

文章编号: 1004-7220(2022)03-0498-06

# 马蹄环式外固定架固定 AO-C2 型 Pilon 骨折在轴向载荷下的稳定性

陈洋<sup>1,2</sup>, 刘广伟<sup>3</sup>, 成永忠<sup>1</sup>, 黄晓宇<sup>1</sup>, 陈奕历<sup>1</sup>, 陈泓颖<sup>2</sup>, 汪雄伟<sup>2</sup>,  
赵继阳<sup>4</sup>, 史长龙<sup>1</sup>

(1.中国中医科学院望京医院 创伤一科,北京 100102; 2.北京中医药大学 临床医学院,北京 100102;  
3.中医正骨技术北京市重点实验室,北京 100102; 4.北京中医药大学第三附属医院 创伤关节科,北京 100102)

**摘要:**目的 在传统环形外固定架构型基础上进行重新设计,使其更适合关节内 Pilon 骨折的固定。通过定量分析负重载荷下应用马蹄环形外固定架固定 Pilon 骨折端位移以验证该外固定架的稳定性。**方法** 采用摆锯依据预先制定的截骨线制备 AO-C2 型 Pilon 骨折模型,应用马蹄环形外固定架对其固定,然后于力学加载机上进行轴向载荷力学加载。轴向载荷加载方式为从 0 N 开始依次加载至 150、300、450 N。用动态捕捉仪记录轴向载荷加载过程中骨折块在 X(左右)、Y(上下)、Z(前后)轴的移位变化。**结果** 腓骨左右、上下、前后方向整体移位范围分别为 0.32~0.70、-0.27~-0.23、0.23~0.32 mm,最大差值为 0.09 mm。胫骨内踝侧骨折块左右、上下、前后方向整体移位分别为 0.02~0.14、-0.80~-0.19、-0.78~-0.13 mm。胫骨外踝侧骨折块左右、上下、前后方向整体移位范围分别为 -0.07~0.05、-0.36~-0.03、0.27~0.47 mm。**结论** 马蹄环形外固定架不仅能实现骨折端的稳定固定且能产生有利于骨折愈合的微动,符合骨折愈合的生物力学特点。该外固定架构型简单,适合 Pilon 骨折的治疗,值得推广应用。

**关键词:** Pilon 骨折; 马蹄环; 外固定架

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.03.018

## Stability of Fixation for AO-C2 Pilon Fracture with Horseshoe Ring External Fixator under Axial Loading

CHEN Yang<sup>1,2</sup>, LIU Guangwei<sup>3</sup>, CHENG Yongzhong<sup>1</sup>, HUANG Xiaoyu<sup>1</sup>, CHEN Yili<sup>1</sup>,  
CHEN Hongying<sup>2</sup>, WANG Xiongwei<sup>2</sup>, ZHAO Jiyang<sup>4</sup>, SHI Changlong<sup>1</sup>

(1. No.1 Department of Traumatology, Wangjing Hospital, Chinese Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100102, China; 2. School of Clinical Medicine, Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 100102, China; 3. Beijing Key Laboratory of Bone Setting Technology of Traditional Chinese Medicine, Beijing 100102, China; 4. Department of Traumatic Joint, the Third Affiliated Hospital of Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 100102, China)

**Abstract: Objective** The traditional circular external fixation structure was redesigned to make it more suitable for

收稿日期: 2021-05-07; 修回日期: 2021-08-22

基金项目: 中国中医科学院科技创新工程项目(C12021A02008), 首都临床特色应用研究与成果推广(Z161100000516111), 2020 年度北京中医药大学中央高校基本科研业务费研究生创新创业类自主选题(2020-jxs-022)

