

· 基础研究 ·

# 外侧壁破裂股骨粗隆间骨折三种内固定有限元分析

赵豪<sup>a</sup>, 高山<sup>a</sup>, 陈庭瑞<sup>b</sup>

(河南省驻马店市中心医院 a. 关节外科; b. 创伤骨科, 河南驻马店 463000)

**摘要:** [目的] 比较三种内固定外侧壁破裂型股骨粗隆间骨折的力学特性。[方法] 自1名志愿者采集股骨CT图像, 在Mimics14.0、Geomagic Studio、CERO3.0、Hypermesh13.0软件处理, 分别构建外侧壁破裂型股骨粗隆间骨折的PFNA、PFNA张力带和锁定钢板内固定模型。在Abaqus6.12中加载, 分析内固定及骨折端应力和位移变化。[结果] 三种内固定模式的Von Mises应力由大至小依次为颈干交界>股骨头区>骨折区, 差异有统计学意义( $P<0.05$ )。股骨头区Von Mises应力由大至小依次为PFNA>PFNA张力带>锁定钢板, 差异有统计学意义( $P<0.05$ ); 骨折区Von Mises应力三组间差异均无统计学意义( $P>0.05$ ); 颈干交界区Von Mises应力由大至小依次为PFNA>锁定钢板>PFNA张力带, 差异有统计学意义( $P<0.05$ )。三种固定物骨折端位移由小至大依次为PFNA张力带<锁定钢板<PFNA ( $P<0.05$ )。[结论] PFNA联合张力带固定治疗外侧壁破裂型股骨粗隆间骨折, 能够减小应力和位移, 有利于骨折端稳定。

**关键词:** 股骨粗隆间骨折, 外侧壁破裂, 股骨近端防旋髓内钉, 张力带, 锁定钢板

**中图分类号:** R683.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2023) 06-0538-05

**A finite element analysis on three kinds of internal fixation for femoral intertrochanteric fracture with lateral wall fracture**  
// ZHAO Hao<sup>a</sup>, GAO Shan<sup>a</sup>, CHEN Ting-ru<sup>b</sup>. a. Department of Joint Surgery, b. Department of Traumatic Orthopaedics, Central Hospital of Zhumadian City, Zhumadian 463000, China

**Abstract:** [Objective] To compare the mechanical properties of three kinds of internal fixation for femoral intertrochanteric fractures with lateral wall fracture. [Methods] The CT images of femur were obtained from a volunteer and processed by MIMICS14.0, Geomagic Studio, CERO3.0, Hypermesh13.0 software to create the models of proximal femoral nail anti-rotation (PFNA), PFNA enhanced by tension band and locking plate as internal fixation for femoral intertrochanteric fractures with ruptured lateral wall respectively. The Von Mises stress and displacement of the implant and fractures were analyzed by using Abaqus6.12. [Results] All the Von Mises stresses of the three internal fixation modes were in descending order as the neck-trunk junction > femoral head > fracture site, with statistically significant differences ( $P<0.05$ ). The Von Mises stress in femoral head was in descending order as PFNA > PFNA-tension band > locking plate with a statistically significant difference among them ( $P<0.05$ ), whereas which proved not significantly different in the fracture site among the three groups ( $P>0.05$ ), and were significantly ranked up-down in neck-trunk junction as PFNA > Locking plate > PFNA-tension band ( $P<0.05$ ). Conversely, displacements of fracture ends were significantly arranged down-up in order of PFNA-tension band < locking plate < PFNA ( $P<0.05$ ). [Conclusion] PFNA enhanced by tension band fixation does reduce the stress and displacement of femoral intertrochanteric fracture complicated with lateral wall fracture, which is beneficial to the stability of fracture ends.

