

椎间孔镜下腰椎间盘突出髓核摘除治疗腰椎间盘突出症的生物力学优势

吐尔洪江·阿布都热西提¹, 孟祥玉¹, 买合木提·亚库甫¹, 王天堂², 西尔艾力·买买提¹, 戴继芳¹, 王 为³ (1新疆医科大学第六附属医院微创脊柱治疗科, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830002; ²新疆阿克苏地区第一人民医院骨科, 新疆维吾尔自治区阿克苏地区 843000; ³乌鲁木齐大为创新信息科技有限公司, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830000)

DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.2907

ORCID: 0000-0002-2604-0049(吐尔洪江·阿布都热西提)

文章快速阅读:

文章特点一	对象	观察指标	结论
<p>(1)腰椎间盘突出症的手术方法较多, 目前各种微创术式发展迅速;</p> <p>(2)采用有限元法对比分析各种术式的优缺点, 结果证实经皮椎间孔镜腰椎间盘髓核摘除术在应力分布及位移等生物力学方面均优于其他方法。</p>	<p>(1)选择 1 名无腰椎病史的 35 岁男性志愿者;</p> <p>(2)拍摄腰椎 CT 并收集数据, 构建有限元模型并验证其有效性。</p>	<p>(1)L₃/L₅ 建立 5 种模型;</p> <p>(2)用 7 种加载工况下测出 L₄/L₅ 阶段椎体、椎间盘和左右关节软骨应力分布及 L₄ 椎体位移。</p>	<p>(1)经皮椎间孔镜腰椎间盘髓核摘除模型在椎体、椎间盘和关节突关节应力分布最小, 优势明显;</p> <p>(2)椎间盘镜手术模型和经皮椎间孔镜腰椎间盘髓核摘除模型的位移均较其他手术模型稳定, 二者无差异;</p> <p>(3)经皮椎间孔镜腰椎间盘髓核摘除是目前较理想的术式。</p>

吐尔洪江·阿布都热西提, 1975 年生, 2007 年新疆医科大学毕业, 硕士, 副主任医师, 硕士生导师, 主要从事脊柱微创方面的研究。

通讯作者: 吐尔洪江·阿布都热西提, 硕士, 副主任医师, 硕士生导师, 新疆医科大学第六附属医院微创脊柱治疗科, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830002

文献标识码:A

投稿日期: 2020-03-11

送审日期: 2020-03-17

采用日期: 2020-04-15

在线日期: 2020-06-08



文题释义:

腰椎间盘突出症的手术治疗: 腰椎间盘突出症是脊柱外科常见病, 手术方式较多。近年来, 经皮椎间孔镜腰椎间盘髓核摘除术作为微创治疗方法迅速发展, 具有创伤小、出血量少并能快速康复的优点, 受到越来越多的关注。

摘要

背景: 腰椎间盘突出症的手术方式较多, 各有优缺点, 通过有限元分析方法进行脊柱生物力学研究可以指导临床工作。

目的: 建立 L₃₋₅ 三维有限元模型, 分析不同术式在椎间盘摘除后对脊柱力学的影响。

方法: 选择 1 名无腰椎病史的 35 岁男性志愿者, 收集腰椎 CT 数据构建有限元模型并验证。在 L₃/L₅ 脊柱正常模型(模型 I)的基础上建立 L_{4/5} 节段单纯开窗髓核摘除模型(模型 II)、椎间盘镜手术模型(模型 III)、经皮椎间孔镜腰椎间盘髓核摘除模型(模型 IV)、关节突关节切除模型(模型 V), 在 7 种加载工况下测定 L₄/L₅ 节段椎体、椎间盘和左右关节软骨应力分布及 L₄ 椎体位移。

结果与结论: ①建立的三维有限元模型有效, 方差分析模型有效; ②L₄₋₅ 椎间盘两两比较后模型 III、IV 在椎间盘应力集中最小; L₄ 椎体应力, 模型 IV 对椎体影响最小; L₄ 椎体位移, 模型 III 和 IV 对椎体稳定影响最小; ③从加载方式看, 关节突关节损伤越小, 椎间盘应力越小, 模型 IV 最小; 左侧关节突模型 III 和 IV 均保持关节完整; 右侧关节左右旋转加载下手术侧关节越完整, 应力越大, 故模型 IV 较大; 左右侧倾加载下反而相反, 模型 V 最大; L₄ 椎体应力模型 IV 最小; 椎体位移, 模型 III 和 IV 位移最小, 接近模型 I; ④提示经皮椎间孔镜腰椎间盘髓核摘除模型在椎体、椎间盘和关节突关节应力分布最小, 有明显优势; 椎间盘镜手术模型和经皮椎间孔镜腰椎间盘髓核摘除模型位移均较其他手术模型稳定, 二者无差异; 故经皮椎间孔镜腰椎间盘髓核摘除目前是较理想的术式。

关键词:

骨; 腰椎; 椎间盘; 椎间孔镜; 髓核; 生物力学; 有限元分析

中图分类号: R459.9; R318; R445

基金资助:

新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2017D01C266), 项目负责人: 吐尔洪江·阿布都热西提

缩略语:

经皮椎间孔镜腰椎间盘髓核摘除术: percutaneous endoscopic lumbar discectomy, PELD

Tuerhongjiang · Abuduresiti, Master, Associate chief physician, Master's supervisor, Department of Minimally Invasive Spine Therapy, Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830002, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Corresponding author: Tuerhongjiang · Abuduresiti, Master, Associate chief physician, Master's supervisor, Department of Minimally Invasive Spine Therapy, Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830002, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Biomechanical advantages of percutaneous endoscopic lumbar discectomy for lumbar disc herniation

Tuerhongjiang · Abuduresiti¹, Meng Xiangyu¹, Maihemuti · Yakufu¹, Wang Tiantang², Xieraili · Maimaiti¹, Dai Jifang¹, Wang Wei³ (1Department of Minimally Invasive Spine Therapy, Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830002, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China; 2Department of Orthopedics, Akesu First People's Hospital, Akesu 843000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China; 3Urumqi Dawei Innovation Information Technology Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

Abstract

BACKGROUND: There are many operative methods for lumbar disc herniation; all kinds of operations have advantages and disadvantages. The biomechanical study of spine by finite element analysis can guide the clinical work.

OBJECTIVE: To establish L₃₋₅ three-dimensional finite element model and analyze the effect of different surgical methods on the mechanics of the spine after discectomy.

METHODS: A 35-year-old volunteer with no history of lumbar disease was selected. Lumbar CT data were obtained to build a finite element model and verify the validity. Five models of L₃₋₅ spine were established, including L₃₋₅ normal spine model as the model I, small fenestration operation as a model II, microendoscopic discectomy as model III, percutaneous endoscopic lumbar discectomy as model IV, and facet removal operation as model V. Stress distribution of L₄₋₅ vertebrae, intervertebral disc, left and right articular cartilages and displacement of L₄ vertebrae were measured under seven loading conditions.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) The three-dimensional finite element model was effective. Model was effective by analysis of variance. (2) The stress concentration was low and the lowest instability of model III and IV by paired comparison. Model IV had the least effect on vertebral body in L₄ vertebral body stress. Model III and IV had the least effect on vertebral stability in the displacement of L₄ vertebral body. (3) From load modes, the less stress was received by the intervertebral disc when the joint damaged small, and the model IV was the smallest. The left articular process cartilage, models III and IV both maintained joint integrity. Under the right and left rotation load of on the right side, the greater stress received when the joint on the surgical side maintained more complete, so model IV was larger. On the contrary, the bilateral tilted load was in contrast, and the model V was largest. L₄-vertebral had the smallest equivalent stress in model IV. The displacement was obvious when the joint damaged more. Models III and IV had the smallest displacements and were close to model I. (4) It is indicated that surgical model of percutaneous endoscopic lumbar discectomy has the smallest stress distribution in the vertebral body, intervertebral disc, and articular process, and has obvious advantages. The displacements of microendoscopic discectomy and percutaneous endoscopic lumbar discectomy are more stable than other surgical models. There is no difference between the two. Therefore, percutaneous endoscopic lumbar discectomy is currently an ideal technique.

Key words: bone; lumbar vertebrae; lumbar intervertebral disc; intervertebral foramen; nucleus pulposus; biomechanics; finite element analysis

Funding: the Natural Science Foundation (General Project) of Xinjiang Uygur Autonomous Region, No. 2017D01C266 (to Abuduresiti T)

0 引言 Introduction

腰椎间盘突出症是脊柱外科常见病，手术方式较多。近年来，经椎间孔镜腰椎间盘髓核摘除术(percutaneous endoscopic lumbar discectomy, PELD)作为微创治疗方法迅速发展，该术式具有创伤小、出血量少并能快速康复的优点，受到越来越多的关注^[1-2]。各种手术都不同程度地影响脊柱应力变化导致复发等问题，故需对各种术式进行生物力学研究了解对脊柱生物力学的影响。计算机三维有限元模型对比分析有助于指导临床工作，避免伦理学带来的问题。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 有限元分析实验。

1.2 时间及地点 于2018年11月至2019年5月在新疆医科大学第六附属医院微创脊柱治疗科完成。

1.3 对象 选择1名无脊柱病史的35岁男性志愿者，签署知情同意书，符合伦理学标准。

1.4 方法

1.4.1 三维有限元模型的建立 用螺旋CT薄层扫描志愿者L₂-S₁椎体和椎间盘，取间隔0.7 mm，重建厚度0.75 mm、平面分辨率512×512、每像素0.629 mm的二维断层图像，共获图像233张，保存为DICOM格式并三维重建，见图1。

