

脊柱内镜下腰椎间盘突出范围对腰椎稳定性影响的有限元分析

王鹏¹ 卢火炎¹ 赵崇程¹ 郭肖楠¹ 赵若琦¹ 赵建^{1△}

[摘要] 目的:分析脊柱内镜下腰椎间盘突出范围对腰椎稳定性的影响,明确脊柱内镜下腰椎间盘突出最合适的范围。方法:选取 12 例行腰椎 L_{4~5} 节段脊柱内镜手术患者 MRI 影像,测量术后腰椎间盘突出范围,设定健康模型组、部分切除组 1、部分切除组 2、部分切除组 3 和假设模型组。应用健康人体的 CT 数据建立健康组有限元模型,在此基础上分别建立部分切除 1、2、3 组和假设模型组有限元模型,研究在直立、前屈、后伸、侧弯和旋转七种工况下 L_{4~5} 节段腰椎稳定性与脊柱内镜下腰椎间盘突出范围的关系。结果:有限元分析得到腰椎 L_{4~5} 节段关节活动度(Range of Motion, ROM)、L₄ 轴向位移和腰椎间盘突出范围正相关,即腰椎 L_{4~5} 节段稳定性与腰椎间盘突出范围负相关。结论:脊柱内镜下腰椎间盘突出范围对腰椎稳定性的影响十分明显,考虑纤维环后缘变薄和椎间隙变窄的影响,在脊柱内镜术中除了切除腰椎间盘的突出部分,并预留纤维环瘢痕增生的空间外,应尽可能减小髓核和纤维环的切除范围,以减少腰椎稳定性的丢失。

[关键词] 脊柱内镜;腰椎间盘突出症;腰椎稳定性;有限元分析

[中图分类号] R681.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1005-0205(2021)12-0012-05

Finite Element Analysis of the Influence of Lumbar Discectomy Range on Lumbar Stability under Spinal Endoscope

WANG Peng¹ LU Huoyan¹ ZHAO Chongcheng¹ GUO Xiaonan¹
ZHAO Ruoqi¹ ZHAO Jian^{1△}

¹ The First Affiliated Hospital of Hebei University of Chinese Medicine, Shijiazhuang 050011, China.

Abstract Objective: To investigate the efficacy of the range of endoscopic lumbar discectomy on lumbar stability and determine the most appropriate range of endoscopic lumbar disc resection. **Methods:** A total of 12 MRI images of patients undergoing lumbar L_{4~5} segment endoscopic surgery were selected to measure the postoperative lumbar discectomy range. Healthy model group, partial resection group 1, partial resection group 2, partial resection group 3 and hypothetical model group were set. The finite element model of the health group was established using the CT data of one healthy subject. On this basis, the finite element models of the partial resection groups 1, 2, 3 and the hypothetical group were established respectively to study the relationship between the stability of the L_{4~5} lumbar spine and the scope of endoscopic lumbar disc resection under seven operating conditions: upright standing, anterior flexion, posterior extension, lateral bending and torsion. **Results:** The finite element analysis revealed that the range of motion (ROM) and axial displacement of L_{4~5} segment of lumbar spine were positively correlated with the range of lumbar discectomy, this is, there was a negative correlation between the stability of the lumbar L_{4~5} segment and the lumbar disc resection range. **Conclusion:** The efficacy of the discectomy range of lumbar intervertebral disc under spinal endoscopy on the stability of the lumbar spine is very obvious. Considering the thinning of the posterior edge of the annulus fibrosus and the narrowing of the intervertebral space, the discectomy range of nucleus pulposus and annulus fibrosus should be reduced as much as possible in addition to removing the protruding part of the lumbar intervertebral disc and reserving the space for scar proliferation of the annulus fibrosus to reduce the loss of stability of the lumbar spine.

to reduce the loss of stability of the lumbar spine.