**Key words:** femoral intertrochanteric fractures, lateral wall rupture, proximal femoral nail anti-rotation, tension band, locking plate

股骨粗隆间骨折是老年人常见的髋部骨折类型, 但外侧壁骨质薄弱或骨折的患者, 常出现内固定失效、股骨头部切出等并发症<sup>[1]</sup>。随着对髋部生物力学研究的深入, 有学者们提出股骨粗隆外侧壁的概念, 该结构的范围近端至股外侧肌嵴与大粗隆相接, 远端至小粗隆中点平面的股骨近端外侧皮质<sup>[2, 3]</sup>。股骨粗隆外侧壁为多种内固定系统股骨颈主钉的进针点, 发挥外侧阻挡及支点作用<sup>[4]</sup>。依据外侧壁的完整程度,

将股骨粗隆间骨折分为3个亚型<sup>[5]</sup>, 即外侧壁稳定型、外侧壁危险型、外侧壁破裂型, 其中外侧壁破裂型在内固定选择方面仍存在不同观点<sup>[6, 7]</sup>。本研究采用有限元的方法观察股骨近端髓内钉 (proximal femoral nail anti-rotation, PFNA) 与股骨近端锁定钢板对外侧壁危险型股骨粗隆间骨折稳定性影响。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究对象

选择1例75岁健康志愿者为研究对象，纳入标准为髋部无骨折病史，X线检查髓关节发育正常，无畸形及肿瘤。PFNA及股骨近端外侧锁定板均参照山东威高骨科材料有限公司的相关参数进行设计。

### 1.2 外侧壁破裂型股骨粗隆间骨折有限元模型的建立

螺旋CT扫描志愿者骨盆至股骨中段，获得的薄层图像导入医学图像处理软件Mimics 14.0识别股骨区域，建立股骨的三维模型，以TXT点云格式保存，导入逆向工程软件Geomagic Studio，将点云转换为三角片模型进行补片、光滑等处理，形成股骨NUMBERS曲面模型。在CERO 3.0中，根据每种内固定的相关参数，设计出PFNA、PFNA张力带和锁定钢板的模型。

上述模型以IGES格式导入有限元前处理软件Hypermesh中进行装配及网格划分。对股骨近端骨骼模型参照外侧壁破裂型股骨粗隆间骨折的骨折线走行方向进行切割，外侧壁骨折线通过降低远端单元的材料属性进行模拟。

将PFNA和锁定钢板系统导入Hypermesh进行装配，建立PFNA模型、PFNA+张力带模型及锁定钢板模型固定股骨外侧壁破裂股骨粗隆间骨折模型，见图1。各个结构的设计为各向同性线弹性材料，材料力学参数及单元类型见表1<sup>[8-10]</sup>。

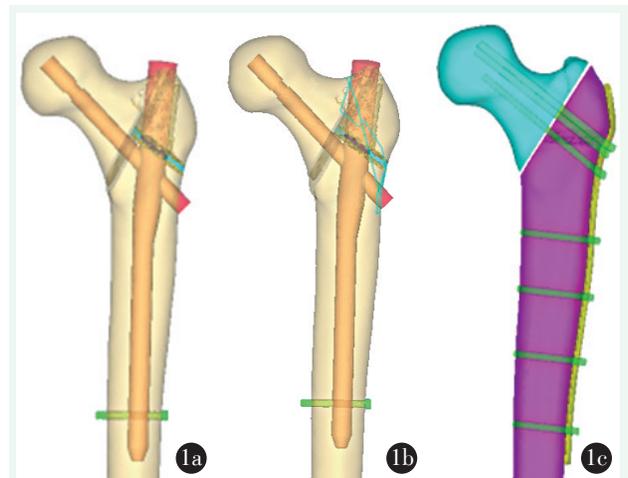


图1 三种内固定有限元模型 1a: PFNA模型 1b: PFNA+外侧张力带模型 1c: 锁定钢板模型

表1 有限元模型中各结构的力学参数及单元类型

指标	皮质骨	松质骨	骨折端	PFNA	锁定钢板	螺钉	钢丝
弹性模量 (MPa)	12 000	1 600	5	110 000	110 000	12 000	-
泊松比 (%)	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	0.3	-
单元类型	C3D4	C3D4	C3D4	C3D4	C3D4	C3D4	弹簧单元

