

· 基础研究 ·

三种空心钉构型踝关节融合的有限元分析

张宁, 康颂科*, 李伟延, 李强, 朱涛

(山东第一医科大学附属人民医院手足外科, 山东济南 271199)

摘要: [目的] 通过有限元分析, 研究空心钉不同构型对镜下踝关节融合稳定性的影响。[方法] 选择 1 例 37 岁男性志愿者为研究对象, 螺旋 CT 自膝关节至足底进行薄层扫描, 获得 DICOM 图像导入到 Mimics 中分割跟骨、距骨、胫骨、腓骨三维点云, Geomagic、Hypermesh 中模拟构建踝关节有限元模型, 分别建立正常对照模型和双钉平行、双钉交叉和三钉交叉的踝关节融合模型。观察模型中胫距关节面相对位移、Mises 应力峰值及平均 Mises 应力。[结果] 载荷下双钉平行组位移显著大于双钉交叉组和三钉交叉组, 包括跖屈 [(106.2±8.6) μm vs (58.9±4.5) μm vs (58.5±4.1) μm, $P<0.001$], 内旋 [(101.6±6.4) μm vs (59.1±4.4) μm vs (58.5±4.0) μm, $P<0.001$] 和外旋 [(101.5±6.6) μm vs (58.5±4.6) μm vs (58.3±4.2) μm, $P<0.001$], 而双钉交叉组和三钉交叉组之间差异无统计学意义 ($P>0.05$)。双钉平行组空心钉的应力峰值大于双钉交叉组和三钉交叉组, 其中站立状态下 (65.5 MPa, 51.3 MPa, 50.5 MPa), 双钉平行组胫距关节平均 Mises 应力显著小于双钉交叉组、三钉交叉组 ($P<0.05$), 双钉交叉组、三钉交叉组之间差异无统计学意义 ($P>0.05$)。[结论] 双钉交叉组、三钉交叉组空心钉构型的稳定性优于双钉平行组, 有利于提高镜下踝关节融合的成功率。

关键词: 踝关节融合, 关节镜, 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 (2024) 08-0744-06

A finite element analysis on ankle joint fusion with three cannulated screw configurations // ZHANG Ning, KANG Song-ke, LI Wei-yan, LI Qiang, ZHU Tao. Department of Hand and Foot Surgery, People's Hospital of Jinan City, Shandong First Medical University, Jinan 271199, China

Abstract: [Objective] To explore the effect of different configurations of cannulated screws on the stability of ankle joint fusion by finite element analysis. **[Methods]** Thin-layer scan from knee joint to sole was performed in a 37-year-old male volunteer by spiral CT, and DICOM images were obtained and imported into Mimics to segment three-dimensional point clouds of calcaneus, talus, tibia and fibula, and then, the finite element model of ankle joint was simulated in Geomagic and Hypermesh. The normal control model and the ankle joint fusion models with double screws parallel (DSP), double screws crossover (DSC) and triple screws crossover (TSC) were established respectively. The relative displacement of the tibial talar joint surface, the Mises stress peak value and the mean Mises stress in the model were observed. **[Results]** The DSP group proved significantly greater than the DSC and TSC groups in term of displacements under loading, including plantar flexion [(106.2±8.6) μm vs (58.9±4.5) μm vs (58.5±4.1) μm, $P<0.001$] internal rotation [(101.6±6.4) μm vs (59.1±4.4) μm vs (58.5±4.0) μm, $P<0.001$] and external rotation [(101.5±6.6) μm vs (58.5±4.6) μm vs (58.3±4.2) μm, $P<0.001$], while there was no significant difference between the DSC and TSC groups ($P>0.05$). The DSP had significantly greater peaks Mises stress on the implant than DSC group and the TSC group (65.5 MPa, 51.3 MPa, 50.5 MPa). In addition, the Mises stress on the tibiotalar articular surface in the DSP group was significantly less than those in the DSC and the TSC groups ($P<0.05$), whereas which was not statistically significant between DSC group and TSC group ($P>0.05$). **[Conclusion]** The DSC and TSC have significantly better stability of the screw placement configuration than that in DSP placement, while good stability of the screw placement is conducive to improving the success rate of arthroscopic ankle arthrodesis.

