doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.10.017

展向行波电磁力控制下的槽道湍流雷诺应力

洪延姬[1], 吴文堂[1], 范宝春[2]

(1.激光推进及其应用国家重点实验室(装备学院), 101416 北京;
2. 瞬态物理国家重点实验室(南京理工大学), 210094 南京)

摘 要: 为研究槽道湍流的电磁力减阻控制问题,采用直接数值模拟(DNS)方法对槽道湍流的展向行波电磁力控制问题进行数值研究.讨论了由展向行波诱导的诱导流场对槽道湍流流场的调制过程,分析了控制前后雷诺应力离散点分布、平均雷诺应力分布以及雷诺应力波谱分布的规律.研究表明,在合适参数条件控制下,展向行波电磁力的控制不仅使近壁条带结构基本消失,形成加宽的低速条带,而且能使控制后的流场中涡结构几乎消失,而仅剩下由展向行波电磁力诱导产生的带状负涡结构,同时展向行波电磁力在一定程度上抑制了湍流的脉动,减小了雷诺应力,最终使壁面阻力下降.

关键词: 槽道湍流; 直接数值模拟; 展向行波电磁力; 雷诺应力
中图分类号: O357.5 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2015)10-0088-06

Reynolds stress in the turbulent channel flow controlled byspanwise travelling wave Lorentz forc

HONG Yanji[1], WU Wentang[1], FAN Baochun[2]

(1.National Key Laboratory of Laser Propulsion and Application(Academy of Equipment), 101416 Beijing, China;
2. National Key Laboratory of Transient Physics(Nanjing University of Science and Technology), 210094 Nanjing, China)

Abstract: The flow control and drag reduction in a turbulent channel flow by using a spanwise travelling wave Lorentz force are investigated numerically via the direct numerical simulation (DNS). The evolution of the streaks and the vortex structures adjoining the wall in the turbulent channel flow controlled by Lorentz force are described. Moreover, normal fluctuation velocity, streamwise fluctuation velocity distribution, the average Reynolds stress distribution and the spectra analysis of Reynolds stress are also discussed simultaneously. The results show that, under the action of the distributed Lorentz force with proper control parameters, only well-organized strip-shaped streamwise vortexes are observed in the near-wall region of the turbulent channel flow, and the others vortexes are almost disappeared, which is the same as the streaks in the near-wall region. Besides the Reynolds stress in the controlled channel flow was inhibited sharply by the spanwise travelling wave Lorentz force which leads to the reduction of skin-friction drag. The mechanism of turbulence drag reduction controlled by using a spanwise travelling wave Lorentz force is further clarified.

Keywords: turbulent channel flow; direct numerical simulation (DNS); spanwise travelling wave Lorentz force; Reynolds stress

湍流控制技术种类繁多,涉及面广,可以从不同的角度进行分类.考虑到连续介质的流动是由守恒方程和相应的初始和边界条件确定的,因此可以从数学角度上将流动控制方法分为两类,即改变边界条件和改变守恒方程[1].改变边界条件包括壁面改性、异性壁面、引射壁面、运动壁面、变形壁面等.改变守恒方程包括改变流体物性和在方程中添加源项等.由电极和磁条组成的电磁板被激活时,在弱电介质溶液中形成电磁力(Lorentz 力),它可以改变流动速度,控制边界层流动.这种利用电磁力控制湍流的方法属于上述湍流控制方法中在守恒方程中添加源项的方法,近年来,这种方法受到较多关注[2-4].

文献[5]通过对槽道湍流的研究证实,展向周

收稿日期: 2014-04-29.
基金项目: 国家自然科学基金(11172140,11372356).
作者简介: 洪延姬(1963—),女,教授,博士生导师;
范宝春(1945—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 洪延姬,hongyanji@ vip.sina.com.

