

文章编号: 1672-9897(2011)05-0021-05

超疏水表面减阻水洞实验及减阻机理研究

黄桥高, 潘光, 武昊, 胡海豹, 宋保维

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 针对超疏水表面功能材料在流动减阻方面的潜在应用, 通过水洞实验研究了具有超疏水表面航行器模型的阻力特性, 获得了其减阻特性曲线, 并得到了超过 20% 的减阻效果。对超疏水表面进行了表面能特性和滑移特性分析, 认为表面组分中的疏水基团和表面微观结构分别导致了超疏水表面的低表面能效应和壁面滑移效应, 两者是超疏水表面具有减阻作用的直接原因。

关键词: 超疏水表面; 水洞实验; 表面能; 微观结构; 减阻机理

中图分类号: O357.5 **文献标识码:** A

Investigation about drag reduction water tunnel experiment and mechanism of superhydrophobic surface

HUANG Qiao-gao, PAN Guang, WU Hao, HU Hai-bao, SONG Bao-wei

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: For the possible drag reduction application of superhydrophobic surface, the drag characteristics of vehicle models with superhydrophobic surface is studied by water tunnel experiment. The drag characteristic curves and excess 20% experimental drag reduction effect are acquired. The surface energy specialty and slip specialty of superhydrophobic surface are analyzed. The results indicate that the hydrophobic fragments and microstructure bring about low surface energy effect and wall slip effect respectively, which are efficient reasons that superhydrophobic surface possesses drag reduction effect.

Key words: superhydrophobic surface; water tunnel experiment; surface energy; microstructure; drag reduction mechanism

0 引言

随着科学技术的发展, 各种超疏水表面的设计和应用已成为研究的热点。自然界有很多生物都具有超疏水性和自清洁功能, 例如荷叶表面和水龟腿部, 其表面水的接触角都高达 160° 以上, 滚动角小于 5° ^[1-2]。正是生物表面的超疏水性和自清洁功能带给了水下减阻技术新的研究方向。受此启发, 国内外学者开始关注超疏水表面减阻技术的研究^[3-6]。Choi C. H.^[7]通过实验对超疏水表面微通道内水流动时的滑移效果进行了研究, 发现在相同压力下超疏水表面微通道内的流率大于普通表面微通道内的流率, 并把流率增大的原因归结为超疏水表面壁面处存在滑移。Kevin Jeffs 和 Daniel Maynes^[8]利用数值模拟的方法研究了具有平行于流动方向的微结构的超疏水

表面的减阻特性。结果表明: 自由剪切面积增大时, 表观滑移速度增加, 摩擦阻力系数减小, 且在相同条件下湍流状态时的减阻量明显高于层流状态。霍素斌^[9]在铝制微通道内壁上制造出接触角达 153° 的超疏水表面, 并对水在超疏水表面微通道和超亲水表面微通道中流动的压降进行了测试与对比, 实验得出水在超疏水表面微通道内的流动阻力有明显降低, 降低的最大值可达 25%。李刚^[10]利用飞秒激光在硅表面刻蚀具有不同宽度和深度的微槽形貌, 经过硅烷化处理, 通过接触角的测量和流变特性实验研究其疏水性与流动减阻的关系。吕田^[11]使用数值模拟方法研究了超疏水性圆管内的湍流流动特性。研究表明: 其流场中存在临界 Re 数, 当 Re 数大于此临界值时, 超疏水性圆管内的湍流流动表现为减阻; 反之则表现为增阻, 并认为超疏水表面无滑移壁面与自由剪切面的综

收稿日期: 2010-10-08; 修訂日期: 2011-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(50835009); 陕西省自然科学基础研究计划(2010JQ1009); 西北工业大学科技创新基金(2008KJ02012); 西北工业大学研究生创业种子基金(Z2011033)

合效果是导致这一现象的主要原因。

从已有的研究情况来看,国内外学者从数值仿真和实验两方面充分证明了超疏水表面的减阻作用,但对超疏水表面减阻技术在水下航行器上的应用及其减阻机理方面的研究较少,目前仍无统一认识。通过水洞实验研究超疏水表面航行器模型的阻力特性,并分析具有显著减阻效果的超疏水表面的表面能特性及滑移特性,探索其减阻机理。

1 超疏水表面减阻水洞实验

1.1 实验测试设备

超疏水表面减阻实验在西北工业大学高速水洞实验室完成。该水洞洞体为一个充满水的不锈钢封闭循环管道,在叶轮泵的驱动下水沿管道循环流动,并在工作段内形成一个稳定的、水速和压力可调的均匀流场。实验模型置于工作段内并与测试仪器相连,以测定模型的流体动力特性,图1为水洞实验装置示意图。

