

精细化股骨粗隆间骨折 PFNA 内固定术 三维有限元模型的构建*

陈焕青¹, 易陈鹏¹, 葛辉², 陈帅^{1,2}, 焦锋^{2,3}

(1. 广州中医药大学, 广东 广州 510405; 2. 广州市中西医结合医院, 广东 广州 510800;
3. 焦锋广东省名中医传承工作室, 广东 广州 510800)

摘要: **目的** 建立精细化股骨粗隆间骨折股骨近端防旋髓内钉 (PFNA) 内固定术的三维有限元模型, 为股骨粗隆间骨折的力学研究提供研究基础。**方法** 基于研究对象的 CT 数据, 应用数字化三维重建、CAD、逆向工程、有限元生物力学分析等技术, 建立股骨粗隆间骨折股骨近端防旋髓内钉 (PFNA) 内固定术的三维有限元模型, 并验证模型的有效性。**结果** 建立了正常人的股骨粗隆间骨折 PFNA 内固定术三维有限元模型, 经检验本研究所建立的模型具有应用价值, 可用于股骨的力学研究。**结论** 本研究建立的粗隆间骨折 PFNA 内固定术的三维有限元模型, 充分考虑了软骨, 韧带, 肌肉, 应力接触点等对股骨的力学影响, 模型更加接近人体实际, 其力学研究结果更具有参考意义。

关键词: 粗隆间骨折; 股骨近端防旋髓内钉; 生物力学; 有限元

中图分类号: R683.42

Construction of a refined three-dimensional finite element model for PFNA internal fixation of intertrochanteric fracture of femur*

CHEN Huanqing¹, YI Chenpeng¹, GE Hui², CHEN Shuai^{1,2}, JIAO Feng^{2,3}

(1. Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou, Guangdong 510405, China; 2. Guangzhou Hospital of Integrated Traditional Chinese Medicine and Western Medicine, Guangzhou, Guangdong 510800, China;
3. Jiao Feng Guangdong Provincial Famous Traditional Chinese Medicine Inheritance Studio, Guangzhou, Guangdong 510800, China)

Abstract: **[Objective]** The three-dimensional finite element model of PFNA internal fixation of intertrochanteric fracture of femur was established to provide a research basis for the mechanical study of intertrochanteric fracture of femur. **[Methods]** Based on the CT data of the study object, the three-dimensional finite element model of PFNA internal fixation of intertrochanteric fracture of femur was established by applying digital three-dimensional reconstruction, CAD, reverse engineering, finite element biomechanical analysis and other technologies, and the effectiveness of the model was verified. **[Results]** A three-dimensional finite element model for PFNA internal fixation of intertrochanteric fracture of femur in normal people was established. The model established in this study has practical value and can be used for the mechanical study of femur. **[Conclusion]** The three-dimensional finite element model of PFNA internal fixation for intertrochanteric fracture established in this study fully considers the mechanical effects of cartilage, ligament, muscle, stress contact point, etc., on femur. The model is closer to the actual human body, and the mechanical research results are more significant for reference.

Keywords: intertrochanteric fracture; proximal femoral nail antirotation; biomechanics; finite element

股骨粗隆间骨折是常见的髋部骨折, 占有 髋部骨折的 60%~70%^[1], 占全身骨折的

收稿日期: 2023-09-23

*基金项目: 广东省中医药局科研项目 (20222175); 省级医疗卫生健康事业发展(传承发展中医药事业)-广东省中医师承"薪火工程"项目(粤中医[2021]5号); 广州市花都区科技计划项目 (21-HDWS-068); 广州市中西医结合医院广州市中医高水平重点专科(骨伤科)建设项目

