

新型股骨颈内固定系统与3枚空心钉加内侧钢板固定青壮年Pauwels III型股骨颈骨折的有限元分析

杜兵^{1,2} 马腾² 路遥² 张聪明² 许毅博² 黄强² 姬帅^{1,2} 李明² 任程² 王谦² 张堃² 李忠²

【摘要】 目的 采用有限元分析方法比较新型股骨颈内固定系统(FNS)与3枚空心螺钉加内侧钢板固定青壮年Pauwels III型股骨颈骨折的生物力学特性。方法 收集一例Pauwels III型股骨颈骨折住院患者(男,35岁)的健侧股骨CT扫描数据,将该股骨CT数据通过数字医学软件建立股骨的三维模型。按照60°骨折线角度对股骨颈进行简化分割,模拟出Pauwels III型股骨颈骨折,在Solidworks2017软件中按照临床上相应的内固定尺寸和手术方案置入模拟的内固定模型于股骨模型中,分为FNS置入和3枚空心钉加内侧钢板置入两种模型,最后使用ANSYS软件进行划分网格、材料赋值和数据计算等步骤,FNS与3枚空心钉加内侧钢板固定后的生物力学稳定性有何差异。结果 实验分为2组:a.FNS组,b.空心钉加内侧钢板组。股骨头侧应力峰值分别为:a:126.74Mpa,b:180.11Mpa。内固定应力峰值分别为:a:143.17Mpa,b:214.68MPa。股骨头处位移峰值分别为:a:10.726mm,b:11.278mm。内固定位移峰值分别为:a:10.164mm,b:11.004mm。结论 FNS对骨折端固定的力学稳定性优于3枚空心钉加内侧钢板,是青壮年不稳定型股骨颈骨折值得优先考虑的手术固定方式。

【关键词】 股骨颈骨折; 生物力学; 青壮年; 有限元分析

Finite Element Analysis of the new femoral neck internal fixation system and three hollow screws plus medial plate fixation for Pauwels III femoral neck fractures in young adults Du Bing^{1,2}, Ma Teng², Lu

Yao², Zhang Congming², Huang Qiang², Ji Shuai^{1,2}, Li Ming², Ren Cheng², Wang Qian², Zhang Kun², Li Zhong². ¹Medical College of Yan'an University, Yan'an 716000, China; ²Honghui Hospital Affiliated to Medicine College of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China

Corresponding author: Li Zhong, Email: lizhong0607@126.com

【Abstract】 Objective In this study, finite element analysis method was used to compare the biomechanical characteristics of femoral neck system (FNS) and three hollow screws combined with medial plate fixation of Pauwels type III femoral neck fracture, so as to provide reference for the selection of clinical surgical options. **Methods** The CT scanning data of the healthy femur of a hospitalized patient with Pauwels III femoral neck fracture (male, 35 years old) were collected, and the CT data of the femur were used to establish the three-dimensional model of the femur by digital medical software. The femoral neck was simplified and segmented according to the angle of 60° fracture line, and the Pauwels III femoral neck fracture was simulated. In Solidworks 2017 software, the simulated internal fixation model was placed in the femoral model according to the corresponding clinical internal fixation size and surgical scheme, and it was divided into two models, FNS placement and three hollow nails plus medial plate placement. Finally, ANSYS software was used meshing, material assignment and data calculation. What was the difference in biomechanical stability between FNS and three hollow nails plus medial plate fixation. **Results** The peak stress of femoral head were, a: 126.74 Mpa, b: 180.11 Mpa. The peak stress of internal fixation were, a: 143.17 MPa, b: 214.68 MPa. The peak displacement of femoral head were, a: 10.726 mm, b: 11.278 mm. The peak displacement of internal fixation were, a: 10.164 mm, b: 11.004 mm. **Conclusions** FNS for the fixation of the fracture end is better than that of the hol-

low nail and the medial plate, and the femoral neck system has the advantages of small incision and short time-consuming in the operation process, which is a preferred surgical fixation method for femoral neck fractures.

