

射流孔排布对射流表面减阻性能的影响*

谷云庆¹ 牟介刚¹ 郑水华¹ 赵刚² 汝晶² 王成刚³

(1. 浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310014; 2. 哈尔滨工程大学机电工程学院, 哈尔滨 150001;

3. 约瑟夫傅立叶大学格勒诺布尔国立综合理工学院, 格勒诺布尔 38031)

摘要: 基于单孔射流特性,建立射流孔排布方式的计算模型,利用 SST $k-\omega$ 湍流模型对射流表面不同射流孔排布情况下的减阻特性进行数值模拟,分析射流表面射流孔排布对壁面黏性阻力和减阻率的影响,得到最大减阻率为 33.65%,并对数值计算模型进行了实验验证。通过分析射流表面壁面边界层剪应力、壁面压应力、流场速度及射流孔下游区域产生的漩涡运动特性及分布规律,得知射流表面射流孔排布能够对壁面边界层进行有效的控制,并揭示了射流表面的减阻机理。

关键词: 射流表面 减阻 射流孔排布 数值模拟 边界层

中图分类号: TP17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0340-07

引言

射流技术通过射流反作用力以及射流与来流相互作用产生的干扰力,对飞行器进行姿态控制或提供直接机动力,能够在飞行动压很小的低速情况下起到很好的控制作用^[1]。射流减阻技术现已被引入到高超声速飞行器减阻方面^[2-7]。谷云庆等^[8-9]基于鲨鱼鳃部结构特征对射流表面的减阻特性进行了研究,发现射流出孔下游流场黏性底层增厚,速度梯度降低,同时形成的反向漩涡使流场存在稳定的大涡结构,降低了湍流脉动对壁面的作用;并对射流表面主流场速度与射流速度耦合情况下减阻特性进行数值模拟,研究了射流表面减小摩擦阻力的原因及对射流孔附近壁面区域边界层控制行为^[10]。为了更好地验证射流表面减阻效果,研制了射流表面减阻实验测试平台^[11],在不同旋转速度条件下对射流表面模型进行实验研究,验证了射流表面的减阻效果^[12]。

射流减阻是一项新技术,有待于深入研究与验证。当前对射流表面减阻技术的研究大都集中在单孔射流上,而在工程实际应用中,单孔射流的减阻效果非常微弱,这就需要考虑多孔情况来综合体现其减阻效果,而射流孔的排布方式对射流减阻效果存在着重要影响。汝晶^[13]基于单孔射流剪应力分布情况,对射流孔以等腰三角形排布方式下的仿生射流表面的减阻特性进行了研究,并从模型射流表面

所受剪应力、压应力、速度矢量等方面分析了仿生射流表面的减阻机理,其结果为研究射流孔其他排布方式下仿生射流表面的减阻特性提供了参考。任露泉等^[14-17]对非光滑表面单因素、多因素耦合及排布等方面进行了大量研究,证明了非光滑表面减阻具有优异的减阻效果。本文建立具有射流功能特征且便于工程实践的射流孔菱形排布方式模型,通过对射流表面模型进行数值计算,研究射流孔排布对射流表面减阻性能的影响,解析其减阻机理。

1 模型建立及参数设置

1.1 射流孔排布方式计算模型

射流表面结构模型如图 1 所示,其中: $L_x = 60\text{ mm}$ 、 $L_y = 20\text{ mm}$ 、 $L_z = 12\text{ mm}$,射流孔个数为 4 个,射流角度为 30° ,射流孔径 $d = 4\text{ mm}$, $L_1 = 8\text{ mm}$;射流孔采用菱形排布方式,计算中分别取菱形沿展向(y 向)的对角线 $l = 7 \sim 11\text{ mm}$ (等间隔 1 mm)、沿流向(x 向)的对角线 $h = 14 \sim 22\text{ mm}$ (等间隔 2 mm); v_1 为主流场速度, v 为射流速度。为了便于分析射流表面与光滑表面的流动特性、降低计算误差、节省计算时间、同时保证数值计算结果是在同一流场状态下得到的,将与射流表面对应的壁面作为光滑表面。

1.2 控制方程及湍流模型

控制方程基本形式为

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

收稿日期: 2013-09-25 修回日期: 2013-11-25

* 国家自然科学基金资助项目(51305399,51275102)