图像调整用Mimics 21.0，运用Calculate 3D命令初建各椎体三维模型并导出stl格式保存^[3-4]，见图2。模型的交错面、细小通道、噪点等用Geomagic Studio 2013软件检查，利用曲面重建功能建立脊柱曲面模型以iges格式保存，见图3。



图1 CT断层图像的三维重建
Figure 1 Three-dimensional reconstruction of CT tomographic images



图2 初步椎体三维模型
Figure 2 Preliminary three-dimensional vertebral model



图3 曲面模型
Figure 3 Surface model

在Unigraphics NX 8.5三维设计软件中使用布尔运算得到椎间盘模型。将模型导入Ansys workbench 19.2中，根据不同的材料选择不同单位尺寸的精度进行网格划分，不同材料赋予不同属性，并通过此软件进行力学加载、约束，得出结果^[5-7]。

1.4.2 实验加载设计及验证 实验载荷设计为7种，即垂直、垂直左旋、垂直右旋、垂直前屈、垂直后伸、垂直左倾和垂直右倾加载方式。垂直加载300 N，转矩加载8 000 N·mm，计算各个工况在设计载荷方式下的应力分布和位移。约束L₅

椎体下表面及棘突底面上所有节点在3个方向上的自由度, 所以只观察L_{4/5}椎间隙的改变, 无法检测L₅/S₁间隙的变化。模拟正常脊柱前屈后伸、左右侧屈及旋转下变形情况, 证实模型与实际情况相符合, 外观符合生理解剖, 精准可使用。

1.4.3 L₃₋₅椎体不同术式模型的建立 模型I为正常模型, 模型II为传统开窗手术模型, 模型III为椎间盘镜手术模型, 模型IV为椎间孔镜(PELD侧路)手术模型, 模型V为关节突关节切除模型, 见图4。

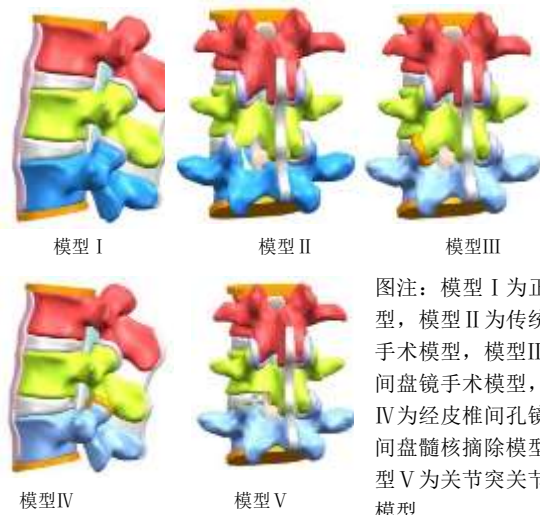


图4 各种L₃₋₅椎体术式模型
Figure 4 Various L₃₋₅ vertebral body surgery models

1.5 主要观察指标 取L₄/L₅各部分节点, 分析5种模型在7种加载方式下的等效应力和位移。以模型I为标准推断出4种手术模型的生物力学差异。

1.6 统计学分析 应用SPSS 25.0软件进行统计分析。组间差异是连续性变量, 根据正态性及方差齐性的情况选用多因素方差分析; 所有的检验均用双侧检验做统计分析, 检验水准 $\alpha=0.05$, $P \leq 0.05$ 为差异有显著性意义。

