

# 两种方式固定 Sanders II 型跟骨骨折后的力学稳定性

https://doi.org/10.12307/2022.162

温明韬<sup>1</sup>, 梁学振<sup>1</sup>, 李嘉程<sup>1</sup>, 许波<sup>1,2</sup>, 李刚<sup>1,2</sup>

投稿日期: 2021-04-26

送审日期: 2021-04-28

采用日期: 2021-06-03

在线日期: 2021-08-04

中图分类号:

R459.9; R363; R683

文章编号:

2095-4344(2022)06-00838-05

文献标识码: A

## 文章快速阅读:

### 文章特点一

△ 有限元分析能够处理结构复杂、形态不规则的 Sanders II 型跟骨骨折的内固定三维模型, 可以反映内固定模型各部分的应力、应变情况;  
△ 通过对两种内固定模型的有限元仿真和生物力学分析, 为撬拨复位空心螺钉内固定及锁定钢板内固定治疗跟骨骨折的生物力学基础提供参考。

### 三维建模:

选取 1 例正常跟骨的 CT 数据建立跟骨三维模型并完成验证。

### 模型装配:

在 Solidworks 中分别完成两种内固定与跟骨三维模型装配。

### 分析设置:

在 ANSYS 中完成材料属性、网格划分等参数设置, 运算求解。

### 结果:

对比同工况下两种内固定方式固定 Sanders II 型跟骨骨折的最大应力及位移。

### 结论:

空心螺钉内固定可以获得良好的固定稳定性, 相较钢板内固定具有一定的优势。

## 文题释义:

**有限元分析:** 运用数学近似的方法对真实物理系统进行模拟。通过计算机运算模拟将载荷、形态、材料结构和力学性能较为复杂的整体划分为有限个简单的单元, 进而充分反映整体内外部应力、应变、位移等力学参数的变化。

**跟骨骨折 Sanders 分型:** 跟骨骨折以足跟部剧烈疼痛、肿胀和瘀斑明显、足跟不能着地行走及跟骨压痛为主要表现。Sanders 分型基于 CT 冠状位扫描图像, 在 CT 冠状位上选择跟骨后距关节面最宽处由外向内分为 3 份, 分别代表骨折线的位置。

## 摘要

**背景:** 对于 Sanders II 型跟骨骨折, 锁定钢板内固定的“L 型”切口易发生皮瓣坏死等并发症, 而撬拨复位后空心螺钉内固定可以很好地避免此问题, 但仍然缺乏内固定效果的评价。

**目的:** 基于有限元分析方法, 比较研究 Sanders II 型跟骨骨折 2 种固定方式的固定效果与力学稳定性。

**方法:** 筛选 1 名男性志愿者 (25 岁, 身高 175 cm, 体质量 75 kg), 应用断层 CT 对胫骨中段至全足行全层连续扫描。通过 CT 扫描数据, 建立完整跟骨的三维有限元分析模型。模拟 Sanders II 型跟骨骨折, 分别行锁定钢板固定 (锁定钢板组) 及撬拨复位后空心螺钉加压固定 (空心螺钉组)。对两组模型施加相同约束与载荷下比较 2 种固定方式的应力分布、位移情况及骨折块位移表现。

**结果与结论:** ① 空心螺钉内固定的应力集中于骨折线接触附近, 最大 Von Mises 应力达 53.948 MPa, 横向空心螺钉相较纵向螺钉位移较大, 最大位移达 0.175 37 mm; 锁定钢板内固定应力与位移均集中于钢板中部螺钉孔附近, 其最大 Von Mises 应力达 129.95 MPa; 骨折线位移空心螺钉组 (0.015 77 mm) 小于锁定钢板组 (0.021 03 mm); ② 两组内固定的最大应力均低于材料的屈服强度; ③ 两组跟骨模型在距下关节附近发生最大位移; ④ 结果表明, 空心螺钉与锁定钢板内固定用于治疗 Sanders II 型跟骨骨折均具有良好的稳定性, 且撬拨复位空心螺钉内固定具有减少术后并发症发生等优点, 是 Sanders II 型跟骨骨折较为推荐的内固定方式。

**关键词:** 跟骨骨折; Sanders II 型骨折; 骨折内固定; 有限元分析; 生物力学

## Mechanical stability of Sanders II type calcaneal fractures fixed by two internal fixation methods

Wen Mingtao<sup>1</sup>, Liang Xuezhen<sup>1</sup>, Li Jiacheng<sup>1</sup>, Xu Bo<sup>1,2</sup>, Li Gang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, Shandong Province, China; <sup>2</sup>Department of Microscopic Orthopedics, Affiliated Hospital of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250014, Shandong Province, China

