

高速槽道湍流中的速度/温度壁面附着结构*

李峻洋[†] 周清清 孙东 余明 袁先旭 刘朋欣[‡]

(空天飞行空气动力学科学与技术全国重点实验室, 绵阳 621000)

(2025年6月18日收到; 2025年8月26日收到修改稿)

采用聚类连通法, 提取高速槽道湍流中强流向速度脉动与强温度脉动对应的拟序结构. 依据空间位置, 结构被划分为壁面附着型与壁面分离型. 部分壁面附着结构在尺度上呈现自相似性, 符合 Townsend (1976) 附着涡假设, 据此进一步细分为矮结构、自相似结构和高结构. 条件平均结果表明, 流向雷诺正应力和温度脉动在对数区满足对数率, 这一现象同样与附着涡假设相符合; 同时, 附着结构内速度脉动与温度脉动间仍保持强雷诺比拟关系. 基于 RD (Renard-Deck) 分解恒等式的分析显示, 低速高结构主导了壁面摩擦和热流的生成, 而高温高结构则在法向热流传输中起主要作用.

关键词: 高速槽道湍流, 聚类连通法, 拟序结构, 自相似性, 摩擦热流

PACS: 47.27.-i, 47.27.De, 47.27.ek, 47.27.nd

DOI: 10.7498/aps.74.20250783

CSTR: 32037.14.aps.74.20250783

1 引言

壁湍流广泛存在于自然界和工程科学中, 是流体力学的重要研究问题之一^[1,2]. 湍流流动虽然表现出高度的随机性和无序性, 但其内部却蕴含着丰富的拟序结构, 这些结构在湍流的能量传递、动量运输和耗散过程中扮演着关键角色. 对拟序结构的研究不仅有助于揭示湍流的本质, 还为湍流建模和控制提供了理论基础. 自 Kline 等^[3] 在湍流边界层中发现近壁条带以来, 壁湍流拟序结构研究取得了显著进展. 其中, 最具代表性的成果之一是“壁面附着涡”假设^[4,5]. 该假设由 Townsend^[6] 首次提出, 认为壁湍流对数区域的含能结构可以视为一系列自相似涡结构的线性叠加, 且每个涡的尺度与其到壁面的距离成正比. 随后, Perry 和 Chong^[7] 进一步发展了附着涡假设, 通过一系列自相似涡构建了附着涡模型, 并认为涡密度与其高度成反比.

附着涡假设是一个重要的理论模型, 它通过简单的几何自相似附着涡, 为理解雷诺数限制下壁湍流中一系列复杂物理过程提供了有力工具^[8]. 该模型通过自相似涡结构的叠加, 能够有效描述壁湍流对数区域的统计特性和动力学行为. 目前, 针对高雷诺数壁湍流的研究部分验证了 Townsend 的附着涡假设. 例如, 在流向雷诺应力的分布中观察到了对数变化规律^[9-12], 流向速度能谱中存在 k_x^{-1} 区域^[12-14]. 在瞬时流场中, 研究者提取到大量壁附着的拟序结构, 并发现这些结构表现出高度的自相似性^[15-18], 进一步支持了附着涡假设的合理性. 然而, 附着涡假设理论上的自相似性在二维能谱分析中仍面临挑战. 高层壁面附着结构的存在往往会干扰自相似特性的显现, 使得上述规律在复杂流场中不易被直接观测到^[19]. 为了更清晰地提取和验证自相似壁面附着结构, 需要采用特定的分析方法, 例如条件平均、多尺度分解等结构识别技术, 以排除高层结构的干扰.

* 青年人才托举工程和国家自然科学基金 (批准号: 12272396) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: lijnyang@cardc.cn

[‡] 通信作者. E-mail: liupengxin@cardc.cn

聚类连通法作为一种数据特征提取工具,能够直观地捕捉到结构的时空特性,在研究湍流拟序结构的运动学特性和动力学过程中得到广泛应用^[20]. Hwang 和 Sung^[21]观察到,流向速度脉动的高附着结构由多个具有长流向范围的均匀动量区组成,而其他分量则相对较短且宽度一致,表明存在多个与均匀动量区相关的高涡结构. Yang 等^[22]在管流湍流中发现,黏性扩散引起的小尺度运动导致局部卷吸速度增大,表明大尺度特征调制了与卷吸速度相关的小尺度,并且泡状低速结构形成的鞍形凹面显著地增强了局部卷吸速度的黏性成分. Yoon 等^[23]提取了逆压梯度和零压力梯度湍流边界层的速度结构,发现自相似壁面附着结构是对数区普遍存在的结构,并在对数区和外区贡献了一半的流向雷诺应力和雷诺切应力. Hwang 等^[24]通过充分滤除非自相似运动的贡献,捕捉到了附着涡假设预测的湍流统计的渐近行为. Yoon 和 Sung^[25]证实了缓冲区壁附着自相似结构密度减小是整体减阻的主要原因.

以上结果表明,目前对壁面附着结构的研究主要集中在不可压缩湍流拟序结构对统计量的贡献,而鲜有研究考察拟序结构与工程上关注的壁面摩擦阻和热流之间的关联. 壁面摩擦阻热流分解方法能够将壁面摩擦阻热流的产生与相应的流动物理过程联系起来,目前常用的方法包括 FIK (Fukagata-Iwamoto-Kasagi) 分解^[26]和 RD (Renard-Deck) 分解^[27]. Fukagata 等^[26]通过对不可压平均动量方程的连续三次积分,首次建立了壁面摩擦系数与雷诺应力之间的关系. Gomez 等^[28]将其推广至可压缩壁湍流,指出湍流作用项是可压缩槽道湍流壁面摩擦阻的主要贡献机制. Zhang 和 Xia^[29]针对槽道湍流壁面热流进行了 FIK 分解,发现黏性耗散作用最为重要. Wenzel 等^[30]改进了 FIK 分解方法,利用 Cauchy 连续积分公式,通过对平均动量方程和平均总焓方程的双重积分,提出了新的壁面摩擦阻与热流分解公式,研究了超声速湍流边界层中流向压力梯度对壁面摩擦阻和热流演化的影响. Renard 和 Deck^[27]提出了一种新的分解方法,在远离壁面的绝对参考系下,通过对流向动量方程的变换和积分,将摩擦阻产生分解为黏性耗散和湍动能生成,具有更明确的物理意义. Li 等^[31]将该公式推广至可压缩壁湍流,并研究了雷诺数效应对壁面摩擦阻的影响. Sun 等^[32]针对完全气体边界层提出了基于总

焓方程的 RD 恒等式,将壁面热流分解为热传导、湍流热输运、平均动能黏性扩散、湍动能黏性扩散、湍动能输运等 7 项,表征了不同能量输运过程对壁面热流的贡献.

本文利用聚类连通法提取高速槽道湍流中的拟序结构,分析其自相似特性,并建立拟序结构与壁面摩擦阻和热流之间的定量贡献关系,具体内容安排如下,第 2 节介绍了本文使用的高速槽道湍流直接数值模拟数据库,第 3 节分析了速度/温度壁面附着结构特性,第 4 节给出了附着结构对壁面摩擦阻热流的影响,最后总结了研究结果.

