

## 疏水表面减阻环带实验研究\*

宋保维<sup>1)†</sup> 郭云鹤<sup>1)</sup> 罗荏竹<sup>2)</sup> 徐向辉<sup>3)</sup> 王鹰<sup>1)</sup>

1) (西北工业大学, 航海学院, 西安 710072)

2) (中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 401122)

3) (中国科学院兰州化学物理研究所, 兰州 730000)

(2013年3月12日收到; 2013年4月8日收到修改稿)

针对疏水功能材料在流动减阻方面的应用, 选取典型不同粗糙度、不同疏水性的功能涂层表面, 通过新型环带实验研究了其阻力特性, 并获得了相应的扭矩和减阻率曲线. 实验采用测量圆盘带动环带旋转时的扭矩的方法间接计算环带表面所受的摩阻, 突破了传统微管道实验在尺度上的限制, 避免了水洞实验中影响因素过多的弊端, 对疏水材料的宏观应用有着重要意义. 实验证实了在宏观尺度下疏水涂层在低雷诺数时的减阻作用; 但在高雷诺数时, 减阻作用减弱, 甚至部分涂层有增阻作用, 而压差阻力的迅速增大是造成增阻的主要原因. 通过对比分析认为: 低雷诺数时, 疏水特性对于减阻效果影响更大; 而高雷诺数时, 粗糙度起更大作用, 甚至可能起到增阻的反效果.

**关键词:** 疏水表面, 环带实验, 粗糙度, 减阻

**PACS:** 47.54.De, 47.54.Jk, 47.85.lb

**DOI:** 10.7498/aps.62.154701

## 1 引言

受荷叶、芋头以及水稻等植物叶面疏水特性的启发, 近年来, 越来越多的国内外研究者开始关注疏水性表面在减小流体阻力、降低流噪声和海洋防污等方面潜在的良好应用前景. 疏水表面与普通表面相比, 除了材料的化学组成差异外, 在表面微观结构方面也存在差别(疏水表面存在着复杂的微米、纳米或微纳米双重结构<sup>[1]</sup>), 从而使得水介质在材料表面呈现出不同的润湿行为<sup>[2]</sup>. 本文则是主要关注疏水表面的减阻性能; 虽然现在减阻技术众多<sup>[3,4]</sup>, 但改变运动体表面微结构及组成, 构筑疏水性能的表面, 具有经济简便, 技术可行性强等明显优点.

目前, 关于疏水表面的制备方法和技术已经发展成熟<sup>[5-8]</sup>, 对于疏水表面减阻的理论研究<sup>[9,10]</sup>和数值模拟<sup>[11,12]</sup>也得到了充分的发展. 另一方面, 国

内外学者也对疏水表面减阻进行了一定量的微通道试验和水洞实验: Ou等<sup>[13]</sup>用 $30\ \mu\text{m}$ 的立方柱构建了间距为 $30\ \mu\text{m}$ 的图纹表面, 实验结果表明, 水流经这种图纹表面的压力降低达40%, 表观滑移长度大于 $20\ \mu\text{m}$ ; 黄桥高等<sup>[14]</sup>通过水洞实验测试了超疏水表面飞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.

从已有的实验研究情况来看, 国内外学者已充分证明了疏水表面具备一定的减阻作用. 但这些实验或者因尺度较小(微小通道实验), 只能研究低雷诺数下的减阻现象, 从而无法说明疏水表面的宏观减阻效应并应用于实际应用; 或者因为影响因素过多(水洞实验所测阻力包含成分较多, 尤其是在高流速时, 压差阻力和支杆阻力占的比重较大), 而无法准确分析疏水表面的减阻性能. 因此, 为了准确表征大尺度疏水表面的减阻性能, 本文在水洞实验的基础上与中船重工第七〇二所拖曳水池实验室合作建立了大尺度疏水表面环带实验, 分析了典型

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 50835009)、国家自然科学基金(批准号: 51109178)和陕西省自然科学基金基础研究计划(批准号: 2010JQ1009)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: songbaowei@nwpu.edu.cn

疏水功能涂层表面的表面特性及减阻规律.

## 2 实验和数据方法

### 2.1 实验对象及方法

环带实验测试对象如图 1 所示, 其中圆盘 (图 1(a)) 起支撑作用, 功能涂层均匀地喷涂于测试环带 (图 1(b)). 环带内径为 0.400 m, 外径为 0.410 m, 平均直径 0.405 m; 环带高度 0.200 m, 内外测试面积共计 0.509 m<sup>2</sup>.

