

文章编号:1004-7220(2010)03-0157-06

· 述 评 ·

人上气道生物力学模型的研究进展

于 申, 刘迎曦

(大连理工大学 工业分析结构装备国家重点实验室, 大连 116023)

摘要: 建立人上气道生物力学模型是研究上气道结构和功能的有效方法,对上气道疾病的预测和治疗也有重要的临床意义。本文总结了上气道生物力学模型的研究状况,以及模型在上气道疾病治疗方面的临床应用,并对今后的研究方向进行了展望。

关键词: 生物力学模型; 上气道; 数值模拟

中图分类号: R318.01 **文献标志码:** A

Advances on biomechanical model of human upper airway

YU Shen, LIU Ying-xi (State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Rebuilding the biomechanical model of human upper airway is an effective method for studying upper airway structure of human and its function, and it is also helpful to predict and make the treatment for upper airway diseases. This paper summarized the advances on biomechanical model of human upper airway and its application in clinical treatment, as well as try to make prediction about the research work in the future.

Key words: Biomechanical Model; Upper airway; Numerical simulation

人上气道生物力学模型的研究是生物力学的重要分支之一,对上呼吸道生物力学模型的研究有利于认识上呼吸道结构与功能之间的关系,有利于进一步认识上呼吸道疾病的发病机制以及与其他相关系统疾病之间的关系。然而,由于上呼吸道结构复杂、体积紧密,使得人们对上呼吸道气流的研究受到了技术手段上的限制。人们从早期到现在采用了不同的技术手段对上气道气流流场进行研究。

1 研究方法

在早期,人们直接应用尸源或者通过"铸造法"获取等比例比例的鼻腔尸源性模型,向模型中注入不同形式的含有示踪成分的模拟流体(如含有铝粒

子、染色剂、墨水等的水流,含有放射性元素、水滴等的气流),通过观察流体中示踪成分的流动形式从而获得对鼻腔气流的认识^[1-3]。Simmen等^[1]以空气做媒质并用雾化的液滴做标记,通过仿制的半透明鼻中隔进行观察。发现主要的气流流经中鼻道,鼻甲和粘膜的肥大也会增加流经中鼻道气流的比例。模拟鼻甲切除术的结果表明术后会有相当一部分气流流经鼻腔底部。尸源性模型对于组织器官的研究有一定的辅助作用,但其研究的局限性较大,离体后组织器官无法保持原来的一些特征,必然影响分析研究的结果。

研究人员还通过对猴和鼠等动物进行实验,得出能够反映某些生理功能的模型参数,根据这些实

收稿日期:2010-04-06; 修回日期:2010-04-15

作者简介:于申,男,研究方向:生物医学工程。

通讯作者:刘迎曦,教授、博士生导师。中国力学学会理事,生物力学专委会委员。辽宁省力学学会理事长。国务院特殊津贴专家,省优秀博士生导师。曾获国家自然科学基金三、四等奖及省市科技进步多项奖励。主要从事耳鼻咽喉器官生物力学模型和计算力学领域的研究工作。
E-mail: yxliu@dlut.edu.cn.

验结果试图探讨人上呼吸道中相应的结构与功能的关系^[4]。Frederick等^[5-6]经过实验后发现鼠嗅区易损伤的原因在于其嗅区主要位于鼻腔前端,且嗅区面积大、局部气流流量较大。而人体由于嗅区狭窄且位于鼻腔后端,气流难以到达;同时嗅区面积小,吸收的甲醛量较小,所受刺激小,所以不易损伤。动物实验能在一定程度上帮助人们了解各个器官的生理功能与组织特性,但动物与人体仍有一定区别,其组织器官的功能效应存在一定的差异。因此,不能完全反映人体组织结构特性。

