

文章编号: 1000-8055(2007)06-0980-06

温度边界层对壁湍流多尺度相干结构的影响

田 砚, 姜 楠

(天津大学 机械工程学院, 天津 300072)

摘 要: 用热线风速仪以高于对应最小湍流时间尺度的分辨率精细测量了风洞中壁面加热平板湍流边界层不同法向位置流向速度分量的时间序列信号, 与常温情况相比, 热对流加速了壁湍流中流体的动量、质量和能量的交换, 加快了湍流边界层的发展; 用子波分析方法研究了壁面加热对壁湍流多尺度相干结构喷射和扫掠条件相位平均波形的影响, 显示热对流明显增大了缓冲层相干结构扫掠过程和喷射过程的强度, 是增强壁湍流中流体的动量、质量和能量交换的根本原因。

关 键 词: 壁湍流; 温度边界层; 多尺度相干结构; 子波分析

中图分类号: O357

文献标识码: A

Experimental investigation of effects of temperature boundary layer on multi-scale coherent structures in wall turbulence

TAIN Yan, JIANG Nan

(Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjing 300072, China)

Abstract: The velocity time sequence at different vertical locations of turbulent boundary layer in wind tunnel was finely measured using a hot-wire anemometer, at a resolution higher than the corresponding minimum turbulence time scale. As compared with normal temperature, the heat convection could accelerate the exchanges of momentum, mass and energy in wall turbulence, and also facilitate the development process of turbulent boundary layer. Wavelet analysis method was employed to study the effects of temperature boundary layer on phase-averaged waveforms of multi-scale coherent structures during ejection and sweep process in wall turbulence. The research reveals that heat convection enhances dramatically the strength of coherent structures, contributing much to the exchange of momentum, mass and energy in wall turbulence.

Key words: wall turbulence; temperature boundary layer; multi-scale coherent structure; wavelet analysis

湍流是自然界和工程技术中广泛存在的一种极为复杂的流体流动现象, 同时也是工程技术和经典物理学尚未解决的一个难题, 工程技术中的大量问题与湍流问题密切相关. 同样, 热物理工程中的大量问题也与湍流问题密切相关, 例如, 冷凝

器的强化传热, 燃烧器中的热交换, 喷管的紊动热射流等.

在早期的湍流研究中, 湍流被认为是流体质点的完全随机运动, 雷诺(1895)将不规则的湍流场分解为平均场和不规则的脉动场, 从而将研究

收稿日期: 2006-11-21; 修订日期: 2007-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助(10472081); 教育部中国高等学校新世纪优秀人才计划资助;

天津市科技发展计划资助(06TXJJJC13800)

作者简介: 田砚(1972), 女, 天津人, 助工, 硕士, 主要从事实验流体力学研究.

的重点引向湍流脉动特性. 20 世纪中叶, 随着流体力学实验技术和计算机技术的迅速发展, 能够对湍流的脉动特性进行比较深入、细致的研究. 通过大量的湍流实验, 在射流、尾流、混合层和湍流边界层中相继发现了有组织的大尺度运动, 这种大尺度运动的强度、尺度和结构形态对一定类型的流动具有普遍性和可重复性, 因而被称为相干结构(亦称拟序结构).

1967 年, 美国斯坦福大学的 Kline 小组^[1]对湍流近壁区条纹结构进行的全面细致的观测工作标志着开始对湍流近壁区域相干结构进行系统的研究. 相干结构的猝发过程在局部时空范围内对壁湍流雷诺应力具有很大的贡献, 是壁湍流产生的主要原因. 相干结构的发现是湍流研究中的一次重大突破, 使湍流研究进入了一个新阶段. 现在相干结构已成为公认的湍流中最重要的结构. 它对湍流的维持、演化、和发展起着重要的作用, 湍流相干结构的理论和实验研究, 为认识湍流的本质开辟了新的途径. 开展相干结构研究的最终目的是通过研究相干结构的动力学行为和规律, 建立符合相干结构机理的数学模型和湍流模式, 在工程中更加准确地预报湍流, 探索在工程中通过控制相干结构控制湍流的有效途径^[2]. 著名流体力学家 Liepmann^[3]在 1979 年就已经预言, 可以通过控制相干结构控制湍流. 现在控制相干结构已成为控制湍流的有效途径, 在减小壁面摩擦阻力、降低流动噪声方面具有重要的应用前景, 对于提高管道的运输效率、降低能耗等方面具有重要的工程应用价值.