期振荡的电磁力可以干扰湍流的拟序结构，抑制流向涡结构，从而减少壁面阻力.随后文献[6]对此进行了实验验证，文献[7]对展向振荡电磁力以波的形式在导电流体中沿展向传播的电磁力(简称展向行波电磁力)的流动控制问题进行了数值研究，文献[8]利用实验对此加以证实，文献[9]通过数值研究表明，由柔性壁面产生的展向行波同样具有类似的减阻效果.最近，文献[10]对等离子体诱导产生的展向行波的槽道湍流控制问题进行了实验研究，流场显示和电磁力控制具有很多相似之处.文献[11]讨论了该类电磁力的展向波数对壁湍流控制的影响，研究表明存在最佳波数的展向行波电磁力，可以调制壁湍流的条带结构的展向间距与强度，影响近壁流体的湍流猝发活动，从而减小壁湍流阻力.

上述研究在一定程度上揭示了展向行波状电磁力在控制槽道湍流和减少壁面阻力方面的一些规律.但是由于湍流的复杂性，迄今仍未能很好地理解和揭示其内在机理.近年来研究者们对湍流的研究表明，湍流近壁涡结构产生的雷诺应力对壁面阻力产生了十分重要的影响[12-13].雷诺应力主要产生于条带结构的猝发和下扫过程，它是湍流掺混导致的动量输运的结果，可以看作是平均脉动动量产生的应力，其大小与流场脉动速度的二阶交叉相关量有关，是壁面阻力形成的主要因素[1,12].基于这种理解，从雷诺应力分布的角度去揭示这种控制的机理是非常必要的.

本文采用直接数值模拟方法，研究展向行波电磁力的湍流控制.首先分析和讨论了展向行波电磁力对槽道湍流的控制，并将槽道湍流的控制过程视作诱导流场对固有流场的调制过程，随后讨论了控制前后流向和法向脉动速度的离散点分布规律，且进一步讨论平均雷诺应力分布以及雷诺应力的波谱分布规律，揭示其壁面减阻机理.

1　数值方法

以槽道流形成的充分发展的湍流边界层为基本研究对象，采用谱方法对近壁湍流结构进行了直接数值模拟.计算空间如图 1 所示，来流沿着 x 方向，从左向右流动.在底部壁面装有电磁激励板，启动后可在流场内产生展向行波电磁力.计算域尺寸为 $4\pi/3\times2\times2\pi/3$(约 754×360×377 壁面单位，流向×法向×展向).控制方程为量纲一的不可压缩流体的N-S方程为

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\boldsymbol{u}=-\nabla p+\frac{1}{Re}\nabla^2\boldsymbol{u}+f.$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0.$$

式中：$\boldsymbol{u}$ 为速度矢量；p 为压强与密度的比；Re 为雷诺数；f 为体积力，f 表达式为

$$f=(0,0,f_z),$$

$$f_z=A\mathrm{e}^{-y/\Delta}\sin\left(\frac{2\pi}{L_z}k_z z-\frac{2\pi}{T}t\right).$$

此为展向行波电磁力，在展向呈正弦分布，且随时间不断变化.A 是振幅，$k_z=L_z/\lambda_z$ 为展向波数，其中 λ_z 为展向波长，L_z 为计算区域的展向长度，Δ是电磁力的渗透系数.计算过程中，流向流量保持不变，截面平均速度为 $U=2/3$，相应的雷诺数为 $Re=2\ 667$.当 $t=200$ 时，用于形成湍流的初始扰动的影响基本消除，流场可视作充分发展湍流，或平稳湍流，从而进行统计讨论和湍流对壁面阻力影响的定量讨论.

