

一维短沟槽复合准晶结构减阻效应及模拟分析*

张盟[†] 耿兴国 张瑶 王晓娜

(西北工业大学理学院, 西安 710072)

(2012年1月9日收到; 2012年4月1日收到修改稿)

本文测试了人工构建的一维短沟槽复合准晶结构对流体的减阻性能, 并与一维短沟槽复合周期结构和一维沟槽周期结构的流阻进行了对比. 实验结果表明, 一维短沟槽复合准晶结构的减阻效果优于一维短沟槽复合周期结构, 其中一维短沟槽十二重复合准晶结构的减阻效果最佳, 同时与一维沟槽周期结构具有同样的减阻效果. 在机理分析方面, 建立了二维光栅的夫琅禾费衍射波模型, 对通过一维短沟槽复合准晶结构的波谱特征进行模拟分析. 频谱分析表明, 经过二维准周期光栅的相干波强度谱具有谱带结构特征, 抑制了大角度方向上的强峰形成. 这一结果与流体流过一维短沟槽复合准晶结构相对应, 展向上的准周期结构在激活边界层微扰动的同时, 也使得二次涡分布比较均匀, 从而抑制了展向强扰动的形成, 所以能够有效减小流阻.

关键词: 一维短沟槽复合准晶结构, 流体减阻, 二维光栅模型, 谱带结构

PACS: 47.27.De, 47.27.Rc, 47.27.Er

1 引言

水下航行器研究发现, 航行器表面的摩擦阻力与总阻力的比值可高达 70%^[1], 若使其摩擦阻力下降 50%, 则航速可提高 26%. 因此减阻结构的设计与作用机理, 长期以来被人们所关注. 而生物在长期进化的适应与自然选择过程中, 形成了各具功能特色的形态, 为人类的创造设计提供了丰富的构型资源, 如“鲨鱼皮效应”就是其中一个典型的流体减阻模式^[2]. 20 世纪 70 年代末, Walsh 及其合作者曾比较系统地开展了对一维仿鲨鱼皮肋条结构的湍流减阻研究^[3,4], 并通过对多种类型的肋条结构表面的减阻测试表明, 其最佳的设计是一种对称的表面 V 形结构, 减阻率最大可达到 7%. 这些研究成果也激发了近 30 年来人们对一维仿鲨鱼皮结构减阻的持久兴趣和探索.

近年来通过对鲨鱼鳞形进行放大^[5,6]和细致观察发现, 鲨鱼皮的表面结构并不是单纯的一维沟槽结构, 而是由一维短沟槽单元在二维空间上有序拼接而成的模式结构. 但长期以来国内外对仿鲨鱼

皮结构的研究, 几乎全部都集中在由一维长沟槽单元周期性排列结构的减阻方面^[7-10]. 这样就提出了一个重要而有趣的问题, 其他单元如一维短沟槽按准周期序排列时, 其减阻效应与机理是否与由一维长沟槽单元按周期性排列结构的相同? 虽也有极少数研究曾涉及到准周期排列的一维长沟槽单元和二维小凹坑单元组成结构的减阻效应^[11-12], 但对由一维短沟槽单元准周期排列成准晶结构的减阻效应却一直未见有研究报道.

要探索准周期结构对流体的减阻作用, 则首先会注意到从 1984 年 Schaheman 发现准晶体以来^[13], 人们关于准晶结构和特性的研究及相关进展^[14,15]. 因为准晶结构是具有准周期性和通常包含非晶体学旋转对称性的一类特殊结构, 因此可以通过人工构建准晶结构的方法来实现人工准周期结构. 准晶体结构的这种长程准周期有序特性, 使其表现出了与晶体和非晶体不同的物理特性, 如准晶固体比相同组分的晶体具有更低的固体滑动摩擦系数等等^[16].

综上所述, 本文的主要工作在于: 1) 设计制备由一维短沟槽单元复合而成的具有准晶结构的减

* 国家自然科学基金(批准号: 10872172)和西北工业大学研究生创业种子基金(批准号: z2012234). 资助的课题.

