

文章编号: 1004-7220(2024)01-0111-07

跳跃运动中不同护膝条件下膝关节半月板应力场的数值研究

阮江涛¹, 孟洋洋¹, 张银光², 肖霞¹

(1. 天津工业大学 航空航天学院, 天津 300387; 2. 天津医院 创伤骨科, 天津 300211)

摘要:目的 采用数值模拟方法,建立人体膝关节肌骨系统生物力学模型,并将人体动力学模型模拟跳跃运动时获得的运动学和动力学信息作为模型驱动数据,进而分析不同热力耦合护膝条件下膝关节半月板的应力场分布特征。方法 基于受试者CT与MRI断层扫描图像,构建包括骨、关节软骨、半月板、韧带和膝关节外围软组织的较真实人体膝关节模型,依据跳跃运动全周期分析选择蓄力起跳、落地冲击两个半月板损伤风险较大的位姿步态进行模拟,分析4种不同热力耦合护膝条件下膝关节半月板的应力场特征,讨论半月板峰值应力及其应力集中区域的变化,探究半月板损伤以及佩戴护膝的防护功效和力学依据。结果 膝关节内侧半月板前角是应力集中的易受损区域;在热力场耦合护膝条件下,内侧半月板应力集中区域由其狭长且薄弱的前角转移至其较为宽厚的中部,且峰值应力显著降低;内、外侧半月板的峰值应力接近,表明两者共同承担外载,且半月板应力集中区域面积减小。结论 热力场耦合护膝对于膝关节半月板的损伤具有良好防护作用。数值模拟研究结果可以为热力多功能护膝的设计提供理论支撑和技术指导。

关键词: 半月板; 热力耦合; 护膝; 应力场; 跳跃运动; 数值模拟; 肌骨系统

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.01.016

Stress Field of the Meniscus under Different Knee Brace Conditions in Jumping Motion: A Numerical Study

RUAN Jiangtao¹, MENG Yangyang¹, ZHANG Yinguang², XIAO Xia¹

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Department of Orthopedic Trauma, Tianjin Hospital, Tianjin 300211, China)

Abstract: Objective The biomechanical model for the musculoskeletal system of a human knee joint was established using a numerical simulation method. The kinematic and dynamic information captured during jumping motion simulated by the human dynamic model was used as driven data of the knee biomechanical model, followed by further analysis of the stress field distribution characteristics of the meniscus under different thermal-force coupling knee brace conditions. **Methods** Based on computed tomography and magnetic resonance imaging of the subject, a realistic human knee model, including bone, articular cartilage, meniscus, ligaments and peripheral soft tissues of the knee joint, was constructed. Furthermore, two gaits, namely taking-off and landing-on, of jumping motion with an increased risk of meniscus injuries were selected according to mechanical features in full-cycle jumping motion. Subsequently, the stress field characteristics of the knee meniscus under four different thermal-force coupling knee braces were analyzed, the changes of the peak stress of the meniscus and its stress concentration area were discussed, and the protective efficacy and mechanical basis of meniscal

收稿日期: 2023-04-06; 修回日期: 2023-05-26

基金项目: 天津市应用基础多元投入基金项目(21JCYBJC01400), 天津市卫生健康科技项目(ZC20053)

通信作者: 肖霞, 副教授, 硕士生导师, E-mail: xiaoxia@tiangong.edu.cn.

injuries and wearing knee braces were explored. **Results** The anterior part of the medial knee meniscus was a vulnerable area under concentrated stress. Under the knee brace thermal-force coupling condition, the stress concentration area of the medial meniscus was transferred from its narrow and weak anterior part to its wide and thick middle part, and the peak stress was also significantly reduced. The peak stress on the medial meniscus and that on the lateral meniscus were similar, indicating that the two parts of the meniscus bore the external load evenly, and the meniscus stress concentration area decreased. **Conclusions** Thermal-force coupling knee braces have good protective effects against knee meniscus injury. The numerical simulation provides theoretical support and technical guidance for the design of multifunctional thermal knee braces.

