

文章编号:1004-7220(2022)02-0244-06

# 空心钉与锁定钢板治疗股骨颈骨折的振动特性

章浩伟<sup>1</sup>, 徐昕晟<sup>1</sup>, 刘颖<sup>1</sup>, 吴升辉<sup>2</sup>, 梅炯<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 医疗器械与食品学院, 上海 200093; 2. 上海交通大学附属第六人民医院 骨科, 上海 200233)

**摘要:**目的 探讨股骨颈骨折术后植入空心钉及钢板后,髋关节固有和约束模态对内固定的影响。方法 对1名股骨颈骨折患者CT图像数据进行分析,提取髋关节边界生成髋关节三维模型,并建立常用内固定模型与髋关节模型装配,进行有限元仿真,重点分析振动特性。结果 振动对空心钉、钢板的内固定稳定性有一定影响,扭转的发生将破坏空心钉、钢板的固定环境,在骨折断端产生微小位移;在约束状态下,模态频率范围较低,振型的变形多发生在股骨头近端处,导致内固定以及假体发生松动的现象。从振动特性角度提出一种评判内固定稳定性的方法,发现空心钉内固定的稳定性优于近端锁定钢板。结论 选用内固定时需要考虑螺钉、钢板固有频率的影响,避免与股骨的固有频率相近,导致谐振的产生。研究结果对指导内固定材料的选择和结构、排列的设计具有一定借鉴作用。

**关键词:**股骨颈骨折;有限元分析;模态分析;空心螺钉;锁定钢板

中图分类号:R 318.01 文献标志码:A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.02.008

## Vibration Characteristics of Hollow Screws and Locking Plates for Treating Femoral Neck Fractures

ZHANG Haowei<sup>1</sup>, XU Xinsheng<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>, WU Shenghui<sup>2</sup>, MEI Jiong<sup>2</sup>

(1. School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Department of Orthopedics, Shanghai Jiao Tong University Affiliated Sixth People's Hospital, Shanghai 200233, China)

**Abstract: Objective** To investigate the influence from natural and constrained modal of the hip joint on internal fixation after implantation of hollow screws and locking plates for treating femoral neck fractures. **Methods** CT image data of a patient with femoral neck fracture were analyzed, boundary of the hip joint was extracted to generate a three-dimensional (3D) model of the hip joint, and the assembly of common internal fixation models and hip joint models was established. Finite element simulation was then conducted, with focus on vibration characteristics. **Results** Vibration had a certain effect on internal fixation stability of hollow screws and locking plates. The occurrence of torsion would destroy the fixation environment of hollow screws and locking plates, resulting in a small displacement at the fracture end. In a constrained state, the modal frequency range was lower. Deformation of the vibration shape mostly occurred at proximal end of the femoral head, leading to the loosening phenomenon of internal fixation and prosthesis. A method for judging the stability of internal fixation was proposed from the perspective of vibration characteristics, and it was found that the stability of internal fixation with hollow screws was better than that of proximal locking plates. **Conclusions** For choosing internal fixation, influences from natural frequency of the screw and plate should be considered, so as to avoid natural frequency of the femur, which may cause resonance. The results can be used as a guidance for the selection of internal fixation materials and the design of structure and configuration.

**Key words:** femoral neck fracture; finite element analysis; modal analysis; hollow screw; locking plate

收稿日期:2021-03-04; 修回日期:2021-04-07

通信作者:梅炯,主任医师,博士生导师,E-mail:meijiong@sjtu.edu.cn

股骨颈骨折是骨科临床常见损伤,约占全身骨折 3.6%,髌部骨折 53%。其治疗费用高昂,并发症严重,是影响各国的重大公共卫生问题。对青壮年股骨颈骨折患者而言,内固定手术一直是治疗首选。3枚平行的部分螺纹空心螺钉 (partially-threaded cannulated screws, PTCS) 固定是现今临床常用的内固定方式之一<sup>[1-2]</sup>。大量临床及生物力学研究表明,3枚 PTCS 在股骨颈骨折治疗中能取得较好的效果。对于骨质较好的年轻股骨颈骨折患者,建议使用 3枚平行的 PTCS 固定,并采用倒三角构型<sup>[3]</sup>。股骨近端锁定钢板 (proximal femur locking plate, PFLP) 作为角度固定及长度稳定的固定方案,可以减少股骨颈骨折固定术后股骨颈短缩的问题;在生物力学方面,PFLP 固定能增强轴向刚度,抗剪切力和抗张力均得以增强,减少骨折端微动。因此,本文以临床常用的 PTCS 和 PFLP 作为内固定研究对象。

