

文章编号:1004-7220(2016)06-0490-05

个性化扁平足矫形鞋垫的生物力学研究

苏宏伦^{1,2}, 郭俊超^{2*}, 莫中军², 樊瑜波^{1,2}

(1. 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;

2. 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)

摘要: **目的** 研究不同结构和不同材料硬度的矫形鞋垫对扁平足的矫正效果。**方法** 利用 Infoot 设备扫描扁平足负重位和非负重位的外形轮廓。通过鞋垫式足底压力测试系统, 比较 3 种矫形鞋垫内侧纵弓高度(类型 I、II、III)和 3 种材料硬度(30°、35°、42°)对扁平足的作用效果。**结果** 类型 I 鞋垫对提高舟骨高度有效, 且在硬度为 35° 时分散了足底压力集中的区域和增大了内侧足弓的承载面积。**结论** 合适的鞋垫对改善扁平足畸形有良好的矫正作用, 研究结果为个性化矫形鞋垫的设计应用提供理论基础。

关键词: 扁平足; 矫形鞋垫; 材料硬度; 足底压力

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2016.06.490

Biomechanical study on the personalized orthopedic insoles for flatfoot

SU Hong-lun^{1,2}, GUO Jun-chao^{2*}, MO Zhong-jun², FAN Yu-bo^{1,2} (1. *Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*; 2. *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*)

Abstract: Objective To study the effect from different structures and material hardness of orthopedic insoles on flatfoot correction. **Methods** The contours of flatfoot under weight-bearing and non-weight-bearing conditions were scanned by Infoot system. The 3 kinds of medial longitudinal arch height (type I, II, III) and 3 kinds of material hardness (30°, 35°, 42°) from orthopedic insoles were used to compare their effects on flatfoot by the embedded insole test system. **Results** Type I orthopedic insoles could significantly restore the anatomical position by improving the height of navicular bone, and redistribute the concentrated plantar pressure and increase the loading area of medial longitudinal arch with material hardness of 35°. **Conclusions** The appropriate insole shows a favorable orthopedic effect to ameliorate the foot deformity of flatfoot patients. The research findings lay a theoretical basis on design of the personalized orthopedic insoles.

Key words: Flatfoot; Orthopedic insole; Material hardness; Plantar pressure

扁平足是内侧足弓降低或消失, 同时伴随跟骨外翻和距骨下沉内突, 是一种常见的足部畸形^[1]。

生长发育期时, 轻、中度的扁平足会随着软组织和骨骼的发育自行纠正, 而重度扁平足作为一种足部畸

收稿日期: 2016-11-15; 修回日期: 2016-12-06

基金项目: 科技部研发专项(2016YFB1101101, 2016YFB1101105), 国家自然科学基金项目(11572029, 11422202, 11120101001, 11602063)。

通信作者: 樊瑜波, 教授, 博士研究生导师, E-mail: yubofan@buaa.edu.cn。

* 为共同第一作者

形的症状,会出现韧带松弛、肌腱无力、胫骨扭转,从而引起下肢疼痛、足部损伤、局部溃疡等疾病的发生^[2]。我国人口调查报告显示,近30年来青少年扁平足患者增加了约20%^[3],给个人健康和家庭生活造成很大负担。因此,合理、有效地纠正扁平足畸形对提高足部健康、预防足部疾病具有重要意义。

