

文章编号: 1004-7220(2021)05-0676-03

主动健康中的生物力学

牛文鑫^{1,2}

(1. 同济大学附属养志康复医院(上海市阳光康复中心)转化研究中心, 同济大学智能康复临床研究中心, 上海 201619;

2. 同济大学医学院 康复工程与生物力学实验室, 上海 200331)

摘要:在主动健康中,生物力学发挥着不可替代的作用。运动通过肌肉和关节活动对人体组织和器官形成力学刺激,促进健康,也可能导致损伤或病变。另外,在辅具设计与评价、康复临床诊疗中都涉及生物力学。主动健康生物力学的发展需要体育和医学的融合,考虑更多动力学、疲劳和力学耦合问题。在将来的研究中,一方面需要借鉴其他生物力学方向的经验,另一方面结合科技发展前沿开拓生物力学新方向。

关键词:运动; 康复; 辅具; 智能康复

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.05.002

Biomechanics in Active Health

NIU Wenxin^{1,2}

(1. *Translational Research Center, Yangzhi Rehabilitation Hospital, Shanghai Sunshine Rehabilitation Center, the Clinical Research Center of Intelligent Rehabilitation, Tongji University, Shanghai 201619, China;*

2. *Laboratory of Rehabilitation Engineering and Biomechanics, School of Medicine, Tongji University, Shanghai 200331, China*)

Abstract: In active health, biomechanics plays an irreplaceable role. Exercise creates mechanical stimulation to human tissues and organs. It promotes health, or causes injury and disease. In addition, biomechanics is involved in the design and evaluation of assistive devices, as well as in rehabilitation clinical diagnosis and treatment. The development of active health biomechanics requires the integration of sports and medicine. It includes more dynamics, fatigue and mechanical coupling issues. In the future research, on the one hand, the experience of other directions in biomechanics should be learnt from. On the other hand, it is necessary to combine the frontiers of scientific and technological development to develop new directions in biomechanics.

Key words: sports; rehabilitation; assistive devices; intelligent rehabilitation

人民群众对健康的要求与日俱增。同时,工作和生活方式的改变又导致慢性病不断攀升并呈现低龄化趋势,以及社会老龄化的进展对公共卫生资源供给形成巨大需求。这些现实都为“主动健康”

理念、技术和产品的推广提供了条件,也为运动与康复生物力学的发展提供了应用场景^[1]。借助本期发表8篇与主动健康相关的研究论文,对主动健康中的生物力学研究进展做一述评。

收稿日期:2021-10-03; 修回日期:2021-10-11

基金项目:国家重点研发计划(2021YFE0204500),国家自然科学基金项目(32071308,11732015)

通信作者:牛文鑫,副教授,博士生导师,E-mail: niu@tongji.edu.cn

1 研究内容

1.1 运动促进健康

“运动是良药”理念已经深入人心,本质上是通过运动,对人体组织和器官形成有利的力学刺激,从而促进组织的修复和生长,以及器官功能的恢复、维持和提高。康复临床中使用深蹲作为康复训练方式。同济大学生物力学课题组应用肌骨系统模型进行逆向动力学分析,比较亚洲蹲和西方蹲的下肢关节运动学和肌肉激活,为临床深蹲康复训练方案的制定提供了理论依据^[2]。张彦龙等^[3]对太极拳上步弓步动作进行运动学和动力学分析,认为太极拳动作改变肌肉募集方式,影响膝关节功能,规范动作可作为膝骨关节炎的运动疗法。

1.2 预防运动损伤

作为“良药”的运动处方,也具有潜在副作用,其中之一就是运动损伤或病变。剧烈运动会导骨、肌肉、肌腱、关节韧带、关节囊等所受的载荷或变形超过其强度极限,从而引起急性损伤。为研究跑步损伤机制并进行预防,梅齐昌等^[4]通过一维统计参数映射分析比较了在跑步不同阶段地面反作用力的性别差异以及左右侧对称性差异。不恰当的运动形式或装备也会导致受力不当,持续周期性作用会导致长期慢性影响。考虑到对膝关节载荷的影响,王勇等^[5]建议在日常锻炼中穿着极简鞋进行小步幅快步走锻炼。

