

# 圆柱表面沟槽减阻的大涡模拟研究

戎 荣, 罗大海, 牛志罡

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘要:**为了降低钝体绕流的阻力,以圆柱为研究对象,考虑在圆柱表面布置沟槽来实现减阻。研究采用大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)方法对雷诺数 $Re$ 为3 900的圆柱绕流进行数值模拟,通过表面沟槽影响近壁区流动来达到流动控制的效果。分析了V型和L型两种沟槽分别以横向和纵向形式布置时对圆柱阻力系数的影响,通过对粗糙圆柱与光滑圆柱的壁面摩擦力系数、流动分离点及近壁区流场结构,研究了表面沟槽对于钝体流动的减阻机理。数值模拟结果表明:表面布置特定深度与间距的沟槽后,粗糙圆柱的阻力系数与光滑圆柱相比最多可降低12.5%,边界层分离点也更延后;流体在流经沟槽表面时,会在沟槽底部形成稳定的旋转小涡,减少了壁面摩擦阻力。

**关键词:**圆柱绕流;大涡模拟;表面沟槽;减阻

中图分类号:TK8 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2023.09.014

[引用本文格式] 戎 荣, 罗大海, 牛志罡. 圆柱表面沟槽减阻的大涡模拟研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(9):113-122. RONG Rong, LUO Da-hai, NIU Zhi-gang. Large eddy simulation study on the effect of drag reduction using riblets applied to the surface of a circular cylinder [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(9):113-122.

## Large Eddy Simulation Study on the Effect of Drag Reduction using Riblets Applied to the Surface of a Circular Cylinder

RONG Rong, LUO Da-hai, NIU Zhi-gang

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

**Abstract:** In order to reduce the drag of bluff bodies, a circular cylinder was selected as the research object and riblets were applied to the cylinder surface. Flow over a circular cylinder at  $Re = 3\,900$  was simulated numerically using the large eddy simulation (LES) method. The effective flow control was achieved using surface riblets under its influence to the near-wall flow. The influence of V-shaped and L-shaped riblets, which were arranged on the smooth cylinder surface in horizontal and vertical forms, respectively, on the drag coefficient of the cylinder was analyzed and the drag reduction mechanism of the flow over bluff bodies by arranging surface riblets was explored according to the detailed comparison of wall friction coefficient, flow separation point and near-wall flow field structures between the smooth and rough cylinders. The numerical simulation results show that after the riblets with specific depth and spacing are arranged on the surface, the drag coefficient of the rough cylinder can be reduced by up to 12.5% compared with the smooth cylinder, and the separation point of boundary layer is also more rearward; when the fluid flows through the surface of the riblets, a stable rotating vortex will be formed at the bottom of the riblets, which reduces the wall frictional drag.

**Key words:** flow over a circular cylinder, large eddy simulation, surface riblets, drag reduction

收稿日期:2022-09-27; 修订日期:2022-11-14

基金项目:上海理工大学学位点引导布局与建设培育项目(XWDA2021104)

**Fund-supported Project:** Degree Guide Layout and Construction Cultivation Project of University of Shanghai for Science and Technology (XWDA-2021104)

作者简介:戎 荣(1997-),男,上海理工大学硕士研究生。

通讯作者:罗大海(1986-),男,上海理工大学副教授。

## 引言

减小钝体绕流的阻力一直是众多学者关注的问题。圆柱绕流是钝体绕流的典型代表,是众多工程理论分析、实验以及数值模拟研究的对象,它包含了边界层、分离流以及旋涡流等诸多丰富的流动现象。实际工程中,流体流过钝体结构时会产生非常大的阻力,这将对结构的安全性和运动物体的能耗造成一定影响,因此采用控制手段降低阻力十分重要。根据日常生活的直观经验,阻力大小一般与物体表面的粗糙度成正比,然而随着人们对仿生学和湍流理论研究的深入,这一直被打破。研究者发现运动灵活的鲨鱼其表皮并不是完全光滑的,而是具有微小的沟槽结构,这种结构可以改变表皮附近的流场,使摩擦阻力减小<sup>[1-5]</sup>。

圆柱绕流作为经典的流体力学问题,其数值模拟的主流计算方法是大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)方法。苑明顺<sup>[6]</sup>是国内较早对圆柱绕流进行大涡模拟方法研究的学者,在其研究中获得了与实验吻合较好的计算数据,验证了数值方法的合理性。Kravchenko 等人<sup>[7]</sup>和 Kim<sup>[8]</sup>分别对  $Re = 3\,900$  和  $Re = 1.4 \times 10^5$  的圆柱绕流进行了大涡模拟研究,并将计算结果与实验数据进行了详细的对比,同时分析了网格分辨率对剪切层转换的影响。Paradaudou 等人<sup>[9]</sup>对  $Re = 3\,900$  的圆柱绕流进行了实验研究,研究得到的丰富的实验数据被后续的研究工作者广泛用于数值与实验的对比之中。Breuer<sup>[10]</sup>对  $Re = 3\,900$  的圆柱绕流进行了数值模拟,主要关注大涡模拟方法数值和模型方面的性能,认为其数值耗散对大涡模拟的求解精度非常关键。Niaz 等人<sup>[11]</sup>评估了  $Re = 3\,900$  的圆柱绕流 LES 计算网格分辨率对计算结果的影响,得出了比较合理的网格、模型和参数设置。端木玉等人<sup>[12]</sup>基于开源代码 OpenFOAM 采用大涡模拟方法对三维圆柱绕流问题进行了数值模拟研究,着重分析了尾流特征和性质。詹昊等人<sup>[13]</sup>和战庆亮等人<sup>[14]</sup>都对  $Re = 3\,900$  的圆柱进行了大涡模拟研究,验证了大涡模拟方法在模拟亚临界雷诺数圆柱绕流中的合理性。