Key words: meniscus; thermal-force coupling; knee brace; stress field; jumping motion; numerical simulation; musculoskeletal system

半月板是人体膝关节中的重要承载组织,具有缓冲震荡、维持关节稳定等作用。但因组织的结构和形态等生理特点,半月板在膝关节活动中容易受到损伤,且受损后基本不能自行修复再生,从而影响膝关节的正常运动,甚至带来膝骨关节发生病变^[1]。因此,在日常活动和体育运动中,对于膝关节半月板的损伤防护非常重要。

膝关节承载人体约 80% 重量,且其作为下肢股骨和胫骨的关键连接部分,是实现人体各项运动的重要支撑。研究表明,绝大多数膝关节半月板损伤是因运动不当、运动过度造成。在坡路行走时,下坡时膝关节损伤概率较平地行走更高^[2];在负重下蹲时,深蹲动作给膝关节带来的损伤较髌、踝关节的可能性更大^[3];在急停起跳动作时,助跑速度是膝关节损伤风险的重要影响因素^[4];在跳跃时,人体疲劳状况会增加膝关节的受损风险^[5]。由此可见,在走、蹲、跑、跳等各种运动方式中,膝关节都存在一定的损伤风险,故膝关节的损伤防护尤为必要和重要。

佩戴护膝是各项运动中保护膝关节的常用措施,它通过改善膝关节外部的受力环境来实现膝关节内部各组织受损防护的功效。在慢跑^[6]、急停跳投^[7]、跳台跳落^[8-9]等运动中,穿戴护膝对于膝关节有明显的保护作用。人体关节模型跌倒实验表明,佩戴护膝可以减小膝关节所承受的冲击力^[10]。目前护膝防护功效的研究大都基于实验测试有、无防护下膝关节所承受外力来进行对比分析,而基于膝关节内部组织应力场等信息分析护膝防护功能的研究鲜有报道。

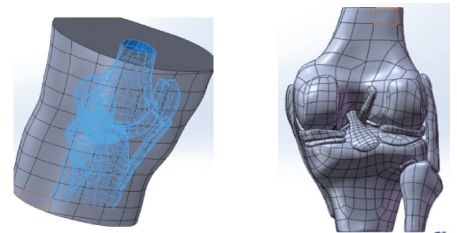
有限元方法通过建立肌骨系统生物力学模型,

将人体运动时捕捉到的运动学和动力学信息作为模型驱动数据,分析模型内部软硬组织相互作用以及局部组织应力或应变分布,直观地评估和预测肌骨内部生物力学响应^[11]。本文采用数值模拟方法,结合 CT 与 MRI 断层扫描数据,构建较真实的人体膝关节肌骨生物力学模型,模拟跳跃运动中蓄力起跳和落地冲击两个损伤风险较大的位姿步态,围绕膝关节半月板在不同热力耦合护膝条件下的应力场展开研究,基于半月板在不同热力耦合护膝条件下的应力场分布、半月板峰值应力和集中区域等特征,探究半月板损伤以及热力耦合护膝的防护功效和力学依据。

1 膝关节及其护膝数值模型

1.1 膝关节数值模型

采用 1 名 24 岁男性受试者(身高 172 cm, 体重 80 kg)右膝关节处 CT 与 MRI 断层扫描数据,构建包含骨、关节软骨、前后交叉韧带、内外侧副韧带、髌韧带、内外侧半月板、膝关节外围软组织的较真实膝关节几何模型(见图 1)。



(a) 包含外围软组织膝关节模型 (b) 膝关节主要结构

图 1 膝关节几何模型

Fig. 1 Geometric model of knee joint (a) Knee model with peripheral soft-tissue, (b) Main structures of knee model

