

冲击载荷下切牙种植体应力分析及结构参数优化

李天煦^{1,2}, 俞经虎^{1,2}, 朱房勇³, 杨郁敏^{1,2}, 丁祺文^{1,2}, 钱善华^{1,2}

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;
3. 江南大学附属医院 口腔科, 江苏 无锡 214000)

摘要:目的 探讨种植体长度、直径和基台角度对上颌中切牙周围骨质应力分布的影响, 确定最优参数组合。方法 基于 CBCT 数据, 重建口腔上颌三维模型; 使用正交表建立有关于长度、直径以及基台角度共 16 个种植牙三维模型, 并与上颌模型和刚体模型组装; 利用 ANSYS 瞬态动力学模块进行有限元分析; 最后, 对所得应力数据进行正交实验与单因素方差分析。结果 种植体直径对皮质骨最大 von Mises 应力具有显著性影响 ($P=0.010$), 种植体长度 ($P=0.229$) 与基台角度 ($P=0.844$) 对皮质骨最大 von Mises 应力无显著性影响, 最优参数组合为种植体直径 5.0 mm、种植体长度 12 mm、基台角度 0°。种植体长度 ($P=0.001$)、直径 ($P=0.011$) 与基台角度 ($P=0.013$) 均对皮质骨最大 von Mises 应力具有显著性, 最优参数组合为种植体长度 14 mm、种植体直径 5.0 mm、基台角度 5°。结论 种植体直径对皮质骨和松质骨应力均有显著影响, 临床上应优先选择较大直径以降低应力峰值。种植体长度次之, 基台角度影响最小。

关键词: 冲击载荷; 上颌中切牙; 种植体; 基台角度; 正交试验; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2025.01.029

Stress Analysis and Optimization of Structural Parameters for Incisal Dental Implants under Impact Loads

LI Tianxu^{1,2}, YU Jinghu^{1,2}, ZHU Fangyong³, YANG Yumin^{1,2}, DING Qiwen^{1,2}, QIAN Shanhua^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Equipment Technology for Food, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 3. Department of Dentistry, Affiliated Hospital of Jiangnan University, Wuxi 214000, Jiangsu, China)

Abstract: Objective To investigate the effects of implant length, diameter, and abutment angle on bone stress distributions around maxillary central incisors, and determine the optimal parameter combination. **Methods** A three-dimensional (3D) model of the maxilla was reconstructed based on CBCT data. Using an orthogonal table, a total of 16 dental implant 3D models were established, varying in length, diameter, and abutment angle. These models were assembled with the maxillary and rigid-body models. Finite element analysis was performed using the transient dynamics module of ANSYS. Orthogonal experiments and one-way analysis of variance (ANOVA) were conducted on the obtained stress data. **Results** The implant diameter showed a statistically significant effect on the maximum von Mises stress in cortical bone ($P=0.010$), while implant length ($P=0.229$) and abutment angle ($P=0.844$) did not demonstrate a statistical significance. The optimal parameter combination for

cortical bone stress was 5.0 mm implant diameter, 12 mm implant length, and 0° abutment angle. In cancellous bone, implant length ($P=0.001$), diameter ($P=0.011$), and abutment angle ($P=0.013$) all had statistically significant effects on the maximum von Mises stress. The optimal parameter combination for cancellous bone stress was 14 mm implant length, 5.0 mm implant diameter, and 5° abutment angle. **Conclusions** Implant diameter significantly affects the stress of both cortical and cancellous bone. Clinically, a larger diameter should be preferred to reduce the stress peak. Implant length is the next most important factor, while abutment angle has the least effect.

