

上颌骨改良Le Fort I型截骨术的三维建模和术后咬合有限元分析

刘楚晴¹, 李阳², 毕绍洋³, 林阳阳⁴

(1. 大连医科大学口腔医学院, 辽宁 大连 116044; 2. 大连市口腔医院口腔颌面外科, 辽宁 大连 116021; 3. 天津大学机械工程学院固体力学系, 天津 300354; 4. 天津市口腔医院正颌外科, 天津 300041)

摘要 **目的** 根据CT扫描数据, 基于4种软件建立光滑的上颌骨三维几何模型, 模拟改良Le Fort I型截骨术及固定方案, 对患者术后咬合情况进行有限元分析。**方法** 使用Mimics软件初步处理CT图像, 建立STL模型。将模型导入Inspire Studio软件中, 建立光滑的PolyNURBS几何模型。使用SpaceClaim软件, 模拟手术截骨及钛板、钛钉固定方案。使用ANSYS Workbench软件, 对术后患者咬合情况进行三维有限元分析。**结果** 仿真结果显示, 在磨牙咬合状态下有限元模型的连接关系建立准确无误。在共计6 N的咬合力作用下, 钛板最大等效应力为73 MPa。**结论** 本研究采用的上颌骨建模和分析方法可获得适用于仿真分析的光滑几何模型, 有限元分析结果可以为各类正颌手术的固定方案提供参考。

关键词 上颌骨建模; 有限元分析; 改良Le Fort I型截骨术; 应力分布

中图分类号 R78 文献标志码 A 文章编号 0258-4646(2024)01-0046-05

网络出版地址 <https://link.cnki.net/urlid/21.1227.R.20240103.1617.018>

DOI: 10.12007/j.issn.0258-4646.2024.01.008

Three-dimensional modeling of modified Le Fort I osteotomy of the maxilla and finite element analysis of postoperative occlusion

LIU Chuqing¹, LI Yang², BI Shaoyang³, LIN Yangyang⁴

(1. Stomatology College, Dalian Medical University, Dalian 116044, China; 2. Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Dalian Stomatological Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116021, China; 3. Department of Mechanics, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 4. Department of Orthognathic Surgery, Tianjin Stomatological Hospital, Tianjin 300041, China)

Abstract **Objective** To establish a smooth three-dimensional (3D) geometric model of the maxilla based on CT data using four different software packages, to mimic the modified Le Fort I osteotomy and its fixation scheme, and to perform a finite element analysis of the postoperative occlusion. **Methods** CT data were preliminarily processed using Mimics software to produce an STL 3D model. The model was then imported into Inspire Studio software to create a smoothed PolyNURBS geometric model. SpaceClaim software was used to model the surgical osteotomy and fixation schemes. Finally, ANSYS Workbench was used to conduct a 3D finite element analysis simulating the patient's occlusion after surgery. **Results** The simulation results showed that the connection relationship of the finite element model was accurately established under the molar occlusion condition. Under a total occlusal force of 6 N, the maximum equivalent stress of the titanium plate was 73 MPa. **Conclusion** The maxillary modeling and analysis method used in this study can produce a smooth geometric model suitable for finite element simulation. The results of this study can provide reference for various fixation schemes in orthognathic surgery.

Keywords maxilla modeling; finite element analysis; modified Le Fort I osteotomy; stress distribution

上颌骨Le Fort I型截骨术是一种常用的正颌外科手术, 用于矫正各种类型的上颌骨畸形, 如上颌骨后缩、前突、垂直性发育不良或过长等^[1-2]。该手术的基本原理是在上颌骨的黏骨膜下进行水平

方向的截骨, 使上颌骨与中面部骨分离, 然后根据术前设计调整上颌骨的位置和角度, 并用钛板和螺钉固定。改良Le Fort I型截骨术在传统Le Fort I型截骨术的基础上改进了截骨方案, 增加了一段矩形截骨线, 其上缘不超过眶下孔水平, 左右位于上颌骨前壁, 使截骨线整体呈几字形。手术时应沿截骨线先后截开上颌窦前外侧壁、部分后壁和内侧壁, 并离断翼上颌连接, 游离松懈上颌骨段, 术中注意保护颌内动脉的翼腭段、腭降动脉及眶下神经血管

