

· 临床研究 ·

不同髓内固定方法治疗老年耻骨上支骨折的有限元分析

郑永泽¹, 陈心敏¹, 郑利钦¹, 李木生¹, 梁子毅¹, 林梓凌²

(1. 广州中医药大学第一临床医学院, 广东 广州 510405; 2. 广州中医药大学第一附属医院创伤骨科 广州中医药大学岭南医学研究中心, 广东 广州 510405)

【摘要】 目的: 通过有限元分析评价弹性髓内钉治疗耻骨上支骨折的生物力学稳定性, 并与空心螺钉髓内固定的稳定性进行比较。方法: 选取 1 位志愿者骨盆 CT 数据, 运用逆向工程软件重建骨盆三维模型并截骨模拟耻骨上支骨折, 分别与不同内植物进行装配得到空心钉模型、单弹性钉模型和双弹性钉模型, 在 ANSYS 软件中进行网格划分、材料赋值、加载载荷等步骤后提交运算。结果: 弹性钉模型骨盆整体移位较空心钉模型小, 其中双弹性钉模型整体位移最小, 但空心钉模型内植物位移最小, 单弹性钉模型内植物位移最大; 空心钉固定应力虽小但存在明显的应力集中, 弹性钉应力大但无明显应力集中, 尤其双弹性钉应力分布较为均匀且骨盆整体应力最小。结论: 3 种固定方式均能有效改善骨盆前环稳定性, 空心钉固定、双弹性钉固定的总体生物力学性能无明显差距, 均优于单弹性钉固定。弹性钉固定同时具有微创手术的优势及良好的生物力学稳定性, 可作为治疗耻骨上支骨折较好的手术方法。

【关键词】 有限元分析; 耻骨; 骨折; 骨折固定术, 髓内

中图分类号: R683.3

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.2021.07.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Finite element analysis of different intramedullary fixation methods for the treatment of senile pubic ramus fractures

ZHENG Yong-ze, CHEN Xin-min, ZHENG Li-qin, LI Mu-sheng, LIANG Zi-yi, and LIN Zi-ling*. *Department of Orthopaedics Trauma, the First Affiliated Hospital of Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine, Lingnan Medical Research Center, Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine, Guangzhou 510405, Guangdong, China

ABSTRACT Objective: To evaluate the biomechanical stability of elastic intramedullary nail in the treatment of pubic ramus fractures by finite element analysis, and to compare the stability of elastic intramedullary nail with cannulated screw intramedullary fixation. **Methods:** The CT data of the pelvis of a volunteer were selected, and the three-dimensional model of the pelvis was reconstructed by reverse engineering software and the fracture of the pubic ramus fractures was simulated by osteotomy. The hollow nail model, single elastic nail model and double elastic nail model were assembled with different implants respectively. The mesh division, material assignment loading and other steps were carried out in the ANSYS software, and then the calculation was submitted. **Results:** The overall displacement of the pelvis of the elastic nail model was smaller than that of the cannulated screw model, in which the double elastic nail model had the smallest overall displacement, but the cannulated screw model had the smallest plant displacement and the single elastic nail model had the largest plant displacement. Although the stress of cannulated screw was small, there was obvious stress concentration, the stress of elastic nail was large, but there was no obvious stress concentration, especially the stress distribution of double elastic nail was more uniform and the overall stress of pelvis was the smallest. **Conclusion:** All the three fixation methods can effectively improve the stability of the anterior ring of the pelvis. Among them, there is no significant difference in the overall biomechanical properties of hollow nail fixation and double elastic nail fixation, which is better than that of single elastic nail fixation. Elastic nail fixation has the advantages of minimally invasive surgery and good biomechanical stability, so it can be used as a better surgical method for the treatment of pubic ramus fractures.

