

# 不同鞋面硬度对击球时足部应力和球运动的影响

王 硕, 朱晓兰, 邓 成

(北京体育大学 运动人体科学学院, 北京 100084)

**摘要:**目的 利用有限元方法进行击球过程模拟,探究鞋面硬度对足部受力和球运动的影响。方法 建立骨骼、软组织、足球鞋和球的实体模型,借助红外高速运动捕捉系统测试足背内侧击球时的运动学参数,将足速度和足、球之间的位姿关系加载到有限元模型中,从而完成击球模拟。结果 不同的鞋面硬度对球的旋转速度产生影响,而对球的平动速度几乎无影响。鞋面硬度增加导致足背压力逐渐上升并趋于稳定,最大压力差异为 200 N。第 1、第 5 跖骨应力分别升高了 40.07%、16.2%,第 3、第 4 跖骨应力分别下降了 22.96%、4.64%。结论 不同的鞋面硬度对球运动状态具有显著影响。相较于硬度较高的鞋面材料,硬度较低的鞋面材料能够有效减少足背压力,也有助于减少对骨骼应力的影响,从而降低长期穿着可能导致的损伤风险。

**关键词:** 足球鞋; 鞋面硬度; 有限元分析; 生物力学; 数值模拟

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.04.003

## Effects of Different Shoe Stiffness on Foot Stress and Ball Motion During Kicking

WANG Shuo, ZHU Xiaolan, DENG Cheng

(School of Sport Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** **Objective** To simulate the kicking process using the finite element method and investigate the effects of shoe upper stiffness on foot force and ball motion. **Methods** Solid models of bones, soft tissues, football shoes, and balls were established, and the kinematic parameters of the dorsal medial foot during ball striking were tested using an infrared high-speed motion capture system. The foot velocity and positional relationship between the foot and ball were loaded into the finite element model to complete the striking simulation. **Results** Different shoe upper stiffness affected the rotational speed of the ball, but had no significant effect on its translational speed. As the shoe upper stiffness increased, the pressure on the foot instep gradually increased and stabilized, with a maximum pressure difference of 200 N. The 1<sup>st</sup> and 5<sup>th</sup> metatarsal stress increased by 40.07% and 16.2%, respectively, and the 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> metatarsal stress decreased by 22.96% and 4.64%, respectively. **Conclusions** Different shoe upper stiffness had a significant impact on the motion state of the ball. Compared to shoe materials with higher upper stiffness, shoe materials with lower upper stiffness effectively reduced pressure on the foot instep and helped to reduce the impact on bone stress, thus reducing the injury risks that may result from long-term wear.

**Key words:** football shoes; shoe upper stiffness; finite element analysis; biomechanics; numerical simulation

足球是一项深受全球球迷喜爱的运动。然而,由于其高度对抗性的特点,往往伴随较高的运动损伤风险,尤以下肢损伤居多。据统计,每 1 000 h 的训练中平均会有 8 次受伤发生,而职业球员每个赛季平均会有 2 次受伤<sup>[1]</sup>。这产生了巨大的健康成本,估计全球每年需要支付 16 亿美元的医疗费用<sup>[2]</sup>。球鞋作为足球运动员的主要装备,不同硬度的鞋面会给运动员足部带来不同程度的压力和应力<sup>[3]</sup>;同时也会影响鞋面与球之间的摩擦力,进而改变控球能力和球的操控性<sup>[4]</sup>。

鞋面硬度是预防伤病和提高运动表现的重要因素。研究表明,硬度较高的鞋面会增加足部压力和摩擦力,导致运动员出现足部疼痛或受伤<sup>[2]</sup>。材料特性是影响鞋面压力峰值的关键因素,材料越坚硬,鞋面压力峰值越大<sup>[5]</sup>。此外,鞋面硬度还会影响鞋的抗扭转和纵向弯折性能,二者都能影响球鞋舒适度,增加踝关节损伤风险<sup>[6-7]</sup>。同时,鞋面的生物力学设计与舒适度、击球触感、准确度、球速等密切相关,影响击球准度和球速的因素也很复杂<sup>[8]</sup>。虽然一些研究表明,鞋面材质和整体舒适度会对击球准度和球速产生显著影响<sup>[9]</sup>,不同鞋之间的准确度差异高达 13%<sup>[8]</sup>,但仍然存在很多不确定因素。因此,需要进一步的研究来验证和完善这些结论,并确定其产生影响的具体因素。

