

11-17-2020

Effect of New Titanium Alloy on Biomechanical Behavior of Dental Implant

Jiwu Zhang

Department of Mechanics and Engineering Science, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

Qiguo Rong

Department of Mechanics and Engineering Science, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Effect of New Titanium Alloy on Biomechanical Behavior of Dental Implant

Abstract

Abstract: Titanium alloy materials have excellent mechanical properties, chemical stability and biocompatibility, and have become the main raw materials for implants. However, the biomechanical compatibility of medical titanium alloys still needs to be improved in order to meet the long-term safety and functionality of patient's clinical treatment requirement. New medical titanium alloy materials with high strength and low modulus play an important role in reducing the loosening and shedding of implants caused by stress shielding. The effects of new medical titanium alloy materials and traditional medical titanium alloy materials on implant structure and stress distribution of jaw are compared and analyzed by the finite element method. *The results show that the new medical titanium alloy material is more suitable for implant application, which reduces the risk of bone resorption, implant loosening and failure caused by stress shielding effect.*

Keywords

dental Implant, finite element method, new titanium alloy, mechanical compatibility, Biomedical metallic material

Recommended Citation

Zhang Jiwu, Rong Qiguo. Effect of New Titanium Alloy on Biomechanical Behavior of Dental Implant[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(11): 2100-2104.

医用钛合金材料对种植体生物力学行为的影响

张继武, 荣起国

(北京大学工学院力学与工程科学系, 北京 100871)

摘要: 钛合金材料具有优异的机械性能、化学稳定性和生物相容性, 已成为种植体主要原材料, 但要满足患者临床治疗的长效安全性和功能性, 医用钛合金材料的生物及力学相容性仍有待提高。具有较低弹性模量和较高强度的新型医用钛合金, 对降低由应力屏蔽导致的种植体的松动、脱落有着重要作用。本文利用有限元方法, 对比新型医用钛合金材料以及传统医用钛合金材料对种植体结构和颌骨应力分布。通过对比发现由于新型医用钛合金材料高强度、低模量等特点, 减少了由应力遮挡效应导致, 诱发骨吸收、植入体松动、失效等问题的风险。

关键词: 种植体; 三维有限元; 新型钛合金材料; 力学相容性; 生物医用金属材料

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 11-2100-05

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0521

Effect of New Titanium Alloy on Biomechanical Behavior of Dental Implant

Zhang Jiwu, Rong Qiguo

(Department of Mechanics and Engineering Science, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Titanium alloy materials have excellent mechanical properties, chemical stability and biocompatibility, and have become the main raw materials for implants. However, the biomechanical compatibility of medical titanium alloys still needs to be improved in order to meet the long-term safety and functionality of patient's clinical treatment requirement. New medical titanium alloy materials with high strength and low modulus play an important role in reducing the loosening and shedding of implants caused by stress shielding. The effects of new medical titanium alloy materials and traditional medical titanium alloy materials on implant structure and stress distribution of jaw are compared and analyzed by the finite element method. *The results show that the new medical titanium alloy material is more suitable for implant application, which reduces the risk of bone resorption, implant loosening and failure caused by stress shielding effect.*

Keywords: dental Implant; finite element method; new titanium alloy; mechanical compatibility; Biomedical metallic material

引言

由于钛及传统钛合金材料是较为理想的生物

金属材料, 具有良好的机械性能以及生物相容性和耐腐蚀性能, 因此在口腔医学中广泛应用^[1-2]。但是, 纯钛及传统钛合金材料也具有一些问题。纯钛应用在种植体上, 其强度和刚度不高, 材料硬度不够, 导致耐磨性也较差, 在长期和反复的受力情况下, 会出现磨损, 产生金属颗粒和碎屑。这些金属颗粒和碎屑会引起局部组织病变和



收稿日期: 2019-07-26 修回日期: 2019-09-11;
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1101503);
作者简介: 张继武(1989-), 男, 吉林四平, 博士, 研究方向为生物力学分析、有限元模拟仿真; 荣起国(1967-), 男, 北京, 博士, 副教授, 研究方向为口腔生物力学、骨骼肌肉系统力学。

