

文章编号: 1004-7220(2022)04-0771-06

口腔咀嚼黏膜的生物力学研究进展

王晓萌, 冯馥驰

(北京大学第一医院 口腔科, 北京 100034)

摘要: 根据口腔黏膜所在的部位和功能可将其分为咀嚼黏膜、被覆黏膜和特殊黏膜。口腔咀嚼黏膜包括硬腭和牙龈黏膜, 承受咀嚼压力和摩擦, 在义齿修复中发挥十分重要的作用。研究口腔咀嚼黏膜的生物力学情况有助于更好地理解 and 解决与口腔咀嚼黏膜相关的临床问题。本文从解剖生理分析、生物力学特性(应力-应变曲线、泊松比、摩擦因数)、临床意义 3 个方面对口腔咀嚼黏膜的生物力学研究进展进行综述, 以为口腔修复学相关领域的研究提供进一步理论依据。

关键词: 口腔咀嚼黏膜; 生物力学; 口腔修复学

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.04.030

Biomechanical Research Progress on Oral Masticatory Mucosa

WANG Xiaomeng, FENG Yuchi

(Department of Stomatology, Peking University First Hospital, Beijing 100034, China)

Abstract: According to its location and function, the oral mucosa can be divided into masticatory mucosa, coated mucosa and special mucosa. Oral masticatory mucosa, including hard palate and gingival mucosa, bears the chewing pressure and friction, and plays an important role in denture restoration. The study on biomechanics of oral masticatory mucosa is helpful to better understand and solve clinical problems related to oral masticatory mucosa. In this review, the progress of biomechanical researches on oral masticatory mucosa was summarized from three aspects: anatomical and physiological analysis, biomechanical characteristics (stress-strain curve, Poisson's ratio, friction coefficient) and clinical significance, in order to provide further theoretical basis for the researches in oral prosthodontics-related areas.

Key words: oral masticatory mucosa; biomechanics; prosthodontics

口腔修复学是研究用符合口腔生理和生物力学的方法修复口腔内及颌面部各种缺损的一门学科, 是口腔医学的重要分支和组成部分。口腔咀嚼黏膜直接与口腔修复体接触, 在口腔义齿修复中扮演了十分重要的角色。本文从生物力学角度对口腔咀嚼黏膜的研究进展进行综述, 旨在为口腔义齿修复的相关临床应用和研究提供理论基础。

1 口腔咀嚼黏膜与生物力学相关的解剖生理分析

口腔咀嚼黏膜上皮表层角化, 由多排细胞和细胞间质组成, 其中的黏多糖是黏膜变形和负载载荷的基础。固有层厚, 与上皮嵴呈指状镶嵌, 形成良好的机械附着。指状镶嵌结构为上皮层与固有层的连接提供足够大的表面积, 既可以使更多的营养

收稿日期: 2021-08-31; 修回日期: 2021-10-26

通信作者: 冯馥驰, 主任医师, E-mail: dentfeng@sina.com

物质运输到上皮,也可以使上皮能够承受更大的剪切力而不发生移位,从而更好地锚定于结缔组织上。

口腔咀嚼黏膜在负载下表现出明显的变形阻力。其胶原纤维网在微观结构上呈单向排列,而非多向排列,使其弹性模量高且抗拉性强^[2]。口腔咀嚼黏膜可以分散咀嚼力来保护下方的剩余牙槽嵴,避免牙槽嵴受到过度负荷。随着压缩载荷的不断增加,黏膜抵抗变形的能力也不断增强,表明随着压力增加,黏膜弹性模量也在增加。这种不同应变水平下的不同力学行为可能是由胶原纤维网屈曲等微观结构变形引起。作为一种高度血管化的组织,口腔咀嚼黏膜含有大量细胞间隙液,负荷产生的机械压力使得间隙液被推到邻近组织,进而产生泵送效应。然而,一旦静水压力增加并超过毛细血管压力,由于小动脉闭合和被动性的毛细血管压缩,血流量将减少甚至可能暂时停止导致局部缺血。血液流动的变化会进一步诱导局部缺氧和代谢物的积累,破骨细胞出现,支持骨组织被破坏,剩余牙槽嵴吸收^[3]。

