

• 技术与方法 • doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2019.01.030

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*

余 洋¹,樊效鸿^{1△},顾党伟²,吴卫东³

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

[摘要] 目的 利用三维有限元法评估腰椎经皮内镜下不同的关节突成形部位对椎间盘力学的影响。

方法 建立正常的 L₃₋₅ 三维有限元模型, 模拟腰椎经皮内镜技术分别在 L₅ 上关节突“尖部”或“基底部”做直径 7.5 mm 的圆柱状骨切除以模拟椎间孔成形, 从而获得正常 L₃₋₅ 模型、关节突尖部成形模型和关节突基底部成形模型 3 种模型。给予特定加载条件, 比较 3 种模型在前屈、后伸、左右侧曲、左右旋转工况下 L_{4/5}、L_{3/4} 椎间盘应力变化情况。**结果** L₅ 上关节突尖部成形后在左右旋转及后伸状态下 L_{4/5} 椎间盘的最大应力均较正常明显增大, 以后伸状态最为明显; L₅ 上关节突基底部成形后在左右旋转状态下 L_{4/5} 椎间盘的最大应力较正常稍增大。L₅ 上关节突尖部、基底部成形后在 6 种不同运动状态下均对临近节段 L_{3/4} 椎间盘的应力变化影响均较小。**结论** 腰椎经皮内镜技术下, L₅ 上关节突尖部成形较基底部成形对 L_{4/5} 椎间盘的生物力学影响较大。L₅ 上关节突成形对临近节段 L_{3/4} 椎间盘的应力变化的影响较小。

[关键词] 腰椎经皮内镜; 关节突成型; 三维有限元

[中图法分类号] R681.5+3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2019)01-0120-04

The biomechanical effect of facet joint arthroplasty of different parts under lumbar percutaneous endoscopy on adjacent segment disc: a finite element analysis*

YU Yang¹, FAN Xiaohong^{1△}, GU Dangwei², WU Weidong³

(1. Department of Orthopaedics, the Affiliated Hospital of Chengdu University of T. C. M., Chengdu, Sichuan 610075, China; 2. Chengdu University of T. C. M., Chengdu, Sichuan 610075, China;
3. Guangdong Key Laboratory of Biomechanics, Southern Medical University, Guangzhou, Guangdong 510515, China)

[Abstract] **Objective** To evaluate the influence of facet joint arthroplasty of different parts under lumbar percutaneous on adjacent segment disc by using three-dimensional finite element method. **Methods** Estab-

lished a normal 3D finite element mode of L₃₋₅, simulate lumbar percutaneous endoscopy by doing cylindrical excision of bone whose diameter was 7.5 mm on the tip and basal part of L₅ facet joint respectively so that obtained three models, the first one was normal lumbar vertebra mode, the second one was the tip of the facet joint was shaped, the third one was the basal part of the facet joint was shaped. Compared the stress of intervertebral disc of L_{3/4} and L_{4/5} when they were in the states of flexion, extension, left and right lateral flexion, left and right rotation on specific loading conditions. **Results** When the second model of which the L₅ facet joint tip was shaped was in the states of extension, left rotation and right rotation, the stress of the intervertebral disc of L_{4/5} were more bigger than normal model, especially in the states of extension. When the third model of which the L₅ facet joint basal part was shaped in the states of left and right rotation, the biggest stress of the intervertebral disc of L_{4/5} was increased slightly. However, the model of L₅ facet joint tip or basal was shaped, the influence on the stress of the intervertebral disc of L_{3/4} was small, when the model was in the six states. **Conclusion** There would be more biomechanical influence on the intervertebral disc of L_{4/5} when the tip of L₅ facet joint is shaped than the basal of the L₅ facet joint is shaped under lumbar percutaneous endoscopy. And the influence of L₅ facet joint arthroplasty on the stress of intervertebral disc of L_{3/4} is small.

