

射流表面射流角度与射流速度耦合减阻特性

谷云庆, 赵刚, 郑金兴, 张殊, 汝晶, 刘明明, 姚建均

(哈尔滨工程大学机电工程学院, 150001, 哈尔滨)

摘要: 针对射流的仿生非光滑表面的减阻问题, 运用可拓学基本原理建立了射流角度与射流速度耦合元、耦合的可拓模型. 利用 SST $k-\omega$ 湍流模型在对射流表面射流角度与射流速度耦合情况下的减阻特性进行了数值模拟, 并以此研究了射流表面压差阻力和黏性阻力减小的原因和射流表面边界层的控制行为. 结果表明: 在射流的角度、速度耦合的情况下, 射流表面的减阻性能较好; 当耦合的射流角度为 30° 、射流速度为 1.2 m/s 时, 减阻率最大, 为 28.10% ; 角度、速度耦合下的射流表面有助于减小模型壁面的速度梯度, 增加壁面黏性底层的厚度, 继而降低了模型壁面的压差阻力和黏性阻力, 并且表现出良好的减阻性能; 耦合下的压差阻力在一定程度上可以作为一种附加的动力, 对射流表面流体起到推动的作用.

关键词: 射流表面; 减阻; 数值模拟; 黏性阻力; 压差阻力

中图分类号: TB17 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)09-0071-07

Drag Reduction Characteristics on Jetting Surface with Jet Angle-Jet Velocity Coupling

GU Yunqing, ZHAO Gang, ZHENG Jinxing, ZHANG Shu,

RU Jing, LIU Mingming, YAO Jianjun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: An extension model for coupling elements and coupling ways of the jet angle and jet velocity was built to reduce the resistance of unsmoothed bionics surfaces from the basic extension theory. With the SST $k-\omega$ turbulence model, the simulation on the drag reduction characteristics with the jet angle-jet velocity coupling was performed, and then the reasons for reducing the viscous resistance and pressure resistance of the jetting surface and the controlling behavior of jetting surface towards the boundary layer were explored. The results show that the drag reduction effect of the jetting surface is better when the jet angle and the jet velocity are coupled. The maximum drag reduction rate reaches 28.10% when the jet angle is 30° coupled with the jet velocity of 1.2 m/s . With the jet angle-jet velocity coupling, the jetting surface can reduce the velocity gradient at the wall and increase the viscous sublayer thickness, thus reducing the pressure resistance and viscous resistance at the wall and then leading to the drag reduction. In addition, the pressure resistance with the coupling, as an additional power to a certain extent, has a propelling effect on the fluid of the jetting surface.

Keywords: jet surface; drag reduction; numerical simulation; viscous resistance; pressure resistance

收稿日期: 2012-02-29. 作者简介: 谷云庆(1982—), 男, 博士生; 赵刚(通信作者), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50905037); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HEUCF110702); 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金资助项目(159070220011).

网络出版时间: 2012-07-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120710.1758.002.html>

射流减阻技术一直备受国内外重视,并且引入到了高超声速飞行器的减阻领域.耿湘人等^[1]对轴对称逆向喷流减阻进行了计算研究,发现适当的逆向喷流有益于球头外形减阻和降低热流量.石清等^[2]研究了零净质量射流的速度幅值和射流频率对飞机翼型升力的影响,结果表明随着射流速度 v 幅值的增加,翼型的平均升力和阻力有所增大.关晖等^[3]采用大涡模拟方法模拟了流向和展向椭圆喷嘴的湍流横向射流,同时研究了旋涡结构的产生、发展等动力学演化过程.蔡晋生等^[4]通过数值方法研究了拱柱体侧向射流与超声速来流的相互干扰,发现喷管出口上游不仅形成了碗状激波,而且存在复杂的分离区和分离激波. Meyer 等^[5]对二维圆柱外形进行了研究,结果表明逆向冷喷流对于减阻和降低表面热流量具有良好的效果. Eswar 等^[6]将逆向射流减阻技术应用于飞行器和导弹. Barber 等^[7]研究了平板物体上楔形和圆形侧向射流喷管出口形状及形状对物面压力分布的影响.

受鲨鱼鳃部射流启发,本文在前期射流表面减阻机理研究^[8-10]的基础上,基于仿生学原理并从工程实际应用出发,建立了具有鲨鱼鳃裂部位射流特征的仿生射流表面模型,对不同的射流角度 θ 和不同 v 耦合下的射流表面进行了数值模拟,以研究射流表面的减阻特性和机理.