湍流的脉动速度信号实际上并不是完全随机和杂乱无序的, 而是由不同尺度结构的信号迭加而成的貌似随机和杂乱无序的信号. 湍流脉动包含着关于不同尺度湍流结构非常丰富的信息, 对湍流脉动速度信号所包含的不同尺度的信息进行深入研究, 需要将湍流脉动速度信号进行分解成不同尺度的结构^[4]. 最近的湍流高精度实验测量和高精度直接数值模拟结果表明, 在湍流的不同尺度结构中, 同样存在着相干结构, 条件相位平均结果表明, 它们的发展和演化过程具有共同的特征, 剪切湍流中的多尺度相干结构对湍流的间歇性产生重要影响.

1 子波分析简介

子波分析是近几年发展起来的一种新的信号分析方法^[5-6], 通过信号与一个被称为子波的解析

函数进行卷积, 将信号在时域与频域空间同时进行分解, 在不同尺度上观察信号中不同时刻的局部多尺度行为, 对湍流多尺度局部结构检测具有明显的优势. 作为一种新的数学工具, 子波变换可以代替条件采样方法检测和提取壁湍流相干结构.

设一维湍流信号 $u(t)$ 相对于子波函数 $W_{ab}(t)$ 的子波分析定义为

$$W_u(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) \overline{W_{ab}(t)} dt \tag{1}$$

其中, 子波函数族 $W_{ab}(t)$ 是由子波的母波函数 $W(t)$ 经过平移(位置参数 b)和伸缩(尺度参数 a)变换而来

$$W_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} W\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{2}$$

子波母函数具有消去性, 从而子波函数也具有消去性

$$\int_{-\infty}^{+\infty} W(t) dt = 0 \tag{3}$$

公式(3)说明子波函数是一定尺度下局部范围内的振荡, 其整体平均值为零, 即局部振荡幅值必须有正有负, 但正值和负值总的绝对值必须相等. 虽然子波母函数的具体表达形式可以不尽相同, 但所有子波函数都具有上述共同性质.

对湍流信号 $u(t)$ 进行确定位置 b 、确定尺度 a 的子波分析就相当于对 $u(t)$ 中以 b 为中心、长度为 $2a$ 的一段信号 $t \in [b-a, b+a]$ 与一定性状的子波函数 $W_{ab}(t)$ 进行尺度范围为 $2a$ 的局部振荡加权互相关分析, 如果其相关性高, 表明该信号在该处含有该子波函数性状的相干结构成分, 使得信号在该处与该形状的子波函数具有较好的相似性. 其中子波函数在各点的函数值为权值, 权值有正有负, 但总权值之和必须为零. 另一方面, 由于子波函数在各点的函数权值有正有负, 但总权值的和为零, 湍流信号 $u(t)$ 的子波系数 $W_u(a, b)$ 还表示湍流信号 $u(t)$ 在局部时刻 b 和一定尺度 $2a$ 范围内的局部平均变化的程度^[7,8]. 根据子波函数种类和性状的不同, 对于反对称或近似反对称形状的子波函数, 如 Harr 子波、Gaussian 的一阶导数, $W_u(a, b)$ 表示湍流信号 $u(t)$ 一阶(奇数阶)局部平均变化, 类似于一阶(奇数阶) $\frac{\partial u}{\partial t}$ 导数在一定尺度范围内的局部平均值; 对于对称或近似对称形状的子波函数, 如 Mexican Hat 子波和 French Hat 子波, $W_u(a, b)$ 表示湍流信号 $u(t)$ 二

阶(偶数阶)局部平均变化,类似于二阶(偶数阶)

$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ 导数在一定尺度范围内的局部平均值.

总之,不同种类和性状的子波基函数可以具有不尽相同的具体表达形式.湍流信号相对于不同子波函数的子波变换也反映了湍流多尺度结构不同的数学物理性质.子波函数的多样性也正可以描述不同类型湍流中多尺度结构及其动力学性质的多样性.

