

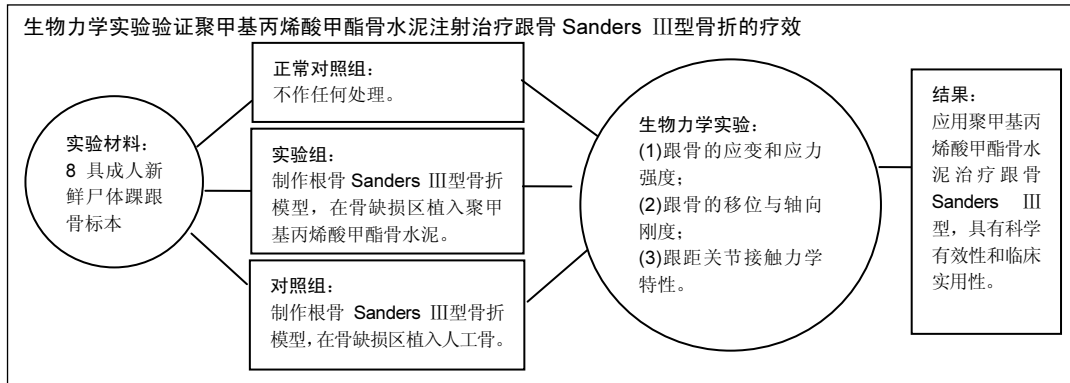
聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥注射治疗跟骨Sanders III型骨折的生物力学测试

管志海, 王勤业, 常小波, 宁波, 罗亚平(上海市嘉定区南翔医院, 上海市 201802)

DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.0003

ORCID: 0000-0002-2578-4871(王勤业)

文章快速阅读:



管志海, 男, 1977年生, 汉族, 上海市人, 主治医师, 主要从事骨与关节的损伤研究。

通讯作者: 王勤业, 副主任医师, 上海市嘉定区南翔医院骨科, 上海市 201802

中图分类号:R318

文献标识码:A

稿件接受: 2017-08-06



文题释义:

聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥: 是一种用于填充骨与植入物间隙或骨腔并具有自凝特性的生物材料, 自从 1958 年 Charney 首次应用骨水泥固定股骨假体成功施行全髋关节置换以来, 骨水泥已广泛应用于骨科临床, 骨水泥固定可保证术后假体的即时稳定, 在骨组织-骨水泥-假体界面上无任何微动, 允许术后早期负重, 疗效肯定。

跟骨骨折 Sanders 分型: Sanders 根据 CT 30° 半冠状位扫描, 最大程度显示距下关节后关节面, 将跟骨平均分为 3 柱, 跟骨后关节面由平行于跟骨纵轴的 A、B 两线分为 3 个等大的区域, 产生 3 种潜在的骨折块, 外侧、中央、内侧; I 型, 所有无移位的关节内骨折; II 型, 后关节面 2 片段骨折, 根据骨折线的位置分为 A、B、C3 个亚型; III 型, 后关节面 3 片段骨折, 按照 2 个骨折线的位置分为 AB、AC 或 BC3 个亚型; IV 型, 后关节面 4 片段骨折, 为严重的粉碎性关节内骨折, 常不止 4 个骨块。

摘要

背景: 聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥已被广泛应用于骨科临床, 可保证术后假体的即刻稳定性, 且界面无微动, 允许术后早期负重, 疗效肯定。

目的: 采用生物力学实验验证聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥注射治疗跟骨 Sanders III 型骨折的疗效。

方法: 采集 8 具成人新鲜尸体踝跟骨标本, 检测其生物力学性能, 作为正常对照组; 实验组(n=4)、对照组(n=4)制作跟骨 Sanders III 型骨折模型, 实验组在骨缺损区植入聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥, 对照组骨缺损区植入人工骨, 对照组以钢板固定外侧壁, 检测两组标本的生物力学性能。

结果与结论: ①跟骨的应变和应力强度: 正常对照组的应力分布与实验组应力分布规律相一致, 两组应力比较差异无显著性意义; 实验组与对照组的应力相近, 组间比较差异无显著性意义; ②跟骨的移位与轴向刚度: 与正常对照组相比, 实验组的跟骨移位略有降低, 但差异无显著性意义; 与正常对照组相比, 对照组的跟骨移位略有提高, 但差异无显著性意义; 实验组跟骨的轴向压缩应力强度达到(21.98±1.88) MPa, 轴向刚度达到(1 633±150) N/mm, 与正常对照组相比较差异无显著性意义(P > 0.05); ③跟距关节接触力学特性: 实验组跟骨聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥注射后, Sanders III 型骨折基本上得到恢复, 可见治疗效果不错; ④结果表明: 应用聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥治疗跟骨 Sanders III 型, 具有科学有效性和临床实用性。

