

不同入路经皮内窥镜下关节成形术对椎间盘生物力学影响的三维有限元分析

谢一舟¹, 简强¹, 吴昊阳¹, 吴卫东², 余洋¹

(1 成都中医药大学附属医院骨科 610075 成都市; 2 南方医科大学广东省生物力学重点实验室 510515 广州市)

【摘要】目的:通过三维有限元法分析经皮内窥镜下 L4 下关节突成形术与 L5 上关节突成形术对椎间盘生物力学的影响。**方法:**选取 1 例健康青年男性志愿者, 对其进行薄层螺旋 CT 扫描, 建立正常的 L3~L5 三维有限元模型, 将上述有限元模型与经典文献数据进行验证。验证后, 模拟腰椎经皮内窥镜技术分别于侧后方入路对 L5 上关节突与后方入路对 L4 下关节突做直径 7.5mm 的圆柱状骨切除以模拟椎间孔成形, 从而获得正常模型、L5 上关节突成形模型(A 模型)和 L4 下关节突成形模型(B 模型)3 种模型。在 L3 椎体上表面向终板施加负荷为 400N 的垂直于水平面压力模拟正常人腰椎承载重力, 在前屈、后伸、左右侧弯、左右旋转的方向上分别施加 7.5N·m 的纯扭矩, 比较 3 种模型在前屈、后伸、左右侧弯、左右旋转状况下 L3/4、L4/5 椎间盘应力变化情况。**结果:**A 模型前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋状态下 L4/5 椎间盘的最大应力分别为 0.390MPa、0.520MPa、0.450MPa、0.430MPa、0.510MPa 和 0.498MPa; B 模型前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋状态下 L4/5 椎间盘的最大应力分别为 0.375MPa、0.490MPa、0.440MPa、0.420MPa、0.482MPa 和 0.478MPa。A 模型前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋状态下 L3/4 椎间盘的最大应力分别为 0.369MPa、0.480MPa、0.442MPa、0.432MPa、0.468MPa 和 0.452MPa; B 模型前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋状态下 L3/4 椎间盘的最大应力分别为 0.368MPa、0.478MPa、0.436MPa、0.430MPa、0.465MPa 和 0.444MPa。**结论:**腰椎经皮内窥镜技术下, 侧后入路 L5 上关节突成形较后方入路 L4 下关节突成形对 L4/5 椎间盘在后伸、旋转状态下的生物力学影响较大。两者对邻近节段 L3/4 椎间盘的应力变化的影响较小。

【关键词】腰椎经皮内窥镜; 关节突成形术; 三维有限元分析

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2020.02.09

中图分类号: R318.01 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2020)-02-0151-08

Three dimensional finite element analysis of the biomechanics influence of L4 inferior articular process and L5 superior articular process foraminoplasty under percutaneous endoscopy on the intervertebral disc/XIE Yizhou, JIAN Qiang, WU Haoyang, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2020, 30(2): 151-158

【Abstract】 Objectives: To evaluate the biomechanical effects of lumbar 4-facet arthroplasty and lumbar 5-facet arthroplasty under percutaneous endoscopy using three dimensional finite element analysis. **Methods:** a healthy young male volunteer was selected and scanned under the thin-layer spiral CT to establish a normal L3-L5 three-dimensional finite element model. The above normal finite element model and classical literature data were verified. The simulated lumbar percutaneous endoscopic technique was used to resect the L5 superior articular process and L4 inferior articular process through the lateral posterior approach. The normal model, L4 model (A model) and L5 model (B model) were obtained. The load of 400N was applied to the endplate on the upper surface of L3 vertebral body to simulate the load-bearing gravity of normal human lumbar spine. The pure torque of 7.5N·m was applied in the direction of forward bending, backward stretching, left and right side bending and left and right rotation respectively. The stress changes of L3/4 and L4/5 intervertebral discs of the three models were compared under the conditions of forward bending,

基金项目: 成都中医药大学附属医院基金(编号: 18PY04)

第一作者简介: 男(1995-), 住院医师, 硕士研究生在读, 研究方向: 脊柱外科

电话: 15008498380 E-mail: 411801003@qq.com

通讯作者: 余洋 E-mail: 270539179@qq.com

backward stretching, left/right side bending and left/right rotation. **Results:** The maximum stress of L4/5 intervertebral disc was 0.390MPa, 0.520MPa, 0.450MPa, 0.430MPa, 0.510MPa and 0.498MPa respectively in flexion, extension, left flexion, right flexion, left rotation and right rotation after L5 superior articular process was formed; the maximum stress of L4/5 intervertebral disc was 0.375MPa, 0.490MPa, 0.440MPa, 0.420MPa, 0.482MPa and 0.478MPa respectively in flexion, extension, left flexion, right lateral flexion, left rotation and right rotation after L4 inferior articular process was formed. The maximum stress of L3/4 intervertebral disc was 0.368MPa, 0.478MPa, 0.436MPa, 0.430MPa, 0.465MPa and 0.444MPa after L5 superior articular process was formed under the condition of forward flexion, backward extension, left flexion, left rotation and right rotation, respectively. The maximum stress of L3/4 intervertebral disc was 0.369MPa, 0.480MPa, 0.442MPa, 0.432MPa, 0.468MPa and 0.452MPa under flexion, right flexion, left rotation and right rotation after L4 inferior articular process was formed, respectively. **Conclusions:** The biomechanics of L4/5 disc in the state of extension and rotation is more affected by the L5 superior articular process foraminoplasty through the lateral posterior approach than that through L4 inferior articular process foraminoplasty through the posterior approach. Both of them have little effect on the six kinds of stress changes of L3/4 disc.

