

固壁温度对壁湍流相干结构的影响¹⁾

石建军 舒 玮

(天津大学力学系, 天津 300072)

摘要 用半导体元件对平板进行加热, 用 VITA 法和 μ -level 法两种条件采样技术研究了固壁温度对湍流相干结构的影响, 改进了 Tiedeman 等人提出的“归组”方法, 并且用“归组”的 VITA 法和 μ -level 法研究了固壁加热对湍流猝发平均周期的影响。实验结果表明, 固壁加热使得湍流脉动速度均方根值变大, 条件采样检测到的事件数量增多, 但猝发周期维持不变。

关键词 相干结构, 条件采样, 猝发, 归组

引 言

湍流边界层近壁区的相干结构在湍流动量及能量的输运中起着重要的作用, 并与减阻等重要工程问题有关, 因而受到极大重视。

相干结构产生于极靠近固壁的粘性底层, 固壁条件对其有很大影响。我们已经发现, 柔性壁^[1]、人工扰动^[2,3]和绊线^[4]对壁湍流相干结构有控制作用。本文研究固壁温度引起的近壁湍流变化, 用热线风速仪测量了三组来流流速下边界层的湍流数据, 通过加热与不加热两种情况的对比, 分析了固壁加热对相干结构的影响。

1 实验设备、仪器与基本流场

1.1 实验设备与仪器

本文是在 DQS-1 型多功能空气动力学实验台上完成的。多功能空气动力学实验台由鼓风机、流道、稳压箱、蜂窝器、阻尼网、收缩段和实验段组成。实验段长 345 mm, 横截面尺寸为 120 mm × 50 mm。来流流速在 30 m/s 左右时, 背景湍流度小于 2%。

实验用的平板为铝板, 平板前缘为对称楔形。板长 300 mm, 宽 50 mm, 沿实验段轴线安装在铝板距前缘 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来给平板加热, 其大小为 40 mm × 40 mm × 4 mm, 最大功率为 41 W, 输出功率可由输入电压在 0~15 V 范围内调节。为有效散热, 半导体元件上加装了水箱。

实验中使用的是 TSI-1050 主单元和 TSI-1210-T1.5 单丝热线探头构成的恒温式热线风速仪。热线风速仪的输出通过 KHAD-03 数据采集板采入 PC 386 兼容机。KHAD-03 数据采集板 A/D 转换精度 12 位, 最高采样频率 100 kHz, 采样频率和采样长度可由软件设定。实验中为了既不损失湍流信息, 又节省存储空间, 按照汪健生(1995)^[5]的建议, 选取采样率 5 K, 采样长度 10 K。

¹⁾国家自然科学基金资助项目的一部分。

1995-11-04 收到第一稿, 1996-06-24 收到修改稿。

1.2 基本流场

图 1 为在三种来流流速下测得的基本流场, 时均流速的剖面以无量纲坐标绘在图中, 其中 $Y^+ = Y u^* / \nu, u^+ = u / u^*, \nu$ 为运动粘度, u^* 为摩擦速度, 由测得的时均速度剖面中对数律层内的实验数据迭代求出, 取对数区中各点得到的算术平均值作为 u^* . 从图中可见, 基本流场的时均流速分布完全与湍流边界层的 spalding 公式一致, 基本流场是合格的

此外, 还测量了平板加热情况下的边界层温度分布, 测量方法见文献^[6], 并且把平均速度、速度均方根值与平均温度、温度均方根值做了比较 图 2 是速度和温度的脉动均方根值, 二者有相似的特点, 都在缓冲层达到最大值 这表明, 速度脉动最强烈的地方也是温度脉动最强烈的地方