2 高速槽道湍流直接数值模拟数据库

本研究采用 Yu 等^[33-35]计算得到的可压缩槽道湍流数据库,物理模型如图 1 所示. 该流动由可压缩 N-S 方程控制,具体形式如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} &= 0, \\ \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_1 \delta_{i1}, \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j E}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i \tau_{ij}}{\partial x_j} \\ &\quad - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} + f_1 u_1 - Q, \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= 2\mu \left(S_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} S_{kk} \right), \quad q_j = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x_j}, \\ E &= c_v T + \frac{1}{2} u_i u_i, \end{aligned} \quad (2)$$

上式中, ρ , p , T , t 分别代表了密度、压力、温度和时间; u_i ($i = 1, 2, 3$) 代表了速度在 x_i 方向的分量,分别对应于流向、壁面法向和展向,同时也写作 u , v , w . 动力黏性系数 μ 由 Sutherland 公式计算得到,导热系数 κ 由 $\kappa = \mu c_p / Pr$ 计算得到. R 为气体常数,定压比热 c_p 和定容比热 c_v 分别满足 $c_p = \gamma R / (\gamma - 1)$, $c_v = R / (\gamma - 1)$, 比热比 $\gamma = 1.4$. f 和 Q 代表了外力和热汇,以平衡黏性引起的阻力并维持质量流不变.

表 1 列出了所引用数据库的参数. 其中, $Re_\tau = \rho_w u_\tau h / \mu_w$ 为摩擦雷诺数 (u_τ 为壁面摩擦速度,由 $u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho_w}$ 计算得到), $M_b = U_b / \sqrt{\gamma R T_b}$ 为体积马赫数, $M_c = U_c / \sqrt{\gamma R T_c}$ 为中心线马赫数,

普朗特数 $Pr = 0.70$. 壁温比 T_w/T_r 选取 1.0, 0.5 和 0.2 分别作为 M8AW, M8CW05 和 M8CW02 算例, 其中恢复温度的计算式为 $T_r = T_0(1 + (\gamma - 1)rM_0^2/2)$, 恢复系数 $r = 0.9$, 来流温度和马赫数分别为 $T_0 = 288.15$ K, $M_0 = 8$. M8AW 和 M8CW05 算例计算采用 $576 \times 288 \times 576$ 的网格, 计算域为 $2\pi h \times 2h \times \pi h$, 分别对应于流向、壁面法向和展向. M8CW02 算例计算采用 $1024 \times 288 \times 576$ 的网格, 计算域为 $6\pi h \times 2h \times \pi h$, 其中 h 为半槽高度.

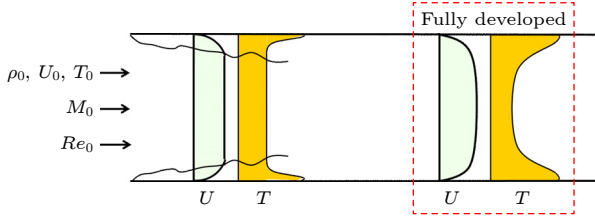


图 1 高速槽道湍流物理模型

Fig. 1. Physical model of high-speed turbulent channel flows.

表 1 不同算例的网格与流动参数

Table 1. Grid and flow parameters for different cases.

算例	T_w/T_r	Re_τ	M_b	M_c	Δx^+	Δy_w^+	Δz^+
M8 AW	1.0	504	4.44	6.93	5.5	0.50	2.7
M8 CW05	0.5	450	4.61	6.15	4.8	0.46	2.4
M8 CW02	0.2	540	4.79	6.03	9.9	0.59	2.9

在下面的分析中, 约定以下符号: 对于任一变量 φ 的系综平均 (包括时间、流向和展向平均) 表示为 $\bar{\varphi}$, 其对应的脉动表示为 $\varphi' = \varphi - \bar{\varphi}$, 而对于密度加权平均 (亦称为 Favre 平均) $\bar{\rho\varphi}/\bar{\rho}$ 则表示为 $\tilde{\varphi}$, 其对应的脉动则表示为 $\varphi'' = \varphi - \tilde{\varphi}$. 上标“+”对应于黏性尺度无量纲, 例如 $\bar{\rho}^+ = \bar{\rho}/\bar{\rho}_w$, $\tilde{u}^+ = \tilde{u}/u_\tau$, $\tilde{T}^+ = \tilde{T}/T_w$. 下标“w”对应于壁面处的值.

3 速度/温度壁面附着结构

3.1 拟序结构的提取

聚类连通法是一种基于数据驱动的结构识别技术, 能够直观且高效地识别流场中的拟序结构. 其主要步骤包括: 1) 对流场进行二值化处理, 将满足特定条件的脉动点标记为 1, 其余点标记为 0; 2) 利用种子填充算法将流场划分为多个连通域, 每个连通域代表一个提取出的流动结构.

针对高速槽道湍流中速度和温度脉动, 提取到的拟序结构可以分为低速结构、高速结构、低温结构和高温结构. 在使用聚类连通法提取强脉动结构

时, 需设定阈值参数 α , 同时引入可压缩效应的影响, 提取依据为 $\sqrt{\bar{\rho}\phi''} > \alpha\sqrt{\bar{\rho}\phi''_{rms}}$. 不同的阈值会影响提取结构的数量. 本文主要考察高速槽道湍流中的速度和温度壁附着结构, 其中 $u'' > 0$, $u'' < 0$, $T'' > 0$, $T'' < 0$ 对应的拟序结构分别代表了高速结构、低速结构、高温结构和低温结构. 图 2 给出了不同 α 取值时识别出来的结构数量和体积, 其中结构的总数 N 和总体积 V 分别通过最大值 N_{max} 和 V_{max} 归一化, 且对应的是所有正脉动和负脉动结构的总和; 这可以为确定阈值提供参考依据. 依据文献 [20–25] 的提取原则, 选择在提取结构数量的峰值附近进行提取, 以确保结构大小适中. 阈值过小会使结构过大且连成一体, 难以有效反映统计特性; 而阈值过大会导致结构过小且数量不足, 影响统计收敛. 因此, 这里选择 $\alpha = 1.5$.

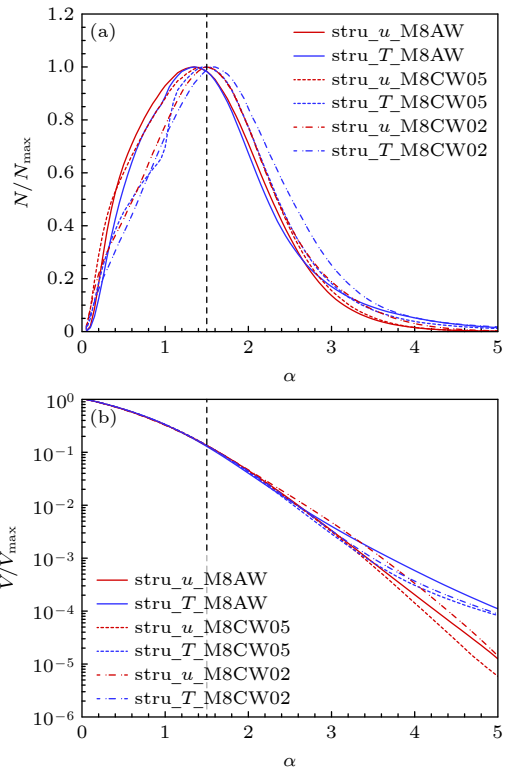


图 2 不同 α 值下高速槽道湍流中提取得到的 (a) 结构数量和 (b) 结构体积, 分别用各自的最大值进行无量纲化
Fig. 2. (a) Number of structures and (b) the volume of structures extracted from high-speed turbulent channel flows under different α values, normalized by their respective maximum values.

