

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2022.06.019

生物力学与材料

骨水泥不同分布对骨质疏松性椎体压缩性骨折的生物力学影响： 三维有限元分析

蔡明¹, 戚颖², 刘肃¹, 马朋朋¹, 张鑫¹, 张春玲¹, 宗治国¹, 李伟¹, 张志敏¹

1. 河北北方学院附属第一医院骨外科, 河北 张家口 075000; 2. 河北北方学院附属第一医院输血科, 河北 张家口 075000

【摘要】目的:在骨质疏松性椎体压缩性骨折(OVCFs)椎体成形术(PVP)中,病椎内骨水泥分布不充分、不对称,将影响手术效果及远期症状。本文研究椎体成形术中骨水泥在椎体内分布情况对术后病椎的应力影响。**方法:**利用志愿者椎体CT数据,建立T12~L2椎体有限元模型。模拟L1椎体OVCFs,行PVP。向L1椎体内注入骨水泥柱,骨水泥形成3组分布模式(骨水泥分布不充分组、分布充分组和分布不对称组,其中分布不对称组包括骨水泥偏上分布和偏下分布)。研究不同方向运动对术后L1椎体的生物力学影响。**结果:**(1)与骨质疏松的L1椎体应力相比,术后L1椎体松质骨中最大应力的分布主要集中于骨水泥周围的松质骨,而皮质骨中最大应力的分布没有变化。(2)与骨水泥分布充分组相比,不充分组L1椎体的松质骨和皮质骨的最大应力和最大位移均显著增加,而不对称组中松质骨的最大应力显著增加。(3)在不同方向的载荷条件下都能得到相似的结果。**结论:**(1)在OVCFs的PVP中,病椎骨水泥分布不充分会引起术后该椎体最大位移明显增加,导致术后疼痛未缓解。(2)病椎骨水泥分布不充分和分布不对称会引起术后病椎皮质骨及松质骨的最大应力明显增加,所以容易导致术后病椎的再次骨折。

【关键词】椎体成形术;有限元;骨质疏松;椎体压缩性骨折

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)06-0771-07

Biomechanical effects of different distributions of bone cement on osteoporotic vertebral compression fractures: a three-dimensional finite element analysis

CAI Ming¹, QI Ying², LIU Su¹, MA Pengpeng¹, ZHANG Xin¹, ZHANG Chunling¹, ZONG Zhiguo¹, LI Wei¹, ZHANG Zhimin¹

1. Department Orthopaedic Surgery, the First Affiliated Hospital of Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China; 2. Department of Blood Transfusion, the First Affiliated Hospital of Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China

Abstract: Objective In percutaneous vertebroplasty (PVP) for osteoporotic vertebral compression fractures (OVCFs), the inadequate and asymmetrical distributions of bone cement in the affected vertebra will affect surgical effect and long-term symptoms. The effects of the distribution of bone cement in the vertebra on the stress of the affected vertebra after PVP are analyzed in the study. **Methods** The finite element model of T12-L2 vertebral body was established using the CT data of the vertebral body of a volunteer. The OVCFs of L1 vertebral body was simulated, and then PVP was carried out. The bone cement column was injected into L1 vertebral body, and there are 3 distribution patterns of bone cement, namely inadequate distribution group, well-distribution group, and asymmetrical distribution (including the upper and lower distributions) group. The biomechanical effects of movements in different directions on L1 vertebral body after surgery were analyzed. **Results** Compared with the stress of osteoporotic L1 vertebral body, the maximum stress of postoperative L1 vertebral cancellous bone was mainly concentrated at the cancellous bone around bone cement, while the distribution of maximum stress of cortical bone remain unchanged. Compared with those in well-distribution group, the maximum stress and maximum displacement of L1 vertebral cancellous bone and cortical bone in inadequate distribution group were significantly increased, while the maximum stress of cancellous bone in the asymmetrical distribution group was significantly increased. Similar results could be obtained under all loading conditions in different directions. **Conclusion** In PVP for OVCFs, inadequate distribution of vertebral cement will lead to significantly increased maximum displacement of the vertebral body after surgery, resulting in unrelieved postoperative pain. Inadequate and asymmetrical distributions of the diseased

【收稿日期】2021-12-25

【基金项目】2021年度张家口市级科技计划(No:2021061D);2015年度河北省医学科学研究重点课题计划(No:20150057)

【作者简介】蔡明,硕士研究生,住院医师,主要研究方向:脊柱与关节有限元分析,E-mail: 2465074355@qq.com

【通信作者】马朋朋,E-mail: 2548002626@qq.com

vertebrae cement will significantly increase the maximum stress of the diseased vertebral cortical bone and cancellous bone after surgery, so it is easy to cause the re-fracture of the diseased vertebra after surgery.

