

新型股骨颈动力交叉钉系统与空心螺钉治疗不同类型股骨颈骨折的有限元分析

杨雄威*, 王 新#

青岛大学附属烟台毓璜顶医院创伤骨科, 山东 烟台

收稿日期: 2025年3月18日; 录用日期: 2025年4月11日; 发布日期: 2025年4月21日

摘 要

目的: 采用有限元分析的方法比较新型股骨颈动力交叉钉系统与3枚空心螺钉治疗不同类型股骨颈骨折的生物力学特性。方法: 收集1例在院患者髋部CT扫描数据, 将该髋部CT数据通过数字医学软件建立股骨三维模型。利用SOLIDWORK2021对股骨模型以30°, 50°, 70°骨折线角度进行分割来模拟不同Pauwels角度的股骨颈骨折, 并按临床上合适尺寸和手术方案植入内固定模型于股骨模型中, 分为FNS (新型股骨颈动力交叉钉系统)组与CCS (空心螺钉)组。最后利用ANSYA2021软件进行网格划分, 材料赋值, 数据计算等步骤后, 比较(FNS)与空心螺钉治疗不同类型的股骨颈骨折的生物力学特性。结果: 在三种不同骨折角度的情况下FNS组股骨头侧最大应力均小于CS组, 即使用FNS固定时, 股骨头承担的压力更小; 两组模型最大应力均出现在骨折线内侧和下侧。股骨头侧位移FNS组小于空心螺钉组, 即使用FNS固定时股骨头侧更不易移位, 这对预防髋内翻有重要意义; 两组模型最大位移均出现在股骨顶部。FNS组应力峰值均大于空心螺钉组; 而FNS组内固定装置位移峰值均小于CS组, 且位移分布更为均匀, 而内固定位移直接影响着内固定的切出及股骨颈短缩。结论: FNS治疗不同类型股骨颈骨折生物力学稳定性均优于空心螺钉, 是治疗不同类型股骨颈骨折值得优先考虑的内固定方式。

关键词

股骨颈骨折, FNS, 空心螺钉, 有限元分析, 生物力学

Finite Element Analysis of Novel Femoral Neck Dynamic Cross Screw System and Cannulated Screws in the Treatment of Different Types Femoral Neck Fractures

Xiongwei Yang*, Xin Wang#

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 杨雄威, 王新. 新型股骨颈动力交叉钉系统与空心螺钉治疗不同类型股骨颈骨折的有限元分析[J]. 临床医学进展, 2025, 15(4): 2303-2312. DOI: 10.12677/acm.2025.1541182

Abstract

Objective: Using finite element analysis to compare the biomechanical properties of novel dynamic cross screw system and cannulated screws in the treatment of different types of femoral neck fractures. **Methods:** Collected CT scanning data of the healthy hip from an in-hospital patient with a femoral fracture, and established a three-dimensional model of the femur using the digital medicine software. Using SOLIDWORKS 2021, the femur model was segmented at fracture line angles of 30°, 50° and 70° to simulate different Pauwels angles of femoral neck fractures. The internal fixation model was implanted into the femoral model according to clinically appropriate dimensions and surgical plans, dividing it into two groups: the FNS (novel dynamic cross screw system for femoral neck) group and the CS (cannulated screws group). Finally, after performing mesh generation, material assignment, and data calculations using ANSYS 2021 software, the biomechanical properties of the FNS group and the CS group in the treatment of different types of femoral neck fractures were compared. **Results:** In the presence of three different fracture angles, the maximum stress on the femoral head in the FNS group was consistently lower than that in the CS group, indicating that the FNS fixation results in less pressure on the femoral head; The maximum stress in both groups of models occurred on the inner and lower sides of the fracture line; The lateral displacement of the femoral head in the FNS group was less than that in the CS group, indicating that the femoral head is less prone to displacement when using FNS fixation, which have significant importance for preventing hip internal rotation; The maximum displacement in both groups of models occurred at the top of the femoral head. The stress peak values in the FNS group were consistently greater than those in the CS group. However, the peak displacement of the internal fixation device in the FNS group was consistently lower than that in the CS group, and the displacement distribution was more uniform. Additionally, the displacement of the internal fixation directly affects the cutout and shortening of the femoral neck. **Conclusion:** FNS demonstrates superior biomechanical stability compared to hollow screws in the treatment of various types of femoral neck fractures, making it a preferable option for internal fixation in such cases.

Keywords

Femoral Neck Fracture, FNS, Cannulated Screws, Finite Element Analysis, Biomechanics

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

股骨颈骨折是一种临床常见的骨折类型, 占全部髋部骨折的 54% [1], 随着人口老龄化、汽车的普及等因素, 股骨颈骨折发病率逐年上升。对于股骨颈骨折的老年患者, 首选髋关节(半髋关节或全髋关节)置换治疗。对于骨量良好的老年患者和青壮年患者(临床上一般将年龄 < 65 岁的患者定义为“年轻患者” [2])首选内固定的治疗策略。根据骨折线与水平线夹角(即 Pauwels 角)的不同, 股骨颈骨折分为三个

