

生物可吸收板与微型钛板在不同骨质下颌骨骨折固定中的有限元分析

周宗昊¹, 罗思阳², 陈佳文², 陈光能², 冯红超^{1, 2}

<https://doi.org/10.12307/2025.223>

投稿日期: 2023-11-27

采用日期: 2024-01-20

修回日期: 2024-02-28

在线日期: 2024-03-16

中图分类号:

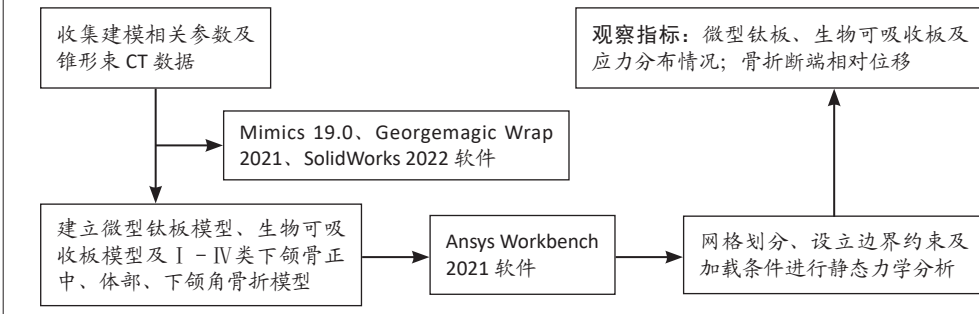
R496; R318; R782

文章编号:

2095-4344(2025)04-00818-09

文献标识码: A

文章快速阅读: 不同骨质条件下颌骨骨折微型钛板和生物可吸收板固定系统的生物力学研究



文题释义:

有限元分析法: 利用数学近似的方法对真实物理系统进行模拟, 利用简单而又相互作用的元素, 使用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统, 是目前力学模型研究较为完善的分析方法, 能够计算模型整体及局部的应力大小和位移变化, 目前已被广泛应用于颌骨骨折生物力学研究当中。

坚强内固定: 是一种外科手术治疗方法, 通过在骨骼上安装金属器械来加固骨骼部位, 可提升骨折部位的三维稳定性, 有效保持骨骼的稳定性, 促进骨折愈合。

摘要

背景: 下颌骨骨折在坚强内固定后的愈合受多种因素影响, 包括接骨板的材料、骨折部位以及患者骨密度等, 然而, 目前对于不同骨质下下颌骨骨折固定稳定性关系的研究相对较少, 并且缺乏科学的依据。

目的: 利用有限元法分析生物可吸收板和微型钛板固定不同骨质条件下颌骨骨折的稳定性。

方法: 根据ZARB和LEKHOLM提出的骨质分类方法, 分别建立 I-IV 类下颌骨骨折三维有限元模型, 每类骨质条件下分别模拟下颌骨正中、体部和下颌角3个部位的骨折模型, 采用生物可吸收板(或微型钛板)对上述骨折进行内固定, 模拟健侧咬合状态, 利用有限元分析骨折段的相对位移与内固定物应力分布情况。

结果与结论: ①随着骨质等级的增加, 内固定物的最大应力值基本呈逐渐增加趋势, 微型钛板组、生物可吸收板组下颌体部IV类骨质下的内固定物最大应力值最高, 分别为382.74, 96.11 MPa; 在相同骨质条件下, 钛板组各部位骨折模型的内固定物最大应力值均高于生物可吸收板组。②对于III和IV类下颌骨正中中部骨折, 微型钛板组、可吸收板固定组骨折断端位移较大, 超过了骨愈合极限值(大于150 μm); 对于IV类骨质下颌骨体部骨折, 生物可吸收板组骨折断端位移超过了愈合极限值, 微型钛板组骨折断端位移接近愈合极限值; 在相同骨质条件下, 微型钛板组骨折断端位移要小于生物可吸收板组。③结果显示, 两种内固定物的强度和刚度均足以支持 I-IV 类骨质下颌骨3种部位骨折的骨愈合, 并且生物可吸收板的固定稳定性与微型钛板几乎相同, 可以提供骨折早期的愈合条件。在治疗下颌骨骨折时应将下颌骨骨质类型纳入考虑因素, 下颌骨骨质等级越高, 骨折固定的稳定性越差, 术后更易发生骨愈合不良等并发症。

关键词: 生物可吸收板; 微型钛板; 三维有限元分析; 下颌骨骨折; 固定方法; 骨质

Finite element analysis of bioabsorbable plates versus miniature titanium plates in mandibular fracture fixation in different bone qualities

Zhou Zonghao¹, Luo Siyang², Chen Jiawen², Chen Guangneng², Feng Hongchao^{1, 2}

¹School of Stomatology of Guizhou Medical University, Guiyang 550004, Guizhou Province, China; ²Guiyang Hospital of Stomatology, Guiyang 550000, Guizhou Province, China

Zhou Zonghao, Master candidate, School of Stomatology of Guizhou Medical University, Guiyang 550000, Guizhou Province, China

Corresponding author: Feng Hongchao, MD, Professor, Chief physician, School of Stomatology of Guizhou Medical University, Guiyang 550004, Guizhou Province, China; Guiyang Hospital of Stomatology, Guiyang 550000, Guizhou Province, China

Abstract

BACKGROUND: The healing of mandibular fractures after rigid internal fixation is influenced by many factors, including the material of the bone plate, fracture

¹贵州医科大学口腔医学院, 贵州省贵阳市 550004; ²贵阳市口腔医院, 贵州省贵阳市 550000

第一作者: 周宗昊, 男, 1996年生, 贵州省贵阳市人, 汉族, 贵州医科大学在读硕士, 主要从事口腔颌面外科临床技能训练及研究。

通讯作者: 冯红超, 博士, 教授, 主任医师, 贵州医科大学口腔医学院, 贵州省贵阳市 550004; 贵阳市口腔医院, 贵州省贵阳市 550000

<https://orcid.org/0009-0004-8386-2788> (周宗昊)

基金资助: 贵州省卫生健康委科学技术基金项目(gzkwj2022-431), 项目名称: 基因重组人生长激素对人生长细胞增殖及成骨分化研究, 项目负责人: 冯红超; 观山湖湖区科技计划项目(观科合同[2021]01号), 项目名称: 人工智能技术在口腔颌面医学影像中的应用研究, 项目负责人: 冯红超

引用本文: 周宗昊, 罗思阳, 陈佳文, 陈光能, 冯红超. 生物可吸收板与微型钛板在不同骨质下颌骨骨折固定中的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(4):818-826.



site, and bone density of the patient. However, there are relatively few studies on the relationship between the stability of mandibular fracture fixation in different bone qualities and they lack a scientific basis.

OBJECTIVE: To analyze the stability of fixation of mandibular fractures with different bone qualities with bioabsorbable plates and miniature titanium plates by finite element analysis.

