

# 损伤生物力学 2023 年度研究进展

李海岩<sup>1,2</sup>, 赵洪乾<sup>1,2</sup>, 王彦鑫<sup>1,2</sup>, 贺丽娟<sup>1,2</sup>, 崔世海<sup>1,2</sup>, 吕文乐<sup>1,2</sup>

(1. 天津科技大学 机械工程学院, 天津 300457; 2. 现代汽车安全技术国际联合研究中心, 天津 300457)

**摘要:** 损伤生物力学是研究人体在外部载荷作用下的生物力学响应与损伤机制的交叉学科, 旨在为预防、诊断与治疗人体损伤提供科学依据, 广泛应用于临床医学、运动科学、康复工程、交通安全和航空航天等领域。本文综述了2023年度损伤生物力学的研究进展, 主要涉及损伤机制的深度解析、损伤预测与防护策略创新, 以及损伤诊断与康复技术的最新应用。通过系统梳理研究进展, 希望为未来损伤生物力学学科的持续发展提供新的研究方向与思路, 并致力于推动跨学科交叉融合与技术创新。

**关键词:** 损伤生物力学; 损伤机制; 损伤预测; 防护策略; 诊断与康复

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.06.003

## Research Progress of Injury Biomechanics in 2023

LI Haiyan<sup>1,2</sup>, ZHAO Hongqian<sup>1,2</sup>, WANG Yanxin<sup>1,2</sup>, HE Lijuan<sup>1,2</sup>, CUI Shihai<sup>1,2</sup>, LÜ Wenle<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;  
2. International Research Association on Emerging Automotive Safety Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** Injury biomechanics is an interdisciplinary field that studies the biomechanical responses and injury mechanisms of the human body under external loads. The goal is to provide scientific foundations for the prevention, diagnosis, and treatment of human injuries. This field is widely applied in clinical medicine, sports science, rehabilitation engineering, traffic safety, aerospace, and other domains. In this review, the research progress in injury biomechanics in the year 2023 is summarized, focusing on in-depth analysis of injury mechanisms, innovations in injury prediction and protective countermeasure, and the latest applications of injury diagnosis and rehabilitation technologies. By systematically reviewing the research advancements, this review aims to offer new directions and ideas to the continued development of injury biomechanics and promote interdisciplinary collaboration and technological innovation.

**Key words:** injury biomechanics; injury mechanisms; injury prediction; protective strategy; diagnosis and rehabilitation

损伤生物力学是现代生物力学的一个重要分支, 融合了工程学、医学、生物学和材料科学等多学科的理论知识。通过研究人体在外部载荷作用下的生物力学响应, 损伤生物力学为揭示人体损伤机制、优化防护设备和康复治疗方案提供了科学依据。随着实验技术、数值模拟和人工智能等

新兴技术的发展进步, 损伤生物力学在基础研究和工程应用方面都取得了显著进展。本文综述了2023年度损伤生物力学领域的主要研究成果, 涵盖损伤机制分析、损伤预测与防护、损伤诊断与康复等方面, 以为相关领域的研究者提供参考和启发。

## 1 损伤机制解析

### 1.1 运动过程中的人体损伤

在人类运动实践中,高强度运动或不正确的运动姿势极易导致身体损伤。因此,深入研究不同运动场景下人体的生物力学响应,对于提升运动表现、预防运动损伤以及优化康复训练具有重要意义。以跑步为例,这是一项广受欢迎且参与度极高的运动形式,跑步姿态和跑鞋的选择显著影响跑步者的生物力学响应。研究发现,不同的足部落地方式会改变跑步过程中髌、膝及踝关节的负荷模式。例如,当跑者将步幅缩短 10% 时,髌、膝关节的屈曲角峰值会显著降低,从而减少肌肉骨骼的负荷及胫骨骨折风险<sup>[1]</sup>。进一步研究表明,与传统跑鞋导致的后足着地方式相比,穿极简跑鞋(minimalist running shoes)跑步时会更接近裸足跑时的前足着地方式,可以在一定程度上预防髌关节和膝关节的损伤。然而,极简跑鞋也会带来潜在风险,例如踝关节内翻角、跖屈力矩以及跟腱受力等指标的增加。因此,跑者尤其是新手跑者,需谨慎选择极简跑鞋<sup>[2]</sup>。同时,鞋底前后落差较低的跑鞋可以显著降低髌股关节应力和伸膝力矩,从而减少运动损伤的风险[见图 1(A)]<sup>[3]</sup>;而跑鞋厚度的增加则会加剧足部落地时的足外翻和外旋倾向,从而进一步增加损伤可能性<sup>[4]</sup>。对于跳绳这种常见的有氧运动,

不同跳绳方式对下肢生物力学特征的影响也有所不同。并腿跳绳时,运动员倾向于采用矢状面上的髌、膝、踝关节屈曲缓冲策略,更有效地吸收冲击能量;而交替跳绳则在冠状面上表现出更大的膝关节外翻角度,这可能增加受伤风险。因此,并腿跳在减少下肢着地负荷和降低潜在伤害方面更具优势<sup>[5]</sup>。

