

经皮椎体成形术及椎体后凸成形术骨水泥的研究进展

A review of bone cement in percutaneous vertebroplasty and kyphoplasty

潘 俊, 杨惠林, 孟 斌

(苏州大学附属第一医院骨科 215006 江苏省苏州市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2012.01.16

中图分类号: R687.3, R318.08 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2012)-01-0081-04

近年来,经皮椎体成形术(PVP)和经皮椎体后凸成形术(PKP)作为一种微创手术广泛应用于治疗骨质疏松性椎体压缩骨折、椎体血管瘤或椎体转移瘤,获得了满意的临床效果。其中永久留置在椎体内的骨水泥成为国内外众多学者的研究热点。笔者就骨水泥的研究进展综述如下。

1 聚甲基丙烯酸甲酯(polymethylmethacrylate, PMMA)骨水泥

PMMA 是目前 PVP、PKP 手术中应用最为广泛的骨水泥材料,取得了较好的疗效^[1-2]。其优点在于可注射时间容易为临床医师掌控,易于操作,同时具有良好的生物力

学强度和刚度以及相对便宜的价格。但 PMMA 并非专门为 PVP 或 PKP 手术设计,存在潜在的缺陷:其聚合时可产生高温,如果注射时发生渗漏会对周围组织如神经根、硬膜产生热损伤;缺乏与周围骨融合性,与骨质间形成纤维膜,在长期随访中发现有松动的可能;PMMA 骨水泥与人体骨组织在生物力学方面存在差距,骨水泥压缩强度为 80MPa 明显高于压缩强度小于 10MPa 的骨质疏松性骨质,可能引起术后邻近节段骨折;在 X 线透视下不具有显影性,其特性可能受所加入显影剂影响^[3]。

Baroud 等^[4]利用体外椎体成形术(VP)骨水泥渗漏模型,比较了低粘度、中等粘度、高粘度 PMMA 骨水泥各自混合 5~7min、7~10min、10min 后模拟 VP 注射后渗漏情况,提出在骨水泥成面团状的高粘度情况下注射可以显著减少骨水泥渗漏量,并且骨水泥分布的均匀性优于中、低

第一作者简介:男(1985-),硕士研究生在读,研究方向:脊柱外科
电话:(0512)67780101 E-mail:55982162@qq.com

culture system[J].Biomaterials,2010,31(26):6876-6891.

33. Kurose R, Ichinohe S, Tajima G, et al. Characterization of human synovial fluid cells of 26 patients with osteoarthritis knee for cartilage repair therapy[J]. Int J Rheum Dis, 2010, 13(1):68-74.
34. Lee SY, Nakagawa T, Reddi AH. Mesenchymal progenitor cells derived from synovium and infrapatellar fat pad as a source for superficial zone cartilage tissue engineering: analysis of superficial zone protein/lubricin expression[J]. Tissue Eng Part A, 2010, 16(1):317-325.
35. Yoshii T, Sotome S, Torigoe I, et al. Isolation of osteogenic progenitor cells from trabecular bone for bone tissue engineering[J]. Tissue Eng Part A, 2010, 16(3):933-942.
36. Goldschlager T, Ghosh P, Zannettino A, et al. Cervical motion preservation using mesenchymal progenitor cells and pentosan polysulfate, a novel chondrogenic agent: preliminary study in an ovine model[J]. Neurosurg Focus, 2010, 28(6):E4.
37. Sommar P, Pettersson S, Ness C, et al. Engineering three-dimensional cartilage- and bone-like tissues using human dermal fibroblasts and macroporous gelatine microcarriers [J]. J Plast Reconstr Aesthet Surg, 2010, 63(6):1036-1046.
38. 江标, 李明, 曹豫江. 人骨形成蛋白 9 基因修饰的兔骨髓间充质干细胞异位成骨实验研究 [J]. 四川大学学报 (医学版),

2008, 39(5):723-727.

