

上颌前牙区非埋入式种植体不同角度基台的三维有限元分析*

陈祖贤¹, 王超², 樊瑜波², 顾晓明³, 韩景芸², 王立军³

Finite element analysis of the angulate abutment of non-imbedding implant in the anterior maxilla

Chen Zu-xian¹, Wang Chao², Fan Yu-bo², Gu Xiao-ming³, Han Jing-yun², Wang Li-jun³

Abstract

BACKGROUND: When the abutment angulations of the upper mandible increase to 25°, the implant stress increases 18%. When the stress increases exceed to the bearing range, the implant is failed. Therefore, greater abutment angulation is not helpful. It remains unclear the maximal angulation that cannot affect implantation success.

OBJECTIVE: To investigate the stress distribution of peri-implant bone which is subjected to different loading conditions when the different abutment angulations are applied, and to analyse the safety factor of the different implants to determine the maximum angulation.

METHODS: The finite element models of the different angulate abutments were established in commercial software packages, and stress distribution of both implant and peri-implant bone were compared.

RESULTS AND CONCLUSION: With the increased abutment angulation, the larger maximum von-Mises stress was observed, and the position of the stress concentration diverted from top of implant to the neck of the implant ($P < 0.05$). The abutment $< 25^\circ$ is recommended to achieve higher survival rates of dental tooth treatments in the anterior maxilla. When the abutment has to be larger than 25°, it is better to decrease its loading.

Chen ZX, Wang C, Fan YB, Gu XM, Han JY, Wang LJ. Finite element analysis of the angulate abutment of non-imbedding implant in the anterior maxilla. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2010;14(30): 5591-5595. [http://www.crter.cn http://en.zglckf.com]

摘要

背景: 研究发现, 在上颌前牙区的角度基台增加到 25°时, 种植体应力增加 18%, 当种植体的应力增大到其所能承受的范围之外时必然会导致种植失败率的增加, 因此角度基台角度肯定不是越大越好。那么到底使用最大多少角度的角度基台不会影响种植的成功率呢? 以往的研究并未给予明确的答案。

目的: 观察上颌前牙区种植体连接不同角度基台时的应力应变情况, 分析种植体的安全系数, 确定上颌种植时能用的基台角度。

方法: 通过建立三维模型, 利用有限元软件计算种植体连接不同角度基台时, 种植体及周围骨质的应力分布。

结果与结论: 种植体连接不同角度基台时, 随基台角度的增大, 种植体的最大 von-mises 应力值逐渐增大, 受力部位逐渐向种植体颈部转移, 各模型组相互比较, 差异具有显著性意义($P < 0.05$)。提示上颌前牙区种植为了远期成功率建议最大不要超过 25°的角度基台; 使用大于 25°角度基台时应适当减少其所受殆力。

关键词: 种植; 角度基台; 有限元; 上颌; 前牙区

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2010.30.020

陈祖贤, 王超, 樊瑜波, 顾晓明, 韩景芸, 王立军. 上颌前牙区非埋入式种植体不同角度基台的三维有限元分析[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(30):5591-5595. [http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

¹Graduate School of Liaoning Medical University, Jinzhou 121001, Liaoning Province, China; ²School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; ³Stomatological Center, General Hospital of Chinese Armed Police Forces, Beijing 100039, China

Chen Zu-xian*, Studying for master's degree, Physician, Graduate School of Liaoning Medical University, Jinzhou 121001, Liaoning Province, China chenzuxian@163.com

Correspondence to: Wang Li-jun, Doctor, Associate chief physician, Master's supervisor, Stomatological Center, General Hospital of Chinese Armed Police Forces, Beijing 100039, China wlj6861@yahoo.com.cn

Received: 2010-02-24
Accepted: 2010-04-21

0 引言

近年来, 随着社会经济水平的提高, 缺牙患者选择种植修复越来越普遍。目前在临床上上颌前牙种植特别是即刻种植是一个难题, 上颌前牙缺失后一般骨缺损明显, 根尖上倒凹也明显, 如都要植骨后再种植修复的话, 不仅费时费力, 还要增加患者的创伤和花费, 对普通人来讲难以承受, 这可能导致他们最终放弃种植修复, 从而失去享受人类第三副牙齿的乐趣。有时候缺牙区唇侧骨质缺损不明显, 不需植骨, 但是平行邻牙长轴植入时, 经常出现种植体基台平面与牙槽嵴顶平面成一定角度的情

