

文章编号:1004-7220(2021)02-0201-07

新型关节突钉板系统联合单侧椎弓根螺钉固定的生物力学研究

缪伟¹, 施建东¹, 陆爱清¹, 王素春¹, 李霞¹, 王志荣¹, 张文²

(1.南京中医药大学张家港附属医院 骨科, 江苏 苏州 215600; 2.苏州大学骨科研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要:目的 研究经椎间孔入路椎体间融合术(transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF)结合新型关节突钉板系统(articular process fixation system, APFS)的腰椎稳定性。方法 在已验证的有限元模型L3~S1完整节段(模型A)上,模拟TLIF手术,建立双侧椎弓根螺钉固定TLIF模型(模型B)、右单侧椎弓根螺钉固定TLIF模型(模型C)、APFS联合右侧椎弓根螺钉固定TLIF模型(模型D)。观察不同工况下腰椎模型的活动度(range of motion, ROM)以及椎弓根螺钉、APFS、椎间融合器应力分布情况。结果 不同工况下,模型B、C、D整体ROM相当,均小于生理状态模型。模型D与模型B、C相比,右侧椎弓根螺钉及椎间融合器最大压应力在不同工况下最小或介于模型B、C之间。模型D在前屈状态下APFS及右侧椎弓根螺钉应力峰值均最大。结论 APFS联合对侧椎弓根螺钉固定可作为腰椎TLIF手术的一种新型固定方式。

关键词:椎弓根螺钉; 关节突; 椎体间融合; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.02.006

Biomechanical Study of Novel Articular Process Fixation System Combined with Unilateral Pedicle Screw Fixation

MIAO Wei¹, SHI Jiandong¹, LU Aiqing¹, WANG Suchun¹, LI Xia¹, WANG Zhirong¹, ZHANG Wen²

(1. Department of Orthopaedics, Zhangjiagang Hospital Affiliated to Nanjing University of Chinese Medicine, Suzhou 215600, Jiangsu, China; 2. Institute of Orthopaedics at Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China)

Abstract: Objective To study the stability of lumbar spine after transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) surgery combined with a novel articular process fixation system (APFS). **Methods** Based on the validated finite element model of L3-S1 intact segment (Model A), TLIF surgery was simulated to establish bilateral pedicle screw TLIF model (Model B), right unilateral pedicle screw TLIF model (Model C), APFS combined with right pedicle screw fixation TLIF model (Model D). The range of motion (ROM) of the lumbar spine model and stress distributions on pedicle screws, APFS and interbody fusion cages under different working conditions were observed. **Results** The overall ROMs of Models B, C, and D under different working conditions were comparable, which were all smaller than those of the physiological model. Compared with Models B and C, the maximum compressive stress of the right pedicle screw and the interbody fusion cage in Model D was the

收稿日期:2020-02-18; 修回日期:2020-03-19

基金项目:苏州市产业技术创新专项—民生科技医疗卫生应用基础研究项目(SYSD2017008),张家港市科技计划项目(ZKS1919)

通信作者:张文,高级实验师,E-mail: wenzhang@suda.edu.cn

smallest or between Models B and C under different working conditions. Model D had the largest peak stress of APFS and right pedicle screw during anterior flexion. **Conclusions** APFS combined with contralateral pedicle screw fixation can be used as a novel fixation method for TLIF surgery of lumbar spine.

Key words: pedicle screw; articular process; interbody fusion; finite element analysis

随着工作压力增加、锻炼减少、生活节奏加快,腰椎间盘突出症患者人数在不断增多。尽管多数患者行药物、牵引、按摩等保守治疗的效果良好,但不少患者仍须行手术治疗^[1]。临床多采用后路减压融合内固定术治疗腰椎间盘突出症,但目前广泛采用的经椎间孔入路椎体间融合术结合双侧椎弓根螺钉固定手术创伤大,并且双侧椎弓根螺钉固定还会增加神经根和椎间盘损伤的风险^[2-4]。相比之下,单侧椎弓根螺钉固定可以降低以上风险。研究表明,采用单侧椎弓根螺钉治疗腰椎退行性疾病具有良好的疗效^[5-6]。但也有研究认为,在腰椎融合手术中,单侧椎弓根螺钉固定与双侧椎弓根螺钉固定相比,断钉风险增加,椎间融合器下沉风险较高,还会因应力不平衡而发生耦合运动^[7-8]。