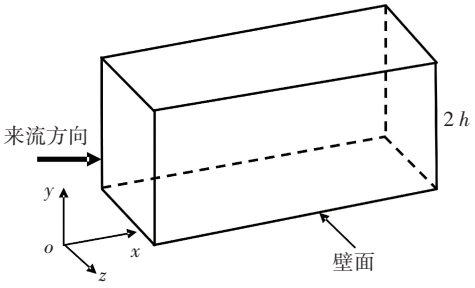


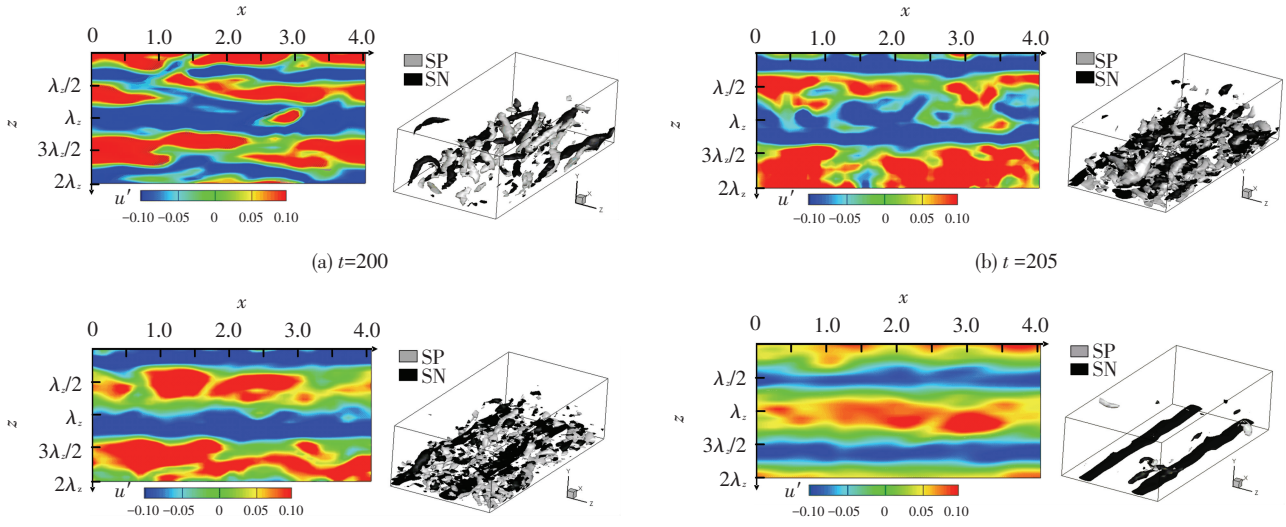
图 1　计算空间示意

2　诱导流场对槽道湍流的调制

壁湍流具有的以周期性条带和流向涡为结构特征的流场称为固有流场，而电磁力作用于层流边界层所形成的流场称为诱导流场.电磁力作用于槽道湍流的过程可视作诱导流场对固有流场的调制过程，调制结果使二者各自发生变化，叠加成新的被控制的流场[14].当电磁力的相关参数选择合适时，湍流可以被有效控制，此时，壁面阻力下降.本文选取符合要求的一组控制参数，即 $A=1.0$，$k_z=2$，$\Delta=0.02$，$T=8$，讨论展向行波电磁力对槽道湍流的控制及控制后的流场特征，参数选择要求详见文献[11].

在诱导流场作用下，近壁流场不断发生变化.图 2 为诱导流场和固有流场相互作用过程中，$y^+=11$处的条带和近壁空间的流向涡结构的变化图.左边一列是条带变化图，深色代表低速条带，浅色代表高速条带.起始时刻，高/低速条带在展向交替分布，条带有较多的弯曲，长短不一，具有壁湍流拟序结构的基本特征.在诱导流场的作用下，湍流流场中条带逐渐出现较大而且明显的低速条带，这是由展向行波电磁力诱导所致，待发展到最后，高速条带也逐渐连成两个较大的条带了，整个流场的条带强度有所减弱.右列为 $y^+=0\sim120$ 区域内的流向涡分布图，涡是用速度梯度张量的共轭复数特征根的虚部的等值面表示的[15]，其中 SP 为

所在区域流向涡量为正的涡结构，SN 为所在区域流向涡量为负的涡结构.起始时刻，壁面附近存在许多无明显规则的准流向涡和马蹄涡，正涡结构与负涡结构数量差别不大.电磁力作用后，流向涡的数量现增加然后迅速减少，最终马蹄涡几乎消失，而仅剩两条较大的负流向涡结构.