通过聚类连通法获得的瞬时结构如图 3—图 5 所示, 其中, 速度和温度脉动的正值和负值分别用红色和蓝色表示, 距离壁面的法向距离通过颜色深浅体现. 紧贴壁面的结构被称为壁面附着结构,

而远离壁面的则被称为壁面分离结构^[20,24,25]. 从图3—图5中可观察到, 对于壁面附着结构, 随着壁温比逐渐降低, 速度结构中高速结构的占比逐渐减少; 温度结构表现出高温和低温结构交错分布的

现象. 对于壁面分离结构, 速度结构主要由高速结构组成, 且尺度明显小于温度结构; 温度结构中高温和低温交错分布. 提取的结果与文献一致^[24,25], 验证了提取方法的有效性. 单个结构的长度尺度定义为

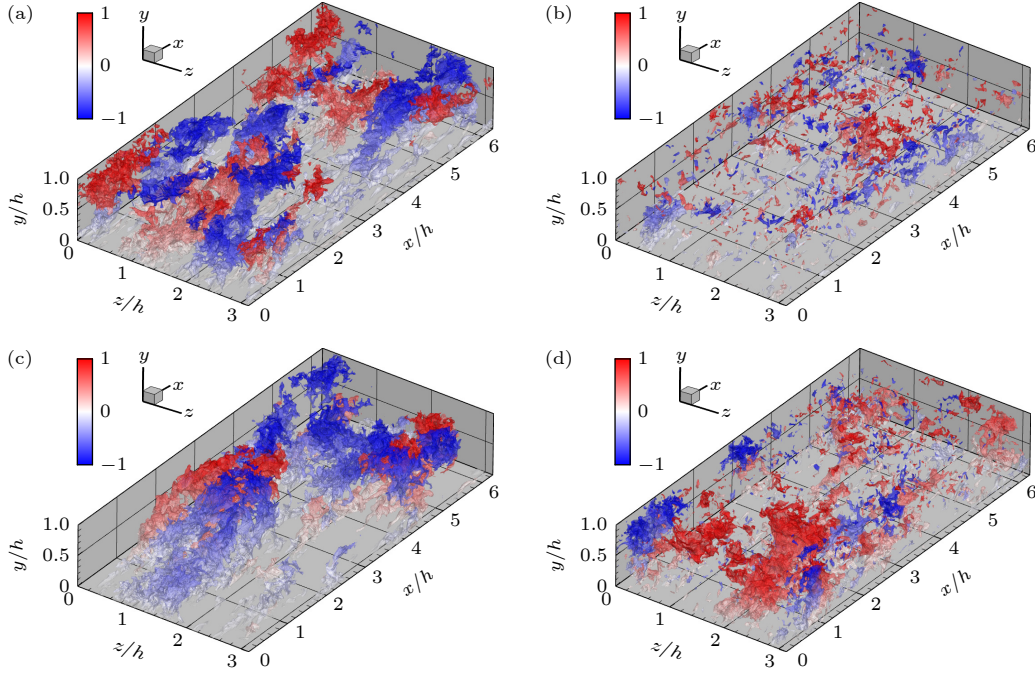


图3 高速槽道湍流MSAW算例中的(a)速度壁面附着结构, (b)速度壁面分离结构, (c)温度壁面附着结构, (d)温度壁面分离结构
Fig. 3. (a) Velocity wall-attached structures, (b) velocity wall-detached structures, (c) temperature wall-attached structures, and (d) temperature wall-detached structures in the MSAW case of high-speed turbulent channel flow.

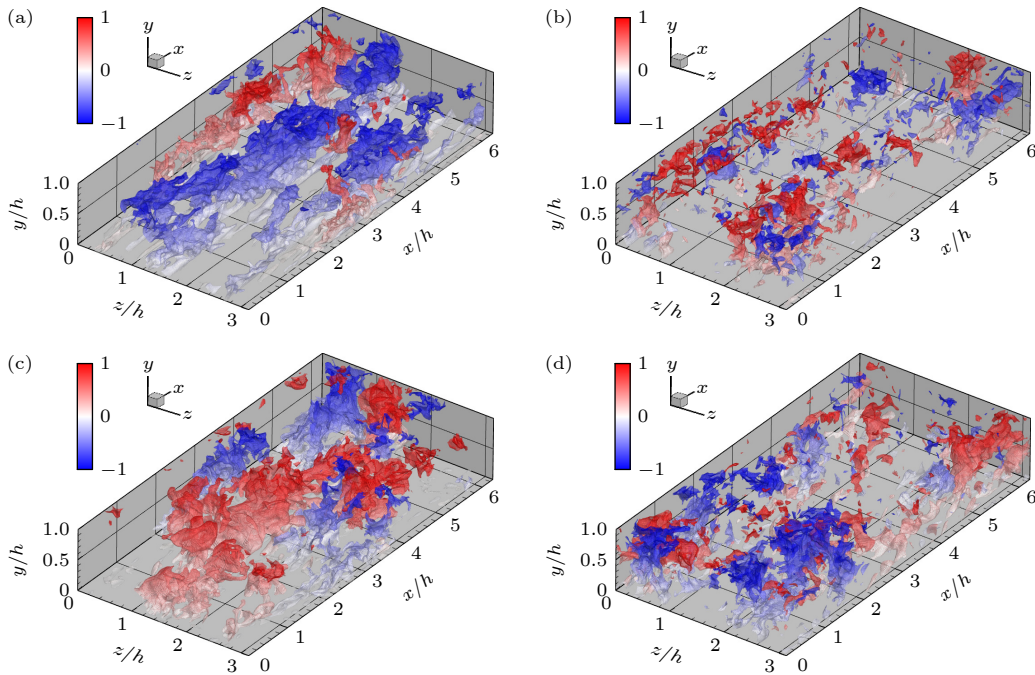


图4 高速槽道湍流MS CW05算例中的(a)速度壁面附着结构, (b)速度壁面分离结构, (c)温度壁面附着结构, (d)温度壁面分离结构
Fig. 4. (a) Velocity wall-attached structures, (b) velocity wall-detached structures, (c) temperature wall-attached structures, and (d) temperature wall-detached structures in the MS CW05 case of high-speed turbulent channel flow.

