

# 有限元法在腰椎融合术生物力学研究中的应用进展

付坤飞, 林福, 全仁夫, 杜伟斌

(浙江中医药大学第三临床医学院, 浙江 杭州 310053)

**摘要** 腰椎融合术是治疗腰椎退行性疾病的常用方法,然而术后容易出现内固定物或融合器移位、邻近节段椎体加速退变等并发症。从生物力学角度研究腰椎融合术,有利于了解该术式在生物力学方面的特点和预防术后并发症。本文从评估腰椎的稳定性、评估内固定物和融合器的性能、评估融合节段对邻近节段的影响 3 个方面,对有限元法在腰椎融合术生物力学研究中的应用进行了综述,并对其优势和局限性进行了总结。

**关键词** 限定因素分析;腰椎;脊柱融合术;生物力学现象;综述

腰椎退行性疾病是临床常见病,病情严重时多采用腰椎融合术等手术方法治疗<sup>[1]</sup>。内固定物或融合器移位、邻近节段椎体加速退变是腰椎融合术的常见并发症,容易影响手术效果。近年来,从生物力学角度研究腰椎融合术后并发症发生机制的文献报道逐渐增多。有限元法可以通过数字研究方式,以完善的建模功能为相关研究提供帮助。有限元法在腰椎融合术生物力学研究中的应用内容,包括正常腰椎的应力分析,以及腰椎融合术后腰椎的生物力学特点、内固定物或融合器的应力特点等。为了对腰椎融合术的临床应用及并发症预防提供生物力学参考,本文对有限元法在腰椎融合术生物力学研究中的应用进展综述如下。

## 1 有限元法在腰椎融合术生物力学研究中的应用

**1.1 评估腰椎的稳定性** 腰椎融合术治疗腰椎退行性疾病,主要目的是重建和维持腰椎的稳定性。由于腰椎融合术的手术方案或具体术式不同,术后腰椎的稳定性也不同<sup>[2-5]</sup>。

Song 等<sup>[5]</sup>研究发现,斜外侧腰椎间融合术(oblique lateral interbody fusion, OLIF)治疗骨质疏松性和非骨质疏松性脊柱疾病,术后腰椎均可获得良好的稳定性,原因可能是 OLIF 术中应用宽大的 Cage 增加了其与上下椎体之间的接触面积;但是使用相同的 OLIF 固定方案时,骨质疏松性脊柱的生物力学性能劣于非骨质疏松性脊柱,这可能与骨质疏松性脊柱的骨密度和骨强度下降有关。Song 等<sup>[5]</sup>建议骨质疏

症患者行 OLIF 手术时应用椎弓根钉棒系统来增加腰椎的稳定性,这与 Fang 等<sup>[6-7]</sup>的观点相同。侯坤鹏等<sup>[8-11]</sup>研究发现,OLIF 联合双侧椎弓根钉棒系统固定治疗腰椎疾病可以良好恢复腰椎的稳定性,由此认为该方案可以作为 OLIF 的首选手术方案。Fan 等<sup>[12]</sup>采用有限元法比较了后路腰椎椎间融合术(posterior lumbar interbody fusion, PLIF)和 Coflex 棘突间动态稳定系统对腰椎的生物力学作用,发现 Coflex 系统和 PLIF 均可降低 L<sub>3</sub> ~ L<sub>4</sub> 的活动度,有利于改善腰椎的稳定性;但 PLIF 术后邻近节段椎体退变的发生率高于 Coflex 系统。

