

文章编号:1004-7220(2015)06-0506-04

# 高跟鞋与足部跖间应力关系的有限元分析

周嘉骏<sup>1</sup>, 张洪涛<sup>2</sup>, 罗宗平<sup>1</sup>, 张明<sup>3</sup>, 余嘉<sup>1,3</sup>

(1. 苏州大学 骨科研究所, 苏州 215007; 2. 苏州大学附属第一医院 骨科, 苏州 15007; 3. 香港理工大学 生物医学工程跨领域学部, 香港)

**摘要:** **目的** 研究穿着高跟鞋时前足跖间组织的应力变化,为跖间神经瘤诱发机制的定量分析和相应治疗方案提供参考。**方法** 通过已验证的足-踝-高跟鞋有限元模型平台,分析足部在0、2.54、5.08、7.62 cm[0、1、2、3"(英寸)] 4种不同跟高高跟鞋平衡站立以及穿5.08 cm跟高高跟鞋行走时步态周期内的跖间组织应力大小及趋势。**结果** 随着鞋跟高度的增加,跖间组织应力明显增加,穿7.62 cm跟高高跟鞋时第3、4跖间组织受力是穿平跟鞋的312%。穿5.08 cm跟高高跟鞋行走时,在蹬地期第3、4跖间组织的受力最大,达到90 kPa,与临床最常见的跖间神经瘤发病部位相符。**结论** 穿着高跟鞋明显增加跖间组织的应力,鞋面横向挤压导致第3、4跖间组织受力最大,最容易导致跖间神经瘤的发生。

**关键词:** 跖间神经瘤; 高跟鞋; 足踝; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2015.06.506

## Finite element analysis on relationship between wearing high-heeled shoes and stresses in intermetatarsal region of foot

ZHOU Jia-jun<sup>1</sup>, ZHANG Hong-tao<sup>2</sup>, LUO Zong-ping<sup>1</sup>, ZHANG Ming<sup>3</sup>, YU Jia<sup>1,3</sup>(1. *Orthopedics Institute, Soochow University, Suzhou 215007, Jiangsu, China*; 2. *Department of Orthopedics, The First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215007, Jiangsu, China*; 3. *Interdisciplinary Division of Biomedical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China*)

**Abstract:** **Objective** To study stress changes in forefoot intermetatarsal region when wearing high-heeled shoes, so as to provide references for quantitative analysis on inducement mechanism of intermetatarsal neuroma and corresponding treatment strategy. **Methods** Based on the validated foot-ankle-shoe finite element platform, changes of stress levels and tendency in intermetatarsal region were analyzed for both in balanced standing when wearing 0-3 inch (0, 2.54, 5.08, 7.62 cm) high-heeled shoes and walking when wearing 5.08 cm high-heeled shoes in a gait cycle. **Results** With the increase of heel height, the stresses in intermetatarsal region were significantly increased, and the stress in the third web space of toes when wearing 7.62 cm high-heeled shoes reached 312% of that when wearing flat shoes (0 cm high-heeled shoes). When walking with 5.08 cm high-heeled shoes, the third web space of toes at push-off instance had the largest stress, reaching 90 kPa, which agreed with the most commonly pathogenic site of intermetatarsal neuroma in clinic. **Conclusions** Wearing high-heeled shoes can obviously increase the stress in intermetatarsal region. Squeezing by upper extrusion of shoes can result in the largest stresses in the third web space of toes region, which is most likely to cause the development of intermetatarsal neuroma.

**Key words:** Intermetatarsal neuroma; High-heeled shoes; Foot ankle; Finite element analysis

收稿日期:2015-05-28; 修回日期:2015-06-23

基金项目:国家自然科学基金项目(11272273,31270995,11572211),江苏省临床医学资助项目(BL2012004)。

通信作者:余嘉,副教授, E-mail: jjiayu@suda.edu.cn。

当今都市社会,高跟鞋已成为女性必不可少的时尚装备,然而穿着高跟鞋所引起的跖间神经瘤已成为女性足部的常见疾病之一,极大危害了女性足部健康<sup>[1-2]</sup>。Thomson等<sup>[3]</sup>报道,中年女性跖间神经瘤的发病率较中年男性甚至超过10倍<sup>[3]</sup>。早在1876年有关跖间神经瘤疾病的临床表现就已有报道<sup>[4-5]</sup>,随后的研究发现其发病机制与足部长期的异常生物力学有很大关系,穿高跟鞋和过紧的鞋被认为是导致跖间神经瘤发生的主要原因之一,但其确切的诱发机制以及跖间神经瘤为何总是高发于第3、4跖骨间尚不明确,导致医生在临床治疗中对于是否松解跖间深横韧带<sup>[6]</sup>、如何确定切除趾底总神经的起始点等无法做出准确预判。有限元数值模拟是一种有效的力学定量研究手段,已经广泛应用于肌骨系统生物力学特性研究<sup>[7-8]</sup>。

