

## 功能性鼻窦内镜术后对鼻腔鼻窦气流的影响

熊观霞<sup>1</sup>, 詹杰民<sup>2</sup>, 江广理<sup>1</sup>, 黎建峰<sup>2</sup>, 容亮湾<sup>2</sup>, 许庚<sup>1\*</sup>

(中山大学 1. 附属第一医院耳鼻咽喉科医院//耳鼻咽喉科研究所, 2. 应用力学与工程系, 广东 广州 510080)

**摘要:**【目的】用计算流体力学的方法研究功能性鼻窦内镜手术后鼻腔-鼻窦的气场参数特点。【方法】从30例健康青年人中,通过鼻内镜、鼻声反射测定仪及CT检查,严格筛选出一例研究对象,根据该入选对象的鼻腔CT影像资料,利用Fluent 6.1.22软件重建出正常鼻腔的数字模型,同时根据功能性鼻窦内镜手术的要求(切除钩突,开放筛窦、上颌窦和蝶窦)模拟出鼻内镜术后的鼻腔数字模型,再用Navier-Stokes方程对手术前后鼻腔气流的粘性运动进行数值计算,比较内镜手术前后鼻腔的气流速度、分布和压力的差异。【结果】功能性鼻内镜术后模型的总鼻道流量明显减少,中鼻道和开放的筛窦区域的气流量增加在13%以上;气流在上颌窦、筛窦、蝶窦前方部分区域的气流速度均大于0.01 m/s;上颌窦中、上部的气流速度大于0.1 m/s,并形成明显环状流场;术后模型鼻腔内部阻力减小,以术腔中后部阻力减少为主。【结论】鼻内镜术后的鼻腔气流力学参数发生了变化,功能性鼻内镜手术改变了鼻腔一些原有的生理力学特性。

**关键词:** 三维重建; 鼻腔; 气流; 计算流体力学; 功能性内镜鼻窦手术

中图分类号: R764.43 文献标识码: A 文章编号: 1672-3554(2009)02-0205-06

## Influence of Functional Endoscopic Sinus Surgery on Airflow of Postoperative Nasal Cavity and Sinuses

XIONG Guan-xia<sup>1</sup>, ZHAN Jie-min<sup>2</sup>, JIANG Guang-li<sup>1</sup>, LI Jian-feng<sup>2</sup>, RONG Liang-wan<sup>2</sup>, XU Geng<sup>1\*</sup>

(1. Otorhinolaryngology Hospital of The First Affiliated Hospital//Otolaryngology Institute;

2. Department of Applied Mechanics and Engineering, SUN Yat-sen University, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** 【Objective】 To study the characteristics of the airflow-field parameter in nasal cavity and sinuses after functional endoscopic sinus surgery (FESS) by computational fluid dynamics (CFD). 【Methods】 A subject was selected strictly from 30 healthy young people through nasal endoscopic examination, acoustic rhinometry measurement and CT scanning. Based on the CT image data of the subject, digital model of normal nasal cavity was reconstructed through Fluent 6.1.22 software. At the same time, according to the surgical requirements of FESS (remove the uncinata process and open the ethmoid sinus, maxillary sinus, and sphenoid sinus), post-FESS digital nasal cavity model was simulated. The viscous motion of nasal airflow before and after FESS was calculated by Navier-Stokes equations to compare the differences of airflow velocity, distribution, and pressure. 【Results】 In the post-FESS digital nasal cavity model, airflow through common nasal meatus decreased obviously but increased over 13% through middle nasal meatus and open ethmoid sinus. The airflow velocity in maxillary sinus, ethmoid sinus, and the anterior part of sphenoid sinus was all more than 0.01 m/s. In the middle-upper part of maxillary sinus, the airflow velocity was over 0.1 m/s and an obvious annular flow was observed. Resistance in the post-FESS digital nasal cavity model diminished mainly in the middle and posterior parts of the operational cavity. 【Conclusion】 The airflow dynamic parameters of pre- and post-FESS nasal cavity models are different which proves that FESS changes some natural physiological mechanic characteristics of nasal cavity.

