

槽道湍流的展向振荡电磁力壁面减阻

梅栋杰 范宝春 黄乐萍 董刚

(南京理工大学,瞬态物理重点实验室,南京 210094)

(2009 年 11 月 4 日收到;2009 年 12 月 24 日收到修改稿)

采用直接数值模拟方法,对槽道湍流的展向振荡电磁力的减阻效果和减阻机理进行了研究,讨论了电磁力强度和振荡频率对湍流猝发事件以及壁面减阻率的影响.结果表明,电磁力强度或振荡频率变化时,湍流猝发频率和猝发强度的变化趋势是相反的,所以存在最优参数使得减阻效果最好.等价壁面展向速度可以很好地描述电磁力强度和振荡频率的变化对减阻效果的综合效应.

关键词: 湍流, 展向振荡电磁力, 减阻, 湍流猝发事件

PACC: 0340G, 4765

1. 引 言

近年来,能源问题受到世界范围内的普遍关注.随着社会的发展,运输工具消耗的能源愈来愈多.研究表明,在各种运输工具中,边界层阻力在总阻力中占有很大的比例,减少边界层的阻力可以减少能耗,节约能源.为达到减少边界层阻力的目的,产生了各种各样的减阻方法和技术^[1-5].湍流边界层的高摩擦阻力与边界层内的湍流拟序结构有关,如果能够控制边界层的流动,便可有效抑制湍流,减少壁面阻力.

由电极和磁条组成的电磁板被激活时,在弱电介质溶液形成电磁力,可以改变流动速度,使边界层流动得到控制^[6-10].电磁力的大小和方向与电磁板的结构以及放置方向有关,是可以调整的,故具有很大的灵活性.此外,还可将小型的基元电磁板组装成足够大的激励板,因此可以研制成 MEMS 装置.正由于此,壁湍流的电磁控制的研究受到特别的关注.

Henoch^[11]和 Crawford^[12]分别对平面电磁板形成的流向电磁力的减阻问题进行了实验和数值研究,而 Nosenchuck^[13]和 Bandyopadhyay^[14]等则对法向电磁力的减阻进行了实验和数值研究,结果表明,此类电磁力没有明显的减阻效果.

Pang^[15]和 Breuer^[16]等通过实验,研究了平面电磁板形成的展向振荡电磁力的湍流控制问题,其结果表明,展向振荡电磁力具有减阻功能,其减阻效果与

电磁力强度 St (即振幅)和振荡频率 T^+ 有关,最高减阻率可达到 10%. Berger^[17], Lee^[18], Du^[19] 和 Satake^[20] 等对该问题进行了数值模拟,结果同样证实了展向振荡电磁力的减阻功效,并且存在一个最优参数,即等价速度 $\frac{St \cdot T^+}{Re_r \pi}$ 约为 20,其减阻效果可达 40%. 根据计算结果,文献还对控制过程中流场以及湍流强度的变化进行了讨论,但很少讨论其减阻机理.

湍流边界层的高摩擦阻力与边界层中的湍流猝发事件有关,传统观点认为,湍流猝发与边界层中条带结构的发展有关,而近年来, Lee 和 Wu 通过实验观察发现^[21],转捩湍流和充分发展湍流中,孤立波(soliton)结构的存在及其演化对湍流的猝发起到了至关重要的作用,因而与湍流摩擦阻力形成密切相关.另一方面,从湍流产生的检测和统计角度看,摩擦阻力的产生不但决定于湍流猝发事件的频率,还决定于湍流猝发事件的强度.基于这一事实,本文利用直接数值模拟方法,对槽道湍流的展向振荡电磁力控制进行了计算,讨论了 St 和 T^+ 对湍流猝发事件及壁面减阻率的影响.结果表明, T^+ 或 St 变化时,湍流猝发频率和猝发强度的变化趋势是相反的,即同时存在使阻力增大和减小的矛盾因素.因此,存在最优参数,使阻力减小成为矛盾的主导因素,从而使减阻效果最好.

2. 物理问题和计算方法

如图 1 所示的水槽,高为 $2h$,充满弱电介质溶

† 通讯联系人. E-mail: bcfan@mail.njust.edu.cn

液,其中心流速为 U_c . 水槽底壁 Γ 上装有控制流动用的电磁激活板.