针对扁平足的研究进展,许多学者探索了不同的研究方法。20世纪60年代出现的足印法及相关的评估设备,利用比例、划线宽度、角度等测量方法^[4]研究扁平足。由于足印法存在主观误差较大、测量时耗时耗材等缺点,医学影像的检测方法被广泛应用,如扁平足不同体位的X线和投照方法^[5]、扁平足负重位X线正位和侧位的测量^[6]等,通过测量距骨纵轴与跟骨纵轴的夹角、距骨第1趾骨角、距舟覆盖角、外足弓角、内足弓角、前足弓角等方法,从空间结构和位置变化上定量分析扁平足的严重程度。但由于一些骨骼的轴线如跟骨和第1趾骨的中轴线很难准确定位,在对比患者康复前后的差异时,影像设备、参照物的选取等对X图像的测量结果有很大影响。随后出现了X线光谱分析的方法,探索正常足和扁平足后足足跟垫的差异性^[7]。近年来,足底压力测试与X线相结合的方法逐渐应用于诊断扁平足,在调查扁平足姿态如跟骨内外翻度数、距舟关节凸出状况、前足内收外展度数等方面起重要作用^[8],为扁平足的诊断提供有效的研究方法。

在临床上,常采用矫形器和手术法矫正扁平足。对于柔性扁平足的患者,特别是青少年阶段常采用物理矫形的方法^[3]。物理矫形法主要通过矫形鞋或矫形鞋垫的结构形状或材料特性,提高和恢复足弓的正确支撑作用,通过体外冲击波联合矫形鞋垫^[9]、物理因子结合矫形鞋垫^[10]、压电效应^[3]、针刺配合矫形鞋^[11]等方法,改善扁平足足部疼痛、内侧肌肉疼痛、腱鞘炎、关节的异常运动等功能^[12]。但对于重度扁平足患者,外科医生常采用手术方法矫形。目前针对僵硬性扁平足畸形,多种手术方案已获得相当好的治疗效果,例如利用骨板或骨钉固定足踝关节的关节融合术^[13]、利用嵌入式植入限制关节活动的关节制动术^[14]、在跟骨远端植入骨块以提高足弓形态的跟骨截骨术^[15]、改变控制足部活动的肌肉起止点或行跟腱转移术^[16]、足踝三关节固定术^[17]等是大多数临床上采用的方法,然而这些手术方法限制了

关节的活动,后期会伴随二次并发症的发生。

本文以重度扁平足患者为研究对象,通过3种不同高度和材料硬度的矫形鞋垫,比较分析鞋垫结构和材料对患者矫形效果的影响,旨在探索扁平足个性化矫形鞋垫的参数化研究。

1 方法

1.1 实验测量

选取1名重度扁平足患者(体重55 kg,年龄12岁)为研究对象,该患者可代表此类扁平足的症状^[18]。通过足部主要的标记点标识,利用Infotool足部扫描系统(Ware Laboratory Co., Ltd., 美国)对患者进行负重位和非负重位的足部扫描,采集足部相关数据,特别是足内侧纵弓的形态测量(见图1)。

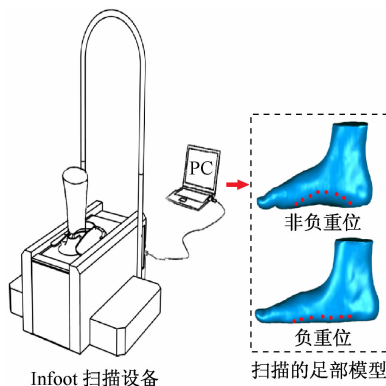


图1 Infotool足部扫描系统

Fig. 1 Infotool foot scanning system

测量受试者赤脚站立时的足底压力。通过Foot-Scan分析软件,调整足底压力的分区^[19],划分为10个区:第1足趾、第2~5足趾,第1、2、3、4、5跖骨、中足、后足内侧和后足外侧(见图2)。

为比较矫形鞋垫形态结构和材料硬度对扁平足的矫形效果,根据其测量的内侧纵弓的形态数据,针对改善患者的足弓高度,3种类型矫形鞋垫的内、外侧足弓形态如图3所示。从舒适性和矫形效果考虑^[20],利用邵氏A硬度仪选择鞋垫的材料硬度为30°、35°和42°。

1.2 3种鞋垫足底压力的测量

通过鞋垫无线式足底压力测量系统(Novel inc., 美国),每只鞋垫分布100个压力传感器,通过无线设备输出该患者穿戴3种硬度和3种高度鞋垫时对患者足底压力的影响,其测量方法如图4所示。

