-20}$ 作为涡流发生器强化传热和流阻综合性性能评价准则, 其中 j 为表面传热因子 $j = StPr^{2/3} = Nu/(RePr^{1/3})$; f 为表面摩擦因子, $f = 2\Delta p A_c / (\rho A_0 U^2)$; A_0 为通道有效换热面积, m^2 ; A_c 为通道最小横截面积, m^2 ; ρ 为空气密度, kg/m^3 , u 为通道内空气横截面平均流速, m/s ; Δp 为通道进出口压力损失, Pa ; j_0 和 f_0 分别为平直矩形通道表面传热因子和摩擦因子。

3.2 涡流发生器强化传热性能

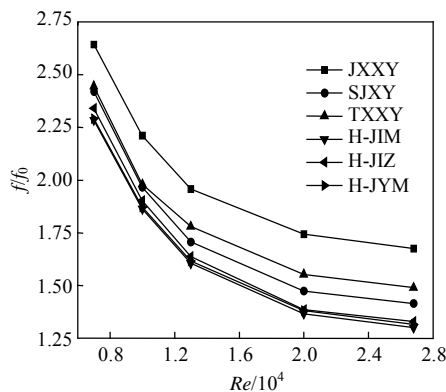
图 4 为各涡流发生器在矩形通道内的 j/j_0 值随雷诺数变化曲线。相比平直矩形通道, 布置矩形小翼、三角形小翼、梯形小翼、斜截半椭圆柱面、斜

图4 j/j_0 随雷诺数的变化Fig. 4 Variation of j/j_0 vs. Reynolds number

截半圆柱体、斜截半圆柱面的矩形通道传热强度分别提高了 20.70%~87.61%、20.73%~84.76%、16.68%~81.41%、15.17%~80.67%、13.34%~78.80%、13.25%~77.12%。可以观察到，各涡流发生器在矩形通道内传热的强化程度差别不大，最多不超过 10%。

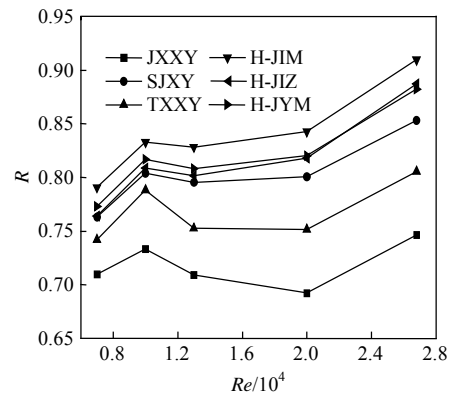
3.3 涡流发生器流阻性能

图 5 为各涡流发生器在矩形通道内的 ff_0 值随雷诺数变化曲线。相比平直矩形通道，布置矩形小翼、三角形小翼、梯形小翼、斜截半圆柱面、斜截半圆柱体、斜截半圆柱面的矩形通道流动阻力分别增加了 67.58%~164.30%、41.49%~142.08%、48.97%~144.49%、29.96%~128.49%、32.96%~134.04%、31.59%~129.11%。可以看出斜截半圆柱面使矩形通道内的流动阻力增加最少，斜截半圆柱面流阻比斜截半圆柱面略高，这说明相比矩形小翼、三角形小翼、梯形小翼等翼型以及斜截半圆柱体等涡流发生器，斜截半圆柱面涡流发生器的流动阻力较小，其较小迎流截面和流线型设计起到了重要作用。