METHODS: Three-dimensional finite element models of class I-IV mandibular fractures were developed according to the bone quality classification method proposed by ZARB and LEKHOLM. The fractures at the median mandibular symphysis, mandibular body, and mandibular angle were simulated under different bone qualities. Bioabsorbable bone grafting plates (or miniature titanium plates) were placed at each fracture site for fixation and to simulate the state of healthy side occlusion. Finite element analysis on the model was used to analyze the relative displacement of the fracture segments and the stress distribution of fixators.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) The maximum stress value during fixation with titanium plates increased gradually with the increase of bone class, in which the maximum stress value of titanium plates was the highest in the mandibular body class IV bone group, which was 382.74 MPa and 96.11 MPa in the miniature titanium plate and bioabsorbable plate groups. The results for mandibles of the same bone type showed that the maximum stress value of titanium plates was much higher than that of bioabsorbable plates. (2) For fractures of the median middle of the mandible in types III and IV, the displacement of the fracture breaks at the fixation site was large and exceeded the limiting value of bone healing ($> 150 \mu\text{m}$), regardless of whether the fixation was performed with a miniature titanium plate or a bioabsorbable plate. For type IV mandibular fractures, the fracture end displacement in the bioabsorbable plate group exceeded the healing limit value, and the fracture end displacement in the miniature titanium plate group was close to the healing limit value. Under the same bone quality and fracture site, the fracture displacement of the miniature titanium plate group was smaller than that of the bioabsorbable plate group. (3) The results showed that the strength and stiffness of the two internal fixations were sufficient to support bone healing of fractures at three sites of the types I-IV mandible, and the fixation stability of the bioabsorbable plate was almost the same as that of the miniature titanium plate, which could provide early healing conditions for fractures. Mandibular bone type should be taken into consideration in the treatment of mandibular fracture. The higher the mandibular bone grade, the worse the stability of fracture fixation, and the more likely the complications such as poor bone healing will occur after surgery.

Key words: bioabsorbable plate; miniature titanium plate; three-dimensional finite element analysis; mandibular fracture; fixation method; bone quality

Funding: Science and Technology Fund Project of Guizhou Provincial Health Commission, No. gzwkj2022-431 (to FHC); Science and Technology Plan Project of Guanshanhu District, No. [2021]01 (to FHC)

How to cite this article: ZHOU ZH, LUO SY, CHEN JW, CHEN GN, FENG HC. Finite element analysis of bioabsorbable plates versus miniature titanium plates in mandibular fracture fixation in different bone qualities. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2025;29(4):818-826.

0 引言 Introduction

下颌骨是面部最大的骨骼之一，也是最容易受伤的骨骼之一，研究显示下颌骨骨折在颌面部骨折中的占比较高^[1]。目前，坚强内固定技术已成为治疗下颌骨骨折的首选方法，并在临床上得到广泛应用^[2]。坚强内固定技术的主要优点是能够在固定骨折断端的同时促进愈合，为患者提供更好的术后口腔卫生条件和摄入充足营养^[3]。微型钛板作为常用的下颌骨固定材料在临床中得到广泛应用，将钛板固定在骨折两端的骨皮质处可以实现骨折断端的稳定，促进骨折愈合并恢复骨折处的血运；此外，微型钛板无毒，在体内可以长期存在^[4]。然而，微型钛板作为固定材料在颌面部和口腔内的应用仍存在一些局限性：钛板的刚性较高，在骨折愈合的晚期可能对局部产生不良影响，例如骨质疏松、骨量减少和炎症反应，导致骨愈合率降低甚至再骨折^[5-6]；钛板植入后可能受到唾液和其他液体的腐蚀释放金属离子，导致局部炎症和慢性疼痛^[7]；金属材料无法在体内降解，需要二次手术取出，给患者带来主观不适和二次手术的风险和痛苦^[8]。对于生长发育期的儿童来说，应用微型钛板可能限制颌骨的发育，甚至导致钛板与颌骨骨壁分离^[9-10]。因此，近年来生物可吸收材料在颌面外科中的应用引起了广泛关注。生物可吸收材料具有许多优点，例如良好的生物相容性和无需二次手术取出等，它们可以在一段时间内提供足够的稳定性来支持骨愈合，并逐渐被人体吸收代谢。

生物可吸收板作为一种具有良好生物相容性、能够逐渐降解且无需二次手术取出的材料，在颌面外科领域取得了重要进展。常见的生物可吸收材料包括聚乳酸、聚乳酸-羟基乙酸共聚物等，这些材料可以在适当的时间内降

解和吸收，在愈合过程中减少需要再次手术的风险并促进术后康复。使用生物可吸收板可以提供持久的固定效果，同时避免了传统金属固定器材的一些缺点，然而由于生物可吸收板的材料特性，其强度相对于微型钛板较低。另外，由于下颌骨处于高生物应力环境中，因此在临床应用生物可吸收板时需要严格选择适应证，并注意术后随访。对于生物可吸收板的适用范围和治疗效果仍存在争议^[11-12]。

下颌骨骨折在坚强内固定后的愈合受多种因素影响，包括接骨板的材料、骨折部位及患者骨密度等^[13]。根据 ZARB 和 LEKHOLM 提出的骨质分类方法，I - IV 类骨质之间的结构和弹性模量存在差异，使得下颌骨在咀嚼和功能运动时的变形和动度也有明显差异^[14]。然而，目前关于生物可吸收板材料是否能够满足不同类别骨质骨折固定的研究尚少。因此针对不同骨质类型，此次实验采用有限元方法比较微型钛板和生物可吸收板在下颌骨骨折固定中的稳定性，从生物力学角度探讨微型钛板和生物可吸收性接骨板的适用范围，以为临床试验和治疗提供一些建议和指导。

1 材料和方法 Materials and methods

1.1 设计 三维有限元建模分析。

1.2 时间及地点 实验于 2023 年 3-9 月在贵州医科大学口腔医学院完成。

1.3 材料 采用德国 KaVo 3DeXam 三维体层 X 射线影像系统筛选出 1 例牙列完整、无严重错颌畸形、无颌骨类疾病患者的锥形束 CT 文件 (DICOM 格式) 作为下颌骨模型建模素材。由于某些原因已无法获得该患者的知情同意书，已向贵州医科大学附属口腔医院伦理委员会申请免除患

者的知情同意。实验方法已通过贵州医科大学附属口腔医院伦理委员会审批，批准号：2024 伦审第 1 号。

1.4 方法

1.4.1 收集相关数据 对牙体组织及骨组织结构的几何形态数据和力学参数进行收集，包含牙、松质骨、皮质骨、微型钛板、生物可吸收板及其部件的弹性模量、泊松比等，见表 1。

表 1 | 生物可吸收板、微型钛板、皮质骨、松质骨及牙材料属性^[15-16]
Table 1 | Properties of bioabsorbable plates, miniature titanium plates, cortical bone, cancellous bone, and dental material

材料	弹性模量 (MPa)	泊松比
I 类松质骨	9 500	0.3
II 类松质骨	5 500	0.3
III 类松质骨	1 600	0.3
IV 类松质骨	690	0.3
皮质骨	13 700	0.3
牙	20 290	0.3
微型钛板及螺钉	103 400	0.35
生物可吸收板及螺钉	3 150	0.46

1.4.2 建立 I - IV 类下颌骨模型 将采集的 DICOM 格式原始数据导入 Mimics 19.0 软件，并根据灰度值进行分割，建立下颌骨目标区域的硬组织的 Mask。对 Mask 进行处理以去除噪点，提取 STL 格式的三维立体图像文件。将 STL 文件导入 Geomagic Wrap 2021 软件中，进行孔洞填充、表面光顺和拟合曲面处理。依据 ZARB 和 LEKHOLM 提出的骨质分类方法，利用 Geomagic Wrap 2021 软件的偏置命令，将下颌骨模型向内分别偏置 2.5, 2, 1 mm，从而得到不同厚度的松质骨模型 (表 2)。通过布尔操作获取不同厚度的皮质骨模型，随后对模型进行优化光滑处理以去除多余的特征，通过网格医生对模型进行检查和调整，以确保模型没有任何问题；最后，构建格栅进行曲面拟合，将结果保存为 STEP 格式的文件。通过这一系列处理能够得到精确且逼真的下颌骨模型，为后续的分析研究提供可靠基础。

表 2 | 不同模型下颌骨特征^[17-18]
Table 2 | Characteristics of the mandible of different models

