

非光滑结构对水下航行器压差阻力的影响

徐佳¹, 方建军², 范卫东³, 王起⁴, 顾怡红⁵

¹浙江领盛科技有限公司, 浙江 金华

²浙江格普光能科技有限公司, 浙江 金华

³浙江宏鑫电力工程有限公司, 浙江 金华

⁴金华集群科技有限公司, 浙江 金华

⁵衢州职业技术学院机电工程学院, 浙江 衢州

收稿日期: 2024年5月23日; 录用日期: 2024年6月3日; 发布日期: 2024年6月17日

摘要

覆盖非光滑表面是降低水下航行器阻力最直接、最有效的办法, 本文对水下航行器的压差阻力进行了研究, 将吸附性非光滑结构和导流性非光滑结构分别安装在航行器的流固分离处, 采用流体动力学仿真的方法研究两类非光滑结构对流体尾部流场的影响, 研究表明, 在航行器流固分离位置覆盖吸附性非光滑结构能够延迟流固分离, 有效降低航行器压差阻力。

关键词

水下航行器, 非光滑, CFD, 减阻

The Research of the Drag Reduction of Non-Smooth Underwater Vehicle

Jia Xu¹, Jianjun Fang², Weidong Fan³, Qi Wang⁴, Yihong Gu⁵

¹Zhejiang Leadsheng Technology Co., Ltd., Jinhua Zhejiang

²Zhejiang Gepu Light Energy Technology Co., Ltd., Jinhua Zhejiang

³Zhejiang Hongxin Power Engineering Co., Ltd., Jinhua Zhejiang

⁴Jinhua Cluster Technology Co., Ltd., Jinhua Zhejiang

⁵School of Mechanical Engineering, Quzhou College and Technology, Quzhou Zhejiang

Received: May 23rd, 2024; accepted: Jun. 3rd, 2024; published: Jun. 17th, 2024

Abstract

Covered the surface of underwater vehicle with non-smooth surface is the most directly and most

文章引用: 徐佳, 方建军, 范卫东, 王起, 顾怡红. 非光滑结构对水下航行器压差阻力的影响[J]. 流体动力学, 2024, 12(1): 1-9. DOI: 10.12677/ijfd.2024.121001

effective method, the writer studied the pressure drag of underwater vehicle, put the diversion structure and adsorption structure on the fluid-solid separation phase, use the CFD method to study the effect of non-smooth surface to the tail of underwater vehicle. Results show that put the adsorption structure on the fluid-solid separation phase can reduce the pressure drag of underwater vehicle.

Keywords

Underwater, Non-Smooth, CFD, Drag Reduction

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

仿生学发现自然界中的生物普遍存在着非光滑表面形态，这些非光滑结构有很好的减阻特性。非光滑表面减阻不会改变绕流体的空间形态，也没有对流体产生污染，该方法清洁环保。

任露泉等人采用矩形布置方式在旋成体模型上布置非光滑结构，将凸型、凹型和棱型三种非光滑模型布置在旋成体模型尾部，并与表面光滑模型开展了对比试验，模拟结果显示，通过非光滑结构在尾部部位的应用，压差阻力得到了明显的改善，尤其是棱型的非光滑结构，使得压差阻力减少了 24.8%，总阻力减少了 12.03%。

ZHANG De-yuan 等提取了鲨鱼皮式的非光滑表面，并引入了一个角度参数，对其进行了数值仿真，发现非光滑单元顶部的速度非常大，在沟槽的速度非常小，从而减小了摩擦阻力；具有鲨鱼皮结构的表面，其湍流强度比光滑表面更大；该结构能够降低涡流的扩散速度。实验数据也反映了鲨鱼皮结构的非光滑表面具有减阻效应[1] [2] [3]。

