

自就位个性化钛网连接体的优化设计

张佳园^{1,2#}, 魏凌飞^{1,3#}, 冀敏⁴, 林海燕², 吴轶群^{1*}, 于德栋^{1*}

(1. 上海交通大学医学院附属第九人民医院 口腔第二门诊部; 上海交通大学口腔医学院; 国家口腔医学中心; 国家口腔疾病临床医学研究中心; 上海市口腔医学重点实验室; 上海市口腔医学研究所, 上海 200011; 2. 杭州医学院存济口腔医学院; 杭州医学院附属口腔医院, 杭州 310012; 3. 滨州医学院附属烟台口腔医院 口腔种植科, 山东 滨州 264003; 4. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 摩擦学与表面工程实验室, 山东 青岛 266400)

摘要:目的 对3D打印自就位钛网主体与两端定位翼的连接处进行优化,包括定位翼厚度、宽度以及连接处构型。分析优化改进前后仿真模型的结构性能,最终获得最优设计的新型自就位钛网。**方法** 基于SolidWorks软件,构建自就位钛网仿真模型,优化、改进尺寸参数。采用仿真软件ANSYS Workbench对连接处厚度和宽度进行多目标优化设计。并在连接处设计间断连接构型,获得优化后的自就位钛网。**结果** 当对新型自就位钛网顶端外表面施加40 N载荷,连接处最大应变未超过钛网的断裂应变,且应力与变形皆在可接受范围内。当对一侧定位翼的游离端施加10 N的45°弯折力时,连接处最大应变超过了钛网的断裂应变,且裂纹集中于连接处。虚拟模型的仿真结果与力学性能验证试验的结果基本一致。**结论** 通过优化自就位个性化钛网连接体的尺寸以及构型,实现手术中摆放、按压个性化钛网时,连接体不发生折断和较大位移。术后对定位翼游离端简单弯折,即可实现连接体沿连接线整齐断裂分离,并且断面光滑平整。本研究对自就位个性化钛网连接处尺寸及构型进行的优化取得了较为理想的临床效果。

关键词: 个性化钛网; 连接体; 自就位; 优化设计

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.05.004

Optimization Design of Individualized Self-Positioning Titanium Mesh Connectome

ZHANG Jiayuan^{1,2#}, WEI Lingfei^{1,3#}, JI Min⁴, LIN Haiyan², WU Yiqun^{1*}, YU Dedong^{1*}

(1. Second Dental Center, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine; College of Stomatology, Shanghai Jiao Tong University; National Center for Stomatology; National Clinical Research Center for Oral Diseases; Shanghai Key Laboratory of Stomatology; Shanghai Research Institute of Stomatology, Shanghai 200011, China; 2. Savaid Stomatology School of Hangzhou Medical College; Affiliated Stomatological Hospital of Hangzhou Medical College, Hangzhou 310012, China; 3. Department of Oral Implantation, Yantai Stomatological Hospital Affiliated to Binzhou Medical College, Binzhou 264003, Shandong, China; 4. Tribology and Surface Engineering Laboratory, School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266400, Shandong, China)

收稿日期:2023-03-28; 修回日期:2023-04-14

基金项目:国家自然科学基金项目(52175422,32101094),上海市卫生健康委员会卫生行业临床研究专项(202240194),上海交通大学医学院附属第九人民医院“交叉”研究基金项目(JYJC202114)

通信作者:吴轶群,主任医师,E-mail: yiqunwu@hotmail.com;于德栋,副主任医师,E-mail: yudedong@sjtu.edu.cn

#为共同第一作者,*为共同通信作者

Abstract: Objective To optimize the connection between the three-dimensional (3D) printed self-positioning titanium mesh main body and the positioning wings at both ends, including thickness, width and connection configuration of the positioning wings at the connection, and to analyze and optimize structural performance of the simulation model before and after the improvement, ultimately obtain the optimal design of a novel self-positioning titanium mesh. **Methods** A self-positioning titanium mesh simulation model was built in software SolidWorks to optimize and improve dimension parameters. Then, the multi-objective optimization design for thickness and width of the connection was conducted using the simulation software ANSYS Workbench. A discontinuous connection configuration was designed at the connection to obtain an optimized self-positioning titanium mesh. **Results** When the 40 N load was applied to outer surface of the novel self-positioning titanium mesh alveolar crest, the maximum strain at the connection did not exceed fracture strain of the titanium mesh, and the stress and deformation were within an acceptable range. When the 10 N bending force at 45° angle was applied to free end of the positioning wing on one side, the maximum strain at the connection exceeded the fracture strain of the titanium mesh, and the crack propagation path was concentrated at the connecting line. The experimental results of the virtual model were basically consistent with the results of mechanical performance verification test. **Conclusions** By optimizing the dimension and configuration of the individualized self-positioning titanium mesh connectome, the connectome does not break or shift significantly when the individualized titanium mesh is placed and pressed during surgery. After surgery, simply bending free end of the positioning wing can achieve a neat fracture and separation of the connector along the connecting line, with a smooth and flat cross-section. This study has achieved ideal clinical results by optimizing the dimension and configuration of the individualized self-positioning titanium mesh connectome.

