

文章编号:1004-7220(2013)05-0509-06

真实人体口喉模型内气流喷射诱导涡结构演化

孙 栋¹, 李福生², 赵秀国², 谭树林², 徐新喜²

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

摘要: **目的** 研究咽喉部位射流所诱导的涡结构特征及其演化, 加深对咽喉部位气流喷射运动特性以及咽喉部位疾病防治的认识。 **方法** 运用 CT 扫描和三维重建技术, 构建真实人体口喉三维模型, 运用大涡模拟数值仿真方法对模型内的涡结构演化过程进行精细模拟。 **结果** 吸气过程中, 气流在口腔中部形成多个涡管结构, 气流在声门部位形成强烈射流; 呼气过程中, 气流在咽喉部位产生较为复杂的涡结构。 **结论** 吸气过程中, 气流在咽部发生湍流转捩, 气管前壁处出现了类似于马蹄形状的“马蹄涡”; 呼气过程中, 咽喉后壁处射流受到阻碍, 形成了“拱状涡”。

关键词: 真实人体口喉模型; 涡演化; 气流喷射; 数值模拟

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

Vortex evolution induced by jets in realistic human mouth-throat model

SUN Dong¹, LI Fu-sheng², ZHAO Xiu-guo², TAN Shu-lin², XU Xin-xi² (1. *Institute of Military Transportation of the General Logistics, Tianjin 300161, China*; 2. *National Biological Protection Engineering Center, Institute of Medical Equipment, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300161, China*)

Abstract: Objective To study the vortex structure and vortex evolution induced by jets in mouth-pharynx area, so as to deepen the understanding of jet motion characteristics and disease prevention in mouth-pharynx area.

Methods CT scanning and 3D reconstruction were used to construct 3D model of realistic human mouth-throat model, and the method of large eddy numerical simulation was used to accurately simulate the process of vortex evolution in the model.

Results In the phase of inhalation, several vortex tubes were formed in mouth, and a turbulence jet appeared in the glottal region. In the phase of exhalation, the intense jet in the glottal region caused complex vortex structures in throat. **Conclusions** During inhalation, transition occurs in the pharynx, and the “horseshoe vortexes” which are similar to the shape of horseshoe appeared on the anterior wall of the trachea.

During exhalation, “arch vortex” are formed on the posterior wall of throat with the barrier of epiglottis.

Key words: Realistic human mouth-throat model; Vortex evolution; Airflow jet; Numerical simulation

咽喉是呼吸系统的重要组成部分,其几何结构非常复杂。呼吸气流通过咽喉部位时形成射流运动,射流运动不仅对呼吸道的生理功能产生重要影响,同时会对吸入呼吸道内的细微颗粒物(粉尘、烟雾、病毒气溶胶等)的运动轨迹产生干扰,影响其扩

散沉积状态。因此,为深入理解咽喉部位射流的生物力学特性,揭示咽喉部位疾病与咽喉射流运动之间的关系,国内外许多学者对咽喉部位的气流运动开展了研究。Kleinstreuer 等^[1]研究发现,受喉结构特征影响,气管内产生反流现象,同时喉结构也影响

收稿日期:2012-09-03; 修回日期:2012-10-29

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。

气管内涡流运动形式;徐新喜等^[2-5]通过实验和仿真相结合的研究发现,吸气时咽喉部位的气流喷射导致气管内产生流动分离现象,且在下游气管内产生速度分布不均匀现象;Ching等^[6]研究发现,喉射流气流从与气管轴线成 $0^\circ \sim 20^\circ$ 的方向冲击到气道壁面,产生射流冲击作用,从而形成反向涡旋运动;Jayaraju等^[7-8]研究发现,射流气流在下游气道内的气道后部产生明显的流动分离现象,形成涡旋运动;喉部喷射导致气管内气流发生偏转,出现主流倾斜的流动现象。然而,目前的相关研究仅限于咽喉部位的气流运动形式是一种射流的认识,初步发现了射流能够导致涡结构存在的现象,但并未对咽喉部位射流所诱导的涡结构特征及其演化开展系统研究,尤其是对循环呼吸模式下真实咽喉部位的涡结构演化过程缺乏深入分析,妨碍了对咽喉部位气流喷射运动特性的理解,不利于加深对咽喉部位疾病防治的认识。