作者简介: 谷云庆,讲师,博士,主要从事射流减阻技术及非光滑表面减阻研究,E-mail: guyunqing@hrbeu.edu.cn

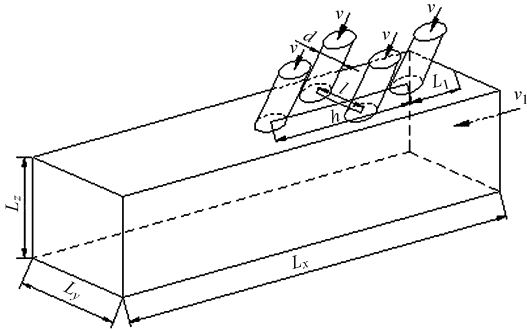


图 1 射流表面结构模型
Fig. 1 Structure model of jet surface

式中 ρ ——流体密度 t ——时间
 $\mathbf{u}$ ——速度矢量 ϕ ——通用变量
 S_ϕ ——广义源项 Γ_ϕ ——广义扩散度

控制方程各符号具体形式见文献[8]。

SST $k-\omega$ 湍流模型在近壁区比其他湍流模型有较好的精度和算法稳定性,对湍流促发和分离流模拟有较高的准确度^[18],故在模拟高速复杂的流体过程中,选用 SST $k-\omega$ 湍流模型。 k 方程和 ω 方程在不考虑浮力情况下为

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

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

式(2)、(3)中相关参数见文献[19]。

1.3 网格划分及边界条件设置

为了更好地保留真实的微观流场虚拟流动状态与特点,保证计算精度、降低计算量,网格采取射流孔附近网格密集、远离射流孔表面区域密度有规律减小的划分策略。对射流孔结构进行网格细密划分,其网格尺寸为 0.2 mm,射流表面到光滑表面的网格递增比例为 1.01,其基数为 0.3 mm。

数值计算中连续方程残差设为 1×10^{-4} ,其他残差设为 1×10^{-3} ;流体温度为 293 K;求解方法选择基于密度的显式求解器;离散格式选择稳定性

和精度较高的二阶迎风格式;主、射流皆为速度入口,主流场速度 v_1 为 20 m/s,射流速度 v 为 0.4 ~ 2.0 m/s (等间隔 0.2 m/s);外界条件常温、常压,流体为水。

为了精确对比光滑表面和射流表面计算结果,光滑表面和射流表面边界条件及求解控制参数完全一致,二者壁面选择无滑移绝热固壁边界;同时为保证较好的表面光洁度、尽量消除表面粗糙度对计算结果的影响,充分体现射流表面减阻特性,设置光滑表面和射流表面粗糙度为 0.7。选择两侧对称壁面为无滑移壁面。

2 射流孔排布对减阻特性影响

射流表面减阻率计算公式为

$$\eta = \frac{f_s - f_j}{f_s} \times 100\% \quad (4)$$

式中 f_s ——光滑表面所受黏性阻力
 f_j ——射流表面所受黏性阻力

2.1 射流表面黏性阻力分析

图 2 为射流表面黏性阻力云图。由图 2 可知,同一射流速度下,在菱形排布单元中对角线 h 一定的情况下,黏性阻力随对角线 l 的增加呈先增大后减小再增大的变化趋势;在 l 一定的情况下,黏性阻力随 h 的增加基本呈增大的变化趋势;说明增加 l 或降低 h 有利于减小射流表面黏性阻力。当 $h = 14$ mm 时,黏性阻力随 l 的增加呈先增大后减小的变化趋势,在 $v = 0.6、1.2、1.8$ m/s 3 种射流速度下黏性阻力均在 $l = 10$ mm 时达到极大值;当 h 逐渐增大时,随着 l 的变化,黏性阻力波峰更加明显,呈现出多处极值,并且伴随着射流速度的增加,极值区域越明显;当 $h = 22$ mm、 $l = 7$ mm 时,黏性阻力达到极大值。

在 l 一定的情况下,同一射流速度时黏性阻力随 h 的增加大体上呈现出增大的变化趋势。当 $l = 7$ mm 时,在 3 种射流速度条件下,黏性阻力皆随着 h 的增加呈现几乎相同的变化趋势,即 h 由 14 ~

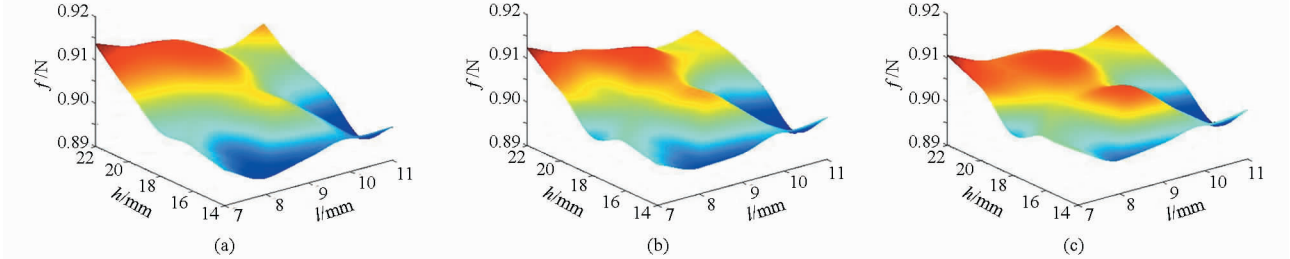


图 2 射流表面黏性阻力云图
Fig. 2 Contours of viscous resistance for jet surface
(a) $v = 0.6$ m/s (b) $v = 1.2$ m/s (c) $v = 1.8$ m/s

