

## · 基础研究 ·

# 脊柱颈胸段全脊椎切除术内固定重建的生物力学

滕红林<sup>1</sup>, 肖建如<sup>2</sup>, 倪向明<sup>1</sup>, 王健<sup>1</sup>, 魏海峰<sup>2</sup>, 贾连顺<sup>2</sup>, 徐华梓<sup>3</sup>, 池永龙<sup>3</sup>

(1. 温州医学院附属第一医院骨科, 浙江 温州 325000; 2. 上海长征医院骨科; 3. 温州医学院第二医院骨科)

**【摘要】** 目的: 研究颈胸段脊柱肿瘤在 T<sub>1</sub> 椎体全脊椎切除术后, 前路、后路或者前后联合内固定重建方法的生物力学的优缺点。方法: 使用 6 具颈胸段脊柱标本。在完整状态进行力学分析后, T<sub>1</sub> 椎椎根据 WBB 脊柱肿瘤解剖区域分类依次切除。然后前路利用颈椎前路带锁 Orion 钢板和钛网进行固定和重建, 后路利用 SUMM II 方向螺钉枕颈胸钉棒系统或者联合前后路两种重建方法进行测试。在非破坏性生物力学状态下进行屈伸和左右侧屈等不同工况下测试。结果: T<sub>1</sub> 椎全脊椎切除术后, 前路钢板固定加后路短节段的椎弓根螺钉固定, 其刚度优于单纯后路双节段的经椎弓根螺钉固定。前路钢板固定加后路双节段的椎弓根螺钉固定, 其刚度优于前路钢板固定加后路单节段的椎弓根螺钉固定, 但两者之间无显著性差异。全脊椎切除后, 单纯前后钢板固定, 其刚度下降明显, 在肋椎关节切除后, 已近失稳。结论: 临床上在全脊椎切除后, 尽可能采用前后联合固定, 后路可以采用单节段的经椎弓根螺钉固定。临床医师应该注意的是, 全脊椎切除后, 单纯前路钢板固定, 稳定性较差, 尤其在患者肋椎关节已被肿瘤破坏的情况下, 稳定性更差。

**【关键词】** 颈椎; 胸椎; 骨折固定术, 内; 生物力学

**Biomechanical evaluation of spinal reconstruction for the total spondylectomy in the cervicothoracic spine** TENG Hong-lin<sup>\*</sup>, XIAO Jian-nu, NIXiangming, WANG Jian, WEI Hai-feng, JIA Lian-shun, XU Hua-zhi, CHI Yong-long<sup>\*</sup> Department of Orthopaedics, the First Affiliated Hospital of Wenzhou Medical College, Wenzhou 325000, Zhejiang, China

**ABSTRACT Objective:** To investigate the stiffness of anterior, posterior and circumferential spinal reconstructions for different anatomic stages of tumor lesion so as to effectively treat with the tumorous lesion in the cervicothoracic spine **Methods:** Six human cadaveric cervicothoracic spines were studied. The T<sub>1</sub> vertebral body and posterior elements were resected in sequence based on the Weinstein-Boriani-Biagini (WBB) anatomic zone classification for tumor lesion in the spine. Anterior reconstruction with titanium mesh and Orion plates systems, posterior reconstruction with the SUMM II universal-axial transpedicular rod-screw systems or both of them were used in the reconstruction after the spondylectomy of the T<sub>1</sub> vertebra. Nondestructive biomechanical test was performed under different loading situations. **Results:** There were no statistical differences observed between the group of S+AP+PPS+M and the group of S+AP+PPS+S, even if the stiffness of group S+AP+PPS+M was higher than that of the group of S+PPS+S. Anterior instrumentation alone for total spondylectomy did not restore stiffness to the intact level, and it was more deteriorated when the costovertebral joint were destructed by the tumor. **Conclusion:** The instrumentation of S+AP+PPS+S is the optimal reconstruction method though S+AP+PPS+M provide more stability, but they do not demonstrate statistical difference. Attention should be paid that anterior reconstruction alone could not exhibited more stability than that of the intact spine when the T<sub>1</sub> total spondylectomy is performed, especially when the costovertebral joints are destructed in certain circumstances.