关键词:

生物材料; 骨科材料; 跟骨骨折; 聚甲基丙烯酸甲酯; 骨水泥; 生物力学

主题词:

甲基丙烯酸甲酯类; 生物力学; 组织工程

基金资助:

嘉定区卫计委课题资助(2015-KY-06)

Guan Zhi-hai, Attending physician, Nanxiang Hospital of Jiading District, Shanghai 201802, China

Corresponding author: Wang Qin-ye, Associate chief physician, Nanxiang Hospital of Jiading District, Shanghai 201802, China

Treatment of Sanders type III fracture of the calcaneus with polymethylmethacrylate bone cement: a biomechanical study

Guan Zhi-hai, Wang Qin-ye, Chang Xiao-bo, Ning Bo, Luo Ya-ping (Nanxiang Hospital of Jiading District, Shanghai 201802, China)

Abstract

BACKGROUND: Polymethylmethacrylate (PMMA), commonly known as bone cement, has been widely used in the orthopedic surgery. It ensures the immediate stability of prosthesis and the minimal micromotion at the cement-bone interface, allowing early weight-bearing after surgery.

OBJECTIVE: To investigate the biomechanical performance of Sanders type III fracture of the calcaneus by using PMMA bone cement as a treatment.

METHODS: Eight adult cadaveric ankle and calcaneus specimens were selected and served as normal controls after detection of biomechanical properties. Another eight specimens were collected and randomized into experimental group and control group to make a model of Sanders type III fracture in the calcaneus. In the experimental group, PMMA bone cement was injected into the defect area. In the control group, the artificial bone was implanted in the defect area and a steel plate was used to fix the lateral calcaneus. Biomechanical properties of the specimens in the experimental and control group were detected.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) Strain and stress of the calcaneus: The stress distribution of the calcaneus in the normal control group was consistent with that in the experimental group, and there was no significant difference between the two groups. The stress of the calcaneus in the experimental group was similar to that in the control group with no significant difference. (2) Displacement and axial stiffness of the calcaneus: Compared with the normal control group, the calcaneal displacement in the experimental group only decreased slightly, and there was no significant difference between the two groups, and likewise, the calcaneal displacement in the control group increased slightly. In the experimental group, the axial compression strength was (21.98 ± 1.88) MPa and the axial compression stiffness was $(1\ 633 \pm 150)$ N/mm. Therefore, there was no significant difference between the experimental group and the normal control group ($P > 0.05$). (3) Contact strength of the subtalar joint: Fractures basically recovered with good outcomes after PMMA bone cement injection. To conclude, by using PMMA bone cement in the treatment of calcaneus fractures, the scientific validity and clinical utility can be ensured.

Subject headings: Methylmethacrylates; Biomechanics; Tissue Engineering

Funding: a grant from the Health and Family Planning Commission of Jiading District, No. 2015-KY-06

0 引言 Introduction

跟骨骨折占全身骨折的2%，占跗骨骨折的60%^[1]，常由高处坠下或挤压致伤，骨折线进入关节面或复位不良，后遗创伤性关节炎及跟骨负重时疼痛者为常见，特别是Sanders III型骨折创伤面大，切口皮缘坏死，不愈合，继发感染等严重并发症等发生率达14%–27%^[2-7]。鉴于切开复位钢板螺钉加植骨内固定不尽人意，急需寻找一种既能良好复位又能可靠的固定的微创治疗方法。聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥已被广泛应用于骨科临床，可保证术后假体即刻稳定性，且在界面无微动，允许术后早期负重、疗效肯定。经皮椎体成形和椎体后凸成形均将聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥注入椎体内，治疗椎体骨质疏松性骨折及椎体肿瘤，获得了满意疗效^[8-16]。实验采用生物力学实验来验证其有效性，为临床应用提供科学依据。

