

股骨颈动力交叉钉系统(FNS)的临床疗效观察及有限元分析

陈松岩¹, 范筱², 董维华³, 窦馥国⁴, 张其亮^{2*}

¹青岛大学医学部, 山东 青岛

²青岛市市立医院骨关节外科, 山东 青岛

³平度市第四人民医院骨科, 山东 青岛

⁴大连医科大学研究生院, 辽宁 大连

收稿日期: 2024年4月11日; 录用日期: 2024年5月6日; 发布日期: 2024年5月13日

摘要

目的: 探讨股骨颈动力交叉钉系统(FNS)的有限元分析及其治疗股骨颈骨折(FNF)的临床疗效。方法: 选择自2021.12~2022.12在青岛市市立医院接受内固定治疗的年轻股骨颈骨折患者60例, 以手术方式进行分组, 空心加压螺钉(CCS)组30例接受CCS固定治疗, FNS组30例接受FNS固定治疗。观察两组患者围手术期相关指标, 术后采用X线摄片、髋关节CT评估骨折愈合及股骨头是否出现缺血坏死, 采用髋关节功能Harris评分对术后临床功能疗效进行评估。利用Solid Works建立股骨颈模型, Ansys workbench软件模拟并分析FNS固定股骨颈骨折的受力情况及特点, 通过上述有限元分析技术探究FNS在治疗股骨颈骨折时的力学机制。结果: 1) 两组患者性别、年龄、BMI水平、受伤致手术时间等基本资料比较, 无统计学意义($P > 0.05$); 而FNS组患者术前术后血红蛋白差值、手术时间、透视次数、失血量、切口长度等指标均低于CCS组, 有统计学意义($P < 0.05$)。2) FNS组患者的骨折愈合时间及术后6个月复诊时Harris评分均优于CCS组, 有统计学意义($P < 0.05$)。3) FNS组患者术后并发症发生率6.67%、低于CCS组患者并发症22.22%, 有统计学意义($P < 0.05$)。4) FNS组件在杨氏模量、泊松比、体积模量、剪切模量、拉伸屈服强度、拉伸极限强度等力学指标的分析研究中, 各项性能均优于股骨。结论: 1) 对于年轻股骨颈骨折患者使用CCS与FNS内固定手术治疗, 结果分析表明FNS内固定治疗更符合微创理念, 手术创伤更小, 减少透视次数, 操作简单, 有助于术后快速康复。2) FNS内固定手术可以降低患者术后并发症的发生。3) FNS固定治疗对恢复患者髋关节功能作用更为显著, 可早期功能锻炼, 可更好提高患者生活质量。4) FNS内固定材料可以满足人体功能需求, 可以作为一种可靠的内固定方式供临床选择。

关键词

股骨颈骨折, 股骨颈动力交叉钉系统, 有限元分析, 内固定

*通讯作者。

Clinical Observation and Finite Element Analysis of Dynamic Cross-Pinning System of Femoral Neck (FNS)

Songyan Chen¹, Xiao Fan², Weihua Dong³, Fuguo Dou⁴, Qiliang Zhang^{2*}

¹Medical Science Center of Qingdao University, Qingdao Shandong

²Department of Bone joint, Qingdao Municipal Hospital, Qingdao Shandong

³Department of Orthopedics, The Fourth People's Hospital of Pingdu, Qingdao Shandong

⁴Graduate School of Dalian Medical University, Dalian Liaoning

Received: Apr. 11th, 2024; accepted: May 6th, 2024; published: May 13th, 2024

Abstract

Objective: To investigate the finite element analysis of femoral neck dynamic cross pinning system (FNS) and its clinical effect in the treatment of femoral neck fracture. **Methods:** A total of 60 young patients with femoral neck fracture who received internal fixation treatment in Qingdao Municipal Hospital from December, 2021 to December, 2022 were selected and divided into surgical groups. 30 patients in the hollow compression screw (CCS) group received CCS fixation treatment, and 30 patients in the FNS group received FNS fixation treatment. Perioperative relevant indexes of the two groups were observed. Postoperative radiography and hip CT were used to evaluate fracture healing and ischemic necrosis of the femoral head. Postoperative clinical efficacy was evaluated by Harris score of hip function. SolidWorks was used to establish the femoral neck model, Ansys workbench software simulated and analyzed the stress situation and characteristics of FNS fixed femoral neck fracture, and explored the mechanical mechanism of FNS in the treatment of femoral neck fracture through the above finite element analysis technology. **Result:** 1) There was no statistical significance in gender, age, BMI level and operation time between the two groups ($P > 0.05$); The difference of hemoglobin before and after operation, operation time, fluoroscopy times, blood loss and incision length in FNS group were all lower than those in CCS group, with statistical significance ($P < 0.05$). 2) The fracture healing time and Harris score of patients in FNS group were better than those in CCS group at 6 months after surgery, with statistical significance ($P < 0.05$). 3) The incidence of postoperative complications in FNS group was 6.67%, lower than that in CCS group by 22.22%, with statistical significance ($P < 0.05$). 4) In the analysis and study of mechanical indexes such as Young's modulus, Poisson's ratio, volume modulus, shear modulus, tensile yield strength and tensile ultimate strength, FNS components are superior to femur. **Conclusion:** 1) For young patients with femoral neck fractures, CCS and FNS internal fixation surgery were used, and the analysis of the results showed that FNS internal fixation treatment was more in line with the concept of minimally invasive surgery, less surgical trauma, less fluoroscopy times, simple operation, and conducive to rapid postoperative recovery. 2) FNS internal fixation can reduce the incidence of postoperative complications. 3) FNS fixation therapy has a more significant effect on restoring the hip function of patients, and can provide early functional exercise and better improve the quality of life of patients. 4) FNS internal fixation materials can meet the functional needs of the human body and can be used as a reliable internal fixation method for clinical selection.

