横向间断肋条湍流减阻大涡模拟分析

王卫强[1]，王博[1]，陈一鸣[1]，康凯[1,2]，王静[3]，范开锋[1]

（1.辽宁石油化工大学，辽宁 抚顺 113001；
2.中国科学院工程热物理研究所，北京 100190； 3.上海理工大学，上海 200093）

摘　要：目的 通过改变肋条结构，提高传统肋条的减阻效果。**方法** 基于 Walsh 肋条减阻实验，利用 LES 理论的 WALE 模型以及 PISO 算法，对传统连续肋条及新型间断肋条进行了仿真模拟计算，其中梯度求解基于 Green-Gauss 节点格式，压力求解采用二阶格式，动量方程求解采用中心差分格式，时间离散采用二阶隐式格式。通过对比分析两种不同肋条结构流场湍流流动的细节及肋条的减阻率，探究新型肋条结构的减阻作用和机理。**结果** LES 方法准确地再现了 Wlash 实验的流场细节及计算结果，相同计算条件下，传统连续肋条表面摩擦减阻率和黏性减阻率均为 4.641%，而新型间断肋条表面摩擦减阻与黏性减阻率高达 9.317%和 6.306%。**结论** 新型间断肋条相较于传统连续肋条的表面摩擦减阻率和黏性减阻率皆得到了较大的提升。新型间断肋条具有较高的减阻率是由于横向肋条阻断作用使得大涡旋受到抑制而分裂成较小的涡旋，降低了近壁面流体的流速，减弱了湍流扰动对流体的影响，使低速流体更加稳定的发展。

关键词：肋条减阻；沟槽；连续肋条；间断肋条；大涡模拟；亚格子尺度模型

中图分类号：TH117　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-3660(2020)11-0226-10

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.026

Large Eddy Simulation Analysis of Turbulent Drag Reduction for Transverse Discontinuous Ribs

***WANG Wei-qiang*[1], *WANG Bo*[1], *CHEN Yi-ming*[1], *KANG Kai*[1,2], *WANG Jing*[3], *FAN Kai-feng*[1]**

(1.Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China; 2.Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the drag reduction effect of traditional ribs by changing the rib structure. Based on the Walsh rib drag reduction experiment, the WALE model of LES theory and the PISO algorithm were used to simulate and calculate the traditional continuous ribs and new discontinuous ribs. The gradient solution was based on the Green-Gauss node format, the pressure solution adopted a second-order format, the momentum equation was solved with a central difference format, and the time dispersion used a second-order implicit format. By comparing and analyzing the details of the turbulent flow in the flow field of two different rib structures and the drag reduction rate of the ribs, the drag reduction effect and mechanism of the new rib structure were explored. LES method accurately reproduced the flow field details and calculation

收稿日期：2019-10-04；**修订日期：**2020-03-24

Received：2019-10-04；**Revised：**2020-03-24

基金项目：辽宁省公益研究基金（20170047）；辽宁省教育厅基础科研项目（31006858）

Fund：Supported by the Liaoning Provincial Public Welfare Research Fund (20170047); Liaoning Provincial Department of Education Basic Research Project (31006858)

作者简介：王卫强（1976—），男，博士，教授，主要研究方向为表面减阻。邮箱：bobaocomeon@163.com

Biography：WANG Wei-qiang (1976—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface drag reduction. E-mail: bobaocomeon@163.com

引文格式：王卫强，王博，陈一鸣，等. 横向间断肋条湍流减阻大涡模拟分析[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 226-235.

WANG Wei-qiang, WANG Bo, CHEN Yi-ming, et al. Large eddy simulation analysis of turbulent drag reduction for transverse discontinuous ribs[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 226-235.

results of the Wlash experiment. Under the same calculation conditions, the surface friction reduction rate and viscosity reduction rate of traditional continuous ribs were both 4.641%, while the frictional drag reduction and viscous drag reduction rate of new discontinuous ribs were as high as 9.317% and 6.306%. Compared with the traditional continuous ribs, the new discontinuous ribs have greatly improved the surface friction reduction rate and the viscosity reduction rate. The new discontinuous ribs have a higher drag reduction rate due to the lateral rib blocking effect, which causes the large vortex to be suppressed and split into smaller vortices, thus reducing the flow velocity of the near-wall fluid and weakening the influence of turbulent disturbance on the fluid to make low-speed fluids develop more stably.

KEY WORDS: rib drag reduction; groove; discontinuous rib; large eddy simulation; sub-grid scale model

随着世界经济的高速发展，能源消耗不断上升，世界各国在研发新能源的同时也越来越重视能源的利用率。国内外学者们通过各种研究试图有效地提高能源的利用率，克拉默在 1965 年通过观察鲨鱼的表皮结构，提出了类似鲨鱼皮的肋条结构并对其进行了相关研究，得到了该结构具有减阻效果的结论[1-2]。1967 年，乌克兰的摩科洛夫在研究涡屏蔽过程中，明确了条纹沟槽表面降低水动力阻力的机理，并正式提出了“riblet”这一科学词汇[3]。20 世纪 80 年代，NASA 研究中心 Walsh 等人[4-5]首先针对肋条减阻进行了实验研究，并且得出 V 型肋条具有最好的减阻效果（减阻率高达 25%）的结论，这一成果为后续学者的研究工作指明了方向。自此，肋条减阻技术逐渐成为减阻研究的焦点。

目前，国内外对于肋条的减阻机理以及肋条形状对减阻效果的影响已取得了一定的研究成果。对于肋条减阻机理的揭示，S. J. Lee 等[6]、马付良等[7]和 G. R. Hough 等[8]从流体力学角度对鲨鱼皮盾鳞结构的减阻机理进行了解释；Klumpp 等[9]采用 LES 方法验证了三角肋条在零压梯度下具有延迟转捩的作用，并解释了涡旋的发展过程以及形态变化随边界层波动的变化规律；K. S. Cloi[10]以及 Tang[11]等对模型近壁面流向肋条的湍流边界层进行了流动可视化实验，对湍流流动和流场特性进行探究。对于肋条形状对减阻效果的影响，B. E. Launder 对[12]以刀刃形、V 形以及 U 形的肋条结构进行了数值模拟研究，结果表明 V 形肋条的减阻效果最好；Bechert 等人[13]通过测试多种形状肋条的表面减阻效能，也得到了 V 形肋条减阻效果最好的结论；吴宇峰等[14]通过分析前人的研究成果，得出 V 型肋条的夹角为 120°时，减阻效果最好；王晋军等人[15]对 4 种不同尺寸的沟槽平板进行了实验，也说明了沟槽平板具有减阻特性，局部阻力减少高达 13%～26%；P. Luchini 等[16]认为顺流向三角形肋条表面具有较好的减阻效果，而垂直流向三角形肋条表面的减阻效果较差；Bechert 等[17]采用大尺寸肋条结构在油槽中进行了实验研究，结果表明减阻效果较传统尺寸肋条有很大的提高，该结论为系统优化理论奠定了一定的基础；Viswanath[18]通过实验证明了通过对肋条结构的优化设计，机翼在低速入射风洞中可以实现减阻 5%～8%。