1 材料和方法 Materials and methods

1.1 设计 生物力学实验与应力分析。

1.2 时间及地点 实验于2015年3月至2016年4月在上海市嘉定区南翔医院完成。

1.3 材料

1.3.1 标本制作 8具成新鲜成人下肢足踝跟骨尸体标本，由上海交大医学院提供，符合相关伦理学要求，供者年龄50–54岁，身高168–174 cm，体质量64–70 kg，标本间尺寸及骨密度无显著性差异。在所有标本踝关节以上20 cm处离断胫腓骨，得到完整的踝跟骨标本，经大体观察及X射线摄片排除踝跟骨骨科先天性畸形、骨质疏松破坏、结核、肿瘤及退行性骨关节炎改变，在胫腓骨近端用骨水泥固定作上端夹具，剔除肌肉及软组织，保留下胫腓联合，韧带、踝跟骨肌腱韧带，制作下底夹具。

分别在跟骨骨折断面两侧处粘贴高精度小标距电阻应

变片($R=120 \Omega \pm 0.5\%$, $K=2.16$, $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$)，以测量骨折固定前后的应力应变变化，预先在跟骨设测点定位，依次编号、测量跟骨的主要尺寸，并行骨密度测量(NORLAND XR-36 Dual Energy X-ray Absorbtiometry, DEXA)。标本保存在 $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱内，实验前逐级解冻，并做好实验前各项准备工作。

1.3.2 标本分组 将制作的完整踝跟骨标本直接进行生物力学测试，实验结果作为正常对照组；而后随机分为2组，实验组($n=4$)、对照组($n=4$)制作根骨Sanders III型骨折模型，实验组在骨缺损区植入聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥，对照组骨缺损区植入人工骨，对照组以钢板固定外侧壁。统一标本制作，从正常标本到两种固定标本进行生物力学实验，自身对照统计检验。

1.4 实验方法

跟骨骨折骨水泥成形: 实验组、对照组跟骨标本逐级解冻后，用骨凿将跟骨标本外侧骨皮质凿开，掀起，将跟骨跟距关节面下方的松质骨用克氏针邮票样边缘钻孔 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ ，用骨凿刮匙将该部位松质骨取出，造成关节面下失去支撑，再在跟距关节面上给以向下压力，造成跟骨骨折，关节面塌陷，实验组标本直视下将关节面抬起复位，恢复跟骨高度，将跟骨外侧壁复位，恢复跟骨宽度，用斯氏针由跟骨后方向跟距关节面下骨缺损区钻孔形成工作通道后用经皮椎体成形注射器注射聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥(法国Teknimed公司)；对照组标本直视下将跟骨关节面抬起复位，以自固化磷酸钙人工骨(上海瑞邦生物材料有限公司)充填骨缺损区，跟骨钛钢板(TC4钛合金，上海手术医疗器械厂)外侧壁固定。

1.5 主要观察指标 所有实验力学模型均要求在结构模拟上、载荷、力学性质、固定方式诸方面应保持一致，以确保它的实验精度^[17]。同时予先应对下肢跟骨的材料力学

性质进行测量。根据文献记载^[18-19]: 跟骨静力实验的极限载荷为(5 698±803)N, 极限变形为(1.91±0.32)mm, 当跟骨达到最大相对变形18%~25%时, 跟骨发生骨折或塌陷, 一般在Gissane跟骨高应力三角区居多。一般新鲜成人跟骨承受的正常生理载荷由足部运动力学计算为800 N, 实验时行分级加载, 直至破坏。实验前预载3次以消除骨的松弛、蠕变等流变学时间效应, 然后将标本安装在生物力学材料试验仪上(WE-5, 长春试验机研究所)进行正式加载(图1), 加载速率控制在1.5 mm/min, YJD-14静动态电阻应变仪(华东电子仪器厂)测量标本的应变, 由辅助CAD自动采集数据, 每一标本反复实验多次。

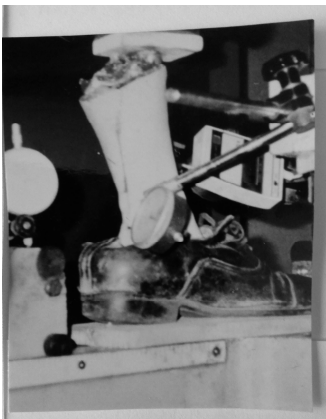


图1 跟骨生物力学实验应力分析实验
Figure 1 The biomechanical stress analysis of the calcaneus

跟骨不同内固定的移位和骨折的分离位移由JG-1型高精度光栅位移传感器测量(上海科技大学仪器仪表公司)(应变范围0~2 500 $\mu\epsilon$, 精度小于 $\pm 5\% \mu\epsilon$)。跟骨上骨折固定处的应变测量, 要求粘贴高精度小标距电阻应变片($R=120 \Omega \pm 0.5\%$, $K=2.16$, $1.50 \text{ mm} \times 1.50 \text{ mm}$), 以保证应变的高精度传递特性, 所有贴片技术均严格按照实验力学要求进行^[17]。

