

# 基于3D打印透明鼻腔模型的鼻阻力变化规律研究

马瑞萍<sup>1</sup> 郑国玺<sup>1</sup> 鄂殿玉<sup>2</sup> 胡真真<sup>1</sup> 娄森<sup>1</sup> 佟振博<sup>3</sup> 王玉升<sup>1</sup> 郭刚<sup>3</sup> 王波涛<sup>1</sup> 张亚<sup>1</sup>

**[摘要]** 目的:探讨鼻腔内最小截面积与鼻阻力互为因果的变化规律。方法:3D打印全透明可拆卸功能性鼻窦内镜手术(FESS)术后鼻腔模型30侧,在不同解剖部位用密封材料彻底堵塞气道,然后用不同截面积的可通气鼻腔引流管再通鼻腔,测量鼻阻力,再进行统计学分析。结果:①术后患者实测、3D打印模型鼻阻力分别为 $(0.38\pm 0.15)$  Pa·s/mL、 $(0.39\pm 0.02)$  Pa·s/mL,两组之间差异无统计学意义( $P>0.05$ ),术前患者鼻阻力为 $(0.56\pm 0.09)$  Pa·s/mL,术后模型较术前显著下降约31%,差异有统计学意义( $P<0.05$ );②当截面积为 $3.14\text{ mm}^2$ 的可通气鼻腔引流管位于总鼻道上部、鼻阀区时鼻腔均中度阻塞,鼻阻力分别为阻塞前的 $(1.80\pm 0.30)$ 倍、 $(2.02\pm 0.36)$ 倍,位于总鼻道下部时鼻腔轻度阻塞,鼻阻力为阻塞前的 $(1.68\pm 0.28)$ 倍;③当截面积为 $6.28\text{ mm}^2$ 的可通气鼻腔引流管位于总鼻道下部、总鼻道上部、鼻阀区时,鼻阻力值分别为阻塞前的 $(1.44\pm 0.23)$ 倍、 $(1.50\pm 0.25)$ 倍、 $(1.60\pm 0.27)$ 倍;④当截面积为 $9.42\text{ mm}^2$ 的可通气鼻腔引流管位于以上部位时,鼻腔通气均接近正常,无明显鼻塞,鼻阻力值分别为阻塞前的 $(1.17\pm 0.18)$ 倍、 $(1.26\pm 0.21)$ 倍、 $(1.33\pm 0.24)$ 倍;⑤鼻阻力与通气管截面积、部位相关,相关系数分别为 $-0.895$ 和 $0.339$ ,差异均有统计学意义( $P<0.05$ )。结论:①3D打印可快速精准地复制鼻腔解剖结构,可作为定量测量鼻阻力的研究方法;②鼻腔最小截面积为鼻阻力主要决定因素;③部位为鼻阻力的次要决定因素,当阻塞程度相同时,鼻阀区鼻阻力略高于总鼻道。

**[关键词]** 鼻窦炎;鼻阻力;3D打印;功能性鼻窦内镜手术

**DOI:**10.13201/j.issn.2096-7993.2021.12.009

**[中图分类号]** R765.4 **[文献标志码]** A

## Study on changes of nasal resistance based on 3D printing transparent nasal cavity models

MA Rui ping<sup>1</sup> ZHENG Guoxi<sup>1</sup> E Dianyu<sup>2</sup> HU Zhenzhen<sup>1</sup> LOU Miao<sup>1</sup>  
TONG Zhenbo<sup>3</sup> WANG Yusheng<sup>1</sup> GUO Gang<sup>3</sup> WANG Botao<sup>1</sup> ZHANG Ya<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Department of Otolaryngology Head and Neck Surgery, the Second Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710004, China; <sup>2</sup>Jiangxi University of Science and Technology, Key Laboratory of Jiangxi Provincial Particle System Simulation; <sup>3</sup>School of Energy and Environment, Southeast University, Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education)

Corresponding author: ZHANG Ya, E-mail: zhangya@xjtu.edu.cn

**Abstract Objective:** To investigate the causal relationship between the minimum cross-sectional area of nasal cavity and nasal resistance. **Methods:** Thirty transparent detachable 3D printing nasal cavity models were made. The airway was completely blocked with sealing material at different anatomical sections. Then ventilatable nasal drainage tubes with different cross-sectional areas were used to pass through the nasal cavity. Nasal resistance was measured. SPSS was used for statistical analysis. **Results:** ①The postoperative nasal resistances of patients and 3D printing nasal cavity models were  $(0.38\pm 0.15)$  Pa·s/mL and  $(0.39\pm 0.02)$  Pa·s/mL respectively. There was no statistical difference between the two groups. The preoperative nasal resistance of patients was  $(0.56\pm 0.09)$  Pa·s/mL, and the postoperative nasal resistance of the models was significantly decreased by 31% compared with preoperative nasal resistance of the patients, with statistically significant difference ( $P<0.05$ ). ②When the ventilatable nasal drainage tubes with a cross-sectional area of  $3.14\text{ square millimeters}$  was located in the the upper part of common meatus and the nasal valve area, the nasal cavity is moderately blocked, and the nasal resistances were  $(1.80\pm 0.30)$  times and  $(2.02\pm 0.36)$  times of that before the obstruction respectively. When the ventilatable nasal drainage tube was located in the lower part of common meatus, the nasal resistance was  $(1.68\pm 0.28)$  times of that before the obstruction. ③When the ventilatable nasal drainage tubes with a cross-sectional area of  $6.28\text{ square millimeters}$  and were located in the lower part of common meatus, the upper part of

