

基础研究

单节段椎弓根螺钉固定联合上方棘突间
Coflex 置入的生物力学评价

车 武, 姜允琦, 马易群, 袁 维, 周晓岗, 李熙雷, 董 健

(复旦大学附属中山医院骨科 200032 上海市)

【摘要】目的:对腰椎单节段椎弓根螺钉固定联合上节段使用棘突间 Coflex 置入手术(Topping-off 手术)进行生物力学评价。方法:采用 6 具男性 L3~S1 节段的人脊柱标本,建立 L4/5 椎弓根螺钉坚强固定(后路腰椎体间融合术,PLIF)模型及 L4/5 椎弓根螺钉固定联合 L3/4 棘突间 Coflex 置入(Topping-off 手术)的模型。每具标本均进行完整、坚强固定和联合固定 3 种状态的生物力学测试。分别比较完整标本(A 组)、L4/5 坚强固定(B 组)、联合固定(C 组)中 L3/4 和 L5/S1 节段活动度及椎间盘内压差异。结果:B 组 L3/4 节段平均活动度较 A 组显著增加($P<0.05$)(分别比 A 组前屈增大 0.54° ,后伸增大 0.34° ,侧弯增大 0.30° ,旋转增大 0.19°);B 组 L5/S1 活动度亦比 A 组增加,但无统计学意义($P>0.05$)。C 组 L3/4 节段的活动度与 B 组相比,后伸方向显著减小($P<0.05$)(比 B 组减小 0.32°),而前屈、侧弯、旋转减小不明显($P>0.05$);与 A 组相比,后伸及旋转无显著增大($P>0.05$),前屈及侧屈有显著增大($P<0.05$)(分别比 A 组前屈增大 0.38° ,侧屈增大 0.28°)。C 组 L5/S1 活动度与 B 组相比,除前屈方向外均有增大趋势,但无统计学意义($P>0.05$);与 A 组比较,均有增大,但无统计学意义($P>0.05$)。与 A 组相比,B 组 L3/4 椎间盘内压显著增加($P<0.05$)(分别比 A 组前屈增大 0.78kPa ,后伸增大 0.88kPa ,侧弯增大 1.84kPa ,旋转增大 1.45kPa);L5/S1 椎间盘内压也显著增加($P<0.05$)(分别比 A 组前屈增大 1.21kPa ,后伸增大 0.94kPa ,侧弯增大 0.70kPa ,旋转增大 0.81kPa)。与 B 组相比,C 组 L3/4 椎间盘内压减小(分别比 B 组前屈减小 0.29kPa ,后伸减小 1.39kPa ,侧弯减小 0.13kPa ,旋转减小 0.10kPa),但仅后伸减小有统计学意义($P<0.05$);C 组 L5/S1 椎间盘内压分别比 B 组前屈减小 0.39kPa ,后伸减小 0.10kPa ,侧弯增大 0.15kPa ,旋转增加 0.18kPa ,但无统计学意义($P>0.05$)。与 A 组相比,C 组 L3/4 椎间盘内压增大,其中前屈、侧屈及旋转显著增大($P<0.05$)(分别比 A 组前屈增大 1.53kPa ,侧屈增大 1.71kPa ,旋转增大 1.35kPa);C 组 L5/S1 椎间盘内压也显著增大($P<0.05$)(分别比 A 组前屈增大 0.82kPa ,后伸增大 0.84kPa ,侧屈增大 0.85kPa ,旋转增大 0.99kPa)。结论:生物力学测试发现,Topping-off 手术中 Coflex 对单节段坚强固定上方相邻节段有保护作用;但使下方相邻节段的应力增加,可能对远期退变产生不良影响。

【关键词】腰椎坚强固定;棘突间装置;生物力学

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2015.01.10

中图分类号:R681.5,R687.3 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2015)-01-0062-05

Biomechanical evaluation for single-level rigid fixation combined with Coflex implantation/CHE Wu, JIANG Yunqi, MA Yiqun, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2015, 25(1): 62-66