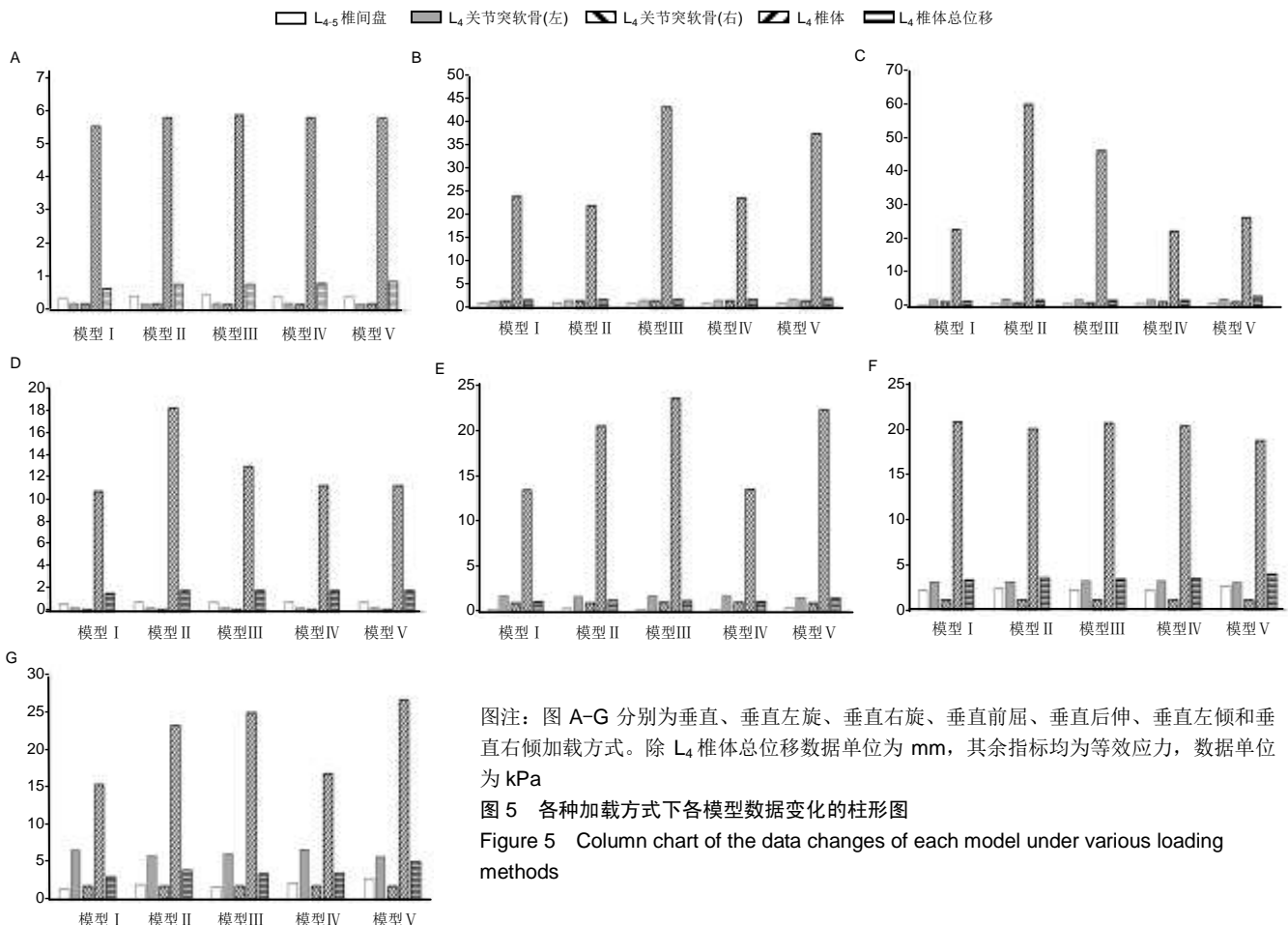
2 结果 Results

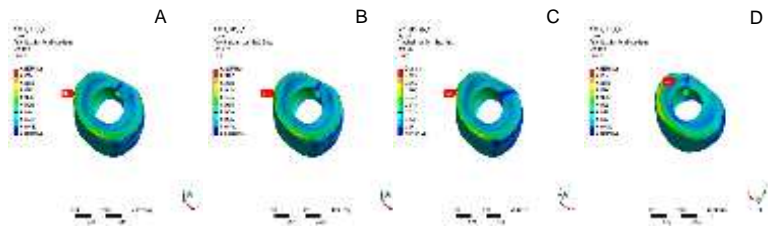
2.1 L₄₋₅椎间盘等效应力 见表1, 2及图5, 6。

表1 多因素方差分析的模型参数

Table 1 Model parameters of multivariate analysis of variance

模型	L ₄₋₅ 椎间盘等效应力(kPa)	L ₄ 关节软骨等效应力(kPa)		L ₄ 椎体等效应力(kPa)	L ₄ 椎体总位移(mm)
		左	右		
模型I	0.891±0.070	2.195±0.068	0.979±0.006	15.981±2.674	3.840±0.140
模型II	1.110±0.070	2.112±0.068	0.970±0.006	24.081±2.674	4.210±0.140
模型III	1.019±0.070	2.152±0.068	0.978±0.006	25.243±2.674	4.050±0.140
模型IV	1.073±0.070	2.241±0.068	0.986±0.006	16.152±2.674	4.090±0.140
模型V	1.299±0.070	2.096±0.068	0.983±0.006	21.118±2.674	4.820±0.140
F值	4.559	0.766	0.989	2.623	7.192
R ² 值	0.940	0.991	0.999	0.639	0.975
P值	0.007	0.558	0.432	0.060	0.001





图注：图 A-D 分别为模型 II-传统开窗手术模型、模型 III-椎间盘镜手术模型、模型 IV-经皮椎间孔镜腰椎间盘髓核摘除模型、模型 V-关节突关节切除模型

图 6 四种手术模型在椎间盘垂直加载下的应力集中模型图

Figure 6 Stress concentration models of four surgical models under vertical loading of intervertebral disc

表 2 L₄₋₅ 椎间盘等效应力各模型间差异多重比较 LSD

Table 2 LSD of comparing L₄₋₅ intervertebral disc equivalent stress difference of various models

(I)模型	(J)模型	平均值差值(I-J)	标准误差	显著性
I	II	-0.219 19	0.098 537	0.036
	V	-0.408 33	0.098 537	< 0.001
III	V	-0.280 61	0.098 537	0.009
IV	V	-0.225 85	0.098 537	0.031