在对抗性竞技运动中,如足球,运动动作复杂多变,损伤风险较高。研究表明,在足球运动员正脚背踢球动作中,腓绳肌在触球后摆阶段会经历离心收缩并被拉长到极限,这是拉伤最易发生的时刻[见图 1(B)]<sup>[6]</sup>。而在侧切运动中,膝关节松弛、胫骨外旋、髌关节前屈及膝关节外翻等因素均可能导致前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)损伤<sup>[7]</sup>。其中,侧切变向角度的增大会进一步增加 ACL 损伤风险[见图 1(C)]<sup>[8]</sup>。在棒球运动员中,肘部受伤过的运动员肱肌和肱桡肌的肌肉刚度显著高于正常运动员,同时其肘部屈肌横截面积及前臂总质量也更大<sup>[9]</sup>。乒乓球运动员的跨步攻球动作则进一步揭示,膝关节负荷不仅由动力学和运动学变量决定,还受到周围肌肉力量的影响,通过针对神经肌肉控制策略的预防性计划可以优化膝关节的生物力学响应,从而有效减少 ACL 损伤[见图 1(D)]<sup>[10]</sup>。类似地,在跆拳道运动中,双飞踢动作是一项典型的高强度动作。研究表明,击打前下

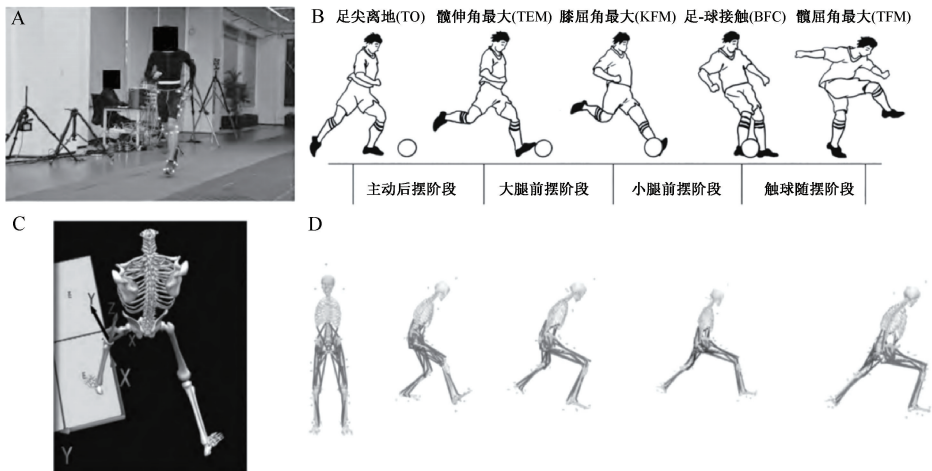


图 1 人体运动过程损伤测试研究

Fig. 1 Injury testing study of human body during movement process

注:(A)受试者跑步测试<sup>[3]</sup>; (B)足球运动员正脚背踢球过程<sup>[6]</sup>; (C)45°斜向落地侧切动作<sup>[8]</sup>; (D)乒乓球运动员运动过程<sup>[10]</sup>。

肢的腓肠肌内侧头、股二头肌长头及臀大肌的募集程度较高。因此,在双飞踢动作训练中,加强踝关节灵活性以及腓肠肌、臀大肌的力量训练,对于降低损伤风险至关重要<sup>[11]</sup>。

## 1.2 工作生活中的人体损伤

相比于运动过程中的损伤原因和表现,工作和生活中的人体损伤机制亦有其特殊性和多样性。在工作环境中,为了避免人类在与机器人协同工作时受到伤害,研究人员开展了摆锤冲击实验,针对人类手臂上最容易暴露于机器人碰撞的4个部位进行撞击实验,以确定手臂的损伤阈值,从而为优化机器人设计及提高人机协同工作的安全性提供了重要依据[见图2(A)]<sup>[12]</sup>。久坐也是工作中的常见状态,牛斌等<sup>[13]</sup>通过定量研究分析了坐姿状态下肌肉及脂肪的应力分布情况,发现臀部软组织在受到一定时间和大小的压力载荷后可能出现深层组织损伤,因此建议长时间保持坐姿后应及时变换体位,以降低压力性损伤的风险[见图2(B)]。在生活场景中,跳跃、上下坡和上下楼梯等活动同样伴随潜在的损伤风险。研究表明,下落过程中受到上躯干或下躯干外力扰动会

显著增加膝关节的损伤风险,尤其是与ACL损伤相关的指标(如膝外展角和地面反作用力),其中上躯干扰动对膝关节的影响更为显著,这可能与躯干和对侧腿的旋转以及重心偏移有关[见图2(C)]<sup>[14]</sup>。进一步分析发现,单腿着陆比双腿着陆的ACL损伤风险更高,主要表现为较低的膝关节弯曲角度、更高的着陆反作用力以及较短的预着陆调整时间,而提高预着陆时膝关节的弯曲速度和角度有助于降低着陆冲击力,从而有效减少ACL损伤的发生概率<sup>[15]</sup>。此外,躯干的过度旋转、膝关节外展角度增大以及臀大肌和股薄肌力量不足也会显著增加ACL的损伤风险[见图2(D)]<sup>[16]</sup>。在坡道和楼梯的行走场景中,不同的行走方式对关节的影响各有不同。研究发现,在斜坡上进行后退行走可以有效减少膝关节损伤风险,同时这一方式还可用于下肢力量训练,并能更好地保持身体平衡,对因足底受力过大引发的足踝损伤具有预防和康复作用[见图2(E)]<sup>[17]</sup>;而另一项研究则表明,与上低坡度楼梯行走相比,上中坡度楼梯会显著增加髌股关节的应力峰值,进而提升髌股关节负荷并可能增加损伤风险[见图2(F)]<sup>[18]</sup>。

