

仿生射流孔形状减阻性能数值模拟及实验研究

李芳 赵刚 刘维新 张殊 毕红时

Numerical simulation and experimental study on drag reduction performance of bionic jet hole shape

Li Fang Zhao Gang Liu Wei-Xin Zhang Shu Bi Hong-Shi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 034703 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高超声速平板边界层流动显示的试验研究

[Experimental study on flow visualization of hypersonic flat plate boundary layer](#)

物理学报.2015, 64(1): 014704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.014704>

八重准周期排列的短沟槽结构减阻机理分析

[Drag reduction mechanisms of 8-fold quasi-periodic short groove structures](#)

物理学报.2014, 63(8): 084704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084704>

基于微空泡效应的疏水性展向微沟槽表面水下减阻研究

[Drag reduction on hydrophobic transverse grooved surface by underwater gas formed naturally](#)

物理学报.2014, 63(7): 074702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074702>

表面张力对疏水微结构表面减阻的影响

[Drag reduction on micro-structured hydrophobic surfaces due to surface tension effect](#)

物理学报.2014, 63(5): 054708 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.054708>

仿生射流孔形状减阻性能数值模拟及实验研究*

李芳 赵刚† 刘维新 张殊 毕红时

(哈尔滨工程大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

(2014年7月25日收到; 2014年8月18日收到修改稿)

针对横流中的侧向射流能够减小仿生射流表面摩擦阻力问题, 建立仿生射流表面模型, 利用 SST $k-\omega$ 湍流模型对不同射流孔形状的仿生射流表面模型进行数值模拟, 并对数值模拟结果进行了实验验证. 结果表明: 当射流孔的流向长度和展向长度不变时, 3号模型的折线形射流孔减阻效果最好; 将折线形射流孔简化为圆弧形, 当 $r = 3-5$ mm 时, 减阻率随着射流速度的增大而增大, 当 $r = 4$ mm 时减阻效果最好, 最大减阻率为 9.51%. 减阻原因: 通过射流孔向横向主流场中注入射流流体, 改变了射流表面附近边界层的流场结构, 使得边界层黏性底层厚度增加, 垂直于射流表面的法向速度梯度减小, 从而减小了壁面剪应力; 低速的射流流体被封锁在边界层内, 降低了高速流体对壁面的扫掠, 达到了减阻目的.

关键词: 减阻, 射流孔形状, 数值模拟, 边界层

PACS: 47.85.lb, 47.85.ld, 47.27.N-, 47.27.nb

DOI: 10.7498/aps.64.034703

1 引言

随着经济的发展, 能源问题越来越突出, 国内外学者提出了多种减阻方法^[1,2], 而仿生减阻是其中的一类重要减阻方法, 尤其在仿生非光滑表面减阻方面成果显著, 如沟槽减阻、凹坑、凸包等^[3-8]非光滑表面均获得了较好的减阻效果. 受生物表面功能的启发, Walsh^[9]对鲨鱼体表的非光滑表面进行研究提出了沟槽减阻法, 赵刚等受鲨鱼鳃部射流功能的启发提出仿生射流表面减阻法. 射流表面减阻技术的研究相对较少, 主要集中在高超声速飞行器表面减阻. 蔡晋生等^[10]研究拱柱体侧向射流与超声速来流的相互干扰, 为侧向射流喷管出口横截面几何形状的设计提供依据. 文献^[11]研究了平板物体上楔形和圆形侧向射流喷管出口形状对物面压力分布的显著影响. 姜国强等^[12]对多种喷口形式和流速比工况下的流速场和涡量场进行了数值计算, 模拟得到了其漩涡结构发展演化特性. 文献^[13]分析了沿流向排布和沿展向排布的圆形射流孔、矩形射流孔对流场的影响. 文献^[14]则对圆

形射流孔和楔形射流孔进行了研究. 相关资料表明射流孔的形状可以直接影响射流表面的压力分布情况. 张丁午等^[15]对比了菱形射流孔和圆形射流孔的气动特性差别.

射流孔形状对流场结构具有重要影响, 但前期主要针对圆形^[16]和矩形射流孔^[17]进行研究, 为研究射流孔形状对仿生射流表面减阻特性的影响, 本文通过分析鲨鱼鳃部的呼吸过程以及鳃裂形状建立具有不同射流孔形状的仿生射流表面模型, 通过数值模拟方法获得各模型的减阻效果, 通过流体摩擦阻力测试试验装置对仿真结果进行实验验证, 并分析其减阻原因.

