

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2021.07.020

生物力学与材料

# 三角稳定固定系统对股骨颈骨折生物力学特性的有限元分析

刘俊俊<sup>1,2</sup>, 付建国<sup>1,2</sup>, 柳威<sup>2</sup>, 朱剑<sup>1,2</sup>

1. 蚌埠医学院研究生院, 安徽 蚌埠 233030; 2. 蚌埠医学院附属泰兴市人民医院, 江苏 泰兴 225400

**【摘要】目的:**运用有限元分析,探讨三角稳定固定系统对股骨颈骨折的生物力学特性。**方法:**选取1名健康青年志愿者,获取其股骨CT影像学资料,构建股骨三维模型及股骨颈骨折三维模型。运用Ansys12.1有限元分析软件,模拟人体直立情况下正三角、倒三角稳定固定系统对内固定物应力分布、骨折处位移的影响。**结果:**正三角内固定、倒三角内固定模型的股骨头最大等效应力接近,倒三角内固定模型的内固定物最大等效应力低于正三角内固定。正三角内固定、倒三角内固定模型的股骨近端、内固定物最大位移接近。**结论:**正三角、倒三角稳定固定系统的股骨头最大等效应力、股骨近端最大位移、内固定物最大位移接近,倒三角内固定模型的内固定物最大等效应力更低。

**【关键词】**三角稳定固定系统;股骨颈骨折;生物力学;有限元分析

**【中图分类号】**R318.01

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2021)07-0893-05

## Finite element analysis of biomechanical characteristics of femoral neck fracture with triangular stabilization and fixation system

LIU Junjun<sup>1,2</sup>, FU Jianguo<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, ZHU Jian<sup>1,2</sup>

1. Graduate School of Bengbu Medical College, Bengbu 233030, China; 2. Taixing People's Hospital Affiliated to Bengbu Medical College, Taixing 225400, China

**Abstract: Objective** To explore the biomechanical characteristics of femoral neck fracture with triangular stabilization and fixation system by finite element analysis. **Methods** The CT imaging data of the femur in a healthy young volunteer was obtained, and the three-dimensional models of the femur and femoral neck fracture were constructed. Ansys12.1 finite element analysis software was used to simulate the effects of regular triangular and inverted triangular stabilization and fixation systems on the stress distribution of internal fixator and the displacement of the fracture when human body was in upright posture. **Results** The maximum equivalent stress of femoral head in regular triangular and inverted triangular internal fixation models was similar, while the maximum equivalent stress of internal fixator in inverted triangular internal fixation model was lower than that in regular triangular internal fixation model. Moreover, the differences in the maximum displacements of proximal femur and internal fixator between regular triangular and inverted triangular internal fixation models were trivial. **Conclusion** There is no significant difference between regular triangular and inverted triangular stabilization and fixation systems in the maximum equivalent stress of femoral head, the maximum displacement of proximal femur and the maximum displacement of internal fixator, but the maximum equivalent stress of internal fixator in inverted triangular internal fixation model is lower.

**Keywords:** triangular stabilization and fixation system; femoral neck fracture; biomechanics; finite element analysis

### 前言

股骨颈骨折约占髋部骨折的50%~60%,占全身骨折的3.58%,其治疗方式包括内固定、半髋或全髋关节

置换术等,对于未见股骨头缺血证据的患者而言,内固定是临床治疗股骨颈骨折的首选方式<sup>[1]</sup>。股骨颈骨折的治疗关键在于良好的骨折解剖复位与坚强内固定,故动力髋螺钉、空心加压螺钉等内固定材料备受关注。前者具有动力和静力双重加压功能,是股骨颈基底型骨折的首选内固定装置,而对于股骨颈头下型、经颈型骨折而言,3枚空心加压螺钉应用最为广泛,且具有良好的抗扭转能力、维持骨量、避免股骨头血运损伤等多种优势<sup>[2]</sup>。既往临床应用空心钉的排列摆放多以正三角为主,但存在可能导致股骨外侧抗张应力强度下降、

**【收稿日期】**2021-01-18

**【基金项目】**安徽省教育厅省级质量工程项目(2017jyxm0511)

**【作者简介】**刘俊俊,在读硕士研究生,研究方向:骨关节, E-mail: 1343458600@qq.com

**【通信作者】**朱剑,主任医师,研究方向:脊柱创伤, E-mail: bbyxyljj@163.com

破坏旋股内侧动脉血运的弊端,故有学者提出采用倒三角排列的观点。关于正三角、倒三角两种固定方式的固定效果,目前临床尚存在争议<sup>[3-4]</sup>。本研究运用有限元分析,就两种固定方式的生物力学特性进行比较,旨在为临床治疗股骨颈骨折时空心螺钉的排列摆放方法选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究材料