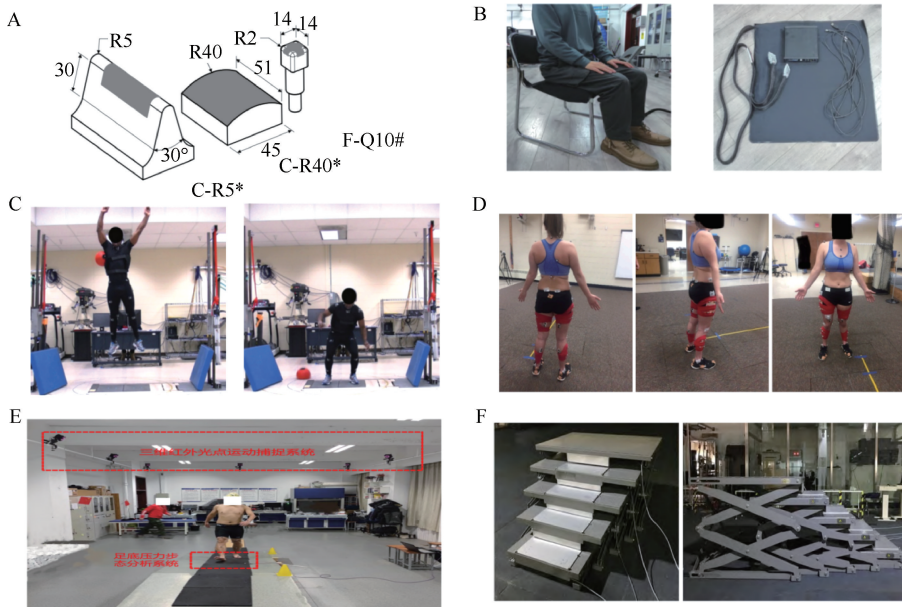


图2 人体工作生活过程损伤测试研究

Fig.2 Injury testing study of human body during work and daily life process

注:(A) 上肢冲击实验冲击器<sup>[12]</sup>; (B) 坐姿接触压力测试<sup>[13]</sup>; (C) 受试者跳跃测试<sup>[14]</sup>; (D) 受试者 ACL 损伤风险测试<sup>[16]</sup>; (E) 受试者斜坡步态测试<sup>[17]</sup>; (F) 可调节式测试楼梯<sup>[18]</sup>。



## 2 损伤预测与防护

### 2.1 基于人体有限元模型的损伤预测

人体损伤预测的研究方法涉及多个学科领域, 主要包括流行病学数据统计分析、物理实验和数值仿真模拟等。其中, 数值仿真模拟因其高效性、安全性、灵活性、精细化分析能力以及良好的可重复性, 在人体损伤预测研究中具有显著优势。与传统的实验和统计分析方法相比, 数值仿真模拟不仅能够深入挖掘复杂数据之间的关系, 还能实现与实验数据的高度融合, 尤其在人工智能等新兴技术的辅助下, 能够广泛适用于各类复杂场景的研究。

目前, 通过构建局部或全身有限元模型, 模拟不同条件下外部载荷对人体的作用, 进而预测人体的生物力学响应, 已成为人体损伤预测领域的常用手段。构建具有高生物逼真度的人体有限元模型, 是业界经久不衰的研究热点问题。2023 年度, 相关研究者在人体有限元模型构建方面取得了一系列进展, 构建了诸如颈椎<sup>[19]</sup>、肩部<sup>[20]</sup>、肘部<sup>[21]</sup>和胸腔<sup>[22]</sup>等多个局部人体模型(见图 3)。除了局部模型的构建, 天津科技大学现代汽车安全技术国际联合研究中心还开发了符合中国体征的第 5 百分位女性汽车乘员损伤仿生模型<sup>[23]</sup>, 这是我国首次基于符合中国第 5 百分位女性体征的志愿者医学影像, 开发的具有中国第 5 百分位女性体征的汽车乘员损伤仿生模型, 相较于在国外模型基础上更改的模型, 该模型具有自主知识产权, 可为我国汽车行业自主研发汽车全域安全系统及汽车安全测评提供

基础数据。为了提高有限元模型的生物逼真度和计算准确性, 还有研究人员从改进用于模拟人体组织器官的材料属性入手, 开展了颅骨<sup>[24]</sup>、肋骨<sup>[25]</sup>、肺<sup>[26]</sup>和皮肤<sup>[27]</sup>等结构的生物材料特性研究。这些不断优化的人体生物材料模型, 进一步提升了仿真模拟的生物力学精度, 为人体损伤预测的科学性和可靠性提供了坚实基础。

