

腰椎后路手术椎间融合器应用的专家共识

Expert consensus on the application of interbody fusion cage
in posterior lumbar surgery

(孟海¹, 杨雍^{1*}, 孙天胜^{2*}, 伍骥^{3*}, 李中实^{4*}, 阮狄克^{5*}, 王炳强^{1*}, 孙常太^{6*}, 洪毅^{7*}, 李淳德^{8*},
李放^{2*}, 杜俊杰^{3*}, 刘波^{9*}, 海涌^{10*}, 李利^{11*}, 丁立祥¹², 刘宝戈¹³, 鲁世保¹⁴, 唐家广¹⁵, 藏磊¹⁰)

(1 首都医科大学附属北京友谊医院 100050; 2 中国人民解放军总医院第七医学中心骨科 100700 北京市; 3 中国人民解放军空军特色医学中心 100143 北京市; 4 中日友好医院骨科 100029 北京市; 5 中国人民解放军总医院第六医学中心骨科 100048 北京市; 6 北京医院骨科 100730; 7 北京博爱医院脊柱外科 100071; 8 北京大学第一医院骨科 100034; 9 北京积水潭医院骨科 100035; 10 首都医科大学附属北京朝阳医院骨科 100020; 11 中国人民解放军总医院第四医学中心骨科 100048 北京市; 12 首都医科大学附属北京世纪坛医院骨科 100038; 13 首都医科大学附属北京天坛医院骨科 100050; 14 首都医科大学宣武医院骨科 100053; 15 首都医科大学附属北京同仁医院骨科 100730)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2021.04.16

中图分类号: R687.3 文献标识码: C 文章编号: 1004-406X(2021)-04-0379-06

椎间融合器(interbody fusion cage)联合椎弓根钉棒系统实施腰椎后路减压融合内固定术是治疗腰椎退变性疾病如腰椎管狭窄症、腰椎滑脱症、腰椎间盘突出症合并腰椎不稳等的常用手术方法,包括后路腰椎椎间融合术(posterior lumbar interbody fusion, PLIF)和经椎间孔入路腰椎椎间融合术(transforaminal interbody fusion, TLIF),取得了良好的效果。但是有 0.9%~4.7% 的腰椎后路手术患者由于椎间融合器应用不规范,术后出现椎间融合器相关并发症,给后续治疗带来困难^[1-5]。为了正确规范地应用椎间融合器,减少椎间融合器相关并发症的发生,《中国脊柱脊髓杂志》编辑部组织的国脊沙龙邀请 20 余位脊柱外科专家,在循证医学的基础上,经多轮专家讨论,形成以下共识,供脊柱外科医师参考。

1 腰椎后路手术椎间融合器应用的适应证和禁忌证

1986 年, Bagby 和 Kuslich 首次设计出人体使用的椎间融合器并应用于临床,简称 BAK(Bagby and Kuslich)^[6]。自此以后,椎间融合器发展至今,无论其材质/形状的变化,均遵循了 Bagby 提出的“撑开-压缩”原理:置入椎间融合器后,椎间隙被撑开,使得纤维环、前后纵韧带等周围组织处于张力状态;同时受到自身重力的作用和椎旁肌肉的收缩作用,两种拮抗的作用力,使椎间融合器达到稳定的状态,增加脊柱融合率^[6]。

1.1 适应证

有椎体间融合指征的腰椎退行性疾病均可作为后路椎间融合技术使用椎间融合器的适应证。

1.2 禁忌证

(1)各种原因导致的终板不完整;(2)脊柱感染性疾病、脊柱肿瘤;(3)椎管内粘连严重、椎间隙重度狭窄及严重骨质疏松患者慎用^[1,7];(4)椎间融合器材料过敏者禁用。

2 椎间融合器的材质

椎间融合器的材质主要有四大类:(1)生物类。主要指同种异体骨。其优点为来源充足,保证了植骨量,利于椎间隙快速融合^[8,9]。但存在传播疾病风险,且难以保持完整的结构来抵抗轴向载荷,其对于椎