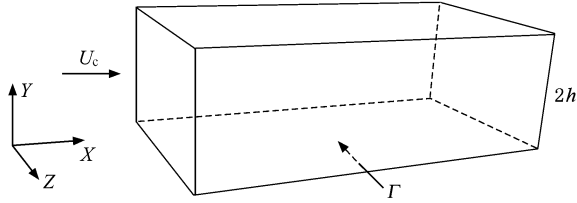


图1 水槽示意图

电磁激活板由长方形的磁条和电极按图2所示的方式交替排列而成. 根据右手螺旋定则,可以确定洛伦兹力 \mathbf{F} 的方向. 将该电磁板置于水槽底壁,并使流动方向与磁条和电极垂直. 电极通电后,将产生展向电磁力. 如果周期性的更换电极的电流方向,便可得到展向振荡的电磁力.

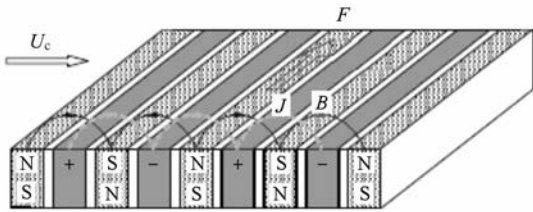


图2 展向振荡电磁激活板 图中S和N分别表示磁条的南极和北极,+和-分别表示电极的正极和负极,实线表示磁力线,虚线表示电力线

以半槽道高 h 和中心流速 U_c 为特征量,有无量纲流动守恒方程

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (2)$$

其中 \mathbf{f} 是单位质量的电磁力

$$\mathbf{f} = (0, 0, f_z), \quad (3)$$

$$f_z = A e^{-\gamma/\Delta} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right), \quad (4)$$

A 是振荡电磁力的强度, T 是振荡电磁力的振荡周期, Δ 是振荡电磁力的穿透厚度, Re 是 Reynolds 数.

利用谱方法^[22]求解上述方程,对壁湍流的电磁控制进行直接数值模拟. 流向和展向用 Fourier 变换,采用周期性边界条件,法向则用 Chebyshev 变换,采用无滑移壁面条件. 方程(1)中的时间项,采用三阶精度的半隐式后差分格式;右边的线性项和压力项,通过影响矩阵法和 Chebyshev-tau 方法联立求解,用以消除残余散度;还利用 3/2 规则,消除非线性项的混淆误差.

计算区域为 $4\pi/3 \times 2\pi/3 \times 2$ (流向 \times 展向 \times 法向),对应的网格点数为 $64 \times 32 \times 65$. $Re = 4000$. $t = 200$ 时,开始电磁控制, $t = 500$ 时,开始对湍流量进行统计.

为便于讨论,引入如下无量纲量:

$$Re_\tau = Re(u_\tau/U_c), \quad (5)$$

$$St = A(U_c/u_\tau)^2, \quad (6)$$

$$T^+ = T u_\tau^2/\nu, \quad (7)$$

其中, u_τ 为摩擦速度, ν 为动力学黏性系数.

3. 结果与讨论

壁湍流具有拟序结构,其基本要素是条带和流向涡. 低速条带通过发夹涡的输运作用,在涡腿之间抬升. 当低速条带上升到一定高度后,开始变得不稳定,容易发生振动和破碎,即出现湍流猝发. 间歇性的湍流猝发是壁湍流的特征之一,其下冲运动将主流体所具有的高能量带至壁面,使壁面阻力增加. 因此,湍流壁面的高摩擦阻力与湍流猝发事件有关,它决定于湍流猝发事件的频率和强度.