1 射流表面耦合模型

图 1 为计算域,其中 L_x 为计算域沿流向的尺寸, L_y 为计算域沿展向的尺寸, L_z 为计算域沿竖直方向的尺寸, L_1 为射流孔中心到主流场速度入口的距离, φ 为射流孔直径, θ 为射流角度, V 为主流场速度, v 为射流速度. 为便于分析,计算流域上表面将作为与底部射流表面对照的光滑表面, 2 个表面相对于速度入口处的位置和尺寸相同.

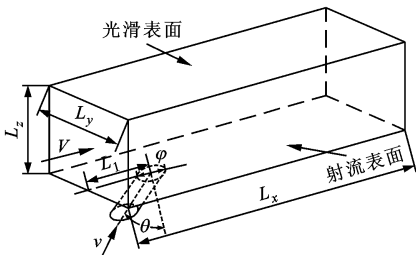


图 1 计算域

计算域模型的形状为矩形,其中 $L_x=50\text{ mm}$, $L_y=10\text{ mm}$, $L_z=6\text{ mm}$. 射流孔形状为圆形, $\varphi=$

4 mm,尾端长度为 6 mm. 射流孔位于 x 与 y 构成的平面内, $L_1=6\text{ mm}$ 且距两侧壁等距离.

根据工程实际应用,本文对生物模型进行了合理改进和优化,同时基于可拓分析原理^[11],结合射流表面的工作机理,确定特征耦合的耦元为 θ 和 v ,由此建立了相关耦元的可拓模型,具体内容如表 1 所示.

表 1 耦元可拓模型表述形式

耦元	名称	因素	数值
M_1	$\theta/(^\circ)$	倾斜角度	0、15、30、45、60
M_2	$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	速度大小	0.4~1.2(间隔 0.1)
		供给方式	连续
M_3	介质	主流场介质	水
		$V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	20
		射流介质	水
		外部介质	空气
		内部状态	常温
		外部状态	常温、常压

利用关系元建立了射流角度耦元 M_1 与射流速度耦元 M_2 及相关耦元之间耦合方式的可拓模型 $R(O_m, C_m, V_m)$, 基于 $R(O_m, C_m, V_m)$ 和耦合方式的可拓模型建立了多元耦合可拓模型 $B(O_m)$ 以及它们的表述形式,如表 2 所示.

表 2 耦元耦合方式可拓模型表述形式

可拓模型	耦合方式	因素	参数
$R(O_m, C_m, V_m)$	关系耦合	前项 c_{m1}	M_i
		后项 c_{m2}	M_j
		模拟顺序 c_{m3}	v_{m3}
		耦合程度 c_{m4}	v_{m4}
		数学关系 c_{m5}	v_{m5}
		方位关系 c_{m6}	v_{m6}
$B(O_m)$	特征耦合	功能 c_{n1}	v_{m1}
		耦元 c_{n2}	$M_1 \wedge M_2 \wedge M_3$
		工作环境 c_{n3}	M_3
		耦合方式 c_{n4}	$R(O_m, C_m, V_m)$

表 2 中: M_i 、 M_j 分别为第 i 、 j 个耦元; v_{m3} =[先后,顺序,依次]; v_{m4} =[复合,结合,组合]; v_{m5} =[函数,多元,空间,耦联,...]; v_{m6} =[上下,左右,前后,叠加,...]; v_{m1} =[支配对象,降低,表面黏附力] $\wedge$ [支配对象,减小,表面张力].

2 数值模拟方法

在建立 M_1 、 M_2 及 $R(O_m, C_m, V_m)$ 的基础上,基于介质耦元 M_3 对多元耦合可拓模型 $B(O_m)$ 进行了数值模拟。

2.1 数值模拟计算方程

控制方程的基本形式^[12]为

$$\frac{\partial(\rho \Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \Phi) = \text{div}(\Gamma_\Phi \text{grad} \Phi) + S_\Phi \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; $\mathbf{u}$ 为流场速度矢量; Φ 为通用因变量; Γ_Φ 为广义扩散系数; S_Φ 为广义源项。式(1)在表达不同方程时各参数的具体形式如表 3 所示,其中 μ 为流体动力黏度系数, u_i 为方向分量。

表 3 控制方程中各符号的具体形式

方程	Φ	S_Φ	Γ_Φ
连续方程	1	0	0
动量方程	u_i	$-\partial p / \partial x_i + S_i$	μ
能量方程	T	S_T	k/c