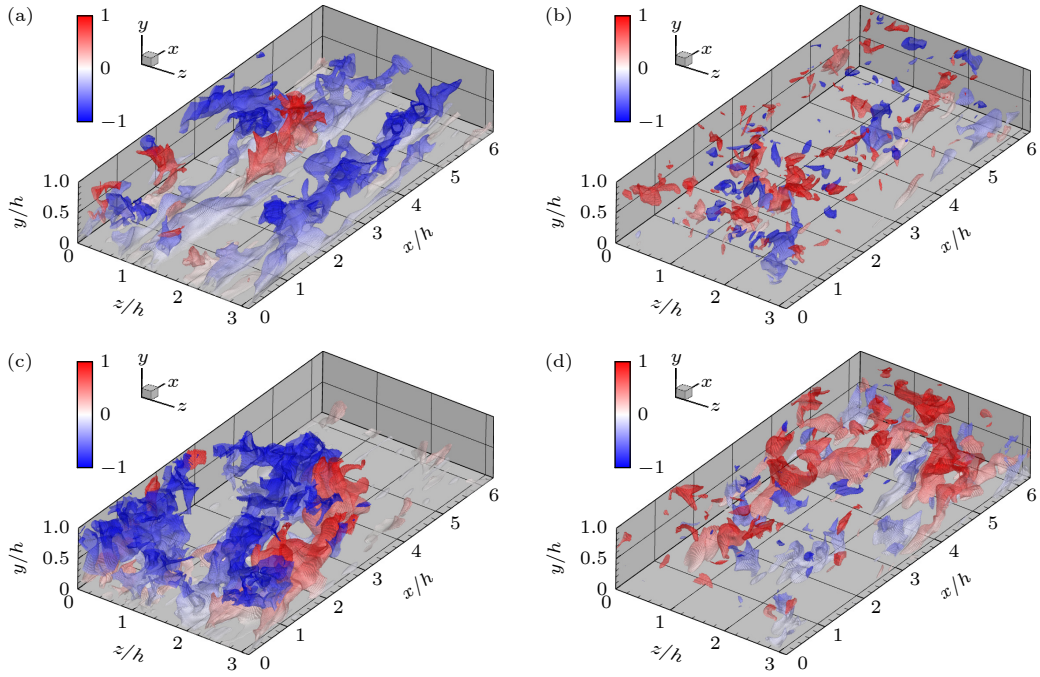


图 5 高速槽道湍流 MS CW02 算例中的 (a) 速度壁面附着结构, (b) 速度壁面分离结构, (c) 温度壁面附着结构, (d) 温度壁面分离结构

Fig. 5. (a) Velocity wall-attached structures, (b) velocity wall-detached structures, (c) temperature wall-attached structures, and (d) temperature wall-detached structures in the MS CW02 case of high-speed turbulent channel flow.

包围该结构的最小长方体的尺寸, 即 l_x , $l_y = y_{\max} - y_{\min}$ 和 l_z 分别代表流向、壁法向和展向长度. 其中, y_{\min} 和 y_{\max} 分别表示该结构到壁面的最小和最大法向距离.

3.2 结构空间尺度特征

为深入探讨 3.1 节中壁面附着结构的尺度分布, 本节从统计学角度分析这些结构的尺度分布规律, 以揭示其空间特征. 图 6 给出了高速槽道湍流结构数量的概率分布, 左侧为壁面附着结构 (即对应 $y_{\min}^+ < 1$ 的结构), 其余部分为壁面分离结构 (即 $y_{\min}^+ > 1$), 壁面分离结构具有趋近于 $y_{\max}^+ = y_{\min}^+$ 的特性. 对于壁面附着结构, 速度结构表现出相似的分布特征, 主要集中于近壁区; 温度结构分布的峰值区域随着壁温比的降低逐渐升高, 由 $l_y^+ \approx 10$ 变化至 $l_y^+ \approx 30$ 附近. 速度结构的分布与文献 [22–25] 中的结果基本一致, 表明可压缩性对壁面附着结构和壁面分离结构分布的影响不显著.

为了进一步研究提取结构的尺度分布特性, 图 7 给出了速度和温度壁面附着结构的平均长度分布. 很明显, 在对数区附近 ($l_y^+ \geq 50$, $l_y/h < 0.6$), 速度壁面附着结构满足 $l_x^+ \sim (l_y^+)^{0.7}$, $l_z^+ = l_y^+$, 与

Yoon 等 [17] 结果 ($l_x^+ \sim (l_y^+)^{0.74}$, $l_z^+ = l_y^+$) 一致, 符合 Townsend (1976) 附着涡假设中对数区壁面附着结构的自相似特性. 而温度壁面附着结构在对数区同样具有类似的特征, 其满足 $l_x^+ \sim (l_y^+)^{0.85}$, $l_z^+ \sim (l_y^+)^{0.8}$, 证明了温度脉动与速度脉动在结构分布上的相似特性. 基于上述结果, 可以将结构划分为三类: 自相似结构 (self-similar, ss)、非自相似矮结构 (short, s) 和非自相似高结构 (tall, t), 即

$$\phi_{\text{attached}} = \phi_{\text{ss}} + \phi_{\text{s}} + \phi_{\text{t}}, \quad (3)$$

其分别对应于 $l_y^+ \geq 50$, $l_y/h < 0.6$, $10 \leq l_y^+ < 50$ 与 $l_y/h \geq 0.6$ 所包含的区域. 该分类方法与 Yoon 等 [17] 的分类结果一致.

3.3 拟序结构条件统计特性

拟序结构能在一定程度上反映脉动量的行为特征. 为进一步探讨拟序结构对脉动统计量的影响, 采用基于拟序结构条件平均的方法, 即仅统计与相应拟序结构相关的部分, 以揭示不同拟序结构对应的统计量分布特征. 统计方法可以用下式表述为

$$\bar{\phi}_c(y) = \frac{1}{N_c(y)} \sum_c \phi(x, y, z, t). \quad (4)$$

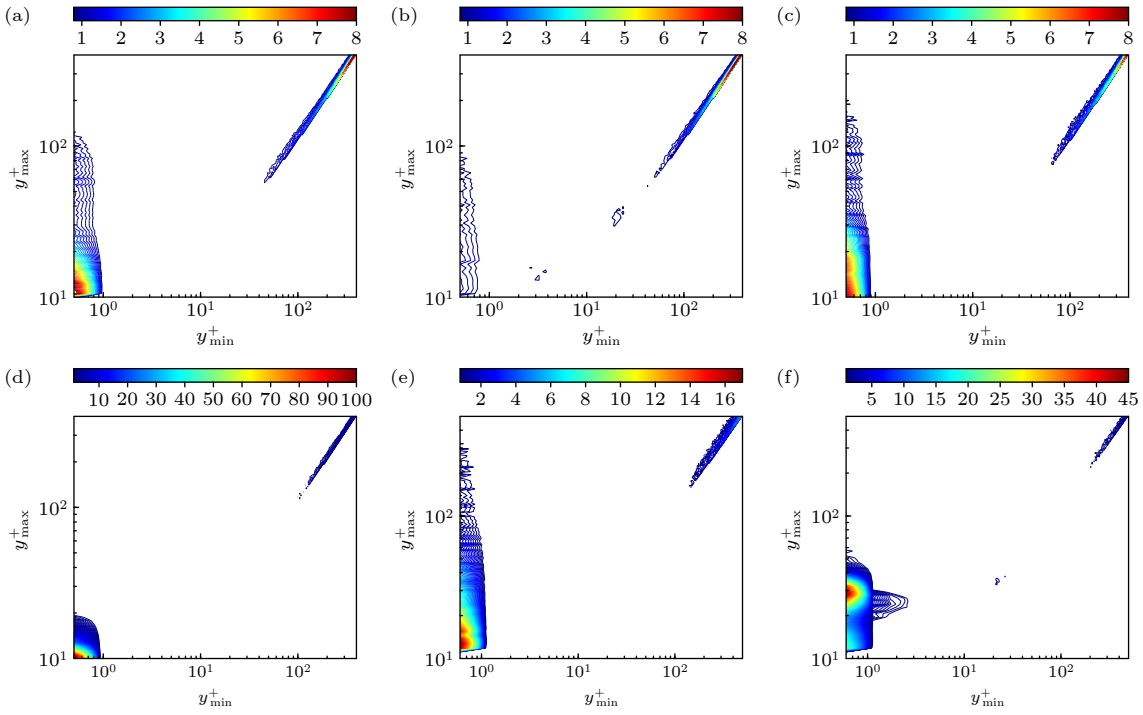


图 6 高速槽道湍流中的结构数量概率分布 M8AW 算例中的 (a) 速度结构和 (b) 温度结构; MSCW02 算例中的 (c) 速度结构和 (d) 温度结构; MSCW05 算例中的 (e) 速度结构和 (f) 温度结构
 Fig. 6. The number of clusters per unit with respect to y_{min} and y_{max} : (a) Velocity and (b) temperature structures in the M8AW case; (c) velocity and (d) temperature structures in the MSCW02 case; (e) velocity and (f) temperature structures in the MSCW05 case.

