

固体颗粒对沟槽湍流边界层影响的实验研究¹⁾严 冬^{*,†} 孙 姣^{*,†,**} 高天达^{*,†} 陈 丕^{*,†} 成雨霆^{*,†} 陈文义^{*,†,2)}^{*} (河北工业大学过程装备与控制工程系, 天津 300130)[†] (河北工业大学化工学院, 化工节能过程集成与资源利用国家地方联合工程实验室, 天津 300130)^{**} (天津大学机械工程学院力学系, 天津 300350)

摘要 本文采用粒子图像测速技术 (particles image velocimetry, PIV) 研究固体颗粒对放置在平板湍流边界层中的平壁和沟槽壁面减阻效果的影响. 实验对清水和加入粒径为 155 μm 聚苯乙烯颗粒的流法向二维速度场信息进行采集, 对不同工况下的平均速度剖面、雷诺应力和湍流度等统计量进行对比, 分析流体在边界层中的行为. 运用空间局部平均结构函数提取了不同工况湍流边界层喷射-扫掠行为的空间拓扑结构并进行比较. 结果发现, 在不同的壁面条件下, 粒子加入后的对数律区中无量纲速度均略大于清水组, 雷诺切应力有所降低, 湍流度有所减弱. 对于不同流场速度下的沟槽而言, 颗粒的加入均降低了壁面附近的阻力, 而颗粒单独作用于光滑壁面的减阻效果并不明显. 加入粒子后的相干结构数目有所增加, 法向脉动速度下降. 沟槽壁面附近的相干结构数目有所增加, 法向脉动速度在自由来流速度较大时有所上升, 在速度较小时有所下降. 这表明不同减阻状况下的沟槽均能将大涡破碎成更多的涡, 并且粒子的加入强化了这种破碎作用.

关键词 沟槽壁面, 两相流, 粒子图像测速, 湍流边界层, 相干结构

中图分类号: O357.5^{†2} 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-21-149

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF SOLID PARTICLES ON RIBLET-PLATE TURBULENT BOUNDARY LAYER¹⁾Yan Dong^{*,†} Sun Jiao^{*,†,**} Gao Tianda^{*,†} Chen Pi^{*,†} Cheng Yuting^{*,†} Chen Wenyi^{*,†,2)}^{*} (Department of Process Equipment and Control Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)[†] (National-Local Joint Engineering Laboratory for Energy Conservation in Chemical Process Integration and Resources Utilization, School of Chemical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)^{**} (Department of Mechanics, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract The particle image velocimetry (PIV) is used to conduct experimental research in the solid-liquid two-phase wall turbulent boundary layer in smooth and riblet surface. The streamwise-normal two-dimensional velocity field information of clean water (as single phase) and water with polystyrene particles which diameter is 155 μm was collected, and the turbulence statistics such as the average velocity profile, turbulence intensity and Reynolds shear stress of the smooth and riblet surface are compared in particle phase and clean water to analyze the behavior of fluid in different wall boundary layers. Coherent structures were detected by quadrant splitting method and the concept of local average velocity structure functions of the streamwise is utilized to extract the sweep and eject motions under different

2021-04-13 收稿, 2021-07-05 录用, 2021-07-06 网络版发表.

1) 国家自然科学基金 (11572357, 11602077), 河北省自然科学基金 (A2021202009) 资助项目.

2) 陈文义, 教授, 主要研究方向: 实验流体力学. E-mail: cwy63@hebut.edu.cn

引用格式: 严冬, 孙姣, 高天达, 陈丕, 成雨霆, 陈文义. 固体颗粒对沟槽湍流边界层影响的实验研究. 力学学报, 2021, 53(8): 2279-2288

Yan Dong, Sun Jiao, Gao Tianda, Chen Pi, Cheng Yuting, Chen Wenyi. Experimental study on the effect of solid particles on riblet-plate turbulent boundary layer. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(8): 2279-2288

operating conditions. Under the different wall conditions, the dimensionless fluid velocity with particles was greater than that of clean water, the Reynolds stress in the logarithmic law region is decreased and the turbulence intensity is receded. The addition of particles reduces the drag reduction near the riblet surface with different velocities, but the drag reduction effect of particles acting on smooth wall surface is not obvious. The number of coherent structures is increased with the addition of particles and the normal fluctuating velocity is decreased. The number of coherent structures is increased near the riblet surface, the normal fluctuating velocity is increased in a higher free flow velocity and the normal fluctuating velocity is decreased in a lower free flow velocity. This indicates that the large vortices can be broken into more vortices under different drag reduction conditions, and this effect is increased by the addition of particles.

Key words riblet, two-phase flow, PIV, turbulent boundary layer, coherent structure

引言

减阻沟槽作为一种被动的减阻方式因其不消耗能源的特点拥有广泛的应用前景. 减阻沟槽起源于对于海豚皮肤的仿生学研究^[1], 海豚和鲨鱼表皮存在着微小的, 沿着水流方向排列的沟槽结构. 这些结构与鲨鱼体表的清洁程度和快速游泳能力有较大的关系^[2]. 顺流沟槽的研究始于 20 世纪 80 年代美国兰利研究所^[3-5], 之后科研人员对于不同边界层中的减阻效果和机理进行了大量研究, Walsh 等^[5-6]和 Bechert 等^[7-8]对于不同截面形状的平行沟槽分别进行了大量模拟和实验, 分别得到了不同截面形状下沟槽的减阻曲线. 对于无量纲间距相同的不同形态的沟槽而言, 其单条沟槽截面积越小, 即越“薄”的沟槽减阻效果越好^[9], 但更加不耐用且更易失效. 直线锯齿形沟槽易于加工, 成本较低并且更加耐用, 更加符合生产生活中使用的减阻沟槽形态.

大量实验和模拟数据表明, 对于某一形态的沟槽, 其存在一个有效的减阻范围^[8], 这个范围与沟槽的无量纲高度 h^+ 和无量纲间距 s^+ 有关, García-Mayoral 和 Jiménez^[10] 使用沟槽截面积的平方根 l_g^+ 作为新的特征长度, 以更精确地刻画减阻曲线. 目前关于顺流向沟槽的减阻机理有两个理论: 一是沟槽的表面可以视作一个“虚拟平面”, 沟槽相对于这个“虚拟平面”的表面仍存在一定的突出高度, 这突出结构抑制了沟槽附近的展向脉动^[11-13]; 二是沟槽壁面边界层的流向涡结构相对于光滑壁面有所抬升^[14-17], 这减小了流向涡同壁间的接触面积和相互作用.

对湍流边界层中的沟槽壁面的研究在之前已有一定的进展, 近年来也有较多的风洞、水洞和水槽中的实验数据和数值模拟结论. 这些文章得到了较为统一的边界层中的统计量分布——即减阻沟槽壁面与光滑平壁面相比, 其黏性底层及缓冲层增厚, 对

数律区外移^[18-20], 并且相应的雷诺应力和湍流度的强度有所下降, 极值点也有所外移.

