

基于蚯蚓背孔射流的仿生射流表面减阻性能研究

谷云庆 牟介刚 代东顺 郑水华 蒋兰芳 吴登昊 任芸 刘福庆

Characteristics on drag reduction of bionic jet surface based on earthworm's back orifice jet

Gu Yun-Qing Mou Jie-Gang Dai Dong-Shun Zheng Shui-Hua Jiang Lan-Fang Wu Deng-Hao Ren Yun Liu Fu-Qing

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 024701 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一类新型激波捕捉格式的耗散性与稳定性分析

[On the accuracy and robustness of a new flux splitting method](#)

物理学报.2015, 64(2): 024702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024702>

基于弱可压与不可压光滑粒子动力学方法的封闭方腔自然对流数值模拟及算法对比

[Comparisons among weakly-compressible and incompressible smoothed particle hydrodynamic algorithms for natural convection](#)

物理学报.2014, 63(22): 224701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224701>

带自由面流体的多体耗散粒子动力学模拟

[The study of fluid with free surface by many-body dissipative particle dynamics](#)

物理学报.2014, 63(8): 084701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084701>

有结构壁面上液滴运动特征的耗散粒子动力学模拟

[Movement of a droplet on a structured substrate: A dissipative particle dynamics simulation study](#)

物理学报.2013, 62(13): 134701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.134701>

均匀流中近壁面垂流向振荡圆柱水动力特性研究

[Hydrodynamic characters of a near-wall circular cylinder oscillating in cross flow direction in steady current](#)

物理学报.2013, 62(6): 064701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.064701>

基于蚯蚓背孔射流的仿生射流表面减阻性能研究*

谷云庆¹⁾ 牟介刚^{1)†} 代东顺¹⁾ 郑水华¹⁾ 蒋兰芳²⁾ 吴登昊²⁾
任芸²⁾ 刘福庆²⁾

1) (浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310014)

2) (浙江工业大学之江学院, 杭州 310024)

(2014年5月13日收到; 2014年6月23日收到修改稿)

为了减小流体对固体壁面的阻力, 基于蚯蚓生物学特征, 对蚯蚓背孔射流特性进行分析, 建立仿蚯蚓背孔射流的仿生射流表面计算模型, 采用 SST $k-\omega$ 湍流模型对仿生射流表面的减阻特性进行数值模拟, 同时对数值模拟结果进行实验验证, 并以此研究了仿蚯蚓背孔射流表面的减阻机理. 结果表明, 在一定条件下, 仿蚯蚓背孔射流的仿生射流表面具有较好的减阻效果; 在同一射流方向角下, 随着射流速度的增加, 减阻率逐渐增大; 在同一射流速度下, 随着射流方向角的增加, 减阻率呈先减小后增大的变化趋势; 数值模拟与实验均在射流速度为 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、射流方向角为 -30° 时达到最大, 分别为 8.69%, 7.86%; 射流表面改变了原有光滑壁面的边界层结构, 对壁面边界层进行了有效的控制, 减小了壁面的剪应力, 降低了壁面边界层的速度.

关键词: 射流, 减阻, 数值模拟, 边界层

PACS: 47.10.-g, 47.11.-j

DOI: 10.7498/aps.64.024701

1 引言

减阻技术具有很高的军事价值和广泛的经济价值, 一直是研究的热点问题之一^[1,2]. 常规水面船舶表面摩擦阻力约占总阻力的 50%, 水下航行器表面摩擦阻力甚至占总阻力的 70%^[3]. 理论推算表明, 在能源和动力恒定时, 若航行器阻力减小 10%, 则航程和巡航速度增加约 3.57%; 即便只能获得较小的减阻效果, 每年也能够节约大量能源, 对于缓解能源危机极为重要^[4]. 研究表明, 在各种运输工具中, 边界层阻力在总阻力中占有很大的比例, 减少边界层的阻力可以减少能耗, 节约能源, 为达到减少边界层阻力的目的, 产生了各种各样的减阻方法和技术^[5,6]. 生物通过自然选择, 获得适合自身生存的特殊结构及功能, 实现对外界环境的调控^[7,8]. 仿生学是通过模仿生物的特殊本领, 并利用生物的结构和功能原理来研究新技术的一门新

兴边缘学科^[9,10].

运用类比、模拟及模型方法是仿生学研究的重要特点, 其目的不在于直接复制各个细节, 而是要明确生物系统的工作原理, 以实现特定功能. 如受鲨鱼皮表面非光滑结构的启发而发展起来的沟槽减阻技术, 打破了只有光滑表面才具有减阻功能这一传统观念, 推动了减阻技术的发展^[11,12]. 王永华等^[13]针对鸮皮肤和覆羽的多层次组织结构与形态特征, 设计了梯形棱纹表面、背衬空腔的单元仿生模型, 对不同结构聚氨酯多孔材料的吸声性能进行分析表明, 梯形棱纹表面能有效提高多孔材料中的高频吸声性能, 背衬空腔能有效提高多孔材料的低频吸声性能. 刘芳等^[14]从蚯蚓爬行的生物力学角度, 分析了蚯蚓爬行时的体表形变及体表与地面间的摩擦阻力情况, 得到了蚯蚓质量与爬行速度间的关系. 蚯蚓的身体非常柔软, 却可以在坚硬的土壤中进行行走, 通过研究表明, 蚯蚓体表的非光滑形态背

* 国家自然科学基金 (批准号: 51275102, 51305399, 51476144) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mjg1964@zjut.edu.cn

孔能够向外分泌液体,起到润滑体表及周围土壤的作用^[15–17].通过对蚯蚓等生物的力学特性进行分析,构建运动学模型,并对其进行数值模拟,明确蚯蚓生物力学特性,基于仿生学原理,建立类似蚯蚓等生物运动形态的仿生机器人,该机器人应用广泛,具有重要的实用价值^[18–21].科研人员针对蚯蚓的生理特性,从体表液和生物电方面对蚯蚓的减黏脱土功能进行仿生学研究^[22–26].对生物体这种能够用于减阻的形貌特征进行模仿,势必会促进减阻技术的发展,拓展仿生减阻技术的研究领域,为仿生学与减阻技术的进一步融合提供新思路和新方法,具有重要的理论意义及较高的学术价值.基于蚯蚓背孔射流生理行为,对蚯蚓背孔结构及射流情况进行分析;针对蚯蚓背孔射流后能够降低体表与土壤间摩擦阻力的现象,结合射流特性的启发,抽取蚯蚓背孔射流工程化模型,采用计算流体力学方法,对仿生射流表面的减阻性能进行研究,揭示射流表面减阻机理.