[Key words] lumbar percutaneous endoscopy; arthroplasty; three-dimensional finite element

* 基金项目: 四川省医学会重点课题(S17024)。 作者简介: 余洋(1985—), 主治医师, 硕士, 主要从事脊柱外科研究。 △ 通信作者, E-mail: fanxiaohongcd@foxmail.com。

腰椎经皮内镜作为临床常用的一种微创技术,具有手术损伤小、术中失血少、术后疼痛轻、下床活动早、康复快速等优点^[1-2]。椎间孔成形作为腰椎经皮内镜操作中的一项关键技术,虽然应用广泛,但关于椎间孔成形的部位和大小对相应节段或邻近节段的椎间盘应力变化的影响等问题还缺少细致的研究和确凿的证据^[3-4]。本研究通过三维有限元法分别模拟腰椎经皮内镜技术中在 L₅ 上关节突的尖部和基底部行椎间孔成形,研究不同的关节突成形部位对相应节段 L_{4/5} 和邻近节段 L_{3/4} 椎间盘力学的影响,现报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取 1 名健康男性志愿者,年龄 30 岁,体质量 70 kg,身高 175 cm,通过腰椎 X 射线、CT、磁共振(MRI)等检查排除腰椎畸形和腰椎退行性病变。

1.2 方法

1.2.1 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 Creo3.0、医学图像处理软件 Mimics16.0、逆向工程软件 Geomagic Studio12.0 用于三维模型建立;有限元分析软件 ANSYS15.0 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。

1.2.2 L_{3~5} 正常三维有限元模型建立 使用螺旋 CT 行 L_{3~5} 扫描,将扫描获得层厚为 0.625 mm 二维横断面以 DICOM 格式保存,再将 DICOM 文件录入 Mimics16.0 软件,在 Mimics 软件中建立 L_{3~5} 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 L_{3~5} 的正常三维有限元模型,见图 1。对模型中结构按照正常组织参数赋值^[5],见表 1。其起止点及横截面积尽可能模仿相关节段的解剖观察结论^[6-7],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^[8]。

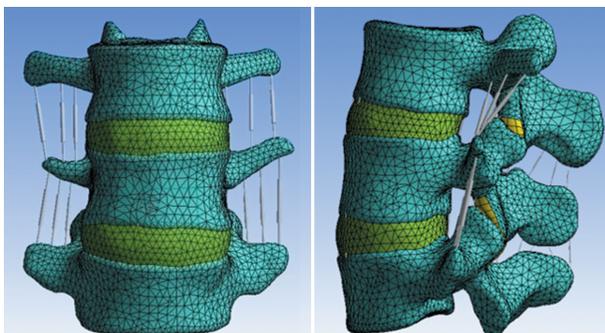


图 1 L_{3~5} 三维有限元模型

表 1 有限元模型的材料特性

项目	弹性模量 (Mpa)	泊松比
皮质骨	12 000.0	0.30
松质骨	100.0	0.20
关节软骨	25.0	0.40
髓核	1.0	0.49
纤维环	4.2	0.45
前纵韧带	7.8	0.30
后纵韧带	10.0	0.30
黄韧带	15.0	0.30
横突间韧带	10.0	0.30
关节囊韧带	7.5	0.30
棘间韧带	10.0	0.30
棘上韧带	8.0	0.30

1.2.3 正常模型的有效性验证 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^[9]生物力学实验的范围内,以此验证模型有效、可靠,见表 2。

表 2 模型验证结果($\bar{x} \pm s, ^\circ$)

项目	Shim 标本试验		L _{3~5} 有限元模型	
	L _{3/4}	L _{4/5}	L _{3/4}	L _{4/5}
前屈	4.2±0.8	5.4±0.9	3.9	4.6
后伸	2.9±0.5	2.9±0.5	3.3	3.2
左屈	3.5±1.0	4.4±1.1	3.5	3.4
右屈	3.5±1.0	4.4±1.1	3.5	3.4
左转	2.8±0.6	3.8±1.0	2.7	2.8
右旋	2.8±0.6	3.8±1.0	2.7	2.8