环带实验在减压拖曳水池进行, 水池尺度 150 m(长)×7.5 m(宽)×4.5 m(深). 采用 H390 敞水动力仪进行测试, 推力量程 800 N, 扭矩量程 50 N·m, 精度 0.1%; 转速采用编码器进行测量, 精度 0.1%. 实验过程中圆盘带动环带旋转 (图 2 所示), 通过测量扭矩可以间接计算出圆盘和环带所受的阻力. 考虑设备量程, 实验最高转速 15 r/s, 对应环带雷诺数超过  $2.0 \times 10^7$ . 环带在完全紊流流状态下 (局部雷诺数大于  $1.0 \times 10^7$ ) 的测试点达到了 8 个.

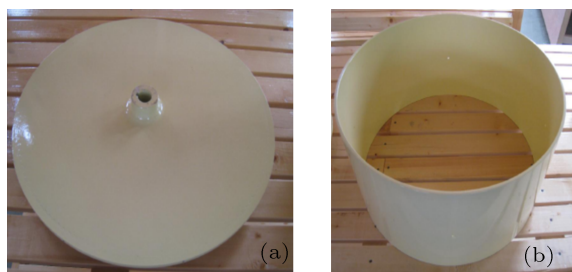


图 1 环带实验研究对象

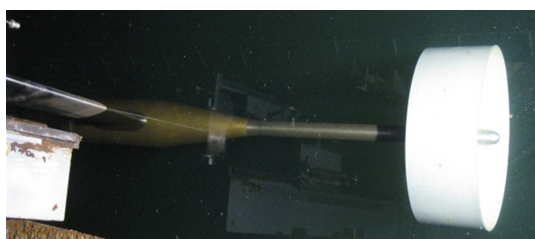


图 2 环带实验示意图

由于实验精度要求较高, 必须避免环带旋转时出现震颤、摇摆等现象, 因此, 实验前首先对环带装置的同心度进行校准. 如图 3 所示的校准现场图,

校准确定了动力支杆位于圆盘圆心, 并且保证了环带为绝对的圆形.

另外, 实验水深也会对实验精度产生影响, 因此, 在定转速条件下 (10 r/s), 进行了不同轴线深度的实验以观察表面兴波对扭矩测量的影响. 变深度实验结果见表 1.

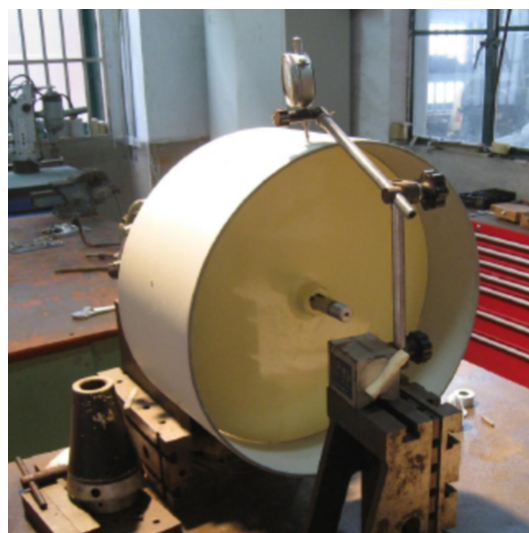


图 3 环带装置同心度校准

表 1 变深度实验结果

序号	转速/(r/s)	深度/mm	扭矩/N·m
1	10.000	200	20.829
2	10.000	250	21.194
3	10.000	300	21.398
4	10.000	350	21.445
5	10.000	400	21.440

从表 1 中可以看出, 轴线深度达到 300 mm 后, 深度对扭矩测量的影响已经小于 0.5%, 而本次实验时环带装置轴线深度取 H390 动力仪最大深度 600 mm, 达到 1.5 倍的环带装置直径 (这一深度设置参考了螺旋桨敞水试验规范要求), 可以满足实验精度需求.