**Key words:** three-dimensional reconstruction; nasal cavity; airflow; computational fluid dynamics; functional endoscopic sinus surgery

[J SUN Yat-sen Univ(Med Sci), 2009, 30(2):205-210]

收稿日期:2008-09-01

基金项目:中山大学“临床医学研究5010计划”项目(No.180002)

作者简介:熊观霞,在读博士,副主任医师,硕士生导师,E-mail: xgx001@163.com; \*通讯作者:许庚,E-mail: entxgfs@163.com

功能性内镜鼻窦手术是当代手术治疗慢性鼻-鼻窦炎的主体方式<sup>[1-2]</sup>,但是越来越多的鼻科学家注意到了鼻窦炎术后仍有复发的现状<sup>[3]</sup>。虽然引起鼻窦炎术后复发的原因很多,但手术后由于鼻腔内部结构改变而引发鼻腔气流力学的变化仍是一个不可忽视的原因。对于这个问题,由于鼻腔鼻窦结构的复杂性和气流力学研究要求的精确性<sup>[4]</sup>,目前国内、外均没有相关的研究报道。有鉴于此,我们利用目前最为先进的计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)研究方法对经典功能性内镜手术前后的鼻腔气流进行模拟计算,从而了解功能性鼻窦内镜术前后鼻腔气流力学的差异,为提高手术治疗鼻窦炎的远期治愈率作基础研究。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究对象

在本研究所的30个健康青年当中,首先筛选出既往无慢性鼻腔疾病史,近3个月没有患过急性鼻腔疾病的17人。对这17人进行鼻内镜检查,再筛选出一个鼻中隔不偏曲,无明显鼻甲肥大和萎缩,上、中、下鼻道未见异常者5人。进一步用丹麦 RhioMetrics 公司的 SRE2000 型鼻声反射测定仪对5人在三个不同时段进行测试,其中4人不同时段三次检查显示气流分布与阻力曲线均在正常值范围,1人有一次检查中气流分布与阻力曲线有轻微异常,予以剔除。最后对这4人进行鼻腔CT扫描,专家阅片鉴定鼻腔影像结构基本正常的2人,选其中1个40岁女性作为标准研究对象,另外1位26岁女性因准备怀孕暂不作为研究对象入选。入选的研究对象在参与研究前已签署参与研究同意书。

### 1.2 研究方法

1.2.1 鼻腔模型的三维重建 采用日本 Toshiba 公司生产的64层高速螺旋CT对筛选出的志愿者鼻腔鼻窦扫描,扫描前让志愿者在室温环境下(约24℃)休息30min,获得影像作为数据源,层厚0.3mm,骨组织窗。将水平截面CT图输入边界提取软件3D-DOCTOR,提取鼻腔流场的边界线,并由鼻科和放射科专家鉴定修正。在上述所提取边界线上取点,输出点的坐标,作为构建 Fluent(美国 Fluent 公司的6.1.22版本)数值模型的基本数

据,利用 Fluent 中自带的 Gambit 软件重建模型。模型分层构造,每一层间距为1.2mm,直到形成一个完整的模型。整个正常鼻腔模型分为112层,包括所有鼻窦在内的整个完整鼻腔区域。在模拟的正常鼻腔模型基础上,对鼻腔每层已数字化的图像进行修改:按功能性鼻窦手术的要求(切除钩突和筛窦气房、开放上颌窦、蝶窦和额窦窦口)模拟术后鼻腔鼻窦每层的数据文件,再进行三维重建。模拟手术后的鼻腔结构模型外形与正常鼻腔模型一致,但鼻腔钩突,前后筛房已被切除,上颌窦口、蝶窦口、额窦口分别开放为1.0cm×1.2cm、0.6cm×0.5cm和0.4cm×0.5cm。