通信作者: 成永忠, 主任医师, 博士生导师, E-mail: bless518@139.com

intraarticular Pilon fracture fixation. The stability of the horseshoe annular external fixator was verified by analyzing fracture displacement of the Pilon bone after fixation with the external fixator under loading. **Methods** AO-C2 Pilon fracture model was prepared by pendulum saw according to predetermined osteotomy line, and then fixed by horseshoe ring external fixator. The fixed ankle model was subjected to axial loading on mechanical test machine. The axial force loading mode was from 0 N to 150 N, 300 N and 450 N successively. The displacement changes of fracture blocks in X (left-right), Y (up-down) and Z (anterior-posterior) axis during axial loading were recorded by dynamic capture instrument. **Results** The overall left-right, up-down and anterior-posterior displacement of the fibula ranged from 0.32 mm to 0.70 mm, -0.27 mm to -0.23 mm and 0.23 mm to 0.32 mm, and the maximum difference was 0.09 mm. The overall left-right, up-down and anterior-posterior displacement of medial malleolus fracture in the tibia range from 0.02 mm to 0.14 mm, -0.80 mm to -0.19 mm and -0.78 mm to -0.13 mm. The overall left-right, up-down and anterior-posterior displacement of lateral malleolus fracture in the tibia ranged from -0.07 mm to 0.05 mm, -0.36 mm to -0.03 mm, 0.27 mm to 0.47 mm. **Conclusions** The horseshoe ring external fixator can not only stabilize the fracture end, but also produce micromotion which is beneficial to fracture healing, which accords with biomechanical characteristics of fracture healing. The external fixator structure is simple, suitable for the treatment of Pilon fracture, and worthy of popularization and application.

**Key words:** Pilon fracture; horseshoe ring; external fixator

Pilon 骨折占下肢骨折 1%, 占胫骨骨折 3% ~ 5%<sup>[1]</sup>。高能量的轴向暴力和旋转暴力会导致胫骨远端干骺端严重粉碎, 关节面压缩及严重的软组织损伤<sup>[2]</sup>。目前, 手术是 Pilon 骨折主要治疗方式。相比急诊切开复位内固定, 延期治疗方案大大降低了感染以及皮瓣坏死、骨折延期愈合及不愈合等术后并发症的发生率, 故延期治疗 Pilon 骨折得到广泛的推广<sup>[3-4]</sup>。然而延期方案虽降低了并发症, 但二次手术依然会对骨与软组织造成二次创伤<sup>[5]</sup>。研究表明, 外固定支架微创固定不仅可以作为临时固定支架, 同时也能实现骨折的一期固定, 且骨折的外固定架一期固定与延期方案的治疗效果相当<sup>[6-7]</sup>。目前临床常用的单臂式外固定架及环形外固定架都具有一定的局限性。单臂式外固定架稳定性较差, 而环形外固定架构型复杂、体积较大, 不方便佩戴, 且在髋、肩关节及股骨附近应用时会对医生操作造成非常大的不方便<sup>[8-9]</sup>。

本课题组在传统环形外固定架构型基础上进行重新设计, 使其构型更简单, 患者佩戴轻便, 适合关节内 Pilon 骨折的马蹄环形外固定架。本文定量分析负重载荷下应用该外固定架固定 Pilon 骨折端位移, 以验证该外固定架的稳定性。

## 1 对象与方法

### 1.1 实验材料及设备

6 个 PVC 材料右踝关节模型(ENOVO 公司, 中国); 电子万能试验机测控系统(SYL-Ladan678, 鑫峰仪器设备公司); 动态捕捉系统(产品型号 Prime 13, 130 万像素, 镜头捕捉频率 120 Hz, Optitrack 公司, 美国); 生产动作捕捉系统软件 Motive: Body 1. 10. 1 Final 及其他同步配套软件。

### 1.2 AO-C2 型 Pilon 骨折模型制备

**1.2.1 AO-C2 型 Pilon 骨折截骨线规划** 胫骨截骨: 先于冠状面关节面 50% 纵行截骨, 深度为 3 cm; 再于距踝关节面水平线垂直上 3 cm 横行截骨, 以横行截骨线中点做与胫骨纵轴平行的截骨线。截骨线穿过关节面将胫骨远端分为大小基本相等的两个骨块, 将关节面分为三部分。腓骨截骨: 在踝关节面水平面上 3 cm 对腓骨横行截骨(见图 1)。

**1.2.2 模型的合理性阐述** ① 胫骨截骨线参照 Pilon 骨折 AO-C2 型骨折线走向。关节面参照 Reudi-Augower II 型关节面的骨折线及骨折块情况。② 胫骨截骨高度设定参考文献[10], 胫骨截骨线高度为关节面上 3 cm; ③ 研究表明, 40% 的 Pilon 骨折会合并腓骨。腓骨高度确立参考文献[11], 腓骨骨折线高度与胫骨骨折线高度等同。

