

文章编号: 1004-7220(2016)02-0148-06

不同骨缺损类型牙种植体的三维有限元分析

雍 苓¹, 黄仕禄¹, 刘 洪¹, 牟雁东²

(1. 四川医科大学 口腔医学院, 泸州 646000; 2. 四川省医学科学院·四川省人民医院 口腔种植科, 成都 610072)

摘要: **目的** 研究动态加载下不同骨缺损类型对种植体-骨整合界面、天然骨与 Bio-oss 成骨结合界面应力分布的影响。**方法** 应用 ANSYS 软件, 建立第 1 磨牙缺失并伴有不同类型骨缺损(旁穿型、裂开型、环型、垂直型)的 4 种模型, 并建立各模型对应的植骨块和种植体模型, 以 200 N 垂直载荷及 100 N 斜向载荷分别模拟咀嚼周期中 5 个阶段的动态受力过程, 分析各组织结合界面应力分布情况。**结果** 4 类骨缺损模型在一个咀嚼周期中, 从第 2 到第 4 阶段, 种植体-骨整合界面应力增幅依次为 81.6%、90.7%、106%、182%, Bio-oss 成骨与天然骨结合界面应力增幅依次为 26%、13%、6%、56%。**结论** 4 类模型的植骨稳定性为: 环型骨缺损 > 裂开型骨缺损 > 旁穿型骨缺损 > 垂直型骨缺损, 在临床上种植医师应根据其植骨部位甄别出植骨高风险患者, 治疗时应为骨植入材料选择不同的固定方式, 最终提高植骨稳定性; 垂直载荷更有利于各组织结合界面的应力分布状况, 在临床设计种植义齿上部结构时应尽量减小或避免斜向载荷。

关键词: 牙种植体; 骨缺损; 有限元分析; 动态加载**中图分类号:** R783.6; R318.01 **文献标志码:** A**DOI:** 10.3871/j.1004-7220.2016.02.148

Three-dimensional finite element analysis of dental implants with different bone defects

YONG Ling¹, HUANG Shi-lu¹, LIU Hong¹, MU Yan-dong² (1. School of Stomatology Sichuan Medical University, Luzhou 646000, Sichuan, China; 2. Department of Prosthodontics, Sichuan Academy of Medical Sciences & Sichuan Provincial People's Hospital, Chengdu 610072, China)

Abstract: Objective To analyze the effect of different types of bone defect on stress distributions of implant-bone interface and bone-Bio-oss interface under dynamic loads by finite element method. **Methods** The finite element models for four types of bone defects (fenestrated bone defect, dehiscence bone defect, circular bone defect, vertical bone defect) with the first molars loss were established, then the models with grafting bone and implants corresponding to each model were established. The vertical load of 200 N and oblique load of 100 N were added respectively to simulate the dynamic chewing process of 5 stages in a masticatory cycle, and the maximum Von Mises stresses at the implant-bone interface and bone-Bio-oss interface were analyzed. **Results** In a masticatory cycle, from stage 2 to stage 4, the stresses on implant-bone interface increased by 81.6%, 90.7%, 182%, 106%, respectively, while the stresses on Bio-oss bone and natural bone interface increased by 26%, 13%, 6%, 56%, respectively. **Conclusions** The sequence of bone graft stability for the models with four types of bone defects is: circular bone defect > dehiscence bone defect > fenestrated bone defect > vertical bone defects. In clinic, doctors should screen the high-risk patients according to the sites of the bone grafts, and choose the more relevant methods for fixing the bone grafts so as to improve the stability of bone grafting. The axial loading will be more beneficial to the stress distributions on the interface, and the oblique loading should be decreased or avoided in clinical design for the superstructure of implant denture.