2 仿生射流表面模型的建立

2.1 鲨鱼的呼吸过程

大部分鲨鱼为了在水中保持一定的水位, 需要不停的游动, 在鲨鱼游动过程中富氧水进入口腔, 通过鳃部进行气体交换后贫氧水从鳃裂流出形成射流, 鲨鱼的呼吸过程如图 1 所示. 鲨鱼的呼吸

* 国家自然科学基金(批准号: 51275102)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: s310070095@hrbeu.edu.cn

过程: 首先, 鲨鱼口咽腔腹面的缩肌收缩, 口腔底壁下降, 从而扩大了口咽腔, 同时鲨鱼张开口, 水在惯性力作用下流入口腔, 口关闭, 口腔瓣悬垂, 阻止水流出. 然后, 附在鳃弓上的肌肉收缩, 使鳃囊扩张, 水自然流入鳃囊, 并在此进行呼吸作用. 最后, 鳃囊在背腹缩肌和鳃间隔肌的收缩下被压缩, 水经过外鳃裂流出, 形成射流.

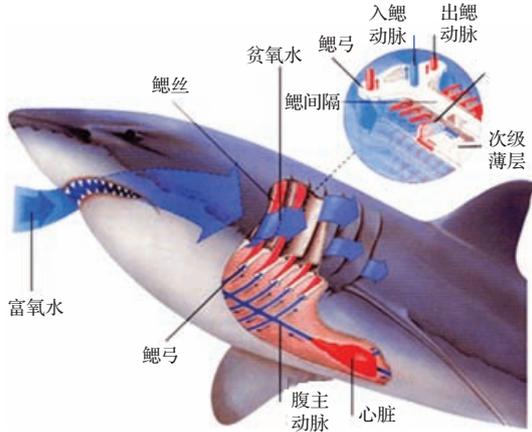


图1 (网刊彩色) 鲨鱼鳃部的呼吸与射流过程

2.2 计算域的建立

鲨鱼呼吸过程中从外鳃裂喷出的射流流体改变了鳃裂周围的流场结构, 为研究鳃裂射流对鲨鱼体表流体摩擦阻力的影响, 本文以单个鳃裂射流为例, 将鳃裂周围的体表结构简化为平板、外鳃裂简化为平板上的射流孔, 带有射流孔的平板结构即为仿生射流表面, 将鳃部的呼吸过程简化为连续的射流过程. 为评价仿生射流表面的减阻效果, 将具有相同流场条件的光滑表面作为对照表面, 建立计算域如图2所示. 图2中上表面为光滑表面, 下表面为带有射流孔的射流表面, 其参数为: x 方向为流

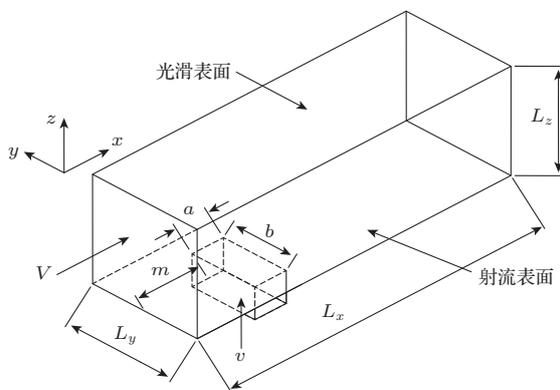


图2 计算域示意图

向, $L_x = 60 \text{ mm}$, y 方向为展向, $L_y = 20 \text{ mm}$, z 方向为垂直方向, $L_z = 20 \text{ mm}$; 射流孔中心位于坐标原点, 入口断面距坐标原点为 $m = 15 \text{ mm}$; 射流孔距两侧壁等距离, 射流孔沿展向的长度为 $b = 6 \text{ mm}$, 沿流向的长度为 $a = 1.25 \text{ mm}$. 横流速度 $V = 12 \text{ m/s}$, 侧向射流速度 v 为 3 m/s , 射流方向与横流方向垂直.

2.3 射流孔形状

本文的仿生对象为白斑星鲨, 鲨鱼的鳃裂形貌如图3所示. 由图3可知, 鲨鱼鳃裂形状不规则, 为研究射流孔形状对射流表面流体摩擦阻力的影响, 建立箭头形、折线形、椭圆形等8种不同形状的射流孔, 并将其与矩形射流孔的减阻效果进行对比, 以得到具有最佳减阻效果的射流孔形状, 具体的射流孔形状及参数如图4所示, 所有的射流孔在流向方向及展向方向的投影长度与矩形射流孔一致.