压敏片法: 在进行实验应力分析的同时, 再进行跟距关节压敏片法(采用日本富氏低电压敏片, $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$)测量跟距关节的接触面积和接触压, 进一步来检验跟骨骨折采用聚甲基丙烯酸甲酯注射成形技术的可行性。

1.6 统计学分析 实验所得力学数据, 均以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 采用SPSS 11.5软件进行统计学处理, 以线性回归、Student t 检验, 经最小二乘法处理绘图。组间比较采用单因素方差分析(one-way ANOVA)。设 $P < 0.05$ 为显著性差异水平。

2 结果 Results

2.1 跟骨的应变和应力强度测试结果 根据所有跟骨标本的应变和应力测量^[4], 在正常生理载荷800 N作用下, 跟骨上的二向(横向和轴向)应变和二向应力状态测试结果见表1。结果表明: ①跟骨自关节面至跟结节间的区域受力较大, 应变也较大, 跟骨纵向(y)受到压应力(σ_y)控制, 横向(x)拉应力(σ_x)是由跟腱拉力所产生, 且跟骨纵向压应力大于横向拉应力。从应力分布状态来看, 跟距关节面上应力由距骨均匀传到跟骨的压力所产生; 骰骨关节面所受压力

沿着跟骨纵向传递。当纵向压力过大(暴力), 跟骨中部具有较大弯矩, 导致跟骨骨折, 高应力区常发生在后关节面至跟结节部位和结构较薄弱的生理三角区, 易造成骨折^[6]; ②正常跟骨的应力分布与用聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥注射植入的跟骨应力分布规律相一致, 且后者应力稍高, 但两者仅相差4%~6%, 统计显示两者应力比较差异无显著性意义($t=2.252$, $P > 0.05$); ③实验组与对照组的应力两者十分相似、相近, 仅相差6%~8%, 后者强度略低, 统计显示两者应力比较差异无显著性意义($t=2.011$, $P > 0.05$); ④聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥注射治疗跟骨 Sanders III型骨折, 固定在高应力区内中, 固定比较牢固, 与主应力迹线相垂直, 有效克服了张应力, 抵抗压应力, 充分发挥聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥具有强大承受压应力的功能, 所以极大提高了跟骨的承载能力, 恢复了Bohler角和跟骨体的高度和宽度, 达到了距下关节面和跟骨轴的解剖复位, 有助于足部功能的早日康复。

2.2 跟骨的移位与轴向刚度测试结果 在进行跟骨应变和应力强度测量的同时, 进行了跟骨两种不同内固定的跟骨移位、刚度测量, 其结果见表2。

结果表明: ①跟骨在生理载荷800 N作用下, 会产生足弓的移位变形, 包括足部总体下沉位移(Δy), 足弓的向下移位(f)和横向移位(Δx)。表中结果显示足弓移位中以下沉位移(Δy)最大, 横向移位(Δx)最小。由于足弓由坚强足底长短韧带和足底筋膜所支撑, 它们在载荷作用产生足够大的张力, 阻止足的移位; ②实验组采用聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥治疗跟骨 Sanders III型骨折固定后发生的移位, 与正常对照组足的移位相比分别相差4%、10%、9%, 两组移位比较差异无显著性意义($t=1.895$, $P > 0.05$)。对照组移位与正常足移位相比, 要高6%、7%、7%, 两组移位比较差异无显著性意义($t=1.733$, $P > 0.05$); ③正常足的跟骨刚度包括水平足横向刚度和足弓刚度、足总体刚度。若两种不同内固定的3个刚度相互比较, 发现与移位分布规律相似。结果证明采用聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥治疗跟骨 Sanders III型骨折后, 抵抗轴向和横向变形能力是很不错的, 能够担负起足部正常的承载能力, 完全满足了足部强刚度的要求; ④尽管采用聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥填充材料治疗跟骨 Sanders III型骨折技术满足强刚度要求, 但实验发现由于骨水泥材料弹性模量 $E=2.80 \times 10^3 \text{ N/mm}$, 比较高, 强度大, 材料性质脆性材料, 相反不足的一面是韧性差, 弹性不足, 所以应予以改进聚甲基丙烯酸甲酯配方, 例如自体骨髓磷酸钙骨水泥材料、磷酸钙骨水泥等有着广阔的发展前景。