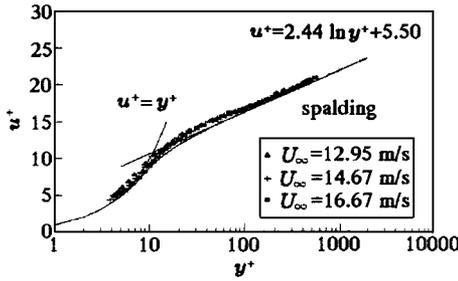


图 1 基本流场

Fig. 1 Universal velocity profiles

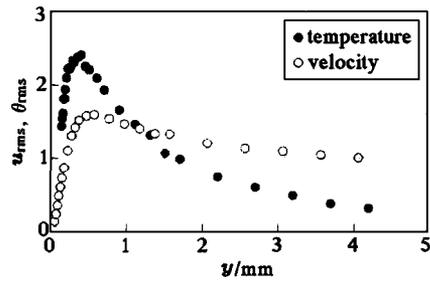


图 2 边界层脉动速度均方根值与脉动温度均方根值分布

Fig. 2 U_{rms} and θ_{rms} distribution in the boundary layer

2 实验方法

2.1 条件采样方法

2.1.1 VITA 法

VITA 法是变间隔时间平均的简称, 最早由 Blackwelder 和 Kaplan (1976)^[7]提出, 后被广泛使用 VITA 法的检测函数定义为

$$D(t) = \begin{cases} 1, & V_{ar}(t) > \kappa u_{rms}^2(I), \frac{du}{dt} > 0(II) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1.1)$$

其中

$$V_{ar} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} u^2 dt - \left(\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} u dt \right)^2 \quad (1.2)$$

VITA 法以在短时间内的能量超过一设定的门限为特征来检测相干结构的存在

2.1.2 mu-level 法

mu-level 法是 Luchik 和 Tiedeman (1987)^[8]在 u-level 法的基础上提出的, 此种方法具有简单快速而且准确(与流动显示相对比)的优点, 因此被广泛采用 mu-level 法的检测函数是

$$D(t) = \begin{cases} 1, & u < -L u_{rms} \\ 0, & u \geq -0.25 u_{rms} \end{cases} \quad (2)$$

mu-level 法以流速低于某一给定门限(条件 I)来判断一次事件的开始,以流速大于某一门限(条件 II)来判断此次事件的结束

2.2 猝发的“归组”检测方法

通常对相干结构进行条件采样时,条件采样方法检测到的每一次事件都记为一次猝发,并据此求出平均猝发周期 Bogard 和 Tiedeman (1986)^[9]将条件采样的结果与流动显示的录像对比发现,一次猝发有时由不只一次的喷射事件组成,一次猝发可能被探头检测为一次事件,也可能被检测为两次甚至多次事件.他们据此提出,应将来自于同一低速条纹的若干次事件“归组”为一次猝发.由“归组”后的结果求出的才是真正的平均猝发周期 T_B ,“归组”前的结果只应称作平均事件周期 T_E .

通过对实验数据的观察,本文同意这一观点.在本文的实验中,门限最高时的采样结果甚至是门限最低时的 4~5 倍.这使得选择哪一门限下的结果变得很困难.本文认为应对条件采样的结果进行“归组”处理.这样做的优点在于得到的平均猝发周期在很大的范围内与门限无关,从而使对猝发周期的讨论变得比较合理.

来自同一猝发的两次事件间的间隔时间应当小于来自不同猝发的两次事件间的间隔时间.这一假设,是建立“归组”方法的基础.理想情况下,两次事件之间的间隔时间的概率分布应如图 3 所示.概率分布曲线含有两个峰,一个代表来自同一猝发的事件,一个代表来自不同猝发的事件. τ_{max} 定义为来自于同一次猝发的两次事件之间的最大间隔时间.凡彼此间的间隔时间小于此值的两次事件将被归组为一次猝发,反之,记为两次猝发.

可是,从实验中得到的概率分布图中没有如此分明的界限来区分这两种事件,在概率分布图中选取 τ_{max} 远没有图 3 中理想的那样简单. Bogard 和 Tiedeman (1986)^[9], Luchik 和 Tiedeman (1987)^[8]提出了各自不同的方法,这些方法操作都很复杂,往往还要辅以流动显示录像的帮助.

