

· 基础研究 ·

四维结构锁定板固定股骨干骨折的有限元分析[△]宋美玲^{1,2}, 徐创业³, 温俭^{1,4}, 王哲¹, 曾玉^{1,5}, 董谢平^{1,4*}

[1. 江西省人民医院(南昌医学院第一附属医院) 数字骨科重点实验室, 江西南昌 330006; 2. 瑞金市中医医院, 江西瑞金 342500; 3. 深圳市安保医疗科技股份有限公司, 广东深圳 518000; 4. 南昌大学江西医学院, 江西南昌 330006; 5. 江西中医药大学, 江西南昌 330004]

摘要: [目的] 比较四维结构锁定板及常规锁定板的力学特性。[方法] 采集志愿者的股骨 CT 数据后建立股骨干斜行骨折模型, 分别构建以四维结构锁定接骨板、常规锁定接骨板内固定模型。在 ANSYS 软件中添加轴向、四点折弯两种载荷, 分析两组模型的位移、应力及云图分布情况。[结果] 在 600 N 的轴向加载下, 四维组的接骨板位移均值显著小于常规组 [(0.1±0.0) mm vs (0.4±0.0) mm, $P<0.001$], 螺钉位移均值 [(0.6±0.0) mm vs (0.4±0.0) mm, $P<0.001$] 和股骨位移均值 [(1.2±0.0) mm vs (0.8±0.0) mm, $P<0.001$] 显著大于常规组; 接骨板应力 [(11.3±0.0) MPa vs (15.4±0.0) MPa, $P<0.001$]、螺钉应力均值 [(9.3±0.0) MPa vs (10.1±0.0) MPa, $P<0.001$] 均显著小于常规组, 而股骨应力均值 [(2.4±0.0) MPa vs (2.3±0.0) MPa, $P<0.001$] 显著大于后者。在 500 N 的四点折弯加载下, 四维组的接骨板位移均值 [(0.029±0.00) mm vs (0.044±0.00) mm, $P<0.001$] 显著小于常规组, 而螺钉位移均值 [(0.058±0.00) mm vs (0.051±0.00) mm, $P<0.001$]、股骨的位移均值 [(0.112±0.001) mm vs (0.096±0.00) mm, $P<0.001$] 显著大于常规组。四维组的接骨板应力 [(3.685±0.005) MPa vs (5.556±0.001) MPa, $P<0.001$]、螺钉应力 [(2.608±0.004) MPa vs (3.024±0.001) MPa, $P<0.001$] 显著小于常规组, 而股骨应力均值 [(0.326±0.005) MPa vs (0.308±1.160) MPa, $P<0.001$] 显著大于常规组。[结论] 四维组可相对降低螺钉断裂风险, 整体生物力学性能与常规组相近, 具有发展成为一种新的骨折内固定物的潜力。

关键词: 股骨干骨折, 四维结构锁定接骨板, 内固定, 有限元分析

中图分类号: R683.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2025) 07-0631-06

A finite element analysis on four-dimensional locking plate for fixation of femoral shaft fracture // SONG Mei-ling^{1,2}, XU Chuang-ye³, WEN Jian^{1,4}, WANG Zhe¹, ZENG Yu^{1,5}, DONG Xie-ping^{1,4}. 1. Key Laboratory of Digital Orthopaedics, Jiangxi Provincial People's Hospital, Nanchang 330006, China; 2. Ruijin Hospital of Traditional Chinese Medicine, Ruijin 342500, China; 3. Shenzhen Security Medical Technology Co., LTD., Shenzhen 518000, China; 4. Jiangxi Medical College, Nanchang University, Nanchang 330006, China; 5. Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