为了保留单、双侧椎弓根螺钉固定的各自优势,并克服其不足,本课题组研制了关节突钉板系统(articular process fixation system, APFS)及配套瞄准工具(国家实用新型专利号:ZL 201821209904.5),临床使用时拟采用 APFS 联合对侧椎弓根螺钉固定。为了从理论上探讨该新型固定装置的可行性,本文建立生理状态及3种不同内固定组合的腰椎有限元模型,观察不同工况下模型的活动度(range of motion, ROM)及椎弓根螺钉、APFS、融合器的应力分布情况,为该固定装置的临床应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 正常腰椎三维几何模型建立

应用螺旋 CT 对 1 位成年健康男性志愿者(43岁,体质量 70 kg,身高 173 cm)腰椎进行横断位薄层连续扫描(扫描参数:120 kV,200 mA),数据以 DICOM 格式存储在计算机中,导入 Mimics 15.0 医学图像处理软件中建立椎体模型,利用 3-matic 软件建立各节段椎间盘、上下终板和纤维环模型。将 Mimics 软件导出的 L3~S1 模型以 STL 文件导入

Geomagic Studio 12.0 中,并进行特征面模型处理,重建 L3~S1 椎体复杂曲面模型。将完成后的各节段模型以 IGES 格式导出。

1.2 生理状态及 3 种固定模型建立

将模型导入 Pro/E 5.0 软件中,对椎间盘、髓核、上下终板进行组装。使用 HyperMesh 12.0 划分体网格,并添加前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘上韧带、棘间韧带和横突间韧带等,建立 L3~S1 生理状态三维有限元模型(模型 A),该模型的有效性已在先前研究中验证^[9-10]。模拟 TLIF 手术方法,分别切除 L4 右侧下关节突、L5 右侧上关节突、部分黄韧带、L4~5 椎间盘,保留其余韧带。通过 Pro/E 软件分别建立椎弓根螺钉系统、APFS 及椎间融合器模型,其中椎弓根螺钉直径 5.5 mm、长 50.0 mm,连接棒直径 6.0 mm、长 5.0 mm;APFS 为不规则形状;椎间融合器为聚醚醚酮(poly-ether-ether-ketone, PEEK)材料,尺寸为 22.0 mm×10.0 mm×9.0 mm。利用 Mimics 软件在椎体上装配以上内固定,其中椎间融合器植入 L4~5 椎间隙,APFS 放置于 L4~5 左侧关节突关节,分别建立双侧椎弓根螺钉固定 TLIF 模型(模型 B)、右单侧椎弓根螺钉固定 TLIF 模型(模型 C)、APFS 联合右侧椎弓根螺钉固定 TLIF 模型(模型 D)(见图 1)。4 个模型的材料属性见表 1^[11-12]。其中,模型 A 包含 536 741 个单元,874 956 个节点;模型 B 包含 1 114 739 个单元,1 746 146 个节点;模型 C 包含 961 756 个单元,1 501 557 个节点;模型 D 包含 1 117 714 个单元,1 739 233 个节点。

1.3 加载和分析

在 ANSYS 13.0 中约束有限元模型 S1 底部所有节点的全自由度,并在 L3 上表面施加上半身体质量 400 N 模拟人体直立状态。在 L3 上表面同时施加 400 N 重力以及 10 N·m 力矩^[13-14],模拟人体进行前屈、后伸、左/右侧弯、左/右旋转运动工况。观察在不同工况下腰椎模型 ROM 及椎弓根螺钉、APFS、椎间融合器上的应力分布情况。