### 1.3 股骨近端模型的边界条件及工况

在有限元计算软件Abaqus 6.12中进行力学分析及后处理。边界条件设定为股骨远端平面，约束各节点的平移和旋转自由度。人体重力添加在股骨头负重区，外展肌肌力添加在大粗隆顶端，调整载荷的大小及方向，以模拟双足站立和单足站立两种状态。

### 1.4 评价指标

观察在不同载荷下，股骨头内部、螺旋刀片及空心锁钉、内固定外侧壁部位的Von Mises应力，骨折端上下区域的位移及应力，为便于研究本实验中将骨折断端分为上下两个区域，其中上区为股骨颈上方与大粗隆内侧交界，下区为股骨距部位的骨折端。

### 1.5 统计学方法

采用SPSS 24.0软件进行统计学处理。计量数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示，资料符合正态分布，多组间比较采用单因素方差分析，采用LSD法进行组间比较。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 模型的有效性验证

本研究建立的股骨近端三维有限元模型解剖参数符合大部分人体实际情况。在PFNA模型中，出现的应力分布规律与Zheng等<sup>[12]</sup>研究结论一致，即PFNA固定时股骨侧最大应力均位于内固定远端股骨内侧，而内固定最大应力点位于螺旋刀片与主钉交叉处内侧，从而验证了本实验建立的有限元模型的有效性。

### 2.2 三种内固定模型不同区域应力分布

无论是单腿站立载荷还是双足站立载荷，PFNA+张力带模型和PFNA模型的内固定应力集中在螺旋刀片与主钉结合部，锁定钢板模型则集中在股骨颈下方2枚螺钉及钢板结合部，见图2。不同区域Von Mises应力检测结果见表2，双足站立与单足站立状态下，

三种内固定模式的 Von Mises 应力由大至小依次为颈干交界>股骨头区>骨折区, 差异有统计学意义 ( $P<0.05$ )。股骨头区 Von Mises 应力由大至小依次为 PFNA>PFNA 张力带>锁定钢板, 差异有统计学意义

( $P<0.05$ ) 骨折区 Von Mises 应力三组间差异均无统计学意义 ( $P>0.05$ ); 而颈干交界区 Von Mises 应力由大至小依次为 PFNA>锁定钢板>PFNA 张力带, 差异有统计学意义 ( $P<0.05$ )。

表 2 三种内固定模型不同区域 Von Mises 应力检测结果 (MPa,  $\bar{x} \pm s$ ) 与比较

工况与部位	PFNA 模型	PFNA+张力带模型	锁定钢板模型	P 值
双足站立				
股骨头区	73.7±6.4	68.6±4.1	60.4±5.2	<0.001
骨折区	61.6±4.4	60.7±3.3	60.1±4.5	0.181
颈干交界区	93.3±7.2	76.3±6.6	83.7±4.5	<0.001
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	
单足站立				
股骨头区	113.4±9.6	108.3±8.3	93.6±7.2	<0.001
骨折区	85.7±7.2	83.5±6.6	83.2±7.1	0.144
颈干交界区	158.5±10.4	126.4±8.8	138.2±9.9	<0.001
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	

### 2.3 三种内固定骨折端的应力及位移变化

三种内固定骨折端的应力及位移测量结果见表 3, 无论单足负重还是双足负重, 三种固定骨折下区的应力均显著大于骨折下区 ( $P<0.05$ ); 相反, 三种

固定骨折下区的位移均小于骨折上区 ( $P<0.05$ )。无论单足负重还是双足负重, 三种固定物骨折端位移由小至大依次为 PNFA 张力带<锁定钢板<PFNA ( $P<0.05$ )。

