

文章编号: 1004-7220(2024)02-0265-07

## 新型骶髂拉力钉力学性能评价

梁成<sup>1,2,3</sup>, 卓川川<sup>1</sup>, 王冠<sup>1</sup>, 李文<sup>1</sup>, 段可<sup>1,2</sup>, 李忠<sup>1</sup>, 鲁晓波<sup>1,2</sup>, 卓乃强<sup>1</sup>

(1. 西南医科大学附属医院 骨科, 四川 泸州 646000; 2. 四川省骨科置入器械研发及应用技术工程实验室, 四川 泸州 646000; 3. 西南医科大学附属医院 临床医学研究中心, 四川 泸州 646000)

**摘要:** **目的** 研究一种具有螺旋刀片结构新型骶髂拉力钉的生物力学性能。 **方法** 用临床中常用的骶髂经皮拉力钉作为对照。使用聚氨酯材料模拟松质骨, 利用 Instron 力学试验机测试对比抗拔出性能。然后使用骨盆标本, 以正常骨盆、单侧骶髂关节损伤骨盆、骶髂经皮拉力钉-单钉修复、骶髂经皮拉力钉-双钉修复骶髂关节损伤为对照, 分析新型骶髂拉力钉修复正常站立姿态骶髂关节损伤的静态刚度和动态稳定性。 **结果** 新型骶髂拉力钉组拉力钉拔出后的聚氨酯材料破坏更小。新型骶髂拉力钉抗拔出的有效把持位移显著大于骶髂经皮拉力钉( $P < 0.05$ )。但骶髂经皮拉力的最大抗拔出力量显著大于新型骶髂拉力钉( $P < 0.05$ )。骶髂关节损伤修复后, 采用1枚骶髂新型骶髂拉力钉刚度显著高于骶髂经皮拉力钉-双钉修复组( $P < 0.05$ )。骶髂关节损伤组的位移振幅最大, 其次为正常组; 其余组别的位移振幅较为接近, 但差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。新型骶髂拉力钉修复的动态稳定性最优, 略优于骶髂经皮拉力钉-双钉修复组, 骶髂关节损伤组的稳定性最差。新型骶髂拉力钉能有效修复骶髂关节损伤。 **结论** 骶髂新型骶髂拉力钉能更有效地把持松质骨, 具有一定的临床实用性。

**关键词:** 骶髂经皮拉力钉; 松质骨; 骶髂关节损伤

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.02.011

## Evaluation of Mechanical Properties of a Novel Sacroiliac Lag Screw

LIANG Cheng<sup>1,2,3</sup>, ZHUO Chuanchuan<sup>1</sup>, WANG Guan<sup>1</sup>, LI Wen<sup>1</sup>, DUAN Ke<sup>1,2</sup>, LI Zhong<sup>1</sup>, LU Xiaobo<sup>1,2</sup>, ZHUO Naiqiang<sup>1</sup>

(1. Department of Orthopedics, the Affiliated Hospital of Southwest Medical University, Luzhou 646000, Sichuan, China; 2. Sichuan Provincial Laboratory of Orthopaedic Engineering, Luzhou 646000, Sichuan, China; 3. Clinical Medicine Research Center, the Affiliated Hospital of Southwest Medical University, Luzhou 646000, Sichuan, China)

**Abstract:** **Objective** To investigate the biomechanical properties of a novel sacroiliac lag screw with a spiral blade. **Methods** Percutaneous sacroiliac lag screws were used as the controls. Polyurethane material was used to simulate the trabecular bone, and the pullout resistance performance was tested on an Instron mechanical testing machine. Subsequently, pelvic specimens were utilized to analyze the static stiffness and dynamic stability of the novel sacroiliac lag screw in repairing sacroiliac joint injuries under normal standing conditions, with normal pelvis, single-sided sacroiliac joint injury pelvis, percutaneous sacroiliac lag screw-single screw repair, and percutaneous sacroiliac lag screw-double screw repair as controls. **Results** The damage to the polyurethane

收稿日期: 2023-08-23; 修回日期: 2023-09-15

基金项目: 泸州-西南医科大合作项目(2020LZXNYDF02), 西南医科大学校级课题(2023ZD015), 西南医科大学产学研项目(2022CX03)