Key words: Dental implants; Bone defect; Finite element analysis; Dynamic loading

收稿日期: 2015-07-14; 修回日期: 2015-11-07

基金项目: 四川省科技厅资助项目(2014JY0187), 四川省卫生厅资助项目(140075)。

通信作者: 牟雁东, 主任医师, 博士研究生导师, Tel: (028) 87394269; E-mail: muyd@necsc.edu.cn。

口腔种植学已成为当代口腔医学中发展最快、成效最显著的一个学科,但临床上常见到因外伤、牙周炎及拔牙后吸收萎缩等原因造成的种植体周围牙槽嵴骨缺损病例。根据骨缺损的位置,可分为旁穿型、裂开型、环型、垂直型 4 种类型。而牙槽嵴骨缺损重建和骨再生仍是目前限制牙种植修复的瓶颈问题,是达到种植体初期稳定性和恢复软组织外形的前提基础。

本文以下颌第 1 磨牙缺失为研究对象,建立 4 种类型的骨缺损模型,通过有限元软件模拟并分析一个咀嚼周期中各模型的应力分布情况,以为临床骨增量术后各组织结合界面受力情况、力学稳定性和远期使用效果提供参考,为不同骨缺损类型选择不同的固定方式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 建立三维有限元模型

选择 1 名成年男性(下颌骨牙列完整),采用三维螺旋 CT 对其下颌骨进行连续薄层平行扫描,层厚 0.5 mm,扫描范围从下颌骨下缘至髁骨。扫描图像数据以 DICOM 格式导入 3D 图像生成及编辑处理软件 Mimics 及 Geomagic 中,对图像进行相应处理后生成完整下颌骨三维模型;然后选取右下颌骨(C7 远中面至 C5 近中面之间部分)导入 ANSYS 软件,建立第 1 磨牙缺失并伴有不同骨缺损的 4 类模型:

模型 1 旁穿型骨缺损模型,种植体中 1/2 至根尖的颊侧缺损;

模型 2 裂开型骨缺损模型,种植体顶至种植体中 1/2 的颊侧缺损;

模型 3 环型骨缺损模型,种植体上 2/3 圆环形骨缺损;

模型 4 垂直型骨缺损模型,牙槽嵴顶 2 mm 骨缺损。

建立 4 类骨缺损模型对应的植骨块模型和螺纹种植体模型(直径 4.1 mm,长度 10 mm,穿龈 1.8 mm,螺纹深度 0.35 mm,螺距 1.25 mm,上部实心基台高度 5 mm,锥度为 6°)。应用布尔运算合成含牙种植体和植骨块的 4 类骨缺损模型[见图 1(a)]。4 类骨缺损模型对应的骨缺损位置及植骨情况如图 1(b)~(e)所示。

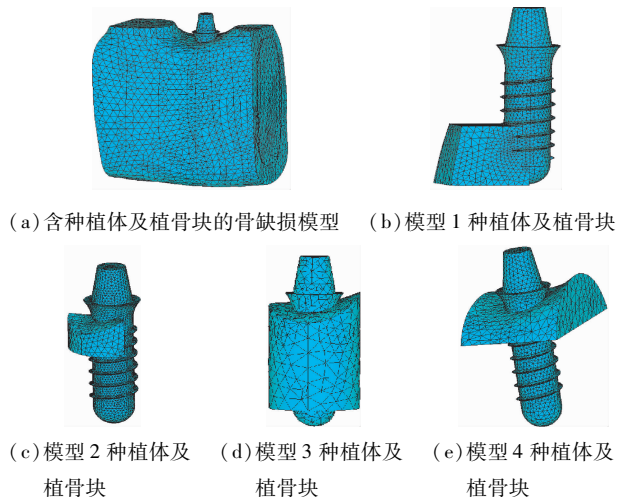


图 1 4 类骨缺损模型对应的骨缺损位置及植骨情况

Fig. 1 Four kinds of bone defect models with dental implants and Bio-oss (a) Bone defect models with Implant and Bio-oss, (b) Model 1 with dental implants and Bio-oss, (c) Model 2 with dental implants and Bio-oss, (d) Model 3 with dental implants and Bio-oss, (e) Model 4 with dental implants and Bio-oss

