

· 论 著 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2015.12.005

## TLIF 单双侧椎弓根螺钉固定融合前后的有限元分析\*

刘玉武<sup>1</sup>, 李 杰<sup>2</sup>, 周 跃<sup>2△</sup>

(1. 浙江省江山市人民医院骨科, 浙江江山 324100; 2. 第三军医大学新桥医院骨科, 重庆 400037)

[摘要] 目的 探索经椎间孔腰椎椎间融合术(TLIF)单双侧椎弓根螺钉固定方式在椎间植骨融合前后存在的差异。

方法 基于正常人 L<sub>3-5</sub> 节段的 CT 扫描数据建立人正常 L<sub>3-5</sub> 三维有限元模型(INT)和 TLIF 手术模型,并在此基础上构建椎间融合前单侧和双侧椎弓根螺钉固定模型(M1 和 M2),以及椎间融合后单侧和双侧椎弓根螺钉固定模型(M3 和 M4)。在设定的加载和边界条件下,模拟腰椎前屈、后伸、侧屈及旋转运动,并记录 L<sub>4-5</sub> 节段角位移和内植物应力分布情况。结果 单侧和双侧椎弓根螺钉固定模型在融合前均较完整状态减少了节段的活动度,双侧固定减少幅度更大,而融合后这种差异明显缩小。融合前单侧固定的钉棒系统 Von Mises 应力峰值明显高于双侧固定,而融合之后二者应力峰值趋于一致。结论 融合后单侧固定可以提供和双侧固定一致的节段稳定性,TLIF 手术应用单侧椎弓根螺钉固定的远期临床效果与双侧固定相似。

[关键词] 经椎间孔腰椎椎间融合术;椎弓根螺钉固定;有限元分析

[中图分类号] R687.3

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-8348(2015)12-1599-04

## Finite element analysis of unilateral and bilateral pedicle screw fixation before and after segment fusion in transforaminal lumbar interbody fusion\*

Liu Yuru<sup>1</sup>, Li Jie<sup>2</sup>, Zhou Yue<sup>2△</sup>

(1. Department of Orthopedics, Jiangshan Municipal People's Hospital, Jiangshan, Zhejiang 324100, China;

2. Department of Orthopedics, Xinqiao Hospital, Third Military Medical University, Chongqing 400037, China)

[Abstract] Objective To explore the difference between before and after intervertebral fusion in transforaminal lumbar inter-

body fusion (TLIF) by unilateral or bilateral pedicle screw (PS) fixation. Methods The L<sub>3-5</sub> CT data based on the normal people were used to rebuild the L<sub>3-5</sub> three-dimensional finite element model(INT) and TLIF operative model. On this basis, the unilateral PS fixation (M1) and bilateral PS fixation (M2) models before the intervertebral fusion and the unilateral PS fixation (M3) and bilateral PS fixation (M4) models after intervertebral fusion were built. After setting the boundary and loading the burden, the ante-flexion, retroversion, lateral bending and rotation of lumbar vertebra were simulated and the L<sub>4-5</sub> segment angular displacement and the stress distribution of implant were recorded. Results The unilateral and bilateral PS fixation model before fusion reduced the range of motion(ROM) of segment compared with the INT model, the bilateral fixation was reduced greater than the unilateral fixation, but the difference after fusion was significantly decreased. The peak Von Mises stresses before fusion in the unilateral PS fixation was significantly higher than that in the bilateral fixation, while their peak Von Mises stresses after fusion trended to be consistent. Conclusion The unilateral PS fixation after fusion can provide the consistent segment stability same to the bilateral PS fixation. The long-term effect of TLIF with unilateral PS fixation is similar to that with the bilateral PS fixation.