### 2.2 数据方法

实验过程记录转速  $n_m$  和扭矩  $Q_m$ , 首先测试无环带时圆盘扭矩  $Q_{m0}$  随转速  $n_m$  的变化, 并以此为基线; 再测量装涂有聚氨酯底漆的环带时的扭矩  $Q_{m1}$ , 以及涂有功能涂层 A—D 的环带时的扭矩

$Q_{mA} - Q_{mD}$ . 从敷有不同涂层的环带的测试结果中扣除无环带时的结果基线即可得到各涂层环带所受扭矩. 然后通过扭矩计算摩擦阻力系数  $C_f$ , 分析方法如下:

$$F_{fi} = \frac{2(Q_{mi} - Q_{m0})}{D}, \quad (1)$$

对应的摩擦阻力系数为

$$C_{fi} = \frac{F_{fi}}{0.5\rho_m(\pi D n_m)^2 S}. \quad (2)$$

以聚氨酯漆摩擦阻力系数  $C_{f1}$  为对比的基础, 分析 A—D 等 4 种功能涂层的减阻效果  $\delta_{fi}$ ,

$$\delta_{fi} = \frac{C_{f1} - C_{fi}}{C_{f1}} = \frac{Q_{m1} - Q_{mi}}{Q_{m1} - Q_{m0}}. \quad (3)$$

### 3 疏水表面实验表征

#### 3.1 环带表面功能涂层改性处理

本研究试验选用涂层改性处理 LY12 铝合金环带模型 (基材为喷涂防锈底漆), 测试其水动力学性能, 从而研究功能涂层表面的减阻行为及其作用机理. 配制上述功能涂料, 用丙酮清洗 LY12 铝合金模型, 于 0.2—0.3 MPa 压力空气下喷涂处理铝合金模型, 并于一定温度固化成型. 所制备 4 种功能涂层 (编号为涂层表面 A—D) 具备高粘结强度及优异耐介质性等实际工程应用性能, 但其疏水性能和粗糙度等各不相同, 如表 2 所示.

表 2 功能涂层表面的理化特性

序号	测试项目	性能指标			
		A	B	C	D
1	颜色及外观	浅色	浅色	浅色	浅色
2	表面硬度 (铅笔)	H1—H3	H1—H3	H1—H3	H1—H3
3	附着力级 (划格法)	1 级	1 级	1 级	1 级
4	冲击强度/kg·cm	50	50	50	50
5	涂层厚度/ $\mu\text{m}$	55	56	54	58
6	表面粗糙度/ $\mu\text{m}$	0.92	2.10	1.20	0.11
7	疏水性: 接触角/ $^\circ$	111	123	101	83
8	耐酸性 (5% $\text{H}_2\text{SO}_4$ 浸泡 100 h)	无变化	无变化	无变化	无变化
9	耐碱性 (5% $\text{NaOH}$ 浸泡 100 h)	无变化	无变化	无变化	无变化
10	耐盐性 (5% $\text{NaCl}$ 浸泡 100 h)	无变化	无变化	无变化	无变化

#### 3.2 疏水功能涂层表面 SEM 分析

图 4 为四种实验测试涂层表面的不同放大倍数 SEM 图.

从图 4 中可以清晰看到, 4 种涂层表面均为非光滑表面, 具有复杂的表面微结构. 涂层 D 表面致密、光滑, 粗糙度较低; 而涂层 B 和 C 表面较粗糙, 其中涂层 B 表面粗糙度最大. 另外, 从 SEM 图右上角的接触角示意图可以看到, 涂层 B 表面接触角较大, 疏水性最好; 而涂层 D 表面接触角较小, 基本不具备疏水性.

### 4 实验结果与分析

分别对底漆表面和 4 种涂层表面模型进行测试, 实验转速  $n_m = 0.5 - 15$  r/s, 共测量 17 个速度点.

实验水温  $23.0$   $^\circ\text{C}$ , 密度  $997.97$   $\text{kg}/\text{m}^3$ , 运动黏性系数  $0.9379 \times 10^{-6}$   $\text{m}^2/\text{s}$ . 实验结果如表 3 所示, 可以看到, 测量得到涂层 A—D 的扭矩随着转速的增加而增加, 符合定性规律.

根据实验结果可以由 (1)—(3) 式计算出各涂层表面减阻率随转速的变化曲线, 如图 5 所示.

由图 5 可以看到, 无论哪种涂层, 低雷诺数下均有可观的减阻收益, 该系列涂层的疏水微观结构在低雷诺数下减阻效果明显; 但随着雷诺数的增加, 减阻效果迅速下降, 甚至在涂层 B 和涂层 C 上出现了增阻的情况. 涂层 A 和 D 在高雷诺数下的减阻效果相当, 约为 1%. 另外, 不同涂层表面均在转速为  $4.0$  r/s (雷诺数  $3.5 \times 10^6$ ) 附近出现并不显著的峰值, 分析认为应是过渡流引起.