Keywords

Femoral Neck Fracture, Femoral Neck Dynamic Cross-Pinning System, Finite Element Analysis, Internal Fixation

Copyright © 2024 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(femoral neck fracture, FNF)是临床中一种常见的骨折,约占全身骨折的3.6%,占髋部骨折的53% [1]。老年患者由于骨质疏松的原因,轻微的外力就可使股骨颈发生骨折,而高能量暴力损伤是导致年轻人群发生股骨颈骨折的关键性因素,且以不稳定型骨折类型较为多见[2]。目前,临床对于股骨颈骨折主要采取外科手术治疗[3],由于年轻人群作为社会主要劳动力,对于术后的功能需求高、日常活动量大,故对于这一部分患者选择手术方案时,国内外基本达成一致意见,采取内固定治疗[4],最大程度保留患者股骨头。但由于股骨颈生物力学的复杂性、解剖结构的特殊性,不仅极大地增加手术治疗难度,同时更增加患者术后骨不连、骨折后股骨头缺血性坏死等不良并发症风险[5]。故在手术治疗中,内固定装置不仅需要保证患者术后生物力学稳定性、髋关节解剖结构的稳定,同时还需达到良好的骨折解剖复位,提供坚强有效的内固定支持效果,减少对股骨头血供的破坏,更好地促进术后患者骨折断端的愈合,降低术后发生股骨头缺血性坏死、骨不连等相关并发症风险[6]。在近年的临床发展中,如何更好地治疗年轻股骨颈骨折患者,成为了骨科的一个重点研究方向。目前在临床中较为常用的空心加压螺钉(cannulated compression screw, CCS)、动力髋螺钉(dynamic hip screw, DHS)、经皮加压钢板内固定术、髓内钉系统等方法[7]。虽然这些方法均较为成熟,但仍存在较多的并发症,如退钉、骨不连等。所以,年轻股骨颈骨折的治疗仍是一个有待解决的问题。为了更好地治疗年轻的股骨颈骨折的患者,美国 Depuy Synthes 公司结合 CCS 与 DHS 的优势,研发了一种新型内固定装置——股骨颈动力交叉钉系统(femoral neck system, FNS),能微创植入同时兼具旋转稳定性及角度稳定性[8]。FNS 技术的出现为中青年骨折患者提供新的选择与契机,相比于 CCS 固定技术, FNS 固定具有更为良好的稳定性[9]。本研究纳入 2021 年 12 月~2022 年 12 月我院收治的年轻股骨颈骨折患者 60 例,分析 FNS 的手术效果。

有限元分析(finite element analysis, FEA)作为骨科领域里重要的生物力学研究工具,是临床前开展器械力学性能检验、提供科学理论依据的必要环节[10]。FEA 是一种数学建模方法[11],最早出现在航空工程领域,随着计算机技术的不断发展,其被逐渐应用于生物力学、热力学及电磁学等领域。Breklemans 等和 Rybicki 等在 1972 年首次将 FEA 应用于骨科的生物力学研究,为此后 FEA 在骨科的发展奠定了基础[12]。在骨生物力学研究领域,FEA 是一种适用于任何复杂结构中某一点的应力及应变的计算方法[13]。通过 CT 等影像学技术获得数据,然后利用计算机软件将人体骨骼标本复杂的几何形状(域)分割成许多个子域,并以此为基础构建目的标本的计算机网格模型,再将各个单元节点连接,描述出标本的几何形状,形成三维立体数字模型,最后赋予该模型材料属性、定义力学特性和约束条件,从而进行数据分析和研究计算[14]。在目前的股骨颈骨折内固定治疗手术方案中, FNS 作为一种新型的股骨颈骨折内固定治疗装置,为了研究其材料学及力学性能,我们对成人股骨及 FNS 内固定系统进行有限元分析,以研究 FNS 的力学特点,并与临床实验相结合,分析 FNS 的临床效果,更好地应用于年轻股骨颈骨折的治疗。

2. 研究对象与方法

2.1. 研究对象

选取 2021 年 12 月~2022 年 12 月我院骨科收治 60 例年轻股骨颈骨折患者,利用随机方法分组, CCS 组 30 例、FNS 组 30 例,两组患者一般资料见表 1。

纳入标准: (1) 随访时间 ≥ 12 个月; (2) 入组对象年龄 18~65 岁; (3) 在我院行股骨颈骨折内固定手术治疗; (4) 无合并严重疾病或严重骨质疏松症; (5) 经过影像学证据、体格检查确诊为股骨颈骨折; (6) 受试者均为首次股骨颈骨折; (7) 无其他严重创伤。

排除标准: (1) 患者存在小儿麻痹症既往史, 并经过髋部 CT、或 X 线片检查, 提示髋关节发育异常; (2) 受试者为陈旧性骨折; (3) 受试者存在精神或神经性疾病; (4) 受试者长期酗酒史; (5) 病理性骨折患者; (6) 随访资料不完整患者, 未达到定期随访患者; (7) 多发伤患者; (8) 伤前生活不能自理患者; (9) 正在接受其他临床药物实验患者。

2.2. 临床实验

2.2.1. 材料

本研究材料股骨颈动力交叉钉系统由 DePuy Synthes 公司提供, 空心加压螺钉由苏州康力公司提供。

2.2.2. 术前准备

术前所有患者均接受双侧髋关节正位的 X 线片检查, 行 CT 平扫及三维重建检查, 充分了解患者骨折位移情况、骨折部位与粉碎程度等。对患者实施皮肤牵引术, 设置 4~5 kg 牵引重量, 告知患者注意禁止下床活动, 且休养期间避免内旋患肢, 预防因活动进一步损伤患者股骨头血运。完善各项检查, 包括肺部 CT 平扫、心电图、心脏彩超、下肢血管超声、输血常规、凝血功能、血生化、血常规等, 并根据患者影像学检查结果, 对骨折进行分型。对于术前存在基础疾病或临床检查存在其他增大手术风险的问题给予对症治疗, 所有患者入院后均给予低分子肝素皮下注射抗凝治疗。术前 30 min 给予患者头孢滴注进行预防性治疗, 预防感染的发生。采取神经阻滞麻醉结合硬膜外阻滞麻醉或全身麻醉, 患者取仰卧位, 在 C 型臂机 X 线透视引导下进行手术治疗。