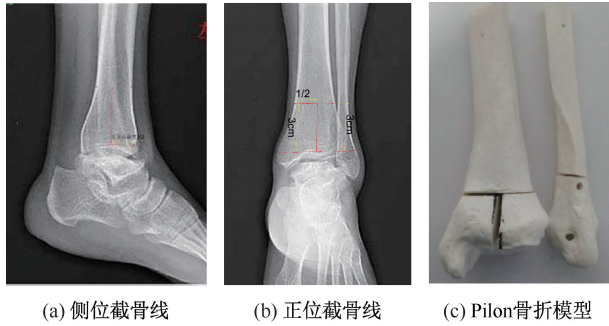


图1 Pilon骨折模型制备

Fig.1 Pilon fracture model preparation (a) Lateral osteotomy line, (b) Anterior osteotomy line, (c) Pilon fracture model

### 1.3 自主设计的马蹄环式外固定架特点

本马蹄环形外固定架靠后面的两个螺纹杆调节环的间距,并通过所带的万向关节器维持踝关节的力学轴向;马蹄环前端螺纹杆用于调节踝关节固定的角度;L型杆配合管针架调节半针固定的位置,扁平柱增加骨针的固定距离,方便原理马蹄环位置的骨针与外固定架连接(见图2)。

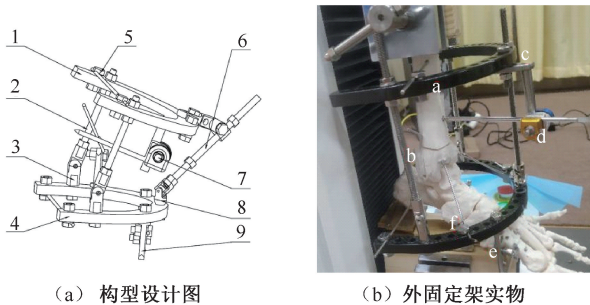


图2 马蹄环式外固定架构型

Fig.2 Configuration of horseshoe annular external fixator

(a) Configuration plan, (b) External fixing frame

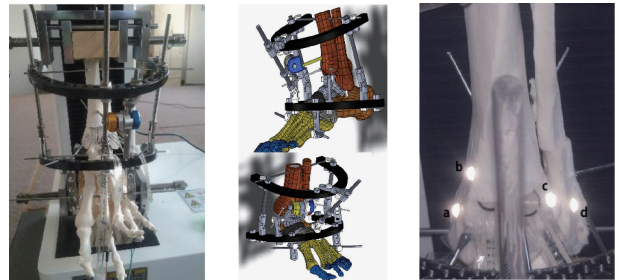
注:1、4为马蹄环,2为螺纹杆,3为球形关节器,5为锁针器,6为牵拉螺纹杆,7为L型杆及弹簧管针夹,8为万向关节器,9为扁平柱;a为马蹄环;b为带关节器的螺纹杆,支撑和调节足背固定方向;c为L型杆,调节螺纹半针固定方向;d为弹簧管针夹,连接固定骨针;e为扁平柱,连接骨针与外固定架;f为锁针螺钉,压紧骨针。

马蹄环相比半环的周长更长,这可以增大骨针交叉穿针的角度。整体环的数量减为两个,以减轻外固定架重量。螺纹杆上加入上球型关节铰链调节踝关节固定位置。临床中可以方便地把踝关节固定于背伸中立位置,以避免踝穴变窄,同时能利用后侧关节囊牵拉后侧骨折块复位,加强牵拉的力

度以减少固定性马蹄足下垂畸形的发生。

### 1.4 标本固定

用粗螺钉固定从跟骨上方穿入将足固定在木块上;带将另一木块固定在模型胫腓骨上。然后放入力学加载机的夹具上进行力学加载。最后将光标标记点贴在相应的骨折块上。外固定架固定方法:用3根克氏针分别从胫骨中下1/3位置,跟骨及第1跖骨底打入对侧并固定在马蹄环上,连接螺纹杆与扁平柱组成外固定架的整体框架;再分别用两根橄榄针从左右两个方向,倾斜 $60^\circ$ 左右穿入两个骨块对其进行固定;1根克氏针从腓骨尖端穿入固定腓骨骨折。将两根橄榄针用锁针器(扁平柱)连接,增加固定的稳定性(见图3)。