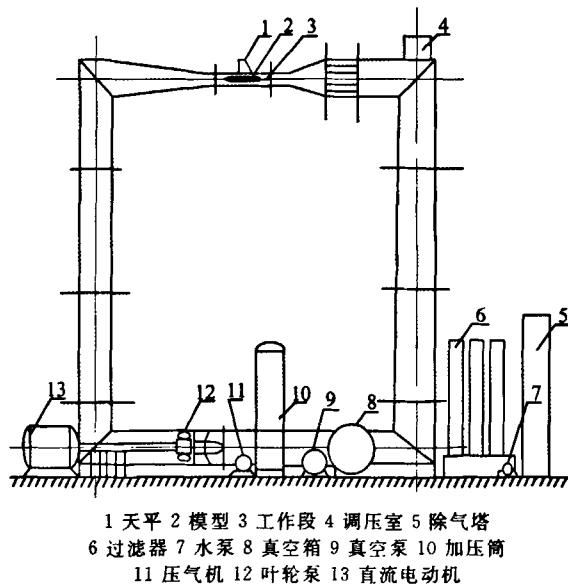


Fig. 1 Schematic of water tunnel equipments

高速水洞的主要参数为:

(1) 工作段尺寸: $\phi 400\text{mm} \times 2000\text{mm}$; (2) 工作段水速: $0 \sim 18\text{m/s}$, 连续可调; (3) 工作段压力: $(0.2 \sim 3) \times 10^5\text{Pa}$, 连续可调; (4) 最小空化数: $K = 0.15$ 。

实验测试设备主要包括:

(1) 三分量天平; (2) HP34970A型数据采集系统; (3) IBM PIII计算机; (4) 激光测速仪。

其中,三分量天平利用电桥平衡原理,同时测量阻力、升力和力矩。为了消除系统误差,提高流体动力测量的准确性,实验前必须对天平进行严格的静校。静校采用双向加减砝码的办法,这样做可以消除

应变片伸长和缩短时变形量存在的偶然误差。完成对3个通道的静校测量后,采用最小二乘法对静校结果进行处理,确定天平各通道的灵敏度,天平的主要技术参数见表1。

表1 三分量天平主要技术参数表

Table 1 Main technical parameters of three-component balance

分量 角项目	阻力	升力	力矩
设计量程	$\pm 60\text{N}$	$\pm 150\text{N}$	$\pm 25\text{N}\cdot\text{m}$
均方根误差	0.3631%	0.0604%	0.0846%
相对误差	0.015%	0.015%	0.02%
灵敏度	23.2907N/mV	-40.6720N/mV	$-6.1201\text{N}\cdot\text{m/mV}$

1.2 实验模型的设计及制备

以回转体模型为载体进行水洞实验,模型的总体构成如图2所示,由头部曲线段、前圆柱段、天平连接段、后圆柱段及尾部曲线段5部分组成,其中头部采用半球线型,尾部采用双参数尖尾线型,各段之间分段加工,并用螺纹连接。模型全长900mm,最大直径60mm,天平连接段90mm,前后圆柱段均为300mm,超疏水材料喷涂在前后圆柱段上。实验过程中,对于不同表面模型的测试只需更换前后圆柱段即可,这样不仅提高了不同模型实验状态的一致性,也避免了实验过程中更换整体模型带来的定位及装夹误差。



图2 模型总体构成示意图

Fig. 2 Schematic of experiment model

实验选用聚四氟乙烯(PTFE)/聚苯硫醚(PPS)仿生超疏水涂层改性处理LY12铝合金模型表面,测试其水动力学性能,从而研究超疏水表面的减阻行为及作用机理。配置PTFE/PPS仿生超疏水涂料,用丙酮清洗LY12铝合金模型表面,在 $0.3 \sim 0.4\text{MPa}$ 压力 N_2 下喷涂处理铝合金模型,并于一定温度固化成型。所制备的PTFE/PPS仿生超疏水涂层具备优异的超疏水性能、高粘结强度和耐介质性等实际工程应用性能。图3为水滴在超疏水表面上的接触行为,其表观接触角为 165° ,滚动角为 4° ,图4为利用涂层改性处理后的超疏水表面模型及光滑表面模型。

