

文章编号:1004-7220(2022)01-0186-06

# 骨盆骨折生物力学研究进展

张李东, 孟祥俊, 苏云, 陈艺清

(大连大学附属中山医院 创伤手外科, 辽宁 大连 116001)

**摘要:**近年来,随着交通事故增多和老龄化进一步发展,骨盆骨折发病率呈现逐渐增多的趋势。基于骨盆骨折固定物生物力学的深入研究,其手术治疗得以广泛开展,手术治疗目的是有效复位固定骨折,矫正畸形,恢复骨盆完整性和稳定性,并尽量减少内外固定物引起的并发症。如何在保证治疗效果的情况下提高骨盆稳定性是每个临床医生都会面对的问题。本文从骨盆及其韧带解剖、正常生物力学、分型和骨盆骨折固定生物力学几个方面,总结近年来骨盆骨折的生物力学研究进展,为临床骨盆骨折的合理治疗提供一定参考。

**关键词:**骨盆; 骨盆骨折; 损伤机制; 生物力学

**中图分类号:**R 318.01 **文献标志码:**A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2022.01.029

## Progress in Biomechanics of Pelvic Fractures

ZHANG Lidong, MENG Junxiang, SU Yun, CHEN Yiqing

(Department of Trauma and Hand Surgery, Affiliated Zhongshan Hospital of Dalian University, Dalian 116001, Liaoning, China)

**Abstract:** In recent years, with the increase of traffic accidents and the further development of aging, the incidence of pelvic fracture is gradually increasing. Based on the in-depth study about biomechanics of pelvic fracture fixation, the surgical treatment has been widely carried out. The purpose of surgical treatment is to effectively reduce and fix the fracture, correct deformity, restore integrity and stability of the pelvis, and minimize the complications caused by internal and external fixation. How to improve stability of the pelvis while ensuring therapeutic effect is a problem that every doctor will face in clinic. This paper summarizes the biomechanical research progress of pelvic fracture in recent years from the aspects of anatomy, normal biomechanics, classification and biomechanics of pelvic fracture fixation, so as to provide some references for reasonable treatment of pelvic fracture.

**Key words:** pelvis; pelvic fractures; injury mechanism; biomechanics

骨盆骨折是创伤骨科中常见的损伤,其损伤机制复杂。骨盆周围富有血管神经等重要软组织,一旦发生严重的骨盆骨折,如不及时选择正确的治疗方案,将会严重危及生命。报道表明,骨盆骨折合并大出血的病死率接近40%,骨盆骨折合并多发伤的病死率为30%~58%,合并多脏器损伤病死率可

达100%<sup>[1]</sup>。因此,对于一些不稳定的骨盆骨折,及时恢复骨盆的稳定性显得十分重要。本文对近年来骨盆骨折的力学研究进展进行总结。

### 1 骨盆及其韧带的功能解剖学特点

骨盆是由复杂的韧带将一块骶骨及两块髌骨

收稿日期:2021-02-01; 修回日期:2021-04-10

通信作者:苏云,主任医师,E-mail:suyunll@sina.com

连接而成的骨环,骨盆前方由耻骨联合及其周围的韧带连接,耻骨联合由两侧的耻骨体及耻骨间盘组成,耻骨联合周围有4条韧带加强,分别为耻骨上韧带、耻骨下韧带、耻骨前韧带、耻骨后韧带。骨盆后方由左右骶髂关节及其周围附着的韧带连接,骶髂关节的关节面凹凸不平,相互啮合形成内锁形态。骶髂关节与其周围韧带共同组成骶髂关节复合体,骶髂关节周围韧带包括骶髂前韧带、骶髂后韧带和骶结节韧带、骶棘韧带,其总称为骶髂关节复合体周围韧带,是骶髂关节稳定的基本要素之一。

## 2 正常骨盆及其韧带的生物力学行为特性研究

骨盆解剖结构复杂,其稳定性同时依赖于骨盆骨结构和骨盆周围韧带、肌肉等软组织<sup>[2]</sup>。骨盆的骨结构主要分为前环和后环。骨盆后环稳定主要依赖于骶髂关节复合体,骶髂关节的中段关节骶骨的凹面与髂骨相对应的凸面相适合呈楔形从而形成交锁机制,这种交锁机制使向下传导的重力和向外扩张的力量挤压骶骨向下,与髂骨形成的关节面形成紧密的联系。当这种匹配关系被破坏时,意味着骨盆稳定性丧失。因此,骨盆受力非常复杂(见图1)。此外,骨质本身对骨盆的稳定性也有一定影响<sup>[3-4]</sup>。骨质疾病会直接影响骨盆的稳定性,而且可能导致骨盆骨折固定失败。此类骨折稳定,移位极少,无休克或休克较轻,很容易在X线片上漏诊,导致临床医生常低估此类疾病的发生率。

