

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: 纵向沟槽能够显著降低湍流流动的壁面摩擦阻力, 在诸多工程领域具有重要应用价值。针对当前其在间隙高度受限场景下减阻特性不明晰的现状, 本文通过数值方法研究了6种纵向微沟槽在不同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、降低湍动能峰值, 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; 在无量纲槽宽、无量纲横截面积和无量纲湿周分别为18、13和40左右时, 各种纵向沟槽的减阻效果达到最佳, 且法向湿润周长增加可使得槽谷两端摩擦切应力大幅度下降, 增大减阻区域, 提升减阻效果; 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%。本研究结果为纵向沟槽截面形状和尺寸优化提供了技术支持, 同时更为间隙高度受限条件下的湍流减阻提供了重要参考。

关键词: 湍流减阻; 纵向沟槽; 有限间隙高度; 湿润周长

中图分类号: TK14 文献标志码: AA

文章编号: 0253-987X(XXXX)XX-0001-22

Drag reduction characteristics of longitudinal grooves under the condition of limited gap height

JU Kang, ZHAO Zhuobin, DENG Qinghua, LI Jun

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

Abstract: Longitudinal grooves can significantly reduce wall frictional resistance in turbulent flow, holding substantial application value across various engineering fields. In light of the unclear drag reduction characteristics in scenarios with restricted gap heights, this study investigates the drag reduction performance of six types of longitudinal micro-grooves at different gap heights using numerical methods. The research delves into the drag reduction mechanisms from five perspectives: velocity gradient, frictional shear stress, mean velocity distribution, turbulent kinetic energy, and streamwise vorticity. The drag reduction performances of various groove geometries are compared, and

收稿日期: 2026-01-27。基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFB4102203); 国家联合基金重点支持项目(U20A20303)。

the effects of the dimensionless cross-sectional area and dimensionless wetted perimeter on drag reduction performance are analyzed. The results indicate that longitudinal grooves effectively mitigate the velocity gradient, reduce frictional shear stress, lower the peak turbulent kinetic energy, and suppress streamwise vortices, with rectangular and semicircular grooves demonstrating the most effective drag reduction, 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, an increase in normal wetted perimeter significantly reduces the frictional shear stress at both ends of the groove valley, enlarging the drag reduction area and enhancing the drag reduction effect. As the gap height increases, the drag reduction effect improves, eventually stabilizing. At a gap height of 80 times the groove width, rectangular grooves can achieve a drag reduction of 4.2%. The findings of this study provide technical support for the optimization of the cross-sectional shape and size of longitudinal grooves, and serve as an important reference for turbulent drag reduction under conditions of restricted gap height.

Keywords: Turbulent drag reduction; Longitudinal grooves; Limited gap height; Wetted perimeter

无论是交通运输领域中的汽车、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,其主要有压差阻力和摩擦阻力两种。部分文献研究结果表明,摩擦阻力占主导地位^[1-3],有些情况甚至可能高达90%^[4],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^[2],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NASA兰利研究中心^[5]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^[6,7]提出的突出高度论和Bacher等^[8]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^[9]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等^[10]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和Bhushan^[11]的实验和数值研究的结果表明,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。Wilkinson等^[12],丛茜等^[13],Qiu等^[14],Bai等^[15],Wu等^[16],Bechert和Bartenwerfer等^[7]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,结果表明,在三种基础形状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。除了沟槽的形状,Liu等^[17]还通过PIV实验与FVM模拟得出V形槽在高宽比为1时减阻效果最好,Zhu等^[18]

将高宽比为1的V形槽用到旋转叶片上得到最优减阻3.7%。Li等^[19]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7.85%,Tirandazi^[20]等从流场结构和主涡调控方面也得出矩形槽在高宽比为0.5时最好。Walsh等^[21,22]人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,故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^[23]采用数值模拟方法研究了长1750 mm、高220 mm的壁面上布置纵向沟槽,获得了减阻效果4.14%。冯晓明等^[24]在长960 mm、高为60 mm平壁上布置半径0.75 mm,高0.2 mm的圆锥体,以模拟另类非光滑表面减阻。李茂林等^[25]在长600 mm、宽1 mm的平壁上布置宽和深均为0.2 mm的纵向沟槽,获得的最大减阻效果为10.23%。王巍等^[26]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%。攸连庆等^[27]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。因此,本文在前人工作的基础上,系统研究了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研究,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,为间隙高度受限条件下的湍流减阻提供了重要参考。

1 参数定义及几何模型

沟槽形状和尺寸对于湍流条件下的表面微结构减阻至关重要。本文中无量纲沟槽宽度 s^+ 、沟槽深度 h^+ 分别表示为:

$$s^+ = \frac{sU_\tau}{\nu} \quad (1)$$

$$h^+ = \frac{hU_\tau}{\nu} \quad (2)$$

式中, s 为沟槽宽度,m, h 为沟槽深度,m, ν 为流体运动粘度, m^2/s , U_τ 为摩擦速度,m/s,其表达式如下:

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

式中, τ 为壁面摩擦切应力,Pa, ρ 为流体密度, kg/m^3 。

需要指出的是,Walsh等^[21,22]的研究结果表明,当纵向沟槽 $s^+ \leq 30$ 、 $h^+ \leq 25$ 时能够产生减阻效果。

Garcia-Mayoral and Jimenez 等^[28]在 2011 年提出了无量纲沟槽截面积 l_g^+ ，其定义为：

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

式中， A_g 为沟槽横截面积， m^2 。现有实验数据表明，采用此参数 l_g^+ 可以更好刻画沟槽表面的阻力，且 Garcia-Mayoral and Jimenez 得出当 $l_g^+ \approx 11$ 时，沟槽减阻效果达到最大值。

本文研究工质为液态水，流速范围为 1-7 m/s，以平均流速 U_m 表示，该流速范围常用于管道运输、通风系统、经济航运等。对于沟槽尺寸，考虑了以下

因素：(1) 沟槽形状和尺寸参数需要覆盖足够宽广的范围，以便于优选；(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，本文设计出六种沟槽结构，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) 四种，且在 MV 的基础上设计了 MJ 和 MK 型两种新型沟槽。