模型	特征
I 类骨质下颌骨	皮质骨 2.5 mm+ 致密松质骨
II 类骨质下颌骨	皮质骨 2.0 mm+ 较致密松质骨
III 类骨质下颌骨	皮质骨 1.0 mm+ 较低密度松质骨
IV 类骨质下颌骨	皮质骨 1.0 mm+ 低密度松质骨

1.4.3 固定系统相关结构模型建立 生物可吸收板 (由珠海港康达医疗器材有限公司提供) 的材料参数为：厚度为 1.5 mm，宽度为 4.5 mm，孔径为 2.0 mm，总长度为 22 mm (4 个孔)，螺钉的长度为 6 mm、直径为 2.0 mm。微型钛板内固定系统 (由美国强生公司提供) 的规格与可吸收板基本相同。参考的两种内固定物信息，见表 3。使用 SolidWorks 软件建立了微型钛板和生物可吸收板模型，并

表 3 | 建模过程中参考的内固定物相关信息
Table 3 | Information about internal fixators in the modeling process

项目	生物可吸收板	微型钛板内固定系统
生产厂家	珠海港康达医疗器材有限公司	强生
批准文号	国械注进 20163461470	04.503.783
材质及组成	聚左旋丙交酯乳酸	钛
规格	I 型 4 孔板	I 型 4 孔板
适应证	颌骨骨折、正颌外科	颌骨骨折、正颌外科
不良反应	感染，神经损伤，接骨板断裂，接骨板暴露，骨吸收	骨、软组织坏死，感染、神经损伤、疼痛，颞下颌关节并发症，接骨板断裂，接骨板暴露

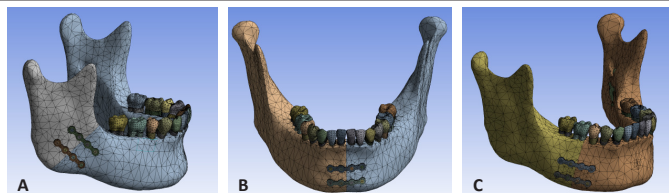
将其保存为 STEP 格式文件，这些模型能够准确呈现微型钛板和生物可吸收板的几何形状和尺寸。

1.4.4 建立 I - IV 类骨折内固定下颌骨模型 将下颌骨的三维实体模型导入至 SolidWorks 软件中，并在右侧下颌骨的颞部、下颌骨体以及下颌角地区设定了骨折线。在每个骨折部位放置了 2 块相同的接骨板 (生物可吸收板或微型钛板)，并且确保 2 个接骨板之间的距离大于 5 mm。随后，对各零件进行匹配和装配，并消除了它们之间的干涉部分。通过这一过程可以在实体模型上模拟出具体的骨折情况，并进行骨折修复所需的接骨板放置和装配工作。

1.4.5 网格划分及约束、加载 整个研究模型由下颌骨、固定钉以及固位板组装而成，鉴于各部件的尺寸和研究需要的不同，采用了不同的网格大小划分方法。对于下颌骨整体模型，将网格大小设定为 5 mm，而对于固定板和固位钉，将网格大小设定为 0.5 mm。将所得的模型导入 Ansys Workbench 2021 软件，对各个材料和接触面进行定义和网格划分，具体的网格划分情况可参考表 4，图 1。模型的边界条件参考了 BUJTÁR 等^[19]的研究结果，由于翼外肌对骨折位移的影响较小，为简化计算过程，在模型中不考虑其作用。实验模拟了翼内肌、颞肌和咬肌的作用，肌力的方向和大小是根据相关文献研究结果确定的^[20-21]。对下颌骨肌肉附着处的单元施加固定约束，以限制下颌骨的刚性运动，模拟在内固定后健侧的咬合状态。对每颗牙面施加相应的力，中切牙、侧切牙、尖牙、第一前磨牙、第二前磨牙、第一磨牙、第二磨牙的加载力分别为 60, 60, 100, 120, 150, 200, 200 N，使下颌骨在力学状态下保持其相对稳定的位置，并进行静态力学分析 (图 2)。通过这一系列步骤能够对模型进行计算和仿真，以评估内固定后接骨板的力学性能和稳定性。

表 4 | 下颌骨模型的平均单元、节点情况
Table 4 | Average unit and node of the mandible model

项目	骨折部位	I 类骨	II 类骨	III 类骨	IV 类骨
单元	正中骨折	362 849	364 019	364 019	370 125
	下颌角骨折	364 752	364 253	364 253	373 192
	下颌体部骨折	365 613	365 174	365 174	372 864
节点	正中骨折	186 637	187 192	187 192	190 334
	下颌角骨折	186 516	186 377	186 377	191 006
	下颌体部骨折	192 137	191 935	191 935	195 695



图注: A 为下颌角骨折; B 为下颌骨正中骨折; C 为下颌骨体部骨折。
图 1 | 下颌骨骨折固定模型的网格划分

Figure 1 | Mesh delineation for mandibular fracture fixation modeling

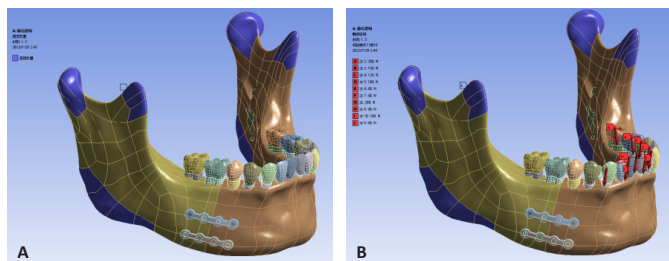


图 2 | 下颌骨模型的约束 (A) 和加载力 (B)

Figure 2 | Constraints (A) and loading forces (B) in mandibular models

1.5 主要观察指标 各组模型内固定物最大应力值与骨折断端相对位移。

2 结果 Results

2.1 两种内固定物的应力分布情况 微型钛板与生物可吸收板固定后各组下颌骨骨折模型中内固定物应力分布情况, 见图 3, 4。对于 I - IV 类骨质, 随着骨质等级的增加, 使用微型钛板进行固定时, 不论是下颌骨中部、下颌角部还是下颌骨体部的骨折, 钛板所受最大应力值逐渐增加, 其中 IV 类骨质下颌体部骨折模型钛板受到的最大应力值最高, 达到 382.74 MPa。相比之下, 使用生物可吸收板进行固定时, I - IV 类骨质下颌骨下颌角、下颌体部骨折模型生物可吸收板所受的最大应力值也逐渐增加, 但在下颌骨正中骨折时, 生物可吸收板所受最大应力值随 I - III 类骨质等级的增加而逐渐降低, 在 IV 类骨质时达到最大值, 见表 5, 图 5。需要注意的是, 相同骨质类型、相同骨折部位下, 钛板承受的最大应力值远远高于生物可吸收板。

表 5 | 两种内固定下各组下颌骨骨折模型内固定物承受的最大应力值 (MPa)

Table 5 | The maximum stress value of the internal fixator in each mandibular fracture model using two internal fixation methods

固定方法	骨折部位	骨质类型			
		I 类骨	II 类骨	III 类骨	IV 类骨
微型钛板	正中	294.65	315.84	362.46	375.41
	下颌角	240.48	253.02	285.86	361.16
	体部	320.28	341.62	360.30	382.74
生物可吸收板	正中	58.45	57.85	55.46	65.10
	下颌角	49.66	53.83	61.36	75.57
	体部	49.25	56.58	58.80	96.11

通过对材料特性的对比可以得知, 钛板的最大屈服强度为 900-1 000 MPa, 生物可吸收板的最大屈服强度为 200-260 MPa, 这说明在所设定的边界条件下无论是钛板还是生物可吸收板都不会发生屈服现象, 即处于受力安全范围内。