Key words: ankle arthrodesis, arthroscopy, internal fixation, finite element analysis

踝关节骨性关节炎多继发于慢性踝关节不稳、创伤和类风湿性关节炎, 患病率低于髋关节或膝关节, 严重影响患者生活质量^[1]。尽管全踝关节置换术正在成为一种常用的治疗方法, 然而踝关节融合仍是治疗

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2024.08.13

作者简介: 张宁, 主治医师, 研究方向: 足踝关节, (电话)13626343117, (电子信箱)zhangmishu@163.com

* 通信作者: 康颂科, (电话)0531-76278397, (电子信箱)13863409635@163.com

踝关节终末期关节炎和关节畸形的首选方案，特别是针对年轻或高度活跃患者^[2]。踝关节融合术能够避免全踝关节置换继发的假体松动，有效缓解关节疼痛，并可保留部分的后足活动功能^[3]。近年来，随着踝关节镜微创技术的发展，镜下踝关节融合取得良好的临床效果，与传统的开放式踝关节相比，关节镜下融合术并发症少、康复快、住院时间短^[4]。但对关节镜下踝关节融合仍存在一些问題，包括镜下融合的矫正能力、骨丢失、融合率等^[5]。

镜下置入空心螺钉的数量和方向是影响胫距关节面愈合时间的重要因素^[6]。目前，常用固定方式为经皮两枚或 3 枚空心钉^[7, 8]。Jullion 等^[9]对 111 例镜下踝关节融合患者随访显示，3 枚空心钉组的融合率和融合时间均优于两枚空心钉组。Wang^[10]等通过有限元分析认为，跨“胫-距”的后内侧螺钉组合的固定强度优于后外侧螺钉组合，然而胫距关节接触面积较小，有时很难打入 3 枚空心钉。Zhu 等^[11]研究了两枚螺钉组合形态对踝关节融合强度的影响，结果显示，后内+后外两枚螺钉在抗背屈、抗外翻和内翻强度方面差于交叉放置和内侧平行排列。本研究对三种常用的空心钉组合方式进行有限元分析，为临床正确选择提供帮助。

1 资料与方法

1.1 数据采集与足踝模型建立

选择 1 例 37 岁男性志愿者为研究对象。纳入标准：双下肢无骨折手术史、下肢无畸形及肿瘤、距骨无坏死。研究对象双下肢保持中立位，即双下肢并拢，足脚尖向上，踝关节 90°，以 0.625 mm 层厚，自膝关节至足底进行 CT 薄层扫描，共获取 261 张 DICOM 图像。导入到医学建模软件 Mimics14.0 中，通过灰度值分割出跟骨、距骨、胫骨、腓骨的三维点云，以 .txt 格式导入逆向软件 Geomagic studio 10.0 中，对各骨骼模型进行去除表面钉状物、空洞及异常特征，光滑骨面，构建精确曲面，经栅格化后，形成 Nurbs 曲面，以 .iges 格式输出，在 Hypermesh 中导入骨骼的实体文件，因 CT 图像中不显示关节软骨厚度，基本符合融合手术过程中切除关节软骨，向胫骨侧调整距骨位置，以模拟踝关节融合。在 Hypermesh 的辅助设计模块，拉伸出直径为 7.5 mm 的全螺纹空心螺钉，长度分别为 50、55、60 mm 等。参照手术设计，将其分别于踝关节模型进行组合和布尔运算，建立双钉平行模型、双钉交叉模型、三钉交叉模型。

