

空心螺钉联合同种异体腓骨治疗股骨颈骨折的 三维有限元力学研究*

葛辉¹, 苏丽霞¹, 陈鹏², 汤永南¹, 罗东斌¹, 焦锋¹, 何伟³

(1.广州市中西医结合医院 骨科, 广东 广州 510800; 2.广州中医药大学第一附属医院 骨科, 广东 广州 510405; 3.广州中医药大学第三附属医院 骨科, 广东 广州 510378)

摘要: **目的** 探讨空心螺钉联合同种异体腓骨术式治疗股骨颈骨折的生物力学稳定性, 为股骨颈骨折临床治疗新方法提供理论依据。**方法** 采用三维有限元分析方法对空心螺钉联合同种异体腓骨术式治疗股骨颈骨折进行力学分析。基于 1 位 45 岁骨盆及股骨正常解剖的男性志愿者的 CT 数据, 应用三维重建、逆向工程、有限元力学分析等技术, 建立空心螺钉联合同种异体腓骨和多枚空心螺钉两种术式三维有限元模型, 进行力学分析, 评估两种术式内固定构型的生物力学稳定性。**结果** 空心螺钉联合同种异体腓骨术式与多枚空心螺钉术式的股骨头颈部皮质的最大应力和位移及骨组织内部和内固定的最大应力分布位置无明显差异, 但空心螺钉联合同种异体腓骨术式的股骨头颈部皮质的最大应力和位移及骨组织内部和内固定的最大应力值均比多枚空心螺钉术式小。**结论** 空心螺钉联合同种异体腓骨术式固定股骨颈骨折的力学稳定性优于多枚空心螺钉术式, 能够为股骨颈骨折愈合提供良好的力学稳定性, 在股骨头发生坏死后腓骨亦可以提供力学支撑, 预防股骨头塌陷, 为较理想的股骨颈骨折治疗术式。

关键词: 股骨颈骨折; 股骨头坏死; 生物力学; 三维有限元; 空心螺钉; 同种异体腓骨

中图分类号: R687.3

Three-dimensional finite element mechanical study of the treatment of femoral neck fracture with cannulated screw combined with fibular allograft*

GE Hui¹, SU Lixia¹, CHEN Peng², TANG Yongnan¹, LUO Dongbin¹, JIAO Feng¹, HE Wei³

(1. Department of Orthopedics, Guangzhou Hospital of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, Guangzhou, Guangdong 510800, China; 2. Department of Orthopedics, the First Affiliated Hospital of Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou, Guangdong 510405, China; 3. Department of Orthopedics, the Third Affiliated Hospital of Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou, Guangdong 510378, China)

Abstract: **[Objective]** To investigate the biomechanical stability of cannulated screws combined with fibula allograft in the treatment of femoral neck fractures, and to provide theoretical basis for a new clinical treatment method of femoral neck fractures. **[Methods]** Three-dimensional finite element analysis was used to analyze the mechanical properties of cannulated screws combined with fibula allograft in the treatment of femoral neck fractures. Based on the CT data of a 45-year-old male volunteer with normal anatomy of the pelvis and femur, three-dimensional reconstruction, reverse engineering, finite element mechanical analysis and other techniques were used to establish three-dimensional finite element models of the surgical methods of cannulated screws combined with fibula allograft and multiple cannulated screws for mechanical analysis, and the biomechanical stability of the two internal fixation configurations was evaluated. **[Results]** There was no significant difference in the distribution in the maximum stress and displacement of the femoral head and neck cortex and the maximum stress within the bone tissue and internal fixation

收稿日期: 2023-07-13

* 基金项目: 广东省中医药局科研项目 (20222175); 广州市花都区科技计划项目 (21-HDWS-068)

[通信作者] 何伟, E-mail: hwl3802516062@126.com; Tel: 13802516062

between the cannulated screws combined with fibular allograft and multiple cannulated screws operation. However, the maximum stress and displacement of the femoral head neck cortex and the maximum stress of the bone and internal fixation in the cannulated screw combined with fibular allograft group were significantly lower than those in the multiple cannulated screw group. **【Conclusion】** The mechanical stability of cannulated screws combined with fibular allograft is better than that of multiple cannulated screws, which can provide good mechanical stability for the healing of femoral neck fracture, and provide mechanical support after the femoral head necrosis, to prevent the collapse of the femoral head. It is an ideal surgical method for the treatment of femoral neck fractures.

