

文章编号: 1004-7220(2023)06-1186-06

不同材料赋值属性下髋关节有限元分析

郭苏童^{1a}, 冯德宏^{1a}, 郭宇^{1a}, 王凌^{1a}, 丁育健^{1a}, 刘仪^{1a}, 钱正瑛^{1b}, 李明洋²

(1. 南京医科大学附属无锡人民医院 a 骨科, b 医学工程处, 江苏 无锡 214023; 2. 北京中诺恒康生物科技有限公司, 北京 102299)

摘要:目的 探讨3种不同建模方式对髋关节有限元模型生物力学特性的影响, 研究出更符合实际的髋关节的材料属性赋值方法。方法 对髋关节模型进行三维重建, 分别采用皮-松质骨赋值法、均一赋值法和灰度赋值法完成材料参数赋值, 设定相同的边界条件和载荷, 模拟单腿站立位状态下髋关节受力情况, 对比3组模型的髋关节应力和形变情况。结果 3种不同建模方式下髋关节应力均集中于股骨颈内侧, 皮-松质骨赋值法、均一赋值法、灰度值赋值法模型 von Mises 应力峰值分别为 11.04、3.91、4.25 MPa。皮-松质骨赋值法模型最大形变位于股骨大粗隆上部, 髌臼与股骨头处最大形变值为 0.27 mm。均一赋值法模型及灰度值赋值法模型最大形变位于髌臼与股骨头处, 最大形变值分别为 0.11、0.12 mm。结论 根据髋关节 CT 数据灰度值进行梯度赋值, 使得髋关节模型材料属性分布更接近骨骼真实的材料属性。

关键词: 髋关节; 皮-松质骨赋值法; 均一赋值法; 灰度值赋值法; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.06.020

Finite Element Analysis on the Hip with Different Material Assignment Properties

GUO Sutong^{1a}, FENG Dehong^{1a}, GUO Yu^{1a}, WANG Ling^{1a}, DING Yujian^{1a}, LIU Yi^{1a}, QIAN Zhengying^{1b}, LI Mingyang²

(1a. Department of Orthopaedics, 1b. Medical Engineering Division, Wuxi People's Hospital, Nanjing Medical University, Wuxi 214023, Jiangsu, China; 2. Beijing Zhongnuo Hengkang Biotechnology Co., Ltd., Beijing 102299, China)

Abstract: Objective To investigate the effects of three different modelling approaches on biomechanical properties of the hip finite element model, and to investigate a more realistic method for assigning material properties to the hip joint. **Methods** The hip joint model was reconstructed in three dimensions, and the material parameters were assigned using the cortical bone and cancellous bone assignment method, the homogeneous assignment method and the gray value assignment method, respectively. The same boundary conditions and loads were set, the stress on hip joint during standing on one leg was simulated, and the stress and deformation of hip joint in three groups of models were compared. **Results** The hip stresses were concentrated in the medial femoral neck under three different modelling approaches, and the peak von Mises stresses were 11.04, 3.91 and 4.25 MPa under the cortical bone and cancellous bone assignment method, the homogeneous assignment method and the gray value assignment method, respectively. The maximum deformation in hip model under cortical bone and cancellous assignment was at the upper part of the greater trochanter, with the maximum

收稿日期: 2023-01-16; 修回日期: 2023-02-23

基金项目: 无锡市社会发展科技示范(医疗卫生类)项目(N20192006), 无锡市卫生健康委科研项目(重大项目)(Z202010)

通信作者: 冯德宏, 主任医师, E-mail: med_fdh@163.com

deformation value of 0.27 mm at the acetabulum and femoral head. The maximum deformation in hip model under the homogeneous material assignment method and the gray value assignment model was at the acetabulum and femoral head, with the maximum deformation values of 0.11 mm and 0.12 mm, respectively.

Conclusions The gradient assignment based on gray value of the hip CT data makes material property distributions of the hip model closer to real material properties of the bone.

