

# 髌臼横断骨折双柱内固定的生物力学分析\*\*

吴淑琴

## Biomechanical analysis of double-column internal fixation on acetabular transverse fracture

Wu Shu-qin

### Abstract

**BACKGROUND:** The key of pelvic and acetabular fracture treatment is accurate fracture reduction and stable internal fixation.

**OBJECTIVE:** To analyze the biomechanical characteristics of three kinds of double-column internal fixation operation for acetabular transverse fracture in order to find the most stable method.

**METHODS:** Anisotropic pelvic fracture model was established, and based on the maximum displacement, the maximum equivalent stress and other comprehensive evaluation indexes, the biomechanics of double-column screw, anterior-column screw and posterior-column plate, double-column plate on the standing position were analyzed.

**RESULTS AND CONCLUSION:** Finite element analysis showed that the maximum displacement of double-column screw was 1.827 mm, maximum equivalent stress was 26.589 MPa; the maximum displacement of screw and posterior-column plate was 2.080 mm, maximum equivalent stress was 106.04 MPa; the maximum displacement of double-column plate was 2.987 mm, maximum equivalent stress was 200.37 MPa. The most stable method is double-column screw and the last one is double-column plate.

Wu SQ. Biomechanical analysis of double-column internal fixation on acetabular transverse fracture. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2012;16(22): 4067-4070. [http://www.crter.cn http://en.zglckf.com]

### 摘要

**背景:** 骨盆髌臼骨折治疗的关键是精确的骨折复位和稳定的内固定。

**目的:** 分析比较3种髌臼横断骨折双柱内固定手术的生物力学特性, 找到固定效果最好的双柱内固定手术方法。

**方法:** 建立各向异性的髌臼横断骨折模型, 通过对最大位移、最大等效应力等评价指标的有限元综合分析, 比较分析双柱螺钉、前柱螺钉后柱钢板、双柱钢板等3种双柱内固定方法在站立位置的生物力学性能差异。

**结果与结论:** 有限元分析双柱螺钉固定最大位移 1.827 mm, 最大等效应力 26.589 MPa; 前柱螺钉后柱钢板固定最大位移 2.080 mm, 最大等效应力 106.04 MPa; 双柱钢板固定最大位移 2.987 mm, 最大等效应力 200.37 MPa。3种双柱内固定方法稳定性最好的是双柱螺钉固定, 最后是双柱钢板固定。

**关键词:** 髌臼; 横断骨折; 内固定; 有限元建模; 生物力学  
doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2012.22.018

吴淑琴. 髌臼横断骨折双柱内固定的生物力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(22):4067-4070.  
[http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

School of Mechanical Engineering & Automatization, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi Province, China

Wu Shu-qin★, Master, Associate professor, School of Mechanical Engineering & Automatization, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi Province, China  
wushuqin@nuc.edu.cn

Supported by: the National Natural Science Foundation of China, No.30870603\*

Received: 2012-01-15  
Accepted: 2012-02-13

中北大学机械工程与自动化学院, 山西省太原市 030051

吴淑琴★, 女, 1972年生, 山西省太原市, 汉族, 1996年中北大学毕业, 硕士, 副教授, 主要从事生物力学研究。  
wushuqin@nuc.edu.cn

中图分类号: R318  
文献标识码: B  
文章编号: 1673-8225 (2012)22-04067-04

收稿日期: 2012-01-15  
修回日期: 2012-02-13  
(20120115002/W·C)

## 0 引言

在髌臼骨折的分类中, 横断骨折比较常见, 且诊断最为明确, 手术内固定是主要治疗方法<sup>[1-3]</sup>。横断骨折主要采用的双柱内固定形式有: 双柱螺钉固定、前柱螺钉后柱钢板和双柱钢板固定<sup>[4-6]</sup>, 见图1。