表1示, $R^2=0.94$, $P < 0.001$, 说明方差分析模型有效。再看方差因素, 其中“模型”因素 $P=0.007$, “测试方式”因素 $P < 0.001$, 两个因素均是此次方差分析模型的独立影响因素。用多重比较LSD探讨各模型间差异, 见表2。

表2列出多重比较LSD有统计学意义的指标, 结果显示, 模型 I 与 II、V 之间 ($P=0.036$ 和 $P < 0.001$), 模型 III 与 V 之间 ($P=0.009$), IV 与 V 之间 ($P=0.031$), 差异均有显著性意义; 模型 III、IV 与模型 I 之间, 模型 III、IV 之间差异均无显著性意义。说明椎间盘应力集中在模型 III、IV 上最小。

从图6椎间盘在垂直加载下的等效应力图中发现, 除模型 V 最大应力集中在靠近椎间盘减压处外, 其他手术模型最大应力集中在椎间盘前缘纤维环处, 所以纤维环切除部分对应力的分布有明显影响。

2.2 L₄左侧关节突软骨等效应力 表1示, $R^2=0.991$, $P < 0.001$, 方差分析模型有效。再看方差因素, 其中“模型”因素 $P=0.558$, “测试方式”因素 $P < 0.001$, 说明测试方式是此次方差分析模型的独立影响因素, 是加载方式, 见图5。即在垂直和垂直前屈加载下, 5种模型基本相等。在垂直左旋加载下, 模型 III 和 IV 最接近模型 I; 在垂直右旋加载下, 模型 IV 最接近模型 I; 在垂直后伸和右倾加载下, 模型 V 最小, 模型 IV 最大; 在垂直左倾加载下, 模型 V 最小, 模型 III 最大。说明手术侧关节在关节突关节切除越多所受的应力在左右旋转时变大外其他载荷下变小, 故模型 III 和 IV 在旋转加载下小, 最接近模型 I, 而其他加载下模型 V 最小。

2.3 L₄右侧关节突软骨等效应力 表1示, $R^2=0.999$, $P < 0.001$, 方差分析模型有效。再看方差因素, 其中“模型”因素 $P=0.432$, “测试方式”因素 $P < 0.001$, 说明测试方式是此次方差分析模型的独立影响因素, 是加载方式(图5)。即在垂直、垂直前屈和垂直后伸加载下, 5种模型基本相等。在垂直左右旋加载下, 模型 IV 大; 在垂直左倾加载下, 模型 I 最小, 模型 V 最大; 在垂直右倾加载下, 模型 IV 最小; 说明关节突关节越完整, 左右旋转和后伸活动时受到的应

力就越大, 左右侧倾和前屈活动时就越小。

2.4 L₄椎体等效应力 表1示, $R^2=0.639$, $P < 0.001$, 方差分析模型有效。再看方差因素, 其中“模型”因素 $P=0.06$, “测试方式”因素 $P < 0.001$, 说明测试方式是此次方差分析模型的独立影响因素, 是加载方式(图5)。即模型 III 最大; 在垂直左旋加载下, 模型 II 最小, 模型 I 和 IV 相等, 模型 III 最大, 而且模型 III 和 V 与其他模型差异比较大; 在垂直右旋和后伸加载下, 模型 IV 最小; 在垂直前屈加载下, 模型 IV 和 V 最接近模型 I; 在垂直左倾加载下, 模型 V 最小, 模型 I 最大; 在垂直右倾加载下, 模型 I 和 IV 小。说明椎体上模型 IV 所受到的应力最小。

但经过多重比较, 模型 I 和 II、III, P 值分别为 0.043 和 0.022; 模型 II 和 IV, P 值 0.047; 模型 III 和 IV, P 值 0.024; 均有差异。模型 I 与 IV 之间最接近, 差异无显著性意义。

2.5 L₄椎体位移 表1示, $R^2=0.975$, $P < 0.001$, 方差分析模型有效。再看方差因素, 其中“模型”因素 $P=0.001$, “测试方式”因素 P 为 0, 说明两个因素均是此次方差分析模型的独立影响因素。用多重比较LSD探讨各模型间差异, 见表3。

表 3 L₄ 椎体位移各模型间差异多重比较 LSD

Table 3 LSD of comparing differences between L₄ vertebral body displacement models

(I)模型	(J)模型	平均值差值(I-J)	标准误差	显著性
I	V	-0.977 03	0.195 388	0.000
II	V	-0.611 18	0.195 388	0.005
III	V	-0.773 67	0.195 388	0.001
IV	V	-0.736 44	0.195 388	0.001

表3列出多重比较LSD有统计学意义的指标, 结果显示, 模型 I 和 V ($P=0$)、模型 II 和 V ($P=0.005$)、模型 III 和 V ($P=0.001$)、模型 IV 和 V ($P=0.001$), 差异均有显著性意义。模型 III 与 IV 之间最接近, 差异无显著性意义, 与模型 I 最接近。