39. Jiang J, Fan CY, Zeng BF. Experimental construction of BMP2 and VEGF gene modified tissue engineering bone in vitro[J]. Int J Mol Sci, 2011, 12(3):1744-1755.
40. Pan C, Hicks A, Guan X, et al. SNL fibroblast feeder layers support derivation and maintenance of human induced pluripotent stem cells[J]. J Genet Genomics, 2010, 37(4):241-248.
41. Galende E, Karakikes I, Edelmann L, et al. Amniotic fluid cells are more efficiently reprogrammed to pluripotency than adult cells[J]. Cell Reprogram, 2010, 12(2):117-125.
42. Korecki CL, Taboas JM, Tuan RS, et al. Notochordal cell conditioned medium stimulates mesenchymal stem cell differentiation toward a young nucleus pulposus phenotype [J]. Stem Cell Res Ther, 2010, 1(2):18.
43. Purmessur D, Schek RM, Abbott RD, et al. Notochordal conditioned media from tissue increases proteoglycan accumulation and promotes a healthy nucleus pulposus phenotype in human mesenchymal stem cells[J]. Arthritis Res Ther, 2011, 13(3):R81.

(收稿日期:2011-05-20 修回日期:2011-08-05)

(本文编辑 刘 彦)

粘度组。Confidence 高粘度 PMMA 骨水泥成为研究新热点,其混合后可瞬间达到面团状的高粘度状态,并可保持 8~10min 的可注射状态,聚合温度低(50~60℃),操作简单,且大大降低了骨水泥渗漏的风险,但也存在与传统 PMMA 相同的不可降解、无生物活性等缺点^[4]。

Habib 等^[5]在体外采用 Baroud 设计的 VP 骨水泥渗漏模型,比较了 Confidence 高粘度骨水泥(DePuy Spine)与现存低粘度骨水泥(DePuy Spine)的渗漏及骨水泥分布均匀性的差别,得到了与 Baroud 相似的结论,Confidence 高粘度骨水泥于混合后 3.5min 及 6.5min 分别注射于渗漏模型中,其骨水泥渗漏量显著低于低粘度骨水泥于混合后 3.5min、6.5min、9.5min 注射所产生的渗漏量,并且骨水泥分布的均匀性亦优于现存低粘度骨水泥。Ruger 等^[6]利用 Confidence 高粘度 PMMA 骨水泥及其注射系统对人新鲜冰冻尸体胸腰椎压缩性骨折模型行 VP,结果表明术后椎体后凸畸形、椎体生物力学强度均较术前显著改善,且只有极少量骨水泥渗漏。

目前 Confidence 高粘度骨水泥在国内外临床中均已开始使用。Anselmetti 等^[7]将 60 例椎体疼痛性塌陷患者(其中骨质疏松性骨折 46 例,转移性肿瘤 12 例,血管瘤 2 例,共 190 个椎体)随机分成两组,其中 A 组 30 例患者(98 个椎体)使用 Confidence 高粘度骨水泥(Disc-O-Tech,以色列)及其注射系统行 VP, B 组 30 例(92 个椎体)使用标准低粘度 PMMA 骨水泥行 VP,术后随访发现两组均能显著改善临床症状,术后 CT 观察发现使用 A 组骨水泥渗漏率较 B 组显著降低,其骨水泥渗漏所引起的并发症亦显著减少。Georgy^[8]回顾了临床治疗胸腰椎骨质疏松性压缩骨折应用 Confidence 高粘度骨水泥行 VP 的 66 个椎体与行常规 PKP 手术的 46 个椎体,两组骨水泥渗漏率无统计学差异,各在椎间隙发生 1 例严重渗漏,但未引起任何临床症状,表明应用 Confidence 高粘度骨水泥行 VP 与常规 PKP 手术骨水泥渗漏率相当。

李春海等^[9]应用 Confidence 高粘度 PMMA 骨水泥及其椎体成形系统治疗老年骨质疏松性椎体压缩骨折 23 例 31 个椎体,术后随访发现腰背部疼痛明显缓解,2 例发生椎体旁骨水泥渗漏,无骨水泥毒性反应、肺栓塞、感染和神经损伤等并发症发生。蔺福辉等^[10]采用 Confidence 高粘度 PMMA 骨水泥行 PVP 治疗老年骨质疏松性椎体压缩骨折 45 例 65 个椎体,亦得到类似的疗效。但相关中长期的临床随访结果目前尚无报道。

2 磷酸钙骨水泥

磷酸钙骨水泥具有在体内被机体吸收、被骨组织替代的生物学作用,且不会像 PMMA 那样产生热损伤^[11,12],成为研究的热点。磷酸钙骨水泥主要分为两类:磷灰石骨水泥(apatite cement)和磷酸氢钙骨水泥(brushite cement)。但磷酸氢钙骨水泥^[13]降解速度过快导致生物力学作用大大削弱,凝固时间短,注射性差,限制了其临床应