[Key words] Lumbar percutaneous endoscopy; Foraminoplasty; Three-dimensional finite element

[Author's address] Department of Orthopaedics, Hospital of Chengdu University of TCM, Chengdu, 610075, China

近年来,经皮内窥镜技术在脊柱退变性疾病的治疗中的应用越来越广泛^[1]。随着经皮内窥镜技术的成熟和手术设备的升级,其手术适应证已由单纯的腰椎间盘突出症扩大到腰椎管狭窄症,手术入路也由单纯的侧后方椎间孔入路到后方椎板间入路^[2]。在 L4/5 经皮内窥镜手术侧后方入路的手术过程中,关节突关节是阻挡工作通道进入椎管内硬膜囊前方间隙的主要障碍,而在后方入路中,L4/5 椎板间隙的狭窄也成为工作通道放置入椎管的阻碍。但目前对于两种关节成形术式的部位对相应以及相邻的椎间盘产生应力变化的影响缺少细致性的研究和科学的测量数据^[3-5]。本研究旨在通过三维有限元分析法分别模拟腰椎经皮内窥镜技术在侧后方入路 L5 上关节突成形与后方入路 L4 下关节突成形,并探究其对相应节段(L4/5)与邻近节段(L3/4)椎间盘生物力学产生的变化和影响。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取一名健康男性志愿者,年龄 25 岁,体重 65kg,身高 170cm,在研究之前,参与者签署知情同意,并由作者的附属机构成都中医药大学附属医院的伦理委员会进行审查。本研究已获作者所属机构内部伦理委员会批准。通过腰椎 X 线片、CT、MRI 等获得 L3~L5 影像学资料。

纳入标准:申请人年龄在 20~60 岁之间,身

体健康,精神和智力正常。服从研究组安排,接受研究组设计的治疗方案并签署知情同意书。排除标准:参与者遭受严重的脊柱退行性变或多个脊柱的严重不可逆损伤,如脊柱结核和肿瘤。

1.2 软件与设备

Siemens Somatom Sensation 64 排螺旋 CT 检查,由成都中医药大学附属医院提供。曲面设计软件 Creo 3.0、医学图像处理软件 Mimics 16.0、逆向工程软件 Geomagic Studio 12.0 用于三维模型建立;有限元分析软件 ANSYS 15.0 用于三维模型处理和生物力学有限元分析,相关软件由南方医科大学生物力学重点实验室提供。

1.3 研究方法

1.3.1 L3~L5 正常三维有限元模型的建立 使用螺旋 CT 行 L3~L5 扫描,将扫描获得层厚为 0.625mm 二维横断面以 DICOM 格式保存,在 Mimics 软件中建立 L3~L5 的三维模型,对模型进行打磨光滑等处理后导入 ANSYS 中进行网格划分处理,制作骨性有限元模型。再根据各韧带的解剖位置,在模型中加入椎间盘、前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘间韧带、棘上韧带、横突间韧带,建立 L3~L5 的正常三维有限元模型(图 1)。对模型中结构按照正常参数赋值(表 1)^[6]。其起止点及横突面积尽可能模仿相关节段的解剖观察论^[7,8];模型中所有关节的关节面均定义为滑动接触关系,摩擦系数为 0.1^[9]。

1.3.2 模型的有效性验证 将上述正常有限元模

型与 Shim 等^[9]尸体研究施加同样的约束条件和载荷,并进行不同方向上活动度的比较,经过反复修正相关的韧带结构后,使其在各个方向的活动度均分布于 Shim 等^[10]生物力学试验的范围内,以此验证模型有效、可靠(表 2)。

1.3.3 不同部位关节突成形模型建立 在已建立的正常有限元模型上,模拟腰椎经皮内窥镜技术,在侧后入路中以 L5 上关节突作为穿刺点,建立精确的穿刺引导路线,在与冠状面 30°夹角方向切除右侧 L5 上关节突,切除直径为 7.5mm(腰椎经皮内窥镜最常用环锯直径);在后方入路中以 L4 下关节突作为穿刺点,建立精确的穿刺引导路线,切除右侧 L4 下关节突(切除直径为 7.5mm);获得右侧 L5 上成形模型(A 模型)与 L4 下关节突成形模型(B 模型),详见图 2。

