

两种上颌无牙颌种植固定修复方案的有限元分析

木志翔 刘婷 陈陶 王超 黄元丁*

(重庆医科大学附属口腔医院, 口腔疾病与生物医学重庆市重点实验室,
重庆市高校市级口腔生物医学工程重点实验室 重庆 401147)

[摘要] 目的:应用有限元分析法从生物力学角度比较以 4 颗种植体支持的两种固定修复方案的优劣。方法:建立方案模型:常规组模型为临床 all-on-4 方案,即 2 颗种植体垂直植入上颌骨的侧切牙区,另 2 颗种植体倾斜 45° 植入第二前磨牙区;而改良组模型与前者区别是在第二前磨牙区应用两颗短植体的垂直植入取代前者的倾斜植入。随后通过加载不同的载荷条件(条件一:倾斜载荷于切牙区;条件二:倾斜载荷于磨牙区)并进行有限元分析。结果:在两种载荷条件下,常规组及改良组中上颌骨及种植体的应力峰值均未超过其屈服强度。但在颌骨上,相较于改良组,常规组显示出更为集中的应力分布。结论:两种方案均可用于无牙颌上颌骨的修复重建。与常规 all-on-4 方案相比,改良组在上颌骨上表现出更为理想的 von-Mises 应力分布。上述结果为种植支持式全口固定修复方案的制定提供了生物力学角度的参考。

[关键词] all-on-4 短植体 倾斜植体 有限元分析

[文献标识码] A **[文章编号]** 1671—7651(2019)10—0931—05

[doi] 10.13701/j.cnki.kqxyj.2019.10.006

Finite Element Analysis of Two Fixed Prosthesis Treatment Concepts in Atrophic Maxilla. MU Zhixiang, LIU Ting, CHEN Tao, WANG Chao, HUANG Yuanding*. *Chongqing Municipal Key Laboratory of Oral Biomedical Engineering of Higher Education, Chongqing Key Laboratory of Oral Diseases and Biomedical Science, Affiliated Stomatological Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 401147, China.*

[Abstract] **Objective:** To compare two fixed prosthesis treatment concepts supported by four implants in an atrophic maxilla. **Methods:** Two different treatment concept models were constructed. The conventional group was two mesial vertical implants in the lateral incisor regions and two distal tilted (45°) implants in the second premolar regions of the maxilla. The modified group was two mesial vertical implants in the lateral incisor regions and two short vertical implants in the second premolar regions of the maxilla. Numerical simulation was performed under two loading types. **Results:** Under the first loading type, the conventional group showed a higher stress concentration than the modified group in the bones. For the implants, the peak of von-Mises stress of the conventional group was lower than that of the modified group. Under the second loading type, the conventional group showed higher stress concentrations than the modified group, either on the bones or on the implants. **Conclusion:** Both treatment concepts can be applied in edentulous maxilla. Compared to the conventional group, the modified group can transmit less occlusal force to the supporting tissues.

[Key words] all-on-4 short implant tilted implant finite element analysis

基金项目 国家自然科学基金青年项目(编号:31100690)
重庆市卫生计生委面上项目(编号:2017MSXMD73)
重庆高校创新团队建设计划资助项目(编号:
CXTDG201602006)
重庆市高校市级口腔生物医学工程重点实验室资助项目
(渝教科[2015]55号)
重庆医科大学附属口腔医院科研培育项目
(PYM201605)

作者简介 木志翔(1993~),男,浙江人,硕士在读,研究方向:口腔种植学。

* 通信作者 黄元丁, E-mail: huangyd@hospital.cqmu.edu.cn

上颌无牙颌的全口种植固定修复在口腔领域颇具挑战。一方面,上颌骨存在复杂的解剖结构,例如鼻窝和上颌窦,增加手术难度;另一方面,缺牙后颌骨的废用性吸收及上颌窦气化限制种植位点的选择^[1]。上述原因导致术者不得不引入包括上颌窦底提升术^[2]、Onlay 植骨等复杂的骨增量手术,在增加治疗费用、延长治疗周期的同时导致最终的修复效果不可预期。

