

经后路伤椎置入椎弓根螺钉短节段固定治疗胸腰椎骨折的生物力学研究

吴冰 吴天泉 程德良 单方军 徐学方 曹志军 谢兴平 沈良

【摘要】目的 探讨经后路伤椎置入椎弓根螺钉短节段固定治疗胸腰椎骨折的生物力学稳定性及刚度。**方法** 取 15 具新鲜猪胸腰椎椎体($T_{11} \sim L_3$)标本,随机分为跨节段双椎间 4 枚椎弓根螺钉固定组(4 钉固定组)、经伤椎单侧椎弓根螺钉固定组(5 钉固定组)、经伤椎双侧椎弓根螺钉固定组(6 钉固定组),每组 5 具,建立胸腰椎爆裂性骨折模型,对 3 组标本进行后路短节段跨节段椎弓根螺钉固定或经伤椎椎弓根螺钉固定,测试 3 组标本在正常、骨折、固定、疲劳状态下的前屈后伸、左右侧屈的运动范围(ROM)以及生物力学刚度。**结果** 3 组标本的固定方法均能提高胸腰椎骨折模型生物力学稳定性及刚度;生物力学刚度方面,5 钉固定组、6 钉固定组均明显高于 4 钉固定组,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$),5 钉固定组与 6 钉固定组之间比较差异无统计学意义($P > 0.05$);运动范围方面,5 钉固定组与 6 钉固定组在前屈后伸、左右侧屈 4 个方向的 ROM 均明显低于 4 钉固定组,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$),5 钉固定组与 6 钉固定组之间比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。**结论** 经后路伤椎置入椎弓根螺钉短节段固定可提高胸腰椎骨折模型各个运动方向上的生物力学稳定性及刚度,但经伤椎单侧与双侧椎弓根螺钉固定在刚度及稳定性方面无统计学差异。

【关键词】 胸腰椎骨折 生物力学 伤椎置钉

Biomechanical evaluation of posterior short-segment pedicle at the injured level for thoracolumbar spine fracture WU Bing, WU Tianquan, CHENG Deliang, et al. Department of Spine Surgery, Shaoxing Municipal TCM integrated Western Medicine Hospital, Shaoxing 312030, China

【Abstract】Objective To evaluate the biomechanical properties of posterior short-segment pedicle at the injured level for thoracolumbar spine fracture. **Methods** Fifteen fresh porcine spines ($T_{11} \sim L_3$) were randomized into 3 groups with 5 in each, which were subject to traditional short-segment pedicle screw fixation(4-screw construct), unilateral pedicle screw fixation at the injured level (5-screw construct) and bilateral pedicle screw fixation at the injured level (6-screw construct), respectively. The vertebral compression fracture was performed in the L_1 vertebra body of the 3 groups. The range of motion (ROM) and biomechanical stiffness were tested in the normal state, fracture state and the fixed state. **Results** The biomechanical stability and the biomechanical stiffness of thoracolumbar fracture were improved by the fixed methods in all 3 groups. The improvement of 5-screw fixation and 6-screw fixation were significantly superior to that of 4-screw fixation in both biomechanical stiffness and range of motion ($P < 0.05$), while there was no significant difference between 5-screw fixation and 6-screw fixation ($P > 0.05$). **Conclusion** Posterior short-segment pedicle at the injured level for thoracolumbar spine fracture can improve the biomechanical stability and stiffness in the thoracolumbar fracture model, however, there is no significant difference between unilateral pedicle screw fixation and bilateral pedicle screw fixation.

