

跑鞋底厚梯度差异对下肢生物力学参数的影响研究

贾斌, 陈瑶, 陈家明

(西南民族大学体育学院, 610041 成都)

摘 要:目的 比较不同鞋底厚度运动鞋对跑步者运动过程中的下肢生物力学参数的影响。方法 择取 30 名男性体育专业的大学生作为受试者, 对比分析鞋底厚度分别为 36、39、42 mm (增厚 3~6 mm) 时, 跑步者下肢肌肉活性 (积分肌电值)、下肢运动学 (下肢关节角度、角速度和关节活动度) 以及下肢动力学 (地面反作用力、下肢关节力矩和功率) 等生物力学指标的变化。结果 随着鞋底厚度的增加, 下肢各主要肌群的积分肌电值呈现“U 型”变化趋势, 且在鞋底增加 3 mm 至厚度为 39 mm 时积分肌电值最小, 差异具有显著性 ($P < 0.05$); 垂直地面反作用力的第一峰值力逐渐降低, 第一峰值力出现的时间和第一峰值加载率逐渐增大, 差异具有显著性 ($P < 0.05$); 膝关节的力矩及膝关节外展角冲量逐渐降低, 对腕关节力矩的影响并不显著 ($P > 0.05$); 离地及触地时刻下肢各关节的活动度均等无交互效应, 而鞋底增厚 6 mm 时踝关节内外活动度最小。结论 适当增加鞋底厚度 (如增厚 3 mm) 能够有效减轻关节冲击、提高跑步稳定性, 但过厚鞋底 (如增厚 6 mm) 也影响运动效率。

关键词: 鞋底厚度; 跑步; 生物力学; 下肢关节; 运动学; 动力学

中图分类号: G804; TS943.1 文献标志码: A DOI: 10.11776/j.issn.1000-4939.2026.01.022

文章编号: 1000-4939(2026)01-0236-09 CSTR: 32414.14.cjam.issn.1000-4939.2026.01.022

Influence of gradient differences in bottom thickness of running shoes on lower limb biomechanics parameters

JIA Bin, CHEN Yao, CHEN Jiaming

(Sports College, Southwest Minzu University, 610041 Chengdu, China)

Abstract: **Objective** To compare the effects of different shoe sole thicknesses on the lower limb biomechanical parameters of runners during exercise. **Method** Thirty male college students majoring in sports were selected as subjects to compare and analyze the changes in biomechanical indicators such as lower limb muscle activity (iEMG), lower limb kinematics (lower limb joint angle, angular velocity, and joint range of motion), and lower limb dynamics (ground reaction force, lower limb joint torque, and power)

收稿日期: 2025-04-29

基金项目: 国家社会科学基金西部项目 (No. 19XTY007)

通信作者: 贾斌. E-mail: jiabin1224@163.com

引用格式: 贾斌, 陈瑶, 陈家明. 跑鞋底厚梯度差异对下肢生物力学参数的影响研究[J]. 应用力学学报, 2026, 43(1): 236-244.

JIA Bin, CHEN Yao, CHEN Jiaming. Influence of gradient differences in bottom thickness of running shoes on lower limb biomechanics parameters[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2026, 43(1): 236-244.

of runners with shoe sole thicknesses of 36 mm, 39 mm, and 42 mm (increased thickness of 3 mm ~ 6 mm). **Result** With the increase of sole thickness, the integrated electromyographic values of the main muscle groups in the lower limbs showed a “U-shaped” trend, and the integrated electromyographic values were the smallest when the sole thickness increased by 3 mm to 39 mm, and the difference was significant ($P < 0.05$). The first peak force of the vertical ground reaction force gradually decreases, and the time and loading rate of the first peak force gradually increase, with significant differences ($P < 0.05$). The torque of the knee joint and the impulse of the knee joint abduction angle gradually decrease, but the effect on the hip joint torque is not significant ($P > 0.05$). At the moment of leaving and touching the ground, the range of motion of each joint in the lower limbs is equal without any interaction effect, while the ankle joint has the smallest range of motion both inside and outside when the sole thickens by 6 mm.

Conclusion Increasing the thickness of the sole appropriately (such as thickening by 3 mm) can effectively reduce joint impact and improve running stability, but excessively thick soles (such as thickening by 6 mm) also affect exercise efficiency.

Key words: sole thickness; running; biomechanics; lower limb joints; kinematics; dynamics

跑步运动是一种高动态、高强度的运动形式,要求运动员的下肢具备高效的能量转换和优秀的冲击力吸收能力^[1-2]。在跑步过程中,下肢的生物力学特征不仅影响着运动员的跑步效率,同时也与运动损伤的风险密切相关^[3]。而运动鞋作为运动员跑步时不可或缺的装备,其设计对于运动员的整体表现以及健康状态具有深远的影响^[4]。运动鞋的鞋底厚度作为直接关联到运动员与地面接触的关键因素,直接关系到运动员跑步时的舒适度、能量消耗以及运动损伤风险^[5-6]。

