

文章编号:1004-7220(2010)06-0444-05

鼻腔气道结构对鼻腔加温加湿功能影响的数值模拟

于 申¹, 刘迎曦^{1,2}, 孙秀珍^{2,1}, 苏英锋²

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023; 2. 大连医科大学附属二院 耳鼻咽喉科, 大连 116027)

摘要: 目的 研究鼻腔气道结构的变化对鼻腔加温加湿功能的影响。方法 选取9例正常人和2例鼻中隔偏曲患者(术前术后)作为研究对象,建立鼻腔的三维有限元模型,数值模拟鼻腔气道中的气流分布、气流温度和湿度,并对比正常人与病患、术前与术后的数值模拟结果。结果 鼻腔气道宽敞一侧气流量相对较大,加温加湿效果差;狭窄一侧加温效果相对较好。对于正常人,鼻腔对吸入气流加温加湿的部位主要位于前端;对于病患,则取决于鼻腔的气道结构。结论 鼻腔气道结构影响鼻腔对吸入气流的加温加湿效果,鼻腔气道结构的几何参数如鼻腔气道壁面积、鼻腔体积可以用来衡量鼻腔对气流的加温加湿效果。

关键词: 鼻腔气道; 鼻腔功能; 数值模拟; 有限元方法; 计算流体力学

中图分类号: R318.01 文献标志码: A

Numerical simulation for the influence of nasal cavity structure on nasal function of warming and humidifying the inhaled airflow

YU Shen¹, LIU Ying-xi^{1,2}, SUN Xiu-zhen^{2,1}, SU Ying-feng² (1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. Department of Otorhinolaryngology, the Second Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116027, China)

Abstract: Objective To study the influence of nasal cavity structure on nasal function of warming and humidifying the inhaled airflow. **Method** Nine normal persons and two patients with deviation of nasal septum (pre- and post-operation) were selected as research subjects. The three-dimensional finite element model of nasal cavities of these volunteers was established. Numerical simulations for the airflow distribution, the airflow temperature and the airflow humidity in the nasal cavity were performed. Based on the simulation results, comparisons were made between normal nasal cavities and the patient's nasal cavities as well as between the pre- and post-operative nasal cavities. **Results** In the wider side of nasal cavity, the volume flow rate and the velocity of airflow were higher and the effect of warming and humidifying on the airflow was worse. For normal people, the nasal cavity for warming and humidifying the inhaled airflow was in the anterior segment of the nose. While for the patients, the main segment of warming and humidifying the inhaled airflow had to depend on the airway geometry. **Conclusions** The nasal cavity structure can influence the effect of warming and humidifying on the airflow. The parameters describing the geometry of nasal cavity, such as the surface area of nasal airway and volume of nasal cavity, may be a useful measurement for the nasal function of warming and humidifying the inhaled airflow.

Key words: Nasal airway; Nasal function; Numerical simulation; Finite element method; Computational fluid dynamics(CFD)

鼻腔是人体呼吸道的门户器官,除了承担呼吸功能外,还有对吸入的气流进行加温加湿、粉尘过滤

和保护下呼吸道黏膜的功能。当鼻腔发生病变时,鼻腔的功能就会受到影响。Keck 等^[1]用小型热电

收稿日期:2010-07-29; 修回日期:2010-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10902022,10872043),大连理工大学科研启动经费项目。