【Abstract】Objectives: To evaluate the biomechanical effect of topping-off operation with Coflex interspinous dynamic device combined with adjacent monosegmental rigid fixation by pedicular screw in lumbar spine. Methods: 6 fresh frozen human cadaveric lumbar spine specimens(6 males) were tested. Models of L4/5 rigid fixation by pedicular screw(posterior lumbar interbody fusion, PLIF) and models of L4/5 rigid fixation by pedicular screw combined with L3/4 Coflex were established. On each specimen, range of segmental motion(ROM) and intradiscal pressure(IDP) of L3/4 and L5/S1 were tested in the condition of intact(group A), rigid fixation(L4/5)(group B) and combined with Coflex(L3/4)(group C), respectively. Results: The L3/4 ROM of group B was

基金项目:2012 年上海市科委医学重点项目(12411951300);2012 年上海市卫生局局级科研项目(2012289);上海市市级医院新兴前沿技术联合攻关项目(SHDC12014102)

第一作者简介:男(1976-),主治医师,医学硕士,研究方向:脊柱外科,电话:(021)64041990-2908 E-mail:13795211806@163.com

共同第一作者:姜允琦 E-mail:jiang.yunqi@zs-hospital.sh.cn

通讯作者:董健 E-mail:doctor_dong@126.com;李熙雷 E-mail:li_xi_lei@126.com

higher than that of group A significantly ($P<0.05$). The L3/4 ROM of group B in flexion, extension, lateral bending and axial rotation increased by 0.54° , 0.34° , 0.30° and 0.19° , respectively. The L5/S1 ROM of group B increased with no statistical significance ($P>0.05$), compared with group A. The L3/4 ROM of group C was lower than that of group B ($P<0.05$) only in the extension, while the decreases were not significant in other directions. Compared with group A, the L3/4 ROM of group C did not increase significantly in the extension and axial rotation ($P>0.05$), while it increased significantly in flexion (0.38°) and lateral bending (0.28°), respectively. Compared with group B, the L5/S1 ROM of group C had a increasing trend in extension, lateral bending and axial rotation, but no statistical significance ($P>0.05$). Compared with group A, the L5/S1 ROM of group C had a increasing trend in all directions ($P>0.05$). The L3/4 IDP of group B was higher than that of group A ($P<0.05$). The L3/4 IDP of group B in flexion, extension, lateral bending and axial rotation increased by 1.82kPa, 1.88kPa, 1.84kPa and 1.45kPa, respectively. The L5/S1 IDP of group B in flexion, extension, lateral bending and axial rotation increased by 1.21kPa, 0.94kPa, 0.70kPa and 0.81kPa, respectively ($P<0.05$). The L3/4 IDP of group C was lower than that of group B only in the extension ($P<0.05$). Compared with group A, the L3/4 IDP of group C in flexion, lateral bending and axial rotation increased by 1.53kPa, 1.71kPa and 1.35kPa, respectively ($P<0.05$). Compared with group B, L5/S1 IDP of group C increased in lateral bending and axial rotation, but no statistical significance ($P>0.05$). Compared with group A, L5/S1 IDP of group C in flexion, extension, lateral bending and axial rotation increased by 0.82kPa, 0.84kPa, 0.85kPa and 0.99kPa, respectively ($P<0.05$). **Conclusions:** Biomechanical evidence supports the protective effect of interspinous device on upper adjacent segments after monosegmental rigid fixation. It may increase the stress of lower adjacent segment which may induce adverse effects in the long-term period.

