

颈椎前路微型记忆加压合金板的体外生物力学研究

刘俭涛¹,徐明国¹,王润青²,王彦飙¹,刁攀³,杨寅⁴,高延征¹

(1 河南省人民医院脊柱脊髓外科 450003 郑州市;2 兰州大学第一医院心脏中心 730000 兰州市;

3 西安交通大学第二附属医院骨科 710004 西安市;4 西安市中心医院骨科 710003 西安市)

【摘要】目的:采用体外生物力学研究方法评估颈椎前路椎间盘切除融合内固定手术的微型记忆加压合金板(GYZ 记忆合金板)置入后的即刻稳定性。方法:6 具新鲜颈椎尸体标本,男性,年龄 55.2±7.1 岁,身高 175.4±3.8cm,体重 72.3±6.0kg。通过薄层 CT 及骨密度检查,排除畸形、骨折、骨质疏松等疾病。所有标本剔除脊柱周围血管、肌肉等软组织,保留韧带、关节囊后,先后制作为生理组、损伤组、新型合金板组、传统钛板组 4 组:生理组为空白对照组;损伤组标本仅将 C3/4 椎间盘破坏;新型合金板组将 C3/4 椎间盘切除后置入椎间融合器,前路辅助 GYZ 记忆合金板融合固定;传统钛板组前路辅助传统钛板固定。每组标本均在前屈、背伸、左右侧弯、左右扭转方向上给予 1.5N·m 的载荷。记录第 3 次试验的结果并对四组标本 C3/4 椎间隙在前屈、背伸、左右侧弯及左右扭转方向上的活动度进行对比分析。结果:术后影像学检查显示置入物位置良好。生理组 C3/4 在前屈、背伸、左侧弯、右侧弯、左旋转、右旋转方向上的活动度分别为 4.8°±0.5°、2.5°±0.1°、2.4°±0.3°、2.6°±0.3°、2.0°±0.2°与 3.9°±0.1°;损伤组分别为 6.0°±0.7°、3.4°±0.3°、3.4°±0.5°、3.8°±0.6°、2.4°±0.9°与 5.7°±1.3°,较生理组明显增大 ($P<0.05$)。新型合金板组 C3/4 椎间隙在上述六个方向上的活动度分别为 0.6°±0.1°、0.4°±0.1°、0.5°±0.1°、0.7°±0.1°、0.6°±0.1°及 1.0°±0.1°,传统钛板组分别为 0.6°±0.1°、0.5°±0.1°、0.5°±0.1°、0.7°±0.1°、0.5°±0.1°与 1.0°±0.1°,两组在各方向上的活动度无明显差异 ($P>0.05$)。结论:微型记忆合金板可以获得与传统钛板相似的固定强度和重建手术部位的即刻稳定性。

【关键词】生物力学研究;尸体标本;颈椎融合术

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2020.03.12

中图分类号:R318.01 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2020)-03-0263-07

In vitro biomechanical study of anterior cervical micromemory compression alloy plate/LIU Jiantao, XU Mingguo, WANG Runqing, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2020, 30(3): 263-269

【Abstract】 Objectives: To evaluate the immediate stability of a new miniature memory compression alloy plate (GYZ memory alloy plate) for anterior cervical discectomy and fusion through biomechanical test in fresh cadaver specimens. **Methods:** Thin layer CT scan and bone density examination were on the cervical spine of 6 fresh cadaveric specimens (male, average age: 55.2±7.1 years old, average height: 175.4±3.8cm, average weight: 72.3±6.0kg) to exclude fractures, deformities and osteoporosis. All specimens were removed from peripheral blood vessels, muscles and other soft tissues, while ligaments and joint capsules were retained. Then, the specimens were divided into intact group, injury group, new alloy plate group and traditional titanium plate group. In the intact group no treatment was given. In the injury group, only the C3/4 intervertebral disc was damaged. In the new prosthesis group, C3/4 intervertebral fusion and fixation with GYZ memory alloy plate was given. In the traditional titanium plate group, C3/4 intervertebral fusion and fixation with traditional titanium plate was given. Each group was loaded under 1.5N·m in the direction of flexion, extension, left and right lateral bending and left and right torsion. The results of the third experiment were recorded and the range of motion (ROM) of C3/4 intervertebral disc in flexion, extension, left and right lateral bending and left and right torsion direction of the four groups were collected and analyzed. **Results:**

基金项目:2016 年河南省科技攻关项目,数字化精准脊柱外科技术系统的构建和临床应用(编号:162102310018);河南省科技创新杰出人才项目,复杂脊柱疾病及脊髓损伤的治疗相关数字化技术的建立及开发(编号:154200510027)