液固两相流在日常生产生活中极为常见, 如污水处理、含泥沙的自然水体和颗粒相水力输运等. 在对平壁面液固两相流的研究中, 研究人员发现固体颗粒会影响流场的湍动能. Gore 等^[21] 在关于自由射流和管内流的研究中提出了一个参数 $O=d_p/l$, 其中 d_p 为固体粒径, l 为湍流积分长度尺度, 实验结果表明在多种流动状况下, 当 $d_p/l > 0.1$ 时, 颗粒的加入会增强湍动能, 反之则会降低湍动能. Noguchi 等^[22] 研究了开口槽流道中的固液两相流. 他们的结果验证了含不同直径颗粒的流场同清水流相比湍流程度得到了减弱或者增强, 该实验说明了临界粒径与 Kolmogorov 微观尺度相关. 后续的其他实验中也同样提出存在一个分界尺度, 小于该尺度粒径的颗粒会减弱近壁区的湍流强度^[23], 而大于该尺度的颗粒会增强近壁区的湍流强度^[24-25]. Shokri 等^[26] 研究了大雷诺数下颗粒直径对于液体流动中湍流强度的影响. 实验中使用了不同直径的玻璃珠, 观察到较小的颗粒会造成较强的近壁湍流, 并且高雷诺数下的较轻颗粒具有更加均匀的分布. 其他研究者的实验同样表明颗粒的加入会对相干结构产生抑制^[27-28] 或促进作用^[29], 这些影响与固体颗粒的具体形态有关.

减阻沟槽所适合的工作条件, 譬如管内的流体输运, 飞机和船舶的表面减阻等都不可避免地涉及到两相流. 在这些条件下工作的沟槽其颗粒相尺度大多小于 Kolmogorov 尺度. 根据已有研究发现, 目前的沟槽研究实验中的流动相大多数集中于清水相和空气相, 而对于含颗粒的液体或含尘气体的研究较少. 对于减阻沟槽应用于被污染的介质或在输运固体颗粒的情况下能否保持减阻尚未得到验证.

本文使用粒子图像测速技术 (particles image

velocimetry, PIV) 对清水和粒子加入后的不同壁面湍流边界层进行研究, 通过对平均速度剖面线, 雷诺应力和湍流度等统计量进行对比, 再进一步使用空间平均局部结构函数, 探讨粒子对不同壁面湍流边界层中拟序结构的影响.

1 实验设备及参数

实验在河北工业大学粒子图像测速流体力学实验室中型低速循环水槽中进行, 其背景湍流度小于 0.9%. 实验装置如图 1 所示, 水槽实验段长约 2600 mm, 宽 500 mm, 高 600 mm. 光滑大平板为有机玻璃材质, 长 2200 mm, 宽 500 mm, 厚 15 mm, 前缘进行 8:1 椭圆修形. 平板竖直放置在水槽中, 令待测面与水槽侧壁面距离为 260 mm. 为获得充分发展的湍流边界层, 在距离平板前缘 100 mm 处粘贴一条直径为 5 mm 的绊线. 在距平板前缘 1600 mm 处有一 300 mm × 300 mm 的凹槽, 内可嵌平板和沟槽板以进行不同壁面形态的研究, 沟槽板如图 2 所示. 实验中通过调节动力段轴流泵转速将来流速度 U_∞ 调为 0.205 m/s 和 0.280 m/s, 实验环境温度为 20 °C, 此时水的密度 $\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3$, 运动黏性系数 $\mu = 1.0067 \text{ mm}^2/\text{s}$, 此时两种工况下的清水相平板的摩擦雷诺数 Re_τ 分别为 436.9 和 489.9. 实验选用 15 μm 的聚苯乙烯颗粒作为液相的示踪颗粒, 颗粒相选用直径 $d_p = 155 \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯颗粒, 颗粒密度 $\rho_p = 1050 \text{ kg/m}^3$, 其直径均小于 Kolmogorov 尺度. 液固质量比为 500:1 的液固两相混合液通过泵以 2 L/min 的流量从距液面深 300 mm, 距凹槽前缘 2.8 m 处注入. 沟槽尺寸如图所示. 实验数据通过德国 Lavision 公司的 PIV 系统进行采集. 激光器型号为 LPY700, 其双脉冲激光最高频率为 100 Hz, 最大能量为 100 mJ, 相机为 4MX 相机 (像素为 2048 × 2048), 最大采样频率为 180 Hz. 本实验中激光器能量为 90 mJ, 图像采集模式为双帧双曝, 采集频率为 90 Hz, 曝光时间为 1000 μs . 对于每个不同工况下的流法向平面进行采集, 样本为 8000 张, 图像实际视野约为 120 mm × 120 mm. 通过系统自带的 Davis 软件对采集的图像进行互相关处理, 查询窗口大小为 32 × 32 像素, 重叠率为 75%. 得到 256 × 256 个速度矢量. 注意到第一个有效查询窗口需从壁面开始测量, 本 PIV 系统不足以精确得到近壁区域, 特别是 $y^+ < 5$ ($U_\infty = 0.205 \text{ m/s}$) 和 $y^+ < 8$ ($U_\infty = 0.280 \text{ m/s}$) 的位置中的

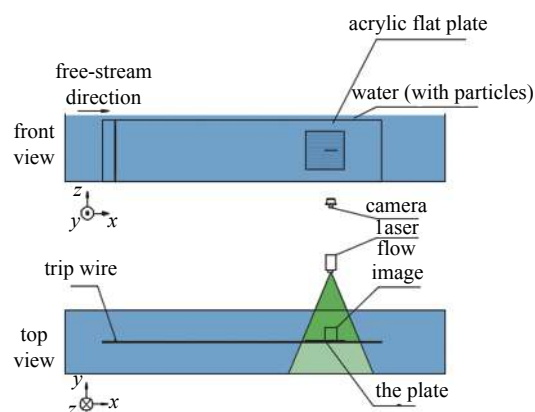
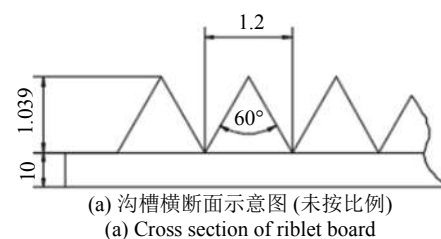
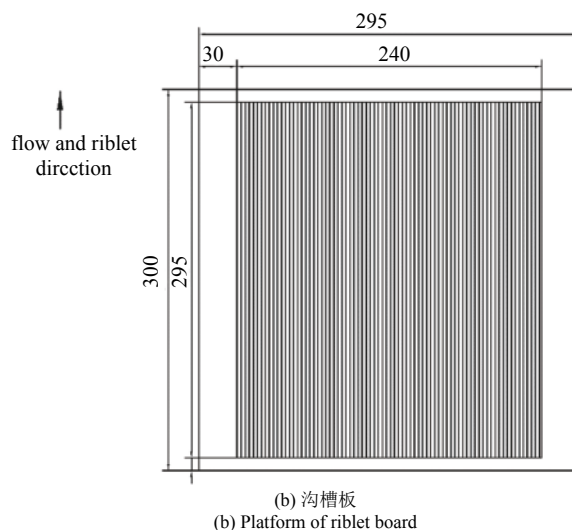


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental facility



(a) 沟槽横断面示意图 (未按比例)
(a) Cross section of riblet board



(b) 沟槽板
(b) Platform of riblet board

图 2 沟槽板示意图 (单位: mm)

Fig. 2 Schematic diagram of riblet plate (unit: mm)

速度场.

