

文章编号:1004-7220(2012)06-0655-06

不同咬合方式下人体下颌骨膜下种植体的生物力学特性

董泽文¹, 张小军¹, 李彦生¹, 高承志², 高轩², 李晓阳¹

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124; 2. 北京大学人民医院, 北京 100044)

摘要: **目的** 研究骨膜下种植体在4种咬合力作用下的生物力学特征,为临床病例骨膜下种植体个性化设计提供基础。**方法** 在下颌骨三维实体模型的基础上,分别建立网状基底骨膜下种植体(种植体1)和带状基底骨膜下种植体(种植体2)。研究在4种荷载作用下两种种植体的应力分布。**结果** 种植体1在荷载IV作用下最大应力可达230.42 MPa,种植体2在荷载I作用下最大应力可达311.11 MPa。网状基底种植体具有较好的抗垂直荷载能力,而带状基底种植体具有较好的抗斜向荷载能力。**结论** 在种植体设计时可以通过合理布置基台个数和间距来有效控制种植体上的应力,同时应使基台与下颌牙槽嵴垂直,以保证斜向荷载水平分力不被放大。此外,还应保证基底对基台有足够的约束,避免因约束不足导致基台底部应力过大。在义齿制作过程中,应保证全口牙齿做正中、前伸、侧方咬合时必须多点接触,使咬合处于平衡状态,达到减小接触面拉应力的目的。

关键词: 骨膜下种植体; 生物力学特性; 有限元分析; 应力分布

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Biomechanical properties of the complete mandibular subperiosteal implant under different bite loads

DONG Ze-wen¹, ZHANG Xiao-jun¹, LI Yan-sheng¹, GAO Cheng-zhi², Gao Xuan², LI Xiao-yang¹

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. People's Hospital, Peking University, Beijing 100044, China)

Abstract: Objective To investigate biomechanical properties of the complete mandibular subperiosteal implant under four different bite loads, and provide some references for the personalized implant design in clinical cases.

Methods Based on the three-dimensional model of human mandible, two kinds of matching complete mandibular subperiosteal implants, meshy base (implant 1) and zonary base (implant 2), were established, respectively. Stress distributions of both the two implants under four different bite loads were calculated and compared.

Results The maximum stress of implant 1 was 230.42 MPa under the load IV and that of implant 2 was 311.11 MPa under the load I. The stress distributions and maximum stress showed that the implant with meshy base had better resistance to the vertical loads, while the implant with zonary base had better resistance to the horizontal loads. **Conclusions** Rational arrangement for the number of posts and the distance between posts can effectively control the stress of implants. Posts should be placed in a vertical direction with the alveolar bone to avoid amplifying the horizontal component. In addition, posts should be well bounded to the bases, so that the stress on the bottom of posts won't be at a high level. The complete denture should be guaranteed to contact at several spots during centric, protrusive and lateral bites to keep occlusion balance and decrease the maximum tensile stress on the contact surface.

Key words: Complete mandibular subperiosteal implant; Biomechanical properties; Finite element analysis; Stress distribution

收稿日期:2012-01-04; 修回日期:2012-03-11

基金项目:首都特色临床医学应用发展基金(Z101107050210026)。

通讯作者:张小军,副教授,硕士生导师,Tel:(010)67394525;E-mail:xjzhang@bjut.edu.cn。

随着我国人口老龄化日益加深,越来越多的老年患者牙齿完全缺失,需要一副全口义齿帮助恢复口腔基本功能。随着年龄增长,患者的剩余牙槽骨会逐渐被吸收。上颌全口义齿可以通过腭部的硬组织固位义齿,而下颌骨解剖结构呈细窄的马蹄形,黏膜接触面积非常有限,剩余牙槽骨为下颌全口义齿提供的支持与固位往往不足。当下颌牙槽嵴重度吸收时,下颌全口义齿会出现松动、压痛以及咀嚼困难等情况,严重影响了患者的生活质量^[1]。骨膜下种植体为该患者提供了一种解决办法^[2-3],它避免了骨内种植体对骨量的依赖和可能引发的病理性骨折、以及传统全口义齿的松动问题。

