

文章编号:1004-7220(2013)03-0316-05

# 真实人体上呼吸道规范模型流场 PIV 实验研究

李福生<sup>1</sup>, 孙 栋<sup>2</sup>, 徐新喜<sup>1</sup>, 赵秀国<sup>1</sup>, 谭树林<sup>1</sup>

(1. 军事医学科学院 卫生装备研究所, 国家生物防护装备工程技术研究中心, 天津 300161; 2. 总后勤部军交运输研究所, 天津 300161)

**摘要:** 目的 研究上呼吸道模型内气流组织形式, 深入认识上呼吸道内气流运动特性, 为分析气溶胶在人体上呼吸道内的扩散、转捩以及沉积模式提供科学依据。方法 采用粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术对真实人体上呼吸道模型内流场进行了实验研究, 并针对口腔、咽腔和气管等不同位置对气流状态进行了分析。结果 气流在舌苔上部和口腔中部速度较高, 到咽部时, 由于截面积的变小而导致气流速度增大, 在声门处气流速度达到最大 (10.24 m/s), 且在气管内呈前高后低分布; 而在涡量分布方面, 气流在声门部位产生强烈的喷射, 致使气管内部速度梯度增加, 在声门的前后壁面形成两个涡量集中区, 并导致气管前壁面的涡量值要明显高于后壁面。结论 PIV 是研究人体上呼吸道内气流组织形式的一种有效方法, 对于探索有毒气溶胶对人体的危害和吸入药物气溶胶的治疗效果以及研究呼吸系统的发病机理有着重要的意义。

**关键词:** 粒子图像测速技术; 人体上呼吸道; 流场; 速度分布; 涡量

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

## PIV experiment on flow fields of the real human upper respiratory tract gauge model

LI Fu-sheng<sup>1</sup>, SUN Dong<sup>2</sup>, XU Xin-xi<sup>1</sup>, ZHAO Xiu-guo<sup>1</sup>, TAN Shu-lin<sup>1</sup> (1. National Biological Protection Engineering Center, Institute of Medical Equipment, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300161, China; 2. Institute of Military Transportation of the General Logistics, Tianjin 300161, China)

**Abstract: Objective** To investigate the airflow distribution mode in human upper respiratory tract model for understanding the characteristics of the airflow in human upper respiratory tract, and provide scientific basis for analyzing the diffusion, transition and deposition patterns of aerosol in human upper respiratory tract. **Methods** PIV (particle image velocimetry) technology was adopted to study flow fields of the real human upper respiratory tract model. The airflow state in oral cavity, pharynx and trachea was analyzed. **Results** The flow velocity was relatively high at the upper tongue coating and in the middle of the oral cavity; when the airflow reached the pharynx, the velocity was increased rapidly due to the reduction of sectional area; the maximum velocity (10.24 m/s) appeared in the glottis, and the velocity in the anterior wall was higher than that in the posterior wall of the trachea; as the airflow injected at the glottis, the velocity gradient was increased, and the vorticity was concentrated at the anterior and posterior wall of the glottis, resulting in a significantly higher vorticity value at anterior wall of the trachea than that at the posterior wall. **Conclusions** PIV technology is an effective way to investigate the airflow distribution mode in human upper respiratory tract, and it is of great importance for exploring the harm of toxic aerosol to human body and the therapeutic effect of inhalation drug aerosol, as well as for researching the pathogenesis of respiratory system.

**Key words:** Particle image velocimetry (PIV); Human upper respiratory tract; Flow field; Velocity distribution; Vorticity

收稿日期:2012-06-04; 修回日期:2012-07-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31070832)。