图3 (网刊彩色) 鲨鱼鳃部实物图

3 数值模拟

3.1 控制方程和湍流模型

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

式中, ρ 为流体密度, t 为时间, \mathbf{u} 为速度矢量; ϕ 为通用因变量, S_ϕ 为广义源项, Γ_ϕ 为广义扩散系数. 表1给出了(1)式与连续方程、动量方程以及能量方程的对应关系, 表中 μ 为动力黏度, u_i 为 x, y, z 方向的速度分量.

表1 控制方程中各符号的具体形式

方程	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
连续方程	1	0	0
动量方程	u_i	μ	$-\partial p / \partial x_i + S_i$
能量方程	T	k/c	S_T

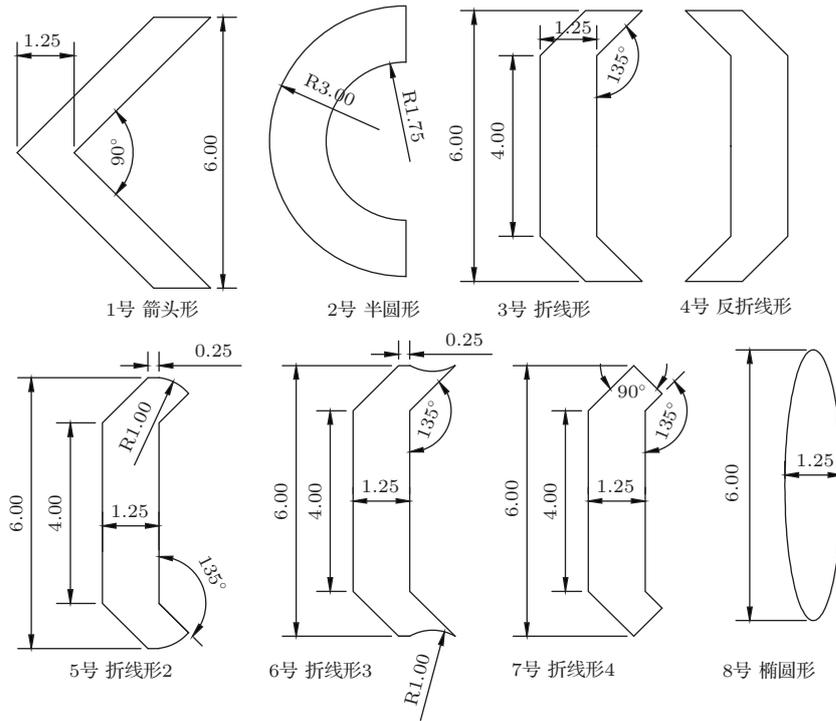


图4 不同射流孔形状及参数

湍流模型选用 SST $k-\omega$ 模型. SST $k-\omega$ 模型对于模拟壁面边界层流动性能较好, 用于研究射流表面边界层内流体的流动特性较为合适. 在不考虑浮力的情况下 k 及 ω 运输方程如 (2) 式及 (3) 式所示, 相关参数详见文献 [18].

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

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

3.2 网格划分及边界条件

利用 GAMBIT 对计算域进行非结构化网格划分, 除射流孔区域网格参数不同外, 其余部分采用相同的网格划分方法, 通过网格无关性验证, 选取全局最大网格尺寸参数为 0.5 mm; 在光滑表面和射流表面的近壁面采用网格加密处理, 第一层网格尺寸参数为 0.002 mm, 网格增长率为 1.1, y_+ 为 1.

入口断面 ($x_1 = -15$ mm) 采用速度入口边界条件, 入口速度为 12 m/s, 湍流强度为 5%, 湍流直

径为 20 mm; 出口断面 ($x_2 = 45$ mm) 采用压力出口, 出口压力为 0; 射流孔入口采用速度入口边界条件, 入口速度为 1—5 m/s, 湍流强度为 5%, 湍流直径按水力直径公式进行计算; 光滑表面 ($z_2 = 20$ mm) 和射流表面 ($z_1 = 0$ mm) 采用无滑移绝热壁面.

数值计算中能量方程残差设置为 10^{-6} , 其余残差均设为 10^{-4} ; 流体温度为 293 K. 求解方法选用基于压力基求解器, 离散格式选用二阶迎风离散格式.

4 数值模拟结果

4.1 减阻效果评价方法

仿生射流表面减阻率计算式为

$$\eta = \left[1 - \frac{F_j A}{F_s (A - A_j)} \right] \times 100\%, \quad (4)$$

式中, η 为减阻率, F_s 为光滑表面所受阻力, F_j 为射流表面所受阻力, A 为光滑表面面积, A_j 为射流孔面积.

