

纤维环切口对椎间盘应力分布影响的有限元分析

李勇¹ 白杰² 陈荣彬¹

[摘要] 目的:采用三维有限元分析软件建立正常腰椎及纤维环切口模型,分析纤维环切开后在不同生理载荷下椎间盘的应力分布变化。方法:建立正常人体 L_{4~5} 椎间盘正常模型及纤维环切口模型,导入 ANSYS 软件进行分析,施加前屈、后伸、侧弯和旋转生理载荷,计算在不同载荷下正常模型与纤维环切口模型椎间盘不同部位的应力,分析椎间盘应力分布变化。结果:构建了腰椎间盘及纤维环环形切开的三维有限元模型,纤维环切开后,在前屈、后伸载荷下,纤维环、髓核应力均集中于纤维环切口处;在各载荷下,椎间盘、髓核、纤维环的最大应力值较正常模型均显著增加。结论:纤维环切开后椎间盘的承载功能明显下降,其髓核和纤维环的应力分布发生变化,这可能是椎间盘再次突出的原因之一。

[关键词] 椎间盘;纤维环;有限元;应力分布

[中图分类号] R-33 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1005-0205(2019)04-0007-04

Finite Element Analysis of the Change of Stress Distribution on Intervertebral Disc After Discectomy

LI Yong¹ BAI Jie² CHEN Rongbin¹

¹ Third Department of Orthopaedics, Zhuhai Hospital of Guangdong Hospital of Traditional Chinese Medicine, Zhuhai 519015, Guangdong China;

² Second Clinical Medicine College, Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510405, China.

Abstract Objective: By using three-dimensional finite element analysis, to establish a normal lumbar spine and an annulus fibrosus incision model, and to analyze the changes of the stress distribution on the intervertebral disc after the annulus fibrosus incision under different physiological loads. **Methods:** A normal human L4/5 intervertebral disc model and an annulus fibrosus incision model were established. With the aid of the analysis software, ANSYS, the normal disc and post-incision disc were analyzed with loads generated from four physiological movements, namely anterior flexion, posterior extension, lateral bending and rotation. Thus, changes in distribution on the intervertebral disc were analyzed. **Results:** A three-dimensional finite element model of lumbar intervertebral disc and annulus fibrosus were constructed. Under the anterior flexion and posterior extension loads, the stresses of both the annulus fibrosus and the nucleus were found to concentrate at the incision site after the discectomy. Also, under all types of loads, the maximum stress values of the intervertebral disc, nucleus pulposus and annulus fibrosus were significantly higher than that of the normal model. **Conclusion:** The bearing capacity of the intervertebral disc after the incision of the annulus fibrosus is significantly decreased and the stress distribution of the nucleus pulposus and the annulus fibrosus is changed, which may be one of the reasons to develop the recurrence of the intervertebral disc protrusion.

Keywords: intervertebral disc; annular fibrosus; finite element; stress distribution

腰椎间盘突出症是脊柱骨科临床常见的疾病,髓核摘除术作为一种有效的治疗方法在临床上应用广泛。但有文献表明,髓核摘除术后的复发率为 5%~18%^[1],不论是哪一种切口处理方式,均存在术后复发问题。关于纤维环切开后椎间盘应力分布改变的研究鲜有报道。本文通过建立 L_{4~5} 椎间盘纤维环环形切口模型,观察其在各方向运动中的应力分布,并与正常椎间盘比较,探讨纤维环切开后椎间盘的应力分布变化。

1 材料与方法

1.1 三维有限元模型的建立

本实验选取 1 名 47 岁健康成年男性志愿者,身高 170 cm,体质量 70 kg,无腰部外伤史及腰部病史,签署相关知情同意书,并已完善脊柱 MRI 及 CT 等相关检查,排除与脊柱相关疾患,通过广东省中医院伦理道德委员会批准,利用 CT 采集志愿者腰椎图像数据,以 DICOM 数据格式导入光盘储存。