类型: I 型: Pauwels 角 $\leq 30^\circ$; II型: $30^\circ < \text{Pauwels 角} < 50^\circ$; III型: Pauwels 角 $\geq 50^\circ$ 。Pauwels 角度越大, 骨折端垂直剪切力越大, 骨折越不稳定, 其相应治疗更为困难, 术后并发症率更高[3]。对于股骨颈骨折的固定方式, 空心螺钉固定以操作简单、微创植入、保存骨量、保留股骨头血供等优点成为股骨颈骨折的首选[4]。研究表明三枚空心螺钉以贴边、平行、“倒品字”形植入能提供最大支撑力和活动加压, 促进骨折愈合[5][6]。FNS 以其固定牢靠, 创伤小等优点近些年逐渐应用于临床。关于股骨颈骨折内固定装置的选择仍未达成共识, 本研究对这两种内固定方式治疗不同类型股骨颈骨折进行有限元分析, 以期 为临床治疗提供参考。

2. 资料和方法

2.1. 骨折有限元模型的建立

选取一名在院患者(已签署知情同意书), 男, 35 岁, 体重 75 kg, X 线扫描, 股骨无髌部疾病且骨质良好。双侧髌关节采用螺旋 CT 平扫, 球管电压 120 kV, 电流 150 mA, 扫描层厚 1 mm。扫描长度为 大转子顶点上 10 cm 至膝关节平面, 将所获得的数据以 DICO 格式保存。以检测股骨近端为样本, 导入 Mimics 21.0, 设定适当的灰度阈值, 再通过区域增长, 智能填充等命令得到粗略的股骨模型将其导入 Geomagic 2021, 通过重画网格, 精确曲面, 拟合曲面等操作得到股骨皮质, 将股骨皮质模型向内整体移动 2 mm [7]得到股骨松质模型。将上述皮质骨与松质骨模型以 STEP 格式输入 Solidworks2021, 通过布尔运算装配得到正常人体结构的股骨模型。通过股骨头中心点建立一个横断面后创建一个切割平面与横断面形成 30° , 50° , 70° 以此模拟三种类型股骨颈骨折。

2.2. 内固定有限元模型的建立

使用 Solidworks 根据临床数据分别构建两种内固定模型。FNS 组: 动力棒直径: 10 mm 长度: 100 mm; 抗旋螺钉直径: 6.4 mm; 长度: 95 mm 及接骨板构成。空心螺钉组: 空心螺钉直径: 7.3 mm; 长度 两枚 95mm 及 1 枚 100 mm。由于实验的重点与螺纹无关, 故将螺纹简化成实心圆柱模型。将其内固定模型与股骨模型按临床正确, 合适的位置进行装配。

2.3. 网格生成

将上述两种模型导入 ANSYS 自动生成网格, 网格选用四面体 solid185 单元网格。两组模型生成网格数及节点数见表 1。

Table 1. Number of nodes and elements of two finite element models
表 1. 两种有限元模型的节点数和单元数

项目	FNS 组			空心螺钉组		
	30°	50°	70°	30°	50°	70°
节点数	212,321	210,720	209,760	210,911	211,173	209,989
单元数	128,028	127,042	126,423	126,532	126,825	126,107

2.4. 材料属性及边界条件

根据前人的研究对于股骨骨皮质, 骨松质, 内固定装置给予不同的材料属性。见表 2。将股骨颈骨折部位视为完全骨折, 两组模型均达到解剖复位要求, 并且骨折端摩擦系数设为 0.2 [7]。将股骨与螺钉或

钢板的接触区域设置为绑定状态。股骨远端限制了自由度。根据文献报道[8][9]，本实验在股骨头负重中心区建立坐标系，在股骨头上施加 1200 N 的轴向压缩荷载，以模拟人行走时单腿承受约 2 倍体重的力量。本实验研究未考虑各肌群的具体作用。

Table 2. Material parameters of finite element models
表 2. 有限元模型材料参数

项目	内固定装置	皮质骨	松质骨
弹性模量	110,000	16,800	840
泊松比	0.33	0.3	0.29

2.5. 主要观察指标

使用 ANSYS 进行计算，主要观察不同类型股骨颈骨折，骨折近端股骨头侧和内固定装置应力峰值、应力分布、最大位移以及应力集中情况。

3. 结果

1) Pauwels I 型骨折：a FNS 组：股骨头侧最大应力 20.49 MPa，最大位移 2.16mm；内固定最大应力 170.46 MPa，最大位移 2.01mm；空心螺钉组：股骨头侧最大应力 38.41 MPa，最大位移 2.26 mm；内固定最大应力 149.57 MPa，最大位移 2.23 mm (见图 1，图 2)。

2) Pauwels II 型骨折：FNS 组：股骨头侧最大应力 28.64 MPa，最大位移 2.19 mm；内固定最大应力 201.73 MPa，最大位移 2.04 mm；空心螺钉组：股骨头侧最大应力 51.51 MPa，最大位移 2.27 mm；内固定最大应力 152.33 MPa，最大位移 2.24 mm (见图 3，图 4)。

3) Pauwels III 型骨折：FNS 组：股骨头侧最大应力 43.28 MPa，最大位移 2.29 mm；内固定最大应力 213.19 MPa，最大位移 2.13 mm；空心螺钉组：股骨头侧最大应力 59.96 MPa，最大位移 2.39 mm；内固定最大应力 158.65 MPa，最大位移 2.35 mm (见图 5，图 6)。

4) 空心螺钉组 3 种不同类型股骨颈骨折均有应力集中现象，并且均出现在空心螺钉中段；而 FNS 仅在 Pauwels I 型骨折模型中有应力集中现象并出现在主钉中段后方，其余两种骨折模型应力分布状况良好。