2 蚯蚓生物学特征

蚯蚓的形状多为圆柱形,细长,头尾稍尖,生活在潮湿、疏松和肥沃的土壤中.蚯蚓体表分布很多环状体节,前段稍尖,后端稍圆,大多数体节中间有刚毛,对蚯蚓在爬行过程中起到支撑作用,加上体壁肌肉的伸缩,蚯蚓便可以蠕动行进^[27].

2.1 蚯蚓背孔形貌及行进分析

蚯蚓自11—12节间沟开始,于背中线节间位置有背孔,实现呼吸以及潮湿外表;蚯蚓体表的背孔能自动调控开启和关闭,平时紧闭,遇干燥或刺激时孔张开,射出体腔液,湿润体表及周围土壤,使蚯蚓易于在土壤中穿行并保护体表,蚯蚓体表背孔结构如图1所示^[28].由图1可知,蚯蚓背孔呈凹坑状,类似于仿生非光滑表面减阻中的仿生凹坑结构;蚯蚓的行走方式呈“/\ /\ /\”形,即射流面存在一定倾斜角度,在运动时,靠刚毛钉住地面以及体壁肌肉的舒缩,身体呈波浪式的向前蠕动;一些体节的纵肌层收缩,环肌层舒张,刚毛段体节变粗变短,附着在体壁上斜向后伸的刚毛伸长,插入土壤;之后,前一段体节的环肌收缩,纵肌舒张,此段体节变细变长,刚毛缩回,与土壤脱离接触,如此,由后

一段体节的刚毛支撑,即推进身体向前进.

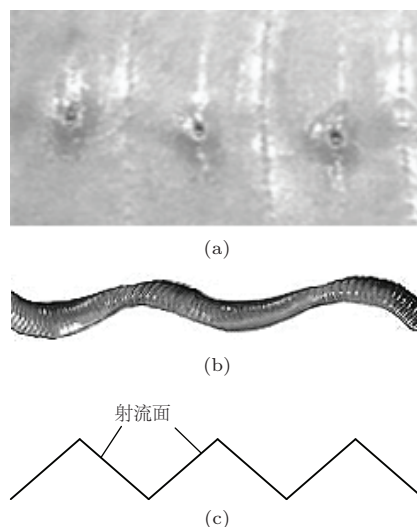


图1 蚯蚓体表 (a) 背孔结构; (b) 行走形态; (c) 射流面

2.2 蚯蚓体表减阻特性分析

蚯蚓背孔喷射的体腔液多为乳白色的黏性液体,含有很多水分和悬浮着的各类细胞和颗粒,是一种以有高滞留性的黏蛋白为主溶液的稀溶液,具有润滑功能^[23,25].体腔液提供了一个弱剪切层,在土壤动物体表与土壤层之间形成润滑界面,可降低土壤对动物体表的黏附,具体表现为^[25,28,29]:当蚯蚓在土壤中进行时,背孔将由表皮黏液细胞分泌的体表液喷射出来,环节状体表均匀地将体表液分布到蚯蚓体表和周围土壤中,体表液渗入土壤形成一层液体膜,液体膜在蚯蚓运动过程中起到保护作用;在蚯蚓伸缩前进时,单个体节在运动中呈现出曲率不断变化的弧形凸圆面,使蚯蚓体表与土壤形成楔形空间,减小了蚯蚓与土壤的接触面积,也使得液体膜更易进入摩擦表面,得到较好的润滑效果,大大降低蚯蚓与土壤之间的摩擦;此外蚯蚓运动时体表受到周围土壤的刺激会在同一体表面形成正负电位分布,可以改善表面润滑膜的分布和增加其厚度,避免土壤黏附与体表发生磨损破坏.

3 蚯蚓背孔射流特性

3.1 蚯蚓背孔射流速度分析

设蚯蚓背孔体腔液喷射初始速度为 v_0 ,喷射高度为 h ,则有

$$v_0^2 = 2gh, \quad (1)$$

式中, g 为重力加速度.

选取 10 只形状、大小等外表相近的活环毛蚓, 用温水冲洗干净, 依次对其进行 1—10 编号. 将编号 1 的环毛蚓放在托盘中, 使其背面朝上放置, 分别用镊子轻轻按在环毛蚓的头部和尾部, 并用滴管吸取少量浓度为 75% 的酒精, 滴于环毛蚓的背面; 在酒精强烈刺激下, 环毛蚓的背孔开放, 部分体节的背孔同时喷射出体腔液, 采用激光位移传感器对环毛蚓背孔射出的体腔液喷射高度进行测量; 激光位移传感器的测量精度为 0.03—0.1 mm, 经串口与电脑连接, 使用串口调试软件进行数据采集. 依次对编号 2—10 的环毛蚓重复上述实验, 并分别测试环毛蚓背孔射出的体腔液喷射高度, 并通过 (1) 式计算出蚯蚓背孔射流速度, 实验数据如表 1 所示.