鞋底厚度的不同可在缓冲地面冲击、分散压力等方面发挥不同作用,从而对运动员的跑步效率和下肢损伤风险产生重要影响^[7-8]。有研究表明,较薄的鞋底(如 0~1 cm)在立定跳远时冲量时间更短,表现出更好的效果^[9]。同时,2 cm 厚的鞋底能够显著提升步态稳定性,而更软或更厚的鞋底则会降低稳定性^[10]。另一方面,薄底鞋虽然能使脚部触地更平坦,减少膝盖偏移,却也会导致外翻和胫骨旋转偏移增大^[11]。对于长跑运动员,中底较薄的鞋(1 mm 和 5 mm)可以显著增加垂直负荷率并缩短触地时间,这对提升跑步性能有积极作用^[12]。然而,增加鞋底厚度虽然可以增强脚跟的缓冲效果,减轻膝关节和髌关节的冲击压力,但过厚的鞋底会降低稳定性,改变踝关节角度,减少足部趾屈动作的效率,并增加韧带损伤的风险^[13-14]。相反,减少鞋底厚度能促进足部肌肉活动,提高跑步的自然性和地面感知,但过薄的鞋底可能缺乏足够的缓冲,增加下肢受伤的风险^[15]。由此可见,选择适当厚度的运动鞋对于提高

跑步效率和预防下肢损伤具有重要作用^[16]。尽管已有研究提供了有价值的见解,但多数研究仍聚焦于鞋底厚度对生物力学特征的静态影响,关于鞋底厚度对跑步时下肢生物力学影响的动态变化过程及其具体机制仍需进一步探讨。

因此,本研究将采用高精度的生物力学测量技术和先进的数据分析方法,对穿着不同鞋底厚度跑鞋的运动员进行系列跑步实验,旨在探讨不同跑鞋鞋底厚度对运动员跑步过程中下肢生物力学特征的影响。通过对跑步时下肢关节角度、肌肉活动强度、地面反作用力等方面进行系统的量化分析,揭示跑鞋鞋底厚度变化对跑步时下肢生物力学的具体影响,评估其对运动表现和健康的潜在效应。以期为跑步者科学选择合适的跑鞋提供坚实的理论依据,助力提升跑步体验与运动健康水平。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本实验在成都体育学院招募了 30 名男性体育专业的大学生,身体状况及运动能力良好,受试者基本资料如表 1 所示。本研究已获得伦理委员会批准(No. TY202303230002),在实验正式开始前,保证每一位受试者了解本实验的研究目的及实验要求和过程及步骤,实验前签署知情同意书。

1.1.1 受试者纳入标准

①受试者足部无畸形、无异常;②身体质量指数

在正常范围,即 BMI 在 18.5~23.9 范围内;③6 个月内无任何下肢损伤史,参与实验时四肢未出现外伤,且本人已知情自愿参加本实验;④受试者鞋码大小范围在 40~44 码(EUR 标准);⑤无任何基础性疾病(如心血管系统疾病、肝肾功能受损、视力模糊、无神经系统疾病);⑥未穿戴任何足部矫正器具,跑步方式为后脚跟着地;⑦受试者在实验测试开始前 48 h 内未参加剧烈运动;⑧通过步态分析预筛选确认为

后脚跟着地(rearfoot strike, RFS)跑者(触地角 $>15^{\circ}$)。

1.1.2 受试者排除标准

①不符合上述纳入标准的人员;②思维意识缺失,无法有效配合完成实验;③扁平足、高弓足者;④中途自行退出,资料完整度不足;⑤存在局部皮肤破损等其他皮肤疾病者。

经过一系列筛选后,符合上述条件的 30 名受试者个人基本情况如表 1 所示。

表 1 受试者基本资料($n=30$)

Tab. 1 Basic data of the subjects ($n=30$)

数量	年龄/岁	身高/cm	体质量/kg	实验跑速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	热身跑速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	鞋码/码
30	20.21 $\pm$ 1.68	175.62 $\pm$ 3.13	67.82 $\pm$ 5.89	3.15 $\pm$ 0.41	2.51 $\pm$ 0.29	41

1.2 测试用鞋

本研究选取 Saucony Endorphin 系列的 3 款专业运动跑鞋(Speed 3、Pro 3、Shift 3)作为测试用鞋,其均采用 PWRRUN PB 超临界发泡中底与统一鞋楦设计,但中底厚度逐级递增;后跟厚度分别为(36 ± 0.5)、(39 ± 0.5)、(42 ± 0.5) mm,质量分别为 238、225、285 g。外底均采用 XT-900 耐磨橡胶与 3~4 mm 耳齿纹路,排除大底摩擦系数差异对动力学数据的干扰。通过实测验证,3 款鞋仅在中底厚度上存在显著差异(质量误差 $<10\%$),其他参数(如 8 mm 落差、鞋面结构)保持一致,可有效控制非研究变量,精准分析鞋底厚度对下肢生物力学的独立影响。图 1(a)、图 1(b)、图 1(c)分别对应后跟厚度为(36 ± 0.5)、(39 ± 0.5)、(42 ± 0.5) mm 的 3 款运动鞋,按照鞋底厚度的不同,将测试组分别命名为中厚 36 mm 组、次厚 39 mm 组、超厚 42 mm 组,对比 3 组实验测试结果。



图 1 3 种测试用鞋

Fig. 1 Three types of testing shoes

1.3 测试仪器与测试内容

1.3.1 测试方案

测试方案:本次测试中的跑道长度设定为 16 m,跑道中间为 Kistler 三维测力台(型号 9260AA6,尺寸 60 cm $\times$ 50 cm),采集频率设定为 1 000 Hz,使用 8 镜头 Motion Analysis Raptor-4 红外高速运动捕捉系统

(Motion Analysis Corp., Santa Rosa, CA, USA) 以 200 幅/s 的采样频率收集运动员在跑步过程中下肢环节的生物力学参数,跑道前后两处位置摆放测力台两旁为 Smart Speed 红外测速仪,目的是即时检验受试者的跑步速度是否符合实验要求,测试现场示意图如图 2 所示。

