

涡产生器倾角对换热器内流动与换热特性的影响^{*}

高 辰, 罗 超, 史维娜, 宋克伟

(兰州交通大学 机电工程学院 铁道车辆热工教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 为优化涡产生器强化传热的性能, 通过改变三角翼式涡产生器的倾角, 数值分析了倾角变化对板式换热器通道内流动与换热特性的影响, 倾角变化范围为 $-30^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。获得了不同倾角下通道内的纵向涡、涡量分布, 换热及阻力特性。结果表明涡产生器倾斜方向对流动与换热的影响不同, 存在最佳的涡产生器倾角 -10° , 使得换热通道内涡产生器强化换热的性能最优; 改变倾角可进一步提高涡产生器的强化传热性能, 不同倾角对应努塞尔数和热性能评价因子间的最大差值分别达到8.9%和5.7%。

关键词: 换热器; 涡产生器; 倾角; 对流传热

中图分类号: TK124

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2020) 04-0868-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190315

Effects of Inclination Angle of Vortex Generator on Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics of Heat Exchanger

GAO Chen, LUO Chao, SHI Wei-na, SONG Ke-wei

(Key Laboratory of Railway Vehicle Thermal Engineering of Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To improve the heat transfer enhancement performance of vortex generator, the inclination angle of a delta winglet vortex generator is proposed. The effects of inclination angle in the range between -30° and 30° on the fluid flow and heat transfer characteristics are numerically studied in the flow channel of plate heat exchanger. The details of the longitudinal vortex, vorticity, heat transfer and pressure loss in the flow channel are obtained under different inclination directions and different inclination angles. The results showed that inclination direction has apparent effect on the characteristics of fluid flow and heat transfer. There is an optimum inclination angle with -10° for the best heat transfer performance. Heat transfer performance of vortex generator can be further improved by changing the inclination angle. The maximum differences in Nusselt number and thermal performance factor between different inclination angles are approximately 8.9% and 5.7%, respectively.

Key words: Heat exchanger; Vortex generator; Inclination angle; Convective heat transfer

符号表

L/mm	通道长度	N/mm	涡产生器距离对称面距离
W/mm	通道宽度	s/mm	涡产生器长度
H/mm	通道高度	S/m^2	换热面积
R/mm	涡产生器距入口距离	k/mm	涡产生器高度

^{*} 收稿日期: 2019-05-17; 修订日期: 2019-07-24。

基金项目: 国家自然科学基金 (51866007); 甘肃省自然科学基金 (17JR5RA092); 甘肃省协同创新团队 (2018C-13)。

作者简介: 高 辰, 硕士生, 研究领域为强化传热技术。E-mail: 651610487@qq.com

通讯作者: 宋克伟, 博士, 教授, 研究领域为换热设备与节能技术。E-mail: songkw@mail.lzjtu.cn

引用格式: 高 辰, 罗 超, 史维娜, 等. 涡产生器倾角对换热器内流动与换热特性的影响[J]. 推进技术, 2020, 41(4): 868-874. (GAO Chen, LUO Chao, SHI Wei-na, et al. Effects of Inclination Angle of Vortex Generator on Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics of Heat Exchanger[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(4): 868-874.)

$\alpha/(^{\circ})$	涡产生器攻角
$\theta/(^{\circ})$	涡产生器倾角
p/Pa	流体压力
$C_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	流体的比热容
$\nu/(\text{m}^2/\text{s})$	运动黏度
$\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	动力黏度
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	密度
$T/^{\circ}\text{C}$	温度
$\lambda/(\text{W}/\text{m})$	流体的导热率
D_h/mm	特征尺寸
Re	雷诺数
Nu	努塞尔数
f	阻力系数
JF	热性能评价因子
$u, v, w/(\text{m}/\text{s})$	速度分量
下标	
in	进口
local	局部
out	出口
p	无涡产生器通道
w	壁面
s	横向平均值

1 引言

提高航空发动机的冷却性能可以在不改变发动机结构的前提下,通过安装换热器降低发动机进气温度来进一步提高航空发动机的性能^[1-4]。Bock 等^[2]通过数值模拟的方法发现利用换热器对冷却空气进行预冷却,可用更少量的冷却空气完成发动机的冷却任务,进一步提高了发动机的效率。Boyle 等^[3]发现使用换热器将冷却空气温度降低 400K,可以允许转子进口温度增加 100K,从而可节约发动机燃油消耗量。因此,改善换热器的换热性能可以进一步提高发动机的效率。