本文运用CT扫描和三维重建技术,构建包括口腔、咽喉、气管在内的真实人体口喉三维模型,运用大涡模拟数值仿真方法对模型内的涡结构演化过程进行精细模拟,分析循环呼吸模式下真实人体上呼吸道内的速度及涡量分布状态,研究模型内涡结构形成、发展、分离、破碎的演化过程。

1 模型与方法

1.1 真实人体口喉模型

选取健康中国男性为志愿者1名,既往无呼吸道病史,上呼吸道常规体检未见明显异常。采用GE LightSpeed VCTXT 64型多层螺旋CT机,对志愿者的口腔至气管部位进行水平位与冠状位连续扫描,并运用三维重建技术对扫描后图像进行三维重建,为便于呼吸道内气流组织的研究,参照以往大多数呼吸道模型构建的简化方法,将模型嘴部假设为直径23 mm的圆,具体过程参考文献^[9]。所构建的人体口喉三维模型(从口腔至气管)如图1所示。

1.2 控制方程

为能够更好地捕捉人体上呼吸道内涡结构演化的微观特征,采用大涡模拟数值仿真方法,其控制方程^[10]为:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$



图1 真实人体口喉模型

Fig. 1 Realistic human mouth-throat model

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j - \overline{u_i u_j})}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: $i, j = 1, 2, 3$, \bar{u}_i 为流体速度的大尺度分量, \bar{p} 为流体压力的大尺度分量, ρ 为流体密度, ν 为运动黏度。

1.3 涡结构判别

“涡”是流体力学中一个常用的概念,是识别湍流场中拟序结构的基础,但其定义却很模糊,人们通常根据日常涡旋的概念给出一些描述,而很难给出涡的严格数学定义。本文使用速度梯度张量的第2不变量的 Q 判据^[11]来识别涡结构特征及其演化。对于不可压缩流动有

$$Q = (|\Omega|^2 - |S|^2)/2 \quad (3)$$

式中: S 为应变率张量, Ω 为旋转率张量,其表达式为

$$S_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} - u_{j,i}) \quad (4)$$

当 $Q > 0$ 时,压力分布呈现出中心低周围高的形态,与涡心周围的压力分布相同,故 Q 可以作为涡的识别判据。通常选定一个正的阈值 Q_c ,认为 $Q = Q_c$ 的等值面就是涡面,即用正 Q 值的等值面来描述拟序涡结构。该方法比较简便直观,但识别出涡的数量级尺度依赖于阈值 Q_c 的选取。

1.4 数值仿真

对循环呼吸模式下真实人体上呼吸道口喉模型内的涡结构演化过程进行数值模拟,呼吸流量按正弦函数变化形式(见图2),呼吸流量为30 L/min,呼吸频率为15 cycle/min,吸气、呼气过程持续时间各

为 2 s。模型入口边界采用速度入口条件,假定速度均匀分布;气管出口采用压力出口边界条件,出口相对压力为 0,同时假定壁面为刚性壁面,不考虑壁面弹性的影响,壁面采用无滑移壁面边界条件^[12]。计算在 IBM M/T-M 6223-I2C 工作站上进行,工作站具有 2 个 3.0 GHz CPU,2.0 GB 内存,循环呼吸模式的计算中时间步长设置 ($t = 5 \times 10^{-4}$,每隔 10 步的流场发展过程数据。

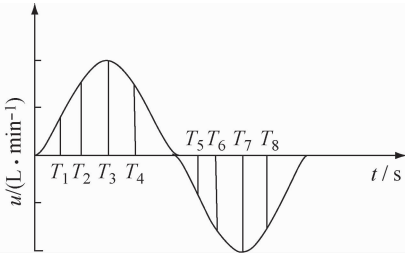


图 2 循环呼吸模式下呼吸流量变化示意图
 Fig.2 Schematic diagram of the respiratory flow under circular breathing mode