(a) t=200　(b) t =205

(c) t=220　(d) t=250

图 2　加入控制后流场条带与涡结构分布

图 3 是展向行波电磁力分别作用于层流和槽道湍流前后，层流和槽道湍流壁面阻力实时曲线，图 3 中均在 t =200 时刻加入控制，在层流中，加入展向行波电磁力后，阻力突然增大，随后逐渐平稳并接近层流阻力.在湍流中在未加控制时，槽道湍流壁面阻力较大，而加入电磁力控制后，槽道湍流壁面阻力迅速减小，平均减阻约 33%.

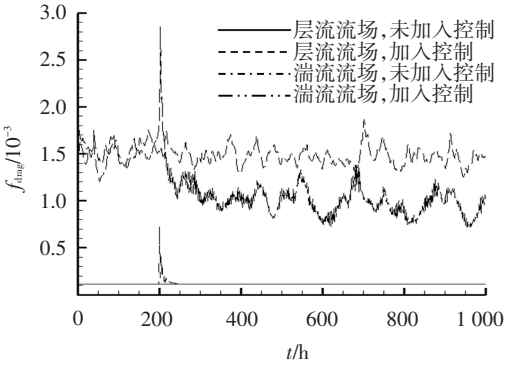


图 3　控制前后，层流与湍流阻力变化

3　结果讨论

3.1　雷诺应力离散点

对某 y^+平面，可画出控制前的离散雷诺应力分布和控制后的离散雷诺应力分布.如果将两图相减，即除去相同的点，便可得到流动控制前后，离散雷诺应力的变化图，如图 4 所示.因此，根据图 4，可将流动控制理解为将空心点状态转变为实心点状态.图 4(a)为 y^+=2.85 处，流动控制前后的离散雷诺应力变化图.因为该平面位于黏性子层，其雷诺应力分布对壁面摩擦力影响极大，即权重极大.由图 4 可以看出，无论流场控制前还是控制后，离散雷诺应力皆集中在 u'轴附近，其($u'v'$)值很小.因为，黏性子层内的流动不是层流，少量流体的运动方向不与壁面平行，即 v'不为零，故存在微小的旋涡和湍流脉动.流动控制后，黏性子层内的流向速度的脉动强度显著下降，但法向速度的脉动强度有所增加，这是由展向行波电磁力诱导所致.图 4(b)~图 4(d)分别对应于 y^+=21.10，43.40，141.00.流动控制前，离散点分布较为分散，具有较大的流向和法向的脉动速度.流动控制后，离散点向内部集中，表明流向和法向的脉动强度有所减弱，但是 y^+=21.10 截面，控制后的流场中法向脉动速度有所增加.当 y^+= 141.00 时，已超出流向涡的抬升高度，此处无论是否加入控制，其流场中的 u'、v'离散点都向原点集中.

3.2　平均雷诺应力分布

上述研究表明，展向行波电磁力的控制，极大程度上改变了雷诺应力离散点的分布，这与平均雷诺应力分布的规律是相应的.图 5 为展向行波电磁力控制前后流场的$\overline{u'v'}$值分布，左侧(即 $y\in[-1,0]$)为控制壁面，右侧(即 $y\in[0,1]$)为无控制壁面.从整体上看，在电磁力控制后，流场中的$\overline{u'v'}$值均有所减小，这直接减小了壁面阻力；从局部来看，壁面附近的$\overline{u'v'}$值减小幅度较小，展向行波电磁力诱导导致产生的雷诺应力比较大，但仅限图中圈出的区域，对于距离壁面稍远的区域，$\overline{u'v'}$值减小幅度较大.文献[12]提到湍流壁面阻力是所有离散雷诺应力加权的和，展向行波电磁力控制后，流场的雷诺应力有较为明显的下降，因此壁面阻力自然也会减小.

