[DOI]10.12016/j.issn.2096-1456.202660002

·基础研究·

上颌窦底形态对液压提升手术安全性影响的三维有限元研究

林曦[1]，　阙国鹰[2]，　刘嘉[3]，　周震[1]，　郑相淮[4]
1.南方医科大学口腔医院种植中心，广东 广州（510280）；　2.南方医科大学口腔医院牙体牙髓病科，广东 广州（510280）；　3.南方医科大学口腔医院牙周病科，广东 广州（510280）；　4.南方医科大学口腔医院口腔颌面外科，广东 广州（510280）

【摘要】　目的　探讨不同上颌窦底壁形态对液压提升手术安全性的影响，为临床治疗提供生物力学依据。**方法**　获得单位医学伦理委员会批准，选取9例患者的锥形束CT影像学数据，根据上颌窦底壁形态分为倾斜型、平坦型及凹型。采用Mimics、Geomagic、Solidworks和ANSYS软件构建3种上颌窦三维有限元模型，模拟上颌窦行液压提升法的过程。设定上颌窦黏膜提升高度为1～6 mm，记录各提升高度下所需的提升压力，并分析黏膜产生的等效应力、压应力、拉应力及剪切应力，同时观察等效应力的分布云图。**结果**　提升所需压力、黏膜产生等效应力、压应力、拉应力和剪切力均随提升高度增加而增加。黏膜提升至6 mm时，倾斜型、平坦型与凹型上颌窦提升所需压力分别为（301.17±98.1）kPa、（151.85±3.7）kPa和（149.36±10.31）kPa，黏膜产生的等效应力分别为（1 023.86±201.99）kPa、（687.91±69.08）kPa和（698.27±96.09）kPa。在相同提升高度下，倾斜型上颌窦黏膜所需提升压力及黏膜产生的等效应力、压应力、剪切力应力值均大于平坦型和凹型上颌窦（$P<0.05$）。应力云图显示，平坦型上颌窦的应力分布均匀，凹型上颌窦次之，而倾斜型上颌窦的应力分布不对称。**结论**　采用液压提升法时，倾斜型上颌窦的手术安全性及操作效能均低于平坦型与凹型上颌窦。

【关键词】　上颌窦内提升；　上颌窦黏膜穿孔；　液压提升法；　底壁分型；　倾斜型；　平坦型；　凹型；　三维有限元分析；　生物力学；　牙种植术
【中图分类号】　R782.1　**【文献标志码】**　A　**【文章编号】**　2096-1456（2026）06-0556-09
【引用著录格式】　林曦，阙国鹰，刘嘉，等. 上颌窦底形态对液压提升手术安全性影响的三维有限元研究[J]. 口腔疾病防治, 2026, 34(6): 556-564. doi:10.12016/j.issn.2096-1456.202660002.

微信公众号

Effect of maxillary sinus morphology on the safety of hydraulic sinus floor elevation: a three-dimensional finite element analysis

LIN Xi[1], QUE Guoying[2], LIU Jia[3], ZHOU Zhen[1], ZHENG Xianghuai[4].　1. Implantology Center, Stomatological Hospital, Southern Medical University, Guangzhou 510280, China;　2. Department of Endodontic, Stomatological Hospital, Southern Medical University, Guangzhou 510280, China;　3. Department of Periodontology, Stomatological Hospital, Southern Medical University, Guangzhou 510280, China;　4. Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Stomatological Hospital, Southern Medical University, Guangzhou 510280, China
Corresponding author: ZHENG Xianghuai, Email: 195785732@qq.com

【Abstract】　Objective　To investigate the influence of sinus morphology on the safety of hydraulic sinus floor elevation surgery and provide a biomechanical basis for clinical treatment. **Methods**　After approval by the Medical Ethics Committee of the institution, cone beam computed tomography imaging data from nine patients were collected. The sinus morphologies were classified into slope, flat and concave types. Three-dimensional finite element models of maxillary sinuses with the aforementioned morphologies were constructed using Mimics, Geomagic, Solidworks, and ANSYS software, followed by a simulation of the hydraulic elevation process. The sinus membrane elevation height was set at

【收稿日期】2026-01-04；　**【修回日期】**2026-03-09
【基金项目】广东省援疆农村科技特派员项目（KTPYJ2024015）；南方医科大学口腔医院院级科研培育项目（PY2024035）
【作者简介】林曦，副主任医师，博士，Email：654365980@qq.com
【通信作者】郑相淮，副主任医师，硕士，Email：195785732@qq.com

1-6 mm. The pressure required for elevation and the equivalent, compressive, tensile, and shear stresses generated on the sinus membrane were recorded and analyzed. The equivalent stress distribution on the sinus membrane was visualized using contour plots. **Results** The elevation pressure and the equivalent, compressive, tensile, and shear stresses generated on the sinus membrane increased along with the elevation height. When the sinus membrane was lifted to 6 mm, the elevation pressure was (301.17 ± 98.1) kPa, (151.85 ± 3.7) kPa, and (149.36 ± 10.31) kPa in the slope, flat and concave finite element analysis models, respectively. The equivalent stress was (1 023.86 ± 201.99) kPa in the slope sinuses, comparing with (687.91 ± 69.08) kPa and (698.27 ± 96.09) kPa in the flat and concave sinuses. Higher elevation pressure and the equivalent stress, compressive stress and shear stress values were found in the slope sinus than in the flat and concave sinuses under the same elevation height ($P < 0.05$). Stress distribution analysis revealed that stress was uniformly distributed in the flat sinuses, followed by concave sinuses, but asymmetrically distributed in the slope sinuses. **Conclusions** The slope sinuses demonstrated inferior safety and efficiency compared with the flat and concave sinuses when performing hydraulic sinus floor elevation surgery.

【Key words】 transcrestal maxillary sinus elevation; sinus membrane perforation; hydraulic sinus floor elevation; sinus contour; slope type; flat type; concave type; three-dimensional finite element analysis; biomechanics; dental implant surgery

J Prev Treat Stomatol Dis, 2026, 34(6): 556-564.