为研究射流孔形状对减阻效果的影响, 本文所建模型的射流孔面积不同, 相同射流速度时射流流量不等, 为减阻所提供的主动力的功率也不同, 为消除射流孔面积不同给减阻效果带来的差异, 将仿

生射流表面模型的减阻率 η 与射流孔面积 A_j 的比值定义为单位面积减阻率 η_j , 公式如下:

$$\eta_j = \eta / A_j. \quad (5)$$

模型表面所受阻力 F 包括黏性阻力 f 和压差阻力 f^* 两部分, 即 $F = f + f^*$, 其中

$$f = \int \tau dA = \sum_{i=1}^n \tau_i |A_i|, \quad (6)$$

$$f^* = \int \sigma dA^* = \sum_{i=1}^n \sigma_i |A_i^*|, \quad (7)$$

式中, τ 为壁面剪应力, A 为壁面面积, τ_i 为壁面离散单元剪应力, A_i 为壁面离散单元面积, σ 为壁面所受压应力, A^* 为壁面沿主流场投影方向的面积, σ_i 为壁面离散单元压应力, A_i^* 为离散单元沿主流场投影方向的面积.

4.2 射流孔形状对减阻效果的影响

以射流速度为 $v = 3 \text{ m/s}$ 为例对不同射流孔形状的仿生射流表面模型的减阻特性进行研究, 得到射流孔形状对减阻效果的影响如图 5 所示. 分析图 5 可知, 当射流孔沿展向方向和沿流向方向长度固定不变时, 3 号模型的折线形射流孔减阻效果最好, 最大减阻率为 8.40%, 1—6 号模型的减阻效果均好于矩形射流孔.

不同射流孔形状的单位面积减阻率如图 6 所示. 由图 6 可知, 3 号模型的射流孔减阻效果最好, 最大单位面积减阻率为 1.12%.

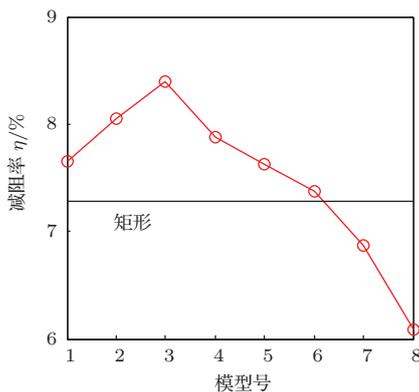


图 5 射流孔形状对减阻效果的影响

4.3 不同曲率的圆弧形射流孔对减阻效果的影响

由图 5 和图 6 可知, 3 号模型的折线形射流孔减阻效果最好, 但 3 号模型射流孔的上下两端是由

与竖直方向成 45° 的折线构成的, 而经折线形的射流孔射出的流体在弯角处会与横流的流体有较大的冲击碰撞, 因此本文将折线形射流孔简化为圆弧形, 建立圆弧形射流孔形状如图 7 所示, 其中圆弧半径 r 分别为 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 20, 50 和 80 mm.