Keywords: vertebroplasty; finite element; osteoporosis; vertebral compression fracture

前言

骨质疏松性椎体压缩性骨折 (Osteoporotic Vertebral Compression Fractures, OVCFs) 在老年人中非常常见。据估计,全世界 30%~50% 的 50 岁以上人口面临 OVCFs 的威胁^[1]。近年来,经皮椎体成形术 (Percutaneous Vertebroplasty, PVP) 作为一种有效的治疗手段被广大临床医生所应用^[2]。生物力学研究显示,PVP 术后椎体的强度显著增加^[3]。而且,PVP 更重要的作用是快速缓解疼痛和恢复骨折椎体高度,从而减少患者脊柱的后凸畸形及相关并发症的发生^[4]。

但是,众多学者发现,部分患者 PVP 术后疼痛无缓解,并且部分患者在术后随访中观察到手术椎体高度再次丢失^[5-7]。手术椎体内部骨水泥分布不充分和分布不对称分别被认为是疼痛未缓解和术后病椎再次骨折的主要危险因素^[5-8]。然而,到目前为止,很少有生物力学实验研究骨水泥在病椎内部分布不充分和分布不对称会引起上述并发症的原因。本研究的目的是探讨 OVCFs 在 PVP 中骨水泥不同分布情况对术后病椎应力的生物力学影响。因此,理解掌握这种生物力学特点,对于提高手术成功率和优化治疗效果至关重要。

1 资料与方法

1.1 临床资料

选择 1 例 2019 年 7 月在河北北方学院附属第一医院诊治的胸腰段疼痛患者。通过 X 线检查排除椎体骨折、脊柱畸形及感染等疾病。对该患者胸腰椎 T12~L2 节段进行 64 排螺旋 CT 检查,排除椎间盘突出症。本研究通过医院伦理委员会批准,志愿者对该研究知情同意。

1.2 T12~L2 椎体骨质疏松性模型建立

上述 CT 检查扫描层厚为 1 mm,共获得 176 层 CT 图像,将此 CT 数据,导入 Mimics 17.0 软件,选取骨组织,分割处理及 3D 建模,建立 T12~L2 椎体骨性模型,将此椎体模型导入 3-Matic 软件,分别对 T12、L1 及 L2 椎体进行 Mark 分离、补洞抽壳及布尔运算,获得松质骨及皮质骨结构。再选取 T12 及 L1 椎体相邻两个面,进行解剖重建、Scale 和布尔运算,建立 T12~L1 椎间盘模型(包括上下终板、髓核及纤维环)。

同理建立 L1~L2 椎间盘模型。将上述所有模型依次导入 ANSYS Workbench19.2 软件中,再利用绳索单元建立椎体周围韧带模型^[8],最终组成 T12~L2 骨质疏松性椎体模型(图 1)。

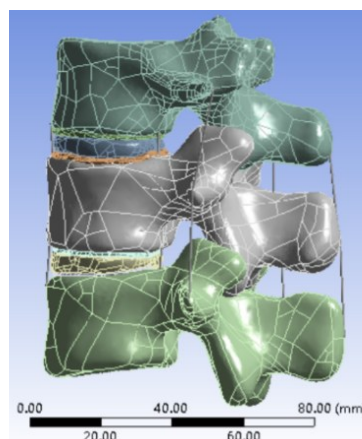


图1 T12~L2 正常椎体模型

Figure 1 Normal vertebral body model of T12 to L2

1.3 添加骨水泥模型,划分网格并赋予材料属性

在骨折的椎体中分别植入一个或两个模拟的骨水泥圆柱体,以模拟双侧椎弓根入路的 PVP。每个骨水泥圆柱体的体积约为 2 mL。骨水泥不同分布情况及数量代表不同模型类型,即代表不同的手术效果:(1)两个骨水泥柱状体对称且居中地分布在 L1 椎体内,以模拟骨水泥对称且充分分布的类型;(2)两个骨水泥圆柱体均位于 L1 椎体偏上部或偏下部,来模拟骨水泥非对称分布的类型。(3)在(1)的基础上,保留其中一个骨水泥圆柱体,以模拟骨水泥不充分分布的类型。所用模型见图 2。

最后,我们得到了 5 种不同类型的模型,包括骨质疏松性椎体模型和 4 种 PVP 手术模型。所有模型均进行网格划分。赋予模型材料属性,参考既往研究^[9-10],见表 1。

1.4 对有限元模型施加应力条件

考虑到椎旁肌肉和腹内压力的影响,在所有模型上均先施加 500 N 垂直载荷来模拟站立状态,即固定 L2 椎体下面,在 T12 椎体上面施加 500 N 垂直向下的力^[11-12]。在施加上述载荷的基础上,固定 L2 椎体下面,在 T12 椎体上面施加力矩为 7.5 N·m 的载荷,方向分别为前、后、左、右,用于模拟屈曲、伸展、左右

