

# InterTan 治疗股骨转子间骨折有限元分析

郝连升, 关涛, 黄峰, 陈健, 穆胜凯, 朱贵伟  
(聊城市中医医院, 山东 聊城 252000)

**【摘要】** 目的: 利用有限元方法研究使用 InterTan 治疗 Evans-Jensen IV 型股骨转子间骨折的生物力学特点。方法: 利用螺旋 CT 对志愿者的股骨及内植物进行断层扫描获取 DICOM 格式数据, 将数据经 Mimics 软件重建左侧股骨、InterTan 三维模型, 在此基础上建立 Evans-Jensen IV 型股骨转子间骨折内固定三维有限元模型, 研究不同模型的 Von Mises 应力及微应变分布, 分析 Evans-Jensen IV 型股骨转子间骨折内固定后生物力学稳定性。结果: InterTan 模型股骨的应力模式与正常股骨相同, 主要位于股骨近端内侧与股骨中下 1/3 外侧, 但 InterTan 模型股骨应力较正常股骨相同部位应力有不同程度降低, 模型中股骨应力峰值为 13.92 MPa, 位于内植物末端与股骨接触处; 模型中内植物应力峰值位于拉力钉与主钉内下接触处, 为 146.5 MPa。结论: 对于骨质疏松性 Evans-Jensen IV 型股骨转子间骨折患者, InterTan 固定具有明显的生物力学优势, 且不易导致股骨中段应力性骨折; 尤其对于活动度较大的 Evans-Jensen IV 型股骨转子间骨折患者, InterTan 固定具有更好的稳定性, 为手术内固定物的选择提供理论依据。

**【关键词】** 股骨转子间骨折; 骨折固定术, 内; 有限元分析

中图分类号: R683.42

DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2019.02.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**Finite element analysis of InterTan for the treatment of femoral intertrochanteric fractures** HAO Lian-sheng, GUAN Tao, HUANG Feng, CHEN Jian, MU Sheng-kai, and ZHU Gui-wei. Liaocheng Chinese Medicine Hospital, Liaocheng 252000, Shandong, China

**ABSTRACT Objective:** To study the biomechanical characteristics of InterTan for the treatment of femoral intertrochanteric fracture of Evans-Jensen IV. **Methods:** Scanning the femur and internal plant of volunteers with spiral CT to obtain DICOM format data. Three-dimensional models of left femur and InterTan were reconstructed by Mimics software. On this basis, a three-dimensional finite element model of internal fixation for Evans-Jensen IV intertrochanteric fracture of femur was established. The stress and microstrain distribution of Von Mises in different models were studied. The biomechanical stability after internal fixation of the Evans Jensen IV femoral intertrochanteric fracture was analyzed. **Results:** The stress pattern of the femur of InterTan model was the same as that of the normal femur, which was mainly located on the medial side of the proximal femur and the lower third of the femur. However, the stress of femur in InterTan model was lower than that in the same part of normal femur. The peak stress of the femur in the model was 13.92 MPa, located at the end of the inner plant in contact with the femur. The stress peak of the plant in the model was 146.5 MPa at the lower contact point between the tension nail and the main nail. **Conclusion:** InterTan fixation has obvious biomechanical advantages and is not easy to cause stress fractures in the middle femur in patients with osteopenic Evans-Jensen IV intertrochanteric fractures. In particular, for patients with greater activity in the intertrochanteric fracture of the Evans-Jensen IV femur, InterTan fixation has better stability and provides a theoretical basis for the choice of internal fixation.

**KEYWORD** Femoral intertrochanteric fractures; Fracture fixation, internal; Finite element analysis

股骨转子间骨折(intertrochanteric fracture, FF)是指发生于髋关节囊线以外至小转子下方区域内的骨折,多见于老年人<sup>[1]</sup>。股骨转子间骨折的治疗方式主要为髓内与髓外两种,因髓内固定系统力臂较短、固定强度大、手术创伤小、出血少,已经被广泛接

