

## 鼻腔气流动力学研究进展\*

魏君<sup>1</sup> 李琳<sup>1</sup>

[关键词] 计算流体动力学;鼻;功能

doi:10.13201/j.issn.1001-1781.2017.08.021

[中图分类号] R765 [文献标志码] A

### The research progress of nasal airflow dynamics

**Summary** Computational fluid dynamics(CFD) was used to evaluate the function of nose by indicating the nasal airflow velocity and flow rate of airflow. This article is to review the progress of clinical research on nasal physiology and pathophysiology mechanisms, such as normal station, surgery design, effect analysis and drug transportation.

**Key words** computational fluid dynamics; nose; function

鼻腔功能由其内流动的气流完成,但由于鼻腔及鼻窦分隔过多,且狭窄,因而对鼻腔内气流的特点无法通过直接测量进行描述分析。计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)是流体力学、数值数学和计算机科学结合的产物,以计算机为工具,应用数学方程,完成流体力学的计算机模拟后的数值实验及分析研究。借助 CFD 技术能够仿真模拟哺乳动物体内空腔脏器内气体和流体的流动特性,因而完成对非透明管道的直观观察,并可客观完成定量和定性的描述,CFD 成为临床医学的重要研究工具。近年来鼻腔流体力学的研究逐渐增多,包括各鼻道内的气流流速及流量、鼻窦与鼻腔的气流交换方式、气流的主要冲击位置以及药物运输过程中的作用方式。本文旨对以 CFD 为基础的鼻腔病理生理学的临床研究进展进行综述。

#### 1 正常鼻腔气流流场特点

鼻腔作为呼吸道的门户器官,通过气流运动,完成包括呼吸、调节温度和湿度、过滤及清洁、嗅觉在内的多种生理功能,而气流运动也是完成药物运输的必要条件。气流运动方式由鼻腔的解剖结构特点决定。鼻腔以鼻中隔为界分为左右两侧鼻腔,吸气相气流经前鼻孔进入鼻腔,并以不同的方式在狭窄的腔隙中流动,到达后鼻孔流出鼻腔在鼻咽部流动方向改为 90°后向下进入喉腔,呼气相气流运动方向相反。鼻甲是鼻腔外侧壁向鼻腔内突入的骨性结构(上、中、下鼻甲),将鼻腔分隔成不同的腔隙(上、中、下鼻道及总鼻道、嗅区)。而作为含气空

腔的鼻窦也因为开口于鼻腔参与鼻腔内的气流变化机制。

进入鼻腔的气流在鼻阈区首次发生流场改变。距前鼻孔 2~3 cm 处鼻腔最狭窄的区域是鼻瓣区(nasal valve)或被称为鼻阈区,横截面 30~60 mm<sup>2</sup>。鼻瓣区的横截面积最小,而阻力最大。根据流体连续性原理,气流速度与横截面积呈反比,因而鼻瓣区气流速度最高,经过鼻瓣区后气流速度增加。平静吸气时气流经前鼻孔进入鼻腔,一小部分向上达鼻腔顶部,进入嗅区,完成嗅觉功能;其余则大部分呈抛物线状至后鼻孔<sup>[1]</sup>,到达鼻咽部气流再次因 90°转角而流速增加<sup>[2]</sup>进入咽部,进而影响到上气道的压力。鼻腔气体的流动形式分为两种:层流(laminar)和涡流/湍流(turbulent)。在一个流场中,上方的流速大于下方时,即在冠状位面内发生由上向下的流动即进行“层流”运动;若上下方的流速相差较大,则形成“涡流/湍流”。层流增加了鼻腔气流与黏膜的接触面积,可能与鼻腔的温度湿度调节功能有关。涡流呈旋涡状,可增加气体与鼻腔黏膜之间的相互力量,可能影响到嗅觉的形成过程。鼻腔气流流场动力学与鼻腔正常生理功能(喷嚏、鼻周期、气流湿度和温度的调节作用和嗅觉)相关。研究者对喷嚏这一常规生理现象进行气流仿真模拟的研究,发现剧烈活动时上气道的压力仅为 200 Pa,但打喷嚏时气道内压力高达 7 000 Pa;而掩鼻和掩口的动作,则会使气道的压力增加 5~24 倍,因而掩住口鼻的动作可能隐藏着意想不到的损害<sup>[3]</sup>。鼻周期流体力学模型也被成功模拟,该模型通过模拟下鼻甲、中鼻甲及鼻中隔黏膜逐渐增厚状态完成,计算气流参数、鼻阻力及平均热流密度(average heat flux)数值,同时通过队列研究发现,鼻周期的生理状态是决定下鼻甲手术效果的重要因素<sup>[4]</sup>。CFD 的研究也发现环境温