<http://www.china-simulation.com>

• 2100 •

炎症。对于传统钛合金材料, 主要指的是 Ti-6Al-4V 合金和 Ti-6Al-7Nb 合金。这 2 种材料满足种植体要求的强度, 但合金中的 Al 元素和 V 元素对组织器官会造成损伤, 具有一定的毒性。Al 元素会在大脑、肝、脾、肾、甲状腺等组织器官蓄积, 并对其产生一定损伤, V 元素会引起骨软化, 贫血和神经紊乱。同时, 这 2 种钛合金的弹性模量(120 GPa 左右)与骨骼(10~35 GPa)^[3-4]相比, 它们的弹性模量仍然很高。Niinomi M^[5]发现低弹性模量的钛合金比高弹性模量具有更好的载荷传递特性。由于致密的金属植入物会承担绝大部分荷载, 种植体附近的骨组织应力水平会显著降低, 引起植入体周围骨组织密度和强度降低, 产生应力遮挡效应, 可能引发骨组织愈合迟缓, 随之而来诱发骨吸收、植入体松动、失效等问题。

为此, 研制具有优良生物相容性和良好的力学性能匹配的钛合金材料, 对种植体设计和研发有着重要意义。目前, 具有高强度、低弹性模量及无毒性元素构成的新型钛合金受到广泛关注。为满足牙种植体对高强度低模量钛合金的需要, 开发了一种具有较低弹性模量和较高强度的新型医用钛合金。这类钛合金具有更高的拉伸性能、断裂韧度、更好的耐磨损性能。新型医用钛合金的抗拉强度大多集中在 800~1 100 MPa 之间, 弹性模量在 55~85 GPa 之间。尽管仍然比人体骨骼的弹性模量略高, 但相比于传统种植体材料, 有效降低结构的刚度, 使得弹性模量更为接近人体骨骼, 骨性结合更加稳定^[6]。

因此, 本文针对传统合金材料(MA)种植体和新型医用钛合金材料(MB)种植体, 通过建立三维有限元模型, 模拟种植体在口腔中的环境, 在受到垂直载荷的作用下, 对比 2 种材料对牙齿骨骼、种植体、基台的应力分布变化情况。

1 材料和方法

1.1 建立种植体、基台及螺钉模型

分别建立由传统钛合金材料和新型医用钛合

金属材料构成的种植体。如图 1 所示, 根据种植体外形几何数据运用 CAD 软件(Solidworks)建立带有螺纹的种植体、基台、基台螺钉的三维几何模型, 其中螺钉与种植体的内螺纹相配合, 螺钉的颈部与基台内表面相互配合, 基台通过凹槽与种植体配合。为了更加真实的模拟种植体受力状态, 模型保留了螺纹结构。

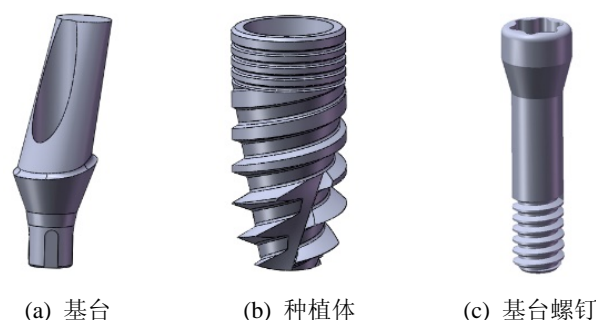


图 1 种植体结构
Fig. 1 Implant system

1.2 建立三维有限元模型

将建立的几何模型导入到 ABAQUS 有限元软件中, 建立三维有限元模型。假设模型中各种材料和组织为连续、均质、线性、各向同性的弹性材料, 材料变形为小变形。基台、种植体、皮质骨、松质骨的力学参数来自文献[6-7]。

在松质骨和皮质骨外环面施加固定约束, 以模拟颌骨受力和阻止颌骨的刚性移位。假定骨骼与种植体之间充分接触。对义齿施加垂直向下的 100 N, 螺钉与种植体内螺纹以及基台与种植体之间的摩擦系数均设定为 0.1^[8]。