表 1 实验数据

编号	h/mm	$v_0/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
1	16.04	0.56
2	15.32	0.55
3	21.28	0.65
4	14.26	0.53
5	17.63	0.59
6	16.55	0.57
7	20.52	0.63
8	18.66	0.60
9	13.02	0.51
10	15.87	0.56

由表 1 可知, 蚯蚓背孔体腔液喷射初始速度 v_0 较小, 基本上维持在 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 由于实验中主要测试的是蚯蚓体腔液喷射的最高距离, 故蚯蚓背孔射流速度在一定范围内变化. 考虑到不同射流速度对其表面减阻的影响, 分析过程中, 以 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为基准, 分别选取射流速度 $v = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3.2 射流表面模型设计

射流表面模型设计既源于蚯蚓, 又要高于蚯蚓, 而蚯蚓具有的特征只是进化过程中的一个阶段, 并不是进化的终点, 因此需要在蚯蚓背孔射流原型的基础上进行必要的改进、优化. 由于蚯蚓生活在土壤之中, 在蚯蚓瞬间射流时, 体腔液喷射到

土壤及背孔四周, 使得背孔附近区域得到润滑, 减小体表与土壤之间的摩擦阻力. 蚯蚓背孔射流具有瞬时性, 这种瞬时的射流主要作用是润滑体表, 基于蚯蚓的背孔射流特征, 在流体流经固体表面时, 为了研究连续射流情况下的射流表面的减阻性能, 需要建立合理的仿生射流表面结构模型, 以便工程化应用. 结合蚯蚓背孔射流特点, 采用在平板壁面上布置圆形射流孔, 通过圆形射流孔向内腔体中输入加压流体, 实现在内腔壁面形成类似于蚯蚓背孔连续射流这一特征. 仿生射流表面示意图见图 2, 内腔体中的流体为主流场, 以一定速度流动; 射流表面和上壁面静止; 通过射流孔可以持续向内腔体中提供射流所需流体.

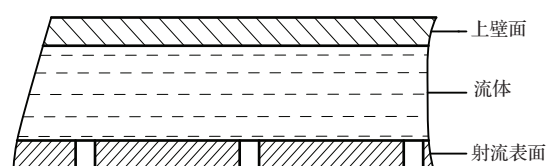


图 2 仿生射流表面示意图

为了明确蚯蚓背孔射流特性的减阻行为, 将蚯蚓射流特性应用于流-固之间表面减阻, 并且模型与流体的相对运动速度以模仿船的航行速度. 对于普通杂货船速度为 12—15 节、大型集装箱船速度为 20—28 节、大型核动力航母速度为 32—35 节、普通军舰速度为 20—30 节、大型邮轮速度与大型集装箱船速度相当, 故研究中取流场速度 $V = 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

4 仿蚯蚓射流表面数值计算方法

4.1 计算模型

图 3 为计算域示意图, 其参数为: 沿流向方向 $L_x = 60 \text{ mm}$, 沿展向方向 $L_y = 10 \text{ mm}$, 沿法向方向 $L_z = 10 \text{ mm}$; 射流孔为圆孔, 数目为 3 个, 射流孔径 $D = 4 \text{ mm}$; 射流孔中心距入口距离 $L_1 = 10 \text{ mm}$, 两射流孔沿流向间距 $L_2 = 20 \text{ mm}$, 射流孔距两侧壁等距, 射流方向角 $\theta = 0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ$, 射流速度 $v = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 流场速度 $V = 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 为便于分析射流表面边界层流动与光滑表面边界层流动特性, 将计算域上表面作为与底部射流表面对照的光滑表面, 二者相对于速度入口处的位置和尺寸大小均相同.

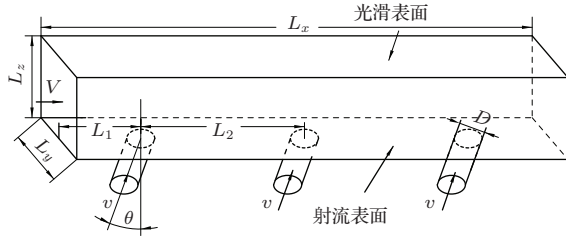


图3 计算域示意图

4.2 计算方程

在流场求解时所用连续方程、动量方程和能量方程可以写成以下通用形式^[3]:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}\Phi) = \text{div}(\Gamma_\Phi \text{grad}\Phi) + S_\Phi, \quad (2)$$

式中, Φ 为通用因变量, S_Φ 为广义源项, $\mathbf{u}$ 为速度矢量, Γ_Φ 为与 Φ 相对应的广义扩散系数, ρ 为流体密度, t 为时间. 当 Φ 取不同变量时, 表达各类方程时各参数的具体形式如表 2 所示, 其中 μ 为动力黏度系数, p 为静压, χ 为求解变量.

表2 表达各类方程时各符号的具体形式

方程	Γ_Φ	Φ	S_Φ
连续方程	0	1	0
动量方程	μ	$\mathbf{u}$	$-\partial p / \partial \mathbf{u} + S_{M\mathbf{u}}$
能量方程	χ	i	$-p \cdot \text{div}(\mathbf{u}) + \Phi + S_i$

SST k - ω 湍流模型采用建立混合函数的方法, 使湍流模型方程在壁面附近流场到远离壁面的流场之间实现平稳过渡, 避免了在近壁区域使用壁面函数法带来的问题, 提高了仿真的精度^[30,31]. 在针对近壁区流体对壁面的阻力特性研究中, 选用 SST k - ω 湍流模型具有较好的仿真效果, 湍流动能方程为^[31-34]

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho k)}{dt} = & \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

湍流频率方程为

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho \omega)}{dt} = & \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\gamma \rho}{\mu_t} - \beta \rho \omega^2 \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ & + 2\rho(1 - F_1)\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}. \end{aligned} \quad (4)$$

湍动剪切应力 τ_{ij} 满足

$$\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \mu_t \left[S_{ij}^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)^2 - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right], \quad (5)$$

其中 S_{ij} 为应变张量.

