

doi:10.3969/j.issn.2095-4344.2013.50.010 [http://www.crter.org]

刘晓芳, 胡玲玲, 宋光保, 邵龙泉, 柳大烈, 章锦才. 以有限元法仿真分析闭合式上颌窦提升的黏膜形变[J]. 中国组织工程研究, 2013, 17(50):8678-8684.

以有限元法仿真分析闭合式上颌窦提升的黏膜形变**

刘晓芳¹, 胡玲玲², 宋光保¹, 邵龙泉³, 柳大烈⁴, 章锦才¹ (¹广东省口腔医院·南方医科大学附属口腔医院, 广东省广州市 510280; ²中山大学工学院应用力学与工程系, 广东省广州市 510275; ³南方医科大学, 广东省广州市 510280; ⁴南方医科大学珠江医院, 广东省广州市 510280)

文章亮点:

1 骨挤压式上颌窦提升因为无血管破坏及不良反应小, 被称为微小侵入性手术。但因为在盲视状态下操作, 力度与提升程度无法掌握, 容易撕裂黏膜引起穿孔, 黏膜穿孔受很多因素影响, 如上颌窦底不规则的骨形态、过薄的上颌窦黏膜等。

2 为减少闭合式上颌窦提升黏膜穿孔的发生率, 文章首次通过无侵入的生物力学方法探讨不同上颌窦黏膜厚度对骨挤压式上颌窦提升黏膜应力与应变的影响, 以期为提高治疗的成功率提供理论依据。

3 课题以有限元大变形理论接触算法对上颌窦黏膜提升过程进行仿真, 并探讨上颌窦黏膜厚度对黏膜应力与应变的影响, 可以更加真实准确地反映黏膜的实际受力状况。

关键词:

组织构建; 口腔组织构建; 上颌窦提升; 有限元分析; 牙种植体; 上颌窦黏膜; Von Mises 应力; 应变; 省级基金

主题词:

上颌窦; 提升; 有限元分析; 牙种植体; 应力, 物理

基金资助:

广东省医学科研课题资助项目(A2009095)*, 课题名称: 骨挤压式上颌窦提升术的计算机力学分析研究

摘要

背景: 如何避免闭合式上颌窦提升种植治疗中医源性上颌窦黏膜穿孔等并发症成为近年研究的热点。

目的: 以有限元法比较闭合式上颌窦提升种植治疗中不同上颌窦黏膜厚度对黏膜穿孔的影响。

方法: 在 ANSYS 有限元分析软件的 SHELL63 单元中分别建立 0.3, 0.5, 0.8 mm 厚度上颌窦黏膜与 4.2 mm 直径种植体的有限元模型, 模拟闭合式上颌窦提升手术抬高黏膜, 根据大变形非线性理论计算 3 种厚度上颌窦黏膜中心 Von Mises 最大应力值, 并进行统计学分析。

结果与结论: 通过对 3 种厚度上颌窦黏膜提升 1-5 mm 的形变与应力分析, 发现上颌窦黏膜高变形区发生在黏膜顶端中心, 在黏膜提升 1-4 mm 时, 最大应变值曲线变化温和, 在大于 4 mm 高度后曲线斜率明显增加; 在上颌窦黏膜提升 5 mm 之内, 0.3, 0.5, 0.8 mm 3 种厚度黏膜中心最大 Von Mises 应力值差异无显著性意义 ($P > 0.05$)。提示上颌窦黏膜提升高度大于 4 mm 之后, 黏膜弹性拉伸大幅增加, 增大了穿孔的概率; 对于上颌窦黏膜厚度为 0.3-0.8 mm 需要进行闭合式上颌窦提升治疗的患者, 其所面对的黏膜穿孔风险是无差别的; 而上颌窦黏膜厚度小于 0.3 mm 的患者, 要更加慎重地选择上颌窦提升方案以防止黏膜穿孔的发生。

Finite element analysis on the deformation of maxillary sinus mucosa after closed maxillary sinus augmentation

Liu Xiao-fang¹, Hu Ling-ling², Song Guang-bao¹, Shao Long-quan³, Liu Da-lie⁴, Zhang Jin-cai¹
(¹Department of Prosthodontics, Guangdong Provincial Stomatological Hospital • Affiliated Stomatological Hospital of Southern Medical University, Guangzhou 510280, Guangdong Province, China; ²Department of Applied Mechanics and Engineering, Engineering School of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong Province, China; ³Southern Medical University, Guangzhou 510280, Guangdong Province, China; ⁴Department of Plastic and Aesthetic Surgery, Affiliated Zhujiang Hospital of Southern Medical University, Guangzhou 510280, Guangdong Province, China)

Abstract

BACKGROUND: How to avoid iatrogenic maxillary sinus mucosal perforation after closed maxillary sinus augmentation.

OBJECTIVE: To compare the influence of maxillary sinus mucosa at different thicknesses on the mucosal perforation in closed maxillary sinus augmentation operation by using finite element analysis.

