

临床论著

新型 PEEK 棒半刚性固定系统应用于腰椎退变性疾病手术治疗的临床疗效

杨红军^{1,2}, 樊勇¹, 吴子祥¹, 杨超¹, 曾艳平¹, 雷伟¹, 桑宏勋¹

(1 第四军医大学西京医院骨科 710032 西安市; 2 陕西省扶风县人民医院骨科 722200)

【摘要】目的:观察聚醚醚酮(polyetheretherketone, PEEK)棒半刚性固定系统应用于腰椎退变性疾病后路减压、椎体间融合手术治疗的临床效果。**方法:**回顾性分析 2010 年 1 月~2012 年 1 月收治的 51 例行后路椎间植骨融合术(PLIF)的腰椎退变性疾病患者, PEEK 棒内固定组 24 例, 钛合金棒固定组 27 例; 均行标准腰椎后路减压、椎间融合、内固定术。通过腰痛 VAS 评分及下肢痛 VAS 评分、ODI 评分等指标评价临床疗效; 采用改良 Brantigan 椎间融合标准评价植骨融合情况。**结果:**所有患者均获得完整的术后随访资料。两组术后不同时间点腰痛及下肢痛 VAS 评分、ODI 评分较术前比较差异有统计学意义($P<0.01$); 末次随访时, PEEK 棒组患者腰痛 VAS 评分(1.9 ± 0.4)明显优于钛棒组(2.1 ± 0.4), 差异有统计学意义($P<0.05$), 两组间下肢痛 VAS 评分及 ODI 评分差异无显著性($P>0.05$)。根据改良 Brantigan 椎间融合标准, 术后 3 个月 PEEK 棒组(83.3%, 20 例)融合率显著高于钛棒组(55.6%, 15 例), 两组间差异有显著性($P<0.05$); 术后 6 个月, PEEK 棒组融合率为 91.7%, 而钛棒组融合率为 81.5%(22 例), 两组间差异无显著性($P>0.05$); 术后 12 个月两组植骨融合率差异无显著性($P>0.05$)。**结论:**PEEK 棒-椎弓根螺钉半刚性内固定系统应用于腰椎退变性疾病临床治疗中可获得满意的临床疗效, 与传统钛棒内固定系统比较术后腰痛持续缓解明显, 其长期疗效仍需要进一步观察。

【关键词】腰椎; 退变性疾病; PEEK 棒; 钛棒; 椎间融合

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2015.09.11

中图分类号: R681.5, R687.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2015)-09-0826-06

The clinical outcomes of a novel PEEK rod semi-rigid fixation system in the treatment of lumbar degenerative disease/YANG Hongjun, FAN Yong, WU Zixiang, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2015, 25(9): 826-831

【Abstract】 Objectives: To evaluate the clinical outcomes of polyetheretherketone (PEEK) rod semi-rigid fixation system in the treatment of lumbar degenerative disease. **Methods:** From January 2010 to January 2012, 51 cases with lumbar degenerative disease were randomized into two groups: PEEK rod group(24 cases) and titanium alloy rod group(27 cases). The posterior lumbar interbody fusion with pedicle screw fixation was performed on all patients. The VAS scores of back pain and leg pain, and the ODI scores of leg pain were evaluated. The spine fusion was assessed according to the modified Brantigan grade. **Results:** All patients were followed up. Compared with the preoperation, significant differences were detected in the VAS scores and ODI scores of back pain and leg pain at the different postoperative time points between two groups ($P<0.01$). The VAS scores of back pain (1.9 ± 0.4) in the PEEK rod group were lower than those of the control group (2.1 ± 0.4)($P<0.05$). At the latest follow-up, no significant difference was detected between two groups on leg pain VAS score and ODI score. According to the modified Brantigan grade, at 3 months after operation, the fusion rate in the PEEK rod group (83.3%, 20 cases) was higher than that in the titanium rod group (55.6%, 15 cases)($P<0.05$). At 6 months after operation, the fusion rate in the PEEK rod group(91.7%, 22 cases) was still higher than that in the control group(81.5%, 22 cases)($P>0.05$). At 12 months after operation, there was no significant difference in fusion rate between two groups ($P>0.05$). **Conclusions:** The semi-rigid

第一作者简介: 男(1980-), 主治医师, 在读临床在职硕士研究生, 研究方向: 脊柱外科

电话: (0917)5211051 E-mail: haoyisheng6682@163.com

通讯作者: 桑宏勋 E-mail: hxsang@fmmu.edu.cn

lumbar fixation system (PEEK rod) can achieved satisfied clinical outcomes in the treatment of lumbar degenerative disease. Compared with traditional titanium rod fixation system, it has lower back pain. But the long-term outcomes need to be further studied.