4. 讨论

有限元作为一种力学分析方法，早期主要应用于航空航天、汽车制造等。近年来，随着计算机技术的发展，有限元已成为生物力学分析的常用工具。有限元分析模型可以通过力学模拟来评价骨折内固定的力学性能，与传统的力学试验相比，有限元分析可以更加快速详细的得到实验结果，更重要的是有限元分析可以在不违反伦理的情况下进行多次实验。

股骨颈骨折是临床常见的髋部骨折，因其预后差，相关并发症多等因素被称为“尚未被解决的骨折”，可见其对生命健康构成严重威胁。现阶段临床治疗股骨颈骨折主要是髋关节置换和内固定治疗。对于老年患者股骨颈骨折，为了避免或者减少因长期卧床可能带来的并发症，尽早恢复患者负重行走功能首选髋关节(半髋关节或全髋关节)置换治疗。对于骨量良好的老年患者和青壮年患者(临床上一般将年龄 < 65 岁的患者定义为“年轻患者”[2])首选内固定的手术策略。目前对于最理想的内固定装置仍未达成共识[10]，但不论哪种内固定方式，目的都是解剖复位和坚固的内固定。

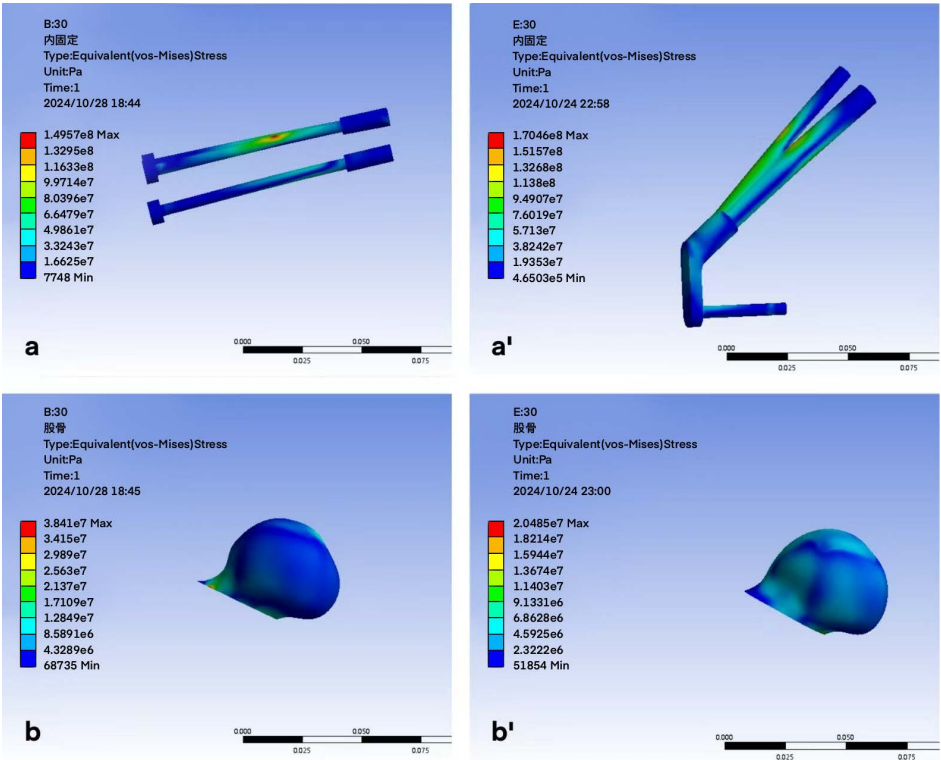


Figure 1. The stress distribution in the proximal femur and two internal fixation methods for Pauwels type I
图 1. Pauwels I 型骨折两组内固定及股骨近端应力分布情况

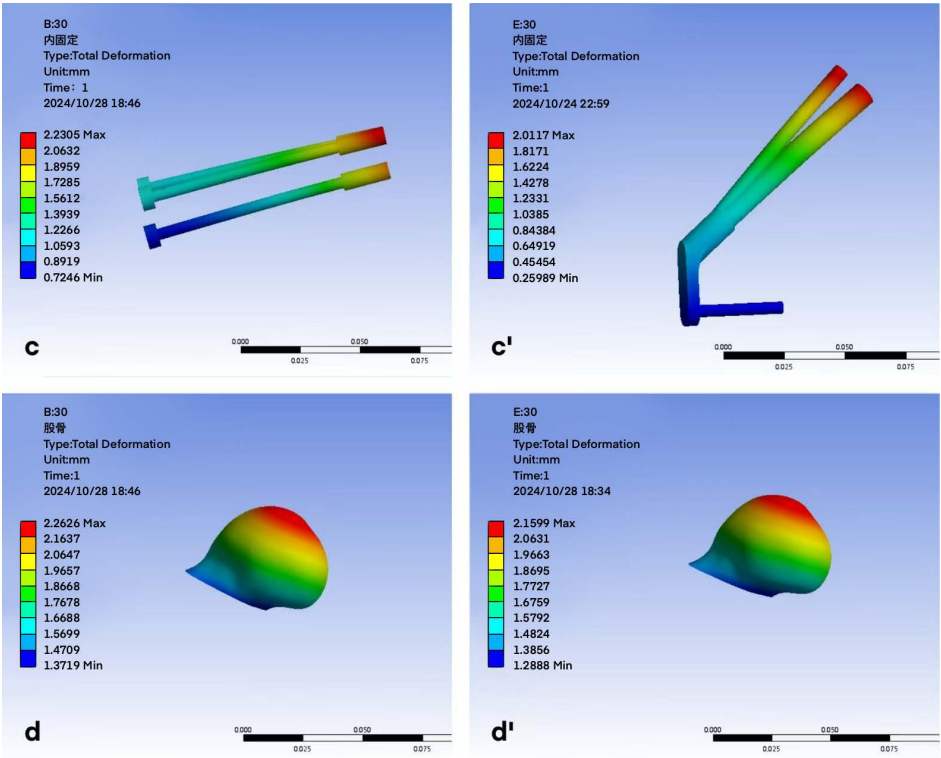


Figure 2. The deformation distribution in the proximal femur and two internal fixation methods for Pauwels type I
图 2. Pauwels I 型骨折两组内固定及股骨近端位移分布情况