纵向涡能以较小的阻力损失来获得较好的传热效果^[5],国内外学者对纵向涡强化传热开展了大量研究工作^[6-10]。Yakut 等^[6]通过实验研究了三角翼涡产生器在矩形通道内传热特性的影响,结果表明攻角、布置方式、翼结构尺寸等参数对换热影响很大,其中翼的尺寸对换热影响最明显。Ke 等^[7]研究了不同涡产生器排列方式对流动与换热的影响。当涡产生器长高比较小时,渐缩式的传热效果要比渐扩式传热效果好;长高比相对较大时,结果则相反。田丽亭等^[8]同样发现矩形翼涡产生器以渐缩式布置时的传热明显优于渐扩式布置。Torri 等^[9]提出了一种新的涡产生器布置方法,在增强换热器换热能力的同时还能减小流动阻力。在低 Re 数管束叉排布置时,涡

产生器使得换热器的换热能力增加 10%~30%,而压力损失降低 34%~55%。

除了涡产生器布置方式,涡产生器强化传热的性能还受涡产生器形状、攻角等因素的影响^[11-18]。Fiebig^[11]在矩形通道层流条件下研究发现涡产生器攻角在 10°~50°间变化时,攻角为 30°时换热最好,与无涡产生器矩形通道相比换热量平均增加 60%。Song 等^[12]研究了曲面涡产生器对圆管管翅式换热器流动与换热的影响,通过纵向涡强度定量分析了涡产生器产生的纵向涡之间的干涉及对换热的影响^[13-15]。Wu 等^[16]发现翅片上冲出三角翼攻角为 45°时的换热能力优于攻角为 30°的情况,但是阻力较大;当通道为两排管时,攻角为 30°的换热提升 13%~18%,压力损失降低 9%~11%。闵春华等^[17]实验研究了一种新型的矩形翼涡产生器,新型矩形翼涡产生器攻角为 45°时传热效果最为明显,辅翼攻角为 30°时,组合翼传热效果最佳。Caliskan^[19]开发了新型穿孔三角形涡产生器和新型穿孔矩形涡产生器,穿孔三角涡产生器和矩形涡产生器都增强了换热,并且穿孔三角涡产生器传热效果强于穿孔矩形涡产生器。Anupam 等^[20]模拟了矩形小翼涡产生器在翅片管换热器中的流动与换热情况,发现换热量随着涡产生器攻角的减小而增加。Assadour 等^[21]发现在 $Re=911$ 时,矩形涡产生器倾斜面与垂直面的夹角为 20°时的强化传热效果最好。

综上所述,关于涡产生器强化传热的研究主要将涡产生器垂直布置于换热表面,而关于涡产生器与翅片表面间不垂直时的倾角变化对强化传热影响的研究甚少。本文利用数值模拟的方法详细研究了三角形涡产生器倾角对通道内流动与传热特性的影响,分析了通道内涡量、换热、阻力及综合换热因子随倾角的变化规律,获得了有利于强化传热的最佳涡产生器倾角。

2 方法

2.1 物理模型

本文所研究的物理模型如图 1 所示,三角形涡产生器布置在通道底面。通道长 $L=1500\text{mm}$,宽 $W=60\text{mm}$,高 $H=40\text{mm}$ 。涡产生器顶端距进口 $R=240\text{mm}$,距对称面 $N=10\text{mm}$ 。涡产生器攻角 $\alpha=30^{\circ}$,底边长 $s=40\text{mm}$,高 $k=20\text{mm}$ 。相对于涡产生器垂直布置于翅片表面,涡产生器顺着流动方向向右倾斜时,倾角 θ 的取值范围为 0°~30°;涡产生器逆着流动方向向左倾斜时,倾角 θ 的取值范围为 -30°~0°,如图 1(d)和(e)所示。

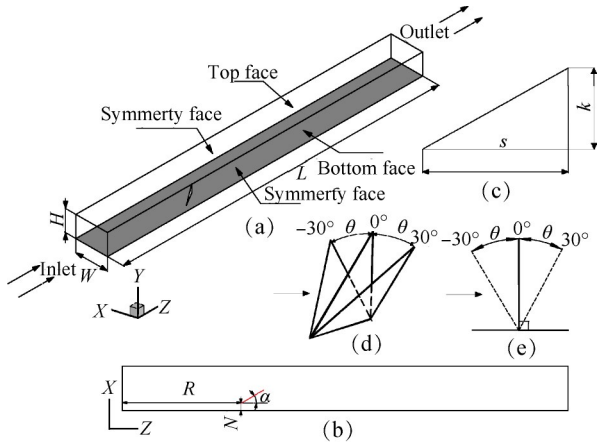


Fig. 1 Schematic diagram of the physical model and vortex generator

2.2 计算方法

对空气流动与传热作以下简化与假设:(1)物性参数为常数;(2)是黏性不可压定常流动,处于层流状态;(3)不考虑空气中的黏性耗散和体积力。流动与换热的控制方程为:

连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_k} \quad (k = 1, 2, 3) \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho C_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

速度进口边界条件为

$$\begin{aligned} w(x, y, z)_{in} &= w_{in}, u(x, y, z)_{in} = v(x, y, z)_{in} = 0 \\ T(x, y, z)_{in} &= T_{in} \end{aligned} \quad (4)$$

自由出口边界条件为

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} &= \frac{\partial v(x, y, z)}{\partial z} = \frac{\partial w(x, y, z)}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

上、下面及涡产生器为无滑移、等壁温边界条件

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= v(x, y, z) = w(x, y, z) = 0 \\ T(x, y, z)_w &= T_w \end{aligned} \quad (6)$$

两侧为对称边界条件

$$\begin{aligned} \frac{\partial v(x, y, z)}{\partial x} &= \frac{\partial w(x, y, z)}{\partial x} = \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial x} = 0 \\ u(x, y, z) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

数值计算采用 Fluent 17.0, 采用有限容积法离散控制方程, 对流项离散采用二阶迎风格式, 扩散项离散采用中心差分法, 采用 SIMPLE 算法处理压力场和速度场的耦合。连续性方程和能量方程残差分别为 10^{-6} 和 10^{-8} 。数据处理用到的主要参数定义如下:

雷诺数 Re

$$Re = \frac{w_{in} D_h}{\nu} \quad (8)$$

式中 w_{in} 为通道进口平均流速, D_h 为通道当量直径, 其值是 2 倍的翅片间距, ν 为空气的运动黏度。

努塞尔数 Nu

$$Nu = \frac{h D_h}{\lambda} \quad (9)$$

式中 h 是对流换热系数, λ 是空气的导热系数。

阻力系数 f

$$f = \frac{2(p_{in} - p_{out}) D_h}{\rho w_{in}^2 L} \quad (10)$$

式中, p_{in} 通道进口压力, p_{out} 通道出口压力, L 为通道长度

局部 Nu_{local}

$$Nu_{local} = \frac{-D_h \frac{\partial T}{\partial n}}{T_w - T} \quad (11)$$

横向平均 Nu_s

$$Nu_s(z) = \frac{\int_s Nu_{local} dS(z)}{\int_s dS(z)} \quad (12)$$

热性能评价因子 JF

$$JF = \left(\frac{Nu}{Nu_p} \right) / \left(\frac{f}{f_p} \right)^{1/3} \quad (13)$$

式中, Nu_p 和 f_p 分别为无涡产生器通道努塞尔数和阻力系数。

2.3 数值解网格独立性及验证

网格生成采用 ICEM 软件, 利用 Block 功能将整个模型分块处理, 生成六面体结构网格, 为提高网格质量, 在涡产生器及通道上下面附近对网格进行加密。数值解的网格独立性考核选取了 5 组网格, 网格数在 40 万~120 万变化, 如表 1 中所示。在 $Re=600, \theta=0^\circ$ 时, 不同网格数目下 Nu 及 f 间的差异均小于 1%, 数值解具有网格独立性。本文所有计算结果均采用网格数约 104 万时的网格, 网格如图 2 所示。

为验证数值方法的可靠性, 建立与文献[22-23]中一致的数值模型, 通道内布置涡产生器前后传热因子 j 和阻力系数 f 的比值 j/f_0 和 ff_0 与文献结果的对比

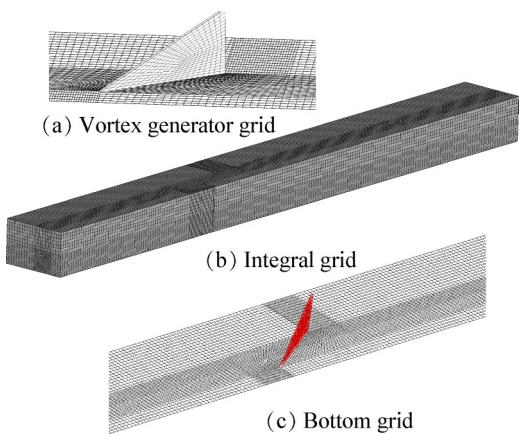


Fig. 2 Grid system

Table 1 Grid independence test

Grid number	Nu	Difference/%	f	Difference/%
436826	11.39132	~	0.210411	~
624991	11.39047	0.01	0.211085	0.32
854398	11.39280	0.02	0.211588	0.24
1039138	11.38184	0.10	0.211503	0.04
1199978	11.38183	0.01	0.211519	0.01