通信作者:徐新喜, 研究员, 博士研究生导师, E-mail: xuxx1@sohu.com。

人体上呼吸道是人体呼吸系统的门户,是人体与外界环境进行气体交换的重要通道。研究人体上呼吸道内流场特性,对于认识有毒气溶胶或药物气溶胶在人体上呼吸道内的沉积特点、探索有毒气溶胶对人体的危害、研究吸入药物气溶胶的治疗效果,以及认识呼吸系统的发病机理、优化和控制气溶胶的运输与沉积等具有非常重要的意义。近年来,国外许多学者从实验层面对其进行了研究。Fresconi 等<sup>[1]</sup>采用采用粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术测量呼气-吸气两种状态下人体肺部支气管模型内的稳态和瞬态气流运动,结果发现支气管模型内不同截面存在二次涡流; Ramuzat 等<sup>[2-5]</sup>分别采用 PIV、激光多普勒测速仪 (LDV) 测量人体肺部支气管模型内的气流组织形式,结果发现人体肺部支气管内气流有涡的存在; Heenan 等<sup>[6]</sup>采用 PIV 技术测量了人体理想的口喉模型内的气流流场,结果发现在口喉模型内存在高速射流; 而 Brucker 等<sup>[7]</sup>采用三维 PIV 测量人体肺部支气管数模型内的气流组织形式,结果发现肺部支气管内的气流流场在瞬态、稳态和脉冲条件下的气流流场有很大的区别,即在高呼吸频率状态下,吸气阶段的气流分离区域扩大,子管内气流流量分布不均匀。目前,国内可查的仅有文献 [8] 利用 PIV 技术对人体上呼吸道简化模型进行了稳态实验研究。基于此,本文采用 PIV 技术对真实人体上呼吸道模型开展实验并进行分析。

## 1 实验设备及仪器

人体上呼吸道流场 PIV 测量实验装置主要包括:真实人体上呼吸道实验模型、气路系统和 PIV 系统。真实人体上呼吸道模型是基于正常人体上呼吸道 CT 扫描图像,运用高级图像处理技术三维重构人体上呼吸道模型并进行规范化处理,将文献 [9] 规范化了的模型数据输入到 SPS600 快速成型机,采用激光快速成型技术,制备透明的树脂模型,模型包括口腔、悬雍垂、咽部、会厌、喉部、声门、梨状窝、气管和前 3 级支气管。为便于开展实验,模型口腔进口简化为直径为 23 mm 的圆形 (见图 1)。此规范模型是在个体模型的基础上进行规范化处理,更具有普适性;利用此模型进行实验和仿真,得到的数据将更加真实可靠。



图 1 真实人体上呼吸道实验模型

Fig. 1 Experimental model of the real human upper respiratory tract

气路系统由真空泵、真空舱室、电磁阀、调节阀、流量计以及烟雾混合舱室组成。PIV 测量装置由激光器、同步器、CCD 摄像机和 Insight 数据采集系统等组成。本次实验采用的 PIV 测量系统为美国 TSI 公司产品,激光器为双谐振 Solo PIV Nd: YAG 激光器,两束激光间隔时间设为 200  $\mu\text{s}$  (根据测量位置和速度的不同随时调整),频率为 3.75 Hz;同步器型号为 Model 610034,相机为 PowerView<sup>TM</sup> 2M 互相关 CCD 相机,分辨率为 1 600  $\times$  1 192 pixel,镜头为 MACRO 105 微距镜头;以及 Insight 6.0 和 Tecplot 10.0 软件;示踪粒子分别使用檀香的烟、加湿器产生的水雾以及烟雾发生器产生的烟雾进行比较,最后选择加湿器产生的水雾作为示踪粒子进行实验。

## 2 实验方案

模型的构建程序在文献 [9] 中已有详细描述,目前世界公认的 3 种稳态呼吸模式分别是休息状态 (呼吸流量 15 L/min)、轻微运动状态 (呼吸流量 30 L/min)、剧烈运动状态 (呼吸流量 60 L/min)<sup>[10]</sup>。本文中实验测量在稳态呼吸模式、呼吸流量为 30 L/min 条件下进行,即保证模型的入口流量保持恒定。

### 2.1 实验过程

(1) 搭好实验台,调试系统,保证各仪器运转正常,进行实验标定,确保拍摄到的图像中的标定尺的刻度在图像中清晰可见,确定比例 (见图 2);

(2) 调节流量调节阀,使流量计读数保持稳定;

(3) 校正激光器,使片光源腰部在待测区域中心附近,并使片光中心面和模型待测位置位置刻好的记号线重合;

(4) 在模型入口处撒播示踪粒子,控制浓度,并调整相机镜头的焦距和光圈,直至获得分布均匀、清晰可见的离子图像;

(5) 在模型待测区域反光严重的部位贴上遮光纸,用以吸收强光壁面反射;

(6) 在 Insight 6.0 软件界面中设置相关实验参数,开始采样,每个位置(具体测量位置参见图3)每个工况拍摄约20张照片;