Key words: individualized titanium mesh; connectome; self-positioning; optimization design

以修复为导向制作的三维打印个性化钛网 (three-dimensional-printed individualized titanium mesh, 3D-PITM) 在一定程度上避免了传统钛网以及以外科为导向设计的个性化钛网存在的诸多缺陷, 在临床应用越发普遍^[1]。术前虽然可以获得基于理想骨增量的个性化钛网, 但在实际手术过程中, 仍需手术医生以自由手的方式转移、植入钛网。基于不同类型骨缺损区的解剖结构, 钛网安置后的稳定性相差迥异, 移位可能性极大; 填充在骨缺损区和钛网内的黏性骨材料会在一定程度上阻碍钛网精准就位, 进而加剧钛网就位发生扭转或移位^[2]。术中拉动 3D-PITM 来纠正位置也存在较大的盲目性和不确定性^[3]。因此, 临床上把个性化钛网最佳的虚拟规划位置精准地转移到实际手术中仍充满挑战^[4]。

基于前期实验, 本文提出了一种三维打印自就位个性化钛网, 它由个性化钛网主体和两端的定位翼连接组成。定位翼可以稳固搭靠在邻牙的颌面, 引导个性化钛网主体迅速精确就位, 保证术中个性化钛网放置位置与设计的理想状态最大程度一致。采用有限元断裂仿真分析、力学性能试验, 证明了

标准化虚拟模型建立的有效性。初步实现了在整个手术过程中摆放、按压钛网, 定位翼不发生断裂和较大位移; 但当对定位翼的游离端进行 45° 弯折时, 定位翼在连接处并不会断裂分离。以上结论初步证明, 自就位个性化钛网在一定程度上具有其设计的合理性以及临床应用的可行性, 但仍然存在如下未解决的系列问题: ① 两侧定位翼在连接处的尺寸 (包括宽度和厚度) 并未给予详细的定义; ② 此种装置在手术完成后需采用特殊器械将定位翼切下, 完成钛网的定位安装^[5], 以保证患者手术创口密合。切割分离两端定位翼操作需要花费更多手术时间, 既增加了手术难度和钛粉末残留在组织中的风险, 也增加了患者痛苦, 以及钛网粗糙断端戳破黏膜导致后期钛网暴露等风险。

本文基于已建立的标准化自就位钛网仿真模型, 采用响应面法对钛网主体与定位翼的连接尺寸以及构型进行优化设计, 实现定位翼在钛网主体精准就位, 以及固位钉固定后通过 45° 弯折沿连接线迅速整齐地断裂分离, 保证断面光滑平整。研究结果为 3D-PITM 治疗骨缺损以及临床转化应用提供理论和实验基础。

1 材料与方法

1.1 标准化自就位钛网原始模型的建立及断裂仿真分析

根据理想状态下的骨增量情况(包括因假骨膜产生而过增量设计 1.5 mm)以及多项研究中钛网设计的基本参数^[6-8],设定自就位钛网的标准化参数和三维尺寸。本课题组在实验前期已经基于 SolidWorks 2020 (Dassault Systemes 公司,美国)三维软件对标准化模型进行构建,并开展力学性能验证性试验证明了标准化自就位钛网模型的有效性。设计的自就位个性化钛网结构及标准化自就位钛网仿真模型如图 1 所示。