[通信作者] 焦锋, E-mail: doctor_jiaofeng@126.com

3.58%^[2]，多数由低能量间接暴力引起，骨质疏松是其常见的危险因素。粗隆间骨折的死亡率非常高，文献表明粗隆间骨折的死亡率在 15%~30% 左右^[3]。为了提高患者生存质量，减低死亡率，手术是临床治疗股骨粗隆间骨折的主要手段。既往以动力髋螺钉（dynamic hip screw, DHS）内固定为主，随着微创技术的发展，近年来，股骨近端防旋髓内钉（proximal femoral nail antirotation, PFNA）内固定逐渐取代传统内固定应用于股骨粗隆间骨折的治疗。其具有操作简单，创口小，固定更稳定等优势。但随着 PFNA 应用的增多，主钉断裂、股骨头颈切割、螺旋刀片松动等相关问题也不断出现^[4]。因此，如何让 PFNA 内固定获得良好的力学稳定性已成为大家关注的重点。

有限元分析技术具有可模拟复杂边界条件、力学性能测试全面及重复性好等优点，已广泛应用于股骨的生物力学研究^[5]。笔者回顾文献发现，既往建立的 PFNA 内固定三维有限元模型，未对骨盆进行建模，直接将力加载在股骨头上，也未考虑软骨、韧带、肌肉对髋部应力的影响，无法真实的反应髋部应力情况^[6-7]。针对以上不足，本研究应用数字化三维重建、CAD、逆向工程、有限元生物力学分析等技术建立精细化股骨粗隆间骨折 PFNA 内固定术三维有限元模型，为 PFNA 内固定的力学研究提供研究基础。

1 资料与方法

1.1 一般资料

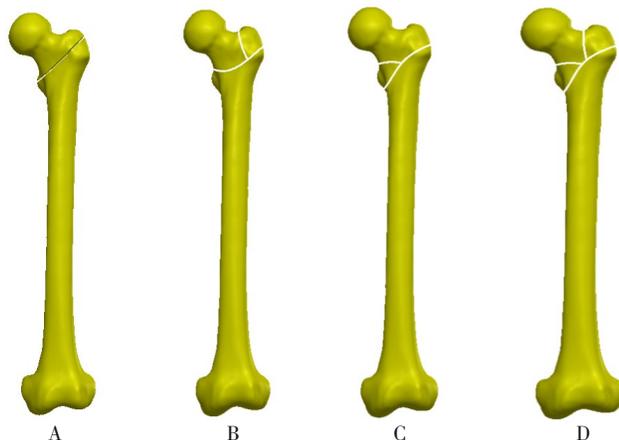
1.1.1 模型数据来源 选取 3 名健康青年志愿者，无髋关节相关疾病史；志愿者知情同意，并签署知情同意书。采用 64 排螺旋 CT 机（德国西门子

股份公司）沿目标股骨干长轴方向进行扫描，范围覆盖骨盆及股骨全长，扫描层距为 1 mm，层厚 0.625 mm，图像像素为 512×512，以医学数字成像和通信（digital imaging and communications in medicine, DICOM）标准格式存储。

1.1.2 软件设备 Mimics 14.1 软件（比利时 Materialise 公司），Geomagic Studio 2013（美国 Geomagic Inc.），Geomagic Design X 软件（美国 Geomagic Inc.），Solidworks 2014（美国 Dassault Systemes S. A.），Abaqus V6.10（美国 Dassault Systemes S.A.），Rexcan CS+3D 激光扫描仪（韩国 Solutionix 公司），PFNA（Synthes 公司）。

1.2 模型构建

1.2.1 股骨粗隆间骨折三维模型的建立 将研究者的 CT 数据导入 Mimics 软件，通过 Thresholding, Region Growing, Edit Masks 和 Calculating 3D 等功能，重建出包括髌骨松质骨，髌骨皮质骨，股骨松质骨和股骨皮质骨的三维模型，然后利用 Smoothing 和 Wrap 等功能对三维模型进行初步优化处理，并导出 STL 格式文件。导入 Geomagic Studio 软件进一步行光滑、网格划分、轮廓探测及拟合曲面等处理，导出 IGS 格式文件。将文件导入 Solidworks 软件，应用拉伸切除功能，进行股骨粗隆间骨折的模拟，建立股骨粗隆间骨折的三维模型，根据 Evans-Jensen 分型骨折线的位置对股骨三维模型进行分割，模拟 5 种不同的骨折类型，见图 1。Evans-Jensen 分型的 I 型、II 型的骨折线位置相同，只有移位非移位之分，在模拟 PFNA 内固定术时，本研究假设骨折已经达到完全复位，因此只需要对其中一种骨折类型进行模拟即可。