Key words: hip joint; cortical bone and cancellous bone assignment method; homogeneous assignment method; gray value assignment method; finite element analysis

髋关节不仅是人体主要的受力关节,也是保持人体平衡的重要关节^[1]。日常生活中所需的基本活动都需髋关节支持^[2]。研究表明,力学因素对髋关节疾病的发生和发展过程均有重要影响。研究髋关节的解剖及生物力学特征,对髋关节疾病的诊治具有重要的作用^[3]。但髋关节解剖结构十分复杂,模拟其应力分布及形变变化比较困难。而既往研究仅建立了股骨三维模型并分析其应力,结果可能存在较大误差^[4]。在医学有限元建模过程中,对材料赋值属性尚无确切定论。在进行生物力学仿真研究时,学者们对骨骼模型常采用不同赋值方法。刁小明等^[5]研究了股骨的弹性模量与泊松比等材料属性,为建立个性化股骨有限元模型的提供参考。张海峰等^[6]采用皮-松质骨赋值法分析不同负荷下髋臼区的应力分布,结果表明,基于 Mimics 软件建立的髋关节模型仿真度高,可进行有限元分析。张馨元等^[7]利用灰度值赋值法研究单腿站立工况下的髋关节应力分布,所获结果准确可靠,为髋关节力学基础研究提供依据。

材料属性赋予方式对有限元分析影响较大。有研究采用不同材料赋值法分别对椎体、股骨、踝关节进行有限元分析,研究结果均表明灰度值赋值法更符合实际情况,可更准确地进行生物力学分析^[4,8-9]。而也有研究采用不同赋值方法对胫骨进行有限元分析,结果表明,灰度值赋值法应用灵活性较低,难以用于复杂的仿真及应力、应变分析^[10]。但目前有关不同赋值方法对髋关节生物力学仿真分析影响的研究较少,很多实验结果差异较大,可比性较差。本文建立髋关节三维有限元模型,通过皮-松质骨赋值法、均一赋值法、灰度值赋值法 3 种方式赋予材料属性,进行髋关节静力学对比分析,研究在单腿站立工况下髋关节模型的应力和形变情况。

1 材料及方法

1.1 研究对象

选取 1 例健康成年女性志愿者,该志愿者身高 160 cm,体质量 50 kg,无髋关节外伤史,无髋关节疼痛及活动受限,无家族遗传病史,影像学排除髋关节骨折、畸形及退行性变。获得该志愿者的髋关节 CT 数据后以 DICOM 格式保存。志愿者了解实验内容,并签署知情同意书。

1.2 实验方法

1.2.1 有限元模型构建 利用计算机断层扫描仪(64 排螺旋 CT 机, Siemens 公司, 德国)对志愿者进行 CT 扫描。志愿者仰卧位,双膝关节并拢伸直,髋关节放松,处中立位,位于扫描视野中心,纵轴方向不动。选择该患者髋关节 CT 数据,分辨率 512×512,层厚 1.0 mm,同时以 DICOM 格式存储。将 DICOM 格式的图像数据导入 Mimics 软件后,软件自动识别数据格式并加载到系统中,根据髋关节解剖结构对图像选择性分割,通过区域增长,光顺骨骼表面部分,使骨骼表面的轮廓变得光滑,建立髋关节骨骼的几何模型,经过分割、修复后,选择蒙板编辑工具修补,填充蒙版并删除多余部分。最后,计算得出髋关节三维有限元模型。将 Mimics 软件中生成的髋关节三维有限元模型导入 3-matic 软件中,检查三维有限元模型后,删除钉状物、小孔等,并进行光滑等处理。结合本模型关节间隙及相关研究结果,本研究通过 3-matic 软件建立厚度均为 1.0 mm 股骨头软骨和髋臼软骨^[11-12](见图 1)。

1.2.2 网格划分 建立好髋关节模型后,进入 3-matic 软件自动生成面网格,此时网格密、质量差,不仅占用计算机内存,还容易计算出错,故对面网格进行减少网格数量、过滤细小的三角片、网格自动优化、检查相交网格并删除、填补空洞、创建体