作者简介:于申(1980-),男,博士研究生,研究方向:生物医学工程。

通讯作者:孙秀珍,E-mail:sunxiuzhen001@163.com。

偶和湿度传感器测量 23 例正常人鼻腔气道内,吸入气流的温度和湿度在鼻腔各个部位的变化。Lindemann 等^[2]用同样的方法测量了 10 个鼻中隔穿孔患者术前术后,吸入气流在鼻腔气道中各个位置的温度和湿度情况;同时还测量鼻腔黏膜的各个部位在呼吸过程中的温度,并分析鼻腔黏膜温度和鼻腔阻力的关系。近几年,很多研究人员开始建立鼻腔的计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模型,模拟气流在鼻腔内流动过程中的分布以及鼻腔的加温加湿等功能的实现过程。Naftali 等^[3]建立了 3 个鼻腔数值模型,其中 1 个是真实模型,另外 2 个是简化模型。作者对气流流经这 3 个模型过程中的加温加湿情况进行数值模拟,并将 3 个模型的加温加湿效果进行比较。Garcia^[4]建立了 4 例正常人鼻腔模型和 1 例患萎缩性鼻炎患者术前术后的鼻腔模型,研究正常鼻腔结构和病态鼻腔结构对吸入气流加温加湿作用的差异。本文研究鼻腔气道结构对鼻腔功能的影响,考虑人的个体差异性,建立了 15 例鼻腔气体动力学模型,包括 9 例正常人鼻腔,并选择 1 例正常人模型模拟部分切除中鼻甲和下鼻甲的手术从而形成 2 例新的模型,此外还有 2 个鼻中隔偏曲患者术前术后的鼻腔模型。通过数值模拟并对比正常人和病患、正常人之间、病患术前术后模型的模拟结果,来研究鼻腔结构和鼻腔功能之间的关系。

1 材料和方法

1.1 志愿者选取与鼻腔模型建立

选择 11 位志愿者作为研究对象,其中 9 例为健康志愿者,2 例为鼻中隔呈 C 型偏曲、对侧下鼻甲代偿性增生的患者,其中 1 例(患者 A)行鼻中隔矫正术及下鼻甲骨折外移术,另 1 例(患者 B)行鼻中隔矫正术及下鼻甲部分切除术。由多层螺旋 CT 扫描,获得各志愿者的鼻腔影像学资料,术后资料均为术后 4 个月获得。根据获得的鼻腔 CT 图像,建立这 13 例鼻腔三维有限元模型,并选择其中 1 例健康志愿者的模型,分别对下鼻甲和中鼻甲进行部分切除,形成 2 个新的模型。用 15 例模型研究鼻腔结构形态的变化对鼻腔功能的影响。

1.2 数值模拟方法

依据黏性流体的 Navie-Stokes 方程、连续方程、

能量守恒方程和组分守恒方程^[3],应用有限单元法对鼻腔中的气体流场,温度场以及湿度场进行数值模拟。本文应用 Ansys 软件中的 FLOTTRAN 模块进行计算。由于鼻腔壁各个部位温度随着呼吸呈周期性变化^[5],但是具体变化趋势尚不清楚,因此本文暂时将吸入气流模拟为稳态湍流,鼻腔壁的温度设定为吸气初始时刻的温度。控制方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{v'_i v'_j}) + S_i \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j T) &= \frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{k}{c_p} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{v'_j T'}) + S_T \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j C) &= \frac{\partial}{\partial x_j}(D \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{v'_j C'}) + S_C \end{aligned}$$

其中: v 为速度, T 为温度, C 为浓度,均为时均值, S 为源项,在本文中为 0,方程右端括号中的第 2 项由脉动值组成的为湍流项。 $\mu = 1.9 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 为空气黏度, $k = 26.8 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 为导热系数, $c_p = 1005.9 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 为比热容, $D = 26 \text{ mm}^2/\text{s}$ 为扩散系数^[4]。

在室内常温常压正常湿度环境下,设定边界条件,鼻孔处设为标准大气压 $P = 101.325 \text{ kPa}$,温度 $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$,湿度 $H = 11.5 \text{ g}/\text{m}^3$ (相对湿度 50%);鼻腔气道壁面设为无滑移边界条件 $v = 0 \text{ m/s}$,鼻前庭温度 $T = 33.5 \text{ }^\circ\text{C}$,固有鼻腔温度 $T = 32.5 \text{ }^\circ\text{C}$,鼻咽部温度 $T = 34.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[5],由于鼻腔壁表面为黏液毯,故设定固有鼻腔湿度 $H = 36.94 \text{ g}/\text{m}^3$ (相对湿度 100%);鼻咽部气流出口处设定气体体积流率为 $Q = 600 \text{ mL/s}$ 。