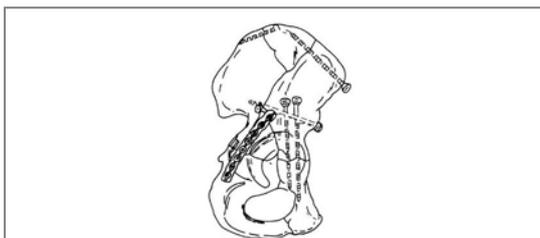


Figure 1 Examples of the internal fixation positions  
图1 内固定物安放示例

目前在骨盆髌臼骨折治疗中存在的主要问

题是: 手术创伤大, 出血多, 操作难度大, 术后并发症较多<sup>[7-9]</sup>。所以骨盆髌臼骨折治疗的关键是精确的骨折复位和稳定的内固定, 亟需研究更微创、更安全、更稳定的手术方法<sup>[10]</sup>。

国内外有一些对髌臼生物力学实验方面的工作<sup>[11-13]</sup>, 王庆贤、张英泽等<sup>[4]</sup>做了比较细致的研究, 应用自制的夹具对半骨盆进行内固定稳定性比较试验, 得出结论双柱内固定稳定性高于单柱内固定<sup>[14]</sup>。吴啸波等<sup>[15]</sup>采用半骨盆标本, 研究髌臼后柱骨折4种方式钢板内固定的稳定性。

采用有限元分析方法辅助骨骼生物力学分析已经被广泛应用<sup>[16-17]</sup>, 准确地模拟了人体骨骼的解剖形态, 反映了骨骼的生物力学特性, 为相关力学提供了可靠的手段和方法, 在骨科的基础和临床研究中正发挥着越来越大的作用。Dalstra等<sup>[18]</sup>提出了骨盆三维有限元的模型, Anderson等<sup>[19]</sup>对骨盆模型进行了多方面的改进与发展, 这些研究成果为作者的建模与分析

工作提供了参考,但是少有对骨盆骨折术后建模与分析的研究,其难度在于既要建立优质的骨盆模型,又要模拟骨折模型并对各种手术方案进行建模。模型的优劣取决于模型与真实骨的结构与材料构成的相似程度。这主要取决于对单元材料属性各向异性的赋值算法的可靠性与分级数。而术后模型的建立则要依赖于骨盆模型数据提取与处理的方式。

本实验首先基于QCT影像数据提出了材料各向异性赋值的原理与算法,对材料进行256级分级<sup>[20-21]</sup>,再依据Wirtz等<sup>[22]</sup>提出的由CT值推导出骨骼表观密度和其相应的弹性模量的公式,得出每个单元轴方向的弹性模量,根据CT值进行单元材料属性的设定,最后进行有限元建模分析。分析结果与生物力学实验结果进行了对比验证。

## 1 材料和方法

**设计:** 单一样本观察。

**时间及地点:** 实验于2011-06/10在北京航空航天大学完成。

**材料:** 骨盆原始数据来自北京积水潭医院放射科,患者为骨盆髌白横断骨折。经患者同意,将其完整的CT扫描数据进行三维重建。

**方法:** 依据大夫的临床经验与患者切开暴露的程度提出3种固定方法,分别为双柱螺钉(SS),双柱钢板(PP),前柱螺钉后柱钢板(SP)。通过最大位移,最大等效应力和骨折线处最大应力3项指标进行分析比较。加载姿态为双足站立位。加载力为650 N,设置髌白骨折线以下部位为固定约束,对内固定器械加预紧力。

**模型各向异性赋值的实现:** CT图像值反映着骨对X射线的吸收程度,其吸收量即为CT值,该值也同时反映了骨密度即骨密度值。获得单元的CT值后,将所有CT值分成256级,求出骨密度值,最后根据骨密度值与弹性模量等材料属性参数间的关系求出每个单元轴方向的弹性模量。