费琦等<sup>[13]</sup>应用有限元法模拟了腰椎后外侧融合术(posterolateral lumbar fusion, PLF)和 PLIF,并对 PLF 和 PLIF 手术前后腰椎失稳节段预定载荷下的活动度进行了观察,发现两者术后的腰椎失稳节段活动度均较术前下降,由此认为两者均可恢复腰椎失稳节段的稳定性;但是该研究并没有比较 PLF 和 PLIF 的手术优劣性。Yang 等<sup>[14-15]</sup>研究发现,椎间孔外腰椎椎体间融合术(extraforaminal lumbar interbody fusion, ELIF)单侧椎弓根钉内固定的腰椎稳定性优于经椎间孔腰椎椎体间融合术(tranforaminal lumbar interbody fusion, TLIF)单侧椎弓根钉内固定,原因可能是 ELIF 单侧椎弓根钉内固定对腰椎解剖结构的破坏较小;TLIF 双侧椎弓根钉内固定的腰椎稳定性优于 ELIF 单侧椎弓根钉内固定,认为行 ELIF 单侧椎弓根钉内固定时可联合应用椎板关节突螺钉固定,提高腰椎的稳定性。Guo 等<sup>[16]</sup>研究发现,单侧椎弓根钉固定联合对侧椎板关节突螺钉固定可以改善腰椎的稳定性,认为该法可用作单节段 TLIF 的替代方案。Liu 等<sup>[17]</sup>应

用有限元法对侧路腰椎椎体间融合术的手术方案进行了研究,发现单侧或双侧椎弓根钉固定均有利于提高腰椎的稳定性。

由上可知:有限元法可以模拟腰椎的内部应力,有助于设计和修改手术方案,从而提高术后腰椎的稳定性;行腰椎融合术时,联合应用内固定,可以提高术后腰椎的稳定性;与双侧内固定相比,单侧内固定同样可以改善腰椎的稳定性,且不容易破坏腰椎的解剖结构。

**1.2 评估内固定物和融合器的性能** 有限元法可用于评估腰椎融合过程中内固定物和融合器的生物力学性能,有助于优化治疗方案。

Lv 等<sup>[18]</sup>在经过验证的 L<sub>4</sub> ~ L<sub>5</sub> 有限元模型上建立新型椎弓根钉系统和双侧椎弓根钉系统固定模型,发现新型椎弓根钉系统固定模型的最大峰值应力出现在屈曲(182.58 MPa)和伸展(272.75 MPa)时,而双侧椎弓根钉系统固定模型的最大峰值应力出现在左旋(180.84 MPa)和右旋(169.76 MPa)时。在进行有限元模型应力测试时会出现应力峰值的区域,是螺钉应力集中处,容易发生螺钉疲劳断裂。Sin 等<sup>[19]</sup>应用有限元法在 L<sub>4</sub> ~ L<sub>5</sub> 建立 PLIF 和 TLIF 模型,结果发现行 PLIF 和 TLIF 时采用皮质螺钉固定可以获得良好的生物力学性能。续彬等<sup>[20]</sup>研究发现,在直立状态下,植入融合器的腰椎模型椎体最大位移小于健康腰椎模型,认为植入融合器有利于提高腰椎的稳定性。

融合器在脊柱融合领域的应用逐渐增多,近年来其设计和材质均有改进<sup>[21-25]</sup>。彭祥等<sup>[23]</sup>报道了一种利用解剖型纳米羟基磷灰石/聚酰胺 66 设计的椎间融合器,其在 OLIF 模型上的生物力学性能优于传统子弹头形融合器。新型材料的应用及更符合腰椎解剖结构的设计,是解剖型融合器的优势所在。Zhu 等<sup>[24]</sup>将自体骨(棘突和椎板)、钛、聚醚醚酮(polyetheretherketone, PEEK)3 种材质的融合器应用于 PLIF 模型,发现 3 种材质的融合器均有助于改善手术节段的稳定性、自体骨材质融合器的终板最大应力低于 PEEK 和钛质融合器,由此认为采用自体骨融合器进行植骨融合可以获得与钛质或 PEEK 融合器相近的固定效果,且能够减少融合器下沉的风险。Lee 等<sup>[25]</sup>研究发现,新型融合器联合双侧内固定在 TLIF 模型上的腰椎稳定性优于传统融合器,原因可能是新型融合器最大限度地增加了移植物与椎体之间的接