Wen Mingtao, Master candidate, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, Shandong Province, China

**Corresponding author:** Li Gang, MD, Professor, Doctoral supervisor, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, Shandong Province, China; Department of Microscopic Orthopedics, Affiliated Hospital of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250014, Shandong Province, China

## Abstract

**BACKGROUND:** For Sanders type II calcaneal fractures, the “L-shaped” incision with locking plate internal fixation often causes complications such as necrosis of the surgical incision flap. The internal fixation with hollow screws after prying and resetting can well avoid this problem, but there is still a lack of evaluation of the effect of internal fixation.

<sup>1</sup> Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355; <sup>2</sup> Shandong University of Traditional Chinese Medicine Affiliated Hospital Microscopic Orthopedics, Jinan 250014

**First author:** Wen Mingtao, male, 1995 year born, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, Shandong Province, China, Master candidate, mainly engaged in the basic and clinical research of bone and joint trauma.

**Corresponding author:** Li Gang, male, 1963 year born, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, Shandong Province, China, Professor, Doctoral supervisor, Shandong University of Traditional Chinese Medicine Affiliated Hospital Microscopic Orthopedics, Jinan 250014, Shandong Province, China

https://orcid.org/0000-0002-1654-2264 (温明韬)

**基金资助:** 济南市科技计划项目 (201907008), 项目负责人: 李刚

**引用本文:** 温明韬, 梁学振, 李嘉程, 许波, 李刚. 两种方式固定 Sanders II 型跟骨骨折后的力学稳定性 [J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(6):838-842.



**OBJECTIVE:** To compare and study the fixation effect and mechanical stability of the two fixation methods for Sanders II type calcaneal fractures based on the finite element analysis method.

**METHODS:** One male volunteer (25 years old, height 175 cm, weight 75 kg) was screened, and a full-thickness continuous scan was performed from the middle part of the tibia to the whole foot by tomographic CT scan. Based on CT scan data, a complete three-dimensional finite element analysis model of the calcaneus was established. The Sanders II type calcaneal fracture was simulated, and locking plate fixation (locking plate group) and hollow screw compression fixation (hollow screw group) were performed after prying reduction. The stress distribution, displacement and fracture displacement performance of the two fixation methods were compared under the same constraints and loads on the two sets of models.

**RESULTS AND CONCLUSION:** (1) The stress of hollow screw internal fixation was concentrated near the fracture line contact, and maximum Von Mises stress reached 53.948 MPa. The displacement of the horizontal hollow screw was larger than that of the longitudinal screw, and the maximum displacement was up to 0.175 37 mm. The fixed stress and displacement of the locking steel plate were concentrated near the screw hole in the middle of the steel plate. The maximum Von Mises stress reached 129.95 MPa. The fracture line displacement of the hollow screw group (0.015 77 mm) was smaller than that of the locking plate group (0.021 03 mm). (2) The maximum stress of the two sets of internal fixation was lower than the yield strength of the material. (3) The two groups of calcaneal models had the largest displacement near the subtalar joint. (4) It is concluded that hollow screws and locking plate internal fixation for the treatment of Sanders II type calcaneal fractures have good stability. Prying reduction hollow screw internal fixation has the advantages of reducing postoperative complications. It is the recommended method of internal fixation for Sanders II type calcaneal fractures.

**Key words:** calcaneal fracture; Sanders type II fracture; internal fracture fixation; finite element analysis; biomechanics

**Funding:** the Science and Technology Plan Project of Jinan, No. 201907008 (to LG)

**How to cite this article:** WEN MT, LIANG XZ, LI JC, XU B, LI G. Mechanical stability of Sanders II type calcaneal fractures fixed by two internal fixation methods. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2022;26(6):838-842.

## 0 引言 Introduction

跟骨骨折一般由高处坠落等轴向应力损伤导致，占全身骨折的 1%-2%，是临床常见骨折之一<sup>[1]</sup>。约有 75% 的跟骨骨折涉及关节面，若得不到适当及时的治疗极易造成跟距关节继发创伤性关节炎，后期将伴有足跟部疼痛、行走功能障碍等后遗症，对患者的生活质量及心理健康造成了严重影响<sup>[2]</sup>。因此，为提高跟骨骨折的愈合率及避免手术相关并发症的发生，探讨不同内固定方式治疗跟骨骨折的治疗效果成为骨科临床治疗的研究方向。