\* 基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(No: 20150204084SF);中国医师协会-中青年医师呼吸研究专项基金资助项目

<sup>1</sup> 吉林大学中日联谊医院耳鼻咽喉头颈外科(长春,130033)  
通信作者:李琳, E-mail: lilin01@jlu.edu.cn

度与鼻腔不同界面的平均温度呈良好的线性关系,因而得以完成鼻腔热交换的过程,与压力增减无关<sup>[5]</sup>。鼻腔气流动力学对嗅觉功能意义重大。鼻腔嗅觉功能的传导过程可以狭义地理解为气流携带溴素到达嗅区摄入黏膜的过程,嗅区位于鼻腔的顶中部,完成嗅觉的气流动力学基础是嗅区区域内的气流为湍流,若形成层流则嗅觉将至少出现减退的可能<sup>[6]</sup>。

## 2 CFD 研究对鼻腔疾病治疗方案设定的指导作用

### 2.1 鼻塞的客观评价和机制研究

鼻塞是常见的临床症状,对鼻塞的临床检查大部分依赖视觉评分进行主观评判,虽然也有如鼻声反射、鼻阻力等属于客观测定,但有时患者对鼻塞的感知程度与临床上常用的气流物理测量之间关联不强。而 CFD 研究则能提供一些更精确的参考信息。CFD 研究发现鼻前庭后端的最高热损失与通畅率相关,而 CFD 获得的鼻腔阻力与鼻声反射测得的鼻阻力值相关<sup>[7]</sup>。对单侧下鼻甲肥大患者进行 CFD 相关参数测定后发现:肥大的下鼻甲区域会出现较健侧更广泛的鼻阻力,在吸气和呼气相均阻碍气流的通过,代偿性肥大的鼻甲处,气流的偏离位于鼻甲的凹面,同时肥大的下鼻甲降低了鼻腔内涡流的形成,不利于鼻腔与空气的能量交换<sup>[8]</sup>,因而鼻腔的温度调节功能也受到影响。鼻塞不仅与结构性解剖异常相关,也可能与温度等环境因素相关,我们在考虑药物或手术治疗的同时还要考虑患者教育的问题。

### 2.2 鼻甲手术问题

功能性鼻内镜手术中鼻甲切除是否会影响鼻腔功能存在争议,近期的 CFD 研究对比患者在切除中鼻甲的术前术后气流改变发现:部分患者中鼻甲切除后虽然可以出现局部壁剪应力降低和局部空气压力增加,使得气流方向出现偏移,但是不会影响到鼻腔内整体气流模式,对嗅区内嗅素摄入也不存在影响,同时不会改善切除侧出现的鼻塞症状<sup>[9]</sup>。而鼻甲肥大虚拟手术研究发现,中鼻甲切除术和下鼻甲切除术同样可以使鼻阻力降低和气流量增加,但下鼻甲全切后,热通量超过 50 W/m 的鼻腔黏膜表面积明显降低,而中鼻甲全切后变化不大;鼻腔的加热加湿功能均下降,但是下鼻甲切除更加明显<sup>[10]</sup>。梨状孔鼻甲成形术(pyriiform turbinoplasty)是一种新的下鼻甲手术方式,流体动力学研究发现这种在黏膜下切除上颌骨的额突和泪骨的手术方法,能够改善通气,但不会影响正常气流的模式,这一点与下鼻甲手术不同,这种术式不会改变下鼻道的气流模式,对鼻腔的损伤更小<sup>[11]</sup>。

