

## ·综述 General review·

## 经皮椎体成形术骨水泥注射量相关生物力学研究现状和进展

宋戈, 吴春根, 程永德, 田庆华, 刘鹤飞

**【摘要】** 经皮椎体成形术(PVP)是广泛应用于治疗椎体血管瘤、椎体压缩骨折、脊柱转移瘤、骨髓瘤等疾病的微创技术。临床上普遍认为 PVP 术疗效与骨水泥注射量密切相关,然而有关术中骨水泥具体注射量仍存在较大争议。本文基于国内外研究现状,简要介绍了影响骨水泥注入量的椎体相关生物力学因素,骨水泥注入量对椎体强度、刚度及相邻椎体的影响,指出目前存在的主要争议,为进一步研究打下基础。

**【关键词】** 经皮椎体成形术;骨水泥;生物力学

中图分类号:R681.5 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2018)-01-0087-04

**The correlation between the injection volume of bone cement and relevant biomechanics in percutaneous vertebroplasty: current status and research progress** SONG Ge, WU Chungem, CHENG Yongde, TIAN Qinghua, LIU Hefei. Department of Interventional Radiology, Affiliated Sixth People's Hospital, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200233, China

Corresponding author: WU Chungem, E-mail: wucgsh@163.com

**【Abstract】** Percutaneous vertebroplasty (PVP) is a minimally-invasive technique, which has been widely employed in the treatment of hemangiomas, vertebral compression fractures, spinal metastases, myeloma and other diseases. Clinically, it is generally believed that the curative effect of PVP is closely related to the injected amount of bone cement. However, there is still great controversy over the optimal injection volume of bone cement. Based on the current researches both at home and abroad, this article aims to make a brief introduction about the relevant vertebral biomechanical factors that might affect the injection volume of bone cement, the influence of the injected volume of bone cement on the vertebral strength, rigidity and adjacent vertebral bodies. The main current disputes are pointed out so as to lay the foundation for further study. (J Intervent Radiol, 2018, 27: 87-90)

**【Key words】** percutaneous vertebroplasty; bone cement; biomechanics

经皮椎体成形术(PVP)是介入放射科广泛应用的微创治疗技术,其原理是在高清晰度影像设备引导下用骨穿针经皮通过椎弓根或椎弓根外侧,实时透视下向病变椎体内注入聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA,骨水泥),以达到提高脊柱稳定性、恢复并增加椎体力学强度和刚度的目的<sup>[1]</sup>。PVP 技术具有费用低、效果优越、并发症少的特点,被推广应用于治疗椎体压缩骨折、脊柱转移瘤、骨髓瘤等疾病<sup>[2-3]</sup>。临床经验认为 PVP 疗效与骨水泥注射量密切相关,骨水泥使用量较少可造成患者疼痛缓解不够理想,

甚者易再发骨折;使用量较多则易出现骨水泥渗漏相关并发症,导致肺栓塞、截瘫等严重后果。有关 PVP 术中骨水泥注射量研究很多。本文从生物力学角度,就 PVP 术中骨水泥注射量研究现状及进展作一综述。

## 1 椎体相关生物力学因素对骨水泥注射量的影响

根据流体力学相关研究,骨水泥注射压力、骨内压力、骨水泥与骨小梁之间黏滞阻力等均可影响骨水泥注入量。

### 1.1 椎体解剖结构

研究证实,骨水泥在压力作用下可通过椎体回流静脉丛、椎体裂隙、骨折裂缝或骨缺损处向椎体

周围弥散,这表明骨水泥推注达到一定剂量后相对较高的压力,会将骨水泥按上述低压力方向推行,引起骨水泥渗漏相关并发症<sup>[4]</sup>。

### 1.2 骨密度

骨密度是反映椎体内骨质和量的指标。骨密度越大,骨矿物质含量越高,单位体积内含有的骨小梁数量越多;骨小梁越粗大,骨小梁间隙也越小,这种情况下单位体积内可容纳的骨水泥量就越小。因此,骨水泥注射量与骨密度密切相关。张亮等<sup>[5]</sup>研究发现,相同注射压力下椎体骨密度与椎体内骨水泥弥散体积密切相关,骨密度较高患者椎体骨水泥弥散体积较大,所需骨水泥注射量较小。

