

· 基础研究 ·

股骨颈骨折治疗中支持带的生物力学特点

戴亚辉, 秦涛

(上海市松江区中心医院骨科, 上海 201600)

【摘要】 目的: 研究股骨颈骨折治疗中支持带的生物力学特点。方法: 通过 1 名 75 岁老年女性志愿者的 CT 数据, 经过软件处理, 构建完整股骨模型和骨折后 3 枚空心钉固定模型, 并分为有支持带模型和无支持带模型, 使用不同模型的 Von-Mises 力分布和模型位移差异分析其稳定性差异, 研究支持带在股骨颈骨折治疗中的力学特点。结果: 在完整股骨上, 位移最明显部位出现在股骨头的负重区。有支持带模型位移为 0.381 37 mm, 无支持带模型位移为 0.381 68 mm。Von-Mises 力分布最集中的部位在股骨颈内下方, 有支持带模型为 11.80 MPa, 无支持带模型为 11.91 MPa。在骨折 3 枚空心钉内固定模型中, 位移最明显部位同样出现在股骨头的负重区。有支持带模型位移为 0.457 27 mm, 无支持带模型位移为 0.458 63 mm。Von-Mises 力分布最集中位置在股骨颈内下方, 有支持带模型为 59.22 MPa, 无支持带模型为 59.14 MPa。对于空心钉, Von-Mises 力峰值均出现在后上方空心钉, 有支持带模型为 107.48 MPa, 无支持带模型为 110.84 MPa。3 枚螺钉中前上方螺钉 Von-Mises 力最小, 在有支持带模型和无支持带模型分别为 67.88 MPa 和 68.76 MPa。结论: 完整的支持带对正常股骨和经解剖复位的股骨颈骨折内固定术后的稳定性作用小, 不能有效提高骨折术后骨折端的稳定性。

【关键词】 股骨颈骨折; 生物力学现象; 有限元分析; 支持带

中图分类号: R683.42

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.2023.03.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**Biomechanical characteristics of retinaculum in the treatment of femoral neck fractures**

DAI Ya-hui, QIN Tao (Department of Orthopaedics Surgery, Songjiang District Central Hospital, Shanghai 201600, China)

ABSTRACT Objective To investigate the biomechanical characteristics of retinaculum in the treatment of femoral neck fractures. **Methods** The CT data of a 75-year-old female volunteer was processed by software to construct an intact femur model and femoral neck fracture model fixed with three cannulated screws, which were divided into models with retinaculum or not. The Von-Mises stress distribution and displacement were compared to analyze the stability differences between the different models to study the mechanical characteristics of the retinaculum in the treatment of femoral neck fractures. **Results** In the intact femur, the most obvious displacement appeared in the weight-bearing area of the femoral head, with retinaculum 0.381 37 mm, and without retinaculum 0.381 68 mm. The most concentrated part of the Von-Mises stress distribution was located in the medial and inferior part of the femoral neck, with retinaculum 11.80 MPa, without retinaculum 11.91 MPa. In the femoral neck fracture fixed with three cannulated screws model, the most obvious position of displacement also appeared in the weight-bearing area of the femoral head, with retinaculum 0.457 27 mm, without retinaculum 0.458 63 mm. The most concentrated part of the Von-Mises located at the medial and inferior part of the femoral neck, with retinaculum 59.22 MPa, without retinaculum 59.14 MPa. For the cannulated screws, the Von-Mises force peaks all appeared in the posterior and superior screw, with retinaculum 107.48 MPa, without retinaculum 110.84 MPa. Among the three screws, the Von-Mises stress of the anterior-superior screw was the smallest, which was 67.88 MPa vs 68.76 MPa in the retinaculum and non-retinaculum groups, respectively. **Conclusion** The complete retinaculum has little effect on the stability of intact femur and femoral neck fractures with anatomical reduction after internal fixation, and cannot effectively improve the stability of the fracture end after the fracture.