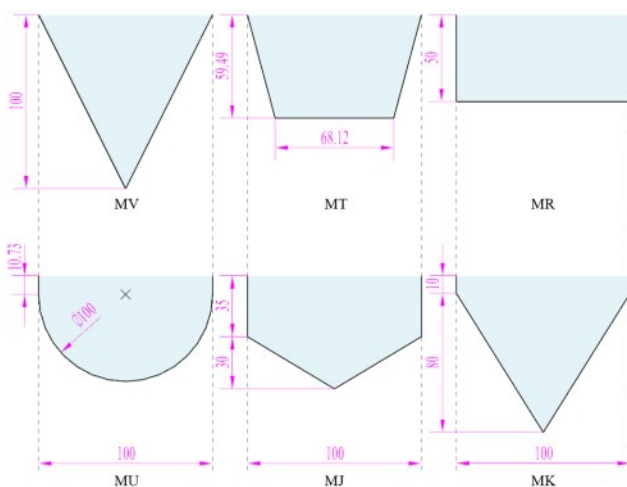


图 1 沟槽几何截面 (单位: μm)

Fig. 1 Cross section of groove geometry (Unit: μm)

表 1 给出了本文计算所用几何模型的尺寸，六种沟槽的宽度和横截面积保持一致。

图 2 给出了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，分别简称

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。Jimenez 和 Moin^[29]建议在湍流模拟中，计算域展向尺寸最好大于 100 个无量纲壁面单位，根据计算，在 1-7 m/s

所有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。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 和 10 mm 五种, 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。

表 1 沟槽几何尺寸

Table 1 Groove geometric dimensions

沟槽类型	宽度 $s/\mu\text{m}$	深度 $h/\mu\text{m}$	湿润周长 $P/\mu\text{m}$	横截面积 $A_g/\mu\text{m}^2$
MV	100	100	223.6	5000
MT		59.49	191.3	
MR		50	200	
MU		60.73	178.54	
MJ		65	186.62	
MK		90	208.68	

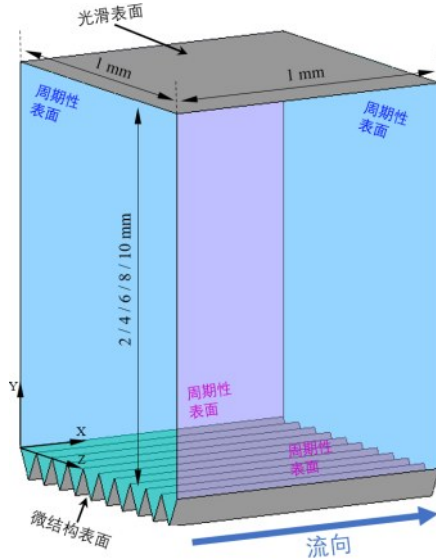


图 2 计算域示意图

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 采用下式计算:

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

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

$$Re = \frac{U_m D_H}{\nu} \quad (7)$$

式中, I 为湍流强度, U_m 为平均流向速度, m/s, D_H 为水力直径, m, 本文取 2 倍的间隙高度 H 。本文雷诺数范围为 4000-84000 左右, 处于湍流状态。

本文采用剪切应力输运 (SST) $k-\omega$ 湍流模型, 其由 Menter^[30] 提出的一种混合两方程模型, 其结合了 $k-\omega$ 模型在近壁区域的准确性和 $k-\varepsilon$ 模型在远场的自由流独立性, 通过混合函数在近壁区域使用 $k-\omega$ 模型, 在远离壁面处切换到类似 $k-\varepsilon$ 模型的形式, 能更准确地模拟多种流动情况, 尤其是涉及边界层、流动分离和再附着等现象的流动, 它利用对 y^+ 不敏感的壁面处理, 适当融合了粘性子层和对数层的解, 使得结果对壁面网格加密不敏感, 而标准壁面函数要求 $y^+ \geq 30$, 这可能导致其无法区分数值误差和建模误差, 故本文采用了剪切应力

输运 (SST) $k-\omega$ 湍流模型。

对于压力 - 速度耦合, 采用 SIMPLE 格式, 梯度重建采用基于最小二乘网格方法, 在压力、动量、湍流动能和比耗散率项均采用高精度的二阶离散化方案, 可有效抑制数值扩散, 提高求解精度。同时监测光滑壁面摩擦阻力和微沟槽表面摩擦阻力, 为保证摩擦阻力的全局守恒性和收敛性, 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, 无论是沟槽面还是光滑壁面的近壁分辨率均设置为 2×10^{-6} m 的第一层网格高度和 1.1 的

网格增长率, 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 和 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, 在 Martin and Bhushan^[31] and Choi 等^[32] 的数值研究中流向上采用了 $\Delta x^+ \approx 30$ 的网格分辨率, 因此本研究在流向上设置了 6 个节点, $\Delta x^+ \approx 20$ 的流向分辨率是完全足够的。最终 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。

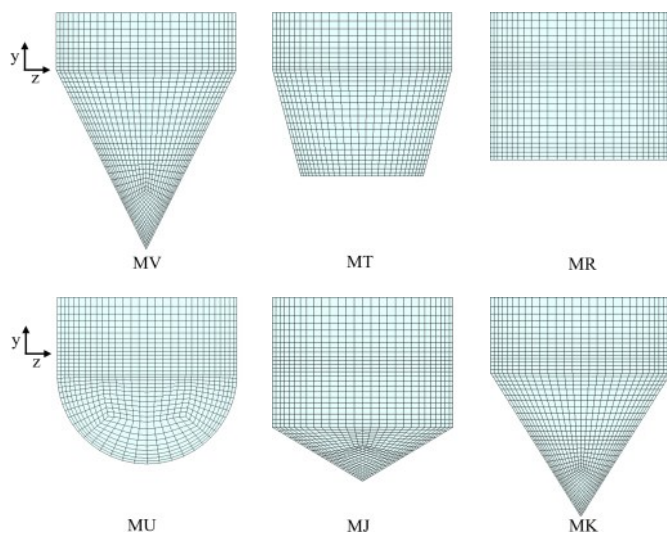


图3 沟槽网格

Fig. 3 Groove grid

网格无关性验证采用 Celik^[33] 方法, 即通过网格收敛指数 (GCI) 来评估, 对 2 mm 间隙高度下的 MT 型沟槽开展验证, 分别设置了 3 万、7 万、16 万和 36 万单元数量的 4 套网格, 网格细化率