股骨颈骨折的静力学研究对于骨折术后内固定及股骨结构和强度研究具有一定的借鉴意义。人体多数时候均处在运动状态,故探讨股骨的动态及振动特性显得尤为重要。而将模态分析作为动力学分析的基础运用于生物力学研究中,对进一步的动力学特性分析具有指导作用。研究显示,施加接近股骨共振频率的动态载荷可以促进骨愈合<sup>[5]</sup>。骨骼的振动特性(固有频率和固有振型)可以用于表征股骨的正交各向异性,用于验证股骨有限元模型中的密度-弹性材料关系<sup>[6]</sup>。模态分析还可以应用于检测空心螺钉、钢板的松动以及测量和监测脊柱的结构特征<sup>[7]</sup>。考虑到不同患者具有不同的固有频率,模态分析对于生物力学研究而言十分必要。

本文利用有限元仿真技术研究模态分析在股骨颈骨折中的应用,其中重点探讨空心螺钉、锁定钢板两种常用固定方式以及髌关节固有和约束模态对骨折术后内固定稳定性的影响,从模态分析和振动特性角度分析内固定失效的因素。研究结果有助于指导内固定的选用与设计,为进一步的振动实验和动力学特性仿真提供参考。

## 1 对象和方法

受试对象为 1 名就诊于上海市第六人民医院

股骨颈骨折女性患者(年龄 65 岁,体重 60 kg)。共采集 737 张 CT 图像,分辨率为 512×512,层厚为 0.781 mm。患者股骨颈骨折类型根据 Pauwels 分型为 Pauwels II 型。

采用整合多种图像分割算法的 Mimics 20.0 软件进行图像分割,分割结果以蒙板的形式储存。以 DICOM 格式 (RA64) 导入 Mimics 20.0 中,通过滤波处理等增强对比度的方法对图像进行预处理,便于图像分割操作。之后找出骨骼对应的合适阈值,对骨骼进行边界提取,将骨骼与其他组织区分开。勾勒区域边界后建立蒙版,填充勾勒区域并逐层检查填充区域,在填充区域局部出现的孔洞可采用手工填充。为了后续建立骨骼模型的便利,采用不同骨骼单独建模的方法。不同骨骼选取不同颜色的模板填充,则最后的三维模型生成就能够建立独立的各个骨骼。建立的骨骼模型会出现表面粗糙,有尖角突起的地方,通过 Geomagic Studio 2015 对模型进行打磨等处理,减少网格数量,提高网格质量和质量准确性。再通过精确曲面功能构造曲面片和格栅,最后拟合曲面构建出三角面片。在曲面阶段构建 NURBS 曲面片,完成髌骨模型的实体化,输出为 IGES 格式导出至 NX Nastran 1899 中,建立三维有限元模型及有限元仿真。

在 NX Nastran 1899 中对三维模型进行三角形网格划分。为了能满足有限元精度的要求,3D 网格类型选用 CTETRA (10) 的正四面体类型,单元尺寸为 2 mm,空心钉的网格单元尺寸为 1 mm。共得到包括髌骨、股骨、髌关节软骨和空心钉的三维有限元模型。对有接触的两构件,包括关节软骨与股骨、关节软骨与髌臼、空心钉与股骨的接触界面进行网格的配准与对齐,防止在仿真过程中出现网格的嵌插,影响仿真结果的准确性。在 Mimics 20.0 中,依据 CT 灰度值 (grey value, GV) 不同,针对骨骼分别赋予材质,具体赋值公式为 Mimics 软件提供的经验公式:

$$\rho = -13.4 + 1017 GV (\text{g}/\text{m}^3)$$

$$E = -388.8 + 5925 \rho (\text{Pa})^{[8]}$$

式中: $\rho$  为骨骼表观密度;GV 为灰度值; $E$  为骨骼弹性模量。泊松比为 0.3<sup>[9]</sup>。空心钉的材料选择使用 NX Nastran 材料库中的钛合金 (titanium alloy)。最后,将材料赋值后的有限元模型导入 NX 1899 的高