1.2 正常腰椎模型的建立

将收集的 CT 图像数据以 DICOM 格式导入 Mimics 14.5 Software (Materialise Company, Leu-

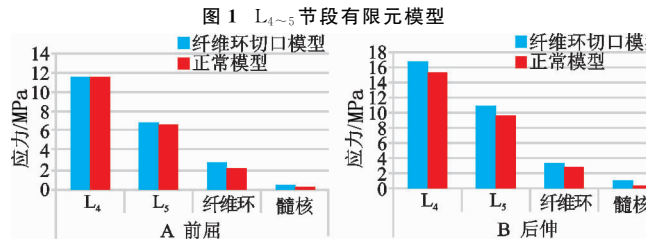
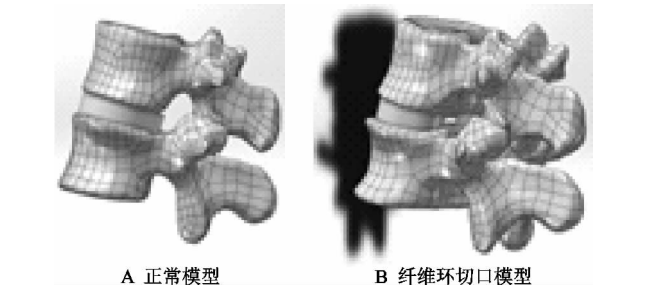
¹ 广东省中医院珠海分院骨三科(广东 珠海,519015)

² 广州中医药大学第二临床医学院

ven,Belgium)软件中,参考方新果等^[2]及姜广宗等^[3]建模过程,选取合适的方位和灰度阈值,对图像数据进行分割,保存L₄,L₅节段图像数据并生成STL文件,将STL文件导入Geomagic Studio 2013 Software (Raindrop Company,Marble Hill,USA)逆向工程软件对L_{4~5}节段模型进行进一步完善修复,并完成对腰椎的终板、纤维环及髓核模型的建立。其中髓核比例为腰椎间盘46%,纤维环比例为54%,终板厚度为0.5 mm^[4];导出Step文件,将Step文件导入Solidworks 2017 Software(Dassault Systemes S. A Company,Massachusetts,USA)中,根据腰椎具体单元材质赋予材料属性(见表1),并参考相关文献^[5-7],构建L_{4~5}椎体模型皮质骨、纤维环、髓核、终板、小关节面模型;参考国际腰椎研究会(ISSLS)分型,使用Solidworks2017软件建立后外侧突出型椎间盘模型,根据真实内镜下髓核摘除术的手术方式,磨除部分关节突,将突出的椎间盘组织切除,构建纤维环切口模型。L_{4~5}节段有限元模型见图1。

表1 L_{4~5}节段有限元模型各组成部分单元类型和材料参数

材料	弹性模量/MPa	泊松比	单元类型
椎体皮质骨	12 000	0.30	四面体单元
纤维环	4.2	0.45	四面体单元
髓核	1	0.49	四面体单元
终板	500	0.40	四面体单元
软骨	10	0.30	四面体单元
缝合线	11 000	0.35	四面体单元
前纵韧带	7.8	0.30	四面体单元
后纵韧带	10	0.30	四面体单元
黄韧带	15	0.30	四面体单元
关节囊韧带	7.5	0.30	四面体单元
棘间韧带	10	0.30	四面体单元
棘上韧带	8	0.30	四面体单元
横突间韧带	10	0.30	四面体单元

