

## 八重准周期排列的短沟槽结构减阻机理分析\*

郎莎莎 耿兴国 臧渡洋†

(西北工业大学理学院, 教育部空间应用物理与化学重点实验室, 西安 710129)

(2013年10月14日收到; 2014年1月14日收到修改稿)

设计构建了一排和三排阵列的八重准周期短条纹沟槽减阻结构, 以及作为对比研究的无序和周期结构, 并采用雷诺 Navier-Stokes 方程和 RANG  $k-\varepsilon$  湍流模型, 系统计算了这些结构表面的湍流边界层状态和总应力. 模拟结果显示: 八重准周期沟槽结构相对于周期和无序结构具有更优的减阻效应, 且为三排阵列时的减阻效果明显优于单排阵列. 这一结果得到了减阻实验的验证. 通过分析比较不同结构的流体边界层特性发现, 八重准周期结构可有效抑制附面层的涡强度, 减小湍流耗散速率, 保持流体条纹相的稳定性. 结合二维光栅的夫琅禾衍射波模型分析表明, 八重准周期结构可减弱衍射谱在大角度方向上的谱强度, 揭示出该结构抑制流体相干扰动波扩展的物理机制, 并与流场分析结果相符合.

**关键词:** 沟槽结构, 涡, 条纹相, 八重准周期

**PACS:** 47.85.lb, 47.27.ek, 47.11.Df

**DOI:** 10.7498/aps.63.084704

## 1 引言

相关凝聚态物理研究表明, 准周期结构往往表现出反常物理特性, 如准晶材料表面具有低表面能的性质<sup>[1,2]</sup>; 同组分的准周期结构材料的固体滑动摩擦系数远小于周期结构材料<sup>[3]</sup>等. 而这些超常特性仍未从理论上得到准确诠释<sup>[4-7]</sup>. 本文通过对流体边界层的数值模拟计算发现, 八重准周期排列的一维短条纹沟槽结构具有比周期和无序排列更优的流体减阻效应. 因此, 探究准周期结构与流体边界层相互作用的减阻机制, 有助于深化认识准周期结构具有超常物理特性的本质, 也对研发新型流体减阻技术有重要的指导作用.

沟槽减阻是受鲨鱼皮表面结构的启发, 在物体与流体接触的表面上布置微小的流向沟槽, 来改变与黏性阻力紧密相关的湍流拟序结构<sup>[8,9]</sup>, 达到减少湍流阻力的目的. 它以能源损耗低、减阻效果好等显著特点受到研究者的关注. 美国航空航天

局利研究中心的 Walsh 等<sup>[10]</sup>通过试验发现顺流向的对称型沟槽在湍流条件下减阻率可达 8%. 王晋军等<sup>[11]</sup>的沟槽板水槽试验表明局部阻力减少达 13%—26%. 刘占一等<sup>[12]</sup>通过数值仿真计算显示有间隔排列的沟槽表面的减阻率可达到 25%.

尽管沟槽减阻技术的相关研究在国内外已持续了五十多年, 但几乎都集中在一维长条纹沟槽周期性排列的结构方面<sup>[13-22]</sup>, 而对短条纹沟槽特别是按准周期排列的相关研究鲜有报道<sup>[23-28]</sup>. 为此, 本文从湍流雷诺平均方程出发, 通过对比分析八重准周期间隔、周期间隔和无序间隔排列的短条纹沟槽结构表面的流场特性, 揭示准周期结构可产生更大流体减阻效应的作用机理.

## 2 模型设计和数值方法

## 2.1 短条纹沟槽结构设计

本模拟中所设计的短条纹沟槽单元由半径为 1 mm, 长为 50 mm 的半圆柱和两端各接 15 mm 的

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51301139, 10872172)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20126102120058) 和西北工业大学基础研究基金 (批准号: JCY20130147) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: dyzang@nwpu.edu.cn

半圆锥组成. 用该单元构建出具有相同平均沟槽密度的三种结构: 具有八重对称性 (Octanacci 序列) 的准周期间隔、无序间隔和周期间隔序列的沟槽结构. 它们的排列规则如下: 八重准周期序列是将宽度为  $W$  的沟槽按照 Octanacci 序列函数  $O_n$  在横向上平行排列. 其中, 链函数  $O_n$  是由长间距  $L$  和短间距  $S$  有序排列, 且满足  $L \rightarrow SSL$  和  $S \rightarrow SL$  的变换规律. 每个  $O_n$  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  $O_n = l + s$ , 则  $O_n$  均满足 Octanacci 数列递增关系  $O_n = 2O_{n-1} + O_{n-2}$ . 若令  $O_0 = 0, O_1 = 1$ , 可递推所有  $O_n$ , 且当  $L/S = \tau$ , 则  $\lim_{n \rightarrow \infty} O_n/O_{n-1} = 1 + \tau = 1 + \sqrt{2}$ . 这种递推操作表明, 沟槽结构按 Octanacci 的链函数排列时, 呈长程有序的准周期性. 如图 1(a) 所示. 在无序序列中, 是将宽度为  $W$  的沟槽按照随机选择的间距进行排列, 如图 1(b) 所示. 在周期序列中, 是将宽度为  $W$  的沟槽按照同一间距  $A$  来排列, 如图 1(c) 所示.

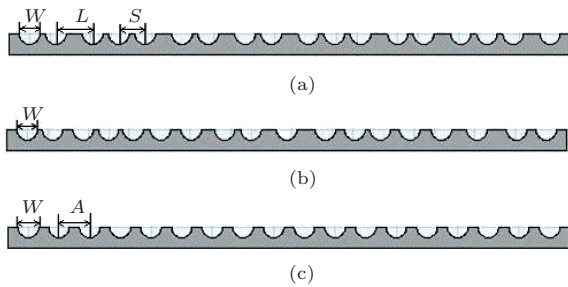


图1 沟槽结构的不同排列方式 (a) 八重准周期; (b) 无序; (c) 周期

### 2.2 RANG $k-\epsilon$ 湍流模型

本文采用的计算流体仿真软件是 COMSOL Multiphysics. 在计算流体力学 (CFD) 模块单相流模式下选择雷诺平均 Navier-Stokes (N-S) 方程

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[ -pl + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\rho kl \right] + F, \quad (1)$$

和 RANG  $k-\epsilon$  的湍流模型,

$$\begin{aligned} \rho(u \cdot \nabla)k &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_K} \right) \nabla k \right] + p_k - \rho \epsilon, \quad (2) \\ \rho(u \cdot \nabla)\epsilon &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_K} \right) \nabla \epsilon \right] \\ &+ C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \rho k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \epsilon = ep. \quad (3) \end{aligned}$$

另外, 流体的运动满足连续性方程, 即

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0, \quad (4)$$

式中,  $u$  为速度场,  $p$  为压力,  $k$  为湍流动能,  $\rho$  为流体密度,  $ep$  为湍流耗散速率,  $\mu_T = \rho c_\mu \frac{\epsilon^2}{k}$  为湍动黏性系数,  $P_K = \mu_T [\nabla u + (\nabla u)^T]$  为湍动生成项. 其中常数分别为  $C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_K = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, K_V = 0.42, B = 5.2$ .

