

· 论 著 ·

# 微创经椎间孔腰椎间融合术的有限元分析

隋吉生<sup>1</sup>, 张绍东<sup>2</sup>, 吴小涛<sup>2</sup>, 王黎明<sup>1</sup>, 蒋纯志<sup>1</sup>

**[摘要]** **目的** 建立微创经椎间孔腰椎融合的有限元模型,通过比较不同固定方式的生物力学特性,来探讨最适宜的固定融合方式。**方法** 分别建立以下融合固定模型:单枚融合器+双侧椎弓根钉(A型);双枚融合器+双侧椎弓根钉(B型);单枚融合器+单侧椎弓根钉(C型);双枚融合器+单侧椎弓根钉(D型)。对各模型进行前屈、后伸、左屈、右屈、左旋、右旋、轴压加载,比较各模型的角位移、椎弓根钉及融合器的所受应力情况。**结果** 各融合固定模型在不同工况下椎弓根钉及融合器所受应力的 Von Mises 峰值各有差异,但均在最大受力范围之内。各工况下四种模型角位移均较有限元模型减少,A/B型、C/D型相比角位移减少程度相当,而单侧椎弓根钉固定时脊柱稳定性较双侧椎弓根钉固定差。**结论** 建立了不同固定方式的腰椎融合模型,验证了在微创经椎间孔腰椎融合术中使用单侧椎弓根螺钉加单枚融合器置入可提供适当的稳定,可以作为微创经椎间孔腰椎间融合术的固定方法选择。

**[关键词]** 有限元分析;腰椎;椎间融合;生物力学

**[中图分类号]** R681.57 **[文献标志码]** A doi:10.3969/j.issn.1672-271X.2014.02.009

## Finite element analysis of transforaminal lumbar interbody fusion

SUI Ji-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Shao-dong<sup>2</sup>, WU Xiao-tao<sup>2</sup>, WANG Li-ming<sup>1</sup>, JIANG Chun-zhi<sup>1</sup>. 1. Department of Orthopaedics, Nanjing First Hospital, Nanjing, Jiangsu 210006, China; 2. Department of Orthopaedics, Zhongda Hospital, Nanjing, Jiangsu 210009, China

**[Abstract]** **Objective** To develop and validate three-dimensional finite element models of transforaminal lumbar interbody fusion, and explore the most appropriate method of fixation and fusion by comparing biomechanical characteristics of fixation method.

**Methods** Developing four fusion models: bilateral pedicle screws fixation with a single cage insertion model (A); bilateral pedicle screws fixation with two cages insertion model (B); unilateral pedicle screws fixation with a single cage insertion model (C); unilateral pedicle screws fixation with two cages insertion model (D), the models were subjected to different forces including axial compressive, anterior bending, posterior extension, left bending and rotation. The von Mises stress of the fusion segments on the pedicle screw and cages were recorded. **Results** There were differences in Von Mises peak stress between four models, but were within the range of maximum force. The angular variation in A, B, C and D decreased significantly compared with normal. There was no significant differences in angular variation between A and B, C and D. Bilateral pedicle screws fixation had more superior biomechanics than unilateral pedicle screws fixation. **Conclusion** The lumbar interbody fusion models were established using varying fixation methods, and the results verified that unilateral pedicle screws fixation with a single cage could meet the demand in transforaminal single segment interbody fusion.

**[Key words]** finite element analysis; lumbar spine; lumbar fusion; bio-mechanics

随着社会老龄化的不断发展,腰椎退行性疾病已成为影响大众健康的重要问题。经椎间孔腰椎间融合术(transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF)治疗腰椎退行性疾病已广泛运用于临床,该术式只切除一侧关节突关节,对硬膜及神经根干扰小,较后路腰椎间融合术(posterior lumbar interbody fusion, PLIF)有很大的优势<sup>[1-2]</sup>。而微创经椎间孔腰椎间融合术能避免常规 TLIF 术中对椎旁肌的持续牵拉,术后腰背肌力量恢复快,术后卧床时间短<sup>[3]</sup>。本研究以有限元分析方法为研究手段,建立 L<sub>4</sub>~L<sub>5</sub> 节段

和微创 TLIF 椎弓根螺钉后路固定系统的有限元模型(INT),观察在工况下单节段融合术后各模型角位移、椎弓根钉及椎间融合器(cage)所受应力情况,为微创椎间融合固定方式的选择及临床应用提供理论依据。