骨膜下种植体为一种置于骨与骨膜之间的种植体,可以为下颌牙槽嵴严重吸收的患者的总义齿修复提供固位和支持。在过去20年,随着骨内种植体技术的发展,骨膜下种植体的价值被大大低估^[4]。传统骨膜下种植体手术需要切开骨膜、暴露下颌骨体后才能制取印模;骨膜下种植体在石膏模型上制作完成后,还需要二次切开患者软组织及骨膜后才能将种植体植入,给患者带来较大的创伤。受到当时加工技术水平的限制,个性化骨膜下种植体很难与下颌骨体紧密贴合,而且骨膜下种植体的设计理念各异,没有形成一套标准的理论体系,限制了骨膜下种植体的推广应用。

随着现代科技的发展,CT扫描结合计算机辅助设计加工技术已广泛应用于临床。针对下颌牙槽嵴吸收重度患者,本文提出了基于CT数据的个性化骨膜下种植体设计方案。该方案利用牙槽嵴吸收达基骨患者的CT数据,建立数字化的下颌骨模型,并根据下颌骨形状确定种植体几何尺寸。种植体的选型是临床中需要解决的问题,本文通过对带状基底和网状基底两种常用的骨膜下种植体力学性能的研究^[4-5],为临床种植体选型提供依据,找出适合该类患者的种植体类型,并为种植体的改进提出建议。

1 材料和方法

1.1 数据采集

使用人无牙下颌骨标本:牙槽嵴顶处粘骨膜厚度为3.0 mm,黏膜转折处厚为1.5 mm,磨牙后垫处厚度为4 mm,Atwood分级为第4级,属牙槽嵴吸收达基骨,即牙槽嵴吸收重度患者。将标本置于CT

床上,使双侧下颌角与颞部所构成的平面与地面平行,扫描中线与下颌骨中线对齐,从颞部开始至下颌升支为止进行扫描,扫描层厚0.625 mm,扫描层间距1.25 mm,共获得178张断层图像。

1.2 三维模型的建立

利用Mimics读取并转换Dicom文件,通过图像灰度的阈值调整,修补后生成多异线,再经填充操作后生成下颌骨,对其进行光滑处理后导出area.lis文件。将该文件导入ANSYS中,通过面生成体的命令生成实体。导出iges格式文件,并在SolidWorks中形成三维实体几何模型。

在下颌骨模型的基础上,通过切割、曲面填充、曲面加厚等操作建立两类种植体模型,即种植体1和2。种植体1(见图1(a))由6个基台连接基底和顶部连杆,种植体基底为网状结构,其厚度为0.5 mm,基台的直径为2.5 mm,高度为3.5 mm,连接杆的内切圆直径为3 mm。种植体2(见图1(b))由4个基台连接基底和顶部连杆,种植体基底为带状结构,带状基底厚度、基台直径、高度、连接杆的内切圆直径与网状基底种植体相同。

1.4 赋材料属性和网格生成

下颌骨、钛合金的弹性模量和泊松比分别定义为13.7 GPa、0.3和96 GPa、0.36^[6-7]。下颌骨采取自由网格划分,种植体部分手动控制网格最小尺寸为0.5 mm,实现网格生成的合理化。种植体与下颌骨接触类型定义为固定接触。网格生成结果如图1(c)、(d)所示,单元类型为solid187。模型1的节点数为162 289,单元数为90 165,其中支架的节点数为95 866,单元数为52 232。模型2的节点数为130 617,单元数为73 040,其中支架的节点数为63 476,单元数为35 033。

1.5 边界条件和荷载分布

设定下颌骨的底部边缘为固定约束^[8],根据天然牙非平衡咬合时的较大咬合力^[9-11],设定了4种咬合状态,分别为:Ⅰ类荷载—双侧下颌前牙垂直方向75 N,Ⅱ类荷载—左下第1磨牙垂直方向150 N,Ⅲ类荷载—双侧第1磨牙垂直方向150 N,Ⅳ类荷载—左下第1磨牙斜向外45°方向105 N,分别模拟前牙切咬、左侧磨牙竖向咬合、双侧磨牙垂直咬合、左侧磨牙斜向咬合。