1.3 辅具设计与评价

《医用生物力学》杂志多次出版康复辅具专栏^[6],为中国的康复辅具研究和转化提供了生物力学贡献,为主动健康提供了物质保障。辅具通过支撑、补偿、替代人体功能不足或缺失,需要对不同条件下的人体受力、组织变形、运动规律和能量代谢等分析研究。复旦大学医工交叉研究团队针对高弓足患者的足底减压需求,设计了一种具有区域梯度硬度的定制化鞋垫^[7]。彭晨等^[8]通过人机耦合生物力学分析,研究摆幅可调型足部康复机器人的康复策略。

1.4 康复临床诊疗

主动健康不仅仅是疾病预防,更是通过对人体主动施加可控刺激,激发人体自组织能力,以达到消除疾病促进健康的目的。主动健康与现有医学

模式并不完全冲突,其理念和方法可以在疾病诊疗中融入现有医学体系。赵梦文等^[9]建立人手肌骨模型,分析脑卒中患者手部康复训练过程中的肌肉活动特性,为康复训练的实施和康复效果的评价提供依据。张杰等^[10]对15名痉挛型脑瘫患者脊神经后根切断术前后的步态进行分析,肯定了手术的疗效,但是提出在步态中动力学参数改善不佳,患者术后仍需进一步进行康复治疗。

2 研究发展趋势

主动健康生物力学需要解决的实际问题,不仅包括其他生物力学分支普遍面对的临床问题和医疗器械问题,还包括日常生活、工作和体育锻炼中健康问题^[4-5]。因此,在主动健康中,大量使用运动生物力学方法解决问题。与体育科学中偏向于提高运动能力和表现不同,在主动健康中需要同时结合医学知识,注重运动主体的健康状态分析^[2-3]。

相对于骨科生物力学问题以静力学强度分析占主导地位,在主动健康的生物力学问题中,存在大量的动力学和疲劳问题。不同载荷状态下,人体组织和器官在受力学长期慢性影响的同时,不可避免地受到现实生活中各种内在和外在因素的影响。在这种情况下,单纯的力学分析不足以完全解决这些问题,往往需要同时考虑其他物理因子以及神经科学等生物学因素的耦合效应^[11]。因此,近年来的宏观生物力学领域表现出离体标本实验研究式微,而以步态分析为代表的在体实验研究崛起,结合临床指标,是“活的力学”在宏观领域的体现。

但是,由于发展时间短和跨学科研究人才的不足,主动健康的生物力学研究层次还有很大提升空间。一方面,需要借鉴发展比较成熟的骨科生物力学方法,结合有限元分析等技术对组织的应力分布做更精细的分析^[12],也需要结合微观和介观尺度生物力学,探讨影响健康的力学机理^[13]。另一方面,结合科技发展最新成果,尤其在人工智能、虚拟现实、脑机接口、外骨骼、康复机器人等方面的进展,开拓生物力学新疆域,更好地为人类健康服务^[14]。

参考文献:

[1] 姜宗来,陈维毅,樊瑜波. 中国生物力学研究展望[J]. 科技

- 导报, 2019, 37(3): 27-29.
- [2] 王凡嘉, 周晨磊, 罗丽娜, 等. 亚洲蹲和西方蹲的下肢关节运动学和肌肉激活比较[J]. 医用生物力学, 2021, 36(5): 705-711.
 WANG FJ, ZHOU CL, LUO LN, *et al.* Comparison of the lower limb kinematics and muscle activation between Asian squat and western squat [J]. J Med Biomech, 2021, 36(5): 705-711.
- [3] 张彦龙, 陈思, 张愉, 等. 太极拳上步弓步动作足前进角对膝关节载荷的影响及肌肉协调收缩策略[J]. 医用生物力学, 2021, 36(5): 718-724.
 ZHANG YL, CHEN S, ZHANG Y, *et al.* Influences of foot progression angle during the Tai Chi step lunge movement on knee joint load and strategy of coordinated muscle contraction [J]. J Med Biomech, 2021, 36(5): 718-724.
- [4] 梅齐昌, 相亮亮, 李建设, 等. 基于一维统计参数映射分析跑者跑步地面反作用力差异[J]. 医用生物力学, 2021, 36(5): 684-691.
 MEI QC, XIANG LL, LI JS, *et al.* Analysis of ground reaction forces during running based on one-dimensional statistical parametric mapping [J]. J Med Biomech, 2021, 36(5): 684-691.
- [5] 王勇, 任慧, 汤运启, 等. 鞋类型和步速对膝关节载荷的影响[J]. 医用生物力学, 2021, 36(5): 725-731.
 WANG Y, REN H, TANG YQ, *et al.* Effects of shoe type and walking speed on knee joint loads [J]. J Med Biomech, 2021, 36(5): 725-731.
- [6] 樊瑜波, 蒲放. 康复辅具与生物力学[J]. 医用生物力学, 2016, 31(6): 476-477.
 FAN YB, PU F. Biomechanics and rehabilitation technical aids [J]. J Med Biomech, 2016, 31(6): 476-477.
- [7] 楚鹏飞, 谷彦颖, 王森, 等. 具有分区域梯度硬度结构的定制减压鞋垫设计[J]. 医用生物力学, 2021, 36(5): 679-683.
 CHU PF, GU YJ, WANG S, *et al.* Design of customized decompression insole with zonal gradient hardness structure [J]. J Med Biomech, 2021, 36(5): 679-683.
- [8] 彭晨, 卢宗兴, 姚立纲, 等. 摆幅可调型足部康复机器人的生物力学特性分析[J]. 医用生物力学, 2021, 36(5): 692-697.
 PENG C, LU ZX, YAO LG, *et al.* Analysis on biomechanical properties of foot rehabilitation robot with adjustable swing [J]. J Med Biomech, 2021, 36(5): 692-697.
- [9] 赵梦文, 胡志刚, 王新征, 等. 基于 AnyBody 脑卒中患者手部抓握训练的肌肉力学特性分析[J]. 医用生物力学, 2021, 36(5): 698-704.
 ZHAO MW, HU ZG, WANG XZ, *et al.* Analysis on muscle mechanical properties of stroke patients' hand grasping training based on AnyBody [J]. J Med Biomech, 2021, 36(5): 698-704.
- [10] 张杰, 徐意涵, 林思渝, 等. 痉挛型脑瘫患者功能性选择性脊神经后根切断术前后的三维步态特征分析[J]. 医用生物力学, 2021, 36(5): 712-717.
 ZHANG J, XU YH, LIN SY, *et al.* Analysis of three-dimensional gait characteristics before and after FRSR surgery of patients with spastic cerebral palsy [J]. J Med Biomech, 2021, 36(5): 712-717.
- [11] CHEN XP, WANG LJ, CHANG XQ, *et al.* Tai Chi and yoga for improving balance on one leg: A neuroimaging and biomechanics study [J]. Front Neurol, 2021, 12: Article 746599.
- [12] DUAN JW, WANG K, CHANG TB, *et al.* Tai Chi is safe and effective for the hip joint: A biomechanical perspective [J]. J Aging Phys Activ, 2020, 28(3): 415-425.
- [13] 宋关斌, 杨力. 组织损伤修复中的生物力学问题[J]. 医用生物力学, 2016, 31(5): 376-378.
 SONG GB, YANG L. Biomechanics in tissue injury and repair [J]. J Med Biomech, 2016, 31(5): 376-378.
- [14] 牛文鑫, 单绵佳, 齐燕, 等. 脊髓损伤康复中的支撑-驱动生物力学问题[J]. 同济大学学报(医学版), 2021, 42(5): 581-588.

文章编号:1004-7220(2021)05-0679-05

· 主动健康与生物力学专栏 ·

具有分区域梯度硬度结构的定制减压鞋垫设计

楚鹏飞¹, 谷彦颖¹, 王森², 陈立², 陈文明^{1*}, 马昕^{2*}

(1. 复旦大学工程与应用技术研究院, 上海 200433; 2. 复旦大学附属华山医院足踝外科, 上海 200040)

摘要:目的 针对高弓足等有足底减压需求的人群,设计一种具有分区域梯度硬度的定制化鞋垫。方法 设计一种功能梯度结构,应用于定制化鞋垫,使鞋垫不同区域具有梯度变换趋势的硬度特征。通过力学试验,研究结构单元参数和模量之间的关系。采集志愿者足部几何形状和足底压力分布数据,根据压力等高线对足底区域进行划分,以此组装结构单元。设计4种定制化鞋垫:普通平板鞋垫、优化平板鞋垫、普通全接触鞋垫、优化全接触鞋垫。通过熔融沉积成型(fused deposition modeling, FDM)打印,再进行足底压力测试实验,验证分区域的优化设计。结果 所设计的鞋垫可使高弓足测试者足部峰值压力在静态站立、步态状态下分别降低52.8%、18.43%。结论 该方法可用于设计定制鞋垫,如针对糖尿病足、高弓足的功能鞋垫,提供更好的减压功能。研究结果为临床保守治疗有减压需求的足部疾病提供参考。