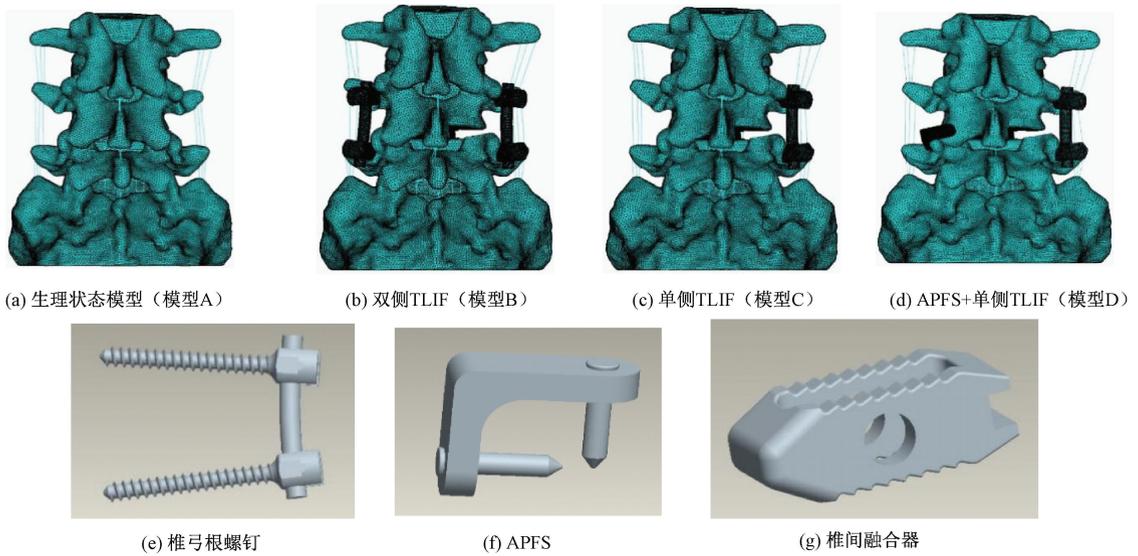


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element model (a) Intact model (Model A), (b) Bilateral TLIF model (Model B), (c) Unilateral TLIF model (Model C), (d) APFS+ unilateral TLIF model (Model D), (e) Pedicle screw, (f) APFS, (g) Fusion cage

表 1 材料属性分配

Tab.1 Attribute of material properties

材料	弹性模量/MPa	泊松比	横断面积/mm ²
椎体皮质骨	12 000	0.30	—
椎体松质骨	100	0.20	—
椎弓根及后部结构	3 500	0.25	—
上下终板	24.0	0.25	—
髓核	1.0	0.499	—
纤维环基质	4.2	0.45	—
前纵韧带	7.8	—	63.7
后纵韧带	1	—	20.0
黄韧带	1.5	—	40.0
横突间韧带	10	—	1.8
棘间韧带	1	—	40.0
棘上韧带	3	—	30.0
椎弓根螺钉系统	110 000	0.30	—
椎间融合器	3 700	0.25	—
关节突钉板固定系统	110 000	0.30	—

还是在其他 6 种运动工况下,TLIF 术后模型 B、C、D 的整体压缩变形和腰椎 ROM 均相当,且模型 D 在各种工况下的 ROM 介于模型 B 和 C 之间,说明 3 种固定方式在 TLIF 术后均能达到类似的固定效果,维持腰椎的稳定(见图 2、3)。

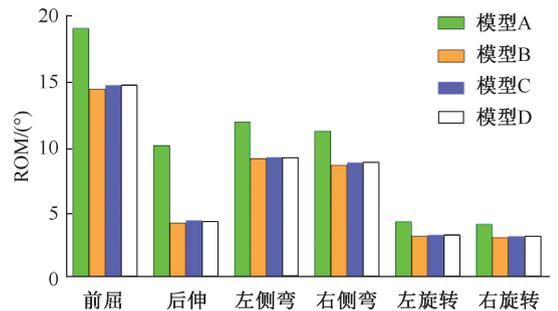


图 2 不同工况下模型活动度比较

Fig.2 Comparison of ROMs for models under different working conditions

2 结果

2.1 腰椎模型 ROM

TLIF 术后模型 B、C、D 直立状态下的整体变形和运动工况下的整体腰椎 ROM 基本相当,均小于生理状态模型 A,特别是在后伸时,ROM 下降量最大。该结果说明,腰椎 TLIF 术后采用双侧椎弓根螺钉、单侧椎弓根螺钉、APFS 联合对侧椎弓根螺钉固定均能对椎体活动起到约束作用。不管是在直立