受<sup>[2]</sup>。而髓内固定亦有不足之处,常出现股骨干中段骨折、拉力钉切出等并发症。因此对于股骨转子间骨折内固定方式的探索一直未间断。InterTan 拉力钉采用 2 枚交锁加压螺钉,能有效避免“Z”字效应的发生,主钉的近端采用梯形横截面设计,加强了旋转稳定性<sup>[3]</sup>,髓内固定在股骨转子间骨折获得良好的临床疗效<sup>[4]</sup>,InterTan 是髓内固定的发展产物,本研究在获得临床疗效基础上,通过运用三维有限元分析法,对 InterTan 治疗 Evans-Jensen IV 型股骨转子间骨折的生物力学进行分析比较,以期为患者治疗方

基金项目:山东省中医药科技发展计划项目(编号:2015-481)

Fund program: Shandong TCM Science and Technology Development Project (No. 2015-481)

通讯作者:朱贵伟 E-mail: hls19860722@163.com

Corresponding author: ZHU Gui-wei E-mail: hls19860722@163.com

案的选择提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 有限元模型的建立

选 1 名健康男性志愿者(年龄 30 岁, 体重 70 kg), 螺旋 CT(DscoveryHD750, GE 公司, 美国)扫描志愿者股骨(层距 0.6 mm), 得到扫描断层图像, 以 DICOM 格式保存。将数据导入 Mimics15.0 (Materalse 公司, 比利时), 根据骨骼阈值(226~1 779 Hu)生成股骨蒙板, 对蒙板消除数据缺陷, 得到股骨几何模型。将股骨模型导入 Cem 软件生成六面体网格, 单元尺寸 2 mm×2 mm×2 mm, 共 47 368 个网格, 53 494 个节点。根据 Evans-Jensen 股骨转子间骨折分型, 利用 Hypermesh 生成 IV 型骨折模型。

将骨折模型再次导入 Mimics 15.0, 进行材料赋值。通过分析股骨灰度值(gray value)范围, 将体网格中的灰度值分成相等的 10 个区域, 通过经验公式将灰度值转化成密度值(density) ( $density = -13.4 + 1.017 \times gray\ value$ ), 再把所得的密度值分配给相应的体网格, 接着为每一种物质定义弹性模量(E-modulus) ( $E-modulus = -388.8 + 5.925 \times density$ ), 见表 1。因股骨转子间骨折多为老年骨质疏松性骨折, 本研究将有关材料的弹性参数设定为正常骨的 66%<sup>[5]</sup>。利用上述同样方法获得内植物几何模型, 将几何模型导入到 Hypermesh 进行网格划分, InterTan 共 39 530 个网格, 9 141 个节点。然后导入到 Abaqus 进行材料赋值和装配, 内植物的弹性模量 E=110 GPa, 泊松比  $\nu=0.33$ , 见表 1。最后利用软件 Hypermesh 10.0, 将内植物根据操作指南植入骨折模型<sup>[6]</sup>, 生成骨折内固定有限元模型。模型为 InterTan 固定 Evans-Jensen IV 型骨折模型。

### 1.2 边界条件及加载

假设为骨折面完全断裂并处于接触状态, 摩擦系数为 0.2<sup>[7]</sup>, 根据临床上对 Evans-Jensen IV 型股骨转子间骨折不进行小转子固定, 本实验将小转子部设为游离, 内植物头钉与主钉之间的接触关系为绑定, 股骨和内植物之间的接触关系为绑定。

股骨近端所承受力量载荷十分复杂, 主要包括髌关节反作用力、关节周围肌肉力量、摩擦力和冲击力等, 人体的体位改变和动作变化都会影响到这些力量载荷的大小, 因此无法模拟所有的载荷情况。根据 Bergmann 等<sup>[8]</sup>研究, 步行过程中力的峰值可达 2.6~2.8 倍体质量。结合相关文献<sup>[9]</sup>及志愿者体质量, 在股骨头上加载 2 100 N(3 倍体重), 力线与股骨干成 15°角, 忽略关节周围肌肉力、摩擦力和冲击力的影响, 并参考相似研究<sup>[10]</sup>, 将股骨模型远端全部节点