[†] E-mail: xiaomeng12325@yahoo.cn

阻超材料; 2) 用微力矩测试平台, 探索这种由一维短沟槽准周期单元复合成的二维表面结构对流体减阻的效应; 3) 在流体减阻实验基础上, 为了揭示准周期结构与流体的作用特征, 构建了二维准周期光栅的波谱分析模型, 深入探索一维短沟槽复合准晶结构的流体减阻机理.

2 一维短沟槽复合准晶结构的构建及流阻测试装置

2.1 结构设计及样品制备

2.1.1 构型特征

本实验所设计的是一维短沟槽复合准晶结构, 其结构单元是由短线型沟槽按准周期序^[17]在横向上排列成一维单元行, 再把这种一维准周期单元行结构按周期序在纵向上排成二维阵列.

一维短沟槽五重复合准晶结构, 就是将一维短沟槽的横向作为一个准周期方向, 在此方向上平行排布的沟槽的横向间隔值有 L 和 S , 而 L, S 的排序是按与五重准晶有关的 Fibonacci 序列排布的. 同样一维短沟槽十二重复合准晶结构, 就是将一维短沟槽的横向作为一个准周期方向, 在此方向上平行排布的沟槽的横向间隔值有 L 和 S , 而 L, S 的排序是按与十二重准晶有关的 Dodecanacci 序列排布. 同时这两种单元结构的纵向排列即平行于短沟槽方向均采用周期序. 而一维短沟槽复合周期结构, 则是将短沟槽在横向上按一维等周期间隔 S 排成单元行, 再将此单元行在纵向上也进行周期排列.

一维序列的几何形貌见图 1(a), (b), (c). 由于本流阻实验装置中, 流体的一次流沿圆环状流线流动, 则一维短沟槽复合准晶结构, 就是将这个一维短沟槽在圆环径向上按照一维准周期序列排列, 在圆环切向上分别按等周期间距排布得到的, 设计见图 1(d). 作为结构性能对比, 也构建了一维短沟槽复合周期结构和一维沟槽周期结构, 其一维沟槽的设计见图 1(e).

本次实验中, 短沟槽间的径向间距取两个基元长度 L 和 S 值, 分别按一维准周期的 Fibonacci 序列和 Dodecanacci 序列沿径向进行设计排布, 其有序排列方式为:

Fibonacci 序列:

L 和 S 有序排列满足 $L \rightarrow LS, S \rightarrow L$ 的变换规则, 便组成了 Fibonacci 函数 F_n 链, 其中 L, S

及 $L + S$ 的个数都满足 $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$ 递增关系. 若令 $F_1 = L, F_2 = LS$, 可递推出所有 F_n , 取 $L/S = \tau, \lim_{n \rightarrow \infty} F_n/F_{n-1} = \tau = (1 + \sqrt{5})/2 = 1.618 \dots$, 上述替换操作表明, 按 Fibonacci 的 F_n 链函数排列的 L 及 S 呈长程有序的准周期性.

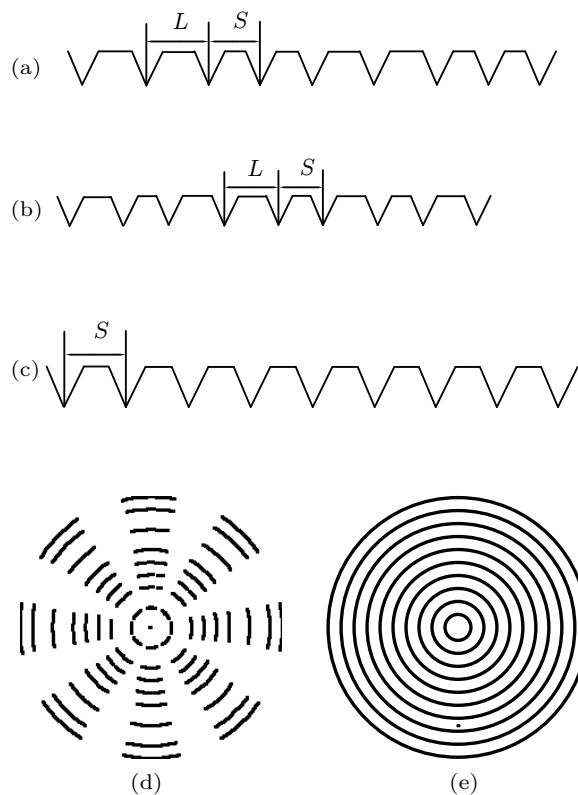


图 1 试验样板的结构设计图 (a), (b), (c) 分别是一维 Dodecanacci 序列、Fibonacci 序列及周期序列径向剖面示意图; (d), (e) 分别是一维短沟槽十二重复合准晶结构、一维沟槽周期结构样板的俯视示意图