**Key words** Cervical vertebrae; Thoracic vertebrae; Fracture fixation, internal; Biomechanics

基金项目: 温州医学院科研发展基金 (编号: Z01)

通讯作者: 滕红林 Tel: 0577-88078234 E-mail: honlinten@yahoo.com.cn

手术切除肿瘤、脊髓减压和植骨融合及内固定重建脊柱稳定性仍是目前治疗脊柱肿瘤的有效方法之一。但常规的脊

椎肿瘤刮除或者病灶内切除,常常导致局部的高复发率。为了减少局部复发率,有人提出全脊椎的手术切除方法。从生物力学观点来看,全脊椎切除是脊柱稳定性重建中最为困难的。对椎体次切后的生物力学研究已经比较多<sup>[1,2]</sup>,对脊柱全脊椎重建的研究却极少<sup>[3]</sup>,尤其对颈胸段脊柱的全脊椎切除术,至今未有文献报道。本文为此对颈胸段脊柱进行研究,根据 WBB (Weinstein-Boriani-Biagini) 脊柱骨肿瘤的分期,研究模拟颈胸段脊柱肿瘤在椎体切除、全脊椎切除术后,利用前路、后路或前后联合入路内固定重建脊柱稳定性的生物力学。

### 1 材料与方法

#### 1.1 标本制备

**1.1.1 标本制作** 本实验采用 6 具成人新鲜颈胸段脊柱标本 (C<sub>3</sub> - T<sub>5</sub>), 年龄 22 ~ 43 岁, 平均 36 岁。X 线排除畸形、肿瘤等病变。进行 DXEA 双能 X 线吸收骨密度仪测试 BMD, 剔除了骨密度明显低于正常的标本。仔细剔除肌肉和脂肪组织, 保留韧带、骨性结构和小关节囊完整。双层塑料袋密封, - 20 低温冰箱保存。标本保存时处于自然中立位。

**1.1.2 标本分组** 根据 WBB 分期, 模拟 T<sub>1</sub> 椎体肿瘤的切除方式。椎体切除术切除 5 ~ 8 区; 全脊椎切除术切除 1 ~ 12 区<sup>[4]</sup>。

**1.1.3 脊椎切除和重建方法** 前路椎体重建在 C<sub>7</sub> 和 T<sub>2</sub> 椎体之间进行。脊椎切除方法包括椎体切除和全脊椎切除。用钛网等重建椎体, 然后用前路 Orion 钢板 (枢法模产品), 后路内固定系统为 SUMM II 系统 (Depuy Acro Med, 强生产品), 颈椎、胸椎均用经椎弓根螺钉。模拟临床上因为肿瘤不同破坏

程度, 分为不同的颈胸段脊柱的内固定重建方式分组: 完整标本 (intact specimen, IS); 椎体切除 + 前路钢板固定 (corpectomy + anterior plating, C + AP); 全脊椎切除 + 钛网重建 + 前路钢板固定 (spondylectomy + Titanium mesh reconstruction and anterior plating, S + AP) (见图 1); 全脊椎切除 + 另切除 T<sub>1</sub> 的肋椎关节以模拟椎旁肋椎关节破坏 + 前路钢板固定 (spondylectomy + costovertebral joint destruction + anterior plating, S + CVD + AP); 全脊椎切除 + 前路钢板 + 后路颈胸椎弓根固定 + 单节段固定 (spondylectomy + anterior plating + posterior pedicle screw + single level, S + AP + PPS + S) (见图 2); 全脊椎切除 + 前路钢板 + 后路颈胸椎弓根固定 + 双节段固定 (spondylectomy + anterior plating + posterior pedicle screw + multiple level, S + AP + PPS + M) (见图 3, 4); 全脊椎切除 + 后路颈胸椎弓根固定 + 双节段固定 (spondylectomy + posterior pedicle screw + multiple level, S + PPS + M); 全脊椎切除 + 后路颈胸椎弓根固定 + 单节段固定 (spondylectomy + posterior pedicle screw + single level, S + PPS + S)。