有限元方法已广泛应用于生物力学领域,尤其是在建模和模拟人体运动方面<sup>[10-12]</sup>。早期已有研究使用有限元方法创建三维模型,并模拟球类运动中的冲击过程。Price 等<sup>[13]</sup>通过建立有限元模型模拟球的弹跳行为,着重研究球的材料特性和冲击速度对弹跳性能的影响。也有学者通过创建足和球的三维模型,使用有限元分析研究冲击过程以及球在空间中的运动状态<sup>[14-15]</sup>。然而,有关击球时球鞋对足力学响应的评估研究,还鲜有报道。本文在前人的研究基础上,继续深入探究击球过程对足部应力和球的影响。

## 1 研究方法

### 1.1 模型建立

基于 1 名具有 5 年足球比赛经验的健康男性(年龄 24 岁,身高 176 cm,体质量 69 kg,优势腿为右侧)建立足-鞋有限元模型[见图 1(a)]。该受试

者身体健康无疾病,下肢近 6 个月内未发生过运动损伤,无手术史,足部形态正常。实验进行前,受试者在明确实验目的、过程、风险和权益等信息后签署知情同意书,同意参与本研究。

受试者足-鞋影像学数据通过 Simens 64 排 128 层螺旋 CT 机获取,扫描范围为右足鞋底向上至踝关节,扫描层厚为 1 mm,共采集 338 张断层图像。将扫描图像导入 Mimics 19.0 中建立模型,并对骨、软组织和足球鞋进行阈值分割。考虑足软骨主要在运动过程中仅起到润滑和缓震的作用,对击球特征时刻的足部力学特性影响较小,故在模型中将软骨和骨骼进行合并处理<sup>[15]</sup>。将处理后的骨骼、软组织、足球鞋 3 个部分导入 Geomagic Studio 2013 中进行修补和优化,平滑松弛表面,对降噪、平滑等处理后的模型进行勾画轮廓线、构建格栅,拟合成连续的 NURBS 曲面。最后,将模型导入 ABAQUS 2020 中。球模型采用双层壳结构,直径为 22 cm,外层厚 2.2 mm,内层厚 0.2 mm。气体模拟通过定义相互作用的流体腔实现。整个足、球和鞋模型由 197 494 个节点和 127 329 个单元组成。

### 1.2 材料参数

本研究中,除足球是超弹性材料外,骨骼、软组织和足球鞋均选用线弹性材料<sup>[16-17]</sup>(见表 1),足球材料参考 Price 等<sup>[13]</sup>单轴拉伸实验数据拟合简化多项式应变势能方程:

$$U = \sum_{i=1}^N C_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i}$$

式中: $U$  为每单位参考体积的应变能; $\bar{I}_1$  为第一应变不变量; $J^{el}$  为弹性体积比; $C_{i0}$  和  $D_i$  为材料常数。足球内层和外层超弹性系数如表 2 所示。

表 1 有限元模型材料属性

Tab. 1 Material properties of the finite element model

材料	$E/\text{MPa}$	$\nu$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
骨骼	7 300	0.3	812
软组织	1.15	0.4	1 500
鞋	10	0.4	998
球内层	超弹性	0.5	1 408
球外层	超弹性	0.5	938

### 1.3 边界条件

模拟受试者平衡站立动作,忽略其他内外在肌肉力的影响,仅考虑腓肠肌作用于跟腱的力,受试

表2 简化多项式超弹性材料系数

Tab. 2 Simplified polynomial hyperelastic material coefficients

系数	球内层	球外层
$C_{10}$	$1.330 \times 10^5$	$1.229 \times 10^7$
$C_{20}$	$1.727 \times 10^5$	$-2.443 \times 10^7$
$C_{30}$	$-2.643 \times 10^5$	$8.536 \times 10^7$
$C_{40}$	$1.422 \times 10^5$	$-1.270 \times 10^7$
$C_{50}$	—	$7.149 \times 10^7$
$D_1$	$3.822 \times 10^{-7}$	$3.756 \times 10^{-8}$