表 3 三种内固定模型骨折端 Von Mises 应力和位移检测结果 (MPa,  $\bar{x} \pm s$ ) 与比较

工况与部位	PFNA 模型	PFNA+张力带模型	锁定钢板模型	P 值
双足站立				
应力 (MPa)				
骨折下区	53.3±5.3	42.8±4.9	41.5±3.8	<0.001
骨折上区	21.8±3.1	33.2±4.5	34.6±4.1	<0.001
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	
位移 (mm)				
骨折下区	1.4±0.2	1.0±0.2	1.1±0.1	<0.001
骨折上区	1.8±0.3	1.1±0.3	1.2±0.3	<0.001
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	
单足站立				
应力 (MPa)				
骨折下区	64.1±5.5	51.3±4.6	52.8±5.2	<0.001
骨折上区	38.3±4.1	45.7±5.3	46.9±4.1	<0.001
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	
位移 (mm)				
骨折下区	1.5±0.3	1.0±0.3	1.1±0.2	<0.001
骨折上区	2.0±0.2	1.2±0.2	1.3±0.2	<0.001
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	

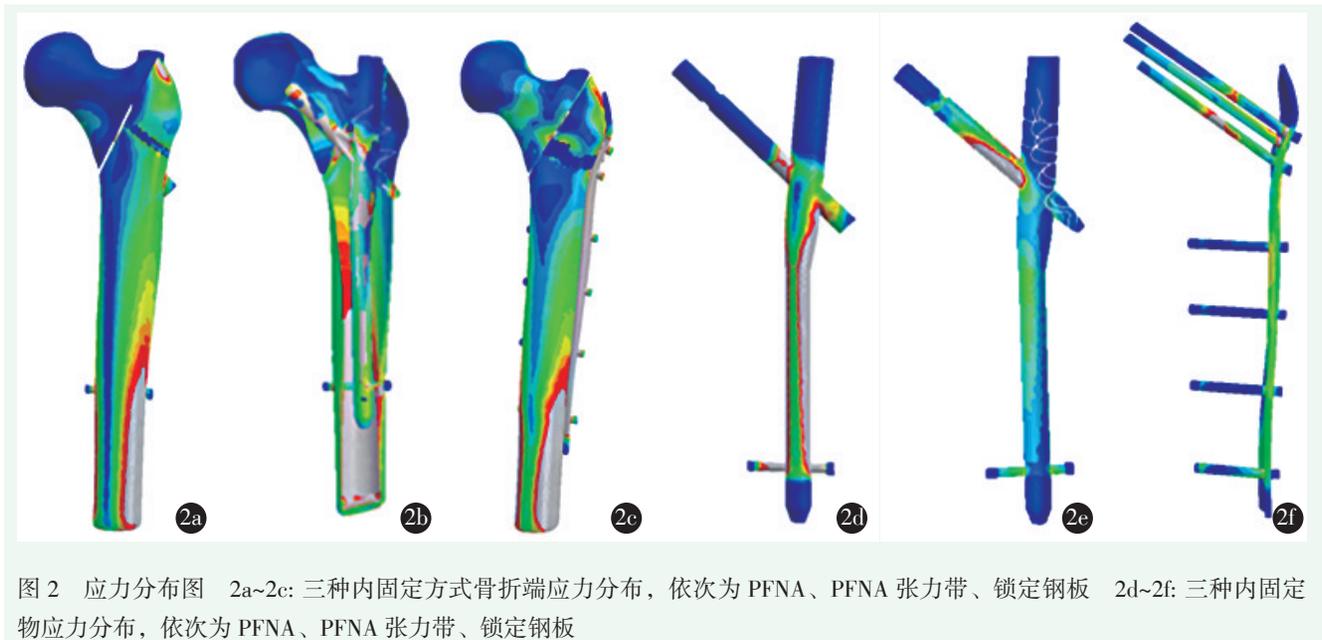


图2 应力分布图 2a~2c: 三种内固定方式骨折端应力分布, 依次为 PFNA、PFNA 张力带、锁定钢板 2d~2f: 三种内固定物应力分布, 依次为 PFNA、PFNA 张力带、锁定钢板