通过对国内外肋条减阻研究的总结可知，其主要的研究内容为既定肋条结构下的分析以及不同肋条结构之间的对比研究，并未从根本上解决减阻效应的问题，针对肋条结构优化方面的研究鲜有报道。基于此，以 Walsh 连续三角肋条实验作为对照，通过对已有连续肋条进行间断处理并运用 LES 方法对优化前后的肋条减阻效果进行对比分析，明确新型肋条结构的优化效果以及肋条减阻的机理。

1　Wlash 实验

1.1　实验平台

Walsh[19]所提出的阻力测量系统表面几何尺寸为 27.9 cm×91.4 cm，具体示意见图 1。为了最大限度地降低空隙存在对阻力测量所带来的影响，在测试区域周围建立一个封闭体，以便平衡测试区域内外侧的静压强。该阻力系统经多次重复试验，结果表明未开空隙前与开设空隙后，阻力差为 1%，即该阻力测量系统通过精度检验，可以用于实验测量。

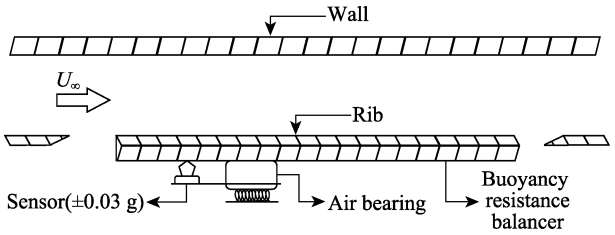


图 1　阻力测量系统

Fig.1 Resistance measurement system

1.2　实验结果

肋条的尺寸由肋条高度以及肋条间距确定，通常用无量纲化表示，计算公式[20]如下：

$$h^+ = \frac{hu_\infty}{\nu}\sqrt{c_f/2} \tag{1}$$

$$s^+ = \frac{su_\infty}{\nu}\sqrt{c_f/2} \tag{2}$$

式中：c_f为表面摩擦力，N；s 为相邻肋条间距，mm；h 为肋条高度，mm；u_∞为充分发展的流体流速，

m/s；v 为流体黏度，Pa·s；h^+为肋条高度无量纲尺寸；s^+为肋条间距无量纲尺寸。

Wlash 通过对实验数据进行处理（表 1），得到不同肋条尺寸下的最大减阻率曲线[5]如图 2 所示。由表 1 及图 2 可知，肋条减阻率与肋条结构紧密相关，其中模型 13R 的减阻效果最佳，因此选取该模型下的肋条尺寸进行后续计算。

表 1　肋条尺寸
Tab.1 Rib size

Model number	h/mm	s/mm	Maximum drag reduction rate/%
39	0.406	0.25	0.00
38	0.25	0.13	0.00
9	0.51	0.25	2.00
13R	0.51	0.51	8.00
33	0.25	0.25	2.00
34	0.12	0.25	2.00
29	0.25	0.51	3.00
30	0.25	0.114	0.00

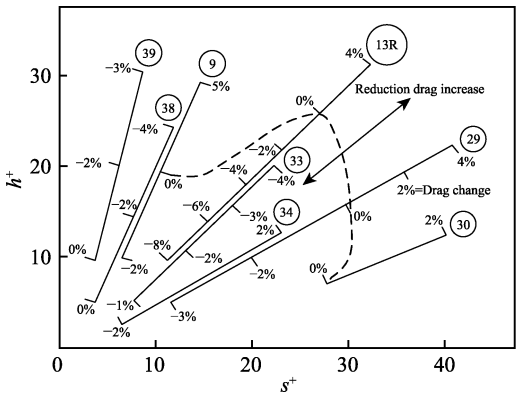


图 2　Wlash 实验减阻结果
Fig.2 Wlash experiment drag reduction results

2　数值模拟

2.1　模型的建立

采用笛卡尔坐标系进行建模，计算域在流向（x）、壁面法向（y）、展向（z）三个方向的尺寸分别为 0.0389、0.01、0.019 38 m。两种肋条计算域模型及尺寸见图 3，其中，左侧为连续直肋条，右侧为横向间断肋条。

计算域上壁面为光滑壁面，底部沿流向均匀布置对称三角肋条。为了保证计算的准确性和真实性，肋条尺寸以及肋条的布置形式与 Walsh 实验中的最佳减阻尺寸保持一致，即肋条横截面均为三角形，肋条间距 s 及肋条高度 h 均为 0.51 mm，V 形肋条的相邻夹角 α 约为 4.235°，横向间断肋条的宽度为 0.1 mm。

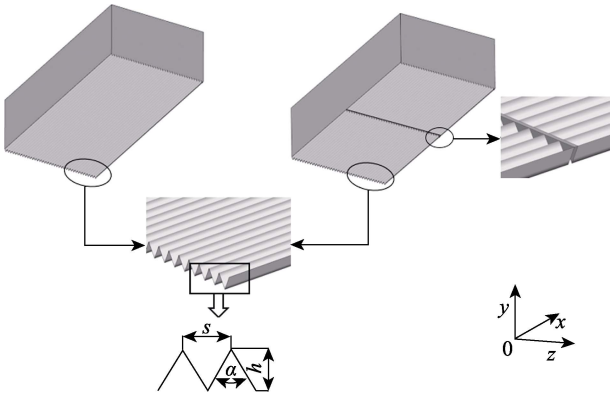
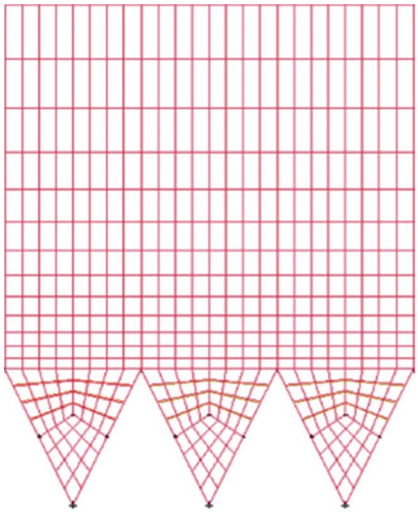