本实验采用东芝Quilion型螺旋CT带5标样体模,其羟磷灰石的密度分别为 $10^3 \text{ g/m}^3$ ,  $5 \times 10^4 \text{ g/m}^3$ ,  $10^5 \text{ g/m}^3$ ,  $1.5 \times 10^5 \text{ g/m}^3$ 和 $2 \times 10^5 \text{ g/m}^3$ 。通过体模数据可以计算出空间任何一点的CT值对应的骨密度值。500为松质骨和皮质骨的界限,小于-800为0级,大于1 450为255级,中间分成254级,将每级的中间CT值提取出来作为该级的特征值。5个体模对应的CT值分别为514 HU, 378 HU, 200 HU, -15 HU, -69 HU。设CT值为x,骨密度值为 $\rho'$ ,两者成线性关系: $\rho'=0.313 2 x+36.85$ 。根据Wirtz DC得到的经验公式,用 $\rho$ 来表示表观密度,则有CT值与骨密度值的转换关系: $\rho=0.001 2 \rho'+0.17$ 。再根据如下弹性模量(E)与表观密度( $\rho$ )的公式:

$$\text{皮质: 轴向: } E=2 065 \rho^{3.09}$$

$$\text{横向: } E=2 314 \rho^{1.57}$$

$$\text{松质: 轴向: } E=1 904 \rho^{1.64}$$

$$\text{横向: } E=1 157 \rho^{1.78}$$

可求得每个单元轴方向的弹性模量。

泊松比与表观密度无关,将皮质骨泊松比设为0.3,松质骨为0.12。

**骨盆模型与术后模型三维重建:** 将QCT扫描后的Dicom图片,共261张,层厚为1 mm,导入到Mimics进行重建处理后,得到骨盆三维模型。在Geomagic中对骨盆复杂的表面轮廓线造型。通过压缩或者拉直轮廓线,平滑轮廓线中比较尖锐的部分,然后修改问题面片并对螺钉和钢板进行装配,完成后将装配好的术后模型导入到ANSYS中进行加载求解。获得髌白横断骨折内固定术后的三维有限元模型。其中,双柱螺钉内固定模型单元数14 007个,节点数27 824个;前柱螺钉后柱钢板内固定模型单元数18 401个,节点数38 468个;双柱钢板内固定模型单元数26 764个,节点数56 828个。

按照站立位姿的载荷施加方式,经过约束设置和加载分析几种内固定方式的应力应变,见图2,获得了最大位移,最大等效应力和骨折线处最大应力等分析指标,见图3~5。

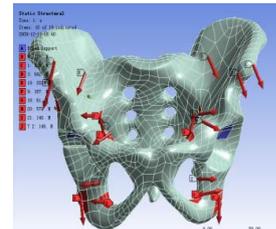


Figure 2 Finite element model of pelvis  
图2 骨盆有限元模型

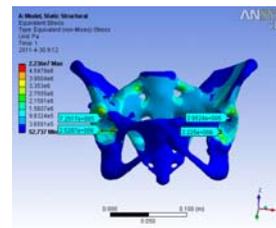


Figure 3 Double-column screw stress analysis  
图3 双柱螺钉应力分析

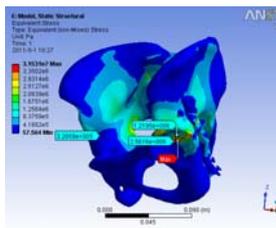


Figure 4 Anterior-column screw and posterior column plate stress analysis  
图4 前柱螺钉后柱钢板应力

