

# 沟槽-超疏水复合壁面湍流边界层高效减阻机理的 TRPIV 实验研究

姜楠, 王鑫蔚, 范子柳

(天津大学机械工程学院力学系, 天津市现代工程力学重点实验室, 天津 300354, Email: nanj@tju.edu.cn)

**摘要:** 在重力溢流式低湍流度循环水洞中, 采用高时间分辨率粒子图像测速技术 (TRPIV), 对沟槽-超疏水复合壁面的湍流边界层减阻机理进行了实验研究。这种减阻壁面综合了沟槽减阻和超疏水减阻两种被动减阻技术的优势。以 300Hz 的拍摄频率, 测量了光滑壁面 (P), 超疏水壁面 (SH), 沟槽壁面 (R) 和沟槽-超疏水壁面 (RS) 四种壁面的平板湍流边界层瞬时速度场的时间序列样本, 实验基于动量厚度和自由流速度的雷诺数  $Re_\theta = 1451$ , 对比分析了四种壁面的平板湍流边界层平均速度剖面和雷诺应力剖面。通过对平均速度剖面的对数律区进行拟合, 获得了壁面摩擦速度、壁面摩擦切应力、壁面摩擦系数及其对应的减阻率。利用湍流边界层瞬时速度场的空间条件采样和相位平均方法, 获得相干结构的特征形态, 并通过分析对比不同壁面上壁湍流相干结构特征, 以湍流相干结构被动控制为切入点分析了沟槽-超疏水复合减阻壁面的减阻机理。

**关键词:** 湍流边界层; 沟槽; 超疏水; TRPIV; 相干结构; 减阻

## 1 引言

工程技术中的大量问题与湍流边界层密切相关。相对于层流边界层, 湍流边界层使壁面摩擦阻力大幅度增加, 能耗和壁面振颤加剧, 机械效率下降, 从而对系统和结构物的安全可靠构成严重威胁。表面摩擦阻力在各种运输工具中的总阻力中占有很大的比例, 例如: 常规的运输机和水上船只, 其表面摩擦阻力约占总阻力的 50%; 对于水下运动的物体如潜艇, 这个比例可达到 70%; 而在长距离管道输送中, 泵站的动力消耗几乎全部用于克服壁面摩擦阻力。在这些运输工具表面的大部分区域, 流动都处于湍流状态, 因此, 从机理上分析湍流边界层中的流动结构及其形成原因, 进而提出控制湍流边界层的有效方法成为湍流控制的前沿课题, 而控制湍流边界层的主要目的之一就是减小壁面摩擦阻力, 减小能耗, 降低噪声, 减少排放。所以研究湍流边界层减阻意义重大。

有关减阻的研究可追溯到 20 世纪 30 年代, 但直到 60 年代中期, 研究工作主要是减小表面粗糙度, 隐含的假设是光滑表面的阻力最小。70 年代阿拉伯石油禁运和由此引起的燃油价格上涨激起了持续至今的湍流减阻研究。NASA 兰利研究中心的研究人员发现沿流向

的微小沟槽表面能有效地降低壁面摩擦阻力,突破了表面越光滑阻力越小的传统思维方式<sup>[1]</sup>。对三角形截面的纵向沟槽进行研究发现,当其高度和间距的无量纲尺寸 $h^+ \leq 25$ 和 $s^+ \leq 30$ 时具有减阻效果,沟槽的尺寸为 $h^+ = s^+ = 15$ 时可减阻 8%左右。对模拟鲨鱼体表肤齿微结构的刀片状沟槽研究发现, $s^+ = 17$ , $h^+ = 0.5s^+$ 的刀片状沟槽中得到了 9.9%减阻效果,这里 $s^+$ 和 $h^+$ 分别指的是内尺度无量纲化的刀片状沟槽的间距和高度。内尺度无量纲化的沟槽截面积的开方 $l^+$ 可作为更好的指标来衡量沟槽的减阻效果,具有最佳减阻效果的沟槽尺寸为 $l^+ \approx 10.7$ <sup>[2]</sup>。