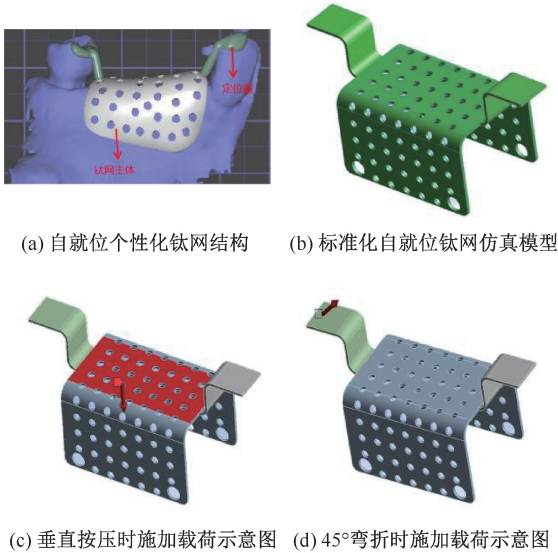


图 1 自就位个性化钛网结构及标准化仿真模型

Fig. 1 Individualized self-positioning titanium mesh structure and standardized simulation model (a) Individualized self-positioning titanium mesh structure, (b) Simulation model of standardized self-positioning titanium mesh, (c) Schematic diagram of applying load during vertical pressing, (d) Schematic diagram of applying load during 45° bending

为了对模型进行连接尺寸优化,可在建模过程中对优化参数(定位翼在连接处的宽度和厚度)进行定义和标记,供 Workbench 2020(ANSYS 公司,美国)软件识别。

1.2 优化系统搭建及优化结果获得

基于钛网植入手术的两个主要步骤,分别对自就位钛网标准化仿真模型进行优化系统搭建:

① 钛网安置。对钛网主体的外表面进行垂直按压,实现钛网就位;② 定位翼移除。自就位钛网就位后,对两侧的定位翼进行 45°弯折,进而移除定位翼。为了分析装置在临床应用过程中是否会发生折断和被破坏,将上述两种情况下的优化目标皆设为最大等效总应变^[9-10]。

1.2.1 参数变量设置 在 Design of Experiments 版块中对参数变量进行设置。优化分析时,具体变量优化参数如下:① 定位翼在连接处宽度(DS-1)初始值 5 mm,优化范围 3~6 mm;② 定位翼在连接处厚度(DS-2)初始值 0.4 mm,优化范围 0.2~0.4 mm。

1.2.2 参数灵敏度及响应面分析 ANSYS Workbench 系统根据提供的优化目标、优化参数及其范围生成多组模型,并以数值列表和响应面模型形式对两种情况下的多组优化目标进行输出。确定对目标函数影响最大的设计变量,由此挑选最终的优化设计点^[11]。

1.3 重建尺寸优化后的自就位钛网仿真模型

根据优化后的尺寸参数重建仿真模型,并进行断裂仿真分析。加载方式和 1.2 节一致。

1.4 自就位钛网在两端连接处的构型优化

利用 SolidWorks 软件,在连接尺寸得到优化后的标准自就位钛网模型两端连接处制作间断连接构型(见图 2)。对连接尺寸与连接构型皆优化的新型自就位钛网模型进行重建以及断裂仿真分析。加载方式和 1.2 节一致。

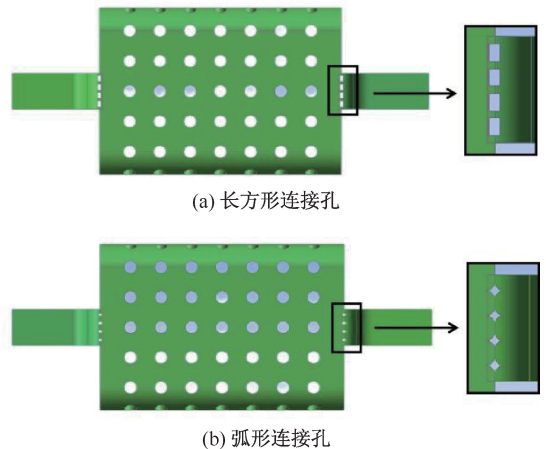


图 2 在连接处制作了连接孔的仿真模型

Fig. 2 Simulation model with connecting hole made at the connection (a) Rectangular connecting hole, (b) Arc connecting hole

1.5 连接尺寸与连接构型优化完成的新型自就位钛网力学性能验证试验

将标准化自就位钛网样品用特制夹具及支架装夹固定,采用万能试验机(Instron公司,美国)对3种优化的标准自就位钛网(连接尺寸优化、连接尺寸及连接构型优化-长方形孔、连接尺寸及连接构型优化-弧形连接孔)以及1种未优化的标准自就位钛网开展力学性能试验。共进行钛网主体的垂直按压和定位翼游离端45°弯折两组试验,加载速度为0.3 mm/min;当载荷超过40 N时,停止试验。获取试验数据并用Origin 2018(OriginLab公司,美国)绘图软件进行处理。