Dodecanacci 序列:

L 和 S 有序排列满足 $L \rightarrow LLSSS, S \rightarrow LSS$ 的变换规则, 即组成了 Dodecanacci 函数 D_n 链, 每个 D_n 链函数项中包含的 L 的个数 l 与 S 的个数 s 之和为数列项 $D_n = l + s, D_n$ 满足 Dodecanacci 数列递增关系 $D_n = 4D_{n-1} - D_{n-2}$. 若令 $D_1 = S, D_2 = LSS$, 可递推出所有 $n \geq 2$ 的 D_n , $\lim_{n \rightarrow \infty} D_n/D_{n-1} = \rho = (2 + \sqrt{3}) = 3.732 \dots$, 上述替换操作表明, 按 Dodecanacci 的 D_n 链函数排列的 L 及 S 呈长程有序的准周期性.

周期序列:

周期序列的排布规则为 $SSSSSSSSSS$.

2.1.2 样品制备

首先在铝合金圆板上烧制了一层石蜡作为基板, 根据如图 1 所示的结构设计图, 在基板上分别

刻制出一维短沟槽五重、十二重复合准晶结构, 一维短沟槽周期结构, 和一维沟槽周期结构试样. 其 S 的值为 3 mm, L 的值为 4.854 mm.

2.2 减阻测试装置

减阻测试系统采用锥板式流变仪 (R/S^+ rheometer, Brookfield), 其测试原理图如图 2 所示, 所选用的转子半径 (R)25 mm, 转子母线角度 (θ_0) 1° , 锥形转子尖顶为一小平面且距样品间隙高度 $52 \mu\text{m}$, 测试温度由 Peltier 控温系统控制, 控制精度 0.1°C . 在外界环境不变时, 使转子在覆盖有相同的测试液体的不同表面结构的样板上以设定的剪切速率旋转, 由于样板结构的变化引起流体流动状态的变化, 因而壁面剪切力会发生变化. 通过测试不同结构样板的剪切力 ($\tau_{\text{结构板}}$), 与光滑表面的基准样板所受剪切力 ($\tau_{\text{基准版}}$) 对比, 来表征不同表面结构的相对减阻效果, 采用剪切力的相对减小率 K 来表示. K 的公式表示为

$$K = \frac{\tau_{\text{基准版}} - \tau_{\text{结构板}}}{\tau_{\text{基准版}}} \quad (1)$$

经温度系统控温使测试温度保持恒定时, 对同一块样板, 在剪切率为 400 s^{-1} — 2000 s^{-1} 下测试相应的剪切力 τ , 经多次测量取平均值, 剪切率在 400 s^{-1} — 2000 s^{-1} 时, 剪切力的相对误差 $\frac{\delta\tau}{\tau} = 2.75\%$ — 0.01% .

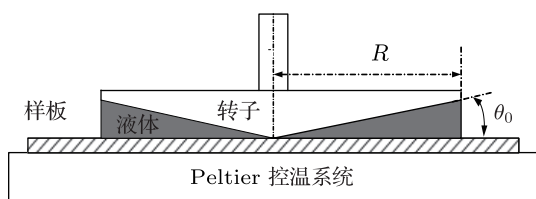


图2 R/S^+ rheometer 流变仪

3 一维短沟槽复合准晶结构的流体减阻效应及机理分析

3.1 不同表面结构的流阻现象

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 19.4°C 恒温. 实验过程中分别测试了一维短沟槽五重、十二重复合准晶结构样板和一维短沟槽复合周期结构、一维沟槽周期结构样板的减阻效

应, 其中剪切率的变化范围为 400 s^{-1} — 2000 s^{-1} . 由公式 $Re = R^2\Omega/\nu$ [18] 计算得雷诺数的变化范围为 208—1041, 表明液体流动状态为从层流向有序涡流状态转变的过渡阶段 [19]. 具体表现为, 剪切率小时, 流体在流变仪中的流动仅有一次流;; 当剪切率增大时, 附加的径向流即二次流的产生, 还在径向形成有序排布的二次涡流. 图 3 中显示了较大的剪切率下所形成的有序二次涡.