自然界中有很多动植物表面都具有疏水性,例如荷叶、水稻等植物叶子的表面,蝴蝶、蝉、蜻蜓等昆虫的翅膀等。这种疏水性是由一定粗糙度表面上微米级突起以及纳米级蜡状物共同作用引起的。近十年来,超疏水表面因其疏水性而具有的减阻性质,引起了极大关注。Min 等<sup>[3]</sup>对超疏水壁面湍流减阻的直接数值模拟结果表明,超疏水壁面可产生滑移,其中流向滑移有益于减阻,展向滑移不利于减阻,超疏水表面的减阻特性是流向滑移和展向滑移共同作用的结果。

沟槽壁面和超疏水壁面均可用于船舶及鱼雷、潜艇、赛艇的表面,以实现减小阻力和噪声,提高航速和航程等目的。单纯的沟槽壁面和超疏水壁面的减阻率一般都不超过 10%。

沟槽-超疏水复合壁面减阻技术是一种新型的壁湍流被动减阻技术,它综合了沟槽壁面减阻技术和超疏水壁面减阻技术的优势,利用沟槽限制超疏水壁面产生的展向滑移,弥补了超疏水在展向滑移增阻的缺点,同时不需要任何额外的能量注入,不需要增加任何额外的减阻装置,其产生的减阻率并不是沟槽壁面减阻率和超疏水壁面减阻率的简单叠加,而是高于沟槽壁面减阻率和超疏水壁面减阻率之和,因而是一种新型的高效减阻技术。美国密西根大学的 Amirreza Rastegari 和 Rayhaneh Akhavan<sup>[4]</sup>采用格子-玻尔兹曼方法对沟槽-超疏水复合壁面减阻机理进行了直接数值模拟研究,但目前对沟槽-超疏水复合壁面减阻机理的实验研究还鲜有报道。

本文在重力溢流式低湍流度循环水洞中,采用高时间分辨率粒子图像测速技术(TRPIV),对沟槽-超疏水复合壁面的湍流边界层减阻机理进行了实验研究,以 300Hz 的拍摄频率,拍摄了光滑壁面(P),超疏水壁面(SH),沟槽壁面(R)和沟槽-超疏水壁面(RS)四种壁面的平板湍流边界层瞬时速度场的时间序列样本,对比分析了四种壁面的平板湍流边界层平均速度剖面,获得了壁面摩擦速度及其对应的减阻率。并通过分析对比不同壁面上壁湍流相干结构特征,分析了沟槽-超疏水复合壁面的减阻机理。

## 2 沟槽超疏水复合减阻壁面模型的制备

在 12 块 130mm×130mm×10mm 的光滑铝合金平板表面用精密数控加工中心分别铣出槽宽深分别为 0.6mm, 0.8mm, 1.0mm, 1.2mm, 1.4mm, 1.6mm 的模型各两块,将其中的一组 6 块沟槽板和一块光滑板再使用飞秒激光加工技术,在表面刻蚀出具有导向性的 35 微米宽,间隔 15um 的 U 型微槽,生成了具有 153° 接触角的稳定的超疏水结构壁面,在

基于湍流边界层动量厚度和自由来流速度的雷诺数  $Re_\theta = 2586$  的实验工况下, 仍能保持壁面不润湿(图 1)。所以本文的实验模型板为 1 块普通光滑亲水板、1 块超疏水板、6 块沟槽板、6 块沟槽超疏水板共 14 块平板模型。

