

微创椎间隙注入骨水泥对上下椎体应力的影响

于泽¹, 霍文涛², 汪建新², 杨婷²

(1. 内蒙古科技大学包头医学院第一附属医院, 内蒙 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学, 内蒙 包头 014017)

摘要: **目的** 通过建立腰椎模型进行生物力学分析, 研究椎间盘中注入骨水泥后对上下椎体所受最大应力的影响, 降低后期患者在运动和劳动中椎体骨折的风险, 为治疗腰椎疼痛及椎间隙注入骨水泥手术提供实验数据和参考。**方法** 获取符合要求的 CT 数据, 利用 Mimics、Geomagic Wrap、SolidWorks、Ansys Workbench 等软件构建实验要求的腰椎有限元模型, 将构建的模型进行前屈、后伸、左弯、右弯、左旋、右旋、站立运动状态分析, 比较注入在不同位置和注入不同量的骨水泥对上下椎体的应力影响和变化趋势。**结果** 成功建立了腰椎三维有限元模型。构建的腰椎三维有限元模型在各种运动中分析的结果均在既往文献数据参考范围内, 可认为模型有效, 可以进行下一步的实验研究。通过分析研究发现骨水泥注入到椎间盘的左侧、中间、右侧三者之间对椎体表面的最大应力差异无统计学意义 ($P>0.05$)。通过在椎间盘中注入 1 mL、4 mL 和 7 mL 骨水泥后分析发现随着骨水泥注入量的增加上下椎体表面所受的最大应力明显下降, 差异有统计学意义 ($P<0.05$)。**结论** 考虑到人体的实际运动更加多样和复杂等综合因素骨水泥注入到椎间盘中间更加合理, 综合过往的文献和本次的实验研究在椎间盘中注入 4~7 mL (50%~100%) 骨水泥能达到良好的效果, 但是不建议注入到 100%, 骨水泥渗漏的风险过大, 可为临床治疗提高参考。

关键词: 经皮骨水泥椎间盘成形术; 腰椎; 骨水泥; 有限元; 应力

中图分类号: R687.3

Effect of minimally invasive intervertebral space bone cement injection on upper and lower vertebral body stress

YU Ze¹, HUO Wentao, WANG Jianxin², YANG Ting²

(1. The First Affiliated Hospital of Baotou Medical College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China; 2. Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014017, China)

Abstract: [Objective] Through the establishment of a lumbar spine model for biomechanical analysis, the influence of bone cement injection in the intervertebral disc on the maximum stress of the upper and lower vertebrae was studied, so reduce the risk of vertebral fractures during exercise and labor in later patients, and provide experimental data and reference for the treatment of lumbar pain and the operation of bone cement injection in the intervertebral space. **[Methods]** The required CT data was obtained, Mimics, Geomagic Wrap, SolidWorks, Ansys Workbench and other software were used to construct the finite element model of the lumbar spine required by the experiment, and the constructed model's forward bending, backward extension, left bending, right bending, left rotation, right rotation, and standing motion state were analyzed. The influence and change trend of the stress of upper and lower vertebrae with different amount of bone cement injected at different positions were compared. **[Results]** The three-dimensional finite element model of lumbar spine was successfully established. The results of analyzing the constructed three-dimensional finite element model of the lumbar spine in various movements were within the reference range of the previous literature data, and the model can be considered valid for the next experimental study. Through analysis and study, it was found that bone cement injected into the left, middle and right sides of the intervertebral disc had no significant difference in the maximum stress on the vertebral surface ($P>0.05$). Moreover, the maximum stress on the upper and lower vertebral surfaces decreased

significantly with the increase of the injection amount of bone cement after 1 mL, 4 mL and 7 mL of bone cement were injected into the intervertebral disc, and there were significant differences ($P < 0.05$). **【Conclusion】** Considering the fact that the actual movement of the human body is more diverse and complex and other comprehensive factors, it is more reasonable to inject bone cement into the intervertebral disc. Based on the previous literature and this experimental study, injecting 4 mL to 7 mL (50% to 100%) bone cement into the intervertebral disc can achieve a good effect, but it is not recommended to inject 100%, because the risk of bone cement leakage is too large, it can provide reference for clinical treatment.