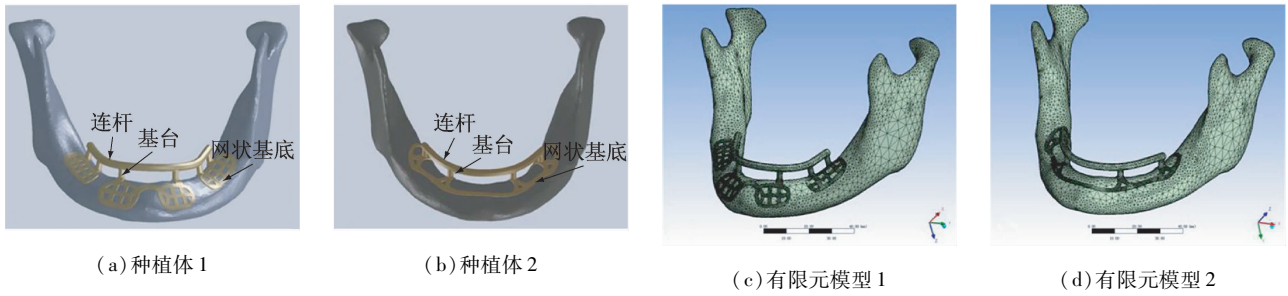


图1 种植体的结构和有限元网格模型

Fig.1 Structure of implants and finite element models (a) Implant 1, (b) Implant 2, (c) Finite element model 1, (d) Finite element model 2

2 结果

2.1 种植体应力分布

两种种植体应力分布云图如图 2、3 所示。荷载通过连杆传到基台,再由基台传到网状基底,靠近加载位置的基台以及基台之间的连杆应力值较大,起到了主要的荷载传递作用,分担了大部分荷载,其余部分应力较小。

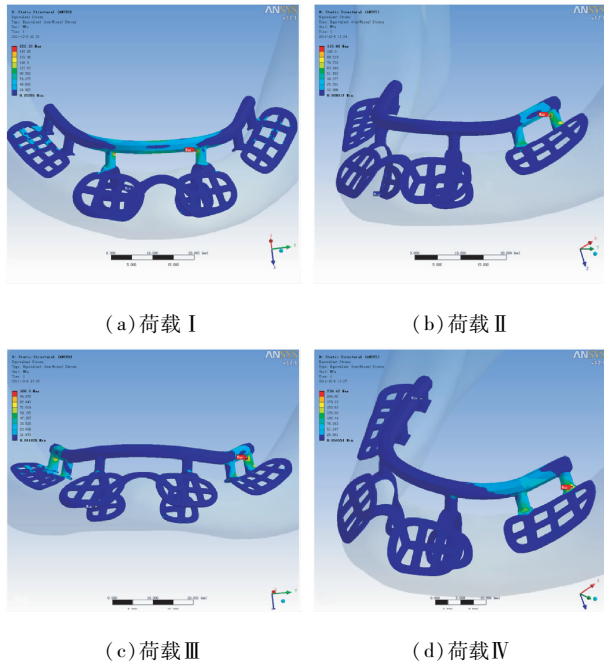


图2 种植体 1 在 4 种荷载作用下的应力分布

Fig.2 Stress distribution of implant 1 under four different loads

(a) Load I, (b) Load II, (c) Load III, (d) Load IV

2.1.1 种植体 1 在 4 种荷载作用下的应力分布

(1) 在 I 类荷载作用下,种植体 1(见图 2(a))

的应力呈左右近似对称分布,加载部位附近的两个基台及这两个基台之间的连杆上的应力较大,最大应力为 222.33 MPa,位于基台顶部。

(2) 在 II 类荷载作用下,种植体 1(见图 2(b))在加载位置附近的两个基台及这两个基台之间的连杆上的应力值较大,最大应力为 115.09 MPa,位于基台顶部。