【Key words】 Thoracolumbar spine fracture Biomechanical properties pedicle pedicle Screw fixation at the injured level

目前骨科医生治疗胸腰椎骨折常用的方法是经典的后路手术治疗胸腰椎骨折^[1]。后路椎弓根螺钉内固定

具有三维矫正和三柱固定稳定作用,能使伤椎压缩高度和矢状面成角获得良好恢复。但传统后路短节段椎弓根螺钉固定技术对骨折后突畸形矫正、骨折椎体稳定控制以及对椎管内占位骨块的复位不够理想,部分患者还需二期前路手术^[2]。有研究表明,采用传统短节段椎弓根螺钉固定治疗胸腰椎骨折,长期有可能出现椎体高度丢失

基金项目:绍兴市卫生科技计划项目(2012D10011)

作者单位:312030 绍兴市中西医结合医院脊柱外科

通信作者:吴冰,E-mail:wubing607@hotmail.com

失、内固定断裂及松动等并发症^[2-4]。近年来,采用伤椎置钉克服了传统后路置钉出现的弊端,具有稳定性增加、改善螺钉应力分布、利于椎管内骨块复位等优点^[5],与传统后路短节段椎弓根螺钉内固定技术相比临床效果满意^[6-8],但其生物力学研究较少,尤其是在伤椎单侧与双侧固定比较方面,本研究应用猪骨胸腰椎建立模型,进行生物力学测试,探讨伤椎固定对胸腰椎骨折稳定性的影响,比较单侧伤椎固定与双侧伤椎固定是否存在差异,以期为临床治疗提供基础研究理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验标本的选择与包埋 取 15 具新鲜猪骨胸腰段($T_{11} \sim L_3$)椎体标本,经 X 线摄片排除骨折、肿瘤及畸形变等疾病,采用双能 X 射线吸收骨密度仪(dualenergy X-ray absorbtinmetry, DEXA)测试每个标本胸腰段区域的骨密度,骨密度值均 $>0.9g/cm^2$,排除骨质疏松。剔除椎体周围所有肌肉组织,尽量保留椎间盘、前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘间韧带、棘上韧带、关节囊、小关节及椎骨完整,标本予以双层塑料袋密封保存于 $-20^{\circ}C$ 冰柜中。测试前将标本移至普通冰箱及室温下($20 \sim 25^{\circ}C$)逐级解冻。标本以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)在特制标本包埋装置上对标本进行包埋,制成新鲜胸腰椎测试标本。

1.2 试验分组 随机分为跨节段双椎间 4 枚椎弓根螺钉固定组(4 钉固定组)、经伤椎单侧椎弓根螺钉固定组(5 钉固定组)、经伤椎双侧椎弓根螺钉固定组(6 钉固定组),每组 5 具,进行生物力学测试,对照实验,每组设定 4 种状态:(1)正常状态;(2)骨折状态;(3)固定状态;(4)疲劳状态。

1.3 固定器械及测试仪器 椎弓根钉棒内固定系统为浙江康辉医疗器械材料公司提供的通用型脊柱内固定系统(general spine system, GSS),椎弓根螺钉规格为 $3.5cm \times 5.0mm$ (长度 $\times$ 直径,下同)、 $2.5cm \times 5.0mm$ 。脊柱三维运动 MTS 858 多功能生物力学试验机为绍兴大学医学院生物力学实验室提供。

1.4 骨折模型的建立 运用 MTS 机压缩法^[9]制作胸腰段骨折模型,按照 Chiba 法^[10]用 $3.5mm$ 钻头损伤 L_1 椎体上终板及前缘皮质,固定标本底端的包埋块,上端包埋块屈曲约 10° ,于椎体中心前 $0.5cm$ 处压缩标本,导致 L_1 终板及后部结构(主要为椎弓、棘间韧带、棘上韧带)损伤。制作 L_1 椎体不完全爆裂性骨折模型,按胸腰椎骨折 AO 分型,属于 B1 型骨折(图 1)。当 L_1 椎体高度压缩接近 75%时,停止压缩。