METHODS: Three finite element models of maxillary sinus mucosa at different thicknesses of 0.3 mm, 0.5 mm, 0.8 mm respectively and implant with 4.2 mm diameter were established in the SHELL63 units. ANSYS finite

刘晓芳★, 女, 1972年生, 河北省昌黎县人, 汉族, 2004年解放军第四军医大学毕业, 硕士, 主任医师, 主要从事口腔生物力学的研究。
liuxiaofang900@hotmail.com

通讯作者: 章锦才, 教授, 博士生导师, 广东省口腔医院·南方医科大学附属口腔医院, 广东省广州市 510280
jincaizhang@hotmail.com

并列通讯作者: 柳大烈, 教授, 博士生导师, 南方医科大学附属珠江医院整形美容外科, 广东省广州市 510280
liudalie@hotmail.com

中图分类号: R318
文献标识码: A
文章编号: 2095-4344
(2013)50-08678-07

修回日期: 2013-11-09
(201310045/G·Y)

Liu Xiao-fang★, Master, Chief physician, Department of Prosthodontics, Guangdong Provincial Stomatological Hospital • Affiliated Stomatological Hospital of Southern Medical University, Guangzhou 510280, Guangdong Province, China liuxiaofang900@hotmail.com

Corresponding author: Zhang Jin-cai, Professor, Doctoral supervisor, Department of Prosthodontics, Guangdong Provincial Stomatological Hospital • Affiliated Stomatological Hospital of Southern Medical University, Guangzhou 510280, Guangdong Province, China jincaizhang@hotmail.com

Corresponding author: Liu Da-lie, Professor, Doctoral supervisor, Department of Plastic and Aesthetic Surgery, Affiliated Zhujiang Hospital of Southern Medical University, Guangzhou 510280, Guangdong Province, China liudalie@hotmail.com

Accepted: 2013-11-09

element analysis software was used to evaluate maxillary sinus mucosal deformation by the simulated closed maxillary sinus augmentation surgery. Differences of Von Mises maximum stress values of mucosa surface were calculated according to the non-linear large-deformation theory.

RESULTS AND CONCLUSION: When maxillary sinus mucosa height was increased from 1 mm to 5 mm, the large deformation was observed in the center of mucosa center. The maximum stress curve slope was shifted mild between 1–4 mm deformation, while shifted abruptly after 4 mm. There was no difference in the value of Von Mises maximum stress values between three maxillary sinus mucosa at 0.3 mm, 0.5 mm, 0.8 mm thickness, when the lift height was increased from 1 mm to 5 mm ($P > 0.05$). Maxillary sinus mucosa are faced with a higher risk of mucosal perforation and elastic elongation when maxillary sinus height is increased more than 4 mm. Maxillary sinus mucosa at 0.3–0.8 mm thickness are faced the similar risk of mucosal perforation in closed maxillary sinus augmentation operation within 5 mm. While more considerations should be paid on patients with less than 0.3 mm maxillary sinus mucosa thickness.

Subject headings: maxillary sinus; augmentation; finite element analysis; dental implants; stress, physics
Funding: a grant by Medical Research Project of Guangdong Province in China, No. A2009095*

Liu XF, Hu LL, Song GB, Shao LQ, Liu DL, Zhang JC. Finite element analysis on the deformation of maxillary sinus mucosa after closed maxillary sinus augmentation. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2013;17(50):8678-8684.

0 引言 Introduction

闭合式上颌窦底提升亦称为骨挤压式上颌窦提升或上颌窦冲顶,是解决上颌后牙区种植骨量不足的有效方法^[1-5]。在治疗中,上颌窦黏膜的提升过程是在非视觉与直接触觉的支配下进行,黏膜修复的路径也受到限制,如何避免医源性上颌窦黏膜穿孔是医生非常关心的问题^[6-9]。在上颌窦提升过程中,黏膜穿孔通常归因于上颌窦复杂的骨解剖结构^[10-11]、存在过薄的上颌窦黏膜及不完善的外科技巧等^[12-18]。学者们对上颌窦黏膜进行了许多研究^[19-21],2009年Pommer等学者对20例新鲜尸体上获取的上颌窦黏膜样本进行测试,得出黏膜的厚度由0.024 mm变化到0.35 mm的范围时,穿孔强度值的变化具有统计学意义的结论。但是,在临床工作中所见到的黏膜厚度多在0.3–0.8 mm^[12],这种厚度范围的上颌窦黏膜在面对提升手术时,黏膜形变及应力分布是否有差异的研究至今未见报道。因此,实验选择临床常用的种植体,建立三维有限元模型,测量0.3, 0.5, 0.8 mm 3种厚度上颌窦黏膜提升后形变与应力分布情况,初步分析上颌窦黏膜局部解剖因素对提升效果的影响。

1 材料和方法 Materials and methods

设计: 三维有限元分析。

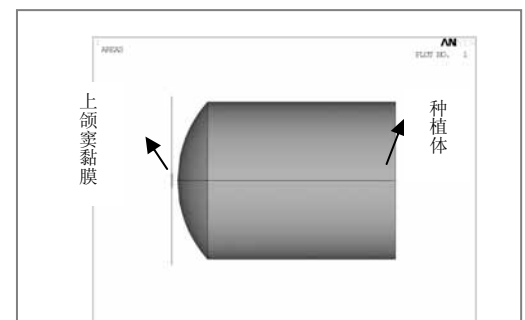
时间和地点: 于2013年9月在中山大学完成。

材料: ANSYS 10.0有限元分析软件购

自美国ANSYS公司。

方法:

