

文章编号: 1004-7220(2024)03-0532-07

舌侧金属加强杆种植覆盖义齿的三维有限元分析

张馨月¹, 王勇¹, 陈倩², 周团锋^{2*}, 马珂楠¹, 王子轩³, 赵一姣^{1*}

(1. 北京大学口腔医学院·口腔医院, 数字化研究中心; 国家口腔医学中心; 国家口腔疾病临床医学研究中心;

口腔生物材料和数字诊疗装备国家工程研究中心; 国家卫生健康委口腔数字医学重点实验室; 口腔数字医学北京市重点实验室, 北京 100081; 2. 北京大学口腔医院门诊部, 北京 100034; 3. 北京大学口腔医院 义齿加工中心, 北京 100081)

摘要:目的 通过三维有限元分析探讨舌侧金属加强结构义齿基托设计对无牙下颌种植修复义齿的生物力学影响, 为无牙颌修复治疗提供参考。方法 构建舌侧金属加强结构与无加强结构两种义齿基托设计的 2 颗种植体支持 Locator 式覆盖义齿三维有限元模型, 分别对后牙中央窝垂直施加 150 N 载荷、斜向施加 150 N 载荷以及对前牙垂直施加 150 N 载荷, 模拟正中咬合、左右侧方咀嚼以及前牙切割食物时两种模型各组织的受力情况。结果 后牙及前牙垂直向加载时, 两种义齿基托设计模型各组织的应力分布较为接近, 所受最大应力差别在 0~0.16 MPa 之间; 侧偏咀嚼时, 未添加金属加强杆的义齿基托、种植体和黏骨膜应力集中范围, 以及种植体、种植体周围骨最大受力明显大于添加金属加强杆模型, 所受最大应力差别在 0.59~2.99 MPa 之间。结论 在义齿基托舌侧添加金属加强杆, 可以起到应力分散的作用, 或可在一定程度上减小骨吸收及基托折断的风险。

关键词: 覆盖义齿; 种植体; 义齿基托; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.03.023

Three-Dimensional Finite Element Analysis of Implant-Supported Overdenture with Lingual Metal-Reinforced Bar

ZHANG Xinyue¹, WANG Yong¹, CHEN Qian², ZHOU Tuanfeng^{2*}, MA Kenan¹,
WANG Zixuan³, ZHAO Yijiao^{1*}

(1. Center of Digital Dentistry, Peking University School and Hospital of Stomatology; National Center for Stomatology; National Clinical Research Center for Oral Diseases; National Engineering Research Center of Oral Biomaterials and Digital Medical Devices; NHC Key Laboratory of Digital Stomatology; Beijing Key Laboratory of Digital Stomatology, Beijing 100081, China; 2. The Clinical Division, Peking University School and Hospital of Stomatology, Beijing 100034, China; 3. Dental Laboratory, Peking University School and Hospital of Stomatology, Beijing 100081, China)

Abstract: **Objective** To investigate the biomechanical effects of lingual metal-reinforced denture bases on edentulous implant-supported prostheses by three-dimensional finite element analysis, and provide references for the treatment of edentulous jaws. **Methods** Two implant-supported Locator-type overdenture models with lingual metal-reinforced and non-reinforced denture bases were constructed. A 150 N vertical load on the fovea of the

收稿日期: 2023-11-21; 修回日期: 2023-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (82271039, 82071171), 国家重点研发计划项目 (2022YFC2405401), 甘肃省重点研发计划项目 (21YF5FA165)

通信作者: 周团锋, 主任医师, E-mail: 1442880187@qq.com; 赵一姣, 高级工程师, E-mail: kqcades@bjmu.edu.cn

* 为共同通信作者

posterior teeth, a 150 N oblique load on the fovea of the posterior teeth, and a 150 N vertical load on the anterior teeth were applied to simulate the centric occlusion, left and right lateral chewing, and anterior teeth cutting, and stresses on the tissues of two models were analyzed. **Results** When the posterior and anterior teeth were loaded vertically, the stress distribution on each organization was similar between the two denture base designs. The maximum stress difference was between 0 and 0.16 MPa. Under unilateral masticatory chewing, the range of stress concentration on denture base, implant and mucoperiosteum, and the maximum stress of the implant and peri-implant bone without metal reinforcement were significantly greater than those with metal reinforcement, and the maximum stress difference was between 0.59 MPa and 2.99 MPa. **Conclusions** Lingual metal-reinforced denture base can play a role in stress dispersion, or reduce the risk of bone resorption and denture base fracture to a certain extent.