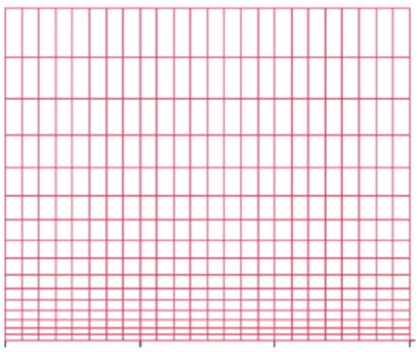
图 3　物理模型
Fig.3 Physical model

2.2　网格划分

采用六面体结构化网格对计算域进行划分。其中流向与展向均匀划分，法向非均匀划分，使用壁面函数进行网格加密处理。肋条沟槽采用 Y-block 划分，以提高网格质量。网格划分结果见图 4。选取壁面减阻率作为检验指标对网格进行无关性检验，结果见表 2。



a 肋条表面



b 平滑表面

图 4　网格分布
Fig.4 Grid distribution: (a) rib surface, (b) smooth surface

表 2　网格无关性检验结果
Tab.2 Grid independence test results

Examples	$N=N_x\times N_y\times N_z$	Number of grids /($\times10^4$)	Drag reduction rate/%
1	54×60×305	95.0608	–3.9
2	64×73×305	132.1488	–4.6
3	77×85×305	189.4528	–4.7

由表 2 可知，算例 2 与算例 3 的网格计算结果相差较小，可忽略不计，考虑计算资源情况，选取算例 2 网格的情况进行计算。

2.3　求解设置

槽道沿流向进出口设置周期边界，进口质量流率为 2.11×10^{-3} kg/s。上、下壁面均为无滑移固体壁面，侧面为周期边界。流动介质为空气，计算过程不考虑传热及换热问题。

采用相同的计算方法对两种肋条结构进行求解计算。利用 LES 方法的 WALE 模型，采用 PISO 算法，梯度求解基于 Green-Gauss 节点格式，压力求解采用二阶格式，动量方程求解采用中心差分格式，时间离散采用二阶隐式格式，时间步长均采用 2×10^{-5} s，计算达到稳定状态后，收集数据进行时均处理。

3　结果与分析

3.1　时均结果分析

当流动状态达到稳定后，采集 5000 个时间步的壁面剪切力随时间分布的数据；然后，对比分析连续肋条计算结果与 Walsh 实验结果，验证 LES 计算结果的准确性；最后，对比分析连续肋条流场和间断肋条流场的壁面剪切力及减阻率，明确新型间断肋条结构给流场带来的影响。

3.1.1　时均剪切力与表面减阻率

Walsh 实验的最优三角肋条尺寸的实验减阻率为 5.4%[21]，LES 数值求解得到的表面减阻率为 4.612%，两者之间的误差为 0.788%，该数值极小，因此验证了 LES 计算方法是准确、可信的。

图 5 为两种肋条结构完全发展状态下的壁面剪切力和表面减阻率随时间的变化情况。由图 5a 可知，两种肋条结构的上侧光滑面剪切力曲线都呈现出规律性的震荡变化，且大部分区域交叉重叠，两种肋条结构的上壁面时均剪切力基本一致，但连续肋条下侧沟槽面的时均剪切力大于间断肋条下侧沟槽面的时均剪切力。因此可知，间断肋条具有更显著的表面摩擦减阻效果。

由图 5b 可知，连续肋条的表面摩擦减阻率曲线震荡更均匀，且整体幅值要大于间断肋条，这说明间断肋条的表面摩擦减阻效果要显著好于连续肋条。从震荡的频率看，间断肋条的表面摩擦减阻率震荡的周期性要长一点；从震动的幅度看，连续肋条的表面摩擦减阻率在 5%左右，而间断肋条在 9%左右。这说明新型间断肋条提高了减阻的效果。

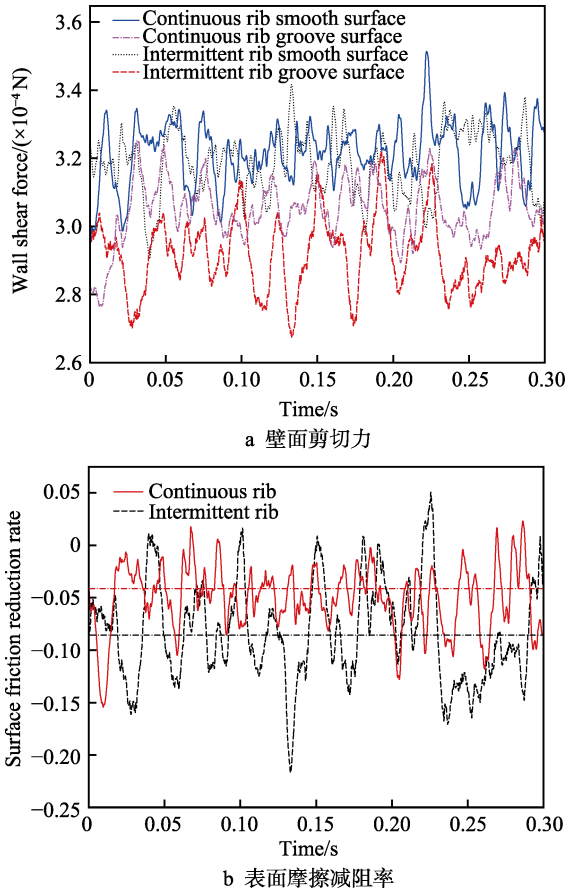


图 5　壁面剪切力和表面摩擦减阻率随时间发展的曲线
Fig.5 Wall shear force (a) and surface friction reduction rate (b) with time development curve

两种肋条壁面剪切力及减阻率的计算结果见表 3，其中，减阻率计算公式[22]如下：

$$R=\frac{(D_{\text{top}}-D_{\text{bottom}})}{D_{\text{top}}}\times100\% \tag{3}$$

式中：R 为减阻率；D_{top} 为上壁面剪切力，N；D_{bottom} 为下壁面剪切力，N。

由表 3 可知，两种肋条结构上下壁面的面积比变化较小，仅为 0.002，因此可忽略结构优化对计算结果造成的影响。相同条件下，间断肋条表面摩擦减阻率相较于连续肋条提升了 4.705%，黏性减阻率相较于连续肋条提升了 1.665%，因此可知优化后的间断肋条综合减阻效果要优于连续肋条，但由于间断肋条模型在横向阻断肋的两侧会产生一定的压差阻力，因此其实际的对表面摩擦的有效减阻效果会略有降低。

