

上颌无牙颌 All-on-Four 远中种植体不同倾斜角度和长度的三维有限元应力分析

丁晓军^{1,2}, 邱 憬¹, 汤春波^{1*}, 周储伟³, 孙玉林³, 苏峰梅¹

(¹南京医科大学口腔疾病研究江苏省重点实验室, 南京医科大学附属口腔医院种植科, 江苏 南京 210029; ²江苏大学附属医院口腔科, 江苏 镇江 212001; ³南京航空航天大学航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

[摘要] 目的:应用三维有限元法研究上颌无牙颌 All-on-Four 远中种植体在不同角度和不同长度模型中的应力分布。方法:选择 1 例上颌无牙颌女性患者,采集数据,三维重建,构建上颌无牙颌“All-on-Four”种植修复的三维有限元模型。按照远中种植体角度和长度不同分为 4 组:A 组 30° 11.5 mm, B 组 30° 13.0 mm, C 组 45° 11.5 mm, D 组 45° 13.0 mm。100 N 垂直静载荷分别加载于第一、二前磨牙及第一磨牙上模拟咀嚼受力,应用 ABAQUS 软件测算种植体在上颌无牙颌模型上的等效应力值。结果:垂直载荷下,应力集中在种植体颈部周围骨皮质区;远中种植体长度增加,各区域应力缓慢下降;远中种植体倾斜角度增加,应力分布分散,种植体颈部和根尖区应力明显减小。结论:远中种植体长度增加对应力分布和大小的改变并不显著,远中种植体倾斜 45° 比倾斜 30° 更有利于应力分散。

[关键词] 无牙颌; All-on-Four; 三维有限元; 等效应力

[中图分类号] R783.1

[文献标志码] A

[文章编号] 1007-4368(2015)11-1628-04

doi: 10.7655/NYDXBNS20151128

Three-dimensional finite element stress analysis of All-on-Four distal implants with different tilt angles and lengths on edentulous maxilla

Ding Xiaojun^{1,2}, Qiu Jing¹, Tang Chunbo^{1*}, Zhou Chuwei³, Sun Yuning³, Su Fengmei¹

(¹Jiangsu Key Laboratory of Oral Disease of NJMU, Department of Implantology, Affiliated Hospital of Stomatology of NJMU, Nanjing 210029; ²Department of Stomatology, Affiliated Hospital of Jiangsu University, Zhenjiang 212001; ³Astronautics College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[Abstract] **Objective:** To study stress distribution of All-on-Four distal implants with different tilt angles and lengths on edentulous maxilla using the three-dimensional finite element method. **Methods:** A female patient with edentulous maxilla was selected. After data collecting and three-dimensional reconstruction, a three-dimensional finite element model of edentulous maxilla with All-on-Four implant restoration was established. According to the tilt angles and lengths of the distal implants, there were four groups: Group A: 30°, 11.5 mm; Group B: 30°, 13 mm; Group C: 45°, 11.5 mm; Group D: 45°, 13 mm. 100 N vertical static force was loaded on the first premolar, the second premolar and the first molar to simulate chewing, respectively Equivalent stress values of implants on the edentulous maxilla model were calculated using ABAQUS software. **Results:** Under the vertical static load, stress concentration was found around the implant neck in the cortical bone area. With the increase of the distal implant length, the stress decreased slowly in all regions. With the tilt angle of distal implant increasing, the distribution of stress became more dispersed and the stress in implant neck and apical areas significantly reduced. **Conclusion:** The stress distribution and magnitude of distal implant did not change significantly with the increase of the implant length, while the implant tilt angle of 45° was more favorable for stress dispersion than the implant tilt angle of 30°.

