

· 基础研究 ·

新型腰椎侧前逆向椎弓根钉固定的有限元分析[△]

易红蕾¹, 王昕辉¹, 陈虎², 夏虹^{1*}

(1. 南部战区总医院, 广东广州 510010; 2. 南方医科大学第一临床医学院, 广东广州 510515)

摘要: [目的] 应用有限元分析评估新型腰椎侧前逆向椎弓根钉固定的生物力学特性。[方法] 建立正常人体下腰椎(L₃~S₁)有限元模型并验证其有效性, 而后建立L_{4/5}椎间盘切除笼架置入后5种内固定模型: (1) 侧方椎体螺钉固定(lateral vertebral screw, LVS); (2) 单侧椎弓根螺钉固定(unilateral pedicle screw, UPS); (3) 双侧椎弓根螺钉固定(bilateral pedicle screw, BPS); (4) 侧前方逆向椎弓根螺钉钉棒系统(2钉)(anterolateral pedicle screw-rod, ALPSR); (5) 侧前方逆向椎弓根螺钉钉板系统(4钉)(anterolateral pedicle screw-plate, ALPSP)。L₃椎体的上表面施加400 N的轴向预载荷和7.5 N·m的扭转力矩, 模拟腰椎前屈、后伸、左侧屈、右侧屈、左旋转和右旋转的活动度, 以及上终板和笼架的峰值Von Mises应力。[结果] 本研究建立了健康人的下腰椎有限元模型, 并验证其有效性。与完整组比较, ALPSP模型在前屈及左右侧屈控制最佳; 而BPS模型在后伸和左右旋转控制最佳, ALPSP模型次之。前屈及左右侧屈的条件下, ALPSP上终板压力峰值最小。后伸及左右旋转条件下, BPS上终板压力峰值最小, ALPSP次之。笼架应力也呈现相应的变化趋势, ALPSP与BPS模型相当。[结论] ALPSP能够提供良好的生物力学稳定性, 具有BPS相似的生物力学性能, 明显优于LVS和UPS。

关键词: 腰椎, 侧前椎弓根螺钉, 有限元分析

中图分类号: R687 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2022) 20-1872-05

A finite element analysis on a novel lumbar reverse anterolateral pedicle screw fixation // YI Hong-lei¹, WANG Xin-hui¹, CHEN Hu², XIA Hong¹. 1. General Hospital, Southern Theater Command of CPLA, Guangzhou 510010, China; 2. Southern Medical University, Guangzhou 510515, China

Abstract: [Objective] To evaluate the biomechanical properties of a novel lumbar reverse anterolateral pedicle screw fixation by the finite element analysis. [Methods] A finite element model of normal human lower lumbar spine (L₃~S₁) was established with its effectiveness verified. Subsequently, five internal fixation models were established after L_{4/5} discectomy and cage placement, including (1) lateral vertebral screw fixation (LVS); (2) unilateral pedicle screw (UPS); (3) bilateral pedicle screw (BPS); (4) anterolateral pedicle screw-rod (ALPSR) and (5) anterolateral pedicle screw-plate (ALPSP). As axial preload of 400 N with a torsional torque of 7.5 N·m were applied to the upper surface of the L₃ vertebral body in conditions of lumbar flexion, extension, left bending, right bending, left rotation and right rotation, the range of motion (ROM), Von Mises stresses on the upper endplate and cage were measured. [Results] The finite element model of the lower lumbar spine (L₃~S₁) was established and verified successfully. Compared with the intact model, the ALPSP model got the best restriction of forward flexion and lateral bending, while the BPS model got the best restriction of backward extension and lateral rotation, followed by the ALPSP model. The pressure peak Von Mises stress on the upper endplate in the ALPSP model was the lowest under forward flexion and left and right bending, whereas which was the lowest in BPS under backward extension and lateral rotation, followed by the ALPSP model. The stress on the cage also presented a corresponding trend, with the ALPSP model corresponding to the BPS model. [Conclusion] The novel lumbar reverse anterolateral pedicle screw fixation, ALPSP, provides good biomechanical stability and has similar biomechanical properties to BPS, which is significantly superior to LVS and UPS.

