

人工构建二维准晶复合结构的减阻特性研究^{*}

高 鹏 耿兴国 欧修龙 薛文辉

(西北工业大学理学院, 西安 710072)

(2008 年 4 月 10 日收到 2008 年 8 月 5 日收到修改稿)

采用旋转锥板式剪切力测试系统, 测试了人工构建的具有五次、八次、十次、十二次对称性的二维准晶结构对甘油和水混合液的减阻性能, 并与随机排列结构和周期排列结构的流阻进行了对比. 对比试验发现: 准晶结构具有显著的减阻效果, 其中具有十二次对称性的二维准晶结构减阻效应最大, 在剪切率为 200—2000 s^{-1} 时, 剪切力减小的幅度从 15%—9%, 其最大减阻量可达到 15.4%. 进一步在所构建的大尺度二维准晶结构的表面, 再复合制备微米/纳米粗糙结构, 这两种尺度的结构协和作用, 可实现减阻效果明显提高.

关键词: 准晶结构, 粗糙结构, 十二次对称性, 减阻

PACC: 6810C, 6140M

1. 引 言

摩擦阻力是水下航行器在行进时的主要阻力, 因此降低摩擦阻力对提高水下航行器的速度和在航海领域的节能降耗具有重要意义. 目前国内外所采取的减小摩擦阻力的主要方法有沟槽结构减阻、柔性壁面减阻、聚合物添加剂减阻、疏水涂层减阻等. 以沟槽结构为例, 其减阻率较小^[1,2], 并且在大型装置和复杂构件上制备比较困难. 近年来流体减阻技术发展的新方向有随机凸起结构减阻和超疏水涂层减阻. Sirovich 等^[3]所做的试验表明, 随机凸起结构的阻力系数比光滑表面约小 10%, 而周期性排列结构的阻力系数比光滑表面则有增大. Watanabe 等^[4]通过实验发现, 在层流状态下高疏水性材料壁面存在着明显的滑移现象, 使其最大减阻可达 14% 以上. Jia Ou 等^[5], Chang-Jin Kim 等^[6]的试验也显示, 在超疏水粗糙表面的流体边界层滑移可达 10 μm 量级, 则对层流有显著的减阻效果. 因此探索和发现新的流体减阻现象并揭示其减阻机理, 对流体学科的发展和技术进步有重要意义.

我们通过验证性试验发现, 在普通材料表面构建出宏观尺度的二维准晶结构, 可以使流体摩擦阻力减小, 而这种流体减阻新现象是与所构建的准晶特殊结构有关联. 因为准晶结构是具有准周期性基

本性质和包含非晶体学旋转对称性的一类特殊结构, 准晶结构与波作用使波谱带可呈现无能隙特征并和自相似性相关, 所以这种新的减阻效应是波与结构耦合作用的体现.

回顾准晶体自 1984 年被发现以来的研究进展^[7,8], 可以看到人们虽已观察到准晶物质具有与晶体和非晶体不同的特性, 如准晶固体具有较低的固体滑动摩擦系数而且是各向异性的^[9], 但这些特性主要是在材料本身就为准晶体的物质中所发现的, 而对人工构建的准晶结构的流体减阻特性, 几乎未见有相关报道.

因此我们构建了宏观尺度的二维准晶结构, 通过系统的流体减阻实验发现其实验规律, 并用流动显示方法揭示准晶结构对横向涡流扩展的抑制作用及与流体减阻的内在关联, 在此基础上, 进一步将大尺度的二维准晶结构与微尺度的粗糙疏水表面复合, 实现宽域和大幅度的流体减阻效果.

2. 实验研究

2.1. 研究内容

第一步通过制作二维准晶结构模板结合电化学刻蚀技术, 在铝合金表面刻蚀出小圆坑作为基本微元并按准周期性结构排布, 构建出具有五次、八次、

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10872127), 航天支撑技术基金, 西北工业大学研究生创业种子基金(批准号: Z200865)资助的课题.

十次、十二次对称性的二维准晶结构,并系统试验研究具有不同重数对称性的准晶结构所产生的流体减阻效果;再通过阳极氧化工艺,在已构建好的二维准晶结构表面上,进一步复合出微/纳米粗糙结构,并揭示大尺度的二维准晶结构与微/纳米粗糙结构复合的表面对流体减阻的规律.