1.5 仿真方法验证

为验证数值仿真方法的准确性,应用粒子图像速度仪 (particle image velocimetry, PIV) 对人体在呼吸流量为 30 L/min 的低强度稳态呼吸模式下呼吸道标准模型内的气流运动特性进行试验研究,将试验结果与数值仿真结果进行对比。图 3 所示为上呼吸道声门部位的试验结果与数值仿真结果对比。图 3(a) 是 PIV 试验各点气流速度测量结果图,图 3(b) 是仿真气流速度矢量图。整体气流组织形式较为一致,且测量数值与仿真数值误差最大不超过 10%,吻合较好,说明数值仿真方法的准确性。

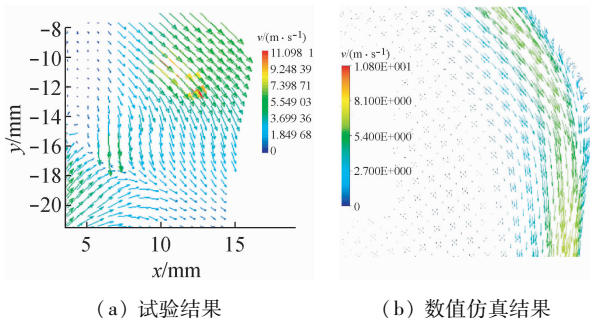
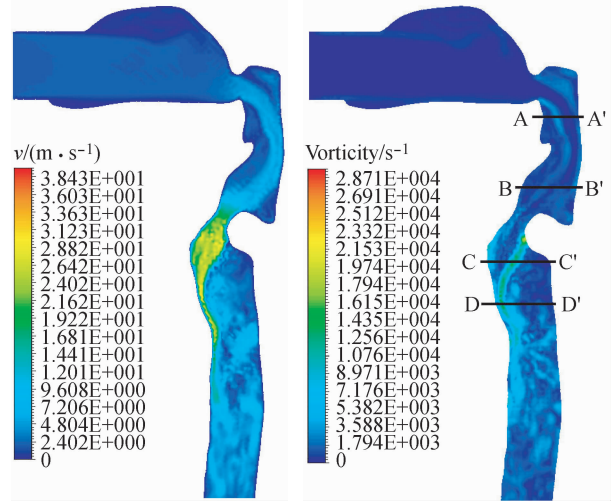


图 3 人体上呼吸道声门部位气流组织形式对比
 Fig.3 Comparison of airflow patterns between experimental results and large eddy simulation results of the glottal region (a) Experimental results, (b) Large eddy simulation results

2.1 吸气阶段口喉模型内速度分布及涡结构演化

图 4 为吸气流量达到最大值 $t = 1$ s 时刻口喉模型不同截面内的速度与涡量分布图。其中,图 4(a) 为口喉模型对称截面内速度分布图,图 4(b) 为口喉模型对称截面内涡量分布图。



(a) 速度分布 (b) 涡量分布

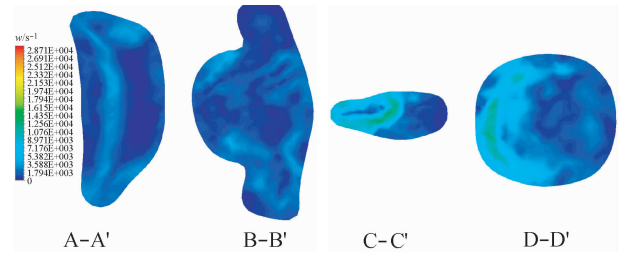


图 4 $t = 1$ s 时刻口喉模型不同截面内的速度与涡量分布图
 Fig.4 Velocity and vorticity distribution at different cross section in human mouth-throat model at $t = 1$ s (a) Velocity distribution, (b) Vorticity distribution