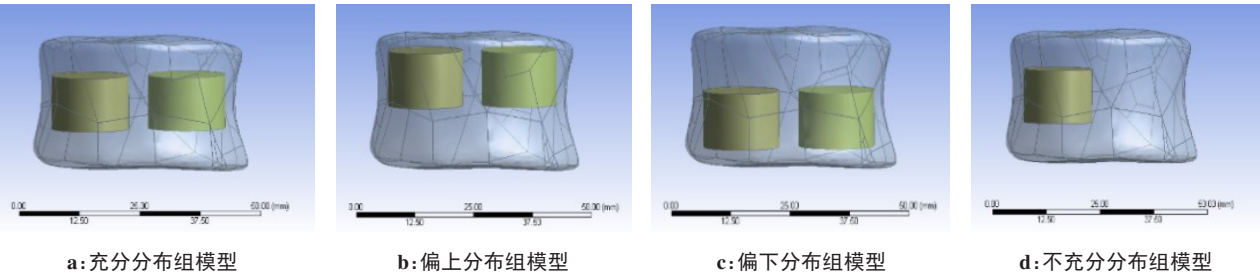


图2 经皮椎体成形术模型

Figure 2 Percutaneous vertebroplasty models

表1 骨质疏松性椎体有限元模型各结构材料参数
Table 1 Structural material parameters of the finite element model of osteoporotic vertebral body

部位	弹性模量/MPa	泊松比
皮质骨	8 040	0.30
松质骨	34	0.25
终板	670	0.40
髓核	1	0.499 9
纤维环	4.2	0.45
骨水泥	3 000	0.40
韧带	10	0.30

侧屈动作^[11-12]。最后比较5种模型中L1椎体皮质骨和松质骨的Von Mises应力及位移情况。Von Mises应力已被提出作为骨折破坏标准参数^[13],最大位移是稳定性的参数^[14]。

2 结果

2.1 有限元模型准确性的验证

对正常椎体模型施加前屈后伸、侧屈及轴向扭转几个不同方向的载荷,获得T12~L2节段椎体的活动范围数据,与既往文献的生物力学实验数据进行比较^[13, 15],一致性良好。该结果证实了本次模型的准确性和可靠性,并说明笔者的模型可用于后续的模拟研究。

2.2 PVP手术前后L1椎体皮质骨中Von Mises应力的分布及大小

L1椎体皮质骨在PVP治疗前后,在垂直压缩力作用下Von Mises应力的分布及大小结果如图3所示。与骨质疏松模型的分布相比,PVP术后的Von Mises应力分布没有变化,仍然集中在后柱未骨折区。类似的结果可以在屈曲、伸展、左右侧屈中看到。在垂直压缩力作用下,骨质疏松组、PVP术后骨水泥分布不充分组、充分组、偏上组和偏下组之间L1椎体皮质骨的最大Von Mises应力分别为15.06、12.16、6.01、9.03和8.16 MPa。因此,与骨水泥分布偏

上组和偏下组对比,不充分组Von Mises应力增加;与骨水泥分布充分组相比,不充分组Von Mises应力显著增加。类似的变化也出现在屈曲、伸展、左右侧屈的作用下(图4)。

2.3 PVP手术前后L1椎体松质骨中Von Mises应力的分布和大小

在垂直压缩力的作用下,L1椎体松质骨在PVP治疗前后Von Mises应力的分布及大小如图5所示。实验结果表明,骨质疏松组中最大应力集中于中柱未骨折区域,但在PVP术后,最大应力集中于骨水泥周围的松质骨。类似的结果可以在屈曲、伸展、左右侧屈中看到。在垂直压缩力作用下,骨质疏松组、骨水泥分布不充分组、充分组、偏上组和偏下组中L1椎体松质骨的最大Von Mises应力分别为0.53、1.31、0.70、1.81和1.54 MPa。因此,与骨水泥分布充分组相比,分布不充分组、偏上组和偏下组松质骨的最大应力均明显增加。类似的变化也出现在屈曲、伸展、左右侧屈的作用下,见图6。

2.4 PVP手术前后L1椎体的最大位移

在垂直压缩力作用下,骨质疏松组、骨水泥分布不充分组、充分组、偏上组和偏下组中L1椎体的最大位移分别为0.22、0.16、0.08、0.11和0.10 mm,见图7。因此,与骨水泥分布偏上组、偏下组和充分组相比,不充分组的骨水泥分布增加了L1椎体的最大位移。类似的变化也出现在屈曲、伸展、左右侧屈的作用下,见图8。