2 结果

2.1 连接体尺寸优化结果

模型采用“CCD-2因素-3水平”拟合方式,标准情况下列出9个设计点(见表1)。

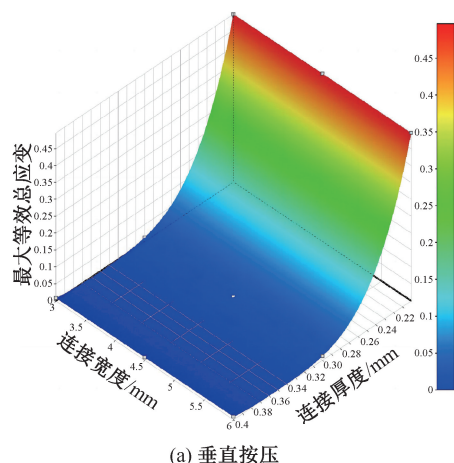
表1 垂直按压时及45°弯折时标准化自就位钛网模型的设计点分组

Tab. 1 Design point grouping of standardized self-positioning titanium mesh model during vertical pressing and 45° bending

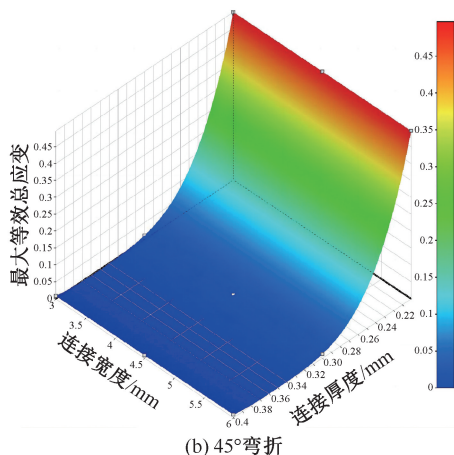
设计点	连接宽度/mm	连接厚度/mm	垂直按压时	45°弯折时
			最大等效总应变	最大等效总应变
1	4.5	0.3	3.72×10^{-7}	0.011 918
2	3	0.3	3.72×10^{-7}	0.011 918
3	6	0.3	3.72×10^{-7}	0.011 918
4	4.5	0.2	7.66×10^{-7}	0.496 770
5	4.5	0.4	3.39×10^{-7}	0.008 419
6	3	0.2	7.66×10^{-7}	0.496 770
7	6	0.2	7.66×10^{-7}	0.496 770
8	3	0.4	3.39×10^{-7}	0.008 419
9	6	0.4	3.39×10^{-7}	0.008 419

根据3D打印材料的国际执行标准获得tc4钛合金材料断裂应变为0.17(当一种材料所受到的应变超过其断裂应变时,材料会发生断裂)。为达到优化目的,自就位钛网需同时满足以下两种情况:①钛网安装就位时(即垂直按压),最大等效总应变小于0.17;②钛网固定后,对两侧的定位翼进行45°弯折,最大等效总应变大于0.17。并考虑材料成本(宽度和厚度最小)等因素。最终,根据两种情况下响应面曲线可得,定位翼在连接处的宽度为

3 mm、厚度为0.2 mm为最佳设计(见图3)。



(a) 垂直按压



(b) 45°弯折

图3 标准化自就位钛网模型的响应面模型

Fig. 3 Response surface model of standardized self-positioning titanium mesh model (a) Vertical pressing, (b) 45° bending

2.2 连接体尺寸及连接构型优化前后的结构性能比较

通过扭矩表(Tohnichi Mfg公司,日本)测量口腔临床医生手术操作时的施力范围为10~40 N。

本文结果表明:①当对钛网进行垂直按压,施力为40 N工况下,连接尺寸及连接构型皆优化后的新型自就位钛网仿真模型最大应变未超过钛网的断裂应变,且应力与变形皆在可接受范围内(见表2);②对一侧定位翼的游离端进行45°弯折,施力为10 N工况下,连接尺寸及连接构型皆优化后的新型自就位钛网仿真模型最大应变超过了钛网的断裂应变(见表3)。