2.2.3. 手术方法

1) IFNS 组

患者麻醉满意后, 将患者搬至骨科牵引床上, 充分外展并屈髋屈膝健侧下肢, 使用约束带对健侧肢体进行固定, 并注意保护会阴部, 患侧上肢固定于胸前, 避免影响手术视野。对股骨颈骨折进行闭合复位, 对患侧肢体进行外展外旋位牵引处理完成后, 在进行内收内旋处理, 利用 C 型臂机 X 线下观察髋关节正位, 患者的股骨颈长度是否基本或完全恢复, 且骨折断端是否对线、对位处于精准状态; 并再次使用 C 型臂机对患者进行侧位观察, 在影像学下显示患者股骨颈为双“S”曲线征, 说明患者闭合复位良好。对于复位 3 次未达到理想效果患者, 采取 DAA 入路小切口切开复位。常规消毒铺巾前, 对导针置入的进针方向、进针点等使用一枚克氏针在体外于透视下先行初步定位, 维持患侧下肢牵引状态并定位准确后, 进行常规的患侧肢体消毒铺巾。首先, 对于复位良好患者, 从股骨颈轴中心近端开始 2~3 cm 处, 做一个长 4~5 cm 的纵行皮肤切口, 将 1 枚直径 2.5 mm 的防旋克氏针插入股骨颈的上/前部, 正位贴近股骨颈上缘, 以防止股骨头旋转, 在 130°导向器引导下置入初始导针, 透视见初始导针位于股骨颈与股骨头中轴线上、深度为达软骨下 5 mm 左右。测深及预计加压距离, 确定拉力螺钉和抗旋螺钉长度。使用空心台阶钻沿初始导针方向钻孔至限位处, 使用多功能瞄准架将组装好的钢板及拉力螺钉沿导针方向拧入, 通过外架上的标记可确定钢板是否沿股骨纵轴方向放置并紧贴骨面对复位后的导针位置置入是否理想, 进行常规的测深度、扩髓处理, 再将 FNS 动力棒置入后, 使用敲击装置将 FNS 动力棒置入适合深度。

2) CCS 组

术前各项操作同 FNS 组, 手术切口位置同 FNS 组, 逐层分离肌肉、筋膜后, 完整暴露近端股骨, 于小转子之上沿股骨颈远端皮质经股骨颈插入一枚直径 2.5 mm 的克氏针, 以确定股骨颈的前倾角, 并通过

透视确认导针位置,使用平行导向器确定后上和前上的导针进针位置,分别置入导针,距前后皮质 5 mm,在 C 型臂机透视下调整导针进入的深度,使其深达软骨下 5 mm 处,在正侧位均透视满意后,进行常规的扩孔、探测深度、并将 CCS 逐个拧入,加压测试后,在 C 型臂机 X 线片透视下再次观察骨折复位满意度、螺钉位置等,确保无误后,退出导针,部分患者可根据术中复位效果增加一枚空心螺钉。清理伤口,缝合伤口,术毕。

2.2.4. 术后处理

术后所有患者均 24 h 内使用抗生素,预防术后切口感染的发生。术后连续给予低分子肝素皮下注射,避免长时间卧床增加下肢深静脉血栓形成风险,对症消肿、止痛、补液等治疗。同时,术后 1 d 指导患者进行床上的被动或主动髌关节功能锻炼,注意不可负重。术后 1 d 复查血常规、CRP、血沉等相关实验室指标,术后 1~2 d 对患者患侧髌关节进行正侧位 X 线片检查,部分患者进行 CT 平扫及三维重建,了解股骨颈骨折术后复位是否良好、内固定位置是否良好。本研究中两组患者术中复查 X 片均显示固定效果良好。术后两组患者在康复治疗师、主管医师的指导下,积极开展膝关节主动与被动训练、髌关节主动与被动训练、下肢肌肉力量训练。暂时禁止患者做直腿抬高、患侧肢体负重等活动。术后指导家属正确进行相关护理,并告知注意事项等。包括:术后可由卧位逐步过度至坐位,告知患者与家属居家康复活动时,臀部、患侧足跟部不可离开床面,仅做简单的屈膝活动,避免下肢肌肉力量萎缩,并适当的锻炼患者膝关节与踝关节能力。FNS 组术后 1~2 周可逐步行下地活动,注需要在拄双拐或助行器辅助下行走,避免患侧肢体过度负重。CCS 组术后 6~8 周后根据复查情况,可逐步过渡至下地活动,注意要在拄双拐或助行器辅助下行走,避免患侧肢体过度负重。两组患者在术后 3~6 个月根据门诊随访结果,根据自身恢复情况,在医师评估及指导下进行完全负重。出院前嘱咐两组患者前三个月每月返院检查一次,愈合良好的患者术后 6 个月、9 个月、12 月返院检查一次,如出现骨折延迟愈合的患者,术后复查时要求其每月返院检查一次,直至骨折愈合,后每隔三月复检一次。两组患者均行 12 个月的随访跟踪。

2.2.5. 观察指标

记录两组患者围手术期指标,包括手术出血量、术前术后血红蛋白的差值、手术时间、切口长度、手术中透视次数、住院时间、下地负重时间、骨折愈合时间等。股骨颈骨折愈合判断标准:(1) 功能测定:在无其他辅助工具作用下,患者可进行 3 min 以上的徒步行走,并且行走步数不可低于 30 步;同时,对患者进行 1 月连续观察,骨折处未出现变形情况。(2) 患者经过 X 线检查,患侧股骨颈骨折线消失或模糊,骨折断端有新生骨小梁通过。(3) 患者进行自主髌关节活动时患侧髌部未出现明显的不适感,并且髌关节无异常活动。(4) 患侧髌部无纵向敲击痛,无压痛。骨折愈合时间:即患者术后第 1 天至骨折临床愈合时间。在术后随访时记录并发症情况,包括股骨颈短缩移位、内固定松动、骨不连、股骨头坏死、深静脉血栓等。患者髌关节功能采用 Harris 评分进行评价,总分为 100 分,分值越高患者关节功能越好,选取两组患者术后 6 月时的 Harris 评分作为评价指标。

2.3. 有限元分析

2.3.1. 材料

CT 影像学资料由青岛市市立医院提供,志愿者为健康成年男性及已接收 FNS 内固定治疗的患者,CT 等影像学检查显示股骨无其他病变及异常,骨质条件良好。此次研究方案的制定与实施符合相关伦理要求。