1.3 实验原理及方法

水洞水速调节控制没有启动时,洞内水流处于静止状态,即来流速度为零,模型不受任何流体流动的作用,测得无受力情况下的参照值,即天平初始资料。启动水洞后,模型在水流中受到的阻力作用于三分量天平就表现为弯曲力矩,这个变形通过电阻应变片转

化为电信号,由电桥电路测量出这个电信号的大小,通过 HP34970A 数据采集系统进行数据采集,并以电压值的形式显示出测量值。实验中采集时间和采集次数分别设定为 0.1s 和 100 次,即在每一水速下每 0.1s 采集一次数据,共采集 100 次。采集系统会自动读取这 100 组数据,给出其平均值。最后根据天平静校结果把电压值换算成阻力值,进行数据处理。

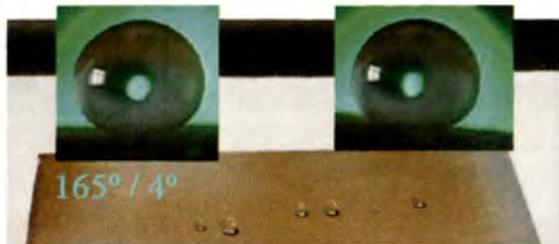


图 3 水滴在超疏水表面上的接触行为
Fig. 3 The contact action of water drops on superhydrophobic surface



图 4 水洞实验模型各段照片
Fig. 4 Photo of water tunnel experiment models

1.4 实验结果

实验中分别对超疏水表面模型和光滑表面模型进行阻力测试,模型迎角设定为 0°,来流水速 $v=3\sim10\text{m/s}$,调节间隔 0.5m/s,静压力 0.15MPa,水温 20°C。将超疏水表面模型的阻力系数和相同条件下光滑表面模型的阻力系数进行比较,即可获得其减阻特性,减阻量的计算公式如下:

$$DR = (1 - \frac{C_d}{C_0}) \times 100\%$$

式中, C_d 、 C_0 分别表示超疏水表面模型和光滑表面模型的阻力系数。

图 5 为超疏水表面模型与光滑表面模型的阻力系数对比曲线,图 6 为超疏水表面模型减阻量随雷诺数的变化曲线。从图中可以看出,超疏水表面模型在雷诺数(2.7~9.0)×10⁶ 范围内具有显著、稳定的减阻效果,最大减阻量达到了 25%。但随着雷诺数的增加,减阻效果逐渐降低直至基本消失。

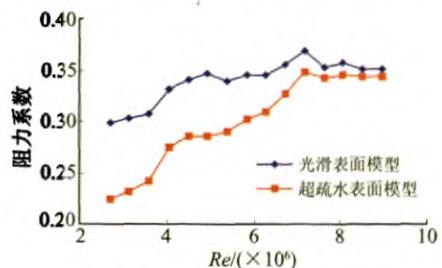


图 5 航行器模型的阻力系数曲线
Fig. 5 Drag coefficient curves of vehicle models

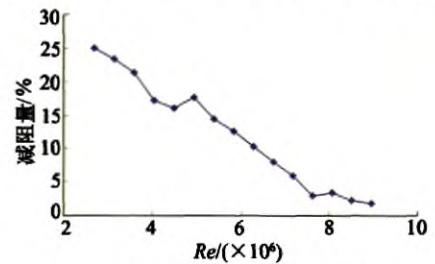


图 6 超疏水表面的减阻量曲线
Fig. 6 Drag reduction effect curves of superhydrophobic surface

众所周知,低表面能化学组成和表面微观结构是决定超疏水表面润湿性大小的两个主要因素^[12-13],因此,有必要从这两方面进一步研究超疏水表面具有减阻作用的机理。

2 超疏水表面减阻机理分析

2.1 低表面能效应的影响

为了定量地分析超疏水表面的表面能,采用接触角法^[14]对所制备的超疏水表面进行表面能测试,其测试原理为

$$\cos\theta = -1 + 2\varphi \sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_l}}$$

根据此式,利用已知表面张力值 γ_l 的液体,测得与固体表面的接触角 θ ,并在已知 φ 值的情况下,就可以求得固体的表面能 γ_s 。水滴在超疏水表面上的接触角为 $\theta=165^\circ$,水的表面张力取 $\gamma_l=72.8\text{mN/m}$,修正因子 φ 与分子大小和分子间相互作用力有关,随体系组成而定。对于非极性液体与非极性固体构成的体系, $\varphi \approx 1$ 。计算得到超疏水表面的表面能为 $\gamma_s=0.0211\text{mJ/m}^2$,相比普通金属的表面能 200~5000mJ/m²,超疏水表面确实具有低得多的表面能。