SST $k-\omega$ ^[13] 湍流模型通过建立混合函数的方法,使得模型在近壁区计算精度高和算法稳定性好,在从近壁面到远壁面的流场实现平稳过渡,进而避免了近壁区域使用壁面函数法带来的问题,提高了仿真精度。因此,为了确保高速和复杂的流体仿真过程中模型对压力场及阻力模拟的准确性,本文采用了 SST $k-\omega$ 湍流模型。 k 方程与 ω 方程在不考虑浮力的情况下

$$\frac{\text{d}(\rho k)}{\text{d}t} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\text{d}(\rho \omega)}{\text{d}t} &= \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\gamma \rho}{\mu_t} - \beta \rho \omega^2 + \\ &\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1 - F_1) \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: τ_{ij} 为湍动剪切应力,其生成项为

$$\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \mu_t \left[\Gamma_{ij}^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)^2 - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (4)$$

其中 Γ_{ij} 为应变张量。

在建立 SST 湍流模型时需要将 $k-\omega$ 湍流模型与 $k-\epsilon$ 湍流模型进行混合, SST 湍流模型中 ϕ 为常数,即

$$\phi = \lambda_1 \phi_1 + (1 - \lambda_1) \phi_2 \quad (5)$$

式中: ϕ_1 为 $k-\omega$ 湍流模型中的常数; ϕ_2 为 $k-\epsilon$ 湍流模型中的常数; λ_1 与 λ_2 为混合函数,可以制约边界层,分别为

$$\lambda_1 = \tanh(\xi_1^4) \quad (6)$$

$$\lambda_2 = \tanh(\xi_2^2) \quad (7)$$

$$\xi_1 = \min \left(\max \left(\frac{k^{1/2}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{D_{k\omega} \sigma_{\omega 2} y^2} \right) \quad (8)$$

$$\xi_2 = \max \left(\frac{2k^{1/2}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \quad (9)$$

其中 y 是距壁面最近的位置, ν 为运动黏度系数

$$D_{k\omega} = \max \left(\frac{2\rho}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 1.0 \times 10^{-10} \right) \quad (10)$$

BSL 模型混合了 Wilcox $k-\epsilon$ 模型和标准 $k-\epsilon$ 模型的优点,但仍不能正确预测光滑表面的流动分离性,因为这两个模型都不能解释传输中的湍流切应力,结果导致涡流黏度估计过高。涡流黏度可以通过适当的传输行为加以限定,即

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega \lambda_2)} \quad (11)$$

式中: μ_t 为涡流黏度, $\mu_t = \nu_t \rho$; Ω 为不变测度应变率。 λ_2 的功能类似于 λ_1 , 可以制约边界层的限制。

$k-\omega$ 湍流模型中 $\sigma_{k1} = 0.85$, $\sigma_{\omega 1} = 0.5$, $\beta_1 = 0.075$, $\kappa = 0.4$, $\beta^* = 0.09$, $a_1 = 0.31$, $\gamma = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \sigma_{\omega 1} \kappa^2 / \beta^{*1/2}$; $\sigma_{k2} = 1.0$, $\sigma_{\omega 2} = 0.856$, $\beta_2 = 0.0828$, $\kappa = 0.41$, $\beta^* = 0.09$, $\gamma = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \sigma_{\omega 2} \kappa^2 / \beta^{*1/2}$ 。

2.2 网格划分

计算流域采用非结构化网格划分,利用四面体单元网格进行离散,壁面第 1 层网格距壁面垂直距离 Δy 约为 0.006 mm

$$\Delta y = 80^{1/2} L_y^+ Re_L^{-13/14} \quad (12)$$

$$Re_L = \frac{u_\infty L_x}{\nu} \quad (13)$$

式中: u_∞ 为来流速度。SST $k-\omega$ 模型中, $y^+ < 5$, 本文中 $y^+ = 1$ 。

射流表面边界层厚度

$$\delta = 0.035 L Re_L^{-1/7} \quad (14)$$

计算得 $\delta = 0.24316$ mm。

2.3 边界条件

计算中边界条件及求解参数设置如下:连续方程残差为 1×10^{-4} , 其他残差为 1×10^{-3} ; 流体温度为 293 K; 出口压力为 0 Pa; 湍流强度为 5%; 光滑表面及仿生射流孔壁面为无滑移壁面, 求解方法选择基于密度的显式求解器; 离散格式为二阶迎风格式。