均高于 1.3, 符合 GCI 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 GCI 值, 图 4 是模拟值与其外推误差的图形

展示。由于GCI值是根据表观阶数 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。从表中结果可以看出, N3网格的GCI值已经低至1%,满足精度要求,故选用16万网格数量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	网格数 ($\times 10^4$)	r_i	F_{groove} (10^{-5}N)	外推误差 _{$i+1, i$} (%)	$\text{GCI}_{i+1,i}$ (%)
N1	3.02	1	6.06117	—	—
N2	6.76	1.31	6.13625	3.80	4.93
N3	16.07	1.33	6.15545	0.92	1.16
N4	36.51	1.31	6.15245	0.16	0.19

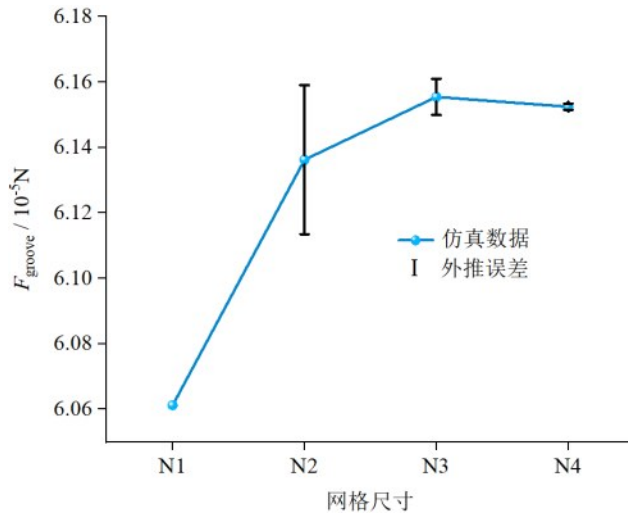


图4 网格无关性验证

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, 将光滑壁面摩擦阻力系数 C_f 与 Zanon 等^[34]的经验公式进行比较, 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:

$$C_f = 0.058 Re_m^{-0.243} \quad (8)$$

$$Re_m = \frac{U_m \delta}{\nu} \quad (9)$$

图5给出了三种间隙高度条件下光滑平壁的摩擦阻力系数 C_f 与经验公式(8)的对比, 可以看出其具有很好的一致性, 说明了 SST $k-\omega$ 模型的可靠性。

图6给出了6 mm 间隙高度下光滑壁面在流速为4 m/s时速度分布与壁面

规律的比较,可以看出,其速度分布也与壁面规律符合良好。

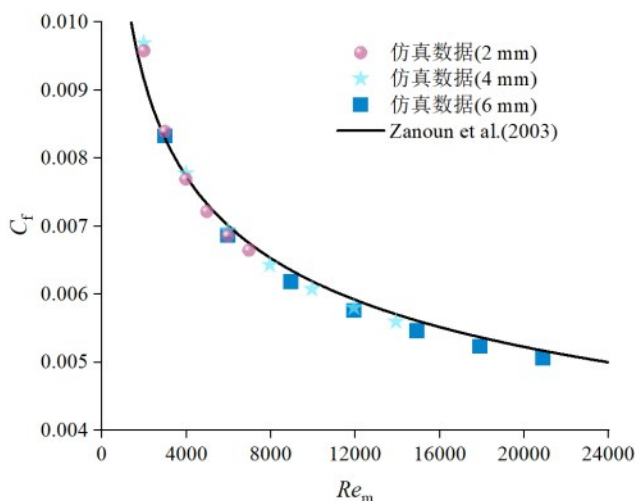


图5 光滑平壁阻力系数与经验公式对比

Fig. 5 Comparison of smooth wall drag coefficient with empirical formulas

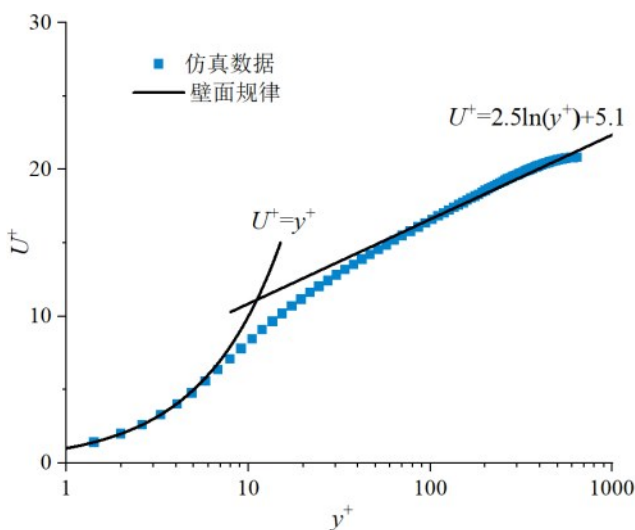


图6 计算速度分布与壁面规律对比

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

$$DR = \frac{F_{\text{groove}} - F_{\text{smooth}}}{F_{\text{smooth}}} \times 100\% \quad (10)$$