触面积。张海平等<sup>[26]</sup>报道了一种可变向的腰椎融合器,并在 TLIF 模型上观察融合器在椎体间不同位置的生物力学特性,结果显示融合器在不同位置的应力分布存在差异,当融合器位于椎体前中部时应力分布效果最理想。易新等<sup>[27]</sup>通过建立有限元模型发现,在生理载荷下新型融合器可以提供足够的强度,在极限载荷下融合器所承受的最大应力超过了螺钉屈服强度,因此建议腰椎融合术患者术后注意佩戴腰部支具,并减少高强度运动。

采用有限元法观察内固定物和融合器对腰椎的生物力学影响,有助于临床选择合适的手术方式。Shen 等<sup>[28]</sup>通过有限元分析发现,不同的内固定物对腰椎的生物力学性能有不同的影响,双侧椎弓根钉内固定在稳定手术节段椎体方面更有优势,原因可能是双侧椎弓根钉内固定在静态和振动条件下均减小了终板和融合器的应力。张振军等<sup>[29]</sup>报道了一种新型 3D 打印多孔腰椎融合器,并利用有限元法对新型融合器在不同入路腰椎融合术中的生物力学性能进行了对比,结果发现新型融合器在外侧入路椎体间融合术模型上可以获得理想效果。刘艺等<sup>[30]</sup>在 L<sub>4</sub> ~ L<sub>5</sub> 单侧固定和双侧固定模型上对椎弓根钉、cage 和相邻节段椎间盘的应力进行了观察,发现单侧经皮椎弓根钉固定融合术可以获得和双侧经皮椎弓根钉固定融合术相同的生物力学效果,这与高鑫等<sup>[31]</sup>的研究结论相近。陆向东等<sup>[32-33]</sup>研究发现,与单侧椎弓根钉固定相比,双侧椎弓根钉固定的应力分布相对均匀,更有利于患者恢复。

由上可知:一款性能良好的融合器应具备减小融合节段活动度、分散接触面应力分布、降低下沉率、增加椎间孔高度及实现间接减压目的等条件;单侧内固定可以减少对椎体周围软组织的剥离,有利于减少内固定物对邻近节段退变的影响,但是单侧内固定存在应力分布不均的问题,远期容易出现椎弓根钉疲劳断裂,而双侧内固定则可以降低该风险。

**1.3 评估融合节段对邻近节段的影响** 虽然融合器联合内固定物有利于提高腰椎融合术的融合率,但存在术后邻近节段退变等问题<sup>[34-35]</sup>。Okuda 等<sup>[36]</sup>对接受 PLIF 椎弓根钉固定治疗的患者进行了 8 年左右的随访,发现术后邻近节段疾病的发生率为 9%。腰椎融合术后,邻近节段的活动度增加和应力增大是引起其退变的主要因素<sup>[37-39]</sup>。Du 等<sup>[39]</sup>在 L<sub>4</sub> ~ L<sub>5</sub> 构建了