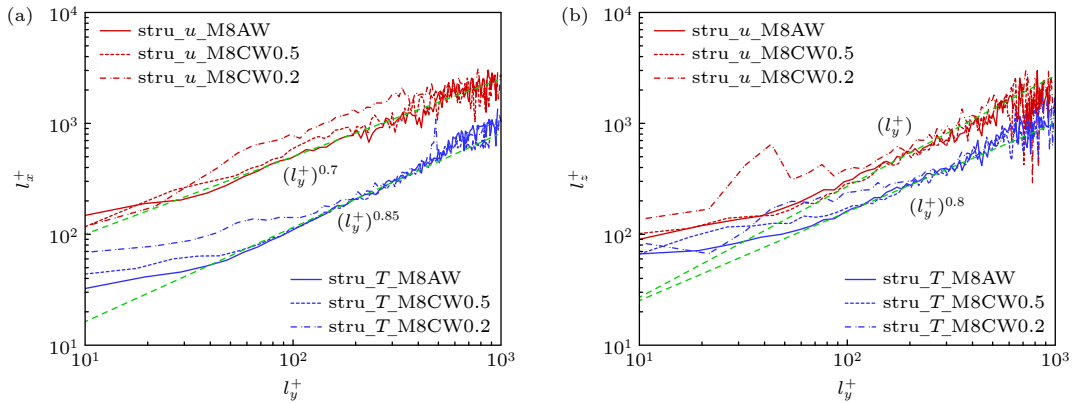


图 7 高速槽道湍流中的速度/温度壁面附着结构中的结构尺度关系 (a) $l_x^+ - l_y^+$; (b) $l_z^+ - l_y^+$
 Fig. 7. Scale relations in wall attached structures for u and T : (a) $l_x^+ - l_y^+$; (b) $l_z^+ - l_y^+$.

首先, 本文考察了不同速度特征的壁面附着结构对速度脉动统计量 (包括流向雷诺正应力与雷诺切应力) 的影响, 结果如图 8 所示. 与低速附着结构相比, 高速附着结构的雷诺正应力峰值出现在更靠近壁面的区域. 随着壁温比降低, 两类结构的峰值位置均整体向远离壁面的方向移动, 且两者峰值之间的差异逐渐减小. 具体而言, 在 M8AW 工况下, 低速与高速结构对应的峰值位置分别为 $y^+ = 9$ 和 $y^+ = 13$; 在 MSCW05 工况下, 分别移至 $y^+ = 16$ 和 $y^+ = 22$; 而在 MSCW02 工况下, 则进一步

外移至 $y^+ = 31$ 和 $y^+ = 40$. 此外, 速度自相似结构及高速条件平均结构在对数区内均遵循对数律, 该结果与 Townsend(1976) 的附着涡假设一致. 但随着壁温比降低, 符合对数律的区域范围有所缩减. 另一方面, 低速附着结构所对应的雷诺切应力峰值显著高于高速结构. 矮结构受限于其法向高度无法延伸至对数区, 因此对该区域的湍流统计量贡献微弱.

为进一步探究不同壁面附着结构对温度脉动统计特性的影响, 本文分析了温度脉动方差与法向

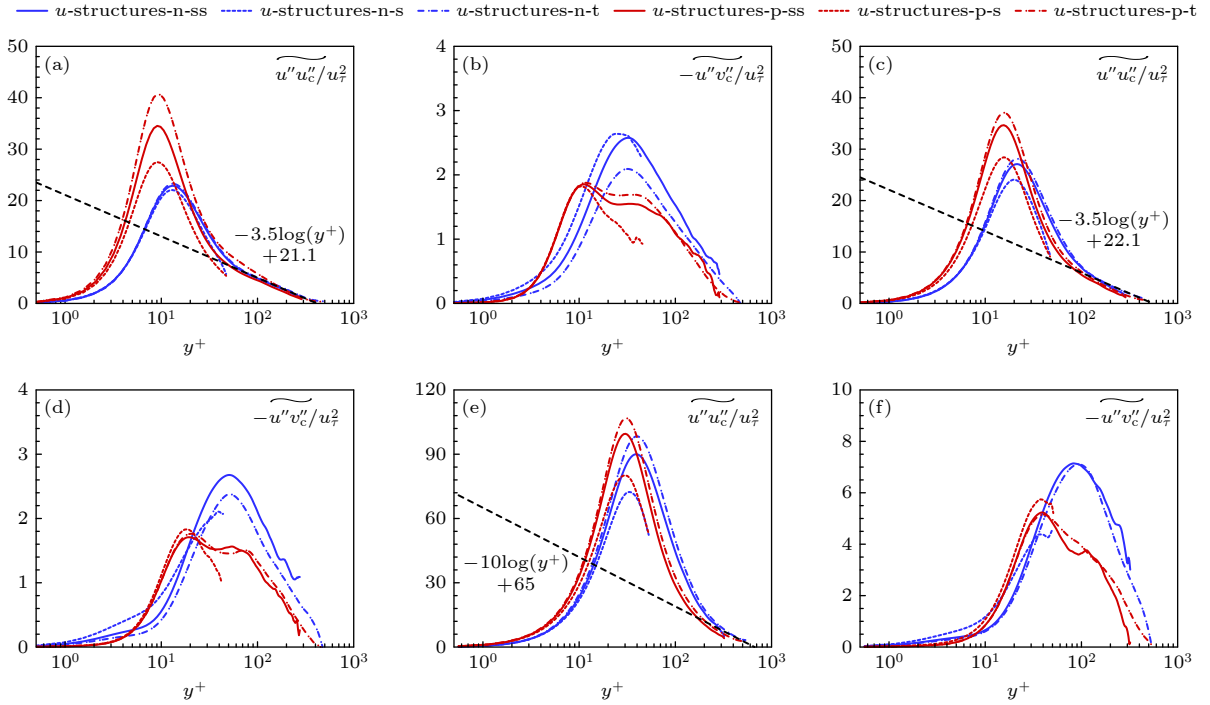


图 8 高速槽道湍流中速度壁面附着结构的条件平均结果。MSAW 算例中的 (a) 流向雷诺正应力和 (b) 剪切雷诺应力；MSCW05 算例中的 (c) 流向雷诺正应力和 (d) 剪切雷诺应力；MSCW02 算例中的 (e) 流向雷诺正应力和 (f) 剪切雷诺应力。其中，p 和 n 分别代表高速和低速结构；ss, s 和 t 分别代表自相似结构、矮结构以及高结构。

Fig. 8. Conditional averaging results of velocity wall-attached structures in high-speed turbulent channel flow: (a) Streamwise Reynolds normal stress and (b) shear Reynolds stress in the MSAW case; (c) streamwise Reynolds normal stress and (d) shear Reynolds stress in the MSCW05 case; (e) streamwise Reynolds normal stress and (f) shear Reynolds stress in the MSCW02 case. Here, p and n denote high-speed and low-speed structures, respectively; ss, s, and t represent self-similar, squat, and tall structures, respectively.