随着影像学技术的进步,人们应用CT或MRI等扫描技术获取人体生理状态下的鼻腔气道解剖结构数据,并根据获得的数据构建扩大比例的鼻腔实体模型,使得实验易于观察,为进一步研究人体生理状态下鼻腔内气流流场的详细情况提供了模型基础。Schreck等^[7]根据MRI图像建立放大的成年人鼻腔模型,研究鼻腔结构和鼻腔气流阻力之间的关系。Hahn^[8]、Kelly^[9]和Kim等^[10]分别通过CT图像建立了放大的鼻腔模型,对鼻腔内的气流分布进行研究。Kim等^[10]还在此鼻腔基础上,进行手术模拟,重新生成两个鼻腔,用粒子成像测速法进行实验,比较三者的气流分布,研究鼻腔结构对气流分布的影响。Mylavarap等^[11]根据MRI图像,建立一个放大的上呼吸道模型,并实验测得上呼吸道内的气流场特性。应用影像学来构建实体模型,能较实际的反映人体组织的解剖结构,实验结果也是数值模拟结果很好的验证,但是实验手段一般比较昂贵,而且针对性比较强,一般一次实验只能体现某一种参数的测量结果。

近年来,得益于高性能计算机的出现以及在成熟的数值分析软件的支持下,人们开始借助计算机应用数值模拟软件对上呼吸道气流进行计算流体力学分析^[12-13]。数值模拟方法能有效克服上呼吸道结构复杂、体积紧密而使研究受到的限制。使得人们能够观察到上呼吸道内任何感兴趣部位的气体流场,提供局部气体流场的特征和细节,与实体模型研究和动物实验研究相结合能够更好的显示鼻腔气流场。

2 数值模拟方法的研究现状

由于前三种方法的局限性,故对于人上呼吸道生

物力学模型的研究,数值模拟方法在近几年发展的比较快。在数值方法上常用的有有限元法(FEM)^[8]、有限体积法(FVM)^[14]。FEM应用于人类生物学研究时,显示了很大的优越性。经过长期的进化过程,人体被认为形成了一个近乎完美的力学结构。由于通常的力学实验方法基本上无法直接应用于人体,对人体的力学行为进行有限元数值模拟就成为深化对人体认识的一种有效手段。近十几年来,有限单元法已经被广泛的应用到心血管、骨、眼、耳等人体生物力学研究的各个方面。而FVM在流体力学计算方面计算效率相对较高,因此,在很多商用的CFD软件都采用这种方法;在模拟血液流动和气流流动方面较为常用。

上呼吸道气流的数值模拟研究一般由单例的正常上呼吸道入手,研究气流在上呼吸道中的分布,和上呼吸道中的一些气流现象。人们对鼻腔气流的研究比较注重气流在各部分鼻道中的分布,主要观察通过嗅裂的气流比例、气流主要流经的鼻道、气流峰值速度出现的位置以及气流流线的形式。此外,对于鼻腔内的气压分布、鼻腔中的壁面剪切力以及出现的涡流和二次流现象也分别作了讨论。Elad^[15]和Keyhani等^[16]分别在1993年和1995年制作了简易鼻腔数值模型研究鼻腔气流分布,将气流假设为不可压缩稳态层流,两者模拟的气流分布结果比较相近,呼吸气流主要流经鼻腔底部,鼻甲结构将气流由前导向后,鼻甲和鼻腔的形状将一部分气流导向顶部的嗅区约为10%。Keyhani^[16]同时建立一个实体鼻腔模型进行实验,并对比实验数据和数值模拟结果,两者互相吻合。Subramaniam等^[17]在1998年得到的鼻腔气流分布数值结果与Keyhani略有不同,主要气流通过鼻腔中下部,通过嗅裂的气流比例约为15%。Horschler等^[18]2003年制作一个实体鼻腔模型和一个三维数值模型,假设鼻腔中气流为层流,重点探讨吸气和呼气的气流流线,吸气的气流流线上、中、下鼻道中比较扭曲,这样可以保证吸入的气流可以在鼻腔中停留更长时间。呼气的气流流线比吸气的气流流线更平滑一些,流线扭曲较少,并探讨了在鼻甲末端会产生涡流的现象。Wen等^[19]2008年建立了一例研究鼻腔气流的CFD模型,详细分析了鼻腔阻力、鼻腔壁面剪切力、鼻腔内气流流线以及鼻腔内的气流分布。通过嗅裂的气流比例为11.6%

