

文章编号: 1000-582X(2013)01-121-06

# 受限空间内水平风作用下热分层流流场结构的 POD 分析

阳 东<sup>1</sup>, 祝 实<sup>2</sup>, 霍 然<sup>2</sup>, 胡隆华<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

**摘 要:** 对不同水平剪切强度下受限空间内热分层流的流场进行了 PIV 测量。应用特征正交分解(POD)方法分析了受限空间内热分层流的流场结构。结果表明, 没有水平强迫气流时, 低阶 POD 模态占总能量的比重较高, 表明水平方向的宏观流动为主流运动; 水平强迫剪切气流会造成能量向高阶 POD 模态耗散转移。而且, 水平强迫剪切气流造成不同阶数的 POD 模态中竖向动能与水平方向动能的比值均比没有水平强迫气流时高, 表明水平强迫剪切气流降低热分层流的稳定性并促进竖向质量交换。

**关键词:** 热分层流; 剪切流; 特征正交分解; 速度测量; 流动结构; 卷吸

**中图分类号:** X511; TU834.27

**文献标志码:** A

## POD analysis of flow structures in thermally stratified flow in a confined space with the effects of horizontal wind

YANG Dong<sup>1</sup>, ZHU Shi<sup>2</sup>, HUO Ran<sup>2</sup>, HU Longhua<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** PIV measurements are carried out on the thermally stratified flows under different horizontal shear intensities in a confined space. Proper orthogonal decomposition (POD) is used to analyze the structures of these thermally stratified flows. Results show that, at the conditions without forced horizontal airflow, the low-order POD mode constitutes a high proportion of the total energy of the flow, and the horizontal flow is the dominant flow structure. The horizontal shear drives the energy to dissipate from large structure to smaller structures. Relative to the conditions without forced horizontal airflow, the ratios of vertical kinetic energy to horizontal kinetic energy become higher for each order of POD mode in the conditions with forced horizontal airflow. This indicates that horizontal shear can result in stratification instability and enhance the mass exchange in the vertical direction.

**Key words:** thermally stratified flow; shear flow; proper orthogonal decomposition; velocity measurement; flow structure; entrainment

收稿日期: 2012-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106189)

作者简介: 阳东(1982-), 男, 博士, 主要从事建筑环境与消防工程方面的研究, (E-mail) yangd8210@gmail.com.

热分层是受限空间火灾中典型的流动形态。当建筑中发生火灾以后,燃烧生成的热量和烟气通过火羽流的形式输运到建筑空间顶部,形成热分层流<sup>[1-2]</sup>,并在浮力的作用下水平蔓延。因此,热分层流是有毒有害烟气在水平方向上实现跨区域传播的主要载体。在水平蔓延的过程中,由于上层热烟气与下层冷空气的水平剪切,分层界面附近产生一系列的不同尺度的涡旋结构<sup>[3]</sup>,并导致对下层冷空气的卷吸<sup>[4]</sup>,使得热烟气层的温度、组分浓度分布等发生改变,进而影响到热分层流的水平运动特性。特别是开启机械送风、排烟<sup>[2, 5-6]</sup>的情况下,由于水平受迫气流的作用,热分层流的流场结构会变得更加紊乱,分层稳定性可能被破坏<sup>[2]</sup>,进而导致卷吸量的增大<sup>[7]</sup>。要通过实验对这些流动现象及其影响机理进行研究,需要引进合适的测量技术和数据分析方法。

为了能够实时的捕获实验区域内的速度场,通常采用粒子图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV)<sup>[8]</sup>。该方法具有全场测量、不干扰流场等优点,并且前人已将其应用到分层流速度场的测量当中<sup>[9-10]</sup>。然而,仅仅凭借 PIV 测得的瞬时速度场序列并不能够直接对其运动特性进行分析,因为表征其特性的流动结构在时间和空间上是相互叠加的。因此,要对分层流动力学特性进行有效分析,首先要对其流场进行解构。传统的做法是将时域信号变换为频域信号,并设计滤波器对其截断后进行逆变换,从而获得流场的相干结构<sup>[11]</sup>。然而,对于分层流而言,由于其卷吸(或掺混)等特性不仅与大尺度相干结构有关,也与小尺寸结构密切相关<sup>[3, 12]</sup>,因此很难设计在物理意义上合理的滤波器和截断频率。特征正交分解 (proper orthogonal decomposition, POD) 是近年来使用较多的流场解构方法。POD 方法通过确定最优正交基,将流场中不同尺度的结构按照包含能量的大小分解成完整的序

