

文章编号: 1004-7220(2024)02-0229-07

# 形状记忆合金骑缝钉内固定在三关节融合术中的力学特性分析

富荣昌, 张怀悦, 李寒

(新疆大学 智能制造现代产业学院, 乌鲁木齐 830017)

**摘要:**目的 研究加压空心螺钉及形状记忆合金骑缝钉在三关节融合术内固定中的生物力学差异,为形状记忆合金骑缝钉的临床应用提供参考。方法 选择1例重度僵硬型马蹄足患者的足部二维CT数据,通过Mimics和Geomagic软件构建三关节融合术后模型,并利用SolidWorks 2021软件建立三关节融合内固定几何模型;根据使用固定钉类型和组合方式(加压空心螺钉和形状记忆合金骑缝钉)分为A、B、C、D共4种固定方案;在ABAQUS软件中分析模拟中立位生理载荷下不同内固定方案模型的生物力学特性。结果 方案D内固定模型距下、距舟、跟骰关节融合面端面最大位移均大于方案A、B、C;方案D内固定模型距舟关节、跟骰关节融合面内外侧位移之差分别为13.10%、13.60%,与其他3种固定方案相比融合面位移更接近于平行位移;方案D内固定模型距下、距舟、跟骰关节融合面最大 von Mises 应力均大于方案A、B、C。结论 应用方案D(距舟关节和跟骰关节融合面使用骑缝钉内固定,距下关节融合面使用加压空心螺钉内固定)能够使三关节融合术后内固定融合面具有稳定性,并为其提供近似平行微动,产生适当的融合面应力使融合端面接触更紧密,促进骨痂生长,获得最佳的融合效果。

**关键词:** 三关节融合; 内固定; 加压空心螺钉; 形状记忆合金骑缝钉

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.02.006

## Analysis of Mechanical Properties of Shape-Memory Alloy Staple Internal Fixation in Triple Arthrodesis Surgery

FU Rongchang, ZHANG Huaiyue, LI Han

(College of Intelligent Manufacturing Modern Industry, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

**Abstract: Objective** To study the biomechanical differences between hollow compression screws and shape-memory alloy staples in triple arthrodesis internal fixation and to provide references for the clinical application of shape-memory alloy staples. **Methods** Two-dimensional (2D) computed tomography (CT) foot data from a patient with severe horseshoe foot stiffness were selected, and a triple arthrodesis model was established using Mimics and Geomagic software. A geometric triple arthrodesis internal fixation model was established using SolidWorks 2021 software. Four fixation schemes (A, B, C, and D) were established according to the type and combination of fixed screws (hollow compression screws and shape-memory alloy riding nails). The biomechanical characteristics of models with different internal fixation schemes under neutral physiological loading were simulated and analyzed using ABAQUS software. **Results** The maximum end-face displacements of the fused surfaces of the talocalcaneal talonavicular and calcaneocuboid joints in the internal fixation model of scheme

收稿日期: 2023-10-25; 修回日期: 2023-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(81860164)

通信作者: 富荣昌, 副教授, 硕士生导师, E-mail: 2781642414@qq.com

D were greater than those in schemes A, B, and C. The differences between the medial and lateral displacements of the fused surfaces of the talonavicular and calcaneocuboid joints in the internal fixation model of scheme D were 13.10% and 13.60%, respectively. The fused surface displacements were closer to the parallel displacements than those in the other three fixation schemes. The von Mises stresses were greater than those of schemes A, B, and C. **Conclusions** The application of scheme D (internal fixation at fusion surfaces of the talonavicular and calcaneocuboid joints with staples and at fusion surfaces of the talocalcaneal joints with compression hollow screws) provides stability at fusion surfaces of the internal fixation after triple arthrodesis surgery with near-parallel micromovement, which produces appropriate fusion stresses to make contact at the fusion end closer, promote the growth of bone scabs, and achieve better fusion results.