[Key words] Rigid fixation; Interspinous device; Biomechanical test

[Author's address] Department of Orthopedic Surgery, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai, 200032, China

邻近节段退变 (adjacent segment degeneration, ASD) 是腰椎融合术后邻近节段最常见的病变,其含义较广,可泛指融合区邻近节段的所有异常改变。文献报道影像学 and 症状学邻近节段退变的发生率分别达到 8%~100% 和 5.2%~18.5%^[1]。如何预防和治疗相邻节段退变性疾病是目前研究的热点之一。棘突间装置为预防腰椎固定融合术后相邻节段退变提供了一条新的途径。作为一种填充“过渡地带(从僵硬节段向活动非融合节段)”的方法,即 Topping-off 手术,已经应用于临床。但由于新鲜人体标本的稀缺对生物力学实验的制约,以及较少有前瞻、随机对照、长期的临床试验,因而在关于该手术方法的一些远期安全性和有效性方面尚存在一定空白。因此,我们尝试通过测量腰椎单节段椎弓根螺钉固定且上方节段使用棘突间动态固定装置 Coflex 的情况下的脊柱活动度和椎间盘压力。

1 材料与方法

1.1 实验材料

6具新鲜人体脊柱标本(L3~S1,由复旦大学

医学院解剖教研室提供),年龄 27~46 岁;经摄 X 线摄片证实无肿瘤、骨密度下降及解剖学变异,双层塑料袋密封并保存在 -20°C 冰箱,实验前室温下解冻,去除标本周围肌肉组织,仔细保留所有韧带、小关节囊及骨的完整性。内置物为椎弓根螺钉固定系统(MOSS)、椎间融合器(PEEK 材料,上海微创医疗器械公司提供)及棘突间弹性固定装置(Coflex,通用医疗器械公司提供)。

将每具标本 L3 上半部及 S1 分别用聚甲基丙烯酸甲酯包埋于特制夹具中。包埋过程中注意保持上下两个夹具的平行,以确保实验精度和受载均度,实验加载点为脊柱中轴位置。在 L3、L4、L5 和 S1 椎体和双侧横突末端各刺入 3 枚浅色图钉,用以标记腰椎节段的三维活动。

1.2 模型制备及生物力学测试

先将完整标本(A组)固定在生物力学试验机上(ZWICK-ROELL,上海大学力学实验室提供)。经 L3/4 及 L5/S1 椎间盘左侧放置压强传感器(Samba 3200 压力传感器,购自美国 Samba 实验器械公司)以测定椎间盘内压。通过加载装置自头端对标本施加 500N 的轴向压力,然后以 $0.5^\circ/\text{s}$ 速

度施加 6 个方向(前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左旋及右旋)的 $\pm 8\text{N}\cdot\text{m}$ 力矩。采集数据前先对每一运动状态重复加载和卸载 2 次,于第 3 次加载时用互成角度的两个高清相机记录标本的空间位置图像,以备图像分析软件进行分析。计算 L3/4 和 L5/S1 节段在以上状态下的活动范围(ROM)。同时记录以上各运动状态的 L3/4 和 L5/S1 椎间盘内压(IDP)变化。

然后在 L4/5 节段按常规方法置入椎弓根钉棒系统,固定 L4/5 节段,刮匙刮除椎间盘及上下软骨终板,用试模测量椎间隙,选择合适大小的 PEEK 椎间融合器置入椎间隙,制备出 L4/5 坚强固定模型(B 组)。重复以上力学测试。

再将 L3 和 L4 棘上韧带沿棘突尖部轻轻切开分离并加以保留,中份切断 L3/4 棘突间韧带,修整 L3 与 L4 棘突相对缘,试模后选择合适型号的 Coflex,用锤子轻轻打入 Coflex 至棘突间,用探针探查 Coflex 前方与黄韧带之间的距离,Coflex 位置合适后,用夹钳将 Coflex U 形臂上的两翼夹紧,缝合棘上韧带,制备出 L4/5 坚强固定辅 L3/4 棘突间动态固定模型(C 组)。重复以上力学测试。

每次测试结束后检查标本有无骨折、内固定断裂等情况。在整个操作和测试过程中不断用生理盐水保持标本处于湿润状态。实验在上海大学力学实验室进行。

1.3 统计学处理

本实验对 ROM 及 IDP 进行统计分析。使用 SPSS 13.0 统计软件包,计量资料采用平均值 $\pm$ 标准差表示,用配对资料 t 检验法进行组间比较, $P<0.05$ 被认为有统计学意义。