\*基金项目:国家自然科学基金项目(No:82000960);陕西省重点研发计划项目(No:2020GXLH-Y-017);榆林市科技计划项目(No:CXY-2020-047)

<sup>1</sup>西安交通大学第二附属医院耳鼻咽喉头颈外科(西安,710004)

<sup>2</sup>江西理工大学江西省颗粒系统仿真与模拟重点实验室

<sup>3</sup>东南大学能源与环境学院能源热转换及其过程测控教育部重点实验室

通信作者:张亚, E-mail: zhangya@xjtu.edu.cn

common meatus and nasal valve area, the nasal resistances were  $(1.44 \pm 0.23)$  times,  $(1.50 \pm 0.25)$  times and  $(1.60 \pm 0.27)$  times of those before obstruction, respectively. ④When the ventilatable nasal drainage tubes with a cross-sectional area of 9.42 square millimeters were located in the above areas, nasal ventilation was nearly normal without obvious nasal obstruction. The nasal resistances were  $(1.17 \pm 0.18)$  times,  $(1.26 \pm 0.21)$  times and  $(1.33 \pm 0.24)$  times of those before obstruction, respectively. ⑤The nasal resistance was statistically significant correlated with the cross-sectional area of the ventilation tubes and the obstruction sites. The correlation coefficients were  $-0.895$  and  $0.339$ , respectively ( $P < 0.05$ ). **Conclusion:** ①3D printing can quickly and accurately replicate anatomical structure of the nasal cavity, and can be used as a research method for quantitative measurement of nasal resistance. ②The minimum cross-sectional area of nasal cavity is the main determinant of nasal resistance. ③The obstruction site is the secondary determinant of nasal resistance. When the degree of nasal obstruction is the same, the nasal resistance in the nasal valve area is slightly higher than that in the common meatus.

**Key words** sinusitis; nasal resistance; 3D printing; functional endoscopic sinus surgery

慢性鼻窦炎 (CRS) 的全球患病率为 5%~12%, 总体流行率为 10.9%, 在我国发病率为 8.0%<sup>[1]</sup>, 已经成为严重影响我国公民身体健康及生活质量的疾病之一。鼻塞是鼻部疾病最典型和患者主诉最突出的症状之一<sup>[2]</sup>。2020 年 EPOS 指南将 CRS 根据不同的表现类型分为不同的疾病内型, 不同的分型导致鼻塞的程度也不同<sup>[1]</sup>。评估鼻腔阻塞程度的方法分为主观评估法和客观评估法两大类, 主观评估法通常采用视觉模拟量表 (visual analog scale, VAS) 评分, 客观评估法包括鼻阻力测量法 (rhinomanometry, RMM)、鼻声反射测量法 (acoustic rhinometry, AR)<sup>[3]</sup>。

鼻阻力是呼吸时气流流经复杂多变的鼻道产生的压力, 占整个呼吸道阻力的 40%~60%, 由鼻腔几何结构所决定。Jessen 等<sup>[4]</sup>对 100 例健康人的鼻阻力进行测量, 发现健康人单侧鼻阻力平均为  $0.54 \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ 。Vogt 等<sup>[5]</sup>将单侧鼻阻力分为 5 个等级: 一级  $< 0.75 \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ , 二级  $0.75 \sim 1.00 \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ , 三级  $> 1.00 \sim 1.25 \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ , 四级  $> 1.25 \sim 1.50 \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ , 五级  $> 1.50 \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ 。Valtonen 等<sup>[6]</sup>通过 3D 打印 5 例鼻塞患者的鼻腔模型, 测量体内、体外单侧鼻腔阻力分别为  $(0.58 \pm 2.34) \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ 、 $(0.76 \pm 3.19) \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ , 发现二者之间差异无统计学意义, 认为 3D 打印鼻腔模型可作为鼻阻力研究的新方法。然而目前的研究主要是将鼻腔视为一个整体, 只能区分单、双侧鼻阻力, 并不能细化分析中、下鼻甲肥大、总鼻道、鼻阀区等局部不同部位阻塞时鼻阻力变化, 无法量化功能性鼻窦内镜手术 (FESS) 过程中鼻腔扩容的范围。本研究按照鼻中隔、鼻腔外侧壁、上颌窦内、外侧壁模块化预分割鼻腔结构, 应用透明光敏树脂材料 3D 打印鼻腔鼻窦术后 30 例可拆卸、透明模型, 用蓝丁胶彻底阻塞鼻腔, 在不同解剖部位使用不同截面积的不变形的硬性塑料管再通鼻腔, 分别测量 10 种不同再通状态下鼻腔的鼻阻力。首次控制变量地探索了不同解剖部位残留不同截面积时鼻阻力的变化, 可为优化气流路径、改变气流分布为目的的