湍流热通量的分布，结果如图 9 所示。随着壁温比的降低，温度脉动均方根由单峰分布逐渐转变为双峰分布，该转变主要源于近壁区域平均温度梯度的显著增强。具体而言，在 M8 AW 工况下，低温结构与高温结构的峰值位置分别位于 $y^+ = 9$ 和 $y^+ = 30$ ；在 MSCW05 工况下，两类结构的第二峰值分别出现在 $y^+ = 28$ 和 $y^+ = 42$ ；而在 MSCW02 工况下，其第二峰值进一步外移至 $y^+ = 56$ 和 $y^+ = 93$ 。此外，温度自相似结构与高温条件平均结构在对数区内均符合对数律，与 Townsend(1976) 所提出的附着涡假设一致，但随着壁温比的降低，符合该规律的区间范围有所缩小。壁温比的变化对法向湍流热通量亦具有显著影响，尤其体现在低温矮结构方面：在 MSAW 与 MSCW05 算例中，该热通量以正值为主；而在 M8 CW02 算例中则转为负值占主导。这一结果表明，壁温比对低温矮结构的行为具有决定性影响。

在条件平均的框架下，探讨速度脉动与温度脉动两者之间的关系，考虑 Huang 等^[36]提出的强雷

诺比拟的脉动关系（简称 HSRA），即

$$\frac{T''_{\text{rms}}/\bar{T}}{(\gamma - 1)M^2 u''_{\text{rms}}/\bar{u}} = \frac{1}{\left| Pr_t \left(\frac{\partial \bar{T}_t}{\partial \bar{T}} - 1 \right) \right|}. \quad (5)$$

对所提取速度场和温度场的壁面附着结构（对应于 a）、壁面分离结构（对应于 d）及其他部分（对应于 w，弱脉动）分别进行了研究，结果如图 10 所示。例如 HSRA_u_a_T_a 代表可以看到速度壁面附着结构与温度壁面附着结构对应脉动之间的 HSRA 关系。靠近壁面处的 HSRA 结果显示出强烈的峰值，主要归因于在近壁处存在平均温度峰值，即平均温度梯度为 0。从图 10 中可以看出在整个槽道内，速度脉动与温度脉动符合 HSRA 关系（黑色实线，对应的值为 1）。按照上述规则进行划分，大部分结果均符合强雷诺比拟关系。强脉动结构与 2 倍弱脉动结构同样遵循强雷诺比拟关系（对应于图中 $u_a_T_w$, $u_d_T_w$, $u_w_T_a$, $u_w_T_d$ ），进一步证明了速度场结构和温度场结构之间的关联性。

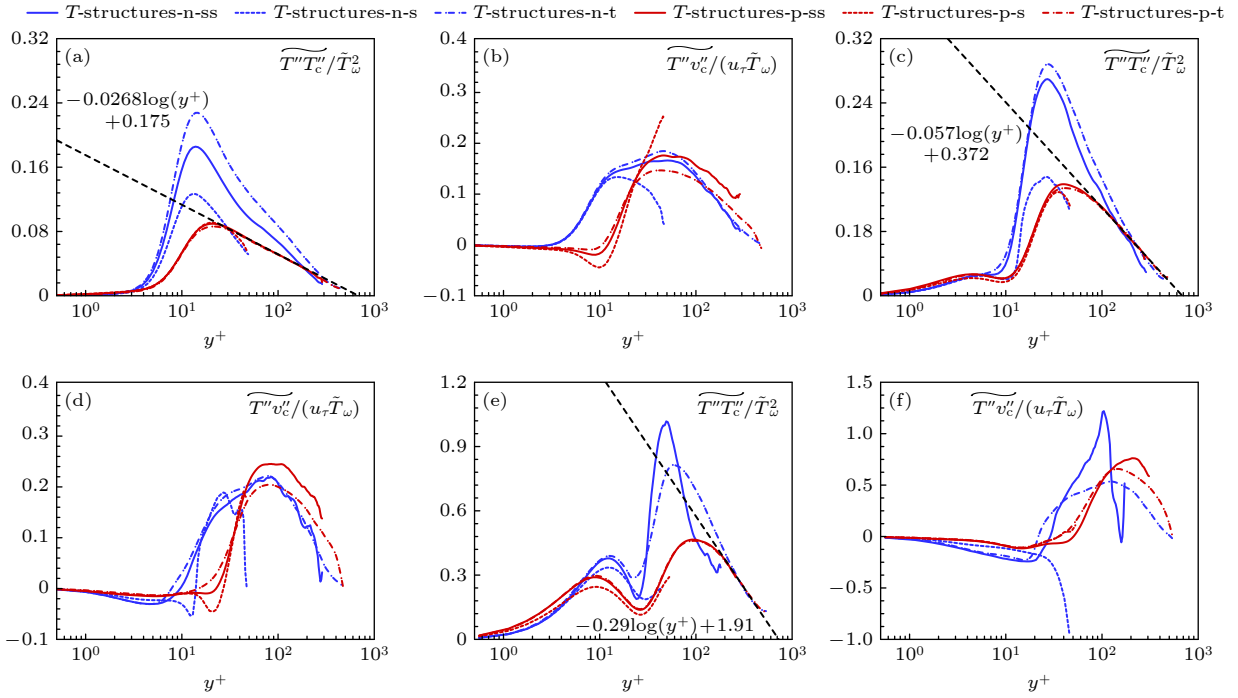


图9 高速槽道湍流中温度壁面附着结构的条件平均结果 MSAW算例中的(a)温度脉动均方根和(b)湍流热通量; MSCW05算例中的(c)温度脉动均方根和(d)湍流热通量; MSCW02算例中的(e)温度脉动均方根和(f)湍流热通量. 其中, p和n分别代表高温和低温结构; ss, s和t分别代表自相似结构、矮结构以及高结构

Fig. 9. Conditional averaging results of temperature wall-attached structures in high-speed turbulent channel flow: (a) Mean square of temperature fluctuations and (b) turbulent heat flux in the MSAW case; (c) mean square of temperature fluctuations and (d) turbulent heat flux in the MSCW05 case; (e) mean square of temperature fluctuations and (f) turbulent heat flux in the MSCW02 case. Here, p and n denote high-temperature and low-temperature structures, respectively; ss, s, and t represent self-similar, squat, and tall structures, respectively.

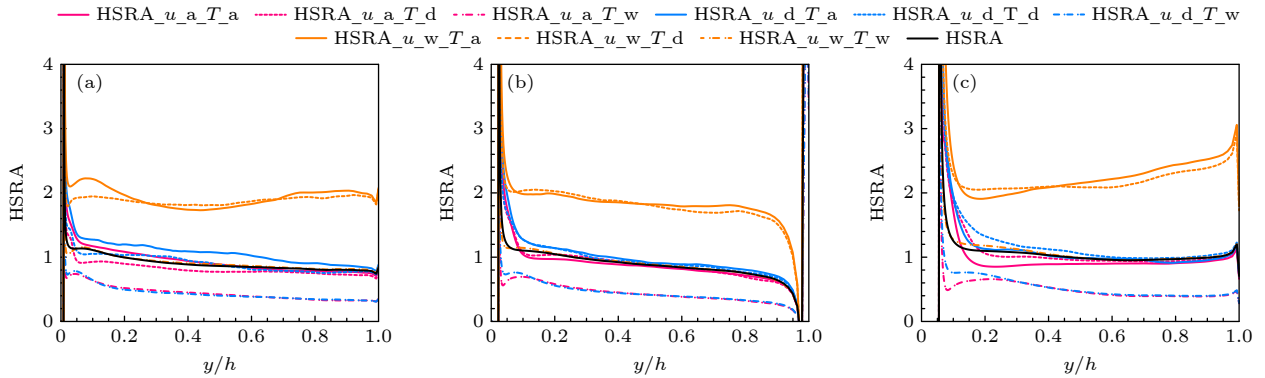


图10 高速槽道湍流中的结构条件统计下的强雷诺比拟关系 (a) MSAW算例; (b) MSCW05算例; (c) MSCW02算例

Fig. 10. Strong Reynolds analogy under conditional averaging in high-speed turbulent channel flows: (a) Case MSAW; (b) Case MSCW05; (c) Case MSCW02.