用。以羟磷灰石(Hydroxyapatite, HA)骨水泥为代表的磷灰石骨水泥成为研究热点,并且衍生出一系列以 HA 为载体的生物型骨水泥。

2.1 HA 骨水泥的理化及生物力学性能

Li 等^[14]报道了将双酚 A 甲基丙烯酸缩水甘油酯(Bis-GMA)与锶羟磷灰石(SrHA)结合的新型可注射骨水泥用于 VP 和 KP 手术。锶(Sr)是一种与钙、钡同族的金属元素,具有显影性,并且可以刺激骨生成、抑制骨吸收^[14]。HA 具有骨传导性,以 Bis-GMA 为树脂基质制成新型骨水泥,其凝固时间在 15~18min,聚合放热最高为 58℃;生物力学刚度低于 PMMA,更接近于骨质;SrHA 与 HA 相比,促进成骨细胞粘附、增殖,钙沉积能力更强,在生物体内骨传导、骨诱导、骨相容性显著优于 PMMA, SrHA 的生物相容性与单纯 HA 相似,但生物活性明显优于 HA,且无需另外添加显影剂即能有良好的显影效果^[15,16]。Hernandez 等^[17,18]将单体表面经过处理后的 PMMA 与 SrHA 合成一种新的骨水泥材料,通过两者在骨水泥中所占比例的不同测定其流体力学性质,得出 SrHA 占 20%质量比时,骨水泥具有良好的操控性,最适宜注射,并且具有一定的力学强度。在其后的生物活性和相容性检测中,骨水泥体现了良好的生物活性及相容性^[18]。Kim 等^[19]将天然 HA 粉末、壳聚糖(chitosan)粉末与 PMMA 混合制成新型的骨水泥,在动物(成年雌性新西兰白兔)实验中发现随着壳聚糖的自然降解留下的孔隙,利于周围骨组织渗入,并且在生物力学效能上与 PMMA 相当,达到了即刻稳定和生物活性的结合,作者认为其有能力替代单纯 PMMA 骨水泥用于临床 VP 或 KP 手术。

2.2 HA 骨水泥的临床应用

SrHA 骨水泥目前已应用于临床试验阶段, Lu 等^[20]报道了 22 例单椎体胸腰段骨质疏松性压缩骨折行 VP 手术注射 SrHA 骨水泥,平均随访 18 个月,22 例 VAS 平均改善 85%,术后椎体高度保持,未发现邻近节段骨折和再发腰痛症状,3 例出现轻微骨水泥渗漏但无神经症状。有学者^[21-23]亦报道了对比 PMMA 及 SrHA 骨水泥作为椎体填充物行 PVP 手术治疗单椎体骨质疏松性椎体骨折的临床研究结果,发现两者均能有效缓解疼痛($P<0.01$),术后优良率 PMMA 组为 84.6%, SrHA 组为 82.6%,两者无统计学差异;SrHA 组随访 1 年以上的病例可见填充物开始降解。SrHA 骨水泥固化时间适中,易于推注,椎体内分布均匀,注入量比 PMMA 骨水泥明显增高($P<0.01$),并且所有病例行单侧注射。PMMA 骨水泥作为经典的骨水泥材料目前广泛应用于 VP 和 KP 手术,在生物性能方面有着巨大的改良空间, SrHA 骨水泥的临床疗效和安全性还有待于临床试验长期随访中得出,但作为 PMMA 骨水泥的替代物显示了巨大的潜力。

3 生物活性陶瓷骨水泥

目前具有生物活性的新型陶瓷骨水泥主要有两种:

Orthocomp 骨水泥和 Cortoss 骨水泥。Orthocomp 以 Bis-GMA 及其衍生物双酚 A 甲基丙烯酸乙氧基酯(Bis-EMA) 为树脂基质,加入生物活性陶瓷的复合材料,作为一种专门适用于 VP 或 KP 手术的骨水泥目前在法国正处于临床试验阶段。Belkoff 等^[24]就 Orthocomp 骨水泥生物力学性能与单纯 PMMA 骨水泥进行了对比,发现其具有与 PMMA 骨水泥相似甚至更好的力学表现,注射 Orthocomp 骨水泥的椎体恢复了最初的刚度,并且在显影性方面显著优于 PMMA 骨水泥,聚合时产生的热量亦少于 PMMA 骨水泥。