手术治疗提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究对象

招募 15 例 2018 年 12 月—2019 年 6 月于我院行 FESS 手术治疗的 CRS 患者为志愿者, 其中 2 例系 CRS 急性发作, 男 8 例, 女 7 例, 年龄  $(34.0 \pm 3.5)$  岁。根据 2018 年中国 CRS 诊断和治疗指南的纳入标准: ①鼻阻、多涕或鼻涕倒流、颜面部疼痛、嗅觉减弱或丧失至少 2 种症状持续存在 12 周以上, 经规律药物治疗无效行 FESS 手术治疗, 鼻窦 CT 报告 CRS; ②伴有影响窦口鼻道复合体或鼻窦引流的鼻息肉或明显解剖学异常。排除标准: 真菌性鼻窦炎, 后鼻孔息肉, 内翻性乳头状瘤, 鼻窦囊肿, 鼻窦肿瘤继发的 CRS 等疾病。手术方式: 全身麻醉下行 FESS, 围术期酌情行鼻用糖皮质激素、抗生素、鼻腔冲洗等治疗。此研究方案经西安交通大学第二附属医院医学伦理委员会批准通过, 受试者已签署知情同意书。

### 1.2 CT 检查

FESS 术后术腔创面愈合需要经历鼻腔清洁、鼻腔黏膜转归竞争、上皮化完成 3 大阶段, 是鼻腔黏膜良性转归和病理性改变两种机制相互抗衡的生长过程<sup>[7]</sup>。有研究通过观察鼻内镜术后鼻腔黏膜转归, 发现 FESS 术后鼻腔黏膜完成上皮化时间为  $(56.82 \pm 11.27) \text{ d}$  和  $(63.6 \pm 14.7) \text{ d}$ <sup>[8-9]</sup>。因此, 为了保证鼻内镜术后鼻腔黏膜愈合、鼻腔功能恢复正常, 志愿者于术后 6 个月复诊时行鼻腔鼻窦 CT 扫描。在室温下安静休息 10 min 后, 清除鼻腔内分泌物, 取仰卧位, 以头架固定头部, 保持正中位, 要求平静吸气末屏气, 行双源光子 CT 扫描, 范围由额窦上缘至声门上水平, 扫描层距为  $0.625 \text{ mm}$ , 分辨率  $512 \times 512$  像素, 以 DICOM 格式储存数据。

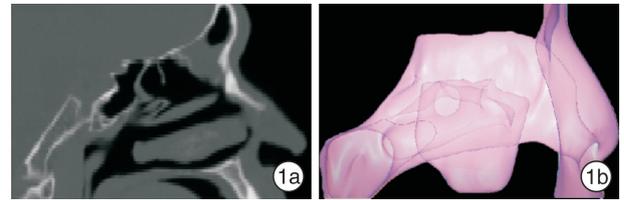
### 1.3 三维建模、3D 打印及鼻塞模拟

将影像学数据以 DICOM 格式导入 Mimics 17.0 软件中进行阈值选取、三维重建及面积、体积测量, 重建结构包括鼻腔气道及上颌窦, 将获得的

鼻腔气道模型保存为 stl 格式, 导入 3-matic Research 预分割模型, 将鼻腔按解剖部位分为鼻中隔、鼻腔外侧壁、上颌窦内侧壁及外侧壁。见图 1。

为了提高模型可视化程度, 鼻腔、鼻窦选取光敏树脂材料, 由 5400-3D 打印机进行打印(图 2), 用 Bostik 蓝丁胶对模型进行密封固定。依次在上颌窦窦口区域或鼻阈区填塞长度为 2 cm 的蓝丁胶完全阻塞以上 2 个平面, 用不同截面积的长度为 2 cm、材质为硬性塑料的可通气鼻腔引流管分别在总鼻道下部、总鼻道上部、鼻阈区再通鼻腔, 见图 3。将流量传感器置于前鼻孔部位, 压力传感器置于鼻咽部, 用连接有 PP 胶嘴的长度为 27 cm 的柔性波纹管模拟气道, 与鼻咽部相连, 检测所有连接处密闭性良好后, 实验者通过 PP 胶嘴平静呼吸, 使用 Diagnostic Cube Rhino 31 鼻阻力检测仪进行模型鼻阻力测量, 见图 4。每侧鼻腔共 10 种状态, 分别为: 原模型, 截面积为 3.14 mm<sup>2</sup>、6.28 mm<sup>2</sup>、

9.42 mm<sup>2</sup> 的通气引流管在总鼻道下部时, 截面积为 3.14 mm<sup>2</sup>、6.28 mm<sup>2</sup>、9.42 mm<sup>2</sup> 的通气引流管在总鼻道上部时, 截面积为 3.14 mm<sup>2</sup>、6.28 mm<sup>2</sup>、9.42 mm<sup>2</sup> 的通气引流管在鼻阈区时。每侧鼻腔每种状态测量 3 次鼻阻力, 本实验共测量鼻阻力 900 次。



