

技术方法

DOI: 10.13406/j.cnki.cyxh.001490

可吸收形状记忆聚氨酯腰椎间融合器的生物力学评价

罗帅红¹, 邓忠良¹, 田冬冬¹, 罗敏², 罗彦凤²

(1. 重庆医科大学附属第二医院骨科, 重庆 400010; 2. 重庆大学生物工程学院生物材料与仿生工程研究中心, 重庆 400030)

【摘要】目的:评价自主研发的可吸收形状记忆聚氨酯(shape memory polyurethane, SMPU)腰椎间融合器(cage)在尸体腰椎单节段的生物力学特性。**方法:**将 15 具腰骶椎(L1~S1)标本随机分为 3 组:自体髂骨组($n=5$), SMPU cage 组($n=5$), 聚醚醚酮(polyetheretherketone, PEEK) cage 组($n=5$)。通过腰椎侧方入路, 摘除 L3~4 椎间盘髓核后植入 3 种内植物, 在力学试验机上测试每组标本术前与术后的运动范围(range of motion, ROM)及轴向破坏载荷。**结果:**ROM 结果显示:术前自体髂骨组、SMPU cage 组及 PEEK cage 组在前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左旋转、右旋转 6 个方向上的 ROM 相比较, 差异均无统计学意义($P>0.05$)。自体髂骨组在 6 个方向上的术后 ROM 均较术前明显增加($P<0.05$); SMPU cage 组在 6 个方向上的术后 ROM 均较术前明显减少($P<0.05$); PEEK cage 组在 6 个方向上的术后 ROM 均较术前明显减少($P<0.05$)。SMPU cage 组与 PEEK cage 组术后在 6 个方向上的 ROM 均明显低于自体髂骨组($P<0.05$); SMPU cage 组与 PEEK cage 组术后在 6 个方向上的 ROM 相比较, 差异无统计学意义($P>0.05$)。轴向压缩测试结果显示: PEEK cage 组的破坏载荷较 SMPU cage 组和自体髂骨组明显增加($P=0.000$), SMPU cage 组的破坏载荷较自体髂骨组明显增加($P=0.000$)。**结论:**SMPU cage 能满足腰椎椎间融合的初始稳定性, 并能够承载腰椎的生理负荷。

【关键词】腰椎; 形状记忆聚氨酯; 椎间融合器; 生物力学**【中图分类号】**R687.3; 318.01**【文献标志码】**A**【收稿日期】**2016-11-02**作者介绍:**罗帅红, Email: 122694603@qq.com,

研究方向: 骨科生物力学及脊柱疾病的研究。

通信作者:邓忠良, Email: deng7586@gmail.com。**基金项目:**重庆市卫生计生委医学科研发资助项目(编号:2016ZDXM007)。**优先出版:**http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1046.R.20180109.1125.046.html

(2018-01-09)

- [2] Zou H, Xiang M, Ye X, et al. Reduction of urinary uric acid excretion in patients with proteinuria[J]. J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci, 2015, 1006(23): 59-64.
- [3] Mount DB, Kwon CY, Zandi-Nejad K. Renal urate transport[J]. Rheum Dis Clin North Am, 2006, 32(2): 313-331.
- [4] Azevedo VF, Buair PG, Giovannella LH, et al. Allopurinol, benzbromarone, or a combination in treating patients with gout: analysis of a series of outpatients[J]. Int J Rheumatol, 2014, 2014(1): 1-5.
- [5] Kamboj A, Saini M, Rajan LS, et al. Construction of infectious cDNA clone derived from a classical swine fever virus field isolate in BAC vector using in vitro overlap extension PCR and recombination[J]. Journal of Virological Methods, 2015, 226(12): 60-66.
- [6] 陈丹, 韩晶, 史洪娜, 等. 球形节杆菌尿酸酶的表达、纯化及其活性[J]. 中国生物制品学杂志, 2014, 27(3): 351-356.
- [7] Medina-Escobedo M, Alcocer-Dzul R, López-López J, et al. Obesity as a risk factor for metabolic disorders in adults with urolithiasis[J]. Rev Med Inst Seguro Soc, 2015, 53(6): 692-697.
- [8] Mancia G, Grassi G, Borghi C. Hyperuricemia, urate deposition and

the association with hypertension[J]. Curr Med Res Opin, 2015, 2(Suppl): 15-19.