【Competing interests】 The authors declare no competing interests.

This study was supported by the grants from Guangdong Provincial Science and Technology Commissioner Program for Rural Areas in Xinjiang (No. KTPYJ2024015), Research and Cultivation Project of Stomatological Hospital, Southern Medical University (No. PY2024035).

上颌窦提升术是解决上颌后牙区种植位点骨高度不足的有效方法[1-2]。其中,液压提升法是上颌窦提升术的一种常见术式,通过向封闭的上颌窦腔底黏膜下注射液体,利用液体产生的压力提升上颌窦底黏膜[3-4]。因液体作用力更温和、操作技术敏感性较传统冲击法低,大量研究证实液压提升法在提升安全性和提升高度方面均优于冲击法[5-6]。随着舒适化和微创治疗的进一步普及,液压提升法具有良好的应用前景[1]。然而,无论采用何种提升方式,上颌窦黏膜穿孔(sinus membrane perforation, SMP)仍然是上颌窦提升术最常见的并发症[7]。

研究表明,上颌窦底形态的个体差异影响上颌窦提升术的难度与风险[8-9]。因此,对不同形态的上颌窦,从生物力学角度探讨作用力的方式和大小对上颌窦黏膜应力的影响,有助于深入理解上颌窦提升术的机制,为临床现象的解释和风险把控提供客观的理论依据[10-11]。

本研究利用三维有限元分析方法,通过建立不同形态上颌窦的有限元分析模型,模拟液压提升过程中上颌窦黏膜的生物力学反应,旨在评估不同类型上颌窦底形态对液压提升手术安全性和效果的影响,为降低SMP发生率、提高手术成功率提供研究依据。

1　材料和方法

1.1　主要仪器和软件

锥形束CT(cone beam computed tomography, CBCT)(NewTom VG, 意大利);Mimics软件(V10.1, Materialise, 比利时);Geomagic Studio软件(v2014, Raindro, 美国);SolidWorks软件(v2023, Dassualt, 法国)和ANSYS软件(v19.0, Ansys, 美国)。

1.2　研究对象

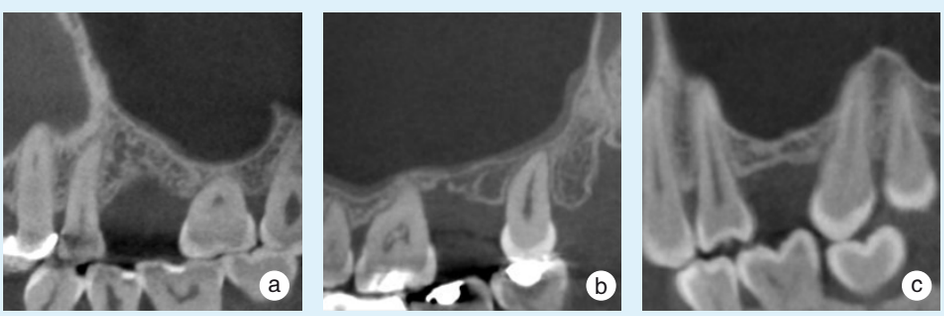
选择2023年1月1日至2023年12月31日,因牙列缺损于南方医科大学口腔医院种植中心就诊并行CBCT检查的患者中,根据纳入标准,随机纳入倾斜型上颌窦3例、平坦型上颌窦3例、凹型上颌窦3例,共9例患者的影像学数据作为研究对象,其中男4例,女5例,平均年龄(32.3±4.7)岁。纳入标准:①上颌后牙单牙缺失,缺牙区存在邻牙或对颌牙,能够识别缺牙位点;②缺牙位点剩余骨高度<10 mm;③上颌窦内未见明显病理性改变,如气-液平面,息肉或占位性病变;④该区域上颌窦无上颌窦提升术史;⑤ 按照French等[12]对上颌窦分型方法,将上颌窦近远中向形态分为3种亚类:倾斜型[近中和/或远中邻面切线与水平线所成锐角(夹角)>45°];平坦型[近中、远中邻面切线与水平线所成锐角(夹角)均<10°];凹型[近中、远中邻面切线

与水平线所成锐角(夹角)均≥10°且≤45°](图1)。

本研究方案的实施符合《赫尔辛基宣言》的要求,并通过了南方医科大学口腔医院医学伦理委员会审批(伦理审批号:NYKQ-EC-[2025] 12)。本研究获患者知情同意并签署书面知情同意书。

1.3　影像资料获取

所有患者的影像学资料均在同一台CBCT,由同一名高年资影像医生拍摄,拍摄体位与条件为:患者站立于机器前,头颈部自然放松,颏部置于颌托上,通过咬合板分开上下颌牙列;调整患者体位,使眶耳平面与地面平行。扫描参数设置为:电压110 kV,电流3~4.5 mA,扫描时间18 s。扫描及重建层厚均为0.3 mm。成像范围为12 cm×15 cm,体素大小为200 μm。使用软件自带的校准线进行定位,使校准线的交点位点处牙槽嵴的中心点,此时冠状面和矢状面图像即为本研究的观察截面。



a: slope type; b: flat type; c: concave type

Figure 1　Schematic diagram of the mesiodistal contour classification of the maxillary sinus based on the French classification

图1　基于French的上颌窦底近远中向轮廓分型示意图

1.4　三维有限元模型构建

每种分型随机选取3例患者的CBCT影像学数据用于建模。将CBCT数据导入Mimics软件进行三维重建,以STL格式文件输出并保存;将STL格式文件导入Geometric Studio软件中,进行网格提取、修补,使模型表面更加光滑;随后将STL格式文件导入Solidworks软件进行装配(图2)。上颌窦黏膜厚度设定为1 mm,且均匀分布。各模型的统计节点数和单元数见表1。平坦型、倾斜型及凹型上颌窦邻面平均夹角分别为6.84°±1.83°、48.01°±7.10°、22.68°±3.0°。