采用四面体四节点对以上模型进行网格划分, 这种单元的优点是对位移求解结果精确, 计算成本小, 且易于收敛缺点是节点应力值不够精确, 但这可以通过细化应力集中处的网格来弥补, 只要单元足够小, 其关键部位的应力值还是准确的, 这是因为它在积分点上的应力结果是足够精确的。具体网格划分如图 2 所示。

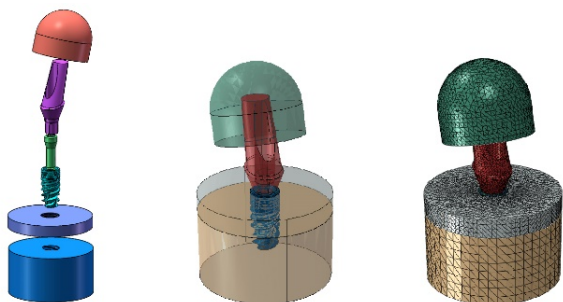


图 2 种植体/骨结构有限元模型
Fig. 2 FE model of Implant/bone structure

单元和节点数如表 1 所示。材料均假设为各向同性线弹性材料，具体参数如表 2 所示。

表 1 单元和节点总数
Tab. 1 Number of elements and nodes

模型	单元	节点
种植体	68 608	20 325
基台	51 663	11 212
螺钉	47 639	19 898
皮质骨	94 271	18 799
松质骨	121 647	22 636

表 2 材料的力学参数
Tab. 2 Material parameters

材料	杨氏模量/MPa	泊松比
新型医用钛合金	50 000	0.35
传统医用钛合金	110 000	0.35
皮质骨	13 700	0.3
松质骨	1 370	0.3

2 结果和讨论

有限元分析 von Mises 应力云图表明，在相同载荷条件下，使用新型医用钛合金材料制作的种植体整体 von Mises 应力均比传统材料的种植体要低。

图 3 给出了应用传统钛合金材料和新型医用钛合金材料在功能载荷作用下的等效应力分布。图 4~8 分别给出了种植体、基台、基台螺钉、皮质骨和松质骨的应力分布。当使用新型钛合金材料时，应力分布的趋势基本相同，但应力峰值发生变化。

最大应力均集中在种植体上表面，既与基台接触的内表面。使用新型医用钛合金材料组的最大应

力均小于传统钛合金材料组。使用传统材料的种植体的最大应力为 145.5 MPa。当改用新型医用钛合金材料后，最大应力为 128.2 MPa，降幅 13%。

基台的等效应力最高，使用新型医用钛合金材料同样能降低最大等效应力，峰值从 235.7 MPa 下降到 191.8 MPa，降幅 23%。对于基台螺钉，2 种材料螺钉的最大等效应力均集中在螺钉的颈部位置，而螺纹处的应力也大多分布在螺纹上部位置。经过改变材料，最大等效应力由 143.1 MPa 下降到 83.8 MPa，降幅达 71%。