2.3 跟距关节接触力学特性测试结果 采用日本产富士压敏片, 用胶纸包裹嵌入跟距关节面, 在正常步态500 N压力载荷作用下, 停留2 min后取出显影的压敏片, 用计算机FPD301浓度计显影比对, 得到实验前跟距关节接触面积(5.74 ± 0.48) cm^2 , 接触压(125.52 ± 10.12) N/cm^2 ; 骨折

表 1 各组跟骨的应变和应力测试结果

($\bar{x} \pm s$, MPa)

Table 1 The strain and stress of the calcaneus in each group

项目	正常对照组		实验组		对照组	
	横向(X向)	轴向(Y向)	横向(X向)	轴向(Y向)	横向(X向)	轴向(Y向)
二向应力	13.16±1.98	20.66±1.80	13.74±1.23	21.98±1.88	12.96±1.16	20.18±1.77
二向应变	767±72	-1 205±116	801±76	-1 282±118	756±70	-1 177±107

表注: 实验组的应力与正常对照组、对照组比较差异均无显著性意义。

表 2 各组跟骨的移位和刚度测试结果

($\bar{x} \pm s$)

Table 2 The displacement and rigidity of the calcaneus in each group

项目	正常对照组			实验组			对照组		
	Δx	Δy	f	Δx	Δy	f	Δx	Δy	f
移位(mm)	6.62±0.55	0.55±0.04	2.83±0.16	6.38±0.52	0.49±0.04	2.58±0.12	7.02±0.65	0.59±0.05	3.03±0.21
刚度 GF、EF、EJ(N/mm)	121±10	1 455±132	283±24	125±10	1 633±150	310±28	114±10	1 356±122	264±25

表注: GF 为跟骨 X 方向横向刚度, EF 为跟骨 Y 轴向刚度, EJ 为跟骨弯曲刚度, Δy 为总体下沉位移, f 为足弓的向下移位, Δx 为足弓的横向移位。实验组的移位与正常对照组、对照组比较差异均无显著性意义。

后距跟关节接触面积(3.84±0.18) cm², 接触压(95.22±8.72) N/cm²。跟骨聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥注射后, Sanders III型骨折基本上得到恢复, 可见治疗效果不错。聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥成形后的关节接触力学特性与实验前原始标本的结果十分接近, 仅相差7%左右, 无明显差异($t=2.674$, $P > 0.05$)。

3 讨论 Discussion

跟骨骨折分型临床上目前应用较为广泛的是 Essex-Lopresti和Sanders分型^[20-21], Sanders分型是基于CT表现, 其中Sanders III型跟骨后关节面有二条骨折线, 为三部分骨折, 有一中央塌陷骨块, 属于关节内骨折, 对于该型跟骨骨折目前主要的治疗方法为切开复位内固定, 切开复位内固定技术的优势是直视下对塌陷骨折块进行复位, 选择适当的内固定材料来固定骨折块, 术后早期进行功能锻炼, 但该技术的弊端就是对软组织的广泛剥离, 损伤大, 术后容易发生感染、皮缘坏死等并发症^[2, 21-25]。

近年来, 采用球囊复位注射聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥治疗胸腰椎骨折取得了良好效果, 聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥强化椎体, 增加椎体抗压强度, 具有简便易行、微创、起效迅速的特点^[26-28]。随着技术的进步, 此项技术得到了推广和应用。注射骨水泥, 在跟骨体同样起着内夹板的作用, 阻止骨折部位间活动或微动, 提供了有利于愈合的稳定力学环境。强度反映了跟着体抵抗跟骨骨折破坏的能力, 刚度反映了跟骨体抵抗变形的能力, 两者都十分重要^[17]。骨水泥注入跟骨骨小梁间隙后, 凝固后可强化原有骨小梁的强度。当骨小梁压缩骨折后, 正常骨小梁失去原来网状结构所维持的强度, 其强度和刚度均会明显下降。此时, 骨水泥注入到塌陷的骨小梁间隙内, 起着替代破坏骨小梁对跟骨起着支撑作用, 恢复了原有跟骨的力学功能。加上骨水泥具有很好的粘接性, 凝固后与骨质紧密接触,