况, 此时修复时必须用角度基台来纠正修复的角度。因此根据患者现有的骨质条件, 适当调整种植体植入的位置和方向, 修复时采用角度基台矫正方向并完成修复就成为一个临床解决问题的最终办法。研究发现, 在上颌前牙区的角度基台增加到25°时, 种植体应力增加18%, 当种植体的应力增大到其所能承受的范围之外时必然会导致种植失败率的增加, 因此角度基台角度肯定不是越大越好^[1]。那么到底使用最大多少角度的角度基台不会影响种植的成功率呢? 以往的研究并未给予明确的答案。本实验应用三维有限元分析的方法, 对不同角度的角度基台及其周围骨组织的应力应变进行分析, 从而为临床提供指导。

¹ 辽宁医学院研究生院, 辽宁省锦州市 121001; ² 北京航空航天大学生物与医学工程学院, 北京市 100191; ³ 北京武警总医院口腔医学中心, 北京市 100039

陈祖贤★, 男, 1982年生, 浙江省杭州市人, 汉族, 辽宁医学院在读硕士, 医师, 主要从事口腔颌面外科的研究。
chenzuxian@163.com

通讯作者: 王立军, 博士, 副主任医师, 硕士生导师, 北京武警总医院口腔医学中心, 北京市 100039
wj6861@yahoo.com.cn

中图分类号: R318
文献标识码: B
文章编号: 1673-8225 (2010)30-05591-05

收稿日期: 2010-02-24
修回日期: 2010-04-21
(20100224009/WL A)

1 材料和方法

设计: 三维有限元分析。

时间及地点: 实验于2009-11/2010-01在北京航空航天大学完成。

材料: 图形工作站1台, HP xw4600 Workstation, 酷睿2, 4核, 4G内存。有限元分析的ANSYS及相关软件。

实验方法:

三维有限元模型的建立: 利用Solidworks软件, 按照Straumann种植体的常规数据(Straumann代理商提供, 北京福克斯有限公司)模拟建立一4.1 mm×12.0 mm的标准种植体, 即种植体直径4.1 mm, 基台连接处平面直径4.8 mm, 长度12.0 mm, 光滑面高度2.8 mm, 螺距2.5 mm, 并建立一牙槽骨示意模块, 使牙槽骨的厚度足以同时放入能连接0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°等8个不同角度基台的种植体而使种植体不暴露于牙槽骨外面。根据基台角度不同, 装配成8个模型, 使其基台表面位置一致, 而种植体位于不同的位置。

材料属性: 实验中所有材料除皮质骨外均假设为均质、各向同性的线弹性材料, 皮质骨假设为横向各向同性^[2-4], 即在同一水平面上假设为各向同性的弹性材料, 而在垂直方向上材料属性与前者不同。这样设置相比所有材料都是各向同性的设置更加接近真实情况。各项材料参数均来自于文献报道, 见表1。

表1 相关材料的参数
Table 1 Parameters related materials

Material	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Reference
Transverse plane of cortical bone	11.5	0.51	[4]
Vertical plane of cortical bone	17.0	0.31	[4]
Cancellous bone	1.37	0.30	[5,6]
Implant	110	0.33	[2,7]
Abutment	110	0.33	[2,7]

接触面的设定及网格的划分: 假设种植体与牙槽骨之间完全骨整合, 因此种植体与牙槽骨之间设定为固定连接, 种植体与基台之间设定为固定连接。在Ansys Workbench(11.0)中使用solid187单元类型划分网格, 划分网格后的模型见图1, 各模型的网格数见表2。