表 1 各区域弹性模量及泊松比

Tab.1 Elastic modulus and Poisson's ratio in different regions

密度 (kg/mm <sup>3</sup> )	弹性模量 (MPa)	泊松比
0.000 670 17	3 838.55	0.3
0.000 792 90	4 565.77	0.3
0.000 915 64	5 292.99	0.3
0.001 038 38	6 020.20	0.3
0.001 161 12	6 747.44	0.3
0.001 283 85	7 474.63	0.3
0.001 406 59	8 201.82	0.3
0.001 529 33	8 929.07	0.3
0.001 652 07	9 656.26	0.3
0.001 774 80	1 0383.5	0.3

的自由度施加约束, 限制矢状面、冠状面及轴向 3 个方向的位移为 0。

### 1.3 观察项目与方法

根据以下观察点观察股骨在 InterTan 植入后所受到应力评估内置物稳定程度, 观察点包括:(1)股骨各象限平均应力, 将股骨近端在水平状面上分成 18 个节段, 并将每个节段按前后内外分成 4 个象限, 取每个象限所有节点应力均值作为该区域的骨质应力水平(图 1)。(2)股骨各部位最大应力。(3)内置物最大应力及位置。(4)股骨微应变峰值及位置。

## 2 结果

### 2.1 正常股骨 von Mises 应力变化

完整股骨有限元模型模拟步行过程中最大负荷, 研究结果显示股骨应力主要分布在股骨近端内侧及股骨中下 1/3 外侧, 股骨张力骨小梁处应力较小, 而压力骨小梁和股骨距为主要应力集中区, 与刘建斌等<sup>[11]</sup>研究结果相似, 符合骨小梁的分布特点。股骨应力峰值 24.86 MPa, 位于内侧小转子下方(图 2a、图 3)。

### 2.2 InterTan 模型股骨 von Mises 应力分布

在相同加载条件下, InterTan 模型股骨应力分布(图 2b)及各象限平均应力分布曲线图(图 3)。研究结果显示 InterTan 内植物植入 Evans-Jensen IV 型股骨转子间骨折模型后, 未改变股骨的整体应力模式, 股骨应力主要分布在股骨近端内侧及股骨中下 1/3 外侧, 但应力峰值低于正常股骨。模型股骨应力峰值为 13.92 MPa, 位于内固定末端与股骨接触处, 模型相同部位最大应力为 10.07 MPa。

### 2.3 InterTan 模型内植物 von Mises 应力分布

在相同加载条件下, 模型内植物应力主要位于内侧。模型中内植物应力峰值位于拉力钉与主钉内

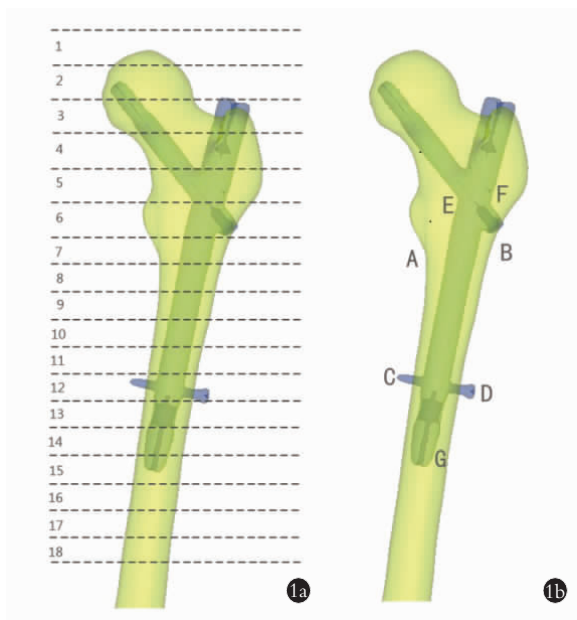


图 1 股骨 InterTan 植入后示意图 1a. 股骨近端节段图 1b. A 点(股骨小转子下缘)为股骨近端内侧最大应力点;B 点为股骨近端外侧最大应力点;C 点为内植物远端锁钉处股骨内侧最大应力点;D 点为内植物远端锁钉处股骨外侧最大应力点;E 点为内植物拉力钉与主钉内侧最大应力点;F 点为内植物拉力钉与主钉外侧最大应力点;G 点为内植物末端与股骨接触处最大应力点