力矩均为 7.5 Nm

1.2.4 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,模拟腰椎经皮内镜技术,分别以 L₅ 的上关节突的尖部和基底部作为穿刺点,建立精确穿刺引导路线,在与冠状面 30° 夹角方向分别切除右侧关节突尖部或基底部(切除直径 7.5 mm),获得关节突尖部成形模型和关节突基底部成形模型,见图 2、3。

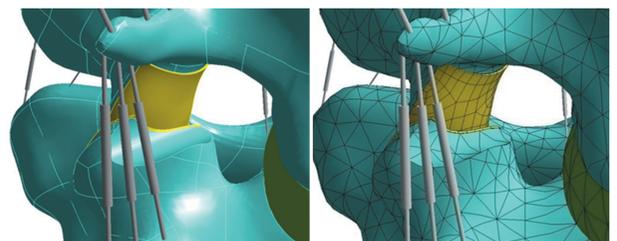


图 2 L₅ 上关节突尖部成形的三维有限元模型

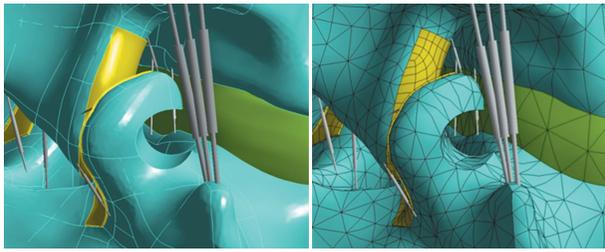


图3 L₅上关节突基底部成形的三维有限元模型

1.2.5 载荷和边界条件 本研究约束 L₅椎体下表面的自由度为 0, 在 L₃椎体上表面向终板施加负荷为 400 N 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 7.5 Nm 的纯扭矩, 分前屈、后伸、左右旋转和左右侧弯等 6 种运动状态加载。

2 结果

L₅上关节突尖部成形模型在前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋状态下 L_{4/5}椎间盘的最大应力分别为 0.387、0.543、0.446、0.427、0.510、0.501 MPa, 其中在后伸、左旋、右旋状态较正常模型明显增大。L₅上关节突基底部成形模型在前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋状态下 L_{4/5}椎间盘的最大应力分别为 0.375、0.492、0.442、0.426、0.487、0.482 MPa, 其中在左旋、右旋状态较正常增大, 见图 4。

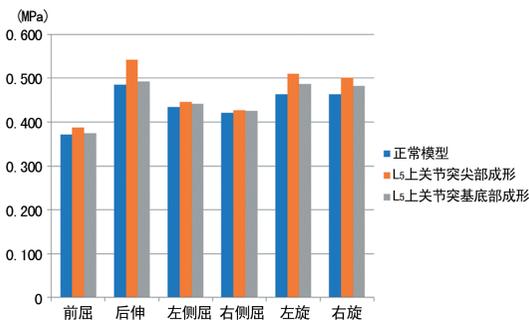


图4 L₅上关节突不同部位关节突成形后 L_{4/5}椎间盘应力最大值

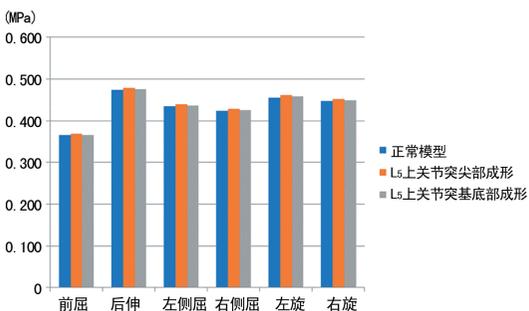


图5 L₅上关节突不同部位关节突成形后 L_{3/4}椎间盘应力最大值

L₅上关节突尖部成形模型在前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋状态下 L_{3/4}椎间盘的最大应力分别为 0.366、0.479、0.439、0.428、0.462、0.452 MPa, 与