1.2 踝融合模型建立

Hypermesh 中划分四节点六面体单元 (C3D4R)。根据踝关节周围韧带的解剖位置，建立主要韧带，如跟腓韧带、距腓前韧带、距腓后韧带及三角韧带，韧带采用四节点膜单元。本研究中均采用全螺纹空心钉，螺纹与骨隧道之间通过面面之间 tie 约束关系进行模拟，而将螺纹简化成圆柱体。同时在空心钉的距骨与胫骨间添加 80 N 预紧力，模拟螺钉加压作用。融合模型中胫距关节面摩擦因数为 0.7，其他关节的摩擦系数为 0.01。所有结构均视为各向同性线弹性材料，其中皮质骨和松质骨的杨氏模量为分别为 837 MPa 和 13 000 MPa，泊松比为 0.3。螺钉的杨氏模量定义为 110 GPa，泊松比为 0.4。韧带的杨氏模量为 260 MPa，泊松比为 0.4，关节的杨氏模量为 12 MPa，泊松比为 0.4^[10, 12, 13]。

1.3 加载与设定

上述模型导入 Abaqus 6.14 中，调整模型的坐标位置，使冠状面为 XZ，矢状面为 YZ、横断面为 XY。模型胫腓骨近端为边界条件，约束旋转和平移 6 个自由度，在踝关节中线与足底下表面焦点建立参考点，并与跟骨下表面节点建立耦合关系，在几何点上添加 Z 轴正方向的垂直载荷 300 N，模拟人体双足站立地面的反作用力。另外，分别添加 10 N·m 的力矩，模拟踝关节屈伸和内外旋运动。每种模型重复加载 10 次，进行计算和验证。

1.4 测量指标

踝关节融合模型中，相应节点相对位移量；胫距关节接触面、腓骨远端的平均 Mises 应力及内固定螺钉的 Mises 应力峰值。

1.5 统计学方法

采用 SPSS 24.0 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，组间比较采用独立样本 *t* 检验；资料呈非正态分布时，采用秩和检验。计数资料采用 χ^2 检验或 Fisher 精确检验。等级资料两组比较采用 Mann-Whitney *U* 检验，组内比较采用多个相关资料的 Friedman 检验。*P*<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 模型验证

本研究建立正常对照模型及 3 个镜下踝关节融合模型，双钉平行组两枚空心钉分别从胫骨后内侧和后外侧平行置入到距骨头。双钉交叉组两枚空心钉中，

1 枚为后内侧空心钉，另 1 枚从胫骨前内侧植入到距骨体。三钉交叉组为 3 枚空心钉固定，1 枚为后内侧空心钉，另外 2 枚分别从胫骨前内和前外置入到距骨体外侧。4 个模型与人体踝关节均具有高度的相似性，模型单元数量为 310 176~316 211，节点数为 67 812~68 681。

2.2 位移分析

本研究中采用胫距关节面的平均位移和最大位移

分析 3 个踝关节融合模型的稳定性。跖屈和内、外旋载荷下，三个模型的平均位移均显著大于站立和背屈载荷 ($P<0.05$)。跖屈载荷平均位移显著大于内、外旋载荷 ($P<0.05$)。跖屈及内、外旋载荷下，双钉平行组平均位移显著大于双钉交叉组和三钉交叉组 ($P<0.05$)，双钉交叉组和三钉交叉组之间差异无统计学意义 ($P>0.05$)。

表 1. 踝关节融合模型中胫距关节面位移比较 ($n=10, \mu\text{m}, \bar{x} \pm s$)

Table 1. Comparison of displacement of tibiotalar articular surface in ankle fusion models ($n=10, \mu\text{m}, \bar{x} \pm s$)

状态	双钉平行组	双钉交叉组	三钉交叉组	P 值
站立	46.1±5.2	45.9±3.3	45.5±4.0	0.187
背屈	46.4±4.7	46.2±4.1	46.1±3.3	0.965
跖屈	106.2±8.6	58.9±4.5	58.5±4.1	<0.001
内旋	101.6±6.4	59.1±4.4	58.5±4.0	<0.001
外旋	101.5±6.6	58.5±4.6	58.3±4.2	<0.001
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	

2.3 Von Mises 应力测量

站立载荷下，对照模型中腓骨远端应力与双钉平行组、双钉交叉组、三钉交叉组 3 个融合模型比较，差异无统计学意义 ($P>0.05$)。而其他载荷下，对照模型中腓骨远端平均应力显著小于融合模型 ($P<0.05$)。3 个融合模型之间差异无统计学意义 ($P>0.05$)。