关于沟槽减阻的相关应用,国内外学者开展了大量的研究工作。Walsh 等人<sup>[15-16]</sup>发现,顺着流向

布置微小沟槽能有效地降低壁面摩擦力,通过调节沟槽的不同形式和尺寸,得出减阻效果最佳的参数组合; Aaron 等人<sup>[17]</sup>将不同形式的沟槽布置在平板上,通过实验和数值模拟的方法取得了大量平板沟槽减阻的数据<sup>[17-20]</sup>,减阻率大约在 7% 左右。国内学者王晋军等人<sup>[21]</sup>对沟槽粗糙度的影响进行了实验,发现减阻效果主要与沟槽的尺寸有关,而粗糙度影响不大。陈莹等人<sup>[22]</sup>在旋成体表面布置沟槽,选定不同尺寸的沟槽进行了减阻试验,发现与光滑表面相比可减小约 3% ~ 4% 的阻力,并得出计算沟槽高度和宽度的无量纲公式。钱权等人<sup>[23-24]</sup>将 V 型沟槽横向布置在海洋隔水管上,在不同雷诺数下计算得到最大减阻率可达 28.4%。陈雪丽等人<sup>[25]</sup>将 V 型沟槽布置在灌溉输水管道上,在最优尺寸下取得最佳减阻效果为 7.17% 左右。Chamorro 等人<sup>[26]</sup>将不同形式和大小的沟槽布置在机翼表面,得出沟槽尺寸的无量纲值与阻力大小的关系:沟槽的尺寸  $h^+ = 8$  和  $s^+ = 15$  时减阻效果最佳。目前国外已将仿生沟槽减阻技术运用到了实际工程之中<sup>[27-29]</sup>,空客公司在机翼表面贴上沟槽薄膜,达到了 1% ~ 2% 的节油效果。

本文采用大涡模拟方法,研究亚临界雷诺数( $Re = 3\,900$ )圆柱表面沟槽的减阻效果。通过数值方法给出光滑圆柱算例的计算结果,并与已有的实验数据进行详细对比,验证其可靠性。然后对表面布置 V 型和 L 型沟槽的粗糙圆柱进行三维模拟,重点研究不同几何形式的沟槽对圆柱阻力特性的影响。最后通过阻力系数的对比和流场结构分析阐述沟槽减阻的流动机理。

## 1 数值方法

### 1.1 大涡模拟控制方程

本文基于 ANSYS Fluent 软件对圆柱绕流流场进行三维非定常不可压的大涡模拟方法。选用基于压力的耦合求解器,速度压力耦合采用 SIMPLE 算法,压力项和动量项空间离散采用二阶差分格式。

数值求解方法的控制方程是滤波后的纳维-斯托克斯方程。本文研究的工况为  $Re = 3\,900$ ,入流流速为  $U_\infty = 5.697 \text{ m/s}$ ,工质为不可压缩空气,温度变化忽略不计,因此可以不关注能量方程,只考虑连续方程和动量方程。大涡模拟的控制方程是将不可压

N-S 方程滤波后得到:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: $\rho$ —流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\tilde{p}$ —滤波后的压强, Pa;  $\tilde{u}_i$ —滤波后  $x_i$  方向的速度分量, m/s;  $T_{ij}$ —亚格子应力张量。

亚格子模型采用 Dynamic Smagorinsky 模型, 有关大涡模拟的理论见参考文献[30]。

## 1.2 几何模型及边界条件

圆柱直径为  $D$  ( $D = 1$  cm), 采用的计算域及边界条件如图 1 所示。计算域以圆柱中心为坐标原点, 区域全长为  $40D$ , 上游进口边界距离圆柱中心为  $10D$ , 下游出口边界距离圆柱中心为  $30D$ , 计算域宽度为  $20D$ 。边界条件设置为速度进口, 压力出口, 上下边界设置为对称边界条件, 来流沿  $x$  轴正方向, 圆柱表面为绝热无滑移壁面。圆柱展向长度为  $\pi D$ , 展向两端面设置为周期性边界条件。

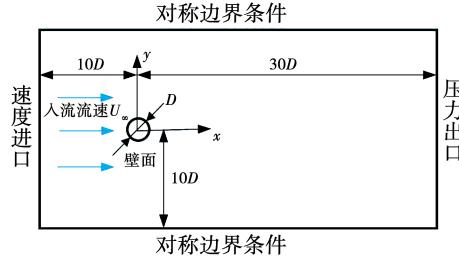


图 1 计算域及边界条件

Fig. 1 Computational domain and boundary conditions

圆柱表面的沟槽几何形式如图 2 所示, 可以分为 L 型和 V 型沟槽, 图中  $h$  为沟槽的深度,  $s$  为沟槽间隔,  $w$  为 L 型沟槽的宽度。

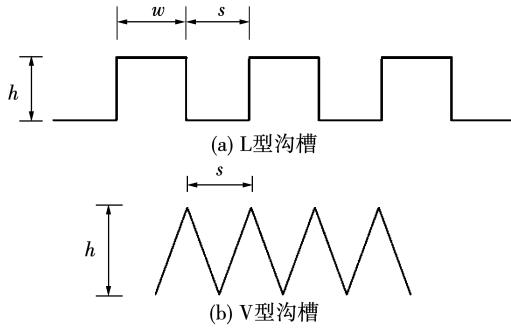


图 2 沟槽几何形式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of riblet geometric form

两种沟槽的不同布置形式如图 3 所示。横向沟槽沿圆周方向连续均匀分布, 纵向沟槽则顺流向布置。因沟槽几何尺寸太小, 在整个圆柱表面布置纵向沟槽所需计算量过大, 因此在圆柱中间段只布置 10 个连续的纵向沟槽, 如图 3(b) 和图 3(d) 所示。