Key words: impact load; maxillary central incisors; implant; abutment angle; orthogonal experiments; finite element analysis

上颌中切牙作为口腔咀嚼过程中承受冲击载荷的关键部位,最容易因咀嚼异物、运动和日常生活中的外伤而受损。采用口腔种植修复技术对上颌中切牙缺失进行修复已成为许多患者的首选方案^[1]。切牙种植体的结构参数设计对于临床成功至关重要,尤其是在冲击载荷条件下,种植体的应力分布和结构稳定性对其使用寿命和患者舒适度有直接影响。尽管已有研究探讨了种植体的应力分布,但大多关注单一变量的影响,未能充分揭示这些因素的组合效应。由于上颌中切牙区牙槽嵴的倾斜和前牙区骨量的限制,种植体直径、长度和基台角度的选择常常难以兼顾,传统的垂直植入方式往往会缩短种植体长度并影响其直径。为解决这一相互制约的难题,本文通过正交试验和单因素方差分析,系统探讨种植体长度、直径和基台角度三者的复合因素对上颌中切牙种植体周围骨组织应力分布的影响。通过优化这些参数的组合,为种植体结构设计提供新的科学依据,有助于在临床实践中实现更优的种植体选择和植入策略。

1 材料与方法

1.1 实验材料与软件

临床口腔 CBCT 公开数据集,使用德国 Kavo OP 3D Pro 型 CBCT 机拍摄,层厚 0.125 mm; Mimics 21.0 医学三维影像处理软件(Materialies 公司,比利时);Geomagic Wrap 2021 逆向工程处理软件(Geomagic 公司,美国);SolidWorks 2020 三维建模软件(Dassault Systemes 公司,法国);ANSYS Workbench 2020 R2 有限元仿真分析软件(ANSYS 公司,美国);SPSS 25 统计数据软件(IBM 公司,美国)。

1.2 上颌骨与上颌中切牙模型建立

将 CBCT 扫描图像的 DICOM 格式导入 Mimics 中,利用灰度级分割原理提取头骨蒙版,得到上颌骨及上颌中切牙部分的三维表面几何形状 STL 格式文件。将 STL 文件导入 Geomagic 中,使用重划网格命令细化曲面片网格,使用去除特征、填充孔、松弛等命令使得表面光滑并符合实际特征,使用精确曲面选项按照模型轮廓重新构造曲面片,并修复异常曲面片,最终拟合曲面并输出 STP 格式文件。使用 Geomagic 中的偏移整体命令将整体表面向内偏移 2 mm^[2] 得到松质骨模型。将 STP 文件导入 SolidWorks 中并组装,使用布尔运算减去相交部分,最终得到上颌模型(见图 1)。

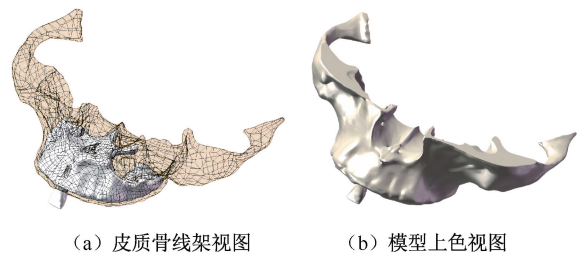


图 1 上颌三维模型

Fig. 1 Maxillary 3D model (a) Cortical skeleton view, (b) Colouring view of the model

1.3 根据正交表建立种植牙模型并组装

实验研究种植体长度、直径、基台角度 3 个因素,每个因素建立 4 个水平。目前有关种植体长度的研究多集中在 5~20 mm,而临床上常见的种植体长度为 8~15 mm^[3],故构建长度为 8、10、12、14 mm 种植体。临床上常见的种植体直径为 4 mm,并根据患者实际情况适当调整直径^[4],故构建直径为 3.2、3.8、4.4、5.0 mm 种植体。最后,根据所建上颌模型与上切牙模型,并在符合美学需求的前提下,构建

0°、5°、10°、15°角度基台。由此确定实验所需3个因素的4个水平(见表1)。

表1 因素水平

Tab. 1 Factor levels

水平	A l/mm	B d/mm	C $\theta/(\text{°})$	D 空白列
1	8	3.2	0	1
2	10	3.8	5	2
3	12	4.4	10	3
4	14	5.0	15	4