基于子波变换的 p 阶瞬时结构函数为 $|W_u(a, b)|^p$, 其统计平均值为 $\langle |W_u(a, b)|^p \rangle_b$, 其中 $\langle \rangle_b$ 代表对位置 b 总体统计平均运算.

特别地, $p = 2$ 时根据子波系数定义瞬时强度因子定义为

$$I(a, b) = \frac{|W_u(a, b)|^2}{\langle |W_u(a, b)|^2 \rangle_b} \quad (4)$$

它描述了每一个确定时刻和每一个确定尺度的单个湍流结构的平均相对强度.

$$E(a) = \langle |W_u(a, b)|^2 \rangle_b \quad (5)$$

描述了每一个确定时刻和每一个确定尺度的单个湍流结构所拥有的湍流平均脉动动能.

$p = 4$ 时,平坦因子定义为

$$F(a) = \frac{\langle |W_u(a, b)|^4 \rangle_b}{\{ \langle |W_u(a, b)|^2 \rangle_b \}^2} \quad (6)$$

公式(6)描述了发生概率比较小而幅值比较大的子波系数 $|W_u(a, b)|$ 在 $|W_u(a, b)|^4$ 的统计平均中所起的作用,反映了 $|W_u(a, b)|$ 的概率密度分布函数的平坦宽度.湍流间歇性和多尺度相干结构关系密切,可以利用子波变换提取单个湍流相干结构^[9-10].

为了在所有的尺度中系统地检测相干结构,采取一种后验的选择门限值的方法,即利用在每一个尺度下使平坦因子 $F(a)$ 小于等于3的方法来选择门限值 L .这种方法可以简单地概括为:首先在每个子波尺度上计算平坦因子 $F(a)$,如果在某尺度上平坦因子小于3,则不检测相干结构.如果它大于3,那么就在 $I(a, b)$ 函数上假设一个门限值 L ,将瞬时强度因子 $I(a, b)$ 中大于该门限值的点的子波系数 $W_u(a, b)$ 置为零,然后重新计算平坦因子,如果平坦因子仍然大于3,那么降低门限值,重复上述过程直到使平坦因子等于(或小于)3.最后对提取出的相同尺度的原始速度信号进行相位平均,若某尺度下某位置 b 的瞬时强度因子 $I(a, b)$ 大于该尺度的门限值 L ,将以 b 为中心,前后尺度各为 a 的原始速度信号提取出来.对

所有提取出的同一尺度的相干结构进行相位平均,得到该尺度相干结构的相位平均波形,以此研究相干结构的典型发展和演化过程.

这个方法选择了一些区间间断的局部信号,这些局部信号的作用是使整体信号在每一尺度的子波系数的概率密度函数在小概率部分是强烈的非高斯正态分布的.检测出相干结构以后,就将信号分解为两部分.一部分信号使所有尺度的子波系数具有准高斯概率密度分布函数,另一部分信号是多尺度相干结构成分,是使湍流产生奇异标度律和间歇性的原因.

2 实验设备和技术

实验所用风洞为天津大学流体力学实验室的 DQS-1 型多功能空气动力学实验台,该多功能空气动力学实验台实验段长 345 mm,横截面为 120 mm × 50 mm 的矩形.来流背景湍流度小于 2%.

实验用平板为铝板,长 300 mm,宽 50 mm,厚 5 mm,导热系数为 236~240 W/m·℃,平板平行于气流来流方向,从实验段入口处沿实验段中心轴线安装,平板前缘为对称的楔形,在距离平板前缘 2.5 mm 处放置了直径 1 mm 的绊线.在铝板的背面加装了半导体元件,其尺寸为 40 mm × 40 mm × 4 mm,当通电以后,一面为冷面,另一面为热面.用不同的面贴在铝板上,可以实现对铝板的加热或制冷.半导体元件的最大功率为 41 W,输出功率可以由输入电压在 0~15 V 范围内调节.当固壁被加热时,靠近固壁的流体也被加热,因此,近壁流体的温度高于外层流体的温度.