16 mm 时的黏性阻力增加,由 16 ~ 18 mm 时的黏性阻力略有减小,由 18 ~ 22 mm 时的黏性阻力接近于线性增加趋势;当 $l=8$ mm 时,黏性阻力随 h 的增加呈趋于直线的增大状态,且仅在 $v=1.8$ m/s、 $h=20 \sim 22$ mm 时阻力下降;当 $l=9$ mm 时,黏性阻力随 h 的增加呈先增大后减小再增大再减小的变化趋势,分别在 $h=16$ 、20 mm 时出现极大值,在 $h=18$ mm 时出现极小值;当 $l=10$ mm 时,在 $v=0.6$ m/s 情况下,黏性阻力随 h 的增加呈增大的变化趋势,在 $v=1.2$ 、1.8 m/s 时,黏性阻力受 h 的变化波动较大;当 $l=11$ mm 时,黏性阻力随 h 的增加呈先减小后增大的变化趋势,在 $h=16$ mm 时达到极小值,该极小值亦为射流表面黏性阻力的最小值。

2.2 射流表面减阻率分析

基于以上对不同 h 和 l 下射流表面黏性阻力分析,取射流速度 $v=0.6$ 、1.2、1.8 m/s,由式(4)对不同射流孔排布方式下的射流表面减阻效果进行计算,得到射流表面减阻率云图如图 3 所示。由图 3 可知,在 l 一定时,射流表面减阻率在同一射流速度条件下,随 h 的增加大体上呈现减小的变化趋势;当 $l=9$ mm 时,在 $v=0.6$ 、1.2 m/s 情况下,减阻率随 h

的增加呈先减小后增大的变化趋势,在 $h=20$ mm 时出现极小值,在 $v=1.8$ m/s 情况下,减阻率随 h 的增加呈先减小后增大再减小再增大的变化趋势;当 $l=11$ mm 时,减阻率随 h 的增加呈先增大后减小的变化趋势,即 $h=14 \sim 16$ mm 时减阻率增加,之后随着 h 的增加减阻率减小。在 h 一定的情况下,减阻率在相同射流速度条件下随 l 的增加大体上呈先减小后增大的变化趋势;当 $h=14$ mm 时,减阻率随 l 的增加呈先增大后减小再增大的变化趋势,极大值皆发生在 $l=8$ mm 时,极小值除 $v=1.8$ m/s 时发生在 $l=9$ mm 时,其余皆发生在 $l=10$ mm 时;当 $h=16$ mm 时,减阻率随 l 的增加其变化规律基本相同,皆为先增大后减小再增大的变化趋势,极大值均发生在 $l=8$ mm 时,极小值均发生在 $l=9$ mm 时;当 $h=18$ mm 时,减阻率随 l 的增加均呈先减小后增大的变化趋势,除 $v=1.8$ m/s 下极小值发生在 $l=9$ mm 时,其他皆发生在 $l=10$ mm 时;当 $h=20$ mm 时,减阻率随 l 的增加呈先增大后减小再增大的变化趋势,极大值发生在 $l=8$ mm 时,极小值发生在 $l=9$ mm 时;当 $h=22$ mm 时,减阻率随 l 的增加基本表现出增大的变化趋势,且线性变化明显。

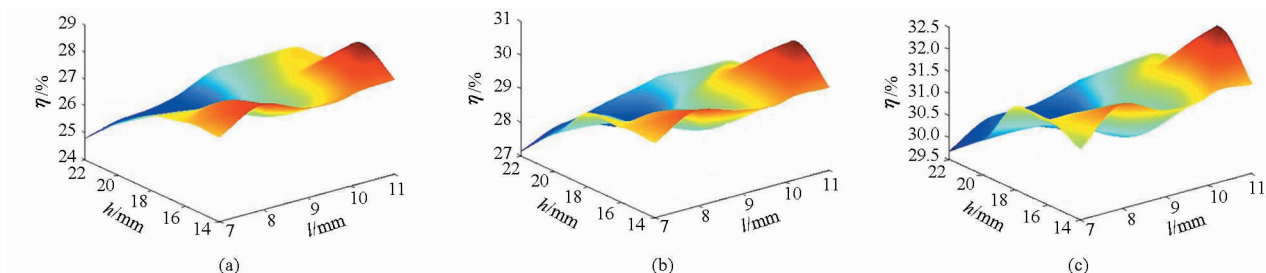


图 3 射流表面减阻率云图

Fig. 3 Contours of drag reduction rate for jet surface

(a) $v=0.6$ m/s (b) $v=1.2$ m/s (c) $v=1.8$ m/s

通过分析可知,射流表面具有较好的减阻效果,最大减阻率发生在 $h=16$ mm、 $l=11$ mm 处于 $v=2.0$ m/s 情况下,其值为 33.65%,此时射流表面黏性阻力为 0.878 N。