者体质量为 69 kg,地面反作用力为 345 N,向上作用于地板;腓肠肌作用力约为足部承受载荷的 75%<sup>[18]</sup>,故在跟骨和跟腱连接处向上施加集中力 259 N,胫腓骨上表面远端被完全固定[见图 1(b)]。地板与足底表面定义为摩擦接触,摩擦系数为 0.6<sup>[19]</sup>。

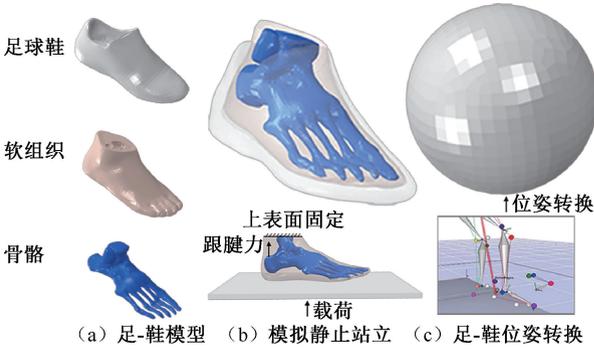


图1 足-鞋-球有限元模型

Fig. 1 Finite element model of the foot-shoe-ball

- (a) Foot-shoe model, (b) Static standing simulation, (c) Foot-shoe position transition

使用 Raptor-4 8 镜头红外高速运动捕捉系统 (200 Hz, Motion Analysis 公司, 美国) 对击球过程进行数据采集。贴点方案为内外踝、足跟、足尖、第 1 和第 5 跖骨, 足球贴点方案为直径两端以及球面贴点。足贴点建立环节完成位姿转换和控制踝关节速度, 足球贴点建立环节获取球心运动。为了确定足和球之间的关系, 以及踝关节的速度变化和球心的运动轨迹, 在球心位置建立全局坐标系, 并基于足标记点创建局部坐标系。两坐标系之间的关系可以通过计算旋转矩阵得出欧拉角。类似地, 在有限元软件中在球的中心建立全局坐标系, 并使用与鞋模型相对应的反射标记点创建局部坐标系。为了实现实际的击球动作, 首先旋转鞋模型, 使其局部坐标系与球中心坐标系重合。然后, 根据从实验中两坐标系之间的关系来旋转鞋模型, 旋转完成后

并基于实验中两坐标系的原点位置来平移鞋模型, 以上步骤使模型还原真实的足、球位姿关系[见图 1(c)]。在模拟足和球碰撞时, 设置了两个分析步骤, 第 1 个分析步对球进行加压, 球的初始压力为 0, 通过将振幅控制缓慢增加压力到 66.879 kPa<sup>[15]</sup>; 第 2 个分析步在踝关节处添加速度, 同时也对球设置了重力加速度 ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ), 以能够更准确地模拟球体在受到重力作用下的运动状态。预定义场还需要对鞋模型设置与足相同的初速度, 骨和软组织设置为绑定接触, 软组织、鞋和球处于表面接触, 软组织与鞋内部、鞋面和球之间的摩擦系数均设置为 0.4<sup>[15]</sup>。本实验选取 6 种鞋面材料的性能, 从软到硬的弹性模量分别为 5 (相当于软质聚氨酯)、10 (相当于皮革)、20、30、40、50 MPa (相当于硬质聚氨酯)<sup>[15]</sup>。

## 2 研究结果

### 2.1 有限元模型验证

站立状态下的足底压力分布情况均通过压力平板和有限元模拟得出。结果表明, 实际测得的足底压强峰值为 182.0 kPa, 主要集中在足跟和第 1 跖趾关节处。而有限元模拟得出的足底压强峰值为 177.2 kPa, 同样分布在足跟和第 1 跖趾关节处。有限元模拟结果与实测数据相比小了 4.8 kPa, 误差为 2.6%。其前掌区域数值模拟的压力分布和压力峰值与测力板测得的实验数据一致; 后跟略有差异, 可能与地板的位置关系有关。但总体上来看, 该模型的几何形状和材料属性与实际相符 (见图 2)。

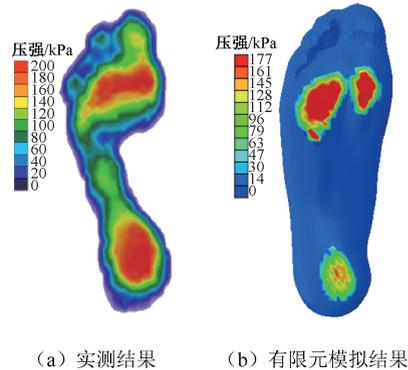


图2 站立时足底压力分布情况对比

Fig. 2 Comparison of plantar pressure distributions during standing (a) Measured results, (b) Finite element simulation results