级仿真 sim 文件中,进行模态分析。股骨颈骨折有限元模型如图 1(a)所示,3种常用内固定的模型如图 1(b)~(d)所示。

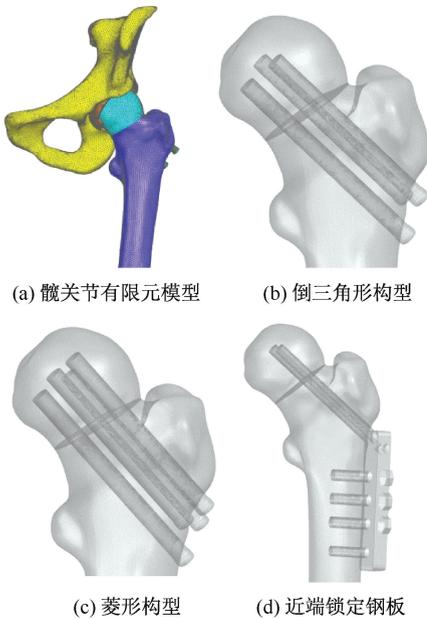


图1 髋关节有限元模型和股骨颈骨折3种内固定方式

**Fig.1 Hip joint finite element model and three types of internal fixation for femoral neck fractures** (a) Finite element model of hip joint, (b) Inverted triangle configuration, (c) Rhomboid configuration, (d) Proximal locking plate

模态分析求解的基本思想是求解振动方程的特征值问题<sup>[10]</sup>,即

$$[M][\ddot{t}] + [C][\dot{t}] + [K][t] = 0$$

式中:  $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$  分别为质点系的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $[\ddot{t}]$ 、 $[\dot{t}]$ 、 $[t]$  分别为质点的加速度、速度和位移矢量<sup>[11]</sup>。本文视股骨模型为无阻尼的振动系统<sup>[12]</sup>,即  $[C] = 0$ , 则公式简化为:

$$[M][\ddot{t}] + [K][t] = [0]$$

其解为:  $\{x\} = \{\cdot\} = h(t)$ , 得到的齐次方程为:

$$[K] - \omega^2[M][\Phi] = [0]$$

NX 高级仿真中求解模态分析的结算类型为 SOL 103 Real Eigenvalues。通常来说,结构前几阶模态对结构的动力性能影响极大,如第 1 阶模态导致部件产生最大的变形,故进行结构模态有限元分析时,只需计算前几阶的模态即可。设置 Lanczos

值为 10,即求解模型的前 10 阶固有频率。对模型所有两两接触的边界设置接触、黏合条件后,选择仿真求解。

## 2 结果

模态分析通常通过结构的振型和固有频率评价结构本身的固有特性,振型能提供一种直观的结构振动状态<sup>[13]</sup>;且固有频率不仅在骨科临床上常用于评价骨折愈合、骨质疏松症等状态,还可以用于分析人工植换假体后引起髋臼磨损脱位、不贴合、松动和长期无法愈合等不良反应<sup>[14]</sup>。

对股骨颈骨折各内固定钉的固有、约束模态分析后,在 NX 结果处理器中查看仿真结果,并分析股骨的模态振型和模态频率。图 2 所示为倒三角形排列方式下,股骨的前 6 阶固有模态振型。

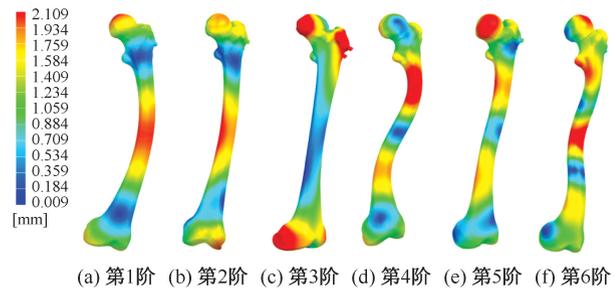


图2 倒三角形内固定排列下股骨前6阶固有模态振型

**Fig.2 First 6-order vibration shape of the femur in the inverted triangle internal fixation configuration** (a) 1<sup>st</sup> natural mode, (b) 2<sup>nd</sup> natural mode, (c) 3<sup>rd</sup> natural mode, (d) 4<sup>th</sup> natural mode, (e) 5<sup>th</sup> natural mode, (f) 6<sup>th</sup> natural mode