由图 4(a) 可知,循环吸气过程中,气流分别在咽部和喉部形成两个速度增长点;气流在声门位置受到几何结构的限制,产生湍流喷射的现象,声门下下方的气管内发生流动分离,靠近气管前壁气流速度较高。由图 4(b) 可知,气流通过嘴部进入口腔内,由于口腔内气流所受扰动较小,虽然有涡结构形成,但涡量较小,涡强度也较低;到达咽部后,由于气道的转向以及咽部横截面积的迅速减小,在咽部产生第 1 次射流,咽部的前壁和后壁形成两个涡量集中区,此处的涡强度较口腔内明显增强。其中,咽前壁处涡量集中区较为扁平,如图 4 中 A-A' 截面所示;

到达会厌部位,两个主要的涡量集中区开始变形、发散,涡心位置发生偏移,在声门上方以及梨状窝部位形成多个分散的涡量集中点,但涡强度有所减弱,如图4中B-B'截面所示;气流到达喉部后,由于声门截面的限制,形成比咽部射流更为强烈的第2次射流,在声门部位前后壁处形成两个涡量集中点,其中后壁面涡量较强,达到上呼吸道内涡量最大值,并向气管内延伸,声门下方也成为整个呼吸道内涡强度

最高的部位,如图4中C-C'、D-D'截面所示。

图5是 $t=1\text{ s}$ 时刻口喉模型内变量 Q_2 的三维等值面图。其中, Q_2 是根据速度梯度张量第2不变量 Q 判别原理而构建的变量: $Q_2 = \Omega^2 - S^2$ 。图5(a)为口腔中 $Q_2 = 1.5 \times 10^5$ 的三维等值面分布图,图5(b)为咽喉中 $Q_2 = 2 \times 10^5$ 的三维等值面分布图,图5(c)为气管中 $Q_2 = 1.3 \times 10^8$ 的三维等值面分布图。

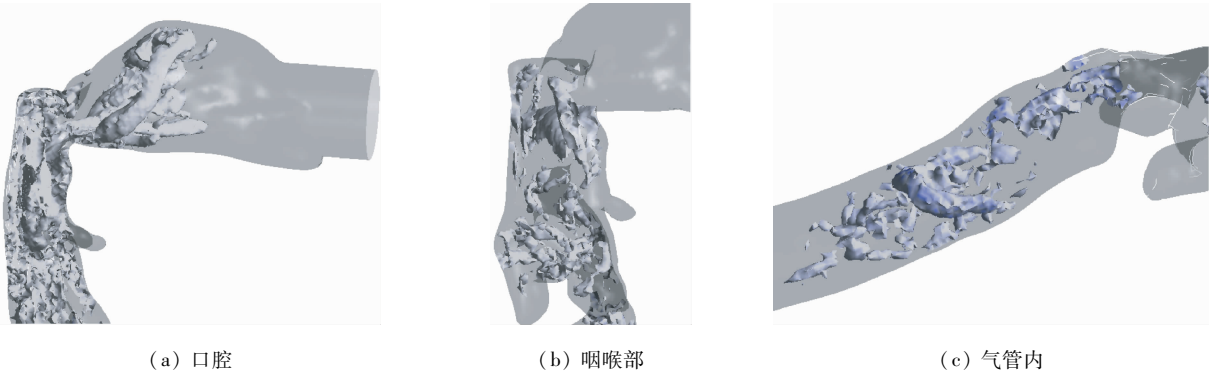


图5 $t=1\text{ s}$ 时刻口喉模型内涡结构演化图

Fig. 5 The vortex revolution in human mouth-throat model at $t=1\text{ s}$ (a) In mouth, (b) In throat, (c) In trachea