基金项目: 辽宁省自然科学基金 (20180550327)

作者简介: 刘楚晴 (2002-), 女, 本科在读。

通信作者: 李阳, E-mail: liyangkq@163.com

收稿日期: 2023-10-20

网络出版时间: 2024-01-04 19:35:17

束。相比于传统Le Fort I型截骨术,该术式增大了上颌骨前移的范围,增加了面中部的丰满程度,可以更好地改善患者面部容貌^[3]。

有限元分析是一种计算机模拟方法,可以预测结构和生物组织在机械负载下的应力分布和变形情况^[4]。该方法已经广泛用于生物医学工程领域,对于研究人体组织和器官的力学特性和功能有重要意义。近年来,有限元分析也被引入到正颌外科中,用于模拟上颌骨Le Fort I型截骨术后患者咬合时钛板和骨骼的应力变化,提高了手术的成功率^[5]。

本研究使用Mimics、Inspire Studio、SpaceClaim和ANSYS Workbench 4种软件,根据CT扫描数据,建立上颌骨三维模型。模拟改良Le Fort I型截骨术手术方案,对截骨术后患者的咬合情况进行有限元分析。与传统的基于CT扫描数据进行的三维建模方案相比,本研究使用的建模方法得到的模型表面更光滑,更易于修改,并且有限元分析结果能够准确反映截骨后咬合时骨骼的位移情况,从而为制定术后固定方案提供了参考依据。

1 材料与方法

1.1 数据获取

选取就诊于大连市口腔医院的一名19岁女性患者,该患者因龋病就诊,除第三磨牙外牙列完整,颌面部形态正常,无软硬组织疾病,无既往颌面部外伤史和手术史,无系统性疾病。本研究获得大连市口腔医院伦理委员会批准。取得患者本人知情同意后,使用KaVo 3D eXam CBCT(美国Envista公司)进行扫描,采集其颌面部骨骼和牙齿的CT断层影像,用于建模。

1.2 设备与软件

CT数据处理软件:Mimics 21.0软件(比利时Materialise公司),Inspire Studio 2020软件(美国Altair公司)。模型处理软件:SpaceClaim 2020 R1软件(美国ANSYS公司)。有限元分析软件:Workbench 15.0软件(美国ANSYS公司)。

1.3 方法

首先使用Mimics软件,根据CT扫描数据生成颌面部骨骼、牙齿的三维模型。然后使用Inspire Studio软件处理该模型,将其转变为适用于有限元分析的光滑几何模型。之后使用SpaceClaim在模型上模拟

改良Le Fort I型截骨术的截骨方案,并在适当的位置建立固定所需的钛板和钛钉模型。最后使用有限元分析软件ANSYS Workbench为模型添加物理参数,模拟施加咬合力,对骨骼及钛板、钛钉模型的位移和应力分布进行有限元分析。

1.3.1 Mimics软件处理CT扫描数据:为了对牙齿和骨骼的形貌进行准确仿真,需要根据真实患者的牙齿和骨骼形貌建立有限元模型。首先收集受试者上颌骨和牙齿的CBCT断层影像,导入Mimics软件,生成三维点阵图。通过调整HU阈值,将密度较小的软组织隐藏,初步获得面部牙齿和骨骼的三维模型,见图1。

