

文章编号:1004-7220(2018)05-0453-06

不同康复训练方法对术后拇外翻第1跖列的生物力学影响

郭俊超¹, 王丽珍², 常程^{3,4}, 温建民³, 樊瑜波^{1,2}

(1. 国家康复辅具研究中心, 北京市老年功能障碍康复辅助技术重点实验室, 民政部人体运动分析与康复技术重点实验室, 北京 100176; 2. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京 100191; 3. 中国中医科学院望京医院 矫形外科, 北京 100102; 4. 山西中医药大学 中医临床学院, 太原 030619)

摘要:目的 研究拇外翻术后不同康复训练对第1跖列的生物力学影响。方法 通过拇外翻医学影像数据建立完整的足部三维有限元模型, 此模型包括骨骼、籽骨、软骨、韧带、软组织、跟腱等结构。模拟分析拇外翻患者术后被动跖屈和背屈、主动跖屈和背屈、站立位对截骨远端的生物力学影响。结果 被动训练情况下, 截骨远端截骨面的应力分布较均匀, 且峰值(7.78 MPa)较站立位和主动训练时大; 被动训练时的最大位移量(0.98 mm)在前后方向上大于站立位(0.69 mm)和主动训练(0.38 mm)的位移量。结论 被动训练可促进截骨面的接触, 并减少截骨端的愈合时间, 有利于术后拇外翻患者的康复。

关键词:拇外翻; 康复训练; 截骨远端; 应力; 位移

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.05.012

Effects of Different Rehabilitation Training Methods on the First Ray of Postoperative Hallux Valgus

GUO Junchao¹, WANG Lizhen², CHANG Cheng³, WEN Jianmin³, FAN Yubo^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory of Rehabilitation Technical Aids for Old-Age Disability, Key Laboratory of Human Motion Analysis and Rehabilitation Technology of the Ministry of Civil Affairs, National Research Center for Rehabilitation Technical Aids, Beijing 100176, China; 2. Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Department of Orthopedic Surgery, Wangjing Hospital of China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100102, China; 4. Clinical College of Chinese Medicine, Shanxi University of Chinese Medicine, Taiyuan 030619, China)

Abstract: Objective To investigate the effect of the different rehabilitation training method on the first ray of postoperative hallux valgus (HV). **Methods** Based on medical images of HV patient, a comprehensive three-dimensional finite element model of HV foot was established, including bones, sesamoid, cartilage, ligaments, soft tissues, Achilles tendon. The passive/active plantar flexion and dorsal flexion as well as standing were simulated to investigate the biomechanical behavior of distal osteotomy fragment of the postoperative HV. **Results** The stress distribution on distal osteotomy fragment during passive training was more uniform, and the peak stress

收稿日期:2017-11-21; 修回日期:2017-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(11572029, 11702068, 11120101001, 11602063), 民政部基本科研项目(118009001000160001)

通信作者:樊瑜波, 教授, 博士研究生导师, E-mail: yubofan@buaa.edu.cn; 温建民, 主任医师, 博士研究生导师, E-mail: wjm5734@263.net

(7.78 MPa) was greater than that during stance phase and active training. The distal osteotomy fragment displacement during passive training (0.98 mm) in anterior-posterior direction was greater than that during stance phase (0.69 mm) and active training (0.38 mm). **Conclusions** The passive training could promote the contact of osteotomy surface and reduce the healing time of osteotomy, which would be beneficial for rehabilitation of postoperative HV.

Key words: hallux valgus; rehabilitation training; distal osteotomy fragment; stress; displacement

拇外翻是足部畸形的常见疾病,在总人口中的发生率为2%~4%,主要表现为第1跖列位置不正、跖趾关节内侧粗隆突出^[1]。成人中特别是女性的患病率高达33%^[2]。研究报道表明,这与女性穿着高跟鞋或束脚鞋袜有关^[3],其内侧突的明显畸形严重影响了第1跖趾关节的机械转位,进而造成第1跖列的疼痛、位置不稳等并发症的产生^[1]。然而,目前还没有切实有效的保守和手术治疗的方法。