(7) 调整系统位置,使相机和片光移动到下一个测量位置,重复步骤(5)~(7),直至完成所有的

测量工作。

## 2.2 数据处理

实验数据采集结束后,运用 PIV 分析软件 Insight 6.0 对原始数据进行处理,包括3个步骤,即 Mask、Cross-Correlation、Filter 的处理。其中,Mask 是面罩选择,即选择需要的部分,去掉不需要的部分;Cross-Correlation 是互相关处理;Filter 是滤波,分两步:一是在互相关处理后得到的图片中,去除错误的速度矢量;二是运用插值计算填补在实验过程中或计算过程中一些缺失的点的速度矢量,这样可能会抹掉一些特殊的现象,但会使图像显得完整。最后通过 Insight 6.0 软件界面链接到 Tecplot 软件,通过相应的运算法则,对得到的速度矢量文件进行处理,得到速度及涡量的分布结果。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 上呼吸道内气流速度测量结果

图4所示为人体上呼吸道内不同部位气流速度的 PIV 实验测量结果;其中, $X$ 轴为模型测量部位的水平方向, $Y$ 轴为模型测量部位的垂直方向。从图中可以看出,气流进入口腔后,由于口腔上部靠近硬腭部位气流速度较低,而中部气流速度较高,致使低速气流产生回旋,在口腔上部产生涡结构,如图4(a)所示;口腔下部气流撞击舌苔表面,气流遇到障碍后会产生绕流运动,致使舌苔上部及口腔中部的气流速度较高,而口腔内其他部位气流速度相对较低,如图4(b)所示;在咽部,受到气道转向及截面变小的影响,气流发生喷射,喷射导致喷射点处气流速度迅速增加,射流沿着咽腔不断延伸,如图4(c)所示;气流进入喉部后,由于声门部位结构形状的特殊性,气流产生朝向气管前壁面的喷射,在声门处达到最大为  $10.24 \text{ m/s}$ ,射流沿气管前壁面延伸,致使气管前壁面气流速度较高,而后壁面处气流速度较低,如图4(d)所示。

### 3.2 上呼吸道内涡量测量结果

图5所示为人体上呼吸道内不同部位涡量的 PIV 实验测量结果;其中, $X$ 轴为模型测量部位的水平方向, $Y$ 轴为模型测量部位的垂直方向。从图中可以看出,气流进入口腔后,搓动硬腭部位的气体导致口腔中部涡量较高;同时气流受到舌体的阻挡,形成绕流运动,致使舌苔上方的涡量较高,如图5(a)、

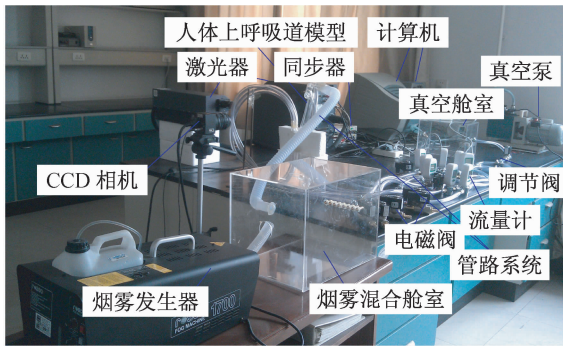


图2 真实人体上呼吸道流场 PIV 实验台

Fig.2 PIV experimental table for simulating the real flow fields of human upper respiratory tract

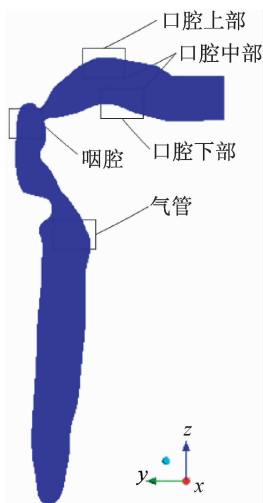


图3 人体上呼吸道模型 PIV 测量部位指示图

Fig.3 Schematic diagram for PIV measuring sites of human upper respiratory tract model