为了进一步深入分析超疏水表面具有低表面能的原因,对其进行了 X 射线光电子能谱分析(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)。XPS 被广泛用来进行固体表面化学分析,得到有关样品的组成、化学态、表面吸附、表面态、表面价电子结构、原子和分子的化学结构、化学键合情况等信息。图 7 为超疏水表面的 XPS 能谱全图,从图中可以看出,超疏水表面

中含有-C-F₂疏水基团，F1s的XPS谱峰位于688.4eV处。该表面实现了疏水涂层功能的梯度分布，低表面能组分在涂层表面的富集和高结合强度组分在基底的富集，既强化了涂层与底材的粘附，又使涂层表面具有较低的表面能。

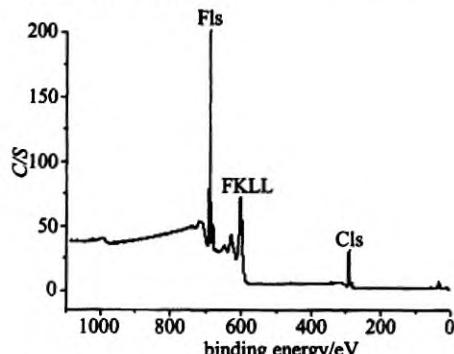


图7 超疏水表面XPS能谱全图
Fig. 7 The XPS of superhydrophobic surface

从物理特性来讲，对同一种液体，固、液两相接触面上超疏水固体分子对液体分子的吸引力比亲水固体分子的吸引力要小。降低固体表面能是减小流体流动过程中所受粘滞力的有效方法，而超疏水表面由于含有-C-F₂等疏水基团，具有比普通金属低得多的表面能。实验中利用超疏水表面功能涂层材料改性处理LY12铝合金模型，其目的就是降低壁面的表面能，从而减小固体分子与液体分子的吸引力或粘附力，减小液体流经固体表面时的阻力。

2.2 滑移效应的影响

超疏水表面的微观结构与其滑移流动现象的产生有直接联系，与表面化学组成对滑移流动的影响相比较，表面微观结构显得更加重要^[15]。图8为超疏水表面微观结构放大200倍的SEM图。从图中可以发现，超疏水表面分布着许多不规则形状的凹坑，正是这些特殊微观结构的存在，使得水滴滴在超疏水表面上时，一部分与空气相接触，一部分与离散的表面凸起相接触。

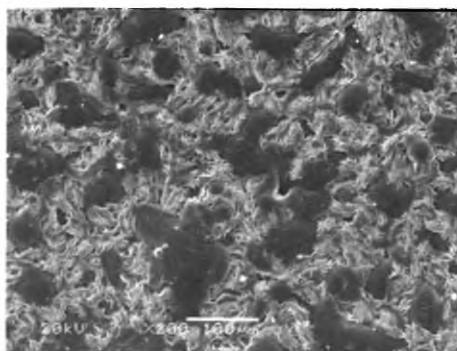


图8 超疏水表面微观结构SEM图(200×)
Fig. 8 The SEM of microstructure of superhydrophobic surface(200×)

根据Cassie方程

$$\cos\theta_c = f(1 + \cos\theta_e) - 1$$

式中， θ_c 表示超疏水表面的表观接触角， f 表示水滴与固体的接触面占复合界面的百分数（相应地， $1-f$ 则表示水滴与空气的接触面所占的百分数）， θ_e 表示本征接触角。若以 $\theta_e=165^\circ$ 、 $\theta_c=92^\circ$ 来计算，可以得到 $f=4\%$ 。这一数据意味着，当水滴置于这种超疏水表面上时，只有约4%的面积是水滴和固体表面接触，而有约96%的面积是水滴和空气接触，气液界面的存在为滑移流动现象的产生提供了有利条件。

从流体力学的角度讲，当流体流经具有微观结构的超疏水表面时，由于气液界面的存在促使滑移流动现象产生，使得边界面上的速度梯度减小，从而减小了边界面上的剪切力；由于边界面上的速度梯度减小，推迟了层流附着面流态的转变，使得附着面的层流流态更加稳定，也使得层流边界层和层流附面层的厚度增加。这些因素的共同作用产生了减阻效果，减阻机理如图9所示。

