

蚬子外壳仿生表面减阻结构的设计与分析

林盛, 宋世奇

(大连交通大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要:受天然生物蚬子在泥沙环境中优异的运动能力的启发,提出了仿生蚬子表面形貌减阻方法,并根据其外壳表面形貌特征的显微图像设计了仿生表面减阻结构,利用 CFD 数值模拟方法中的多相流 Mixture 模型对设计的 3 种仿生表面结构进行横向仿真模拟并与光滑表面结构进行减阻效果对比。结果表明,在不同的两相流速下,3 种仿生表面结构在横向模拟中都具有一定的减阻特性,且以棱纹结节表面结构的减阻性能最佳。

关键词:仿生表面减阻结构;多相流;数值模拟;Mixture 模型

文献标识码:A **DOI:**10.13291/j.cnki.djdxac.2024.01.016

仿生表面减阻结构具有成本低、容易实现、效果突出等优势,在诸多减阻技术中应用广泛,主要应用于民用航空、航海运输和石油天然气管道运输等方面^[1-4]。早在 20 世纪 80 年代,NASA 兰利研究中心的 Walsh^[5-7]首次发现凹槽棱纹结构对表面减阻有一定的积极作用,这打破了以往人们认为表面越光滑阻力越小的认知,从那时起,国内外相关学者一直在仿生表面减阻结构方面开展研究,并取得一些显著成果。丛茜等^[8]利用有限体积法对三角形、扇贝形和刀刃形 3 种仿生表面沟槽结构进行了数值计算,分析了不同沟槽形状对减阻效果的影响。Wu 等^[9]利用 3D 显微镜和扫描电镜对泥鳅的表面皮肤微观形貌进行了观察和分析,设计了仿生泥鳅横向 V 形表面微结构并对表面微结构进行仿真模拟,结果表明在速度为 1m/s 时达到最大减阻率,此外该研究还对具有不同柔性变形的仿生 V 形减阻结构进行了仿真数值分析,发现柔性体具有良好的自适应性,可通过实时变形减小阻力。卢愿^[10]利用数值仿真模拟方法对不同沟槽尺寸、角度、数量、间距、形状下的横向沟槽减阻效果进行研究对比并通过研究结果分析横向沟槽结构在水中的减阻机理。Wu 等^[11]以擅长土壤挖掘的蚁狮幼体为仿生原型,建立了凸起高度和运动速度之间的数学关系,设计了仿

生减阻铲尖,并通过田间试验验证了其良好的减阻效果。

近年来仿生表面减阻结构的研究大多是在单相环境中开展,缺少在多相环境中的仿生表面减阻结构的研究。本文受天然生物蚬子在泥沙中优异的运动能力的启发,根据蚬子外壳表面的显微图像设计了 3 种仿生表面减阻结构,并利用 CFD 数值模拟方法中的 Mixture 多相流模型,横向仿真模拟了仿生表面结构的流动特性,得出了在不同两相流速下各仿生表面结构的减阻特性。

1 仿生表面减阻结构建模

1.1 天然蚬子的表面结构分析

生物经过亿万年的生命演化与协同进化,造就了适应外界环境的特殊能力,这与生物体表的形貌特征密切相关。蚬子作为一种典型的双壳贝类生物,其表面的特殊纹理结构与其在泥沙中优异的运动能力有着必然联系。本文使用基恩士 VW-6000 动态显微系统,观察天然蚬子的表面微观结构,测量其表面几何参数,图 1 为天然蚬子壳的整体图以及局部显微图。从图中可以清楚看到天然蚬子外壳表面的纹理结构,其中蚬子外壳的中间边缘部位见图 1(c),呈现规律的棱纹沟壑结构,测量出天然蚬子壳的棱纹宽度为 0.5 mm

收稿日期:2023-02-15

第一作者:林盛(1979—),男,教授。E-mail:linsheng138@163.com

通信作者:宋世奇(1996—),男,硕士研究生。E-mail:qufussq@163.com

左右,棱纹之间的沟壑间距为 0.2 mm。图 1(d) 为天然蜆子壳左侧部位的显微图,可以看出,壳的左侧部位由大小相似的结节规律排布而成,呈现棱纹与结节相结合的表面结构,其结节形状类似正方形,边长约为 0.5 mm,棱纹宽度约为 0.5 mm,棱纹之间的沟壑间距约为 0.2 mm。