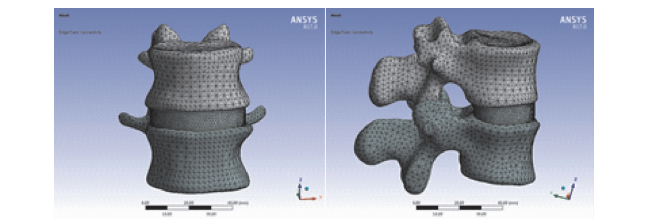


2.2 两组模型L_{4~5}节段椎间盘各部分所受最大应力点及应力集中位置
应力云图显示在前屈、后伸、侧弯及旋转状态下,

将建立的L_{4~5}模型导入ANSYS17.0 Software (ANSYS Company,PA,USA)中进行Mesh网格划分,椎体皮质骨及后部结构均采用四面体网格单元,同时对后部结构进一步细化,而椎体部分结构的网格相对大一些,在单元总数尽可能少的情况下保证计算精度。模型中包括椎体39 477个单元,纤维环33 952个单元,髓核28 301个单元,终板17 731个单元和软骨761个单元(见表2),得到的L_{4~5}椎体及椎间盘网格模型见图2。

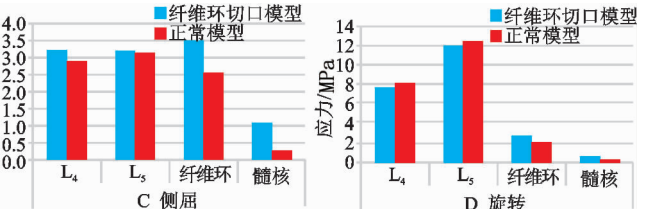
表2 腰椎模型单元数

材料	单元
椎体	39 477
纤维环	33 952
髓核	28 301
终板	17 731
软骨	761



1.3 边界及负载条件
约束并固定L₅椎体下表面各方向的自由度,L₄,L₅椎体由椎间盘、纤维软骨及关节突关节软骨相连,其中关节突关节之间的摩擦因数定义为0,对L₄上关节面施加500 N的轴向压力模拟正常人体质量,以7.5 N·m扭矩的载荷,分别模拟正常腰椎在前屈、后伸、侧弯、旋转情况下的受力情况,利用Von Mises软件获取L₄椎体、L₅椎体、椎间盘、纤维环、髓核的应力分布情况及应力云图,研究纤维环及髓核在这些负载下所发生的力改变。

2 结果
2.1 两组模型L_{4~5}椎体节段各部分应力比较
与正常腰椎模型相比,在前屈、后伸、侧屈及旋转状态下,L₄椎体与L₅椎体所受的应力跟正常相比无明显变化,但在侧屈状态下,纤维环切口模型中髓核及纤维环所受的应力变化较正常模型大,见图3。