通信作者: 卓乃强, 主任医师, E-mail: zqnq0101@163.com

material after screw extraction was smaller in the novel sacroiliac lag screw group. The average effective holding displacement of the novel sacroiliac lag screw was significantly greater than that of the percutaneous sacroiliac lag screw ( $P < 0.05$ ). However, the maximum resistance to the pullout force for the percutaneous sacroiliac lag screw was significantly higher than that for the novel sacroiliac lag screw ( $P < 0.05$ ). The stiffness after repair of sacroiliac joint injuries was significantly higher when using a single sacroiliac lag screw than when using two percutaneous sacroiliac lag screws ( $P < 0.05$ ). The displacement amplitude was the highest in the sacroiliac joint injury group, followed by that in the normal group. The displacement amplitudes in the other groups were similar; however, the differences were statistically significant ( $P < 0.05$ ). The dynamic stability of the sacroiliac lag screw repair group was the best, slightly better than that of the percutaneous sacroiliac lag screw-double screw repair group, and the dynamic stability of the sacroiliac joint injury group was the worst. The novel sacroiliac lag screw effectively repaired the sacroiliac joint injuries. **Conclusions** The novel sacroiliac lag screw can effectively hold the trabecular bone and has practical clinical utility.

**Key words:** percutaneous sacroiliac lag screw; trabecular bone; sacroiliac joint injury

老化、韧带松弛、臀部撞击等均可导致骶髂关节损伤,严重疼痛采用融合治疗,效果较好<sup>[1-2]</sup>。经皮空心骶髂螺钉固定和重建钢板固定均有较好临床效果,经皮空心螺钉固定更微创、难度更高<sup>[3-5]</sup>。对于骨质疏松病人普通空心螺钉对松质骨的把持作用较差,研发能有效把持骨质疏松松质骨的拉力钉具有重要意义。

松质骨屈服应力、最大破坏应力远小于皮质骨,其力学性能决定了常用骨钉对其把持能力低,较大承载时容易脱出,造成植入物失效<sup>[6]</sup>。松质骨的有效把持和固定一直是临床中的难点。骨盆松质骨含量丰富,骨盆骨折或者软组织损伤的固定较困难,尤其是骨质疏松病人<sup>[7-8]</sup>。股骨头内部松质骨含量丰富,且股骨是重要的承力构件,股骨颈骨折固定的难点在于实现股骨头内部松质骨的有效把持和固定<sup>[9]</sup>。具有螺旋刀片结构的防旋股骨近端髓内钉(proximal femoral nail antirotation, PFNA)为临床中股骨颈骨折的常见结构<sup>[10]</sup>,团队借鉴股骨颈骨折的内植物固定经验,针对骶髂关节损伤开发新植入物。螺旋刀片结构特殊,多数研究关注了其临床疗效<sup>[11]</sup>,其固定原理还有待进一步考察。

本文设计了一款具有螺旋刀片结构的新型骶髂拉力钉(发明专利申请号为202211582022.4)[见图1(a)],在实现松质骨有效把持固定的同时提供一定拉力,促进骨折愈合<sup>[12]</sup>。新型骶髂拉力钉尖端为螺旋刀片结构,尾端有防止拉力钉自旋的防旋尾卡,以及调节修复部件间预压紧力的调节螺栓。本文首先研究测试拉力钉的抗拔出性能。然后使用

骨盆标本进行骶髂关节损伤修复的对比<sup>[13]</sup>。抗拔出试验的对照样品为临床中骨盆手术常用的骶髂经皮拉力钉[见图1(b)]。骶髂关节损伤修复的对照组为正常骶髂关节组、骶髂关节损伤组、骶髂经皮拉力钉-单钉修复组和骶髂经皮拉力钉-双钉修复组[见图1(c)]。