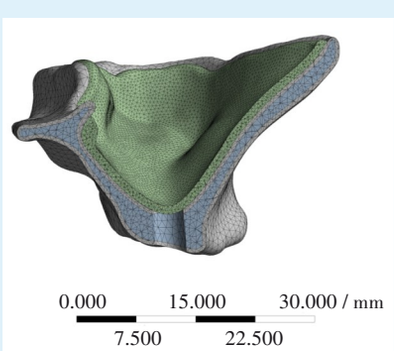


Figure 2　Assembled maxillary sinus augmentation model in the Solidworks system

图2　在Solidworks软件中装配的上颌窦提升模型

表1　基于French分型的不同形态上颌窦底三维有限元分析模型的统计节点数和单元数

Table 1　Number of nodes and elements in different maxillary sinus finite element analysis models based on the French classification

	Case	Number of nodes	Number of elements
Flat sinus	1	215 098	129 579
	2	260 073	165 320
	3	273 507	162 781
Slope sinus	4	191 703	113 790
	5	198 200	117 562
	6	220 910	133 203
Concave sinus	7	253 199	151 185
	8	196 746	115 779
	9	280 733	165 574

参考已发表的研究数据[10-11],分别对皮质骨、松质骨、上颌窦黏膜进行赋值。本研究将上颌窦黏膜设定为超弹性材料。各材料的弹性模量、泊松比和单元类型见表2。在液压提升模拟中,允许液体在垂直向及侧向产生位移。利用孔道投影在黏膜表面形成加载面,对构成的加载面施加均匀压力,方向为垂直于加载面。载荷方式为力载荷:从0 kPa开始,速率为0.1 mL/s的准静态加载模式[13]。

1.5　三维有限元分析

采用ANSYS软件对模型进行求解与后处理,

表2　材料弹性模量、泊松比和单元类型

Table 2　Elastic modulus, Poisson's ratio, and element type of the material

Materials	Elastic modulus / MPa	Poisson ratio	Element type
Cortical bone[10-11]	13 700	0.3	Tetrahedron
Trabecular bone[10-11]	1 370	0.3	Tetrahedron
Sinus membrane[10-11]	Hyperelastic	0.3 - 0.45	Tetrahedron

获取各模拟条件下的仿真计算结果。观察指标包括：①压力指标：记录不同模型中上颌窦底黏膜分别提升至1~6 mm时所需压力；②应力指标：记录不同模型中上颌窦底黏膜分别提升至1~6 mm时上颌窦黏膜的最大等效应力、拉应力、压应力及剪切力。以各项最大应力值点为圆心画直径0.2 mm的圆形，随机选取圆形范围内的2个点测量，结合最大应力值进行统计分析；③应力云图：输出各模型的最大等效应力分布云图。

1.6　统计学分析

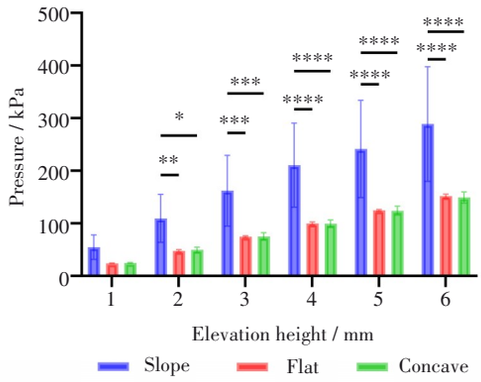
采用GraphPad Prism 7.0软件进行统计学分析。计数资料以频次表示，计量资料以均数±标准差表示。组间比较采用单因素方差分析，事后两两比较采用Tukey多重检验。采用Spearman相关分析评估提升压力与各黏膜应力指标之间的相关性。$P<0.05$为差异有统计学意义。

2　结　果

随着提升高度的增加，所需的提升压力逐渐增大。提升压力与各项应力均呈强正相关（$P<0.001$），提升压力与等效应力（$r=0.959$）、压应力（$r=0.962$）相关性最强，与拉应力（$r=0.766$）、剪切力（$r=0.876$）相关性稍弱。

相同提升高度下，倾斜型上颌窦所需的提升压力高于平坦型和凹型上颌窦（$F=4.304$，$P=0.008$）。提升高度为6 mm时，倾斜型上颌窦的提升压力最大值为426 kPa，平均值为（301.17 ± 98.1）kPa；平坦型上颌窦的压力最大值为156 kPa，平均值为（151.85 ± 3.7）kPa；凹型上颌窦的压力最大值为163 kPa，平均值为（149.36 ± 10.31）kPa（图3）。

倾斜型上颌窦黏膜的等效应力、压应力与剪切力指标均显著大于平坦型与凹型上颌窦黏膜（等效应力：$F=2.485$，$P=0.022$；压应力：$F=2.925$，$P=0.010$；剪切力：$F=6.339$，$P<0.001$）；平坦型和凹型上颌窦之间各项应力指标差异不明显；不同分型间拉应力差异无统计学意义（$F=1.682$，$P=0.452$）（图4）。



n = 3, *P<0.05, **P<0.01, ***P<0.001, ****P<0.000 1

Figure 3　Elevation pressure trends for different maxillary sinus types with increasing elevation height