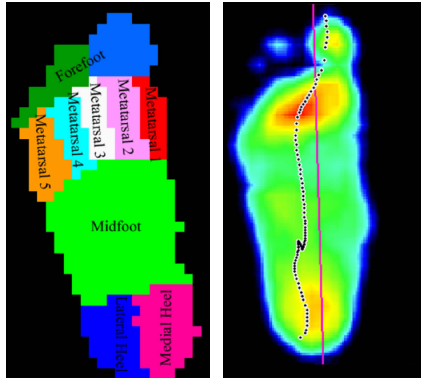


图2 赤足的足底压力分区及压力测量
Fig.2 Plantar pressure partitions and pressure measurement during barefoot standing

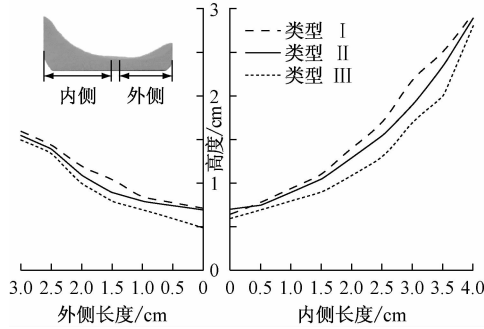


图3 3种类型矫形鞋垫的内、外侧足弓形态
Fig.3 Medial and lateral foot arch structures for 3 types of orthopaedic insoles

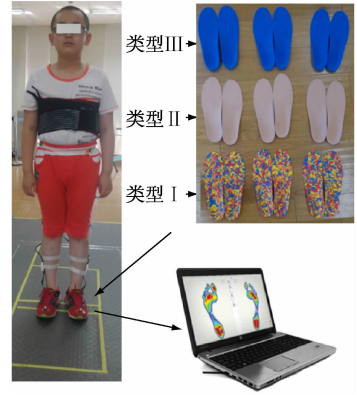


图4 无线足底压力测量系统
Fig.4 Wireless plantar pressure measurement system

2 结果

图5所示为穿戴不同硬度和不同结构矫形鞋垫时舟骨高度的变化趋势。与赤脚测量的舟骨离地面高度16.6 mm相比,鞋垫硬度42°时,类型I、II、III的矫形鞋垫分别提高舟骨110%、97%和80%;鞋垫硬度35°时,对应的分别提高舟骨高度103%、90%和65%;鞋垫硬度30°时,分别提高舟骨高度83%、66%和43%。

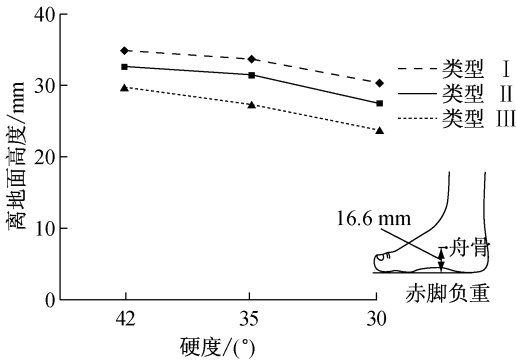


图5 穿戴3种类型矫形鞋垫时舟骨高度变化趋势
Fig.5 Variation trend of navicular height by wearing 3 types of orthopaedic insoles

图6所示为穿戴不同结构和不同硬度矫形鞋垫时足底压力的变化趋势。与赤脚站立时足底压力集中在后足外侧和前足2、3跖骨区域相比,类型I鞋垫在硬度为35°和30°时,分散了后足和前足相对集中的压力区域,而类型II、III鞋垫缩小了压力集中的区域和压力转移到外侧纵弓的区域。与赤脚站立时

