

基础研究

腰椎单侧椎弓根螺钉固定的三维有限元分析

陈志明¹, 马华松¹, 赵杰², 陈博³

(1 解放军第 306 医院骨科 全军脊柱外科中心 100101 北京市; 2 上海市第九人民医院骨科 200011 上海市;

3 上海交通大学伤骨科研究所 200025 上海市)

【摘要】目的:建立人正常 L3~L5 节段三维有限元模型,分析腰椎单侧椎弓根螺钉固定融合的生物力学特性。**方法:**基于人正常 L3~L5 节段的 CT 扫描数据,利用 Geomagic Studio 9.0、Simpleware 2.0、Abaqus 6.7 软件建立人正常 L3~L5 三维有限元模型(INT),并在此基础上分别建立 L4/5 单侧椎弓根螺钉内固定加后外侧植骨融合模型(M1)、单侧椎弓根螺钉内固定加单枚融合器置入模型(M2)及双侧椎弓根螺钉内固定加单枚融合器置入模型(M3)。在 L3 上表面施加 500N 预载荷,再施加 10N·m 的力矩模拟腰椎前屈、后伸、侧屈及旋转等生理活动,观察不同工况下 L4~L5 节段角位移、椎弓根螺钉及融合器应力分布情况。**结果:**各工况下 M1、M2、M3 角位移均较 INT 减少,M3 减少最明显;除右屈和后伸外,其他工况下 M2 与 M3 的角位移减少程度相当,而 M1 在左、右侧屈及左、右旋转时稳定性较差。M1 的螺钉应力峰值明显高于 M2 和 M3,尤以左屈及后伸载荷时螺钉应力峰值最大,M2 螺钉应力峰值高于 M3,M2 椎间融合器的应力峰值在各种工况下均高于 M3。**结论:**单侧椎弓根螺钉固定不能很好地控制侧屈和旋转载荷,椎弓根螺钉承受较大的应力;附加单枚融合器置入可以重建融合节段的稳定性,明显减少螺钉的应力。

【关键词】腰椎;有限元模型;椎弓根螺钉;单侧固定;椎间融合

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2010.08.18

中图分类号:R318.01,R687.3 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2010)-08-0684-05

Three-dimensional finite element analyses of unilateral pedicle screws fixation in lumbar spine/CHEN Zhiming, MA Huasong, ZHAO Jie, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2010, 20(8):684-688

【Abstract】 Objective: To construct a normal L3-L5 spinal segment model by using finite element method and investigate the biomechanical characteristics of unilateral pedicle screws fixation. **Method:** A three-dimensional finite element model of an intact L3-L5 segment was constructed by using computed tomography scans of a healthy male. The commercially available finite element program Geomagic Studio 9.0, Simpleware 2.0 and Abaqus 6.7 were applied to model. Based on the intact L3-L5 model (INT), new models were generated by simulating unilateral pedicle screws fixation and posterolateral fusion model (M1), unilateral pedicle screws fixation with a single cage insertion model (M2), and bilateral pedicle screws fixation with a single cage insertion model (M3). 500N preload was added on the superior surface of the L3 vertebral body, followed by load of 10N·m torque to simulate L4/5 flexion-extension, lateral bending and axial rotation, the L4/5 angular variation and stress distribution in pedicle screw and cage under different load were documented. **Result:** The angular variation in M1, M2, and M3 decreased significantly compared with normal, the angular variation in M3 showed similar with that in M2 under all direction except right lateral bending and extension, and M1 showed less stability under lateral bending and axial rotation. The pedicle peak stress in M1 was markedly higher than that in M2 and M3, especially high on left lateral bending and extension. The pedicle peak stress in M2 was markedly higher than that in M3, and the cage peak stress in M2 was higher than that in M3 on all direction. **Conclusion:** Unilateral pedicle screws fixation cannot provide sufficient stability in lateral bending and axial rotation, pedicle screws endure more stress. Unilateral pedicle screws plus cage instrumentation can restore the stability as well as share the stress of pedicle screws.