1.3.4 载荷和边界条件 本研究约束 L5 椎体下表面自由度为 0,在 L3 椎体上表面向终板施加负荷为 400N 的垂直于水平面压力模拟正常人腰椎承载重力,在前屈、后伸、左右侧弯、左右旋转的方向上分别施加 7.5N·m 的纯扭矩,分别测量前屈、后伸、左右旋转和左右侧曲等 6 种运动状态下, L4/5 与 L3/4 椎间盘的最大应力值(Von Mises 应力极值)。

2 结果

A 模型在前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、

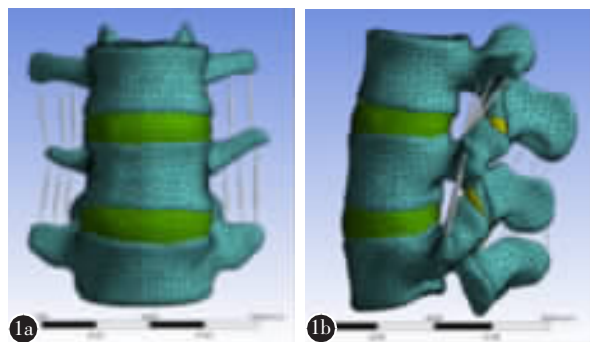


图 1 a、b 网络划分处理后的 L3~L5 骨性三维有限元模型,并加入椎间盘、前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘间韧带、棘上韧带、横突间韧带

Figure 1 a, b L3-L5 bone three-dimensional finite element model after network division, with the addition of intervertebral disc, anterior longitudinal ligament, posterior longitudinal ligament, yellow ligament, interspinous ligament, supraspinous ligament and intertransverse process ligament

右旋状态下 L3/4 椎间盘的最大应力与正常类似。L4 下关节突成形模型在前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋状态下 L3/4 椎间盘的最大应力与正常类似。B 模型在前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋状态下 L4/5 椎间盘的最大应力在后伸、左旋、右旋状态下较正常模型明显增大。B 模型在前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋状态

表 1 有限元模型的材料特性

Table 1 Finite element model material properties

	弹性模量 Elasticity modulus	泊松比 Poisson's ratio
皮质骨 Cortical bone	12000	0.3
松质骨 Cancellous bone	100	0.2
关节软骨 Cartilago articularis	25	0.4
髓核 Nucleus pulposus	1	0.49
纤维环 Fibrous rings	4.2	0.45
前纵韧带 Anterior longitudinal ligaments	7.8	0.3
后纵韧带 Posterior longitudinal ligaments	10	0.3
黄韧带 Ligamentum flavum	15	0.3
横突间韧带 Intertransverse ligaments	10	0.3
关节囊韧带 Capsule ligament	7.5	0.3
棘间韧带 Interspinous ligaments	10	0.3
棘上韧带 Supraspinous ligaments	8	0.3

表 2 模型验证结果 ($\bar{x} \pm s, ^\circ$)

Table 2 Model verification results

	Shim标本试验 Specimen test		本模型 The model of this study	
	L3/4	L4/5	L3/4	L4/5
前屈 Forward flexion	4.2±0.8	5.4±0.9	4	4.9
后伸 Backward extension	2.9±0.5	2.9±0.5	3	3.2
左屈 Left flexion	3.5±1.0	4.4±1.1	3.6	3.5
右屈 Right flexion	3.5±1.0	4.4±1.1	3.6	3.5
左旋 Left rotation	2.8±0.6	3.8±1.0	2.8	2.9
右旋 Right rotation	2.8±0.6	3.8±1.0	2.8	2.9

下 L4/5 椎间盘的最大应力其中在左旋、右旋状态下较正常增大(图 3、4,表 3、4)。

3 讨论

3.1 腰椎经皮内窥镜生物力学研究现状

长期以来,传统后路直接减压或辅助融合手术被认为是治疗腰椎管狭窄症和腰椎间盘突出症的最有效治疗方法^[11,12]。但其对机体较大的损伤、对脊柱后柱的破坏、神经周围瘢痕的形成以及麻醉的风险被很多国内外专家和学者所诟病。腰椎经皮内窥镜技术是一项创伤小、恢复快、花费相对少以及对脊柱稳定性保护相对较好的一种微创技

术。目前也在国内外掀起一股热潮,同时也被越来越多的腰椎退行性病变患者所接受^[13~16]。这项技术发展至今,衍生的各种技术流派百花齐放,各种学术观点更是百家争鸣,其实技术多样性的最主要的体现点就在于工作通道进入椎管前对关节突的成形技术。特别是 L4/5 节段,侧后方入路 L5 上关节突成形和 L4 下关节突成形为两种广泛使用的关节突成形方式^[17~19]。Chen 等^[20]、张西峰等^[21]学者报道的后方入路治疗 L5/S1 椎间盘突出均取得良好的临床效果。Nie 等^[22]、李振宙等^[23]认为通过运用带保护管道环锯的腰椎间孔成形器械行椎间孔扩大成形,克服了小关节对 L5/S1 椎间盘的遮