2 结果

实验中未出现骨折、内固定断裂等情况。L3/4 及 L5/S1 节段的 ROM 值测量结果分别见表 1 和表 2。IDP 值测量结果见表 3 和表 4。

与 A 组比较,在 L4/5 施加椎弓根钉坚强固定后(即 B 组),其上方相邻节段 L3/4 活动度明显增加($P<0.05$,分别比 A 组前屈增大 0.54° ,后伸增大 0.34° ,侧弯增大 0.30° ,旋转增大 0.19°);下方相邻节段 L5/S1 活动度亦增加,但无统计学意义($P>0.05$)。

与 B 组比较,使用 Coflex 固定 L3/4 节段后

表 1 各组不同状态下 L3/4 节段活动范围($\bar{x}\pm s, n=6, ^\circ$)

Table 1 ROM of L3/4 under different condition

状态 Condition	A组 Group A	B组 Group B	C组 Group C
前屈 Flexion	2.93 $\pm$ 0.26	3.47 $\pm$ 0.42 ^①	3.31 $\pm$ 0.26 ^①
后伸 Extension	2.41 $\pm$ 0.23	2.75 $\pm$ 0.30 ^①	2.43 $\pm$ 0.19 ^②
左右侧屈 Lateral bending	2.62 $\pm$ 0.29	2.92 $\pm$ 0.20 ^①	2.90 $\pm$ 0.17 ^①
左右旋 Rotation	2.15 $\pm$ 0.24	2.34 $\pm$ 0.14 ^①	2.23 $\pm$ 0.14

注:①与 A 组比较 $P<0.05$ ②与 B 组比较 $P<0.05$

Note: ①Compared with group A, $P<0.05$, ②Compared with group B, $P<0.05$

表 2 各组不同状态下 L5/S1 活动范围($\bar{x}\pm s, n=6, ^\circ$)

Table 2 ROM of L5/S1 under different condition

状态 Condition	A组 Group A	B组 Group B	C组 Group C
前屈 Flexion	3.34 $\pm$ 0.40	3.72 $\pm$ 0.30	3.60 $\pm$ 0.30
后伸 Extension	2.62 $\pm$ 0.35	2.84 $\pm$ 0.25	2.96 $\pm$ 0.27
左右侧屈 Lateral bending	2.87 $\pm$ 0.40	3.10 $\pm$ 0.29	3.13 $\pm$ 0.30
左右旋 Rotation	2.32 $\pm$ 0.23	2.46 $\pm$ 0.20	2.47 $\pm$ 0.15

表 3 各组不同状态下 L3/4 椎间盘内压值($\bar{x}\pm s, n=6, \text{kPa}$)

Table 3 IDP of L3/4 under different condition

状态 Condition	A组 Group A	B组 Group B	C组 Group C
前屈 Flexion	10.20 $\pm$ 1.22	12.02 $\pm$ 1.69 ^①	11.73 $\pm$ 1.17 ^①
后伸 Extension	8.94 $\pm$ 0.98	10.82 $\pm$ 1.51 ^①	9.43 $\pm$ 1.32 ^②
左右侧屈 Lateral bending	9.42 $\pm$ 0.69	11.26 $\pm$ 1.13 ^①	11.13 $\pm$ 1.00 ^①
左右旋 Rotation	9.56 $\pm$ 0.91	11.01 $\pm$ 0.86 ^①	10.91 $\pm$ 0.71 ^①

注:①与 A 组比较 $P<0.05$ ②与 B 组比较 $P<0.05$

Note: ①Compared with Group A, $P<0.05$, ②Compared with Group B, $P<0.05$

表 4 各组不同状态下 L5/S1 椎间盘内压值($\bar{x}\pm s, n=6, \text{kPa}$)

