

文章编号:1004-7220(2020)05-0401-07

新型组合式锁定钢板治疗 Sanders II 型及 III 型跟骨骨折的有限元分析

郭万恺¹, 崔 峯², 李昊伟², 王秀会²

(1. 贵州医科大学, 贵阳 550004; 2. 上海健康医学院附属周浦医院 骨科, 上海 201318)

摘要:目的 研究已投入临床中使用的长型组合式锁定钢板与新型短型组合式锁定钢板治疗 Sanders IIa、IIb、IIIab 型跟骨骨折的骨折端应力分布规律及生物力学的稳定性。方法 建立 Sanders IIa、IIb、IIIab 型跟骨骨折三维模型, 同时模拟跟骨在中立位及背伸 20° 时的受力情况。参照人体标本实物形态, 施加 500 N 垂直轴向载荷, 研究骨折块在受力作用下的位移及相对位移, 并分析骨组织和内固定的受力情况。结果 长、短型组合式锁定钢板固定 Sanders IIa、IIb 型跟骨骨折中, 钢板及跟骨应力集中位置基本相同, 两种钢板固定同一种类型跟骨骨折的最大应力差均小于 5 MPa, 骨折模型最大位移无明显差异。长、短型组合式锁定钢板固定 Sanders IIIab 型跟骨骨折中, 前臂钢板螺钉最高应力集中, 有金属疲劳风险, 最大应力差达 12 MPa, 跟骨最大位移达 9 μm。结论 长、短型组合式锁定钢板治疗 Sanders IIa、IIb 型跟骨骨折无明显差异, 而 Sanders IIIab 型跟骨骨折治疗中, 长型组合式锁定钢板的固定效果优于短型组合式锁定钢板。

关键词:跟骨骨折; Sander 分型; 骨折; 内固定; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2020.05.003

Finite Element Analysis on Sanders II and III Calcaneal Fractures Treated with the Novel Composite Locking Plate

GUO Wankai¹, CUI Yin², LI Haowei², WANG Xiuhui²

(1. Guizhou Medical University, Guiyang 550004, China; 2. Department of Orthopedics, Zhoupu Hospital Affiliated to Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 201318, China)

Abstract: Objective To study the stress distribution and biomechanical stability of the long-type composite locking plate already used in clinic practice and the novel short-type composite locking plate for treating Sanders type IIa, IIb and IIIab calcaneal fractures. **Methods** The three-dimensional (3D) models of Sanders type IIa, IIb and IIIab calcaneal fractures were established, and the force conditions of calcaneus in neutral standing position and under 20° dorsal extension were simulated. By referring to the physical form of human specimens, 500 N vertical axial load was applied, so as to study the displacement and relative displacement of the fracture block under the force, and the force conditions of bone tissues and internal fixation were analyzed. **Results** For Sanders type IIa, IIb calcaneal fractures treated with long-type and short-type composite locking plates, the stress concentration positions of the plates and calcaneal fractures were basically the same. The maximum stress difference of the two plates for fixing calcaneal fractures with the same type was smaller than 5 MPa, and there

收稿日期:2019-10-14; 修回日期:2019-12-06

基金项目:上海市浦东新区卫生系统重点学科群建设(PWZxq2017-12),上海市医学重点专科建设项目(ZK2019B-05)

通信作者:王秀会,主任医师,E-mail: zpyykwxh@sina.cn

was no significant difference in the maximum displacement of the fracture models. For Sanders type IIIab calcaneal fractures treated with long-type and short-type composite locking plates, the maximum stress concentration occurred in the forearm of plate screws, indicating the risk of metal fatigue. The maximum stress difference was up to 12 MPa, and the maximum calcaneal displacement was up to 9 μm . **Conclusions** The long-type and short-type composite locking plates showed no significant differences in treating Sanders type IIa, IIb calcaneal fractures. For fixing Sanders type IIIab calcaneal fractures, the long-type composite locking plate was superior to the short-type composite locking plate.