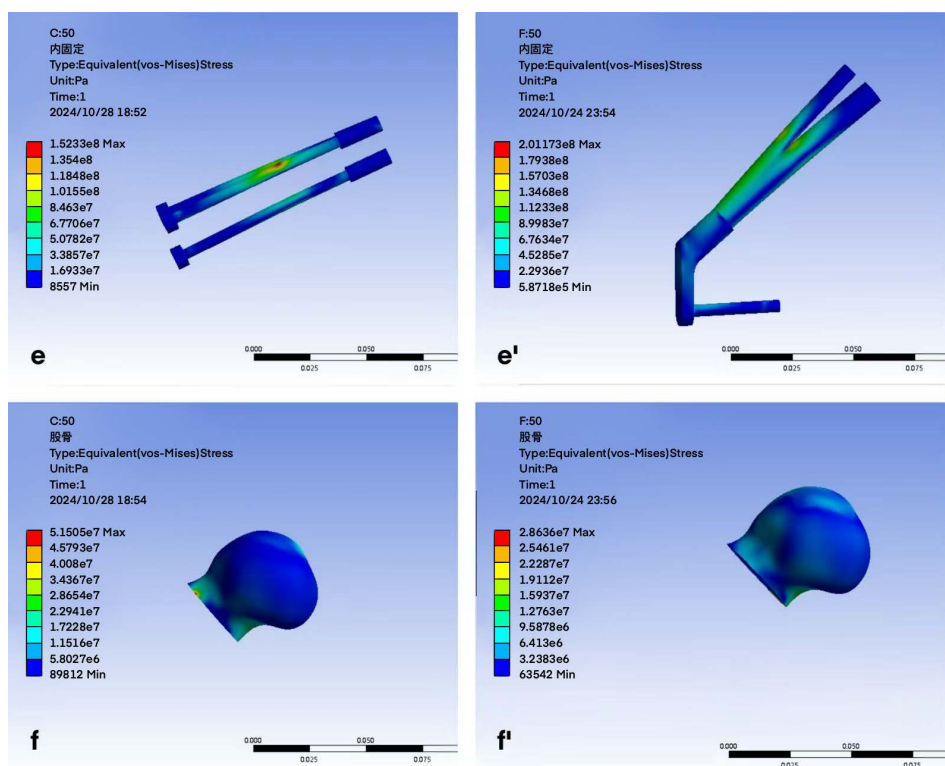


Figure 3. The stress distribution in the proximal femur and two internal fixation methods for Pauwels type II
图 3. Pauwels II 型骨折两组内固定及股骨近端应力分布情况

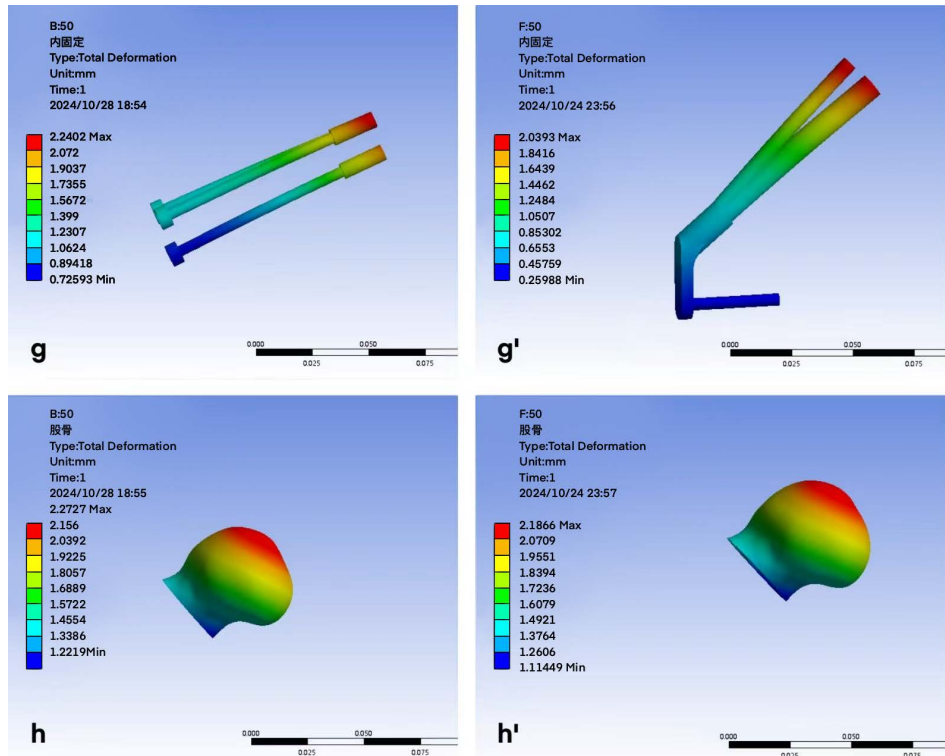


Figure 4. The deformation distribution in the proximal femur and two internal fixation methods for Pauwels type II
图 4. Pauwels II 型骨折两组内固定及股骨近端位移分布情况