由图5(a)可知,进入口腔的气流“搓起”原有口腔中的气体,使得口腔中后部气流产生了纵向涡管状结构;虽然口腔中有涡结构产生,但由于气流速度较小且所受干扰不大,涡结构尺度较大但强度不高;随后受到气道转向、软腭阻滞以及咽部横截面积减小等因素的影响,气流发生转捩现象,在口腔中形成的较大尺度的涡结构迅速耗散、破碎,在咽喉部位形成一系列破碎的小尺度涡,且由于咽部喷射现象的发生,咽喉内出现了大尺度涡结构夹带小尺度涡结构的现象。由图5(b)可知,受到气道转向、横截面积缩小以及软腭阻滞3个因素的影响,气流在会厌上方形成了明显的、强度较强、尺度较大的涡结构,包括涡心位置位于咽部前壁处的扁平涡结构,以及涡心在咽部后壁处的管状涡结构;受到会厌部位影响,涡结构迅速耗散、破碎,在会厌的下方以及梨状窝内,形成了一系列复杂的、小尺度的涡结构。由图5(c)可知,气流在气管中已经发展成为充分湍流状态,出现了“大涡包裹小涡”的现象,在声门下方,由于声门截面的迅速收缩以及气道的转向,气流在声门部位形成强烈的射流,射流沿着气管的前壁向前发展,受到气管前壁形状的影响,在气管前壁处出

现了多个涡尺度较大、形状类似于马蹄形状的“马蹄涡”,涡心位置沿气管前壁面弯曲,且有不断向后壁面延伸的趋势。

2.2 呼气阶段口喉模型内速度分布及涡结构演化

图6为呼气流量达到最大值 $t=3\text{ s}$ 时刻口喉模型不同截面内的速度与涡量分布图。其中,图6(a)为口喉模型对称截面内速度分布图,图6(b)为口喉模型对称截面内涡量分布图。由图6(a)可知,在口喉模型内,在咽部和喉部由于受到截面收缩和气流运动方向改变的影响,分别在咽部会厌前壁、喉部后壁和声门后部形成高速区气流速度的增加,容易造成气溶胶颗粒在咽部和喉部的沉积。由图6(b)可知,气流从气管上部进入喉腔以前,气流速度发展总体比较平稳,气管壁面处涡量高于气管内部,总体涡量较小,如图6中D-D'、C-C'截面所示;气流到达喉部后,由于声门截面的限制,形成强烈的喷射,在声门部位前后壁处形成两个涡量集中点,涡强度显著提高,其中前壁面涡量较强,并向喉腔内延伸,如图6中B-B'截面所示;在会厌处,受到声门处射流的影响,后壁面涡量高,受到会厌和软腭的影响,前壁面处的涡量集中区开始发生变形、弯曲,涡心位置开

始发生偏移,如图6中A-A'截面所示;气流到达口腔时,由于气道转向、横截面积缩小等因素的影响,气流再次产生射流,并在口腔内部形成多个涡量集中区。

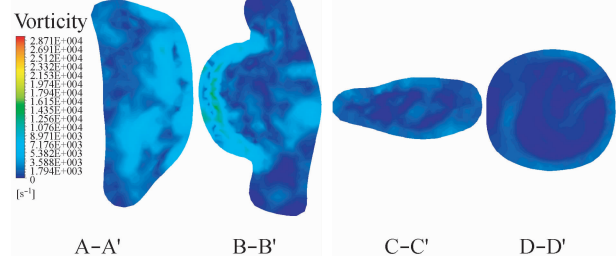
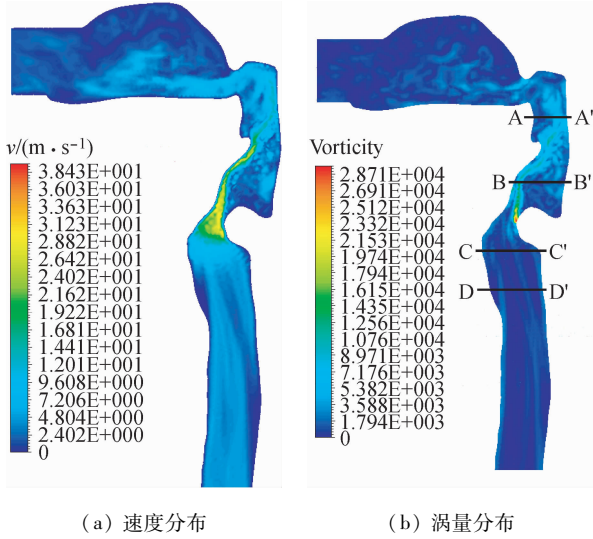