从各振型的位移云图可以看出,股骨的振型主要以弯曲为主。其中,第 1 阶振型为 ZOX 面的 1 阶弯曲,第 2 阶振型为 ZOY 面的 1 阶弯曲,第 3 阶振型为 XOY 面的 1 阶扭转,第 4 阶振型为 ZOX 面的 2 阶弯曲,第 5 阶振型为 ZOY 面的 2 阶弯曲,第 6 阶振型为 XOY 面的 2 阶扭转。在前 2 阶的振动中,股骨干出现较大的变形,会导致低频振动位移时对股骨干造成一定影响。在第 3 阶的振动中发生了扭转,股骨头处出现明显的扭转变形,该变形会破坏空心钉固定的稳定性,对螺钉固定和股骨颈骨折的骨愈合以及内固定失效造成较大的影响。

图 3 所示为不同内固定方式下股骨颈骨折断

端的变形情况。从不同内固定方式的模态分析位移云图可以发现,倒三角形排列的空心钉内固定时,在 270.738~842.661 Hz 频率范围内股骨对模态响应较敏感; $f=577.001$  Hz 时,由于股骨头近端出现扭转,股骨颈断端发生微小位移。菱形排列的空心钉内固定时,在 269.522~841.266 Hz 频率范围内股骨对模态响应较敏感; $f=572.653$  Hz 时,股骨颈断端出现移位。近端锁定钢板内固定时,在 536.897~847.423 Hz 频率范围内股骨对模态响应较敏感; $f=536.897$  Hz 时,股骨颈断端出现移位。股骨颈骨折断端出现位移都在第 3 阶振型开始,由于第 3 阶振型是股骨头近端的第 1 阶扭转,对内固定的稳定性将造成一定影响。第 4~5 阶振型为发生于股骨干的弯曲变形,股骨颈断端的位移变化不显著。第 6~10 阶振型起,最大变形通常发生于股骨头近端,股骨颈断端的位移、变形变化很大,股骨近端的大变形通常会导致内固定的螺钉、锁定钢板、假体发生松动和不贴合的危险。锁定钢板在第 3 阶振型时,已出现明显的断端处位移,在更高阶的振型中随着位移的增大,已导致由振动产生的内固定失效现象的产生。因此,实验结果从模态分析和振动特性角度,验证了锁定钢板的内固定强度低于空心钉内固定,易造成内固定失效。

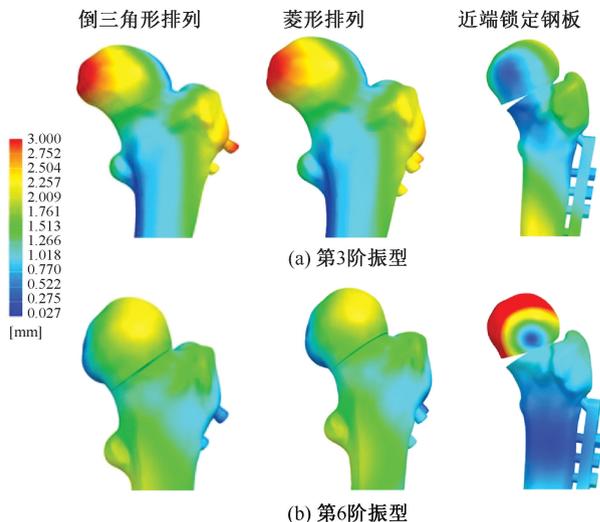


图3 不同内固定方式下股骨颈骨折断端变形情况

Fig.3 Deformation at the fracture of the femoral neck fracture under different internal fixation methods