### 2.3 计算流域与网格划分

针对沟槽表面的特殊结构, 本文采用直接三维模拟仿真计算的方法. 如图 2 展示了八重准周期间隔排列的短条纹沟槽结构, 流向设置了单排和三排阵列, 分别如图 2(a) 和 (b) 所示. 其他不同排列的短条纹沟槽结构均在此计算域中进行. 其中, 计算域展向长度  $x$  为 55 mm, 流向长度  $y$  为 320 mm, 垂向高度  $z$  为 3 mm.

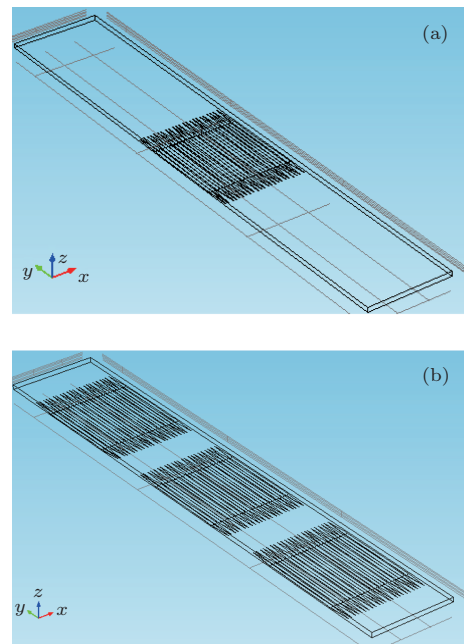


图2 计算域示意图 (a) 单排沟槽结构; (b) 三排沟槽结构

考虑到计算机的性能, 仅在计算域底部 ( $z = 0$ ) 设置了一系列不同排列的沟槽面. 为研究边界湍流状态下的流体减阻特性, 本文选择流体动力学模式. 采用有限体积法离散生成网格, 由于沟槽的特殊形状且存在尖角, 生成高质量结构化网格的难度较大, 所以使用自由剖分四面体非结构化的网格填充计算域. 为捕捉流场的特征, 控制各处网格的疏密, 在近壁区运用定义尺寸函数的

方法,使得沟槽表面附近的网格密集并逐渐向外稀疏.经过反复测试计算,尺寸函数定义为:起始尺寸为0.439 mm,最大单元尺寸为1.47 mm,网格尺寸增长率为1.15,曲率解析度为0.6,狭窄区域解析度为0.7.

### 2.4 计算参数及边界条件设置

为了真实模拟水下沟槽表面的流场特性,本文采用雷诺平均N-S方程和湍流模型的方法,具体计算条件设置如下:

求解器:三维非耦合稳态求解器;

湍流方程: RANG  $k-\epsilon$  湍流模型;

流体介质:水,密度为998.2 kg/m<sup>3</sup>,动力黏性系数为0.001003 Pa·s;

方程离散化方法:压力修正采用SIMPLEC方法(其中欠松弛特性可加速收敛),参数的离散采用二阶迎风格式,收敛标准为10<sup>-4</sup>,迭代次数为2000;

边界条件设置:为保证充分发展为湍流状态,入口处除了设定了速度外,还设定了湍流强度  $I_T = 0.05$ ,湍流长度  $L_T = 0.01$  m;出口处选择压力  $P = 0$  和无黏性应力来消除狄氏条件在压力上对黏性应力的限制;计算流域的上壁面和双侧侧面均采用滑动边界条件;沟槽面设置为壁函数边界条件,即无滑移边界条件.

### 3 减阻率数值仿真结果

本文通过计算比较沟槽表面和对应的光滑平面所受的总阻力来评定不同沟槽表面的减阻效果.表面所受总阻力包含两项,分别是黏性阻力和压差阻力.定义总阻力的相对减阻率为

$$\eta = \frac{F_{smooth} - F_{groove}}{F_{smooth}} \times 100\%, \quad (5)$$

其中  $F_{smooth}$  与  $F_{groove}$  分别为光滑平面和沟槽表面所受总阻力.图3(a)和(b)分别给出了流速为3 m/s时,单排和三排阵列的短条纹沟槽结构的减阻率.其中,单排阵列结构的减阻率随着条纹平均密度的增加而有所增大,当条纹数增加至23纹即平均密度最大时,减阻率达到最大值,且八重准周期结构的减阻效果最优,可达20%.如图3(a)所示.进一步将短条纹沟槽在流向上排布为三排阵列(23纹×3),计算结果如图3(b)所示.八重准周期沟槽

结构的减阻率为30%,比周期和无序结构高约5%和2.5%,比单排结构提高了约10%.

## 4 实验方法与测试结果

### 4.1 实验测试方法

首先在铝合金圆板上烧制一层石蜡作为光滑基板,再在基板上沿流向方向刻制单排和三排阵列的沟槽结构,且沟槽结构分别按八重准周期、无序和周期序列(如图1)排列.对于八重准周期沟槽结构,  $S = 2.7$  mm,  $L = 3.8$  mm;对于周期沟槽结构,  $A = 3.125$  mm;而无序沟槽结构则按随机间隔排列.图4给出了单排和三排两种八重准周期沟槽结构样板的俯视图.