2.2 两种内固定下骨折断端相对位移情况 微型钛板与生物可吸收板固定后各组下颌骨骨折模型中骨折断端位移情况, 见图 6, 7。随着骨质等级的增加, 骨折断端位移值逐渐增加, 在 III、IV 类下颌骨正中骨折情况下, 无论是采用微型钛板还是生物可吸收板进行固定, 骨折断端位移均较大, 超过了愈合极限值 (大于 150 μm); 在 IV 类骨质下颌体部骨折情况下, 生物可吸收板固定后的骨折断端位移也超过了愈合极限值 (大于 150 μm), 微型钛板固定后的骨折断端位移接近愈合极限值 150 μm ; 对于其他骨折类型, 骨折断端位移均较小 (小于 150 μm); 此外, 相同骨质类型、相同骨折部位的情况下, 微型钛板固定的骨折断端位移要小于生物可吸收板固定, 见表 6, 图 8。

表 6 | 两种内固定下各组下颌骨骨折模型骨折断端位移 (μm)
Table 6 | Displacement of fracture end of mandibular fracture model in each group using two internal fixation methods

固定方法	骨折部位	骨质类型			
		I 类骨	II 类骨	III 类骨	IV 类骨
微型钛板	正中	116.45	137.59	173.08	293.61
	下颌角	31.40	38.28	51.20	93.91
	体部	59.91	70.14	86.96	146.05
生物可吸收板	正中	119.85	141.97	177.49	299.61
	下颌角	35.76	43.76	57.84	105.97
	体部	72.67	84.83	102.77	168.82

综合以上结果, 钛板和生物可吸收板在此边界条件下所受最大应力值均处于安全范围内, 不会发生屈服现象; 在 III、IV 类骨折下颌骨正中骨折时, 无论采用微型钛板或生物可吸收板固定, 骨折断端位移均超过了愈合极限值; 在 IV 类骨质下颌体部骨折时, 采用生物可吸收板进行固定后骨折断端位移也超过了愈合极限, 其余情况骨折断端位移量均在愈合极限范围内。

3 讨论 Discussion

随着材料学的不断发展, 生物可吸收材料作为一种新型固定器材在颌面外科领域已经取得了快速发展, 这种材料具有良好的生物相容性, 植入后可以逐渐降解无需进行二次手术取出^[22-24], 因此, 它能够提供持久的固定效果, 并且避免了传统金属固定器材所存在的一些不足之处。牛谦云等^[25]研究发现, 采用生物可吸收性接骨板内固定治疗下颌骨骨折可以提高预后优良率和下颌骨骨折的稳定性, 降低并发症的发生率, 并且效果优于微型钛板内

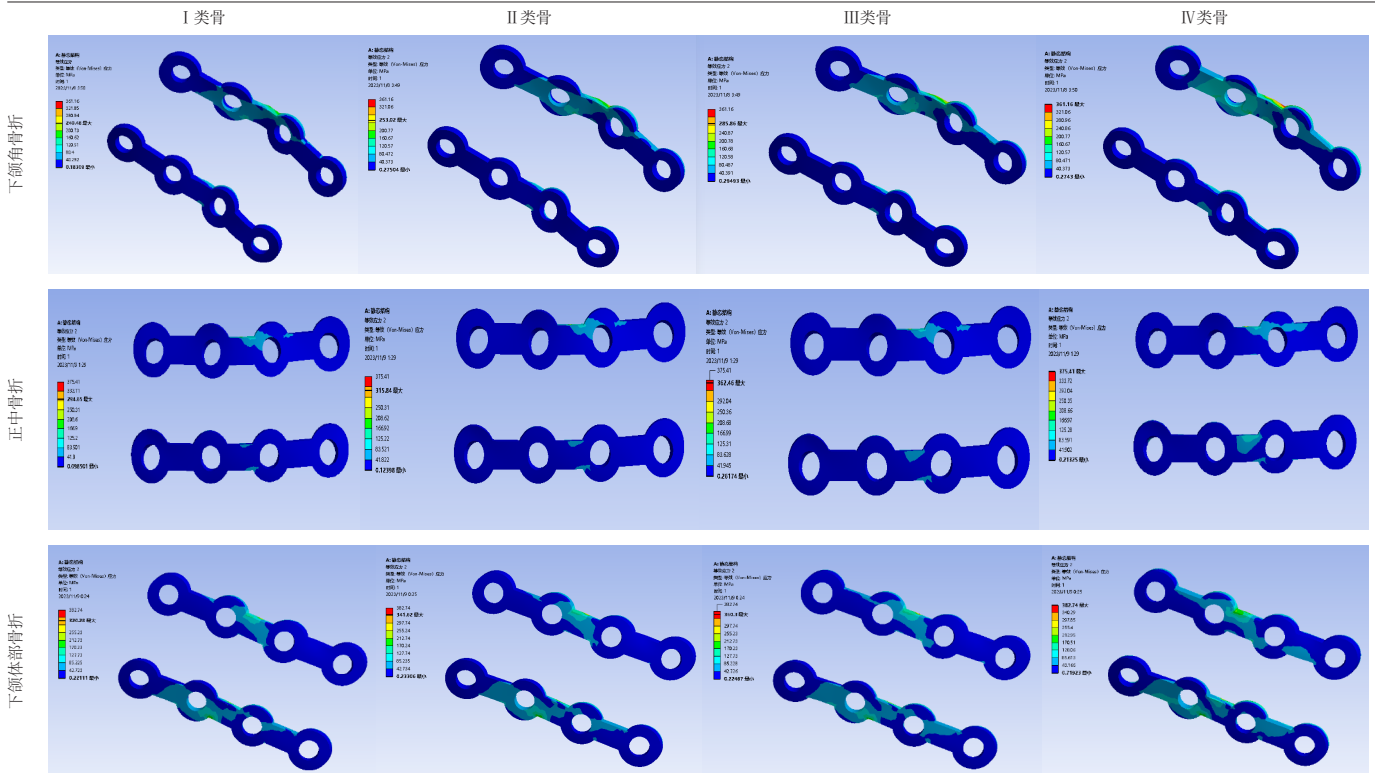


图3 | 微型钛板固定后各组下颌骨骨折模型中内固定物的应力分布
Figure 3 | Stress distribution of internal fixator in each mandibular fracture model after miniature titanium plate fixation