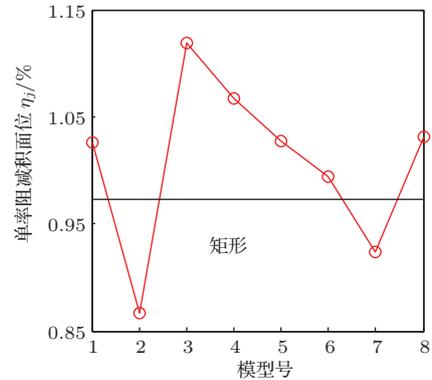


图 6 不同射流孔形状的单位面积减阻率

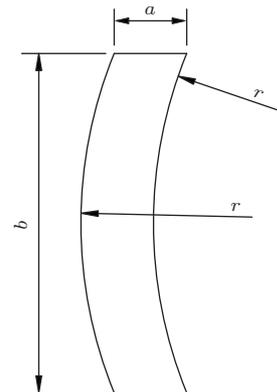


图 7 圆弧形射流孔形状参数

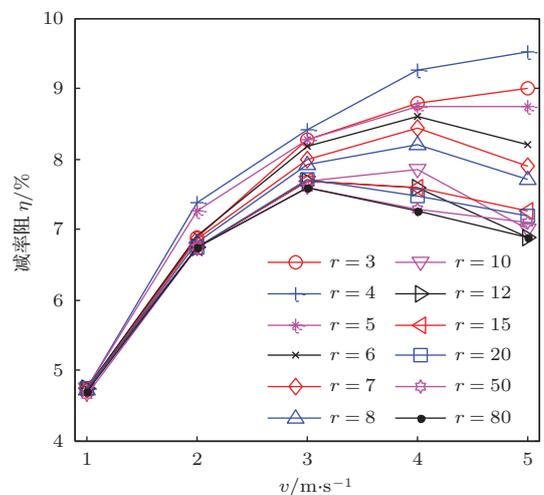


图 8 (网刊彩色) 圆弧形射流孔对减阻效果的影响

圆弧形射流孔的不同曲率半径对仿生射流表面减阻效果的影响如图8所示. 由图8可知, 当时, 随着射流速度的增大, $r = 3-5$ mm的圆弧形射流孔的减阻效果逐渐增大. 当 $v = 5$ m/s时, $r = 4$ mm的圆弧形曲率半径的减阻效果最好, 最大减阻率为9.51%, 比未简化前的3号折线形射流孔的减阻效果好.

5 实验验证

5.1 实验设备

仿生射流表面流体摩擦阻力测试实验装置如图9所示, 该装置主要包括射流供给系统、驱动系统和试验段三部分组成. 测试实验装置工作原理: 实验过程中, 通过变频器调节电机转速来带动试验段的外筒旋转, 内筒外筒之间的流体在外筒旋转的带动下绕筒轴线旋转. 由于内筒处于静止状态, 内外筒之间的旋转流体会在内筒壁面产生流体摩擦阻力, 该阻力通过拨杆传递至HP-10数显推拉力计, 并将采集到的数据显示并储存在与之相连的计算机中. 射流供给系统包括水泵、球阀、溢流阀、压力表、流量计、水箱和相关的连接件组成. 流体经由水泵、压力表、流量计、旋转接头进入到内筒中, 并由孔壁上的射流孔向外射流. 通过溢流阀来调节泵的出口压力, 通过球阀调节流量计的流量进而控制射流孔的射流速度.

测试实验装置主要性能参数: 总体尺寸为 $1700\text{ mm} \times 560\text{ mm} \times 1030\text{ mm}$; 电机转速范围为 $0-3000\text{ r/min}$; 流量控制范围为 $0-6.3\text{ m}^3/\text{h}$, 控制精度为 $0.01\text{ m}^3/\text{h}$; 阻力测量范围为 $0-10\text{ N}$, 测量精度为 0.01 N .



图9 (网刊彩色) 流体摩擦阻力测试实验装置

5.2 实验样件

实验中取外筒转速 $n = 1640\text{ r/min}$ (即 $V =$

12 m/s); 射流速度 $v = 3\text{ m/s}$; 流体介质为水, 常温常压环境. 为验证本文数值模拟结果的有效性, 分别加工光滑表面试验样件和带有不同曲率半径的圆弧形射流孔的实验样件. 本实验选择型号为SDR13.6的聚乙烯塑料PE管作为样件材料, 其外径为 140 mm 、壁厚 10.3 mm , 公称压力为 0.8 MPa , 实验样件高度为 100 mm , 总质量约为 0.43 kg . 为保证射流过程中内筒沿径向方向受力均衡, 本实验样件采用沿圆周方向均布四列, 沿壁面母线每列均布五个尺寸相同的射流孔的布置方式. 仿生射流表面实验样件如图10所示, 具体试验参数如表2所示.



图10 试验样件实物图

表2 圆弧形射流孔在 $V = 12\text{ m/s}$ 、 $v = 3\text{ m/s}$ 流场条件下的实验条件

实验序号	圆弧半径 r/mm	单个射流孔截面积/ mm^2	电机转速 $n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	流量 / $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$
1	3	8.361	1640	1.8060
2	4	8.1838	1640	1.7677
3	5	7.9181	1640	1.7103
4	6	7.7866	1640	1.6819
5	7	7.7264	1640	1.6689
6	8	7.6611	1640	1.6548
7	10	7.6038	1640	1.6424
8	12	7.5726	1640	1.6357
9	15	7.5469	1640	1.6301
10	20	7.5267	1640	1.6258
11	50	7.5044	1640	1.6210
12	80	7.5017	1640	1.6204