本课题组在前期建立的三维足-踝-鞋计算生物力学平台基础上<sup>[9-10]</sup>,模拟分析穿高跟鞋平衡站立和行走时高跟鞋对前足内部跖间区域软组织应力的改变情况<sup>[11]</sup>,定量分析足部异常生物力学诱发跖间神经瘤的机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 足-踝-鞋有限元模型的建立

基于1名无任何足部疾病女性志愿者(身高165 cm,体重54 kg,年龄28岁),取右足在无负重时正中位进行MR冠状面断层扫描,获得层厚1 mm的图像序列。结合解剖学知识,通过三维医学图像重建软件Mimics 14.1分割并重建足部各个主要部分,其中包含28块骨骼、78根韧带和5列足底筋膜、9条肌肉及足部外围软组织。再导入SolidWorks 2003软件进行三维重建,最后导入有限元分析软件ABAQUS 6.11建立有限元模型。通过鞋设计软件ShoeCAD(Excel-Last公司,香港)设计高跟鞋实体模型,分别建立0、2.54、5.08、7.62 cm[0、1、2、3"(英寸)]4种跟高高跟鞋足底支撑模型。足-踝-鞋有限元模型如图1所示。相关的足踝和高跟鞋有限元模型材料属性见表1。

### 1.2 边界条件的施加

该足-踝-鞋计算模型平台<sup>[12]</sup>在胫骨和腓骨远端完全约束,鞋底有地板模拟地面支撑。首先,分别模拟平衡站立于0、2.54、5.08、7.62 cm的高跟足底支

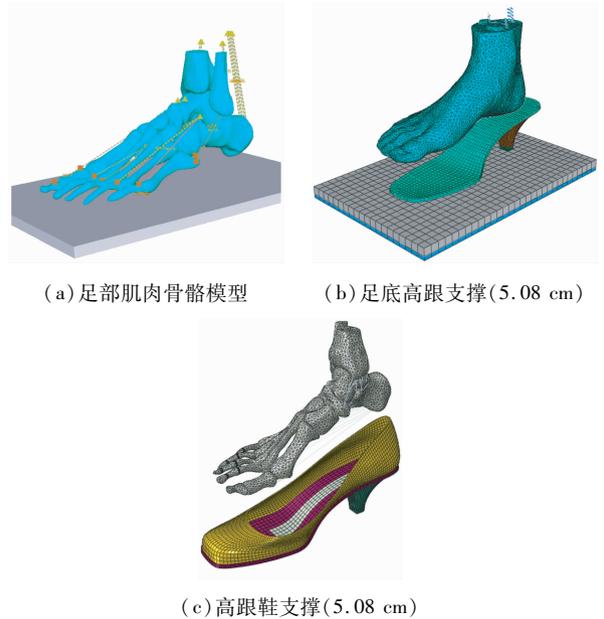


图1 足-踝-鞋有限元模型示意图

Fig. 1 Schematic of the foot-ankle-shoe finite element model  
 (a) Musculoskeletal model of the foot, (b) 5.08 cm high-heeled foot support, (c) 5.08 cm high-heeled shoe support

表1 足-踝-鞋有限元模型中涉及的材料属性<sup>[9-10]</sup>

Tab. 1 Material properties of the foot-ankle-shoe finite element model<sup>[9-10]</sup>

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	横截面积/ mm <sup>2</sup>	密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )
鞋底	1.00	0.42	—	1 000
鞋垫铁芯	200.00	0.30	—	7 800
后跟	3.00	0.30	—	1 100
足部骨骼	7.30	0.30	—	1 500
软组织	超弹性	—	—	950
软骨	1.00	0.40	—	1 050
筋膜	0.35	—	58.6	—
韧带	0.26	—	18.4	—
地面	上层 3.00	0.10	—	—
支撑	下层刚体	—	—	—

撑上,根据参数分析反推,于跟腱处分别施加75%、65%、80%和160%的半体重力(270 N),模拟站立重心与实验志愿者足底压力中心一致。对于穿高跟鞋行走的情况,先建立鞋与足的接触,然后根据实际情况施加跟腱力和其他8条外肌肉,驱动模型行走运动。角度参数通过采集的志愿者步态分析数据获

得,肌肉力大小根据肌肉的生理横截面积和标准化的肌电信号数据计算获得,地面垂直反作用力分别取支撑相3个典型步态周期时刻,包括后跟着地期(29%)、站立中期(57%)和蹬地期(73%)<sup>[9]</sup>。图2所示为志愿者步态实验中地面垂直反作用力随着步态周期的变化曲线。