1.2.2 网格的划分 两个模型均采用四面体网格,考虑到不同区域流动变化的程度不同,采取分区网格划分;并且对两个模型的壁面进行加密。本研究模型的总网格数为1850077(图1A)。

1.2.3 边界设置和条件 两个模型以鼻咽的下端作为入口,给定入口处流量为353mL/s<sup>[5]</sup>,考虑到前鼻孔离鼻阈比较近,不把前鼻孔作为出口,把边界外推,在前鼻孔下方加多一个直径50mm、高60mm的圆柱<sup>[4]</sup>,连接两个鼻孔,圆柱的外边界作为出口,给定压强为1个大气压(101.35kPa),其他鼻腔边界为固壁,鼻腔壁处设为无滑移边界。

1.2.4 数值模拟方法 控制方程为不可压缩粘性流体的 Navier-Stokes 方程,采用层流模式计算稳态吸气时的气流状况,雷诺数约为1500。

1.2.5 横截面设置 本实验设置了截面系统(plane 1N~11N)对鼻腔内主要通道的压力变化进行具体分析研究。取横截面为X=91mm时速度矢量,沿着空气流动的方向依次作截面 plane 1~11,使截面大致上垂直于速度的方向,同时垂直于X=91的平面,plane 1~11分别代表前鼻孔入口、鼻前庭中间位置、鼻阈、下鼻甲前端、中鼻甲前端、钩突的前部、前筛房的中间、上颌窦的开口、后筛房的中部、蝶窦的前壁、后鼻孔、鼻咽腔中部区域(图1B)。

1.2.6 鼻腔阻力计算 我们在本实验中主要研究鼻腔机械阻力的变化,可用沿着空气流动方向的压降来表现。沿着流动方向取与前面相同位置的截面 plane 1~11,测出以上各截面左右鼻腔的面积及沿程距离(沿程距离指质点从前鼻孔流经以上截面的曲线距离),计算两模型左右鼻腔各截面的平均压强并比较其变化,从而得出两模型鼻腔内部阻力的差异。

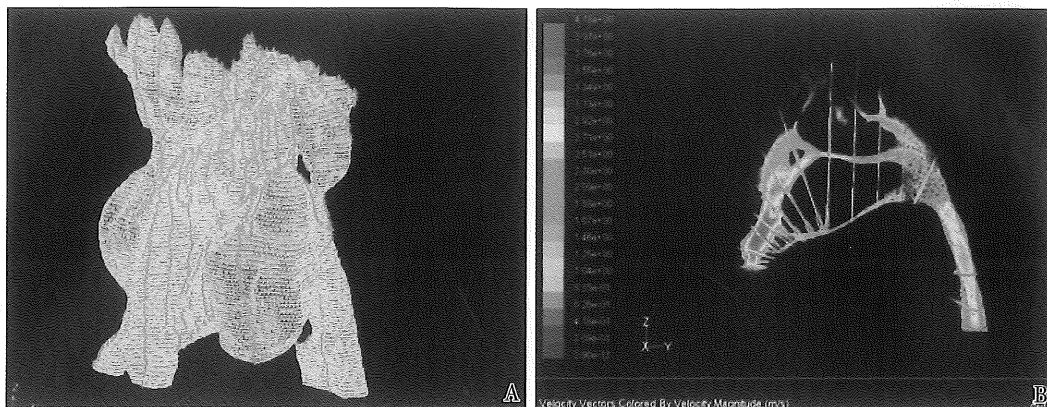


图 1 三维重建后的鼻腔模型

Fig.1 Nasal cavity model after three-dimensional reconstruction

A: Mesh generation of the computational fluid model for the pre-FESS (functional endoscopic sinus surgery) simulation. The nostrils are on the lower left quadrant and the nasopharynx on the lower right quadrant. B: Eleven representative cross sections of selected sagittal planes for the pre-FESS. The nostrils are on the left and the nasopharynx on the right.