Key words: overdenture; implant; denture base; finite element analysis

种植覆盖义齿由于其具有良好的固位和稳定性,逐渐受到人们的青睐。由于种植覆盖义齿附着体种类不同,植体的个数及植入设计不同,义齿基托设计不同,对最终修复效果也会产生不同的影响^[1-5]。有研究报道,双种植体支持的下颌覆盖义齿应是无牙患者的最低治疗选择^[6]。

Locator 附着体相比于其他附着体,更有利于种植体的长期稳定,基台产生的并发症更少^[3,7]。Locator 附着体已被报道具有良好的临床效果^[8]。

在临床上,种植覆盖义齿树脂基托常常由于咬合时应力集中,并在循环咀嚼载荷作用下出现疲劳破坏从而发生微裂纹和断裂现象,这些裂缝和裂隙最终导致修复失败^[7]。覆盖义齿的断裂常发生在2颗种植体支持式覆盖义齿,发生率为9.3%~21.4%^[9]。

目前,有学者通过有限元方法研究不同附着体的受力情况、不同植体数目、不同植入位点或不同植体参数的受力比较^[3-5,10-13]。但有关不同义齿基托结构设计进行力学评价的研究鲜有报道。本文采用有限元方法,针对舌侧金属加强结构与无加强结构两种基托设计,对比评价其对临床常见的两颗种植体支持 Locator 式覆盖义齿的应力分布影响,为无牙颌修复治疗提供参考。

1 材料和方法

1.1 三维有限元模型建立

使用牙颌模型扫描仪 (Imetric 3D SA 公司,瑞士) 扫描仿真无牙下颌骨模型,获取 STL 格式文件,使用逆向工程软件 Geomagic Wrap 2021 (3D Systems 公司,美国) 的偏移和精确曲面功能,对下颌骨模型

向内偏移 2 mm 作为松质骨部分,向外偏移 2 mm 作为黏骨膜外部边界,输出 IGES 格式数据,使用 SpaceClaim 2022 R1 (ANSYS 公司,美国) 对数据重叠部分进行布尔运算,分别构造出黏骨膜 (厚度 2 mm^[3,14])、皮质骨 (厚度 2 mm^[3,14+16]) 和松质骨。使用 3shape Dental System (3shape 公司,丹麦) 修复设计软件,设计两种基托结构的种植覆盖义齿,一种为常规无加强结构 [见图 1(a)],一种为舌侧基托内部添加截面为 1.2 mm×3.8 mm 长方形、长度约为 120 mm 加强金属杆 [见图 1(b)],输出 STL 格式数据。使用扫描仪 3Shape trios 5 (3Shape 公司,丹麦) 扫描直径 4.1 mm、长度 10 mm Straumann 种植体 (Straumann 公司,瑞士),以及 Straumann 种植体相关的 Locator 附着体 (Zest Anchors 公司,美国),获取 STL 格式文件,在 Geomagic Wrap 2021 中完成实物模型的数字化拼合:于下颌双侧尖牙区各垂直植入 1 枚种植体,两侧种植体平行,并参照同一位置装配相应的 Locator 附着体部件。使用精确曲面功能,将所有数据分别以 IGES 格式导出。

将 IGES 格式文件导入 ANSYS Workbench 2022R1 有限元分析软件中,在 SpaceClaim 中对有重叠的数据部分进行布尔运算,得到完整独立的模型零部件 [见图 1(c)]。对模型进行四面体 10 节点网格划分,义齿单元尺寸为 2 mm,种植体和基台单元尺寸为 0.6 mm。无加强结构义齿模型和加强金属杆义齿模型的网格单元数分别为 95 668 和 98 244,节点数分别为 164 820 和 170 173。