为避免复杂的骨增量手术,并充分利用患者现

表 1 种植体及基台属性

Tab. 1 The locations and characteristic of the implants and abutments

组别	种植位点	种植角度	种植体属性	基台属性
常规组	侧切牙	垂直	Nobel Speed Groovy 11.5×4.1	常规基台 4.1 mm×4.0 mm
	第二前磨牙	倾斜 45°	Nobel Speed Groovy 13.0×4.1	30°角度基台 4.1 mm×4.0 mm
改良组	侧切牙	垂直	Nobel Speed Groovy 11.5×4.1	常规基台 4.1 mm×4.0 mm
	第二前磨牙	垂直	Nobel Speed Groovy 7.0×5.0	常规基台 5.0 mm×4.0 mm

存骨量, PMaló 等人提出 all-on-4 方案。该方案仅通过 4 颗种植体支持(2 颗种植体垂直植入前牙区, 另 2 颗种植体斜行植入后牙区)即可完成对上颌骨无牙颌的固定修复。Karen 等人对 all-on-4 方案进行前瞻性研究, 结果显示该方案中种植体具有较高留存率^[3]。然而, 倾斜植入的位点及方向选择必须基于可靠的影像学数据及手术导航系统, 因此该方案存在一定的技术敏感性。可喜的是近期的临床研究证实, 在骨量不足情况下, 应用短植体同样具有较高留存率^[4]。考虑到相对较低的技术敏感性, 有学者提出是否可用短植体替代 all-on-4 中的倾斜植体从而达到同样良好的预后? 然而目前尚无关于两种方案预后的长期随访和比较。

目前, 以生物力学为基础的有限元分析广泛应用于口腔医学领域。相较于实验性应力分析, 有限元分析不易受到样本差异的干扰, 对于上述涉及应力分布相关的临床方案的优劣能够进行有效、客观地模拟和预测^[5]。当前, 涉及种植体支持式固定全口修复的有限元分析的热点问题依然是 all-on-4 方案中斜行植入植体及相应基骨的应力分布, 对于改良方案中短植体的临床可行性和其生物力学行为尚不得而知^[6]。此外, 先前对于 all-on-4 方案的生物力学研究大多仅施加磨牙区咬合力, 而忽略前牙区负载^[7]。简单地将力加载于磨牙区不足以模拟常规咀嚼运动所包含的切割、压碎和碾磨等生理情况, 而这种载荷条件的考虑不足也可能会对相应的应变分布结果带来影响。

针对上述可能存在的问题, 本研究对上颌无牙颌拟进行全口种植固定修复的患者, 分别建立两种方案模型, 即常规 all-on-4 模型及使用短植体取代颌骨远中倾斜植入植体的改良 all-on-4 模型。随后, 采用不同的咬合加载并分析以上两种方案中种植体及颌骨的生物力学行为。研究旨在为临床术者行上颌无牙颌种植体支持式固定全口修复的方案抉择提供生物力学角度的参考。

1 材料与方法

1.1 模型建立 通过锥形束计算机断层扫描

(CBCT, Sirona, 德国) 获得上颌牙列缺失患者影像学数据。同时使用扫描仪(3shape, 丹麦)扫描患者目前佩戴的活动义齿。所选患者 CBCT 显示上颌骨废用性吸收及一定程度的上颌窦气化。随后基于 Silva 等人文献方法对颌骨及修复体模型进行修改和完善^[8]。

鉴于 Maló 在提出 all-on-4 方案时推荐使用 Nobel 种植体^[9], 本研究利用 Solidworks 2014(Dassault Systemes, 法国) 建立 Nobel 种植体及相应固体的模型。随后虚拟临床现实, 将种植体模型按设计位点固定于上颌骨模型。根据前述方案, 分别建立常规 all-on-4 组及改良 all-on-4 组模型。种植体及基台的位置、特征如表 1 和图 1 所示。

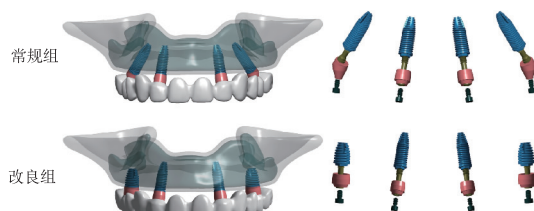


图 1 常规组和改良组模型

Fig. 1 The models of the conventional group and the modified group.