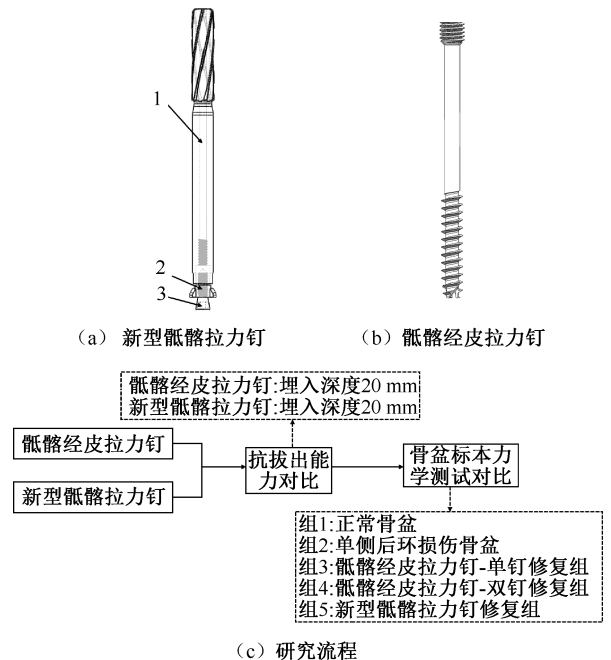


图1 拉力钉结构示意图及研究流程图

Fig. 1 Schematic diagram of lag screw structure and research workflow diagram (a) Novel sacroiliac lag screw, (b) Percutaneous sacroiliac lag screw, (c) Research workflow

注:1-主钉,2-防旋尾卡,3-调节螺栓。

## 1 拉力钉抗拔出性能分析

### 1.1 材料与方法

参考 ASTM F543-2013 骨钉拔出测试方法, 进行新型骶髂拉力钉的拔出测试, 并以骶髂经皮拉力钉作为对照组<sup>[14]</sup>。测量拉力钉埋入样块 20 mm 时最大抗拔出力和有效抗拔出位移, 每组测量 5 组数据, 计算各组数据的平均值和标准差。

加工模拟松质骨的聚氨酯块 (#20, Sawbones 公司, 美国), 模型尺寸为外径 50 mm, 内径 4.5 mm, 厚度 40 mm, 共 10 个。在新型骶髂拉力钉和骶髂经皮拉力钉距离尖端 20 mm 处用记号笔标记, 分别将对应的拉力钉敲入或者拧入试样块对应的尺寸[见图 2(a)]。将聚氨酯块牢固固定在 Instron E10000 力学试验机上, 大三抓卡盘夹持聚氨酯块固定于底座, 小三抓卡盘夹持拉力钉头部固定于作用缸[见图 2(b)], 作用缸以 5 mm/min 速率拔出拉力钉, 记录下最大拔出力和其对应的拔出位移数据。

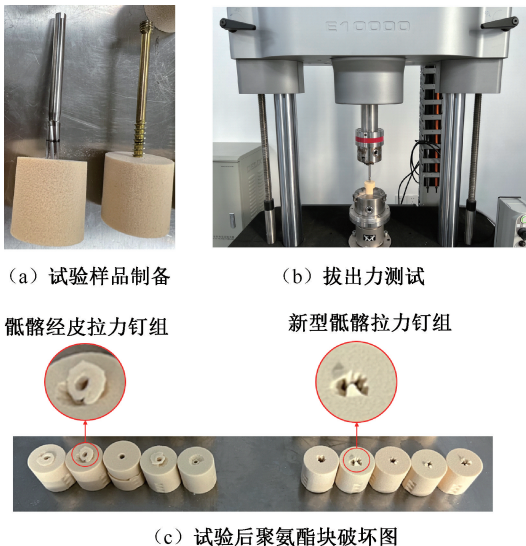


图2 拉力钉各模型结构示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of various lag screw models

- (a) Preparation of test specimens, (b) Pullout force testing, (c) Damage of polyurethane block after testing

### 1.2 试验结果

对比抗拔出测试后聚氨酯材料的破坏情况, 结果显示, 骶髂经皮拉力钉抗拔出造成的聚氨酯材料破坏要大于新型骶髂拉力钉[见图 2(c)]。骶髂经皮拉力钉组聚氨酯块上表面, 贴近圆孔处发生锥状小样块脱落破坏, 少数样块发生断裂。新型骶髂