Key words: calcaneal fracture; Sander classification; fracture; internal fixation; finite element analysis

跟骨骨折是最常见的足跗骨骨折,占全身骨折1%~2%,占足部骨折60%,多见于年轻男性工作人群,多因高处坠落、足跟部遭受严重撞击所致^[1]。约有75%跟骨骨折为关节内骨折,治疗不当会对患者的预后产生不良影响,给患者今后的生活带来不便^[2]。多数骨科医生认为,Sanders分型对跟骨骨折的治疗选择及预后具有较高的临床价值^[3]。Sanders分型是通过CT检查将跟骨骨折分为I~IV型,其中Sanders II、III型最为常见,目前临床上多采用经跗骨窦口切开复位内固定的微创方式进行治疗。

有限元分析方法是一种重要的生物力学研究工具,可以计算复杂形态物体在不同载荷下的应力、应变和位移^[4]。王一民等^[5]通过有限元分析对锁定钢板治疗Sanders IV型跟骨骨折的手术方式进行改良,有效降低术后创伤性关节炎的发病风险。本课题组对已投入临床用于治疗跟骨骨折的条形组合式钢板进行改良,通过缩短钢板长度,进一步优化手术的微创性,但缩减钢板长短会导致内固定受力的改变。因此,本文通过建立跟骨关节内骨折有限元模型,探讨Sanders II、III型跟骨骨折骨折端的应力分布规律及生物力学稳定性。

1 材料与方法

1.1 对象

选择1名28岁健康男性志愿者,身高176 cm,体质量69 kg,既往无足踝病史,X线及CT检查未见足跟部退化或畸形。应用美国GE公司64排螺旋CT,沿人体横断面以层距0.6 mm、层厚0.6 mm自上而下对健康男性志愿者足部进行螺旋扫描,得到337张CT原始图片,筛选后采用有效的84张图片进行建模。

1.2 实体模型建立

将筛选后的CT图片以DICOM格式导入Mimics 20.0软件,根据软组织和骨骼不同灰度值,经阈值、增长和蒙版等步骤构建初步跟骨模型,然后以点云文件格式导入Geomagic Studio 12.0软件对模型进行点、多边形和成型阶段的处理,对模型进行去噪及平滑等操作。将数据转换为step格式导入三维建模软件UG 12.0中,在跟骨模型冠状面上选择跟骨后关节面最宽处,平均划分3个部分,分别在1/3、2/3标记为A和B,同时将距骨下边线标记为C,沿后关节面做3条平行线,对跟骨模型进行切割处理,建立3组模型:A组为跟骨骨折Sanders IIa型;B组为跟骨骨折Sanders IIb型;C组为跟骨骨折Sanders IIIab型。跟骨钢板模型选用自行设计并已投入临床使用的长型(Long)组合式锁定钢板(上海浦卫医疗器械厂有限公司,专利号:ZL201420269654.X)和改良后的短型(Short)组合式锁定钢板。两种钢板均分别由前臂条形钢板和后臂条形钢板组装而成,厚度1.5 mm,宽度13 mm,前后臂均有3孔。长型组合式锁定钢板前臂长42 mm,后臂长39 mm;短型组合式锁定钢板前臂长42 mm,后臂长29 mm。每块板分为结合端和尾端,外形设计为长方状,尾端为锥形。结合端一侧板为带有沟槽,此沟槽具有固定的角度(130°);另一侧板为园状或方形,恰能够嵌入上述板结合端的沟槽内,由螺钉固定旋紧而在微创切口完成组合(见图1)。在三维建模软件UG中对跟骨模型进行钢板的装配。