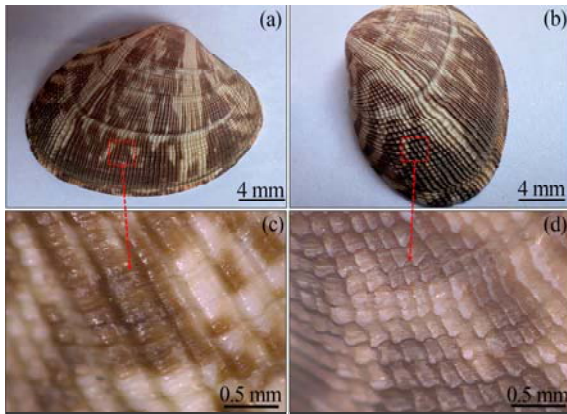


图 1 天然蜆子外壳的整体图像以及局部显微图像

1.2 仿生表面减阻结构建模

基于天然蜆子外壳的表面形貌特征分析以及测量出的表面微结构参数,本文设计了 3 种仿生蜆子外壳表面形貌结构,图 2 中(a)、(b)、(c)、(d)分别为光滑表面结构、仿生圆弧棱纹表面结构、仿生梯形棱纹表面结构和仿生棱纹结节表面结构,光滑表面结构作为对照模型,所有表面结构的基体长度为 4.4 mm,宽度为 4.4 mm,高度为 0.5 mm,同时为了更好地模拟天然蜆子壳的特征,3 种仿生表面结构设置了 30°的弯曲角度,仿生表面结构上的圆弧棱纹宽度为 0.5 mm,高度为 0.25 mm,棱纹之间的沟壑间距为 0.2 mm。梯形棱纹的底边为 0.5 mm,顶边为 0.25 mm,高度为 0.25 mm,间距为 0.2 mm。结节的边长相等为 0.5 mm,高度为 0.15 mm,结节下方的棱纹高度为 0.1 mm,结节之间的间距为 0.2 mm。

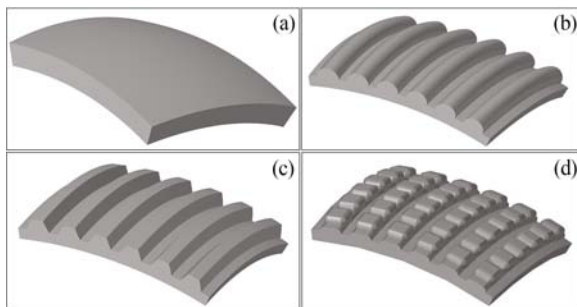
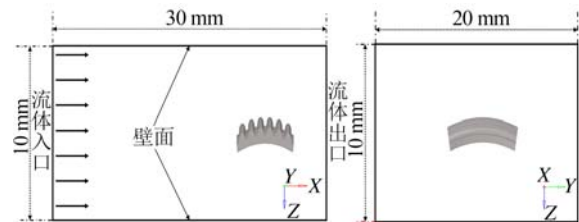


图 2 光滑表面结构和仿生表面结构

2 固液两相流数值模拟

2.1 建立横向仿真模型

本文所用两相流数值计算模型是基于欧拉多相流理论的固液两相流 Mixture 模型,该模型多用于两相或多相均质混合模拟,即固体颗粒和水以相同的速度均匀混合,两相间可以互相贯穿且不存在相间交互面,两相的体积分数可以在 0~1 任意取值。以仿生圆弧棱纹表面结构为例,图 3 为该结构的横向数值仿真模拟,模型外部流体域长为 30 mm,宽为 20 mm,高为 10 mm,仿生模型的中间部位距离入口为 20 mm,左侧为流体入口,右侧为流体出口,由于两相流各项参数保持恒定,故选用稳态计算方式,湍流模型选用 $k - \varepsilon$ 中的 RNG 模型,该模型考虑了涡流对湍流的影响,因此可以更为准确地提供流场数值解,离散方程的求解算法选用 Simplec 算法,该算法是对 Simple 算法的改进,与之相比可以加快迭代过程和提高计算精度。



(a) Y 方向视图

(b) X 方向视图

图 3 横向数值仿真模型

2.2 仿生表面结构在不同的两相流流速下的减阻特性

本文的流体介质是由水和沙组成的固液两相流,其中沙子颗粒体积分数占比为 95%,水占比为 5%,水和沙均定义为连续相且保持体积分数恒定,水和沙的物性参数见表 1。本文先后研究了不同两相流流速下 3 种仿生表面结构的减阻特性,进行数值仿真的同时监测在不同流速下仿生表面结构在流向方向上所受到的阻力,根据式(1)计算出仿生表面结构的减阻率:

$$\eta = \left(\frac{F_s - F_b}{F_s} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: F_s 为光滑表面结构受到的阻力; F_b 为仿生表面结构受到的阻力。当 η 为正值时表现为减阻特性且数值越大表明减阻效果越佳, η 为负值时表现为增阻特性。