1.2 网格划分和材料属性设置 将模型导入 ANSYS Workbench 17.0(ANSYS, 美国)中以生成网格并定义材料属性。采用四面体元件对模型进行网格划分。材料属性如表 2 所示。

表 2 材料属性

Tab. 2 Material Properties of models

模型	杨氏模量/MPa	泊松比
密质骨	13700	0.300
松质骨	1370	0.300
钛	110000	0.350
修复体	210000	0.310

1.3 接触和载荷条件设置 种植体被认定为完全骨结合^[10]; 皮质骨与松质骨设置为“固定”; 修复体和基台间界面亦设置为“固定”。在 ANSYS Workbench 17.0 中设置两种载荷条件, 其一: 在双侧中切牙上加载与切牙长轴呈 45° 的 150N 以模拟前牙

的切割运动^[11]；其二：在双侧后牙区域加载与颊侧呈 30° 的 150N 以模拟后牙的碾磨运动^[7]。载荷条件如图 2 所示。

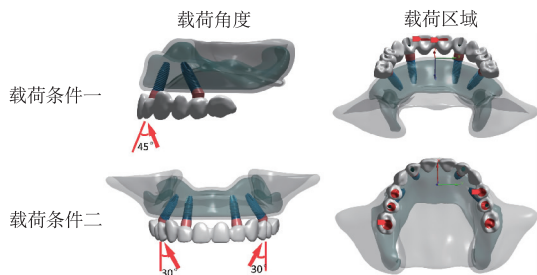


图 2 载荷条件一和载荷条件二

Fig. 2 The first type of loading and the second type of loading.

2 结果

2.1 载荷条件一：前牙切割运动 常规组在颌骨上表现出比改良组更为集中的应力分布：密质骨上，常规组的 von-Mises 应力峰值为 74.11 MPa，大于改良组(图 3)；在松质骨上，常规组的 von-Mises 应力峰值为 15.16 MPa，远大于改良组(图 4)。在种植体上，两组表现出相反的趋势：常规组种植体上 von-Mises 应力峰值为 85.89 MPa，小于改良组(图 5)。此外，两组的上颌骨的应力分布呈现不同趋势：在常规组中，应力分布于四颗种植体周骨面；而在改良组，应力主要集中分布于前牙区域的两颗种植体周骨界面。

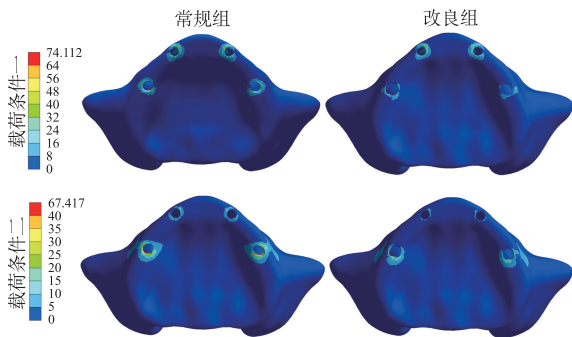


图 3 常规组和改良组密质骨的 von-Mises 应力分布图，von-Mises 应力峰值统计图

Fig. 3 Von-Mises stress distribution in the cortical bones for the conventional group and the modified group. The peak von-mises stress values.

2.2 载荷条件二：后牙研磨运动 无论是在颌骨上还是在种植体上，常规组都表现出比改良组更为集中的应力分布。在密质骨上，常规组的 von-Mise 应力峰值为 67.42 MPa，大于改良组(图 3)；而在松质骨上，常规组的 von-Mises 应力峰值为 16.47 MPa，远大于改良组(图 4)。在种植体上，常规组的种植体上 von-Mises 应力峰值为 78.38 MPa，大于改良

组(图 5)。此外，当模拟后牙研磨运动时，结果显示两组上颌骨上的应力分布相似，应力主要集中于后牙区域种植体周的骨界面上。这一结果与载荷条件一即行前牙切割运动时的应力分布不同。

