

下颌骨重建个性化修复体暴露原因的有限元分析

李鹏¹ 邵小云¹ 李燕玲¹ 黄达鸿¹ 曾华江² 汤炜^{3*}

(1. 佛山科学技术学院附属口腔医院/佛山市口腔医院 广东 佛山 528000;

2. 佛山市智能臻德齿科有限公司 广东 佛山 528000;

3. 四川大学华西口腔医学院, 创伤整形外科 四川 成都 610000)

[摘要] **目的:**利用有限元法分析个性化修复体重建单侧下颌骨缺损的应力应变分布情况,探讨个性化修复体术后软组织暴露的生物力学因素。**方法:**收集2008年9月~2011年9月行个性化修复体重建单侧下颌骨缺损术后出现软组织外露病例,共计3例。重新获得患者CT数据,利用MIMICS及Geomagic软件建立患者下颌骨及个性化修复体的三维有限元模型。根据实际螺钉固位情况及患者咬合工况,在ANSYS14.0软件中计算重建后3D模型的应力应变分布。**结果:**建立的有限元模型能精确分析修复体和颌骨的应力应变分布情况,修复体的应变最大区域与其临床外露的部位基本一致。**结论:**个性化修复体术后外露与总应变分布有关,利用三维有限元分析法可发现修复体的高应变区域,为修复体外形的优化设计提供理论支持。

[关键词] 个性化修复体 下颌骨缺损 有限元分析

[文献标识码] A **[文章编号]** 1671—7651(2018)04—0424—04

[doi] 10.13701/j.cnki.kqxyj.2018.04.020

Finite Element Analysis on Exposure of Individual Endoprosthesis for Mandibular Reconstruction. LI Peng¹, SHAO Xiao-yun¹, LI Yan-ling¹, HUANG Da-hong¹, ZENG Hua-jiang², TANG Wei³. 1. School of Stomatology, Foshan University, Foshan 528000, China; 2. Foshan Perfect Zhende Denture Co., Ltd, Foshan 528000, China; 3. Department of Oral and Maxillofacial Surgery, West China College of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, China.

[Abstract] **Objective:** To explore stress and strain distribution of individual endoprosthesis for the reconstruction of unilateral mandibular defect with finite element method, and discuss the biomechanical factors of postoperative exposure of individual endoprosthesis. **Methods:** From September 2008 to September 2011, there were three cases of implant exposure after mandibular reconstruction. The CT data of patients were reacquired, and three-dimensional finite element model of the mandible and implant was established in MIMICS and Geomagic softwares. According to the actual condition of screw fixation and occlusion of patients, stress-strain distribution of the reconstruction model was calculated in ANSYS14.0 software. **Results:** The finite element model can accurately analyze the stress-strain of reconstruction model of mandibular defect. The maximum strain area of implant is basically located nearby the exposed parts. **Conclusion:** The postoperative exposure of individual endoprosthesis is correlated with the strain distribution. The finite element analysis can discover strain clusters and provide theoretical support for optimization design of the implant.

[Key words] Individual endoprosthesis Mandibular reconstruction Finite element analysis

下颌骨节段性缺损多由严重外伤、感染、肿瘤及骨性关节炎强直等原因所造成,传统修复方法包括血管化或非血管化骨移植及各种骨替代品植入等^[1]。

数字化技术设计的个性化修复体(individual endoprosthesis, IEP)具有快速性、准确性以及易于制作复杂实体等优势,可用于修复各种类型的颌骨缺损。理想的IEP既要很好的恢复患者面形,同时能在承受咀嚼力时不出现断裂或外露,长期、稳定的行使骨替代体的作用。众多文献报道了IEP重建颌骨缺损的临床应用,但修复体断裂及外露仍是这一技术的主要并发症^[2,3]。

基金项目 国家自然科学基金(编号:51672276)

