

文章编号:1004-7220(2014)05-0405-06

腰椎行椎间孔入路椎间融合术固定的有限元分析

张文¹, 王兰¹, 施勤^{1,2}, 曾昭勋², 杨惠林^{1,2}, 罗宗平¹

(1. 苏州大学骨科研究所, 苏州 215006; 2. 苏州大学附属第一医院, 苏州 215006)

摘要: **目的** 利用有限元方法分析经单侧椎间孔入路腰椎间融合术治疗腰椎退行性病变的临床可行性。**方法** 基于正常人 L3~5 节段的 CT 扫描数据, 利用 Mimics、Pro/E、ANSYS 软件分别建立 L3~5 正常生理状态有限元模型、L4/5 左单侧椎弓根螺钉内固定加椎间融合器模型(单侧 TLIF)、L4/5 双侧椎弓根螺钉内固定加椎间融合器模型(双侧 TLIF)。在 L3 上表面施加 500 N 的人体重量和 10 N·m 力矩, 模拟人体直立、前屈、后伸、左侧弯和右旋 5 种生理活动, 观察不同工况时椎体、椎间盘、螺钉及融合器上变形及应力分布情况, 比较两种固定方法力学性能上的差异。**结果** 各种工况下单侧 TLIF、双侧 TLIF 的 L3~5 节段变形量均较生理状态模型减少, 单侧 TLIF、双侧 TLIF 模型均在后伸运动时融合器的应力达到最大值, 且单侧 TLIF 模型椎弓根螺钉上的应力峰值在各种工况中均明显高于双侧 TLIF, 后伸工况时应力峰值达到 463.39 MPa。**结论** 单侧 TLIF 可作为腰椎退变性疾病的一种固定方法, 但应力峰值均明显高于双侧 TLIF 模型, 故系统稳定性差于双侧 TLIF 模型, 提示患者在康复过程中应减少后伸运动, 以免发生手术失效或螺钉断裂。

关键词: 下腰椎不稳症; 椎间孔入路椎间融合术; 椎间融合器; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Finite element analysis on transforaminal lumbar interbody fusion treatment

ZHANG Wen¹, WANG Lan¹, SHI Qin^{1,2}, ZENG Zhao-xun², YANG Hui-lin^{1,2}, LUO Zong-ping¹ (1. Orthopaedic Institute of Soochow University, Suzhou 215006, China; 2. The First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: **Objective** To analyze the clinical feasibility of unilateral transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) for treating lumbar degenerative diseases by finite element method. **Methods** Based on CT scan data, three-dimensional (3D) finite element models of the normal L3-5 segments under physiological status (intact lumbar model), L4/5 with unilateral pedicle screw fixation plus interbody fusion (unilateral TLIF model) and L4/5 with bilateral pedicle screw fixation plus interbody fusion (bilateral TLIF model) were established by using Mimics, Pro/E, ANSYS software, respectively. Preload of 500 N and load of 10 N·m torque were applied on the superior surface of the L3 segment to simulate 5 physiological activities: body upright, flexion, extension, left lateral bending and right axial rotation. The deformation and stress distributions in vertebral body, vertebral discs, pedicle screw and cage under different loads were then recorded and analyzed to compare mechanical properties of the two fixation methods. **Results** The deformation of L3-5 segments fixed with unilateral TLIF or bilateral TLIF decreased as compared to the intact lumbar model; the stresses in cage reached the maximum in both unilateral TLIF model and bilateral TLIF model during back extension, meanwhile peak stresses on pedicle screws in unilateral TLIF were significantly higher than those on bilateral TLIF model, with the peak stress of 463.39 MPa during back extension. **Conclusions** Unilateral TLIF can be selected as a method for treating lumbar degenerative diseases; however, its stability was inferior to bilateral TLIF due to the higher peak stress. Therefore, less stretch

收稿日期:2013-11-23; 修回日期:2013-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11072165,31270995)。

通信作者:罗宗平,教授, E-mail: zongpingluo@suda.edu.cn。

exercises may be safe for patients during rehabilitation to avoid surgery failure or pedicle screw fracture.