Keywords: percutaneous cement discoplasty; lumbar spine; bone cement; finite element; stress

经皮骨水泥椎间盘成形术是一种最新发展起来的手术，于 2015 年由 VARGA^[1] 率先提出和报道，并命名为 PCD，通过微创的方法将骨水泥注入到椎间隙中以维持椎间隙的高度和椎间盘的稳定性，但是该方法对邻近椎体的力学影响是未知的。椎间隙变窄引起的腰痛已经严重影响到患者的日常生活，反复性腰痛给患者带来非常大的困扰和心理压力。在后期回访中发现有患者发生椎体骨折和骨水泥渗漏现象，极有可能是注入量和注入位置不佳造成的^[2-3]。在临床的治疗中骨水泥的注入量和注入位置无法控制到一个合理的范围，为治疗带来一定的困扰。骨水泥注入量和位置的不当往往会造成后期病人的腰椎骨折和其他并发症，骨水泥注入过多和过少都会带来一些问题，此前对于椎间隙注入骨水泥对上下椎体的应力影响研究极少，为此通过计算机建立有限元模型来研究在腰椎间盘中注入不同量的骨水泥和不同位置注入骨水泥对上下椎体的影响，为经皮骨水泥椎间盘成形术提供更加完善的理论依据。

有限元法作为当今炙手可热的一种分析方法，利用计算机仿真就可以进行复杂的力学分析，最初是运用到航天和工程领域^[4]。有限元分析法的原理就是将复杂的整体分解成一个个简单的个体单元，再将分解后的单元个体添加自由度、互相连接，再将这些单元个体添加材料属性等，然后就可以进行仿真分析。随着科学技术和计算机水平的发展，有限元分析可以越来越接近实际，可以添加肌肉韧带等组织结构。运用有限元方法进行分析为医学研究提供了新的研究思路，可以大大缩短研究周期和提高研究准确性^[5-6]，减少病人的痛苦等诸多优势。此次研究通过计算机软件对腰椎 CT 数据进行处理，利用 Mimics、Geomagic Wrap、SolidWorks 软件对腰椎模型进行重建，使用 Ansys Workbench 对腰椎模型进行力学分析。

1 材料与方法

1.1 实验材料

根据实验要求筛选出腰椎健康的男性志愿者 1 名，28 岁，身高 170 cm，体重 75 kg，获得 CT 数据前已获得本人的同意对于实验的用处完全知情，志愿者行 CT 平扫，扫描厚度为 0.625 mm，获得 DICOM 格式的 CT 数据，刻入光盘中保存。本次研究方案符合《赫尔辛基宣言》。

1.2 腰椎 L2~L5 模型建立

将扫描的腰椎 CT 数据以 DICOM 的格式保存，然后将数据导入到 Mimics 21.0 (Materialise's interactive medical image control system, 比利时 Materialise 公司) 软件中，根据组织的差异性，通过阈值变化提取出椎体，使用分割蒙版，编辑蒙版、擦除、填充等操作获得初步光滑的椎体模型，将模型以 stl 格式导入到 Geomagic Wrap 2021 软件中进行椎体表面的光滑、降噪、填充、构造格栅、拟合曲面片等处理形成皮质骨，将制作好的皮质骨模型缩小 2 mm 形成初步的松质骨模型，然后将模型使用光滑、降噪、填充、构造格栅、拟合曲面片操作形成符合实验要求的松质骨模型，使用以上两个软件就形成了皮质骨和松质骨的三维实体模型。分别将皮质骨和松质骨模型以 stp 格式导入到 SolidWorks 2021 中，在 SolidWorks 中进行布尔操作使得皮质骨和松质骨成为一个整体，然后在椎体之间生成终板、纤维环、髓核、关节软骨，在椎体 L3~L4 中间建立骨水泥结构，根据实验要求建立注入不同量骨水泥和在不同位置注入骨水泥的模型。运用 Ansys Workbench 19.2 软件进行生物力学分析，把在椎间盘中注入不同量 (1 mL、4 mL、7 mL) 骨水泥和在不同位置注入骨水泥的腰椎模型从 SolidWorks 中导入。