KEYWORDS Femoral neck fractures; Biomechanical phenomena; Finite element analysis; Retinaculum

支持带是髋关节的重要组成部分。Weitbrecht 在 1742 年首次描述它为沿着股骨颈走行的关节内滑

膜皱襞。1856 年 Henle 将其称作支持带, 该称呼被一直使用到 20 世纪^[1]。直到 1929 年, ANSEROFF^[2]对其进行了更加详细的描述——支持带分为 3 条: 前支持带, 内侧支持带和外侧支持带。在 20 世纪下半叶, 支持带中含有血管为股骨头提供血液供应这一重要功能才被发现。TUCKER^[3]最早将支持带内的血管命名为支持带动脉, 后期随着其他学者对支持带

基金项目: 上海市松江区科技攻关项目(编号: 20SJKJG4)

Fund program: Scientific and Technological Projects in Songjiang District, Shanghai (No.20SJKJG4)

通讯作者: 秦涛 E-mail: dyh_928@foxmail.com

Corresponding author: QIN Tao E-mail: dyh_928@foxmail.com

研究的深入,将其分为后上支持带动脉、后下支持带动脉和前支持带动脉。既往研究对支持带的解剖结构和对股骨头血供的研究较多,对其在股骨近端力学稳定性中的作用研究较少。本研究拟使用有限元分析的方法,研究支持带在股骨近端的力学特点,讨论其在股骨颈骨折内固定术后稳定性中的作用。

1 资料与方法

1.1 影像获取和模型建立

完整的股骨模型通过 1 名 75 岁老年女性志愿者的 CT 数据获得。排除了髌关节严重骨性关节炎、类风湿性关节炎等其他疾病,测量股骨的颈干角是 128°,前倾角 13.5°,在正常范围。CT 数据通过西门子公司 64 排 CT 扫描获取,厚度 0.625 mm,像素 512×512。总共获取 726 张图像,导入 Mimics 20.0 (Materialise, Southport, Australia) 软件中,制作股骨的三维模型。将模型导出为 .stl 模式,使用 Geomagic (3D Systems, Rock Hill, SC, USA) 软件去除噪点,优化后生成股骨曲面模型,保存为 .stp 格式。将 .stp 文件导入 Unigraphics NX (Siemens) 软件获得股骨的三维模型,在股骨颈处截断制造股骨颈骨折模型。分别在股骨颈的前方、后上方和后下方添加支持带^[4],在骨折复位情况下装配内固定物到合适位置。

1.2 内固定物的装配

目前国内应用最为广泛的股骨颈骨折内固定方式是 3 枚空心钉倒三角固定^[5]。本研究采用了 Depuy-Synthes 公司 (Raynham, MA, USA) 的空心螺钉规格。在 3 枚空心钉固定的模型中,将 3 枚空心钉放置在标准位置上:第 1 枚,放在靠近股骨颈前上方皮质的位置;第 2 枚,放在靠近后上方皮质的位置;第 3 枚,放在靠近股骨颈下方皮质的位置。3 枚螺钉呈倒三角形,尖顶距控制在 10 mm 以内,下方螺钉的进针点需要在大转子以上,以避免转子间区域的受力增加^[6]。使用 Ansys Workbench 软件 (Canonsburg, PA, USA) 对所有模型进行 10 节点四面体网格划分 (节点数量和单元数量见表 1)。网格收敛确认网格数量足够,模型网格质量验证通过 >98%。根据既往文献报道^[6-8],对模型中骨、内固定物、韧带的属性进行设定 (见表 2)。

1.3 边界和加载条件

股骨后倾 15°^[6],下端固定,在股骨头施加垂直向下的 700 N 的力^[9],以模拟中等身材成年人单腿站立的情况 (见图 1)。

2 结果

为研究支持带在稳定正常股骨稳定性和股骨颈骨折内固定术后骨折端稳定性的影响,比较不同模型之间股骨位移和 Von-Mises 力分布情况^[8]。

表 1 各模型的节点和单元数量

Tab.1 Number of nodes and elements for each model

模型	节点	单位:个
		单元
完整股骨(含支持带)	38 390	25 225
完整股骨(不含支持带)	37 389	24 956
骨折内固定模型(含支持带)	190 140	114 886
骨折内固定模型(不含支持带)	188 357	114 129

