

文章编号: 1000-0887(2002) 09-0921-08

壁面加热湍流耗散率标度指数 测量的实验研究*

姜楠, 王玉春, 舒玮, 王振东

(天津大学 力学系, 天津 300072)

(李家春推荐)

摘要: 对中等雷诺数下壁面常温和壁面加热的平板湍流边界层中速度和温度粗粒化的耗散率结构函数标度指数进行了实验测量。用热线风速仪测量了风洞中壁面常温和加热的平板湍流边界层中不同法向位置的流向速度分量和温度的时间序列信号, 研究了由于湍流边界层近壁区域相干结构的的存在而导致的非各向同性、非均匀性对湍流耗散率结构函数标度指数的影响, 研究发现, 中等雷诺数下壁面加热的边界条件和剪切湍流的平均速度梯度对速度和温度耗散率结构函数的标度指数没有影响, 均匀各向同性湍流的耗散率结构函数标度指数的层次结构模型对壁面加热平板湍流边界层的速度和温度耗散率结构函数的标度指数也是适用的。

关键词: 加热; 壁湍流; 耗散率; 标度指数; 层次结构模型
中图分类号: O357 文献标识码: A

引言

对充分发展湍流中的流向速度分量 $u(x, y, z, t)$ 和被动标量如温度 $T(x, y, z, t)$, 其结构函数在惯性子区存在着标度律:

$$S_p(l) = \langle |u(x+l) - u(x)|^p \rangle = \langle |\delta u(l)|^p \rangle \propto l^{\zeta(p)}, \quad (1)$$

$$R_p(l) = \langle |T(x+l) - T(x)|^p \rangle = \langle |\delta T(l)|^p \rangle \propto l^{\xi(p)} \quad (\eta \ll l \ll L), \quad (2)$$

其中 $\delta u(l) = u(x+l) - u(x)$ 和 $\delta T(l) = T(x+l) - T(x)$ 是沿流向空间距离为 l 的空间两点 x 和 $x+l$ 的流向速度分量 $u(x+l)$ 和 $u(x)$ 温度 $T(x+l)$ 和 $T(x)$ 的相对增量, $\zeta(p)$ 和 $\xi(p)$ 为标度指数, η 为湍流的耗散尺度, L 为湍流的积分尺度, $\langle \rangle$ 代表系综平均。

Kolmogorov (1941)^[1] 对极高雷诺数 (雷诺数趋于无穷大) 的均匀各向同性湍流的能谱进行了分析, 成功地预言出惯性子区的存在及著名的 $-5/3$ 定律, 得到线性的标度指数:

$$\zeta(p) = p/3 \quad (3)$$

Obukhov^[2] Corrsin^[3] Yaglom^[4] 根据 Kolmogorov 1941 年 (K41) 的理论预测:

$$R_2(l) = \langle |T(x+l) - T(x)|^2 \rangle = \langle |\delta T(l)|^2 \rangle \propto \langle \varepsilon \rangle^{-1/3} \langle N \rangle l^{2/3}, \quad (4)$$

* 收稿日期: 2001_08_17; 修订日期: 2002_04_28

基金项目: 国家“九五攀登计划”项目(970211021); 国家自然科学基金资助项目(10002011); 国家自然科学基金资助重点项目(19732005)

作者简介: 姜楠(1968—), 男, 河南封丘县人, 博士, 教授. (E-mail: nanj@mail.tju.edu.cn)

$$\langle \delta u(l) \delta T^2(l) \rangle = -4/3 \langle N \rangle l \quad (5)$$

因此, 温度结构函数与速度结构函数具有同样的线性标度指数:

$$\zeta(p) = \xi(p) = p/3, \quad (6)$$

其中 ε 是动能的耗散率函数, N 是温度的耗散率函数, $N = \kappa(\cdot T)^2$.