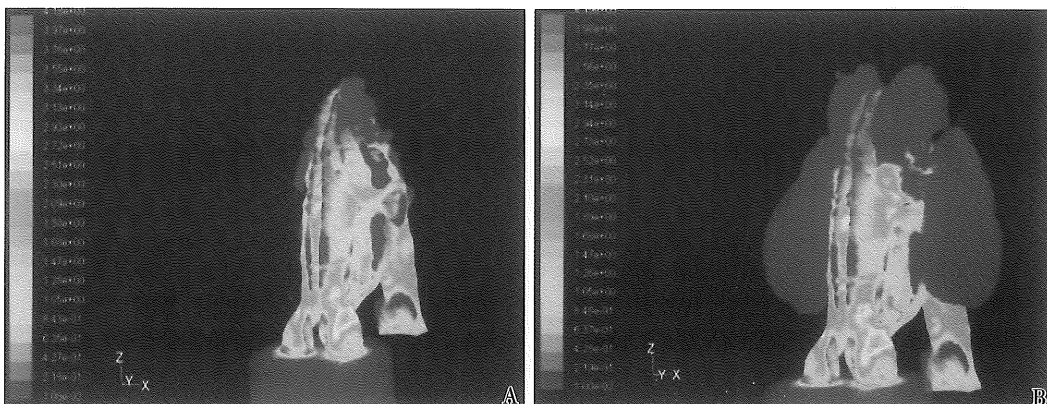


图 2 功能性鼻窦内镜手术前后鼻腔的整体流场速度矢量图

Fig.2 Velocity vectorgraphs of general airflow-field in pre- and post-FESS nasal cavity models

A: Contour plot of velocity vector magnitudes from the normal nasal model indicates a lack of paranasal sinus airflow (less than 0.01 m/s). B: Velocity vector magnitude in the post-FESS nasal model indicates a three-fold increase in airflow dynamics (greater than 0.01 m/s) in the maxillary, ethmoid, and sphenoid areas.

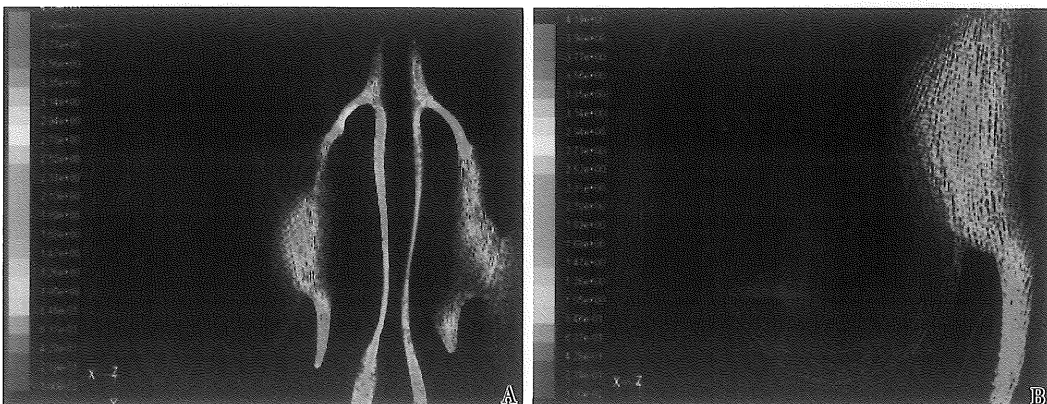


图 3 手术后模型上颌窦上截面速度矢量图

Fig.3 Velocity vectorgraphs of upper plane in the maxillary sinus of post-FESS model

A and B show the coronal cross-section of maxillary sinus depicts annular airflow from the posterior to the anterior maxillary sinus.

