

• 临床研究 •

doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2025.03.021

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.r.20241127.1634.010\(2024-11-28\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.r.20241127.1634.010(2024-11-28))

两种内镜入路下双侧椎弓根螺钉固定及单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉固定的生物力学比较

刘忠鑫,李伟[△],任冬,杨正刚,黄楠

(成都市第六人民医院骨科,成都 610051)

[摘要] **目的** 通过有限元分析探索两种内镜入路(椎板间入路和椎间孔入路)下双侧椎弓根螺钉固定及单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉固定的生物力学差异。**方法** 建立单纯融合器融合模型(CAGEF 模型)、双侧椎弓根螺钉固定椎板间入路和椎间孔入路模型(BPSP 模型和 BPSL 模型)及单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉固定椎板间入路和椎间孔入路模型(TLFSP 模型和 TLFSL 模型)。比较各模型在前屈、后伸、左/右侧屈及左/右旋转 6 种运动状态下的脊柱位移峰值、椎间融合器最大应力、内固定装置最大应力及第 3、4 腰椎椎间盘最大应力。**结果** 相较于 CAGEF 模型,另外 4 种模型的脊柱位移峰值和椎间融合器最大应力均明显下降,且 4 种固定模型数值接近。BPSP 模型在左侧屈、左旋转、右旋转这 3 种运动状态下内固定装置最大应力大于 BPSL 模型,TLFSP 模型在前屈这 1 种运动状态下内固定装置最大应力小于 TLFSL 模型。相较于 TLFSP 模型和 TLFSL 模型,BPSP 模型和 BPSL 模型仅在前屈、后伸 2 种运动状态下内固定装置最大应力更大,其他 4 种运动状态下则较小。除了 CAGEF 模型在旋转运动状态下第 3、4 腰椎椎间盘最大应力较另外 4 种模型高外,其他各运动状态下各模型第 3、4 腰椎椎间盘最大应力均接近。**结论** 椎板间入路和椎间孔入路下,双侧椎弓根螺钉和单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉固定均是有效的脊柱微创融合术,生物力学情况均较为满意。若选择椎板间入路,推荐行双侧椎弓根螺钉固定,同时减少前屈、后伸的动作;也可考虑行单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板间关节突螺钉固定,并减少左/右侧屈的动作。但具体的治疗选择仍需要考虑患者的个体情况及临床医师的手术操作能力。

[关键词] 腰椎间盘突出症;椎板关节突螺钉;腰椎椎体间融合术;生物力学;有限元分析

[中图法分类号] R687.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2025)03-0678-05

Biomechanical comparison between bilateral pedicle screw fixation and unilateral pedicle screw fixation combined with contralateral translaminar facet screw fixation under two endoscopic approaches

LIU Zhongxin, LI Wei[△], REN Dong, YANG Zhenggang, HUANG Nan

(Department of Orthopedics, Chengdu Sixth People's Hospital, Chengdu, Sichuan 610051, China)

[Abstract] **Objective** To explore the biomechanical difference between bilateral pedicle screws fixation and unilateral pedicle screw combined with contralateral translaminar facet screw fixation under two endoscopic approaches (interlaminar approach and transforaminal approach) through finite element analysis. **Methods** The fusion model of simple fusion device (CAGEF model), interlaminar approach and transforaminal approach models for bilateral pedicle screw fixation (BPSP model and BPSL model), and interlaminar approach and transforaminal approach for unilateral pedicle screw fixation combined with contralateral translaminar facet screw fixation (TLFSP model and TLFSL model) were established. The peak value of spinal displacement, maximum stress of the intervertebral fusion device, maximum stress of the internal fixation device, and maximum stress of the L₃ and L₄ intervertebral disc of each model under six motion states: forward flexion, backward extension, left/right flexion, and left/right rotation were compared among the models. **Results** Compared with the CAGEF model, the peak spinal displacement and the maximum stress of the interbody fusion cage in the other four models were significantly reduced, and the values of the four fixed models were close to