Johnsson 和 Alfredsson (1984)^[10]用正弦信号研究 VITA 法时指出,VITA 法具有滤波特性,当积分平均时间 T 取为正弦信号周期的 0.7 倍时,方差达到最大值.这说明积分平均时间与猝发的持续时间有密切关系.若两个事件来自于同一次猝发,这两次事件间的最大间隔时间应该与猝发的持续时间相当,所以事件的最大间隔时间也应与积分平均时间有一定的联系.

据此,本文采用 VITA 法中的积分平均时间 T 为统计时间单位,计算了近 60 组数据的事件间隔概率分布,各组数据表现出相同的特点.这就是:在 2~3 倍积分时间处有一个峰值,代表来自于同一次猝发的事件,在 8~9 倍积分时间处出现另一个峰值,代表来自于不同次猝发的事件.图 4 是实验中得到的间隔时间概率分布图.可见,用积分平均时间作为单位统计事件间隔概率分

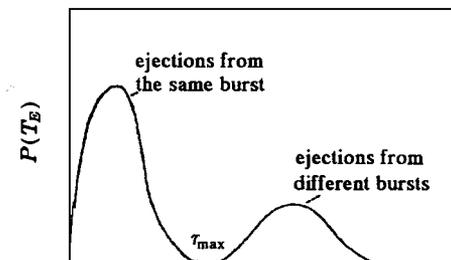


图 3 事件间隔时间概率分布(理想)

Fig 3 Probability distribution of time between events (Idealized)

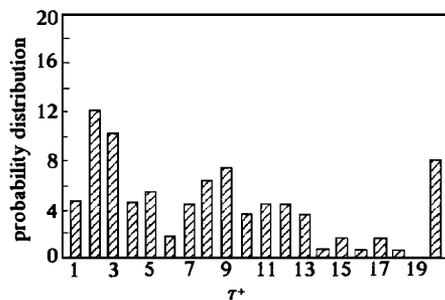


图 4 事件间隔时间概率分布(实验)

Fig 4 Probability distribution of time between events (actuals)

布, 可以获得比较明显的两个不同的峰值

从概率分布图确定 τ_{max} , 困难还在于实验得到的概率分布图中两峰之间的谷值不十分明显这是由于猝发具有一定的随机性, 两种事件(一种来自于同一次猝发, 一种来自于不同次猝发)在时间间隔上应有重叠 在这种情况下, 取三倍积分平均时间取作 T_{max} 来区分两种事件, 这样做主要因为: 2~ 3 倍积分平均时间处的概率分布值远大于 4~ 7 倍处的值 本文对 60 组不同数据计算后得出, 选择三倍积分时间作为 τ_{max} 造成的误差占全部事件总数的 10 左右

根据以上理由, 本文选择三倍积分平均时间作为 τ_{max} , 对条件采样结果进行了“归组”处理, 凡彼此间间隔小于三倍积分平均时间的事件被“归组”为一次猝发, 并由此求出平均猝发周期

3 实验结果与分析

用铝板作为实验平板, 在三种来流风速下, 分别测量了平板为常温和加热两种情况下的流向瞬时流速, 分析了固壁加热对湍流平均量以及猝发周期的影响, 流动参量见表 1.

表 1 流动参量

Table 1 Flow parameters

Parameters	Constant temperature			Heating		
	Wall temperature()	21.8	19.5	19.5	57.3	55.6
Incident velocity U (m/s)	12.95	14.67	16.67	12.54	14.71	16.44
Reynolds number Re_x ($\times 10^5$)	2.09	2.41	2.47	2.03	2.38	2.70
Friction velocity u^* (m/s)	0.64	0.72	0.80	0.60	0.71	0.78

从表中可见, 当外流流速相同时, 平板加热时的 u^* 值略小于平板为常温时的值 这与 Wardana 等(1994)^[11]在壁温高达数百度时的测量结果相反, 这一不同, 值得注意

3.1 固壁加热对平均量的影响

图 5 为平板加热时测得的边界层时均速度分布, 在对数区以下, 测量值偏离 Spalding 曲线对比图 1 可以发现, 固壁加热对粘性底层和缓冲层有较大影响, 对对数律层影响较小

图 6 为边界层内脉动速度均方根值的分布 空心符号代表常温, 实心符号代表加热 从图中可以看出, 在边界层外层, 固壁加热对 u_{rms} 影响很小; 在近壁区固壁加热使得 u_{rms} 值显著增大, 加热时的 u_{rms} 值比常温时大 30 左右 并且, u_{rms} 的最大值从常温的 $y^+ = 15$ 处移到了 $y^+ = 20$ 左右, 最大值点外移不是由 u^* 变化引起的, 用无量纲坐标画出的图中也清楚地表明最大值点外移了.

