

文章编号:1004-7220(2018)05-0423-06

不同固定方法治疗 Tile C 型骨盆骨折的生物力学稳定性比较

刘敏¹, 周晓赛², 刘良乐¹, 王俊诚¹, 王伟良¹, 蔡春元¹, 张东升³

(1. 温州医科大学附属第三医院 骨科, 浙江 瑞安 325200; 2. 瑞安市中医院 放射科, 浙江 瑞安 325000;
3. 上海大学 理学院, 力学系, 上海 200444)

摘要:目的 比较不同固定方法治疗不稳定骨盆骨折的生物力学稳定性,为临床治疗提供参考。方法 使用三维有限元方法,建立一侧骶髂关节脱位合并耻骨支骨折的不稳定骨盆骨折模型(Tile C型),前方采用改良 Stoppa 入路(anterior pelvic Stoppa approach, ASA)、前方经皮入路(anterior pelvic approach, APA)、传统的髂腹股沟入路(anterior pelvic ilioinguinal approach, AIA)、外固定架(anterior pelvic external fixation, AEF)4种方法固定,后方采用骶髂螺钉固定(sacroiliac joint screw, SIJS)和经皮重建钢板(posterior tension-band plate, PTP)两种方法固定,并比较分析模拟站立状态时8种不同组合固定方法下骨盆环 Von Mises 应力、应变分布情况。结果 加载竖直方向500 N 载荷后,在前方内固定组中,骨折处的最大应力均被限制在10 MPa 以下。内固定前、后方的最大应力分布 ASA < AIA < AEF < APA;在相同应力下,平均位移为 ASA < AIA < AEF < APA。而在后方固定组中 PTP 组在骶髂关节处及内固定后方的最大应力明显小于 SIJS 组,且在骶髂关节和骨折处的最大总位移和垂直位移也比 SIJS 组要小。结论 不稳定性骨盆骨折在8种组合方法植入物的固定后均能得到明显改善,但采用 ASA、AIA 治疗前环损伤的生物力学总体性能要优于 APA 和 AIA 治疗的方法,PTP 治疗后方损伤稳定性要优于 SIJS 固定。

关键词:骨盆;骨折;生物力学;有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.05.007

Comparison of Biomechanical Stability for Tile Type C Unstable Pelvic Fractures Fixed by Different Approaches

LIU Min¹, ZHOU Xiaosai¹, LIU Liangle¹, WANG Juncheng¹, WANG Weiliang¹,
CAI Chunyuan¹, ZHANG Dongsheng³

(1. Department of Orthopedics, the Third Affiliated Hospital of Wenzhou Medical University, Ruian 325200, Zhejiang, China; 2. Radiology Department, Ruian Hospital of Traditional Chinese Medicine, Ruian 325000, Zhejiang, China; 3. Department of Mechanics, College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Objective To compare the biomechanical stability of different fixation methods for unstable pelvic fractures, so as to provide references for clinical treatment. **Methods** An unstable pelvic fracture model (Tile C) with the sacroiliac joint dislocation at one side and the pubic rami fracture was constructed via three-dimensional finite element method. In the front of the pelvis, the fracture models were fixed with anterior pelvic Stoppa

收稿日期:2017-10-01; 修回日期:2018-02-04

基金项目:浙江省医药卫生一般研究计划(2014KYB262),温州市科学技术局项目(Y20130330)