A: I、II型；B: III型；C: IV型；D: V型。

图 1 Evans-Jensen 分型粗隆间骨折模拟示意图

1.2.2 PFNA 三维实体模型建立 应用 3D 激光扫描仪扫描 Ao PFNA 内固定实体，建立 PFNA 的点云数据，保存为 STL (stereolithography) 格式。将点云数据导入 Geomagic Design X 软件，进入“点云模块”，应用“过滤杂点”、“平滑”等功能对点云数据进行优化，然后应用“构造曲面”功能将 PFNA 的点云数据制作成曲面模型。再应用

Geomagic Design X 软件的曲面片模块的“平滑”、“穴填补”、“面片优化”、“包裹”等功能对 PFNA 的曲面数据模型进行优化，制作成精细的曲面数据模型。然后应用“变换实体”把曲面数据模型转换成三维实体数据模型，见图 2，保存为 IGS 格式。

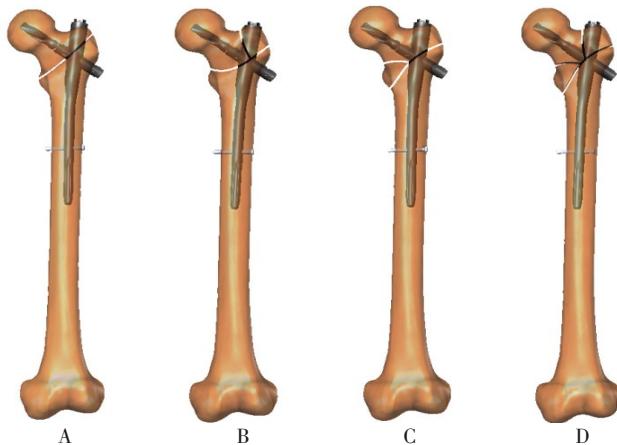


A: 螺旋刀片; B: 主钉。

图 2 PFNA 螺旋刀片、主钉三维实体数据模型图

1.2.3 粗隆间骨折 PFNA 内固定术三维模型建立 将上述建立的 4 种粗隆间骨折与 PFNA 内固定器械的三维模型导入到 Solidworks 软件，进入到“对齐”功能模块，应用“手动对齐”功能，根据标