实验用测速仪为天津大学流体力学实验室引进的美国 TSI 公司 IFA300 型恒温热线风速仪.为了实现近壁测量,在本实验中使用的热线探头为 TSF1210-T1.5 型单丝热线探头,热线敏感材料为直径 2.5 μm 的钨丝.每一个探针在测量前都单独进行了标定.实验时的采样频率为 50 kHz,每点数据量为 1 048 576.

用热线风速仪测量了距前缘 200 mm 处壁面加热前后平均速度剖面,发现加热条件在非常靠近壁面的区域,明显改变了平均速度剖面的趋势,为了进一步探讨该种变化的机理,采用前述方法对原始速度信号进行了子波分析,并在提取相干结构的前提下,按照 $du/dt > 0$ 对应扫掠过程, $du/dt < 0$ 对应喷射过程的原则,分别对比了不同法向位置两个过程的条件相位平均波形.

图1是在不同的自由来流速度(不同自由来

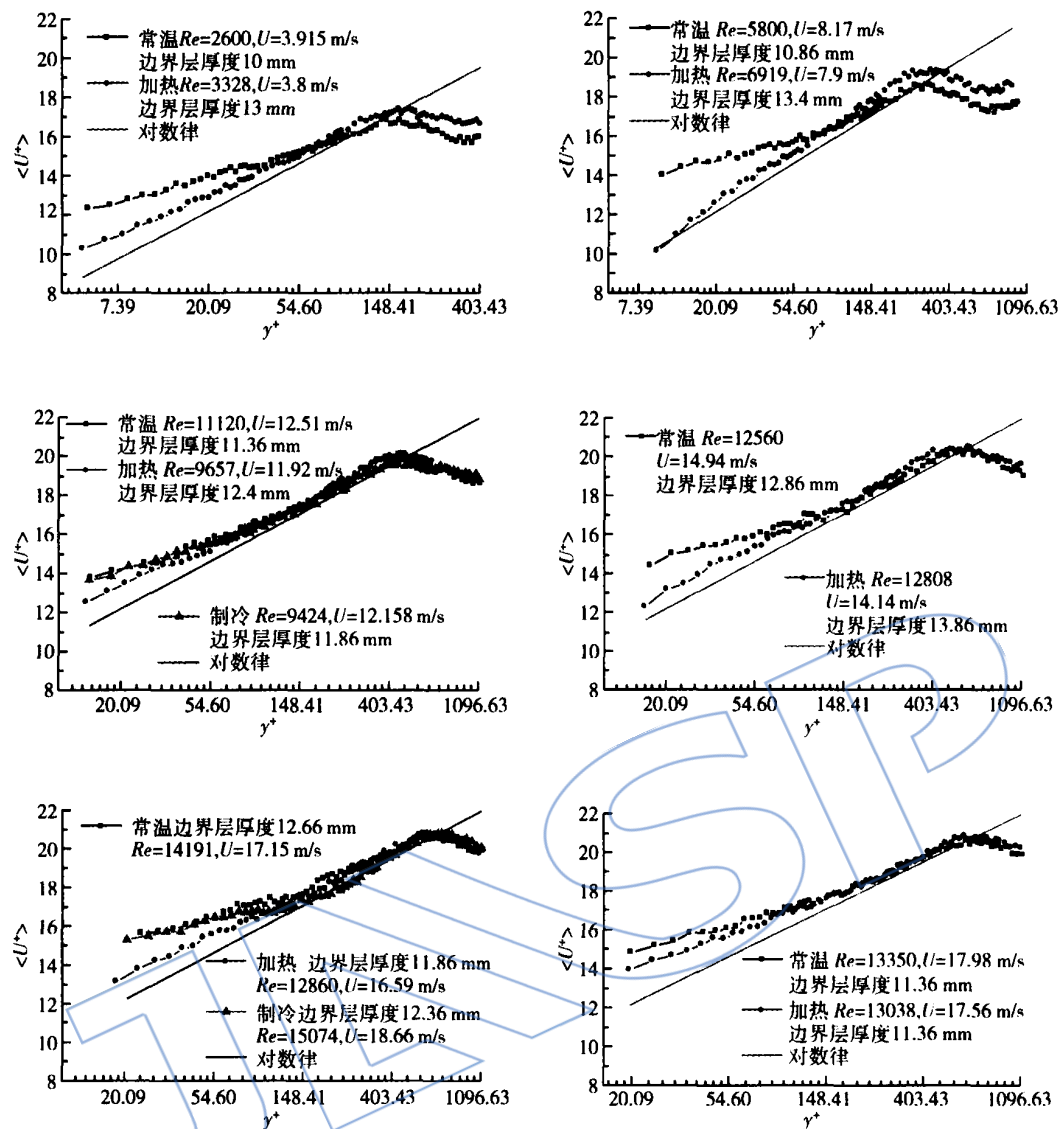


图 1 湍流边界层平均速度剖面
Fig. 1 Mean velocity profile of turbulent boundary layer

流雷诺数) 壁面加热和壁面常温条件下用热线风速仪测量的平板湍流边界层平均速度剖面与对数律平均速度剖面的对照. 从图 1 可以看出, 在壁面常温的条件下, 近壁区缓冲层速度分布比较明显, 与对数律存在较大偏离, 而在壁面加热条件下, 平均速度剖面与对数律更加接近, 说明壁面常温条件下缓冲层较厚, 热线探针还能测量到, 而在壁面加热条件下缓冲层较薄, 热线探针已经很难测量到. 说明壁面加热形成的热对流加速了壁湍流中流体的动量、质量和能量的交换, 加快了湍流边界层的发展.