Key words: lumbar spine, anterolateral pedicle screw, finite element analysis

腰椎侧方微创入路椎体间融合技术(lateral lumbar interbody fusion, LLIF)是治疗各种脊柱退变性疾病

的有效方法^[1-3]。与后路经椎间孔融合术(transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF)、后路腰椎板切

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2022.20.10

△基金项目:国家自然科学基金项目(编号:81972080);广东省自然科学基金项目(编号:2015A030312004)

作者简介:易红蕾,副主任医师,研究方向:脊柱外科,(电话)13926041866,(电子信箱)hongleiyimd@qq.com

*通信作者:夏虹,(电话)18620116688,(电子信箱)gzxiahong2@163.com

除椎间融合术 (posterior lumbar interbody fusion, PLIF) 相比, LLIF 可以置入更大的椎间笼架, 术中可保留前纵韧带、后纵韧带及后方小关节的完整性, 能更好地维持手术节段稳定性, 具有较好的生物力学优势^[4, 5]。但 LLIF 术后出现笼架塌陷或者邻近节段退变的报道日渐增多^[6, 7], 尤其是单纯笼架置入不附加内固定的情况下更明显^[8, 9]。对于此类患者, 一般需要辅助后路的椎弓根螺钉系统, 是腰椎手术内固定的金标准, 稳定性好, 内固定系统成熟。但是由于侧方入路手术体位为侧卧位, 而椎弓根螺钉内固定通常需要俯卧位, 术中需更换体位, 2次消毒, 延长麻醉和手术时间。为了方便后路的俯卧位椎弓根螺钉置入, 减少翻身导致的系列并发症的可能, 部分学者尝试侧卧位行 LLIF 和后路的经皮置钉^[10, 11], 或者是俯卧位进行 LLIF 手术^[12]。

因此, 笔者设计了腰椎侧方入路基于逆向椎弓根螺钉内固定系统, 已申报专利 (2020202281922), 并已成功进行了尸体标本的螺钉置入的预实验。该内固定系统选择手术侧椎体侧前方合适进针点开路, 斜向通过椎体直至对侧椎弓根及横突基底, 确保螺钉尽可能多地通过皮质骨, 增加拔出力和抗旋转力, 然后以合适弧度的解剖钢板进行连接固定, 以期通过单一入路、单一体位提供坚强稳定的内固定, 达到或近似后路双侧椎弓根螺钉内固定系统的稳定性, 提高腰椎内固定融合率。为验证该内固定系统的生物力学稳定性, 本研究通过有限元分析方法, 比较研究不同固定方式下腰椎的运动范围、终板应力、笼架应力的变化, 验证新型侧方入路逆向椎弓根螺钉内固定系统应用的生物力学可行性。

1 资料与方法

1.1 腰椎有限元模型的建立

招募健康成年男性志愿者 1 名, 在中国人民解放军南部战区总医院放射科 CT 室完成对 L₃~S₁ 腰椎螺旋 CT 薄层扫描 (Siemens, 德国), 扫描条件: 130 kV, 125 mA, 层厚为 0.625 mm, 获得 214 张腰椎二维断层 CT 图像数据并以 DICOM 格式进行保存, 使用 Mimics21.0 软件 (Materialise, 比利时) 建立椎体骨模型, 然后使用 wrap2017 软件 (Geomagic, 美国) 进行优化处理, 通过曲面拟合等处理得到 L₃~S₁ 腰椎三维实体模型。接着对有限元模型进行网格划分, 选用 4 节点四面体 (C3D4) 单元对腰椎实体模型进行网格划分, 然后再完善三维几何模型, 重塑皮质骨