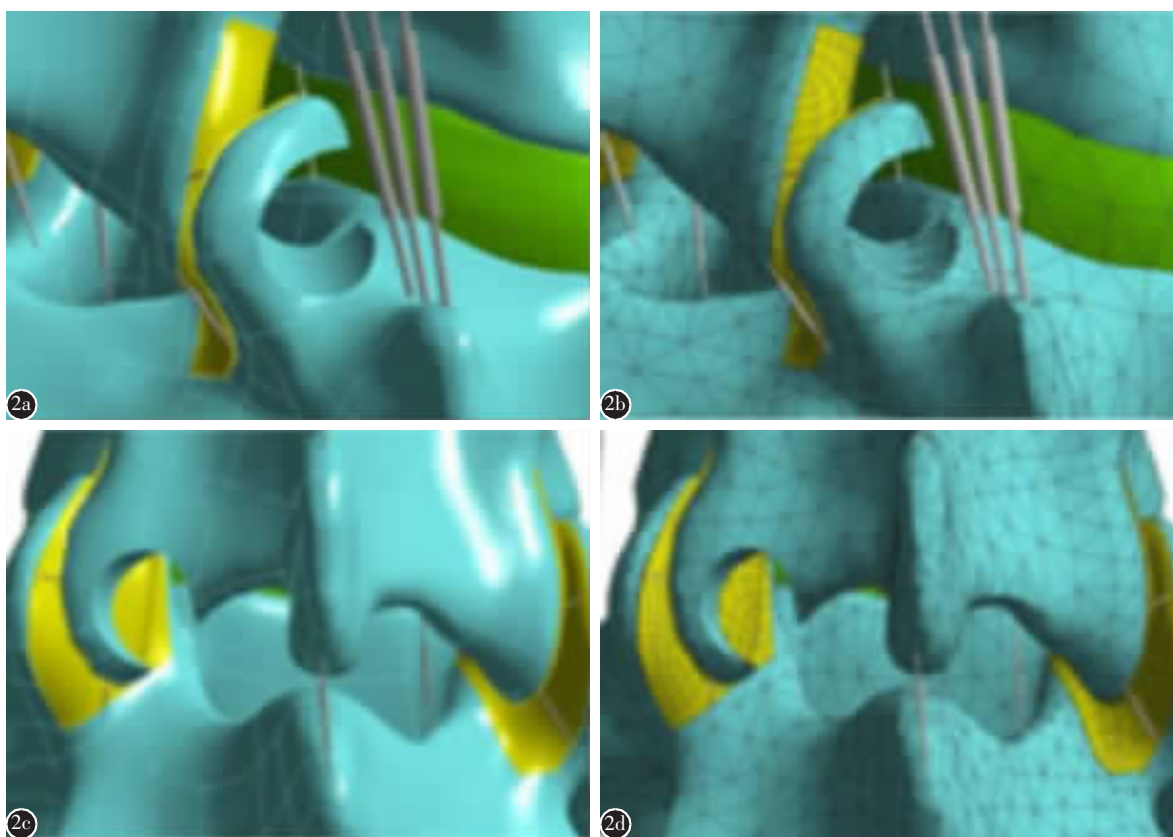


图 2 a 模拟侧后入路中以 L5 上关节突作为穿刺点,建立精确的穿刺引导路线,在与冠状面 30° 夹角方向切除右侧 L5 上关节突(切除直径为 7.5mm)所获得的 L5 上关节突成形模型(A 模型) b 网络划分处理后的 A 模型 c 模拟后方入路中以 L4 下关节突作为穿刺点,建立精确的穿刺引导路线,切除右侧 L4 下关节突(切除直径为 7.5mm)所得到的 L4 下关节突成形模型(B 模型) d 网络划分处理后的 B 模型

Figure 2 a In the simulated lateral posterior approach, the superior articular process of L5 was used as the point of puncture to establish an accurate guidance route for puncture, and the right superior articular process of L5 was resected at an angle of 30° in the coronal plane. Then the model of L5 superior articular process formed in diameter of 7.5mm was obtained from the facet(the diameter of resection was 7.5mm) b Model A after network partition c In the simulated posterior approach, the L4 inferior articular process was used as the point of puncture to establish an accurate guidance route for puncture, and the L4 inferior articular process forming model(B model) was obtained by resection of the right L4 inferior articular process(the diameter of resection was 7.5mm) d Model B after network partition

挡,以及改善侧后入路的穿刺方法,L5/S1 侧路镜穿刺的困难得到了部分解决。

但当前对两种成形方式对腰椎间盘突出本节段及相邻节段造成的退变影响的相关研究较少,本次研究在腰椎三维有限元模型建立的基础上对其进

行探索,应用外直径为 7.5mm 环锯分别在侧后入路对 L5 上关节突和后方入路对 L4 下关节突切除直径为 7.5mm 的圆柱状骨性区域,后在 L3 椎体上表面施加 400N 压力并通过 6 个运动状态以便对 L3/4 与 L4/5 椎间盘产生的应力变化和影响