Keywords: spinal endoscopy; lumbar disc herniation; lumbar spine stability; finite element analysis

基金项目:全国老中医药专家学术经验继承工作(国中医药人教发[2017]29号)

河北省重点研发计划项目(203777110D)

河北省中医药管理局课题(2020067)

¹ 河北中医学院第一附属医院(石家庄,050013)

[△]通信作者 E-mail: williamtcm@yeah.net

脊柱内镜下腰椎间盘突出术是治疗腰椎间盘突出症的非融合手术之一,因其操作简单、疗效好、创伤小、安全性高等特点^[1-2],已经在临床广泛开展。脊柱内镜手术极大程度上减少了对肌肉和软组织的损伤,因此对腰椎稳定性的影响较开放手术大幅度降低,极大地减少了“邻椎病”等并发症^[3-4]出现的可能。术中仅清理突出的椎间盘可能减压不彻底,需要增加切除范围,预留椎间盘瘢痕增生的空间。但是尚没有对于切除范围的公认标准,因此本研究用有限元分析法,明确腰椎间盘突出切除范围对腰椎稳定性之间的具体数量关系。实现对脊柱内镜术后腰椎稳定性的量化分析,探索切除腰椎间盘突出最合适的范围,规范化脊柱内镜术式,为制定脊柱内镜标准化治疗方案提供循证医学依据。

1 资料与方法

1.1 研究对象

共选取因 L_{4~5} 腰椎间盘突出行脊柱内镜手术切

除腰椎间盘突出后缘的术后患者 12 例,其中男 6 例,女 6 例。收集术前及术后 1 周内的腰椎 MRI 数据。

1.2 整理数据

将 12 例患者术后复查的腰椎 MRI 导入软件 RadiAnt DICOM Viewer 5. 5. 0,取 T₂ 加权成像(T₂W1)的脂肪抑制序列中的矢状位图像。选取其中 L_{4~5} 椎间盘后缘低信号距椎体后缘最远处图像。将 L₄ 椎体前下缘标记一点,记为点 A;L₄ 椎体后下缘标记一点,记为点 B;L₅ 椎体前上缘标记一点,记为点 C;L₅ 椎体后上缘标记一点,记为点 D;L_{4~5} 椎间盘后缘低信号距椎体后缘最远处标记一点,记为点 E。分别连接线段 AB、CD、BD 和经点 E 作与线段 AB、CD 平行的线段 EF,并测量长度,见图 1。切除腰椎间盘突出后缘范围用 $P_n = \{EF / [(AB + CD) / 2]\} \times 100\%$ 。