3 讨论

目前,关于PVP的手术效果仍然存在争议。Marcia等^[16]通过总结PVP治疗OVCFs的安全性和有效性的最新证据,明确指出PVP是一种安全的手术方法,术后并发症发生率明显降低,并不增加再次骨折的风险。De Leacy等^[17]也认为,PVP可以明显改善疼痛,并不会增加手术椎体及邻近椎体再次骨折的风险。但是,在PVP治疗OVCFs后,手术椎体再骨折的现象引起了专家学者们广泛关注。Yu等^[18]研究

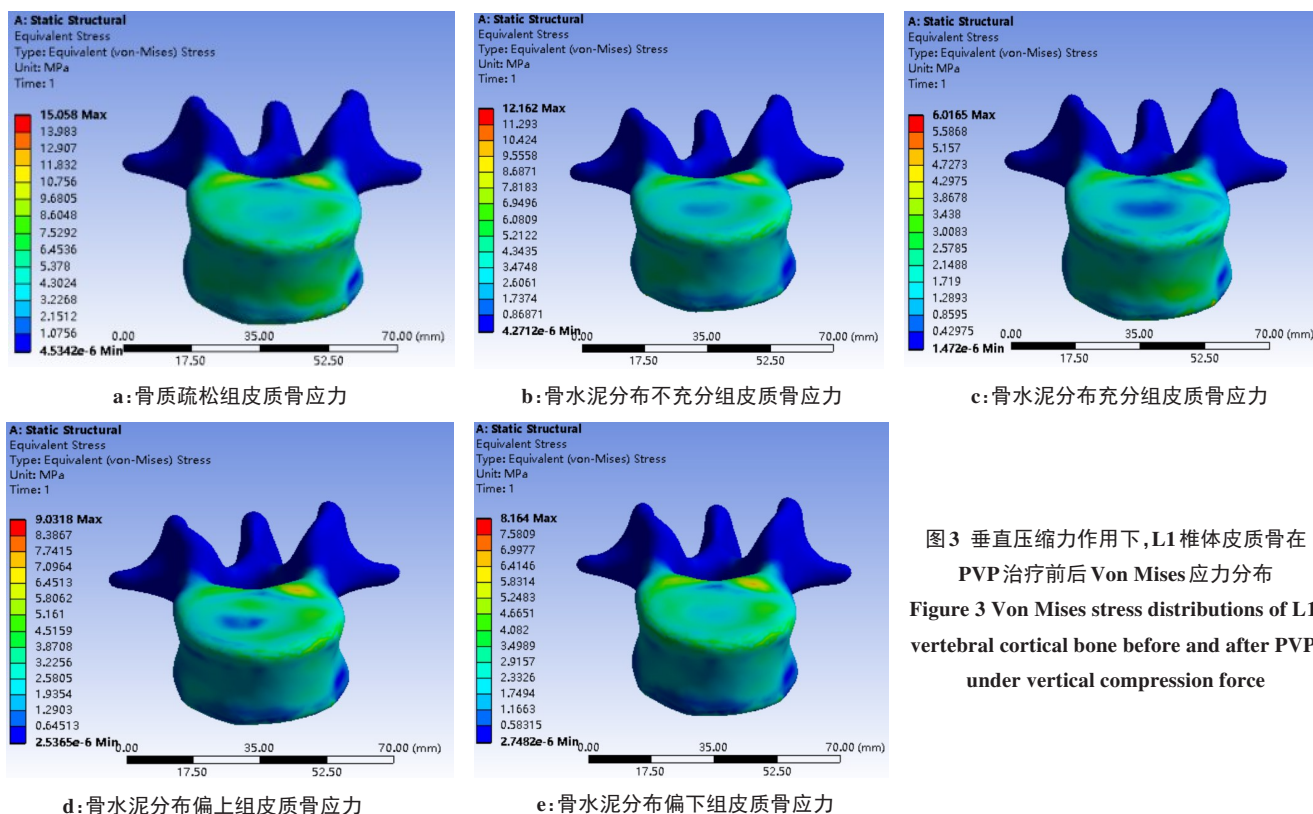


图3 垂直压缩力作用下,L1椎体皮质骨在PVP治疗前后 Von Mises 应力分布
Figure 3 Von Mises stress distributions of L1 vertebral cortical bone before and after PVP under vertical compression force

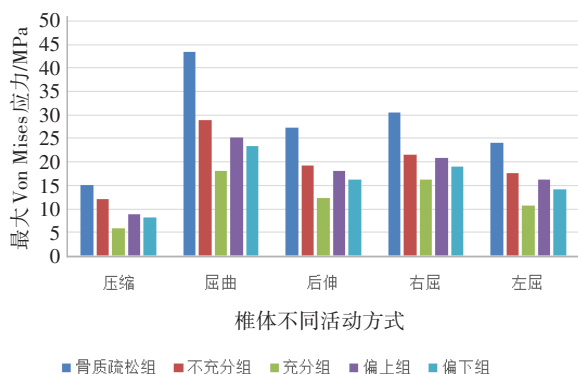


图4 PVP手术前后L1椎体皮质骨中最大 Von Mises 应力
Figure 4 Maximum Von Mises stress in L1 vertebral cortical bone before and after PVP