(a) 1<sup>st</sup> natural mode, (b) 6<sup>th</sup> natural mode

通过约束模态分析,可以得到各模型在约束状态下的模态频率及模态振型。以锁定钢板为内固定的约束模态分析为例,振型如图 4 所示。从约束模态分析的位移云图可以看出,在约束状态下,第 1 阶振型为  $ZOX$  面的 1 阶弯曲,第 2 阶振型为  $ZOX$  面的 2 阶弯曲,第 3 阶振型为  $XOY$  面的 1 阶扭转,第 4 阶振型为  $ZOY$  面的 1 阶弯曲,第 5 阶振型为  $XOY$  面的 2 阶扭转,第 6 阶振型为  $ZOY$  面的 2 阶弯曲。约束状态下,模型的模态频率变小,提示在更低的频率段范围内更易发生共振或谐振的现象。例如:患者在日常生活中,接触到常用机械装置(如乘坐汽车、飞机、船舶等交通工具),接触某些处于待机或工作状态下产生振动的机械装置(如按摩椅、家用电器等电子元件),或在康复过程中需要运用到振动帮助康复的设备时,都有可能产生谐振、共振。谐振会导致内固定与骨界面微动会明显加剧,从而导致内固定松动以及内固定的失效。每一模态振型中大变形都发生在股骨头近端,更易导致空心钉、钢板等内固定发生松动、不贴合的现象,影响内固定的稳定性,以及骨愈合的效果。

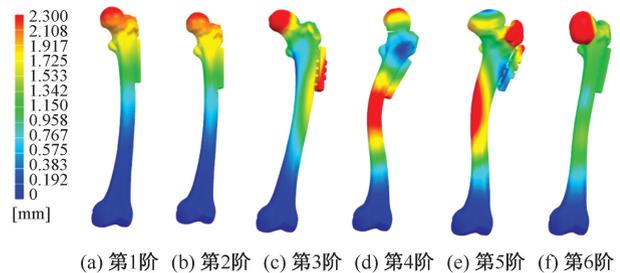


图4 锁定钢板内固定方式下股骨前 6 阶约束模态振型

Fig.4 First 6-order constrained modes of the femur by proximal locking plate internal fixation (a) 1<sup>st</sup> natural mode, (b) 2<sup>nd</sup> natural mode, (c) 3<sup>rd</sup> natural mode, (d) 4<sup>th</sup> natural mode, (e) 5<sup>th</sup> natural mode, (f) 6<sup>th</sup> natural mode

### 3 讨论

本文使用 Mimics 20.0 软件将 1 例股骨颈骨折病例 CT 影像 DICOM 数据进行三维重建,获得髋关节三维模型,并利用 Geomagic Studio 2015 软件进行三角面片优化、光顺。使用 UG 三维建模软件创建、装配常用内固定方式的空心螺钉、锁定钢板于股骨

大转子区固定骨折断端。利用NX Nastran 1899完成四面体网格划分,获得质量较好的有限元模型,且利用灰度值赋予材料属性,获得较为准确的材料分布特性,最后应用NX Nastran 1899分别对股骨颈骨折伴有倒三角形排列、菱形排列的空心螺钉内固定及近端锁定钢板内固定的模型进行模态振动仿真计算,提取出股骨的固有、约束6阶振型频率。

本文基于模态分析中得到骨折后各模型在固有、约束状态下模态振型和模态频率,其中模态频率的对比见表1。从分析结果可知,振动对空心钉、钢板等内固定的稳定性有一定影响。发生第1阶

表1 常用内固定方式股骨不同振型频率对比

Tab.1 Mode frequency comparison of the femur by common internal fixation

阶数	固有振型频率/Hz			约束振型频率/Hz		
	倒三角形排列	菱形排列	近端锁定钢板	倒三角形排列	菱形排列	近端锁定钢板
1	234.673	233.875	234.348	52.293	51.464	50.003
2	270.738	269.522	269.132	57.544	56.626	55.100
3	577.001	572.653	536.897	361.103	358.605	311.887
4	787.968	787.306	792.746	435.375	434.236	427.309
5	842.661	841.266	847.423	481.159	476.445	457.967
6	1633.760	1610.870	1278.690	1022.280	1016.470	942.488

Chiu等<sup>[15]</sup>研究在髓内钉和板式固定两种类型固定方式下,使用模态分析确定内固定作用下振动与骨愈合的关系。结果发现,380~440 Hz频率范围对骨愈合较敏感。在骨愈合前期阶段,当 $f=380$  Hz时,股骨断端出现破损,与本文中股骨颈断端出现破损的现象得到了验证。姜海波等<sup>[10]</sup>通过对股骨的振型分析发现,振动对置换假体的稳定性有一定影响,且从第5阶振型开始,最大振动位移位置上升到近骨端。髋关节的振型分析与文献<sup>[12,16]</sup>的仿真结果一致。提取前4阶的振动频率,根据本文所得到的振动频率段与国内外文献<sup>[12,17-18]</sup>进行比较。结果表明,前2阶的固有频率与各文献的结果较为接近,该频率段也是最容易发生谐振的低频率段;第4阶频率与文献<sup>[17]</sup>的计算结果较为接近(见图5)。考虑到股骨模型、计算方法、材料设置等存在个体差异性,总体结果较接近,故本文通过NX Nastran仿真得到的各模型模态频率与模态振型结果可以被参考。髋关节的固有频率和振型直接影响人体下肢在遭受外界载荷时的动态响应,为避免发生共振,应尽量使人体所