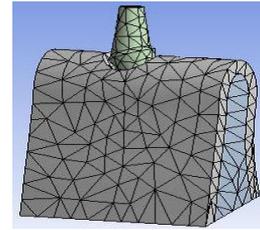


Figure 1 Model after meshing
图1 划分网格后的模型

表2 不同角度基台模型的网格数
Table 2 Elements and nodes of models different angled abutments

	0°	5°	10°	15°
Node	57 593	53 207	37 421	35 230
Mesh	34 783	32 123	21 982	20 567
	20°	25°	30°	35°
Node	52 190	54 774	61 343	54 448
Mesh	31 237	32 956	37 228	32 466

边界的约束及加载方式: 将上颌骨各游离面的外表面节点进行固定约束, 因为加载的方向会显著影响应力的分布和大小, 因此本文参照Tada等^[8]的方法垂直向加载, 根据学者对最大殆力的测定^[9], 将加载最大牙殆力定为100 N。

有限元计算和疲劳分析: 在图形工作站上进行静态应力分析, 比较不同模型中种植体及其周围骨的应力应变分布情况, 然后输入种植体纯钛材料的S-N曲线参数^[4], 分析种植体的安全系数。本实验所用钛合金S-N曲线见图2。

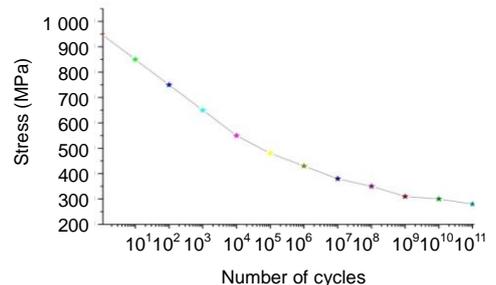


Figure 2 Fatigue curves of titanium
图2 钛合金的疲劳曲线

主要观察指标: 种植体的安全系数, 最大应力值, 应力分布面积和部位; 骨组织的最大应力值, 最大应变值, 应力分布面积和部位。

设计、实施、评估者: 实验设计、干预实施为第一、二作者, 评估为第一、二、五作者, 经过正规培训, 未采用盲法评估, 因为其一实验结果都是直观的数据, 其二没有对照组, 本

实验采用的是计算机模拟实验。

统计学分析: 由第一作者采用SPSS 13.0软件完成统计处理, $P < 0.05$ 为差异有显著性意义。

2 结果

2.1 种植体的应力 种植体的最大应力随着角度基台角度的增加而逐渐增大, 见图3。其最大应力值在5°和0°时位于基台的顶部, 即直接受力的部位, 10°时的最大应力已经从基台顶部转移至种植体唇侧颈部, 随着角度的增加, 最大应力值增幅明显增大, 15°时增加17.8%, 20°时增加19.24%, 25°时增加16.7%, 这与Kao等^[1,10]的研究相似。

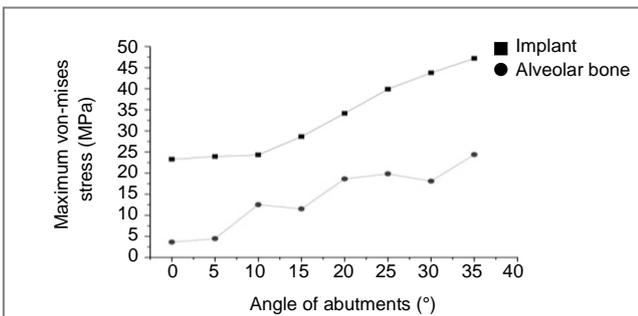


Figure 3 Relationship between the maximum von-mises stress and the angle of abutments of implant and alveolar bone around the implant