击球前足速度根据碰撞前三帧运动的速度确定,实验得出  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的速度分别为  $-10.332$ 、 $0.307$ 、 $0.261$  m/s。本文结果表明,鞋面 ( $E=10$  MPa) 在与球发生碰撞阶段,总的合力达到  $1\ 135.8$  N [见图 3(a)];其  $x$  轴是主要的发力方向,主要与脚在  $x$  轴方向速度最大有关,故在  $x$  轴上运动的加速度也最大,最高达到  $2\ 419$  m/s<sup>2</sup> [见图 3(b)]。

实验获得击球后球心在空间内位移情况,结果显示,球心在空间出  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的变化曲线实测结果与模拟结果总体相似,足与球碰撞过程持续时间约  $10$  ms,主要位移方向为  $z$  坐标轴方向,与实测数据相比,总的合位移相差为  $9.74\%$ 。球心轨迹的模拟数据在  $x$  和  $y$  方向有较大区别,尤其是在  $x$  方

向上,因为  $x$  方向是主要的受力方向,同时在仿真模拟过程没有考虑空气阻力的影响,而实际测试时球会因空气阻力的缘故导致数值相对仿真结果偏小,且随着运动距离的增大,误差也会越来越大 [见图 3(c)]。球的旋转结果在仿真和实际结果偏差稍大,其中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴转动角度差异为  $0.07$ 、 $0.03$ 、 $0.03$  rad,尤其是  $x$  轴方向,而且在该方向上的旋转幅度相对较小,推测原因是实际运动脚发力方向刚好与  $x$  轴重合,导致球绕该轴的转动较小;另外,导致整体球旋转角度差异的原因是摩擦因数的不确定和空气阻力的影响 [见图 3(d)]。总之,从验证球模型有效性的角度,该球模型的建立能够在一定程度上反映击球过程中足受力的真实情况。

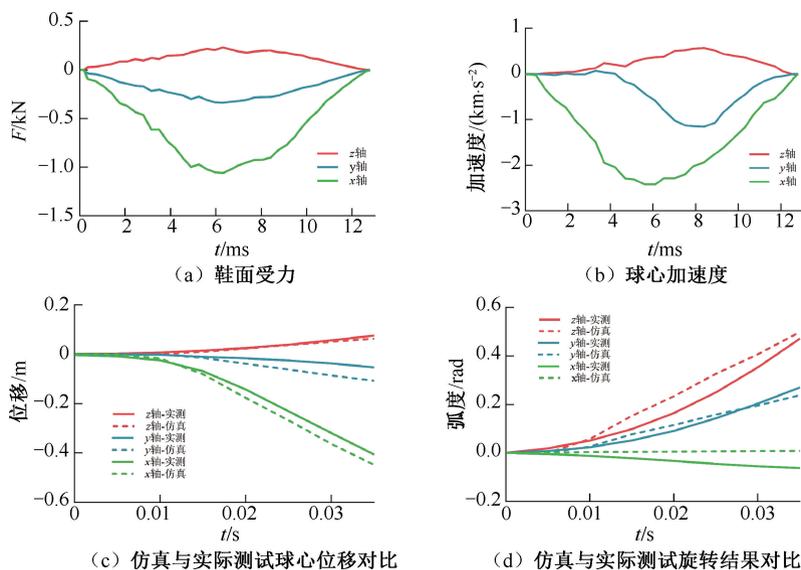


图 3 击球过程鞋面受力、球心加速度、位移和旋转结果

Fig. 3 Shoe upper force, acceleration, displacement, and rotation of the ball during the striking process

(a) Shoe upper force, (b) Ball acceleration, (c) Comparison of ball core displacement between the simulation and real tests, (d) Comparison of rotation between the simulation and real tests