#### 1.2 实验准备

**1.2.1 制作骨水泥平台及传感器、位移的测定** 在实验标本的上下两端浇注骨水泥平台, 以便正确平整加载。骨水泥平台上下端平行度不大于 1.0° 以精确测量各类数据。应变式传感器采用与脊柱相近刚度的优质铍青铜作为弹性元件, 构成了弓形式应变传感器, 经过标准校正后, 绘制力 - 应变曲线, 刚度和椎体相一致。全部试验中标本在载荷的作用下, 发

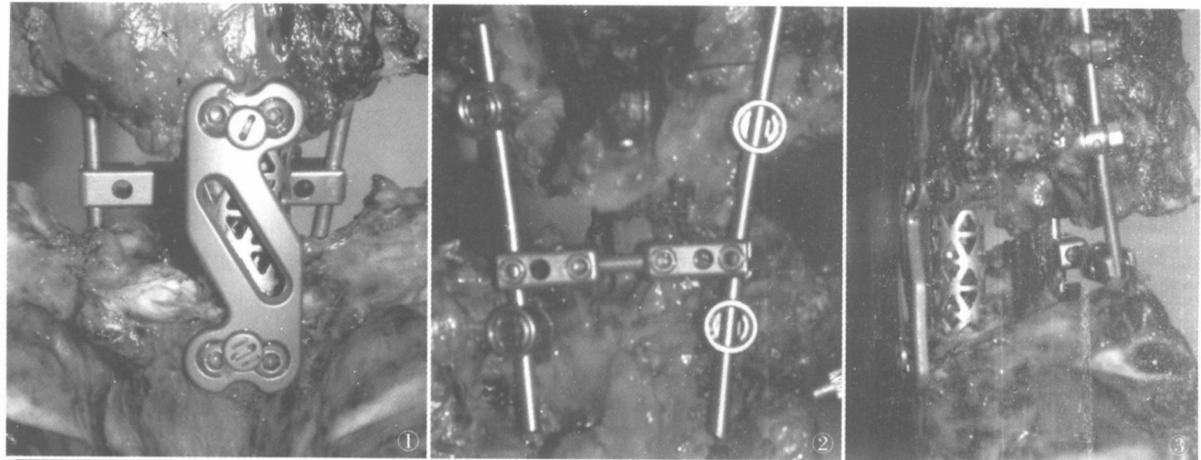


图 1 全脊椎切除, 前后联合内固定正面观 图 2 全脊椎切除, 前后联合内固定后面观 T<sub>1</sub> 全脊椎切除, 前路 Orion 钢板内固定, 钛网重建椎体, 后路 SUMMIT 系统内固定; 椎弓根螺钉上下单节段固定 (固定在 C<sub>7</sub> 和 T<sub>2</sub> 上) 图 3 全脊椎切除, 前后联合内固定侧面观 T<sub>1</sub> 全脊椎切除, 前路 Orion 钢板内固定, 钛网重建椎体, 后路 SUMMIT 系统内固定; 椎弓根螺钉上下均双节段固定在 C<sub>6</sub>、C<sub>7</sub> 和 T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 上 图 4 全脊椎切除, 前后联合内固定后面观

Fig. 1 Anterior view after T<sub>1</sub> spondylectomy, circumferential instrumentation and reconstruction. Titanium mesh was used as an anterior vertebral spacer in all reconstruction models Fig. 2 Posterior view after T<sub>1</sub> spondylectomy, circumferential instrumentation and reconstruction. Single segmental posterior transpedicular fixation at C<sub>7</sub> and T<sub>2</sub> Fig. 3 Lateral view after T<sub>1</sub> spondylectomy, circumferential instrumentation and reconstruction. Multisegmental posterior transpedicular fixation at C<sub>6</sub>, C<sub>7</sub>, T<sub>2</sub> and T<sub>3</sub> Fig. 4 Posterior view after T<sub>1</sub> spondylectomy, circumferential instrumentation and reconstruction