5.3 实验结果与分析

利用仿生射流表面流体摩擦阻力测试实验装置分别测出光滑表面模型和带有不同曲率半径圆弧射流孔的射流表面模型的摩擦阻力, 利用(4)式得到表2中各模型的减阻率, 并与数值模拟结果进行对比, 如图11所示. 图11为当 $v = 3 \text{ m/s}$ 时仿生射流表面减阻特性的实验结果与数值模拟对比图. 分析图11可知, 实验结果和数值模拟值具有相同的变化趋势, 随着圆弧半径 r 的增大, 减阻率先增大后减小, 证明了本文数值模拟结果的正确性. 当 $r = 4 \text{ mm}$ 时减阻效果最好, 最大减阻率分别为9.45%和8.51%, 实验结果高于数值模拟值, 最大误差为9.95%. 产生实验误差的原因在于: 运用外筒旋转带动内外筒之间的流体流动形成横流流场, 外筒内部的横流速度发生衰减, 在射流孔周围的横流速度要低于 12 m/s , 横流速度越大减阻效果越差, 因此, 本文的实验结果要略高于数值模拟结果, 另外, 数值模拟中的模型为单孔平板模型, 而实验样件为多孔圆筒模型, 模型有差异, 流场状态也必然有差异, 所以试验结果存在偏差.

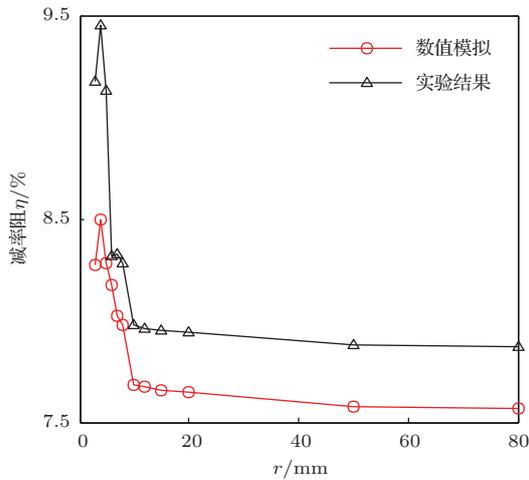


图11 (网刊彩色) 数值模拟与实验结果对比图

6 减阻原因分析

光滑壁面和仿生射流壁面所受的摩擦阻力包括黏性剪切应力和湍流雷诺应力, 其表达式为

$$\tau = \tau_w + \tau_t = \mu \frac{\partial v_x}{\partial y} + \mu_t \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y}, \quad (8)$$

式中, μ 是流体黏性系数; μ_t 湍流黏性系数; $v_x = \bar{v}_x + v'$, 即瞬时速度 v_x 是时均速度 \bar{v}_x 与脉动速度

v' 的叠加. 在壁面上黏性剪应力起主要作用, 离开壁面之后, 由于大量流体微团的脉动作用使得雷诺应力起主要作用.

随着射流速度的增大, 射流孔下游的湍流雷诺应力增大, 为实现射流需要的能量增大不利于节能, 为此, 射流速度不宜过大. 本文以射流速度为 3 m/s 来研究射流表面的减阻原因.

图12分别为无射流和圆弧半径形射流孔中心对称面上的速度矢量图($y = 0$). 由图12可知, 相对于未加射流的光滑表面而言, 射流流体改变了射流孔下游的流场结构, 射流与横流相互作用在近壁面形成低速条带, 阻挡了高速横流流体对壁面的扫掠, 另外, 低速的射流流体离开射流孔后, 在横流的作用下, 射流轨迹线发生弯曲, 最后几乎与横流流场平行, 使得射流流体被封闭在边界层内, 使得射流孔下游的流体速度减小, 使得射流表面的法向速度梯度发生改变.

由于射流的存在使得在垂直于射流表面的法线方向上的主流方向速度发生变化. 在垂直于射流表面的法线方向上, $y = 0$, 在不同位置上选取法线方向上的主流速度变化情况. 所取直线在射流表面上的投影坐标为($x = -2, y = 0$)和($x = 2, y = 0$). 光滑表面和射流表面法线方向上的主流速度变化率如图13所示, 图13中将 y^+ 作为横坐标. 由图13可知, 在射流孔上游光滑表面和射流表面的速度梯度相差无几, 而在射流孔下游的近壁面上的法向速度梯度小于光滑表面. 射流的存在使得射流表面附近流体在垂直于壁面的法向上的速度变化降低, 达到了减阻效果.