内固定的 Mises 应力峰值均集中在钉体中部 (图 1a, 1b)，其中后内侧螺钉峰值应力大于其他螺钉 (图 1c)。不同模型之间比较，双钉平行组应力峰值显著大于双钉交叉组和三钉交叉组，三组跖屈载荷时，螺钉应力最大，站立时载荷最小，见表 2。

表 2. 踝关节融合模型中内固定峰值应力比较 (MPa)

Table 2. Comparison of peak stress on the implant in ankle fusion models (MPa)

状态	双钉平行组	双钉交叉组	三钉交叉组
站立	65.5	51.3	50.5
背屈	73.3	68.5	65.4
跖屈	94.4	76.2	73.4
内旋	85.5	72.5	69.5
外旋	85.7	72.7	68.6

3 个融合模型中，胫距关节最大应力均出现在钉道周围 (图 1d~1f)，其中以站立载荷最大，跖屈载荷最小 ($P<0.05$)。不同模型之间比较，胫距关节面

双钉平行组模型平均应力显著小于双钉交叉组、三钉交叉组 ($P<0.05$)，双钉交叉组、三钉交叉组之间差异无统计学意义 ($P>0.05$)，见表 3。

3 讨论

踝关节融合是治疗终末期踝关节炎主要方案^[14]。自 Albert 于 1879 年首次报道以来，踝关节融合术已经由石膏固定演化出近 40 余种手术方式，包括手术方法、入路和固定器材等^[15, 16]。白子兴等^[17]对 18 篇文献、1 102 例患者荟萃分析显示，关节镜辅助踝关节融合术的临床疗效优于开放性融合。空心螺钉是镜下融合的主要器材，然而在螺钉空间构型、数量、直径等方面仍存在争议^[18]。Jullion 等^[9]临床研究显示，3 枚空心钉固定术后踝关节融合率和融合时间均优于两枚空心钉。但因胫距关节间的空间有限，致使术中置入空心钉过程很容易出现相互干扰，而无法打入第 3 枚空心钉，特别是对一些初学者^[19-21]。本研究对 2 枚空心钉的不同空间构型与常用的 3 枚空心钉固定的稳定性进行有限元对照研究。既往文献中关于踝关节融合的有限元模型多研究了内固定和胫距关节应力，而忽略了腓骨远端的作用^[22]。笔者在建模过程中，保留了踝关节外侧韧带结构，如距腓前韧带、跟腓韧带等，并观察腓骨远端对融合稳定性的影响。

表 3. 踝关节融合模型中骨结构的平均 Mises 应力比较 (n=10, MPa, $\bar{x} \pm s$)

Table 3. Comparison of Mises stress on the bone structures in ankle fusion and non-fusion models (n=10, MPa, $\bar{x} \pm s$)

状态	双钉平行组	双钉交叉组	三钉交叉组	对照模型	P 值
腓骨远端					
站立	5.4±1.0	5.3±1.1	5.4±0.9	5.4±1.1	0.977
跖屈	13.6±2.0	14.4±2.1	14.1±2.3	9.8±1.2	<0.001
背屈	14.3±1.5	14.5±1.7	14.6±1.2	10.1±1.0	<0.001
内旋	14.4±1.7	14.7±1.6	14.7±1.3	10.3±1.0	<0.001
外旋	13.2±1.4	13.1±0.8	13.2±1.0	10.0±0.8	<0.001
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	
胫距关节面					
站立	59.4±3.7	72.4±5.6	72.9±5.2	-	<0.001
跖屈	37.2±2.8	44.0±3.9	43.6±3.1	-	<0.001
背屈	41.7±3.2	57.0±4.4	56.3±3.7	-	<0.001
内旋	40.8±3.1	56.5±5.2	57.1±4.6	-	<0.001
外旋	41.2±3.6	56.8±4.2	56.7±3.6	-	<0.001
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	-	