后来的实验研究表明, 由于湍流的间歇性, 导致标度指数随阶数的变化是非线性的, 这就是湍流的奇异标度现象. Kolmogorov^[5] 提出了修正的自相似假设 (Refined Similarity Hypothesis), 认为粗粒化脉动速度与粗粒化能量耗散率以量纲关系式相联系:

$$\langle \delta u(l) \rangle \propto (\langle \varepsilon \rangle l)^{1/3}, \quad (7)$$

$$\langle \mathcal{E} \rangle \propto l^{\tau(p)}, \quad (8)$$

$$\langle \mathcal{T}(l) \rangle \propto l^{1/3} \langle \varepsilon \rangle^{1/6} \langle N_l \rangle^{1/2}, \quad (9)$$

其中 ε 、 N_l 分别为速度和温度的耗散率函数, ε 、 N 在尺度为 l 的空间内的局部平均. 由此导出速度结构函数的标度指数 $\zeta(p)$ 与能量耗散率函数的标度指数 $\tau(p)$ 有如下关系:

$$\zeta(p) = p/3 + \tau(p/3). \quad (10)$$

She 与 Leveque^[6] 提出了层次结构理论, 基于层次结构理论, 得到速度结构函数和能量耗散率的标度指数公式:

$$\zeta(p) = \nu p - \frac{3\nu - 1}{1 - \beta} (1 - \beta^{p/3}), \quad (11)$$

$$\tau_p = \lambda p - \frac{\lambda}{1 - \beta} (1 - \beta^p), \quad (12)$$

其中 ν 是速度结构函数最奇异标度指数, 即最高激发态的标度指数, β 是间歇参数, $\lambda = 3\nu - 1$ 是能量耗散率的最奇异标度指数, 即最强能量耗散率的标度指数.

以上研究结果都是对最简单的湍流——均匀各向同性湍流在极高雷诺数(雷诺数趋于无穷大)的条件下得到的, 而自然界和工程技术中广泛存在的是非均匀各向同性湍流——剪切湍流, 对于中等雷诺数下不同类型的非均匀湍流, 不同尺度结构的统计特性以及剪切湍流的影响是理论和实验都迫切需要进一步深入研究的问题. 这对于研究不同类型的非均匀湍流流场中湍流的普适性规律及通过控制湍流中的最高激发态结构达到控制湍流的目的具有重要意义.

当湍流场不是均匀各向同性时, 最强间歇结构随着空间位置和方向的变化而改变, $\zeta(p)$ 对最强间歇结构的改变很敏感, 对不同的流场环境很容易发生变化, $\zeta(p)$ 的系统性变化就表明了流场物理环境的变化^[7]. 最近, G Ruiz Chavarria^[8]、F. Toschi 等人^{[9]、[10]} 在槽道湍流和边界层湍流的数值实验和物理实验中发现, 槽道湍流近壁区和平板湍流边界层中流向脉动速度的结构函数的标度指数明显小于同阶均匀各向同性湍流的标度指数, 随着测点距离壁面法向位置的增加, 同阶的标度指数也相应逐渐增加, 边界层外测点的标度指数逐渐趋于均匀各向同性湍流的标度指数.

为了研究非均匀各向同性湍流流场中剪切湍流流场的非均匀性对 $\zeta(p)$ 的系统性变化的影响, 本文在中等雷诺数下用热线风速仪以及热线测速和冷线测温技术测量了风洞中壁面加热和壁面常温两种情况下平板湍流边界层不同法向位置的流向速度分量和温度, 研究了壁面加热的边界条件和平板湍流边界层不同法向位置对流向脉动速度和脉动温度粗粒化的耗散率结构函数标度指数 $\tau(p)$ 及其层次结构模型公式(12)的影响.

1 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。来流速度在 30 m/s 时背景湍流度小于 2%。实验用平板沿实验段中心轴线安装。DQS_1 型多功能空气动力学实验台如图 1 所示。