选取1名健康男性志愿者,选取标准:(1)既往体健,无内科疾病;(2)影像学检查示髋部骨质良好,骨骼形态正常;(3)对研究知情同意,配合度良好。排除标准:(1)既往有双上肢骨折史;(2)合并恶性肿瘤;(3)合并骨质疏松等骨骼异常。该男性志愿者年龄56岁,身高177 cm,体质量75 kg。本研究已征得本院医学伦理委员会批准,批件号:UH200817。

1.2 模型建立方法

1.2.1 股骨模型获取 使用西门子64排螺旋CT,对志愿者股骨上部至胫骨中上段进行扫描,获取二维横断面图像,使用医学数字成像和通信(DICOM)格式进行CT图像存储,三维重建使用Mimics 21.0软件。选择合适的灰度值对组织与骨骼进行区分,运用蒙版编辑、区域增长等功能,建立股骨三维模型,以STL格式对模型文件进行输出。使用Geomagic Wrap 2017软件对图像进行去除特征、降噪、网格划分、拟合曲面等处理,完成原始模型优化后,将所得股骨松质骨与皮质骨三维模型以STEP格式进行保存。使用Solidworks 2017软件处理STEP文件,借助布尔运算,组配皮质骨、松质骨结构,重建符合人体结构的股骨模型。

1.2.2 股骨颈骨折模型建立 使用Solidworks 2017软件处理股骨模型,于股骨头中心建立横断面,创造切割平面,确保切割平面位于股骨颈中心附近,并与横断面呈30°角,完成股骨颈稳定性骨折(Pauwell 30°)制作,见图1。

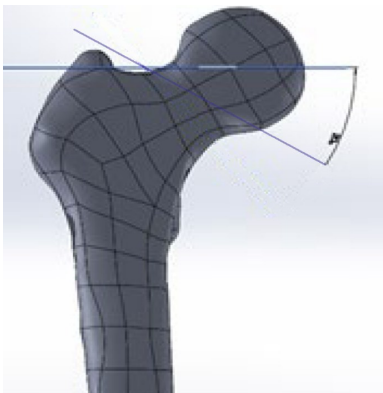
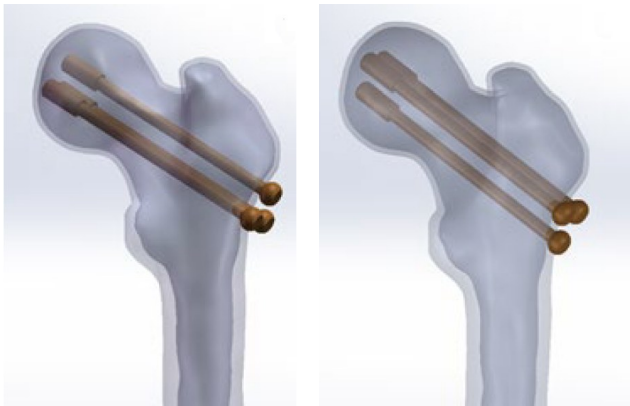


图1 Pauwell 30°股骨颈骨折模型  
Fig.1 Pauwell 30° femoral neck fracture model

1.2.3 内固定模型建立 使用Solidworks 2017软件建立两种内固定模型,空心螺钉直径7.3 mm,螺纹长度16 mm,两种内固定模型中,分别将3枚空心螺钉以正三角、倒三角的形式置入(图2)。将完整模型导入Abaqus 2017软件,依次执行材料属性赋予、边界条件约束、载荷分配及网格划分操作;各装配体均采用四面体单元进行网格划分。材料参数见表1。



a:正三角内固定                      b:倒三角内固定

图2 内固定装置模型结构示意图

Fig.2 Structural diagrams of internal fixation models

表1 有限元模型材料参数

Tab.1 Material parameters of finite element model

材料	弹性模量/GPa	泊松比
钛合金	105	0.35
皮质骨	16.8	0.30
松质骨	0.84	0.20

1.3 模型分析方法

模拟人体站立状态,将约3倍体重即2 250 N载荷力置入股骨头中心,确保载荷力矢量在冠状面上与股骨干轴、矢状面角度分别为13°、8°,内固定装置与股骨间关系选择绑定接触,骨折表面摩擦系数设定为0.46<sup>[5-6]</sup>。分析两组模型内股骨和内固定物的应力分布、最大等效应力及最大位移。