人体有限元模型在交通事故、航空航天、消防救援、军事行动等多个极端环境中的损伤预测得到了广泛应用, 其中交通事故由于其相对较高的发生频率, 成为研究的重点之一。在对汽车后排乘员的损伤研究中发现, 当汽车发生正面碰撞时, 后排乘员在左倾坐姿下相比于右倾和正常坐姿损伤更为严重, 这主要是因为约束装置对左倾坐姿乘员的保护效果较差, 安全带无法有效限制乘员的运动<sup>[28]</sup>。研究还发现, 在正面碰撞工况下, 对于大倾角增高座椅中的儿童乘员, 通过限制其盆骨旋转能够有效减小下潜趋势, 从而降低损伤风险<sup>[29]</sup>。随着智能驾驶技术的快速发展, 车内乘员的姿态变得更加多样化, 这对车辆安全性研究提出了新的挑战。研究表明, 在自动驾驶情况下, 正面碰撞中驾驶员的股骨力和弯矩会随着髋关节屈曲角度的增加而减小<sup>[30]</sup>。而在追尾碰撞中, 乘员损伤的严重程度同样与坐姿角度密切相关。具体而言, 随着坐姿倾斜角度的增大, 乘员颈部棘间韧带的应变逐渐减小。这是因为当上躯干倾斜角度增大时, 头颈部在追尾过程中的回弹减弱, 从而减少了脊柱的前屈程度。然而, 在高速追尾碰撞中, 随着座椅靠背角度的增大, 头枕对头部姿态的支撑作用减弱, 无法有效限制头部的位移, 可能导致更严重的损伤<sup>[31]</sup>。弱势道路使用者的损伤预测同样受到了广泛关注。张道文等<sup>[32]</sup>研究发现, 当行人的下肢与车辆碰撞的位置靠近车灯区域时, 所受的损伤会低于其他碰撞区域。李海岩等<sup>[33]</sup>采用非线性回归方法建立预测模型, 获得了 6 岁儿童小腿骨折的人-车碰撞速度及损伤阈值, 为儿童行人交通安全保护提供了更为具体的科学依据。此外, 轮椅使用者与车辆发生碰撞时的损伤问题也得到了研究者的关注<sup>[34]</sup>。这一领域的研究正在不断深入, 以提高不同弱势道路使用者群体在交通事故中的安全性及生存率。

在航空航天领域, 研究者们采用主动和被动

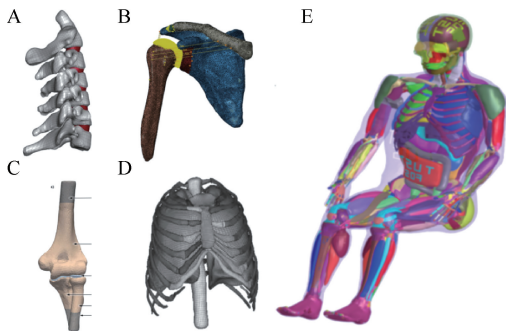


图 3 人体有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the human body

注: (A) 颈椎有限元模型<sup>[19]</sup>; (B) 肩关节有限元模型<sup>[20]</sup>; (C) 肘关节有限元模型<sup>[21]</sup>; (D) 胸腔有限元模型<sup>[22]</sup>; (E) 图斯特中国体征第 5 百分位女性汽车乘员损伤仿生模型<sup>[23]</sup>。

肌肉人体模型分别模拟宇航员在站立姿势下进行月球着陆和发射任务时的生物力学响应。研究发现,主动肌肉的参与可以有效防止宇航员膝关节屈曲和脊柱下垂,从而显著降低胫骨损伤的风险。因此,在航天载荷条件下,被动肌肉模型可能会高估宇航员的损伤风险,而主动肌肉模型或更为准确<sup>[35]</sup>。此外,针对飞行员的损伤研究也取得了一系列进展。研究发现,伴有峡部裂症状的飞行员在短期内执行任务或训练时,短时间的加速度过载不会导致严重损伤。然而长时间承受过载的飞行员可能会经历腰椎峡部负荷性损伤,诱发临床症状,甚至导致脊柱活动受限,进而危及飞行安全<sup>[36]</sup>。另外,当飞行员佩戴头盔挂载设备(helmet-mounted devices)时,设备的负荷容易导致飞行员颈椎过度伸展,从而增加颈椎所受的压力和弯矩,尤其是下颈椎段变化更为明显,这可能导致飞行员颈椎损伤<sup>[37]</sup>。在消防救援领域,研究表明,消防队员穿戴消防水枪外骨骼时,能有效避免单侧肌肉的过度疲劳,同时消防水枪外骨骼会对消防员左侧下肢关节和肩部的受力情况有所改善<sup>[38]</sup>。在军事领域,研究人员分析了军事装备内乘员在垂直冲击环境下的损伤情况。研究表明,在低加载速率下,骨盆的大角度偏转所产生的弯矩,以及在中高加载速率下腰椎的过度弯曲,都会导致脊柱交界处的楔形骨折,而在中等加载速率下的高冲击力则可能引发峡部结节的粉碎性骨折<sup>[39]</sup>。

## 2.2 损伤防护装备研究

近年来,关于运动损伤预防及装备对关节生物力学影响的研究不断深入,相关成果为运动爱好者和专业运动员提供了科学的参考。在运动急停阶段,ACL 损伤的发生率较高。足弓支撑鞋垫通过减少地面反作用力,防止膝关节的过度内外旋,从而降低 ACL 的负荷,能对膝关节起到一定的保护作用[见图 4(A)]<sup>[40]</sup>。曾露露等<sup>[41]</sup>研究发现,不同材料的运动护膝在一定程度上可以对膝关节韧带提供防护作用,但在特定角度下,护膝可能会增加前交叉韧带和后交叉韧带的负荷,因此提示在使用护膝时应考虑到不同角度可能产生的负面影响[见图 4(B)]。针对踝关节不稳问题,杨亦敏等<sup>[42]</sup>研究发现,功能性踝关节不稳患者佩戴