准的 PFNA 植入位置，将 PFNA 内固定器械植入到股骨粗隆间骨折三维模型中，模拟股骨粗隆间骨折复位 PFNA 内固定术，见图 3。

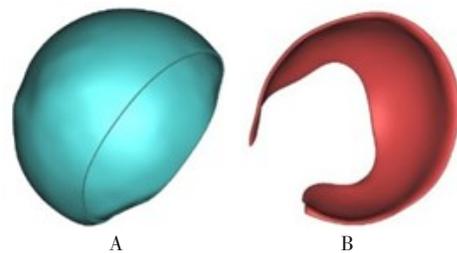


A: I、II型; B: III型; C: IV型; D: V型。

图 3 粗隆间骨折 PFNA 内固定术模拟图

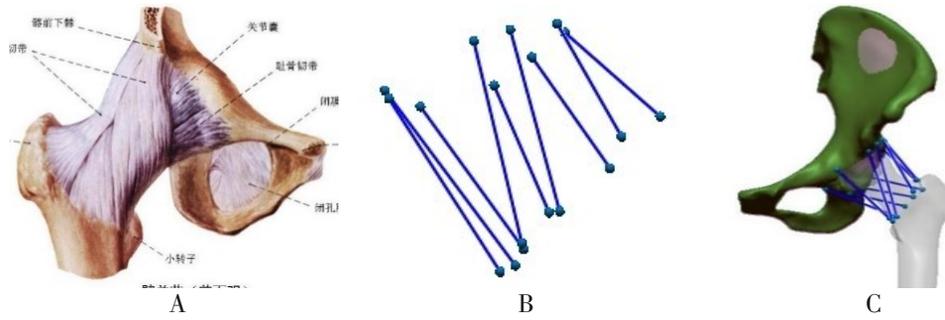
1.2.4 关节软骨、韧带、肌肉三维模型的建立 根据髌臼、股骨头软骨的厚度和关节间隙，应用 Geomagic Design X 软件的“曲面偏移”、“赋厚”、“圆角”、“布尔运算”等功能建立髌臼、股骨头软骨三维模型，见图 4。将骨盆与股骨的骨性结构三维模型导入到 Solidworks 软件中，根据髌关节韧带的解剖结构确定韧带的起点、终点与三维形态，应用“3D 草图”功能绘制韧带的三维结构，建立韧带的三维模型，见图 5。根据髌关节韧带的解剖学结构和生物力学特性，应用 Abaqus 软件桁架 (truss) 模型模拟关节韧带。基于髌关节肌肉的解剖结构与生物力学特点，应用 Abaqus 软件的创建连接模块的轴 (axial) 模拟髌关节 7 条主要肌肉 (大收肌、梨状肌、臀小肌、臀中肌、长收肌、阔

筋膜张肌、臀大肌)。根据 SVERDLOVA 等^[8]报道的肌力和肌肉横断面面积关系，估算站立位关节周围 7 条肌肉的肌力大小见表 1，在 Abaqus 软件进行肌力赋值。



A: 股骨头软骨; B 髌臼软骨。

图 4 股骨头软骨、髌臼软骨的三维模型



A: 髋关节韧带的解剖结构; B: 韧带的三维实体模型; C: 图像融合后的髋关节模型。

图 5 髋关节韧带三维 truss 模型图

表 1 髋关节 7 条主要肌肉的肌力 (N)

肌肉	肌力
长收肌	560
大收肌	600
臀大肌	550
臀中肌	700
臀小肌	300
梨状肌	500
阔筋膜张肌	300

1.2.5 三维有限元模型的网格划分与材料属性赋值 进入 Abaqus 有限元分析软件的“Mesh”模块，应用“Seed Part Instance”、“Mesh Part Instance”等功能对上述建立的骨盆、股骨、韧带、关节软骨、腓骨、螺钉等组件进行网格划分，网格类型采用二次四面体网格 (C3D10)。进入 Abaqus 软件的“Property”模块，应用“Create Material”等功能，给上述的骨盆、股骨、韧带、软骨的三维模型，赋予各项同性匀质材料属性。具体赋值如表 2 所示^[9-13]。

表 2 有限元模型的材料属性

组件	弹性模量	泊松比
AO PFNA	110 000.0	0.30
髌骨皮质骨	15 100.0	0.30
髌骨松质骨	445.0	0.22
软骨	10.5	0.45
韧带	12.4	0.40
腓骨	15 100.0	0.30
股骨皮质骨	15 100.0	0.30
股骨松质骨	445.0	0.22

1.2.6 三维有限元模型的边界条件设置与力学加载 进入到 Abaqus 软件的“Interaction”模块，“Create Interaction”、“Create Interaction Property”、“Create Constraint”等功能，将髌骨的髌股关节和耻骨联合定义为完全约束；关节定义为无摩擦接

触 (Smooth)。韧带、肌肉与骨表面定义为捆绑 (Tie) 约束，植入物与宿主骨之间的接触定义为摩擦系数为 0.6 的摩擦接触，骨折断端的接触关系定义为摩擦系数 0.46 的摩擦接触，各接触关系见表 3^[14-17]。进入到“Load”模块，应用“Create Load”等功能进行力学加载。

