



CSTAM 2012-B03-0138

**具有微纳结构超疏水表面的槽道湍流减阻
机理研究**

卢思，姚朝晖，郝鹏飞，傅承诵

航天航空学院工程力学系

清华大学

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

具有微纳结构超疏水表面的槽道湍流减阻机理研究¹⁾

卢思, 姚朝晖²⁾, 郝鹏飞, 傅承诵

(清华大学航天航空学院工程力学系, 北京海淀区 100084)

摘要超疏水表面的优异性质使其在现代生活和工业生产中具有十分广泛的潜在应用。本文采用了碳纳米管缠绕技术和聚氟硅氧烷疏水化处理制备了具有二级微纳米结构的超疏水表面。测量了由该超疏水表面构建的槽道中的流动压差, 将其与普通表面构建的槽道内的流动压差进行比较, 发现在层流情况下, 流动阻力减小最多达到了 22.8%。在湍流的情况下, 超疏水表面的减阻比例约为 53.3%, 减阻效果比层流更加明显。利用 PIV 技术测量了具有超疏水表面的槽道内的速度场, 通过超疏水表面速度滑移和湍动脉动场信息, 分析了湍流减阻效果比层流更加明显的物理机制。

关键词 超疏水表面, 二级微纳米复合结构, 湍流, 减阻, 壁面滑移

引言

超疏水表面的优异性质使其在现代生活和工业生产中具有十分广泛的潜在应用, 如利用其自清洁性, 疏水材料可以作为防污材料、防腐蚀材料和管道减阻, 近些年来将超疏水材料用于水中运输工具或水下潜艇上, 以减小水的阻力, 提高行驶速度也开始得到人们的关注。

Ou 等人^[1]在一系列高 $76\mu\text{m} < H < 254\mu\text{m}$, 宽高比 $W/H = 20$, 长度 $L = 50\text{mm}$ 的微管道中, 发现超疏水表面构成的槽道对层流具有减阻效应, 最大减阻甚至达到了 40%。而减阻的效应随着超疏水表面的微结构的尺寸不同而变化。Watanabe 等人^[2]研究了直径 6 mm 和 12 mm 具有高疏水壁面的管道流动, 由于表面覆盖了一层 $10\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ 的微沟槽, 在 $500 < Re < 10000$ 的流动状态下, 流动阻力减少了 14%。Choi 等人^[3]采用 500nm 高 230nm 间距纳米柱结构形成超疏水表面, 将其应用于 $3\mu\text{m}$ 的微管道中, 压降较普通微管道降低 20%~30%。在作者前期的研究^[4]中, 利用由碳纳米管制成的无序缠绕碳纳米管构建成的超疏水表面进行流动阻力实验, 发现对于层流而言, 由二级微纳米复合结构构成的超疏水表面比仅仅具有一级结构的疏水表面具有更好的减阻效应。

超疏水表面不仅对层流能够产生减阻效应, 而且对湍流的流动阻力也有影响。2006

年, T. N. Krupenkin 等人^[5]先后利用两种具有不同微结构 (纳米草和微米砖) 的超疏水表面进行实验, 发现相比层流而言, 拥有微结构的超疏水表面对湍流具有更加明显的减阻效应。R. J. Daniello 等人^[6]利用具有沿流向微槽道结构的超疏水表面进行了流动实验, 当流动在层流范围内时 ($0 < Re < 2200$) 在超疏水表面的流动阻力并没有减小, 但是随着雷诺数的增加, 当流动开始由层流变为湍流的时候, 流动阻力开始明显地减小。并且随着雷诺数的增加, 减阻的比例越来越高。但是当雷诺数增加到一定程度时, 减阻的比例就不再减小。B. Woolford 等人^[7]采用光刻蚀技术制备的具有微脊结构的超疏水表面进行了湍流流动实验, 并利用 PIV 对槽道内的流动速度进行了测量, 发现当微脊沿着流动方向的时候, 该超疏水表面能够有效地减小流动阻力, 但是当微脊的方向与流动方向相垂直的时候, 流动阻力反而增加了。前人的超疏水表面基本上是微米或纳米一级结构, 对具有微纳二级结构的超疏水表面进行流动减阻和机理研究尚少有报道。