Keywords: femoral neck fractures; femoral head necrosis; biomechanics; three-dimensional finite element; cannulated screw; fibular allograft

股骨颈骨折是临床上常见的骨折之一，约占全身骨折的 3.6%，占股骨近段骨折的 51.97%^[1]。三枚空心螺钉内固定术是目前临床最常用的股骨颈骨折内固定方式^[2-3]。尽管三枚空心螺钉内固定构型具有较强的抗剪力作用，使骨折断端能获得较好的力学稳定性，但股骨头坏死仍是其主要的并发症之一，根据研究显示：股骨颈骨折术后股骨头坏死发生率高达 14.3%^[4]。一旦发生股骨头坏死，股骨头将面临塌陷的风险，一旦塌陷将快速诱发髋关节骨性关节炎，最终不得不进行人工关节置换，这对于中青年股骨颈骨折患者将是灾难性的^[5-11]。股骨颈骨折内固定术后如何预防股骨头坏死塌陷成为人们关注的重点。理想的股骨颈骨折内固定术式，是在股骨颈骨折复位后能提供有效的力学稳定性，同时在股骨头坏死发生后仍能形成稳定的力学支撑，预防股骨头塌陷，并促进股骨头坏死的修复。

相关研究证实腓骨在股骨头坏死后提供的有效力学支撑可以预防股骨头塌陷，同时腓骨的生物相容性还能促进坏死股骨头的修复^[12]，因此腓骨移植支撑术常用于治疗非创伤性股骨头坏死。然而，股骨颈骨折术后继发股骨头坏死患者，如采用腓骨移植支撑术治疗股骨头坏死患者需面临二次手术，同时很多继发股骨头坏死患者诊断明确时股骨头已经塌陷，错过了最佳手术时机。如果在应用空心螺钉固定股骨颈骨折的同时联合腓骨植入，这样既解决了骨折固定的问题，还解决了术后股骨头坏死的防治问题，也避免了二次手术。腓骨没有螺纹，其力学强度也不及空心螺钉，空心螺钉联合同种异体腓骨内固定构型能否为股骨颈骨折的固定提供良好的力学稳定性，目前尚缺乏有效的力学依据。

为此本研究拟应用受试对象的 CT 数据，应用

三维重建、逆向工程、有限元生物力学分析等技术，建立空心螺钉联合同种异体腓骨治疗股骨颈骨折的三维有限元力学模型，进行力学分析，评估其力学稳定性，为解决股骨颈骨折术后继发股骨头的治疗难题做出新的探索。

1 材料与方法

1.1 几何模型数据来源

1 名 45 岁骨盆及股骨符合正常生理解剖的男性志愿者，体重 70 kg，身高 175 cm。应用 Somatom Balance 64 排螺旋 CT（德国西门子公司）获取研究对象的骨盆及股骨 CT 数据。

1.2 软件设备

Mimics 14.1 软件（比利时 Materialise 公司），Geomagic Studio 2013（美国 Geomagic 公司），Geomagic Design X 软件（美国 Geomagic 公司），Solidworks 2014（美国 Dassault Systemes S.A），Abaqus 6.10（美国 Dassault Systemes S.A），Rexcan CS+3D 激光扫描仪（韩国首尔 Solutionix 公司），6.5 mm 空心螺钉（Synthes 公司）。

1.3 模型构建

1.3.1 股骨颈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，进行股骨颈骨折的模拟，建立股骨颈骨折的三维模型，本研究对骨折线垂直股骨颈的骨折类型进行建模，见图 1。