第一作者简介:男(1981-),医学博士,副主任医师,研究方向:脊柱外科

电话:(010)63139153 E-mail:menghai@ccmu.edu.cn

*均为共同通讯作者

间隙高度及生理曲度的维持并不理想^[10,11]。(2)金属类。主要包括钛合金等。生物力学性能优良,早期的稳定性较好,便于 3D 打印制备个性化的椎间融合器。其缺点为弹性模量大,有应力遮挡,融合器下沉风险大,占据有效的骨生长空间,X 线检查难以判断其内部的骨融合情况,CT 及 MRI 检查时存在金属伪影,金属碎屑的产生可能造成远期的骨溶解^[12-15]。(3)高分子材料。有碳纤维、聚醚醚酮(PEEK)等。特点是弹性模量接近骨组织,力学特性接近皮质骨,应力遮挡较小,透光性好,利于影像学观察^[12,16,17]。但是其表面齿状突起比较浅,咬合力差,容易发生移位,必须与坚强的内固定联合使用^[18,19]。(4)可降解高分子材料。如聚碳酸酯、 α -多聚酸等。优点为亲水性好,具有良好的生物相容性^[20-22];但内在脆性使其容易在手术的操作过程中碎裂,骨替代的时间较长,高浓度的降解产物(酸类和晶体成分)可导致严重的组织反应,如感染、骨质溶解^[23,24],限制了其临床应用。

理想的椎间融合器材质应具备以下特点:①良好的生物相容性;②稳定的化学性质;③与骨组织相近的生物力学性能;④促进骨融合;⑤利于影像观察;⑥具有可降解性。

3 椎间融合器的形状和类型

融合器外形轮廓方面存在多种设计方案^[25-28]。从横断面考虑:长方形和肾形是目前两种流行的设计,长方形融合器通常情况下会成对使用;肾形和椎间盘的外形轮廓更为接近,能更好地分担应力,通常情况下单枚使用。从矢状面考虑,融合器主要有楔形和橄榄形两种^[29,30]。楔形是指前高后低的形状,这样融合器置入后可以有效恢复腰椎部分生理曲度,但这种形状也会在置入时造成较大的阻力,置入操作相对困难,主要用于椎间盘已经发生退变或病变的患者;橄榄形轮廓类似于终板面的生理曲度,置入操作较容易。

根据椎间融合器内部是否中空设计,又分为闭合式椎间融合器、开放式椎间融合器以及多孔式椎间融合器三种类型^[31-33]。闭合式椎间融合器一般为金属材质带有或无表面涂层的实心结构;开放式椎间融合器,即常见的长方形结构,中空设计,其内可以置入颗粒骨;多孔式椎间融合器常为钽金属制作,其微孔率高达 80%,类似骨小梁的结构可使骨的融合率更高。

理想的椎间融合器设计应满足如下条件:①即刻稳定。如椎间融合器表面齿突增加咬合力,或膨胀撑开装置增加植入后稳定性等。②长期稳定。椎间融合器内部大的植骨腔容量,与邻近椎体大的接触面积,利于最终的融合。③接近正常腰椎生理曲度,符合人体正常椎间隙解剖学形状。④能够调节大小,安装便捷及无损的置入路径^[34,35]。

4 椎间融合器的高度

椎间融合器高度选择对其顺利完成椎间植入至关重要。如果选择椎间融合器高度过高,可能会导致置入困难、椎间隙过度牵张,使神经根牵拉伤几率增加^[36];同时相邻节段应力增高,增加其退变的发生率;椎间融合器负荷过高还导致沉降率上升^[37]。椎间融合器高度不足,不能恢复椎间高度和腰椎前凸,还可能会导致椎间融合器移位和融合失败^[38-42]。

建议采取的方案:①术前规划。椎间融合器的高度选择与患者性别、身高、手术节段以及椎间高度具有相关性,尤其是根据手术节段邻近的正常椎间高度,预估椎间融合器的高度。②术中试模。椎间隙处理完毕后,由小至大进行融合器试模操作,如试模与术前预估高度不符,则以试模为准。③术中透视。完成加压操作后,使用 C 型臂 X 线机进行术中透视,一般认为,侧位像上椎间融合器后缘的高度应略大于椎间后缘的高度,有利于增加稳定性,减少椎间融合器松动退出的发生率。