列,从而实现对流场的有效分离。Lumley<sup>[13]</sup>于 1967 年最早提出将 POD 用于湍流研究。而后,POD 被广泛应用于各类基本流动类型的分析,如平板边界层<sup>[14]</sup>、圆柱尾迹流<sup>[15]</sup>、库埃特流动<sup>[16]</sup>、槽道流动<sup>[17]</sup>、后台阶流动<sup>[18]</sup>等;POD 甚至被用于分析复杂工业设备内的流场<sup>[19]</sup>;Yang<sup>[20]</sup>等利用 POD 提取了火灾诱导浮力羽流的大尺度流动结构。这些研究证明通过 POD 方法可以从原始流场分解出物理上有意义的全序列流场结构,为利用 POD 方法分析受限空间内热分层流的流场结构,特别是水平剪切对热分层流卷吸强度的影响指明了前景。这里将引进 POD 技术对受限空间热分层流的 PIV 数据进行后处理和分析。

## 1 试验设置

首先通过 PIV 试验获得热分层流在连续时间段内的速度场。试验在 7.5 m(长)×1.5 m(宽)×0.6 m(高)的通道中开展,见图 1。通道的顶面和底面均为 8 mm 厚的防火板,侧面为 6 mm 厚的防火玻璃。在距离通道端部 1.85 m 处设置气体燃烧器,点燃后可以营造热分层流(见图 1)。气体燃烧器的燃料为液化石油气,燃气流量由转子流量计控制,使得燃烧产生的浮力维持稳定。在试验中,打开距端部 0.8 m 处的排风口(排烟口为边长 0.2 m 的正方形),将靠近排风口的一端封闭,另一端与外界连通(见图 1)。于是,在远离排风口的一侧,热分层流与水平环境风形成剪切。试验包括 2 个工况,火源功率均为 11.8 kW,排风口中心的速度分别为 0、1.8 m/s。在开展 PIV 试验之前,对其他典型流动参数(如温度、热分层流厚度、局部点速度等)进行了测量,这些参数的详细测量方法在文献[2]中作了详细介绍。热分层流的厚度、剪切速度、平均温升以及 Froude 数的计算方法也在文献[2]中作了说明,具体情况见表 1。

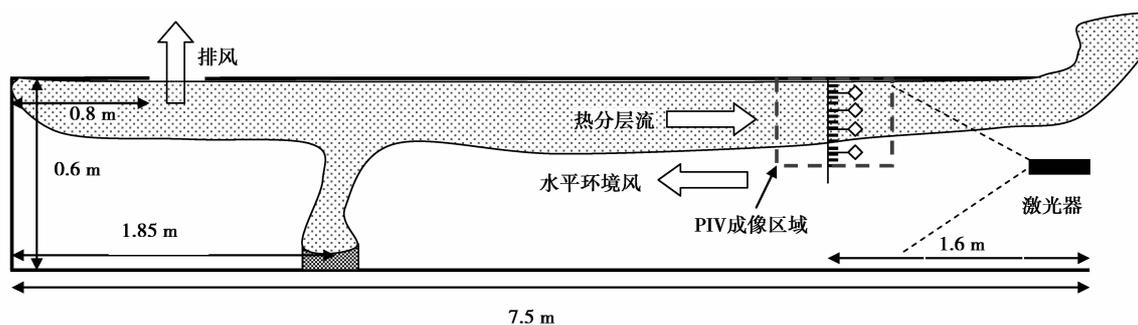


图 1 试验装置示意图

表1 试验工况

工况	排风口中 心速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	剪切 速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	热分层流 平均温升/ $^{\circ}\text{C}$	热分层 流厚度/ m	Fr 数	对流 Re 数
工况 1	0	0.52	38	0.11	1.1	2 148
工况 2	1.8	0.49	32	0.09	1.5	1 366