关键词:高弓足; 矫形鞋垫; 足底压力; 步态

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.05.003

Design of Customized Decompression Insole with Zonal Gradient Hardness Structure

CHU Pengfei¹, GU Yanjie¹, WANG Sen², CHEN Li², CHEN Wenming^{1*}, MA Xin^{2*}

(1. Academy for Engineering & Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. Department of Foot and Ankle Surgery, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China)

Abstract: **Objective** To design a kind of customized insole with zonal gradient hardness for people with high arch foot in need of plantar decompression. **Methods** A functional gradient structure was designed and applied to the customized insole. Porous elements with corresponding elastic modulus were used in different areas of insole. The relationship between structural element parameters and modulus was studied through mechanical tests. The foot geometry and plantar pressure distribution data of volunteers were collected, and the plantar region was divided according to the pressure contour line, so as to assemble the structural unit. Four kinds of customized insoles were designed: ordinary flat insole, optimized flat insole, ordinary full contact insole and optimized full contact insole. Through plantar pressure test experiment, the optimization design of sub region was verified. **Results** The designed insole could reduce the peak pressure of high arch foot by 52.8% in static standing state and 18.43% in gait condition. **Conclusions** This method can be used to design customized insoles, such as functional insoles for patients with diabetes and high arch feet, by providing better decompression function. The research findings provide references for conservative treatment of foot diseases with decompression needs.

Key words: high arch foot; orthopedic insole; plantar pressure; gait

收稿日期:2020-09-18; 修回日期:2020-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目(81472037),上海市卫生和计划生育委员会科研课题青年项目(20184Y0085),华山医院北院科研启动基金(HSBY2016003)

通信作者:陈文明,研究员,E-mail: wuchen@fudan.edu.cn;马昕,教授,E-mail: prof.xin.ma@qq.com

*为共同通信作者

人足在站立、行走等日常活动中支撑人的身体,还起到为足部骨骼提供缓冲、为身体提供减震的重要作用^[1]。研究表明,年龄增长、糖尿病以及高弓足等足部畸形会引起足底压力异常相关的足跟痛、跖痛症、足底溃疡等一系列足部疾病^[2-4]。

鞋垫类足矫形器可以通过分散足底压力负荷来缓解高弓足患者的足痛症状,提供足底软组织保护^[5]。Cheung等^[6]研究表明,几何外形是减压鞋垫最重要的设计因子,其次是鞋垫刚度。因此,可以通过改进鞋垫结构或制作材料属性的方式改进鞋垫缓冲能力以及舒适度^[7];或使用热塑性材料,将鞋垫加热后贴合足底变形,冷却后的鞋垫即可适应足底表面解剖形态,实现较好的保护功能^[8]。目前针对鞋垫的研究多集中在几何外形,主要标准是与患者的足部轮廓相匹配。这些设计通常在整个鞋垫上都具有均匀的材料力学性能。然而,畸形足(例如高弓足)的病理特征可能会导致局部相当高的压力水平,特别是在前脚和后脚区域,如果简单地将鞋垫视为一个整体来减少其整体硬度,这些局部高压区域的压力下降程度并不理想。因此,足底不同区域需要采用不同力学性能的鞋垫材料。目前,关于足与鞋具之间的相互作用,鞋内足底峰值压力、峰值力和压力时间累积是用于评估治疗鞋垫常用的有效测量指标^[9]。

Chatzistergos等^[10]研究足底软组织刚度、厚度和负荷对于正确选择鞋垫材料的影响,结果发现,负荷对选择缓冲材料有影响。另一项研究表明,优化缓冲材料的刚度确实可以显著提高鞋垫缓解压力的能力。研究还发现,最佳刚度与参与者体重和体质量指数(body mass index, BMI)有关;体重较大受试者需要相对较大刚度的鞋垫来最小化压力^[11]。这些研究结果表明,在选择鞋垫材料时应仔细考虑影响足底软组织的负荷,例如体重或人的活动状态。