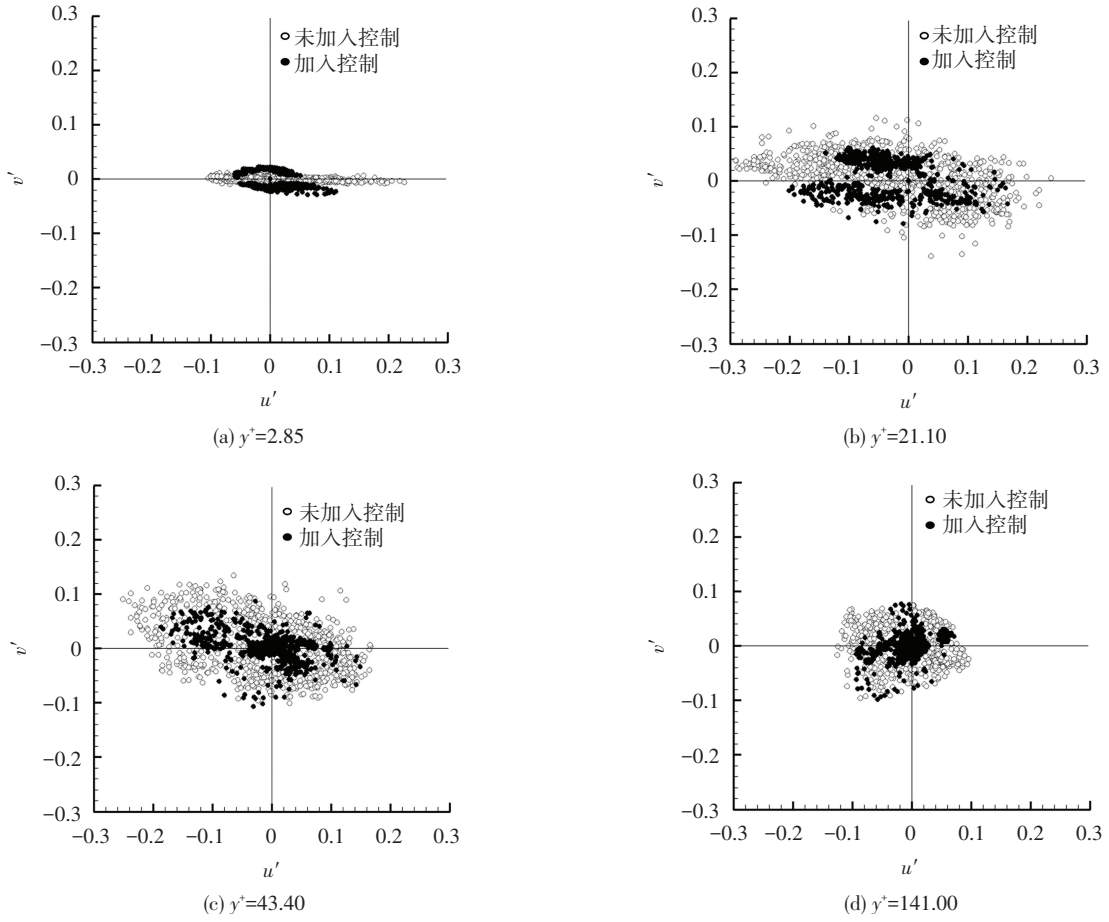


图 4　电磁力控制前后离散雷诺应力分布

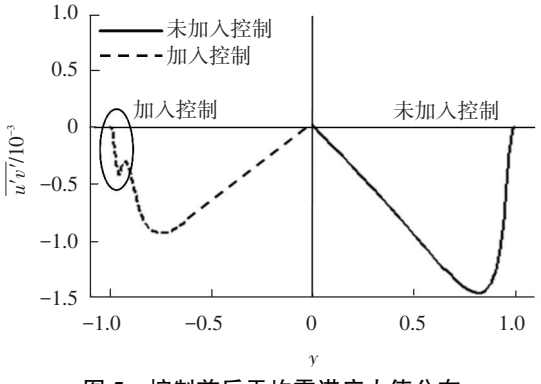


图 5　控制前后平均雷诺应力值分布

3.3　雷诺应力二维谱分布

物理量的谱对于分析物理现象具有重要意义. 湍流脉动的能谱可以表示湍流脉动强度在各种尺度上的分布.空间相关函数的傅里叶变换称为对应相关变量的波谱,它表示湍流脉动量在空间尺度上的分布,其高波数成分表示长度尺度小的湍流脉动,低波数成分表示长度尺度大的湍流脉动[16].图 6(a)为 $y^+=2.85$ 处,流动控制前后的雷诺应力的二维波谱分布图.因为该平面位于黏性子层,其脉动较小.可见,未加控制情况下,展向上存在较多脉动,但是脉动强度比较小,流向上的湍流脉动很小.在加入控制之后,由展向行波电磁力诱导产生的展向脉动比较大,因此在波谱分布图上存在一个很明显的波谱强度峰值区域.