有限元分析是运用有限元方法分析动静态物理系统的方法。基于有限元的方法，将物体分散为有限数目的单元构成的集合体，各个单元通过定义接触在节点上相互连接，通过运算各个单元来求解整体的未知变量。在结合生物力学、计算力学等仿真类似技术的基础上，有限元分析得到了广泛的进步与发展，在骨科生物力学领域成为了有效的计算实验方法<sup>[3-10]</sup>。

通过对人体结构的仿真与数字建模、模型的数据计算与处理等手段，可以有效地分析计算人体结构的应力、应变、强度与稳定效果。对于复杂情况下的分析计算，通过简化模型的方法处理数据量过大的复杂问题，展现出了强大的处理能力。

为了探讨跟骨骨折微创与传统治疗方法的治疗效果与生理载荷下的力学稳定性，该研究通过建立跟骨关节内骨折的三维有限元模型，对 Sanders II 型跟骨骨折行锁定钢板内固定与撬拨复位空心螺钉加压固定的固定效果及力学稳定性进行分析比较。

## 1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 基于有限元分析方法进行 CT 数据分析。

1.2 时间及地点 2020 年 12 月至 2021 年 3 月在山东中医药大学骨科教研室完成。

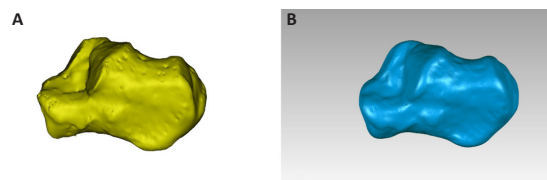
1.3 对象 以 1 名男性志愿者 (25 岁，身高 175 cm，体质量 75 kg) 为研究对象，排除足跟部病变、畸形等异常情况。该志愿者对实验方案知情同意，且得到医院伦理委员会批准。

1.4 实验仪器和相关软件 德国西门子 CT(SOMATOM Definition); 医学影像学软件 Mimics 21.0(Materialise 公司, 比利时); 三维结构优化软件 Geomagic Studio 2017(Rainrrop 公司, 美国); Solidworks 2018 软件 (Dassartl Systemes SA 公司, 美国); 力学分析软件 Anasys 21.0(ANSYS 公司, 美国)。

### 1.5 方法

1.5.1 数据获取及三维建模 应用螺旋 CT 对志愿者胫骨中段至全足部行全层连续扫描，电压为 120 kV，电流为 150 mA，扫描层厚为 0.5 mm，获得 512×512 矩阵的 CT 图像数据 (Dicom 格式)。

获得数据导入 Mimics 21.0 软件，通过阈值分割、区域增长及三维重建等蒙版编辑操作，初步获得正常跟骨的三维有限模型。模型经过光滑处理后，以 STL 格式导入 Geomagic Studio 2017 软件。在 Geomagic Studio 2017 软件中通过光滑曲面、松弛、整体偏移等操作建立松质骨及皮质骨部分，装配后得到跟骨的面实体模型。CT 提取的初步模型与光滑模型，见图 1。



图注：图 A 为初步提取模型；B 为光滑处理模型

图 1 | 跟骨三维模型的提取

Figure 1 | Extraction of the three-dimensional model of the calcaneus

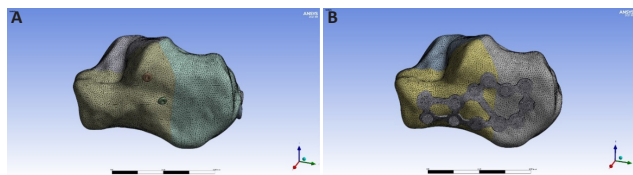
1.5.2 内固定模型的建立 将跟骨模型导入 Solidworks 2018 软件，在软件中建立锁定钢板系统 (跟骨锁定钢板及锁定螺钉，钛合金材质) 及空心螺钉 (螺钉全长 90 mm，螺纹部直径 7.3 mm，螺钉空杆部直径 6 mm，中空部分直径 4 mm，钛合金材质) 等模型。在 Solidworks 2018 软件中将跟骨模型与内固定通过原点重合、布尔运算等操作分别进行装配，获得 Sanders II 型跟骨骨折的两种内固定方式模型。依据相关参考文献<sup>[11-12]</sup>，定义装配模型材料的具体材料性质，见表 1。

表 1 | 模型材料各部分性质

Table 1 | Properties of each part of the model material

| 材料  | 弹性模量 (MPa) | 泊松比  |
|-----|------------|------|
| 皮质骨 | 7 300      | 0.3  |
| 松质骨 | 620        | 0.3  |
| 钛合金 | 190 000    | 0.27 |