[Key words] transforaminal lumbar interbody fusion; pedicle screw fixation; finite element analysis

经椎间孔腰椎椎间融合术(transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF)是治疗腰椎退行性疾病的常用手术方式,其临床应用的效果获得了广泛的认可<sup>[1-2]</sup>。TLIF 术后通常需要辅助双侧椎弓根螺钉固定<sup>[3]</sup>,而坚强的双侧椎弓根螺钉固定在提供良好的稳定性的同时,也引发了学者对于其因过于坚强而导致应力遮挡效应的担忧<sup>[4]</sup>。有学者采用单侧椎弓根螺钉固定的方法来减少创伤,以降低应力遮挡效应及减轻患者负担<sup>[5]</sup>。目前已经有初步的临床结果支持在合适病例中采用单侧椎弓根螺钉固定的方法<sup>[6-7]</sup>。但是,也存在部分生物力学研究结果不支持单侧椎弓根螺钉固定的应用,主要出于对其初始稳定性不足和应力集中导致断裂失效的担忧<sup>[8-10]</sup>。此外关于单侧固定的长期临床效果是否和双侧固定一致仍存在较多的

争议<sup>[6,10]</sup>。目前的生物力学研究主要集中在术后即刻状态即未融合状态下的稳定性和应力分布研究,并没有关注椎间植骨融合后融合节段和内植物发生的生物力学改变,缺少关于其远期疗效的模拟分析。本研究采用有限元分析的方法,构建了椎间植骨融合前后的单侧和双侧椎弓根螺钉固定模型,分析两种固定方式在融合前后生物力学指标差异,为 TLIF 术中单侧椎弓根螺钉固定的临床应用提供参考。

## 1 资料与方法

1.1 一般资料 取 1 名健康男性志愿者(29 岁,身高 172 cm,体质量 70 kg)L<sub>3-5</sub> 椎体 CT 图像。

## 1.2 方法

1.2.1 三维有限元模型的建立 用 64 排螺旋 CT 机对该志

愿者腰椎进行连续扫描,层厚 1.25 mm,导入 Mimics 软件建立  $L_{3-5}$  椎体的 STL 三角网格模型,然后导入逆向工程软件 Geomagic 中进行修补与优化,简化处理部分细节之后生成表面模型。利用 SolidWorks 软件将生成的表面模型转换成实体模型,生成包括皮质骨、松质骨、椎间盘和韧带结构。椎间盘结构包括髓核、纤维环和纤维环纤维。7 组韧带包括前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘间韧带、棘上韧带、横突间韧带和关节囊韧带。将实体模型导入有限元分析软件 Abaqus 6.10,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)<sup>[11-12]</sup>,设置各部件相互作用关系,将关节突关节面用接触单元进行处理,韧带设置为仅受牵张力作用。对模型的每个部件进行有限元网格划分,其中内植物和椎间盘采用六面体网格,其余实体部件采用四面体网格。完成人正常  $L_{3-5}$  节段完整状态有限元模型(INT)的建立,见图 1。

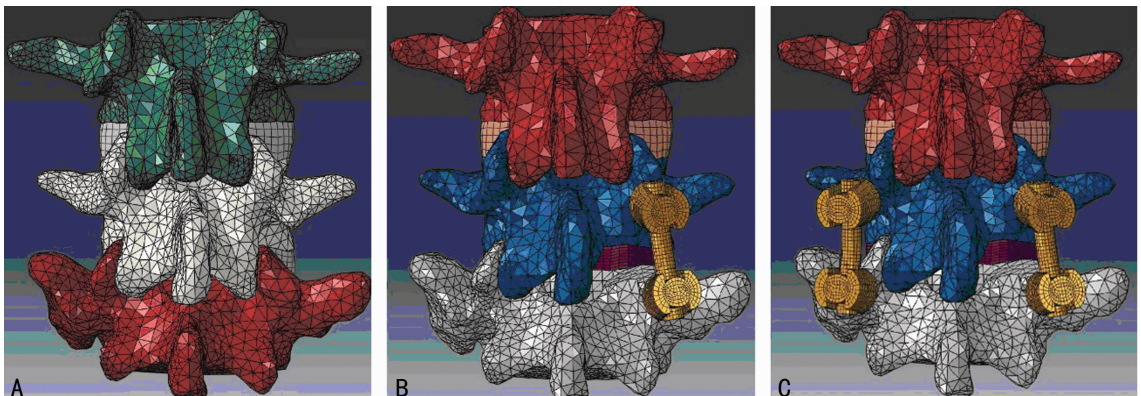
**1.2.2 手术模型与内固定模型建立** 在正常  $L_{3-5}$  模型的基础上模拟构建 TLIF 手术模型。切除  $L_{4-5}$  节段右侧关节突,切除髓核组织,保留纤维环纤维与外层纤维环,斜跨中线放置椎间融合器<sup>[13]</sup>。椎间融合器模拟 PEEK 材料,杨氏模量为 3 600 MPa,泊松比 0.3,高度为 12 mm,与椎体终板接触为面性接触,融合器内充填松质骨。模拟 Sextant 系统钛合金椎弓根螺钉固定,螺钉直径 6.5 mm,长 50 mm,杨氏模量 110 000 MPa,泊松比 0.3。椎弓根螺钉与骨性结构接触采用绑定的方式。采用设定椎间植入物与上下终板接触关系设定为面性接触的