1.2 实验条件假设和材料力学参数

将模型中各种材料和组织假设为连续、均质、各向同性的线弹性材料,并对其进行三维四面体网格划分。各种材料的力学参数见表 1。

表 1 模型有关材料的力学参数^[1]

Tab. 1 Mechanical parameters of materials in the models^[1]

材料	弹性模量/GPa	泊松比
皮质骨	13.70	0.30
松质骨	1.37	0.30
种植体	110.00	0.35
基台	110.00	0.35
Bio-oss 成骨	11.00	0.30

1.3 接触条件

假设种植体-骨界面为 100% 骨整合,种植体与颌骨骨整合界面、天然骨与 Bio-oss 成骨结合界面均为固定接触,无相对滑动。

1.4 载荷及边界条件

对模型施加面约束:在下颌骨的四周施加固定约束。然后,将动态外载荷施加于基台顶部,设定 1 个动态外载荷周期为 5 个阶段,共 0.875 s^[2]。

第 1 阶段:下颌向下、向外,即向工作侧移动,上、下颌牙齿无接触;

第2阶段:下颌向上,工作侧同名牙牙尖相对,垂直加载于颌面;

第3阶段:载荷由颊侧斜向舌侧,与牙体长轴呈30°;

第4阶段:载荷由舌侧斜向颊侧,与牙体长轴呈30°;

第5阶段:卸载阶段,下颌后牙与对颌牙分离,回归至牙尖交错位。

综合相关文献资料^[3]及临床实践,设定垂直载荷为200 N,侧向载荷为100 N(见表2)。在一个咀嚼周期,第2、3、4阶段时外载荷的加载方向如图2所示。

表2 咀嚼周期不同时间段加载量、方向和时间
Tab.2 Force, direction and time of dynamic loads in a masticatory cycle

阶段	时间/s	加载方向	载荷/N
1	0.000 ~ 0.130	—	—
2	0.130 ~ 0.150	垂直于牙合平面	200
3	0.150 ~ 0.260	颊斜向舌 30°	100
4	0.260 ~ 0.300	舌斜向颊 30°	100
5	0.300 ~ 0.875	—	—

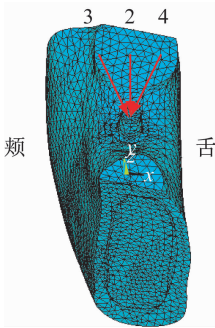


图2 第2、3、4阶段加载方向
Fig.2 Loading direction at stage 2, 3, 4

2 结果

由于4类骨缺损模型在第1阶段义齿未受力、在第5阶段应力释放(应力近似为0),则分析在第2~4加载阶段种植体-骨整合界面和天然骨-Bio-oss成骨结合界面的 Von Mises 应力分布情况及最大应力值。

2.1 种植体-骨整合界面颊侧应力分布特征

自上而下提取种植体-骨整合界面颊侧 Von Mises 应力,由于骨与种植体各螺纹结合处的应力波动较大,故只取各螺纹结合处的应力最大值进行分析。不同模型种植体-骨整合界面颊侧的 Von Mises 应力曲线如图3所示,种植体光滑部位的最上部设为0位置。