2 结果

2.1 股骨和内固定物的最大等效应力

两种内固定模型股骨头应力均集中于骨折线内下侧,接近股骨距位置;内固定装置的应力峰值均集中于骨折线附近螺钉表面。正三角内固定、倒三角内固定模型的股骨头最大等效应力接近,倒三角内固定模型的内固定物最大等效应力低于正三角内固定,见表2、图3和图4。

表2 两种三角稳定固定系统的股骨和内固定物最大等效应力(MPa)

Tab.2 Maximum equivalent stress of the femur and internal fixator in two kinds of triangular stabilization and fixation systems (MPa)		
指标	正三角内固定	倒三角内固定
股骨头	58.1	59.9
内固定物	182.4	155.9

2.2 股骨和内固定物的最大位移

两种内固定模型股骨头位移集中于股骨头顶端;内固定装置的位移集中于内固定物上侧顶端。正三角内固定、倒三角内固定模型的股骨近端、内固定物最大位移接近,见表3、图5和图6。

3 讨论

目前临床治疗股骨颈骨折的常用术式为三角稳

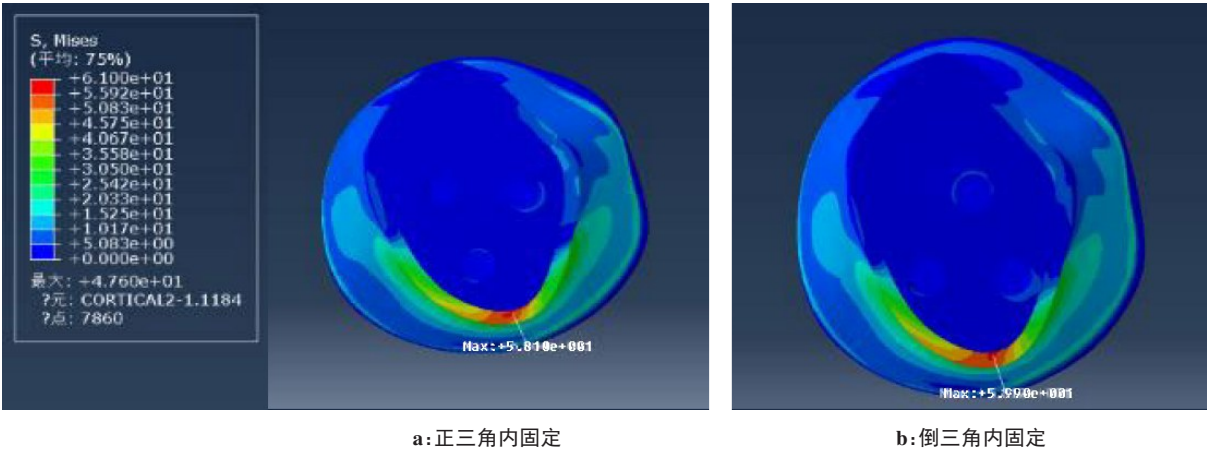


图3 两种内固定装置模型的股骨头 Von Mises 应力云图

Fig.3 Von Mises stress nephogram of the femoral head in two kinds of internal fixation models