整理 12 例椎间盘切除范围数据(见图 2),其中最小值为 7. 04%,最大值为 19. 49%,中位数为 12. 40%。

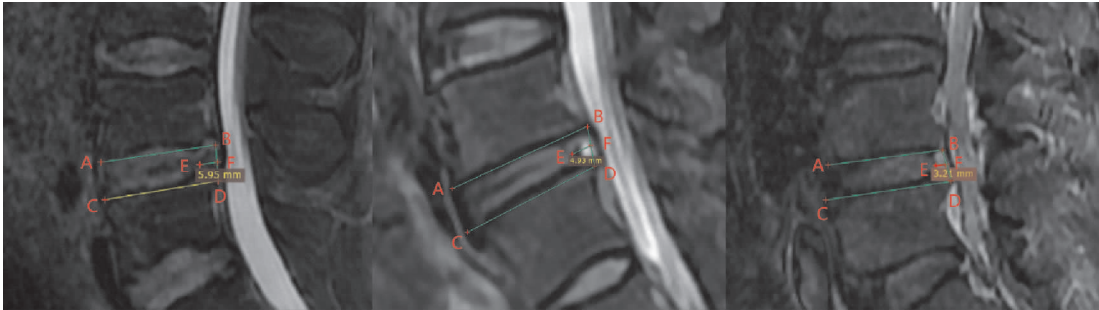


图 1 测量椎间盘切除范围

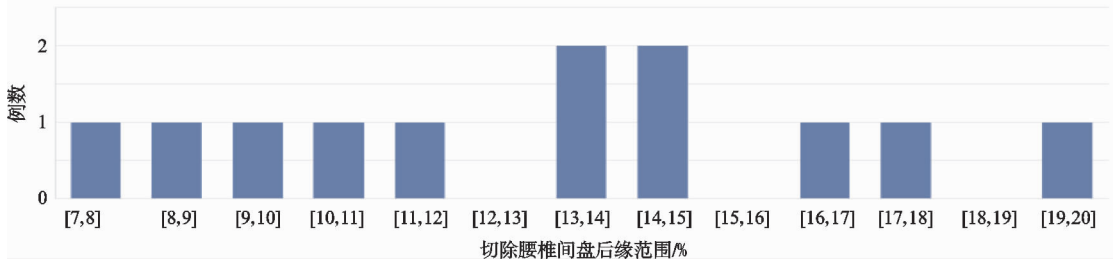


图 2 12 例脊柱内镜下腰椎间盘突出切除范围

1.3 方法

1.3.1 分组方法 总结 12 例切除 L_{4~5} 椎间盘范围的临床数据,已统计的脊柱内镜手术临床病例中切除比例最小值、中位数、最大值分别为 7. 04%, 12. 40%, 19. 49%。在 Denis^[5] 提出的三柱理论中中柱决定脊柱 70%~80% 的稳定性,其中椎间盘后 1/3 就是中柱的重要组成部分。因此本研究分为 5 组,即健康模型组,部分切除组 1,部分切除组 2,部分切除组 3 和假设模型组,并为每组建立模型(健康模型、切除椎间盘后缘 7. 04% 模型、切除椎间盘后缘 12. 40% 模型、切除椎间盘后缘 19. 49% 模型和切除椎间盘后缘 33. 30% 模型)。

1.3.2 建模环境和数据来源 Mimics21. 0 软件(Materialise 公司,比利时),Geomagic Wrap2017 软件

(Raindrop 公司,美国),HyperMesh2021 软件(Altair 公司,美国),以及 Abaqus2021 软件(SIMULIA 公司,美国)等。

CT 数据:选择 1 名 35 岁中国籍健康成年男性志愿者,身高 170 cm,体质量 60 kg,使用 64 排螺旋 CT 机(西门子公司,德国)对志愿者进行腰椎 CT 三维重建扫描,扫描宽度为 0. 6 mm,扫描层数为 435 层。志愿者对试验方案知情同意,已签署知情同意书。

1.3.3 建模方法 将志愿者腰椎 CT 图像以 DICOM 格式导入 Mimics Research21. 0 软件,初步建成 L₄、L₅ 的三维几何模型。导入 Geomagic Wrap2017 软件中,通过光滑、简化等处理,最后建成保留腰椎特征的三维几何简化模型。拟合、合并曲面,最终生成曲面模型。导入 Hypermesh2021 软件中,划分椎体松质骨、皮质骨、后

部结构的 3D 网格。根据解剖结构建立上下终板、纤维环和髓核的 3D 网格,其中髓核、纤维环分别占腰椎间盘 46%和 54%,皮质骨、终板厚度均为1 mm^[6]。在韧带起

止点处用 truss(桁架)单元分别模拟韧带。在健康 L_{4~5} 节段腰椎模型的基础上分别建立切除椎间盘后缘 7.04%,12.40%,19.49%,33.30%的模型,见图 3。