表 2 骨及内固定和韧带的属性

Tab.2 Properties of bone, internal fixation, and ligaments

材料	杨氏模量/MPa	泊松比
皮质骨	16 800	0.30
松质骨	840	0.20
内固定物	105 000	0.35
支持带	260	0.40

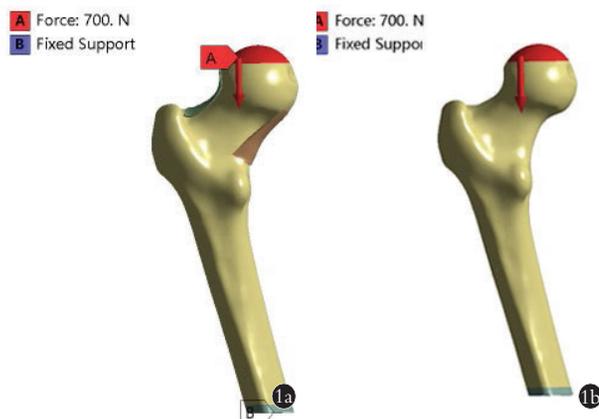


图 1 边界条件(股骨后倾 15°,下端固定,在股骨头施加垂直向下的 700 N 的力) 1a. 含支持带模型 1b. 不含支持带模型

Fig.1 Boundary conditions (The femur is tilted back 15°, the lower end is fixed, and a vertical downward 700 N force is applied to the femoral head) 1a. Model with retinaculum 1b. Model without retinaculum

2.1 完整股骨模型中位移和 Von-Mises 力分布情况

在完整股骨模型中,位移最明显部位出现在股骨头的负重区,但位移差别较小,有支持带模型位移为 0.381 37 mm,无支持带模型位移为 0.381 68 mm。支持带是否完整对正常股骨的位移无明显影响。Von-Mises 力分布最集中的部位位于股骨颈内下方,支持带对 Von-Mises 力的分布也没有明显影响,有支持带模型为 11.80 MPa,无支持带模型为 11.91 MPa(图 2)。

2.2 骨折 3 枚空心钉内固定模型中位移和 Von-Mises 力分布情况

在骨折 3 枚空心钉内固定模型中,有支持带模型股骨头位移为 0.457 27 mm,无支持带模型股骨头

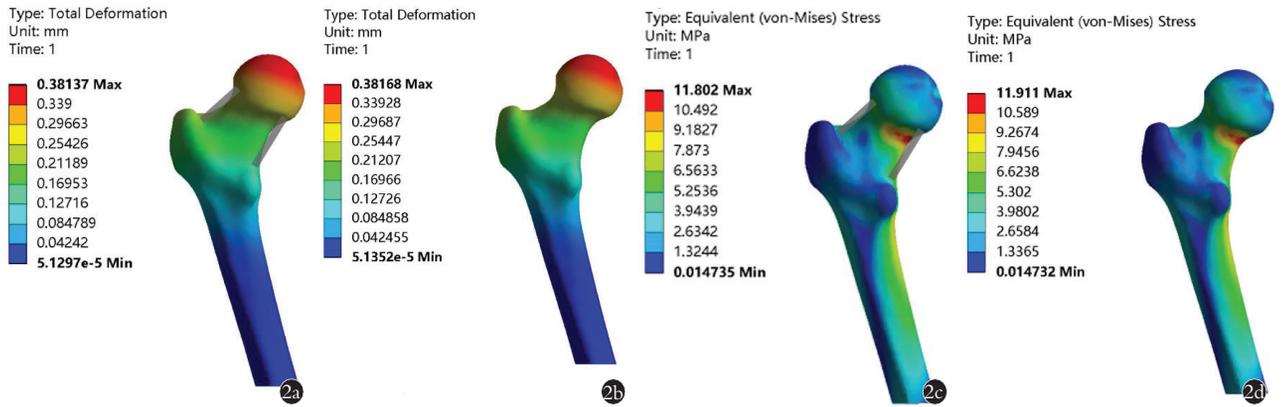


图 2 正常股骨的位移和 Von-Mises 力 2a. 有支持带模型位移 2b. 无支持带模型位移 2c. 有支持带模型 Von-Mises 力 2d. 无支持带模型 Von-Mises 力