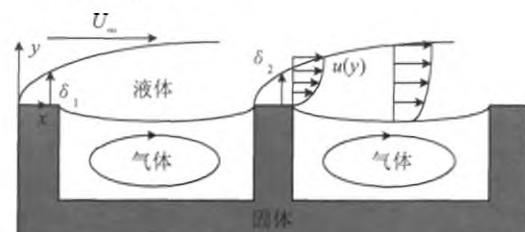


图9 基于滑移效应的超疏水表面减阻机理示意图
Fig. 9 Schematic of drag reduction mechanism of superhydrophobic surface based on slip effect

3 结论

通过水洞实验测试了超疏水表面航行器模型的阻力特性，分析了超疏水表面的表面能特性及滑移特性，获得如下结论：

(1)超疏水表面具有稳定、显著的减阻效果，最大减阻量超过了20%，在水下航行器上具有广泛的应用前景；

(2)-C-F₂等疏水基团的存在是超疏水表面具有低表面能效应的直接原因，降低固体表面能能够减小固体分子与液体分子的吸引力或粘附力，从而减小液体流经固体表面时的阻力；

(3)表面微观结构的存在能够使液体流经超疏水表面时形成气液两相流，产生滑移流动现象，降低边界面上的速度梯度，从而减小液体流经固体表面时的阻力；

(4)低表面能化学组成和表面微观结构对于超疏水表面减阻作用的影响程度，还有待开展进一步深入

的研究。

致谢：感谢中科院兰州化学物理研究所的罗莊竹副研究员在超疏水表面的制备及XPS能谱分析方面给予的大力帮助。

参考文献：

- [1] FENG L, LI S, LI Y, et al. Super-hydrophobic surfaces: from natural to artificial[J]. Advanced Materials, 2002, 14(24): 1857-1860.
- [2] 高雪峰, 江雷. 天然超疏水生物表面研究的新进展[J]. 物理, 2006, 35(7): 559-564.
- [3] OU J, PEROT B, ROTHSTEIN J P. Laminar drag reduction in microchannels using ultrahydrophobic surfaces[J]. Physics of Fluids, 2004, 16(12): 4635-4643.
- [4] 余永生, 魏庆鼎. 超疏水性材料减阻特性实验研究[J]. 实验流体力学, 2005, 19(2): 60-66.
- [5] ZHAO Jia-peng, SHI Xiu-hua, GENG Xing-guo, et al. Liquid slip over superhydrophobic surface and its application in drag reduction[J]. Journal of Ship Mechanics, 2009, 13(3): 325-330.
- [6] OU J, ROTHSTEIN J P. Direct velocity measurements of the flow past drag-reducing ultrahydrophobic surfaces [J]. Physics of Fluids, 2005, 17(10): 103606(10).
- [7] CHOI C H, KIM C J. Large slip of aqueous liquid flow over a nanoengineered superhydrophobic surface [J]. Physical Review Letters, 2006, 96(6): 066001(4).
- [8] KEVIN Jeffs, DANIEL Maynes, BRENT W Webb. Prediction of turbulent channel flow with superhydrophobic walls consisting of micro-ribs and cavities oriented parallel to flow direction[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53: 786-796.
- [9] 霍素斌, 于志家, 李艳峰, 等. 超疏水表面微通道内水的流动特性[J]. 化工学报, 2007, 58(11): 2721-2726.
- [10] 李刚, 周明, 蔡兰, 等. 疏水表面流动减阻特性的试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 172-174.
- [11] 吕田, 陈晓玲. 超疏水性圆管湍流减阻的数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(8): 1280-1283.
- [12] 汪家道, 禹营, 陈大融. 超疏水表面形貌效应的研究进展[J]. 科学通报, 2006, 51(18): 2097-2099.
- [13] XU D H, LIU H, YANG L, et al. Fabrication of superhydrophobic surfaces with non-aligned alkyl-modified multi-wall carbon nanotubes [J]. Carbon, 2006, 44 (15): 3226-3231.
- [14] 姚寿山, 李戈扬, 胡文彬. 表面科学与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [15] DAVIES J, MAYNES D, WEBB B W, et al. Laminar flow in a microchannel with superhydrophobic walls exhibiting transverse ribs[J]. Physics of Fluids, 2006, 18 (8): 087110(11).

作者简介：



黄桥高(1983-),男,湖北孝感人,博士研究生。研究方向:水下航行器总体设计、水下减阻技术。通讯地址:陕西省西安市西北工业大学航海学院709室(710072),电话:13991288604,E-mail:huangqiaogao_1@163.com