KEYWORDS Finite element analysis; Pubic bone; Fracture fixation, intramedullary

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号: 81673996)

Fund program: The National Natural Science Foundation of China (No. 81673996)

通讯作者: 林梓凌 E-mail: 13600460045@139.com

Corresponding author: LIN Zi-lin E-mail: 13600460045@139.com

老年骨盆骨折中, 单纯耻骨上支骨折通常被认为是由低能量创伤引起的稳定性骨折, 一般行保守治疗且预后尚可。随着生物力学的发展, 人们逐渐认识到骨盆前环稳定的重要性。早期固定耻骨上支骨折有利于骨盆环的稳定, 减少后环应力水平及骶髂关

节的活动^[1]。另外,有学者发现,耻骨上支骨折常伴有骨盆后环损伤^[2](posterior pelvic ring injury, PP-RI)。骨盆平片常作为骨盆骨折的第一筛查手段,因平片很难诊断 PPRI 故常常造成漏诊,从而未能采取更好的治疗方案^[3]。通过 CT 或 MRI 评估,伴发 PPRI 的发生率从 54%到 96.8%不等^[4]。耻骨上支骨折传统治疗手段如切开复位内固定钢板手术时间长、损伤大,且易损伤重要神经、血管。随着导航、透视技术、器械发展和手术经验的积累,微创治疗骨盆前环骨折技术开始出现,经皮空心钉内固定逐渐成为耻骨上支骨折重要的术式。但其仍存在一定的局限性,比如对术者操作水平要求高、术中需反复精确透视、肥胖患者置钉困难等^[5]。基于此,团队尝试使用弹性钉微创治疗耻骨上支中段骨折取得较好临床疗效,但病例仍在积累^[6]。作者旨在通过有限元法分析不同髓内固定方式治疗老年耻骨上支中段骨折的生物力学差异,为临床治疗提供实验支撑和新思路。2019 年 3 月至 2019 年 12 月收集相关 CT 数据资料后进行骨盆三维重建、模型装配、运算及后处理工作,于广州中医药大学国家重点学科楼中医骨伤科学数字骨科与生物力学实验室完成。

1 资料与方法

1.1 病例资料

选取 1 位体健志愿者(81 岁男性,身高 175 cm,体重 70 kg),该志愿者骨盆无畸形、骨折、肿瘤等。经广州中医药大学第一附属医院伦理委员会批准并与患者签署知情同意后,志愿者取仰卧位,采用 GE 64 排螺 CT 对骨盆螺旋扫描并以 Dicom 格式保存扫描的 CT 数据。扫描条件:扫描电压 120 kV,扫描电流 250 mA,层厚 2 mm,层距 5 mm,每个扫描层的像素矩阵密度大小为 512×512。

1.2 软件选择

Mimics 19.0 软件(Materialise 公司,比利时);Geomagic studio 2017 软件(Geomagic 公司,美国);Solidworks 2017 软件(Dassault Systemes 公司,美国);有

限元软件 ANSYS 2016 软件(LSTC 公司,美国)。

1.3 试验方法

1.3.1 建立骨盆三维模型 将 Dicom 格式 CT 资料导入 Mimics 19.0 软件中,进行阈值分割、区域增长、三维重建等处理,建立骨盆三维有限元模型,导出为 stl 格式文件并导入 Geomagic studio 2017 软件中,进行去除特征、划分网格、光滑、拟合曲面等步骤处理后得到仿真骨盆有限元分析模型,生成 STEP 文件。

1.3.2 模型装配、分割与复位模拟 运用 Solidworks 2017 软件对 STEP 格式的骨盆模型进一步处理:首先参照临床病例对骨盆模型耻骨支中段进行分割模拟骨折线;然后根据弹性髓内钉、空心钉相应参数和形状画出内固定物草图。其中空心钉直径为 7.0 mm,弹性钉直径均为 2.0 mm。通过拉伸、旋转、切割、放样等命令得到内固定模型,再对内固定和骨盆模型按照临床规范进行装配,空心钉进针点位于耻骨结节外 2 cm、下缘 1 cm 处,沿耻骨支走向向髋臼方向逆行置入;弹性钉进钉点位于耻骨角稍下方,使其通过骨折端达髂前下棘水平。最终得到 3 个模型:空心钉模型、单弹性钉模型、双弹性钉模型(见图 1)。

1.3.3 材料赋予与网格划分 将 3 个模型分别导入 ANSYS workbench 2016 软件中,设置所有材料为均质、各向同性、连续、线弹性材料,赋予骨盆、韧带、内植物材料参数(见表 1)。进行网格划分,检验确保没有交叉、翘曲和颠倒单元,并进行网格收敛性分析。

1.3.4 载荷与约束 将髌骨和胫骨与胫髌关节之间的接触关系设置为绑定约束。空心钉与骨、弹性钉与骨的接触关系均为绑定约束。使用线性弹簧代替骨盆的韧带结构。根据文献[10]约束两侧髋臼 6 个方向自由度,并在胫骨上表面施加 500 N 垂直向下的均布载荷,模拟站立状态下受力情况。