第一作者简介:男(1989-),主治医师,博士,研究方向:骨科新型内置物的研制及相关基础研究

电话:(029)87679601 E-mail:liujiantao2010xjtu@163.com

通讯作者:高延征 E-mail:doctorgao63@163.com

Postoperative imaging showed that the position of the prostheses was normal. In the intact group, the ROMs of C3/4 disc in flexion, extension, left lateral bending, right lateral bending, left rotation and right rotation were $4.8^{\circ}\pm 0.5^{\circ}$, $2.5^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$, $2.4^{\circ}\pm 0.3^{\circ}$, $2.6^{\circ}\pm 0.3^{\circ}$, $2.0^{\circ}\pm 0.2^{\circ}$ and $3.9^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$, respectively. The ROMs of C3/4 disc in the injury group were respectively $6.0^{\circ}\pm 0.7^{\circ}$, $3.4^{\circ}\pm 0.3^{\circ}$, $3.4^{\circ}\pm 0.5^{\circ}$, $3.8^{\circ}\pm 0.6^{\circ}$, $2.4^{\circ}\pm 0.9^{\circ}$ and $5.7^{\circ}\pm 1.3^{\circ}$. Compared with the intact group, the C3/4 ROMs in the injury group in flexion, extension, lateral bending and rotation direction increased significantly ($P<0.05$). The C3/4 ROMs in the new alloy plate group in the above six directions were $0.6^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$, $0.4^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$, $0.5^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$, $0.7^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$, $0.6^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$ and $1.0^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$, respectively, while those in the traditional titanium plate group were $0.6^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$, $0.5^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$, $0.5^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$, $0.7^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$, $0.5^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$ and $1.0^{\circ}\pm 0.1^{\circ}$. The ROMs of the new alloy plate group and the traditional titanium plate group decreased significantly in the above directions ($P<0.05$). There was no significant difference in ROMs between the new alloy plate group and the traditional titanium plate group in the above directions ($P>0.05$). **Conclusions:** The miniature memory alloy plate can obtain the fixation strength and the immediate stability of the operation site similar to the traditional titanium plate.

[Key words] Biomechanics; Cadaveric specimens; Fusion; Cervical spine

[Author's address] Department of Spine Surgery, Henan Provincial People's Hospital, Zhengzhou, 450003, China

目前,治疗颈椎病的经典术式有前路颈椎椎间盘切除融合术(anterior cervical discectomy and fusion, ACDF)^[1]、前路颈椎椎体次全切除融合术(anterior cervical corpectomy and fusion, ACCF)^[2]及后路颈椎椎管扩大椎板成形术^[3,4]等。ACDF自20世纪50年代被Smith-Robinson^[5]首次报道以来,已经在临床上广泛推广普及^[6-8]。传统的ACDF常需要使用前路钛板固定,以增加减压节段的稳定性、提高融合率^[9,10]。然而,钛板的使用可增加术后吞咽困难、邻近节段骨化的发生率^[11,12]。究其原因,可能与传统钛板体积较大、弹性模量较高有一定关系^[13]。为减少此类并发症的发生,零切迹自稳型颈椎融合器开始被临床医生所关注,该假体在重建颈椎生理曲度、降低术后吞咽困难等并发症方面疗效显著^[14-16]。但也有部分生物力学及临床随访的研究表明,零切迹自稳定型颈椎融合器在骨性融合率和重建脊柱稳定性方面,劣于传统钛板^[17]。如何弥补上述二者的不足,成为当前脊柱内固定材料研究的热点。

Ni-Ti合金是一种形状记忆合金,因其独特的形状记忆功能以及高耐磨性、超弹性、生物相容性好等优势,已广泛应用于骨科内置物的制作,如Ni-Ti记忆合金指、Ni-Ti髌骨爪、Ni-Ti记忆合金环抱器等^[18,19]。鉴于该材料的优良生物力学性能,我们研制了一种适用于颈椎前路椎间盘切除融合内固定的新型内固定板——GYZ记忆合金板,获得了国家发明专利(专利号:ZL200810141238.0)。前期临床研究表明,该内固定板与传统钛板具有

手术时间短、创伤小、置入方便等优势^[20]。

为评估新型假体与传统钛板在颈椎前路椎间盘切除融合内固定中的生物力学性能,本研究通过新鲜尸体标本体外力学研究,与传统钛板相比在重建颈椎稳定性方面的差异等进行对比,以期为其临床的进一步推广应用奠定生物力学基础。

1 材料与方法

1.1 假体设计

该假体由两部分构成:加压部件和固定部件。加压部件呈圆环状,中间有便于夹持的横梁,该部分在冰盐水中可以在外力作用下进行一定程度的变形,而在温开水中会自动恢复到原来形状;固定部件呈四棱柱状,对称的位于加压部件两端,其末端设有锯齿状倒刺结构,主要置入邻近椎体内部,防止脱位,起到良好的固定作用。整个假体由医用镍钛记忆合金一体加工而成(图1)。