[9] Larsen KS, Pottegård A, Lindegaard H, et al. Is urate crystal precipitation a predictor of cardiovascular risk in hyperuricemic patients? A Danish cohort study[J]. Arthritis Res Ther, 2015, 17(21): 304-310.

[10] Hediger MA, Johnson RJ, Miyazaki H, et al. Molecular physiology of urate transport[J]. Physiology (Bethesda), 2005(20): 125-133.

[11] Miyaoka T, Mochizuki T, Takei T, et al. Serum uric acid levels and long-term outcomes in chronic kidney disease[J]. Heart Vessels, 2014, 29(4): 504-512.

[12] Liu X, Wen M, Li J, et al. High-yield expression, purification, characterization, and structure determination of tag-free *Candida utilis* uricase[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2011, 92(3): 529-537.

[13] Zhang ZH, Wang ZQ, Yang Z, et al. A novel mice model of metabolic syndrome: the high-fat-high-fructose diet-fed ICR mice[J]. Exp Anim, 2015, 64(4): 435-542.

(责任编辑: 张辉洁)

Biomechanical evaluation of absorbable shape memory polyurethane lumbar interbody fusion cage

Luo Shuaihong¹, Deng Zhongliang¹, Tian Dongdong¹, Luo Min², Luo Yanfeng²

(1. Department of Orthopaedic Surgery, the Second Affiliated Hospital, Chongqing Medical University;

2. Research Center for Bio-inspired Material Science and Engineering, College of Bioengineering, Chongqing University)

[Abstract] **Objective:** To evaluate the biomechanical properties of the self-designed absorbable lumbar interbody fusion cage in a single-level of cadaveric lumbar spine. **Methods:** Fifteen lumbosacral (L1-S1) specimens were randomly divided into three groups: autogenous iliac bone group ($n=5$), shape memory polyurethane (SMPU) cage group ($n=5$), polyetheretherketone (PEEK) cage group ($n=5$). Three different intervertebral implants were implanted by lateral lumbar interbody fusion after complete discectomy (L3-4) was performed. The axial failure load and ROM between preoperation and postoperation were tested by a mechanical testing machine. **Results:** The ROM showed that there was no observed statistical difference in the preoperative ROM of all directions among three groups ($P>0.05$). In the autogenous iliac bone group, the ROM in all directions of postoperation was significantly higher than that of preoperation ($P<0.05$). In the SMPU cage group, the ROM in all directions of postoperation was significantly lower than that of preoperation ($P<0.05$). In the PEEK cage group, the ROM in all directions of postoperation was significantly lower than that of preoperation ($P<0.05$). The postoperative ROM of all directions was significantly lower in SMPU cage group and PEEK cage group than autogenous iliac bone group ($P<0.05$). There was no observed statistical difference in the postoperative ROM of all directions between SMPU cage group and PEEK cage group ($P>0.05$). In axial compression testing, the failure load of PEEK cage group was significantly higher than that of SMPU cage group and autogenous iliac bone group ($P=0.000$), and the failure load of SMPU cage group was significantly higher than that of autogenous iliac bone group ($P=0.000$). **Conclusion:** SMPU cage can meet initial stability and bear the lumbar physiological load for lumbar interbody fusion.

[Key words] lumbar spine; shape memory polyurethane; interbody fusion cage; biomechanics

腰椎椎间融合术已经广泛运用于腰椎退变性疾病的治疗^[1-2]。Cage 材料的选择对腰椎融合效果起着至关重要的作用^[3]。目前临床上的不可吸收 cage 多采用金属、聚醚醚酮 (polyetheretherketone, PEEK) 作为制备材料, 但存在人体易出现应力遮挡、cage 下沉、假关节等缺陷^[4-6]。可吸收的聚乳酸 cage 的降解产物可引起局部无菌性炎症及骨溶解, 临床应用受到限制^[7-8]。可吸收形状记忆聚氨酯 (shape memory polyurethane, SMPU) 具有良好的生物降解性、生物相容性及力学性能, 降解后无大量酸性物质产生, 可避免局部无菌性炎症, 可用于制备可吸收 cage^[9-11]。本实验选用尸体 L3~4 节段作为实验对象, 建立腰椎术后模型, 以评价自体髂骨、SMPU cage 及 PEEK cage 的生物力学特性。