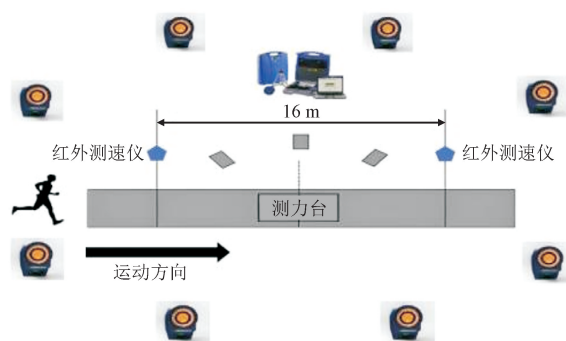


图 2 测试现场示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test site

1.3.2 人员和测试要求

实验前通过压力分布鞋垫(Novel Pedar 系统)对受试者进行步态分析,筛选出后脚跟着地模式(heel strike)的跑者。要求入选的 30 名受试者穿着不同鞋底厚度的运动鞋,3 双鞋测试顺序随机,所有受试者换上相同的袜子及紧身短裤,跑步的目标速度为 3.3 m/s,每双鞋测试完成后受试者休息 30 min,再重复进行第 2 双鞋测试,直至 3 双运动鞋全部测试完成。每种鞋底条件下采集 5 次有效数据取平均值进行分析。

1.3.3 跑步过程中肌电信号测试

使用 Vicon Nexus 软件采集数据,采样频率设定为 200 Hz。受试者的右腿股二头肌、股外侧肌、股直肌和胫骨前肌布置无线表面肌电信号遥测系统(美国 DELSYS Trigno 表面肌电测试系统)。肌电信号经

20~500 Hz 带通滤波和全波整流后,选取受试者连续5个稳定步态周期进行时间标准化(0~100%)和振幅标准化(以最大自主收缩百分比表示),计算积分肌电值(integrated electromyographic value, iEMG)。

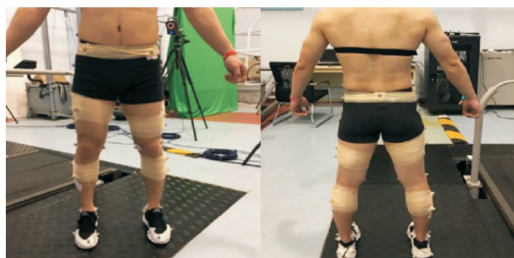


图3 Marker点粘贴方式

Fig. 3 Marker point pasting method

1.4 测试指标

(1) 肌肉活性

通过积分肌电值来衡量肌肉在整个收缩过程中的总体活跃程度^[17]。

(2) 运动学指标

触地时刻($v_{GRF} > 50$ N 的第一帧)与离地时刻($v_{GRF} < 50$ N 的第一帧)下肢各关节角度以及角速度^[18];

关节活动度(range of motion, ROM):指关节在最大主动或被动活动范围内能够达到的运动幅度,用于评估关节灵活性和功能状态。

(3) 动力学指标

垂直地面反作用力:第一峰值力、第一峰值力出现的时间以及缓冲时间(鞋着地时刻到膝关节屈曲角度最大时间)^[19]、加载率第一峰值。

关节力矩:反映肌肉或外力对关节产生的旋转效应。

关节功率:用于量化跑步过程中下肢关节的能量生成、吸收和传递效率;正功率表示能量生成;负功率表示能量吸收。

另外,为消除受试者自身的身高或体质量对实验可能带来的误差,后续采用标准化地面反作用力(BW),标准化关节力矩($BW \cdot BH$)和标准化关节功率(W/kg)等归一化单位。

1.5 统计学方法

将实验所测得数据输入到 Excel 2016 进行整理,并通过软件 SPSS 20.0 进行统计学分析。采用多因素方差分析(analysis of variance, ANOVA)观察不同鞋底厚度的运动鞋对人体下肢的肌电信号、运

动学、动力学参数的影响。实验过程中的所有计数资料采用平均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SD)表示,使用独立样本 T 检验和配对样本 T 检验分别进行组间和组内测试数据对比。当 $P < 0.05$ 时,则表明存在显著性差异;反之,则表明不存在显著性差异。

2 研究结果

2.1 下肢肌肉活性分析

如表2所示。受试者穿着鞋底厚度为39 mm的运动鞋跑步时,其股二头肌标准化积分肌电值为最低值;当鞋底增加3 mm至厚度为42 mm时,跑步过程中的积分肌电值均较36 mm时更高,整体呈现“U型”变化趋势。42 mm组股二头肌 iEMG 显著高于36 mm组($P < 0.01$),而39 mm组呈现最低激活水平(21.36 ± 12.15) $\mu V \cdot s$ 。类似的,胫骨前肌 iEMG 在42 mm组显著高于36 mm组($P < 0.05$),表明超厚鞋底增加了肌肉激活需求。

表2 不同底厚的跑鞋跑步时下肢积分肌电值

Tab. 2 iEMG of lower extremity when running shoes with different sole thicknesses 单位: $\mu V \cdot s$