口腔咀嚼黏膜的厚度是影响黏膜生物力学反应的主要因素之一。对于口腔咀嚼黏膜厚度的测量,目前主要有以下几种方法:

(1) 标本切片法。测量尸体脱钙后黏膜切片标本的厚度^[4];

(2) 探针法。用牙周探针以垂直角度刺入黏膜直到骨面进行测量^[5];

(3) 超声法。利用超声原理和设备直接进行测量。与探针法相比,超声法无创并且可在对黏膜加力时进行实时测量,但超声法显示出明显地低估黏膜厚度的倾向^[6-7];

(4) 磁共振法。① 磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)法。与探针法相比, MRI法无创且可靠^[8];但与超声法相比, MRI法无法在黏膜加力时进行实时测量。② 磁共振弹性成像(magnetic resonance elastography, MRE)法。MRE法是一种新兴的成像技术,可以测量体内软组织的黏弹性特性,弥补了MRI法的不足^[9];

(5) 锥形束计算机断层(cone beam computer tomography, CBCT)扫描法。CBCT法和探针法的测量结果没有显著性差异, CBCT法被认为可作为探

针法的替代方法^[5]。在此基础上,有学者为进一步提高测量精度,尝试利用CBCT结合牙颌模型^[10]、树脂基板^[11]、光学扫描数据^[12]等方法测量黏膜厚度。研究结果显示,黏膜厚度与年龄相关,年轻受试者的腭黏膜通常较老年人更薄,仅从黏膜厚度无法预估黏膜的弹性模量^[8,13-14]。

2 口腔咀嚼黏膜的生物力学特性

2.1 应力-应变曲线

口腔咀嚼黏膜具有黏弹性物质的特性。其应力和应变在咀嚼负荷下表现出时间依赖性行为。如图1所示,口腔咀嚼黏膜受压时可将其分为3类压缩。第1类是瞬时弹性压缩,也称为短期或即时响应。在咀嚼力作用下,黏膜发生瞬间弹性压缩,义齿随着咀嚼周期可以对黏膜形成节律性的生理刺激,有利于黏膜的血液循环,可减缓支持组织的吸收过程。第2、3类是迟缓弹性压缩和纯黏性流动压缩,即所谓的长期和延迟响应。它们与黏膜中的流体黏度或渗透性有关,并且有时间依赖性。长时间的轻负荷比短时间的重负荷更容易使黏膜发生变形。持续和重复的载荷将累积为黏膜表面应变,进而使得黏膜表面最大压缩应变出现延迟增加。而应变强度则可能由于厚度和弹性模量的变化而存在较大差异。

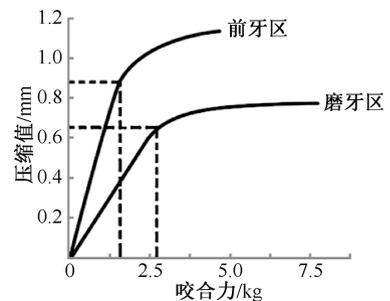


图1 咬合力与咀嚼黏膜压缩关系^[15]

Fig. 1 Relationship between bite force and compression of masticatory mucosa^[15]

如图2所示,与口腔咀嚼黏膜受压时的特点类似,口腔咀嚼黏膜恢复时也分为3类:瞬时弹性恢复、迟缓弹性恢复、纯黏性流动恢复。对无牙颌患者黏膜的体内研究表明,载荷移除1 min内下颌磨牙区咀嚼黏膜恢复量达最大压缩的3/4;载荷移除30 min时,下颌磨牙区咀嚼黏膜未能恢复的残留量