图3　不同分型上颌窦提升压力随提升高度的变化趋势

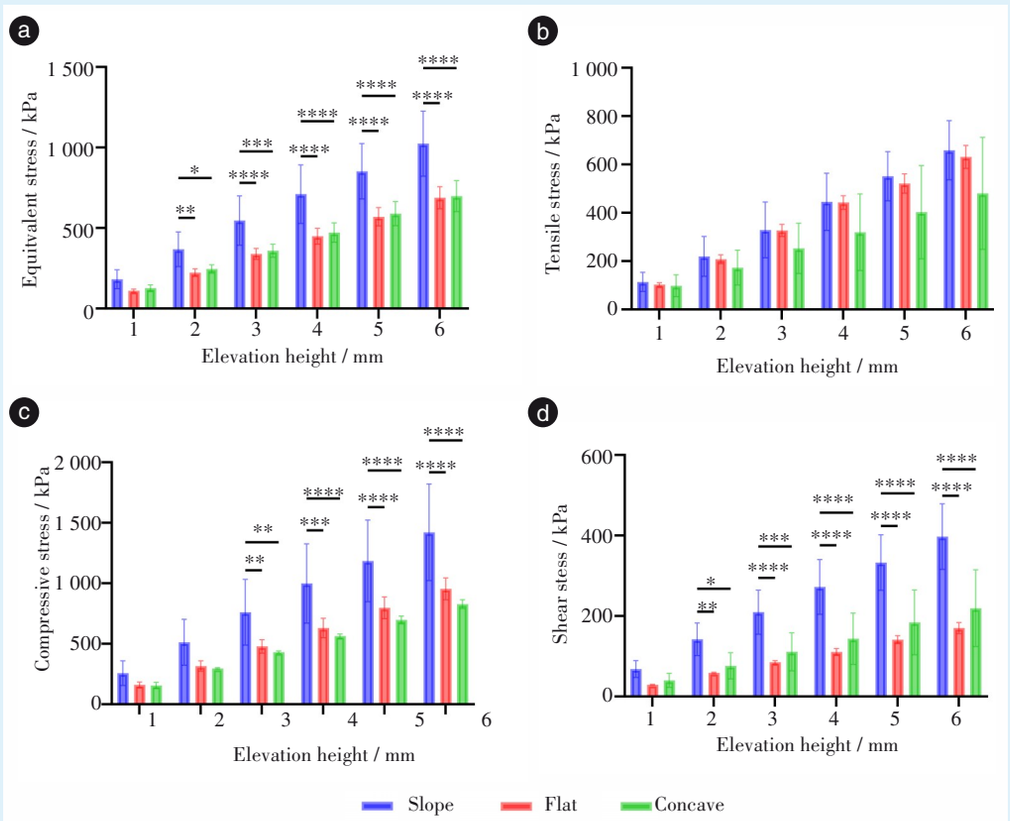
当上颌窦黏膜提升至6 mm时，倾斜型上颌窦的平均等效应力为（1 023.86 ± 201.99）kPa，平坦型与凹型上颌窦黏膜的平均等效应力分别为（687.91 ± 69.08）kPa和（698.27 ± 96.09）kPa。

等效应力云图显示，液压提升初期黏膜应力集中在加载力点中央，随着提升高度的增加，应力集中点从中央向四周扩散。平坦型上颌窦应力分布最均匀，不同提升高度下应力分布变化较小，凹型上颌窦次之，倾斜型上颌窦应力分布的对称性较差（图5~图7）。

3　讨　论

上颌窦提升术的病例鉴别、方案设计、临床效果与并发症等均与上颌窦解剖密切相关。上颌窦底形态复杂，不少学者提出了不同分型方法，目前尚无统一分类标准[14-16]。French等[12]参考上颌窦在矢状面形态将上颌窦分为倾斜型、平坦型、凹型与不规则型。本研究选取French分类方法是因为这种分型具有较明确的分类标准，不同分型上颌窦形态差异较大，且目前关于近远中向形态差异对上颌窦提升手术安全性影响的研究较少；由于不规则型上颌窦解剖结构变异较大，因此没有纳入本次研究中。

目前国内外关于上颌窦黏膜应力分析的研究主要集中在上颌窦提升术后种植体、上颌窦黏膜、骨移植材料及牙槽骨的受力分布[17-19]，提升过程中上颌窦底形态对黏膜应力和应变影响的研究较



a: equivalent stress; b: tensile stress; c: compressive stress; d: shear stress. n = 3, *P<0.05, **P<0.01, ***P<0.001, ****P<0.000 1

Figure 4　Comparison of various stress components in different types of maxillary sinus mucosa