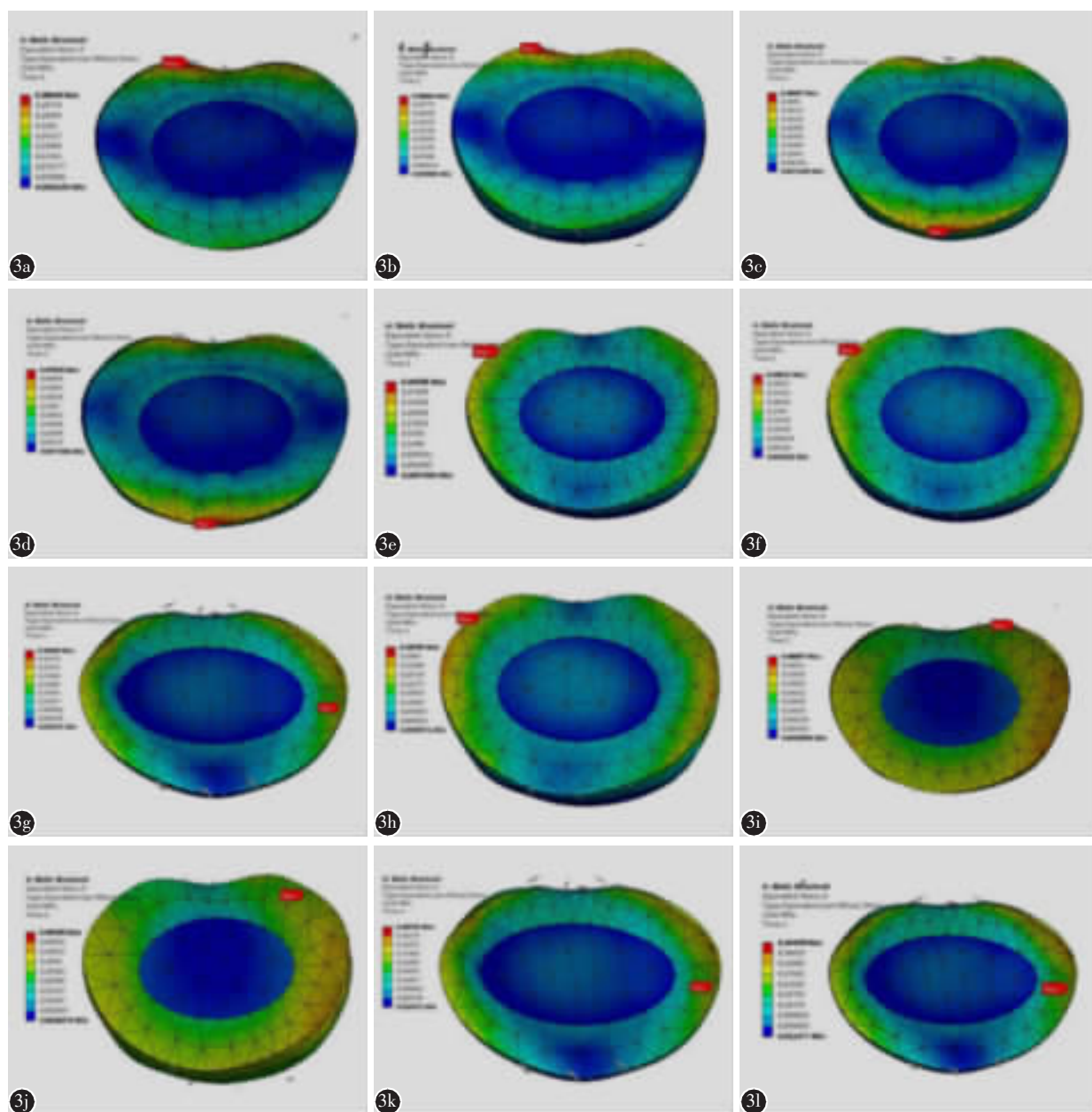


图 3 a、b A 模型与 B 模型在腰椎前屈状态下 L3/4 椎间盘的应力云图 c、d A 模型与 B 模型在腰椎后伸状态下 L3/4 椎间盘的应力云图 e、f A 模型与 B 模型在左侧屈状态下 L3/4 椎间盘的应力云图 g、h A 模型与 B 模型在右侧屈状态下 L3/4 椎间盘的应力云图 i、j A 模型与 B 模型在左旋转状态下 L3/4 椎间盘的应力云图 k、l A 模型与 B 模型在右旋转状态下 L3/4 椎间盘的应力云图

Figure 3 a, b The mises stress cloud of L3/4 disc of A and B models in flexion c, d The mises stress cloud of L3/4 disc of A and B models in extension e, f The mises stress cloud of L3/4 disc of A and B models in left bending g, h The mises stress cloud of L3/4 disc of A and B models in right bending i, j The mises stress cloud of L3/4 disc of A and B models under the left rotation state k, l The mises stress cloud of L3/4 disc of A and B models in right rotation