PIV 试验中采用粒径为  $100 \sim 300 \mu\text{m}$  的氮化硼 (BN) 颗粒作为流场的示踪颗粒。BN 的分子量为 24.82, 密度为  $2\,250 \text{ kg/m}^3$ , 熔点为  $2\,700 \sim 3\,000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在流场充分发展以后, 从通道底面将 BN 颗粒喷入流场。采用波长为  $530 \text{ nm}$  的半导体激光器作为光源, 输出功率为  $200 \text{ mW}$ , 片光厚度约为  $1 \text{ mm}$ 。图 2 为利用激光片光辅助显示的热分层流流场情况。用于 PIV 测量的 CCD 相机的分辨率为  $1\,920 \times 1\,080$ , 采集频率为 25 帧; 成像区域为  $0.22 \text{ m}$  (长)  $\times 0.13 \text{ m}$  (高), 其成像中心距离通道开启端  $1.6 \text{ m}$ , 距离通道顶面  $0.065 \text{ m}$ , 如图 1 所示。采用 Gui<sup>[21]</sup> 等提出的最小平方差法 (minimum quadric differences, MQD) 作为 PIV 的图像诊断算法, 以获得流场稳定段后 25 幅连续时间序列的瞬态速度场。

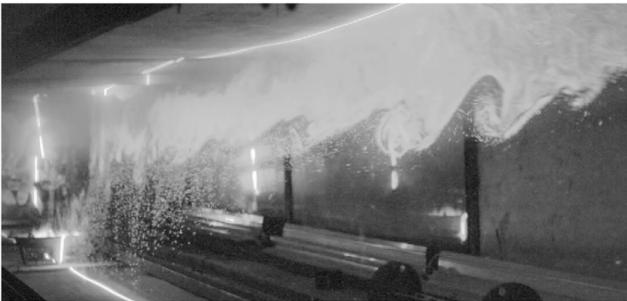


图2 激光辅助显示的流场情况

## 2 POD 方法理论

POD 的原理是将流场中的相干结构与其包含的能量关联起来, 从能量的角度对流场进行解构。从数学上讲, POD 是通过计算得到函数空间的最优正交基 (也称特征模态或 POD 模态)<sup>[13, 22]</sup>, 这些正交基代表了空间信号在各时间序列中出现最多的结构, 也是时间平均意义下最主要的结构。POD 的原理在前人的文献中也作了一些介绍<sup>[16-19]</sup>。

对于一个速度场集合  $\{u^k\}$ , 可以通过计算得到其最优正交基  $\{\varphi^j\}_{j=1, \infty}$ 。由于集合  $\{\varphi^j\}$  是一个完全正交集,  $\{u^k\}$  可以写成  $\{\varphi^j\}$  的级数展开形式:

$$u^k = \sum_{j=1}^{\infty} a_i^k \varphi^j, \quad (1)$$

式中,  $a_i^k$  为投影系数。

基函数  $\{\varphi^j\}$  满足的条件是  $\{u^k\}$  在  $\{\varphi^j\}$  上投影的平均值最大, 即:

$$\max_{\phi} \frac{[\int (u, \phi)]^2}{\phi^2}. \quad (2)$$

求解  $\{\varphi^j\}$  的过程为一个特征值问题:

$$\iint R(x, x') \cdot \phi(x') dx' = \lambda \phi. \quad (3)$$

式中,  $R$  为相关张量, 定义为:

$$R_{i,j}(x, x') = [u^i(x) \cdot u^j(x')]. \quad (4)$$

直接求解式 (4) 所定义的特征值问题计算量较大。Sirovich<sup>[23]</sup> 提出采用 snapshots 方法求解该问题以降低计算量, 则函数  $R$  可通过下式计算得到:

$$R_{i,j}(x, x') = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M u_n^i(x) \cdot u_n^j(x'). \quad (5)$$

式中:  $M$  表示  $\{u^k\}$  所包含的元素个数,  $u^i$  为瞬态速度场。

基函数可以表示为:

$$\phi = \sum_{k=1}^M A_k U_k. \quad (6)$$

将式 (5)、(6) 代入式 (3) 后, 则得到特征方程

$$C \cdot A = \lambda \cdot A, \quad (7)$$

式中, 张量  $C$  定义为:

$$C_{i,j} = \sum_{m=1}^n u^i(x_m) \cdot u^j(x_m). \quad (8)$$

式中,  $n$  为瞬态速度场的元素个数。

式 (7) 中的  $\lambda^i$  为第  $i$  阶特征值, 表征了第  $i$  阶 POD 模态的能量 (动能)。按照  $\lambda^i > \lambda^{i+1}$  的方式对 POD 模态重新排列, 则能量较大的 POD 模态为低阶模态, 代表复杂流场中占主导地位的流场结构。