Cortoss 骨水泥是一种模拟人体骨质许多重要性质的生物活性复合物,其主要成分为 Bis-GMA 和 Bis-EMA 交叉结合树脂和生物活性玻璃陶瓷粒子菱硅钙钠石(Combeite),可使天然羟磷灰石分布于材料表面促进骨组织的结合^[25]。Cortoss 骨水泥具有良好的生物相容性,动物实验显示 Cortoss 骨水泥的生物陶瓷活性使其在注射后一段时间内周围新骨直接分布其表面,强化了材料与骨界面的作用力,而 PMMA 只是被纤维组织所包裹^[26]。Cortoss 骨水泥可使压缩椎体达到 PMMA 强化椎体相似的强度和刚度^[26]。Luo 等^[27]将 30 个胸腰椎“动态节段”(motion-segments)压缩制成椎体压缩性骨折模型,通过 VP 分别向椎体内注入 PMMA 与 Cortoss 骨水泥,分析其力学性能,发现两者在恢复椎体强度、刚度方面没有统计学差异。

Cortoss 骨水泥具有内在显影性,便于术中观察,且可应用即刻注射系统,省略了 PMMA 骨水泥注射多个节段时需多次制备骨水泥步骤。相对于 PMMA 骨水泥,其在体内的凝固时间更短,减少了注射后骨水泥流动的风险,并且具有可控的“即停即止”的注射系统,这些都是 PMMA 骨水泥所不具备的。更重要的优点是,可预先少量注入骨水泥以堵住潜在的裂缝或破口,待这部分骨水泥聚合后再进行二次灌注,从而增加了注射的灵活性^[28]。此外,Cortoss 骨水泥较 PMMA 骨水泥聚合时产生更少的热量,减少了周围组织热坏死的风险^[29],并且不具有心血管系统毒性。

Cortoss 骨水泥目前在欧洲已应用于临床,在美国尚处于临床试验阶段^[30,31]。2 年随访的临床验证试验结果显示,Cortoss 骨水泥在缓解疼痛及改进生活质量方面与 PMMA 骨水泥作用相似,且可以弥补 PMMA 骨水泥诸多不足和安全性方面的缺陷^[28]。组织学检查结果显示 KP 术后 6 个月,Cortoss 骨水泥在椎体内分散、相容良好,骨组织直接分布于 Cortoss 骨水泥表面^[28]。但尚无长期、大规模的临床试验报道,其潜在的并发症和在人体内相容性仍需进一步观察。

4 硫酸钙骨水泥

硫酸钙骨水泥作为临床上骨缺损的填充材料已有相当长的历史,其具有可注射性、骨传导性以及凝固时有限产热等优点,引起了学者的关注。Perry 等^[32]体外研究结果表明,在人新鲜冰冻尸体骨质疏松性椎体压缩性骨折模型上使用硫酸钙骨水泥行 KP 后,生物力学测试结果显示能

完全恢复椎体的强度(108%)及部分刚度(46%),与 PMMA 骨水泥相比无统计学差异。张绍东等^[33]报道了对体外小牛胸腰椎爆裂性骨折模型用硫酸钙、磷酸钙、PMMA 三种骨水泥行 VP,硫酸钙骨水泥、磷酸钙骨水泥能部分恢复椎体强度,PMMA 骨水泥能完全恢复椎体强度,三者恢复椎体刚度方面无明显差别。

但硫酸钙骨水泥被机体过快吸收,13 周左右即可生物降解^[34],以至在 VP 及 KP 后不能维持椎体的生物力学强度。张绍东等^[35]利用椎弓根螺钉固定结合可注射性硫酸钙骨水泥行 VP 治疗 21 例胸腰椎爆裂型骨折,认为使用硫酸钙骨水泥行 VP 为一项有效的辅助治疗胸腰椎爆裂骨折的方式,硫酸钙骨水泥可有效恢复椎体力学性能,减少单纯椎弓根螺钉固定后断钉及椎体高度再丢失等并发症。