(厚度为 1.88 mm)、松质骨、纤维环、髓核、终板 (厚度为 1 mm), 笼架, 重建 L₃~S₁ 的韧带结构, 选用弹簧模拟前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、横韧带、棘间韧带以及棘上韧带。通过查阅相关腰椎有限元分析的文献后, 对正常腰椎 L₃~S₁ 三维有限元模型中各个元件材料, 根据相关参数等进行赋值^[13, 14] (表 1)。此外, 韧带材料刚度分别为: 黄韧带 15.98 N/mm、前纵韧带 8.73 N/mm、后纵韧带 5.833 N/mm、棘间韧带 10.746 N/mm、棘上韧带 3.82 N/mm、横韧带 0.187 5 N/mm。

表 1 相关有限元元件材料

解剖结构	弹性模量 (MPa)	泊松比 (%)
皮质骨	12 000	0.3
松质骨	100	0.3
软骨	10	0.45
纤维环	4.2	0.45
髓核	1	0.49
笼架	3 600	0.3
终板	1 200	0.29
椎弓根钉	110 000	0.3

1.2 有限元模型应力施加及有效性验证

将 S₁ 椎体进行约束, 在 L₃ 椎体的上表面施加 400 N 的轴向预载荷和 7.5 N·m 的扭转力矩, 模拟腰椎前屈 (flexion, Flex)、后伸 (extension, Ext)、左侧屈 (left bending, LB)、右侧屈 (right bending, RB)、左旋转 (left rotation, LR) 及右旋转 (right rotation, RR) 的活动范围 (range of motion, ROM)。计算后, 将完整模型 ROM 数据与 Shim 等^[15] 的尸体生物力学研究以及 Li 等^[16] 的有限元研究进行比较, 验证其有效应。

1.3 内固定有限元模型的建立

完成模型验证后, 根据创生医疗器械公司提供的腰椎后路钉棒内固定系统实物参数, 选择 Solidworks 2017 软件 (Dassault Systemes) 进行 L_{4/5} 椎间盘的切除, 置入腰椎侧路椎间笼架 (大小 50 mm×22 mm×10 mm, 前凸 10°)。同时构建腰椎侧方椎体螺钉及连接棒系统 (椎体螺钉直径 6.5 mm, 长度 50 mm; 连接棒直径 5.5 mm) 及腰椎后方椎弓根螺钉及连接棒系统 (椎弓根螺钉直径 6.5 mm, 长度 45 mm; 连接棒直径 5.5 mm) (侧方特制四孔钢板厚度 4 mm, 逆向椎弓根螺钉直径 6.5 mm, 长度 60 mm, 椎体螺钉直径 6.5 mm, 长度 50 mm) 的三维实体内固定模型。共获得 5 种固定模型: (1) 侧方椎体螺钉固定

(lateral vertebral screw, LVS); (2) 单侧椎弓根螺钉固定 (unilateral pedicle screw, UPS); (3) 双侧椎弓根螺钉固定 (bilateral pedicle screw, BPS); (4) 侧前方逆向椎弓根螺钉钉棒系统 (2 钉) (anterolateral pedi-

cle screw-rod, ALPSR); (5) 侧前方逆向椎弓根螺钉钉板系统 (4 钉) (anterolateral pedicle screw-plate, ALPSP) (图 1)。