### 1.3 椎体内压力

孙晓威<sup>[6]</sup>经体外实验表明,骨水泥分布与椎体内压力相关。PVP 术时适度控制椎体内压力,有利于引导骨水泥在椎体内分布,只要达到理想分布便可减少补充注射量。

## 2 骨水泥注射量对椎体强度和刚度变化的影响

PVP 术中骨水泥可沿骨小梁间隙扩散至整个椎体并固化填充病灶,故可改变椎体生物力学特性。椎体压缩骨折后生物力学评价指标包括椎体高度、Cobb 角、能量吸收、强度、刚度等,其中强度、刚度是最常用指标<sup>[7]</sup>。强度指椎体在外力作用下抵抗永久变形和断裂的能力,即椎体载荷能力,刚度指椎体在载荷作用下抵抗弹性变形的能力。一般认为恢复强度可阻止压缩椎体在外力下进一步塌陷,恢复刚度则可使椎体内稳定,防止椎体内骨小梁微动,为骨折愈合提供稳定环境。实施 PVP 术的目的为最大程度恢复压缩椎体的抗压强度和刚度<sup>[8]</sup>。

### 2.1 骨水泥适量填充对椎体强度和刚度的影响

很多实验研究验证了 PVP 强化椎体后可提高椎体强度和刚度。Tohmeh 等<sup>[9]</sup>研究证实 PVP 术后椎体强度明显高于术前,椎体刚度也得到恢复。Bai 等<sup>[10]</sup>采用骨水泥强化骨质疏松性椎体后椎体抗压强度明显提高,刚度也得到增强。赵必增等<sup>[11]</sup>通过对脊柱功能节段进行加载负荷力学分析证实,椎体强化后强度通常为原强度的 2~3 倍,刚度恢复至原水平。这些研究均表明,强化后的椎体要使其骨折需要更大的应力。

PVP 术中如果使用骨水泥量过大,易引起渗漏,导致并发症发生<sup>[12]</sup>。目前国内外部分学者认为,应使用最少量骨水泥达到理想的椎体强度和刚度。然而由于所治疗椎体及患者病情各异,具体注射多

少剂量骨水泥才算合适,尚无定论。Barr 等<sup>[13]</sup>认为,胸腰段平均注射 3~5 ml 骨水泥即可取得较好的椎体稳定和止痛效果。Belkoff 等<sup>[14]</sup>通过离体实验证实无论使用何种骨水泥,椎体各节段仅需注入 2 ml 即可恢复强度;要恢复刚度,则在使用 Orthocomp 骨水泥时胸段及胸腰段椎体需注入 4 ml,腰段椎体需 6 ml,使用 Simplex 20 骨水泥时胸段及腰段椎体需注入 4 ml,胸腰段椎体需 8 ml。Liebschner 等<sup>[15]</sup>研究认为,椎体刚度恢复仅需少量骨水泥(约 15%体积分数)。Amar 等<sup>[16]</sup>对 97 例患者 258 个椎体行 PVP,术后经 3 年随访发现胸腰段平均注入骨水泥 2~6 ml 能获得较好疗效。Deramond 等<sup>[17]</sup>报道认为常规椎体骨水泥注入量分别为颈椎 2~3 ml,胸椎 4~6 ml,腰椎 7~10 ml。Papanastassiou 等<sup>[18]</sup>报道认为骨水泥注射量在颈椎为平均 2.5 ml,胸椎为平均 5.5 ml,腰椎为平均 7.0 ml。国内学者也报道仅需注入 2 ml 骨水泥即可恢复椎体强度,若完全恢复刚度则需 8 ml<sup>[19]</sup>。通常认为,骨水泥适量填充不仅能恢复理想的椎体强度及刚度,也可减少相关并发症发生;过量填充既不安全,也无必要。

