

文章编号:1004-7220(2011)01-0057-06

## 垂直梯级载荷下人体全骨盆轴向刚度分析

汪方<sup>1,2</sup>, 刘瑞<sup>1</sup>, 王秋根<sup>1</sup>, 石柱芳<sup>2</sup>, 杨庆<sup>1</sup>, 陈博<sup>3</sup>, 唐昊<sup>4</sup>

(1. 上海交通大学附属第一人民医院 骨科, 上海 200080; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240;

3. 上海市伤骨科研究所, 上海 200025; 4. 第二军医大学附属长海医院 骨科, 上海 200433)

**摘要:** **目的** 分析垂直梯级载荷下人体全骨盆在双腿站立位时的轴向刚度。**方法** 短期福尔马林固定全骨盆标本9具,按测试顺序编号1<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>;分别在0~500 N、100 N的梯级载荷下对标本进行垂直轴向加载;利用电子万能试验机横梁传感器所采集的载荷-位移数据计算全骨盆轴向刚度。**结果** 骨盆轴向刚度数值个体差异较大( $P=0.815$ ),400~500 N时轴向刚度为 $(443.6 \pm 190.9)$  N/mm;采用聚类分析法将骨盆分为3组(第1组:1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>;第2组:4<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>;第3组:7<sup>#</sup>),经方差分析各组间的刚度有统计学差异( $P<0.05$ );在梯级载荷下骨盆的轴向刚度变化趋势不同,第1组和第3组共6具标本轴向刚度随载荷增加而增大,第2组3具标本轴向刚度随载荷增加而先增大后减小。**结论** 在生理范围内垂直梯级载荷下,人体全骨盆轴向刚度数值和变化规律存在较明显的个体差异,本组防腐骨盆标本轴向刚度总体上随载荷增大而增大。

**关键词:** 骨盆;生物力学;轴向刚度;梯级载荷;位移

**中图分类号:** R 3 **文献标志码:** A

## Testing of axial stiffness of human pelvis under gradient vertical loads

WANG Fang<sup>1,2</sup>, LIU Rui<sup>1</sup>, WANG Qiu-gen<sup>1</sup>, SHI Du-fang<sup>2</sup>, YANG Qing<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>3</sup>,

TANG Hao<sup>4</sup> (1. Department of Orthopedics, the First People's Hospital, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200080, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. Institute of Orthopedics and Traumatology of Shanghai, Shanghai 200025, China; 4. Department of Orthopedics, Changhai Hospital, the Second Military Medical University, Shanghai 200433, China)

**Abstract: Objective** To analyze the axial stiffness of human pelvis that were set with the double support standing posture and subjected to gradient vertical loads. **Method** Nine intact embalmed cadaver specimens were marked from 1<sup>#</sup> to 9<sup>#</sup> according to the test sequence, and then subjected to vertical static loads in the gradient of 100 N from 0 N to 500 N. The load-displacement data were collected by using the beam sensor of electronic universal testing machine to calculate the axial stiffness of human pelvis. **Results** The differences of axial stiffness among individual pelvis were large ( $P=0.815$ ), ranging from 240 N/mm to 776 N/mm. All the pelvic specimens were divided into three groups by cluster analysis (the first group: 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>, the second group: 4<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>, the third group: 7<sup>#</sup>). According to the processed results, there were statistical differences among the groups ( $P<0.05$ ). The trends of pelvic axial stiffness were different under gradient loads. The axial stiffness of the first and third group, totally six specimens, increased with loads increasing; while the axial stiffness of the second group including three specimens increased first, but then decreased with the loads increasing. **Conclusions** There are significant individual differences in pelvic axial stiffness and its changing discipline within the physiological range;

收稿日期:2010-09-13; 修回日期:2010-12-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(81000795),上海市基础研究重点项目(08JC1412800),上海市科委科技攻关重点项目(074119633),上海交通大学“医工(理)交叉研究基金”项目(YG2010MS09)。

通讯作者:王秋根, Tel:13801862558; E-mail: wangqiugen@126.com。

the cluster analysis can be used to analyze the changing discipline between the load and stiffness of human pelvis; as a whole, the pelvic axial stiffness increased with the loads increasing.