图 1 股骨颈骨折模拟示意图

1.3.2 空心螺钉固定股骨颈骨折的三维模型建立
应用 3D 激光扫描仪扫描空心螺钉实体，建立空心螺钉的点云数据，保存为 STL 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”功能将空心螺钉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”等功能对空心螺钉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。将建立的股骨颈骨折与空心螺钉三维模型导入到 Solidworks 软件中，进入装配模块，根据手术中空心螺钉的排列位置，进行空心螺钉固定股骨颈骨折的手术模拟，建立空心螺钉固定股骨颈骨折的三维实体模型，螺钉的排列方式为倒“品”字型，见图 3，螺钉的植入深度为股骨头皮质骨下 5 mm。

1.3.3 空心螺钉联合同种异体腓骨固定股骨颈骨折的三维模型建立
进入 Solidworks 软件零件模块，应用草图、凸台拉伸、拉伸切除等功能，建立腓骨的三维模型。根据腓骨的生理解剖，设置同种异腓骨的参数为长 95 mm、外直径 12 mm、内直径 8 mm，见图 4。将建立的股骨颈骨折、空心螺钉、腓骨三维模型导入到 Solidworks 软件中，进入装配模块，根据手术中空心螺钉和腓骨的排列位置，进行空心螺钉联合同种异体腓骨固定股骨颈骨折的手术模拟，建立空心螺钉联合同种异体腓骨固定股骨颈骨折的三维模型。螺钉和腓骨的植入深度

度为股骨头皮质骨下 5 mm，股骨头坏死常发生于股骨头的前上方，腓骨的植入位置位为倒“品”字型的左上方，见图 5。



图 2 空心螺钉三维实体模型

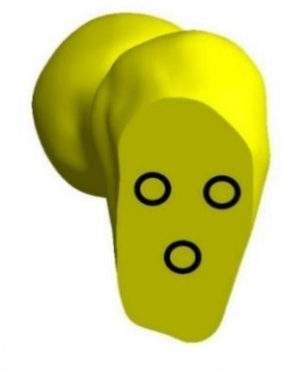


图 3 三枚空心螺钉倒“品”字植入示意图



图 4 同种异体腓骨三维实体模型

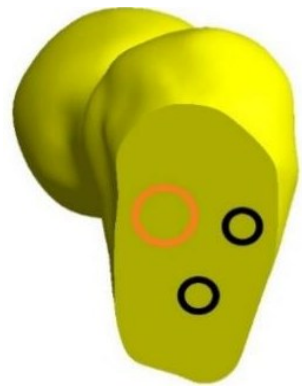


图 5 空心螺钉联合同种异体腓骨倒“品”字植入示意图，腓骨位于前上方

1.3.4 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 软件建立髌臼、股骨头软骨三维模型。根据髌关节韧带的解剖学结构和生物力学特性，应 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 ABAQUS 软件的创建连接模块的轴

(Axial) 模拟髋关节 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^[13]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。

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

1.3.5 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。空心螺钉联合同种异体腓骨术式模型的单元总数为 627 089，节点总数为 161 869。多枚空心螺钉术式模型的单元总数为 592 863，节点总数为 160 798。

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，赋予各向同性匀质材料属性。具体赋值如表 2 所示^[14-18]。

表 2 有限元模型的材料属性

组件	弹性模量	泊松比
AO 空心螺钉	110 000.00	0.30
髌骨皮质骨	15 100.00	0.30
髌骨松质骨	445.00	0.22
软骨	10.50	0.45
韧带	12.40	0.40
腓骨	15 100.00	0.30
股骨皮质骨	15 100.00	0.30
股骨松质骨	445.00	0.22

1.3.6 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，将髌骨的髌髌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^[19-22]。进入到“Load”模块，应用“Create Load”等功能，等效于体重的地面反作用力（700 N）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。已赋予边界条件的股骨颈骨折三维有限元模型，见图 6。

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	0.30
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