混合函数是基于距离最近的表面及流场变量, 在构建 SST 湍流模型需将 k - ω 与 k - ε 湍流模型混合, 则 SST 湍流模型中的常数 φ 为^[31-34]

$$\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2, \quad (6)$$

式中, φ_1, φ_2 分别为 k - ω, k - ε 湍流模型中的常数; 混合函数 F_1, F_2 分别为

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4), \quad (7)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2), \quad (8)$$

其中,

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{CD_{k\omega} \sigma_{\omega 2} y^2} \right], \quad (9)$$

$$\arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \quad (10)$$

式中, y 为到壁面最近的距离; ν 为运动黏度.

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right). \quad (11)$$

适当的传输行为可通过一个限定因素来获取湍流黏性系数:

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)}, \quad (12)$$

式中, ν_t 为湍流黏性系数, $\nu_t = \mu_t / \rho$; F_2 的混合功能与 F_1 类似, 可以制约边界层的限制; S 为不变测度应变率.

k - ω 湍流模型中常数: $\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \beta_1 = 0.075, \gamma = \beta_1 / \beta^* - \sigma_{\omega 1} \kappa^2 / \sqrt{\beta^*}, \kappa = 0.4, \beta^* = 0.09, a_1 = 0.31$.

k - ε 湍流模型中常数: $\sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828, \gamma = \beta_2 / \beta^* - \sigma_{\omega 2} \kappa^2 / \sqrt{\beta^*}, \kappa = 0.41, \beta^* = 0.09$.

4.3 网格划分及边界条件设置

SST 湍流模型在近壁区利用低雷诺数法处理壁面流场, 为保证计算精度, 采用混合网格离散流场. 在远离壁面的流场区域划分四面体网格, 为捕捉射流表面边界层流场特性, 在壁面附

近增加细密且均匀增长的棱柱型网格, 棱柱型网格层数为20层, 其中第一层网格节点到壁面的距离 Δy 为^[35]

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

式中, L 为流场长度; Δy^+ 为第一层网格节点到壁面的无量纲距离, 对于壁面附近的低雷诺数流场, 取 $\Delta y^+ = 1$; 基于流场长度的雷诺数 Re_L 为

$$Re_L = u_\infty L / \nu, \quad (14)$$

式中, u_∞ 为来流速度.

射流表面边界层厚度为

$$\delta = 0.035 L (u_\infty L / \nu)^{-1/7}. \quad (15)$$

上壁面为滑移壁面, 下壁面及射流出口壁面为无滑移壁面, 两侧为对称壁面; 射流入口速度 $v = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 计算域入口平均速度为 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 湍流强度为5%, 出口压力为零. 选择基于密度显示求解器和二阶迎风离散格式, 流体介质为水, 常温常压环境; 残差设为 1×10^{-3} .

5 仿蚯蚓背孔射流表面减阻特性

仿蚯蚓背孔射流表面减阻率 η 计算式为

$$\eta = \frac{F_S - F_J}{F_S} \times 100\%, \quad (16)$$

式中, F_S 为光滑表面所受黏性阻力; F_J 为射流表面所受黏性阻力.

5.1 壁面黏性阻力分析

图4为壁面黏性阻力云图. 由图4(a)可知, 在同一射流速度 v 下, 随着射流方向角 θ 的增加, 光滑表面黏性阻力 F_S 呈现出先减小后增大的变化趋势, 说明 θ 的极大和极小值不利于降低 F_S ; 在同一 θ 下, 随着 v 的增加, F_S 呈现逐渐递增的变化趋势, 梯度变化明显, 说明 v 的极大值不利于降低 F_S , 而 v 的极小值有利于降低 F_S . 由图4(b)可知, 在同一 v 下, 随着 θ 的增加, 射流表面黏性阻力 F_J 呈现出先增大后减小的变化趋势, 且 F_J 在 θ 从 -30° — -15° , 15° — 30° 范围内变化梯度较大, 在 θ 从 -15° — 15° 范围内变化梯度变化缓和, 说明 θ 的极大和极小值有利于降低 F_J ; 在同一 θ 下, 随着 v 的增加, F_J 呈现逐渐递减的变化趋势, 梯度变化明

显, 说明 v 的极大值有利于降低 F_J , 而 v 的极小值不利于降低 F_J .

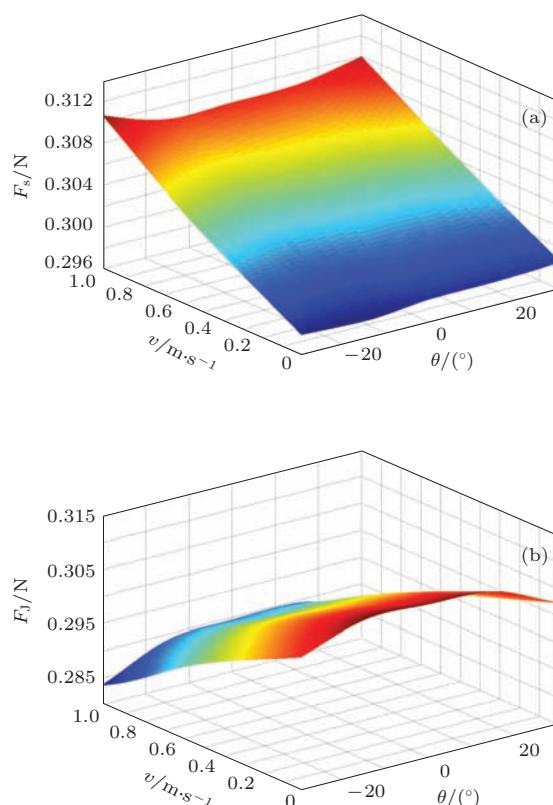


图4 (网刊彩色) 壁面黏性阻力云图 (a) 光滑表面; (b) 射流表面

由以上分析可知, 射流作用导致模型光滑表面的黏性阻力 F_S 增加、射流壁面的黏性阻力 F_J 减小, F_S , F_J 二者的变化呈现出逆向变化趋势. 通过图4可以明显看到, 在 θ 和 v 作用的影响下, F_J 的减小幅度明显高于 F_S 的增加幅度, F_J 梯度变化更为显著, 进一步说明仿蚯蚓背孔的这种射流行为改变了流体对固体壁面原有的阻力作用方式, 制约了射流表面黏性阻力的增加, 最终达到降低流体对壁面黏性阻力的目的.