所建膝关节模型的单元数为 3 222 140 个,节点数为 709 885 个。骨、关节软骨、半月板、髌韧带以及外围软组织定义为各向同性线弹性材料;内外侧副韧带和前、后交叉韧带定义为超弹性材料^[12-13],采用 Neo-Hookean 模型,其应变能量密度函数如下:

$$\psi = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 \quad (1)$$

式中: C_{10} 与 D_1 为新胡克材料常数,分别表示体积材料常数和材料不可压缩性; $J(J=|F|)$ 表示弹性变形梯度 F 的雅可比行列式; \bar{I}_1 表示柯西-格林变形张量 $\bar{F}\bar{F}^T$ 的第1不变量; $\bar{F}(\bar{F}=J^{-\frac{1}{3}}F)$ 表示修改后的弹性变形梯度。膝关节模型中各组织具体的材料参数如表1所示。

表1 模型中各组织的材料参数

Tab. 1 Material parameters for tissues of the knee joint model

组织	E/MPa	ν	C_{10}/MPa	D_1/kPa^{-1}
骨	17 000	0.30	—	—
关节软骨	5	0.46	—	—
半月板	59	0.49	—	—
髌韧带	215.3	0.40	—	—
外围软组织	1.15	0.49	—	—
内外侧副韧带	—	—	1.45	1.27
前交叉韧带	—	—	1.95	6.83
后交叉韧带	—	—	3.24	4.20

选取与文献[14-15]一致的载荷数据,即膝关节直立状态下在股骨上施加 1 150 N 轴向压缩载荷,采用包含膝关节骨、软骨、韧带、半月板和外围软组织的膝关节模型进行数值模拟,计算所得内、外侧半月板峰值应力分别为 4.56、2.85 MPa,与文献[14-15]结果(5.10、2.58 MPa)相近。目前研究中所建膝关节几何模型不同,且各组织的材料参数和边界条件也略有区别,故满足一定的峰值应力误差即可认为所建数值模型有效。

1.2 热力耦合护膝的数值模型

佩戴护膝是各项运动中保护膝关节的常用措施,通过改善膝关节外部的受力环境达到保护膝关节各组织受损的功效。护膝具有运动保护、关节养护、防寒保暖的作用,适宜运动员、中老年人、膝部疾病患者使用。随着护膝防护和治疗功能的升级,具有发热和加热功能的护膝逐渐成为护膝研制和市场需求的热点,同时中医热疗法对于膝关节炎的

康复具有显著疗效。因此,热力耦合的功能护膝同时具有防护和治疗的功效,满足保护膝关节的日常需求以及热疗的医用需求。本文根据不同的热力耦合方式,定义普通、运动、热力普通和热力运动4种类型护膝,并进行佩戴的数值模拟。

通过调研市面上销售的护膝产品和查阅护膝设计及生产的相关文献^[16-17],设置压力场的分布形式和载荷。普通护膝对膝关节起到一定的固定束缚和保护作用,在膝关节外围全表面施加均匀分布力载荷,结合护膝设计中通常将紧身压迫调控在 2.1~2.9 kPa,故本研究在人体膝关节外围软组织表面全部区域施加 2.5 kPa 均布力^[18]。运动护膝可以优化膝关节的力载荷分布形式,稳定髌骨且加强膝关节的支撑力,故本研究在膝关节外围软组织表面区域施加 2.5 kPa 均布载荷,且在髌骨下围环绕加压(即在加强固定绑带区域再施加 2.5 kPa 均布力)^[19](见图2)。



图2 护膝及其模拟示意图

Fig. 2 Knee braces and simulation diagram

(a) Normal knee brace, (b) Sports knee brace

热力普通护膝、热力运动护膝是通过将温度场与普通护膝和运动护膝中的应力场相互耦合实现。查阅人体组织特性研究的相关文献得到膝关节中各组织的热物性参数^[20](见表2),且对流换热系数设置为 4.1。调研目前具有加热功能的医用护膝,并查阅有关下肢热疗相关文献,膝关节热疗时温度调节在 38~60 °C 内,故本文设置护膝表面温度恒定为 40 °C^[21-22]。膝关节疾病在寒冷地区或者较为寒冷天气时容易发作,故本文设置膝关节及均匀软组织初始温度为 20 °C。