与 Keyhani 和 Elad 的结果相似;主要气流通过中下部鼻道,这点与 Subramaniam 得结果相似。人体咽腔和喉腔内气流分布也与气道解剖结构形态有关。Payan 等^[20]在 2003 年通过流固耦合的方法研究了软腭与周围流场的相互作用,研究中假定流体场是一维的,软腭分析是二维的。Renotte 等^[21]模拟了一个呼吸周期过程中喉腔内气流的分布,由于喉部的急剧收缩,气流分布形态呈喷射状。Allen 等^[14]于 2004 年根据 MRI 医学图像建立了小儿上呼吸道的三维有限元模型,包括口腔和咽腔与气管分叉,研究上气道各处的紊流强度。研究人员在数值模拟鼻腔内气流的分布的时候,需要确定鼻腔内的气流是层流还是湍流(紊流),很多研究文献的设定不同,上述很多研究认为鼻腔气流为层流,也有认为鼻腔气流中含有湍流的^[1,8]。Simmen 等^[1]通过实验发现,在正常生理条件下鼻腔气流既有层流也有湍流,在气流低速流动时湍流也存在,在更低的气流流速下湍流会减少。鼻腔气流经历加速,近似稳态和减速三种形态,在第一种和第三种状态下湍流最为明显。气流是层流还是湍流在理论上取决于雷诺数 Re ,对于鼻腔这种形状复杂的腔体,还需要实验辅助确定。Hahn 等^[7]认为鼻腔内的气流性质与气流体积流速有关,气流体积流速低时为层流,体积流速高时为湍流。此外还受鼻腔气道形状的影响,在气流经过鼻阈时,即使雷诺系数 Re 小于 2 000 也可能转变为湍流。Lin 等^[22]等人研究发现喉部气流的喷射会形成湍流。

在研究正常人上气道的基础上,人们还研究在某种上气道疾病状态下,病态上气道结构对气流分布的影响。Zhao 等^[23]模拟分析了一例鼻腔阻塞病例的气流场分布。对于咽腔的研究主要集中在阻塞型睡眠呼吸中止症(Obstructive Sleep Apnea, OSA)病因机制的探讨,由于 OSA 病因复杂,目前 OSA 的发病机制尚不完全清楚,近年来学者们试图从生物力学的角度来寻找答案。韩德民等认为结构因素在 OSA 发病机制中的作用具有重要意义^[24]。而国内外的研究人员也试图建立咽腔结构和气流压强场以及声场的关系,以此探讨 OSA 的病因机制。Shome 等^[25]建立 OSA 患者的咽腔模型,研究咽腔气流,比较了层流和紊流两种状况下的压力差以及三种治疗 OSA 方法对咽腔气流特性的影响。Chun 等^[26]对比

研究了 OSA 患儿与正常儿童在吸气与呼气过程中,上气道内气压的分布情况。Jeong 等^[27]对 OSA 患者上气道气流分布进行数值模拟,结果发现腭咽附近存在较高的剪切力和压强梯度。Chouly 等^[28]建立简化的上气道模型,采用流固耦合的方法模拟呼气过程中舌与咽腔壁模型与气流之间的相互作用,并将结果与实验进行了对比,研究 OSA 患者睡眠过程中气流受限诱发的打鼾现象。赵雪岩等^[29]建立一个由硬腭水平位置至气管约第 2、3 软骨下端的人体上气道三维有限元模型,分析 OSAS 事件发作期间解剖结构和生理过程之间的关系。认为鼾声声波特征能较大程度地反映上气道解剖结构相关部位的形态。Liu 等^[30]建立了一个包括软腭、硬腭、舌、鼻腔以及部分咽腔在内的人脑三维有限元模型,研究在不同声压作用下鼾声的力学特性。研究者认为对病态上气道进行数值模拟,通过优化气流路径,有助于指导手术,辅助手术方案的确定。