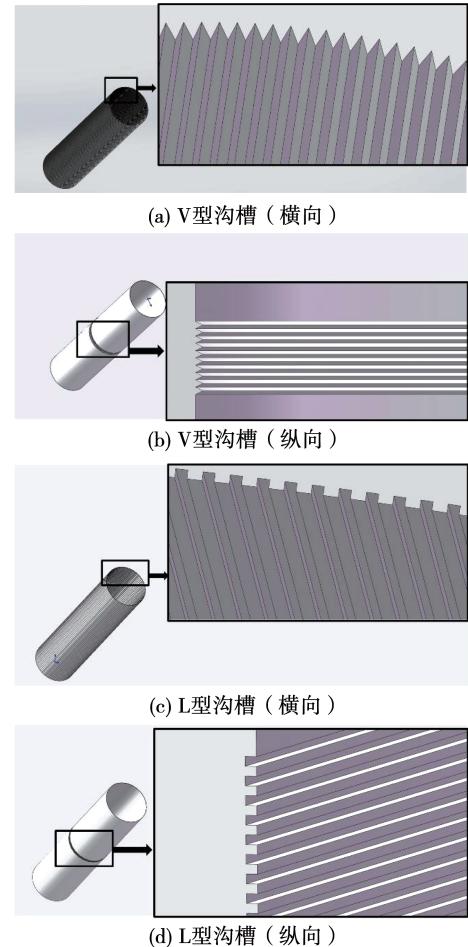


图 3 两种沟槽的不同布置形式

Fig. 3 Different arrangement forms of two kinds of riblets

沟槽无量纲尺寸定义如下:

$$h^+ = \frac{h \cdot u^*}{v} \quad (3)$$

$$s^+ = \frac{s \cdot u^*}{v} \quad (4)$$

$$u^* = \frac{\tau_\omega}{\rho} \quad (5)$$

式中: $h^+$ —无量纲高度;  $s^+$ —无量纲面积;  $\tau_\omega$ —壁面剪切应力, Pa;  $v$ —运动粘性系数, m<sup>2</sup>/s;  $u^*$ —摩擦速度, m/s。

根据参考文献[1] 和文献[26],  $h^+ = 8, s^+ = 15$  为最佳 L 型沟槽尺寸即  $h = 0.0054D, s = 0.01D$ ;

$h^+ = 15, s^+ = 15$  为最佳 V 型沟槽尺寸即  $h = 0.001D$ ,  $s = 0.01D$ 。本文选取最佳沟槽尺寸进行圆柱绕流减阻研究。

### 1.3 计算条件与网格

大涡模拟所采用的计算网格如图 4 所示。圆柱展向布置 41 个网格节点, 在圆柱附近区域对网格进行加密, 基准网格总量为 158.8 万。壁面附近第 1 层网格高度设为  $4.0 \times 10^{-5}$  m, 以保证  $y^+ \approx 1$ , 近壁面法向网格增长比控制在 1.1 以内。