[△] 通信作者, E-mail: 597780773@qq.com.

each other. The maximum stress of the internal fixation device in the three motion states of left flexion, left rotation, and right rotation in the BPSP model was greater than that in the BPSL model, while the maximum stress of the internal fixation device in TLFSP model was less than that in the TLFSL model only under the forward flexion motion state. Compared with the TLFSP model and TLFSL model, the maximum stress of the internal fixation devices in the BPSP model and BPSL model was greater only in the two motion states of flexion and extension, while which in the other four cases was smaller. Except for the maximum stress on the L₃ and L₄ intervertebral disc during rotation in the CAGEF model was higher than the other 4 models, the maximum stress on the L₃ and L₄ intervertebral disc was similar in all other models under other motion states.

Conclusion Under both interlaminar and foraminal approaches, the bilateral pedicle screws fixation and unilateral pedicle screw combined with contralateral translaminar facet screw fixation are both effective minimally invasive spinal fusion operations, and their biomechanical conditions are satisfactory. If choosing the interlaminar approach, it is recommended to perform bilateral pedicle screw fixation, meanwhile decreasing the forward flexion and backward extension movements. Alternatively, a unilateral pedicle screw combined with contralateral interlaminar screw fixation can also be considered, while reducing left/right flexion movements. However, the specific treatment choice still needs to consider the patient's personalized treatment and the surgical operation ability of the clinical physician.

[Key words] lumbar disc herniation; translaminar facet screw; lumbar interbody fusion; biomechanics; finite element analysis

近年来,随着人们生活及工作方式的不断改变,腰椎间盘突出症(lumbar disc herniation, LDH) 的发病率逐年升高。LDH 主要临床症状包括腰部的不适及活动受限等,部分患者伴有同侧下肢放射性疼痛或(和)麻木,容易出现病情反复。传统开放手术虽然疗效好,但存在创伤大、恢复时间长等不足,不能很好地满足现在的社会情况与医疗需求,经皮内镜技术作为一种新型微创治疗方法,具有创伤小、恢复时间短及复发率低等优势,符合当下的要求^[1-5]。对于合并腰椎管狭窄、腰椎滑脱的患者,最终通常需要行腰椎椎间融合术,故内镜下椎间融合术(endoscopic lumbar interbody fusion, Endo-LIF)在腰椎退行性疾病中的应用也越来越广泛^[6-10]。后方固定常见的方式为双侧椎弓根螺钉固定,但存在一定不足,故有学者提出了使用单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉固定的方法^[11-15],但相关生物力学证据仍较为欠缺。

椎板间入路与椎间孔入路是两种常见的椎间孔内镜入路,对人体局部结构的影响不同,现对于经椎板间入路与椎间孔入路行腰椎融合孰优孰劣仍存在一定争议^[16-18],尤其是生物力学资料欠缺。为了进一步明确 Endo-LIF 两种入路的生物力学优劣性,本研究采用常见的有限元分析方法,构建了第 3~5 腰椎节段的生理模型,在生理模型的基础上完成了第 4、5 腰椎椎间盘摘除融合器融合模型、双侧椎弓根螺钉固定模型及右侧椎弓根螺钉联合左侧椎板关节突螺钉固定模型的构建,再分别根据两种不同的内镜入路建立共 4 种不同入路模型,对比分析各自的生物力学优劣性,期为临床 Endo-LIF 治疗方式的选择提供一定

参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取 1 名 30 岁成年健康男性志愿者为测试对象,身高 176 cm,体重 70 kg。通过采集病史、查体及影像学评估,确定其无脊柱相关疾病,采用 64 排螺旋 CT 对实验对象腰椎进行连续扫描后获得原始 CT 图像,获取脊柱、胸腰椎 CT 数据。本研究已通过本院伦理委员会审核[审批号:2023-L(论文)-05],志愿者签订知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 建立脊柱、腰椎三维有限元模型