图3 种植体及周围牙槽骨最大应力值与基台角度的关系

种植体受力部位随基台角度的增加从整个种植体逐渐向其颈部和根部转移, 当基台角度达到25°时, 种植体中下1/3几乎不受力, 其舌侧尤为明显, 见图4。

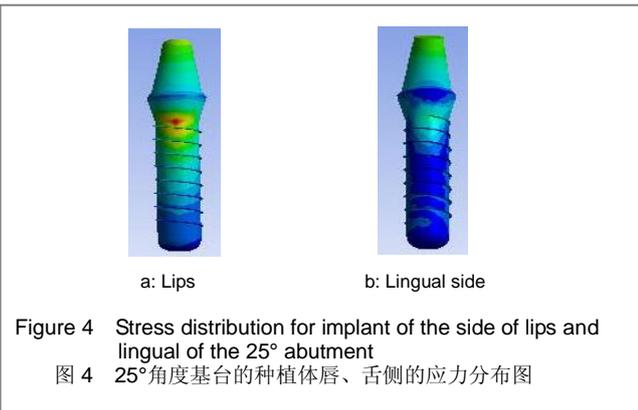


Figure 4 Stress distribution for implant of the side of lips and lingual of the 25° abutment

图4 25°角度基台的种植体唇、舌侧的应力分布图

2.2 骨组织的应力应变分布 骨组织的应力主要集中于种植体唇侧牙槽嵴顶, 最大von-mises应力值随着基台角度的增大而呈逐渐增大趋势, 牙槽嵴顶部的受力面积也逐渐增大, 见图5。其受力部位由整个种植体周围骨组织逐渐转移到牙槽嵴顶和种植体的底部, 其周围牙槽嵴顶应力集中尤其明显, 见图6。牙槽嵴顶的最大应变也随基台角度的增大而增大, 与基台角度的关系见图7。