图5 ff_0 随雷诺数的变化Fig. 5 Variation of ff_0 vs. Reynolds number

3.4 涡流发生器强化传热与流阻综合性能

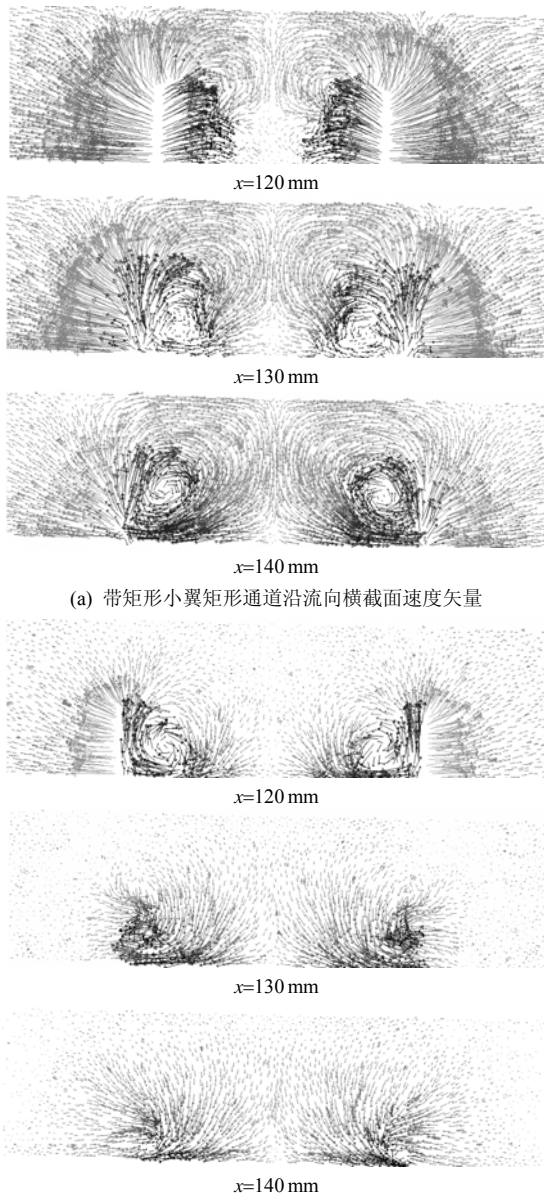
图 6 为涡流发生器综合评价因子随雷诺数的变化曲线，可以看到几种涡流发生器综合评价因子都小于 1，也就是各涡流发生器综合性能都低于无涡流发生器的平直矩形通道。6 种涡流发生器综合评价因子从高到低依次为斜截半圆柱面、斜截半圆柱面、斜截半圆柱体、三角形小翼、梯形小翼、矩形小翼。相比矩形小翼，斜截半圆柱面、斜截半圆柱面、斜截半圆柱体、三角形小翼、梯形小翼的综合性能分别提高了 11.40%~21.88%、8.91%~18.48%、7.63%~18.63%、7.52%~15.66%、4.53%~8.55%。在今后的研究工作中，可通过优化影响涡流发生器强化传热与流动阻力性能的诸如涡流发生器尺寸、斜截角、攻角、布局及流体流态等参数来提高其综合性能，使得涡流发生器在产生一定流动阻力时获得更好的强化传热效果。

图6 综合评价因子 R 随雷诺数的变化Fig. 6 Variation of comprehensive evaluation factor R vs. Reynolds number

4 强化传热机制与流阻性能分析

涡流发生器强化传热作用主要是由于其所诱发的涡旋对流体流动和传热产生了作用。Fiebig 等^[21-22]认为纵向涡强化传热的根本原因是涡破坏并减薄边界层、诱导旋转流动和二次流、强化主流与边界层流体间动量和能量交换。

图 7 示出了 $Re=2.0 \times 10^4$ 时内置矩形小翼和斜截半圆柱面矩形通道沿流向横截面速度矢量(局部)，图 7(a)与(b)的速度矢量缩放比例相同。可以看出，矩形小翼和斜截半圆柱面在其内侧后缘都产生了一对向内侧下壁面流动的反向旋转纵向涡，并且纵向涡对在沿流向发展的过程中有逐渐靠近下壁面的趋势，使得壁面边界层速度梯度变大。分析可知涡对在沿流向逐渐靠近下壁面有助于减薄壁面