(a) 力学加载机固定 (b) 外固定架局部穿针布局 (c) 光标标记位置

图3 模型固定

Fig.3 Model fixation (a) Mechanical loading machine fixation, (b) Local needle threading layout of external fixator, (c) Location of cursor mark

注:a为胫骨近端标记点(参考标记);b为胫骨内侧骨折标记点,c为胫骨外侧骨块标记点;d为腓骨骨块标记点。

### 1.5 观察指标

正常成人平均体重60 kg,单足负重为体重的1/2,即30 kg。研究采用轴向力学加载,从0 N开始分别加载至150、300、450 N。用动态捕捉仪记录在轴向载荷加载过程中骨折块在X、Y、Z轴的位移变化。X轴水平面向左为正,向右为负;Y轴:矢状面向上为正,向下移位为负;Z轴:冠状面向后为正,向前移位为负。

## 2 结果

### 2.1 腓骨骨折端不同方向微移位变化

随着轴向施加力增加,腓骨骨折端逐渐沿X轴向左移位,整体移位范围为0.32~0.70 mm,最大差值为0.38 mm。骨折块在Y轴的变化规律是先向上

移位,后向下移位;整体移位范围为  $-0.27 \sim -0.23$  mm,最大差值为  $0.04$  mm。腓骨在 Z 轴的变

化规律是先向后移位在前向移位,整体移位范围为  $0.23 \sim 0.32$  mm,最大差值为  $0.09$  mm。

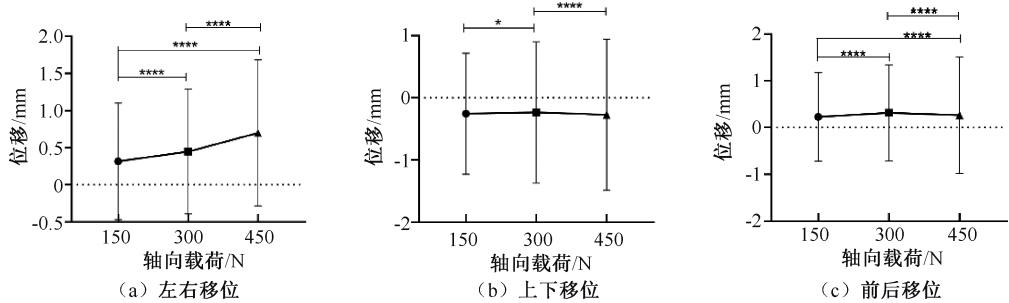


图4 腓骨不同方向微移位变化(\*\*\*\* $P < 0.0001$ , \* $P < 0.01$ )

Fig.4 Micromovement in the fibula in different directions (a) Left-right displacement, (b) Up-down displacement, (c) Anterior-posterior displacement

## 2.2 胫骨内踝侧骨折块不同方向微位移变化

轴向载荷增大至  $300$  N 时,胫骨内踝侧骨折块向右移位,增大至  $450$  N 时则不再发生变化;整体移位范围为  $0.02 \sim 0.14$  mm,最大差值为  $0.12$  mm。上下

位移变化规律是先向上移位,后由向下移位;整体移位范围为  $-0.80 \sim -0.19$  mm,最大差值为  $0.11$  mm。在前后方向上,内踝侧骨折块逐渐向前移位,整体移位范围  $-0.78 \sim -0.13$  mm,最大差值为  $0.65$  mm(见图5)。

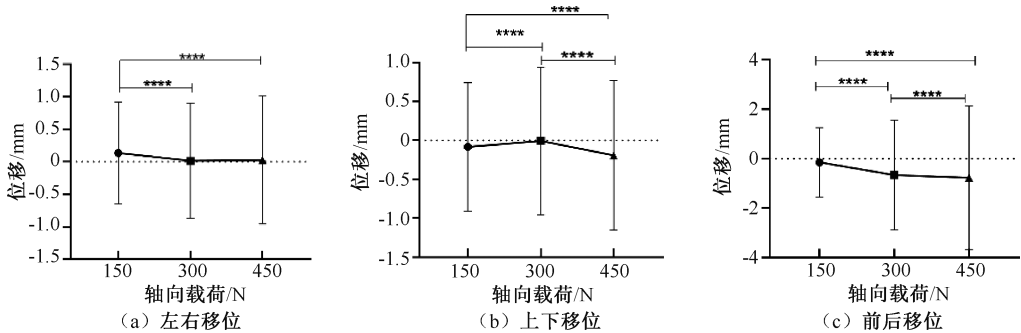


图5 胫骨内踝侧骨折块不同方向微移动变化(\*\*\*\* $P < 0.0001$ , \* $P < 0.01$ )