2 结果

对 15 例鼻腔进行气流与功能的数值模拟后,可以得到吸气过程中,鼻腔气道各个部位的气流速度、压强以及温度湿度。关心的是气流在前鼻孔到后鼻孔之间的加温加湿效果。统计正常人模拟结果可知,室内环境的气流($T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $H = 11.5 \text{ g}/\text{m}^3$),流经鼻腔后温度和湿度分别增加到 $(31 \pm 0.95) \text{ }^\circ\text{C}$, $(35.6 \pm 1.2) \text{ g}/\text{m}^3$ 。由正常人的模拟结果可以看出,鼻腔加温加湿的主要部位位于鼻腔的前端(见图 1)。在鼻腔顶部、中部和底部各取一条流线,可

以看到鼻腔顶、中、底3个部位对气流的加温情况,在鼻腔前端温度和湿度上升很快,到了鼻腔中部后上升速度渐渐降低。鼻腔顶部和底部的加温效果要好于鼻腔中部。鼻腔结构能够影响对吸入气流的加温加湿作用,总体来看鼻腔气道越窄,加温加湿的效果越好(见图2)。靠近鼻腔壁的气流温度要高于气流中心的温度。选取1例正常鼻腔模型,分别施加120、240、600 mL/s的流量,气流经左右鼻腔加温后温度为31.8、32.3、30.3、31.4、29.7、30.3℃。可见对于同一个人,鼻腔内吸入气流的体积流率越小,加温的效果越好。由模拟鼻甲部分切除的例子可以看出少量改变固有鼻腔结构,对于鼻腔的加温加湿效果影响不大(见表1)。

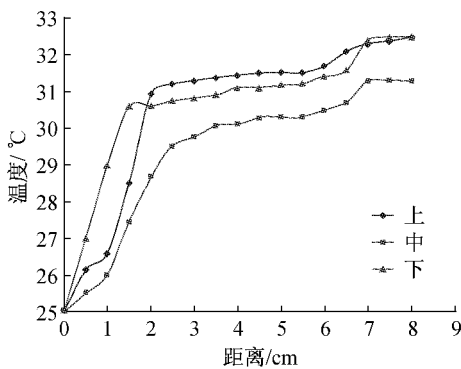


图1 鼻腔内不同流线气流的加温情况
Fig.1 Warming of different streamline of air-flow in the nasal airway

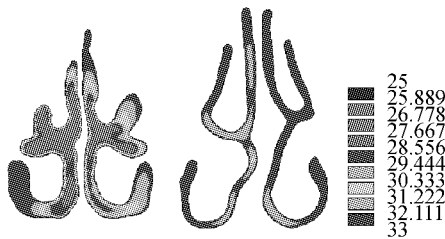


图2 不同形状气道中的气流温度
Fig.2 Airflow temperature in airway of different size

由2个患者术前术后鼻腔模型模拟结果相比较可知,手术后鼻腔气道的体积增加而表面积减少。患者A术后左侧鼻腔的加温效果几乎不变,而另一侧鼻腔的加温加湿效果比术前有明显的降低(后鼻孔处温度变化1.2℃,相对湿度变化>10%)。

表1 鼻甲部分切除加温加湿的模拟结果

Tab.1 Simulation results of airflow warming and humidifying for nasal airway with part removal of nasal turbinates

	左鼻温度/°C	右鼻温度/°C	左鼻湿度/(g·m ⁻³)	右鼻湿度/(g·m ⁻³)
原始模型	30.8	30.7	34.3 (92.9%)	34.0 (92.0%)
部分中鼻甲切除	30.7	30.7	34.0 (92.0%)	33.9 (91.8%)
部分下鼻甲切除	30.6	30.7	33.7 (91.2%)	34.0 (92.0%)