1.4 观察指标

本研究观察 3 种不同固定方法固定后的骨盆及内植物静态条件下的应力位移情况,通过以下指标进行综合分析:(1)骨盆及内植物整体位移。(2)骨盆

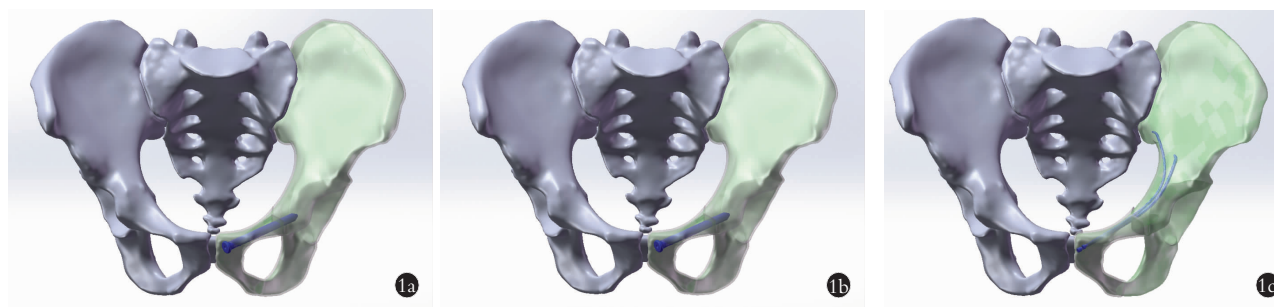


图 1 不同固定方式的骨盆有限元模型 **1a.** 空心钉模型 **1b.** 单弹性钉模型 **1c.** 双弹性钉模型
Fig.1 Finite element models of pelvis with different fixation methods **1a.** Cannulated screw nail model **1b.** Single elastic nail model **1c.** Double elastic nail model

表 1 有限元模型的材料参数

Tab.1 Material properties of finite element models

材料	弹性模量(MPa)	泊松比(μ)
皮质骨 ^[7]	17 000	0.3
松质骨 ^[8]	129	0.2
空心钉	114 000	0.3
弹性钉	114 000	0.3
韧带 ^[9]	251.3	0.3

模型整体应力分布。(3)内植物应力分布及应力峰值。

2 结果

2.1 位移分析

模型整体位移呈波状分布(见图 2),位移较大者位于骶骨上表面左缘、左骶骨翼及双侧骶骨上关节突,骨折端附近位移极小。骨盆整体位移:空心钉(5.47 mm)>单弹性钉(5.34 mm)>双弹性钉(5.01 mm)。

内植物位移分布见图 3,空心钉最大位移位于螺纹尖,弹性钉位于钉顶部,内植物最大位移:单弹性钉(1.13 mm)>双弹性钉(1.00 mm)>空心钉(0.31 mm)。

2.2 骨盆整体应力

不同固定方式的骨盆应力分布大致相同(图 4),最大应力位于坐骨外侧缘,值得注意的是,空心钉模型骨折端几乎无应力分布,而弹性钉模型骨折端附近一定范围较小的应力分布,且双弹性钉模型的应力分布面积小于单弹性钉模型。其中最大应力:单弹性钉(105.6 MPa)>空心钉(99.4 MPa)>双弹性钉(89.9 MPa)。

2.3 内植物的应力分布

根据应力云图(见图 5)可知,内植物应力峰值:单弹性钉(105.6 MPa)>双弹性钉(66.3 MPa)>空心钉(39.1 MPa),差异具有统计学意义($P<0.05$)。表现为空心钉应力峰值最小,但在耻骨下缘皮质骨内部存