其中, F_{groove} 表示沟槽表面受到的总摩擦阻力, F_{smooth} 表示光滑壁面受到的总摩擦阻力, DR 为负值则表示产生了减阻效果。

为进一步验证湍流模型的可靠性,图7给出了MV型沟槽在6 mm间隙高度下的减阻效果 DR 随无量纲间距 S^+ 的分布,并与Walsh^[21]的一组同类型沟槽

的实验数据进行比较,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。

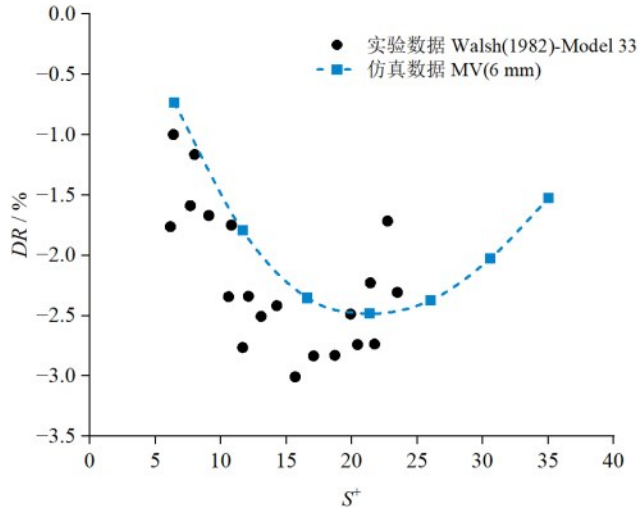


图7 MV型沟槽仿真数据与Walsh^[21]相应实验数据比较

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

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时进行结果与讨论。

壁面处摩擦切应力可由下式获得:

$$\tau = \mu \frac{dU}{dy} \quad (11)$$

式中, τ 为壁面摩擦切应力,Pa, μ 为流体动力粘度,Pa·s, dU/dy 为近壁法

向速度梯度。

图8展示了4种沟槽形状和光滑壁面区域附近的速度云图,从图中可以看出,四种沟槽的低速区(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^[6-7]提出的突出高度论,即沟槽尖端的速度梯度较大,而表观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,相当于增厚了粘性底层,使得壁面处剪切应力降低,实现了减阻。

由式(11)可以得出,壁面摩擦切

应力与近壁速度梯度成正比。从图8中的速度分布可以看出,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。

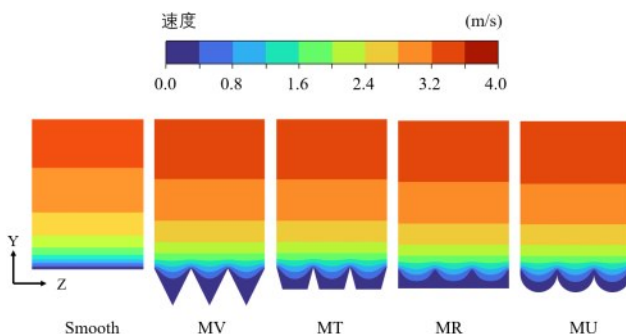


图8 4种形状沟槽和光滑壁面的速度分布

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

3.1.2 表面摩擦切应力分布

为了解不同沟槽如何实现减阻,以及不同沟槽之间减阻的差异性,作者对四种沟槽表面的摩擦切应力分布进行了分析。图9是4种沟槽的摩擦切应力沿展向分布情况,以蓝色线示出,作为比较光滑壁面的摩擦切应力以黑色线示出,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。可以看出,四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型沟槽高达180 Pa,远高于光滑壁面的摩擦切应力46 Pa,但其增阻区域远小于减阻

区域,四种沟槽还是呈现出明显的减阻效果。

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分差值评价,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, $y^+ \leq 5$ 时为粘性底层,中间为过渡层,而在远离壁面的区域为对数律分布层,其平均流向速度服从对数分布,并由下式给出:

$$U^+ = 2.5 \ln(y^+) + 5.1 \quad (12)$$

该公式适用于 $y^+ \geq 30$ 区域,这是广泛接受的。

对粗糙表面,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

用, 修改后的方程可写成:

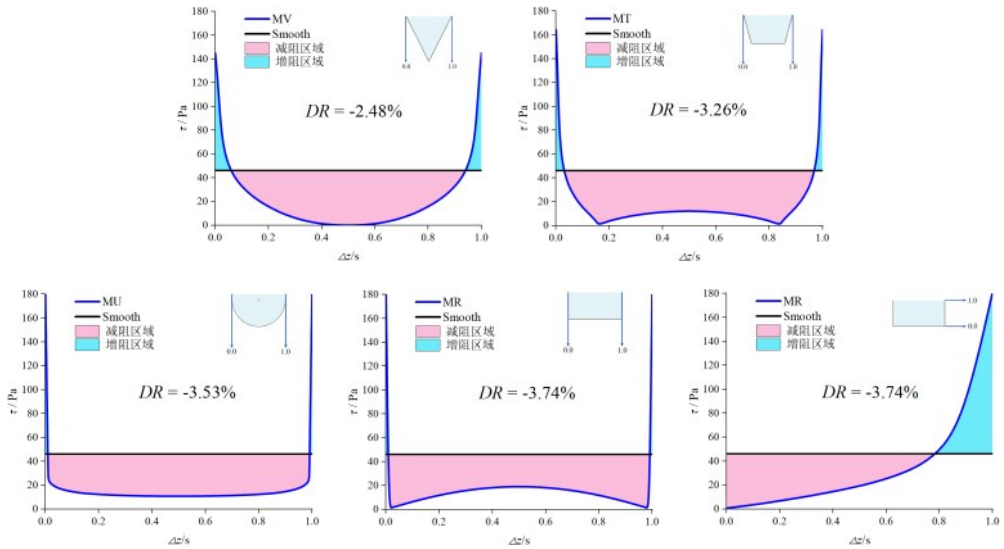


图9 4种形状沟槽和光滑壁面的摩擦切应力展向分布

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

$$U^+ = 2.5 \ln(y^+) + 5.1 + \Delta U^+ \quad (13)$$

对于大多数粗糙表面, 粗糙度函数 ΔU^+ 为负值, 会导致无量纲平均速度 U^+ 减小。

图 10 分别为四种沟槽从槽谷 (Valley-start) 和槽峰 (Peak-start) 两个不同起始点, 到 $y=3 \text{ mm}$ (半间隙高度位置) 的流向平均速度分布曲线图, 并以光滑壁面的速度分布曲线作为对比。

从图 10 可以看出, 平均速度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, 而在槽谷处, 局部摩擦切应力减小, U^+ 增大, 表现为减阻, 此表明不同展向位置的壁

面摩阻分布可以用无量纲平均流速进行表征, 也证实了用式 (13) 粗糙度函数 ΔU^+ 表征减阻的有效性, 即 ΔU^+ 为正值时表现为减阻。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, 在图 9 中可以看出约为 180 Pa。MV 槽谷起始点的平均速度分布曲线最高, 其末端值 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, 但在槽谷处是四种形状里减阻效果最好的。