表2 40 N 加载力下垂直直接压时新型自就位钛网优化前后力学性能比较

Tab. 2 Comparison of mechanical properties before and after optimization of the novel self-positioning titanium mesh under 40 N load during vertical compression

模型	总变形/mm			等效总应变			等效应力/MPa		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
优化前	0	0.112	0.069	2.923×10^{-10}	3.806×10^{-3}	3.552×10^{-4}	3.214×10^{-5}	418.76	32.063
尺寸优化后	0	0.282	0.209	5.038×10^{-13}	1.423×10^{-2}	6.668×10^{-4}	4.257×10^{-8}	1 566.30	58.026
尺寸与构型	长方形孔	0	0.284	1.232×10^{-13}	1.302×10^{-2}	7.213×10^{-4}	1.356×10^{-8}	1 096.40	60.342
皆优化后	弧形连接孔	0	0.282	1.434×10^{-13}	1.078×10^{-2}	7.374×10^{-4}	1.578×10^{-8}	1 113.00	62.881

表3 10 N 加载力下定位翼 45° 弯折时新型自就位钛网优化前后力学性能比较

Tab. 3 Comparison of mechanical properties before and after optimization of the novel self-positioning titanium mesh under 10 N load during 45° bending of the positioning wing

模型	总变形/mm			等效总应变			等效应力/MPa		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
优化前	0	2.41	0.128	7.185×10^{-29}	0.022	4.892×10^{-4}	5.942×10^{-24}	1 133.2	44.381
尺寸优化后	0	277.62	6.914	1.618×10^{-29}	1.206	1.333×10^{-2}	1.365×10^{-24}	3 509.5	62.981
尺寸与构型	长方形孔	0	96.61	2.216×10^{-30}	2.060	8.555×10^{-3}	0	5 286.9	42.385
皆优化后	弧形连接孔	0	51.62	1.100×10^{-30}	0.627	3.541×10^{-3}	0	2 165.4	35.661

两种连接构型改进后,当对自就位钛网模型的定位翼进行 45° 弯折时,最大等效总应变更加

集中于连接处,长方形孔的间断连接设计更优(见图 4)。

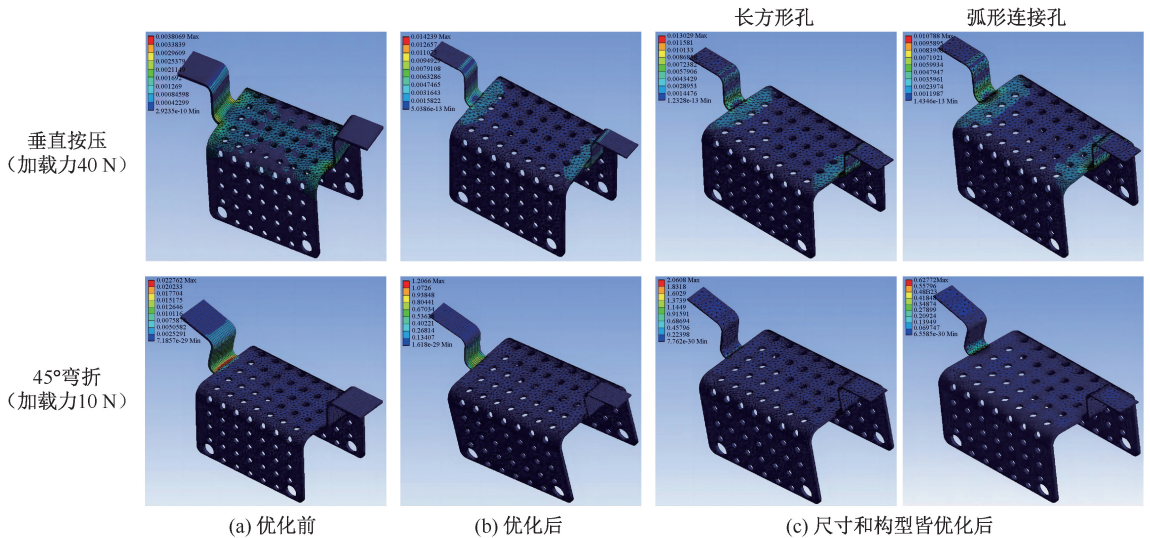


图4 新型自就位钛网优化前后等效总应变分布

Fig. 4 Distributions of equivalent total strain before and after optimization of the novel self-positioning titanium mesh