佛山科学技术学院学术基金项目

作者简介 李鹏(1978~),男,四川江油人,博士,主治医师,主要从事数字化技术辅助颌面修复研究。

* 通讯作者 汤炜, E-mail: mydrtw@vip.sina.com

三维有限元分析法 (finite element analysis, FEA) 是工程及材料等领域一种常用的理论力学分析方法, 也广泛应用于生物力学的研究中^[4,5]。本研究利用 FEA 分析 IEP 重建后下颌骨的生物力学特性, 明确修复体外露与其应力应变分布情况之间的关系, 减少术后并发症的发生, 延长修复体的使用寿命, 为优化设计各类 IEP 及调整其生物力学分布提供一种可靠的、实用的方法。

1 材料与方 法

1.1 一般资料 2008 年 9 月~2011 年 9 月, 四川大学华西口腔医院创伤整形外科利用钛合金 IEP 重建各种类型下颌骨缺损患者 20 余例, 修复体外露与断裂为主要并发症。术后随访 4 年期间, 共计发生术后修复体外露 3 例, 其中口内暴露 1 例, 口外暴露 2 例, 暴露部位均位于颏部, 即修复体与下颌骨连接的部位, 术式均为颌骨肿瘤行单侧下颌骨切除术并同期行钛合金 IEP 重建下颌骨(图 1、图 2)。收集 3 例患者的所有临床诊疗资料进行 FEA, 根据分析结果优化 IEP。



图 1 修复体外露(白箭头示 IEP 暴露部分)
Fig. 1 Postoperative exposure of the implant (white arrow indicate).

图 2 树脂头模和钛合金 IEP
Fig. 2 Resin model and titanium alloy IEP.

1.2 数据处理及 3D 模型的建立 收集患者术前面部 CT 扫描数据 (Philips /Brilliance 64, Netherlands), 扫面范围从颅顶到颏部, 以眶耳平面为基准平面。将 DICOM 格式的 CT 数据输入计算机, 采用 MIMICS 软件对患者的 CT 数据进行处理和转换, 通过设定阈值范围 (280—3071HU) 分离骨组织与软组织, 重建患者颅骨模型, 再进一步手动去除 IEP 模型数据, 重建缺损的下颌骨模型。利用我院自行研制的 3D 打印机, 打印患者头颅模型(如图 2), 模拟 IEP 就位后颌骨重建情况。

1.3 有限元模型的建立 患者钛合金 IEP 由北京金马飞公司设计制作, 将 IEP 模型数据及单侧缺损

下颌骨模型以 STL 格式导入 ANSYS 14.0 有限元分析软件, 通过模拟实际手术中螺钉形态和放置位置, 再以手工和自动方式对模型进行网格划分, 螺钉模型行细分网格, 建立缺损下颌骨与 IEP 装配后的 FEA 生物力学理论分析 3D 模型^[6,7]。根据体网格密度的敏感性分析调整网格大小和密度(如图 3)。

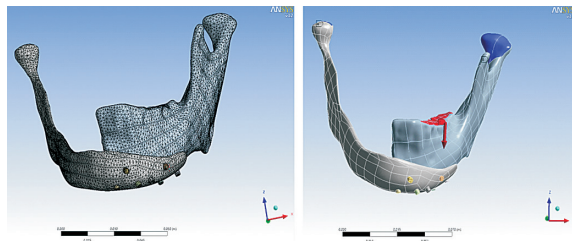


图 3 网格划分效果图
Fig. 3 The model of grid partition.

图 4 约束条件及施加载荷
Fig. 4 The constraint and load condition.

1.4 约束条件及载荷 假设模型所有组织均为连续、均质和各向同性的线弹性材料。将下颌骨重建模型的双侧髁突顶端处所有节点予以全自由度的刚性约束, 阻止下颌骨位移。由于模型的一侧下颌骨缺损, 分析时模拟正常人咬合工况, 于健侧后牙区施加与颌平面垂直方向的 150 N 载荷(如图 4)。以上前处理完成后, ANSYS14.0 软件开始计算并得出应力应变分布情况。

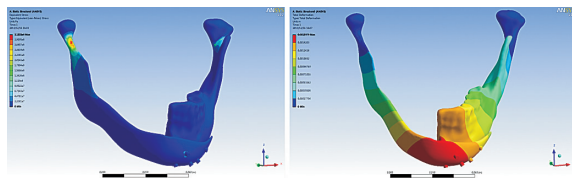


图 5 应力集中于髁突颈部
Fig. 5 Stress concentration on the condylar neck.