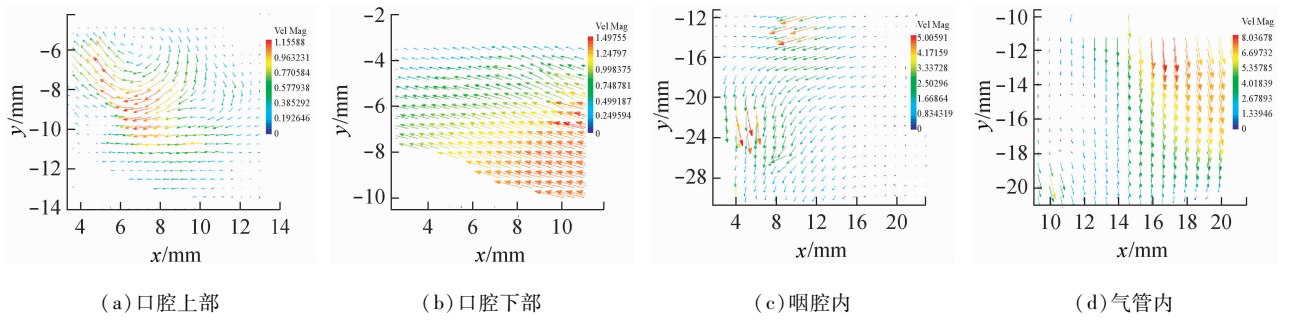


图4 人体上呼吸道内不同部位气流速度 PIV 实验测量结果

Fig. 4 PIV measuring results of the airflow velocity at different sites of human upper respiratory tract (a) At the top of the oral cavity, (b) At the bottom of the oral cavity, (c) In the pharynx, (d) In the trachea

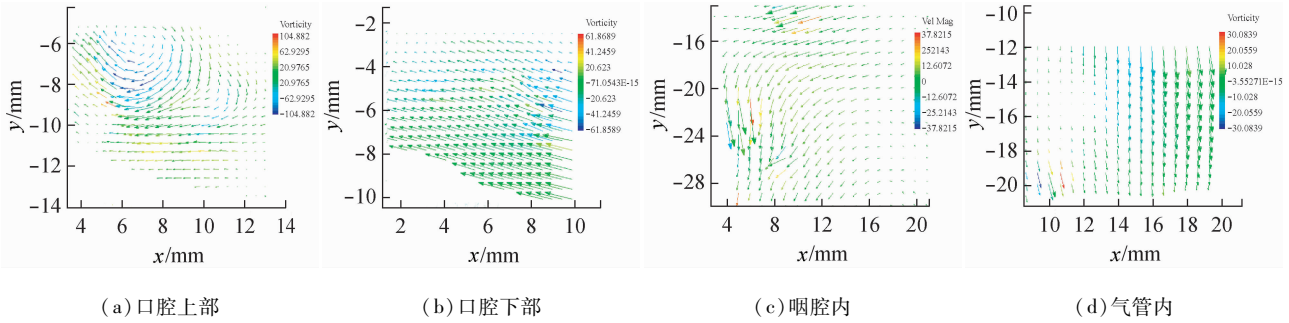


图5 人体上呼吸道内不同部位涡量分布 PIV 实验测量结果

Fig. 5 PIV measuring results of the vorticity distribution at different sites of human upper respiratory tract (a) At the top of the oral cavity, (b) At the bottom of the oral cavity, (c) In the pharynx, (d) In the trachea

(b) 所示;在咽部,受到气道转向及截面变小的影响,气流发生喷射,喷射导致咽部前后壁面处涡量较高,且后壁面处的涡量高于前壁面处涡量,如图 5 (c) 所示;气流进入喉部后,由于声门部位结构形状的特殊性,气流产生朝向气管前壁面的喷射,涡量沿气管前壁延伸,声门处气流的强烈喷射致使气管内的气流速度梯度增加,涡量较高,且气管前壁处涡量要高于后壁处涡量,如图 5(d) 所示。

## 4 结论

目前,在人体上呼吸道气流组织特性研究方面,国内研究人员主要集中在数值仿真层面。为了进一步揭示人体上呼吸道模型流场湍流结构的变化,本文制备了较为真实的人体上呼吸道实验模型,运用成熟的流场可视化 PIV 技术对人体上呼吸道模型内流量为 30 L/min 条件下的速度场和涡量场进行实验测量,证明了 PIV 技术在人体上呼吸道研究中的可行性。得出主要结论为:气流在舌苔上部和口腔