生位移均采用高精度数字显示光栅位移传感器,型号为 KG-101光栅数显高精度测微仪,精度达 0.01%。

1.2.2 载荷级别、加载速度与方式 实验所用的载荷采用分级加载,轴向载荷分别为 50、100、150、200、250 N。为保证加载精度,实验时采用滚珠加载,严格对准加载中心。为保证准静态加载,速度应控制在 1.4 mm/min,采用液压平稳加载。加载方式采用前屈、后伸和左右侧屈 4 种不同力学模型模拟生理运动状态。

1.3 标本的测试方法与步骤

1.3.1 具体测试方法 实验标本于实验前 2 h 逐级解冻,按照实验应力分析要求严格进行贴片、接线、密封和温度补偿等电测技术准备。测试过程,实验标本重复在线载荷下按照不同的生理运动工况下进行顺序加载,以模拟颈胸段脊柱主要生理活动方式。每步加载 30 s 内采集一次数据,并重复实验。整个操作和测定过程中控制室温为 17~20,室内湿度为 20%~24%,并间断用生理盐水喷洒在标本上,以保持其湿润。每一标本每种加载方式测试完毕后,标本卸载一定时间后再行下一次加载方式的测定。

1.3.2 数据处理及统计方法 本实验数据采用统计软件 SPSS 11.0 处理,所有计量资料均采用方差分析。

2 结果

在整个实验过程中,所有试验组均未发现肉眼可见的植入物下沉或塌陷、断裂。所有实验组中均未发现应力骨折(屈服)。颈胸段脊柱在模拟各种全脊椎切除术后重建方式,载荷、应变、应力、位移、强度与刚度的变化,经数据处理后结果见图 5。

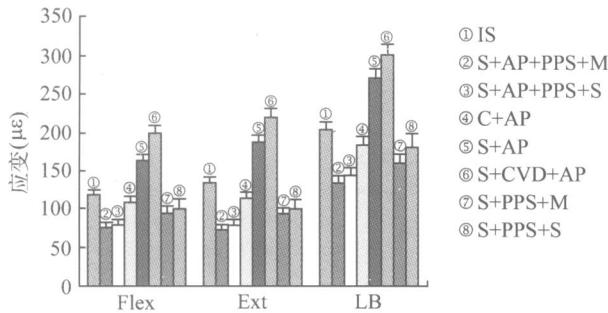


图 5 颈胸段脊柱全脊椎切除后前后路重建的载荷作用下的平均应变

Fig 5 Mean value of the strain after T<sub>1</sub> spondylectomy in the cervicothoracic junction

2.1 颈胸段脊柱全脊椎切除后前后路重建的载荷-应变关系 在 3 种状态时, S+AP+PPS+M、S+AP+PPS+S 和 C+AP 等固定法在屈曲 (extension, Ext)、后伸 (flexion, Flex) 和侧屈 (lateral bending, LB) 时的应变均小于正常标本,稳定性较好。前两者与 IS 相比,差异有显著性 (P < 0.05),但是两者之间差异无显著性 (P > 0.05)。椎体切除术因为保留了后方的椎弓根和关节突关节,故其稳定性也较好。S+PPS+M 和 S+PPS+S 的平均应变也小于正常标本,且在 S+AP+PPS+S 和 C+AP 之间。S+AP 以及 S+CVD+AP 的应变远大于正常标本,且差异有显著性 (P < 0.05),说明这两种状态均不稳定;尤其是 S+CVD+AP,因为切除两侧肋椎关节 (模拟肿