【Key words】 Lumbar spine; Finite element model; Pedicle screw; Unilateral fixation; Lumbar fusion

【Author's address】 Department of Orthopaedics, 306th Hospital of PLA, Beijing, 100101, China

第一作者简介:男(1974-),主治医师,医学博士,研究方向:脊柱外科

电话:(010)66356729-2261 E-mail:czm306@163.com

自椎间融合器(cage)应用于临床后,后路椎间融合器置入加短节段椎弓根螺钉固定成为治疗腰椎退变性疾病的主要方法之一。目前,临床上行后路腰椎椎体间融合术多采用双侧椎弓根螺钉置入附加双枚或单枚融合器置入的术式。也有采用单侧椎弓根螺钉固定的报道^[1],但缺乏此方面的生物力学研究。本研究在人正常 L3~L5 三维有限元模型的基础上,建立腰椎不同固定融合的三维有限元模型,测量前屈、后伸、侧屈及旋转各工况下各模型的稳定性、椎弓根螺钉和融合器应力,探讨单侧椎弓根螺钉固定的稳定性和可行性,为临床应用提供理论力学依据。

1 资料和方法

1.1 三维有限元模型建立

健康男性成年志愿者 1 例(35 岁,身高 172cm,体重 62kg),既往无腰椎疾病史,拍摄腰椎 X 线片排除腰椎病变。用 64 排螺旋 CT 机从 L3 上终板至 L5 下终板进行连续扫描,层厚 1.25mm,以通用 DICOM 3.0 格式读入医学有限元建模软件 Simpleware 2.0,建立 L3~L5 椎体的 STL 三角网格模型,然后导入逆向工程软件 Geomagic 8.0 中进行修补与优化,生成实体模型。利用有限元软件 Abaqus 6.7,在实体模型的基础上,补充建立皮

质骨、松质骨、椎间盘、前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘间韧带、棘上韧带等结构;将上、下相邻小关节面用接触单元进行处理,以保证小关节面在维持脊柱结构功能中的正常作用。参考相关文献^[2-3],采用合适的单元类型和材料性质,对模型进行有限元网格划分,将各部位材料的弹性模量、泊松比等材料系数及特征值输入模型(表 1),完成人正常 L3~L5 节段有限元模型(INT)的建立(图 1)。

1.2 内固定模型建立

模拟 CD-Legacy 椎弓根螺钉固定,螺钉直径 6.5mm,长 50mm;螺钉弹性模量为 110 000MPa,泊松比为 0.3。螺钉设计成圆柱形,与椎体的关系设计成弹性固定,钉与连接棒设计为一体化。椎间融合器为插入式融合器,长度为 32mm,弹性模量为 3 700MPa,泊松比为 0.25。表面设计为倒齿状多面体,与椎体终板接触为面性接触,融合器内充填松质骨,放置深度为融合器后缘于椎体后缘前 2mm 处。

利用三维重建软件分别建立单侧椎弓根螺钉内固定+后外侧植骨融合模型(M1),单侧椎弓根螺钉内固定+单枚椎间融合器置入模型(M2),双侧椎弓根螺钉内固定+单枚椎间融合器置入模型(M3)。设定各种融合术式均达骨性融合。实验模型的设计完全按临床手术方法:M1,去除 L4 左侧

表 1 有限元模型的单元划分及材料常数

结构	单元类型	弹性模量(MPa)	泊松比	横断面积(mm ²)	单元数目
椎体					
皮质骨	4节点四面体	12000	0.3	—	94535
松质骨	4节点四面体	100	0.2	—	529858
后方结构					
骨	4节点四面体	3500	0.25	—	28568
小关节软骨	4节点四面体	25	0.25	—	5668
椎间盘					
髓核	4节点四面体	1.0	0.499	—	15684
基质	4节点四面体	4.2	0.45	—	32168
纤维	两节点绳索式	175	—	0.76	65384
韧带					
前纵韧带	两节点绳索式	7.8($\varepsilon < 12\%$)20($\varepsilon > 12\%$)	—	63.7	24
后纵韧带	两节点绳索式	10($\varepsilon < 11\%$)20($\varepsilon > 11\%$)	—	20	24
黄韧带	两节点绳索式	1.5($\varepsilon < 6.2\%$)1.9($\varepsilon > 6.2\%$)	—	40	6
关节囊韧带	两节点绳索式	7.5($\varepsilon < 25\%$)33($\varepsilon > 25\%$)	—	30	12
横突间韧带	两节点绳索式	10($\varepsilon < 18\%$)59($\varepsilon > 18\%$)	—	1.8	8
棘间韧带	两节点绳索式	1.0($\varepsilon < 14\%$)1.2($\varepsilon > 14\%$)	—	40	6
棘上韧带	两节点绳索式	3.0($\varepsilon < 20\%$)5.0($\varepsilon > 20\%$)	—	30	2