表 3 髋关节模型各个接触关系

接触对	接触类型 or 摩擦系数
植入物与周围骨质	0.3
关节面	光滑(Smooth)
韧带与骨	捆绑(Tie)
肌肉与骨	捆绑(Tie)
骨折断端	0.46

2 结果

2.1 三维模型几何验证

基于研究对象的 CT 影像学资料，成功建立了股骨粗隆间骨折 PFNA 内固定术的三维有限元分析模型，该模型包含骨盆、股骨、关节软骨、韧带和肌肉等结构，共有 756 774 个网格单元、512 560 个节点。本模型对髋关节的形态、结构高度还原，仿真度极高，见图 6。



图 6 粗隆间骨折 PFNA 内固定术三维有限元模型

2.2 三维模型力学结果验证

等效于体重 700 N 的地面反作用力施加于与股骨远端捆绑 (Tie) 在一起的刚体平面上, 模拟人体单腿站立。站立位的情况下股骨头软骨的应力云图见图 7, 股骨头软骨负重区最大范氏等效应力 (Von Mises Stress) 为 6.161 MPa。LANDGRAEBER 等^[18]报道了施加 1.5 倍体重载荷得到的 5 个尸体样本接触压力的平均峰值是 5.84 MPa。MONT 等^[19]进行的单侧尸体材料的研究结果显示, 在给予 1/2 体重载荷时测得峰值接触压力是 7 MPa。KOROMPILIAS 等^[20]进行了步行状态下的尸体研究和有限元分析, 获得的应力峰值分别为 10 MPa 和 10.78 MPa。WATTERS 等^[21]设计了一个应力传感器并把它安装在股骨假体中, 测得的峰值接触压力是 6.8 MPa。WANG 等^[22]的研究发现, 当给予 1 500~3 000 N 载荷时, 接触压力为 4~8 MPa。根据上述有限元研究和尸体骨研究的结果可知, 尽管可能存在是由于边界条件和股骨尺寸所造成的细小偏差, 本研究所建立的正常髋关节三维有限元模型模拟算得的应力与以往的研究结果非常接近, 因此可推测本研究所建立的模型具有应用价值。

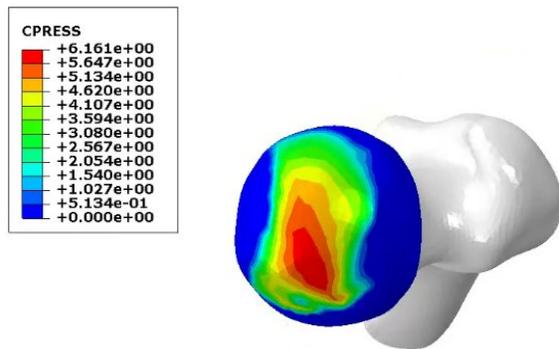


图 7 粗隆间骨折 PFNA 内固定术三维有限元模型
股骨头软骨的应力云图

3 讨论

3.1 国内外进展和研究意义

二十世纪七十年代, BREKELMANS 等^[23]首次利用有限元分析方法研究股骨的力学特性, 为应用有限元方法研究骨科生物力学奠定了基础。有限元分析最大的优势在于能够反映物体内部的力学变化情况, 这也是体外实验一直难以解决的难题。通过与三维重建及逆向工程技术有效结合, 有限元模型能够真实地模拟骨骼、韧带和肌肉等

组织, 使分析结果更接近于人体生理与病理。在有限元仿真实验中, 对模型施加几何约束, 模拟拉伸、弯曲、疲劳实验等, 可获得在不同实验条件下模型任意部位的形变、应力、应变分布和极限破坏的力学结果。