**Key words** : Pelvis; Biomechanics; Axial stiffness; Gradient loads; Displacement

骨盆轴向刚度,即骨盆抵抗轴向变形的能力,是衡量骨盆稳定性的重要指标之一。多位学者就此进行研究,Ilharrebord 等<sup>[1]</sup>在 200 ~ 400 N 载荷下,对 14 具新鲜骨盆进行测量,其平均刚度为  $(219.3 \pm 112)$  N/mm 和  $(216.5 \pm 138)$  N/mm; Van Zwien 等<sup>[2]</sup>在 150 N 载荷下测得 12 具防腐标本平均刚度为 346 N/mm。尽管 Wilke 等<sup>[3]</sup>研究表明,防腐处理使得骨的刚度升高,但 Hugate 等<sup>[4]</sup>在 800 N 载荷下测得的新鲜骨盆标本平均刚度也仅为 353 N/mm。说明骨盆处理方式的不同,载荷的大小都会对刚度测量结果造成较大差异。至于骨盆轴向刚度的个性化差异,在生理载荷下骨盆刚度随载荷增加的变化规律如何,目前这方面报道较少。本文选取防腐全骨盆标本 9 具,采用垂直梯级加载法,利用电子万能试验机横梁传感器所采集的载荷-位移数据,计算双腿站立位时骨盆轴向刚度,观察分析全骨盆刚度随载荷的变化规律。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验器材

本实验采用的生物力学加载测试系统为长春试验机研究所生产的 CSS-44010 电子万能试验机,其测控部分采用 DOLI 公司 EDC 数字控制器。传感器力测量精度在负荷传感器容量的 0.4% ~ 100% 范围内,精度为示值的  $\pm 0.5\%$ ; 变形测量精度在引申计量程的 2% ~ 100% 范围内,精度为示值的  $\pm 0.5\%$ ; 横梁位移测量分辨率高于 0.001 mm; 位移速度精度优于  $\pm 0.5\%$ 。试验机采用 Test Expert 3 程序控制及数据处理软件。

### 1.2 标本处理

选用福尔马林短期防腐处理的大小相似的成年男性尸体标本 9 具,由第二军医大学解剖学教研室提供。经检查骨盆无缺损、畸形,年龄 32 ~ 71 岁,平均 60 岁,按测试顺序编号 1# ~ 9#。保留从第四腰椎到股骨近端约 20 cm 的部分,保留耻骨联合及周围韧带、髂腰韧带、骶髂骨间韧带、骶髂前韧带、骶髂后韧带、骶棘韧带、骶结节韧带、盆底肌、髌关节囊及周

围组织,去除其他多余软组织。

### 1.3 标本固定与加载

用特制的固定装置将骨盆固定于万能试验机上。将股骨插入特制的套筒内,拧紧四周防滑螺丝钉以固定股骨。套筒下焊接钢板平台以保持骨盆在加载过程中的稳定性。为模仿人体站立位的姿势,调整骨盆双侧髂前上棘与耻骨结节的平面与水平面垂直。为避免加载过程中的骨盆偏斜,用牙托粉在腰椎上方浇筑一个圆柱形平台,牙托粉固化前在平台上方以试验机加载夹具的球头压制一个半球形凹槽(球头直径 20 cm)。经过约 0.5 h,牙托粉完全固化后进行实验加载(见图 1)。