3 实验结果分析与讨论

图 2 为在法向位置 $y^+ = 20$ 处对应缓冲层位

置提取出的壁面加热和壁面常温条件下相干结构扫掠过程的条件相位平均波形. 图 3 为同一位置相干结构喷射过程的条件相位平均波形. 图中第 i 尺度对应的时间尺度为 $2^i \times$ 采样间隔. 图中纵轴为瞬时脉动速度, 横轴为时间. 壁面加热和壁面常温条件下的相干结构扫掠过程和喷射过程条件相位平均波形形状基本一致, 具有一定的相似性, 这说明相干结构发展演化的动力学过程具有一些共同特征: 在扫掠过程的时间历程中, 首先是一个缓慢的减速过程, 然后是一个突然的急剧加速过程, 这一部分的作用非常短暂, 但作用最为强烈, 在物理上表现为湍流边界层外区的高速流体向壁面的剧烈扫掠, 使测量点当地速度急剧增加, 在此过程中流体产生较大的剪切摩擦阻力. 在喷射过

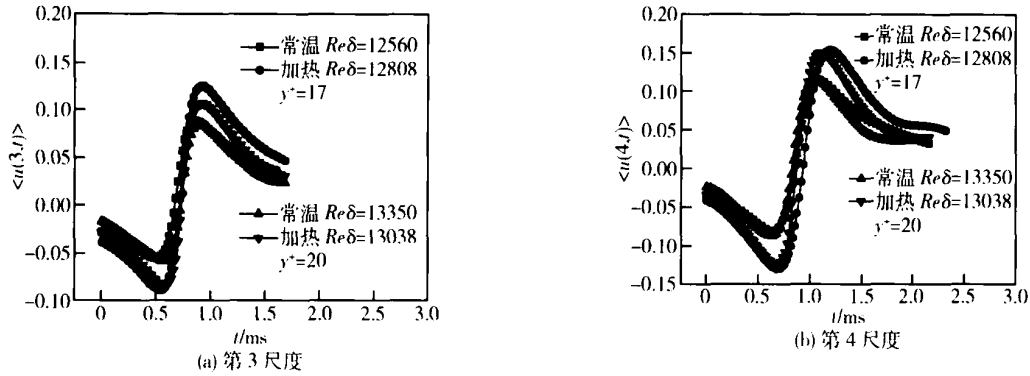


图 2 缓冲层相干结构扫掠的条件相位平均波形

Fig. 2 Conditional phase averaged waveform of coherent structure in sweep process in buffer layer