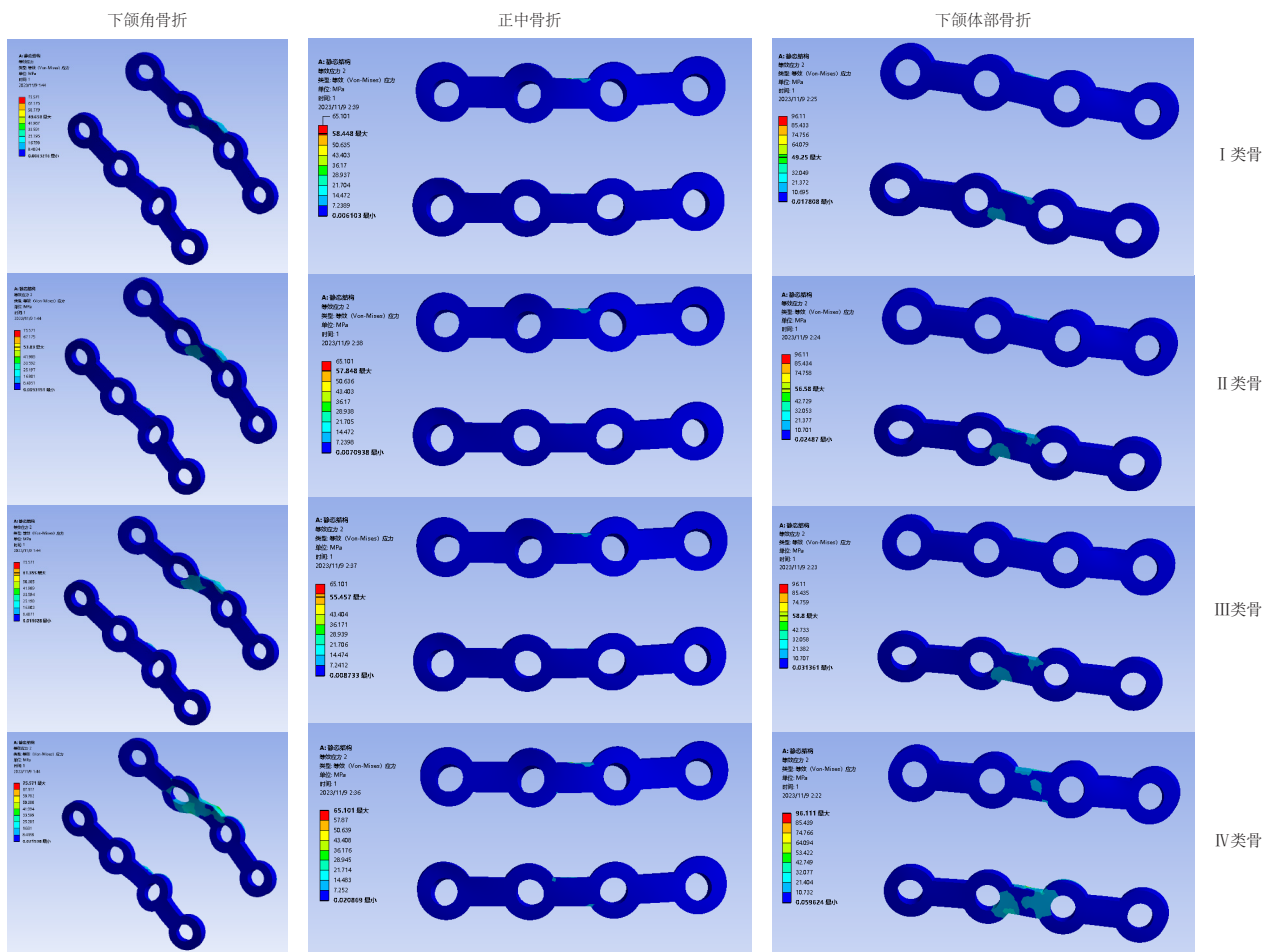
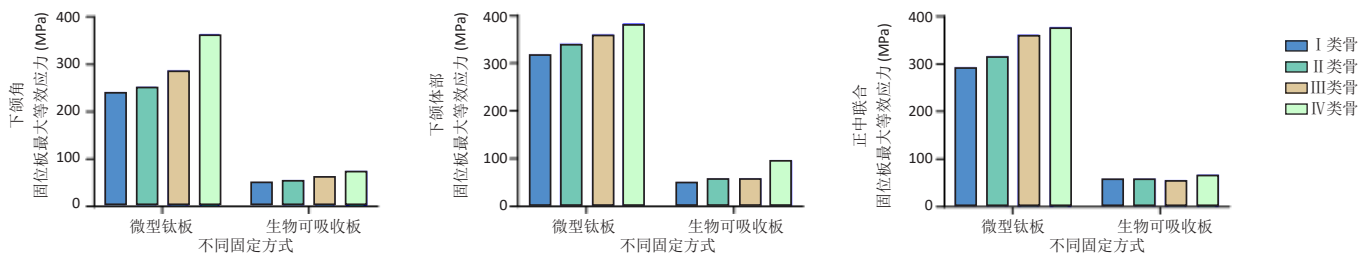


图4 | 生物可吸收板固定后各组下颌骨骨折模型中内固定物的应力分布
Figure 4 | Stress distribution of internal fixators in mandibular fracture models in bioabsorbable plate fixation group



图注：除生物可吸收板固定下颌骨正中骨折外，随着骨质等级的增加，各骨折模型中内固定物的最大应力值逐渐增加，微型钛板微型组、生物可吸收板组下颌体部IV类骨质下的内固定物最大应力值最高，分别为 382.74，96.11 MPa；在相同骨质条件下，钛板组各部位骨折模型的内固定物最大应力值均高于生物可吸收板组。

图 5 | 微型钛板与生物可吸收板内固定后各组下颌骨折模型中固位板所受的最大应力值

Figure 5 | Maximum stress values of the retainer plate in each mandibular fracture model of each group after internal fixation with miniature titanium plate and bioabsorbable plate

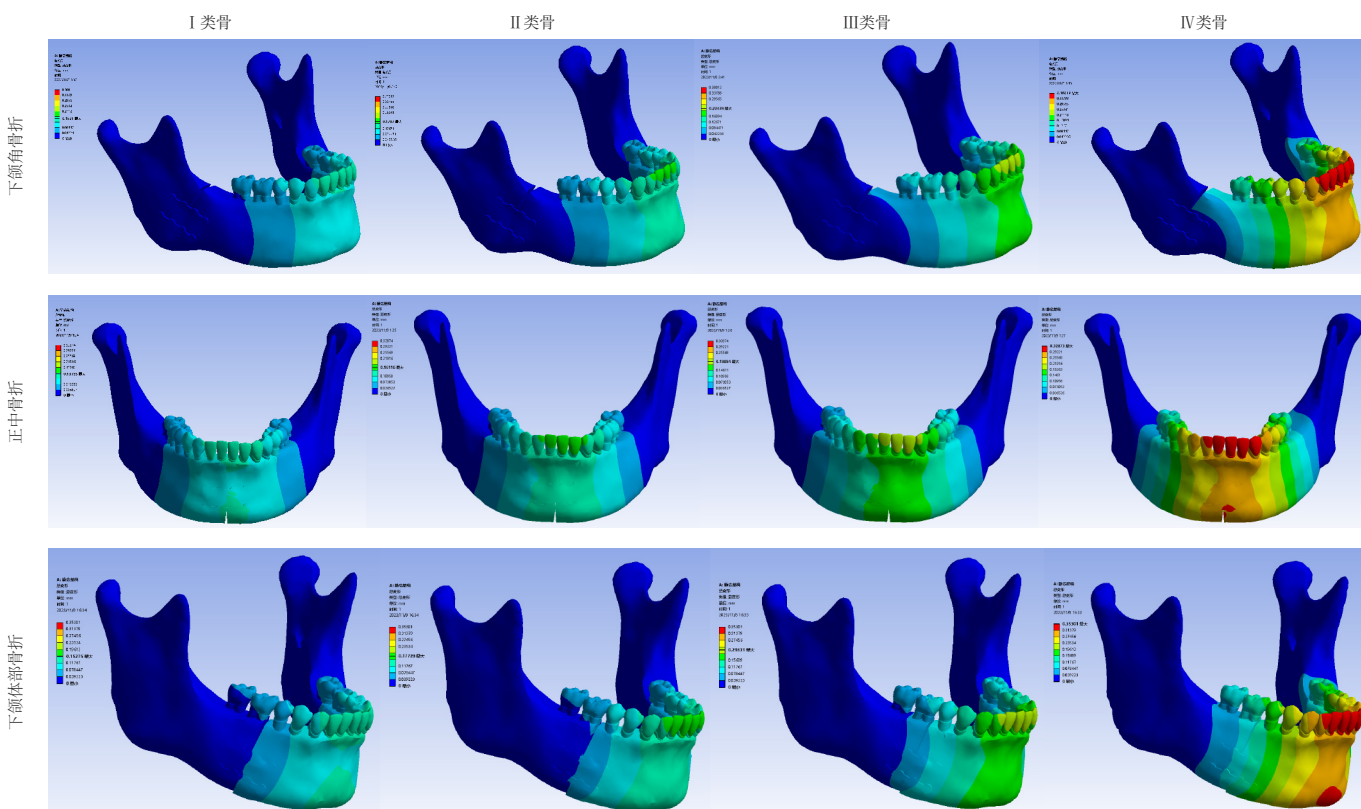


图 6 | 微型钛板固定后各组下颌骨折模型中骨折断端位移情况

Figure 6 | Displacement of fracture ends in each group after miniature titanium plate fixation