纤维环切口模型的髓核最大应力点及应力集中位置均是切口处,而纤维环的最大应力点及应力集中位置均与切口密切相关,见图4-5。

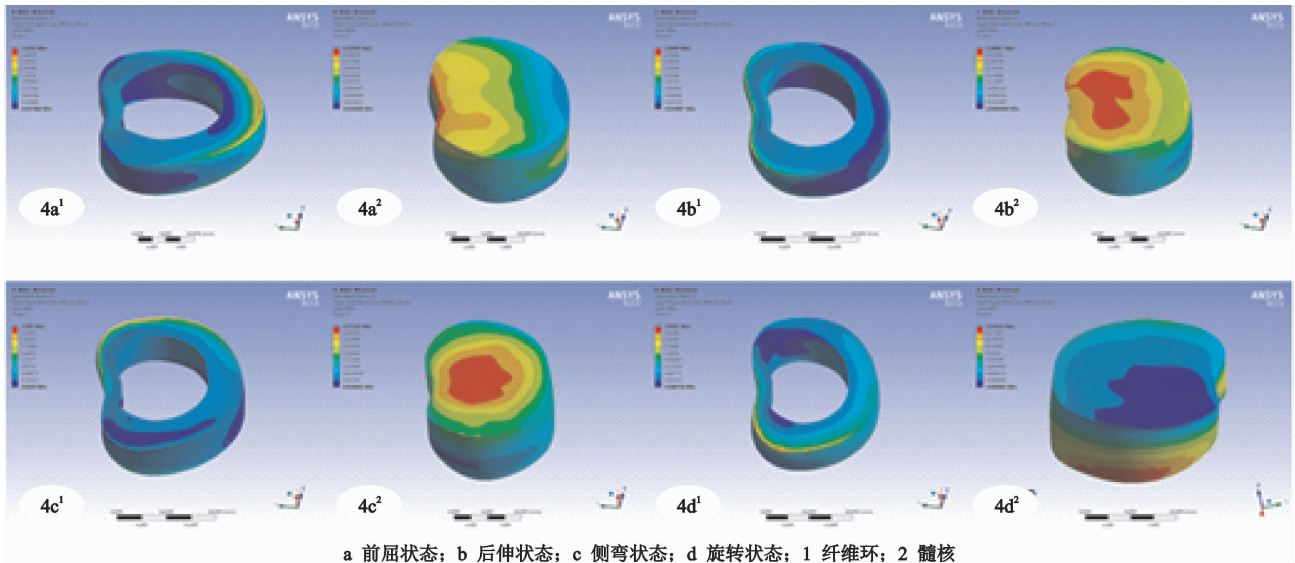


图 4 正常模型纤维环及髓核应力分布图

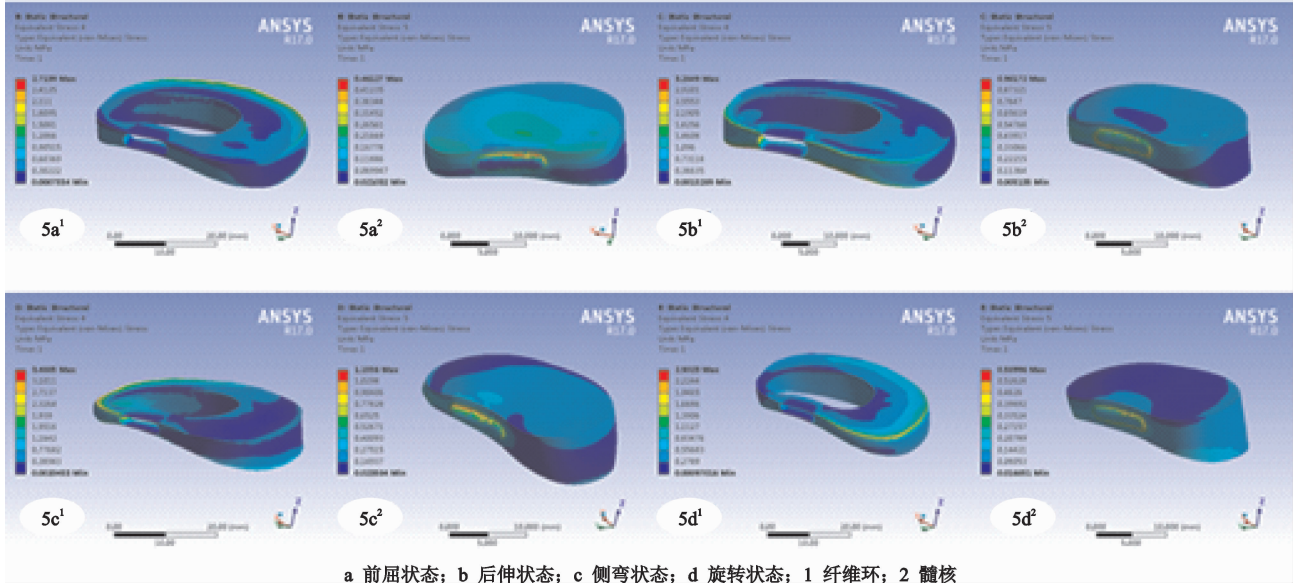


图 5 纤维环切口模型纤维环及髓核应力分布图

3 讨论

近年来腰椎间盘突出症患者日益增多,髓核摘除术相比传统手术具有创伤小、术后恢复快的优点,成为腰椎间盘突出症手术治疗的主要方式之一。文献表明^[8-10]复发性腰椎间盘突出症患者多见于 L_{4~5} 节段,可能与此节段承重较大有关。术后 L₄ 及 L₅ 椎体、髓核及纤维环的应力分布均有改变,以致术后复发的概率增加。为此,本研究利用三维有限元分析软件分别对正常模型及纤维环切口模型进行模拟生物力学及应力分布比较,以探讨髓核摘除术后髓核及纤维环的应力分布改变,从而为解决术后复发率高等问题提供理论依据。

有限元法与传统生物力学方法相比最大的优点就是能反映构件的全域性信息,在结构应力分析方面具有独特的优势^[11]。前人对脊柱生物力学的有限元模型不断完善,建立了脊柱各类模型并可模拟生物力学

实验,提供可靠的科学实验数据,同时验证了有限元分析的有效性,以避免因缺乏实体标本等困境^[12-14]。为保证实验的准确性,本研究依据既往文献报道及前人经验,建立腰椎有限元模型^[15],并在此基础上模拟真实手术方案,成功建立了髓核摘除术后腰椎模型。

腰椎间盘突出症术后的复发是多因素影响的结果,而生物力学特性的改变促使椎间盘加速退化。其中椎间盘的纤维环是维持脊柱稳定性的重要结构,纤维环损伤对椎间盘生物力学性能有很大影响,纤维环破裂可以导致运动节段在承受载荷时各向活动度的加大,对其即刻稳定性造成影响并导致纤维环应力分布不均、小关节负荷加重等一系列的问题^[16]。