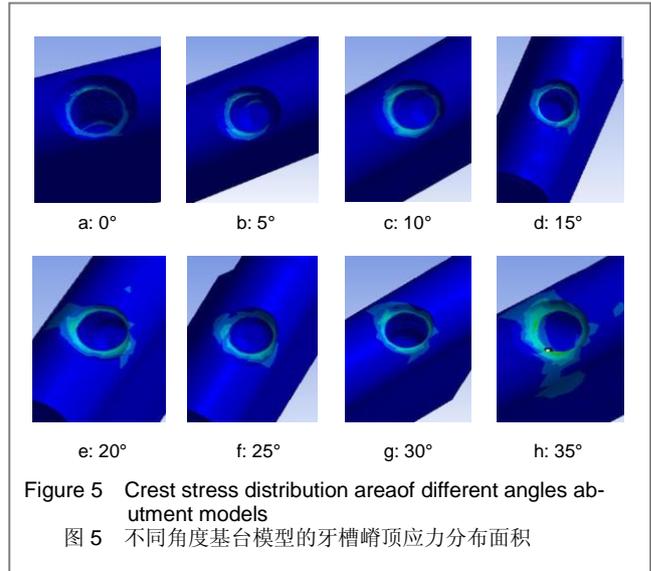


Figure 5 Crest stress distribution area of different angles abutment models

图5 不同角度基台模型的牙槽嵴顶应力分布面积

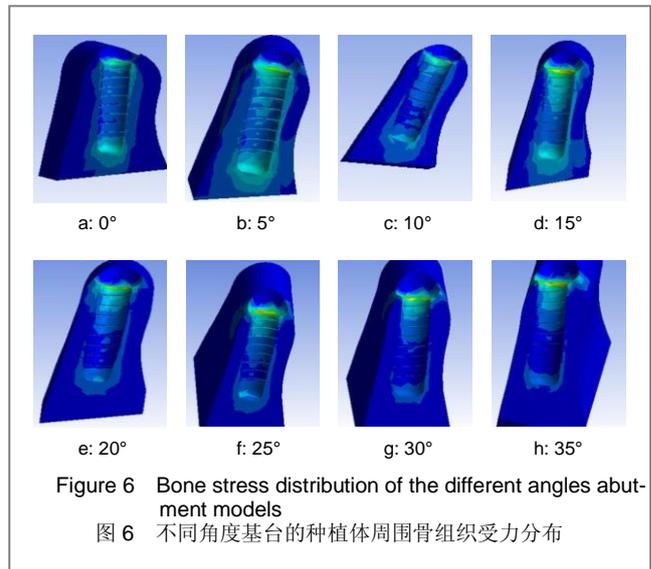


Figure 6 Bone stress distribution of the different angles abutment models

图6 不同角度基台的种植体周围骨组织受力分布

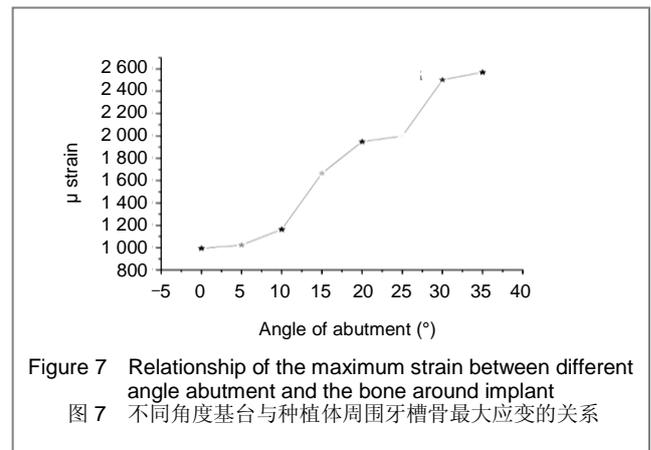


Figure 7 Relationship of the maximum strain between different angle abutment and the bone around implant

图7 不同角度基台与种植体周围牙槽骨最大应变的关系

2.3 安全系数的分析 用100 N的载荷力对上颌前牙区不同角度的角度基台模型进行加载计算, 分析基台角度与种植体安全系数之间的关系, 结果表明, 随基台角度的增大种植体的安全系数逐渐下降, 见图8。

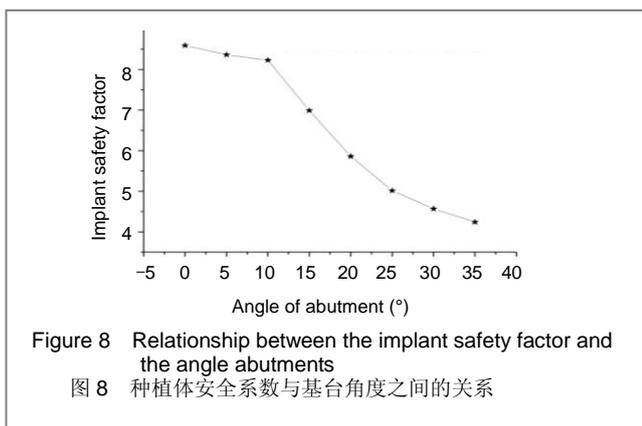


Figure 8 Relationship between the implant safety factor and the angle abutments

图8 种植体安全系数与基台角度之间的关系

然后用不同大小的载荷力施加于同一模型, 分析力量大小对于使用角度基台的种植体安全系数的关系, 结果显示, 载荷力增大1倍, 种植体的安全系数减小一半。见表3。

表3 35°角度基台的种植体安全系数与加载负荷的关系
Table 3 Relationship between the implant safety factor and loading of the 35° abutment

Loading (N)	Safety factor
50	78.480
100	44.240
150	62.827
200	22.119
250	61.695
400	11.059
500	30.847

2.4 统计分析 有限元分析是将载荷分散到每一个结点, 因此一个有限元模型网格划分有多少个结点, 就有多少个应力值。实验利用SPSS 13.0软件包对所有模型的应力值建立数据库, 8个模型之间相互两两比较, $P < 0.05$, 用中位数和四分位数来表示其整个模型中应力值的集中趋势和离散程度, 数据见表4。

表4 各模型的中位数及四分位数值
Table 4 Median and quartile of each model (MPa)

	0°	5°	10°	15°
P ₂₅	0.756 6	0.725 4	0.602 3	0.546 4
P ₅₀	0.893 9	0.917 8	0.940 9	0.957 0
P ₇₅	1.204 7	1.268 0	1.421 7	1.694 8
	20°	25°	30°	35°
P ₂₅	0.621 0	0.627 9	0.674 7	0.647 3
P ₅₀	0.998 2	1.032 4	1.063 4	1.064 1
P ₇₅	1.755 6	1.851 9	1.900 3	2.156 7