1.5.3 网格划分 为了方便软件运算和后期的数据分析, 通过 ANSYS 21.0 软件划分有限元网格。将跟骨模型的网格平均尺寸定义为 1 mm, 内固定模型的网格平均尺寸定义为 0.6 mm, 网格均设定为四面体单元, 将跟骨与内固定物的网格进行细化处理。空心螺钉组有限元网格模型中, 节点数 1 109 136 个, 有限单元数 731 693 个; 锁定钢板组有限元网格模型中, 节点数 522 081 个, 有限单元数 299 023 个, 见图 2。



图注: 图 A 为空心螺钉内固定模型; B 为锁定钢板内固定模型  
图 2 | 有限元网格划分

Figure 2 | Finite element meshing diagram

为了保证模型网格的计算精度及运算收敛, 依据参考文献 [13] 的研究经验, 对载荷加载的时间迭代运算进行分段设置, 并对非线性接触部分进行网格加密, 保证模型的运算收敛性。

1.5.4 边界条件及载荷分析 跟骨的受力情况相对复杂, 作为足部最大的跗骨, 其结构为不规则的长方体<sup>[1]</sup>。跟骨周围的肌腱和韧带数量较多, 产生的力学稳定性影响存在不确定性, 完整的数字模拟存在较大难度<sup>[14]</sup>。因此, 该研究的受力模型简化跟骨的受力情况, 忽略韧带及次要韧带的影响, 只讨论静止站立位的力学稳定性。依据参考文献 [7, 12], 将跟骰关节面和跟骨与地面接触最低点处的节点定义完全约束, 在 X、Y、Z 轴上的活动度均为 0。各骨折块之间的接触设定为摩擦, 摩擦系数 0.2, 空心螺钉及锁定螺钉与跟骨的接触设定为摩擦, 摩擦系数设定为 0.5; 锁定螺钉与钢板之间的接触设定为绑定, 锁定钢板与跟骨的接触不考虑加压摩擦。在设定好工况的跟骨三维有限元模型上运算中立位下的力学稳定情况。依据参考文献 [10] 的设定条件, 模拟跟骨中立位下各位置的施加载荷, 见表 2。

表 2 | 载荷设定位置及大小

Table 2 | Position and size of load setting

| 加载位置   | 载荷 (N) |
|--------|--------|
| 跟距中关节面 | 200    |
| 跟距后关节面 | 420    |
| 跟腱止点   | -300   |

1.6 主要观察指标 空心螺钉内固定组与锁定钢板内固定组 2 个有限元模型在同种载荷加载工况下表现出的模型各部分最大位移和 Von Mises 应力分布, 评价两种内固定方式固定 Sanders II 型骨折的力学稳定性。

## 2 结果 Results

2.1 模型有效性验证 为了验证模型的合理有效性, 运算跟骨完整模型在不同工况加载情况下的最大 Von Mises 应力, 并与现有研究文献 [15] 的所得数据比较。在 3 种不同工况下, 此次研究模型的最大 Von Mises 应力与文献研究结果较为相似, 见图 3。考虑到各自模型的差异性, 此次研究所建立的模型是有效的。

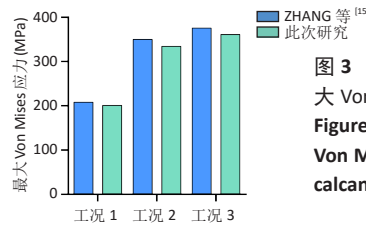


图 3 | 完整跟骨模型与研究文献的最大 Von Mises 应力比较  
Figure 3 | Comparison of the maximum Von Mises stress between the complete calcaneus model and other research

### 2.2 模型的应力比较

2.2.1 内固定模型应力 空心螺钉组的应力主要集中在螺钉与骨折线接触附近, 最大应力值达到了 53.948 MPa, 出现在纵向螺钉附近。2 根横向螺钉的分析结果显示, 应力出现明显集中于内外侧骨折块骨折线附近, 对抗内外侧骨折块载荷承载下的分离形变。锁定钢板组的应力主要集中在钢板与锁定螺钉附近, 最大应力值为 129.95 MPa, 出现在钢板中部螺钉孔周围。空心螺钉组最大等效应力相较于锁定钢板组较小, 而锁定钢板组应力集中情况突出, 应力分布结果见图 4。