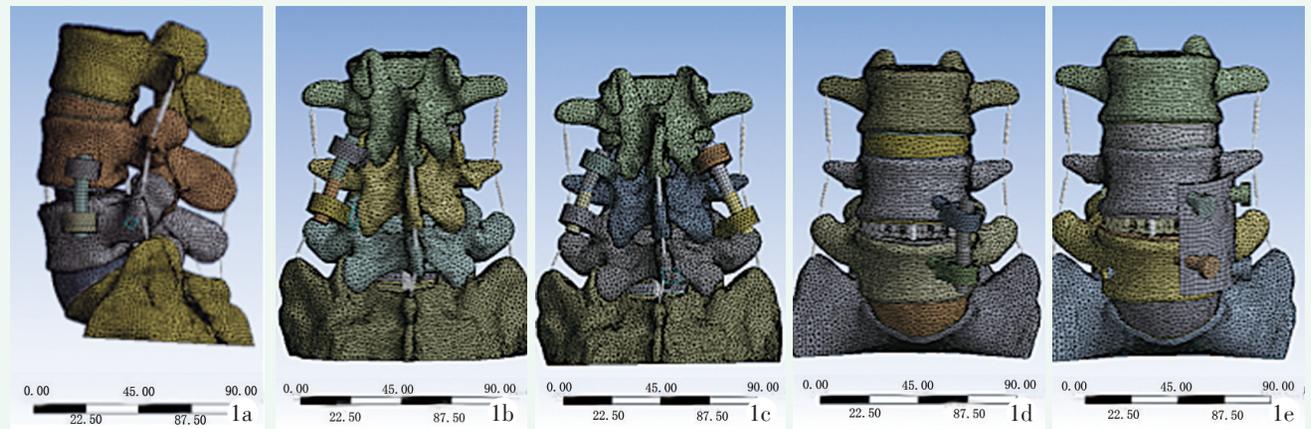


图 1 5 种 L_{4/5} 椎体间融合固定模型 1a: LVS 1b: UPS 1c: BPS 1d: ALPSR 1e: ALPSP

1.4 测量指标

分析五组模型在 Flex、Ext、LB、RB、LR 和 RR 6 种工况下椎间 ROM。记录各组上终板及笼架应力峰值 (peak Von Mises stress) 及 Von Mises 应力云图。

2 结果

2.1 模型验证

下腰椎有限元模型的特征及验证结果健康人下腰椎三维非线性有限元模型包括网格: 465390, 节点: 721814, 外形逼真, 椎间活动度良好。与 Shim^[15] 及 Li^[16] 进行比较, 可见有限元模型各节段的活动度在报道文献的范围内。

2.2 椎间活动度

将 S₁ 椎体进行约束, 在 L₅ 椎体的上表面施加 400 N 的轴向预载荷, 并在 L₃ 椎体上施加 7.5 N·m 的扭转力矩, 正常模型在 Flex、Ext、LB、RB、LR、RR 的活动度分别为 4.67°、2.29°、2.60°、2.15°、1.65°、1.63°。在所有置入了 22 mm 椎间笼架的模型中, 不同的固定条件下, 各维度活动范围均较正常组减小。结果表明在 Flex、LB 和 RB 活动中, ALPSP 的 ROM 最小, BPS 次之。而在 Ext、LR 和 RR 活动中, BPS 的 ROM 最小, ALPSP 次之; LVS 和 ROM 在各个方向均为最大 (图 2a)。

2.3 应力测量

在加载了 400 N 的轴向压力和 7.5 N·m 纯力偶矩载荷下, 6 种工况下终板应力峰值见图 2b。在所有

的模型中, Flex、LB 和 RB 时, ALPSP 上终板压力峰值最小, 分别为 13.81、7.43、5.65 MPa, BPS 次之。Ext 及 LR 和 RR 转条件下, BPS 上终板压力峰值最小, 分别为 5.93、4.96、4.06 MPa, ALPSP 次之。LVS 上终板压力峰值在 6 种工况下均为最大。从云图分布来看, 压力峰值主要集中于笼架与终板接触区域, 尤其以椎体边缘环最明显。

6 种工况下笼架应力峰值见图 2c。LVS 模型笼架应力峰值最大。Flex、Ext、LB、RB、LR 和 RR 状态下 BPS 模型笼架应力峰值分别为 48.56、24.75、23.26、21.02、15.65、13.48 MPa, 而 ALPSP 模型笼架应力峰值分别为 48.40、25.48、23.12、20.77、15.66、13.62 MPa, 两者相当。