进行分析。

3.2 不同部位关节突成形对邻近节段椎间盘力学影响的三维有限元分析

本研究分别对正常模型, L5 上关节突成形模型及 L4 下关节突成形模型进行下表面约束, 施

加轴向载荷 1 不同方向的侧向应力, 分析其在本节段 L4/5 及邻近节段 L3/4 椎间盘在前屈、后伸、侧屈、旋转状态下的应力变化情况。通过试验研究得知 L4 下关节突成形模型在左旋、右旋状态下, L4/5 椎间盘的最大应力分别为 0.482Mpa、

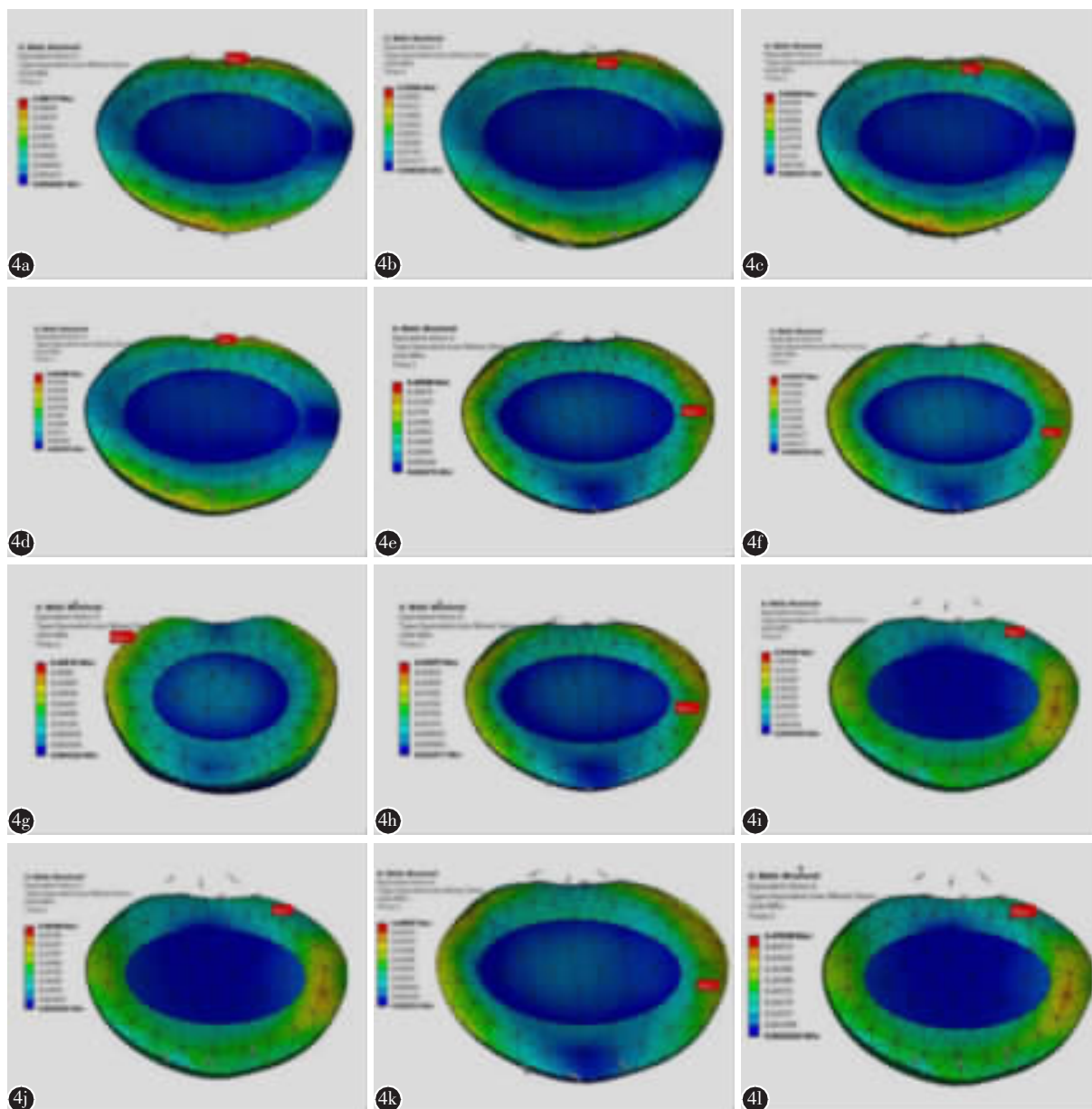


图 4 a、b A 模型与 B 模型在腰椎前屈状态下 L4/5 椎间盘的应力云图 c、d A 模型与 B 模型在腰椎后伸状态下 L4/5 椎间盘的应力云图 e、f A 模型与 B 模型在腰椎左侧屈状态下 L4/5 椎间盘的应力云图 g、h A 模型与 B 模型在腰椎右侧屈状态下 L4/5 椎间盘的应力云图 i、j A 模型与 B 模型在左旋转状态下 L4/5 的应力云图 k、l A 模型与 B 模型在右旋转状态下 L4/5 的应力云图