为 0.11 mm。口腔咀嚼黏膜受压后,老年人需要数小时才能恢复,而年轻人只需要数分钟就能完全恢复。载荷大小、载荷持续时间、年龄等因素都会对黏膜恢复时的应力-应变曲线产生影响。

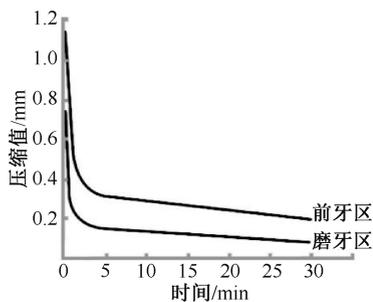


图2 咬合后时间与咀嚼黏膜恢复关系^[15]

Fig.2 Relationship between duration after occlusion and recovery of masticatory mucosa^[15]

为在体外模拟口腔咀嚼黏膜的应力-应变情况,在三维有限元研究中对于口腔咀嚼黏膜的建模主要包括以下3种模型:①线性弹性模型。线性弹性模型的应力-应变曲线为1条具有恒定弹性模量的直线。在近年的三维有限元研究中,口腔咀嚼黏膜的线性弹性模量多采用10 MPa^[16],也有个别研究设置了0.68 MPa^[17]、1 kPa^[18]等比较极端的数值。线性弹性模型将黏膜的弹性行为进行简化,提高了计算效率,但弹性模量设置不同数值将对计算结果产生很大影响;②多相线性弹性模型。多相线性弹性材料模型在不同的应力加载范围内具有一系列不同的弹性模量,从而更好地模拟黏膜的非线性行为,在精度和计算效率之间取得平衡,但对非线性行为的模拟精度依然有限^[19];③超弹性模型。在超弹性模型中,应力和应变不再是线性对应的关系,而是以弹性势能函数的形式一一对应。如何寻求一个合理的应变能函数正确描述其本构关系,是研究超弹性材料力学特性的关键。尽管有学者建立超弹性模型表征口腔黏膜组织的非线性弹性特性,也有学者发展基于体内测量数据的口腔咀嚼黏膜超弹性模型,但由于口腔咀嚼黏膜非线性及各向异性的特点以及其复杂的生理反应,超弹性模型在口腔咀嚼黏膜的应用仍处于初级阶段^[20-22]。

2.2 泊松比

泊松比是材料变形时抵抗体积变化的趋势。垂直方向上,材料受压力时横向膨胀,受张力时则

会横向收缩。泊松比通常定义为横向应变与纵向应变的负比。泊松比越高,组织变形越小。当泊松比为0.5时,表明材料完全不可压缩。口腔咀嚼黏膜高度复杂和连续的解剖形态使得直接在体内测量其泊松比十分困难。尽管有研究尝试通过体内接触压力测量确定口腔黏膜表面泊松比,但由于缺乏足够的实验数据,多数有限元研究都是参考其他软组织数据假设口腔咀嚼黏膜的泊松比,以模拟低压缩性或不可压缩性。既往三维有限元研究中,口腔咀嚼黏膜的泊松比常被设定为恒定值,泊松比范围为0.3~0.5^[16,23-24]。此外,也有研究利用非线性三维有限元方法对口腔咀嚼黏膜进行分析时将其设定为多个不同的泊松比,其中不同位点的泊松比范围为0.30~0.49^[19]。