【Keywords】 Femoral neck fractures; Biomechanics; Youth; Finite element analysis

股骨颈骨折是一种较为常见的髋部骨折,在世界范围内发病率较高^[1-2],现代社会随着汽车的普及,因车祸等高暴力损伤所致年轻患者的股骨颈骨折人数也在日益增多,对于骨量良好的老年患者和年轻患者,保留股骨头采用内固定的手术策略,有着较小的损伤和更好术后功能恢复^[3]。以年龄为参考,由于假体寿命的限制,一般小于65岁的患者主要采用内固定手术治疗。国外学者提出的Pauwels角分类是股骨颈骨折中一种经典的分类方式,按照骨折线与水平线的夹角将股骨颈骨折分为3类,即 $<30^\circ$ 为Pauwels I型, $30^\circ\sim 50^\circ$ 之间为Pawels II型, $>50^\circ$ 为Pauwels III型^[4]。本研究涉及的正是Pauwels III型,此种类型的股骨颈骨折临床上应用内固定治疗的策略包括空心钉固定、动力髋螺钉固定(dynamic hip screw, DHS)、锁定钢板固定和股骨颈系统(femoral neck system, FNS)固定等。临床上较成熟且使用较多的是空心钉和DHS固定,但都有着显著的优缺点,空心钉固定切口小但把持力不足,易发生骨不连,DHS固定稳定性好但手术切口大,持续的加压易导致股骨颈短缩的发生^[5]。何种方案能在提供足够稳定性的同时避免股骨颈短缩等并发症的发生便成了股骨颈骨折治疗的难点。已有研究表明:3枚空心钉加内侧支撑钢板与传统倒三角置入3枚空心钉对比,有更好的抗剪切力作用,生物力学稳定性更佳^[6]。FNS是近年来逐渐应用于临床的一种相对新颖的股骨颈骨折固定方式,有着切口小、耗时短的优点,其结构主要由动力棒、锁定钢板、锁定螺钉和抗旋螺钉构成,具有可与DHS媲美的生物力学稳定性^[6]。以上两种手术方案相较传统的置入3枚空心钉都有更强的稳定性,考虑到何种内固定方案能为患者提供更好的生物力学稳定性问题,目前尚缺乏研究FNS与3枚空心螺钉加内侧钢板生物力学稳定性的比较,为解决这个问题,本研究通过对这两种内固定方式固定Pauwels III型股骨颈骨折对其进行有限元分析。

资料和方法

一、有限元模型的建立

选取1名Pauwels III型股骨颈骨折住院患者(已自愿签署知情同意书),男,35岁,体重70 kg, X线检

查患者健侧股骨无髋部疾病且骨质良好,采用螺旋CT平扫,球管电压120 kV,电流150 mA,扫描层厚1 mm,扫描长度为转子顶点以上10 cm至膝关节平面,将所获得的数据以DICOM格式保存。以右侧近端股骨数据作为样本,将二维DICOM格式保存的数据导入Mimics15.0软件,在该软件中通过阈值分割,区域增长等命令建立粗略股骨模型,将其导入到Geomagic 2017软件中,对模型进行三角面片细分,降噪,光滑处理,并通过精确曲面等处理构建得到股骨松质骨与皮质骨的三维模型,将上述模型导入Solidworks软件中,模拟Pauwels III型骨折进行实体重构,切割骨折线为 60° 。

二、内固定有限元模型的建立及分组

使用Solidworks软件根据临床内固定器材数据分别构建本研究所涉及的2种内固定结构,分别为a. FNS组:动力棒直径10 mm,长94 mm,抗旋螺钉直径6.5 mm,长89 mm,(动力棒与螺钉夹角为 7.5°)及锁定板等模型组成,b. 3枚空心钉加内侧钢板组:3枚空心钉长度为2枚85 mm和1枚90 mm,除长度不同外其余均为:螺纹部分7.3 mm,螺钉光杆部分直径4.8 mm,中空直径为2.6 mm,内侧支撑钢板采用钢板厚度2.7 mm,宽度10.0 mm,配套螺钉直径3.5 mm。后在SolidWorks软件中将股骨三维模型与内固定模型装配到一起。实验分2组:a. FNS组:股骨颈系统置入股骨颈冠状面正中处,b. 空心钉加内侧钢板组:将3枚空心钉以倒三角形态置入股骨颈骨折模型中,并于股骨颈内侧置入1块支撑钢板、3枚配套螺钉,将上述所建实体模型在Ansys软件模块中自动划分网格,网格选用四面体solid185单元网格(图1)。a. 股骨颈系统组:410 174个节点,310 754个单元,b. 空心钉加内侧钢板组:467 235个节点,358 821个单元(表1)。

三、材料属性

在ANSYS有限元分析软件中的材料库中设置股骨和内固定物的材料参数,由于股骨近端形态不规则且骨质不均匀缺乏规律,将所有模型材质简化,分区域均设为均匀体,实验假设所有模型均为连续、各向同性和均匀的线弹性材料^[7](表2)。