1.2 标本获取及筛选

本研究严格按照世界医学会伦理规范(赫尔辛基宣言)执行,并获得了郑州大学生物医学伦理委员会的批准。所有标本都获得尸体捐赠亲属的知情同意。标本纳入标准:(1)年龄在18岁以上;(2)生前无颈椎骨折、感染、畸形;(3)颈椎无骨质疏松。6具男性新鲜颈椎尸体标本由河南省漯河医学高等专科学校解剖教研室提供,平均年龄 55.2 ± 7.1 岁,平均身高 175.4 ± 3.8 cm,平均体重 72.3 ± 6.0 kg。所有标本行薄层CT扫描(GE Lightspeed VCT-xt 64,层厚0.625mm,电压

140kV, 扫描电流:350mA)及骨密度(MEDIX90, French MrStowe, France)检查,排除骨折、畸形、骨质疏松等疾病(图 2)。标本骨密度均正常($1.012 \pm 0.005 \text{g/cm}^2$)。入选标本剔除脊柱周围的肌肉及软组织,保留椎间盘、韧带及小关节突,用双层塑料袋包裹,于 -20°C 冰箱中冷冻保存,以备后续建模及生物力学测试。

1.3 模型建立

所有颈椎标本仅保留 C2-5 节段,用自凝水与牙托粉(液粉比 1:3)调和成的包埋剂对 C2、C5 进行包埋固定。根据 Gonzalez-Blohm 等^[21]报告的脊柱内置物体外稳定性测试操作规范,包埋固定时需标本位于铸模工具固定槽的中心位置,使 C3/4 椎间隙平行于上、下两个包埋块。所有标本先后作为生理组、损伤组、新型合金板组及传统钛板组。生理组为空白对照组;损伤组将 C3/4 椎间盘破坏;新型合金板组将 C3/4 椎间盘切除后置入椎间融合器,前路辅助 GYZ 记忆合金板融合固定(图 3a);传统钛板组前路辅助传统钛板固定(图 3b)。新型合金板组及传统钛板组术后均行 CT 薄层扫描及 X 线检查,评估假体位置是否合适。

1.4 体外生物力学实验

分别在标本 C3、C4、C5 椎体上设置标记物(图 3c),通过图像采集转化系统将标记物间的相对运动转化为角度。各组标本均在前屈、背伸、左右侧弯、左右扭转方向上给予 $1.5 \text{N}\cdot\text{m}$ 的载荷^[22],每个运动重复 3 次,以第 3 次试验结果进行统计

学分析,以消除组织的蠕变效应。每组标本测试结束后,需要间隔 2d,给标本一定的缓冲,再进行下一组测试。记录最大载荷下各组标本 C3/4 椎间隙在各个方向上的活动度,并进行对比分析(图 3c、d)。整个实验过程中每 5min 向标本表面喷洒生理盐水,以保持标本湿润。

1.5 统计学分析

实验过程中所有数据均采用 SPSS Statistics 21 软件(IBM,美国)进行统计学分析。骨密度、C3/4 运动范围均以均值 \pm 标准差(mean \pm S.D.)表示。各组标本 C3/4 椎间隙的活动度采用单因素方差分析和两两比较的 LSD-t 检验。检验水准 α 取双侧 0.05。

2 结果

2.1 模型建立后的影像学评估

新型合金板组与传统钛板组所有假体置入位置均良好,与邻近椎体固定牢靠,颈椎生理曲度及椎间隙高度被有效重建,未见脊髓压迫及螺钉断裂、内固定进入椎管等并发症(图 4)。

2.2 体外力学实验

各组标本 C3/4 椎间隙在前屈、背伸、左右侧弯、左右扭转方向上的活动度及对比分析结果见表 1。由实验结果可知,损伤组 C3/4 椎间隙在上述六个方向上的活动度较生理组、传统钛板组及新型合金板组明显升高,差异具有统计学意义($P < 0.05$)。与生理组相比,传统钛板组与新型合金