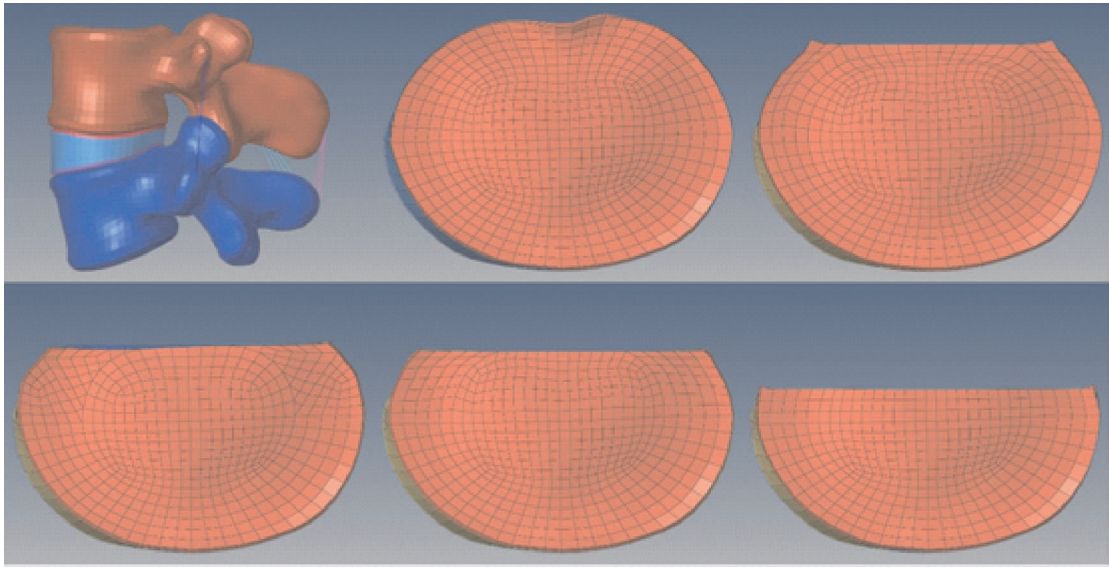


图 3 L_{4~5} 节段腰椎模型网格划分和切除部分后缘的椎间盘

1.3.4 有限元前处理 对松质骨、皮质骨、后部结构、1),导入 Abaqus2021 软件中完成装配、约束和相互
终板、纤维环、髓核和各个韧带赋材料和属性^[7-9](见表 作用。

表 1 腰椎各部分材料属性和单元属性

名称	网格	单元类型	弹性模量/MPa	泊松比	横截面积/mm ²
皮质骨	六面体	C3D8	12 000	0.300	
松质骨	四面体	C3D4	100	0.300	
后部结构	四面体	C3D4	3 500	0.300	
终板	六面体	C3D8	25	0.250	
髓核	六面体	C3D8H	1	0.499	
纤维环基质	六面体	C3D8	4.2	0.450	
纤维	桁架单元	T3D2	400	0	0.76
前纵韧带	桁架单元	T3D2	7.8	0	63.70
后纵韧带	桁架单元	T3D2	10	0	20
黄韧带	桁架单元	T3D2	15	0	40
棘间韧带	桁架单元	T3D2	10	0	40
棘上韧带	桁架单元	T3D2	8	0	30
横突间韧带	桁架单元	T3D2	10	0	1.80
关节囊韧带	桁架单元	T3D2	7.5	0	30

1.3.5 模型验证 施加与 Heth 等^[10-14]相同的载荷,利用 Abaqus 求解器计算健康腰椎 L_{4~5} 节段在前屈、后伸、侧弯和旋转工况下,腰椎 L_{4~5} 节段 ROM 和直立工况下 L₄ 椎体的轴向位移,与 Heth 等^[10]已验证的模型或离体实验结果进行比较。

1.3.6 载荷和边界条件 在 L₄ 椎体上表面施加垂直向下的 400 N 的集中力载荷,L₅ 椎体的下表面固定,模拟腰椎直立状态。参考腰椎单一运动单元生理活动角度,分别 L₄ 上表面 X,Y,Z 轴方向上施加 10 N·m 和-10 N·m 的扭矩模拟正常人体前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左旋转、右旋转 6 种运动状态,同一工况下的左右侧弯、左右旋转均取平均值。