1.3 有限元模型建立

将装配好的模型导入HyperMesh中建立有限元模型,其中跟骨网格分为皮质骨(厚度2 mm)和松质骨。跟骨为四面体网格,钢板为六面体网格。骨

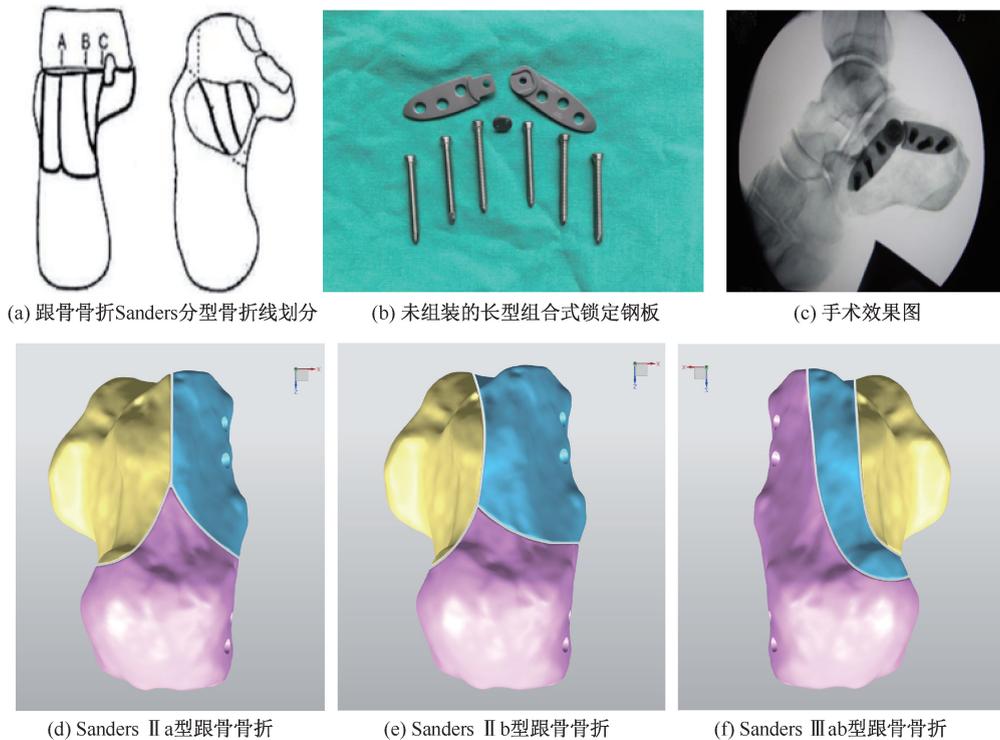


图 1 实体模型建立

Fig.1 Establishment of the entity model (a) Dividing the fracture line of Sanders type calcaneal fracture, (b) Unassembled long composite locking plate, (c) Operative effect diagram, (d) Sanders IIa calcaneal fracture, (e) Sanders IIb calcaneal fracture, (f) Sanders IIIab calcaneal fracture

组织材料属性参数如下:皮质骨弹性模量 10 GPa,泊松比 0.3;松质骨弹性模量 1.45 GPa,泊松比 0.2。钢板与螺钉的材料为钛合金,弹性模量 200 GPa,泊松比 0.28^[4-5]。

1.4 模型的限制及加载

固定跟距关节及跟骰关节最低点各方向自由度,模拟单腿站立状态。站立位和背屈位均设定从距骨垂直向下均匀分布加载 500 N,模拟正常体质量。

2 结果

2.1 跟骨骨折有限元模型

长型组合式锁定钢板固定的 Sanders IIa 型跟骨骨折,生成实体单元 245 269 个,节点 628 322 个;短型组合式锁定钢板固定的 Sanders IIa 型跟骨骨折,生成实体单元 252 059 个,节点 644 662 个。

长型组合式锁定钢板固定的 Sanders IIb 型跟骨骨折,生成实体单元 255 483 个,节点 653 477 个;短

型组合式锁定钢板固定的 Sanders IIb 型跟骨骨折,生成实体单元 254 991 个,节点 651 950 个。

长型组合式锁定钢板固定的 Sanders IIIab 型跟骨骨折,生成实体单元 255 483 个,节点 653 477 个;短型组合式锁定钢板固定的 Sanders IIIab 型跟骨骨折,生成实体单元 254 991 个,节点 651 950 个(见表 1)。

2.2 跟骨及内固定的应力分布与位移

由图 2 可知,长、短型组合式锁定钢板固定治疗 Sanders IIa 型跟骨骨折的效果相似。两组钢板在站立位和背屈位应力均主要集中于前臂钢板 Y 型结点的钉板结合部,且多位于钢板的水平分支方向,载距突螺钉也承受较大的应力,两组钢板后臂以及跟骨骨骼整体应力分布较均匀,跟骨最大应力部位位于跟骨骨折线最远端,但最大应力点较小,对整体骨骼应力无明显影响。长型组合式锁定钢板治疗跟骨骨折中,跟骨骨折线交叉点位移距离最大;短型组合式锁定钢板固定治疗跟骨骨折的情

表 1 长、短型组合式锁定钢板固定跟骨骨折内固定应力与骨折块移位对比

Tab.1 Comparison of internal fixation stress and displacement of fracture block for calcaneal fractures with long-type composite locking plate and short-type composite locking plate