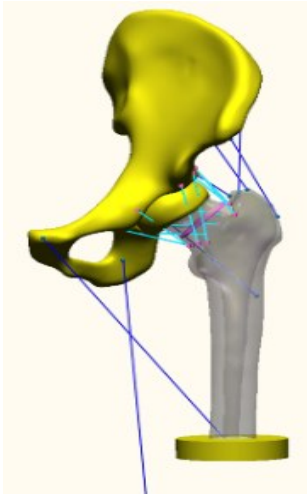


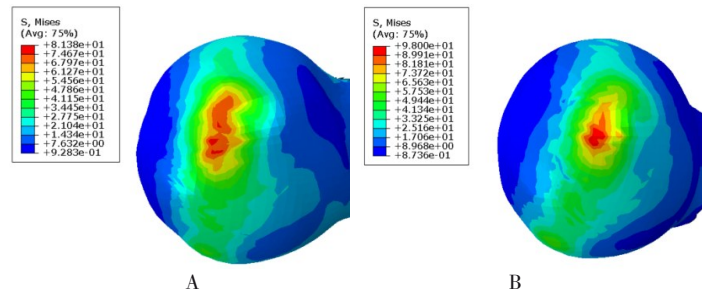
图 6 股骨颈骨折三维有限元模型

2 结果

2.1 股骨头颈部皮质骨的应力和位移情况

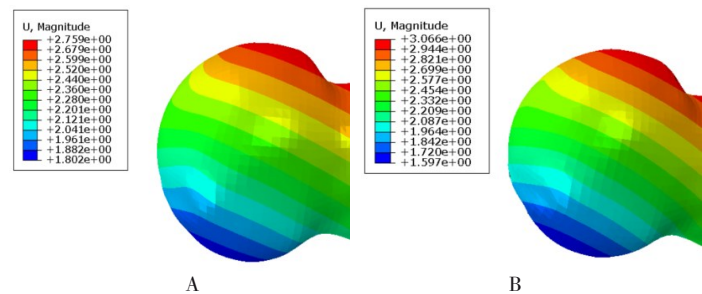
空心钉联合腓骨术式和多枚空心钉术式固定股骨颈骨折皮质骨最大应力均出现在股骨头皮质的头顶部，空心钉联合腓骨术式最大应力为 81.38 MPa，多枚空心钉术式的最大应力为 98.00 MPa，两者的差值为 16.62 MPa，应力云图见图 7。空心钉联合腓骨术式和多枚空心钉固定术式的股骨头颈位移均从股骨头颈上缘向下缘逐渐减小，最大位移均发生在股骨头颈张力最大的外上缘，空心钉联合腓骨术式最大位移为 2.759 mm，多枚空心钉术式的最大位移为 3.066 mm，两者的差值为 0.307 mm，位移云图见图 8。空心螺钉联合同种异体腓骨术式的股骨头颈部皮质骨的最大应力和最大位移分布

位置与多枚空心螺钉术式差异无统计学意义，但多枚空心螺钉术式小。
股骨头颈部皮质骨的最大应力和最大位移值均比



A：空心螺钉联合同种异体腓骨术式；B：多枚空心螺钉术式。

图 7 股骨头颈部皮质骨应力云图



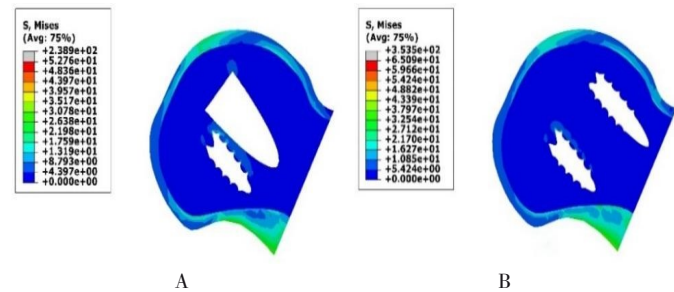
A：空心螺钉联合同种异体腓骨术式；B：多枚空心螺钉术式。

图 8 股骨头颈部位移云图

2.2 骨组织内部和内固定的应力情况

应用剖面视图，观察股骨头内部骨组织的力学变化。空心螺钉联合同种异体腓骨术式和多枚空心螺钉术式固定股骨颈骨折的骨组织最大应力均出现在骨组织的皮质骨部位，空心螺钉联合同种异体腓骨术式最大应力 52.76 MPa，多枚空心螺钉术式的最大应力 65.09 MPa，两者的差值为 12.33 MPa，应力云图见图 9。空心螺钉联合同种