1 材料与方法

1.1 标本的准备

由南方医科大学解剖教研室提供 15 具新鲜成人冰冻腰骶椎 (L1~S1) 标本及自体髂骨。尸体标本的平均年龄 59 岁 (50~68 岁), 男性 11 具, 女性 4 具。仔细逐个剔除脂肪组织、肌肉, 保留所有椎体骨、相应椎间盘、各类韧带、小关节突关

节及关节囊。所有标本行 X 线检查, 排除腰椎骨折、畸形、骨肿瘤、感染等疾病。先对各组的 ROM 进行测试, 之后截取 L3~4 制成单独的腰椎功能单位进行轴向压缩载荷试验。将每个节段上下椎体分别包埋于自凝牙托粉及牙托水 (上海新世纪齿科材料有限公司) 中, 尽量保证节段上下表面平行。用双层保鲜薄膜包裹尸体标本, 然后放置于 -20℃ 冰柜中保存。测试前将标本放在室温 (18℃~27℃) 下自然解冻 10~14 h, 实验时用生理盐水湿润标本。

1.2 Cage 的准备

SMPU cage 的三维模型图由 CAD 软件设计, 以 SMPU 作为材料 (重庆大学生物工程学院), 由重庆溯联精工机械有限公司采用注塑成型技术进行制备。Cage 外形和尺寸的设计同 PEEK cage (山东威高骨科股份有限公司), 内植物的尺寸为 40 mm × 18 mm × 12 mm (长 × 宽 × 高)。自体髂骨、SMPU cage 及 PEEK cage 的外形如图 1 所示。

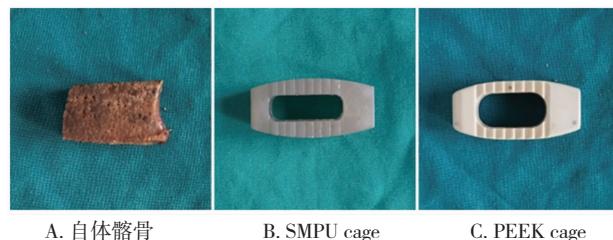


图 1 3 种不同的内植物
Fig.1 Three different implants

1.3 实验分组及方法

将 15 具腰椎(L1~S1)标本随机分为 3 组:自体髂骨组($n=5$),SMPU cage 组($n=5$),PEEK cage 组($n=5$)。实验时所有标本选择腰椎侧方手术入路,切开并切除 L3~4 椎间盘的侧方纤维环,使用髓核钳取出髓核,并用刮匙刮除上下软骨终板,Cobb 剥离器松解对侧纤维环,前后纤维环保持完整。Cage 空腔内填满自体髂骨松质骨颗粒,SMPU Cage 组和 PEEK cage 组分别植入 SMPU cage 和 PEEK cage,自体髂骨组取自体髂骨块植入。在脊柱三维运动试验机上分别测试每组标本术前与术后的 ROM。此外,对 L3~4 节段进行轴向压缩载荷试验,测试自体髂骨组($n=5$)、SMPU cage 组($n=5$)及 PEEK cage 组($n=5$)的轴向破坏载荷。

1.4 生物力学测试

1.4.1 ROM 测试 选取每具标本的 L3~4 作为测试的运动节段,将 6 根直径为 2.00 mm 的克氏针稳定在 L3 与 L4 椎体上,并把标本置于脊柱三维运动试验机(南方医科大学医学生物力学重点实验室),将可反射红外线的球形标记物安装于克氏针。使用砝码和滑轮系统对每个标本施加 8 N·m 纯力矩,标本可产生前后屈伸、左右侧弯及左右旋转 6 种运动状态,以模拟腰椎的生理运动,本实验采用非破坏性应力条件下测试,如图 2 所示。为减少标本软组织粘附、蠕变的影响,每个标本预先给予 3 次加载、卸载的循环,每次加载-卸载后停留 1 min,第 4 次循环所得的数据用来进行统计学分析。运用 6 台红外线摄像机拍摄零载荷和最大载荷时 L3~4 的角位移图像,运用专业软件进行图像分析和数据转换,计算出 L3~4 的 ROM。