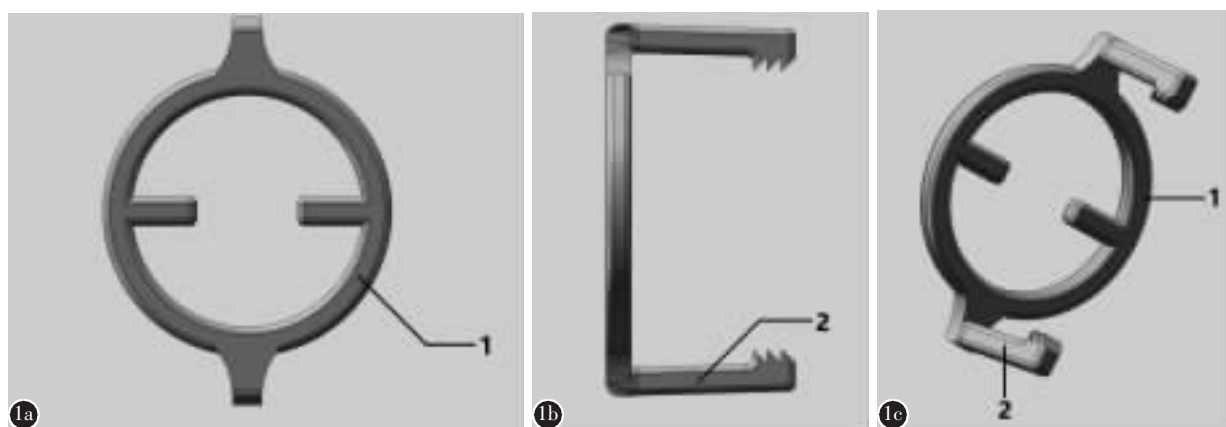


图 1 GYZ 记忆合金板三维模型示意图 a GYZ 记忆合金板正视图 b GYZ 记忆合金板侧视图 c GYZ 记忆合金板斜视图。1 为 GYZ 记忆合金板加压部件,2 为 GYZ 记忆合金板固定部件

Figure 1 Schematic diagram of 3D model of GYZ memory alloy plate a The front view of GYZ memory alloy plate b The lateral view of GYZ memory alloy plate c the oblique view of GYZ memory alloy plate. 1 refers to the pressurized parts of GYZ memory alloy plate, 2 refers to the fixed parts of GYZ memory alloy plate

板组 C3/4 椎间隙活动度在各个方向明显降低, 差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。与传统钛板组相比, 新型合金板组在前屈、背伸、左右侧弯、左右扭转方向上的活动度无明显差异 ($P > 0.05$)。

3 讨论

ACDF 目前已成为颈椎病的常用治疗术式, 该术式常常将病灶椎间盘完全切除, 对受压脊髓或神经根进行充分减压, 然后置入椎间融合器, 同时前方辅助钛板融合固定, 从而重建手术部位的生理曲度及稳定性。然而, 术后患者常常存在吞咽困难, 颈部异物感等不适症状, 术后早期发生率高达 79%^[23]。此外, 长期临床随访结果亦显示存在着异位骨化、邻近椎间盘退变加速等并发症^[24,25], 究

其原因可能与钛板体积大, 弹性模量高等有关。为降低前路钛板体积过大引起的并发症, 诸多学者开展零切迹椎间融合器的研制, 在临床上也获得一定的应用并取得了较满意的效果。但该假体对于高位或者低位颈椎椎间隙, 由于下颌骨或胸骨的遮挡, 存在着置入螺钉困难的弊端, 增加了手术难度。此外, 部分研究显示其固定后的力学强度难以与前路钛板相媲美。鉴于上述内置物的不足, 研制一种综合传统钛板与零切迹椎间融合器双重优势的新型内置物具有重要临床意义。

镍钛记忆合金是一种能将自身的塑性变形在特定温度下自动恢复为原始形状的特殊合金, 伸缩率在 20% 以上, 具有耐磨损、抗腐蚀、高阻尼和超弹性等优点, 在医学和航天等领域获得了较广