注: l 为种植体长度, d 为种植体直径, θ 为基台角度;D为空白列,用于估算随机误差并有助于进行后续方差分析。

在因素水平表的基础上,依据正交表L16(4⁴)将各个参数均衡搭配,得到正交实验表(见表2)。

表2 正交试验

Tab. 2 Orthogonal tests

模型	l/mm	d/mm	$\theta/(\text{°})$	空白列
1	8	3.2	0	1
2	8	3.8	5	3
3	8	4.4	10	2
4	8	5.0	15	4
5	10	3.2	10	3
6	10	3.8	15	1
7	10	4.4	0	4
8	10	5.0	5	2
9	12	3.2	5	4
10	12	3.8	0	2
11	12	4.4	15	3
12	12	5.0	10	1
13	14	3.2	15	2
14	14	3.8	10	4
15	14	4.4	5	1
16	14	5.0	0	3

参照常见的内中央螺丝固位种植牙,使用SolidWorks进行建模。模型由种植体、基台、牙冠和中央螺丝4个部分组成,种植体与基台以正交试验表所需数据为基础建模,牙冠参照原有的中切牙外形进行建模,使用中央螺丝将各部分组合。使用布尔运算减去相交部分,得到最终模型。模型1剖面如图2所示。

使用SolidWorks对冲击所使用的金属柱建模,金属柱直径15 mm,高20 mm。将上颌骨、种植牙和金属柱组装。以上颌骨原有上切牙为基准,确保

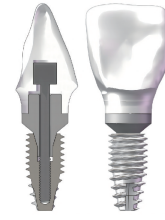


图2 模型1剖面与主视图

Fig. 2 Section and main view of Model 1

16个种植牙牙冠处于同一位置,金属柱撞击点相同,布尔运算减去上颌骨中种植体与上颌相交部分的实体并输出x_t格式文件。

1.4 有限元分析

1.4.1 材料力学参数设定 假定模型中上颌骨、种植牙及金属柱均为均质、连续、各向同性的线弹性体,在ANSYS中对各个模型的材料属性进行设定,其具体参数见表3^[5]。

表3 种植牙与骨组织等材料性能参数

Tab. 3 Material parameters of dental implants and bone tissues

材料	E/GPa	ν	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
种植体(钛)	110	0.35	4 510
基台(钛)	110	0.35	4 510
中央螺丝(钛)	110	0.35	4 510
皮质骨	13.7	0.30	1 740
松质骨	1.37	0.30	900
瓷	70	0.19	5 000
结构钢	200	0.30	7 850

1.4.2 网格划分 种植体、中央螺丝与基台的单元格尺寸为0.3 mm,金属柱与牙冠的单元格尺寸为0.8 mm。皮质骨与松质骨模型较大,为了反映种植体周围骨组织应力情况,加快计算速度且不影响计算精度,使用新建坐标轴,并仅划分坐标轴附近半径球体。将皮质骨和松质骨与种植体交界面向外5 mm区域设置单元格尺寸为0.2 mm,其余为软件自动划分。为了验证网格划分的合理性,对模型进行网格无关性分析。结果表明,当网格尺寸从0.2 mm进一步细化至0.16 mm时,应力分布结果的误差仅为1.27%。此外,当半径球体直径由5 mm缩小至4 mm时,应力分布结果的误差为0.19%。

1.4.3 接触与瞬态 金属柱与牙冠之间的接触设置为无摩擦,接触算法为广义拉格朗日,接触时间步

长控制选择预测冲击,其余各模型接触设置均为绑定。同时,为了更好地模拟上颌前牙区种植体的受力环境,赋予金属柱初速度为 30 mm/s,方向沿模型 z 轴,约束金属柱仅能沿 z 轴平移。该方向为眶耳平面的垂直方向,与上颌中切牙的长轴方向通常形成 $12^\circ \sim 28^\circ$ 夹角,符合临床常见的咬合力作用方式。将上颌骨切面部分设定为固定约束,对中央螺丝设置预紧力为 150 N。步结束时间为 0.1 s,初始时间步长为 1 ms,最大时间步长为 10 ms,最小时间步长为 $10 \mu\text{s}$ 。