Fig.1 Sketch map of femur after InterTan implantation 1a. Proximal segment of the femur 1b. A point(lower edge of the femur) is the maximum stress point of the proximal medial femur;B point is the maximum stress point of the proximal lateral femur;C point is the maximum stress point of the medial femur at the distal locking point of the inner plant;D point is the maximum stress point of the lateral femur at the distal locking point of the inner plant;E point is the maximum stress point of the inner plant tension nail and the inside of the main nail;The maximum stress point of the plant tension nail and the main nail in the F point;G point is the maximum stress point at the contact between the end of the inner plant and the femur

下接触处,为 146.5 MPa,而内植物与股骨接触处峰值为 13.92 MPa。

### 2.4 InterTan 模型股骨微应变情况

应变指在外力等因素作用下物体局部的相对变形,是形变量与原来尺寸比值,用  $\epsilon$  表示,即  $\epsilon = \Delta L / L$ ,微应变是用来描述极其微小的形变,用  $\mu\epsilon$  表示,  $\mu\epsilon = (\Delta L / L) \times 10^6$ 。I 组模型的微应变情况(见图 2c)。模型最大微应变为 2 230  $\mu\epsilon$ ,发生于股骨中段与内固定末端接触处模型同部位微应变为 2 113  $\mu\epsilon$ 。

## 3 讨论

### 3.1 有限元模型在临床中的应用

有限元分析法是将研究对象转换为具有有限单元组合体的模型,利用模型模拟研究对象的生物力学特点。该方法具有可行性强、计算精度高,能直观地反映模型整体或局部的生物力学特点。本研究模型使用螺旋 CT 对股骨及内植物进行薄层扫描,运用三维重建软件 Mimics 建立几何模型,可以高度模拟骨骼及内植物的几何形态。Burkhart 等<sup>[12]</sup>研究显示,最大网格单元长度 < 1 mm 会极大地增大运算量, > 3 mm 则会大大降低有限元的准确性,故股骨模型采用单元尺寸 2 mm × 2 mm × 2 mm 六面体网格。模型材料属性运用经验公式将 CT 断层图像各位置的灰度值转化成密度值,再把所得的密度值转化为弹性模量。因此,本研究模型可以最大程度模拟股骨各项生物力学特性,可以为 Evans-Jensen IV 型股骨转子间骨折的治疗提供一定的理论依据。

### 3.2 内固定术后股骨生物力学变化

根据应力遮挡原理,骨折内固定术后由具有较高弹性模量的内植物承担较高的载荷,而弹性模量较低的股骨承载较低的载荷,以降低骨折断端过大

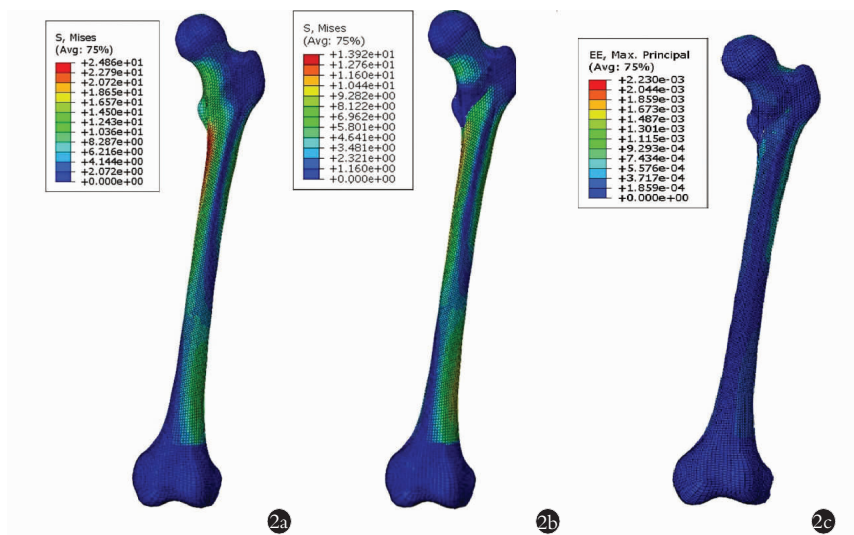


图 2 应力云图 2a. 正常股骨应力云图 2b. 模型股骨应力云图 2c. 模型股骨微应变图

Fig.2 Stress cloud map 2a. Normal femoral stress cloud map 2b. Stress cloud map of femur model 2c. Microstrain of femur model