### 2.3 术前方案设计

鼻腔手术适应证的选择和手术效果的评价都可以应用 CFD 模型进行评估,术前虚拟手术评估。

临床诊断为肥厚性鼻炎的患者,可以完成不同减容手术方式(鼻甲下端、鼻甲内侧面和外侧面)CFD 造模和参数计算,通过模拟呼吸过程中的气流、传热及湿度传递的过程,有研究发现下鼻甲底部减容不仅可能避免鼻腔的加湿功能出现损伤,同时术后鼻阻力下降最大的区域恰恰是术前阻力最高的位置<sup>[12]</sup>。CFD 也应用于模拟手术设计工作中,如经鼻入路的颅底手术,能够预测鼻腔内气流改变情况,包括对嗅区功能的影响等<sup>[13]</sup>。CFD 还可以指导术后药物的选择,如蝶窦开放术后直径达 25  $\mu\text{m}$  的颗粒能够进入蝶窦内,而在平静呼吸时直径为 10  $\mu\text{m}$  的颗粒沉积发生率约为 1.5%<sup>[14]</sup>,因而提供了临床药物选择依据。鼻中隔穿孔患者气流速度最快的位置在穿孔的中心区域,而在穿孔边缘则较低,穿孔区前方的壁剪切力高于上方。但有研究发现鼻中隔穿孔修补术成功的患者,鼻腔内气流的流速和气场的分布在手术前后并无改变<sup>[15]</sup>,提示我们对鼻中隔穿孔者要进行进一步的研究。

### 2.4 鼻临近器官疾病的研究

除了鼻腔疾病外,其他临近器官的病变机制及临床治疗机制的研究也可得益于 CFD 研究。其中腺样体扁桃体导致的儿童鼾症术后,会出现 AHI 降低,CFD 模拟研究发现 AHI 的降低与扁桃体及腺样体区域的最高压力降(maximum pressure drop, dPTAmax)及 dPTAmax 与流速的比值相关<sup>[16]</sup>。而上颌骨大面积缺损者亟待解决的问题是呼吸发声功能,通过腭复体修复患者 CFD 相关研究可以发现修复侧气体流动模式与健侧接近,其各截面层的气道截面积和气体流速等指标也接近健侧,因而再次证明腭复体修复可以治疗上颌骨缺损后出现的呼吸和发声功能障碍<sup>[17]</sup>。

## 3 CFD 研究在药物实验研究中的应用

动物模型是重要的应用医学研究工具,CFD 技术能够提供具体的形态功能信息即嗅觉、吸入性毒理、药物运输和药代动力学的相关模型参数。现在已经通过 CFD 的研究总结了与人类相似的兔鼻腔的气流动力学特点,即在鼻前庭区存在螺旋状三股气流,方向为下鼻道、中鼻道和总鼻道,鼻腔内的气流大部分是平稳的层流,仅在嗅区才可能出现不稳定的湍流<sup>[18]</sup>。动物模型中感染性气溶胶粒子对气道的致病性和药物气溶胶的治疗作用都可以通过 CFD 进行测算。气溶胶粒子在呼吸道沉降需计算沉积率(deposition enhancement)和沉降增强因子(deposition enhancement factor),进而描述不同颗粒直径、不同吸入方式的气溶胶颗粒的释放位置和沉积特征,确定气溶胶颗粒沉积位置和功效,或者是否会因肺深部进入血液循环产生对全身其他器官的负向作用<sup>[19]</sup>,及在鼻腔的沉降位置<sup>[20]</sup>。微米级气溶胶颗粒的沉降机制主要包括惯性撞击、重

力沉降和二次流对流作用、湍流扩散<sup>[21]</sup>。纳米级气溶胶颗粒则主要是由布朗运动产生的扩散作用控制的。已开发出鼻腔喷剂在上呼吸道上皮表面的CFD完整模型,既可确定气雾分子的主要沉降位置,也可通过映射的表面模型,完成黏液速度场(mucus velocity field)的计算,总体客观地评估黏液层对药物的吸收效果<sup>[22]</sup>。

流体动力学研究起源于交通运输业,目前引入临床医学研究范畴,可以用客观的数据直观地描述空腔器官的病理生理状态。鼻腔气流流场的模拟不仅可对鼻腔的病理及生理状态进行机制的解读,还可完成虚拟手术设计及药物动物模型构建,为完成精准手术和药物治疗方案提供理论基础,具有广阔的发展前景。