1 超疏水表面的制备

本文所采用超疏水表面的制备方法是首先以单体的形式制备出超疏水表面的上的微米尺度的微纳米复合结构单元, 又叫无序缠绕碳纳米管, 然后再采用涂敷工艺用胶将碳纳米管复合颗粒粉

1) 国家自然科学基金资助项目 (项目批准号 10872106)

2) Email: yaozh@tsinghua.edu.cn

体粘接固定在表面上，构成碳纳米管微纳米复合结构表面，如图 1 所示。无序缠绕碳纳米管的制备方法见参考文献^[4]，将无序缠绕碳纳米管粉体浸泡到聚氟硅氧烷溶液中进行疏水化处理，聚氟硅氧烷的化学学名叫做十七氟癸基三乙氧基硅烷，化学式 $C_8F_{17}C_2H_4Si(OCH_3)_3$ ，是一种无色至淡黄色透明液体。有良好的透气性能，能够耐高温、耐氧化、耐紫外辐射，而且具有疏水疏油性质。然后再利用硅橡胶将疏水处理过的无序缠绕碳纳米管粘附在表面上，形成具有二级微纳米结构的超疏水表面。采用接触角测量仪(JC2000CD1)对表面进行接触角和滚动角测量，得到经聚氟硅氧烷处理的超疏水表面接触角为 151° ，滚动角为 0.9° 。

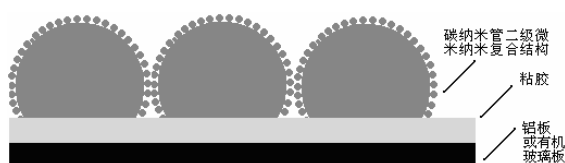


图 1 超疏水表面制备示意图

2 实验方法与过程

2.1 流动阻力实验

本流动阻力实验的实验示意图见图 2，槽道尺寸长 240mm、宽 12mm、高 0.96mm，在槽道上表面的两端端口处各有一个小孔作为入水口和出水口，而再从入口端向内 60mm 处以及出口向内 40mm 处，则是压力传感器安装的位置，用来测量这两点之间的压差，而这两个测量孔处的流动，经过模拟计算，在该测点间流动已经进入充分发展区了。在实验中质量流量由精密天平测量得到。

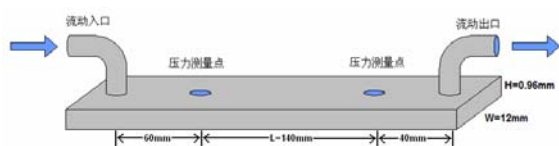


图 2 流动阻力实验示意图

对于层流流动，在矩形槽道内的普通流动中，沿程阻力系数^[1]：

$$f = \frac{\Delta p}{(L/D_H)} \frac{1}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{92}{Re} \quad (1)$$

其中： L 为测量压差的两点之间的距离， U 为槽道内流体的平均速度，通过流量与槽道横截面积可以算出。 $Re = \rho U D_H / \mu$ ， D_H 为水力直径：

$$D_H = 4A / P \quad (2)$$

假定在超疏水表面构建的槽道中，沿程阻力常数为 $C_{f-SuperHyd}$ ，那么其沿程阻力系数满足：

$$f_{SuperHyd} = \frac{\Delta p}{(L/D_H)} \frac{1}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{C_{f-SuperHyd}}{Re} \quad (3)$$

在实验过程中只要能够测量出两点之间的压差，就能够计算出该流动中的沿程阻力系数，进而把普通槽道内的流动与超疏水表面槽道内的阻力进行比较。

2.1 PIV 实验

为了确定在超疏水表面流动减阻的机理，利用 PIV 技术对槽道中的流场进行细致测量。在 PIV 实验中，片光源和 CCD 相机分别在槽道的正上方和正前方，利用片光源照亮待测槽道中心截面，如图 3 所示。槽道长为 600mm，宽 20mm，深 3.5mm（为了使流场细节更加清晰，放大了槽道尺寸），其基底为有机玻璃，槽道的下表面是超疏水表面，上表面采用透明的有机玻璃盖板，以方便测量。示踪粒子采用的镀银的空心玻璃微珠，其型号为 900875，其粒径在 $14\mu m$ 左右，密度与水接近，具有很好的跟随性。水泵是微型磁力潜水泵，其最大流量为 2800ml/min。