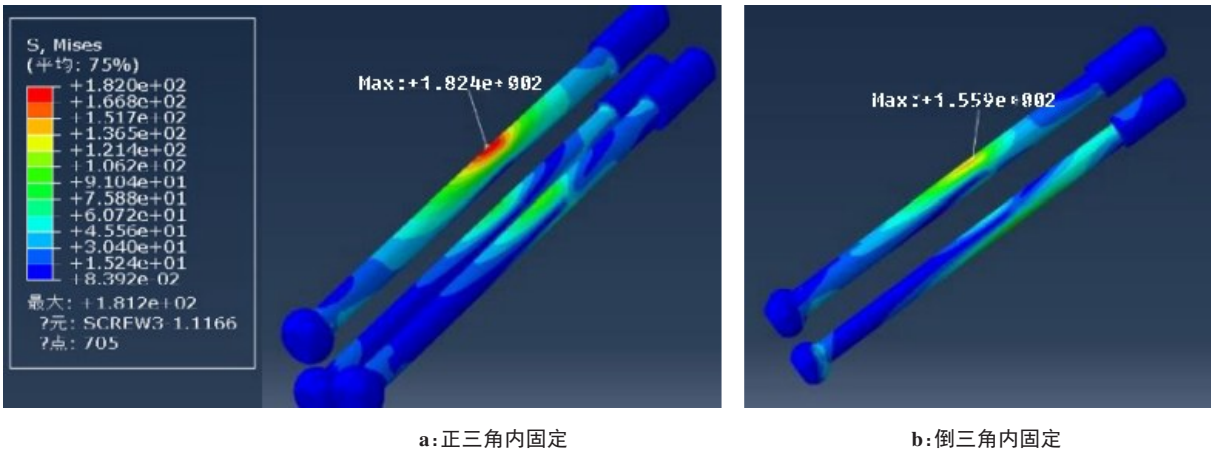


图4 两种内固定装置模型的内固定物 Von Mises 应力云图

Fig.4 Von Mises stress nephogram of internal fixator in two kind of internal fixation models

表3 两种三角稳定固定系统的股骨和内固定物最大位移(mm)

Tab.3 Maximum displacement of the femur and internal fixator in two kinds of triangular stabilization and fixation systems (mm)		
指标	正三角内固定	倒三角内固定
股骨近端	2.781	2.754
内固定物	2.582	2.577

定固定系统内固定,螺钉常选择正三角模式,一方面可对骨折断端起到加压作用,另一方面,三角稳定原

理使得内固定具有较高的强度和抗扭转能力,在维持骨量、避免切开复位所致股骨头血运再次损伤方面亦有着积极意义<sup>[7-9]</sup>。然而,正三角排列会造成小转子下缘附近外侧皮质出现螺钉孔,且术中反复调整置钉可能导致导针孔数量进一步增加,均使得股骨外侧抗张应力强度下降,甚至导致转子下骨折、动脉血运受限<sup>[10]</sup>。

为解决正三角排列的弊端,有学者提出倒三角排列思路,旨在提供更加充分的轴向加压作用,并进一步提高螺钉应力分布的均匀性,在避免应力集中



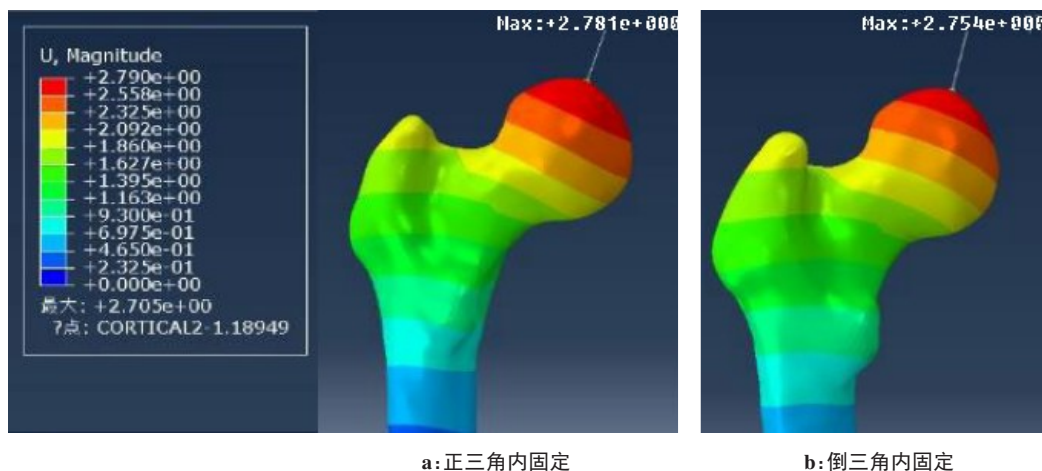
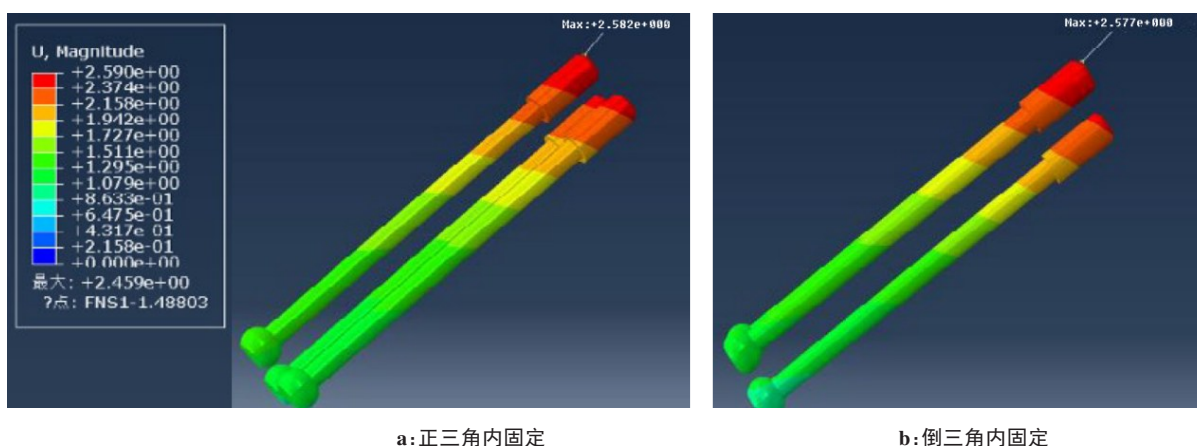