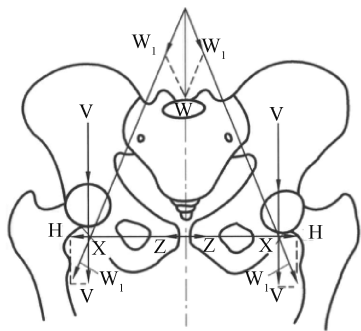


图1 站立位正常骨盆受力示意图<sup>[5]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of force on normal pelvis in standing position<sup>[5]</sup>

注:W-躯干重力,V-垂直分力,H-水平分力,Z-耻骨支及耻骨联合内支持力,X-骶关节上传导力的压迫中心。

骨盆的韧带也在骨盆的稳定性中有着重要影

响,骶髂前韧带结构较为薄弱,故对骶髂关节稳定性影响较小。骶髂后韧带和骨间韧带构成骶髂后韧带复合体,该复合体通过悬吊作用,将骶骨悬吊于两侧髂骨之间,形成骶髂关节后侧的主要力学阻力。耻骨联合周围有骨上、下、前、后韧带,而真正起连接作用的是耻骨间盘。传统上认为,这4条韧带较为薄弱,稳定性较差。但有观点认为,耻骨韧带作为影响骨盆前环稳定的因素之一,在骨盆稳定性的评估中应受到足够重视<sup>[6]</sup>。近些年来,关于骨盆的生物力学研究大多集中于骨结构和骨盆周围韧带,而针对骨盆周围其他软组织(例如肌肉、筋膜等)的研究,多数内容陈旧且薄弱,不利于理解骨盆骨折稳定机制<sup>[7]</sup>。

## 3 骨盆骨折的分类

### 3.1 Tile分型

Tile将骨盆损伤分为A型(稳定)、B型(旋转不稳定)和C型(垂直不稳定性损伤型),每种类又分为3个亚型,每个亚型又可进一步分型,按顺序骨折的稳定性逐渐下降(见图2)。Tile分型进一步细化和完善,形成了更全面的骨盆骨折AO/OTA分型标准<sup>[1]</sup>。

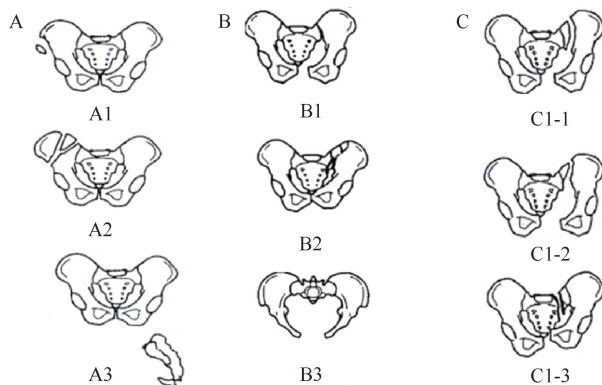


图2 骨盆骨折Tile分型<sup>[8-9]</sup>

Fig.2 Tile classification of pelvic fractures<sup>[8-9]</sup>

### 3.2 Yung-Burgess分型

Yung-Burgess根据损伤机制将骨盆骨折分为4种类型:侧方挤压(lateral compression, LC)型、前后挤压(anterior-posterior compression, APC)型、垂直剪切(vertical shear, VS)型、混合性损伤(complex mechanism, CM)型。其中,LC型和APC型又进一步分为3个亚型。APCI型和APC II型区分指标是

耻骨联合分离大于 2.5 cm。有学者通过分析以往生物力学实验数据,对这一标准提出疑问,认为这一标准已不适用,需要修订<sup>[10]</sup>。Yung-Burgess 分型与临床补液相关,有助于医生判断骨折失血量以及是否需要紧急固定不稳定骨盆骨折等<sup>[4]</sup>。