2.2 右侧椎弓根螺钉最大应力

椎弓根上的应力分析结果表明,术后各种模型的最大应力峰值均分布在椎弓根螺钉尾端。模型 C 在直立及 6 种运动工况下右侧椎弓根螺钉应力峰值均高于模型 B、D,说明与 B、D 这两种固定方式相比,单侧椎弓根螺钉固定时螺钉在各种工况下均承受较大应力,断钉的风险最高。模型 C 在前屈时最大应力峰值达到 233.75 MPa,显示单

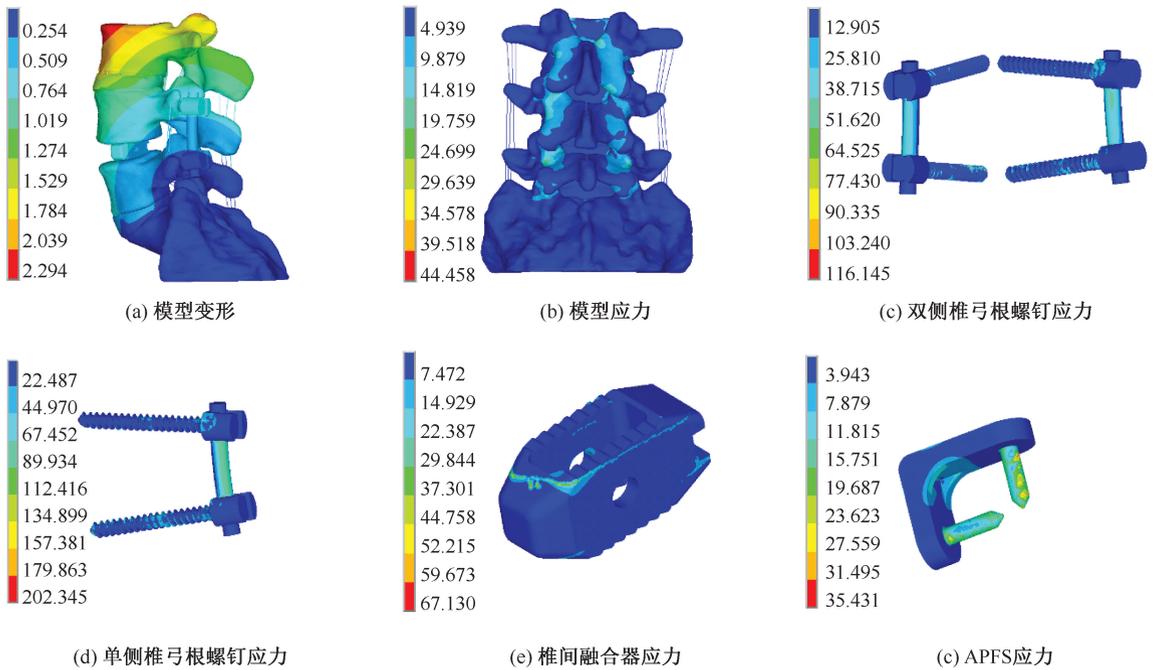


图3 模型变形和应力分布

Fig.3 Deformation and stress distributions on the model (a) Deformation of the model, (b) Stress of the model, (c) Stress of bilateral pedicle screws, (d) Stress of unilateral pedicle screws, (e) Stress of cage, (f) Stress of APFS

侧椎弓根螺钉固定时需限制前屈活动以防椎弓根螺钉断裂。模型 D 与模型 B、C 相比,左侧弯及左旋转时右侧椎弓根螺钉应力峰值最小,其余工况下右侧椎弓根螺钉应力峰值均大于模型 B,而小于模型 C,说明 APFS 联合对侧椎弓根螺钉固定较仅采用单侧椎弓根螺钉固定断钉的风险降低,其断钉风险介于单、双侧椎弓根螺钉固定之间(见图 4)。

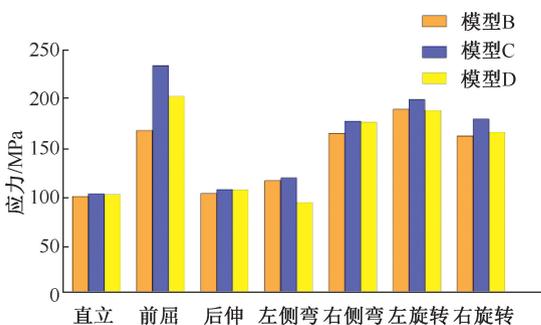


图4 不同工况下模型右侧椎弓根螺钉应力

Fig.4 Stress of right pedicle screw for models under different working conditions