图5 两种内固定装置模型的股骨位移云图

Fig.5 Nephogram of femoral displacement in two kinds of internal fixation models



a: 正三角内固定

b: 倒三角内固定

图6 两种内固定装置模型的内固定物位移云图

Fig.6 Nephogram of internal fixator displacement in two kinds of internal fixation models

的同时,实现滑动加压,确保良好的生物力学稳定性<sup>[11]</sup>。本研究运用已在骨与关节力学性质和应力分析中的有效方法——有限元分析,对两种股骨颈骨折三角稳定固定系统的生物力学特性进行探讨,结果显示与正三角内固定相比,倒三角内固定模型的股骨头最大等效应力相仿,而内固定物的最大等效应力显著下降。倒三角稳定固定系统能够有效避免应力集中,其优势主要在于:倒三角构型的内固定物,其应力峰值多集中于骨折线区域,且较正三角构型有着更好的应力分散、抗剪切力作用<sup>[12-13]</sup>。有研究指出接受倒三角构型内固定的股骨颈骨折患者,再次发生骨折时所受平均负荷是正三角构型内固定患者的1.45倍<sup>[14]</sup>,说明倒三角构型有着更强的抗张应力和压应力,对预防再次骨折有着积极意义。

在最大位移比较中,两种三角稳定固定系统并未见较大差异,说明两种固定模式对骨折端压缩趋势的影响具有一致性<sup>[15-16]</sup>,同时,两种模式的滑动加压作用相仿,故理论而言,无论是接受正三角还是倒

三角固定的患者,其术后股骨颈短缩、股骨头缺血性坏死发生风险相当<sup>[17]</sup>。需要注意的是,从位移云图来看,两种固定模式的股骨近端、内固定物均存在一定程度的位移,若股骨颈轴向应力过大,可能导致螺钉穿入髓腔内,引发不良后果<sup>[18]</sup>。因此,对于合并骨质疏松的股骨颈患者而言,应慎用三角稳定固定系统。基于本研究结果,在今后的研究中可尝试在三角稳定固定系统的基础上联合钢板,以对抗骨折断端因负重而产生的剪切力,结合空心螺钉的抗旋转作用,有望实现更理想的固定强度,为骨折愈合提供稳定的生物力学环境。

## 【参考文献】

- [1] CHA Y H, YOO J I, HWANG S Y, et al. Biomechanical evaluation of internal fixation of Pauwels type III femoral neck fractures: a systematic review of various fixation methods [J]. Clin Orthop Surgery, 2019, 11(1): 1-14.
- [2] 梁会, 何小健, 陈农, 等. Pauwels II型后侧壁粉碎股骨颈骨折不同构型空心钉内固定的生物力学比较[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2018, 33(10): 11-14.
- LIANG H, HE X J, CHEN N, et al. Biomechanical comparison of