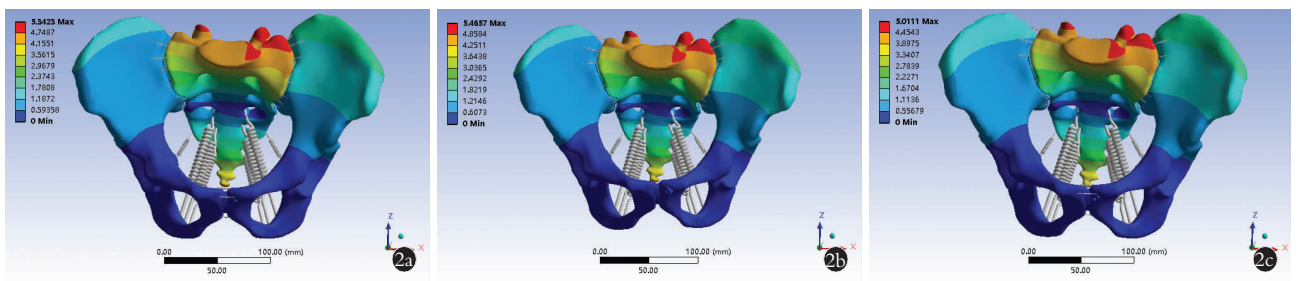


图 2 不同固定方式的骨盆有限元模型的位移分布 2a. 空心钉模型 2b. 单弹性钉模型 2c. 双弹性钉模型

Fig.2 Displacement distribution of finite element models of pelvis with different fixation methods 2a. Cannulated screw nail model 2b. Single elastic nail model 2c. Double elastic nail model

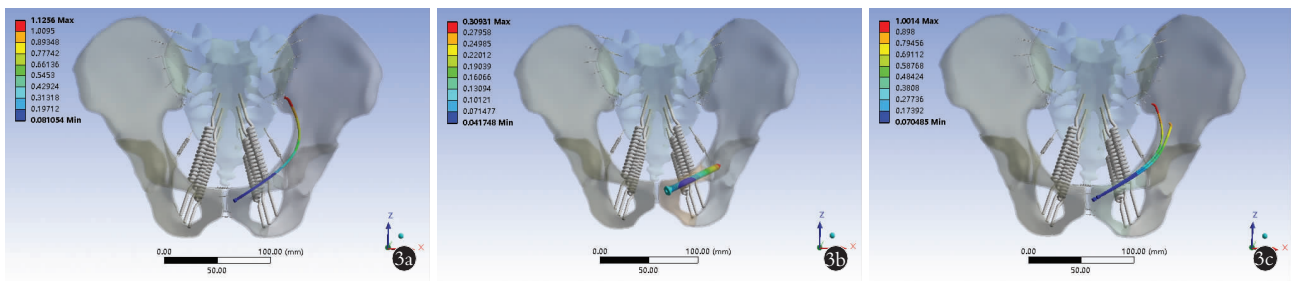


图 3 内植物的位移分布 3a. 空心钉模型 3b. 单弹性钉模型 3c. 双弹性钉模型

Fig.3 Displacement distribution of implants 3a. Cannulated screw nail model 3b. Single elastic nail model 3c. Double elastic nail model

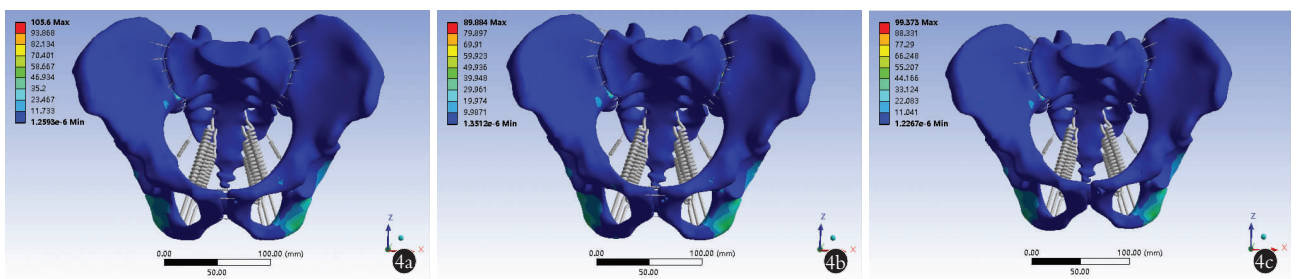


图 4 不同固定方式的骨盆有限元模型的应力分布 4a. 空心钉模型 4b. 单弹性钉模型 4c. 双弹性钉模型

Fig.4 Stress distribution of pelvic finite element model with different fixation methods 4a. Cannulated screw nail model 4b. Single elastic nail model 4c. Double elastic nail model