这样, 特征值  $\lambda^i$  与所有特征值之和  $\sum_{i=1}^M \lambda^i$  的比值表征了第  $i$  个 POD 模态的能量占流场总能量的比重, 即:

$$E_i = \lambda^i / \sum_{n=i}^M \lambda^i. \quad (9)$$

求得特征模态  $\{\varphi^j\}$  以后, 可以用特征模态的线性组合来重构瞬态速度场:

$$u^i = \sum_{j=1}^M a_{i,j} \varphi_j. \quad (10)$$

式中,  $a_{i,j}$  为瞬时速度场在特征模态上的投影:

$$a_{i,j} = (u^i, \varphi_j). \quad (11)$$

### 3 结果与讨论

#### 3.1 瞬态速度矢量场

图 3 为流场发展稳定后工况 1 和工况 2 的典型瞬态速度矢量场。由图 3 可知,对于工况 1,其上部的流动方向较均匀;其下部的流场较紊乱,并且出现涡旋结构。这是因为热分层流与其下部的冷空气流之间存在剪切,造成剪切层附近的流场结构相对复杂。对于工况 2,由于水平强迫气流的作用,上部热分层流和下部冷空气流之间的剪切增强,使得剪切层附近的流场更加紊乱。

虽然瞬态速度矢量场在一定程度上反映了水平强迫气流对热分层流流场结构的影响,然而,仅依靠瞬态速度矢量场还无法全面理解其动力学特性。

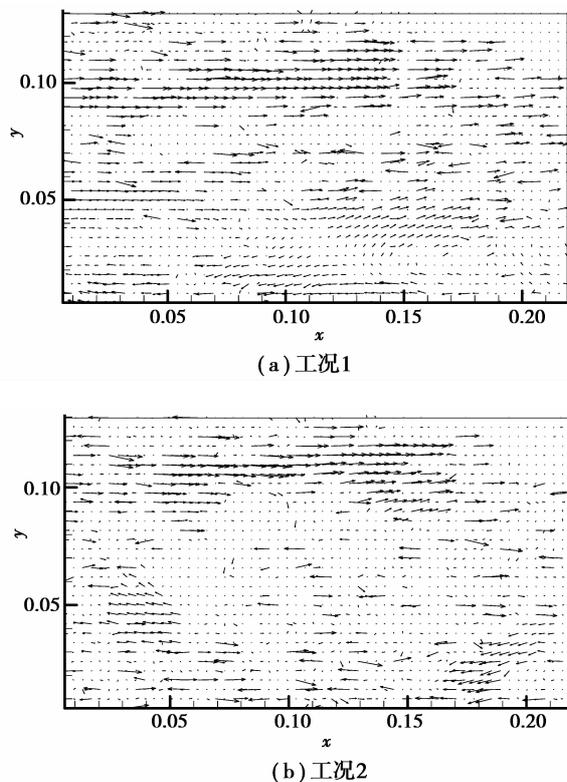


图 3 剪切层附近的典型速度场

#### 3.2 POD 模态分析

选取流动稳定后 25 幅具有均匀时间间隔的瞬态速度场作为 POD 分析所用的 snapshots。图 4 为工况 1 流场的前 3 阶模态,也是其流场中能量最大的 3 个模态。由图 4 可以看出,占支配地位的流场结构(1 阶模态)主要为上部的水平流动;2 阶模态和 3 阶模态为流场中的小尺度结构,它们随机分布在流场中。