5 椎间融合器的数量和长度

PLIF 手术中双侧使用 2 枚椎间融合器是标准术式^[43]。2 枚椎间融合器置入通常采用长度相对短的融合器,同时安放轨迹趋于平行,避免头端的碰撞,影响稳定性。

为减少对腰椎后柱骨性结构的破坏、并减少对神经组织的干扰,近年来越来越多的学者提倡单侧使

用一枚融合器。有限元分析及临床试验均表明,使用双枚融合器和使用单枚融合器的稳定性以及最终的融合率方面并无统计学差异^[44-46],其中单枚椎间融合器的使用可以减少手术时间及出血量,降低医疗费用,同时减少了邻近节段的压力,但是在椎间盘高度的维持方面,部分文献报道采用双枚椎间融合器更有优势^[47]。

单枚椎间融合器的使用应符合其设计理念,通常应用于 TLIF 手术。更多的文献报道^[43,44,48,49],单枚椎间融合器的使用,并不增加其下沉的风险,可以有效维持椎间盘高度。但其前提是单枚椎间融合器的长度足够,可以使两端达到终板的边缘区域,降低融合器下沉风险;其次优化融合器的安放轨迹,入口点尽量靠近外侧远离椎间盘中点,这样融合器整体更容易位于椎间中份,以达到两侧均衡的压缩力,提高稳定性。

6 椎间融合器的位置

椎间融合器的置入位置应遵循其设计理念。根据不同患者的临床特点,其具体位置有相应的调整。如需要恢复腰椎前凸,则椎间融合器的位置偏前放置,融合器的中点置于椎间中点的前方^[36];如重点是恢复椎间隙及椎间孔的高度,则椎间融合器应适当靠后放置^[50];如存在脊柱侧凸畸形,应根据需要将椎间融合器置于左侧或右侧^[51]。

椎间融合器置入深度的标准为融合器前端不超过椎体前缘,后端位于椎体骨性后缘前至少 3mm。一方面可避免椎间融合器刺激硬膜囊和神经根;另一方面,由于椎体终板略带弧形,椎间隙中间高度大于椎间隙后缘高度,加压上下终板后,椎间隙后缘高度小于融合器高度,可有效阻止融合器后移。尽量避免长度较短的融合器位于椎间的中央区域,该位置骨小梁薄弱,抗压能力低,容易出现下沉;应使椎间融合器靠近终板的边缘区域,以增加稳定性^[3,27,52]。

7 植骨床的准备

后路减压暴露椎间盘,行椎间盘部分切除,椎间盘的切除量首先应满足椎间融合器的顺利植入操作,其次能够有足够的空间填充植骨,达到有效的融合接触面积。椎间融合器空间植骨量有限,应尽量选择成块的纯净松质骨,其周边植骨更为重要。植骨操作中配合使用植骨漏斗或者自制管状通道,既可以将植骨颗粒高效准确的推送入椎间,又可避免植骨颗粒洒落至椎管内造成神经干扰。

椎间盘部分切除之后,保护硬膜囊及神经根,用刮匙刮除椎间隙上下软骨终板,将骨性终板刮成粗糙面或者点状渗血状态,保持骨性终板的纵向支撑功能。避免刮匙过深穿透前方纤维环及前纵韧带伤及前方的大血管,防止纤维环前方破裂亦是椎间融合器前脱出的重要因素,同时避免刮匙出入椎间隙时损伤硬膜囊及神经根^[53,54]。

8 融合器空间及椎间植骨

椎间融合器可以维持椎间高度和稳定性,为获得最佳的脊柱融合率,椎间融合器内部或/及周围环境需要通过其他成骨性的、骨传导性的、骨诱导性的移植材料进一步补充,包括自体皮、松质骨、骨髓、同种异体骨及骨形态发生蛋白(BMP)等,其中自体骨被认为是移植材料的“金标准”^[55,56],自体骨移植材料的制备时应注意将其周围的软组织去除干净。