**Key words:** triple arthrodesis; internal fixation; compression hollow screw; shape-memory alloy staple

重度僵硬型马蹄内翻足是临床常见的一种足部畸形,对患者的生活影响严重。三关节融合术是临床治疗重度僵硬型马蹄内翻足有效且常用的治疗方法,切除跟距、距舟、跟骰关节的关节面,通过内固定或外固定装置加压使截骨面紧密贴合,形成骨性愈合,从而达到关节融合、矫正畸形的目的<sup>[1]</sup>。临床研究发现,融合面的骨不愈合是三关节融合术的常见并发症之一,骨不愈合率为 10%~23%<sup>[2-3]</sup>。导致骨不愈合的因素包括不稳定的内固定和融合表面准备不足。早期,使用石膏对三关节融合术后进行固定。近年来,随着三关节内固定装置的采用,距下关节采用螺钉交叉固定已经是默认的内固定标准<sup>[4-5]</sup>。然而,距舟关节和跟骰关节截骨面通常采用以加压空心螺钉为代表的螺钉固定,而螺钉对组织创伤大,无法垂直于融合面进行加压固定,有时需要石膏协助,骨痂形成和融合面骨愈合较慢,会发生感染和并发症<sup>[6-10]</sup>。

为解决上述问题,出现了一种新型内固定方式,即形状记忆合金骑缝钉固定,在垂直于截骨面上纵向加压,不仅使融合面紧密接触,还给融合面提供了近似平行位移的平行微动,有利于对称性骨痂生长,加速骨愈合<sup>[10-14]</sup>。贾力等<sup>[10]</sup>研究发现,采用骑缝钉治疗 Lisfranc 损伤患者,通过纵向加压,使骨折端与关节面紧密连接,降低了患者术后固定松动等并发症的发生,临床治疗效果显著。李建鹏等<sup>[13]</sup>应用骑缝钉固定治疗跖骨颈骨折,也发现骑缝钉有利于骨折愈合及关节功能恢复,并取得良好的临床疗效。

但因为个体的差异性,患者最佳内固定置入物的数量及类型暂无统计学定量分析,置入物的数量和类型多靠医生凭经验选取。固定置入物类型不

同,势必影响僵硬性马蹄内翻足截骨矫形后生物力学特性。不当的内固定方式影响截骨面融合效果和足部功能恢复,产生骨不愈合、内固定物断裂等并发症。运用有限元技术可在术前较为精确地获取僵硬性马蹄内翻足的力学信息,模拟不同内固定方案下的融合结果。本文通过有限元分析,探究形状记忆合金骑缝钉与空心加压螺钉固定治疗三关节融合术后的生物力学差异,为临床应用提供数据支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 模型建立

首先,使用西门子双源 CT 扫描设备获取 1 例严重僵硬型马蹄内翻足成年男性患者(年龄 42 岁,身高 178 cm,体质量 80 kg)中立位的足部扫描数据,存储为 DICOM 格式;将获得的医学图像序列灰度信息导入 Mimics 21.0 中,创建蒙版,生成足部骨骼的三维点云模型,输出为 STL 格式;然后,将文件导入逆向工程软件 Geomagic Studio 2012 中,得到光滑且清晰的实体几何模型,输出为 IGES 格式;利用 SolidWorks 2021 装配,根据临床要求在软件中模拟三关节融合术矫形截骨(见图 1)。

新疆医科大学第六附属医院临床医生根据经验并进行充分讨论,对此病例设计了 4 种内固定方案(见表 1),根据方案生成置入空心加压螺钉和形状记忆合金骑缝钉。为方便计算,只选取足部模型的距骨、跟骨、舟骨、骰骨,并建立三关节融合术 4 种内固定方案三维实体模型(见图 2)。最后,再导入有限元前处理软件 HyperMesh 2019 中,对模型进行网格划分。

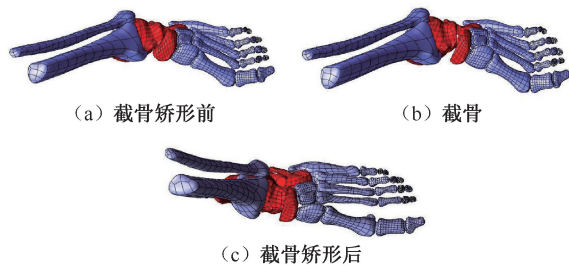


图1 僵硬型马蹄足三关节融合术矫形前后模型

Fig.1 Pre- and post-orthopedic model of rigid horseshoe foot triple arthrodesis (a) Preorthopaedic osteotomy, (b) Osteotomy, (c) Postorthopaedic osteotomy