实验分为四组: 第一、二组为仅含示踪粒子的清水组, 其中第一组流体流过光滑壁面, 第二组流体流过沟槽壁面; 第三、四组为清水中加入 155 μm 聚苯乙烯颗粒的两相组, 第三组流体流过光滑壁面, 第四组流体流过沟槽壁面. 对两相流场的处理参考液固双流体模型, 即在数学处理上采用连续介质假设, 按照连续相处理; 而在动力学分析上则考虑颗粒相和流体相之间的耦合作用.

2 湍流边界层中的统计量分析

2.1 减阻率及平均速度剖面

本实验无法直接对壁面阻力进行测量, 故采用 Clauser 图法对摩擦速度 u^* 进行拟合^[30]. 该方法基于平板湍流边界层的对数律区无量纲速度和法向高度满足对数关系, 通过迭代法得到数值解. 对于光滑壁面, 其速度在对数律区满足

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (1)$$

其中 κ 为卡门常数, 本文取 $\kappa = 0.41$.

对于沟槽表面, 其理论零点要低于沟槽槽脊平面, 该方法中 y^+ 应替换为测量点坐标 y 与突出高度 h_p 的和, 同时存在速度偏移项 ΔU , 即

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B + \Delta U \quad (2)$$

对于式 (1) 和式 (2) 两侧同时对 y 取微分后, 均有

$$\frac{\Delta u}{\Delta y} = \frac{u^*}{\kappa} \frac{1}{y + h_p} \quad (3)$$

通过对式 (3) 的迭代计算可以得到摩擦速度 u^* . 定义颗粒雷诺数 $Re_p = d_p u_p / \nu$, 其中 $u_p = g d_p (\rho - \rho_f) / (18\mu)$, 为颗粒沉降系数; 颗粒 Stokes 数 $St = \tau_p / \tau_f$, 其中 $\tau_p = \rho_p d_p^2 / (18\mu)$, 为流体对颗粒的响应时间, $\tau_f = \nu / u^{*2}$ 为流体特征时间; g 为重力加速度, ρ_p 为颗粒密度, d_p 为颗粒直径, ρ_f 为流体密度, μ 为流体动力黏度, u^* 为摩擦速度, 经计算得到颗粒雷诺数为 0.100, 在两种自由来流速度下的颗粒斯托克斯数分别为 0.123 和 0.160. 无因次壁面尺度定义为 $WU = \nu / (\tau \rho)^{0.5}$ 其中, τ 为壁面摩擦应力, 在两种速度下的沟槽无因次间距 s^+ 分别为 10.4 和 14.1, 无因次高度 h^+ 分别为 9.0 和 12.2, h/s 为 0.87. 由文献 [8] 中图表推算, 0.205 m/s 时沟槽处于较优的工作状态, 0.280 m/s 的速度下沟槽已越过最优减阻区间, 并且接近失效.

减阻率 DR 定义为

$$DR = \frac{\tau_s - \tau_r}{\tau_s} \quad (4)$$

其中 τ_s 为光滑壁面的摩擦应力, τ_r 为沟槽壁面的摩擦应力, 有

$$\tau = \rho u^{*2} \quad (5)$$

同样地, 不同工况对于单相平板的减阻率定义为 DR^* , 其定义为

$$DR^* = \frac{\tau_0 - \tau_w}{\tau_0}$$

其中 τ_w 为工作状况的摩擦应力, τ_0 为单相壁面的摩擦应力. Bechert 等^[8] 提出沟槽壁面存在一虚拟原点, 该原点与沟槽尖端的距离称作突出高度, 这决定了沟槽尖端深入边界层的厚度. Bechert 在文章中提出了突出高度的计算方式^[8], 对于锯齿形沟槽, 有

$$\frac{h_p}{s} = \frac{1}{2\pi} \left[\gamma + 2 \ln 2 + \frac{\pi}{\tan \alpha} - \frac{\pi}{\alpha} + \psi \left(1 + \frac{\alpha}{\pi} \right) \right]$$

其中, $\gamma = 0.5772$ 为欧拉常数, ψ 为 Digamma 函数. 本沟槽顶角为 60° , 计算结果为 $h_p = 0.1707s$, s 为沟槽槽脊间距. 在两个速度下分别为 1.714 和 2.390 个无因次壁面尺度.

从表 1 中可以看出, 在 0.205 m/s 的速度下, 两种工况的沟槽壁面均有减阻效果, 并且加入颗粒后, 减阻效果有所提升. 在 0.280 m/s 的速度下, 清水相的沟槽壁面出现阻力上升的状况, 而两相工况中的沟槽壁面阻力仍然下降.

表 1 不同工况下的减阻效果对比

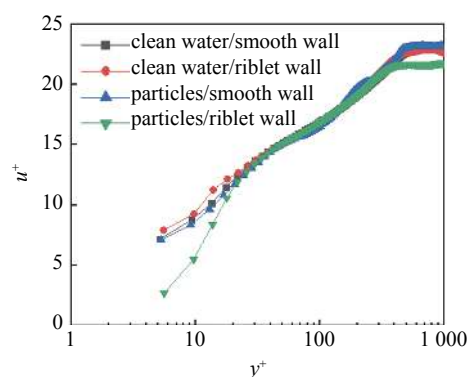
Table 1 Drag reduction under different working condition

	$U_\infty / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$u^* / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$DR / \%$	$DR^* / \%$
clean water smooth wall	0.205	0.0088	—	—
clean water riblet wall	0.205	0.0084	8.88	8.88
particle smooth wall	0.205	0.0086	—	4.49
particle riblet wall	0.205	0.0081	11.28	15.31
clean water smooth wall	0.280	0.0115	—	—
clean water riblet wall	0.280	0.0117	-3.51	-3.51
particle smooth wall	0.280	0.0115	—	0
particle riblet wall	0.280	0.0112	5.43	5.43

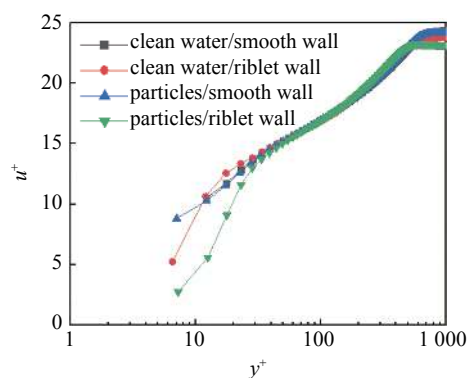
图 3 为两种速度下不同工况的流向平均速度剖面. 可以看到在清水相工况下, 沟槽壁面的缓冲层厚度略有减小. 而对于两相工况而言, 沟槽壁面的缓冲层均有所增厚, 对数律区外移, 边界层厚度有所增加. 分析可知两相流中颗粒的惯性使近壁面流体的运动更倾向于维持之前的行为, 从而抑制了展向的脉动. 对比两种工况下的光滑-沟槽壁面的流动, 可以看出沟槽壁面更有利于非洁净流体的输运. 并且颗粒的加入对于沟槽壁面的减阻能力有一定程度的提升.