通信作者:王俊诚, E-mail:153043716@qq.com

approach (ASA), subcutaneous anterior pelvic approach (APA), anterior pelvic ilioinguinal approach (AIA) and anterior pelvic external fixation (AEF), and the rear was fixed with sacroiliac joint screw (SIJS) and posterior tension-band plate (PTP). The Von Mises stress and strain distributions of fracture models fixed by different combinations of fixation approaches were analyzed under simulated standing conditions. **Results** After the models were applied with 500 N vertical load, the maximum stresses at the fracture sites were all reduced, which were smaller than 10 MPa in the front of the pelvis. The maximum stress at the anterior and posterior part of implants in sequence was ASA < AIA < AEF < APA, and the average displacement under the same stress in sequence was ASA < AIA < AEF < APA. Meanwhile, the maximum stresses at the sacroiliac joint and the posterior part of implants in PTP group were significant smaller than those in SIJS group, and the maximum total displacement and vertical displacement in PTP group were also smaller than those in SIJS group. **Conclusions** Unstable pelvic fractures could be significantly improved when the fracture was fixed by implants in eight combined methods. However, the overall biomechanical properties of the AIA groups were superior to those of the AEF groups and the APA groups. The stability of PTP groups in the treatment of posterior injury was better than that of SIJS groups.

Key words: pelvis; fractures; biomechanics; finite element analysis

不稳定骨盆骨折是指 Tile B、C 型的严重骨盆骨折,往往合并有休克或伴脏器损伤。据统计,高能量损伤致不稳定骨盆骨折的发生率占骨盆骨折的 17%~30%^[1]。这种特殊类型骨盆骨折的治疗一直是创伤骨科领域的热点和难点。由于不稳定骨盆骨折的前、后环结构均遭到破坏,故单独固定前环或后环很难获得稳定的固定。近年来,随着手术经验的积累、器械的发展以及微创技术的要求,各种微创治疗骨盆骨折的方法开始出现,例如:骨盆前侧皮下内固定架 (anterior pelvic subcutaneous internal fixator, APIF)^[2-3]、改良的 Stoppa 切口^[4]以及闭合空心螺钉。虽然这些方法获得了比较满意的临床疗效,但有关其治疗骨盆骨折的生物力学稳定性,尤其是何种方法治疗不稳定骨盆骨折的效果更佳,目前鲜有文献报道。本文应用三维有限元分析方法,对临床目前常用的几种前方固定治疗不稳定骨盆骨折的生物力学稳定性进行比较,为临床实践提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究资料

选取 1 名 32 岁健康男性,进行 X 线、B 超等检查排除骨盆发育异常、损伤、肿瘤等,对骨盆行 CT 扫描(飞利浦 Brilliance 64 排 CT,层厚 0.6 mm),获得 DICOM 格式的数据。

1.2 研究方法

模拟一侧骶髂关节脱位合并耻骨支骨折(Tile

C1 型),建立不稳定骨盆骨折模型,针对该骨折模型前方采用 4 种不同的固定方法,后方均采用骶髂螺钉 (sacroiliac joint screw, SIJS) 或经皮重建钢板 (posterior tension-band plate, PTP) 进行固定。比较不同固定方法组合治疗后骨盆环的稳定性。

1.2.1 三维有限元模型建立 将 DICOM 数据导入 Simpleware 6.0 的 ScanIP 模块建立髌骨和骶骨的 3D 网状表面结构。然后将新的三角形网状结构模型输入 Geomagic Studio 11.0,导出带有 G1 光滑拼接的 NURBS 曲面的骨盆实体模型。然后通过 HyperMesh 10.0 将实体模型分割成平均长度为 0.8 mm 的四面体结构,同时进行网格收敛性分析。皮质骨部分厚度为 1 mm,包绕松质骨,所有单位均由 4 节点线形四面体结构组成。松质骨、皮质骨的弹性模量分别为 129 MPa 和 17 GPa,泊松比分别为 0.2、0.3。骶髂关节、髌臼及耻骨间盘的软骨设置为 3D 实体单位。软骨接触面定义为摩擦系数 0~0.48 的可移动接触面。各种韧带组织定义为两节点不可压缩棒状单位,根据 Dorland 医学词典,解剖模拟韧带连接点位置。去除一侧的骶髂韧带结构,模拟后方骶髂关节脱位,另将同侧耻骨上支模拟为骨折,从而生成不稳定骨盆骨折的三维有限元模型(见图 1)。韧带的材料性质及各种材料的参数参照文献[5]中报道的数据。

