

间隙高度受限条件下纵向沟槽的减阻特性研究

巨康, 赵卓斌, 邓清华, 李军
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对纵向沟槽在间隙高度受限场景下减阻特性不明确的现状,通过数值方法研究了 6 种形状纵向微沟槽在不同受限间隙高度下的减阻情况。从速度梯度、摩擦切应力、平均速度分布、湍流动能和流向涡量 5 个方面深入探讨了其减阻机制,比较了各种槽形的减阻性能,分析了沟槽的无量纲横截面积和无量纲湿润周长对减阻性能的影响规律。结果表明:纵向沟槽能够有效减缓速度梯度,降低摩擦切应力和湍动能峰值,抑制流向涡,使得矩形沟槽和半圆形沟槽的减阻效果最好,梯形沟槽次之;当无量纲沟槽宽度、无量纲横截面积和无量纲湿润周长分别为 18、13 和 40 左右时,各种纵向沟槽的减阻效果达到最佳,且增加法向湿润周长可使得槽谷两端摩擦切应力大幅度下降,减阻区域增大,减阻效果提升;随着间隙高度增加,减阻效果增加,且逐渐趋于稳定,矩形沟槽在间隙高度为 80 倍沟槽宽度时,可减阻 4.2%。研究结果可为纵向沟槽截面形状和尺寸优化提供技术支撑,同时为间隙高度受限条件下的湍流减阻提供参考。

关键词: 湍流减阻;纵向沟槽;受限间隙高度;湿润周长

中图分类号: TK14 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202609015 **文章编号:** 0253-987X(2026)09-0154-11

Drag Reduction Characteristics of Longitudinal Grooves under Limited Gap Height Conditions

JU Kang, ZHAO Zhuobin, DENG Qinghua, LI Jun

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To clarify the drag reduction characteristics of longitudinal grooves under limited gap height conditions, the drag reduction performance of six types of longitudinal microgrooves at different limited gap heights is investigated numerically. The drag reduction mechanisms are examined from five aspects: velocity gradient, frictional shear stress, mean velocity distribution, turbulent kinetic energy, and streamwise vorticity. The drag reduction performance of various groove shapes is compared, and the effects of the dimensionless cross-sectional area and dimensionless wetted perimeter on drag reduction performance are analyzed. It is shown that the velocity gradient and frictional shear stress are effectively reduced, the peak turbulent kinetic energy is lowered, and streamwise vortices are suppressed by longitudinal grooves. The best drag reduction is achieved by rectangular and semicircular grooves, followed by trapezoidal grooves. Optimal drag reduction is achieved when the dimensionless groove width, dimensionless cross-

sectional area, and dimensionless wetted perimeter are approximately 18, 13, and 40, respectively. Furthermore, the frictional shear stress at both ends of the groove valley is significantly reduced by increasing the normal wetted perimeter, thereby enlarging the drag reduction region and enhancing the drag reduction effect. As the gap height increases, the drag reduction effect is enhanced and gradually stabilizes. At a gap height 80 times the groove width, a drag reduction of 4.2% is achieved by rectangular grooves. The results provide technical support for optimizing the cross-sectional shapes and dimensions of longitudinal grooves and a reference for turbulent drag reduction under limited gap height conditions.

Keywords: turbulent drag reduction; longitudinal grooves; limited gap height; wetted perimeter

无论是汽车、船舶、飞机等交通工具,还是工业生产中的管道输送、通风系统等,都存在着流动阻力,主要有压差阻力和摩擦阻力两种。研究表明,摩擦阻力占主导地位^[1],有些情况甚至可能高达90%,因此减少摩擦阻力对节能降耗至关重要。

结构减阻是通过优化物面形状,减少流体与物体表面接触时产生的阻力,其物面形状应用最多的为沟槽型,分为纵向沟槽和横向沟槽。自美国航空航天局(NASA)兰利研究中心^[2]首次证实流向脊状表面(纵向沟槽)可以有效降低表面摩擦阻力以来,脊状减阻一直是减阻领域的研究热点。纵向沟槽的减阻机理以 Bechert 等^[3-4]等提出的突出高度论和 Bacher 等^[5]提出的第二涡群论受到广泛认可。采用纵向沟槽减阻的灵感来自 Kumar 等^[6]在鲨鱼身上观察到的自然肋状表面,其 Riblet 纹理表面通过影响湍流边界层(TBL)中的流场模式和湍流动能损失来实现减阻。横向沟槽的减阻机理则一般用潘家正^[7]提出的微空气轴承论解释。纵向沟槽的减阻效果一般优于横向沟槽,Dean 等^[8]的结果表明,纵向沟槽可能会减少高达10%的阻力。

大量学者研究了不同纵向沟槽形状的减阻效果。文献[4,9-11]均对纵向沟槽的截面形状进行了详细的减阻实验和数值模拟研究,发现在V形槽、U形槽和矩形槽中,矩形槽的减阻效果最好,其次是U形槽和V形槽,但是矩形槽的机械强度不如后两者高。除了沟槽形状,Liu 等^[12]还通过粒子图像测速(PIV)实验与有限体积法(FVM)模拟得出V形槽在高宽比为1时减阻效果最好。Li 等^[13]得出高宽比为0.5的矩形槽最优,且和微气泡耦合后最佳减阻效果为7.85%。Tirandazi 等^[14]也得出矩形槽在高宽比为0.5时最好。Walsh^[15-16]通过实验研究表明在沟槽的无量纲宽度 $s^+ \leq 30$,无量纲高度 $h^+ \leq 25$ 时沟槽能产生减阻效果。可见,目前关于沟

槽形状的研究多关注 s^+ 和 h^+ 两个参数。

除了关注纵向沟槽形状,学者们主要侧重于其在无限大空间内的减阻效果。陈璠等^[17]采用数值模拟方法研究了在长1750 mm、高220 mm的壁面上布置纵向沟槽,获得的减阻效果为4.14%。王巍等^[18]在长140 mm、宽2 mm的平壁上布置宽和深均为0.08 mm的纵向沟槽,获得的最大减阻效果为9.31%。攸连庆^[19]在长200 mm、宽1 mm的平壁上布置宽和深均为0.12 mm的纵向沟槽,获得的最大减阻效果为9.61%。

上述主要针对的是纵向沟槽的形状以及无量纲宽度与无量纲高度参数在无限大平板或非限高度条件下的减阻效果研究,而对于纵向沟槽的无量纲横截面积、无量纲湿润周长等关键参数的分析较为缺乏,同时在内流机械中,即间隙高度受限条件下的减阻研究也很鲜见。本文研究了6种纵向沟槽形状在不同间隙高度下的减阻效果与流动特性,分析了不同槽形的减阻机制,重点研究了无量纲横截面积和无量纲湿润周长的影响规律,以及不同间隙高度对减阻效果的作用机制,获得了间隙高度与沟槽尺寸之间的最佳比例与纵向沟槽的最佳无量纲参数,以期为间隙高度受限条件下的湍流减阻提供参考。