建立有限元模型: 在ANSYS 10.0有限元分析软件前处理模块Preprocessor中建立4.2 mm直径种植体与3种厚度上颌窦黏膜的几何模型,见图1。种植体形状如下:底部为球体,高0.8 mm;上部为圆柱体,高5.0 mm^[22];在种植体模型前方与其垂直的位置建立4.2 mm直径圆柱形的上颌窦黏膜模型,厚度分别为0.3, 0.5, 0.8 mm。



注:种植体底部为球体,高0.8 mm;上部为圆柱体,高5.0 mm。在种植体模型前方与其垂直的位置建立4.2 mm直径圆柱形的上颌窦黏膜模型,厚度为0.3 mm。

图1 直径为4.2 mm的种植体与0.3 mm厚度上颌窦黏膜的几何模型效果图

Figure 1 Geometric model of maxillary sinus mucosa at 0.3 mm thickness combined with implant at 4.2 mm diameter

在SHELL63单元对模型进行三角网格划分,对各部分输入相应的力学参数,见表1,获得三维有限元模型,见图2。上颌窦黏膜共有930个节点,1 758个单元;种植体

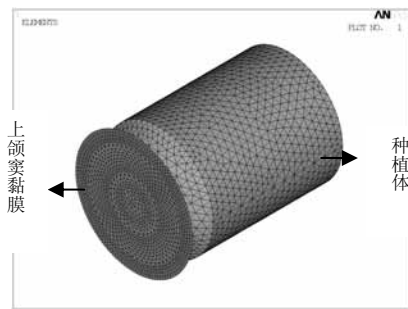
共有1 113个节点, 2 172个单元。

表 1 种植体与上颌窦黏膜的力学参数

Table 1 Mechanical properties of implants and maxillary sinus mucosa

材料	弹性模量(MPa)	泊松比
种植体	1.078×10^5	0.35
上颌窦黏膜	58	0.45

注: 力学参数参照文献[21-22]。

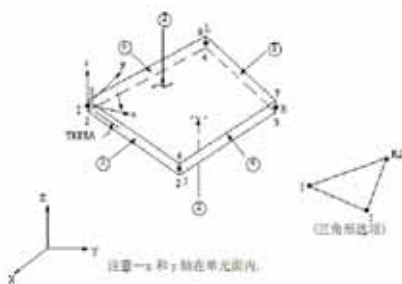


注: 在 SHELL63 单元对模型进行三角网格划分, 对各部分输入相应的力学参数, 获得三维有限元模型。

图 2 直径为 4.2 mm 的种植体与 0.3 mm 厚度上颌窦黏膜有限元模型效果图

Figure 2 Finite element model of maxillary sinus mucosa at 0.3 mm thickness and implant at 4.2 mm diameter

实验假设及边界约束: 设定上颌窦黏膜和种植体为线弹性材料, 将上颌窦黏膜周边设定全约束, 约束种植钉在 X, Y 方向的位移以及绕 x, y, z 3 个方向的转动自由度, 沿 z 方向施加位移, 见图 3。



注: 设定上颌窦黏膜和种植体为线弹性材料, 将上颌窦黏膜周边设定全约束, 约束种植钉在 X, Y 方向的位移以及绕 x, y, z 3 个方向的转动自由度, 沿 z 方向施加位移。

图 3 SHELL63 单元受力模拟图

Figure 3 The stress simulation diagram of SHELL63 unit

模拟接触与求解: 创建接触对单元来模拟接触及计算, 定义种植体单元为目标单元, 上颌窦黏膜为接触单元。采用大变形非线性迭代求解^[23], 在 ANSYS 的 solution 模块中完成求解过程。

大变形条件下的应变与应力的描述:

① Green 应变定义为

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial x_k}{\partial X_i} \cdot \frac{\partial x_k}{\partial X_j} - \delta_{ij} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_k}{\partial X_i} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial X_j} \right) \quad (1)$$

公式中, δ_{ij} 为 Kronecher 符号; $u_i = x_i(X_j, t) - X_j$ 为初始构形中定义的位移矢量。

Green 应变的物质导数(全导数)为

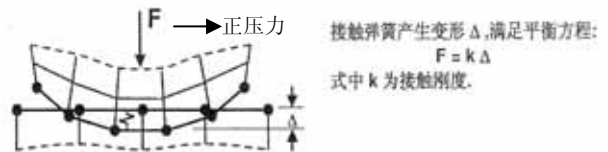
$$\frac{DE_{ij}}{Dt} = \dot{E}_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial x_k}{\partial X_i} \cdot \frac{\partial x_l}{\partial X_j} \left(\frac{\partial v_k}{\partial x_l} + \frac{\partial v_l}{\partial x_k} \right) = \frac{\partial x_k}{\partial X_i} \cdot \frac{\partial x_l}{\partial X_j} \cdot D_{kl} \quad (2)$$

