

文章编号:1004-7220(2021)01-0085-07

3D 打印表面多孔钛根形种植体的生物力学研究

郭芳¹, 黄硕¹, 胡敏², 王超³, 刘昌奎¹

(1. 西安医学院 口腔医学院, 西安 710021; 2. 中国人民解放军总医院 口腔颌面外科, 北京 100083;
3. 重庆医科大学附属口腔医院 口腔疾病与生物医学重庆市重点实验室, 重庆 400147)

摘要:目的 探讨个性化表面多孔钛根形种植体的生物力学性能,为多孔根形种植体的设计及临床植入提供理论依据。方法 根据 CT 数据,运用 3-matic 软件设计表面多孔个性化根形种植体模型,并将其与下颌骨模型进行配准、网格划分和赋予材料学参数,负载 200 N 分析种植体最大应力及其周围骨的应力、应变。选择合适的临床病例微创拔牙后即刻植入种植体,并进行临床评价。结果 表面多孔个性化根形种植体的峰值应力主要集中在种植体实体结构和多孔结构的接触界面上,且实体、多孔结构最大应力分别为 137.710、37.008 MPa,均小于其屈服强度。3D 打印多孔根形种植体拔牙后即刻植入后初期稳定性良好,创伤小,力学传导与天然牙类似,简化了手术流程,缩短了治疗时间,患者满意度较高。结论 3D 打印表面多孔根形种植体为拔牙后即刻种植开辟一种新的方法。

关键词: 3D 打印;根形种植体;表面多孔;即刻种植

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.01.014

Biomechanical Study of Three-Dimensional Printed Titanium Root-Analogue Implant with Porous Surface

GUO Fang¹, HUANG Shuo¹, HU Min², WANG Chao³, LIU Changkui¹

(1. College of Stomatology, Xi'an Medical University, Xi'an 710021, China; 2. Department of Oral and Maxillofacial Surgery, General Hospital of Chinese PLA, Beijing 100853, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Oral Diseases and Biomedical Science, Affiliated Stomatology Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400147, China)

Abstract: Objective To investigate biomechanical properties of personalized titanium root-analogue implants with porous surface, so as to provide theoretical basis for the design and clinical implantation of such implants. **Methods** Based on CT data, the personalized model of root-analogue implant with porous surface was designed by using 3-matic software, and after registering it with the mandible model, the mesh was divided and material parameters were attributed. The implant was applied with 200 N loading, and the maximum stress of the implant and the stress and strain of the bone around the implant were analyzed. An appropriate clinical case was selected and the implant was implanted immediately after tooth extraction for conducting clinical evaluation. **Results** The peak stress of the personalized root-analogue implant with porous surface was mainly concentrated on the interface between the solid structure and the porous structure of the implant. The maximum stresses of the solid structure and porous structure were 137.710 and 37.008 MPa, respectively, which were smaller than its yield

收稿日期:2020-03-25; 修回日期:2020-05-09

基金项目:国家自然科学基金项目(81470726),西安医学院高层次人才引进基金项目(2018RCYJ03),陕西省卫生健康科研项目(2018D072),陕西省西安市未央区科技计划项目(201929)

通信作者:刘昌奎,教授, E-mail: dentistlek@126.com

strength. The three-dimensional (3D) printed porous root-analogue implants had good initial stability immediately after implantation, with minimal trauma and similar mechanical transmission to natural teeth. This simplified the surgical process, shortened the treatment time, and had high patient satisfaction. **Conclusions** The 3D printed root-analogue implant with porous surface explores a new method for immediate implantation after tooth extraction.