1 参数定义及几何模型

无量纲沟槽宽度 s^+ 、无量纲沟槽深度 h^+ 分别为

$$s^+ = sU_\tau/\nu \quad (1)$$

$$h^+ = hU_\tau/\nu \quad (2)$$

式中: s 为沟槽宽度; h 为沟槽深度; ν 为流体运动黏度; U_τ 为摩擦速度,其表达式如下

$$U_\tau = \sqrt{\tau/\rho} \quad (3)$$

其中, τ 为壁面摩擦切应力, ρ 为流体密度。

Walsh^[15-16]的研究表明,当纵向沟槽 $s^+ \leq 30$ 、 $h^+ \leq 25$ 时能够产生减阻效果。

无量纲沟槽截面积 $l_g^{+[20]}$ 的定义为

$$l_g^+ = A_g^{1/2} U_\tau / \nu \quad (4)$$

式中: A_g 为沟槽横截面积。实验表明, l_g^+ 可以更好地刻画沟槽的表面的阻力, 且 $l_g^+ \approx 11$ 时沟槽的减阻效果最好^[20]。

本研究工质为液态水, 流速为 1~7 m/s, 以平均流速 U_m 表示。对于沟槽尺寸, 考虑以下因素: ①沟槽形状和尺寸参数需要覆盖足够宽广的范围; ②沟槽表面的设计采用无量纲宽度、无量纲深度、无量纲横截面积等, 其参数应分布于上述提到的最佳值附近; ③沟槽宽度相同, 便于排除沟槽数量对减阻效果的影响; ④沟槽截面积相同, 避免截面积差异的影响。

基于以上因素, 本文设计出 6 种沟槽结构, 其几何截面如图 1 所示, 分别为三角形沟槽(MV)、梯形沟槽(MT)、矩形沟槽(MR)、半圆形沟槽(MU) 4 种, 且在 MV 的基础上设计了 MJ 和 MK 型两种新型沟槽。6 种沟槽结构的几何尺寸见表 1。

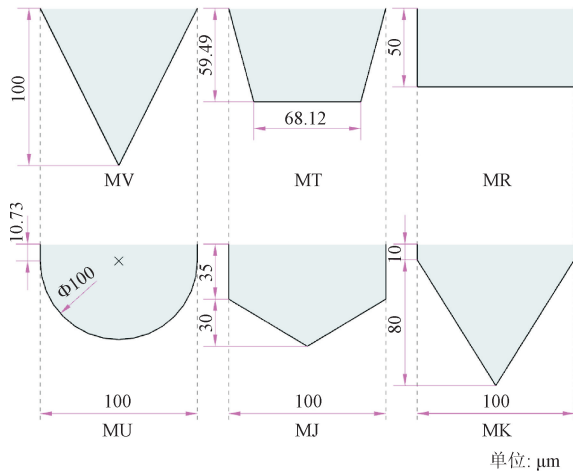


图 1 6 种沟槽几何截面

Fig. 1 Cross-sectional geometries of six types of grooves

表 1 沟槽几何尺寸

Table 1 Groove geometric dimensions

沟槽 类型	宽度 $s/$ μm	深度 $h/$ μm	湿润周长 $P/\mu\text{m}$	横截面积 $A_g/\mu\text{m}^2$
MV	100	100.00	223.60	5 000
MT	100	59.49	191.30	5 000
MR	100	50.00	200.00	5 000
MU	100	60.73	178.54	5 000
MJ	100	65.00	186.62	5 000
MK	100	90.00	208.68	5 000

图 2 为本文计算域的示意图, x 、 y 、 z 分别为流体流动方向、间隙高度方向、沟槽水平布置方向, 简称流向、法向和展向。由于沟槽对湍流边界层的影响仅存在于近壁区, 故将下壁面布置满纵向沟槽, 上壁面为光滑平壁。根据 Jiménez 等^[21] 的建议计算, 在 1~7 m/s 流速工况下展向尺寸设计为 1 mm 时均可满足大于 100 个无量纲壁面单位的要求。为减小计算成本, 流向设置为周期性, 尺寸设置为 1 mm。间隙高度 H 设计为 2、4、6、8、10 mm, 分别为沟槽宽度的 20~100 倍, 用于研究不同间隙高度条件下的减阻效果。

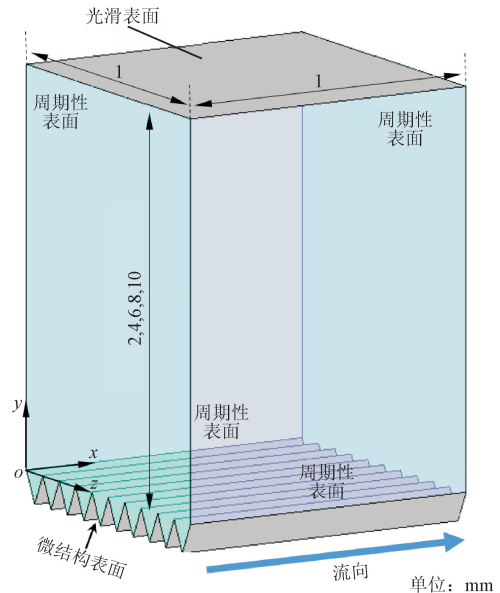


图 2 计算域示意图

Fig. 2 Computational domain schematic

2 数值计算方法及验证

2.1 数值计算方法及网格无关性验证

本研究的工质为液态水, 流向和展向面均设置为周期性边界条件, 流体流速为 1~7 m/s, 法向上的光滑壁面和沟槽表面均为无滑移边界条件。对于流向周期性模拟, 需要采用标准初始化条件, 精确给出流向速度以及湍流动能。湍流动能 k 为

$$k = \frac{3}{2} (U_m I)^2 \quad (5)$$

式中: I 为湍流强度, 公式为

$$I = 0.16 Re^{-1/8} \quad (6)$$

其中, $Re = U_m D_H / \nu$, D_H 为水力直径, 本文取 $D_H = 2H$ 。本文雷诺数范围为 4 000~84 000, 处于湍流状态。

本文采用剪切应力输运 (SST) $k-\omega$ 湍流模型^[22]。对于压力-速度耦合,采用 SIMPLE 格式,梯度重建采用二阶离散化方案。同时,监测光滑壁面摩擦阻力和微沟槽表面摩擦阻力,将所有方程的最大均方根残差值设置为 1×10^{-7} 。

计算域采用结构化网格,沟槽壁面和光滑壁面近壁区域第一层网格高度统一设为 2×10^{-6} m,网格增长率取 1.1。法向上从槽峰到光滑平壁分别设置 100、150、200、250 和 300 个节点,分别对应 2、4、6、8、10 mm 的间隙高度。展向上由于受沟槽几何形状的关联,分辨率已经确定。对于流向,参考文献[23-24]的研究,采用无量纲流向间距 $\Delta x^+ \approx 30$ 的网格分辨率较为合适,因此在流向上设置了 6 个节点, $\Delta x^+ \approx 20$ 。6 种沟槽网格的平均长宽比均不超过 45,平均正交质量约为 0.99,最终网格划分见图 3。