3 计算结果及机理分析

针对 θ 和 M_2 , 对射流表面的阻力分量进行了数值计算, 对光滑表面模型、射流表面模型的壁面所受阻力总和进行了比较, 以评价射流表面减阻特性, 分析减阻机理。射流表面减阻特性可由减阻率表示, 计算式为

$$R = \frac{F_s - F_l}{F_s} \times 100\% \quad (15)$$

式中: F_s 为光滑表面所受阻力总和; F_l 为射流表面所受阻力总和。

模型表面所受阻力总和 F 包括压差阻力 f^* 和黏性阻力 f , 即 $F = f^* + f$

$$f^* = \int \sigma dA^* = \sum_{i=1}^n \sigma_i |A_i^*| \quad (16)$$

$$f = \int \tau dA = \sum_{i=1}^n \tau_i |A_i| \quad (17)$$

式中: σ 为壁面压应力; σ_i 为壁面离散单元压应力; A^* 为壁面沿主流场流动方向面积投影; A_i^* 为壁面离散单元沿主流场流动方向面积投影; τ 为壁面剪应力; τ_i 为壁面离散单元剪应力; A 为壁面面积; A_i 为壁面离散单元面积。

3.1 摩擦阻力特性分析

3.1.1 压差阻力分析 图2为 θ 与 v 耦合下的压差阻力云图。由图2可知: 当 θ 一定时, 射流表面模型的压差阻力随 v 的增大而减小; 当 v 一定时, 射流表面模型的压差阻力随着 θ 增大先减后增; 对于不同 θ 的仿生射流模型, 压差阻力随 v 的变化具有相似的规律。在 $\theta=60^\circ$ 、 $v=0.4$ m/s 耦合下, 压差阻力最大, $f^*=0.169$ N; 在 $\theta=30^\circ$ 、 $v=1.2$ m/s 耦合下, 压差阻力最小, $f^*=-0.480$ N; 在 θ 与 v 耦合对压差阻力的影响中, M_2 为主耦元, M_1 为次主耦元。对图2进行分析可知, 当 $v>0.7$ m/s 时, 压差阻力均为负值, 说明此时压差阻力是一种附加动力, 对射流表面流体起到推动的作用。 θ 分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 时, 射流表面模型的平均压差阻力分别为 -0.145 、 -0.176 、 -0.208 、 -0.162 、 -0.056 N, 可见随着 θ 的增大, 射流表面受到的平均压差阻力先减后增; $\theta=30^\circ$ 时, 射流表面的平均压差阻力最小, $f^*=-0.208$ N, 说明在该参数条件下可最大程度降低模型壁面的压差阻力。

3.1.2 黏性阻力分析 图3为 θ 与 v 耦合下的黏性阻力云图。由图3可知: 在 θ 与 v ($v=0.4\sim 1.2$ m/s) 耦合下, 当 θ 分别为 0° 、 15° 、 30° 时, 随着 v 的增

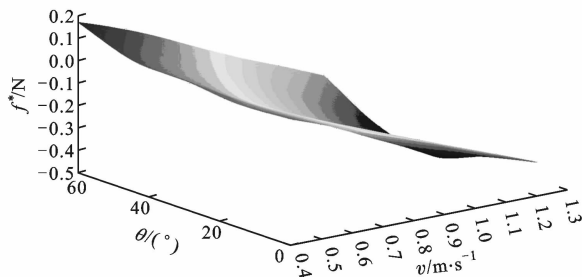


图2 θ 与 v 耦合下的压差阻力云图

大黏性阻力先减后增, 当 θ 分别为 45° 、 60° 时, 随 v 的增大黏性阻力逐渐减小; 在 $\theta=60^\circ$ 、 $v=0.4$ m/s 耦合下, 黏性阻力最大, $f=1.859$ N; 在 $\theta=15^\circ$ 、 $v=0.9$ m/s 耦合下, 黏性阻力最小, $f=1.795$ N。可见, θ 与 v 耦合对黏性阻力的影响中, M_1 为主耦元, M_2 为次主耦元。对图3进行分析可知: 在 $\theta=60^\circ$ 时, 黏性阻力受 v 影响较大; θ 越小, 受 v 影响的黏性阻力变化梯度越小; $\theta\leq 30^\circ$ 时, 黏性阻力随 v 增大呈现出先减后增的趋势。 θ 分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 时, 射流表面模型的平均黏性阻力分别为 1.814 、 1.809 、 1.814 、 1.824 、 1.832 N, 其中光滑表面所受阻力总和 $F_s=1.833$ N。可见: 不同 θ 下射流表面模型平均黏性阻力均比光滑表面有所降低; 当 θ 由 0° 增大到 60° 时, 射流表面模型平均黏性阻力先减后增, $\theta=15^\circ$ 时, 平均黏性阻力最小, $f=1.809$ N。