四、边界条件及加载

假设骨折面完全断裂,且设定处于完全接触状态,钉和骨,钉与钉,板与钉之间形成绑定接触,在骨



图1 模型分组:股骨颈系统组(a);3枚空心钉加内侧钢板组(b)

表1 有限元模型的节点数及单元数

有限元模型	节点数	单元数
a组	410174	310754
b组	467235	358821

表2 模型材料参数

材料名称	弹性模量(MPa)	泊松比
皮质骨	16 800	0.30
松质骨	840	0.30
股骨头	900	0.29
股骨颈	620	0.29
钛合金	110 000	0.30

折表面上使用摩擦接触,摩擦系数设定为0.2^[8]。进行分析时,股骨远端表面的所有节点都被约束为0自由度,以防止刚体运动。正常人在行走时股骨颈所承受的力量约为体重的两到三倍,在股骨头中心引入相当于3倍体重的2 100 N的荷载^[9],以更好的模拟人体行走时的状态。

五、评价指标

(1)股骨头侧应力分布及应力峰值;(2)内固定应力分布及应力峰值;(3)股骨头处位移分布及位移峰值;(4)内固定位移分布及位移峰值。

结 果

一、股骨头侧应力分布及应力峰值

两种模型在股骨头侧的应力峰值均集中于股骨头侧断面与内固定连接处,模型的应力分布云图见图2~3,由图中数据可得出两组模型股骨头侧应力

峰值分别为:a: 126.74 Mpa, b: 180.11 Mpa。使用FNS固定时,股骨头承担的应力更小,能起到更好的支撑作用。

二、内固定应力分布及应力峰值

两种模型内固定应力峰值均集中于内固定与股骨头连接位置近骨折线处,其峰值为:a: 143.17 Mpa, b: 214.68 Mpa,见图4~5。使用FNS固定有最小的内固定应力,更不易出现断钉的状况。

三、股骨头处位移分布及位移峰值

在巨大的载荷之下,两组的股骨头处都发生了不同程度的位移,模型的位移分布云图数据显示,两股骨头处的位移峰值分别为:a: 10.726 mm, b: 11.278 mm,见图6~7。

四、内固定位移分布及位移峰值

两种模型内固定位移分布均呈现出顶端最大,底端最小。从顶端到底端位移不断缩小的趋势,其中顶端位移的峰值分别为:a: 10.164 mm, b: 11.004 mm,见图8~9。内固定位移的大小直接影响着骨折可否稳定固定,发生髓内翻与股骨颈短缩风险的大小,