5.2 减阻性能分析

通过(16)式计算仿蚯蚓背孔射流表面的减阻率, 得到如图5所示的射流表面减阻率曲线图. 由图5可知, 在同一射流方向角 θ 下, 随着射流速度 v 的增加, 减阻率逐渐增大, 减阻率梯度变化明显; 在同一 v 下, 随着 θ 的逐渐增加, 减阻率变化趋势类似, 均呈现出先减小后增大的变化趋势, 并且在 $\theta = -15^\circ$ — 15° 之间变化时, 减阻率变化不明显, 减阻率均在 $\theta = -30^\circ$ 或 30° 时达到最大值. 当

$v = 0$ 时, 减阻率均为负值, 表现为增阻状态, 在 $\theta = -15^\circ$ 时增阻最为明显; 当 $v = 0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 减阻率既有增阻又有减阻状态, 在 $\theta = -30^\circ, 30^\circ$ 时表现为减阻; 当 $v = 0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 射流表面均呈现出减阻效果, 减阻率数值相对较小; 当 $v = 0.75, 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 射流表面减阻效果明显, 这两种情况下的减阻率的变化趋势最为相近, 并且减阻率均在 $\theta = -30^\circ$ 达到最大值、在 $\theta = 0^\circ$ 达到最小值. 在 $v = 0, 0.25, 0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 射流表面减阻率的变化趋势最为相近, 并且减阻率均在 $\theta = 30^\circ$ 达到最大值、在 $\theta = -15^\circ$ 达到最小值; $v = 0$ 时射流表面无减阻效果, 不利于减阻. 当 $v = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}, \theta = -30^\circ$ 时, 减阻率最大, $\eta_{\max} = 8.69\%$.

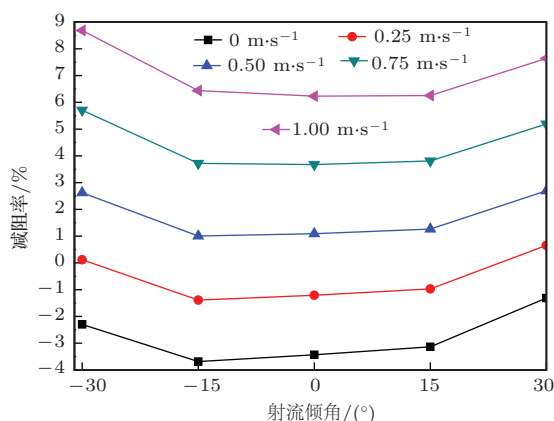


图5 射流表面减阻率曲线

6 实 验

针对蚯蚓背孔射流的仿生射流表面特征, 同时考虑到在平面结构上容易实现对射流的供给, 但对于仿生射流表面的阻力测试则很难实现, 在基于平板表面流动与环形空间内流动满足相似准则的基础上, 从同轴旋转式的角度研制出一款射流表面减阻测试实验平台^[36]. 实验通过射流表面减阻测试实验平台进行, 该平台主要包括动力、射流供给、实验和数据采集四部分, 其主要参数^[37]: 内筒(实验模型)直径140 mm, 外筒直径180.8 mm; 外筒旋转速度范围0—2600 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; 扭矩信号耦合器扭矩范围0—10 $\text{N}\cdot\text{m}$, 精度0.5% F·S, 频率响应100 μs ; 流量范围0—6.3 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$.

实验数据采集时间间隔0.05 s, 在每一工况下取第501—800次数据的平均值作为实验分析数据; 外筒旋转速度 $n = 1575 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ($V = 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),

射流速度 $v = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 流体介质为水, 常温、常压. 实验过程中, 水的黏性作用对实验模型外表面产生摩擦阻力, 摩擦阻力作用于中心轴而产生摩擦扭矩, 由于实验模型与回转中心间距离一定, 则射流表面减阻率可表示为

$$\eta = \frac{M_S - M_J}{M_S} \times 100\%, \quad (17)$$

式中, M_S 为光滑表面实验模型所受摩擦扭矩; M_J 为射流表面实验模型所受摩擦扭矩.

实验模型以U-PVC管为原型, 高度为10 mm (即 L_y), 表面上均匀分布 $[\pi \times 140/20] = [21.98] = 22$ 个射流孔. 分别加工6组实验模型, 包括射流方向角 $\theta = -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 的五组射流表面模型, 以及一组光滑表面模型, 实验模型如图6所示.

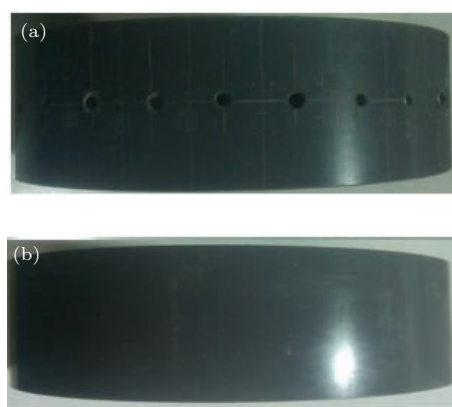


图6 实验模型 (a) 射流表面; (b) 光滑表面

依次对 $\theta = -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 的模型在 $n = 1575 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}, v = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 情况下进行实验, 其中光滑表面实验模型在 $n = 1575 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 情况下进行实验. 由(17)式分别计算 $\theta = -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 下射流表面的减阻率为7.86%, 5.79%, 5.63%, 5.66%, 6.91%; 而数值计算中相同条件下的减阻率分别为8.69%, 6.44%, 6.23%, 6.25%, 7.64%. 实验与数值计算结果接近, 略低于数值模拟结果, 在允许误差范围内, 验证了数值模拟的准确性.