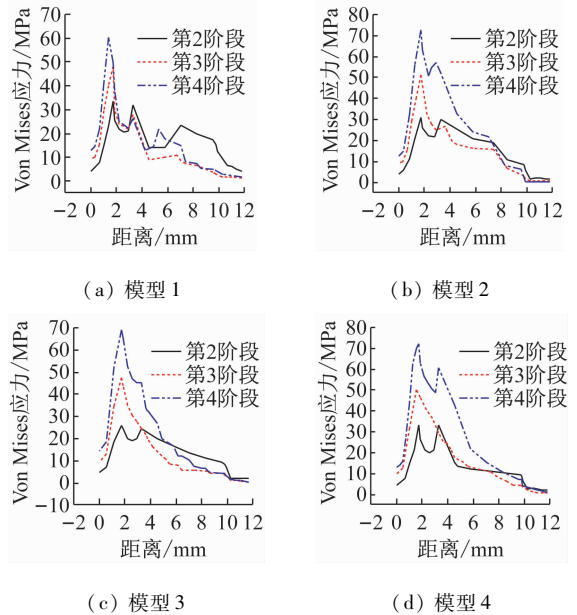


图3 一个咀嚼周期中4类骨缺损模型种植体-骨整合界面颊侧的应力分布

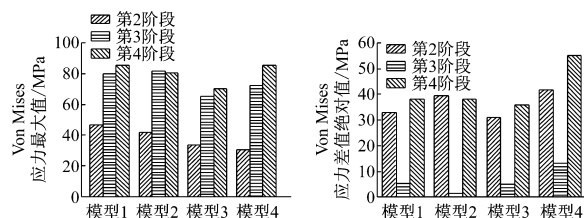
Fig.3 Stress distributions at implant-bone interface of the models with 4 different kinds of bone defects in a masticatory cycle
(a) Model 1, (b) Model 2, (c) Model 3, (d) Model 4

由图3可知,在一个咀嚼周期第2~4加载阶段,4种模型所对应的 Von Mises 应力分布均表现出以下特点:①垂直加载时,种植体骨界面的应力主要集中于种植体颈部,并向根尖方向逐渐减小;颊舌向加载及舌颊向加载时,种植体骨界面的应力明显增大,但仍集中于种植体颈部;②在种植体螺纹与松质骨、皮质骨、Bio-oss 成骨的接触面处出现了不同程度的应力集中现象,这主要是由于接触面的受载面积小、应力无法得到释放所致。

2.2 种植体-骨整合界面应力分析

一个咀嚼周期中,4类骨缺损模型的种植体-骨整合界面应力分布情况如图4所示。不同模型的种植体-骨界面最大应力不同。在第2阶段加载时,4种模型的最大应力依次为46.85、42.15、33.91、

30.42 MPa;在第3、4阶段时,各模型种植体-骨界面的 Von Mises 应力均明显大于第2阶段,其中第4阶段应力最大,不同模型第4阶段最大应力值依次为85.08、80.38、69.93、85.45 MPa;从第2到第4阶段,应力的增幅分别为81.6%、90.7%、106%、182%。不同骨缺损模型在一个咀嚼周期内应力变化为:模型4 > 模型1 > 模型2 > 模型3。



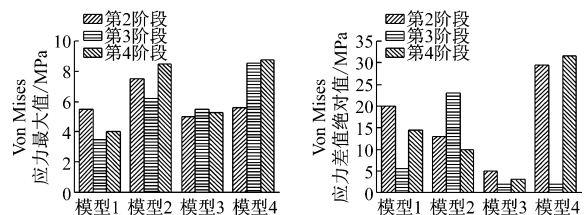
(a) 种植体-骨界面应力峰值 (b) 种植体-骨界面应力差值的绝对值

图4 4类骨缺损模型种植体-骨整合界面应力分布情况

Fig. 4 Von Mises stress at implant-bone interface of the models with 4 different kinds of bone defects (a) The maximum stress at implant-bone interface, (b) The absolute value of stress difference at implant-bone interface

2.3 天然骨与 Bio-oss 成骨结合界面应力分析

一个咀嚼周期中,4类骨缺损模型天然骨与 Bio-oss 成骨结合界面应力分布情况如图5所示。从第2到第4阶段, Bio-oss 成骨与天然骨结合界面应力增幅依次为26%、13%、6%、56%。不同模型中, Bio-oss 成骨与天然骨结合界面的最大应力不同。在第2阶段时,应力由大到小:模型2 > 模型1 > 模型4 > 模型3,而在第3、4阶段时,应力由大到小:模型4 > 模型2 > 模型3 > 模型1。一个咀嚼周期中,从第2到第4阶段应力之差的绝对值由大到小:模型4 > 模型1 > 模型2 > 模型3。



