

不稳定结构设计对足部动力学的影响

荣 明, 马加彬

(宁波大学 体育学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 选取 22 名步态稳定的健康男性作为受试者, 分别用控制鞋和实验鞋以自选速度沿 10 m 长实验室跑道行走, 对足底不同区域的峰值压强、压强-时间积分和接触面积进行研究. 结果表明: 实验鞋在后跟区域的峰值压强和压强-时间积分比控制鞋明显升高, 说明不稳定结构元素在前脚掌冠状面上的调整可以显著地改变足底压力的分布.

关键词: 不稳定结构; 足底压力; 峰值压强; 压强-时间积分

中图分类号: G804.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 04-0104-04

不稳定性是依据人体重心和足底压力接触区域之间的关系提出的定义^[1]. 在正常站立和行走中, 无论是前-后还是左-右方向, 身体重心的运动轨迹总是处于压力中心运动轨迹的垂直范围之内, 当人体的重心轨迹超出压力中心运动轨迹的垂直范围时, 身体姿势就会产生“摇摆”, 从而造成人体处于一种不稳定的状态, 增加人体跌倒的风险^[1]. 由于步态的复杂表现形式, 人体维持步态稳定的能力往往被分为局部稳定能力和整体稳定能力^[2].

前期研究发现, 改变鞋底特殊区域结构的设计可以引起足底压力分布的显著变化^[3-4], 调控足底压力中心的变化, 可以起到减轻疼痛和改善下肢功能的作用^[5-6]. 随着现代社会足底不适患者的增多以及社会对这一群体的关注, 一系列通过调节足底压力分布以减轻患者疼痛和增强行走稳定性的装备应运而生, 例如全足接触装置、后足接触装置、特殊功能鞋垫、压力感应功能鞋、术后鞋等, 这些特殊装置都可以显著地降低相应区域的压力峰值^[7-8]. 全足接触装置已被证明可显著地减小足底峰值压力, 且得到了广泛应用^[9].

基于生物力学的设计理念可以减轻相应区域的峰值压强, 如全足接触装置的设计使整个足底充分与地面接触, 从而更均匀地分配足底压力, 降低峰值压强, 但这种设计理念并没有改变高压区

的分布^[8]. 而后足接触装置是设计成特殊的高跟使前脚掌部位无法接触地面, 这样的设计充分降低了前脚掌的压力分布. Carl 等^[10]研究发现, 后足接触装备可使足中部和前脚掌的峰值压强减少 100%, 但却造成人体在行走时只能靠脚后跟维持身体的平衡, 对身体平衡能力是一种挑战. 因而设计一款既可以明显降低特定区域的压力分布又可以保证身体在行走状态下的平衡装备具有重要的现实意义. Debbi 等^[11]通过对刚性较好的鞋底添加不稳定结构元素来调节足底压力的分布, 发现不稳定结构元素位置的改变可以明显改变人体的稳定性以及膝关节和踝关节的运动学数据, 而这些参数变化正是由于鞋底结构的变化转移了足底压力的分布所引起^[12-13]. 目前在下肢生物力学研究中虽引入了不稳定概念, 但不稳定结构的位置调整及所产生的力学特征性变化未曾涉及. 笔者试图对前掌“分区域式”添加不稳定设计, 观察足前掌支撑区域的受力面积变化及对于足部动力学的影响.

1 研究方法

1.1 受试者

本研究选取 22 名健康男性作为受试者, 所有受试者之前均没有穿着不稳定结构鞋的经历, 没有关节炎、糖尿病和神经肌肉损伤等步态的症状.

在过去的6个月里, 没有下肢损伤和疼痛, 且下肢或背部无大型手术史。在实验前一段时间, 要求受试者分别穿实验鞋站立或行走不少于每天1h, 持续2w以上, 以适应不稳定结构鞋底对人体行走姿态的影响。身体基本指标为: 年龄(23.5 ± 1.26)岁, 身高(172.9 ± 1.2)cm, 体重(66 ± 2.4)kg, 体质指数BMI (22.1 ± 0.8) $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 在实验阶段步态稳定。