患者B术后两侧鼻腔的加温加湿的效果变化不大(后鼻孔处温度变化<0.5℃,相对湿度变化<3%)。图3显示的是患者B术前(左)术后(中)以及1例正常鼻腔(右)的气道壁的热流率,可以看出术前鼻腔内发挥加温作用的部位主要位于中鼻道,术后变为鼻腔前端;而对于正常人鼻腔的主要加温部位在鼻腔前端。取患者B术前术后鼻腔模型和正常人鼻腔模型的结果作比较,在3个模型的右侧气道中部各取一条流线,比较3个鼻腔气道中部对吸入气流的加温效果,可以看出患者术后和和正常人的加温趋势相似,都是前部分曲线斜率较大,这说明鼻腔前端加温效果明显。而从患者术前的加温曲线来看,气流在整个鼻腔气道加温过程比较均匀。

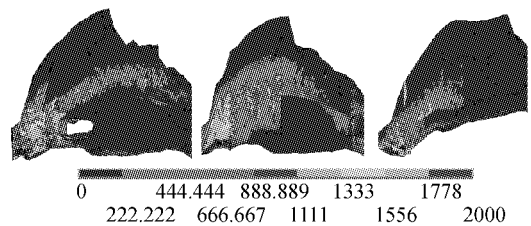


图3 不同形状鼻腔气道的热流率
Fig.3 Heat flux in nasal airway of different shape

由以上结果发现,鼻腔的加温加湿效果是和鼻腔气道的几何形态有关系的。根据以上数值模拟结果,取一个无量纲量 $(S \cdot l)/V$ 作为描述鼻腔气道结构的参数,其中S是鼻腔的气道壁面积、V是鼻腔气道体积、l是前后鼻孔之间的长度。对11例正常鼻腔,分别取两侧鼻腔后鼻孔处的平均温度、平均湿度和鼻腔结构参数,研究鼻腔气道结构与鼻腔功能之

间的关系,如图 5、6 所示,鼻腔温度湿度的升高与鼻腔结构参数($S * l/V$)基本成正比例关系。当所取参数值大于 60 后可以发现,鼻腔的温度和湿度已经和鼻腔壁接近,随着参数值增加不再增大。

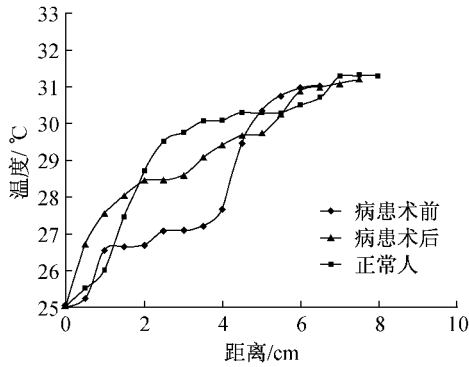


图 4 不同鼻腔对气流的加温情况
 Fig. 4 Warming of airflow in different nasal airway

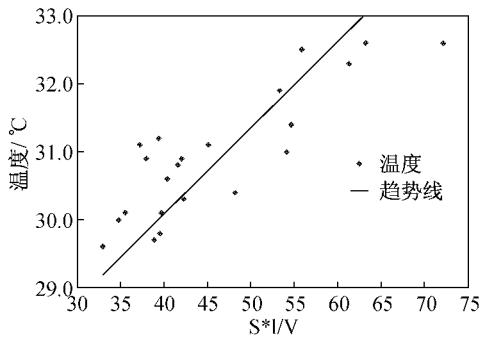


图 5 鼻腔的加温功能与鼻腔结构的关系
 Fig. 5 The relationship between the warming function and nasal structure

3 讨论

由于吸入气流的温度湿度一般都会低于鼻腔气道内的环境,所以气流在流经鼻腔时,会与鼻腔壁发生热量和水分的交换。

由正常人鼻腔的模拟结果可以看出,鼻腔前端是热量和水分的主要交换部位,这是因为气流刚进入鼻腔内,温度和湿度与鼻腔壁的相差较大,所以鼻腔前端的热流率和水分流率较高,而在经过鼻腔前端加温加湿后,吸入气流的温度和湿度与鼻腔壁面比较接近了,所以在鼻腔后半段单位面积上发生的