表1 不同内固定方案

Tab.1 Different internal fixation schemes

方案	跟距关节	距舟关节	跟骰关节
A		2 颗 4 mm 加压空心螺钉	2 颗 4 mm 加压空心螺钉
B	2 颗 7 mm 加压空心螺钉	2 颗形状记忆合金骑缝钉	2 颗 4mm 加压空心螺钉
C	交叉固定	2 颗 4 mm 加压空心螺钉	2 颗形状记忆合金骑缝钉
D		2 颗形状记忆合金骑缝钉	2 颗形状记忆合金骑缝钉

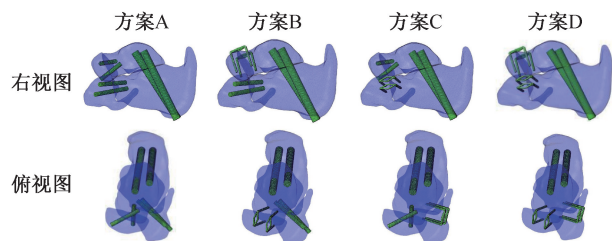


图2 不同内固定方案模型

Fig.2 Models of different internal fixation schemes

## 1.2 材料属性

本固定方案模型由骨骼、加压空心螺钉、形状记忆合金骑缝钉三部分组成,通过查阅大量相关研究文献,将模型中各种组织均模拟为准静态载荷下均质、各向同性和线弹性材料(见表2)。

表2 模型材料属性<sup>[15-17]</sup>Tab.2 Material properties of the model<sup>[15-17]</sup>

材料	弹性模量/GPa	泊松比	单元类型
足骨	7.30	0.30	四面体
螺钉	110.00	0.33	四面体
骑缝钉	65.84	0.33	四面体

## 1.3 模型有效性验证

将建立的僵硬型马蹄足模型导入3-matic中,通

过测量得到该模型的距骨第1跖骨角(侧位)为 $31^\circ$ ,距骨第1跖骨角(正位)为 $39^\circ$ ,距骨跟骨角(侧位)为 $20^\circ$ ;同时,通过测量该患者僵硬性马蹄足X线片上的相应角度可知,距骨第1跖骨角(侧位)为 $28^\circ$ ;距骨第1跖骨角(正位)为 $40^\circ$ ;距骨跟骨角(侧位)为 $19^\circ$ 。该结果表明,模型测量和实验测量结果之间有合理的一致性,从而验证了模型的有效性。因此,本文建立的4种三关节融合术后内固定有限元模型具有有效性,可以用于分析三关节融合术后融合面的位移和应力分布情况。

表3 3-matic软件和X光片上测得的标志性骨性角度

Tab.3 Signature bony angles measured on the 3-matic software and X-ray

工具	距骨第1跖骨角/ $(^\circ)$		距骨跟骨角/ $(^\circ)$
	侧位	正位	侧位
3-matic 软件	31	39	20
X 线片	28	40	19
相对误差/%	9.67	2.56	5.00

## 1.4 边界条件和载荷

将跟骨的下表面和骰骨、舟骨的前下方面完全固定;跟距、距舟、跟骰融合面之间设置为绑定,并对螺纹部分进行简化处理。为模拟螺纹产生的效果,螺钉和骑缝钉与骨之间的接触设置为绑定。在螺钉的垂直上表面施加 $50\text{ MPa}$ 压强<sup>[4]</sup>,模拟螺钉的加压作用;在骑缝钉两钉面分别施加 $2\ \mu\text{m}$ 位移,模拟骑缝钉的预紧力,在距骨滑车面垂直施加 $400\text{ N}$ 载荷。