2.3.2. 软件

SolidWorks、Ansys workbench。

2.3.3. 方法

首先, 我们使用 SolidWorks 扫描成人志愿者的股骨 CT, 建立一个完整的股骨模型及置入 FNS 后的股骨模型, 如图 1:

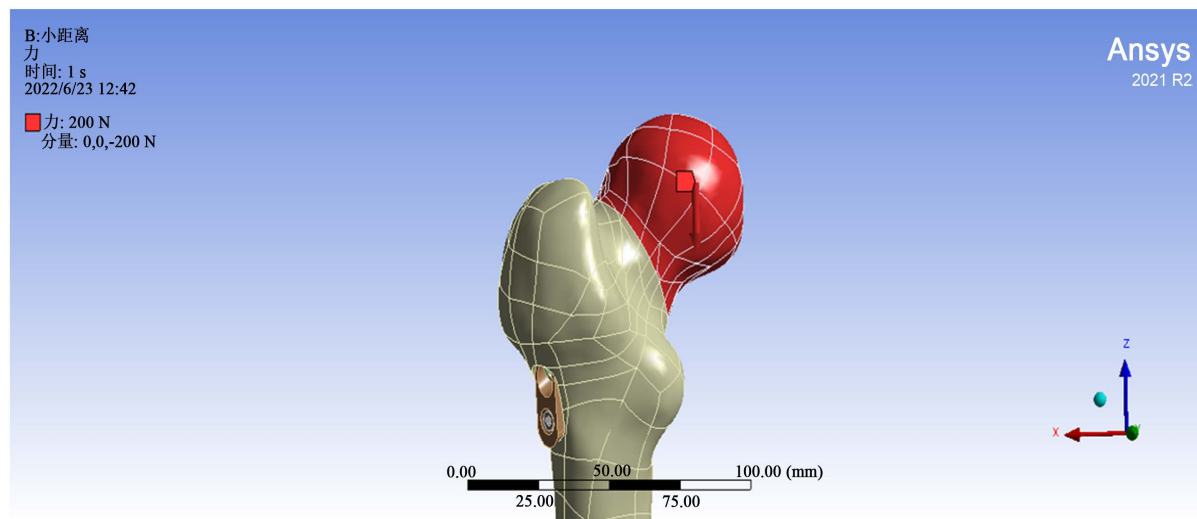


Figure 1. FNS finite element model

图 1. FNS 有限元模型

利用 Ansys workbench 软件模拟正常站立时以及 FNS 在固定股骨颈骨折时的受力情况及特点。假设选用的样本体重为 75 Kg, 从而对于左右两腿中的任意股骨而言, 正常状态下双腿着地时, 身体保持直立状态, 无偏斜的情况下, 每根股骨的受力应为自身重量的一半, 在正常直立情况下, 由此每个关节面的受力应为 367.5 N, 对此, 我们在模型中将人体自然站立时的重力简化为沿 Z 轴负方向施加 400 N 的力, 同时选择股骨最下端做全约束。

2.3.4. 观察指标

(1) 近端股骨体的应力分布及峰值; (2) FNS 内固定装置的应力分布及峰值; (3) 股骨的材料学强度; (4) FNS 内固定装置的材料学强度。

2.4. 统计学方法

应用 SPSS23.0 软件进行数据分析, 服从正态分布的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 采用独立样本 t 检验; 计数资料采用卡方检验; 分类资料采用 Cochran Q 值检验, 以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

3. 结果

3.1. 两组患者一般资料分析

两组患者性别、年龄、BMI 水平、受伤至手术时间等基本资料比较, 无统计学意义($P > 0.05$)。详见表 1。

3.2. 比较两组围手术期指标

分析显示, FNS 组患者术前术后血红蛋白差值、手术时间、透视次数、失血量、切口长度等指标均低于 CCS 组, 有统计学意义($P < 0.05$)。详见表 2。

Table 1. Compares the general data of the two groups of patients
表 1. 比较两组患者一般资料

项目	FNS (n = 30)	空心钉(n = 30)	P
性别(男/女)	16/14	18/12	0.45
BMI (kg/m ²)	22.13 ± 1.89	22.20 ± 1.972	0.89
年龄(岁)	44.29 ± 10.28	43.87 ± 8.016	0.86
受伤至手术时间(天)	2.03 ± 1.35	2.00 ± 1.39	0.93

Table 2. Comparison of perioperative indexes between the two groups
表 2. 两组围手术期指标比较

项目	FNS (n = 30)	空心钉(n = 30)	P
血红蛋白差值(mmol/L)	15.39 ± 7.29	21.97 ± 5.19	<0.001
手术时长(分钟)	58.06 ± 8.23	80.65 ± 10.06	<0.001
透视次数(次)	15.32 ± 1.536	20.71 ± 2.70	<0.001
失血量(ml)	48.23 ± 16.76	80.97 ± 11.36	<0.001
切口长度(cm)	4.00 ± 0.78	5.52 ± 1.21	<0.001

3.3. 比较两组术后康复情况

分析显示, FNS 组患者的骨折愈合时间及术后 6 个月复诊时 Harris 评分均优于 CCS 组, 有统计学意义($P < 0.05$)。详见表 3。

Table 3. Compared the postoperative rehabilitation of the two groups
表 3. 比较两组术后康复情况

项目	FNS (n = 30)	空心钉(n = 30)	P
骨折愈合时间(月)	3.32 ± 0.46	3.84 ± 0.44	<0.001
Harris 评分	92.48 ± 2.32	88.00 ± 3.04	<0.001

3.4. 比较两组术后并发症情况

结果显示, FNS 组患者术后并发症发生率 6.67%、低于 CCS 组患者并发症 22.22%, 有统计学意义($P < 0.05$)。详见表 4。

Table 4. Compared postoperative complications between the two groups
表 4. 比较两组患者术后并发症

组别	n	短缩移位	内固定松动	骨不连	股骨头坏死	深静脉血栓	发生率
FNS	30	1	1			1	3/30
空心钉	30	2	2		1	2	7/30
P							0.167