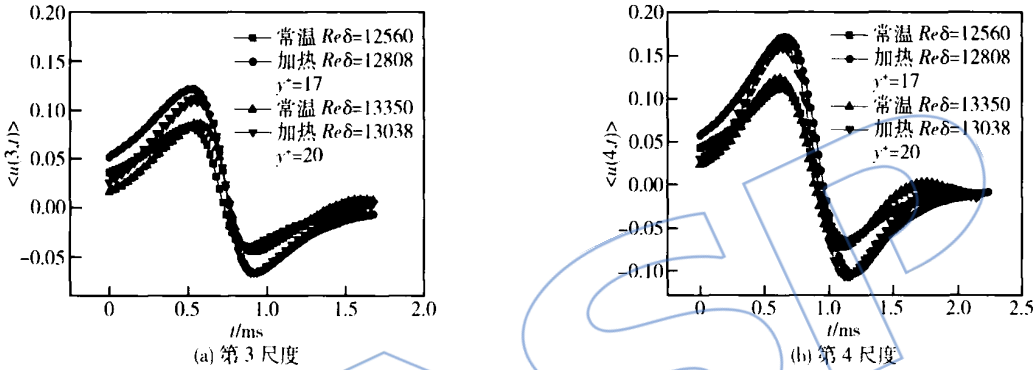


图 3 缓冲层相干结构喷射的条件相位平均波形

Fig. 3 Conditional phase averaged waveform of coherent structure in eject process in buffer layer

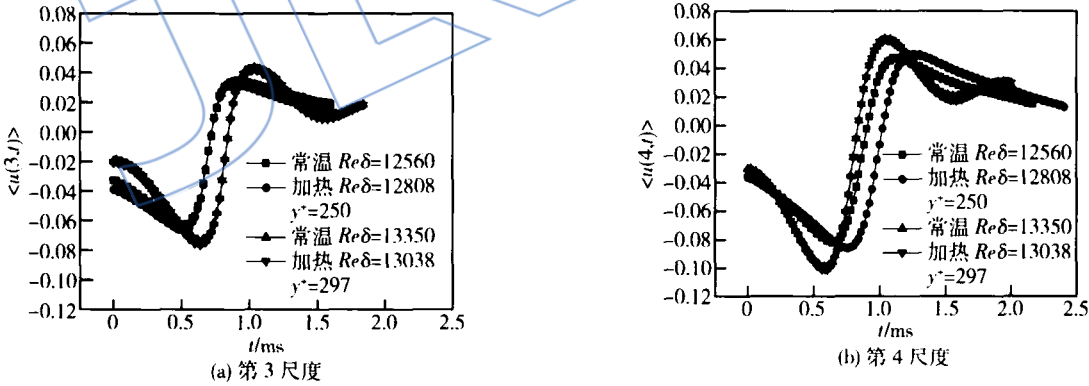


图 4 对数层相干结构扫掠的条件相位平均波形

Fig. 4 Conditional phase averaged waveform of coherent structure in sweep process in logarithmic layer

程的时间历程中, 首先是一个缓慢的加速过程, 然后是一个突然的急剧减速过程, 这一部分的作用非常短暂, 但作用较为强烈, 在物理上表现为湍流边界层靠近壁面内区的低速流体抬升远离壁面, 低速流体到达测量点后, 使测量点当地速度减少。

在壁面加热条件下, 湍流边界层近壁区域缓冲层相干结构扫掠过程和喷射过程的强度比壁面常温明显增大, 说明壁面加热形成的温度边界层

热对流加剧了湍流边界层近壁区域的湍流脉动, 增强了壁湍流中流体的动量、质量和能量的交换。

图 4 为在法向位置 $y^+ = 300$ 处对应层数位置提取出的壁面加热和壁面常温条件下相干结构扫掠过程的条件相位平均波形。图 5 为同一位置相干结构喷射过程的条件相位平均波形。在此区域, 壁面加热的影响已经不明显, 壁面加热和壁面常温条件下相干结构扫掠过程和喷射过程的强