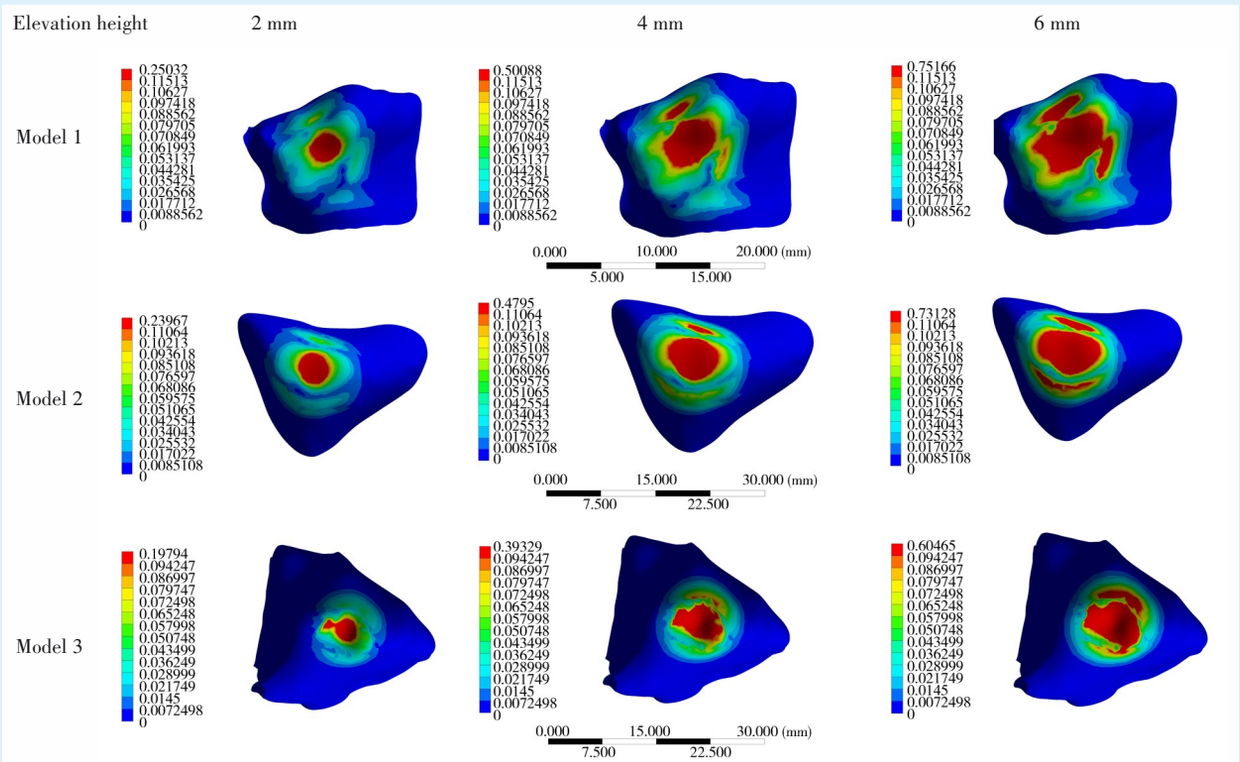
图4　不同分型上颌窦黏膜各项应力指标比较

少。由于传统研究方法无法直接测量提升过程中上颌窦黏膜的应力分布，故本研究引入三维有限元分析方法，模拟液压提升过程并分析上颌窦底形态差异对窦底黏膜生物力学的影响，以期在伦理约束和实验条件难以达到的条件下，对临床实际状况进行预测与分析。

上颌窦黏膜厚度的个体化差异较大，同一牙位不同区域的黏膜厚度亦可能存在差异[20]。根据文献报道，健康黏膜的平均厚度为1～2 mm，生理范围内均匀厚度的上颌窦黏膜是最常见形态特征之一[21-22]。目前大部分三维有限元分析将黏膜厚度设置为1 mm[11, 23]。本研究亦对上颌窦黏膜进行了简化处理，将其厚度设定为均匀1 mm。

材料受到多轴应力作用时，一个微小单元体可同时受到拉应力、压应力和剪切力的共同作用，不同应力在材料内部的合成效果可通过等效应力来表示[24-25]。本研究结果显示，压应力与提升压力相关性最高，等效应力与提升压力的相关性与压应力接近，表明压缩变形在此过程黏膜应力状态中呈主导地位。黏膜拉伸变形程度较轻，因此拉应力与提升压力相关性稍弱。随着提升压力和提升高度增加，更多黏膜从骨面上剥离，主要靠剪切力破坏黏膜与骨面的黏着，但因剪切力方向与提升压力呈一定角度，故与提升压力相关性亦稍弱。

解剖形态差异可影响黏膜从骨面上剥离的难易程度和变形程度，从而造成黏膜的应力差异。倾斜型上颌窦行液压提升时，为获得相同提升高度，斜坡下方黏膜需要被提升得更高，局部需施加更大压力，应力分布不均匀，局部应力较大。本研究中，不同工况倾斜型上颌窦应力与提升压力差异较大原因主要和窦底倾斜程度有关：工况4上颌窦近中邻面夹角为52°，工况5和工况6的邻面夹角分别为45°与46°；夹角越大，不同部位黏膜提升高度差异越大，提升所需压力和黏膜产生应力显著增加。平坦型与凹型上颌窦因窦底宽阔且相对平整，解剖结构差异较小[26]；提升过程主要集中在窦底区域，窦底内部空间较大，储能小，提升时需要压力小，外力可均匀作用到上颌窦底黏膜处，黏



The number of nodes and elements in model 1 is 215 098 and 129 579; in model 2 it is 260 073 and 165 320; and in model 3 it is 273 507 and 162 781, respectively. Stress was diffused from the center to peripheral side as the elevation height increased. Stress distribution of the flat sinuses was uniform and symmetric

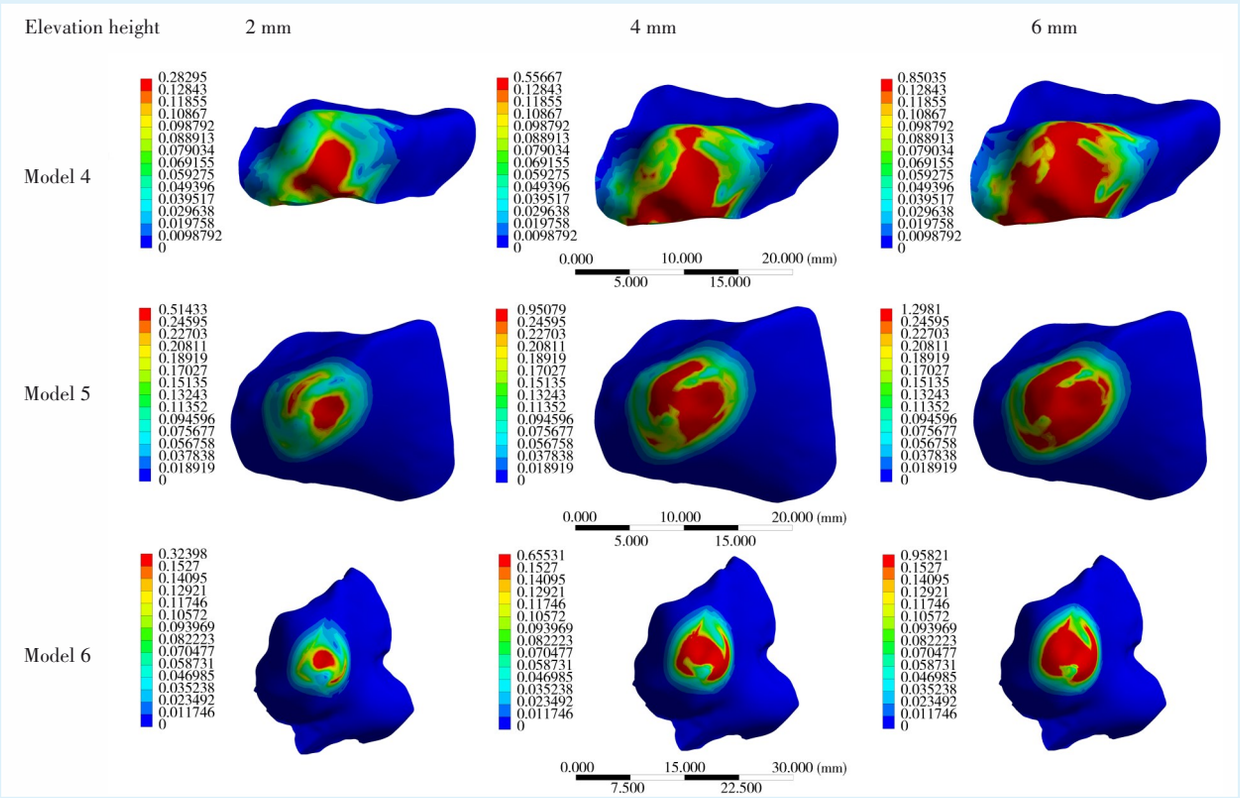
Figure 5　Equivalent stress distribution cloud map in the flat maxillary sinus at different elevation heights