方法模拟椎间融合前状态,摩擦系数为 0.3<sup>[14]</sup>,采用设定椎间植入物与上下终板接触关系为绑定的方法模拟椎间植骨融合后状态。利用软件重建融合前单侧椎弓根螺钉固定模型(M1)和双侧椎弓根螺钉固定模型(M2),融合后单侧椎弓根螺钉固定模型(M3)和双侧椎弓根螺钉固定模型(M4),见图 1。

表 1 有限元模型的材料常数

材料	弹性模量(MPa)	泊松比	横截面积
皮质骨	12 000.00	0.29	—
终板	1 200.00	0.29	—
松质骨	100.00	0.29	—
纤维环基质	4.20	0.40	—
髓核	1.00	0.49	—
纤维环纤维	450.00	0.45	—
前纵韧带	7.80	0.30	63.70
后纵韧带	10.00	0.30	20.00
棘上韧带	10.00	0.30	40.00
棘间韧带	8.00	0.30	30.00
黄韧带	15.00	0.30	40.00
横突间韧带	10.00	0.30	1.80
关节囊韧带	7.50	0.30	30.00

—:此项无数据。



A:完整状态;B:单侧固定;C:双侧固定。

图 1 不同工况下的模型图

**1.2.3 负载与边界条件** 将  $L_5$  椎体下表面完全固定,限制其所有的自由度。在  $L_3$  椎体上表面施加垂直向下的预载荷,大小 500 N<sup>[14]</sup>,均匀分布在整体  $L_3$  椎体的上终板。在施加预载荷的同时,耦合  $L_3$  椎体上表面所有节点于中性点并施加 7.5 Nm 扭矩,模拟前屈、后伸、左右侧弯和左右轴向旋转工况下腰椎生物力学状态。将模型导入 Abaqus 6.10 软件中进行计算求解。

**1.2.4 主要观察指标** 腰椎活动范围(range of motion, ROM)用  $L_{4-5}$  节段角位移表示;后路内固定和椎间植入物应力,直接记录各种工况下的 Von Mises 应力峰值。

## 2 结果

**2.1 模型有效性验证** 对完整状态模型进行有效性验证,采用与 Renner 等<sup>[15]</sup>的离体生物力学实验条件一致的加载方式,

施加 7.5 Nm 扭矩,在腰椎前屈、后伸、左右侧屈及左右旋转 6 种工况下计算  $L_3/L_4$  和  $L_4/L_5$  节段角位移。结果表明正常腰椎有限元模型在不同工况下各个节段的角位移与 Renner 等<sup>[15]</sup>的生物力学测试结果一致,均处于一个标准差范围内(图 2)。因此,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。

**2.2 运动学结果** 各种模型在不同工况下  $L_{4-5}$  节段的角位移,见图 3。椎间融合前双侧固定比单侧固定减少了更多的节段活动度,特别是在旋转状态下,单侧固定在旋转控制中仅减少 38.0%的节段活动度,而双侧固定则达到 70.2%。融合后单侧固定和双侧固定的固定效果都获得了提升,但是单侧固定提高幅度较大,导致了和双侧固定的差距变小,特别是在旋转控制中,二者几乎实现一致。