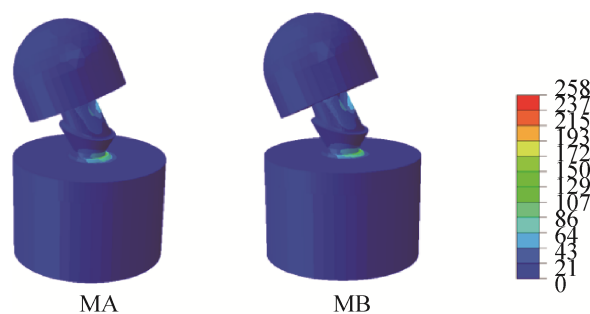


图 3 种植体/骨结构等效应力分布
Fig. 3 von Mises stress of Implant/bone structure

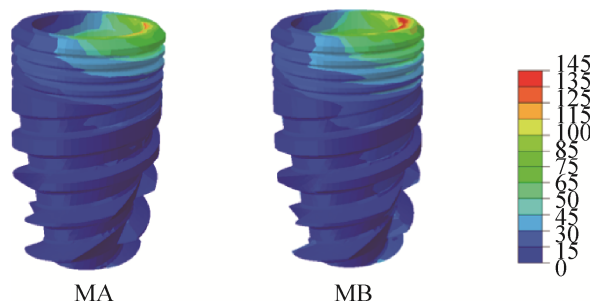


图 4 种植体等效应力分布
Fig. 4 von Mises stress of implant

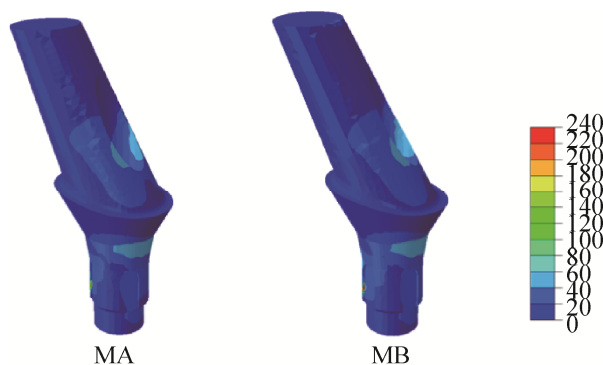


图 5 基台等效应力分布
Fig. 5 von Mises stress of abutment

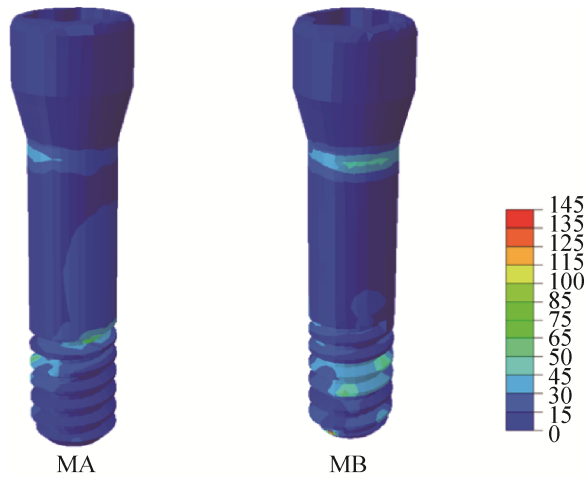


图 6 基台螺钉等效应力分布
Fig. 6 von Mises stress of abutment screw

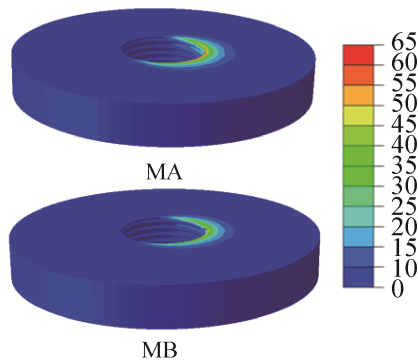


图 7 皮质骨等效应力分布
Fig. 7 von Mises stress of cortical bone

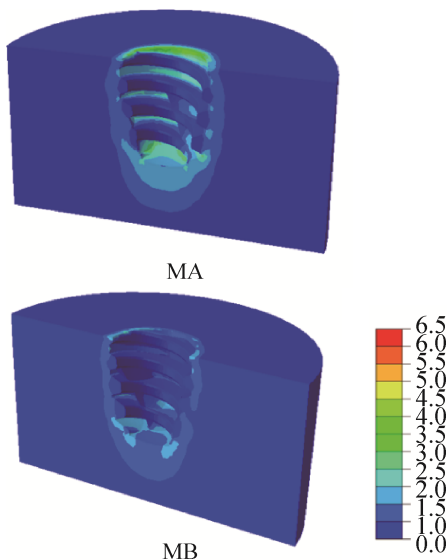


图 8 松质骨等效应力分布
Fig. 8 von Mises stress of cancellous bone

表 3 为基台、种植体、螺钉及皮质骨和松质骨等效应力最大值。

表 3 最大等效应力
Tab. 3 Maximum von Mises stress

模型/材料	基台	种植体	螺钉	皮质骨	松质骨
MA	191.8	128.2	83.8	62.6	5.2
MB	235.7	145.5	143.1	53.4	5.0