4 壁面附着结构与壁面摩阻/热流的关联

拟序结构通过影响壁湍流的动量和能量输运过程进而影响其壁面摩阻/热流. 引入RD分解公式, 以衡量不同物理过程对壁面摩阻/热流的定量贡献. 对于壁面摩阻,

$$C_f = C_{f,v} + C_{f,T} + C_{f,G}, \quad (6)$$

其中,

$$C_{f,v} = \frac{2}{\rho_c U_c^3} \int_0^h \bar{\tau}_{xy} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} dy,$$

$$C_{f,T} = \frac{2}{\rho_c U_c^3} \int_0^h \left(-\bar{\rho} \widetilde{u''v''} \right) \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} dy,$$

$$C_{f,G} = \frac{2}{\rho_c U_c^3} \int_0^h \bar{\rho} (\tilde{u} - U_c) \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} dy. \quad (7)$$

将摩阻分解为以下三部分的贡献: 分子黏性耗散项、湍动能生成项和对流项. 对于壁面热流,

$$C_h = C_{h,G} + C_{h,L} + C_{h,T} + C_{h,MS} + C_{h,MD} + C_{h,K} + C_{h,RS}, \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} C_{h,G} &= \frac{1}{\rho_c U_c^4} \int_0^h (\tilde{u} - U_c) \left(\bar{\rho} \tilde{v} \frac{\partial \tilde{E}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{v}}{\partial y} \right) dy, \\ C_{h,L} &= \frac{1}{\rho_c U_c^4} \int_0^h \left(\kappa \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} \right) dy, \\ C_{h,T} &= \frac{1}{\rho_c U_c^4} \int_0^h \left(-c_p \bar{\rho} \widetilde{T'' v''} \right) \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} dy, \\ C_{h,MS} &= -\frac{1}{\rho_c U_c^4} \int_0^h \left[(\tilde{u} - U_c) \frac{\partial}{\partial y} (\tilde{u} \bar{\tau}_{xy} + \tilde{v} \bar{\tau}_{yy}) \right] dy, \\ C_{h,MD} &= -\frac{1}{\rho_c U_c^4} \int_0^h (\tilde{u} - U_c) \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u'' \tau_{xy}} + \overline{v'' \tau_{yy}}) dy, \\ C_{h,K} &= \frac{1}{\rho_c U_c^4} \int_0^h \left[-\frac{1}{2} (\tilde{u} - U_c) \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\rho} \widetilde{u'' v'' k} u''_k) \right] dy, \\ C_{h,RS} &= \frac{2}{\rho_c U_c^4} \int_0^h - \left[\bar{\rho} (\widetilde{u u'' v''} + \widetilde{v v'' v''}) \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} \right] dy. \end{aligned} \quad (9)$$

可以将热流系数分解为以下 8 部分的贡献: 对流、压力作用项、热传导项、湍流热输运项、分子应力做功项、分子扩散项、湍动能输运项与雷诺应力做功项.

可见, 壁面摩阻的相关脉动作用项为湍动能生成项 $C_{f,T}$, 壁面热流的相关脉动作用项为生成项 $C_{h,RS}$ 和湍流热输运项 $C_{h,T}$. 针对这三项, 进一步采用条件平均来评估不同拟序结构对摩阻/热流的贡献, 结果如表 2—表 4 所列, 其中 N 代表低速或低温结构, P 代表高速或高温结构; ss, s, t 分别代表自相似结构、非自相似矮结构和非自相似高结构.

表 2 不同速度结构下湍动能生成项对壁面摩阻的贡献占比 $C_{f,T}/C_f$

Table 2. Contribution percentage, $C_{f,T}/C_f$ of the turbulent kinetic energy production term to wall friction under different velocity structures.

Case	N, ss	N, s	N, t	P, ss	P, s	P, t	Total
M8 AW	3.22	0.32	6.26	1.88	1.35	5.40	42.11
M8 CW05	3.71	0.13	7.10	1.66	1.27	3.70	38.84
M8 CW02	2.21	0.15	9.61	2.01	0.73	2.70	37.20

表 3 不同速度结构下生成项对壁面热流的贡献占比 $C_{h,RS}/C_h$

Table 3. Contribution percentage, $C_{h,RS}/C_h$ of the production term to wall heat flux under different velocity structures.

Case	N, ss	N, s	N, t	P, ss	P, s	P, t	Total
M8 CW05	6.66	0.16	14.24	2.33	1.38	6.32	69.21
M8 CW02	3.00	0.10	14.19	2.09	0.58	3.40	50.56

表 4 不同速度结构下湍流热输运项对壁面热流的贡献占比 $C_{h,T}/C_h$

Table 4. Contribution percentage, $C_{h,T}/C_h$ of the turbulent heat transport term to wall heat flux under different velocity structures.

Case	N, ss	N, s	N, t	P, ss	P, s	P, t	Total
MSCW05	-0.21	0.33	-0.62	-0.36	0.11	-3.00	-24.95
MSCW02	0.00	0.93	-0.24	-0.01	0.08	-1.22	-8.08

从表 2—表 4 中数据可以看出, 低速非自相似高结构对壁面摩阻和热流生成的贡献最为显著, 是摩阻与热流产生的主要机制之一; 其次为低速自相似结构. 相比之下, 高速结构对摩阻和热流生成的影响较小. 在热流输运方面, 高温非自相似高结构主导了从壁面带走热量的过程; 而对于自相似结构与非自相似矮结构, 低温与高温结构在热流传输中的贡献程度相近.

上述现象表明, 速度结构对壁面摩阻和热流的贡献主要源于其所产生的剪切雷诺应力, 而温度结构对壁面热流的输运作用则主要依赖于湍流热通量. 具体而言, 速度壁附着结构对应的脉动对壁面摩阻/热流生成的贡献率接近 50%, 占据主导地位; 而温度壁附着结构对应的脉动对热流输运的贡献相对有限. 这一规律与图 3—5 所呈现的结构分布特征一致: 速度壁附着结构表现出较强的动力学作用, 而温度壁附着结构的影响则相对较弱.

5 结论

本研究基于聚类连通方法, 系统提取高速槽道湍流中速度与温度壁面附着结构, 通过统计分析得出以下结论.

1) 结构自相似性验证: 速度与温度壁面附着结构均存在显著自相似区域, 符合 Townsend 附着涡理论假设, 据此建立“自相似结构-非自相似低结构-非相似高结构”的三级分类体系.

2) 主导结构演化特性: 条件统计分析表明, 流向

雷诺正应力与温度脉动平方在对数区均满足对数率,这一现象符合 Townsend(1976)附着涡假设,且壁温比对温度统计量的影响显著强于速度统计量.