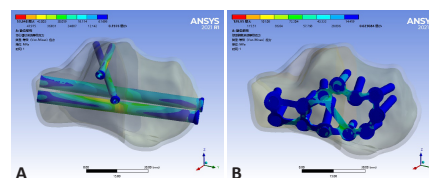


图 4 | 两种内固定的应力分布云图

Figure 4 | Stress distribution cloud diagram on two different internal fixations

2.2.2 两种内固定方式装配下跟骨的应力分布 两种内固定方式下的跟骨模型均未出现明显的应力集中情况, 整体应力情况表现良好。两组内固定方式下, 空心螺钉组的最大等效应力为 60.053 MPa, 锁定钢板组的最大等效应力为 129.95 MPa, 应力分布云图见图 5。

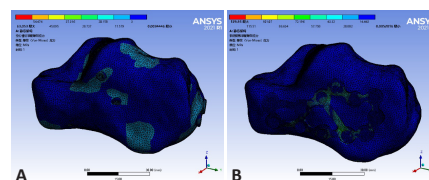


图 5 | 两种内固定方式装配下跟骨的应力分布云图

Figure 5 | Stress distribution cloud diagram of the calcaneus under two internal fixations

### 2.3 模型的位移比较

2.3.1 内固定模型位移 空心螺钉组载距突附近的横向螺钉发生了最大位移, 最大位移为 0.175 37 mm。锁定钢板组最大位移发生在距下关节附近的钢板中部螺钉孔及锁定螺钉处, 最大位移为 0.10 318 mm, 见图 6。

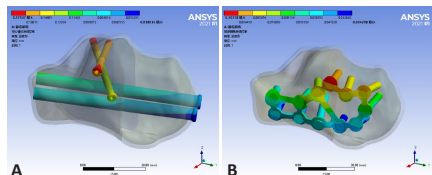


图6 | 两种内固定的位移云图

Figure 6 | Displacement cloud diagram on two different internal fixations

图注：图A为空心螺钉内固定总位移，最大值为0.17537 mm；B为锁定钢板内固定总位移，最大值为0.10318 mm

2.3.2 两种内固定方式装配下跟骨的位移 空心螺钉组整体的位移最大值为0.21402 mm，距下关节、载距突及关节面骨折线周围的移位最为明显。锁定钢板组整体的位移最大值为0.13572 mm，最大位移位于距下关节、载距突和关节面骨折线附近。空心螺钉组的骨折线位移为0.01577 mm，而锁定钢板组骨折线位移为0.02103 mm，表明空心螺钉组保持骨折块相对稳定位置的效果优于锁定钢板组，位移云图见图7。

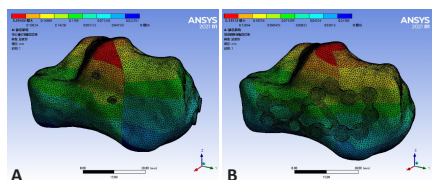


图7 | 两种内固定方式装配下跟骨的位移云图

Figure 7 | Displacement cloud diagram of the calcaneus under two internal fixations

图注：图A为空心螺钉组总位移，最大值为0.21402 mm；B为锁定钢板组总位移，最大值为0.13572 mm

### 3 讨论 Discussion

跟骨骨折多由高处坠落等垂直方向的高能量损伤导致<sup>[16-20]</sup>，主要承力的跟骨外侧壁失去力学稳定性，影响足踝部的正常功能。由于跟骨骨折大多涉及跟距关节，如若得不到及时正确的治疗，预后往往不良，病废率较高。目前，跟距关节内骨折的跟骨骨折大多选择手术治疗。选择经典的外侧长“L”型切口切开复位植入钢板内固定是最常用的手术方式，因能广泛显露跟骨外侧，这种术式在恢复跟骨 Bohler 角、Gissane 角及宽度、高度方面具有一定优势<sup>[21]</sup>，但其切口较大，术后常伴有切口附近皮瓣坏死等并发症，因此探讨微创内固定技术在跟骨骨折的应用对于减少创伤、保护跟骨外侧皮瓣等方面具有重要意义。撬拨复位空心螺钉加压内固定技术具有操作简单、创伤小、可以避免术后切口并发症等优点，一期愈合率高，其作为平衡保守治疗和经典手术治疗优缺点的一种术式已经广泛应用于临床<sup>[22-24]</sup>。