如图 3 所示。在 $Re=650$ 和 1000 时, j/j_0 与文献[22]中数值结果的误差分别为 7%, 4.1%, 与文献[23]中实验结果的误差分别为 0.08%, 0.31%; ff_0 与文献[22]中数值结果的误差分别为 0.23%, 6.4%, 与文献[23]中实验结果的误差分别为 1.8%, 6.5%。数值计算结果与文献中的数值和实验结果均吻合较好, 因此, 本文采用的数值方法合理, 数值结果可信。

3 结果与讨论

3.1 不同倾角下横截面上纵向涡与涡量

涡产生器不同倾角下同一横截面上的纵向涡和涡量分布如图 4 所示。倾角 θ 从 -30° 变化至 -10° 时, 横截面上纵向涡逐渐增大; 而倾角从 -10° 变化至 0° 时, 纵向涡强度则减小。 $\theta=-10^\circ$ 时的纵向涡明显大于

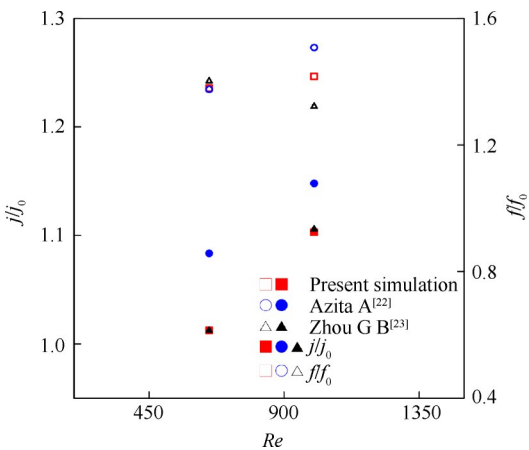


Fig. 3 Comparisons of numerical results with literature results

$\theta=0^\circ$ 时的纵向涡, 而 $\theta=-30^\circ$ 时的纵向涡则最小。 θ 由 0° 增加至 10° 时, 纵向涡强度增大; 而 θ 在 $10^\circ \sim 30^\circ$ 间变化时, 纵向涡则随着倾角的增大而逐渐减小。纵向涡倾角在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 间的变化规律与在 $-30^\circ \sim 0^\circ$ 间的变化规律相似, $\theta=10^\circ$ 时的纵向涡最大, 而 $\theta=30^\circ$ 时的纵向涡最小。图 4(b) 中横截面上涡量绝对值与图 4(a) 中纵向涡的分布规律一致。 θ 由 -30° 变化至 0° 时, 横截面上纵向涡对应区域的涡量先增加后减小, 在 $\theta=-10^\circ$ 时横截面上的涡量最大, 而在 $\theta=-30^\circ$ 时的涡量最小。 θ 在从 0° 变化到 30° 时, 横截面上的涡量同样先增大后减小, 在 $\theta=10^\circ$ 时的涡量最大, 而 $\theta=30^\circ$ 时的涡量则最小。

3.2 倾角对翅片局部 Nu 的影响

翅片表面 Nu 分布反应了翅片表面的局部换热性能, 如图 5 中所示。由于温度边界层在翅片入口开始形成, 因此在翅片入口 Nu 值很大。随着流体向下游流动, 边界层逐渐发展, Nu 逐渐减小; 在涡产生器之后区域, 翅片表面换热因纵向涡而得到强化, 纵向涡流经区域的 Nu 值相对较大, Nu 随着纵向涡的衰减而逐渐减小, 如图 5(a) 中所示。翅片入口到涡产生器

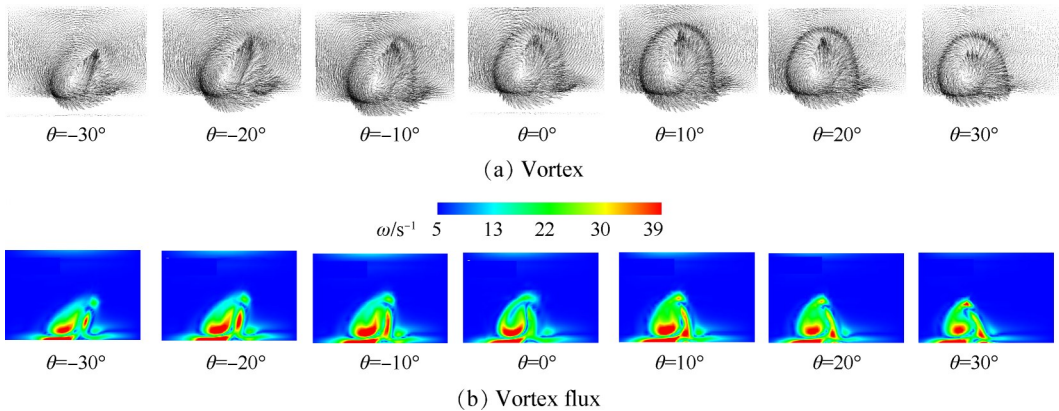


Fig. 4 Distributions of vortex and vorticity for different θ on the same cross section