#### 4 骨盆骨折的损伤机制

骨盆骨折的损伤机制复杂,通常除骨盆的自重外,还有前后挤压力、外旋力、侧方挤压力或纵向剪力等载荷的作用。往往这些力是组合力作用,致使骨盆产生不稳定骨折、变形、移位,甚至髌翼外翻等损伤<sup>[11]</sup>。后前方力会使髌骨前部遭受直接暴力,这种暴力能否导致骨盆部分或完全不稳定性骨折,取决于骶髌后韧带是否撕裂。侧方挤压力作用于髌骨和大转子,这种力往往会造成髌臼横行骨折。若仅为单纯的侧方压力,后侧韧带结构会保持完整,但显著的侧方挤压也会导致半侧骨盆出现向内、上旋转,从而导致双下肢不等长。这种暴力损伤作用强弱主要取决于骨骼和韧带结构的相对强度。纵向剪力通常会导致骨折端移位明显同时伴有软组织的严重损伤,严重的纵向剪力甚至可以造成开放性骨盆损伤。

#### 5 骨盆骨折手术治疗的生物力学研究

根据 Tile 分型,Tile B 型和 Tile C 型骨盆骨折属于不稳定骨折,需要手术复位固定,其中 Tile B 型中 Tile B1 型骨折与 Yung-Burgess 分型中的 APC I 和 APC II 相似,属于开书样损伤,Tile B2 型骨折属于闭书样损伤,具有相对稳定性。如果耻骨支移位不是太大,一般不需要固定。Tile B 型骨折如果后环能够保持足够的稳定,一般只需要固定前环即可。Tile C 型属于垂直不稳定骨折,一般涉及后环和前环及其相关韧带的断裂,需要固定后环的同时固定前环。人在站立时,骨盆前环可提供 40% 结构稳定性<sup>[12]</sup>,而且有报道证实,骨盆前环固定能有效减少后环固定的失败风险,提高骨盆的整体稳定性<sup>[13-14]</sup>。

##### 5.1 Tile B 型骨盆骨折外固定的生物力学

外固定一般用于骨盆骨折的急救, Osterhoff 等<sup>[12]</sup>通过生物力学实验证明,外固定生物力学稳定性与内固定相比较差。特别是垂直剪切的骨盆骨

折,可能因为在不稳定的垂直剪切骨折中外固定架不能提供足够的力抵抗骨盆后环受到的纵向力,而产生较大的位移,这是由于牵引力作用线与骨架本身之间的距离相对较大,使得骨盆环在受力过程中产生相当大的弯矩<sup>[3]</sup>。Wardle 等<sup>[14]</sup>持有同样观点,并通过文献回顾认为,在远期功能恢复方面内固定也明显优于外固定。近年来,有学者对外固定架进行改良。Stewart 等<sup>[16]</sup>在双侧髌臼上钉模型中的稳定半骨盆侧顶端增加一个钉通过垂直杆连接到下方的髌臼上钉,并通过斜杆连接到对侧的髌臼上钉,形成一种改良外固定结构,发现这种新型结构能够很好承受 250 N 坐位生理负荷,但是却不能承受站立的生理负荷。该研究结果也说明,骨盆前环外固定提供的生物力学稳定性有限,而且在骨折愈合的中晚期,患者起身困难,并不利于骨盆骨折的功能恢复锻炼,但改良的外固定不失为临时固定骨盆骨折的较好选择。

##### 5.2 Tile B 型骨盆骨折内固定的生物力学

Kuttner 等<sup>[17]</sup>提出应用钉棒系统对 19 例不稳定性骨盆骨折患者进行骨盆前环皮下固定,取得较好的效果。这种系统被称为骨盆前环皮下内固定 (internal fixator, INFIX),能有效避免外固定架的一些并发症,而且具有良好的稳定性(见图 3)。