Fig.2 Displacement and Von-Mises stress of intact femur 2a. Displacement with retinaculum 2b. Displacement without retinaculum 2c. Von-Mises stress with retinaculum 2d. Von-Mises force without retinaculum

位移为 0.458 63 mm，有支持带模型股骨头位移稍小。Von-Mises 力最集中位置在股骨颈内下方，有支持带模型为 59.22 MPa，无支持带模型为 59.14 MPa。空心钉应力方面，Von-Mises 力峰值均出现在后上方空心钉，有支持带模型为 107.48 MPa，无支持带模型为 110.84 MPa，无支持带模型稍增加。3 枚螺钉中前上方螺钉 Von-Mises 力最小，在有支持带模型和无支持带模型分别为 67.88 MPa 及 68.76 MPa(图 3)。

3 讨论

3.1 支持带的解剖和在股骨头血供的重要作用

股骨颈部血供不够丰富是造成股骨颈骨折术后骨折端不愈合、股骨头坏死的最主要原因，股骨近端血液供应主要来自于旋股内外侧动脉、小凹动脉以及股骨滋养血管的升支。其中，旋股内侧动脉最为重要，为大多数股骨近端主要血供来源。旋股内侧动脉和旋股外侧动脉在股骨颈基底部分形成动脉环，并延伸出支持带动脉，在股骨颈部通过支持带到达股骨头基底部分，进入股骨头为股骨头供血^[4,10]。支持带是股骨颈部的重要解剖结构，分为前支持带、外侧支持带和内侧支持带(也可称作上支持带和下支持带)^[2]。前期研究对股骨颈支持带的结构进行了显微结构观察，观察到支持带纤维分 3 层，内外层纤维结构致密而中层纤维结构较疏松，类似于三夹板样结构，丰富的血管和神经行走于中间层的疏松纤维组织中。在支持带起止的两端，即股骨颈基底部分以及股骨头关节软骨边缘，支持带纤维束几乎呈直角紧密铆入骨质之中，树根样在骨质内分出密集的纤维束。但在支持带经股骨颈中段的沿途，支持带一般都平行于股骨颈骨质表面，除了进入股骨颈滋养孔的血管，较少有纤维进入骨质。下支持带在股骨颈中段和股骨颈多无接触，为分离状态，但其起止两端和股骨

颈骨质的连接同样十分紧密。当股骨颈发生骨折移位时，如果支持带和骨质紧密结合，则支持带势必随着骨折移位而发生撕裂，损伤走行于其中的血管；如果在骨折移位时，支持带和股骨颈骨面随即分离，则可大大缓冲骨折移位对支持带的损伤暴力，减少对其中血管的损伤，这种结构可以很好地保护走行于其中的血管。而紧密附着的两端则可使支持带保持结构上的连续性，发挥桥梁一样的功能，使行走其中的血管跨越骨折端通往股骨头，最大限度减少骨折移位对股骨头血供的危害^[11]。股骨头颈部的滋养孔在股骨颈的后上方，也就是上支持带走行区域分布最多^[12]，这也证实了在 3 条支持带当中，上支持带对于股骨头的血供最为重要。

3.2 支持带在股骨近端的力学性能

支持带、关节囊等软组织，虽然有一定的韧性，对于稳定关节、限制关节的活动度有重要作用。但是支持带对正常股骨和股骨颈骨折内固定术后稳定性的研究较少，1895 年 FAWCETT 等^[13]认为支持带在股骨颈部起到夹板的作用，有加固股骨颈，预防股骨颈骨折的作用，并可以在股骨颈骨折减轻股骨颈骨折的移位。本研究通过有限元分析的方法分析支持带对完整股骨及股骨颈骨折内固定术后骨折端稳定性的影响，结果显示在正常股骨模型中，支持带并不能够明显减少股骨的位移，并且对股骨的应力分布影响很小；在骨折内固定模型中，对骨折端、内固定物的应力，以及股骨头的位移影响也不明显。原因可能是由于支持带的力学性能相对骨骼、金属内固定物差距巨大，对骨折端稳定性的作用极其有限。支持带更多的作用是在髋关节活动、外伤骨折时，对其内部血管保护，最大程度减小内部血管的损伤，从而维持股骨头的血液供应，减少股骨头坏的发生率。