## 2 结 果

### 2.1 鼻腔气流速度的特点

2.1.1 手术前鼻腔气流特点 从数值模拟结果的速度云图中可知,稳态吸气时,鼻腔气流以层流为主,空气从前鼻孔流入,经过鼻前庭、鼻阈、再经过主要鼻腔通道(上、中、下鼻道和总鼻道),到达鼻咽。气流最大流速出现在左鼻阈与下鼻甲前端之间的区域,约为 4.12 m/s。分别取上颌窦和蝶窦的开口截面和窦内中间截面分析气流速度。上颌窦开口截面积为 13.6 mm<sup>2</sup>, 气流平均速度为 0.058 m/s,最大速度为 0.19 m/s;窦内中间截面的气流平均速度为  $4.3 \times 10^{-5}$  m/s,最大速度为 0.0002 m/s。蝶窦开口处截面平均速度为 0.057 m/s,最大速度为 0.15 m/s;窦内中间截面平均速度为  $2.31 \times 10^{-5}$  m/s,最大速度为  $9.26 \times 10^{-5}$  m/s。提示在稳态吸气相时,各鼻窦的气流都与主要通道相连,但气流速度极低,鼻腔与鼻窦之间几乎没有气流交换(图 2A)。

2.1.2 手术后鼻腔气流特点 功能性鼻窦内窥镜术后的鼻腔,稳态吸气时气流进入开放后的上颌窦、筛窦、蝶窦和额窦。速度云图的计算结果中设定只显示速度大于 0.01 m/s 的区域,图 2A 是手术前鼻腔的空气流场速度矢量分布图,可见正常情况下各鼻窦内气流基本不显示,提示各鼻窦内气流速度均小于 0.01 m/s。图 2B 显示鼻内窥镜术后的鼻腔流场速度矢量分布图,显示的区域明显比 A 图增多,包括上颌窦、筛窦和蝶窦前方区域,提示上述部位内有气流流动,且气流速度均大于 0.01 m/s,但额窦内气流速度依然小于 0.01 m/s。上颌窦的中、上部区域气流速度大于 0.1m/s,上部区域平均速度为 0.15 m/s,最大速度为 0.43 m/s。气流在上颌窦的中上部形成明显环状带:气流从上颌窦的后端流进,绕一圈,从前端流出,但在这环的中心速度较小(图 3)。

### 2.2 鼻腔气流压强特点

表 1 显示鼻腔内部气流的压力分布,从前鼻孔到鼻咽部,压强一直下降,而压强下降的幅度在逐渐减小。以右侧鼻腔为例,用压力曲线图表示手术前后鼻腔阻力的变化规律(图 4)。从图中看出,手术后模型鼻腔内部阻力减小了,在开放后的筛房中后部位为主。

表 1 手术前后鼻腔模型在相同沿程距离截面上的压力比较

Table 1 Comparison of pressure over varying distances of selected planes in pre- and post-FESS nasal models (Pa)

	Distance (cm)	Left nasal cavity		Right nasal cavity	
		Pre-FESS	Post-FESS	Pre-FESS	Post-FESS
Plane 1	0	-6.39	-6.43	-4.39	-4.37
Plane 2	0.5	-8.89	-8.91	-6.30	-6.27
Plane 3	1.1	-9.91	-9.96	-7.05	-7.05
Plane 4	1.54	-9.97	-10.05	-7.33	-7.38
Plane 5	2.24	-10.33	-10.52	-8.27	-8.39
Plane 6	2.91	-11.42	-11.58	-9.92	-10.02
Plane 7	3.75	-12.98	-13.13	-11.59	-11.72
Plane 8	5.37	-16.20	-15.16	-14.62	-13.57
Plane 9	6.42	-18.67	-16.86	-17.12	-15.22
Plane 10	7.52	-21.13	-19.68	-19.91	-18.37
Plane 11	8.54	-21.88	-20.57	-21.96	-20.61