在一定程度的应力集中。弹性钉相对空心钉承载了更多的应力，尤其双弹性钉应力分布较为均匀且骨盆整体应力最小。

3 讨论

由于人口老龄化及预期寿命增加，骨质疏松骨折发生率逐年上升^[11]，低能量跌倒或撞击，甚至在严重骨质疏松患者中自发发生。在老年脆性骨病患者中，骨盆骨结构的强度低于周围韧带的强度，因关节增生、韧带钙化等原因，相对强大的骶髂背侧韧带、骶结节韧带等保持完好，形成解剖边界，较少出现关节脱位，多为耻骨联合两侧的耻骨支骨折和骶骨翼骨折^[8-9]。无移位或移位较小的 FFP 患者可行保守治疗。然而，在一些患者中，骨损伤的潜伏进展会导致移位、骨不连和持续不稳定的增加。一项病例对照研究中^[12]，单纯耻骨上支骨折患者 1、5、10 年病死率分别为 24.7%、64.4%、93.8%，其中 1/3 死于心血管事件。住院期间因长期卧床并发症发生率为 20.2%，主要为泌尿系感染、坠积性肺炎等。在另一项基于 CT 的研究中，在 245 例 FFP 患者中，超过 80% 的患者合并前、后骨盆环骨折，只有 18% 的患者有单纯的耻骨支骨折^[13]。因此，老年患者低能量创伤所致骨盆环骨折是否诊断和治疗不足仍有待商榷。

耻骨周围解剖结构十分复杂，耻骨上支为不规则、起伏不定、呈曲线状的骨性结构，可为髓内固定

提供骨性管道，耻骨上支骨性固定径路的曲线和倾角在前后平面和冠状面都有很大的变异性^[14]，传统切开复位内固定术创伤大，手术风险高，且易损伤周围神经、血管。随着术中透视技术及微创技术的发展，经皮空心螺钉固定逐渐发展成一种可靠且可重复的方法。与传统切开复位内固定技术相比，经皮空心螺钉固定具有创伤小、手术时间短、并发症少等特点，除了快速缓解疼痛外，使用髓内螺钉固定已被证明比非手术治疗更能改善生物力学性能，与经皮钢板螺钉内固定相当，甚至可能更稳定^[15]。但其仍存在一定的局限性：(1)肥胖患者进钉困难。(2)粉碎骨折无法固定。(3)骨质疏松患者退钉风险增大。(4)耻骨上支狭窄者无法容纳螺钉等^[16]。

骨科手术微创理念不断发展，为探索更加简便有效的治疗方法，团队完成了 2 例耻骨上支骨折闭合复位经皮弹性钉内固定术^[6]，并取得了较好的临床效果。弹性髓内钉同空心螺钉一样具有创伤小、手术时间短、手术费用低等特点。此外，弹性钉直径小，对于耻骨支髓腔过小无法置入空心螺钉的患者，弹性钉能很好地穿行于髓腔内，通过弹性支撑与髓腔内部相接触，将力传递到骨内壁上，从而制约骨折端的移动。弹性钉固定力线位于骨干受力的中轴线上，“三点支撑”原理可防止骨折端的短缩、旋转移位。骨盆前环周围结构复杂，耻骨支解剖变异性大，弹性钉