表2 膝关节各组织热物性参数

Tab.2 Thermophysical parameters of each tissues in knee joint

材料	$C/$ [J·(g·K) ⁻¹]	$\alpha/$ (K ⁻¹)	$k/$ [W·(mm·K) ⁻¹]
软组织	2.50	0.6×10^{-4}	440
韧带、半月板、软骨	3.51	7×10^{-4}	510
骨骼	7.67	—	410

注: C 为比热容; α 为热膨胀系数; k 为导热系数。

2 膝关节半月板应力场研究

2.1 跳跃运动中的位姿步态数据

LifeMOD 是目前世界上较为先进的人体动力学仿真软件,通过输入人体参数建立人体模型,对人体运动进行动态模拟,得到运动过程中的关节位姿、力和力矩等运动学和动力学数据,为研究人体运动的内在规律提供技术支撑^[23-24]。研究者们利用 LifeMOD 对人体落地动作开展动力学仿真和验证,结果表明,通过该人体动力学仿真软件建立人体模型并将其应用于研究人体落地冲击过程的动力学响应特性具有可信度^[25],而且利用该软件对体操运动员踏跳过程^[26]、高水平运动员纵跳落地动作^[27]以及人工膝关节置换^[28]等进行仿真研究。

本文利用 LifeMOD 模拟跳跃运动,将其运动学和动力学数据作为有限元模型的驱动数据,包括膝关节所承受的垂直载荷、内外旋力矩和屈膝角度。依据下肢运动特点,将跳跃运动分为3个阶段、6个瞬时位姿步态,分别为起跳准备阶段的触地准备、下蹲蓄力步态,双腿离地阶段的双腿离地步态,跳后落地阶段的落地瞬时、身体转正、重心前移步态(见图3)。

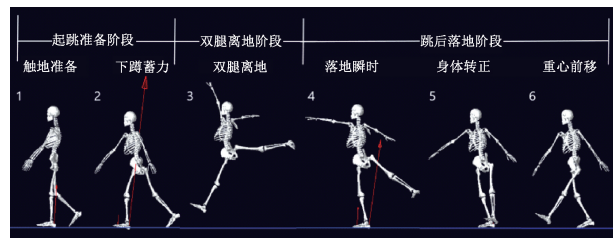


图3 跳跃运动的步态位姿

Fig.3 Gaits and postures in jumping motion

1个完整的跳跃运动周期中分析时间为1.53 s,分析步为154步,全周期中膝关节横断面上的垂直压致力、内外旋力矩和屈膝角度如图4所示。

选择损伤风险较大的两个位姿步态进行有限

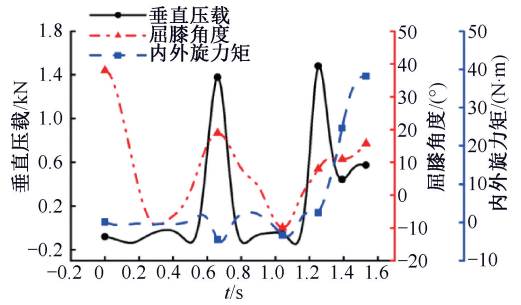


图4 跳跃运动周期中膝关节的载荷曲线

Fig.4 Load curves of knee joint during jumping cycle

元数值模拟,分别为:①下蹲蓄力起跳步态,分析时间为0.66 s,膝关节垂直压致力为1378 N,外旋力矩为4.41 N·m、屈膝角度为18.9°;②落地瞬时冲击步态,分析时间为1.25 s,垂直压致力为1482 N、内旋力矩为2.56 N·m、屈膝角度为7.9°。