### 2.2 骨水泥过量填充对椎体强度和刚度的影响

与上述报道不同,Graham 等<sup>[20]</sup>研究提出只有注射高剂量骨水泥才能影响椎体强度和刚度,例如注入平均 7 ml 约 24%椎体填充量骨水泥填充与未经处理的椎体对比,强度超过完整椎体,刚度虽有提高,但不能恢复至骨折前水平,说明实验和临床上椎体强化后刚度往往小于(至少不远大于)原椎体刚度,因此不存在应力集中现象,即与强化上下椎体发生应力性骨折无关(详见后述);同时指出,椎体刚度和强度提高很大程度上取决于其骨密度,临床治疗中骨质疏松性椎体压缩骨折患者受益最少,如果注射低剂量骨水泥,再经受同样载荷,仍可在原椎体处造成骨折。

### 2.3 骨水泥分布对椎体强度和刚度的影响

有学者研究认为,达到骨水泥满意分布状态是提高 PVP 术疗效的关键,与具体注射剂量无关<sup>[21]</sup>。王延涛等<sup>[22]</sup>报道认为骨水泥过量充填并不能获得最佳生物力学效果,该效果取决于椎体内小量充填骨水泥及其对称分布。目前国内较多学者认为,至少在椎体前柱需填充足量甚至过量骨水泥,达到“顶天立地”效果,这样才能使椎体稳定。

## 3 骨水泥注射量对相邻椎体的影响

随着近年 PVP 术广泛开展,术后随访中发现很多患者发生相邻椎体骨折,由此展开相关研究。

Kawanishi 等<sup>[23]</sup>在 PVP 术后随访中发现患者椎体相邻节段再发骨折概率为 10%~20%，而其它节段再骨折率仅为 6.7%。Voormolen 等<sup>[24]</sup>对 66 例患者 PVP 术后随访发现，约 25% 患者在 1 年内发生新骨折，其中大多发生于 3 个月内，且半数骨折发生于椎体相邻节段。有学者构建腰 2~3 节段骨质疏松性三维有限元模型(正常解剖形态)，模拟 PVP 过程对椎体进行完全强化(骨水泥完全充填松质骨区)，结果显示若腰 2 节段完全强化，则腰 3 节段终板应力增加 13%，支持了上述观点<sup>[13]</sup>。

部分学者认为，PVP 术中骨水泥注入量过多是发生椎体相邻节段骨折的主要原因。Chen 等<sup>[25]</sup>认为，PVP 术中骨水泥注入量过多会导致其渗入相邻椎间盘，从而增加相邻椎体应力，产生新骨折。Nieuwenhuijse 等<sup>[26]</sup>研究显示，骨水泥体积分数达 24% 或更高时虽能有效缓解疼痛，但会发生骨水泥渗漏，进而导致新发骨折。这一理论被 Lin 等<sup>[27]</sup>研究所证实，对 38 例伴椎体压缩骨折患者 PVP 术后随访发现，14 例新发骨折中 10 例有骨水泥渗入椎间盘，4 例与骨水泥渗出无关。另有部分研究提示，PVP 虽能恢复经治椎体的强度和刚度，但过量骨水泥也增加相邻椎体应力和应变，从而改变相邻椎体应力分布，易发生骨折。Berlemann 等<sup>[28]</sup>报道对经骨水泥增强的脊柱功能单位进行力学测试，结果发现与未得到增强的相邻椎体相比，PVP 术后增强的相邻椎体最大承载负荷较低，且骨折大多发生在未增强椎体处；因此认为，PVP 术后经治椎体刚度得到增加，使得力学负荷转移至相邻椎体，故增加了椎体相邻骨折发生率。Polikeit 等<sup>[29]</sup>研究证实椎体增强导致相邻椎体终板应力和应力分布发生变化，有力支持了过量骨水泥增强椎体易发生相邻椎体骨折的假说。