1.2 实验用鞋

本研究采用的控制鞋为普通平底鞋, 实验鞋为在此基础上的后跟和前掌区域分别添加不稳定结构元素: 厚度1.5cm, 直径5.5cm的圆弧体(图1), 这种凸起的不稳定结构增加了鞋底的高度, 可引起人体在站立和行走状态下足底压力和稳定性的改变^[11]。本研究选用的测试用鞋的鞋底材料相对较软, 以减小鞋底硬度对足底压力分布的影响。目前市场上常见的不稳定元素实验位置为前掌部位冠状面中点向内侧偏移1.5cm, 向外侧偏移2cm, 主要为前掌受力的峰值区域, 保证健康人群可在相对稳定的步态条件下行走^[5]。

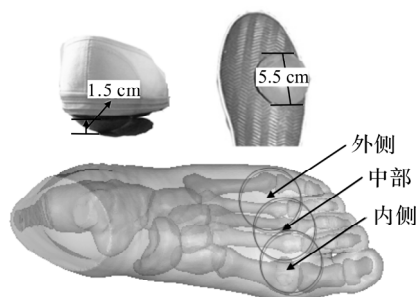


图1 不稳定结构鞋及前掌外侧区域

1.3 实验设计

实验在宁波大学运动生物力学实验室完成。足底压力数据采用Novel Pedar(德国Novel公司)鞋垫式足底压力测量系统获得。实验参数包括: 各区域的峰值压强、压强-时间积分和受力面积。要求受试者随机穿2款鞋进行测试, 以自选最佳控制步速沿着10m长的实验室跑道行走。研究选用中间的步态数据进行分析, 以减少实验误差。针对受试者足底压力的特点和研究的需要, 将足部根据解剖学原理划分为7个解剖区域: 后跟(H)、足中部内侧(MMF)、足中部外侧(LMF)、前掌内侧(M1)、前掌中部(M2-3)、前掌外侧(M4-5)、大脚趾区域(BT)、2~5脚趾区域(OT)。

2 结果

2款鞋具的峰值压强和压强-时间积分均表现出显著的差异性, 而且主要集中在元素位置变化的前掌部位。实验鞋之间的峰值压强呈现相同的规律性, 即不稳定元素添加区域的峰值压强出现显著升高, 远端区域则处于较低水平, 并都与对照鞋具有差异性(图2)。不稳定结构元素添加在前掌外侧时, 引起了4~5跖骨区域的压强峰值出现显著增高。

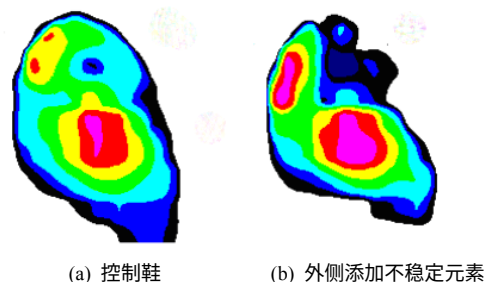


图2 前脚掌区域压强峰值比较

由图3可知, 实验鞋和控制鞋在前掌部位都表现出了明显的差异, 外侧不稳定实验鞋在第1跖骨区域的峰值压强表现出了显著性差异, 而4~5跖骨区域和2~3跖骨区域, 外侧不稳定实验鞋的峰值压强也出现了增大。

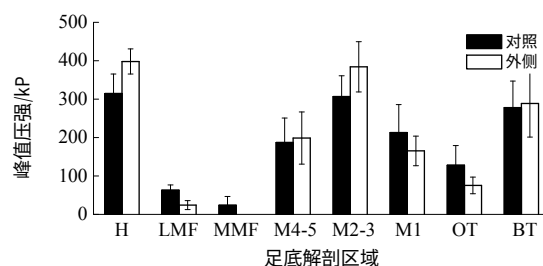


图3 各解剖区域峰值压强比较

接触面积的比较如图4所示。从图4可发现, 实验鞋之间没有表现出明显的差异, 只有在足中部区域, 实验鞋表现出的接触面积较小; 在足中部

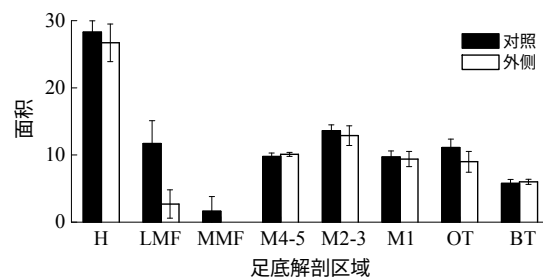


图4 各解剖区域接触面积比较

内侧,实验鞋与控制鞋具有显著性差异;足中部外侧,虽然与控制鞋表现出了显著性差异,但实验鞋没有出现明显的接触区域。

压强-时间积分比较如图5所示。由图5知,随着不稳定结构元素位置发生变化,前掌各解剖区域的压强-时间积分变化明显。外侧不稳定实验鞋在2~3跖骨区域的压强-时间积分要明显大于控制鞋,且具有显著性差异($P<0.05$)。