根据有限元分析结果，空心螺钉组模型的骨折线位移小于锁定钢板组，表明空心螺钉组保持骨折块各部分相对位置的效果要优于锁定钢板组。从结构角度分析，主要原因在于垂直于骨折线的空心螺钉发挥了梁结构的效果，对于施加的载荷有明显的应力承载作用，有效抵抗了载荷对骨折块的加压变形，因此空心螺钉组的骨折线位移较小，其中横向的2枚空心螺钉发挥了重要作用，空心螺钉组内固定最大位移发生在2枚横向螺钉上，打入载距突的横向螺钉对载距突起到了拉力作用，在载荷加载下抵抗骨折线位移提供了更好的稳定性作用。锁定钢板组的最大应力位于钢板中部螺钉孔附近，

这是由锁定钢板与锁定螺钉的悬臂结构所决定的。位移结果显示，锁定钢板内固定在承担载荷加载下的应力时，位移呈现出阶段性分布。锁定钢板组维持关节面稳定的作用主要通过锁定螺钉分散应力，以减弱载荷应力过于集中导致的钢板屈服变形，但整体的受力结果显示仍然是钢板分担了更大的载荷。由于锁定钢板内固定是通过锁定成角来发挥稳定的效果，在载荷加载下对抗形变的效果相对不足，内固定的位移较大。根据应力的计算结果，两种内固定方式在相同的加载条件下，最大应力均远远小于其屈服强度<sup>[25]</sup>，并且两组模型骨折线的位移结果相差不大，说明两种内固定方式均可在骨折早期保证骨折块的相对稳定，但空心螺钉组骨折线位移相较于锁定钢板组较小。综合二者临床应用的优缺点，采用撬拨复位空心螺钉加压内固定作为 Sanders II 型跟骨骨折的治疗方式是较为推荐的。

与郭宗慧等<sup>[10]</sup>的有限元分析设定比较，此次研究中均为单独的跟骨三维模型建立后的有限元分析，对跟骨周围软骨、韧带结构等周围软组织均简化处理，在同样工况下的骨折线最大位移与最大应力相差不大。在 ZHANG 等<sup>[15]</sup>构建的有限元模型中，其对足踝部的骨及韧带等结构均细化考虑，重建了跟骨周围结构，且载荷的加载及边界条件设置不同，故有限元分析结果有较大的差异。有限元分析作为针对个体案例的生物力学分析方法，在模型构建、材料属性、网格划分及载荷加载等方面各研究者的设定有一定的差异性，模型建立的个性化较强，但不同研究者的有限元分析结果在整体上的等效应力与模型位移的变化趋势具有一定的参考意义。

临床研究文献表明，针对 Sanders II、III 型的跟骨骨折，撬拨复位后空心螺钉加压内固定的治疗方式可以获得良好的临床疗效，术后切口愈合不良及皮缘坏死等并发症低<sup>[26-28]</sup>。与切开复位锁定钢板内固定的治疗方式相比，二者的疗效相当<sup>[29]</sup>，并且可以进行早期锻炼以尽快恢复患肢功能<sup>[30-31]</sup>，但此种固定方式对于术者的操作经验及骨折的复位要求较高，临床开展具有一定难度。现阶段临床上采用的骨科手术机器人系统可以辅助骨科医生精准化小切口下的空心螺钉置钉，满足骨折复位的基本原则，进一步提高了撬拨复位空心螺钉内固定跟骨骨折的治疗良率<sup>[32]</sup>。

经典的“L”形切口切开复位锁定钢板内固定作为临床最常用的跟骨骨折治疗方式，术野充分暴露和术者简便操作所带来的切口附近皮缘软组织的广泛破坏、局部血运不良等负面作用，可能会导致皮肤坏死和伤口迸裂，甚至出现跟骨髓炎等手术并发症<sup>[33]</sup>，相较于撬拨复位空心螺钉的固定方法，具有明显缺陷。研究表明，切开复位钢板内固定也是造成跟骨创伤性关节炎与足踝附近关节功能恢复不佳的原因<sup>[34]</sup>。胡凯等<sup>[22]</sup>针对空心螺钉和钢板内固定跟骨关节内骨折的 Meta 分析表明，Sanders II 型跟骨骨折的钢板内固定和空心螺钉内固定的强度相似，但空心螺钉内固定组在手术时间、减少术后并发症方面优于钢板内固定组。因此，综合考量两种内固定方式的力学特性及临床应用优缺点，撬拨复位空心

螺钉加压固定可能是一种更好的治疗 Sanders II 型跟骨骨折的内固定方式。

综上所述, 该研究通过有限元分析的生物力学方法比较了 Sanders II 型跟骨骨折切开复位锁定钢板内固定及撬拨复位后空心螺钉加压内固定的力学稳定性。撬拨复位后空心螺钉加压内固定治疗 Sanders II 型跟骨骨折, 在减少术后并发症发生与加速骨折术后康复等方面具有较大优势, 是 Sanders II 型跟骨骨折推荐的内固定方式。由于有限元分析中为了减少计算压力, 通常对实际情况进行简化考虑, 以及骨骼组织材料的各向异性、非线性问题被忽略, 该研究仅能从实验角度粗略描述模型的力学稳定性, 但实验内容的整体变化趋势与实际情况基本相符, 对指导临床应用具有一定意义。