3 实验验证

3.1 实验设备

射流表面减阻测试实验平台^[20]如图 4 所示,该平台主要包括为装置运转提供动力源的动力部分、提供水源并完成射流任务的射流供给部分、进行实验的实验部分和数据采集部分^[11]。实验平台工作原理:实验过程中,由调频电动机作为实验平台的动力源,为实验部分中的外筒提供旋转动力;当外筒处于高速旋转状态时,其内部流体将随之一同转动,并经过一段时间后,二者将以相同角速度绕其中心轴

旋转。内部流体将与保持静止的内筒之间发生相对运动,由于流体具有黏性,在运动时会产生一定的摩擦阻力,此摩擦阻力作用于内筒壁面,并以扭矩的形式经由配水空心轴及一对啮合的圆柱直齿轮传至扭矩信号耦合器中,通过扭矩信号耦合器反映射流表面模型与光滑表面模型在相同旋转速度、相同实验工况下所受流体摩擦扭矩,进而量化减阻效果。通过变频器来控制调频电动机,使外筒以设定的转速运行,从而获得内筒外壁流场所需流速。射流环节通过水泵、阀及流量计之间的相互协调,控制单位时间内向装置实验部分的供水量,进而调节射流孔的射流速度。扭矩信号耦合器将信号依次通过变送器、采集卡送至计算机中,通过 LabVIEW 软件对数据进行读取并存储。

实验平台主要参数:内筒直径 140 mm,外筒直

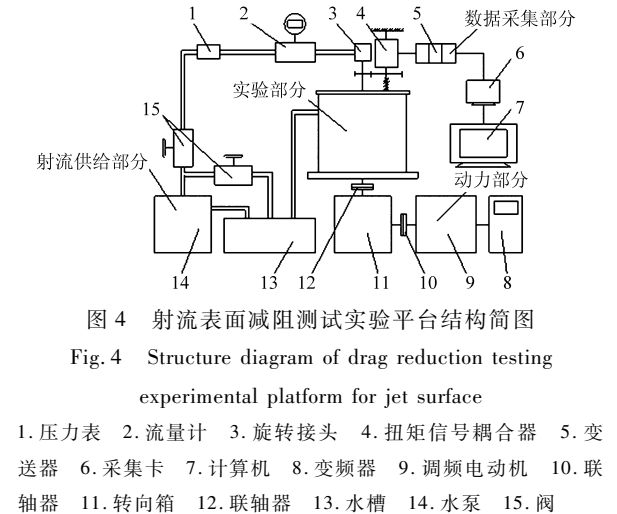


图 4 射流表面减阻测试实验平台结构简图

Fig. 4 Structure diagram of drag reduction testing experimental platform for jet surface

1. 压力表 2. 流量计 3. 旋转接头 4. 扭矩信号耦合器 5. 变送器 6. 采集卡 7. 计算机 8. 变频器 9. 调频电动机 10. 联轴器 11. 转向箱 12. 联轴器 13. 水槽 14. 水泵 15. 阀

径 180.8 mm;外筒旋转速度量程 0 ~ 2 600 r/min,连续可调;扭矩信号耦合器量程为 0 ~ 10 N·m,精度为 0.5 % F·S,频率响应为 100 μs;流量调节范围为 0 ~ 6.3 m³/h。

3.2 实验分析

实验过程中采集时间间隔为 0.05 s,在每一工况下采集 800 次数据。为了避免实验初始过程中产生的不稳定变动,将每组数据的前 500 次数据剔除,取第 501 ~ 800 次作为实验数据,并分别计算每一工况下的 300 组数据的平均值作为所需数据。实验中取外筒旋转速度 $n = 2\ 100\ \text{r/min}$ (即 $v_1 = 20\ \text{m/s}$),射流速度 $v = 2.0\ \text{m/s}$ 。实验流体为水,常温常压环境。

外筒旋转过程中,由于水的黏性作用而导致实验样件外表面产生的摩擦阻力为

$$f = \int \tau dA + \int \sigma dA^* = \sum_{i=1}^n \tau_i |A_i| + \sum_{i=1}^n \sigma_i |A_i^*| \tag{5}$$

- 式中 τ ——壁面剪应力 σ ——壁面压应力
 A ——壁面面积
 A^* ——壁面在流场流动方向的投影面积
 τ_i ——壁面离散单元剪应力
 σ_i ——壁面离散单元压应力
 A_i ——壁面离散单元面积
 A_i^* ——壁面离散单元在流场流动方向的投影面积

摩擦阻力作用于中心轴产生的摩擦扭矩为

$$M = d_r \sin \alpha \int \tau dA + d_r \sin \beta \int \sigma dA^* = d_r \sin \alpha \sum_{i=1}^n \tau_i |A_i| + \int d_r \sin \beta \sum_{i=1}^n \sigma_i |A_i^*| \tag{6}$$