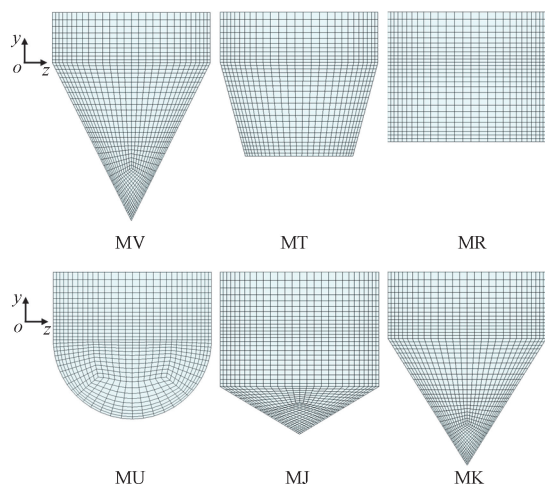


图3 沟槽网格

Fig. 3 Groove grid

网格无关性验证采用 Celik^[25] 方法,即通过网格收敛指数来评估,对 2 mm 间隙高度的 MT 型沟槽开展验证,分别设置 3.02 万、6.76 万、16.07 万和 36.51 万单元数的 4 套网格,网格细化率 r_i 均高于 1.3,符合网格无关性验证要求。

表 2 是采用 Celik 方法计算得到的沟槽壁面阻力 F_{groove} 、外推误差和网格收敛指数。图 4 是网格无关性验证结果。由于网格收敛指数是根据表观阶数 p 保守估计的计算值与真实解的误差,故一般大于外推误差。从表 2 可以看出,N3 网格收敛指数已经低至 1%,满足精度要求,故选用 16.07 万网格数能保证计算结果的精度。

表2 网格无关性验证

Table 2 Grid independence verification

网格编号	网格数/ 10^4	r_i	总摩擦阻力 $F_{\text{groove}}/10^{-5}$ N	外推 误差/%	网格收敛 指数/%
N1	3.02	1.00	6.061 17		
N2	6.76	1.31	6.136 25	3.80	4.93
N3	16.07	1.33	6.155 45	0.92	1.16
N4	36.51	1.31	6.152 45	0.16	0.19

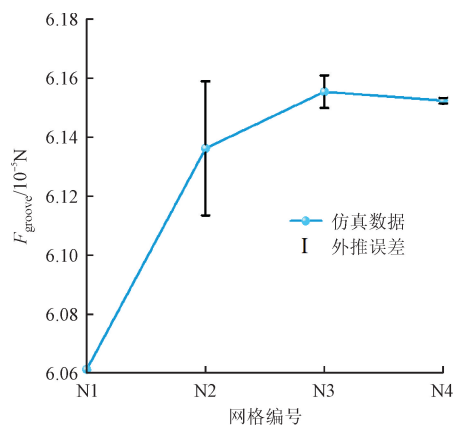


图4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence verification

2.2 湍流模型验证

为验证 SST $k-\omega$ 模型的有效性,将仿真得到的光滑壁面摩擦阻力系数 C_f 与 Zanoun 等^[26] 的经验公式计算结果进行比较,该公式适用于充分发展湍流下的通道流动,与本文模拟场景相似,其表达式如下

$$C_f = 0.058 Re_m^{-0.243} \quad (7)$$

式中: $Re_m = U_m \delta / \nu$ 。

图 5 给出了 3 种间隙高度条件下光滑平壁的 C_f 与文献[26]的对比,可以看出二者具有很好的一致性,说明了 SST $k-\omega$ 模型的可靠性。

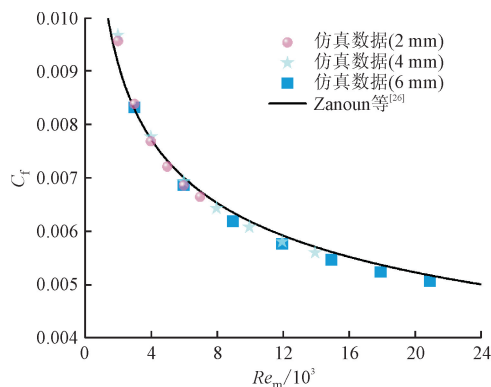


图5 光滑平壁阻力系数仿真值与文献[26]结果的对比

Fig. 5 Comparison of simulated values of smooth wall drag coefficient with Ref. [26]

图6给出了6 mm间隙高度下光滑壁面在流速为4 m/s时无量纲速度 U^+ 分布与壁面规律的比较,可以看出其速度分布也与壁面规律符合良好。

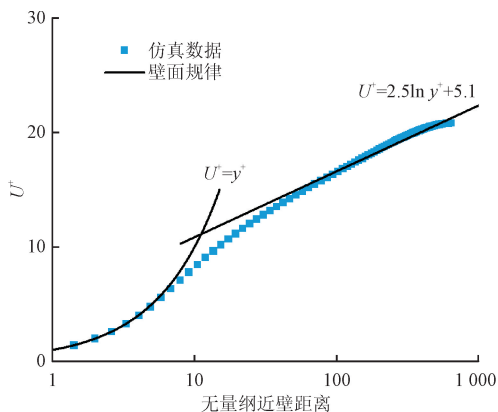


图6 计算速度分布与壁面规律对比

Fig. 6 Comparison of computed velocity distribution with wall patterns

在减阻研究中,减阻效果一般被定义为

$$D_R = \frac{F_{\text{groove}} - F_{\text{smooth}}}{F_{\text{smooth}}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: F_{smooth} 表示光滑壁面受到的总摩擦阻力。若 D_R 为负值,则表示产生了减阻效果。

图7给出了MV型沟槽在6 mm间隙高度下的减阻效果 D_R 随 s^+ 的分布,并与Walsh^[15]的实验数据(Model 33)进行比较。可以看出,在实验范围内,仿真结果与实验结果大小接近,分布趋势一致。

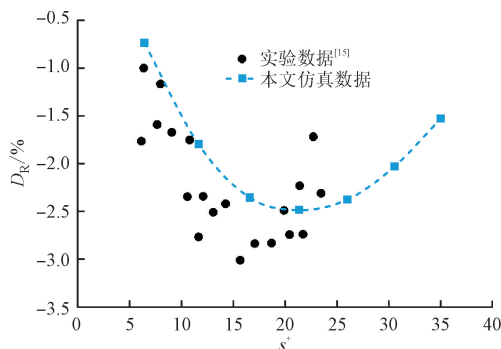


图7 MV型沟槽仿真数据与Walsh^[15]相应实验数据的对比

Fig. 7 Comparison between simulation data for MV-groove and the corresponding experimental data from Walsh^[15]