大量的科学研究已经证实了生物的非光滑结构具有优异的减阻、减粘、抗磨损等特性。非光滑结构在水介质中的应用也比较广泛，现阶段研究比较多的是沟槽型非光滑表面、自适应非光滑表面，研究成果主要有人造海豚皮、人造鲨鱼皮，且已经走向了实际应用[4] [5]。

为了进一步研究非光滑水下航行器减阻问题，本文将水下航行器压差阻力作为研究对象，将吸附性和导流性非光滑结构分别布置在水下航行器流固分离位置，通过 CFD 数值模拟，比较两类非光滑表面对压差阻力的影响，研究两类非光滑表面对航行器流场特性的影响，为非光滑形态减阻理论研究和工程应用提供参考[6] [7]。

2. 数值模拟

2.1. 建立三维模型

水下航行器模型如图 1 所示，图 1 中 A 区域为流体与水下航行器分离的主要区域。

为了分析流体与水下航行器分离后的流场特性，同时为了降低研究的复杂度，减少计算时间，本文将水下航行器流固分离位置模型简化成下图 2 所示，本文将以(a)、(b)、(c)三种不同表面的模型为研究对象，分析吸附性结构和导流性结构水下航行器压差阻力的影响[8]。

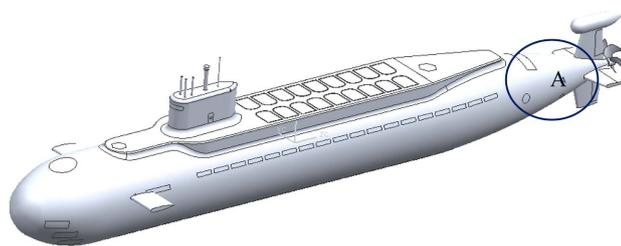


Figure 1. A 3D model of the submarine
图 1. 潜艇三维模型

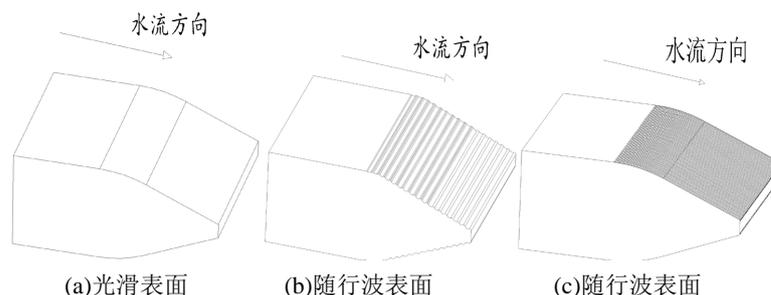


Figure 2. Schematic diagram of the abstract model
图 2. 抽象模型示意图

2.2. 选择湍流模型

本文选择剪切压力传输(SST) $k-\omega$ 模型作为流体动力学仿真的计算模型, 将湍流剪应力的作用纳入 SST 模型, 修正了湍流粘性公式, 综合了高雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型与低雷诺数 $k-\omega$ 模型的优点, 利用混合函数使对近壁面到充分发展区域的过度更加完美。

3. 结果分析与讨论

3.1. 水下航行器阻力产生机理

水下航行器的阻力是指水下航行器在航行过程中受到的与航行方向平行的阻力, 它的方向与航行方向相反。在实际流动中, 水下航行器的雷诺数很大, 一般都是 $Re > 10^6$, 因此粘性效应在物体邻近的边界层内会比较明显。

