doi:10.11659/jjssx.03E019193

·临床研究·

“蛋壳”优化球囊成形技术在经皮椎体后凸成形术中的运用

沈影超,陆 苇,蒋晓伟,缪逸鸣,陈 俊,王 强 (南京中医药大学附属常熟医院骨科,江苏 常熟 215500)

[摘 要] **目的** 在经典的经皮椎体后凸成形术中运用“蛋壳”优化球囊成形技术,观察临床和影像学各类指标,探索新术式的疗效。**方法** 选取2018年8月至2019年1月在常熟市中医院骨科就诊的骨质疏松性胸腰椎骨折病例48例,按手术方法的不同将其分为观察组和对照组。观察组24例在经皮椎体后凸成形术中运用“蛋壳”优化球囊成形技术;对照组24例采用经典的经皮椎体后凸成形术治疗。采用疼痛视觉模拟量表(VAS)评分、Oswestry功能障碍指数(ODI)和影像学Genant′s半定量法判断椎体的畸形程度和骨水泥渗透率。**结果** 2组患者术前、术后2 d及术后3个月末VAS和ODI评分比较差异无统计学意义($P>0.05$);观察组患者骨水泥渗漏率为12.5%,对照组患者骨水泥渗漏率为25%,2组比较差异具有统计学意义($P<0.05$);观察组患者Genant′s半定量法术后Ⅰ度占82%,对照组Ⅰ度占75%,2组比较差异具有统计学意义($P<0.05$)。**结论** 在经皮椎体后凸成形术中运用“蛋壳”优化球囊成形技术治疗骨质疏松性胸腰椎骨折临床疗效满意,是一种较为理想的治疗方法。

[关键词] “蛋壳”技术;经皮椎体后凸成形术;骨质疏松;胸腰椎骨折

[中图分类号] R683 [文献标识码] A [收稿日期] 2019-03-16

Application of "eggshell" modified balloon technique in percutaneous kyphoplasty

SHEN Ying-chao, LU wei, JIANG Xiao-wei, MIAO Yi-Min, CHEN Jun, WANG Qiang (Department of Orthopedics, Changshu Hospital Affiliated to Nanjing University of Chinese Medicine, Changshu Jiangshu 215500, China)

Abstract: Objective In the classic percutaneous kyphoplasty, the "eggshell" technique was used to optimize balloon formation, and various clinical and imaging indicators were observed to explore the efficacy of the new method. **Methods** From August 2018 to January 2019, 48 cases of osteoporotic thoracolumbar vertebral fractures treated in our department were observed. According to the different surgical methods, they were divided into the observation group and the control group. In the observation group (24 cases), "eggshell" technique was used to optimize balloon formation during percutaneous kyphoplasty. In the control group(24 patients) were treated with the classic percutaneous kyphoplasty. Visual analogue scale score of pain(VAS), Oswestry disability index(ODI) and imaging Genant′s semi-quantitative method were used to determine the degree of vertebral deformity and bone cement permeability. **Results** There was no significant difference in VAS and ODI scores between the two groups($P>0.05$). The bone cement leakage rate in the observation group was 12.5%, while it was 25% in the observation group, and the difference was statistically significant($P<0.05$). In the observation group, the percentage of degree Ⅰ after

[基金项目] 常熟市科技局资助性课题(CS201819)

[通信作者] 王 强,E-mail:Luntan100@sina.com

[18] Wutzler S, Wafaisade A, Maegele M, et al. Lung Organ Failure Score (LOFS): probability of severe pulmonary organ failure after multiple injuries including chest trauma[J]. Injury, 2012, 43(9): 1507-1512. doi:10.1016/j.injury.2010.12.029.

[19] Wyen H, Wutzler S, Maegele M, et al. Rotational bed therapy after blunt chest trauma: a nationwide online-survey on current concepts of care in Germany[J]. Injury, 2013, 44(1): 70-74. doi:10.1016/j.injury.2011.11.003.

[20] 赵晓东,刘红升. 创伤患者ARDS诊治策略掌握规律——实施时效与整体性救治[J]. 解放军医学杂志,2016,41(8):525-528.