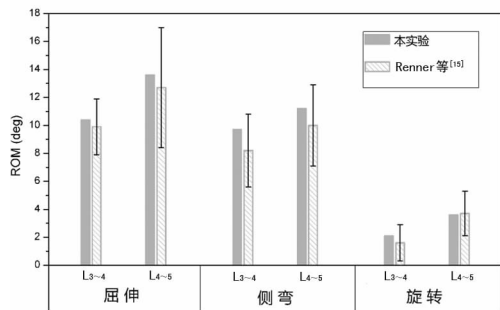


图 2 模型有效性验证

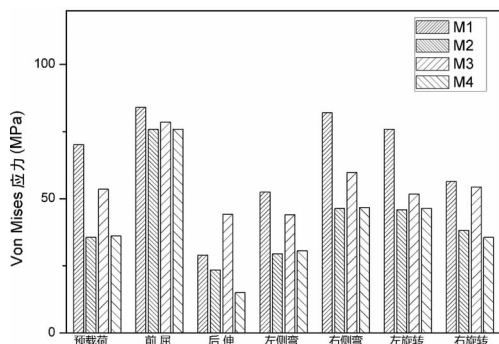


图 5 植骨融合前后椎间植入物的 Von Mises 应力峰值

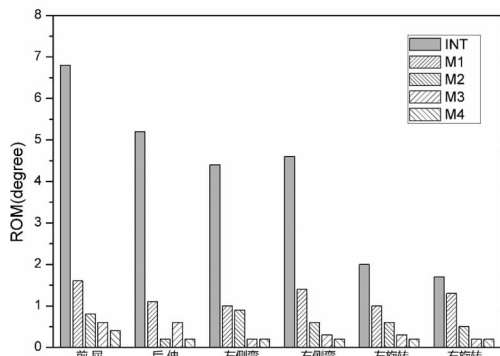


图 3 植骨融合前后不同工况下 L<sub>4-5</sub> 节段 ROM

**2.3 椎弓根钉棒系统应力分布特点** 各种模型在不同工况下椎弓根钉棒系统的 Von Mises 应力峰值, 见图 4。除预载荷和左侧弯状态下, 融合前单侧固定的应力峰值明显高于双侧固定的应力峰值。融合之后两种固定方式的应力峰值均获得了大幅度降低。除左侧弯状态出现双侧固定明显高于单侧固定之外, 其余状态下单侧固定与双侧固定的 Von Mises 应力峰值接近。

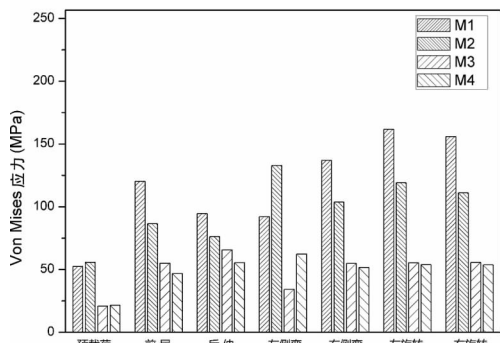


图 4 植骨融合前后椎弓根钉棒系统的 Von Mises 应力峰值

**2.4 椎间植入物应力分布特点** 各种模型在不同工况下椎间植入物的 Von Mises 应力峰值见图 5。融合前单侧固定状态下 Von Mises 应力峰值明显高于双侧固定状态, 特别是垂直载荷、侧弯和旋转状态存在明显差异, 单侧固定下椎间植入物的应力峰值是双侧固定的 1.5~1.7 倍。除了后伸运动以外, 融合后单侧固定的应力峰值较融合前均有所下降; 而双侧固定仅在后伸运动下获得明显减少之外, 其他状态下融合前后变化不明显; 总体而言单侧固定和双侧固定的下椎间植入物 Von Mises 应力峰值差异在融合之后缩小。

