

· 基础研究 ·

第 1 跖骨颈部微创截骨联合分趾垫和“8”字绷带外固定治疗拇外翻的有限元分析

孙卫东¹, 胡海威¹, 温建民¹, 桑志成¹, 吴寿长¹, 成永忠¹, 余志勇², 王庆雷³

(1. 中国中医科学院望京医院, 北京 100102; 2. 湖北省襄阳市中医医院, 湖北 襄阳 441000; 3. 北京市老年病医院, 北京 100095)

摘要 目的:探讨拇外翻患者采用第 1 跖骨颈部微创截骨联合分趾垫和“8”字绷带外固定治疗后截骨端的稳定性和截骨愈合的生物力学机制。**方法:**选取 1 位青年女性拇外翻患者, 年龄 28 岁, 身高 168 cm, 体质量 62 kg, 右足拇外翻角 24°, 第 1、2 跖骨间角 13°。利用其右足 CT 扫描所获得的数据建立右足拇外翻骨骼有限元模型, 并模拟第 1 跖骨颈部微创截骨联合分趾垫和“8”字绷带外固定术, 测定截骨端的 Von Mises 应力和位移。**结果:**截骨端 X 轴位移为 0.261 mm, Y 轴位移为 0.078 mm, Z 轴位移为 -0.167 mm, 截骨端总位移为 0.293 mm; 截骨端 Von Mises 应力为 0.712 MPa, 主要分布在截骨端的外侧边缘部位。**结论:**采用第 1 跖骨颈部微创截骨联合分趾垫和“8”字绷带外固定治疗拇外翻, 截骨端之间位移小、应力适中, 能使截骨端以软骨成骨的方式愈合。

关键词 拇外翻 截骨术 有限元分析

Finite element analysis of mini - invasive osteotomy in the first metatarsal neck combined with hallux valgus splint and figure - of - eight bandage fixation in the treatment of hallux valgus Sun Weidong*, Hu Haiwei, Wen Jianmin, Sang Zhicheng, Wu Shouchang, Cheng Yongzhong, Yu Zhiyong, Wang Qinglei. * Wangjing Hospital of China Academy Of Chinese Medical Sciences, Beijing 100102, China

ABSTRACT Objective: To study the stability of the end of the cut bone and the biomechanical mechanism of cut bone healing in the patients with hallux valgus treated with mini - invasive osteotomy in the first metatarsal neck combined with hallux valgus splint and figure - of - eight bandage fixation. **Methods:** One female with hallux valgus (age 28 years, height 168 cm, body mass 62 kg) was selected. Her right hallux valgus angle was 24 degree and her intermetatarsal angle was 13 degree. The finite element model of right foot hallux valgus was built by using CT data, and the Von Mises stress and displacement were measured after simulating mini - invasive osteotomy in the first metatarsal neck combined with hallux valgus splint and figure - of - eight bandage fixation. **Results:** The displacement in X - axis was 0.261 mm, the displacement in Y - axis was 0.078 mm, the displacement in Z - axis was -0.167 mm, and the total displacement was 0.293 mm. The Von Mises stress was 0.712 Mpa and was mainly distributed at the lateral margin of the end of the cut bone. **Conclusion:** In the treatment of hallux valgus, the therapy of mini - invasive osteotomy in the first metatarsal neck combined with hallux valgus splint and figure - of - eight bandage fixation has such advantages as small displacement, moderate stress, furthermore, the end of the cut bone can be united by means of os cartilaginea.

Key words Hallux valgus; Osteotomy; Finite element analysis

临床上我们采用第 1 跖骨颈部微创截骨联合分趾垫和“8”字绷带外固定治疗拇外翻, 术后允许患者下地行走。由于截骨愈合需要断端稳定, 因此这一方法受到部分学者质疑^[1]。但经长期随访, 采用这一方法治疗的患者并未出现截骨不愈合现象^[2]。为此, 我们采用有限元分析的方法, 对采用第 1 跖骨颈部微创截骨联合分趾垫和“8”字绷带外固定治疗后, 拇外翻患者截

骨端的位移和应力情况进行了分析研究, 现报告如下。

1 材料与仪器

1.1 数据来源 选取青年女性拇外翻志愿者 1 名, 年龄 28 岁, 身高 168 cm, 体质量 62 kg, 右足拇外翻角 (hallux valgus angle, HVA) 24°, 第 1、2 跖骨间角 (intermetatarsal angle, IMA) 13°。采用 GE LightSpeed 16 排螺旋 CT 对其右足进行扫描, 层厚 1 mm, 层距 1 mm, 共获得 542 张 512 × 512 像素的 CT 图像, 以 DICOM 格式输出并存储。