异体腓骨术式内固定的最大应力为 538.9 MPa，多枚空心螺钉术式内固定的最大应力为 650.0 MPa，两者的差值为 111.1 MPa，两者的应力较大区域均出现在骨折断端及内固定的尾部，应力云图见图 10。空心螺钉联合同种异体腓骨术式的骨组织内部和内固定的最大应力分布位置与多枚空心螺钉术式无明显差异，但骨组织内部和内固定的最大应力值均比多枚空心螺钉术式小。



A：空心螺钉联合同种异体腓骨术式；B：多枚空心螺钉术式。

图 9 骨组织内部应力云图

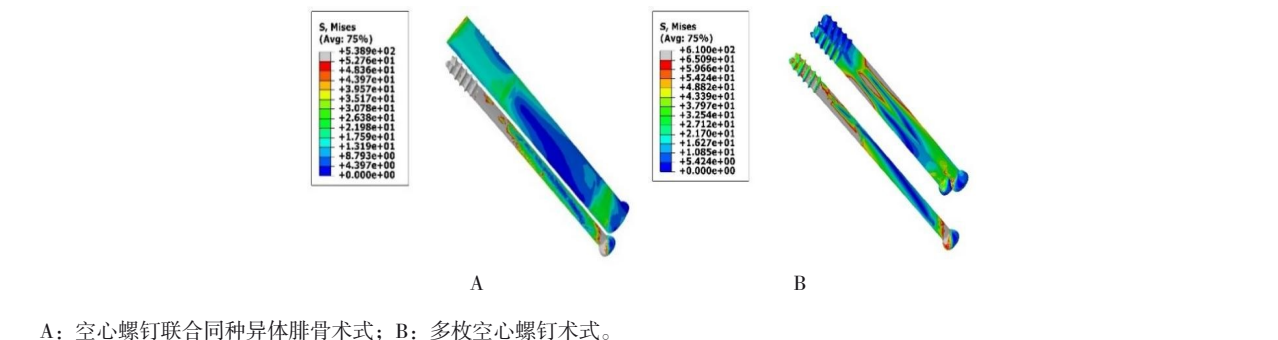


图 10 内固定应力云图

3 讨论

稳定的股骨颈骨折内固定构型能有效的重建股骨颈内部的应力传导，避免应力集中，降低骨组织及内固定需要承受的最大应力。一旦发生应力集中，骨组织和螺钉承受的应力超过其屈服强度，将发生骨组织被切割和断钉等现象。

虽然空心螺钉联合同种异体腓骨术式与多枚空心螺钉术式的股骨头颈部皮质的最大应力和位移及骨组织内部和内固定的最大应力分布位置无明显差异，但空心螺钉联合同种异体腓骨术式的股骨头颈部皮质的最大应力和位移及骨组织内部和内固定的最大应力均比多枚空心螺钉术式小，说明空心螺钉联合同种异体腓骨内固定构型能更好地重建股骨近端的应力传导，使骨组织和内固定整体结构的应力相对分散，骨组织和内固定需要承受的最大应力更小，失效可能性低，具有更好的力学稳定性。

结合以上研究结果，本研究认为空心螺钉联合同种异体腓骨术式固定股骨颈骨折的力学稳定性优于多枚空心螺钉术式，能够为股骨颈骨折愈合提供良好的力学稳定性。同时同种异体腓骨具有力学支撑作用及生物相容性，股骨头坏死发生后能提供有效的力学支撑，预防股骨头的塌陷，腓骨的生物相容性能促进坏死的修复，因此空心螺钉联合同种异体腓骨术式为较理想的股骨颈骨折内固定术式。

本研究的优势：既往的髋部生物力学研究，进行髋关节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^[23]。本研究对上述问题进行了改良，使力学结果更加接近实际，对临床应用更具有指导意义。其次，以