Key words: three-dimensional (3D) printing; root-analogue implants; porous surface; immediate implantation

即刻种植是指在手术微创拔牙后立即植入种植体的方法,简化手术流程,缩短治疗时间,故患者接受度较高。目前常规种植体形态主要为柱状或者锥柱状,与牙槽窝不匹配,需要通过逐级备洞获得种植体初期稳定性;且术中需要配合使用骨粉和骨膜,以防止结缔组织或上皮细胞沉入植入物和牙槽窝之间。而3D打印表面多孔个性化根形种植体解决了上述问题,具有以下优点:①根据患者牙根形态进行设计,与牙槽窝形态更匹配。②牙齿拔除后即可植入,无需逐级备洞,手术操作简单,创伤小。③其表面多孔结构降低了钛金属的弹性模量,改善了种植体周围骨的应力屏蔽;多孔结构与周围天然骨之间的机械互锁,提供了更高的机械稳定性。④其牙根形态与天然牙解剖结构基本一致,在行使功能时力学传导与天然牙相似。对于多孔结构植入物的制备,选择性激光熔化技术(selective laser melting, SLM)可以直接使用计算机辅助设计(computer-aided design, CAD)模型生产不受几何形状约束的多孔组件,具有良好的应用前景和价值。本文通过有限元分析个性化表面多孔根形种植体及其周围骨的生物力学性能;选择合适病例进行个性化表面多孔根形种植体的设计和制备,并在微创拔除患牙后即刻植入体内,评价其临床疗效。

1 材料和方法

1.1 实验材料与设备

Mimics 20.0/16.0 (Materialise 公司,比利时); 3-matic Medical 13.0 (Materialise 公司,比利时); SolidWorks 2016 (Dassault Systemes 公司,美国); ANSYS Workbench 14.5 (ANSYS 公司,美国); SLM 打印设备(型号 Mlab cusing R, Concept Laser 公司,德国); Ti6Al4V 金属粉末。

1.2 方法

1.2.1 牙及下颌骨模型建立

采用锥形束计算机

断层扫描(cone beam computed tomography, CBCT)对志愿者下颌骨进行扫描,扫描数据保存为 DICOM 格式文件。使用 Mimics 医学影像处理软件基于 CT 数据建立患牙和下颌骨的 3D 模型,该模型用于植人物设计和有限元模型的构建。为简化模型,选择下颌骨的部分区域,在此建模过程中,下颌骨包括皮质骨和松质骨。

1.2.2 种植体设计 患牙 3D 模型被导入 3-matic 软件中用于个性化根形种植体和全瓷冠的设计。种植体基台的形状符合全瓷牙冠的预备标准,肩宽为 1 mm;植入物的颈部形状与天然牙相匹配,并且表面光滑;植入物的根部形状与天然牙的根部相匹配并去除倒凹,植入物的根部内部为固体结构,而多孔结构位于根部的表面。设计参数如下:植人物牙根表面多孔层厚度为 1.0 mm,孔隙率为 70%,孔径及丝径均为 500 μm 。个性化植人物、全瓷冠的几何形状如图 1(a)所示。

1.2.3 个性化根形种植体生物力学分析 有限元分析常被用于研究植人物及其周围骨的生物力学定量评估^[1-2]。将设计好的个性化根形种植体和下颌骨模型导入 SolidWorks 中进行实体建模并装配,然后在 ANSYS 软件中进行生物力学分析。假定所有材料均质、线性弹性和各向同性,皮质骨、松质骨、钛合金、多孔钛和烤瓷冠的弹性模量分别为 13.0、1.6、110、5.45、210 GPa,泊松比分别为 0.3、0.3、0.3、0.3、0.25^[3-6]。由于种植体和骨之间形成骨整合,故植人物和下颌骨之间的接触界面设置为绑定接触。在咬合运动中产生的最大咬合力为 350~500 N,考虑到平均力约为最大力 60%,本文将 200 N 咀嚼负荷以均布的方式施加到种植体上,加载方向是垂直加载及颊向 45°加载[见图 1(b)]。下颌骨模型的侧面和底部保持固定^[7],观察种植体以及骨-植人物界面的应力、应变分布。

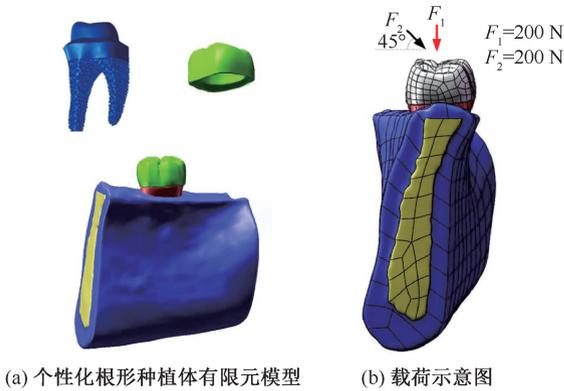


图1 有限元分析模型
Fig.1 Finite element analysis model (a) Finite element model of individual root-analogue implant, (b) Illustration of external load