1.2.1 网格划分 有限元模型网格的划分是分析最为重要的步骤之一，网格的大小和疏密程度将

影响结果的准确性，而且还需考虑计算机的算力和结果的收敛性，通过综合考虑选择模型划分为 1 mm 的网格，共 841 738 个节点，474 669 个单元，经检验网格质量合格。

1.2.2 腰椎材料属性赋值 将在椎体上生成的韧带根据韧带所在部位所体现的功能赋予合适的刚度系数，再把皮质骨、松质骨、软骨、纤维环、髓核、终板、骨水泥赋予材料属性，如表 1^[7-8]。

表 1 模型材料参数

材料	杨氏模量/MPa	泊松比	刚度/(N/mm)
皮质骨	12 000	0.3	-
松质骨	100	0.3	-
骨水泥	1 000	0.41	-
终板	25	0.3	-
髓核	1	0.499	-
纤维环	4.2	0.453	-
软骨	50	0.3	-
前纵韧带	-	-	8.74
后纵韧带	-	-	5.83
棘上韧带	-	-	15.38
棘间韧带	-	-	0.19
黄韧带	-	-	15.75
横突间韧带	-	-	2.39

注：“-”无数据或本实验不需要。

1.2.3 设置加载和边界条件 在 L5 椎体下表面设置固定约束，L2 上表面施加压力和弯矩纤维环，髓核和终板之间设置为面面接触，将各独立实体设置成接触关系，皮质骨，松质骨，终板之间设置为绑定关系，上下关节突关节之间定义为面面接触，摩擦系数为 0.1，上下关节和椎体之间设置为面面接触和绑定关系如图 1。然后模拟人的多种运动情况（前屈、后伸、左弯、右弯、左旋、右旋、站立）并分别添加不同的力和弯矩（前屈 1 175 N+7.5 N·m，后伸 500 N+10 N·m，左弯 500 N+10 N·m，右弯 500 N+10 N·m，左旋 500 N+10 N·m，右旋 500 N+10 N·m，站立 1 000 N）进行分析，观察注入骨水泥后对上下椎体表面的应力影响。

1.2.4 模型有效性验证 通过在 L4~L5 上施加 10 N·m 与先前文献活动度进行对比，前屈 5.51°、后伸 3.31°、侧弯（左右两侧取平均值）3.88°、扭转（左右两侧取平均值）1.97°，活动度结果在两文献^[9-10]之间如图 2 所示，可认为本次建立的模型有效。