3 结果与讨论

3.1 减阻机制分析

3.1.1 速度梯度分布

鉴于不同流速与不同间隙条件下的减阻机制类

似,故3.1节内容均以间隙高度在6 mm、平均自由流速度为4 m/s时进行研究与讨论。

壁面处摩擦切应力为

$$\tau = \mu \frac{dU}{dy} \quad (9)$$

式中; μ 为流体动力黏度; dU/dy 为近壁面法向速度梯度。

图8为4种沟槽形状和光滑壁面区域的速度云图。可以看出,4种沟槽的低速区(0~0.4 m/s)厚度均大于光滑壁面,且该低速区域的面积由槽谷向两端槽峰时逐渐减小,此印证了Bechert等^[3-4]提出的突出高度论,即沟槽尖端的速度梯度较大,而表现起点以下的流体速度梯度很小,流动绝大部分被黏性所阻滞,相当于增厚了黏性底层,使得壁面处剪切应力降低,实现了减阻。

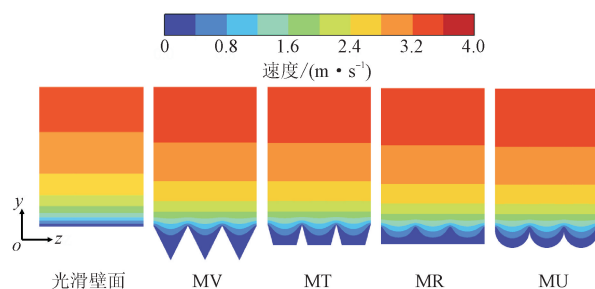


图8 4种形状沟槽和光滑壁面的速度分布

Fig. 8 Velocity distribution of four types of grooves and smooth wall surfaces

由式(9)可以得出,壁面摩擦切应力与近壁速度梯度成正比。从图8可以看出,总体上各种沟槽壁面附近的速度梯度均小于光滑壁面,整体上表现为摩擦阻力减小。

3.1.2 表面摩擦切应力分布

图9是4种沟槽表面的摩擦切应力沿展向的分布,以蓝色线表示,光滑壁面的摩擦切应力以黑色线表示,浅蓝色和浅粉色分别对应沟槽展向上的增阻区域和减阻区域, Δz 为 z 方向绝对距离的差。可以看出,4种沟槽槽谷的摩擦切应力分布明显不同,对于MV和MU型沟槽,摩擦切应力在槽谷中心最低,向两端槽峰逐渐增大,且MU的增长速率比MV明显较缓,显然MU型沟槽减阻性能优于MV。对于MT和MR型沟槽,摩擦切应力则在槽谷两端最低,向中心处缓慢增大。

尽管在几种沟槽的槽峰处均出现了极高的摩擦切应力,MR和MU型沟槽 τ 高达180 Pa,远高于光滑壁面的46 Pa,但其增阻区域远小于减阻区域,4种沟槽还是呈现出明显的减阻效果。

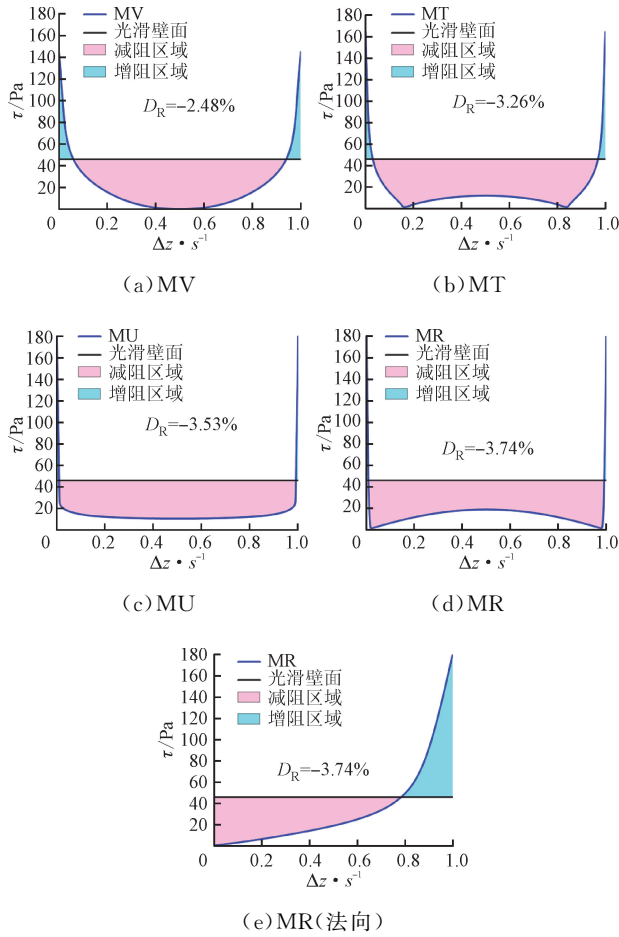


图9 4种形状沟槽和光滑壁面的摩擦切应力展向分布

Fig. 9 Directional distribution of frictional shear stress along grooves of four shapes and smooth walls

需要说明的是,总的减阻效果不能简单根据两块区域的面积积分差评价,而应该根据摩擦切应力随沟槽湿润周长的积分来衡量。对于MR这种壁面法向湿润周长占比较大的形状,在图9(e)中还特别补充了其沿槽深 h 的法向切应力分布图作为对比。

3.1.3 平均速度分布

在光滑表面的近壁区, $y^+ \leq 5$ 时为黏性底层,中间为过渡层,而在远离壁面的区域为对数律分布层,其 U^+ 服从对数分布,公式为

$$U^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.1 \quad (10)$$

该公式适用于 $y^+ \geq 30$ 区域。

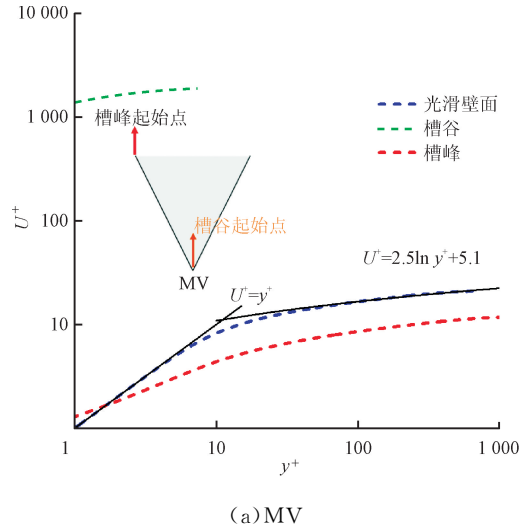
对于粗糙表面,需要引入附加项对公式进行修正,即粗糙度函数 ΔU^+ ,用于考虑粗糙表面与流体流动时的相互作用,修改后的方程可写成

$$U^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.1 + \Delta U^+ \quad (11)$$