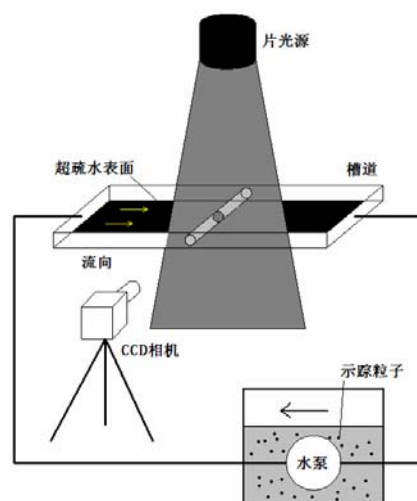


图 3 PIV 实验示意图

3 数据处理与分析

3.1 流动阻力实验结果

在湍流研究中，分别测量了具有相同槽道尺寸（长 240mm，宽 12mm，高 0.96mm）的光滑槽道和带超疏水表面的槽道从层流到湍流的流动压降和相应的质量流量，采用沿程阻力系数计算公式得到了各流动雷诺数下的沿程阻力系数与雷诺数的关系曲线如图 4 所示。

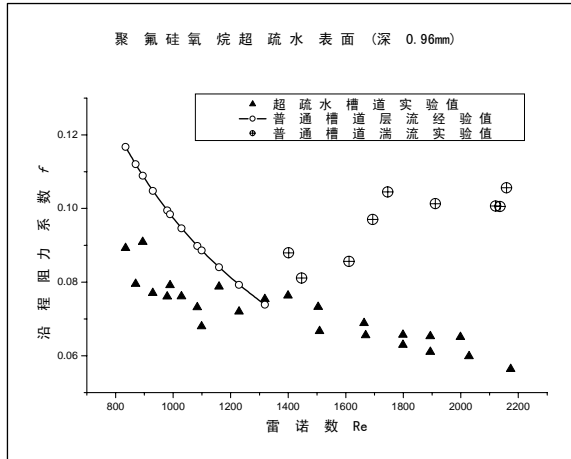


图 4 无序缠绕碳纳米管超疏水槽道中的沿程阻力系数

从图 4 可以看到，在普通槽道中，当雷诺数达到 1300 到 1400 之间的时候，流动压降急剧增加，沿程阻力系数随着雷诺数的增加而增大，这表明在普通槽道中流动由层流向湍流过渡。而在由无序缠绕碳纳米管构成的超疏水表面的槽道内，当雷诺数达到 1300 到 1400 之间的时候，沿程阻力系数仍然随着雷诺数的增加而减少，这说明具有微纳米结构的超疏水表面能够增大槽道内流动的转捩雷诺数，使得流动更不容易进入湍流状态，从而达到减阻的效果。

对于层流，通过计算，经聚氟硅氧烷疏水化处理的槽道沿程阻力系数常数为 $C_{f-SuperHyd} = 71$ 即：

$$f_{SuperHyd} = \frac{\Delta p}{(L/D_H)} \frac{1}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{C_{f-SuperHyd}}{Re} \quad (4)$$

其减阻达到了 22.8%。对于湍流而言，由于目前还没有解析解也没有相对应的经验公式，因此在这里我们根据槽道中压降随雷诺数变化的趋势来评估湍流情况下超疏水表面构建的槽道内的减阻效应。根据图 4 中的数据结

果，估算出湍流情况下，与普通槽道实验结果相比，利用聚氟硅氧烷进行疏水化处理之后的超疏水表面的减阻比例约为 53.3%。

从实验的结果来看，在具有超疏水表面的槽道中，湍流情况下的流动减阻比层流情况下的流动减阻效果更加明显。

3.2 PIV 实验结果

在 PIV 实验中，对于某一个雷诺数下的流动，在槽道中选定某一沿流向的垂直平面，CCD 相机两次曝光间隔时间为 0.5ms，一共拍摄 200 对共计 400 幅图，可以计算出 200 个瞬时速度场，两两速度场的时间间隔是 400ms。调整水泵的转速，可以进行不同雷诺数下的槽道内流场测量。现以雷诺数 $Re=2441$ 的流场为例，进行流动减阻机理研究。