Abstract: [Objective] To compare the mechanical properties of four-dimensional (4D) locking plate and conventional locking plate. [Methods] The oblique fracture model of femoral shaft was established based on CT data of volunteers, and then the internal fixation model with 4D locking bone plate and routine locking plate were constructed respectively. The axial and four-point bending loads were added by using ANSYS software to analyze the displacement, stress and nephogram distribution of the two models. [Results] Under 600 N axial loading, the 4D group proved significantly less than the routine group in plate displacement [(0.1±0.0) mm vs (0.4±0.0) mm, $P<0.001$], while the former was significantly greater than the latter in screw displacement [(0.6±0.0) mm vs (0.4±0.0) mm, $P<0.001$] and femur displacement [(1.2±0.0) mm vs (0.8±0.0) mm, $P<0.001$]. In addition, the 4D group had significantly less stress on plate [(11.3±0.0) MPa vs (15.4±0.0) MPa, $P<0.001$] and stress on screw [(9.3±0.0) MPa vs (10.1±0.0) MPa, $P<0.001$], whereas greater stress on femur [(2.4±0.0) MPa vs (2.3±0.0) MPa, $P<0.001$] than the routine group. Under 500 N four-point bending load, the 4D group had significantly less plate displacement [(0.029±0.00) mm vs (0.044±0.00) mm, $P<0.001$], while greater screw displacement [(0.058±0.00) mm vs (0.051±0.00) mm, $P<0.001$] and femur displacement [(0.112±0.001) mm vs (0.096±0.00) mm, $P<0.001$] than the routine group. Furthermore, the 4D group had significantly less

DOI:10.20184/j.cnki.issn1005-8478.110079

△基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(编号:8216090362); 国家骨科与运动康复临床医学研究中心创新基金项目(编号:2021-NCRC-CXJJ-PY-05); 江西省技术创新引导类计划项目(编号:20212BDH81018); 江西中医药大学大学生创新创业训练计划项目(编号:202210412153)

作者简介: 宋美玲, 住院医师, 研究生, 研究方向: 创伤骨折愈合的临床研究, (电子信箱)song202306@163.com

***通信作者:** 董谢平, (电子信箱)13576030901@163.com

stress on plate [(3.685±0.005) MPa vs (5.556±0.001) MPa, $P<0.001$], and screw stress [(2.608±0.004) MPa vs (3.024±0.001) MPa, whereas greater stress on femur [(0.326±0.005) MPa vs (0.308±1.160) MPa, $P<0.001$] than the routine group. **[Conclusion]** The four-dimensional plate has relatively reduced risk of screw fracture, the overall biomechanical properties similar to the conventional plate, which has the potential to develop into a new internal fixation for fracture.

Key words: femoral shaft fracture, 4-dimensional locking plate, internal fixation, finite element analysis

股骨干骨折多由高能量损伤所致，有着较高的发病率^[1, 2]，接骨板内固定是其主要治疗方法之一^[3, 4]，但传统骨折固定理念强调固定系统的机械稳定性（AO），会因应力遮挡和集中，增加螺钉、钢板断裂的风险。近些年开始强调生物性固定（BO），出现了可在降低锁定接骨板整体结构刚度的同时保持结构强度，有助于接骨板的近皮层与远皮层均匀地形成骨痂的微动接骨板^[5]。本课题组研发了一款能随时间推移改变结构及功能的新型四维结构锁定接骨板，可从固定初始的坚强固定（AO）渐进式自动降低固定刚度而转化为弹性固定（BO），并将这种固定方式称为“A-BO”固定，该发明已获国家专利（专利号：CN202021289303.7）^[6]，其采用常规锁定接骨板的外观轮廓和尺寸，但以中央为界分成两种结构，半边接骨板与常规锁定接骨板相同；另半边由滑块和滑槽以榫卯方式结合组成，所有的锁定螺钉孔均设在滑块上，滑块的长度较滑槽短 1 mm，手术时将可生物降解的金属镁垫片嵌入靠骨折端的滑槽间隙中，即可对骨折实施坚强的锁定固定。随着镁金属垫片逐渐降解变薄，垫片对滑块的支撑及接骨板对骨折两断端的支撑作用将同步逐渐减弱，在肌张力的牵拉作用下，滑块会同步向接骨板中部即骨折线方向逐渐滑动，以填补垫片变薄后出现的空间，而此时靠近接骨板末端处的滑槽也将逐渐同步产出新的间隙。镁金属垫片完全降解后，接骨板端部的滑槽间隙即达到 1 mm 的最大值，骨折断端也就能获得 0~1 mm 范围内的轴向微动。