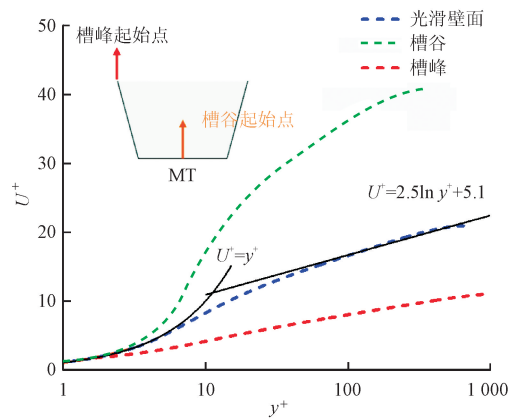
对于大多数粗糙表面,粗糙度函数 ΔU^+ 为负,

会导致 U^+ 减小。

图10分别为4种沟槽从槽谷和槽峰两个起始点到 $y=3\text{ mm}$ (半间隙高度)的流向平均速度分布,并以光滑壁面的速度分布曲线作为对比。可以看出, U^+ 从大到小依次是从槽谷、光滑壁面和槽峰起始点的分布;在槽峰处,局部摩擦切应力增大, U^+ 减小,表现为增阻;在槽谷处,局部摩擦切应力减小, U^+ 增大,表现为减阻。这表明不同展向位置的壁面摩擦分布可以用无量纲平均流速进行表征,也证实了用 ΔU^+ 表征减阻的有效性,即 ΔU^+ 为正时为减阻。由于沟槽结构不同,沟槽表面的摩擦切应力也不同,相同位置的平均速度分布曲线也表现出明显的差异性。MR和MU槽峰起始点的平均速度分布曲线较低,其末端 U^+ 仅为10.5,由一个极高的局部摩擦切应力造成,约为180 Pa(图9)。MV槽谷起始点的平均速度分布曲线最高,其末端 U^+ 高达1877,对应一个极低的局部摩擦切应力,说明虽然MV型沟槽的整体减阻效果最差,但在槽谷处是4种形状里减阻效果最好的。



(a) MV



(b) MT

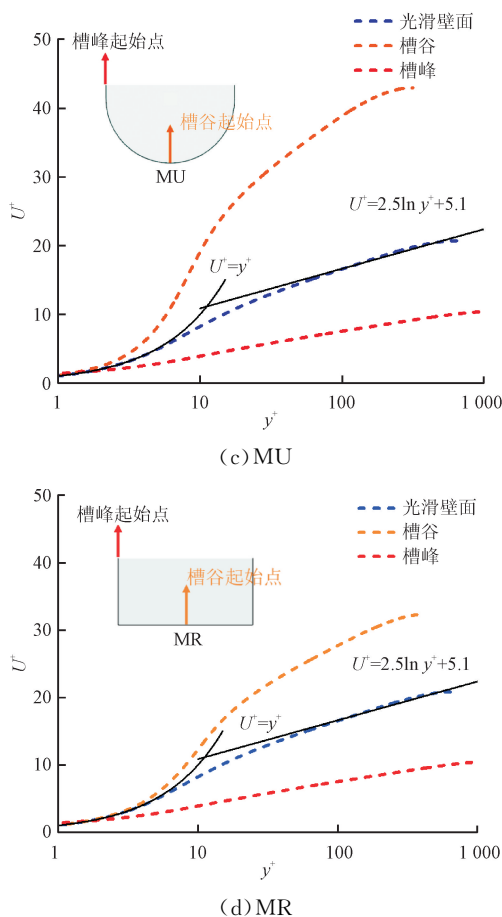


图10 4种形状沟槽和光滑壁面的平均速度分布

Fig. 10 Mean velocity profile of four types of groove shapes and smooth walls

总体来说,与光滑壁面相比,不同展向位置的平均速度分布差异明显,且与能否减阻相关。对于槽峰起始点,其平均速度分布曲线表现为向下偏移,对应增阻,而槽谷起始点的向上偏移分布曲线对应减阻,4种沟槽的平均速度分布图均很好说明了此规律。

3.1.4 湍流动能分布

图11是4种沟槽和光滑壁面在 $x=0.5\text{ mm}$ 的

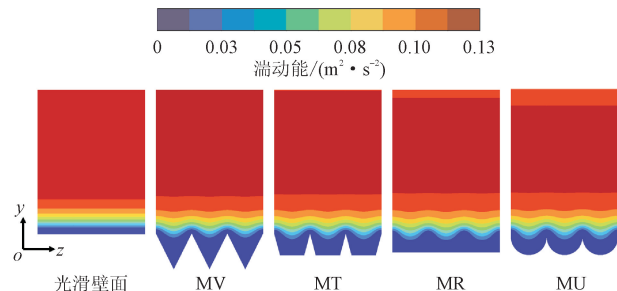


图11 4种形状沟槽和光滑壁面的湍流动能分布

Fig. 11 Turbulent kinetic energy distribution in four types of grooves and smooth walls

$yo z$ 平面截取的湍流动能分布云图。可以看出,沟槽改变了近壁区湍流动能分布,并将高湍流动能区推离了壁面,减小了近壁区受到的湍流动能的影响,进而减小了摩擦阻力。

图12为MU型沟槽沿槽谷起始点到光滑壁面的湍流动能分布曲线。对光滑壁面, k 最大出现在 $y^+ \approx 46.0$,而对于MV、MT、MR和MU表面, k 最大分别出现在 y^+ 为67.0、56.0、56.4和54.5的位置,最大湍流动能位置被分别推离了21.0、10.0、10.4和8.5个无量纲壁面单位,此结果与Bechert等^[3-4]提出的减阻机理一致,即湍动能的偏离壁面产生了较厚的黏性底层,降低了摩擦阻力。此外,MU型沟槽湍动能峰值小于光滑壁面的湍动能峰值,减小了5.37%,MV、MT和MR则分别减少了4.18%、5.09%和5.51%,这与4种沟槽的减阻效果相匹配,即MR和MU的减阻性能最优,MT次之,MV最差。

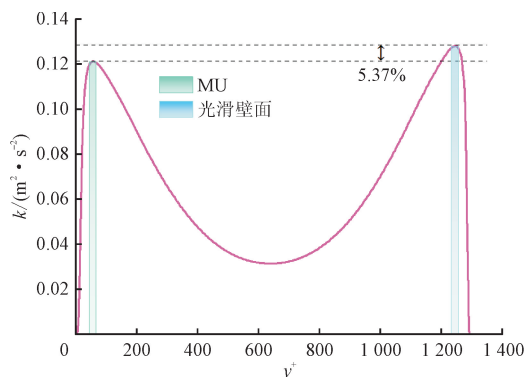


图12 MU型沟槽法向湍流动能分布

Fig. 12 MU-type groove normal turbulent kinetic energy distribution

3.1.5 流向涡量分布

图13为4种沟槽的流向涡量分布图。可以看出,4种沟槽的最大流向涡量均出现在槽峰处,且MR和MU型沟槽槽峰处的涡量最大,MT次之,MV槽峰诱导的流向涡量最小,这与图9中槽峰处摩擦切应力的分布一致。正如Choi等^[24]指出,表面摩擦力较大的区域总是伴随着较强的流向涡旋,在图13中进一步给出了槽峰处放大图。