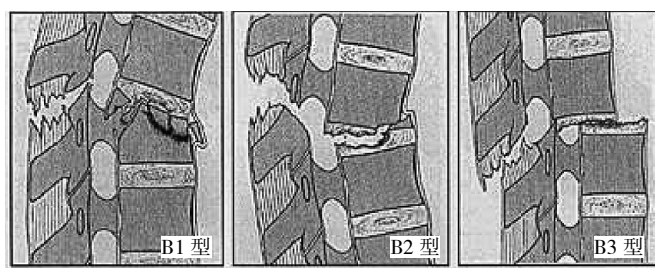


图 1 骨折模型建立

1.5 标本内固定方法 骨折模型建立后,对 3 组标本进行后路短节段跨节段椎弓根螺钉固定或经伤椎椎弓根螺钉固定,骨折上下椎体使用 $3.5cm \times 5.0mm$ 螺钉固定,伤椎使用 $2.5cm \times 5.0mm$ 螺钉固定。按常规进钉点于椎体置入螺钉。4 钉固定组于骨折椎上、下相邻椎体植入 4 枚椎弓根螺钉,5 钉固定组、6 钉固定组于骨折椎及其上、下相邻椎体置入 5 枚或 6 枚椎弓根螺钉。行正、侧位 X 线摄片及 CT 检查,观察模型制作情况,确保植入物位置满意。

1.6 生物力学轴向压缩刚度实验 将标本置于 INSTRON 材料机,在 $0 \sim 500 N$ 加载力下进行压缩速率为 $\pm 25mm/min$ 的轴向压缩实验。对 3 组标本在正常状态(标本未进行模型建立之前的状态)、骨折状态(标本进行模型建立之后的状态)、固定状态(骨折模型建立并进行内固定后的状态)、疲劳状态(骨折模型进行内固定并进行疲劳试验后的状态)下的载荷信号进行分析(图 2、3),以评估标本的轴向压缩刚度。实验前需预加载 $50 N$,以降低标本因松弛、蠕变等时间效应产生的影响,提高测量精确度。轴向压缩刚度以 N/mm 为单位,表示轴向压缩 $1mm$ 所需的力。

1.7 脊柱稳定性测试 本实验在 INSTRON 骨科生物力学运动分析系统上进行。标本解冻后,将标本固定于加载盘底座,对标本实施一对大小相等、方向相反、相互平行的力,形成作用于标本的纯力偶,以 $4 N/mm$ 大小载荷加载,使其产生前屈、后伸、左侧弯、右侧弯 4 个方向的运动,通过 INSTRON 软件系统进行数据分析,计算出标本测量节段角位移运动范围(range of motion, ROM)。每次测量均加载、卸载 3 次,加载、卸载间隔 30s,只记录第 3 次的结果,这样可以减少脊柱赫弹性的影响,得到相对稳定的运动学测量数据^[8]。

1.8 疲劳实验 将固定后的标本置于 INSTRON 材料试验机上,在 $0 \sim 500 N$ 加载力下进行速率为 $\pm 25mm/min$ 的 1 000 次循环屈伸、左右侧屈运动。实验中,用浸有 0.9%氯化钠溶液的棉花薄片覆盖标本,保持其湿润。

1.9 实验流程 每组标本依次进行 4 种状态生物力学



图2 正常状态下前屈、后伸、侧屈运动载荷信号分析(A:前屈;B:后伸;C:侧屈运动)

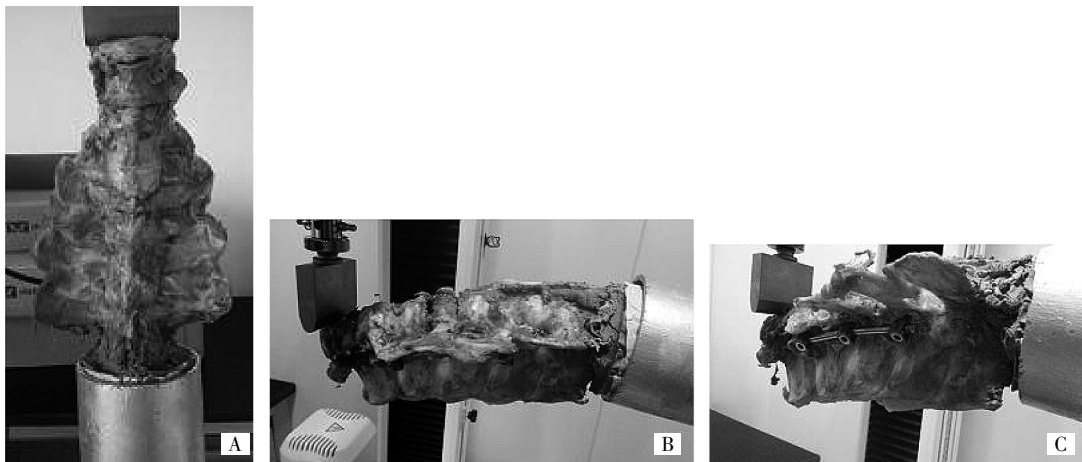


图3 特殊状态下载荷信号分析(A:骨折状态;B:固定状态;C:疲劳状态)