2.2 膝关节半月板的应力场分布

选用 ABAQUS 有限元软件,对跳跃运动的下蹲蓄力起跳和落地冲击瞬时两个典型步态进行数值模拟,得到无防护、普通护膝、运动护膝、热力普通护膝、热力运动护膝条件下膝关节半月板应力场分布。结果显示,在起跳和落地两个步态中,内侧半月板的峰值应力始终大于外侧半月板,表明内侧半月板主要承载;同时,在内侧半月板前角处出现峰值应力,前角组织形态较为狭长单薄,故膝关节内侧半月板前角是跳跃运动中的易损伤位置(见图5)。

将应力大于85%峰值应力的区域作为应力集中区域,并计算不同防护条件下该区域在半月板上的面积占比(见表3)。结果显示,在内侧半月板上,随着膝关节防护条件从无防护、普通护膝、运动护膝、热力普通护膝到热力运动护膝的改善,应力逐渐减小,应力集中区域的位置逐渐由狭长单薄的半月板前角转移到其较为宽厚的中部,该区域的面积占比也发生变化。在起跳步态中,随着防护条件的改善,应力集中区域面积占比明显减小,尤其在热力运动护膝防护条件下减小至无防护条件下的1/10,即从1.647%减少至0.167%。在落地步态中,内侧半月板上的应力较小,应力集中区域面积占比也较小,膝关节防护条件的改善带来应力降低和应力集中位置的转移,但对于应力集中区域面积占比的影响不明显。由此可见,佩戴护膝尤其在起跳步态中对于膝关节内侧半月板损伤防护具有显著功效。

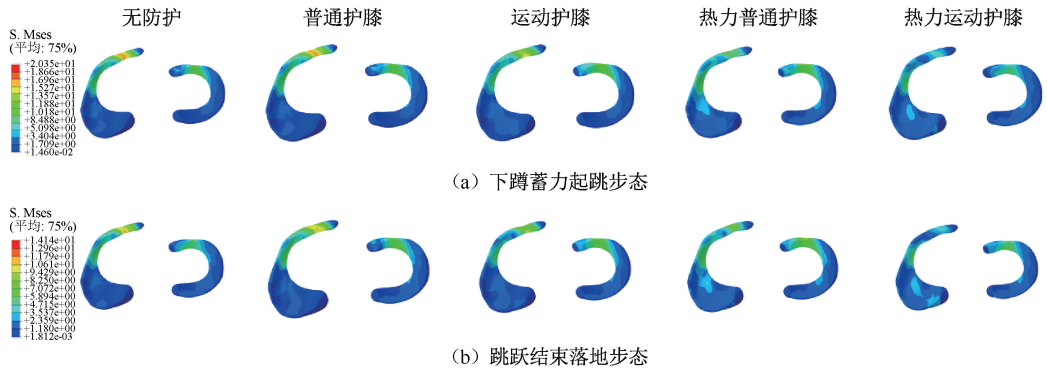


图5 不同护膝条件下膝关节半月板应力场云图

Fig. 5 Stress field distribution of the meniscus under different knee brace conditions (a) Taking-off gait, (b) Landing-on gait

表3 起跳和落地步态时内、外侧半月板上应力分布特征

Tab. 3 Stress distribution characteristics of the meniscus in taking-off and landing-on gaits

半月板	护膝	下蹲蓄力起跳			跳跃结束落地		
		峰值位置	峰值应力/MPa	面积占比/%	峰值位置	峰值应力/MPa	面积占比/%
内侧	无防护	前角	20.35	1.647	前角内缘	14.14	0.266
	普通	前角	19.87	1.650	前角	13.59	0.955
	运动	前角内缘	17.86	0.834	前角内缘	12.78	0.126
	热力普通	中部内缘	13.37	0.267	中部内缘	10.86	0.131
	热力运动	中部内缘	12.19	0.167	中部内缘	9.47	0.160
外侧	无防护	前角	11.33	5.515	前角	7.34	6.484
	普通	前角	11.51	5.843	前角	8.34	6.698
	运动	前角	11.73	7.566	前角	8.01	8.555
	热力普通	前角	11.99	6.230	前角	9.32	5.464
	热力运动	前角内缘	9.99	2.510	前角内缘	7.84	1.415