3 讨论

既往研究表明 LLIF 椎间笼架联合双侧椎弓根螺钉固定能提供更高的稳定性^[17, 18]。应用有限元方法分析 LLIF 椎间笼架、椎间笼架联合附加固定的生物力学特点也得到了相似的结论^[19, 20]。单独椎间笼架、椎间笼架联合侧方钢板或单、双侧椎弓根螺钉都比完整脊柱更加稳定, 其中以联合双侧椎弓根螺钉最为稳固, 联合侧方钢板不如联合单、双侧椎弓根螺钉稳定。本研究也得出类似的结论。BPS 较 UPS、ALPSR (2 钉) 控制椎体活动效果都要好。但是 ALPSP (4 钉) 在前屈及左右侧屈活动中控制椎体活动最小, 而在后伸, 左右旋转活动中, BPS 活动度最

小。从控制椎体活动角度来看, ALPSP (4 钉) 可以 和 UPS 媲美, 明显优于 UPS 及 LVS。

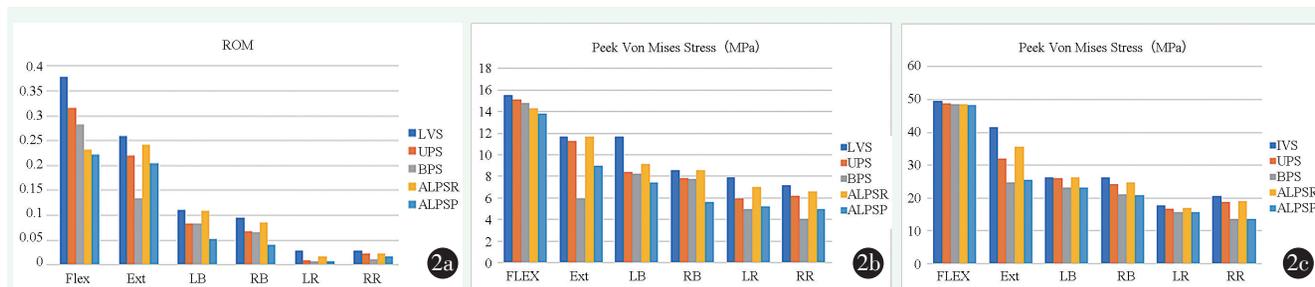


图 2 5 种 L_{4/5} 固定模型有限元测量结果 2a: L_{4/5} 间隙 ROM 2b: 上终板峰值应力 (Peak Von Mises Stress) 2c: 笼架应力峰值 (Peak Von Mises Stress)

而对于上终板压力而言, ALPSP (4 钉) 在前屈、侧屈 3 个方向压力最小, 而在后伸及旋转条件下仅次于 BPS。因为 ALPSP (4 钉) 是单侧偏心固定, 不对称受力, 所以对旋转控制稍弱。但是它是前柱固定, 与后路椎弓根螺钉不同, 在正常人体, 腰椎大约有 80% 的轴向负荷集中于前柱, 前柱在稳定腰椎运动节段方面起到了相当重要的作用。所以在前屈及侧屈的时候对终板的支撑力最有效, 能起到良好的保护作用, 理论上能减少终板损伤, 降低塌陷的发生率。而且从云图分布来看, 压力峰值主要集中于笼架与终板接触区域, 尤其以椎体边缘环最明显。而侧方入路笼架相对后方 TLIF 笼架而言较长也较宽, 能够接触到椎体边缘环, 这也是建议切除椎间盘的时候要突破对侧纤维环的原因, 这样才能起到更好的支撑作用, 减少塌陷风险^[21]。

对于笼架应力来说, 同样发现 ALPSP (4 钉) 与 BPS 压力峰值相当, 远小于 LVS 及 UPS。在 Zhang 等^[22] 的有限元模拟实验中, 除了得到上述相似的结论外, 还发现椎间笼架联合侧方钢板和棘突钢板的联合固定方法相较于椎间笼架联合双侧椎弓根在屈伸、侧弯、轴向旋转上更加稳定, 且椎间笼架压力和终板压力更小。这也从另一个角度验证, 联合前后方固定比单纯前路或者单纯后路固定稳定性更好, 对终板支撑更有效, 只是临床上很少应用前后路联合固定, 尤其是单节段手术。