1.4 主要观察指标
测量腰椎 L_{4~5} 节段 ROM 及 L₄ 椎体轴向位移。

1.5 统计学分析
实验数据全部采用 SPSS23.0 统计软件进行统计处理,此次实验健康模型与其他文献刚度比较采用单样本 t 检验,检验水准 $\alpha=0.05$ 。同一工况不同组间数据与切除范围间采用回归分析,检验回归分析的显著性采用方差分析,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 腰椎 L_{4~5} 节段有限元模型的结构
腰椎 L_{4~5} 节段包括 L₄ 和 L₅ 椎体的皮质骨、松质骨及后部结构,椎间盘的纤维环,髓核及上、下终板,前

纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘间韧带、棘上韧带、关节囊韧带、横突间韧带等结构。每组模型包含的节点和单元见表 2。

表 2 各模型节点和单元

组别	节点数	单元数
健康模型组	105 447	258 681
部分切除组 1	112 083	258 489
部分切除组 2	131 516	258 105
部分切除组 3	131 426	258 105
假设模型组	131 735	257 065

2.2 腰椎 L_{4~5} 节段有限元模型有效性

验证模型中,前屈、后伸、侧弯、旋转工况下的刚度

表 3 各模型不同工况下腰椎 L_{4~5} 节段 ROM 和 L₄ 椎体轴向位移

组别	前屈角位移/(°)	后伸角位移/(°)	侧弯角位移/(°)	旋转角位移/(°)	轴向位移/mm
健康模型组	5.20	3.85	2.82	3.56	0.33
部分切除组 1	5.56	4.35	3.06	3.63	0.36
部分切除组 2	5.72	4.72	3.25	3.67	0.41
部分切除组 3	5.96	5.06	3.66	3.74	0.60
假设模型组	6.07	5.02	5.16	4.13	1.05

表 4 回归分析及验证显著性

工况	R	F	P
前屈	0.943	23.999	0.016
后伸	0.881	10.437	0.048
侧弯	0.963	38.499	0.008
旋转	0.953	29.716	0.012
直立	0.955	31.249	0.011

前屈、后伸、侧弯、旋转 6 个工况下的腰椎 L_{4~5} 节段 ROM、L₄ 椎体轴向位移均有不同程度的增大。直立工况下的 L₄ 椎体轴向位移和前屈、后伸、侧弯、旋转工况下的腰椎 L_{4~5} 节段 ROM 与腰椎间盘突出范围的线性相关有显著性意义。

3 讨论

3.1 不同工况下腰椎稳定性的分析

利用 ABAQUS 后处理功能得到的数据中,切除腰椎间盘后缘范围与腰椎的 ROM 正相关,即与腰椎稳定性负相关,且存在显著相关性,这与陈华星等^[15]和 Panjabi 等^[16]的结论是一致的。在已统计的临床病例中最高能增加腰椎 L_{4~5} 节段 14.60% 的前屈活动度、31.43% 的后伸活动度、29.79% 的侧弯活动度、5.06% 的旋转活动度和 81.82% 的轴向位移。需要注意的是在旋转工况下,健康模型组、部分切除组 1、部分切除组 2 和部分切除组 3 的腰椎活动度非常接近,分别为 3.56°,3.63°,3.67°,3.74°,这可能是因为腰椎的生理结构决定的。下位椎体的上关节突位于上位椎体下关节突的外侧,这能够很好地维持人体腰椎的稳定性,限制腰椎旋转的范围,达到保护脊髓的效果。查看 5 组模型在旋转工况下的应力云图,发现 L₄ 下关节突和 L₅ 上关节突相互接触并在接触部位形成了最大 21.07,19.89,18.28,19.69,18.84 N 的压力。

分别为 1.92,2.60,3.54,2.81 N·m/(°), $P=0.392$,0.142,0.125,0.152,差异无统计学意义。结果表明建立的实验模型与 Heth 等^[10]的研究结果一致,建模可靠,可用于后续的实验研究。

2.3 腰椎 L_{4~5} 节段 ROM 和轴向位移

得到不同模型组在前屈、后伸、侧弯、旋转 6 个工况下,L_{4~5} 节段 ROM 和 L₄ 轴向位移的数据见表 3。对不同工况下的腰椎活动度与直立工况下的 L₄ 椎体轴向位移和椎间盘切除范围之间采用回归分析,结果见表 4。