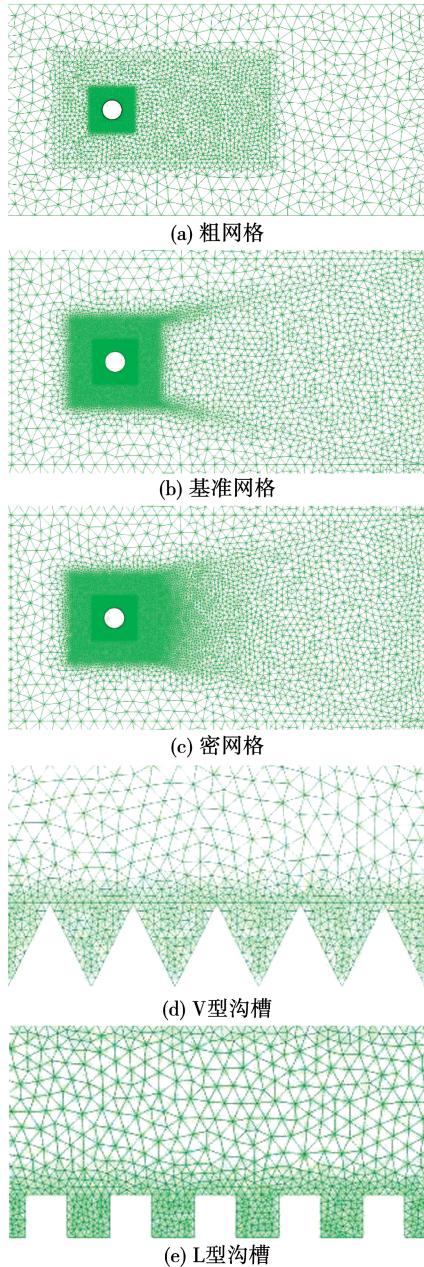


图 4 计算域及网格分布

Fig. 4 Computational domain and  
mesh distribution

布置表面沟槽的粗糙圆柱表面网格及沟槽附近网格分布如图 5 所示。10 个纵向沟槽圆柱的网格总量为 382.8 万。

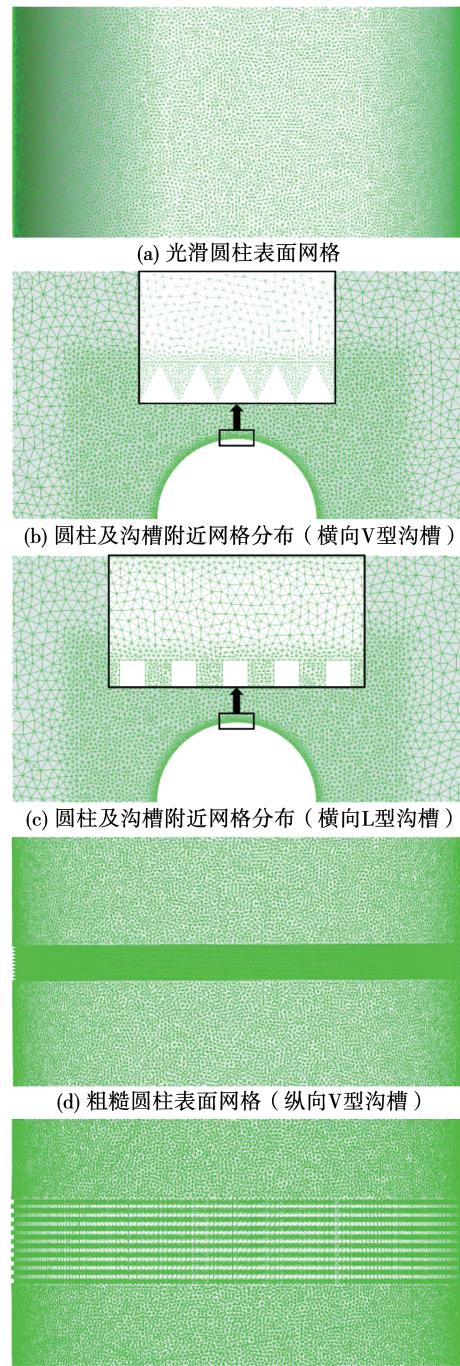


图 5 圆柱表面及沟槽附近网格分布

Fig. 5 Mesh distribution on cylinder surface  
and near riblets

### 2 数值验证

采用不同密度网格模拟得到的计算结果在 50 个

旋涡脱落周期内( $\Delta t \approx 230$ )进行时间平均,然后将计算结果沿圆柱展向进行空间平均,并与前人的实验以及数值模拟结果进行对比,对比结果如表1所示。表中 $C_D$ 为阻力系数, $C_p$ 为表面压力系数, $St$ 为斯特劳哈尔数, $Lr/D$ 为回流区长度。

表1 全局流动变量对比

Tab. 1 Global flow variable comparison

算例	$C_D$	$C_p$	$St$	$Lr/D$	方法
粗网格	1.08	1.00	0.221	1.70	LES
中等网格	1.04	0.96	0.217	1.50	LES
密网格	1.04	0.97	0.216	1.50	LES
Kravchenko <sup>[7]</sup>	1.04	0.97	0.212	-	LES
Kim <sup>[8]</sup>	1.09	1.00	0.201	1.28	LES
Parnaudeau <sup>[9]</sup>	0.99	0.95	0.210	1.51	EXP
Breuer <sup>[10]</sup>	1.07	1.01	-	1.37	LES
Niaz <sup>[11]</sup>	0.98	0.95	0.218	1.68	LES

注:EXP 表示实验,LES 表示大涡模拟。

从表中可以看出,随着网格加密到中等程度以后,本文计算结果与实验以及他人的计算都较为吻合,出于计算时间以及计算资源的考虑,本文选用中等密度网格作为基准网格,后续关于减阻效应的研究都以中等密度网格为参考。

阻力系数 $C_D$ 公式及圆柱表面压力系数 $C_p$ 公式如下所示:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho^2 U_\infty^2 DL} \quad (6)$$

$$C_p = \frac{2(p - p_\infty)}{\rho^2 U_\infty^2} \quad (7)$$

式中: $F_D$ —阻力,N; $L$ —圆柱展向长度,m; $D$ —圆柱直径,m; $U_\infty$ —入流流速,m/s; $p$ —圆柱表面压强,Pa; $p_\infty$ —入流参考压强,Pa。

图6和图7分别给出圆柱表面压力系数 $C_p$ 分布和尾迹中心线流向速度分布,其中 $\theta$ 为圆柱表面测点和圆心的连线与 $x$ 轴负方向的夹角。从图中可以看出,本文采用的数值方法模拟结果较为精确,计算方法和相关设置合理。

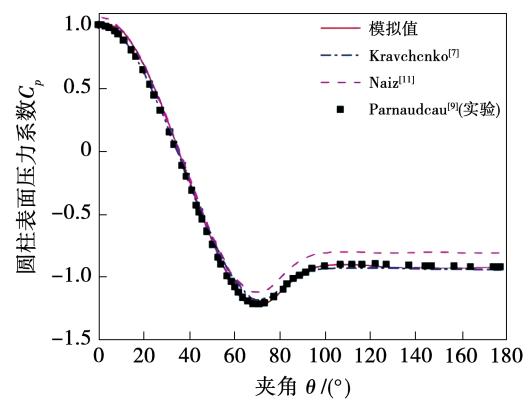


图6 光滑圆柱表面压力系数分布曲线

Fig. 6 Pressure coefficient distribution curve on smooth cylinder surface

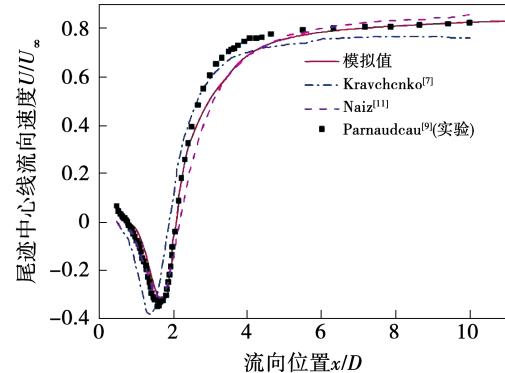


图7 光滑圆柱尾迹中心线流向速度分布曲线

Fig. 7 Flow velocity distribution curve of center line of smooth cylinder wake

### 3 分析与讨论

#### 3.1 升阻力系数及旋涡脱落频率

表2给出了光滑圆柱和表面粗糙圆柱的全局流动变量对比。其中, $C_{l rms}$ 为升力系数均方根值,从中可看出,圆柱表面布置L型和V型两种几何形式的纵向沟槽后,圆柱的时均阻力系数 $C_D$ 由1.04降到0.99,降低了4.8%,而圆柱表面布置横向沟槽时阻力系数反而有所增加。此外,布置纵向沟槽后,其升力系数的均方根 $C_{l rms}$ 以及斯特劳哈尔数 $St$ 降低,这说明纵向沟槽对圆柱表面旋涡脱落引起的气动力振荡具有抑制效果。