- 式中 d_r ——摩擦力臂
 α ——摩擦力臂与剪应力所成角
 β ——摩擦力臂与压应力所成角

则射流表面减阻率为

$$\eta = \frac{M_s - M_j}{M_s} \times 100\% \tag{7}$$

- 式中 M_s ——光滑表面实验样件所受摩擦扭矩
 M_j ——射流表面实验样件所受摩擦扭矩

以 U-PVC 管为载体,根据数值计算模型射流表面结构尺寸,取实验样件高度为 20 mm (为 L_y),其表面上均匀分布 7 处菱形射流孔排布结构。分别加工样件 1 ~ 5,5 组样件的菱形对角线 (沿壁面尺寸长度) 分别为 $h = 16\ \text{mm}$ 、 $l = 11\ \text{mm}$, $h = 14\ \text{mm}$ 、 $l = 11\ \text{mm}$, $h = 18\ \text{mm}$ 、 $l = 11\ \text{mm}$, $h = 16\ \text{mm}$ 、 $l = 10\ \text{mm}$, $h = 16\ \text{mm}$ 、 $l = 9\ \text{mm}$,共计 5 组射流表面实验样件和一个光滑表面实验样件,实验样件如图 5 所示。

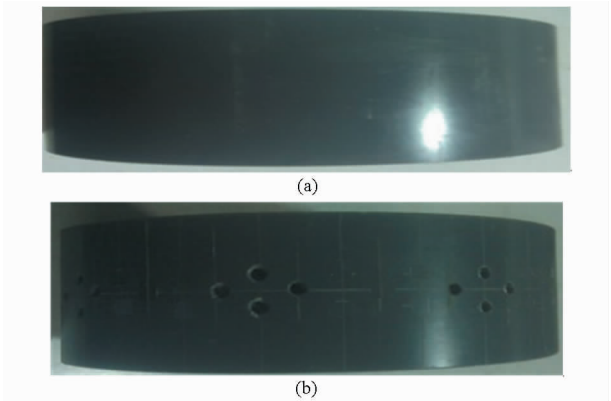


图 5 实验样件

Fig. 5 Experimental samples

(a) 光滑表面样件 (b) 射流表面样件

依次对实验样件 1 ~ 5 进行实验,由式 (7) 计算不同工况下的减阻率分别为 30.41 %、27.95 %、27.06 %、28.82 %、28.68 %;而相对应的数值计算中的减阻率分别为 33.65 %、31.38 %、29.87 %、32.26 %、32.05 %。数值模拟结果高于实验结果;实验获得的最佳排布方式与数值模拟一致,最大减阻率均发生在菱形对角线 $h = 16\ \text{mm}$ 、 $l = 11\ \text{mm}$ 情况,数值计算最大减阻率比实验值大 9.6 %,在允许误差范围内。

4 射流表面减阻机理

4.1 边界层剪应力分析

图 6 为 $v = 2.0\ \text{m/s}$ 时射流孔不同排布方式下壁面剪应力云图。由图 6 可知,射流表面沿主流场速度方向其壁面所受剪应力逐渐减小,在射流孔下游变化最为明显。在射流孔排布菱形单元中展向对角线一定时,壁面剪应力随着流向对角线的变化而变化,具体表现在射流孔下游剪应力减小区域的改变,随着流向对角线的增加,射流孔下游区域剪应力减小范围逐渐合并,但在射流孔上游区域,壁面所受

剪应力则有微小增大现象。在射流孔排布菱形单元中流向对角线一定时,展向对角线的改变同样可以影响流体射流对壁面所受阻力;随着展向对角线的增加,射流孔下游剪应力减小区域逐渐分散,菱形范围内剪应力有所增大,菱形外壁面所受剪应力则明显减小,各射流孔射流对壁面阻力的影响范围增大。