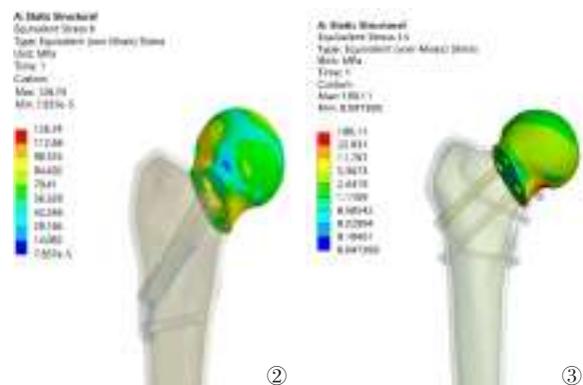


图2~3 两组模型股骨头侧应力分布云图

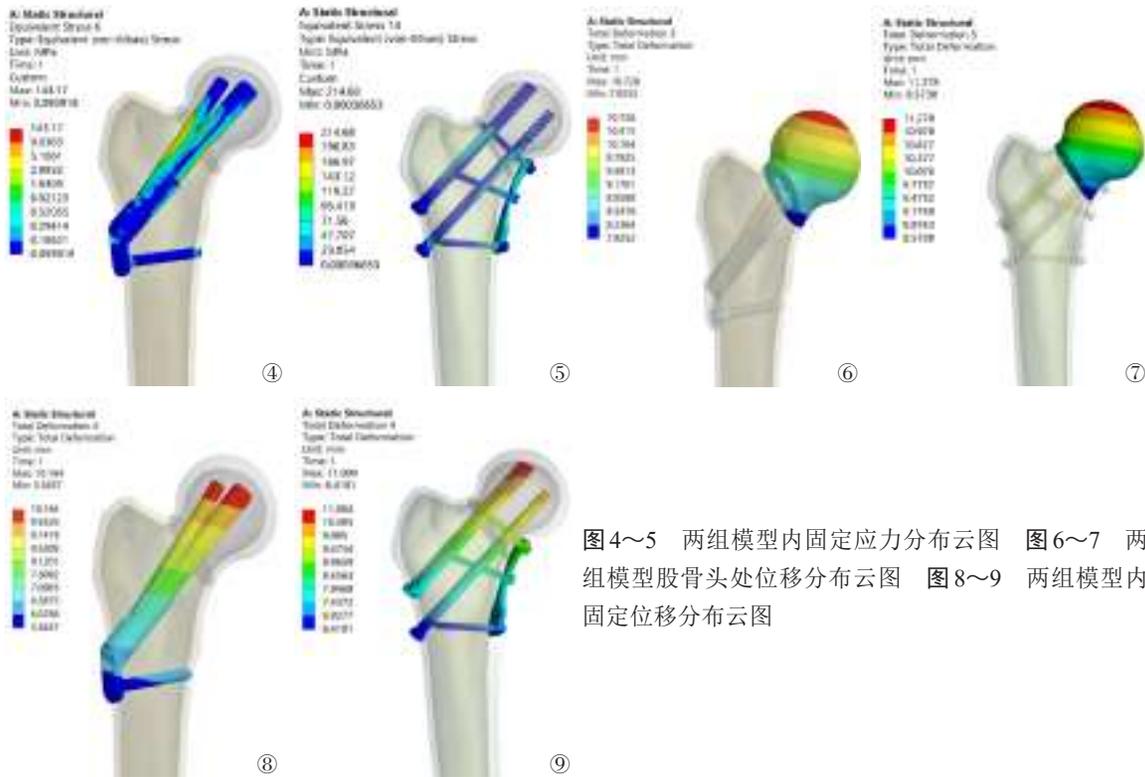


图4~5 两组模型内固定应力分布云图 图6~7 两组模型股骨头处位移分布云图 图8~9 两组模型内固定位移分布云图

可见FNS的内固定位移较小有着更好的稳定性。

讨 论

一、股骨颈骨折内固定手术的目标在于稳定的固定

青壮年股骨颈骨折常见于高能量损伤,其损伤机制决定骨折分型多为Pauwels III型,在青壮年股骨颈骨折的治疗方面,“保留自身髋关节”这一基本原则已得到绝大多数学者的认可^[10]。Pauwells III型骨折在临床治疗过程中难度较大,较易出现股骨颈短缩、髋外翻、骨不连等的相关并发症。国外有研究显示骨折的愈合分为直接骨愈合和间接骨愈合,间接骨愈合要经历组织分化、骨吸收等过程而直接骨愈合则跳过了组织分化、骨吸收等的中间步骤直接进展到哈弗斯系统的最终重建^[11]。大多数骨折固定后属于间接骨愈合,一定程度可控的轴向微动可刺激骨痂形成,而股骨颈骨折特殊之处在于大多数属于囊内骨折,血运差,囊内的关节滑液可防止血凝块形成不利于实现间接骨愈合,缺乏外骨膜的参与,骨折仅靠骨内愈合,因此股骨颈骨折内固定手术的目标就在于稳定的固定^[12]。

二、剪切力等因素所致的相关并发症问题突出 随着Pauwels角度的增大,股骨颈骨折断端所

承受的剪切力也呈现出显著增加的趋势,术后出现固定失败和骨不连的几率也越大,同时所要求的骨折固定强度也越高^[13]。所以Pauwels III型骨折也就是最棘手的股骨颈骨折分型,较为垂直的骨折线使其具有相对不稳定和较其它骨折分型会出现更大的剪切力的特点^[14]。对于股骨颈骨折的治疗,解剖复位是必须的,同时也要保持复位的稳定性,牢固的内固定正是维持其稳定性的关键^[15]。国外有诸多学者对较为年轻患者的股骨颈骨折固定结果进行了荟萃分析,包括Damany等^[16]回顾了50岁患者中缺血性坏死和骨不连的发生率,他们的分析包括1976年至2003年发表的18项研究中的564名患者,作者报告的缺血性坏死总发生率为23.0%,骨不连发生率为8.9%。还有Slobogean等^[17]报告了近20%的股骨颈骨折的患者进行了与髋部骨折相关的再次手术。Liporace等^[18]通过对75例Pauwels III型股骨颈骨折患者的术后随访结果总结出使用主流的内固定方案手术,尽管绝大多数病例复位及时,复位准确,但仍然会有10%左右的概率会在治疗后发生股骨头坏死,表明了治疗该型骨折的挑战性,仍然没有一种理想的内固定装置。上述国外学者的研究说明了在股骨颈骨折治疗中剪切力等相关因素所致的股骨颈短缩、髋外翻、骨不连等并发症是较为常见的,而本研究通