[Key words] edentulous; All-on-Four; three-dimensional finite element; equivalent stress

[Acta Univ Med Nanjing, 2015, 35(11): 1628-1631, 1636]

[基金项目] 国家自然科学基金(81470778); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(2014-37)

*通信作者(Corresponding author), E-mail: cbtang@njmu.edu.cn

许多无牙颌患者牙槽骨过度吸收,这类患者使用传统全口义齿修复方法难以取得满意的临床效果。随着种植义齿技术的不断发展和普及,无牙颌患者开始选择种植义齿修复。对于无牙颌患者,由于解剖结构的局限性,如下牙槽神经管、上颌窦腔等,常导致骨量不足,无法使用常规种植技术^[1]。近年来, Maló 等^[2]提出了针对无牙颌的“All-on-Four”种植技术,即植入 4 个种植体完成无牙颌的固定修复,其中 2 个种植体位于前牙区,另 2 个种植体分别位于左右颞孔之间或上颌后牙区上颌窦前壁之间。前牙区种植体为垂直植入,后面的种植体向远中倾斜 30°左右植入,角度大小取决于颌骨的吸收程度和解剖结构的安全性,上部结构采用角度基台,完成种植固定修复。短期临床观察显示,“All-on-Four”技术具有较高的成功率^[2-3],但目前仍缺乏长期的临床研究结果。种植体周围应力集中引起的骨吸收是导致种植失败的主要是原因之一。因而,有学者开始采用三维有限元对“All-on-Four”种植体进行力学分析^[4]。但目前对“All-on-Four”种植体长度、角度等的应力分析尚不充分。本研究利用有限元法研究上颌无牙颌“All-on-Four”远中种植体在不同角度和不同长度模型中应力分布的差异,为临床应用提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料

锥形束 CT(New Tom VG 公司,意大利),Mimics 10.01 (Materialise 公司,比利时),Geomagic Studio 12.0(Raindrop Geomagic 公司,美国),CATIA 三维建模软件(Dassault System 公司,法国),ABAQUS 6.9 有限元分析软件(Simulia 公司,法国)。BEGO 种植系统(BEGO 公司,德国),3D CaMega 光学三维扫描系统(北京博维恒信公司),3Shape D700 激光扫描仪(3Shape 公司,丹麦)。

1.2 方法

1.2.1 上颌骨三维模型构建

选择 1 例上颌无牙颌中年女性患者,采用锥形束 CT 进行扫描,扫描范围自眶上缘上 1 cm 始,至下颌骨下缘止,连续横断扫描,并以 DICOM 格式储存。将 DICOM 二维断面数据导入 Mimics 软件,进行三维重建,获得皮质骨和松质骨的点云文件。将点云文件导入 Geomagic Studio,处理生成两个部分的 NURBS(Non-Uniform Rational B-Splines)曲面片模型,最后应用 CATIA 快速成型功能生成上颌骨实体模型。

1.2.2 种植体三维有限元模型的建立

本研究选取 BEGO 种植体和基台:前牙区种植体 4.5 mm×10.0 mm,后牙区种植体 4.5 mm×11.5 mm、4.5 mm×13.0 mm;使用复合基台,基台底部螺丝直径 1.8 mm,BEGO 内六角圆锥混合连接。采用 3D CaMega 光学三维扫描系统扫描实体模型,对捕获的多视角变形光栅条纹图像进行解码、拼合处理,形成完整的种植体点云模型,经预处理、去噪,提取有效特征,再通过平面测量,获取螺纹、倒角等小特征的几何信息并对表面特征进行重建,获取特征的描述参数,基于该参数,利用正向建模工具进行特征建模,构造种植体、基台的实体模型。利用 CATIA 软件对 Bego 基台进行切割、旋转、桥接、填充等操作,建立 30°和 45°的角度基台模型。

1.2.3 建立上颌种植固定义齿的三维有限元模型

用 3Shape D700 激光扫描仪扫描患者的种植固定义齿,为了与种植体基台达到良好匹配,选择手动蜡型扫描的方法获得修复体内外冠形状的 STL 数据,输入 Geomagic Studio,处理得到 IGS 格式的曲面模型,将种植体填平后获得一个完整的上颌牙列固定义齿(图 1)。最后应用 CATIA 软件转换成实体模型导入有限元分析软件 ABAQUS 中。前牙区种植体长度 10.0 mm,均垂直种植于上颌侧切牙区,按照后牙区种植体角度和长度不同分为 4 组:A 组 30° 11.5 mm,B 组 30° 13.0 mm,C 组 45° 11.5 mm,D 组 45° 13.0 mm。