1.2.1.1 生成骨骼三维几何模型

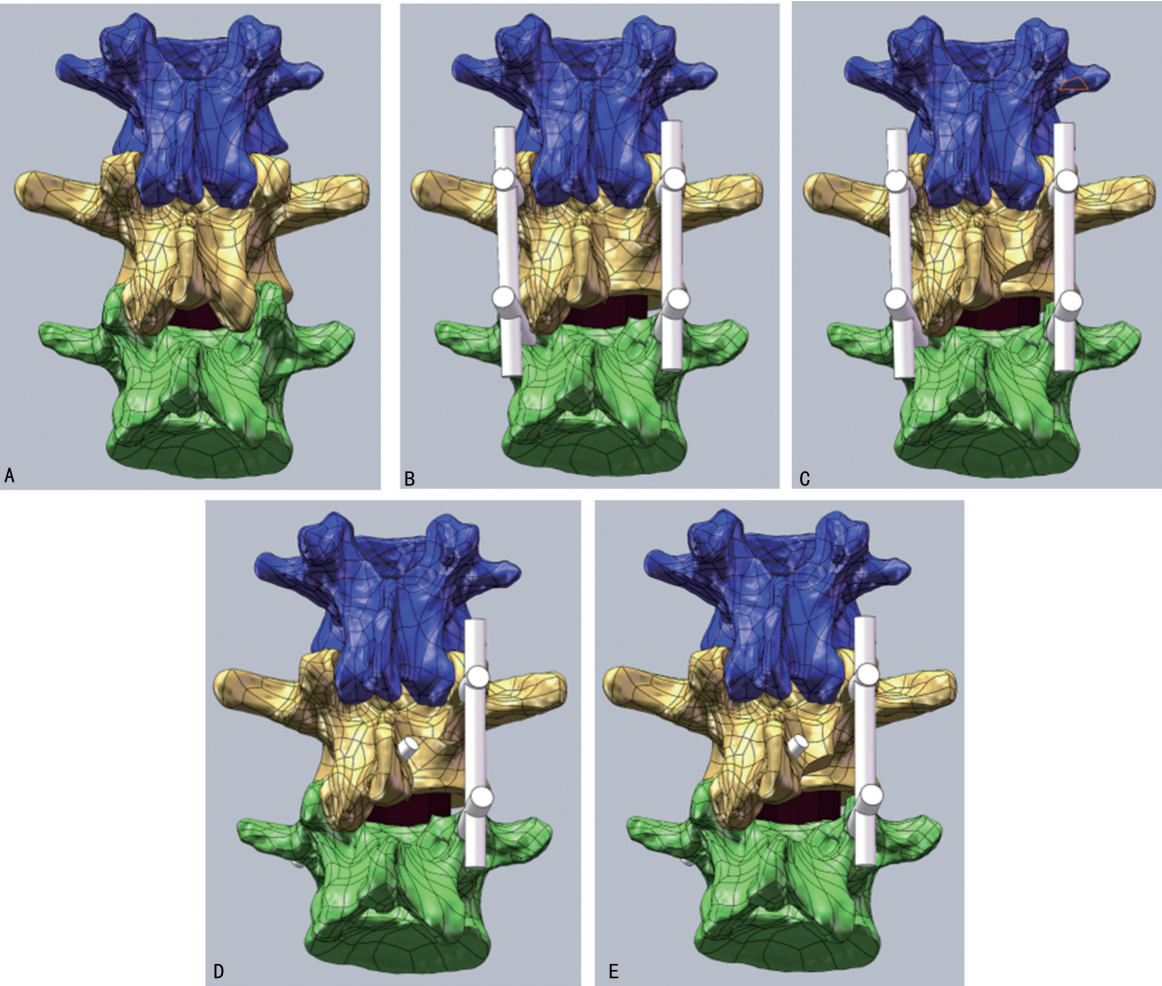
将 CT 扫描所得的 Dicom 格式图像导入 Mimics 21.0 软件中,得到腰骶椎三维 CT 影像。以横断面作为基础,通过阈值界定、手动绘制等操作,分别生成了第 3、4、5 腰椎椎体模型,后以 stl 格式导入 Geomagic Studio12 软件中,进行优化后生成实体模型,再以 step 格式导入 Solidworks2021 软件中,按照解剖关系进行组装。并在第 3、4 腰椎椎体间添加椎间盘,髓核占终板面积约 60%,第 4、5 腰椎椎体间添加椎间融合器,其高度为椎间隙高度。