3 讨论 Discussion

随着人口老龄化逐步加剧, 下腰痛发病率逐年增加, 严重影响人们的日常工作和生活, 下腰痛常见的发病原因有腰肌劳损、急性腰扭伤、腰椎间盘突出等^[8-9]。随着科学技术的发展, 脊柱外科领域也在迅速发展并出现了各种微创手术技术。腰椎全内镜手术现已成为脊柱微创手术的主流方式之一^[10], 鉴于内镜微创手术可视化及术中影像学实

时监测的特点, 相对于开放手术可进行更为精准的减压^[11]; 全脊柱内镜手术从Kambin三角进入椎间孔, 为增加操作空间, 需行椎间孔扩大成型术^[12], 各种手术方式都对脊柱生物力学有影响。开展有限元生物力学实验仅需在正常模型上运行布尔减运算, 得出切除后路椎板、侧路上关节突及椎间盘的模型, 符合手术实际情况, 能进行生物力学分析, 模拟制作各种手术模型用来对照, 提高了模型研究的可行性及对照性。随着技术进步, 生物力学研究进入新的体外模拟阶段, 并逐渐成为目前研究的热点^[13-15], 有限元分析法是实验生物力学的必要补充和有效替代工具^[17-18]。

3.1 椎间盘等效应力对脊柱生物力学的影响 PANJABI等^[19]研究发现, 脊柱力学特性在切除尸体标本的纤维环和髓核后出现异常改变, 腰椎关节突关节活动的不对称变化由节段矢状面对称性破坏引起。文毅等^[20]研究表明, 前部纤维环对髓核的挤压与椎间盘的退行性变密切相关。此次研究显示, 椎间盘纤维环前部应力大, 后部手术切除区应力明显减小, 故与组织完整性和压力分布有关(图6)。模型III、IV在椎间盘应力集中最小并出现不稳概率低。从加载方式观察, 在垂直加载下, 5种模型基本相等, 但模型III为最大; 在垂直左旋、右旋和前屈加载下, 模型IV最接近模型I; 在垂直后伸和左倾加载下, 模型III和IV接近模型I; 在垂直右倾加载下, 模型III较小(图5)。即除在垂直左倾和右倾加载下模型III稍有优势以外, 其他加载下模型IV均有优势, 说明椎间盘应力集中在模型IV上最小, 术后破坏最小, 但术后早期尽量减少左右旋转活动。

3.2 左侧关节突关节等效应力对脊柱生物力学的影响 已有大量系统性的生物力学研究结果证实传统后路逐级切除关节突关节对腰椎稳定性有一定影响^[21]。阮朝阳等^[22]发现, PELD手术去除椎间盘左后侧约1/4的纤维环中部及1/4的髓核, 术后L₄/L₅双侧关节突关节受到不对称的应力集中。李振宙等^[23]报道行经椎间孔脊柱内径技术行椎间孔扩大时, 如果切除了关节突上半部分及腹侧关节囊, 关节丧失完整性, 侧屈活动不稳。此次研究显示, 方差分析模型有效, 但两两比较模型之间差异无显著性意义, 加载方式下有差异(图5)。在垂直和垂直前屈加载下, 5种模型基本相等; 在垂直左旋加载下, 模型III和IV最接近模型I; 在垂直右旋加载下, 模型IV最接近模型I; 在垂直后伸和右倾加载下, 模型V最小, 模型IV最大; 在垂直左倾加载下, 模型V最小, 模型III最大。说明左右旋转和左右侧倾加载下关节越完整受到应力就越大, 易增生硬化; 模型III和IV均可保持关节的完整性。

3.3 右侧关节等效应力对脊柱生物力学的影响 腰椎旋转活动时关节骨性结构和韧带结构双侧影响不一样, 一侧受压同时另外一侧分离, 故双侧受的应力也有差异^[24-25]。此次研究显示, 方差分析模型有效, 但两两比较模型之间差异无显著性意义, 加载方式下有差异(图5)。在垂直、垂直前屈和后伸加载下, 5种模型基本相等。在垂直左右旋加

载下, 模型IV大; 在垂直左倾加载下, 模型I最小, 模型V最大; 在垂直右倾加载下, 模型IV最小; 说明右侧关节在垂直、前屈后伸加载下基本相同, 左右旋转加载下手术侧关节越完整, 受到的应力越大, 左右侧倾加载下反而相反。