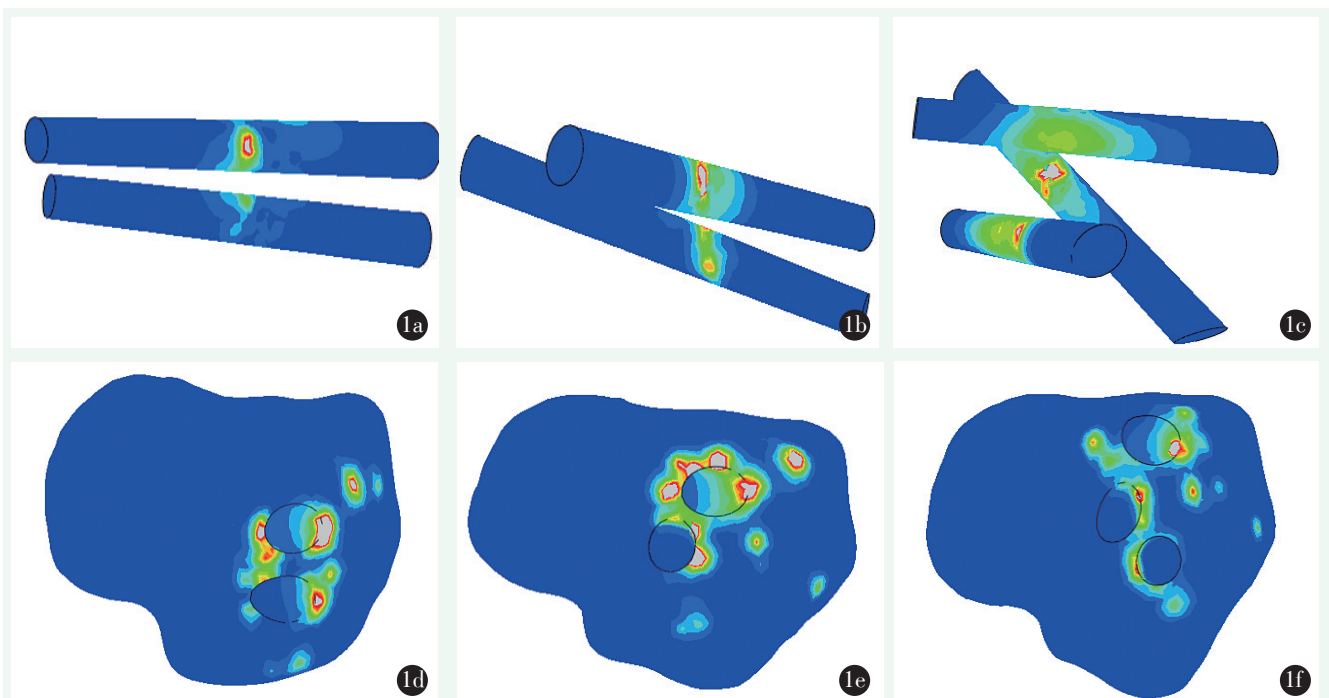


图 1. 三维有限元模型的应力分布。1a: 双钉平行组的空心钉应力分布；1b: 双钉交叉组空心钉应力分布；1c: 三钉交叉组空心钉应力分布；1d: 双钉平行组中距骨上关节面的应力；1e: 双钉交叉组中距骨上关节面的应力分布；1f: 三钉交叉组中距骨上关节面的应力分布。

Figure 1. Stress distributions in the 3D finite element models. 1a: Stress distribution on double screws placed parallelly; 1b: Stress distribution on two screws placed crossly; 1c: Stress distribution of three screw placed crossly each other; 1d: Stress on the articular surface of the upper talus in the double-screw parallel group; 1e: Stress on talus upper articular surface in double-screw crossover group; 1f: Stress on the articular surface in the three-screw crossover group.