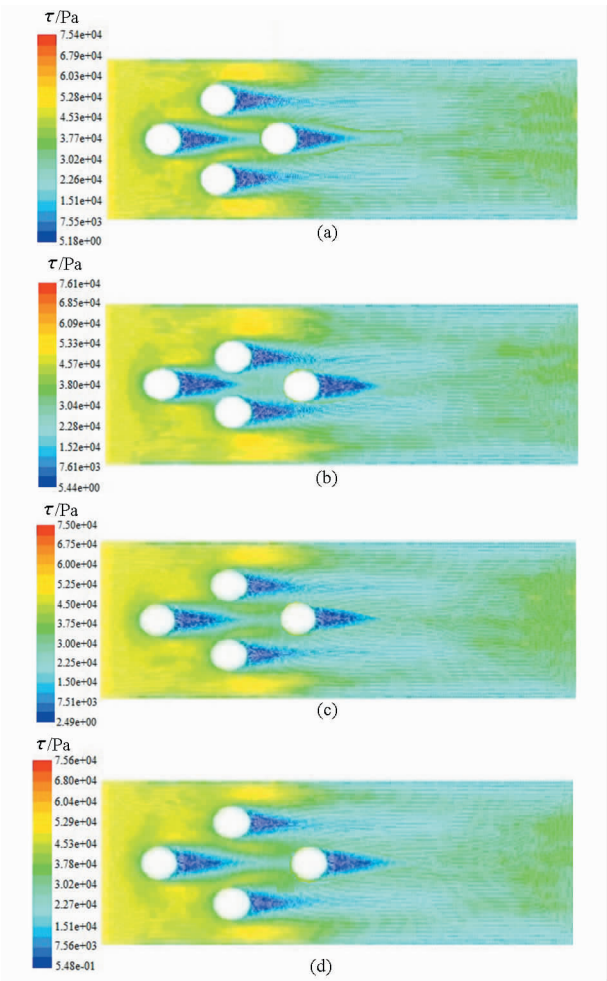


图6 不同排布方式下壁面剪应力云图
Fig.6 Contours of wall shear strength at different configuration modes

- (a) $h=14\text{ mm}, l=11\text{ mm}$ (b) $h=16\text{ mm}, l=7\text{ mm}$
(c) $h=16\text{ mm}, l=9\text{ mm}$ (d) $h=18\text{ mm}, l=11\text{ mm}$

菱形排布单元中,沿流向对角线与展向对角线的变化对射流表面剪应力分布的这种影响直接导致壁面黏性阻力不同:随着流向对角线的改变,在同一射流速度情况下,射流表面剪应力降低区域随流向对角线的增加对射流孔下游近壁面流场的影响范围越大。随着展向对角线的改变,在同一射流速度情况下,展向对角线的增大使每个射流孔下游的剪应力减小区域具有更大的影响范围。射流表面导致了近壁面流体的速度梯度降低,壁面黏性底层的厚度增加,最终导致壁面黏性阻力减小。

同时,对不同射流速度下壁面剪应力分析可知,

随着射流速度的增加,射流孔下游区域剪应力降低梯度较大,剪应力降低区域面积也不断增加,射流孔下游剪应力降低区域向中部靠拢;而射流孔上游区域剪应力亦随着射流速度的增加呈现出减小的变化趋势,表明随着射流速度的增加射流表面剪应力在不断的减小。

4.2 壁面压应力分析

图7为射流孔最佳排布方式 $h=16\text{ mm}, l=11\text{ mm}$ 的射流表面沿流向中截面压应力云图。由图7可知,受主流场的高速流体的作用,射流孔流出的低速流体沿壁面向下游流动,射流流体作为缓冲层,将主流场的高速流体与壁面分离,使壁面边界层的平均压力梯度降低,保证了壁面边界层的流动稳定性,致使摩擦阻力有所降低。随着射流速度的增大,射流孔下游的低压区域厚度逐渐增加,而在远离壁面区域,高压部分亦逐渐由较低压力区域所覆盖。

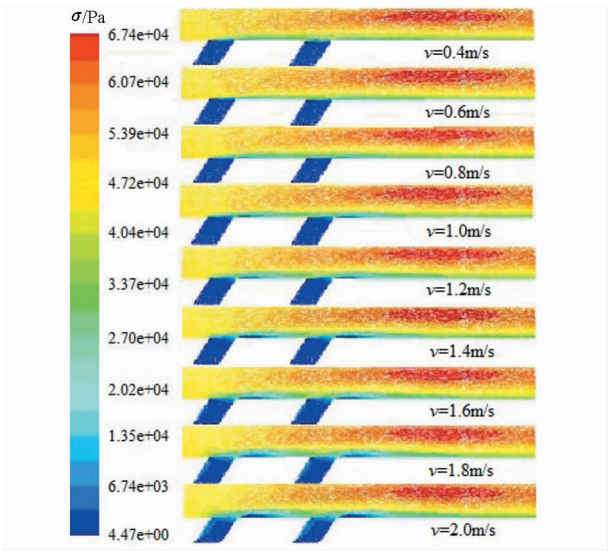


图7 射流表面沿流向中截面的压应力云图
Fig.7 Contours of pressure stresses along flow middle section for jet surface

4.3 流场速度分析

图8为射流孔最佳排布方式 $h=16\text{ mm}, l=11\text{ mm}$ 的射流表面沿流向中截面速度云图。由图8可知,在射流孔下游近壁面处流体流速明显较小,射流流体受主流场高速流体的影响,使其沿着壁面流向下游,在射流孔下游近壁面呈现出低速流体分布带;随着射流速度的增加,其低速流场在流向方向的分布区域逐渐增大;同时射流表面黏性阻力受壁面流体速度的影响较大,因此由射流而形成的近壁面低速流体亦为减小壁面黏性阻力的重要原因。同时,在射流孔下游区域流体出现漩涡状态,主流场流体与射流流体作用后形成了与流体流向相反的漩涡,漩涡降低了流向涡强度,使近壁面处流体能够保持低