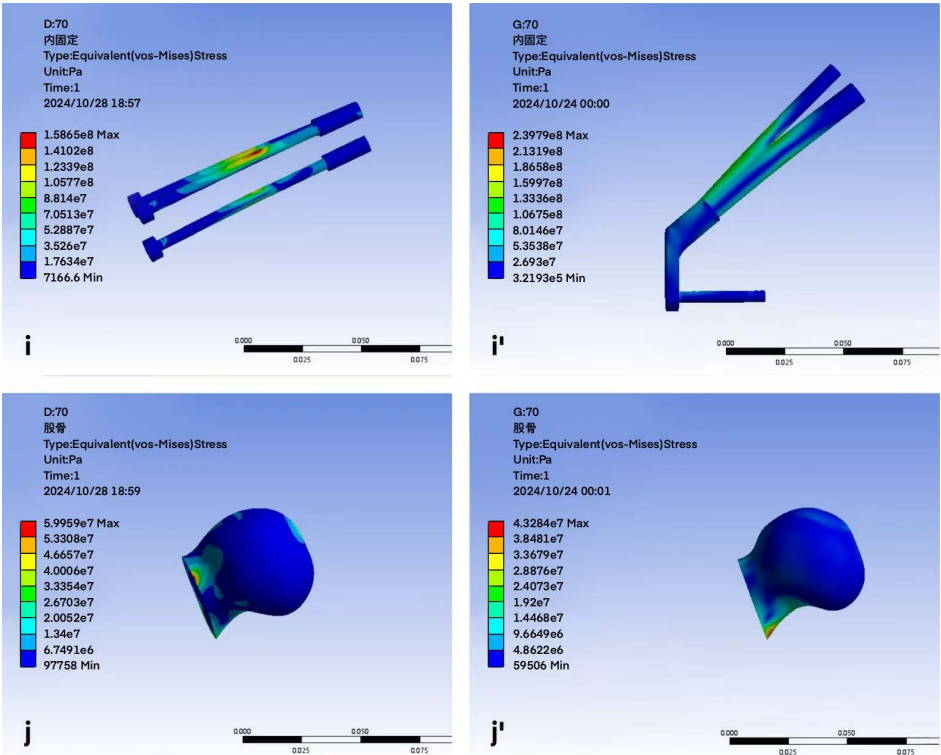


Figure 5. The stress distribution in the proximal femur and two internal fixation methods for Pauwels type III
图 5. Pauwels III 型骨折两组内固定及股骨近端应力分布情况

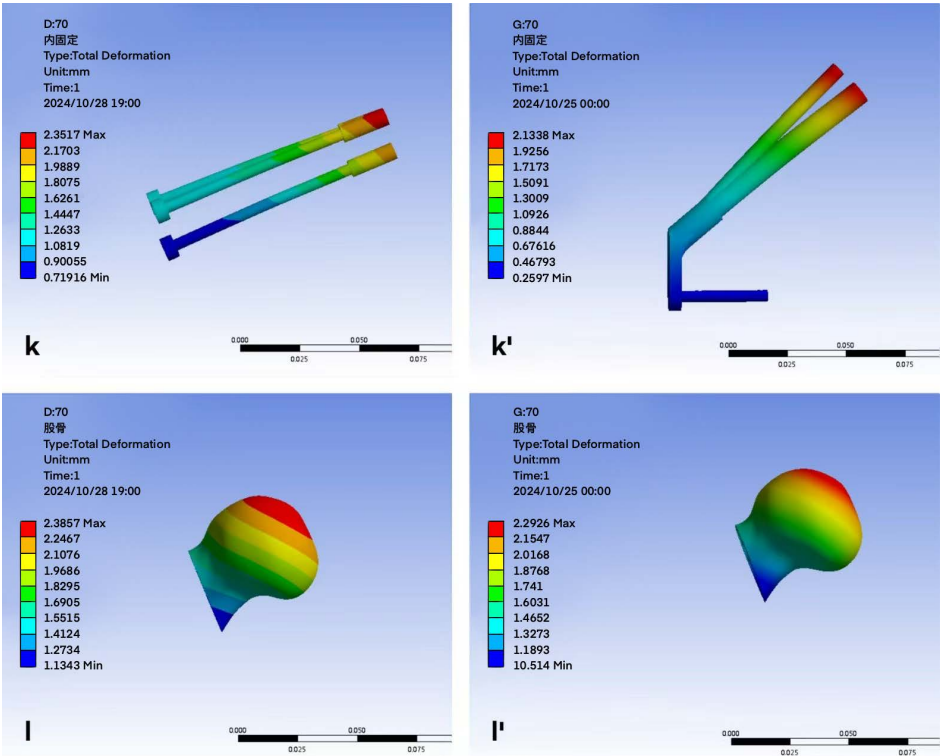


Figure 6. The deformation distribution in the proximal femur and two internal fixation methods for Pauwels type III
图 6. Pauwels III 型骨折两组内固定及股骨近端位移分布情况