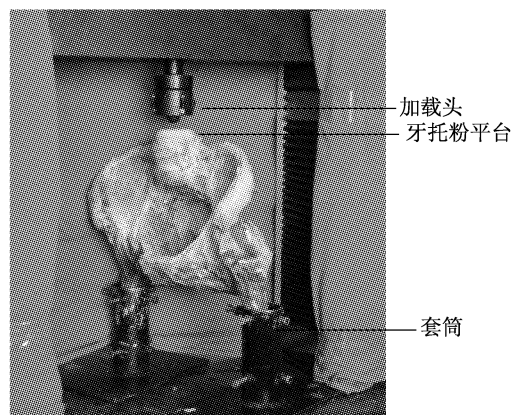


图1 骨盆标本处理、固定及加载方式

Fig.1 The fixture and loading method of processed pelvis

### 1.4 加载步骤

考虑到骨盆的黏弹性,采用 Varga 的预处理方法<sup>[5]</sup>,在正式实验之前对标本进行 0 ~ 300 N, 5 次循环加载,速率 2 mm/min 的预调,以消除骨盆蠕变影响。而后对骨盆标本进行 0 ~ 500 N、100 N 的梯级逐级加载,加载速率为 2 mm/min,各梯级载荷位置维持载荷不变约 10 s,以方便数据采集。以系统原装的电子万能试验机试验程序 VERSION 3.6.16 进行数据采集。

### 1.5 数据处理

各骨盆在逐级加载过程,试验机都将采集出一

组 0 ~ 100, 100 ~ 200, 200 ~ 300, 300 ~ 400, 400 ~ 500 N 时的载荷位移数据, 将各阶段载荷增加值 (100 N) 除此阶段中的位移增加值则得到此阶段的骨盆轴向刚度值。

### 1.6 统计学分析

实验数据采用 SPSS 12.0 软件进行统计学处理, 以聚类分析和重复测量方差分析为统计学方法, 检验水准  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果

本实验共测试 9 具骨盆标本, 获取载荷与整体位移数据以及各梯级载荷下骨盆轴向刚度。由于加载结束时, 要提升试验机横梁至加载力归零, 导致夹具与骨盆间难免会存在间隙, 为避免该“间隙”对实验的“位移”数据精度造成影响, 故 0 ~ 100 N 阶段的骨盆轴向刚度和位移数据予以剔除。

### 2.1 骨盆标本的轴向刚度数据

受测骨盆标本在 200 ~ 500 N 梯级载荷下轴向刚度从 151.21 ~ 881.57 N/mm (见表 1); 骨盆标本在 200 与 400 N、200 与 500 N 的载荷下轴向刚度值存在统计学差异 ( $P < 0.05$ ), 其余载荷下刚度值无统计学差异。

### 2.2 骨盆标本轴向刚度的聚类分析

9 具骨盆在 200 ~ 500 N 梯级载荷下轴向刚度比较, 无统计学差异 ( $P = 0.815$ )。因此, 对 9 具骨盆的轴向刚度进行了聚类分析 (见图 2)。结果提示 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、9<sup>#</sup> 骨盆归为第 1 组, 4<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> 骨盆归为第 2 组, 7<sup>#</sup> 骨盆为第 3 组。

表 2 各组骨盆标本在 200 ~ 500 N 梯级加载下的刚度均值变化

Tab.2 Changing of the mean value of pelvic axial stiffness under gradient loads ranging from 200 N to 500 N ( $\bar{x} \pm SD$ )

	刚度/(N · mm <sup>-1</sup> )			
	100 ~ 200 N	200 ~ 300 N	300 ~ 400 N	400 ~ 500 N
第 1 组	228.59 ± 67.25	268.33 ± 50.33	304.19 ± 35.73	315.09 ± 18.29
第 2 组	511.31 ± 87.82	533.32 ± 70.82	520.54 ± 48.87	511.66 ± 31.45
第 3 组	622.64	750.15	851.19	881.57
总体	366.61 ± 179.28	410.2 ± 187.7	437.09 ± 190.58	443.56 ± 190.92

意义 ( $P < 0.05$ ), 300 与 500 N、400 与 500 N 的载荷下轴向刚度值无统计学差异, 其余载荷下刚度值存在统计学差异  $P < 0.05$ 。刚度与载荷间有交互作用

表 1 骨盆标本在 200 ~ 500 N 梯级载荷下的轴向刚度值

Tab.1 The axial stiffness of pelvic specimens under gradient loads ranging from 200 N to 500 N ( $\bar{x} \pm SD$ )