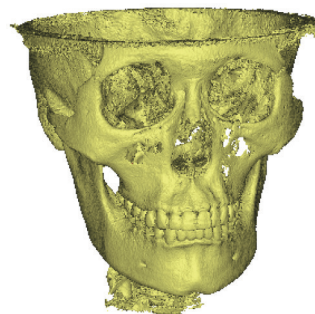


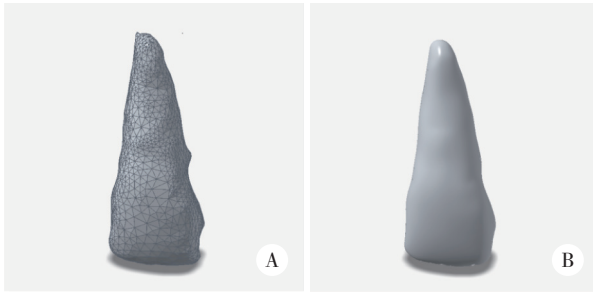
图1 经Mimics软件初步处理的CT扫描三维图

Fig.1 Three-dimensional CT image processed by Mimics

为了分析咬合中的受力情况,需在模型整体中分离上颌骨与上牙列。应用Mimics软件中Segment菜单下的功能,手动建立遮罩,根据CT图像中上颌骨与上牙列的位置,独立出各牙体与上颌骨的粗略模型。再经Smooth和Wrap命令处理,使模型光滑,获得基本符合原本生理形态的3D模型。将模型导出为STL格式,供下一步使用^[6]。

1.3.2 应用Inspire Studio软件建立基础三维模型:由Mimics软件获得的STL模型外表由三角面片构成,尚不够光滑,需使用Inspire Studio软件将其重构为具有光滑曲面的几何模型。在Inspire Studio软件中导入STL格式文件,利用fit命令,根据现有的三角形面网格形状创建PolyNURBS曲面(图2)。该功能最初用于将复杂结构的拓扑优化结果快速转换为PolyNURBS几何体,也同样适用于不规则的有机生物体建模的过程^[7]。

由于CT数据的精度限制以及建模过程中存在的人为误差,模型可能存在与实际不符的细节。Inspire Studio软件支持在光顺化后通过拖动Poly-

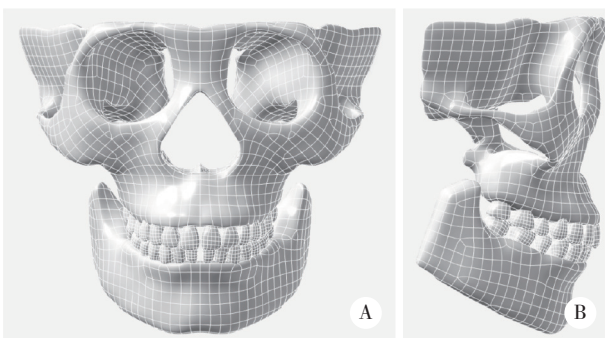


A, before reconstruction; B, after reconstruction.

图2 使用PolyNURBS重构前和重构后一颗中切牙的几何模型

Fig.2 Geometric model of a central incisor before and after PolyNURBS reconstruction

NURBS控制点的方式微调几何形状,在保持曲面连续性的基础上,使模型更贴合牙齿和骨骼的真实形态。最后进行几何渲染,获得可供仿真分析的颌面部硬组织三维模型(图3)。



A, frontal view; B, lateral view.

图3 重建完成的完整颅骨模型的正侧面观

Fig.3 Frontal and lateral views of reconstructed complete skull model

1.3.3 应用SpaceClaim软件模拟手术切割方案和建立连接钛板:将模型导入几何建模软件SpaceClaim,模拟改良Le Fort I型截骨术进行截骨。首先,在矢状面垂直截骨方向建立一个平面,以正对平面视角设计几字形截骨线,向下距牙根5 mm,向上不超过眶下孔水平,近中至梨状孔边缘,远中至上颌结节。将截骨线沿垂直平面方向拉动,形成穿越上颌骨模型的几字形曲面,在翼颌连接、鼻中隔等需要单独断离处各自建立曲面。使用上述建立的参考曲面将上颌骨几何体切开,经适当组合,将上颌骨截为沿改良Le Fort I型截骨线分割的上下两部分。