弹性护踝时,会通过减小踝关节内翻角度、内翻角速度和能量吸收,增大踝关节外翻力矩,从而有效预防踝关节扭伤。然而,佩戴半刚性护踝的患者需要关注可能导致的踝关节慢性损伤风险[见图 4(C)]。同样,应用脚踝贴扎限制踝关节活动范围从而预防损伤时,应注意脚踝贴扎在跳深任务中会增加膝关节外翻并降低下肢的平衡能力,这意味着在健康个体中不建议广泛使用脚踝贴扎,否则可能会增加损伤风险<sup>[43]</sup>。在运动损伤防护性鞋类设计方面,宋杨等<sup>[44]</sup>研究发现,裸足及鞋底刚度增加会导致跖骨应力异常变化,因此,在裸足跑鞋或碳板跑鞋的研发设计中,应考虑在前足跖骨区域添加缓冲结构,以优化跖骨应力分布,降低潜在的损伤风险[见图 4(D)]。Pan 等<sup>[45]</sup>研究显示,仿生鞋通过去除前脚掌部分厚度,设计出更接近人脚真实形状的结构,随着跑步速度的增加,仿生鞋能够吸收更多力量,从而创造更稳定的训练环境,有助于预防髌关节和踝关节的损伤[见图 4(E)]。段伟<sup>[46]</sup>对专业乒乓球鞋的研究发现,在运动员 180°跨步训练中,穿专业乒乓球鞋时踝关节屈曲角度、内收和外展角度、旋内和旋外角度均高于普通鞋,而最大屈曲角度、最大内收角度及最大旋外角度低于普通鞋,表明专业乒乓球鞋可以有效改善专业步伐训练中的踝关节运动生物力学指标,降低运动损伤的风险。

除了运动过程中的损伤防护设备,Grindle 等<sup>[47]</sup>开展了供轮椅使用者的可穿戴保护装备的有效性研究,包括安全腰带、气囊背心和头盔[见图 4(F)]。研究发现,头盔会有效减少头-车和头-地接触导致的头部损伤风险。单独使用气囊背心时,背心在家庭轿车(family car, FCR)与轮椅使用者头部接触中减少了头部受伤风险,但在运动型多用途车(sports utility vehicle, SUV)碰撞中由于增加了挥鞭效应进而增加了脑部受伤风险。在单独使用安全腰带时,腰带增加了轮椅使用者与 FCR 和 SUV 碰撞中的头部受伤风险,因为腰带的存在造成了更大的头-车及头-地接触力。当腰带和背心组合使用时,会发现头部受伤风险显著降低,这是因为发生碰撞后轮椅使用者的手臂或腿部会首先撞击地面,从而对头-地接触产生明显的缓冲作用。

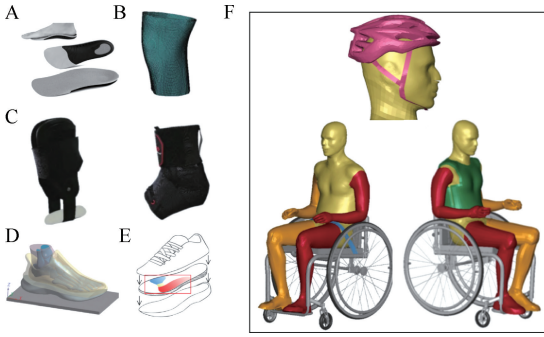


图4 损伤防护装备

Fig. 4 Injury protective equipment

注:(A)足弓支撑鞋垫<sup>[40]</sup>;(B)护膝<sup>[41]</sup>;(C)护踝<sup>[42]</sup>;(D)防护性跑鞋<sup>[44]</sup>;(E)仿生鞋<sup>[45]</sup>;(F)轮椅使用者穿戴式护具<sup>[47]</sup>。

### 3 损伤诊断与康复

#### 3.1 损伤诊断方法研究

基于人体损伤部位的生物力学响应分析,能够深入揭示不同类型损伤的发生机制和程度,从而为临床提供重要的辅助信息,帮助准确诊断损伤类型、定位和严重性,并为个性化治疗方案的制定提供科学依据。通过对生物力学特征的评估,不仅可以提高诊断效率,还能推动损伤评估技术的发展,优化伤后康复过程。魏智彬等<sup>[48]</sup>通过对不同因素导致的肋骨骨折断端形态特征进行研究发现,拳击引起的肋骨骨折断端通常呈向内弯曲形态,且分布于直接受到击打的区域;而按压胸部所致的肋骨骨折则导致骨折断端向外翻折,主要集中在肋骨的非直接受击部位。这一发现为不同类型的肋骨骨折提供了形态学依据,也丰富了肋骨损伤的诊断方法。在下肢损伤诊断中,舒俊森等<sup>[49]</sup>研究发现,退变性半月板损伤患者的膝关节 $Q$ 角和骨盆冠状倾斜角与正常人存在明显差异,因此建议将这两个角度作为退变性半月板损伤患者姿势评估和生物力学分析中的重要参数。Wang等<sup>[50]</sup>研究揭示了臀中肌和股二头肌受电刺激后对膝部外展力矩的影响,发现通过单独或同时刺激这两块肌肉,可以显著减少膝部在着陆过程中的外展力矩。该结果表明,刺激臀中肌和股二头肌不仅有助于改善膝关节的力学表现,还能作为检测前交叉韧带损伤的一种有效方法。在损伤检测诊断设备开发方面,Ozmen等<sup>[51]</sup>基于双频生物电阻抗分析(dual-frequency

bioimpedance analysis, DFBI)技术,开发了一种可穿戴的DFBIA系统,用于非侵入性监测肌肉中的液体动态,从而评估肌肉疲劳。这一系统能量化评估肌肉健康程度。通过这一技术,运动员可以实时了解肌肉状态,及时调整训练强度,从而提高运动表现并减少伤害风险。