表 2 不同圆柱绕流的全局变量对比

Tab. 2 Comparison of global variables of flow over different cylinders

算例	$C_D$	$C_{lrms}$	$St$	$C_p$
光滑圆柱	1.04	0.15	0.217	0.96
V 型沟槽(横向)	1.14	0.29	0.228	1.04
V 型沟槽(纵向)	0.99	0.1	0.215	0.95
L 型沟槽(横向)	1.08	0.25	0.215	1.01
L 型沟槽(纵向)	0.99	0.13	0.216	0.95

当流体绕过圆柱时,圆柱体会对来流流动产生阻碍,近壁流体在圆柱上、下表面发生分离,分离点位置  $\theta_{sep} \approx 0^\circ$ 。边界层分离后形成不稳定的自由剪切层,剪切层失稳后发展成旋涡,从圆柱上、下表面周期性交替脱落。图 8 为圆柱表面的流动分离点。从图中可以看出,流体流经光滑圆柱表面时,分离点在  $88^\circ$  附近,而流经纵向 V 型沟槽圆柱表面时,分离点在  $95^\circ$  附近,流经纵向 L 型沟槽圆柱表面时,分离点在  $91^\circ$  附近。纵向沟槽的布置导致流动分离延迟发生,后流场的低压中心更加远离柱体后表面,前后表面的压差减小,因此压差阻力降低。相反,圆柱表面布置横向沟槽时,流动分离提前发生,圆柱的阻力不减反增。

### 3.2 沟槽尺寸与数量的影响

图 9 为布置不同尺寸 V 型沟槽后的圆柱阻力系数。从图中可以看出,沟槽尺寸  $h = s = 0.01D$  ( $0.1\text{ mm}$ ) 时减阻效果最好,  $C_D = 0.99$ , 减阻率达到  $4.8\%$ ; 沟槽尺寸为  $0.005D$  ( $0.05\text{ mm}$ ) 和  $0.03D$  ( $0.3\text{ mm}$ ) 时几乎没有减阻效果,此时  $C_D = 1.02$ , 减阻率只有  $1.9\%$ ; 沟槽尺寸选择  $0.02D$  ( $0.2\text{ mm}$ ) 时,  $C_D = 1.00$ , 减阻率为  $3.8\%$ , 这证明了本模拟的沟槽数据确实在最佳减阻点 ( $h^+ = 15, s^+ = 15$ ) 附近。将圆柱上最佳尺寸的 V 型沟槽数量分别增加为 20 个、50 个以及 100 个,阻力系数如图 10 所示。可以看出,随着沟槽数量的增多,圆柱时均阻力系数降低,近似为线性变化。在沟槽数量为 20 个时  $C_D = 0.98$ , 减阻率为  $5.8\%$ ; 在沟槽数量为 50 个时  $C_D = 0.96$ , 减阻率为  $7.7\%$ ; 在沟槽数量达到 100 个时,网格总量