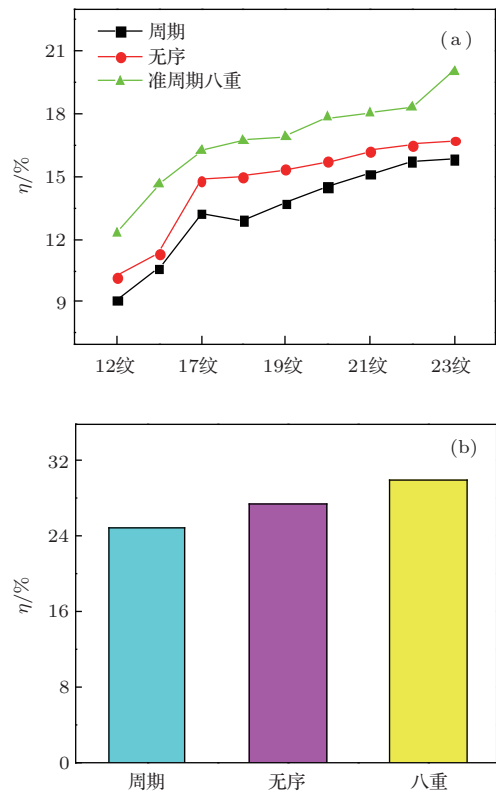


图3 短条纹沟槽结构减阻率 (a) 单排; (b) 三排

采用锥板式流变仪(R/S+ rheometer, Brookfield)对结构样板进行测试,所选用的转子半径  $R$  为25 mm,转母线角度  $\theta_0$  为1°,测试温度由Peltier控温系统控制,约为20 °C ± 0.1 °C.采用甘油和水混合液( $V_{甘油} : V_{水} = 2 : 1$ )作为测试液体,使转子以设定的剪切速率在覆盖有相同测试液体的结构样板上旋转,如图5所示.由于样板结构的变化引起流体流动状态的改变,因而壁面剪

切应力会发生变化. 对同一块样板, 在剪切速率为 200—2000  $s^{-1}$  下测试相应的剪切应力  $\tau$ , 经多次测量取平均值. 剪切应力测量误差小于 3%.

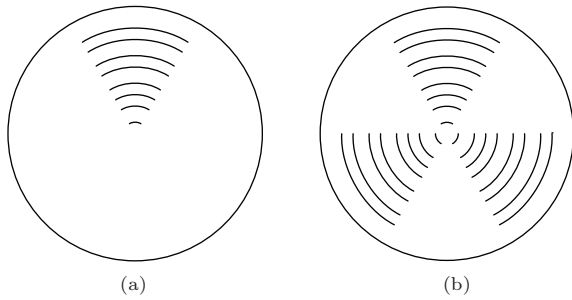


图4 实验样板结构的俯视图 (a) 单排准周期结构; (b) 三排准周期结构

### 4.2 减阻率实验测试结果

实验过程中通过测试不同结构样板的剪切应力 ( $\tau_{groove}$ ), 与无结构光滑样板所受剪切应力 ( $\tau_{smooth}$ ) 对比, 来表征不同结构表面的减阻效果. 采用剪切应力的相对减阻率  $\kappa$  来表示:

$$\kappa = \frac{\tau_{smooth} - \tau_{groove}}{\tau_{smooth}} \times 100\%, \quad (6)$$

不同沟槽结构的相对减阻率在图 6 中给出. 当剪切速率从 200  $s^{-1}$  增加到 2000  $s^{-1}$  时, 对于单排和三排阵列的沟槽结构, 准周期沟槽结构的减阻率分别为 10.4% 和 22.5%; 无序沟槽结构的减阻率分别为 6.5% 和 16.8%; 而相应的周期沟槽结构的减阻率仅为 3.6% 和 14%, 如表 1 所示. 实验结果表明, 三排阵列的沟槽结构比单排阵列的沟槽结构有更好的减阻效果, 且八重准周期沟槽结构的减阻效果最优, 与本文流场模拟结果相一致.

## 5 流场分析及减阻机理讨论

### 5.1 速度场分析

图 7 展示了流场近壁区的速度分布. 如图 7(a),  $u_y$  表明在沟槽底部存在着低速条带, 当外部高速流体从沟槽面内的低速条带上流动, 可减小直接从沟槽面上流过而损失的能量. 图 7(b) 显示, 在沟槽尖端处, 速度分布呈波动状态, 即产生扰动波. 从图 7(c) 可以看出, 在每个沟槽结构顶部形成了正向旋转 (红色) 和反向旋转 (蓝色) 的“二次涡”, 由这些“二次涡”引起的在沟槽结构顶部弱相对运动的出现和发展, 有效地削弱了湍流的猝发强度, 使得沟谷处的低速条带保持稳定, 降低了流体

速度脉动和动量交换的频率, 减小了湍能损耗, 从而实现减阻.

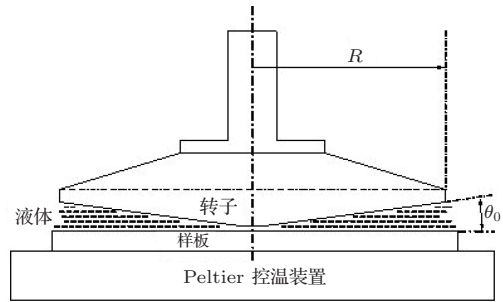


图5 R/S+ rheometer 流变仪

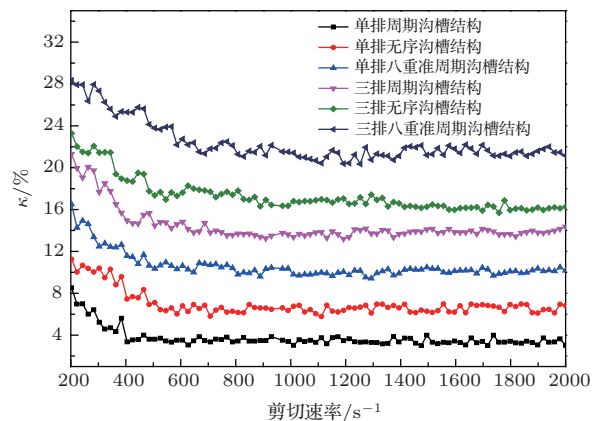


图6 单排、三排沟槽结构在不同剪切率下相对光滑样板的减阻率

表1 不同沟槽结构的减阻率

沟槽减阻结构	周期	无序	八重
单排结构的减阻率/%	3.6	6.5	10.4
三排结构的减阻率/%	14	16.8	22.5

### 5.2 湍流耗散率分析

图 8 展示了沟槽结构的湍流耗散速率分布. 由图 8 可知, 由于沟槽结构与流体的相互作用, 沟槽间隔顶端处的湍流耗散速率达到最大值, 且离沟槽表面越远, 湍流耗散速率越小. 在不同排列的沟槽结构表面, 湍流耗散速率最小值几乎一样, 而最大值则不同. 如表 2 所示: 八重准周期沟槽结构表面的最大湍流耗散速率比周期和无序结构分别减小了约 32% 和 7.7%. 因此, 准周期沟槽结构有效减小了湍流耗散速率, 可具有更大的减阻率.