测试指标	中厚 36 mm	次厚 39 mm	超厚 42 mm
股二头肌	23.18 $\pm$ 10.62	21.36 $\pm$ 12.15 **	28.81 $\pm$ 13.90 **
股外侧肌	24.13 $\pm$ 8.64	26.45 $\pm$ 9.33	31.04 $\pm$ 11.21
股直肌	12.36 $\pm$ 5.75	13.57 $\pm$ 5.13 *	15.01 $\pm$ 7.44 *
胫骨前肌	28.61 $\pm$ 8.83	30.22 $\pm$ 6.75 *	33.18 $\pm$ 10.31 *

注:与中厚36 mm组比较,** $P < 0.01$,有非常显著性差异;* $P < 0.05$,有显著性差异。

2.2 下肢运动学指标分析

2.2.1 离地时刻下肢各关节的角度和角速度

如表3所示。随着运动鞋鞋底厚度的增加,受试者在跑步过程中足离地角度先增大后减小,42 mm鞋底厚度的运动鞋足离地角度较39 mm减小0.95°,有显著性差异($P < 0.05$)。42 mm鞋底厚度的运动鞋踝关节离地角速度比36 mm的运动鞋小28.01°/s,有非常显著性差异($P < 0.01$)。膝关节离地角度与运动鞋鞋底厚度无交互效应,差异无统计学意义($P > 0.05$)。42 mm鞋底厚度的运动鞋膝关节离地角较36 mm运动鞋小49.63°,有显著性差异($P < 0.05$)。髌关节离地角度与运动鞋鞋底厚度无交互效应,髌关节离地角速度与运动鞋鞋底厚度无交互效应,差异均无统计学意义($P > 0.05$)。

表 3 离地时刻跑步者下肢各关节的角度和角速度变化

Tab. 3 Changes in angles and angular velocities of various joints in the lower limbs of runners during ground clearance

测试指标	中厚 36 mm	次厚 39 mm	超厚 42 mm
足离地角度/(°)	5.02±1.16 *	5.78±1.75 *	4.83±1.31 *
踝关节离地角度/(°)	-16.88±4.05	-15.13±3.95	-13.85±5.02
踝关节离地角速度/(°·s ⁻¹)	361.43±57.22 **	352.16±66.32 **	333.42±52.37 **
膝关节离地角度/(°)	-18.18±4.26	-18.21±3.32	-18.25±5.12
膝关节离地角速度/(°·s ⁻¹)	286.15±11.26 *	258.61±10.22 *	236.53±12.16 *
髋关节离地角度/(°)	2.21±0.78	1.96±0.43	2.07±0.37
髋关节离地角速度/(°·s ⁻¹)	112.49±8.85	109.33±9.64	103.58±9.07

注:与中厚 36 mm 组比较, ** $P<0.01$, 有非常显著性差异; * $P<0.05$, 有显著性差异。

2.2.2 触地时刻下肢各关节的角度和角速度

如表 4 所示,足触地角度与运动鞋鞋底厚度无交互效应,组间对比差异无统计学意义($P>0.05$)。踝关节触地角度与运动鞋鞋底厚度无交互效应,组间对比差异无统计学意义($P>0.05$)。次厚 39 mm 鞋底厚度的运动鞋踝关节触地角速度最大为 211.36°/s,较中厚 36 mm 运动鞋大 24.62°/s,有显著性差异

($P<0.05$)。膝关节触地角度与运动鞋鞋底厚度无交互效应,组间对比差异无统计学意义($P>0.05$)。膝关节触地角速度与运动鞋鞋底厚度无交互效应,组间对比差异无统计学意义($P>0.05$)。髋关节触地角度与运动鞋鞋底厚度无交互效应,髋关节触地角速度与运动鞋鞋底厚度无交互效应,差异无统计学意义($P>0.05$)。

表 4 触地时刻跑步者下肢各关节的角度和角速度变化

Tab. 4 Changes in the angles and angular velocities of the lower limb joints of the runner at the moment of contact with the ground

测试指标	中厚 36 mm	次厚 39 mm	超厚 42 mm
足触地角度/(°)	-5.28±1.21	-5.12±1.11	-5.09±1.36
踝关节触地角度/(°)	4.38±0.98	4.41±1.02	4.47±0.84
踝关节触地角速度/(°·s ⁻¹)	186.74±28.56	211.36±31.12 *	206.18±4.41 *
膝关节触地角度/(°)	-22.47±4.12	-21.65±3.38	-20.76±3.57
膝关节触地角速度/(°·s ⁻¹)	346.71±53.14	351.24±55.67	356.78±48.62
髋关节触地角度/(°)	38.65±6.72	39.01±6.33	38.76±5.62
髋关节触地角速度/(°·s ⁻¹)	25.38±4.24	26.75±3.37	29.88±5.21

注:与中厚 36 mm 组比较, ** $P<0.01$, 有非常显著性差异; * $P<0.05$, 有显著性差异。

2.2.3 触地时刻下肢各关节的活动度

如表 5 所示。运动鞋鞋底厚度与踝关节屈曲活动度无交互效应,差异无统计学意义($P>0.05$),

42 mm 鞋底厚度的运动鞋踝关节内外活动度最小为 14.12°,较 36 mm 运动鞋小 3.21°,有显著性差异($P<0.05$)。

表 5 不同底厚的跑鞋触地时刻下肢各关节活动度指标

Tab. 5 Running shoes with different bottom thicknesses touch the ground at each lower limb joint motion index 单位:(°)