(a) 带矩形小翼矩形通道沿流向横截面速度矢量
 (b) 带斜截半椭圆柱面矩形通道沿流向横截面速度矢量
 图 7 $Re=2.0 \times 10^4$ 时矩形通道沿流向截面速度矢量
 Fig. 7 Velocity vector on cross section in rectangular channel at $Re=2.0 \times 10^4$

边界层厚度，进而降低边界层热阻有利于换热。而壁面边界层速度梯度变大，则有助于延缓边界层分离促进了主流与边界层流体的动量和能量交换。

同时从图中还可以观察到矩形小翼后缘形成的纵向涡强度及影响范围都大于斜截半椭圆柱面，这也就是矩形小翼强化传热效果好于斜截半椭圆柱面的根本原因。但是由于矩形小翼在矩形通道内迎流截面较大，其产生的流动阻力会有相当大的增加，并且小翼背面可能会产生较大的回流滞止区使得该区域温度过高。相比矩形小翼，斜截半椭圆柱面在矩形通道内具有较小的迎流截面和流线型设

计，产生的流动阻力比矩形小翼低得多，流场也较均匀，这也是斜截半椭圆柱面综合性能优于矩形小翼的主要原因。

5 结论

通过对斜截半椭圆柱面、斜截半圆柱面等六种涡流发生器在矩形通道内强化传热效果和压降特性方面的数值计算及分析，可以得出以下结论：

1) 6种涡流发生器在所计算条件下比较，矩形小翼强化传热效果最好，传热强度比平直通道高 20.70%~87.61%，比斜截半椭圆柱面高 3.84%~5.80%；但其流动阻力也是最大的，比平直通道高 67.58%~164.30%，比斜截半椭圆柱面高 15.67%~28.95%。

2) 斜截半椭圆柱面由于其较小迎流截面和流线型设计，在通道内产生的流阻比矩形小翼最高可低 22.45%，与斜截半圆柱面、斜截半椭圆柱体相当或略低。

3) 通过对比综合性能评价因子 R ，各种涡流发生器的综合性能都低于平直矩形通道。斜截半椭圆柱面综合性能优于其它几种涡流发生器，比斜截半圆柱面高 1.98%~2.11%，比斜截半椭圆柱体高 2.53%~3.50%，比矩形小翼高 11.40%~21.88%。

4) 斜截半柱面是一种强化传热与流动阻力综合性能较好的新型涡流发生器。涡流发生器后缘产生的纵向涡对其强化矩形通道传热及流动结构的改善起到了重要作用。

通过优化影响涡流发生器强化传热与流动阻力性能的诸多参数可以进一步提高其强化传热与流动阻力综合性能。

参考文献

- [1] Wu Junmei, Tao Wenquan. Numerical study on laminar convection heat transfer in a rectangular channel with longitudinal vortex generator. Part A: Verification of field synergy principle [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(5-6): 1179-1191.
- [2] Wu Junmei, Tao Wenquan. Numerical study on laminar convection heat transfer in a channel with longitudinal vortex generator. Part B: Parametric study of major influence factors[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(13-14): 3683-3692.
- [3] Chu Pan, He Yaling, Lei Yonggang, et al. Three-dimensional numerical study on fin-and-oval-tube heat exchanger with longitudinal vortex generators[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(5-6): 859-876.
- [4] Tian Liting, He Yaling, Tao Yubing, et al. A comparative study on the air-side performance of wavy fin-and-tube heat exchanger with