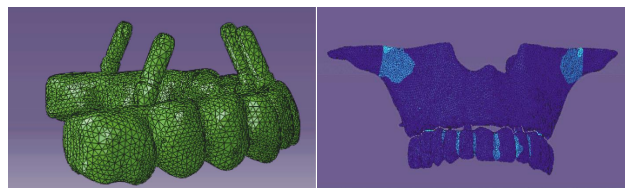


图 1 All-on-Four 种植固定修复体三维实体模型

Figure 1 Three dimensional entity models of All-on-Four implant-supported restoration

1.2.4 三维有限元网格划分及各部分材料属性

在有限元分析软件 ABAQUS 中,对导入的实体模型进行网格划分,单元类型为 C3D4(四节点线性四面体单元)。各组模型的单元数和节点数见表 1。实验条件假设及材料属性设置中,将种植体及基台设定为钛合金(Ti-6Al-4V),修复体设定为烤瓷冠,模型中各种材料和组织考虑为连续、均质、线性、各向同性的弹性材料,材料变形为小变形,材料力学参数见表 2^[5]。设定皮质骨层为 2 mm,种植体-骨界面定义为 100% 骨结合,种植体与骨之间为固定接触,

载荷作用下义齿各部分以及各组织之间不发生相对滑动。100 N 垂直静载荷分别加载于第一、二前磨牙及第一磨牙上模拟咀嚼受力,载荷共 300 N。应用 ABAQUS 软件测算种植体在上颌无牙颌模型上的等效应力值。

表 1 各组模型的单元数和节点数

Table 1 The number of elements and nodes in four models

| 分组 | 远中种植体角度(°) | 远中种植体长度(mm) | 单元数 | 节点 |
|-----|------------|-------------|---------|---------|
| A 组 | 30 | 11.5 | 799 777 | 152 688 |
| B 组 | 30 | 13.0 | 798 819 | 152 590 |
| C 组 | 45 | 11.5 | 798 364 | 152 430 |
| D 组 | 45 | 13.0 | 798 413 | 152 486 |

表 2 各部分材料的力学参数

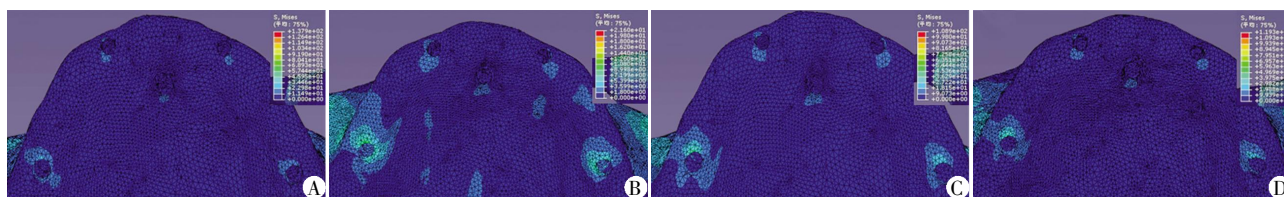
Table 2 Biomechanical properties of the different material

| 材料部位 | 弹性模量(MPa) | 泊松比(ν) |
|------|-----------|--------------|
| 骨松质 | 1 370 | 0.30 |
| 骨皮质 | 13 400 | 0.33 |
| 种植体 | 110 000 | 0.33 |
| 上部结构 | 69 000 | 0.28 |