	刚度/(N · mm <sup>-1</sup> )			
	100 ~ 200 N	200 ~ 300 N	300 ~ 400 N	400 ~ 500 N
1 <sup>#</sup>	151.21	236.97	304.61	323.46
2 <sup>#</sup>	202.36	222.82	250.20	286.98
3 <sup>#</sup>	335.17	345.75	333.27	307.09
4 <sup>#</sup>	563.33	565.43	532.19	494.97
5 <sup>#</sup>	222.13	244.78	293.57	325.15
6 <sup>#</sup>	560.68	582.40	562.54	547.93
7 <sup>#</sup>	622.64	750.15	851.19	881.57
8 <sup>#</sup>	409.92	452.13	466.90	492.07
9 <sup>#</sup>	232.09	291.34	339.32	332.77

Dendrogram using Average Linkage (Between Groups)

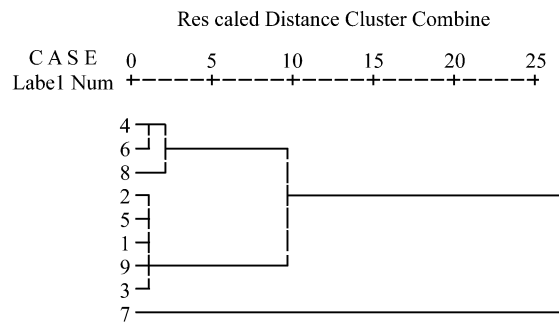


图 2 骨盆标本轴向刚度的聚类分析

Fig.2 The cluster analysis on pelvic axial stiffness

### 2.3 骨盆标本轴向刚度的重复测量方差分析

200 ~ 500 N 共 4 个水平各组测量值间差异有

( $P = 0.049$ ), 载荷影响刚度值, 但影响不大。表 2 是 3 组骨盆不同载荷下刚度均值变化; 3 组骨盆在相同载荷下, 所产生的轴向刚度变化大小不同, 第 1

和第3组共6具标本轴向刚度随载荷增大;第2组3具标本轴向刚度随载荷增大而先增大后减小。各骨盆轴向刚度随载荷的变化规律有差异,但总体而言9具骨盆标本轴向刚度随载荷增大而增大。不同载荷下各组间的刚度差异有统计学意义( $P < 0.05$ ),并且随载荷的增加,差异逐渐增加,增加的幅度也逐渐明显,说明该分组较为合理。

### 3 讨论

#### 3.1 骨盆轴向刚度的差异分析

目前骨盆刚度测量的实验方法已经成熟,其固定方式、加载方法已经接近于统一(见表3),可以基本排除因实验方法的不同而造成结果的巨大差异。标本性状的不同,新鲜或经福尔马林固定,会对实验结果造成一定的影响;不过新鲜与新鲜骨盆标本之间、防腐与防腐骨盆标本之间也存在巨大差异。进

一步说明骨盆轴向刚度值之间的巨大差异是来自于不同骨盆个体本身,也即骨盆轴向刚度的个性化差异很大。笔者将测量结果同其他学者的实验结果进行比较,同样发现差异普遍存在。郑琦等<sup>[7-8]</sup>、张烽等<sup>[13]</sup>、石岩<sup>[14]</sup>、司卫兵等<sup>[15]</sup>测量的骨盆标本无论是新鲜还是经福尔马林防腐固定,其轴向刚度值都约100~150 N/mm。本组实验骨盆标本在200~500 N梯级载荷下轴向刚度从151.21~881.57 N/mm。Zwienen等<sup>[2]</sup>、Hugate等<sup>[4]</sup>、Comstock等<sup>[17]</sup>、于滨生等<sup>[9]</sup>、宋连新等<sup>[16]</sup>测量的新鲜或经福尔马林固定骨盆标本的轴向刚度数据约300~450 N/mm,与本实验结果较接近;于滨生等<sup>[10]</sup>测量的经福尔马林固定骨盆标本的轴向刚度平均值为775 N/mm。