### 5.3 沟槽结构附近涡场分析

图 9, 10 和 11 分别展示了沟槽结构在  $x-z$  面附近的流向涡、展向涡和垂向涡强度矢量. 从图 9 可知, 不同短条纹沟槽结构表面的流向涡强度有明



显差异. 如表 3 所示: 八重准周期沟槽结构表面的流向涡强度比周期和无序结构分别减小了约 39.5% 和 31.1%. 即准周期沟槽结构形成了明显小于另外两种排列的沟槽结构的流向涡对, 有效地抑制了流向涡的发展, 提高了边界附面层流体运动的稳

定性.

由图 10 可知, 对于不同排列方式的沟槽结构, 其展向涡强度不同. 如表 4 所示: 八重准周期结构表面的展向涡强度最小, 比周期和无序结构分别减小了约 11.9% 和 4.4%.

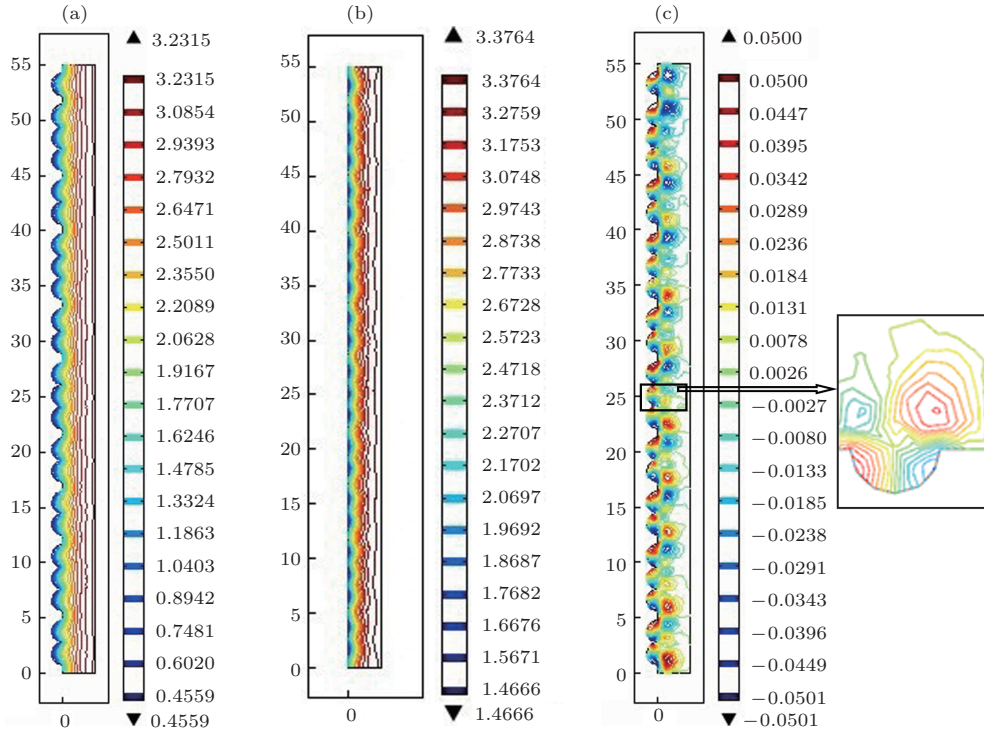


图 7 (网刊彩色) 八重准周期沟槽结构横截面上  $y$  向速度分布图 (a) 沟槽内流向速度  $u_y$ ; (b) 沟槽尖端流向速度  $u_y$ ; (c) 沟槽内展向速度  $u_x$ , 方框内为局部放大图

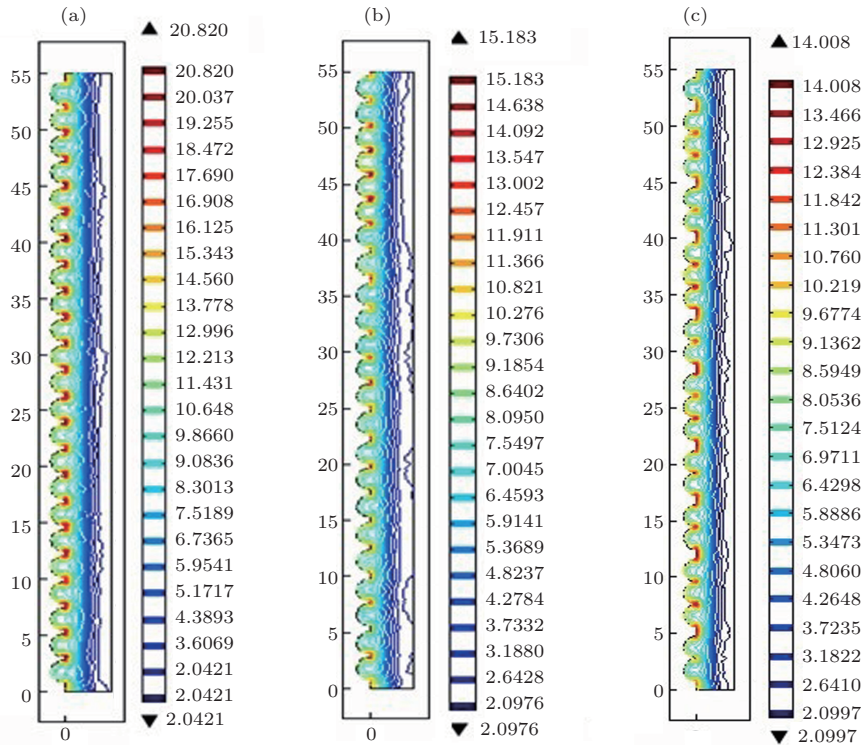


图 8 (网刊彩色) 不同沟槽结构  $y$  向截面上的湍流耗散率分布 (a) 周期; (b) 无序; (c) 八重准周期

表2 湍流耗散速率

沟槽减阻结构	周期	无序	八重
最大湍流耗散速率/ $m^2 \cdot s^{-3}$	20.82	15.183	14.008
相对周期结构的最大湍流耗散速率比/%	100	72.9	67.3
最小湍流耗散速率/ $m^2 \cdot s^{-3}$	2.0976	2.0421	2.0997