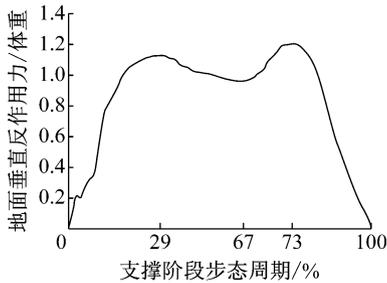


图2 穿高跟鞋时地面垂直反作用力

Fig. 2 Vertical ground reaction force when wearing high-heeled shoes

## 2 结果

### 2.1 穿不同高跟鞋平衡站立下的跖间应力

处于平衡站立时,穿4种不同跟高高跟鞋足部跖间应力分布曲线如图3所示。

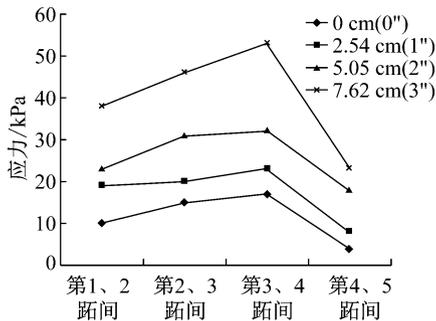


图3 穿不同高跟鞋在平衡站立时各跖间组织应力

Fig. 3 Stresses in intermetatarsal regions during balanced standing when wearing different high-heeled shoes

跟高越高,跖间应力越大,即跟高和跖间应力呈现正相关。其中,穿跟高0、2.54、5.08、7.62 cm高跟鞋时第3、4趾间的应力分别为17、23、32、53 kPa,是各跖间中最大的,而第4、5趾间的应力与穿同跟高高跟鞋时其他趾间应力相比为最小。

### 2.2 穿5.08 cm高跟鞋行走时步态周期下的跖间应力

通过上述足-踝-鞋有限元模型对穿跟高为

5.08 cm高跟鞋行走时的步态周期进行模拟,得到足部跖间应力分布曲线(见图4)。在一个步态周期内,从后跟着地到蹬地期,各跖间应力都呈现出上升的态势,特别是3、4趾间在后跟着地期、站立中期、蹬地期的应力分别为31、66、90 kPa,都远高于同期其他跖间的应力值。

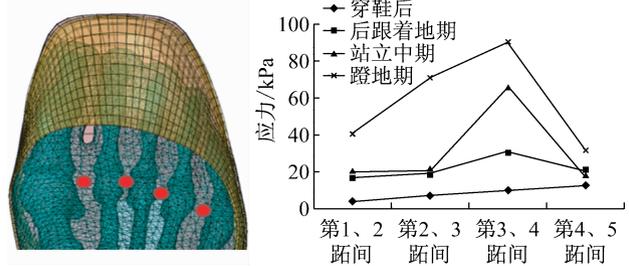


图4 穿5.08 cm高跟鞋行走时步态周期下各趾间组织应力

Fig. 4 Stress in intermetatarsal regions during a gait cycle when walking with 5.08 cm high-heeled shoes

## 3 讨论

### 3.1 实验结果的分析

由穿不同跟高高跟鞋站立时的模拟结果可知,随着高跟鞋的跟高增加,重心向前足转移,前足的跖间组织应力增加,穿7.62 cm跟高高跟鞋时跖间最大应力是穿平跟鞋的312%。足部的异常生物力学也由之产生,从而影响到跖趾关节周边组织、韧带和肌肉的应力分布。穿5.08 cm跟高高跟鞋行走时,步态周期内跖间应力也整体提高,前足不仅足底压力增大,而且高跟鞋鞋面对足部横向的限制导致前足受到的横向压力增大,使得前足受到横向挤压,说明足部受到的作用力大小和方向对跖间应力起着明显的作用。其中,第3、4趾间应力远大于其他跖间应力,超过第1、2趾间或第4、5趾间应力,与跖间神经瘤最容易在第3、4趾间的临床诊断相符,故推测神经瘤出现的概率与跖间局部应力集中呈正相关。

### 3.2 生物力学结果与临床意义

Mulder<sup>[15]</sup>提出慢性创伤假说,他认为重复性的创伤对前足和足底趾底神经结构造成累积性损伤,而且由于趾屈肌在跖屈运动中进一步拉伸趾底总神经而导致神经拉伸损伤。Gauthier<sup>[16]</sup>提出神经卡压假说,他则认为行走时趾底总神经被跖骨间深横跖韧带边缘压迫,限制了趾底总神经的活动,产生卡压作用,反复的力学刺激作用导致神经炎症,故建议通