2.3 椎间融合器最大压应力

椎间融合器承担一定的压应力,可有效分担椎

弓根螺钉上的应力。模型 C 椎间融合器的最大压应力均高于模型 B、D,说明单侧椎弓根螺钉固定时椎间融合器对椎体终板的应力较大,造成椎体终板塌陷及骨折风险较高。与模型 B、C 相比,模型 D 椎间融合器最大压应力在直立、前屈、后伸及左侧弯时均最小,说明在这些运动工况下采用 APFS 联合对侧椎弓根螺钉固定时椎间融合器对椎体终板的压应力最小,造成椎体终板塌陷及骨折风险最小。在右侧弯时模型 D 椎间融合器最大压应力大于模型 B,小于模型 C,说明在右侧弯工况下采用 APFS 联合对侧椎弓根螺钉固定时椎间融合器对椎体终板的压应力介于单、双侧椎弓根螺钉固定之间(见图 5)。

2.4 APFS 及对侧椎弓根螺钉应力

通过对 APFS 的应力分析可知,APFS 上最大应力峰值主要分布于固定在关节突上的螺钉根部。其中,直立时 APFS 最小应力峰值为 22.06 MPa,而 APFS 在前屈时最大应力峰值达到 58.57 MPa,此时右侧椎弓根螺钉应力也达到最大,为 202.35 MPa。因此,采用 APFS 联合对侧椎弓根螺钉固定时,需适当限制前屈运动以防内固定系统失效。

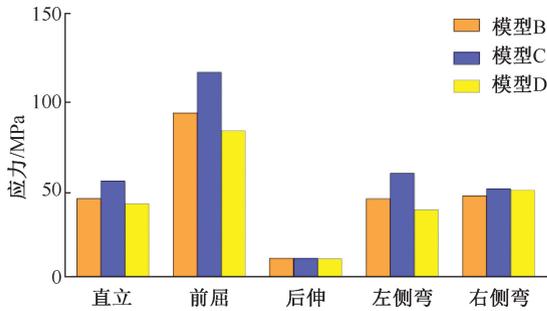


图5 不同工况下模型椎间融合器应力

Fig.5 Compression stress of interbody fusion cage for models under different working condition

3 讨论与结论

据流行病学研究,2011年45岁以上中国人腰痛患病率为18.6%,随着年龄增长,腰痛患者逐步增多^[15]。部分患者需手术治疗,而腰后路减压植骨融合内固定手术是治疗腰椎退行性病变最常用的方法之一。目前临床上广泛采用的腰后路减压植骨融合内固定手术多采用双侧椎弓根螺钉固定,可较好恢复脊柱的生理弧度,并且固定牢靠,螺钉及椎间融合器的应力较小,但其缺点也较明显。双侧椎弓根螺钉固定时手术出血多、创伤大,尤其双侧椎弓根螺钉固定较单侧固定会增加神经根损伤的概率。一旦神经根损伤,会造成下肢肌肉瘫痪,这样的并发症往往令患者难以承受。为了减少神经损伤及双侧固定引发肌肉损伤大、出血多等问题,研究人员采用单侧椎弓根螺钉固定,但术后发生融合器下陷及椎间不融合概率增高^[16]。而且单侧椎弓根螺钉因固定不对称会导致应力不平衡及耦合运动,这些问题使骨科医生对单侧椎弓根螺钉固定手术方案心存担忧,故未能在临床广泛开展。随后研究人员采用单侧椎弓根螺钉结合对侧经椎板关节突螺钉固定的方案,临床使用取得了较好疗效,但其也有局限性^[17]。陆声等^[18]研究认为,腰椎椎板上缘的厚度太薄,不适合经椎板关节突螺钉的放置。另外,临床上使用的经椎板关节突螺钉需要通过椎板打入关节突,技术难度高,椎板关节突螺钉进入椎管,损伤神经的风险较高^[19]。经椎板关节突螺钉固定的局限性限制了其在临床的进一步开展。