图 6 最大形变部位位于颏部
Fig. 6 Maximum deformation located in the chin.

2 结果

根据患者 CT 数据、IEP 数据和实际使用的固位螺钉, 成功的建立了 3 例钛合金 IEP 重建单侧下颌骨缺损的三维有限元分析模型, 所建模型具有高度的几何相似性。体网格密度的敏感性分析结果显示: 每个模型最终所划分的网格密度对应应力数值影响极小, 说明体网格密度均匀合理, 模型的总节点数约为 150000 个, 总单元数约为 80000 个。

加载后, 计算得出 IEP 重建后下颌骨整体模型的生物力学分布情况如图 5、图 6 所示。3 例分析结果显示出较为明显的一致性: 垂直咬颌状态下, 应力最集中区位于 IEP 髁突颈部, 约 300 MPa。其次为

IEP 升支前缘,其应力最大值约 50 MPa,钛钉约为 200 MPa,此结果与临床常见的断裂和松动部位一致;模型应变的最大部位位于下颌骨颏部,即 IEP 与下颌残端的连接部位,与临床实际中 IEP 最先出现暴露的部位一致。应力应变在健侧下颌骨和 IEP 的分布状态总体呈现不对称性,推测与两者材质相差悬殊有关。由以上生物力学分析可以推断出:形变过度集中及应力分布不均是导致术后出现 IEP 外露及断裂的主要原因。

3 讨论

随着医学影像处理、3D 打印及医学软件等计算机辅助医学技术的发展,钛合金材质 IEP 已从基础研究过渡到临床应用研究,并取得了一定的临床效果。目前,颌骨缺损修复重建的金标准仍为“血管化自体骨组织移植”,但其仍然存在骨塑性困难、面部外形恢复不理想、供区创伤大、遗留不同程度的畸形及功能障碍等缺陷。IEP 技术的出现,为颌面骨缺损的修复重建提供了另外一种选择。但随着 IEP 在临床上的广泛应用,其技术缺点也逐渐显露出来,如修复体软组织暴露、疲劳断裂和螺钉松动等^[6]。FEA 已经成为解决口腔医学中生物力学问题的一种常用手段,如桩核及牙折的风险评估、牙种植体、义齿修复设计及正畸中牙齿移动的应力分布等^[8~12]。本研究将 FEA 法应用在 IEP 重建下颌骨缺损的生物力学分析中。

通过对 IEP 断裂患者重建后的模型进行生物力学分析,优化并重新设计植体外形及钛钉固位位置,取得了较好的颌骨修复重建效果^[6,13~18]。本研究也得出了相同的研究结果:靠近骨断端的牙槽嵴方向的螺钉受力与形变最大,相应的螺钉孔部位下颌骨也是应力最集中的区域,这提示在临床应用中应防止该部位螺钉的松脱及断裂等情况的发生,可通过预备钉道、改良螺钉外形、选择贯穿双层皮质的长螺钉等措施预防。本研究还显示重建下颌在功能运动时颏部形变最大。人每天进行上万次张口运动,颌骨与附着软组织同时运动,而植体较大的形变使得该区软组织附着张力过大且极不稳定,严重时会造成局部软组织感染,最终导致植体外露。通过对 3 例患者的临床观察,植体最先暴露部位均位于下颌骨颏部附近,暴露范围逐渐增大,最终导致重建手术失败。本研究认为:在术前有必要对 IEP 模型进行三维有限元分析,结合颌骨缺损个性化修复的特点,及时发现植体的应力高度集中区并调整形变最大部位,延长修复体的使用寿命,提高修复重建效