1.2.4 个性化根形种植体的设计、制备及植入 患者资料及种植体设计:30岁,女,46残冠伴慢性根尖周炎[见图2(a)、(b)]。拟进行46微创拔除后即刻植入3D打印个性化多孔根形种植体,患者知情同意。本研究已获得西安医学院及中国人民解放军总医院伦理委员会的批准。根据患者CBCT数据,按照上述种植体设计方法进行拟植入种植体

的设计。为了保证种植体获得较高的术中适应性,设计3种型号种植体,一种是原型设计,另外两种分别是减径0.15 mm和减径0.3 mm组。此外,本研究设计了光滑的试件,每个试件大小与其对应的种植体型号相同[见图2(g)]。

采用Mlab eusing R打印个性化根形种植体。Ti6Al4V金属粉末用于在氩气中进行熔融和烧结。激光光斑的直径为70 μm ,每层的厚度为50 μm 。扫描参数:速度0.6 m/s,激光功率200 W。后处理后高压灭菌备用。

微创拔除46后即刻植入个性化根形种植体。手术步骤如下:局麻后分离牙龈,采用仰角手机分根并微创拔除[见图2(c)];刮匙清理牙槽窝,避免对牙槽和软组织造成损伤[见图2(d)]。用光滑的试件与牙槽窝相匹配,选择合适大小的种植体以保证种植体的初期稳定性[见图2(e)]。将选择好的个性化根形种植体放入牙槽窝,并用锤子轻敲就位。种植体周围软组织采用褥式缝合使牙龈和种植体紧密贴合[见图2(f)],术毕。7~10 d拆线。3个月后氧化锆全瓷冠修复并复查CT检查。

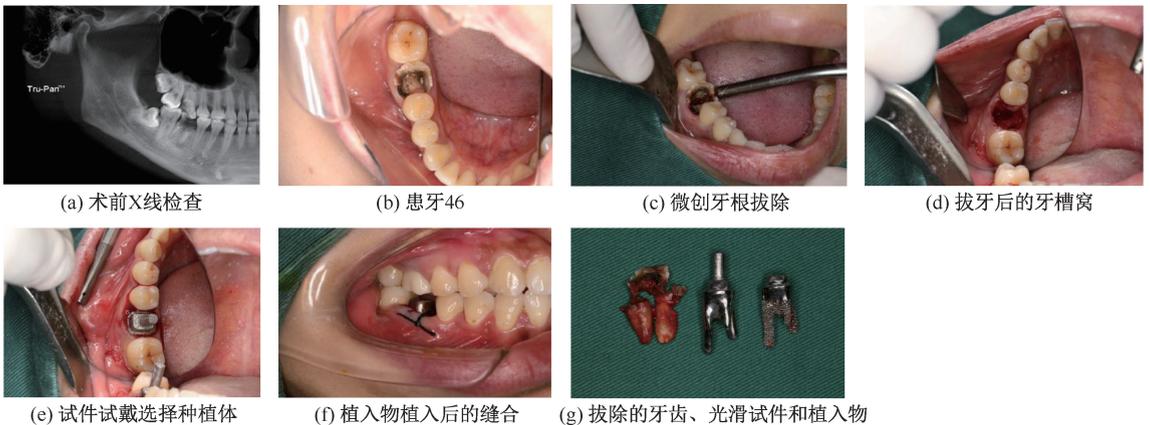


图2 微创拔牙和多孔根形种植体植入的手术步骤

Fig.2 Surgical procedures of tooth extraction and porous root implants (a) Preoperative X-ray examination, (b) Diseased teeth 46, (c) Minimally invasive root extraction, (d) Alveolar socket after tooth extraction, (e) Select implant to try on smooth test piece, (f) Suture after implant implantation, (g) Extracted tooth, smooth test piece and implant