雷诺应力波谱向着小波数方向,也即大尺度涡方向发展,这个规律对该位置湍流强度有较大影响,其直接影响结果是导致该位置的湍流强度减小,上述提到雷诺应力主要产生于条带结构的猝发和下扫过程,湍流强度减小势必导致猝发强度减小,进而导致雷诺应力的减小.图 6(b)、(c)给出了 $y^+=21.10$、$y^+=43.40$ 位置平面上,雷诺应力的二维波谱分布.可见,在控制前的湍流中,雷诺应力的波谱分布比较分散,分布区域比较大,在 $k_x<20$,$k_z<15$ 的区间内,波谱强度比较大.而控制后的流场中,雷诺应力的谱分布则相对比较集中,相比之下分布区域也小了很多,绝大部分分布在 $k_x<10$,$k_z<10$ 的区间内,但由于展向行波电磁力诱导导致的较大展向脉动,波谱的强度并没有减小很多,这说明控制后,流场中的脉动受到了一定程度的抑制作用.当 $y^+=141.00$(图 6(d))时,该平面所在的位置已超出控制后流向涡的抬升高度,无论流场控制前还是控制后,雷诺应力的二维波谱分布范围都比较小,相对于图 4(b)、(c)两个平面位置的波谱强度也有所减小,总体来说控制前后波谱分布变化较小,说明流场中的脉动受到的抑制作用已不明显.