空心螺钉自临床应用以来以操作简单、微创植入、保存骨量、保留股骨头血供等优点成为股骨颈骨折的首选[4]。研究表明三枚空心螺钉以贴边、平行、“倒品字”形植入能提供最大支撑力和活动加压,促进骨折愈合[5][6]。但三枚空心螺钉多用于骨折角较小的 Pauwels I 型骨折,而对于骨折端不稳定,垂直剪切力较大股骨颈骨折,三枚空心钉固定后术后股骨颈缩短,内固定失效,骨折不愈合和股骨头坏死的风险较高[10]。Liporace 等人的一项研究中使用三枚螺钉治疗 Pauwels III 型股骨颈骨折,结果显示术后并发症发生率为 32%,骨不连发生率为 19%,股骨头坏死率为 14% [11]。可见空心螺钉在治疗 Pauwels 角度较大的股骨颈骨折在生物力学稳定性方面没有优势,不能作为常规治疗手段。相关研究表明,在三枚螺钉平行植入的同时植入一枚垂直于骨折线的空心螺钉(四枚螺钉)以增强骨折端稳定性[12]。有研究报道,股骨后颈骨折粉碎后,4 枚螺钉固定比 3 枚螺钉固定具有更好的稳定性[13]。但也有研究指出四枚螺钉对于减少临床并发症、改善 Harris 髋关节评分等相关预后并没有显著效果,认为用于应用 4 枚螺钉(尤其是后螺钉)的技术需要改进,因此在此之前,在倒三角形配置中使用 3 颗螺钉仍然是治疗股骨颈骨折的“黄金标准”[14]。

Mir 等认为对于 Pauwels 角较大的青壮年股骨颈骨折可以使用内侧支撑钢板固定可以更好地消除断端的垂直剪切力,且通过改良 Smith-Petersen 入路并不会损伤后方的旋股内侧动脉[15]。Kunapuli 等对空心螺钉固定、DHS 固定、空心螺钉 + 内侧支撑钢板固定、DHS + 内侧支撑钢板固定四组分别进行荷载-失效试验,结果表明:使用 2.7 mm 锁定板进行增强使两种结构的失效载荷平均增加了 83%,使结构的稳定性增加了 35%,且使用空心螺钉检测的股骨的失效载荷比使用 DHS 检测的股骨高 26% [16]。即空心螺钉联合内侧支撑钢板治疗青壮年股骨颈骨折在力学方面占有极大优势。但内侧钢板的植入无疑会增大手术难度,延长手术时间,进一步破坏局部血供,在临床疗效尤其术后相关并发症方面如股骨头坏死等还需长时间的随访研究证明。动力髋螺钉(DHS)是另一种临床常用治疗股骨颈骨折的内固定装置,相较于空心螺钉,DHS 有着更大的抗剪切力,因此常用于骨折角度较大的如 Pauwels III 型股骨颈骨折。但 DHS 仅有一枚螺钉,与多枚空心螺钉相比抗旋转力较弱[17]。研究表明在 DHS 基础上加一枚抗旋螺钉(DHS + S)可以提供更好的稳定性,且相较于空心螺钉更不易出现内固定失效[10][18]。但由于其操作复杂、手术切口较大、可能进一步破坏局部血供、且最佳适应为基底型股骨颈骨折限制了 DHS 在国内的应用[10]。

FNS 是由 AO 内固定协会 LEEG (Lower Extremity Expert Group, 下肢专家工作组)和强生 Depuy Synthes 公司合作为了股骨颈骨折的动态固定而研发的一种新型内固定装置。FNS 结合了角度稳定和微创手术技术的优点,与空心螺钉相比提供更大的抗旋转力和抗剪切力以及更好的整体结构稳定性,且相对于其他角度稳定型内固定装置创伤更小。Stoffel 等研究发现,FNS 在治疗 Pauwels III 型股骨颈骨折时稳定性与 DHS 系统相当,优于空心螺钉[19]。Tang 等回顾性研究 FNS 与空心螺钉治疗成人股骨颈骨折的短期疗效表明:相较于空心螺钉,FNS 可改善髋关节功能恢复,并降低术后股骨颈短缩率和透视暴露[20]。对于 FNS 治疗股骨颈骨折也有研究表明 FNS 结构稳定性弱于空心螺钉,空心螺钉 + 内侧支撑钢板和双平面支撑螺钉[21]。在一项有限元分析中同样发现 DHS + DS (抗旋螺钉)的生物力学稳定性优于 4 枚空心螺钉和 FNS,当青年人发生 Pauwels III 型股骨颈骨折时,DHS + DS 是治疗此类骨折的首选方法[22]。面对股骨颈骨折时,大多数学者聚焦于选取何种内固定装置以及何种内固定装置更为稳定,关于内固定的取出关注甚少。一项包含 250 名患者的随机对照实验显示股骨颈骨折内固定后取出植入物对生活质量有积极影响[23]。Liu 等认为在股骨颈骨折愈合后,取出内固定对股骨颈的应力没有影响,而且在他的研究中,内固定的存在会使松质骨硬化,这种硬化的松质骨会将应力集中在股骨头顶部,可能会增加股骨头坏死的机会,因此建议在股骨颈骨折愈合后取出内植物[24]。一项研究表明,股骨内固定的存在会导致应力集中和应力遮挡,相较于空心螺钉,FNS 在取出后会留下更大的骨隧道和更不稳定[25]。这与我们的临床理念相符合,在面对部分患者考虑到年龄、骨质疏松等因素,在股骨颈骨折愈合后不进行内植物取出术(除外内植物