1.2.1.2 装配并生成初步模型

应用 SolidWorks2021 软件制作椎弓根螺钉、连接棒及椎板关节突螺钉,为了简化模型,忽略螺钉的螺纹、尾帽等结构。其中第 4 腰椎椎体的椎弓螺根钉直径 6.0 mm、长度 45 mm;第 5 腰椎椎体的椎弓螺根钉直径 6.0 mm、长度 50.0 mm;连接棒直径 5.5

mm、长度 50.0 mm；椎板关节突螺钉直径 4.5 mm、长度 50.0 mm。共建立以下 5 种模型：(1)单纯融合器融合模型(CAGEF 模型)。包括第 3、4、5 腰椎皮质骨(厚度 1.0 mm)、松质骨、椎间盘、完整关节突关节及关节软骨。其中前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘间韧带等使用仅能拉伸的弹簧进行模拟，数据参考既往文献^[19-20]。(2)双侧椎弓根螺钉内固定椎板间入路和椎间孔入路模型(BPSP 模型和 BPSL 模型)。在 CAGEF 模型的基础上，按照临床常规手术方法置入双侧椎弓根螺钉并使用连接棒连接。在此基础上，破坏第 4 腰椎椎体右侧椎板、右侧下关节突、第 5 腰椎椎体右侧上关节突内侧缘、第 4、5 腰椎黄韧带及后纵韧带来模拟椎板间入路，得到 BPSP 模型；将破坏部分改为第 4 腰椎椎体右侧下关节突、第 5 腰椎椎体右

侧上关节突尖部及内侧缘、第 4、5 腰椎黄韧带、后纵韧带来模拟椎间孔入路，得到 BPSL 模型；(3)单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉内固定椎板间入路和椎间孔入路模型(TLFSP 模型和 TLFSL 模型)。在 CAGEF 模型的基础上，按照临床常规手术方法置入右侧椎弓根螺钉并使用连接棒连接，同时置入左侧椎板关节突螺钉。在此基础上，破坏第 4 腰椎椎体右侧椎板及右侧下关节突、第 5 腰椎椎体右侧上关节突内侧缘、第 4、5 腰椎黄韧带及后纵韧带来模拟椎板间入路，得到 TLFSP 模型；将破坏部分改为第 4 腰椎椎体右侧下关节突、第 5 腰椎椎体右侧上关节突尖部及内侧缘、第 4、5 腰椎黄韧带、后纵韧带来模拟椎间孔入路，得到 TLFSL 模型，见图 1。



A: CAGEF 模型; B: BPSP 模型; C: BPSL 模型; D: TLFSP 模型; E: TLFSL 模型。

图 1 5 种有限元模型

1.2.2 有限元模型设定

采用 simulation 对模型进行优质网格划分，参考既往文献对模型各部分材料的弹性模量、泊松比等性质进行定义^[19-20]。椎间融合器与各椎体、椎体与钉棒系统均定义为接触。上下关节突之间定义为摩擦接

触，其摩擦系数为 0.2。

1.2.3 加载和记录

固定第 5 腰椎椎体底部，对第 3 腰椎椎体顶端施加 400 N 的轴向载荷，以及施加 5 N/m 力矩来模拟腰椎日常前屈、后伸、左/右侧屈及左/右旋转 6 个方