(3) 在 III 类荷载作用下,种植体 1(见图 2(c))的应力呈左右近似对称分布,两侧加载位置附近的两个基台及基台之间连杆上的应力值较大,最大应力为 106.50 MPa,位于基台顶部。

(4) 在 IV 类荷载作用下,种植体 1(见图 2(d))在加载位置附近的基台及连接这两个基台连杆上的应力值较大,最大应力为 230.42 MPa,位于基台底部。

2.1.2 种植体 2 在 4 种荷载作用下的应力分布

(1) 在 I 类荷载作用下,种植体 2(见图 3(a))应力呈左右近似对称分布,加载部位附近的两个基台及这两个基台之间连杆上的应力较大,最大应力为 311.11 MPa,位于基台顶部。

(2) 在 II 类荷载作用下,种植体 2(见图 3(b))在加载位置附近的两个基台及这两个基台之间连杆上的应力值较大,最大应力为 222.89 MPa,位于基台顶部;

(3) 在 III 类荷载作用下,种植体 2(见图 3(c))应力呈左右近似对称分布,两侧加载位置附近的两个基台及基台之间连杆上的应力值较大,最大应力为 222.95 MPa,位于基台顶部;

(4) 在 IV 类荷载作用下,种植体 2(见图 3(d))在加载位置附近的基台及连接这两个基台连杆上的

应力值较大,最大应力为 214.03 MPa,位于基台底部。

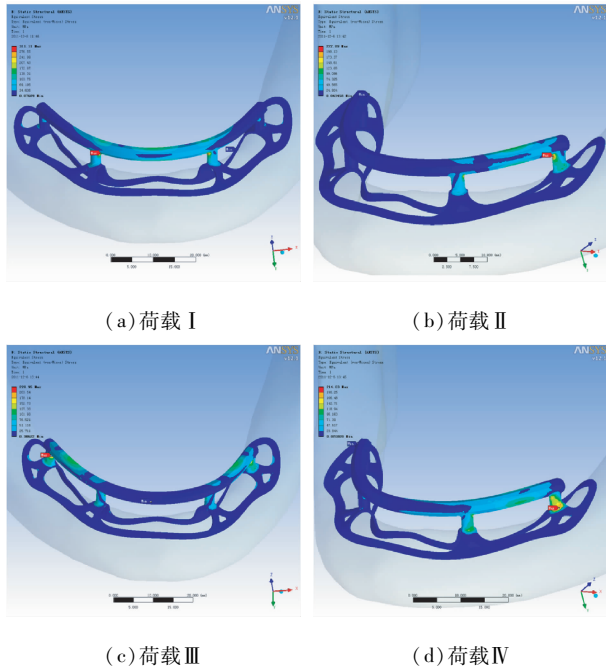


图3 种植体2在4种荷载作用下的应力分布
Fig.3 Stress distribution of implant 2 under four different loads
(a) Load I, (b) Load II, (c) Load III, (d) Load IV

在垂直荷载作用下,种植体1的应力小于种植体2;而在斜向荷载作用下,种植体1的应力大于种植体2。可见种植体1的抗垂直荷载能力好,种植体2的抗斜向荷载能力好。

在垂直荷载I作用下种植体1对应基台间距比种植体2对应基台间距小6.1 mm,种植体1的最大应力比种植体2小88.78 MPa;在垂直荷载II作用下,种植体1对应基台间距比种植体2对应基台间距小10.0 mm,种植体1的最大应力比种植体2小107.80 MPa。

2.2 斜向荷载水平分力和垂直分力分别作用下的应力分布

将斜向荷载IV分解为一个垂直牙槽嵴方向的垂直分力和一个平行牙槽嵴方向的水平分力。分别计算垂直和水平分力作用下种植体的应力响应。种植体1在水平分力作用下,最大应力位置与荷载IV作用下的最大应力位置相同,最大应力为199.14 MPa,此时基台顶部的应力较小(见图4(a));在垂直分力作用下,最大应力位于基台顶部,