【Key words】 Lumbar vertebrae; Degenerative disease; PEEK rod; Titanium rod; Interbody fusion.

【Author's address】 Department of Orthopaedics, Xi'jing hospital, the Fourth Military Medical University, Xi'an, 710032, China

腰椎后路椎间植骨融合术 (posterior lumbar interbody fusion, PLIF) 是治疗腰椎退行性疾病的常用术式之一;但是,目前临床常用的脊柱内固定器械采用钛合金棒和钛质椎弓根螺钉所组成的钉棒系统,因其过高的刚度造成术后融合节段运动功能丧失、加速邻近节段退变等^[1-2],被越来越多的学者认同并重视。为解决钉棒系统上述问题,随着新材料、新技术在骨科的应用,基于聚醚醚酮树脂 (polyetheretherketone, PEEK) 的 PEEK 棒-椎弓根螺钉半刚性内固定系统,近年来已被应用于临床;但国内鲜有随访报道。我科自 2010 年 1 月~2012 年 1 月行腰椎 PLIF 手术的腰椎退变性疾病患者 51 例,采用 PEEK 棒-椎弓根螺钉半刚性系统 24 例及传统钉棒内固定系统 27 例,随访 3 年以上,对其临床疗效进行总结分析,报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料

纳入标准:①临床症状表现为严重的腰腿痛,经过严格保守治疗 6 个月以上无效,X 线、CT 及 MRI 影像学资料与临床表现一致;②术前确诊为腰椎间盘突出、腰椎管狭窄症,腰椎滑脱≤Ⅰ度;③均为单节段手术,行 PLIF 手术患者;④随访时间不少于 3 年。

排除标准:①手术需多节段减压融合患者;②既往有腰椎手术、外伤史,腰椎骨折、感染、肿瘤、重度骨质疏松症、精神病等疾病史;③存在侧后凸畸形,腰椎滑脱≥Ⅱ度的患者。

本研究共回顾性纳入腰椎间盘退变性疾病患者 51 例,PEEK 棒-椎弓根螺钉半刚性系统 (PEEK 棒组) 24 例;传统钉棒内固定系统 (钛棒组) 27 例。两组患者例数、术前年龄、性别、疾病构成、术前 VAS 评分及 ODI 功能评分、术前融合节段、术前手术间隙高度、随访时间比较,差异无统计学意义 ($P>0.05$,表 1)。

1.2 手术方法及术后处理

表 1 两组患者术前一般资料

Table 1 The clinical data in two groups before operation

	PEEK 棒组 Peek rod group	钛棒组 Tid rod group
病例数 NO.of case	24	27
性别 (男/女) Gender (M/F)	13/11	12/15
年龄 (岁) Age (y)	47.5±5.3	49.9±5.3
疾病构成 Diseases of composition		
腰椎间盘突出症 Lumbar disc herniation	13	15
腰椎管狭窄症 Lumbar stenosis syndrome	9	9
腰椎滑脱症 Mild lumbar spondylolisthesis	2	3
融合节段 (L3/4/L4/5/L5/S1) Fusion segment	3/13/8	2/15/10
术前腰痛 VAS 评分 VAS score of low back pain preoperative	7.0±0.8	6.8±0.8
术前下肢痛 VAS 评分 VAS score of legs pain preoperative	7.3±0.6	7.3±0.5
术前 ODI 评分 ODI score of preoperative	71.7±9.2	70.2±9.9
手术椎间隙高度 (mm) Disc height of operated segment	10.8±1.8	10.9±1.6
随访时间 (月) Follow-up time (months)	40.9±3.8	42.9±4.5

所有手术均由同一组医生完成,全部采取气管插管全麻;取俯卧位,后正中纵形切口,依次显露至椎板及关节突关节。置入椎弓根螺钉后行椎板切除减压 (保留棘突复合体)、椎间盘切除。完成彻底神经减压后,椎间隙填入减压时获得的自体骨粒及置入填充自体骨的椎体间融合器,力争椎体间充分植骨。根据分组,PEEK 组需先安装金属模拟棒进行撑开或提拉,C 型臂 X 线机透视证实位置满意后,再分别更换相应长度的 PEEK 棒安装于椎弓根螺钉钉尾;钛棒组以钛棒安装于钉尾并安装横连。两组椎间隙植骨后均适当加压抱紧,利于椎体间融合。最后透视确认椎间隙高度及腰椎生理曲度良好,内固定位置良好后关闭切口。本