2 结果

2.1 个性化表面多孔根形种植体的应力分布

当种植体加载负荷为200 N时,种植体的应力主要集中在实体和多孔界面接触点之间。垂直加载时,

种植体实体和多孔结构最大 von Mises 应力分别为54.162、12.819 MPa,全瓷冠最大 von Mises 应力为16.981 MPa;颊向加载200 N时,种植体实体和多孔结构最大 von Mises 应力分别为137.710、37.008 MPa,全瓷冠最大 von Mises 应力为183.97 MPa(见图3)。

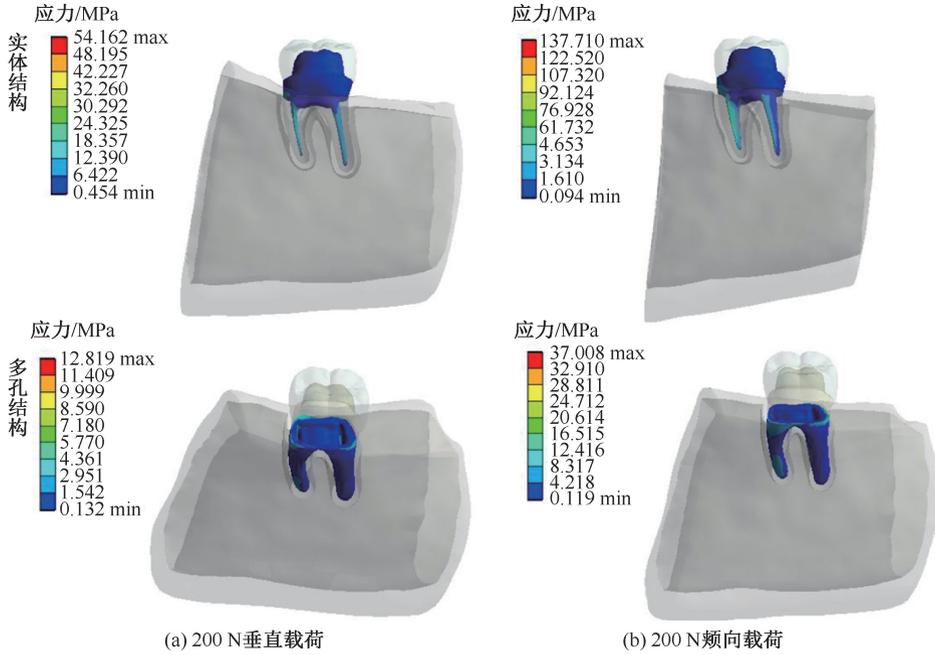


图3 不同载荷下种植体实体和多孔结构应力分布

Fig.3 Stress distributions on implant solid and porous structure under different loading

(a) 200 N vertical loading, (b) 200 N buccal loading

2.2 种植体周围骨应力、应变分布

种植体垂直载荷 200 N 时,皮质骨、松质骨最大 von Mises 应力分别为 16.369、1.867 MPa,应变分别

为 1.374、1.168;种植体颊向载荷 200 N 时,皮质骨最大 von Mises 应力分别为 50.422、5.202 MPa,应变分别为 4.179、3.579(见图 4、5)。