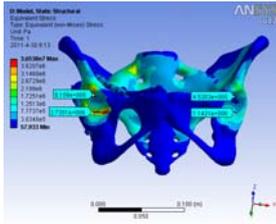


Figure 5 Double-column plate stress analysis  
图5 双柱钢板应力分析

生物力学实验设计: 见图6~9。



Figure 6 Position of the anterior-column screw  
图6 前柱螺钉固定



Figure 7 Position of the posterior-column screw  
图7 后柱螺钉固定



Figure 8 Position of the anterior-column plate  
图8 前柱钢板固定



Figure 9 Position of the posterior-column plate  
图9 后柱钢板固定

本文根据人体站立位生理姿态设计了实验夹具, 该夹具骨盆向前倾斜, 两侧髂前上棘与两耻骨结节位于同一冠状面内, 尾骨尖与耻骨联合上缘位于同一水平面。利用正常尸体骨标本, 模拟制作双柱拉力螺钉、前柱螺钉后柱钢板、双柱钢板3种双柱内固定手术。

利用应变片测量在加载过程中这些承重区域的应变变化。分别在前柱距离骨折线2 cm处下方距离弓状线1 cm处, 距离骨折线2 cm处上方距离髌臼缘3 cm处、后柱距离骨折线2 cm下方距离髌臼缘2 cm处, 白顶负重区上方布片, 测量髌臼周围的应变, 见图10。



Figure 10 Biomechanical experiment  
图10 生物力学实验

## 2 结果和讨论

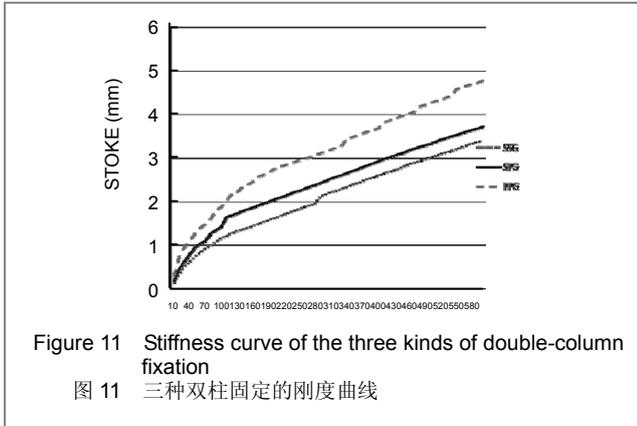
2.1 三种双柱固定方式有限元分析 双柱螺钉、前柱螺钉后柱钢板、双柱钢板等3种双柱内固定方法, 均为临床采用的固定形式。双柱螺钉固定的难度最大, 但其暴露损伤最小, 通过分析总结发现其固定效果最佳, 见表1, 骨承受的应力很小, 说明螺钉固定方式稳定性好。图7~9给出了3种固定方式应力分析图。其直观体现了这3种方式的力学稳定性, 按照分析结果排列顺序为: 双柱螺钉、前柱螺钉后柱钢板、双柱钢板。

表1 三种双柱内固定的生物力学分析结果  
Table 1 Mechanical index values of double-column screw (SS), anterior-column screw and posterior-column plate (SP) and double-column plate (PP)

Internal fixation	Maximum displacement (mm)	Maximum equivalent stress (MPa)	Maximum stress on the fracture line (MPa)
SS	1.827	26.589	3.380
SP	2.080	106.040	5.361
PP	2.987	200.370	6.993

前柱螺钉后柱钢板方式是临床最常采用的固定形式, 分析表明其稳定性介于双螺钉与双钢板之间, 其暴露损伤程度也介于两者之间, 但既要承担打螺钉的风险, 又要在后柱造成大程度的组织剥离与损伤, 实际上没有减轻患者的压力。双柱钢板固定组织损伤程度最严重, 术后医源性病变发生率也最高。但临床上对于骨表面的裂缝依然很依赖于这种钢板固定。

2.2 三种双柱固定方式实验分析比较 从力学试验机测得的压缩实验刚度曲线图, 见图11。可以看出, 3种双柱内固定中双柱螺钉的刚度最好, 将所有3种内固定方法的位移比较发现, 双柱螺钉固定的位移值是最接近完整骨盆的。