2.2 湍流度及雷诺切应力

湍流度是衡量流场中湍流强弱的标准. 图 4 中给出了 $U_\infty = 0.205 \text{ m/s}$ 和 $U_\infty = 0.280 \text{ m/s}$ 下平均湍



(a) 0.205 m/s



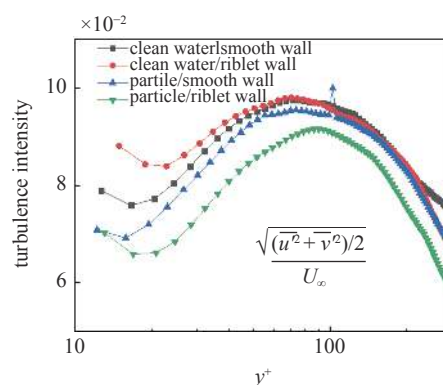
(b) 0.280 m/s

图 3 不同来流速度下流向平均速度剖面

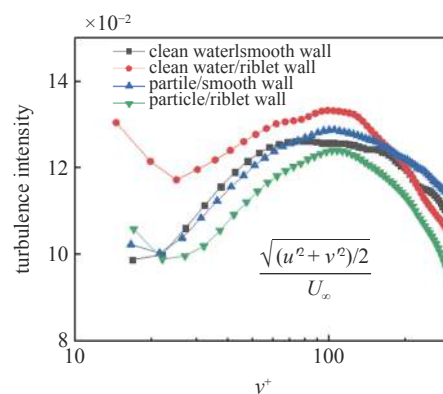
Fig. 3 Streamwise mean velocity profiles at different velocity

流度的对比. 可以看到, 在 0.205 m/s 的清水相流场中光滑壁面的湍流度在 $y^+ \approx 80$ 附近出现峰值, 清水相和含颗粒相沟槽壁面流场的湍流度分布曲线均与光滑壁面类似, 但其峰值内移, 强度近似不变, 这表明沟槽壁面的湍流脉动峰值更加接近壁面. 同清水相沟槽壁面流场相比, 两相沟槽壁面流场的湍流度分布曲线与清水相壁面分布曲线形状类似, 但是其峰值外移, 强度明显下降. 这说明颗粒的加入使得湍流脉动峰值更远离壁面, 并且削弱了流场内部的输运, 湍流脉动得到抑制. 在 0.280 m/s 的流场中, 可以看到相对光滑壁面而言, 清水相沟槽壁面的湍流度峰值位置几乎不变, 强度有所提高. 这意味着清水相光滑壁面流场中湍流最剧烈的部分对壁面的影响更大; 而两相流场中的沟槽峰值位置亦几乎不变, 但强度降低, 与阻力变化结论吻合.

雷诺应力是指在湍流的时间平均运动中, 流体颗粒之间动量交换所产生的附加应力. 雷诺应力越大, 说明流体颗粒动量交换就越大, 流体脉动就越强烈. 图 5 为不同速度下雷诺应力的对比, 可以看到在 0.205 m/s 下清水相光滑壁面流场的雷诺应力在 $y^+ \approx 40$ 附近较为平缓, 其峰值大约在 $y^+ \approx 30$ 和 $y^+ \approx 90$



(a) 0.205 m/s



(b) 0.280 m/s

图 4 不同来流速度下端流度分布曲线

Fig. 4 Distribution of the turbulence intensity at different velocity

处. 可观察到两种流动相下的沟槽壁面雷诺应力峰值均有所降低, 并且其峰值同样有所外移. 雷诺应力的降低说明动量交换减弱, 流体脉动被抑制, 是减阻壁面的一个典型特征. 在 0.280 m/s 的单相工况下可以看到沟槽壁面的雷诺应力峰值仍向外移动, 但峰值相对单相壁面有所增加, 这同平均速度剖面和阻力上升的结果吻合.

3 流动中的喷射-扫掠结构检测及其分析

从上文的统计量分析中可以看出, 颗粒的存在加强了沟槽的减阻效果. 但多种工况下颗粒对于沟槽的影响十分类似, 无法推断更加具体的机理上的影响, 故下文从拟序结构的方向进行进一步的分析.

相干结构是湍流边界层研究中的重要对象, 湍流边界层相干结构是指在尺度为边界层厚度的量级空间内流动特征一致或紧密相关的流动, 例如快慢斑、上升流、下扫流和各种涡结构^[31]. 对于不可压缩流体, 可以通过对相邻流体微团的相对速度来反映喷射和扫掠运动. 以下使用新象限分裂法和空间局部平均结构函数^[32]提取喷射-扫掠行为.

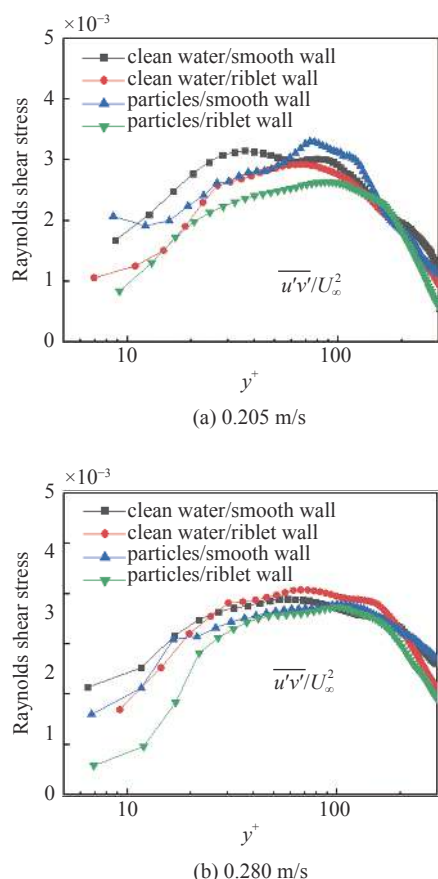


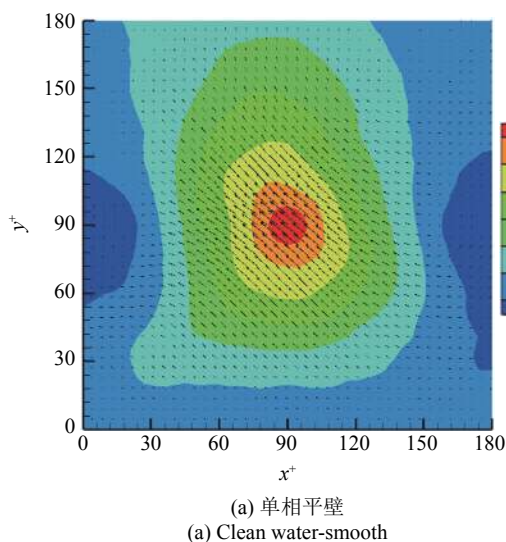
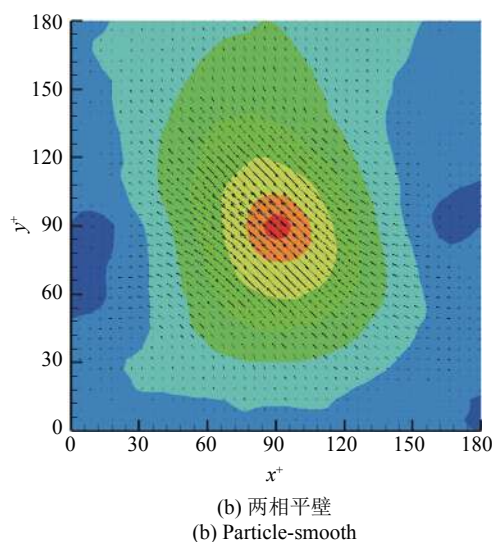
图 5 不同来流速度下雷诺切应力分布曲线