利用可变空间间隔平均(variable interval space average, 简记为 VISA)方法^[23, 24]可以从流场中识别湍流猝发事件. 定义湍流猝发检测函数

$$D(t) = \begin{cases} 1 & (\hat{V}\hat{a}r > k \cdot u_{r,m,s}^2, \partial u/\partial x < 0) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}, \quad (8)$$

其中,条件均方差速度

$$\hat{V}\hat{a}r(x_i, t, L) = \hat{u}^2(x_i, t, L) - [\hat{u}(x_i, t, L)]^2, \quad (9)$$

局部平均速度

$$\hat{u}(x_i, t, L) = \frac{1}{L} \int_{x_i-L/2}^{x_i+L/2} u(s, t) ds, \quad (10)$$

局部均方差速度

$$\hat{u}^2 = \frac{1}{L} \int_{x_i-L/2}^{x_i+L/2} u^2(s, t) ds, \quad (11)$$

流向脉动均方根速度

$$u_{r,m,s}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \hat{V}\hat{a}r, \quad (12)$$

k 是采样阈值,本文取 1, L 是采样空间长度,本文取 20. 由该式根据速度数据,可得到某时刻,流场中出现湍流猝发事件的事件数 N 和出现湍流猝发事件的地点 x_j ($j = 1, \dots, N$).

湍流猝发事件在被检测区域出现的概率称为猝发频率. 而湍流猝发强度可用流向脉动速度的条件平均值来表示. 定义猝发事件中,流向脉动速度的条件平均值

$$\langle u(\xi) \rangle_{y^+} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u(x_j + \xi), \quad (13)$$

ξ 为距离猝发位置的距离. 该式反映了出现湍流猝发事件的附近区域, 流向脉动速度的分布, 将其最大值定义为湍流猝发强度.

3.1. T^+ 不变时, St 的影响

振荡的展向电磁力可以用来控制壁湍流, 从而实现减阻的目的. T^+ 和 St 是描述振荡电磁力特性的两个重要参数, 为讨论它们对壁湍流控制的影响, 先讨论 T^+ 不变时, St 的影响.

图 3 是 $T^+ = 113$ 时, 湍流猝发频率随 St 的变化图. 从图 3 可以看出, 当 T^+ 不变时, 猝发事件出现的频率随着 St 的增加而增加.