瘤破坏状态),应变比正常标本增加 66.6%,间接说明了肋椎关节对胸椎稳定性的作用不可忽视。

2.2 颈胸段脊柱全脊椎切除后前后路重建的载荷-位移关系 颈胸段脊柱 T<sub>1</sub> 全脊椎切除后前后路重建的载荷-位移关系,根据所有标本的测量,其结果如图 6 所示。

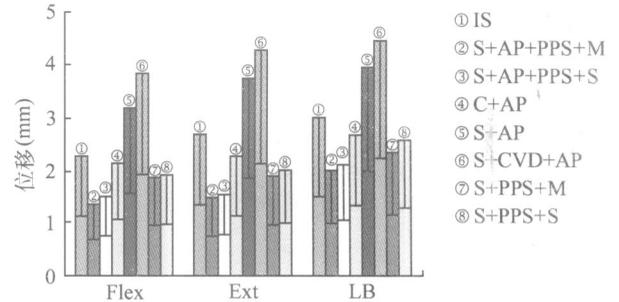


图 6 颈胸段脊柱全脊椎切除后前后路重建的载荷作用下的平均位移

Fig 6 Mean value of displacement after T<sub>1</sub> spondylectomy in the cervicothoracic junction

在屈曲、后伸和侧屈时,规律都基本相似,平均位移 S+CVD+AP > S+AP > IS > C+AP > S+PPS+S > S+PPS+M > S+AP+PPS+S > S+AP+PPS+M。颈胸段脊柱 T<sub>1</sub> 全脊椎切除术后重建的压缩性位移以 S+AP+PPS+M 为最佳,位移仅 1.38 mm,而 S+AP+PPS+S 固定方法也仅 1.52 mm。但两者之间差异无显著性 (P > 0.05)。而 S+AP 及 S+CVD+AP 分别为 3.20 mm 和 3.86 mm,与原始标本相比明显增加,变形增大,差异具有显著性 (P < 0.05)。后路多节段或单节段的椎弓根螺钉固定后,稳定性已经非常接近正常标本,差异无显著性 (P > 0.05)。值得注意的是, S+AP+PPS+S 固定方法的稳定性优于后路 S+PPS+M 固定方法,虽然两者差异无显著性。

单纯椎体切除术后,内固定重建的稳定性压缩性位移小于正常标本,相差 6.1%,优于正常标本,差异无显著性 (P > 0.05)。

从上面可以发现,颈胸段脊柱在后伸、侧屈状态时,位移与应变明显增加,尤其在侧屈时更为明显,这是因为颈椎在旋转和侧屈状态的耦合运动,是两种状态变形和位移的叠加,使颈椎处于加速失稳状态。所以,颈胸段脊柱在全脊椎切除状态时,在载荷的作用下往往会发生侧屈和旋转的复合,所以在生物力学实验中,测量的数据偏大,就是这个原因。实际上测出的数据包括了两种运动的复合,即位移的复合和应变的复合,这也就是颈胸段脊柱的“共轭现象”。

2.3 颈胸段脊柱 T<sub>1</sub> 椎体全脊椎切除术各种不同重建方法的刚度分析 所有不同内固定方法的刚度测量结果见图 7。

(1) 前屈时:前后联合固定 (S+AP+PPS+M 和 S+AP+PPS+S) 的刚度优于其他固定方法,分别达到正常标本的 166%、151%,但其两者之间差异无显著性 (P > 0.05)。S+AP+PPS+S 固定方法稳定性优于单纯后路多节段的经椎弓根螺钉固定 (S+PPS+M)。全脊椎切除后,单纯后路双节段或单节段的经椎弓根螺钉固定,其刚度虽均大于正常标本,两者之间差异无显著性 (P > 0.05)。