1.2 实验仪器 GE LightSpeed 16 排螺旋 CT; Geomag-

ic Studio 8.0 软件;ANSYS 12.0 有限元分析软件。

2 方法

2.1 模型建立 将采用 CT 所得右足数据导入 Geomagic Studio 8.0 软件进行足部骨骼曲面重构,建立足部骨骼的三维实体模型,并利用 ANSYS12.0 有限元软件将其转换为有限元网格模型^[3-4](图 1)。在有限元模型的第 1 跖骨颈部模拟微创截骨联合分趾垫和“8”字绷带外固定,建立第 1 跖骨颈部截骨固定模型(图 2)。矢状面上截骨线与跖骨轴线的垂线成 10° 角,水平面上截骨线与跖骨轴线的垂线成 15°

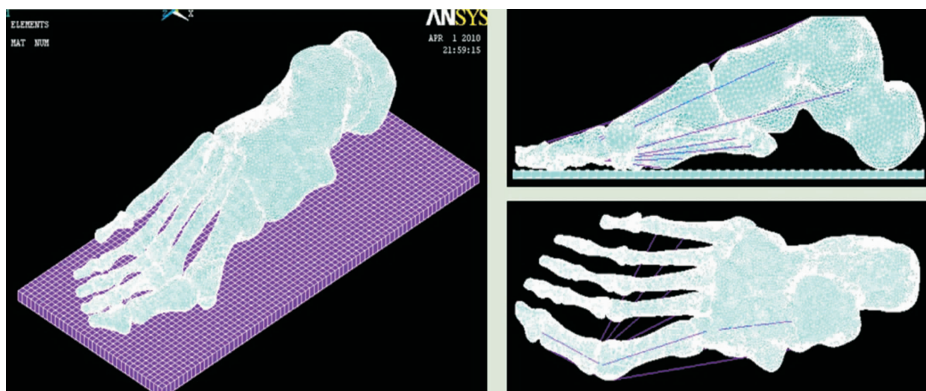


图 1 拇外翻右足骨骼有限元模型



图 2 第 1 跖骨颈部截骨模型

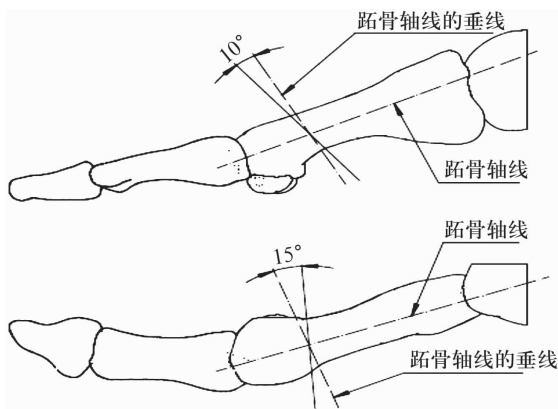


图 3 第 1 跖骨颈部截骨方向示意图

2.3 模型加载 模拟体质量 62 kg 拇外翻患者第 1 跖骨颈部微创截骨联合分趾垫和“8”字绷带外固定术后拇趾尽力跖屈站立时,截骨端的应力和位移情况。在双足站立时,模型单足承担体重一半的力,约为 310 N。影响第 1 跖列的肌力仅考虑拇长屈肌和拇短屈肌在等长收缩状态下的肌力,二者肌力之和约为 639 N。按照实际计算值的 50% 作为拇长、短屈肌在站立时产生的肌力,并假设该肌力与第 1 跖骨长轴平行^[4]。分趾垫和“8”字绷带的外固定力通过实验测量数值为 24.84 N,将其分解为与趾骨垂直和与第 1 跖骨平行的 2 个力。在有限元模型分析中,分趾垫和“8”字绷带

角(图 3)。模型各部分连接以及材料参数和材料特性根据参考文献确定,绷带的弹性模量经既往实验测量确定为 44.61 MPa ^[5-9]。

2.2 模型约束 支撑结构上表面和足底表面的相互作用定义为接触关系,摩擦系数设为 0.6 ^[10]。根据载荷和地面反作用力等效互换原理,以集中力通过支撑结构面向上施加在压力中心处,距骨上表面完全约束,踝关节处在平衡站立时的中立位。第 1 跖骨截骨近端设为固定端,截骨远端为自由端,断端间设为肉芽组织填充(图 4)。