#### 3.2 骨盆轴向刚度随载荷的变化规律分析

虽然许多学者在测量骨盆轴向刚度时,都采用逐级梯级加载的方式,但一般都只求出各梯级载荷

表3 文献中各骨盆刚度测量实验结果统计

Tab.3 The measurement results of pelvic stiffness proposed in references

作者	标本量/类型	年龄/y	加载载荷/N	刚度/(N·mm <sup>-1</sup> )	备注
Ilharbord <sup>[1]</sup>	14/新鲜	47~81	200~400	219.3±112 216.5±138	固定L5及骶骨、单侧髌白加载,0.1 mm/s
Hugate <sup>[4]</sup>	3/新鲜	66、81、91	加载至破坏	353	固定L4~5及耻骨联合;双侧髌白,1 mm/s
锡林宝勒 <sup>[6]</sup>	6/新鲜	成年	500	164.5±20.8	固定L3及股骨近端,分级加载,5 mm/min
郑琦 <sup>[7]</sup>	10/新鲜	20~40	500	103.7±28.9	固定L5及坐骨结节,分级加载,1.4 mm/min
郑琦 <sup>[8]</sup>	20/新鲜	34~57	500	102.7±7.9	固定L5及坐骨结节,分级加载,1.4 mm/min
于滨生 <sup>[9]</sup>	7/新鲜	31~69	800	343±105	固定L3~SIJ*及坐骨结节,循环加载5次,速度不详
Yu B <sup>[10]</sup>	7/防腐	31~50	800	775±253	固定L3~SIJ*及坐骨结节,循环加载5次,0.5 Hz
Zheng Z <sup>[11]</sup>	7/防腐	31~69	800	≈200	固定L3~SIJ*及坐骨结节,循环加载5次,20%/s
吴寅良 <sup>[12]</sup>	6/防腐	成年	1000	115.7±8.1	固定L3及坐骨结节,分级加载,1.4 mm/min
张烽 <sup>[13]</sup>	3/防腐	成年	500	108.3±8.1	固定L3/4及坐骨结节,分级加载,速度不详
石岩 <sup>[14]</sup>	3/防腐	34~65	500	111.1±3.3	固定L5及坐骨结节,分级加载,1.4 mm/min
司卫兵 <sup>[15]</sup>	4/防腐	38~68	500	138.5±9.7	固定L3及坐骨结节,分级加载,1.4 mm/min
宋连新 <sup>[16]</sup>	4/防腐	成年	位移1cm <sup>△</sup>	343.3	固定L5及股骨近端,分级加载,速度不详
Van Zwien <sup>[2]</sup>	12/防腐	67~92	150	346	固定髌骨,站位,循环加载3次,速度不详
Comstock <sup>[17]</sup>	6/防腐	>50	350~1000	465.8±91.7	固定L4及股骨近端,循环加载,0.5 Hz
			100~200	367±179.3	
			200~300	410±187.7	
本实验	9/防腐	32~71	300~400	437±190.6	固定L4及股骨近端,分级加载,2 mm/min
			400~500	444±190.9	

注:\* SIJ表示骶髂关节,为 sacroiliac joint 的缩写;<sup>△</sup>位移1 cm表示加载至骨盆纵向分离位移为1 cm时的载荷

下刚度的平均值或最大载荷下的刚度值,没有分别运算出各梯级载荷下的刚度值,并对其进行比较分析。针对这一点不足,本文测量并统计了各梯级载荷下骨盆轴向刚度数据。根据数据特征,以聚类分析的方法将其分为3组,每组骨盆轴向刚度均值都有一定的规律,其中第1组和第3组共6具骨盆轴向刚度均值随载荷增加而增大,总增加幅度为43.3%;第2组3具骨盆轴向刚度均值随载荷增加而先增大后减小,总减小幅度为7.4%;总体而言,大部分骨盆标本轴向刚度随载荷增加而增大。发现5具骨盆轴向刚度均值随载荷增加而增大,平均增加幅度为11.44%;3具骨盆轴向刚度均值随载荷增加而先增大后减小到500 N基本等于200 N的载荷刚度值;1具骨盆随载荷增大而刚度增加,但刚度值明显比其他8具高,平均增加幅度为11.32%。总体而言,大部分骨盆标本轴向刚度随载荷增加而增大,这一规律也与文献中一些学者的测量结果相吻合。全仁夫等<sup>[18]</sup>加载骨盆至破坏的实验中可以看到,其载荷位移曲线呈“S”形,这表明在生理载荷下骨盆刚度(反应为曲线斜率)是逐渐增大的。Hugate等<sup>[4]</sup>与Comstock等<sup>[17]</sup>测量得到的载荷-位移曲线也同样呈“S”形。鉴于骨盆轴向刚度的个体差异较大,需采用聚类分析的方法描述载荷-刚度的变化趋势,但由于本实验样本量较小,结果存在较大局限性,需在今后加强。