表1 流体材料以及物性参数

材料	密度/(kg/m ³)	粒径/mm	动力黏度/(mPa·s)
沙(SiO ₂)	2 500	0.1	3.200
水	998	—	1.003

图4所示为横向仿真模型中,3种仿生表面结构在不同的两相流流速下的减阻率分布。从图4可以看出,3种仿生表面结构都有减阻特性,在0.5~1 m/s内,棱纹结节表面结构减阻性能最佳,在0.5 m/s时棱纹结节表面结构达到最大减阻率为6.1%,在1~3 m/s圆弧棱纹表面结构的减阻率最佳,在2 m/s时最大减阻率为5.9%;在3~4 m/s时3种仿生表面结构的减阻率都呈现出最低的减阻率,圆弧棱纹表面结构的最低减阻率为1.4%,梯形棱纹表面结构的最低减阻率为0.7%,棱纹结节表面结构的最低减阻率为2.0%;速度大于3 m/s时,棱纹结节表面结构的减阻性能要明显优于另外两种仿生结构,最终棱纹结节表面结构的减阻率稳定在4.8%,圆弧棱纹表面结构的减阻率稳定在3.4%,梯形棱纹表面结构稳定在2.7%。

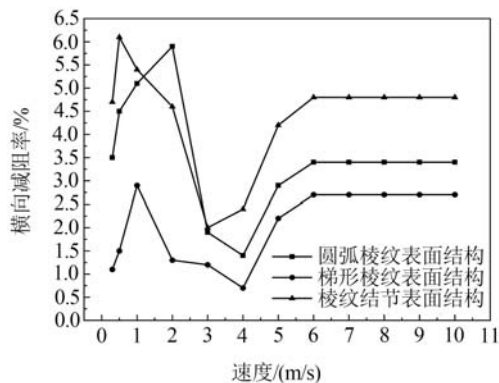


图4 仿生表面结构在不同的两相流流速下的减阻率(横向仿真模型)

3 横向模型中仿生表面结构的减阻机理分析

在横向结构的数值分析模拟中,当两相流流速达到6 m/s时,3种仿生表面结构都达到了稳定的减阻率,故本文以两相流流速为6 m/s时的情况为例,分析3种仿生表面结构的减阻机理。表2为两相流流速为6 m/s时光滑表面结构和仿生表面结构所受阻力对比。

表2 横向模拟中光滑表面结构和仿生表面结构所受阻力对比

结构名称	压差阻力	黏性阻力	总阻力
光滑表面结构	0.940 0	2.278 8	3.218 8
圆弧棱纹表面结构	1.205 3	1.903 3	3.108 9
梯形棱纹表面结构	1.406 6	1.724 1	3.130 7
棱纹结节表面结构	1.055 6	2.007 5	3.063 1

在黏性阻力方面,3种仿生结构以梯形棱纹结构的黏性阻力最小,圆弧棱纹表面结构次之,棱纹结节表面结构因其表面较为复杂,所以所受黏性阻力与前两者相比较大。在压差阻力方面,3种仿生结构的压差阻力较光滑结构都是增加的,其中又以梯形棱纹表面结构的压差阻力最大,圆弧棱纹表面结构次之,棱纹结节表面结构的压差阻力最小。对比来看,仿生表面结构所受阻力中黏性阻力占据主体地位且3种仿生表面结构都能够降低表面所受黏性阻力,但都伴随着压差阻力的增大,这一点以梯形棱纹表面结构最为明显,表现出较大的压差阻力值,而棱纹结节表面结构则表现出最小的压差阻力。总体来看,3种仿生结构的压差阻力的增量明显小于黏性阻力的减量,所以3种仿生结构都可以表现出减阻的作用,尤其是以棱纹结节表面结构的减阻效果最为明显。