② Cauchy 应力在现时构形上有向面元 $n_i \Delta A$ 上作用的力 ΔT_i , 在极限状态下,

$$t_i^{(n)} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T_i}{\Delta A} = \frac{dT_i}{dA} \quad (3)$$

面元 $n_i dA$ 上的应力矢量 $t_i^{(n)}$, 用 3 个垂直于坐标轴的面元上的应力矢量表示, 有 $t_i^{(n)} = \sigma_{ij} n_j$ 即为 Cauchy 应力张量, σ_{ij} 为定义在现时构形上每单位面积上的应力, 是与变形相关的真实应力。

接触界面算法选择: 本文计算时主要用到的是对称罚函数法, 所有的接触单元都采用惩罚刚度(接触刚度)来保证接触界面的协调性, 见图 4。



注: 所有的接触单元都采用惩罚刚度(接触刚度)来保证接触界面的协调性。

图 4 接触面结构示意图

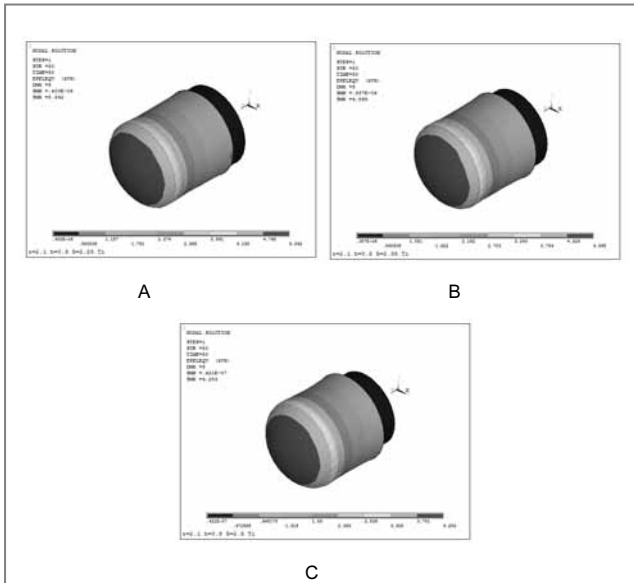
Figure 4 Interface structure diagram

主要观察指标: 4.2 mm 直径种植体分别提升 3 种厚度上颌窦黏膜 1-5 mm 时黏膜最大应变值与黏膜中心所对应 Von Mises 最大应力值。

统计学分析: 由邵龙泉将 3 种模型上颌窦黏膜提升 1-5 mm 时黏膜中心 Von Mises 最大应力值结果在 SPSS 14.0 软件中进行分析, $P < 0.05$ 为差异有显著性意义。

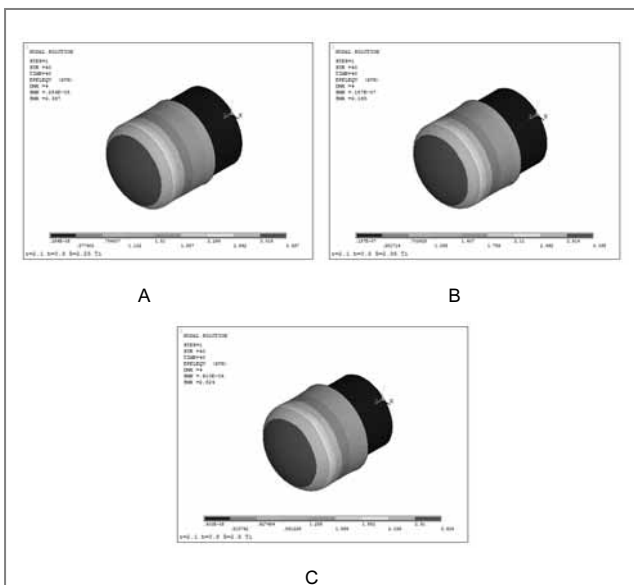
2 结果 Results

2.1 不同厚度上颌窦黏膜抬高时应变分布情况 见图5, 6及表2。



注: A, B, C 分别为 4.2 mm 直径种植体抬高 0.3, 0.5, 0.8 mm 厚度上颌窦黏膜 5 mm 时的应变分布图。

图 5 种植体抬高 3 种厚度上颌窦黏膜 5 mm 时的应变分布
Figure 5 Strain distribution after maxillary sinus mucosa at different thicknesses was elevated 5 mm



注: A, B, C 分别为 4.2mm 直径种植体抬高 0.3, 0.5, 0.8 mm 厚度上颌窦黏膜 4 mm 时的应变分布图。

图 6 种植体抬高 3 种厚度上颌窦黏膜 4 mm 时的应变分布
Figure 6 Strain distribution after maxillary sinus mucosa at different thicknesses was elevated 4 mm