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,四种沟槽的平均速度分布图均很好说明了此规律。

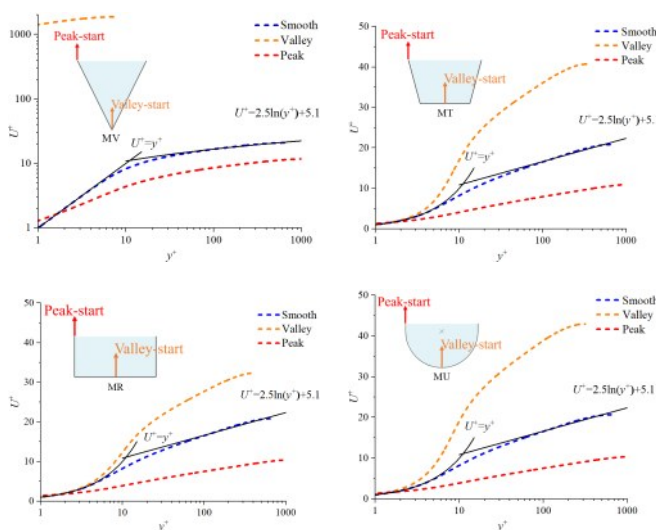


图 10 4种形状沟槽和光滑壁面的平均速度分布

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

3.1.4 湍流动能分布

湍流动能是表征湍流脉动强度的重要物理量,在流动中,湍流动能和摩擦阻力息息相关,因此对于减阻研究,分析不同沟槽引起的湍流动能变化是非常重要的。图 11 是 4 种沟槽和光滑壁面在 $x=0.5$ mm 的 yz 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。

为定量描述沟槽对湍流分布的影响,图 12 给出了 MU 型沟槽沿槽谷中心 (Valley-start) 到上光滑壁面的湍动能分布曲线。对光滑壁面, $k_{\max}$ 出现在

$y^+ \approx 46$ 左右,而对于 MV、MT、MR 和 MU 表面, $k_{\max}$ 分别出现在 y^+ 为 67、56、56.4 和 54.5 的位置,最大湍流动能位置被分别推离了 21、10、10.4 和 8.5 个无量纲壁面单位,此结果与 Bechert 等^[6-7]提出的减阻机理一致,即湍动能的偏离壁面产生了较厚的粘性底层,降低了摩擦阻力。由图 12 还可以看出, 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。

3.1.5 流向涡量分布

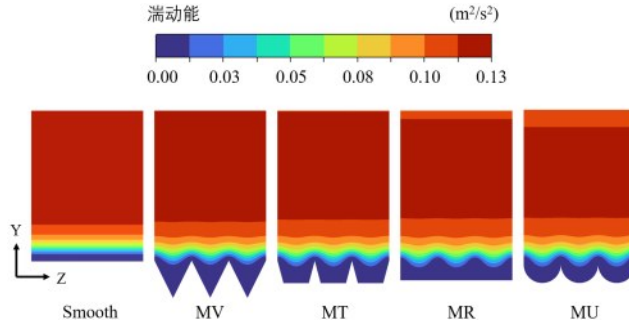


图 11 4 种形状沟槽和光滑壁面的湍流动能分布

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

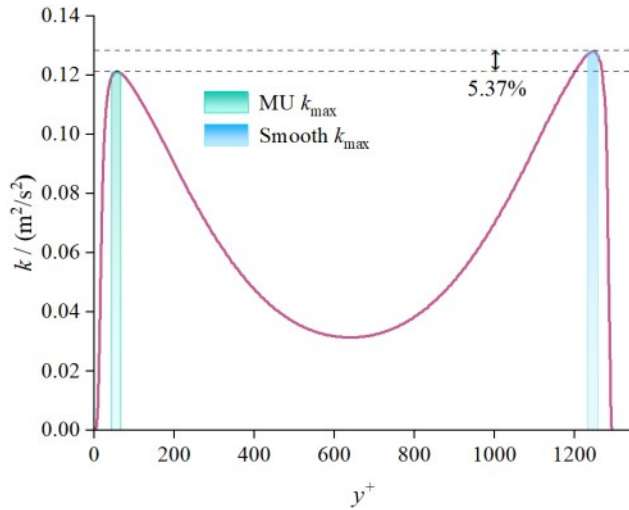


图 12 MU 型沟槽法向湍流动能分布

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

在湍流流动中, 涡流运动可将近壁区的低速流体卷入到距离壁面稍远的高速区域, 这样低速流体被加速, 也可将高速流体压入到近壁的低速区域, 高速流体在此被减速, 这是湍流边界层内速度脉动的重要来源。上喷下扫运动被认为是湍流猝发的标志, 关系到雷诺应力、壁面摩擦阻力以及湍流控制等各方

面, 是湍流边界层内高摩擦阻力的来源, 因此观察流向涡量分布对于探究沟槽减阻机制与减阻性能有非常大的帮助。

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在槽峰处出现, 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^[32]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14中进一步给出了槽峰处放大的流向涡量图。