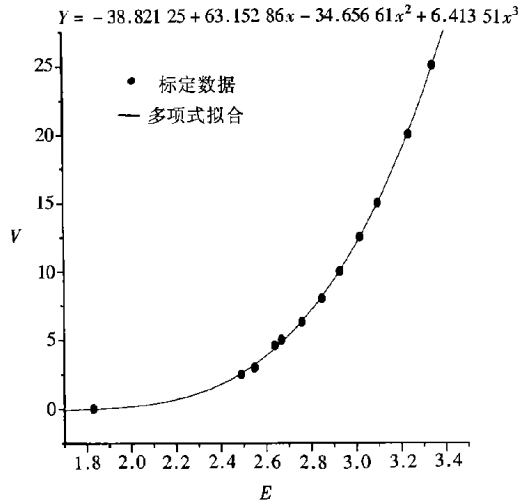
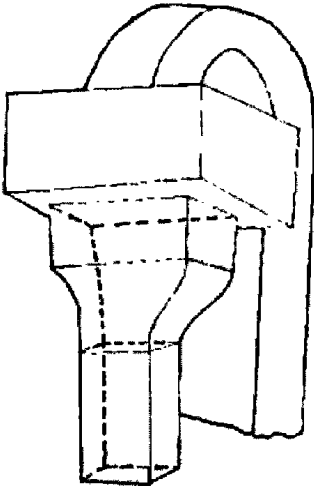


图 1 DQS_1 型多功能空气动力学实验台 图 2 TSL_1212_T_1.5 边界层探针校准曲线

实验用平板为铝板, 长 300 mm, 宽 50 mm, 厚 5 mm。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热电偶, 其尺寸为 40 mm×40 mm×4 mm, 当通电以后, 热电偶一面为冷面, 另一面为热面。用热电偶不同的面贴在铝板上, 可以实现对铝板的加热或制冷。热电偶的最大功率为 41 瓦, 输出功率可以由输入电压在 0~15 伏范围内调节。

实验测量仪器为 TSL_1050 恒温式热线风速仪和 TSL_1212_T_1.5 边界层热线探针, 实验用探针在使用前在 20 千赫方波下建立了最佳动态响应并用 TSL_1125 气校准仪进行了标定, 图 2 为 TSL_1212_T_1.5 边界层热线探针的标定曲线, 标定的相对误差小于 1%。TSL_1050 恒温式热线测速仪主单元上有一个测量温度单元, 接通这个单元并调节通过热线探针的电流保持 1.5 毫安恒定, 该风速仪可以用于恒流式冷线测温, 热线探针可以作为温度计使用。实验数据采集系统由 KHAD03 数据采集卡和微机组成, 其中 KHAD03 数据采集卡 A/D 转换精度 12 位, 最高采样频率 100K, 采样频率和采样长度可以根据实验情况自行设定。具体实验条件如表 1 所示, 测点法向位置坐标用内尺度无量纲化如表 2 所示。

2 壁面常温和壁面加热平板湍流边界层耗散率结构函数的标度指数

图 3 为壁面常温和壁面加热情况下距离壁面最近点 ($y = 0.2$ mm) 的流向脉动速度 $u(t)$ 和脉动温度 $T(t)$ 的时间序列信号, 图 4 为壁面常温和壁面加热平板湍流边界层在距离壁面 $y = 0.2$ mm 的流向脉动速度分量 $u(t)$ 和脉动温度 $T(t)$ 的一阶结构函数 $\delta u(t; \Delta t) = u(t + \Delta t) - u(t)$ 和 $\delta T(t; \Delta t) = T(t + \Delta t) - T(t)$ 在 $\Delta t = 0.000 5$ s 和 $\Delta t = 0.5$ s 的时间序列信号, 为了将小尺度脉动的细节显示清楚, 图中只给出了 20s 到 20.2s 的部分。

表 1 流动参数表

	壁面常温	壁面加热
壁面温度 $T_w(^\circ\text{C})$	19.5	59.4
测点流向位置 $X(\text{mm})$	258	258
来流速度 $U_\infty(\text{m/s})$	16.67	16.44
粘性系数 $\nu(\times 10^6)(\text{m}^2/\text{s})$	15.7	19.6
来流雷诺数 Re_x	273 940	216 404
边界层名义厚度 $\delta(\text{mm})$	6.03	6.25
雷诺数 Re_δ	6 400	5 242
摩擦速度 $u_\tau(\text{m/s})$	0.78	0.78