Fig. 5 Distribution of the Reynolds shear stress at different velocity

脉动速度沿流向的空间局部平均结构函数为:

$$\delta u_x(x, l) = \overline{u(x, y)}_{x \in [x_0, x_0+l]} - \overline{u(x, y)}_{x \in [x_0-l, x_0]} \quad (6)$$

$$\delta v_x(x, l) = \overline{v(x, y)}_{x \in [x_0, x_0+l]} - \overline{v(x, y)}_{x \in [x_0-l, x_0]} \quad (7)$$

(a) 单相平壁
(a) Clean water-smooth(b) 两相平壁
(b) Particle-smooth图 6 $U_\infty = 0.205$ m/s 时不同工况下的喷射法向脉动速度云图Fig. 6 Contours of the normal fluctuating velocity around eject at $U_\infty = 0.205$ m/s

其中, $\overline{u(x, y)}$ 和 $\overline{v(x, y)}$ 是中心位于 $x_0 - 0.5l$ 和 $x_0 + 0.5l$ 的流体微团的局部平均速度, l 是流动的湍流的空间尺度, x_0 是相邻两个涡的接触位置. 式 (3) 和式 (4) 体现了流体在 $x \in [x_0, x_0+l]$ 和 $x \in [x_0-l, x_0]$ 之间的平均速度差. 若 $\delta u_x(x_0, l) > 0$, 则表明上游的平均速度小于下游的平均速度, 此时湍流结构被拉伸; 若 $\delta u_x(x_0, l) < 0$, 则说明上游平均速度大于下游平均速度, 湍流结构被压缩. 法向的平均速度也类似于这一点.

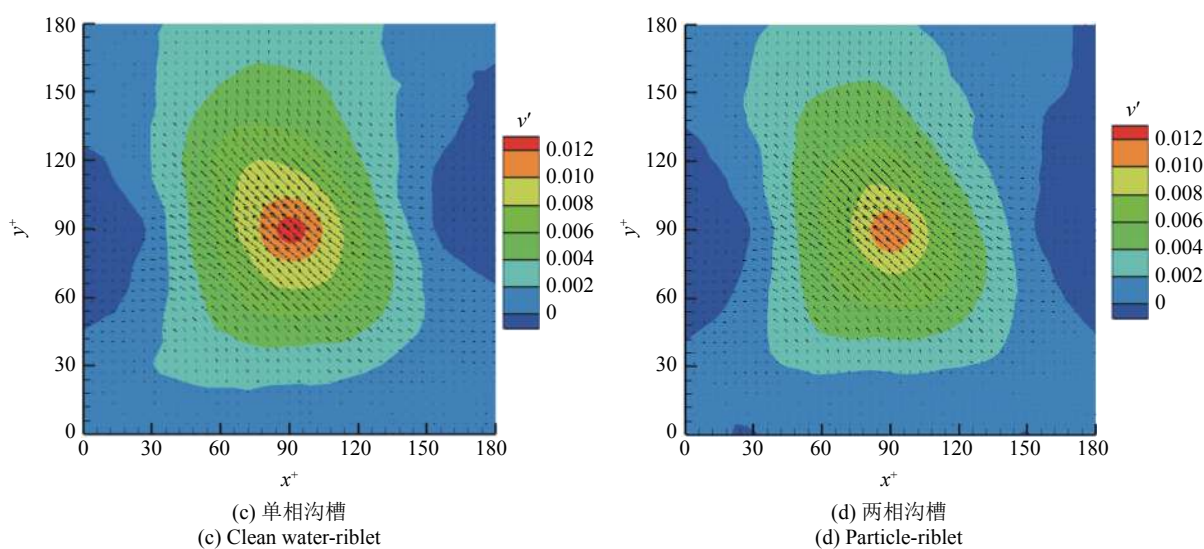
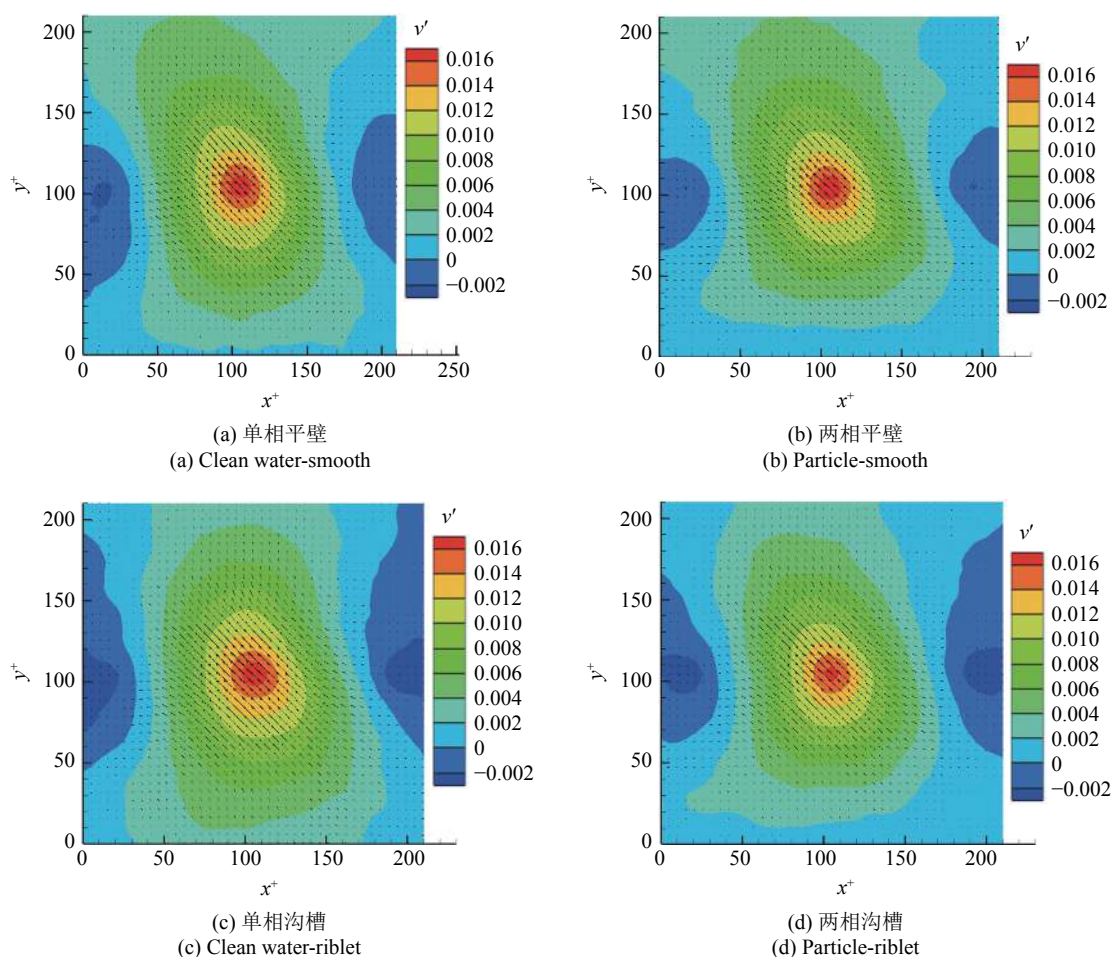
基于象限分裂法的壁面湍流相干结构采样如下