固定治疗。韩婧等^[26]实验表明，生物可降解固定系统的刚度和内部强度能够支持大部分下颌骨切开术的骨愈合。尽管有大量关于生物可吸收接骨板骨内固定材料在临床应用成功的研究报告，但由于生物可吸收板本身强度较微型钛板低以及下颌骨的高生物应力特征，近年来有很多案例报道生物可吸收性接骨板在受力区骨折位置因弹性不足导致固定不稳定，甚至出现接骨板断裂的情况。LIU等^[27]研究发现，在下颌骨正中骨切开术后应用生物可吸收板固定时会出现可吸收钉松动和接骨板断裂。赵志强等^[28]研究表明，由于生物可吸收性接骨板的强度较微型钛板低，固定下颌骨骨折后咬合紊乱、移位或错位的发生率较高。

LOVALD等^[29]研究发现，为了加强固定的稳定性往往会增加生物可吸收板的宽度和厚度，由于固定系统的体积增加导致其降解需要更多的时间，出现并发症的可能性增加。因此，对于临床应用生物可吸收板来固定下颌骨骨折仍然需要严格选择适应证，并且需要注意进行随访。对于生物可吸收性接骨板内固定的适用范围和治疗效果仍存在争议^[11-12]。

随着计算机科学和技术的进步，有限元分析方法在颌骨骨折的生物力学研究中得到广泛应用^[30-32]。与以往的研究方法相比，有限元方法具有以下特点：可以模拟微型钛板和生物可吸收接骨板的形状、结构、材料力学性能和

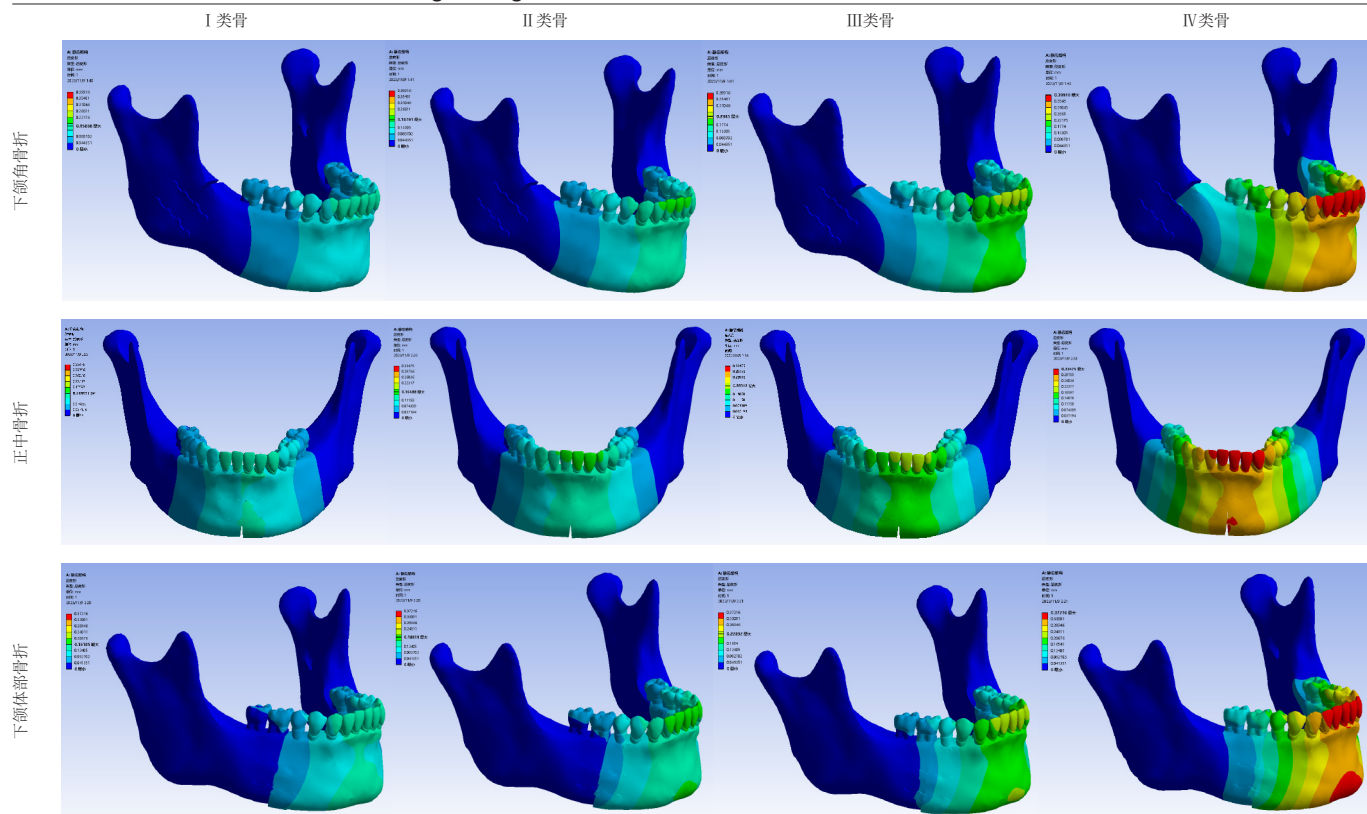
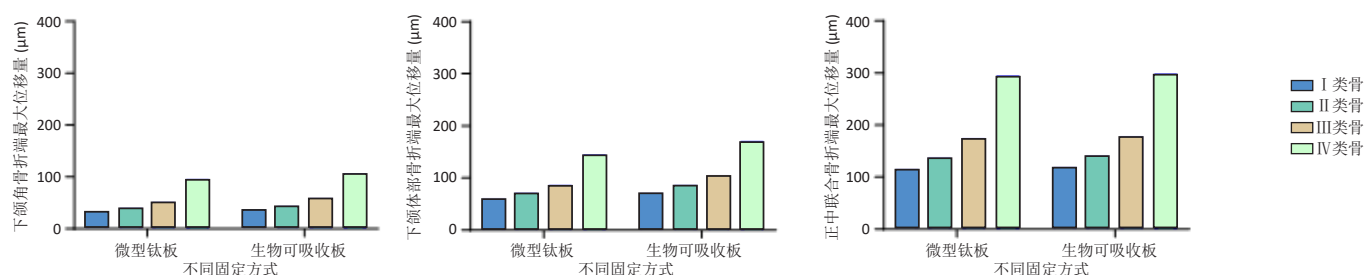


图7 | 生物可吸收板固定后各组下颌骨骨折模型中骨折断端位移情况
Figure 7 | Displacements of fracture ends in mandibular fracture models in each group after fixation with bioabsorbable plates



图注：在III、IV类下颌骨正中骨折情况下，无论是采用微型钛板还是生物可吸收板进行固定，骨折断端位移均较大，超过了愈合极限值（大于150 μm）；在IV类骨质下颌体部骨折情况下，生物可吸收板固定后的骨折断端位移也超过了愈合极限值（大于150 μm），微型钛板固定后的骨折断端位移接近愈合极限值150 μm。

图8 | 微型钛板与生物可吸收板内固定后各组下颌骨骨折模型中骨折断端位移值
Figure 8 | Displacement value of fracture end of mandibular fracture model in each group after internal fixation with miniature titanium plate and bioabsorbable plate