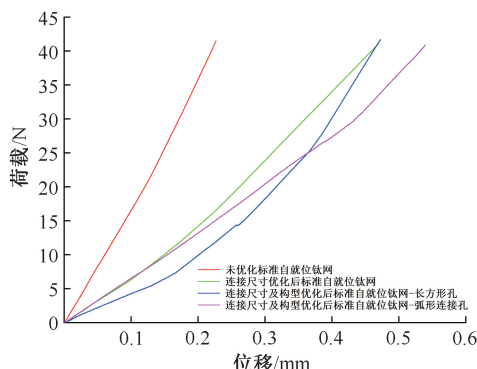
(a) Before optimization, (b) After optimization, (c) After optimization of dimension and configuration

2.3 优化完成的钛网力学性能验证试验结果

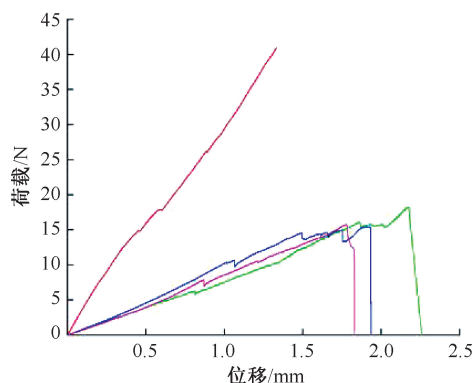
3种优化的标准自就位钛网与1种未优化的标准自就位钛网力学性能比较结果如下:受到垂直方向 40 N 载荷,4 种类型的标准化自就位钛网皆出现了比较稳定的线性变化。随着载荷的逐渐增加,位移逐渐增大;当载荷为 40 N 时,曲线仍处于弹性区域,未发生较大的变形和断裂。当定位翼游离端在

40 N 载荷下受到 45° 弯折力时,未进行优化的自就位钛网定位翼不会发生折断,而 3 种优化后的自就位钛网定位翼分别在受到 45° 约 15 N 弯折力时则会发生断裂分离,且连接尺寸和连接构型皆进行优化后的新型自就位钛网定位翼最先断裂(见图 5)。

仅进行连接尺寸优化后的标准自就位钛网,定位翼的断裂线倾斜,且并未沿着连接线断裂;连接



(a) 垂直按压试验



(b) 定位翼进行45°弯折试验

图5 力学试验曲线

Fig. 5 Mechanical test curve (a) Vertical compression test, (b) 45° bending test on the positioning wing

尺寸及连接构型皆优化后的新型自就位钛网,定位翼的断裂线整齐,其中连接处为长方形孔间断连接的定位翼沿着连接线均匀断裂分离(见图6)。

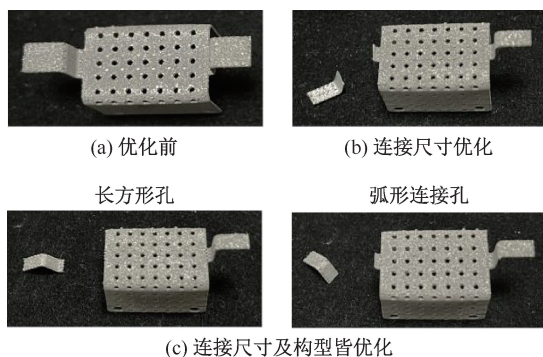


图6 对各类型标准化自就位钛网定位翼进行45°弯折试验后结果

Fig. 6 Results after 45° bending test on the positioning wings for various types of standardized self-positioning titanium mesh (a) Before optimization, (b) Dimension optimization of the connection, (c) Dimension and configuration optimization of the connection

3 讨论

钛网作为一种不可吸收的膜,已越来越多地应用在种植骨增量治疗中^[12]。以修复为导向的个性化钛网可以在术前明确种植体植入的最佳位置,进而实现引导骨再生区域轮廓的精准设计^[1,13]。但术中实现钛网迅速、精准地转移到最佳规划位置仍是目前临床中未解决的问题^[14-15]。以往提出的带有定位装置的钛网,在手术完成后需采用特殊器械将定位装置切除。这使得手术操作难度提高,会耗费更多手术时间,增加患者痛苦;钛网的粗糙切口或者断裂端增加了戳穿黏膜、钛网暴露的可能^[16-17]。本文旨在优化个性化钛网与定位装置之间连接处的细节设计,探索最佳的连接体尺寸与构型,为术中精准安置钛网,术后迅速去除定位翼提供理论基础。