半椎板及左侧 L4 下关节突和 L5 上关节突内侧半, 切除 L4/5 间隙全部髓核及左后 1/3 纤维环, 保留后方的棘上韧带、棘间韧带、棘突及右侧结构, 于 L4、L5 左侧椎弓根各置入 1 枚螺钉; 后外侧植骨块设计成长方体, 外层 1mm 厚为皮质骨, 中心为松质骨, 融合位置从左侧 L4 横突延伸到 L5 横突, 植骨块与横突间骨性融合模拟为松质骨节点与松质骨节点相黏结(图 2)。M2(图 3)和 M3(图 4)减压范围与 M1 相同, 融合器与矢状面成 45°从左侧斜行置入。

1.3 加载和记录方法

将 L5 椎体的下表面全固定, 在 L3 椎体上表面施加面载荷, 压力方向垂直向下, 大小相当于人体质量的 2/3 (50kg, 取 500N), 均匀分布在 L3 椎体的上终板。在垂直加载 500N 的同时, 于 L3 椎体上表面施加 10N·m 的运动附加力, 进入 Abaqus 6.7 求解器 Solution 模块, 在腰椎前屈、后伸、左右侧屈及左右旋转六种工况下进行计算。主要观察指标有: (1) 腰椎活动范围 (range of motion, ROM), 用 L4-L5 节段角位移表示, 测量 L4、L5 上表面最前点、最后点、最左点、最右点共 4 点的空间位置坐标连接成线, 各线间夹角代表相邻两椎体上表面间的夹角, 加载前后此夹角差

值的绝对值即为 L4-L5 节段角位移。(2) 螺钉和融合器应力, 直接记录各种工况下螺钉和融合器的 Von Mises 应力峰值。

2 结果

对模型施加 400N 预载荷, 运动附加力为 6N·m, 定义好模型的约束和载荷条件后, 在腰椎前屈、后伸、左右侧屈及左右旋转六种工况下计算 L4-L5 节段角位移。结果表明正常腰椎有限元模型在不同工况下 L4-L5 节段角位移与 Vadapalli 等^[4]的有限元研究结果一致(图 5)。认为本模型在一定条件下有效, 可以应用于临床和实验研究。

各种模型在不同工况下 L4-L5 节段的角位移、椎弓根螺钉和融合器所受应力见表 2、3。

各固定融合模型的角位移均较 INT 减少, 其中 M3 减少最明显, 且尤以前屈、后伸时减少最多。除右屈和后伸外, 其他工况下 M2 与 M3 的角位移减少程度相当, 说明两者均能提供足够的稳定性。而 M1 在左、右侧屈及左、右旋转时角位移较大, 说明其在这四种工况下稳定性较差。