本研究通过有限元分析方法，在施加不同载荷条件下，比较四维结构锁定接骨板与常规锁定接骨板固定股骨干斜行骨折的力学特性。

1 资料与方法

1.1 股骨模型建立

招募健康成年女性志愿者 1 名，行股骨 CT 扫描，层厚 1.25 mm，在 Mimics 19.0 软件（Materialise, 比利时）中建立股骨模型，然后使用 Wrap 2017 软件（Geomagic, 美国）进行优化处理，通过曲面拟合等处理得到股骨三维实体模型。

1.2 固定分组与模型建立

在 SolidWorks2022 软件（Dassault Systemes）中，分别建立四维结构锁定接骨板、常规锁定接骨板 2 种有限元内固定模型（图 1）。2 种接骨板的外形规格均是 275 mm×22 mm×5.4 mm，远端和近端分别设置 6 个锁定螺钉。考虑到计算成本，本实验忽略螺纹结构^[7, 8]。因此，将两种接骨板配套的螺钉螺纹结构简化为圆柱体，钉头直径 8 mm、钉体直径 5 mm、长度 50 mm，均能穿透双层骨皮质。基于 ANSYS 软件平台，将上述股骨干斜行模型及内固定接骨板进行装配，常规组在股骨外侧用常规锁定接骨板固定，接骨板中部正对骨折线中央，两侧骨断端各以 6 枚锁定螺钉固定于接骨板上。四维组的四维结构接骨板放置位置和螺钉数量与常规组相同，以中间为界，接骨板的一边与常规锁定接骨板相同的一边置于股骨近断端，接骨板带滑槽的一边置于股骨远断端，靠近膝关节的滑槽远端设置出 1 mm 间隙，模拟未设置镁金属垫片或镁金属垫片降解后接骨板整体结构及其固定强度最薄弱时的状态。

1.3 加载与设定

采用 ANSYS 2023 软件进行有限元分析，材料属性见表 1。因模拟无松动条件下的受力分析，故将股骨与螺钉、螺钉与接骨板之间定义为绑定关系。股骨上段与股骨下段设置为“摩擦”接触，摩擦系数为 0.2。在四维组中，接骨板和滑块设置为“摩擦”接触，摩擦系数为 0.05。在股骨头中心垂直施加大小为 600 N 的面载荷，来模拟人体自身重量产生的载荷进行加载（图 1a）。根据国标 YY/T 0342-2020，分别在股骨内侧，选择 2 个受力点，以 250 N 的力量进行加载（图 1b）。两种工况设定，分别重复 10 次。

表 1. 模型材料属性
Table 1. Model material properties

材料	杨氏模量 (GPa)	泊松比 (%)
皮质骨	16.7	0.3
松质骨	0.03	0.3
接骨板	111.2	0.3
螺钉	111.2	0.3

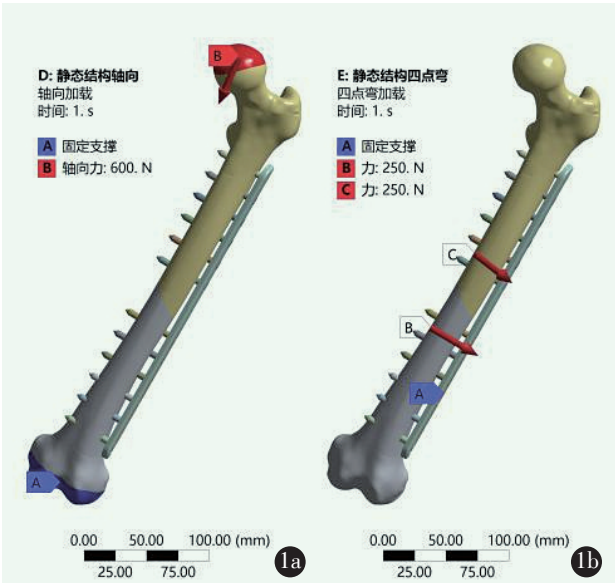


图 1. 接骨板模型及加载工况示意图。1a: 轴向加载工况示意图；1b: 四点折弯加载工况示意图。
Figure 1. Schematic diagram of plate model and loading condition. 1a: Schematic diagram of axial loading condition; 1b: Schematic diagram of the four-point bending loading state.