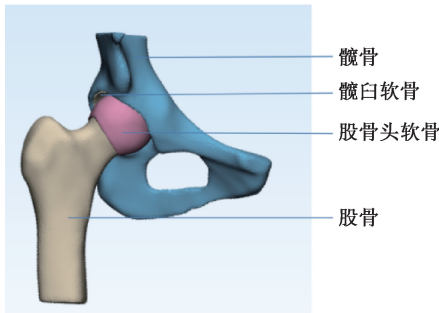


图1 髌关节模型三维重建

Fig. 1 Three-dimensional reconstruction of hip model

网格等操作。结合本模型实际及既往研究经验,将网格尺寸分别设置为0.5、1.0、1.5、2.0 mm 并进行收敛性分析。结果表明,网格尺寸为0.5、1.0 mm 时,最大等效应力相差小于5%^[13]。考虑到网格质量、计算速度和结果精度,将髌关节模型的网格尺寸设置为1.0 mm,共生成四面体网格单元数为183 998个,节点数为49 372个。经网格检验,本研究无不合格网格。

1.2.3 不同骨骼材料属性赋予方法 ① 皮-松质骨赋值法。Wolf定律指出,骨的结构与其承受的运动载荷以及骨强度相关,故研究者们对人体骨骼生物力学性能进行了广泛的探究^[14]。皮质骨分布在髌关节骨骼表层,抗压缩、抗弯曲能力较强,支撑人体结构;松质骨结构复杂,由骨小梁交织组成,骨小梁根据其所处力学负载分布排列^[15]。对髌关节赋予材料属性时,常采用皮质骨和松质骨两种材料^[16]。本文对骨骼进行1.5 mm厚皮质骨的建模,其余部分为松质骨。皮质骨、松质骨弹性模量分别为17.1 GPa,二者泊松比均为0.3^[17]; ② 均一赋值法。考虑到松质骨对接触压力的影响较小^[18],为提高分析计算的效率,网格划分时不包括松质骨,将股骨与髌骨等效化处理,赋予相同材料属性^[19]。均一赋值法将骨骼均视为各向同性材料^[20]。本文在ANSYS Workbench中赋予骨弹性模量为17 GPa,泊松比为0.29^[21]; ③ 灰度值赋值法。当前建模方法多采用均质材料属性,然而,在实际生理状态下,骨骼是由骨小梁连接而成的多孔网状结构,为各向异性^[22]。同时,皮质骨与松质骨无明确的界限,且个体之间差异较大,故建立个体化材料属性的模型对髌关节有限元分析十分重要。将3-matic中建立的

髌关节模型体网格导入Mimics 21.0软件中,通过材料赋值模块可以得到CT数据上每一点的灰度值,通过公式计算对每个网格单元进行材料属性赋予,参考相关文献,将髌骨与股骨按照密度与弹性模量各划分为10种材料属性^[23-24]。依据经验公式对髌关节有限元模型进行材料参数赋值^[24-25]:

$$\rho = -13.4 + 1.017 Gv$$

$$E = -388.8 + 5.925 \rho$$

式中: ρ 为密度; Gv 为灰度值; E 为弹性模量。泊松比设为0.3。

1.2.4 关节软骨材料属性赋值 关节软骨具有弹性,在承受力学负荷中起着重要的作用^[26]。本文依据其解剖形态特点,在髌白及股骨头表面分别建立软骨,赋予髌白软骨及股骨头软骨弹性模量为10.5 MPa,泊松比为0.45^[27]。

1.2.5 设置边界条件及负载 将模型以CDB格式导入ANSYS Workbench软件,在股骨上段的下端横断面施加垂直向上的载荷。因单足站立状态下髌关节承受的负荷约为体重的81%,故施加载荷为患者体重的81%,为405 N^[28]。对髌骨近端及耻骨联合进行约束,无位移和转位^[16]。设置股骨远端只可以沿股骨干方向位移,其他方向位移约束固定,故限制其除垂直方向以外的5个自由度^[29]。负载加载及边界条件设置情况如图2所示。

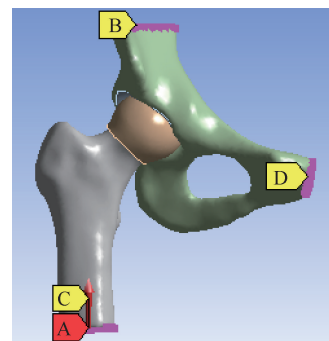


图2 负载和边界条件设置情况

Fig. 2 Setting of loading and boundary conditions

注:A代表在股骨上段的下端横断面施加垂直向上的载荷;B代表对髌近端进行约束,无位移和转位;C代表限制股骨远端除垂直方向以外的5个自由度;D代表对耻骨联合进行约束,无位移和转位。