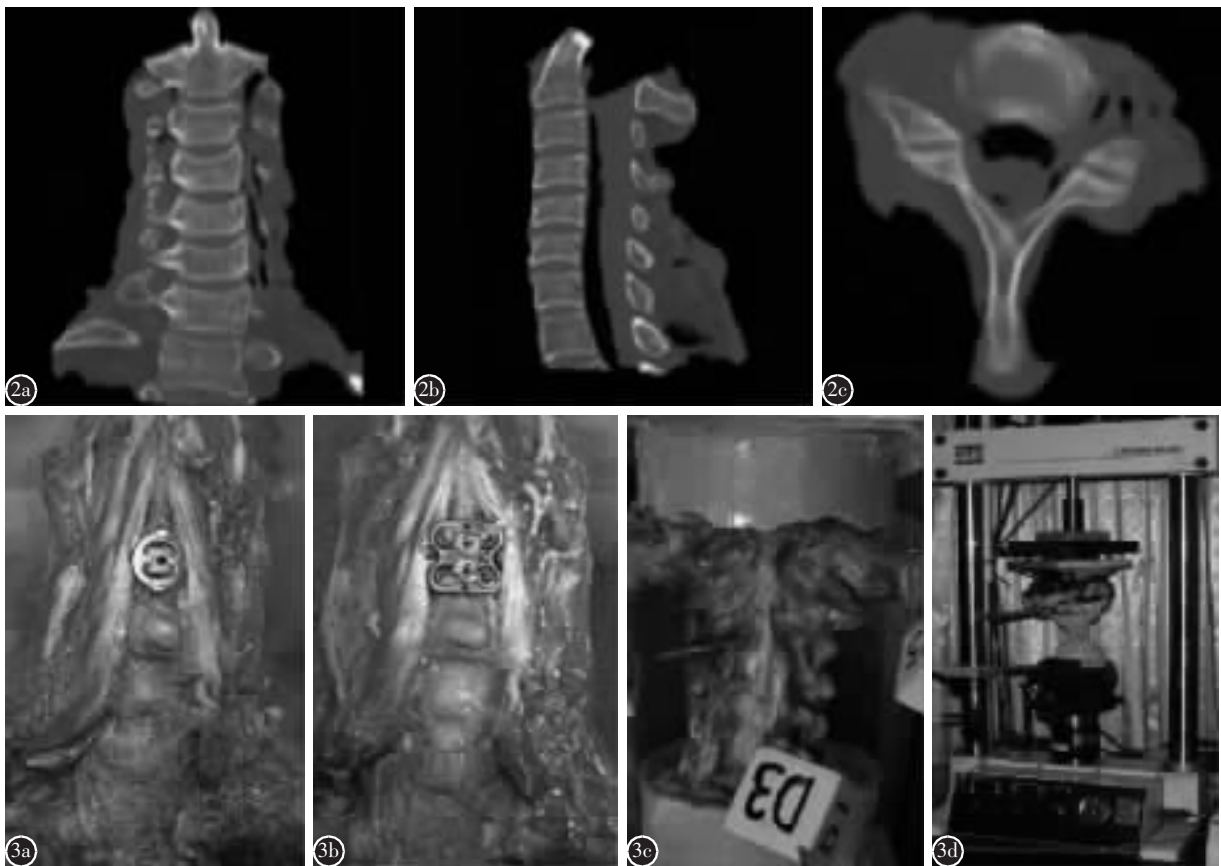


图 2 行 CT 薄层扫描筛查的颈椎标本 a 冠状位 CT 图像 b 矢状位 CT 图像 c 水平位 CT 图像, 所有平面均未见椎体骨折、畸形等疾病 图 3 置入假体后的大体标本及生物力学测试图 a 置入 GYZ 记忆合金板的颈椎标本 b 置入传统钛板的颈椎标本 c 设有测量标记物的颈椎标本 d 处于体外力学测试中的标本

Figure 2 Cervical spine specimens screened by CT thin-layer scanning a Coronal CT image b Sagittal CT image c Horizontal CT image. No vertebral fracture, deformity and other diseases were found in all planes **Figure 3** Gross specimen after implantation and biomechanical test diagram a Cervical spine specimens implanted with GYZ memory alloy plates b Cervical spine specimens implanted with traditional titanium plates c Cervical spine specimens with measurement markers d A specimen in an in vitro mechanical test

泛的应用。基于我国健康成人颈椎解剖参数设计的 GYZ 记忆合金板分为 5 种规格,其加压部件和固定部件均由镍钛记忆合金一体成型,两者无缝衔接。与传统钛板、零切迹椎间融合器相比,无需螺钉固定,避免了螺钉脱出、松动的风险。此外,该

假体在一定温度下具有可逆形变的功能,置入后可以对病灶椎间隙进行持续加压,以促进手术部位的骨整合。由于镍钛记忆合金具有较好的弹性,新型假体置入后理论上可以降低手术部位固定刚度,一定程度上降低应力屏蔽,减缓邻近椎间隙退