Figure 4 a, b The mises stress cloud of L4/5 disc of A and B models in flexion c, d The mises stress cloud of L4/5 disc of A and B models in extension e, f The mises stress cloud of L4/5 disc of A and B models in left bending g, h The mises stress cloud of L4/5 disc of A and Bmodels in right bending i, j The mises stress cloud of L4/5 disc of A and B models in left rotation k, l The mises stress cloud of L4/5 disc of A and Bmodels in right rotation

表 3 L3/4 椎间盘的 Von Mises 应力极值 (MPa)

Table 3 Von Mises stress extremes of L3/4 intervertebral

	disc					
	前屈 Forward flexion	后伸 Backward extension	左屈 Left flexion	右屈 Right flexion	左旋 Left rotation	右旋 Right rotation
正常模型 Normal Model	0.365	0.478	0.434	0.415	0.463	0.444
A模型 Model A	0.369	0.480	0.442	0.432	0.468	0.452
B模型 Model B	0.368	0.478	0.436	0.430	0.465	0.444

0.478MPa 均较正常模型增大了 5.60% 和 3.76%。L5 上关节突成形模型在后伸、左旋、右旋状态下 L4/5 椎间盘的最大应力分别为 0.520MPa、0.510MPa、0.498MPa, 均较正常腰椎模型显著增加了 10.57%、10.78% 和 7.63%。由此说明不同部位的关节突成形后, 腰椎相应节段会在左旋、右旋状态下造成明显应力变化影响, 以 L5 上关节突成形最为明显。除此之外, 当 L5 上关节突成形后, 后伸状态也会对 L4/5 椎间盘产生明显的应力增加。

L4 下关节突成形模型在前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋状态下邻近节段 L3/4 椎间盘产生最大的应力分别是 0.368MPa、0.478MPa、0.436MPa、0.430MPa、0.465MPa、0.444MPa; L5 上关节突成形模型在前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋状态下邻近节段 L3/4 椎间盘产生最大的应力分别是 0.369MPa、0.480MPa、0.442MPa、0.432MPa、0.468MPa 和 0.452MPa。以上两种成形方式在 6 种运动状态下对邻近节段 L3/4 产生的最大应力与正常腰椎模型无明显差异。由此可以表明腰椎经皮内窥镜关节突成形技术对邻近节段的生物力学影响较小。

通过对腰椎的解剖分析可知, 腰椎上关节突起源于椎弓根与椎板交界处, 但其关节面呈凹形, 面向后内侧, 关节面较下关节突宽大。腰椎下关节突是椎板的延伸, 关节面朝外。关节突关节以接近榫对榫眼的方式牢固地锁在一起。腰椎的这种排列限制了它的旋转和平移。当我们进行椎间孔成形术时, 这种运动限制改变了, 导致旋转时相应节段椎间盘的应力增加。但在 L4 下关节突成形的过程中, L5 上关节突凹宽的关节面没有受到损伤。因此成形后 L4 下关节突的剩余部分仍能在

表 4 L4/5 椎间盘的 Von Mises 应力极值 (MPa)

Table 4 Von Mises stress extremes of L4/5 intervertebral

	disc					
	前屈 Forward flexion	后伸 Backward extension	左屈 Left flexion	右屈 Right flexion	左旋 Left rotation	右旋 Right rotation
正常模型 Normal Model	0.365	0.478	0.434	0.415	0.463	0.444
A模型 Model A	0.390	0.520	0.450	0.430	0.510	0.498
B模型 Model B	0.375	0.490	0.440	0.420	0.482	0.478

一定程度上被 L5 上关节突的关节面锁定, 因此其生物力学的增加将明显小于 L5 上关节突成形。然而, L3/4 椎间盘的生物力学几乎没有受到影响, 因为 L4 上关节突和 L3 下关节突没有受到磨削。

综上所述, 该研究以三维有限元技术建立的 L3~L5 腰椎模型拥有直观而形象的几何外形, 在此模型上进行两种关节突成形技术几乎能够完全比拟临床实际操作。并通过在模拟人体重量的力学效应中进行 6 种运动状态下采用力学分析后得知, 侧后入路的 L5 上关节突成形与后方入路的 L4 下关节突成形均会对 L4/5 椎间盘产生显著的应力变化, 尤以后方入路的 L5 上关节突成形更为明显。而两种成形方式对邻近节段 L3/4 椎间盘应力变化无明显影响。

本研究通过三维有限元建模方法进行生物力学的基础性分析, 对腰椎经皮内镜治疗 L4/5 椎间盘突出侧后入路与后方入路的选择上阐明了一种趋势, 具有一定的临床指导意义。但有其局限性, 因实际临床上影响腰椎术后稳定性的因素较多, 远期研究尚需长期临床随访可更加明确。

4 参考文献

1. Kapetanakis S, Gkasdaris G, Angoulas AG, et al. Transforaminal percutaneous endoscopic discectomy using transforaminal endoscopic spine system technique: pitfalls that a beginner should avoid[J]. World J Orthop, 2017, 8(12): 874-880.
2. Ahn Y, Lee SH, Park WM, et al. Percutaneous endoscopic lumbar discectomy for recurrent disc herniation: surgical technique, outcome, and prognostic factors of 43 consecutive cases [J]. Spine, 2004, 29(16): E326-332.
3. 赵凡, 刘正, 王炳强, 等. 有限元模拟单节段腰椎关节突关节分级切除对腰椎稳定性的影响[J]. 中华医学杂志, 2015, 95(13): 973-977.