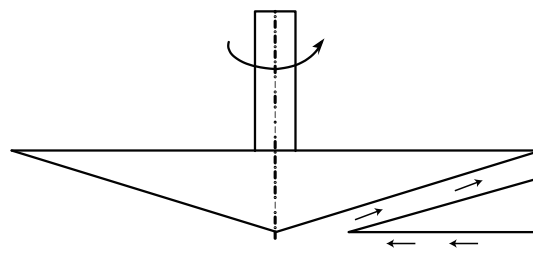


图3 径向涡流动示意图

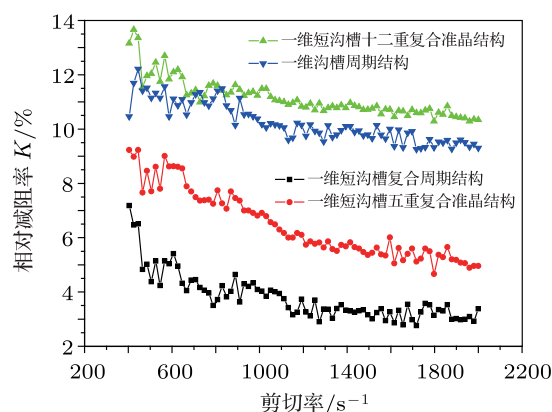


图4 不同表面结构在不同剪切率下相对光滑表面试样的减阻率

由图 4 可知, 不同结构样板相对于光滑表面均有减阻效果, 一维短沟槽复合准晶结构比一维短沟槽复合周期结构有更好的减阻效果, 其中一维短沟槽十二重复合准晶结构的减阻效果最佳, 同时与一维沟槽周期结构具有同样的减阻效果. 因为其减阻曲线单调且无交叠, 可用平均减阻率表示其效应, 平均减阻率 K 从大到小的顺序依次为: 一维短沟槽十二重复合准晶结构 $K = 11.68\%$, 一维沟槽周期结构 $K = 10.31\%$, 一维短沟槽五重复合准晶结构 $K = 6.62\%$, 一维短沟槽复合周期结构 $K = 4.09\%$. 以上结果说明沟槽的排列影响减阻效果. 同时单元形态对减阻效果也有重要作用, 一维短沟槽十二重复合准晶结构可以达到与一维沟槽周期结构同样的减阻效果.

3.2 一维短沟槽复合准晶结构的减阻机理分析

要探索一维短沟槽复合准晶结构的减阻机理, 可从沟槽作用和排布作用两方面入手. Bacher 和 Smith^[20] 认为反向旋转的流向涡与沟槽尖端相互作用形成小的二次涡 (图 5), 这些离散的涡旋在产生后不久便会因黏性耗散而消失. 条纹沟槽的尖峰能够加速和增强二次涡的发展, 使得流向涡对的强度逐渐减弱, 从而抑制了流向涡对在展向上集结低速流体的能力, 使得低速流体保留在沟槽内. Choi^[21] 认为沟槽限制了流向涡的展向运动, 引起壁面猝发变弱, 导致了壁面摩擦阻力的减小.