拉力钉组聚氨酯材料上表面靠近螺旋刀片处产生随颗粒状破坏, 无样块断裂。该结果说明, 新型骶髂拉力钉固定对周围骨质的破坏影响较小。

由拔出力和拔出位移曲线可见, 新型骶髂拉力钉最大抗拔出力为  $(517.04 \pm 24.15) \text{ N}$ , 显著小于骶髂经皮拉力钉的最大抗拔出力  $[(1230.58 \pm 23.18) \text{ N}]$ ; 新型骶髂拉力钉最大抗拔出力对应的拔出位移为  $(4.51 \pm 0.20) \text{ mm}$ , 显著大于骶髂经皮拉力钉最大抗拔出力对应的最大位移  $[(0.60 \pm 0.02) \text{ mm}]$ ; 新型骶髂拉力钉有效把持力的位移范围为  $(8.81 \pm 0.21) \text{ mm}$ 。施加拔出力的过程中, 骶髂经皮拉力钉很快达到最大抗拔出力并急速下降, 1.6 mm 内完成整个拔出过程; 新型骶髂拉力钉很快达到极大抗拔出力, 随后缓慢上升到最大抗拔出力, 然后缓慢下降, 8.81 mm 内均能提供有效把持力, 12 mm 后失去有效把持。对于松质骨, 新型骶髂拉力钉比骶髂经皮拉力钉具有更好的把持能力; 但新型骶髂拉力钉的最大抗拔出力偏小, 约为同条件对照组的 50% (见图 3)。

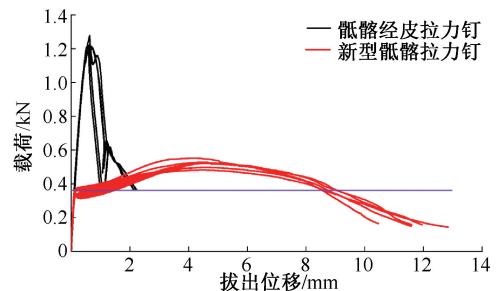


图3 不同拉力钉在埋入深度 20 mm 时拔出位移-载荷曲线

Fig. 3 Pullout displacement-load curve of different lag screws at a depth of 20 mm

## 2 骶髂损伤修复生物力学测试

### 2.1 对象与方法

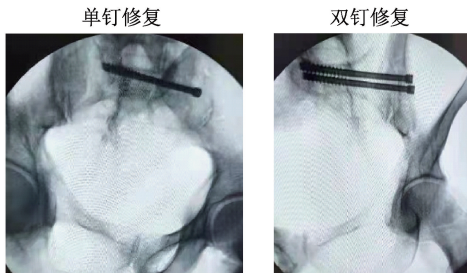
从西南医科大学解剖实验室获取 25 支完整福尔马林浸泡保存骨盆标本(死亡年龄 30~40 岁, 平均 35 岁), 进行 X 线扫描排除畸形、陈旧性骨折、肿瘤等病变。标本均保留到股骨小转子下 15 cm, 根据情况保留 L4 或 L5, 保留双侧髋关节囊和骨盆主要韧带连接, 剔除其他软组织。

按照随机原则分为 5 组。组 1 进行正常骨盆的生物力学试验, 探究正常骨盆承载的生物力学性

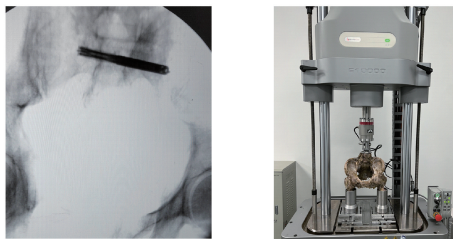


能。组2~5为统一对照组。其中,组2进行单侧后环损伤骨盆的生物力学试验,完全切断右侧骶髂前韧带、骶髂后韧带、骶结节韧带等骶骨和右侧髂骨的连接韧带,保留左侧,探究单侧后环损伤骨盆的生物力学性能,作为采用植入物修复后实验组的对比组。组3、4分别采用骶髂经皮拉力钉-单钉、双钉修复骨盆后环单侧损伤,在损伤模型上根据AO进行拉力钉植入操作[见图4(a)]。组5采用新型骶髂拉力钉修复骨盆后环单侧损伤[见图4(b)]。同一骨科医师完成所有内固定操作,夹具和标本安装、力学测试均在四川省骨科置入器械研发及应用技术工程实验室内完成。统计分析采用SPSS 25软件(IBM公司,美国),采用单因素ANOVA检验。