负载情况；可以比较不同材料的力学性能^[33-34]；可以通过有限元仿真分析观察到临床上难以观测到的组织结构的应力分布和形变情况^[35]。此外，有学者通过研究证实了使用有限元方法进行微动分析的可行性^[36]。为了研究微型钛板和生物可吸收板在不同骨质条件下是否能够承受负载并为骨折断端提供稳定性以促进骨折愈合，此次实验从2个方面考虑数据，即骨折断端的位移限制在150 μm以下^[37]，并且固定板所受的最大应力值均在安全范围内（钛板的屈服极限值为900-1 000 MPa，生物可吸收板的屈服极限值为200-260 MPa）^[38-39]。从实验结果可以看出，在施加最大咬合力的情况下，使用钛板和生物可吸收板两

种固定方式时内固定物所受的最大应力值远远小于各自的屈服极限，说明在这种边界条件下固定板不会发生屈服现象，即在受力安全范围内；在相同骨质类型、相同骨折部位的下颌骨骨折模型中，钛板的最大应力值远远高于生物可吸收板，说明生物可吸收板的材料性能较微型钛板更接近于骨组织，具有更好的生物力学性能。对比3处不同骨折部位骨折断端的位移值可以发现，下颌骨正中中部骨折断端的位移值明显大于下颌角部、下颌体部，由于下颌骨正中部骨质较薄且当下颌骨行使功能运动时此处易产生扭转力，下颌骨正中部骨折固定的稳定性较其他部位差，易出现感染、创口破裂、骨不连等并发症，

这与 RHA 等^[40] 临床研究结果一致。对比两种固定方法骨折断端的相对位移, 不论是下颌角部、下颌骨正中部还是下颌体部的骨折, 微型钛板和生物可吸收板所固定后骨折断端的位移量随骨质等级的增加而逐渐增加, 在相同骨质类型、骨折部位情况下, 生物可吸收板骨折断端最大位移值略大于微型钛板组 (3-23 μm), 但差值很小, 两种固定系统的最大位移几乎相同, 说明生物可吸收板与微型钛板固定下颌骨骨折的稳定性几乎相同, 这与谢铁松等^[41] 临床研究结论一致, 生物可吸收板具有与钛板同样的强度, 能够为骨折的愈合提供足够的稳定性。对于 I - IV 类骨质下颌骨下颌角骨折, 无论是钛板还是生物可吸收板固定, 骨折断端的位移较小, 均在安全范围内; 对于 I、II 类骨质下颌骨正中骨折, 无论是钛板还是生物可吸收板固定, 骨折断端的位移均较小, 均在安全范围内; 对于 I - IV 类骨质下颌骨体部骨折, 微型钛板固定时骨折断端的位移较小, 均在安全范围内。对于 I - III 类骨质骨折下颌体部骨折, 生物可吸收板固定时骨折断端的位移较小, 均在安全范围内; 对于 III、IV 类骨质下颌骨正中骨折, 无论是钛板还是生物可吸收板固定时, 骨折断端的位移均较大, 超过安全范围, 不利于骨折愈合; 对于 IV 类骨质下颌骨体部折, 采用生物可吸收板固定时骨折断端的位移较大, 超过安全范围, 不利于骨折愈合。临床上应提醒患者在术后进行开闭口训练等下颌骨受力时要循序渐进, 避免愈合早期过度加力, 以防止并发症的发生。需要注意的是, 在实际临床术后恢复期牙齿和颌骨一般不会承受最大咬合力, 因此计算得出的钛板和生物可吸收板所承受的力要比实际术后承受的力大, 骨折断端的位移量要比实际术后的位移量大。

该实验的优势: 为了进行颌骨骨折的生物力学研究, 利用 Mimics 19.0 软件构建了下颌骨的有限元模型, 该模型通过快速建模和高精度模拟, 能够较好地反映下颌骨的力学特性和生物力学行为。为了研究生物可吸收板和微型钛板在固定下颌骨骨折时的适应范围, 根据 ZARB 和 LEKHOLM 提出的骨质分类方法建立了 I - IV 类骨质下颌骨模型, 通过比较不同骨质类型下使用生物可吸收板和微型钛板进行固定的下颌骨骨折受力特征和位移量, 为未来的临床试验及治疗提供一定的建议。

该实验的不足: 实验尽可能模拟口腔真实生理状态, 但由于骨小梁组织结构的复杂性, 无法完全模拟口腔内的真实情况, 因此, 模型的形状与生物体的组织结构可能存在差异; 此外, 实验仅考虑骨折早期健侧咬合状态, 而随着骨折的愈合, 患者的咬合力会增大, 并且生物可吸收板会随着降解而导致其力学性能的改变, 这些因素都可能对结果产生影响, 因此对于骨折中期和后期仍需要进一步的研究; 三维有限元方法具有其他研究方法无法

比拟的优势, 但该方法仍然是一种模拟仿真研究的方法, 模型中的材料、载荷和边界条件设置较为理想化, 与实际情况存在不可避免的差异。因此, 仍需要结合临床实践进行深入研究, 以进一步验证实验结果的准确性和可靠性。

综上所述, 实验从生物力学角度证明生物可吸收板和微型钛板固定系统内部强度和刚度都足以支持 I - IV 类骨质下颌骨角部、体部、正中部骨折固定的骨愈合, 生物可吸收板应用于下颌骨骨折的固定稳定性与微型钛板几乎相同, 可以提供骨折早期的愈合条件。在治疗下颌骨骨折时应将下颌骨骨质类型纳入考虑因素, 下颌骨骨质等级越高, 骨折固定的稳定性越差, 术后更易发生骨愈合不良等并发症, 临床上应提醒患者在术后进行开闭口训练等下颌骨受力时要循序渐进, 避免愈合早期过度加力, 以防止并发症的发生。

作者贡献: 周宗昊、冯红超先负责实验设计, 陈佳文、陈光能负责资料收集, 周宗昊负责实验实施和撰写成文, 罗思阳、冯红超负责实验方法的指导及审核。

利益冲突: 文章的全部作者声明, 在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章, 根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享 4.0”条款, 在合理引用的情况下, 允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展, 同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献, 并为之建立索引, 用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

版权转让: 文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

出版规范: 该文章撰写遵守了国际医学期刊编辑委员会《学术研究实验与报告和医学期刊编辑与发表的推荐规范》。文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行 3 次查重。文章经小同行外审专家双盲外审, 同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

4 参考文献 References

- [1] WUSIMAN P, MAIMAITITUERXUN B, GULI, et al. Epidemiology and Pattern of Oral and Maxillofacial Trauma. *J Craniofac Surg.* 2020;31(5): e517-e520.
- [2] 杨志良. 钛板坚强内固定术用于颌面骨折治疗的临床研究 [J]. *现代预防医学*, 2012,39(13):3462-3463.
- [3] 平江涛, 黄国贤, 张勇辉, 等. 下颌骨骨折的微型钛板坚固内固定术疗效分析 [J]. *吉林医学*, 2012,33(14):2296-2297.
- [4] 郑志勋, 翟敏, 黄宏, 等. 牵引钉颌间牵引术联合微型钛板内固定治疗颌骨骨折的效果分析 [J]. *深圳中西医结合杂志*, 2020,3(5): 150-151.
- [5] 朱伟政, 叶茂昌, 王来平, 等. 可吸收接骨板在下颌骨骨折内固定治疗中的临床评价 [J]. *口腔颌面外科杂志*, 2013,23(6):440.
- [6] THOREN H, SNALL J, KORMI E, et al. Symptomatic plate removal after treatment of facial fractures. *J Craniomaxillofac Surg.* 2010;38(7): 505-510.
- [7] 梁一雷, 苏武. 聚左旋乳酸可吸收夹板在裸突颈内固定术中的应用效果观察 [J]. *中国临床新医学*, 2012,5(10):958.