(a) Bio-oss 与天然骨界面应力峰值 (b) Bio-oss 与天然骨界面应力差值的绝对值

图5 4类骨缺损模型天然骨与 Bio-oss 成骨结合界面应力分布情况

Fig. 5 Von Mises stress at bone-Bio-oss interface of the models with 4 different kinds of bone defects (a) The maximum stress at bone-Bio-oss interface, (b) The absolute value of stress difference at bone-Bio-oss interface

3 讨论

3.1 不同骨缺损类型牙种植的三维有限元模型构建

在种植修复中,种植体周围骨缺损是影响种植修复长期稳定与美学效果的关键因素^[4]。临床上,关于种植区骨量不足的分类很多,本文选择根据缺损位置对种植区骨量不足的分类方法^[1],通过三维有限元软件建立4类骨缺损模型。由于有限元分析中非关键结构单元过多会造成计算成本过大,故在建模中用部分下颌骨替代整个下颌骨,进行种植体界面应力分析。

种植义齿修复时,垂直于牙合面的轴向载荷是所有种植外科、修复科医生所期望的理想状态。但在真实咀嚼过程中,施加于种植体上的颌力在位置、方向、大小上都随着时间快速变化,本文将后牙颌运动循环过程的5个阶段进行分解,采用动态加载的方法,使分析结果对临床更具有指导意义。

3.2 4类骨缺损类型的种植体-骨整合界面应力特征分析

近年来,随着新技术的发展,各种骨增量手术及引导骨再生技术应用于临床,而术后种植体-骨整合界面是决定种植义齿是否成功的关键界面。因此,本文从临床观点出发,研究一个咀嚼周期内4种骨缺损类型对骨整合界面应力的影响。研究结果表明,应力峰值均集中于颈部,这与以往许多实验结果相一致,即种植牙颈部是种植牙应力集中的主要部位,也与临床上观察到的颌骨组织吸收主要发生于种植体颈部并呈蝶状吸收的现象相吻合^[5]。Kitamura等^[6]指出,种植体颈部颌骨组织吸收是对生理载荷的适应。载荷方向只能影响应力的大小,而对应力分布情况影响不大。影响应力分布情况的主要因素为不同骨缺损类型(见图3)。

邹敬才等^[7]通过多元逐步回归方程发现,单颗种植牙失败的危险主要来自种植牙受力角度的改变。本文进一步分析了受力角度改变对不同骨缺损类型应力分布影响的大小。研究结果表明,同一模型在斜向载荷下种植体-骨整合界面应力显著高于垂直载荷下,这是由于种植体与骨组织是骨性结合,种植体周围无牙周膜的缓冲作用,故各种力尤其是侧向力对种植体的影响远比对天然牙大,以模型4

表现最为显著。垂直载荷下模型4种植体-骨界面的 Von Mises 应力最低,表明模型4种植体承受垂直载荷的能力较强。这与 Jensen 等^[8] 临床调查结果一致,即垂直型骨缺损植骨成功后种植体存活率为100%,相比旁穿型及裂开型骨缺损种植体平均存活率(95.4%)高。推测种植体颈部为应力集中区,而模型4颈部为 Bio-oss,其弹性模量比皮质骨低,致使模型4种植体-骨整合界面应力峰值较模型1、2低。但斜向载荷下模型4种植体-骨界面应力则明显高于其他模型,这是由于垂直型骨缺损植骨区受外力大,自身缺乏稳定性结构支撑,植骨稳定性最差^[9],而这种高水平应力对松质骨的骨重建非常不利,继而影响骨结合,故临床修复时应采用减小牙尖斜度、消除颌干扰等措施,以免义齿受到过大的侧向力,影响骨整合。模型3的骨缺损常见于即刻种植,由于临床常用种植体直径为2.5~4.8 mm,而据统计自然牙颈部宽度为3.6~8.9 mm^[10]。即刻种植要求拔牙时尽量不破坏周围骨壁,拔牙后拔牙创不能复位,故种植体颈部周围多遗留环形缺损,但由于缺损四周均有皮质骨包绕,植骨稳定性高于其他3类骨缺损。因此,受力角度改变对模型3的影响最小。Pal 等^[11]认为,当种植体骨壁间距为1~2 mm,可以仅利用种植体窝预备过程中的自体骨屑和血凝块,无需植入骨替代材料或覆盖屏障膜,种植体与拔牙窝内壁之间的间隙也会有新骨的形成,最终形成良好的骨结合(见图4)。