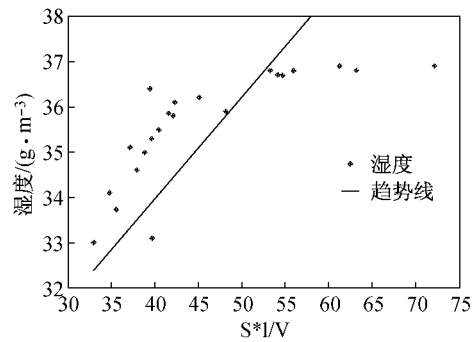


图 6 鼻腔的加湿功能与鼻腔结构的关系
 Fig. 6 The relationship between the humidifying function and nasal structure

热量和水分的交换一般会少于前半段。这个结果与 Keck^[1,7]的工作结果相吻合。而到达后鼻孔处的气流温度统计结果也与 Wiesmiller 等^[8]的研究结果基本吻合。

鼻腔气道的几何形态能够影响鼻腔功能的实现。在气流量相同的情况下,如果鼻腔气道截面积相近,那么气道越狭窄,气道的周长就越大,气流与气道壁接触的面积(换热面积)也就越大。因此,气道狭窄的鼻腔加热加湿效果较好。而少量改变固有鼻腔内的结构,比如切除少部分中鼻甲或下鼻甲引起的鼻腔气道容积和表面积的变化不大。因此,对鼻腔的加温加湿效果影响也不大,这个结果与 Naftali 等^[3]的研究结果相一致。由计算结果可以看出,气流量也对鼻腔功能的实现有影响,气流量小,气流平均速度小,气流就会有充分的加热加湿的时间,气流通过鼻腔后,温度湿度就更接近鼻腔壁,这与 Naftali 等^[3]的研究结果相近。在鼻腔中取上、中、下 3 条气流流线,发现鼻腔顶部和底部加温效果要比中部好,就是因为吸入气流大部分通过鼻腔中部,只有少量会通过鼻腔的顶部和底部^[6]。因此流经鼻腔顶部和底部的气流平均流速较慢,气流加热时间充分,所以气流平均温度更接近鼻腔壁的温度。由患者 A 术前术后对比可知,患者术前术后鼻腔结构变化明显,右侧气道体积增大 41.7%,表面积减小 5.6%,对吸入气流的加温加湿效果有较显著的下降。由患者 B 术前术后对比可知,气道的体积和面积虽然有变化,但是最后的加温加湿效果几乎不变。这是由于患者 B 术前下鼻甲前部与鼻中隔黏

连,鼻腔气道部分堵塞,在鼻腔气道下部通过的气流,都流经中鼻道,有效的加温加湿面积减小,因此数值模拟结果显示,整个鼻腔中部的热流率都比较高;而手术后鼻腔通气程度恢复正常,因此加温加湿部位在鼻腔前端,而鼻腔后端的热流率要明显低于前端。因此在术后鼻腔和正常鼻腔中,都是在鼻腔前部温度上升较快,在鼻腔后部上升较缓。而在术前鼻腔整个中鼻道里,气流温度都有明显的升高(见图4)。