之间 Nu 的分布不受倾角的影响。因此,为更清晰地展现不同倾角对局部 Nu 的影响,图 5(b)中仅示出了翅片表面 $z=220\text{mm}\sim 510\text{mm}$ 间的 Nu 分布,涡产生器后翅片表面局部 Nu 在不同倾角下的差异明显。 θ 在 $-30^\circ\sim 0^\circ$ 间变化时,下翅片表面 Nu 值较大的区域先增大后减小,在 $\theta=-10^\circ$ 和 -20° 时的区域相对较大。当 θ 从 0° 增加至 10° 时, Nu 值较大的区域增大,而 θ 从 10° 增加至 30° 时, Nu 值较大的区域逐渐减小,因此在 $\theta=10^\circ$ 时 Nu 值较大的区域最大。

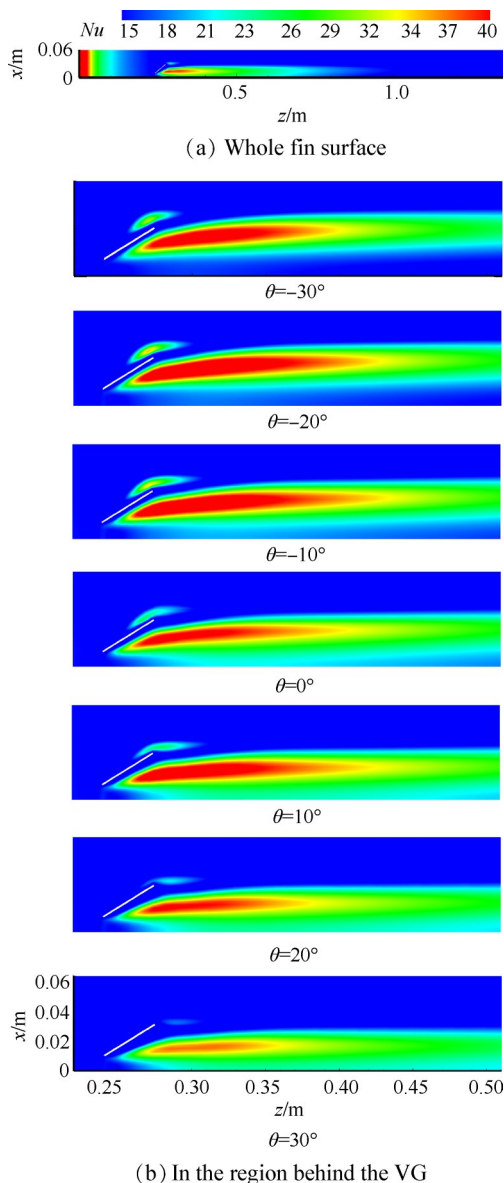


Fig. 5 Distributions of local Nu for different θ

3.3 倾角对翅片横向平均 Nu_s 的影响

图 6 为涡产生器不同倾角下,与图 5 中区域对应的横向平均 Nu_s 沿流向的变化。当流体流过涡产生器时,涡产生器破坏边界层的发展同时产生纵向涡,

使得涡产生器处 Nu_s 取得峰值。涡产生器后区域 Nu_s 随着纵向涡的衰减而逐渐减小。由于纵向涡的强度受涡产生器倾角的影响,不同倾角下涡产生器处及涡产生器之后区域 Nu_s 间的差别明显。当 θ 在 $-30^\circ\sim 0^\circ$ 间变化时, $\theta=-10^\circ$ 和 $\theta=-20^\circ$ 时的横向平均 Nu_s 均大于 $\theta=0^\circ$ 时的值,最大分别增加了 5.2% 和 1.6%。而 $\theta=-30^\circ$ 时的 Nu_s 小于 $\theta=0^\circ$ 时的 Nu_s ,最大减小了 8.5%。倾角在 $0^\circ\sim 30^\circ$ 之间变化时, $\theta=10^\circ$ 时的横向平均 Nu_s 略大于 $\theta=0^\circ$ 时的横向平均 Nu_s ,但差别很小。而 $\theta=20^\circ$, 30° 时的横向平均 Nu_s 均明显小于 $\theta=0^\circ$ 时的 Nu_s 值,最大相差约 7.6%。当倾角在 $-30^\circ\sim 30^\circ$ 间变化时, $\theta=-10^\circ$ 时的 Nu_s 最大,而 $\theta=30^\circ$ 时的 Nu_s 最小,最大值与最小值之间相差约 11.7%。因此,涡产生器倾角 θ 在 $-30^\circ\sim 0^\circ$ 之间时的换热要优于 θ 在 $0^\circ\sim 30^\circ$ 之间时的换热,且 $\theta=-10^\circ$ 时翅片表面 Nu_s 值最大,换热最好。