参数		Sanders IIa		Sanders IIb		Sanders IIab	
		长板	短板	长板	短板	长板	短板
站立位最大应力/MPa	接骨板	36.36	35.02	69.43	73.88	47.85	59.77
	跟骨	121.80	124.31	48.81	52.04	62.21	71.29
背屈位最大应力/MPa	接骨板	11.36	11.38	27.63	30.85	21.91	29.09
	跟骨	53.75	54.37	24.02	25.08	30.48	34.28
站立位最大位移/ μm	跟骨	27.27	28.99	83.29	84.39	80.14	89.08
背屈位最大位移/ μm	跟骨	13.15	14.92	37.09	39.04	41.04	42.41

况中,最易发生位移的部位集中在跟骨底面内侧端骨折线最远处,但两组骨折块最大移位距离相似。

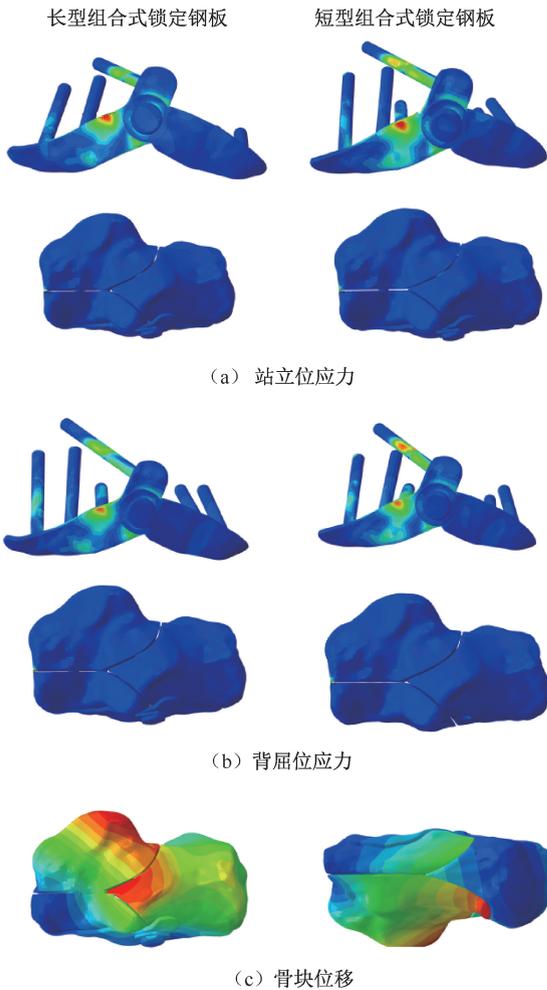


图 2 长、短型组合式锁定钢板固定治疗 Sanders IIa 型跟骨骨折云图

Fig.2 Nephogram of Sanders IIa calcaneal fracture treated with long-type and short-type composite locking plate fixation (a) Stress under standing position, (b) Stress under dorsiflexion, (c) Bone mass displacement

由图 3 可知,长、短型组合式锁定钢板固定治疗 Sanders IIb 型跟骨骨折的效果相似。两种内固定在站立位和背屈位应力主要集中于前臂钢板 Y 型结点的钉板结合部,且多位于钢板的水平分支方向,与治疗 Sanders IIa 型跟骨骨折应力分布相似,分布更加均匀,但内固定上所承受的最大应力高于 Sanders IIa 型跟骨骨折。跟骨整体承受的应力分布均匀,骨骼所承受的最大应力小于两组钢板治疗 Sanders IIa 型跟骨骨折。两组钢板治疗下最大位移处于跟骨载距,从内而外逐渐降低,骨折块移位差仅为 1.1 μm ,与 A 组模型最大位移差约为 60 μm 。

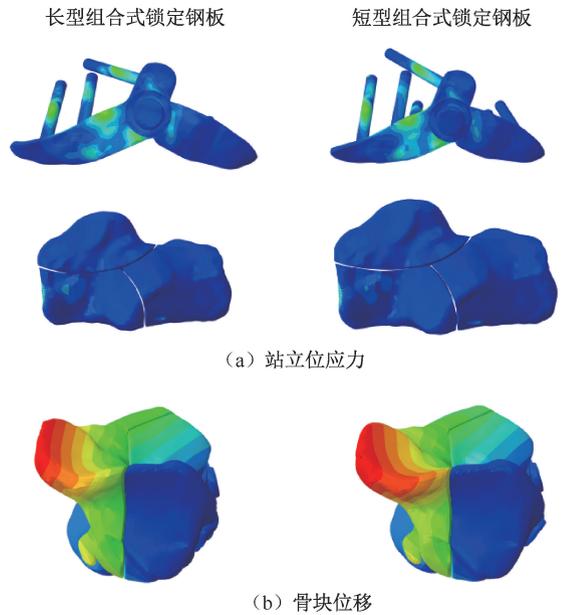


图 3 长、短型组合式锁定钢板固定治疗 Sanders IIb 型跟骨骨折云图

Fig.3 Nephogram of Sanders IIb calcaneal fracture treated with long-type and short-type composite locking plate fixation (a) Stress under standing position, (b) Bone mass displacement