单、双侧椎弓根螺钉固定各有优缺点。为了保留各自的优势并克服不足,同时鉴于经椎板关节突

螺钉结合对侧椎弓根螺钉固定在临床应用取得了良好疗效,本课题组根据“非减压侧固定关节突关节”的理念,研制了一种安装简便、手术创伤小并且不容易损伤神经的关节突内固定系统 APFS,并应用三维有限元方法来验证有效性。APFS作为一种新的尝试,可部分弥补单、双侧椎弓根螺钉及经椎板关节突螺钉固定的缺点。本文希望通过对 APFS 的深入研究,采取合理内固定组合方案,优势互补,使患者利益最大化。临床使用 APFS 时拟采用腰后路小切口切开,肌间隙入路,手指触及关节突关节后,将 APFS 固定至配套瞄准工具后插到关节突关节表面,顺着瞄准工具上的套筒将两枚锁定螺钉打入。两枚螺钉的打入方法与股骨髓内钉的远端螺钉使用瞄准器打入方法类似(见图6)。其中,APFS 配套瞄准器上有个弹性插销,可插入 APFS 接骨板转角处,螺钉打入完成后可将瞄准器从 APFS 上拔离。

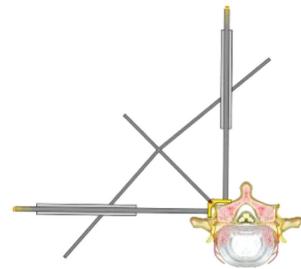


图6 APFS 及置入示意图

Fig.6 Diagram of APFS and placement

有限元结果显示,腰椎 TLIF 术使用单、双侧椎弓根螺钉固定或 APFS 联合对侧椎弓根螺钉固定均能对椎体活动起到约束作用,在术后维持腰椎的稳定。双侧椎弓根螺钉固定需剥离较多椎旁肌,可引起椎旁肌失神经萎缩、腰背衰弱综合征,并且双侧椎弓根螺钉固定较单侧固定造成神经根损伤的概率会增加。APFS 联合对侧椎弓根螺钉固定方案只需在神经根减压侧置入椎弓根螺钉,理论上减少一侧椎弓根螺钉的置入,可使神经根损伤风险降低50%。而对侧采用的 APFS 可微创置入,APFS 的锁定螺钉顺着瞄准器套筒进入可限制螺钉置入方向,螺钉总长度小于1cm,使螺钉只能打入关节突关节而不会进入椎管,操作起来较经椎板关节突螺钉及双侧椎弓根螺钉固定明显简便,创伤小,出血少,并且没有损伤神经根的风险。

椎间融合器配合不同内固定造成融合器沉降、

终板塌陷或骨折的风险差异较大,采用有限元法验证力学性能十分重要^[20]。椎间融合器与相邻终板接触面较小,会在需融合节段间形成一个类似“杠杆支点”的效应,导致未融合前椎体骨性终板与融合器不稳定,而单侧椎弓根螺钉采用的单边固定更加剧了这种不稳定^[21]。如果在对侧增加 APFS,或许能降低这种“杠杆支点”效应,后续试验将对此进行研究。椎弓根钉棒系统的连接棒有部分弹性,APFS 直接固定关节突关节,为硬固定且无明显弹性形变。通过单独分析各组模型 L4~5 节段 ROM 发现,模型 D 的 ROM 在直立、前屈、后伸及左侧弯工况下 L4 椎体下缘相对 L5 椎体上缘均比模型 B、C 小,这也是以上运动工况下模型 D 椎间融合器压应力最小的原因。从椎间融合器应力情况看,采用单侧椎弓根螺钉固定时,椎间融合器对椎体终板的压应力最大,造成椎体终板塌陷及骨折风险最高。采用 APFS 联合对侧椎弓根螺钉固定时,各工况下椎间融合器压应力均小于单侧椎弓根螺钉固定,说明这种新型固定方案能改善单侧椎弓根螺钉固定中融合器沉降及终板骨折的问题。而从右侧椎弓根螺钉最大应力来看,采用 APFS 联合对侧椎弓根螺钉固定时,各工况下右侧椎弓根螺钉最大应力均小于单侧椎弓根螺钉固定,显示 APFS 能改善单侧椎弓根螺钉固定断钉风险增高的问题。APFS 联合对侧椎弓根螺钉固定能解决单侧椎弓根螺钉固定的以上缺点,以期 APFS 能减轻临床医生对单侧椎弓根螺钉固定的担忧。