1.2 模型假设及材料属性

将有限元模型中各材料均假设为连续、均匀、

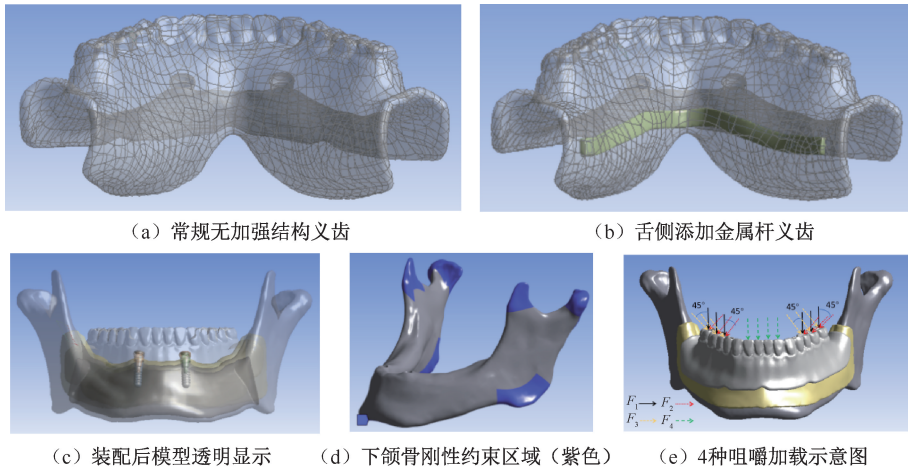


图1 模型及边界、载荷条件

Fig. 1 Models and boundary/load conditions (a) Conventional unreinforced denture, (b) Lingual metal-reinforced denture, (c) Transparent display of models after assembly, (d) Rigid restraint region of the mandible (purple), (e) Schematic diagram of four loading conditions

各向同性的线弹性材料,且各模型之间为完全绑定关系^[14,17-18]。表1所示为模型主要材料力学参数。

表1 材料力学参数^[1-2, 19-20]

Tab. 1 Material properties of mandible and implant-overdenture parts^[1-2, 19-20]

材料	E/MPa	ν
皮质骨	13 700	0.30
松质骨	1 370	0.30
黏骨膜	680	0.45
树脂基托、树脂牙	2 940	0.30
钛种植体	135 000	0.30
钛基台、帽	114 000	0.30
尼龙	2 550	0.30
加强金属杆(钴铬)	218 000	0.33

1.3 边界条件及载荷条件

考虑咬肌(masseter, M)、颞肌(temporalis, T)、翼内肌(medial pterygoid, MP)、翼外肌(lateral pterygoid, LP)、二腹肌(digastric, D)的前腹和颞下颌关节对下颌骨的支持固定作用^[21-22],在各肌肉附着位点予以刚性约束[见图1(d)]。

依据咀嚼受力,模拟如下4种咬合工况^[2,23]:

① 与牙体长轴平行(垂直向),对下颌双侧后牙中央窝施加150 N力(F_1),模拟正中咬合时义齿受力情况;② 沿牙体长轴成 45° ,左侧后牙指向舌侧、右侧后牙指向颊侧均施加150 N力(F_2),模拟下颌左侧咀嚼运动时义齿受力情况;③ 沿牙体长轴成 45° ,

左侧后牙指向颊侧、右侧后牙指向舌侧分别均施加150 N力(F_3),模拟下颌右侧咀嚼运动时义齿受力情况;④ 沿下切牙切端垂直加载150 N力(F_4),模拟前牙切割食物时义齿受力情况[见图1(e)]。

1.4 应力分析

记录4种咬合工况下两种义齿基托结构模型的义齿基托、种植体、种植体周围骨及黏骨膜的应力分布,比较两种基托设计对下颌种植覆盖义齿力学性能的影响。

2 结果

2.1 义齿基托、种植体、种植体附近的牙槽骨应力分布

在正中咬合工况下(F_1),义齿基托受到的应力主要集中在基托与种植体接触偏远中部位,两种模型应力分布无差异;在偏侧咀嚼工况下(F_2, F_3),两种模型义齿基托受到的应力主要集中在基托舌侧和咀嚼对侧颊侧,最大应力均出现在义齿基托舌侧中央区域,未添加金属加强杆的义齿基托应力集中范围明显大于添加金属加强杆模型;在前牙切割工况下(F_4),义齿基托部分应力主要集中在前牙区域和种植体与基托接触偏颊侧部位,最大应力均出现在义齿基托的前牙区,两种模型应力分布无差异(见图2)。