由图 4 可知,长型组合式锁定钢板治疗 Sanders IIIab 型跟骨骨折较短型组合式锁定钢板固定效果更佳。两组模型在站立位和背屈位应力主要集中于前臂钢板最远端的螺钉中部,短型组合式锁定钢板内固定模型及跟骨骨骼在站立位和背屈位的最大应力均高于长型组合式锁定钢板内固定模型,同时短型组合式锁定钢板内固定模式下的骨折块移位程度大于长型组合式锁定钢板内固定模式,最大位移约为 90 μm ,位移分布从载距突由内向外逐渐降低,分布程度与 Sanders IIb 型跟骨骨折相似。

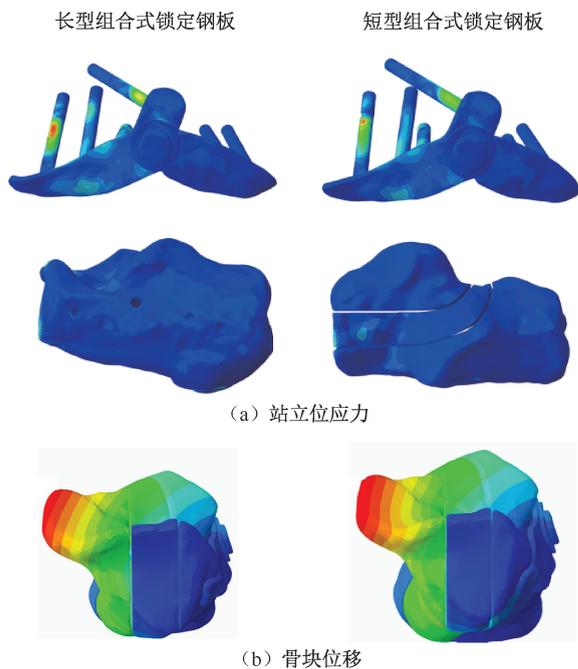


图 4 长、短型组合式锁定钢板固定治疗 Sanders IIIab 型跟骨骨折云图

Fig.4 Nephogram of Sanders IIIab calcaneal fracture treated with long-type and short-type composite locking plate fixation (a) Stress under standing position, (b) Bone mass displacement

3 讨论与结论

有限元分析是根据运动学与动力学特性,对连续力学及物理问题的一种新的数值求解方法,被广泛用于骨科生物力学研究^[6]。结合螺旋 CT 的应用,可以更好地采集数据,对复杂的足部结构进行精细扫描,根据跟骨的生物力学特性建立有限元模型,还可通过重建软骨、韧带等组织,进一步建立较

高准确性、真实性的实验模型^[7]。

跟骨独特的解剖结构及其特殊性,导致皮肤软组织的并发症一直是困扰临床医生的问题。刘亮等^[8]对比治疗 89 例 Sanders II 型跟骨骨折患者后,提出经皮撬拨复位空心钉内固定治疗 Sanders II、III 型跟骨骨折,比切开复位钢板螺钉内固定的手术方式,具有缩短手术时间和降低软组织破坏等优势。李景光等^[9]研究表明,微创空心钉的方式比钢板固定具有周围软组织创伤小的优势。但倪明等^[10]研究认为,尽管螺钉固定治疗跟骨骨折具有良好的临床效果和较小的软组织并发症,但是否具有足够的固定强度尚存在争议。

对于 Sanders II 型以上严重跟骨骨折,目前多数医生主张采用切开复位锁定钢板治疗^[10]。传统的手术方式采用跟骨外侧“L”形切口,优点是允许在直视下显露、重建及恢复整个跟骨外侧壁及其距下关节后关节面和跟骰关节。但跟骨周围软组织覆盖少,皮下动脉丛血管数目少,血液循环较差。而跟骨骨折本身属高能量损伤,骨折部位出血较多,易造成皮下组织肿胀、瘀血,影响骨折局部的皮肤血供。以往传统手术中外侧“L”型切口容易损伤腓动脉及其分支供应的足外侧血供,且术中大范围的皮下剥离,进一步影响了皮肤血供^[11]。Palmer 等^[12]提出的跗骨窦切口为外踝下跗骨窦水平 6 cm 弧形切口,平行于腓骨长短肌肌腱,可以有效减少软组织剥离,降低术后并发症的发生几率。