3 讨论

TLIF 通常应用双侧椎弓根螺钉固定以增强节段稳定性, 为椎间植骨融合形成条件。单侧椎弓根螺钉固定被认为是可以替代双侧固定的固定方式<sup>[5-7]</sup>。Xue 等<sup>[5]</sup>报道的前瞻性随机对照研究中, 单侧和双侧椎弓根螺钉固定在椎间融合率、临床指标、断钉事件和并发症等指标比较中, 差异无统计学意义 ( $P>0.05$ )。而在手术时间、出血量、住院时间和植入物花费等方面单侧固定更具有优势。Hu 等<sup>[6]</sup>认为在合适的患者中, TLIF 术后应用单侧椎弓根螺钉固定和双侧椎弓根螺钉固定同样安全有效。以上临床研究为单侧椎弓根螺钉固定提供了临床和影像学依据, 但是有生物力学研究的结果却并不支持这一结果<sup>[8-10]</sup>。除了生物力学研究对单侧椎弓根钉棒固定存在担忧之外, 关于单侧固定的长期临床效果和影像学改变是否和双侧固定一致也存在争议<sup>[6,10]</sup>。

TLIF 术后节段生物力学指标是随着椎间植入物融合进程产生变化的, 是一个动态的过程。在术后即刻, 椎间植入物并未与上下终板融合, 仅产生面-面接触和摩擦, 可以分担垂直向下的载荷而不能控制牵张分离载荷和旋转载荷; 随着椎间融合进展, 椎间植入物开始控制牵张分离载荷和旋转载荷, 这种控制能力随着植骨融合程度的深入而增强; 当完全实现融合之后, 椎间植入物对节段的生物力学稳定性贡献达到最大, 对节段的各个方向的运动均能起到有效控制的作用。伴随着椎间植入物生物力学作用变化, 后路固定系统的生物力学特性必然发生改变。本研究中通过分析术后即刻和融合后两个阶段的生物力学指标, 以了解这种变化的趋势, 分析其可能对远期临床效果带来的影响。

本实验中的术后即刻稳定性相关结果与之前的有限元分析和生物力学研究结果一致<sup>[13-14]</sup>, 单侧固定控制节段稳定性方面不如双侧固定。此外, 单侧固定中的椎弓根钉棒系统应力峰值也明显高于双侧固定。然而, 由于没有双侧固定坚强, 单侧固定的应力遮挡效应较低, 椎间植入物的应力峰值高于双侧固定。在融合后, 单侧固定和双侧固定在维持节段稳定性中的差异明显缩小, 均能显著的减少节段活动度。融合后侧弯和旋转稳定性都几乎达到了和双侧固定同样的效果。对于 Von Mises 应力峰值而言, 融合后单侧固定的椎弓根钉棒系统应力峰值较融合前大幅度下降, 达到了与双侧固定几乎一致的水平, 椎间植入物的应力峰值却依然略高于双侧固定。总体而言, 随着植骨融合过程的进行, 单侧固定模式下椎弓根钉棒系统的应力呈下降的趋势。上述结果提示在椎间植骨融合实现之后, 单侧固定的远期临床效果与双侧固定接近。

综上所述,本研究认为单侧椎弓根螺钉固定的方式在椎间融合后可以取得和双侧固定同样的效果,理论上并不会显著增加内植物失效的发生率,其远期临床疗效是可以保证的。本研究结果为单侧椎弓根螺钉固定方法的临床应用提供了理论支持。当然,单侧椎弓根螺钉并不适合每种腰椎退行性病变的 TLIF 手术固定,比如术前存在腰椎不稳的病例,以及腰椎滑脱症和双侧关节突切除减压的病例,选择合适的患者进行单侧固定可以减少患者的经济负担和手术创伤,并且达到和双侧固定一样的融合效果。