图5　平坦型上颌窦在不同提升高度下的等效应力分布云图

膜应力分布更广泛均匀。

上颌窦黏膜提升至相同高度时，需要压力越小，提示该模型垂直方向提升效能越高；黏膜产生的等效应力越大，物体承受较大的负荷或外力，如果超过其强度极限，可能发生破坏。因此，较大的等效应力可能对该区域的强度和稳定性产生负面影响。结合压力和应力综合分析，倾斜型上颌窦提升安全性和效能较低；平坦型和凹型上颌窦提升安全性和效能较好。对提升效能较低的上颌窦，可通过加大注射液体量、延长注射时间和增加注射速度等方式改善。加大注射液体量可有效增加局部压力，但当注水量超出合理范围时，黏膜可因细胞膜内外渗透压差而大量吸收水分，引起黏膜水肿，或导致黏膜撕裂。此外，黏膜水肿可造成局部缺氧以及代谢物大量积累，激活破骨细胞，造成牙槽骨继发性吸收，阻碍新骨形成[27-28]。增加注射速度可以快速增加局部压力，但在临床操作中，主要靠医生的经验和手感，注射速度难以控制，容易造成瞬间局部高压，增加SMP发生风险。王晓萌等[29]对口腔咀嚼黏膜的生物力学研究发现，长时间的轻负荷相较于短时间的重负荷，更易使黏膜产生变形。此外，持续且重复的载荷会在黏膜表面逐渐累积为位移。综上所述，适度加大注射液体的量，保持缓慢均匀的注射速度并合理延长注射时间，采用间歇性提升方式，相较于单纯增加注射速度，是更为稳妥且合理的选择。两种方式相互配合，既能在一定程度上保障上颌窦黏膜的有效提升，又能最大程度降低手术风险和术后并发症的发生概率。

本研究通过三维有限元分析证实，倾斜型上颌窦可增加液压提升过程中SMP发生风险，该结论与冲击法临床三维有限元分析观察结果一致[9, 30-31]。本团队另一项三维有限元分析研究证实，上颌窦行冲击法与液压提升法时，黏膜的生物力学行为差异较大：在提升初期，冲击法应力集中在加载力点的四周，且随着提升高度的增加从四周向中央集中；而液压提升法的应力分布呈相反趋势。因此，冲击法在提升初期提升效率较低，且



The number of nodes and elements in model 4 is 191 703 and 113 790; in model 5 it is 198 200 and 117 562; and in model 6 it is 220 910 and 133 203, respectively. Stress was diffused from the center to peripheral side as the elevation height increased. Stress distribution of the slope sinuses was asymmetric

Figure 6　Equivalent stress distribution cloud map in the slope maxillary sinus at different elevation heights

图6　倾斜型上颌窦在不同提升高度下的等效应力分布云图

随着提升高度增加，应力集中进一步增加SMP的发生风险[13]。即使是相同的临床现象，背后的生物力学机制可能迥然不同，三维有限元分析研究为深入理解上颌窦提升术的机制，为临床现象的解释和风险把控提供客观的理论依据。