图6 $t=3\text{ s}$ 时刻口喉模型不同截面内的速度与涡量分布图
 Fig.6 Velocity and vorticity distribution at different cross section in human mouth-throat model at $t=3\text{ s}$ (a) Velocity distribution, (b) Vorticity distribution

图7为呼气流量达到最大值 $t=3\text{ s}$ 时刻口喉模型内变量 Q_2 的三维等值面图,其中,图7(a)为口腔中 $Q_2=3\times 10^6$ 的三维等值面分布图,图7(b)为咽喉中 $Q_2=2.5\times 10^7$ 的三维等值面分布图。气流在声门处的强烈喷射以及会厌部位的阻碍使咽喉部位产生较为复杂的涡结构;咽喉部位的气流处于充分湍流状态,出现大尺度涡结构夹带小尺度涡结构的现像;在咽喉后壁处射流受到阻碍,形成“拱状涡”,涡心位置位于咽喉得后壁面处,如图7(b)所示;进入口腔时,气流受到软腭阻碍、气道转向以及截面缩小的影响,一方面导致咽腔内大的涡结构发生破裂,另一方面致使气流在咽部再次发生喷射,射流朝向口

腔中部,虽然口腔内涡强度较高,但涡结构分散,且涡量扩散,并没有较大的涡结构产生,如图7(a)所示。

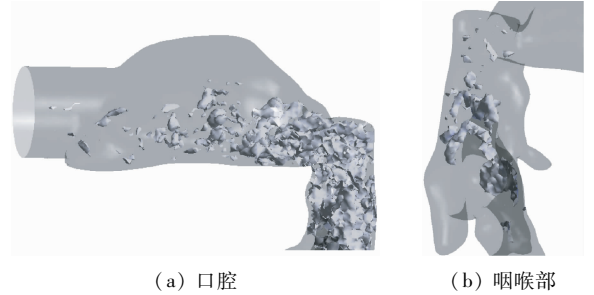


图7 $t=3\text{ s}$ 时刻口喉模型内涡结构演化图
 Fig.7 Vortex revolution in human mouth-throat model at $t=3\text{ s}$ (a) In mouth, (b) In throat

3 讨论

运用大涡模拟数值仿真方法对真实人体上呼吸道口喉模型内的气流喷射诱导涡结构演化过程进行了精细的模拟,分析了循环呼吸模式下呼吸流量为 30 L/min 时口喉的速度及涡量分布状态,研究了模型内涡结构形成、发展、分离、破碎的演化过程,通过分析可知:

(1) 循环吸气阶段,声门下方成为整个呼吸道中的气流速度最大的部位,声门气流喷射对声门及气管前壁的冲击较大,容易造成声门及气管前壁的壁面劳损和组织损伤;循环呼气阶段,声门上方的气流速度较其他部位明显偏高,对声门及喉部前壁面的冲击较大,导致其壁面剪应力的明显增加,使此处发生组织损伤的可能性较其他部位稍高一些。

(2) 循环吸气阶段,咽部发生湍流转捩现象,大尺度的涡结构迅速耗散、破碎为一系列的小尺度涡,转捩现象的发生使以往绕口腔内涡管运动的微小颗粒迅速扩散开来,在咽喉喉内滞留更长时间,并造成更多的沉积;循环呼气阶段,气流在口腔内发生喷射,虽然口腔内没有大的涡结构产生,但是强度较高的小涡结构仍然会使更多的气溶胶颗粒在口腔中产生强烈的扩散、回旋并沉积。

(3) 呼吸过程中,气流在声门处的强烈喷射,使声门处的涡强度明显增强,并分别导致气管前壁“马蹄涡”及喉部后壁“拱状涡”的产生;这些较高强度较大尺度的涡结构的产生,将导致更多的微小颗粒以及较大粒径的气溶胶颗粒产生绕涡管运动的现