运动测试:(1)正常状态;(2)骨折状态;(3)固定状态;(4)疲劳状态。实验中,不断用 0.9%氯化钠溶液喷洒标本,保证其在整个实验期间湿润,尽量减少实验造成的组织变性,最大限度减小实验误差。

1.10 观察指标 观察 3 组标本在 4 种不同状态下的轴向压缩刚度及 4 个方向的运动范围。所得原始数据为刚度值及各状态的前屈、后伸和左右侧弯的 ROM。

1.11 统计学处理 采用 SPSS 15.0 统计软件, 计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 多组间比较采用方差分析, 两组间比较采用 t 检验。

2 结果

2.1 3 组标本 4 种状态下轴向压缩刚度试验结果 3 组标本 4 种状态下轴向压缩刚度试验结果见表 1。

表 1 4 种状态下标本的轴向压缩刚度(N/mm)

不同状态	4 钉固定组	5 钉固定组	6 钉固定组
骨折状态	143.3 ± 18.2 [#]	148.9 ± 15.7 [#]	151.1 ± 12.4 [#]
固定状态	219.9 ± 21.4 [▲]	309.1 ± 29.4 [▲]	311.6 ± 30.7 [▲]
疲劳状态	214.2 ± 20.3	310.2 ± 29.6 [*]	312.1 ± 29.7 ^Δ
正常状态	308.6 ± 26.1	317.1 ± 21.2	312.7 ± 18.0

注: 与 4 钉固定组比较, ^{*} $P < 0.05$; 与 5 钉固定组比较, ^Δ $P > 0.05$; 与骨折状态比较, [▲] $P < 0.05$; 与正常状态比较, [#] $P < 0.05$

由表 1 可见, 轴向压缩刚度实验表明, 3 组标本在

正常状态、骨折状态下分别比较, 轴向压缩刚度差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$), 说明 3 组标本具有可比性。与正常状态比较, 3 组标本骨折状态刚度明显减小, 差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。固定状态下的刚度较骨折状态明显增强, 差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$); 固定状态下, 5、6 钉组的轴向压缩刚度较 4 钉组明显增强, 差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$), 而 5、6 钉组间压缩刚度比较差异无统计学意义($P > 0.05$), 见表 1。

2.2 3 组标本 4 种状态下脊柱 4 个方向 ROM 实验结果 见表 2~5。

表 2 3 组标本正常状态下脊柱 4 个方向 ROM(度)

运动范围	4 钉固定组	5 钉固定组	6 钉固定组
前屈	8.10 ± 0.31	7.89 ± 0.19	7.66 ± 0.39
后伸	4.78 ± 0.20	4.38 ± 0.32	4.59 ± 0.20
左侧弯	4.13 ± 0.18	4.37 ± 0.21	3.92 ± 0.34
右侧弯	4.30 ± 0.15	4.46 ± 0.24	4.18 ± 0.32

表 3 3 组标本骨折状态下脊柱 4 个方向 ROM(度)

运动范围	4 钉固定组	5 钉固定组	6 钉固定组
前屈	11.38 ± 0.25	10.68 ± 0.14	12.10 ± 0.56
后伸	6.10 ± 0.16	6.12 ± 0.41	7.05 ± 0.41
左侧弯	5.48 ± 0.24	5.06 ± 0.32	5.88 ± 0.20
右侧弯	5.50 ± 0.24	5.47 ± 0.35	5.77 ± 0.37

由表 2、3 可见, 3 组标本在正常状态及骨折状态

下,各方向 ROM 差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$),骨折状态下脊柱前屈后伸以及左右侧屈运动活动范围均较正常状态明显增加,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。