1.5 正交试验与单因素方差分析

使用 SPSS 软件单变量分析,将所得皮质骨的最大 von Mises 应力和松质骨的最大 von Mises 应力分别作为因变量,长度、直径与基台角度作为固定因子,使用 S-N-K 法作为事后检验方法,构建主效应模型。观察同一水平下对应因素的结果平均值 k 和同一因素水平 k 值的极差 R ,即可确定各个因素中的最佳水平,并找出最佳的因素水平组合。观察主体间效应检验表中的显著性,判断各个因素的显著性。

2 结果

2.1 皮质骨与松质骨应力分析

使用 ANSYS 软件分别计算 16 组模型皮质骨和松质骨最大 von Mises 应力,结果见表 4。

表 4 有限元分析结果

Tab. 4 Finite element analysis results

模型	最大 von Mises 应力/MPa		模型	最大 von Mises 应力/MPa	
	皮质骨	松质骨		皮质骨	松质骨
1	5.740 6	0.208 7	9	4.025 4	0.100 1
2	3.314 9	0.158 7	10	1.2233	0.069 2
3	2.396 6	0.175 9	11	2.012 0	0.128 1
4	2.067 2	0.175 6	12	1.225 9	0.048 7
5	4.620 8	0.180 7	13	4.132 0	0.139 9
6	4.627 0	0.174 6	14	3.524 8	0.075 7
7	2.095 5	0.067 8	15	2.519 9	0.006 6
8	1.677 4	0.068 0	16	1.708 1	0.051 0

观察有限元模型 von Mises 应力云图发现,皮质骨最大应力集中在种植体螺纹第 1 圈与周围骨组织接触部位,且随着轴向深度增加,应力显著降低;松质骨最大应力集中在偏唇侧,种植体螺纹第 1 圈或第 2 圈与周围骨组织接触部位,或种植体轴向最

深处平面区域(见图 3)。

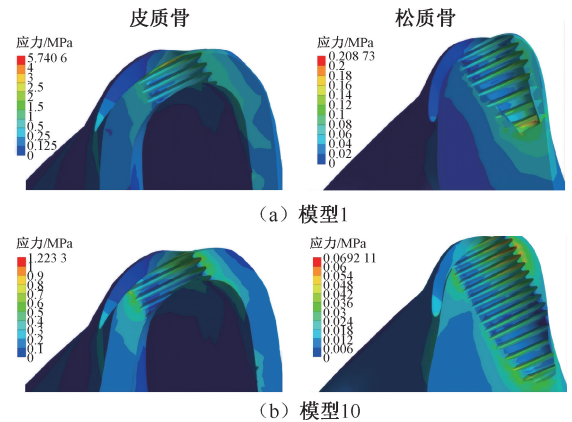


图 3 种植体周围骨组织等效应力云图

Fig. 3 Equivalent stress contours of bone tissues around the implant (a) Model 1, (b) Model 10

2.2 显著性水平与最优参数组合

分析由 SPSS 软件计算所得的因素显著性水平可知:对于皮质骨最大等效应力,种植体直径对于本实验模型皮质骨最大应力具有显著性影响;种植体长度与基台角度对皮质骨最大应力显著性影响。对于松质骨最大等效应力,植体长度、直径与基台角度对松质骨最大应力均具有显著性影响(见表 5)。

表 5 因素显著性水平

Tab. 5 Factor significance levels

因素	P
长度(皮质骨)	0.229
直径(皮质骨)	0.010
基台角度(皮质骨)	0.844
长度(松质骨)	0.001
直径(松质骨)	0.011
基台角度(松质骨)	0.013

注: $P < 0.05$ 视为因素显著。

分析正交试验结果,建立 $k-R$ 图(k 越大说明该因素水平造成的应力越大, R 越大说明该因素的影响越大)可知:对于皮质骨峰值等效应力,种植体直径影响最大,种植体长度次之,基台角度影响最小,其最优参数组合为长度 12 mm、直径 5.0 mm、角度基台 0° ;对于松质骨峰值等效应力,种植体长度对其影响最大,种植体直径次之,基台角度影响最小,其最优参数组合为长度 14 mm、直径 5.0 mm、基台角度 5° (见图 4)。