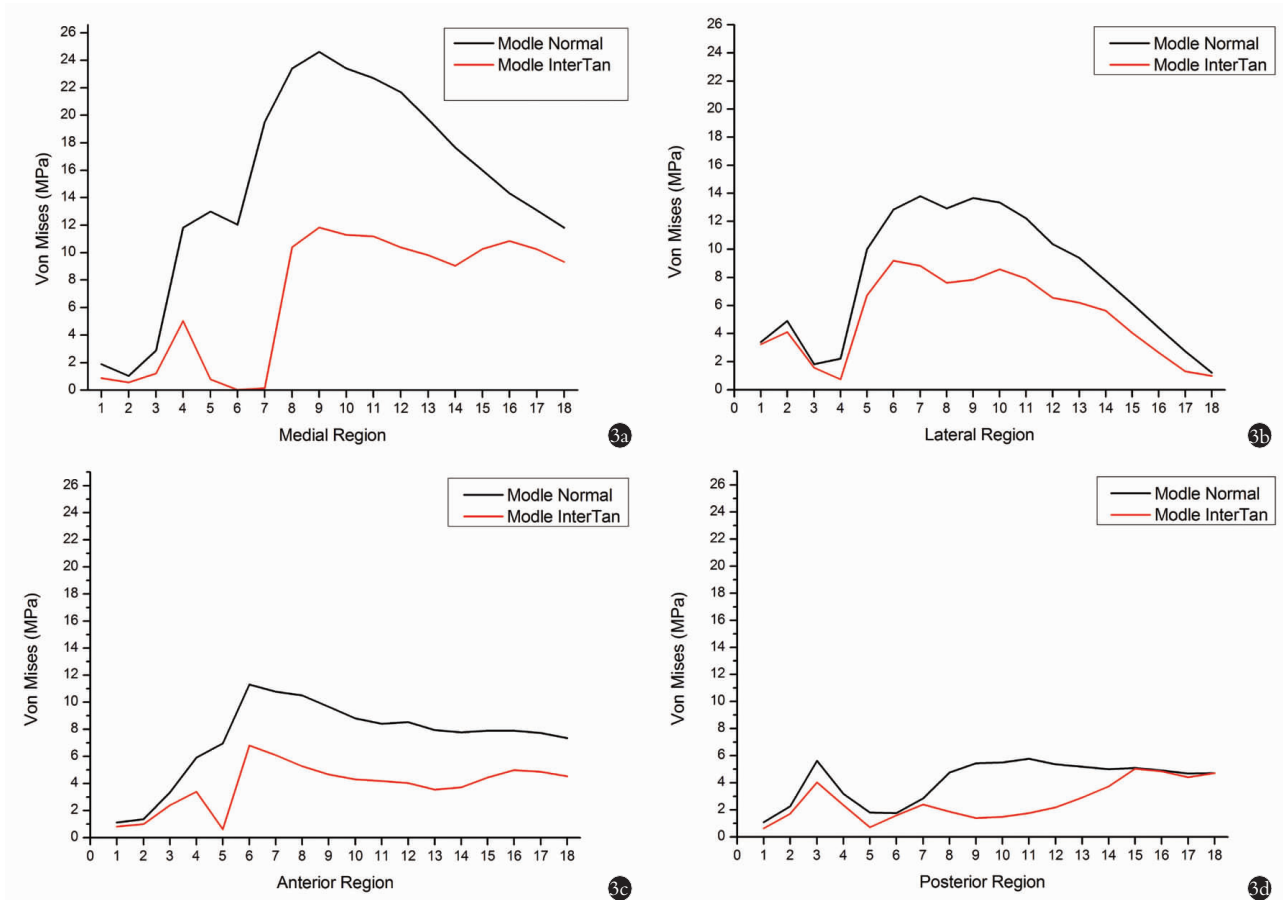


图 3 股骨各象限平均应力 3a. 内侧象限 3b. 外侧象限 3c. 前侧象限 3d. 后侧象限  
 Fig.3 Average stress in each quadrant of the femur 3a. Medial quadrant 3b. Lateral quadrant 3c. Anterior quadrant 3d. posterior quadrant.