### 3.3 骨盆轴向刚度直接测量方法的意义

骨盆轴向刚度是衡量骨盆稳定性的重要指标之一,采用光栅测量法<sup>[14-15]</sup>与数字散斑相关法<sup>[20]</sup>均测得骨盆局部相对位移,光栅法常用于测量骨盆骶髂关节处位移;光弹模型<sup>[21]</sup>、有限元模型<sup>[22]</sup>等可提供骨盆内部应力、应变的分布特征。电子万能试验机横梁传感器所采集的载荷-位移数据是骨盆整体位移的数据,本实验主要讨论骨盆整体刚度值,作者认为采用骨盆整体位移数据进行分析更为合理。此外光栅测量法测位移需要对骨盆局部置入光栅传感器,对骨盆是一种有创处理;散斑法需要对骨盆表面粘贴标识点,布置CCD器材。全骨盆的刚度为轴向载荷与骨盆整体位移的比值,利用电子万能试验机横梁传感器即可直接获得整体骨盆位移、载荷数据;而光栅测量法与数字散斑法用于测量骶髂关节位移,计算出的是骶髂关节部位的局部刚度值。这两

种方法着重点不同,但骶髂关节部位的轴向刚度是否能称作“全骨盆刚度”或“骨盆刚度”,还是应称作“骶髂关节刚度”,这一问题尚待进一步探讨。为方便同类实验数据间的比较,笔者认为采用全骨盆位移计算出的刚度值称作为“全骨盆刚度”,采用骶髂关节位移计算出的刚度值称作为“骶髂关节刚度”较为合适。

## 4 结语

在生理范围内垂直梯级载荷下,人体骨盆轴向刚度数值和变化规律存在较明显的个体差异。总体而言,本组标本全骨盆轴向刚度随载荷增大而增大。

**致谢:** 同济大学生命科学与技术学院丁祖泉教授、余慧琴硕士、徐峰博士等为本实验提供了技术指导并参与部分工作;上海交通大学王冬梅老师为论文撰写给予指导;施鹏、王彦丽协助本文的资料统计分析,在此一并表示感谢!

## 参考文献:

- [1] Ilharreborde B, Breited D, Lenoir T, et al. Pelvic ring fractures internal fixation: Iliosacral screws versus sacroiliac hinge fixation [J]. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, 2009, 95(8): 563-567.
- [2] Zwiener VC, Bosch VE, Snijders C, et al. Biomechanical comparison of sacroiliac screw techniques for unstable pelvic ring fractures [J]. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 2004, 18(9): 589-595.
- [3] Wilke HJ, Krischak S, Claes LE. Formalin fixation strongly influences biomechanical properties of the spine [J]. *J Biomech*, 1996, 29(12): 1629-1631.
- [4] Hugate JR R, Dickey I, Phimolsarnti R, et al. Mechanical effects of partial sacrectomy: When is reconstruction necessary [J]. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 2006, 450: 82-88.
- [5] Varga E, Hearn T, Powell J, et al. Effects of method of internal fixation of symphyseal disruptions on stability of the pelvic ring [J]. *Injury*, 1995, 26(2): 75-80.
- [6] 锡林宝勒日,白靖平,芦勇,等. 后路短螺丝钉固定术治疗骶髂关节骨折脱位实验研究与临床 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2003, 11(3): 228-32.
- [7] 郑琦,徐荣明,刘耀升,等. 骨盆骨折 S1 螺钉结合棒-板内固定系统的生物力学评价. *医用生物力学* [J], 2004, 19(2): 93-102.