表明,在PVP治疗OVCFs后,手术椎体再次骨折的发生率依然很高。而且,Li等^[5-7]研究发现,在PVP术中,骨水泥的分布情况会极大地影响手术效果,如缓解疼痛及病椎再次骨折情况。

本文根据门诊志愿者胸腰椎节段的CT扫描数据建立有限元模型,赋予材料属性反映椎体骨质疏松症的特征。本研究并非建立单个椎体模型(L1),而是建立了3个节段的脊椎模型(T12~L2),因为在椎体压缩性骨折时,椎间盘和小关节之间的作用可以模拟胸腰椎节段的力学传导和运动情况;而且也可以避免将载荷条件直接作用到病椎(L1)上,建立3个节段的脊椎模型使得L1椎体的生物力学研究更趋

近于真实^[13,19]。验证实验证明,所建立的三维有限元模型可以准确地模拟胸腰椎节段的生理活动,因此,可以作为今后临床研究重要的工具。

Xu等^[20]研究发现,在双柱骨水泥的椎体成形术中,将两个骨水泥柱植入整个松质骨的骨折区域内,骨水泥不仅分布在骨折区域,而且还交错地进入周围松质骨内。Liang等^[7]和Kim等^[21]采用有限元的方法均得出一致的观点。他们认为,这种骨水泥形状(圆柱体)与患者术后影像学上所见的骨水泥形状相似,目前的骨水泥模拟圆柱体的形状可能是PVP手术的合理方案,术后可以将骨折的椎骨恢复到其原始的高度^[7,21]。笔者发现使用圆柱体骨水泥模型模拟PVP手术,虽然不同的载荷可以使用骨水泥模拟PVP产生不同的应力和位移情况,但是得出结论均一致。

笔者研究PVP手术前后的骨折模型中,L1椎体皮质骨和松质骨应力以及位移的大小和分布情况。Liang等^[7]通过有限元分析表明,在PVP术后,松质骨的最大应力较术前增加,并且分布在骨水泥周围,皮质骨的最大应力较术前减少。这与笔者的研究结果相一致,与骨质疏松L1椎体应力相比,术后L1椎体松质骨中最大应力的分布主要集中于骨水泥周围的松质骨,而皮质骨中最大应力的分布情况没有变化。在所有不同方向的载荷条件下都能得到相似的结果。因此,在某种程度上可以验证笔者使用这些模