3.3 4类骨缺损类型天然骨与 Bio-oss 成骨结合界面的应力特征分析

临床上常因各种原因造成不同部位的骨缺损,种植手术之前往往需要植入骨替代材料恢复骨量。本文选用与人体颌骨晶体结构相近,且抗压强度及弹性模量在同一范围内的 Bio-oss 为骨替代材料,临床上 Bio-oss 修复骨缺损过程分为血肿机化期、原始骨痂形成期和骨痂改造塑形期^[1],而不同时期的骨缺损表面会有不同程度的骨再生。本文设置天然骨与 Bio-oss 成骨结合界面为固定接触,无相对滑动的界面,以模拟缺损处未完全被成熟骨替代。研究结果表明,一个咀嚼周期中,天然骨与 Bio-oss 成骨结合界面应力变化幅度是:模型4 > 模型1 > 模型2 > 模型3。Sarnachiaro 等^[12]也认为,旁穿型和裂开型骨缺损模型植骨相对稳定,经过常规引导骨再生术

便能达到很好的成骨;该结果亦符合 Aloy-Prósper 等^[13]提出的垂直型骨缺损植入物吸收风险大于水平型骨缺损的结论。这是因为垂直型骨缺损植骨后没有骨壁支撑,易受外力特别是软组织张力的影响。因此,临床上垂直型骨缺损植骨手术时一方面应采用钛网钛钉等增强方式对植骨材料牢固固定^[14],另一方面应减少软组织张力。减少天然骨与 Bio-oss 成骨结合界面早期的滑动将有利于成骨(见图5)。

4 结论

本研究建立了下颌第1磨牙缺失、不同骨缺损类型的右下颌骨三维有限元模型,并建立各模型对应的植骨块和种植体模型。动态加载的三维有限元分析结果表明,不同骨缺损模型模拟植骨及植入种植体后行使口腔功能,其力学稳定性为:环型骨缺损 > 旁穿型骨缺损 > 裂开型骨缺损 > 垂直型骨缺损。因此,在临床上种植医师应根据其植骨部位甄别出植骨高风险患者,治疗时应为骨植入材料选择不同的固定方式,最终提高植骨稳定性;垂直载荷更有利于各组织结合界面的应力分布状况,在临床设计种植义齿上部结构时应尽量减小或避免斜向载荷。

参考文献:

- [1] 丁熙,朱彤好,林芝,等. 不同植入扭矩对种植体骨界面生物力学特性的影响[J]. 医用生物力学, 2013, 28(2): 184-188.
- [2] Ding X, Zhu XH, Lin Z, *et al.* Influence of insertion torque on biomechanical characteristics at implant-bone interface [J]. J Med Biomech, 2013, 28(2): 184-188.
- [3] 吕佳,刘翠玲,蓝菁,等. 动态载荷下种植体位置和直径对悬臂梁种植固定义齿应力影响的三维有限元研究[J]. 华西口腔医学杂志, 2013, 31(6): 552-556.
- [4] Kitamura E, Stegaroiu R, Nomura S, *et al.* Influence of marginal bone resorption on stress around an implant-A three-dimensional finite element analysis [J]. J Oral Rehabil, 2005, 32(4): 279-286.
- [5] 孙嘉峰,都承斐,徐鹏,等. 不同固位技术修复单侧上颌骨缺损的生物力学研究[J]. 医用生物力学, 2014, 29(4): 29-23.
- [6] Sun JY, Du CF, Xu P, *et al.* Biomechanical study on unilateral maxilla restoration using different retention methods