向的活动。主要观察记录各模型的脊柱位移峰值、椎间融合器最大应力、内固定装置最大应力及第 3、4 腰椎椎间盘最大应力。

2 结 果

2.1 脊柱位移峰值

相较于 CAGEF 模型,另外 4 种模型中的脊柱位移峰值均明显减小,且各模型间数值接近,见图 2。

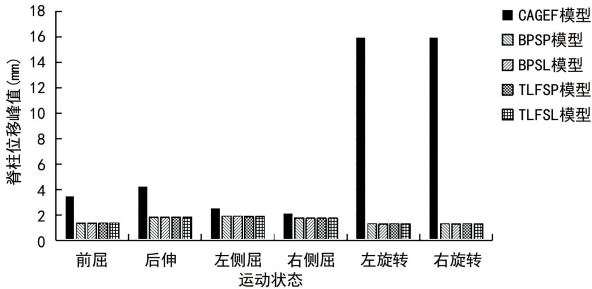


图 2 各模型 6 种运动状态下的脊柱位移峰值

2.2 椎间融合器最大应力

相较于 CAGEF 模型,另外 4 种模型的椎间融合器最大应力均明显下降,尤其是旋转情况,且 4 种模型间数值接近,见图 3。

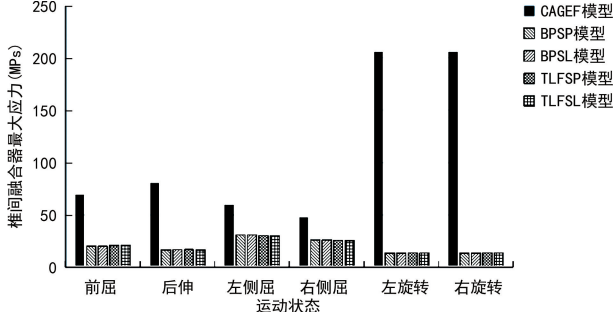


图 3 各模型 6 种运动状态下的椎间融合器最大应力

2.3 内固定装置最大应力

BPSP 模型在左侧屈、左旋转、右旋转这 3 种运动状态下内固定装置最大应力大于 BPSL 模型,其他 3 种运动状态下则小于 BPSL 模型,TLFSP 模型在前屈这 1 种运动状态下其内固定装置最大应力小于 TLFSL 模型,其他 5 种运动状态下则大于 TLFSL 模型。相较于 TLFSP 模型,BPSP 模型在前屈、后伸这 2 种运动状态下内固定装置最大应力较大,其他情况则小于 TLFSL 模型。BPSL 模型在前屈、后伸 2 种运动状态下其内固定装置最大应力大于 TLFSL 模型,其他 4 种运动状态下则小于 TLFSL 模型。各模型间的总体差异并不大,见图 4。