### 3 讨论

股骨粗隆外侧壁理论的提出, 将人们对股骨粗隆间骨折的认识由内侧的股骨距转移到外侧, 其中外侧壁稳定型及危险型骨折, 采用 PFNA 或 DHS 均能够维持较好的稳定性<sup>[13]</sup>, 而外侧壁破裂型骨折, 因后内侧与外侧的支撑结构均遭到破坏, 采取髓内固定还是髓外固定仍存在不同的观点<sup>[14]</sup>。Zheng 等<sup>[15]</sup>通过有限元分析方法评估了股骨外侧壁厚度对内固定失败的影响, 结果显示当外侧壁厚度 $<21.4\text{ mm}$ 时, 置入物的应力和位移显著增加, 需应采取预防措施。Fan<sup>[16]</sup>亦认为外侧壁较薄的粗隆间骨折不应单独使用 DHS, 建议采用髓内钉或加装转子稳定钢板。但目前尚未发现对外侧壁破裂型粗隆间骨折的相关力学研究。

单足站立载荷和双足站立载荷下的应力分布显示, PFNA 模型及 PFNA+张力带模型的应力集中在股骨头与螺旋刀片结合部, PFNA+张力带模型的平均应力显著小于 PFNA 模型。锁定钢板模型应力集中在 4 枚股骨颈螺钉周围, 平均应力小于 PFNA 模型及 PFNA+张力带模型。内固定外侧壁区的应力比较显示, PFNA 模型 $>$ 锁定钢板模型 $>$ PFNA+张力带模型。对股骨头及内固定的应力分析有助于正确判断内固定螺钉切出股骨头及内固定疲劳断裂的影响, 该研究结果与 Shao 等<sup>[17]</sup>研究结果一致, Shao 研究亦显示无论正向复位还是负向复位, 应力均集中在螺旋叶片与主钉交界处以及大转子钉插入点的外侧部位。但本研究结果

提示合并外侧壁破裂的股骨粗隆间骨折, 不仅破坏了股骨颈内部主张力带的连续性, 而且减弱了外部臀中肌外展力矩。在 PFNA 模型中, 因缺少张力带的协同作用, 单纯依靠螺旋刀片发挥杠杆支撑作用, 这大大增加了螺旋刀片的压力, 而 PFNA+张力带模型和锁定板模型中均能够通过固定外侧壁骨块, 恢复外展力矩连续性, 从而减轻负重时股骨头内部的应力。锁定板模型的 4 枚螺钉中, 下方 2 枚发挥压力骨小梁的作用, 其应力大于上方 2 枚, 因此, 当内侧壁存在缺失或严重骨质疏松骨质强度较弱时, 下方 2 枚螺钉将会承受更大的应力, 更容易出现疲劳断裂。徐锴等<sup>[18]</sup>亦认为锁定钢板其螺钉处会出现应力集中, 对股骨近端内侧皮质支撑作用较弱, 可能是导致术后内固定物失效主要原因。

观察三组模型中骨折端的应力及移位情况, 结果显示在断端下区应力, PFNA 模型显著大于 PFNA+张力带模型和锁定钢板模型。而在断端上区应力, PFNA 模型显著小于 PFNA+张力带模型和锁定钢板模型, 同时位移量显著大于 PFNA+张力带模型和锁定钢板模型。笔者认为术中恢复外侧壁连续性, 实际上为在股骨头、大粗隆、外展肌骨盆止点三者之间重建稳定三角结构, 在此状态下粗隆间骨折转换为该三角形的 1 条边, 从而可以将部分垂直方向的负重载荷转换为横向压力, 有效避免了骨折再移位或内固定断裂。而外侧壁骨折可能出现不同程度的臀中肌无力, 股骨头内将承受较大的压力载荷。