### 3 结论

本文对骨盆模型进行了各向异性材料的赋值, 在不失真的情况下对骨盆模型进行了一系列形态学处理, 完成了骨盆和内固定物的重建。模拟髌臼横断骨折模型, 并对该骨折模型进行了3种方式的内固定模拟, 分别进行了有限元模拟与分析, 比较其不同力学特性指标。根据比较结果得出3种方式稳定性差异, 分析结果与生物力学实验结果一致。在未来的研究工作中, 将不断完善该骨盆模型, 增加肌肉与韧带的建模, 并且在更多的髌臼位置下进行分析, 使分析实验条件更接近真实状况。

### 4 参考文献

[1] Pascarella R, Maresca A, Reggiani LM, et al. Intra-articular fragments in acetabular fracture-dislocation. Orthopedics. 2009; 32(6):402-405.  
[2] Boraiah S, Ragsdale M, Achor T, et al. Open reduction internal fixation and primary total hip arthroplasty of selected acetabular fractures. J Orthop Trauma. 2009;23(4):243-248.  
[3] Chuckpaiwong B, Suwanwong P, Harnroongroj T. Roof-arc angle and weight-bearing area of the acetabulum. Injury. 2009;40(10): 1064-1066.  
[4] Wang QX, Zhang YZ, Pan JS, et al. Zhongguo Chuangshang Guke Zazhi. 2005,7(3):64-68.  
王庆贤,张英泽,潘进社,等.髌臼横断骨折不同内固定方法的生物力学研究及临床意义[J].中国创伤骨科杂志, 2005,7(3):64-68.  
[5] Qian JY, Xu ZS, Hu CL. Zhongguo Gu yu Guanjie Sunshang Zazhi. 2011,26(6):518-519.  
钱金用,徐祯书,胡传亮.复杂髌臼骨折的内固定治疗策略[J].中国骨与关节损伤杂志,2011,26(6):518-519.  
[6] Wu XB, Zhang Q, Guo MK, et al. Disan Junyi Daxue Xuebao. 2010;32(7):665-668.  
吴啸波,张奇,郭明珂,等.髌臼后柱骨折不同方式钢板内固定的稳定性研究[J].第三军医大学学报,2010,32(7):665-668.  
[7] Li LB, Shen YX, Zhang P, et al. Gu yu Guanjie Sunshang Zazhi. 2009;24(5):409.  
李柳炳,沈忆新,张鹏,等.髌臼骨折手术疗效与预后影响因素分析[J].中国骨与关节损伤杂志,2009,24(5):409.  
[8] Fang XC, Qiu XJ, Zha XS, et al. Zhonghua Quanke Yixue. 2009; 7(3):262-263.  
方宣城,邱兴建,查兴胜,等.髌臼骨折的内固定治疗[J].中华全科医学, 2009,7(3):262-263.