的应力,并将载荷向股骨远处传导。通过内置物承担的载荷来评定内置物对骨折断端的稳定性,而 Inter-Tan 很好的传导应力,承担骨折术后主要的载荷。

股骨近端内侧应力体现了股骨转子间骨折术后总体抗压能力,当压力传导受阻,内侧应力出现集中,就会出现局部骨质嵌插,颈干角减小,类似髓内翻发生。基础研究与临床试验充分体现 InterTan 抗扭转能力,InterTan 可以避免髓内翻的发生。

Evans-Jensen IV 型股骨转子间骨折常累及内侧股骨距,破坏了股骨近端内侧区域框架结构,内侧骨质缺失易导致外侧张应力增加。InterTan 可为 Evans-Jensen IV 型股骨转子间骨折提供可靠固定。

### 3.3 股骨的应力性骨折

股骨中段应力性骨折是股骨转子间骨折内固定术后失败的原因之一,而内植物与股骨髓腔的不匹配被认为是应力性骨折的主要原因。而 Intertan 固定后内固定末端应力要远远低于股骨干皮质屈服强度。

根据“机械负荷理论”<sup>[13]</sup>:生理载荷引起的应变范围 100~1 500  $\mu\epsilon$ , 骨组织的吸收和形成可保持相对平衡;应变范围 1 500~3 000  $\mu\epsilon$ , 骨组织的塑形和重建活跃,增加骨量和骨强度;当应变超过 3 000  $\mu\epsilon$

时,骨微损伤产生过多,无法得到完整修复,进而引起骨小梁断裂和骨的疲劳骨折。Intertan 固定后不易发生股骨中段应力性骨折<sup>[14]</sup>。

### 3.4 内植物的疲劳性断裂

理想的内固定能够将髌关节的作用力顺利向下传导,避免发生应力集中。Evans-Jensen IV 型股骨转子间骨折内侧稳定性遭到破坏,压应力不能由股骨距向下传导,对于此型骨折采用髓内固定时,内植物承担了主要载荷。Intertan 固定后的应力峰值未达到疲劳断裂强度,能够为骨折提供可靠固定,对于活动量较大的 Evans-Jensen IV 型股骨转子间骨折患者,推荐使用 InterTan 治疗。

本研究存在一些不足之处,首先,股骨近端所承受力量载荷十分复杂,研究中将股骨近端承受的主要外力进行简化处理,没有考虑肌肉对股骨的应力影响;其次,拉力钉切出亦是髓内钉治疗股骨转子间骨折的重要并发症,再加上临床医师在操作过程的熟练程度也会影响临床结果,本研究中尚未涉及。将在今后的研究中进一步完善。