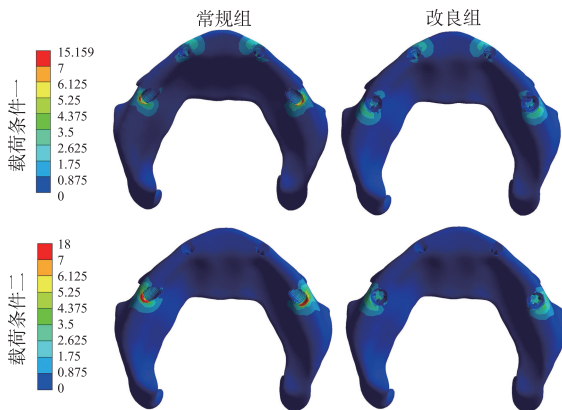


图 4 常规组和改良组松质骨的 von-Mises 应力分布图 von-Mises 应力峰值统计图

Fig. 4 Von-mises stress distribution in the trabecular bones for the conventional group and the modified group. The peak von-mises stress values.

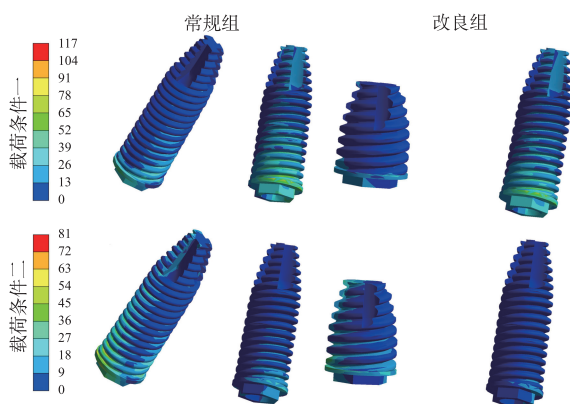


图 5 常规组和改良组种植体的 von-Mises 应力分布图 von-Mises 应力峰值统计图

Fig. 5 Von-mises stress distribution in implants for the conventional group and the modified group. The peak von-mises stress values.

3 讨论

由于缺牙后的上颌窦气化及颌骨废用性吸收导致的骨量不足给以种植体为支持的全口固定修复带来了极大的挑战。all-on-4 方案通过种植体的倾斜植入在充分利用剩余骨量的同时有效规避后牙区复杂的骨增量手术，得到了临床术者的认可。然而，种植体的倾斜植入存在一定的技术敏感性。此外，有大量临床证据支持在骨量不足的区域应用短植体同样可获得良好的临床效果。考虑相对较低的技术敏感性，有学者提出采用短植体替代常规 all-on-4 中的倾斜植入植体。由于目前尚无关于两种方案预后

的长期随访,因此本研究团队认为有必要对上述方案进行有限元分析,以此为术者在临床方案的抉择时提供生物力学角度的参考。

Fellippo 等人研究表明简化种植体表面的模型会改变皮质骨的应力分布,但维持模型螺纹的简化并不对此造成影响。因此,本研究采用维持螺纹的种植体模型以最小化对皮质骨应力的影响^[12]。其次,本研究建立了基台和中央螺丝等模型固件,从而能够更精准地模拟临床现实。

本研究所有组别中,皮质骨的 von-Mises 应力值均远高于松质骨,皮质骨比松质骨更坚固,更耐变形,因而将承受比松质骨更大的负荷^[13]。在该研究中,通过不同载荷条件模拟两种咀嚼运动,其中常规组在颌骨上均显示出更高的应力峰值,这可能是由于种植体倾斜植入所导致^[14]。此外,两组中加载的负荷主要通过种植体颈部 2~3 mm 部分转移至骨组织,这一结果与其他研究相似。该现象意味着在承受载荷时,种植体主要起作用部位为颈部 2~3 mm 处,由此说明种植体的长度对其功能的行使影响较小,所以只要短种植体在颌骨中形成良好的骨结合,就可以维持其功能。然而,有必要强调的是,短种植体的临床效果的可预测性还与种植体设计、植入方案、剩余骨量、咬合情况以及患者口腔卫生相关^[15]。