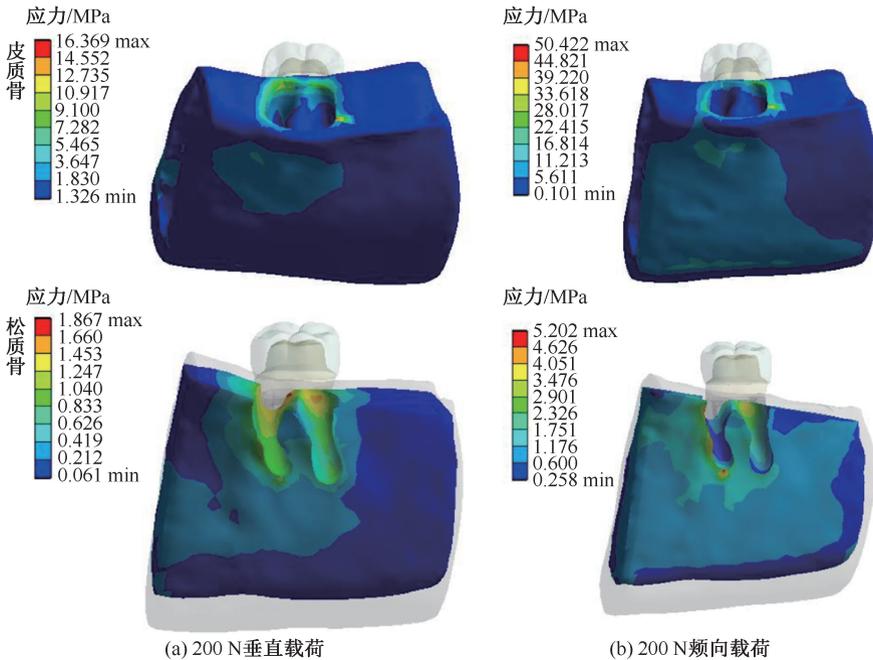


图4 不同载荷下皮质骨和松质骨应力分布

Fig.4 Stress distributions on cortical bone and cancellous bone under different loading

(a) 200 N vertical loading, (b) 200 N buccal loading

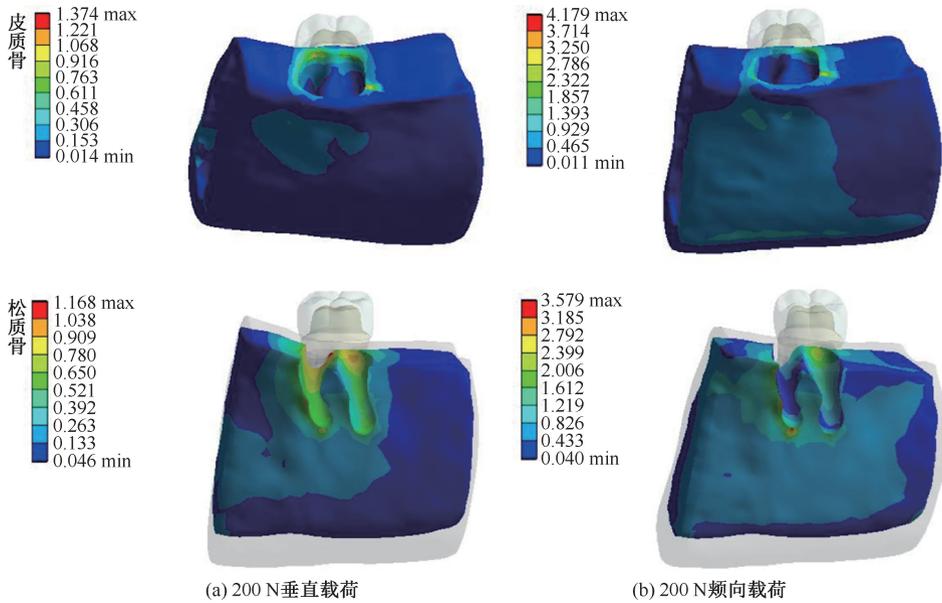


图5 不同载荷下皮质骨、松质骨应变分布

Fig.5 Strain distributions of cortical bone and cancellous bone under different loading (a) 200 N vertical loading, (b) 200 N buccal loading

松质骨 von Mises 应力相对皮质骨较小,这可能是因为松质骨与植入物之间没有直接接触。随着种植体深度的增加,皮质骨和松质骨的应力和应变逐渐减小,即颈部>根中部>根端。

2.3 植入种植体的临床及影像学评估

手术过程顺利,种植体初始稳定性良好,无术

后疼痛、肿胀、出血及感染。

术后3个月,影像学资料显示种植体骨结合良好,没有明显的骨组织丧失[见图6(a)]。咬合关系良好,显示出良好的功能和美学效果,患者比较满意[见图6(b)]。



(a) 术后3个月影像学资料



(b) 术后3个月全瓷冠永久性修复

图6 种植体的临床及影像学评估

Fig.6 Clinical and imaging evaluation of implants (a) Imaging data at 3 months after surgery, (b) Permanent repair of zirconia at 3 months after surgery