3.4 L₄椎体等效应力对脊柱生物力学的影响 结构体应力集中与结构体的断裂有关, 因此断裂面多与应力集中区相关^[26]。此次研究显示, 方差分析和两两比较统计处理, 模型IV应力集中最小, 对椎体稳定影响最小。再看加载方式(图5), 在垂直加载下, 模型III最大; 在垂直左旋加载下, 模型II最小, 模型I和IV相等, 模型III最大, 而且模型III和V较其他模型差异比较大; 在垂直右旋和后伸加载下, 模型IV最小; 在垂直前屈加载下, 模型IV和V最接近模型I; 在垂直左倾加载下, 模型V最小, 模型I最大; 在垂直右倾加载下, 模型I和IV小。即关节破坏越多, L₄椎体在垂直、右旋、前屈和右倾加载下受到的应力大; 关节破坏越小, 在左旋、后伸和左倾加载下受到的应力越大。

3.5 椎体位移变化对脊柱生物力学的影响 SHARMA等^[27]通过对腰椎节段有限元分析发现, 腰椎前屈时腰椎后部韧带起重要的抵抗作用。ADAMS^[28]发现, 小关节对限制腰椎后伸运动范围起重要作用。马剑雄等^[29]研究发现, 伴两侧关节突切除时, 前屈、后伸刚度比正常分别下降35.59%与34.80%。有研究表明, 椎板开窗越大腰椎稳定性会越受到影响, 相应节段椎间盘应力也会增加, 加速椎间关节退变。此次研究发现, 模型III跟IV之间最接近, 差异无显著性意义, 它们又与模型I最接近, 说明模型III和IV破坏最小, 对椎体稳定影响最小(图5), 符合上述文献研究结果。

综上所述, 此次研究建立的L₃₋₅三维有限元模型有效, 除了总结出4种手术模型和正常脊柱模型对比的优缺点外, 还发现各种手术模型在不同力学加载方向上都有各自的优缺点, 哪一种手术都不是完美的, 具体在数据处理和结果中详细描述。关节突关节损伤越小, 椎间盘受到的应力就越小, 以模型IV最小; 左侧关节突软骨(手术侧)模型III和IV均保持关节的完整性; 右侧关节(手术对侧)左右旋转加载下手术侧关节越完整, 受到的应力越大, 故模型IV较大, 左右侧倾加载下反而相反, 以模型V最大。L₄椎体应力关节破坏越多, 椎体在垂直、右旋、前屈和右倾加载下受到的应力就大; 而关节破坏越小, 在左旋、后伸和左倾加载下受到的应力就越大。椎体位移分析, 模型III和IV位移最小, 接近模型I, 关节突关节破坏越多, 位移越明显。故模型III和IV在应力分布和位移方面均较其他手术模型占优势, 尤其模型IV后方结构完整更加优于其他模型, 但邻近上下节段参与生物力学改变和对手术节段有多大影响需要进一步研究分析。

致谢: 感谢新疆维吾尔自治区科技厅和新疆医科大学第六附属医院的经费资助, 感谢科研参与团队的付出和严谨的工作态度。

作者贡献: 吐尔洪江·阿布都热西提负责科研项目的设计、标书的书写、全程管理监督和总结撰写论文; 孟祥玉负责部分设计和监督

工作; 买合木提·亚库甫负责数据处理; 王天堂负责辅助资料的分析处理; 西尔艾力·买买提负责收集和整理数据, 辅助论文撰写; 戴继芳负责资料的管理; 王为负责做有限元处理和整理资料。

经费支持: 该文章接受了“新疆维吾尔自治区自然科学基金资助的面上项目(2017D01C266)”的基金资助。所有作者声明, 经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

利益冲突: 文章的全部作者声明, 在课题研究和文章撰写过程不存在利益冲突。

机构伦理问题: 该研究方案的实施符合《赫尔辛基宣言》和新疆医科大学第六附属医院对研究的相关伦理要求(医院伦理批件号: LFYLLSJ2017011, 审批时间: 2020-03-19)。

知情同意问题: 志愿者为自愿参加, 在充分了解试验方案的前提下签署了“知情同意书”。

写作指南: 该研究遵守国际医学期刊编辑委员会《学术研究实验与报告和医学期刊编辑与发表的推荐规范》。

文章查重: 文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。

文章外审: 文章经小同行外审专家双盲外审, 同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

生物统计学声明: 文章统计学方法已经有新疆医科大学和新疆医科大学第六附属医院生物统计学专家审核。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章, 根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款, 在合理引用的情况下, 允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展, 同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献, 并为之建立索引, 用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

[1] PAN Z, HA Y, YI S, et al. Efficacy of transforaminal endoscopic spine system(TESSYS)technique in treating lumbar disc herniation. Med Sci Monit. 2016;22:530-539.

[2] LI ZZ, HOU SX, SHANG WL, et al. Modified percutaneous lumbar foraminoplasty and percutaneous endoscopic lumbar discectomy: instrument design, technique notes, and 5 years follow-up. Pain Physician. 2017;20(1):E85-98.

[3] CHEN C, SHIH S. Biomechanical analysis of a new lumbar interspinous device with optimized topology. Med Biol Eng Comput. 2018;56(8):1333-1341.

[4] LI L, SHEN T, LI Y. A finite element analysis of stress distribution and disk displacement in response to lumbar rotation manipulation in the sitting and side-lying positions. J Manipulative Physiol Ther. 2017;40(8):580-586.