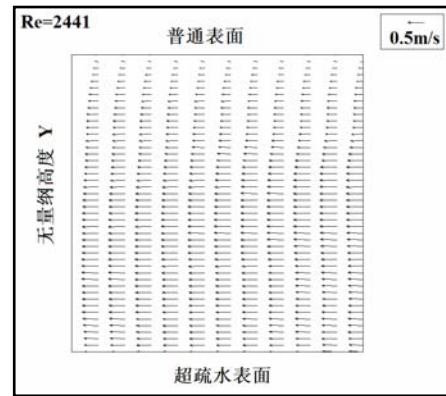


图 5 槽道内的平均速度场

图 5 给出了槽道内的平均速度场，图 6 给出了剖面上 X 方向的无量纲速度分布图，从两图上可以看出来，在 $Y=0$ 即超疏水表面固壁处流体的速度不为零，存在明显的速度滑移。而在 $Y=1$ 处即普通光滑的有机玻璃固壁处，流体速度近似为零。

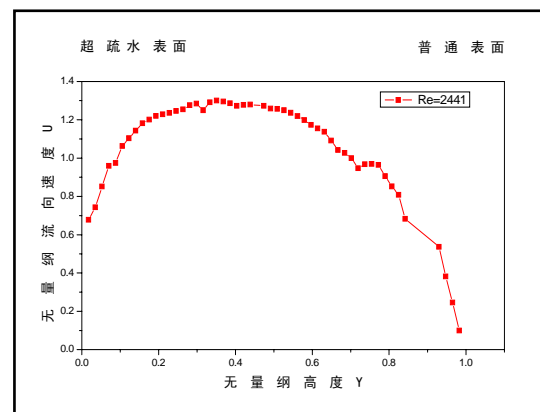


图 6 剖面上 X 方向的无量纲速度 U

图 7 为剖面上 X 方向的无量纲速度脉动均方根量随着 Y 的分布。

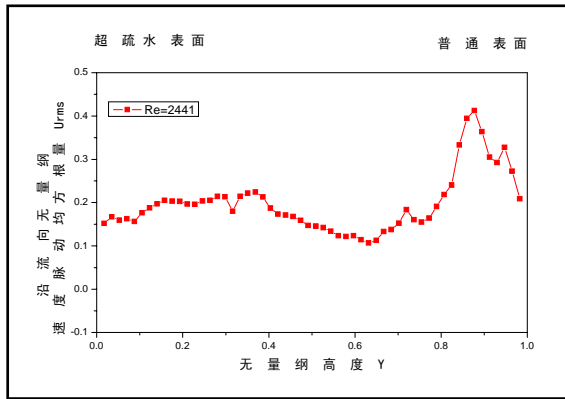


图 7 剖面上 X 方向的无量纲速度脉动均方根量

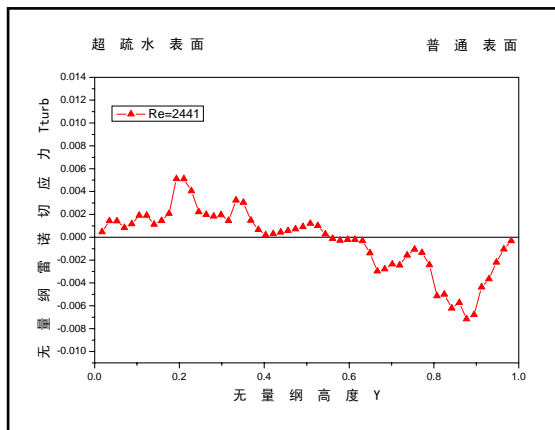


图 8 剖面上无量雷诺应力

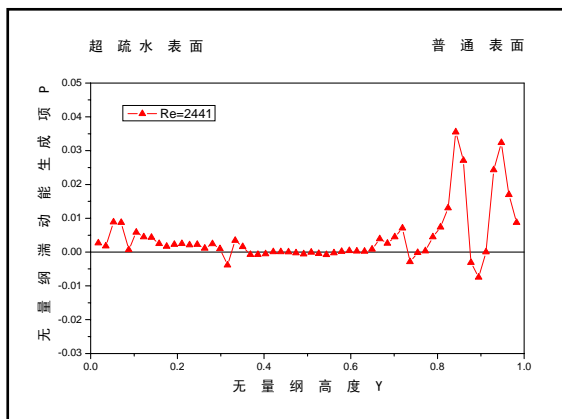


图 9 剖面上无量湍动能生成项

图 8 和图 9 表示槽道内剖面上的无量纲雷诺切应力和无量纲湍动能生成项。在湍流状态下，超疏水表面附近的雷诺切应力以及湍动能生成项都比较小，在普通表面附近，雷诺切应力以及湍动能生成项都比超疏水表面附近对应

的物理量大，这是因为在超疏水表面的速度滑移抑制了壁面附近的速度脉动，进而减少了由脉动动量运输而产生的雷诺应力和湍动能的生成。

4 结论

超疏水表面的优异性质使其在现代生活和工业生产中具有十分广泛的潜在应用。本文采用了碳纳米管缠绕技术和聚氟硅氧烷疏水化处理制备了具有二级微纳米结构的超疏水表面。测量了由该超疏水表面构建的槽道中的流动压差，将其与普通表面构建的槽道内的流动压差进行比较，发现在层流情况下，流动阻力减小最多达到了 22.8%。在湍流的情况下，超疏水表面的减阻比例约为 53.3%，减阻效果比层流更加明显。利用 PIV 技术测量了具有超疏水表面的槽道内的速度场，通过超疏水表面速度滑移和湍动脉动场信息，分析了湍流减阻效果比层流更加明显的物理机制。

参考文献

- 1 Ou J, Perot B, Rothstein JP. Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces. *Physics of fluids*, 2004, 16(12): 4635~4643
- 2 Watanabe K, Yanuar H, Udagawa H. Drag reduction of Newtonian fluid in a circular pipe with highly water-repellent wall, *J. Fluid Mech.* 1999, 381: 225~238
- 3 Choi CH, Ulmanella U, Kim J, Ho CM, Kim CJ. Effective slip and friction reduction in nanograted superhydrophobic microchannels, *Physics of fluids*, 2006, 18: 087105
- 4 Lu S, Yao ZH, Hao PF, Fu CS. Drag reduction in ultrahydrophobic channels with micro-nano structured surfaces, *Science China*, 2010, 53(7):1298~1305
- 5 Krupenkin TN. Turbulent Drag Reduction Using Superhydrophobic Surfaces. *AIAA* 2006-3192