局限性: 有限元分析不能精确地再现生物力学特征, 例如体重、腹部脏器、椎旁肌的影响。也不能准确地描述复杂的腰椎退变情况, 如骨质疏松、椎间盘塌陷及腰椎滑脱等情况。此外, 该模型仅限于检测静态生物力学的即时特征, 不能完全模拟手术后在体的内固定力学变化。因为持续的负载或内固定材料疲劳都没有考虑进去, 可能需要在体的生物力学研究以便

更长期地评估 LLIF 疗效。

本研究的结果表明 LLIF 辅助 ALPSP (4 钉) 能够提供良好的生物力学稳定性, 具有与 BPS 相似的生物力学性能, 明显优于 LVS 及 UPS, 能降低笼架下沉的风险。临床上尚待进一步进行逆向椎弓根螺钉的解剖学及影像学研究和相关器械的改进, 提高螺钉置入的准确性。

参考文献

- [1] 唐杰, 汪洋, 应放, 等. 经侧方入路腰椎融合术 (LLIF) 的研究进展 [J]. 中国矫形外科杂志, 2016, 24 (15): 1399-1402.
- [2] 董振宇, 安春青, 李建江, 等. 侧路融合术治疗退变性腰椎侧凸的临床疗效分析 [J]. 中国矫形外科杂志, 2016, 24 (3): 274-277.
- [3] Campbell PG, Nunley PD, Cavanaugh D, et al. Short-term outcomes of lateral lumbar interbody fusion without decompression for the treatment of symptomatic degenerative spondylolisthesis at L₄₋₅ [J]. Neurosurg Focus, 2018, 44: E6.
- [4] Teng I, Han J, Phan K, et al. A meta-analysis comparing ALIF, PLIF, TLIF and LLIF [J]. J Clin Neurosci, 2017, 44 (1): 11-17.
- [5] Ahlquist S, Park HY, Gatto J, et al. Does approach matter? A comparative radiographic analysis of spinopelvic parameters in single-level lumbar fusion [J]. Spine J, 2018, 18: 1999-2008.
- [6] Liang ZY, Cui JC, Zhang JR, et al. Biomechanical evaluation of strategies for adjacent segment disease after lateral lumbar interbody fusion: is the extension of pedicle screws necessary [J]. BMC Musculoskelet Disord, 2020, 21 (1): 117.
- [7] Chioffe M, McCarthy M, Swiatek PR, et al. Biomechanical analysis of stand-alone lateral lumbar interbody fusion for lumbar adjacent segment disease [J]. Cureus, 2019, 11: e6208.
- [8] Chen EL, Xu JJ, Yang SZ, et al. Cage subsidence and fusion rate in extreme lateral interbody fusion with and without fixation [J]. World Neurosurg, 2019, 122: e969-e977.
- [9] Macki M, Anand SK, Surapaneni A, et al. Subsidence rates after lateral lumbar interbody fusion: a systematic review [J]. World Neurosurg, 2019, 122: 599-606.