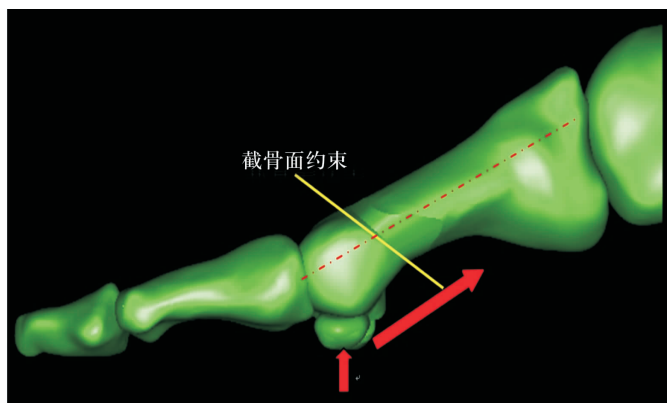


图 4 第 1 跖骨颈部截骨固定后载荷、约束示意图

的外固定力以及肌力以载荷的方式表示。截骨端间摩擦系数根据实测实验数据和相关资料设为 0.6 ^[4]。

2.4 指标观测 以空间一点为原点,建立 3 条两两垂直的数轴,即 X 轴、Y 轴和 Z 轴。X 轴水平摆放,指向右方;Y 轴竖直摆放为纵轴,指向上方;Z 轴平行于足水平面,指向前方。位移与数轴方向一致时为正值,相反时为负值。计算在上述约束与加载条件下,截骨端的 Von Mises 应力和 X、Y、Z 轴 3 个方向的位移及总位移情况。