#### 参考文献

- [1] Chastain CA, Eck JC, Hodges SD, et al. Transforaminal lumbar interbody fusion: a retrospective study of long-term pain relief and fusion outcomes [J]. *Orthopedics*, 2007, 30(5): 389-392.
- [2] Rosenberg WS, Mummaneni PV. Transforaminal lumbar interbody fusion: technique, complications, and early results [J]. *Neurosurgery*, 2001, 48(3): 569-574.
- [3] Sim HB, Murovic JA, Cho BY, et al. Biomechanical comparison of single-level posterior versus transforaminal lumbar interbody fusions with bilateral pedicle screw fixation: segmental stability and the effects on adjacent motion segments [J]. *J Neurosurg Spine*, 2010, 12(6): 700-708.
- [4] Park P, Garton HJ, Gala VC, et al. Adjacent segment disease after lumbar or lumbosacral fusion: review of the literature [J]. *Spine*, 2004, 29(17): 1938-1944.
- [5] Xue H, Tu Y, Cai M, et al. Comparison of unilateral versus bilateral instrumented transforaminal lumbar interbody fusion in degenerative lumbar diseases [J]. *Spine J*, 2012, 12(3): 209-215.
- [6] Hu XQ, Wu XL, Xu C, et al. A systematic review and meta-analysis of unilateral versus bilateral pedicle screw fixation in transforaminal lumbar interbody fusion [J]. *PLoS One*, 2014, 9(1): e87501.
- [7] Yang XM, Wang H, Zhao QL, et al. A comparison of uni-

lateral and bilateral pedicle screw fixation combined with transforaminal lumbar interbody fusion for lumbar degenerative diseases [J]. *Chin Med J*, 2014, 127(20): 3592-3596.

- [8] Schleicher P, Beth P, Ottenbacher A, et al. Biomechanical evaluation of different asymmetrical posterior stabilization methods for minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion [J]. *J Neurosurg Spine*, 2008, 9(4): 363-371.
- [9] Chen HH, Cheung HH, Wang WK, et al. Biomechanical analysis of unilateral fixation with interbody cages [J]. *Spine*, 2005, 30(4): E92-96.
- [10] Yucesoy K, Yuksel KZ, Baek S, et al. Biomechanics of unilateral compared with bilateral lumbar pedicle screw fixation for stabilization of unilateral vertebral disease [J]. *J Neurosurg Spine*, 2008, 8(1): 44-51.
- [11] Kim TY, Kang KT, Yoon DH, et al. Effects of lumbar arthrodesis on adjacent segments: differences between surgical techniques [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2012, 37(17): 1456-1462.
- [12] Denoziere G, Ku DN. Biomechanical comparison between fusion of two vertebrae and implantation of an artificial intervertebral disc [J]. *J Biomech*, 2006, 39(4): 766-775.
- [13] 王建华, 万磊, 夏虹, 等. 单枚融合器与单钉棒系统微创术式的有限元研究 [J]. *临床骨科杂志*, 2010, 13(6): 700-703.
- [14] 敖俊, 万磊, 廖文波, 等. 椎间融合后路非对称与对称固定螺钉应力的有限元比较 [J]. *中国组织工程研究*, 2013, 17(9): 1555-1562.
- [15] Renner SM, Natarajan RN, Patwardhan AG, et al. Novel model to analyze the effect of a large compressive follower pre-load on range of motions in a lumbar spine [J]. *J Biomech*, 2007, 40(6): 1326-1332.

(收稿日期: 2014-11-04 修回日期: 2015-01-27)

(上接第 1598 页)

- activates the cryopyrin inflammasome independent of Toll-like receptor signaling [J]. *Immunity*, 2007, 26(4): 433-443.
- [11] Eugenin EA. Role of connexin/pannexin containing channels in infectious diseases [J]. *FEBS Lett*, 2014, 588(8): 1389-1395.
  - [12] Locovei S, Bao L, Dahl G. Pannexin 1 in erythrocytes: function without a gap [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2006, 103(20): 7655-7659.

- [13] Lai CP, Bechberger JF, Thompson RJ, et al. Tumor-suppressive effects of pannexin 1 in C6 glioma cells [J]. *Cancer Res*, 2007, 67(4): 1545-1554.
- [14] Iglesias R, Dahl G, Qiu F, et al. Pannexin 1: the molecular substrate of astrocyte "hemichannels" [J]. *J Neurosci*, 2009, 29(21): 7092-7097.

(收稿日期: 2014-08-28 修回日期: 2015-01-03)