本文有限元结果显示,APFS 联合对侧椎弓根螺钉固定能够在 TLIF 术后维持腰椎的稳定性,减少双侧椎弓根螺钉置入所造成创伤大、出血多、神经根损伤风险高的问题,改善单侧椎弓根螺钉融合器下陷及断钉风险增高的不足,解决经椎板关节突螺钉固定技术难度高的问题。各种工况下 APFS 最大应力均小于 TC4 的屈服强度^[22],说明 APFS 强度能满足术后日常活动的要求。

关节突关节退变程度是影响腰椎内固定后疗效的重要因素^[23-24]。研究表明,慢性下腰椎疼痛与关节突增生所致侧隐窝狭窄有较大相关性^[25]。APFS 固定关节突关节,能够减少关节突关节活动,增加腰椎抗旋转、抗张力作用,增强后柱稳定性,对下腰椎手术意义重大。

医疗器械的传统检测主要通过力学试验装置完成,但这种方式耗时耗力,样本的一致性无法保证。随着有限元分析手段的不断成熟,有限元成为一种可有效节约时间和费用的更有针对性的科学检测手段。本文通过有限元方法检测 TLIF 术后 APFS 联合右侧椎弓根螺钉固定的力学性能,对模型进行部分合理简化,所得结果可为了解 APFS 力学性能提供参考,但这并不能完全代替动物或尸体的生物力学测试。肌肉在维持脊柱稳定性方面也具有重要作用,有限元方法仍不能精确模拟活体在各种运动工况下的力学变化,故后续研究将对动物标本进行生物力学测试^[26]。同时,鉴于手术入路、术式、固定方法的更新离不开与之相辅相成的内固定器械及生物力学研究,如何将两者创新发展是临床与基础研究发展的方向之一。

参考文献:

- [1] HUSSEIN M, ABDELDAYEM A, MATTAR MM. Surgical technique and effectiveness of microendoscopic discectomy for large uncontained lumbar disc herniations: A prospective, randomized, controlled study with 8 years of follow-up [J]. *Eur Spine J*, 2014, 23(9): 2017-2017.
- [2] ZHU Y, ZHANG Y, FANG J, *et al.* Mid-term outcomes of unilateral pedicle screw fixation with lumbar interbody fusion for lumbar degenerative diseases [J]. *Chin J Surg*, 2014, 94(17): 1326-1329.
- [3] ZANG JC, MA XL, WANG T, *et al.* Unilateral versus bilateral pedicle screw fixation in lumbar spinal fusion: A meta-analysis of available evidence [J]. *Chin J Surg*, 2012, 50(9): 848-853.
- [4] CHANG PY, WANG MY. Lumbar scoliosis (degenerative) MIS surgery (PSO/TLIF) complication [M]//*Spinal Deformity*. Cham: Springer, 2018: 225-231.
- [5] SUK S, LEE M, KIM H, *et al.* Unilateral versus bilateral pedicle screw fixation in lumbar spinal fusion [J]. *Spine*, 2000, 25(14): 1843-1847.
- [6] CHEN DJ, YAO C, SONG Q, *et al.* Unilateral vertebral pedicle screw fixation combined with transforaminal lumbar interbody fusion versus bilateral for the treatment of low lumbar degenerative disc diseases: Analysis of clinical and radiographic results [J]. *World Neurosurg*, 2018, 115: e516-e522.
- [7] MI J, LI K, ZHAO X, *et al.* Vertebral body Hounsfield units are associated with cage subsidence after transforaminal lumbar interbody fusion with unilateral pedicle screw