拇外翻无法自体修复,需要通过矫形或手术方式治疗。拇外翻早期发病时,通过趾间垫矫形器^[4]、固定设备、康复训练等保守治疗方法可改善病情的恶化。但早期症状往往被病人忽略而出现跖趾关节拇囊炎、疼痛等严重情况的发生^[5]。微创手术以切口小、恢复时间短、手术操作简单等优点逐渐应用到拇外翻手术中,目前手术干预被认为是最有效的治疗方式^[6]。拇外翻手术方式约150种,其中报道比较全面的微创手术方法大致有3种,分别是Bosch手术^[7]、经皮截骨术^[8]和温氏手术^[9]。Bosch手术的具体操作为:在第1跖骨颈处行1 cm左右的切口并截开,随后从切口处经软组织紧挨骨头向拇趾远端打入克氏针,直至克氏针近端末端达到截骨线处,然后调整跖骨头位置,将克氏针近端插入跖骨骨干内进行固定。经皮截骨术思路和Bosch手术类似,术后需取出固定物。而温氏手术同样在第1跖骨远端采用小切口截骨,截骨线与Bosch手术和经皮截骨术类似;但术后在第1和第2脚趾之间放置纱布分趾垫,并用绷带呈“8”字缠绕固定。临床跟踪报道显示,温氏手术的固定方法能有效固定截骨端的稳定。

温氏手术中的“8”字绷带固定法,利用“动静结合”的骨折治疗理念,维持截骨端的相对稳定^[10]。同时,截骨端微动有利于截骨面的细胞分化,加速截骨面的愈合^[11]。绷带固定约束骨轴线的稳定,相

对较小的剪应力维持截骨端的相对稳定,在某种功能活动上,会增大第1跖列肌肉收缩的能力^[12]。研究显示,绷带固定可减少术后患者的恢复时间,有利于第1跖骨的功能性恢复^[13]。此外,也有研究者采用尸体研究,比较不同固定对第1跖骨的生物力学影响^[14-16],或通过建立第1跖骨有限元模型,研究不同截骨术对第1跖列稳定性的影响^[17]。但有关跖骨远端截骨的术后康复训练方式的选择,目前鲜有报道。

为探讨拇外翻微创术后“8”字绷带固定情况下,跖屈和背屈康复训练对第1跖列的影响,本文建立拇外翻足部三维有限元模型,比较分析拇外翻患者术后主动跖屈和背屈、被动跖屈和背屈、负重站立位时对第1跖列的生物力学影响。

1 材料与方 法

1.1 实验方法

招募1名女性(体重54 kg)拇外翻患者,根据其足部X光片图像,通过Mimics 10.01软件测量,获得术前拇外翻角度(hallux valgus angle, HVA)为35.62°、第1、2跖骨角度(internetatarsal angle, IMA)为20.26°。HVA和IMA是量化拇外翻严重程度的指标^[11],本研究的HVA、IMA测量值与文献^[18]中报道的HVA $\leq 40^\circ$ 和IMA $\leq 20^\circ$ 为轻度或中度畸形相一致,具有统计学意义。按照温氏手术法进行截骨手术:头颈部截骨,其截骨方向在水平面截骨线从远端内侧至近端外侧与第1跖骨轴线的夹角为70°,在矢状面截骨线从远端背侧至近端跖侧与第1跖骨轴线的夹角为75°^[19][见图1(a)]。截骨术后,通过“8”字绷带固定截骨端,文献报道,这种固定方法可使患者术后着地负重^[11]。

术后患者在康复医师的引导下,进行如下训练:①被动跖屈和背屈训练。坐姿位,腿部与上肢垂直即腿部平行地面,康复医师大拇指、食指、

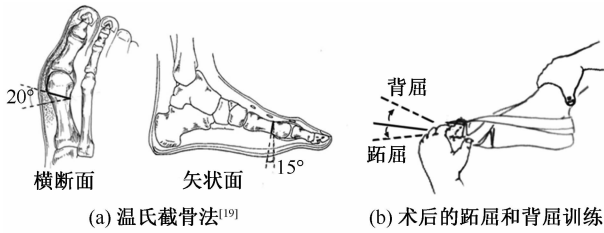


图 1 截骨与康复训练法

Fig. 1 Methods of osteotomy and rehabilitation training

(a) Wen's osteotomy method^[19], (b) Dorsiflexion and plantar flexion training of post-operation

中指紧握第 1 跖趾关节处,进行跖屈和背屈训练 [见图 1(b)],通过量角器测得跖屈最大角度为 18° 和背屈角度 27° ,1 次训练 15 min。② 主动跖屈和背屈训练。坐姿位,腿部被垫起且平行地面,使足底面保持垂直地面,让患者足部主动进行跖屈和背屈训练,每次训练角度根据患者自体感受到疼痛的状态,测量跖屈角度为 15° 和背屈角度 21° 。③ 站立位训练。让患者足部站立负重,反复 100 次。