1.2.6 主要观察指标 通过模拟加载进行有限元仿真分析,观察不同赋值条件单腿站立工况下髌关节的应力及形变情况。

2 结果

2.1 模型应力及分布情况

在相同输出条件下采用不同赋值方法,对单腿站立工况下髋关节有限元模型进行应力分析。结果表明,髋骨区域的应力主要集中在及髋臼区、弓状线、坐骨大切迹及耻骨梳,在股骨近端,股骨颈的内侧区域、股骨头、股骨干应力分布较集中。其中,皮-松质骨赋值法 von Mises 应力峰值位于股骨颈内侧,为 11.04 MPa;均一赋值法 von Mises 应力峰值位于股骨颈内侧,为 3.91 MPa;灰度值赋值法 von Mises 应力峰值位于股骨颈内侧,为 4.25 MPa。3 种赋值法应力分布均主要集中在股骨颈部,但皮-松质骨赋值法在股骨颈部的应力分布相对较大且不均匀,而均一赋值法和灰度值赋值法在股骨颈部的应力分布相对均匀。另外,皮-松质骨赋值法的髋关节模型应力分布范围最大,而均一赋值法和灰度值赋值法的髋关节模型应力分布范围较小,但均一赋值法应力集中分布部位较多,如股骨头、股骨颈、股骨干处均有明显应力集中现象。而且均一赋值法髋关节模型在股骨颈处应力分布区域较窄,而灰度值赋值法较其他两种赋值法的髋关节模型在股骨颈处的应力分布则更为均匀(见图 3)。

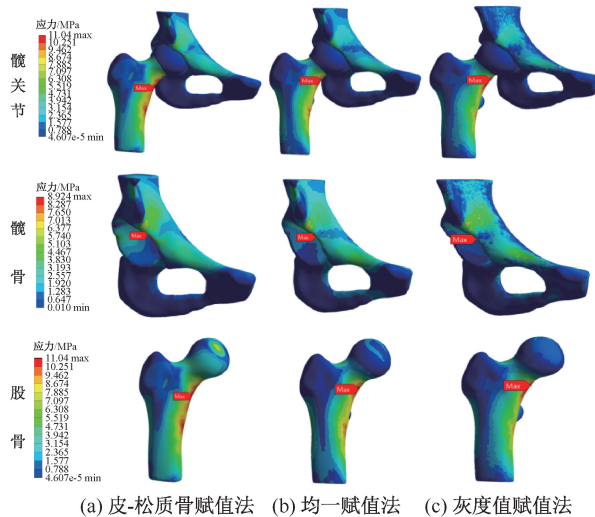


图 3 不同赋值条件下髋关节模型应力分布

Fig. 3 Stress distributions in hip model under different assignment conditions (a) Cortical bone and cancellous bone assignment method, (b) Homogeneous assignment method, (c) Gray value assignment method

2.2 模型形变及分布情况

在相同输出条件下采用不同赋值方法对髋关节模型的形变与分布进行分析。结果表明,单足站立位下形变方面,髋关节皮-松质骨赋值模型最大形变位于股骨大粗隆上部,为 0.28 mm;均一赋值模型和灰度赋值模型最大形变位于髋臼与股骨头处。髋关节皮-松质骨赋值模型髋臼与股骨头处值最大形变为 0.27 mm,均一材料赋值模型髋臼与股骨头处最大形变为 0.11 mm,灰度值赋值模型髋臼与股骨头处最大形变为 0.12 mm。均一赋值模型输出的最大形变值最小,而皮-松质骨赋值模型最大形变值最大。灰度赋值模型与均一赋值模型最大形变结果相近,并且二者的形变分布也基本一致(见图 4)。