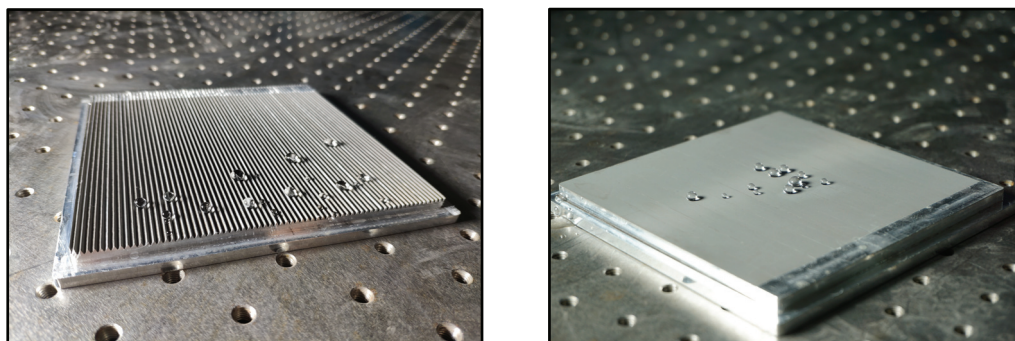


图 1 制备的沟槽-超疏水复合壁面模型和超疏水壁面模型

### 3 实验设备和测量技术

#### 3.1 重力溢流式低湍流度循环水洞

实验在天津大学北洋园新校区流体力学实验室新建成的重力溢流式低湍流度循环水洞(图 2)进行, 水洞的流速由 4 个不锈钢潜水泵组合控制, 采用无极变频调速, 水洞实验段尺寸 600mm 宽, 700mm 深, 4000mm 长, 最大流速 0.5m/s, 来流背景湍流度小于 0.1%。一块长宽厚分别为 3700mm $\times$ 590mm $\times$ 10mm 的铝合金大平板水平固定在水洞实验段中心线上, 平板前缘为 1: 8 半椭圆头尖劈形, 直径 3mm 的绊线放置于平板前缘下游 20mm 处, 以加速边界层转捩为充分发展的湍流边界层, 在距离平板前缘 3120 毫米的中心线位置, 切割 130mm $\times$ 130 mm 的带台阶的方形通孔, 用于轮流更换 14 块不同的测试小平板(图 3), 配合形成的表面平整无台阶, 测量证实, 流动在该位置已经发展为充分发展的湍流边界层(图 4)。