## 1 对象与方法

**1.1 对象** 选取 1 名 31 岁健康中国男性志愿者为建模素材,既往无腰椎疾病史,采用 64 排螺旋 CT 机对其 L<sub>4</sub>~L<sub>5</sub> 节段进行连续横切扫描,得到层厚为 1 mm 的连续断面图像,以 DICOM 格式输出其断面图像并转入微机保存。利用三维重建软件 Mimics 10.0 建立 L<sub>4</sub>~L<sub>5</sub> 节段三维计算机模型<sup>[4]</sup>。利用有限元软件 Ansys 的前处理功能,在该节段骨性结构

**基金项目:** 南京市医学科技发展项目(QYK10134)

**作者单位:** 1. 210006 江苏南京,南京市第一医院骨科; 2. 210009 江苏南京,东南大学附属中大医院骨科

的基础上补充建立皮质骨、松质骨、椎间盘、前后纵韧带、黄韧带、棘间韧带、棘上韧带等结构。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,并注意把上下相邻关节突关节面用接触单元进行处理,以保证关节突关节在维持脊柱功能结构的正常作用<sup>[5]</sup>。参考相关文献<sup>[1]</sup>,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,完成人正常 L<sub>4</sub> ~ L<sub>5</sub> 节段 INT 的建立见表 1、表 2。

表 1 腰椎有限元模型骨与间盘材料属性

材料	弹性模量 (MPa)	泊松比	性质
椎体			
皮质骨	12 000	0.3	均质等向
松质骨	100	0.2	均质等向
软骨终板	12 000	0.3	均质等向
后部结构	3500	0.25	均质等向
椎间盘			
纤维环	6	0.4	均质等向
髓核	0.0013	0.4999	均质等向

表 2 腰椎有限元模型主要韧带材料属性

主要韧带	弹性模量 (MPa)	横截面积 (mm <sup>2</sup> )	平均长度 (mm)	刚度
前纵韧带	7.8	22.4	20	8.74
后纵韧带	10	7.0	12	5.83
黄韧带	17	14.1	15	15.98
横突间韧带	10	0.6	32	0.19
关节囊韧带	7.5	10.5	5	15.75
棘间韧带	10	14.1	13	10.85
棘上韧带	8.0	10.5	22	3.82

注:刚度 = 弹性模量 × 横截面积 / 平均长度

**1.2 微创 TLIF 各种融合固定模型的建立** 腰椎内固定系统数据由本实验操作人员用 Auto CAD2007 画图软件绘制而成,并将数据存为 STL 格式。参照微创 TLIF 临床手术方法,实验模拟的椎弓根钉直径为 6.0 mm,长度 55 mm,螺钉的弹性模量为 110 000 MPa,泊松比为 0.3,与椎体的关系设计成弹性固定,钉与连接棒为一体化;融合器形状设计成矩形:(单枚融合器:长 24 mm,宽 12 mm,高 11 mm)、(双枚融合器:长 22 mm,宽 8 mm,高 11 mm),弹性模量为 3700 MPa,泊松比为 0.25,与椎体终板接触为面性接触,接触点为终板的软骨下骨。利用三维重建软

件 Mimics 10.0 的三维几何建模功能,分别建立以下融合固定模型:单枚融合器 + 双侧椎弓根钉(A 型);双枚融合器 + 双侧椎弓根钉(B 型);单枚融合器 + 单侧椎弓根钉(C 型);双枚融合器 + 单侧椎弓根钉(D 型)。

**1.3 加载和记录方法** 将各模型的 L<sub>5</sub> 下终板表面全固定,在 L<sub>4</sub> 椎体上终板施加 500 N 载荷模拟正常行走姿势,同时在 L<sub>4</sub> 椎体上表面施加 15 N · m 的运动附加力,在轴压、前屈、后伸、左屈、右屈、左旋、右旋七种工况下通过 Mimics 软件进行计算。主要观察指标有:①腰椎活动范围(range of motion, ROM),用 L<sub>4</sub> ~ L<sub>5</sub> 节段角位移表示,测量 L<sub>4,5</sub> 上表面最前点、最后点、最左点、最右点共四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的夹角,加载前后此夹角差的绝对值即为 L<sub>4</sub> ~ L<sub>5</sub> 节段角位移;②椎弓根螺钉和融合器的应力,直接记录各工况下螺钉和融合器的 Von Mises 应力峰值,双融合器取其平均值。