#### 3.2 损伤治疗及康复对策

结合损伤生物力学理论与有限元方法,可以直观地展示损伤部位在治疗前后的变化情况,精确模拟不同治疗方案对损伤部位的修复过程和效果。这种方法能够通过定量分析力学参数(如应力、应变、位移等),客观地评估治疗效果,为医生提供数据支持,帮助优化治疗方案。孟春玲等<sup>[52]</sup>通过有限元方法模拟摇拨戳手法的力学状况,对比足踝距腓前和跟腓韧带联合损伤治疗前后韧带、关节面受力的变化。李银倩等<sup>[53]</sup>研究发现,腰椎前纵韧带损伤后腰椎稳定性会下降,后伸和侧弯运动会产生较大的应变,可能加重原有损伤,因此建议腰椎前纵韧带损伤患者在康复过程中应尽量避免后伸和侧弯运动。同时,应用生物力学分析和有限元方法还能预测不同治疗策略的长远影响,提升治疗的个性化和科学性,从而实现了对损伤部位的精准干预和康复效果的量化评估,如为辅助骨折恢复的植入物材质及布局方式的选择提供参考<sup>[54-55]</sup>。有研究人员进一步结合损伤生物力学理论和CT扫描、3D打印等技术和方法,重构人体局部几何模型,并在此基础上进一步构建了人体局部的物理模型,如颅骨<sup>[56]</sup>和椎体<sup>[57]</sup>等,为损伤预测和治疗康复提供了新的研究手段。

### 4 总结与展望

本文综述了2023年度损伤生物力学领域的研究进展,涵盖人体在运动、工作及日常生活中的损伤机制、损伤预测与防护以及损伤诊断与康复等内容。损伤生物力学不仅为运动损伤预防、医疗干预和康复策略的优化提供了科学依据,而且在提高各类人群安全性、降低损伤风险方面也具有重要意义。随着实验技术、数值模拟方法的不断进步,以及人工智能和大数据技术的应用,损伤生物力学的研究已经迈向更高的精度和深度。未来,随着人体有限元模型和生物材料特性的持续优化,以及运动装备和防护技术的创新,损伤生物力学将为提高人