表 2 测点位置内尺度无量纲化坐标

$y(\text{mm})$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
y^+ (壁面常温)	9.94	19.88	29.82	39.75	49.7	74.55	99.4	124.25	149.1
y^+ (壁面加热)	7.96	15.92	23.88	31.84	39.8	59.7	79.6	99.5	119.4
$y(\text{mm})$	3.5	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	
y^+ (壁面常温)	173.45	198.8	248.5	298.2	347.9	397.6	447.3	497.0	
y^+ (壁面加热)	139.3	159.2	199	238.8	278.6	318.4	358.2	398.0	

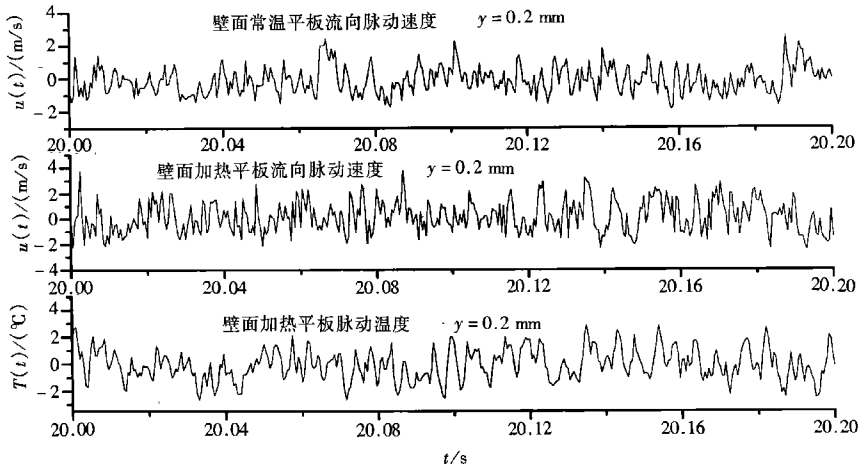


图 3 壁面常温和壁面加热平板距离壁面 0.2 mm 流向脉动速度分量和脉动温度时间序列信号

图 5 从下向上依次为壁面常温和壁面加热情况下距离壁面不同位置的湍流边界层中的流向脉动速度和脉动温度耗散率函数的二阶结构函数 $\langle \epsilon_{\Delta t}^2 \rangle$ 和 $\langle N_{\Delta t}^2 \rangle$ 相对于 Δt 的变化的双对数坐标图, 图 6 从下向上依次为壁面常温和壁面加热情况下距离壁面不同位置的湍流边界层中的流向脉动速度和脉动温度耗散率函数的三阶结构函数 $\langle \epsilon_{\Delta t}^3 \rangle$ 和 $\langle N_{\Delta t}^3 \rangle$ 相对于 Δt 的变化的双对数坐标图, 为了使图 5、图 6 更加清晰, 图中只给出了距离壁面从 $y = 0.2 \text{ mm}$ 到 $y = 1.0 \text{ mm}$ 的五个位置的曲线。

从图 5、图 6 中可以看出, 在双对数坐标中, 耗散率函数 p 阶结构函数 $\langle \epsilon_{\Delta t}^p \rangle$ 与 Δt 在小尺度区域呈线性关系, 图中的斜率即为耗散率函数 p 阶结构函数的标度指数 τ_p , 壁面加热情况的标