OLIF 模型,并与健康腰椎模型进行了对比,结果发现 OLIF 模型的  $L_3 \sim L_4$  和  $L_5/S_1$  活动范围、椎间盘内压力、关节突关节应力均大于健康腰椎模型。Jiang 等<sup>[40]</sup>研究发现,PLIF 术后邻近节段退变可能与邻近节段的活动度和椎间盘内压力改变等有关,这与黄宇峰等<sup>[41-42]</sup>的研究结论一致。Srinivas 等<sup>[43]</sup>研究发现,内固定物和融合节段长度是影响邻近节段退变的重要因素。Zhao 等<sup>[44]</sup>采用有限元法将  $L_4 \sim L_5$  前凸程度对 TLIF 后腰椎的生物力学影响进行了观察,发现  $L_4 \sim L_5$  前凸程度减小可引起邻近节段应力增加,从而导致邻近节段退变。Wang 等<sup>[45]</sup>研究发现,不同入路的腰椎融合术均有邻近节段退变的风险。Disch 等<sup>[46]</sup>对  $L_4 \sim S_1$  单节段或双节段融合术对邻近节段的影响进行了观察,发现单节段融合更容易导致邻近节段退变。Umehara 等<sup>[47]</sup>在尸体标本上研究了后外侧腰椎融合经椎弓根内固定对腰椎的生物力学影响,结果发现固定节段活动度降低可导致邻近节段的后柱负荷增加。Tsuang 等<sup>[48]</sup>通过建立有限元模型发现,腰椎融合术后去除内固定物可以降低邻近节段的椎间盘内压力和关节突接触力,从而防止或延缓邻近节段退变。Mesbah 等<sup>[49-50]</sup>研究发现,可通过减小邻近节段的压力负荷达到延缓临近节段退变的目的。Huang 等<sup>[51]</sup>研究发现,在 PLIF 术中保留后方韧带复合体可减小术后邻近节段的屈曲活动度和椎间盘内压力。侯继春等<sup>[52]</sup>通过有限元分析发现,双侧椎弓根钉固定对手术节段的固定强度更高,但容易影响腰椎的活动度;单侧椎弓根钉固定对手术节段的稳定性相对较低;单侧椎弓根钉联合经椎板对侧关节突关节螺钉固定,可以克服单侧椎弓根钉固定稳定性差的缺点,而且可以避免双侧固定对邻近节段的影响。Tan 等<sup>[53]</sup>应用有限元法将不同方案 TLIF 对邻近节段的影响进行了比较,发现其中双侧连接棒固定具有软组织剥离少、手术节段稳定性高、并发症少等优点。Zhang 等<sup>[54]</sup>研究发现,骨质疏松症可能减轻前路椎体间融合术对邻近节段的不利影响;但该研究结论具有局限性,没有考虑骨质疏松症可能造成 cage 下沉、螺钉松动等情况,然而该研究结论仍有助于了解腰椎融合术后邻近节段退变的发生机制。Kumaran 等<sup>[55]</sup>将肌肉力量整合到有限元模型中进行研究,发现 TLIF 术中腰椎医源性肌肉损伤会导致邻近节段应力改变,进而造成术后腰背痛。

由上可知:将腰椎邻近肌肉加入不同融合术有限元模型中来比较融合术后腰椎的各项生物力学数据,有助于临床医师制定手术计划;利用有限元法研究腰椎不同融合术式的生物力学特点,不仅有助于了解术后邻近节段退变的发生机制,而且有利于临床医师根据生物力学依据改进手术方案。

## 2 有限元法在腰椎融合术生物力学研究中的应用优势和局限性

**2.1 优势** 应用有限元法研究腰椎融合术的生物力学特点,可以将内固定系统和椎体等的应力结构在有限元模型中量化。有限元模型的构建相对简单,且能够对其进行重复测试,有利于提高实验效率、节约实验成本。在有限元模型上设计和修改不同的手术方法,有利于制定合理的治疗方案。

**2.2 局限性** 有限元法在腰椎融合术生物力学研究中的局限性相对较多。脊柱解剖结构复杂,受力环境复杂,实验过程中需要忽略肌肉等组织对腰椎应力的影响,因此无法将腰椎承受的主要外力体现在腰椎应力中,可能对研究结果产生影响<sup>[56]</sup>。在建立腰椎有限元模型时需要将模型进行网格化操作,模型网格化程度越小越能反映模型的实际状况,而无尽的网格化操作会造成计算无限循环,因此不容易寻找最适合的数据点<sup>[57]</sup>。有限元法仅能模拟静态环境下的力学情况,而人体的生物力学状态是动态变化的,因此有限元模型不能完全反映人体腰椎的受力情况。在构建有限元模型的过程中,虽然单元的划分、节点和边界条件的选择及相关载荷的加载均由研究人员完成,但目前尚无统一标准,因此实验结果存在较大的误差。此外,CT 图像的分辨率、计算机技术的发展和有限元软件的更新,均不同程度制约着腰椎有限元模型的准确性<sup>[32]</sup>。