1a: CRS 患者术后 CT 扫描; 1b: 3-matic research 软件中重建鼻腔 3D 结构模型。

图 1 鼻腔全透明模型制作示意图

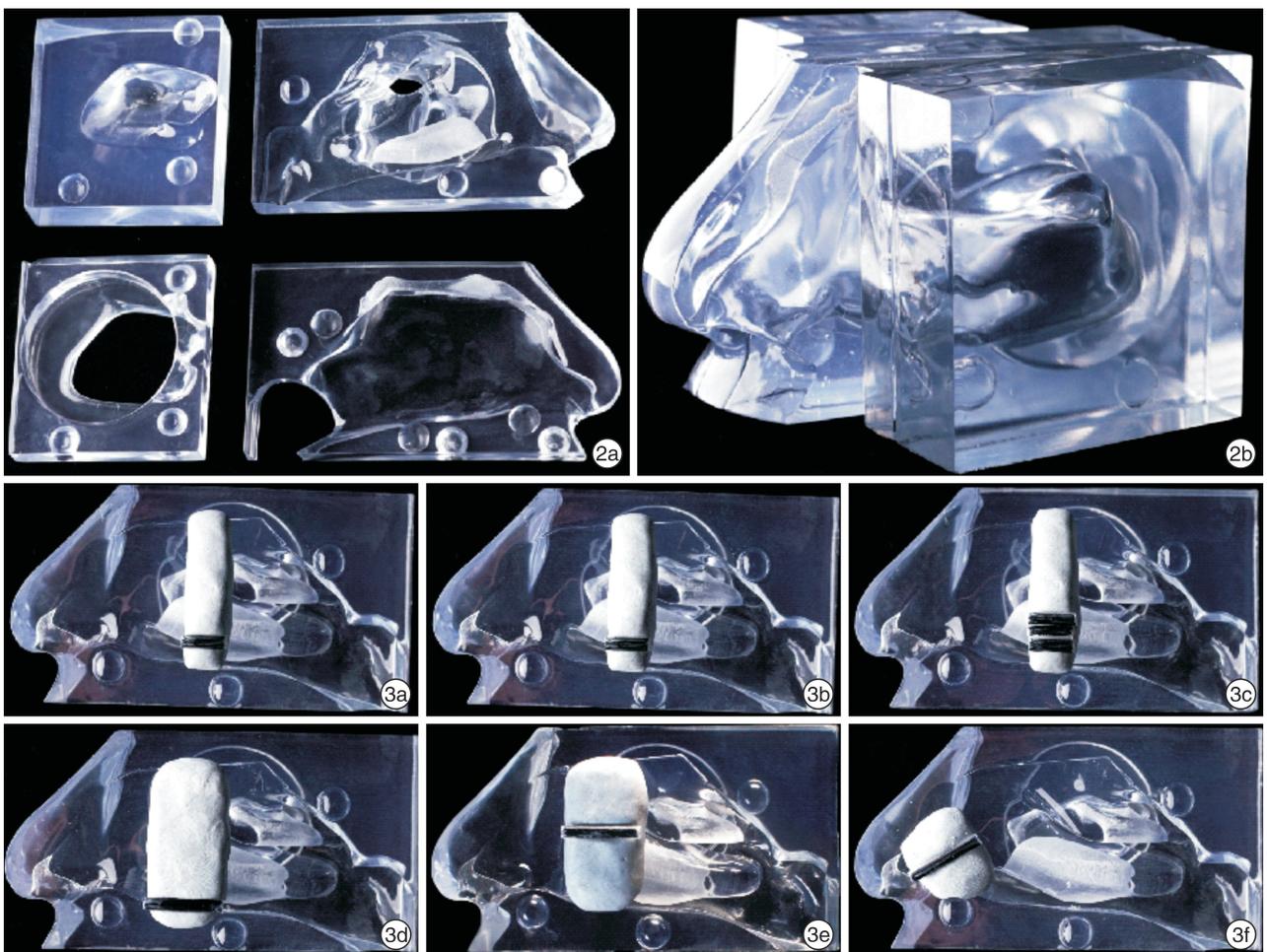


图 2 全透明鼻腔模型 2a: 可拆卸鼻腔全透明 3D 打印模型模块, 依次为上颌窦外侧壁、鼻腔外侧壁、上颌窦内侧壁、鼻中隔; 2b: 鼻腔全透明 3D 打印模型整体侧面观; 图 3 在鼻腔内不同解剖部位残留不同截面积时模型状态示意图 3a: 截面积为 3.14 mm<sup>2</sup> 通气管在总鼻道下部再通鼻腔; 3b: 截面积为 6.28 mm<sup>2</sup> 通气管在总鼻道下部再通鼻腔; 3c: 截面积为 9.42 mm<sup>2</sup> 通气管在总鼻道下部再通鼻腔; 3d: 截面积为 3.14 mm<sup>2</sup> 通气管在总鼻道下部再通鼻腔; 3e: 截面积为 3.14 mm<sup>2</sup> 通气管在总鼻道上部再通鼻腔; 3f: 截面积为 3.14 mm<sup>2</sup> 通气管在鼻阈区再通鼻腔。