在减阻情况下,槽峰通过限制流向涡的展向运动来修正近壁湍流边界层,因此流向涡引起的扫掠运动不太可能进入槽谷。另外,第二涡群论解释过,槽峰处抬高的流向涡与槽峰相互作用,产生了反向的二次涡群,从而削弱了流向涡,带来了沟槽整体的减阻效果。

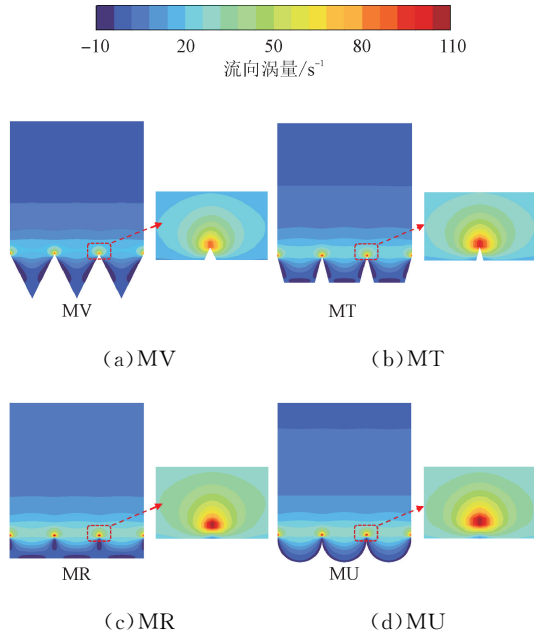


图13 4种沟槽的流向涡量分布和槽峰处的放大图对比
Fig. 13 Streamwise vorticity distribution across four groove types and magnified comparison at the valley peaks

3.2 减阻性能分析

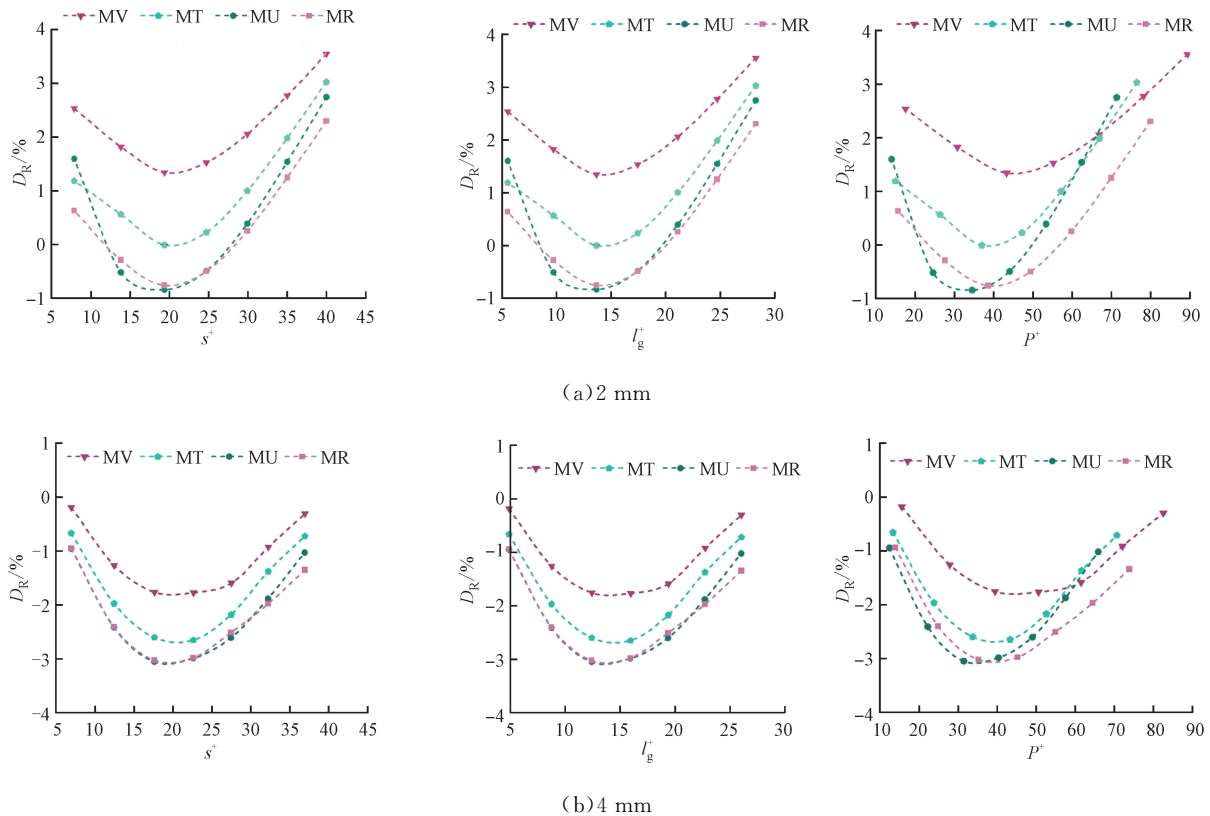
3.2.1 无量纲参数的相关性

目前关于表面微结构减阻性能的评估,多是对 s^+ 、 h^+ 的度量,本文增加了对 l_g^+ 和无量纲湿润周

长 P^+ 的分析。

图14为沟槽MV、MT、MR和MU在不同间隙高度下的减阻效果。可以看出,对于 s^+ ,间隙高度为2、4、6 mm时,其最佳减阻效果分别出现在19~24、17~22和16~21时,这与Walsh^[15]获得的沟槽在 $s^+ \approx 18$ 时减阻效果最大的结论是基本一致的。对于 l_g^+ ,其最佳减阻效果分别出现在13~17、12~16和11~15时,这与文献[20]的结论基本相符。而对于本文重点讨论的 P^+ ,尽管不同沟槽的 P 有一定差异,还是可以看出,当 $P^+ \approx 30 \sim 50$ 时,尤其是40附近时,各间隙高度下沟槽减阻效果均最好。

各间隙高度下,MU和MR的减阻效果较好,MT次之,MV最差,间隙高度为6 mm时,MV、MT、MU和MR的最大减阻效果分别为-2.48%、-3.26%、-3.53%和-3.74%。随着间隙高度增加,各沟槽的减阻效果均明显增长:间隙高度为2 mm时,4种沟槽中大部分流况为增阻;间隙高度为4、6 mm时所有沟槽处于减阻区,MU型沟槽的最佳减阻效果从2 mm时的-0.85%增长到6 mm时的-3.53%,MR则从-0.77%增长到-3.74%,均说明间隙高度对沟槽减阻影响较大。