2.3 摩擦因数

义齿和口腔咀嚼黏膜之间的相互作用与摩擦因数有关。患者之间的差异主要取决于他们的口腔生理条件和使用的义齿材料。唾液变化会改变口腔咀嚼黏膜与义齿间的摩擦因数。老年人及颌面部放疗后的患者由于唾液分泌减少常出现口干的症状;相对于唾液正常患者,他们更易出现佩戴义齿后的疼痛^[25]。在相同口腔条件下,不同的义齿材料与口腔咀嚼黏膜间的摩擦因数也会发生变化。例如:软衬等一些具有较高湿润性的材料更有可能在提供支撑的口腔咀嚼黏膜表面和义齿基托之间形成良好的润滑层,从而通过减少摩擦来保护口腔咀嚼黏膜。为了简化模型,既往三维有限元研究中多假设口腔咀嚼黏膜与义齿之间为固定连接,即义齿受力后,口腔咀嚼黏膜与义齿间没有位移,这与临床实际情况并不相符。有学者提出在三维有限元模型中可以将义齿基托与黏膜之间设置为滑动摩擦关系。测量结果显示,猪下颌黏膜与自凝基托树脂间的滑动摩擦因数为0.33±0.04^[26]。

3 口腔咀嚼黏膜生物力学研究的临床意义

不同患者口腔黏膜不同的生物力学性质会对口腔修复设计方案和预测治疗效果产生影响。黏膜压痛是义齿佩戴后最常出现的问题之一,也是预测治疗效果的重要因素。影响黏膜压痛的因素有很多,例如缺失牙齿数量、义齿类型等^[27]。在这些因素中,黏膜疼痛阈值 (pressure-pain threshold,

PPT)与患者满意度直接相关。目前临床上常用PPT表示患者对疼痛的敏感程度,该指标通过定量的方式将客观压力刺激与主观疼痛反应联系起来。目前的研究显示,影响黏膜PPT的因素主要包括以下几个:①黏膜厚度。黏膜厚度越厚,压痛阈值越高^[14];②黏膜所处口腔部位。对于无牙颌患者的口腔咀嚼黏膜,上颌及下颌牙槽嵴顶黏膜PPT均从前牙向后牙方向逐渐增大,而上颌腭部黏膜PPT则从前牙向后牙方向逐渐减小^[28]。在同样的牙位处,上颌黏膜PPT大于下颌黏膜PPT,同颌左右侧黏膜PPT则无显著差异^[29]。上颌及下颌牙槽嵴顶黏膜PPT最大,颊侧次之,腭侧最小^[30];③口腔唾液情况。对于佩戴全口义齿的患者,口腔唾液减少与PPT增加有显著的相关性。而对于佩戴可摘局部义齿的患者,口腔干燥程度与黏膜PPT的相关性并不明显^[31]。以上结果提示,在临床诊疗中,可以通过预判患者黏膜PPT情况,进而初步预测患者对义齿的满意程度,并在义齿的设计、制作中予以重视,从而提高口腔修复治疗效果。

可摘局部义齿或种植-可摘联合义齿多为混合支持式,即义齿会将咬合负荷不均匀地分布到多个支持组织上。牙周膜、牙槽黏膜、牙槽骨等不同组织的力学特性不同,故受力后产生的形变不同,这种受力后形变的差异会导致义齿不同部位位移的差异。具体表现为以基牙或种植体为原点,义齿的垂直位移量从原点向游离端远方延伸增加。在杠杆原理作用下,义齿垂直位移量的延伸增加会导致黏膜的应力集中于游离端,进而可能导致义齿的不稳定性增加。这不仅会引起黏膜压痛和牙槽嵴吸收,而且还会影响剩余牙齿和其周围软组织的长期健康。临床实践中,为了尽量减少不同组织可移位性差异的影响,学者们提出了功能印模技术。尽管从义齿及黏膜位移等统计学数据上可证明这种印模技术确实缩小了不同组织可移位性的差异,但印模技术在临床上的应用效果尚有争议^[34]。

随着口腔种植学的发展,种植体及其周围骨组织的生物力学研究逐渐成为热点^[35-36]。Wolff定律指出,骨骼的生长会受到力学刺激影响而改变其结构,用之则强,废用则弱。然而对于口腔黏膜及其下方的牙槽嵴而言,剩余牙槽嵴的改建不仅是机械刺激的结果,还受到黏膜周围组织的生理条件的影