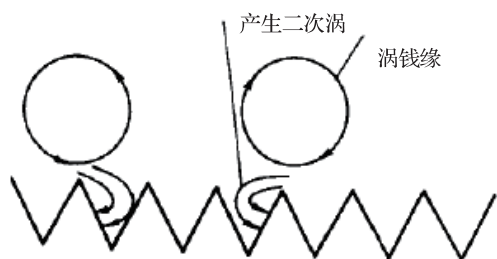


图 5 流向涡与沟槽尖端的相互干扰生成二次涡

3.3 二维光栅的夫琅禾费衍射波模型构建

为了揭示沟槽排列方式对流阻的影响, 构建了二维光栅的衍射波模型. 设二维光栅所在的平面为 (x, y) , 对于一维短沟槽复合准晶结构来说, 矩形短栅纹阵列沿 x 轴方向为一维准周期排布, 沿 y 轴方向为周期排列; 而对于一维短沟槽复合周期结构来说, 这两个方向上的矩形短栅纹都是周期排列. 设单色平行光束与二维光栅共面, 其入射方向与 y 轴平行, 一维短沟槽十二重复合准晶结构的二维光栅衍射如图 6 所示.

入射光经第一排栅纹作用后的衍射波, 依次波及第二排栅纹等等, 产生相干叠加. 设坐标为 $(0, 0)$ 的单元产生的衍射场为 u_0 , 其他单元相对该单元的位移矢量分别为 $r_j(x_j, y_j)$, 其相应的衍射场相移量分别为

$$(\delta_{1j}, \delta_{2j}) = -k(x_j \sin \theta + y_j(1 - \cos \theta)). \quad (2)$$

根据位移 - 相移定理, 一个单元的波函数可以表示为

$$u_j = u_0 \cdot e^{i(\delta_{1j} + \delta_{2j})}, \quad (3)$$

其中 θ 为衍射线与 y 方向的夹角.

于是, 得到含有 N 个全同单元的有序结构产生的夫琅禾费衍射场的一般表达式为

$$u = \sum_{j=0}^{(N-1)} u_j = u_0 \cdot \sum_0^{N-1} e^{i(\delta_{1j} + \delta_{2j})}. \quad (4)$$

一维短沟槽复合结构的夫琅禾费衍射强度为:

$$I = |u|^2, \quad (5)$$

其中 u_0 为衍射强度单元因子, 其衍射强度单元因子为

$$u_0 = \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right), \quad \alpha = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}, \quad (6)$$

其中 a 为缝宽.

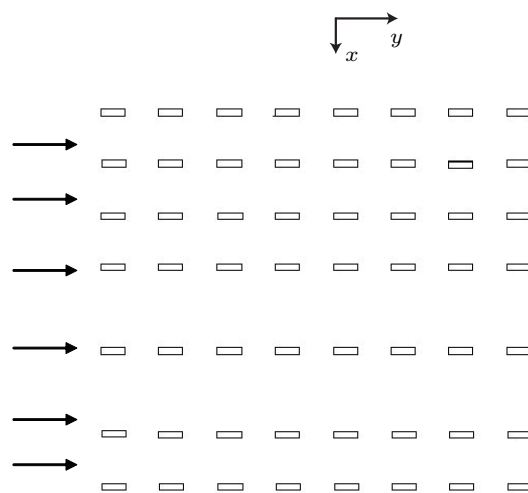


图 6 一维短沟槽十二重复合准晶结构的二维光栅衍射

根据上 (2)—(6) 式, 得到一维短沟槽复合准晶结构和一维短沟槽复合周期结构的衍射强度随衍射角的空间分布, 模拟结果如图 7 所示.

由图 7 可以看出, 扰动波在通过二维光栅后, 谱强度因相干叠加而进行了重新分布. 准晶结构的衍射谱与周期结构相比, 形成了各级谱带结构, 且在各级谱带中均包含有多个较强的衍射峰. 这一特征由准周期结构所具有多个特征尺度因子所决定^[22], 其中谱带结构特征又以一维短沟槽十二重复合准晶结构最为显著. 并且按准晶序列排布的波强分布在大角度方向上比较均匀, 图 7(b) 中: 十二重准晶结构角度大于 0.5 rad 的最强谱线值约