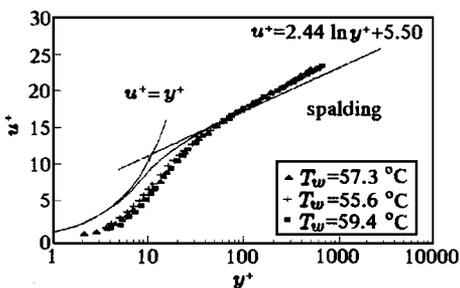


图 5 加热壁边界层平均流速分布

Fig 5 Mean velocity profiles at various wall heating

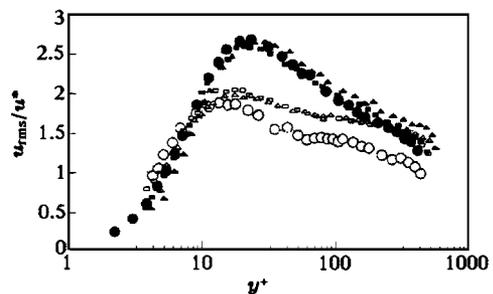


图 6 脉动速度均方根值分布

Fig 6 Turbulence intensity profiles at various wall heating

图 7, 图 8 为边界层内偏斜因子与平坦因子分布图, 符号意义同上

观察图 5~ 图 8 可以发现, 固壁加热对平均量的影响都发生在边界层的近壁区, 而在外区则没有明显影响

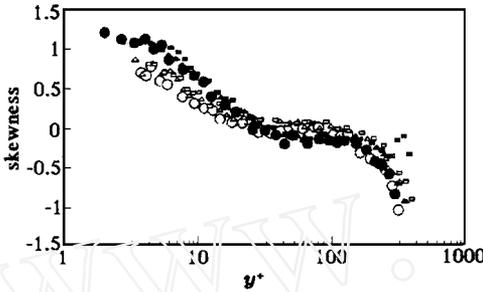


图 7 边界层偏斜因子分布
Fig 7 The skewness factors at various wall heating

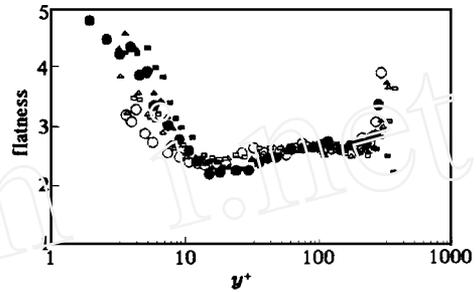


图 8 边界层平坦因子分布
Fig 8 The flatness factors at various wall heating

3.2 固壁加热对平均猝发周期的影响

本文采用目前广泛使用的适于—维信号分析的 V ITA 法和 mu- level 法两种条件采样技术, 并配合本文改进后的“归组”方法对此进行研究

图 9 是用 V ITA 法和 mu- level 法对三组实验数据条件采样的结果 横坐标为门限, 纵坐标表示平均事件频率 T_F , 空心符号表示常温壁, 实心符号表示加热壁 门限选择 0.6~ 1.4 是根据许多学者的建议, 从图 9 中可以看出, 对常温和加热两种情况, 用同一方法, 同一门限进行条件采样, V ITA 法取任何门限时, 加热时检测到的事件都多于固壁为常温的情况 与 V ITA 法稍有不同, mu- level 法在门限较高时, 二者检测结果基本相同