仿生表面结构会因为流体的黏性作用而受到大小不同的流体剪切应力作用,图5和图6分别为各结构受到的表面剪切应力和表面湍流动能云图,6(a)为光滑表面结构、6(b)为圆弧棱纹表面结构、6(c)为梯形棱纹表面结构、6(d)为棱纹结节表面结构。图7和图8分别为各结构表面剪切应力和表面湍流动能,从这些图中可以看出光滑表面结构受到的表面剪切应力和表面湍流动能呈现平缓下降趋势,3种仿生表面结构的表面剪切应力和表面湍流动能则与其形状相似,均在仿生表面结构的棱纹顶部出现最大值,最大值略高于光滑表面结构,其余部位的剪切应力和湍流动能均小于光滑表面结构。总体对比来看,仿生结构表面的平均剪切应力与湍流动能均低于光滑结构表面,因此也说明3种仿生结构表面所受到的黏性阻力要小于光滑结构,符合之前得出的3种仿生表面结构能有效减小黏性阻力的结论。

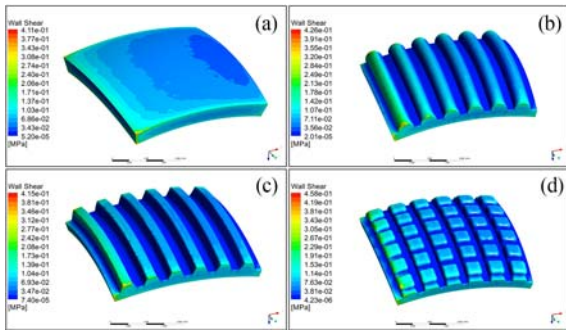


图 5 仿生表面结构受到的剪切应力云图

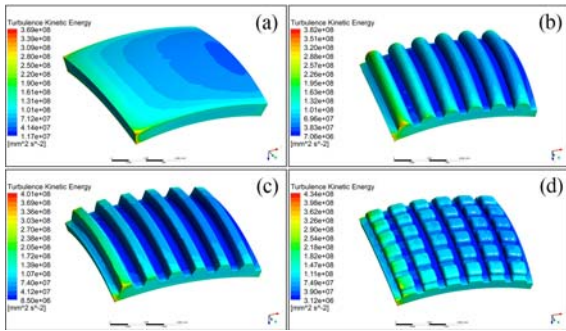


图 6 仿生表面结构受到的湍流动能云图

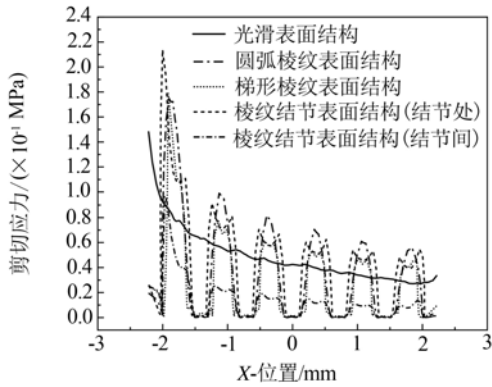


图 7 仿生表面结构受到的剪切应力

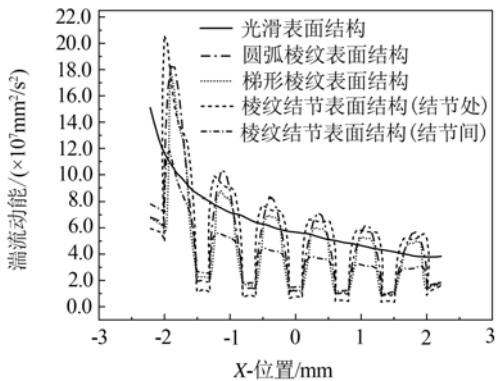


图 8 仿生表面结构受到的湍流动能

4 结论

(1)在横向模型中,0.5~1 m/s 速度区间内,以棱纹结节表面结构的减阻性能最佳,在 0.5 m/s 的两相流速时减阻率达到最高,为 6.1%;1~3 m/s 速度区间内,圆弧棱纹表面结构的减阻性能最佳;速度大于 3 m/s 时,棱纹结节结构减阻性能最佳,减阻率稳定在 4.8%。

(2)本文分析了仿生表面结构在两相流中压差阻力和黏性阻力的影响,其中黏性阻力占据总阻力的主体部分,3 种仿生结构的压差阻力的增量明显小于黏性阻力的减量,所以 3 种仿生结构都可以表现出明显的减阻特性。

(3)本文从仿生表面结构受到的表面剪切应力和湍流动能两个方面,分析了横向减阻机理,仿生表面结构可以减小表面受到的剪切应力和湍流动能,继而减小结构表面受到的黏性阻力,达到减阻效果。

参考文献:

[1] TIAN G Z, ZHANG Y S, FENG X M, et al. Focus on bioinspired textured surfaces toward fluid drag reduction: recent progresses and challenges [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 24(1): 1-25.