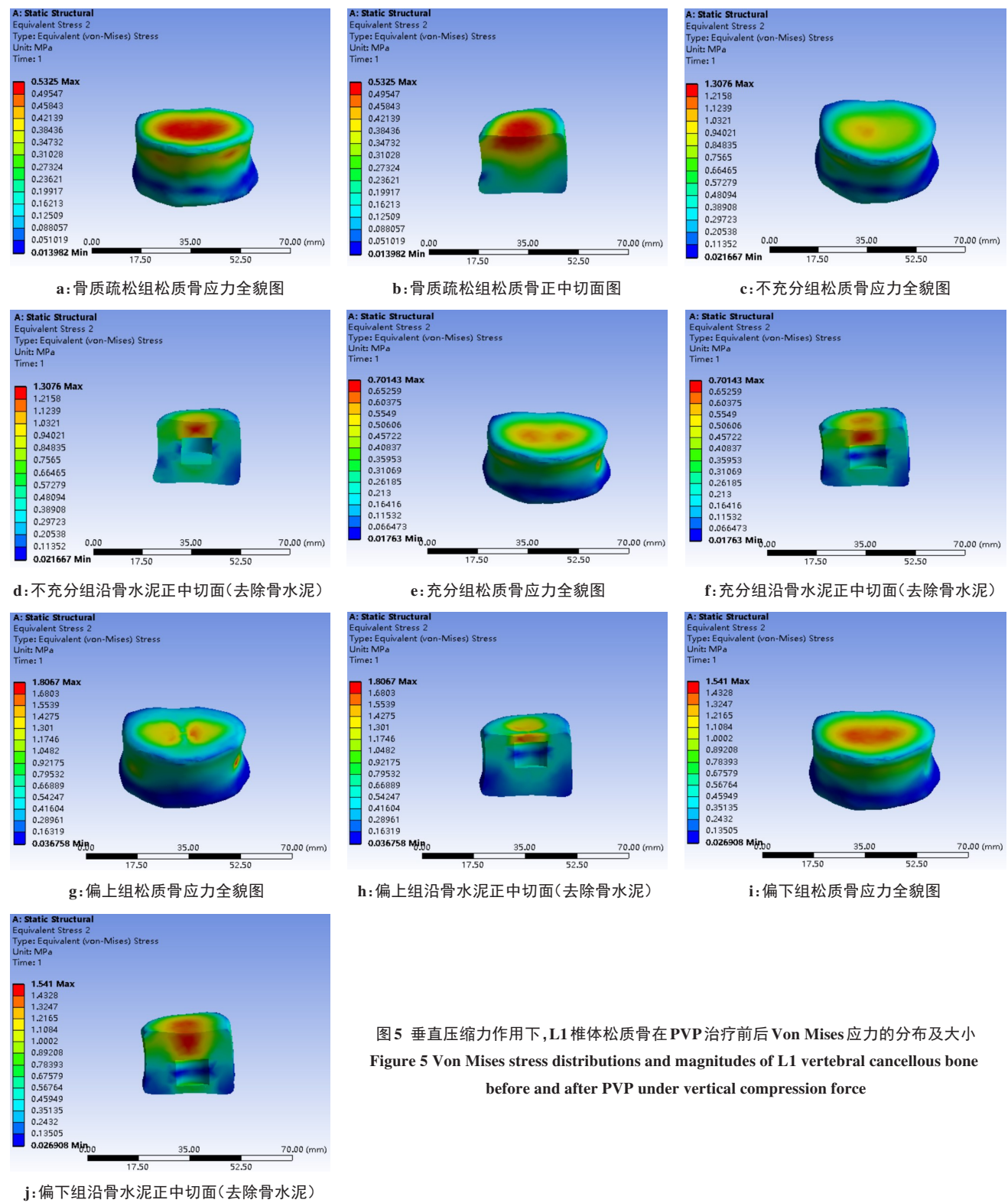


图5 垂直压缩力作用下,L1椎体松质骨在PVP治疗前后 Von Mises 应力的分布及大小
Figure 5 Von Mises stress distributions and magnitudes of L1 vertebral cancellous bone before and after PVP under vertical compression force

型来模拟椎体骨折PVP手术中骨水泥分布情况的研究结果是合理的。Li等^[5]通过分析手术椎体再次骨折的危险因素后发现,行PVP手术中骨水泥注射量低的患者,手术椎体再次骨折的风险较高。这与笔者的研究结果相一致。笔者同样发现,与骨水泥分布充分组相比,不充分组的L1椎体(手术椎体)皮质骨和松质骨中最大应力和最大位移均显著增加。最大压力和最大位移的增加表明,由于骨折椎体内部

骨水泥分布不充分,不能很好地恢复脊柱的稳定性,因此容易引发手术椎体的再次骨折及术后疼痛。

在之前临床研究和三维有限元分析均得出一致的结论:尽管PVP术后疼痛消失,但是骨水泥分布不充分的手术椎体相比于分布充分者,更容易再次发生骨折^[7,22]。其研究结论与笔者的结论相吻合。笔者从有限元分析的角度来看,在骨水泥分布不充分和不对称的情况下,手术椎体术后的松质骨最大应力较骨水泥

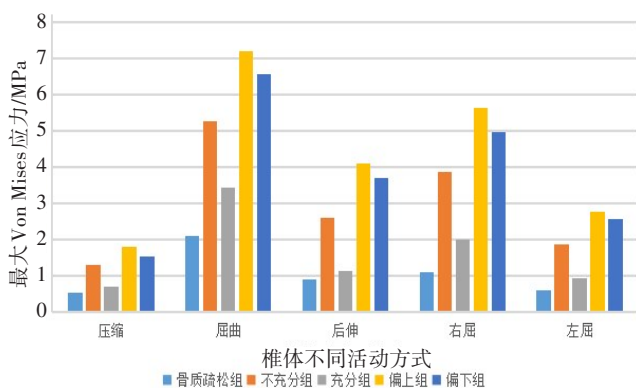


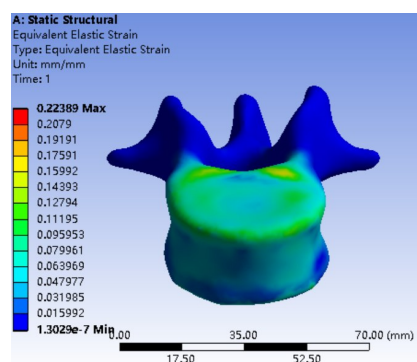
图6 PVP手术前后L1椎体松质骨中最大 Von Mises 应力

Figure 6 Maximum Von Mises stress in L1 vertebral cancellous bone before and after PVP