图2 天津大学流体力学实验室重力溢流式低湍流度循环水洞

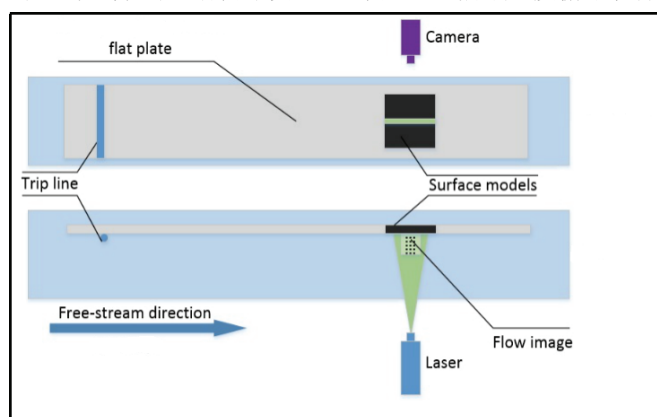


图3 平板组装模型示意图

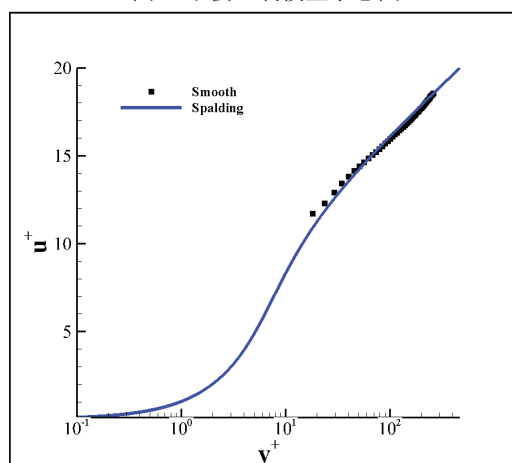


图4 平板湍流边界层平均速度剖面

### 3.2 高时间分辨率粒子图像测速系统 (TRPIV)

实验中用到的 PIV 系统包含高速相机，激光器，同步器，示踪粒子以及软件系统。光源系统由激光器、导光臂和片光源组合透镜组成。激光器是 Litron Laser 公司生产的 LDY DualPower 304 型 PIV 专用激光系统。拍摄所用高速相机为 Dantec 公司 Speed Sense 系列 CMOS 相机，1280 像素×800 像素，8G 内部循环缓存，最多能够存储 8216 张粒子图像，且具有较高的感光度。实验用两种相机镜头，一种为 Nikon 公司所生产的焦距为 60mm 的定焦镜头；另一种为 Nikon 公司所生产的焦距为 200mm 的定焦镜头，分别拍摄大小两种视场流动图像。实验所用的示踪粒子为 Dantec 公司生产的聚酰胺 (Polyamid seeding particles, PSP-50)，粒子直径为 20um，密度 1.03g/cm<sup>3</sup>。实验使用的 PIV 图像处理软件为 Dantec 公司开发的 Dynamics Studio，具有良好的人机交互界面，控制部分操作简洁，数据后处理部分囊括了绝大部分的基础算法。

本文实验的自由来流速度 0.273m/s，相机拍摄区域位于绊线下游 3.1m 处，拍摄帧率 300 帧/秒，拍摄瞬时流场总样本量 16430。表 1 为每个工况的流场基本参数。

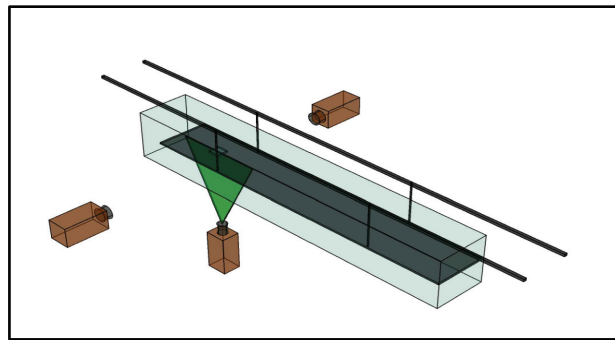


图 5 实验测试方位示意图

表 1 基本实验参数

	瞬时场数	采样频率(Hz)	$U_{\infty}$ (m/s)	$\delta$ (mm)	$Re_{\tau}$	$Re_{\theta}$	$u_{\tau}$ (m/s)	减阻率 (%)	$s^{+}$	$lg^{+}$
P	16430	300	0.273	44.2	570	1451	0.01237			
SH				45.5	565	1437	0.01191	7.4		
R				44.3	551	1460	0.01194	6.9	2 3	15.9
SR				47.1	526	1542	0.01073	24.8	2 1	13.6

## 4 实验结果分析与讨论

图 6a 是无量纲化的各工况平均速度剖面。对比图 6b 和 6c 中的流法向湍流度和雷诺切应力, 可发现 3 个减阻的壁面在近壁区域展现出明显的降低趋势。这表明超疏水壁面, 沟槽壁面和沟槽-超疏水壁面可以抑制近壁区产生的高雷诺应力事件, 而且沟槽-超疏水壁面在流向湍流度和雷诺切应力中均为最低值, 这和它均有最佳的减阻效果相对应。

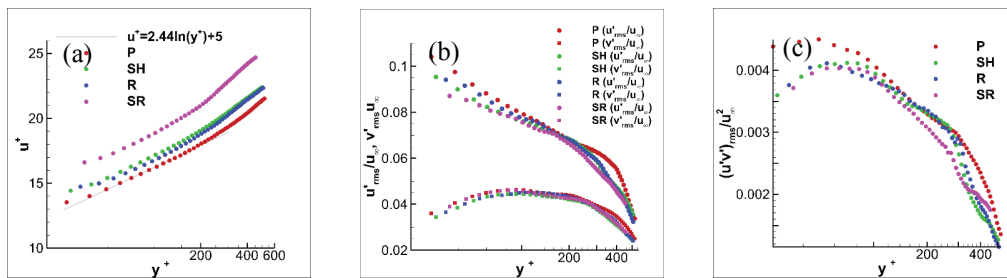


图 6 (a) 平均速度剖面; (b) 湍流度; (c) 雷诺切应力

图 7 给出近壁区  $y=0.05 \delta$  处用  $\lambda ci$  方法获得的壁湍流相干结构展向涡头的平均拓扑形态, 发现相干结构展向涡头为典型的顺时针负向涡结构, 向下游有一定的倾斜攻角, 而且相干结构展向涡头的流线刻画出了焦点-鞍点的奇异动力系统。沟槽、超疏水、沟槽-超疏水减阻壁面相干结构展向涡头的攻角都比水力光滑壁面有所减小, 其中沟槽-超疏水减阻壁面相干结构展向涡头的攻角最小, 只有  $17^\circ$ , 说明沟槽-超疏水减阻壁面相干结构最不活跃。