类健康与安全作出更加积极的贡献。

利益冲突声明:无。

作者贡献说明:李海岩负责论文设计、撰写和修改;赵洪乾、王彦鑫负责文献搜集整理和论文撰写;贺丽娟、崔世海、吕文乐参与文献搜集整理和论文修改。

## 参考文献:

- [ 1 ] SUNDARAMURTHY A, TONG J, SUBRAMANI AV, *et al.* Effect of stride length on the running biomechanics of healthy women of different statures [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2023(24): 604.
- [ 2 ] 史岩峰, 崔吉洋. 足跟着地动作下极简跑鞋对踝关节的运动生物力学影响[J]. *中国皮革*, 2023, 52(7): 90-93.
- [ 3 ] 李英丽. 鞋底前后落差对慢跑运动员髌股关节的影响研究[J]. *中国皮革*, 2023, 52(7): 94-97+101.
- [ 4 ] 杨瑞鹏. 不同运动鞋鞋底硬度对人体动力学指标影响探究[J]. *中国皮革*, 2023, 52(3): 61-66.
- [ 5 ] 邵诗蕊. 不同跳绳方式对青少年下肢生物力学特征的影响研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2023, 36(4): 89-96.
- [ 6 ] 雷静民, 李翰君, 张力文. 力量素质对正脚背踢球动作腓绳肌生物力学特征的影响[J]. *中国体育科技*, 2023, 59(4): 77-83.
- [ 7 ] 蒙恩. 足球运动员侧切动作中前交叉韧带损伤机制研究[J]. *当代体育科技*, 2023, 13(16): 5-8.
- [ 8 ] 薛博士, 杨晓巍, 赵建斌, 等. 不同落地方向及运动疲劳对侧切动作中前交叉韧带损伤风险的影响[J]. *首都体育学院学报*, 2023, 35(6): 653-662.
- [ 9 ] TSUTSUI T, MAEMICHI T, SAEKI J, *et al.* Characteristics of upper limb mass, muscle CSA and stiffness in adolescent baseball players with and without elbow injury [J]. *J Biomech*, 2023(157): 111750.
- [ 10 ] 张蓓, 孙东岳, 兰景越. 乒乓球运动员跨步攻球动作膝关节动力学与下肢肌肉激活特征分析[J]. *体育科技文献通报*, 2023, 31(9): 238-242.
- [ 11 ] 刘林, 彭赛, 贾孟尧, 等. 得分状态下竞技跆拳道运动员双飞踢动作下肢生物力学特征分析[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(6): 1226-1234.
- LIU L, PENG Q, JIA MY, *et al.* Analysis on biomechanical characteristics of lower extremities for athletes under effective striking during double roundhouse kick in competitive Taekwondo [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(6): 1226-1234.
- [ 12 ] BEHRENS R, PLISKE G, PIATEK S, *et al.* A statistical model to predict the occurrence of blunt impact injuries on the human hand-arm system[J]. *J Biomech*, 2023(151): 111517.
- [ 13 ] 牛斌, 郑清丽, 赵一凡, 等. 坐姿下不同组织压力性损伤生物力学研究[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(6): 1079-1085.
- NIU B, ZHENG QL, ZHAO YF, *et al.* Biomechanical study on pressure injury of different tissues in sitting position [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(6): 1079-1085.
- [ 14 ] SONG Y, Li L, LAYER J, *et al.* Indirect contact matters: Mid-flight external trunk perturbation increased unilateral anterior cruciate ligament loading variables during jump-landings[J]. *J Sport Health Sci*, 2023, 12(4): 534-543.
- [ 15 ] LI L, SONG Y, JENKINS M, *et al.* Prelanding knee kinematics and landing kinetics during single-leg and double-leg landings in male and female recreational athletes [J]. *J Appl Biomech*, 2023(39): 34-41.
- [ 16 ] SADEQI S, NORTE GE, MURRAY A, *et al.* Effect of whole body parameters on knee joint biomechanics: Implications for ACL injury prevention during single-leg landings[J]. *Am J Sports Med*, 2023, 51(8): 2098-2109.
- [ 17 ] 贾敏, 侯捷, 闫可, 等. 不同坡度后退走对下肢运动学和足底压力的影响[J]. *体育科技*, 2023, 44(3): 31-35.
- [ 18 ] 林瑞, 李秋捷, 杨辰, 等. 楼梯坡度对健康成人上楼行走时膝关节生物力学特征的影响[J]. *中国运动医学杂志*, 2023, 42(5): 359-365.
- [ 19 ] TAHMID S, LOVE BM, LIANG Z, *et al.* Cervical spine finite element models for healthy subjects: Development and validation[J]. *J Comput Inf Sci Eng*, 2023, 23(4): 044501.
- [ 20 ] SADEQI S, BAUMANN AP, GOEL VK, *et al.* A validated open-source shoulder finite element model and investigation of the effect of analysis precision [J]. *Ann Biomed Eng*, 2023, 51(1): 24-33.
- [ 21 ] KAHMANN SL, SAS A, HOKAMP NG, *et al.* A combined experimental and finite element analysis of the human elbow under loads of daily living [J]. *J Biomech*, 2023(158): 111766.
- [ 22 ] 郭世永, 尹菲, 刘志红. 薄壁长杆撞击驾驶员胸腔时肺部生物力学响应[J]. *机械设计与制造*, 2023(1): 80-85.
- [ 23 ] 李海岩, 胡静, 贺丽娟, 等. 中国体征第五百分位女性汽车乘员损伤仿生模型开发及验证[J]. *汽车工程*, 2023, 45(10): 1965-1974.
- [ 24 ] ADANTY K, BHAGAVATHULA KB, TRONCHIN O, *et al.* The mechanical characterization and comparison of male and female calvaria under four-point bending impacts [J]. *J Biomech Eng*, 2023, 145(5): 051009.
- [ 25 ] ALBERT DL, KATZENBERGER MJ, HUNTER RL, *et al.* Effects of loading rate, age, and morphology on the material properties of human rib trabecular bone [J]. *J Biomech*, 2023(156): 111670.
- [ 26 ] PYDI YS, NATH A, CHAWLA A, *et al.* Strain-rate-dependent material properties of human lung parenchymal tissue using inverse finite element approach [J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2023(22): 2083-2096.
- [ 27 ] CHATTRAIRAT A, AIMMANEES S, KANDARE E. Modelling and characterisation of the dynamic behaviours of silicone-based composite skin simulant with short polyethylene fibres and bioactive glass particles [J]. *Mech*