本文评估不同模量多孔单元的缓冲和减压能力,探索功能梯度特性缓冲鞋垫对步态过程的减压能力,为具有个性化硬度的定制鞋垫提供设计参考。

1 方法

1.1 多孔单元

图1所示为功能鞋垫的设计流程,其加工方式为熔融沉积成型(fused deposition modeling, FDM)。

FDM属于增材制造,能够通过添加材料的方式,按照三维数字模型快速制造出实体模型。FDM可以省去模具等中间环节,简化生产周期,适合制造多孔结构和定制化制造^[12]。所使用的热塑性聚氨酯(thermoplastic urethane, TPU)是一种均匀、各向同性的弹性材料,弹性模量为11.7 MPa,泊松比为0.45。通过构造具有不同特征参数的多孔结构,如结构单元和截面尺寸,可以调节结构的力学性能。本文通过有限元分析和实验测量,建立多孔单元力学性能与其特征参数之间的关系;用胡克定律测量受压缩载荷作用单元的力和位移,确定其等效模量。

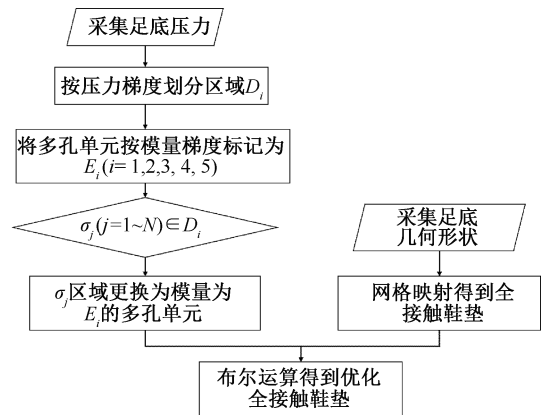


图1 设计优化过程流程

Fig.1 Flow chart for the procedure of design and optimization

利用ABAQUS建立具有64个多孔单元(8×8×1)的装配模型,计算其等效模量。同时,通过力学试验确定该装配体的应力-应变曲线,并利用该曲线的弹性阶段来计算等效模量。采用Instron 5966通用电子万能试验机(Instron公司,美国),按照ISO 604-2002标准进行机械压缩试验,压缩速度为1 mm/min^[13],采样频率为50 Hz[见图2(a)]。图2(b)所示为具有不同截面尺寸的多孔单元模型。

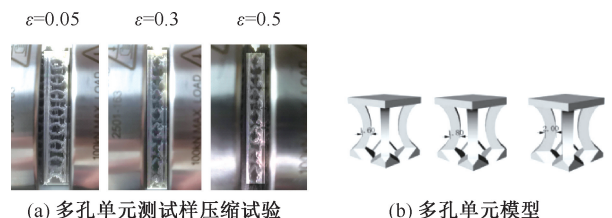


图2 不同规格多孔单元模型及压缩测试实验

Fig.2 Model of porous cell with different specifications and compression test experiment (a) Compression test on porous cell specimen, (b) Porous cell models

实验测定的多孔单元测试样应力-应变曲线如图 3(a)所示。在本研究中,设计 5 种不同参数的多孔结构单元,用于得到不同的等效模量。为了减少加工过程中由于缺陷等误差带来错误,采用有限元分析和力学测试相结合的方法。其中,有限元预测模量作为参考,再通过实验测量验证有限元计算结果。由得到的 5 个单元等效弹性模量结果可知,多孔单元的等效弹性模量与截面尺寸相关[见图 3(b)]。小截面尺寸对应多孔单元的有限元预测模量接近实验得到的等效模量,大尺寸下出现不一致,推测原因是大尺寸情况下支柱之间的间隔变小,局部发生融合。将这 5 个单元组成单元库,用以组装鞋垫模型。

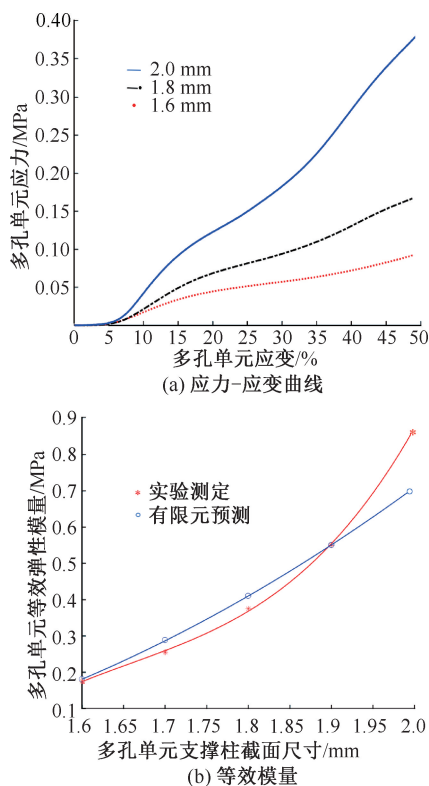


图 3 多孔单元测试样力学性质

Fig.3 Mechanical properties of test samples composed of porous units (a) Stress-strain curve, (b) Equivalent moduli