## 3 小结

随着科学技术的不断发展,有限元法在腰椎融合术生物力学研究中的应用逐渐增多。有限元法不仅可用于观察不同腰椎融合术对腰椎的生物力学影响、评估腰椎融合术的手术效果,还可用于评价椎弓根钉和 cage 的生物力学性能,有助于临床制定合理的治疗方案。未来应推动有限元模型向精细化方向发展,并注意解决软件引起的相关问题。此外,实现肌肉等重要软组织在有限元模型中的添加及由静态受力向动态受力转变,将提高我们对融合手术前后腰椎生物

力学特性的认识,而对腰椎融合术进行个性化模拟将是未来的发展方向之一。

### 参考文献

- [1] RAVINDRA V M, SENGLAUB S S, RATTANI A, et al. Degenerative lumbar spine disease; estimating global incidence and worldwide volume [J]. *Global Spine J*, 2018, 8 (8): 784 – 794.
- [2] 叶建东, 程哲, 王剑龙. 腰椎融合术 3 种内固定方式的生物力学特点[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(2): 208 – 215.
- [3] 吕杰, 王永峰, 原杰, 等. 腰椎斜外侧椎间融合后融合器侧方移位的生物力学有限元分析[J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(33): 5301 – 5306.
- [4] 王啸, 谭国庆, 薛海鹏, 等. 腰椎椎间融合联合邻近节段半刚性固定的有限元分析[J]. *中国组织工程研究*, 2020, 24(15): 2361 – 2367.
- [5] SONG C, CHANG H, ZHANG D, et al. Biomechanical evaluation of oblique lumbar interbody fusion with various fixation options; a finite element analysis [J]. *Orthop Surg*, 2021, 13(2): 517 – 529.
- [6] FANG G, LIN Y, WU J, et al. Biomechanical comparison of stand-alone and bilateral pedicle screw fixation for oblique lumbar interbody fusion surgery – a finite element analysis [J]. *World Neurosurg*, 2020, 141: e204 – e212.
- [7] 秦一川, 赵斌, 原杰, 等. 三维有限元法分析内固定类型及骨质疏松对斜外侧椎间融合的影响[J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(30): 4767 – 4773.
- [8] 侯坤鹏, 赵泉来, 吴天亮, 等. 斜外侧入路腰椎融合内固定的生物力学稳定性[J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(33): 5362 – 5368.
- [9] 郭惠智, 梁德, 张顺聪, 等. 斜外侧入路椎间融合术不同内固定方式的有限元分析[J]. *医学研究生学报*, 2020, 33(4): 394 – 398.
- [10] 孙科, 杨学军. 应用有限元技术对 OLIF 术后生物力学的分析与研究[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2021, 14(1): 16 – 20.
- [11] 曹杰, 古凯, 蔡婧璇, 等. 侧前方入路腰椎融合术的有限元研究[J]. *中国医疗器械信息*, 2020, 26(19): 36 – 38.
- [12] FAN Y, ZHOU S, XIE T, et al. Topping – off surgery vs posterior lumbar interbody fusion for degenerative lumbar disease; a finite element analysis [J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1): 476.
- [13] 费琦, 赵凡, 杨雍, 等. 腰椎后路融合手术对失稳模型节段稳定性及相邻节段力学的影响[J]. *中华医学杂志*, 2015, 95(45): 3681 – 3686.