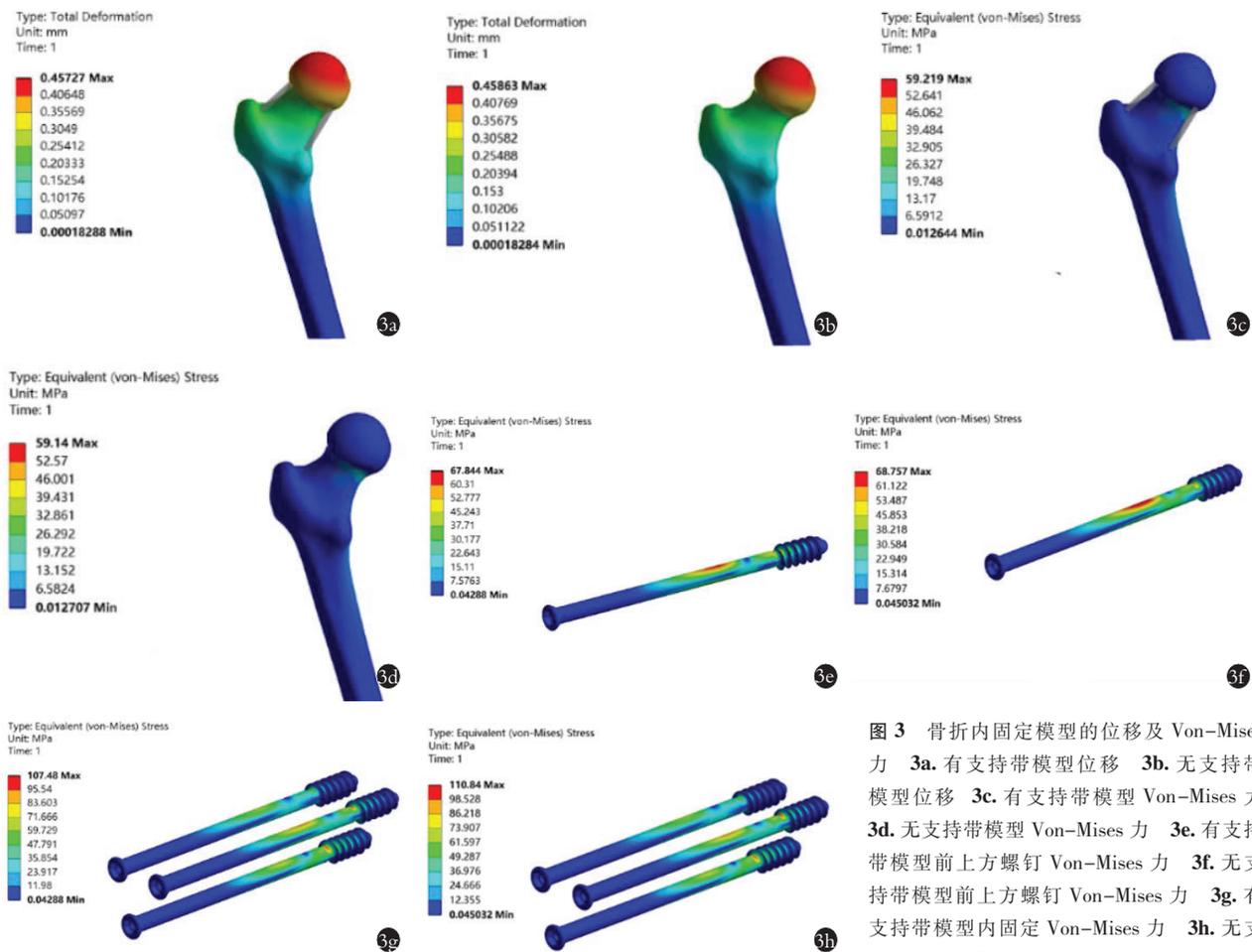


图 3 骨折内固定模型的位移及 Von-Mises 力 3a. 有支持带模型位移 3b. 无支持带模型位移 3c. 有支持带模型 Von-Mises 力 3d. 无支持带模型 Von-Mises 力 3e. 有支持带模型前上方螺钉 Von-Mises 力 3f. 无支持带模型前上方螺钉 Von-Mises 力 3g. 有支持带模型内固定 Von-Mises 力 3h. 无支持带模型内固定 Von-Mises 力