M1 的螺钉应力峰值明显高于 M2 及 M3, 其中尤以左屈及后伸时螺钉应力峰值最大, 右屈时螺钉应力峰值最小。M2 的螺钉应力峰值明显低

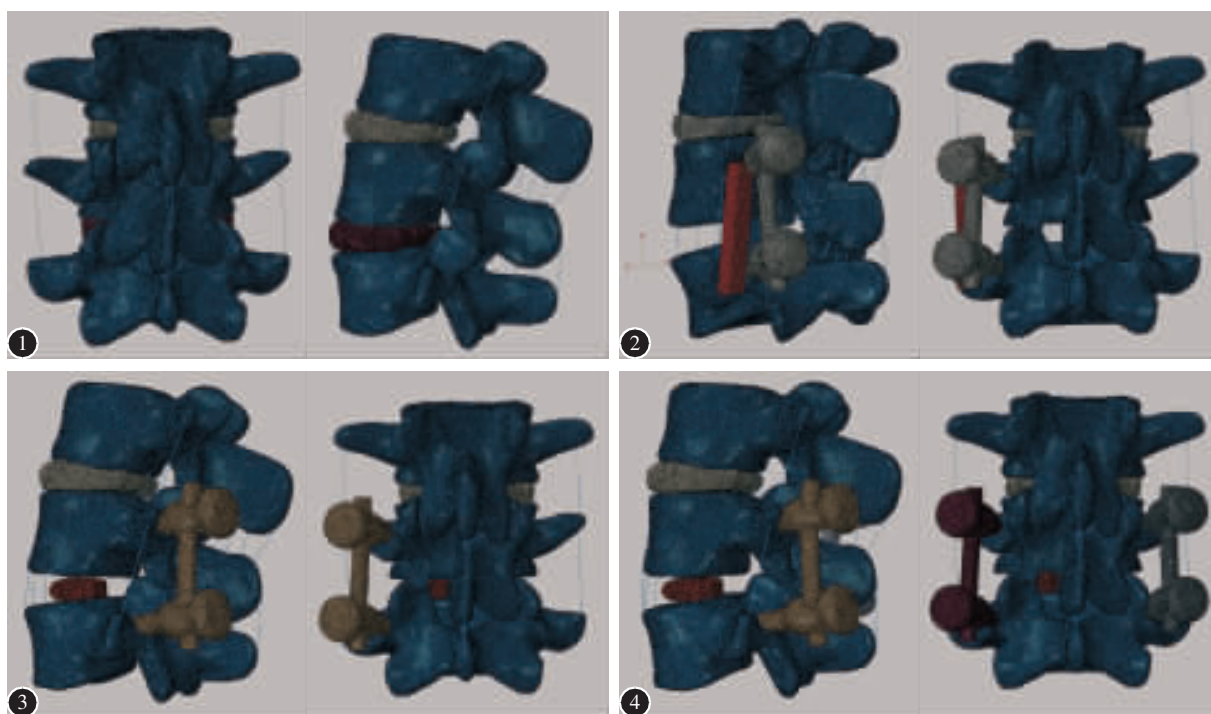


图 1 人正常 L3~L5 三维有限元模型 INT(后面观和侧面观) 图 2 单侧椎弓根螺钉内固定+后外侧植骨融合模型(M1, (侧面观和后面观) 图 3 单侧椎弓根螺钉内固定+单枚椎间融合器置入模型(M2, 侧面观和后面观) 图 4 双侧椎弓根螺钉内固定+单枚椎间融合器置入模型(M3, 侧面观和后面观)

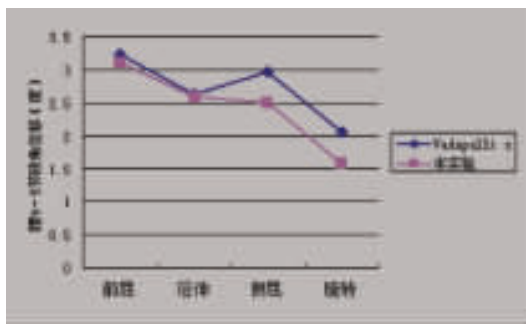


图 5 人正常腰椎 L4-L5 节段有限元模型在不同工况下角位移与文献对比

表 2 各模型在不同工况下 L4-L5 节段角位移 (度)

	前屈	后伸	左屈	右屈	左旋	右旋
INT	3.10	3.23	1.67	1.67	1.70	1.70
M1	0.69	0.79	1.21	1.39	1.18	1.10
M2	0.32	0.58	0.24	0.76	0.33	0.28
M3	0.11	0.09	0.16	0.26	0.15	0.13

表 3 各模型在不同工况下椎弓根螺钉和融合器的 Von Mises 峰值 (MPa)

	垂直	前屈	后伸	左屈	右屈	左旋	右旋
椎弓根螺钉							
M1	1332	1131	1806	1992	1089	1423	1241
M2	571.3	488.2	1310	1262	692.5	680.1	496.5
M3	491.5	395	948	1113	416.1	626.9	386.6
融合器							
M2	71.7	120	62.7	51.8	123.5	77.7	83.4
M3	33.9	47.3	26.4	40.4	49.2	35.3	37.2