Table 4 IDP of L5/S1 under different condition

状态 Condition	A组 Group A	B组 Group B	C组 Group C
前屈 Flexion	10.51 $\pm$ 1.27	11.72 $\pm$ 0.94 ^①	11.33 $\pm$ 0.96 ^①
后伸 Extension	9.23 $\pm$ 0.85	10.17 $\pm$ 0.66 ^①	10.07 $\pm$ 0.17 ^①
左右侧屈 lateral bending	9.52 $\pm$ 0.88	10.22 $\pm$ 0.71 ^①	10.37 $\pm$ 0.93 ^①
左右旋 Rotation	9.72 $\pm$ 0.91	10.53 $\pm$ 0.79 ^①	10.71 $\pm$ 0.88 ^①

注:①与 A 组比较 $P<0.05$

Note: ①Compared with Group A, $P<0.05$

(即 C 组), L3/4 节段的活动度以后伸方向减小为明显($P<0.05$, 减小 0.32°), 而前屈、侧弯、旋转减小不明显($P>0.05$); L5/S1 活动度除前屈方向外均有增大趋势, 但无统计学意义($P>0.05$)。与 A 组比较, C 组 L3/4 节段活动度后伸及旋转无显著增大($P>0.05$), 前屈及侧屈有显著增大($P<0.05$) (分别比 A 组前屈增大 0.38° , 侧屈增大 0.28°); C 组 L5/S1 节段活动度均有增大, 但无统计学意义($P>0.05$)。

椎间盘内压: 与 A 组比较, B 组 L3/4 椎间盘内压增加, 且具有统计学意义($P<0.05$) (分别比 A 组前屈增大 1.82kPa , 后伸增大 1.88kPa , 侧弯增大 1.84kPa , 旋转增大 1.45kPa); L5/S1 盘内压增加($P<0.05$) (分别比 A 组前屈增大 1.21kPa , 后伸增大 0.94kPa , 侧弯增大 0.70kPa , 旋转增大 0.81kPa)。与 B 组比较, C 组 L3/4 的椎间盘内压减小 (分别比 B 组前屈减小 0.29kPa , 后伸减小 1.39kPa , 侧弯减小 0.13kPa , 旋转减小 0.10kPa), 但仅后伸减小有统计学意义($P<0.05$); L5/S1 的椎间盘内压在侧屈和旋转时增大, 但无统计学意义($P>0.05$) (分别比 B 组前屈减小 0.39kPa , 后伸减小 0.10kPa , 侧弯增大 0.15kPa , 旋转增加 0.18kPa)。与 A 组比较, C 组 L3/4 椎间盘内压增大, 其中前屈、侧屈及旋转显著增大($P<0.05$, 分别比 A 组前屈增大 1.53kPa , 侧屈增大 1.71kPa , 旋转增大 1.35kPa); C 组 L5/S1 椎间盘内压与 A 组相比显著增大 ($P<0.05$, 分别比 A 组前屈增大 0.82kPa , 后伸增大 0.84kPa , 侧屈增大 0.85kPa , 旋转增大 0.99kPa)。

3 讨论

3.1 内固定邻近节段椎间盘退变(ASD)

腰椎行坚强内固定后可使相邻节段的负荷过重, 加速邻近的椎间盘退变^[1,2]。由于邻近节段椎间盘退变而再次手术者, 文献报道效果欠佳^[1,3], 应慎重考虑再次手术, 所以如何减缓及预防脊柱融合内固定术后邻近节段椎间盘退变这一潜在风险已成为研究热点^[4,5]。

ASD 的发生原因是多方面的^[6,7], 包括年龄、邻近节段椎间盘本身是否已有退变、融合固定的方法、融合时脊柱生理曲线恢复以及机体自身的解剖学异常等。临床研究发现, 腰椎不稳及年龄偏大且原有脊柱退变以及融合节段多的患者邻近节

段椎间盘退变的发生率高^[2,8]。推测融合术后, 一方面邻近节段活动度增加, 另一方面脊柱应力分布的不平衡导致邻近节段椎间盘退变加速。在发生的部位, 上方相邻节段发生率(36%)远高于下方相邻节段(5.7%)。