测试指标	中厚 36 mm	次厚 39 mm	超厚 42 mm
踝关节屈曲活动度	33.72±3.12	32.65±5.33	33.12±4.78
踝关节内外活动度	17.33±4.02	15.57±3.12 *	14.12±2.75 *
膝关节屈曲活动度	26.46±3.32	25.71±4.12	25.68±3.73
膝关节内外活动度	5.42±1.04	5.68±1.16	5.71±1.22
髋关节屈曲活动度	38.65±4.33	38.92±2.65	37.79±2.84
髋关节内外翻活动度	13.36±4.15	11.62±5.88	12.67±3.16
髋关节内外旋活动度	9.88±2.37	10.67±2.45	10.12±3.25

注:与中厚 36 mm 组比较, ** $P<0.01$, 有非常显著性差异; * $P<0.05$, 有显著性差异。

运动鞋鞋底厚度与膝关节屈曲活动度、膝关节内外活动度均无交互效应,差异无统计学意义($P>0.05$)。运动鞋鞋底厚度与髌关节屈曲活动度、髌关节内外翻活动度、髌关节内外旋活动度均无交互效应,差异无统计学意义($P>0.05$)。双因素方差分析显示鞋底厚度与关节部位存在显著交互作用($P=0.02$),简单效应分析表明踝关节内外活动度在不同

厚度间差异显著($P<0.05$)。

2.3 下肢动力学指标分析

2.3.1 地面反作用力

如表6所示。随着鞋底厚度的增加,受试者在跑步过程中的缓冲时间、第一峰值加载率有增大趋势。

表6 不同底厚的跑鞋跑步时地面反作用力指标

Tab. 6 Ground reaction force index of running shoes with different bottom thicknesses

测试指标	中厚 36 mm	次厚 39 mm	超厚 42 mm
缓冲时间/ms	88.32±12.75	97.33±11.5	102.21±18.3
第一峰值力/BW	1.88±0.44	1.72±0.34*	1.62±0.73*
第一峰值力出现的时间/ms	33.83±2.74	33.92±3.16	33.98±3.74
第一峰值加载率/(BW·s ⁻¹)	98.32±17.64	102.33±21.15	109.63±25.26

注:与中厚 36 mm 组比较,** $P<0.01$,有非常显著性差异;* $P<0.05$,有显著性差异。

其中,鞋底厚度 42 mm 的运动鞋测试的缓冲时间较 36 mm 厚度增加,说明适当增加鞋底厚度可以增加缓冲时间,提升缓冲效果。另外,第一峰值力随鞋底厚度的增加而降低,42 mm 厚度的运动鞋的第一峰值力较 36 mm 运动鞋降低了 0.26 BW,差异显著($P<0.05$)。同时,由于脚部着地时地面反作用力的峰值会在脚部着地后的一瞬间出现,因此鞋底厚度 36 cm 至 42 cm 测试出的第一峰值力出现时间无明显变化,差异不显著($P>0.05$)。

2.3.2 下肢各关节的力矩

如表7所示。随着运动鞋鞋底厚度的增加,受试者在跑步过程中的膝关节的最大伸力矩、最大外展力

矩、最大内旋力矩和膝关节外展角冲量均有降低趋势,受试者穿 36 mm 厚度的运动鞋比穿 42 mm 厚度运动鞋测得的膝关节最大伸力矩降低了 0.036 BW·H,最大内旋力矩降低了 0.015 BW·H,均具有显著性差异($P<0.05$)。踝关节最大跖屈力矩随鞋底厚度的增加而降低,踝关节最大外翻力矩和踝关节最大外旋力矩随鞋底厚度的增加均呈现先降低后增加的趋势,有显著性差异($P<0.05$)。髌关节最大伸力矩、髌关节最大屈力矩随着鞋底厚度的增加无明显变化,无显著性影响($P>0.05$)。同时,任何鞋底厚度下膝关节的最大伸力矩均大于髌关节,说明膝关节在跑步中起着更为主要的支撑和稳定作用。

表7 不同底厚的跑鞋跑步时下肢各关节的力矩指标

Tab. 7 Torque index of each joint of lower limb when running shoes with different bottom thickness

测试指标	中厚 36 mm	次厚 39 mm	超厚 42 mm
膝关节最大伸力矩/(BW·H)	0.25±0.012	0.23±0.018*	0.21±0.027*
膝关节最大外展力矩/(BW·H)	0.04±0.006	0.03±0.004*	0.03±0.011*
膝关节最大内旋力矩/(BW·H)	0.045±0.004	0.041±0.009*	0.030±0.002*
膝关节外展角冲量/(BW·H·s)	0.0012±0.0001	0.0009±0.0001	0.0007±0.0001
踝关节最大跖屈力矩/(BW·H)	0.136±0.014	0.127±0.018*	0.121±0.011*
踝关节最大外翻力矩/(BW·H)	0.021±0.003	0.017±0.001*	0.023±0.003*
踝关节最大外旋力矩/(BW·H)	0.0024±0.0003	0.0017±0.0005*	0.0021±0.0003*
髌关节最大伸力矩/(BW·H)	0.163±0.018	0.159±0.021	0.155±0.016
髌关节最大屈力矩/(BW·H)	0.122±0.011	0.116±0.014	0.112±0.016