## 1.5 评价指标

基于CT扫描数据对三关节融合术不同内固定方式进行三维重建,通过以下指标对不同三关节融合术固定方式的优劣进行对比分析。

**1.5.1 中立位载荷下载骨融合面微动** 融合面的微动对骨生长具有重要影响。研究表明,融合面骨与骨之间的适宜的微动,特别是在融合面对侧产生相同距离微动(即平行微动)时,会有利于骨痂生长、融合面融合。本文通过对比生理载荷下三关节融合面位移和内外侧位移差值,确定不同内固定方式融合效果的优劣。

**1.5.2 中立位载荷下载骨融合面应力分布** 融合面的应力在融合面骨长入过程中起到重要作用。研究表明,融合面上适当的应力刺激能够刺激骨组

织的长入,提高融合的成功率。本文对融合面的应力分布状态和峰值进行比较,评估不同内固定方式的融合效果。

## 2 结果

### 2.1 融合面微动

由图 3(a)、图 4(a)和表 4 可以看出,在相同载荷下:

(1) 跟距融合面:方案 A~D 产生的最大位移分别为 2.615、3.082、3.163、2.693  $\mu\text{m}$ ,4 种内固定方案之间位移差距微小。

(2) 距舟融合面:方案 A~D 产生的最大位移分别为 0.405 5、0.922 7、0.464 9、1.005 0  $\mu\text{m}$ 。方案 D 融合面内外侧位移之差为 13.10%,小于其他 3 种内固定方案。

(3) 跟骰融合面:方案 A~D 产生的最大位移分别为 0.089 32、0.079 85、0.882 90、0.909 90  $\mu\text{m}$ 。方案 D 融合面内外侧位移之差为 13.60%,小于其他 3 种内固定方案。

综上所述,在中立位相同载荷下,各种内固定方案各融合面的最大位移都远小于 150  $\mu\text{m}$ ,具有很好的稳定性,且方案 D 融合面对侧位移差值最小,更接近于平行位移,使骨痂对称生长,有利于截骨面融合。因此,方案 D 骨接触面微动更利于骨痂生长、融合面融合,采用形状记忆合金骑缝钉固定融合效果更佳。

### 2.2 融合面应力分布

由图 3(b)、图 4(b)和表 5 可见,在中立位相同载荷下:

(1) 跟距融合面:4 种方案的最大应力差距不大,且分布趋势相似,在融合面前侧存在应力集中现象。

(2) 距舟融合面:方案 D 融合面应力最大,峰值为 2.673 MPa;方案 A 融合面应力最小,为 0.893 5 MPa,且方案 A、C 融合面的应力分布更不均衡,对融合面的融合十分不利。