退出或造成局部疼痛、不适), 而面对青壮年患者尤其青年患者, 我们主张在骨折愈合后取出内固定, 而取出 FNS 后内植物留下的巨大骨隧道和骨量丢失使我们不得不进行同种异体骨或者自体骨的移植, 以及相对较长时间使用双拐来预防再骨折, 故考虑到内固定的取出, 在面对剪切力较小的青壮年股骨颈骨折时 FNS 虽然表现出优异的生物力学稳定性, 但仍不能完全取代空心螺钉, 这也是我们未来的研究方向。

本实验采用有限元分析的方法, 建立不同角度的两种内固定模型, 对比分析在不同角度下两种内固定装置的生物力学性能。结果表明在三种不同骨折角度的情况下 FNS 组股骨头侧最大应力均小于空心螺钉组, 即使用 FNS 固定时, 股骨头承担的压力更小; 两组模型最大应力均出现在骨折线内侧和下侧。股骨头侧位移 FNS 组小于空心螺钉组, 即使用 FNS 固定时股骨头侧更不易移位, 这对预防髓内翻有重要意义; 两组模型最大位移均出现在股骨头顶部。FNS 组应力峰值均大于空心螺钉组; 而 FNS 组内固定装置位移峰值均小于空心螺钉组, 且位移分布更为均匀, 而内固定位移直接影响着内固定的切出及股骨颈短缩。空心螺钉组 3 种骨折模型均有应力集中现象而 FNS 组仅在 Pauwels I 型观察到应力集中现象, 这表明 FNS 应力分布更为均匀且不易出现内固定失效、断钉等现象。综上所述 FNS 作为一种新型的治疗股骨颈骨折的内固定装置, 在面对不同类型的股骨颈骨折时生物力学稳定性表现优异, 值得优先考虑; 但内固定装置的选取不仅只需考虑生物力学的稳定, 还应将患者身体状况、骨折位置及角度、内固定的取出、术后预期等多方面因素考虑在内, 在临床上应更加的灵活和个性化选取内固定装置。

本实验的不足: ① 本实验模型设定股骨为各向同性弹性材料, 而实际股骨为各向异性材料, 这可能导致实验结果的不同, 但本实验目的为探究整体趋势所以这样的设置可以认为是合理的。② 本研究仅探讨轴向荷载, 而实际情况股骨颈周围关节囊、韧带、肌肉等结构均会对实验产生影响, 未来需将上述结构考虑在内。③ 本实验本研究仅进行有限元分析, 相关结果需尸体骨标本进一步研究论证。

作者贡献

1) 王新和杨雄威构思了本文。2) 杨雄威负责文章的撰写, 模型建立, 与数据采集。3) 王新与负责文章最后修改。

利益冲突声明

本文作者之间无利益冲突。

参考文献

- [1] Thorngren, K., Hommel, A., Norrman, P.O., Thorngren, J. and Wingstrand, H. (2002) Epidemiology of Femoral Neck Fractures. *Injury*, **33**, 1-7. [https://doi.org/10.1016/s0020-1383\(02\)00324-8](https://doi.org/10.1016/s0020-1383(02)00324-8)
- [2] Anagnostis, P., Paschou, S.A. and Goulis, D.G. (2018) Management of Acute Hip Fracture. *The New England Journal of Medicine*, **378**, 971-972.
- [3] Bartoniček, J. (2001) Pauwels' Classification of Femoral Neck Fractures: Correct Interpretation of the Original. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **15**, 358-360. <https://doi.org/10.1097/00005131-200106000-00009>
- [4] Swiontkowski, M.F., Harrington, R.M., Keller, T.S. and Van Patten, P.K. (1987) Torsion and Bending Analysis of Internal Fixation Techniques for Femoral Neck Fractures: The Role of Implant Design and Bone Density. *Journal of Orthopaedic Research*, **5**, 433-444. <https://doi.org/10.1002/jor.1100050316>
- [5] Walker, E., Mukherjee, D.P., Ogden, A.L., et al. (2007) A Biomechanical Study of Simulated Femoral Neck Fracture Fixation by Cannulated Screws: Effects of Placement Angle and Number of Screws. *American Journal of Orthopedics*, **36**, 680-684.
- [6] Sowmianarayanan, S., Chandrasekaran, A. and Kumar, R.K. (2008) Finite Element Analysis of a Subtrochanteric Fractured Femur with Dynamic Hip Screw, Dynamic Condylar Screw, and Proximal Femur Nail Implants—A Comparative Study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, **222**, 117-127. <https://doi.org/10.1243/09544119jeim156>
- [7] Cui, Y., Xing, W., Pan, Z., Kong, Z., Sun, L., Sun, L., et al. (2020) Characterization of Novel Intramedullary Nailing