在本研究中笔者参考临床实际情况设计了两种双螺钉固定的构型，第 1 种为后内+后外的平行构型，Zhu 等^[11]有限元分析认为，该构型的力学稳定性优

于内外侧交叉构型及双内侧平行构型。但该种构型在术中安全置入后外侧空心钉存在很大难度，后外侧通道周围有腓骨阻挡和腓肠神经，Cesar 等^[23]认为，经

皮后外侧螺钉的软组织通道周围距离跟腱为(5.4±2.7) mm; 腓骨肌腱(9.7±5.2) mm, 而距腓肠神经仅为(3.6±2.2) mm。为此笔者设计了第2种构型, 即后内+前内的交叉构型, 该构型的优点在于前内侧螺钉的远端置入位置为距骨体的内侧部分, 距离后内侧螺钉较远, 不容易形成干扰, 可操控性强。3枚螺钉固定的空间形态较多。Wang等^[10]设计了5种构型进行力学分析, 结果显示, 配置后内侧螺钉3种构型的力学稳定性显著优于配置后外侧螺钉的2种构型。本研究中建立的模型为后内侧+前外+前内的有限元模型, 为避免螺钉之间的干扰, 2枚前侧螺钉的远端均处于距骨体的外侧部分。

胫距融合模型中均根据手术实际情况保留了腓骨, 结果显示3个融合模型中腓骨远端应力 Mises 应力显著大于对照模型。腓骨远端是维持踝关节稳定的重要结构, 微创踝关节融合中, 保留腓骨能够通过周围的韧带结构, 将距下关节的扭转载荷通过韧带的控制作用, 有效向近端放散, 从而减少胫距关节的应力, 有利于踝关节和距下关节的稳定^[24]。本研究通过在胫骨侧添加不同轴向的10 N·m 扭矩, 模拟踝关节不同运动状态对胫距关节稳定性和固定强度的影响, 结果显示, 在跖背屈、内和外旋时, 踝关节融合模型的平均位移均显著大于站立和背屈载荷, 其中双钉平行组平均位移显著大于双钉交叉组和三钉交叉组, 并且3个融合模型的最大位移均出现在胫距关节面前侧, 主要因后踝与距骨体之间存在较大的接触, 有后内侧螺钉固定, 能够较好地控制后方稳定。双钉平行组中两枚螺钉均由后向前平行放置, 前侧关节面之间无轴向加压, 在承受扭转及跖屈载荷时, 容易形成前侧融合面的张开, 而双钉交叉组中前内侧置入距骨体中前部, 三钉交叉组中更在中后部辅助螺钉, 更增加了固定的稳定性。该结果与欧阳汉斌等^[25]研究结果一致。

胫距关节面接触应力是维持骨性愈合的关键因素, 接触面应力越大越稳定。3个融合模型中, 胫距关节最大应力均出现在钉道周围。因双钉平行组中的螺钉方向均为斜向固定胫距关节, 无垂直方向的加压。使得其胫距关节的平均应力显著小于双钉交叉组、三钉交叉组, 并且使得后内侧螺钉成为主要固定螺钉, 其峰值应力大于其他螺钉^[10]。