## 2.2 足球鞋材质改变对运动状态的影响

本文发现,足球鞋面硬度对球位移和旋转的影响不同。其中,鞋面硬度对球的位移影响不大,最大与最小位移之间仅有  $0.65\%$  的差异。该结果提示,不论鞋面硬度如何变化,球的位移变化并不明显。然而,与球位移不同,鞋面硬度确实会对球的旋转状态产生影响。随着鞋面硬度的增加,球的旋转弧度呈现增长趋势,最大与最小旋转弧度之间的差异为  $0.069$  rad,增加了  $15\%$ ;鞋面硬度为  $30$  MPa 时,获得了最高的旋转结果 (见图 4)。

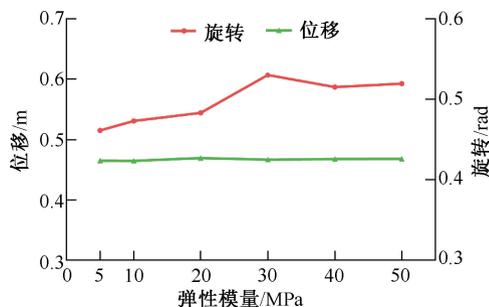


图 4 鞋面硬度对球运动状态的影响

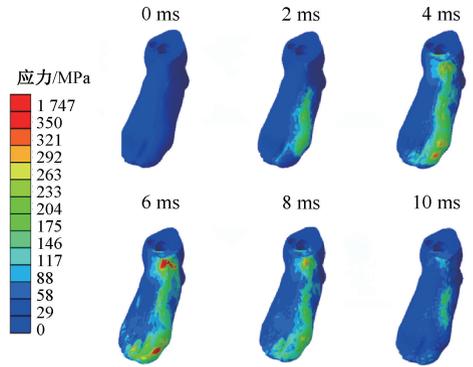
Fig. 4 Effects of shoe upper stiffness on ball motion state

综合来看,足球鞋面硬度的变化对球的运动状态有较大影响。

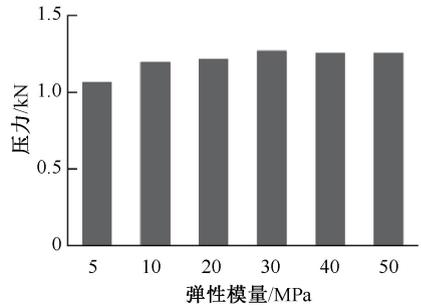
### 2.3 足球鞋材质改变对足背压力和骨骼应力的影响

由足背应力随时间变化云图可见,从刚接触到分离,足背内侧是主要的受力区域,主要发力阶段4~8 ms,球会完全包裹足部,应力区域逐渐延伸,根据结构特征产生应力集中[见图5(a)]。随着鞋面硬度的增加,足背部压力逐渐上升并趋于稳定。具体来说,当弹性模量为5 MPa时,足背压力达到最低点,为1 069.6 N;而当弹性模量提高到30 MPa时,足背压力增加到1 270.08 N。此外,当鞋面硬度达到40或50 MPa时,足背压力与鞋面硬度为30 MPa时几乎相同,提示在一定的硬度范围内,材料的变化对足背压力产生的影响相对较小[见图5(b)]。

不同材质足球鞋对应的骨骼应力峰值分布情况不同。本文发现,骨骼应力主要集中在足跖骨区域。在跖骨底面分布更大的应力,应力主要集中于第1、3、4和5跖骨上表面及底部跖骨区域。随着鞋面硬度的增加,第1跖骨上表面和底部、第5跖骨应力不断增加,第3、4跖骨应力不断减小。其中,30 MPa材质对应的第1、2跖骨区域应力最高,50 MPa材质对应的第3、4跖骨应力最高,推测原因是不同硬度的鞋面对球产生的形变不同,故受力区域也会稍有不同。本文结果显示,第1、5跖骨上表面和底部应力分别升



(a) 足背应力云图(鞋面硬度30 MPa)