图 4 是 $T^+ = 113$ 时, 不同 St 条件下, 湍流猝发

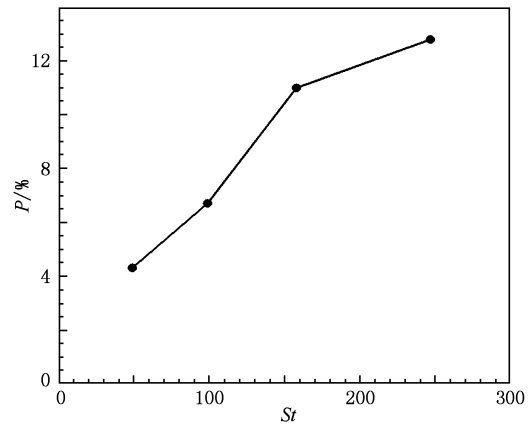


图 3 湍流猝发频率随 St 的变化 $T^+ = 113$

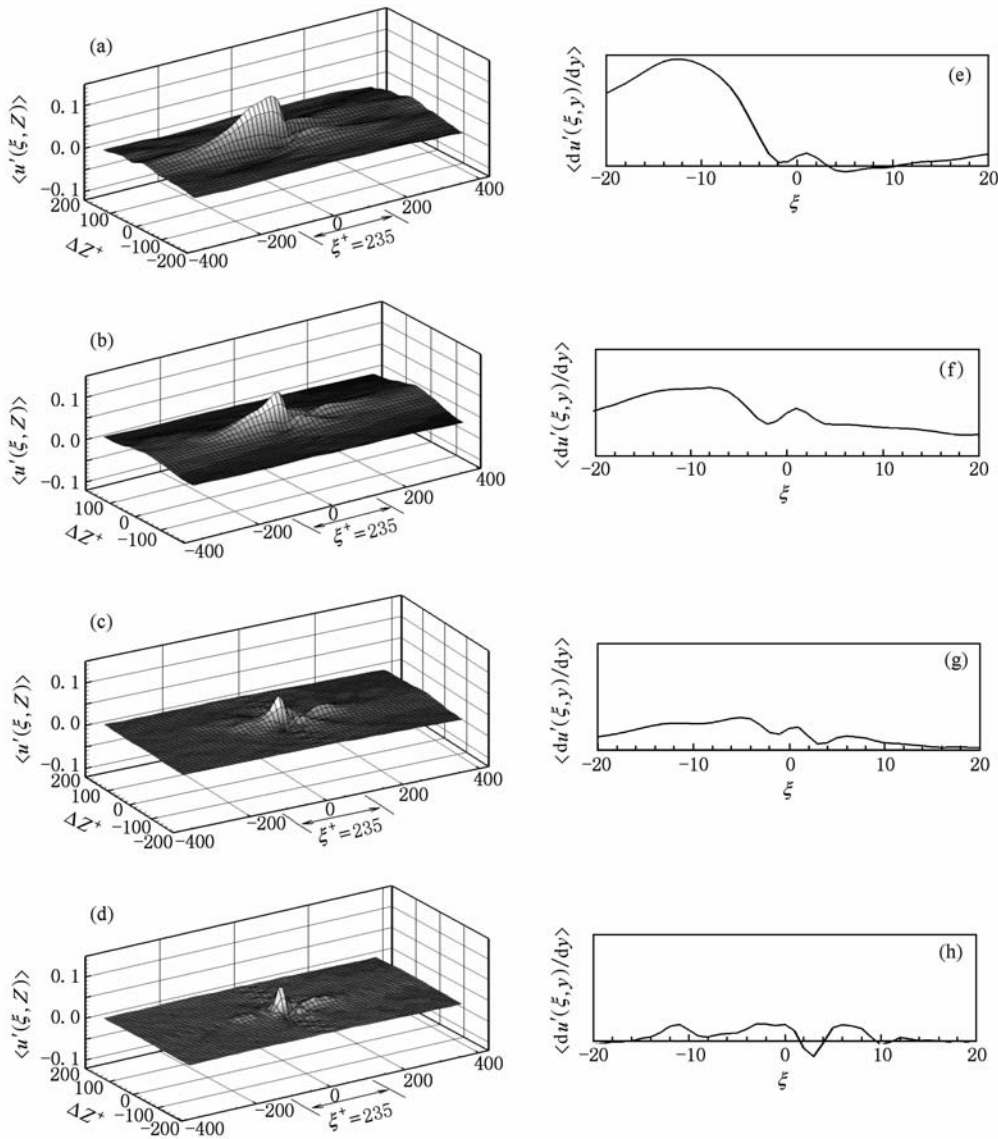


图 4 不同 St 的湍流猝发事件条件平均值的分布曲线 (a) — (d) 为流向脉动速度的条件平均值, (a) $St = 49, y^+ = 13.5$; (b) $St = 99, y^+ = 13.5$; (c) $St = 158, y^+ = 13.5$; (d) $St = 247, y^+ = 13.5$; (e) — (f) 为流向脉动速度梯度的条件平均值; (e) $St = 49, y^+ = 0$; (f) $St = 99, y^+ = 0$; (g) $St = 158, y^+ = 0$; (h) $St = 247, y^+ = 0$

事件的条件平均值. 其中图 4(a) — (d) 为 $y^+ = 13.5$ 平面上, 流向脉动速度的分布; 图 4(e) — (h) 为壁面上, 流向脉动速度梯度的分布. 由图 4 可见, 湍流猝发强度愈大, 壁面流向脉动速度梯度也愈大, 这意味着相应的壁面阻力愈大.

图 5 是 $T^+ = 113$ 时, 湍流猝发强度随 St 的变化图. 由图 5 可见, 湍流猝发强度随 St 的增加而减小.

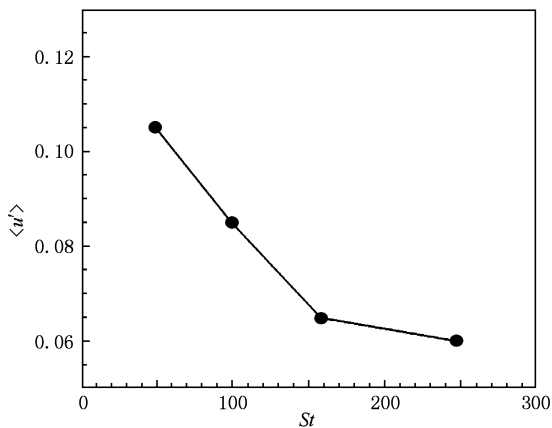


图 5 湍流猝发强度随 St 的变化 $T^+ = 113$

综上所述, 当 T^+ 一定时, 随着 St 的增加, 猝发频率变大, 猝发强度变小. 而前者使壁面阻力增大, 后者使之减小. 这说明, St 的变化存在使阻力增大和减少两种相反趋势, 故存在最优的 St , 其减阻效果最好.