[2] YAN M H, GU Y Q, MA L B, et al. Slime-groove drag reduction characteristics and mechanism of marine biomimetic surface[J/OL]. (2022-03-14) [2023-02-15]. <https://www.hindawi.com/journals/abb/2022/44853651>.

[3] 王树立, 史小军, 赵书华, 等. 沟槽面在湍流减阻中的技术研究及应用进展 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2008(1): 146-150.

[4] KUMAR S, PANDEY K M, SHARMA K K, et al. Advances in drag-reduction methods related with boundary layer control—a review[J]. *Materials Today*, 2021, 45: 6694-6701.

[5] WALSH M J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets[J/OL]. (2012-08-17) [2023-02-15]. <https://arc.aiaa.org/doi/ads/10.2514/6.1982-169>.

[6] WALSH M J. Riblets as a viscous drag reduction technique[J]. *AIAA Journal*, 1983, 21(4): 485-486.

[7] WALSH M J. Effect of detailed surface geometry on riblet drag reduction performance[J]. *Journal of Aircraft*, 1990, 27(6): 572-573.

[8] 丛茜, 封云, 任露泉, 等. 仿生非光滑沟槽形状对减阻效果的影响[J]. *水动力学研究与进展(A 辑)*, 2006, (2): 232-238.

[9] WU L, WANG H, SONG Y, et al. Drag reduction

mechanism of paramisgurnus dabryanus loach with self-lubricating and flexible micro-morphology[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-8.

[10] 卢愿. 横向沟槽流场数值模拟及减阻机理分析[D]. 厦门: 厦门大学, 2020.

[11] WU B G, ZHANG R Z, HOU P F, et al. Bionic non-smooth drag reduction mathematical model verification [J/OL]. (2021-11-20) [2023-02-15]. <https://www.hindawi.com/journals/abb/2021/5113453>.

Design and Analysis of Drag Reduction Structures for Clamshells with Bionic Surface

LIN Sheng, SONG Shiqi

(School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: To reduce drag, bionic surface structures can be applied to the surface of underwater vehicles, the inner wall of pipeline transportation, and the surface of ships. Bivalves' surface morphological features have excellent drag reduction properties. A bionic clam surface morphology drag reduction method is proposed, and a bionic surface drag reduction structure is designed based on microscopic images of its shell surface morphology characteristics, inspired by the excellent motility of natural clams in a muddy environment. Using the multi-phase flow Mixture model in the CFD numerical simulation method, the three designed bionic surface structures are simulated laterally and compared to the smooth surface structure for drag reduction. The results show that the three bionic surface structures have different drag reduction characteristics in the transverse simulation at different two-phase flow velocities, with the ribbed nodular surface structure having the best drag reduction performance. The designed bionic surface structure serves as a model for the subsequent investigation of the drag reduction structure in solid-liquid two-phase flow.

Keywords: bionic surface drag reduction structure; multiphase flow; numerical simulation; Mixture model

下期待发表文章摘要预报

考虑焊接质量的铝合金车体关切焊缝的疲劳寿命预测

谢素明¹, 赵洪帝¹, 陈胜¹, 程亚军²

(1. 大连交通大学 机车车辆工程学院, 辽宁 大连 116028; 2. 中车长春轨道客车股份有限公司 工程研究中心, 吉林 长春 130062)

摘要: 利用裂纹扩展分析方法和质量分类法研究铝合金车体含缺欠焊接结构的疲劳寿命问题。首先, 研究 IIW:2015 的基于 Paris 定律的裂纹扩展分析的理论基础和 BS 7910:2019 的基于考虑焊接缺欠质量的 S-N 曲线的质量分类法的算法原理; 然后, 归纳总结了这两种方法进行考虑焊接质量的焊接结构疲劳寿命评估流程; 接着, 在疲劳载荷作用下, 基于 BS EN 1999-1-3:2007 的名义应力法对某动车组铝合金车体进行疲劳分析, 确定车体疲劳关切焊缝部位; 最后分别利用裂纹扩展分析方法和质量分类法对车体关切焊缝侧门下角进行考虑初始裂纹的疲劳寿命评估。结果表明: 基于质量分类法的剩余寿命为 1.4×10^6 次, 基于裂纹扩展分析法的剩余寿命为 2.64×10^6 次。