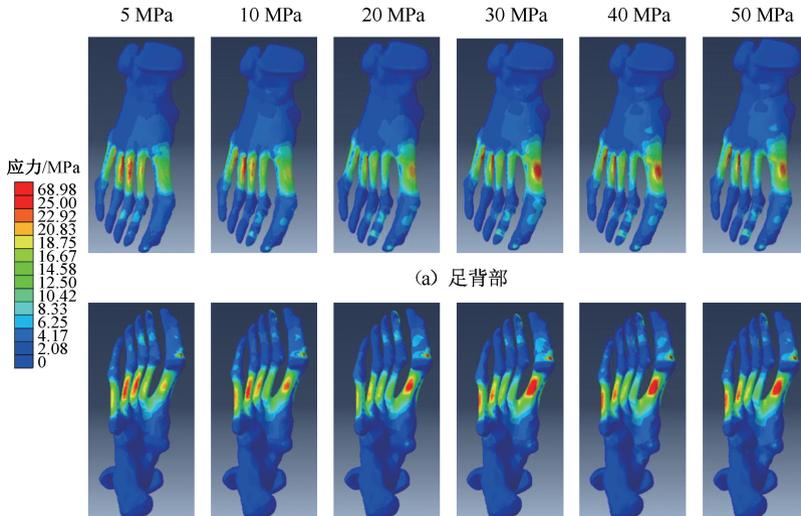


(b) 不同鞋面硬度下足背压力对比

图5 足背应力以及足背压力随硬度的变化

Fig. 5 Stress on foot instep and variation of instep pressure with stiffness (a) Stress contours of foot instep, (b) Comparison of instep pressures under different shoe upper stiffness

高40.07%、16.2%,第3、4跖骨上表面和底部应力分别下降22.96%、4.64%(见图6)。



(b) 足底部

图6 击球时不同鞋面硬度下跖骨应力

Fig. 6 Metatarsal stress under different shoe upper stiffness during kicking (a) Foot instep, (b) Foot bottom

### 3 讨论

本文根据研究目的建立了足、鞋、球有限元模型,包括几何建模、材料特性的定义、边界条件的设定等。将求解结果与测试实验数据进行比较,发现吻合度很高。静止站立时,足底压力分布的仿真值与实测值保持着较高的相似性,主要分布在足跟和跖骨区域,最大压强结果非常接近,误差率仅为2.6%。并且,碰撞后球心位移和旋转的模拟结果与实验测试结果也具有较高的相似性。上述结果表明,本研究所提出的方法在解决该问题上是有有效和准确的,为进一步研究和实际应用提供了有力支持。

鞋面硬度几乎不影响平动速度,但会对球的转动产生影响。与现实情况不同的是,在仿真中平动和转动效果相互独立,互不影响。首先,增加足球鞋材料的硬度不影响球平动速度的原因可能是鞋面厚度较小,而且鞋面相较于骨骼硬度较低。因此,即使增加鞋面硬度,球在与鞋面碰撞时也不会获得较大的反弹力,从而不会使球的速度增加,本实验结果也与以往一些研究结果一致<sup>[15,20]</sup>。其次,增强足球鞋面硬度会影响球旋转的原因是提高了球与鞋面之间的摩擦力,从而导致球的旋转增加。在运动鞋摩擦因数的研究中,发现摩擦因数与材料的接触面积、材料种类、滑动速度以及法向载荷等因素均有一定的关系<sup>[21]</sup>。例如,弹性或黏弹性材料物体随着法向载荷的变化,其真实的接触面积也会产生变化,从而造成摩擦因数的改变<sup>[22]</sup>。在现实情况中,足球在空中的转动和平动相互联系,转动能够影响平动。因此,足球鞋面硬度对球的运动轨迹、速度和旋转产生显著影响。

鞋面硬度对足部的力学响应和受力分布具有显著影响。本文发现,在击球时,鞋面硬度会直接影响足部承受的冲击力,较硬的鞋面材料会导致冲击力集中在足部的特定区域,增加了这些区域的受力。鞋面硬度越高,则足背压力越大。当鞋面硬度达到一定数值时,压力会趋于稳定。研究表明,鞋面材料是鞋面压力的重要影响因素。通过比较不同的鞋材质(材料的弹性模量从8.616 MPa逐渐增加到126.085 MPa)发现,硬质鞋面材料的鞋在穿着时会产生更高的峰值向上压力<sup>[23]</sup>。足背压力会直接影响舒适性,在一定范围内,两者之间呈现负相

关关系。因此,降低鞋面压力可以有效提升舒适度<sup>[24]</sup>。鞋面硬度增加不仅会影响足背压力,同时也会影响鞋的弯曲刚度和扭转刚度,进而影响跑步和变向运动<sup>[25-26]</sup>。