正常类似。L₅上关节突基底部成形模型在前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋状态下 L_{3/4}椎间盘的最大应力分别为 0.366、0.476、0.437、0.426、0.459、0.449 MPa, 与正常类似, 见图 5。

3 讨论

3.1 腰椎经皮内镜生物力学研究现状 与传统开放手术比较, 腰椎经皮内镜手术具有切口小、软组织创伤小、术中出血少、术后恢复快、术后活动早、术后并发症明显减少、手术费用相对较低及伤口感染率明显降低等优点, 已逐渐成为腰椎间盘突出症患者接受度最高的治疗方式之一^[10-12]。在腰椎经皮内镜技术中, 关节突关节是操作通道置入的主要障碍, 不同技术流派或不同手术方式的主要区别在于对关节突关节成形的的方式、位置及大小的不同^[13-15]。虽然较传统的开放髓核摘除或经典的固定融合手术而言, 腰椎经皮内镜技术对邻近节段的影响更小, 但由于手术操作过程中大部分患者需要进行关节突的扩大成形, 对于不同的关节突成形位置、大小, 同样对本节段及邻近节段的生物力学会造成一定的影响^[13]。由于目前关于不同部位的椎间孔成形后对腰椎本节段及邻近节段退变影响的相关研究较少, 本研究首先建立正常的 L₃₋₅三维有限元模型并对其进行有效性验证, 在正常模型的基础上模拟术中采用外直径 7.5 mm 环锯对 L₅上关节突成型的情况, 以与冠状面 30°夹角方向分别切除 L₅右侧关节突尖部或基底部, 切除直径为 7.5 mm 的圆柱状骨性区域, 以此模拟不同部位的关节突成形, 便于对其进行 L_{4/5}及 L_{3/4}椎间盘的相关应力变化进行分析。

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 分别对正常模型, L₅上关节突尖部成形模型及 L₅上关节突基底部成形模型进行下表面约束, 施加轴向载荷和不同方向的侧向应力, 分析其在本节段 L_{4/5}及邻近节段 L_{3/4}椎间盘在前屈、后伸、侧屈、旋转状态下的应力变化情况。通过分析得知 L₅上关节突尖部成型模型在后伸、左旋、右旋状态下 L_{4/5}椎间盘的最大应力分别为 0.543、0.510、0.501 MPa 均较正常模型明显增大, 分别增大 11.7%、10.0%、8.2%, 其中以后伸状态最为明显。L₅上关节突基底部成形模型在左旋、右旋状态下 L_{4/5}椎间盘的最大应力分别为 0.487、0.482 MPa 分别较正常模型增加 5.2%、4.1%。这表明不同部位的关节突成形后, 在左旋和右旋状态下均会对邻近节段椎间盘应力造成影响, 其中以关节突尖部成形的影响较为明显。在 L₅上关节突尖部的成形除在旋转状态下邻近节段椎间盘最大应力增大外, 在后伸展状态邻近节段椎间盘的最大应力也明显增大。

L₅上关节突尖部成形模型在前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋状态下临近节段 L_{3/4} 椎间盘的最大应力分别为 0.369、0.479、0.439、0.428、0.462、0.452 MPa;其基底部成形模型在上述 6 个状态临近节段 L_{3/4} 椎间盘的最大应力分别为 0.366、0.476、0.437、0.426、0.459、0.449 MPa。上述两个成形部位在 6 种不同运动状态下临近节段 L_{3/4} 椎间盘的最大应力均较正常模型无明显变化,说明腰椎经皮内镜技术在进行椎间孔扩大成形时切除了部分关节突但对临近节段的生物力学影响较小。

综上所述,本研究建立的 L₃₋₅ 正常三维有限元模型具有良好的几何外形,在其基础上建立的 L₅上关节突尖部和基底部成形的三维有限元模型能够很好地模拟临床状况。对其进行力学分析得知 L₅上关节突尖部和基底部成形后对 L_{4/5} 椎间盘的应力情况均产生一定的影响,其中在 L₅上关节突尖部成形的影响明显大于基底部的成形。在 L₅上关节突不同部位的椎间孔成型均对临近节段 L_{3/4} 椎间盘应力变化的影响较小。

参考文献

[1] TENENBAUM S, ARZI H, HERMAN A, et al. Percutaneous posterolateral transforaminal endoscopic discectomy: clinical outcome, complications, and learning curve evaluation[J]. *Surg Technol Int*, 2011, 21: 278-283.