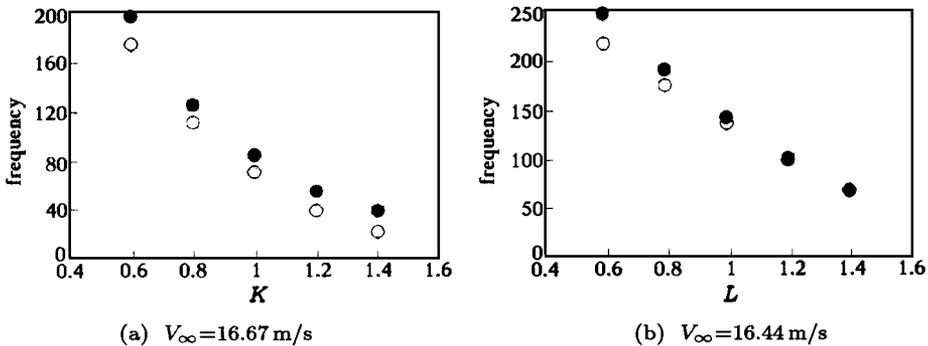


图 9 (a)V ITA 法的检测结果和(b)mu- level 法的检测结果
Fig 9 Variation in the average bursting frequency for (a) the V ITA and (b) the mu- level techniques without grouped

以上得到的是平均事件周期, 由于有些猝发包含了多次事件, 因此需要用前面介绍的“归组”方法对条件采样结果进行“归组.” 以便求出平均猝发周期 “归组”处理后的结果如图 10 所示 从“归组”后的结果来看, 平板加热时的平均猝发周期与平板为常温时的基本相同

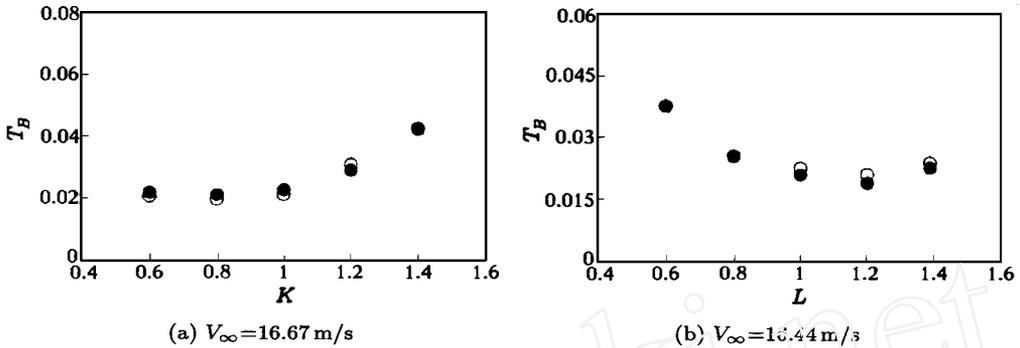


图 10 (a), VITA 法的检测结果和 (b), μ -level 法的检测结果

Fig. 10 Variation in the average bursting frequency for (a) the VITA and (b) the μ -level techniques without grouped

3.3 实验结果分析

固壁加热使得用同一方法, 同一门限检测到的事件数量增多, 而“归组”后的结果又显示平均猝发周期不变, 这一结果反映了这样一个问题: 猝发不能简单的用一种事件表征, 猝发是一个过程, 是由若干事件组成的, 门限定选后, 那些能量超过门限的事件被检测到, 而另一些能量较小的事件则检测不出来, 此时, 猝发只表现为一次事件, 而在改变门限后, 有些猝发就可能表现为两次或多次事件. 固壁加热时, 加热使得湍流脉动更加剧烈, 脉动动能得到加强, 此时选取与常温时相同的门限进行检测, 将有更多的事件由于能量增加而超过门限被检测到, 新增加的事件多数属于已有的猝发的一部分, 经过“归组”处理, 这些事件被“归组”入相应的猝发, 因而猝发总数基本不变.

令人振奋的是, Liandrat et al (1990)^[12]在应用子波变换(wavelet transform)分析加热壁附近的湍流信号时, 得出喷出周期($t_e^+ = 21$)小于扫掠周期($t_s^+ = 67$)的结果. 他们从完全不同于本文的概念与方法获得的这一结果与本文得到的加热壁使喷出事件增多的结论完全一致.