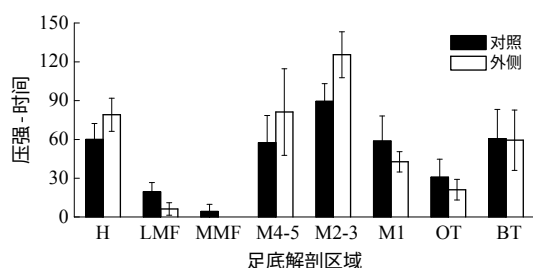


图5 各解剖区域压强-时间积分比较

3 讨论

从实验结果看,前掌部位冠状面的改变对峰值压强和压强-时间积分的重新分配效果明显,而且主要集中在前掌区域。研究采用的实验鞋是通过在脚后跟和前脚掌区域添加不稳定结构元素,使添加区域优先与地面接触,引起添加区域的峰值压强和压强-时间积分显著升高^[5,14]。这与改变足底压力分布的功能鞋设计原理相似,都是通过改变足底的受力面积或区域来降低或升高特殊区域压力分布的效果^[9,15-17]。本研究所用的鞋底较薄且柔软度好,避免了鞋底硬度对足底压力分布的影响^[18],更有效地反映出不稳定结构元素本身对足底压力分布的影响^[5]。

研究同时也证实了不稳定结构元素在前掌区域对足底压力的分布产生有效的影响,尤其表现在峰值压强和压强-时间积分上。不稳定结构元素可以使足前部的足底压力集中分布在添加区域和大脚趾部位,使区域内的峰值压强和压强时间积分显著增高,这与文献^[9,19]对前脚掌卸压式鞋的研究结果相一致。实验鞋在脚后跟区域的峰值压强比控制鞋增加了28.7%,压强-时间积分增加了35%,这可能是由于不稳定结构元素使足后跟受力面积减小,从而引起峰值压强和压强时间积分出现显著增加^[20]。步态后期,压力中心向内侧转移,

不稳定元素添加在前脚掌外侧时,内侧的峰值压强和压强-时间积分分别比控制鞋降低了22.1%和27.6%。可见,由于不稳定结构元素破坏了脚与地面的接触区域,使压力中心强制向添加不稳定结构元素的一侧转移,从而造成添加远端区域的足底压力分布减小^[5]。

不稳定结构元素的添加可以根据特定需要实现一些特殊的功能,如对糖尿病患者、筋骨结膜炎患者以及足底局部出现损伤患者的病变区域,可以通过调整不稳定结构元素的位置起到调整足底压力分布的效果,缓解病变区域的压力峰值。之前针对缓解前掌损伤或糖尿病患者足底溃烂区域的设计用鞋,是在脚后跟部位设计一种明显的高跟,使脚掌成10度背屈的倾斜角,这样使前掌悬空,减少地面的反作用力^[9]。但这样的设计使足部与地面的接触面积明显减小,且完全集中在后跟区域,造成身体重心后移,使人体维持身体平衡的负担加重,不利于行走的稳定性。因此在足底添加不稳定结构元素的方法,不仅可降低足底病变区域的峰值压强,比起悬空鞋又可增加行走的稳定性。

本研究同时证明了在前掌冠状面外侧添加不稳定结构元素的方法可以显著地降低远端区域的峰值压强和压强-时间积分,与其他改变足底压力功能鞋(术后鞋、特殊鞋垫等)相比^[8-9],具有改变压力区域和维持身体平衡的双重优势。这一发现可以根据不同患者的足底压力分布特征及需求,利用添加不稳定结构元素的方法调节患者足底压力的分布,起到缓解疼痛和治疗的目的。

参考文献:

- [1] Winter D A. Human balance and posture control during standing and walking[J]. *Gait Posture*, 1995, 3(4):193-214.
- [2] Dingwell J B, Cusumano J P, Sternad D, et al. Slower speeds in patients with diabetic neuropathy lead to improved local dynamic stability of continuous over-ground walking[J]. *J Biomech*, 2000, 33(10):1269-1277.
- [3] Gu Yaodong, Li Jianshe, Ren Xuejun, et al. A pilot study in different unstable designs on the biomechanical effect of gait characteristics[J]. *J Mech Med Biol*, 2012, 12(5): 1-7.
- [4] 李建设, 顾耀东, 陆毅琛, 等. 运动鞋核心技术的生物