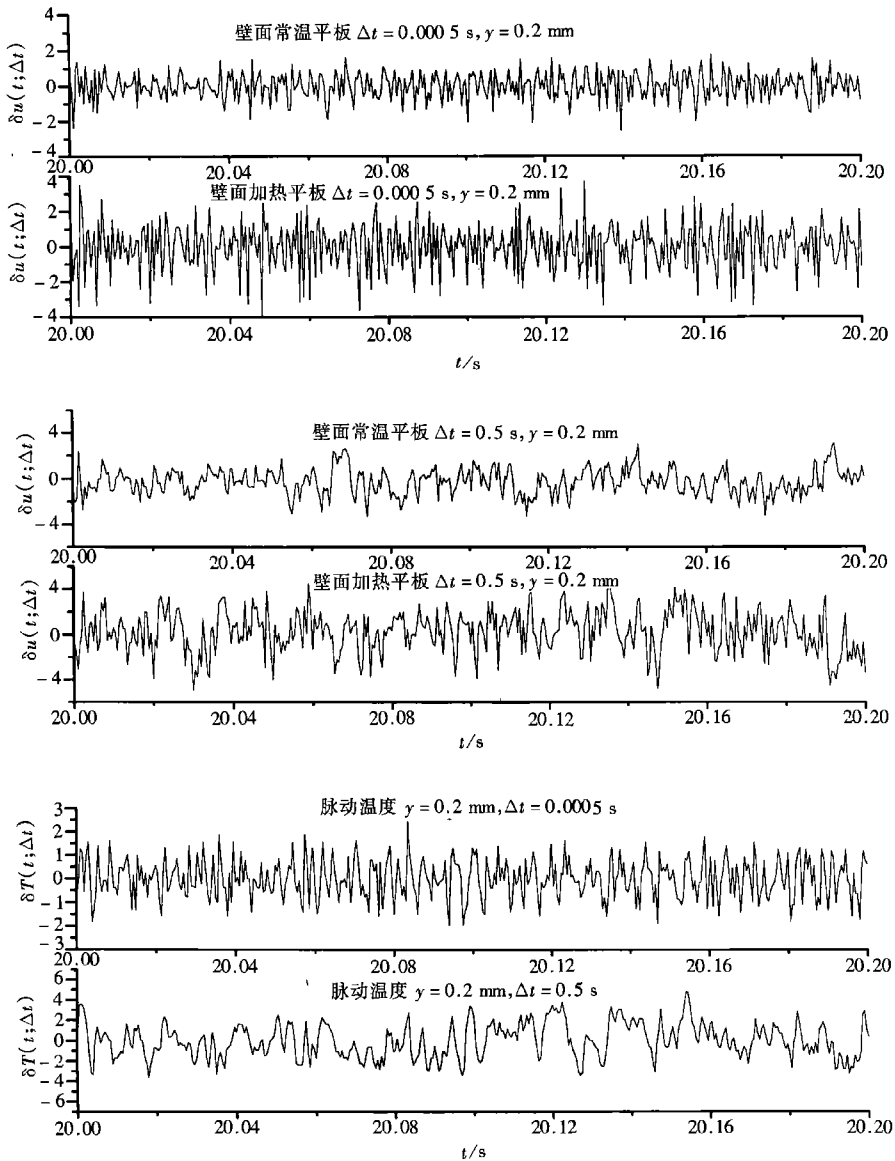


图4 壁面常温和壁面加热平板在 $y = 0.2 \text{ mm}$ 的流向脉动速度和脉动温度增量在 $\Delta t = 0.0005 \text{ s}$ 和 $\Delta t = 0.5 \text{ s}$ 的时间序列

度指数的变化规律与壁面常温的情况没有明显差别。

图7(a)为平板湍流边界层距离壁面从 $y = 0.2 \text{ mm} \sim y = 1.0 \text{ mm}$ 不同位置的脉动速度耗散率函数的 p 阶结构函数 $\langle \mathcal{E}_{\Delta t}^p \rangle$ 的标度指数 τ_p 随阶数 p 的变化,图7(b)为平板湍流边界层距离壁面从 $y = 0.2 \text{ mm} \sim y = 1.0 \text{ mm}$ 不同位置的脉动温度耗散率函数的 p 阶结构函数 $\langle N_{\Delta t}^p \rangle$ 的标度指数 π_p 随阶数 p 的变化。从图7可以看到:平板湍流边界层中流向脉动速度和脉动温度耗散率函数的 p 阶结构函数 $\langle \mathcal{E}_{\Delta t}^p \rangle$ 和 $\langle N_{\Delta t}^p \rangle$ 的标度指数 τ_p 和 π_p 不随测点距离壁面法向位置变化,即 τ_p 和 π_p 与湍流边界层中测点的位置无关,从而说明标度指数 τ_p 和 π_p 不受剪切湍流平均速度梯度的影响;壁面加热的边界条件对 τ_p 和 π_p 随阶数 p 的变化规律也没有影响。