种植体应力主要集中在颈部,在正中咬合、前牙切割工况下(F_1, F_4),两种模型种植体应力分布

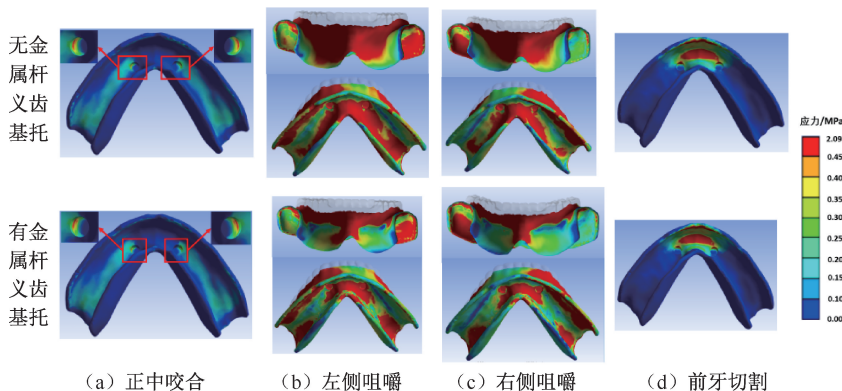


图2 不同工况下义齿基托等效应力分布

Fig. 2 Equivalent stress distributions of denture bases under different working conditions (a) Centric occlusion, (b) Left lateral chewing, (c) Right lateral chewing, (d) Anterior teeth cutting

较为一致,在偏侧咀嚼工况下(F_2 、 F_3),未添加金属加强杆的模型,种植体应力集中范围略大于添加金属加强杆模型(见图3)。

义齿基托部、种植体、种植体附近牙槽骨 von Mises 等效应力、最大主应力以及最小主应力的最大值见表2。

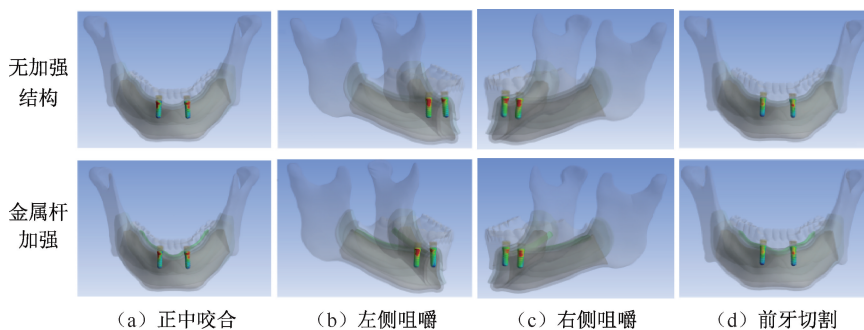


图3 种植体等效应力分布

Fig. 3 Equivalent stress distributions of implants under different working conditions (a) Centric occlusion, (b) Left lateral chewing, (c) Right lateral chewing, (d) Anterior teeth cutting

表2 不同咬合工况下两种基托结构种植覆盖义齿模型种植体及义齿基托、近植体牙槽骨受力

Tab. 2 Stresses the implant, denture base and peri-implant bone in the model of implant-supported overdenture with two types of base structures under different occlusal conditions

单位:MPa

工况		种植体			义齿基托			近植体牙槽骨		
		等效应力	最大主应力	最小主应力	等效应力	最大主应力	最小主应力	等效应力	最大主应力	最小主应力
正中咬合	①	1.89	1.03	-2.20	0.53	0.27	-0.56	0.8	0.46	-0.98
	②	1.83	1.03	-2.13	0.57	0.26	-0.50	0.75	0.44	-0.93
左侧咀嚼	①	11.77	9.76	-11.58	2.09	1.54	-2.16	4.83	4.19	-5.89
	②	9.15	8.27	-9.74	2.02	1.36	-1.93	4.11	3.37	-5.08
右侧咀嚼	①	13.83	10.96	-9.29	2.07	1.54	-2.03	5.41	3.93	-6.40
	②	10.84	8.22	-7.79	2.02	1.24	-1.92	4.56	3.34	-5.24
前牙切割	①	2.81	1.48	-3.14	0.84	0.41	-1.01	0.75	0.35	-0.65
	②	2.69	1.32	-3.00	0.85	0.39	-1.10	0.62	0.33	-0.59