Fig.3 Displacement and Von-Mises stress of fracture after internal fixation 3a. Displacement with retinaculum 3b. Displacement without retinaculum 3c. Von-Mises stress of model with retinaculum 3d. Von-Mises stress of model without retinaculum 3e. Von-Mises stress of anterior-superior screw in the model with retinaculum 3f. Von-Mises stress of anterior-superior screw in the model without retinaculum 3g. Von-Mises stress of the internal fixation model with retinaculum 3h. Von-Mises stress of the internal fixation model without retinaculum

3.3 不足和展望

本研究存在一些不足:在设置支持带属性时,由于既往没有支持带力学分析相关文献,对其杨氏模量和泊松比数据取自文献中足部韧带的数据,支持带的力学性能和足部韧带的力学性能可能存在一些差距,导致试验结果有一定误差;本研究使用计算机有限元分析的方式模拟股骨、骨折、内固定的受力分析等,没有生物力学试验验证,与真实情况可能存在一定差距,但仍能有效反应实际情况的趋势;本研究仅模拟了静态模型,无法反应动态活动时的力学情况,并且只有 700 N 的载荷,模拟正常成年人单腿站立的情况,无法反应动态情况和屈服的极限受力情况。在未来的研究中,需要对完整支持带在股骨颈骨折移位时的限制作用以及股骨颈骨折移位程度对支持带中血供的影响进行进一步的研究与探讨。

综上所述,支持带的完整虽然能够在股骨颈骨折后限制骨折端的移位程度,但对正常股骨和经解

剖复位的股骨颈骨折内固定术后的稳定性作用小,支持带的完整并不能有效提高骨折术后骨折端的稳定性。支持带更重要的作用和意义主要在于保护支持带血管对股骨头的血液供应。

参考文献

- [1] BARTONICEK J, NANKA O. Josias Weitbrecht, the founder of syndesmology, and the history of the retinacula of Weitbrecht [J]. Surg Radiol Anat, 2019, 41(10):1103-1111
- [2] ANSEROFF N I. Die synovialfalten (binnenbänder) des menschlichen Hüftgelenks[J]. Z Anat Entwickl Gesch, 1929, 89(5): 580-605.
- [3] TUCKER F R. Arterial supply to the femoral head and its clinical importance[J]. J Bone Joint Surg Br, 1949, 31(1):82-93.
- [4] LAZARO L E, KLINGER C E, SCULCO P K, et al. The terminal branches of the medial femoral circumflex artery: the arterial supply of the femoral head[J]. Bone Joint J, 2015, 97-B(9):1204-1213.
- [5] 张英泽. 股骨颈骨折治疗方案选择策略与进展[J]. 中国骨伤, 2015, 28(9):781-783. ZHANG Y Z. Selection strategy and progress on the treatment of femoral neck fractures[J]. China J Orthop Traumatol, 2015, 28(9):

- 781-783. Chinese.
- [6] MEI J, LIU S W, JIA G Y, et al. Finite element analysis of the effect of cannulated screw placement and drilling frequency on femoral neck fracture fixation[J]. *Injury*, 2014, 45(12):2045-2050.
- [7] CHEUNG J T M, ZHANG M, LEUNG A K L, et al. Three-dimensional finite element analysis of the foot during standing—a material sensitivity study[J]. *J Biomech*, 2005, 38(5):1045-1054.
- [8] LI J T, WANG M L, LI L T, 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.
- [9] 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.
- [10] KALHOR M, BECK M, HUFF T W, et al. Capsular and pericapsular contributions to acetabular and femoral head perfusion[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2009, 91(2):409-418.
- [11] DOU B, MEI J, WANG Z Y, et al. Histological observation of the retinacula of weibrecht and its clinical significance[J]. *IJO*, 2018, 52(2):202-208.
- [12] KAMATH V, GUPTA C. Morphological study on distribution of nutrient foramina in femoral neck in relation to retinacula of weibrecht with its surgical implications[J]. *J Orthop*, 2022, 31:57-60.
- [13] FAWCETT E. Retinacula of weibrecht. what is their function? [J]. *J Anat Physiol*, 1895, 30(Pt 1):53-58.