在上述研究结果中有些实验结果和数值模拟结果不相符,而数值模拟的结果也不完全相同,这是由于人体上气道结构的个性,单独研究一例上气道,无法找出上气道气流流场的共性,所以一些研究人员开始研究多例上气道的气体流场,从中寻找一些共性,探讨上气道结构对气流场分布的影响,开展了国人上气道几何形态与气体流场相互关系的研究,刘迎曦通过 24 例正常人鼻腔模型,研究气流在正常人鼻腔中的分布规律,按照气流在鼻腔各个气道的体积流量比例,将正常人鼻腔分为三类^[31],并通过建立多例正常人上气道(鼻咽腔),研究鼻咽腔中的气流分布规律^[32-33]。Horschler 等^[34]建立了一例鼻腔数值模型,并通过修改模型模拟同一个鼻腔在去掉中鼻甲、去掉下鼻甲、去掉中下鼻甲,以及鼻中隔有棘突等情况下的气流分布,气流流线、气压分布以及壁面摩擦力的分布情况。大样本鼻腔模型的研究,其结果有一定的涵盖性,可以更全面的了解鼻腔气流场的分布规律。

上气道的结构和功能是密切相关的,上气道的主要功能是对吸入的气流进行加温、加湿、过滤灰尘以及嗅觉等功能。人们在研究上气道气体流场的基础上,开始研究正常上气道结构对吸入 5 气流流的加温、加湿、过滤灰尘以及嗅觉等功能的影响。Sara 等^[35]建立两个简化鼻腔模型和真实鼻腔模型,研究

鼻腔对吸入的不同温度湿度的空气进行加温加湿的效果。通过比较模拟结果可知三种模型对气流的调节功能相差不多,其中真实鼻腔模型的最好;外界环境对于鼻腔的调节气流温度湿度的功能影响也不大;但是潮气量对于鼻腔调节功能的影响却很明显。Garcia 等^[36]等建立四个正常人和一个萎缩性鼻炎患者术前术后的鼻腔气体动力学模型,研究不同鼻腔结构对于调节吸入气流的温度和湿度的功能。研究发现患有萎缩性鼻炎的鼻腔对于吸入气流在加温加湿方面均不如正常人鼻腔。而且萎缩性鼻炎使鼻腔粘膜面积减小,单位面积就需要提供更多的水分和热量,这可能导致萎缩性鼻炎中鼻腔粘膜干燥结痂的原因。石志标等^[37]建立简化鼻腔模型,研究鼻腔结构对人体嗅觉反应的影响。曾敏捷等^[38]通过气体动力学模型研究微颗粒在人体上呼吸道中的运动沉积,研究颗粒沉积率与气流流速和颗粒惯性大小的关系。Zhang 等^[39-40]建立了包括口腔,咽,喉和支气管的上气道模型,研究了微小粒子在气道中的传送和沉积作用。颗粒传输的研究除了可以辅助了解鼻腔的嗅觉功能和对灰尘的过滤功能,还有助于研究鼻腔在有毒气体环境中,鼻腔粘膜受损的规律^[41]和治疗鼻炎类的喷洒类药剂的研制与开发^[42]。

研究人上气道的生物力学模型,也是通过生物力学的角度来研究上气道相关疾病的问题,从而服务于临床。在对病态鼻腔进行数值研究的基础上,一些研究人员开展了鼻腔手术模拟^[43]、在正常人鼻腔模型的基础上,根据功能性鼻窦内镜手术的要求,模拟出鼻内镜术后的鼻腔数字模型,比较术前术后鼻腔气流分布和压力的差异,用以预测手术效果。Reimersdahl 等^[44]建立鼻腔气流 CFD 模型,并以此为基础结合虚拟仿真技术,开发针对鼻科手术的手术计划系统,在正式手术前设计优化手术方案。刘迎曦、孙秀珍等^[45-46]以鼻腔模型数据库为平台,进行了鼻腔内窥镜手术“智能引流器”和“鼻用塞固器”等医疗器械的研制工作,并初步应用于临床。