$$D(x_0, l) = \begin{cases} 1 \text{ (ejection), if } u' < 0 \& \delta u_x(x_0, l)^- < 0 \& \delta u_x(x_0, l)^+ > 0 \\ \& v' > 0 \& \delta v_x(x_0, l)^- > 0 \& \delta v_x(x_0, l)^+ < 0 \\ -1 \text{ (sweep), if } u' > 0 \& \delta u_x(x_0, l)^- > 0 \& \delta u_x(x_0, l)^+ < 0 \\ \& v' < 0 \& \delta v_x(x_0, l)^- < 0 \& \delta v_x(x_0, l)^+ > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

其中 $D(x_0, l)$ 为 x_0 处, 湍流尺度为 l 的检测函数. $\delta u_x(x_0, l)^-$ 和 $\delta u_x(x_0, l)^+$ 是位于 x_0 处的左右邻域. 式 (8) 体现了喷射和扫掠时流体的运动状况. 在喷射事件中, 低速流体从近壁区被喷射到外层, 局部脉动速度 $u' < 0$ 并且达到极小值; $v' > 0$ 并且达到极大值. 在扫掠事件中, 高速流体从外区向壁面下扫, 局部脉动速度 $u' > 0$ 并且达到极大值; $v' < 0$ 并且达到极小值.

3.1 喷射和扫掠事件

由上文可知, 在速度分别为 0.205 m/s 和 0.280 m/s 时, 雷诺应力和综合湍流度的极大值分别在 $y^+ = 90$ 和 $y^+ = 105$ 附近. 图 6 和图 7 为 0.205 m/s 速度下不同工况 x - y 平面内在无因次法向位置 $y^+ = 90$ 下

图 6 $U_{\infty} = 0.205$ m/s 时不同工况下的喷射法向脉动速度云图 (续)Fig. 6 Contours of the normal fluctuating velocity around eject at $U_{\infty} = 0.205$ m/s (continued)图 7 $U_{\infty} = 0.280$ m/s 时不同工况下的喷射法向脉动速度云图Fig. 7 Contours of the normal fluctuating velocity around eject at $U_{\infty} = 0.280$ m/s

和 0.280 m/s 速度下不同工况 x - y 平面内无因次法向位置 $y^+ = 105$ 下的喷射事件的法向脉动速度二维拓

扑结构. 图中横纵坐标分别使用壁面单位 WU 进行了无量纲化. 除 0.280 m/s 的单相沟槽外, 可以观察

到沟槽壁面下喷射中心流向脉动速度值较大的区域小于同工况下的清水区,说明沟槽壁面降低了喷射的低速流体和周围流体的速度差,减小了喷射行为的猝发强度,也减小了边界层内部之间的动量交换.并且喷射行为的削弱同样降低了与流向相反的脉动速度.相对于清水相,加入颗粒后的流体喷射中心附近的流向脉动速度要小于清水相中的区域,并且同样可以观察到脉动速度值较大的区域明显减小,喷射结构被抑制,这说明颗粒的加入同样降低了边界层内部的动量交换.

相应地,图 8 和图 9 为 0.205 m/s 速度下不同工况 x - y 平面内无因次法向位置 $y^+ = 90$ 下和 0.280 m/s 速度下不同工况 x - y 平面内无因次法向位置 $y^+ = 105$ 下的扫掠事件的法向脉动速度二维拓扑结构.可以看到高速流体在低速流体上部,并且向壁面下扫.对两种速度下的不同壁面而言,颗粒的加入均降低了壁面附近的法向湍动,降低了壁面附近的扫掠行

为的强度,这是由于颗粒惯性使其在扫掠过程时不易跟随流体接近壁面,进而使得各层间速度更加均匀,能量交换有所削弱.这能够降低输运过程中的阻力.并且注意到 0.280 m/s 的两种工况下,沟槽壁面对扫掠的猝发强度有所强化,说明当雷诺数较大时,沟槽的突出结构会增加下扫的高速流体同周围低速流体的速度差异.

3.2 扫掠事件数量随法向距离的变化

图 10 为不同速度下扫掠事件发生数量沿法向的分布规律.可以看到在颗粒加入后沟槽壁面附近的扫掠行为数量均明显增加,而沟槽和颗粒单独作用时的扫掠行为数量同清水相平板下的数值相差不大.这是由于两相流中的颗粒将沟槽诱导出的流向涡破碎成了小涡,从而导致涡诱发的扫掠事件数目增加.并且在 0.280 m/s 下扫掠行为的数量均随着法向距离的增加而减少.