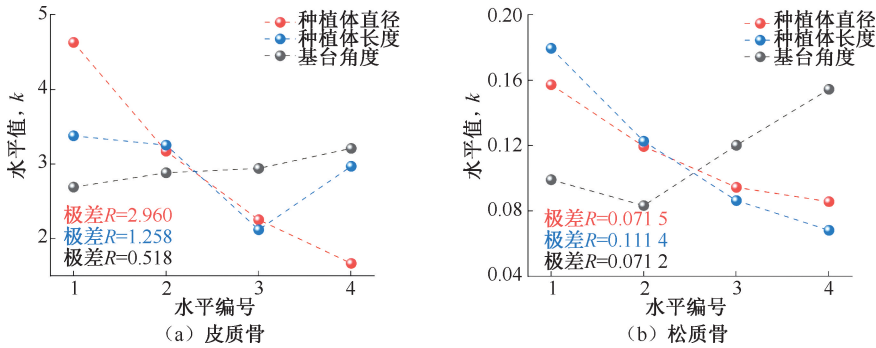


图4 同一水平下对应因素的实验结果平均值 k 和同一因素水平 k 值的极差 R

Fig. 4 Mean k value of experimental results of corresponding factors at the same level and extreme difference of R values at the same factor level k (a) Cortical bone, (b) Cancellous bone

3 讨论

3.1 建模参数量

为了提高有限元分析的准确性,本文以医学二维影像逆向还原三维模型,最大程度模拟人体上颌骨的结构,同时种植牙模型完整还原了种植牙装配体的实际结构。种植体的植入位点以原有中切牙为基准,既保证了正交试验变量的唯一性,又不违背美观的原则。

3.2 动态载荷的优势

目前大多数研究在分析种植体受力时采用静力加载的方法。然而,静力加载无法真实反映口腔中咀嚼、语言等复杂的动态过程。采用动态载荷与冲击载荷的方法进行加载,可以更好模拟实际的口腔情况^[6]。通过在有限元分析中引入瞬态动力学模块,本研究能够更贴近真实的口腔环境,准确捕捉种植体周围骨组织在动态载荷下的应力分布特点。该方法不仅提高了分析的准确性,还为未来口腔种植体设计和临床应用提供了更加可靠的参考。

3.3 结果讨论

本文结果表明,尽管16种模型的应力分布位置相似,但皮质骨的应力峰值显著大于松质骨。本文推测,皮质骨弹性模量远大于松质骨,在相同应变条件下,皮质骨所承受的应力显著高于松质骨。Fouda等^[7]使用Meta分析得出,上颌前牙区种植体早期失败率明显高于其他部位,可能与该区域皮质层较薄有关。马新扬^[8]结合有限元分析与动物实验,在兔股骨上加载冲击载荷,发现皮质骨在冲击过程中承担了最多的冲击能量。在实际临床中,种

植体周围骨组织发生骨吸收的主要区域也集中于颈部区域。因此,优化皮质骨的应力峰值较松质骨更加紧迫和重要。

种植体直径与最大应力关系密切。丁熙等^[9]研究种植体直径从3.3 mm增至4.1 mm时的应力变化,发现种植体与其周围骨组织所受应力均明显减小。Raaj等^[10]研究表明,随着种植体直径的增加,与种植体接触的皮质骨区域所受应力逐渐降低。本文也发现,随着直径增加, k 不断降低,即周围骨组织所受应力降低。