2.4 第 3、4 腰椎椎间盘最大应力

除了 CAGEF 模型旋转情况下第 3、4 腰椎椎间盘最大应力较其他模型高外,其他运动状态下各模型第 3、4 腰椎椎间盘最大应力均接近,见图 5。

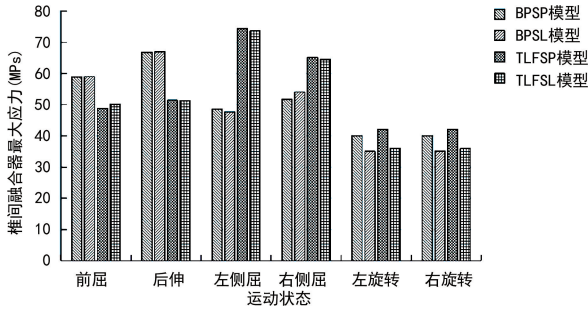


图 4 各模型 6 种运动状态下的内固定装置最大应力

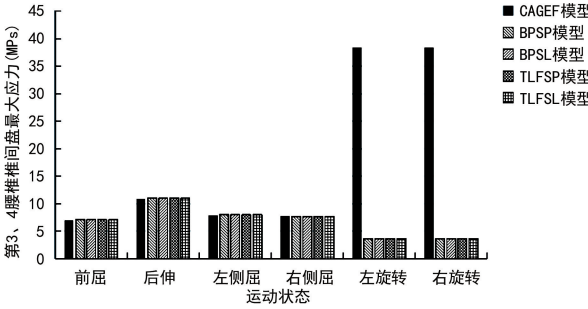


图 5 各模型 6 种运动状态下的第 3、4 腰椎椎间盘最大应力

3 讨 论

腰椎椎间融合术是治疗腰椎滑脱、腰椎不稳等问题的终极方案,Endo-LIF 不同于传统后路腰椎椎间融合术,在内镜装置下,用工具切除部分骨质及黄韧带,可单侧入路减压,能清楚地观察硬膜囊及神经根,完成髓核及椎间盘摘除,同时完成椎间融合器融合,再联合后方钉棒系统固定,该手术方式较好地保留了对侧关节及腰椎后方的完整性,提升了椎体间的稳定性,通过内镜微创技术实现了充分减压。有研究发现使用椎板关节突螺钉后,关节突关节在平均 6 个月后可出现骨性融合,且能实现前、中、后三柱融合^[21]。但全内镜下椎体融合术存在融合率低、内植物移位等问题,亟需生物力学的研究支持。腰椎间盘病变常见部位为第 4、5 腰椎及第 5 腰椎至第 1 骶椎节段,因第 5 腰椎至第 1 骶椎节段入路选择时可能受髂后上棘阻挡,故本研究仅完成对第 4、5 腰椎节段的手术模拟。传统的尸体研究不能在同一标本上行两种不同的固定方式,后行的固定方式会受先行的固定移除后的骨缺损的影响^[22],有限元分析利用计算机软件,可以在同一种模型上施加不同固定方式,能为临床提供更加客观的生物力学参考。

随着技术不断进步,传统双侧椎弓根螺钉固定方式的不足之处日益明显,尤其相邻节段容易发生退变,有学者提出了单侧椎弓根螺钉固定,但单侧置钉导致应力不对称,很容易出现内固定物失效的情况,故越来越多的人开始使用单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉固定。刘爽等^[15]研究表明,相较于双侧椎弓根螺钉固定,单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关

节突螺钉固定可以缩小手术切口,减少手术时间、术中出血量、术后引流量及住院费用。现有研究认为,椎弓根螺钉联合椎板关节突螺钉固定的安全性、有效性较好,并发症发生率低,值得广泛推广^[23]。但需要注意的是,单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉固定要求椎弓根及椎板关节突完整,不适合于椎体发育不良、腰椎峡部裂等情况。同时,单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉固定在轴向刚度上弱于传统双侧椎弓根螺钉固定,故对于过度肥胖、骨质疏松明显、局部存在骨三维畸形的患者,也不建议使用。随着科技的不断进步,现阶段可借助脊髓神经电生理监测系统、导航系统及手术机器人等^[24-25]更好地实现安全经皮置钉,极大地减少了创伤。

本研究分析了腰椎内镜常见的椎板间入路及椎间孔入路下双侧椎弓根螺钉固定和单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉固定的不同生物力学表现。结果显示,在进行了椎间及后方融合后,局部椎体的活动度明显下降,尤其旋转状态下较为明显。同时在添加了后方固定装置后,椎间融合器所受最大应力明显降低,故临床实际中,若随访过程中发现钉棒系统出现松动、断裂,需高度关注椎间融合情况,因为很可能出现融合器移位、沉降等情况,需要重视后方融合成功率。经典的双侧椎弓根螺钉固定,除了前屈及后伸的情况,其他 4 种运动状态下在椎板间入路及椎间孔入路中内固定装置最大应力均小于单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉,尤其在椎板间入路中优势更为明显,考虑到术后常使用支具或腰围限制前屈后伸活动,故从生物力学角度双侧椎弓根螺钉固定可作为首选,但单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉内固定总体生物力学情况也支持临床使用。同时,双侧椎弓根螺钉内固定其内固定装置最大应力发生在前屈及后伸情况,而单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板间螺钉固定模型则发生在左/右侧屈上,术后康复中应尽量减少此动作以减少内固定物松动、断裂的可能。