- Method for Treating Femoral Shaft Fracture through Finite Element Analysis. *Experimental and Therapeutic Medicine*, **20**, 748-753. <https://doi.org/10.3892/etm.2020.8763>
- [8] Wang, J., Ma, J., Lu, B., Bai, H., Wang, Y. and Ma, X. (2020) 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). *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, **106**, 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2019.04.027>
 - [9] Panteli, M., Rodham, P. and Giannoudis, P.V. (2015) Biomechanical Rationale for Implant Choices in Femoral Neck Fracture Fixation in the Non-Elderly. *Injury*, **46**, 445-452. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2014.12.031>
 - [10] Samsami, S., Saberi, S., Sadighi, S. and Rouhi, G. (2015) Comparison of Three Fixation Methods for Femoral Neck Fracture in Young Adults: Experimental and Numerical Investigations. *Journal of Medical and Biological Engineering*, **35**, 566-579. <https://doi.org/10.1007/s40846-015-0085-9>
 - [11] Liporace, F., Gaines, R., Collinge, C. and Haidukewych, G.J. (2008) Results of Internal Fixation of Pauwels Type-3 Vertical Femoral Neck Fractures. *The Journal of Bone and Joint Surgery-American Volume*, **90**, 1654-1659. <https://doi.org/10.2106/jbjs.g.01353>
 - [12] Gumustas, S.A. (2014) Influence of Number and Orientation of Screws on Stability in the Internal Fixation of Unstable Femoral Neck Fractures. *Acta Orthopaedica et Traumatologica Turcica*, **48**, 673-678. <https://doi.org/10.3944/aott.2014.14.0088>
 - [13] Kauffman, J.I., Simon, J.A., Kummer, F.J., Pearlman, C.J., Zuckerman, J.D. and Koval, K.J. (1999) Internal Fixation of Femoral Neck Fractures with Posterior Comminution: A Biomechanical Study. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **13**, 155-159. <https://doi.org/10.1097/00005131-199903000-00001>
 - [14] Guo, J., Dong, W., Yin, Y., Zhang, R., Hou, Z. and Zhang, Y. (2020) The Effect of Configuration of Rhombic Cannulated Screws on Internal Fixation of Femoral Neck Fractures. *Orthopedics*, **43**, e72-e78. <https://doi.org/10.3928/01477447-20191212-03>
 - [15] Mir, H. and Collinge, C. (2015) Application of a Medial Buttress Plate May Prevent Many Treatment Failures Seen after Fixation of Vertical Femoral Neck Fractures in Young Adults. *Medical Hypotheses*, **84**, 429-433. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2015.01.029>
 - [16] Kunapuli, S.C., Schramski, M.J., Lee, A.S., Popovich, J.M., Cholewicki, J., Reeves, N.P., *et al.* (2015) Biomechanical Analysis of Augmented Plate Fixation for the Treatment of Vertical Shear Femoral Neck Fractures. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **29**, 144-150. <https://doi.org/10.1097/bot.0000000000000205>
 - [17] Peng, M.J., Xu, H., Chen, H., Lin, Z., Li, X., Shen, C., *et al.* (2020) Biomechanical Analysis for Five Fixation Techniques of Pauwels-Iii Fracture by Finite Element Modeling. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **193**, Article ID: 105491. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105491>
 - [18] Siavashi, B., Aalirezai, A., Moosavi, M., Golbakhsh, M.R., Savadkoobi, D. and Zehtab, M.J. (2015) A Comparative Study between Multiple Cannulated Screws and Dynamic Hip Screw for Fixation of Femoral Neck Fracture in Adults. *International Orthopaedics*, **39**, 2069-2071. <https://doi.org/10.1007/s00264-015-2881-9>
 - [19] Stoffel, K., Zderic, I., Gras, F., Sommer, C., Eberli, U., Mueller, D., *et al.* (2017) Biomechanical Evaluation of the Femoral Neck System in Unstable Pauwels III Femoral Neck Fractures: A Comparison with the Dynamic Hip Screw and Cannulated Screws. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **31**, 131-137. <https://doi.org/10.1097/bot.0000000000000739>
 - [20] Tang, Y., Zhang, Z., Wang, L., Xiong, W., Fang, Q. and Wang, G. (2021) Femoral Neck System versus Inverted Cannulated Cancellous Screw for the Treatment of Femoral Neck Fractures in Adults: A Preliminary Comparative Study. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **16**, Article No. 504. <https://doi.org/10.1186/s13018-021-02659-0>
 - [21] Xia, Y., Zhang, W., Hu, H., Yan, L., Zhan, S. and Wang, J. (2021) Biomechanical Study of Two Alternative Methods for the Treatment of Vertical Femoral Neck Fractures—A Finite Element Analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **211**, Article ID: 106409. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2021.106409>
 - [22] Ma, J., Zhao, Z., Zhi, X., Wang, H. and Wang, W. (2022) Finite Element Comparative Analysis of Three Different Internal Fixation Methods in the Treatment of Pauwels Type III Femoral Neck Fractures. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **23**, Article No. 1030. <https://doi.org/10.1186/s12891-022-06003-3>
 - [23] Zielinski, S.M., Heetveld, M.J., Bhandari, M., Patka, P. and Van Lieshout, E.M.M. (2015) Implant Removal after Internal Fixation of a Femoral Neck Fracture: Effects on Physical Functioning. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **29**, e285-e292. <https://doi.org/10.1097/bot.0000000000000358>
 - [24] Liu, Y., Song, W., Liang, H., Li, C., Niu, W., Shao, H., *et al.* (2022) Comparison of Femoral Mechanics before and after Internal Fixation Removal and the Effect of Sclerosis on Femoral Stress: A Finite Element Analysis. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **23**, Article No. 930. <https://doi.org/10.1186/s12891-022-05888-4>
 - [25] Nan, C., Liu, Y., Zhang, D., Qin, Y., Yu, H. and Ma, Z. (2024) Biomechanical Changes in the Proximal Femur before and after Removal of Femoral Neck System. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **19**, Article No. 290. <https://doi.org/10.1186/s13018-024-04769-x>