注:①、②分别表示无加强结构、金属杆加强结构。

2.2 基托下黏骨膜应力分布及位移

4种咬合工况下,基托下黏骨膜最大 von Mises 等效应力和最大位移如表3所示。两种义齿基托设计模型义齿下黏骨膜的应力分布基本一致,偏侧咀嚼时两种模型应力集中区域略有不同,无金属杆加强结构的模型,应力主要集中在咀嚼对侧颊侧区;添加金属杆加强结构的模型,应力集中区域分布在两个部位,即在黏骨膜的前牙舌侧区域和咀嚼对侧颊侧区,应力集中区域较无金属杆模型区域范围小[见图4(a)]。未添加金属杆的义齿下黏骨膜最大位移区域要大于添加金属杆的义齿下黏骨膜[见图4(b)]。

表3 义齿下黏骨膜等效应力及最大位移

Tab.3 Equivalent stress and maximum displacement of the mucoperiosteum under the overdenture

工况		等效应力/MPa	位移/ μm
正中咬合	①	0.14	2.27
	②	0.14	2.22
左侧咀嚼	①	0.62	13.4
	②	0.53	11.7
右侧咀嚼	①	0.52	13.9
	②	0.50	11.7
前牙切割	①	0.38	3.40
	②	0.37	3.35

注:①、②分别表示无加强结构、金属杆加强结构。

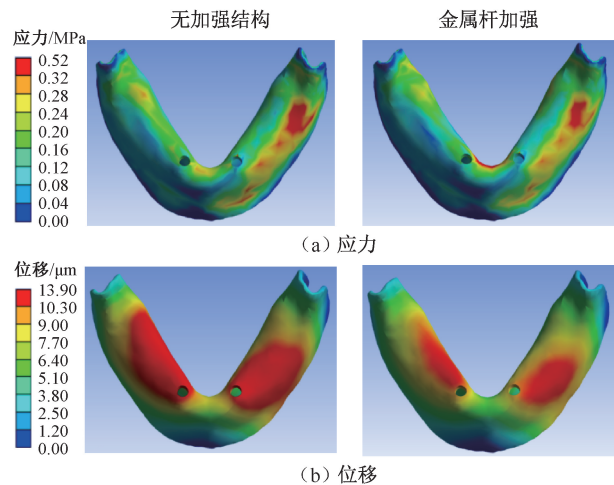


图4 右侧咀嚼工况下两种义齿基托结构的模型黏骨膜等效应力和位移分布

Fig. 4 Equivalent stress and displacement distributions of the mucoperiosteum of two denture base models under right lateral chewing condition (a) Stress, (b) displacement

3 讨论

临床上为防止义齿基托断裂,通常会添加一些加强结构^[24-27]。但由于加强结构的设计以及所用的材料不同,义齿的力学性能也有可能不同^[19]。目前鲜有相关研究采用力学分析对不同义齿基托设计进行系统的评价,而本文采用的三维有限元力学分析方法将有助于医生对义齿基托结构的力学性能做出评价。

本文对比评价了无加强结构和添加金属加强杆两种结构设计,在4种不同形式咬合载荷下(正中咬合、左右侧方咀嚼以及前牙切割食物),义齿基托、种植体、种植体周围骨及黏骨膜的受力情况。本文发现,在4种咬合工况下,种植体的应力都主要集中在颈部,这与文献[28]研究结果一致。后牙垂直加载,无论设计何种基托结构,种植体和义齿基托受力情况均无明显差异;偏侧咀嚼时,无金属杆模型种植体最大受力明显大于有金属杆模型,无金属杆模型义齿基托应力集中范围明显大于有金属杆模型,说明金属杆的添加起到分散应力的作用;前牙垂直加载,无金属杆模型种植体受力略大于有金属杆模型,而义齿基托受力则无明显差异。因此,本文认为,金属杆的添加可以有效减轻偏侧咀嚼时种植体所受的应力,减少义齿基托的应力集中;而对后牙及前牙的垂直向加载力时种植体及义齿基托所受的应力影响不大。此外,在4种咬合工况下,无金属杆模型的牙槽骨受力均大于添加金属杆模型,说明添加金属杆可以减小牙槽骨的受力。该研究结果也提示,改良基托结构有助于减少种植覆盖义齿修复的骨吸收,提高修复成功率。

在正中咬合(F_1)和偏侧咀嚼(F_2 、 F_3)工况下,义齿基托、种植体以及植体周围骨受到的应力为种植体>近植体牙槽骨>义齿基托;而在前牙咬合(F_4)工况下,受到的应力为种植体>义齿基托>近植体牙槽骨。该结果说明,在后牙咬合受力时,种植体和牙槽骨更均匀更大范围地接受并卸载应力;而在前牙受力时,义齿基托所受应力更为集中。因此,临床上建议患者更多地进行后牙的咀嚼动作,同时减少前牙的啃切动作,这样不但增大牙槽骨的受力效率,而且减小义齿基托的应力集中,降低基托折断的风险。