通过对 FNS 和 3 枚空心钉加内侧钢板固定青壮年 Pauwels III 型股骨颈骨折模型进行生物力学分析来比较二者的生物力学稳定性,为探究何种内固定具有更佳生物力学稳定性以对抗剪切力、减少相关并发症的出现提供参考。

三、FNS 有着较好的抗剪切力作用

解决股骨颈骨折稳定性的关键在于抵抗骨折断面剪切力,本研究中两组内固定模型股骨头处的位移峰值显示 FNS 固定的股骨头处位移峰值更小,故其具有更好的抗剪切力作用。在抗剪切力的研究方面,目前尚缺乏对 FNS 的深入研究,但已有诸多学者对 3 枚空心钉加内侧钢板的组合进行横向与相似内固定的对比,纵向与类似骨折部位的对比等的研究,其中有研究显示 3 枚空心钉加内侧钢板较经典的 3 枚空心钉固定方式能有效抵抗 Pauwels III 型股骨颈骨折的剪切力,为骨折愈合创造良好的力学环境^[19]。近年来, Mir 和 Collinge^[20]也提出股骨颈的内侧支撑与肱骨近端相似,在股骨颈骨折的治疗中尤为重要。有效的股骨颈内支撑可以抵抗股骨颈垂直骨折产生的强烈剪切力,使其保持解剖对齐,直至骨折固定后愈合,可见 3 枚空心钉加内侧钢板的方案在抗剪切力方面得到了学者们的肯定。Samsami 等^[21]的一项关于研究股骨颈骨折固定稳定性的有限元分析显示 DHS 加抗旋螺钉的组合在固定青壮年 Pauwels III 型股骨颈骨折中有着更出色的生物力学稳定性,这与 FNS 自带的抗旋螺钉设计类似, FNS 出色的抗旋作用也为 Pauwels III 型股骨颈骨折在早期骨愈合阶段提供了良好的力学环境有利于直接骨愈合的发生和缩短骨愈合的时间。Stoffel 等^[22]的一项生物力学研究表明 FNS 能为股骨颈骨折的治疗提供可靠的固定,其稳定性与 DHS 相当,均优于传统的 3 枚空心钉固定,除此之外还有着微创的显著优点。相较于传统手术方案,本研究有限元分析中涉及的两种方案都有更好的抗剪切力作用,在临床实践中无论是 DHS 还是空心钉加内侧支撑钢板的组合均有手术切口较大的特点,这无疑会损伤周围软组织甚至是股骨头的血供,而 FNS 在兼顾稳定性的同时,以其手术切口小,对股骨头血供破坏小的特点解决了这个问题。在本研究中,通过对各评价指标的综合分析发现 FNS 的所有上述评价指标均优于 3 枚空心钉加内侧支撑钢板,显示出更好

的生物力学稳定性,所以 FNS 是综合各方面因素的更佳选择,对于股骨颈骨折尤其是 Pauwels III 型股骨颈骨折的治疗仍处于探索过程中,推陈出新以及深入对新固定方式的研究是不断优化股骨颈骨折治疗方案的必经之路。

四、不足之处

本研究的局限性在于简化骨折模型和内固定细节,忽略周围肌肉和韧带对骨折稳定性的影响。此外,本研究是基于对 CT 图像模拟重建模型进行有限元分析的基础上进行的。然而,与本实验相比,实际的手术过程要复杂得多。因此,本文对两种不同内固定模型的生物力学进行了比较,得到的只是一个初步的结论,进一步的比较需要更大的临床研究样本,以验证实验结果的可靠性。