本文利用已经建立的标准化自就位钛网仿真模型,通过响应面法对定位翼在连接处的厚度和宽度进行多目标优化设计。优化后的新型自就位钛网在就位时没有产生断裂或较大变形,定位翼可以为钛网主体提供稳定固位、精准的引导,具有临床实用性、可行性。当对连接尺寸及连接构型进行优化设计后,对定位翼的游离端施加45°弯折力,可实现定位翼在连接处沿连接线整齐断裂分离,断面较平整,因此对构型优化设计也取得了良好的效果。

本研究中,力学性能验证性试验与有限元分析实验得出的结论在某些方面一致,证明了本设计对新型标准自就位钛网的优化效果良好,为装置的进一步临床应用奠定了理论基础。研究结果也反向证明了标准化自就位钛网模型建立的合理性,基于有限元方法的断裂仿真分析的科学性,响应面优化方法以及间断连接构型设计的有效性^[18-19]。将有限元分析方法与力学性能试验进行比较后发现,利用ANSYS软件中的响应面法进行迭代优化,减小了设计周期,减少了工作量,费用更低^[20-21]。

本研究仍存在一定的局限性:①作为一项初步研究,采用了标准样式的个性化钛网以及多项研究中钛网设计的基本参数,初步建立了标准化自就位钛网模型;②对口腔临床医生的常规手术动作进行分析,只考虑了两个主要操作步骤,手术中其他细节操作并未纳入;③临床上牙槽骨缺损类型

不尽相同, 剩余牙齿数量迥异, 骨缺损位置也各有差异等也影响了自就位钛网的最优设计。因此, 仍需展开更深入的实验, 考虑更多现实因素对自就位个性化钛网临床使用的影响, 进行更加真实的模拟分析^[22-24], 最终实现针对具体病例, 采用个性化方案设计满足具体骨缺损情况、最优的自就位钛网解决方案。目前, 改进后的新型自就位钛网主体厚度为 0.4 mm, 定位翼厚度为 0.2 mm, 定位翼的断裂面会与下方骨组织及上方牙龈软组织有一定的距离, 且位于朝向邻牙的邻侧面, 故对下方骨组织及上方牙龈软组织的影响相对较少。但是新型自就位钛网的定位翼在断裂后仍可能会存在断裂面粗糙的情况, 连接处可设计为连接构型弯折向后缩进, 不突出于主体两端, 整个新型自就位钛网的设计改进将更加完善和合理。

4 结论

本课题组前期建立了标准化自就位钛网模型, 确定了断裂仿真分析流程, 开展了验证性力学实验。本文利用已经建立的标准化自就位钛网仿真模型, 通过响应面法对定位翼在连接处的尺寸以及构型进行改进优化, 得到了新型自就位钛网, 实现了在手术中摆放、按压钛网时, 连接体不发生折断和较大位移; 在术后, 通过对定位翼游离端进行 45° 弯折, 使定位翼在连接处沿连接线整齐断裂分离, 断面光滑平整。本研究首次创新性地提出并优化 3D 打印的新型自就位钛网设计, 为个性化钛网的精准转移、稳定固位提供了理论基础和实践意义, 对钛网骨增量技术的临床应用具有积极的指导意义。

参考文献:

[1] SUMIDA T, OTAWA N, KAMATA YU, *et al.* Custom-made titanium devices as membranes for bone augmentation in implant treatment: Clinical application and the comparison with conventional titanium mesh [J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2019, 43(10): 2183-2188.

[2] AI-ARDAH AJ, AIQAHTANI N, AIHELAL A, *et al.* Using virtual ridge augmentation and 3-dimensional printing to fabricate a titanium mesh positioning device: A novel technique letter [J]. *J Oral Implantol*, 2018, 44(4): 293-299.

[3] LI L, WANG C, LI X, *et al.* Research on the dimensional accuracy of customized bone augmentation combined with

3D-printing individualized titanium mesh: A retrospective case series study [J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2021, 23(1): 5-18.

[4] CHIAPASCO M, CASENTINI P, TOMMASATO G, *et al.* Customized CAD/CAM titanium meshes for the guided bone regeneration of severe alveolar ridge defects: Preliminary results of a retrospective clinical study in humans [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2021, 32(4): 498-510.

[5] 北京大学口腔医学院. 一种用于牙槽骨缺损的钛网制作方法; CN201810820741. 2 [P]. 2019-12-31.