当水下航行器水平向前航行时, 航行器前方的水流将从周围绕过, 由于流体粘性, 航行器表面流体速度会有不同程度的下降。以航行器中轴线上流来的水流为例, 该股水流撞在航行器正前方中轴线上时, 立即四散开来, 水流流向转过 90° , 然后沿着航行器表面向后流动, 中轴线上这一点的速度为零, 可称该点为水流驻点, 根据伯努利方程, 速度越低, 动能越大, 静压越高, 所以该点的压强最大。该点周边的水流速度虽然不是零, 但离该点距离越近的水流, 速度也越低。随着与该点空间距离的不断增大, 水流的绝对速度也在不断增加, 直到和周边静水速度一致。所以航行器前方水流速度较低, 在航行器前段会形成一个高压区。当水流发生分离以后, 它的流动方向就不再沿着航行器表面, 其流动速度也就不再持续下降, 当水流流过航行器尾部时, 水流的速度要大于在航行器前端的速度, 所以就会形成一个低压区。这样, 航行器前端的压力大于航行器后端的压力, 因而形成了压力差, 引起了前后压差阻力[9] [10]。

3.2. 流固分离位置阻力对比分析

为了研究不同雷诺数下两类非光滑结构对流场阻力的影响[11], 本文分别对 $0.5\sim 10$ m/s 速度下, 光滑

表面、三角形沟槽表面、随行波表面布置在流固分离位置时进行了流体动力学仿真[12][13]，表1即为三种情况下压差阻力对比数据。表中差值是指三角形沟槽表面、随行波表面和光滑表面的阻力差值，减阻率是指该类非光滑结构的减阻率[14]，根据以下公式(1)计算：

$$r = \frac{F_{\text{non-smooth}} - F_{\text{smooth}}}{F_{\text{smooth}}} \times 100\% \quad (1)$$

式1中 $F_{\text{non-smooth}}$ 为非光滑表面的阻力， F_{smooth} 为光滑表面的阻力， r 为减阻率。

Table 1. Comparison of pressure resistance at fluid-solid separation position

表 1. 流固分离位置压差阻力对比

速度 m/s	光滑表面 压差阻力/N	三角形沟槽表面			随行波表面		
		压差阻力(N)	差值(N)	减阻率	压差阻力(N)	差值(N)	减阻率
10	3.1143818	3.1024134	0.011968	0.38%	2.964246	0.150136	4.82%
9	2.5275261	2.5104475	0.017079	0.68%	2.399567	0.127959	5.06%
8	1.9992142	1.9868345	0.01238	0.62%	1.899906	0.099308	4.97%
7	1.5329963	1.5226264	0.01037	0.68%	1.457601	0.075396	4.92%
6	1.1275327	1.1167319	0.010801	0.96%	1.07183	0.055702	4.94%
5	0.78429753	0.77889109	0.005406	0.69%	0.745423	0.038875	4.96%
4	0.50261271	0.49862222	0.00399	0.79%	0.477905	0.024708	4.92%
3	0.28305966	0.28117364	0.001886	0.67%	0.269451	0.013608	4.81%
2	0.12609388	0.1252203	0.000874	0.69%	0.119905	0.006189	4.91%
1	0.03162	0.031227509	0.000392	1.24%	0.030024	0.001596	5.05%
0.5	0.00797997	0.007948977	3.1E-05	0.39%	0.00756	0.00042	5.26%