由图5、6可以看出,鼻腔温度湿度的升高与鼻腔结构参数($S \cdot l/V$)基本成正比例关系。当鼻腔气道体积 V 一定时,鼻腔壁表面积 S 越大,对吸入气流的加温加湿面积也就越大,因此加热效果也就越好,这种情况通常对应于鼻腔气道狭窄^[4],即鼻阻力大的情况^[9];而前后鼻孔长度 l 越大也能使得鼻腔壁表面积增大。在鼻腔壁表面积 S 和前后鼻孔距离 l 一定的情况下,鼻腔气道体积 V 越大,也就表明鼻腔气道越宽敞^[4],鼻阻力越小^[9]。由Lindemann等^[10]的实验结果可知,鼻阻力与鼻腔黏膜表面温度成反比,鼻阻力越小,吸气后鼻腔壁温度越高,即吸入气流吸收的热量越少,当流经的气流量一定时,可以知道加温效果是降低的。由以上结论可知,对于鼻腔来说结构参数值($S \cdot l/V$)越大,加温加湿效果越好。但是,当结构参数值($S \cdot l/V$)大于60时,温度湿度很快接近鼻腔壁,所以不再增加,而且此时鼻腔一般过于狭窄,鼻腔阻力偏大,可能会影响到正常呼吸。从患者A手术结果来看,术后的加温加湿程度比术前稍差,但是也能满足要求,即与正常鼻腔加温加湿后的气流相近。因此,手术后鼻腔气道的宽度保持在一定范围内就可以,过于宽敞会影响到加温加湿的效果^[4],而过于狭窄则会影响到呼吸。由图中还可以看出,数据点有一定的离散度,这是因为鼻腔的加温加湿效果除了和鼻腔壁表面积、体积等参数相关外,还和鼻腔具体的形状有关;而且在整个加温加湿过程中,鼻腔前端为加热主要部位,而选取结构参数时用整个鼻腔壁的面积,因此数据点会有所偏差。

4 结语

本文通过对15例鼻腔模型对吸入气流加温加

湿效果的数值模拟,初步了解鼻腔结构对鼻腔功能的影响。总体来看鼻腔气道前端为加温加湿主要部位,而鼻腔气道的横截面积、长度、气道壁表面积等鼻腔结构参数以及吸入气流的体积流率都会对鼻腔功能的实现产生影响。而本文选择的表示鼻腔结构的参数可以一定程度的反应鼻腔的功能。通过本研究,可以为鼻腔功能性手术提供一定的临床参考数据,同时也为深入研究鼻腔结构和功能的关系打好基础。

参考文献:

- [1] Keck T, Leiacker R, Heinrich A, *et al.* Humidity and temperature profile in the nasal cavity [J]. *Rhinology*, 2000, 38(4): 167-171.
- [2] Lindemann J, Leiacker R, Stehmer V, *et al.* Intranasal temperature and humidity profile in patients with nasal septal perforation before and after surgical closure [J]. *Clin Otolaryngol Allied Sci*, 2001, 26(5): 433-437.
- [3] Naftali S, Rosenfeld M, Wolf M, *et al.* The air-conditioning capacity of the human nose [J]. *Ann Biomed Eng*, 2005, 33(4): 545-553.
- [4] Garcia GJ, Bailie N, Martins DA, *et al.* Atrophic rhinitis: a CFD study of air conditioning in the nasal cavity [J]. *J Appl Physiol*, 2007, 103(3): 1082-1092.
- [5] Lindemann J, Leiacker R, Rettinger G, *et al.* Nasal mucosal temperature during respiration [J]. *Clin Otolaryngol Allied Sci*, 2002, 27(3): 135-139.
- [6] Yu S, Liu YX, Sun XZ, *et al.* Influence of nasal structure on the distribution of airflow in nasal cavity [J]. *Rhinology*, 2008, 46(2): 137-143.
- [7] Keck T, Leiacker R, Riechelmann H, *et al.* Temperature profile in the nasal cavity [J]. *Laryngoscope*, 2000, 110(4): 651-654.
- [8] Wiesmiller K, Keck T, Leiacker R, *et al.* Simultaneous in vivo measurements of intranasal air and mucosal temperature [J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2007, 264(6): 615-619.
- [9] 于申,刘迎曦,孙秀珍. 湍流状态下鼻腔的几何尺寸与鼻腔阻塞系数的关系[J]. *计算力学学报*, 2008, 25(4): 459-463.
- [10] Lindemann J, Keck T, Scheithauer MO, *et al.* Nasal mucosal temperature in relation to nasal airflow as measured by rhinomanometry [J]. *Am J Rhinol*, 2007, 1(1): 46-49.