速状态。

图 9 为射流孔下游等涡线分布图。由图 9 可知,随着射流速度的增大,射流孔下游区域内所产生的漩涡强度越大,从而导致射流孔下游区域流体受漩涡的控制变强,降低了流体流动速度和速度梯度,减

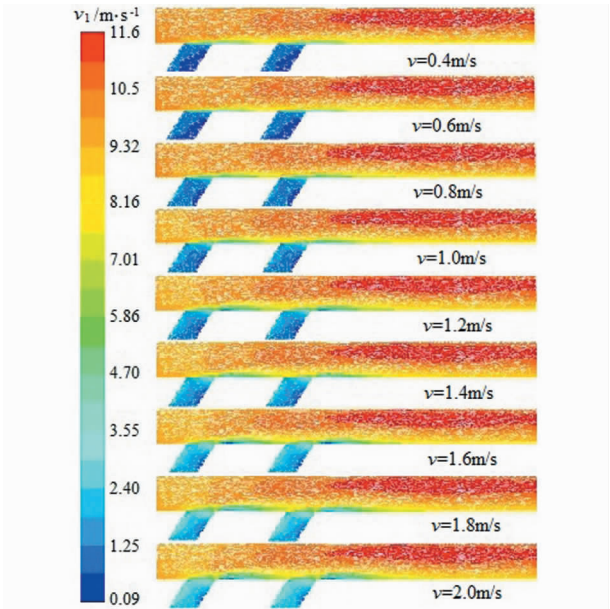


图 8 射流表面沿流向中截面的速度云图

Fig. 8 Contours of velocity along flow middle section for jet surface

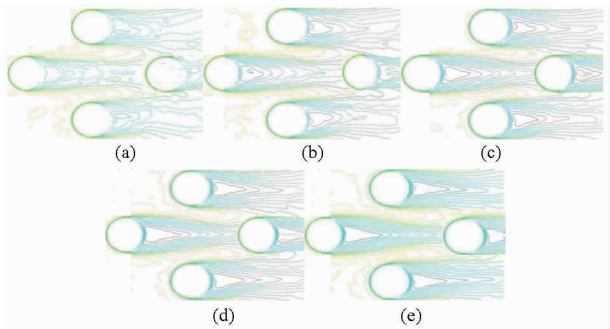


图 9 射流孔下游等涡线分布

Fig. 9 Distribution map of vorticity lines below jet hole

(a) $v=0.4\text{ m/s}$ (b) $v=0.8\text{ m/s}$ (c) $v=1.2\text{ m/s}$

(d) $v=1.6\text{ m/s}$ (e) $v=2.0\text{ m/s}$

小了壁面的黏性阻力,最终导致射流表面总阻力减小。

分析表明,相比于光滑表面近避面处湍流边界层的流动,射流表面射流孔下游流体的流速较低,速度梯度较小,说明射流可以控制射流孔下游的流体流动状态,降低其速度脉动和动量交换的频率,使射流孔下游附近区域内保留了带有较小摩擦阻力的低速稳态流体。射流表面减阻的根本原因是射流表面对壁面边界层进行了有效的控制,射流流体在射流孔下游区域形成漩涡,漩涡的不断发展变化对流场边界层的影响逐渐增强,使得边界层厚度有所增大,致使壁面摩擦阻力下降。

5 结论

- (1)射流表面具有较好的减阻效果,同一射流速度下,菱形排布单元中在流向对角线一定时,射流表面减阻率随展向对角线的增加大体上呈先减小后增大变化趋势;在展向对角线一定时,减阻率随流向对角线的增大大体上呈减小的趋势。
- (2)在一定条件下,增加展向对角线或降低流向对角线有利于减小黏性阻力;最大减阻率发生在展向对角线 11 mm、流向对角线 16 mm 处于射流速度 2.0 m/s 情况下,为 33.65%;实验与数值模拟得到的射流孔最佳排布方式一致。
- (3)射流表面射流孔排布改变了射流孔下游区域剪应力分布,菱形外壁面所受剪应力减小,各射流孔射流对壁面所受阻力的影响范围增大,近壁面流体流动速度梯度减小,壁面黏性底层厚度增加,导致黏性阻力减小;射流流体将主流场高速流体与壁面分离,使射流孔下游近壁区的边界层流体在很长一段距离上处于低速流动,降低了射流孔下游区域壁面处流体的速度和摩擦阻力。
- (4)射流流体在射流孔下游区域形成漩涡,漩涡的不断发展变化对壁面流场边界层的影响逐渐增强,增加了边界层厚度,实现了对边界层的有效控制,最终导致壁面摩擦阻力下降。

参 考 文 献

1 Srivastava B. Lateral jet control of a supersonic missile; computational and experimental comparisons[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1998, 35(20): 140–146.