4. 赵勇, 李玉茂, 李平生, 等. 单侧小关节分级切除对腰椎稳定性影响的三维有限元分析[J]. 实用骨科杂志, 2009, 15(10): 764-767.
 5. 余洋, 樊效鸿, 顾党伟, 等. 腰椎经皮内镜下不同部位关节突成形对椎间盘力学影响的三维有限元分析 [J]. 重庆医学, 2019, 48(1): 120-123.
 6. Zhang QH, Teq EC, Ng WH, et al. Finite element analysis of momentrotation relationships for human cervical spine [J]. J Biomech, 2006, 39(1): 189-193.
 7. 苏晋, 赵文志, 陈秉智, 等. 建立全腰椎有限元接触模型[J]. 医用生物力学, 2010, 25(3): 200-205.
 8. 黄菊英, 李海云, 吴浩. 腰椎间盘突出症的力学特征的仿真计算方法[J]. 医用生物力学, 2012, 27(1): 96-101.
 9. Brodin K, Halldin P. Development of a finite element model of the upper cervical spine and a parameter study of ligament characteristics[J]. Spine, 2004, 29(4): 376-385.
 10. Shim CS, Park SW, Lee SH, et al. Biomechanical evaluation of an interspinous stabilizing device, locker[J]. Spine, 2008, 33(22): E820-827.
 11. Bono CM, Kadaba M, Vaccaro AR. Posterior pedicle fixation based dynamic stabilization devices for the treatment of degenerative diseases of the lumbar spine [J]. J Spinal Disord Tech, 2009, 22(5): 376-383.
 12. Sengupta DK, Herkowitz HN. Degenerative spondylolisthesis: Review of current trends and controversies[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2005, 30(6 Suppl): S71-S81.
 13. Weinstein JN, Tosteson TD, Lurie JD, et al. Surgical versus nonsurgical therapy for lumbar spinal stenosis [J]. N Engl J Med, 2008, 358(8): 794-810.
 14. Jasper GP, Francisco GM, Telfeian AE. Transforaminal endoscopic discectomy with foaminoplasty for the treatment of spondylolisthesis[J]. Pain Physician, 2014, 17(6): E703-708.
 15. Jasper GP, Francisco GM, Aghion D, et al. Technical considerations in transforaminal endoscopic discectomy with foraminoplasty for the treatment of spondylolisthesis: Case report[J]. Clin Neurol Neurosurg, 2014, 119: 84-87.
 16. Kitahama Y, Sairyo K, Dezawa A. Percutaneous endoscopic transforaminal approach to decompress the lateral recess in an elderly patient with spinal canal stenosis, herniated nucleus pulposus and pulmonary comorbidities [J]. Asian J Endosc Surg, 2013, 6(2): 130-133.
 17. Sharma M, Langrana NA, Rodriguez J. Role of ligaments and facets in lumbar spinal stability [J]. Spine (Phila Pa 1976), 1995, 20(8): 887-900.
 18. Kato Y, Panjabi MM, Nibu K. Biomechanical study of lumbar spinal stability after osteoplastic laminectomy[J]. J Spinal Disord, 1998, 11(2): 146-150.
 19. Evins AI, Banu MA, Njoku I Jr, et al. Endoscopic lumbar foraminotomy[J]. J Clin Neurosci, 2015, 22(4): 730-734.
 20. Chen HT, Tsai CH, Chao SC, et al. Endoscopic discectomy of L5-S1 disc herniation via an interlaminar approach: Prospective controlled study under local and general anesthesia[J]. Surgical Neurology International, 2011, 2(1): 93.
 21. 张西峰, 王岩, 肖嵩华, 等. 内窥镜下不同入路治疗 L5/S1 椎间盘突出症[J]. 中华骨科杂志, 2010, 30(4): 341-345.
 22. Nie HF, Zeng JC, Liu KX. A simple technique of accessing the L5-S1 disc space for transforaminal endoscopic spine surgery[J]. Surg Technol Int, 2012, 22: 302-306.
 23. 李振宙, 吴闻文, 侯树勋, 等. 经皮侧后路腰椎间孔成形手术器械的设计及临床应用[J]. 中华骨科杂志, 2011, 31(10): 1026-1032.
- (收稿日期:2019-11-06 末次修回日期:2020-01-21)
(英文编审 庄乾宇/谭 啸)
(本文编辑 姜雅浩)