[21] 赵晓东,刘红升. 创伤患者急性呼吸困难的快速识别及治疗临床误诊误治[J]. 临床误诊误治,2015,28(4):80-81. doi:10.3969/j.issn.1002-3429.2015.04.027.

[22] Wutzler S, Sturm K, Lustenberger T, et al. Kinetic therapy in multiple trauma patients with severe thoracic trauma: atreatment option to reduce ventilator time and improve outcome[J]. Eur J Trauma Emerg Surg, 2016, 43(2): 155-161. doi:10.1007/s00068-016-0692-3.

[23] 中华医学会呼吸病学分会呼吸危重症医学学组. 急性呼吸窘迫综合征患者机械通气指南(试行)[J]. 中华医学杂志,2016,96(6):404-424.

[24] Holst LB, Petersen MW, Haase N, et al. Restrictive versus liberal transfusion strategy for red blood cell transfusion: systematic review of randomised trials with meta-analysis and trial sequential analysis[J]. BMJ, 2015, 350: h1354. doi:10.1136/bmj.h1354.

(编辑:刘 艺)

Genant's semi-quantitative spell was 82%, and it was 75% in the control group, with statistically significant difference ($P < 0.05$). **Conclusion** In percutaneous kyphoplasty, "eggshell" optimized balloon shaping technique is used to treat osteoporotic thoracolumbar vertebral fracture, and the clinical effect is satisfactory, which is an ideal treatment method.

Keywords: "eggshell" technology; percutaneous kyphoplasty; osteoporosis; thoracolumbar fractures

骨质疏松性椎体压缩骨折(osteoporotic vertebral compression fractures, OVCF)是一种常见的老年人易发骨折,70岁以上老年人发病率尤其高[1]。其治疗方案包括开放手术和微创手术,高龄患者基础疾病较多、手术风险大,所以目前开放手术仅适用于有神经压迫症状需要椎管减压者[2]。经皮椎体成形术(percutaneous vertebroplasty, PVP)及经皮椎体后凸成形术(percutaneous kyphoplasty, PKP)对患者身体条件要求低,操作简单,创伤小,且止痛见效快,能早期恢复行走能力,已成为OVCF治疗首选方案[3-6]。但是,PVP或者PKP手术中骨水泥注射仍然存在难点。注射时,骨水泥如果太稀薄,其在椎体内就会扩散过快,容易沿血管管道或者缝隙渗漏;而骨水泥如果太黏稠,则其在椎体内不能良好灌注,与宿主骨棒卯结合不足,易导致后期骨水泥团块移位。因此,有必要进行改良以提高手术效果。本研究分析骨水泥的流体力学特点,提出了治疗优化球囊成形的"蛋壳"技术,选择2018年8月至2019年1月我院收治的骨质疏松性胸腰椎骨折患者,采用"蛋壳"优化球囊成形技术治疗,通过观察对比其临床疗效和术中、术后影像学结果,探讨最佳治疗方式。

1 资料与方法

1.1 临床资料

选取2018年8月至2019年1月在常熟市中医院骨科就诊的OVCF患者48例。按照手术方法的不同将其分为观察组和对照组。观察组24例在经皮椎体后凸成形术中运用"蛋壳"优化球囊成形技术;对照组24例采用经典的经皮椎体后凸成形术治疗。观察组男7例,女17例;年龄62~82岁,平均73.2岁;胸椎骨折8例,腰椎骨折16例。对照组男6例,女18例;年龄61~84岁,平均73.8岁;胸椎骨折9例,腰椎骨折15例。

纳入标准:①年龄不低于55岁;②轻微外伤后胸腰背部疼痛,查体提示胸椎或腰椎棘突有压痛及叩击痛;③MRI显示T1低信号、T2等信号或高信号、STIR高信号;如未行MRI检查,则骨扫描检查应提示椎体核素浓聚;④骨折引起胸腰背部中重度疼痛经保守治疗无法缓解(VAS评分4~10分),疼痛时间≤6周;⑤C_5~L_5骨折;⑥骨密度(bone mineral density, BMD)≤-1.0。