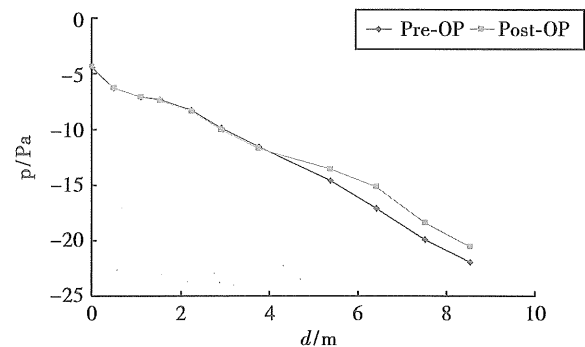


图 4 右鼻腔手术前后的压力曲线图

Fig.4 Pressure-flow diagram of the right nasal cavity before and after FESS

Pressure-flow magnitude averages over selected planes of the nasal model at various levels from the entrance of the nares to the nasopharynx before and after FESS.

### 2.3 鼻腔主要鼻道的气流分布特点

左、右鼻腔各主要通道在不同部位的截面气流量不同,但总气流量是恒定的。因内镜手术将筛房切除后将有一部分的气流会经开放后的筛房进入上鼻道,这样会与正常吸气状态下进入上鼻道的气流方式不同,为避免由此而引起的误差,在分析比较手术前后鼻腔主要通道的气流量差异时,两模型均选用  $Y = 48$  mm 截面对鼻腔总鼻道和下、中鼻道的气流进行计算,此层面上鼻道结构尚未出现,这样会更具有可比性。表 2 显示术前鼻腔气

流主要流经总鼻道和中鼻道(两者占了一侧鼻腔气流的80%以上),且以总鼻道为主;术后模型左右鼻腔流量比例基本一致,但术后模型总鼻道流

量明显比原模型减少了,减少比例在12%以上,下鼻道流量也稍微减少1%以上,而中鼻道及开放的筛窦区域的气流量相应地明显增加。

表2 Y=48 mm 截面时左、右鼻腔术前、术后各鼻道的气流量比较

Table 2 Comparison of airflow in the left and right nostril pre- and post-FESS while Y=48 mm (mL/s)

	Left nostril		Right nostril	
	Pre-FESS	Post-FESS	Pre-FESS	Post-FESS
Common meatus airflow	113.4(60.5%)	90.4(48.2%)	98.6(59.5%)	74.3(44.9%)
Inferior meatus airflow	20.5(10.9%)	18.6(9.9%)	27.5(16.5%)	25.4(15.4%)
Middle meatus airflow <sup>1)</sup>	53.5(28.6%)	78.7(41.9%)	39.5(24.0%)	65.6(39.7%)
Global airflow	187.4(100%)	187.7(100%)	165.6(100%)	165.3(100%)

1) The ethmoid sinuses are included in the post-FESS nasal model

### 3 讨论

为了能够在没有任何干扰和临床危险的情况下提高对鼻腔里面细节流动现象的认识和理解,更好地阐明功能性鼻窦内镜手术对鼻腔气流的影响,我们在本课题中利用目前较为先进且应用成熟的计算流体力学(CFD)技术<sup>[6-9]</sup>,以严格筛选的正常鼻腔CT影像为蓝本,模拟并三维重建出正常的鼻腔和经典功能性内镜手术后的鼻腔,并对鼻腔气流进行流场分析、计算和预测,模拟结果的三维可视化使我们能够得到一个关于手术前后鼻腔流动物理参数(气流速度、分布和压力)整体和局部分布的详细图像,这样精细的计算技术使到鼻腔模型的气流定性和定量分析更为科学和可信。事实上,这样的研究方法已得到许多同行的认可<sup>[5-8]</sup>。考虑到运动状态下有鼻翼煽动等面部肌肉活动及同时存在的神经、体液等其他因素的影响,鼻腔黏膜舒缩会导致气流通道截面积的变化,从而引起其中气流流场的变化,因此本课题主要就人体在稳态吸气状态下的鼻腔气流流场进行分析,并在鼻咽出口处采用353 mL/s<sup>[5]</sup>的中等气流速度计算。另外,考虑到在正常鼻腔模型基础上模拟出的手术后模型会更准确地达到标准鼻内镜手术的要求,可排除患者基础疾病、手术医生等临床干扰因素,使研究结果更有说服力。