表 3　壁面剪切力及减阻率
Tab.3 Wall shear force and drag reduction rate

Examples	Upper wall shear force/N	Lower wall shear force/N	Upper and lower area ratio	Surface friction reduction rate/%	Viscous drag reduction rate/%
Continuous rib	0.000 322 2	0.000 307	0.447	–4.641	–4.641
Intermittent rib	0.000 321 4	0.000 292 7	0.445	–9.317	–6.306
Relative difference	0.000 000 8	0.000 014 3	0.002	–4.705	–1.665

3.1.2　时均流向速度剖面

冯卡门[23]针对湍流流动不同区域的光滑面速度剖面计算公式如下所述。

黏性底层区经验公式为：

$$u^+=y^+ \tag{4}$$

$$u^+=\frac{u}{u_\tau} \tag{5}$$

$$y^+=\frac{yu_\tau}{v} \tag{6}$$

式中：u_τ为壁面摩擦速度，m/s；v 为运动黏度，m^2/s。

对数律区经验公式为：

$$u^+=\frac{1}{k}\times\ln y^+ +C \tag{7}$$

式中：k、B 为冯卡门常数，通常取 $k\approx0.4\sim0.42$，$C\approx5.0\sim5.5$[24]。

Aupoix 等[25]提出肋条壁面上速度剖面的公式为：

$$u^+=\frac{1}{k}\ln y^+ +C+\Delta U^+ \tag{8}$$

式中：ΔU^+为对数律区位移特性参数，即位移速度。若ΔU^+为正，表示减阻情况，具体表现为肋条壁面对数律区的速度剖面向上移动，即当在 y 相同时，速度 u 增大，边界层厚度增加，从而达到减阻的效果；相反，若ΔU^+为负，则表示增阻情况。

图 6 为两种肋条结构肋条面和光滑面速度剖面。由图 6 可知，两种肋条结构的上侧光滑面在黏性底层区域的计算结果完全吻合 $u^+=y^+$ 公式，这说明在黏性底层区域的黏性力大于惯性力，并占据主导地位，即优化后的间断肋条不会对槽道上侧光滑壁面造成影响；而两种肋条结构上侧光滑面在对数律区上侧光滑面的速度剖面拟合结果为 $u^+=2.5\ln y^+ +5.3$，这一结论与冯卡门得到的经验理论公式一致[26]。由于两种肋条结构的上侧光滑面在黏性底层和对数律区的速度剖面数值结果与理论经验吻合度较好，因此可判定 LES 计算结果的精确性。

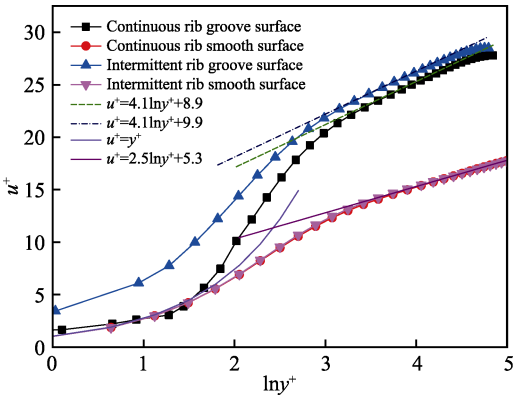


图 6　速度剖面
Fig.6 Speed profile

为计算肋条壁面附近的速度剖面，采用 Hooshmand[27]定义的物理原点修正模型，即用虚拟原点替代物理原点进行计算求解，经计算，虚拟原点的位置为肋尖下方 0.1 mm 处。通过对比可知，在对数律区，两种肋条结构在下侧肋条壁面的速度剖面曲线基本保持平行，但间断肋条略高于连续肋条，即间断肋条速度剖面曲线略向上移动。运用冯卡门经验的关联式对速度曲线进行拟合处理可得，两种肋条结构的速度剖面拟合线的斜率保持一致，均为 4.1，而截距却不同，连续肋条为 8.9，间断肋条为 9.9，即横向间断肋条不改变对数律区拟合曲线的斜率，只改变截距即减阻量的大小。

两种肋条结构下侧肋条面对数律区速度曲线相较于光滑面发生了上移现象，其速度剖面拟合曲线对应的截距（$C_{连}$=8.9，$C_{间}$=9.9）均大于光滑面拟合曲线的截距（C=2.5），速度曲线的上移表明高速流体被抬升，高速流体被推离黏性底层区至外层主流区，因此可知两种肋条结构均具有减弱表面摩擦的作用，且间断肋条的减弱效果更加明显，其对高速流体的推离作用更强。

3.1.3　时均速度分布

图 7 为两种肋条结构的时均流向速度沿法向距离的分布曲线。由图 7a 可知，两种肋条结构的时均流速整体分布基本一致，即肋条结构的变化对流场内流体速度分布的影响较小。通过对比可知，两种结构下侧肋条壁面的时均速度均小于上侧光滑壁面，该现象从肋条处持续到主流区至平板光滑侧消失。由图 7b 可知，肋条尖端附近的时均速度受到了微弱影响，而肋条凹槽内特别是沟槽中部及下部的时均速度几乎不受影响。在肋条的凹槽内部（y=0.000 45 m），间断肋条对应的时均速度为 1.20 m/s，连续肋条的时均速度为 1.41 m/s，相比之下间断肋条使速度减少了约 14.89%。由图 7c 可知，间断肋条主流区的时均速度略小于连续肋条，但两种肋条结构在肋条侧的时均速度均远小于光滑平板，这说明肋条结构使得壁面的速度大幅度降低，并且间断肋条的降低效果更加明显。

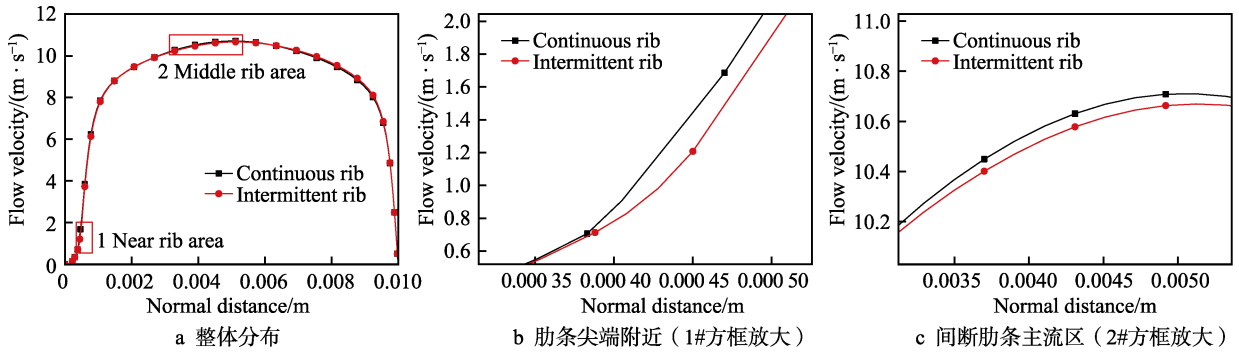


图 7　时均流向速度沿法向分布曲线

Fig.7 Average flow velocity along the normal distribution curve: (a) overall velocity distribution, (b) near rib area partial enlargement, (c) mainstream area partial enlargement