1.2.2 手术固定模型模拟 分别采用 AO 公司空心钉(直径为 6.5 mm)、重建钢板及螺钉(3.5 mm)对前后环进行固定。后方采用 SIJS 和 PTP 两种固



图1 不稳定骨盆骨折有限元模型

Fig.1 Model of unstable pelvic fracture

定方式,前方采用4种方法进行固定,分别为:改良Stoppa入路(anterior pelvic Stoppa approach, ASA)、前方经皮入路(subcutaneous anterior pelvic approach, APA)、传统髂腹股沟入路(anterior pelvic ilioinguinal approach, AIA)、外固定架(anterior pelvic external fixation, AEF)。根据上述8种模拟固定方式,将所建有限元模型分组如下:①后方经皮重建钢板+前方Stoppa入路(PTP+ASA组),②后方经皮重建钢板+前方经皮入路(PTP+APA组),③后方经皮重建钢板+前方腹股沟入路(PTP+AIA组),

④后方经皮重建钢板+前方外固定(PTP+AEF组);⑤后方骶髂螺钉+前方Stoppa入路(SIJS+ASA组),⑥后方骶髂螺钉+前方经皮入路(SIJS+APA组),⑦后方骶髂螺钉+前方腹股沟入路(SIJS+AIA组),⑧后方骶髂螺钉+前方外固定(SIJS+AEF组)

1.2.3 有限元模型约束与加载 将髌骨和骶骨与骶髌关节之间的接触关系设置为绑定约束。空心钉与骨、螺钉与骨的接触关系均为绑定约束。钢板与骨、螺钉头与钢板的接触关系均为滑动摩擦。在两个髌臼施加Z轴方向的平动约束模拟股骨对上身的支撑作用。在骶骨上表面施加垂直向下载荷500 N模拟上半身的重力,模拟站立状态下受力情况。最后将模型导入ABAQUS 6.10软件进行有限元分析评估,分析比较不同内固定组合方式下在骶髌关节处、骨折和内固定处 Von Mises 应力及应变分布情况。