3 研究展望

近 10 年来在国内外生物数值模型的研究得到极大的重视,人上气道生物力学模型的研究也取得了许多可喜的成果,但我们认为今后应在以下几个

方面有所突破:(1)模型的精准,研究上气道生物力学模型务求模型能够真实的再现实际情况,以前的研究由于技术手段的限制,不得不对一些结构进行简化,由此可能引起一些结果的偏差,随着技术手段的提高,对于模型的精准,尤其是病态气道研究部位结构的精准重建是可以实现的,也是非常必要的。(2)多场分析,上气道的结构和功能是密切相关的,要研究上气道的功能,就必须对上气道气流进行多场分析或耦合场分析。通过分析正常、非正常以及手术前后等各种状态下上气道气流场分布和功能的关系,探讨上气道结构与功能的关系。(3)多尺度分析,以上研究均为宏观意义上的研究,而生物体是由微观结构构成。因此要研究一些现象,如上气道结构的适应性变化等,还需要进行微观尺度的研究,探讨其机理和本质问题。(4)加强与临床结合,将生物力学模型的研究成果应用到临床实践。为解决临床疑难问题从机理、诊断、个性化干预、疗效评估和医疗器材的研制,提供数字化及定量分析的平台。

结合近年来鼻腔解剖结构功能提出的新概念,为耳鼻咽喉学科基础理论深入研究提供了量化分析的平台;为现代医学理论基础研究逐步精细化及定量化,大量临床数据积累的模型化及数学化探索出一条可行的途径。

参考文献:

- [1] Simmen D, Scherrer JL, Moe K, *et al.* A dynamic and direct visualization model for the study of nasal airflow [J]. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg.*, 1999, 125(9): 1015-1021.
- [2] Courtiss EH, Goldwyn RM. The effects of nasal surgery on airflow [J]. *Plast Reconstr Surg*, 1983, 72(1):9-21.
- [3] Homung DE, Leopold DA, Youngentob SL, *et al.* Airflow patterns in human nasal model [J]. *Arch. otolaryngol. head neck surg.*, 1987, 113(2): 169-172.
- [4] Kelly JT. Deposition of fine and coarse aerosols in a rat nasal mold [J]. *Inhal Toxicol*, 2001, 13(7): 577-588.
- [5] Frederick CB, Lomax LG, Black KA, *et al.* Use of a hybrid computational fluid dynamics and physiologically based inhalation model for interspecies dosimetry comparisons of ester vapors [J]. *Toxicol Appl Pharmacol*, 2002, 183(1): 23-40.
- [6] Frederick CB, Bush ML, Lomax LG, *et al.* Application of a hybrid computational fluid dynamics and physiologically