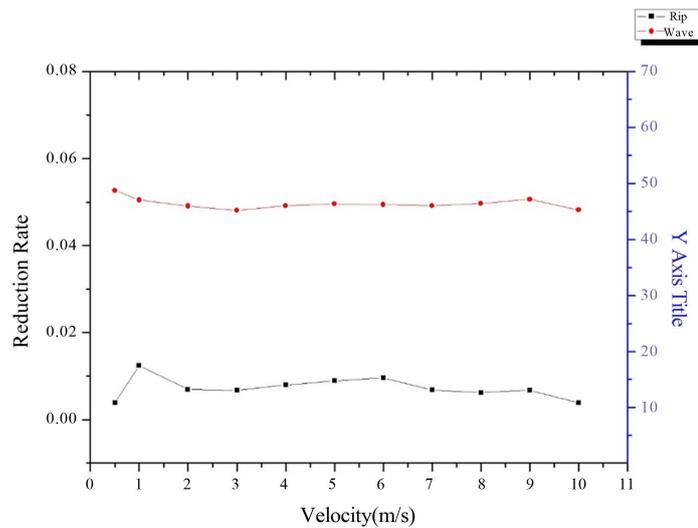


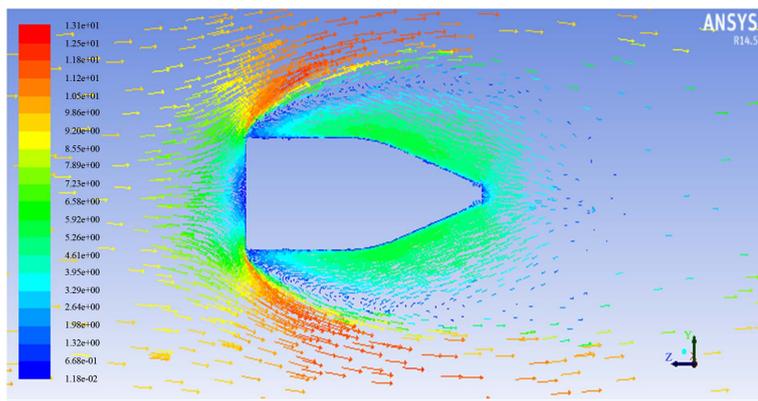
Figure 3. The differential pressure resistance plot of the fluid and solid separation position

图 3. 流固分离位置压差阻力曲线图

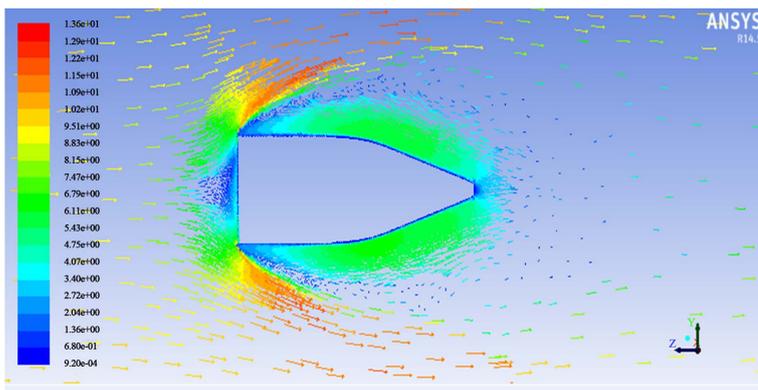
为了更直观的对比两种非光滑表面的减阻效果，本文将以上两种非光滑结构的减阻率以折线图的形式