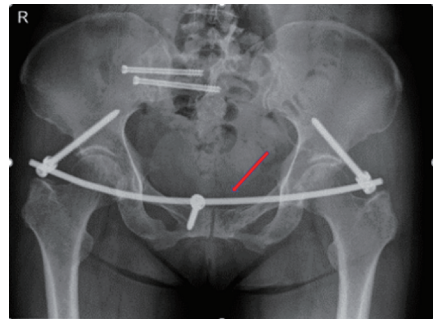


图 3 骨盆前环皮下内固定

Fig.3 Anterior subcutaneous pelvic fixator

Jordan 等<sup>[18]</sup>研究表明,普通 2 螺钉 INFIX 和髌臼上外固定架相比,生物力学稳定性相似,并且认为在多轴螺丝头上使用锁定螺钉,能防止棒的旋转,同时增强 INFIX 的稳定性。MacCormick 等<sup>[19]</sup>通过尸体标本进行力学实验,得出相似结论。李斯铭等<sup>[20]</sup>用三维有限元方法分析比较 2 螺钉、3 螺钉 (患侧) INFIX、3 螺钉 (健侧) 和内固定钢板生物力学



强度,发现2螺钉INFIX生物力学稳定性不如内固定钢板,但3螺钉患侧INFIX的固定效果要优于内固定钢板。Liu等<sup>[21]</sup>用同样方法比较2螺钉、3螺钉、4螺钉和内固定钢板的力学强度和稳定性,并认为螺钉数目越多,固定效果越好。

Osterhoff等<sup>[22]</sup>在模拟开书样损伤的骨盆复合模型上,使用万能试验机对标准钢板和联合式内固定棒(symphyseal internal rod fixation, SYMFIX)固定进行测试,发现SYMFIX与标准钢板刚度相当,但位移却比标准钢板小。虽然该实验显示,联合式内固定棒和标准钢板没有明显的生物力学差异,但是为临床治疗骨盆前环提供了一种新的固定方式,特别是在需要避免广泛开放手术的患者中。相对于新兴的INFIX技术,标准钢板固定骨盆前环是传统常用的内固定方式。Godinsky等<sup>[23]</sup>建立单肢站立模型,比较锁定和非锁定钢板系统耻骨联合处的刚度。结果发现,对于前后方剪切平移,锁定的联合钢板系统比非锁定系统提供更好的稳定性,而更多的稳定性可以潜在降低钢板或螺钉失败的风险。使用钢板固定骨盆前环无法避免对骨盆软组织的损害,手术中软组织的过度损伤不利于骨折的愈合。He等<sup>[24]</sup>尝试在腹腔镜下进行钢板植入,并用生物力学实验进一步证实腹腔镜下进行钢板植入的可行性。螺钉固定骨盆前环也是一种固定骨盆前环比较常用的方法。

Mc Lachlin等<sup>[25]</sup>在人工骨盆上比较4种手术结构(两枚针的髂前下棘外固定架、3.5 mm重建钢板、双皮质全螺纹3.5 mm、6.5 mm耻骨升支螺钉)固定C型骨盆环损伤的稳定性,结果发现,全螺纹双皮质6.5 mm耻骨升支螺钉在单腿站立载荷下为耻骨中下粉碎性骨折提供最稳定的前路固定,推测原因是较大的螺钉在耻骨升支内起到抵抗角运动从而紧固髓内钉的作用,抵抗角运动可能是由于较大螺钉直径和螺纹深度增加而使其表面积变大,从而增加了骨与螺钉界面之间的摩擦力。Liu等<sup>[26]</sup>采用三维有限元分析方法比较后方统一采用骶髂螺钉固定、前方采用改良Stoppa入路、钢板前方经皮入路、钢板传统前方髂腹股沟入路、前方外固定架、空心螺钉5种固定方式。结果表明,不稳定性骨盆骨折中的前环损伤在5种组合方法植入物的固定后均能得到明显的改善,但采用改良Stoppa入路、

髂腹股沟入路、前方空心钉固定方法治疗前环损伤在生物力学总体性能要优于前方经皮入路和前方外固定架治疗的方法。该实验结果也进一步证明了骨盆前环内固定的优良生物力学稳定性。

### 5.3 Tile C型骨盆骨折后环内固定的生物力学

在发生Tile C型骨折的重大创伤时,需要稳定骨盆环前部和后部,但目前的共识是先稳定骨盆后环,再固定骨盆前环<sup>[13,27]</sup>。骨盆后环固定不稳定型骨盆骨折尚无最为理想的固定方式,后环常用的固定方式为骶髂螺钉内固定、后环张力带钢板内固定、改良三角固定术内固定、联合固定等。在这些方法的基础上,出现了各种各样的固定方式。