2 结果

2.1 整体应力分析

在骶骨上表面施加垂直向下载荷500 N模拟上半身的重力后,8种内固定骨盆模型的整体应力分布如图2所示。

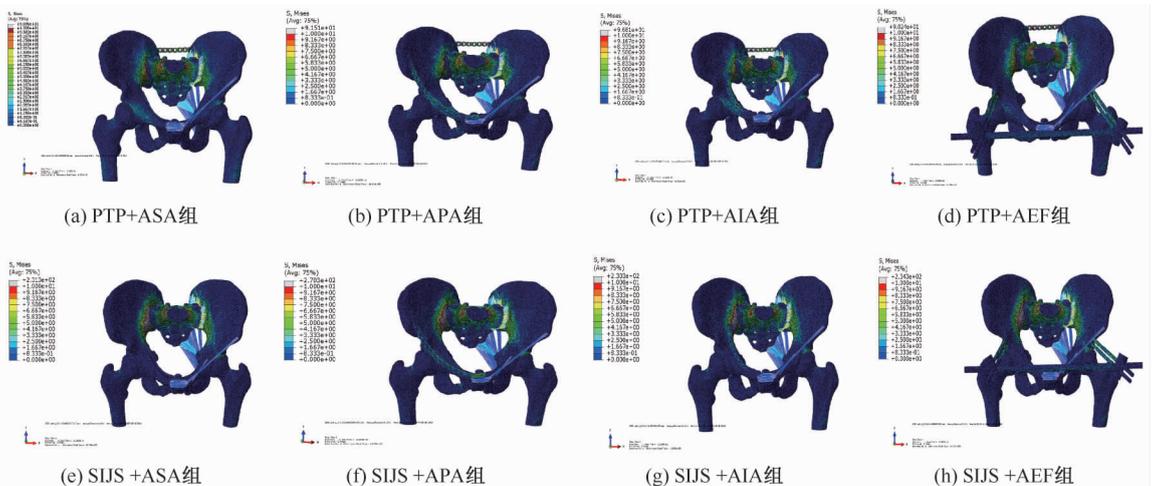


图2 不同骨盆模型应力分布

Fig.2 Stress distributions on different pelvic models (a) PTP + ASA group, (b) PTP + APA group, (c) PTP + AIA group, (d) PTP + AEF group, (e) SIJS + ASA group, (f) SIJS + APA group, (g) SIJS + AIA group, (h) SIJS + AEF group

8种骨盆模型术后在骶髌关节处、骨折处、内固定前方、内固定后方的最大 Von Mises 应力结果如

图3所示。后方固定时,PTP组在骶髌关节处及内固定后方的最大应力明显小于SIJS组,说明PTP固

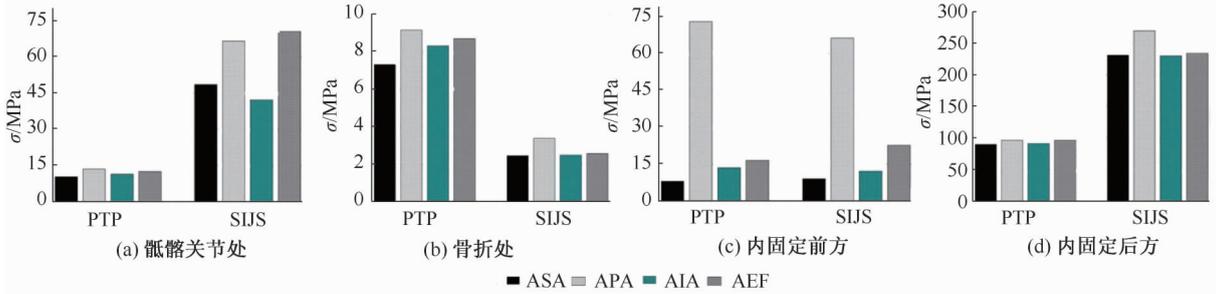


图3 不同骨盆模型术后不同部位应力比较

Fig.3 Comparison of Von Mises stresses on the postoperative pelvic models at different locations (a) At the dislocated joint, (b) At the fracture sites, (c) At the anterior plates, (d) At the posterior plates

定时应力分布更均匀,减少了局部的应力集中。而SIJS组在前方骨折处的应力要比PTP组所受的最大应力小得多,推测原因是PTP组仅提供间接复位,桥接固定,而SIJS组提供的是后方的直接复位,复位更加彻底牢靠,从而为前方的稳定性提供帮助。

前方的ASA、AIA、AEF和APA这4组在前方骨折处的最大应力均被限制在10 MPa以下。其中,APA组的最大应力要高于其他3组,特别是在内固定前方。内固定前方和后方的最大应力分布从小到大依次为ASA < AIA < AEF < APA。因此,在骨盆后方得到良好的复位固定后,常见的4种前方固定方法都行之有效,对骨折处的应力起到很好的“屏蔽”作用。

2.2 位移分析

在骶骨上表面施加垂直向下载荷500 N模拟上半身的重力后,骶髂关节和骨折处的总位移和Y轴上垂直位移如图4所示。后方固定中,PTP组在骶髂关节和骨折处的最大总位移和垂直位移均比SIJS组要小。前方固定中,ASA组和AIA组的位移要小于其他2组,在相同应力下,平均位移从小到大依次为ASA < AIA < AEF < APA。

由位移结果可知:①对于Tile C不稳定骨盆骨折,后方采用PTP的微创治疗方式在恢复骨盆“即刻”稳定性方面可能比SIJS更优;②在前方复位固定方面,骨盆稳定性在前方的ASA、AIA、AEF和APA这4种方法植入物的内固定后均能得到明显改善。Stoppa入路和经典的髂腹股沟入路组的效果要好于外固定和前方经皮入路组固定。