与健康模型组相比,部分切除组和假设模型组在

3.2 脊柱内镜下椎间盘切除范围的选择

脊柱内镜下腰椎间盘切除术是治疗腰椎间盘突出症主要治疗手段之一,因其操作简单、创伤小、安全性高,已经在临床广泛开展。脊柱内镜手术在切除压迫神经的椎间盘后缘之后,创面愈合会有瘢痕增生。如果只切除压迫神经的突出椎间盘的后缘,瘢痕增生再次压迫神经,因此需要切除更多的椎间盘来预留瘢痕增生的空间。Denis 提出的三柱理论认为,脊柱的中柱决定了 70%~80% 的稳定性,这已成为国内外脊柱外科专家的共识。而腰椎间盘的后 1/3 是腰椎中柱的重要组成部分,因此切除椎间盘后缘会导致腰椎稳定性降低,进而引发一系列病变,如延缓纤维环修复、加速椎间盘退变、椎间隙高度丢失、诱发椎间盘源性腰痛等。对于腰椎间盘后缘的切除,过多会导致腰椎稳定性丢失,过少则无法预留瘢痕增生的空间,容易再次压迫神经。因此,脊柱内镜手术切除腰椎间盘后缘的范围对腰椎稳定性的影响,是决定术后远期疗效的关键问题。

目前,临床中椎间盘切除范围尚无统一的标准,Yorimitsu 等^[17]认为对于椎间盘是影响椎间高度的一个重要因素,建议减少切除范围,但是会导致二次突出的可能性增大。Cinotti 等^[18]则认为椎间盘切除范围对术后疗效及复发率无明显影响。腰椎间盘突出症在中医学属于腰痹病范畴,梅建强教授临证经验认为用于治疗骨折的“筋骨并重”,同样适用于腰痹病的诊疗:腰痹病日久,渐现筋骨不健,肾主骨、肝主筋,究其因当为肝肾不足;腰椎间盘广义上属于“筋”的范畴,从“筋束骨”角度分析,腰椎间盘的切除范围对于腰椎稳定有重要意义。

本研究通过有限元分析法,建立腰椎间盘突出不同切除范围的模型并对其生物力学进行比较,结果发现在脊柱内镜下腰椎间盘突出切除后缘的范围对腰椎 ROM 的影响很大。同时,过多切除椎间盘后缘也会导致纤维环后缘变得薄弱,髓核更容易突破薄弱的纤维环。过多切除椎间盘后缘会导致上位椎体下移,椎间隙变窄。患有腰椎间盘突出症的患者很大一部分伴有腰椎退变、椎间孔狭窄,这可能导致椎间孔进一步减小,增加对神经根的压迫。因此在脊柱内镜术中,除了切除突出的椎间盘,并预留纤维环瘢痕增生的空间外,应尽可能减小髓核和纤维环的切除范围。

3.3 本研究的临床指导意义

以往脊柱生物力学的研究主要靠动物实验,但因成本高、模拟直立动物难度大等原因,导致建模困难,因此研究转向有限元分析。有限元法研究通过网格化、约束并加载模型,可以模拟人体的各种组织,排除其他因素的影响,计算结果具有很强的可重复性^[19],在模拟人体结构和分析生物力学特性方面,这是其他方法无法比拟的。可以客观解释模型在外力作用下的应力和形变情况,进行定性、定量分析,这也验证了梅建强教授治疗腰痹病时对“筋”“骨”的临床经验。因此,有限元分析法可用三维精确模拟椎间盘部分切除后的生物力学改变,实现对脊柱内镜术后腰椎稳定性的量化分析,明确切除椎间盘最合适的范围,规范脊柱内镜术式,为制定脊柱内镜标准化治疗方案提供循证医学依据。