3.2 Topping-off 作用与可选的弹性固定装置

目前报道中有多种腰椎后路非融合技术被用于防止融合邻近节段退变, 作为缓冲地带, 亦称 Topping-off 作用, 如 Dynesys、Isobar 棒、Bioflex、Accuflex 棒^[9]、Coflex 等。其中 Dynesys、Isobar 棒、Bioflex 均基于椎弓根螺钉技术, 考虑到其对相邻椎弓根的操作对骶棘肌剥离的创伤较大、钉道松动影响以后的手术操作, 故 Bertagnoli 将该类技术放在腰椎退变疾病阶梯治疗备选方法的第 6 层, 即最接近融合术的方法^[10]。而 Coflex 作为棘突间置入物, 手术操作创伤小, 方便放置, 即使行再次手术时亦对融合操作无影响。该假体既能维持棘突间高度, 又可以在腰椎屈伸活动中对抗上下棘突间的压迫, 并且在脊柱后伸位、前屈位时表现为材料本身弹性动态改变, 允许轴向旋转与侧弯。

3.3 Coflex 对内固定相邻节段的生物力学影响

本研究结果显示 L4/5 行椎弓根螺钉坚强固定后(即 B 组), 上方相邻节段 L3/4 的各方向的活动度均明显增大并有统计学意义, 这说明坚强固定后若承受同等的生理负荷则可使邻近节段负荷增加、活动度增大。同样在椎间盘内压方面也发现, 在 L4/5 坚强固定后, L3/4 屈、伸、侧弯过程中椎间盘内压均有增大并具有统计学意义。William 等^[11]研究发现, 静水压的增大可直接影响椎间盘细胞胶原和蛋白多糖的合成, 导致退变。在本研究中, 坚强固定节段的相邻椎间盘内压力升高, 将导致该椎间盘的退变过程加速。

在联合使用棘突间装置组(即 C 组)中, 上方相邻节段 L3/4 左右侧弯时活动度和单纯 L4/5 坚强固定组无明显差别, 大于完整组的活动度。前屈、后伸和左右旋转活动度均比单纯 L4/5 坚强固定组明显降低, 后伸时活动度明显减小, 且小于完整组, 而前屈和左右旋转活动度仍较完整组大。此结果说明 Coflex 可以明显限制固定节段的后伸运动, 可以轻度限制固定节段的前屈和旋转运动, 而对侧弯运动没有影响, 这与国外作者的研究结果一致^[12]。本实验还显示棘突间稳定装置 Coflex 对后伸的限制作用明显强于对前屈和旋转的限制作

用。脊柱后部结构特别是棘上和棘间韧带对维持脊柱稳定和限制脊柱过度屈曲有重要作用,而在置入 Coflex 时损伤棘间韧带,因而影响 Coflex 屈曲限制的作用发挥。在椎间盘内压方面,联合使用 Coflex 系统组(C 组)的椎间盘内压在屈、侧弯方向时的变化趋势与 L4/5 坚强固定组相同,但幅度较小,而在后伸方向则椎间盘内压变化极小,推测与 Coflex 撑开椎间隙的作用有关。

3.4 Coflex 联合椎弓根螺钉固定后对下方相邻节段的影响

多数学者^[13,14]认为,融合节段的上方邻近节段常比下方邻近节段更容易出现应力集中。但 Shono 等^[15]通过牛脊柱的体外生物力学研究发现,在辅以内固定的脊柱融合术可使下方腰骶相邻节段受到的压力更为集中。因而对这一问题尚存在争论。本研究结果发现,在坚强固定的上方联合使用 Coflex,可使下方相邻节段的活动度和椎间盘内压增大,推测与棘突间装置可增加整体腰椎的刚度有关,其中尤以后伸时增加明显。这可能对下方节段的远期退变加速产生不良影响。