2.2. 测试方法

本研究采用锥板转子在覆盖液体的待测样板上

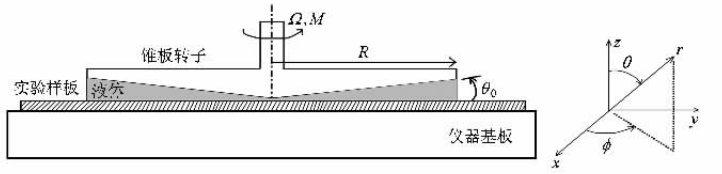


图1 锥板转子测试剪切力系统原理图

旋转,转子与实验样板间的液体间的作用形成对转子的剪切力,通过测试不同样板产生的剪切力,并与光滑表面的基准样板的剪切力对比,表征测试样板的表面结构与基准试样相比所引起的相对减阻效果.其测试原理如图1所示.

所测得的剪切力 τ 值,再根据相对减阻量公式

$$K = \frac{\tau_{\text{未处理}} - \tau_{\text{处理后}}}{\tau_{\text{未处理}}}$$

可计算出相对减阻量 K .

2.3. 样品制备及表面形貌特征

首先在铝合金(LY12)表面上,用小圆坑作为基

本微元并按准周期性排布,构建出具有五次、八次、十次、十二次对称性的二维准晶结构^[10,11];作为对比,也用小圆坑作为基本微元构建了随机排列结构

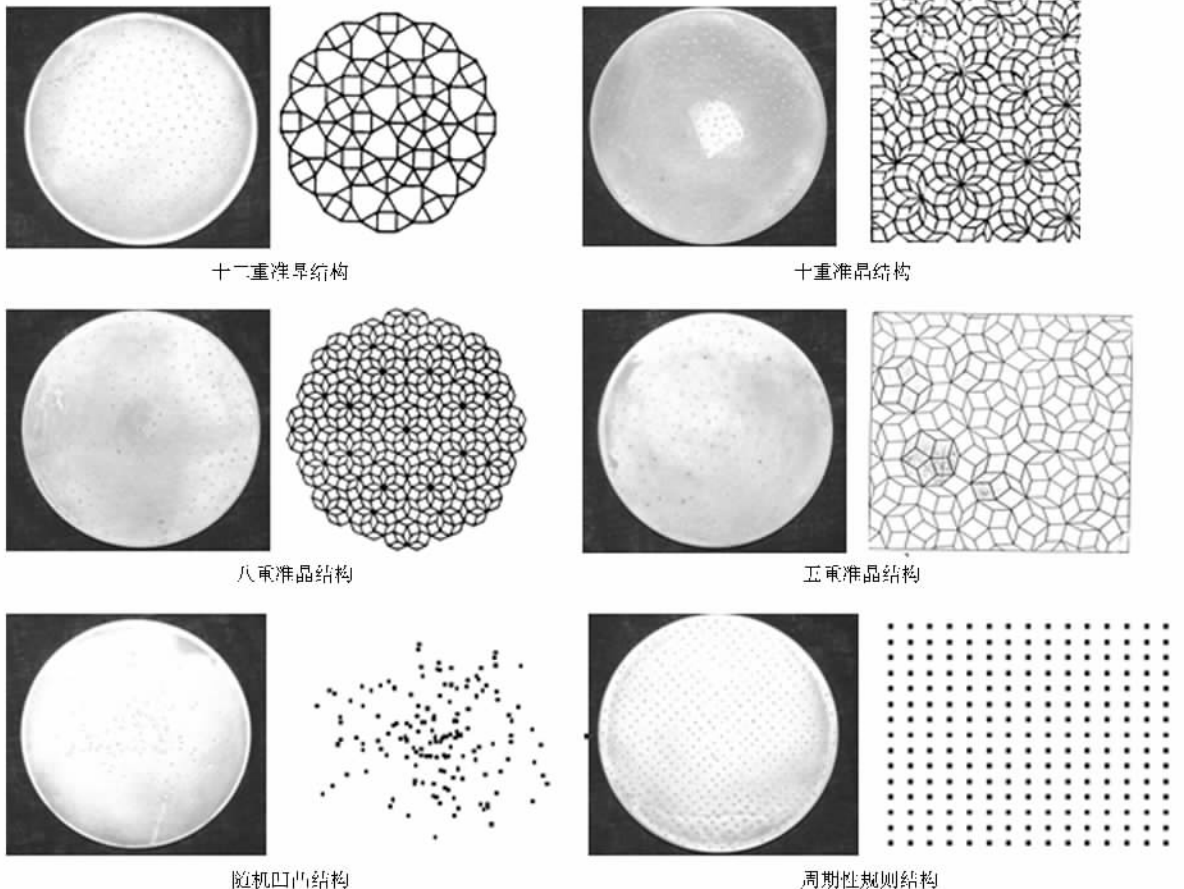


图2 试验样板的表面形貌特征

和周期性排列结构的样板,而以光滑表面的样板作为基准试样.这些试样结构如图 2 所示.