- based inhalation model for interspecies dosimetry extrapolation of acidic vapors in the upper airways [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 1998, 152: 211-231.
- [7] Schreck S, Sullivan KJ, Ho CM, *et al.* Correlations between flow resistance and geometry in a model of the human nose [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1993, 75 (4): 1767-1775.
- [8] Hahn I, Scherer PW, Mozell MM, *et al.* Velocity profiles measured for airflow through a large scale model of the human nasal cavity [J]. *J Appl Physiol.*, 1993, 75 (5): 2273-2287.
- [9] Kelly JT, Prasad AK, Wexler AS, *et al.* Detailed flow patterns in the nasal cavity [J]. *Journal of Applied Physiology*, 2000, 89 (1): 323-337.
- [10] Kim SK, Chung SK. An investigation on airflow in disordered nasal cavity and its corrected models by tomographic PIV [J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15 (6): 1090-1096.
- [11] Mylavarapu G, Murugappan S, Mihaescu M, *et al.* Validation of computational fluid dynamics methodology used for human upper airway flow simulations [J]. *J Biomech.* 2009, 42(10): 1553-1559.
- [12] Martonen TB. Flow simulation in the human upper respiratory tract [J]. *Cell Biochem Biophys*, 2002, 37 (1): 27-36.
- [13] Horschler I, C Brucker, Schroder W, *et al.* Investigation of the impact of the geometry on the nose flow [J]. *European Journal of Mechanics B: Fluids*, 2006, 25 (4): 471-490.
- [14] Allen GM, Shortall BP, Gemci T, *et al.* Computational simulations of airflow in an In vitro model of the pediatric upper airways [J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2004, 126 (5): 604-613.
- [15] Elad D, Liebenthal R. Analysis of air flow patterns in the human nose [J]. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 1993, 31 (3): 585-592.
- [16] Keyhani K, Scherer PW, Mozell MM. Numerical simulation of airflow in the human nasal cavity [J]. *J Biomech Eng* 1995, 117(4): 429-441.
- [17] Subramaniam RP, Richardson RB, Morgan KT, *et al.* Computational fluid dynamics simulations of inspiratory airflow in the human nose and nasopharynx [J]. *Inhal Toxicol*, 1998, 10(2): 473-502.
- [18] Horschler I, Meinke M, Schroder W, *et al.* Numerical simulation of the flow field in a model of the nasal cavity [J]. *Computers & Fluids*, 2003, 32(1): 39-45.
- [19] Jian Wen, Kiao Inthavong, Jiyuan Tu. Numerical simulations for detailed airflow dynamics in a human nasal cavity [J]. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 2008, 161: 125-135.
- [20] Payan Y, Pelorson X, Perrier P, *et al.* Physical modeling of airflow-walls interactions to understand the sleep apnea syndrome [J]. Heidelberg: Springer Berlin, 2003.
- [21] Renotte C, Bouffieux V, Wilquem F. Numerical 3D analysis of oscillatory flow in the time-varying laryngeal channel [J]. *J Biomech*, 2000, 33(2): 1637-1644.
- [22] Lin CL, 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.
- [23] Zhao K, Scherer PW, Hajiloo SA, *et al.* Effect of anatomy on human nasal air flow and odorant transport patterns: implications for olfaction [J]. *Chem Senses*, 2004, 29 (5): 365-379.
- [24] 韩德民. 睡眠呼吸障碍疾病外科治疗的思考-论结构和功能与症状的相关性 [J]. *中华耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2007, 42: 81-82.
- [25] Shome B, Wang LP, Santare MH, *et al.* Modeling of airflow in the pharynx with application to sleep apnea [J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 1998, 120(3): 416-422.
- [26] Chun Xu, SangHun Sin, McDonough JM, *et al.* Computational fluid dynamics modeling of the upper airway of children with obstructive sleep apnea syndrome in steady flow [J]. *Journal of Biomechanics*, 2006, 39: 2043-2054.
- [27] Jeong SJ, Kim WS, Sung SJ. Numerical investigation on the flow characteristics and aerodynamic force of the upper airway of patient with obstructive sleep apnea using computational fluid dynamics [J]. *Med Eng Phys.* 2007, 29 (6): 637-651.
- [28] Chouly F, Van Hirtum A, Lagree PY, *et al.* Numerical and experimental study of expiratory flow in the case of major upper airway obstructions with fluid-structure interaction [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2008, 24(2): 1-20.
- [29] 赵雪岩, 黄任含, 楼航迪, 等. 阻塞性睡眠呼吸暂停综合征的生物力学研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2009, 45 (5): 737-742.
- [30] Liu ZS, Luo XY, Lee HP, *et al.* Snoring source identification and snoring noise prediction [J]. *Journal of Biomechanics*, 2007, 40(4): 861-870.
- [31] Yu Shen, Liu Yingxi, Sun Xiuzhen. Influence of nasal structure on the distribution of airflow in nasal cavity [J]. *Rhinology*, 2008, 46(2): 137-143.
- [32] 刘迎曦, 于驰, 孙秀珍, 等. 正常人咽腔气体流场数值模拟 [J]. *大连理工大学学报*, 2007, 47(3): 317-321.
- [33] 孙秀珍, 于驰, 刘迎曦, 等. 人体上气道三维有限元重建与流场数值模拟 [J]. *航天医学与医学工程*, 2006, 19 (2): 129-133.
- [34] Horschler I, CBrucker, Schroder W, *et al.* Investigation of the impact of the geometry on the nose flow [J]. *European Journal of Mechanics B: Fluids*, 2006, 25 (4): 471-490.