综上所述, 无论选择 PFNA 还是锁定钢板, 针对外侧壁破裂型股骨粗隆间骨折, 术中有效地固定外侧

壁骨折块,不仅能够减小股骨头内部螺旋刀片或空心钉的应力,而且恢复了髋部正常的生物力学结构,有利于骨折端稳定。

#### 参考文献

- [1] 马腾洋. 老年股骨粗隆间骨折 PFNA 失败的危险因素分析 [J]. 中国矫形外科杂志, 2020, 28 (4): 292-296.
- [2] 马卓, 张世民. 股骨粗隆外侧壁研究进展 [J]. 国际骨科学杂志, 2012, 33 (4): 221-224.
- [3] 武英楷, 宁尚攀, 孙国华, 等. 股骨近端外侧壁厚度及其临床意义 [J]. 中国矫形外科杂志, 2021, 29 (18): 1680-1682.
- [4] Himanshu K, Vivek T, Samarth M, et al. Risk factors associated with cephalomedullary nail cutout in the treatment of trochanteric hip fractures [J]. J Orthop Trauma, 2018, 32 (9): e385-e386.
- [5] 雷赛云, 谭文甫. 股骨粗隆外侧壁的临床意义 [J]. 当代医学, 2014, 20 (4): 7-9.
- [6] 蔡群斌, 姜自伟, 林梓凌, 等. 股骨近端防旋髓内钉不同进钉点治疗外侧壁破裂型股骨转子间骨折的有限元分析 [J]. 天津医药, 2020, 48 (2): 105-109.
- [7] 徐金渭, 韩雷, 胡云根, 等. 股骨近端解剖锁定钢板治疗伴外侧壁骨折的股骨转子间骨折中期疗效随访 [J]. 中国骨伤, 2017, 30 (3): 256-260.
- [8] Yunwei C, Chenhou D, Siyu T, et al. Traditional and bionic dynamic hip screw fixation for the treatment of intertrochanteric fracture: a finite element analysis [J]. Int Orthop, 2021, 44 (3): 551-559.
- [9] Wang C, Li X, Chen W, et al. Three-dimensional finite element analysis of intramedullary nail with different materials in the treatment of intertrochanteric fractures [J]. Injury, 2020, 52 (4): 705-712.
- [10] Kim JT, Jung CH, Shen QH, et al. Mechanical effect of different implant caput-collum-diaphyseal angles on the fracture surface after fixation of an unstable intertrochanteric fracture: a finite element analysis [J]. Asian J Surg, 2019, 42 (11): 947-956.
- [11] Li M, Zhao K, Ding K, et al. Titanium alloy gamma nail versus bio-degradable magnesium alloy bionic gamma nail for treating intertrochanteric fractures: a finite element analysis [J]. Orthop Surg, 2021, 13 (5): 1513-1520.
- [12] Zheng L, Chen X, Zheng Y, et al. Cement augmentation of the proximal femoral nail antirotation for the treatment of two intertrochanteric fractures - a comparative finite element study [J]. BMC Musculoskelet Disord, 2021, 22 (1): 1010.
- [13] 季英楠, 阿良, 赵忠海, 等. 防旋股骨近端髓内钉与动力髋螺钉治疗外侧壁危险型股骨粗隆间骨折的疗效比较 [J]. 大连医科大学学报, 2016, 38 (1): 32-36.
- [14] 张涛, 杨扉扉, 张松, 等. 两种手术方式治疗外侧壁危险型股骨粗隆间骨折的疗效比较 [J]. 中国矫形外科杂志, 2017, 25 (2): 174-177.
- [15] Zheng L, Wong DW, Chen X, et al. Risk of proximal femoral nail antirotation (PFNA) implant failure upon different lateral femoral wall thickness in intertrochanteric fracture: a finite element analysis [J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2022, 25 (5): 512-520.
- [16] Fan J, Xu X, Zhou F. The lateral femoral wall thickness on the risk of post-operative lateral wall fracture in intertrochanteric fracture after DHS fixation: a finite element analysis [J]. Injury, 2022, 53 (2): 346-352.
- [17] Shao Q, Zhang Y, Sun G, et al. Positive or negative anteromedial cortical support of unstable pertrochanteric femoral fractures: a finite element analysis study [J]. Biomed Pharmacother, 2021, 138: 111473.
- [18] 徐锴, 李开南. PFNA 与 PCCP 固定法治疗不稳定型股骨转子间骨折的有限元分析 [J]. 中国骨与关节杂志, 2019, 8 (7): 498-503.

(收稿:2020-06-01 修回:2022-06-29)  
(同行评议专家: 陈庭瑞 张保龙)  
(本文编辑: 宁 桦)