表 2 直径为 4.2 mm 的种植体抬高 3 种厚度上颌窦黏膜 1-5 mm 时黏膜的最大应变值

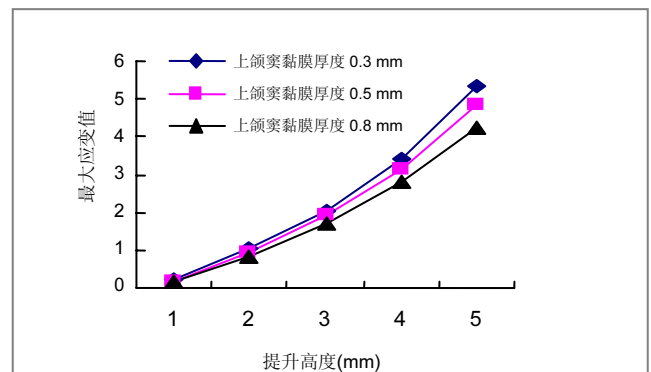
Table 2 The maximum strain in the center of maxillary sinus mucosa at different thicknesses was elevated 1-5 mm

提升高度(mm)	上颌窦黏膜厚度(mm)		
	0.3	0.5	0.8
1	0.222	0.174	0.138
2	1.022	0.933	0.822
3	2.064	1.911	1.722
4	3.397	3.165	2.824
5	5.342	4.865	4.253

注: 随着提升高度的增加, 上颌窦黏膜应变值逐渐增大。

从应变图中可以看到, 随着高度的增加, 黏膜拉伸从顶端逐渐过渡到边缘, 上颌窦黏膜高变形区发生在顶端中心。

在黏膜提升 1-4 mm 时, 黏膜顶端中心最大应变值变化曲线温和, 在大于 4 mm 高度后最大应变值曲线斜率明显增加, 见图 7。



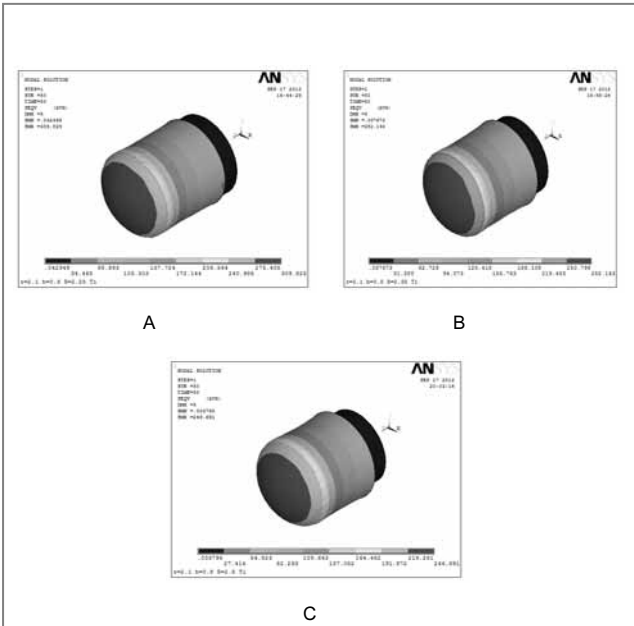
注: 随着提升高度的增加, 上颌窦黏膜应变值逐渐增大。在黏膜提升 1-4 mm 时, 黏膜顶端中心最大应变值变化曲线温和, 在大于 4 mm 高度后最大应变值曲线斜率明显增加。

图 7 不同厚度上颌窦黏膜提升 1-5 mm 时上颌窦黏膜中心最大应变值比较

Figure 7 The maximum strain in the center of maxillary sinus mucosa at different thicknesses was elevated 1-5 mm

2.2 不同厚度上颌窦黏膜抬高时应力分布情况 见图 8, 9。

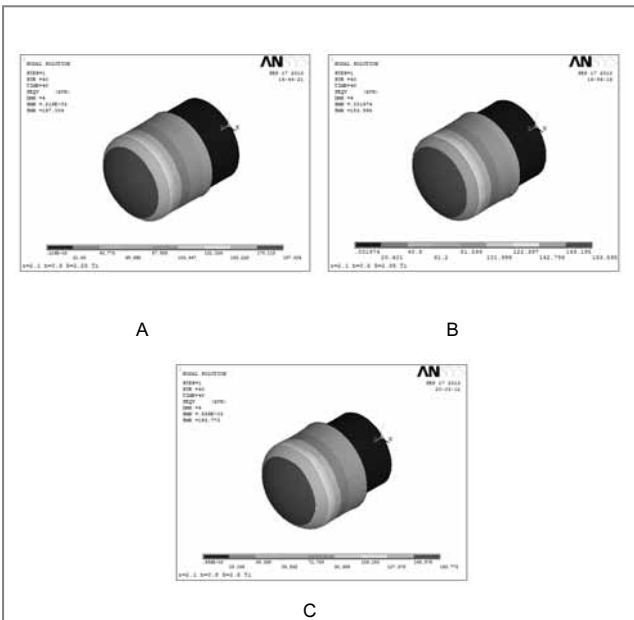
经统计分析, 0.3, 0.5, 0.8 mm 厚度上颌窦黏膜提升 1-5 mm 高度时上颌窦黏膜中心最大 Von Mises 应力分布差异无显著性意义 ($P > 0.05$), 具体数据见表 3, 统计结果见表 4。