**作者贡献:** 实验设计及实验实施为温明韬、梁学振、李刚, 实验理论指导为李刚、梁学振, 实验评估为李嘉程, 资料收集为许波, 实验过程指导为李刚。

**经费支持:** 该文章接受了“济南市科技计划项目(201907008)”的资助。所有作者声明, 经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

**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。

**机构伦理问题:** 该研究的实施符合山东中医药大学附属医院的相关伦理要求(2020 伦审 96 号-KY, 2020 年 12 月)。

**知情同意问题:** 1 名男性志愿者参与该项研究, 排除足跟部病变、畸形等异常情况。志愿者对实验方案知情同意并签署了“知情同意书”。

**写作指南:** 该研究遵守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》。

**文章查重:** 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。

**文章外审:** 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。

**生物统计学声明:** 文章统计学方法已经通过山东中医药大学附属医院生物统计学专家审核。

**文章版权:** 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

**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进行编辑、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。

#### 4 参考文献 References

[1] ALLEGRA PR, RIVERA S, DESAI SS, et al. Intra-articular Calcaneus Fractures: Current Concepts Review. *Foot Ankle Orthop.* 2020;5(3):247301142092733.

[2] POTTER MQ, NUNLEY JA. Long-term functional outcomes after operative treatment for intra-articular fractures of the calcaneus. *J Bone Joint Surg Am.* 2009;91(8):1854-1860.

[3] 许隆, 曾展鹏, 陈梓杰, 等. 股骨近端防旋髓内钉治疗股骨转子间骨折主钉断钉失效: 有限元仿真模型构建及有效性验证 [J]. *中国组织工程研究*, 2021,25(30):4839-4844.

[4] 张成宝, 余润泽, 喻德富, 等. 有限元分析股骨颈骨折下后方不同程度骨缺损空心螺钉内固定后的稳定性 [J]. *中国组织工程研究*, 2020, 24(18):2799-2804.

[5] 陈林, 秦大平, 张晓刚, 等. 有限元分析法在脊柱生物力学中的研究进展 [J]. *中国疼痛医学杂志*, 2020,26(3):208-211,216.

[6] 甘东浩, 乔全来, 陈德强, 等. Waveflex 半刚性内固定治疗腰椎间盘突出症的生物力学优势 [J]. *中国组织工程研究*, 2019,23(36):5830-5835.

[7] 林娟颖, 刘晓颖, 邢立杰, 等. 基于有限元法的跟骨生物力学分析 [J]. *医用生物力学*, 2018,33(1):37-41.

[8] 倪鹏辉, 张鹰, 杨晶, 等. 临床骨科中应用的有限元分析法: 新理论与新进展 [J]. *中国组织工程研究*, 2016,20(31):4693-4699.

[9] 倪明, 牛文鑫, 梅炯. 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.

[10] 郭宗慧, 庞清江, 刘江涛, 等. 载距突螺钉内固定治疗 Sanders II 型跟骨骨折的生物力学研究 [J]. *中华骨科杂志*, 2013,33(4):331-335.

[11] SITTHISERIPRATIP K, VAN OOSTERWYCK H, VANDER SLOTEN J, et al. Finite element study of trochanteric gamma nail for trochanteric fracture. *Med Eng Phys.* 2003;25(2):99-106.

[12] 杨攀, 章莹, 刘坚, 等. 锁定钢板内置和外置固定 Sanders II 型跟骨骨折的三维有限元分析 [J]. *中国临床解剖学杂志*, 2014,32(6):716-720.

[13] 张雷雷, 王盟圣, 徐大伟, 等. 足部三维有限元建模及其多姿态生物力学分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2021,25(30):4799-4804.

[14] CHEN CH, HUNG C, HSU YC, et al. Biomechanical evaluation of reconstruction plates with locking, nonlocking, and hybrid screws configurations in calcaneal fracture: a finite element model study. *Med Biol Eng Comput.* 2017;55(10):1799-1807.

[15] ZHANG H, LV ML, LIU Y, et al. Biomechanical analysis of minimally invasive crossing screw fixation for calcaneal fractures: Implications to early weight-bearing rehabilitation. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2020;80:105143.