[2] LI Z Z, HOU S X, SHANG W L et al. Modified percutaneous lumbar foraminoplasty and percutaneous endoscopic lumbar discectomy: instrument design, technique notes, and 5 years follow-up[J]. *Pain Physician*, 2017, 20(1): E85-98.

[3] HASSAN A, GUS V, ANDREW P, et al. Biomechanics of the posterior lumbar articulating elements[J]. *Neurosurg Focus*, 2007, 22(1): E1-6.

[4] 唐谨, 刘鏐, 李莹, 吴从俊, 等. 腰椎间盘突出症椎间孔镜术后复发的原因分析及相关预防对策[J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2017, 25(2): 75-78.

[5] ZHANG Q H, TEO E C, NG W H, et al. Finite element

analysis of momentrotation relationships for human cervical spine[J]. *J Biomech*, 2006, 39(1): 189-193.

[6] 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.

[7] 黄菊英, 李海云, 吴浩. 腰椎间盘突出症力学特征的仿真计算方法[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(1): 96-101.

[8] BROLIN 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.

[9] SHIM C S, PARK S W, LEE S H, et al. Biomechanical evaluation of an interspinous stabilizing device, locker[J]. *Spine*, 2008, 33(22): E820-827.

[10] HOOGLAND T, SCHUBERT M, MIKLITZ B, et al. Transforaminal posterolateral endoscopic discectomy with or without the combination of low-dose chymopapain: a prospective randomized study in 280 consecutive cases [J]. *Spine*, 2006, 31(24): E890-897.

[11] HOOGLAND T, VAN DEN BREKEL DIJKSTRA K, SCHUBERT M, et al. Endoscopic transforaminal discectomy for recurrent lumbar disc herniation: a prospective, cohort evaluation of 262 consecutive cases [J]. *Spine*, 2008, 33(9): 973-978.

[12] YEUNG A T, TSOU P M. Posterolateral endoscopic excision for lumbar disc herniation: surgical technique, outcome, and complications in 307 consecutive cases [J]. *Spine*, 2002, 27(7): 722-731.

[13] 阮朝阳, 何永春, 曾强华, 等. 腰椎椎间孔成形幅度对关节突压力变化的有限元分析[J]. *脊柱外科杂志*, 2017, 15(6): 357-360.

[14] 李振宙, 侯树勋, 吴闻文, 等. 经皮侧后路腰椎间孔成形术对腰椎解剖及生物力学影响的实验研究[J]. *中国骨与关节杂志*, 2010, 9(6): 503-508.

[15] 李嵩鹏, 周游, 李定, 等. 椎间孔镜 (TESSYS) 入路相关 L₅-S₁ 阶段椎间孔解剖学观察[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2015, 30(2): 129-133.

(收稿日期: 2018-06-18 修回日期: 2018-10-01)

(上接第 119 页)

[11] 刘璐. 医用壳聚糖水凝胶研究进展[J]. *科技创新与应用*, 2017, 33(8): 87.

[12] ISHIKAWA T, WATANABE Y, TAKAYAMA K, et al. Effect of hydroxypropylmethylcellulose (HPMC) on the release profiles and bioavailability of a poorly water-solu-

ble drug from tablets prepared using macrogol and HPMC[J]. *Int J Pharm*, 2000, 202(1): 173-178.

[13] 王倩倩, 陈大俊. 壳聚糖可注射水凝胶制备及药物缓释行为[J]. *化工新型材料*, 2017, 45(9): 150-152.

(收稿日期: 2018-05-18 修回日期: 2018-09-08)