1.4 测量指标
观察在不同载荷工况下，两组模型的股骨、接骨板、螺钉的形变、应力峰值及应力云图。

1.5 统计学方法
采用 SPSS 26.0 软件进行统计学分析。计量数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示，资料呈正态分布时，采用单因素方差分析，两两比较采用 *LSD* 法；资料呈非正态分布时，采用秩和检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 模型验证
以四维组模型为例，单元类型选择二阶四面体，螺钉单元尺寸 1.0 mm，股骨单元尺寸 1.5 mm，接骨板单元尺寸 1.5 mm，接骨板和滑块线尺寸 0.5 mm。网格节点数为 1 249 303，单元数为 836 103。网格单元质量为 (0.8±0.1)，偏度为 (0.2±0.1)。在轴向加载下，模型总位移最大值为 3.9 mm。将上述尺寸减少 50%后，所得网格节点数为 7 821 101，单元数为 5 518 000，模型总位移最大值为 4.1，变化率为 4.3%，<5%，符合网格敏感性分析。

2.2 轴向加载
在 600 N 的轴向加载下，两组模型不同组件的位移及应力检测结果见表 2，应力分布云图见图 2。四

维组的接骨板位移均值显著小于常规组 ($P < 0.05$)，螺钉位移均值、股骨位移均值显著大于常规组 ($P < 0.05$)。四维组的接骨板、螺钉应力均值均显著小于常规组 ($P < 0.05$)，股骨应力均值显著大于常规组 ($P < 0.05$)。

表 2. 轴向载荷下两组测量结果 ($\bar{x} \pm s$) 与比较			
Table 2. Comparison of measurements between 2 groups in term of axial loading ($\bar{x} \pm s$)			
指标与部位	四维组	常规组	P 值
位移 (mm)			
接骨板	0.1±0.0	0.4±0.0	<0.001
螺钉	0.6±0.0	0.4±0.0	<0.001
股骨	1.2±0.0	0.8±0.0	<0.001
P 值	<0.001	<0.001	
应力 (MPa)			
接骨板	11.3±0.0	15.4±0.0	<0.001
螺钉	9.3±0.0	10.1±0.0	<0.001
股骨	2.4±0.0	2.3±0.0	<0.001
P 值	<0.001	<0.001	

2.3 四点折弯加载
在 500 N 的四点折弯加载下，两组模型不同组件的位移及应力检测结果见表 3。四维组的接骨板位移均值显著小于常规组 ($P < 0.05$)，螺钉、股骨的位移均值显著大于常规组 ($P < 0.05$)。四维组的接骨板、螺钉应力均值显著小于常规组 ($P < 0.05$)，股骨应力均值显著大于常规组 ($P < 0.05$)。

表 3. 四点折弯载荷下两组测量结果 ($\bar{x} \pm s$) 与比较			
Table 3. Comparison of measurments between 2 groups in term of four-point bending ($\bar{x} \pm s$)			
指标与部位	四维组	常规组	P 值
位移 (mm)			
接骨板	0.029±0.00	0.044±0.00	<0.001
螺钉	0.058±0.00	0.051±0.00	<0.001
股骨	0.112±0.001	0.096±0.00	<0.001
P 值	<0.001	0.020	
应力 (MPa)			
接骨板	3.685±0.005	5.556±0.001	<0.001
螺钉	2.608±0.004	3.024±0.001	<0.001
股骨	0.326±0.005	0.308±1.160	<0.001
P 值	<0.001	<0.001	