排除标准:①高能量损伤并存椎管狭窄需行椎弓根钉内固定;②骨折椎体后缘突入椎管明显压迫硬膜囊,合并神经损伤症状;③继发性骨质疏松症;④类风湿性关节炎;⑤应用激素时间≥3个月;⑥恶性肿瘤所致病理性椎体骨折,比如多发性髓瘤、骨转移瘤、骨巨细胞瘤以及血管瘤等;⑦存在严重心肺肝肾功能不全等疾病或精神病,不能耐受手术;⑧凝血功能障碍。

1.2 材料与术前处理

1.2.1 材料 扩张球囊成分为聚氨酯,具有较高的机械强度、氧化稳定性、柔屈性、回弹性和优良的耐油性、耐溶剂型、耐水性、耐火性,是一种难燃的自熄性材料,软化点可达到250 ℃,仅在较高温度出现分解。骨水泥为OSTEOPAL® V,是聚甲基丙烯酸甲酯粉剂+单体丙烯酸甲酯聚合而成,混合二氧化锆作为造影剂。叶绿色铜(E141)用来使骨水泥呈现绿色。每小袋(26 g)粉剂含有聚甲基丙烯酸甲酯粉剂+单体丙烯酸甲酯混合物14.2 g、二氧化锆11.7 g、过氧化苯甲酰0.1 g;每安瓿(10 mL)液体含有甲基丙烯酸甲酯9.2 g。NN二甲基-对甲苯胺0.2 g。

1.2.2 术前处理 患者平卧休息,完善各项实验室检查,包括术前血常规、出凝血时间、肝肾功能、电解质、红细胞沉降率及超敏C反应蛋白等。拍摄脊椎MRI、CT及正侧位X射线片、胸部X射线片等。X射线片观察骨质疏松椎体压缩塌陷形态;MRI观察鉴别骨质疏松椎体新旧骨折,显示椎体骨折的部位和压缩程度,排除椎体转移肿瘤的可能,检测椎体压缩程度和硬膜囊是否受压;CT检查了解压缩椎体边缘骨皮质是否完整,椎管内是否有游离骨碎片,鉴别椎体转移肿瘤,判断椎弓根是否完整,椎体后缘骨皮质破坏程度,并可观察穿刺途径的解剖结构等。VAS评分4分以上者予以鲑鱼降钙素50 Iu肌肉注射。术前存在贫血者予以纠正贫血。常规予以莫沙必利口服。

1.3 手术方法

患者采用气管插管全身麻醉或局部浸润麻醉,俯卧位,常规消毒、铺无菌巾。C型臂X射线机透视下监测经双侧或单侧椎弓根或椎弓根旁穿刺。透视椎体标准正侧位像,分步穿刺到达椎体后缘前方3~5 mm处;然后依次放置导针、扩张套管、工作套管建立工作通道。

经工作套管将可扩张球囊导入椎体,使其位于患椎前3/4处。行双球囊同时双侧扩张。视椎体大小和骨折压缩程度,予以容量1~2 mL、压力不超过200 mmHg。

"蛋壳"技术灌注骨水泥。第1次调配2推杆骨水泥,待骨水泥处于拉丝期后期或团状期早期,将推杆置入椎体,靠近椎体中部,将推杆内的1/3容量骨水泥缓慢推入椎体;再次经工作套管导入可扩张球囊。再次予以球囊扩张,容量达到第1次的90%~100%、压力不超过200 mmHg。此时C型臂X射线机透视,可发现骨水泥分布椎体周边,形成"蛋壳"样结构。第2次调配骨水泥,待骨水泥处于拉丝期中期或早期,将推杆置入椎体,将骨水泥缓慢推入椎体,透视监测骨水泥弥散满意时停止。此时C型臂X射线机透视,可发现形成周边毛刺的骨水泥团块。患者术后1~2 d在硬腰围保护下离床行走,继续抗骨质疏松药物治疗。术后摄片观察有无骨水泥渗漏。

1.4 疗效评定

临床结果:术前、术后2 d及术后3个月末采用疼痛视觉模拟量表(visual ana-logue scale,VAS)评分及Oswestry功能障碍指数(oswestry disability index,ODI)综合评估手术疗效。影像学观察:①在术中,以C型臂X射线机观察骨水泥渗漏率。②在术中,以C型臂X射线机观察骨水泥团块动态变化,有无明显的"蛋壳"形成过程,手术终末骨水泥团块是否呈边缘毛刺状。本研究认为骨水泥团块边缘毛刺状越明显,微榫卯及榫卯结构越完善。③术后在腰椎侧位片上观察伤椎椎体后凸角的变化以及前缘相对高度的变化,以Genant′s半定量法量化判断椎体的畸形程度。在术后第3个月末复查胸腰椎正侧位片,观察骨水泥团块有无移位。