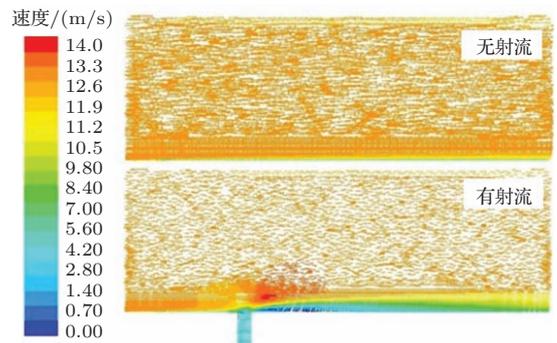


图12 (网刊彩色) 速度矢量对比图 ($y = 0$)

图14为当 $v = 3 \text{ m/s}$ 时光滑表面和射流表面的壁面剪应力对比图, 图中的射流孔形状为 $r = 4 \text{ mm}$ 的圆弧射流孔. 由图14可知, 相对于光滑表面而言, 在射流孔下游形成低剪应力条带,

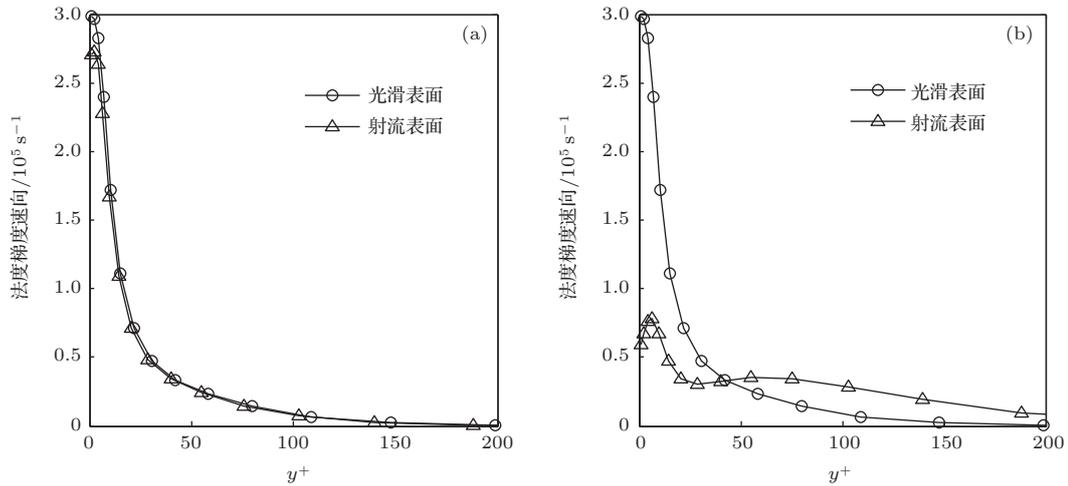


图 13 垂直于壁面法线方向上的速度梯度分布 (a) $x = -2 \text{ mm}, y = 0 \text{ mm}$; (b) $x = 2 \text{ mm}, y = 0 \text{ mm}$

在射流孔两侧形成局部的高剪应力区, 但射流表面的平均剪应力低于光滑表面, 即射流表面的摩擦阻力减小.

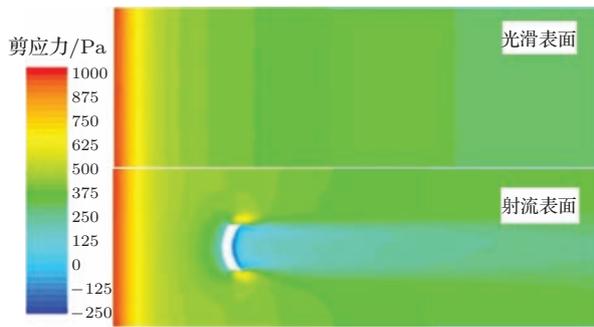


图 14 (网刊彩色) 壁面剪应力对比图

7 结 论

本文通过分析鲨鱼鳃部的呼吸过程, 建立了 8 种具有不同射流孔形状的射流表面模型, 利用 SST $k-\omega$ 湍流模型对其进行数值模拟, 结果表明: 8 种不同射流孔形状均具有减阻效果, 折线形射流孔减阻效果最好; 将折线形射流孔优化为圆弧形射流孔, 随着射流速度的增大, 圆弧半径对减阻效果的影响增大, 当 $r = 4 \text{ mm}, v = 5 \text{ m/s}$ 时射流表面的减阻效果最好, 最大减阻率为 9.51%. 本文通过流体摩擦阻力测试实验装置分别测量了光滑表面和射流表面的流体摩擦阻力, 继而验证了本文数值模拟结果的有效性. 减阻原因: 射流流体改变了射流孔下游的流场结构, 使得近壁面主流流体的速度减小, 射流表面边界层的厚度增大, 壁面法线方向上的速度梯度减小, 壁面剪应力减小, 达到了减阻效果.