定义减阻率

$$Dr = (1 - \langle \tau_w \rangle / \langle \tau_{wn} \rangle) \times 100\%, \quad (14)$$

其中, $\langle \tau_w \rangle$ 表示控制情况下壁面摩擦应力的平均值, $\langle \tau_{wn} \rangle$ 表示未控制情况下壁面摩擦应力的平均

值. 图 6 是 $T^+ = 113$ 时, 减阻率随 St 的变化图, 由该图可知, 当 $St = 99$ 时, 壁面的减阻率最好.

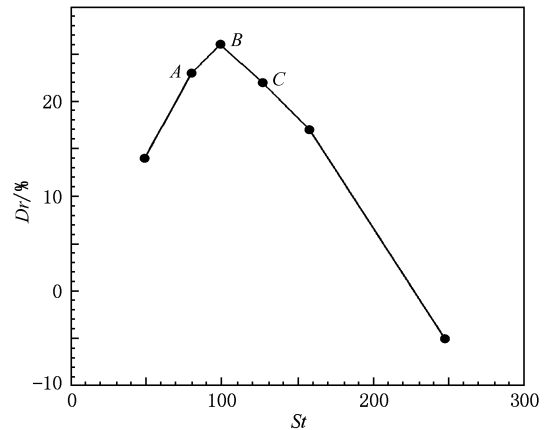


图 6 减阻率随 St 的变化 $T^+ = 113$

为了进一步说明壁面阻力与湍流猝发频率和猝发强度之间的关系, 图 7 为壁面流向速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 分布图, 该图直接描述了壁面的阻力分布. 其中图 7(a) $St = 80$, (b) $St = 99$, (c) $St = 127$, 分别对应于图 6 中 A, B 和 C 点. 显然, 图 7(b) 的减阻率最大, 图 7(a) 和图 7(c) 的减阻率相当. 由图 7 可见, 流向速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 分布曲面上的起伏的频率与起伏大小与检测到的猝发频率和猝发强度相对应, 即图 7(a) 的起伏频率最低, 起伏强度最大; 图 7(c) 的起伏频率最高, 起伏强度最小, 但两者的减阻率相当. 图 7(b) 的起伏频率高于图 7(a), 而起伏强度高于图 7(c), 但其减阻率最大.

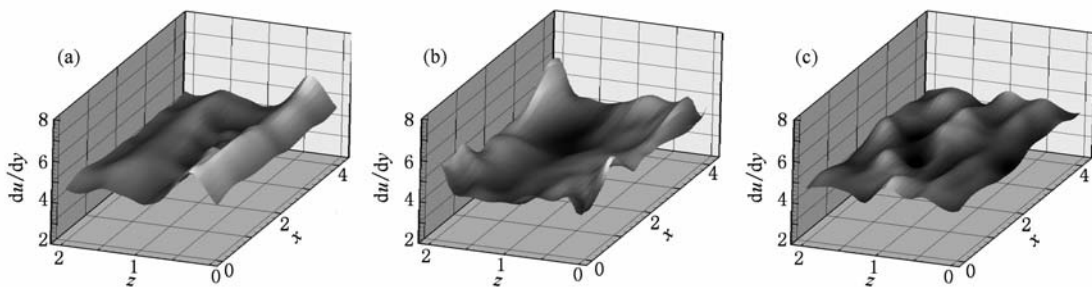


图 7 壁面流向速度梯度分布图 (a) $St = 80$, (b) $St = 99$, (c) $St = 127$

3.2. St 不变时 T^+ 的影响

下面讨论 St 不变时, T^+ 的变化对减阻效果的影响. 图 8 给出 $St = 173$ 时湍流猝发频率随 T^+ 的变化情况. 由图可见, St 不变时, 猝发频率随着 T^+ 的增

加而增加.