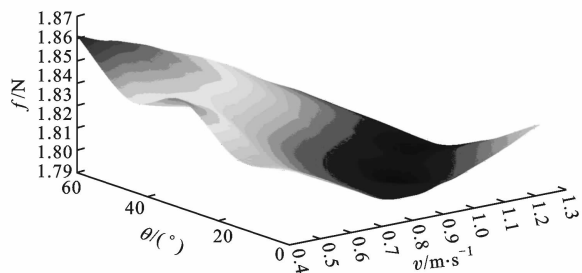


图3 θ 与 v 耦合下的黏性阻力云图

3.1.3 减阻率分析 根据式(15)对 θ 与 v 耦合下的减阻率进行了计算, 结果如图4所示。由图4可知: 对于 θ 一定的射流表面模型, 当 v 由 0.4 m/s 增加到 1.2 m/s 时, 射流表面的减阻率逐渐增大; 在 $\theta=30^\circ$ 、 $v=1.2$ m/s 耦合下, 减阻率最大, 此时 $R=28.10\%$; 在 θ 与 v 耦合对减阻率的影响中, M_2 为主耦元, M_1 为次主耦元。

图5为不同 θ 下射流表面的减阻率曲线。由图5可知: 在 θ 一定的情况下, 随着 v 的减小, 射流表面呈现出增阻的趋势, 随着 v 逐渐增大, 减阻率呈现出线性变化的趋势; 不同 θ 下, 随着 v 的变化, 减阻率

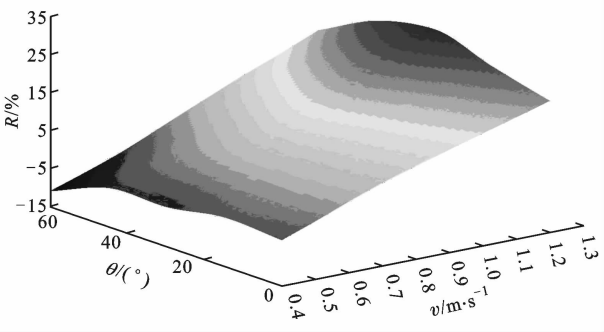


图 4 θ 与 v 耦合下的减阻率云图

的变化类似. 为了评价最佳减阻效果时的 θ , 取 θ 分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 计算出射流表面模型在不同 v 时的平均减阻率, 它们分别为 8.96%、10.93%、12.41%、9.35%、3.05%. 可见, 随着 θ 的增大, 射流表面的平均减阻率呈现出先增后减的趋势, 当 $\theta=30^\circ$ 时, 平均减阻率最大, 为 12.41%. 对减阻率分析表明, 当 $\theta=30^\circ$ 时, θ 与 $v=0.4\sim1.2$ m/s 耦合具有最佳减阻效果.

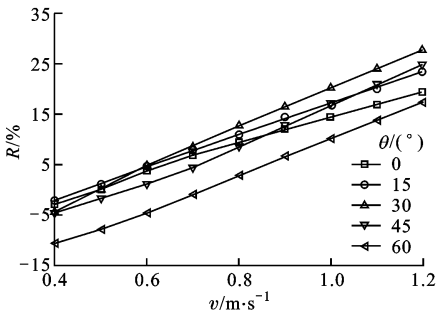


图 5 不同 θ 下射流表面的减阻率曲线

3.2 射流表面对边界层控制行为的影响分析

通过多元耦合可拓模型 $B(O_m)$ 在数值模拟过程中模型流场的仿真结果, 来研究不同 θ 与 v 耦合情况对减阻特性的影响机理. 由于在不同的 v 下, θ 对减阻效果的影响机理相同, 为了便于分析, 取 $v=1.0$ m/s 来分析射流表面的边界层控制行为.

3.2.1 流场压应力分析 图 6 为不同 θ 下流场压应力分布云图, 其中模型上表面为对照的光滑表面. 由图 6 可知, θ 会影响低压流域, 随着 θ 的增大, 低压流域的面积减小, 但压应力值没有变化, 流场压应力的这种变化使得靠近下游射流出口壁面的压力发生变化, 从而使得模型的压差阻力发生变化.