- 6 Daniello RJ, Waterhouse NE, Rothstein JP. Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces, *Phys. Fluids*, 2009, 21: 085103
- 7 Woolford B, Prince J, Maynes D, Webb BW. Particle image velocimetry characterization of turbulent channel flow with rib patterned superhydrophobic walls, *Phys. Fluids*, 2009, 21: 085106

DRAG REDUCTION IN TURBULENT FLOWS OVER SUPERHYDROPHOBIC SURFACES WITH MICRO-NANO TEXTURES

LU Si YAO Zhaohui HAO Pengfei FU Chengsong

(Department of Engineering Mechanics, School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100190, China)

Abstract The superhydrophobic surfaces will have a very wide range of potential applications in the modern life and industrial production for their excellent properties. In the paper, a kind of superhydrophobic surface was fabricated by pasting micro-nano particles onto an aluminium or perspex substrate. The micro-nano particles was obtained by carbon nanotubes winding technology and hydrophobic processing. The pressure drop measurements were carried out in the channel with above superhydrophobic surfaces. Compared with the common surface channel, the flow resistance decreases approaching 22.8% at most in the laminar flow. In the turbulent flow, the drag reduction can reach to 53.3%. The velocity field in the channel with such superhydrophobic surfaces was measured by Particle Image Velocimetry (PIV) technology. Through the slip velocities in the superhydrophobic surface and turbulent fluctuations information field, the physical mechanism of the turbulent friction reduction effect more apparent than laminar can be obtained.

Key words superhydrophobic surface, micro-nano dual-scale structures, turbulent flow, drag reduction, slip velocity