图 9 给出 $St = 173$ 时湍流猝发强度随 T^+ 的变化情况. 由图 9 可见, St 不变时, 猝发强度随着 T^+ 的增加减小. 因此, 在 St 不变, T^+ 变化的过程中, 同时存在使阻力增大和减少的两个矛盾因素, 故也必然

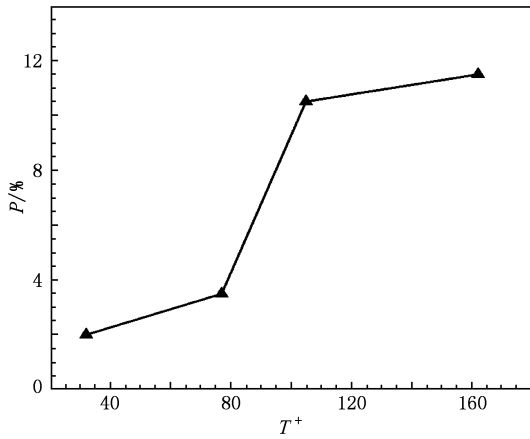


图 8 湍流猝发频率随 T^+ 的变化 $St = 173$

存在最优的 T^+ , 使减阻效果最好. 图 10 给出 $St = 173$ 时, 减阻率随 T^+ 的变化情况, 可知当 $T^+ = 77$ 时, 壁面的减阻率最大.

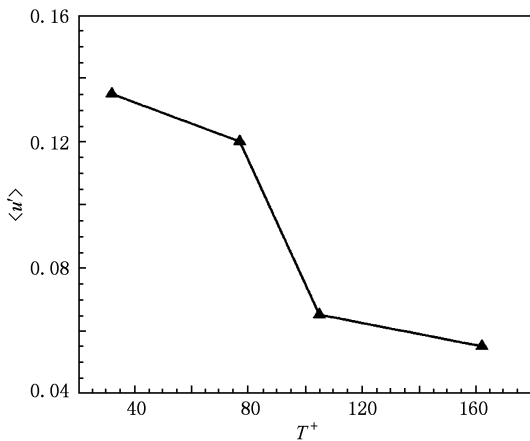


图 9 湍流猝发强度随 T^+ 的变化 $St = 173$

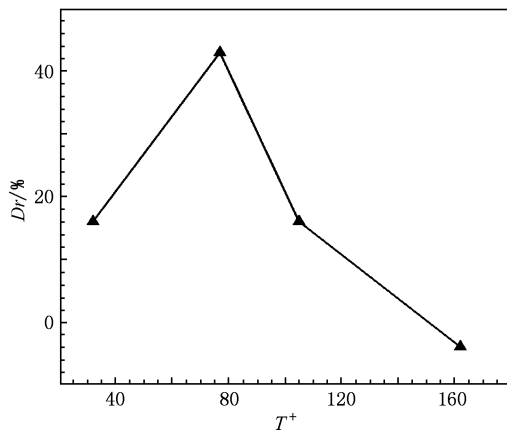


图 10 减阻率随 T^+ 的变化 $St = 173$

3.3. 组合变量的影响

定义组合变量

$$W^+ = St \cdot T^+ / (2\pi Re_\tau), \quad (15)$$

称为等价壁面展向速度. 图 11 是减阻效果随 W^+ 的变化曲线, 图中圆点表示 $T^+ = 113$, 不同 St 的值; 三角表示 $St = 173$, 不同 T^+ 的值. 由图 11 可知, 等价壁面展向速度很好地描述了 St 和 T^+ 的变化对减阻效果的综合效应. 减阻率随 W^+ 的增大先增大后减小, 且在 $W^+ = 10$ 附近取极值, 即减阻效果最好, 这和 Berger^[17] 的数值模拟结果以及 Pang^[15] 的实验结果一致.