参 考 文 献

- Okcu G, Özkayın N, Erkan S, et al. Should full threaded compression screws be used in adult femoral neck fractures? [J]. *Injury*, 2015, 46 Suppl 2: S24-S28.
- Windolf M, Braunstein V, Dutoit C, et al. Is a helical shaped implant a superior alternative to the Dynamic Hip Screw for unstable femoral neck fractures? A biomechanical investigation [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2009, 24(1): 59-64.
- Knobe M, Altgassen S, Maier KJ, et al. Screw-blade fixation systems in Pauwels three femoral neck fractures: a biomechanical evaluation [J]. *Int Orthop*, 2018, 42(2): 409-418.
- Shen M, Wang C, Chen H, et al. An update on the Pauwels classification [J]. *J Orthop Surg Res*, 2016, 11(1): 161.
- Ye Y, Chen K, Tian K, et al. Medial buttress plate augmentation of cannulated screw fixation in vertically unstable femoral neck fractures: Surgical technique and preliminary results [J]. *Injury*, 2017, 48(10): 2189-2193.
- Lichstein PM, Kleimeyer JP, Githens M, et al. Does the Watson-Jones or modified Smith-Petersen approach provide superior exposure for femoral neck fracture fixation? [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2018, 476(7): 1468-1476.
- Sithiseripratip K, Van OH, Vander Sloten J, et al. Finite element study of trochanteric gamma nail for trochanteric fracture [J]. *Med Eng Phys*, 2003, 25(2): 99-106.
- Sowmianarayanan S, Chandrasekaran A, Kumar RK. Finite element analysis of a subtrochanteric fractured femur with dynamic hip screw, dynamic condylar screw, and proximal femur nail implants—a comparative study [J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2008, 222(1): 117-127.
- 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.
- Freitas A, Bontempo R L, Azevedo F, et al. New fixation method for Pauwels type III femoral neck fracture: a finite element analysis of sliding hip screw, L-shaped, and L-shaped with medial plate [J]. *Eur J*

- Orthop Surg Traumatol,2021,31(6):1069-1075..
- 11 Roerdink WH, Aalsma AM, Nijenbanning G, et al. The dynamic locking blade plate,a new implant for intracapsular hip fractures: biomechanical comparison with the sliding hip screw and Twin Hook [J]. Injury, 2008, 40(3): 283-287.
 - 12 Samsami S, Saberi S, Sadighi S, et al. Comparison of three fixation methods for femoral neck fracture in young adults: experimental and numerical investigations [J]. J Med Biol Eng, 2015, 35(5): 566-579.
 - 13 Li J, Wang M, Li L, et al. Finite element analysis of different configurations of fully threaded cannulated screw in the treatment of unstable femoral neck fractures [J]. J Orthop Surg Res, 2018, 13(1): 272.
 - 14 Li J, Yin P, Zhang L, et al. Medial anatomical buttress plate in treating displaced femoral neck fracture a finite element analysis [J]. Injury, 2019, 50(11): 1895-1900.
 - 15 Siavashi B, Aalirezai A, Moosavi M, et al. A comparative study between multiple cannulated screws and dynamic hip screw for fixation of femoral neck fracture in adults [J]. Int Orthop, 2015, 39(10): 2069-2071.
 - 16 Damany DS, Parker MJ, Chojnowski A. Complications after intracapsular hip fractures in young adults. A meta-analysis of 18 published studies involving 564 fractures [J]. Injury, 2005, 36(1): 131-141.
 - 17 Slobogean GP, Sprague SA, Scott T, et al. Complications following young femoral neck fractures [J]. Injury, 2015, 46(3): 484-491.
 - 18 Liporace F, Gaines R, Collinge C, et al. Results of internal fixation of Pauwels type-3 vertical femoral neck fractures [J]. J Bone Joint Surg Am Vol, 2008, 90A(8): 1654-1659.
 - 19 Tianye L, Peng Y, Jingli X, et al. Finite element analysis of different internal fixation methods for the treatment of Pauwels type III femoral neck fracture [J]. Biomed Pharmacother, 2019, 112: 108658.
 - 20 Mir H, Collinge C. Application of a medial buttress plate May prevent many treatment failures seen after fixation of vertical femoral neck fractures in young adults [J]. Med Hypotheses, 2015, 84(5): 429-433.
 - 21 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.
 - 22 Stoffel K, Zderic I, Gras F, et al. Biomechanical Evaluation of the Femoral Neck System in Unstable Pauwels III Femoral Neck Fractures: A Comparison with the Dynamic Hip Screw and Cannulated Screws [J]. J Orthop Trauma, 2017, 31(3): 131-137.

(收稿日期:2021-07-29)

(本文编辑:吕红芝)

杜兵, 马腾, 路遥, 等. 新型股骨颈内固定系统与3枚空心钉加内侧钢板固定青壮年Pauwels III型股骨颈骨折的有限元分析 [J/CD]. 中华老年骨科与康复电子杂志, 2021, 7(6): 333-338.