中部速度较高,到咽部时,由于截面积的变小而导致气流速度增大,在声门处气流速度达到最大,为 10.24 m/s,且在气管内呈前高后低分布;而在涡量分布方面,气流在声门部位产生强烈的喷射,致使气管内部速度梯度的增加,在声门的前后壁面形成两个涡量集中区,并导致气管前壁面的涡量值要明显高于后壁面。

## 参考文献:

[1] Fresconi FE, Prasad AK. Secondary velocity fields in the conducting airways of the human lung [J]. J Biomech Eng, 2007, 129(5): 722-732.  
 [2] Ramuzat A, Riethmuller ML. PIV investigations of oscillating flows within a 3D lung multiple bifurcation model [C]// Proceedings of 11th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Flows. Lisbon, Portugal: [s. n.], 2002: 1-19.  
 [3] Ramuzat A, Riethmuller ML. Application of 2D laser

- doppler velocimetry to biomedical flows experimental investigations of flows within lung bifurcations [C]//Proceedings of 7th International Conference on Laser Anemometry Advances and Applications. Karlsruhe, Germany; [s. n.], 1997.
- [4] Ramuzat A, Day S, Riethmuller ML. Steady and unsteady LDV and PIV investigations of flow within 2D lung bifurcations model [C]. Proceedings of 9th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal; [s. n.], 1998.
- [5] Ramuzat A, Richard H, Riethmuller ML. PIV investigation of unsteady flows within lung bifurcations [C]//7th International Conference Laser Anemometry Advances and Applications. Rome, Italy; [s. n.], 1999.
- [6] Heenan AF, Matida E, Pollard A, *et al.* Experimental measurements and computational modeling of the flow field in an idealized human oropharynx [J]. *Exp Fluid*, 2003, 35(1): 70-84.
- [7] Brücker CH, Schroder W. Flow visualization in a model of the bronchial tree in the human lung airways via 3-D PIV [C]// Proceedings of the 4th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing. Chamonix, France; [s. n.], 2003.
- [8] 赵秀国, 徐新喜, 谭树林, 等. 人体上呼吸道内稳态气流运动特性的PIV初步试验研究[J]. *实验流体力学*, 2009, 23(4): 60-64.
- [9] 孙栋, 李功杰, 李福生, 等. 人体上呼吸道模型三维重建及规范化研究[J]. *生物医学工程与临床*, 2012, 16(2): 127-131.
- [10] 孙栋, 徐新喜, 李福生, 等. 人体上呼吸道中气流涡结构特征数值仿真研究[J]. *医用生物力学*, 2011, 26(3): 262-268.
- Sun D, Xu XX, Li FS. Simulation study on characteristics of the vortex structure in human upper respiratory tract [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(3): 262-268.

• 致读者 •

## 关于文稿中法定计量单位的书写要求

本刊法定计量单位实行国务院1984年12月颁布的《中华人民共和国法定计量单位》，并以单位符号表示，具体使用参照中华医学会杂志社编写的《法定计量单位在医学上的应用》。注意单位名称与单位符号不可混用。如  $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{天}^{-1}$  应改为  $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ；组合单位符号中表示相除的斜线多于1条时，应采用负数幂的形式表示，如  $\text{ng}/\text{kg}/\text{min}$  应采用  $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  的形式；组合单位中斜线和负数幂亦不可混用，如前例不宜采用  $\text{ng}/\text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  的形式。在首次出现不常用的法定计量单位时加注与旧制单位的换算系数，下文再出现时只列法定计量单位。人体及动物体内的压力单位使用  $\text{mmHg}$  或  $\text{cmH}_2\text{O}$ ，但文中首次出现使用括号加注 ( $1 \text{ mmHg} = 0.133 \text{ kPa}$ )。正文中时间的计量单位表达，凡表示时间的具体数据时，数据后的计量单位应采用  $\text{d}$ 、 $\text{h}$ 、 $\text{min}$ 、 $\text{s}$ ，而不用天、小时、分钟、秒。量的符号一律用斜体字，如吸光度（旧称光密度）的符号  $A$ ，“ $A$ ”为斜体。

## 关于缩略语使用的要求

摘要及正文中首次出现缩略语时应先写出其中文名称，再在括号内注明其英文全称及缩略语，二者之间以逗号隔开。缩略语的使用需规范、准确、避免出现缩略语相同的词语。公知公用的缩略语可不写出其全称，如“DNA”。缩略语不得拆开移行。