3) 输运机制解耦: 速度结构通过调制动量输运主导壁面摩阻与热流生成, 而温度结构则通过法向湍流热输运控制热量传递方向. 定量分析证实, 低速高结构与高温高结构对壁面摩阻及热流产生具有决定性贡献.

参考文献

- [1] Smits A, McKeon B, Marusic I 2011 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **43** 353
- [2] Jiménez J 2012 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **44** 27
- [3] Kline S, Reynolds W, Schraub F, Runstadler P 1967 *J. Fluid Mech.* **30** 741
- [4] Cheng C, Fu L 2022 *Phys. Rev. Fluids* **7** 114604
- [5] Yu M, Xu C, Chen J, Liu P, Fu Y, Yuan X 2022 *Phys. Rev. Fluids* **7** 054607
- [6] Townsend A 1976 *The Structure of Turbulent Shear Flows* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [7] Perry A, Chong M 1982 *J. Fluid Mech.* **119** 173
- [8] Marusic I, Monty J. 2019 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **51** 49
- [9] Hutchins N, Nickels T, Marusic I, Chong M 2009 *J. Fluid Mech.* **635** 103
- [10] Hultmark M, Vallikivi M, Bailey S, Smits A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 094501
- [11] Hutchins N, Chauhan K, Marusic I, Monty J 2012 *Boundary-Layer Meteorol.* **145** 273
- [12] Lee M, Moser R 2015 *J. Fluid Mech.* **774** 395
- [13] Nickels T, Marusic I, Hafez S, Chong M 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 074501
- [14] Ahn J, Lee J, Kang J, Sung H 2015 *Phys. Fluids* **27** 065110
- [15] Lozano D, Flores O, Jiménez J 2012 *J. Fluid Mech.* **694** 100
- [16] Lozano D, Jiménez J 2014 *J. Fluid Mech.* **759** 432
- [17] Dong S, Lozano D, Sekimoto A, Jiménez J 2017 *J. Fluid Mech.* **816** 167
- [18] Lozano D A, Bae H J 2019 *J. Fluid Mech.* **868** 698
- [19] Jiménez J 2013 *Phys. Fluids* **25** 101302
- [20] Dong S W, Cheng C, Chen J Q, Yuan X X, Li W P 2021 *Adv. Mech.* **51** 792 (in Chinese) [董思卫, 程诚, 陈坚强, 袁先旭, 李伟鹏 2021 力学进展 **51** 792]
- [21] Hwang J, Sung H 2018 *J. Fluid Mech.* **856** 58
- [22] Yang J, Hwang J, Sung H 2019 *Phys. Rev. Fluids* **4** 114606
- [23] Yoon M, Hwang J, Yang J, Sung H 2020 *J. Fluid Mech.* **885** A12
- [24] Hwang J, Lee J, Sung H 2020 *J. Fluid Mech.* **905** A6
- [25] Yoon M, Sung H 2022 *J. Fluid Mech.* **943** A14
- [26] Fukagata K, Iwamoto K, Kasagi N 2002 *Phys. Fluids* **14** 73
- [27] Renard N, Deck S 2016 *J. Fluid Mech.* **790** 339
- [28] Gomez T, Flutet V, Sagaut P 2009 *Phys. Rev. E* **79** 035301
- [29] Zhang P, Xia Z 2020 *Phys. Rev. E* **102** 043107
- [30] Wenzel C, Gibis T, Kloker M 2021 *J. Fluid Mech.* **930** A1
- [31] Li W, Fan Y, Modesti D, Cheng C 2019 *J. Fluid Mech.* **875** 101
- [32] Sun D, Guo Q, Yuan X, Zhang H, Liu P 2021 *Adv. Aerodyn.* **3** 1
- [33] Yu M, Xu C 2021 *Phys. Fluids* **33** 075106
- [34] Yu M, Liu P, Fu Y, Tang Z, Yuan X 2022 *Phys. Fluids* **34** 065139
- [35] Yu M, Liu P, Fu Y, Tang Z, Yuan X 2022 *Phys. Fluids* **34** 065140
- [36] Huang P G, Coleman G N, Bradshaw P 1995 *J. Fluid Mech.* **305** 185

Wall attached structures of velocity and temperature fluctuations in high-speed turbulent channel flows^{*}

LI Junyang[†] ZHOU Qingqing SUN Dong YU Ming
YUAN Xianxu LIU Pengxin[‡]

(*State Key Laboratory of Aerodynamics, Mianyang 621000, China*)

(Received 18 June 2025; revised manuscript received 26 August 2025)

Abstract

In this study, a clustering method is used to extract the coherent structures associated with intense streamwise velocity fluctuations and temperature fluctuations in high-speed turbulent channel flow. Based on their spatial locations, these structures are categorized into wall-attached type and wall-detached type. A subset of the wall-attached structures exhibits self-similarity in scale, consistent with Townsend (1976)'s attached eddy hypothesis, and these structures are further classified as squat structure, self-similar structure, and tall structure. Conditional averaging results indicate that the streamwise Reynolds normal stress and the intensity of temperature fluctuations follow a logarithmic law in the logarithmic layer, a phenomenon that aligns with the attached eddy hypothesis; meanwhile, the strong Reynolds analogy relationship between velocity and temperature fluctuations remains valid within these attached structures. Analysis based on the RD (Renard-Deck) identity decomposition reveals that tall structures related to low streamwise momentum mainly control the generation of wall friction and heat flux, while tall structures related to high-temperature events play a main role in the of wall-normal heat flux transfer.

Keywords: high-speed turbulent channel flows, clustering method, coherent structures, self-similarity, wall shear stress and wall heat flux.

PACS: 47.27.-i, 47.27.De, 47.27.ek, 47.27.nd

DOI: [10.7498/aps.74.20250783](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250783)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250783](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250783)

^{*} Project supported by the Young Talent Lifting Project, China and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12272396).

[†] Corresponding author. E-mail: lijunyang@cardc.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: liupengxin@cardc.cn

高速槽道湍流中的速度/温度壁面附着结构

李峻洋 周清清 孙东 余明 袁先旭 刘朋欣

Wall attached structures of velocity and temperature fluctuations in high-speed turbulent channel flows

LI Junyang ZHOU Qingqing SUN Dong YU Ming YUAN Xianxu LIU Pengxin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 204702 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250783

CSTR: 32037.14.aps.74.20250783

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250783>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

亚临界区圆柱绕流相干结构壁面模化混合RANS/LES模型

A wall-modeled hybrid RANS/LES model for flow around circular cylinder with coherent structures in subcritical Reynolds number regions

物理学报. 2024, 73(5): 054701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231745>

气泡在超声场中绕圈运动的高速摄影及其图像分析

High-speed photography and image analysis of orbital motion of gas bubbles in ultrasonic field

物理学报. 2021, 70(5): 054701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201381>

基于高阶信息的网络相似性比较方法

Network similarity comparison method based on higher-order information

物理学报. 2024, 73(3): 038901 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231096>

小液滴撞击壁面传热特性数值分析

Numerical analysis of heat transfer characteristics of small droplets impacting on wall

物理学报. 2021, 70(7): 074402 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201354>

基于锁模光学频率梳的高速数据传输

High-speed data transmission based on mode-locked optical frequency comb

物理学报. 2024, 73(4): 044204 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231384>

基于高速相位型空间光调制器的双光子多焦点结构光显微技术

Two-photon multifocal structured light microscopy based on high-speed phase-type spatial light modulator

物理学报. 2021, 70(9): 098701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201797>