Key words: Lower lumbar instability; Transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF); Interbody fusion (cage); Finite element analysis

经椎间孔入路椎间融合术(transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF)是治疗下腰椎不稳症的主要手术方法,相对于经前路椎体间融合技术(anterior lumbar interbody fusion, ALIF)和经后路椎体间融合技术(posterior lumbar interbody fusion, PLIF)是一种较新的脊柱融合技术^[1-2]。

TLIF表现为经椎间孔入路植入椎间融合器,保留了对侧的椎板及后部结构,减小了对神经根和硬膜囊的牵拉,从而降低神经损伤的可能。由于只切除一次关节突,脊柱后方稳定结构得到最大程度保留,故更具有力学优势^[3]。本文采用有限元方法对L3~5正常生理状态模型、L4/5左单侧椎弓根螺钉内固定加椎间融合器模型(单侧TLIF)、L4/5双侧椎弓根螺钉内固定加椎间融合器模型(双侧TLIF)进行受力分析,观测两种不同固定方式在不同工况时椎体、椎间盘、螺钉和融合器上的变形和应力分布情况,比较两种方法的差异;从理论上探讨研究腰椎行单侧TLIF治疗腰椎退行性病变的临床可行性,并从理论上分析行TLIF手术后椎弓根钉和融合器上的力学性能变化,为该手术的临床应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 建立椎体和椎间盘三维几何模型

利用General Electrics 64层螺旋CT机对成年男性志愿者腰椎段进行横断面扫描,将获取的CT数据导入医学图像重建软件Mimics 10.01中,通过调整阈值、区域增长、空洞填补和三维建模等步骤分别得到L3~5各节段及椎间盘的三维几何模型^[4-6]。其中椎体骨被分成皮质骨、松质骨和后部解剖结构三部分。椎间盘被分成纤维环和髓核两部分。

1.2 建立内固定模型

将Pro/E软件中建立的螺钉系统(螺钉直径5.5 mm,长度50.0 mm,连接棒直径6.0 mm,长度50.0 mm)和椎间融合器模型(22.0 mm × 10.0 mm × 9.0 mm),由STL格式导入Mimics软件(见图1)。



图1 椎弓根螺钉、椎间融合器实体模型

Fig.1 Solid model of the pedicle screws and cage

1.3 建立三维有限元模型

在三维几何模型的基础上利用软件的模拟模块,对螺钉系统、椎间融合器和椎体进行装配及布尔操作,从而建立生理状态模型、L4/5左单侧TLIF固定模型、L4/5双侧TLIF固定模型(见图2)。

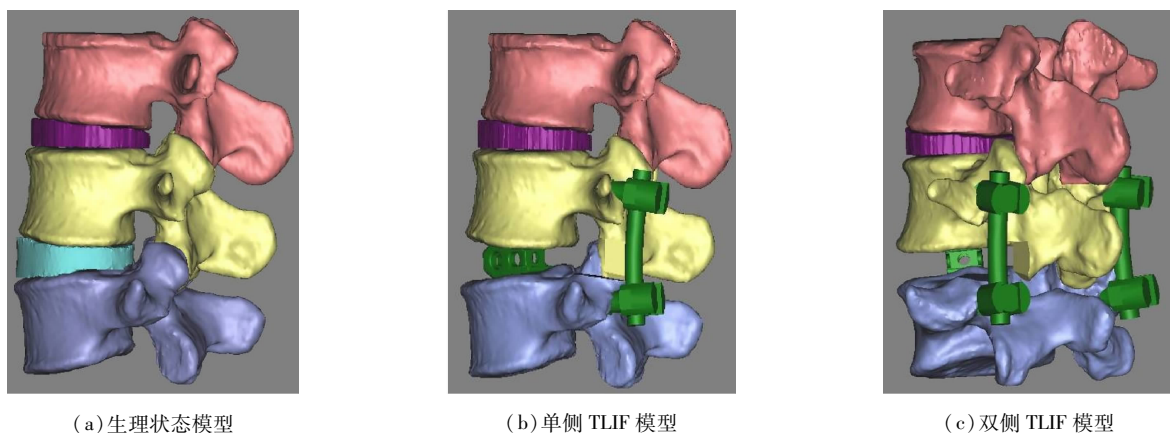
将骨性模型经过优化网格模块进行面网格优化,导入有限元分析软件Ansys 10.0,划分用于有限元分析的体网格。将完成体网格的模型再次导入Mimics软件,对模型的皮质骨、松质骨、后部结构及髓核、纤维环等部分分别赋以相应的材料属性(见表1)。