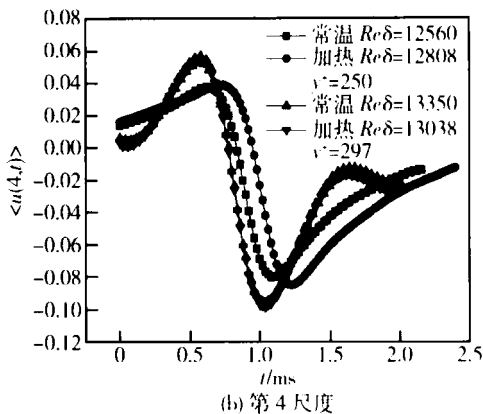
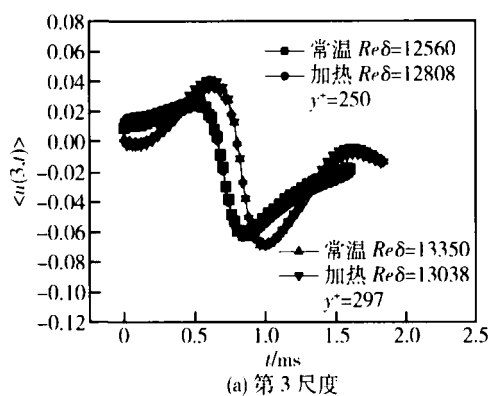


图5 对数层相干结构喷射的条件相位平均波形

Fig. 5 Conditional phase averaged waveform of coherent structure in eject process in logarithmic layer

度已没有明显区别. 说明壁面加热形成的温度边界层热对流的影响只限于近壁区域, 而对湍流边界层外区的影响不大.

4 结 论

本文用热线风速仪以高于对应最小湍流时间尺度的分辨率精细测量了风洞中壁面加热和壁面常温平板湍流边界层不同法向位置流向速度分量的时间序列信号, 比较了壁面加热和壁面常温平板湍流边界层平均速度剖面, 用子波分析方法研究了壁面加热对壁湍流多尺度相干结构喷射和扫掠条件相位平均波形的影响. 主要结论如下:

(1) 壁面加热形成的温度边界层热对流加剧了湍流边界层近壁区域的湍流脉动, 增强了壁湍流中流体的动量、质量和能量的交换, 使缓冲层变薄, 加快了湍流边界层的充分发展.

(2) 壁面加热形成的温度边界层热对流使湍流边界层近壁区域缓冲层相干结构扫掠过程和喷射过程的强度比壁面常温明显增大, 是增强壁湍流中流体的动量、质量和能量交换的根本原因.

(3) 壁面加热形成的温度边界层热对流的影响只限于湍流边界层近壁区域, 而对湍流边界层对数区以外的区域影响不大.

参考文献:

- [1] Kline S J, Reynolds W C, Schraub F H, et al. The structure of turbulent boundary layer[J]. J. Fluid Mech., 1967, 30: 741-774.
- [2] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 走近湍流[J]. 力学与实践, 2002, 24(1): 1-8.

ZHANG Zhaoshun, CUI Guixiang, XU Chunxiao. Approach to turbulence[J]. Mechanics in engineering, 2002, 24(1): 1-8.

- [3] Liepmann H W, Narasimha R. Turbulence management and relaminarisation[M]. IUTAM Symposium, Bangalore, India: 1987.
- [4] 舒玮, 姜楠. 湍流中涡的尺度分析[J]. 空气动力学报, 2000, 18(增刊): 89-95.
SHU Wei, JIANG Nan. Analysis of eddy scale in turbulent flows[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2000, 18(Supply): 89-95.
- [5] Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence[J]. Annu Review Fluid Mech., 1992, 24: 395-457.
- [6] Farge M, Kevlahan N, Perrier V, et al. Wavelet and turbulence[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(4): 639-669.
- [7] LIU Wei, JIANG Nan. Three kinds of velocity structure function in turbulent flow[J]. Chinese Physics Letter, 2004, 21(10): 1989-1992.
- [8] LIU Jianhua, JIANG Nan, WANG Zhendong, et al. Multi scale coherent structures in turbulent boundary layer detected by locally averaged velocity structure function[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2005, 26(4): 495-504.
- [9] JIANG Nan, ZHANG Jin. Detecting multi scale coherent eddy structures and intermittency layer in turbulent boundary layer by wavelet analysis[J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22(8): 1968-1971.
- [10] 姜楠, 田砚. 子波分析检测壁湍流多尺度相干结构及其间歇性[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(1): 7-12.
JIANG Nan, TIAN Yan. Wavelet analysis of detecting multi scale coherent structures and intermittency in wall turbulence[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005, 26(1): 7-12.