本研究的应力分布云图结果显示纤维环切开后,髓核最大应力点及应力集中处均在切口处,iv 脊柱正常活动时,纤维环切口处的应力较集中,虽然切除了突出物,但切口位置的应力集中影响瘢痕组织的形成及周围应力的改

变,导致瘢痕组织在应力的影响下过度生长,并导致神经根再次受压的风险增加^[17]。其次,纤维环破坏后导致椎间盘发生明显退变,生物力学结构发生改变,椎间隙高度丢失,使其功能和强度不能恢复至正常状态。而术中切口对纤维环连续性破坏更为明显,椎间盘内部信号低且不均匀,椎间隙高度丢失程度更大^[18]。由于人类日常生活以站立及坐位为主,腰椎负重大,所以椎间盘应力改变在人体上表现的会更明显^[19,20]。另外,吴青坡等^[21]研究也表明纤维环切开后纤维环最大应力都有所升高,从生物力学角度看,髓核摘除后,椎间盘的内压瞬间下降,纤维环承担了全部载荷,因而局部应力增大,导致髓核摘除进一步加速椎间盘的退变。这就解释术后患者主观满意率低及复发率高的问题,术后髓核及纤维环切口处负重后较术前应力不断增加,使椎间盘承担过量的负荷,以致切口处不断磨损,加速椎间盘的退化,从而影响腰椎的稳定性,加重腰椎间盘突出症的症状。

综上所述,本文根据真实手术方案成功建立 L₄₋₅ 节段髓核摘除术后模型。而纤维环切口模型中髓核及纤维环的应力升高,导致术后复发率增高。术后切口处应力集中,笔者建议术后早期应告知患者避免负重下地活动,以免造成瘢痕组织过度生长,再次出现或加重腰椎间盘突出症状,其次在术后早期应尽可能避免过屈过伸等运动。本实验由于技术条件受限未将肌肉、韧带等软组织考虑在内,同时也欠缺远期复发率的观察,但有限元分析为临床,尤其是脊柱方面提供了新的研究途径,研究术后椎间盘应力分布有助于降低复发率并为改进手术方案提供有力的支持。