2 结 果

各模型在不同工况下 L<sub>4</sub> ~ L<sub>5</sub> 节段的椎弓根螺钉和融合器所受应力见表 3:通过将 A 型/B 型、C 型/D 型相比较得知,椎间植入双枚融合器在各工况下椎弓根螺钉及融合器的应力较植入单枚融合器小;通过将 A 型/C 型、B 型/D 型相比较得知,使用单侧内固定者在螺钉及融合器的应力较双侧固定者高。但不同工况下椎弓根钉及融合器所受应力的 Von Mises 峰值均在最大受力范围之内,说明不管是选用单/双侧固定抑或是单/双枚融合器融合,都具有相同的作用效果。

各种模型在不同工况下 L<sub>4</sub> ~ L<sub>5</sub> 节段的角位移见表 4。将 A/B 型、C/D 型相比较发现应用双枚融合器能维持较好的角稳定性。通过对 A/C 型、B/D 型进行比较,单侧椎弓根钉固定角位移较大。但各固定融合模型的角位移均较 INT 明显减少,说明单侧椎弓根钉固定即能提供足够的脊柱稳定性,可以作为微创经椎间孔腰椎间融合术的固定方法选择。

3 讨 论

手术治疗腰椎退行性疾病可通过椎弓根螺钉系统达到三柱坚强固定,恢复腰椎生理弧度。椎间融合可以维持脊柱正常的序列,防止失稳的复发,是术后远期疗效的保障。随着椎间融合器和融合方法的改进,逐渐出现应用双枚与单枚椎间融合器行椎间融合术。张建乔等<sup>[6]</sup>认为在联合椎弓根螺钉系统

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)

	轴压	前屈	后伸	左屈	右屈	左旋	右旋
椎弓根螺钉							
A 型	534	417	1005	1218	485	784	397
B 型	531	401	988	1189	469	774	378
C 型	673	524	1488	1379	576	836	471
D 型	641	497	1339	1166	505	799	412
融合器							
A 型	43.4	53.2	38.6	49.3	57.3	41.4	43.2
B 型	39.5	47.8	32.9	44.1	56.2	37.7	39.3
C 型	92.3	137.4	97.5	59.4	152.1	88.5	92.5
D 型	85.6	121.5	88.3	50.5	142.8	81.3	84.5

表 4 各模型在不同工况下 L<sub>4</sub> ~ L<sub>5</sub> 节段角位移 (度)

	前屈	后伸	左屈	右屈	左旋	右旋
INT	3.41	3.61	1.74	1.74	1.79	1.79
A 型	0.14	0.11	0.19	0.32	0.17	0.15
B 型	0.12	0.09	0.18	0.29	0.16	0.14
C 型	0.39	0.61	0.29	0.81	0.40	0.35
D 型	0.36	0.57	0.23	0.77	0.32	0.29

固定的基础上,以双枚碳纤维融合器作椎间融合与单纯植骨椎间融合相比在临床疗效、椎间隙高度的维持、植骨融合率上有明显优势,但双融合器植入行椎间融合术,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,一方面破坏了脊柱后部结构和稳定性,另一方面亦有潜在损伤马尾神经根的风险<sup>[7]</sup>。赵杰等<sup>[8]</sup>早先采用双侧椎弓根钉固定结合后路斜向置入单枚融合器治疗腰椎退行性疾病,该方法仅需切除单侧小关节突及半椎板,在最大限度保留椎体结构相对完整的基础上,又能满足融合术的要求。Tsuang 等<sup>[9]</sup>通过建立腰椎半椎板切除、全椎板切除加椎间关节切除、单枚或双枚融合器植入等有限元模型,通过不同载荷下最大 Von mises 应力比较认为在植入单枚融合器的基础上,加入后路固定装置可提供更好的稳定性,且椎间植入单枚或双枚融合器在应力方面无明显差异。本研究通过建立微创经椎间孔腰椎融合的有限元模型,认为椎间植入单枚或双枚融合器在各工况下模型角位移均较 INT 明显减少,虽然在植入单枚融合器下,椎弓根螺钉及融合器所受应力较双枚融合器大,但仍在椎弓根钉及融合器的最大受力范围内,说明单枚融合器置入即可提供足够的脊柱稳定性,可以作为微创经椎间孔腰椎间融合术的融合方法选择。