从图 11 可知, 沟槽减阻结构的排列方式也对

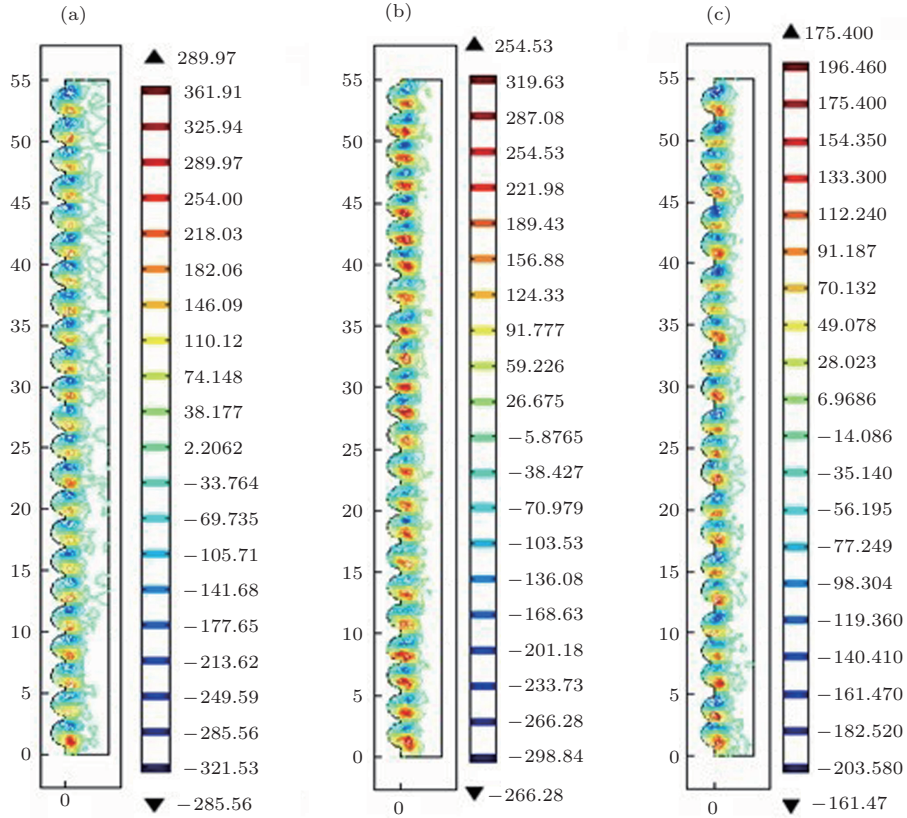


图9 (网刊彩色) 不同沟槽结构  $y$  向截面上的流向涡强度  $I_y$  分布 (a) 周期; (b) 无序; (c) 八重准周期

表3 流向涡强度

沟槽减阻结构	周期	无序	八重
流向涡强度最大值/ $s^{-1}$	289.97	254.53	175.4
相对周期结构流向涡强度比/%	100	87.8	60.5

表4 展向涡强度

沟槽减阻结构	周期	无序	八重
展向涡强度最大值/ $s^{-1}$	1848.1	1700.1	1627.9
相对周期结构展向涡强度比/%	100.0	92.0	88.1

表5 垂向涡强度

沟槽减阻结构	周期	无序	八重
垂向涡强度最大值/ $s^{-1}$	742.33	641.95	583.35
相对周期结构垂向涡强度比/%	100.00	86.50	78.60

垂向涡强度有影响. 如表 5 所示: 八重准周期沟槽结构表面的垂向涡强度分别比周期和无序结构减小了约 21.4% 和 9.1%.

因此, 与周期和无序排列的沟槽结构相比, 八重准周期沟槽结构有效地减小了流向涡强度的扩展, 依次也抑制了垂向涡和展向涡的扩展, 从而保持了沟槽结构内附面层扰动波及涡结构的稳定性.

### 5.4 条纹相稳定性分析

图 12 给出了沟槽结构表面不同区域的流向速度分布. 图 12 (a), (b) 和 (c) 表明沟槽结构表面在  $y = 200$  mm 处都出现了均匀密集的流体条纹相. 随着流向位置下移到  $y = 205$  mm 处, 由图 12 (d), (e) 和 (f) 知, 周期 12(d) 和无序 12(e) 排列的沟槽结构表面的流体条纹相减少且较紊乱, 而八重准周期 12(f) 沟槽结构表面的流体条纹相仍保持均匀有序. 流向位置进一步下移至  $y = 210$  mm 处, 从图 12 (g), (h) 和 (i) 看到, 周期 12(g) 和无序排列 12(h) 的沟槽结构表面的流体条纹相不规整, 但八重准周期图 12(i) 沟槽结构仍保持完整的流体条纹相结构. 表明沟槽结构的排列方式对流场分布产生很大影响, 准周期沟槽结构保持了流体条纹相的稳