于 M1, 后伸及左屈时螺钉应力峰值最大, 前屈时螺钉应力峰值最小; 而 M3 的螺钉应力峰值在各种工况下均最低。

M2 的融合器应力峰值在各种工况下均高于 M3; 两种模型均在前屈及右屈时融合器应力峰值最大, M2 的融合器应力峰值在左屈时最小, M3 的融合器应力峰值在后伸时最小。

3 讨论

目前, 临床上行后路腰椎椎体间融合术多采用双侧椎弓根螺钉置入附加双枚融合器置入的术式, 该术式不仅需广泛切除双侧小关节突及全椎板, 而且术中需过度牵拉马尾神经及双侧神经根。为解决这一问题, Zhao 等^[5,6]设计了一种后路斜向置入单枚融合器行腰椎椎体间融合的手术方

式, 生物力学及临床应用表明, 该方法在保留后路手术优点的同时, 由于仅需切除单侧小关节突及半椎板, 保留了椎体的稳定性, 同时又能满足融合术的要求。本研究也证实了 L4、L5 双侧椎弓根螺钉固定加单枚融合器置入有较好的稳定性, 螺钉及融合器的应力均最小。但双侧椎弓根螺钉固定手术需同时显露两侧, 对很多只有单侧根性症状的患者来说, 无症状侧的显露、置入椎弓根螺钉是对患者的额外损伤。

固定的目的是为了能使植骨坚强融合以提供融合节段的稳定。如果内固定强度不够, 就会导致螺钉的松动、断裂和假关节形成; 但如果内固定过于坚强, 又会导致邻近节段应力集中, 加速邻近节段退变^[7,8]。如何在不影响融合的前提下降低内固定的刚度, 尝试采用较少的螺钉来获得可靠的固定就成为一种合理的选择。从本研究可以看出, 虽然单侧椎弓根螺钉置入后 L4-L5 节段的角位移较完整组明显减少, 但由于前方椎间盘切除, 并不能很好地控制侧屈和扭矩载荷, 椎弓根螺钉承受较大的应力, 在各向载荷下其应力峰值均大幅超过钛合金螺钉的屈服强度 897~1034MPa^[9]。因此, 在固定后如果出现侧屈、扭矩参与的频繁大幅度腰部活动, 此处的持续应力使螺钉发生疲劳性断裂的可能性增大。Goel 等^[10]也指出, 单侧钉板由于内在的不平衡导致的耦合运动, 对需要完全切除椎间盘减压的病例不能提供足够的稳定。单侧椎弓根螺钉固定附加单枚融合器置入后, L4-L5 节段的角位移较单侧椎弓根螺钉固定进一步降低, 说明其稳定性进一步提高; 融合器主要承担了椎间的轴向压力载荷, 充分分担了椎弓根螺钉的应力, 使脊柱前、中柱稳定性提高, 而椎弓根螺钉又有效控制了节段间的伸、屈运动, 使脊柱后柱稳定, 二者联合使用可获得前、中、后三柱良好的稳定性, 符合 Dennis 三柱理论, 能协同提供真正意义上的三维固定。本研究结果证实, 置入单枚融合器后, 椎弓根螺钉的应力明显降低, 虽然仍较双侧椎弓根螺钉固定的应力峰值高, 但差别不大。说明椎间融合器可明显减少螺钉应力, 从而减少螺钉断裂的发生率。我们认为单侧椎弓根螺钉固定加单枚融合器置入可以提供足够的稳定, 可以作为治疗腰椎退变性疾病的一种内固定方法选择。但单侧椎弓根螺钉固定附加单枚融合器置入模型中, 融合器的应力峰值明显高于双侧椎弓根螺钉

固定模型,提示单侧椎弓根固定发生融合器沉降的可能性要高于双侧椎弓根固定。

尽管有限元分析法是腰椎生物力学研究中的有效方法之一,但还不能达到与人体完全仿真的程度,例如没有考虑肌肉的作用,生物力学分析不够全面;有些组织材料性质还不清楚;参考国外文献参数,与实际的数值可能存在差别。另外,本研究在有限元分析上,对软组织的生物力学特性做了线性简化处理;减压范围设计为去除 L4 左侧半椎板及左侧 L4 下关节突和 L5 上关节突内侧半,切除了 L4/5 间隙全部髓核及左右 1/3 纤维环;融合器采用从左侧斜向 45°置入,与椎体上下终板直接接触;设定各种融合术式均达骨性融合,螺钉与椎体的关系设计成弹性固定,模拟的并不是术后即刻的稳定。这样的设计与实际的操作可能不同,但能很好地模拟手术。虽然这些简化都是在合理的前提下进行的,但是不可避免对模型的计算结果产生一定影响,所得的结果并不是精确的数值,而是代表一种趋势。实验结果只在模型条件下有效,人体本身是有组织活性的生物,有一个生长、成熟和衰退的过程,有限元模型只能反应机体某一点、某一刻的力学特性,不能反应其整个过程。