Fig.5 Micromovement changes of medial malleolus fracture in the tibia in different directions (a) Left-right displacement, (b) Up-down displacement, (c) Anterior-posterior displacement

## 2.3 胫骨外踝侧骨折块不同方向微移位变化

随着轴向施加力增加,胫骨外踝侧骨折块先向右侧移位,然后再向左侧移位;整体移位范围为  $-0.05 \sim 0.07$  mm,最大差值为  $0.13$  mm。上下方向上,骨折块逐渐向下移位。整体移位范围为  $-0.36 \sim -0.03$  mm,最大差值为  $0.33$  mm。在前后方向上,骨折块在载荷从  $300$  N 增大至  $450$  N 时逐渐向前移位,整体移位范围为  $0.27 \sim 0.47$  mm,最大差值为  $0.2$  mm(见图6)。

## 3 讨论

目前 Pilon 骨折治疗方式有切开复位内固定,延期切开复位内固,外固定架结合或不结合有限内固定。外固定架的优势在于能减少对骨折周围软组织床及血供的干扰。对于软组织缺损的 Pilon 骨折,外固定的应用还可以减少内固定物的占位,从而避免内固定物刺激致软组织张力过大,导致软组织坏死或者伤口难以缝合<sup>[12]</sup>。外固定架还可以早



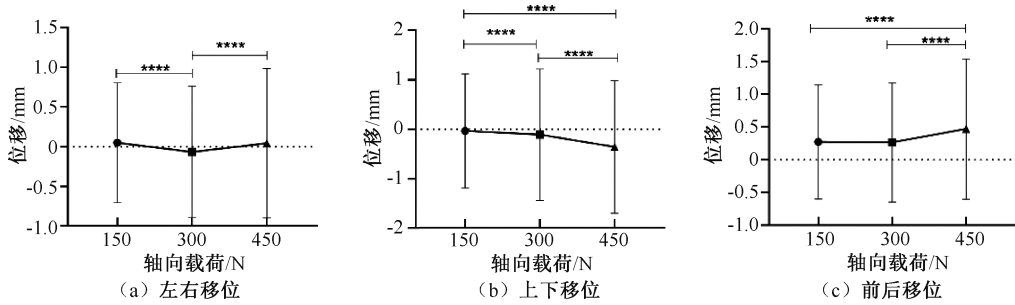


图6 胫骨外踝侧骨折块不同方向移位变化(\*\*\*\* $P < 0.0001$ , \* $P < 0.01$ )

Fig.6 Micromovement changes of lateral malleolus fracture in the tibia in different directions (a) Left-right displacement, (b) Up-down displacement, (c) Anterior-posterior displacement

期固定,避免晚期手术骨折周围软组织挛缩导致的复位困难,难以恢复下肢长度及力线<sup>[13-14]</sup>。外固定架和有限内固定联合应用则能实现关节面解剖复位及早期功能锻炼,而功能锻炼过程中,肌肉的收缩会在骨折端产生力学刺激,促进骨折端的重建及骨量维持,预防术后废用性骨折疏松<sup>[15-16]</sup>。

临床外固定架的应用中,相比其他类型的外固定架,环形外固定架能提高闭合复位的稳定性,应力分布更均匀不易出现应力集中而至骨针断裂或者松动,后期还可以对出现的畸形进行矫正,也能更早进行踝关活动锻炼<sup>[7]</sup>。此外,环形外固定架还能对骨折碎块进行固定,且对关节软骨的蛋白多糖代谢及营养有明显改善,降低后期关节炎的发病率<sup>[17-18]</sup>。对于老年骨质疏松患者,环形外固定架也能实现良好固定<sup>[19]</sup>。但是,环形外固定架构型复杂,给临床医生操作带来很多困难,且体积笨重,患者佩戴不适感强。

马蹄环形外固定架优势在于简化构型。全构型仅使用两个环形及3个螺纹支撑杆,提高操作的简便性,也减轻了外固定架重量。马蹄环的设计一方面相比半环式能够增加交叉穿针的角度,另一方面能减少悬空对皮肤的剪切,增加患者的舒适度。以往外固定架多为铝合金材料,本文新设计的外固定架改为碳纤维材料制作,在术中透视时显影,也方便医生更好地观察骨折复位情况。碳纤维外固定环也比铝合金外固定环更加轻便,也更方便病人活动。