图8、图9分别是对图7所示的壁面加热和壁面常温情况下的标度指数用最小二乘法拟合

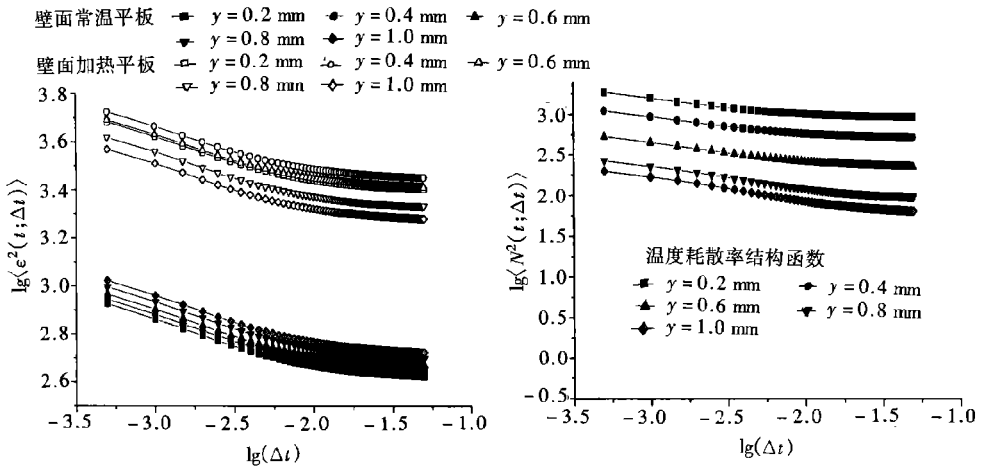


图5 平板湍流边界层流向脉动速度和脉动温度耗散率函数的二阶结构函数

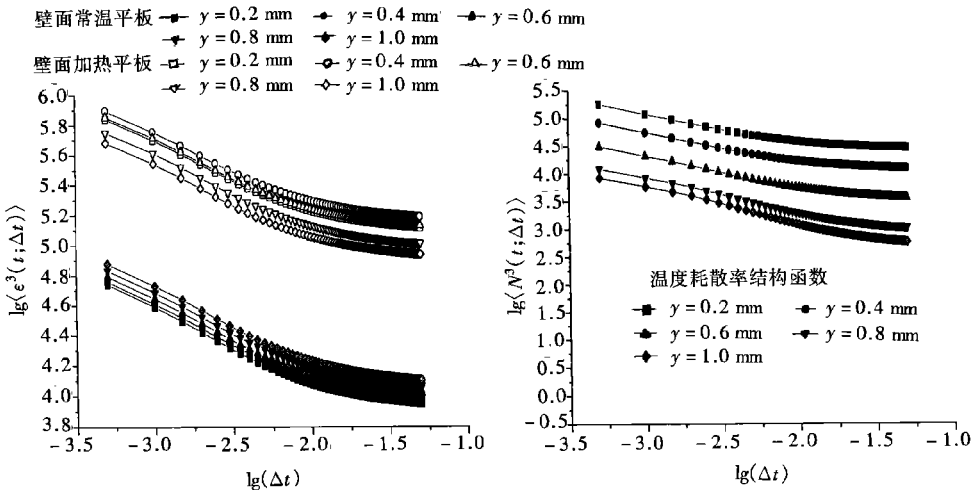


图6 平板湍流边界层流向脉动速度和脉动温度耗散率函数的三阶结构函数

公式(12)得到的层次结构模型中间歇参数 β 和速度结构函数最强激发态(最奇异结构)的标度指数 γ 随测点位置坐标 y 的变化规律。从图8和图9可以看出,用粗粒化的耗散率结构函数标度指数 τ_p 和 π_p 拟合的 β 和 γ 不随测点位置的坐标 y 变化,壁面加热的边界条件对 β 和 γ 没有影响。平板湍流边界层中流向脉动速度耗散率函数的 p 阶结构函数 $\langle e_{\Delta t}^p \rangle$ 的标度指数 τ_p 和 π_p 随阶数 p 的变化规律与湍流多层次结构理论的预测公式(12)相吻合。

3 主要结论

本文对中等雷诺数下湍流边界层为代表的非均匀湍流中平均流场的非均匀性和壁面加热的边界条件对湍流脉动速度和脉动温度耗散率结构函数标度指数及其层次结构模型的影响进行了实验研究,在目前的实验条件下,得出以下结论:

1) 平板湍流边界层中流向脉动速度和脉动温度耗散率函数的 p 阶结构函数 $\langle e_{\Delta t}^p \rangle$ 和 $\langle N_{\Delta t}^p \rangle$ 的标度指数 τ_p 和 π_p 不随测点距离壁面法向位置 y 变化,标度指数 τ_p 和 π_p 不受剪切湍流平均速度梯度的影响;

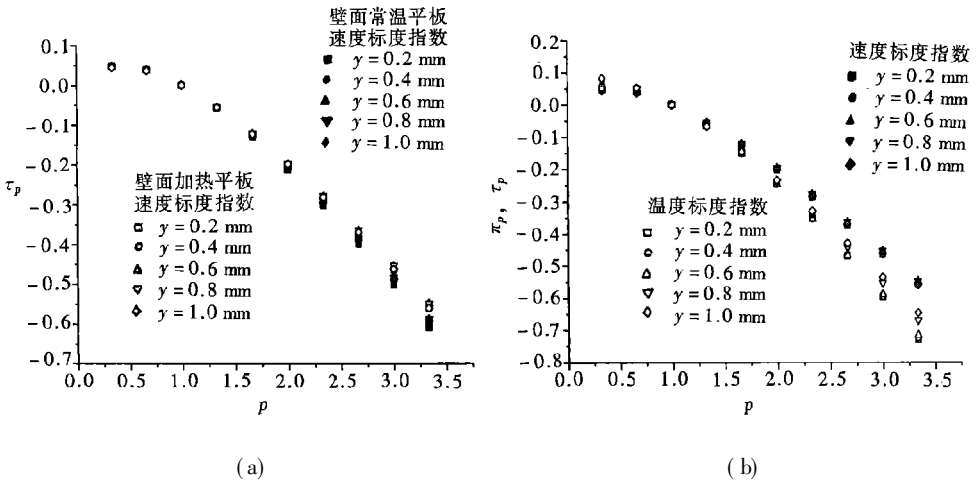


图7 壁面加热和壁面常温湍流边界层中不同法向位置标度指数 τ_p 和 π_p 随阶数 p 的变化规律

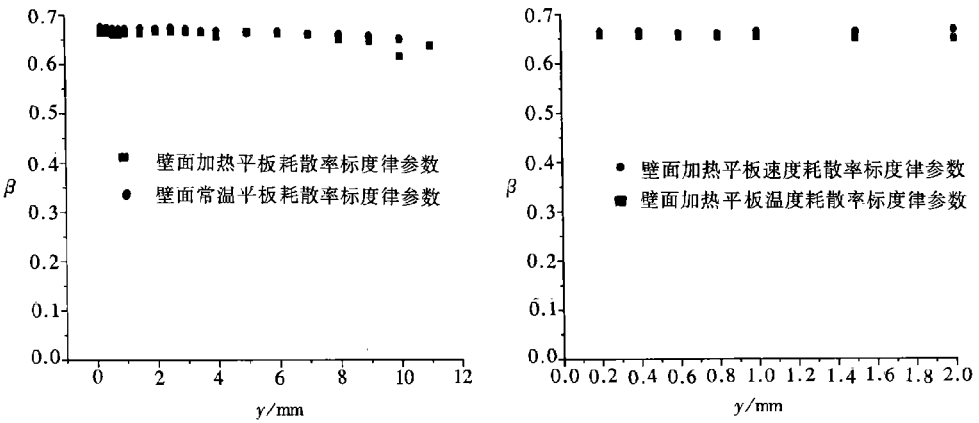


图8 间歇参数 β 随测点位置坐标 y 的变化

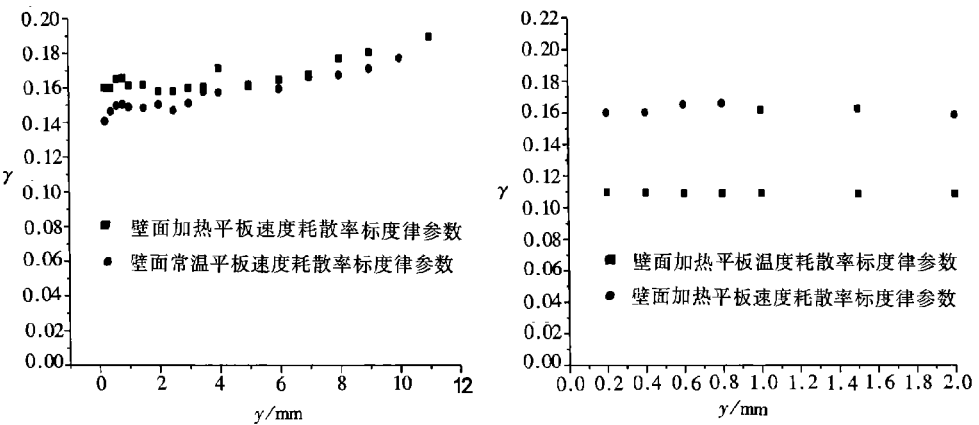


图9 最奇异结构标度指数 γ 随测点位置坐标 y 的变化

- 2) 壁面加热的边界条件对标度指数 τ_p 随阶数 p 的变化规律也没有影响;
- 3) 标度指数 τ_p 和 π_p 随阶数 p 的变化规律与湍流多层次结构理论的预测公式(12)相吻合。

致谢 中国科学院力学研究所李家春教授对本文提出了修改意见, 谨表致谢。

[参 考 文 献]

- [1] Kolmogorov A N. Dissipation of energy in the locally isotropic turbulence[J]. Dokl Akad Nauk SSSR, 1941, **32**(1): 19—21.
- [2] Oboukov A M. Spectrum of energy of turbulent flow[J]. Dokl Akad Nauk SSSR, 1941, **32**(1): 22—24.
- [3] Corrsin S. On the spectrum of isotropic temperature fluctuations in an isotropic turbulence[J]. J Appl Phys, 1951, **22**(4): 469—473.
- [4] Yaglom A M. On the local structure of a temperature field in a turbulent flow[J]. Dokl Akad Nauk SSSR, 1949, **69**(6): 743—746.
- [5] Kolmogorov A N. A refinement of previous hypothesis concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds number[J]. J Fluid Mech, 1962, **13**(1): 82—85.
- [6] SHE Zhen_su, Leveque E. Universal scaling laws in fully developed turbulence[J]. Phys Rev Lett, 1994, **72**(3): 336—339.
- [7] 余振苏, 苏卫东. 湍流中的层次结构和标度律[J]. 力学进展, 2000, **29**(3): 289—303.
- [8] Chavarria G Ruiz, Ciliberto S, Baudet C, et al. Scaling properties of the streamwise component of velocity in a turbulent boundary layer[J]. Physica D, 2000, **141**: 183—198.