- [14] YANG M J, SUN G X, GUO S, et al. The biomechanical study of extraforaminal lumbar interbody fusion; a three – dimensional finite – element analysis [J]. *J Healthc Eng*, 2017, 2017(22): 1 – 8.
- [15] 杨明杰, 曾诚, 李立钧, 等. 腰椎椎间孔外椎体间融合术的三维有限元建模及分析[J]. *同济大学学报(医学版)*, 2018, 39(3): 41 – 47.
- [16] GUO H Z, TANG Y C, GUO D Q, et al. Biomechanical evaluation of four different posterior instrumentation techniques for single – level transforaminal lumbar interbody fusion; a finite element analysis [J]. *Am J Transl Res*, 2020, 12(10): 6160 – 6169.
- [17] 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 Musculoskelet Disord*, 2017, 18(1): 63.
- [18] LV Q B, GAO X, PAN X X, et al. Biomechanical properties of novel transpedicular transdiscal screw fixation with interbody arthrodesis technique in lumbar spine; a finite element study [J]. *J Orthop Translat*, 2018, 15: 50 – 58.
- [19] SIN D A, HEO D H. Comparative finite element analysis of lumbar cortical screws and pedicle screws in transforaminal and posterior lumbar interbody fusion [J]. *Neurospine*, 2019, 16(2): 298 – 304.
- [20] 续彬, 张先隆, 吕智. 个性化设计腰椎融合器在脊柱内固定术中生物力学研究[J]. *中华实验外科杂志*, 2020, 37(6): 1030 – 1032.
- [21] 王博文, 吴子祥, 冯亚非, 等. 新型无尾帽自锁式椎弓根钉的设计与有限元力学分析[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2019, 34(1): 5 – 8.
- [22] 黄浩瀚, 张凯, 程晓非, 等. 支架 – 骨粒 – 可吸收骨水泥式腰椎间融合术的有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(2): 184 – 188.
- [23] 彭祥, 王文军, 晏怡果, 等. 解剖型纳米羟基磷灰石/聚酰胺 66 椎间融合器在腰椎 XLIF/OLIF 手术中的三维有限元分析[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2016, 34(5): 557 – 562.
- [24] ZHU H, ZHONG W, ZHANG P, et al. Biomechanical evaluation of autologous bone – cage in posterior lumbar interbody fusion; a finite element analysis [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2020, 21(1): 379.
- [25] LEE J, CHANG S H, CHO H C, et al. Anterior bridging bone in a newly designed cage for lumbar interbody fusion; radiographic and finite element analysis [J]. *World Neurosurg*, 2021, 154: e389 – e397.
- [26] 张海平, 郝定均, 孙宏慧, 等. 可变向腰椎融合器在腰椎