1.2 有限元建模

利用志愿者足部在非负重状态下的 CT 图像,通过 Mimics 软件建立足部的皮肤和骨骼边界轮廓,骨骼结构包括胫骨、腓骨、距骨、舟骨、跟骨、骰骨、楔骨(3 块)、跖骨(5 块)、趾骨(14 块)。利用 Geomagic 12.0 软件把骨骼处理成实体模型。骨骼之间通过类似于软骨结构的软骨层连接,基于骨骼解剖点的位置连接成韧带结构。基于皮肤表面轮廓生成壳结构建立绷带模型,用于模拟拇外翻术后的绷带固定。

为了有效地模拟第 1 跖列的运动情况,足部组织被理想化为均匀、各向同性、线弹性材料。设定骨骼的弹性模量和泊松比分别为 7.3 GPa 和 0.3^[20],皮肤软组织的弹性模量和泊松比分别为 1.15 MPa 和 0.49^[21]。患者平衡站立时,地面为刚体结构,弹性模量、泊松比分别为 170 GPa 和 0.3^[22]。韧带和足底跖筋膜设置为仅受拉伸而不可压缩的杆单元,其截面面积为 $18.4 \sim 58.6 \text{ mm}^2$ ^[22]。网格划分在 ABAQUS 6.13 中完成,模型共划分 386 865 个 4 面体单元网格。

跖屈和背屈康复训练在非负重状态下进行,故

仅仅加载实验测量的跖屈和背屈角度。边界条件依据实验结果加载:被动跖屈 18° 和背屈 27° ;主动跖屈 15° 和背屈 21° 。负重平衡站立位时,除胫骨腓骨末端加载 $1/2$ 体重外,地面反作用力为 $1/2$ 体质量,跟腱力为地面反作用力的 50%^[23]。此外,关节之间的摩擦系数设为 0,足与地面之间的摩擦系数设为 0.6^[24],截骨面间的摩擦系数为 0.6,通过尸体实验测量得到^[25]。足部模型及边界条件如图 2 所示。

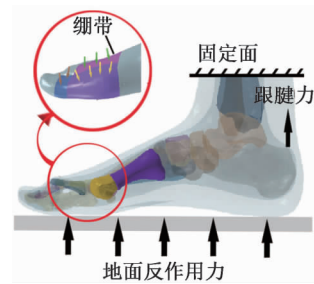


图 2 足部有限元模型及边界条件的设置

Fig. 2 Finite element model of the foot and setting of boundary condition

2 结果

2.1 模型验证

图 3 所示为有限元预测和 RSscan 测量的足底压力结果。有限元预测的峰值足底压力(233 kPa)集中在足跟区域,与 RSscan 测量的峰值压力(204 kPa)集中区域基本一致,表明计算值和实验值及压力分布区域趋势一致,验证所建有限元模型的有效性。

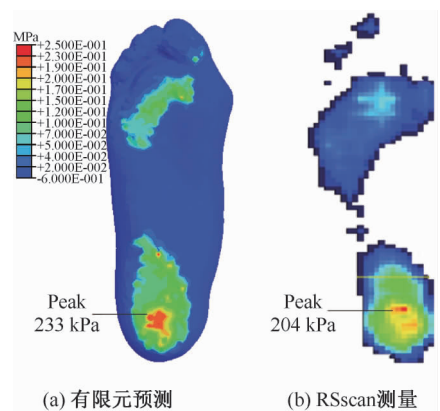


图 3 足底压力结果

Fig. 3 Plantar pressure results (a) Finite element prediction, (b) RSscan measurement