图 12 是 $0 < y^+ < 40$ 区域内的涡结构图. 图 12

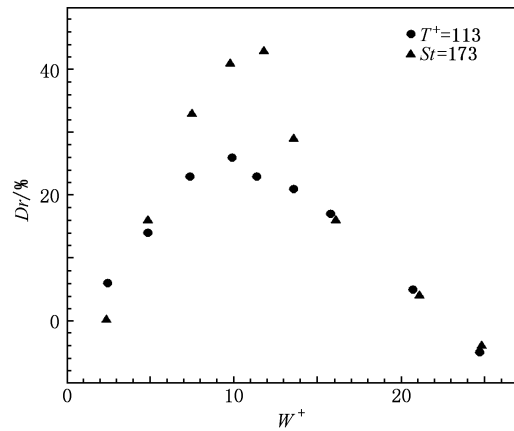


图 11 减阻率随 W^+ 的变化

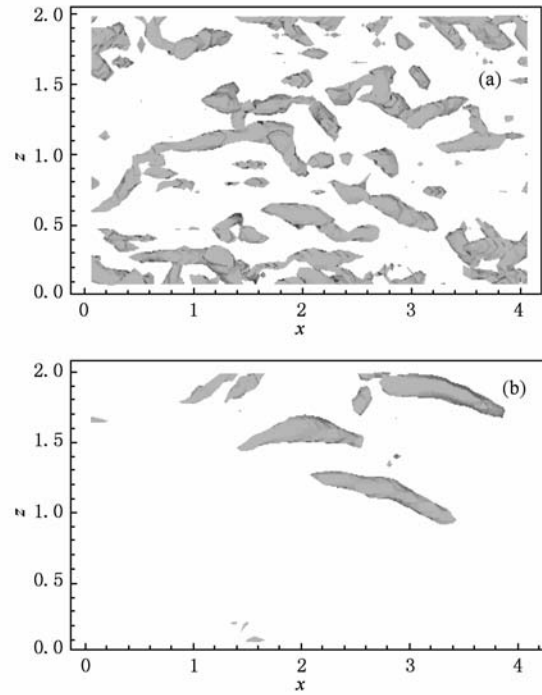


图 12 近壁区域的涡结构图 (a) 未施加控制 ($0 < y^+ < 40$), (b) $W^+ = 11.8$ ($0 < y^+ < 40$)

(a) 是未施加控制的情况, 可以看出近壁区域存在大量的流向涡, 图 12(b) 是 $W^+ = 11.8$ 的情况, 可以看出在展向振荡电磁力的作用下, 流向涡明显受到抑制.

图 13 给出壁面平均阻力随时间的变化曲线, 粗

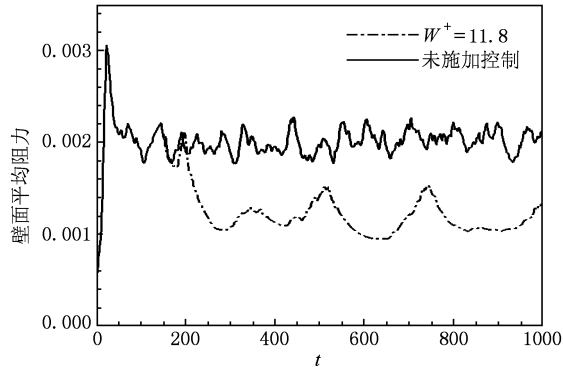


图 13 壁面平均阻力随时间的变化

实线表示未施加控制的情况, 点划线表示 $W^+ = 11.8$ 的情况. 可以发现, $t = 200$ 以后, 即开始施开展向振荡电磁力以后, 壁面阻力有明显的下降.

4. 结 论

本文采用直接数值模拟方法, 对槽道湍流的展向振荡电磁力控制的减阻效果和减阻机理进行了研究, 讨论了电磁力强度 St 和振荡频率 T^+ 对湍流猝发事件以及壁面减阻率的影响. 随着 St 或 T^+ 的变化, 湍流猝发频率和猝发强度的变化趋势是相反的, 同时存在使得阻力增大和减小的可能. 因此, 存在最优参数使阻力减小成为主导因素, 从而使减阻效果最好. 等价壁面展向速度 W^+ 可以很好地描述 St 和 T^+ 的变化对减阻效果的综合效应.