#### 参考文献

- [1] ISHIKAWA S, NAKAYAMA T, WATANABE M, et al. Visualization of flow resistance in physiological nasal respiration: analysis of velocity and vorticities using numerical simulation [J]. Arch Otolaryngol Head Neck Surg, 2006,132:1203-1209.
- [2] THAPA A, JAYAN B, NEHRA K, et al. Pharyngeal airway analysis in obese and non-obese patients with obstructive sleep apnea syndrome [J]. Med J Armed Forces India, 2015, 71(Suppl 2):S369-375.
- [3] RAHIMINEJAD M, HAGHIGHI A, DASTAN A, et al. Computer simulations of pressure and velocity fields in a human upper airway during sneezing [J]. Comput Biol Med, 2016, 71:115-127.
- [4] PATEL R G, GARCIA G J, FRANK-ITO D O, et al. Simulating the nasal cycle with computational fluid dynamics [J]. Otolaryngol Head Neck Surg, 2015, 152:353-360.
- [5] BURGOS M A, SANMIGUEL-ROJAS E, MARTÍN-ALCÁNTARA A, et al. Effects of the ambient temperature on the airflow across a Caucasian nasal cavity [J]. Int J Numer Method Biomed Eng, 2014, 30: 430-445.
- [6] ZHAO K, DALTON P, YANG G C, et al. Numerical modeling of turbulent and laminar airflow and odorant transport during sniffing in the human and rat nose [J]. Chem Senses, 2006,31:107-118.
- [7] LU J, HAN D, ZHANG L. Accuracy evaluation of a numerical simulation model of nasal airflow [J]. Acta Otolaryngol, 2014,134:513-519.
- [8] 郭宇峰,张宇宁,陈广,等. 单侧下鼻甲肥大鼻腔气流流体力学分析 [J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2009,23(17):773-777.
- [9] ZHAO K, MALHOTRA P, ROSEN D, et al. Computational fluid dynamics as surgical planning tool: a pilot study on middle turbinate resection [J]. Anat Rec (Hoboken), 2014,297:2187-2195.
- [10] DAYAL A, RHEE J S, GARCIA G J. Impact of Middle versus Inferior Total Turbinectomy on Nasal Aerodynamics [J]. Otolaryngol Head Neck Surg, 2016,155:518-525.
- [11] SIMMEN D, SOMMER F, BRINER H R, et al. The effect of "Pyiform Turbinoplasty" on nasal airflow using a virtual model [J]. Rhinology, 2015,53:242-248.
- [12] HARIRI B M, RHEE J S, GARCIA G J. Identifying patients who may benefit from inferior turbinate reduction using computer simulations [J]. Laryngoscope, 2015,125:2635-264.
- [13] FRANK-ITO D O, SAJISEVI M, SOLARES C A, et al. Modeling alterations in sinonasal physiology after skull base surgery [J]. Am J Rhinol Allergy, 2015, 29:145-150.
- [14] BAHMANZADEH H, ABOUALI O, FARAMARZI M, et al. Numerical simulation of airflow and micro-particle deposition in human nasal airway pre- and post-virtual sphenoidotomy surgery [J]. Comput Biol Med, 2015,61:8-18.
- [15] FARAMARZI M, BARADARANFAR M H, ABOUALI O, et al. Numerical investigation of the flow field in realistic nasal septal perforation geometry [J]. Allergy Rhinol (Providence), 2014,5:70-77.
- [16] LUO H, SIN S, MCDONOUGH J M, et al. Computational fluid dynamics endpoints for assessment of adenotonsillectomy outcome in obese children with obstructive sleep apnea syndrome [J]. J Biomech, 2014,47:2498-2503.
- [17] 盖德倩,吴亚东,焦婷,等. 上颌腭复合修复后上呼吸道气场模拟分析 [J]. 上海交通大学学报(医学版), 2013,33(5):602-606.
- [18] XI J, SI X A, KIM J, et al. Anatomical Details of the Rabbit Nasal Passages and Their Implications in Breathing, Air Conditioning, and Olfaction [J]. Anat Rec (Hoboken), 2016, 299:853-868.
- [19] 刘克洋,李劲松. 气溶胶粒子在呼吸道沉降的计算机流体力学模拟方法研究进展 [J]. 军事医学, 2011, 35(2):153-157.
- [20] SHANG Y, DONG J, INTHAVONG K, et al. Comparative numerical modeling of inhaled micron-sized particle deposition in human and rat nasal cavities [J]. Inhal Toxicol, 2015,27:694-705.
- [21] ZHENG L, CLEMENT K, ZHE Z. Particle deposition in the human tracheobronchial airways due to transient inspiratory flow patterns [J]. J Aerosol Sci, 2007,38:625-644.
- [22] RYGG A, LONGEST P W. Absorption and Clearance of Pharmaceutical Aerosols in the Human Nose: Development of a CFD Model [J]. J Aerosol Med Pulm Drug Deliv, 2016,29:416-431.

(收稿日期:2017-01-25)