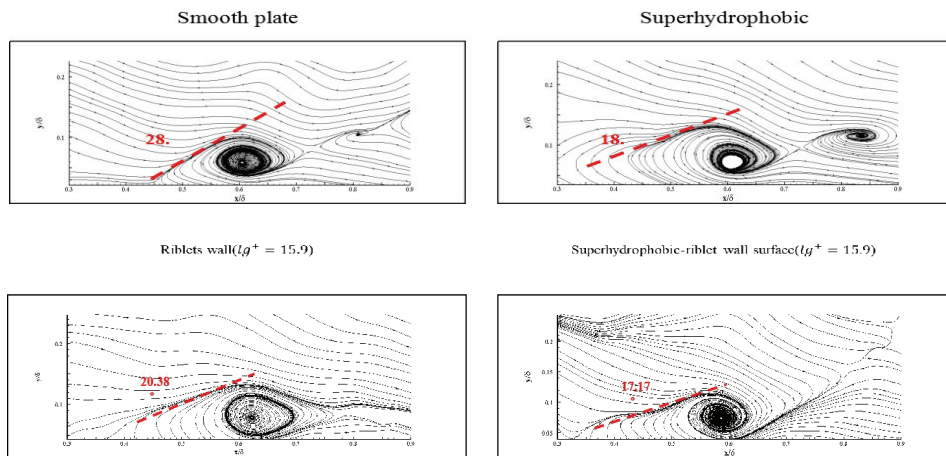


图 7 壁湍流相干结构的二维鞍-焦奇异动力系统

图 8 给出了近壁区  $y=0.05 \delta$  处用  $\lambda ci$  方法获得的壁湍流相干结构展向涡头随时间的发展演化过程, 可以看到, 沟槽、超疏水、沟槽-超疏水减阻壁面相干结构展向涡头的尺度都比水力光滑壁面有所减小, 其中第四排沟槽-超疏水减阻壁面相干结构展向涡头的尺度最