充足的植骨量及融合接触面积是脊柱有效融合的保障。一般认为,椎间植骨量应不少于 5ml,植骨与终板的接触面积应大于终板面积的 30%^[57],否则将显著降低脊柱融合率。椎间融合器空间植骨量有限,应尽量选择成块的纯净松质骨,其周边植骨更为重要。植骨操作中配合使用植骨漏斗或者自制管状通道,既可以将植骨颗粒高效准确的推送入椎间,又可避免植骨颗粒洒落至椎管内造成神经干扰。自体松质骨早期往往来自髂骨区,现有的研究证实,减压切除的自体碎骨同髂骨植骨的融合率一致^[53]。植骨材料联合使用骨生长因子在临床上应用越来越广泛,最常见的是骨形态发生蛋白-2(BMP-2),它能够诱导未分化的间充质细胞分化为成骨细胞和软骨细胞,进而诱导新骨的形成。临床研究证实,自体骨联

合 BMP-2 可以增加脊柱融合率^[58-62]。

9 后路内固定

腰椎后路减压融合手术应用椎间融合器,通常需要配合坚强内固定系统同时使用。椎间融合器置入后,往往需要经过内固定系统的加压操作,使融合器、移植骨更好地与椎体接触,稳定性更高,利于脊柱融合^[53,63-65]。加压操作需强度适中,如强度不够,椎间融合器更容易松动;而加压强度过大,容易损伤骨性终板,出现椎间融合器的下沉、不稳等。

椎间融合器联合腰椎后路半刚性/弹性内固定系统同样可以获得满意的临床疗效,既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,促进植骨融合^[66-69]。

10 总结

综上所述,使用椎间融合器的腰椎后路融合手术作为一项治疗腰椎退行性疾病的成熟技术,能够提供优异的节段稳定性,为植入骨创造良好的融合环境等。但如何减少椎间融合器使用带来的并发症还值得我们进一步探讨和研究;同时,也期望新的椎间融合器与内固定系统来满足不同患者的需求,达到个体化的治疗目的。

11 参考文献

1. Park MK, Kim KT, Bang WS, et al. Risk factors for cage migration and cage retropulsion following transforaminal lumbar interbody fusion[J]. Spine J, 2019, 19(3): 437-447.
2. Lee DY, Park YJ, Song SY, et al. Risk factors for posterior cage migration after lumbar interbody fusion surgery[J]. Asian Spine J, 2018, 12(1): 59-68.
3. Hu YH, Niu CC, Hsieh MK, et al. Cage positioning as a risk factor for posterior cage migration following transforaminal lumbar interbody fusion: an analysis of 953 cases[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2019, 20(1): 260.
4. Chen L, Yang H, Tang T. Cage migration in spondylolisthesis treated with posterior lumbar interbody fusion using BAK cages[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2005, 30(19): 2171-2175.
5. Kuslich SD, Ulstrom CL, Griffith SL, et al. The Bagby and Kuslich method of lumbar interbody fusion: history, techniques, and 2-year follow-up results of a United States prospective, multicenter trial[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1998, 23(11): 1267-1279.
6. Kuslich SD, Bagby G. The BAK interbody fusion system: early clinical results of treatment for chronic low back pain[C]. 8th NASS Annual Meeting. San Diego, USA. 1993. 175-176.
7. Harry N, Steven R, Frank J. Rothman-Simeone The Spine[M]. The United States of America, Elsevier Science Health Science div. 2011. 954-966.
8. Xue Q, Li H, Zou X, et al. Healing properties of allograft from alendronate-treated animal in lumbar spine interbody cage fusion[J]. Eur Spine J, 2005, 14(3): 222-226.
9. Wu WJ, Li Y, Hou TY, et al. Application of new allogeneic lumbar fusion cage (biocage) in single-segment lumbar degenerative disease: a prospective controlled study with follow-up for ≥ 2 years[J]. World Neurosurg, 2019, 126: e1309-e1314.
10. Lin B, Yu H, Chen ZD, et al. Comparison of the PEEK cage and an autologous cage made from the lumbar spinous process and laminae in posterior lumbar interbody fusion[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2016, 17(1): 374.
11. Hart RA, Daniels AH, Bahney T, et al. Relationship of donor variables and graft dimension on biomechanical performance of femoral ring allograft[J]. J Orthop Res, 2011, 29(12): 1840-1845.
12. Cuzzocrea F, Ivone A, Jannelli E, et al. PEEK versus metal cages in posterior lumbar interbody fusion: a clinical and radiological comparative study[J]. Musculoskelet Surg, 2019, 103(3): 237-241.
13. Seaman S, Kerezoudis P, Bydon M, et al. Titanium vs. polyetheretherketone(PEEK) interbody fusion: Meta-analysis and review of the literature[J]. J Clin Neurosci, 2017, 44: 23-29.
14. 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.
15. Marino JF. Subsidence of metal interbody cage after posterior lumbar interbody fusion with pedicle screw fixation[J]. Orthopedics, 2010, 33(4): 226-227.