全脊椎切除后,单纯前后钢板固定,其刚度下降明显,在肋椎关节切除后,已近失稳。全椎体切除后,钛网重建,前路

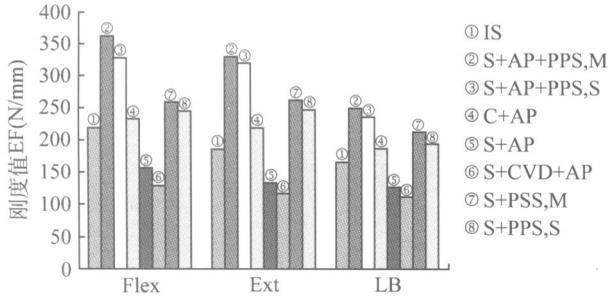


图 7 T<sub>1</sub> 全脊椎切除术后, 各种内固定重建方法的刚度 EF

Fig 7 The stiffness of various methods of instrumentation after T<sub>1</sub> spondylectomy in the cervicothoracic junction

钢板固定, 刚度也达正常标本的 107%。

(2) 后伸和侧屈状态时: 大致趋势如同前屈时测量值。但后伸时前后联合固定与单纯后路固定的刚度差别较前屈时小, 这与椎弓根固定系统的力学特性有关。这表明单纯后路经椎弓根螺钉固定, 后伸时的稳定性优于前屈时的稳定性。

3 讨论

近年来, 全脊椎切除的优点逐渐得到许多临床医师的一致公认<sup>[5,6]</sup>。尤其是随着脊柱内固定器械的发展, 使全脊椎切除术后的脊柱稳定性的重建和彻底切除肿瘤成为可能, 极大地促进了脊柱肿瘤外科的发展。虽然临床上全脊椎切除术开展已经逐渐增加, 并取得了较好的效果<sup>[4]</sup>, 但是, 文献上对其的生物力学研究却极少。只有 Kanayama等<sup>[7]</sup>对模拟肿瘤破坏胸腰椎时进行了各种重建方式的评价, 利用前路 Kaneda 钢板和后路 Cotrel-Dubouset 钩棒系统内固定, 发现在全脊椎切除后, 前后路联合固定稳定性优于单纯前路固定。还有 Oda等<sup>[3]</sup>在同年报道利用 Hams 钛网重建椎体, 前路 Kaneda 钢板和后路 ISOLA 椎弓根螺钉固定, 对胸腰椎全脊椎切除后的生物力学研究。

颈胸段脊柱疾患因其特殊性<sup>[8]</sup>, 尤其是在上胸椎 (T<sub>1</sub>-T<sub>4</sub>) 全脊椎切除术后, 目前并没有专门设计的前路器械, 我们利用颈前路带锁 Orion 钢板和钛网进行前路内固定重建。后路内固定采用 SUMM II 钉棒系统, 其螺钉为万向设计, 钉棒结合部安装方便, 可以进行枕颈胸椎的后路经椎弓根螺钉固定。在颈胸段脊柱全脊椎切除术后, 临床中常可见有全脊椎切除后多节段或单节段的经椎弓根螺钉固定, 联合或者不联合前路固定, 或者有时仅仅单纯前路钢板固定, 对上述各种方法内固定的稳定性, 未见有相关文献报道。

本实验研究发现, 在 T<sub>1</sub> 椎体全脊椎切除后, 前后联合入路固定稳定性最佳, 前后联合入路前路固定加后路双节段的椎弓根螺钉固定 (S+AP+PPS+M) 的稳定性稍优于前路固定加后路单节段的椎弓根螺钉固定 (S+AP+PPS+S); 但两者之间无统计学的显著性差异。因此, 临床上在 T<sub>1</sub> 全脊椎切除在前路确切固定后, 后路经椎弓根螺钉固定不必强求多节段的固定, 单节段的经椎弓根螺钉系统固定同样能获得较好的稳定性。此外, 经椎弓根螺钉固定节段的增多将增加肿瘤患者手术时间, 增加融合节段的同时必将带来了一定程度的脊柱运动功能的丧失, 此外患者的费用也相应的增加。