(3) 跟骰融合面:方案 D 融合面应力最大,峰值为 3.332 MPa;方案 C 次之,为 3.033 MPa,且这

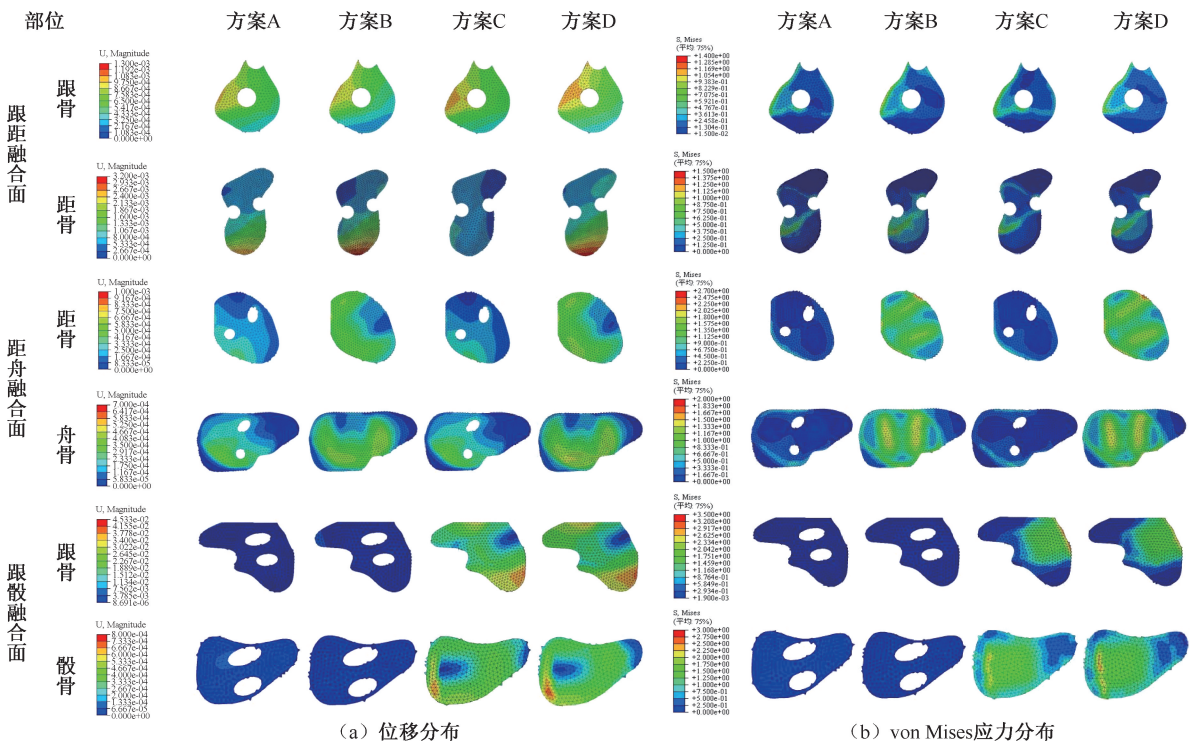


图 3 各内固定方案融合面位移和应力云图

Fig. 3 Displacement and stress nephograms at fusion surface for each internal fixation scheme (a) Displacement distributions, (b) Von Mises stress distributions



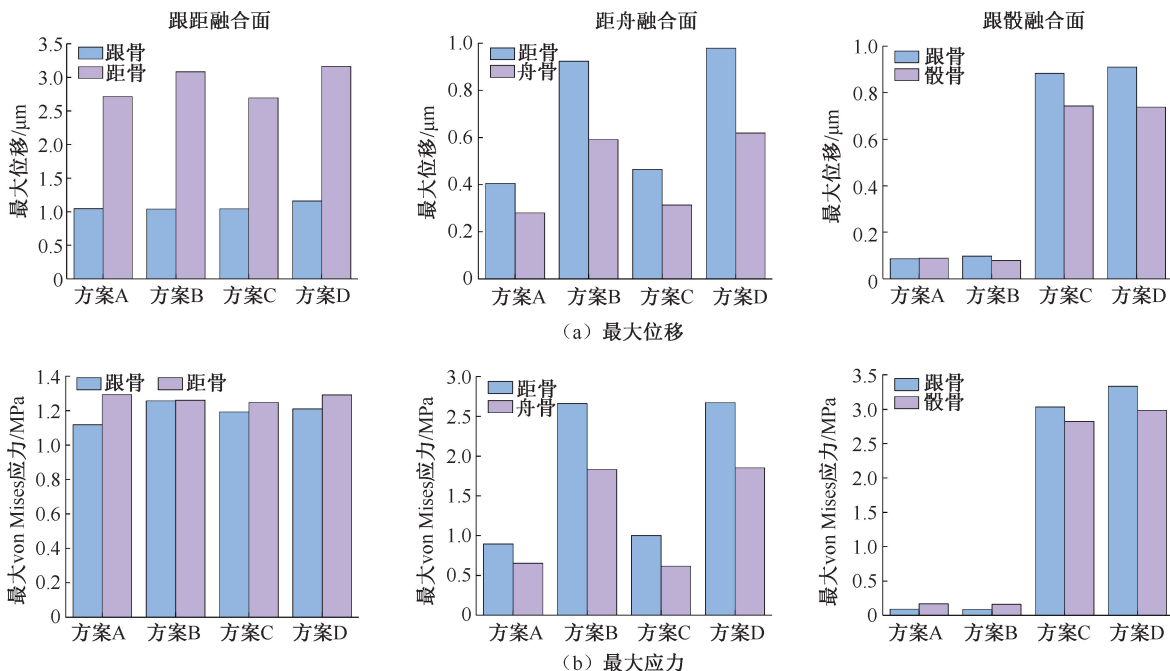


图 4 各内固定方案融合面最大位移和最大 von Mises 应力比较

Fig. 4 Comparison of the maximum displacements and the maximum von Mises stresses at fusion surface for each internal fixation scheme (a) The maximum displacement, (b) The maximum stress