3 讨论与结论

即刻种植是指在患牙拔除的同时将种植体植入牙槽窝的治疗方式,适用于因龋坏、外伤等原因无法保留的牙齿。在后牙区,即刻种植能够有效维持拔牙位点骨量,避免牙槽嵴高度和宽度的废用性萎缩。然而,传统种植体的外形与拔牙窝形态不吻合,需要通过逐级备洞、植入骨替代材料等步骤获得初期稳定性,增加了操作复杂程度和患者的经济负担。鉴于此,本文设计了个性化根形种植体。该种植体是模拟天然牙形态的骨内种植体,形状与要拔除牙齿的牙槽窝形状相吻合。此外,力学载荷对骨再生和重建有着重要的影响,要避免应力遮挡现象,植入体的弹性模量需要与骨相匹配,将其设计为多孔结构是减小植入体弹性模量的有效方式^[8]。目前,多孔结构被认为是较为理想的种植体表面结构能改良方法之一,多孔结构的植入物具有以下优点:①多孔钛合金具有与骨骼相似的弹性模量,有助于防止钛合金在骨界面处的应力屏蔽。②多孔表面结构改善植入物生物材料与周围天然骨之间的机械互锁,从而在此关键界面处提供更高的机械稳定性^[2,9]。③孔隙度增加表面积,降低刚度,促进血管化和骨的生长,从而增强骨植入体界面的稳定性^[10-11]。根据 Karageorgiou 等^[12]的研究,通常认为再生骨骼所需的最小孔径为 100 μm 。如果孔径大于 300 μm ,则有利于新生骨组织和毛细血管长入^[13]。因此,本文在牙根表面设计多孔结构,孔径为 500 μm ,并通过有限元分析种植体及其周围骨 von Mises 应力、应变分布。

为了确保植入物的稳定性,von Mises 应力均应小于材料的屈服强度^[14]。Ti6Al4V 合金的屈服强度为 970 MPa,70%孔隙率的多孔结构 Ti6Al4V 合金屈服强度为 159 MPa^[15]。本文发现,当负载 200 N时,表面多孔个性化根形种植体的峰值应力主要集中在种植体实体结构和多孔结构的接触界面上,实体结构和多孔结构的峰值应力分别小于 450、80 MPa(考虑到安全系数 2)。此外,Lin 等^[16]认为,骨骼过早微损伤的临界阈值是 60 MPa。本文分析结果显示,皮质骨和松质骨所受 von Mises 应力均小于 60 MPa。Mellal 等^[17]认为,当骨组织所受应变低于 0.2 时,骨组织会发生废用性吸收;而当等效

应变大于 4,会出现病理性过度负载。本文分析结果表明,垂直加载 200 N 时皮质骨、松质骨所受应变以及颊向加载 200 N 时松质骨所受应变均在 0.2~4.0 之间,但颊向加载 200 N 时,皮质骨应变为 4.179,说明侧向力过大会对骨壁产生破坏,患者应尽量避免咀嚼硬物。综上所述,本文设计的个性化表面多孔根形种植体从理论上分析不会出现种植体的断裂,且有利于种植体周围新骨的形成。为了验证其临床效果,本文选择 1 例患者进行拟植入种植体的设计和制备,并微创拔除患牙后即刻植入体内,评价临床疗效。结果显示,种植体植入后初始稳定性良好,无术后疼痛、肿胀、出血及感染。术后 3 个月,影像学资料显示,种植体骨结合良好,患者比较满意。

3D 打印技术的引入标志着口腔种植革命性新时期的开始。在拔牙后立即植入个性化表面多孔根形种植体具有创伤小、保留原有解剖结构、力学传导与天然牙类似的优点,简化了手术流程,缩短了治疗时间,降低了治疗成本,患者满意度较高。然而,后续需要对较大的样本量开展进一步的长期研究,以评估这项技术的益处。

参考文献:

- [1] SAHIN S, CEHRELI MC, YALCIN E. The influence of functional forces on the biomechanics of implant-supported prostheses: A review [J]. *J Dent*, 2002, 30(7): 271-282.
- [2] CHEN LJ, HE HL, YI M, *et al*. Finite element analysis of stress at implant-bone interface of dental implants with different structures [J]. *T Nonferr Metal Soc*, 2011, 21(7): 1602-1610.
- [3] LIU T, MU Z, YU T, *et al*. Biomechanical comparison of implant inclinations and load times with the all-on-4 treatment concept: A three-dimensional finite element analysis [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2019, 22(6): 585-594.
- [4] BAHRAMI B, SHAHRBAF S, MIRZAKOUCHAKI B, *et al*. Effect of surface treatment on stress distribution in immediately loaded dental implants: A 3D finite element analysis [J]. *Dent Mater*, 2014, 30(4): 89-97.
- [5] SU KX, JI P, WANG H, *et al*. *In vivo* study of 3D printed porous tantalum implant on osseointegration [J]. *West Chin J Stomatol*, 2018, 36(3): 291-295.
- [6] 王淑英,江青松,蒋向华,等. 钛基台支持的不同牙合面厚度 CAD/CAM 全瓷单冠应力分布的三维有限元分析[J]. *北京口腔医学*, 2019, 27(4): 201-205.

- [7] SULAGNA S, TIKESHWAR PS, ARIJIT D, *et al.* Mechanical response at peri-implant mandibular bone for variation of pore characteristics of implants: A finite element study [J]. *Acta Bioeng Biomech*, 2019, 21(2): 83-93.
- [8] 赵春伶, 贾少薇, 李剑, 等. 基于3D打印多孔支架和植入体的结构设计研究进展[J]. *医用生物力学*, 2019, 34(4): 446-452.
ZHAO CL, JIAO SW, LI J, *et al.* Research progress in structural design of porous scaffolds and implants based on 3D printing [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(4): 446-452.
- [9] 冯辰栋, 夏宇, 李祥, 等. 3D打印多孔钛支架微观孔隙结构和力学性能[J]. *医用生物力学*, 2017, 32(3): 256-260.
FENG CD, XIA Y, LI X, *et al.* Micro-pore structure and mechanical properties of porous titanium scaffold using 3D print technology [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(3): 256-260.
- [10] LI JP, WIJI JR, BLITTERSWIJK CA, *et al.* Porous Ti6Al4V scaffold directly fabricating by rapid prototyping: Preparation and *in vitro* experiment [J]. *Biomaterials*, 2006, 27(8): 1223-1235.
- [11] OTSUKI B, TAKEMOTO M, FUJIBAYASHI S, *et al.* Pore throat size and connectivity determine bone and tissue ingrowth into porous implants: Three-dimensional micro-CT based structural analyses of porous bioactive titanium implants [J]. *Biomaterials*, 2006, 27(35): 5892-5900.
- [12] KARAGEORGIU V, KAPLAN D. Porosity of 3D biomaterial scaffolds and osteogenesis [J]. *Biomaterials*, 2005, 26(27): 5474-5491.
- [13] CHENG A, HUMAYUN A, COHEN DJ, *et al.* Additively manufactured 3D porous Ti-6Al-4V constructs mimic trabecular bone structure and regulate osteoblast proliferation, differentiation and local factor production in a porosity and surface roughness dependent manner [J]. *Biofabrication*, 2014, 6(4): 1-12.
- [14] CHEN X, WANG Y, MAO Y, *et al.* Biomechanical evaluation of Chinese customized three-dimensionally printed total temporomandibular joint prostheses: A finite element analysis [J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2018, 46(9): 1561-1568.
- [15] CHLADEK W, LIPSKI T, KARASINSKI A, *et al.* Experimental evaluation of occlusal forces [J]. *Acta Bioeng Biomech*, 2001, 3(1): 25-37.
- [16] LIN JX, ZHANG GJ, ZHEN Y, *et al.* Evaluation of biomechanical health degree of peri-implant bone through finite element analysis: A first approach [J]. *Int J Appl Mech*, 2019, 10(9): 1850097-1850116.
- [17] MELLAL A, WISKOTT HWA, BOTSIS J, *et al.* Stimulating effect of implant loading on surrounding bone. Comparison of three numerical models and validation by *in vivo* data [J]. *Clin Oral Impl Res*, 2004, 15(2): 239-248.