表 4 3 组标本固定状态下脊柱 4 个方向 ROM(度)

运动范围	4 钉固定组	5 钉固定组	6 钉固定组
前屈	1.13 ± 0.32	$0.80 \pm 0.27^*$	$0.88 \pm 0.30^*$
后伸	0.83 ± 0.22	$0.63 \pm 0.20^*$	$0.65 \pm 0.19^*$
左侧弯	0.78 ± 0.31	$0.50 \pm 0.27^*$	$0.54 \pm 0.20^*$
右侧弯	0.70 ± 0.25	$0.52 \pm 0.19^*$	$0.55 \pm 0.21^*$

注:与 4 钉固定组比较, $^*P < 0.05$

表 5 3 组标本疲劳状态下脊柱 4 个方向 ROM(度)

运动范围	4 钉固定组	5 钉固定组	6 钉固定组
前屈	1.13 ± 0.30	$0.80 \pm 0.29^*$	$0.85 \pm 0.30^*$
后伸	0.83 ± 0.21	$0.62 \pm 0.20^*$	$0.64 \pm 0.19^*$
左侧弯	0.78 ± 0.32	$0.53 \pm 0.24^*$	$0.56 \pm 0.20^*$
右侧弯	0.74 ± 0.29	$0.50 \pm 0.20^*$	$0.51 \pm 0.23^*$

注:与 4 钉固定组比较, $^*P < 0.05$

由表 4、5 可见,固定状态以及疲劳状态下,5、6 钉固定组前屈后伸以及左右侧屈运动范围均较 4 钉固定组明显减小,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$),而 5 钉组与 6 钉组之间比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 传统后路短节段椎弓根螺钉固定技术存在的缺陷 椎弓根螺钉固定技术治疗脊柱骨折可取得良好的临床效果,目前临床常用的椎弓根螺钉内固定术式为传统后路 4 钉短节段椎弓根螺钉内固定术。1994 年 McCormack 等^[11]研究短节段固定胸腰椎骨折的失败原因,认为内固定失效可能与骨折粉碎程度、复位不满意、固定不稳定有关,并提出了 Load-Sharing 评分标准评价骨折的粉碎程度。传统后路短节段椎弓根螺钉固定存在以下不足之处^[12-13]:(1)对脊柱骨折后凸畸形矫正、对椎管内占位骨块的复位不满意;(2)复位过程中可能发生过度撑开,从而可能导致医源性神经损害;(3)4 钉固定具有平行四边形效应和悬挂效应,易引起后期内固定松动、侧向不稳和后凸畸形。

3.2 实验标本的选择和模型的建立 本实验采用猪的脊椎骨,在动物实验中,猪脊柱的结构与人较为相似,其个体差异小,无关节退变及骨质疏松等病理改变,有利于实验的均衡性,而且猪的脊椎已被证实用于做生物力学模型是有效的^[14-15]。本研究采用 Chiba 法^[10]进

行造模,椎体预损伤后在力学实验机上逐级压缩进行骨折造模,与传统的自由落体或撞击等脊柱爆裂性骨折造模方法相比较,该方法能较好地控制骨折的部位和损伤程度,重复性较好,可以按实验要求控制骨折椎的损伤范围。

3.3 伤椎置钉技术的可行性及技术优势 伤椎置钉是否可行?通常认为,在骨折椎体上植入螺钉会使骨折块进一步分离,解剖标志不清也增加了伤椎置钉技术的难度,增加了大血管和内脏损伤的可能性,与此同时,纵向撑开时螺钉可能在椎体内移位导致椎体切割。所以,长期以来国内外学者认为在骨折椎上植入螺钉是不合理的或错误的。