- 力学研究[J]. 体育科学, 2009, 29(5):40-49.
- [5] Yulia G, Eytan M D, Amir H, et al. The effect of manipulation of the center of pressure of the foot during gait on the activation patterns of the lower limb musculature [J]. J Electromyogr Kinesiol, 2011, 21(2):333-339.
- [6] 郝琦, 李建设, 顾耀东. 裸足与着鞋下跑步生物力学及损伤特征的研究现状[J]. 体育科学, 2012, 32(7):91-97.
- [7] 马加彬, 李蜀东, 顾耀东, 等. 不稳定结构鞋具的运动生物力学研究进展[J]. 浙江体育科学, 2012, 34(4): 125-128.
- [8] Glod D J, Fettinger P, Gibbons R W. A comparison of weight bearing pressures in various postoperative devices [J]. J Foot Ankle Surg, 1996, 35(2):149-154.
- [9] Deleu P A, Leemrijse T, Vandeleene B, et al. Plantar pressure relief using a forefoot offloading shoe[J]. Foot Ankle Surg, 2010, 16(4):178-182.
- [10] Carl H D, Pfander D, Swoboda B. Assessment of plantar pressure in forefoot relief shoes of different designs[J]. Foot Ankle Int, 2006, 27(2):117-120.
- [11] Debbi E M, Wolf A, Haim A. Detecting and quantifying global instability during a dynamic task using kinetic and kinematic gait parameters[J]. J Biomech, 2012, 45(8): 1366-1371.
- [12] Goryachev Y, Debbi E M, Haim A, et al. The effect of manipulation of the center of pressure of the foot during gait on the activation patterns of the lower limb musculature[J]. J Electromyogr Kinesiol, 2011, 21(2): 333-339.
- [13] Long J T, Klein J P, Sirota N M, et al. Biomechanics of the double rocker sole shoe: Gait kinematics and kinetics [J]. J Biomech, 2007, 40(13):2882-2890.
- [14] Kakihana W, Akai M, Nakazawa K, et al. Effects of laterally wedged insoles on knee and subtalar joint moments[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2005, 86(7):1465-1471.
- [15] Carl H D, Pfander D, Swoboda B. Assessment of plantar pressure in forefoot relief shoes of different designs[J]. Foot Ankle Int, 2006, 27(2):117-120.
- [16] Fuller E, Schroeder S, Edwards J. Reduction of peak pressure on the forefoot with a rigid rocker-bottom postoperative shoe[J]. J Podiatr Med Assoc, 2001, 91(10): 501-507.
- [17] Schaff P S, Cavanagh P R. Shoes for the insensitive foot: The effect of a “rocker bottom” shoe modification on plantar pressure distribution[J]. Foot Ankle, 1990, 11(3): 129-140.
- [18] Wright I C, Neptune R R, Van Denbogert A J, et al. Passive regulation of impact forces in heel-toe running[J]. Clin Biomech, 1998, 13(7):521-531.
- [19] Lavery L A, Vela S A, Lavery D C, et al. Total contact casts: Pressure reduction at ulcer sites and the effect on the contralateral foot[J]. Arch Phys Med Rehabil, 1997, 78(11):1268-1271.
- [20] Bonanno D R, Landorf K B, Menz H B. Pressure-relieving properties of various shoe inserts in older people with plantar heel pain[J]. Gait Posture, 2011, 33(3):385-389.

Foot Kinematic Effect Resulting from Different Unstable Design

RONG Ming, MA Jia-bin

(Faculty of Physical Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Footwear's structure design can alter foot's plantar pressure in certain specific regions. In the test, we adjust unstable structural elements in the heel and forefoot regions with 22 healthy male respondents participated. The participants are asked to walk over a 10-m walkway wearing a control shoes and test shoes in their self-selected speed. Peak pressure, pressure-time integral and contact area are measured and calculated. It is found that both the peak pressure and pressure-time integral are significantly increased in the test shoes. By adjusting the unstable structural elements in metatarsals position, the plantar pressure distribution can be effectively changed, and the peak pressure and pressure-time integral is significantly higher in the append region.

Key words: unstable structural; plantar pressure; peak pressure; pressure-time integral

(责任编辑 史小丽)