比较不同硬度足球鞋材料对跖骨应力的影响发现,足球鞋材料硬度对跖骨应力产生重大影响。跖骨区域是击球撞击的主要受力点,鞋面硬度的变化会影响该区域的应力。Tol等<sup>[27]</sup>研究表明,89%的击球位置是球和第1跖骨的根部之间的撞击,76%的击球位置是球和内侧踝骨前部之间的撞击,本文发现也支持了该研究结果。进一步的调查显示,第5跖骨骨折是足球运动中常见的损伤,应力性骨折是主要类型,54.0%的第5跖骨骨折被归类为Torg II型(应力性骨折),而其余46%被标记为Torg I型(急性型)<sup>[28]</sup>。一项有关足球运动中鞋面压力变化的研究结果显示,射门时运动员的舟状骨和楔形骨周围区域承受较高压力,这与足球运动员跗跖关节损伤高发率的情况相一致<sup>[29]</sup>。本文结果表明,随着鞋面硬度的增加,第1和第5跖骨的应力增加。因此,在足球训练中,长时间使用硬质鞋面会对跖骨造成伤害。穿着较硬的足球鞋会导致跖骨的应力分布更为集中,这是因为材料硬度更高的鞋面形变较小,而较软的足球鞋则能更好地分散足部压力,使得跖骨应力分布更加均匀。

### 4 结论

本研究建立的足球鞋有限元模型可以模拟实际的足球冲击过程,揭示鞋面与球之间以及鞋面与足内部之间的力学响应特性。足球鞋材料硬度对球的运动轨迹、速度和旋转产生显著影响。鞋面硬度的降低会导致足背压力的降低和舒适度的提高,也直接影响跖骨应力分布,长时间穿着高硬质鞋面可能会造成伤害。由于每个人的力量和疼痛承受能力各不相同,无法确定最佳的鞋面硬度,因此,对于力量和疼痛承受能力较弱的初学者来说,较小的鞋面硬度更适合;而对于更高级的运动员来说,较高的鞋面硬度更有利于提高成绩。