在系统试验研究具有不同表面结构对流体减阻效果影响的基础上,通过阳极氧化工艺,在已构建的大尺度结构表面上,进一步复合致密的微/纳米量级

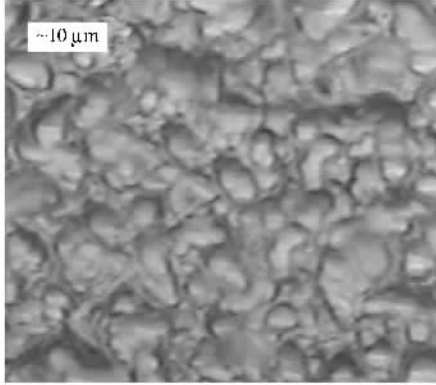


图 3 粗糙表面的微结构

的粗糙结构,如图 3 所示,并再次测试其复合结构表面的减阻效果.

3. 流体减阻实验结果

本实验中,采用 $V_{\text{甘油}}:V_{\text{水}}=2:1$ 的甘油和水混合液作为测试液体,实验过程中温度条件设定为 19°C 恒温.实验分别测试了具有不同重数非晶体学旋转对称性的二维准晶结构、随机排列结构和周期性规则排列结构表面的减阻效应.

3.1. 人工构建准晶结构的减阻效果

为了探索不同表面结构对减阻的作用,分别对表面构造有五重、八重、十重、十二重的准晶结构样品和构造的随机排列结构及周期性规则排列结构的样品,进行了流体摩擦力测试,其剪切力随着剪切率的变化关系如表 1 所示.

表 1 不同表面结构在不同剪切率下相对基准对照板的减阻率

剪切率/ s^{-1}	十二重准晶/%	十重准晶/%	八重准晶/%	五重准晶/%	随机排列结构/%	周期性规则结构/%
200	15.4	7.6	3.8	3.8	0.0	-3.8
300	14.2	8.6	5.7	5.7	2.8	0.0
400	11.6	6.9	4.6	6.9	0.0	0.0
500	13.5	7.7	5.8	7.7	2.0	0.0
600	8.6	3.5	3.5	5.3	-3.5	-3.5
800	8.2	2.8	1.4	4.2	-2.6	-2.6
1000	6.8	1.1	1.3	3.3	0.0	-4.6
1200	7.9	0.0	0.0	4.9	2.1	-1.9
1400	8.6	3.4	1.7	5.9	2.7	0.0
1600	6.5	1.6	0.0	3.2	0.0	-0.8
1800	7.2	2.3	0.8	5.1	1.4	0.8
2000	5.4	1.3	0.7	3.5	0.7	-0.7

从表 1 中可以看出,在 19°C 时,十二重准晶结构具有最好的减阻效果,其相对减阻量从 5.4% — 15.4% ;十重准晶结构的相对减阻量从 0% — 8.6% ,八重准晶结构的相对减阻量从 0% — 5.8% ,五重准晶结构的相对减阻量从 3.1% — 7.7% ,随机排列结构的相对减阻量从 -3.5% — 2.8% ,周期性规则排列结构的相对减阻量从 -4.6% — 0.8% ,光滑表面

为基准板.

3.2. 微/纳米粗糙结构的减阻效果

流体减阻实验中,对表面微/纳米粗糙化的试样(H)与光滑表面的基准板试样(G)进行了对比,其结果如图 4 所示.