改良Le Fort I型截骨术的固定使用左右对称的4枚L型钛板,沿颌面部尖牙支柱和颧突支柱打入。在SpaceClaim中,依照实际型号为钛板和钛钉建

模,摆放在模型对应位置,使二者与上颌骨具备正确的位置关系。至此,完成改良Le Fort I型截骨术切割和固定的模拟(图4)。

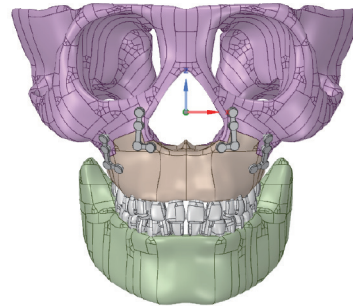


图4 三维模型模拟改良Le Fort I型截骨术的切割和固定方案

Fig.4 Three-dimensional model simulating the cutting and fixation of a modified Le Fort I osteotomy

1.3.4 应用ANSYS Workbench软件进行三维有限元分析:使用ANSYS Workbench软件对截骨后的咬合过程进行初步仿真分析。分析中使用的材料包括牙齿、牙槽骨、钛合金。其中,牙齿的弹性模量为19 600,泊松比为0.3;牙槽骨的弹性模量为1 730,泊松比为0.3;钛合金的弹性模量为110 000,泊松比为0.36^[8-9]。

在模型连接上,需要确保截开的两段上颌骨不直接发生连接,仅通过钛钉和钛板传递力和位移。在所有骨骼与钛钉相连处、钛钉与钛板相连处设置多点约束类型的绑定约束。牙齿与上颌骨牙槽突之间同样设置为绑定约束。牙齿间不进行连接。为减小计算量,创建钛钉与骨骼的连接时,Pinball region仅计入接触区域周围2 mm。由于钛板和钛钉是后续分析的重点对象,使用Sizing命令细化钛板和钛钉的网格尺寸,使分析结果更为精确^[10]。

在模型上端设置固定约束。按照咬合关系,在主要承担咬合功能的2颗第一磨牙各施加3 N指向牙槽骨方向的咬合力(图5),对钛板的应力和应变进行求解。

2 结果

2.1 位移结果与连接关系的验证

求解后,调出全模型位移云图验证连接关系(图6)。截下的骨块以钛板连接处为支点受力发生旋转,位移分布均匀,牙齿与骨骼、钛钉与骨骼间无相对滑动,截骨位置未发生接触,验证模型连接建