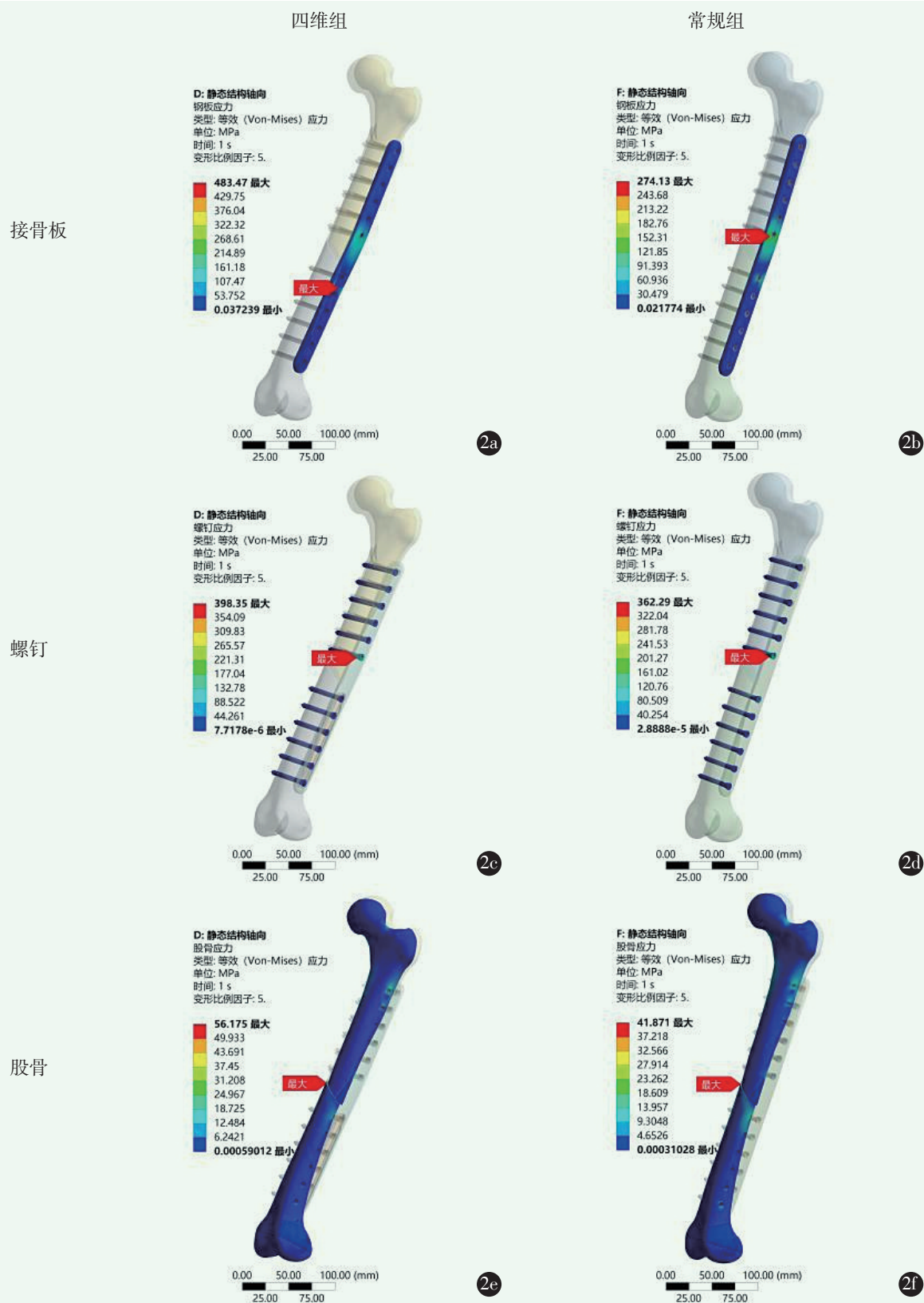


图 2. 轴向加载应力云图。2a: 四维组接骨板应力云图; 2b: 常规组接骨板应力云图; 2c: 四维组螺钉应力云图; 2d: 常规组螺钉应力云图; 2e: 四维组股骨应力云图; 2f: 常规组股骨应力云图。

Figure 2. Axial loading stress cloud diagram. 2a: Stress cloud diagram of 4D group; 2b: Stress cloud diagram of plate in routine group; 2c: Screw stress cloud diagram of 4D group; 2d: Stress cloud diagram of screws in routine group; 2e: Femoral stress cloud diagram of the 4D group; 2f: Stress cloud diagram of the femur in the routine group.