峰值压强141.67 kPa相比,材料越硬(类型I)、内侧纵弓越高(类型II 42°),足底峰值压强约为赤脚的1.01~1.29倍。

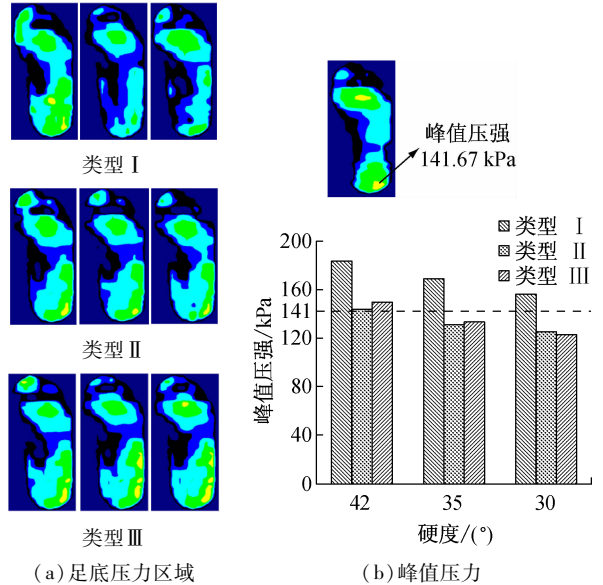


图6 穿戴3种类型矫形鞋垫时足底压力变化趋势
Fig.6 Variation trend of plantar pressures by wearing 3 types of orthopaedic insoles (a) Plantar pressure regions, (b) Peak pressure

3 讨论

矫形鞋垫对青少年扁平足的有效纠正及防护,是目前物理治疗中普遍采用的方法。不同的鞋垫形状和材料硬度对扁平足的影响不同^[20],科学合理的设计个性化矫形鞋垫可大大改善扁平足的功能和预

防足部并发症的发生^[12]。

许多研究已报道, 针对扁平足患者, 矫形鞋垫可有效改善患者的足弓结构^[3,9-10]、降低足部疼痛^[12]、改善软组织和腱鞘炎症^[12]等病理特征, 但对于扁平足内部骨骼及内侧纵弓的变化特点, 目前鲜有精确量化研究的报道。本研究从鞋垫不同高度和硬度出发, 量化分析了鞋垫对舟骨高度的影响。结果显示, 材料越硬、内侧纵弓曲率越高的鞋垫, 作为内侧纵弓最高点的舟骨^[21], 与赤脚负重位相比, 舟骨高度可被提高为原来的 2 倍多(见图 5)。特别是类型 I 鞋垫在硬度 42° 时, 最大程度地提高了舟骨高度, 作为内侧纵弓最高点的舟骨进而带动提高纵弓高度^[21], 这对改善扁平足病人足弓塌陷的症状有重要作用, 可能会提高联合副舟骨的机制^[22]。类型 II、III 鞋垫对提高舟骨高度及内侧纵弓形态有一定的作用, 但随着曲率和硬度的降低, 患者足底压力明显下降[见图 6(a)], 并且压力区域逐渐转移到了外侧纵弓, 这有可能改变下肢张力和剪切力对胫骨后肌的作用, 提高副舟骨的功能^[23], 此种鞋垫可提高患者足部的舒适度^[20]。而类型 I 鞋垫在硬度 35° 左右时, 能够很好地分散足底压力集中的区域^[24], 这不仅改善了足底压力分布, 避免出现足部并发症, 而且有利于足弓形态的恢复, 对改善扁平足患者足部畸形有较好的矫形效果。