Tian等<sup>[28]</sup>开发出一种由缆索系统和钢板-椎弓根螺钉组合系统(组合系统)的新型固定系统,这种新型固定系统在轴向压缩方面产生足够的稳定性,为骶髂关节脱位骨折提供更好的解决方案。骶髂螺钉是骨盆后环骨折中最常用的固定方式,经骶1(S1)椎骶髂螺钉内固定是骨盆后环固定的常用方法。Tabaie等<sup>[29]</sup>制备尸体标本模型,比较标准骶髂螺钉与经骶骨螺钉在固定Tile C2型骨盆骨折模型中的生物力学特性。结果发现,与2枚标准骶髂螺钉固定相比,骶髂螺钉和经骶骨的锁定螺钉联合固定治疗Tile C2型不稳定骶骨骨折,能抵抗变形,承受更大的力。这种锁定的经骶骨结构可能被证明是有利的,解决了经皮骶髂螺钉技术用于Tile C2型垂直不稳定骶骨骨折损伤时可能会导致残余骨折部位分离的问题。钢板在骨盆后环骨折中也有广泛的应用。王琦<sup>[30]</sup>使用生物力学试验机,利用尸体标本模型观察3种张力带钢板不同固定位置在不稳定骨盆骨折中的治疗效果以及生物力学性能情况。结果表明,采用髂后上棘水平放置钢板、钢板指向前方的固定方式生物力学性能更佳,故建议在选择张力带治疗骨盆后环骨折时可优先考虑此种固定物放置位置。研究发现,与张力带钢板相比,新型可调式微创接骨板有更好的生物力学性能<sup>[31]</sup>。Wu等<sup>[32]</sup>通过力学实验比较应用两枚骶髂螺钉、张力带钢板和微创可调钢板固定C型骨盆骨折的稳定性,结果显示,在不同垂直载荷作用下,微创可调钢板固定Tile C骨盆骨折的稳定性与骶髂螺钉固定的稳定性相似,微创可调钢板优于张力带钢板。Hu等<sup>[33]</sup>用三维有限元方法获得类似的结果。骨盆后

环的三角固定有出色的生物力学性能,但固定位置一直有所争议。Jazini 等<sup>[34]</sup>通过生物力学实验证明腰椎骨盆固定在复杂骶骨骨折治疗中的作用,特别是在骶骨粉碎性骨折情况下,当只有1枚经骶骨(TI~S)螺钉可行时,可能需要腰盆固定与腰椎L4近端固定的混合入路,以获得跨越骨折区域的最大生物力学支持。罗永<sup>[35]</sup>运用有限元方法观察垂直与水平三角固定在Denis I型骶骨骨折中的生物力学稳定性差异,发现垂直和水平三角固定术均能有效固定Denis I型骶骨骨折。与水平三角固定术相比,垂直三角固定术对骨折固定的力学稳定性更好,尤其是限制骨折垂直位移,并且垂直三角固定有更好的生物力学相容性。Chaiyamongkol 等<sup>[36]</sup>研究认为,三角固定会影响脊柱,增加手术风险,故提出在骶髂螺钉的固定基础上加用钉棒系统固定来固定垂直不稳定的骶骨骨折。Futamura 等<sup>[37]</sup>在生物力学实验中证实,脊柱骨盆固定术组的垂直阻力大于将腰椎排除在固定范围之外的骶髂关节棒固定术组,但刚度和变形、水平阻力和角变形无显著差异。该结果也进一步证实了Chaiyamongkol 等<sup>[36]</sup>三角固定手术替代方案的可行性。

## 6 展望

骨盆骨折是一种复杂的高能量损伤,并发症多,远期生活质量较正常人下降,而且随着损伤的程度增加,生活质量下降越明显<sup>[38]</sup>。通过分析总结不同的力学实验研究发现,大多实验研究都使用处理过的陈腐尸体或人工模型,这些模型缺乏正常活力及强度的软组织和骨质,而且可重复性低,成本较高;新兴的计算机建模仿真技术避免了这些缺点,但是由于骨盆及其周围组织的结构复杂性,计算机建模仿真对骨盆各点及周围主要韧带都是一种理想状态的假设,可能会对实验结果产生误差,这也是未来材料和计算机技术发展需要解决的问题。而在临床上,对骨盆骨折手术治疗后的功能恢复要求也将越来越高。比较上述骨盆前环或者后环固定的生物力学特性可以发现,各种固定方式虽然有一定的力学强度差异,但是固定方式的选择并不是以固定强度为标准,故要结合临床患者的实际情况决定。可以预见,未来骨盆环固定主要以微创、损伤小、术后骨折快速愈合和舒适度提高、最大