伤椎置钉理论上可以提供更多的前中柱稳定的支持,本实验发现,在骨折造模之后,15 例标本中仅有 1 例标本发生椎弓根骨折,椎弓根骨折发生在椎弓根与椎体后缘结合部,没有发现双侧椎弓根骨折标本,椎体中下部基本保持完整,理论上为置入椎弓根螺钉提供可能。其次,在 5 钉固定组及 6 钉固定组的 10 例标本的固定过程中均较为顺利置入伤椎螺钉,置入方法同正常椎体无异,在试验操作过程中,没有发现伤椎螺钉偏离正常钉道从而增加损伤大血管或内脏的可能性,与此同时,纵向撑开时螺钉在椎体内没有造成椎体切割,反而有利于突入椎管骨块复位。实验结果也表明在固定状态下及疲劳状态下伤椎置钉技术较传统的 4 钉固定能提供更好的脊柱稳定性。综上所述,我们认为在伤椎椎弓根及部分椎体正常的条件下,行伤椎固定和复位是安全、可靠的,国内外相关生物力学研究也支持本研究结果^[16-17],近年来的临床研究报道也证实伤椎置钉技术是安全、可行的,该技术有利于后凸畸形的矫正,骨折复位(特别是椎管内骨折块的复位),降低了内固定失效和畸形丢失的发生率^[18-20]。

通过本实验研究,我们认为伤椎置钉技术具有以下优势:(1)提供良好的三点固定,变双平面固定为三平面固定,避免平行四边形效应及悬挂效应;(2)螺钉所承受的应力相应减少,由于螺钉向腹侧加压,可以克服骨折产生的后凸应力,防止椎体高度的丢失及骨折椎后移,再次压迫椎管;(3)避免了内固定器的应力集中,降低钉-棒应力负荷,使内固定折损率降低;(4)增加了 2 点固定,既缩短了椎间固定点的距离,同时提供更强的抗拔出力;(5)在骨折椎上建立一个支点,通过韧带的牵拉有可能使压缩的骨折椎体恢复高度,同时避免对正常椎间盘的牵张。通过以上几点,达到更佳骨折复位,增强脊柱稳定性,从而减低复位丢失率及术后内固定失效可能

性,与此同时能最大限度减少对正常椎间盘的影响,从而降低术后椎间盘疾患的发生率。

与传统伤椎置钉生物力学测试不同,本实验将标本进行分组,而不是像传统生物力学试验那样将同一标本在正常状态、骨折状态、固定状态、疲劳状态下进行位移和刚度测定,可以最大限度减少实验误差;其次,本研究针对 5 钉固定与 6 钉固定之间的是否存在差异进行生物力学测试,为临床治疗选择最佳固定方法提供实验依据。从本试验结果可以看出,胸腰椎骨折后通过 3 种后路椎弓根螺钉固定方法均能有效提高胸腰椎骨折模型的生物力学稳定性及刚度,但 5 钉固定法、6 钉固定法与 4 钉固定法相比,前两者刚性更强,同时 ROM 明显缩小,说明固定的稳定性更强,而 5 钉固定法、6 钉固定法两者之间比较却无统计学差异,由此可见,伤椎置钉技术较传统后路短节段椎弓根螺钉技术有明显的优势,更有利于脊柱稳定,临床上更倾向使用单侧伤椎固定技术。

3.4 不足及展望 首先,本实验标本是猪的脊椎骨,虽然猪脊柱的结构与人较相似,但毕竟不是人尸体标本,因为猪骨密度较人骨密度高,它的生物力学行为与人不同,这种差别多少会影响实验的结果;其次,本实验测量正常、骨折、固定、疲劳状态下的脊柱前屈后伸、左右侧屈的 ROM 以及生物力学刚度,基本反映了后路伤椎置钉技术治疗胸腰椎骨折的生物力学特点,但由于实验条件及生物力学实验仪器的限制,未对脊柱旋转进行力学测试,但在评价生物力学全面性方面存在一定的局限,有待于下一步研究进行完善;第三,由于课题经费有限,我们进行研究的样本量有限,本实验是在体外进行生物力学测试,没有考虑到前后纵韧带之外的组织对脊柱稳定性的影响。因此,本实验结果仅代表伤椎置钉技术的体外效果,具体临床运用过程中的中远期效果有待于下一步的临床研究进一步证实。