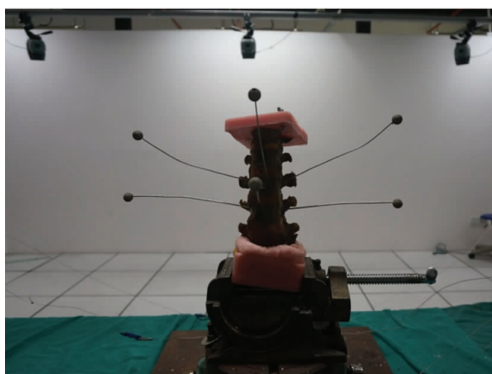


图 2 三维运动测试

Fig.2 Three-dimensional motion testing

1.4.2 轴向压缩测试 待 ROM 测试后,将 15 具单独的 L3~4 放置于轴向压缩试验机(南方医科大学医学生物力学重点实验室),对准重心摆放标本,保持节段上下平行,逐个进行轴向压缩试验,如图 3 所示。速度是 5 mm/min,由零开始逐级加载,计算机以 25 Hz 记录载荷-位移曲线。在加载全程用生理盐水湿润标本。当载荷-位移曲线中的载荷出现下降说明内植物塌陷破裂或椎体骨折,并记录相应破坏载荷值,进行统计学分析。



图 3 轴向压缩测试

Fig.3 Axial compression testing

1.5 统计学分析

所有数据采用 SPSS 22.0 统计软件进行分析,数据以均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$)表示。多组间计量资料比较采用单因素方差分析,其组间两两比较采用 LSD- t 法,组内手术前后比较采用配对 t 检验。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 ROM

术前自体髂骨组、SMPU cage 组及 PEEK cage 组在前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左旋转、右旋转 6 个方向上的 ROM 相比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)。自体髂骨组在前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左旋转、右旋转上的术后 ROM 均较术前明显增加($t=-4.587, P=0.010; t=-2.995, P=0.040; t=-6.808, P=0.002; t=-3.920, P=0.017; t=-3.859, P=0.018; t=-4.601, P=0.010$);SMPU cage 组在前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左旋转、右旋转上的术后 ROM 均较术前明显减少($t=3.804, P=0.019; t=3.859, P=0.018; t=4.795, P=0.009; t=3.437, P=0.026; t=5.139, P=0.007; t=5.191, P=0.007$);PEEK cage 组在前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左旋转、右旋转上的术后 ROM 均较术前明显减少($t=4.421, P=0.012; t=4.136, P=0.014; t=4.034, P=0.016; t=5.423, P=0.006; t=2.857, P=0.046; t=2.812, P=0.048$)。SMPU cage 组与 PEEK cage 组术后在 6 个方向上的 ROM 均明显低于自体髂骨组($P<0.05$);SMPU cage 组与 PEEK cage 组术后在 6 个方向上的 ROM 相比较,差异无统计学意义($P>0.05$),见表 1。

2.2 轴向压缩载荷试验

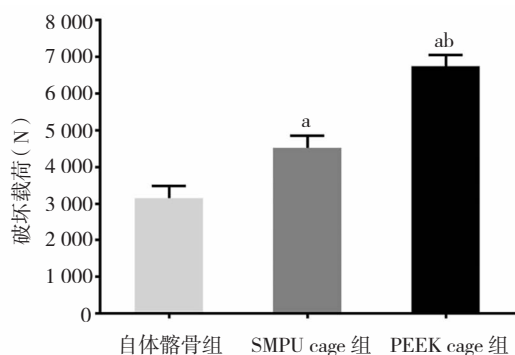
在逐级加载时,SMPU cage 与自体髂骨块出现塌陷破裂。当 PEEK cage 达到破坏载荷时,椎体出现骨折,PEEK cage 未见明显破坏。各组轴向破坏载荷结果分别为:自体髂骨组(3160.00 ± 326.72) N,SMPU cage 组(4530.00 ± 327.10) N, PEEK cage 组(6750.00 ± 316.22) N。方差分析 3 组轴向破坏载荷的差异具有统计学意义($F=156.920, P=0.000$)。两两比较结果显示 PEEK cage 组的破坏载荷较 SMPU cage 组和自体髂骨组明显增加($P=0.000$),SMPU cage 组的破坏载荷较自体髂骨组明显增加($P=0.000$),如图 4 所示。