GOFFIN 等^[24]应用三维有限元技术对 Gamma 钉与动力髌螺钉固定 Evans IV 和 V 型的粗隆间骨折进行力学分析, 比较不同大小内侧皮质骨折块对内固定稳定性的影响。SERAL 等^[25]应用三维有限元技术对 Gamma 钉与 PFN 治疗 A1 型与 A2 型股骨粗隆间骨折进行了生物力学研究, 对两种内固定术后骨折的移位及股骨与植入物的应力分布进行观察。FILARDI 等^[26]对股骨粗隆间骨折 Gamma 钉远端固定应用 1 枚螺钉与 2 枚螺钉固定进行了力学研究, 结果显示远端应用 2 枚螺钉确实能够增强内固定的稳定性。以上研究均表明采用有限元技术分析股骨粗隆间骨折的相关问题, 具有无创、简便、经济、高效等优势。然而, 这些研究所建立的模型只有股骨成分, 难以反应髋部的真实应力情况。

3.2 本研究所建有限元模型的特点

既往的股骨粗隆间骨折生物力学研究, 进行三维有限元模型建立时, 常常忽略关节软骨、韧带、肌肉对关节应力的影响; 也未对骨盆进行建模, 直接将力加载在股骨头上, 无法真实的反应髋部的应力及股骨头的受力点^[27]。本研究对上述问题进行了改良, 对关节软骨、韧带、肌肉等结构建模并进行力学模拟, 同时对骨盆进行建模, 力通过骨盆传导再作用到股骨头。整个模型仿真度更高, 股骨的力学结果更加接近实际, 对临床应用更具有指导意义。

3.3 本研究的局限性

研究在进行 PNFA 固定粗隆间骨折手术模拟时, 假设股骨粗隆间骨折已获得理想的解剖复位, 尚缺乏对未获得解剖复位情况下生物力学稳定性的研究。同时, 股骨粗隆间骨折患者常伴有骨质疏松, 本研究建模时未对骨质疏松模型进行建立, 对临床的参考尚存在一定的局限性, 在进一步的研究中, 笔者将对上述内容深入探讨。

综上所述, 本研究建立的粗隆间骨折 PFNA 内固定术的三维有限元模型, 充分考虑了软骨, 韧带, 肌肉, 应力接触点等对股骨的力学影响, 模型更加接近人体实际, 其力学研究结果更具有参考意义。