表 4 各内固定方案融合面位移

Tab. 4 Displacements at fusion surface for each internal fixation scheme

单位: μm

方案	跟距融合面			距舟融合面			跟骰融合面		
	前侧	后侧	差别/%	前侧	后侧	差别/%	前侧	后侧	差别/%
A	1.131	0.678 8	39.98	0.101 4	0.304 1	66.66	0.029 77	0.066 99	55.56
B	1.027	0.516 7	49.68	0.364 8	0.422 9	13.73	0.024 46	0.057 08	57.14
C	1.208	0.673 2	44.27	0.116 2	0.309 9	62.50	0.350 00	0.408 30	14.28
D	1.300	0.780 0	40.00	0.372 6	0.428 8	13.10	0.367 90	0.425 80	13.60

表 5 各内固定方案融合面最大 von Mises 应力

Tab. 5 Maximum von Mises stresses at fusion surface for each internal fixation scheme

单位: MPa

方案	跟距融合面	距舟融合面	跟骰融合面
A	1.292	0.893 5	1.169 3
B	1.261	2.662 0	0.164 4
C	1.248	1.001 0	3.033 0
D	1.291	2.673 0	3.332 0

两种方案的融合面应力分布更加均匀,更有利于融合面的愈合。

综上所述,方案 D 在 3 个融合面上的应力分布相比其他方案更加均匀,且应力峰值更大。因此,方案 D 的内固定方式在一定程度上使截骨融合面之间更加紧密接触,增大融合成功率。因此,本文认为,形状记忆合金骑缝钉内固定的融合成功率优

于空心加压螺钉内固定。

### 3 讨论

目前,临床上关于三关节融合术的内固定方式,多数研究关注的是对不同人群的不同融合方式之间的比较,其结果的说服力不强。张晋文等<sup>[18]</sup>研究表明,三关节融合术仍有 11% 的不愈合率。因此,为了进一步改善治疗效果,本文通过有限元分析,探究形状记忆合金骑缝钉与空心加压螺钉在治疗三关节融合术后固定方面的生物力学差异,验证不同融合内固定方式的优劣,为进一步改善治疗方案提供参考。

研究表明,骑缝钉内固定领域应用效果显著,具有以下特性:骑缝钉钉身属于微型接骨板,可以

纵向加压始终保持骨与骨之间紧密相连,保证了融合的稳定,能够减少内固定松动的发生,从而更有利于患者的恢复<sup>[12-14,19-22]</sup>。而加压空心螺钉受指定位置和空间限制,无法垂直于融合面进行加压固定,有时需要石膏增加固定提高融合率。

融合面之间骨性紧密接触和坚强的内固定是影响三关节融合成功的重要因素<sup>[23-24]</sup>。因此,融合面的位移及应力分布对融合成功与否非常重要。对融合部位施加适当的微动刺激,有利于骨痂的生长,增加融合成功的概率<sup>[25-26]</sup>。本文发现,4种固定方案的融合面微动均远小于150 μm,表明都具有稳定性。其中,方案D融合面对侧位移差值最小,更接近于平行位移。但是方案A、B、C中采用螺钉固定的融合面微动均小于骑缝钉内固定方式,同时由于螺钉内固定刚度强,微动较小,不利于骨痂的形成及接触面的融合;螺钉内固定产生的融合面微动分布不均衡,即微动不对称,导致骨痂生长不对称,这在很大程度上会影响融合效果。而形状记忆合金骑缝钉内固定产生的融合面位移近似于平行位移,使骨痂对称生长,有利于融合面愈合。王丽娅<sup>[27]</sup>研究表明,在临床使用骑缝钉内固定技术治疗1例马蹄足患者时融合良好,获得良好的临床疗效。