- Zheng Q, Xu RM, Lin YS, *et al.* Biomechanical evaluation of S1 screw and rod-plate internal fixation development for fixation of pelvic fracture [J]. *Journal of Medical Biomechanics*, 2004, 19(2): 93-102.
- [8] 郑琦, 毕大卫, 石仕元, 等. 骶髂关节解剖型棒-板内固定系统的生物力学评价 [J]. *中国骨伤*, 2008, 21(8): 577-580.
- [9] 于滨生, 庄新明, 李泽民, 等. 髂骨不同置钉方式在腰-髂重建结构中稳定性的生物力学研究 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2009, 11(12): 1169-72.
- [10] Yu B, Zheng Z, Zhuang X, *et al.* Biomechanical effects of transverse partial sacrectomy on the sacroiliac joints: an in vitro human cadaveric investigation of the borderline of sacroiliac joint instability [J]. *Spine*, 2009, 34(13): 1370.
- [11] Zheng Z, Yu B, Chen H, *et al.* Effect of iliac screw insertion depth on the stability and strength of lumbo-iliac fixation constructs: an anatomical and biomechanical study [J]. *Spine*, 2009, 34(16): 565-572.
- [12] 吴寅良, 杨惠林, 王以进, 等. 骶骨不同水平切除对骨盆稳定性影响的生物力学研究 [J]. *中华骨科杂志*, 2008, 28(3): 218-223.
- [13] 张烽, 刘军, 陆建华. 骶髂关节骨折脱位不同内固定方式的生物力学研究 [J]. *江苏医药*, 2008, 34(10): 1034-1036.
- [14] 石岩. 骨盆及骶髂螺钉内固定稳定性的生物力学研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2007.
- [15] 司卫兵, 吴乃庆, 嵇鹏, 等. 骨盆骨折  $\pi$  棒双重固定效应的生物力学研究 [J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2005, 20(4): 249-251.
- [16] 宋连新, 张英泽. 垂直不稳定性骨盆骨折内固定的生物力学研究 [J]. *中华实验外科杂志*, 2000, 17(2): 126-127.
- [17] Comstock C, Dermeulen VM, Goodman S. Biomechanical comparison of posterior internal fixation techniques for unstable pelvic fractures [J]. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 1996, 10(8): 517-520.
- [18] 全仁夫, 胡文跃, 李伟, 等. 骨盆的垂直动态冲击试验研究 [J]. *中医正骨*, 2005, 17(8): 1-3.
- [19] 白靖平. 后路短螺丝钉固定术治疗骶髂关节骨折脱位实验研究与临床 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2003, 11(3): 228-232.
- [20] 陈博, 丁祖泉, 游木荣, 等. 髋臼周围肿瘤切除后功能重建手术的仿真建模方法 [J]. *医用生物力学*, 2008, 23(1): 37-42.
- Chen B, Ding ZQ, You MR, *et al.* Study on Simulation modeling method of the reconstruction following resection of peri-acetabular tumor [J]. *Journal of Medical Biomechanics*, 2008, 23(1): 37-42.
- [21] 丁秀敏, 侯丽丽, 郭子学, 等. 半球与椭球髋臼假体对骨性髋臼应力分布的对比分析 [J]. *医用生物力学*, 2008, 23(6): 465-470.
- Ding XM, Hou LL, Guo ZX, *et al.* Comparative study of stresses on acetabulum after implanted hemisphere and ellipse cup [J]. *Journal of Medical Biomechanics*, 2008, 23(6): 465-470.
- [22] 杜明奎, 王秋根, 张秋林, 等. 锁定加压钢板固定骶骨不稳定骨折的三维有限元分析 [J]. *医用生物力学*, 2007, 22(1): 94-98.
- Du MK, Wang QG, Zhang QL, *et al.* 3-dimension finite elemental analysis on effects of locking compression plate for fixing unstable sacral fractures [J]. *Journal of Medical Biomechanics*, 2007, 22(1): 94-98.