本文还发现,在4种咬合工况下,义齿基托受到的最大应力发生在偏侧咀嚼时义齿基托舌侧中央区域,这与临床上常断裂的部位较为一致。在两种模型中,基托所受最大应力无明显差别,说明添加金属杆后,虽然减少了应力集中的范围,但此处仍是受力薄弱点。

本文旨在定性比较不同义齿基托结构在多种咬合力作用下,义齿基托、黏膜、骨以及种植体的受力情况区别。鉴于人体组织复杂本构关系,较难从既往文献中获得公认参数,以及考虑理论研究中有有限元模型的易收敛性等方面,本文参考了部分既往相关研究采用的方法^[14,17-18],在模型材料属性和模型间接触关系上进行适当简化,将材料假设为连续均匀、各向同性的线弹性材料,各模型之间为完全绑定关系,获得的计算结果具有一定的理论参考价值。在后续的研究中,将会分析各组织参数、接触关系改变对力学结果的影响。

4 结论

在义齿基托舌侧添加金属加强杆,可以起到对种植体、种植体周围骨、义齿基托、基托下黏骨膜等的应力分散作用,在一定程度上减小了骨吸收及基托折断的风险。在后续研究中,会对更多结构设计的义齿基托模型进行力学分析,以期得到从力学角度考虑的最佳设计方案。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:张馨月负责有限元建模、数据采集和分析、论文撰写及修改;王勇负责实验设计、论文指导及修改;陈倩负责论文修改;周团锋负责选题、实验设计;马珂楠负责种植体等相关模型构建;王子轩负责义齿模型的设计;赵一姣负责实验设计、论文指导及修改。

参考文献:

[1] AMARAL CF, GOMES RS, RODRIGUES GR, 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.

[2] ALVAREZ-ARENAL A, GONZALEZ-GONZALEZ I, DELLANOS-LANCHARES H, et al. Effect of implant- and occlusal load location on stress distribution in Locator attachments of mandibular overdenture. A finite element

study [J]. J Adv Prosthodont, 2017, 9(5): 371-380.

- [3] 姜梦洋,文静,徐珊珊,等. 下颌四枚种植体支持的两种附着体覆盖义齿的三维有限元分析[J]. 中华口腔医学杂志, 2019, 54(1): 41-45.
- [4] 王璨,顾卫平,蒋煜彬,等. 不同种植设计对下颌无牙颌应力影响的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(4): 573-578.
- [5] 杜军,万哲. 植入位点及轴向上颌中切牙即刻种植即刻负重应力影响的三维有限元分析[J]. 医用生物力学, 2023, 38(2): 353-359.
- DU J, WAN Z. Effects of Implant sites and axial direction on stress of maxillary central incisors with immediate implantation under immediate weight-bearing: A three-dimensional finite element analysis [J]. J Med Biomech, 2023, 38(2): 353-359.
- [6] THOMASON JM, FEINE J, EXLEY C, et al. Mandibular two implant-supported overdentures as the first choice standard of care for edentulous patients--the York Consensus Statement[J]. Br Dent J, 2009, 207(4): 185-186.
- [7] 武红艳,王仁飞,朱琰,等. Locator附着体和球帽附着体在种植覆盖义齿中的临床修复效果比较[J]. 口腔医学, 2016, 36(2): 162-165.
- [8] ELSYAD MA, HAMMOUDA NI. Expansion of mandibular knife-edge ridge and simultaneous implant placement to retain overdentures: One-year clinical and radiographic results of a prospective study [J]. Clin Implant Dent Relat Res, 2017, 19(1): 167-179.
- [9] Gonda T, Maeda Y, Walton J N, et al. Fracture incidence in mandibular overdentures retained by one or two implants [J]. J Prosthet Dent, 2010, 103(3): 178-181.
- [10] OZAN O, RAMOGLU S. Effect of implant height differences on different attachment types and peri-implant bone in mandibular two-implant overdentures: 3D finite element study [J]. J Oral Implantol, 2015, 41(3): e50-e59.
- [11] LIU J, PAN S, DONG J, et al. Influence of implant number on the biomechanical behaviour of mandibular implant-retained/supported overdentures: A three-dimensional finite element analysis [J]. J Dent, 2013, 41(3): 241-249.
- [12] 聂秀吉,李淑娴,马宗民,等. 种植体不同设计参数对下颌骨牙齿种植的影响[J]. 医用生物力学, 2021, 36(6): 890-895.
- NIE XJ, LI SX, MA ZM, et al. Effects of different implant design parameters on mandibular tooth implantation [J]. J Med Biomech, 2021, 36(6): 890-895.
- [13] 周钰琳,毛志红,王琼瑶,等. 牙科即刻种植中不同螺旋形态及深度设计参数种植体的生物力学性能[J]. 医用生物力