3.2.2 边界层剪应力分析 图 7 为不同 θ 下壁面剪应力分布云图. 由图 7 可知, 与对照的光滑表面剪应力相比, 在射流表面的射流孔下游, 随着 θ 的增大, 剪应力降低的流域范围逐渐缩小, 剪应力降低的

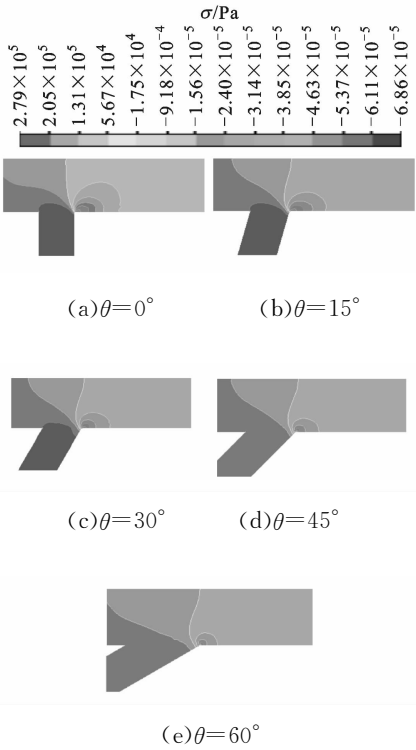


图 6 不同 θ 下流场压应力分布云图

幅值减小, 同时在该流域两侧对称分布的多条壁面剪应力增大的流域的面积减小, 剪应力流域的变化具有同向性, 射流表面通过对壁面剪应力的影响改变了模型的黏性阻力.

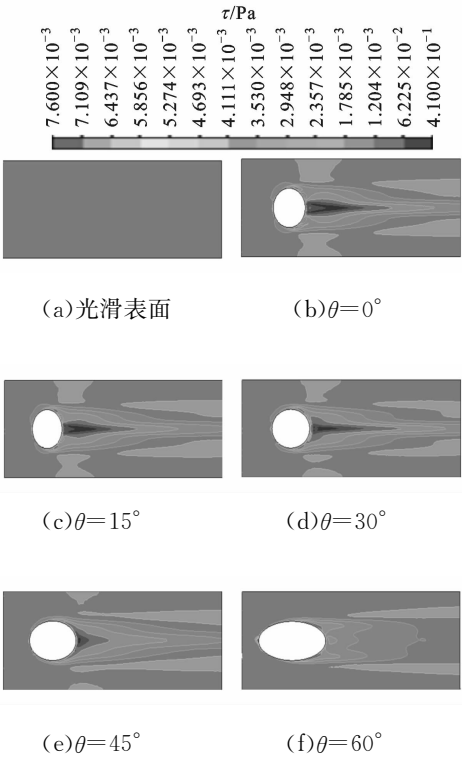


图 7 不同 θ 下壁面剪应力分布云图

3.2.3 流场速度场分析 图 8 为不同 θ 下沿流向的速度(过射流表面孔径中心线并沿流向方向截面的速度)云图. 由图 8 可知,在射流表面的射流孔下游边界层内,当 θ 逐渐增大时,低速流体的厚度减小,速度梯度不断变化,边界层厚度减小. 通过减阻理论的分析知,这种变化使得壁面剪应力降低的幅度减小.

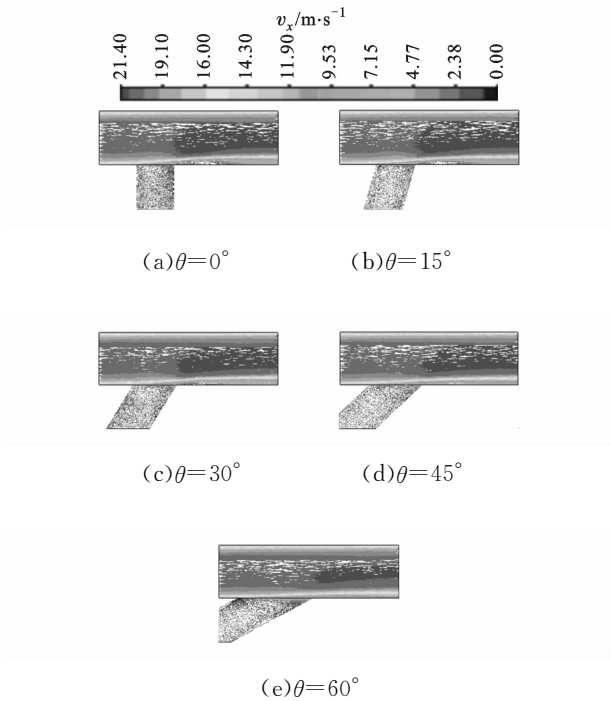


图 8 不同 θ 下沿流向的速度云图

图 9 为不同 θ 下沿展向的速度(过射流表面孔径中心线并沿展向方向截面的速度)云图. 由图 9 可知,随着 θ 的增大,射流孔区域的边界层厚度明显减小,表明 θ 影响了壁面剪应力及边界层黏性底层厚度,继而影响模型的黏性阻力.