3.5 本研究的局限性

本生物力学研究受限于实验对象为非活体标本,无法测定周围肌肉和腹压等对实验的影响,以此结果推断临床现象有一定局限性。此外,关节突关节作为“三关节复合体”的重要组分,在腰椎退变中起着重要的作用,本研究仅对节段活动度及椎间盘内压进行了测定,而未对关节突关节的受力情况进行测量。

4 参考文献

1. Park P, Garton HJ, Gala VC, et al. Adjacent segment disease after lumbar or lumbosacral fusion: review of the literature[J]. Spine, 2004, 29(17): 1938-1944.
2. Yang JY, Lee JK, Song HS. The impact of adjacent segment degeneration on the clinical outcome after lumbar spinal fusion[J]. Spine, 2008, 33(5): 503-507.
3. Phillips FM, Carlson GD, Bohlman HH, et al. Results of surgery for spinal stenosis adjacent to previous lumbar fusion [J]. J Spinal Disord, 2000, 13(5): 432-437.
4. Fu L, France A, Xie Y, et al. Functional and radiological outcomes of semi-rigid dynamic lumbar stabilization adjacent to single-level fusion after 2 years [J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2014, 134(5): 605-610.
5. Grasso G, Giambardino F, Iacopino DG. Clinical analysis following lumbar interspinous devices implant: where we are and where we go[J]. Spinal Cord, 2014, 52(10): 740-743.
6. Okuda S, Iwasaki M, Miyauchi A, et al. Risk factors for adjacent segment degeneration after PLIF[J]. Spine, 2004, 29(14): 1535-1540.
7. Lee CS, Hwang CJ, Lee SW, et al. Risk factors for adjacent segment disease after lumbar fusion[J]. Eur Spine J, 2009, 18(11): 1637-1643.
8. Videback TS, Egund N, Christensen FB, et al. Adjacent segment degeneration after lumbar spinal fusion: the impact of anterior column support: a randomized clinical trial with an eight- to thirteen-year magnetic resonance imaging follow-up [J]. Spine, 2010, 35(22): 1955-1964.
9. Reyes-Sánchez A, Zárate-Kalfópulos B, Ramírez-Mora I. Posterior dynamic stabilization of the lumbar spine with the Accuflex rod system as a stand-alone device: experience in 20 patients with 2-year follow-up[J]. Eur Spine J, 2010, 19(12): 2164-2170.
10. Bertagnoli R, Yue JJ, Shah RV, et al. The treatment of disabling multilevel lumbar discogenic low back pain with total disc arthroplasty utilizing the ProDisc prosthesis: a prospective study with 2-year minimum follow-up[J]. Spine, 2005, 30(19): 2192-2199.
11. Williams FM, Bansal AT, van Meurs JB, et al. Novel genetic variants associated with lumbar disc degeneration in northern Europeans: a meta-analysis of 4600 subjects [J]. Ann Rheum Dis, 2013, 72(7): 1141-1148.
12. Wilke HJ, Drumm J, Häussler K, et al. Biomechanical effect of different lumbar interspinous implants on flexibility and intradiscal pressure[J]. Eur Spine J, 2008, 17(8): 1049-1056.
13. Dennison CR, Wild PM, Byrnes PW, et al. Ex vivo measurement of lumbar intervertebral disc pressure using fibre-Bragg gratings[J]. J Biomech, 2008, 41(1): 221-225.
14. Hasegawa K, Kitahara K, Hara T, et al. Evaluation of lumbar segmental instability in degenerative diseases by using a new intraoperative measurement system[J]. J Neurosurg Spine, 2008, 8(3): 255-262.
15. Shono Y, Kaneda K, Abumi K, et al. Stability of posterior spinal instrumentation and its effects on adjacent motion segments in the lumbosacral spine[J]. Spine, 1998, 23(14): 1550-1558.

(收稿日期:2014-09-17 修回日期:2014-12-16)

(英文编审 蒋欣/贾丹彤)

(本文编辑 彭向峰)