参考文献

- [1] AIZAWA T, OZAWA H, KUSAKABE T, et al. Reoperation for recurrent lumbar disc herniation: a study over a 20-year period in a Japanese population[J]. J Orthop Sci, 2012, 17(2): 107-113.
- [2] 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.
- [3] 姜广宗, 李学锋, 聂林, 等. 利用 MIMICS 和 ABAQUS 建立正常人颈椎的三维有限元模型[J]. 中国矫形外科杂志, 2013, 21(11): 1114-1120.
- [4] 郭清华, 黄鹏. 经皮内镜腰椎间盘髓核摘除术后脊柱生物力学改变的有限元分析[J]. 山东医药, 2018, 58(13): 74-77.
- [5] 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.
- [6] 秦计生, 王昱, 彭雄奇, 等. 全腰椎三维有限元模型的建立及其有效性验证[J]. 医用生物力学, 2013, 28(3): 321-325.
- [7] 项斌, 都承斐, 赵美雅, 等. 全腰椎有限元模态分析[J]. 医用生物力学, 2014, 29(2): 154-160.
- [8] 郭涛, 魏人前, 邓睿. 腰椎间盘突出症术后复发的相关因素分析[J]. 西部医学, 2016, 28(8): 1110-1113.
- [9] 刘宁. 腰椎间盘突出复发相关因素分析及预防策略[J]. 现代诊断与治疗, 2012, 10(23): 1753-1754.
- [10] 毛克亚, 王岩, 肖嵩华, 等. 微创下腰椎经椎间孔椎体间融合术混合内固定治疗复发性腰椎间盘突出症的可行性研究[J]. 中华外科杂志, 2013, 51(8): 723-727.
- [11] 刘治华, 管文浩, 檀中奇. 基于 CT 图像构建的腰椎三维有限元模型[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(26): 4760-4764.
- [12] DU H G, LIAO S H, JIANG Z, et al. Biomechanical analysis of press extension technique on degenerative lumbar with disc herniation and staggered facet joint[J]. Saudi Pharm J, 2016, 24(3): 305-311.
- [13] ROHLMANN A, NELLER S, BERGMANN G, et al. Effect of an internal fixator and a bone graft on intersegmental spinal motion and intradiscal pressure in the adjacent regions[J]. Eur Spine J, 2001, 10(4): 301-308.
- [14] ZANDER T, ROHLMANN A, CALISSE J, et al. Estimation of muscle forces in the lumbar spine during upper body inclination[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2001, 16(Suppl): 73-80.
- [15] KARIMI M T, EBRAHIMI M H, MOHAMMADI A, et al. Evaluation of the influences of various force magnitudes and configurations on scoliotic curve correction using finite element analysis[J]. Australas Phys Eng Sci Med, 2017, 40(1): 231-236.
- [16] 蔡学依, 陈录兴, 钟桥, 等. 腰椎间盘突出症髓核摘除术中纤维环切口关闭与开放对后期疗效的影响[J]. 四川医学, 2013, 34(9): 1350-1352.
- [17] 刘宪义, 李淳德, 孙浩林, 等. 椎间盘源性痛—射频消融术和椎间孔镜下椎间盘摘除术的疗效对比[J]. 脊柱外科杂志, 2012, 10(5): 277-279.
- [18] 张福勇, 吴小涛, 王运涛. 纤维环退变及其修复的研究现状[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2008, 18(9): 715-719.
- [19] 丁文元, 申勇, 郭金库, 等. 人工生物膜修复椎间盘纤维环的研究[J]. 中华实验外科杂志, 2010, 27(11): 1636-1638.
- [20] 辛洪奎, 张超, 阮狄克. 骨形态发生蛋白-7 及其对椎间盘退变修复作用的研究进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2011, 21(5): 416-418.
- [21] 吴青坡, 张春霖, 张美超, 等. 两种术式髓核摘除对腰椎生物力学影响的有限元分析[J]. 医用生物力学, 2007, 22(3): 298-301.

(收稿日期: 2018-12-12)