- [9] Toschi F, Amati G, Succi S, et al. Intermittency and structure functions in channel flow turbulence[J]. Phys Rev Lett, 1999, **82**(25): 5044—5047.
- [10] Toschi F, Leveque E, Chavarria G Ruiz. Shear effects in non-homogeneous turbulence[J]. Phys Rev Lett, 2000, **85**(7): 1436—1439.

Experimental Study of Measurement for Dissipation Rate Scaling Exponent in Heated Wall Turbulence

JIANG Nan, WANG Yu_chun, SHU Wei, WANG Zhen_dong
(Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, P R China)

Abstract: Experimental investigations were devoted to the study of scaling exponent of coarse-grained dissipation rate structure function for velocity and temperature fluctuation in a turbulent boundary layer at moderate Reynolds number. Longitudinal velocity and temperature were measured at different vertical positions in turbulent boundary layer over a heated and unheated flat plate in a wind tunnel using hot wire anemometer. The effect of non-isotropy and inhomogeneity on scaling exponent of dissipation rate was studied because of the existence of organized coherent structure burst process in the near wall region. The scaling law of coarse-grained dissipation rate structure function is found to be independent of the mean velocity shear strain and the heating wall boundary condition. The scaling exponent of the dissipation rate structure function is verified to be in agreement with the hierarchical structure model which has been valid for isotropic and homogeneous turbulence.

Key words: heating; wall turbulence; dissipation rate; scaling exponent; hierarchical structure model