- Mater, 2023(184): 104740.
- [28] 武和全, 周惠来, 李羿辉, 等. 汽车正面碰撞中后排不同坐姿乘员损伤生物力学分析[J]. 汽车安全与节能学报, 2023, 14(6): 688-697.
- [29] 张学荣, 尹逊蒙. 儿童乘员在大倾角增高座椅中的下潜趋势及腹部损伤研究[J]. 汽车技术, 2023(8): 57-62.
- [30] TIAN T, XIAO S, YOU S, et al. Effect of hip flexion angle on lower limb injuries of occupants in autonomous vehicle crashes[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2023, 26(16): 1966-1979.
- [31] 武和全, 边楚虹, 胡林, 等. 汽车自动驾驶过程中不同姿态乘员在追尾碰撞中的损伤研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(13): 1628-1637.
- [32] 张道文, 雷毅, 任耀, 等. 基于人-车碰撞事故重建的行人下肢动力学响应与损伤生物力学分析[J]. 汽车安全与节能学报, 2023, 14(6): 671-680.
- [33] 李海岩, 黄盛一, 李琨, 等. 行人-车辆碰撞中六岁儿童下肢损伤分析及预测[J]. 汽车工程, 2023, 45(6): 1050-1061.
- [34] GRINDLE D, UNTAROIU C. Computational seated pedestrian impact design of experiments with ultralight wheelchair[J]. Ann Biomed Eng, 2023, 51(7): 1523-1534.
- [35] LALWALA M, DEVANE KS, KOYA B, et al. Effect of active muscles on astronaut kinematics and injury risk for piloted lunar landing and launch while standing [J]. Ann Biomed Eng, 2023, 51(7): 1408-1419.
- [36] 靳萌萌, 王家涛, 郭攀, 等. 持续性过载条件下飞行员峡部裂腰椎的动力学响应及损伤预测[J]. 医用生物力学, 2023, 38(1): 77-83.
- JIN MM, WANG JT, GUO P, et al. Dynamic response and injury prediction for lumbar vertebrae of pilots with spondylolysis under persistent overload [J]. J Med Biomech, 2023, 38(1): 77-83.
- [37] LIU J, LIU H, BU W, et al. Effects of different helmet-mounted devices on pilot's neck injury under simulated ejection[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2023, 26(12): 1-12.
- [38] 李艳志, 王建敏, 庄延杰, 等. 消防水枪外骨骼的生物力学分析[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(6): 799-803.
- [39] JIANG Y, XIONG X, CHEN Z, et al. Movement posture and injury pattern of pelvis-lumbar spine of seated human impacted by the vertical high loads: A finite element analysis [J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2023, 26(7): 835-845.
- [40] 蒋兵, 郭琪. 足弓支撑鞋垫对人体膝关节生物力学特征与 ACL 损伤的影响[J]. 中国皮革, 2023, 52(5): 96-100.
- [41] 曾露露, 谢红. 有限元法预测运动护膝在不同运动状态下对膝关节韧带的影响[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(36): 5771-5777.
- [42] 杨亦敏, 张泽毅, 刘卉, 等. 护踝对功能性踝关节不稳患者下肢运动生物力学特征的影响[J]. 医用生物力学, 2023, 38(4): 742-748.
- YANG YM, ZHANG ZY, LIU H, et al. Effects of ankle braces on lower extremity biomechanics of patients with functional ankle instability [J]. J Med Biomech, 2023, 38(4): 742-748.
- [43] MORALES CR, CRUZ AM, ARRABE MG, et al. Assessing the effect of prophylactic ankle taping on ankle and knee biomechanics during landing tasks in healthy individuals: A cross-sectional observational study[J]. Sao Paulo Med J, 2023, 142(2): e2022548.
- [44] 宋杨, 孙冬, 岑炫震, 等. 个体化足-鞋耦合有限元建模及在跖骨应力研究中的应用[J]. 应用力学学报, 2023, 40(5): 1204-1212.
- [45] PAN J, CHEN H, ZHENG Z, et al. A comparative analysis of bionic and neutral shoes: Impact on lower limb kinematics and kinetics during varied-speed running [J]. Appl Sci, 2023, 13:23.
- [46] 段伟. 专业步伐训练中乒乓球鞋对踝关节的运动生物力学影响[J]. 中国皮革, 2023, 52(8): 79-82.
- [47] GRINDLE D, UNTAROIU C. Effectiveness of wearable protection equipment for seated pedestrians [J]. Ann Biomed Eng, 2023, 51(9): 2086-2096.
- [48] 魏智彬, 李洋, 崔世海, 等. 基于有限元法分析肋骨骨折致伤方式 [J]. 刑事技术, 2023, 48(5): 441-448.
- [49] 舒俊森, 周乐, 谢凌锋, 等. 退变性半月板损伤患者的骨盆及下肢姿势特征性分析[J]. 中国康复, 2023, 38(6): 358-361.
- [50] WANG D, WANG M, CHU S, et al. Effects of gluteus medius and biceps femoris stimulation on reduction of knee abduction moment during a landing task [J]. J Appl Biomech, 2023, 39(2): 1-8.
- [51] OZMEN GC, MABROUK S, NICHOLS C, et al. Mid-activity and at-home wearable bioimpedance elucidates an interpretable digital biomarker of muscle fatigue [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2023, 12(70): 3513-3524.
- [52] 孟春玲, 王晓, 高春雨, 等. 基于有限元法对摇摆截手法治疗外侧踝关节韧带联合损伤的研究[J]. 中国骨伤, 2023, 36(8): 767-772.
- [53] 李银倩, 吕杰, 王多多, 等. 三维有限元法分析前纵韧带对腰椎生物力学的影响[J]. 生物医学工程学进展, 2023, 44(2): 176-183.
- [54] 杨威, 李雅峰, 彭鹏, 等. 腓骨内植入物材质的选择及螺钉布局方式[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(18): 7686-7693.
- [55] 殷浩, 陈光, 李燕, 等. 背侧克氏针增强 AOC 型桡骨远端骨折尺背侧骨折块稳定性的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(31): 4921-4925.
- [56] HANNA M, ALI A, KLIENBERGER A. A method for evaluating brain deformation under sagittal blunt impacts using a half-skull human-scale surrogate [J]. J Biomech Eng, 2023, 145(6): 061001.
- [57] FONSECA G, VAKIEL P, CRIPTON PA. UBC neck C4-C5: An anatomically and biomechanically accurate surrogate C4-C5 functional spinal unit [J]. Ann Biomed Eng, 2023(51): 1802-1815.