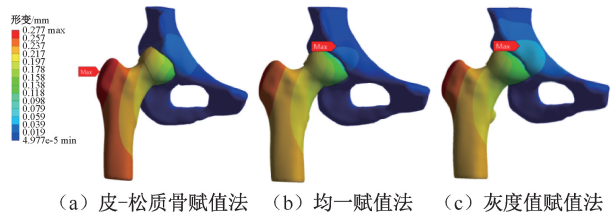


图 4 不同赋值条件下髋关节形变分布

Fig. 4 Deformation distributions on the hip under different assignment conditions (a) Cortical bone and cancellous bone assignment method, (b) Homogeneous assignment method, (c) Gray value assignment method

3 讨论

有限元方法可以对人体骨骼、软骨、肌肉和韧带等组织进行仿真分析,建立高仿真模型是准确进行有限元分析的基础^[30]。正确的弹性模量赋予可使有限元模型更接近真实力学特性,故正确赋予髋关节材料属性十分重要^[31]。有限元分析能够在满足约束条件合理、材料属性等条件正确的情况下,为实体实验的选择提供依据,也可作为实验研究的验证和补充方法,弥补大多数传统生物力学研究成本高、耗时长、可能对人体造成伤害的弊端^[32]。

近年来,人体骨骼系统的有限元分析领域出现了不少新的理论和方法。其中,材料赋值方法一直是争论的焦点^[8]。本文运用皮-松质骨赋值法、均一赋值法、灰度值赋值法 3 种材料属性赋予方法,建立人体单足站立状态下髋关节静力学有限元模型进行仿真分析,从而对比不同赋值方法建立的髋关

节有限元模型仿真结果之间的差异,以期建立更符合临床实际情况的有限元分析模型。

通过不同赋值的髌关节模型应力峰值对比发现,虽然结果都在合理范围之内^[33-34],但皮-松质骨赋值的髌关节模型输出的 von Mises 应力峰值最大,均一赋值的髌关节模型输出的 von Mises 应力峰值最小,3种赋值条件下髌关节模型最大应力分布范围在股骨颈内侧,而皮-松质骨赋值、均一材料赋值髌关节模型应力集中部位较多,主要分布于股骨颈、股骨头、股骨干等部位。而且均一赋值法髌骨节模型在股骨颈处应力分布区域较窄,而灰度值赋值法髌关节模型较其他两种赋值法在股骨颈处的应力分布则更为均匀。通过不同赋值的髌关节模型形变对比发现,结果与既往研究相比也无明显差异^[7]。3种赋值方法中,由于材料属性一致,均一赋值模型输出的最大形变值最小,而皮-松质骨赋值模型最大形变值最大^[35],推测与皮质骨与松质骨之间弹性模量相差较大有关。灰度值赋值模型与均一赋值模型最大形变值结果相近,并且二者的形变分布也基本一致。

从实际材料强度、硬度出发,结合3种不同赋值的髌关节模型应力与形变分布情况,在对髌关节进行生物力学有限元分析时,灰度值赋值法所得出的结果都更为准确^[9,36]。此次研究通过对3种髌关节模型不同赋值方法输出的 von Mises 应力峰值与最大形变值结果对比发现,灰度值赋值法建立的髌关节模型更符合实际,输出结果更为合理精确。灰度值赋值通过参考文献经验公式建立灰度值、密度、弹性模量之间的关系赋予骨骼材料属性,可以反映不同个体的骨质特性,免去了手动操作带来的误差,赋值方式自动化程度高且可满足个体多样性有限元分析的需求^[37]。随着加工制造技术和影像技术的成熟,数据准确性和图像质量精确性的提高有望促进灰度值赋值技术的发展。

本文分别采用皮-松质骨赋值法、均一赋值法、灰度值赋值法对髌关节模型赋值,并分析不同赋值方法对髌关节有限元力学分析的影响,研究结果可为髌关节有限元分析提供参考和借鉴。此外,本模型也可依据研究内容模拟骨质增生、骨折、骨质疏松、股骨头坏死等疾病,还可为髌关节手术及其他髌关节力学研究提供借鉴^[38]。然而,在建模过程中

并未考虑韧带、肌肉等对髌关节生物力学的影响,故后续需建立完整的髌关节骨骼、软骨、韧带、肌肉等有限元模型。为克服本研究缺乏临床试验验证的局限性,也应将有限元结合实体实验进行对比分析,以求得到更为精确的结果。并且本研究样本量小,后续需更完善且深入地研究。