试验采用定制夹具,用自凝牙托粉(上海新世纪齿科材料有限公司)竖直包埋股骨到股骨小转子处<sup>[15]</sup>,用骨钉将L4或L5和上夹具固定。静态刚度试验:仪器夹头以20 mm/min加载速率竖直加载直到500 N,记录下骶骨整体的竖直位移变化;动态稳定性试验:仪器夹头以正弦压力负载(最大值200 N,最小值50 N,频率0.5 Hz)加载到上夹具,记录下骶骨整体的竖直位移变化与加载周期的信息数据[见图4(c)]。



(a) 骶髂经皮拉力钉修复



(b) 新型骶髂拉力钉修复

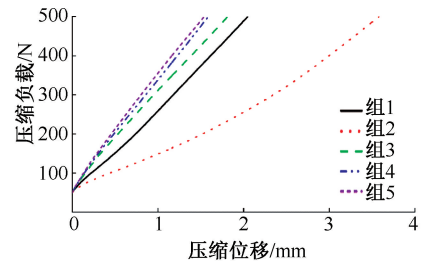
(c) 样本装夹示意图

图4 骨盆力学测试

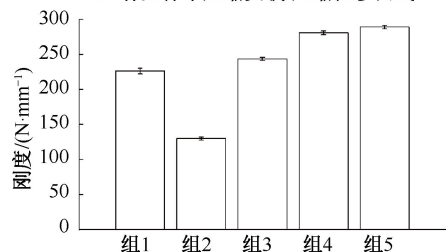
**Fig. 4 Pelvic mechanical testing** (a) Percutaneous sacrospinous lag screw repair, (b) Novel sacrospinous lag screw repair, (c) Illustration of specimen clamping

## 2.2 试验结果

**2.2.1 静态刚度** 参考正常骨盆标本的曲线,损伤骨盆标本压缩位移明显偏大,500 N压力时达到 $(3.48 \pm 0.08)$  mm [正常骨盆标本为 $(1.96 \pm 0.04)$  mm];各拉力钉修复均为有效修复,新型骶髂拉力钉修复的压缩位移最小,为 $(1.51 \pm 0.01)$  mm;骶髂经皮拉力钉-双钉修复的压缩位移为 $(1.56 \pm 0.02)$  mm;骶髂经皮拉力钉-单钉修复的压缩位移为 $(1.79 \pm 0.02)$  mm。损伤骨盆模型刚度最小,和预期相符[见图5(a)]。骶髂经皮拉力钉-单钉修复的骨盆模型刚度大于正常骨盆模型,二者刚度接近。新型骶髂拉力钉修复的骨盆模型刚度最大,略大于骶髂经皮拉力钉-双钉修复的骨盆模型刚度[见图5(b)]。骶骨和髂骨松质骨含量丰富,用1颗新型骶髂拉力钉的固定效果略优于骶髂经皮拉力钉-双钉的固定效果,充分说明了新型骶髂拉力钉优越的松质骨固定性能。



(a) 骨盆样本压缩负载-压缩位移曲线



(b) 各骨盆样本刚度

图5 静态试验结果

**Fig. 5 Static test results** (a) Pelvic specimen compression load-displacement curve, (b) Stiffness of each pelvic specimen  
注:图5(b)中各组比较, $P < 0.05$ 。

**2.2.2 动态稳定性** 为了直观描述各组动态稳定性的变化趋势,选择分析第1、100、200、300、400和500个周期的压缩位移变化情况[见图6(a)]。分析选定周期最小压缩位移的变化趋势。结果显示,曲线整体向右下角倾斜,最小压缩位移随周期数量增加逐渐减小,但组1、组2倾斜趋势最

重,即经历相同的试验周期,最小压缩位移更小。组1、组2最小位移的初始值约为0.3、0.5 mm,两组倾斜趋势明显;组3约为0.225 mm,倾斜趋势稍弱;组4、组5约为0.2 mm,倾斜趋势不明显[见图6(b)]。分析各组单周期位移振幅的变化趋势发现,组2的位移振幅最大,为 $(0.995 \pm$

$0.021)$  mm;其次是组1的位移振幅,为 $(0.520 \pm 0.011)$  mm;其余组别的位移振幅较为接近,但差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。综上所述,新型骶髂拉力钉修复的动态稳定性最优,略优于骶髂经皮拉力钉双钉修复组,骶髂关节损伤组的稳定性最差。