表 1 各组在术前与术后的 ROM(°)

Tab.1 ROM of each group between preoperation and postoperation(°)

组别	前屈		后伸		左侧弯		右侧弯		左旋转		右旋转	
	术前	术后	术前	术后	术前	术后	术前	术后	术前	术后	术前	术后
自体髂骨组	10.38 ± 1.18	12.89 ± 0.48	9.83 ± 1.09	12.42 ± 1.17	8.92 ± 0.30	11.68 ± 0.78	9.23 ± 0.79	11.67 ± 0.63	2.67 ± 0.54	3.90 ± 0.83	2.47 ± 0.31	4.68 ± 0.76
SMPU cage 组	9.71 ± 0.51	8.49 ± 0.45 ^a	9.36 ± 0.51	8.18 ± 0.61 ^a	9.41 ± 0.57	8.03 ± 0.67 ^a	9.72 ± 1.33	7.78 ± 0.65 ^a	2.05 ± 0.41	1.35 ± 0.32 ^a	2.11 ± 0.72	0.95 ± 0.34 ^a
PEEK cage 组	10.38 ± 1.00	8.19 ± 0.71 ^a	9.61 ± 0.78	7.99 ± 0.69 ^a	9.25 ± 0.32	7.76 ± 0.73 ^a	9.20 ± 0.46	8.14 ± 0.87 ^a	2.36 ± 0.79	1.31 ± 0.38 ^a	2.43 ± 0.43	1.44 ± 0.40 ^a
F 值	0.838	109.728	0.408	41.902	1.776	44.405	0.494	43.383	1.329	35.111	0.744	71.430
P 值	0.456	0.000	0.674	0.000	0.211	0.000	0.622	0.000	0.301	0.000	0.496	0.000

注:a,与自体髂骨组术后比较,P<0.05



a:与自体髂骨组比较,P=0.000;b:与 SMPU cage 组比较 P=0.000

图 4 内植物的轴向压缩测试结果

Fig.4 Results of axial compression testing of the implants

3 讨论

腰椎椎间融合术是 2 个或多个脊柱节段间经植骨后形成骨性连接,以获得脊柱中远期的稳定效果,现已广泛运用于腰椎退行性疾病的治疗^[1-2]。椎间隙高度的恢复及腰椎融合效果受内植物材料选用的直接影响^[3]。自体髂骨传统上被认为是评价植骨材料的“金标准”,能够显著提高植骨融合率,但易于出现移植物骨折、供区并发症及骨量有限^[12]。同种异体骨尽管避免了取骨区的并发症,骨量不受限制,但具有潜在的免疫排斥、艾滋病病毒等疾病的传播^[13]。Cage 现已广泛运用于椎间融合术中,可恢复椎间隙的高度,且有较高的融合率^[14]。临床早期金属 cage 出现应力遮挡及对 X 线产生遮挡等缺陷^[4,15]。当前临床常用的 PEEK cage 出现 cage 下沉、假关节及过敏反应等不足^[5-6,16]。研究最为广泛的聚乳酸 cage 在降解后会产生局部无菌性炎症及骨溶解,临床应用受到限制^[7-8]。寻找一种具有良好的生物降解性、生物相容性及力学性能的替代材料,已成为脊柱外科的研究热点。