式呈现(图 3), 横坐标为水流速度, 纵坐标为减阻率, 从图中可以看出, 随行波表面对压差阻力的影响要明显优于三角形沟槽表面。

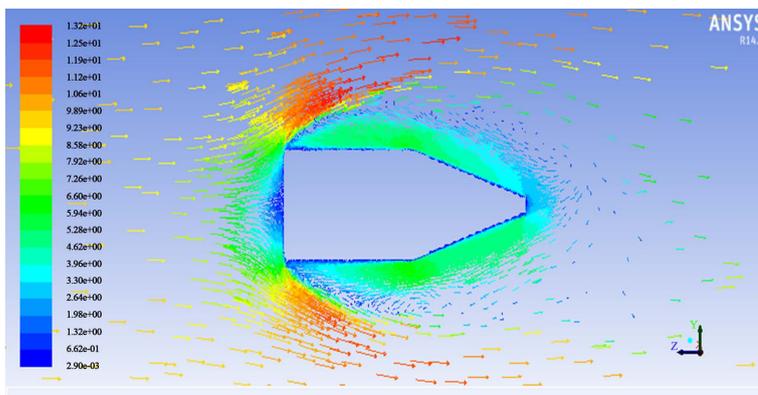
3.3. 流场速度及流线分析



(a)光滑面流场流线分布



(b)沟槽面流场流线分布



(c)随行波面流场流线分布

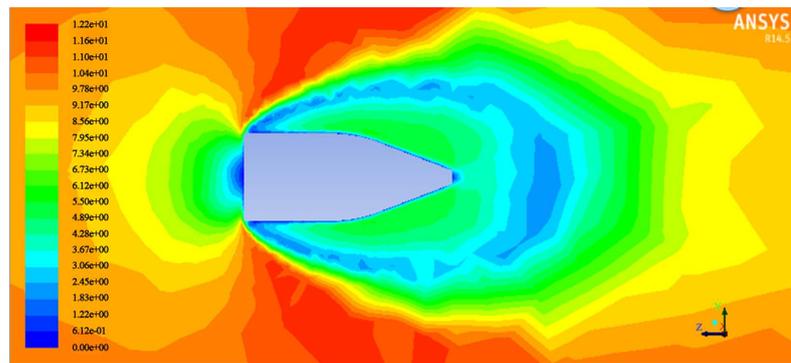
Figure 4. Flow line diagram of the flow field

图 4. 流场流线图

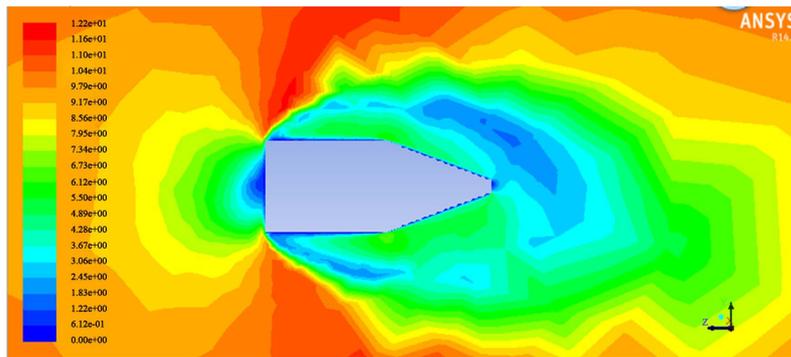
为了分析光滑表面和非光滑表面流固分离位置的流场分布特性, 本文取抽象模型的中轴面为截取平面, 得到光滑表面、随行波表面和沟槽表面的流场流线特性分布图, 流场流线分布图能较直观的呈现流

体流过绕流体时流场的分布以及发散程度。如图 4 所示，图(a)中 A 区域为流体流过光滑表面时流体发散程度示意图，图(b)中 B 区域为流体流过随行波面时的发散程度示意图，从图中可以明显看出随行波表面和沟槽表面的流场发散程度要低于光滑表面，其中随行波表面的流场发散程度最小，也就是说随行波表面对发散的流场有一定的吸附作用。

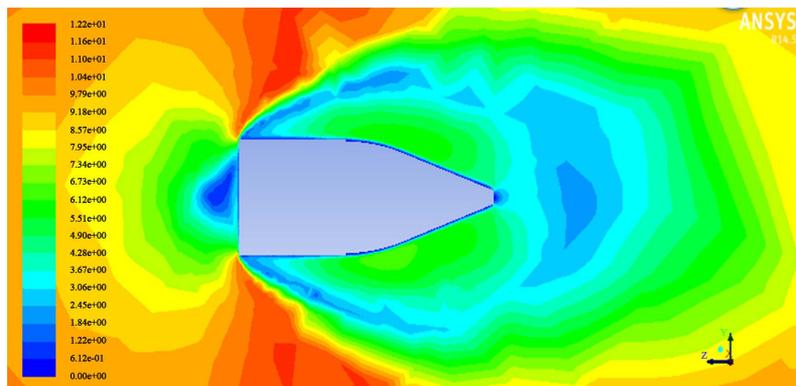
图 5 为三种不同表面下的速度分布云图，图中蓝色区域为速度较低的区域，从图中我们可以明显看出，光滑表面和沟槽表面尾部的蓝色区域距离航行器较远，而附着随行波表面的尾部蓝色区域距离航行器较近，根据伯努利定理，速度越低，动能越低，静压越高，从而也就印证了随行波表面能降低压差阻力的实验结果。