图 10 为 θ 分别为 0° 、 15° 时射流孔下游 1 mm 截面处速度矢量图. 由图 10 可知,射流表面的变化会导致射流孔下游近壁面处低速流场厚度发生变化,致使边界层黏性底层增厚,相应的速度梯度减小,壁面的剪应力降低,所以摩擦阻力减小.

通过以上分析可知, θ 及 v 耦合会影响射流孔下游流域的壁面剪应力、压应力,继而影响射流孔下游流域边界层及速度梯度. 通过改变射流表面的壁面剪应力及压应力,可以减小壁面速度梯度,降低壁面黏性阻力及压差阻力,增加壁面边界层黏性底层厚度,从而达到减小壁面摩擦阻力的目的,继而达到减阻的目的.

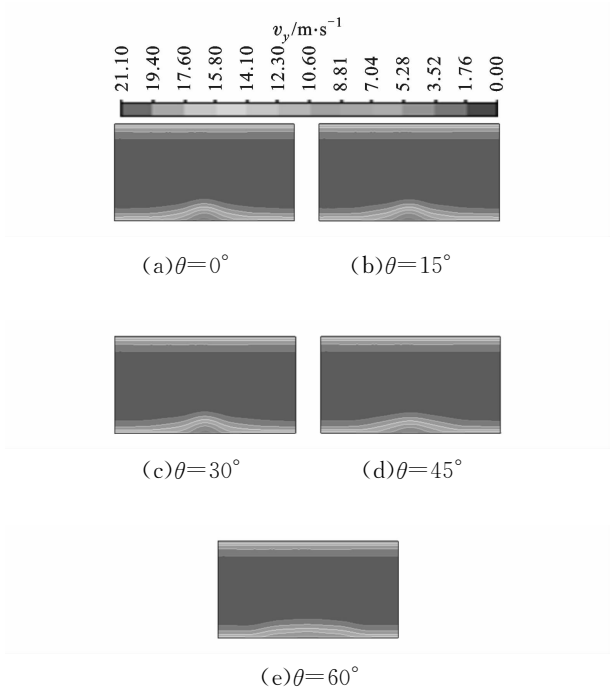


图 9 不同 θ 下沿展向的速度云图

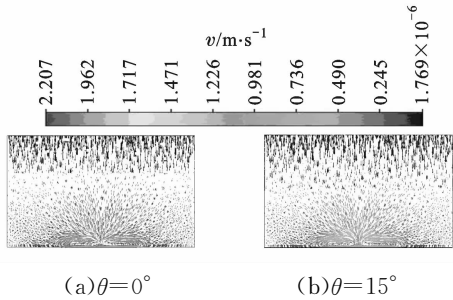


图 10 射流孔下游 1 mm 截面处速度矢量图

4 结 论

通过 θ 与 v 耦合可以达到射流表面减阻的效果,在 M_1 中 $\theta=30^\circ$ 、在 M_2 中 $v=1.2$ m/s 的情况下, R 最大, $R=28.10\%$. v 是影响射流表面压差阻力的主要因素,它的影响力大于 θ ; θ 是影响射流表面黏性阻力的主要因素,它的影响力大于 v ; v 是影响减阻率的主耦元, θ 是影响减阻率的次主耦元. 射流表面 θ 与 v 耦合后的减阻特性主要体现在:射流表面减小,使得壁面速度梯度减小,壁面黏性底层的厚度增加;耦合下产生的压差阻力将成为一种附加动力,对射流表面流体起到了推动的作用.

参考文献:

[1] 耿湘人, 桂业伟, 王安龄, 等. 利用二维平面和轴对称逆向喷流减阻和降低热流的计算研究 [J]. 空气动力学报, 2010, 28(1): 1-6.