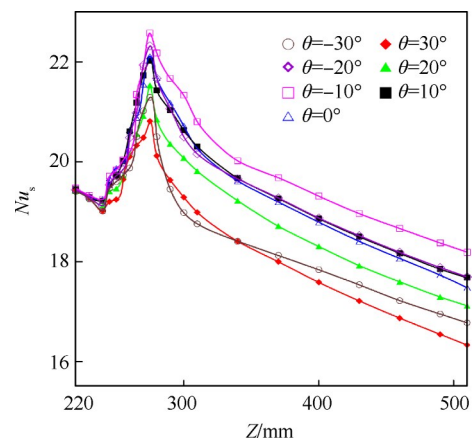


Fig. 6 Effects of inclination angle on Nu_s

3.4 倾角对平均 Nu , f 和 JF 的影响

不同倾角通道内平均 Nu 随 Re 的变化规律如图 7 所示。 Re 较小时,涡产生器产生的纵向涡较弱且不同倾角下的纵向涡差别不大,因此不同倾角下 Nu 间的差别很小。随着 Re 的增大,倾角对纵向涡强度的影响逐渐增大,不同倾角下 Nu 间具有明显的差别。 θ 在 $-30^\circ\sim 0^\circ$ 间变化时, $\theta=-10^\circ$ 时的 Nu 最大,与 $\theta=0^\circ$ 时的 Nu 相比增大约 2.6%。在 $Re=200\sim 1000$ 范围内, $\theta=-20^\circ$ 时的 Nu 小于 $\theta=0^\circ$ 时的 Nu ,而在 $Re>1000$, $\theta=-20^\circ$ 时的 Nu 略大于 $\theta=0^\circ$ 时的 Nu 。 $\theta=-30^\circ$ 时的 Nu 最小,与 $\theta=-10^\circ$, $\theta=0^\circ$, $\theta=-20^\circ$ 时相比,分别最大减小约 5.3%, 4.8% 和 3.5%。 θ 从 0° 增加至 30° 且 $Re<1400$ 时, $\theta=10^\circ$ 时的 Nu 比 $\theta=0^\circ$ 时小,而在 $Re\geq 1400$ 时, $\theta=10^\circ$ 时的 Nu 比 $\theta=0^\circ$ 时大。不同 Re 下 $\theta=20^\circ$ 和 $\theta=30^\circ$ 时的 Nu 都小于 $\theta=0^\circ$ 时的 Nu ,且 $\theta=30^\circ$ 时的 Nu 最小,比 $\theta=0^\circ$ 时的 Nu 最大减小约 7%。 θ 在 $-30^\circ\sim 30^\circ$ 间变化时, $\theta=-10^\circ$,

$-20^\circ, -30^\circ$ 时的 Nu 明显大于 $\theta=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 时的 Nu , 分别增大约 1.6%, 3.2% 和 2.8%。 $\theta=-10^\circ$ 时的 Nu 值最大, 相同 Re 下比 $\theta=30^\circ$ 时的 Nu 提高约 8.9%。

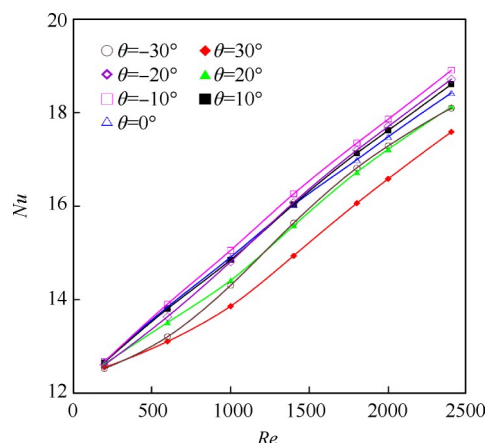


Fig. 7 Effects of inclination angle on averaged Nu

倾角 θ 对阻力系数 f 的影响如图 8 所示。 f 随着 Re 增大逐渐减小, 当 Re 较小时, 倾角变化对阻力系数的影响很小。当 $\theta=-10^\circ$ 时的 f 略大于 $\theta=0^\circ$ 时的 f 值, $\theta=-20^\circ$ 时的 f 略小于 $\theta=0^\circ$ 时的 f 值, 差别均小于 1%。 $\theta=-30^\circ$ 时的 f 小于 $\theta=0^\circ$ 时的 f 值, 最大减小约 1.8%。 θ 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 间变化时, f 随着 θ 的增大而减小, $\theta=10^\circ, 20^\circ$ 及 30° 时的 f 与 $\theta=0^\circ$ 时相比, 分别最大减小约 1%, 1.9% 和 4.3%。