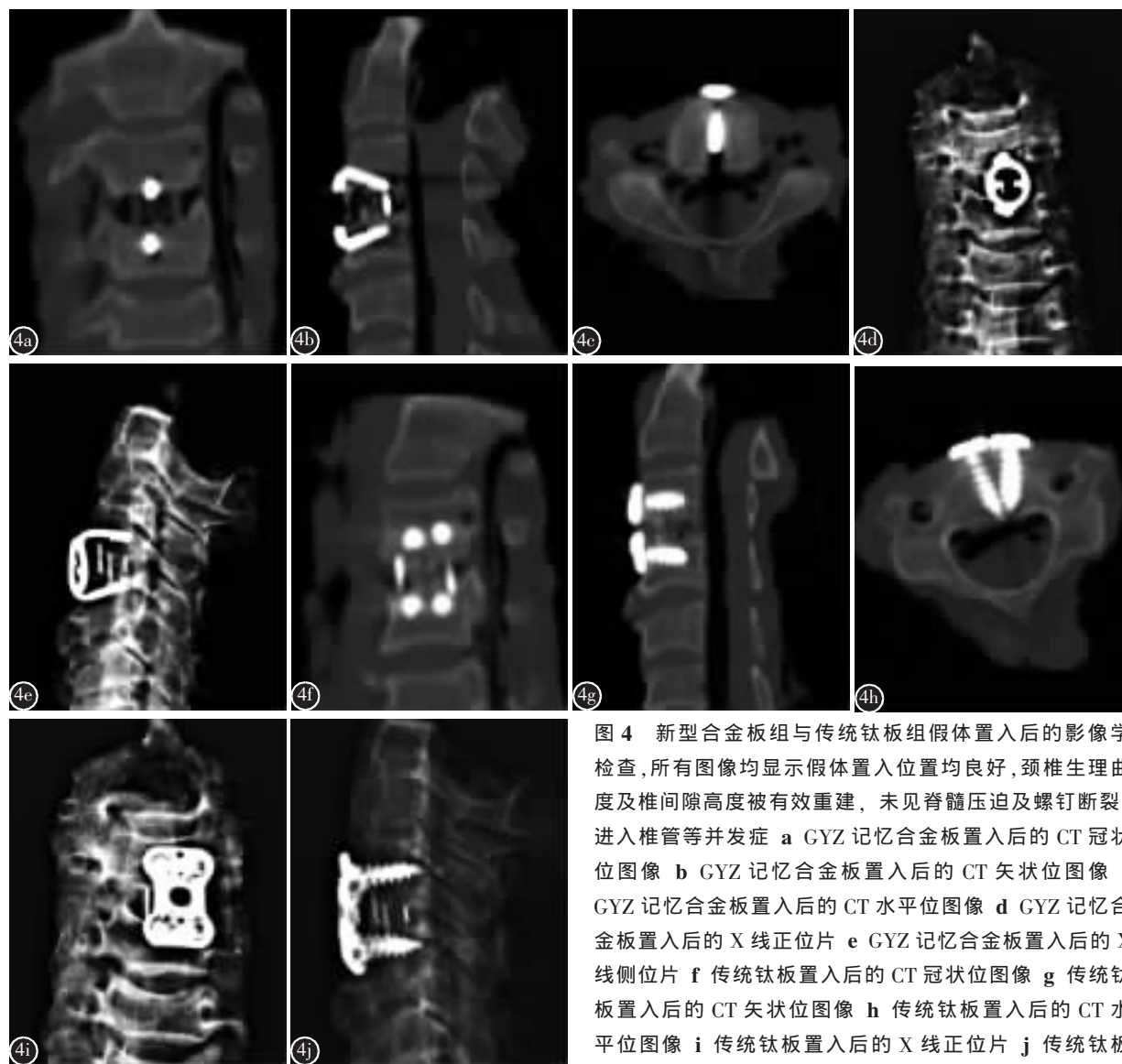


图 4 新型合金板组与传统钛板组假体置入后的影像学检查,所有图像均显示假体置入位置均良好,颈椎生理曲度及椎间隙高度被有效重建,未见脊髓压迫及螺钉断裂、进入椎管等并发症 a GYZ 记忆合金板置入后的 CT 冠状位图像 b GYZ 记忆合金板置入后的 CT 矢状位图像 c GYZ 记忆合金板置入后的 CT 水平位图像 d GYZ 记忆合金板置入后的 X 线正位片 e GYZ 记忆合金板置入后的 X 线侧位片 f 传统钛板置入后的 CT 冠状位图像 g 传统钛板置入后的 CT 矢状位图像 h 传统钛板置入后的 CT 水平位图像 i 传统钛板置入后的 X 线正位片 j 传统钛板置入后的 X 线侧位片

Figure 4 Imaging examination after implantation. All images showed that the placement of the prosthesis was good, the physiological curvature of the cervical spine and the height of intervertebral space were effectively reconstructed, and no complications such as spinal cord compression, screw fracture and entry into the spinal canal were observed a CT coronal images after implantation of the GYZ memory alloy plate b CT sagittal images after implantation of the GYZ memory alloy plate c CT horizontal images after implantation of the GYZ memory alloy plate d Positive X-ray images after implantation of GYZ memory alloy plate e Lateral X-ray images after implantation of GYZ memory alloy plate f CT coronal images after implantation of the traditional titanium plates g CT sagittal images after implantation of the traditional titanium plates h CT horizontal images after implantation of the traditional titanium plates i Positive X-ray images after implantation of traditional titanium plates j Lateral X-ray images after implantation of traditional titanium plates