为 623.8 万,  $C_D = 0.91$ , 减阻率达到  $12.5\%$ 。由此可知,随着纵向沟槽数量的增加,阻力系数将进一步下降。

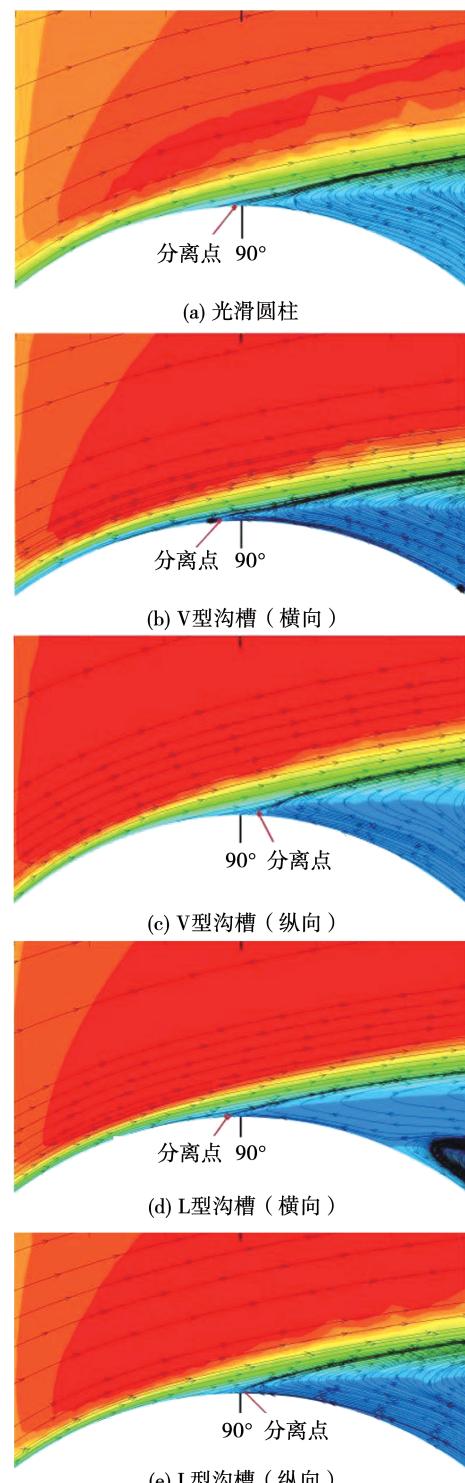


图 8 不同圆柱表面的流动分离点

Fig. 8 Flow separation points on different cylinder surfaces

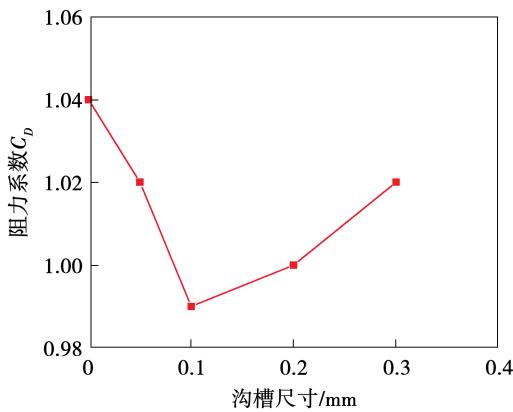


图9 阻力系数随沟槽尺寸的变化

Fig. 9 Variation of drag coefficient with riblet sizes

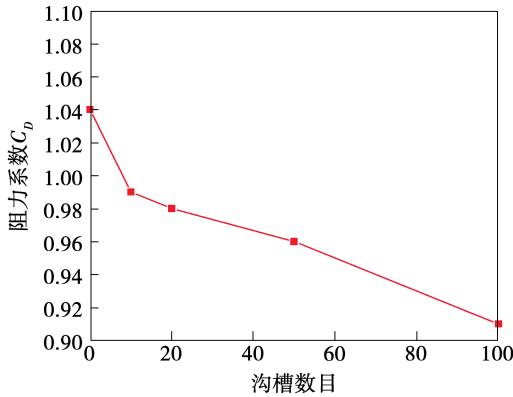


图10 阻力系数随沟槽数目的变化

Fig. 10 Variation of drag coefficient with number of riblets

### 3.3 流场分析

选取布置 100 个尺寸  $h = s = 0.01D$  的纵向 V 型沟槽圆柱算例进行流场分析,以探究表面沟槽的减阻机理。图 11 为圆柱上表面摩擦力系数随方位角的分布。从图中可以看出,其摩擦力系数峰值在约 45°位置,故选取该位置附近的圆柱近壁区域进行流场分析。

图 12 为光滑圆柱和布置沟槽的粗糙圆柱表面  $\theta = 45^\circ$  位置的时均摩擦力系数曲线对比。由图可知,光滑圆柱表面的摩擦力系数约为 0.08;而布置沟槽的粗糙圆柱表面摩擦力系数则保持在 0.06 以下,摩擦力系数沿展向呈现周期性变化,且分布与沟槽形状相似。沟槽底部摩擦力系数趋于零,沟槽顶部与圆柱边界层内流体直接接触,槽口附近摩擦力系数有极大值。

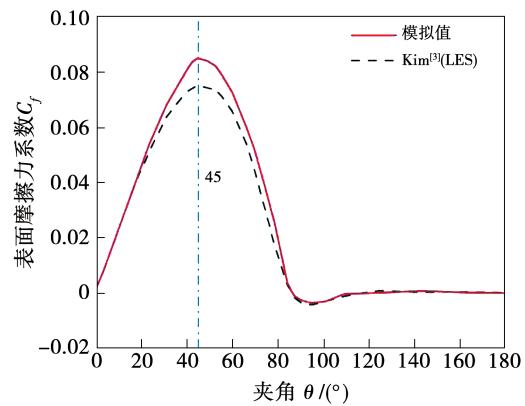


图11 圆柱表面摩擦力系数分布

Fig. 11 Distribution of friction coefficient on cylinder surface

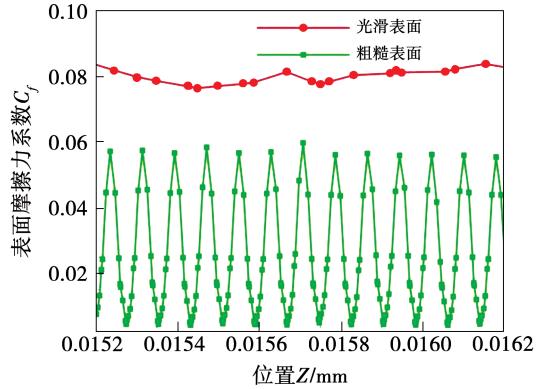


图12 光滑圆柱与粗糙圆柱表面摩擦力系数对比

Fig. 12 Comparison of friction coefficients between smooth and rough cylinder surfaces

图 13 为光滑圆柱与粗糙圆柱的表面摩擦力系数云图分布。从图中可以看出,沟槽顶部的摩擦力系数最大,底部摩擦力系数最小,总体上粗糙圆柱表面的摩擦力系数要低于光滑圆柱表面。虽然沟槽增大了圆柱表面固壁与流体的总接触面积,但粗糙圆柱的摩擦力系数总体上要小于光滑圆柱,从而粗糙圆柱的摩擦阻力反而是更小的。

图 14 为光滑圆柱和粗糙圆柱  $45^\circ$  方向角附近展向截面的时均速度云图分布。由图可知,两者的流场区别主要体现在近壁区域,表面沟槽改变了近壁区的流场结构。与光滑圆柱相比,粗糙圆柱表面处的边界层厚度有所减小。沟槽内部低速区内存在稳定旋转的涡结构,这些涡结构将流体与壁面间的滑动摩擦力转化为流体间的滚动摩擦。图中可清晰地看到,沟槽底部存在稳定的低速旋涡,这些旋涡使