1.5 统计学处理

采用SPSS 13.0软件,计量资料以均数±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,2组患者组间比较采用两独立样本t检验;计数资料以率(%)表示,采用χ^2检验,以$P<0.05$为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 2组患者VAS评分和ODI评分比较

对2组患者在术前、术后2 d及术后3个月末采用VAS评分及ODI综合评估手术疗效,差异均无统计学意义($P>0.05$),见表1。此外,2组患者均未发现明显的血压降低、恶心呕吐、呼吸困难、心慌气促等不良反应。

2.2 2组患者影像学观察

在术中以C型臂X射线机可以看到观察组在二次球囊撑开后形成明显的"蛋壳"影像。在术后亦未发现骨水泥团块移位。

表1 2组患者术前、术后VAS、ODI评分比较($\bar{x}\pm s$,$n=24$,分)

组别	术前		术后2 d		术后3个月末	
	VAS	ODI	VAS	ODI	VAS	ODI
观察组	6.2±1.2	43±1.2	1.2±1.1	8.5±1.3	0.8±1.3	4.5±1.5
对照组	5.9±1.4	42±1.5	1.3±1.2	8.8±1.3	0.9±1.2	5.1±1.6
t	1.328	0.642	0.856	1.542	0.842	0.954
P	0.09	0.25	0.22	0.07	0.23	0.18

2.3 2组患者伤椎椎体后凸角的变化以及前缘相对高度的变化

术后在腰椎侧位片上观察伤椎椎体后凸角的变化以及前缘相对高度的变化,以Genant′s半定量法量化判断椎体的畸形程度。观察组Genant′s半定量法术后Ⅰ度21例,占87.5%;对照组Ⅰ度18例,占75%,2组比较差异有统计学意义($\chi^2=38.12$,$P<0.05$)。

观察组术中有3例患者骨水泥渗漏侧壁少量渗漏,渗漏率为12.5%;对照组术中有6例骨水泥渗漏侧壁少量渗漏,骨水泥渗漏率为25.0%,2组比较差异有统计学意义($t=2.054$,$P<0.05$)。