1.2 全接触鞋垫设计

测试者为 1 名男性高弓足患者,身高 185 cm,体重 65 kg。对其使用光学扫描设备 UPOD-S (ScanPod3D 公司,加拿大),获取负重状态下足部的几何轮廓[见图 4(a)]。根据采集仪器计算出志

愿者左、右足弓指数分别为 0.13、0.18,均低于正常足标准(0.28~0.30)。通过人体测量学绘制出与人足底尺寸相符的平板鞋垫[见图 4(b)]。然后通过有限元前处理软件 HyperMesh 13.0,将平板鞋垫对应的网格映射到人足底[见图 4(c)]。将变形后的网格导回为几何文件,得到贴合人足的定制化鞋垫上表面。

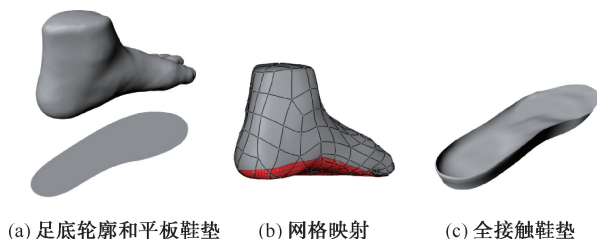


图 4 全接触鞋垫设计过程

Fig.4 Design process of total contact insole (a) Plantar contour and flat insole, (b) Mesh mapping, (c) Total contact insole

1.3 足底压力测量

通过 XSensor X4 鞋垫压力测量系统(XSensor 公司,加拿大)进行测量脚与鞋垫接触压力的实验。测量系统包含 1 双鞋垫,有 230 个压力传感器均匀分布在表面积上,鞋垫厚度为 (1.8 ± 0.2) mm,可以放置在脚和鞋垫之间,精度测量足底压力。设定采样频率为 100 Hz,传感器测力范围为 7~880 kPa。测试鞋垫有 4 种类型:普通平板鞋垫、优化平板鞋垫、普通全接触鞋垫和优化全接触鞋垫。全接触鞋垫的几何模型由网格映射得到。汤磊等^[14]提出了一种使用仿真迭代优化的方法为鞋垫不同区域适配不同模量的材料。结果显示,在后足和前足等高压区,应使用最低模量的多孔单元,同时在低模量区边界处是一圈高模量单元。根据采集到的足底静态压力分布结果[见图 5(a)],按照压力梯度变化,对鞋垫划分区域。不同区域采用不同模量的多孔单元,得到优化后的平板鞋垫[见图 5(b)]。将优化后的平板鞋垫与全接触鞋垫进行布尔并集运算,得到优化后的全接触鞋垫[见图 5(c)]。

2 结果

在测量过程中志愿者用手臂弯曲,站立不动,分别测量穿戴 4 种鞋垫时态足底应力分布,然后在跑步机上以 5 km/h 速度测试步态下足底应力分

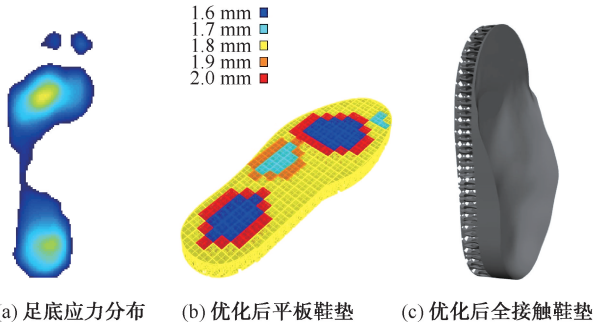


图5 具有梯度硬度结构的减压鞋垫设计过程
Fig. 5 Design process of decompression insole with gradient hardness structure (a) Plantar pressure distributions, (b) Optimized flat insole, (c) Optimized total contact insole