3 讨论

股骨干骨折术后不愈合一直是临床难点,适度微动产生的应力能刺激骨膜骨痂的生长,加速骨折愈合^[9-11],多数研究认为,骨折端轴向微动0.2~1 mm可促进骨折愈合^[12-14]。故四维结构锁定板通过1 mm宽的镁金属垫片降解调控来获得骨折断端0~1 mm的微动,实现骨折断端间初始坚强固定向单一轴向微动的相对弹性固定之自动转化,从而使断骨能自动获得利于其愈合也可防止废用性骨质疏松的生理性应力刺激,进而更好地促进骨折愈合。

有限元仿真分析在骨科生物力学研究中发挥了重要作用,其可靠性得到了广泛认同^[15-17],能够对接骨板的力学性能、断骨-接骨板系统的力学稳定性进行评估^[18]。等效应力是弹塑性力学里的 VonMises 应力,主要考察的是材料在各个方向上的应力差值,是判断材料屈服和抗破坏能力的重要指标,等效应力越大,该材料则越容易疲劳或破坏^[19, 20]。内固定系统首先需要满足对骨折断端稳定固定的要求,同时减小骨折断端间的剪切应力和应力遮挡^[21]。

接骨板固定骨折过程中最常见的失效原因是螺钉断裂,从有限元分析结果可知,在600 N的轴向加载下,四维组的螺钉位移均值显著大于常规组,而螺钉应力均值(9.3±0.0) MPa,相较于常规组中螺钉应力均值(10.1±0.0) MPa,降低了0.08%,差异有统计学意义($P<0.05$)。在500 N的四点折弯加载下,四维组的螺钉位移均值显著大于常规组,螺钉应力均值(2.6±0.0) MPa,相较于常规组中螺钉应力均值(3.0±0.0) MPa,降低了0.14%,差异有统计学意义($P<0.05$);说明四维组可相对降低螺钉所受应力,有利于内固定系统的稳定性和安全性。

Heintz 等^[22]研究表明,人体在活动过程中,股骨所受的主要载荷为轴向压缩力。人体在站立状态下,股骨干载荷约为人体质量的1/3,当人体质量为60~90 kg时,站立时股骨干所承受载荷为200~300 N^[23, 24],以自身体重的1/2~2倍作为轴向负载的参考区间具有实际意义^[25]。本研究选取的患者体质量为60 kg,相当于轴向压缩载荷设置为600 N,是站立状态下所承受载荷的2倍。结果两组模拟轴向加载后模型内固定均未失效,这表明四维组整体的力学性能与常规组相近,也能用于股骨骨折的固定。况且股骨骨折内固定术后早期锻炼均需拄拐以减轻负重并保障安全,此时患肢所承受载荷小于其体重。而当镁金属垫片完全降解,四维组接骨板的间隙达到1 mm这种最薄弱状态时,已是骨折愈合的中后期,断端间的骨与软

组织连续性和强度的修复已接近尾声,患肢自身已变得较为坚强,对内固定保护的需求大大减少。因此,从固定强度来说,四维结构接骨板具有发展成为一种新的骨折内固定物的潜力。

本研究也存在一些局限性:(1)对螺钉螺纹和接骨板边缘等结构进行了简化处理,而这些区域可能会影响接骨板整体的应力;(2)本试验只基于健康的成年女性股骨CT数据建立的股骨斜行模型并赋值,未考虑骨质疏松的情况,而骨质状态将影响骨折稳定性及内固定物的固定强度;(3)本研究只设定了静态力学加载的工况,与日常活动中具有动态属性的情况存在一定差距。

利益冲突声明 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 宋美玲: 酝酿和设计实验、实施研究、数据采集及分析/解释、起草文章、统计分析; 徐创业: 实施研究、文章审阅; 温俭: 酝酿和设计实验、分析、解释数据、文章审阅; 王哲: 实施研究、采集数据; 曾玉: 酝酿和设计实验、采集数据; 董谢平: 酝酿和设计实验、文章审阅、指导、获取研究经费