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。

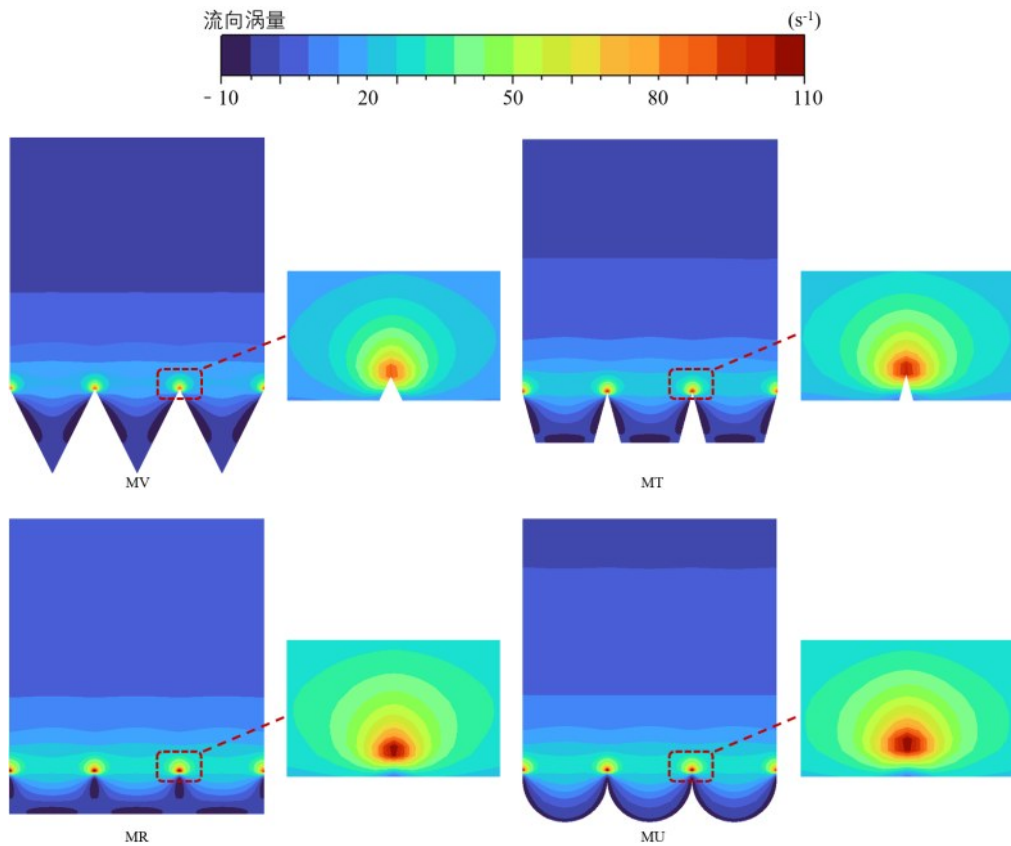


图13 4种沟槽的流向涡量分布和槽峰处的放大图对比

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,多是针对无量纲参数 s^+ 、 h^+ 的度量,本文以此为基础,增加了横截面积 l_g^+ 和湿润周长 P^+ 的分析。

图14为沟槽MV、MT、MR和MU在不同间隙高度条件下的减阻效果对比。可以看出,对于无量纲槽宽 s^+ ,2、4和6 mm间隙高度时,其最佳减阻效果分别出现在19-24、17-22和16-21时,这与Walsh获得的沟槽在无量纲槽宽 $s^+ \approx 18$ 时减阻效果最大的结论是基本一致的。对于无量纲横截面积 l_g^+ ,其最佳减阻效果分别出现在13-17、12-16和11-15时,这与Garcia-Mayoral and Jimenez获得的无量纲横截面积 $l_g^+ \approx 11$ 时减阻效果最好的结论也基本相符。而对于本文重点讨论的无量纲湿周 P^+ ,尽管不同沟槽出现最佳减阻效果的湿润周长 P 有一定差异,还是可以看出当无量纲湿周 $P^+ \approx 30-50$ 的范围下,尤其是40附近时,各间隙高度下沟槽减阻效果均最好。

关于减阻效果优劣,各间隙高度下MU和MR的减阻效果较好,MT次之,MV最差,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呈现明显增长趋势,2 mm高度时,4种沟槽中大部分流况为增阻,4和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巨大。

另外,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缩小到18.5, l_g^+ 从15缩小到13, P^+ 从44缩小到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

摩擦阻力 F 是摩擦切应力 τ 在流固接触面上的积分值,由于流向上具有周期性,因此 F 可以等价于 τ 在湿润周长 P 上的积分,由此可见无量纲湿润周长 P^+ 的重要性。为进一步研究无量纲湿周 P^+ 对各种沟槽减阻性能的影响,在四种常见沟槽的基础上设计了MJ和MK型沟槽,按绝对湿周从大到小依次为MV、MK、MR、MT、MJ和MU。

图15为6种不同湿润周长的沟槽在6 mm间隙高度和3和4 m/s流速条件下的减阻效果对比,从图中可以看出,在两个最佳流速下,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。可以将减阻效果的综合体现分为“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。这一结论在 Qiu 等^[14]的文章中也得出过,对于本文的 6 种沟槽而言,若忽略 MR 和 MJ 型沟槽,剩下的 4 种沟槽与 Qiu 等文中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结论中,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,独特的点在于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,且这个法向湿润周长占总湿润周长的比例很大,在本文的 MR 中为 50%,在图 9 中可以看出,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 Pa。

事实上 MJ 和 MK 型沟槽的设计就是在 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。因此,可以得出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

为进一步明晰沟槽结构减阻效果随间隙高度变化的趋势,图 17 中展示了 MU 型沟槽在间隙高度 2-10 mm 条件下的减阻效果对比。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,基于图 14 间隙高度 2-6 mm 时其他类型沟槽的减阻效果变化情况,可以得到普适性结论,各种类型的纵向沟槽的减阻效果随间隙高度增加而增大,而增大幅度逐渐减小。

以上关于间隙高度影响减阻效果的结论,作者作如下解释。一方面,在 2 mm 间隙高度条件下,不同沟槽结构的上光滑壁面的摩擦系数不一致,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 4 mm 间隙高度条件下,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, 此干涉越来越小, 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, 由式 (5)、(6) 和式 (7) 可知, 随着