- punched delta winglets in staggered and in-line arrangements [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48(9): 1765-1776.
- [5] Joardar A, Jacobi M A. A numerical study of flow and heat transfer enhancement using an array of delta-winglet vortex generators in a fin-and-tube heat exchanger[J]. *Journal of Heat Transfer Transactions of the ASME*, 2007, 129(9): 1156-1167.
- [6] 李少华, 朱励, 李延臣, 等. 多孔气膜冷却却纵向偶合涡的数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(8): 55-59.
Li Shaohua, Zhu Li, Li Yanchen, et al. Numerical simulation in lengthways coupled-vortex of multiple holes[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(8): 55-59(in Chinese).
- [7] 高翔, 骆仲泐, 周劲松, 等. 衰减性旋流强化传热性能的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(5): 184-188.
Gao Xiang, Luo Zhongyang, Zhou Jinsong, et al. Study on heat transfer enhancement characteristics with a decaying swirl flow [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(5): 184-188(in Chinese).
- [8] Johnson T R, Joubert P N. The influence of vortex generators on drag and heat transfer from a circular cylinder normal to an airstream [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1969, 91(1): 91-99.
- [9] Hiravennavar S R, Tulapurkara E G, Biswas G. A note on the flow and heat transfer enhancement in a channel with built-in winglet pair [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2007, 28(2): 299-305.
- [10] Hemida H, Spehr F, Krajnovic S. Local heat transfer enhancement around a matrix of wall-mounted cubes using passive flow control: large-eddy simulations[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, 29(5): 1258-1267.
- [11] Ehsan M L, Mofid G B, Reza M. A numerical study of flow and temperature fields in circular tube heat exchanger with elliptic vortex generators[J]. *Thermal Science*, 2008, 12(2): 129-136.
- [12] Nasiruddin S, Siddiqui K. Heat transfer augmentation in a heat exchanger tube using a baffle[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2007, 28(2): 318-328.
- [13] 周国兵, 张于峰, 齐承英, 等. 一种强化太阳能换热的新型涡流发生器换热机理与实验研究[J]. *太阳能学报*, 2003, 24(6): 781-785.
Zhou Guobing, Zhang Yufeng, Qi Chengying, et al. Heat transfer enhancement and experimental investigation of a new vortex generator enhancing heat exchange of solar energy[J]. *Acta Energiac Solaris Sinica*, 2003, 24(6): 781-785(in Chinese).
- [14] 魏晋, 齐承英. 纵向涡发生器强化换热性能的数值研究[J]. *河北工业大学学报*, 2006, 35(6): 88-91.
Wei Jin, Qin Chengying. Numerical study on heat transfer enhancement of longitudinal vortex generator[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2006, 35(6): 88-91(in Chinese).
- [15] 汪健生, 汤俊洁, 张金凤. 半椭圆涡流发生器强化换热机理[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(5): 160-164.
Wang Jiansheng, Tang Junjie, Zhang Jinfeng. Mechanism of heat transfer enhancement of semi-ellipse vortex generator[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(5): 160-164(in Chinese).
- [16] 汪健生, 刘志毅, 张金凤, 等. 斜截椭圆柱式涡流发生器强化传热的大涡模拟[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(10): 55-61.
Wang Jiansheng, Liu Zhiyi, Zhang Jinfeng, et al. Large eddy simulation on heat transfer of inclined-cut ellipsoidal vortex generator [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(10): 55-61(in Chinese).
- [17] 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).
- [18] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 347-376.
Tao Wenquan. *Numerical heat transfer*[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 347-376(in Chinese).
- [19] Chen Y, Fiebig M, Mitra N K. Conjugate heat transfer of a finned oval tube with a punched longitudinal vortex generator in form of a delta winglet parametric investigations of the winglet[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, 41(23): 3961-3978.
- [20] Chen Y, Fiebig M, Mitra N K. Heat transfer enhancement of a finned oval tube with punched longitudinal vortex generators in line [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, 41(24): 4151-4166.
- [21] Fiebig M. Embedded vortices in internal flow: heat transfer and pressure loss enhancement[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1995, 16(5): 376-388.
- [22] Fiebig M. Vortices, generators and heat transfer[J]. *Transactions of Institution of Chemical Engineers*, 1998, 76(2): 108-123.



高猛

收稿日期: 2010-05-14.

作者简介:

高猛(1986), 男, 硕士研究生, 研究方向: 强化传热与流动减阻, gaomeng5960@yahoo.com.cn;

周国兵(1970), 男, 博士, 副教授, 研究领域: 强化传热与流动减阻, 太阳能热利用, 本文通讯作者, zhougb@ncepu.edu.cn.

(责任编辑 王庆霞)