图 5 为工况 2 中流场的前 3 阶模态,由图 5 可知,占支配地位的流动结构仍为上部的水平流动。

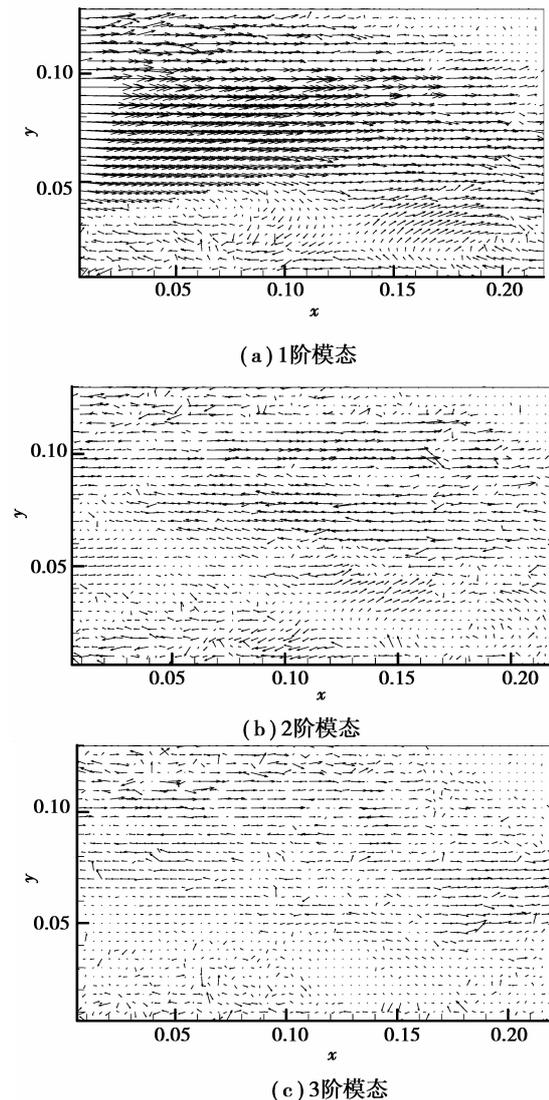


图 4 工况 1 剪切层附近流场的 POD 模态

但是,相对于工况 1,工况 2 中呈现水平流动的区域明显变小;2 阶模态和 3 阶模态为流场中的小尺度结构,它们也随机分布在流场范围内。

图 6 为工况 1 和工况 2 对应的 POD 能谱。可以看出,1 阶模态占据了流场的大部分能量。相对于 1 阶模态,2 阶模态和 3 阶模态的能量比重大幅减小。工况 1 的 2 阶模态和 3 阶模态分别占流场总能量的 7% 和 3%;工况 2 的 2 阶模态和 3 阶模态分别占流场总能量的 7% 和 5%。然而,对比 2 种工况也可以看到,1 阶模态含有的能量存在较大差别:工况 1 的 1 阶模态能量占其流场总能量的 55%;工况 2 的 1 阶模态能量仅占流场总能量的 28%。

对于分层流流场而言,其 1 阶模态体现的是主流运动,即热烟气层向远处发展,冷空气层流向火源方向的整体水平流动状态。而越高阶模态反映的是越细微的涡旋结构,其运动方向的随机性也越强。