- 力学学报, 2006, 24(1):85-89.
- GENG Xiangren, GUI Yewei, WANG Anling, et al. Numerical investigation on drag and heat-transfer reduction using 2-D planar and axisymmetrical forward facing jet[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2006, 24(1):85-89.
- [2] 石清, 李桦. 增升减阻流动控制技术的数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(3):280-287.
- SHI Qing, LI Hua. Numerical simulation about the effects of flow control for increasing lift and decreasing drag [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(3): 280-287.
- [3] 关晖, 吴锤结. 湍流横向射流的大涡模拟及其涡结构特性[J]. 中国科学:G 物理学, 力学, 天文学, 2006, 36(6):662-677.
- GUAN Hui, WU Chuijie. Characteristics of vortex structures for large-eddy simulation of turbulent jets in crossflow [J]. Science in China: G Physics, Mechanics & Astronomy, 2006, 36(6):662-677.
- [4] 蔡晋生, 刘秋洪. 超声速流场中侧向射流的数值研究[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(5):553-558.
- CAI Jinsheng, LIU QiuHong. Numerical investigation of lateral jets in supersonic cross-flows [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(5):553-558.
- [5] MEYER B, NELSON H F, RIGGINS D W. Hypersonic drag and heat-transfer reduction using a forward-facing jet [J]. Journal of Aircraft, 2001, 38(4):680-686.
- [6] ESWAR J, MARK P, WILLIAM B B. Applications of a counterflow drag reduction technique in high-speed systems [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2002, 39(4):605-614.
- [7] BARBER M, SCHETZ J, ROE L. Normal sonic helium injection through a wedge shaped orifice into a supersonic flow [J]. Journal of Propulsion and Power, 1997, 13(2):257-263.
- [8] ZHAO G, GU Y Q, ZHENG J X, et al. The study of the small drag reduction testing platform [C]// 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce. Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society, 2011:6021-6024.
- [9] ZHAO G, ZHAO H L, SHU H S, et al. Simulation study of bionic jetting direction influence on drag reduction effect [J]. Advances in Nature Science, 2010, 3(2):17-26.
- [10] 赵华琳. 仿生射流表面减阻特性及减阻机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [11] 赵燕伟, 苏楠. 可拓设计[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 12-56.
- [12] 张成春, 任露泉, 王晶, 等. 旋成体仿生凹坑表面流场控制减阻仿真分析 [J]. 兵工学报, 2009, 30(8): 1066-1072.
- ZHAGN Chengchun, REN Luquan, WANG Jing, et al. Simulation on flow control for drag reduction of revolution body using bionic dimpled surface [J]. Acta Armamentar, 2009, 30(8):1066-1072.
- [13] 吴晓明, 李国君, 丰镇平, 等. SST $k-\omega-k_p$ 两相湍流模型及其在湿蒸汽凝结流动数值模拟中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(5):526-530.
- WU Xiaoming, LI Guojun, FENG Zhenping, et al. SST $k-\omega-k_p$ two-phase turbulence model and its application in numerical simulation of wet steam flow with condensation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(5): 526-530.

[本刊相关文献链接]

- 张获, 樊涛, 蓝吉兵, 等. 涡旋射流控制逆压梯度平板边界层分离的涡结构研究. 2012, 46(1): 1-8.
- 韩永强, 谢永慧, 张获, 等. 空气环境中水滴和半空间弹性体撞击力学行为的数值模拟. 2011, 45(5): 102-107.
- 叶冬挺, 张获, 蓝吉兵, 等. 合成射流控制下低压高负荷透平叶片边界层分离大涡模拟. 2011, 45(3): 58-64.
- 刘小民, 周海涛, 王星, 等. 低压透平叶片表面合成射流非定常流动控制机理研究. 2011, 45(3): 95-101.
- 刘钊, 丰镇平, 宋立明. 实际叶片前缘冲击冷却流动和换热的数值研究. 2011, 45(1): 5-9.
- 郭栋, 魏进家, 张永海. 方柱微结构芯片射流冲击流动沸腾换热实验研究. 2011, 45(1): 31-37.
- 谢永慧, 樊涛, 张获. 定常与脉冲涡旋射流下矩形扩压器流动分离控制研究. 2010, 44(11): 1-5.
- 刘小民, 周海洋. 低压透平叶片流动分离主动控制的数值研究. 2010, 44(9): 21-26.
- 邝九杰, 隋丹, 金东苑, 等. 轴流风扇冲击射流下泡沫铝热沉的换热特性. 2010, 44(3): 6-10.
- 石龔, 李少军, 邓清华, 等. 透平级轴向间隙对非定常流动干涉影响的研究. 2009, 43(9): 9-13.
- 刘小民, 肖立宁. 射流式旋涡发生器对离心叶轮性能的影响. 2009, 43(6): 123-128.
- 王海军, 卜琳, 罗毓珊, 等. 扇形射流的空气动力学特性. 2009, 43(3): 97-100.

(编辑 苗凌)