响^[37-38]。例如:在相同应力的作用下,厚而坚韧的黏膜组织比薄而松软的黏膜组织更能有效地帮助剩余牙槽嵴缓冲并分散应力。口腔黏膜生物力学改变也可用于推测其下方剩余牙槽嵴吸收的情况。有研究通过对比种植覆盖义齿与全口活动义齿,证明了口腔咀嚼黏膜内的静水应力与临床测量的剩余牙槽嵴吸收量有相关性^[20];静水压力越大的部位,剩余牙槽嵴吸收量越多^[21]。推测原因是义齿在负载下对口腔咀嚼黏膜产生过度的静水压会减慢血液循环,进而导致剩余牙槽嵴吸收。但目前关于黏膜组织对牙槽骨改建的影响的机制尚无定论^[39-40]。上述研究结果提示,在进行与剩余牙槽嵴有关的力学分析时,不仅要剩余牙槽嵴进行分析,更要重视剩余牙槽嵴上方口腔咀嚼黏膜的生物力学情况。

4 结论

研究口腔咀嚼黏膜生物力学的特点,有助于了解口腔咀嚼黏膜的生物力学反应,并能够帮助更好地理解一些口腔临床现象。正确应用这些数据不仅有助于改善口腔修复设计,还有助于预测修复治疗结果。当然,也应该认识到上述文献中所得出结论的局限性。在体内研究中,不仅收集口腔黏膜相关力学数据较为困难,而且难以做到对单一变量的绝对控制。在体外研究中,尽管有了更接近黏膜实际性质的仿生三维有限元分析,但仍存在很大局限性。目前,对于黏膜和义齿之间相互作用的认识仍在初期阶段,口腔咀嚼黏膜生物力学特点与黏膜解剖学和生理学的关系仍有待进一步探索。未来的研究可以在这些领域继续深入,以扩展现有的黏膜生物力学知识,并促进临床诊疗的进一步发展。

参考文献:

- [1] TSAIRA A, KARAGIANNIDIS P, SIDIRA M, *et al.* Theoretical considerations and a mathematical model for the analysis of the biomechanical response of human keratinized oral mucosa [J]. *Front Physiol*, 2016(7): 364.
- [2] CHOI JJE, ZWIRNER J, RAMANI RS, *et al.* Mechanical properties of human oral mucosa tissues are site dependent: A combined biomechanical, histological and ultrastructural approach [J]. *Clin Exp Dent Res*, 2020, 6