注:与中厚 36 mm 组比较,** $P<0.01$,有非常显著性差异;* $P<0.05$,有显著性差异。

2.3.3 下肢各关节功率

如表8所示。在跑步时,受试者穿42 mm比36 mm鞋底厚度运动鞋测得的膝关节最大负功率减少0.92 W/kg,单独效应检验无统计学差异($P>0.05$)。随着鞋底厚度的增加,踝关节最大正功率和最大负功率均逐渐降低,42 mm厚度的运动鞋比36 mm厚度的运动鞋踝关节最大正功率减少了1.86 W/kg,踝关节最大负功率相差0.93 W/kg,两者有显著性差异($P<0.05$)。髌关节最大正功率、最大负功率与鞋底厚度无交互效应,单独效应检验无统计学差异($P>0.05$)。

表8 不同底厚的跑鞋跑步时下肢各关节功率

Tab. 8 Power of each joint of lower limb when running shoes with different bottom thickness

单位: $W \cdot kg^{-1}$

测试指标	中厚 36 mm	次厚 39 mm	超厚 42 mm
膝关节最大正功率	4.37±1.08	4.28±1.17	4.44±1.43
膝关节最大负功率	-6.82±1.62	-7.11±1.54	-7.74±2.13
踝关节最大正功率	13.12±4.22	11.37±2.78*	11.26±2.78*
踝关节最大负功率	-8.55±2.36	-9.12±1.33*	-9.48±2.77*
髌关节最大正功率	4.97±1.39	5.01±1.54	4.99±1.76
髌关节最大负功率	-4.20±2.06	-4.15±1.96	-4.18±2.01

注:与中厚36 mm组比较,** $P<0.01$,有非常显著性差异;* $P<0.05$,有显著性差异。

3 分析与讨论

3.1 不同底厚的跑鞋对下肢肌肉活性的影响

受试者穿着不同鞋底厚度的跑鞋跑步时,下肢股二头肌、股外侧肌、股直肌和胫骨前肌募集到的积分肌电值,随着鞋底厚度的增加总体呈现“U型”变化趋势。当鞋底厚度为39 mm时,适中的缓冲和能量回馈特性优化了下肢的力学传递效率,减少了肌肉对冲击吸收的需求,从而降低了股二头肌、股外侧肌、股直肌和胫骨前肌的激活程度;此时下肢积分肌电值通常处于最低水平,各肌肉群能以较节能的方式完成跑步动作。而在36 mm厚度时,薄底鞋缺乏足够的缓冲能力,导致冲击力直接传递至下肢关节和肌肉,迫使肌肉(尤其是胫骨前肌和股四头肌)通过更高的激活来吸收冲击和维持稳定性;当鞋底厚度增加至3~6 mm时,鞋底增厚使得足部与地面的

力学传递路径变长,增加了膝关节和髌关节的屈曲力矩;为了适应这种变化,下肢肌肉需要更多的募集运动单位来维持平衡和推动身体前进。尤其是股二头肌的高激活($P<0.01$),表明膝关节屈曲负荷显著增加。表明了较厚的鞋底尽管能提供更好的缓冲效果,减少冲击对足部和下肢关节的直接影响,但也会增加肌肉的负担^[20]。

3.2 不同底厚的跑鞋对下肢动力学参数的影响

随着跑鞋鞋底厚度由36 mm增加至42 mm,缓冲时间也随之增加,第一峰值力逐渐降低,第一峰值力出现的时间则无显著变化。这表明适当增加鞋底厚度可以有效地延长脚部与地面的接触时间,从而提供更多的缓冲空间和时间,冲击力也会在传递至足部之前,在更长的时间内被鞋底分散和吸收,使足部在接触地面时能够更缓慢地过渡,从而减轻跑步时对关节和骨骼的冲击^[21]。但36 mm与42 mm测试出的第一峰值力出现时间并无明显变化,则是因为脚部着地时地面反作用力的峰值总是在着地后的一瞬间迅速达到,而与鞋底厚度无明显联系。此外,鞋底厚度增加42 mm时的加载率第一峰值最大,反映了42 mm鞋底厚度的运动鞋在受到冲击时表现出更快的响应速度,但同时加载率的增加也会增加关节和软组织的受力速率,可能带来潜在的风险。

在跑步过程中的膝关节的力矩及膝关节外展角冲量表现出降低趋势,厚的鞋底能够吸收和分散更多的冲击力,从而减少跑步时地面对膝关节的冲击,降低传递到膝关节的力矩。并且膝关节外展角冲量的减少,表明增加鞋底厚度不仅能减轻冲击力,还能更好地控制足部的运动轨迹。特别是当鞋底厚度增加到42 mm时,鞋底具有更好的支撑性和稳定性,更能有效地减少足部的外翻或内翻动作,进一步减少膝关节在跑步过程中的异常受力,从而降低受伤风险。LEREBOURG等^[22]的研究也指出,鞋底厚度的增加能改变下肢肌肉的活动模式和协调性,使跑步者在跑步过程中能够更好地控制膝关节的运动,减少外侧受力。踝关节力矩随鞋底厚度增加而降低,是因为厚鞋底分散更多的冲击力同样会带来踝关节力矩的降低。对于髌关节而言,在跑步过程中,地面反作用力通过腿部向上传递至髌关节,传递过程中会被很大程度分散和减弱。因此,在大多数情况下,鞋底厚度的变化对髌关节力矩的影响并不显著。

此外,随着鞋底厚度的增加,运动员跑步时关节受到的冲击减少,肌肉在吸收能量时的速率和幅度也相应降低,因此下肢部分关节的最大正负功率也会随之降低。然而,由于运动时髌关节受到的冲击相对较小,且其主要功能更多地体现在稳定性和力量传递上,而非直接的能量吸收和释放。因此,即使鞋底厚度增加,对髌关节功率的影响也相对较小。