外侧半月板的前角始终主要承载,而且不同防护条件下,大于85%峰值应力的应力集中区域在半月板中的面积占比都较大,且随防护条件产生的变化较小,只有在热力运动护膝条件下发生较明显减小。无防护条件下,起跳步态和落地步态中应力集中区域的面积占比分别为5.515%和6.484%;在热力运动护膝条件下,两步态中应力集中区域的面积占比都减小,分别为2.510%和1.415%,可见在热力运动护膝条件下,外侧半月板承载均匀、应力集中区域减小。

2.3 膝关节半月板峰值应力

在起跳和落地步态中,膝关节所承受的垂直压载荷相近,但起跳步态中内外旋力矩和屈膝角度较大,带来该步态的半月板峰值应力大。而且,两步态中内侧半月板的峰值应力始终大于外侧半月板。在起跳步态中,无防护条件时内、外侧半月板的峰值应力分别为20.35、11.33 MPa[见图6

(a)];在落地步态中,无防护条件时内、外侧半月板的峰值应力分别为14.14、7.34 MPa[见图6(b)]。同时,随着护膝条件的改善,内、外侧半月板的峰值应力相互接近,表明内、外侧半月板开始共同承担外载。

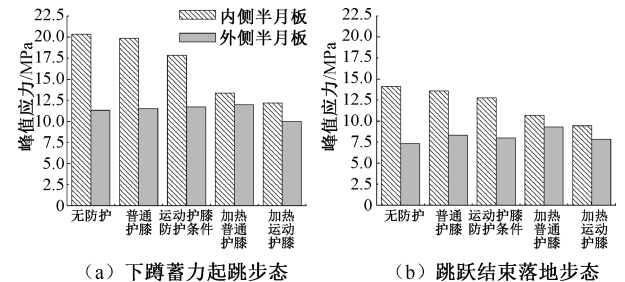


图6 不同护膝条件下膝关节半月板的峰值应力对比

Fig. 6 Comparison for peak stress of the meniscus under different knee brace conditions (a) Taking-off gait, (b) Landing-on gait

内侧半月板的峰值应力随着膝关节防护条件

从无防护到力护膝、热力护膝的改善显著减小。在起跳步态中,与无防护膝关节对比,在均布载荷防护的普通护膝条件下,内侧半月板的峰值应力降低为 19.87 MPa,减少约 2.4%;在优化外载分布形式的运动护膝条件下,即在髌骨下方加强固定防护,内侧半月板的峰值应力为 17.86 MPa,减少约 12.2%;随着热力耦合防护功能的加强,峰值应力也明显减小,热力普通护膝条件下峰值应力减少约 34.3%,为 13.37 MPa,热力运动护膝条件下减少约 40.1%,为 12.19 MPa[见图 6(a)]。在落地步态中,护膝防护功能的增强同样显著降低了内侧半月板的峰值应力,从无防护时 14.14 MPa 降为普通护膝条件下 13.59 MPa,降幅约 3.9%;在运动护膝条件下下降为 12.78 MPa,降幅约 9.6%;在热力普通护膝条件下为 10.68 MPa,降幅约 24.5%;在热力运动护膝条件下为 9.47 MPa,降幅约 33% [见图 6(b)]。由此可见,对于跳跃运动中具有代表性的落地和起跳步态,佩戴护膝是防护膝关节内侧半月板损伤的有效措施,而且热力运动护膝对于内侧半月板的损伤防护功效显著。