3 讨论

每个种植系统都有角度基台, 但是每个系统的最大角度基台上限则并不统一。目前各系统最大角度基台并不一致^[11], Branemark系统最大有30°的角度基台,

3i(Implant Innovation Inc.)的种植系统有35°的角度基台, (Straumann)ITI种植系统以其非埋入式一次穿龈, 成骨活性好, 其精确设计的骨预备方式在达到较理想的初期稳定性方面, 较其他种植系统容易且可靠, 目前已成为世界第二大种植系统。但ITI系统最大只有20°的角度基台, 这无疑限制了它的应用。那么对于ITI系统来说是否就只能应用到20°的角度基台呢? 如果基台角度增大是否会导致应力集中而至失败呢? 这正是本实验所需要解决的问题。

有限元分析法是借助于电子计算机进行运算的数值计算方法, 是生物力学研究中的重要手段之一^[12-13]。它可对复杂几何形状物体建模, 将待分析的连续实体离散成有限个单元, 以各单元的结合体代替原连续体并逐个研究每个单元的力学性质, 求得整体和局部的应力值及其分布规律, 并可根据需要改变受载与边界条件等力学参数, 在维持原模型几何形状不变的情况下, 可方便地对其应力大小和分布变化进行对比分析, 是口腔生物力学研究中的重要手段, 已广泛应用于口腔种植、修复、正畸等各个领域的研究^[14-18]。本实验采用三维有限元方法对种植体不同角度的角度基台及其周围骨组织的应力应变进行分析, 从而为临床提供指导。

采用三维有限元方法分析种植体及周围骨质的应力分布, 国内外已有不少文献报道^[19-23], 但以往三维有限元模型在骨材料属性上国内外学者多数都将其设为均质、各向同性, 也就是骨组织各个方向的层面弹性模量都是相同的, 这是一种对模型理想的假设, 而这与实际骨组织的情况相差甚远, 因此本实验模型将其设为横向各向同性, 即在每一个横断面上弹性模量相同, 而垂直面上弹性模量不相同, 这比以往模型更加接近真实情况; 本实验引入骨生物力学阈值的概念, 用数据直接表示应力集中程度, 代替以往的百分比, 这将实验从半定量研究转变成定量测定, 这在国内外是首次; 此外作者对ITI系统角度基台进行了三维有限元分析, 这在国内外也属首次; 本实验的加载力量是根据对中国人最大咬合力测定得出的结论而设定的^[9], 符合国人实际, 比以往研究更接近临床情况^[24-25]。

骨组织受外力作用而产生的内部抵抗力称为应力, 其大小等于单位骨面积所接受的外力, 应力的单位为PASCAL(Pa)。骨组织受外力作用而变形, 或改变其长度的现象称为应变, 应变的单位是相对的, 当骨受力而增长至原有长度的101%, 其变化是1%, 单位是0.01 strain(应变), 或10 000 μstrain(微应变)^[26-27]。骨组织对外力作用的敏感性称为阈值。骨重建阈值为200微应变, 小于此值的骨组织处于失用状态, 使骨吸收量大于成骨量。当外力作用在200~1 000微应变之间时, 骨组织处于适应状态。大于1 000微应变时骨组织处于中度超负荷状态。通常情况下, 在200~2 000微应变生理应变范

围内, 骨组织能够维持正常的生理代谢和改建活动, 保持足够的机械力学性能。但是如果骨组织出现剧烈的变形, 其形变超过2 000~3 500微应变, 则被称为“功能性超载”, 大于3 500微应变时骨组织处于病理性超负荷状态^[26, 28-29]。因此当骨组织受到的应变小于200微应变或者大于3 500微应变时都会导致骨吸收。

本实验8个模型中25°角度基台模型的骨组织最大应变为1 949.1 μstrain , 小于2 000 μstrain 这个形变量在骨组织的生理应变范围内, 能保持足够的力学性能。30°和35°两个模型骨组织的最大应变都大于2 000 μstrain , 但都在3 500 μstrain 之内, 属于功能性超载范围, 只要给予骨组织足够的时间, 牙槽骨将会改建成适应种植体的载荷需要。因此使用这两个角度的角度基台时, 如果使用频率过快, 使牙槽骨的适应性功能性改建速度达不到其超载所带来的骨的损伤速度, 时间久就会导致牙槽骨发生病理性超负荷, 导致牙槽骨吸收, 最终导致失败。为了远期的成功率, 当上颌前牙区使用大于25°的角度基台时, 在最终修复体完成时建议适当调殆, 以减少种植体所受的殆力。