5 其他新型骨水泥

有学者^[36]将氧化铁纳米粒子加入磷酸钙骨水泥中,这种新型骨水泥较普通磷酸钙骨水泥有更长的凝固时间,增强了其注射性;无细胞毒性;加入的氧化铁纳米粒子不影响骨水泥凝固的反应方式,并强化了其显微结构以具有更高的抗压强度。Jayabalan 等^[37]报道了羟基聚丙烯延胡索酸(HT-PPF)骨水泥,其有生物降解活性及易注射性,在体外对其理化及生物学特性进行了一系列测定,发现其具有良好的弥散性,凝固时间适中(5min),凝固温度较低(42℃),力学性能平稳,组织相容性高,同时具有良好的骨传导和骨诱导性,在被周围组织缓慢降解的过程中诱导周围成骨细胞渗入附着,软骨形成,钙化组织沉着,并提供支架作用。但尚无 HT-PPF 用于临床的报道。

6 参考文献

- Ledlie JT, Renfro M. Balloon kyphoplasty: one-year outcomes in vertebral body height restoration, chronic pain, and activity levels[J]. *Neurosurg*, 2003, 98(1): 36-42.
- Coumans JV, Reinhardt MK, Lieberman IH. Kyphoplasty for vertebral compression fractures: 1-year clinical outcomes from a prospective study [J]. *Neurosurg*, 2003, 99(1): 44-50.
- Deb S, Vazquez B. The effect of cross-linking agents on acrylic bone cements containing radiopacifiers [J]. *Biomaterials*, 2001, 22(15): 2177-2181.
- Baroud G, Crookshank M, Bohner M. High-viscosity cement significantly enhances uniformity of cement filling in vertebroplasty: an experimental model and study on cement leakage[J]. *Spine*, 2006, 31(22): 2562-2568.
- Habib M, Serhan H, Marchek C, et al. Cement leakage and filling pattern study of low viscous vertebroplastic versus high viscous confidence cement[J]. *SAS J*, 2010, 4(1): 26-33.
- Ruger M, Schmoelz W. Vertebroplasty with high-viscosity polymethylmethacrylate cement facilitates vertebral body restoration in vitro[J]. *Spine*, 2009, 34(24): 2619-2625.