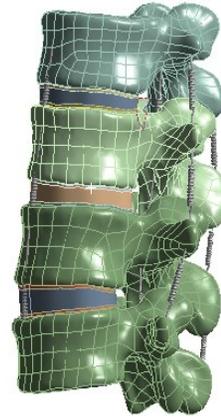


图 1 腰椎有限元模型

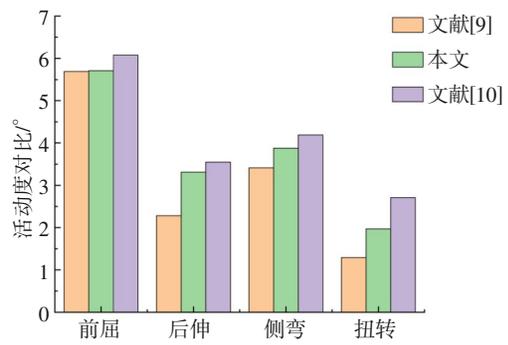


图 2 活动度对比

1.3 统计学方法

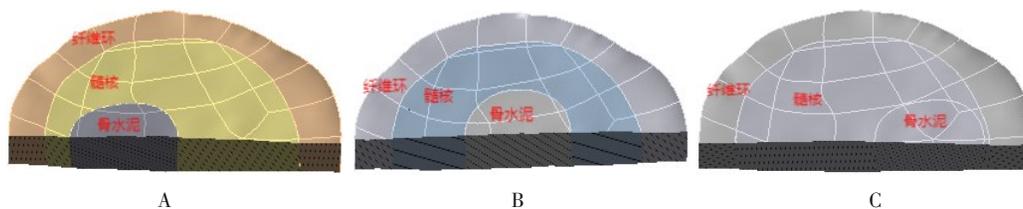
使用 SPSS 27.0 统计学软件进行数据分析，相邻区域的数据之间采用两两配对 *t* 检验， $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 骨水泥注入位置对椎体应力的影响

成功构建了骨水泥注入到椎间盘中不同位置的腰椎有限元模型。建立将 1 mL 的骨水泥（形状为无规则形状，近似模拟骨水泥注入椎间盘后的形状）分别注入到椎间盘的左侧、右侧和中间的有限元模型，见图 3。通过施加不同的力和弯矩模拟多种运动情况（前屈、后伸、左弯、右弯、左旋、右旋、站立），统计椎间盘（主要在骨水泥处）对上下椎体表面所受的最大应力，见表 2。通过统计数据可以看出虽然骨水泥注入到不同位置对椎体的应力分布有影响，且出现在与椎体接触的地方，在注入同量的情况下，通过两两比较骨水泥注入到不同位置对椎体表面应力的影响，发现差异无统计学意义 ($P > 0.05$)，并且对腰椎的活动度影响也很小。以人类活动最频繁的前屈为例骨水泥在左侧时

腰椎 L2 活动最大位移为 10.595 mm，骨水泥在中间为 10.895，骨水泥在左侧为 10.503 mm。



A: 骨水泥在左侧; B: 骨水泥在中间; C: 骨水泥在右侧。

图 3 骨水泥注入椎间盘不同位置图

表 2 在椎间盘左、中、右侧注入 1 mL 骨水泥椎体表面所受的最大应力 (MPa)

位置	前屈	后伸	左弯	右弯	左旋	右旋	站立
左侧							
上椎体下表面	24.986	8.413	12.433	32.811	23.235	25.746	29.541
下椎体上表面	19.346	9.944	12.809	42.519	11.988	14.670	38.875
中间							
上椎体下表面	25.989	7.238	28.303	24.163	24.868	25.928	16.105
下椎体上表面	28.334	11.774	39.927	29.644	14.306	14.317	21.773
右侧							
上椎体下表面	20.735	7.695	22.515	28.883	19.781	22.977	17.916
下椎体上表面	18.361	11.257	24.293	29.321	14.064	12.639	17.142

2.2 骨水泥注入量对椎体应力的影响

结合上面的分析研究结果，建立了在椎间盘中间分别注入 1 mL、4 mL、7 mL 骨水泥的腰椎模型，然后分别施加不同的力和弯矩模拟前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左旋、右旋、站立七种运动状态，统计椎间盘（主要在骨水泥处）对上下椎体表面所受的最大应力，如表 3 所示。通过统计数据发现随着骨水泥注入量的增加，上下椎体表面所受的最大应力出现明显下降，如图 4、图 5，在骨水泥注入位置相同的情况下，通过两两比较

注入不同骨水泥的量对上下椎体表面的应力影响，差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。骨水泥注入量越多应力分布就会越分散，应力就不会全部集中到某一点上。从分析结果看，注入椎间盘中 7 mL 骨水泥对上下椎体的影响最小，如图 6（运动状态为前屈，上椎体下表面），且不同量骨水泥对腰椎的活动影响很小，以人体活动最为频繁的前屈为例，骨水泥为 1 mL 时腰椎 L2 的最大活动位移为 10.895，4 mL 时最大活动位移为 10.350 mm，7 mL 时最大位移为 10.255。