[5] MOORE MK, FULOP S, TABIB-AZAR M, et al. Piezoresistive pressure sensors in the measurement of intervertebral disc hydrostatic pressure. Spine. 2009;12:120-134.

[6] 王沛,董强,雪原.腰椎间盘突出病变部的压力测定及病理学意义[J].中华骨科杂志,2002,22(3):129-133.

[7] 李勇,彭立阳,陈荣彬.三种纤维环处理方式对腰椎生物力学影响的三维有限元分析[J].中国中西医结合外科杂志,2019,25(4):509-514.

[8] LEITE PMS, MENDONCA ARC, MACIEL LYS, et al. Does Electroacupuncture treatment reduce pain and change quantitative sensory testing responses in patients with chronic nonspecific low back pain? A randomized controlled clinical trial. Evid Based Complement Alternat Med. 2018;2018:8586746.

[9] LI J, HE J, LI H, et al. Proportion of neuropathic pain in the back region in chronic low back pain patients-a multicenter investigation. Sci Rep. 2018;8(1):16537.

[10] CHOI KC, SHIM HK, PARK CJ, et al. Usefulness of percutaneous endoscopic lumbar foraminoplasty for lumbar disc herniation. World Neurosurg. 2017;106:484492.

[11] ZHANG JJ, CUI HP, DING Y, et al. Endoscopic foraminoplasty and neuro-ventral decompression for the treatment of lumbar disc herniation combining with lateral recess stenosis. J Spine. 2018; 7(2):412-417.

[12] OKOSUKA J, OSHIMA Y, KANEKO T, et al. Advantages and disadvantages of posterolateral approach for percutaneous endoscopic lumbar discectomy. J Spine Surg. 2016;2(3):158-166.

[13] ZHONG ZC, WEI SH, WANG JP, et al. Finite element analysis of the lumbar spine with a new cage using a topology optimization method. Med Eng Phys. 2006;1:90-98.

[14] WILCOX RK. The influence of material property and morphological parameters on specimen-specific finite element models of porcine vertebral bodies. J Biomech. 2007; 3:669-673.

[15] WHEELDON JA, PINTAR FA, KNOWLES S, et al. Experimental flexion/extension data corridors for validation of finite element models of the young, normal cervical spine. J Biomech. 2006; 2:375-380.

[16] SAIRYO K, GOEL VK, VADAPALLI S, et al. Biomechanical comparison of lumbar spine with or without spina bifida occulta. A finite element analysis. Spinal Cord. 2006;7:440-444.

[17] 范建平,王传锋,魏显招,等.新型个体化三维矫形胸腰骶气囊支具的有限元研究[J].脊柱外科杂志,2013,11(6):348-353.

[18] 黄宇峰,潘福敏,赵卫东,等.腰椎后外侧融合椎弓根钉对相邻节段椎间盘影响的三维有限元分析[J].脊柱外科杂志,2016,14(6):362-366.

[19] PANJABI MM, KRAG MH, CHUNG TQ. Effects of disc injury on mechanical behavior of the human spine. Spine(Phila Pa 1976). 1984;9(7):707-713.

[20] 文毅,苏峰,刘肃,等.L₄₋₅椎体有限元模型建立及退变椎间盘力学分析[J].中国组织工程研究杂志,2019,23(8):1222-1227.

[21] 赵凡,刘正,王炳强,等.有限元模拟单节段腰椎小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.

[22] 阮朝阳,何永清,增强华,等.腰椎间孔成形幅度对关节突关节应力变化的有限元分析[J].脊柱外科杂志,2017,15(6):357-365.

[23] 李振宙,侯树勋.经皮侧后路腰椎间孔成形与经椎间孔完全内镜下腰椎间盘摘除术[J].中国骨与关节杂志,2014,3(8):621-625.

[24] ABUMI K, PANJABI MM, KRAMER KM, et al. Biomechanical evaluation of lumbar spinal stability after graded facetectomies. Spine(Phila Pa 1976). 1990;15(11):1142-1147.

[25] 安民,袁野,曹虹,等.单双侧小关节分级切除的有限元分析[J].中国临床解剖学杂志,2002,20(6):473-474.

[26] 王小平,梁真娇,杨芳梅,等.齿突下软骨基质融合部对枢椎骨折类型影响的有限元分析[J].脊柱外科杂志,2013,11(5):295-302.

[27] SHARMA M, LANGRANA NA, RODRIQUEZ J. Role of ligaments and facets in lumbar spinal stability. Spine. 1995; 20(8):887-900.

[28] ADAMS MA. The resistance to flexion of the lumbar intervertebral joint. Spine. 1980;5:245.

[29] 马剑雄,马信龙,骆巍,等.后部结构对腰椎前屈/后伸稳定性的影响[J].中国中西医结合外科杂志,2009,15(1):71-74.