象,增加其在呼吸道内停留的时间以及在咽喉后壁以及气管前壁处的沉积机率。

参考文献:

- [1] Kleinstreuer C, Zhang Z. Airflow and particle transport in the human respiratory system [J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 2010, 42(1): 301-334.
- [2] 徐新喜, 赵秀国, 谭树林, 等. 循环呼吸模式口喉模型内气流运动特性数值模拟[J]. *力学学报*, 2010, 42(2): 182-190.
- [3] 徐新喜, 赵秀国, 谭树林, 等. 人体上呼吸道内气流运动特性的数值模拟分析[J]. *计算力学学报*, 2010, 27(5): 881-886.
- [4] 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, *et al.* Simulation study on characteristics of the vortex structure in human upper respiratory tract [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(3): 262-268.
- [5] 赵秀国, 徐新喜, 孙栋, 等. 人体上呼吸道内气溶胶沉积数值仿真研究[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(1): 90-95. Zhao XG, Xu XX, Sun D, *et al.* Numerical simulation of aerosol deposition in human upper respiratory tract [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(1): 90-95.
- [6] Ching LL, Tawhai MH, McLennan G, *et al.* Characteristics of the turbulent laryngeal jet and its effect on airflow in the human intra-thoracic airways [J]. *Respir Physiol Neurobiol*, 2007, 157(2-3): 295-309.
- [7] Jayaraju ST, Brouns M, Verbanck S, *et al.* Fluid flow and particle deposition analysis in realistic extrathoracic airway model using unstructured grids [J]. *J Aerosol Sci*, 2007, 38(5): 494-508.
- [8] Jayaraju ST, Verbanck S, Lacor C. LES and DES study of fluid-particles dynamics in human mouth-throat geometry [M]//*Proceedings of the Turbulence and Interactions 2009 Conference. USA: Springer*, 2010; 183-189.
- [9] 孙栋, 李功杰, 李福生, 等. 人体上呼吸道三维模型重建及规范化研究[J]. *生物医学工程与临床*, 2012, 16(2): 127-131.
- [10] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流大涡数值模拟的理论和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008; 72-76.
- [11] Hunt JC, Wray AA, Moin P. Eddies, streams and convergence zones in turbulent flows [C]//*Proceedings of the Summer Program, Center for Turbulence Research. California: Stanford University*, 1988; 193-208.
- [12] Wang Y, Liu YX, Sun XZ, *et al.* Numerical analysis of respiratory flow patterns within human upper airway [J]. *Acta Mecheanica Sinica*, 2009, 25(6): 737-746.

· 致读者 ·

关于图表的要求

表和图的设计应科学、简洁、合理,有自照性,均分别按其正文出现先后次序连续编号,并冠以图(表)序号和题目。说明性的资料应置于图(表)下方注释中,并在注释中标明图标中使用的全部非公知公用的缩写及表中的统计学处理。均采用三线表,表内数据同一指标有效位数一致,均数及标准差小数点后保留位数一致。图题、表题及图注、表注均应中、英文对照书写。

黑白图片必须清晰度及对比度良好,层次分明,彩色照片要求色彩鲜明,图像清晰。图片或照片大小要基本一致。图不宜过大,最大宽度半栏图不超过 7.5 cm,通栏图不超过 16.5 cm,高与宽比例以 5 : 7 为宜。图注应附于图下或文后,不要粘贴,背面用铅笔注明作者姓名、图序号,并表明上、下方向,照片中需说明的部位请以箭头或字母标注,在图注中说明。图片及照片不得折损。若刊用人像,应征得本人书面同意,或遮盖其能辨认出系何人部分(眼睛)。大体标本照片在图内最好有尺度标记。病理照片要求注明染色方法和放大倍数。

试验数据的曲线图必须根据测试数据绘制,线条必须光滑清明,有横纵坐标的统计图必须有确切的标目名称和规范的计量单位;实验装置等示意图一定要精心绘制,对图内的结构要有必要的注释,使读者一目了然;引用他人的图(表)一定要用文献角码表明出处。