椎板间入路和椎间孔入路下双侧椎弓根螺钉固定和单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉固定均是有效的腰椎微创融合技术,生物力学情况均较为满意。若选择椎板间入路,推荐行双侧椎弓根螺钉固定,同时减少前屈、后伸的动作,也可考虑行单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板间螺钉固定,并减少左/右侧屈的动作。但实际情况中,两种入路及两种内固定方式有各自独特的优势和难点,本研究仅从生物力学角度进行了部分探索,具体的治疗选择仍需要考虑患者的个体情况及临床医师的手术操作能力。

参考文献

[1] 何宇,王建军,康晓乐,等. 经皮椎间孔入路内镜下神经根腹侧减压治疗侧隐窝狭窄症的疗效观察[J]. 重庆医学,2019,48(15):2590-2594.

[2] 郑勇,王剑,郭子仪,等. 内镜腰椎间融合术治疗复发性腰椎间盘突出症的临床研究[J]. 重庆医学,2022,51(24):4197-4202.

[3] 徐亚青,刘仕杰,李长江,等. Joimax 椎间孔镜治疗老年腰椎间间盘突出症的疗效研究[J]. 国际老年医学杂志,2020,41(4):241-243.

[4] 刘金龙,刘彦宾,张志,等. 经一侧入路双侧减压固定融合术与 Open-TLIF 治疗腰椎管狭窄症的疗效比较[J]. 中国骨与关节损伤杂志,2021,36(11):1141-1144.

[5] 张林,陈晓钢,庄宇,等. 全可视化单通道内镜下腰椎减压融合术的临床疗效[J]. 中国临床研究,2024,37(2):230-235.

[6] 贾忠雄,唐敏,胡侦明,等. 全内镜技术与显微内镜技术治疗单节段腰椎管狭窄症的 meta 分析[J]. 重庆医学,2021,50(9):1568-1572.

[7] 林博颖,沈茂. 内镜下腰椎椎间融合:单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉固定的生物力学稳定性[J]. 中国组织工程研究,2022,26(3):329-334.

[8] 陈子豪,董健文,刘仲宇,等. 大通道脊柱内镜辅助下腰椎椎间融合术治疗腰椎退行性疾病 3 年以上随访的疗效观察[J]. 骨科临床与研究杂志,2024,9(1):19-24.

[9] 叶贵生,唐海波,周长征,等. Delta 内镜下腰椎减压融合术治疗巨大型腰椎间间盘突出症的疗效[J]. 中国内镜杂志,2023,29(12):8-14.

[10] 唐龙,郑佳状,汪凡栋,等. 椎弓根螺钉内固定联合单轴内镜下椎间融合治疗腰椎退变性疾病[J]. 中国组织工程研究,2024,28(24):3873-3878.

[11] 侯英诺,张子檀,聂志红,等. 关节突螺钉固定在腰椎前路椎间融合手术中的应用研究[J]. 世界最新医学信息文摘,2019,19(25):86-88.

[12] 曾忠友,吴宏飞. 单侧椎弓根螺钉联合对侧椎板关节突螺钉内固定椎间融合术的研究进展[J]. 脊柱外科杂志,2022,20(4):279-282.

[13] 金辉,籍建飞,唐宏超,等. 腰椎椎间融合联合单侧皮质骨通道螺钉与对侧经椎板关节突螺钉内固定治疗腰椎退行性疾病的疗效观察[J]. 中国骨与关节损伤杂志,2021,36(9):913-916.

[14] 韩建福,吴鹏,宋永兴,等. 两种(下转第 688 页)