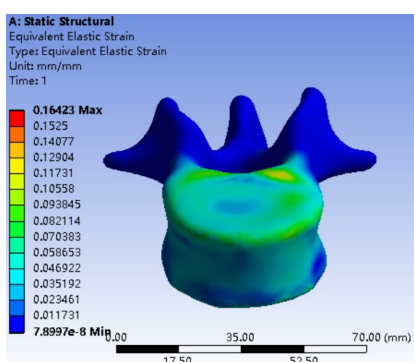
充分分布组增加,因此更容易再次发生骨折。

4 结论

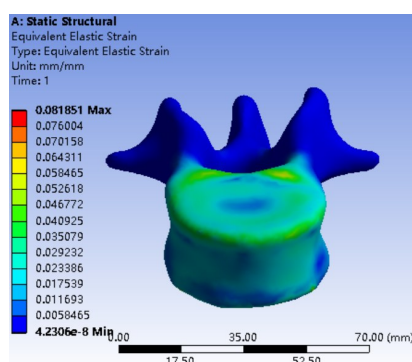
骨折椎体内骨水泥分布不充分可明显增加术后手术椎体的位移,导致患者在PVP术后疼痛未缓解。骨折椎体内骨水泥不充分和不对称分布更容易引起手术椎体的再骨折,这是因为手术椎体松质骨和皮质骨的最大应力显著增大。因此,为了保证PVP术后疼痛的缓解,降低术后远期病椎再骨折的发生率,应将骨折椎体内骨水泥充分分布纳入PVP的手术方案,而且骨折椎体内骨水泥的对称分布可能是我们今后在手术操作中追求的最佳模式。



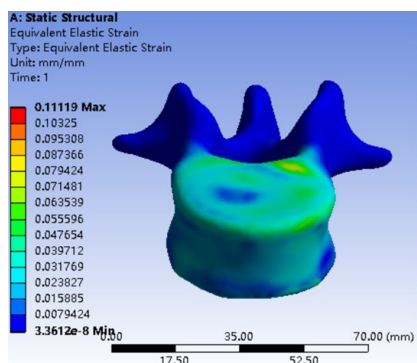
a: 骨质疏松组位移图



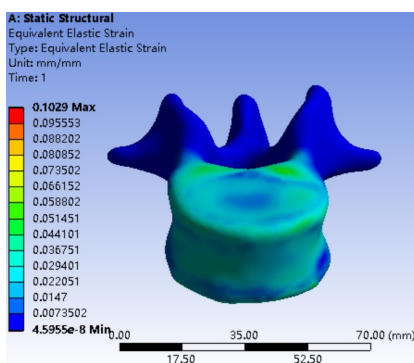
b: 骨水泥分布不充分组位移图



c: 骨水泥分布充分组位移图



d: 骨水泥分布偏上组位移图



e: 骨水泥分布偏下组位移图

图7 垂直压缩力作用下,PVP手术前后L1椎体最大位移

Figure 7 Maximum displacements of L1 vertebral body before and after PVP under vertical compression force

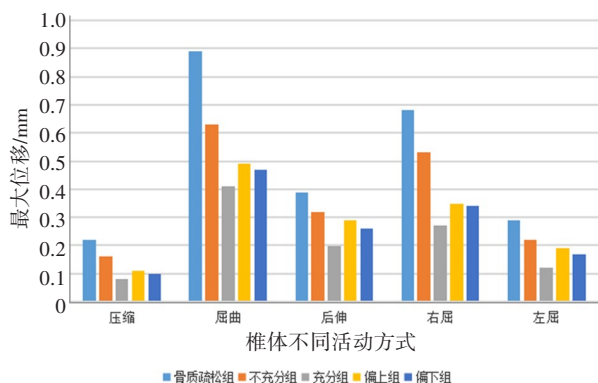


图8 PVP手术前后L1椎体的最大位移

Figure 8 Maximum displacements of L1 vertebral body before and after PVP

【参考文献】

- [1] Yang DH, Zhang YL, Ma X, et al. Resources utilisation and economic burden of percutaneous vertebroplasty or percutaneous kyphoplasty for treatment of osteoporotic vertebral compression fractures in China: a retrospective claim database study[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2020, 21(1): 255.
- [2] Chang JZ, Bei MJ, Shu DP, et al. Comparison of the clinical outcomes of percutaneous vertebroplasty vs. kyphoplasty for the treatment of osteoporotic Kümmell's disease: a prospective cohort study[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2020, 21(1): 238.
- [3] Yang WC, Yang JY, Liang M. Percutaneous vertebroplasty does not increase the incidence of new fractures in adjacent and nonadjacent vertebral bodies[J]. Clin Spine Surg, 2019, 32(2): E99-E106.
- [4] Yu HM, Li YZ, Yao XD, et al. Application of percutaneous vertebroplasty and percutaneous kyphoplasty in treating Kümmell's patients with different stages and postural correction status[J]. Expert Rev Med Devices, 2020, 17(4): 357-364.