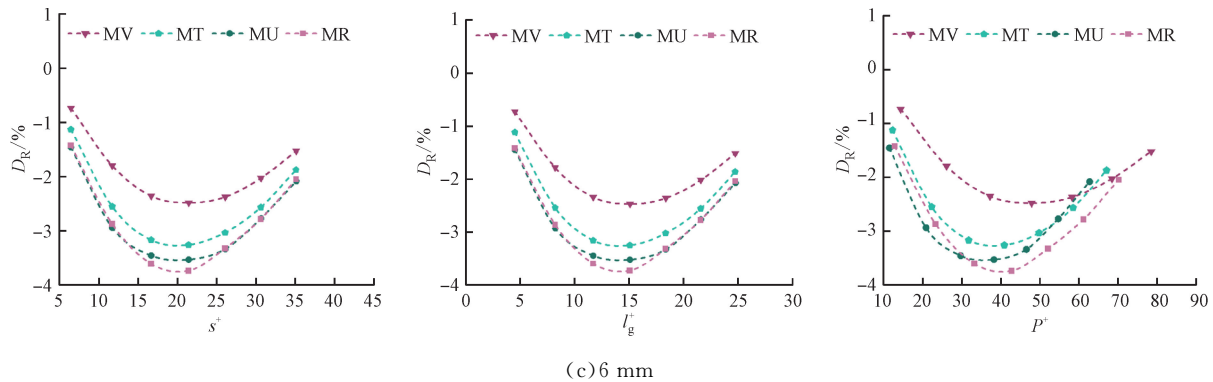


图 14 3 种间隙高度下的不同形状沟槽在无量纲宽度、无量纲面积和无量纲湿周下的减阻效果对比

Fig. 14 Comparison of drag reduction effects of different shaped grooves at three gap heights under dimensionless width, dimensionless area, and dimensionless wetted perimeter

随着间隙高度增加,最佳减阻效果出现的无量纲参数均有小幅度的向左偏移, s^+ 从 21.5 减小到 18.5, l_g^+ 从 15 减小到 13, P^+ 从 44 减小到 39。但对于流体速度,减阻效果的最佳流速值是向右偏移的,2 和 4 mm 间隙减阻效果最大值均出现在 3 m/s 时,6 mm 间隙减阻效果则在 4 m/s 时最大。

3.2.2 湿润周长的影响

图 15 为 6 种湿润周长的沟槽在 6 mm 间隙高度和 3、4 m/s 流速条件下的减阻效果对比(D_R 取绝对值)。可以看出,在 2 个最佳流速下,随着湿润周长的增加,减阻效果总体上均呈下降的趋势,但在 MJ 和 MR 型沟槽出现了攀升。减阻效果体现在数量和质量两方面,前者代表摩擦切应力在总湿周上的累积,后者代表沟槽局部摩擦切应力较光滑壁面摩擦切应力减小的幅值。如果是数量的影响大于质量,即湿润周长越大,沿程摩擦阻力累积越多,则湿润周长越小的沟槽形状应该带来越好的减阻效果。

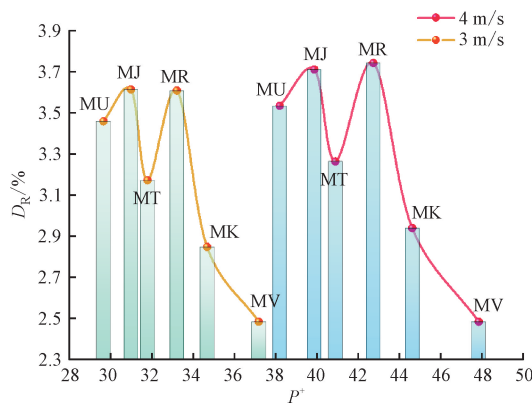


图 15 不同湿润周长沟槽的减阻效果对比

Fig. 15 Comparison of drag reduction effects of grooves with different wet perimeters

对于本文的 6 种沟槽,若忽略 MR 和 MJ 型沟槽,剩下的 4 种沟槽与 Qiu 等^[10]选用的沟槽形状基本一致,减阻效果随湿周的变化也呈现出一致的负相关性。但在微结构减阻的大多数研究中,均得出 MR 矩形沟槽是减阻效果最佳的形状,对于 MR 这种以较大的湿润周长达到了较高减阻效果的沟槽,则需要考虑是质量的影响大于了数量。MR 相较于其他的形状,出现了完全垂直于光滑壁面的表面,这里用法向湿润周长指代,且其占总湿润周长的比例很大,在本文的 MR 中为 50%。从图 9 可以看出,法向湿周的存在可以让 MR 沟谷两端附近的摩擦切应力大大降低,且 MR 中法向湿周底部最低摩擦切应力接近于 0。

事实上,MJ 和 MK 型沟槽就是在 MV 型的基础上增加了法向湿润周长的占比,分别为 37.5% 和 9.6%。图 16 给出了 MV、MK 和 MJ 型沟槽表面摩擦切应力的展向分布对比。可以看出,相较于 MV 型沟槽,MK 和 MJ 型沟槽表面摩擦切应力随

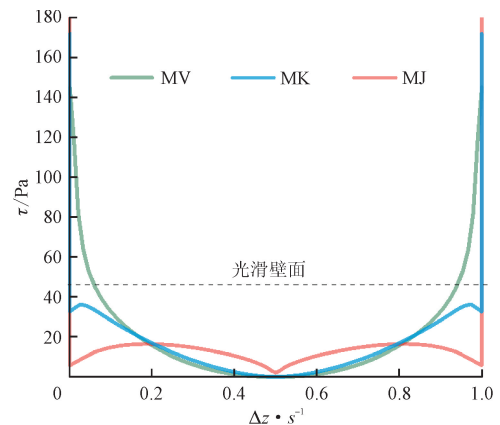


图 16 MV、MK 和 MJ 表面摩擦切应力展向分布对比

Fig. 16 Comparison of surface friction shear stress distribution of MV, MK, and MJ

着法向湿润周长增加,槽谷两端区域的摩擦切应力均出现了明显的下降,MJ型槽谷两端摩擦切应力低至6 Pa,减阻效果得到有效提升,且提升幅度根据法向湿润周长占比的增加而增大,而MV型沟槽在同等展向位置已经处于增阻状态。即使MJ和MK槽峰处的摩擦切应力有所增加,但是整体减阻效果还是提升的。可见,法向湿润周长在总湿润周长中占比越大的槽型,减阻效果通常越好。

3.2.3 间隙高度的影响

图17为MU型沟槽在间隙高度2~10 mm下的减阻效果对比(D_R 取绝对值)。可以看出,随着间隙高度增加,MU型沟槽的减阻效果随之增加,但增加幅度逐渐减小。另外,结合图14可知,各种类型的纵向沟槽的减阻效果会随间隙高度增加而增大,而增大幅度随间隙高度增加逐渐减小。

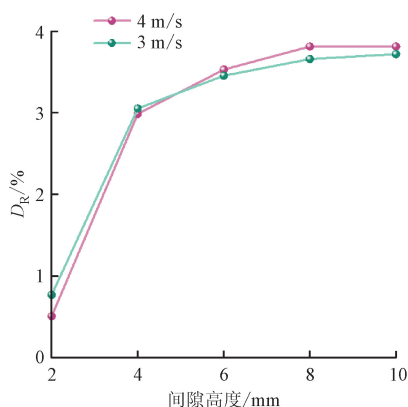


图17 不同间隙高度下MU型沟槽的减阻效果对比
Fig. 17 Comparison of drag reduction effects of MU-shaped grooves at different gap heights