(收稿日期:2022-10-07 本文编辑:连智华)

Pauwels Ⅲ型股骨颈骨折骨缺损不同内固定方案的生物力学分析

苏志豪^{1,2}, 谭宏莉³, 徐子环^{1,2}, 李鹏飞^{1,2}, 王永钦^{1,2}, 李双², 倪明^{2,4}

(1.上海理工大学健康科学与工程学院,上海 200093;2.上海市浦东新区人民医院骨科,上海 201299;3.海安市中医院康复科,江苏 海安 226600;4.上海交通大学医学院附属瑞金医院骨科,上海 200025)

【摘要】 目的:探究不同内固定治疗 Pauwels Ⅲ型股骨颈骨折骨缺损的生物力学特征,为骨折治疗提供参考。方法:基于 CT 图像建立 Pauwels Ⅲ型股骨颈骨折模型,包括单纯骨折和骨折骨缺损两种特征,模拟 4 种内固定,即倒置空心螺钉(inverted cannulated screw, ICS)、ICS+内侧板、股骨颈系统(femoral neck system, FNS)和 FNS+内侧板。测量并比较不同骨折模型在 2 100 N 轴向载荷下的应力分布、模型刚度和位移情况。结果:ICS 和 FNS 固定时,峰值应力集中于螺钉与骨折端接触位置,FNS 的峰值应力高于 ICS;与内侧板联用后,峰值应力转移至内侧板,且应力增大,ICS 的增加幅度大于 FNS。在骨折类型相同的情况下,FNS 固定的刚度高于 ICS。与骨缺损模型相比,骨折模型在相同内固定时刚度更高。内侧支撑板的使用可增加模型的刚度,但 ICS 模型的增加幅度超过 FNS 模型。ICS 固定模型的骨折端位移超过 FNS 模型。结论:对于 Pauwels Ⅲ型股骨颈骨折骨缺损模型,FNS 较 ICS 具有更好的生物力学性能。ICS+内侧板有助于增强治疗的稳定性,但建议采用非锁定板;FNS 具有抗扭转功能,无须与内侧板联用。

【关键词】 股骨颈骨折; 骨缺损; 有限元分析; 内侧板; 股骨颈系统

中图分类号:R687.3; R318.01

DOI:10.12200/j.issn.1003-0034.2023.03.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Biomechanical analysis of four internal fixations for Pauwels Ⅲ femoral neck fractures with defects

SU Zhi-hao^{1,2}, TAN Hong-li³, XU Zi-huan^{1,2}, LI Peng-fei^{1,2}, WANG Yong-qin^{1,2}, LI Shuang², NI Ming^{2,4} (1. School of Health Science and Engineering, Shanghai University of Technology, Shanghai 200093, China; 2. Department of Orthopaedics, Shanghai Pudong New Area People's Hospital, Shanghai 201299, China; 3. Department of Rehabilitation, Hai'an Hospital of Traditional Chinese Medicine in Jiangsu Province, Hai'an 226600, Jiangsu, China; 4. Department of Orthopaedics, Ruijin Hospital, Shanghai Jiaotong University School of Medicine, Shanghai 200025, China)

ABSTRACT Objective To investigate the biomechanical characteristics of different internal fixations for Pauwels type Ⅲ

基金项目:上海市浦东新区新兴交叉学科-数字骨科项目(编号:PWXx2020-08);上海市科委港澳合作项目(编号:21410760200)

Fund program: Emerging Interdisciplinary-Digital Orthopedics Project in Pudong New Area, Shanghai (No. PWXx2020-08); Shanghai Science and Technology Commission Hong Kong and Macao Cooperation Project (No. 21410760200)

通讯作者:倪明 E-mail: gendianqing@163.com

Corresponding author: NI Ming E-mail: gendianqing@163.com