此时在荷载IV作用下的最大应力处应力为40 MPa(见图4(b))。种植体2在水平分力作用下,在荷载IV作用下的最大应力处应力为167 MPa(见图4(c));在垂直分力作用下,最大应力位于基台顶部,在荷载IV作用下的最大应力处应力为55 MPa(见图4(d))。

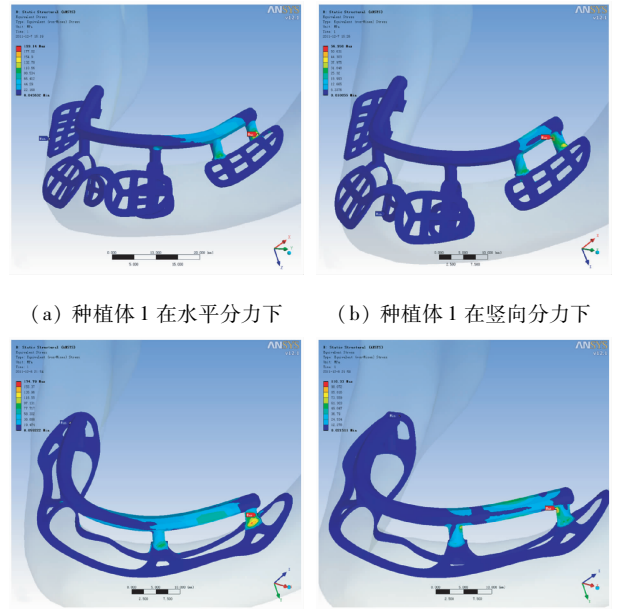


图4 荷载IV的水平分力和垂直分力作用下种植体的应力分布
Fig.4 Stress distribution of implants under the horizontal component and vertical component of load IV (a) Implant 1 under the horizontal component, (b) Implant 1 under vertical component, (c) Implant 2 under the horizontal component, (d) Implant 2 under vertical component

在水平分力作用下,种植体1的最大应力比种植体2大32.14 MPa,这是由于种植体2的带状基底无论是在舌侧还是颊侧,对基台都有足够的约束,而种植体1的网状基底在舌侧对基台的约束不足。

2.3 改变垂直荷载加载位置对接触面拉应力的影响

种植体1和2在4种荷载作用下,在接触面边缘均存在拉应力。当拉应力较大超过种植体和颌骨的粘结力时,种植体与颌骨将分离,引起松动或脱落,故需要找出导致较大拉应力的因素。

改变垂直荷载I的加载部位,从左右两侧1~6号牙位依次对称加载(见图5)。对于种植体1,网

状基底最大拉应力随着加载牙位后移而渐渐变小,到6号牙位时,左右两侧接触面最大拉应力减小了1/2,中间接触面最大拉应力减小了2/3;对于种植体2,带状基底最大拉应力随着加载牙位后移而渐渐变小,到6号牙位时左右两侧接触面最大拉应力减小了1/2,中间接触面最大拉应力减小了7/10。由此可见,加载部位越靠前,在接触面边缘产生的最大拉应力越大。

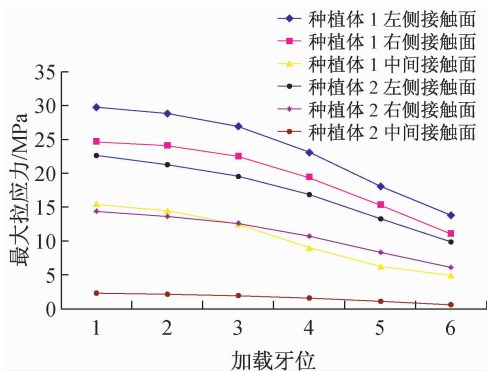


图5 不同加载牙位下种植体接触面最大拉应力

Fig.5 The maximum tensile stress on the contact surface of implants for different teeth