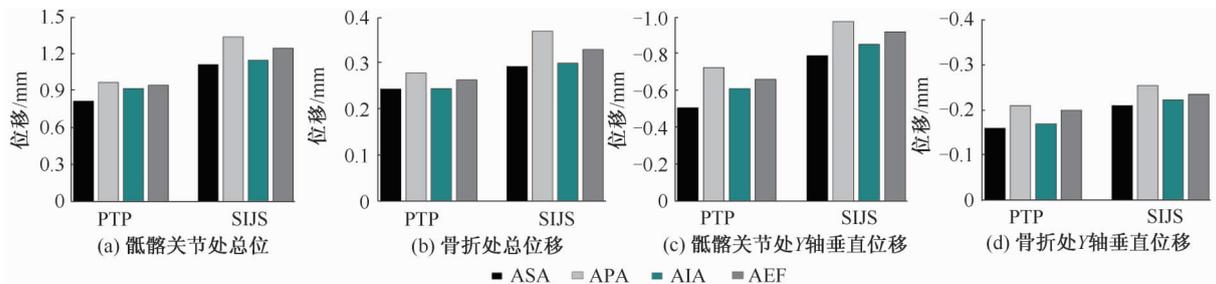


图4 不同骨盆模型术后不同部位的位移比较

Fig.4 Displacement comparison of the postoperative pelvic models at different locations (a) Total displacement at the dislocated joint, (b) Total displacement at the fracture sites, (c) Y axis displacement at the dislocated joint, (d) Y axis displacement at the fracture sites

3 讨论

3.1 骨盆前后环损伤修复的重要性

高能损伤导致的不稳定骨盆骨折治疗一直

是创伤骨科领域的热点和难点。骨盆前后结构对维持骨盆稳定具有重要的作用。Newhouse等^[6]认为,前后环对骨盆稳定性的价值是4:6。Simonianm等^[7]及Ward等^[8]也分别从生物力学和临床角度肯

定上述观点。由此可见,对于不稳定骨盆骨折,骨盆前后环的修复对恢复其稳定至关重要。目前主流的观点认为,在 Tile C 型骨盆骨折损伤中,为了患者的早期活动及防止术后发生再移位,任何类型的前后环损伤均应予以固定^[1,9]。

临床工作中,往往将治疗重点放在骨盆后方稳定性的恢复上,而忽视了对骨盆前环结构损伤的修复。如果骨盆前环损伤没有得到很好的修复,可引起慢性、复发性疼痛,有较高的病死病残率以及生活质量的下降。Hill 等^[10]研究表明,尽管耻骨支骨折伤后 1 年的死亡率低于髌部骨折,但两种损伤的 5 年死亡率近似;较差的预后可能与被迫延长的制动和持续的疼痛有关,而且这种不理想的情况常常发生在存在后环损伤而未被及时发现的患者。也有研究表明,耻骨支骨折的患者较同年龄段对照人群的生存率明显下降;另外,其所消耗的医疗资源也大大增加^[11]。