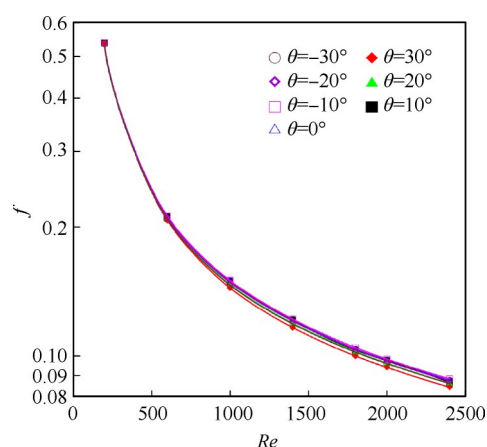


Fig. 8 Effects of inclination angle on distribution of f

涡产生器在强化换热的同时引起流动阻力的增加, 若阻力太大将会降低涡产生器的适用性。不同倾角下翅片热性能评价因子 JF 均大于 1, 如图 9 所示, 综合传热性能相对于平直翅片都有不同程度的提高。 JF 随 Re 的增加而增大, $Re < 600$ 时, JF 随 Re 变化平缓; 在 $600 < Re < 1400$ 时, 纵向涡的强化换热作用明显, JF 随 Re 的增加迅速增大; 在 $Re > 1400$ 时, 由于

涡产生器引起的阻力随着流速的增大迅速增大, JF 增长速率变得较为平缓。 θ 在 $-30^\circ \sim 0^\circ$ 间变化时, $\theta=-10^\circ$ 时的 JF 始终大于 $\theta=0^\circ$ 时的 JF , 最大相差约 2.1%; 在 $Re > 1400$ 时, $\theta=-20^\circ$ 时的 JF 也大于 $\theta=0^\circ$ 时的 JF ; JF 在 $\theta=-30^\circ$ 时最小, 比 $\theta=0^\circ$ 时最大减小 3.3%。 θ 由 0° 增加至 30° 时, $\theta=10^\circ$ 时的 JF 大于 $\theta=0^\circ$ 时的 JF , 而 $\theta=20^\circ, 30^\circ$ 时的 JF 均小于 $\theta=0^\circ$ 时的 JF 值, 最大分别减小了约 1.7 和 4.5%。在倾角绝对值相同的情况下, $\theta=-10^\circ, -20^\circ, -30^\circ$ 时的 JF 大于 $\theta=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 时的 JF 。 $\theta=-10^\circ$ 时的 JF 最大, 而 $\theta=30^\circ$ 时的 JF 最小, 二者最大相差约 5.7%。

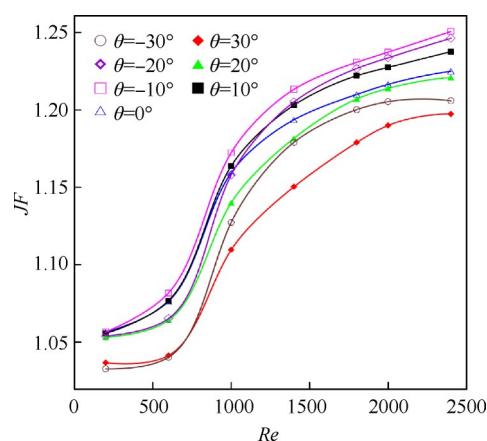


Fig. 9 Distribution of JF for different inclination angles as a function of Re

4 结 论

本文详细分析了三角翼型涡产生器倾角对通道内流动与换热特性的影响, 主要结论总结如下:

(1) 涡产生器倾角 θ 在 $-30^\circ \sim 0^\circ$ 之间时, 涡产生器产生的纵向涡以及所引起的换热随着倾角绝对值的减小先增大后减小, 在倾角 $\theta=-10^\circ$ 时的换热强化最好。

(2) 涡产生器倾角 θ 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间时, 涡产生器产生的纵向涡以及所引起的换热随着倾角的增大先增大后减小, 在倾角 $\theta=10^\circ$ 时的换热强化最好。

(3) 涡产生器倾角 θ 在 $-30^\circ \sim 0^\circ$ 之间时的强化换热性能要优于涡产生器倾角 θ 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间时的强化换热性能。倾角 $\theta=-10^\circ$ 时的强化传热性能最好, 不同倾角下 Nu 和 JF 间的最大差值分别达到 8.9% 和 5.7%。