[6] 李威. 响应面分析法在结构优化中的应用 [J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(8A): 13-15.

[7] CIOCCA L, RAGAZZINI S, FANTINI M, *et al.* Work flow for the prosthetic rehabilitation of atrophic patients with a minimal-intervention CAD/CAM approach [J]. *J Prosthet Dent*, 2018, 114(1): 22-26.

[8] CIOCCA L, LIZIO G, BALDISSARA P, *et al.* Prosthetically CAD-CAM-guided bone augmentation of atrophic jaws using customized titanium mesh: Preliminary results of an open prospective study [J]. *J Oral Implantol*, 2018, 44(2): 131-137.

[9] 荆钰霏, 陈红, 张孝强, 等. 基于 ANSYS Workbench 的伤员快速固定装置优化设计 [J]. *中国医疗器械杂志*, 2021, 45(5): 512-516.

[10] NAN X, LI L, WANG C, *et al.* Application of three-dimensional-printing individualized titanium mesh in alveolar bone defects with different Terheyden classifications: A retrospective case series study [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2023, 10(11): 114-162.

[11] LEWIS GS, MISCHLER D, WEE H, *et al.* Finite element analysis of fracture fixation [J]. *Curr Osteoporos Rep*, 2021, 19(4): 403-416.

[12] ROCCUZZO M, RAMIERI G, SPADA MC, *et al.* Vertical alveolar ridge augmentation by means of a titanium mesh and autogenous bone grafts [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2004, 15(1): 73-81.

[13] CIOCCA L, FANTINI M, CRESCENZIO FD, *et al.* Direct metal laser sintering (DMLS) of a customized titanium mesh for prosthetically guided bone regeneration of atrophic maxillary arches [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2019, 49(11): 1347-1352.

[14] SAGHE K, SCHIEGNITZ E, MOERGEL M, *et al.* Clinical outcome of alveolar ridge augmentation with individualized CAD-CAM-produced titanium mesh [J]. *Int J Implant Dent*, 2017, 3(1): 36.

[15] 王开德, 韩凯凯. 基于 ANSYS Workbench 的磨床立柱结构分析与优化设计 [J]. *制造业自动化*, 2018, 40(10): 64-69.

[16] 吴辰, 侯红玲, 王飞. 基于 ANSYS 响应面法的发动机曲轴

- 优化设计[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2018, 34(6): 6-11.
- [17] VERAM GC, PANDEY PM. Machining forces in ultrasonic-vibration assisted end milling[J]. *Ultrasonics*, 2019, 94: 350-363.
- [18] ZHANG X, YANG J, MA C, *et al.* Optimizing the clearance fit of a progressive cavity pump for the thermal recovery of petroleum using fluid-structure thermal coupling[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(36): 32457-32470.
- [19] 鄢荣曾, 李永锋, 王超, 等. 三维打印三维网状钛合金支架的生物力学性能初探[J]. *中华口腔医学杂志*, 2018, 51(11): 656-660.
- [20] KONYA MN, VERIM Ö. Numerical optimization of the position in femoral head of proximal locking screws of proximal femoral nail system; Biomechanical study [J]. *Balkan Med J*, 2017, 34(5): 425-431.
- [21] 李文迪, 吴荻, 陈华伟, 等. 医用钛网塑形工艺优化及模拟仿真[J]. *中国科技论文*, 2021, 16(2): 229-235.
- [22] SU K, ZHOU Y, HOSSAINI-ZADEH M, *et al.* Effects of implant buccal distance on peri-implant strain: A micro-CT based finite element analysis [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2021, 11(6): 104-325.
- [23] 仲麒, 黄雨捷, 张轶凡, 等. 远中邻骀腭面缺损的上颌第1磨牙纤维桩-树脂核修复的有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(6): 1107-1113.
- ZHONG Q, HUANG YJ, ZHANG YF, *et al.* Finite element analysis on FRC post-and-resin core restored maxillary first molar with disto-occluso-palatal defect [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(6): 1107-1113.
- [24] 朱晓兰, 王海春, 刘敬喜, 等. 基于有限元模型分析不同蹬冰角度足踝部应力分布差异[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(6): 1138-1144.
- ZHU XL, WANG HC, LIU JX, *et al.* Analysis on differences in stress distribution of foot and ankle at different push-off angles based on finite element model [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(6): 1138-1144.