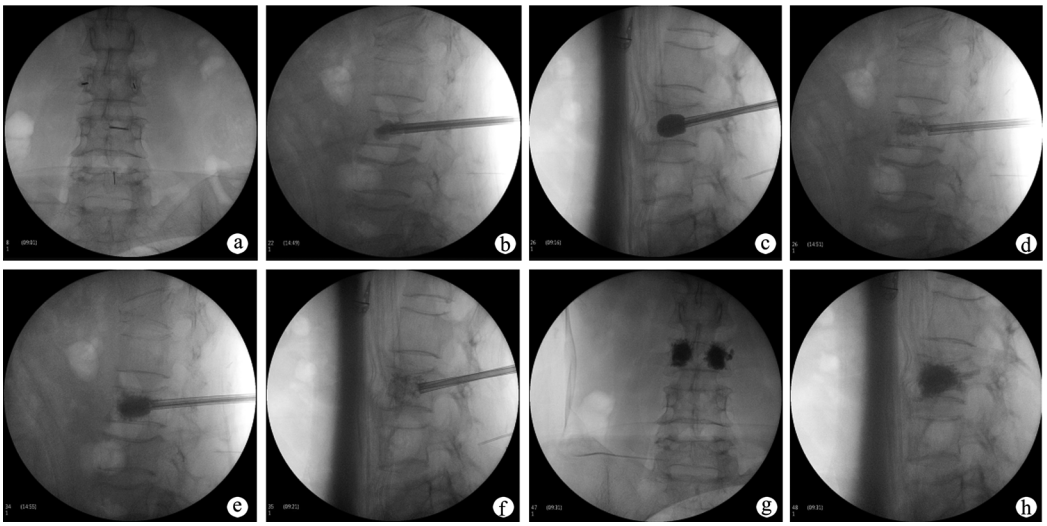
2.4 典型病例

患者,女,63岁,因腰部疼痛1周入院,诊断为L_3骨质疏松性骨折。完善检查后予以全身麻醉下后路椎体成形术,术中采用针头定位(图1a),穿刺成形后一侧推入首剂0.5 mL骨水泥(图1b),一侧予以2次球囊成形(图1c),可见骨水泥团块形成单侧清晰的"蛋壳"结构(图1d),另一侧同法予以二次球囊成形,可见骨水泥分布在球囊四周,形成微榫卯结构(图1e),双侧二次球囊成形后侧位片显示骨水泥团块形成清晰的"蛋壳"结构(图1f),然后予以灌注全量骨水泥,腰椎正位片可见形成周围毛刺的骨水泥团块(图1g),腰椎侧位片可见病椎高度恢复,形态满意,骨水泥团块周围有毛刺,在椎弓根内留有短"球拍"(图1h)。

3 讨论

PKP已经是广泛被采用的治疗OVCF的术式。然而,骨水泥渗漏以及带来的肺栓塞等并发症仍然是骨科医师所应极力避免的。除此之外,如何使伤椎形态更好地恢复、减少远期骨水泥团块移位和避免椎体再次发生骨折均是治疗的重要目标。

骨水泥的流体力学行为是影响骨水泥在松质骨中的渗透性最重要的因素之一[7]。从骨水泥的流体力学切入减少骨水泥渗漏的研究目标,无疑是正确的。Krause等[8]的研究证实骨水泥是一种稠密的非牛顿流体,具有剪切稀化的特性。通常情况下,骨水泥在松



a:针头定位;b:一侧推入骨水泥;c:2 次球囊成形;d:单侧“蛋壳”结构;e:另侧 2 次球囊成形;f:双侧“蛋壳”结构;g:全量灌注后,形成带毛刺的骨水泥团块;h:全量灌注后,病椎高度恢复,椎弓根内留有“球拍”

图 1 “蛋壳”优化球囊成形术中影像资料

质骨中的流速是缓慢的,类似于水在岩土空隙中运动,符合渗流的定义(流体在孔隙介质中的运动)。流动规律为水流流线互相平行的流动即层流,运动规律近似符合达西定律:$Q = \kappa S(p1 - p0)/h$[9]。此外,还基于如下假设:①骨水泥在椎体松质骨中的流速缓慢;②松质骨的形变忽略不计;③骨水泥在松质骨中的弥散具有均匀性,各向同性。从临床的角度分析,椎体骨质疏松程度可以通过测定骨密度进行评价。因此,骨水泥在人体椎体松质骨内的流动分布规律为以注射点为圆心,在经过注射点的各个平面上,向各个方向呈类圆形流动分布,成为一个类球体的结构[10]。因此,为减少骨水泥发生渗漏,可以从以下方面入手:①骨折线[11]。骨水泥易沿骨折线渗漏。因此首剂推入的骨水泥必须控制在一定范围内,在骨折线内有限流动,等待首剂骨水泥失去流体特性(硬化)后,再进行后续治疗;②控制骨水泥黏稠度[12]。骨水泥黏稠度是影响骨水泥渗漏的重要因素之一。骨水泥黏稠度随着时间逐渐增高,同时温度增高。随之而来骨水泥的流体特性下降,推注压力将增大,也无法达到在椎体松质骨内很好地弥散。③椎体球囊扩张程度。充分的球囊扩张可以使较多的骨小梁堆积在球囊表面,从而改变松质骨的多孔介质属性。④注射压力和速率。如果推射压力太大,则会使骨水泥瞬间剪切稀化,渗流增加发生渗漏。

基于以上流体力学的理论,杨惠林等[13]采用了分次灌注技术,以减少骨水泥渗漏并取得了良好效果。此外,有学者采用高黏度骨水泥,因其混合后流体属性减弱、可操作时间长,从而减少骨水泥渗漏,但是也将带来骨水泥 - 宿主骨微榫卯结合不够的问题[14]。何万庆等[15]在 2014 年提出了“蛋壳”技术,方法为:小剂量(0.5 ~ 1.0 mL)骨水泥注入撑开的空腔,再次插入球囊并撑开椎体高度,使之形成一薄的骨水泥蛋壳,撤出球囊,再次注入骨水泥填充,观察患者 VAS 评分、活动能力评分、椎体高度测量及 Cobb's 角测量均得到了改善,且无严重手术并发症。