本研究模拟的正常鼻腔模型的计算结果显示,在稳态吸气状态下,鼻腔气流主要流经中鼻道和总鼻道,占一侧鼻腔总气流量的80%以上,其中总鼻道占60%左右;鼻阈与下鼻甲前端区域的流

场速度最大,左侧鼻阈出现了整个鼻腔流场的最大速度,约为4.12 m/s;鼻腔气流以层流为主;气道压力在鼻腔的前中部变化快,而在后部(如后鼻孔到鼻咽部)的气压变化小。这些结果与Martonen<sup>[10]</sup>、刘迎曦<sup>[11]</sup>等学者同样用CFD方法研究的结果是吻合的,而与Kim<sup>[12]</sup>用PIV(particle image velocimetry)实验方法计算的结果也很相似。鼻腔本部气流的这些力学特性主要与其解剖结构有关<sup>[12]</sup>:鼻阈是鼻腔本部最狭窄的部位;鼻腔各鼻道中总鼻道的容积最大;鼻腔前中部气道的横截面积小,鼻阻力相对也较大。

鼻窦内镜手术后对鼻窦气流的影响是本课题最要解决的问题,因为功能性内镜鼻窦手术(FESS)的关键是处理鼻窦鼻道复合体的病变,其手术方式是在切除钩突之后,全面开放筛窦、上颌窦、额窦和蝶窦。这种手术方式具有病变切除彻底、黏膜保留完整、充分通畅引流等多种优点,成为当代手术治疗慢性鼻-鼻窦炎的主体方式。事实证明七十年代问世的功能性鼻内镜鼻窦手术已将慢性鼻窦炎的手术近期治愈率提高到90%左右<sup>[3]</sup>。但我们发现随着手术后时间的推移,原有已经完全恢复正常形态和功能的鼻窦黏膜会再次发生炎性病变,复发率逐年递增,成为困扰临床的难题<sup>[13]</sup>。引起鼻窦炎症复发的机制复杂,原因很多,如粘膜炎症、纤毛输送功能障碍外、全身变应因素、局部用药不当<sup>[12]</sup>等,但我们不能忽视最基础的一点:目前国际流行的这种功能性内窥镜鼻窦手术解决了窦口鼻道复合体阻塞和各个鼻窦的引流问题,但同时也引发了鼻腔的内部解剖结构的改变。那么,这种由于手术引发的鼻腔内部解剖结构的

变化是否会对鼻腔的气流力学产生影响?也就是说这种改变是否会使得到原应该受到鼻腔外侧壁结构保护的鼻窦黏膜直接受到气流的冲击?

本研究对经典鼻内镜手术前后的模型进行计算分析后显示两者的气流参数是有差异的。首先,由于经典的鼻内镜术后鼻腔内窦口鼻道复合体的切除,中鼻道和筛窦区域已融为一体,术后该区域的鼻腔流阻减小,吸气时气流更多地流经该区域,本模型计算显示术后该区域气流增加在13%以上。其次,进入各鼻窦内的气流量增多,各鼻窦内气流速度增加,在筛窦的大部分区域、上颌窦的中、上部区域气流速度甚至大于0.1 m/s,这是由于筛房切除后,中鼻道与筛房的融合区域气流量增加,加上上颌窦、蝶窦和额窦的窦口扩大后所致。再者,上颌窦内区域产生了具有明显速度的带状区域:在上颌窦的中上部,气流中从上颌窦的后端流进,绕一圈,从前端流出,形成环状流,这环的外周速度高(大于0.1 m/s),中心速度较小,考虑是上颌窦内容积较大,流场速度高,窦壁与中心区域存在压力差所引起的。以上这几点说明鼻内镜术后鼻腔鼻窦的气流已较术前的鼻腔气流发生了变化:功能性鼻内镜手术,在钩突被切除之后,筛窦、上颌窦、额窦、蝶窦全面开放,使得到原先受到鼻腔外侧壁保护的全部鼻窦暴露于气流的直接冲击之下,含有多种致病因素(细菌、病毒、变应原、污染颗粒…)的气流可以直接进入各个鼻窦腔。这样的气流力学变化不可避免地埋下了鼻窦黏膜再次发生炎性病变的隐患。当然,鼻窦炎症的复发是多因素、多层次的综合结果,但由于鼻腔内部解剖结构的改变而引发的气流力学变化是一个不可忽略的因素。