4 参考文献

1. Suk KS, Lee HM, Kim NH, et al. Unilateral versus bilateral pedicle screw fixation in lumbar spinal fusion[J]. Spine, 2000, 25(14): 1843-1847.
 2. Kim Y. Finite element analysis of anterior lumbar interbody fusion: threaded cylindrical cage and pedicle screw fixation [J]. Spine, 2007, 32(23): 2558-2568.
 3. Chiang MF, Zhong ZC, Chen CS, et al. Biomechanical comparison of instrumented posterior lumbar interbody fusion with one or two cages by finite element analysis[J]. Spine, 2006, 31(19): E682-689.
 4. Vadapalli S, Sairyo K, Goel VK, et al. Biomechanical rationale for using polyetheretherketone (PEEK) spacers for lumbar interbody fusion: a finite element study[J]. Spine, 2006, 31(26): E992-E998.
 5. Zhao J, Hai Y, Ordway NR, et al. Posterior lumbar interbody fusion using posterolateral placement of a single cylindrical threaded cage [J]. Spine, 2000, 25(4): 425-430.
 6. Zhao J, Hou T, Wang X, et al. Posterior lumbar interbody fusion using one diagonal fusion cage with transpedicular screw/rod fixation[J]. Eur Spine J, 2003, 12(1): 173-177.
 7. Okuda S, Iwasaki M, Miyauchi A, et al. Risk factors for adjacent segment degeneration after PLIF [J]. Spine, 2004, 29(14): 1535-1540.
 8. Ghiselli G, Wang JC, Bhatia NN, et al. Adjacent segment degeneration in the lumbar spine[J]. J Bone Joint Surg Am, 2004, 86(7): 1497-1503.
 9. 邹德威, 杨惠林, 金大地, 等. 脊柱功能重建外科学-高级理论和技巧[M]. 北京: 人民军医出版社, 2008. 62-63.
 10. Goel VK, Lim TH, Gwon J, et al. Effects of rigidity of an internal fixation device: a comprehensive biomechanical investigation[J]. Spine, 1991, 16(Suppl): 155-161.
- (收稿日期: 2010-04-26 修回日期: 2010-06-25)
(英文编审 蒋欣/郭万首)
(本文编辑 卢庆霞)

消息

中国中西医结合学会脊柱医学专业委员会第四届学术年会征文通知

由中国中西医结合学会脊柱医学专业委员会主办、湖南省南华大学附属第一医院承办的“中国中西医结合学会脊柱医学专业委员会第四届学术年会”定于 2010 年 8 月 20~22 在湖南省张家界市逸臣华天大酒店召开。参会者授予国家级继续教育 I 类学分。大会将邀请国内外知名脊柱疾病专家进行专题讲座,欢迎中西医界广大同道积极参会。

征文内容: ①中西医结合脊柱相关疾病的基础和临床研究;②脊柱外科、脊柱微创及非融合新技术;③脊柱外科并发症及处理;④脊柱外科中西医诊疗技术及其对比研究。

征文要求: ①文稿必须具有科学性、先进性和实用性,论点明确,论据充分,未公开发表;②4000 字以内正文,附 500 字左右摘要一份,包括研究目的、方法、结果及结论;③论文请注明作者姓名、单位、通讯地址、邮编、手机和工作电话、E-mail 地址;④投稿邮箱: nhfy.jzwwk@yahoo.com.cn,请注明会议投稿。

联系地址: 湖南省衡阳市船山路 69 号,南华大学附一医院脊柱外科;邮政编码: 421001;咨询电话: (0734)8279334(可接收传真);联系人: 晏怡果(13875737465),许婷(13575299310)。