间隙高度增加, 湍流强度 I 和湍流动能 k 均减小, 但幅度越来越小, 逐渐趋于“稳定”, 和图中减阻效果随间隙高度变化的结论具有一致性。

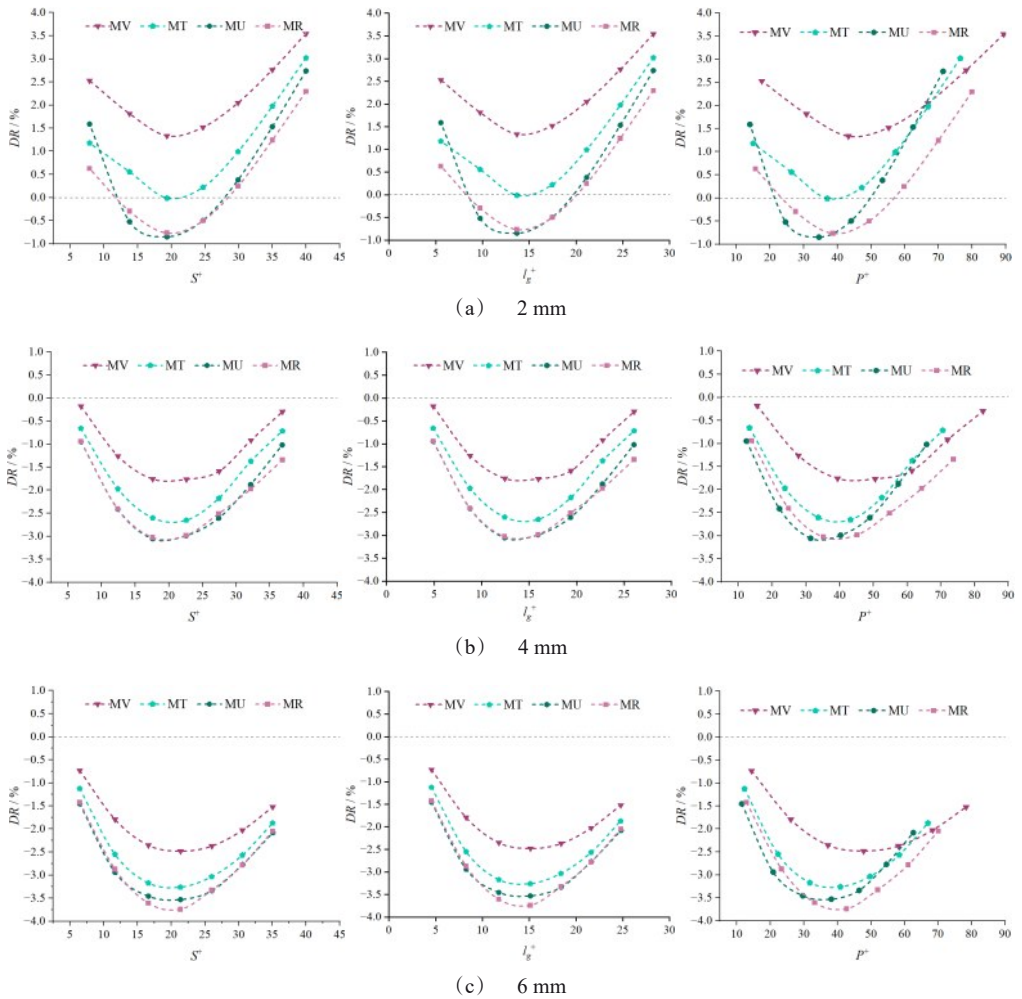


图 14 不同形状沟槽的减阻效果在 3 种无量纲参数和 3 种间隙高度下的对比
Fig. 14 Comparison of the drag reduction effects of grooves with different shapes under three dimensionless parameters and gap heights

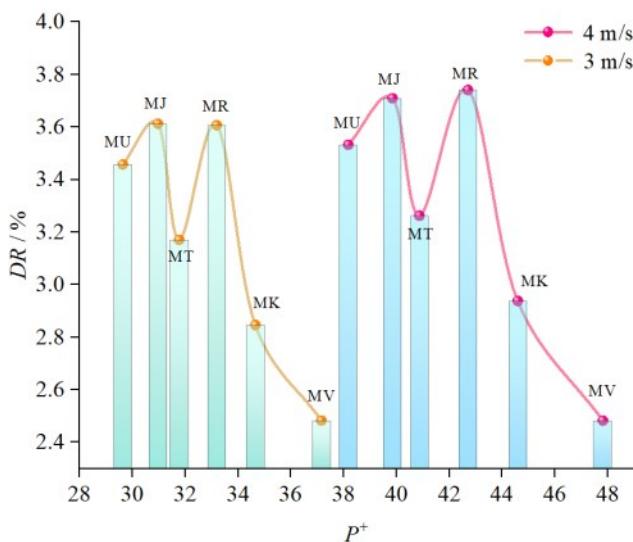


图15 不同湿润周长沟槽的减阻效果对比

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

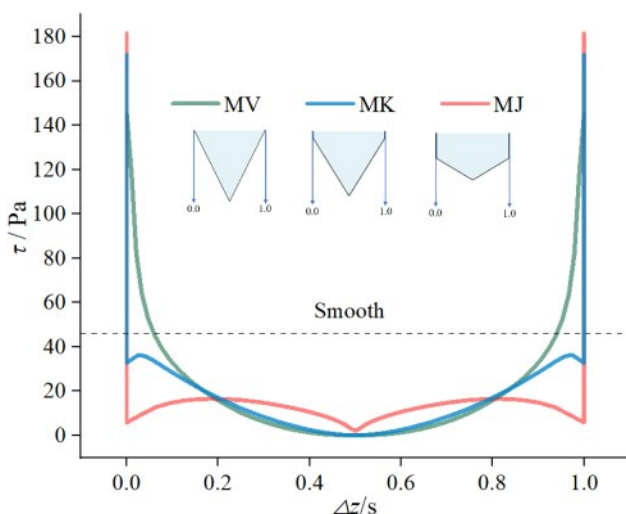


图16 MV, MK和MJ表面摩擦切应力展向分布对比

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

4 结论

本文采用数值方法,研究了间隙高度受限条件下6种纵向沟槽的减阻特性,从不同角度探讨了其减阻机制,为

纵向沟槽减阻在间隙高度受限条件下的理论与工程应用,提供了重要技术支撑,所获主要结论如下:

(1) 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

方面探讨了纵向沟槽的减阻机制, 分析了其减阻性能的差异, 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、降低湍动能峰值, 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。