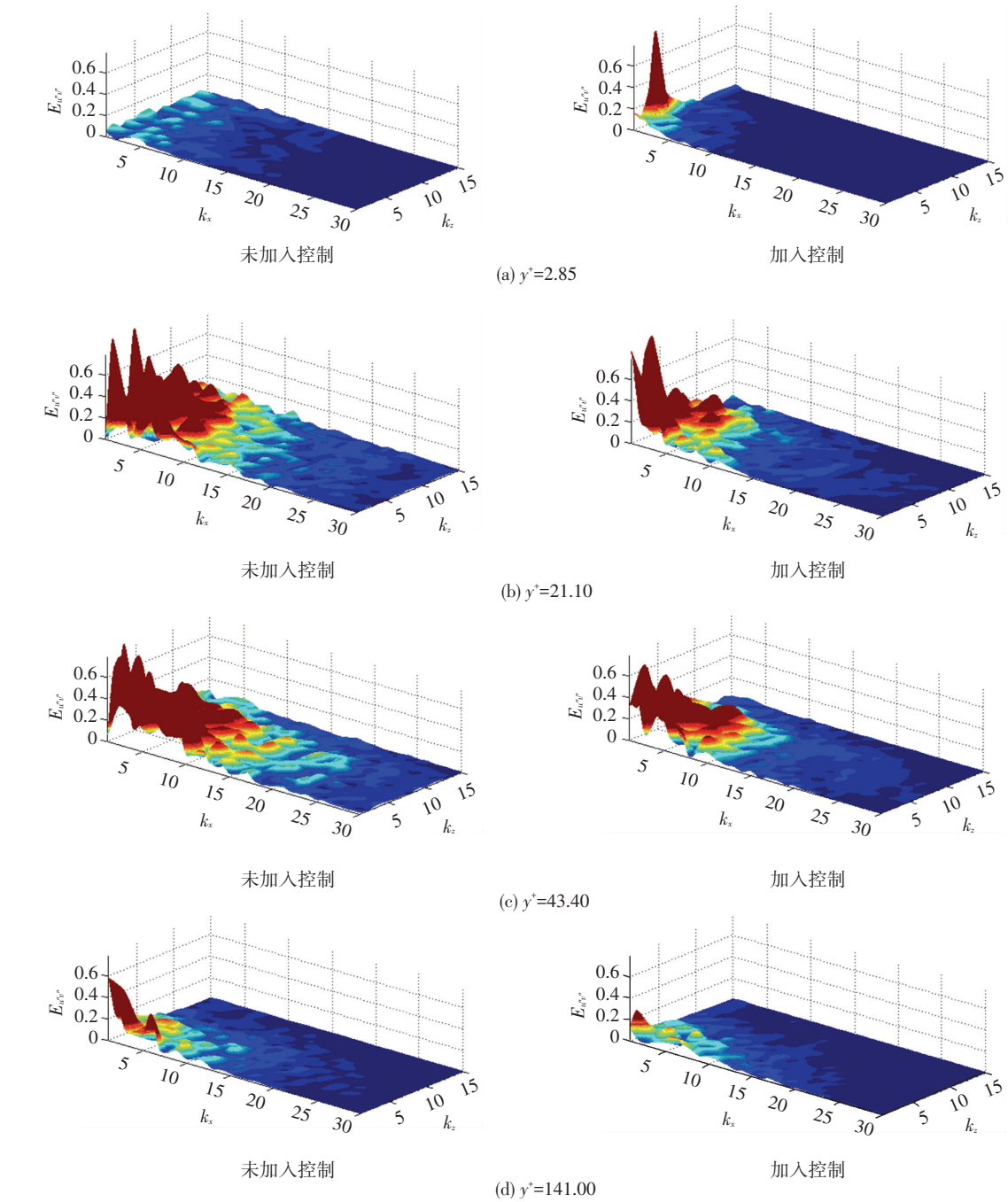


图 6　控制前后,不同平面上的雷诺应力波谱分布

4　结　论

1)在合适控制参数条件下,展向行波电磁力可以有效控制槽道湍流,并使壁面阻力大幅下降.

2)展向行波电磁力不仅使近壁条带结构基本消失,形成一条条加宽的低速条带,而且使控制后的流场中涡结构几乎消失,而仅剩下由展向行波电磁力诱导产生的带状负涡结构,这种特征完全取决于展向行波电磁力的特性.

3)通过对雷诺应力离散点分布、平均雷诺应力分布以及雷诺应力波谱分布规律的分析,可以看出展向行波电磁力在一定程度上抑制了湍流的脉动,减小了雷诺应力,从而也减小了壁面阻力.

参考文献

[1] 范宝春, 董刚, 张辉. 湍流控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011:103-106.

[2] HENOCH C, STACE J. Experimental investigation of a salt water turbulent boundary layer modified by an applied streamwise magnetohydrodynamic body force[J]. Physics of Fluids, 1995, 7(6): 1371-1383.

[3] KIM S J, LEE C M. Investigation of the flow around a circular cylinder under the influence of an electromagnetic force[J]. Experiments in Fluids, 2000, 28(3): 252-260.