过松解跖间深横韧带来治疗该疾病。上述两种假说被认为是最可能导致跖间神经瘤的主要力学诱发机制。本研究结果发现,跖间局部集中应力大小与跖间神经瘤出现概率呈正相关,故临床上无论是切除趾底总神经还是松解跖间深横韧带,都应该以减少跖间局部集中应力为参考标准。

另外,本研究结果还可应用于高跟鞋的设计优化:(1) 优化高跟鞋的跟高,以期在跟高和减少前足足底压力两者之间找到一个平衡点,对高跟鞋整体的结构进行优化,减小对前足的横向挤压;(2) 优化鞋垫的材料和几何形状,分散第3、4趾间受到的应力,以达到降低跖间神经瘤患病几率。本文有限元模型在建模过程中存在一定简化,后续生物力学研究中应进一步细化前足解剖结构,特别是建立趾底神经与跖间深横韧带,从而更加深入了解跖间神经瘤的生物力学诱发机制。

## 4 结语

本研究通过足-踝-鞋有限元模型平台分析足部在穿着不同跟高高跟鞋平衡站立以及行走时步态周期内跖间组织应力大小及趋势,发现随着跟高的增加,跖间组织应力明显增加,而且在穿高跟鞋行走时,鞋面横向挤压导致前足第3、4趾间组织受力最大,与临床跖间神经瘤最常见的发病部位相符。

## 参考文献:

[1] Jain S, Mannan K. The diagnosis and management of Morton's neuroma: A literature review [J]. *Foot Ankle Spec*, 2013, 6(4): 307-317.

[2] Thomas JL, Blitch EL, Chaney DM, et al. Diagnosis and treatment of forefoot disorders. Section 3. Morton's intermetatarsal neuroma [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2009, 48(2): 251-256.

[3] Thomson CE, Gibson JA, Martin D. Interventions for the treatment of Morton's neuroma [M]. USA: The Cochrane Library, 2004.

[4] Morton TG. A peculiar and painful affection of the fourth

metatarso-phalangeal articulation [J]. *Am J Med Sci*, 1970, 71(141): 37-39

[5] 王正义, 陈宝兴. 跖骨骨间神经瘤[J]. *中华骨科杂志*, 1994, 14(12): 772-774.

[6] Singh SK, Ioli JP, Chiodo CP. Thesurgical treatment of Morton's neuroma [J]. *Curr Orthop*, 2005, 19(5): 379-384.

[7] 原芳, 薛清华, 刘伟强, 等. 有限元法在脊柱生物力学应用中的新进展[J]. *医用生物力学*, 2013, 28(5): 585-590.

Yuan F, Xue QH, Liu WQ, et al. Recent advances about finite element applications in spine biomechanics [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(5): 585-590.

[8] Niu WX, Tang TT, Zhang M, et al. An in-vitro and finite element study of load redistribution in the midfoot [J]. *Sci China Life Sci*, 2014, 57(12): 1191-1196.

[9] Yu J, Cheung JT, Wong DW, et al. Biomechanical simulation of high-heeled shoe donning and walking [J]. *J Biomech*, 2013, 46(12): 2067-2074.

[10] Yu J, Cheung JT, Fan Y, et al. Development of a finite element model of female foot for high heeled shoe design [J]. *Clin Biomech*, 2008, 23(S1): 31-38.

[11] 冯洋, 王冬梅, 刘安民, 等. 足踝步态模拟机动力学特性仿真及试验验证[J]. *医用生物力学*, 2014, 29(5): 393-398.

Feng Y, Wang DM, Liu AM, et al. Simulation on dynamic characteristics of the ankle gait simulator and experimental verification [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(5): 393-398.

[12] Cheung JT, Yu J, Wong DW, et al. Current methods in computer-aided engineering for footwear design [J]. *Footwear Sci*, 2009, 1(1): 31-46.

[13] 张明, 张德文, 余嘉, 等. 足部三维有限元建模方法及其生物力学应用[J]. *医用生物力学*, 2007, 22(4): 339-344.

Zhang M, Zhang DW, Yu J, et al. Human foot three-dimensional finite element of modeling and its biomechanical applications [J]. *J Med Biomech*, 2007, 22(4): 339-344.

[14] Luximon Y, Luximon A, Yu J, et al. Biomechanical evaluation of heel elevation on load transfer—Experimental measurement and finite element analysis [J]. *Acta Mech Sin*, 2012, 28(1): 232-240.

[15] Mulder JD. The causative mechanism in morton's metatarsalgia [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1951, 33B(1): 94-95.

[16] Gauthier G. Thomas Morton's disease: A nerve entrapment syndrome: A new surgical technique [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1979, 142: 90-92.