16. Schimmel JJ, Poeschmann MS, Horsting PP, et al. PEEK cages in lumbar fusion: mid-term clinical outcome and radiologic fusion[J]. *Clin Spine Surg*, 2016, 29(5): E252–E258.
17. Rousseau MA, Lazennec JY, Saillant G. Circumferential arthrodesis using PEEK cages at the lumbar spine[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2007, 20(4): 278–281.
18. Weiner BK, Fraser RD. Spine update lumbar interbody cages[J]. *Spine*, 1998, 23(5): 634–640.
19. Lin TW, Corvelli AA, Frondoza CG, et al. Glass peek composite promotes proliferation and osteocalcin production of human osteoblastic cells[J]. *J Biomed Mater Res*, 1997, 36(2): 137–144.
20. Jiya T, Smit T, Deddens J, et al. Posterior lumbar interbody fusion using nonresorbable poly-ether-ether-ketone versus resorbable poly-L-lactide-co-D, L-lactide fusion devices: a prospective, randomized study to assess fusion and clinical outcome[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2009, 34(3): 233–237.
21. Vaccaro AR, Singh K, Haid R, et al. The use of bioabsorbable implants in the spine[J]. *Spine J*, 2003, 3(3): 227–237.
22. Van Dijk M, Smit TH, Sugihara S, et al. The effect of cage stiffness on the rate of lumbar interbody fusion: an in vivo model using poly(L-lactic acid) and titanium cages[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2002, 27(7): 682–688.
23. 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.
24. Smit TH, Engels TA, Sontjens SH, et al. Time-dependent failure in load-bearing polymers: a potential hazard in structural applications of polylactides[J]. *J Mater Sci Mater Med*, 2010, 21(3): 871–878.
25. Gelfand Y, Benton J, De la Garza-Ramos R, et al. Effect of cage type on short-term radiographic outcomes in transforaminal lumbar interbody fusion[J]. *World Neurosurg*, 2020, 141: e953–e958.
26. Patel DV, Yoo JS, Karmarkar SS, et al. Interbody options in lumbar fusion[J]. *J Spine Surg*, 2019, 5(Suppl 1): S19–S24.
27. Cho W, Wu C, Mehbod AA, Transfeldt EE, et al. Comparison of cage designs for transforaminal lumbar interbody fusion: a biomechanical study[J]. *Clin Biomech(Bristol, Avon)*, 2008, 23(8): 979–985.
28. 张绍东, 吴小涛, 唐天骊. 腰椎间融合器的现状及发展方向[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2005, 15(7): 443–446.
29. Comer GC, Behn A, Ravi S, et al. A biomechanical comparison of shape design and positioning of transforaminal lumbar interbody fusion cages[J]. *Global Spine J*, 2016, 6(5): 432–438.
30. Hong TH, Cho KJ, Kim YT, et al. Does lordotic angle of cage determine lumbar lordosis in lumbar interbody fusion [J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2017, 42(13): E775–E780.