本研究虽然没有对基础理论依据和每次球囊撑开容积、灌注时机等进行阐述,但从复习流体力学文献中,认识到达西定律描述了渗透流速与水头损失率成正比的关系。同时还可知渗透系数($k = Cd2\ \gamma/\mu$)只取决于渗流材料系统自身的特性(Cd2)和流体自身特性(γ/μ)两种因素;前者只与多孔介质的组成结构有关,是唯一能够改变的内容。向各个方向呈类圆形流动分布必然造成在推注骨水泥的过程中,外围骨水泥向椎体内血管管道、骨折形成的裂隙渗漏。在住院的短期内明显提高椎体骨密度是不可能的,但是在分次灌注骨水泥过程中,让首剂注入的有限容积的骨水泥有序分布、改变椎体多孔介质的组成结构却是可能实现的选项。

在本研究中,以骨质疏松性胸腰椎骨折为观察对象,对分次灌注技术进行改良,将第 1 次灌注的骨水泥在渗透系数较低的面团期予以再次球囊扩张,然后等待骨水泥变硬即形成渗入周边血管、骨折裂隙的“蛋壳”结构,成为防止骨水泥渗漏的屏障。球囊的聚氨酯成分具有超高耐热性,可以耐受骨水泥固化时产生的高温。根据几何数学计算,若首次球囊扩张 2 mL,然后注入每侧推杆内的 1/3 容量骨水泥(0.5 mL),共

1 mL。根据骨水泥体积推导公式:体积 V = ∫S(z)dz = ∫π × a × b × (1 - z^2/c^2)dz = 4/3 × π × a × b × c,(ABC 是 3 个半轴长),再次球囊扩张 2 mL 后,骨水泥被挤压入骨小梁间的缝隙,即可在球囊扩张的四壁形成约1.3 mm厚度的骨水泥"蛋壳"。"蛋壳"具有力学强度较高的骨水泥 - 宿主骨椎卯结合,与本组研究观察结果一致,观察组骨水泥渗漏率较对照组降低,说明"蛋壳"技术可降低骨水泥渗漏和使骨水泥团块移位。

使用"蛋壳"技术的注意事项:①第 1 次灌注骨水泥时骨水泥推杆尽量接近椎体中央,在骨水泥黏度较高时注入,封堵住裂隙,以球囊再次推入扩张,可使骨水泥均匀分布在椎体四周。②第 2 次在骨水泥黏度较低时注入椎体,骨水泥会很好地弥散在"蛋壳"内。患者术后摄片显示两次骨水泥之间并没有明显界线形成,骨水泥仍为一体。随访结果显示患者疼痛有效缓解,说明"蛋壳"技术灌注骨水泥与一次灌注骨水泥一样,能有效稳定椎体、消除骨折块的微动,起到良好的止痛效果。

本研究将治疗效果、并发症及弥散情况与既往常规成形术式进行对照,表明在改善 VAS 和 ODI 指标方面,2 组患者无明显差异,说明经典的 PKP 手术和改良术式同样能够良好止痛及改善临床效果;但是在骨水泥渗漏率方面,观察组明显优于对照组。观察组的椎体形态得到了更好的恢复,表明以 Genant's 半定量法测量观察组明显优于对照组。本组病例无明显不良反应发生,验证了基于流体力学的椎体成形骨水泥 - 骨锚合技术治疗骨质疏松性胸腰椎骨折的有效性和安全性。

本研究在经典的经皮椎体后凸成形术中运用"蛋壳"技术优化球囊成形,改良了经典的 PKP 术式,结果证实首剂骨水泥形成的"蛋壳"有助于减少骨水泥渗漏,提高手术安全性;骨水泥的微椎卯结构有助于减少应力集中、椎体再骨折和后期骨水泥团块移位的可能性,是一种较为理想的治疗方法。不足之处在于未按照随机对照原则分组,可能会存在一定的偏倚。此外,随访时间较短,仅为 3 ~ 6 个月,有待于更长时间的随访及积累更多的病例来印证。

[参考文献]

[1] Kan SL, Yuan ZF, Chen LX, et al. Which is best for osteoporotic vertebral compression fractures: balloon kyphoplasty, percutaneous vertebroplasty or non-surgical treatment? A study protocol for a Bayesian network meta-analysis[J]. Bmj Open, 2017, 7(1): e012937. doi: 10.1136/bmjopen-2016 - 012937.