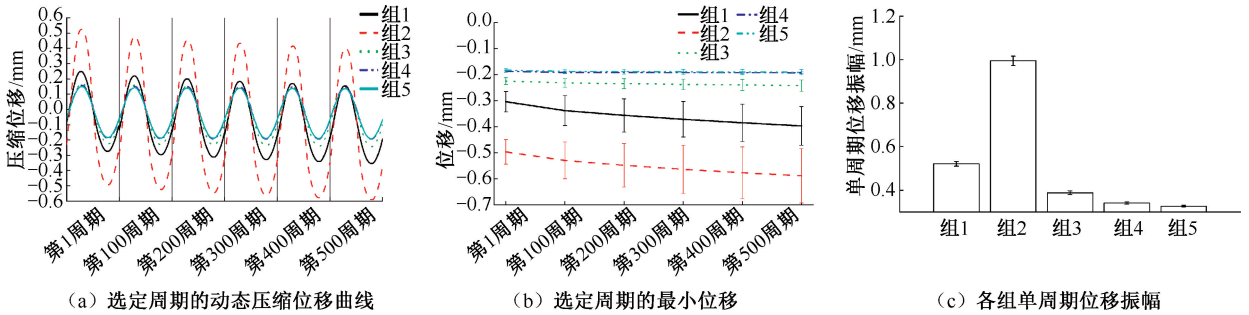


图6 动态稳定性试验结果

Fig. 6 Dynamic stability test results (a) Dynamic compression displacement curve at selected cycles, (b) Minimum displacement at selected cycles, (c) Amplitude for each group at a single cycle

注:图6(b)中组4、组5比较, $P=0.959$ ;其余各组比较, $P < 0.05$ 。图6(c)中各组比较, $P < 0.05$ 。

### 3 讨论

根据 ASTM F543-2013 骨钉测试标准进行拉力钉的抗拔出试验,得到拉力钉实际的最大抗拔出力和有效把持位移。骶髂经皮拉力钉对松质骨的把持能力较弱,容易出现固定失效,影响治疗。针对该问题研制能有效固定松质骨的新型骶髂拉力钉具有重要的临床意义。从试验结果可以看出,新型骶髂拉力钉相对于骶髂经皮拉力钉对松质骨具有更好的把持能力。新型骶髂拉力钉拔出时对周围骨组织的影响相对较小,且新型骶髂拉力钉能够在较大的稳定把持力情况下抵抗较大的拔出位移;而骶髂经皮拉力钉只能在极小的拔出位移内实现有效把持。当超出该位移后,把持力迅速减弱,然后拉力钉固定失效。这些情况均说明新型骶髂拉力钉固定松质骨具有明显优势。

本文发现,新型骶髂拉力钉的最大抗拔出力约为骶髂经皮拉力钉的50%,新型骶髂拉力钉的最大抗拔出力显著小于骶髂经皮拉力钉。新型骶髂拉力钉埋入长度大于20 mm时,其最大抗拔出力大于517 N,接近普通人体自重(600 N)(即新型骶髂拉力钉埋入长度大于20 mm时,拉力钉头略微能竖直吊起1个普通人)。因此,新型骶髂拉力钉使用时

埋入足够的长度也能带来较大的最大抗拔出力,满足临床应用。再次,拉力钉修复骶髂关节损伤,拉力钉主要承受横向载荷,而非拔出载荷,故修复骶髂关节拉力钉的最大抗拔出力满足一定条件即可,过大的最大抗拔出力亦是一种浪费,该条件有利于新型骶髂拉力钉的临床应用。后期研究可以从增加该款新型骶髂拉力钉最大抗拔出力的角度进行改进,例如可通过注射骨水泥增加固定效果。根据新型骶髂拉力钉螺紋具有较大螺旋角的结构特点可以推测,拉力钉拔出能产生较大的旋转扭矩,稳定的固定必然包含可靠的防旋转。螺钉使用过程中的防旋转亦是研究重点,防旋尾卡的形态特点和叶片数量还有待进一步研究优化。股骨 PFNA 螺旋刀片的进钉和退钉问题<sup>[16-17]</sup>,部分因为螺旋刀片防旋不够;PFNA 仅依靠尾端椭圆形结构防旋,防旋能力较差,存在改进空间。