小，而且消亡的最快。说明沟槽-超疏水减阻壁面缩短了相干结构的持续时间，加快了相干结构的消亡速度，产生了减阻效果。

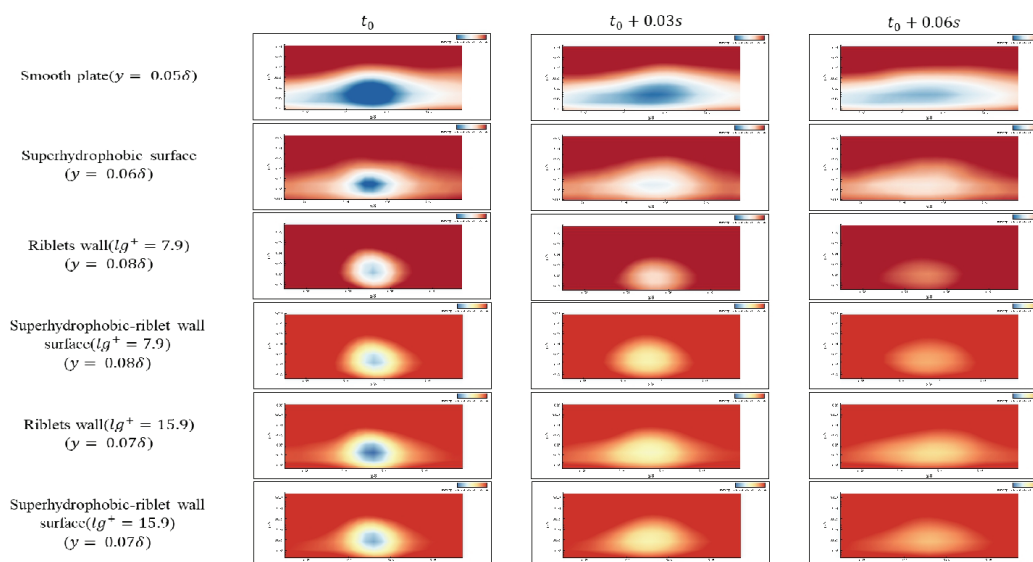


图8 用  $\lambda_{ci}$  方法获得的壁湍流相干结构展向涡头随时间的发展演化

## 5 结论

本文在重力溢流式低湍流度循环水洞中，采用高时间分辨率粒子图像测速技术 (TRPIV)，对沟槽-超疏水复合壁面的湍流边界层减阻机理进行了实验研究。通过对光滑壁面，超疏水壁面，沟槽壁面和沟槽-超疏水壁面四种壁面的平板湍流边界层的平均速度剖面、湍流度剖面和相干结构二维典型拓扑形态的分析，得出如下结论：

(1) 超疏水壁面、沟槽壁面和沟槽-超疏水壁面三种壁面都产生了一定的减阻效果，其中沟槽-超疏水壁面的减阻率最高达到 24.8%。

(2) 超疏水壁面、沟槽壁面和沟槽-超疏水壁面的平均速度剖面与水力光滑壁面相比较，都产生了对数律区上移、湍流度降低的减阻特征，其中沟槽-超疏水壁面的对数律区平均速度剖面上移幅度最大、湍流度降低最明显。

(3) 沟槽、超疏水、沟槽-超疏水减阻壁面相干结构展向涡头的攻角都比水力光滑壁面有所减小，其中沟槽-超疏水减阻壁面相干结构展向涡头的攻角最小，展向涡头的尺度最小，而且消亡的最快，说明沟槽-超疏水减阻壁面相干结构最不活跃，产生了最好的减阻效果。

**致谢：** 本课题的研究得到了国家自然科学基金项目 11732010、11572221、11872272、U1633109、11802195 以及国家重点研发计划项目(2018YFC0705300)的资助。

## 参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Choi K, European Drag-Reduction Research-Recent Developments and Current Status[J], Fluid Dyn. Res., 2000, 26 (5): 325-335.
- 3 Min T, Kim J. Effects of hydrophobic surface on skin-friction drag [J]. Physics of Fluids, 2004, 16(7): 55-58.
- 4 Amirreza Rastegari , Rayhaneh Akhavan, The common mechanism of turbulent skin-friction drag reduction with superhydrophobic longitudinal microgrooves and riblets[J], J. Fluid Mech., 2018, 838:68-104.

### **TRPIV experimental investigation of drag reduction mechanism by superhydrophobic-riblet surface in turbulent boundary layer**

JIANG Nan, WANG Xin-wei, FAN Zi-ye

(Department of Mechanics, School of Mechanical Engineering, Tianjin University. Tianjin 300354)

Email: nanj@tju.edu.cn

**Abstract:** Drag reduction experiments of turbulent boundary layer flow over a unique superhydrophobic-riblet surface, which combining two passive drag-reduction technique of superhydrophobic surface and riblet surface, are performed in a water tunnel with time-resolved Particle Image velocimetry (TRPIV) measurement. The Reynolds number based on the momentum thickness of turbulent boundary layer is  $Re_{\theta}=1451$ . Mean velocity and turbulence intensity profiles in the working cases of natural flat plat, riblet wall, superhydrophobic surface and superhydrophobic-riblet surface are compared. The skin friction velocity is fitted by logarithmic law mean velocity profile to calculate the drag reduction rate. The topology and evolution of coherent structures are presented by conditional phase-lock average methods. Then, the relationship between the outer layer structures and skin drag reduction rate is investigated, by stressing the distinctive dynamic features of the turbulent structures over the superhydrophobic-riblet wall surface.

**Key words:** turbulent boundary layer; superhydrophobic; riblet; drag-reduction; coherent structures