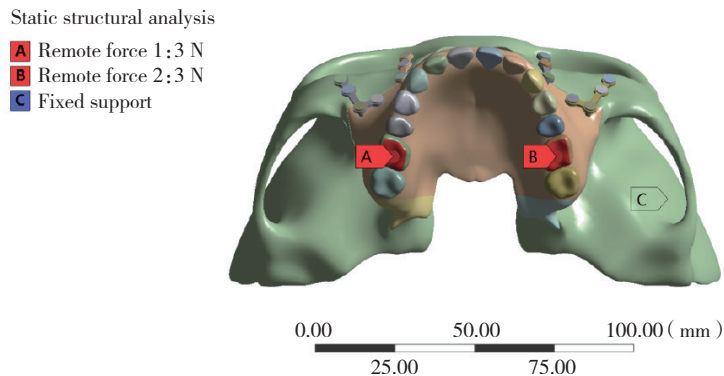


图5 咬合力的施加方式

Fig.5 Bite force application methods

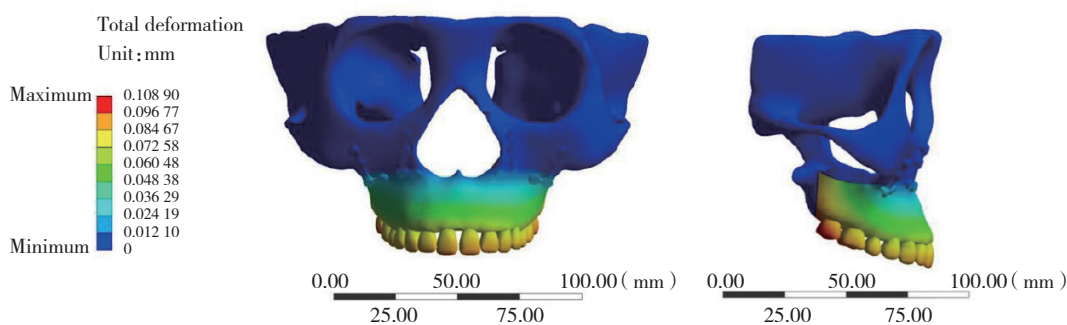


图6 施加共6 N咬合力后的位移云图

Fig.6 Displacement contour after 6 N of bite force applied

立无误。此时,上颌骨最大位移处位于第二磨牙远中尖,向后上方移动约109 μm ,处在安全范围内。

2.2 钛板应力结果

仅选取钛钉和钛板,调出应力云图(图7)。应力主要集中位置位于钛板中部临近截骨线处,应力的最大位置位于圆角边缘,约为73 MPa。

不同标号钛合金的弹性模量差异不大,约为110 GPa;但不同钛合金的屈服极限差异较大,范围

为270~400 MPa。一般认为,材料的工作应力不超过屈服极限的 1/2 时,疲劳寿命较高,在正常咬合次数下不会发生疲劳破坏。在本研究施加的6 N咬合负荷下,钛板仍有相当大的强度富余。

3 讨论

本研究基于CT图像,应用 Mimics、Inspire Studio、SpaceClaim和 ANSYS Workbench 4种软件,对改良的

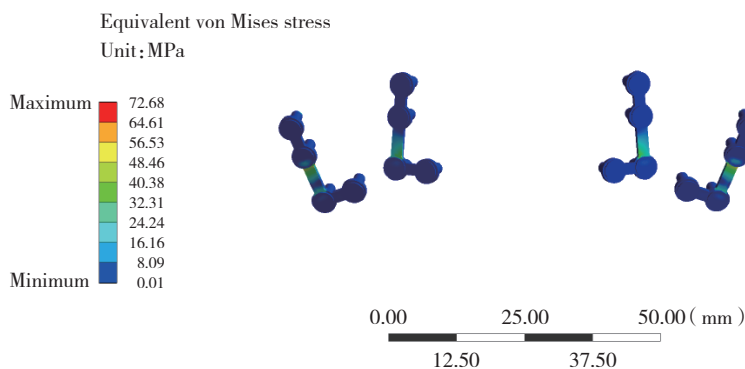


图7 施加共6 N咬合力后的钛钉钛板应力云图

Fig.7 Stress contour of titanium plate and titanium nail after 6 N of bite force applied

Le Fort I型截骨术术后咬合情况进行了建模分析,得到了咬合过程中骨块位移和固定钛板、钛钉应力分布情况。相比于其他上颌骨截骨方式,改良Le Fort I型截骨术为增加面中部突度采用了向上突出的几字形截骨线,使骨骼和固定钛板的受力更为复杂。本研究结果有望为改善患者的术后咬合提供一些参考。

与其他建模软件相比,Inspire Studio软件的建模方式具有易控制、易修改的优点。过去生物组织建模中常用的Geomagic等软件,虽然能拟合出光滑的由NURBS曲面构成的几何体,但不便于修改^[11]。而Inspire Studio创建的PolyNURBS几何体的最大特点之一就是在拟合生成光滑的曲面几何体后,还可以通过控制点、控制线等特征的修改来调整几何形貌,便于针对不够理想的形态进行修改,也可以保证关键几何结构在模型上能够真实表达。调整便捷的特性也为后续研究节约了成本,后续需要模拟一些形貌特征变化不大的生物组织时,只需在现有模型的基础上适当修改,不必重新建模。

在许多同类的仿真研究中,施加的咬合力最高达到100 N^[12]。考虑到Le Fort I型截骨术术后几周内患者以进食半流食为主,不会长时间使用较大的咬合力,本研究只使用了共6 N的咬合力,远小于咬合力的上限数值,以体现位移和应力的分布趋势为主。由于骨位移的旋转轴位于面前部截骨线位置,如果患者多用前后牙均匀咬合或优先用前牙咬合,骨块位移可进一步减小,应力分布也会更趋向均匀。在临床工作中,本研究结果有助于更加定量、直观地理解患者术后恢复期的咬合要求,引导患者遵医嘱进食,为骨骼愈合提供良好的环境。