对于外侧半月板峰值应力,膝关节防护条件的变化对其带来的影响较小。在起跳步态中,峰值应力从无防护条件时 11.33 MPa 略微增加到普通护膝 11.51 MPa、运动护膝 11.73 MPa、热力普通护膝 11.99 MPa;在热力运动护膝条件下,峰值应力减小为 9.99 MPa,相对无防护条件降低约 11.8% [见图 6(a)]。在落地步态中,峰值应力从无防护条件时 7.34 MPa 增加到普通护膝 8.34 MPa、运动护膝 8.01 MPa、热力普通护膝 9.32 MPa,增幅较大,而在热力运动护膝条件下为 7.84 MPa,与无防护条件下的 7.34 MPa 较为接近[见图 6(b)]。可以看到,在跳跃运动的起跳和落地两个步态中,普通护膝、热力普通护膝条件下,外侧半月板的峰值应力相对无防护条件出现小幅增加;在热力运动护膝条件下,峰值应力呈现减小变化,相对无防护条件时起跳步态的峰值应力稍降,落地步态的峰值应力基本不变。由此可见,跳跃运动中均布载荷的普通护膝和热力普通护膝对于外侧半月板损伤的防护效应不明显,优化载荷分布形式且耦合温度场的热力运动护膝只在屈膝角度较大的起跳步态中对于外侧半月板损伤具有些微防护功效。

3 结论

本文通过有限元数值模拟跳跃运动中的下蹲蓄力起跳和跳跃结束落地两个受损风险较高的步态,结果发现,膝关节内侧半月板前角是应力集中的易受损区域,力场、热场力场耦合的护膝条件可以有效降低内侧半月板峰值应力,减缓应力集中,同时改善内外侧半月板应力场分布,均衡内外侧半月板承载,从而降低膝关节半月板的损伤风险。

在热力运动护膝条件下,内、外侧半月板的峰值应力接近,表明两者共同承担外载;内侧半月板峰值应力显著降低,应力集中区域由其狭长单薄的前角转移至其较为宽厚的中部,且应力集中区域面积占比减小;外侧半月板在起跳步态中的峰值应力减小,在落地步态中基本不变,两步态中应力集中区域面积占比减小。通过分析峰值应力、位置以及应力集中区域面积占比可以发现,热力运动护膝条件下,温度场和应力场的共同作用对于跳跃运动中膝关节内侧半月板具有良好的损伤防护功效,对于外侧半月板具有均匀载荷分布的作用。同时,本研究结果为热力多功能护膝的设计提供支持和指导。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:阮江涛负责研究实施和数据采集;孟洋洋负责资料收集和论文撰写;张银光负责数据分析;肖霞负责研究设计和论文指导。

参考文献:

- [1] 张春秋,高丽兰. 关节软骨生物力学与力学生物学 2022 年研究进展[J]. 医用生物力学, 2023, 38(1): 4-13.
ZHANG CQ, GAO LL. Research progress on biomechanics and mechanobiology of articular cartilage in 2022 [J]. J Med Biomech, 2023, 38(1): 4-13.
- [2] 王坤,付裕,余晓俊,等. 不同坡度与负重步行的下肢关节负荷仿真研究[J]. 军事医学, 2022, 46(7): 493-498.
- [3] 褚子雯. 不同负重深蹲练习髌膝踝关节力量的理论计算与变化特征分析[D]. 武汉: 武汉体育学院, 2020.
- [4] 孙晓泽,袁鹏,许贻林,等. 不同助跑速度急停起跳对排球运动员膝关节生物力学特征的影响[J]. 体育科技文献通报, 2022, 30(8): 240-243.
- [5] TSARBOU C, LIVERIS N I, TSIMEAS PD, *et al.* The effect of fatigue on jump height and the risk of knee injury after a volleyball training game: A pilot study [J]. Biomed