表 1 各组 C3/4 椎间隙在不同方向上的活动度($^{\circ}$, $\bar{x}\pm s$)

Table 1 The ROMs of C3/4 disc in different directions in each group

	生理组 Intact group	损伤组 Injury group	新型合金板组 New prosthesis group	传统钛板组 Traditional plate group
前屈 Flexion	4.8±0.5	6.0±0.7 ^①	0.6±0.1 ^{①②}	0.6±0.1 ^{①②}
背伸 Extension	2.5±0.1	3.4±0.3 ^①	0.4±0.1 ^{①②}	0.5±0.1 ^{①②}
左侧弯 Left lateral bending	2.4±0.3	3.4±0.5 ^①	0.5±0.1 ^{①②}	0.5±0.1 ^{①②}
右侧弯 Right lateral bending	2.6±0.3	3.8±0.6 ^①	0.7±0.1 ^{①②}	0.7±0.1 ^{①②}
左扭转 Left rotation	2.0±0.2	2.4±0.9 ^①	0.6±0.1 ^{①②}	0.5±0.1 ^{①②}
右扭转 Right rotation	3.9±0.1	5.7±1.3 ^①	1.0±0.1 ^{①②}	1.0±0.1 ^{①②}

注:①与生理组比较 $P<0.05$;②与损伤组比较 $P<0.05$ Note: ①Compared with intact group, $P<0.05$; ②Compared with injury group, $P<0.05$

变。此外,该假体与传统钛板相比亦具有结构简单、体积小、置入方便等优势。

体外生物力学测试根据测试目的分为破坏性与非破坏性两大类。前者检测内置物承受生理载荷的力学性能及抗疲劳性能等,后者主要评估内置物对脊柱稳定性的影响。本研究属于非破坏性体外力学测试,将 6 组标本先后作为生理组、损伤组、新型合金板组和传统钛板组。为了尽可能避免标本重复测试对结果造成的影响,我们在所有测试均采用对标本无损伤的载荷。根据诸多颈椎体外力学测试文献报道^[22],特将 $1.5\text{N}\cdot\text{m}$ 作为此次力学测试的最大载荷。生理组 C3/4 椎间隙在前屈、背伸、左右侧弯及左右扭转方向上的活动度与部分力学测试结果相似,证明我们此次体外力学测试建模成功。

根据体外力学测试的结果显示损伤组 C3/4 椎间隙在前屈、背伸、左右侧弯左右扭转方向上的活动度较生理组明显升高,这与椎间盘病变后引起椎间隙失稳相一致。传统钛板组 C3/4 椎间隙在上述 6 个方向上的活动度较生理组与损伤组明显降低且差异有统计学意义,说明传统钛板辅助固定可以使术后部位获得更好的即刻稳定性。与生理组和损伤组相比,新型合金板组 C3/4 椎间隙活动度亦明显减小且差异具有统计学意义,而与传统钛板组相比其在上述各个方向上的活动度无明

显差异,表明新型合金板组亦可使手术部位获得较好的即刻稳定性,而且其固定强度与传统钛板相似。

虽然本实验证实了新型假体可以像传统钛板一样重建脊柱的稳定性,但仍存在一些缺陷和不足:(1)实验样本量小,需提高样本量以进一步验证。(2)尽管体外力学实验可以在一定程度上模拟脊柱的生理运动,但与临床实际仍然不同。新型假体置入人体后的具体疗效还需要进一步的临床验证。(3)本研究仅验证了假体置入后重建脊柱的即刻稳定性,而新假体置入后重建脊柱的长期稳定性、抗疲劳性、屈服强度以及对相邻椎间盘应力的影响尚需进一步实验研究。

4 参考文献

- Cheung ZB, Gidumal S, White S, et al. Comparison of anterior cervical discectomy and fusion with a stand-alone interbody cage versus a conventional cage-plate technique: A systematic review and Meta-analysis[J]. *Global Spine J*, 2019, 9(4): 446-455.
- Yang S, Yang D, Ma L, et al. Clinical efficacy of laminectomy with instrumented fixation in treatment of adjacent segmental disease following ACCF surgery: a retrospective observational study of 48 patients[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 6551.
- Moon BJ, Kim D, Shin DA, et al. Patterns of short-term and long-term surgical outcomes and prognostic factors for cervical ossification of the posterior longitudinal ligament between anterior cervical corpectomy and fusion and posterior laminoplasty[J]. *Neurosurg Rev*, 2019, 42(4): 907-913.
- Qin R, Chen X, Zhou P, et al. Anterior cervical corpectomy and fusion versus posterior laminoplasty for the treatment of oppressive myelopathy owing to cervical ossification of posterior longitudinal ligament: a meta-analysis [J]. *Eur Spine J*, 2018, 27(6): 1375-1387.
- Smith GW, Robinson RA. The treatment of certain cervical-spine disorders by anterior removal of the intervertebral disc and interbody fusion[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1958, 40-A(3): 607-624.
- Mazas S, Benzakour A, Castelain JE, et al. Cervical disc herniation: which surgery?[J]. *Int Orthop*, 2019, 43(4): 761-766.
- Schroeder GD, Kurd MF, Millhouse PW, et al. Performing an anterior cervical discectomy and fusion [J]. *Clin Spine Surg*, 2016, 29(5): 186-190.
- Guan L, Hai Y, Yang JC, et al. Anterior cervical discectomy and fusion may be more effective than anterior cervical corpectomy and fusion for the treatment of cervical spondylotic myelopathy[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2015, 16: 29.