流量传感器置于前鼻孔(黄色箭头),压力传感器置于鼻咽部(蓝色箭头),实验者通过 PP 胶嘴平静呼吸(红色箭头)。

图 4 3D 打印鼻腔模型鼻阻力测量示意图

### 1.4 统计学分析

应用 SPSS 18.0 软件,根据数据类型选择统计学方法。手术前后鼻阻力评价采用配对 *t* 检验;不同可通气鼻腔引流管在不同部位再通鼻腔时鼻阻力评价采用方差分析和相关性分析,以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 鼻内镜手术前后鼻阻力变化

15 例患者术后 6 个月单侧鼻腔鼻阻力为  $(0.38 \pm 0.15)$  Pa · s/mL,模型鼻阻力为  $(0.39 \pm 0.02)$  Pa · s/mL,二者差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ );患者术前鼻阻力和术后模型鼻阻力分别为  $(0.56 \pm 0.09)$  Pa · s/mL、 $(0.39 \pm 0.02)$  Pa · s/mL,术后鼻阻力显著低于术前,下降约 31%,差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ ),见图 5。

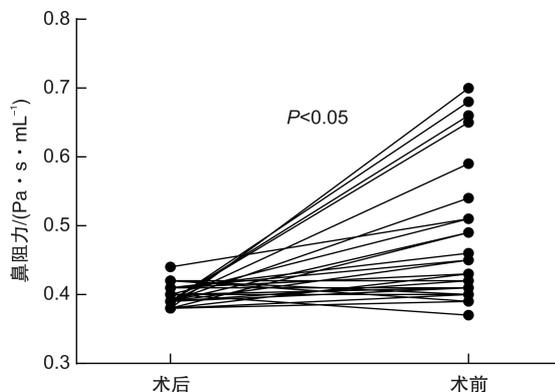


图 5 150 Pa 压差时 FESS 手术前后鼻阻力

### 2.2 可通气鼻腔引流管再通鼻腔对鼻阻力的影响

通过组间对比不同类型鼻腔再通状态时鼻阻力,得出表 1、2 数据。结果提示,不同截面积的

可通气鼻腔引流管在不同部位再通鼻腔时鼻阻力不同。

#### 2.2.1 不同截面积的可通气鼻腔引流管的影响

截面积为  $3.14 \text{ mm}^2$ 、 $6.28 \text{ mm}^2$ 、 $9.42 \text{ mm}^2$  的可通气鼻腔引流管位于总鼻道下部再通鼻腔时鼻阻力分别为  $(0.78 \pm 0.02)$  Pa · s/mL、 $(0.67 \pm 0.01)$  Pa · s/mL、 $(0.55 \pm 0.02)$  Pa · s/mL,位于总鼻道上部再通鼻腔时鼻阻力分别为  $(0.84 \pm 0.06)$  Pa · s/mL、 $(0.70 \pm 0.03)$  Pa · s/mL、 $(0.59 \pm 0.02)$  Pa · s/mL,位于鼻阀区再通鼻腔时鼻阻力分别为  $(0.94 \pm 0.04)$  Pa · s/mL、 $(0.74 \pm 0.04)$  Pa · s/mL、 $(0.63 \pm 0.03)$  Pa · s/mL,见表 1。方差分析示: $F = 191.34, P < 0.05; r = -0.895, P < 0.05$ ,见表 2。

表 1 鼻腔不同类型再通状态在气道压差为 150 Pa 时鼻阻力结果 Pa · s/mL,  $\bar{x} \pm s$

部位	截面积/mm <sup>2</sup>		
	3.14	6.28	9.42
总鼻道下部	$0.78 \pm 0.02$	$0.67 \pm 0.01$	$0.55 \pm 0.02$
总鼻道上部	$0.84 \pm 0.06$	$0.70 \pm 0.03$	$0.59 \pm 0.02$
鼻阀区	$0.94 \pm 0.04$	$0.74 \pm 0.04$	$0.63 \pm 0.03$

表 2 鼻阻力影响因素相关性分析

变量	鼻阻力	Pa · s/mL, $\bar{x} \pm s$	
		<i>r</i>	<i>P</i>
截面积/mm <sup>2</sup>		-0.895	0.000
3.14	$0.86 \pm 0.08$		
6.28	$0.71 \pm 0.04$		
9.42	$0.59 \pm 0.04$		
部位		0.339	0.000
总鼻道下部	$0.67 \pm 0.10$		
总鼻道上部	$0.71 \pm 0.11$		
鼻阀区	$0.77 \pm 0.13$		

#### 2.2.2 不同部位再通的影响

截面积为  $3.14 \text{ mm}^2$  的可通气鼻腔引流管分别在总鼻道下部、总鼻道上部、鼻阀区再通鼻腔时鼻阻力分别为  $(0.78 \pm 0.02)$  Pa · s/mL、 $0.84 \pm 0.06$  (Pa · s/mL)、 $(0.94 \pm 0.04)$  Pa · s/mL;截面积为  $6.28 \text{ mm}^2$  的可通气鼻腔引流管分别在总鼻道下部、总鼻道上部、鼻阀区再通鼻腔时鼻阻力分别为  $(0.67 \pm 0.01)$  Pa · s/mL、 $(0.70 \pm 0.03)$  Pa · s/mL、 $(0.74 \pm 0.04)$  Pa · s/mL;截面积为  $9.42 \text{ mm}^2$  的可通气鼻腔引流管分别在总鼻道下部、总鼻道上部、鼻阀区再通鼻腔时鼻阻力分别为  $(0.55 \pm 0.02)$  Pa · s/mL、 $(0.59 \pm 0.02)$  Pa · s/mL、 $(0.63 \pm 0.03)$  Pa · s/mL,见表 1。方差分析示: $F = 1326.84, P < 0.05; r = 0.339, P < 0.05$ ,见表 2。