参考文献

- [1] Walter N, Szymiski D, Kurtz SM, et al. Femoral shaft fractures in elderly patients - An epidemiological risk analysis of incidence, mortality and complications [J]. *Injury*, 2023, 54 (7): 110822. DOI: 10.1016/j.injury.2023.05.053.
- [2] Kushida Y, Omori K, Muramatsu K, et al. Epidemiology of a femur shaft fracture in an acute critical care center in a rural area of Japan [J]. *Open Orthop J*, 2019, 13 (1): 210835761. DOI: 10.2174/1874325001913010295.
- [3] 李华平, 赵世杰, 姚裴, 等. 锁定钢板与逆行髓内钉固定股骨远端骨折比较 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (18): 1654-1659. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.18.05.
Li HP, Zhao SJ, Yao P, et al. Locking plates versus retrograde intramedullary nailing for distal femoral fractures [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2022, 30 (18): 1654-1659. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.18.05.
- [4] Hamidi S, Khosravifard A, Hematiyan MR, et al. A comparative mechanical study of two types of femur bone implant using the finite element method [J]. *Int J Numer Meth Biomed Engin*, 2021, 37 (6): e3459. DOI: 10.1002/cnm.3459.
- [5] Han Z, Wu J, Deng G, et al. Axial micromotion locking plate construct can promote faster and stronger bone healing in an ovine osteotomy model [J]. *Front Bioengin Biotech*, 2021, 8: 593448. DOI: 10.3389/fbioe.2020.593448.
- [6] 董谢平, 李青莉, 艾子政, 等. 可从刚性固定渐变为轴向非刚性固定的接骨板系统 [P]. 江西省: CN213552257U, 2021-06-29.
Dong XP, Li QL, Ai ZZ, et al. A plate system that can be gradually changed from rigid fixation to axial non-rigid fixation [P]. *Jiangxi Province: CN213552257U*, 2021-06-29.
- [7] MacLeod AR, Pankaj P, Simpson AHRW. Does screw - bone interface modelling matter in finite element analyses [J]. *J Biomech*, 2012, 45 (9): 1712-1716. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2012.04.008.
- [8] Rathor S, Uddanwadiker R, Saryam N, et al. Effective treatment of