参 考 文 献

- [1] 唐佩福, 姚琦, 黄鹏, 等. 股骨近端髓内钉-螺旋刀片治疗高龄骨质疏松性股骨转子间骨折[J]. 中华创伤骨科杂志, 2007, 9(7): 622-624.
- [2] DUYGULU F, CALIS M, ARGUN M, et al. Unusual combination of femoral head dislocation associated acetabular fracture with ipsilateral neck and shaft fractures: a case report[J]. J Trauma, 2006, 61(6): 1545-1548.
- [3] KANIS JA, JOHNNELL O, LAET CD, et al. International variations in hip fracture probabilities: implications for risk assessment[J]. J Bone Miner Res, 2002, 17(7): 1237-1244.
- [4] 邓杰林, 倪进荣, 王海虎, 等. 多学科协同在老年股骨粗隆间骨折诊治中的应用[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2021, 36(10): 1061-1063.
- [5] 黄明辉, 宋进良, 陈彦军, 等. 动力髋螺钉及股骨近端防旋髓内钉治疗老年股骨转子间骨折术后内固定失败的危险因素分析[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2019, 12(10): 791-795.
- [6] 林臻, 陈少坚, 高连云, 等. 股骨近端抗旋髓内钉螺旋刀片两种锁定方式治疗不稳定股骨粗隆间骨折的力学比较[J]. 中国现代医生, 2021, 59(21): 58-61, 193.
- [7] 辛力, 王业华, 杨志. 尖顶距对股骨粗隆间骨折动力髋螺钉内固定稳定性的相关有限元分析[J]. 徐州医学院学报, 2013, 33(12): 821-824.
- [8] SVERDLOVA NS, WITZEL U. Principles of determination and verification of muscle forces in the human musculoskeletal system: muscle forces to minimise bending stress[J]. J Biomech, 2010, 43(3): 387-396.
- [9] BROWN TD, HILD GL. Pre-collapse stress redistributions in femoral head osteonecrosis: a three-dimensional finite element analysis[J]. J Biomech Eng, 1983, 105(2): 171-176.
- [10] BROWN TD, WAY ME, FERGUSON AB. Mechanical characteristics of bone in femoral capital aseptic necrosis[J]. Clin Orthop Relat Res, 1981(156): 240-247.
- [11] 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]. Rev Roum De Morphol Embryol, 2010, 51(1): 151-155.
- [12] STEWART KJ, EDMONDS-WILSON RH, BRAND RA, et al. Spatial distribution of hip capsule structural and material properties[J]. J Biomech, 2002, 35(11): 1491-1498.
- [13] 王沫楠, 郭鸿书. 股骨颈骨折固定方式研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17(3): 125-130.
- [14] CHEN WP, TAI CL, SHIH CH, et al. Selection of fixation devices in proximal femur rotational osteotomy: clinical complications and finite element analysis[J]. Clin Biomech, 2004, 19(3): 255-262.
- [15] 陈宇峰, 任栋, 耿林丹, 等. 菱形构型空心钉固定 Pauwels III 型股骨颈骨折生物力学特性的有限元分析[J]. 中华创伤骨科杂志, 2020, 22(12): 1080-1085.
- [16] LU H, SHEN HQ, ZHOU SQ, et al. Biomechanical analysis of the computer-assisted internal fixation of afemoral neck fracture[J]. Genes Dis, 2020, 7(3): 448-455.
- [17] 严坤, 牟利民, 杨晓辉, 等. 三种空心钉构型固定 Pauwels III 型股骨颈骨折的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(18): 2807-2811.
- [18] LANDGRAEBER S, THEYSOHN JM, CLASSEN T, et al. Advanced core decompression, a new treatment option of avascular necrosis of the femoral head: a first follow-up[J]. J Tissue Eng Regen Med, 2013, 7(11): 893-900.
- [19] MONT MA, MARULANDA GA, SEYLER TM, et al. Core decompression and nonvascularized bone grafting for the treatment of early stage osteonecrosis of the femoral head[J]. Instr Course Lect, 2007, 56: 213-220.
- [20] KOROMPILLAS AV, BERIS AE, LYKISSAS MG, et al. Femoral head osteonecrosis: why choose free vascularized fibula grafting[J]. Microsurgery, 2011, 31(3): 223-228.
- [21] WATTERS TS, BROWNE JA, ORLANDO LA, et al. Cost-effectiveness analysis of free vascularized fibular grafting for osteonecrosis of the femoral head[J]. J Surg Orthop Adv, 2011, 20(3): 158-167.
- [22] WANG BL, SUN W, SHI ZC, et al. Treatment of nontraumatic osteonecrosis of the femoral head using bone impaction grafting through a femoral neck window[J]. Int Orthop, 2010, 34(5): 635-639.
- [23] BREKELMANS WA, POORT HW, SLOOFF TJ. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts[J]. Acta Orthop Scand, 1972, 43(5): 301-317.
- [24] GOFFIN JM, PANKAJ P, SIMPSON AH. A computational study on the effect of fracture intrusion distance in three- and four-part trochanteric fractures treated with Gamma nail and sliding hip screw[J]. J Orthop Res, 2014, 32(1): 39-45.
- [25] SERAL B, GARCÍA JM, CEGOÑINO J, et al. Finite element study of intramedullary osteosynthesis in the treatment of trochanteric fractures of the hip: Gamma and PFN[J]. Injury, 2004, 35(2): 130-135.
- [26] FILARDI V, MONTANINI R. Measurement of local strains induced into the femur by trochanteric Gamma nail implants with one or two distal screws[J]. Med Eng Phys, 2007, 29(1): 38-47.
- [27] 徐景利, 陈达, 林天焯, 等. 腓骨柱联合空心螺钉与 3 枚空心螺钉比较治疗股骨颈骨折的有限元分析[J]. 新疆医科大学学报, 2019, 42(3): 301-308, 313.

(张咏 编辑)