病例 1: 患者毕某某, 女, 40 岁, 因“车祸伤后左髋部疼痛 2 小时”入院, 图 2 为该患者术前及术后 1 月、6 月、1 年的髋关节 X 线片, 术前 X 线片提示左侧股骨颈骨折, 于入院第 3 天在硬膜外阻滞麻醉下行“左侧股骨颈骨折闭合复位内固定术”。术后 1 年 X 线片提示骨折愈合良好, 内固定装置无松动、移位, 无股骨头坏死、股骨颈短缩等并发症出现。



Figure 2. Image data of FNS patients

图 2. FNS 患者影像资料

病例 3: 患者任某某, 女, 60 岁, 因车祸伤致左股骨颈骨折, 伤后 2 小时入院, 术前 X 线提示: 左股骨颈骨折; 完善相关检查后, 于第 2 天在全麻下行“左侧股骨颈骨折空心拉力螺钉内固定术”, 图 3 为该患者影像学资料, 术中术后 1 月、6 月及 1 年 X 线提示: 骨折愈合良好, 股骨头形态正常, 未见股骨头坏死早期 X 线表现及股骨颈短缩等并发症, 四枚空心拉力螺钉位置良好, 未见退钉、断钉等并发症。

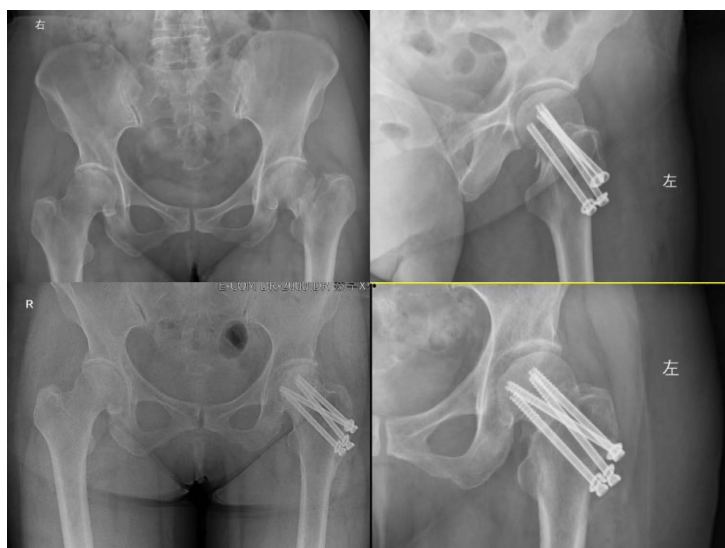


Figure 3. CCS patient image data

图 3. CCS 患者影像资料

3.5. 比较股骨及 FNS 的有限元分析

股骨体峰值的应变处，发生在股骨体上端股骨平台的关节面上，此处主要为松质骨，峰值应变仅为 0.83 mm，可以忽略不计，得到的结果显示，在仅受自身重力的情况下，股骨体结构保持完整，峰值应变的数据显示股骨本身不会发生明显的形变或位移，从而可知在仅受自身重力无外力撞击的情况下，股骨结构不会发生断裂或明显的结构上的破坏。由 Ansys workbench 软件模拟，对股骨在仅受自身重力情况下，产生的应力如图 4、图 5 所示。