- femur diaphyseal fracture with compression plate—a finite element and in vivo study comparing the healing outcomes of nailing and plating [J]. *Ind J Orthop*, 2022, 2022: 1–13. DOI: 10.1007/s43465-022-00795-1.
- [9] Köseoğlu E, Durak K, Bilgen MS, et al. Comparison of two biological internal fixation techniques in the treatment of adult femur shaft fractures (plate-screws and locked intramedullary nail) [J]. *Turk J Trauma Emerg Surg*, 2011, 17 (2): 159–165. DOI: 10.5505/tjtes.2011.24892.
- [10] Augat P, Simon U, Liedert A, et al. Mechanics and mechano-biology of fracture healing in normal and osteoporotic bone [J]. *Osteop Int*, 2005, 16: S36–S43. DOI: 10.1007/s00198-004-1728-9.
- [11] 史金友, 肖玉周. 锁定钢板治疗股骨远端粉碎性骨折的现状与进展 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2021, 35 (10): 1352–1356. DOI: 10.7507/1002-1892.202102050.
- Shi JY, Xiao YZ. Current status and progress of locking plate in the treatment of distal femoral comminuted fracture [J]. *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*, 2021, 35 (10): 1352–1356. DOI: 10.7507/1002-1892.202102050.
- [12] Lipphaus A, Witzel U. Finite-element syntheses of callus and bone remodeling: biomechanical study of fracture healing in long bones [J]. *Anat Rec (Hoboken)*, 2018, 301 (12): 2112–2121. DOI: 10.1002/ar.23893.
- [13] Zhou K, He X, Tao X, et al. A biomechanical matched-pair comparison of two different locking plates for tibial diaphyseal comminuted fracture: carbon fiber-reinforced poly-ether-ether-ketone (CF-PEEK) versus titanium plates [J]. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15 (1): 1–8. DOI: 10.1186/s13018-020-02096-5.
- [14] Schuelke J, Meyers N, Reitmaier S, et al. Intramembranous bone formation after callus distraction is augmented by increasing axial compressive strain [J]. *Plos One*, 2018, 13 (4): e0195466. DOI: 10.1371/journal.pone.0195466.
- [15] 徐志, 仲鹤鹤, 向浩, 等. 股骨干骨折3种不同固定方式的有限元分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2022, 26 (33): 5271–5277. DOI: 10.12307/2022.717.
- Xu Z, Zhong HH, Xiang H, et al. Finite element analysis of three internal fixation methods for treating femoral shaft fracture [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2022, 26 (33): 5271–5277. DOI: 10.12307/2022.717.
- [16] 田园, 梁慧敏, 程秀玲, 等. 侧卧角度对骶尾部软组织压力的有限元分析 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2023, 31 (6): 533–537. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.06.11.
- Tian H, Liang HM, Cheng XL, et al. A finite element analysis on sacrococcygeal soft tissue pressure at different lateral positioning angles [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2023, 31 (6): 533–537. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.06.11.
- [17] 熊华章, 斯海波, 吴元刚, 等. 有限元分析在胫骨高位截骨治疗膝内侧间室骨关节炎的研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (15): 1377–1380. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.15.07.
- Xiong HZ, Si HB, Wu YG, et al. Research progress of finite element analysis on high tibial osteotomy for treatment of the medial knee compartmental osteoarthritis [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2022, 30 (15): 1377–1380. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.15.07.
- [18] Taylor M, Prendergast PJ. Four decades of finite element analysis of orthopaedic devices: Where are we now and what are the opportunities [J]. *J Biomech*, 2015, 48 (5): 767–778. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2014.12.019.
- [19] 江仁兵, 董磊, 刘启震, 等. 胸腰段血管瘤有限元模型建立及生物力学分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2017, 21 (11): 1753–1757. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.2017.11.020.
- Jiang RB, Dong L, Liu QZ, et al. Finite element model establishment of thoracolumbar hemangioma and biomechanical analysis [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2017, 21 (11): 1753–1757. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.2017.11.020.
- [20] 郑利钦, 林梓凌, 何祥鑫, 等. 有限元法分析不同侧方跌倒角度下股骨颈骨折裂纹扩展的断裂力学特征 [J]. *中国组织工程研究*, 2019, 23 (8): 1203–1207. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.1055.
- Zheng LQ, Ling ZL, He XX, et al. A finite element analysis on crack extension on femoral neck simulated by multi-axial sideways fall based on fracture mechanics [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2019, 23 (8): 1203–1207. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.1055.
- [21] 王明明, 张中, 孙建华, 等. 胫骨远端骨折伴软组织损伤3种不同微创固定方式的有限元分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2024, 28 (6): 879–885. DOI: 10.12307/2023.797.
- Wang MM, Zhang Z, Sun JH, et al. Finite element analysis of three different minimally invasive fixation methods for distal tibial fractures with soft tissue injury [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2024, 28 (6): 879–885. DOI: 10.12307/2023.797.
- [22] Heintz S, Gutierrez-Farewik EM. Static optimization of muscle forces during gait in comparison to EMG-to-force processing approach [J]. *Gait Posture*, 2007, 26 (2): 279–288. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2006.09.074.
- [23] 汪亮, 黄朝朝, 于娇娜, 等. 桥接系统混棒与双棒结构治疗股骨及胫骨骨折的生物力学特点 [J]. *中国组织工程研究*, 2020, 24 (6): 888–892. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.1189.
- Wang L, Hang CC, Yu QN, et al. Biomechanical characteristics of bridge-link type combined internal fixation system with mixed-rod versus double-rod in the treatment of femoral and tibial fractures [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2020, 24 (6): 888–892. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.1189.
- [24] 胡缜玉. 现代骨科基础与临床 [M]. 北京: 人民卫生出版社. 2006: 76.
- Hu Z. *Modern orthopaedics basic and clinical* [M]. Beijing: People's Medical Press. 2006: 76.
- [25] Damm P, Reitmaier S, Hahn S, et al. In vivo hip and lumbar spine implant loads during activities in forward bent postures [J]. *J Biomechanics*, 2020, 102: 109517. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2019.109517.

(收稿:2024-01-23 修回:2024-09-02)

(同行评议专家:蔡贤华,张立峰,张元智,成永忠)

(本文编辑:宁桦)