限度降低手术并发症为主要目标。

## 参考文献:

- [1] 赵晶鑫,唐佩福. 骨盆骨折分型方法的演变[J]. 解放军医学院学报, 2015, 36(3): 288-290.
- [2] OSTERHOFF G, TIZIANI S, FERGUSON SJ, *et al.* Mechanical testing of a device for subcutaneous internal anterior pelvic ring fixation versus external pelvic ring fixation [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2014, 15: 111.
- [3] PAPATHANASOPOULOS A, TZIOUPIS C, GIANNOUDIS VP, *et al.* Biomechanical aspects of pelvic ring reconstruction techniques: Evidence today [J]. *Injury*, 2010, 41(12): 1220-1227.
- [4] HAWS BE, WUERTZER S, LENCHIK L, *et al.* Misclassification of pelvic ring injuries in the national trauma data bank [J]. *J Orthop Trauma*, 2015, 29(10): 460-462.
- [5] 《骨盆创伤学》(第2版)出版[J]. 中国矫形外科杂志, 2010, 18(3): 180.
- [6] KLENGEL A, STEINKE H, PIEROH P, *et al.* Integrity of the pectineal ligament in MRI correlates with radiographic superior pubic ramus fracture displacement [J]. *Acta Radiol*, 2021, 62(1): 67-72.
- [7] FENSKY F, WEISER L, SELLENSCHLOH K, *et al.* Biomechanical analysis of anterior pelvic ring fractures with intact peripelvic soft tissues: A cadaveric study [J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2021, 47(1): 187-193.
- [8] ISLER B, GANZ R. Classification of pelvic ring injuries [J]. *Injury*, 1996, 27(Suppl 1): 3-12.
- [9] TILE M. Pelvic ring fractures: Should they be fixed? [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1988, 70(1): 1-12.
- [10] MA ZJ, BAI LP, ZENG XS, *et al.* Biomechanics and imaging evaluation on stable structure of pelvis [J]. *Zhongguo Gu Shang*, 2016, 29(12): 1164-1168.
- [11] 王国喜,吴乃庆. 不稳定骨盆骨折发病机制的生物力学研究[J]. 医用生物力学, 1998, 13(4): 215-221.  
WANG GX, WU NQ. Biomechanical studies of cause of disease mechanism for unstable pelvic fracture [J]. *J Med Biomech*, 1998, 13(4): 215-221.
- [12] TILE M. Acute pelvic fractures: I. Causation and classification [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 1996, 4(3): 143-151.
- [13] MCDONALD E, THEOLOGIS AA, HORST P, *et al.* When do anterior external or internal fixators provide additional stability in an unstable (Tile C) pelvic fracture? A biomechanical study [J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2015, 41(6): 665-671.
- [14] WARDLE B, ESLICK GD, SUNNER P. Internal versus external fixation of the anterior component in unstable fractures of the pelvic ring: Pooled results from a