根据研究结果,拉力钉抗拔出试验使用相同材料,在该条件下,新型骶髂拉力钉的松质骨把持性能显著更优。可以推断,在同样骨质疏松的松质骨条件下,新型骶髂拉力钉也有更好的松质骨把持性能<sup>[18]</sup>。对于骨质疏松的松质骨固定,新型骶髂拉力钉的埋入长度应根据实际情况进行一定加长,使新型骶髂拉力钉具备足够大的最大抗拔出力。新型

骶髂拉力钉具备较好的松质骨友好型,不论是修复的静态刚度还是修复后的动态稳定性,新型骶髂拉力钉修复骶髂关节损伤的效果略优于骶髂经皮拉力钉-双钉修复,新型骶髂拉力钉能够满足临床应用要求。对于骨质疏松条件的修复固定,可根据现有研究结论进行推断:对于骨质疏松病患,新型骶髂拉力钉修复骶髂关节损伤的效果接近甚至可能优于骶髂经皮拉力钉-双钉。根据试验结果,动态稳定性测试结果一定程度上亦能反映测试样本的静态刚度,主要观察最小位移的起始值和单周期振幅。在相同的负载加载条件下,最小位移的起始值越小,则该样本刚度越大;单周期振幅越小,该样本刚度越大。该结果只能初步了解样本的整体刚度,静态刚度的详细信息亦需要通过静态刚度试验测试。整体而言,动态稳定性测试结果的刚度推测和静态刚度测试结果吻合,在一定程度上说明了试验的准确性。

采用三棱柱状的多孔植入物融合骶髂关节是现今较热的研究方向<sup>[19-21]</sup>。多孔结构有利于骨长入,后期骨长入之后具有较好的固定效果,但前期固定效果较差。有研究团队采用骨水泥方式加强前期固定,若再次发生骨折,治疗难度会极大提升。总之,多孔结构微小缺陷多,其疲劳寿命短,在未找到极大提高多孔植入物疲劳寿命办法之前,该方法不是一种好的长期治疗方法<sup>[22]</sup>。本文研究植入物相对多孔植入物,螺旋刀片进入皮质骨牢固把持松质骨,具有较好前期、中期、后期固定性能,且产品光滑圆润内部缺陷较少,可以推断其疲劳寿命相对长。

本研究的局限性如下:①由于骨质标本的稀缺性,本文采用聚氨酯材料替代松质骨进行抗拔出对比试验,采用相同的接近松质骨材料推断出结果,后期可采用松质骨标本进行抗拔出试验;②由于获得一定数量的特定骨质疏松标本十分困难,故本文选用正常骨盆标本进行试验。后期可收集到足够骨质疏松标本后补充生物力学试验,探究新型骶髂拉力钉对骨质疏松松质骨的把持效果。

## 4 结论

从拉力钉抗拔出试验聚氨酯材料的破坏情况和有效把持力的位移角度分析,对于松质骨,新研制的拉力钉具有更友好的把持性能,对周围骨质影

响较小,能够实现有效固定。骨盆标本构造的骶髂关节损伤模型修复试验亦表明,新型骶髂拉力钉修复骶髂关节损伤的固定刚度和动态稳定性,一颗新型骶髂拉力钉的固定效果和两个骶髂经皮拉力钉的固定效果相当,充分说明了新型骶髂拉力钉更良好的固定性能。