然而也有部分学者认为，PVP 术后患者邻近节段骨折的发生是疾病自然病程结果，与骨水泥具体用量无关。如前所述，Graham 等<sup>[20]</sup>认为经高剂量骨水泥填充的椎体强度超过完整椎体，而刚度虽有提高，但不能恢复至骨折前水平。从中可看出实验和临床上椎体强化后其刚度往往小于原椎体刚度，因此不存在应力集中现象，即与强化椎体上下节段发生应力性骨折无关。征华勇等<sup>[30]</sup>报道显示 PVP 术使邻近节段椎体刚度降低、应力强度有轻微提高趋势，但与术前差异无统计学意义，因此考虑 PVP 术对邻近椎体影响较小。Jensen 等<sup>[31]</sup>报道分析 109 例骨质疏松患者 107 处椎体骨折，结果显示 PVP 术后

经治椎体相邻节段骨折发生率与未治疗对照组比较，差异无统计学意义，进一步说明椎体刚度和强度提高很大程度上取决于骨密度。这与上述 Graham 等的观点一致。史丽娜等<sup>[32]</sup>选取 120 例明确诊断为骨质疏松性椎体骨折患者分别采用保守治疗和 PVP 治疗，结果发现 PVP 术与保守治疗相比并不增加新发骨折风险，任何椎体节段均可发生骨折；无论骨水泥注射量多少，经治椎体的相邻节段骨折发生危险并不高于其它节段。

综上所述，PVP 术能有效增加椎体强度和刚度，从而缓解患者局部疼痛，提高生存质量。目前国内研究明确，椎体相关生物力学因素会对骨水泥注射量产生影响，不同注射量骨水泥也对椎体生物力学产生影响。关于不同剂量骨水泥对椎体强度和刚度的影响、是否增加椎体邻近节段骨折及其它并发症发生等仍存在较大争议，需要进一步研究探索。

#### [参 考 文 献]

- [1] 李世平, 肖建斌, 严越茂, 等. 经皮单侧椎体成形术治疗老年骨质疏松胸腰椎骨折体会[J]. 中国医学工程, 2017, 25: 97-99.
- [2] Galibert P, Deramond H, Rosat P, et al. Preliminary note on the treatment of vertebral angioma by percutaneous acrylic vertebroplasty[J]. Neurochirurgie, 1987, 33: 166-168.
- [3] 杨晓清, 张少甫, 胡凡奇, 等. 椎体成形术治疗骨质疏松椎体压缩性骨折现状[J]. 解放军医学院学报, 2017, 38: 1-3.
- [4] Song BK, Eun JP, Oh YM. Clinical and radiological comparison of unipedicular versus bipedicular balloon kyphoplasty for the treatment of vertebral compression fractures[J]. Osteoporos Int, 2009, 20: 1717-1723.
- [5] 张亮, 高梁斌, 李健, 等. 椎体成形术中椎体骨密度对骨水泥弥散体积的影响[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2011, 21: 915-918.
- [6] 孙晓威. 负压引导下骨水泥在椎体内分布规律的计算机模拟及体外实验研究[D]. 广州: 中山大学, 2010.
- [7] 孙梅兰, 刘长安, 王宇清, 等. 椎体成形术生物力学研究进展[J]. 解放军医药杂志, 2016, 28: 113-116.
- [8] 王宏斌. 经皮椎体成形及后凸成形椎体注入材料的生物力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16: 7366-7369.
- [9] Tohmeh AG, Mathis JM, Fenton DC, et al. Biomechanical efficacy of unipedicular versus bipedicular vertebroplasty for the management of osteoporotic compression fractures[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1999, 24: 1772-1776.
- [10] Bai B, Jazrawi LM, Kummer FJ, et al. The use of an injectable, biodegradable calcium phosphate bone substitute for the prophylactic augmentation of osteoporotic vertebrae and the management of vertebral compression fractures[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1999, 24: 1521-1526.