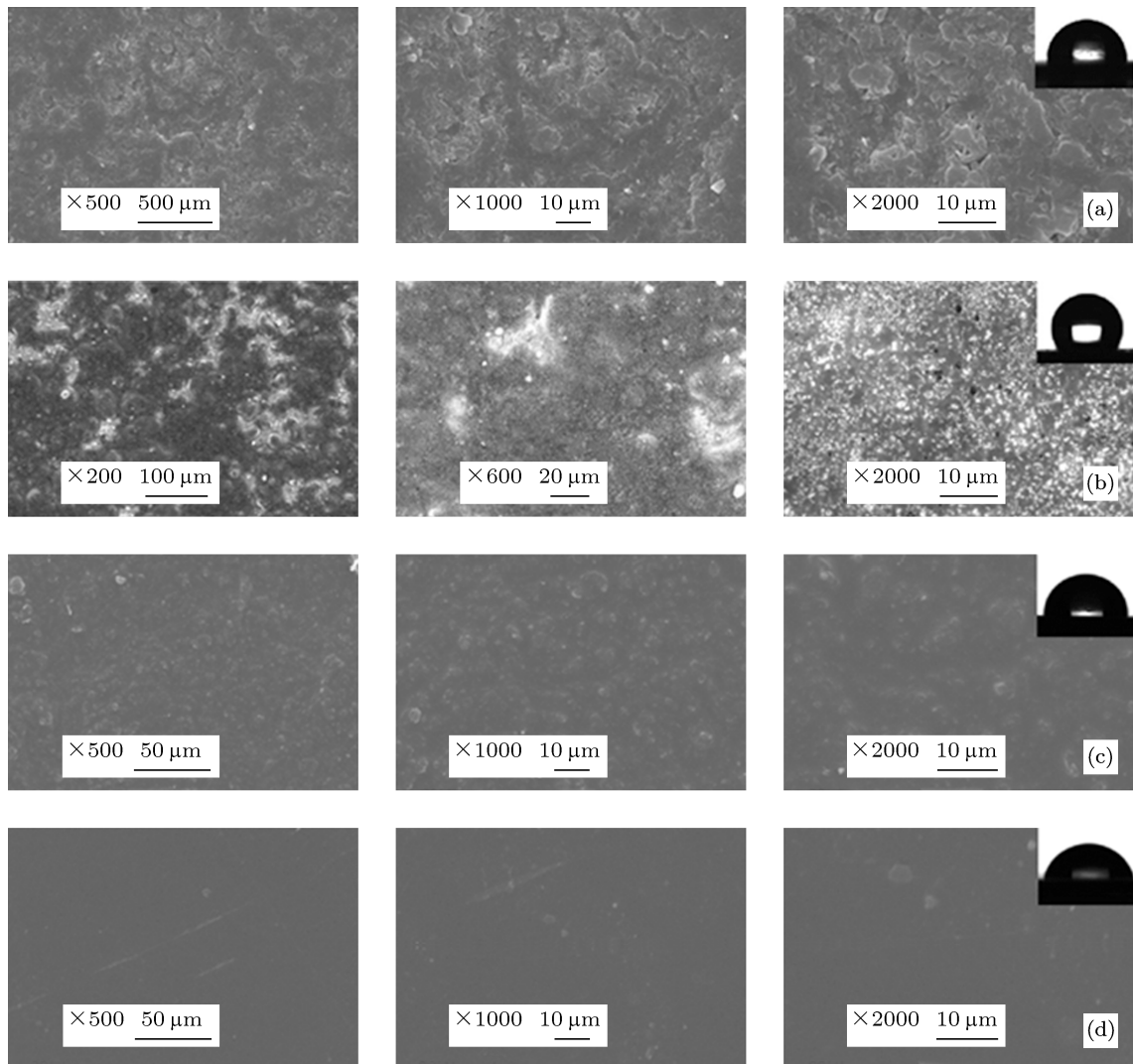


图4 四种涂层表面微观结构 SEM 图 (a) 涂层 A 表面; (b) 涂层 B 表面; (c) 涂层 C 表面; (d) 涂层 D 表面

表3 不同涂层表面环带实验结果

$n_m/(r/s)$	$Q_{m0}/N\cdot m$	$Q_{m1}/N\cdot m$	$Q_{mA}/N\cdot m$	$Q_{mB}/N\cdot m$	$Q_{mC}/N\cdot m$	$Q_{mD}/N\cdot m$
0.5	1.732	1.871	1.802	1.825	1.859	1.851
1	1.764	2.063	2.003	2.027	2.051	2.042
1.5	1.876	2.394	2.348	2.378	2.389	2.383
2	1.971	2.884	2.808	2.851	2.844	2.839
2.5	2.141	3.435	3.393	3.451	3.418	3.409
3	2.325	4.136	4.052	4.169	4.107	4.081
3.5	2.505	4.898	4.836	4.998	4.887	4.84
4	2.709	5.786	5.722	5.967	5.775	5.732
5	3.185	7.836	7.752	8.22	7.845	7.756
6	3.755	10.299	10.24	10.949	10.377	10.207
7	4.41	13.04	12.901	14.076	13.22	12.929
8	5.168	16.246	16.143	17.669	16.553	16.108