**利益冲突声明:**无。

**作者贡献声明:**梁成负责设计实验、实施试验、分析数据、论文撰写;卓川川和王冠负责实施实验、数据采集;李文负责数据处理;段可、李忠和鲁晓波负责论文修改;段可负责研究指导;卓乃强负责研究指导、论文修改。

## 参考文献:

- [1] PATEL V. Sacroiliac joint injuries [J]. *Orthopedics*, 2012, 35(5): 398.
- [2] 田大为,蔡林. 骶髂关节脱位骨折内固定治疗进展及生物力学分析[J]. *中国矫形外科杂志*, 2011, 19(12): 1002-1004.
- [3] GIANNIKAS KA, KHAN AM, KARSKI MT, *et al.* Sacroiliac joint fusion for chronic pain: A simple technique avoiding the use of metalwork [J]. *Eur Spine J*, 2004, 13(3): 253-256.
- [4] LEDONIO CG, POLLY DW, SWIONTKOWSKI MF. Minimally invasive versus open sacroiliac joint fusion: Are they similarly safe and effective? [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2014, 472(6): 1831-1838.
- [5] FANG J, DONG H, LI Z. Comparison of curative effects between minimally invasive percutaneous lag screw internal fixation and reconstruction plate for unstable pelvic fractures [J]. *J Coll Physicians Surg Pak*, 2020, 30(1): 28-32.
- [6] 黄公怡. 骨质疏松症骨的组织结构和力学特性[J]. *中华骨科杂志*, 2004(11): 50-53.
- [7] 刘强,胡永成. 骨质疏松性骨折诊疗指南[J]. *中华骨科杂志*, 2017, 37(1): 1-10.
- [8] HOLLENSTEINER M, SANDRIESSER S, BLIVEN E, *et al.* Biomechanics of osteoporotic fracture fixation [J]. *Curr Osteoporos Rep*, 2019, 17(6): 363-374.
- [9] FANG C, LAU TW, WONG TM, *et al.* Sliding hip screw versus sliding helical blade for intertrochanteric fractures: A propensity score-matched case control study [J]. *Bone Joint J*, 2015, 97-B(3): 398-404.
- [10] WÄHNERT D, HOFMANN-FLIRI L, GÖTZEN M, *et al.* Feasibility study on the potential of a spiral blade in osteoporotic distal femur fracture fixation [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2013, 133(12): 1675-1679.

- [11] ASSARI S, KAUFMANN A, DARVISH K, *et al.* Biomechanical comparison of locked plating and spiral blade retrograde nailing of supracondylar femur fractures [J]. *Injury*, 2013, 44(10): 1340-1345.
- [12] FROST HM. Wolff's Law and bone's structural adaptations to mechanical usage: An overview for clinicians [J]. *Angle Orthod*, 1994, 64(3): 175-188.
- [13] 梁成, 张麟麒, 王冠, 等. 不同内植物修复单侧不稳定骨盆后环损伤的有限元及生物力学分析[J]. *中国组织工程研究*, 2024, 28(9): 1336-1341.
- [14] LIANG C, LI CY, QIN XS, *et al.* Biomechanical comparison of the new cross-locking intramedullary nail with tension band wiring for transverse olecranon fractures [J]. *Injury*, 2023(54): S95-S100.
- [15] 童凯, 王钢. 骶髂关节复合体生物力学特征的研究进展[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2018, 20(3): 223-227.
- [16] 刘景一, 杨晓飞, 贺新兵, 等. 股骨近端螺旋刀片抗旋髓内钉治疗股骨粗隆间骨折的并发症及其防治[J]. *中国矫形外科杂志*, 2014, 22(22): 2105-2107.
- [17] CORNELL CN. Internal fracture fixation in patients with osteoporosis [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2003, 11(2): 109-119.
- [18] 梁成, 刘晋琛, 鲁梦婕, 等. 钛合金自攻骨钉力学方程验证及力学性能分析[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(3): 371-376. LIANG C, LIU JH, LU MJ, *et al.* Mechanical equation verification and mechanical property analysis of the TC4 self-tapping bone screw [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(3): 371-376.
- [19] SORIANO-BARON H, LINDSEY DP, RODRIGUEZ-MARTINEZ N, *et al.* The effect of implant placement on sacroiliac joint range of motion: Posterior versus transarticular [J]. *Spine*, 2015, 40(9): E525-E530.
- [20] RUDOLF L. Sacroiliac joint arthrodesis-MIS technique with titanium implants: Report of the first 50 patients and outcomes [J]. *Open Orthop J*, 2012(6): 495-502.
- [21] CHER DJ, RECKLING WC, CAPOBIANCO RA. Implant survivorship analysis after minimally invasive sacroiliac joint fusion using the iFuse Implant System (®) [J]. *Med Devices*, 2015(8): 485-492.
- [22] LI Y, LI W, BOBBERT FSL, *et al.* Corrosion fatigue behavior of additively manufactured biodegradable porous zinc [J]. *Acta Biomater*, 2020(106): 439-449.