**利益冲突声明:**无。

**作者贡献声明:**王硕负责研究设计、数据统计分析和撰写;邓成协助研究实施;朱晓兰负责论文指导和修改。

## 参考文献:

- [1] EKSTRAND J, HÄGGLUND M, WALDÉN M. Injury incidence and injury patterns in professional football: The UEFA injury study [J]. *Brit J Sport Med*, 2011, 45(7): 553-558.
- [2] BLANCHARD S, PALESTRI J, GUER JL, *et al.* Current soccer footwear, its role in injuries and potential for improvement[J]. *Sports Med Int Open*, 2018, 2(2): E52-E61.
- [3] HAGEN M, HÖMME AK, UMLAUF T, *et al.* Effects of different shoe-lacing patterns on dorsal pressure distribution during running and perceived comfort [J]. *Res Sports Med*, 2010, 18(3): 176-187.
- [4] OLASO MELIS JC, PRIEGO QUESADA JI, LUCAS-CUEVAS AG, *et al.* Soccer players' fitting perception of different upper boot materials[J]. *Appl Ergon*, 2016(55): 27-32.
- [5] RUPÉREZ MJ, MONSERRAT C, ALCANÍZ M. A study of the viability of obtaining a generic animation of the foot while walking for the virtual testing of footwear using dorsal pressures[J]. *J Biomech*, 2009, 42(13): 2040-2046.
- [6] LIVESAY GA, REDA DR, NAUMAN EA. Peak torque and rotational stiffness developed at the shoe-surface interface: The effect of shoe type and playing surface[J]. *Am J Sport Med*, 2006, 34(3): 415-422.
- [7] FRASER S, HARLAND A, SMITH P, *et al.* A study of football footwear bending stiffness [J]. *Procedia Engineering*, 2014(72): 315-320.
- [8] LEES A, ASAI T, ANDERSEN TB, *et al.* The biomechanics of kicking in soccer: A review[J]. *J Sports Sci*, 2010, 28(8): 805-817.
- [9] HENNIG EM, STERZING T. The influence of soccer shoe design on playing performance: A series of biomechanical studies[J]. *Footwear Sci*, 2010, 2(1): 3-11.
- [10] CHEN TL, WONG DW, WANG Y, *et al.* Foot arch deformation and plantar fascia loading during running with rearfoot strike and forefoot strike: A dynamic finite element analysis [J]. *J Biomech*, 2019(83): 260-272.
- [11] 朱晓兰, 王海春, 刘敬喜, 等. 基于有限元模型分析不同蹬冰角度足踝部应力分布差异[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(6): 1138-1144.
- ZHU XL, WANG HC, LIU JX, *et al.* Analysis on differences in stress distribution of foot and ankle at different push-off angles based on finite element model [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(6): 1138-1144.
- [12] 刘姣姣, 朱晓兰, 刘卉. 有限元法在足底筋膜炎生物力学研究中的应用[J]. *中国组织工程研究*, 2018, 22(24): 3900-3906.
- [13] PRICE DS, JONES R, HARLAND AR. Computational modelling of manually stitched soccer balls [J]. *Proc Inst Mech Eng*, 2006, 220(4): 259-268.
- [14] ASAI T, CARRÉ M, AKATSUKA T, *et al.* The curve kick of a football I: Impact with the foot [J]. *Sports Eng*, 2002, 5(4): 183-192.
- [15] ISHII H, SAKURAI Y, MARUYAMA T. Effect of soccer shoe upper on ball behaviour in curve kicks[J]. *Sci Rep*, 2014, 4(1): 6067.
- [16] 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.
- [17] CHO JR, PARK SB, RYU SH, *et al.* Landing impact analysis of sports shoes using 3-D coupled foot-shoe finite element model[J]. *J Mech Sci Technol*, 2009 (10): 2583-2591.
- [18] CHEUNG TM, ZHANG M, AN KN. Effect of Achilles tendon loading on plantar fascia tension in the standing foot [J]. *Clin Biomech*, 2006, 21(2): 194-203.
- [19] 章浩伟, 孙洋洋, 刘颖, 等. 基于三维膝-踝-足有限元模型的足跟痛足底压力生物力学分析[J]. *医用生物力学*, 2017, 32(5): 436-441.
- ZHANG HW, SUN YY, LIU Y, *et al.* Biomechanical analysis of plantar pressure of heel pain based on 3D knee-ankle-foot finite element model [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(5): 436-441.
- [20] 谢聪锋, 李春, 任杰, 等. 新材料乒乓球碰撞动力学分析[J]. *天津体育学院学报*, 2017, 32(1): 22-25.
- [21] 苏朕鑫, 何文革, 杨贤罡, 等. 足球鞋的核心结构及运动生物力学特征研究进展[J]. *皮革科学与工程*, 2021, 31(5): 60-65.
- [22] 司尧华, 崔纪超. 库仑摩擦定律局限性探讨[J]. *河南机电高等专科学校学报*, 2004, 12(2): 20-21.
- [23] RUPÉREZ MJ, MARTÍN-GUERRERO JD, MONSERRAT C, *et al.* Artificial neural networks for predicting dorsal pressures on the foot surface while walking [J]. *Expert Syst Appl*, 2012, 39(5): 5349-5357.
- [24] 晏彪, 弓太生, 汤运启, 等. 运动鞋鞋面压力研究进展[J]. *中国皮革*, 2021, 50(4): 50-55.
- [25] GRAF ES, STEFANYSHYN D. The effect of footwear torsional stiffness on lower extremity kinematics and kinetics during lateral cutting movements [J]. *Footwear Sci*, 2013, 5(2): 101-109.
- [26] KULESSA DJ, GOLLHOFER A, GEHRING D. The influence of football shoe characteristics on athletic performance and injury risk—A review[J]. *Footwear Sci*, 2017, 9(1): 49-63.
- [27] TOL JL, SLIM E, VAN SOEST AJ, *et al.* The relationship of the kicking action in soccer and anterior ankle impingement syndrome: A biomechanical analysis [J]. *Am J Sport Med*, 2002, 30(1): 45-50.
- [28] NERY C, RADUAN F, BAUMFELD D. Foot and ankle injuries in professional soccer players: Diagnosis, treatment, and expectations[J]. *Foot Ankle Clin*, 2016, 21(2): 391-403.
- [29] PUIGSERVER SA, OLASO J, GONZÁLEZ JC, *et al.* Analysis of foot dorsum pressure patterns in soccer full instep kick [J]. *Footwear Sci*, 2011, 3(Sup1): S128-S130.