3 结果

3.1 截骨端位移 X 轴位移为 0.261 mm ,Y 轴位移

为 0.078 mm, Z 轴位移为 -0.167 mm, 截骨端总位移为 0.293 mm(图 5)。

3.2 截骨端 Von Mises 应力 应力值为 0.712 MPa, 主要分布在截骨端的外侧边缘部位(图 6)。

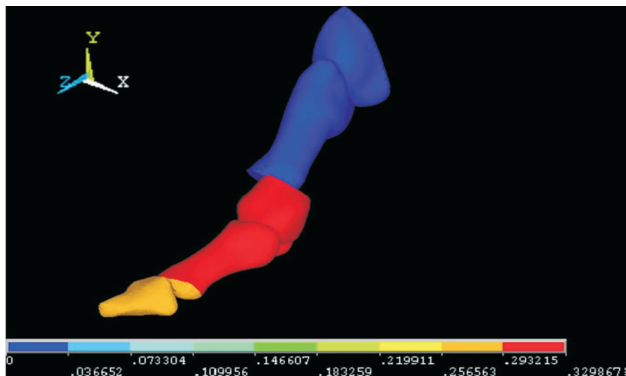


图 5 第 1 跖骨颈部截骨固定后截骨端总位移

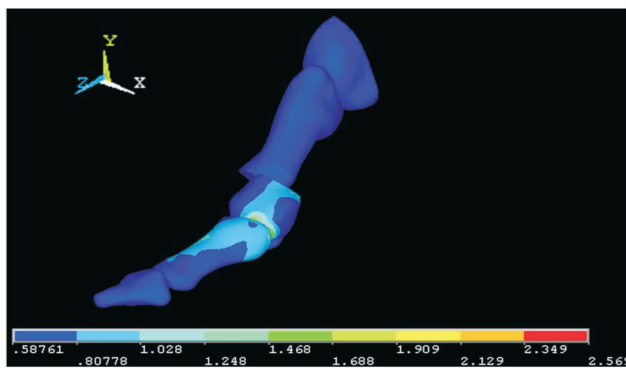


图 6 第 1 跖骨颈部截骨固定后截骨端应力云图

4 讨论

从有限元模型计算的结果看,截骨端总位移为 0.293 mm,说明截骨端是基本稳定的。截骨端位移主要发生在 X 轴方向上,其他两个方向位移很小,而 X 轴上的位移是该技术设计所允许的,即截骨远端可以存在向外侧的移位。Kristen 等^[11]建立了第 1 跖骨干的有限元模型,分析后发现与第 1 跖骨截骨手术相关的应力应变集中点在跖骨头近端跖侧 5~10 mm 处和跖楔关节远端 10~15 mm 的后内侧 2 个部位。跨越这两处的截骨可能影响截骨后的稳定性,而避开这些高应力力区的截骨则比较稳定。而我们所采用的截骨位置恰在第 1 跖骨头颈部,相对于跖骨干部和基底部,截骨远端到截骨线距离较小,力臂较短,所受应力较小,相对稳定。保证截骨断端间的摩擦是稳定固定的一项普遍原则^[12];采用削磨钻进行截骨使截骨面粗糙,增加了截骨面间的摩擦,有利于截骨端的稳定。同时,截骨线的方向决定了远端截骨块向外侧推移时第 1 跖骨会发生短缩,使挛缩的拇长屈肌腱和拇长伸

肌腱等肌腱相对延长,使之易于恢复到原来位置。在复位第 1 跖趾关节的同时,拇伸、屈肌腱也随之复位,将拇伸、屈肌腱的弓弦病理作用变为对第 1 跖骨的纵向挤压,有利于保持截骨端的稳定。另外,我们的截骨方式几乎不暴露和分离术区软组织,基本保持了局部软组织的完整性,为截骨端提供了软组织“合页”,更容易获得和维持固定后的稳定。

在固定过程中,绷带和胶布提供了直接的外力,而且绷带和胶布的松紧度可根据患足的肿胀程度进行调节。分趾垫由 4 列绷带卷成,通过绷带和胶布固定于第 1、2 趾蹠间,这样就给第 1 跖趾关节远端外侧提供了一个持续的向内的推挤力,以维持第 1 跖趾关节半脱位的复位和畸形的纠正。该模型在矢状面上截骨线与跖骨轴线的垂线成 10°角,此时外固定模型的总位移为 0.293 mm,小于单纯截骨 75°和 90°手术治疗时有限元模型的总位移(0.413 mm 和 0.434 mm)^[4]。这一结果提示,分趾垫和“8”字绷带外固定对截骨端具有很好的固定作用。

在固定过程中,绷带和夹垫的约束力始终与骨轴线垂直,不影响骨干轴向的受力状态,生理应力仍然通过骨折断端传导,无明显功能替代。而绷带和压垫的合力只是在三维空间上维持截骨端在应力下的几何位置。因此,“8”字绷带局部外固定完全符合“固定稳定、非功能替代、断端生理应力”的弹性固定准则,能够很好地保证截骨的愈合。而且“8”字绷带弹性固定允许截骨端存在一定幅度的微动,有利于骨痂生长^[13-14]。Kenwright 等^[15]的研究表明,骨愈合过程对力学环境的微小变化非常敏感,骨折端 0.5 mm 以内的微动不会对骨折愈合产生不良影响。

根据 Perren 等^[16]提出的骨折块间应变理论,骨折块间的应变和骨痂组织的力学特性之间的平衡决定了骨折是一期愈合还是二期愈合。拇外翻术后截骨端的“8”字绷带固定,是一种非坚强的固定方式,截骨端之间为二期愈合。因此,虽然截骨端在受到外力时会发生一定程度的移动,但在愈合早期截骨端形成的肉芽组织能很好地耐受截骨块间的运动变化。

Claes 等^[17]在骨折愈合生物力学实验中发现,骨痂内骨管表面的应变和流体静压大小决定了骨痂组织的分化方向。膜内骨化发生在应变 <5%、静态压力 <0.15 MPa 的区域,软骨内骨化发生在应变 <15%、静态压力 >0.15 MPa 的区域,其他情况导致结缔组织或

纤维软骨形成。我们所采用的微创截骨方式,截骨端间隙约为 2 mm,截骨端位移为 0.293 mm,则其截骨块间的应变在 9.4% ~ 14.6% 之间,且其截骨端应力为 0.712 MPa,符合软骨内成骨的条件。

本研究的结果提示,采用第 1 跖骨颈部微创截骨联合分趾垫和“8”字绷带外固定治疗拇外翻,截骨端之间位移小、应力适中,能使截骨端以软骨成骨的方式愈合。但本研究仅分析了截骨端总 Von Mises 应力,没有具体分析截骨端关键节点的应力大小和性质,同时出于简化模型和便于计算的考虑,有限元模型的构建和分析主要在第 1 跖列,可能会影响模型的准确性。

5 参考文献

[1] 张建中. 拇外翻畸形的发生、发展与外科矫正[J]. 医学与哲学,2007,28(10):16-18.