4 参考文献

- [1] 张志成,孙天胜,李放,等.胸腰椎损伤分类及损伤程度评分系统的初步评估[J].中国骨与关节损伤杂志,2009,24(1):18-21.
- [2] Alanay A, Acaroglu E, Yazici M, et al. Short-segment pedicle instrumentation of thoracolumbar burst fractures: does transpedicular intracorporeal grafting prevent early failure? [J]. Spine, 2001, 26(2): 213-217.
- [3] Alvin G F, Swain J M, Asher M A. The safety and efficacy of variable screw placement and Isola spinal implant systems for the surgical treatment of thoracolumbar burst fractures [J]. J Bone Joint Surg (Br), 1997, 79: 306.
- [4] 赵刘军,柴波,徐荣明,等.前路减压重建治疗前中柱的胸腰椎骨折[J].中国骨伤,2008,21(1):10-12.
- [5] 卢厚微,罗远明.伤椎置钉治疗胸腰椎单椎体爆裂性骨折的临床观察[J].中国骨与关节损伤杂志,2011,26(5):434-435.
- [6] 吴卫平,楼列名,史永振,等.经骨折椎弓根直接复位固定治疗胸腰椎爆裂性骨折[J].脊柱外科杂志,2007,5(4):206-217.
- [7] Shen W J, Liu T J, Shen Y S. Nonoperative treatment versus posterior or fixation for thoracolumbar junction burst fractures without neurologic deficit [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2001, 26(9): 1038-1045.
- [8] 陈建明,张成程,许天明,等.GSS 系统经伤椎固定治疗难复性胸腰椎骨折并脱位[J].颈腰痛杂志,2009,30(4):363-364.
- [9] Lu W W, Cheung K M, Li Y W, et al. Bioactive bone cement as a principal fixture for spinal burst fracture; an in vitro biomechanical and morphologic study [J]. Spine, 2001, 26(24): 2684-2691.
- [10] Wang Z, Lu B, Chen L, et al. Evaluation of an osteostimulative putty in the sheep spine [J]. J Mater Sci Mater Med, 2011, 22(1): 185-191.
- [11] McCormack T, Karaikovic E, Gaines R W. The load sharing classification of spine fractures [J/CD]. Spine (Phila Pa 1976), 1994, 19(15): 1741-1744.
- [12] 王洪伟,李长青,周跃,等.脊柱骨折经伤椎椎弓根置钉附加横连短节段固定的稳定性测试[J].中国脊柱脊髓杂志,2010,20(9):745-748.
- [13] 郑佳状,张亨闰,蒋电明,等.经伤椎椎弓根复位固定治疗胸腰椎爆裂骨折[J].中华临床医师杂志(电子版),2010,4(6):804-806.
- [14] Kaigle A M, Holm S H, Hansson T H. 1997 Volvo Award winner in biomechanical studies. Kinematic behavior of the porcine lumbar spine: a chronic lesion model [J]. Spine, 1997, 22(24): 2796-2806.
- [15] Pfeiffer M, Griss P, Franke P, et al. Degeneration model of the porcine lumbar motion segment: effects of various intradiscal procedures [J]. Eur Spine J, 1994, 3(1): 8-16.
- [16] Mahar A, Kim C, Wedemeyer M, et al. Short-segment fixation of lumbar burst fractures using pedicle fixation at the level of the fracture [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2007, 32(14): 1503-1507.
- [17] 王洪伟,李长青,周跃,等.伤椎置钉技术治疗胸腰椎骨折的生物力学及临床随访研究[J].中国矫形外科杂志,2011,19(16): 1356-1360.
- [18] 盛文辉,尚琦松,吴兵,等.短节段固定结合伤椎置钉、植骨治疗胸腰椎骨折的临床研究[J].中华临床医师杂志(电子版),2013,7(3):990-995.
- [19] 孟庆勇,母心林,潘玉林,等.经伤椎置钉椎弓根钉内固定治疗胸腰椎椎体骨折脱位[J].中国矫形外科杂志,2011,19(18):1555-1557.
- [20] 顾勇杰,胡勇,马维虎,等.后路短节段结合骨折椎弓根螺钉复位内固定治疗胸腰椎骨折[J].中国骨伤,2010,23(4):264-267.

(收稿日期:2015-09-15)

(本文编辑:严玮雯)