随基台角度的增大, 种植体应力集中部位由基台表面转移到种植体的颈部第一螺纹处, 因此种植体的最薄弱部位也在种植体的颈部, 种植体最小的安全系数也在此。根据纯钛的疲劳曲线设定, ANSYS软件默认安全系数大于1时为安全范围。根据图9所示, 基台角度增大到10°以后, 随角度的增加安全系数急剧下降。根据对最大殆力测定的报道, 上颌前牙所承受的最大殆力是100 N, 因为牙周膜尚有一半的咬合力储存, 所以以200 N的力量加载来评价种植体的安全系数。根据表3所示, 加载力量加大, 种植体的安全系数减小, 并且呈相反关系, 力量加大1倍, 安全系数减小一半, 200 N的载荷力量下, 35°角度基台的种植体的安全系数约为2.12, 大于1, 属于安全范围之内。因此在上颌前牙区, 可以应用大于20°的角度基台, 甚至使用35°的角度基台。

结论: 在上颌前牙区使用角度基台可以超过20°达到25°, 甚至达到35°, 在生物力学上种植体没有安全隐患, 但是超过25°以后种植体周围牙槽骨达到功能性超载。因此, 上颌前牙区可以使用25°的角度基台; 为了长远的成功率, 建议在上颌前牙区使用大于25°的角度基台时, 对最终修复体进行适当调殆, 以减小种植体所受的殆力。

4 参考文献

- [1] Kao HC, Gung YW, Chung TF, et al. The influence of abutment angulation on micromotion level for immediately loaded dental implants: a 3-D finite element analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2008;23(4):623-630.
- [2] Lin D, Li Q, Li W, et al. Dental implant induced bone remodeling and associated algorithms. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2009; 2(5):410-432.