3 讨论

随着高精度CT的出现,完成人体结构三维模型重建而无需制取实物印模已成为可能,而CAD-CAM技术的发展为虚拟软件平台中对缺损部位进行个性化修复体设计提供了平台。在此基础上,本文提出了基于CT数据的骨膜下种植体设计方案。该方案通过患者CT数据建立下颌骨三维实体模型和与之匹配的骨膜下种植体模型,避免了传统种植体制作中切开骨膜暴露下颌骨后制取印模的环节。对个性化的骨膜下种植体进行有限元分析,一方面可以为种植体的临床选型提供力学性能上的依据,另一方面还可以为种植体设计提供参考意见,并进一步改进种植体。

结果显示,种植体基台间距对种植体基台顶部应力大小有较大影响,基台间距越小产生的应力值越小。因此,可以通过控制种植体基台间距来有效控制种植体的应力。基底对基台的约束作用对基台底部应力也有较大的影响,应保证基底能够为基台提供良好的约束。

通过比较斜向荷载水平分力和垂直分力分别作

用下种植体的应力分布发现,水平分力对基台底部应力的影响较大,而垂直分力对基台顶部的影响较大。水平分力下种植体的最大应力比垂直分力下的种植体最大应力大数倍。郑群英等^[7]对前牙区平台转换种植体的研究发现,在水平荷载下的应力会明显大于相应垂直荷载下的应力,应尽量减小水平分力,以避免出现过大的应力集中。本文的研究结果与文献^[7]中的结果具有一致性,在种植体设计加工时,应使基台与牙槽嵴保持垂直,以免产生过大的水平分力,导致基台底部应力过大。

改变垂直荷载I的加载部位后发现,加载部位越靠前,种植体与颌骨的接触面边缘处的拉应力越大。为避免前方咬合时出现过大大应力,在全口义齿重建时,应使义齿的咬合满足双侧平衡殆的状态,即下颌在功能运动范围内前伸及侧方运动时,上下颌前牙和后牙,工作侧和平衡侧后牙都能同时接触,使咬合力分配更均匀。孟玉坤^[12]在无牙颌全口义齿重建的研究中提到,无牙颌全口义齿满足双侧平衡殆可以使牙槽均匀受力减缓吸收,并指出咬合时应使工作侧能够有尽量多的接触点以分散咬合力,增加咀嚼效率。这与本文的观点相类似,通过重建满足双侧平衡殆状态的全口义齿,可以避免前方咬合时在接触面出现过大的拉应力。

本文提出了基于CT数据的骨膜下种植体设计方法,并从力学的角度对骨膜下种植体在咬合力作用下的应力响应作了初步研究。文中种植体与下颌骨的接触类型为固定接触,模拟了种植体功能愈合中常见的纤维愈合,而对于种植体在骨结合时的力学特点,将在以后的研究中进一步讨论。在今后的深入研究中,还将建立骨膜下种植体-下颌骨的动荷载模型,模拟真实咬合的过程。

4 结论

通过建立牙槽嵴吸收重度患者的下颌骨模型和数字化种植体模型,并对其进行有限元分析,证明了基于CT数据的个性化骨膜下种植体设计方案对于牙槽嵴吸收重度患者是一种可行的方案。在力学性能方面,种植体2在4种咬合力作用下均能满足强度要求,比种植体1具有更好的抗水平荷载能力,且基底在舌侧和颊侧对基台都有足够的约束。综合上述比较得出,种植体2比种植体1更适合牙槽嵴吸

收重度患者。在种植体的尺寸方面,建议基底厚度为0.5 mm,基台直径为2.5 mm,高度为3.5 mm,连接杆直径为3 mm。通过结果对比和讨论,对种植体的设计提出以下建议:

(1) 在垂直荷载作用下,基台间距对种植体基台顶部应力大小有很大影响,基台间距越小产生的应力值越小。在设计时可以通过合理布置基台个数和间距来有效控制种植体上的应力。