- [1] Li G, Li H M, Li Y M, Nie C Q, Xu Y J, Zhang Y, Zhu J Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4026 (in Chinese) [李 钢、李汉明、李轶明、聂超群、徐燕骥、张 翼、朱俊强 2009 物理学报 **58** 4026]
- [2] Park H, Lee D, Jeon W P, Hahn S, Kim J, Kim J, Choi J, Choi H 2006 *J. Fluid Mech.* **563** 389
- [3] Itoh M, Tamano S, Yokota K, Taniguchi S 2006 *J. Turbulence* **7** 1
- [4] Liu W D, Qiu X M, Sun A P, Tang D L, Zeng X J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 186 (in Chinese) [刘万东、邱孝明、孙爱萍、唐德礼、曾学军 2007 物理学报 **56** 186]
- [5] Gong B Z, Zhang B J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1504 (in Chinese) [龚博致、张秉坚 2009 物理学报 **58** 1504]
- [6] Chen Y H, Fan B C, Chen Z H, Li H Z 2009 *Sci. China Ser. G* **52** 1364
- [7] Zhang H, Fan B C, Chen Z H 2009 *Fluid Dyn. Res.* **41** 045507
- [8] Zhang H, Fan B C, Chen Z H, Dong G, Zhou B M 2008 *Chin. Sci. Bull.* **53** 2946
- [9] Chen Y H, Fan B C, Chen Z H, Zhou B M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 648 (in Chinese) [陈耀慧、范宝春、陈志华、周本谋 2008 物理学报 **57** 648]
- [10] Chen Z H, Fan B C, Zhou B M, Li H Z 2007 *Chin. Phys.* **16** 1077
- [11] Henoch C, Stace J 1995 *Phys. Fluids* **7** 1371
- [12] Crawford C H, Karniadakis G E 1997 *Phys. Fluids* **9** 788
- [13] Nosenchuck D M, Brown G L 1993 *Near-Wall Turbulent Flows* (New York: Elsevier Science Publishers BV) p689
- [14] Bandyopadhyay P R, Castano J M 1996 *Proceedings of the Forum on Control of Transitional and Turbulent Flows, Fluids Engineering Division Conference San Diego, American*, July 7—11, 1996 p53
- [15] Pang J, Choi K S 2004 *Phys. Fluids* **16** 35
- [16] Breuer K S, Park J, Henoch C 2004 *Phys. Fluids* **16** 897
- [17] Berger T W, Kim J, Lee C, Lim J 2000 *Phys. Fluids* **12** 631
- [18] Lee C, Kim J 2002 *Phys. Fluids* **14** 2523
- [19] Du Y Q, Symeonidis V, Karniadakis G E 2002 *J. Fluid Mech.* **457** 1
- [20] Satake S, Kasagi N 1996 *Int. J. Heat Fluid Flow* **17** 343
- [21] Lee C B, Wu J Z 2008 *Appl. Mech. Rev.* **61** 030802
- [22] Canuto C, Hussaini M Y, Quarteroni A, Zang T A 1988 *Spectral Methods in Fluid Dynamics* (New York: Springer-Verlag) p201
- [23] Kim J, Moin P, Moser R 1987 *J. Fluid Mech.* **177** 133
- [24] Kim J 1983 *Phys. Fluids* **26** 2088

Drag reduction in turbulent channel flow by spanwise oscillating Lorentz force

Mei Dong-Jie Fan Bao-Chun Huang Le-Ping Dong Gang

(*Science and Technology on Transient Physics Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

(Received 4 November 2009; revised manuscript received 24 December 2009)

Abstract

Direct numerical simulation (DNS) of a turbulent channel flow is carried out to investigate the effect and mechanism of using spanwise oscillating Lorentz force to reduce boundary layer friction. We discussed the influence of Lorentz force intensity St and oscillating frequency T^+ on the drag reduction effect and turbulent burst events. The results suggest the varying tendencies with St or T^+ of the frequency of the turbulent bursts events are opposite to the intensity of the turbulent bursts events, and there exists an optimal parameter to achieve the largest amount of drag reduction. The composite effect of St and T^+ can be well described by the equivalent spanwise wall velocity W^+ .

Keywords: turbulence, spanwise oscillating Lorentz force, drag reduction, turbulent burst event

PACC: 0340G, 4765

† Corresponding author. E-mail: bcfan@mail.njust.edu.cn