- [11] 赵必增, 王以进, 李家顺, 等. 椎体成形术后邻近椎间盘、椎体的力学性质变化[J]. 医用生物力学, 2002, 17: 215-219.
- [12] 苏祥正, 毛克亚, 刘郑生, 等. 椎体成形术后骨水泥渗漏分析[J]. 解放军医学院学报, 2014, 35: 987-989.
- [13] Barr JD, Barr MS, Lemley TJ, et al. Percutaneous vertebroplasty for pain relief and spinal stabilization[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2000, 25: 923-928.
- [14] Belkoff SM, Mathis JM, Jasper LE, et al. The biomechanics of vertebroplasty. The effect of cement volume on mechanical behavior[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2001, 26: 1537-1541.
- [15] Liebschner MA, Rosenberg WS, Keaveny TM. Effects of bone cement volume and distribution on vertebral stiffness after vertebroplasty[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2001, 26: 1547-1554.
- [16] Amar AP, Larsen DW, Esnaashari N, et al. Percutaneous transpedicular polymethylmethacrylate vertebroplasty for the treatment of spinal compression fractures [J]. Neurosurgery, 2001, 49: 1105-1114.
- [17] Deramond H, Depriester C, Galibert P, et al. Percutaneous vertebroplasty with polymethylmethacrylate. Technique, indications, and results[J]. Radiol Clin North Am, 1998, 36: 533-546.
- [18] Papanastassiou ID, Filis A, Gerochristou MA, et al. Controversial issues in kyphoplasty and vertebroplasty in osteoporotic vertebral fractures[J]. Biomed Res Int, 2014, 2014: 934206.
- [19] 曹 奇, 黄新云, 杨铁军, 等. 经皮椎体成形术中取材活检在多节段压缩性骨折诊疗中的应用[J]. 实用医学杂志, 2015, 31: 1299-1301.
- [20] Graham J, Ahn C, Hai N, et al. Effect of bone density on vertebral strength and stiffness after percutaneous vertebroplasty [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2007, 32: E505-E511.
- [21] 李 楠, 张贵林, 何 达, 等. 骨水泥的分布与剂量对椎体成形术疗效影响的研究[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2015, 30: 66-68.
- [22] 王延涛, 孔 畅, 凌 云, 等. 单侧椎弓根入路小剂量骨水泥注射治疗骨质疏松性椎体压缩骨折的临床研究[J]. 颈腰痛杂志, 2014, 35: 447-450.
- [23] Kawanishi M, Itoh Y, Satoh D, et al. Percutaneous vertebroplasty for vertebral compression fracture[J]. No Shinkei Geka, 2006, 34: 793-799.
- [24] Voormolen MH, Lohle PN, Juttman JR, et al. The risk of new osteoporotic vertebral compression fractures in the year after percutaneous vertebroplasty[J]. J Vasc Interv Radiol, 2006, 17: 71-76.
- [25] Chen JK, Lee HM, Shih JT, et al. Combined extraforaminal and intradiscal cement leakage following percutaneous vertebroplasty [J]. Spine(Phila Pa 1976), 2007, 32: E358-E362.
- [26] Nieuwenhuijse MJ, Bollen L, van Erkel AR, et al. Optimal intravertebral cement volume in percutaneous vertebroplasty for painful osteoporotic vertebral compression fractures [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2012, 37: 1747-1755.
- [27] Lin EP, Ekholm S, Hiwatashi A, et al. Vertebroplasty: cement leakage into the disc increases the risk of new fracture of adjacent vertebral body[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2004, 25: 175-180.
- [28] Berlemann U, Ferguson SJ, Nolte LP, et al. Adjacent vertebral failure after vertebroplasty. A biomechanical investigation[J]. J Bone Joint Surg Br, 2002, 84: 748-752.
- [29] Polikeit A, Nolte LP, Ferguson SJ. The effect of cement augmentation on the load transfer in an osteoporotic functional spinal unit[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2003, 28: 991-996.
- [30] 征华勇, 刘 智. 经皮穿刺椎体成形术相关研究进展[J]. 北京医学, 2015, 37: 1094-1096.
- [31] Jensen ME, Dion JE. Percutaneous vertebroplasty in the treatment of osteoporotic compression fractures[J]. Neuroimaging Clin N Am, 2000, 10: 547-568.
- [32] 史丽娜, 吴春根, 李文彬, 等. 经皮椎体成形术后新发椎体骨折是骨质疏松症的自然演进还是并发症?[J]. 介入放射学杂志, 2011, 20: 872-876.

(收稿日期:2017-02-26)

(本文编辑:俞瑞纲)