7 仿蚯蚓背孔射流表面减阻机理

以蚯蚓背孔体腔液喷射初始速度为出发点, 即在 $v = 0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 对仿蚯蚓背孔射流的仿生射流表面的剪应力、速度场进行分析, 揭示仿蚯蚓背孔射流表面的减阻机理.

7.1 壁面剪应力分析

图7为不同射流方向角 θ 下射流壁面剪应力云图. 由图7可知, 射流作用在射流孔下游形成剪应力降低的条带, 减小了射流孔下游壁面剪应力. 在不同 θ 下, 剪应力低压条带分布不同, 如在 $\theta = -30^\circ$ 时, 紧邻第二、三射流孔下游出现剪应力极低的应力分布情况; 不同 θ 下, 射流对每个射流孔影响区域不同; 射流对入口处第一、第二、第三射流孔的影响范围逐渐增大, 说明上游射流孔的射流作用影响着下游射流孔下端流场的分布. 同时, 由于射流孔下游低压区的存在, 流体势必产生回流引发涡旋, 流线经涡旋上端流向下流, 使得射流表面对边界层内的低速流体进行有效的切割, 抑制低速

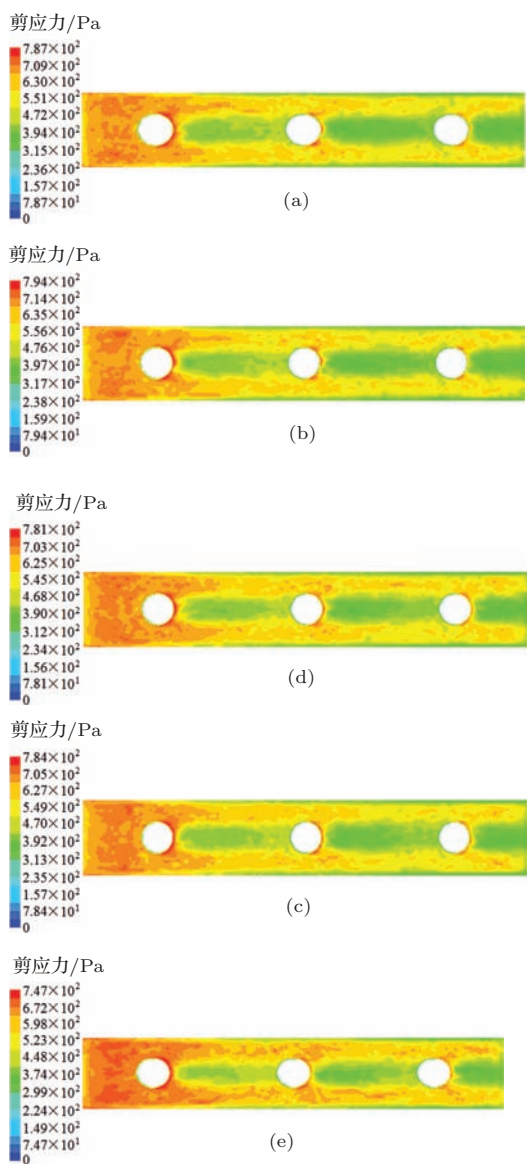


图7 (网刊彩色) 剪应力云图 (a) $\theta = -30^\circ$; (b) $\theta = -15^\circ$; (c) $\theta = 0^\circ$; (d) $\theta = 15^\circ$; (e) $\theta = 30^\circ$

流体向展向集中, 并降低湍流猝发中低速流域的不稳定性及湍流猝发强度, 减小能量损耗.

在壁面层流边界层内, 剪应力主要来源于黏性力, 而在壁面湍流边界层内, 剪应力包括黏性剪应力和雷诺剪应力. 流动中的自由流中的动能被不断地转换为湍流脉动能量, 在黏性作用下耗散为流体内能^[38]. 射流表面正是通过改变壁面边界层实现对流场进行有效的控制, 以减小壁面的黏性剪切应力和雷诺应力, 继而减小壁面所受的摩擦阻力以达到减阻作用.

7.2 速度场分析

图8为不同射流方向角 θ 下沿流向中截面的速度场云图. 由图8可知, 射流表面的射流流体沿壁面流动时, 改变了原有光滑壁面边界层结构, 壁面附近受流体黏性特性的影响形成了新的边界层结构. 射流壁面边界层内的流体速度由零逐渐剧增至与主流场速度相同量级, 而光滑壁面边界层的流体速度由零直接剧增至与主流场速度相同量级, 且在壁面法向上的速度梯度 $\partial v_x / \partial z$ 较大, 黏性力 $\mu \partial v_x / \partial z$ 较大. 湍流在壁面黏性底层形成低速条带, 低速条带离开壁面上升并流向下流; 当产生于黏性底层的低速条带延伸到缓冲区后, 在低速条带顶端出现涡旋. 在不同 θ 下, 光滑壁面附近流场的平均速度梯度较大, 速度脉动较大, 则雷诺应力相应增大; 射流壁面附近流场的平均速度梯度较小, 速度脉动较小, 则雷诺应力也相应减小; 射流壁面的湍流强度小于光滑壁面的湍流强度, 消耗在壁面的湍动能也相应减小, 由速度脉动产生的雷诺应力也相应减小; 射流表面降低了壁面边界层的速度, 增加边界层黏性底层的厚度, 致使摩擦阻力降低.