3.3 不同底厚的跑鞋对下肢运动学参数的影响

本次研究表明跑鞋鞋底厚度的增加会导致受试者在跑步过程中足离地角度增大,而膝关节离地角度、髌关节离地角度与运动鞋鞋底厚度无交互效应。RESENDE 等^[23]也指出鞋底厚度及高度的增加会拉伸足底筋膜,增加牵张反射力量,有助于足部在离地时更迅速地抬起,增大足离地角度。但是,在跑步过程中,膝关节和髌关节的离地角度是由大腿和小腿肌肉的收缩与伸展所决定的,鞋底的厚度变化对这些肌肉并没有直接影响,因此鞋底厚度的增加不会直接影响膝关节和髌关节的运动学特征。

从触地时刻下肢各关节活动度测试来看,运动鞋鞋底厚度与踝关节屈曲活动度、膝关节屈曲活动度、膝关节内外活动度、髌关节屈曲活动度、髌关节内外翻活动度、髌关节内外旋活动度等均无交互效应,而 42 mm 鞋底厚度的运动鞋踝关节内外活动度最小。在跑步过程中,踝关节具有一定的内外活动度,这有助于足部适应不同地形和步态变化,维持身体的平衡。厚底鞋使得脚与地面的距离增加,减少了跑步者对于地面状况的感知,无法及时调整步态和姿势以应对可能的风险^[24]。在跑步过程中,鞋底厚度的增加会限制踝关节的灵活度,降低肌肉工作效率和伸展性,同时也加大了肌肉在特定方向上的受力,长时间的单一受力会使得肌肉僵硬,造成肌肉损伤。

4 结束语

鞋底厚度对跑步者下肢肌肉活性和关节负荷具有显著影响。薄底鞋由于缓冲不足,导致肌肉代偿性激活增加,从而输出强大的爆发力,能满足短跑瞬间爆发的需求,但关节冲击负荷也相对较大;鞋底增厚 3 mm 能够显著降低下肢肌肉激活程度(iEMG),减少关节冲击负荷,是跑步者一种较为理想的鞋底

厚度选择。而鞋底增厚超过 3 mm 时,虽然较厚鞋底能提高缓冲性能,但也显著增加了下肢肌肉激活程度,同时也会降低踝关节活动度和运动灵活性,不利于长跑。为此,适当增加鞋底厚度(如 3 mm)能够有效减轻关节冲击、提高跑步稳定性,但过厚鞋底也影响运动效率。跑者应根据个人需求和运动水平选择适宜的鞋底厚度,以优化跑步表现并降低损伤风险。但是本研究的结论对女性群体的普适性受限,且仅纳入后跟着地跑者,未探讨前掌或全掌着地模式下鞋底厚度的影响。未来研究将扩大样本范围,探究不同着地模式下鞋底厚度对不同性别、运动水平的跑者下肢生物力学的作用机制,最终促进跑步科学的理论完善和实际应用。

参考文献:

- [1] 孙晓乐,叶东强,张桑,等.不同触地习惯对跑步时足弓、跖趾关节在体运动学及足底筋膜长度的影响[J].中国体育科技,2023,59(8):56-64.
SUN Xiaole, YE Dongqiang, ZHANG Shen, et al. Effects of different foot strike patterns on in vivo kinematics of the arch, metatarsophalangeal joint and plantar fascia length during running[J]. China sport science and technology, 2023, 59(8): 56-64(in Chinese).
- [2] 陈诗琴,杨洋,张勤,等.业余跑者跑步经济性与下肢运动学和时空步态特征的相关性研究[J].应用力学学报,2025,42(2):473-482.
CHEN Shiqin, YANG Yang, ZHANG Qin, et al. Relationship of running economy with lower-limb kinematics and spatiotemporal gait characteristics in recreational runners[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(2): 473-482(in Chinese).
- [3] 唐嘉,高毅.体育运动损伤成因及皮革防护用品的应用探究[J].皮革科学与工程,2023,33(5):112.
TANG Jia, GAO Yi. Exploration of the causes of sports injuries and the application of leather protective equipment[J]. Leather science and engineering, 2023, 33(5):112(in Chinese).
- [4] LIN C Y. Human body dynamics detection of shock absorption and rebound ability of specialized athletic shoes[J]. Journal of advanced computational intelligence and intelligent informatics, 2020, 24(3): 293-298.
- [5] 潘美丽,谢辉.运动鞋鞋底性能要求及形态设计研究[J].皮革科学与工程,2022,32(2):104-108.
PAN Meili, XIE Hui. Research on performance requirements and shape design of sports shoes sole[J]. Leather science and engineering, 2022, 32(2): 104-108(in Chinese).
- [6] 王宇笛,唐梓恒,刘汉林.不同高度鞋跟的运动鞋对男性踝关节生物力学参数的影响[J].文体用品与科技,2023,7(7):138-141.
WANG Yudi, TANG Ziheng, LIU Hanlin. The influence of sports