本研究还发现, 虽然单纯后路双节段或单节段的经椎弓

根螺钉固定的稳定性已超过正常标本, 前路钢板联合后路单节段的经椎弓根螺钉固定 (S+AP+PPS+S), 稳定性更优于后路双节段的经椎弓根螺钉固定 (S+PPS+M); 此外, 单纯后路固定的抗屈曲能力相对前后路联合固定要差。因此, 临床上不必刻意增加后路经椎弓根螺钉系统固定的节段而忽视前路固定。很容易理解, 在全脊椎切除前后路联合固定之后, 应力可以从前后方向同时向下传导, 而单纯后路固定时, 应力只能从后方传导。故前后路联合固定稳定性优于后路的多节段的固定方法。

胸椎肿瘤有时累及两侧的肋椎关节, 故本研究模拟了肋椎关节的破坏, 发现在肋椎关节破坏的情况下全脊椎切除后, 单纯前路钢板固定, 稳定性非常差, 已经接近失稳状态, 故临床医师应引起注意。此外, 全脊椎切除后, 单纯钛网重建, 前路钢板固定, 稳定性也非常差, 临床上不可取。在一些特殊情况下, 也必须辅助一些外固定。但有时, 临床上遇到前路肿瘤切除后, 因为诸多因素如出血多、患者一般情况差等需要 期再行后路内固定, 在单纯前路固定后, 术后需要保护性的外固定, 防止意外。

本研究还发现, 在椎体切除术后, 单纯前路内固定, 钛网重建稳定性已经足够, 略高于正常标本。而在全脊椎切除后, 单纯前路钢板固定钛网重建椎体非常不稳, 这主要是因为椎体切除和全脊椎切除的区别主要是关节突关节的保留与否, 而关节突关节能提供扭转和矢状位上的刚度。

颈胸段脊柱由于其解剖的特殊性, 其生物力学特点也明显与脊柱其他部位不同。因此, 对颈胸段脊柱的生物力学研究很有必要。从解剖学的观点来看, 虽然在本实验中利用人体标本进行全脊椎切除术、脊柱重建和生物力学测试, 但一些外源性的能起到稳定作用的结构, 如神经肌肉结构, 已经被切除, 故可能对本实验结果应用于临床判断产生一些不足之处。

参考文献

- 1 An HS, Lin TH, You JW, et al Biomechanical evaluation of anterior thoracolumbar spinal instrumentation. *Spine*, 1995, 20: 1979-1983.
- 2 Lin TH, An HS, Hong JH, et al Biomechanical evaluation of anterior and posterior fixations in an unstable calf spine model. *Spine*, 1997, 22: 261-266.
- 3 Oda I, Cunningham BW, Abumi K, et al The stability of reconstruction methods after thoracolumbar total spondylectomy. An in vitro investigation. *Spine*, 1999, 24 (16): 1634-1638.
- 4 Boriani B, Biagini R, De Lure F, et al En bloc resection of bone tumor of the thoracolumbar spine: a preliminary report on 29 patients. *Spine*, 1996, 21: 1927-1931.
- 5 Tomita K, Kawahara N, Baba H, et al Total en bloc spondylectomy. A new surgical technique for primary malignant vertebral tumors. *Spine*, 1997, 22 (3): 324-333.
- 6 Abe E, Kobayashi T, Murai H, et al Total spondylectomy for primary malignant, aggressive benign, and solitary metastatic bone tumors of the thoracolumbar spine. *J Spinal Disord*, 2001, 14 (3): 237-246.
- 7 Kanayama M, Cunningham BW, Kaneda K, et al Biomechanical analysis of anterior versus circumferential spinal reconstruction for various anatomical stages of tumor lesions. *Spine*, 1999, 24: 445-450.
- 8 滕红林, 贾连顺, 肖建如, 等. MR 测量颈胸角在选择颈胸段脊柱手术入路中的临床应用. *中国骨伤*, 2004, 17 (6): 325-328.

(收稿日期: 2005 - 08 - 16 本文编辑: 王宏)