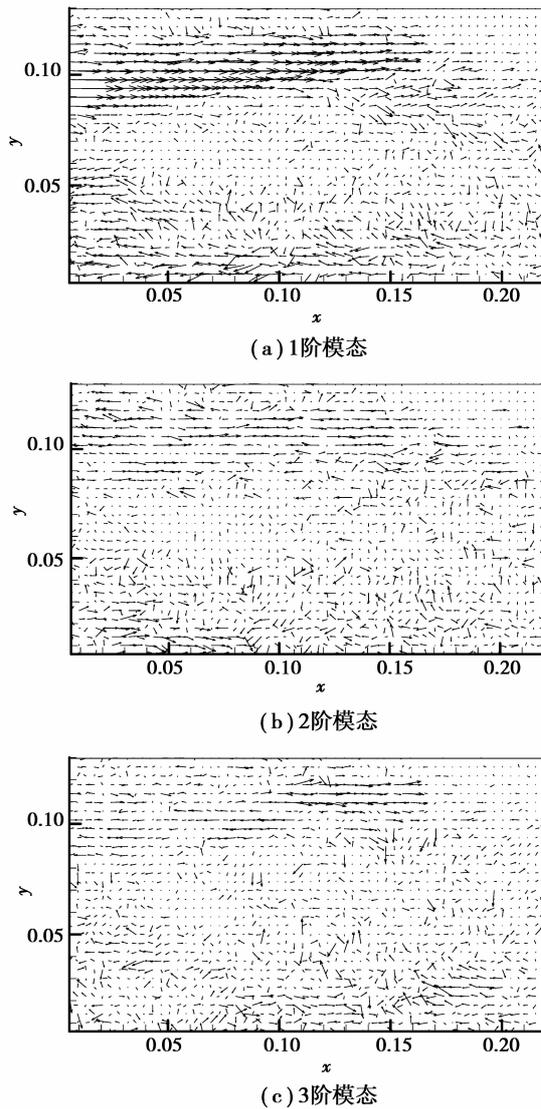


图 5 工况 2 剪切层附近流场的 POD 模态

在分层流的界面上,由于湍流不稳定性,会产生尺度较大的涡旋,并分离破碎成小尺度的涡旋,造成动能的耗散。2 种工况的 1 阶模态能量均占主导地位,表明在笔者设计的 2 种工况条件下,热烟气和冷空气层中水平流动在动能分布上均占优势;而从 1 阶模态所占能量比例来看,可以发现工况 2 中动能向高阶模态转移耗散的比重要明显大于工况 1,这表明水平强迫气流使得分层流的动能耗散加强,造成分层稳定性的衰减。

卷吸是热分层流的重要特性。卷吸系数通常作为量化分层流卷吸强度的指标<sup>[12]</sup>,用流场竖向速度和水平方向速度之比表示,

$$E = w/U, \quad (12)$$

式中: $w$  为垂直于热分流界面的平均流速; $U$  为热分层流在水平方向上的平均流速。

如式(12)所示,前人通常采用时空平均概念的

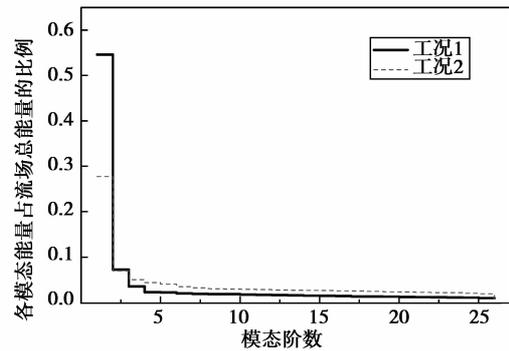


图 6 各阶模态能量占流场总能量的比例

流场来量化卷吸系数。然而,平均流场无法体现不同尺度的流动结构对于热分层流卷吸的贡献。利用 POD 方法,可以获得不同阶数的模态(或不同尺度的流动结构)中竖向动能与水平方向动能之比。图 7 为不同阶数的模态中竖向动能与水平方向动能的比值。可以看出,相对于工况 1,工况 2 中各阶模态的竖向动能与水平方向动能的比值均变大。特别是对于较高阶模态(如 10 阶以上模态),工况 2 的竖向动能与水平方向动能的比值是工况 1 的 4 倍左右。这说明,水平强迫气流造成的剪切作用增加了分层界面上涡旋的产生和脱落,携带动能从主流方向上分离,进入竖向运动,增强了动能的耗散和质量在竖向上的交换。这也从动力学特性的角度初步解释了水平强迫气流使热分层流卷吸增强的原因。

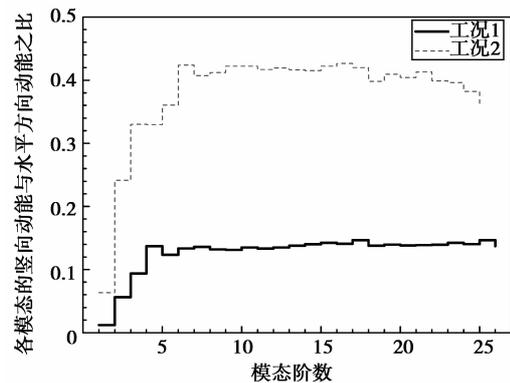


图 7 各阶模态的竖向动能与水平方向动能之比

## 4 结 论

将特征正交分解(POD)方法用于分析受限空间中热分层流的流场结构。研究结果表明:

1) 利用 POD 方法可以有效地对 PIV 测量得到的受限空间火灾烟气流场进行解析,获得隐藏在热分层流紊流场中不同能级结构的分布情况;

2) 当无水平强迫气流时,热分层流的 1 阶模态能

量占主导,表明主要能量分布在水平方向的主流运动中;在存在水平强迫流动的情况下,1阶模态能量比例大幅减少,表明动能大量向小尺度涡旋转移耗散,分层主流运动速度衰减变快,分层稳定性下降。