- systematic review [J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2016, 42(5): 635-643.
- [15] OSTERHOFF G, AICHNER EV, SCHERER J, *et al.* Anterior subcutaneous internal fixation of the pelvis - What rod-to-bone distance is anatomically optimal? [J]. *Injury*, 2017, 48(10): 2162-2168.
- [16] STEWART R, KIESER DC, SCHOLZE M, *et al.* Preliminary biomechanical results of a novel pin configuration for external fixation of vertical shear pelvic fractures [J]. *ANZ J Surg*, 2018, 88(10): 1051-1055.
- [17] KUTTNER M, KLAIBER A, LORENZ T, *et al.* The pelvic subcutaneous cross-over internal fixator [J]. *Der Unfallchirurg*, 2009, 112(7): 661-669.
- [18] JORDAN MC, BREMS AC, HEINTEL T, *et al.* The anterior subcutaneous pelvic ring fixator: No biomechanical advantages compared with external fixation [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2019, 101(19): 1724-1731.
- [19] MACCORMICK LM, CHEN F, GILBERTSON J, *et al.* A biomechanical study comparing minimally invasive anterior pelvic ring fixation techniques to external fixation [J]. *Injury*, 2019, 50(2): 251-255.
- [20] 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.
- [21] LIU L, FAN S, CHEN Y, *et al.* Biomechanics of anterior ring internal fixation combined with sacroiliac screw fixation for tile C3 pelvic fractures [J]. *Med Sci Monit*, 2020, 26: e915886.
- [22] OSTERHOFF G, TIZIANI S, HAFNER C, *et al.* Symphyseal internal rod fixation versus standard plate fixation for open book pelvic ring injuries: A biomechanical study [J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2016, 42(2): 197-202.
- [23] GODINSKY RJ, VRABEC GA, GUSEILA LM, *et al.* Biomechanical comparison of locked versus non-locked symphyseal plating of unstable pelvic ring injuries [J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2018, 44(2): 179-184.
- [24] HE Y, LU Y, YIN B, *et al.* Numerical investigation on the biomechanical performance of laparoscopic-assisted plate used for fixing pelvic anterior ring fracture [J]. *J Healthc Eng*, 2017, 2017: 9261037.
- [25] MCLACHLIN S, LESIEUR M, STEPHEN D, *et al.* Biomechanical analysis of anterior ring fixation of the ramus in type C pelvis fractures [J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2018, 44(2): 185-190.
- [26] LIU M, ZHOU XS, WANG JC, *et al.* Finite element analysis of anterior ring injuries in unstable pelvic fractures treated by different methods [J]. *Zhongguo Gu Shang*, 2019, 32(2): 156-160.
- [27] LANGFORD JR, BURGESS AR, LIPORACE FA, *et al.* Pelvic fractures: part 2. Contemporary indications and techniques for definitive surgical management [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2013, 21(8): 458-468.
- [28] TIAN DW, LIU N, LEI J, *et al.* A novel fixation system for sacroiliac dislocation fracture: Internal fixation system design and biomechanics analysis [J]. *Clin Biomech*, 2013, 28(2): 129-133.
- [29] TABAIE SA, BLEDSOE JG, MOED BR. Biomechanical comparison of standard iliosacral screw fixation to transsacral locked screw fixation in a type C zone II pelvic fracture model [J]. *J Orthop Trauma*, 2013, 27(9): 521-526.
- [30] 王琦. 张力带钢板治疗不稳定骨盆骨折的生物力学性能评价 [J]. *中国组织工程研究*, 2017, 21(11): 1737-1741.
- [31] 李升, 张奇, 张英泽, 等. 应用微创可调式接骨板与张力带接骨板固定骶骨纵行骨折对骨盆后环应力传导的影响 [J]. *河北医科大学学报*, 2012, 33(3): 344-345.
- [32] WU T, CHEN W, LI X, *et al.* Biomechanical comparison of three types of internal fixation in a type C zone II pelvic fracture model [J]. *Int J Clin Exp Med*, 2015, 8(2): 1853-1861.
- [33] HU P, WU T, WANG HZ, *et al.* Biomechanical comparison of three internal fixation techniques for stabilizing posterior pelvic ring disruption: A 3D finite element analysis [J]. *Orthop Surg*, 2019, 11(2): 195-203.
- [34] JAZINI E, KLOCKE N, TANNOUS O, *et al.* Does lumbopelvic fixation add stability? A cadaveric biomechanical analysis of an unstable pelvic fracture model [J]. *J Orthop Trauma*, 2017, 31(1): 37-46.
- [35] 罗永. 垂直与水平三角固定治疗 Denis I 型骶骨骨折的有限元对比研究 [D]. 衡阳: 南华大学, 2019.
- [36] CHAIYAMONGKOL W, KRITSANEEPHAIBOON A, BINTACHITT P, *et al.* Biomechanical study of posterior pelvic fixations in vertically unstable sacral fractures: An alternative to triangular osteosynthesis [J]. *Asian Spine J*, 2018, 12(6): 967-972.
- [37] FUTAMURA K, BABA T, MOGAMI A, *et al.* A biomechanical study of sacroiliac rod fixation for unstable pelvic ring injuries: verification of the "within ring" concept [J]. *Int Orthop*, 2018, 42(4): 909-914.
- [38] BROUWERS L, LANSINK K WW, DE JONGH MAC. Quality of life after pelvic ring fractures: A cross-sectional study [J]. *Injury*, 2018, 49(4): 812-818.