从图中可以看出,微/纳米粗糙结构在剪切率为

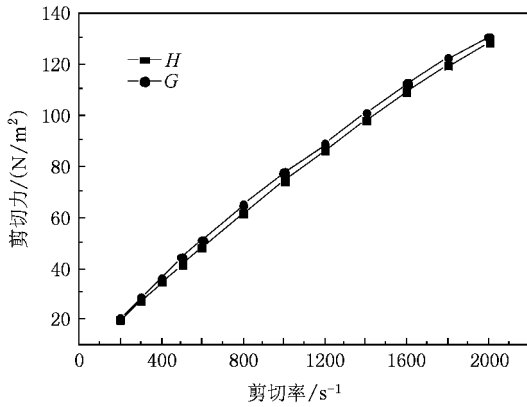


图4 粗糙化表面试样的剪切力随剪切率的变化

200—2000 s^{-1} 时,剪切力的相对减阻量均在 2% 以上,且在 200—600 s^{-1} 的剪切率范围内,剪切力的相对减阻量可超过 5%。

3.3. 复合微/纳米粗糙的准晶表面结构的减阻效果

在准晶结构、随机排列结构和周期性规则排列结构表面上分别复合微/纳米粗糙结构,其剪切力随剪切率的变化关系如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,所有的试样在复合了粗糙结构后,其减阻效果都有一定改善.随剪切率的增加,其减阻幅度有约 5% 到 2% 的提高,当剪切率小于 500 s^{-1} 时,减阻率最大可提高约 5%。经以上的实验探索发现,十二重数的准晶结构减阻效果较好,同时表面粗糙化也在一定程度上改善减阻效果。

从表 2 中可以看出,复合结构的试样减阻效果特别是高速段都有了明显的改善,尤其是十二重准晶结构在剪切率为 200—2000 s^{-1} 时,可实现减阻约 15.4%—8.7%;在剪切率为 500 s^{-1} 时,最大减阻可达 15.4%。

表 2 粗糙化后不同结构在不同剪切率下的减阻率

剪切率(s^{-1})	十二重准晶结构 + 粗糙化/%	十重准晶结构 + 粗糙化/%	八重准晶结构 + 粗糙化/%	五重准晶结构 + 粗糙化/%	随机结构 + 粗糙化/%	周期结构 + 粗糙化/%
200	12.1	9.1	8.1	6.1	3.0	3.3
300	15.2	10.9	7.2	8.7	4.4	2.2
400	13.8	10.4	6.8	8.6	5.2	3.4
500	15.4	11.3	5.6	11.3	7.0	4.2
600	14.6	9.8	6.1	11.0	6.1	4.9
800	13.4	8.6	6.8	10.6	5.8	3.8
1000	12.1	8.1	6.6	9.7	4.9	3.2
1200	10.6	5.7	5.7	7.7	4.2	2.2
1400	10.5	6.2	6.2	8.7	5.0	3.7
1600	9.5	5.6	6.1	8.4	5.6	5.2
1800	9.7	5.6	6.6	8.1	6.6	6.2
2000	8.7	6.3	6.3	7.2	6.3	5.8

4. 准晶结构减阻原理分析与讨论

对于十二重准晶结构的减阻原理目前还没有准确的理论解释,为此我们通过径向涡流动的显示实验,对准晶结构减阻机理进行了分析研究,实验装置如图 5 所示。

径向涡流动显示实验的设计原理如图 6 所示,在转子外沿液体中滴入墨水作为显示染料,实验显示流体随转子转动首先形成绕轴旋转的圆环形流线,但当转速较大时,旋转体又会产生径向附加

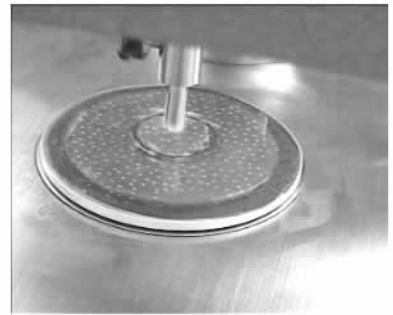


图 5 显示剂径向扩展实验

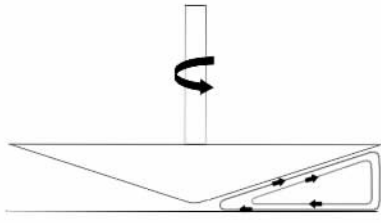


图6 径向涡流动示意图

涡运动,且与圆环型的旋转主流线相垂直.通过比较液体径向涡运动的时间快慢,可揭示出径向流动的强弱.具体测试过程如下:以 400 s^{-1} 的剪切率下,以墨水显示剂从边缘沿内径逆向扩展到 2.0 cm 处的标志线时,来比较墨水显示剂沿径向扩展所需要的

表3 显示剂在不同结构表面附加径向涡扩展实验中所需要的时间

扩展时间/s	十二重准晶 结构+粗糙化	十重准晶结 构+粗糙化	八重准晶结 构+粗糙化	五重准晶结 构+粗糙化	随机结构 +粗糙化	周期结构 +粗糙化	光滑 标准板
	115	88	80	82	74	71	56

但为什么十二重准晶结构减阻效果优于5重、8重和10重准晶结构,还有待于进一步试验和理论探索.