此外,Bayraktar 等研究表明,皮质骨和松质骨能承受的最大 von-Mise 应力分别为 104 MPa 和 82 MPa,当超过这一生理极限时,就可能发生微应力性骨折^[16],继而导致种植体周围骨吸收,最终导致种植的失败。本研究的两种方案中均未观察到大于上述的 von-Mises 应力值,这意味着以上两种方案均可行,这也从生物力学角度支持了临床上 all-on-4 治疗具有较高成功率的结论。另外,种植体的 von-Mises 值不应超过 550 MPa,该值是钛种植体的屈服强度^[17]。在本研究中,没有种植体的 von-Mises 值超过 550 MPa,这说明钛种植体在这两种方案中足以承受其功能性负载。

值得一提的是,本研究仍存在一些局限性:(1) 尽管静态载荷被认为可以较好的代表咬合负荷,但咀嚼运动是作为动态负载的存在,这意味着在未来的研究中需要进行动态载荷的模拟。(2) 常规组的治疗概念通常适用于种植体植入后即刻负载^[18],而在本研究中,种植体被默认为“完全骨结合”,这意味着由此给定的结果更适合于延期负载。尽管存在上述局限性,目前的分析结果仍能为临床术者在方案抉择时提供生物力学角度的参考;即在患者口腔卫

生良好,咬合正常的情况下,应用改良 all-on-4 方案可能具有更好的预后。但该结论仍需要严谨的随机临床对照试验及长期随访来进一步验证。

上述研究结果综合提示两种方案均可用于无牙颌上颌骨的修复重建。与常规 all-on-4 方案相比,改良组即短种植体替代方案在上颌骨表现出更为理想的 von-Mises 应力分布。该方案模型的建立及分析对于临床术者在上颌骨无牙颌种植体支持式固定全口修复方案的选择上可能具有一定参考价值。

参考文献

- [1] Luz J, Greutmann D2, Wiedemeier D, et al. 3D-evaluation of the maxillary sinus in cone-beam computed tomography [J]. *Int J of Implant Dent*, 2018, 4(1):17.
- [2] 张兴,刘英,陈松龄,等.上颌窦内提升不植骨同期种植术——3年临床回顾性研究[J]. *口腔医学研究*, 2016, 32(1):46-49.
- [3] Ayub KV, Ayub EA, Lins do Valle A, et al. Seven-year follow-up of full-arch prostheses supported by four implants: a prospective study [J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2017, 32(6):1351-1358.
- [4] Ayna M, Wessing B, Gutwald R, et al. A 5-year prospective clinical trial on short implants (6mm) for single tooth replacement in the posterior maxilla: immediate versus delayed loading [J]. *Odontology*, 2019, 107(2):244-253.
- [5] 王倩倩,陈中中,杨亚茹,等.基于 FEA 的种植体个性化选择及力学性能评价[J]. *口腔医学研究*, 2017, 33(3):307-310.
- [6] Lofaj F, Kucera J, Németh D, et al. Optimization of Tilted implant geometry for stress reduction in All-on-4 treatment concept: finite element analysis study [J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2018, 33(6):1287-1295.
- [7] Bhering CL, Mesquita MF, Kemmoku DT, et al. Comparison between all-on-four and all-on-six treatment concepts and framework material on stress distribution in atrophic maxilla: A prototyping guided 3D-FEA study [J]. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2016, 69:715-725.
- [8] Silva GC, Mendonça JA, Lopes LR, et al. Stress patterns on implants in prostheses supported by four or six implants: a three-dimensional finite element analysis [J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2010, 25(2):239-246.
- [9] Maló P, de Araújo Nobre M, Lopes A, et al. All-on-4[®] treatment concept for the rehabilitation of the completely edentulous mandible: a 7-year clinical and 5-year radiographic retrospective case series with risk assessment for implant failure and marginal bone level [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2015, 17 Suppl 2:e531-e541.
- [10] Chen Y, Wang C, Huang Y, et al. Biomechanical evaluation of the natural abutment teeth in combined tooth-implant-supported telescopic prostheses: a three-dimensional finite element analysis [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2017, 20(9):967-979.
- [11] Chen J, Zhang Z, Chen X, et al. Influence of custom-made