流体不直接与沟槽壁面发生摩擦接触,而是从低速旋涡的上方流过,使得总体上流动阻力有所降低。

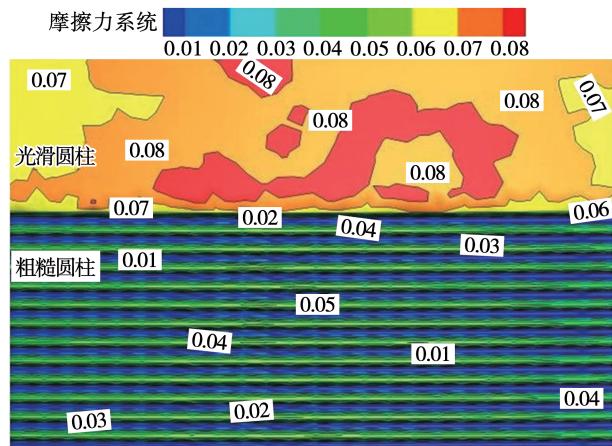
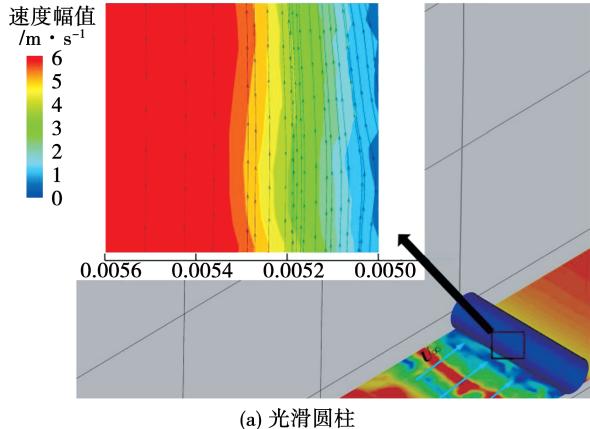
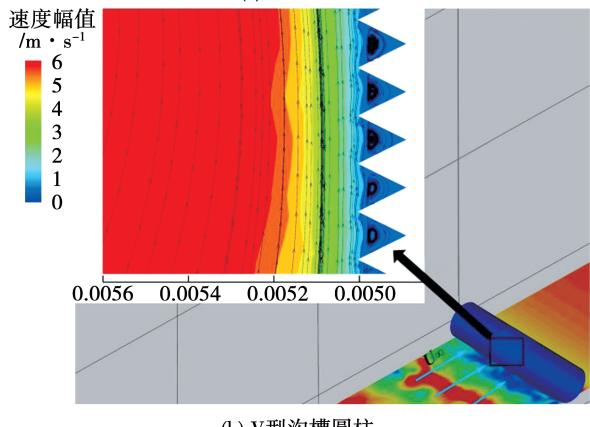


图 13 表面摩擦力系数云图

Fig. 13 Contours of surface friction coefficient



(a) 光滑圆柱



(b) V型沟槽圆柱

图 14 时均展向速度云图和 X-Z 平面流线图

Fig. 14 Time-average spanwise velocity contour and X-Z plane streamlined diagram

图 15 给出了两种不同几何形式的纵向沟槽流线图。可以看出,L型沟槽中同样产生了旋转的涡

结构,这些涡随着流动更靠近沟槽右侧,并且由于沟槽右侧壁面垂直于近壁区的流动方向,阻碍了沟槽内部向外的流动,因此 L 型沟槽比 V 型沟槽的减阻效果稍弱。随着沟槽结构尺度的增加,在沟槽中形成的旋转涡逐渐变大削减了来流速度,使得减阻效果降低,而小尺寸的沟槽没有足够的空间产生旋转涡,流体与沟槽壁面发生摩擦接触,减阻效果较弱。因此,在最佳减阻点附近的沟槽尺寸减阻效果最好。

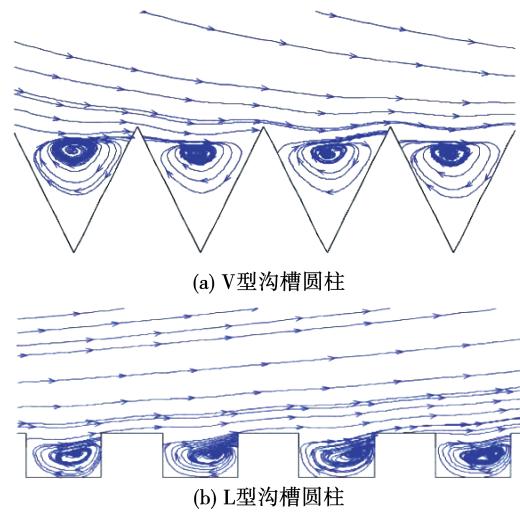


图 15 不同形式表面沟槽的 X-Z 平面流线图

Fig. 15 X-Z plane streamlined diagrams of different forms of surface riblets

## 4 结 论

本文以圆柱绕流为研究对象,在指定雷诺数下设置不同几何形状、不同排布方式的表面沟槽,使用大涡模拟方法对该控制方法的减阻能力进行研究,得到以下结论:

(1) 在圆柱表面布置特定参数的沟槽可减小绕流阻力。沿纵向布置 10 个 V 型和 L 型沟槽都可减阻 4.8%,并使旋涡脱落频率和升力系数的振荡幅值降低。随着沟槽数量的增加,减阻效果线性增强,将 V 型沟槽数量增加到 100 个后减阻可达 12.5%,而横向布置的 V 型和 L 型沟槽则会增加阻力。

(2) 特定参数的圆柱表面沟槽能延迟边界层的分离。相比光滑圆柱,纵向布置 V 型沟槽圆柱分离点更靠后,略微优于纵向 L 型沟槽圆柱,从而减小

了压差阻力,而横向布置沟槽则会导致圆柱表面流动分离提前发生。

(3) 虽然表面沟槽增大了圆柱固壁与流体的总接触面积,但沟槽区域表面平均摩擦力系数要低于光滑表面;流体在流经沟槽表面时,会在沟槽底部形成稳定的旋转小涡,这减少了壁面摩擦阻力,是导致阻力减少的重要因素。