2.2 截骨面应力分布

图4所示为5种康复训练姿态下截骨远端的截骨面应力分布。与站立位截骨面峰值应力

(2.326 MPa)相比,被动训练时的峰值应力大于主动训练,且被动训练的应力较均匀地分布于截骨面。

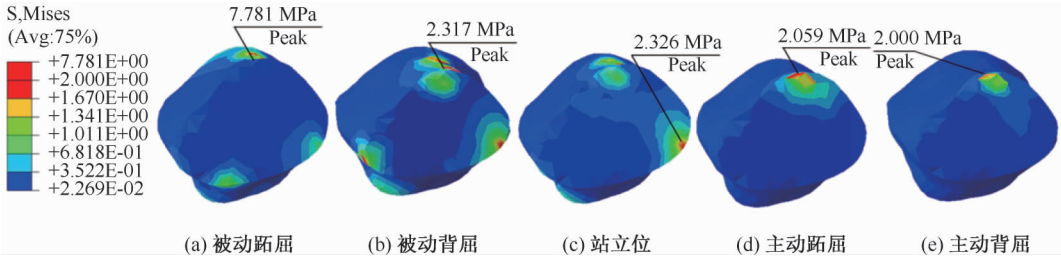


图4 截骨远端5种姿态下应力分布

Fig. 4 Stress distributions of the distal osteotomy fragment under five postures (a) Passive plantarflexion, (b) Passive dorsiflexion, (c) Standing position, (d) Active plantarflexion, (f) Active dorsiflexion

2.3 截骨远端位移

5种康复训练姿态下截骨远端的移动趋势及空间位移量如图5和表1所示。与站立位时截骨远端的空间位移(0.92 mm)相比,被动训练时的位移量增加15.3%~69.4%,主动训练时减小37.3%~37.9%。主要的位移量变化发生在Y轴方向即远端向近端的移动,且截骨远端的空间运动趋势几乎一致,都趋于后下方。

表1 截骨远端5种姿态下的空间位移量

Tab. 1 Displacement of the distal osteotomy surface under five postures

姿态	空间方向位移/mm		
	U_1 (X轴)	U_2 (Y轴)	U_3 (Z轴)
被动跖屈	-0.424 1	0.982 9	-0.607 2
被动背屈	-0.188 9	0.748 4	-0.122 9
站立	-0.323 3	0.695 2	0.348 0
主动跖屈	-0.085 8	0.384 4	-0.272 4
主动背屈	-0.077 2	0.382 3	-0.309 6

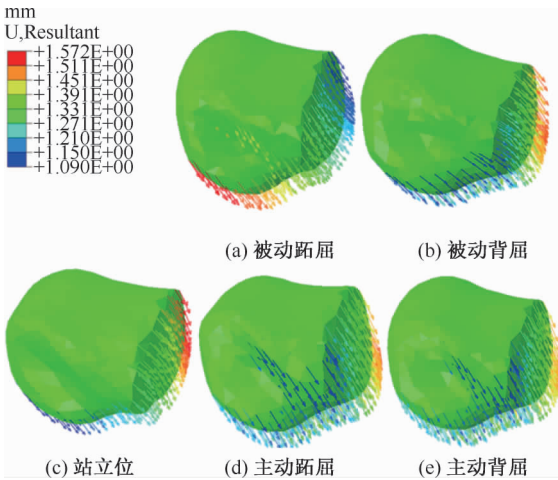


图5 截骨远端5种姿态下的运动趋势

Fig. 5 Movement trend of the distal osteotomy fragment under five postures (a) Passive plantarflexion, (b) Passive dorsiflexion, (c) Standing position, (d) Active plantarflexion, (f) Active dorsiflexion

3 讨论

温氏拇外翻截骨术中截骨远端的稳定性是

影响第1跖列的重要因素。目前采用的第1跖骨远端截骨,其术后复发率低、恢复时间短、并发症少等优点^[26],逐渐应用于拇外翻截骨术。本文研究拇外翻术后的康复训练方式,对评价截骨术和术后效果有重要意义。

截骨端的稳定性影响第1跖列的术后恢复时间、受载特点。从截骨端的应力分布来看,不同训练方式对截骨远端的截骨面应力分布影响不同(见图4)。被动训练时截骨面的峰值应力大于主动训练,且与主动训练时集中在上侧区域和站立位集中在外侧区域相比,被动训练应力较均匀分布于截骨面的内外侧和上下侧,说明截骨近端和远端在被动训练时存在面与面相互作用力,此作用力会随着第1跖列运动幅度的增大而增大^[27],这有利于截骨面的骨细胞分化,快速形成骨性连接的骨痂^[28],促进截骨面快速愈合。此外,8字绷带固定限制了第1跖骨的过度移位,有利于第1跖列的稳定^[29]。临床研究跟踪报道显示,这种固定方法短期手术优良率为98.5%,长期随访(平均随访时间7.5年)满意度