往对股骨颈骨折的力学研究着重于寻求更加稳定的内固定构型，避免内固定失效，忽略股骨颈骨折术后继发股骨头坏死的防治^[24]。本研究应用腓骨替代一枚空心螺钉，建立空心螺钉联合腓骨的全新内固定构型，既保证了股骨颈骨折固定的力学稳定性，股骨头坏死发生后又能提供有效的力学支撑预防坏死股骨头塌陷，同时解决了股骨颈骨折固定和股骨头坏死的防治问题，本术式具有较好的临床推广意义。

本研究的局限性：本研究只对股骨颈骨折的一种常见类型进行了分析，未对股骨颈骨折的各种分型进行系统性的分析；同时，本研究在进行空心螺钉联合同种异体腓骨术式及多枚空心螺钉术式固定股骨颈骨折手术模拟时，假设股骨颈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，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。

参 考 文 献

[1] DAVIDOVITCH RI, JORDAN CJ, EGOL KA, et al. Challenges in the treatment of femoral neck fractures in the nonelderly adult[J]. J Trauma, 2010, 68(1): 236-242.

[2] SELVAN VT, OAKLEY MJ, RANGAN A, et al. Optimum configuration of cannulated hip screws for the fixation of intracapsular hip fractures: a biomechanical study[J]. Injury, 2004, 35(2): 136-141.

[3] ZDERO R, KEAST-BUTLER O, SCHEMITSCH EH. A biomechanical comparison of two triple-screw methods for femoral neck fracture fixation in a synthetic bone model[J]. J Trauma, 2010, 69(6): 1537-1544.

[4] SLOBOGEAN GP, SPRAGUE SA, SCOTT T, et al. Complications following young femoral neck fractures[J]. Injury, 2015, 46(3): 484-491.

[5] BOOTH RE. The closing circle: limitations of total joint arthroplasty[J]. Orthopedics, 1994, 17(9): 757-759.

- [6] CALLAGHAN JJ. Results of primary total hip arthroplasty in young patients[J]. Instr Course Lect, 1994, 43: 315-321.
- [7] CHANDLER HP, REINECK FT, WIXSON RL, et al. Total hip replacement in patients younger than thirty years old. A five-year follow-up study[J]. J Bone Joint Surg Am, 1981, 63(9): 1426-1434.
- [8] DORR LD, TAKEI GK, CONATY JP. Total hip arthroplasties in patients less than forty-five years old[J]. J Bone Joint Surg Am, 1983, 65(4): 474-479.
- [9] HALLEY DK, WROBLEWSKI BM. Long-term results of low-friction arthroplasty in patients 30 years of age or younger[J]. Clin Orthop Relat Res, 1986(211): 43-50.
- [10] MONT MA, MAAR DC, KRACKOW KA, et al. Total hip replacement without cement for non-inflammatory osteoarthritis in patients who are less than forty-five years old[J]. J Bone Joint Surg Am, 1993, 75(5): 740-751.
- [11] RANAWAT CS, ATKINSON RE, SALVATI EA, et al. Conventional total hip arthroplasty for degenerative joint disease in patients between the ages of forty and sixty years[J]. J Bone Joint Surg Am, 1984, 66(5): 745-752.
- [12] 葛辉. 同种异体腓骨移植术治疗股骨头坏死的生物力学与临床疗效研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2016.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] BROWN TD, WAY ME, FERGUSON AB. Mechanical characteristics of bone in femoral capital aseptic necrosis[J]. Clin Orthop Relat Res, 1981(156): 240-247.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 王沐楠, 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.
- [19] 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.
- [20] 陈宇峰. 菱形构型空心钉治疗 Pauwels III 型股骨颈骨折的有限元分析与临床疗效分析[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2021.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 徐景利, 陈达, 林天烨, 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.
- [24] 杨锐, 李永奖. 两种内固定治疗青壮年不稳定型股骨颈骨折的有限元分析[J]. 临床骨科杂志, 2023, 26(1): 132-135.

(方丽蓉 编辑)