3.1.4　脉动速度均方根

图 8 为两种肋条结构不同方向的脉动速度均方根，针对近肋条壁面附近进行局部放大展示。由图 8 可知，两种结构下侧肋条面的脉动速度均方根曲线相较于上侧光滑面脉动速度均方根曲线均发生右移现象，并且槽道下侧肋条面三个方向的脉动速度均方根值峰值较上侧光滑面均有所减小，这说明肋条结构使得高扰动区域被推离肋条表面，从而减弱了流体的脉动速度，进而达到减阻的效果。通过对不同流动区域的放大观察可知，两种肋条结构的流动主流区及上侧近壁区三个方向的脉动速度均方根吻合度较高，且整体分布几乎完全一致，这说明肋条结构在近壁处有明显的减阻效果，而在主流区并不具有显著的减阻效果[28]。通过对比观察两种肋条结构近下侧肋条壁面处脉动速度均方根的局部放大示意图可知，两种结构近肋条壁面流体沿流向的脉动速度均方根曲线吻合度较高，而沿法向和展向的脉动速度均方根差异相对较大，且差异点近似开始于肋中位置。

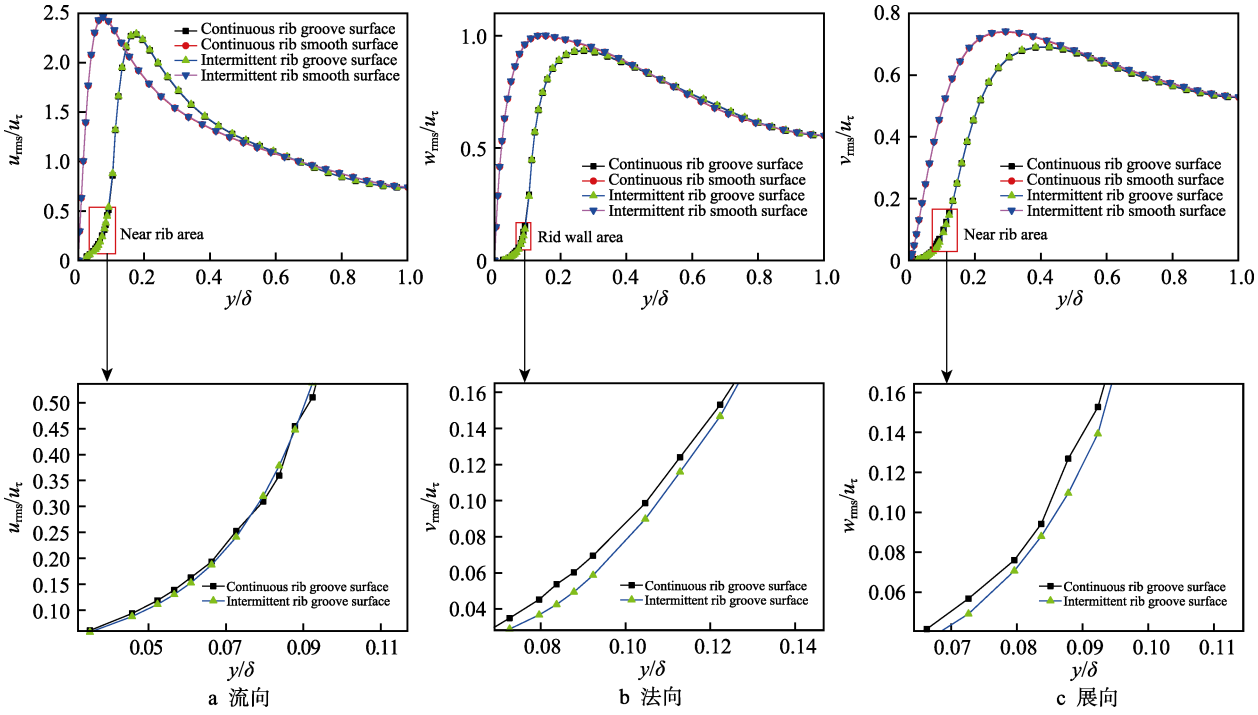


图 8　不同方向的脉动速度均方根

Fig.8 Pulsation speed RMS in different directions: (a) flow direction, (b) normal direction, (c) direction of exhibition

3.1.5　雷诺应力曲线

运用槽道高度及摩擦速度对横、纵坐标进行归一化处理，绘制雷诺应力曲线见图 9。由图 9 可知，两种结构下侧肋条面的雷诺应力均小于上侧光滑面，应力曲线都发生了右移现象，这表明肋条结构具有降低雷诺应力的作用，即肋条结构在湍流流动中实现了减阻效果且将高雷诺应力区推离壁面。通过对比分析可知，间断肋条右向移动的幅值大于连续肋条，这表明间断肋条的减阻能力较强。两种肋条结构的雷诺应力曲线在主流区基本重合，连续肋条上侧光滑面与下侧肋条面的雷诺应力均略高于间断肋条情况，这是由于