*MA: 50 GPa; MB: 110 GPa

为更好的说明应力变化, 总结数据划分柱状图。如图 9 所示, 通过改善材料, 基台、种植体、螺钉都有不同程度的应力降低, 而骨骼的等效应力都有不同程度的提高。说明种植体植入后, 载荷更多的传递到骨骼周围。种植体附近的骨组织应力水平显著提高, 使植入体周围骨组织密度和强度相应的提高, 从而促进骨组织愈合。

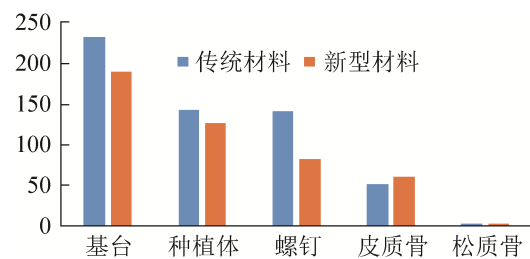


图 9 最大等效应力比较
Fig. 9 Comparison of maximum von Mises stress

从上述结果看, 新型医用钛合金材料的应用有助于改善种植体以及种植体周围骨组织的应力状态, 但似乎改善的程度并不大, 这是因为选取了弹性模量为 50 GPa 的材料。事实上, 当弹性模量进一步降低时, 能够更好地改善种植体与周围骨组织的应力状态。

3 结论

本研究采用三维有限元法分析新型钛合金材料和传统医用钛合金材料对基台、种植体、皮质骨、松质骨应力应变分布的不同。结果表面, 2 种材料产生的最大应力分布均相同, 均集中在螺钉颈部以及基台与种植体相接触的部位。而对于颌骨, 应力大多集中在骨骼上表面。

而新型钛合金材料相比于传统种植体材料, 弹性模量更为接近人体骨骼, 使得基台、种植体、螺钉等应力不同程度的降低。同时, 种植体周围皮质

骨和松质骨应力增大, 刺激骨细胞的生长, 骨性结合更加稳定。

参考文献:

- [1] 韩建业, 罗锦华, 袁思波, 等. 口腔用钛及钛合金材料的研究现状[J]. 钛工业进展, 2016, 33(3): 1-7.
Han Jianye, Luo Jinhua, Yuan Sibao, et al. Research Status of Dental Titanium and Titanium Alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33(3): 1-7.
- [2] 吕宇鹏, 朱瑞富, 马泉生, 等. 医用钛及钛合金种植体材料的研究进展[J]. 中国口腔种植学杂志, 2000, 5(1): 43-49.
Lv Yupeng, Zhu Ruifu, Ma Quansheng, et al. Current Evolution of Biomedical Titanium and Its Alloy Implant Materials[J]. Chinese Journal of Oral Implantology, 2000, 5(1): 43-49.
- [3] Niinomi M. Mechanical Properties of Biomedical Titanium Alloys[J]. Materials Science & Engineering A (S0921-5093), 1998, 243(1/2): 231-236.
- [4] Long M, Rack H J. Titanium Alloys in Total Joint Replacement-a Materials Science Perspective [J]. Biomaterials (S0142-9612), 1998, 19(18): 1621-1639.
- [5] Niinomi M. Mechanical Biocompatibilities of Titanium Alloys for Biomedical Applications[J]. J Mech Behav Biomed Mater (S1751-6161), 2008, 1(1): 30-42.
- [6] Chiang I C, Lee S Y, Wu M C, et al. Finite Element Modelling of Implant Designs and Cortical Bone Thickness on Stress Distribution in Maxillary Type IV Bone[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering (S1025-5842), 2014, 17(5): 516-526.
- [7] 牛金磊, 陈建宇, 陈贤帅, 等. 螺距对即刻负载种植体和周围骨组织影响的三维有限元研究[J]. 口腔疾病防治, 2014, 22(2): 61-68.
Niu Jinlei, Chen Jianyu, Chen Xianshuai, et al. Influence of Pitch on Immediate Loaded Dental Implant-bone System: a Three-dimensional Finite Element Analysis[J]. Journal of Dental Prevention and Treatment, 2014, 22(2): 61-68.
- [8] Barbier L. Finite Element Analysis of Non-axial Versus Axial Loading of Oral Implants in the Mandible of the Dog[J]. J Oral Rehabil (S0305-182X), 1998, 25(11): 847-858.