螺钉系统和椎间融合器直接导入ANSYS有限

表1 各部分材料属性

Tab.1 Material properties for each part of the vertebrae

	弹性模量/MPa	泊松比 ν
皮质骨	12 000	0.3
松质骨	100	0.3
椎体终板	12 000	0.3
后部结构	3 500	0.3
髓核	1	0.499
纤维环	4.2	0.45
钉棒系统	110 000	0.3
椎间融合器	110 000	0.3



(a)生理状态模型

(b)单侧 TLIF 模型

(c)双侧 TLIF 模型

图2 椎体及 TLIF 三维几何模型

Fig.2 Vertebral body and 3D geometric model of TLIF (a) Intact lumbar model, (b) Unilateral TLIF model, (c) Bilateral TLIF model

元软件划分体网格并分配均一的材料属性^[7-8]。从而完成 L3~5 节段生理状态三维有限元模型、L4/5 行左单侧 TLIF 三维有限元模型(单侧 TLIF)和 L4/5 行双侧 TLIF 三维有限元模型(双侧 TLIF)。其中,生理状态模型包含 340 798 个单元,229 931 个节点;单侧 TLIF 模型包含 427 209 个单元,282 238 个节点;双侧 TLIF 模型包含 549 971 个单元,365 831 个节点。

1.4 加载和分析

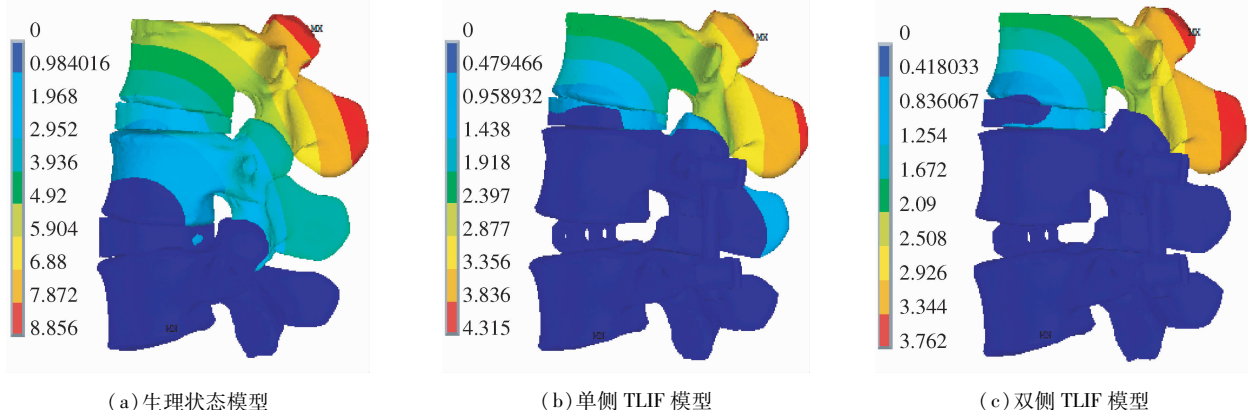
对 L3~5 节段的小关节部分建立约束方程,约束其 X、Y 两个方向的自由度,同时将螺钉系统、椎间融合器与椎体之间建成耦合方程。约束 L5 下表面的所有节点的全自由度,并在 L3 上表面施加

500 N 的人体重力模拟人体直立状态,再同时施加 10 N·m 力矩,模拟人体前屈、后伸、左侧弯和右旋生理活动^[9-10]。在计算机中对上述模型在各种工况下进行模拟分析,观测椎体、椎间盘、螺钉及融合器上变形及应力分布情况(见图 3、4)。

2 结果

2.1 模型有效性验证

为了验证模型的有效性,选取腰椎 L4~5 节段生理状态模型,参考 Panjab、Markolf 和 Virgin 模型^[11-13],在 L4 节段的上表面均匀施加垂直向下的 800 N 载荷,模拟人体直立状态,施加 7.5 N·m 模拟人体侧弯状态,并计算 L4/5 节段平均刚度。在垂