- [5] Li Y X, Guo D Q, Zhang S C, et al. Risk factor analysis for re-collapse of cemented vertebrae after percutaneous vertebroplasty (PVP) or percutaneous kyphoplasty (PKP)[J]. *Int Orthop*, 2018, 42(9): 2131-2139.
- [6] Zhang J N, Fan Y, He X, et al. Bracing after percutaneous vertebroplasty for thoracolumbar osteoporotic vertebral compression fractures was not effective [J]. *Clin Interv Aging*, 2019, 14: 265-270.
- [7] Liang D, Ye L Q, Jiang X B, et al. Biomechanical effects of cement distribution in the fractured area on osteoporotic vertebral compression fractures: a three-dimensional finite element analysis[J]. *J Surg Res*, 2015, 195(1): 246-256.
- [8] 张雪鹏, 邴琳. 椎骨胸腰段压缩骨折的有限元分析研究[J]. *中国现代医学杂志*, 2017, 27(22): 65-73.
Zhang X P, Zhi L. Finite element analysis of thoracolumbar compression fracture of vertebrae[J]. *Chinese Journal of Modern Medicine*, 2017, 27(22): 65-73.
- [9] 赵文韬, 秦太平, 张晓刚, 等. 骨质疏松性椎体压缩骨折椎体强化术后不同椎体高度对相邻椎体应力影响的有限元分析[J]. *中国骨质疏松杂志*, 2018, 24(9): 1141-1147.
Zhao W T, Qin D P, Zhang X G, et al. Finite element analysis of the influence of different vertebral height on the stress of adjacent vertebral body after vertebral augmentation for osteoporotic vertebral compression fracture[J]. *Chinese Journal of Osteoporosis*, 2018, 24(9): 1141-1147.
- [10] 赵亮, 闫广华, 瞿东滨, 等. 腰椎间盘退变对软骨终板生物力学特性影响的有限元分析[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2015, 33(4): 455-460.
Zhao L, Yan G H, Qu D B, et al. Finite element analysis of the effect of lumbar disc degeneration on the biomechanical properties of cartilage endplate[J]. *Chinese Journal of Clinical Anatomy*, 2015, 33(4): 455-460.
- [11] Galbusera F, Casaroli G, Chande R, et al. Biomechanics of sacropelvic fixation: a comprehensive finite element comparison of three techniques[J]. *Eur Spine J*, 2020, 29(2): 295-305.
- [12] Zhou Q K, Zeng F H, Tu J L, et al. Influence of cement-augmented pedicle screw instrumentation in an osteoporotic lumbosacral spine over the adjacent segments: a 3D finite element study[J]. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15(1): 132.
- [13] Peng Y, Du X P, Huang L H, et al. Optimizing bone cement stiffness for vertebroplasty through biomechanical effects analysis based on patient-specific three-dimensional finite element modeling[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2018, 56(11): 2137-2150.
- [14] Guo L X, Li W J. Finite element modeling and static/dynamic validation of thoracolumbar-pelvic segment [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2020, 23(2): 69-80.
- [15] Xu G, Fu X, Du C, et al. Biomechanical effects of vertebroplasty on thoracolumbar burst fracture with transpedicular fixation: a finite element model analysis[J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2014, 100(4): 379-383.
- [16] Marcia S, Muto M, Hirsch J A, et al. What is the role of vertebral augmentation for osteoporotic fractures? A review of the recent literature[J]. *Neuroradiology*, 2018, 60(8): 777-783.
- [17] De Leacy R, Chandra R V, Barr J D, et al. The evidentiary basis of vertebral augmentation: a 2019 update[J]. *J Neurointerv Surg*, 2020, 12(5): 442-447.
- [18] Yu W B, Jiang X B, Liang D, et al. Risk factors and score for recollapse of the augmented vertebrae after percutaneous vertebroplasty in osteoporotic vertebral compression fractures[J]. *Osteoporos Int*, 2019, 30(2): 423-430.
- [19] Zhou F, Yang S, Liu J F, et al. Finite element analysis comparing short-segment instrumentation with conventional pedicle screws and the Schanz pedicle screw in lumbar 1 fractures[J]. *Neurosurg Rev*, 2020, 43(1): 301-312.
- [20] Xu K, Li Y L, Song F, et al. Influence of the distribution of bone cement along the fracture line on the curative effect of vertebral augmentation[J]. *J Int Med Res*, 2019, 47(9): 4505-4513.
- [21] Kim J M, Shin D A, Byun D H. Effect of bone cement volume and stiffness on occurrences of adjacent vertebral fractures after vertebroplasty[J]. *J Korean Neurosurg Soc*, 2012, 52(5): 435-440.
- [22] Jiang X B, Mo L, Liang D, et al. The distribution of bone cement in the fractured lines on the outcome of percutaneous vertebroplasty[J]. *Chin J Spine Spinal Cord*, 2014, 24: 144.

(编辑:薛泽玲)