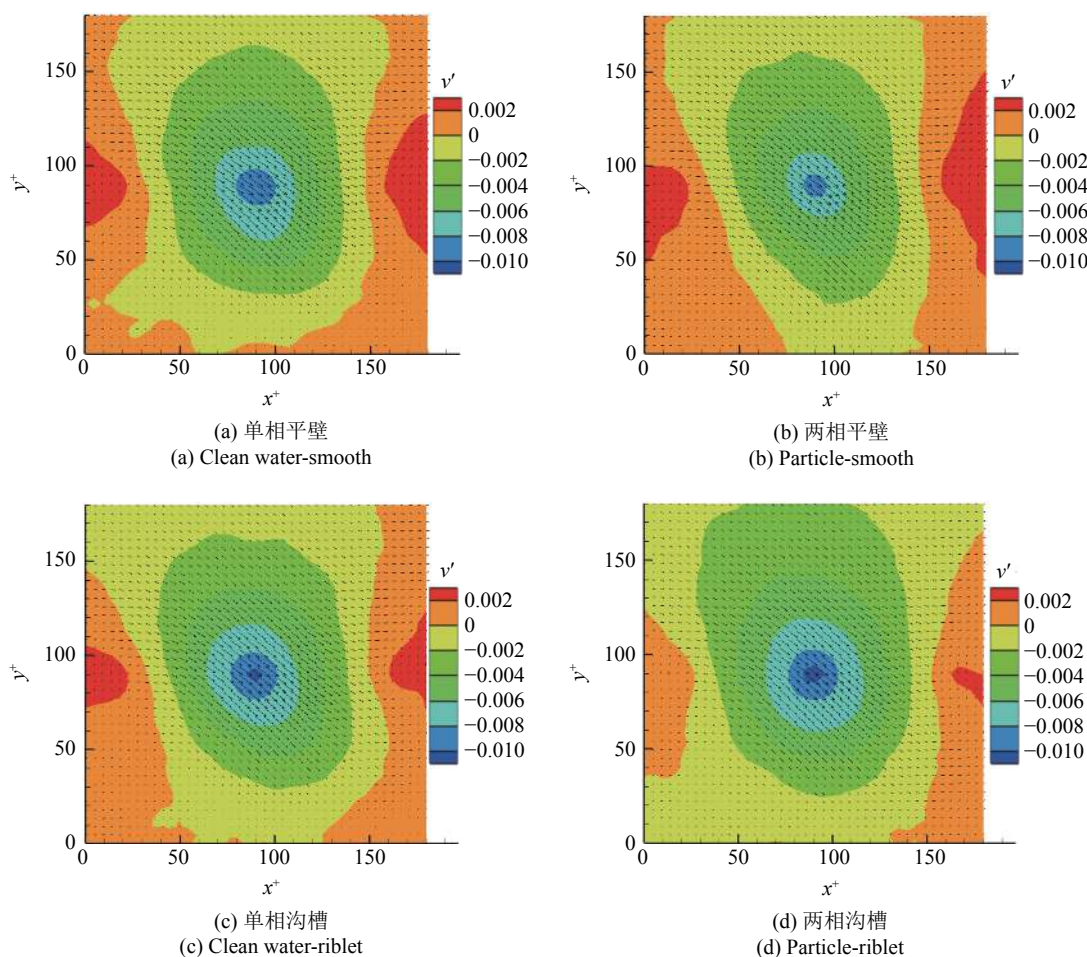


图 8 $U_{\infty} = 0.205$ m/s 时不同工况下的扫掠法向脉动速度云图

Fig. 8 Contours of the normal fluctuating velocity around eject at $U_{\infty} = 0.205$ m/s

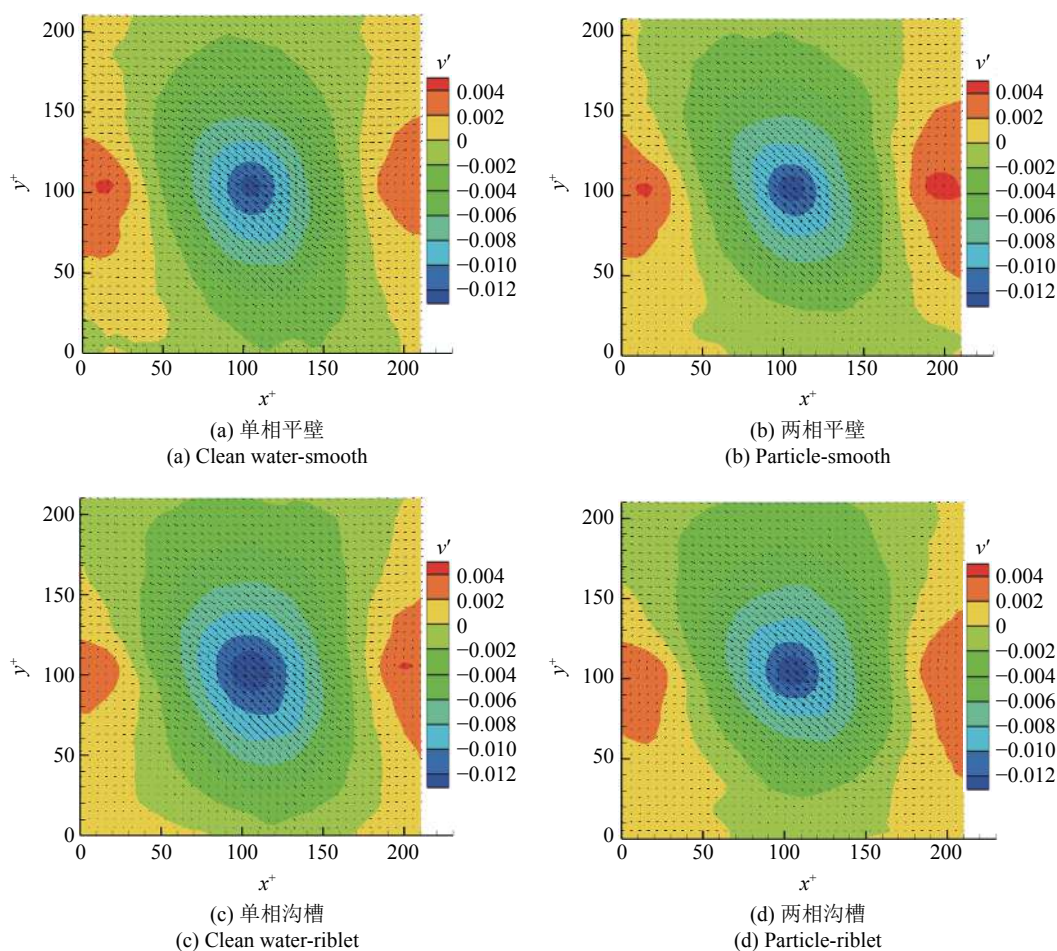
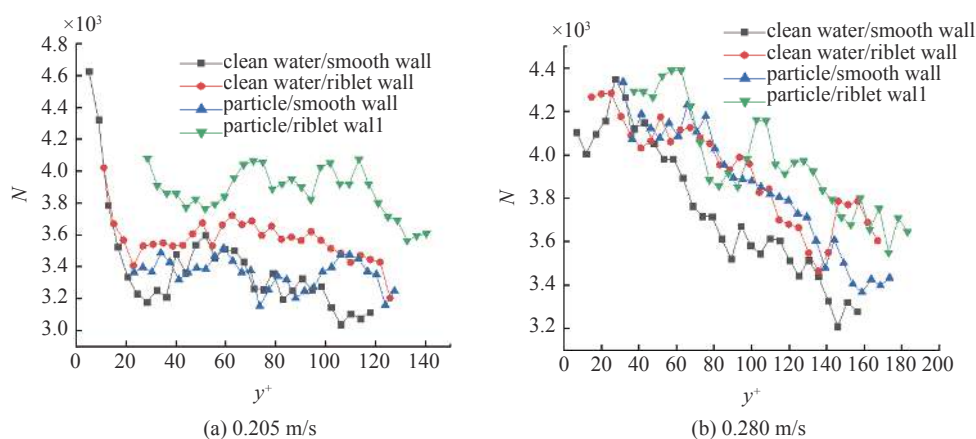
图 9 $U_{\infty} = 0.280$ m/s 时不同工况下的喷射法向脉动速度云图Fig. 9 Contours of the normal fluctuating velocity around eject at $U_{\infty} = 0.280$ m/s

图 10 不同来流速度下扫掠数目沿法向分布规律

Fig. 10 Distributions of the number of sweep along normal-wall positions

4 结论

本文利用粒子图像测速技术分别对清水相工况和液固两相工况下的平板及沟槽板湍流边界层瞬时速度场进行测量, 得到了平均速度剖面、雷诺应力

和湍流度等统计量, 提取分析了 8 种工况条件下喷射-扫掠结构和流向/法向脉动速度的二维拓扑结构, 得到了以下结论:

(1) 在对数律区中, 颗粒组的无量纲速度均略大于清水组, 雷诺切应力有所降低, 湍流度有所减弱;

(2) 对于沟槽而言, 无论其实际处于减阻还是增阻状态, 颗粒的加入均会降低沟槽壁面附近对数律区中的湍流强度, 与沟槽的减阻产生协同效应, 并且令失效的沟槽重新产生减阻效果;

(3) 颗粒对喷射-扫掠两种行为产生的影响类似, 而这种影响同壁面类型无关. 对于两种行为而言, 颗粒的加入会降低其猝发事件强度. 从而可以降低壁面附近的法向脉动强度, 降低流体与壁面的相互作用, 提升沟槽的减阻能力.