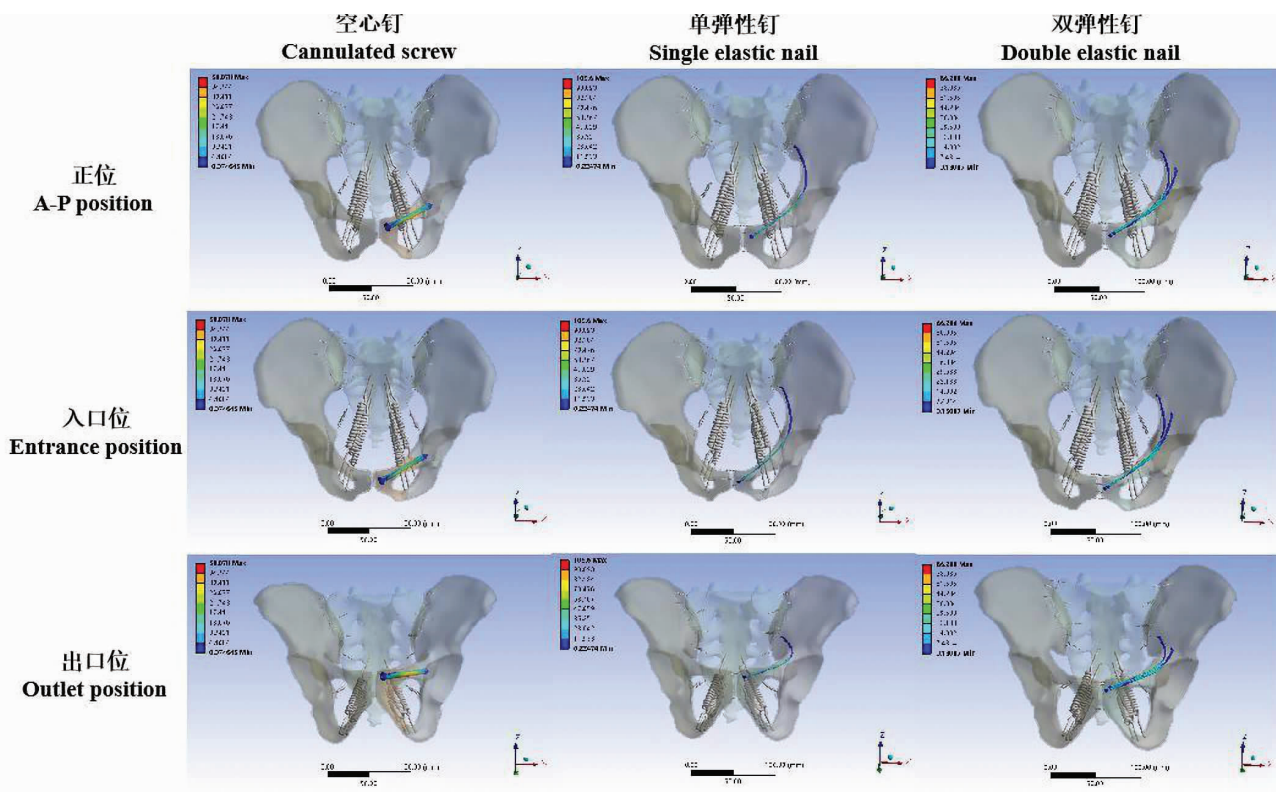


图 5 不同骨盆体位下内植物的应力分布
Fig.5 Stress distribution of plants in different pelvic positions

可塑性强,能够缓慢通过不规则的耻骨髓腔,弹性钉头部的钩状设计可钩住髂前下棘水平以上髂骨内侧面皮质,增强把持力,有效抵抗骨折端的旋转移位。

本研究通过有限元方法验证弹性髓内钉固定耻骨上支骨折的生物力学稳定性,对比其与经皮空心螺钉固定的生物力学性能差异。研究结果显示,在维持骨盆稳定性方面,双弹性钉固定与空心钉固定无明显差距,单弹性钉模型最差。在应力分布上,单弹性钉固定骨盆应力峰值大于空心钉和双弹性钉模型,这主要由于单弹性钉固定的稳定性弱,而空心钉与双弹性钉固定较为牢靠。在垂直载荷下,空心钉存在应力集中,但应力远小于材料的屈服强度,无需担心内固定断裂。弹性钉模型应力分布较为均匀,单弹性钉应力峰值最大,双弹性钉模型次之。3种固定方式均能有效改善骨盆前环稳定性,空心钉固定、双弹性钉固定的总体生物力学性能无明显差距,优于单弹性钉固定。弹性钉固定同时具有微创手术的优势及良好的生物力学稳定性,可作为治疗耻骨上支骨折较好的手术方法。

当前有限元模型存在的不足:(1)本研究中使用了简化的有限元骨盆模型,用弹簧单元替代韧带组织,并将骨组织设置为各向同性的线弹性材料。然而,骨组织本质上是非线性、各向异性、粘弹性且非均质的。有研究表明,在弹性变形阶段,骨组织的行为几乎是线性的。而材料的黏弹性特性,比如蠕变、速率相关和松弛,主要描述材料的长期效果行为^[17],而在本研究中仅进行静力学分析。考虑到这些因素,采用各向同性线弹性模型来描述骨组织的力学行为在本研究中是合适和有效的。(2)临床实践中,预弯置入的弹性髓内钉本身存在着弹性回弹的残余应力,本研究直接构建弯曲后的弹性钉模型进行装配,与临床实际存在一定的差距。(3)本研究只进行了静态有限元分析,没有考虑到内固定松动及破坏行为等动力学方面的分析。(4)站立是日常活动中最常见的姿势,站立位骨骼及内固定的应力分布对外科医生有一定的价值,本研究中只模拟了一种加载场景。今后可进一步研究模拟其他加载情况,以提供不同内固定方法性能的综合分析。