96%^[30]。主动训练时,截骨面的峰值应力较低,较低的峰值应力可能是由于患者康复训练时疼痛致使第 1 跖列的活动幅度小,从而导致截骨面的接触不充分所致。Bosch 和 Giannini 手术矫正后拇外翻复发率较高,推测是术后 4~6 周移除克氏针后截骨端的应力较小,即受到的作用力较小,会出现拇外翻术后复发的现象^[28],这有可能是造成拇外翻术后并发症发生的主要原因。因此,在绷带固定的情况下,被动训练能促进截骨面的骨性桥接,有利于截骨面的快速愈合。

从截骨远端的移动趋势和位移量来看,无论跖屈还是背屈,被动训练时的位移量都大于站立负重位和主动训练(见图 5)。在绷带的固定作用下,绷带拉力加强截骨面的压力和稳定。这种较大的微动位移量能促进骨膜的成纤维细胞和成骨细胞增生,形成骨性骨痂的连接,促进截骨面的二期愈合^[28]。研究表明,截骨端的相对微动会加快骨折部位的骨化分解速度,有利于骨折端的愈合。本研究预测的最大位移量(0.98 mm)发生在远端到近端的方向上,此预测值在文献报道的安全值(2 mm)内^[31],有利于截骨端的愈合。同时,被动训练时截骨面较大的应力会刺激骨细胞分化,激发成骨纤维细胞增生,促进骨痂生长,有利于加速愈合和稳定截骨端^[28]。

此外,研究报道也观察了第 1 跖骨或截骨端的位移和受载特点^[5],这种微动对尸体研究来说,可能误差较大。本研究建立了术后拇外翻的足部有限元模型,分析比较被动训练、主动训练和站立状态下截骨远端的受载及位移特点;量化分析了不同训练方式下截骨远端的生物力学行为,避免了尸体及人为因素导致的误差。此方法预测截骨远端的位移及运动趋势对拇外翻术后的有效康复训练有重要的指导意义。

4 结语

本文通过拇外翻患者足部 CT 图像建立完整的足部有限元模型,并分别建立微创截骨术后的克氏针固定和绷带固定的模型,模拟分析 8 字绷带固定情况下,主动、被动和站立位训练对截骨远端和截骨面的生物力学影响。结果表明,被动训练能增加截骨面的接触应力,产生的较大微动能减少截骨端

的愈合时间,有利于拇外翻患者术后的康复。

参考文献:

- [1] HEIZMANN V, CAPANNI F, ENGLEDER T, et al. Development of an extraosseous nitinol implant for the hallux valgus treatment: preliminary mechanical investigations, design and numerical simulation [J]. Biomed Tech, 2012, 57(SI-1 Track-S): 918-921.
- [2] MATZAROGLOU C, BOUGAS P, PANAGIOTOPOULOS E, et al. Ninety-degree chevron osteotomy for correction of hallux valgus deformity: Clinical data and finite element analysis [J]. Open Orthop J, 2010, 4: 152-156.
- [3] ROBINSON AH, LIMBERS JP. Modern concepts in the treatment of hallux valgus [J]. J Bone Joint Surg Br, 2005, 87B(8): 1038-1045.
- [4] TANG SF, CHEN CP, PAN JL, et al. The effects of a new foot toe orthosis in treating painful hallux valgus [J]. Arch Phys Med Rehabil, 2002, 83(12): 1792-1795.
- [5] ELLA H, PAUL M, YVES T. Arthrodesis of the first metatarsophalangeal joint: A biomechanical comparison of four fixation techniques [J]. Foot Ankle Surg, 2016 23(4): 268-274.
- [6] MAFFULLI N, LONGO UG, MARINOZZI A, et al. Hallux valgus: Effectiveness and safety of minimally invasive surgery. A systematic review [J]. Br Med Bull, 2011, 97(1): 149-167.
- [7] BOSCH P, WANKE S, LEGENSTEIN R. Hallux valgus correction by the method of Bosch: A new technique with a seven-to-ten-year follow-up [J]. Foot Ankle Clin, 2000, 5(3): 485-498.
- [8] GIANNINI S, FALDINI C, NANNI M, et al. A minimally invasive technique for surgical treatment of hallux valgus: Simple, effective, rapid, inexpensive (SERI) [J]. Inter Orthop, 2013, 37(9): 1805-1813.
- [9] 温建民, 桑志成, 林新晓, 等. 小切口手法治疗拇外翻临床研究-附 535 例(986 足)研究报告[J]. 中国矫形外科杂志, 2002, 1: 26-29.
- [10] 毕大卫, 费骏, 王志彬. 尚天裕学术思想的形成与中国 CO 学派的确立[J]. 中国骨伤, 1999, 12(2): 3-5.
- [11] YASSER A, RADWAN AM, REDA M. Percutaneous distal metatarsal osteotomy versus distal chevron osteotomy for correction of mild-to-moderate hallux valgus deformity [J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2012, 132(11): 1539-1546.
- [12] 李瑛, 费攀, 邹季. 骨折弹性固定条件下骨折端“微动”对骨折愈合的影响[J]. 湖北中医杂志, 2009, 31(12): 35-37.
- [13] 张元民, 王志彬. 小夹板治疗骨折的微动观[J]. 中国骨伤, 2000, 13(12): 722-723.