SMPU 因具有良好的生物相容性与降解性被广泛应用于生物医学领域,如用于手术缝线、输卵管避孕器、心血管支架等新型医疗器械^[17-19]。本实验以 SMPU 为材料制备腰椎椎间融合器,SMPU 是以哌嗪与二异氰酸酯作为硬段,以两端带羟基的聚乳酸-聚乙二醇三嵌段大分子为软段,使用溶液法合成一种新型的骨内植物材料^[20]。体外降解研究表明 SMPU 降解后无大量酸性物质产生,可避免局部无菌性炎症及骨溶解^[9]。此外,随着 SMPU 的逐渐降解,体细胞向材料内部生长,很少刺激体内炎症反应,具有良好的血液相容性和细胞相容性^[10,21-22]。SMPU 的弹性模量与骨组织相匹配,能有效减少腰椎术后应力遮挡^[11,23]。可吸收 SMPU cage 有望解决金属及 PEEK cage 的应力遮挡、cage 下沉、假关节等缺陷,同时可避免聚乳酸降解后产生的无菌性炎症。

ROM 结果显示:术前 3 组在前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左旋转、右旋转上的 ROM 相比较无明显差异。3 组在前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左旋转、右旋转上的术后 ROM 均有不同程度的改变,其中自体髂骨组在 6 个方向上的术后稳定性均较术前差,SMPU cage 组与 PEEK cage 组在 6 个方向上的术后稳定性均较术前明显增加。与自体髂骨组相比,SMPU cage 组术后在 6 个方向上的术后 ROM 明显减少,这可能与自体髂骨块较小有关,提供的稳定性有限。与 PEEK cage 组相比,SMPU cage 组术后在 6 个方向上的 ROM 无明显差异,表明 SMPU cage 组在前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左旋转、右旋转上的稳定性与 PEEK cage 组相当。轴向压缩试验结果显示:与自体髂骨组相比,SMPU cage 组的破坏载荷明显增加。与 PEEK cage 组相比,SMPU cage 组的破坏载荷明显减少。理想的 cage 应能支撑人体腰椎的最大生理载荷,正常人体腰椎的承载力与姿势、外加负荷及肌肉活动有关,一般不超过 3 000 N^[24]。轴向

压缩试验中的 SMPU cage 的承载力介于自体髂骨与 PEEK cage 之间, SMPU cage 能够充分满足临床所需的腰椎承载力。

综上所述,本实验证实 SMPU cage 在尸体腰椎标本生物力学的可行性, SMPU cage 植入腰椎后的稳定性优于术前及自体髂骨块,与 PEEK cage 相当,可为腰椎融合术后提供初始稳定性。SMPU cage 在腰椎的生理负荷下能够提供合适的支撑。植入 SMPU cage 的融合率、并发症还将在后续的体内实验中进一步观察。