种植体长度与峰值应力的关系争论较大。Khatami等^[11]研究认为,种植体长度对种植体颈部区域周围骨组织应力影响不大。赖红昌等^[12]研究表明,当种植体长度增加2倍,种植体颈部周围骨组织应力峰值仅下降约10%。这些结果与本文得出的种植体长度对模型皮质骨最大应力没有统计显著性的结论相似。也有研究认为,种植体长度与周围骨组织的应力呈负相关关系^[13]。本文发现,随着种植体长度增加,松质骨所受的应力降低且具有统计显著性(见图4)。皮质骨在种植体长度为12 mm时达到最佳但无显著性,推测原因是上颌前切牙区处唇舌向骨宽度较窄,过长的种植体长度会使种植体周围骨组织厚度变薄,更易出现应力集中情况。

涂慧娟等^[14]研究认为,在IV类骨质下,直径对种植体周围骨组织应力的影响大于长度。Li等^[15]研究发现,皮质骨上直径对应力峰值的影响较长度大,而松质骨上长度的影响更明显。本文正交实验结果提示,皮质骨上直径对应力峰值的影响较长度

大,松质骨上长度的影响更明显,且长度对皮质骨应力峰值无显著影响。

为了保证修复后上颌前牙区的美学、生物力学和功能性,使用角度基台可以满足美学和功能性需求。角度基台的使用会改变种植体周围骨组织的应力。有研究认为,上颌前牙区使用角度基台对应力峰值有不利影响;而也有研究认为,一定角度的角度基台有利于该区域应力分布^[16]。实际临床观察发现,角度基台与直基台均有较高的长期存活率^[17]。王雨琪等^[18]研究认为,角度基台是否带来不利的应力分布,应当以具体病例作为研究方向。本文发现,使用角度基台在 15°内对皮质骨应力无显著影响,对松质骨有显著影响,且使用 5°基台时应力峰值最低。

本文发现,改变种植体参数后,整体最大等效应力从 3.314 9 MPa 降至 2.396 6 MPa,而在种植体轴向最深处尖端区域的松质骨的峰值等效应力则从 0.158 7 MPa 升至 0.175 9 MPa。该结果表明,不同种植体参数对两种应力的影响存在不一致性。然而,本文认为,优化皮质骨的应力峰值更为关键。所有实验中,皮质骨的最大等效应力均出现在种植体螺纹第 1 圈与周围骨组织接触处,表明在此位置最大等效应力与峰值等效应力基本同义。通过对实验模型中的种植体参数进行优化调整,不仅降低了整体最大等效应力,也减少了关键部位的峰值等效应力。

本研究的局限性如下:① 有限元分析无法真实模拟口腔环境,故还需要通过体外实验与临床试验验证结论的真实性与可靠性;② 在模型建立上,种植体的植入位点也可能影响最终结果;③ 由于水平数限制,基台角度被限制到 15°,若使用更大角度的基台是否会显著影响应力,还需要更多的实验与分析;④ 仅依靠应力无法全面反映种植体周围骨组织的应力分布情况,尚未涉及应力均匀度对骨骼健康的影响。未来的研究应进一步探索这些方面,以提高结果的准确性和临床应用的可靠性。

4 结论

本文基于有限元分析,设计正交试验探讨种植体长度、直径及基台角度对上颌中切牙种植体周围皮质骨和松质骨应力的影响,得出以下结论:

(1) 种植体直径对皮质骨应力的影响最为显著,其次为种植体长度,基台角度的影响最小。对于松质骨,应力受种植体长度的影响最大,其次为直径和基台角度。

(2) 皮质骨的最优参数组合为种植体直径 5.0 mm、长度 12 mm、基台角度 0°,松质骨的最优参数组合为种植体长度 14 mm、直径 5.0 mm、基台角度 5°。