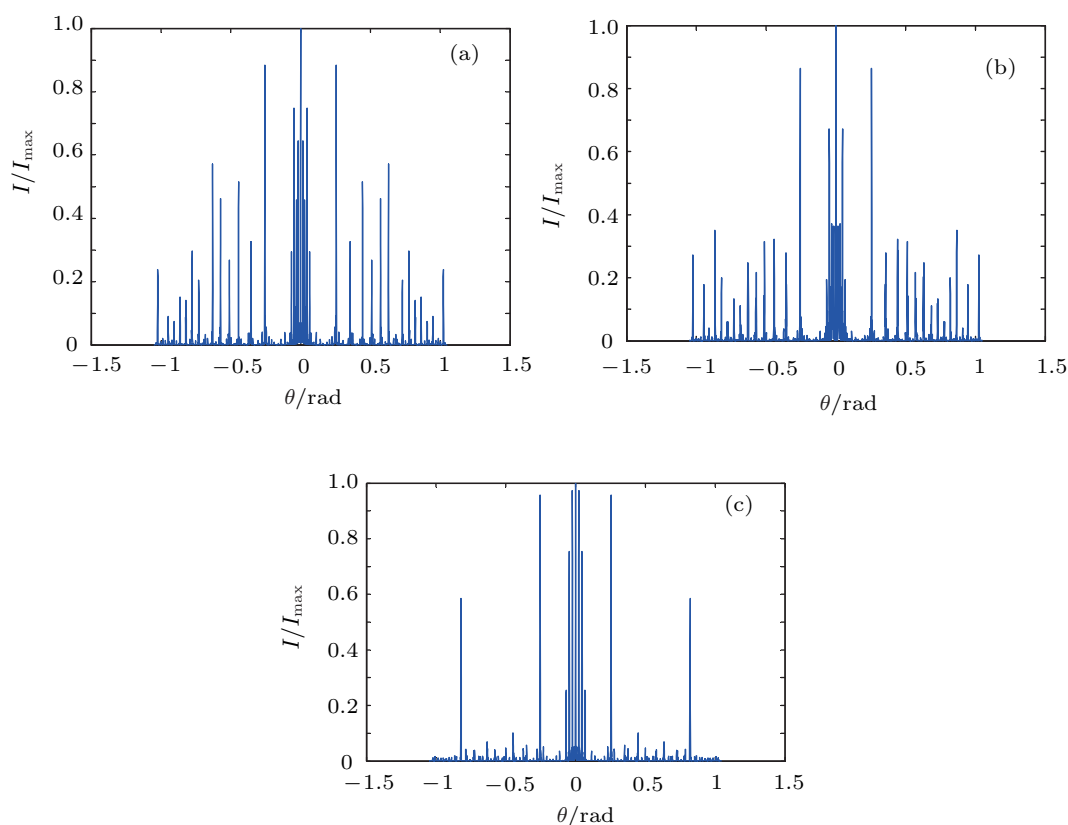


图7 不同结构谱强度分布图 (a) 一维短沟槽五重复合准晶结构; (b) 一维短沟槽十二重复合准晶结构; (c) 一维短沟槽复合周期结构

为 $0.3I_0$; 而图 7(c) 中, 周期结构角度大于 0.5 rad 的最强谱线值约为 $0.6I_0$.

模拟结果显示, 扰动波在通过一维短沟槽五重、十二重复合准晶结构及一维短沟槽复合周期结构后, 准晶结构的衍射谱与周期结构相比, 形成了各级谱带结构, 且在各级谱带中强度比较均匀, 降低了大角度方向上的强衍射峰. 这种谱带结构的形成, 表明二次涡趋于比较均匀分布, 既激活附面边界层, 又抑制了强的展向大涡的形成, 稳定了一次流, 所以减阻效果会比一维短沟槽复合周期结构更显著. 这种谱带强度的均匀性以一维短沟槽十二重复合准晶结构最好, 一维短沟槽五重复合准晶结构次之, 其谱带均匀性次序 (见图 7) 与减阻效果由大到小的顺序相对应 (见图 4).

4 结论

流体减阻实验结果表明, 一维短沟槽复合准晶结构的减阻效果优于一维短沟槽复合周期结构, 其中一维短沟槽十二重复合准晶结构的减阻效果最佳, 同时与一维沟槽周期结构具有同样的减阻效果. 在实验基础上, 建立了二维光栅的夫琅禾费衍射波模型, 对一维短沟槽复合准晶结构和一维短沟槽复合周期结构的扰动波作用特征进行模拟对比分析. 其频谱研究发现, 一维短沟槽复合准晶结构形成的谱带结构特征对应于二次涡的均匀分布, 从而抑制了展向强扰动的形成, 稳定了一次流, 所以提高了减阻效果, 其中一维短沟槽十二重复合准晶结构的谱带均匀性特征最为明显.