注: A, B, C 分别为 4.2 mm 直径种植体抬高 0.3, 0.5, 0.8 mm 厚度上颌窦黏膜 5 mm 时的 Von Mises 等效应力分布图。

图 8 直径为 4.2 mm 的种植体抬高上颌窦黏膜 5 mm 时 Von Mises 等效应力分布

Figure 8 Von Mises equivalent stress distribution after maxillary sinus mucosa was elevated 5 mm



注: A, B, C 分别为 4.2 mm 直径种植体抬高 0.3, 0.5, 0.8 mm 厚度上颌窦黏膜 4 mm 时的 Von Mises 等效应力分布图。

图 9 直径为 4.2 mm 的种植体抬高上颌窦黏膜 4 mm 时 Von Mises 等效应力分布

Figure 9 Von Misse equivalent stress distribution after maxillary sinus mucosa was elevated 4 mm

表 3 直径为 4.2 mm 的种植体抬高 3 种厚度上颌窦黏膜 1-5 mm 时上颌窦黏膜中心最大 Von Mises 应力分布值

Table 3 The Von Misse maximum stress in the center of maxillary sinus mucosa at different thicknesses after elevated 1-5 mm (MPa)

提升高度(mm)	上颌窦黏膜厚度(mm)		
	0.3	0.5	0.8
1	12.860 8	10.0797	8.023 5
2	59.248 9	54.135	47.689 3
3	119.696	110.81	99.871 1
4	197.004	183.595	163.773
5	309.826	282.143	246.691

注: 0.3, 0.5, 0.8 mm 厚度上颌窦黏膜提升 1-5 mm 高度时上颌窦黏膜中心最大 Von Mises 应力分布差异无显著性意义($P > 0.05$), 统计学结果见表 4。

表 4 不同厚度上颌窦黏膜提升 1-5 mm 时黏膜中心最大 Von Mises 应力均数两两比较的 q 检验(Newman-Keuls 法)

Table 4 Pairwise comparison of Von Mises maximum stress in the center of maxillary sinus mucosa at different thicknesses after elevated 1-5 mm using q test (Newman-Keuls method)

项目	两均数之差	组数	q	P
第 1 组与第 2 组	11.574 6	2	0.241 7	> 0.05
第 1 组与第 3 组	26.517 6	3	0.553 7	> 0.05
第 2 组与第 3 组	14.943 0	2	0.312 0	> 0.05

注: 第 1 组上颌窦黏膜厚 0.3 mm, 第 2 组上颌窦黏膜厚 0.5 mm, 第 3 组上颌窦黏膜厚 0.8 mm。

3 讨论 Discussion

上颌窦黏膜与附着在上下牙槽嵴上的骨膜不同, 存在更多的弹性纤维, 闭合式上颌窦提升手术临床依据即源于上颌窦黏膜柔软而有弹性的特性^[23]。由于人体的特殊性, 要研究口腔生物组织的移动机制, 对上颌窦黏膜的受力变化进行分析, 不可能进行临床试验研究, 无侵入的生物力学方法成为当前最普遍的研究手段。有限元分析法属于力学分析中的数值法^[24-25], 在口腔领域应用广泛^[26-33]。它能对多种不同模型进行计算分析, 并逐步从小应变, 小位移, 弹性材料和静力学分析, 发展到大变形, 热分析, 材料非线性问题及动力学问题的研究, 已广泛用于软组织模拟中并取得了明显的效果^[34-35]。

在口腔领域, 学者们应用有限元方法对牙周膜进行了很多研究, 如Geramy等^[36]应用有限元非线性弹性理

论进行牙周膜应力分析的研究, 得出在牙槽骨高度降低的情况下, 牙周膜的最大应力分别提高了16倍(颈部)和11.25倍(根尖区), 最小应力增加了17.13倍(颈部)和9.9倍(根尖区)的结论; Toms等^[37]利用非线性方法模拟计算下颌前磨牙的二维正畸加力运动, 研究牙齿向冠方移动时牙周膜各部分的受力情况, 结果显示在根尖和牙颈部牙周膜的应力显著增大, 与经典的模型基本相同; 国内一些学者如魏志刚等^[38-41]通过逆向工程的方法, 建立了患者上颌中切牙及牙周膜的三维有限元模型, 对牙齿加载试验进行了仿真模拟等。