[2] 孙卫东,温建民,胡海威,等. 微创截骨治疗拇外翻的远期疗效分析[J]. 中华骨科杂志,2010,30(11):1133-1137.

[3] 温建民,孙卫东,成永忠,等. 基于 CT 图像拇外翻足有限元模型的建立与临床意义[J]. 中国矫形外科杂志,2012,20(11):1026-1029.

[4] 孙卫东,温建民,胡海威,等. 拇外翻第 1 跖骨颈部不同截骨角度截骨端稳定性有限元分析[J]. 中华损伤与修复杂志:电子版,2012,7(5):492-496.

[5] 崔红新,程方荣,王健智. 有限元法及其在生物力学中的应用[J]. 中医正骨,2005,17(1):53-55.

[6] Gefen A. Stress analysis of the standing foot following surgical plantar fascia release[J]. J Biomech,2002,35(5):629-637.

[7] Büchler P, Ramaniraka NA, Rakotomanana LR, et al. A finite element model of the shoulder: application to the com-

parison of normal and osteoarthritic joints[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon),2002,17(9/10):630-639.

[8] Cheung JT, Zhang M, An KN. Effects of plantar fascia stiffness on the biomechanical responses of the ankle-foot complex[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon),2004,19(8):839-846.

[9] 孙卫东,温建民. 足部有限元建模方法应用现状[J]. 中国组织工程研究与临床康复,2010,14(13):2457-2461.

[10] Zhang M, Mak AF. In vivo friction properties of human skin[J]. Prosthet Orthot Int,1999,23(2):135-141.

[11] Kristen KH, Berger K, Berger C, et al. The first metatarsal bone under loading conditions: a finite element analysis[J]. Foot Ankle Clin,2005,10(1):1-14.

[12] 柴本甫. 内固定骨折愈合的生物力学概念[J]. 国外医学:创伤与外科基本问题分册,1980(2):20-26.

[13] Larsson S, Kim W, Caja VL, et al. Effect of early axial dynamization on tibial bone healing: a study in dogs[J]. Clin Orthop Relat Res,2001,7(388):240-251.

[14] Kenwright J, Richardson JB, Cunningham JL, et al. Axial movement and tibial fractures. A controlled randomised trial of treatment[J]. J Bone Joint Surg Br,1991,73(4):654-659.

[15] Kenwright J, Goodship AE. Controlled mechanical stimulation in the treatment of tibial fractures[J]. Clin Orthop Relat Res,1989,4(241):36-47.

[16] Perren SM. Physical and biological aspects of fracture healing with special reference to internal fixation[J]. Clin Orthop Relat Res,1979(138):175-196.

[17] Claes LE, Heigele CA, Neidlinger-Wilke C, et al. Effects of mechanical factors on the fracture healing process[J]. Clin Orthop Relat Res,1998,10(355 Suppl):s132-s147.

(2013-03-30 收稿 2013-10-24 修回)

· 简 讯 ·

《中医正骨》广告业务范围

- 医疗、科研、教学单位及药械生产营销企业介绍
- 用于骨伤科医疗、科研、教学的器械设备介绍
- 用于骨伤科医疗、科研、教学的中西药物及中间体介绍
- 各种形式的骨伤科讯息,如书刊征订、招生启事、会议通知等

《中医正骨》2014 年度广告收费标准

刊登位置	印刷规格	版面	每期收费标准(元)	半年收费标准(元)	全年收费标准(元)
封二	大 16 开彩色铜版纸印刷	全版	9 000	54 000	75 600
封三	大 16 开彩色铜版纸印刷	全版	8 000	48 000	67 200
封底	大 16 开彩色铜版纸印刷	全版	10 000	60 000	84 000
前插页	大 16 开彩色铜版纸印刷	全版	7 000	42 000	58 800
后插页	大 16 开彩色铜版纸印刷	全版	6 000	36 000	50 400
内文图文	大 16 开黑白铜版纸印刷	全版	3 000	18 000	25 200
	大 16 开黑白铜版纸印刷	1/2 版	1 800	10 800	15 120
内文文字	大 16 开黑白铜版纸印刷	全版	3 000	18 000	25 200
	大 16 开黑白铜版纸印刷	1/2 版	1 800	10 800	15 120