(3) 在临床上设计上颌中切牙种植体时,应优先选择较大的直径,以减少应力峰值,并兼顾长度和基台角度的调整以优化骨应力分布。

本研究为临床口腔修复中的种植体参数选择提供了科学依据,有助于优化种植体设计,提高种植体的稳定性和成功率。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:李天煦负责论文撰写;俞经虎负责提出研究思路;朱房勇负责提出研究思路;杨郁敏负责数据分析;丁祺文负责数据分析;钱善华负责提出研究思路。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张馨月,王勇,陈倩,等. 舌侧金属加强杆种植覆盖义齿的三维有限元分析[J]. 医用生物力学, 2024, 39(3): 532-538.
ZHANG XY, WANG Y, CHEN Q, et al. Three-dimensional finite element analysis of implant-supported overdenture with lingual metal-reinforced bar [J]. J Med Biomech, 2024, 39(3): 532-538.
- [3] 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.
- [4] 李悦,张燕婷,何晶,等. 联合应用骨劈开、骨挤压术、引导骨组织再生技术并同期种植手术方案的短期临床疗效分析[J]. 中国实用口腔杂志, 2016, 9(9): 532-537.

- [5] ARAUJO ACL, RAMOS FV, YOSHITO PN, *et al.* Effect of bone quality and bone loss level around internal and external connection implants: A finite element analysis study [J]. *J Prosthet Dent*, 2020, 125(1): 137. e1-137. e10.
- [6] CHEN P, ZHANG J, YAO J, *et al.* Effect of angled abutments in the posterior maxillary region on tilted implants: A 3D finite element analysis [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2024, 62(8): 2585-2597.
- [7] HAMEED AAF. The impact of the alveolar bone sites on early implant failure: A systematic review with meta-analysis [J]. *J Kor Assoc Oral Max*, 2020, 46(3): 162-173.
- [8] 马新扬. 冲击力作用下种植体周围骨组织损伤特征与咬合力对其影响的模拟分析 [D]. 西安: 中国人民解放军空军军医大学, 2021.
- [9] 丁熙, 朱形好, 廖胜辉, 等. 不同直径种植体对即刻负载种植体骨界面应力分布的影响 [J]. *医用生物力学*, 2022, 22(2): 146-150.
- DING X, ZHU XH, LIAO SJ, *et al.* Influence of different implant diameter with immediate loading on stress distribution of implant-bone interface [J]. *J Med Biomech*, 2022, 22(2): 146-150.
- [10] RAAJ G, MANIMARAN P, KUMAR DC, *et al.* Comparative evaluation of implant designs: Influence of diameter, length, and taper on stress and strain in the mandibular segment-A three-dimensional finite element analysis [J]. *J Pharm Bioallied Sci*, 2019, 11(6): 347-354.
- [11] KHATAMI AH, SMITH CR. "All-on-Four" immediate function concept and clinical report of treatment of an edentulous mandible with a fixed complete denture and milled titanium framework [J]. *J Prosthodont*, 2008, 17(1): 47-51.
- [12] 赖红昌, 熊焕国, 薛森, 等. 不同长度种植体对骨界面应力影响的三维有限元分析 [J]. *上海口腔医学*, 1997(1): 20-22.
- [13] PIRMORADIAN M, NAEENI AH, FIROUZBAKHT M, *et al.* Finite element analysis and experimental evaluation on stress distribution and sensitivity of dental implants to assess optimum length and thread pitch [J]. *Comput Meth Prog Bio*, 2020(187): 105258-105258.
- [14] 涂慧娟, 李月玲, 俞明. 上颌后牙区IV骨质条件下应用短种植体长度和直径的优化分析 [J]. *中国口腔种植学杂志*, 2018, 23(1): 1-5.
- [15] LI T, HU K, CHENG L, *et al.* Optimum selection of the dental implant diameter and length in the posterior mandible with poor bone quality: A 3D finite element analysis [J]. *Appl Math Model*, 2011, 35(1): 446-456.
- [16] 司金燕. 上颌前牙种植应用角度基台在不同骨质条件下的三维有限元分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [17] 陈小璇, 刘国强, 徐欣. 不同角度基台 Straumann 种植系统行前牙种植修复短期临床效果评价 [J]. *中国实用口腔科杂志*, 2016, 9(10): 605-608.
- [18] 王雨琪, 田克斌, 吴世莲. 角度基台生物力学影响的研究现状 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(3): 391-396.
- WANG YQ, TIAN KB, WU SL. The biomechanical influence of angled abutment in dental implants: A review [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(3): 391-396.