(a)光滑表面速度分布



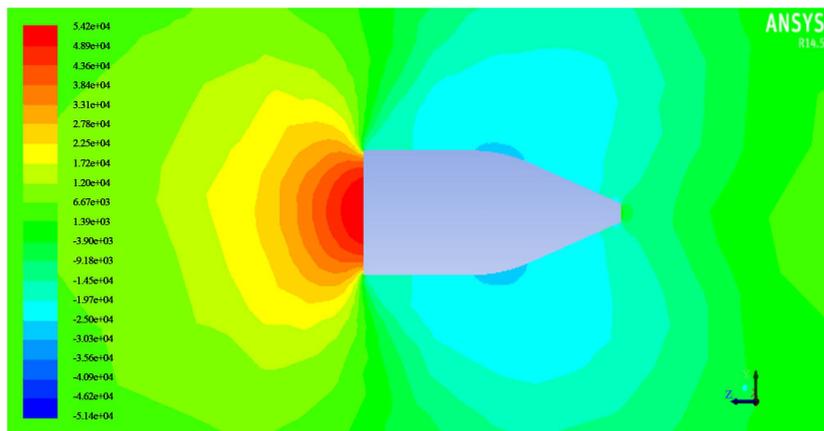
(b)随行波表面速度分布



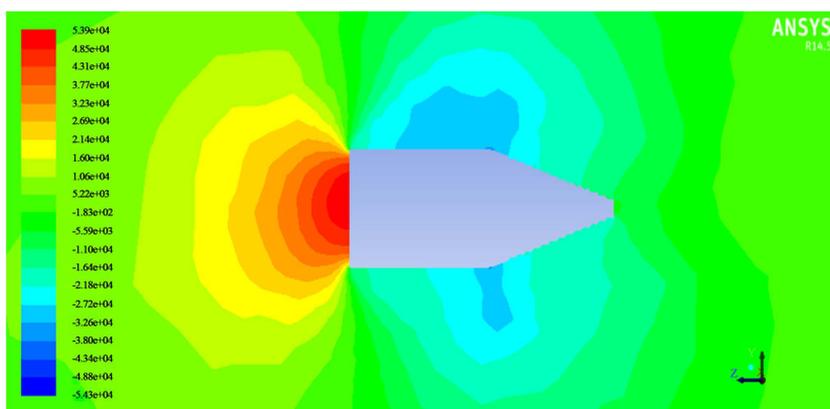
(c)沟槽表面速度分布

Figure 5. Flow line diagram of the flow field
图 5. 流场流线图

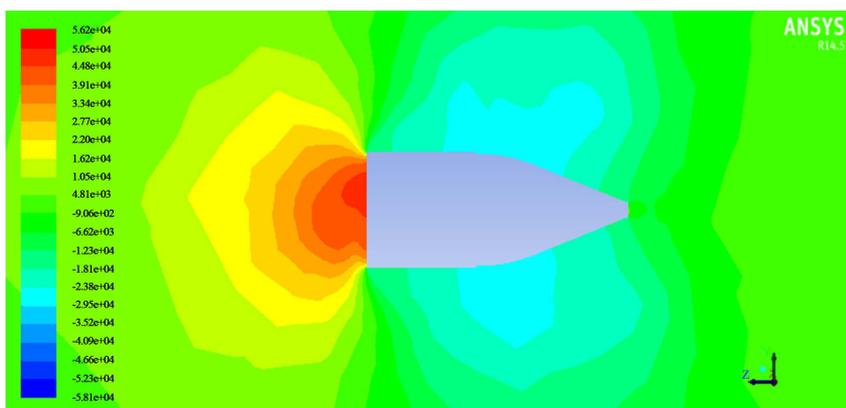
3.4. 流场压力分析



(a)光滑面压强云图



(b)随行波压强云图



(c)沟槽面压强云图

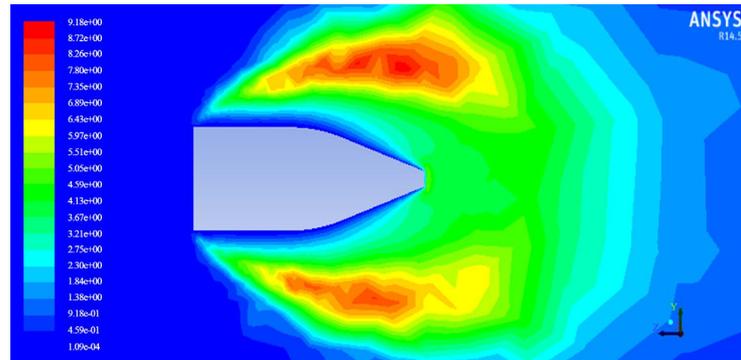
Figure 6. Surface pressure cloud diagram

图 6. 表面压强云图

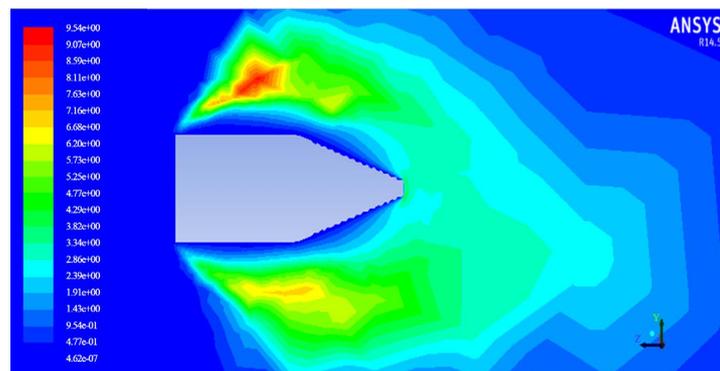
流场压力分布是指流体流过实体时在实体周围的压力分布，流场压力分布图能够较直观的呈现实体周围的压力变化情况，从而更加易于分析实体前后压差变化，如图 6 所示，图(a)为光滑表面的压力分布云图，图(b)为随行波表面的压力分布云图，从图中可以清晰看出，光滑表面和沟槽表面的压力分布相似，

也就是说，沟槽表面对尾部流体的吸附作用有限，对流场压力结构的改变较小；而随行波表面的压力结构有了明显的变化，如图(b)所示，同一位置随行波尾部的压力明显要高一些，这样就导致前后压差变小，从而减小了水下航行器的压差阻力。结合流体动力学原理、流固分离特性、表面结构对流体的引导作用及表面结构对湍流的影响等，综合分析，随行波表面之所以能够明显改变压力结构并减小压差阻力，可能是由于其特定的表面设计能够有效地引导流体流动，延缓流固分离，减少湍流和涡流的形成，从而改善了流体动力学特性，降低了航行器的压差阻力。