扁平足患者的软骨损伤和关节位置的改变也是诸多患者足部疼痛的原因。宋雅伟等^[25]针对鞋底硬度与足底压力改变的研究表明, 鞋底材料硬度会影响足底压力中心轨迹的改变, 进而改变人体上肢重心的轨迹, 这也验证了鞋垫不仅影响足底压力的峰值压强和压力区域的改变[见图 6(a)], 而且可能影响足底生理曲线的形成^[24]。特别是对于身体发育期的青少年来说, 其鞋垫材料如聚乙烯泡沫塑料、乙烯醋酸乙酯(EVA)、皮革、软木等^[20]和鞋垫结构, 对青少年足底压力中心的生理曲线影响很大。有研究表明, 在异常状态下, 神经-肌肉控制机制会被打乱, 若给予机体正常的本体觉输入, 则可以部分或完全重建和恢复机体功能^[26]。因此, 与舟骨的恢复高度和足底压力分布相比(类型 II、III), 类型 I 的鞋垫材料在硬度为 35° 左右时, 不仅分散足底压力和改善足底接触面积^[25], 而且可避免足部并发症如足底疼痛、肌肉疼痛、腱鞘炎^[12]和下肢疼痛、局部

溃疡等疾病的发生^[2], 对改善或重建足部机体功能有重要作用^[26], 对个性化扁平足矫形鞋垫的结构设计和材料选择具有重要的指导意义。

4 结语

本研究通过对扁平足患者负重位和非负重位内侧足弓的取型分析, 利用 3 种不同硬度和内侧纵弓不同曲率的矫形鞋垫, 比较分析了矫形鞋垫对患者内部骨骼和内侧纵弓形态的影响。结果显示, 矫形鞋垫的结构形态和材料硬度对改善扁平足足部畸形的生物力学形态有重要的康复作用, 为个性化矫形鞋垫应用的参数化设计提供重要的理论指导。

参考文献:

- [1] HERRING JA. Flexible pes planovalgus (flatfoot) [M]. USA: Tachd jian MO, 1990: 2717-2759.
- [2] BUERK AA, ALBERT MC. Advances in pediatric foot and ankle treatment [J]. *Curr Opin Orthop*, 2001, 12(6): 437-442.
- [3] 宋雅伟, 陈爱军, 喻菊, 等. 基于压电效应原理的一种扁平足测量仪的研究开发 [J]. *实验室研究与探索*, 2008, 27(6): 54-58.
- [4] 范振华, 屠丹云, 马燮荣, 等. 运动员平足研究 [C]//*体育科学研究论文集*. 北京: 人民体育出版社, 1965: 173-179.
- [5] RAPP SM. X-ray parameters helpful in selecting adults with acquired flatfoot deformity for MDCO [J]. *Orthop Today*, 2010, 30(5): 36-38.
- [6] MURLEY GS, MENZ HB, LANDORF KB. A protocol for classifying normal- and flat-arched foot posture for research studies using clinical and radiographic measurements [J]. *J Foot Ankle Res*, 2009, 2(1): 22-28.
- [7] VANDERWILDE R, STAHELI LT, CHEW DE, *et al.* Measurements on radiographs of the foot in normal infants and children [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1988, 70(3): 407-415.
- [8] JUNG SL, KI BK, JIN OJ, *et al.* Correlation of foot posture index with plantar pressure and radiographic measurements in pediatric flatfoot [J]. *Ann Rehabil Med*, 2015, 39(1): 10-17.
- [9] 严文广, 孙绍丹, 李旭红. 体外冲击波联合矫形鞋垫治疗足底筋膜炎的疗效观察 [J]. *中南大学学报: 医学版*, 2014, 38(12): 899-901.
- [10] 高峰, 李海峰, 谢谨, 等. 物理因子结合矫形鞋垫治疗跟痛症 [J]. *中国康复*, 2012, 27(4): 311-312.
- [11] 孙民焱. 针刺配合矫形鞋垫治疗跖腱膜炎/跟骨骨刺综合征