- (6): 602-611.
- [3] MORI S, SATO T, HARA T, *et al.* Effect of continuous pressure on histopathological changes in denture-supporting tissues[J]. *J Oral Rehabil*, 1997, 24(1): 37-46.
- [4] YU SK, LEE MH, KIM CS, *et al.* Thickness of the palatal masticatory mucosa with reference to autogenous grafting: A cadaveric and histologic study [J]. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 2014, 34(1): 115-121.
- [5] GUPTA P, JAN SM, BEHAL R, *et al.* Accuracy of cone-beam computerized tomography in determining the thickness of palatal masticatory mucosa [J]. *J Indian Soc Periodontol*, 2015, 19(4): 396-400.
- [6] TAKAHASHI K, KOMASA Y, ONO Y, *et al.* Thickness of oral mucosa under occlusal force [J]. *J Osaka Dent Univ*, 2016, 42(2): 137-142.
- [7] LAWSON RB, JONES ML. An evaluation of a noninvasive method of assessing alveolar bone levels in an experimental model of cleft lip and palate [J]. *Cleft Palate Craniofac J*, 1998, 35(1): 1-8.
- [8] HEIL A, SCHWINDLING FS, JELINEK C, *et al.* Determination of the palatal masticatory mucosa thickness by dental MRI: A prospective study analysing age and gender effects [J]. *Dentomaxillofac Radiol*, 2018, 47(2): 20170282.
- [9] CHENG S, GANDEVIA SC, GREEN M, *et al.* Viscoelastic properties of the tongue and soft palate using MR elastography [J]. *J Biomech*, 2011, 44(3): 450-454.
- [10] 闫澍, 施生根, 刘子健, 等. 应用牙颌模型扫描和 CT 扫描技术构建咀嚼黏膜的三维模型[J]. *口腔颌面修复学杂志*, 2018, 19(5): 293-296.
- [11] DONG J, ZHANG FY, WU GH, *et al.* Measurement of mucosal thickness in denture-bearing area of edentulous mandible [J]. *Chin Med J*, 2015, 128(3): 342-347.
- [12] 王晓萌, 刘星纲, 江青松, 等. 模型修正技术下游离端黏膜的数字化分析[J]. *口腔医学研究*, 2021, 37(6): 559-563.
- [13] BHARATI K, SWATI S, THAKUR SL. Determination of thickness of palatal mucosa [J]. *J Indian Soc Periodontol*, 2012, 16(1): 80-83.
- [14] ISOBE A, SATO Y, KITAGAWA N, *et al.* The influence of denture supporting tissue properties on pressure-pain threshold [J]. *J Prosthodont Res*, 2013, 57(4): 275-283.
- [15] 姚江武, 张雪华. 全口义齿咬合力与下颌承托区黏膜变形度的相关性研究[J]. *华西口腔医学杂志*, 1997(1): 25-27.
- [16] SHRIVASTAVA R. Stress Distribution under commercial denture liners—A finite element and clinical analysis [J]. *J Clin Diagn Res*, 2016, 10(12): C14-C18.
- [17] ORTIZ-PUIGPELAT O, LAZARO-ABDULKARIM A, DE MEDRANO-RENE JM, *et al.* Influence of implant position in implant-assisted removable partial denture: A three-dimensional finite element analysis [J]. *J Prosthodont*, 2019, 28(2): e675-e681.
- [18] EOM JW LIM YJ, KIM MJ, *et al.* Three-dimensional finite element analysis of implant-assisted removable partial dentures [J]. *J Prosthet Dent*, 2016, 117(6): 735-742.
- [19] KANBARA R, NAKAMURA Y, OCHIAI KT, *et al.* Three-dimensional finite element stress analysis: The technique and methodology of non-linear property simulation and soft tissue loading behavior for different partial denture designs [J]. *Dent Mater J*, 2012, 31(2): 297-308.
- [20] CHEN J, AHMAD R, SUENAGA H, *et al.* A comparative study on complete and implant retained denture treatments: A biomechanics perspective [J]. *J Biomech*, 2015, 48(3): 512-519.
- [21] CHEN J, SUENAGA H, HOGG M, *et al.* Determination of oral mucosal Poisson's ratio and coefficient of friction from in-vivo contact pressure measurements [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2015, 19(4): 357-365.
- [22] AHMAD R, CHEN J, ABU-HASSAN M, *et al.* Investigation of mucosa-induced residual ridge resorption under implant-retained overdentures and complete dentures in the mandible [J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2015, 30(3): 657-666.
- [23] XIAO W, LI Z, SHEN S, *et al.* Influence of connection type on the biomechanical behavior of distal extension mandibular removable partial dentures supported by implants and natural teeth [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2016, 19(3): 240-247.
- [24] AMARAL CF, GOMES RS, RODRIGUES GARCIA RCM, *et al.* Stress distribution of single-implant-retained overdenture reinforced with a framework: A finite element analysis study [J]. *J Prosthet Dent*, 2018, 119(5): 791-796.
- [25] TURNER MD. Hyposalivation and xerostomia: Etiology, complications, and medical management [J]. *Dent Clin North Am*, 2016, 60(2): 435-443.
- [26] 董静, 莫中军, 潘韶霞, 等. 自凝树脂基托材料与下颌口腔黏膜滑动摩擦系数的实验研究 [J]. *中华口腔医学杂志*, 2012, 47(z1): 178-180.
- [27] KUMAGAI H, FUEKI K, YOSHIDA-KOHNO E, *et al.* Factors associated with mucosal pain in patients with partial removable dental prostheses [J]. *J Oral Rehabil*, 2016, 43(9): 683-691.
- [28] OGAWA T, TANAKA M, OGIMOTO T, *et al.* Mapping, profiling and clustering of pressure pain threshold (PPT) in edentulous oral mucosa [J]. *J Dent*, 2004, 32(3): 219-228.
- [29] 贾骏, 姚月玲, 张铁, 等. 电阻应变式口腔黏膜压力测痛仪