通过三维有限元分析, 对镜下踝关节融合的3种空心钉构型进行分析, 结果显示双钉交叉组、三钉交叉组的空心钉构型的稳定性优于双钉平行组。

参考文献

- [1] Valderrabano V, Horisberger M, Russell I, et al. Etiology of ankle osteoarthritis [J]. *Clin Orthop*, 2009, 467 (7): 1800-1806. DOI: 10.1007/s11999-008-0543-6.
- [2] Duan X, Yang L, Yin L. Arthroscopic arthrodesis for ankle arthritis without bone graft [J]. *J Orthop Surg Res*, 2016, 11 (1): 154. DOI: 10.1186/s13018-016-0490-y.
- [3] 毛宾尧. 终末期踝关节骨关节炎, 选择融合还是置换 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2015, 23 (13): 1232-1233. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2015.13.18.
Mao BY. End stage ankle osteoarthritis: choosing fusion or replacement [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2015, 23 (13): 1232-1233. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2015.13.18.
- [4] 白子兴, 曹旭含, 孙承颐, 等. 关节镜下与开放性踝关节融合术治疗晚期踝关节炎疗效比较的 meta 分析 [J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2020, 13 (11): 916-923. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9958.2020.11.07.
Bai ZX, Cao XH, Sun CY, et al. A meta-analysis of the efficacy of arthroscopic and open ankle arthrodesis in the treatment of advanced ankle arthritis [J]. *Chinese Journal of Bone and Joint Surgery*, 2020, 13 (11): 916-923. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9958.2020.11.07.
- [5] Duan X, Yang L, Yin L. Arthroscopic arthrodesis for ankle arthritis without bone graft [J]. *J Orthop Surg Res*, 2016, 11 (1): 154. DOI: 10.1186/s13018-016-0490-y.
- [6] Yokoo S, Saiga K, Demiya K, et al. Larger sagittal inter-screw distance/tibial width ratio reduces delayed union or non-union after arthroscopic ankle arthrodesis [J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2023, 33 (5): 1557-1563. DOI: 10.1007/s00590-022-03307-x.
- [7] 欧阳汉斌, 熊军, 项鹏, 等. 踝关节融合术两种固定方式的三维有限元分析 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2012, 20 (16): 1484-1488. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2012.16.13.
Ouyang HB, Xiong J, Xiang P, et al. Finite element modeling of ankle arthrodesis with two fixation techniques [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2012, 20 (16): 1484-1488. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2012.16.13.
- [8] 朱绍阳, 梁振雷, 刘玉强. 镜下融合术治疗终末期创伤性踝关节炎 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (3): 281-283. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.03.20.
Zhu SY, Liang ZL, Liu YQ. Arthroscopic ankle arthrodesis for treatment of end-stage traumatic ankle arthritis [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2022, 30 (3): 281-283. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.03.20.
- [9] Goetzmann T, Mole D, Jullion S, et al. Influence of fixation with two vs. three screws on union of arthroscopic tibio-talar arthrodesis: Comparative radiographic study of 111 cases [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2016, 102 (5): 651-656. DOI: 10.1016/j.otsr.2016.03.015.
- [10] Wang S, Yu J, Ma X, et al. Finite element analysis of the initial stability of arthroscopic ankle arthrodesis with three-screw fixation: posteromedial versus posterolateral home-run screw [J]. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15 (1): 252. DOI: 10.1186/s13018-020-01767-7.