(2) 在斜向荷载作用下,种植体底部基底的约束作用对基台底部的应力大小有很大的影响。在设计时应保证基底在舌侧和颊侧对基台有足够的约束。

(3) 在斜向荷载作用下,水平分力的作用对基台底部应力大小起决定性影响。在设计时应使基台与下颌骨上缘牙槽部垂直,避免水平分力过大。

(4) 在垂直荷载作用下,加载部位越靠前,产生的拉应力越大。在义齿制作过程中,应使咬合达到双侧平衡殆的状态,使咬合力分配更均匀。

参考文献:

- [1] 赵献银. 老年人固定义齿修复60例临床效果评价[J]. 中国实用口腔杂志, 2011, 4(5): 303-304.
- [2] 尚政军, 李祖兵. 全下颌骨膜下种植体的演变[J]. 国外医学口腔医学分册, 2000, 27(2): 75-77.
- [3] 两种不同形状骨膜下种植体愈合效果的对比研究[J]. 西北国防医学杂志, 2010, 34(4): 244-246.
- [4] Sirbu I. Subperiosteal implant technology: report from Romania [J]. Oral Implantol, 2003, 29(4): 189-194.
- [5] Linkow LI, Wagner JR, Chanavaz M. Tripodal mandibular subperiosteal implant: Basic sciences, operational and clinical data [J]. Oral Implantol, 1998, 24(1): 16-36.
- [6] 王野平, 林小英, 周慧峰. Mimics 和 Geomagic 辅助下建立固定义齿的有限元模型[J]. 医用生物力学, 2010, 25(6): 433-438.
- Wang YP, Lin XY, Zhou HF. Finite element model of fixed denture aided by Mimics & Geomagic [J]. J Med Biomech, 2010, 25(6): 433-438.
- [7] 郑群英, 杨秋燕, 杜志斌, 等. 前牙区平台转换种植体深度的生物力学分析[J]. 医用生物力学, 2010, 25(6): 417-421.
- Zheng QY, Yang QY, Du ZB, et al. The biomechanical analysis on platform switching implants with different planting depth in front maxilla [J]. J Med Biomech, 2010, 25(6): 417-421.
- [8] Yang HS, Chang HJ, Park YJ. Stress analysis of a cantilevered-fixed partial denture with normal and reduced bone support [J]. Prosthet Dent, 1996, 76(4): 424.
- [9] 孙健, 张富强, 王冬梅, 等. 3种加载方式下正常人下颌骨三维有限元应力分布分析[J]. 上海口腔医学, 2004, 13(1): 41-43.
- [10] 潘韶霞, 尹亚梅, 冯海兰. 三维有限元法分析双套冠覆盖下颌全口义齿基牙受力情况[J]. 上海口腔医学, 1997, 6: 9-11.
- [11] 温颖, 郑东翔, 张振庭, 等. 全口无牙颌应用种植固定修复后的咬合力分布研究[J]. 北京口腔医学, 2008, 16(6): 325-328.
- [12] 孟玉坤. 无牙颌全口义齿咬合重建的关键问题[J]. 中国实用口腔杂志, 2010, 6(3): 326-330.

本刊顾问柳兆荣教授去世

本刊第2届编委会副主编,第3、4届编委会顾问,复旦大学力学系教授、博士研究生导师柳兆荣教授于2012年12月7日凌晨7时30分去世,享年75岁。

柳兆荣教授1937年3月7日出生于福建省惠安县,1960年6月毕业于复旦大学数学系,历任复旦大学数学系助教、讲师、副教授,复旦大学力学系主任、教授、博士研究生导师;曾任中国力学学会常务理事、上海市力学学会副理事长、中国力学学会和中国生物医学工程学会生物力学专业委员会主任委员,《医用生物力学》副主编、顾问,《力学季刊》副主编,《Journal of Hydrodynamics》执行编委等。柳兆荣教授毕生致力于流体力学与生物力学研究和教育事业,是中国生物力学的开拓者之一,在生物力学特别是血液动力学领域做出了重要贡献,对本刊的发展也曾给予了大量的指导和帮助。