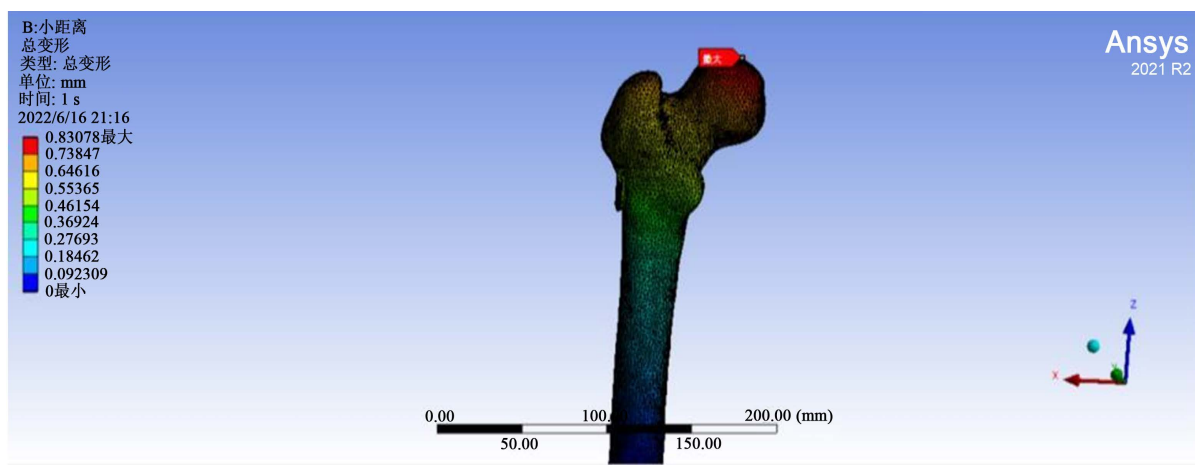


Figure 4. Maximum stress point of femur

图 4. 股骨最大应力点

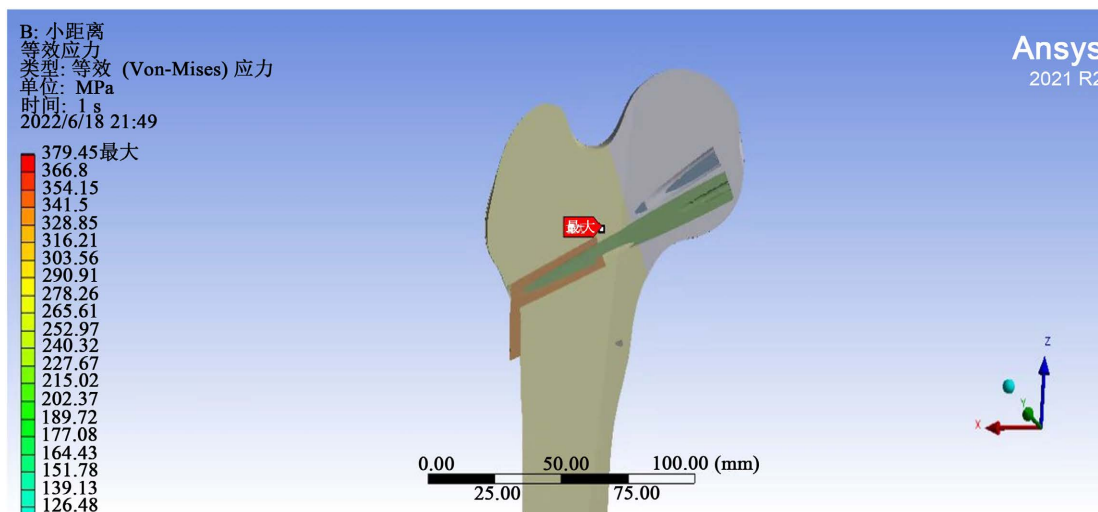


Figure 5. Maximum stress point of FNS

图 5. FNS 最大应力点

股骨颈动力交叉钉系统的螺钉材料为 Ti-6Al-7Nb，在系统中，我们完全还原了材料的刚性及结构。在导入 FNS 组件后，测量股骨体峰值的应力，在防旋螺钉光杆中心处产生应力集中现象，最大应力为 411.95 MPa。

此时我们对股骨及 FNS 组件测量其各个力学指标，并对比两者之间的材料强度，得到的结果如下表 5：

Table 5. Material comparison of femur and FNS**表 5.** 股骨与 FNS 的材料学对比

	杨氏模量	泊松比	体积模量	剪切模量	拉伸屈服强度	拉伸极限强度
股骨	12 GPa	0.25	$8 * 10^9$ Pa	$4.8 * 10^9$ Pa		
FNS	105 GPa	0.35	$1.1667 * 10^{11}$ Pa	$3.8889 * 10^{10}$ Pa	816.6 MPa	933.2 MPa

4. 讨论

手术治疗中, 受限于股骨颈特殊生理解剖学结构, 患者在发生骨折后, 针对股骨头供血系统遭受较为严重的破坏, 导致骨折断端供血不足, 一定程度影响术后骨折愈合, 造成术后患者发生严重并发症风险增高, 如骨折不愈合等, 甚至对手术结果、患者预后等造成不利影响[15]。患者发生股骨颈骨折后, 因其特殊的结构断端无血凝块, 而在血肿机化期能够形成纤维性骨痂的血凝块不足, 导致股骨颈骨折愈合时间相对四肢其他部位骨折延长[16]。基于以上几点原因可知, 股骨颈骨折相比于四肢其他部位的骨折在治疗上具有其特殊性。

年轻的股骨颈骨折患者是指年龄在 18 岁至 65 岁之间的中青年, 相比于老年人群, 中青年人发生股骨颈骨折风险较低[17]。中青年患者因特殊的社会地位, 对于自身功能需求高, 社会参与度高; 故除部分特殊患者, 如合并严重基础疾病, 绝大部分患者均渴望保留股骨头, 并通过手术治疗达到满意的复位, 尽早回归社会。

当前, 手术治疗的目的在于, 实现骨折断端的解剖复位, 并最大程度降低对局部周围软组织破坏、囊内血供破坏, 促进术后骨折的快速愈合, 使患者关节功能得以恢复[18]。当下, 股骨颈骨折患者的内固定治疗多选择 CCS 固定、FNS 固定, 两种内固定方式各有优劣势, 临床对于两种固定方式的选择仍然存在一定争议。其中 CCS 固定技术在患者良好闭合复位处理后, 将 3 枚螺纹空心钉经皮植入, 使螺纹能够全部进入患者股骨头, 进而获得更好的稳定加压固定效果、且术后防旋效果更为优异, 经过股骨距在股骨颈内螺钉呈现出两两平行分布、均匀对称的正“品”字型、或倒“品”字型, 进而提供更为稳定的力学强度。同时, 该手术创伤小、切口小、手术操作时间较短、术中出血量较低, 有利于维持骨折断端良好的生物学环境, 有利于提高骨折愈合, 降低再骨折发生风险, 是临床治疗股骨颈骨折的重要措施之一。但螺钉低于小转子水平, 会增加转子下骨折风险[19]。同时针对复杂不稳定骨折, CCS 固定术后容易出现内固定失败、退钉、断钉等情况[20], 这可能与内固定无法保持良好的骨折断端稳定性、内固定后并发症发生、骨折类型等有关系, 对患者预后结果造成严重不利影响。FNS 固定系统是近年来一种新的治疗措施, 其综合了角度稳定内固定系统、微创理念优点, FNS 固定将加压螺钉、滑动螺钉成角植入, 并且远端分散, 并在股骨头颈占较大空间, 为其提供更好的防旋作用, 受到广大学者关注[21]。鉴于此, 本研究开展对照实验, 结果显示, FNS 组患者手术中透视次数、出血量、手术时长、骨折愈合时间等指标均低于 CCS 组($P < 0.05$), FNS 组患者术后并发症发生率 10%、低于 CCS 组患者并发症 23.33% ($P < 0.05$)说明, 对于年轻股骨颈骨折患者, 采取 FNS 固定治疗, 可降低手术创伤性, 促进骨折愈合, 促使术后快速恢复。经分析, FNS 手术操作时仅做一个手术切口, 极大的减少手术剥离操作, 降低骨暴露及对周围软组织、血供系统的破坏, 为术后骨愈合提供足够的保护与血供支持。并且 FNS 固定在头钉尾端内利用抗旋钉进行锁定, 增大股骨颈的抗旋转力。只需置入 1 枚导针即可, 最大程度降低手术操作对骨骺动脉的损害, 促进术后的快速康复, 并减轻患者痛苦; 在保证良好力学稳定情况下, FNS 固定可更高预防内翻畸形、抗剪切力, 减少术后并发症发生风险[22]。随访调查显示, FNS 组患者髋关节功能 Harris 评分优于 CCS 组($P < 0.05$)说明, FNS 固定治疗相比于 CCS 固定, 前者对改善患者髋关节功能效果更为显著,