- [14] BOZKURT M, TIGARAN C, DALSTRA M, *et al.* Stability of a cannulated screw versus a Kirschner wire for the proximal crescentic osteotomy of the first metatarsal: A biomechanical study [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2004, 43(3): 138-143.
- [15] KHURI J, WERTHEIMER S, KRUEGER J, *et al.* Fixation of the offset V osteotomy: Mechanical testing of 4 constructs [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2003, 42(2): 63-67.
- [16] JACOBSON K, GOUGH A, MENDICINO SS, *et al.* Mechanical comparison of fixation techniques for the offset V osteotomy: A saw bone study [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2003, 42(6): 339-343.
- [17] 刘颖, 周思远, 郑拥军, 等. 基于有限元分析腓肠肌作用力对足部生物力学的影响[J]. *医用生物力学*, 2016, 32(5): 437-442.
Effects of gastrocnemius muscle force on foot biomechanics based on finite element analysis [J]. *J Med Biomech*, 2016, 32(5): 437-442.
- [18] KOTA W, YASUTOSHI I, DAISUKE S, *et al.* Three-dimensional analysis of tarsal bone response to axial loading in patients with hallux valgus and normal feet [J]. *Clin Biomech*, 2017, 42: 65-69.
- [19] 周嘉骏, 张洪涛, 罗宗平, 等. 高跟鞋与足部跖间应力关系的有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2015, 31(6): 506-509.
ZHOU JJ, ZHANG HT, LUO ZP, *et al.* Finite element analysis on relationship between wearing high-heeled shoes and stresses in intermetatarsal region of foot [J]. *J Med Biomech*, 2015, 31(6): 506-509.
- [20] GEFEN A, MEGIDO-RAVID M, ITZCHAK Y, *et al.* Biomechanical analysis of the three-dimensional foot structure during gait: A basic tool for clinical applications [J]. *J Biomech Eng*, 2000, 122(6): 630-639.
- [21] QIAN ZH, REN L, DING Y, *et al.* A dynamic finite element analysis of human foot complex in the sagittal plane during level walking [J]. *PLoS One*, 2013, 8(11): 268-275.
- [22] KIA C, YOSHIDA R, COTE M, *et al.* First metatarsophalangeal contact properties following proximal opening wedge and scarf osteotomies for hallux valgus correction: a biomechanical study [J]. *Foot Ankle Int*, 2017, 38(4): 430-435.
- [23] CHEUNG JT, ZHANG M. A 3-dimensional finite element model of the human foot and ankle for insole design [J]. *Arch Phys Med Rehab*, 2005, 86(2): 353-358.
- [24] ZHANG M, MAK A. *In vivo* skin frictional properties [J]. *Prosthet Orthot Int*, 1999, 23(2): 135-141.
- [25] 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): 22-25.
- [26] RADWAN YA, MANSOUR AM. Percutaneous distal metatarsal osteotomy versus distal chevron osteotomy for correction of mild-to-moderate hallux valgus deformity [J]. *Arch Orthop Traum Surg*, 2012, 132(11): 1539-1546.
- [27] DUO WC, ZHANG M, YU J, *et al.* Biomechanics of first ray hypermobility: An investigation on joint force during walking using finite element analysis [J]. *Med Eng Phys*, 2014, 36(11): 1388-1393.
- [28] EPARI DR, DUDA GN, THOMPSON MS. Mechanobiology of bone healing and regeneration: *In vivo* models [J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2010, 224(12): 1543-1553.
- [29] TONG CK, HO YF. Use of minimally invasive distal metatarsal osteotomy for correction of hallux valgus [J]. *J Orthop Trauma Rehab*, 2012, 16(1): 16-21.
- [30] 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.
- [31] 刘清华, 余斌, 金丹, 等. 正常人足踝部有限元模型的构建研究[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2010, 12(2): 174-177.