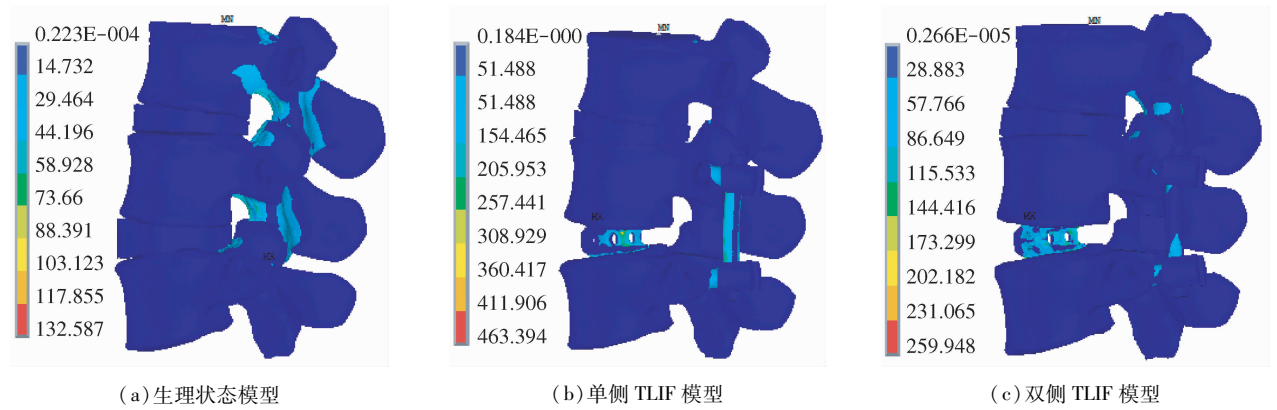
(a)生理状态模型

(b)单侧 TLIF 模型

(c)双侧 TLIF 模型

图3 后伸工况时椎体的变形分布

Fig.3 Deformation distribution on vertebral body under extension condition (a) Intact lumbar model, (b) Unilateral TLIF model, (c) Bilateral TLIF model



(a)生理状态模型

(b)单侧 TLIF 模型

(c)双侧 TLIF 模型

图4 后伸工况时椎体的应力分布

Fig.4 Stress distribution on vertebral body under extension condition (a) Intact lumbar model, (b) Unilateral TLIF model, (c) Bilateral TLIF model

直载荷作用下,本模型的平均刚度为 11.89,小于 Panjabi 模型的 12.20,而大于 Markolf 的 9.59 和 Virgin 的 4.95。在侧弯力矩作用下,本模型的平均刚度 2.17,小于 Panjabi 模型的 2.89,大于 Markolf 的 2.01 和 Virgin 的 1.88。由此可见,本模型的分析结果与其他研究者的实验数据和有限元分析结果比较接近,说明本模型能够很好反映腰椎的实际生物力

表2 不同工况下椎体和椎间盘变形量

Tab.2 Deformation on the vertebral body and disc

工况	椎体变形/mm			椎间盘变形/mm		
	生理	单侧	双侧	生理	单侧	双侧
	状态	TLIF	TLIF	状态	TLIF	TLIF
模型	模型	模型	模型	模型	模型	
直立	3.6	1.9	1.7	2.4	1.7	1.7
前屈	3.4	1.9	1.9	2.7	1.8	1.9
后伸	8.9	4.3	3.8	3.7	1.7	1.4
左侧弯	4.8	2.3	2.3	2.7	1.3	1.3
右旋	3.8	2.1	1.8	2.5	1.8	1.7

从表2可以看出,各工况下生理状态模型L3~5节段整体变形量及L3~4节段间椎间盘变形量均明显高于单侧 TLIF 和双侧 TLIF 模型,后伸工况时生理状态模型及椎间盘上的变形量最大,说明在椎体上作螺钉和椎间融合器固定后,对椎体活动度有一定的限制作用,这样可对病变的腰椎起到保护作用。5种工况中,单侧 TLIF 和双侧 TLIF 模型在椎体和椎间盘上的最大变形程度相当,说明两者均能提供