4 结论

本文基于逆向工程原理建立髌关节有限元模型,所建模型仿真度高。再将所建模型导入有限元分析软件 ANSYS Workbench 设定边界条件,模拟加载负荷,计算单腿站立下的应力及形变分布,结果真实可信。结果表明,通过灰度值定义髌关节模型的材料属性,即根据髌关节 CT 数据灰度值进行梯度赋值,使得髌关节模型材料属性分布更接近骨骼真实的材料属性,更能合理反映髌关节模型的力学性能。

参考文献:

- [1] 王沐楠,安贤俊. 髌关节表面接触应力数学模型的建立及验证[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(6): 2081-2089.
- [2] 郭福运. 髌关节的解剖学分析及其在运动医学中的临床意义[J]. 中国医药导刊, 2012, 14(11): 1923-1925.
- [3] 王晖,王猛. 3D打印个性化髌臼接骨板设计生物力学研究与分析[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2020, 17(6): 41-44.
- [4] 颜继英. 不同材料赋值下股骨静力学有限元模型的力学仿真分析[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(9): 1390-1394.
- [5] 刁小明,尹洪国,朱伟民,等. 人股骨弹性模量与泊松比测定试验研究[J]. 试验技术与试验机, 1998(1): 91-92.
- [6] 张海峰,宋翠荣,庞胤,等. 基于CT数据建立髌关节三维有限元模型的研究[J]. 中国临床医学影像杂志, 2015, 26(9): 667-670.
- [7] 张馨元,丁晓红,段朋云. 基于骨骼材料分布特征的髌关节有限元模型建立及其应力分析[J]. 北京生物医学工程, 2020, 39(5): 462-469.
- [8] 关天民,陈向禹,朱晔,等. 不同材料属性赋予下椎体的静力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(21): 3357-3362.
- [9] 骆健,王立华,王涛,等. 不同材料赋值方法下踝关节三维有限元模型的应力及位移变化[J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(18): 2822-2826.
- [10] 唐勇涛,魏思奇,程刚,等. 基于两种不同建模方式的胫骨有限元对比分析[J]. 中国骨科临床与基础研究杂志, 2016,