综上所述,本研究为初步研究,重点在于建立光滑的上颌骨模型,并验证基于该模型模拟改良Le Fort I型截骨术手术方案的可行性。本研究仅模拟了截骨方案和截开后骨骼的连接关系,未考虑手术中骨骼移动后的真实位置,对钛板的弯折情况也未进行建模。本研究模拟的6 N咬合力为进软食所用的大概数值,后续研究将进一步探究不同种类食物所需的具体咬合力,以将仿真模型得到的定量结论更

好地用于患者的日常生活中。此外,对于本研究建立的上颌骨模型,后续研究还将其用于对比不同的截骨方案,并对更多咬合情况下钛板的应力分布状态进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 李阳,曲卫国,马卫东,等. 正颌外科手术矫治牙颌面畸形的临床回顾性研究[J]. 现代口腔医学杂志,2009,23(3):249-251. DOI: 10.3969/j.issn.1003-7632.2009.03.008.
- [2] 王雨墨,李继华. Le Fort I型骨切开术鼻唇形态控制的研究进展[J]. 口腔医学,2020,40(12):1133-1137. DOI:10.13591/j.cnki.kqyx.2020.12.015.
- [3] 蒋金宏,曲卫国,李阳,等. 改良Le Fort I型截骨术+面中部植骨双颌手术矫治伴面中部凹陷成人骨性Ⅲ类错殆畸形临床分析[J]. 中国美容医学,2021,30(10):112-117. DOI:10.3978/j.issn.2095-6959.2015.06.043.
- [4] 王荣洁,曾融生,朱凯. 应用有限元法预测正颌术后三维软组织形变的初步探讨[J]. 中国口腔颌面外科杂志,2012,10(2):90-95.
- [5] FUJII H, KUROYANAGI N, KANAZAWA T, et al. Three-dimensional finite element model to predict patterns of pterygomaxillary dysjunction during Le Fort I osteotomy [J]. Int J Oral Maxillofac Surg, 2017, 46(5):564-571. DOI:10.1016/j.ijom.2016.12.009.
- [6] 满斌,傅波,白林,等. 基于4种软件的牙周病患者牙齿建模和受力分析[J]. 医用生物力学,2017,32(5):454-457. DOI:10.16156/j.1004-7220.2017.05.010.
- [7] BI S, GUO Z, ZHANG X, et al. Anchorage effects of ligation and direct occlusion in orthodontics: a finite element analysis [J]. Comput Methods Programs Biomed, 2022, 226: 107142. DOI: 10.1016/j.cmpb.2022.107142.
- [8] HUANG SF, LO LJ, LIN CL. Biomechanical optimization of a custom-made positioning and fixing bone plate for Le Fort I osteotomy by finite element analysis [J]. Comput Biol Med, 2016, 68:49-56. DOI: 10.1016/j.combiomed.2015.10.015.
- [9] LI J, XIE Q, LIU X, et al. Biomechanical evaluation of Chinese customized three-dimensional printed titanium miniplate in the Le Fort I osteotomy: a finite element analysis [J]. Heliyon, 2022, 8(12): e12152. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e12152.
- [10] 薛燕青,阎旭. 固位结构的位置与基部宽度对个性化根形种植体影响的三维有限元分析[J]. 中国实用口腔科杂志,2023,16(4):427-433. DOI:10.19538/j.kq.2023.04.009.
- [11] YASIN GÖNDER H, MOHAMMADI R, HARMANKAYA A, et al. Investigation of the effects of adhesive materials of different types and thicknesses on dental tissue stress via FEM analysis [J]. Biomed Res Int, 2022, 2022: 8493909. DOI: 10.1155/2022/8493909.
- [12] ERKMEN E, ATAÇ MS, YÜCEL E, et al. Comparison of biomechanical behaviour of maxilla following Le Fort I osteotomy with 2-versus 4-plate fixation using 3D-FEA: part 3: inferior and anterior repositioning surgery [J]. Int J Oral Maxillofac Surg, 2009, 38(2): 173-179. DOI: 10.1016/j.ijom.2008.10.006.

(编辑 陈 姜)