- [11] Zhu M, Yuan C, Jin Z, et al. Initial stability and stress distribution of ankle arthroscopic arthrodesis with three kinds of 2-screw configuration fixation: a finite element analysis [J]. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 2018, 13 (1) : 263. DOI: 10.1186/s13018-018-0972-1.
- [12] 梁远, 王静成, 何金山, 等. 缝合锚钉固定下胫腓联合损伤对距骨应力分布影响的有限元分析 [J]. *海南医学*, 2018, 29 (15) : 2097-2099. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6350.2018.15.008.
Liang Y, Wang JC, He JS, et al. Finite element analysis of the effect of suture anchor fixation for inferior tibiofibular syndesmosis injury on the stress distribution of talus [J]. *Hainan Medicine*, 2018, 29 (15) : 2097-2099. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6350.2018.15.008.
- [13] 刘忠鑫, 王维, 张欣, 等. 螺钉固定与 Tight-rope 固定治疗下胫腓前联合损伤的初步有限元分析 [J]. *中国骨伤*, 2018, 31 (10) : 937-943. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2018.10.012.
Liu ZX, Wang W, Zhang X, et al. Preliminary finite element analysis of anterior inferior tibiofibular syndesmosis injuries treated with screw and tight-rope fixation [J]. *China Journal of Orthopaedics and Traumatology*, 2018, 31 (10) : 937-943. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2018.10.012.
- [14] 丁松, 周耀君, 陈明亮, 等. 踝关节融合术的研究进展 [J]. *国际骨科学杂志*, 2020, 41 (1) : 32-36. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7083.2020.01.008.
Ding S, Zhou YJ, Chen ML, et al. Research progress of ankle arthrodesis [J]. *International Journal of Orthopaedics*, 2020, 41 (1) : 32-36. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7083.2020.01.008.
- [15] 谭文志, 王国强, 王建忠, 等. 踝关节融合术式的应用与研究进展 [J]. *足踝外科电子杂志*, 2021, 8 (3) : 59-64. DOI: 10.3969/j.issn.2095-7793.2021.03.013.
Tan ZW, Wang GQ, Wang JZ, et al. Application and research progress of ankle arthrodesis [J]. *Electronic Journal of Foot and Ankle Surgery*, 2021, 8 (3) : 59-64. DOI: 10.3969/j.issn.2095-7793.2021.03.013.
- [16] 谢强, 王智慧, 刘文一, 等. 三维有限元分析钢板踝关节融合后的力学稳定性 [J]. *中国组织工程研究*, 2018, 22 (3) : 392-397. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.0036.
Xie Q, Wang ZH, Liu WY, et al. Mechanical stability after plating ankle arthrodesis based on three-dimensional finite element analysis [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2018, 22 (3) : 392-397. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.0036.
- [17] 白子兴, 曹旭含, 孙承颐, 等. 关节镜下与开放性踝关节融合术治疗晚期踝关节炎疗效比较的 meta 分析 [J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2020, 13 (11) : 916-923. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9958.2020.11.07.
Bai ZX, Cao XH, Sun CY, et al. A meta-analysis comparing the efficacy of arthroscopic and open ankle arthrodesis in the treatment of advanced ankle arthritis [J]. *Chinese Journal of Bone and Joint Surgery*, 2020, 13 (11) : 916-923. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9958.2020.11.07.
- [18] Clifford C, Berg S, McCann K, et al. A biomechanical comparison of internal fixation techniques for ankle arthrodesis [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2015, 54 (2) : 188-191. DOI: 10.1053/j.jfas.2014.06.002.
- [19] Somberg AM, Whiteside WK, Nilssen E, et al. Biomechanical evaluation of a second generation headless compression screw for ankle arthrodesis in a cadaver model [J]. *Foot Ankle Surg*, 2016, 22 (1) : 50-54. DOI: 10.1016/j.fas.2015.04.010.
- [20] Kamijo S, Kumai T, Tanaka S, et al. Comparison of compressive forces caused by various cannulated cancellous screws used in arthroscopic ankle arthrodesis [J]. *J Orthop Surg Res*, 2017, 12 (1) : 7. DOI: 10.1186/s13018-016-0503-x.
- [21] de Leeuw PA, Hendrickx RP, van Dijk CN, et al. Midterm results of posterior arthroscopic ankle fusion [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2016, 24 (4) : 1326-1331. DOI: 10.1007/s00167-015-3975-z.
- [22] 宋登新, 曹云, 何小文, 等. 有限元法分析不同截肢术后胫腓骨远端的应力和位移变化 [J]. *生物医学工程研究*, 2015, 34 (2) : 85-88. DOI: 10.19529/j.cnki.1672-6278.2015.02.004.
Song DX, Cao Y, He XW, et al. Finite element analysis of the distal tibia and fibula stress and displacement change after different transtibial amputation [J]. *Journal of Biomedical Engineering Research*, 2015, 34 (2) : 85-88. DOI: 10.19529/j.cnki.1672-6278.2015.02.004.
- [23] Cesar DCN, Roberts L, Staggers J, et al. Ankle fusion percutaneous home run screw fixation: technical aspects and soft tissue structures at risk [J]. *Foot Ankle Orthop*, 2018, 3 (3) : 2473011418S0020. DOI: 10.1177/2473011418S00207.
- [24] 徐菲. 基于有限元模型对踝模拟扭伤机制的探讨 [J]. *天津医科大学学报*, 2019, 25 (6) : 612-614.
Xu F. Discussion on mechanism of ankle sprain based on FEM model [J]. *Journal of Tianjin Medical University*, 2019, 25 (6) : 612-614.
- [25] 欧阳汉斌, 熊军, 项鹏, 等. 腓骨支撑踝关节融合的三维有限元分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2012, 16 (13) : 2296-2299. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8225.2012.13.004.
Ouyang HB, Xing J, Xiang P, et al. Three-dimensional finite element analysis of ankle arthrodesis with fibular strut graft [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2012, 16 (13) : 2296-2299. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8225.2012.13.004.

(收稿:2023-01-10 修回:2023-12-04)

(同行评议专家: 王明明, 仇申强, 徐辉)

(本文编辑: 宁桦)