本实验研究显示,马蹄环形外固定架固定后,腓骨骨折块在整个空间的移位趋势为向侧前方移位;胫骨内踝侧骨折块移位趋势为向前侧移位;骨

折外踝侧块移位趋势侧后方移位。其中,腓骨骨折块及胫骨外踝侧骨折块最大移位均小于0.5 mm。胫骨内踝侧的骨折块在前后及左右方向上最大移位分别为0.78、0.70 mm,均为未超过1 mm。该移位范围均在文献研究证明的骨折块最佳生理微动范围(0.2~1 mm)<sup>[20-21]</sup>。该结果说明,本课题组设计的马蹄环形外固定架能够实现稳定固定,且可以产生有利骨折愈合的微动。研究证明,骨折端的微动可以促进血管内皮生长因子表达、骨形态发生蛋白-2表达,改善骨折端的血液循环,而这些因素会促使骨折端局部产生丰富的反应性血管增生及适当的应力刺激,促使间充质细胞增生分化,加快骨折愈合<sup>[22-24]</sup>。本文结果也表明,在对骨折块进行局部穿针时,单根橄榄针固定骨折块能够实现骨折块的稳定固定,但需要和外固定架相连。

目前采用模型骨进行骨折固定物生物力学研究已有报道<sup>[25-27]</sup>。高杨等<sup>[25]</sup>研究发现,聚氯乙烯材料制作的人工胫骨模型生物力学属性与人工相接近。因此,本文采用模型骨研究所得结论是合理的。采用模型骨研究可以降低实验成本,避免因尸体标本难以获取对实验样本的限制。本实验采用的动态捕捉系统精度为0.1 mm,临床上评价骨折的精度为1 mm,故本研究测量仪器的精度足以满足实验要求。

## 4 结论

马蹄环形外固定架不仅能实现骨折端的稳定固定且能产生一定的微动,符合骨折愈合的生物力学特点。该外固定架构型简单,结构稳定,操作方便,是治疗 Pilon 骨折一个非常不错的选择,值得临床推广应用。