同时, 射流的低速流体与主流场的高速流体接触, 形成涡垫效应^[33,34], 涡垫效应改变了射流孔下游的湍流拟序结构及流线状态, 致使射流表面近壁区湍流强度及湍动能耗散减小; 光滑表面的流线沿流向方向向下游流动, 而射流表面在涡垫效应作用下导致流体从射流孔上产生的反向涡旋的顶部流过, 使得流线在射流孔上端出现暂时中断. 射流产生的反向涡旋在射流壁面上产生阻力, 该阻力反作用于主流场而形成附加动力, 产生逆向推动效应^[38]. 射流产生的涡垫效应及推动效应致使射流表面摩擦阻力降低, 最终使射流表面体现出较好的

减阻效果.

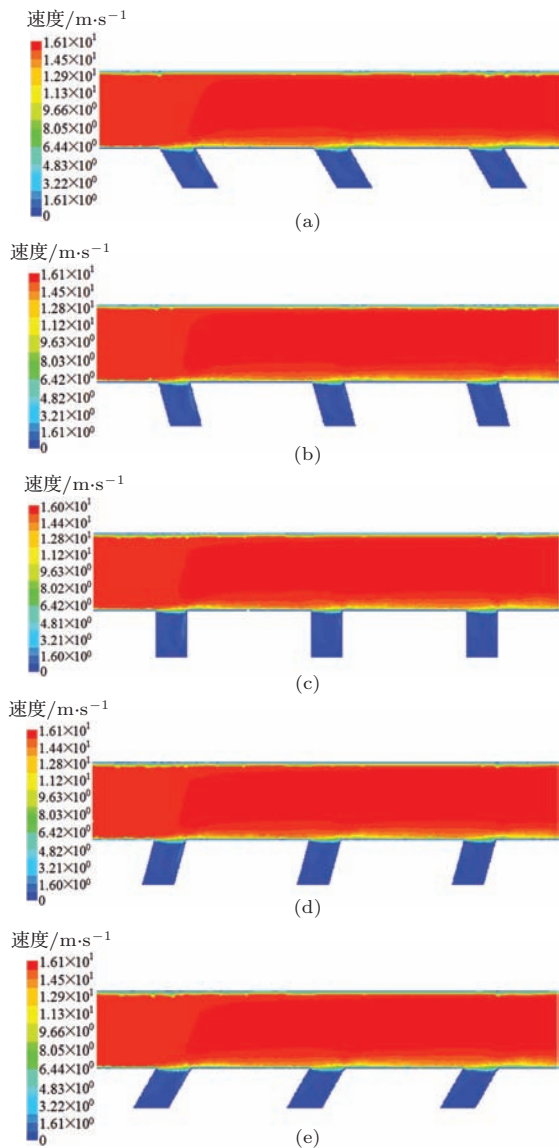


图8 (网刊彩色) 速度矢量云图 (a) $\theta = -30^\circ$; (b) $\theta = -15^\circ$; (c) $\theta = 0^\circ$; (d) $\theta = 15^\circ$; (e) $\theta = 30^\circ$

8 结 论

1) 基于蚯蚓生物学特性, 提出了一种仿蚯蚓背孔射流的仿生射流表面减阻方法, 并通过实验研究了蚯蚓背孔射流速度情况, 建立了仿蚯蚓背孔射流的仿生射流表面计算模型.

2) 仿蚯蚓背孔的这种射流行为改变了流体对壁面原有的阻力作用方式, 制约了射流表面黏性阻力的增加. 射流速度为 $0, 0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 不利于减阻; 为 $0.75, 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 有利于减阻; 当射流速度为 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、射流方向角为 -30° 时, 减阻率最大, 为 8.69% .

3) 实验与数值模拟得到的减阻率接近, 实验中最大减阻率为 7.86% , 与数值模拟条件相一致; 数值模拟与实验验证了仿蚯蚓背孔射流的这种仿生射流表面具有较好的减阻效果.

4) 仿生射流表面减阻机理体现在: 射流表面降低了壁面边界层的速度, 增加边界层黏性底层的厚度, 减小壁面摩擦阻力; 同时, 射流产生的涡垫效应及推动效应致使射流表面摩擦阻力降低, 最终使射流表面体现出较好的减阻效果.

感谢哈尔滨工程大学的赵刚教授在实验过程中给予的帮助, 感谢法国 Joseph Fourier University 的 Wang Evan 博士为本文工作提出宝贵意见.

参考文献

- [1] Ren L Q, Li X J 2013 *Sci. China: Technol. Sci.* **56** 884
- [2] Chirende B, Li J Q, Wen L G, Simalenga T E 2010 *Sci. China: Technol. Sci.* **53** 2960
- [3] Gu Y Q, Zhao G, Zheng J X, Li Z Y, Liu W B, Muhammad F K 2014 *Ocean Eng.* **81** 50
- [4] Koeltzsch K, Dinkelacker A, Grundmann R 2002 *Exp. Fluids* **33** 346
- [5] Huang Q G, Pan G, Song B W 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 054701 (in Chinese) [黄桥高, 潘光, 宋保维 2014 物理学报 **63** 054701]
- [6] Ren L Q, Liang Y H 2009 *Sci. China E: Technol. Sci.* **52** 2791
- [7] Wang L, Cai W H, Li F C 2014 *Chin. Phys. B* **23** 034701
- [8] Karthikeyan C, Krishnan R, Princy S A 2008 *J. Bionic Eng.* **5** 25
- [9] Lu Y X 2004 *J. Bionic Eng.* **1** 1
- [10] Ren L Q, Wang S J, Tian X M, Han Z W, Yan L N, Qiu Z M 2007 *J. Bionic Eng.* **4** 33
- [11] 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]
- [12] Lang S S, Geng X G, Zang D Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 084704 (in Chinese) [郎莎莎, 耿兴国, 臧渡洋 2014 物理学报 **63** 084704]
- [13] Wang Y H, Zhang C C, Wang J, Shi L, Zhang X P, Ren L Q 2012 *J. Jilin Univ. Eng. (Tech. Ed.)* **42** 1442 (in Chinese) [王永华, 张成春, 王晶, 石磊, 张雪鹏, 任露泉 2012 吉林大学学报 (工学版) **42** 1442]
- [14] Liu F, Shi W P, Ren L Q 2010 *Chin. J. Theor. Appl. Mech.* **42** 951 (in Chinese) [刘芳, 施卫平, 任露泉 2010 力学学报 **42** 951]
- [15] Ren L Q, Han Z W, Li J Q, Tong J 2002 *J. Terramech.* **39** 221
- [16] Ren L Q, Han Z W, Li J Q, Tong J 2006 *Soil Tillage Res.* **85** 1