3)通过POD分析发现,随着水平剪切的增加,所有尺度的流动结构中竖向动能与水平方向动能的比值均增大,表明水平强迫气流增强了分层界面上涡旋的产生和分离,更多地消耗了主流方向上气流运动的动能。这从动力学的角度初步解释了水平强迫气流降低分层稳定性,增强层间卷吸的机理。

#### 参考文献:

- [1] Crouzeix C, Mouël J L L, Perrier F, et al. Thermal stratification induced by heating in a non-adiabatic context[J]. *Building and Environment*, 2006, 41(7): 926-939.
- [2] Yang D, Hu L H, Huo R, et al. Experimental study on buoyant flow stratification induced by a fire in a horizontal channel[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(8/9): 872-878.
- [3] Fernando H J S. Turbulent mixing in stratified fluids[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, 23: 455-493.
- [4] Alpert R L. Turbulent ceiling-jet induced by large-scale fires[J]. *Combustion Science and Technology*, 1975, 11(5/6): 197-213.
- [5] Lee S R, Ryou H S. A numerical study on smoke movement in longitudinal ventilation tunnel fires for different aspect ratio[J]. *Building and Environment*, 2006, 41(6): 719-725.
- [6] Stepopoulos E K, Damigos D G. Design of emergency ventilation system for an underground storage facility[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, 22(3): 293-302.
- [7] Hu L H, Huo R, Wang H B, et al. Full scale experiments on studying smoke spread in a road tunnel[C]// *Proceedings of the 8th International Symposium on Fire Safety Science*, September 18-23, 2005, Beijing, China. [S. l.]: IAFSS, 2005: 1437-1447.
- [8] Adrian R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid-mechanics [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991, 23(1): 261-304.
- [9] Wintterle T, Laurien E, Stähler T, et al. Experimental and numerical investigation of counter-current stratified flows in horizontal channels[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, 238(3): 627-636.
- [10] Qiu X. Investigation of turbulence structures and turbulent counter-gradient transport properties in stratified flows[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2006, 18(5): 627.
- [11] Camussi R. Coherent structure identification from wavelet analysis of particle image velocimetry data[J]. *Experiments in Fluids*, 2002, 32(1): 76-86.
- [12] Strang E J, Fernando H J S. Entrainment and mixing in stratified shear flows [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, 428: 349-386.
- [13] Lumley J L. The structure of inhomogeneous turbulence flows [EB/OL]. [2012-01-08] <http://www.citeulike.org/user/l-alex/article/592403>.
- [14] Aubry N, Holmes P, Lumley J L, et al. The dynamics of coherent structures in the wall region of a turbulent boundary layer[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1988, 192: 115-173.
- [15] Ma X, Karniadakis G E. A low-dimensional model for simulating three-dimensional cylinder flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, 458: 181-190.
- [16] Smith T, Moehlis J, Holmes P. Models for turbulent plane Couette flow using the proper orthogonal decomposition: minimal flow unit [J]. *Physics of Fluids*, 2002, 14(7): 2493-2507.
- [17] Liberzon A, Gurka R, Tiselj I, et al. Spatial characterization of the numerically simulated vorticity fields of a flow in a flume [J]. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 2005, 19(2): 115-125.
- [18] Kostas J, Soria J, Chong M S. A comparison between snapshot POD analysis of PIV velocity and vorticity data[J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 38(2): 146-160.
- [19] Tabib M V, Joshi J B. Analysis of dominant flow structures and their flow dynamics in chemical process equipment using snapshot proper orthogonal decomposition technique [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(14): 3695-3715.
- [20] Yang D, Huo R, Hu L H, et al. The application of snapshot POD method in characterization and analysis of numerically simulated fire-induced flows [C] // *Proceedings of the ASME 2009 Heat Transfer Summer Conference and 3rd Energy Sustainability Conference*, July 19-23, 2009, San Francisco, California, USA. New York: ASME, 2009: 41-61.
- [21] Gui L, Merzkirch W. A comparative study of the MQD method and several correlation-based PIV evaluation algorithms[J]. *Experiments in Fluids*, 2000, 28(1): 36-44.
- [22] Berkooz G, Holmes P, Lumley J L. The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1993, 25: 539-575.
- [23] Lawrence S. Turbulence and the dynamics of coherent structures. part I: coherent structures[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1987, 45: 561-571.