9	5.996	19.753	19.7	21.856	20.209	19.581
10.5	7.421	25.761	25.634	28.789	26.501	25.447
12	9.003	32.457	32.293	36.847	33.615	32.188
13.5	10.752	40.104	39.798	45.909	41.691	39.709
15	12.694	48.483	48.172		50.564	

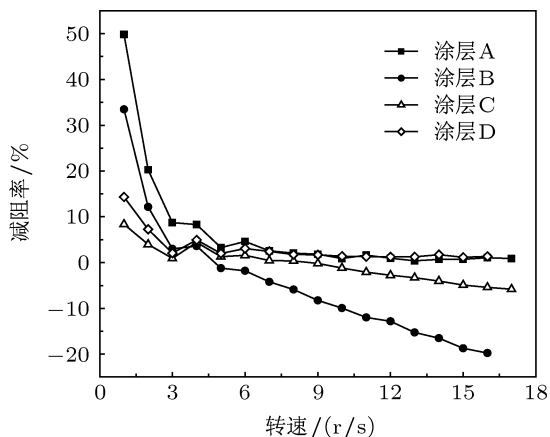


图5 减阻率随转速的变化曲线

由于疏水表面微结构尺寸过小, 利用实验的方法很难探究到涂层表面减阻率随转速增加而降低的原因, 因此, 可以考虑采用数值模拟的办法对疏水表面进行仿真<sup>[15]</sup>. 本文采用雷诺平均的方法进

行了数值模拟, 模拟中所用的简化模型如图6所示, 模拟结果与实验结果的变化趋势基本相同, 即减阻率随水流流速的增加而降低. 图7、图8分别为模拟的微凹槽附近的压力云图和速度矢量图.

由图7可以看到, 涂层表面由于微观结构的存, 而出现了压差阻力, 推测认为: 压差阻力的存在是疏水表面减阻率随速度增加而降低的主要原因. 而从图8中的速度矢量图可以看到, 凹槽中的速度漩涡减小了近壁面处的速度梯度和液固接触面积, 从而减小了摩擦阻. 图9为模拟的疏水微结构表面压差阻力与摩擦阻力所占比例随流速的变化曲线图. 可以看到, 压差阻力所占比重随流速增加而不断增加. 当流速较高时, 疏水表面降低的摩擦阻力已经被压差阻力的增加而大大抵消了, 从而导致减阻率的降低. 而高粗糙度疏水表面的压差阻力作用则更加明显, 这也导致了高粗糙度表面在高速下的增阻.