研究中,所有椎弓根螺钉、椎体间融合器(cage)、PEEK 棒及钛棒均来自美国美敦力公司;cage 材质为 PEEK 材料(cornerstone[®]),常用规格有(8×26mm、10×26mm、12×26mm)。

术后 2~3d 拔除引流管,常规补液及应用抗生素预防感染。术后复查腰椎正侧位片,确认内固定位置及椎间植骨情况。术后第 2 天开始床上行双下肢直腿抬高功能锻炼,防止神经根粘连;术后 1 周在腰背支具保护下下床锻炼;术后支具外固定保护 3 个月。

1.3 随访观察指标

所有患者术后 3、6、12、24 个月及末次随访时复查,拍摄腰椎正侧位 X 线片,必要时复查腰椎动力位 X 线片、腰椎 CT 或腰椎 MRI;并记录腰痛及下肢痛 VAS 评分及 ODI 功能评分;术前及术后随访测量手术间隙椎间高度及植骨融合情况。椎间隙高度:在腰椎侧位片上测量相邻椎体上下终板前、中、后高度,计算平均值;椎体间植骨融合情况采用改良 Brantigan 标准^[3]评定。纳入研究的患者腰椎 X 线片、CT 及 MRI 由我院影像学中心完成拍摄,影像学测量采用 PASC 软件系统处理,课题组专人测量并记录。

1.4 统计学处理

应用统计学软件包 SPSS 19.0 进行统计分析,计量资料采用($\bar{x} \pm s$)形式表示,组间比较采用两独立样本 *t* 检验法,组内比较采用配对 *t* 检验;计数资料组间比较采用卡方检验;以 $P < 0.05$ 有统计学差异, $P < 0.01$ 有显著性统计学差异。

2 结果

患者均顺利完成手术,无硬脊膜损伤、脑脊液漏、神经根损伤、术后切口感染等手术并发症发生;术后临床症状均明显改善;术后 X 线片检查见减压彻底,内固定位置良好。两组患者均获得完整随访,随访期间未发现断钉、断棒及螺钉松动、假关节形成及术后复发翻修等并发症,PEEK 棒组随访 40±3.8 个月(36~48 个月),钛棒组随访 42.9±4.5 个月(36~52 个月)。

两组内腰痛 VAS 评分及下肢痛 VAS 评分术后各随访时间点与术前比较,差异有统计学意义($P < 0.01$);两组间下肢 VAS 评分在术后各时间点比较差异无统计学意义(表 2),两组间腰痛 VAS 评分在末次随访时差异存在统计学意义($P = 0.023$)。两组间术后各时间点 ODI 评分均较术前改善,差异有统计学意义($P < 0.01$),术后各时间点两组间比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。

术前及术后复查拍片两组手术节段椎间隙高度差异无统计学意义($P > 0.05$),术后 3 个月 PEEK 棒组手术节段椎间隙高度低于钛棒组,两组间差异存在统计学意义($P = 0.041$);而术后 6 个月及 12 个月两组间差异无统计学意义(表 3)。术后 3 月 PEEK 棒组植骨成功融合率 83.3%(20 例),钛棒组植骨成功融合率 55.6%(15 例),两组间差异存在统计学差异($P = 0.033$);术后 6 个月,PEEK 棒组融合率 91.7%(22 例),钛棒组融合 81.5%(22 例),两组间差异无统计学意义;术后 12 个月时,两组患者全部融合成功(表 4,图 1)。

3 讨论

3.1 腰椎后路减压植骨融合 PEEK 棒椎弓根螺

表 2 PEEK 棒组与钛棒组腰痛及下肢痛 VAS 评分、ODI 评分
Table 2 The VAS of low back pain, legs pain and ODI score between two groups