- shoes with different heel heights on the biomechanical parameters of male ankle joint[J]. Science & technology of stationery & sporting goods, 2023, 7(7): 138-141 (in Chinese).
- [7] LIN S S, SONG Y, CEN X Z, et al. The implications of sports biomechanics studies on the research and development of running shoes: a systematic review[J]. Bioengineering, 2022, 9(10): 497.
- [8] JIA Y, LI L. Influence of different sole thickness on biomechanical parameters of human lower extremity: 3292 board #161 June 29; 30 AM - 11: 00 AM[J]. Medicine & science in sports & exercise, 2018, 50(5S): 815.
- [9] 杨程, 贾谊. 穿着不同鞋底厚度的运动鞋进行立定跳远的动力学分析[J]. 辽宁体育科技, 2017, 39(6): 46-51.
YANG Cheng, JIA Yi. Kinetic analysis of standing long jump in wearing sneakers with different soles[J]. Liaoning sport science and technology, 2017, 39(6): 46-51(in Chinese).
- [10] 方晨玮, 谢红. 鞋底对老年人负重行走稳定性的影响[J]. 皮革科学与工程, 2023, 33(4): 72-78.
FANG Chenwei, XIE Hong. Influence of shoe sole on the stability of the elderly walking with load[J]. Leather science and engineering, 2023, 33(4): 72-78(in Chinese).
- [11] NIGG B M, CIGOJA S, NIGG S R. Effects of running shoe construction on performance in long distance running[J]. Footwear science, 2020, 12(3): 133-138.
- [12] LAW M H C, CHOI E M F, LAW S H Y, et al. Effects of footwear midsole thickness on running biomechanics[J]. Journal of sports sciences, 2019, 37(9): 1004-1010.
- [13] 严佩. 运动鞋鞋底设计对下肢生物力学特性的影响[J]. 中国皮革, 2017, 46(4): 49-51.
YAN Pei. Effect of sneaker shoe sole design on biomechanical characteristics of lower extremity[J]. China leather, 2017, 46(4): 49-51 (in Chinese).
- [14] BARRONS Z B, WANNOP J W, STEFANYSHYN D J. The influence of footwear midsole thickness on running economy and frontal plane ankle stability[J]. Footwear science, 2023, 15(3): 155-160.
- [15] 彭飘林, 丁绍兰, 刘昭霞, 等. 不同硬度的鞋底-鞋垫组合对运动鞋减震性能的影响[J]. 皮革科学与工程, 2023, 33(2): 75-80.
PENG Piaolin, DING Shaolan, LIU Zhaoxia, et al. Effect of the sole-insole combination with different hardness on the shock absorption performance of sports shoes[J]. Leather science and engineering, 2023, 33(2): 75-80(in Chinese).
- [16] REEVES J, JONES R, LIU A M, et al. A systematic review of the effect of footwear, foot orthoses and taping on lower limb muscle activity during walking and running[J]. Prosthetics and orthotics international, 2019, 43(6): 576-596.
- [17] 赵虎, 李驰明, 霍洪峰. 不同稳定条件下徒手与负重深蹲的下肢肌电 IEMG 比较研究[J]. 医用生物力学, 2021, 36(增刊 1): 369.
ZHAO Hu, LI Chiming, HUO Hongfeng. Comparative study of lower limb myoelectric IEMG in squatting with bare hands and weight bearing under different stable conditions[J]. Journal of medical biomechanics, 2021, 36(S1): 369(in Chinese).
- [18] 吴成亮, 郝卫亚, 李旭鸿, 等. 体操运动员后空翻落地与垂直落地的下肢生物力学比较研究[J]. 中国体育科技, 2022, 58(5): 21-26.
WU Chengliang, HAO Weiya, LI Xuhong, et al. Comparative study of lower-limb biomechanics of backward somersault landing and vertical landing in gymnasts[J]. China sport science and technology, 2022, 58(5): 21-26 (in Chinese).
- [19] 史晓惠, 梁潇, 赵岷. 步频差异对大学生跑步时下肢冲击力和运动学特征的影响研究[J]. 应用力学学报, 2024, 41(6): 1436-1446.
SHI Xiaohui, LIANG Xiao, ZHAO Min. Influence of step frequency difference on the impact force and kinematic characteristics of lower limbs of college students during running[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(6): 1436-1446(in Chinese).
- [20] 孙冬, 宋杨, 岑炫震, 等. 跑鞋抗弯刚度调整对下肢运动生物力学表现的影响研究[J]. 医用生物力学, 2021, 36(增刊 1): 119.
SUN Dong, SONG Yang, CEN Xuanchen, et al. Effect of flexural stiffness adjustment of running shoes on biomechanical performance of lower extremity[J]. Journal of medical biomechanics, 2021, 36(S1): 119(in Chinese).
- [21] RICHERT F C, STEIN T, RINGHOF S, et al. The effect of the heel-to-toe drop of standard running shoes on lower limb biomechanics[J]. Footwear science, 2019, 11(3): 161-170.
- [22] LEREBOURG L, L'HERMETTE M, MENEZ C, et al. The effects of shoe type on lower limb venous status during gait or exercise: a systematic review[J]. PLoS one, 2020, 15(11): e0239787.
- [23] RESENDE R A, FONSECA S T, SILVA P L, et al. Forefoot midsole stiffness affects forefoot and rearfoot kinematics during the stance phase of gait[J]. Journal of the American Podiatric Medical Association, 2014, 104(2): 183-190.
- [24] 杨子涵, 杨辰, 郑志毅, 等. 不同运动表面对跑步时下肢膝关节刚度的影响研究[J]. 医用生物力学, 2021, 36(增刊 1): 124.
YANG Zihan, YANG Chen, ZHENG Zhiyi, et al. Study on the influence of different exercise tables on the stiffness of lower limb knee and ankle joint during running[J]. Journal of medical biomechanics, 2021, 36(S1): 124(in Chinese).

(编辑 吕茵)