#### 2.2.3 不同再通状态与阻塞前鼻阻力对比

①当截面积为  $3.14 \text{ mm}^2$  的可通气鼻腔引流管位于总

鼻道上部、鼻阀区时鼻腔中度阻塞,鼻阻力分别为阻塞前的 $(1.80 \pm 0.30)$ 倍、 $(2.02 \pm 0.36)$ 倍,总鼻道下部时鼻腔轻度阻塞,鼻阻力为阻塞前的 $(1.68 \pm 0.28)$ 倍;②当截面积为 $6.28 \text{ mm}^2$ 的可通气鼻腔引流管位于总鼻道下部、总鼻道上部、鼻阀区时,鼻阻力值分别为阻塞前的 $(1.44 \pm 0.23)$ 倍、 $(1.50 \pm 0.25)$ 倍、 $(1.60 \pm 0.27)$ 倍;③当截面积为 $9.42 \text{ mm}^2$ 的可通气鼻腔引流管位于以上部位时,鼻腔通气均接近正常,无明显鼻塞,鼻阻力值分别为阻塞前的 $(1.17 \pm 0.18)$ 倍、 $(1.26 \pm 0.21)$ 倍、 $(1.33 \pm 0.24)$ 倍。

### 3 讨论

3D 打印技术具有精准、可重复、个体化、可成形复杂结构的特点,在医学研究领域的应用日趋广泛,国内耳鼻咽喉头颈外科已经应用 3D 打印技术修复头颈部肿瘤所致复合缺损、术前模拟复杂手术、制造耳科教学和手术技能训练的颞骨模型等,但是 3D 打印的鼻腔鼻窦模型目前国内外报道较少<sup>[10]</sup>。因此,我们在前期构建正常鼻腔模型的基础上,按照鼻中隔、鼻腔外侧壁、上颌窦内、外侧壁模块化预分割鼻腔结构,应用透明光敏树脂材料 3D 打印鼻腔鼻窦术后模型,具有全透明、可视化、可拆卸鼻腔鼻窦结构的优点,可重复模拟不同类型术后鼻腔再通状态、鼻腔给药等。其次,此模型包含外鼻、鼻窦等结构,在鼻阻力研究中减少了外鼻等解剖因素对鼻阻力的影响。董栋等<sup>[10]</sup>通过研究 3D 打印鼻腔鼻窦模型的制作与检验后指出,3D 打印鼻腔鼻窦模型能够较好地重现鼻中隔、鼻甲、鼻道、嗅裂区、各鼻窦开口及鼻咽部等解剖结构,可用于鼻内镜基本操作的训练和教学,Valtonen 等<sup>[6]</sup>研究鼻腔 3D 打印模型也得到了相似的结果。在这些理论上,本研究测量了 CRS 患者术后单侧鼻腔鼻阻力为 $(0.38 \pm 0.15) \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ ,模型鼻阻力为 $(0.39 \pm 0.02) \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ ,二者相比无统计学差异,提示 3D 打印鼻腔模型不仅可以真实反映鼻腔解剖结构,还可以快速准确地反映鼻腔通气状况。因此,3D 打印可快速精准地复制鼻腔解剖结构,可作为量化鼻阻力测量的研究方法。

鼻道是鼻腔气流的主要通道,气流通过解剖结构复杂多变的鼻腔时,受到鼻阀区的限制和鼻腔内部的摩擦,形成鼻阻力,其中 $52.6\% \sim 78.3\%$ 为鼻前庭和鼻阀区的阻力<sup>[11]</sup>,鼻腔总阻力 $R_t = R_l \times R_r / (R_l + R_r)$ ( $R_l$ 和 $R_r$ 分别为左、右鼻腔阻力)。影响鼻阻力的因素较多,主要有解剖结构差异、鼻周期、鼻腔内血管神经、肌肉等,短时间内主要受鼻周期的影响。为了减少鼻周期对鼻阻力的影响,一些学者采用鼻腔总阻力作为正常参考值,Merkle 等<sup>[12]</sup>认为,正常成人双侧鼻腔总阻力不超过 $0.3 \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ ;李晓明等<sup>[13]</sup>测量了我国 421 例正常人双侧鼻

腔总阻力,结果为 $0.126 \sim 0.328 \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ 。手术前后双侧鼻腔总阻力对比下降 $20\%$ 可认为手术有效,但在临床评估鼻腔通气状况时,通常需要了解单侧的鼻腔通气,为手术等治疗提供依据。因此,本研究中通过测量单侧鼻腔模型分析鼻阻力变化,避免了鼻周期、体位等对鼻阻力的影响,发现 15 例患者术前单侧鼻阻力为 $(0.56 \pm 0.09) \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ ,鼻内镜术后鼻腔模型鼻阻力为 $(0.39 \pm 0.02) \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ ,接近正常人单侧鼻阻力 $0.15 \sim 0.39 \text{ Pa} \cdot \text{s/mL}$ <sup>[14]</sup>,术后较术前鼻阻力显著下降,下降约 $31\%$ ,更加客观地证实了鼻内镜手术改善了 CRS 患者的鼻腔通气。有研究通过测量手术前后患者鼻阻力大小,也得出了一致的结论<sup>[15-16]</sup>。