	腰痛 VAS 评分 VAS score of low back pain		下肢痛 VAS 评分 VAS score of legs pain		ODI 评分(%) ODI score	
	PEEK 棒组 Peek rod group	钛棒组 Tid rod group	PEEK 棒组 Peek rod group	钛棒组 Tid rod group	PEEK 棒组 Peek rod group	钛棒组 Tid rod group
术前 Preoperation	7.0±0.8	6.8±0.8	7.3±0.6	7.3±0.5	71.7± 9.2	70.2±9.9
术后 1 年 1 year postoperation	3.1±0.7	2.9±0.6	2.2±0.4	2.4±0.4	27.0±5.1	27.8±5.0
术后 2 年 2 years postoperation	2.2±0.4	2.4±0.4	1.4±0.2	1.5±0.2	21.9±5.5	22.5±5.6
末次随访 Final follow-up	1.9±0.4 ^①	2.1±0.4	1.3±0.2	1.3±0.1	17.1±5.1	18.0±5.3

注:①与钛棒组同时时间点比较 $P < 0.05$

Note:①Compared with the Tid rod group at the same time, $P < 0.05$

表 3 两组术前及术后手术节段椎间高度变化

(mm)

Table 3 The height of intervertebral space of the two groups before and post operation

	术前 Preoperation	术后 1 周 One week postoperation	术后 3 个月 3 months postoperation	术后 6 个月 6 months postoperation	术后 12 个月 12 months postoperation
PEEK 棒组 Peek rod group	10.8±1.8	11.9±1.7	10.8±1.7 ^①	11.2±1.6	11.1±1.6
钛棒组 Tid rod group	10.9±1.6	12.1±1.5	11.7±1.4	11.4±1.4	11.4±1.3

注:①与钛棒组同时时间点比较 $P<0.05$ Note:①Compared with the Tid rod group at the same time, $P<0.05$

表 4 两组植骨融合率比较

Table 4 The comparison of the fusion rate among two groups

	PEEK 棒组 Peek rod group	钛棒组 Tid rod group
术后 3 个月 3 months postoperation	83.3% ^①	55.6%
术后 6 个月 6 months postoperation	91.7%	81.5%
术后 1 年 1 year postoperation	100%	100%

注:①与钛棒组同时时间点比较 $P<0.05$ Note: ①Compared with the Tid rod group at the same time, $P<0.05$

钉内固定的临床疗效

PEEK 棒作为替代金属棒的可选组件具有强度高、弹性模量与皮质骨相近、摩擦性能优异、蠕变量低、惰性高、生物相容性出色、成像兼容性好等生物学特点^[4-5];徐宏光等^[6]、于秀淳等^[7]临床应用研究认为 PEEK 棒椎弓根螺钉半刚性内固定系统适用于腰椎退变性疾病,但临床疗效仍需进一步观察。

本研究中两组患者术后 VAS 评分及 ODI 功能障碍评分与术前存在显著差异,两组内固定系统的应用均能明显改善患者术前临床症状。由于 PEEK 棒可提供同钛棒同样的稳定性和持久性^[8],达到同钛棒术后同样的短期满意效果^[6,7]。但是本研究术后随访发现,PEEK 棒组患者腰痛持续缓解,而钛棒组患者腰痛症状发生着由缓解到加重的缓慢变化,在末次随访时两者之间出现统计学差异;而术后两组下肢痛未见加重。

我们认为 PEEK 棒组较钛棒组腰痛缓解的可能原因有以下几点:(1)传统钛棒-椎弓根螺钉内固定加重邻近节段退变 (adjacent segment degeneration, ASD) 而出现腰痛症状, Aota 等^[9]研究认为椎弓根固定患者术后平均 25 个月后发现不稳, Etebar 等^[10]发现腰椎内固定平均 26.8 个月

出现伴有症状的 ASD; PEEK 棒可能能够缓解 SAD 的发生, 减缓融合间隙邻近节段的退变^[8]; Athanasakopoulos M^[11]等对 52 例患者使用 PEEK 棒系统研究, 平均随访 3 年, 未见邻近节段退变。(2) 钛合金钉棒内固定系统包括横连装置, 当腰椎长期活动时, 横连与棘突复合体之间的摩擦引起腰痛, 而 PEEK 棒系统无此因素。(3) PEEK 棒是预弯型棒, 符合腰椎生理曲度; 而钛棒则是术中根据临床经验弯折, 存在两棒的弯度不一致以及弯度不符合腰椎生理曲度, 形成局部应力增大, 导致腰痛。(4) PEEK 棒两端均呈圆形, 选入合适长度置入体内后, 两端一般长出 0.5cm; 而钛棒术中裁剪存在两端过长, 以及裁剪后两端较锐利, 随着术后患者腰部活动的逐渐增加, 出现棒尾对周围刺激而引起腰痛。