本实验尚存在不足之处:未考虑部分切除后的椎间盘可能导致其生物材料属性发生变化产生的影响;有限元是基于影像学资料对实际情况进行模拟分析,未来尚需与临床试验、实体标本及其他生物力学实验相互验证。

参考文献

- [1] 邵睿,祝斌,刘晓光,等.内窥镜下腰椎间盘突出髓核摘除术后复发危险因素的研究进展[J].中国脊柱脊髓杂志,2020,30(5):459-462.
- [2] MAHESHA K. Percutaneous endoscopic lumbar discectomy: results of first 100 cases[J]. Indian J Orthop, 2017, 51(1):36-42.
- [3] 任东林,陈宇,陈德玉,等.皮质骨通道螺钉技术在腰椎邻椎病中的应用[J].临床骨科杂志,2020,23(4):510-514.
- [4] OKUDA S, NAGAMOTO Y, MATSUMOTO T, et al. Adjacent segment disease after single segment posterior lumbar interbody fusion for degenerative spondylolisthesis: minimum 10 years follow-up [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2018, 43(23):E1384-E1388.
- [5] DENIS F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1983, 8:817-831.
- [6] 冯勇,刘道志.不同腰椎融合器对邻近节段影响的生物力

学研究[J].中国生物医学工程学报,2010,29(5):717-723.

- [7] SCHMIDT H, HEUER F, CLAES L, et al. The relation between the instantaneous center of rotation and facet joint forces: a finite element analysis [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2008, 23(3):270-278.
- [8] COHEN S P, RAJA S N. Pathogenesis, diagnosis, and treatment of lumbar zygapophysial (facet) joint pain[J]. Anesthesiology, 2007, 106(3):591-614.
- [9] NATARAJAN R N, ANDERSSON G B, PATWARDHAN A G, et al. Study on effect of graded facetectomy on change in lumbar motion segment torsional flexibility using three-dimensional continuum contact representation for facet joints [J]. J Biomech Eng, 1999, 121(2):215-221.
- [10] HETH J A, HITCHON P W, GOEL V K, et al. A biomechanical comparison between anterior and transverse interbody fusion cages[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2001, 26: E261-E267.
- [11] 方新果,赵改平,王晨曦,等.基于CT图像腰椎L₄₋₅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.
- [12] 董凡,戴克戎,侯筱魁.小关节在腰椎结构刚度中的作用[J].中华外科杂志,1993,31(7):417-420.
- [13] YAMAMOTO I, PANJABI M M, CRISCO T, et al. Three-dimensional movements of the whole lumbar spine and lumbosacral joint[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1989, 14(1):1256-1260.
- [14] 曹亮亮,徐建广,梅伟,等.三维有限元法分析腰骶区椎间融合联合置入棘突间动态内固定装置后腰椎的生物力学变化[J].中国组织工程研究,2020,24(12):1905-1910.
- [15] 陈华星,杨圣,芦健民,等.有限元分析显微镜下不同比例髓核摘除后的腰椎力学特征[J].中国组织工程研究,2014,18(17):2659-2666.
- [16] HOU T S, TU K Y, XU Y K, et al. Effect of partial discectomy on the stability of the lumbar spine. A study of kinematics[J]. Chin Med J (Engl), 1990, 103(5):396-399.
- [17] YORIMITSU E, CHIBA K, TOYAMA Y, et al. Long-term outcomes of standard discectomy for lumbar disc herniation: a follow-up study of more than 10 years[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2001, 26(6):652-657.
- [18] CINOTTI G, ROYSAM G S, EISENSTEIN S M, et al. Ipsilateral recurrent lumbar disc herniation: a prospective, controlled study[J]. J Bone Joint Surg Br, 1998, 80(5):825-832.
- [19] XIE Y, WANG X, JIAN Q, et al. Three dimensional finite element analysis used to study the influence of the stress and strain of the operative and adjacent segments through different foraminnoplasty technique in the PELD study protocol clinical trial (SPIRIT compliant) [J]. Medicine (Baltimore), 2020, 99(15):e19670.

(收稿日期:2021-04-09)