- [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(4): 29-23.
- [5] Ohashi T, Matsunaga S, Nakahara K, *et al.* Biomechanical role of peri-implant trabecular structures during vertical loading [J]. *Clin Oral Invest*, 2010, 14(5): 507-513.
- [6] Kitamura E, Stegaroiu R, Nomura S. Biomechanical aspects of marginal bone resorption around osseointegrated implants: Considerations based on a three-dimensional finite element analysis [J]. *Clin Oral Impl Res*, 2004, 15(4): 401-412.
- [7] 邹敬才, 刘宝林. 影响人工种植牙-骨界面应力分布规律因素的多元逐步回归分析[J]. *医用生物力学*, 2000, 15(4): 216-221.
- Zhou JC, Liu BL. Multivariate step regression analysis of influencing factors on the stress distribution patterns at the bone interface around dental implants [J]. *J Med Biomech*, 2000, 15(4): 216-221.
- [8] Jensen SS, Terheyden H. Bone augmentation procedures in localized defects in the alveolar ridge: Clinical results with different bone grafts and bone-substitute materials [J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2008, 24(7): 218-236.
- [9] Restoy LA, Dominguez ML, Infante-Cossio P, *et al.* Reconstruction of mandibular vertical defects for dental implants with autogenous bone block grafts using a tunnel approach: Clinical study of 50 cases [J]. *Inte J Oral Maxi Surg*, 2015, 44(11): 1416-1422.
- [10] 皮昕, 王美青. 口腔解剖生理学[M]. 6版. 北京: 人民卫生出版社, 2005: 40.
- [11] Pal US, Dhiman NK, Singh G, *et al.* Evaluation of implants placed immediately or delayed into extraction sites [J]. *Nati J Maxi Surg*, 2011, 2(1): 54-60.
- [12] Samachiaro GO, Chu SJ, Samachiaro E, *et al.* Immediate implant placement into extraction sockets with labial plate dehiscence defects: A clinical case series [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2015, DOI:10.1111/cid.12347.
- [13] Aloy-Prósper A, Peñarrocha-Oltra D, Peñarrocha-Diago MA, *et al.* The outcome of intraoral onlay block bone grafts on alveolar ridge augmentations: A systematic review [J]. *Med Oral Pato Oral Cir Bucal*, 2015, 20(2): 251-257.
- [14] Haqqerty CJ, Voqel CT, Fisher GR. Simple bone augmentation for alveolar ridge defects [J]. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am*, 2015, 27(2): 203-226.

· 致读者 ·

关于图表的要求

表和图的设计应科学、简洁、合理,有自照性,均分别按其正文出现先后次序连续编号,并冠以图(表)序号和题目。说明性的资料应置于图(表)下方注释中,并在注释中标明图标中使用的全部非公知公用的缩写及表中的统计学处理。均采用三线表,表内数据同一指标有效位数一致,均数及标准差小数点后保留位数一致。图题、表题及图注、表注均应中、英文对照书写。

黑白图片必须清晰度及对比度良好,层次分明,彩色照片要求色彩鲜明,图像清晰。图片或照片大小要基本一致。图不宜过大,最大宽度半栏图不超过 7.5 cm,通栏图不超过 16.5 cm,高与宽比例以 5 : 7 为宜。图注应放在图题之上及固定脚注之前,照片中需说明的部位请以箭头或字母标注,在图注中说明。图片及照片不得折损。若刊用人像,应征得本人书面同意,或遮盖其能辨认出系何人部分(眼睛)。大体标本照片在图内最好有尺度标记。病理照片要求注明染色方法和放大倍数。

试验数据的曲线图必须根据测试数据绘制,线条必须光滑清晰,有横纵坐标的统计图必须有确切的标目名称和规范的计量单位;实验装置等示意图一定要精心绘制,对图内的结构要有必要的注释,使读者一目了然;引用他人的图(表)一定要用文献角码表明出处。