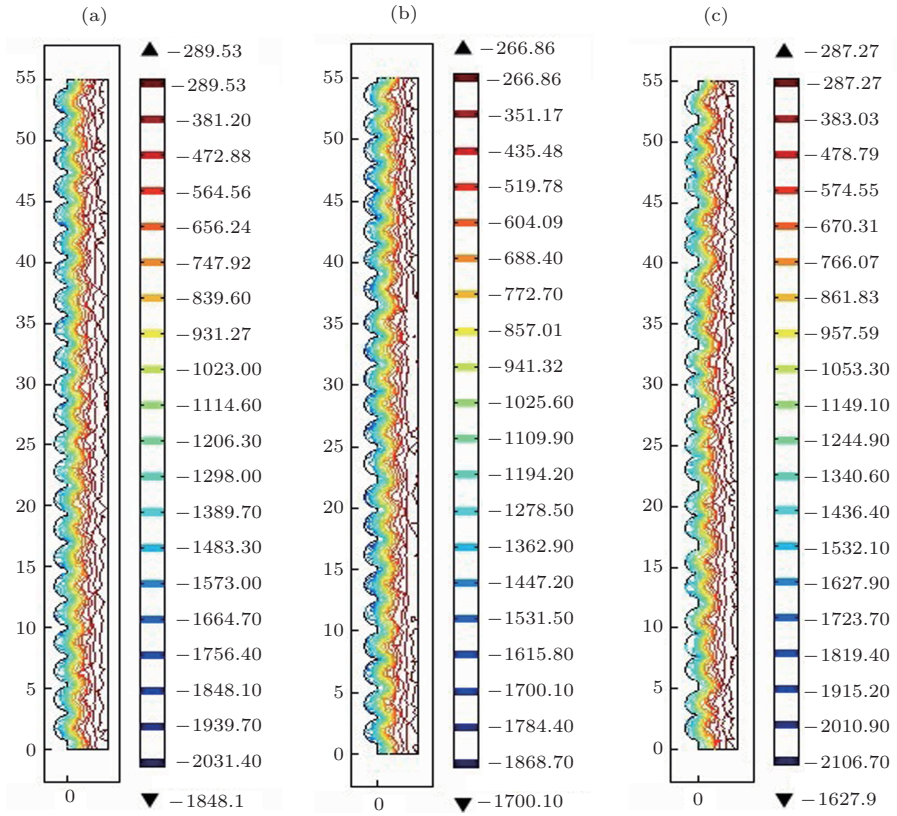


图 10 (网刊彩色) 不同沟槽结构  $y$  向截面上的展向涡强度  $I_x$  分布 (a) 周期; (b) 无序; (c) 八重准周期

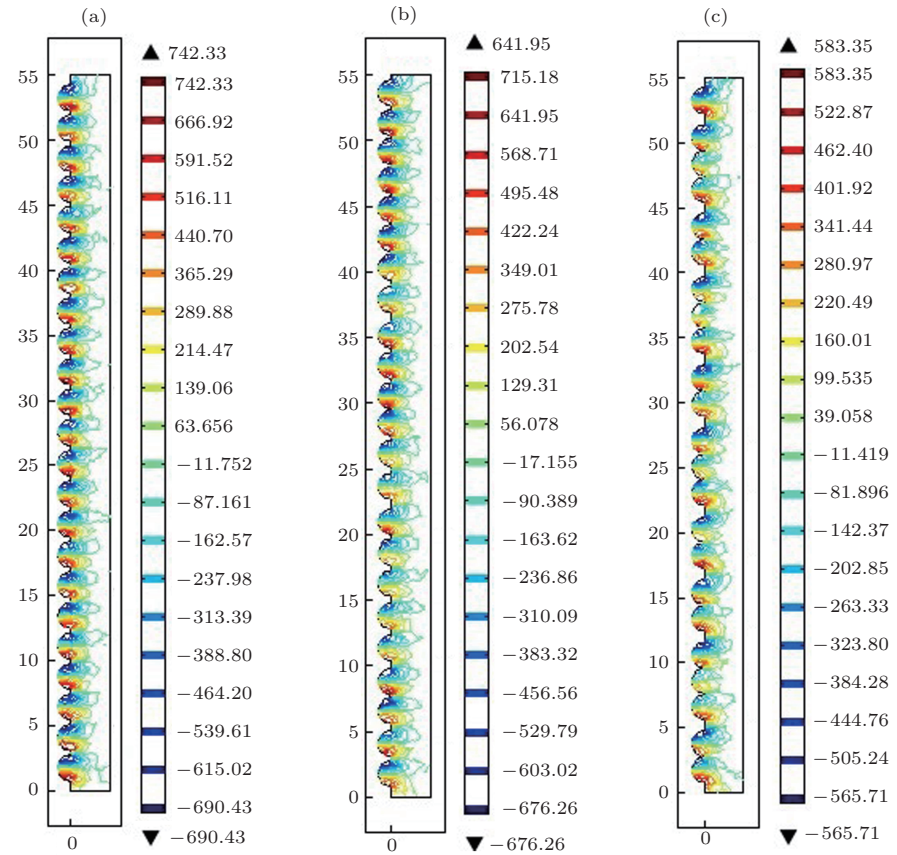


图 11 (网刊彩色) 不同沟槽结构  $y$  向截面上的垂向涡强度  $I_z$  分布 (a) 周期; (b) 无序; (c) 八重准周期



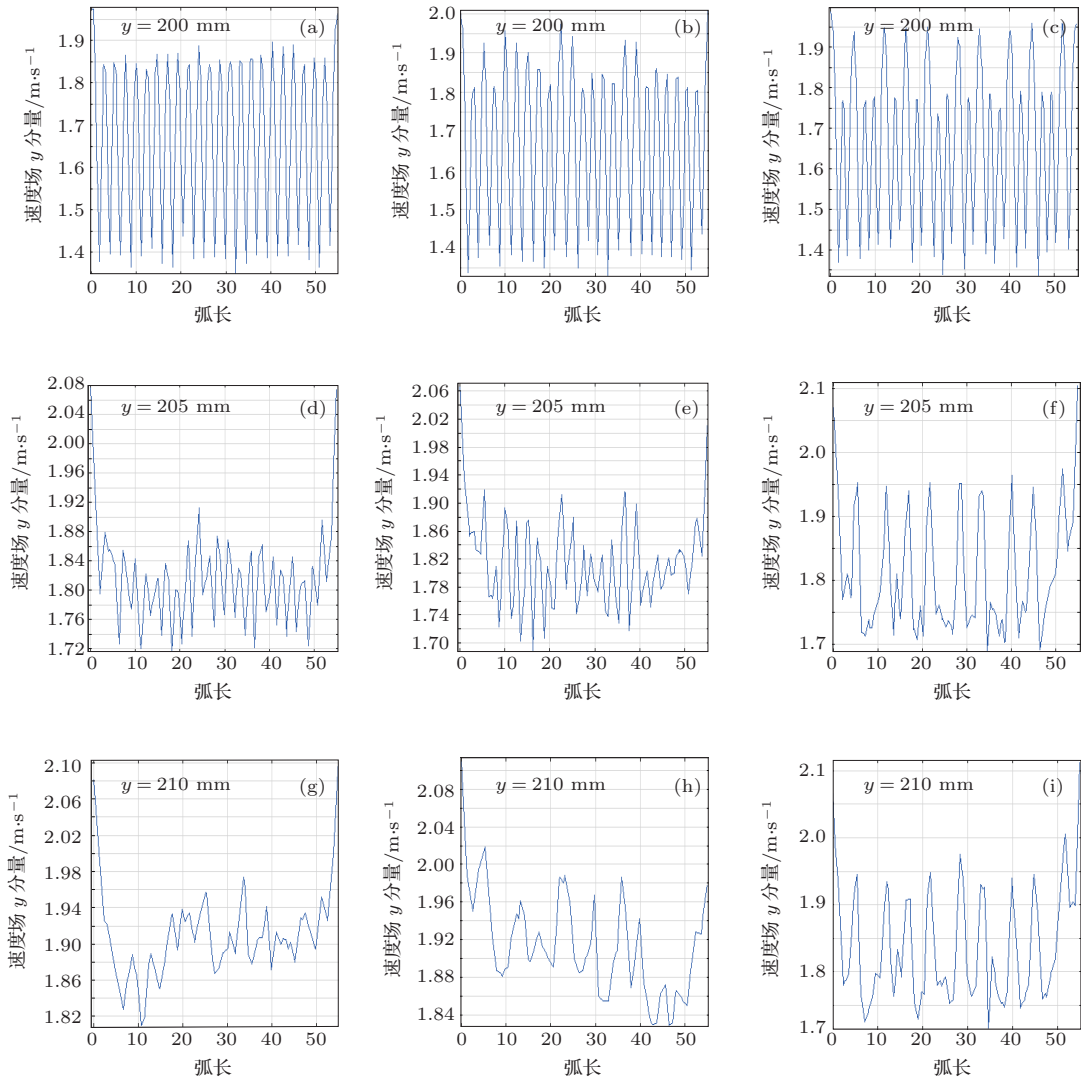


图 12 不同沟槽结构分别在  $y = 200, 205, 210$  mm 横截面上速度分布周期 (a), (d), (g); 无序结构 (b), (e), (h); 准周期八重 (c), (f), (i)

定性, 从而抑制了涡的扩展特别是流向涡的增强, 有利于湍流减阻.