- [10] Akihiko H, Daisuke S, Masato S, et al. The analysis of percutaneous pedicle screw technique with guide wire-less in lateral decubitus position following extreme lateral interbody fusion [J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14 (1) : 304.
- [11] Esteban Q, Cory H, Jakub G, et al. Single position spinal surgery for the treatment of grade II spondylolisthesis: a technical note [J]. *J Clin Neurosci*, 2019, 65 (1) : 145-147.
- [12] Claudio L, Pedro B. Prone single-position extreme lateral interbody fusion (Pro-XLIF) : preliminary results [J]. *Eur Spine J*, 2020, 29 (1) : 6-13.
- [13] Ruberte LM, Natarajan RN, Andersson GB. Influence of single-level lumbar degenerative disc disease on the behavior of the adjacent segments—a finite element model study [J]. *J Biomech*, 2009, 42 (2) : 341-348.
- [14] Kim HJ, Kang KT, Chang BS, et al. Biomechanical analysis of fusion segment rigidity upon stress at both the fusion and adjacent segments: a comparison between unilateral and bilateral pedicle screw fixation [J]. *Yonsei Med J*, 2014, 55 (5) : 1386-1394.
- [15] Shim CA, Park SW, Lee SH, et al. Biomechanical evaluation of an interspinous stabilizing device locker [J]. *Spine*, 2008, 33 (22) : E820-827.
- [16] Li J, Wang W, Zuo R, et al. Biomechanical stability before and after graft fusion with unilateral and bilateral pedicle screw fixation: finite element study [J]. *World Neurosurg*, 2019, 123: e228-e234.
- [17] Cappuccino A, Cornwall GB, Turner AW, et al. Biomechanical analysis and review of lateral lumbar fusion constructs [J]. *Spine*, 2010, 35 (Suppl 1) : S361-367.
- [18] Nayak AN, Gutierrez S, Billys JB, et al. Biomechanics of lateral plate and pedicle screw constructs in lumbar spines instrumented at two levels with laterally placed interbody cages [J]. *Spine J*, 2013, 13: 1331-1338.
- [19] Liu X, Ma J, Park P, et al. Biomechanical comparison of multilevel lateral interbody fusion with and without supplementary instrumentation: A three-dimensional finite element study [J]. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2017, 18 (1) : 63.
- [20] Craig MM, Nikhil J, Tariq MA, et al. A biomechanical analysis of lateral interbody construct and supplemental fixation in adjacent-segment disease of the lumbar spine [J]. *World Neurosurg*, 2019, 128: e694-e699.
- [21] Salzmann SN, Fantini GA, Okano I, et al. Mini-open access for lateral lumbar interbody fusion: indications, technique, and outcomes [J]. *JBJS Essent Surg Tech*, 2019, 9: e37.
- [22] Zhang Z, Fogel GR, Liao Z, et al. Biomechanical analysis of lateral lumbar interbody fusion constructs with various fixation options: based on a validated finite element model [J]. *World Neurosurg*, 2018, 114: e1120-e1129.

(收稿:2021-08-01 修回:2022-06-20)
(同行评议专家: 陈自强 魏显招)
(本文编辑: 宁 桦)

读者·作者·编者

本刊关于学术不端处理意见的声明

为维护学术刊物的严肃性和科学性,也为维护本刊的声誉和广大作者的正当权益,本着对广大读者、作者负责的精神,本刊编辑部再次重申坚决反对剽窃、抄袭他人稿件的行为;一经查实,给予如下处理:撤稿、杂志和网站通告、通知作者单位给予相应处理、3年内不刊登该作者为第一作者的稿件。对信息虚假及数据伪造、篡改和剽窃、一稿两投、一稿两用等学术不端行为,据其性质、情节轻重以及造成的影响程度,给予如下处理:如稿件未刊登一律退稿,如稿件已刊登一律撤稿,并通知作者单位,2年内不刊登该作者为第一作者的稿件。

为倡导优良学风,规范学术行为,净化学术空气,凡向本刊投稿的作者均须严格遵守《中华人民共和国著作权法》等国家有关法律、法规,杜绝学术不端行为。

附:一稿两投和一稿两用的认定:凡属原始研究的报告,同语种一式两份投寄不同的杂志,或主要数据和图表相同,只是文字表达可能存在某些不同之处的两篇文稿,分别投寄不同的杂志,属一稿两投;一经为两个杂志刊用,则为一稿两用。会议纪要、疾病的诊断标准和防治指南、有关组织达成的共识性文件、新闻报道类文稿分别投寄不同的杂志,以及在一种杂志发表过摘要而将全文投向另一种杂志,不属于一稿两投。但作者若要重复投稿,应向有关杂志编辑部作出说明。

中国矫形外科杂志编辑部