有利于改善患者生活质量。经分析, FNS 固定最大程度减少手术二次创伤, 几乎不引起软组织激惹; 并为患者提供良好生物力学优势, 有效预防内固定松动、退钉等并发症风险, 最大程度保留患者骨量, 为术后恢复、骨愈合等提供良好条件; 并且术后早期即开始各项功能锻炼, 更好的促进髋关节功能恢复, 改善患者预后风险, 并促进术后功能恢复[23]。相比于传统的 CCS 内固定治疗, FNS 固定具有以下几方面优势, (1) 生物学优势: FNS 的组成包括锁定螺钉、接骨板、抗螺旋螺钉(Arscrew)、动力棒等四个部件, FNS 内固定装置设计中充分借鉴了其他内固定装置的优点形成。其中圆柱形动力棒的设计, 可使手术过程中骨折维持较为满意的复位状态, 并且与抗旋螺钉呈 7.5° 、与接骨板呈现出 130° 的夹角, 这种交叉设计能够为螺钉与接骨板提供良好的稳定性, 使内固定装置系统的整体稳定性得到质的提升。本研究中 FNS 组患者术后负重时间、功能恢复时间等明显缩短。(2) 降低对软组织激惹作用: FNS 内固定装置的抗旋螺钉、动力棒经过特殊设计, 提供了滑动加压的效果。动力棒滑动距离可达到 20 mm, 同时在向前后 15 mm 滑动距离中, 动力棒能够实现完全不向外侧突出。简而言之, 在这种设计条件下, 允许了骨折断端有一定程度的缩短, 缩短空间最大为 2 cm; 并且在动力棒滑动距离 15 mm 内, 骨折断端即便发生缩短, 亦不会引起植入物的外突, 最大程度上减轻植入物对软组织的影响。本研究认为这一灵活设计, 与患者术后关节功能、骨折断端快速愈合存在关联。(3) 对骨量丢失具有预防作用: FNS 内植物体积较小, 且抗旋螺钉、动力棒的特殊设计, 最大程度降低植入物切割现象。并且子母钉的紧凑组合和较小的尺寸可以有效地减少对股骨头的损伤, 也有利于保留股骨颈的骨量。

有限元分析作为一种较为流行的生物力学研究工具, 可以模拟 FNS 在股骨中所起到的力学作用。我们在模型中通过施加各种方向的力来模拟正常人的活动, 从而分析 FNS 用于固定股骨颈骨折的效果。在弹性范围内大多数材料服从胡克定律, 即物体的变形与受力成正比[24]。其中, 纵向应力与纵向应变的比例常数为杨氏模量, 而横向应变与纵向应变之比值称为泊松比, 也叫横向变性系数, 是反映材料横向变性的弹性常数。股骨及 FNS 的杨氏模量分别为 12 GPa 和 105 GPa, 两者的泊松比分别是 0.25 和 0.35, 这两组数据中 FNS 均优于股骨, 说明 FNS 的弹性强度优于股骨, 在施加的力足够大时, 会迟于股骨产生形变, 证明了其足以在体内满足股骨的生物力学需要。体积模量是弹性模量的一种, 用来反映材料的宏观特性, 即物体的体积应变与平均应力之间的关系, 体积模量越大, 则可以证明该物体越不易被压缩产生形变。在我们的实验中可以看到 FNS 组件的体积模量是 1.1667×10^{11} Pa, 远超股骨的 8×10^9 Pa, 同样证明了 FNS 不易发生形变, 是一种可靠的内固定装置。剪切模量是剪切应力与应变的比值, 是材料在剪切应力作用下, 在弹性变形极限范围内, 剪切应力与剪切应变的比值。它表示材料抵抗剪切应变的能力, 剪切模量越大, 表示材料具有越好的抗剪切力。通过阅读文献可以发现以往的 CCS 及 DHS 抗剪切力均较差, 故在此次研究中, FNS 的抗剪切力也是一项重要的研究指标。通过实验, 我们测得股骨的剪切模量为 4.8×10^9 Pa, FNS 的剪切模量为 3.8889×10^{10} Pa, 证明 FNS 具有良好的抗剪切能力, 但实际情况需要在临床中进一步验证。拉伸屈服强度是指材料在拉伸过程中, 应力达到屈服点时所能承受的最大强度, 此时材料开始出现塑性变形。拉伸极限强度是指材料在拉伸过程中发生断裂之前所能承受的最大应力值。在前面的研究中我们测得导入 FNS 后, 模拟站立的情况下股骨最大应力为 411.95 MPa, 而 FNS 的拉伸屈服强度为 816.6 MPa, 拉伸极限强度为 933.2 MPa, 故在仅自身负重的情况下, FNS 在股骨颈中足以满足生物力学需求而不会发生形变, 在理论上避免了断钉的发生。我们通过上述有限元研究, 可以证明人体在股骨颈处所产生峰值应力小于 FNS 系统的抗压极限强度, 故 FNS 将保持完整, 不会产生结构上的破坏。在本次的有限元研究中, 可以证实 FNS 的材料性能各方面均优于正常成人的股骨, 可以起到较好的内固定效果, 可以在临床中使用。

本研究提示 FNS 固定具有以下几方面优势, 其一、可最大程度的保留患者骨量, 为术后骨愈合提供足够的自体骨。其二、采取的滑动加压措施, 可有效预防骨折断端因骨吸收引起的骨接触不良问题。其

三、FNS 固定采取的特殊锁定螺钉与抗旋螺钉的设计,提供更好的抗旋稳定性。其四、符合微创理念。

本研究不足之处,其一:纳入研究样本较少,研究结果数据受到地域性差异、环境差异等客观因素的影响,存在一定的选择偏倚、抽样误差等问题,造成研究结果代表性相对较为欠缺。其二、随访时间仍然偏短,无法对患者远期预后进一步观察,需要大样本、长期的研究进行深入探讨。其三,手术操作过程非同一医师或同一治疗组医师,存在技术差异。其四,未对其他内固定装置进行有限元分析,无法将 FNS 系统与其他装置的材料学性能进行研究分析。

5. 结论

1) 对于年轻股骨颈骨折患者使用 CCS 与 FNS 内固定手术治疗,结果分析表明 FNS 内固定治疗更符合微创理念,手术创伤更小,减少透视次数,操作简单,有助于术后快速康复。