上述结论主要有两方面原因。一方面,在间隙高度为2 mm条件下,不同沟槽结构的上光滑壁面的摩擦系数不同,说明下壁面的沟槽结构对上壁光滑面的表面摩擦阻力具有较大影响。相应地,上壁光滑面也会影响下壁沟槽面的减阻效果,且上壁光滑面的摩擦阻力相较于下壁面为光滑面时的大,即下壁沟槽使得上壁光滑面增阻,该上、下壁之间的影响对减阻是不利的。在间隙高度为4 mm条件下,各沟槽的上壁光滑面的表面摩擦系数一致,上、下壁之间的干涉逐渐消失。随着间隙高度增加,干涉越来越小,因此减阻效果呈现出逐渐增大并接近稳定的态势。另一方面,由于沟槽结构是用于湍流下减阻,其与湍流情况密切相关,随着间隙高度增加, I 和 k 均减小,但幅度越来越小,逐渐趋于稳定,与图17中减阻效果随间隙高度变化的结论具有一致性。

4 结 论

(1)纵向沟槽能够有效减缓速度梯度,降低摩擦切应力和湍动能峰值,且限制和削弱流向涡,使得矩形沟槽和半圆形沟槽的减阻效果最好,梯形沟槽次之,三角形沟槽最差。

(2)当 s^+ 、 l_g^+ 和 P^+ 分别为18、13和40左右时,各种纵向沟槽的减阻效果达到最佳,且3个最佳无量纲参数均随间隙高度增加有小幅减小。

(3)法向湿润周长增加使得槽谷两端摩擦切应力大幅度下降,提高了减阻区的范围,且减阻效果随法向湿润周在总湿润周中占比增大而增大。对于无法向湿润周或者占比较小的沟槽,减阻效果与总湿润周长呈明显的负相关性。因此,可通过增加法向湿润占比以提高减阻效果。

(4)在受限空间内,当间隙高度为沟槽宽度的20倍时,不仅下壁的沟槽面未能实现减阻,还会给上壁光滑壁面带来增阻。随着间隙高度增加,减阻效果随之增加,且逐渐趋于稳定,当间隙高度达到沟槽宽度的80倍时减阻效果接近最大值,在本研究中矩形沟槽在8 mm间隙高度时最大减阻4.2%。

参考文献:

- [1] 段鹏宇,陈曦. 壁湍流的复合减阻及能流分析[J]. 实验流体力学, 2024, 38(4): 1-10.
Duan Pengyu, Chen Xi. Composite drag control and energy flux analysis for wall turbulence [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2024, 38(4): 1-10.
- [2] Walsh M J. Drag characteristics of V-groove and transverse curvature riblets [C]//Viscous Flow Drag Reduction. Reston, VA, USA: AIAA, 1980: 168-184.
- [3] Bechert D W, Bruse M, Hage W. Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin [J]. Experiments in Fluids, 2000, 28(5): 403-412.
- [4] Bechert D W, Bartenwerfer M. The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1989, 206: 105-129.
- [5] Bacher E V, Smith C R. A combined visualization-anemometry study of the turbulent drag reducing mechanisms of triangular micro-groove surface modifications [C]//Shear Flow Control Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 1985: AIAA 1985-548.
- [6] Kumar S, Pandey K M, Sharma K K. Advances in drag-reduction methods related with boundary layer

- control: a review [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45(Part 7): 6694-6701.
- [7] 潘家正. 湍流减阻新概念的实验探索 [J]. *空气动力学学报*, 1996, 14(3): 304-310.
Pan Jiazheng. The experimental approach to drag reduction of the transverse ribbons on turbulent flow [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 1996, 14(3): 304-310.
- [8] Dean B, Bhushan B. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society: A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2010, 368(1929): 4775-4806.
- [9] 丛茜, 封云, 任露泉. 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, 21(2): 232-238.
Cong Qian, Feng Yun, Ren Luquan. Affecting of riblets shape of nonsmooth surface on drag reduction [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2006, 21(2): 232-238.
- [10] Qiu Hangyu, Chauhan K, Lei Chengwang. A numerical study of drag reduction performance of simplified shell surface microstructures [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 107916.
- [11] Bai Qingshun, Bai Jinxuan, Meng Xiangpan, et al. Drag reduction characteristics and flow field analysis of textured surface [J]. *Friction*, 2016, 4(2): 165-175.
- [12] Liu Z M, Chen R, Tang Z Q, et al. Drag reduction performance of triangular (V-groove) riblets with different adjacent height ratios [J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2023, 16(4): 671-684.
- [13] Li Tianjian, Yang Tianlong, Dong Qin, et al. Numerical simulation study on the drag reduction characteristics of grooves-microbubbles coupling surfaces [J]. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2024, 15: 7.
- [14] Tirandazi P, Hidrovo C H. Study of drag reduction using periodic spanwise grooves on incompressible viscous laminar flows [J]. *Physical Review Fluids*, 2020, 5(6): 064102.
- [15] Walsh M J. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets [C]//20th Aerospace Sciences Meeting. Reston, VA, USA: AIAA, 1982: AIAA 1982-169.
- [16] Walsh M J. Riblets as a viscous drag reduction technique [J]. *AIAA Journal*, 1983, 21(4): 485-486.
- [17] 陈璠, 徐朋飞. "仿生学"沟槽减阻仿真分析及机理研究 [J]. *航空发动机*, 2021, 47(2): 28-32.
Chen Fan, Xu Pengfei. Simulation analysis and mechanism study on drag reduction of "bionics" groove [J]. *Aeroengine*, 2021, 47(2): 28-32.
- [18] 王巍, 黄茹, 周艾, 等. 基于 V 形沟槽的机翼蒙皮减阻特性仿真分析 [J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2023, 40(2): 83-89.
Wang Wei, Huang Ru, Zhou Ai, et al. Simulation analysis of drag reduction characteristics for wing skin based on V-shaped groove [J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2023, 40(2): 83-89.
- [19] 攸连庆. 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.
- [20] García-Mayoral R, Jiménez J. Drag reduction by riblets [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society: A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, 369(1940): 1412-1427.
- [21] Jiménez J, Moin P. The minimal flow unit in near-wall turbulence [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, 225: 213-240.
- [22] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [23] Martin S, Bhushan B. Fluid flow analysis of a shark-inspired microstructure [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 756: 5-29.
- [24] Choi H, Moin P, Kim J. Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, 255: 503-539.
- [25] Celik I B, Ghia U, Roache P J, et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2008, 130(7): 078001.
- [26] Zanon E S, Durst F, Nagib H. Evaluating the law of the wall in two-dimensional fully developed turbulent channel flows [J]. *Physics of Fluids*, 2003, 15(10): 3079-3089.

(编辑 亢列梅)