速度脉动峰值的微小差异造成的。

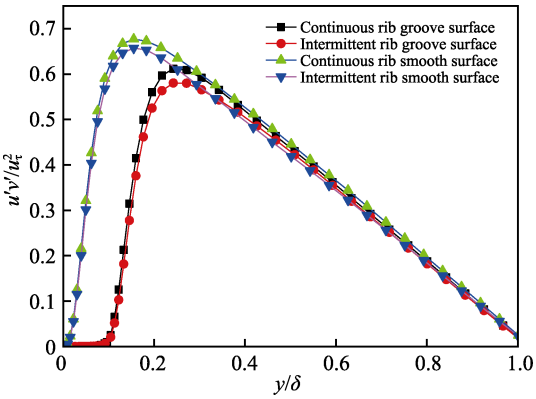


图 9　雷诺应力曲线

Fig.9 Reynolds stress curve

3.2　瞬时流场分析

3.2.1　瞬时剪切力云图

图 10 为瞬时壁面剪切力分布云图。由图 10 可知，两种结构在上侧光滑壁面的剪切力均沿流向呈条状均匀分布，部分区域高低剪切力相间排布；而下侧肋条壁面由于肋条结构的存在，使得沟槽内部剪切力较小，肋尖顶区域的剪切力较大，部分位置甚至超过了上侧光滑壁面的剪切力。这说明肋条底部具有显著的减阻效果，而肋条尖端并无减阻效果，即肋条结构改变了壁面剪切力在其表面上的分布。由于肋条尖端只占肋条表面的很少部分，因而肋条表面的高剪切力区域有限，肋条表面的整体剪切力要小于光滑表面，从而达到较好的减阻效果，这一观点与 Jahanmiri[29]的结论保持一致。通过对比两种结构下侧肋条壁面剪切力可知，间断肋条横向阻断肋前后都出现了局部低值区域，阻断肋后缘一定区域内包括部分肋尖处的阻力值都保持极低的水平；连续肋条下壁面肋尖处的剪切力较大，形成了大阻力“覆盖层”，而间断肋条下壁面因横向阻断肋的作用，使该阻力“覆盖层”被切断，从而使间断肋条表面的剪切力整体上远小于连续肋条。

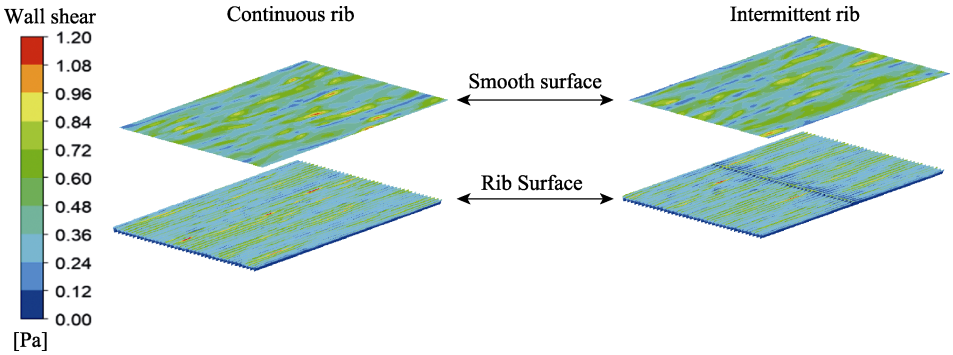


图 10　壁面剪切力分布云图

Fig.10 Wall shear force distribution cloud map

3.2.2　壁面压力分布

图 11 为两种肋条结构壁面压力分布云图。由图 11 可知，相同压力范围内，连续肋条上下壁面的压力呈现比较均匀的斑点分布，而间断肋条上下壁面都存在一些明显的极大值和极小值斑点，且在下壁面阻断处沿着阻断隔板分布着阻力的极大值和极小值。这是因为流体在流经阻断隔板前后形成了压差阻力，正是这部分压差阻力削弱了改型后的表面减阻效果。但该新型肋条结构，肋条表面摩擦的减阻效果远大于压差阻力所带来的负面影响。因而，实际上横向间断会带来两部分效果，即增强表面摩擦减阻和压差阻力。若某工况下压差阻力淹没了表面摩擦减阻效果，则该新型结构需进一步调整。

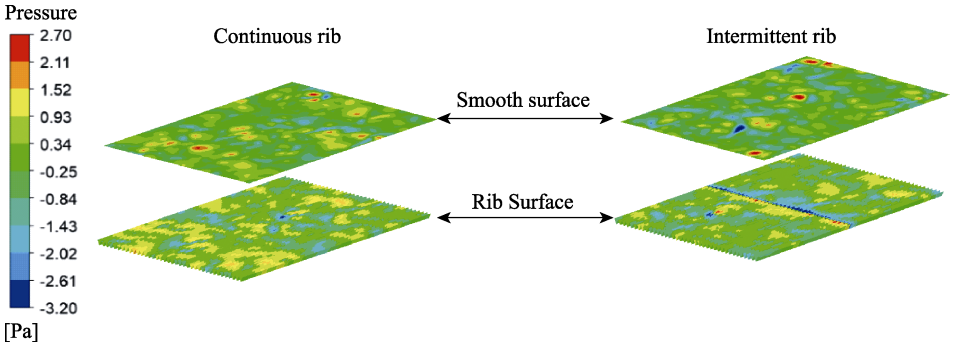


图 11　压力云图

Fig.11 Pressure cloud map

3.2.3　速度条带图

图 12 为 y^+=20 截面处的速度条带云图。其中，上侧截面为距槽道上壁面垂直距离 0.5 mm，下侧截面为肋尖上方 2 mm。由图 12 可知，两种肋条结构上侧截面的速度分布相似，即橙红色高速流体的宽条带与少量蓝色低速流体的窄条带沿流向相间分布，且以橙红色高速流体为主；下侧截面的速度整体小于上侧截面，高速流体的宽条带消失，大量低速流体的细条带沿流向分布。通过对比分析可知，间断肋条下侧截面的低速条带更多、更长、更细，且高速带更弱，这说明间断肋条可使肋条上方流体流速保持更低且更稳定，受展向涡扰动影响更小，横向间断肋条结构使得肋条壁面附近的大涡旋受到抑制而分裂成较小的涡旋，进一步降低了近壁面流体的流速，减弱了湍流扰动对流体的影响，使低速流体更加稳定的发展。

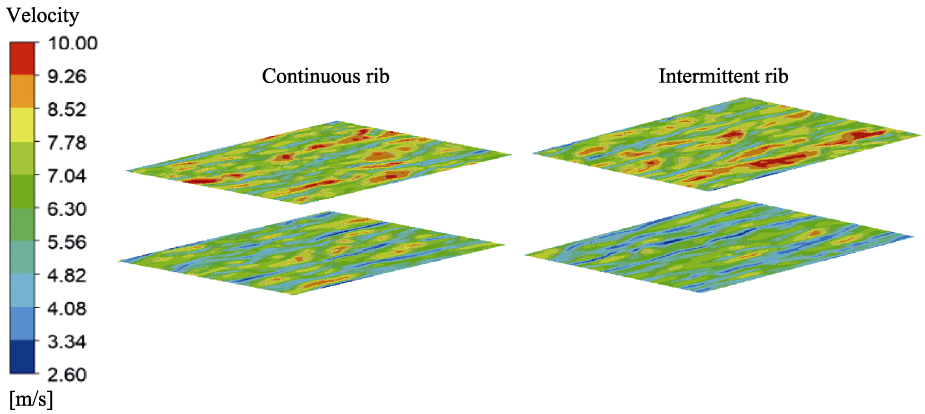


图 12　速度条带云图
Fig.12 Speed strip cloud map

3.2.4　速度流线图

图 13 为不同截面的速度流线图，其中图 13a 为沿流向在 x=0.02 m 处的截面，图 13b 为沿展向横向肋前后 10 mm 距离的 xoy 截面，其中，上侧云图皆为连续肋条，下侧云图皆为间断肋条。