[2] Liu T, Li Z, Su Q, et al. Cement leakage in osteoporotic vertebral compression fractures with cortical defect using high-viscosity bone cement during unilateral percutaneous kyphoplasty surgery[J]. Medicine, 2017,96(25): e7216. doi: 10.1097/MD.0000000000007216.

[3] 陈洪雷,贾连顺. 经皮球囊扩张椎体成形术治疗 203 例骨质疏松性胸腰椎骨折患者临床体会[J]. 临床军医杂志,2018,46(4):55 - 57. doi: CNKI: SUN: JYGZ. 0. 2018 - 04 - 014.

[4] Gerling MC, Eubanks JD, Patel R, et al. Cement augmentation of refractory osteoporotic vertebral compression fractures: survivor ship analysis[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2011, 36(19): E1266 - E1269. doi: 10.1097/BRS.0b013e31820a0b3f.

[5] Yang B. Percutaneous vertebroplasty versus percutaneous kyphoplasty for osteoporotic vertebral compressive fracture: a retrospective cohort study[J]. J Evid Based Med, 2015, 15(4): 377 - 380. doi: 10.7507/1672 - 2531.20150064.

[6] Guo D, Cai J, Zhang S, et al. Treating osteoporotic vertebral compression fractures with intraosseous vacuum phenomena using high-viscosity bone cement via bilateral percutaneous vertebroplasty[J]. Medicine, 2017,96(14): e6549. doi: 10.1097/MD.0000000000006549.

[7] 徐达强,杨惠林,邹 俊,等. 骨水泥在松质骨渗透性的流体力学研究[J]. 苏州大学学报,2007,12(2):207 - 208. doi: 10.3969/j.issn.1673 - 0399.2007.02.012.

[8] Krause WR, Miller J, Ng P. The viscosity of acrylic bone cements[J]. J Biomed Mater Res A, 1982, 16(3): 219 - 243.

[9] 邓英尔,刘慈群,黄润秋,等. 理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2004:21 - 25.

[10] 刘绪立,雷 伟,郑 金,等. 椎体模型内模拟注射 PMMA 的流动及分布规律[J]. 第四军医大学学报,2007,28(2):143 - 145. doi: 10.3321/j.issn:1000 - 2790.2007.02.015.

[11] 刘 滔,张志明,史金辉,等. 骨水泥温度梯度灌注技术在经皮椎体后凸成形术中的应用[J]. 中国脊柱脊髓杂志,2015,25(12):1073 - 1076. doi: 10.3969/j.issn.1004 - 406X.2015.12.04.

[12] 贾 鑫,靳激扬. 经皮椎体成形术骨水泥渗漏的危险因素研究进展[J]. 国际医学放射学杂志,2018,41(4):450 - 453. doi: 10.19300/j.2018.Z5735.

[13] 杨惠林,王根林,姜为民,等. 分次灌注骨水泥技术治疗. Kümmell 病[J]. 脊柱外科杂志,2012,10(1):22 - 24. doi: 10.3969/j.issn.1672 - 2957.2012.01.007.

[14] 吴四军,刘 正,姚洪春,等. 应用高黏度骨水泥 PVP 治疗骨质疏松性椎体压缩骨折与传统 PKP 的临床疗效比较[J]. 中华骨科杂志,2017,37(2):74 - 79. doi: 10.3760/cma.j.issn.0253 - 2352.2017.02.002.

[15] 何万庆,关永林,柳永明,等. "蛋壳"技术在经皮球囊扩张后凸成形术治疗严重骨质疏松性椎体压缩骨折中的应用[J]. 国际外科学杂志,2014,41(11):743 - 747. doi: 10.3760/cma.j.issn.1673 - 4203.2014.11.008.

(编辑:贺绍梅)