传统钉棒系统是由椎弓根螺钉、钛棒、横连及螺帽等组成, 两侧椎弓根螺钉钛棒装置通过横连组成一个坚强的三维稳定结构, 在提高内固定稳定性的同时提高脊柱稳定性^[12]。本研究中患者术中保留棘突复合体, 术后增强脊柱稳定性; 但横连对棘突复合体的慢性刺激, 可能会成为患者腰痛的一个诱因。

3.2 PEEK 棒椎弓根螺钉内固定的手术节段植骨融合

本研究中两组内固定系统术后随访 1 年时, 手术间隙植骨均达到融合标准; 但 PEEK 棒组在术后 3 个月时已有 83.3% (20 例) 达到骨性融合 ($P=0.033$), 术后 6 个月时 PEEK 棒组融合率仍然高于钛棒组, 虽然两组间差异已无统计学意义, 随访到术后 1 年时两组植骨均骨性融合, 与国内学者研究一致^[6,7]; 进一步证实 PEEK 棒椎弓根内固定系统较传统钛棒内固定系统植骨融合率高。这主要得益于 PEEK 棒的生物力学特性, PEEK 棒的弹性模量是 3.5GPa 更接近皮质骨的约

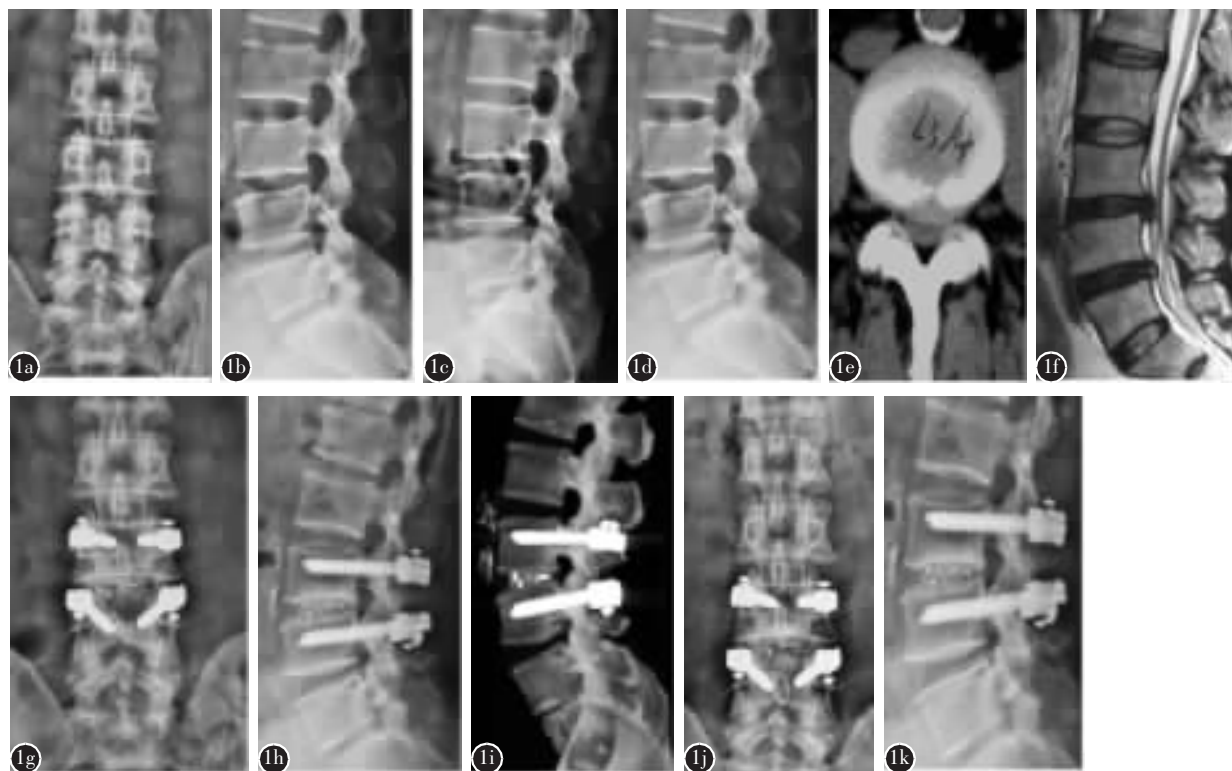


图 1 患者男, 43 岁, L3/4 椎间盘突出症, 经腰椎后路椎板减压、间盘切除、植骨融合内固定术, 术后随访 42 个月 **a, b** 术前腰椎正侧位片示腰椎生理曲度存在, 腰 3/4 椎间隙变窄 **c, d** 术前腰椎过屈过伸位片示 L3/4 节段活动度 14° , 表明 L3/4 节段不稳 **e** 术前腰椎 CT 示 L3/4 椎间盘中央偏左突出 **f** 腰椎 MRI 示 L3/4 椎间盘突出, 向下脱出至椎管内, 致椎管狭窄 **g, h** 术后 1 周拍腰椎正侧位片示内固定位置良好 **i** 腰椎 CT 示 L3/4 椎间融合良好 **j, k** 末次随访腰椎正侧位片示 L3/4 椎间骨性融合良好, 内固定牢靠。

Figure 1 Male, 43years old, L3/4 lumbar disc herniation received the posterior lumbar interbody fusion and pedicle screw fixation, The follow-up time was 42 months **a, b** Lumbar radiographs showed lumbar lordosis exists, L3/4 intervertebral narrowed **c, d** ROM of L3/4 measured at excessive flexion and extension preoperation was 14° , showed lumbar instability at L3/4 segment **e** The preoperation CT scan showed lumbar disc herniation of