由图 13a 可知，两种结构内部的速度流场分布较为相似，即低速流体主要位于槽道的上下壁面处，但沿法向方向可看出槽道下侧肋条壁面附近低速流体的厚度大于上侧光滑壁面。这是因为低速流体被肋条结构限制在凹槽内而不得向外发展，使得壁面附近的黏性底层厚度被进一步抬升。通过对比两种结构肋条表面的低速流体厚度可知，间断肋条略大于连续肋条。两种肋条结构在上侧光滑壁面及下侧肋条壁面附近皆有成对涡旋相依存在，且涡旋的旋转方向相反，但在距壁面相同的法向位置，下侧肋条壁面的涡旋比较细小、强度较低且分布较少。这说明肋条结构限制了涡旋的产生和发展，削弱了涡旋强度。对比分析两种结构的流场可知，该现象在间断肋条中更加明显。

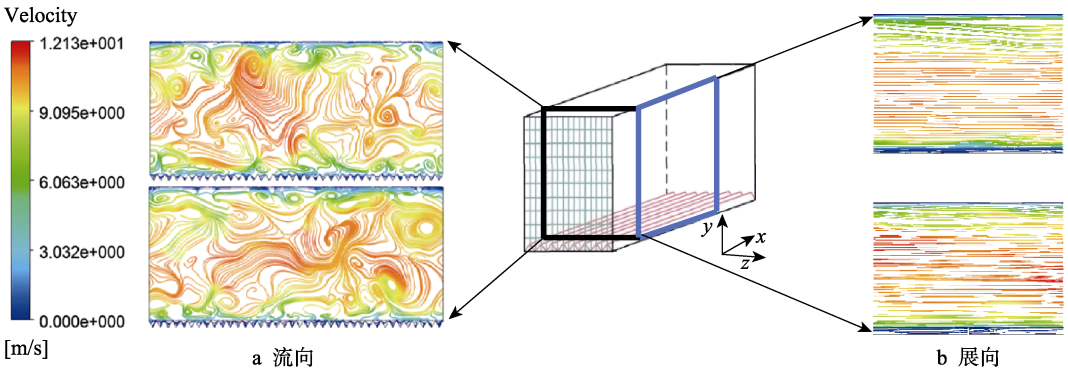


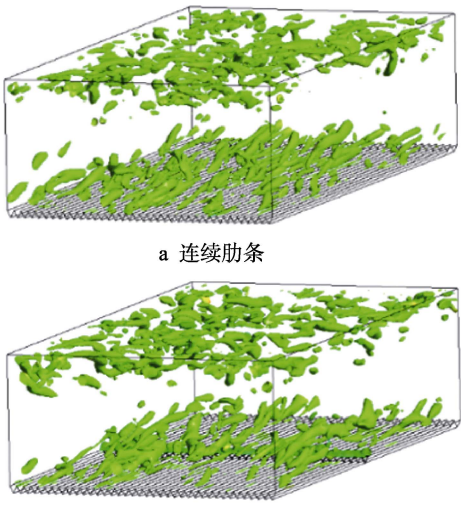
图 13　不同横截面的速度流线图
Fig.13 Velocity flow diagram for different cross sections: (a) the flow direction, (b) the span direction

由图 13b 可知，两者结构主流区流体的流线平行于壁面，而由于流体黏性作用及壁面的特殊结构，使得近壁面附近流体的流线发生弯曲现象，且下侧肋条壁面处尤为严重。产生该现象的原因是肋条的凹槽结构使流体更易在壁面附近产生漩涡，肋条凹槽内的流体流速极低，而肋尖上方的流体流速相对较高。这说明肋条结构对流体产生了限制作用，进而保证了边界层内部流动的稳定性。而由于间断肋条在横向肋附近

形成压力差，进而产生了回流现象，使得流体在阻断面处形成逆流向的回旋运动，因此其表面摩擦阻力进一步减少。

3.2.5　涡核分布

图 14 为涡核等值面图，采用 Q 准则[30]（Q=0.17）计算并着色。由图 14 可知，两种结构的上侧光滑壁面的涡核较细小且均匀分布，而下侧肋条壁面的涡核较细长且不均匀分布。这是由于沿流向布置的 V 型肋条使近壁面涡旋减少，降低了湍流流动的强度[31]。通过对比两种肋条结构在间断处的涡核分布可知，间断肋条上方的流向涡由于受到间断面的影响，所以间断前后的分布发生了明显的变化。流体因受到间断面的阻断，在间断面上方产生分离现象，即在间断面上方形成了一个展向涡带。因此，间断肋条面上方的涡核分布要少于连续肋条，这也说明了间断肋条整体的减阻效果要优于连续肋条的减阻效果。



a 连续肋条

b 间断肋条

图 14　涡核分布图

Fig.14 Vortex core distribution map: (a) continuous rib, (b) intermittent rib

4　结论

1）相同计算条件下，传统连续肋条的表面减阻率与黏性减阻率均为 4.641%，而新型间断肋条表面摩擦减阻率与黏性减阻率分别为 9.317%、6.306%，间断肋条的表面摩擦减阻率相较于连续肋条提升了 4.676%，黏性减阻率相较于连续肋条提升了 1.665%。由此可知，结构优化的间断肋条的综合减阻效果要优于连续肋条。

2）两种肋条结构减阻的机理是肋条结构降低近壁面流体的脉动速度，肋条沟槽限制了展向涡旋发展，使低速小涡限于槽内，将高速大涡拒于槽外，避免高速流体与壁面直接摩擦，槽内低速流体起到类似于“滚动轴承”的作用，即用滚动摩擦代替滑动摩擦，使流体湍流层被抬升，增大边界层厚度，减弱湍流脉动。

3）新型间断肋条具有较高的减阻率是由于横向肋条阻断作用使得大涡旋受到抑制而分裂成较小的涡旋，降低了近壁面流体的流速，减弱了湍流扰动对流体的影响，使低速流体更加稳定的发展。

参考文献：

[1] BECHERT D W, BRUSE M, HAHE W. Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin[J]. Experiments in fluids, 2000(5): 56-69.