31. Abbushi A, Cabraja M, Thomale U. The influence of cage positioning and cage type on cage migration and fusion rates in patients with monosegmental posterior lumbar interbody fusion and posterior fixation[J]. *Eur Spine*, 2009, 18(11): 1621–1628.
32. Patel MS, McCormick JR, Ghasem A, et al. Tantalum: the next biomaterial in spine surgery [J]. *J Spine Surg*, 2020, 6(1): 72–86.
33. Zou X, Li H, Teng X, et al. Pedicle screw fixation enhances anterior lumbar interbody fusion with porous tantalum cages: an experimental study in pigs[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2005, 30(14): E392–E399.
34. Hong X, Wu XT, Zhuang SY, et al. New cage for posterior minimally invasive lumbar interbody fusion: a study in vitro and in vivo[J]. *Orthop Surg*, 2014, 6(1): 47–53.
35. Tsitsopoulos PP, Serhan H, Voronov LI, et al. Would an anatomically shaped lumbar interbody cage provide better stability? an in vitro cadaveric biomechanical evaluation[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2012, 25(8): E240–E244.
36. Yuan W, Kaliya-Perumal AK, Chou SM, et al. Does lumbar interbody cage size influence subsidence? a biomechanical study[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2020, 45(2): 88–95.
37. Kim MC1, Chung HT, Cho JL, et al. Subsidence of polyetheretherketone cage after minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2013, 26(2): 87–92.
38. Alkalay RN, Adamson R, Groff MW. The effect of interbody fusion cage design on the stability of the instrumented spine in response to cyclic loading: an experimental study[J]. *Spine J*, 2018, 18(10): 1867–1876.
39. Landham PR, Don AS, Robertson PA. Do position and size matter? an analysis of cage and placement variables for optimum lordosis in PLIF reconstruction[J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(11): 2843–2850.
40. Walkins RG, Hanna R, Chang D, et al. Sagittal alignment after lumbar interbody fusion: comparing anterior, lateral, and transforaminal approaches[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2013, 27(5): 253–256.
41. Noshchenko A, Hoffecker L, Lindley EM, et al. Perioperative and long-term clinical outcomes for bone morphogenetic protein versus iliac crest bone graft for lumbar fusion in degenerative disk disease: systematic review with meta-analysis[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2014, 27(3): 117–135.
42. Wang H, Chen W, Jiang J, et al. Analysis of the correlative factors in the selection of interbody fusion cage height in transforaminal lumbar interbody fusion[J]. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2016, 17(9): 1–6.
43. Zhao X, Chen C, Zhou T, et al. Analysis of single cage position in transforaminal lumbar interbody fusion through digital images[J].