参 考 文 献

- [1] Farrokhi MR, Rahmanian A, Masoudi MS. Posterolateral versus posterior interbody fusion in isthmic spondylolisthesis[J]. J Neurotrauma, 2012, 29(8): 1567-1573.
- [2] Tsahtsaris A, Wood M. Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion and degenerative lumbar spine disease[J]. Eur Spine J, 2012, 21(11): 2300-2305.
- [3] Nemoto O, Asazuma T, Yato Y, et al. Comparison of fusion rates following transforaminal lumbar interbody fusion using polyetheretherketone cages or titanium cages with transpedicular instrumentation[J]. Eur Spine J, 2014, 23(10): 2150-2155.
- [4] Cabraja M, Oezdemir S, Koeppen D, et al. Anterior cervical discectomy and fusion; comparison of titanium and polyetheretherketone cages[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2012, 13: 172.
- [5] Chen Y, Lu G, Wang B, et al. A comparison of anterior cervical discectomy and fusion (ACDF) using self-locking stand-alone polyetheretherketone (PEEK) cage with ACDF using cage and plate in the treatment of three-level cervical degenerative spondylopathy: a retrospective study with 2-year follow-up[J]. Eur Spine J, 2016, 25(7): 2255-2262.
- [6] Schimmel JJ, Poeschmann MS, Horsting PP, et al. PEEK cages in lumbar fusion; mid-term clinical outcome and radiological fusion[J]. J Spinal Disord Tech, 2012.
- [7] Frost A, Bagouri E, Brown M, et al. Osteolysis following resorbable poly-L-lactide-co-D, L-lactide PLIF cage use; a review of cases[J]. Eur Spine J, 2012, 21(3): 449-454.
- [8] Jiya TU, Smit T, van Royen BJ, et al. Posterior lumbar interbody fusion using non resorbable poly-ether-ether-ketone versus resorbable poly-L-lactide-co-D, L-lactide fusion devices. Clinical outcome at a minimum of 2-year follow-up[J]. Eur Spine J, 2011, 20(4): 618-622.
- [9] Wang Y, Huang M, Luo Y, et al. In vitro degradation of poly(lactide-co-p-dioxanone)-based shape memory poly(urethane-urea)[J]. Polymer Degradation & Stability, 2010, 95(4): 549-556.
- [10] Cabanlit M, Maitland D, Wilson T, et al. Polyurethane shape-memory polymers demonstrate functional biocompatibility *in vitro*[J]. Macromolecular Bioscience, 2007, 7(1): 48-55.
- [11] Zhang X, Ma Y, Li Y, et al. Enhanced mechanical properties of linear segmented shape memory poly(urethane-urea) by incorporating flexible PEG400 and rigid piperazine[J]. Frontiers of Materials Science, 2012, 6(6): 326-337.
- [12] Ba Z, Zhao W, Wu D, et al. Box cages packed with local decompression bone were efficient in anterior cervical discectomy and fusion: five- to 10-year follow-up[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2012, 37(20): E1260-1263.
- [13] Aponte-Tinao LA, Ayerza MA, Muscolo DL, et al. What are the risk factors and management options for infection after reconstruction with massive bone allografts?[J]. Clin Orthop Relat Res, 2016, 474(3): 669-673.
- [14] Kersten RF, van Gaalen SM, de Gast A, et al. Polyetheretherketone (PEEK) cages in cervical applications; a systematic review[J]. Spine J, 2015, 15(6): 1446-1460.
- [15] Button G, Gupta M, Barrett C, et al. Three- to six-year follow-up of stand-alone BAK cages implanted by a single surgeon[J]. Spine J, 2005, 5(2): 155-160.
- [16] Maldonado-Naranjo AL, Healy AT, Kalfas IH. Polyetheretherketone (PEEK) intervertebral cage as a cause of chronic systemic allergy: a case report[J]. Spine J, 2015, 15(7): e1-3.
- [17] Jing X, Mi HY, Huang HX, et al. Shape memory thermoplastic polyurethane (TPU)/poly(epsilon-caprolactone) (PCL) blends as self-knotting sutures[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2016, 64: 94-103.
- [18] Tang S, Zhang CY, Huang MN, et al. Fallopian tube occlusion with a shape memory polymer device; evaluation in a rabbit model[J]. Contraception, 2013, 87(2): 235-241.
- [19] Sgarioni M, Adhikari R, Gunatillake PA, et al. Properties and in vitro evaluation of high modulus biodegradable polyurethanes for applications in cardiovascular stents[J]. J Biomed Mater Res B Appl Biomater, 2014, 102(8): 1711-1719.
- [20] 张晓彦, 罗彦凤, 阮长顺, 等. 咽喉扩链的形状记忆医用材料聚氨酯脲的合成与表征[J]. 功能材料, 2012, 43(8): 1008-1011.
- [21] Cha KJ, Lih E, Choi J, et al. Shape-memory effect by specific biodegradable polymer blending for biomedical applications[J]. Macromol Biosci, 2014, 14(5): 667-678.
- [22] 颜泽萱, 罗彦凤, 黄美娜, 等. 拉伸-复形过程对骨修复形状记忆聚氨酯材料细胞相容性的影响[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(3): 400-404.
- [23] Safranski DL, Smith KE, Gall K. Mechanical requirements of shape-memory polymers in biomedical devices[J]. Polymer Reviews, 2013, 53(1): 76-91.
- [24] Kandziora F, Pflugmacher R, Kleemann R, et al. Biomechanical analysis of biodegradable interbody fusion cages augmented With poly(propylene glycol-co-fumaric acid)[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2002, 27(15): 1644-1651.

(责任编辑: 方 济)