表 3 在椎间盘中间注入 1 mL、4 mL 和 7 mL 骨水泥椎体表面所受的最大应力 (MPa)

剂量	前屈	后伸	左弯	右弯	左旋	右旋	站立
1 mL							
上椎体下表面	25.989	7.238	28.303	24.163	24.868	25.928	16.105
下椎体上表面	28.334	11.774	39.927	29.644	14.306	14.317	21.773
4 mL							
上椎体下表面	11.118	6.322	22.830	21.811	20.196	8.395	10.624
下椎体上表面	13.123	7.641	27.479	24.269	10.827	9.193	11.466
7 mL							
上椎体下表面	7.326	5.423	13.361	6.792	5.078	3.868	6.300
下椎体上表面	8.090	7.599	17.440	9.904	5.365	6.305	8.276

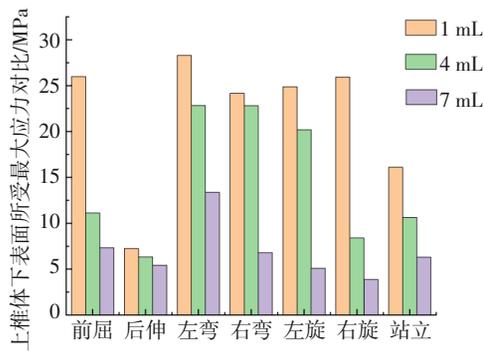


图 4 上椎体下表面应力变化

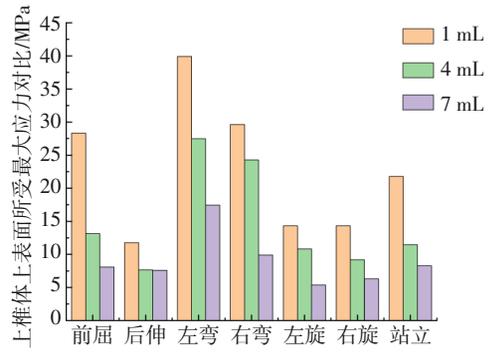
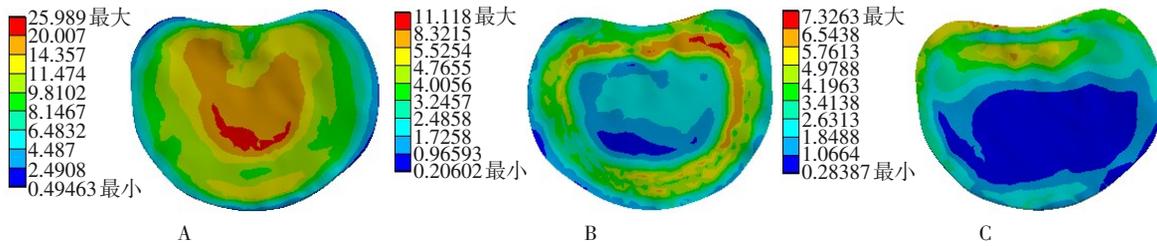


图 5 下椎体上表面应力变化



A: 注入 1 mL 骨水泥; B: 注入 4 mL 骨水泥; C: 注入 7 mL 骨水泥。

图 6 运动状态为前屈注入 1 mL、4 mL、7 mL 骨水泥应力云图

3 讨论

首先本研究通过比较骨水泥注入到不同位置对上下椎体的影响,单从结果看骨水泥注入位置对上下椎体没有影响,但是考虑到骨水泥注入到侧边更容易发生渗漏,产生一些并发症和另一侧椎间盘的持续退变所造成的椎体受力不均匀等情况,骨水泥注入到椎间盘中间更合适。通过比较注入不同骨水泥量可以发现随着骨水泥量注入的增加对上下椎体表面的应力逐渐减小,1 mL 骨水泥对上下椎体表面的应力最大,7 mL 骨水泥对上下椎体应力最小,而对腰椎的活动度影响很小,但是考虑到椎间隙变窄这一病症主要发生老年群体,且老年群体大多带有一些基础疾病,为此不建议注入过多的骨水泥以免发生渗漏带来其他并发症^[11-13],骨水泥注入椎间盘之后会放出大量的热量,也会导致周围的细胞损伤和蛋白变性等。根据田庆华等^[14]的研究结果也表明在椎间盘中注入 50%~100% 的骨水泥能达到良好的效果,综合本次实验研究,椎间盘中注入 4~7 mL 骨水泥具有良好的效果。