- [35] Sara N, Moshe R, Michael W, *et al.* The air-conditioning capacity of the human nose. *Annals of Biomedical Engineering*, 2005, 33(4): 545-553.
- [36] Guilherme J, Garcia M, Neil Baille, *et al.* Atrophic rhinitis: a CFD study of air conditioning in the nasal cavity [J]. *J Appl Physiol*, 2007, 103:1082-1092.
- [37] 石志标. 鼻腔结构影响人体嗅觉反应的数值模拟[J]. *生物物理学报*, 2004, 20(4): 329-333.
- [38] 曾敏捷, 胡桂林, 樊建人, 等. 微颗粒在人体上呼吸道中运动沉积的数值模拟[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2006, 40(7): 1164-1167.
- [39] Zhang Z, Kleinstreuer C. Airflow structures and nano-particle deposition in a human [J]. *Journal of Computational Physics*, 2004, 198(1): 178-210.
- [40] Zhang Z. Aerosol transport and deposition in a triple bifurcation bronchial airway model with local tumors [J]. *Inhalation Toxicology*, 2002, 14(11): 1111-1133.
- [41] Frederick CB, Bush ML, Lomax LG, *et al.* Application of a hybrid computational fluid dynamics and physiologically based inhalation model for interspecies dosimetry extrapolation of acidic vapors in the upper airways [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 1998, 152: 211-231.
- [42] 黄玥, 唐豪, 杨事民, 等. 基于 CFD 技术的鼻腔输药的流动特性研究[J]. *沈阳航空工业学院学报*, 2007, 24(3): 17-23.
- [43] 熊观霞, 詹杰民, 江广理, 等. 功能性鼻窦内镜术后对鼻腔鼻窦气流的影响[J]. *中山大学学报(医学科学版)*, 2009, 30(2): 205-210.
- [44] Van Reimersdahl T, Horschler I, Gerndt A, *et al.* Airflow simulation inside a model of the human nasal cavity in a virtual reality based rhinological operation planning system [J]. *International Congress Series*, 2001, 1230: 87-92.
- [45] 孙秀珍, 于申, 刘迎曦, 等. 应用于功能性内窥镜鼻窦手术后引流器的工作原理分析[J]. *医用生物力学*, 2007, 22(2): 160-164.
- [46] 刘迎曦, 于申, 孙秀珍. 一种新型鼻用塞固器的力学原理分析[J]. *力学与实践*, 2008, 30(1): 70-74.

2010 年上海国际骨科生物力学研讨会会议通知

由中国力学学会中国生物医学工程学会生物力学专业委员会主办、上海市骨科内植物重点实验室暨上海交通大学附属第九人民医院骨科承办的 2010 上海国际骨科生物力学研讨会将于 2010 年 7 月 23-25 日在上海举行,会议邀请了美国、加拿大等国家和地区的十余位国际知名生物力学专家,围绕人工关节设计和临床应用的生物力学问题、骨力学强度分析和力学建模方法、骨的力学适应性和骨细胞的调节作用、细胞生长和分化的力学生物学调节等主题展开研讨。本次会议将在 2010 上海世博会期间召开,会议代表也将有机会体验二百多个国家和地区精彩纷呈的文化和科技展示。会议的详细通知可至上海市骨科内植物重点实验室网站(<http://www.ortholab-snpb.com>)上下载。联系人:张书红、于志锋,电话:021-23271133 电子邮件:shuhongzh@hotmail.com, shengwulixue@gmail.com。