正常上颌窦黏膜的厚度一般为0.3-0.8 mm, 在吸烟的患者中其厚度可以非常薄甚至消失, 而在上颌窦炎症患者中黏膜的厚度可以增加数倍^[12]。本文在Pommer等学者的研究基础上, 通过建立0.3, 0.5, 0.8 mm 3种厚度上颌窦黏膜与种植体的有限元模型, 根据大变形非线性理论计算种植体分别提升3种厚度上颌窦黏膜1-5 mm时黏膜应变与Von mises应力值, 研究闭合式上颌窦提升术中黏膜厚度因素对黏膜穿孔的力学影响。通过对3种厚度上颌窦黏膜提升1-5 mm的应变与应力分析, 本实验结果发现, 随着高度的增加, 黏膜拉伸从顶端逐渐过渡到边缘, 上颌窦黏膜高变形区发生在黏膜顶端中心, 在黏膜提升1-4 mm时, 最大应变值曲线变化温和, 在大于4 mm高度时曲线斜率明显增加, 提示黏膜提升高度大于4 mm之后, 黏膜弹性拉伸大幅增加, 增大了穿孔的概率; 在上颌窦黏膜提升5 mm之内, 0.3, 0.5, 0.8 mm 3种厚度黏膜中心最大Von Mises应力值差异无显著性意义($P > 0.05$)。因此, 对于上颌窦黏膜厚度为0.3-0.8 mm范围, 需要进行闭合式上颌窦提升的患者, 其所面对的黏膜穿孔风险是无差别的, 而上颌窦黏膜厚度小于0.3 mm的患者, 要更加慎重的选择上颌窦提升方案以防止黏膜穿孔的发生。

由于上颌窦解剖结构的复杂性, 在种植方案设计时相对下颌骨要考虑的因素更多, 相信随着技术的成熟, 上颌窦区种植的生物力学研究会日益完善与丰富, 为临床应用提供更多的理论依据。

致谢: 感谢广东省口腔医院修复科对课题的支持。

作者贡献: 刘晓芳负责实验设计, 实验实施者为胡玲玲, 实验评估者为宋光保, 数据统计者为邵龙泉, 章锦才、柳大烈审校, 并对文章负责。章锦才、柳大烈对文章的贡献相同, 故并列列为通讯作者。

利益冲突: 课题未涉及任何厂家及相关雇主或其他经济组织直接或间接的经济或利益的赞助。

伦理要求: 无涉及伦理冲突的内容。

学术术语: 罚函数法-它将有约束最优化问题转化为求解无约束最优化问题, 其中 M 为足够大的正数, 起“惩罚”作用, 称之为罚因子, $F(x, M)$ 称为罚函数。

作者声明: 文章为原创作品, 数据准确, 内容不涉及泄密, 无一稿两投, 无抄袭, 无内容剽窃, 无作者署名争议, 无与他人课题以及专利技术的争执, 内容真实, 文责自负。

4 参考文献 References

- [1] Berengo M, Sivoiella S, Majzoub Z, et al. Endoscopic evaluation of the bone-added osteotome sinus floor elevation procedure. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2004;33(2):189-194.
- [2] Del Fabbro M, Testori T, Francetti L, et al. Systematic review of survival rates for implants placed in the grafted maxillary sinus. *Int J Periodontics Restorative Dent.* 2004;24(6):565-577.
- [3] Leblebicioglu B, Ersanli S, Karabuda C, et al. Radiographic evaluation of dental implants placed using an osteotome technique. *J Periodontol.* 2005;76(3):385-390.
- [4] 李晓东, 裴仲秋, 杨小竺. 闭合式上颌窦底提升同期牙种植体植入术疗效研究[J]. *重庆医学*, 2007, 36(4): 314-315.
- [5] 赵保东, 李宁毅, 许家森, 等. 经牙槽嵴顶入路的上颌窦提升植骨及同期种植体植入术[J]. *中华口腔医学杂志*, 2003, 38(4): 251-253.
- [6] McDermott NE, Chuang SK, Woo VV, et al. Maxillary sinus augmentation as a risk factor for implant failure. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2006;21(3):366-374.
- [7] Degidi M, Daprile G, Piattelli A, et al. Evaluation of factors influencing resonance frequency analysis values, at insertion surgery, of implants placed in sinus-augmented and nongrafted sites. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2007; 9(3): 144-149.
- [8] Barone A, Santini S, Sbordone L, et al. A clinical study of the outcomes and complications associated with maxillary sinus augmentation. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2006;21(1): 81-85.
- [9] 朱卓立, 宫萃, 焦锡藏. 上颌窦提升术与上颌窦炎相关性研究现状[J]. *国外医学: 口腔医学分册*, 2004, 31(6): 467-469.
- [10] van den Bergh JP, ten Bruggenkate CM, Disch FJ, et al. Anatomical aspects of sinus floor elevations. *Clin Oral Implants Res.* 2000;11(3):256-65.
- [11] 蒋峰, 张雄. 上颌窦底壁分嵴的研究进展[J]. *中国口腔种植学杂志*, 2010, 15(1): 48-50.
- [12] Morgensen C, Tos M. Quantitative Histology Of the maxillary sinus. *Rhinology.* 1977;15(3):129-40
- [13] Ardekian L, Oved-Peleg E, Mactei EE, et al. The clinical significance of sinus membrane perforation during augmentation of the maxillary sinus. *J Oral Maxillofac Surg.* 2006;64(2):277-282.
- [14] Hernández-Alfaro F, Torradeflot MM, Marti C. Prevalence and management of Schneiderian membrane perforations during sinus-lift procedures. *Clin Oral Implants Res.* 2008;19(1): 91-98.
- [15] Garbacea A, Lozada JL, Church CA, et al. The incidence of maxillary sinus membrane perforation during endoscopically assessed crestal sinus floor elevation: a pilot study. *J Oral Implantol.* 2012;38(4):345-359.
- [16] Ding X, Zhu XH, Wang HM, et al. Effect of sinus Membrane perforation on the survival of implants placed in combination with osteotome sinus floor elevation. *J Craniofac Surg.* 2013; 24(2):102-104.