7. Anselmetti GC, Zoarski G, Manca A, et al. Percutaneous vertebroplasty and bone cement leakage: clinical experience with a new high-viscosity bone cement and delivery system for vertebral augmentation in Benign and Malignant compression fractures[J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2008, 31(5): 937-947.
8. Georgy BA. Clinical experience with high-viscosity cements for percutaneous vertebral body augmentation: occurrence, degree, and location of cement leakage compared with kyphoplasty [J]. *AJNR*, 2010, 31(3): 504-508.
9. 李春海, 刘尚礼, 叶伟, 等. 高粘度骨水泥在经皮椎体成形术中的应用[J]. *中华骨科杂志*, 2007, 27(4): 259-262.
10. 蔺福辉, 易小波, 任志宏. 高粘度骨水泥在椎体成形术中的应用[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2009, 24(1): 66-67.
11. Verlaan JJ, Oner FC, Sloopweg PJ, et al. Histologic changes after vertebroplasty[J]. *Bone Joint Surg Am*, 2004, 86(6): 1230-1238.
12. Fulmer MT, Ison IC, Hankermayer CR, et al. Measurements of the solubilities and dissolution rates of several hydroxyapatites[J]. *Biomaterials*, 2002, 23(3): 751-755.
13. Dorozhkin SV. Calcium orthophosphate cements for biomedical application [J]. *Mater Sci*, 2008, 43(9): 3028-3057.
14. Li YW, Leong JC, Lu WW, et al. A novel injectable bioactive bone cement for spinal surgery: a developmental and preclinical study[J]. *J Biomed Mater Res*, 2000, 52(1): 164-170.
15. Cheung KM, Lu WW, Luk KD, et al. Vertebroplasty by use of a Strontium-containing bioactive bone cement[J]. *Spine*, 2005, 30(17 Suppl): 84-91.
16. Wong CT, Lu WW, Chan WK, et al. In vivo cancellous bone remodeling on a Strontium-containing hydroxyapatite (Sr-HA) bioactive cement[J]. *Biomed Mater Res*, 2004, 68(3): 513-521.
17. Hernandez L, Gurruchaga M, Goni I. Injectable acrylic bone cements for vertebroplasty based on a radiopaque hydroxyapatite: formulation and rheological behaviour [J]. *Mater Sci: Mater Med*, 2009, 20(1): 89-97.
18. Hernandez L, Parra J, Vázquez B, et al. Injectable acrylic bone cements for vertebroplasty based on a radiopaque hydroxyapatite: bioactivity and biocompatibility[J]. *J Mater Res*, 2009, 88(1): 103-114.
19. Kim SB, Kim YK, Yoon TL, et al. The characteristics of a hydroxyapatite-chitosan-PMMA bone cement [J]. *Biomaterials*, 2004, 25(26): 5715-5723.
20. Lu WW, Cheung KMC, Luk KDK, et al. A novel Sr-HA bioactive bone cement for vertebroplasty [C]. 38th Annual Meeting of the Scoliosis Research Society. Quebec City, Quebec, Canada; September, 2003. 10-13.
21. 苏汝堃, 郑召民, 李佛保, 等. 椎体成形术中注射聚甲基丙烯酸酯和羟基磷灰石的比较 [J]. *中山大学学报 (医学科学版)*, 2006, 27(9): 549-553.
22. 刘尚礼, 郑召民, 吕维加, 等. 注射性羟基磷灰石在椎体成形术中的临床应用[J]. *中华骨科杂志*, 2004, 24(11): 653-656.
23. 苏汝堃, 郑召民, 李佛保, 等. 两种填充物在经皮椎体成形术中的应用的临床比较 [J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2006, 21(4): 250-252.
24. Belkoff SM, Mathis JM, Erbe EM, et al. Biomechanical evaluation of a new bone cement for use in vertebroplasty [J]. *Spine*, 2000, 25(9): 1061-1064.
25. Hench LL. The story of Bioglass[J]. *Mater Sci: Mater Med*, 2006, 17(11): 967-978.
26. Erbe E, Clineff T, Gualtieri G. Comparison of a new bisphenol-a-glycidyl-dimethacrylate-based cortical bone void filler with polymethyl methacrylate [J]. *Eur Spine*, 2001, 10 (Suppl 2): 147-152.
27. Luo J, Skrzypiec DM, Pollintine P, et al. Mechanical efficacy of vertebroplasty: influence of cement type, BMD, fracture severity, and disc degeneration [J]. *Bone*, 2007, 40 (4): 1110-1119.
28. Bae H, Shen M, Maurer P, et al. Clinical experience using Cortoss for treating vertebral compression fractures with vertebroplasty and kyphoplasty: twenty four-month follow-up[J]. *Spine*, 2010, 35(20): 1030-1036.
29. Deramond H, Wright NT, Belkoff SM. Temperature elevation caused by bone cement polymerization during vertebroplasty [J]. *Bone*, 1999, 25(2 Suppl): 17-21.
30. Hatten HP. Prospective randomized trial of Cortoss versus PMMA in the treatment of vertebral compression fractures: preliminary results at a single center [C]. *American Society of Spine Radiology. America; Las Vegas*, 2006. 41-45.
31. Maurer PM, Kim CW, Lieberman I, et al. Treatment of vertebral compression fractures with Cortoss in vertebroplasty and kyphoplasty: one year follow-up[C]. *American Society of Spine Radiology. America; Las Vegas*, 2006. 57-62.
32. Perry A, Mahar A, Massie J, et al. Biomechanical evaluation of kyphoplasty with calcium sulfate cement in a cadaveric osteoporotic vertebral compression fracture model [J]. *Spine J*, 2005, 15(5): 489-493.
33. 张绍东, 姜星杰, 吴小涛, 等. 三种骨水泥应用于椎体成形术的生物力学比较[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2007, 17(3): 205-209.
34. Mirzayam R, Panossian V, Avedian R, et al. The use of calcium sulfate in the treatment of benign bone lesions: a preliminary report[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2001, 83(3): 355-358.
35. 张绍东, 吴小涛, 杨惠林, 等. 椎弓根钉固定结合注射性硫酸钙椎体成形术治疗胸腰椎骨折 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2007, 9(3): 225-228.
36. Vlad MD, Valle L, Barracó M, et al. Iron oxide nanoparticles significantly enhances the injectability of apatitic bone cement for vertebroplasty[J]. *Spine*, 2008, 33(21): 2290-2298.
37. Jayabalan M, Shalunon KT, Mitha MK. Injectable biomaterials for minimally invasive orthopedic treatments [J]. *Mater Sci: Mater Med*, 2009, 20(6): 1379-1387.

(收稿日期: 2011-04-11 修回日期: 2011-08-14)

(本文编辑 李伟霞)