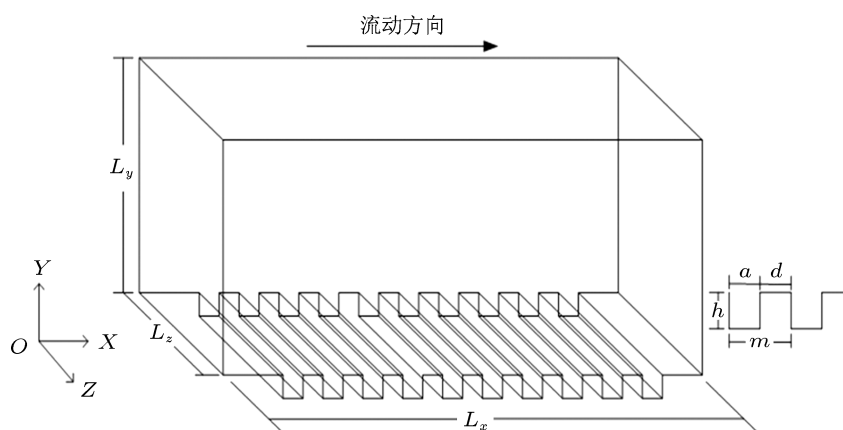


图6 简化的疏水表面模型

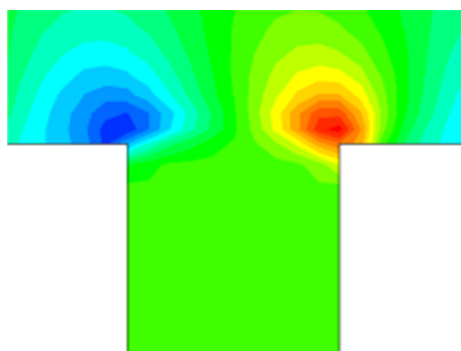


图7 凹槽附近的压力云图

分析4种涂层的疏水性和粗糙度对减阻率的影响, 可以发现: 低雷诺数时, 环带实验的减阻情况与微小通道实验<sup>[13,16]</sup>结果相似(均有可观的减阻效果), 证实了疏水表面在低雷诺数下的减阻效果, 且疏水性较好的涂层B和A减阻率明显高于疏水性较差的涂层C和D; 而在高雷诺数时, 疏水表面减阻作用减弱, 且粗糙度较小的涂层D和A的减阻率则要明显高于具有较大粗糙度的涂层B和C, 这是对微小通道实验雷诺数范围较小的重要补充. 因此得出: 低雷诺数时, 疏水特性对于减阻效果影响更大; 高雷诺数时, 粗糙度起更大作用, 甚至可能起到增

另一方面, 分别在低雷诺数和高雷诺数下对比

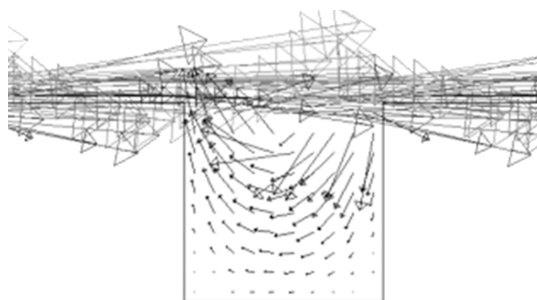


图8 凹槽处速度矢量图

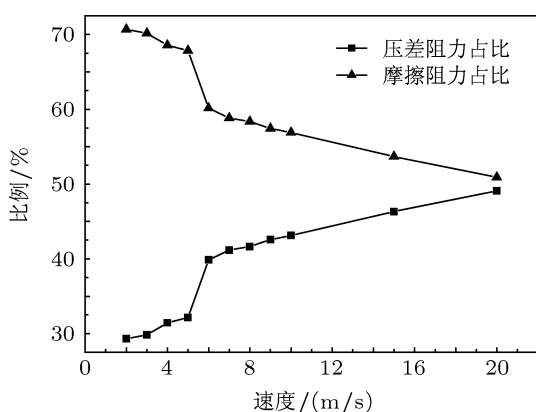


图9 不同阻力成分随速度变化曲线

阻的反效果. 这对以后工程应用疏水表面的制备具

有重要的指导价值: 当应用于速度较低的航行器表面时, 应制备疏水特性更好的疏水表面; 当应用于速度较高的航行器表面时, 应制备具有更低粗糙度的疏水表面.

## 5 结论

本文通过环带实验测试了疏水功能涂层表面的阻力特性, 分析了疏水表面的表面特性及减阻规律, 获得如下结论:

1. 采用环带装置配合高精度的动力仪是一种较好的间接测量摩擦阻力的方法, 测试雷诺数可以达到  $10^7$  量级, 实验结果稳定可靠.
2. 疏水涂层表面在低雷诺数下有较明显的减阻现象 (均可超过 10%), 但是在高雷诺数下减阻效果减弱 (约 1%—3%), 甚至部分涂层有增阻现象.
3. 低雷诺数时, 疏水特性是影响减阻效果的主要因素; 而高雷诺数时, 粗糙度起更大作用.

感谢中船重工第七〇二研究所朱爱军、冯玉龙等老师在环带实验中给予的大力支持.