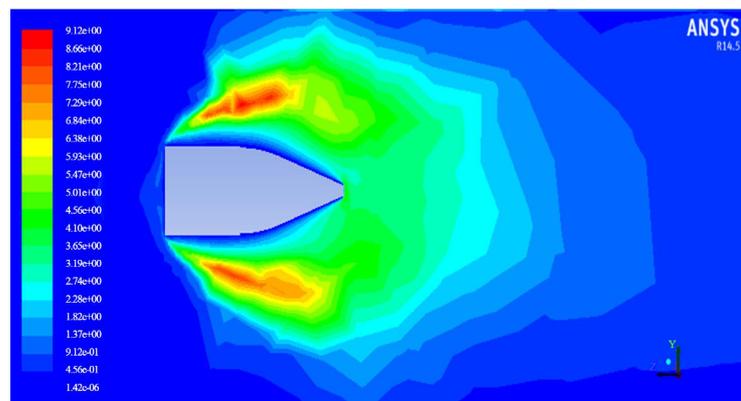
3.5. 湍动能分析



(a)光滑表面湍动能云图



(b)随行波表面湍动能云图



(c)沟槽面湍动能云图

Figure 7. The turbulent kinetic energy cloud map
图 7. 湍动能云图

湍流动能是衡量湍流发展或衰退的重要指标。而湍流的发展容易造成能量损失，所以湍动能云图(图7)能反映流体流过绕流体表面时的能量分布状况，能量损失越多，绕流物体受到的阻力越大，反之，绕流物体受到的阻力越小。

光滑表面、随行波表面和沟槽表面的湍动能云图如图7所示，从图中我们可以看出，附着随行波表面的水下航行器尾部湍动能剧烈程度最小，因此随行波表面能量损失最少，所受到的阻力也最小，这和前几章节的分析结果一致。

4. 结论

研究表明，压差阻力在流固分离位置是航行器的主要阻力；通过分布吸附性非光滑结构，能有效延缓流固分离，并呈现出流体再吸附的趋向性，较大程度提升了尾部压力，改善了前后压力差，实现了减阻效应。

参考文献

- [1] 张效慈. 潜器的随行波减阻降噪贴敷层[J]. 船舶力学, 2021, 5(2): 1-3.
- [2] Zhang, D., Luo, Y., Li, X. and Chen, H. (2011) Numerical Simulation and Experimental Study of Drag-Reducing Surface of a Real Shark Skin. *Journal of Hydrodynamics*, **23**, 204-211. [https://doi.org/10.1016/s1001-6058\(10\)60105-9](https://doi.org/10.1016/s1001-6058(10)60105-9)
- [3] Bechert, D.W., Bruse, M. and Hage, W. (2000) Experiments with Three-Dimensional Riblets as an Idealized Model of Shark Skin. *Experiments in Fluids*, **28**, 403-412. <https://doi.org/10.1007/s003480050400>
- [4] 张成春. 旋成体仿生非光滑表面流场控制流场控制减阻研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [5] 侯昌辉. 减阻力学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [6] Pal, S., Merkle, C.L. and Deutsch, S. (1988) Bubble Characteristics and Trajectories in a Microbubble Boundary Layer. *The Physics of Fluids*, **31**, 744-751. <https://doi.org/10.1063/1.866810>
- [7] Madavan, N.K., Deutsch, S. and Merkle, C.L. (1984) Reduction of Turbulent Skin Friction by Microbubbles. *The Physics of Fluids*, **27**, 356-363. <https://doi.org/10.1063/1.864620>
- [8] 李天然. 仿生减阻表面的数值研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [9] Leitzke, J.P., Della Mea, A., Faller, L.M., *et al.* (2018) Wireless Differential Pressure Measurement for Aircraft. *Measurement*, **122**, 459-465.
- [10] 陈瑞芳, 江志东, 吴嘉. 高分子减阻流场湍流结构实验研究[J]. 大连理工大学学报, 1998(5): 33-36.
- [11] 沙辉. 随行波表面水下减阻降噪的理论及实验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2022.
- [12] 王国华, 姜楠. 周期性扰动对平板湍流边界层统计性质的影响[J]. 航空动力学报, 2017, 22(9): 1505-1511.
- [13] 陈强, 唐登斌, 曹起鹏. 湍流大涡破碎装置的减阻研究[J]. 弹道学报, 2021, 13(4): 28-33.
- [14] Bushnell, D.M., Hefner, J.N. and Ash, R.L. (2017) Effect of Compliant Wall Motion on Turbulent Boundary Layers. *Special Course on Concepts for Drag Reduction*, **9**, 152-160.