[4] HUANG Leping, FAN Baochun, DONG Gang. Turbulent

drag reduction via a transverse wave travelling along streamwise direction induced by Lorentz force[J]. Physics of Fluids, 2010,22(1):015103(1-8).
[5] BERGER T W, KIM J , LEE C, et al. Turbulent boundary layer control utilizing the Lorentz force [J]. Physics of Fluids, 2000, 12(3): 631-649.
[6] PANG Junguo, CHOI K S. Turbulent drag reduction by Lorentz force oscillation [J]. Physics of Fluids, 2004, 16(5): 35-38.
[7] DU Yiqing, KARNIADAKIS G E. Suppresing wall turbulence by means of tranverse traveling wave [J]. Science, 2000, 288(5469):1230-1234.
[8] XU PENG, CHOI K S. Boundary layer control for drag reduction by Lorentz forcing [C]// Proceedings of the IUTAM Symposium on Folw Control and MEMS. London: Springer Netherlands,2006:19-22.
[9] ZHAO H, WU J Z, LUO J S. Turbulent drag reduction by travelling wave of flexible wall [J]. Fluid Dynamics Research, 2004, 34(3):175-198.
[10] CHOI K S, JUKES T, WHALLEY R. Turbulent boundary-layer control with plasma actuators [J]. Philosophical Transactions of the Rayal Society A, 2011, 369(1940): 1443-1458.
[11] 黄乐萍，范宝春. 展向行波状 Lorentz 力的波数对壁湍流控制的影响[J]. 宇航学报, 2012,33(3):305-310.
[12] FUKAGATA K, IWAMOTO K, KASAGI N. Contribution of Reynolds stress distribution to the skin friction in wall-bounded flows [J]. Physics of Fluids, 2002, 14(11): 73-76.
[13] BEWLEY T R, AAMO O M. A 'win-win' mechanism for low-drag transients in controlled two-dimensional channel flow and its implications for sustained drag reduction[J]. Jounal of Fluid Mechanics, 2004, 499: 183-196.
[14] 吴文堂，洪延姬，范宝春. 确定分布电磁力调制下的槽道湍流涡结构[J]. 物理学报, 2014,63(5): 054702.
[15] ZHOU J, ADRIAN R J, BALACHANDAR S, et al. Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow[J]. Jounal of Fluid Mechanics, 1999, 387: 353-396.
[16] 张兆顺. 湍流[M]. 北京：国防工业出版社, 2002: 27-29.

（编辑　张　红）

（上接第 58 页）

4）掺加引气剂可以显著提高陶泥混凝土抗冻性能.

参考文献

[1] 曾令可，金雪莉，刘艳春. 陶瓷废料回收利用技术[M]. 北京：化学工业出版社，2010.
[2] 王功勋. 陶瓷抛光砖粉作辅助胶凝材料的火山灰性[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(7):1229-1234.
[3] 钟明峰，张志杰，王功勋. 常温与蒸压条件下陶瓷抛光砖粉的反应活性及其应用研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2010(4):72-74.
[4] WANG Gongxun, SU Dagen. Performance and mechanism analysis of lime-polishing powder inorganic binder [J]. Journal of Shanxi University of Science & Technology, 2008, 26(5):10-15.
[5] 苏达根，王功勋，钟小敏. 陶瓷抛光砖粉的组成及火山灰性研究[J]. 水泥技术, 2008(4): 22-24.
[6] 王功勋，苏达根. 石灰-抛光砖粉结合料的性能研究[J]. 公路工程，2008, 33(5): 65-68.
[7] 王功勋，苏达根，钟小敏. 陶瓷抛光砖粉对混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2008(10): 64-66.
[8] 王功勋，苏达根，赵一翔. 陶瓷抛光砖粉制备蒸压硅酸盐制品[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2008, 36(7):124-127,133.
[9] 侯建龙. 陶泥混凝土抗渗性及碳化性能试验研究[D]. 沈阳：东北大学，2012.
[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会.GB/T 12957—2005 用于水泥混合材的工业废渣活性试验方法[S].北京：中国标准出版社，2005.
[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会.GB/T 2847—2005 用于水泥中的火山灰质混合材料[S].北京：中国标准出版社，2005.
[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].北京：中国建筑工业出版社，2010.
[13] 钱觉时. 粉煤灰特性与粉煤灰混凝土[M]. 北京：科学出版社，2002.
[14] 秦志生. 陶泥对混凝土和易性及抗压强度影响试验研究[D]. 沈阳：东北大学，2011.

（编辑　张　红）