表 3 种植体周围骨组织 Von Mises 应力峰值

Table 3 Von Mises stress peak values of peri-implant bone tissues (MPa)

| 分组 | 远中倾斜种植体 | | | 近中垂直种植体 | | |
|-----|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
| | 皮质骨 | 松质骨 | 根尖区 | 皮质骨 | 松质骨 | 根尖区 |
| A 组 | 97.610 | 36.651 | 16.880 | 32.553 | 6.858 | 20.731 |
| B 组 | 85.427 | 29.014 | 15.270 | 31.823 | 3.995 | 17.679 |
| C 组 | 84.604 | 48.663 | 8.438 | 47.048 | 18.113 | 7.835 |
| D 组 | 75.850 | 46.296 | 7.672 | 42.137 | 16.738 | 6.778 |



A: A 组 30° 11.5 mm; B: B 组 30° 13.0 mm; C: C 组 45° 11.5 mm; D: D 组 45° 13.0 mm。

图 2 远中种植体不同倾斜角度和长度模型中种植体周围骨组织的等效应力分布

Figure 2 Equivalent stress distribution in peri-implant bone tissues in All-on-Four entity models with different tilting angles and implant lengths of distal implants

3 讨论

在对患者进行种植固定义齿修复后,咀嚼力在功能和非功能状态下通过修复体传导到种植体及其周围组织,过大的力量负荷会导致种植体周围骨组织受压变形和破坏^[6]。力学分析已广泛应用于检测功能性咬合力在修复体及其周围组织中的生物力学行为,其中,三维有限元分析为首选方法,这是由于该方法可以把复杂的结构用各种几何单元图形表现

2 结果

远中种植体不同倾斜角度和长度模型中种植体周围骨组织的等效应力值见表 3,应力分布见图 2。随着远中种植体倾斜角度的增加,远中种植体周围皮质骨的等效应力减小,皮质骨应力分布主要集中于种植体颈部近中,松质骨的等效应力增加,主要集中在颈部,根尖区的等效应力明显减小。而随着远中种植体长度的增加,远中种植体周围皮质骨、松质骨、根尖区的等效应力均有不同程度减小。另一方面,随着远中种植体倾斜角度的增加,前牙区垂直种植体周围皮质骨、松质骨的等效应力增加,根尖区的等效应力减小。随着远中种植体长度的增加,前牙区垂直种植体周围皮质骨、松质骨、根尖区的等效应力均有不同程度减小。由结果可见,垂直载荷下,应力主要集中在远中种植体颈部周围骨皮质区;远中种植体长度增加,各区域应力缓慢下降;远中种植体倾斜角度增加,应力分布分散,根尖区应力明显减小。

出来,可以精确地对几何对象进行测量分析^[7]。尽管过去的研究表明,种植体与牙槽骨之间不一定是完全的骨整合^[8],但在有限元力学研究中,所有模拟的生物组织和材料都是均质、同向性、线性弹性的。因此,在本实验中,也假设种植体与牙槽骨之间形成 100% 的骨整合。已有研究认为,三维有限元力学分析的成功率与数字模型的单元格和节点数有关^[9],本研究构建的数字化实体模型中,其单元格和节点数分别超过 79 000 和 150 000,该数量与同类研究

相比,足以使力学分析的敏锐度最大化^[10-11]。

在很多无牙颌患者中,由于牙槽嵴过度吸收,如果没有复杂的外科技术,如神经移位术、牙槽嵴增高术、骨移植术等,是无法完成种植修复治疗的。“All-on-Four”技术为该临床问题提供了一种有效的解决方案。在无牙颌牙弓远端使用倾斜种植体有利于减少修复体远端的悬臂长度,合理选择种植体的间距,增加骨结合的面积。然而实验室研究和理论计算发现,单个种植体斜向种植时,会明显增加颌骨的应力^[12-13]。单个斜向种植体可能受到曲应力影响,从而导致种植体边缘骨应力的增加。“All-on-Four”技术将倾斜种植体应用在多个种植体支持的修复体中,种植体的分布以及修复体的强度能够减小自然的曲应力^[14]。