[1] Robert J P 1992 *Special Couré Skip Friction Drag Reduction, AGARD Report 786* No. 2
 [2] Matthias S, Stanislav G 2004 *?????* (Berlin: Springer-Verlag) 68
 [3] Walsh M J 1982 *AIAA* **82** 0169
 [4] Walsh M J, Lindemann A M 1984 *AIAA- 84* 0347

[5] Ball P 1999 *Nature* **400** 507
 [6] Koeltzsch K, Dinkelacker A, Grundmann R 2002 *Exp Fluids* **33** 346
 [7] Wang J J 1998 *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics* **24** 31 (in Chinese) [王晋军 1998 北京航空航天大学

- 学学报 **24** 31]
- [8] Kwing-So, Choi 2000 *Fluid Dynamics Research* **26** 325
- [9] Bushnell D M, Hefner J N 1990 *Viscous Drag Reduction in Boundary Layers* p203
- [10] Bechert D W, Brus M 1997 *Fluid Mech.* **338** 59
- [11] Xue W H, Geng X G, Li F, Li J, Wu J 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 104703
- [12] Gao P, Geng X G, Ou X L, Xue W H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 421 (in Chinese) [高鹏, 耿兴国, 欧修龙, 薛文辉 2009 物理学报 **58** 421]
- [13] Shechtman D, Blech I, Gratias D, Chan J W 1984 *Phys. Rev. Lett.* **53** 1951
- [14] Trebin H R 2003 *Quasicrystals, Structure and Physical Properties* (Weinheim: Wiley-VCH) ISBN 3-527-40399-X
- [15] Han J H, Luo G, Qi Z M, Zhao Z Y 1999 *Journal of Anhui University* **23** 18
- [16] 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
- [17] Guo K X 2004 *Quasiperiodic Crystals* (Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Publishing House) 12 p70 (in Chinese) [郭可信 2004 准晶研究 (杭州: 浙江科学技术出版社) 12 第 70 页]
- [18] Fewell M E, Hellums J D 1977 *Trans. Soc. Rheol* **21** 535
- [19] Harish Shankaran, Sriram Neelamegham 2001 *Biophysical Journal* **80** 2631
- [20] Bacher E V, Smith C R 1985 *AIAA Paper* **85** 0548
- [21] Choi K S 1989 *Journal of Fluid Mechanics* **208** 417
- [22] Matsui T, Agrawal A, Nahata A, Vardeny Z, Valy 2007 *Nature* **446** 517

Mechanism analysis of one-dimensional short groove quasicrystal structure drag-reduction*

Zhang Meng[†] Geng Xing-Guo Zhang Yao Wang Xiao-Na

(School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 9 January 2012; revised manuscript received 1 April 2012)

Abstract

Short groove arranged in one-dimensional quasicrystal structure is designed by mechanical method in this paper and drag reduction experiments are performed by viscometer. The results show that there is a novel drag reduction effect compared with periodic structure of one-dimensional short groove, in which 12-fold quasicrystal structure of one-dimensional short groove has the best drag reduction, and has an equal effect compared with one-dimensional periodic groove structure. An two-dimensional grating model is proposed to investigate the mechanism. It is found that in comparison with two-dimensional periodic grating, the intensity spectrum of coherent wave passing through two-dimensional quasiperiodic grating has several characteristic structure factors. Corresponding to the quasicrystal structures of one-dimensional short groove, the quasiperiodic structure in spanwise direction can activate little disturbance on boundary layer and make the secondary vortex more uniform, which restrains the strong disturbance in spanwise, consequently reducing the drag.

Keywords: quasicrystal structure, drag reduction, two-dimensional grating model, characteristic structure factors

PACS: 47.27.De, 47.27.Rc, 47.27.Er

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10872172), and the Graduate Starting Seed Fund of Northwestern Polytechnical University (Grant No. z2012234).

[†] E-mail: xiaomeng12325@yahoo.cn