- implant designs on the biomechanical performance for the case of immediate post-extraction placement in the maxillary esthetic zone: a finite element analysis [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2017, 20(6):636-644.
- [12] Verri FR, Cruz RS, de Souza Batista VE, et al. Can the modeling for simplification of a dental implant surface affect the accuracy of 3D finite element analysis [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2016, 19(15):1665-1672.
- [13] 周立伟,陈向深,乔永刚,等. 纳米羟基磷灰石/聚醚醚酮复合种植体受力的三维有限元分析[J]. *口腔医学研究*, 2016, 32(4):391-394.
- [14] 葛奕辰,蒋少康,李轻如,等. “All-on-4”在不同骨质条件下应力分布的三维有限元分析[J]. *口腔医学研究*, 2016, 32(12):1252-1256.
- [15] Corbella S, Taschieri S, Del Fabbro M. Long-term outcomes for the treatment of atrophic posterior maxilla: a systematic review of literature [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2015, 17(1):120-132.
- [16] Sotto-Maior BS, Senna PM, da Silva-Neto JP, et al. Influence of crown-to-implant ratio on stress around single short-wide implants: a photoelastic stress analysis [J]. *J Prosthodont*, 2015, 24(1):52-56.
- [17] Kaleli N, Sarac D, Külünk S, et al. Effect of different restorative crown and customized abutment materials on stress distribution in single implants and peripheral bone: A three-dimensional finite element analysis study [J]. *J Prosthet Dent*, 2018, 119(3):437-445.
- [18] Maló P, Lopes A, de Araújo Nobre M, et al. Immediate function dental implants inserted with less than 30N·cm of torque in full-arch maxillary rehabilitations using the All-on-4 concept: retrospective study [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2018, 47(8):1079-1085.
- [收稿日期:2019-02-16] (本文编辑 李四群)

欢迎订阅 2020 年《口腔医学研究》杂志

《口腔医学研究》(原名口腔医学纵横)为武汉大学口腔医学院主办、国内外公开发行的口腔医学专业学术期刊。是科技部中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)、《中文核心期刊要目总览》核心期刊,美国《化学文摘》、俄罗斯《文摘杂志》、波兰《哥白尼索引》(国际医学科学数据库)收录期刊。

《口腔医学研究》创刊于 1985 年 6 月,现任主编为陈智教授,编委会由 18 家国内知名口腔医学院校各学科专家组成。《口腔医学研究》创刊 30 多年来,始终坚持刊物的科学性、实用性,面向院、系和基层,以普及、提高、服务为宗旨。最快捷地报道国内外口腔医学的新进展、新技术,为口腔医学临床和科研及教学服务,为读者服务。辟有专家论坛、基础研究论著、临床研究论著、讲座、综述、病例报道、学术动态、会务消息等栏目,读者对象为全国各地口腔医疗、教学、科研人员、口腔专业学生、护理、医技人员等。《口腔医学研究》也可为国内外各医疗器械、材料、药品和保健牙膏生产商或经营商刊登广告,是国家认定的处方药广告的宣传媒体。

《口腔医学研究》为月刊,每月 28 日出版。每期定价 7.00 元,全年 12 期,共 84.00 元(含邮资),欢迎广大读者到当地邮局订阅。如错过邮局订阅时间,可随时向编辑部邮购。编辑部地址:武汉市洪山区珞瑜路 237 号武汉大学口腔医学院,邮政编码:430079。电话:027-87686117,传真:027-87873260。http://www.kqxyj.com, E-mail:kqxyj@163.com。

《口腔医学研究》国内统一刊号:CN 42-1682/R,国际标准出版物号:ISSN 1671-7651。国内总发行:湖北省邮政报刊发行局,邮发代号 38-119。国外总发行:中国国际图书贸易集团有限公司(北京 399 信箱),国外代号 6427BM。广告发布登记编号:鄂广登准字(2019)420000008。