硅胶管具有高吸收性及除湿作用,表面光滑,对黏膜刺激少等优点,韩德民院士建议使用硅胶管作为鼻腔止血通气管主体,相较于目前常用的瑞纳凝胶快速止血材料、膨胀海绵等,不仅解决了术后术腔出血问题,同时也减少了因通气不畅出现鼻塞、头痛、口干等不适<sup>[17]</sup>,但在实验研究中具有易变性等缺点。本研究使用硬性塑料管作为可通气鼻腔引流管,术后不但可以保证鼻腔通气,还可以将鼻腔及鼻窦内的分泌物及渗血引流出来,减少术腔感染及术腔粘连的发生率,且成本低廉,为鼻内镜术后鼻腔填塞提供了新思路。戚意冰等<sup>[18]</sup>认为鼻内镜术后粘连的主要原因是伤口的反应性肿胀、中鼻甲向外漂移致中鼻甲与鼻腔外侧壁空间狭窄等,卫来等<sup>[19]</sup>分析 FESS 手术失败的原因发现:中鼻甲漂移导致中鼻道狭窄约占 $85\%$ ,因此,FESS 术后为了减少粘连、复发,鼻腔填塞鼻腔止血通气管非常重要。韩德民院士将鼻腔扩张引流管分为长短 2 种,长硅胶管长 $8 \sim 10 \text{ cm}$ ,外径 $1 \text{ cm}$ ,内径 $0.8 \text{ cm}$ ,短硅胶管长 $2.5 \sim 3 \text{ cm}$ ,外径 $0.8 \text{ cm}$ ,内径 $0.6 \text{ cm}$ <sup>[17]</sup>。在本研究中仅使用了长度为 $2 \text{ cm}$ 的通气引流管,发现截面积为 $3.14 \text{ mm}^2$ 、 $6.28 \text{ mm}^2$ 、 $9.42 \text{ mm}^2$ 的通气引流管位于总鼻道上部时鼻腔通气状况分别为中度阻塞、轻度阻塞、接近正常,提示鼻腔通气引流管装置可用截面积为 $9.42 \text{ mm}^2$ 的硅胶管,此时鼻腔通气已接近正常,患者无鼻塞症状,而长度的选择仍需进一步研究。

鼻腔扩容术包括了鼻中隔三线减张成形术、双侧下鼻甲骨折外移术、双侧中鼻甲骨折内移术、双侧中鼻道对称性开放术四个基本术式。作为改善上气道阻力的方法在临床上使用广泛,但疗效不一。李界文等<sup>[20]</sup>认为鼻腔扩容术治疗慢性肥厚性鼻炎术后鼻阻力减低;吴俊涛等<sup>[21]</sup>认为鼻腔扩容术治疗鼻中隔偏曲伴变应性鼻炎术后疗效肯定,谢晶晶等<sup>[22]</sup>认为 OSA 患者多为多平面阻塞,鼻腔扩容术治疗疗效结论不一,当术前最狭窄的部位位于鼻腔时,鼻腔扩容术能显著减低鼻阻力、上气道阻

力,而术前最狭窄部位位于腭咽时鼻腔扩容术后有时上气道阻力反而升高。鼻阈区是鼻腔最狭窄的部位,横截面为狭长的三角形,平均面积在  $55 \sim 64 \text{ mm}^2$ <sup>[23]</sup>,显著高于本研究中的截面积  $9.42 \text{ mm}^2$ ,因此气道最小截面积是影响气道阻力的主要因素。通常认为,对于 CRS 伴有鼻中隔偏曲、下鼻甲肥厚、中鼻甲反向弯曲和泡状中鼻甲等,进行单一的手术,患者鼻塞症状改善往往不满意。因此,术前严格评估气道最小截面积,进行鼻阻力测定、鼻腔空气动力学检测等,术中尽可能保证双侧鼻腔通气对称,减少较宽侧代偿性增生肥厚而变窄,才能更好地发挥鼻腔扩容术改善上气道阻力的临床价值。本研究中的 3D 打印鼻腔模型客观准确地反映了鼻腔鼻窦解剖,为鼻腔扩容术前气道特征评估、鼻阻力测定等提供量化可能。

然而在本研究中仅使用内径 2 mm 长度 2 cm 的圆柱形可通气鼻腔引流管,在临床中鼻腔阻塞如鼻甲肥大、鼻息肉等,鼻腔通气缝隙通常为不规则状,不同长度、不同形状的引流管对鼻阻力的影响仍需进一步研究。因此,今后的研究应该提高基准条件设置的准确性,并包括更广泛的群体,如儿童、老人等,对比研究将有助于阐明组间差异和个体间的变异性,为临床手术操作提供参考。