布。实验结果显示,相比普通平板鞋垫,测试者穿戴优化后的平板鞋垫时,静态足底峰值应力降低38.5%,接触面积提高19.3%;全接触鞋垫作用下的静态足底峰值应力降低41.1%,接触面积提高52.4%;优化后的全接触鞋垫使静态足底峰值应力降低52.8%,接触面积提高54.8%(见图6)。由此可知,在平衡站立过程中,本文设计的优化全接触

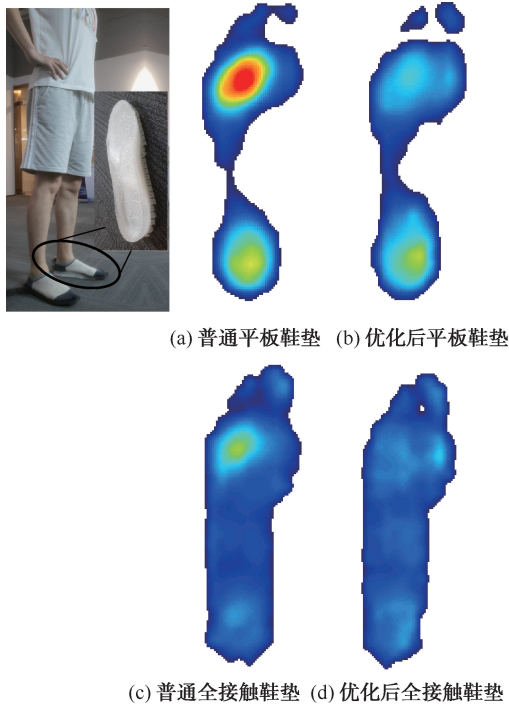


图6 穿戴不同鞋垫下静态足底应力分布
Fig.6 Static plantar pressure distributions with different types of insoles (a) Ordinary flat insole, (b) Optimized flat insole, (c) Ordinary total contact insole, (d) Optimized total contact insole

鞋垫在提高接触面积和降低峰值压力方面幅度最大。

在步态条件下,划分完整步态周期,再进行归一化处理,得到峰值力随时间的变化。相比普通平板鞋垫,优化平板鞋垫、普通全接触鞋垫、优化全接触鞋垫的峰值压力随时间积分分别下降了8.84%、2.47%、18.43%(见图7)。由此可知,优化全接触鞋垫作用下,步态时的足底压力峰值均被减小,其在步态条件下同样具有均匀足底压力分布的作用。

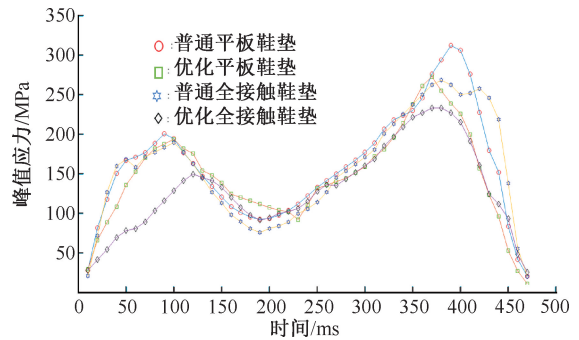


图7 步态下峰值力随时间变化曲线
Fig.7 Variation of peak force with time in gait

3 讨论

本文提出一种新的设计定制鞋垫方法,可以根据人足底几何形状和压力测量结果,定制功能性局部减压鞋垫。实验结果证明,该方法对高弓足在前足和后足接触压力均匀化方面具有有效性和可靠性。将该方法应用于普通平板鞋垫,可使峰值接触压力降低38.5%。研究表明,全接触鞋垫可使人静态站立时的峰值接触压力降低30%~40%^[15-16]。本实验发现,与普通平板鞋垫相比,所设计的全接触鞋垫使高弓足患者在静态站立时的峰值压力降低41.1%,这与优化平板鞋垫的减压能力相似。此外,基于梯度弹性模量和几何轮廓两个设计因子,优化全接触鞋垫可使高弓足测试者静态峰值压力降低52.8%,接触面积增加54.8%以上。

本研究存在一定的局限性:①鞋垫几何形状是用静态测量的足底表面形状来确定,而在整个步态周期中人足底表面形状会有所不同。②由于多孔结构的特殊几何结构,通过FDM制造技术打印的鞋垫在微观层面上存在一些形态缺陷。例如:出料不均匀导致层与层之间黏连较差,可能会缩短鞋垫的