致 谢: 感谢国家自然科学基金, 甘肃省自然科学基金, 甘肃省协同创新团队以及兰州交通大学百名青年优秀人才培养计划的资助。

参考文献

- [1] Lu H Y, Lv D, Yu X, et al. Study of the Pressure Drop and Thermal Performance of an Air-Air Heat Exchanger for Aero-Engine Application[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 99(6): 812-821.
- [2] Bock S, Horn W, Sieber J. Active Core-A Key Technology for more Environmentally Friendly Aero Engines being Investigated under the NEWAC Program[C]. *Anchor-age: 26th International Congress of the Aeronautical Sciences*, 2008.
- [3] Boyle R J, Jones S M. Effects of Precooling Turbine Cooling Air on Engine Performance[R]. *ASME 2009-GT-60120*.
- [4] 王冬兰, 朱卫兵, 平登科, 等. 燃-滑油换热器壳侧换热特性研究[J]. 推进技术, 2016, 37(5): 900-906. (WANG Dong-lan, ZHU Wei-bing, PING Deng-ke, et al. A Study of Heat Transfer Characteristics on Shell-side of Fuel-Oil Heat Exchanger[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(5): 900-906.)
- [5] 马晓驰. 国内外新型高效换热器[J]. 化工进展, 2001, 20(1): 49-51.
- [6] Yakut K, Sahin B, Celik C, et al. Effects of Tapes with double-sided Delta Winglets on Heat and Vortex Characteristics[J]. *Applied Energy*, 2005, 80(4): 77-79.
- [7] Ke Z Q, Chen C L, Li K J, et al. Vortex Dynamics and Heat Transfer of Longitudinal Vortex Generators in a Rectangular Channel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 132(20): 871-885.
- [8] 田丽亭, 雷勇刚, 何雅玲. 纵向涡强化换热特性及机理分析[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(12): 2128-2130.
- [9] Torri K, Kwak K, Nishino K. Heat Transfer Enhancement Accompanying Pressure-Loss Reduction with Winglet-Type Vortex Generators for Fin Tube Heat Exchangers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(7): 3795-3810.
- [10] Fiebig M. Embedded Vortices in Internal Flow: Heat Transfer and Pressure Loss Enhancement[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1998, 16(10): 376-388.
- [11] Fiebig M. Wing Type Vortex Generators for Heat Transfer Enhancement[J]. *Heat Transfer*, 1986, 6(10): 2909-2913.
- [12] Song K W, Xi Z P, Su M, et al. Effect of Geometric Size of Curved Delta Winglet Vortex Generators and Tube Pitch on Heat Transfer Characteristics of Fin-Tube Heat Exchanger[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 82(11): 8-18.
- [13] Song K W, Tagawa T. The Optimal Arrangement of Vortex Generators for Best Heat Transfer Enhancement in Flat-Tube-Fin Heat Exchanger[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 132(13): 355-367.
- [14] Song K W, Hu W L, Liu S, et al. Quantitative Relationship between Secondary Flow Intensity and Heat Transfer Intensity in Flat-Tube-and-Fin Air Heat Exchanger with Vortex Generators[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 103(25): 1064-1070.
- [15] Song K W, Liu S, Wang L B. Interaction of Counter Rotating Longitudinal Vortices and the Effect on Fluid Flow and Heat Transfer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 93(12): 349-360.
- [16] Wu J M, Tao W Q. 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): 1179-1191.
- [17] 闵春华, 齐承英, 谢尚群, 等. 新型矩形翼纵向涡发生器流动与换热实验研究[J]. 热能与动力工程, 2010, 25(1): 43-47.
- [18] 宋克伟, 刘松, 王良璧. 扁管换热器内纵向涡强度与换热强度对应关系[J]. 化工学报, 2016, 5(5): 1858-1867.
- [19] Caliskan S. Experimental Investigation of Heat Transfer in a Channel with New Winglet-Type Vortex Generators[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 78(5): 604-614.
- [20] Anupam S, Himadri C, Ashwin K I. Enhancement of Heat Transfer in a Fin Tube Heat Exchanger Using Rectangular Winglet Type Vortex Generators[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 101(8): 667-681.
- [21] Assadour K, Charbel H, Serge R. Effect of Rectangular Winglet Pair Roll Angle on the Heat Transfer Enhancement in Laminar Channel Flow[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 114(8): 1-14.
- [22] Azita A, Mehrzad S. Optimization of Shape and Angle of Attack of Winglet Vortex Generator in a Rectangular Channel for Heat Transfer Enhancement[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 81(7): 376-387.
- [23] Zhou G B, Feng Z Z. Experimental Investigations of Heat Transfer Enhancement by Plane and Curved Winglet Type Vortex Generators with Punched Holes[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 78(15): 26-35.

(编辑:梅 瑛)