2 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. (in Chinese)

3 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.

4 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.

5 Chen L W, Wang G L, Lu X Y. Numerical investigation of a jet from a blunt body opposing a supersonic flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 684: 85–110.

6 Fomin V M, Fomichev V P, Korotaeva T A, et al. Influence of a counterflow plasma jet on supersonic blunt-body pressures[J]. *AIAA Journal*, 2002, 40(6): 1170 – 1177.

7 Venukumar B, Jagadeesh G, Reddy K P J. Counterflow drag reduction by supersonic jet for a blunt body in hypersonic flow[J]. *Physics of Fluids*, 2006, 18(11): 118104 – 1 – 118104 – 4.

8 谷云庆, 赵刚, 赵华琳, 等. 仿鲨鱼鳃部射流减阻特性的仿真研究[J]. *兵工学报*, 2012, 33(10): 1230 – 1236.
Gu Yunqing, Zhao Gang, Zhao Hualin, et al. Simulation study on drag reduction characteristics of bionic jet flow based on shark gill[J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(10): 1230 – 1236. (in Chinese)

9 Gu Y Q, Zhao G, Zheng J X, et al. Experimental and numerical investigation on drag reduction of non-smooth bionic jet surface[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 81: 50 – 57.

10 谷云庆, 赵刚, 郑金兴, 等. 射流表面主流场速度与射流速度耦合减阻特性[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(12): 4713 – 4721.
Gu Yunqing, Zhao Gang, Zheng Jinxing, et al. Characteristics of drag reduction on coupling of jet surface main flow field velocity and jet velocity[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2012, 43(12): 4713 – 4721. (in Chinese)

11 Zhao G, Gu Y Q, Zheng J X, et al. A testing platform based on bionics drag reduction theory for friction resistance[J]. *Communications in Information Science and Management Engineering*, 2012, 2(5): 34 – 39.

12 赵刚, 谷云庆, 许国玉, 等. 仿生射流表面减阻特性实验研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(8): 3007 – 3012.
Zhao Gang, Gu Yunqing, Xu Guoyu, et al. Experimental study on drag reduction characteristics of bionic jet surface[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2012, 43(8): 3007 – 3012. (in Chinese)

13 汝晶. 仿生射流表面射流孔布局研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.

14 Ren L Q, Liang Y H. Biological couplings: function, characteristics and implementation mode[J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(2): 379 – 387.

15 Ren L Q, Liang Y H. Biological couplings: classification and characteristic rules[J]. *Science China Technological Sciences*, 2009, 52(10): 2791 – 2800.

16 任露泉, 梁云虹. 生物耦合生成机制[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2011, 41(5): 1348 – 1357.
Ren Luquan, Liang Yunhong. Generation mechanism of biological coupling[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2011, 41(5): 1348 – 1357. (in Chinese)

17 张琰, 黄河, 任露泉. 挖掘机仿生斗齿土壤切削试验与减阻机理研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(1): 258 – 261.
Zhang Yan, Huang He, Ren Luquan. Experiment and drag reduction mechanism of bionic excavator tooth during soil cutting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(1): 258 – 261. (in Chinese)

18 Catalano P, Anato M. An evaluation of RANS turbulence modeling for aerodynamic applications[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2003, 7(7): 493 – 509.

19 Menter F R. Two-equation eddy-viscosity models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598 – 1605.

20 Gu Y Q, Ru J, Zhao G, et al. Influence of jet hole configuration on drag reduction of bionic jet surface[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 461: 725 – 730.

Effect of Jet Hole Arrangement on Drag Reduction Characteristics of Jet Surface

Gu Yunqing¹ Mu Jiegang¹ Zheng Shuihua¹ Zhao Gang² Ru Jing² Wang Chenggang³
(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China
3. Institut National Polytechnique of Grenoble, Joseph Fourier University, Grenoble 38031, France)

Abstract: A calculation model of jet hole arrangement ways was established based on the characteristics of single jet hole. With SST $k-\omega$ turbulence model, the drag reduction characteristics of jet surface under the condition of different jet hole arrangement was researched by using the numerical simulation. Then, the impact of jet hole arrangement on surface viscous resistance and drag reduction rate was analyzed, and the maximum drag reduction rate reached 33.65%, which was experimentally validated by using numerical calculation model. The movement characteristics and distribution rules of the shear stress of wall boundary layer, the surface compressive stress, the flow velocity and vortex generating in the downstream of the jet hole were studied. The results showed that wall boundary layer could be well controlled by jet hole arrangement of jet surface, and the drag reduction mechanism of jet surface was also revealed.

Key words: Jet surface Drag reduction Jet hole arrangement Numerical simulation Boundary layer