疲劳寿命。然而,未来随着 3D 打印机器出料控制能力的不断优化改进,3D 打印鞋垫的质量和使用寿命将会显著提高。③ 虽然 TPU 材料本身抗疲劳性较好,但 3D 打印矫形鞋垫的抗疲劳性及其对鞋垫减压效果的影响,还需要对测试者长周期的穿戴情况进行观察。

4 结论

采用 3D 打印技术制造具有多孔结构的定制化鞋垫,其优点在于材料利用率高、多孔结构成型效果好,有利于定制鞋垫的进一步推广和应用。优化后的全接触鞋垫可使步态时的足底峰值压力随时间积分降低 18.43%。本研究开发的方法同样适用于其他鞋类,不仅对高弓足患者,而且对其他有类似需求的人也具有很大的市场潜力。

参考文献:

- [1] TEOH JC, LEE T. Prediction of plantar soft tissue stiffness based on sex, age, bodyweight, height and body mass index [J]. *J Mech Behav Biomed*, 2016, 54: 219-222.
- [2] BURNS J, CROSBIE J, OUVRIER R, *et al.* Effective orthotic therapy for the painful cavus foot: A randomized controlled trial [J]. *J Am Podiat Med Assn*, 2006, 96(3): 205-211.
- [3] TEOH JC, SHIM VPW, LEE T. Quantification of plantar soft tissue changes due to aging in various metatarsophalangeal joint angles with realistic tissue deformation [J]. *J Biomech*, 2014, 47(12): 3043-3049.
- [4] 马新颖, 满喜. 不同年龄段人群行走足底压力特征分析 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(1): 108-113.
MA XY, MAN X. Analysis on characteristics of plantar pressures in different age groups during walking [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(1): 108-113.
- [5] CHOI J, CHA EJ, KIM KA, *et al.* Effects of custom-made insoles on idiopathic pes cavus foot during walking [J]. *Biomed Mater Eng*, 2015, 26 (Suppl 1): S705-S715.
- [6] CHEUNG TM, ZHANG M. Parametric design of pressure-relieving foot orthosis using statistics-based finite element method [J]. *Med Eng Phys*, 2008, 30(3): 269-277
- [7] WAN KWF. Three-dimensional insole design for relieving plantar pressures in high-heeled shoes [D]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2018.
- [8] BONANNO DR, LEDCHUMANASARMA K, LANDORF KB, *et al.* Effects of a contoured foot orthosis and flat insole on plantar pressure and tibial acceleration while walking in defence boots [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 1688-1697.
- [9] 朱婷, 马霞, 翟华, 等. 踝关节不同应力位的动态足底压力特征 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(4): 342-348.
ZHU T, MA X, ZHAI H, *et al.* Dynamic plantar pressure features of ankle joints at different stress positions [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(4): 342-348.
- [10] CHATZISTERGOS PE, NAEMI R, CHOCKALINGAM N. A method for subject-specific modelling and optimisation of the cushioning properties of insole materials used in diabetic footwear [J]. *Med Eng Phys*, 2015, 37(6): 531-538.
- [11] CHATZISTERGOS PE, NAEMI R, HEALY A, *et al.* Subject specific optimisation of the stiffness of footwear material for maximum plantar pressure reduction [J]. *Ann Biomed Eng*, 2017, 45(8): 1929-1940.
- [12] DAVIA-ARACIL M, HINOJO-PÉREZ JJ, JIMENO-MORENILLA A, *et al.* 3D printing of functional anatomical insoles [J]. *Comput Ind*, 2018, 95(1): 38-53.
- [13] WANG L, KANG JF, SUN CN, *et al.* Mapping porous microstructures to yield desired mechanical properties for application in 3D printed bone scaffolds and orthopaedic implants [J]. *Mater Design*, 2017, 133(1): 62-68.
- [14] TANG L, WANG L, BAO WN, *et al.* Functional gradient structural design of customized diabetic insoles [J]. *J Mech Behav Biomed*, 2019, 94(1): 279-287.
- [15] 李云婷. 中国力学虚拟人足部有限元建模及其在糖尿病鞋研究上的临床应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [16] CHEN W, LEE SJ, LEE PVS, *et al.* Plantar pressure relief under the metatarsal heads: Therapeutic insole design using three-dimensional finite element model of the foot [J]. *J Biomech*, 2015, 48(4): 659-665.