研究发现,适当的融合面压力可以使融合端面靠拢并获得稳定,加速愈合<sup>[28-29]</sup>。本文结果表明,方案D内固定模型中融合面的最大应力较方案A、B、C内固定模型大且应力分布均匀,使融合面两端贴合更紧密,获得更好的效果。因此,骑缝钉内固定技术可以使融合面获得更大的压力,融合效果更佳。因此,从融合端的应力情况、融合面位移情况考虑,骑缝钉固定可更好地传导压力并促进融合面的愈合。一项18例骑缝钉固定僵硬型马蹄内翻足研究显示,骑缝钉治疗效果良好,截骨面紧密结合,并未出现骨不愈合或骨不连并发症,证明了骑缝钉可以使骨间紧密接触,促进骨融合,具有较高的融合率<sup>[30]</sup>。

综上所述,形状记忆合金骑缝钉治疗三关节融合,应力相对较大且均匀分布,在一定程度上降低了内固定失效发生率。形状记忆合金骑缝钉可提供融合面端面的平行微动,为骨痂对称性生长提供条件,在很大程度上避免骨不愈合发生。本文结果为形状记忆合金骑缝钉临床应用于采用三关节融合

术治疗重度僵硬性马蹄足患者提供较好的数据及理论支持。

本研究还存在一些不足:有限元分析过程中对三关节融合术内固定模型进行简化,忽略了周围肌肉、韧带及螺钉螺纹和骑缝钉“倒钩”的影响;并且只分析在中立位生理载荷的生物力学情况,故研究结果与真实情况存在一定的偏差。

**利益冲突声明:**无。

**作者贡献声明:**富荣昌负责研究设计、论文写作指导、论文撰写、审阅及修改;张怀悦负责数据分析、论文撰写;李寒负责研究实施。

## 参考文献:

- [1] EBALARD M, HENAFF GL, SIGONNEY G, *et al*. Risk of osteoarthritis secondary to partial or total arthrodesis of the subtalar and midtarsal joints after a minimum follow-up of 10 years [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2014, 100(4 Suppl): S231-S237.
- [2] ANAND P, NUNLEY JA, DEORIO JK. Single-incision medial approach for double arthrodesis of hindfoot in posterior tibialis tendon dysfunction [J]. *Foot Ankle Int*, 2013, 34(3): 338-344.
- [3] SEYBOLD JD. Management of the malunited triple arthrodesis [J]. *Foot Ankle Clin*, 2017, 22(3): 625-636.
- [4] YUAN CS, SUN JJ, WU SY, *et al*. Analysis of the stress distribution of the subtalar joint and fusion efficacy after double-screw insertion [J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1): 1034-1043.
- [5] CHUCKPAIWONG B, EASLEY ME, GLISSON RR. Screw placement in subtalar arthrodesis: A biomechanical study [J]. *Foot Ankle Int*, 2009, 30(2): 133-141.
- [6] 刘核达, 赵明明, 杨宗宇, 等. 三关节融合联合软组织平衡技术治疗成人重度僵硬型高弓马蹄内翻足效果分析 [J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2018, 33(10): 1104-11063.
- [7] 屈福锋, 李毅, 梁晓军, 等. 三关节融合术治疗僵硬性平足畸形短期疗效分析 [J]. *实用骨科杂志*, 2018, 24(10): 948-951.
- [8] 郑炳铃, 王健, 尹靖宇, 等. 足三关节融合术联合康复训练治疗脑瘫马蹄足部畸形的临床分析 [J]. *中国现代药物应用*, 2017, 11(15): 45-46.
- [9] DISTAZIO JJ. Triple arthrodesis [J]. *Clin Podiatr Med Surg*, 1991, 8(3): 693-699.
- [10] 贾力, 雍波. 骑缝钉在 Lisfranc 损伤患者手术治疗中的应用效果 [J]. *临床医学研究与实践*, 2019, 4(34): 91-93.
- [11] 王逢贤, 俞兴, 曹旭, 等. 距下关节外联合骑缝钉固定治疗脑瘫外翻足的疗效观察 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2018, 26(13): 1234-1236.