[2] YEVHENII S, SHIJU E, ANDRII K. Mathematical modeling of turbulent boundary layers, modified by wall-localized drag reduction techniques[J]. Aerospace science and technology, 2019, 93: 578.

[3] 钱权. 典型沟槽表面隔水管减阻性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
QIAN Quan. Research on drag reduction performance of typical groove surface riser[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.

[4] WALSH M J, WEINSTEIN L M. Drag and heat transfer on surfaces with small longitudinal fins[J]. AIAA, 1978, 78: 1161.

[5] WALSH M J, LINDEMANN A M. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction[J]. AIAA, 1984, 84: 347.

[6] LEE S J, JANG Y G. Control of flow around a NACA-0012 airfoil with a micro-riblet silm[J]. Journal of fluids & structures, 2005, 20(5): 659-672.

[7] 马付良, 曾志翔, 高义民, 等. 仿生表面减阻的研究现状与进展[J]. 中国表面工程, 2016, 29(1): 7-15.
MA Fu-liang, ZENG Zhi-xiang, GAO Yi-min, et al. Research status and progress of bionic surface drag reduction[J]. China surface engineering, 2016, 29(1): 7-15.

[8] HOUGH G R. Drag characteristics of V-Groove and transverse curvature riblets[J]. Viscous flow drag reduction, 1980, 72: 168-184.

[9] KLUMPP S, MEINKE M, SCHRODER W. Numerical simulation of riblet controlled spatial transition in a zero-pressure-gradient boundary layer[J]. Flow turbulence & combustion, 2010, 85(1): 57-71.

[10] CHOI K S. Near-wall structure of turbulent boundary layer with riblets[J]. Journal of fluid mechanics, 1989, 208: 417-458.

[11] TANG Y P, CLARK D G. On near-wall turbulence-generating events in a turbulent boundary layer on a riblet surface[J]. Applied scientific research, 1993, 50(3-4): 215-232.

[12] BECHERT D W, BRUSE M, HAGE W, et al. Experi-

ments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry[J]. Journal of fluid mechanics, 2000, 338: 59-87.

[13] BECHERT D W, BRUSE M, HAGE W, et al. Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application[J]. Naturwissenschaften, 2000, 87(4): 157-171.

[14] 吴宇峰, 龙驹, 张晓丽. V 形肋条减阻最佳夹角的探讨[J]. 四川工业学院学报, 2004, 23(3): 80-81.
WU Yu-feng, LONG Ju, ZHANG Xiao-li. Discussion on the best angle of drag reduction of V-shaped ribs[J]. Journal of Sichuan University of Technology, 2004, 23(3): 80-81.

[15] 王晋军, 兰世隆, 苗福友. 沟槽面湍流边界层减阻特性研究[J]. 中国造船, 2001, 42(4): 1-5.
WANG Jin-jun, LAN Shi-long, MIAO Fu-you. Study on drag reduction characteristics of turbulent boundary layer in trench surface[J]. China shipbuilding, 2001, 42(4): 1-5.

[16] LUCHINI P, MANZO F, POZZI A. Resistance of a grooved surface to parallel elow and cross-flow[J]. Journal of fluid mechanics, 2006, 228(228): 87-109.

[17] BECHERT D W, BARTENWERFER M. The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs[J]. Journal of fluid mechanics, 1989, 206(1): 105-129.

[18] VISWANATH P R. Aircraft viscous drag reduction using riblets[J]. Progress in aerospace sciences, 2002, 38(6): 571-600.

[19] WALSH M J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets[J]. AIAA, 1982, 82: 11-14.

[20] WALSH M J. Riblets as a viscous drag reduction technique[J]. AIAA, 1983, 23: 485-486.

[21] WALSH M J. Viscous drag reduction in boundary layers[J]. Progress in astronautics & aeronautics, 1990, 15(3): 123.

[22] 周正阳, 宋文滨. 二维平板横置小肋湍流减阻的数值分析及参数优化[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(11): 2916-2922.
ZHOU Zheng-yang, SONG Wen-bin. Numerical analysis and parameter optimization of two-dimensional flat transverse small rib turbulence drag reduction[J]. Science technology and engineering, 2013, 13(11): 2916-2922.

[23] 秦立果, 杨浩, 董光能, 等. 柔性表面织构化在海洋装备减阻与防污上的应用[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 150-157.
QIN Li-guo, YANG Hao, DONG Guang-neng, et al. Application of flexible surface texturing in drag reduction and antifouling of marine equipment[J]. Surface technology, 2019, 48(6): 150-157.

[24] BENSCHOP H O G, GUERIN A J, BRINKMANN A, et al. Drag-reducing riblets with fouling-release properties: Development and testing[J]. Biofouling, 2018(5): 254.

[25] 刘德俊, 于洋, 王国付, 等. 三种形状肋条减阻特性与机理研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(7): 1411-1415.
LIU De-jun, YU Yang, WANG Guo-fu, et al. Study on drag reduction characteristics and mechanism of three shape ribs[J]. Journal of engineering thermophysics, 2016, 37(7): 1411-1415.

[26] 唐绍猛. V 形肋条减阻技术在输气管道中的数值研究[J]. 天然气与石油, 2018, 36(2): 12-18.
TANG Shao-meng. Numerical study of V-shaped rib reducing resistance technology in gas pipelines[J]. Natural gas and oil, 2018, 36(2): 12-18.

[27] HOOSHMAND D, YOUNGS R, WALLACE J M. An experimental study of changes in the structure of a turbulent boundary layer due to surface geometry changes[J]. AIAA, 1983, 83: 13.

[28] CHU D C, KARNIADAKIS G E. A direct numerical simulation of laminar and turbulent flow over riblet-mounted surfaces[J]. Journal of fluid mechanics, 1993, 250(250): 1-42.

[29] JAHANMIRI M, BAHRAINI A. Large eddy simulation of turbulent drag reduction by V-shaped riblets[J]. International journal of latest research in science and technology, 2015, 4(1): 42-46.

[30] 张宏达, 张济民, 韩超, 等. 大涡模拟研究钝体有旋流流场的拟序结构[J]. 航空学报, 2014, 35(7): 1854-1864.
ZHANG Hong-da, ZHANG Ji-min, HAN Chao, et al. Study on the quasi-ordered structure of swirling flow field in bluff body by large eddy simulation[J]. Acta aeronautica sinica, 2014, 35(7): 1854-1864.

[31] ZHANG Xian-ming, FENG Lian-fang, CHEN Wen-xing, et al. Experimental study of drag reduction characteristics related to the multifactor coupling of a bionic jet surface[J]. Science letter, 2019, 49(9): 1772-1783.