通过建立椎间盘中注入骨水泥的腰椎有限元模型来分析注入骨水泥给椎体带来的影响,具有

经济和高效的优点。了解骨水泥注入椎间盘后对椎体的影响,降低患者在手术过后进行运动和劳动过程中发生椎体骨折和骨水泥渗漏的风险。椎间盘中注入骨水泥后对上下椎体造成的破坏往往是由于发生在某个位置的最大受力处,所以分析骨水泥对上下椎体的最大应力影响就显得非常重要,可以降低由于患者运动和劳动造成的骨折,之前的研究极少从对椎体的应力影响方面着手进行详细分析。

此次研究通过建立有限元模型对骨水泥注入到椎间盘中对上下椎体的应力方面进行分析,可以更好地了解注入骨水泥后对上下椎体最大应力的影响,从而大致了解骨水泥应该的注入量和注入位置,对上下椎体最大应力越小对椎体的影响也就会越小,患者后期在大量的劳动或运动中骨折和骨水泥渗漏的风险就会越小,对患者伤害的风险就会降到最低,可以大大提高手术的成功率。本次实验研究可以为后期经皮骨水泥椎间成形术手术提供实验数据参考,提高康复率,大大缩短研究时间。

虽然有限元方法在腰椎生物力学分析中有很多的优势,但此次的实验研究也存在一定的局限性。这也是有限元生物力学分析的共同缺陷^[15-17],

首先,虽然此次有限元模型已经尽最大可能接近实体,但与人体的腰椎结构相比,有限元模型还是简化了很多。本次实验研究能反应大致的状态,可为进一步研究和临床手术提供数据参考。

通过此次有限元仿真可以在一定程度上对注入骨水泥到椎间盘中对上下椎体的应力影响有一定的了解,但是本研究是在一定的理想条件下进行的,而临床手术面临的情况会更具有多样性,腰椎的实体模型也会更具多样和复杂性,同时患者也会伴随着其他的基础疾病,这对手术也将是一个巨大的考验。并且骨水泥注入到椎间盘中对腰椎的长期影响现在缺乏大量长期的数据分析。此次研究能大致了解骨水泥注入量和注入位置对上下椎体的影响。

经皮骨水泥椎间成形术作为一种新型微创手术,目前仍处于探索阶段,不同文献对于它的治疗效果也存在不同的意见。但是就目前而言,经皮骨水泥椎间成形术手术对于没有基础疾病的患者优点而言也是非常明显,手术时间短,出血少,住院时间短,恢复快等诸多优点也是不可忽略的^[18-20],想要经皮骨水泥椎间成形术手术更加可靠还需要对术后患者进行长期的走访和大量的前期研究调查,相信不久的将来经皮骨水泥椎间成形术手术会更加成熟,适用面更加广阔^[21-22]。

参 考 文 献

[1] VARGA PP, JAKAB G, BORS IB, et al. Experiences with PMMA cement as a stand-alone intervertebral spacer: Percutaneous cement discoplasty in the case of vacuum phenomenon within lumbar intervertebral discs[J]. *Orthopade*, 2015, 44(Suppl 1): S1-S7.

[2] KISS L, VARGA PP, SZOVERFI Z, et al. Indirect foraminal decompression and improvement in the lumbar alignment after percutaneous cement discoplasty[J]. *Eur Spine J*, 2019, 28(6): 1441-1447.