它会通过裂隙将骨折块快速粘接, 在跟骨内充填缺损, 使跟骨恢复原有的外形结构, 恢复其内部的完整结构, 起着充分的力传导作用, 使成形的强度和刚度恢复到原有水平。

生物实验结果显示, 聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥注射治疗跟骨Sanders III型骨折后, 跟骨上纵向压缩强度为(21.98±1.88) MPa, 横向压缩强度为(13.74±1.23) MPa, 纵向刚度为(1633±150) N/mm, 横向刚度(125±10) N/mm, 两者与正常跟骨的强度和刚度相差4%~6%, 甚至高于原始标本的强度水平。从跟骨骨折后的跟骨高度恢复率达到14%, 正说明聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥注射治疗跟骨Sanders III型骨折修复技术是成功的, 它比钢板螺钉固定即跟骨钢板固定具有一定的优势。

聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥注射治疗跟骨Sanders III型骨折的作用机制是, 充填骨水泥与骨床之间的微交锁而达到界面的机械稳定, 恢复跟骨的原有力学功能。但更重要的是骨水泥充填技术是决定界面初期和远期质量的根本因素。由于骨水泥单体的细胞毒性、聚合热、固化时的收缩及高弹性模量等原因, 往往在界面形成纤维组织膜, 并未全部形成直接接触, 因而直接影响成形效果。随着科学技术的发展, 出现了生物活性骨水泥, 戴尅戎^[29]将有机骨粒掺入骨水泥后, 发现可提高骨水泥的疲劳性能, 达到早期有效的稳定、骨吸收和界面直接愈合。近年来研发的磷酸三钙和羟基磷灰石骨水泥, 使植入成形技术、骨折愈合不断推进^[30], 为今后跟骨治疗提高疲劳寿命指明了方向。

作者贡献: 管志海、王勤业、常小波、宁波、罗亚平负责实验设计、实施和评估, 管志海负责资料收集、写作和审核。

经费支持: 该文章接受了“嘉定区卫计委课题资助(2015-KY-06)”的基金资助。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: 所有作者共同认可文章无相关利益冲突。

伦理问题: 研究用人体组织的实验方案经上海交通大学医学院医院相关单位审核符合相关伦理学要求, 文章的撰写与编辑修改后文

章遵守了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 CNKI 反剽窃文献检测系统进行 3 次查重。

文章外审: 文章经国内小同行外审专家双盲外审, 符合本刊发稿宗旨。

作者声明: 管志海、王勤业对研究和撰写的论文中出现的不端行为承担责任。论文中涉及的原始图片、数据(包括计算机数据库)记录及样本已按照有关规定保存、分享和销毁, 可接受核查。