9. Sugawara T. Anterior cervical spine surgery for degenerative disease: A review[J]. *Neurol Med Chir(Tokyo)*, 2015, 55(7): 540-546.
10. Fujibayashi S, Neo M, Nakamura T. Stand-alone interbody cage versus anterior cervical plate for treatment of cervical disc herniation: sequential changes in cage subsidence[J]. *J Clin Neurosci*, 2008, 15(9): 1017-1022.
11. 陆英杰, 鲍卫国, 杨惠林, 等. 颈椎前路术后吞咽困难的研究进展[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2018, 11(3): 227-232.
12. Park JB, Cho YS, Riew KD. Development of adjacent-level ossification in patients with an anterior cervical plate[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2005, 87(3): 558-563.
13. Lee MJ, Bazaz R, Furey CG, et al. Influence of anterior cervical plate design on dysphagia: a 2-year prospective longitudinal follow-up study[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2005, 18(5): 406-409.
14. 戎玉罗, 罗勇骏, 刘蔚, 等. 零切迹自稳型颈椎融合器在前路颈椎间盘切除融合术中的应用及其对吞咽困难和邻近节段骨化的影响[J]. *脊柱外科杂志*, 2019, 17(2): 73-78.
15. Shi S, Liu ZD, Li XF, et al. Comparison of plate-cage construct and stand-alone anchored spacer in the surgical treatment of three-level cervical spondylotic myelopathy: a preliminary clinical study[J]. *Spine J*, 2015, 15(9): 1973-1980.
16. He S, Feng H, Lan Z, et al. A randomized trial comparing clinical outcomes between zero-profile and traditional multi-level anterior cervical discectomy and fusion surgery for cervical myelopathy[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2018, 43(5): E259-E266.
17. Zhu D, Zhang D, Liu B, et al. Can self-locking cages offer the same clinical outcomes as anterior cage-with-plate fixation for 3-level anterior cervical discectomy and fusion (ACDF) in mid-term follow-up?[J]. *Med Sci Monit*, 2019, 25: 547-557.
18. Andreasen GF, Hilleman TB. An evaluation of 55 cobalt substituted nitinol wire for use in orthodontics[J]. *J Am Dent Assoc*, 1971, 82(6): 1373-1375.
19. 魏新锁, 文凯, 胡柯军, 等. 记忆合金聚醚醚治疗髌骨骨折 65 例[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2010, 25(12): 1113-1114.
20. 刘晓曦, 高坤, 高延征. GYZ 型颈前路记忆加压固定器的临床疗效观察[J]. *郑州大学学报(医学版)*, 2015, 50(5): 710-713.
21. Gonzalez-Blohm SA, Doulgeris JJ, Lee WR, et al. The current testing protocols for biomechanical evaluation of lumbar spinal implants in laboratory setting: a review of the literature[J]. *Biomed Res Int*, 2015, 2015: 506181. doi: 10.1155/2015/506181.
22. Schleicher P, Onal MB, Hemberger F, et al. The C2-pars interarticularis screw as an alternative in atlanto-axial stabilization. A biomechanical comparison of established techniques[J]. *Turk Neurosurg*, 2018, 28(6): 995-1004.
23. Riley LR, Vaccaro AR, Dettori JR, et al. Postoperative dysphagia in anterior cervical spine surgery[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2010, 35(9 Suppl): S76-S85.
24. Nanda A, Sharma M, Sonig A, et al. Surgical complications of anterior cervical discectomy and fusion for cervical degenerative disk disease: a single surgeon's experience of 1, 576 patients[J]. *World Neurosurgery*, 2014, 82(6): 1380-1387.
25. Fountas KN, Kapsalaki EZ, Nikolakakos LG, et al. Anterior cervical discectomy and fusion associated complications [J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2007, 32(21): 2310-2317.

(收稿日期:2019-12-13 修回日期:2020-02-28)

(英文编审 庄乾宇/谭 啸)

(本文编辑 姜雅浩)