经典的鼻内镜手术能治疗慢性鼻窦炎并获得较好的近期治愈率是不容置疑的,但通过本研究,我们发现功能性内窥镜鼻窦手术在解决了窦口鼻道复合体阻塞和各个鼻窦的引流问题时,也引发了鼻腔内部气流通道结构的改变和气流动力学的变化,这种变化对鼻腔鼻窦粘膜纤毛系统的影响有待进一步的研究和临床追踪观察。

#### 参考文献:

[1] 董明,曾奇,吴璇,等. 功能性鼻内窥镜鼻窦手

术治疗慢性鼻窦炎 153 例疗效观察 [J]. 新医学, 2007, 38(10):666-667.

- [2] 郑伟明,赵宏辉. 83 例老年患者功能性内窥镜鼻窦手术的围手术期处理 [J]. 新医学, 2002, 33(2):93-94.
- [3] Stammberger H. Endoscopic endonasal surgery—concepts in treatment of recurring rhinosinusitis. Part I. Anatomic and pathophysiologic considerations [J]. *Otolaryngol Head Neck Surg*, 1986, 94(2):143-147.
- [4] 吴望一. 流体力学(上册) [M]. 北京:北京大学出版社, 2003:81-83.
- [5] Croce C, Fodil R, Durand M, et al. In vitro experiments and numerical simulations of airflow in realistic nasal airway geometry [J]. *Ann Biomed Eng*, 2006, 34(6):997-1007.
- [6] Keyhani K, Scherer PW, Mozell MM. A numerical model of nasal odorant transport for the analysis of human olfaction [J]. *J Theor Biol*, 1997, 186(3):279-301.
- [7] Subramaniam RP, Richardson RB, Morgan KT, et al. Computational fluid dynamics simulations of inspiratory airflow in the human nose and nasopharynx [J]. *Inhal Toxicol*, 1999, 10(3):91-120.
- [8] Cant S. High-performance computing in computational fluid dynamics: progress and challenges [J]. *Philos Transact A Math Phys Eng Sci*, 2002, 360 (1795):1211-1225.
- [9] 熊观霞,许庚,詹杰民. 鼻腔鼻窦气流动力学研究的进展 [J]. 中山大学学报:医学科学版, 2008, 29(4S):146-148.
- [10] Martonen TB, Quan L, Zhang Z, et al. Flow simulation in the human upper respiratory tract [J]. *Cell Biochem Biophys*, 2002, 37(1):27-36.
- [11] 刘迎曦,于申,孙秀珍,等. 鼻腔结构形态对鼻腔气流的影响 [J]. 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2005, 40(11):846-849.
- [12] Kim JK, Yoon JH, Kim CH, et al. Particle image velocimetry measurements for the study of nasal airflow [J]. *Acta Otolaryngol*, 2006, 126(3):282-287.
- [13] 许庚,李源,谢民强,等. 功能性内窥镜鼻窦手术后黏膜转归阶段的划分及处理原则 [J]. 中华耳鼻咽喉科杂志, 1999, 34(5):302-305.
- [14] 叶进,李源,刘慧,等. 布地奈德鼻内雾化吸入辅助治疗急性鼻-鼻窦炎 [J]. 中山大学学报:医学科学版, 2007, 28(2):234-237.

(编辑 刘清海)