- [8] IZUMI Y, KAORI I, JYUNKO N, et al. Comparison of Material- Related Complications After Bilateral Sagittal Split Mandibular Setback Surgery: Biodegradable Versus Titanium Miniplates. *J Oral Maxillofac Surg.* 2012;70(4):919-924.
- [9] SVERZUT CE, KATO RB, ROSA AL, et al. Comparative study of bone repair in mandibular body osteotomy between metallic and absorbable 2.0 mm internal fixation systems. *Histological and histometric analysis in dogs: a pilot study.* *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2012;41(11): 1361-1368.
- [10] PAENG JY, H ONG J, KIM CS, et al. Comparative study of skeletal stability between bicortical resorbable and titanium screw fixation after sagittal split ramus osteotomy for mandibular prognathism. *J Craniomaxillofac Surg.* 2012;40(8):660-664.
- [11] 丁琳琳, 张宜澜, 杨茂进, 等. 聚左旋乳酸可吸收接骨板在下颌骨折内固定术中的应用价值 [J]. *创伤外科杂志*, 2020,22(4):267-270.
- [12] SONG IS, CHOI J, KIM SR, et al. Stability of bioabsorbable fixation systems according to different locations of mandibular fracture: A three-dimensional analysis. *J Craniomaxillofac Surg.* 2021;49(8): 732-737.
- [13] 李明喆, 徐晓峰, 徐兵. 不同程度老年人萎缩性无牙颌下颌骨折的内固定方式选择及相关生物力学分析 [J]. *中国口腔颌外科杂志*, 2018,16(4):328-333.
- [14] RUES S, SCHMITTER M, KAPPEL S, et al. Effect of bone quality and quantity on the primary stability of dental implants in a simulated bicortical placement. *Clin Oral Investig.* 2021;25(3):1265-1272.
- [15] 孙庚林, 周健, 郑孝慈, 等. 下颌骨骨折生物接骨内固定的三维有限元分析 [J]. *口腔颌面外科杂志*, 2005,15(1):39-42.
- [16] LEMOS CAA, VERRI FR, NORITOMI PY, et al. Effect of bone quality and bone loss level around internal and external connection implants: A finite element analysis study. *J Prosthet Dent.* 2021;125(1):137.e1-137.e10.
- [17] 缙小蕊, 周政, 姜丹丹, 等. 种植覆盖义齿修复不同骨质类型的 Kennedy I 类缺失的三维有限元分析 [J]. *口腔医学研究*, 2020, 36(9):855-860.
- [18] 葛奕辰, 蒋少康, 李轻如, 等. “All-on-4” 在不同骨质条件下应力分布的三维有限元分析 [J]. *口腔医学研究*, 2016,32(12):1252-1256.
- [19] BUJTÁR P, SÁNDOR GK, BOJTOS A, et al. Finite element analysis of the human mandible at 3 different stages of life. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2010;110(3):301-309.
- [20] KOC D, DOGAN A, BEK B. Bite force and influential factors on bite force measurements: a literature review. *Eur J Dent.* 2010;4(2):223-232.
- [21] LANGENBACH GE, HANNAM AG. The role of passive muscle tensions in a three-dimensional dynamic model of the human jaw. *Arch Oral Biol.* 1999;44(7):557-573.
- [22] KIM DY, SUNG IY, CHO YC, et al. Bioabsorbable plates versus metal miniplate systems for use in endoscope-assisted open reduction and internal fixation of mandibular subcondylar fractures. *J Craniomaxillofac Surg.* 2018;46(3):413-417.
- [23] LEE HB, OH JS, KIM SG, et al. Comparison of titanium and biodegradable miniplates for fixation of mandibular fractures. *J Oral Maxillofac Surg.* 2010;68(9):2065-2069.
- [24] STANTON DC, LIU F, YU JW, et al. Use of bioresorbable plating systems in paediatric mandible fractures. *J Craniomaxillofac Surg.* 2014;42(7): 1305-1309.
- [25] 牛谦云, 孟翔祥, 吴龔, 等. 生物可吸收性微型接骨板内固定术治疗下颌骨骨折患者的效果 [J]. *中国民康医学*, 2022,34(5):19-21.
- [26] 韩婧, 解东平, 王慧珊, 等. 微型钛板与生物可吸收板在下颌骨骨折切开术固定中的应力比较 [J]. *上海口腔医学*, 2020,29(3):237-241.
- [27] LIU JN, ONG HS, WANG MY, et al. Randomized control trial comparing the titanium osteosynthesis and the biodegradable osteosynthesis in mandibulotomy access. *Head Neck.* 2019;41(4):915-923.
- [28] 赵志强, 多力昆·吾甫尔. 可吸收接骨板与微型钛板在下颌骨骨折中临床应用效果评价 [J]. *口腔颌面外科杂志*, 2017,27(6):417-421.
- [29] LOVALD ST, KHRAISHI T, WAGNER J, et al. Mechanical design optimization of bioabsorbable fixation devices for bone fractures. *J Craniofac Surg.* 2009;20(2):389-398.
- [30] WESTBURY LD, SHERE C, EDWARDS MH, et al. Cluster Analysis of Finite Element Analysis and Bone Microarchitectural Parameters Identifies Phenotypes with High Fracture Risk. *Calcif Tissue Int.* 2019;105(3): 252-262.
- [31] YE Y, YOU W, ZHU W, et al. The Applications of Finite Element Analysis in Proximal Humeral Fractures. *Comput Math Methods Med.* 2017; 2017:4879836.
- [32] CURREY J. Measurement of the mechanical properties of bone: a recent history. *Clin Orthop Relat Res.* 2009;467(8):1948-1954.
- [33] 孙英华. 生物可吸收性微型接骨板与微型钛内固定系统治疗下颌骨骨折的临床比较研究 [J]. *中国伤残医学*, 2021,29(24):53-55.
- [34] 吕佳, 刘翠玲, 蓝菁, 等. 动态载荷下种植体位置和直径对悬臂梁种植固定义齿应力影响的三维有限元研究 [J]. *华西口腔医学杂志*, 2013,31(6):552-556.
- [35] 安尼卡尔·安尼瓦尔, 帕丽黛姆·图尔迪, 阿迪力·麦木提敏, 等. 上颌前牙区不同种植修复体在不同咬合受力下的三维有限元分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2020,24(16):2531-2536.
- [36] LI Z, GAO S, CHEN H, et al. Micromotion of implant-abutment interfaces (IAI) after loading: correlation of finite element analysis with in vitro performances. *Med Biol Eng Comput.* 2019;57(5):1133-1144.
- [37] COX T, KOHN MW, IMPELLUSO T. Computerized analysis of resorbable polymer plates and screws for the rigid fixation of mandibular angle fractures. *J Oral Maxillofac Surg.* 2003;61(4):481-487; discussion 487-488.
- [38] WAGNER A, KRACH W, SCHICHO K, et al. A 3-dimensional finite-element analysis investigating the biomechanical behavior of the mandible and plate osteosynthesis in cases of fractures of the condylar process. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2002;94(6):678-686.
- [39] BLEACH NC, TANNER KE, KELLOMÄKI M, et al. Effect of filler type on the mechanical properties of self-reinforced polylactide-calcium phosphate composites. *J Mater Sci Mater Med.* 2001;12(10-12):911-915.
- [40] RHA EY, PAIK H, BYEON JH. Bioabsorbable plates and screws fixation in mandible fractures: clinical retrospective research during a 10-year period. *Ann Plast Surg.* 2015;74(4):432-436.
- [41] 谢铁松, 雷如军, 邵义敏, 等. 不同固定材料对下颌骨骨折愈合的影响 [J]. *医学综述*, 2015,21(1):190-191.

(责任编辑: GW, ZN, QY, LWJ)