- [17] Gu Y Q, Zhao G, Liu H, Zheng J X, Ru J, Liu M M, Chatto A R, Wang C G 2013 *J. Cent. South Univ.* **20** 3065
- [18] Mezoff S, Papastathis N, Takesian A, Trimmer B A 2004 *J. Exp. Biol.* **207** 3043
- [19] Chernousko F L 2005 *Appl. Math. Comput.* **164** 415
- [20] Kim B, Lee M G, Lee Y P, Kim Y, Lee G 2006 *Sens. Actuators A: Phys.* **125** 429
- [21] Ren L Q 2009 *Sci. China E: Technol. Sci.* **52** 273
- [22] Shelley T 2004 *Eureka* **24** 28
- [23] Ren L Q, Tong J, Li J Q, Chen B C 2001 *J. Agric. Eng. Res.* **79** 239
- [24] Zu Y Q, Yan Y Y 2006 *J. Bionic Eng.* **3** 179
- [25] Yan Y Y, Zu Y Q, Ren L Q, Li J Q 2007 *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C: J. Mech. Eng. Sci.* **221** 1201
- [26] Tong J, Moayad B Z, Ren L Q, Chen B C 2004 *Int. Agric. Eng. J.* **13** 71
- [27] Accoto D, Castrataro P, Dario P 2004 *J. Theoret. Biol.* **230** 49
- [28] Liu G M, Li J Q, Zou M, Li Y W, Tian X M 2008 *Trans. Chin. Soc. Agric. Engineer.* **24** 62 (in Chinese) [刘国敏, 李建桥, 邹猛, 李因武, 田喜梅 2008 农业工程学报 **24** 62]
- [29] Yan Y Y, Ren L Q, Li J Q 2006 *Int. J. Des. Nat.* **1** 135
- [30] Catalano P, Amato M 2003 *Aerosp. Sci. Technol.* **7** 493
- [31] You Y C, Buanga B, Hannemann V, Lüdeke H 2012 *Chin. J. Aeronaut* **25** 325
- [32] Menter F R 1994 *AIAA J.* **32** 1598
- [33] Xiong J B, Koshizuka S, Sakai M 2011 *Nucl. Eng. Des.* **241** 3190
- [34] Eça L, Hoekstra M 2011 *Compu. Fluids* **40** 299
- [35] Gu Y Q, Zhao G, Zheng J X, Zhang S, Ru J, Liu M M, Yao J J 2012 *J. Xi'an Jiaotong Univ.* **46** 71 (in Chinese) [谷云庆, 赵刚, 郑金兴, 张殊, 汝晶, 刘明明, 姚建均 2012 西安交通大学学报 **46** 71]
- [36] Gu Y Q, Mou J G, Zhao G, Wang F 2014 *J. Huazhong Univ. Sci. Technol. (Natural Science Edition)* **42** 22 (in Chinese) [谷云庆, 牟介刚, 赵刚, 王飞 2014 华中科技大学学报 (自然科学版) **42** 22]
- [37] Gu Y Q, Ru J, Zhao G, Li Z Y, Liu W B, Muhammad F K 2014 *Appl. Mech. Mater.* **461** 725
- [38] Wang J, Zhang C C, Ren L Q, Han Z W 2011 *J. China Ordnance* **7** 59

Characteristics on drag reduction of bionic jet surface based on earthworm's back orifice jet^{*}

Gu Yun-Qing¹⁾ Mou Jie-Gang^{1)†} Dai Dong-Shun¹⁾ Zheng Shui-Hua¹⁾ Jiang Lan-Fang²⁾
Wu Deng-Hao²⁾ Ren Yun²⁾ Liu Fu-Qing²⁾

1) (College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

2) (Zhijiang College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310024, China)

(Received 13 May 2014; revised manuscript received 23 June 2014)

Abstract

In order to reduce the drag reduction of the fluid on the solid wall, based on the biology characteristics of earthworm, the earthworm's back orifice jet characteristic is analyzed. The bionic jet surface is modeled by imitating the earthworm's back orifice jet, and the SST $k-\omega$ turbulent model is used for numerically simulating the drag reduction characteristics of bionic jet surface, simultaneously the result of the numerical simulation is verified experimentally. On this account, the drag reduction mechanism of bionic jet surface is studied based on the imitation of the earthworm's back orifice jet. The results show that under certain conditions, the drag reduction characteristics of bionic jet surface for imitating the earthworm's back orifice jet are very effective. At the same angle of jet direction, the drag reduction rate increases with the increase of jet velocity; at the same jet speed, the drag reduction rate presents a tendency to increase after the first decrease with increasing the angle of the jet direction. The maximum drag reduction rates obtained from numerical simulation and experimental measurement both on condition that jet velocity is $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and the angle of jet direction angel is -30° , are 8.69% and 7.86%, respectively. Jet surface changes the original boundary layer structure in smooth wall, thereby effectively controlling the wall boundary layer, and reducing the wall shear stress and also the velocity of the wall boundary layer.

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

PACS: 47.10.-g, 47.11.-j

DOI: 10.7498/aps.64.024701

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51275102, 51305399, 51476144).

[†] Corresponding author. E-mail: mjg1964@zjut.edu.cn