[9] Wu SQ, Wu XT, Tang HM, et al. Yixue Zongshu. 2009;15(21): 3251-3253.  
吴少泉,吴雪挺,唐华谋,等.髌臼骨折的内固定手术治疗[J].医学综述, 2009,15(21):3251-3253.  
[10] Gu GS, Zhu D, Xu DX. Lingchuang Guke Zazhi. 2009;12(6): 667-670.  
谷贵山,朱东,徐德新.复杂髌臼骨折内固定的生物力学研究[J].临床骨科杂志,2009,12(6):667-670.  
[11] Lu ZY, Liu YC, Wang TS, et al. Zhongguo Shengwu Yixue Gongcheng Xuebao. 1996;15(2):181-185.  
卢志远,刘永灿,王天胜,等.在静力作用下人体两侧股骨与骨盆模型应力分布实验研究[J].中国生物医学工程学报,1996,15(2):181-185.  
[12] Mehin R, Jones B, Zhu Q, et al. A biomechanical study of conventional acetabular internal fracture fixation versus locking plate fixation. Can J Surg.2009;52(3):221-228.  
[13] Bi YM, Wang LB, Mu WD. Zhongguo Gu yu Guanjie Sunshang Zazhi. 2010;25(8):679-681.  
毕玉梅,王鲁博,穆卫东.髌臼横断骨折安全区钢板内固定生物力学研究[J].中国骨与关节损伤杂志,2010,25(8):679-681.  
[14] Wang QX, Zhang YZ, Pan JS, et al. Zhonghua Wuli Yixue yu Kangfu Zazhi.2001;23 (5):279-281.  
王庆贤,张英泽,潘进社,等.髌臼横断骨折不同内固定方式的生物力学研究[J].中华物理医学与康复杂志, 2001, 23 (5):279-281.  
[15] Wu XB, Zhang Q, Guo MK, et al. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Lingchuang Kangfu. 2009,13(52): 10236-10240.  
吴啸波,张奇,郭明珂,等.髌臼后柱骨折不同方式钢板内固定的稳定性研究[J].中国组织工程研究与临床康复,2009,13(52):10236-10240.  
[16] Chen GX, Yang L, Li K, et al. Disan Junyi Daxue Xuebao.2009; 31(12):1193- 1197.  
陈光兴,杨柳,李恺,等.基于中国可视人体数据集构建髌臼应力分析三维有限元模型[J].第三军医大学学报, 2009, 31(12):1193-1197.  
[17] Chegini S, Beck M, Ferguson S J. The effects of impingement and dysplasia on stress distributions in the hip joint during sitting and walking: a finite element analysis. J Orthop Res.2009;27(2): 195-201.  
[18] Dalstra M, Huiskes R, van Erning L. Development and validation of a three- dimensional finite element model of the pelvic bone. Transactions of the ASME. J Biomech Eng.2005,117:272-278.  
[19] Anderson AE, Peters CL, Tuttle BD, Weiss JA. Subject-specific finite element model of the pelvis: development, validation and sensitivity studies. J Biomech Eng.2008;127:364-373.  
[20] Su JC, Zhang CC, Chen XQ. Zhongguo Lingchuang Kangfu. 2005; 9(2):71-73.  
苏佳灿,张春才,陈学强,等.骨盆及髌臼三维有限元模型材料属性设定及其生物力学意义[J].中国临床康复,2005,9(2):71-73.  
[21] Wang MP, Zhu HM, Zhang GZ. Shanghai Yixue Yingxiang Zazhi. 2004;13(2):83-86.  
王鸣鹏,朱汉民,张国桢.定量CT骨结构学研究[J].上海医学影像杂志, 2004,13(2):83-86.  
[22] Wirtz DC, Schiffrers N, Pandorf T, et al. Critical evaluation of known bone material properties to realize anisotropic FE- simulation of the proximal Femur. J Biomech. 2000, 33(1):1325-1330.

#### 来自本文课题的更多信息--

**基金声明:** 国家自然科学基金项目资助(30870603)。

**作者贡献:** 第一作者完成了双柱内固定的建模分析及协助完成生物力学实验。第一作者对本文负责。

**利益冲突:** 课题未涉及任何厂家及相关雇主或其他经济组织直接或间接的经济或利益的赞助。

**伦理要求:** 参与实验的患病个体及其家属自愿参加, 所有供者、受者均应对实验过程完全知情同意, 在充分了解本治疗方案的前提下签署“知情同意书”; 干预及治疗方案获医院伦理委员会批准。

#### 文章概要:

**文章要点:** 建立了材料属性各向异性的横断骨折模型。

**关键信息:** 采用了有限元建模分析与生物力学实验进行对比研究的方法。

**研究的创新之处:** 创新之处: 实验结果得出 3 种方式的力学稳定性分析结果排列顺序为: 双柱螺钉、前柱螺钉后柱钢板、双柱钢板。不足之处是在生物力学实验中, 没有完全模拟出肌肉和韧带等生理条件。