- fixation [J]. *Clin Spine Surg*, 2017, 30(8): e1130-e1136.
- [8] KASAI Y, INABA T, KATO T, *et al.* Biomechanical study of the lumbar spine using a unilateral pedicle screw fixation system [J]. *J Clin Neurosci*, 2010, 17(3): 364-367.
- [9] MO J, ZHANG W, ZHONG D, *et al.* Is preventative long-segment surgery for multi-level spondylolysis necessary? A finite element analysis study [J]. *PLoS One*, 2016, 11(2): e0149707-e0149707.
- [10] 张文, 王兰, 施勤, 等. 腰椎行椎间孔入路椎间融合术固定的有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2014, 29(5): 405-410. ZHANG W, WANG L, SHI Q, *et al.* Finite element analysis on transforaminal lumbar interbody fusion treatment [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(5): 405-410.
- [11] KUO CS, HU HT, LIN RM, *et al.* Biomechanical analysis of the lumbar spine on facet joint force and intradiscal pressure: A finite element study [J]. *BMC Musculoskel Dis*, 2010, doi: 10.1186/1471-2474-11-151.
- [12] CHEN CS, CHENG CK, LIU CL, *et al.* Stress analysis of the disc adjacent to interbody fusion in lumbar spine [J]. *Med Eng Phys*, 2001, 23(7): 485-493.
- [13] AMBATI DV, WRIGHT EK, LEHMAN RA, *et al.* Bilateral pedicle screw fixation provides superior biomechanical stability in transforaminal lumbar interbody fusion: A finite element study [J]. *Spine J*, 2015, 15(8): 1812-1822.
- [14] ZHU R, NIU WX, ZENG ZL, *et al.* The effects of muscle weakness on degenerative spondylolisthesis: A finite element study [J]. *Clin Biomech*, 2017, 41(1): 34-38.
- [15] 张砚卓, 王倩倩, 袁越, 等. 中国45岁以上人群腰痛患病率调查; 基于中国健康与养老追踪调查数据[J]. *骨科临床与研究杂志*, 2018, 3(1): 38-42.
- [16] SLUCKY AV, BRODKE DS, BACHUS KN, *et al.* Less invasive posterior fixation method following transforaminal lumbar interbody fusion: A biomechanical analysis [J]. *Spine J*, 2006, 6(1): 78-85.
- [17] 姜伟, 袁峰. 单侧椎弓根螺钉联合经椎板关节突螺钉与双侧椎弓根螺钉固定治疗下腰椎退行性疾病: 2年随访[J]. *中国组织工程研究*, 2017, 21(19): 2973-2979.
- [18] 陆声, 徐永清, 丁自海, 等. 经皮椎板关节突螺钉固定的应用解剖及影像学研究[J]. *中国矫形外科杂志*, 2006, 14(5): 351-352.
- [19] 韩建福, 吴鹏, 宋永兴, 等. 两种入路联合固定融合治疗腰椎退行性疾病的早期并发症分析[J]. *临床骨科杂志*, 2018, 21(5): 22-27.
- [20] 张振军, 廖振华, 孙艺菊, 等. 腰椎椎间融合器及其在椎间融合术中的生物力学研究进展[J]. *医用生物力学*, 2018, 33(5): 465-470. ZHANG ZJ, LIAO ZH, SUN YT, *et al.* Biomechanical research progress of lumbar interbody cage and lumbar interbody fusion [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(5): 465-470.
- [21] CHIN KR, REIS MT, REYES PM, *et al.* Stability of transforaminal lumbar interbody fusion in the setting of retained facets and posterior fixation using transfacet or standard pedicle screws [J]. *Spine J*, 2015, 15(5): 1077-1082.
- [22] DONACHIE MJ. Titanium. A technical guide [M]. USA: ASM International, 2000.
- [23] FUJIWARA A, LIM TH, AN HS, *et al.* The effect of disc degeneration and facet joint osteoarthritis on the segmental flexibility of the lumbar spine [J]. *Spine*, 2000, 25(23): 3036-3044.
- [24] 袁建军, 阚世廉, 贾宇涛, 等. 腰椎柔韧性及关节突关节退变程度对腰椎植入物内固定效果的影响[J]. *中国组织工程研究*, 2012, 16(4): 609-612.
- [25] 邹德威. 脊柱功能重建的发展方向——从融合走向非融合? [J]. *中华外科杂志*, 2006, 44(16): 1084-1086.
- [26] 刘慧, 沈国权, 张喜林, 等. 肌肉加载下腰椎间盘突出的有限元研究[J]. *医用生物力学*, 2019, 34(5): 493-499. LIU H, SHEN GQ, ZHANG XL, *et al.* Finite element study of lumbar disc herniation loaded with muscle force [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(5): 493-499.