综上所述,本研究采用的一种创新的全透明可拆卸的 3D 打印鼻腔模型,让鼻阻力的量化研究成为可能。本研究发现鼻腔最小截面积为鼻阻力主要决定因素;部位为鼻阻力的次要决定因素,阻塞程度相同时,鼻阈区鼻阻力略高于总鼻道。

(志谢 本研究得到了国家留学基金委及澳大利亚蒙纳士大学 Aibing Yu 院士的协助。)

#### 参考文献

- [1] Fokkens WJ, Lund VJ, Hopkins C, et al. European Position Paper on Rhinosinusitis and Nasal Polyps 2020[J]. *Rhinology*, 2020, 58(Suppl S29):1-464.
- [2] 陈平,张欣,张红茹,等.鼻阻力测定及鼻声反射评估鼻内镜手术通气功能的研究进展[J]. *国际耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2019, 43(6):369-372.
- [3] Valero A, Navarro AM, Del Cuvillo A, et al. Position paper on nasal obstruction: evaluation and treatment [J]. *J Investig Allergol Clin Immunol*, 2018, 28(2): 67-90.
- [4] Jessen M, Malm L. The spontaneous course of nasal obstruction in patients with normal nasal airway resistance[J]. *Clin Otolaryngol Allied Sci*, 1991, 16(3): 302-304.
- [5] Vogt K, Wernecke KD, Behrbohm H, et al. Four-phase rhinomanometry: a multicentric retrospective analysis of 36,563 clinical measurements[J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2016, 273(5):1185-1198.
- [6] Valtonen O, Ormiskangas J, Kivekäs I, et al. Three-Dimensional Printing of the Nasal Cavities for Clinical Experiments[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1):502.
- [7] 许庚,李源,谢民强,等.功能性内窥镜鼻窦手术后术腔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, 29(5):45-48.
- [8] 张健,王丽华,沙志荣,等.通窍冲洗方对慢性鼻-鼻窦炎 Fess 术后恢复的疗效观察[J]. *中国中西医结合耳鼻咽喉科杂志*, 2018, 26(5):372-375.
- [9] 周书芳,汪旭.桉柠蒎肠溶胶囊对慢性鼻窦炎术后鼻黏膜恢复的影响[J]. *检验医学与临床*, 2018, 15(13): 1927-1929.
- [10] 董栋,吕磊,陈卓,等.3D 打印鼻腔鼻窦模型的制作与检验[J]. *中华耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2018, 53(8): 615-620.
- [11] Yu S, Liu Y, Sun X, et al. Influence of nasal structure on the distribution of airflow in nasal cavity[J]. *Rhinology*, 2008, 46(2):137-143.
- [12] Merkle J, Kohlhas L, Zadoyan G, et al. Rhinomanometric reference intervals for normal total nasal airflow resistance[J]. *Rhinology*, 2014, 52(4):292-299.
- [13] 李晓明,卜国铨.421 名正常成人鼻气道阻力分析[J]. *中华耳鼻咽喉科杂志*, 1990, 20(6):357-359,384.
- [14] Morris S, Jawad MS, Eccles R. Relationships between vital capacity, height and nasal airway resistance in asymptomatic volunteers[J]. *Rhinology*, 1992, 30(4): 259-264.
- [15] 刘彬,彭正加,江殿立,等.鼻内镜手术治疗鼻阻塞及治疗前后鼻阻力比较[J]. *中国医学工程*, 2014, 22(9):104-105.
- [16] Uz U, Günhan K, Yılmaz H, et al. The evaluation of pattern and quality of sleep in patients with chronic rhinosinusitis with nasal polyps[J]. *Auris Nasus Larynx*, 2017, 44(6):708-712.
- [17] 张永杰,王彤,臧洪瑞,等.鼻内镜术后术腔硅胶扩张引流管应用[J]. *中国耳鼻咽喉头颈外科*, 2008, 15(4):243-244.
- [18] 戚意冰,郑开敏.鼻内镜鼻窦术后硅胶管填塞对鼻腔粘连的影响[J]. *中国基层医药*, 2008, 15(3):508-509.
- [19] 卫来,彭凤兰,王立志,等.FESS 或鼻中隔成形术失败原因及修正性鼻功能重建手术的疗效[J]. *西部医学*, 2020, 32(5):730-735.
- [20] 李界文,徐孔昌,张清惠.鼻内镜鼻腔扩容术治疗慢性肥厚性鼻炎的临床效果[J]. *中国当代医药*, 2019, 26(29):151-153,156.
- [21] 吴俊涛,饶裕民,游全贵,等.鼻内镜下鼻中隔矫正术治疗鼻中隔偏曲伴变应性鼻炎的疗效[J]. *实用临床医学*, 2015, 16(1):79-80.
- [22] 谢晶晶,吴慧莉,韦新法.鼻腔扩容术改善上气道阻力治疗 OSAHS 的相关研究进展[J]. *世界睡眠医学杂志*, 2019, 6(11):1637-1640.
- [23] 陈赛明,周小柳,李智群,等.立体“Z”成形术治疗后天性鼻瓣区膜性狭窄[J]. *中国耳鼻咽喉头颈外科*, 2020, 27(1):34-36.

(收稿日期:2021-06-27)