脊柱融合辅助椎弓根钉固定术后可以达到腰椎的即刻稳定,患者可以早期下床活动且增加了融合率;但也改变了临近节段椎间盘和关节突载荷,从而加速了临近运动节段的退变。为降低脊柱内固定的强度问题,有学者提出应用单侧椎弓根内固定系统来降低固定强度从而改善临近关节的退变问题。臧加成等<sup>[10]</sup>对单侧与双侧椎弓根螺钉内固定在短节段腰椎融合术术后疗效进行 meta 分析,认为单侧椎弓根螺钉固定可以明显减少手术时间、术中出血量和住院费用,在融合率、并发症发生率和优良率等方面与双侧固定无明显差异。陈志明等<sup>[7]</sup>通过有限元分析,建立 L<sub>4</sub>/L<sub>5</sub> 不同内固定融合模型,分析不同工况下 L<sub>4</sub>~<sub>5</sub> 节段角位移、椎弓根螺钉及融合器应力分布情况,认为单侧椎弓根螺钉固定加单枚融合器置入可提供足够的稳定,但其融合器的应力峰值明显高于双侧椎弓根螺钉,显示单侧椎弓根固定发生融合器沉降的可能性高于双侧椎弓根固定。本研究通过有限元分析,单侧与双侧椎弓根钉固定时螺钉及融合器应力的 Von Mises 峰值均在最大受力范围之内;虽然单侧椎弓根钉固定的角位移较双侧椎弓根钉固定大,但各固定融合模型的角位移均较 INT 减少,说明无论是单侧椎弓根钉固定还是双侧椎弓根钉固定,都能提供足够的脊柱稳定性。且对于部分仅有单侧根性症状的患者来说,双侧椎弓根钉固定术对无症状侧的显露、置钉在一定程度上进一步破坏了脊柱的稳定性。说明单侧椎弓根钉固定可以作为微创经椎间孔腰椎间融合术的固定方法选择<sup>[2]</sup>。

有限元法在计算机上模拟人体的结构,并赋予真实结构相当的生物力学特性,可进行脊柱动力学、脊柱及椎间盘内部应力改变等各种研究<sup>[11]</sup>。与动物模型、尸体模型相比,计算机模拟能收集椎体、椎间盘、小关节突及固定装置的应力分布情况,可消除标本间个体差异、降低实验成本<sup>[12]</sup>。有限元分析研究的可重复性好,可采用模拟分析的方法研究实验方法无法探讨的生理状况,是对人体体外尸体实验模型的有效补充<sup>[13]</sup>。虽然有限元法有许多无法替代的优点,但其作为理论力学的一种数学模型方法,是客观事物的抽象。有限元模型在建模过程中的简化和假设,材料赋值难免与结构真实情况相异。腰椎力学性质较复杂与体质量、腰椎周围肌肉、韧带、腹压等密切相关,因而由此推导得出的结论必然含有种种假设和限制,最终仍需要经过实验研究的检验。

(下转第 152 页)

损害;严格在帽状腱膜下层及颞肌外分离,术中硬脑膜一旦破裂,应严密缝合,漏口过大时用筋膜修补,必要时可用生物蛋白胶或组织胶水封闭加固;分流手术尽量采用同侧,因数字化钛金属网已一次定型,不需修剪且表面光滑,不会对分流管有机机械性损伤,但如需跨过钛网表面应间断予以固定,防止移位脱离;颞肌充分游离,颅底骨缘要显露,这样钛网才会紧密贴覆,成型满意,钛网固定后间断将假性硬脑膜悬吊于钛网上;术中止血彻底,术后皮下置负压引流管并尽早拔除,一般不超过 48 h,如术后出现皮下积液和皮下积血,尽早予以穿刺抽液并加包扎,加用局部红外线治疗可加快吸收;术后早期预防性抗癫痫治疗 1 周,定期复查头颅 CT 及预后评估。

综上所述,脑室腹腔分流与颅骨修补术同期完成的治疗方式能够有效地改善颅脑损伤后脑积水合并颅骨缺损患者的各种症状,可不同程度上改善患者的意识、神经功能障碍,与传统的治疗方式相比,并无严重的并发症出现,所以此种治疗方法效果良好,值得在临床上进一步普及应用。

## 【参考文献】

- [1] 陈鸿光,边玉松,关茂武,等.去骨瓣减压术后减压窗明显膨出患者的早期颅骨修补[J].中华神经外科杂志,2009,25(12):1135.
- [2] Bor-Seng-Shu E, Figueiredo EG, Amorim RL, et al. Decompressive craniectomy: a meta-analysis of influences on intracranial pressure

and cerebral perfusion pressure in the treatment of traumatic brain injury[J]. J Neurosurg, 2012, 117(3): 589-596.