Left of center in L3/4 **f** The preoperative MRI showed lumbar spinal stenosis in L3/4 **g, h** The 1 week postoperative radiographs showed well position of internal fixation **i** The 3 months postoperative CT reconstruction showed bone fusion **j, k** The last follow-up lumbar radiographs showed well bony fusion and stable fixation.

12GPa, 而钛合金是约 110 GPa^[13,14]。三维有限元 (FEA) 方法比较 5.5mm 和 6.35mm PEEK 棒和钛棒的力学性能, 发现 PEEK 棒可分别承载从后方结构转移到前柱的总轴向负荷的 14% 和 15%, 与 5.5mm 钛棒相比, 增加了前柱大约 21% 的负荷, 减少了后方结构 50% 的负荷^[7]; 并可增加椎间植骨应力刺激促进骨融合^[15]。PEEK 棒具有更接近骨的生理刚度, 即保证了融合节段的稳定性, 又使负荷前移及应力分布更广泛、均匀, 有利于重塑脊柱融合节段的应力传导, 降低骨-螺钉界面引力, 增加植骨区负荷。本研究中, PEEK 棒组植骨间隙高度在术后 3 月较钛棒组下降 ($P=0.041$), 随着两组植

骨间隙骨性融合后, 差异无统计学意义; 验证了 PEEK 棒存在一定动度, 在术后早期导致植骨间隙降低促使植骨区植骨与上下椎板充分接触, 增加植骨接触面积, 促进植骨融合。

3.3 PEEK 棒临床使用注意事项

2005 年美国 FDA 批准 PEEK 腰椎椎弓根螺钉内固定系统应用于单节段腰椎椎间融合^[16], 体外生物力学^[15,15]及临床应用^[7,8]多以腰椎单节段固定为主; 且 PEEK 棒-椎弓根螺钉半刚性系统在国内应用以短期随访较多。因此, 在手术适应证选择上, 对于退变重、多节段退变、胸腰椎骨折、脊柱畸形等仍采用钛合金固定棒, 期望得到牢固固定^[7]。

虽然国外报道^[8,17]可应用于多节段椎间融合术中,但这是否会增加断棒、断钉、翻修等风险,需进一步观察,国内亦未有多节段应用报道。无论是钛棒组还是 PEEK 棒组,我们手术选择人字脊进针点,避免对邻近节段关节突、关节囊的过多破坏,而避免人为形成邻近节段退变的因素;同时保留尽量保留融合节段棘突复合体,对于融合节段已无意义,但有利于保持脊柱的力学稳定性^[18]。椎体间植骨,我们选择患者自体骨,不仅在融合器中填塞,在融合器周围也同样植入充分的自体骨;上下椎体终板之间融合面积更大,应力分布更广、更均匀,更接近人体脊柱载荷的传导模式,本研究结果植骨融合更好。