参考文献

- [1] 刘敏,周晓赛,王俊诚,等.不同方法治疗不稳定骨盆骨折中前环损伤的有限元分析[J].中国骨伤,2019,32(2):156-160.
LIU M, ZHOU XS, WANG JC, et al. Finite element analysis of anterior ring injury in unstable pelvic fractures treated by different methods[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2019, 32(2):156-160. Chinese with abstract in English.
- [2] Lim EJ, Kim JJ, Kim JW, et al. What characteristics indicate con-

comitant posterior pelvic injury in pubic ramus fractures in the elderly[J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2020, 106(5):849-853.

- [3] Lau TW, Leung F. Occult posterior pelvic ring fractures in elderly patients with osteoporotic pubic rami fractures[J]. J Orthop Surg (Hong Kong), 2010, 18(2):153-157.
- [4] Courtney PM, Taylor R, Scolaro J, et al. Displaced inferior ramus fractures as a marker of posterior pelvic injury[J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2014, 134(7):935-939.
- [5] 王伟斌,袁欣华,郑轶,等.经皮桥接钢板与逆行耻骨上支髓内螺钉固定骨盆前环骨折的疗效比较[J].中国骨伤,2020,33(1):47-52.
WANG WB, YUAN XH, ZHENG Y, et al. Comparison of percutaneous bridging plate and retrograde superior pubic branch intramedullary screw in the fixation of pelvic anterior ring fracture[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma, 2020, 33(1):47-52. Chinese with abstract in English.
- [6] 陈心敏,林梓凌,李鹏飞,等.弹性髓内钉微创治疗骨盆前环损伤2例报道[J].重庆医学,2019,48(4):713-716.
CHEN XM, LIN ZL, LI PF, et al. Minimally invasive treatment of anterior pelvic ring injury with elastic intramedullary nail: a report of 2 cases[J]. Chong Qing Yi Xue, 2019, 48(4):713-716. Chinese.
- [7] Kannus P, Parkkari J, Niemi S, et al. Low-trauma pelvic fractures in elderly finns in 1970-2013[J]. Calcif Tissue Int, 2015, 97(6):577-580.
- [8] Cabarrus MC, Ambekar A, Lu Y, et al. MRI and CT of insufficiency fractures of the pelvis and the proximal femur[J]. AJR Am J Roentgenol, 2008, 191(4):995-1001.
- [9] Campbell SE, Fajardo RS. Imaging of stress injuries of the pelvis[J]. Semin Musculoskelet Radiol, 2008, 12(1):62-71.
- [10] Hu P, Wu T, Wang H, et al. Influence of different boundary conditions in finite element analysis on pelvic biomechanical load transmission[J]. Orthop Surg, 2017, 9(1):115-122.
- [11] Andrich S, Haastert B, Neuhase E, et al. Epidemiology of pelvic fractures in Germany: Considerably high incidence rates among older people[J]. PLoS One, 2015, 10(9):0013907.
- [12] van Dijk WA, Poeze M, van Helden SH, et al. Ten-year mortality among hospitalised patients with fractures of the pubic rami[J]. Injury, 2010, 41(4):411-414.
- [13] Rommens PM, Hofmann A. Comprehensive classification of fragility fractures of the pelvic ring: Recommendations for surgical treatment[J]. Injury, 2013, 44(12):1733-1744.
- [14] Eastman JG, Chip Routh Milton L. Intramedullary fixation techniques for the anterior pelvic ring[J]. J Orthop Trauma, 2018, 32(Suppl 6):S4-S13.
- [15] Acklin YP, Zderic I, Buschbaum J, et al. Biomechanical comparison of plate and screw fixation in anterior pelvic ring fractures with low bone mineral density[J]. Injury, 2016, 47(7):1456-1460.
- [16] Wojahn RD, Gardner MJ. Fixation of anterior pelvic ring injuries[J]. J Am Acad Orthop Surg, 2019, 27(18):667-676.
- [17] Fan Z, Rho JY. Effects of viscoelasticity and time-dependent plasticity on nanoindentation measurements of human cortical bone[J]. J Biomed Mater Res A, 2003, 67(1):208-214.

(收稿日期:2020-12-20 本文编辑:王玉蔓)