- [3] O'Mahony AM, Williams JL, Spencer P. Anisotropic elasticity of cortical and cancellous bone in the posterior mandible increases peri-implant stress and strain under oblique loading. *Clin Oral Implants Res*. 2001;12(6):648-657.
- [4] Oguz K, Yuzbasloglub E, Erzincañ F. Static, dynamic and fatigue behaviors of dental implant using finite element method. *Advances in Engineering Software*. 2006;37:649-658.
- [5] Borchers L, Reichart P. Three-dimensional stress distribution around a dental implant at different stages of interface development. *J Dent Res*. 1983;62(2):155-159.
- [6] Ma P, Liu HC, Li DH, et al. Kouqiang Hemian Xiufuxue Zazhi. 2007;8(1):47-49.
马攀,刘洪臣,李德华,等.三种螺距对种植体初期稳定性影响的有限元研究[J].口腔颌面修复学杂志,2007,8(1): 47-49.
- [7] Sevimay M, Turhan F, Kiliçarslan MA, et al. Three-dimensional finite element analysis of the effect of different bone quality on stress distribution in an implant-supported crown. *J Prosthet Dent*. 2005;93(3):227-234.
- [8] Tada S, Stegaroiu R, Kitamura E, et al. Influence of implant design and bone quality on stress/strain distribution in bone around implants: a 3-dimensional finite element analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2003;18(3):357-368.
- [9] Pi X. Beijing: People's Medical Publishing House. 2003:257.
皮昕.口腔解剖生理学[M].北京:人民卫生出版社,2003:257.
- [10] Chun HJ, Cheong SY, Han JH, et al. Evaluation of design parameters of osseointegrated dental implants using finite element analysis. *J Oral Rehabil*. 2002;29(6):565-574.
- [11] Han K. Beijing: People's Military Medical Press. 2007:142.
韩科.种植义齿[M].北京:人民军医出版社,2007:142.
- [12] Huiskes R, Chao EY. A survey of finite element analysis in orthopedic biomechanics: the first decade. *J Biomech*. 1983;16(6): 385-409.
- [13] Jiang XY. Beijing: Qinghua Daxue Chubanshe. 1992:1.
蒋孝煜.有限元法基础[M].北京:清华大学出版社,1992:1.
- [14] Zhu J. Shanghai Shengwu Yixue Gongcheng. 2003;24(3):53-56.
朱静.有限元分析方法在口腔临床中的应用进展[J].上海生物医学工程,2003,24(3):53-56.
- [15] Li QY, Dong YS, Chen WJ, et al. Kouqiang Yixue. 2004;24(1):44-46.
李青奕,董寅生,陈文静,等.预加载“L”形曲力学行为的有限元分析[J].口腔医学,2004,24(1):44-46.
- [16] Xu WC, Chen WJ, Dong YS, et al. Kouqiang Yixue. 2002;22(1):31.
许文翠,陈文静,董寅生,等.垂直曲的力学行为的研究[J].口腔医学, 2002,22(1):31.
- [17] Hirabayashi M, Motoyoshi M, Ishimaru T, et al. Stresses in mandibular cortical bone during mastication: biomechanical considerations using a three-dimensional finite element method. *J Oral Sci*. 2002;44(1):1-6.
- [18] Zhang SF. Guowai Yixue: Kouqiang Yixue Fence. 1990;17(2):92-94.
张少锋.有限元法及其在口腔医学研究中的应用[J].国外医学:口腔医学分册,1990,17(2):92-94.
- [19] Chun HJ, Shin HS, Han CH, et al. Influence of implant abutment type on stress distribution in bone under various loading conditions using finite element analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2006;21(2):195-202.
- [20] Ding X, Zhu XH, Chen SH, et al. Yiyong Shengwu Lixue. 2005; 20(3):153-156.
丁熙,朱彤好,陈树华,等.三维有限元分析角度基台对种植体骨界面应力分布的影响[J].医用生物力学,2005,20(3):153-156.
- [21] Chaichanasiri E, Nanakorn P, Tharanon W, et al. Finite element analysis of bone around a dental implant supporting a crown with a premature contact. *J Med Assoc Thai*. 2009;92(10):1336-1344.
- [22] Guda T, Ross TA, Lang LA, et al. Probabilistic analysis of preload in the abutment screw of a dental implant complex. *J Prosthet Dent*. 2008;100(3):183-193.
- [23] Proos KA, Swain MV, Ironside J, et al. Influence of margin design and taper abutment angle on a restored crown of a first premolar using finite element analysis. *Int J Prosthodont*. 2003;16(4):442-449.
- [24] Chen Y. Kouqiang Yixue. 2008;24(3):317-319.
陈轶.氧化锆全瓷角度基台的三维有限元应力分析[J].口腔医学, 2008, 24(3):317-319.
- [25] Ma P, Li DH, Liu J, et al. Zhonghua Yixue Meixue Meirong Zazhi. 2008;14(3):180-183.
马攀,李德华,刘杰,等.四种螺纹截面形态对种植体初期稳定性影响的三维有限元研究[J].中华医学美容美容杂志,2008,14(3):180-183.
- [26] Li XJ, Harold M Frost, Zhu SS, et al. Zhongguo Guzhi Shusong Zazhi. 2001;7(3):253-261.
黎小坚,Harold M Frost,朱绍舜,等.基础骨生物学新观[J].中国骨质疏松杂志,2001,7(3):253-261.
- [27] Li XJ, Harold M Frost, Zhu SS, et al. Zhongguo Guzhi Shusong Zazhi. 2001;7(2):152-174.
黎小坚,Harold M Frost,朱绍舜,等.基础骨生物学新观[J].中国骨质疏松杂志,2001,7(2):152-174.
- [28] Korioto TW, Hannam AG. Deformation of the human mandible during simulated tooth clenching. *J Dent Res*. 1994;73(1):56-66.
- [29] Saab XE, Griggs JA, Powers JM, et al. Effect of abutment angulation on the strain on the bone around an implant in the anterior maxilla: a finite element study. *J Prosthet Dent*. 2007; 97(2):85-92.