[1] Feng L, Li S H, Li Y S, Li H J, Zhang L J, Zhai J, Song Y L, Liu B Q, Jiang L, Zhu D B 2002 *Adv. Mater.* **14** 1857

[2] Luo Z Z, Zhang Z Z, Hu L T, Liu W M, Guo Z G, Zhang H J, Wang W J 2008 *Adv. Mater.* **20** 970

[3] Zhang M, Geng X G, Zhang Y, Wang X N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 194702 (in Chinese) [张盟, 耿兴国, 张瑶, 王晓娜 2012 物理学报 **61** 194702]

[4] Mei D J, Fan B C, Huang L P, Dong G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6786 (in Chinese) [梅栋杰, 范宝春, 黄乐萍, 董刚 2010 物理学报 **59** 6786]

[5] Saison T, Peroz C, Chauveau V, Berthier S, Sondergard E, Arribart H 2008 *Bioinsp. Biomim.* **3** 046004

[6] Xu F Y, Liu L J, Tan J, Liu B, Mei S 2012 *Acta Phys. Chim. Sin.* **28** 693 (in Chinese) [徐飞燕, 刘丽君, 覃健, 刘贝, 梅双 2012 物理化学学报 **28** 693]

[7] Wang X L, Liu X J, Zhou F, Liu W M 2011 *Chem. Commun.* **47** 2324

[8] Wang D A, Liu Y, Yu B, Zhou F, Liu W M 2009 *Chem. Mater.* **21** 1198

[9] Tretheway D, Meinhart C 2004 *Phys. Fluids* **16** 1509

[10] Lauga E, Brenner M P, Stone H A 2005 *Handbook of Experimental Fluid Dynamics* (New York: Springer) Chap. 15

[11] Kevin J, Daniel M, Brent W W 2010 *Int. J. Heat Mass Transfer.* **53** 786

[12] Chiu-On Ng, Henry C W Chu, Wang C Y 2010 *Phys. Fluids* **22** 102002

[13] Ou J, Perot B, Rothstein J P 2004 *Phys. Fluids* **16** 4635

[14] Huang Q G, Pan G, Wu H, Hu H B, Song B W 2011 *J. Exp. Fluid Mech.* **25** 21 (in Chinese) [黄桥高, 潘光, 武昊, 胡海豹, 宋保维 2011 实验流体力学 **25** 21]

[15] Wang W X, Shi J, Qiu B, Li H B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8371 (in Chinese) [王文霞, 施娟, 邱冰, 李华兵 2010 物理学报 **59** 8371]

[16] Choi C H, Kim C J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 066001

# Investigation about drag reduction annulus experiment of hydrophobic surface\*

Song Bao-Wei<sup>1)†</sup> Guo Yun-He<sup>1)</sup> Luo Zhuang-Zhu<sup>2)</sup>  
Xu Xiang-Hui<sup>3)</sup> Wang Ying<sup>1)</sup>

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

2) (*Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 401122, China*)

3) (*Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

( Received 12 March 2013; revised manuscript received 8 April 2013 )

## Abstract

For the drag reduction application of hydrophobic material, the drag characteristic of typical surface with different roughness or different hydrophobicity is studied by a new annulus experiment. The corresponding torque characteristic and drag reduction rate curve are acquired. The experiment indirectly calculate the surface friction of the annulus by measuring the torque of disk driving annulus and breaks through the limitation of scale in traditional microchannel experiment, avoids the drawbacks of too many influencing factors in water-tunnel experiment, and has important significance in macro application of hydrophobic material. The drag reduction effect of hydrophobic surface is proved at low Reynolds number in macroscale; however, at high Reynolds number, it will be weakened or even changed to drag producing effect, and the rapid increase of pressure drag is the major reason for increasing resistance. Through comparative analysis we find that at low Reynolds number, there will be greater effect of hydrophobicity for drag reduction; where as at high Reynolds number, the roughness will play a greater role, and may even be counterproductive to the increasing resistance.

**Keywords:** hydrophobic surface, annulus experiment, roughness, drag reduction

**PACS:** 47.54.De, 47.54.Jk, 47.85.1b

**DOI:** 10.7498/aps.62.154701

---

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50835009), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51109178), and the Natural Science Basic Research Plan in Shanxi Province of China (Grant No. 2010JQ1009).

† Corresponding author. E-mail: songbaowei@nwpu.edu.cn