- Hum Kinet, 2021, 13(1): 197-204.
- [6] 张峻霞, 张子倩, 邵洋洋, 等. 基于运动生物力学的护膝设计评价[J]. 包装工程, 2020, 41(24): 1-7.
- [7] 刘青青, 阎玉秀. 基于三维运动捕捉的篮球护膝防护性能研究[J]. 现代纺织技术, 2019, 27(2): 53-58.
- [8] RISHIRAJ N, TAUNTON JE, LLOYD-SMITH R, *et al.* Functional knee brace use effect on peak vertical ground reaction forces during drop jump landing [J]. *Knee Surg Sport Tr A*, 2012, 20(12): 2405-2412.
- [9] 张涛. 基于 AnyBody 模拟空降兵半蹲式着陆膝关节及其防护动力学研究[D]. 合肥: 安徽医科大学, 2017.
- [10] SCHWARZE M, HURSCHLER C, WELKE B. Force, impulse and energy during falling with and without knee protection; An *in-vitro* study [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 10336.
- [11] 官赫, 张萌, 邹娜娜. 肌骨系统生物力学建模 2021 年研究进展[J]. 医用生物力学, 2022, 37(1): 18-26.
- GONG H, ZHANG M, ZHOU NN. Research advances in musculoskeletal biomechanical modeling in 2021 [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(1): 18-26.
- [12] 张吉超, 董万鹏, 董跃福, 等. 膝关节有限元模型参数设置[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(30): 4781-4786.
- [13] SHRIRAM D, YAMAKO G, KUMAR GP, *et al.* Non-anatomical placement adversely affects the functional performance of the meniscal implant; A finite element study [J]. *Biomech Model Mechan*, 2021, 20(3), 1167-1185.
- [14] PENA E, CALVO B, MARTINEZ MA, *et al.* A three-dimensional finite element analysis of the combined behavior of ligaments and menisci in the healthy human knee joint [J]. *J Biomech*, 2006, 39(9): 1686-701.
- [15] 刘恩渤. 一种全新半月板假体的三维有限元分析[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [16] 胡帆. 针对膝关节关节炎功能护膝的研究与设计[D]. 上海: 东华大学, 2017.
- [17] 陈凌娴, 李俊, 王敏. 护膝防护性能及其功能设计研究进展[J]. 毛纺科技, 2022, 50(3): 117-123.
- [18] 阎玉秀, 高智英, 金子敏, 等. 跑步运动中护膝压迫对女子膝关节角度影响[J]. 丝绸, 2018, 55(8): 47-51.
- [19] 张宇飞, 魏小红, 王越平, 等. 舒适服装压及其与织物流学性能相关性研究进展[J]. 毛纺科技, 2021, 49(6): 84-90.
- [20] 赵阳. 基于 Smith 模型的三维有限元人体热调节模型[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [21] 章立红. 基于非稳态及粘弹性条件研究沙疗对人体下肢热力耦合的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020.
- [22] 陶杰. 基于热流原理的深部温度传感器在关节热疗中的应用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2022.
- [23] 苏杨, 钱竞光, 宋雅伟. Lifemod 在运动生物力学中的应用[J]. 南京体育学院学报, 2007, 6(4): 1-4.
- [24] 戎科, 钱竞光. 运动生物学仿真建模软件 LifeMOD 和 OpenSim 的建模比较[J]. 南京体育学院学报, 2015, 14(5): 38-42.
- [25] 李旭鸿, 郝卫亚, 肖晓飞, 等. 基于 ADAMS. LifeMOD 人体落地动作的动力学仿真与验证[J]. 浙江体育科学, 2015, 37(1): 114-116.
- [26] 李旭鸿, 郝卫亚, 肖晓飞, 等. 基于 LifeMOD 对体操运动员踏跳过程的仿真研究[J]. 北京体育大学学报, 2015, 38(11): 65-69.
- [27] 于佳彬, 郝卫亚, 周兴龙. 纵跳落地动作地面反作用力计算机仿真方法的研究[J]. 天津体育学院学报, 2013, 28(6): 497-501.
- [28] 马妮, 肖丽英. 基于 LifeMOD 的个性化人体膝关节设计中的生物力学分析[J]. 康复医学工程, 2011, 26(6): 538-542.