本课题组在临床上使用跗骨窦切口长型组合式锁定钢板治疗跟骨骨折取得较好疗效^[13]。但部分老年病人后跟部软组织条件差,皮肤紧贴钢板后缘,皮下可明显触及钢板,容易引起局部炎症甚至皮肤破溃。同时,临床手术中如果能够缩短钢板长度,可进一步减少软组织破坏。因此,本文将已投入临床使用的组合式锁定钢板的后臂钢板长度进行缩短。有限元分析结果表明,Sanders IIa 型跟骨骨折模型中,最大应力均分布于前臂钢板 Y 型结点的钉板结合部,后臂所受应力分布均匀,打入载距突的螺钉虽然承担较高的应力,但应力分布较为均匀,模型中载距突的螺钉均承受较大应力,无明显集中现象。同时,两组内固定承受的最大应力均小于 Sanders IIb 型及 Sanders IIIab 型跟骨骨折模型中内固定所承受的最大应力。Sanders IIb 型跟骨骨

折模型中,内固定应力同样集中于前臂钢板 Y 型结点的钉板结合部,但分布更加均匀,两种内固定承受的应力相近,说明长、短型组合式锁定钢板分别治疗 Sanders IIa、IIb 型跟骨骨折中效果无明显差异。Sanders IIa、IIb 及 Sanders IIIab 型跟骨骨折模型中跟骨的应力分布均匀,虽然 Sanders IIa 型跟骨骨折模型中最大应力超过 100 MPa,但最大应力部位位于跟骨骨折线最前缘,范围小,对于治疗效果无明显影响。想要骨折得到较好的愈合,应使骨折周围的应力分布尽可能接近骨骼的应力分布情况^[14-16]。同时,内固定下跟骨骨折块移位均无较大差异,长、短型组合式钢板后臂在 Sanders IIa、IIb 型跟骨骨折中受力均匀,故对缩短钢板后臂长度在治疗 Sanders II 型两种跟骨骨折时无明显影响。

长、短型组合式锁定钢板治疗 Sanders IIIab 型跟骨骨折时,两种钢板前臂最远端的螺钉承受最大应力,应力集中在螺钉中段,长、短型组合式钢板螺钉最大应力差达到 12 MPa,较 Sanders IIa 型及 Sanders IIb 型跟骨骨折的应力差有明显上升趋势。由距骨垂直向下传导的压力,首先集中在距下关节及载距突,载距突所受压力通过螺钉由内向外传导至钢板,距下关节面所受应力向下传导至钢板,所形成的应力通过内固定向跟骨前后两侧传导,形成较长的力臂^[17-18]。本文认为,Sanders III 型跟骨骨折的骨折粉碎程度严重,骨折线集中在跟骨体前部,导致张应力增加,使得钢板螺钉所受到的应力重心前移,而由于短型组合式锁定钢板进一步缩减了后臂长度,使得力臂进一步缩短,故最大应力差出现较明显的增高趋势,与骨折粉碎的严重程度成正比。因此,长、短型组合式锁定钢板治疗 Sanders IIa、IIb 型跟骨骨折无明显差异,而 Sanders IIIab 型跟骨骨折治疗中,长型组合式锁定钢板的固定效果优于短型组合式锁定钢板。

有限元分析虽然可以模拟复杂的足部结构,但仍存在局限性。所有三维有限元模型在钢板加载上都不可避免地需要根据其研究目的和条件进行适当的假设和简化^[19]。人体结构的差异无法仅靠 CT 数据建模,也无法精确模拟人体足部动态的受力变化。因此,要精确分析内固定对骨骼应力分布的影响,还需要通过大量的生物力学研究得到进一步证实,为临床治疗提供依据。

参考文献:

- [1] LIM EV, LEUNG JP. Complications of intraarticular calcaneal fractures [J]. Clin Orthop Relat Res, 2001, 391: 7-16.
- [2] PAN M, CHAI L, XUE F, *et al.* Comparisons of external fixator combined with limited internal fixation and open reduction and internal fixation for Sanders type 2 calcaneal fractures [J]. Bone Joint Res, 2017, 6(7): 433-438.
- [3] SANDERS R, VAUPEL ZM, ERDOGAN M, *et al.* The operative treatment of displaced intra-articular calcaneal fractures (DIACFs): Long term (10-20 years) results in 108 fractures using a prognostic CT classification [J]. J Orthop Trauma, 2014, 28(10): 551-563.
- [4] MING N, XIAO HW, JIONG M, *et al.* Primary stability of absorbable screw fixation for intra-articular calcaneal fractures: A finite element analysis [J]. J Med Biol Eng, 2015, 35(2): 236-241.
- [5] 王一民, 张晟, 王博炜, 等. 解剖型钢板与锁定钢板固定 Sanders IV 型跟骨骨折的有限元分析 [J]. 中华创伤骨科杂志, 2013, 21(3): 602-607.
- [6] GISLASON MK, STANSFIELD B, NASD DH. Finite element model creation and stability considerations of complex biological articulation: The human wrist joint [J]. Med Eng Phys, 2010, 32(5): 523-531.
- [7] 温建民. 基于 CT 图像外翻足有限元模型的建立与临床意义 [J]. 中国矫形外科杂志, 2012, 20(11): 1026-1029.
- [8] 刘亮, 周恩瑜, 陈宇. 经皮撬拨复位空心螺钉内固定 Sanders II、III 型跟骨骨折 [J]. 局解手术学杂志, 2018(8): 581-585.
- [9] 李景光, 陈先进, 吕维宝, 等. 经皮撬拨复位空心螺钉与切开复位钢板内固定治疗 Sanders II、III 型跟骨骨折的比较 [J]. 中国矫形外科杂志, 2016, 24(16): 1449-1455.
- [10] 倪明, 牛文鑫, 梅炯, 等. 交叉螺钉与钢板内固定治疗 Sander III 型跟骨骨折的有限元分析 [J]. 医用生物力学, 2015, 30(6): 501-505.
- [11] NI M, NIU WX, MENG J, *et al.* Finite element analysis on Sander III calcaneal fractures fixed by crossing screws or steel plate [J]. J Med Biomech, 2015, 30(6): 501-505.
- [12] SCHON LC, WISBECK JM. Minimally invasive plate fixation of calcaneus fractures [J]. Tech Orthop, 2012, 27(2): 118-125.
- [13] PALMER I. The mechanism and treatment of fractures of the calcaneus [J]. J Pediatr Orthop, 1948, 30(1): 2-8.
- [14] WANG Z, WANG XH, LI SL, *et al.* Minimally invasive (sinus tarsi) approach for calcaneal fractures [J]. J Orthop Surg Res, 2016, 11(1): 164-173.
- [15] ROGGE R. An analysis of bone stress and fixation stability

- using a finite element model of simulated distal radius fractures [J]. *J Hand Surg*, 2002, 27(1): 86-92.
- [15] 李昊, 李瑞欣, 冷雪, 等. 皮质骨中骨单元应力集中效应的有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2017, 32(6): 500-505.
LI H, LIU RX, LENG X, *et al.* Finite element analysis on the stress concentration effect of osteons in cortical bone [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(6): 500-505.
- [16] 罗依雪, 罗陈宇, 蔡宇辉, 等. 高冲击运动时不同着陆姿势对骨密度和骨矿含量的影响[J]. *医用生物力学*, 2018, 33(2): 168-173.
LUO YX, LUO CY, CAI YH, *et al.* Effects of different landing postures on bone mineral density and content during high-impact exercises [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(2): 168-173.
- [17] 刘立峰, 蔡锦方. 不同步态位相跟、距骨应力分布的三维有限元分析[J]. *第二军医大学学报*, 2003, 24(9): 1006-1009.
- [18] 戴尅戎. 骨折内固定与应力遮挡效应[J]. *医用生物力学*, 2000, 15(2): 69-71.
DAI KR. Fracture fixation and stress shielding [J]. *J Med Biomech*, 2000, 15(2): 69-71.
- [19] 章浩伟, 孙洋洋, 刘颖, 等. 基于三维膝-踝-足有限元模型的足跟痛足底压力生物力学分析[J]. *医用生物力学*, 2017, 32(5): 436-441.
ZHANG HW, SUN YY, LIU Y, *et al.* Biomechanical analysis of plantar pressure of heel pain based on 3D knee-ankle-foot finite element model [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(5): 436-441.