- 的研制与测试[J]. 临床口腔医学杂志, 2002, 18(5): 349-351.
- [30] 贾骏, 姚月玲, 张铁. 无牙颌患者牙槽嵴黏膜疼痛阈及其相关因素的研究[J]. 实用口腔医学杂志, 2002, 18(6): 539-542.
- [31] INAMOCCHI Y, FUEKI K, MATSUYAMA Y, *et al.* Does oral dryness influence pressure pain sensitivity in the oral mucosa of removable denture wearers? [J]. Clin Oral Investig, 2020, 24(8): 2603-2609.
- [32] SHIOMI A, IZUMI K, UENOYAMA A, *et al.* Cyclic mechanical pressure-loading alters epithelial homeostasis in a three-dimensional *in vitro* oral mucosa model: Clinical implications for denture-wearers [J]. J Oral Rehabil, 2015, 42(3): 192-201.
- [33] TANAKA M, OGIMOTO T, KOYANO K, *et al.* Denture wearing and strong bite force reduce pressure pain threshold of edentulous oral mucosa [J]. J Oral Rehabil, 2004, 31(9): 873-878.
- [34] MOHAMMED S, SAURABH J, *et al.* Comparison between altered cast impression and conventional single-impression techniques for distal extension removable dental prostheses: A systematic review [J]. Int J Prosthodont, 2019, 32(3): 265-271.
- [35] 周钰琳, 毛志红, 王建生, 等. 长径比差异对牙种植体-颌骨界面的应力分布影响[J]. 医用生物力学, 2019, 34(3): 315-319.
- ZHOU YL, MAO ZH, WANG JS, *et al.* The influence of length-diameter ratio difference on stress distribution at dental bone-implant interface [J]. J Med Biomech, 2019, 34(3): 315-319.
- [36] 吕越, 徐侃, 王立强, 等. 植体弹性模量变化对牙种植体和骨组织应力分布的影响[J]. 医用生物力学, 2017, 32(4): 331-335.
- LV Y, XU K, WANG LQ, *et al.* The influence of implant elastic modulus on stress distributions in implant and peri-implant bone [J]. J Med Biomech, 2017, 32(4): 331-335.
- [37] SUENAGA H, CHEN J, YAMAGUCHI K, *et al.* Bone metabolism induced by denture insertion in positron emission tomography [J]. J Oral Rehabil, 2016, 43(3): 198-204.
- [38] SUENAGA H, CHEN J, YAMAGUCHI K, *et al.* Mechanobiological bone reaction quantified by positron emission tomography [J]. J Dent Res, 2015, 94(5): 738-744.
- [39] KM S, KOLI DK, JAIN V, *et al.* Comparison of ridge resorption and patient satisfaction in single implant-supported mandibular overdentures with conventional complete dentures: A randomised pilot study [J]. J Oral Biol Craniofac Res, 2021, 11(1): 71-77.
- [40] GASIK M, LAMBERT F, BACEVIC M. Biomechanical properties of bone and mucosa for design and application of dental implants [J]. Materials, 2021, 14(11): 2845.