扭转时,股骨颈骨折断端发生微小位移;随着阶数增加,断端的变形将扩大,第6阶振型开始有明显的变形/位移的产生。从锁定钢板的模态分析中可以明显看出内固定的失效,而空心螺钉的振动特性明显优于锁定钢板,故从模态分析角度解释了内固定失效的因素。在约束状态下,模态频率的范围降低,低频振动的影响将变得显著,更易发生共振/谐振,且模态振型通常发生在股骨头的近端处,将显著影响骨愈合以及内固定的稳定性,使内固定以及假体发生松动的现象。因此,股骨颈骨折患者在植入内固定后,尤其是在植入锁定钢板的情况下,更应避免术后不必要的运动。

处环境的外界振动频率远离本文所测定的股骨固有频率。本文建议,在选择内固定、假体材料时,除了考虑生物相容性和固定方式外,还需考虑内固定钉、钢板与股骨固有频率之间的关系,避免产生谐振、共振,这有助于避免因振动引起的内固定松动、失效以及长期无法愈合现象。

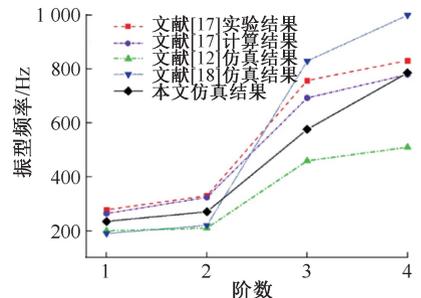


图5 各模型前4阶频率比较

Fig.5 Comparison of the first four-order frequencies for each model

本文的局限性如下:①仅分析1例Pauwels II型股骨颈骨折病例,欠缺对其余骨折类型、内固定方式(近端锁定钢板等)的模态分析,且参与分析的病例

和样本数较少;② 所建模型简化股骨颈短缩、嵌插所造成的骨与骨之间滑移问题;③ 模态分析结果缺少振动实验部分的验证。因此,在后续的研究中,将扩大参与分析的骨折类型、内固定方式以及分析样本,并设计振动实验台,将实验结果与仿真结果相验证。同时,以模态分析为基础,进行更详细的动力学分析,如瞬态动力学分析、频谱分析、频响分析等<sup>[19]</sup>。

## 4 结论

本文从振动特性角度分析股骨颈骨折患者术后伴有空心钉及锁定钢板的内固定稳定性。研究结果发现,振动中扭转的发生会首先破坏内固定钉、钢板的内固定环境及其稳定性;随着阶数的增加,近端锁定钢板将更易出现内固定失效的风险。因此,本文建议选用内固定时需要考虑内固定钉、钢板以及股骨固有频率的影响,避免与内固定产生共振与谐振,发生内固定不贴合的现象,导致由振动引起的内固定失效的风险;患者在术后康复过程中,要注意避免日常生活中与中低频率段机械设备的接触。模态振型与频率段的研究结果对指导内固定材料的选用和结构、排列的设计有一定借鉴作用,且在后续动力学领域的研究中,能作为动力学分析的研究基础。

## 参考文献:

[ 1 ] GJERTSEN JE, FEVANG JM, MATRE K, et al. Clinical outcome after undisplaced femoral neck fractures [ J ]. *Acta Orthopaedica*, 2011, 82(3): 268-274.

[ 2 ] 张长青, 张英泽, 余斌, 等. 成人股骨颈骨折诊治指南 [ J ]. *中华创伤骨科杂志*, 2018, 20(11): 921-928.

[ 3 ] SLOBOGEAN GP, SPRAGUE SA, SCOTT T, et al. Management of young femoral neck fractures: Is there a consensus [ J ]. *Injury*, 2015, 46(3): 435-440.

[ 4 ] CAMPOLI G, WEINANS H, HELM F, et al. Subject-Specific modeling of the adaptation of the scapula bone tissue [ J ]. *J Biomech*, 2013, 46(14): 2434-2441.