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3.0”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] Talarico LM, Vito GR, Zyryanov SY. Management of displaced intraarticular calcaneal fractures by using external ring fixation, minimally invasive open reduction, and early weightbearing. *Foot Ankle Surg.* 2004;43(1):43.
- [2] Clare MP, Crawford WS. Managing Complications of Calcaneus Fractures. *Foot Ankle Clin.* 2017;22(1):105-116.
- [3] Abdelgaid SM. Closed reduction and percutaneous cannulated screws fixation of displaced intra-articular calcaneus fractures. *Foot Ankle Surg.* 2012;18(3):164-179.
- [4] Sanders R, Vaupel Z, 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 Orthop Trauma.* 2014; 28(10):551-563.
- [5] 徐毅, 李海勋, 李智豪. 跗骨窦切口微创接骨板内固定治疗 Sanders II、III型跟骨骨折[J]. *中医正骨*, 2016, 28(8):41-43.
- [6] 罗亚平, 王勤业, 徐忠良, 等. 外侧小切口复位钢板固定治疗跟骨关节内骨折[J]. *实用骨科杂志*, 2008, 14(7):401-403.
- [7] 卢小彬, 王大卫, 张津生. 微创手术治疗跟骨骨折的研究进展[J]. *微创医学*, 2015, 10(1):81-84.
- [8] 梁佩清, 全昌云, 康婷, 等. 改性PMMA骨水泥的临床研究进展[J]. *功能材料*, 2017, 48(2):2048-2054.
- [9] 徐峰, 蔡贤华, 张志文, 等. 可注射性磷酸钙骨水泥对骨质疏松性椎体压缩骨折的生物力学研究[J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2015, 28(10):8-10.
- [10] 周英杰, 赵鹏飞, 郑怀亮, 等. 两种骨水泥应用于老年胸腰椎骨折椎体成形术的疗效观察[J]. *中国矫形外科杂志*, 2015, 23(4):364-367.
- [11] 谭斌, 刘雄文, 刘刚, 等. 经皮椎体后凸与经皮椎体成形术修复骨质疏松性椎体压缩性骨折: 随机分组比较[J]. *中国组织工程研究*, 2016, 20(4):539-543.
- [12] 张大鹏, 强晓军, 王振江, 等. 高黏度骨水泥椎体成形术与低黏度骨水泥椎体后凸成形术治疗骨质疏松性胸腰椎压缩骨折疗效分析[J]. *中国矫形外科杂志*, 2016, 24(4):289-294.
- [13] 李建赤, 黄必留, 谭加群, 等. 高黏度骨水泥经皮椎体成形术治疗骨质疏松性椎体压缩骨折的临床研究[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2016, 9(4):317-321.
- [14] 李楠, 张贵林, 何达, 等. 经皮椎体成形术治疗新鲜与陈旧不愈合骨质疏松性椎体压缩骨折疗效比较[J]. *临床骨科杂志*, 2016, 19(1):1-3.
- [15] 徐无忌, 刘晓岚. 体位复位结合经皮椎体成形术与经皮椎体后凸成形术治疗骨质疏松性椎体压缩骨折的对比研究[J]. *中医正骨*, 2016, 28(7):20-24.
- [16] Chen F, Xia YH, Cao WZ, et al. Percutaneous kyphoplasty for the treatment of spinal metastases. *Oncol Lett.* 2016;11(3):1799-1806.
- [17] 王以进, 王介麟. *骨科生物力学*[M]. 北京: 人民军医出版社, 1989: 104-118.
- [18] 俞光荣, 梅炯, 朱辉, 等. 可塑形跟骨钛钢板的生物力学研究[J]. *医用生物力学*, 2001, 16(2):105-108.
- [19] 朱辉, 俞光荣, 梅炯, 等. 跟骨骨折内固定的生物力学研究[J]. *现代康复*, 2001, 5(1):32-33.
- [20] Essesx-Lopresti P. The mechanism reduction technique and results in fracture of the os calcis. *J Bone Joint Surg(Br).* 1952; 39:395-419.
- [21] 温晓东, 李玉茂, 张玉九. Sanders II、III型跟骨骨折术后切口并发症影响因素分析[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2017, 32(2):215-217.
- [22] 张柏, 祁琇, 韩作峰, 等. 钛板联合植骨内固定修复跟骨骨折: 外侧L形切口愈合的影响因素[J]. *中国组织工程研究*, 2016, 20(26):3876-3882.
- [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] 马东弟, 杨振建, 宋锦旭, 等. 钢板与克氏钉内固定修复跟骨骨折: Gissane角及Bohler角与跟骨高度比较[J]. *中国组织工程研究*, 2015, 19(9):1423-1428.
- [25] Fan B, Zhou X, Wei Z, et al. Cannulated screw fixation and plate fixation for displaced intra-articular calcaneus fracture: A meta-analysis of randomized controlled trials. *Int J Surg.* 2016; 34:64-72.
- [26] 陈超, 关宏刚, 区杏枝, 等. 直入式注入PMMA骨水泥强化椎弓根钉内固定生物力学研究[J]. *岭南现代临床外科*, 2016, 16(1):63-66.
- [27] 朱雪松. 椎体成形填充材料: 应用现状与未来前景[J]. *中国组织工程研究*, 2015, 19(53):8644.
- [28] 许红生, 赵志江. 经皮椎体成形术治疗骨质疏松性胸腰椎压缩骨折[J]. *临床骨科杂志*, 2016, 19(1):127.
- [29] 戴尅戎. 重视骨科内植物-骨界面的研究[J]. *中华关节外科杂志(电子版)*, 2007, 1(1):1-2.
- [30] Cement Calcaneoplasty: An Innovative Method for Treating Nonunion in Calcaneal Insufficiency Fracture. *J Foot Ankle Surg.* 2016;55(5):1097-1099.