果。

本研究分析单侧钛合金 IEP 重建颌骨缺损的力学特性,多数修复体与下颌骨残端行单端固定。尽管术中嚼肌、翼内肌可通过缝合复位包绕下颌角而部分地对抗修复体的重力性下沉,但因修复体喙突结构的省略,使得颞肌、蝶下颌韧带、翼下颌韧带及茎突下颌韧带等下颌骨悬吊作用的组织无法与植体连接,从而丧失对抗下沉的作用。术后患者在张口运动及咀嚼时,修复体以及下颌骨残端会因受力而发生变形^[19]。

与正常下颌骨相比,在健侧下颌骨后牙区垂直加载咬合力后,下颌骨髁突颈部、升支及钛钉周围应力明显增大,说明 IEP 使下颌骨应力分布发生了变化。可能是由于修复体弹性模量高于正常下颌骨,且修复体体积明显小于正常下颌骨,造成了局部应力过度集中。修复体与下颌骨的接触面及修复体的形态均与修复体的应力分布有关^[20],也提示在设计 IEP 时需充分考虑重建后颌骨的生物力学问题,通过优化设计分散应力,从而避免术后出现断裂。对于钛钉周围出现应力集中的情况,已有文献报道方形固位钛钉可有效的缓解应力的过度集中^[21]。IEP 其余部分与下颌骨相近,说明其在恢复下颌骨的完整、连续性中起到了良好作用。

相信在不久的将来,随着相关生物材料学、快速成型及数字化加工技术的不断完善,IEP 技术将成为颌骨缺损畸形的一种主要修复方案。而术前进行有限元理论力学分析,是避免术后 IEP 断裂、暴露及螺钉松动等并发症,延长其使用寿命的一种有效的、必要的流程,尤其对于大范围颌骨缺损的病例。

参考文献

- [1] Goh BT, Lee S, Tideman H, et al. Mandibular reconstruction in adults: a review [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2008, 37(7): 597-605
- [2] 鄢荣曾, 骆丹媚, 秦晓宇, 等. 3D 打印制作个性化下颌骨三维网状修复体支架数字化建模方法的研究[J]. *中华口腔医学杂志*, 2016, 51(5): 280-285
- [3] 张云绮, 贾保军, 敖建华, 等. 3D 打印技术在下颌骨缺损修复中应用的初步临床研究[J]. *口腔医学研究*, 2016, 32(5): 517-520
- [4] 李鹏, 梁瑞, 申龙朵, 等. 应用 Mimics 和 ANSYS 软件建立下颌骨三维有限元模型的方法学研究[J]. *实用口腔医学杂志*, 2012, 28(6): 709-713
- [5] 刘峰, 黄迪炎, 马杰, 等. 下颌骨缺损钛重建板修复的生物力学分析[J]. *中国组织工程研究*, 2010, 14(35): 6504-6507
- [6] Li P, Shen L, Li J, et al. Optimal design of an individual endoprosthesis for the reconstruction of extensive mandibular