- 47 例疗效观察与分析[J]. 中华实用医药杂志, 2009, 9(3): 175-176.
- [12] 胡智宏, 叶倩, 孔叶平. 矫形鞋垫的作用机制及临床研究进展[J]. 中国康复, 2016, 31(3): 229-231.
- [13] KLENERMAN L. Surgery of the foot and ankle [J]. J Bone J Surg, 2007, 89(12): 1676-1681.
- [14] VAN AMAN S, SCHON L. Subtalar arthroereisis as adjunct treatment for type II posterior tibial tendon insufficiency [J]. Tech Foot Ankle Surg, 2006, 5: 117-125.
- [15] KWAK YH, PARK KB, PARK HW, *et al.* Use of allograft in skeletally immature patients for calcaneal neck lengthening osteotomy [J]. Yonsei Med J, 2008, 49(1): 79-83.
- [16] VIEGAS GV. Reconstruction of the pediatric flexible planovalgus foot by using an Evans calcaneal osteotomy and augmentative medial split tibialis anterior tendon transfer [J]. J Foot Ankle Surg, 2003, 42(4): 199-207.
- [17] MOSCA VS. Calcaneal lengthening for valgus deformity of the hindfoot. Results in children who had severe, symptomatic flatfoot and skewfoot [J]. J Bone Joint Surg, 1995, 77(4): 500-512.
- [18] 张丽华, 回俊岭, 陈树君, 等. 沧州市1 629 名儿童青少年足弓发育状况[J]. 中国学校卫生, 2007, 28(6): 532-533.
- [19] 郭俊超, 王丽珍, 韩景芸, 等. 不同结构护踝对伞兵着陆时足外踝损伤防护的仿真研究[J]. 航天医学与医学工程, 2015, 28(3): 190-194.
- [20] 罗向东, 刘丽, 张晔磊, 等. EVA 鞋垫硬度与厚度对人脚舒适度影响的研究[J]. 中国皮革, 2014, 14(2): 124-127.
- [21] GILMOUR JC, BURNS Y. The measurement of the medial longitudinal arch in children [J]. Foot Ankle Int, 2001, 22(6): 493-498.
- [22] UGOLINI PA, RAIKIN SM. The accessory navicular [J]. Foot Ankle Clin, 2004, 9: 165-180.
- [23] JUNG RK, CHAN P, YOUNG JM, *et al.* Concomitant calcaneocuboid-cuneiform osteotomies and the modified Kidner procedure for severe flatfoot associated with symptomatic accessory navicular in children and adolescents [J]. J Ortho Surg Res, 2014, 9(1): 131-139.
- [24] TSUNG BYS, ZHANG M, MAK AFT, *et al.* Effectiveness of insoles on plantar pressure redistribution [J]. J Rehab Res Develop, 2009, 41(6A): 767-774.
- [25] 宋雅伟, 蔡奕玺, 寇恒静, 等. 鞋底硬度与人体行走中的足底压力的变化[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, 13(46): 115-118.
- [26] ELFTMAN HOA. Cinematic study of the distribution of pressure in the human foot [J]. Anat Record, 1934, 4(7): 59-64.

(上接第 482 页)

- [7] YOUNG AJ, KUIKEN TA, HARGROVE LJ. Analysis of using EMG and mechanical sensors to enhance intent recognition in powered lower limb prostheses [J]. J Neur Eng, 2014, 11(5): 056021-056021.
- [8] YOUNG AJ, SIMON AM, FEY NP, *et al.* Classifying the intent of novel users during human locomotion using powered lower limb prostheses[C]// Proceedings of 6th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering. USA: IEEE, 2013: 311-314.
- [9] 李琳, 王建辉, 顾树生. 一种改进的基于信号能量阈值的表面肌电信号自动分割方法[J]. 计算机科学, 2013, 40(s1): 188-191.
- [10] DIDERIKSEN JL, FARINA D, ENOKA RM. Influence of fatigue on the simulated relation between the amplitude of the surface electromyogram and muscle force [J]. Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 2010, 368(1920): 2765-2781.
- [11] TKACH D, HUANG H, KUIKEN TA. Study of stability of time-domain features for electromyographic pattern recognition [J]. J Neuroeng Rehabil, 2009, 7(1): 1640-1643.