- [17] Becker ST, Terheyden H, Steinriede A, et al. Prospective observation of 41 perforations of the Schneiderian membrane during sinus floor elevation. *Clin Oral Implants Res.* 2008; 19(12):1285-1289.
- [18] Wallace SS, Mazor Z, Froum SJ, et al. Schneiderian membrane perforation rate during sinus elevation using piezosurgery: clinical results of 100 consecutive cases. *Int J Periodontics Restorative Dent.* 2007; 27(5):413-419.
- [19] Aimetti M, Massei G, Morra M, et al. Correlation between gingival phenotype and Schneiderian membrane thickness. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2008; 23(6):1128-1132.
- [20] Yilmaz HG, Tözüm TF. Are gingival phenotype, residual ridge height, and membrane thickness critical for the perforation of maxillary sinus? *J Periodontol.* 2012; 83(4):420-425.
- [21] Pommer B, Unger E, Sütö D, et al. Mechanical properties of the Schneiderian membrane in vitro. *Clin Oral Implants Res.* 2009; 20(6):633-637.
- [22] 简波, 宋应亮, 李德华, 等. 含多个种植体的无牙下颌骨三维有限元模型的建立[J]. 牙体牙髓牙周病学杂志, 2008, 18(10):552-555.
- [23] 冯伟, 周新聪, 严新平, 等. 接触问题实体建模及有限元法仿真实现[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(6):52-55.
- [24] 郑诚功. 骨科生物力学研究的发展与现状[J]. 医用生物力学, 2007, 22(4):326-327.
- [25] Koca OL, Eskitascioglu G, Usumez A. Three-dimensional finite-element analysis of functional stresses in different bone locations produced by implants placed in the maxillary posterior region of the sinus floor. *J Prosthet Dent.* 2005; 93(1):38-44.
- [26] 薄斌, 周树夏, 张明, 等. 颌面部撞击伤的生物力学研究[J]. 中华创伤杂志, 2001, 17(2):80-82.
- [27] 黄宇文. 有限元分析在口腔生物力学中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(13):2423-2426.
- [28] 胡建军, 周延民, 王志彪, 等. 不同载荷下天然牙一种植牙联合桥基牙应力分布[J]. 中国口腔种植学杂志, 2001, 6(1):17-19.
- [29] Stegaroiu R, Watanabe N, Tanaka M, et al. Peri-implant stress analysis in simulation models with or without trabecular bone structure. *Int J Prosthodont.* 2006; 19(1):40-42.
- [30] 李长义, 荆洪阳. 下颌后牙固定义齿连接体受力的三维有限元分析[J]. 天津医科大学学报, 2002, 8(1):90-91.
- [31] Lin CL, Chang SH, Chang WJ, et al. Factorial analysis of variables influencing mechanical characteristics of a single tooth implant placed in the maxilla using finite element analysis and the statistics-based Taguchi method. *Eur J Oral Sci.* 2007; 115(5):408-416.
- [32] 李美华, 王伟, 董丽华, 等. 用三维有限元方法对单端固定桥进行应力分析[J]. 口腔医学纵横杂志, 2000, 16(3):197-199.
- [33] Fanuscu MI, Vu HV, Poncelet B. Implant biomechanics in grafted sinus: a finite element analysis. *J Oral Implantol.* 2004; 30(2):59-68.
- [34] 孙艳霞, 鲍旭东, 蒋春涛. 软组织建模中的有限元模型[J]. 生物医学工程研究, 2004, 23(3):137-140.
- [35] 张林, 顾晓明, 王莹, 等. 正颌外科软组织形态有限元分析系统的建立与应用[J]. 中华整形外科杂志, 2003, 19(3):207-210.
- [36] Geramy A, Faghihi S. Secondary trauma from occlusion: three dimensional analysis using the finite element method. *Quintessence Int.* 2004; 35(10):835-843.
- [37] Toms SR, Dakin GJ, Lemons JE. Quasi-linear viscoelastic behavior of the human periodontal ligament. *J Biom.* 2002; 35(10):1411-1415.
- [38] 魏志刚, 汤文成, 严斌, 等. 基于有限元法的牙周膜本构模型研究[J]. 工程力学, 2009, 26(10):211-216.
- [39] 卢红飞, 艾虹, 麦志辉, 等. 牙齿牙周矫治装置三合一三维有限元模型的建立[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(22):4010-4013.
- [40] 赵玺, 米丛波, 居曼江·买买提, 等. 牙周膜牵张成骨术快速移动尖牙的三维有限元模型建立[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(22):4014-4017.
- [41] 林苑云, 郑美华, 韦佩伶, 等. 冠外固位体义齿基牙牙周组织应力分布的三维有限元分析[J]. 广东牙病防治, 2012, 20(3):130-133.