### 参考文献

[1] 高超,王淑君,于普林. 人口老龄化的现状及发展趋势[J]. 中华

- 老年医学杂志, 2014, 33(8): 924-926.
- GAO C, WANG SJ, YU PL. The status and development trend of population ageing[J]. Zhonghua Lao Nian Yi Xue Za Zhi, 2014, 33(8): 924-926. Chinese.
- [2] 曹燕明, 何敏辉, 张美超, 等. 具有可扩张翼的动力髋螺钉固定股骨转子间骨折的三维有限元分析[J]. 中华关节外科杂志(电子版), 2017, 11(3): 272-279.
- CAO YM, HE MH, ZHANG MC, et al. Power hip screw with extensible wing to fix the femoral intertrochanteric. Three-dimensional finite element analysis of fractures[J]. Zhonghua Guan Jie Wai Ke Za Zhi(Dian Zi Ban), 2017, 11(3): 272-279. Chinese.
- [3] 朱佳福, 徐卫星, 刘宏. InterTan 髓内钉治疗老年股骨转子间冠状位骨折的病例对照研究[J]. 中国骨伤, 2016, 29(12): 1130-1134.
- ZHU JF, XU WX, LIU H. Case-control study on InterTan intramedullary nail in treating coronal femoral intertrochanteric fracture in elderly[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2016, 29(12): 1130-1134. Chinese with abstract in English.
- [4] 孙群周, 阮成群, 李光明, 等. 重建股骨距与股骨近端防旋髓内钉治疗老年不稳定股骨粗隆间骨折的疗效比较[J]. 中国骨伤, 2016, 29(8): 684-688.
- SUN QZ, RUAN CQ, LI GM, et al. Comparison of clinical effect between reconstructing femoral calcar and proximal femoral antirotation nail for the treatment of unstable femoral intertrochanteric fracture in elderly patients[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2016, 29(8): 684-688. Chinese with abstract in English.
- [5] 马信龙, 马剑雄, 徐卫国, 等. 骨科生物力学研究的测量方法学专家共识[J]. 中国骨质疏松杂志, 2014, 20(9): 1039-1054.
- MA XL, MA JX, XU WG, et al. Expert consensus on measurement methods for orthopedic biomechanics research[J]. Zhongguo Gu Zhi Shu Song Za Zhi, 2014, 20(9): 1039-1054. Chinese.
- [6] Goffin JM, Pankaj P, Simpson AH. The importance of lag screw position for the stabilization of trochanteric fractures with a sliding hip screw: a subject-specific finite element study[J]. J Orthop Res, 2013, 31(4): 596-600.
- [7] 何祥鑫, 林梓凌, 李鹏飞, 等. 基于 Hypermesh 14.0 和 LS-DYNA 的老年转子间骨折有限元建模分析[J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(11): 1725-1730.
- HE XX, LIN ZL, LI PF, et al. Finite element modeling analysis of interrotor fractures in the elderly based on Hypermesh 14.0 and LS-DYNA[J]. Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu, 2018, 22(11): 1725-1730. Chinese.
- [8] Bergmann G, Deuretzbacher G, Heller M, et al. Hip contact forces and gait patterns from routine activities[J]. J Biomech, 2001, 34(7): 859-871.
- [9] 石俊俊, 王宇泽, 李渊, 等. PFNA 与 InterTAN 治疗股骨转子间骨折的疗效与安全性的 Meta 分析[J]. 中国骨伤, 2017, 30(10): 933-939.
- SHI JJ, WANG YZ, LI Y, et al. Meta-analysis of the efficacy and safety of PFNA and InterTAN for the treatment of intertrochanteric fractures[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2017, 30(10): 933-939. Chinese with abstract in English.
- [10] 王连净, 曾宪铁. 防旋股骨近端髓内钉 II 和亚洲股骨髓内钉内固定修复老年股骨转子下骨折的生物力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(31): 4644-4650.
- WANG LJ, ZENG XT. Biomechanical analysis of the repair of subtrochanteric fractures of the femur in the elderly by intramedullary nailing II of the acoroidal femur and internal nailing of the Asian femoral bone marrow[J]. Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu, 2016, 20(31): 4644-4650. Chinese.
- [11] 刘建斌, 刘敏, 马林, 等. 防旋髓内钉和 InterTan 固定 A3 型股骨转子间骨折: 生物力学变化的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(26): 4242-4246.
- LIU JB, LIU M, MA L, et al. Anti-rotation intramedullary nail and InterTan fixation A3 type intertrochanteric fracture of the femur: finite element analysis of biomechanical changes[J]. Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu, 2015, 19(26): 4242-4246. Chinese.
- [12] Burkhart TA, Andrews DM, Dunning CE. Finite element modeling mesh quality, energy balance and validation methods: a review with recommendations associated with the modeling of bone tissue[J]. J Biomech, 2013, 46(9): 1477-1488.
- [13] 王爱国, 谷福顺, 郑昆仑, 等. 股骨粗隆间骨折单臂外固定术后站立状态肌骨有限元模型的建立及其应力分析[J]. 中华中医药杂志, 2016, 31(3): 1020-1024.
- WANG AG, GU FS, ZHENG KL, et al. Establishment of FEM model and stress analysis of stand-up muscle bone after single arm external fixation of intertrochanteric fractures[J]. Zhonghua Zhong Yi Yao Za Zhi, 2016, 31(3): 1020-1024. Chinese.
- [14] 姜自伟, 黄枫, 郑晓辉, 等. 股骨转子间骨折不同固定方式影响股骨近端应力的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(44): 6599-6605.
- JIANG ZW, HUANG F, ZHENG XJ, et al. Finite element analysis of intertrochanteric fracture affecting proximal femoral stress by different fixation methods[J]. Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu, 2016, 20(44): 6599-6605. Chinese.

(收稿日期: 2018-08-20 本文编辑: 王玉蔓)