3.2 不同方法治疗骨盆损伤的生物力学特点

骨盆环损伤的复位治疗从过去的外固定支架和切开复位钢板螺钉固定,到现在的经皮空心螺钉及经皮钢板螺钉固定,至今缺乏统一的标准。前方外固定架固定是一种简单、安全、微创、有效的固定技术,曾一度被认为是急诊处理严重骨盆骨折最为恰当的措施^[12]。但生物力学研究表明,对于垂直不稳定型骨盆骨折,外固定支架的固定强度仅为正常骨盆结构的 5% ~ 10%^[13]。传统的髂腹股沟入路被最早用于治疗骨盆骨折,但通过该切口需要暴露神经血管窗,一旦操作不慎后果严重;近年来,有学者通过改良的 Stoppa 切口来替代传统入路也获得了良好的疗效^[8]。但上述两种方法都通过切开暴露骨折端,损伤较大。随着术中透视系统的发展和微创技术的改进,骨盆骨折的微创手术逐渐开始流行,包括闭合空心螺钉和骨盆前侧皮下内固定架等。大量的解剖和临床研究均证实了微创治疗方法的安全性和有效性,但微创复位固定骨折的生物力学稳定性尚不明确。李斯铭等^[14]通过有限元方法分析骨盆在双腿、单腿站立位以及坐位下的位移和应力,对钉棒系统、钢板固定 Tile B2 型骨盆骨折有限元模型进行生物力学测试,比较不同内固定方式下的骨盆力学特点,但没有对更加严重的 Tile C 型骨折进行相关研究。回顾文献发现,虽然有不同

学者通过骨盆标本的力学模拟实验对各种骨盆前环治疗方法进行力学性能的比较,但由于受标本来源、个体差异等诸多因素的限制,其结论可靠性受到质疑^[15]。为了克服传统方法的不足,本文通过有限元方法建立不稳定骨盆骨折模型,分析比较不同方法治疗骨盆骨折的稳定性。虽然本研究将皮质骨部分厚度设定为 1 mm,同时将髌骨和骶骨与骶髌关节之间的接触关系设置为绑定约束,考虑到骨盆特殊结构,可能带来一定的误差,但由于实验中将不同内固定组合作为处理因素,在同一个骨盆模型中进行力学分析,所有这样的误差是可以接受的。

3.3 骨盆有限元分析法的特点

传统实验力学检测骨盆标本的力学测试方法虽然可以清晰了解机体结构的位移及损伤情况,但无法检测骨盆表面及骨盆内部的应力分布情况,而且检查结果容易受标本来源、个体差异、测试人员操作水平等诸多因素的影响^[15]。随着计算机技术及相关软件的发展以及赋值方式的改进,有限元分析软件在过去的 20 年中得到了迅速发展,从简单理想模型的二维分析发展为真实模型的三维分析,三维有限元的精度得到更大的提高。有限元法是一种用于求解工程问题中边界值问题近似解的计算方法,广泛应用于骨科中的生物力学分析中^[16]。Phillips 等^[17]建立了包含肌肉和韧带的正常骨盆的三维模型,并对髋关节静力载荷作用后的力学分布及载荷影响进行分析;结果表明,加载肌肉及韧带后的骨盆三维有限元模型应力分布更加逼真,与骨盆标本膜片法进行的生物力学分析结果基本接近。因此,本文基于正常骨盆 CT 图像重建骨盆三维有限元模型,同时构建不稳定骨盆骨折的三维有限元模型,具备很高的几何仿真度及较高的力学仿真度,为今后利用骨盆三维有限元骨折模型进行其他生物力学实验提供了基础和经验。

本文有限元仿真结果表明,目前临床常用的 8 种骨盆组合方法均能较好恢复骨盆环的稳定性,但对于 Tile C 不稳定骨盆骨折,后方采用 PTP 的微创治疗方式在恢复骨盆稳定性方面可能比 SIJS 组更优。而对于前方复位固定方面,APA、ASA、AIA 和 AEF 组均能得到明显的改善骨盆稳定性。而其中 ASA 组和 AIA 组的效果要好于 APA 和 AEF 组固定。

参考文献:

- [1] KABAK S, HALICI M, TUNCEL M, *et al.* Functional outcome of open reduction and internal fixation for completely unstable pelvic ring fractures (type C): A report of 40 cases [J]. *J Orthop Trauma*, 2003, 17 (8): 555-562.
- [2] COLE PA, GAUGER EM, ANAVIAN J, *et al.* Anterior pelvic external fixator versus subcutaneous internal fixator in the treatment of anterior ring pelvic fractures [J]. *J Orthop Trauma*, 2012, 26(5) : 269-277.
- [3] MOAZZAM C, HEDDINGS AA, MOODIE P, *et al.* Anterior pelvic subcutaneous internal fixator application: An anatomic study [J]. *J Orthop Trauma*, 2012, 26 (5): 263-268.
- [4] BASTIAN JD, SAVIC M, CULLMANN JL. *et al.* Surgical exposures and options for instrumentation in acetabular fracture fixation: Pararectus approach versus the modified Stoppa [J]. *Injury*, 2016, 47(3) : 695-701.
- [5] 陈红卫, 吴立军, 王继松, 等. 第二代数字化人体骶骨纵形骨折微创内固定的有限元分析 [J]. *医用生物力学*, 2011, 26 (6): 494-501.
- CHEN HW, WU LJ, WANG JS, *et al.* Finite element analysis on internal fixation biomechanics for vertical sacrum fractures in the second generation of Chinese digitized human [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(6) : 494-501.
- [6] NEWHOUSE KE, EL-KHOURY GY, BUCKWALTER JA. Occult sacral fractures in osteopenic patients [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1992, 74(10) : 1472-1477.
- [7] SIMONIAN PT, ROUTH ML, HARRINGTON RM, *et al.* Internal fixation of the unstable anterior pelvic ring: A biomechanical comparison of standard plating techniques and the retrograde medullary superior pubic ramus screw [J]. *J Orthop Trauma*, 1994, 8(6) : 476-482.
- [8] WARD EF, TOMASIN J, VANDER GRIEND RA. Open reduction and internal fixation of vertical shear pelvic fractures [J]. *J Trauma*, 1987, 27(3) : 291-295.
- [9] 曹奇勇, 吴新宝, 蒋协远, 等. Stoppa 入路在骨盆髋臼骨折中的初步应用 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2009, 11 (6): 504-508.
- [10] HILL RMF, ROBINSON C M, KEATING JF. Fractures of the pubic rami: Epidemiology and five-year survival [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2001, 83(8) : 1141-1144.
- [11] DIJK WA, POEZE M, HELDEN SH, *et al.* Ten-year mortality among hospitalised patients with fractures of the pubic rami [J]. *Injury*, 2010, 41(4) : 411-422.
- [12] TILE M. Acute pelvic fractures: I. Causation and classification [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 1996, 4 (3): 143-151.
- [13] WARD EF, TOMASIN J, VANDER RAG. Open reduction and internal fixation of vertical shear pelvic fractures [J]. *J Trauma*, 1987, 27(3) : 291-295.
- [14] 李斯铭, 王冬梅, 曲爱丽, 等. 钉棒内固定 Tile B2 型骨盆骨折的生物力学效果 [J]. *医用生物力学*, 2016, 31 (3): 240-246.
- LI SM, WANG DM, QU AL, *et al.* Biomechanics effect of screw-rod internal fixation for Tile B2 pelvic fractures [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(3) : 240-246.
- [15] GARCIA JM, DOBLARE M, SERA B, *et al.* Three dimensional finite element analyses of several internal and external pelvis fixations [J]. *J Biomech Eng*, 2000, 122 (5): 516-522.
- [16] 王娟, 乌日开西·艾依提, 赵梦雅, 等. 基于有限元法的骨组织工程支架结构力学性能优化分析 [J]. *医用生物力学*, 2015, 30(3) : 249-255.
- WANG J, AIYIT W, ZHAO MY, *et al.* Optimization analysis on mechanical properties of scaffolds for bone tissue engineering based on finite element method [J]. *J Med Biomech*, 2015, 30(3) : 249-255.
- [17] PHILLIPS AT, PANKAJ P, HOWIE CR. *et al.* Finite element modelling of the pelvis: Inclusion of muscular and ligamentous boundary conditions [J]. *Med Eng Phys*, 2007, 29(7) : 739-741.