参 考 文 献

- 郭杰, 耿兴国, 高鹏等. 边界层控制法减阻技术研究进展. 鱼雷技术, 2008, 16(1): 1-6 (Guo Jie, Geng Xingguo, Gao Peng, et al. Recent development of drag reduction technologies via boundary layer control. *Torpedo Technology*, 2008, 16(1): 1-6 (in Chinese))
- Dean B, Bhushan B. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: A review. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng.*, 2010, 368(1929): 4775-4806
- Walsh MJ. Riblets as a viscous drag reduction technique. *AIAA Journal*, 1983, 21(4): 485-486
- Walsh MJ. Turbulent boundary layer drag reduction using riblets//AIAA, Aerospace Sciences Meeting, Orlando: Florida, 1982.
- Walsh MJ, Weinstein LM. Drag and heat transfer on surfaces with small longitudinal fins. AIAA Paper 78-1161
- Walsh MJ, Lindemann AM. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction//AIAA, Aerospace Sciences Meeting, Reno: Nevada, 1984.
- Bechert DW, Bartenwerfer M. The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs. *Journal of Fluid Mechanics*, 1989, 206: 105-129
- Bechert DW, Bruse M, Hage W, et al. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, 338: 59-87
- Jing C, Fu Y. A numerical study on pressure drop in microchannel flow with different bionic micro-grooved surfaces. *Journal of Bionic Engineering*, 2012, 9(1): 99-109
- García-Mayoral R, Jiménez J. Hydrodynamic stability and breakdown of the viscous regime over riblets. *Journal of Fluid Mechanics*, 2011, 678: 317-347
- Bechert DW, Bartenwerfer M, Hoppe G. Turbulent drag reduction by nonplanar surfaces—A survey on the research at TU/DLR Berlin//Structure of Turbulence & Drag Reduction IUTAM Symposium, Zürich. DLR, 1990: 525-543
- Goldstein DB, Tuan TC. Secondary flow induced by riblets. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 363(1998): 115-151
- Bechert DW, Bruse M, Hage W, et al. Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application. *Naturwissenschaften*, 2000, 87(4): 157-171
- Lee SJ, Lee SH. Flow field analysis of a turbulent boundary layer over a riblet surface. *Experiments in Fluids*, 2001, 30(2): 153-166
- Ng JH, Jaiman RK, Lim TT. Direct numerical simulations of riblets in a fully-developed turbulent channel flow: Effects of geometry. in: *Advances in Computation, Modeling and Control of Transitional and Turbulent Flows*. Sengupta TK, Lele SK, Sreenivasan KR, et al. ed. World Scientific, 2016: 155-165
- Martin S, Bhushan B. Modeling and optimization of shark-inspired riblet geometries for low drag applications. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2016, 474: 206-215
- Okabayashi K, Hirai K, Takeuchi S, et al. Direct numerical simulation of turbulent flow above zigzag riblets. *AIP Advances*, 2018, 8(10): 1-20
- 李思成, 吴迪, 崔光耀等. 低雷诺数沟槽表面湍流/非湍流界面特性的实验研究. 力学学报, 2020, 52(6): 1632-1644 (Li Sicheng, Wu Di, Cui Guangyao, et al. Experimental study on properties of turbulent/non-turbulent interface over riblets surfaces at low Reynolds numbers. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(6): 1632-1644 (in Chinese))
- Bixler GD, Bharat B. Shark skin inspired low-drag microstructured surfaces in closed channel flow. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2013, 393: 384-396
- Hou J, Hokmabad BV, Ghaemi S. Three-dimensional measurement of turbulent flow over a riblet surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 85: 229-239
- Gore RA, Crowe CT. Modulation of turbulence by a dispersed phase. *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME*, 1991, 113: 304-307
- Noguchi K, Nezu I. Particle-turbulence interaction and local particle concentration in sediment-laden open-channel flows. *Journal of Hydro-environment Research*, 2010, 3(2): 54-68
- Montante G, Paglianti A, Magelli F. Analysis of dilute solid-liquid suspensions in turbulent stirred tanks. *Chemical Engineering Research & Design*, 2012, 90(10): 1448-1456
- 高天达, 孙皎, 范赢等. 基于 PIV 技术分析颗粒在湍流边界层中的行为. 力学学报, 2019, 51(1): 103-110 (Gao Tianda, Sun Jiao, Fan Ying, et al. PIV experimental investigation on the behavior of particles turbulent boundary layer. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(1): 103-110 (in Chinese))
- Sato Y, Hishida K. Transport process of turbulence energy in particle-laden turbulent flow. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, 1996, 17(3): 202-210
- Shokri R, Ghaemi S, Nobes DS, et al. Investigation of particle-laden turbulent pipe flow at high-Reynolds-number using particle image/tracking velocimetry (PIV/PTV). *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, 89: 136-149
- Jing L, Wang H, Liu Z, et al. An experimental study on turbulence modification in the near-wall boundary layer of a dilute gas-particle channel flow. *Experiments in Fluids*, 2012, 53(5): 1385-1403
- Li J, Liu ZH, Wang HF, et al. Turbulence modulations in the boundary layer of a horizontal particle-laden channel flow. *Chinese Physics Letter*, 2010, 27(6): 129-132
- Jiao S, Tianda G, Ying F, et al. The modulation of particles on coherent structure of turbulent boundary layer in dilute liquid-solid two-phase flow with PIV. *Powder Technology*, 2018, 344(2019): 883-896
- Clauser FH. Turbulent boundary layers in adverse pressure gradients. *Journal of Aeronautics*, 1954, 21: 91-108
- 连祺祥. 湍流边界层拟序结构的实验研究. 力学进展, 2006, 36(3): 373-388 (Lian Qixiang. Experimental study on quasi-ordered structures of turbulent boundary layer. *Advances in Mechanics*, 2006, 36(3): 373-388 (in Chinese))
- 姜楠, 管新蕾, 于培宁. 雷诺应力各向异性涡黏模型的层析 TRPIV 测量. 力学学报, 2012, 44(2): 213-221 (Jiang Nan, Guan Xinlei, Yu Peining. Tomographic TRPIV measurement of Reynolds stress anisotropic vortex-viscous mode. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44(2): 213-221 (in Chinese))