- [12] 余伟林, 施忠民. 距舟楔关节融合治疗 Müller-Weiss 病的疗效分析[J]. 中国骨与关节外科, 2017, 7(4): 300-304.
- [13] 李建鹏, 尹梦帆, 陈玉宏, 等. 骑缝钉与微钢板内固定跗骨颈骨折的比较[J]. 中国矫形外科杂志, 2021, 29(14): 1291-1294.
- [14] 张庆, 孙军, 陈健, 等. 骑缝钉治疗儿童肱骨近端干骺端骨折的疗效评价[J]. 安徽医学, 2020, 41(9): 1006-1008.
- [15] LEVENT A, YAPTI M, CELIK HK, *et al.* Comparison of fixation techniques in oblique and biplanar chevron medial malleolar osteotomies: A finite element analysis [J]. J Foot Ankle Surg, 2021, 61(3): 253-258.
- [16] FAN Z, MA J, CHEN J, *et al.* Biomechanical efficacy of four different dual screws fixations in treatment of talus neck fracture: A three-dimensional finite element analysis [J]. J Orthop Surg Res, 2020, 15(1): 45.
- [17] 刘晖, 练克俭, 廖丽君, 等. 镍钛开放式记忆合金人工椎体的研制和生物力学分析[J]. 中国修复重建外科杂志, 2010, 24(10): 1180-1184.
- [18] 张晋文, 温春叶. 三关节融合术 43 例效果分析及体会[J]. 中国疗养医学, 2002, 11(2): 15-16.
- [19] 刘洋. 空心加压螺钉治疗股骨颈骨折的愈合情况及影响因素研究[J]. 当代医学, 2019, 25(33): 180-182.
- [20] 段霄, 孟庆丰, 汪军玉, 等. 无头双加压螺钉与空心螺钉内固定治疗踝关节骨折的疗效对比研究[J]. 创伤外科杂志, 2020, 22(9): 701-704.
- [21] 汤样华, 曾林如, 黄忠名, 等. 骑缝钉固定治疗钩掌关节损伤[J]. 中国骨伤, 2014, 27(3): 191-193.
- [22] 徐璐, 覃佳强, 李明. 跗骨楔形截骨术联合骑缝钉内固定治疗严重高弓马蹄足的效果观察[J]. 现代实用医学, 2014, 26(10): 1223-1225.
- [23] KIRKPATRICK JS, GOLDNER JL, GOLDNER RD. Revision arthrodesis for tibiotalar pseudarthrosis with fibular onlay-inlay graft and internal screw fixation [J]. Clin Orthop Relat Res, 1991(268): 29-36.
- [24] PARKER L, SINGH D. The principles of foot and ankle arthrodesis [J]. Orthop Trauma, 2009, 23(6): 385-394.
- [25] GOODSHIP AE, NORRODIN N, FRANCIS M. The stimulation of prostaglandin synthesis by micromovement in fracture healing [M]// Micromovement in Orthopaedics. London: Oxford Press, 1992: 31-34.
- [26] 邢丹, 马信龙, 宋东辉, 等. 长骨骨折愈合力学环境的研究现状[J]. 生物医学工程与临床, 2012, 16(6): 602-605.
- [27] 王丽娅. 一例儿童三关节融合骑缝钉内固定的手术配合[J]. 中华现代护理杂志, 2007, 13(29): 2843-2844.
- [28] PERREN SM, FERNANDEZ A, REGAZZONI P. Understanding fracture healing biomechanics based on the "strain" concept and its clinical applications [J]. Acta Chir Orthop Traumatol Cech, 2015, 82(4): 253-260.
- [29] 冯兴超, 杨毅, 金格勒. 力学刺激在骨愈合中的作用及机制研究进展[J]. 四川解剖学杂志, 2021, 29(1): 187-191.
- [30] 徐璐. 楔形截骨加压骑缝钉内固定治疗大龄儿童僵硬型马蹄足[D]. 重庆: 重庆医科大学, 2009.