- Int Orthop, 2018, 42(5): 1091–1097.
44. Chiang MF, Zhong ZC, Chen CS, et al. Biomechanical comparison of instrumented posterior lumbar interbody fusion with one or two cages by finite element analysis[J]. Spine, 2006, 31(19): 682–689.
45. Vadapalli S, Robon M, Biyani A, et al. Effect of lumbar interbody cage geometry on construct stability: a cadaveric study[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2006, 31(19): 2189–2194.
46. Chang TS, Chang JH, Wang CS, et al. Evaluation of unilateral cage instrumented fixation for lumbar spine[J]. J Orthop Surg Res, 2010, 5: 86.
47. Zhang S, Cui J, Yang Z, et al. Comparison of effectiveness and radiological features between single and double cage implanting through unilateral transforaminal lumbar interbody fusion[J]. Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi, 2015, 29(11): 1389–1396.
48. Lee SK, Kim SW, Ju CI, et al. Posterior lumbar interbody fusion using an unilateral cage: a prospective study of clinical outcome and stability[J]. Korean J Spine, 2014, 11(2): 52–56.
49. Zhao J, Wang X, Hou T, et al. One versus two BAK fusion cages in posterior lumbar interbody fusion to L4–L5 degenerative spondylolisthesis: a randomized, controlled prospective study in 25 patients with minimum two-year follow-up[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2002, 27(24): 2753–2757.
50. Labrom RD, Tan JS, Reilly CW, et al. The effect of interbody cage positioning on lumbosacral vertebral endplate failure in compression[J]. Spine, 2005, 30(19): 556–561.
51. Aoki Y, Yamagata M, Nakajima F, et al. Examining risk factors for posterior migration of fusion cages following transforaminal lumbar interbody fusion: a possible limitation of unilateral pedicle screw fixation[J]. J Neurosurg Spine, 2010, 13(3): 381–387.
52. Choi WS, Kim JS, Hur JW, et al. Minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion using banana-shaped and straight cages: radiological and clinical results from a prospective randomized clinical trial[J]. Neurosurgery, 2018, 82(3): 289–298.
53. 陈仲强, 刘忠军, 党耕町. 脊柱外科学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2013. 400–406.
54. 张建锋, 周志杰, 赵凤东, 等. 腰椎融合器后移的重要因素——间隙上终板后部损伤[J]. 中华骨科杂志, 2016, 36(14): 914–920.
55. Heiple KG, Chase SW, Herndon CH. A comparative study of the healing process following different types of bone transplantation[J]. J Bone Joint Surg Am, 1963, 45: 1593–616.
56. Oikarinen J, Korhonen LK. The bone inductive capacity of various bone transplanting materials used for treatment of experimental bone defects[J]. Clin Orthop Relat Res, 1979, (140): 208–215.
57. Closkey RF, Parsons JR, Lee CK, et al. Mechanics of interbody spine fusion analysis of critical bone graft area[J]. Spine, 1993, 18(8): 1011–1015.
58. Vaccaro AR, Whang PG, Patel T, et al. The safety and efficacy of OP-1(rhBMP-7) as a replacement for iliac crest autograft for posterolateral lumbar arthrodesis: minimum 4-year follow-up of a pilot study[J]. Spine J, 2008, 8(3): 457–465.
59. Sethi A, Craig J, Bartol S, et al. Radiographic and CT evaluation of recombinant human bone morphogenetic protein-2-assisted spinal interbody fusion[J]. AJR Am J Roentgenol, 2011, 197(1): W128–W133.
60. Nourian AA, Harrington J, Pulido PA, et al. Fusion rates of lateral lumbar interbody fusion using recombinant human bone morphogenetic protein-2[J]. Global Spine J, 2019, 9(4): 398–402.
61. Mariscal G, Nuñez JH, Barrios C, et al. A meta-analysis of bone morphogenetic protein-2 versus iliac crest bone graft for the posterolateral fusion of the lumbar spine[J]. J Bone Miner Metab, 2020, 38(1): 54–62.
62. Galimberti F, Lubelski D, Healy AT, et al. A systematic review of lumbar fusion rates with and without the use of rhBMP-2[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2015, 40(14): 1132–1139.
63. Kimura H, Shikata J, Odate S, et al. Risk factors for cage retropulsion after posterior lumbar interbody fusion[J]. Spine, 2012, 13(37): 1164–1169.
64. Blumenthal SL, Ohnmeiss DD, NASS. Intervertebral cages for degenerative spinal diseases[J]. Spine J, 2003, 3(4): 301–309.
65. Zhao J, Hou T, Wang X, et al. Posterior lumbar interbody fusion using one diagonal fusion cage with transpedicular screw/rod fixation[J]. Eur Spine J, 2003, 12(2): 173–177.
66. 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–S116.
67. Selim A, Mercer S, Tang F. Polyetheretherketone(PEEK) rods for lumbar fusion: a systematic review and Meta-analysis[J]. Int J Spine Surg, 2018, 12(2): 190–200.
68. Kim DK, Lim H, Rim DC, et al. Clinical and radiological comparison of semirigid (Waveflex) and rigid system for the lumbar spine[J]. Korean J Spine, 2016, 13(2): 57–62.
69. 伍峻松, 杜峻华, 姜香云, 等. 动态稳定系统治疗腰椎退变性疾病节段的运动分析[J]. 中华医学杂志, 2014, 94(23): 1769–1772.

(收稿日期: 2020–11–20 末次修回日期: 2020–12–30)

(本文编辑 卢庆霞)