- defects with finite element analysis [J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2014, 42 (1) : 73-78
- [7] Li P, Tang Y, Li J, et al. Establishment of sequential software processing for a biomechanical model of mandibular reconstruction with custom-made plate-computer methods and programs in biomedicine [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2013, 111(3) : 642-649
- [8] Roesler CRM, Horn FJ, Moré ADO, et al. A biomechanical analysis of titanium miniplates used for treatment of mandible condylar fracture with the finite element method [J]. *J Med Imag Health Info*, 2014, 4(1) : 106-112
- [9] 甄恩明, 吴昌敬, 邵军. 双侧上颌骨缺损颧种植体修复的有限元探讨[J]. *中国口腔种植学杂志*, 2016, 21(3) : 107-110
- [10] 肖燕, 沈凯奇. 3D 打印纤维桩修复不同形态根管的有限元分析[J]. *口腔医学研究*, 2017, 33(3) : 273-277
- [11] 李晓娜, 刘洋, Hong Guan. 不同临床设计的 ERA 附着体义齿修复下颌牙列游离端缺损的三维有限元分析[J]. *实用口腔医学杂志*, 2017, 33(1) : 95-99
- [12] 姚春燕, 张伟, 李矿伟, 等. 基于有限元分区式多孔种植体设计研究[J]. *口腔医学研究*, 2017, 33(9) : 913-915
- [13] 龚振宇, 李国华, 许瑞杰, 等. 下颌骨缺损个体化修复体的应力分析与优化设计[J]. *中国组织工程研究*, 2011, 15(39) : 7242-7246
- [14] Ow A, Tan W, Pienkowski L. Mandibular reconstruction using a custom-made titanium prosthesis: a case report on the use of virtual surgical planning and computer-aided design/computer-aided manufacturing [J]. *Craniomaxill Trau Recon*, 2016, 9(3) : 246
- [15] Yamada H, Nakaoka K, Sonoyama T, et al. Clinical usefulness of mandibular reconstruction using custom-made titanium mesh tray and autogenous particulate cancellous bone and marrow harvested from tibia and/or Ilia [J]. *J Craniofacial Surg*, 2016, 27(1) : e168-e169
- [16] Chen YD, Guo-Qiang MA, Shang DH, et al. Biomechanical analysis of mandible based on ABAQUS [J]. *J Northeastern University*, 2014, 35(3) : 423-428
- [17] Pinheiro M, Alves JL. The feasibility of a custom-made endoprosthesis in mandibular reconstruction: Implant design and finite element analysis [J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2015, 43(10) : 2116-2128
- [18] Chanchareonsook N, Tideman H, Lee S, et al. Mandibular reconstruction with a bioactive-coated cementless Ti6Al4V modular endoprosthesis in *Macaca fascicularis* [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2014, 43(6) : 758-768
- [19] Dahake S, Kuthe A, Kulkarni S, et al. Finite element analysis of customized implant in mandibular reconstruction after tumor resection with and without using customized surgical osteotomy guide [J]. *Int J Med Robot*. 2018, 14(1)
- [20] Xu X, Luo D, Guo C, et al. An individually designed custom-made mandibular condyle prosthesis using selective laser melting: finite element analysis [J]. *Inter J Oral Maxillofac Surg*, 2017, 46(1) : 239
- [21] Wong RC, Tideman H, Merckx MA, et al. Review of biomechanical models used in studying the biomechanics of reconstructed mandibles [J]. *Inter J Oral Maxillofac Surg*, 2011, 40(4) : 393
- [收稿日期: 2017-11-13] (本文编辑 李四群)

《口腔疾病防治》杂志征稿及征订启事

《口腔疾病防治》是由广东省口腔医院、广东省牙病防治指导中心主办,中南大学湘雅口腔医学院、郑州大学口腔医学院、南昌大学口腔医学院、重庆医科大学口腔医学院、福建医科大学口腔医学院等五所大学协办,月刊, CN44-1724/R, ISSN2096-1456。主要报道国内外口腔医学研究新进展和口腔疾病防治新成果、新技术、新经验,服务口腔疾病预防治疗领域学术交流和口腔疾病防控工作。

本刊图随文走、全铜版纸彩色印刷,设有专家论坛、专家述评、专栏论著、基础研究、临床研究、防治实践、病例报告、综述等栏目。其中含有省级以上基金优秀论文录用后可 3 个月内快速发表。

本刊官网及投稿网址为 <http://www.kqjbfz.com>, 本刊不收取审稿费, 本刊没有授权或委托任何其他网站受理作者投稿, 谨防诈骗。欢迎广大读者订阅。全国各地邮局均可订阅, 邮发代号 46-225。每月 20 日出版, 定价为每册 5.00 元, 全年 60 元。

如错过邮局订阅时间, 可直接向编辑部订购。请将款项汇入开户银行: 广州市建行昌岗路支行, 账号: 44001430402050202779, 户名: 广东省口腔医院, 并且将订阅者的邮政编码、详细地址、姓名、订阅年度、份数及汇款回执扫描件发送至本刊邮箱 (kqjbfz@126.com)。编辑部电话: 020-84403311, 传真: 020-84445386, Email: kqjbfz@126.com。