[16] LAW GW, YEO NE, YEO W, et al. Subtalar arthroscopy and fluoroscopy in percutaneous fixation of intra-articular calcaneal fractures. *J Orthop Surg (Hong Kong).* 2017;25(1):2309499016684995.

[17] COTTOM JM, BAKER JS. Restoring the Anatomy of Calcaneal Fractures: A Simple Technique With Radiographic Review. *Foot Ankle Spec.* 2017; 10(3):235-239.

[18] YOUSEF A, ABDULLAH S, HANAN A, et al. Calcaneal fractures in a trauma center: A retrospective study. *Journal of Musculoskeletal Surgery and Research.* 2021; 5(2): 116-120.

[19] SHAMS A, GAMAL O, MESREGAH MK. Minimally Invasive Reduction of Intraarticular Calcaneal Fractures With Percutaneous Fixation Using Cannulated Screws Versus Kirschner Wires: A Retrospective Comparative Study. *Foot Ankle Spec.* 2021:1938640020987750.

[20] EBRAHIMPOUR A, KORD MHC, SADIGHI M, et al. Percutaneous reduction and screw fixation for all types of intra-articular calcaneal fractures. *Musculoskelet Surg.* 2021;105(1):97-103.

[21] DIRANZO-GARCÍA J, BERTÓ-MARTÍ X, CASTILLO-RUIPEREZ L, et al. Treatment of intraarticular calcaneal fractures by reconstruction plate. Results and complications of 86 fractures. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol (Engl Ed).* 2018; 62(4):267-273.

[22] 胡凯, 乔晓红, 张永红, 等. 空心螺钉和钢板内固定修复移位型跟骨关节内骨折: 基于 15 篇随机对照试验的 Meta 分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2021,25(9):1465-1470.

[23] 林文琛, 林伟东, 王育新. 斯氏针撬拨闭合复位轴向结合横向往多枚中空钉内固定修复跟骨骨折 [J]. *中国组织工程研究*, 2015,19(53):8591-8596.

[24] SHAMS A, GAMAL O, MESREGAH MK. Outcome of Minimally Invasive Osteosynthesis for Displaced Intra-articular Calcaneal Fractures Using Cannulated Screws: A Prospective Case Series. *J Foot Ankle Surg.* 2021; 60(1):55-60.

[25] VAJGEL A, CAMARGO IB, WILLMERSDORF RB, et al. Comparative finite element analysis of the biomechanical stability of 2.0 fixation plates in atrophic mandibular fractures. *J Oral Maxillofac Surg.* 2013;71(2):335-342.

[26] 马超, 王成伟, 唐国柱. 微创技术与开放手术治疗 Sanders II、III 型跟骨骨折的疗效比较 [J]. *中华骨科杂志*, 2020,40(21):1443-1452.

[27] 黄平, 陈先进, 郭艳幸, 等. 撬拨复位空心钉内固定治疗 Sanders II 型跟骨骨折 [J]. *中国骨伤*, 2020,33(10):965-969.

[28] 马晓东, 孙宏桥, 马晓松, 等. 切开复位内固定和经皮撬拨复位内固定治疗 Sanders II 型跟骨骨折的比较研究 [J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2017,32(8):882-884.

[29] 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.

[30] SAMPATH KUMAR V, MARIMUTHU K, SUBRAMANI S, et al. Prospective randomized trial comparing open reduction and internal fixation with minimally invasive reduction and percutaneous fixation in managing displaced intra-articular calcaneal fractures. *Int Orthop.* 2014;38(12):2505-2512.

[31] VICENTI G, CARROZZO M, SOLARINO G, et al. Comparison of plate, calcaneoplasty and external fixation in the management of calcaneal fractures. *Injury.* 2019;50 Suppl 4:S39-S46.

[32] 袁心伟, 张斌, 胡虹, 等. 机器人辅助下跟骨骨折内固定与传统切开复位内固定对比研究 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2021,35(6):729-733.

[33] JIANCHUAN W, SONG Q, TIENAN W, et al. Calcaneus traction compression with orthopaedic reduction forceps combined with percutaneous minimally invasive treatment of intra-articular calcaneal fractures: An analysis of efficacy. *Biomed Pharmacother.* 2020;128:110295.

[34] JACQUOT F, ATCHABAHIAN A. Balloon reduction and cement fixation in intra-articular calcaneal fractures: a percutaneous approach to intra-articular calcaneal fractures. *Int Orthop.* 2011;35(7):1007-1014.

(责任编辑: MZH, ZN, ZH)