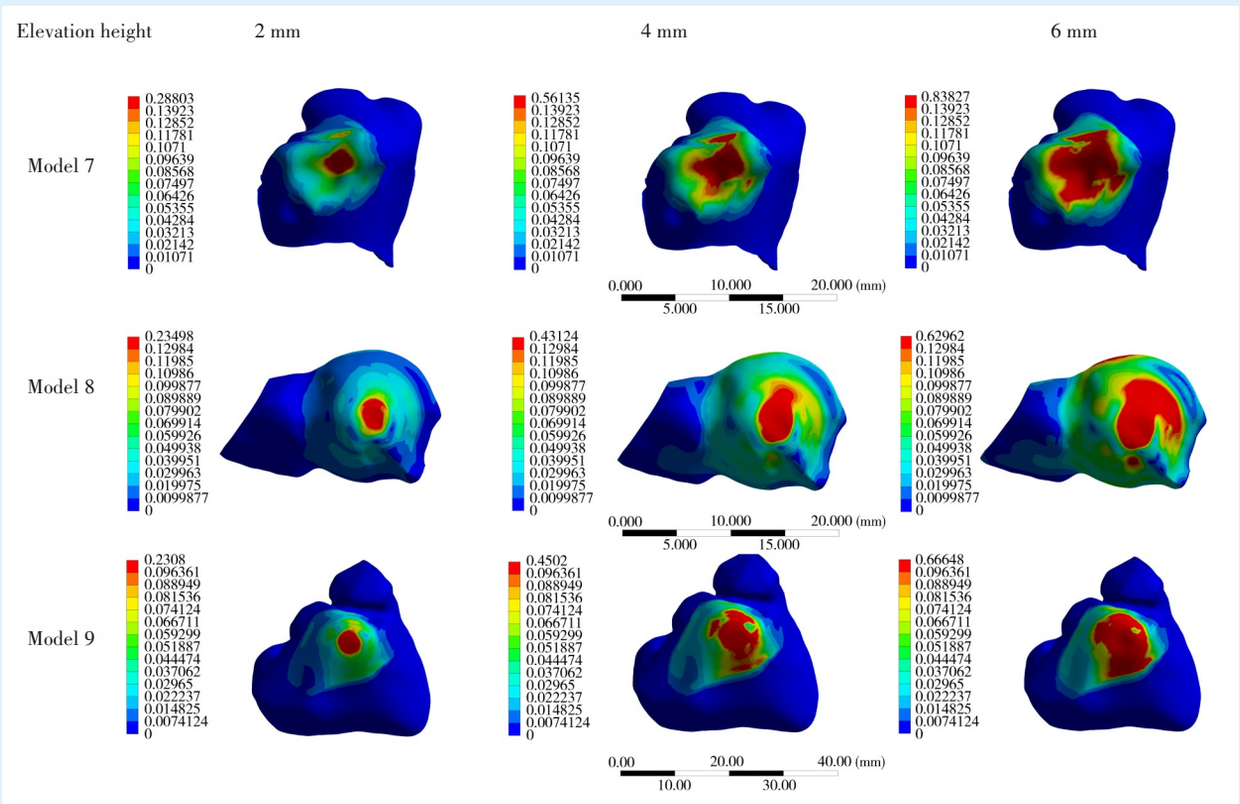
在本研究的预实验阶段，观察到当计算机模拟的提升高度超出6 mm时，由于上颌窦黏膜显著的形变特性，三维有限元分析的计算过程变得异常复杂且结果呈现不稳定性。内提升术的提升高度通常为3～5 mm，本研究模拟和分析上颌窦黏膜提升至6 mm以内的应力与位移情况，所得结果可用于解释常规内提升术的情况。但上述结果也说明三维有限元分析在模拟更复杂的口腔生物力学环境方面仍面临挑战。此外，本研究中纳入的模型数量有限，可能对实验结果带来潜在偏差，后续需进一步增加实验对象数量评估三维有限元分析模拟的准确性。本研究主要探讨窦底形态差异对黏膜生物力学特性的影响，黏膜厚度作为另一个重要的解剖因素，可在很大程度上影响自身的机械性能：生理性的黏膜增厚使黏膜更加坚韧，病理性增厚反而增加材料脆性。目前关于黏膜厚度变化对其机械力学性能影响的体外研究报道少，该领域亦可以作为进一步的研究方向，以更好地指导三维有限元分析的建模，从而提升预测的精确性。

【Author contributions】 Lin X performed the experiments, and wrote the article. Que GY, Liu J, Zhou Z performed the experiments, and revised the article. Zheng XH conceptualized the study and revised the article. All authors read and approved the final manuscript as submitted.

参考文献

[1] Sirinirund B, Rodriguez Betancourt AB, Scaini R, et al. Minimally invasive sinus augmentation: a systematic review[J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2025, 27(1): e13403. doi: 10.1111/cid.13403.

[2] Kadkhodazadeh M, Alimardani Y, Azadi A, et al. Clinical outcomes of implants placed with transcrestal maxillary sinus elevation: a systematic review and meta-analysis[J]. Br J Oral Maxillofac Surg, 2024, 62(8): 685-703. doi: 10.1016/j.bjoms.2024.05.006.



The number of nodes and elements in model 7 is 253 199 and 151 185; in model 8 it is 196 746 and 115 779; and in model 9 it is 280 733 and 165 574, respectively. Stress was diffused from the center to peripheral side as the elevation height increased. Stress distribution of the concave sinuses was uniform and symmetric

Figure 7　Equivalent stress distribution cloud map in the concave maxillary sinus at different elevation heights

图7　凹型上颌窦在不同提升高度下的等效应力分布云图

[3] Huang LR, Zheng XF, Feng ZR, et al. Hydraulic sinus floor elevation using advanced platelet-rich fibrin: a randomized clinical trial with two-dimensional radiographic results[J]. J Prosthodont Res, 2025, 69(2): 275-284. doi: 10.2186/jpr.JPR_D_24_00065.

[4] Enssi M, Karimi M, Etemadi A, et al. Digitally guided hydraulic crestal sinus floor elevation versus free-hand osteotome technique: a single-blinded randomized controlled clinical trial[J]. Clin Oral Implants Res, 2026, 37(2): 171-184. doi: 10.1111/clr.70062.

[5] Testori T, Tavelli L, Scaini R, et al. How to avoid intraoperative and postoperative complications in maxillary sinus elevation[J]. Periodontol 2000, 2023, 92(1): 299-328. doi: 10.1111/prd.12480.

[6] Lee CT, Choksi K, Shih MC, et al. The impact of sinus floor elevation techniques on sinus membrane perforation: a systematic review and network meta-analysis[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2023, 38(4): 681-696. doi: 10.11607/jomi.10048.

[7] Valentini P, Stacchi C. Prevention and management of intraoperative complications in maxillary sinus augmentation: a review [J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2025, 27(1): e13397. doi: 10.1111/cid.13397.

[8] Zheng X, Huang L, Huang S, et al. Influence of anatomical factors related to maxillary sinus on outcomes of transcrestal sinus floor elevation[J]. J Dent Sci, 2022, 17(1): 438-443. doi: 10.1016/j.jds.2021.07.023.

[9] Shao Q, Li J, Pu R, et al. Risk factors for sinus membrane perforation during lateral window maxillary sinus floor elevation surgery: a retrospective study[J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2021, 23(6): 812-820. doi: 10.1111/cid.13052.

[10] Deng Y, Tong C, Gao K, et al. Modified internal sinus elevation for patients with low residual bone height: a retrospective clinical study[J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2023, 25(3): 458-472. doi: 10.1111/cid.13204.

[11] Deng Y, Ma R, He Y, et al. Biomechanical analysis of the maxillary sinus floor membrane during internal sinus floor elevation with implants at different angles of the maxillary sinus angles[J]. Int J Implant Dent, 2024, 10(1): 11. doi: 10.1186/s40729-024-00530-5.