## 参考文献:

- [1] SAMUEL M, BHARAT B. Modeling and optimization of shark-inspired riblet geometries for low drag applications [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2016, 474: 206–215.
- [2] HUA W, FU G, XIAO P, et al. Biomimetic drag reduction study on herringbone riblets of bird feather [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2013, 10: 341–349.
- [3] FU Y, YUA C, BAI X. Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces [J]. *Biosurface and Biotribology*, 2017, 3: 11–24.
- [4] 倪连庆. V形沟槽表面结构特征与减阻性能的关联性研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2016.  
YOU Lian-qing. Study on the relationship between structure characteristics and drag reduction performance of V shaped groove surface [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [5] 杨雪峰. 仿生鲨鱼皮大面积成型技术及减阻性能研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2019.  
YANG Xue-feng. Study on large area molding technology and drag reduction performance of bionic shark skin [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [6] 苑明顺. 高雷诺数圆柱绕流的二维大涡模拟 [J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1992, 7(A12): 614–622.  
YUAN Ming-shun. Two-dimensional large eddy simulation of flow past a circular cylinder at high Reynolds number [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics (Ser. A)*, 1992, 7(A12): 614–622.
- [7] KRAVCHENKO A G, MOIN P. Numerical studies of flow over a cylinder at  $Re = 3\ 900$  [J]. *Physics of Fluids*, 2000, 12(2): 403–417.
- [8] KIM S E. Large eddy simulation of turbulent flow past a circular cylinder in subcritical regime [C]// 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2006: 1418.
- [9] PARNADEAU P, CARLIER J, HEITZ D, et al. Experimental and numerical studies of the flow over a circular cylinder at Reynolds number 3 900 [J]. *Physics of Fluids*, 2008, 20(8): 085101.
- [10] BREUER M. Large eddy simulation of the subcritical flow past a circular cylinder: numerical and modeling aspects [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1998, 28: 1281–1302.
- [11] NIAZ B K, ZAINAH I, et al. Numerical investigation of flow around cylinder at Reynolds number = 3 900 with large eddy simulation technique: effect of spanwise length and mesh resolution [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M – Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2019, 233(2): 417–427.
- [12] 端木玉, 万德成. 雷诺数为 3900 时三维圆柱扰流的大涡模拟 [J]. *海洋工程*, 2016, 34(6): 11–20.  
DUAN Mu-yu, WAN De-cheng. Large-eddy simulation of the flow past a cylinder with  $Re = 3\ 900$  [J]. *The Ocean Engineering*, 2016, 34(6): 11–20.
- [13] 詹昊, 李万平. 不同雷诺数下圆柱绕流仿真计算 [J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(12): 129–132.  
ZHAN Hao, LI Wan-ping. Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at varies Reynolds number [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008, 30(12): 129–132.
- [14] 戚庆亮, 周志勇, 葛耀君.  $Re = 3\ 900$  圆柱绕流的三维大涡模拟 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(12): 75–79.  
ZHAN Qing-liang, ZHOU Zhi-yong, GE Yao-jun. 3-Dimensional large eddy simulation of circular cylinder at  $Re = 3\ 900$  [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(12): 75–79.
- [15] WALSH M J. Riblets as a viscous drag reduction technique [J]. *AIAA Journal*, 1983, 21(4): 485–486.
- [16] WALSH M, LINDEMANN A. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction [C]// 22nd Aerospace Sciences Meeting, 1984: 347.
- [17] AARON B, FOTIS S. Riblet drag reduction in mild adverse pressure gradients: a numerical investigation [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2015, 56: 251–260.
- [18] GU Y, FAN T, MOU J, et al. Characteristics and mechanism investigation on drag reduction of oblique riblets [J]. *Journal of Central South University*, 2017, 24(6): 1379–1386.
- [19] SHABNAM R, GARETH H. Geometric optimization of riblet-textured surfaces for drag reduction in laminar boundary layer flows [J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(5): 053601.1–053601.17.
- [20] ZHANG Z, ZHANG M. Characteristics of large-and small-scale structures in the turbulent boundary layer over a drag-reducing riblet surface [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, 234(3): 796–807.
- [21] 王晋军. 沟槽面湍流减阻研究综述 [J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(1): 31–34.  
WANG Jin-jun. Reviews and prospects in turbulent drag reduction over riblets surface [J]. *Journal of Beijing University of Aeronau-*

- tics and Astronautics, 1998, 24(1): 31–34.
- [22] 陈莹, 陈迎春, 王福新, 等. 旋成体表面沟槽减阻试验研究 [J]. 实验流体力学, 2012, 26(2): 42–45.  
CHEN Ying, CHEN Ying-chun, WANG Fu-xin, et al. Experiment investigation of drag reduction using riblets for a slender body [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(2): 42–45.
- [23] 钱权, 王国荣. 亚临界雷诺数下 V 型沟槽圆柱减阻数值模拟 [J]. 海洋科学进展, 2019, 37(1): 150–160.  
QIAN Quan, WANG Guo-rong. Numerical simulation of drag reduction for V-grooved circular at subcritical Reynolds number [J]. Advances in Marine Science, 2019, 37(1): 150–160.
- [24] 何霞, 蒋雯婧, 王国荣, 等. 基于大涡数值模拟的海洋隔水管绕流分析 [J]. 水动力学研究与进展 (A辑), 2020, 35(1): 106–112.  
HE Xia, JIANG Wen-jing, WANG Guo-rong, et al. Flow around analysis of riser based on large eddy numerical simulation [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics (Ser. A), 2020, 35(1): 106–112.
- [25] 陈雪丽, 魏正英, 马睿佳, 等. 灌溉输水管道沟槽减阻研究 [J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(3): 90–95.  
CHEN Xue-li, WEI Zheng-ying, MA Rui-jia, et al. Research on drag reduction of irrigation delivery pipeline [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(3): 90–95.
- [26] CHAMORRO L P, ARNDT R E A, SOTIROPOULOS F. Drag reduction of large wind turbine blades through riblets: evaluation of riblet geometry and application strategies [J]. Renewable Energy, 2012, 50: 1095–1105.
- [27] TIMMER W A, VAN ROOIJ R, et al. Summary of the Delft University wind turbine dedicated airfoils [J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2003, 125: 488–496.
- [28] SAREEN A, DETERS R W, HENRY S P, et al. Drag reduction using riblet film applied to airfoils for wind turbines [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2014, 136(2): 02107.1–02107.8.
- [29] MOHAM R, IMAN S, ALIREZA A, et al. The effects of rectangular riblets on rectangular micro air vehicles for drag reduction [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2017, 231(2): 364–373.
- [30] METAIS O, LESIEUR M. Spectral large-eddy simulation of isotropic and stably stratified turbulence [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, 239: 157.

(姜雪梅 编辑)