- different configurations of cannulated screw internal fixation for Pauwels type II posterior wall comminuted femoral neck fracture[J]. Chinese Journal of Bone and Joint Injury, 2018, 33(10): 11-14.
- [3] GIORDANO V, PAES R P, ALVES D D, et al. Stability of L-shaped and inverted triangle fixation assemblies in treating Pauwels type II femoral neck fracture: a comparative mechanical study[J]. Eur J Orthop Surg Traumatol, 2018, 28(7): 1359-1367.
- [4] HOLLENSTEINER M, SANDRIESSER S, BLIVEN E, et al. Biomechanics of osteoporotic fracture fixation[J]. Curr Osteopor Rep, 2019, 17(6): 363-374.
- [5] 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.
- CHEN Y F, REN D, GENG L D, et al. Finite element analysis of biomechanical properties of diamond shaped cannulated screw fixation for Pauwels type III femoral neck fracture[J]. Chinese Journal of Orthopedics and Traumatology, 2020, 22(12): 1080-1085.
- [6] LU H, SHEN H, ZHOU S, et al. Biomechanical analysis of the computer-assisted internal fixation of a femoral neck fracture[J]. Genes Dis, 2020, 7(3): 448-455.
- [7] BLIVEN E, SANDRIESSER S, AUGAT P, et al. Biomechanical evaluation of locked plating fixation for unstable femoral neck fractures[J]. Bone Joint Res, 2020, 9(6): 314-321.
- [8] 王雪飞, 张昆亚, 赵福龙, 等. 不同构型3枚螺钉固定稳定型股骨颈骨折的生物力学比较研究[J]. 北京医学, 2018, 40(12): 1126-1129.
- WANG X F, ZHANG K Y, ZHAO F L, et al. Biomechanical comparative study of 3 screws fixation of stable femoral neck fracture with different configurations[J]. Beijing Medical Journal, 2018, 40(12): 1126-1129.
- [9] SAMSAMI S, AUGAT P, ROUHI G. Stability of femoral neck fracture fixation: a finite element analysis[J]. Proc Inst Mech Eng H, 2019, 233(9): 892-900.
- [10] 范智荣, 苏海涛, 周霖, 等. 新型股骨颈内固定系统治疗不稳定型股骨颈骨折的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(15): 31-38.
- FAN Z R, SU H T, ZHOU L, et al. Finite element analysis of new internal fixation system for unstable femoral neck fracture[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2021, 25(15): 31-38.
- [11] 李鹏, 罗建平, 彭学政. 闭合复位经皮4枚空心钉F形置钉内固定治疗 Pauwels III 型年轻股骨颈骨折的临床分析[J]. 医学理论与实践, 2019, 32(3): 380-382.
- LI P, LUO J P, PENG X Z. Clinical analysis of the treatment of Pauwels type III young femoral neck fracture with closed reduction and percutaneous four cannulated screws F-shaped internal fixation[J]. Medical Theory and Practice, 2019, 32(3): 380-382.
- [12] 王子凡, 缪佳庆. 空心钉F形内固定骨质疏松性 Pauwels II 型股骨颈骨折的体外生物力学研究[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2020, 35(2): 153-155.
- WANG Z F, MIAO J Q. *In vitro* biomechanical study of cannulated screw F-shaped internal fixation for osteoporotic Pauwels type II femoral neck fracture[J]. Chinese Journal of Bone and Joint Injury, 2020, 35(2): 153-155.
- [13] WANG G, TANG Y, WANG B, et al. Minimally invasive open reduction combined with proximal femoral hollow locking plate in the treatment of Pauwels type III femoral neck fracture[J]. J Int Med Res, 2019, 47(7): 3050-3060.
- [14] 汤长华, 王黎明, 姚庆强, 等. 双头空心钉组合单头空心钉内固定治疗头下型股骨颈骨折[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2017, 32(3): 93-94.
- TANG C H, WANG L M, YAO Q Q, et al. Treatment of femoral neck fracture with double head cannulated screw and single head cannulated screw[J]. Chinese Journal of Bone and Joint Injury, 2017, 32(3): 93-94.
- [15] GOK K, INAL S, GOK A, et al. Comparison of effects of different screw materials in the triangle fixation of femoral neck fractures[J]. J Mater Sci Mater Med, 2017, 28(5): 81.
- [16] 魏文卿, 崔海坡, 陈舰, 等. 不同固定方式对股骨颈骨折固定效果的影响[J]. 医用生物力学, 2020, 35(2): 89-95.
- WEI W Q, CUI H P, CHEN J, et al. Effect of different fixation methods on fixation of femoral neck fracture[J]. Medical Biomechanics, 2020, 35(2): 89-95.
- [17] LI J, WANG M, ZHOU J, et al. Finite element analysis of different screw constructs in the treatment of unstable femoral neck fractures[J]. Injury, 2020, 51(4): 995-1003.
- [18] WANG J, MA J X, LU B, et al. Comparative finite element analysis of three implants fixing stable and unstable subtrochanteric femoral fractures: proximal femoral nail antirotation (PFNA), proximal femoral locking plate (PFLP), and reverse less invasive stabilization system (LISS)[J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2020, 106(1): 95-101.
- (编辑: 黄开颜)