本研究中,经 CT 断层扫描符合条件的病例获得无牙颌上颌骨模型,种植体和修复体则根据实际参数在软件中生成。4 组模型的分组依据为远中种植体倾斜角度和长度,均符合临床实际。许多研究表明,当种植体直径不变时,增加种植体的长度可以提高初期稳定性和增加种植体-骨接触面积,然而在承受咬合负载时,长度对种植体颈部应力的影响并不大^[14-15],对于根尖区的影响几乎可以忽略不计^[16-17],本研究结果也证实了这一点。相比较而言,远中种植体倾斜角度的影响不可忽视。本研究结果表明,当种植体长度不变时,远中种植体倾斜角度越大,其颈部的应力值越小,各部位的应力分布更加分散,且前牙区种植体颈部皮质骨和松质骨的应力值增加明显。此外,本研究发现,远中倾斜种植体的等效应力主要集中在种植体颈部,这与 Naini 等^[18]的研究结果相一致。

本研究结果提示,“All-on-Four”技术的临床应用中,当种植体直径不变时,可以根据骨的体积和质量来选择种植体的长度和倾斜角度,尽量减少种植体周围骨组织的应力。选择较长的种植体可以增加种植体的初期稳定性,但对应力分布和大小的改变并不显著。远中种植体倾斜 45° 比倾斜 30° 更有利于应力分散,有助于减少骨吸收。

[参考文献]

[1] Kaneko T, Masuda I, Horie N, et al. New bone formation in non-grafted sinus lifting with space-maintaining management: A novel technique using a titanium bone fixation device[J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2012, 70(3): e217-e224

[2] Maló P, Rangert B, Nobre M. “All-on-Four” immediate-

function concept with branemark system implants for completely edentulous mandibles: a retrospective clinical study[J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2003, 5(s1): 2-9

[3] Agliardi E, Panigatti S, Clerico M, et al. Immediate rehabilitation of the edentulous jaws with full fixed prostheses supported by four implants: interim results of a single cohort prospective study[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2010, 21(5): 459-465

[4] Silva GC, Mendonca 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*, 2009, 25(2): 239-246

[5] Motoyoshi M, Ueno S, Okazaki K, et al. Bone stress for a mini-implant close to the roots of adjacent teeth-3D finite element analysis [J]. *Inter J Oral Maxillofac Surg*, 2009, 38(4): 363-368

[6] Thomason JM, Kelly SA, Bendkowski A, et al. Two implant retained overdentures: a review of the literature supporting the Mc Gill and York consensus statements [J]. *J Dent*, 2012, 40(1): 22-34

[7] Rubin C, Krishnamurthy N, Capilouto E, et al. Clinical science stress analysis of the human tooth using a three-dimensional finite element model [J]. *J Dental Res*, 1983, 62(2): 82-86

[8] Natali AN, Carniel EL, Pavan PG. Investigation of bone inelastic response in interaction phenomena with dental implants[J]. *Dent Mater*, 2008, 24(4): 561-569

[9] DeTolla DH, Andreato S, Patra A, et al. The role of the finite element model in dental implants[J]. *J Oral Implantol*, 2000, 26(2): 77-81

[10] Fanuscu MI, Vu HV, Poncelet B. Implant biomechanics in grafted sinus: a finite element analysis[J]. *J Oral Implantol*, 2004, 30(2): 59-68

[11] 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]. *J Prosthetic Dent*, 2005, 93(1): 38-44

[12] Bevilacqua M, Tealdo T, Menini M, et al. Three-dimensional finite element analysis of load transmission using different implant inclinations and cantilever lengths [J]. *Int J Prosthodont*, 2008, 21(6): 539-542

[13] Clelland NL, Lee JK, Bimbenet OC, et al. A three-dimensional finite element stress analysis of angled abutments for an implant placed in the anterior maxilla[J]. *J Prosthodont*, 1995, 4(2): 95-100

[14] Khatami AH, Smith CR. “All-on-Four” immediate function concept and clinical report of treatment of an edentulous