3.4 结论

本研究证实,PEEK 棒用于腰椎退变性疾病单间隙植骨融合内固定术是较理想的选择;术后临床效果明显,尤其是术后腰痛持续缓解,手术节段植骨融合率高。但对于 PEEK 的优点及缺陷,我们需要长期及大样本病例进行进一步临床研究;其次 PEEK 棒内固定系统价格较高,在临床应用时也是需要考虑的问题。

4 参考文献

- Kanayama M, Togawa D, Hashimoto T, et al. Motion-preserving surgery can prevent early break down of adjacent segments: comparison of posterior dynamic stabilization with spinal fusion[J]. Spinal Disord Tech, 2009, 22(7): 463-467.
- Park P, Garton HJ, Gala VC, et al. Adjacent segment disease after lumbar or lumbosacral fusion: review of the literature. Spine, 2004, 29(17): 1938-1944.
- Brantigan JW, Steffee AD, Lewis ML, et al. Lumbar interbody fusion using the Brantigan I/F cage for posterior lumbar interbody fusion and the variable pedicle screw placement system: two-year results from a Food and Drug Administration investigational device exemption clinical trial[J]. Spine, 2000, 25(11): 1437-1446.
- Kurtz SM, Devine JN. PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants[J]. Biomaterials, 2007, 28(32): 4845-4869.
- Ponnappan RK, Serhan H, Zarda B, et al. Biomechanical evaluation and comparison of polyetheretherketone rod system to traditional titanium rod fixation[J]. Spine, 2009, 9(3): 263-267.
- 徐宏光, 宋俊兴, 王弘, 等. 椎弓根螺钉 PEEK 棒动态稳定内固定系统治疗腰椎退行性疾病[J]. 解剖与临床, 2012, 17(3): 181-185.
- 于秀淳, 黄伟明, 周银, 等. 聚醚醚酮棒椎弓根内固定系统在腰椎退行性疾病治疗中的应用 [J]. 中华生物医学工程杂志, 2012, 18(5): 395-398.
- Mavrogenis AF, Vottis C, Triantafyllopoulos G, et al. PEEK rod systems for the spine [J]. Eur J Orthop Surg Traumatol. 2014, 24(Suppl 1): S111-116.
- Aota Y, Kumano K, Hirabayashi S. Postfusion instability at the adjacent segments after rigid pedicle screw fixation for degenerative lumbar spinal disorders[J]. J Spinal Disord, 1995, 8(6): 464-473.
- Etebar S, Cahill DW. Risk factors for adjacent-segment failure following lumbar fixation with rigid instrumentation for degenerative instability[J]. Neurosurg, 1999, 90(2 Suppl): 163-169.
- Athanasakopoulos M, Mavrogenis AF, Triantafyllopoulos G, et al. Posterior spinal fusion using pedicle screws [J]. Orthopedics, 2013, 36(7): e951-e957.
- 朱旻宇, 黄其杉, 池永龙, 等. 对带横连杆的椎弓根钉固定胸腰段脊柱骨折(T11~L3)的稳定性评价[J]. 医用生物力学, 2010, 25(2): 100-104.
- Galbusera F, Bellini CM, Anasetti F, et al. Rigid and flexible spinal stabilization devices: a biomechanical comparison [J]. Med Eng Phy, 2010, 33(4): 490-496.
- Smit TH, Muller R, Wuisman PI et al. Changes in bone architecture during spinal fusion: three years follow-up and the role of cage stiffness[J]. Spine, 2003, 28(16): 1802-1809.
- 黄伟明, 于秀淳, 周银, 等. PEEK 棒椎弓根螺钉内固定系统的三维有限元分析[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2012, 9(4): 4-8.
- Bonon CM, Kadaba M, Vaccaro AR. Posterior pedicle fixation-based dynamic stabilization devices for the treatment of degenerative diseases of the lumbar [23spine [J]. J Spinal Disord Tech, 2009, 22(5): 376-383.
- Lure FD, Bosco G, Cappuccio M, et al. Posterior lumbar fusion by peek rods in degenerative spine: preliminary report on 30 cases[J]. Eur Spine, 2012, 21(Suppl): S50-54.
- 马凯, 姜长明, 杨群, 等. 保留脊柱后方韧带复合体腰椎管扩大术的基础研究与临床应用[J]. 中国修复重建外科杂志, 2008, 22(8): 918-922.

(收稿日期:2015-04-19 修回日期:2015-07-16)

(英文编审 唐翔宇/贾丹彤)

(本文编辑 彭向峰)