参考文献

- [1] Zhang H, Fan B C, Chen Z H, Chen S, Li H Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 104701
- [2] Mei D J, Fan B C, Chen Y H, Ye J F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8335 (in Chinese) [梅栋杰, 范宝春, 陈耀慧, 叶经方 2010 物理学报 **59** 8335]
- [3] Han Z W, Xu X X, Ren L Q 2005 *Tribology* **25** 578 (in Chinese) [韩志武, 许小侠, 任露泉 2005 摩擦学报 **25** 578]
- [4] Wang B, Wang J D, Chen D R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 074702 (in Chinese) [王宝, 汪家道, 陈大融 2014 物理学报 **63** 074702]
- [5] Song B W, Ren F, Hu H B, Guo Y H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 054708 (in Chinese) [宋保维, 任峰, 胡海豹, 郭云鹤 2014 物理学报 **63** 054708]
- [6] Tian L M, Ren L Q, Li Q P, Han Z W, Jiang X 2007 *J. Bionic. Eng.* **4** 109
- [7] Lim H C, Lee S J 2004 *Fluid Dyn. Res.* **35** 107
- [8] Wang J J 1998 *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics* **24** 31 (in Chinese) [王晋军 1998 北京航空航天大学学报 **24** 31]
- [9] Walsh M J 1983 *AIAA J.* **21** 485
- [10] Cai J S, Liu Q H 2010 *Acta Aerodynamica Sinica* **28** 553 (in Chinese) [蔡晋生, 刘秋洪 2010 空气动力学学报 **28** 553]
- [11] Venukumar B, Jagadeesh G, Reddy K P J 2006 *Phys. Fluids* **18** 18101
- [12] Jiang G Q, Ren X W, Li W 2010 *Advances in Water Science* **21** 307 (in Chinese) [姜国强, 任秀文, 李炜 2010 水科学进展 **21** 307]
- [13] Robert P W, Frank C T 1979 *J. aircraft* **16** 701
- [14] Matthew J B, Joseph A S, Larry A R 1997 *J. Propul. Power* **13** 257
- [15] Zhang D W, Wang Q, Hu H Y 2012 *Journal of Aerospace Power* **27** 2378 (in Chinese) [张丁午, 王强, 胡海洋 2012 航空动力学报 **27** 2378]
- [16] Gu Y Q, Zhao G, Zhao H L, Zheng J X, Wang F, Xiao L, Liu W B 2012 *Acta Armamentarii* **33** 1230 (in Chinese)

[谷云庆, 赵刚, 赵华琳, 郑金兴, 王飞, 肖磊, 刘文博 2012 兵
工学报 **33** 1230]
[17] Li F, Zhao G, Liu W X, Sun Z Z 2014 *Journal of Basic*

Science and Engineering **22** 574 (in Chinese) [李芳, 赵
刚, 刘维新, 孙壮志 2014 应用基础与工程科学学报 **22** 574]
[18] Menter F R 1994 *AIAA J.* **32** 1598

Numerical simulation and experimental study on drag reduction performance of bionic jet hole shape*

Li Fang Zhao Gang[†] Liu Wei-Xin Zhang Shu Bi Hong-Shi

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

(Received 25 July 2014; revised manuscript received 18 August 2014)

Abstract

Since the lateral jet in a horizontal stream can reduce the friction of bionic jet surface, a bionic jet surface model is established by using the SST $k-\omega$ turbulence model in numerical simulation of bionic jet surface for jet hole with different shape, and experimental verification of the numerical simulation results is done. Results show that, when the flow length and span length of the jet hole are kept constant, the drag reduction of the third model with broken-line jet hole is the best; the broken-line jet hole is simplified to an arc-shaped hole, when its radius $r = 3-5$ mm, the drag reduction rate increases with jet velocity; furthermore, the best drag reduction can be obtained when $r = 4$ mm, the maximum drag reduction rate is 9.51%. Drag reduction is produced because the jet fluid injected to the lateral mainstream field through jet holes, would change the flow field structure of boundary layer near jet surface, and make the thickness of the underlying viscous sublayer in boundary layer increase. As a result, the gradient of normal velocity, perpendicular to jet surface, is decreased, and thus reduces the wall shear stress. Meanwhile, the low speed jet fluid is blocked at the boundary layer, reducing the sweep of high speed fluid on the wall, which contributes to the drag reduction.

Keywords: drag reduction, jet hole shape, numerical simulation, boundary layer

PACS: 47.85.lb, 47.85.ld, 47.27.N-, 47.27.nb

DOI: 10.7498/aps.64.034703

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51275102).

[†] Corresponding author. E-mail: s310070095@hrbeu.edu.cn