## 6 衍射波模型分析

为揭示沟槽排列方式对流阻影响的物理本质, 可构建二维光栅衍射波模型<sup>[20]</sup>, 研究当扰动波通过二维光栅后, 谱强度因相干叠加所进行的重新分布特征. 设二维光栅所在的平面为  $(x, y)$ , 对于一维八重准晶结构, 矩形短栅纹阵列沿  $x$  轴方向为一维八重准周期排列, 沿  $y$  轴方向为周期排列; 对于一维无序短沟槽结构,  $x$  轴方向为一维无序排列,  $y$  轴方向为周期排列; 而对于一维周期短沟槽结构, 两个方向均为周期排列. 设单色平行波束与二维光栅共面, 其入射方向与  $y$  轴平行, 八重准周期结构的二维光栅构建如图 13 所示.

入射光经第一排栅纹作用后的衍射波, 依次波及第二排和第三排栅纹, 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  $\mathbf{r}_j(x_j, y_j)$ , 其相应的衍射场相移量分别为

$$(\delta_{1j}, \delta_{2j}) = -k(x_j \sin \theta + y_j(1 - \cos \theta)). \quad (7)$$

根据位移-相移定理, 一个单元的波函数可以表示为

$$u_j = u_0 \cdot e^{i(\delta_{1j} + \delta_{2j})}, \quad (8)$$

其中  $\theta$  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

$$u = \sum_{j=0}^{(N-1)} u_j = u_0 \cdot \sum_0^{N-1} e^{i(\delta_{1j} + \delta_{2j})}. \quad (9)$$



一维短沟槽结构的夫琅禾费衍射强度为

$$I = |u|^2, \quad (10)$$

其中  $u_0$  为衍射强度单元因子, 其衍射强度单元因子为

$$u_0 = \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right), \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda},$$

其中  $a$  为缝宽.

根据 (7)—(11) 式, 图 14 给出了一维短条纹沟槽结构谱强度分布. 模拟结果显示, 相对于周期和无序排列, 按准周期排列的波强在大角度方向上分布比较均匀, 且衍射峰强度小, 约是其最大峰值的

1/2, 表明八重准周期沟槽结构更有效地抑制强扰动的形成, 如表 6 所示. 二维光栅的衍射波模型物理分析结果与流场模拟分析相一致, 揭示出准周期沟槽结构抑制流体相干扰动波扩展的物理本质.

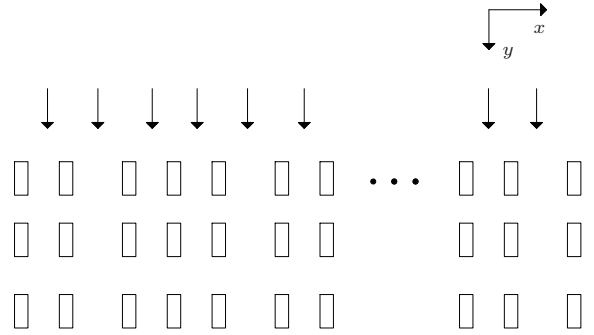


图 13 一维短沟槽八重准晶结构 (23 纹 × 3) 的光栅构建

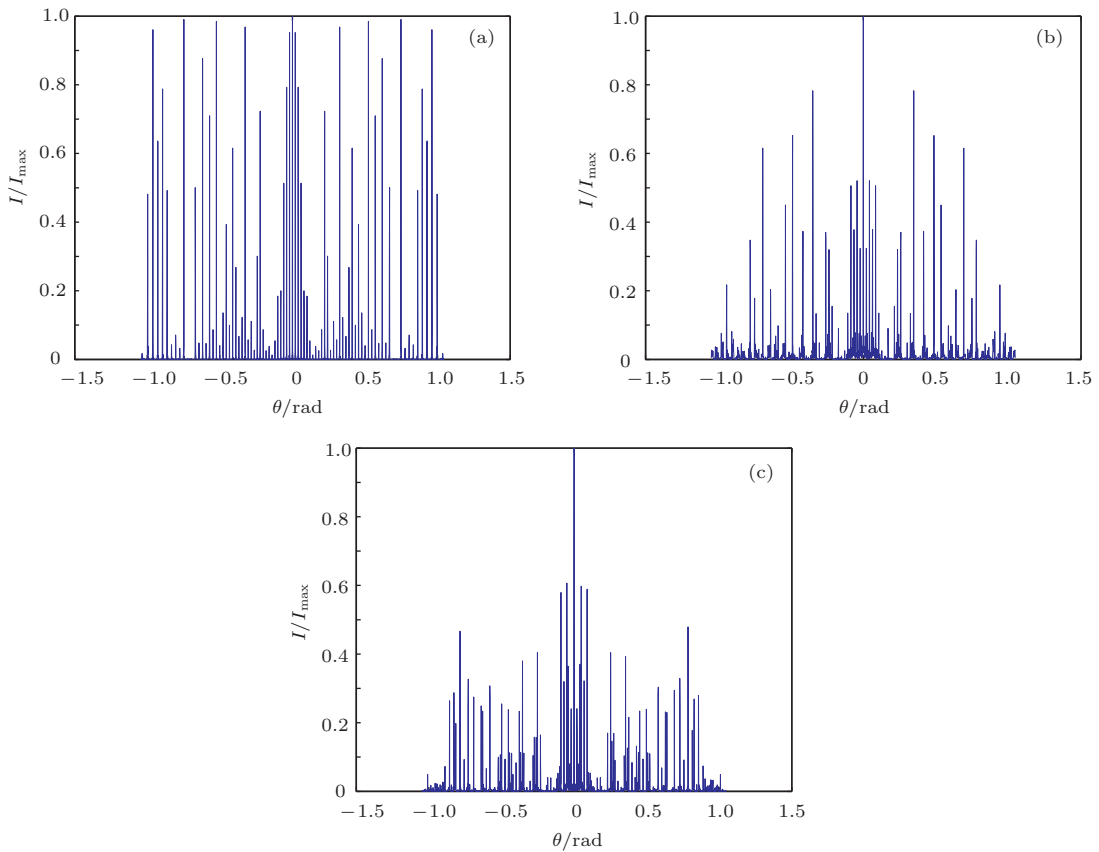


图 14 一维短条纹沟槽结构谱强度分布 (a) 周期结构; (b) 无序结构; (c) 八重准周期结构

表 6 不同结构的衍射波最强谱线值

光栅模型	角度大于 0.25 rad 的最强谱线值
周期结构	$I_0$
无序结构	$0.8I_0$
八重准周期结构	$0.5I_0$

## 7 结 论

采用数值模拟和实验测试相结合的方法研究了不同排列沟槽结构的流体减阻特性, 结合近壁面的流场特性分析了八重准周期沟槽结构的减阻作用, 并通过二维光栅的衍射波模型讨论了准周期结

构的作用原理.