从图 9 可以看到, 条件采样方法检测到的事件数随门限变化很大, 而对其“归组”后的图 10 则显示猝发数与门限无关, 这一点也说明了猝发不是单一事件. “归组”处理是避免一次猝发多次计数并削弱门限影响的有效方法.

据上所述, 固壁加热对猝发的影响仅发生在构成猝发的事件上, 而对猝发周期没有影响.

4 结 论

- 1) 固壁加热时测得的近壁时均流速低于 Spalding 曲线, 并且拟合对数律区数据得到的 u^+ 值在所加热的温度范围内略小于同一来流流速下固壁不加热时的值.
- 2) 固壁加热使得近壁区湍流脉动更加剧烈, 同一位置处的均方根速度、偏斜因子和平坦因子均大于固壁为常温时的值. 均方根速度最大值的位置由常温时的 $y^+ = 15$ 移至 $y^+ = 20$ 处, 均方根速度最大值比常温时增大 30%.
- 3) 固壁加热后, 用同一条件采样方法, 同一门限检测到的事件数量多于固壁为常温时的值, 但“归组”处理后, 猝发次数基本不变, 固壁加热对平均猝发周期没有影响.
- 4) “归组”处理是避免一次猝发多次计数并削弱门限影响的有效方法.

参 考 文 献

- 1 Shu Wei, Liu Weiming. The effect of compliant coatings on coherent structure in turbulent boundary layers. *Acta Mech Sinica*, 1990, 6(2): 97~ 101
- 2 么胜洪, 舒玮. 有序波状扰动对壁湍流相干结构的作用. *力学学报*, 1991, 23(4): 385~ 395
- 3 么胜洪, 舒玮. 壁湍流外层周期扰动对内层脉动特性的影响. *中国科学*, 1991, A (1): 47~ 54
- 4 李冬敏, 么胜洪, 舒玮. 绊线对湍流猝发频率的影响. 见: 杜庆华主编. *力学与工程应用*. 太原: 山西科学技术出版社, 1994. 102~ 106
- 5 汪健生. 壁湍流相干结构的识别及子波分析. [博士论文], 天津: 天津大学, 1995
- 6 石建军. 固壁温度对壁湍流相干结构的影响. [硕士论文], 天津: 天津大学, 1995
- 7 Blackwelder RF, Haritonidis JH. Scaling of the bursting frequency in turbulent boundary layers. *J Fluid Mech*, 1983, 132: 87~ 103
- 8 Luchik TS, Tiedeman WG. Timescale and structure of ejections and bursts in turbulent channel flows. *J Fluid Mech*, 1987, 174: 520~ 552
- 9 Bogard DG, Tiedeman WG. Burst detection with single-point velocity measurements. *J Fluid Mech*, 1986, 162: 389~ 413
- 10 Johansson AV, Alfredsson PH. On the structure of turbulent channel flow. *J Fluid Mech*, 1984, 122: 295~ 314
- 11 Wardane NG, Mizomoto TUM. Effect of strong heating on turbulent statistics of a channel flow. *Experiments in Fluids*, 1994, 18: 87~ 94
- 12 Liandrat J, Moret-Bailly F. The wavelet transform: Some application to fluid dynamics and turbulence. *European J Mech*, 1990, 11(1): 1~ 19

THE EFFECT OF WALL TEMPERATURE ON THE
COHERENT STRUCTURE IN WALL TURBULENCE

Shi Jianjun# Shu Wei

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

Abstract In this paper, two conditional sampling techniques, VITA and μ -level algorithms were used to investigate the wall temperature influence on turbulence coherent structure in heated wall. "Grouped" method proposed by Tiedeman et al was improved, and the advanced "Grouped" method was used with VITA and μ -level technique in analyzing the effects caused by wall heating on average bursting period. Experiments indicate that the U_{ms} and detected results of conditional sampling method increase, but average bursting period remains the same.

Key words coherent structure, conditional sampling, burst, grouped