- 8(1): 26-32.
- [11] PUSTOCH A, CHEZE L. Normal and osteoarthritic hip joint mechanical behaviour: A comparison study [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2009, 47(4): 375-383.
- [12] 陈凯宁, 农明善, 叶青, 等. 钙化软骨层硬度变化对骨软骨结构应力影响的有限元分析[J]. *中国组织工程研究*, 2019, 23(12): 1881-1886.
- [13] 杨锐敏, 吴文正, 郑永泽, 等. 不同松质骨体积分数影响股骨近端表观力学响应的有限元分析[J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(36): 5765-5770.
- [14] 臧建成, 秦泗河. 从 Wolff 定律和 Ilizarov 张力-应力法则到骨科自然重建理念[J]. *中国骨伤*, 2013, 26(4): 287-290.
- [15] 王颖, 刘志朋, 殷涛, 等. 利用有限元探究内固定治疗股骨颈骨折的生物力学研究[J]. *中国中西医结合外科杂志*, 2019, 25(1): 56-61.
- [16] 王瑞昌, 许平, 鲁宁, 等. 利用有限元方法对髋臼弧形截骨术进行术前规划[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(3): 377-383.
- WANG RC, XU P, LU N, *et al.* Preoperative planning of acetabular arc osteotomy using finite element method [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(3): 377-383.
- [17] 张海峰, 宋翠荣, 赵文涛, 等. 髋关节外展角度对股骨颈应力分布的影响[J]. *生物医学工程学杂志*, 2016, 33(2): 274-278.
- [18] ANDERSON AE, ELLIS BJ, MAAS SA, *et al.* Validation of finite element predictions of cartilage contact pressure in the human hip joint[J]. *J Biomech Eng*, 2008, 130(5): 051008.
- [19] 刘骞, 王万春, 姚长海, 等. 构建 Cam 型髋关节撞击综合征有限元模型及力学分析. *中国组织工程研究*, 2014, 18(40): 6513-6518.
- [20] 赖长青, 李若愚, 何敏聪, 等. “三脚架”手术治疗髋臼转移瘤的临床疗效及生物力学分析[J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(13): 1987-1992.
- [21] DALSTRA M, HUISKES R, VAN ERNING L. Development and validation of a three-dimensional finite element model of the pelvic bone [J]. *J Biomech Eng*, 1995, 117(3): 272-278.
- [22] WRONSKI S, KAMINSKI J, WIT A, *et al.* Anisotropic bone response based on FEM simulation and real micro computed tomography of bovine bone[J]. *Comput Method Biomec*, 2019, 22: S465-S467.
- [23] 金乾坤, 王巍, 何盛为, 等. 股骨有限元模型材料属性分配梯度的优化分析[J]. *中国生物医学工程学报*, 2020, 39(1): 84-90.
- [24] 陈诺, 邱兴, 汪帝, 等. 基于 CT 灰度值赋予材料属性的马拉松运动员髋关节有限元模型建立及其应力分析[J]. *中华医学杂志*, 2022, 102(9): 679-682.
- [25] YANG P, LIN TY, XU JL, *et al.* Finite element modeling of proximal femur with quantifiable weight-bearing area in standing position [J]. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15(1): 384.
- [26] 李静, 杜明珊, 侯文静, 等. 基于 MRI-3D DESS 的自动软骨分割技术在髋关节骨关节炎患者软骨定量评估中的价值[J]. *临床放射学杂志*, 2020, 39(8): 137-142.
- [27] GRECU D, PUCALEV I, NEGRU M, *et al.* Numerical simulations of the 3D virtual model of the human hip joint, using finite element method [J]. *Rom J Morphol Embryol*, 2010, 51(1): 151-155.
- [28] 丁海, 朱振安. 髋臼的解剖形态及生物力学研究进展[J]. *医用生物力学*, 2008, 23(5): 411-414.
- DING H, ZH ZA. Recent advances in anatomy and biomechanics of acetabulum [J]. *J Med Biomech*, 2008, 23(5): 411-414.
- [29] 蔡振存, 朴成哲, 周宏宇, 等. 有限元法分析儿童发育不良髋关节“人”字型固定后的应力特征[J]. *中国组织工程研究*, 2019, 23(36): 5841-5845.
- [30] 王星, 李琨, 马渊, 等. 人与成年猕猴全颈椎有限元模型建立及有效性验证的对比[J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(13): 2022-2027.
- [31] TADDEI F, PANCANTI A, VICECONTI M. An improved method for the automatic mapping of computed tomography numbers onto finite element models [J]. *Med Eng Phys*, 2004, 26(1): 61-69.
- [32] ZHAO XB, MA HJ, GENG B, *et al.* Percutaneous endoscopic unilateral laminotomy and bilateral decompression for lumbar spinal stenosis [J]. *Orthop Surg*, 2021, 13(2): 641-650.
- [33] BERGMANN G, DEURETZBACHER G, HELLER M, *et al.* Hip contact forces and gait patterns from routine activities [J]. *J Biomech*, 2001, 34(7): 859-871.
- [34] 陈国栋, 罗羽婕, 王锐英, 等. 有限元分析在股骨生物力学研究中的应用[J]. *实用医学杂志*, 2011, 27(2): 334-336.
- [35] 王攀, 霍洪峰. 老年人坐立转换时股骨近端应力分布的有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(2): 312-316.
- WANG P, HUO HF. Finite Element analysis on stress distributions of proximal femur in the elderly during sit-to-stand transition [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(2): 312-316.
- [36] 欧阳汉斌, 谢普生, 邓羽平, 等. 基于 CT 灰度赋值的有限元模型建立及其在截骨矫形中的应用[J]. *南方医科大学学报*, 2016, 36(7): 979-983.
- [37] HELGASON B, TADDEI F, PÁLSSON H, *et al.* A modified method for assigning material properties to FE models of bones [J]. *Med Eng Phys*, 2008, 30(4): 444-453.
- [38] 郭苏童, 郭宇, 王凌, 等. 发育性髋关节发育不良患者不同髋关节外展角度下髋部应力分布的有限元分析[J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(27): 4265-4270.