1) 数值计算分析了各种沟槽结构的减阻效果,发现三排阵列的沟槽结构的减阻效果明显优于单排阵列,且八重准周期沟槽结构的减阻效果最优.这与实验测试结果相一致.

2) 流场计算分析表明,相对周期和无序结构、八重准周期结构与流体边界层相互作用,有效地抑制涡强度扩展,降低了湍流耗散速率,稳定了流体条纹相.

3) 采用相应的周期、无序和准周期排列的短栅纹正交光栅模型,揭示不同表面结构对相干波作用的物理本质,发现八重准周期结构可有效抑制相干扰动波的扩展.

### 参考文献

- [1] Sun M, Tian J, Li Z Y, Cheng B Y, Zhang D Z, Jin A Z, Yang H F 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 486
- [2] Zhou P Q, Dong C H, Cao Y J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6470 (in Chinese)[周培勤, 董纯红, 曹永军 2006 物理学报 **55** 6470]
- [3] Park J Y, Ogletree D F, Salmeron M, Ribeiro R A 2006 *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.* **74** 24203
- [4] Cao Y J, Yang X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3620 (in Chinese)[曹永军, 杨旭 2008 物理学报 **57** 3620]
- [5] Yuan Y H, Yang J H 2005 *Chin. Phys.* **14** 1683
- [6] Dai Y, Hu X, Song J, Yu B K, Qiu J R 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1941
- [7] Dong J W, Han P, Wang H Z 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1936
- [8] Dean B, Bhushan B 2012 *Adv. Mech.* **42** 6
- [9] Zhang D Y, Luo Y H, Li X, Chen H W 2011 *J. Hydrodyn. B* **23** 204
- [10] Hefner J N, Bushnell D M, Walsh M J 1983 *Date Exchange Meeting on Viscous and Interacting Flow Field Effects* Gottingen, West Germany, May 25–26, 1983 p11
- [11] Wang J J, Fu S, Meng G Q 2001 *The Latest Progress of Turbulence Research* (Beijing: Science Press) pp230–233 (in Chinese) [王晋军, 符松, 梦庆国 2001 湍流研究最新进展 (北京: 科学出版社) 第230—233页]
- [12] Liu Z Y, Hu H B, Song B W, Huang Q G 2009 *J. Syst. Simulat.* **21** 6025 (in Chinese) [刘占一, 胡海豹, 宋宝维, 黄桥高 2009 系统仿真学报 **21** 6025]
- [13] Garcia-Mayoral R, Jimenez J 2011 *Phil. Trans. Roy. Soc. A* **369** 1412
- [14] Choi K S 2000 *Fluid Dyn. Res.* **26** 325
- [15] Nugroho B, Hutchins N, Monty J P 2013 *Int. J. Heat Fluid Flow* **41** 90
- [16] El-Samni O A, Chun H H, Yoon H S 2007 *Int. J. Engineer. Sci.* **45** 436
- [17] Strand J S, Goldstein D B 2011 *J. Fluid Mech.* **668** 267
- [18] Zhang Y H, Cheng Y S 1995 *Acta Phys. Sin.* **44** 204 (in Chinese)[张玉河, 陈岩松 1995 物理学报 **44** 204]
- [19] Wang P, Shao J L, Qin C S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234701 (in Chinese)[王裴, 邵建立, 秦承森 2012 物理学报 **61** 234701]
- [20] Daniello R J, Waterhouse N E, Rothstein J P 2009 *Phys. Fluids* **21** 085103
- [21] Han Z W, Zhang J Q, Chao G, Li W, Ren L Q 2011 *Langmuir* **28** 2914
- [22] Moradi H V, Floryan J M 2013 *J. Fluid Mech.* **716** 280
- [23] Wang X N, Geng X G, Zang D Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 054701 (in Chinese)[王晓娜, 耿兴国, 臧渡洋 2013 物理学报 **62** 054701]
- [24] 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]
- [25] 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]
- [26] García-Mayoral R, Jiménez J 2011 *Phil. Trans. Soc. A* **369** 1414
- [27] Jung C Y, Bhushan B 2010 *J. Phys.* **22** 035104
- [28] Xue W H, Geng X G, Li J, Li F, Wu J 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 104703

# Drag reduction mechanisms of 8-fold quasi-periodic short groove structures\*

Lang Sha-Sha Geng Xing-Guo Zang Du-Yang<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry of the Ministry of Education, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

( Received 14 October 2013; revised manuscript received 14 January 2014 )

## Abstract

We design two types of 8-fold quasi-period short groove structures which are arranged in single row and three rows respectively. The flow field in the turbulent boundary layer and the total stress over these groove surfaces are numerically simulated by using Reynolds average Navier-Stokes equation and turbulence model. It is shown that the 8-fold quasi-periodic structure has good drag reduction effect compared with the periodic and disorder structures, especially for structure arranged in three rows. The results are also confirmed by the shear stress measurements which are performed on substrates with the designed structures. By analyzing the distribution of flow field, we find that the quasi-periodic structure effectively inhibits the intensity of vortex, reduces the turbulent dissipation rate, and keeps the stripe phase stable. Furthermore, by using the two-dimensional grating model, it is found that the 8-fold quasi-periodic structure can reduce spectrum intensity in the large angle direction, revealing that the inhibition of the extension of coherence disturbance waves is responsible for the drag reduction effect, which is also confirmed by the flow field analysis.

**Keywords:** groove structure, vortex, strip phase, 8-fold quasi-period

**PACS:** 47.85.lb, 47.27.ek, 47.11.Df

**DOI:** [10.7498/aps.63.084704](https://doi.org/10.7498/aps.63.084704)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51301139, 10872172), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20126102120058), and Fundamental Research Foundation of Northwestern Polytechnical University, China (Grant No. JCY20130147).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [dyzang@nwpu.edu.cn](mailto:dyzang@nwpu.edu.cn)