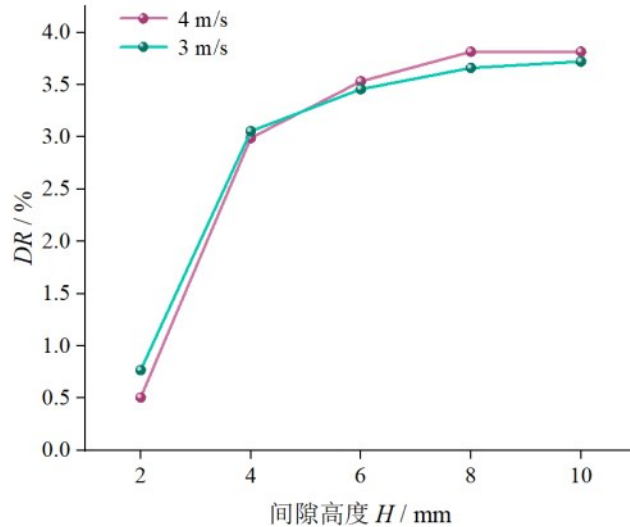


图 17 不同间隙高度下 MU 型沟槽的减阻效果对比

Fig. 17 Comparison of Drag Reduction Effects of MU-Shaped Grooves at Different Gap Heights

(2) 无量纲槽宽 s^+ 、无量纲横截面积 I_g^+ 和无量纲湿周 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, 且三个最佳无量纲参数均随间隙高度增加有小幅减小。因此, 在受限空间内的减阻, 此无量纲槽宽、无量纲横截面积和无量纲湿周的最佳参数为纵向沟槽的结构优化提供了参考。

(3) 法向湿润周长增加可以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周占比以提高减阻效果, 此为沟槽横截面形状的优化方向提供了指导。

(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, 在本文研究中矩形沟槽在 8 mm 间隙高度时最大减阻 4.2%。

参考文献

- [1] DUAN P, CHEN X. Composite drag con-

- trol and energy flux analysis for wall turbulence[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2024, 38(4): 1-10.
- [2] SCHLICHTING H, GERSTEN K. *Boundary-layer theory* [M]. Berlin: Springer Nature, 2017.
- [3] OHTA T, SHIRAHATA F. Friction drag model for axial turbulent flow along the surface of a circular cylinder based on the universal characteristics of wall turbulence [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2024, 1000: A35.
- [4] STUCKENBRUCK S. *Flow mechanics of pipelines*[M]. Cham: Springer International Publishing, 2023: 1-49.
- [5] WALSH M J. Drag characteristics of V-groove and transverse curvature riblets [C]. *Symposium on Viscous Flow Drag Reduction*, 1980.
- [6] 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.
- [7] BECHERT D W, BARTENWERFER M. The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 206: 105-129.
- [8] BACHER E V, SMITH C R. A combined visualization-anemometry study of the turbulent drag reducing mechanisms of triangular micro-groove surface modifications [C]. *AIAA Shear Flow Control Conference*. Boulder, 1985.
- [9] 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(7): 6694-6701.
- [10] 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 J. Experimental exploration of new concepts for turbulent drag reduction[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 1996, 14(3): 304-310.
- [11] 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.
- [12] WILKINSON S P, ANDERS J B, LAZOS B S, et al. Turbulent drag reduction research at NASA langley: Progress and plans[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1988, 9(3): 266-277.
- [13] 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 X, FENG Y, REN L. Affecting of riblets shape of nonsmooth surface on drag reduction[J]. *Journal of Hydrodynamics A*, 2006, 21(2): 232-238.
- [14] QIU H, CHAUHAN K, LEI C. A numerical study of drag reduction performance of simplified shell surface microstructures[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217(1-2): 107916.
- [15] BAI Q, BAI J, MENG X, et al. Drag reduction characteristics and flow field analysis of textured surface[J]. *Friction*, 2016, 4(2): 165-175.
- [16] WU T, CHEN W, ZHAO A, et al. A comprehensive investigation on microstructured surfaces for underwater drag reduction[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 218 (2):107902.
- [17] 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.
- [18] ZHU Q, ZHANG C, YU F, et al. Investigation on drag reduction on rotating blade surfaces with microtextures[J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2024, 15: 833-853.
- [19] LI T, YANG T, DONG Q, et al. Numerical simulation study on the drag reduction characteristics of grooves-microbubbles coupling surfaces[J]. *International Journal of Metrology & Quality Engineering*, 2024, 15: 1-9.
- [20] 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.
- [21] WALSH M. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets[C]. *AIAA 20th Aerospace Sciences Meeting*, Orlando, 1982.
- [22] WALSH M J. Riblets as a viscous drag reduction technique [J]. *AIAA Journal*, 1983, 21(4): 485-486.
- [23] 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 F, XU P. Simulation analysis and mechanism study on drag reduction of "bionics" groove[J]. *Aeroengine*, 2021, 47(2): 28-32.
- [24] 冯晓明, 朱东坡, 颜兵兵, 等. 基于 Fluent 的非光滑表面减阻仿真实验[J]. *实验技术与管理*, 2024, 41(1): 85-90.
- FENG X, ZHU D, YAN B, et al. Simulation experiment of drag reduction on non-smooth surfaces based on Fluent[J]. *Experimental Technology and Management*, 41(1): 85-90.
- [25] 李茂林, 张浩, 玄克勇, 等. 三角形微沟槽壁面湍流减阻的数值研究[J]. *煤气与热力*, 2023, 43(3): 18-24.
- LI M, ZHANG H, XUAN K, et al. Numerical study on turbulent drag reduction on triangular micro-groove wall[J]. *Gas & Heat*, 2023, 43(3): 18-24.
- [26] 王巍, 黄茹, 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 W, HUANG R, 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.
- [27] 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]. *大连理工大学*, 2016.
- YOU L. Study on the correlation between surface structure characteristics of V-shaped grooves and drag reduction performance[D]. *Dalian University of Technology*, 2016.
- [28] 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.
- [29] JIMÉNEZ J, MOIN P. The minimal flow unit in near-wall turbulence[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, 225: 213-240.
- [30] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [31] MARTIN S, BHUSHAN B. Fluid flow

- analysis of a shark-inspired microstructure [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 756: 5-29.
- [32] CHOI H, MOIN P, KIM J. Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, 255: 503-539.
- [33] 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: Transactions of the ASME*, 2008, 130(7): 078001.
- [34] ZANOUN 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.