2) FNS 内固定手术可以降低患者术后并发症的发生。

3) FNS 固定治疗对恢复患者髋关节功能作用更为显著,可早期功能锻炼,可更好提高患者生活质量。

4) FNS 内固定材料可以满足人体功能需求,可以作为一种可靠的内固定方式供临床选择。

参考文献

- [1] 张健, 汤欣. 青壮年 Pauwels III 型股骨颈骨折的内固定治疗进展[J]. 中华创伤骨科杂志, 2021, 23(6): 502-506.
- [2] 舒杉, 庄乐彬, 王钢, 等. 成年人股骨颈骨折分型的研究进展[J]. 中华创伤骨科杂志, 2022, 24(3): 272-276.
- [3] 黄海, 欧阳钧. 内固定治疗成人股骨颈骨折的研究进展[J]. 中国临床解剖学杂志, 2023, 41(6): 751-753, 756.
- [4] Florschütz, A.V., Langford, J.R., Haidukewych, G.J. and Koval, K.J. (2015) Femoral Neck Fractures: Current Management. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **29**, 121-129. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000000291>
- [5] Sprague, S., Slobogean, G.P., Scott, T., Chahal, M. and Bhandari, M. (2015) Young Femoral Neck Fractures: Are We Measuring Outcomes That Matter? *Injury*, **46**, 507-514. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2014.11.020>
- [6] 徐凯航, 纪方. 青壮年股骨颈骨折的治疗进展[J]. 中华创伤骨科杂志, 2020, 22(6): 549-552.
- [7] Samsami, S., Augat, P. and Rouhi, G. (2019) Stability of Femoral Neck Fracture Fixation: A Finite Element Analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, **233**, 892-900. <https://doi.org/10.1177/0954411919856138>
- [8] Wu, Z.F., Luo, Z.H., Hu, L.C. and Luo, Y.W. (2022) Efficacy of the Femoral Neck System in Femoral Neck Fracture Treatment in Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *World Journal of Clinical Cases*, **10**, 11454-11465. <https://doi.org/10.12998/wjcc.v10.i31.11454>
- [9] 常廷杰, 葛宇峰, 高峰, 等. 股骨颈动力交叉钉系统与空心螺钉固定治疗中青年股骨颈骨折的近期疗效比较[J]. 中华创伤骨科杂志, 2022, 24(6): 533-537.
- [10] Welch-Phillips, A., Gibbons, D., Ahern, D.P. and Butler, J.S. (2020) What Is Finite Element Analysis? *Clinical Spine Surgery*, **33**, 323-324. <https://doi.org/10.1097/BSD.0000000000001050>
- [11] Scott, C.E.H., Simpson, A. and Pankaj, P. (2020) Distinguishing Fact from Fiction in Finite Element Analysis. *The Bone & Joint Journal*, **102**, 1271-1273. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.102B10.BJJ-2020-0827.R1>
- [12] Taylor, M. and Prendergast, P.J. (2015) Four Decades of Finite Element Analysis of Orthopaedic Devices: Where Are We Now and What Are the Opportunities? *Journal of Biomechanics*, **48**, 767-778. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.12.019>
- [13] 王家宁, 符绩智, 冯文天, 等. 基于临床 CT 数字体相关和有限元分析的股骨内部变形场研究[J]. 北京生物医学工程, 2024, 43(1): 9-14, 42.
- [14] Umesh, K. and Vidhyapriya, R. (2021) Finite Element Analysis of Lower Limb Exoskeleton during Sit-to-Stand Transition. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, **24**, 1419-1425. <https://doi.org/10.1080/10255842.2021.1892658>
- [15] Proso, I. and Lakstein, D. (2021) The Clinically Stable Femoral Neck Fracture. *Injury*, **52**, 3028-3030. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2021.06.034>
- [16] Ye, Y., Hao, J., Mauffrey, C., Hammerberg, E.M., Stahel, P.F. and Hak, D.J. (2015) Optimizing Stability in Femoral Neck Fracture Fixation. *Orthopedics*, **38**, 625-630. <https://doi.org/10.3928/01477447-20151002-05>

-
- [17] 中华医学会骨科学分会创伤骨科学组, 中国医师协会骨科医师分会创伤专家工作委员会. 成人股骨颈骨折诊治指南[J]. 中华创伤骨科杂志, 2018, 20(11): 921-928.
- [18] Duffin, M. and Pilson, H.T. (2019) Technologies for Young Femoral Neck Fracture Fixation. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **33**, S20-S26. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000001367>
- [19] Slobogean, G.P., Sprague, S.A., Scott, T. and Bhandari, M. (2015) Complications Following Young Femoral Neck Fractures. *Injury*, **46**, 484-491. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2014.10.010>
- [20] Pei, F., Zhao, R., Li, F., Chen, X., Guo, K. and Zhu, L. (2020) Osteonecrosis of Femoral Head in Young Patients with Femoral Neck Fracture: A Retrospective Study of 250 Patients Followed for Average of 7.5 Years. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **15**, Article No. 238. <https://doi.org/10.1186/s13018-020-01724-4>
- [21] Yu, X., Rong, P.Z., Pang, Q.J., Chen, X.J., Shi, L. and Wang, C.H. (2021) The Effect on the Fracture Healing following Femoral Neck Shortening after Osteoporotic Femoral Neck Fracture Treated with Internal Fixation: Finite Element Analysis. *BioMed Research International*, **2021**, Article ID: 3490881. <https://doi.org/10.1155/2021/3490881>
- [22] 刘英科, 陈勤, 陈柯, 马文龙, 田可为, 范克杰, 毛雯正, 田燃, 邝孝坤. 股骨颈动力交叉钉系统治疗中青年垂直不稳定型股骨颈骨折 32 例[J]. 中国中医骨伤科杂志, 2023, 31(12): 70-75, 79.
- [23] 梅伟, 洪博文, 丁亮. 两种内固定治疗股骨颈骨折的疗效比较[J]. 临床骨科杂志, 2024(27): 75-78.
- [24] 齐远博, 王道峰, 刘道宏, 陶笙. 有限元分析在评价股骨颈骨折内固定方式中的研究进展与展望[J]. 中国骨与关节杂志, 2023, 12(9): 704-710.