- [3] 宋健,杜浩,刘敏,等.早期颅骨修补术对颅骨缺损患者脑灌注及生存质量的影响[J].中国临床神经外科杂志,2013,18(5):274-275.
- [4] 杨健,梅佩冬,杨金星,等.颅骨缺损伴脑积水同期手术的临床研究[J].河北医学,2008,14(7):781-783.
- [5] 林超,吕立权,李一明.外伤性脑积水合并颅骨缺损的手术治疗策略[J].中国微侵袭神经外科杂志,2012,17(1):20-22.
- [6] De Bonis P, Pompucci A, Mangiola A, et al. Post-traumatic hydrocephalus after decompressive craniectomy: an underestimated risk factor[J]. Neurotrauma, 2010, 27(11): 1965-1970.
- [7] 黄海,龚骞.颅脑外伤术后颅骨缺损并发脑积水 28 例临床诊治体会[J].临床神经外科杂志,2012,9(4):234.
- [8] De Bonis P, Pompucci A, Mangiola A, et al. Post-traumatic hydrocephalus after decompressive craniectomy: an underestimated risk factor[J]. J Neurotrauma, 2010, 27(11): 1965-1970.
- [9] 于如同,谷佳,张根堂.颅脑损伤去骨瓣减压与术后脑积水的相关性分析[J].中华创伤杂志,2010,26(10):880.
- [10] 吴有志,徐善水,江晓春,等.重型颅脑损伤术后颅骨缺损伴脑积水 22 例临床分析[J].中国临床神经外科杂志,2006,11(10):618-619.
- [11] 李学鉴,陈世洁.骨窗内脑室置管加修补同期手术治疗脑积水伴颅骨缺损[J].长江大学学报(自然版),2013,10(6):9-10.
- [12] 张法云,刘补兴,陈晓,等.早期同期颅骨修补及脑室分流治疗颅骨缺损并脑积水临床分析[J].浙江创伤外科,2011,16(6):813-815.

(收稿日期:2013-12-19;修回日期:2014-01-28)

(本文编辑:黄攸生; 英文编辑:王建东)

(上接第 143 页)

## 【参考文献】

- [1] Goel VK, Kong W, Han JS, et al. A combined finite element and optimization investigation of lumbar spine mechanics with and without muscles[J]. Spine, 1993, 18(11): 1531-1541.
- [2] 苏士乐,刘浩,章华斌,等.黄韧带外椎板扩大开窗治疗腰椎管狭窄症近期疗效观察[J].东南国防医药,2014,16(1):81-82.
- [3] 颜文涛,赵改平,方新果,等.单枚 Cage 行经椎间孔腰椎椎间融合术的有限元分析[J].中国生物医学工程学报,2013,32(6):762-768.
- [4] 郝剑,朴哲,李继海,等.基于 CT 图像和逆向工程方法建立正常人体腰椎三维有限元模型[J].中国组织工程研究,2012,16(4):762-768.
- [5] 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.
- [6] 张建乔,董黎强,金才益,等.单枚与双枚椎间融合器治疗退行性腰椎失稳症的临床对照研究[J].中国骨伤,2009,22(10):733-737.
- [7] 陈志明,马华松,赵杰,等.腰椎单侧椎弓根螺钉固定的三维

有限元分析[J].中国脊柱脊髓杂志,2010,20(8):684-688.

- [8] 赵杰,王新伟,海涌,等.后路斜向单枚椎间融合器的腰椎椎体融合术:生物力学评价[J].第二军医大学学报,1999,20(7):425-427.
- [9] Tsuang YH, Chiang YF, Hung CY, et al. Comparison of cage application modality in posterior lumbar interbody fusion with posterior instrumentation—A finite element study[J]. Med Eng Phys, 2009, 31(5):565-570.
- [10] 臧加成,马信龙,王涛,等.单侧与双侧椎弓根螺钉内固定在短节段腰椎融合手术中疗效比较的 meta 分析[J].中华外科杂志,2012,50(9):848-853.
- [11] 张振辉,陶志强,伍绍成,等.椎弓根螺钉及融合器应力分布在腰椎滑脱后路骨融合模型的三维有限元分析[J].中国组织工程研究与临床康复,2010,14(48):8958-8961.
- [12] 徐晖,赵敬凯,陈鸥,等.后凸成形术中骨水泥量对相邻椎体终板影响的有限元分析[J].中华创伤杂志,2012,28(3):227-231.
- [13] 王健,朱立新,曹延林.人体腰椎有限元建模及内固定的生物力学研究[J].中华创伤骨科杂志,2011,13(6):589-591.

(收稿日期:2013-12-24;修回日期:2014-01-20)

(本文编辑:黄攸生; 英文编辑:王建东)