[ 5 ] ZHAO LM, DODGE T, NEMANI A, et al. Resonance in the mouse tibia as a predictor of frequencies and locations of loading-induced bone formation [ J ]. *Biomech Model Mechan*, 2014, 13(1): 141-151.

[ 6 ] MARCO C, JÖRN R. Vibration exercise makes your muscles and bones stronger: Fact or fiction? [ J ]. *J Br Menopause Soc*, 2006, 12(1): 12-18.

[ 7 ] SCHOLZ R, HOFFMANN F, SACHSEN S, et al. Validation of density-elasticity relationships for finite

element modeling of human pelvic bone by modal analysis [ J ]. *J Biomech*, 2013, 46(15): 2667-2673.

[ 8 ] CIARELLI MJ, GOLDSTEIN SA, KUHN JL, et al. Evaluation of orthogonal mechanical properties and density of human trabecular bone from the major metaphyseal regions with materials testing and computed tomography [ J ]. *J Orthop Res*, 1991, 9(5): 674-682.

[ 9 ] LENGSELD M, SCHMITT J, ALTER P, et al. Comparison of geometry-based and CT voxel-based finite element modelling and experimental validation [ J ]. *Med Eng Phys*, 1998, 20(7): 515-522.

[ 10 ] 姜海波, 葛世荣. 基于 CT 扫描人体股骨的有限元分析 [ J ]. *工程力学*, 2007, 24(10): 156-159.

[ 11 ] 高晓娟, 储照伟, 李文言, 等. 变频振动训练对功能性踝关节不稳的影响 [ J ]. *医用生物力学*, 2020, 35(6): 685-691.

GAO XJ, CHU ZW, LI WY, et al. Effects of vibration training with adjusted frequency on functional ankle instability [ J ]. *J Med Biomech*, 2020, 35(6): 685-691.

[ 12 ] 尚鹏, 闫贺庆, 王成焘. 基于个体材料和几何特性的人体股骨振动模态分析 [ J ]. *上海交通大学学报*, 2003, 37(2): 99-101.

[ 13 ] 王海妹, 谢地, 马旭, 等. 踝关节贴扎在优势侧落地动作中对膝关节生物力学特性的影响 [ J ]. *医用生物力学*, 2020, 35(6): 679-684.

WANG HM, XIE D, MA X, et al. Effects of ankle taping on knee biomechanics during dominant-legged drop landing [ J ]. *J Med Biomech*, 2020, 35(6): 679-684.

[ 14 ] 梁振, 欧阳汉斌, 郑鸿, 等. 胸腰段骨质疏松椎体的模态分析 [ J ]. *医用生物力学*, 2020, 35(4): 422-427.

LIANG Z, OUYANG HB, ZHENG H, et al. Modal analysis of thoracolumbar osteoporotic vertebral bodies [ J ]. *J Med Biomech*, 2020, 35(4): 422-427.

[ 15 ] CHIU WK, ONG WH, RUSS M, et al. Simulated vibrational analysis of internally fixated femur to monitor healing at various fracture angles [ J ]. *Procedia Eng*, 2017, 188: 408-414.

[ 16 ] 韩树洋, 葛世荣. 人工全髋关节置换术对天然股骨生物力学行为的影响 [ J ]. *医用生物力学*, 2010, 25(6): 471-474.

HANG SY, GE SR. Effect of total hip arthroplasty on biomechanical behavior of natural femur [ J ]. *J Med Biomech*, 2010, 25(6): 471-474.

[ 17 ] COUTEAU B, HOBATHO MC, DARMANA R, et al. P041 Experimental and numerical modal analysis of a normal and implanted human femur [ J ]. *J Biomech*, 1998, 31(S1): 75-75.

[ 18 ] 陈龙, 张军洋. 基于 CT 股骨有限元模型精确重建及模态分析 [ J ]. *计算机仿真*, 2014, 31(2): 280-283.

[ 19 ] 项斌, 都承斐, 赵美雅, 等. 全腰椎有限元模态分析 [ J ]. *医用生物力学*, 2014, 29(2): 154-160.

XIANG P, DU CF, ZHAO MY, et al. Modal analysis of human lumbar spine using finite element method [ J ]. *J Med Biomech*, 2014, 29(2): 154-160.