[12] French D, Nadji N, Liu SX, et al. Trifactorial classification system for osteotome sinus floor elevation based on an observational retrospective analysis of 926 implants followed up to 10 years[J]. Quintessence Int, 2015, 46(6): 523-530. doi: 10.3290/j.qi.a33935.

[13] Lin X, Xu S, Chen L, et al. Comparison of biomechanical characteristics of the schneiderian membrane with different transcrestal

sinus floor elevation techniques using three-dimensional finite element analysis[J]. BMC Oral Health, 2025, 25(1): 146. doi: 10.1186/s12903-025-05499-0.

[14] Niu L, Wang J, Yu H, et al. New classification of maxillary sinus contours and its relation to sinus floor elevation surgery[J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2018, 20(4): 493-500. doi: 10.1111/cid.12606.

[15] El-Anwar MW, Alawady MK, Abdelhamid HI, et al. Maxillary sinus assessment: a computed tomography analysis and classification[J]. Int Arch Otorhinolaryngol, 2025, 29(2): 1-6. doi: 10.1055/s-0044-1791728.

[16] Wang Z, Jia Q, Jiang HB, et al. The relation between morphology of maxillary sinus after augmentation in three classification methods and residual bone height: a retrospective study[J]. Int J Clin Pract, 2022, 2022: 1850012. doi: 10.1155/2022/1850012.

[17] Kumar VRA, Manivasakan S, Prabhu K, et al. Effectiveness of the implant stabilizing plate on the stress distribution around the implant placed immediately after maxillary sinus lifting: a finite element study[J]. J Indian Prosthodont Soc, 2025, 25(2): 138-143. doi: 10.4103/jips.jips_409_24.

[18] Yan X, Zhang X, Gao J, et al. Maxillary sinus augmentation without grafting material with simultaneous implant installation: a three-dimensional finite element analysis[J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2015, 17(3): 515-524. doi: 10.1111/cid.12254.

[19] Bordin D, Castro MB, Carvalho MA, et al. Different treatment modalities using dental implants in the posterior maxilla: a finite element analysis[J]. Braz Dent J, 2021, 32(1): 34-41. doi: 10.1590/0103-6440202103890.

[20] 宋雨姣, 孙晓军. 上颌磨牙牙周状况与上颌窦黏膜增厚的相关性研究[J]. 口腔疾病防治, 2025, 33(5): 368-376. doi：10.12016/j.issn.2096-1456.202440396.
Song YJ, Sun XJ. Correlation between periodontal status of maxillary molars and maxillary sinus mucosal thickening[J]. J Prev Treat Stomatol Dis, 2025, 33(5): 368-376. doi：10.12016/j.issn.2096-1456.202440396.

[21] Zimmo N, Insua A, Sinjab K, et al. Impact of sex, age, and season on sinus membrane thickness[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2018, 33(1): 175-180. doi: 10.11607/jomi.5924.

[22] Monje A, Diaz KT, Aranda L, et al. Schneiderian membrane thickness and clinical implications for sinus augmentation: a systematic review and meta-regression analyses[J]. J Periodontol, 2016, 87(8): 888-899. doi: 10.1902/jop.2016.160041.

[23] 邓引昕, 马攀. 不同尖端形态的种植体在上颌窦底黏膜不同剥离范围时窦底黏膜的生物力学分析[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2022, 23(4): 262-266, 309. doi: 10.19748/j.cn.kqxf.1009-3761.2022.4.005.
Deng YX, Ma P. Biomechanical analysis of maxillary sinus floor membrane during internal sinus floor elevation which was performed in different areas of sinus membrane dissection of implants with different tip shapes[J]. Chin J Prosthodont, 2022, 23(4): 262-266, 309. doi: 10.19748/j.cn.kqxf.1009-3761.2022.4.005.

[24] Maghami E, Moore JP, Josephson TO, et al. Damage analysis of human cortical bone under compressive and tensile loadings[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2022, 25(3): 342-357. doi: 10.1080/10255842.2021.2023135.

[25] Li B, Murakami N, Xie C, et al. Effects of tensile and compressive stress on bone resorption and formation parameters surrounding dental implants[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2025, 165: 106928. doi: 10.1016/j.jmbbm.2025.106928.

[26] Lin X, Li S, Zheng X, et al. Comprehensive sinus contour classification and its characteristics from radiographic examination: a cross-sectional study[J]. BMC Oral Health, 2024, 24(1): 1021. doi: 10.1186/s12903-024-04707-7.

[27] Shiomi A, Izumi K, Uenoyama A, et al. Cyclic mechanical pressure-loading alters epithelial homeostasis in a three-dimensional *in vitro* oral mucosa model: clinical implications for denture-wearers[J]. J Oral Rehabil, 2015, 42(3): 192-201. doi: 10.1111/joor.12254.

[28] Imai Y, Sato T, Mori S, et al. A histomorphometric analysis on bone dynamics in denture supporting tissue under continuous pressure[J]. J Oral Rehabil, 2002, 29(1): 72-79. doi: 10.1046/j.1365-2842.2002.00799.x.

[29] 王晓萌, 冯驭驰. 口腔咀嚼黏膜的生物力学研究进展[J]. 医用生物力学, 2022, 37(4): 771-776. doi: 10.16156/j.1004-7220.2022.04.030.
Wang XM, Feng YC. Biomechanical research progress on oral masticatory mucosa[J]. J Med Biomech, 2022, 37(4): 771-776. doi: 10.16156/j.1004-7220.2022.04.030.

[30] Zhuang X, Lin J, Dong H, et al. The transalveolar approach with the small segmentation method for inclined maxillary sinus floor elevation: a retrospective study[J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2024, 26(1): 216-225. doi: 10.1111/cid.13281.

[31] Rosano G, Vacher C, Lazaroo B, et al. Anatomy of the maxillary sinus and the role of CT scans in maxillary sinus augmentation surgery[J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2025, 27(2): e70019. doi: 10.1111/cid.70019.

（编辑　罗燕鸿，管东华）

Open Access
This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Copyright © 2026 by Editorial Department of Journal of Prevention and Treatment for Stomatological Diseases

官网