- 学, 2020, 35(1): 95-100.
- ZHOU YL, MAO ZH, WANG QY, *et al.* Biomechanical properties of implants with different thread shapes and depths in dental immediate implantation [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(1): 95-100.
- [14] TURKER N, BUYUKKAPLAN US, SADOWSKY SJ, *et al.* Finite element stress analysis of applied forces to implants and supporting tissues using the "all-on-four" concept with different occlusal schemes [J]. *J Prosthodont*, 2019, 28(2): 185-194.
- [15] HONG HR, PAE A, KIM Y, *et al.* Effect of implant position, angulation, and attachment height on peri-implant bone stress associated with mandibular two-implant overdentures: A finite element analysis [J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2012, 27(5): e69-e76.
- [16] COSTA C, PEIXINHO N, SILVA JP, *et al.* Study and characterization of the crest module design: A 3D finite element analysis [J]. *J Prosthet Dent*, 2015, 113(6): 541-547.
- [17] OZDEMIR DD, POLAT NT, POLAT S, *et al.* Evaluation of "all-on-four" concept and alternative designs with 3D finite element analysis method [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2014, 16(4): 501-510.
- [18] ALMEIDA EO, ROCHA EP, FREITAS JA, *et al.* Tilted and short implants supporting fixed prosthesis in an atrophic maxilla: A 3D-FEA biomechanical evaluation [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2015, 17(Suppl 1): e332-e342.
- [19] BERGER G, PEREIRA L, SOUZA EM, *et al.* A 3D finite element analysis of glass fiber reinforcement designs on the stress of an implant-supported overdenture [J]. *J Prosthet Dent*, 2019, 121(5): 861-865.
- [20] TERCANLI AH, TURKER N. Retrospective evaluation of marginal bone loss around implants in a mandibular locator-retained denture using panoramic radiographic images and finite element analysis: A pilot study [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2019, 21(6): 1199-1205.
- [21] 沈丹. 下无牙颌四枚种植体覆盖义齿的三维有限元分析 [D]. 重庆: 重庆医科大学, 2017.
- [22] BARAO VA, DELBEN JA, LIMA J, *et al.* Comparison of different designs of implant-retained overdentures and fixed full-arch implant-supported prosthesis on stress distribution in edentulous mandible—A computed tomography-based three-dimensional finite element analysis [J]. *J Biomech*, 2013, 46(7): 1312-1320.
- [23] DE ALMEIDA EO, ROCHA EP, ASSUNCAO WG, *et al.* Cortical bone stress distribution in mandibles with different configurations restored with prefabricated bar-prosthesis protocol: A three-dimensional finite-element analysis [J]. *J Prosthodont*, 2011, 20(1): 29-34.
- [24] OZCELIK TB, YILMAZ B, AKCIMEN Y. Metal reinforcement for implant-supported mandibular overdentures [J]. *J Prosthet Dent*, 2013, 109(5): 338-340.
- [25] AHUJA S, JAIN V, CAGNA D, *et al.* Fabricating a mandibular implant supported overdenture with a suspended framework [J]. *J Indian Prosthodont Soc*, 2013, 13(2): 132-136.
- [26] EL AZIZ MSA, EL MEGID TELLA EAESA. Fully digital workflow for reinforced mandibular implant overdenture—A novel method [J]. *J Indian Prosthodont Soc*, 2022, 22(2): 205-209.
- [27] RODRIGUES AH. Metal reinforcement for implant-supported mandibular overdentures [J]. *J Prosthet Dent*, 2000, 83(5): 511-513.
- [28] 王静雅. 不同连接方式下无牙颌双种植体覆盖义齿的三维有限元应力分析 [D]. 郑州: 郑州大学, 2014.