[3] SOLA C, CAMINO WILLHUBER G, KIDO G, et al. Percutaneous cement discoplasty for the treatment of advanced degenerative disk disease in elderly patients[J]. *Eur Spine J*, 2021, 30(8): 2200-2208.

[4] CAI XY, SANG DC, YUCHI CX, et al. Using finite element analysis to determine effects of the motion loading method on facet joint forces after cervical disc degeneration[J]. *Comput Biol Med*, 2020, 116: 103519.

[5] WELCH-PHILLIPS A, GIBBONS D, AHERN DP, et al. What is finite element analysis?[J]. *Clin Spine Surg*, 2020, 33(8): 323-324.

[6] ZHANG QL, CHON T, ZHANG Y, et al. Finite element analysis of the lumbar spine in adolescent idiopathic scoliosis subjected to different loads[J]. *Comput Biol Med*, 2021, 136: 104745.

[7] 李嘉睿, 燕杨, 武晓刚, 等. 单边双通道内镜下腰椎椎间融合的生物力学分析[J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(34): 5523-5529.

[8] 王智. 基于CT数据L4-5有限元模型的构建以及L5的应力分析[D]. 太原: 山西医科大学, 2011.

[9] 方新果, 赵改平, 王晨曦, 等. 基于CT图像腰椎L4~L5节段有限元模型建立与分析[J]. *中国生物医学工程学报*, 2014, 33(4): 487-492.

[10] 李银倩, 吕杰, 丁立军, 等. 韧带损伤影响腰椎稳定性的生物力学特征[J]. *中国组织工程研究*, 2024, 28(21): 3286-3292.

[11] 付海军, 冯毅, 武太勇, 等. 经椎体成形术椎间盘骨水泥渗漏对相邻椎体生物力学影响的有限元分析[J]. *北京生物医学工程*, 2022, 41(02): 140-147.

[12] XUE YD, ZHANG ZC, DAI WX. Investigation of preoperative traction followed by percutaneous kyphoplasty combined with percutaneous cement discoplasty for the treatment of severe thoracolumbar osteoporotic vertebral compression fractures[J]. *Int J Gen Med*, 2021, 14: 6563-6571.

[13] 龚礼, 范少勇. 腰椎间盘突出症微创治疗的临床进展[J]. *江西中医药*, 2019, 50(3): 77-80.

[14] 田庆华, 王涛, 何煜, 等. 经皮骨水泥椎间融合术与骨水泥椎间成形术治疗老年腰椎间盘突出症的疗效比较[J]. *介入放射学杂志*, 2021, 30(3): 264-269.

[15] 覃春钰. 人体腰椎腰段的三维模型构建及有限元力学分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.

[16] 李伟. 正常腰椎及腰椎骨质疏松三维有限元模型的建立及分析[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2011.

[17] 高旭, 邢文华. 有限元分析法在脊柱外科领域的应用[J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(18): 2921-2927.

[18] 李爽, 徐宝山, 马信龙. 经椎间盘骨水泥成形术的研究进展[J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29(21): 1961-1964.

[19] 关凯, 赵伟东, 关福强, 等. 经皮骨水泥椎间成形术治疗腰椎退行性侧凸1例[J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2021, 26(7): 341-342.

[20] CAMINO WILLHUBER G, BENDERSKY M, DE CICCO FL, et al. Development of a new therapy-oriented classification of intervertebral vacuum phenomenon with evaluation of intra- and interobserver reliabilities[J]. *Global Spine J*, 2021, 11(4): 480-487.

[21] 王莹莹, 杨寅, 王义清, 等. 经皮骨水泥椎间成形术治疗顽固性腰痛1例[J]. *颈腰痛杂志*, 2020, 41(02): 256.

[22] YANG L, KONG JJ, QIU ZY, et al. Mineralized collagen-modified PMMA cement enhances bone integration and reduces fibrous encapsulation in the treatment of lumbar degenerative disc disease[J]. *Regen Biomater*, 2020, 7(2): 181-193.

(方丽蓉 编辑)