5. 结 论

通过对所构建的不同重数准晶结构表面进行了

时间.

由于在相同转速下,不同试样表面墨水附加径向涡运动扩展的快慢,主要取决于径向流动的强弱,即墨水径向扩展慢,则表明径向涡流效应弱;反之,则径向涡流效应强.附加径向涡流动显示试验发现:在十二重准晶结构表面,墨水扩展到红线所用的时间最长为 115 s ;在十重准晶结构表面,八重准晶结构表面,五重结构表面,随机排列结构表面,周期结构表面和标准面依次为 $87, 81, 79, 74, 71$ 和 56 s ,如表3所示.这一试验结果显示,减阻效果大小与抑制附加的径向涡流作用是正相关的关系,由于十二重准晶结构可以有效抑制附加径向涡流的生成,因此减阻效果也最优.

流体减阻对比实验,结果表明:十二重准晶结构的减阻效果最好,若将微/纳米粗糙结构和十二重准晶结构复合,在剪切率为 $200\text{—}2000\text{ s}^{-1}$ 时,可实现减阻约 $15\%\text{—}9\%$,并在剪切率 500 s^{-1} 时,减阻可达 15.4% .径向涡流动显示实验的分析表明,微/纳米粗糙结构和十二重准晶结构的共同作用,抑制了径向扩展流动,实现了减阻效果的提高.

- [1] Walsh M J 1982 *Turbulent boundary layer drag reduction using riblets* AIAA-82-0169
- [2] Walsh M J, Lindemann A M 1984 *Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction* AIAA-84-0347
- [3] Sirovich L, Karlsson S 1997 *Nature* **388** 753
- [4] Watanabe K, Udagawa Hiroshi 1999 *Journal of Fluid Mechanics* **381** 225
- [5] Jia Ou, Blair Perot, Jonathan P, Rothstein 2004 *Physics of Fluids* **16** 4635
- [6] Chang-Hwan Choi, Chang-Jin Kim 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 066001
- [7] Shechtman D, Blech I, Gratias D, Chan J W 1984 *Phys. Rev. Lett.*

53 1951

- [8] Dubois J M 2005 *Useful Quasicrystals* World Scientific, New Jersey
- [9] Jeong Young Park, Ogletree D F, Salmeron M, Ribeiro R A, Canfield P C, Jenks C J, Thiel P A 2006 *Phys. Rev. B* **74** 024203
- [10] Liu Y Y, Fu X J 1999 *Quasicrystal* (Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House) 36—38 (in Chinese) [刘有延、傅秀军 1999 准晶体(上海科技教育出版社) 36—38]
- [11] Guo K X 2004 *Quasiperiodic Crystals* (Zhejiang Science and Technology Publishing House) 12 (in Chinese) [郭可信 2004 准晶研究(浙江科学技术出版社) 12]

Drag-reduction property of composite structure surface with planar quasicrystal^{*}

Gao Peng Geng Xing-Guo Ou Xiu-Long Xue Wen-Hui

(Department of Applied Physics ,Northwestern Polytechnical University ,Xi 'an 710072 ,China)

(Received 10 April 2008 ; revised manuscript received 5 August 2008)

Abstract

We built the quasicrystal structures which are five-fold ,eight-fold ,ten-fold and twelve-fold rotational symmetric artificially , and measured their drag-reduction in the mixed solution of water and glycerin by viscometer. We found the twelvefold symmetric structure has a drag-reduction of 15%—9% when shear rate is 200—2000 s^{-1} . The drag-reduction can be much greater when the structure is compounded with rough surface consisting of micro/nano-structures.

Keywords : quasicrystal structure , rough structure , twelve-fold rotational symmetry , drag-reduction

PACC : 6810C , 6140M

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10872127) , the Astronautical Science Program of China , and the Graduate Starting Seed Fund of Northwestern Polytechnical University , Xi 'an 710072 ,China(Grant No. z200865).