足够的稳定性,应力分布符合实际情况,从而验证了本模型的有效性。

2.2 结果

通过计算机的模拟分析,得到各模型在不同工况下的变形以及应力分布情况(见表2、3),其中应力尺度采用等效应力,即 Von Mises 应力。

表3 椎弓根螺钉和椎间融合器上应力分布

Tab.3 Stress distribution on the pedicle screws and interbody fusion

工况	椎弓根螺钉应力/MPa		椎间融合器应力/MPa	
	单侧 TLIF	双侧 TLIF	单侧 TLIF	双侧 TLIF
	模型	模型	模型	模型
直立	128.71	60.56	318.09	109.51
前屈	172.29	140.31	271.34	196.17
后伸	428.88	259.95	463.39	128.49
左侧弯	119.60	204.86	176.62	122.70
右旋	166.98	101.46	306.73	141.91

足够的稳定性。

由表3可知,单侧 TLIF 和双侧 TLIF 模型均在后伸状态时螺钉上的应力峰值最大,单侧 TLIF 模型的应力达到 428.88 MPa。单侧 TLIF 模型在5种工况中,椎间融合器上的应力均明显高于双侧 TLIF 模型,在后伸状态时应力最高值为 463.39 MPa。双侧 TLIF 模型只有后伸状态时,螺钉系统承担主要应力为 259.95 MPa,其他状态都是由椎间融合器和椎弓

根螺钉系统共同承担。单侧 TLIF 模型在侧弯状态时融合器的应力峰值最小,为 176.62 MPa;而双侧 TLIF 模型在直立时融合器的应力峰值最小,为 109.51 MPa。

3 讨论

目前,临床上后路腰椎椎体间融合多采用置入双枚融合器,该技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,另一方面亦有潜在的术中损伤马尾神经根的风险。为解决这一问题,产生了经椎间孔腰椎融合固定方式,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,故增加了椎体间的稳定性,同时又能满足融合术的要求。由于施术者习惯、技术及其他因素的影响,目前临床上对于经椎间孔腰椎融合固定的手术治疗有多种组合方式,但缺乏系统的生物力学研究^[14-16]。

本文通过有限元方法对腰椎 L4/5 节段行左单侧 TLIF 和双侧 TLIF 进行受力分析,结果发现在生理状态椎弓峡部是椎体后方结构中应力最集中的部位,在后伸位时应力达到峰值。双侧 TLIF 模型椎体后方结构的应力云图分布最为对称,而单侧 TLIF 模型应力集中于左侧(椎弓根螺钉侧),椎体应力分布存在的不对称性,会带来偏心性运动^[17-18]。从后方内固定物所承受的应力峰值来分析,可以发现单侧 TLIF 模型应力峰值最大。椎间融合器在椎间融合术中充分分担了椎弓根螺钉的应力,减少了椎弓根螺钉的断裂,两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,是治疗下腰椎不稳症的有效方法^[19]。

同时,本文证实了 L4/5 节段行双侧椎弓根螺钉固定加椎间融合器有较好的稳定性,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,无症状侧的显露和置入椎弓根螺钉是对患者的额外损伤。

比较两种不同的固定方法,发现单侧 TLIF 模型生物力学性能优良,可以提供足够的稳定性,可作为腰椎退变性疾病的一种固定方法;且该方法在保留后路手术优点的同时,仅需切除单侧小关节突及半椎板,保留了椎体的稳定性。但该方法的应力峰值均

明显高于双侧 TLIF 模型,系统稳定性差于双侧 TLIF 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。两种手术方法在后伸状态时螺钉上的峰值均偏大,提示患者在康复过程中应减少后伸运动,以免发生手术失效或螺钉断裂。

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。本研究在整个建模和分析过程中,对组织的生物力学特性做了简化处理^[8,20]。虽然这些简化不可避免地对模型计算结果产生一定影响,但分析的整个过程还是能很好地模拟手术,为该技术在临床上的应用提供了理论指导。

参考文献:

- [1] Dipaola CP, Molinari RW. Posterior lumbar interbody fusion [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2008, 16(3): 130-139.
- [2] 张文,杨惠林,王兰,等. 腰椎行单侧和双侧椎弓根螺钉固定系统的三维有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(S): 98.
- [3] 顾晓民,贾连顺,陈雄生,等. 单椎节与单节段内固定治疗腰椎椎弓峡部裂的有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2011, 26(1): 63-68.
Gu XM, Jia LS, Chen XS, et al. Finite element analysis on intra-segmental fixation and inter-segmental fixation for lumbar spondylolysis[J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(1): 63-68.
- [4] 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.
Qin JS, Wang Y, Peng XQ, et al. Three-dimensional finite element modeling of whole lumbar spine and its biomechanical analysis [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(3): 321-325.
- [5] Zhou J, Yang HL, Zhang W, et al. A simple intraoperative position determination method during balloon kyphoplasty in patients with osteoporotic vertebral compression fractures and MIMICS 3-dimensional reconstruction evaluation to transpedicular trocars channel and cement leakage [J]. *Bone*, 2010, 47(Suppl 3): 454.
- [6] 牛文鑫,杨云峰,俞光荣,等. 人体足部三维有限元模型的有效构建方法及其合理性的实验分析研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2009, 26(1): 80-84.
- [7] 顾晓民,贾连顺,陈雄生,等. 腰椎椎弓峡部裂三维有限元模型的建立与验证[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(1): 45-50.
Gu XM, Jia LS, Chen XS, et al. Biomechanics of lumbar

- spondylolysis: Finite element modeling and validation [J]. J Med Biomech, 2010, 25(1): 45-50.
- [8] 闫家智, 吴志宏, 徐日新, 等. 腰椎后路单节段椎弓根螺钉内固定的三维有限元分析[J]. 中华医学杂志, 2006, 89(1): 7-11.
- [9] Villavicencio AT, Burneikiene S, Bulsara KR, *et al.* Utility of computerized isocentric fluoroscopy for minimally invasive spinal surgical techniques [J]. J Spinal Disord Tech, 2005, 18(4): 369-375.
- [10] Sethi A, Lee S, Vaidya R. Transforaminal lumbar interbody fusion using unilateral pedicle screws and a translaminar screw [J]. Eur Spine J, 2009, 18(3): 430-434.
- [11] Panjabi MM, Oxland TR, Yamamoto I, *et al.* Mechanical behavior of the human lumbar and lumbosacral spine as shown by three-dimensional load-displacement curves[J]. J Bone Joint Surg Am, 1994, 76(3): 413-424.
- [12] Markolf KL. Deformation of the thoracolumbar intervertebral joints in response to external load: A biomechanical study using autopsy material [J]. J Bone Joint Surg Am, 1972, 54(3): 511-533.
- [13] Virgin WJ. Experimental investigations into the physical properties of the intervertebral disc [J]. J Bone Joint Surg Br, 1951, 33B(4): 607-611.
- [14] Chen CS, Chen CK, Liu CL. A biomechanical comparison of posterolateral fusion and posterior fusion in the lumbar spine [J]. J Spinal Disord Tech, 2002, 15(1): 53-63.
- [15] Kim Y. Finite element analysis of anterior lumbar interbody fusion: Threaded cylindrical cage and pedical screw fixation [J]. Spine, 2007, 32(23): 2558-2568.
- [16] Harris BM, Hilibrand AS, Savas PE, *et al.* Transforaminal lumbar interbody fusion: The effect of various instrumentation techniques on the flexibility of the lumbar spine [J]. Spine, 2004, 29(4): 65-70.
- [17] 张烽, 陈兵乾, 居建文, 等. 三种单纯腰椎椎间融合术加用双侧椎弓根螺钉内固定后生物力学比较的实验研究[J]. 医用生物力学, 2007, 22(3): 302-305.
- Zhang F, Chen BQ, Ju JW, *et al.* Biomechanical comparison of the initial stability after anterior, posterior and transforaminal interbody fusion with and without posterior pedicle instrumentation [J]. J Med Biomech, 2007, 22(3): 302-305.
- [18] Phillips FM, Cunningham B. Intertransverse lumbar interbody fusion [J]. Spine, 2002, 27(2): E37-41.
- [19] Palmer S, Turner R, Palmer R. Bilateral decompression of lumbar spinal stenosis involving a unilateral approach with the microscope and tubular retractor system [J]. J Neurosurg, 2002, 97(2 Suppl): 213-217.
- [20] 张文, 倪俊芳, 蒋定华, 等. 基于 CT 图像构建髌骨关节生物力学模型[J]. 苏州大学学报: 工科版, 2009, 29(4): 56-58.