## 参考文献:

- [ 1 ] 陈广智, 穆刚, 金哲峰. 手术治疗 Pilon 骨折的国内外研究进展[J]. 中国中医骨伤科杂志, 2009, 17(6): 70-72.
- [ 2 ] 祁雷, 吴晗, 李军, 等. Pilon 骨折的诊断与治疗进展[J]. 局解手术学杂志, 2018, 27(1): 73-77.
- [ 3 ] TONG D, JI F, ZHANG H, et al. Two-stage procedure protocol for minimally invasive plate osteosynthesis technique in the treatment of the complex Pilon fracture [J]. *Int Orthop*, 2012, 36(4): 833-837.
- [ 4 ] 陈宇, 张晖, 刘熹, 等. 改良分期分部策略治疗 C3 型 Pilon 骨折[J]. 中国修复重建外科杂志, 2019, 33(11): 1358-1362.
- [ 5 ] SINGH RA, TRICKETT R, HODGSON P. Early versus late surgery for closed ankle fractures [J]. *J Orthop Surg*, 2015, 23(3): 341-344.
- [ 6 ] CUI X, CHEN H, RUI Y, et al. Two-stage open reduction and internal fixation versus limited internal fixation combined with external fixation: A meta-analysis of postoperative complications in patients with severe Pilon fractures [J]. *J Int Med Res*, 2018, 46(7): 2525-2536.
- [ 7 ] MALIK-TABASSUM K, PILLAI K, HUSSAIN Y, et al. Post-operative outcomes of open reduction and internal fixation versus circular external fixation in treatment of tibial plafond fractures: A systematic review and meta-analysis [J]. *Injury*, 2020, 51(7): 1448-1456.
- [ 8 ] YILMAZ E, BELHAN O, KARAKURT L, et al. Mechanical performance of hybrid Ilizarov external fixator in comparison with Ilizarov circular external fixator [J]. *Clin Biomech*, 2003, 18(6): 518-522.
- [ 9 ] NOZAKA K, MIYAKOSHI N, SAITO H, et al. Effectiveness of Ilizarov external fixation in elderly patients with pilon fractures [J]. *J Orthop Sci*, 2021, 26(2): 254-260.
- [ 10 ] 彭明. Pilon 骨折实验模型设计与内固定生物力学比较研究及手术入路改良[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [ 11 ] BUSEL GA, WATSON JT. Plating of Pilon fractures based on the orientation of the fibular shaft component: A biomechanical study evaluating plate stiffness in a cadaveric fracture model [J]. *Int Orthop*, 2017, 14(2): 308-312.
- [ 12 ] 祝少博, 喻爱喜, 余国荣, 等. 外固定架联合皮瓣转位治疗合并软组织缺损的 Pilon 骨折[J]. 中华显微外科杂志, 2006, 29(6): 422-425.
- [ 13 ] 刘建伟, 王朝晖, 郝崇伟, 等. 外固定架与切开复位内固定治疗 Ruedi-Allgower III 型 Pilon 骨折疗效比较[J]. 临床骨科杂志, 2014, 17(4): 448-451.
- [ 14 ] 朱治国, 侯林俊, 于远洋, 等. 急诊切开复位有限内固定结合外固定架治疗 Pilon 骨折[J]. 临床和实验医学杂志, 2013, 12(1): 42-43.
- [ 15 ] 李艳锋. 超关节外固定架结合内固定治疗 Pilon III 型骨折[J]. 临床骨科杂志, 2015, 18(1): 100-102.
- [ 16 ] 许明明, 于志锋. 骨骼肌通过力学刺激对骨重建的影响[J]. 医用生物力学, 2020, 35(3): 385-390.
- XU MM, YU ZF. Effects of skeletal muscle on bone remodeling through mechanical stimulation [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(3): 385-390.
- [ 17 ] BOZKURT M, OCGUDER DA, UGURLU M, et al. Tibial Pilon fracture repair using Ilizarov external fixation, capsuloligamentotaxis, and early rehabilitation of the ankle [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2008, 47(4): 302-306.
- [ 18 ] AHMED ASA, SINGER MS, EI BIGAWI HA. Neglected tibial pilon fractures: Can arthrodesis be avoided? [J]. *J Orthop Trauma*, 2018, 32(7): 369-375.
- [ 19 ] HALLER JM, GITHENS M, ROTHBERG D, et al. Pilon fractures in patients over 60 years of age: Should we be fixing these? [J]. *J Orthop Trauma*, 2019, 34(3): 121-125.
- [ 20 ] BOTTLANG M, FEIST F. Biomechanics of far cortical locking [J]. *J Orthop Trauma*, 2011, 25 (Suppl 1): S21-28.
- [ 21 ] DOBELE S, GARDNER M, SCHROTER S, et al. DLS 5.0—The biomechanical effects of dynamic locking screws [J]. *PLoS One*, 2014, 9(4): e91933.
- [ 22 ] 乔林, 侯树勋, 张树明, 等. 骨折端微动对骨形态发生蛋白-2 表达的影响[J]. 中华创伤骨科杂志, 2007, 9(6): 555-557.
- [ 23 ] 乔林, 侯树勋, 李文峰, 等. 微动对骨折端微循环及血管内皮生长因子(VEGF)表达的影响[J]. 中华创伤骨科杂志, 2005, 7(1): 52-54.
- [ 24 ] 李佳宜, 房兵. 力学因素对血管内皮细胞成血管影响及机制的研究进展[J]. 医用生物力学, 2020, 35(6): 760-766.
- LI JY, FANG B. Research progress in effects of mechanical factors on angiogenesis of vascular endothelial cells and the mechanism [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(6): 760-766.
- [ 25 ] 高杨, 张德强, 汤欣. 胫骨远端后侧锁定接骨板固定 Pilon 后柱骨折的力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21(23): 3712-3717.
- [ 26 ] PIROLO JM, BEHN AW, ABRAMS GD, et al. Anterolateral versus medial plating of distal extra-articular tibia fractures: A biomechanical model [J]. *Orthopedics*, 2015, 38(9): E760-E765.
- [ 27 ] YENNA ZC, BHADRA AK, OJIKE NI, et al. Anterolateral and medial locking plate stiffness in distal tibial fracture model [J]. *Foot Ankle Int*, 2011, 32(6): 630-637.