- 融合术中位置变化的生物力学研究[J]. 陕西医学杂志, 2020, 49(9): 1062 – 1066.
- [27] 易新, 宋西正. 腰骶椎带锁轴向融合内固定器的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(31): 4982 – 4986.
- [28] SHEN H K, CHEN Y R, LIAO Z H, et al. Biomechanical evaluation of anterior lumbar interbody fusion with various fixation options: Finite element analysis of static and vibration conditions [J/OL]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2021, 84 [2021 – 08 – 07]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33780788/>.
- [29] 张振军, 李文钊, 李慧, 等. 多孔钛腰椎融合器在不同入路椎间融合术中的生物力学性能[J]. 医用生物力学, 2019, 34(3): 243 – 250.
- [30] 刘艺, 陈金传, 程辰, 等. 单侧与双侧经皮椎弓根螺钉固定融合术治疗退行性腰椎不稳症的有限元分析[J]. 山东医药, 2019, 59(24): 52 – 55.
- [31] 高鑫, 费燕强, 蒋文超, 等. 改良经椎间孔腰椎椎体间融合术联合单侧椎弓根螺钉内固定的中长期疗效[J]. 江苏医药, 2020, 46(10): 1048 – 1051.
- [32] 陆向东, 赵轶波, 王少伟, 等. 腰椎单侧与双侧内固定后的生物力学特征比较[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(12): 1886 – 1890.
- [33] 王鹏, 王健, 胡勇, 等. 下腰椎融合术后路单、双侧椎弓根固定的有限元比较研究[J]. 中国临床解剖学杂志, 2016, 34(3): 331 – 337.
- [34] PERIASAMY K, SHAH K, WHEELWRIGHT E F. Posterior lumbar interbody fusion using cages, combined with instrumented posterolateral fusion: a study of 75 cases [J]. Acta Orthop Belg, 2008, 74(2): 240 – 248.
- [35] LEE J C, KIM Y, SOH J W, et al. Risk factors of adjacent segment disease requiring surgery after lumbar spinal fusion: comparison of posterior lumbar interbody fusion and posterolateral fusion [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2014, 39(5): E339 – E345.
- [36] OKUDA S, NAGAMOTO Y, MATSUMOTO T, et al. Adjacent segment disease after single segment posterior lumbar interbody fusion for degenerative spondylolisthesis: minimum 10 years follow up [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2018, 43(23): E1384 – E1388.
- [37] HARTMANN F, DIETZ S O, KUHN S, et al. Biomechanical comparison of an interspinous device and a rigid stabilization on lumbar adjacent segment range of motion [J]. Acta Chir Orthop Traumatol Cech, 2011, 78(5): 404 – 409.
- [38] 郭惠智, 梁德, 张顺聪, 等. 腰椎单/双节段骨水泥强化椎弓根螺钉固定对邻近节段影响的有限元分析[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2020, 30(2): 159 – 166.
- [39] DU C F, CAI X Y, GUI W, et al. Does oblique lumbar interbody fusion promote adjacent degeneration in degenerative disc disease: a finite element analysis [J/OL]. Comput Biol Med, 2021, 128 [2021 – 08 – 07]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33248365/>.
- [40] JIANG S, LI W. Biomechanical study of proximal adjacent segment degeneration after posterior lumbar interbody fusion and fixation: a finite element analysis [J]. J Orthop Surg Res, 2019, 14(1): 135.
- [41] 黄宇峰, 潘福敏, 赵卫东, 等. 腰椎后外侧融合椎弓根钉对相邻节段椎间盘影响的三维有限元分析[J]. 脊柱外科杂志, 2016, 14(6): 362 – 366.
- [42] 郝剑, 姚进, 朴哲, 等. 腰椎坚强固定后邻近节段的有限元法生物力学分析[J]. 中国中西医结合外科杂志, 2016, 22(5): 475 – 478.
- [43] SRINIVAS G R, DEB A, KUMAR M N, et al. Long – term effects of segmental lumbar spinal fusion on adjacent healthy discs: a finite element study [J]. Asian Spine J, 2016, 10(2): 205 – 214.
- [44] ZHAO X, DU L, XIE Y, et al. Effect of lumbar lordosis on the adjacent segment in transforaminal lumbar interbody fusion: a finite element analysis [J]. World Neurosurg, 2018, 114: e114 – e120.
- [45] WANG B, KE W, HUA W, et al. Biomechanical evaluation of anterior and posterior lumbar surgical approaches on the adjacent segment: a finite element analysis [J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2020, 23(14): 1109 – 1116.
- [46] DISCH A C, SCHMOELZ W, MATZIOLIS G, et al. Higher risk of adjacent segment degeneration after floating fusions: long – term outcome after low lumbar spine fusions [J]. J Spinal Disord Tech, 2008, 21(2): 79 – 85.
- [47] UMEHARA S, ZINDRICK M R, PATWARDHAN A G, et al. The biomechanical effect of postoperative hypolordosis in instrumented lumbar fusion on instrumented and adjacent spinal segments [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2000, 25(13): 1617 – 1624.
- [48] TSUANG F Y, TSAI J C, LAI D M. Effect of lordosis on adjacent levels after lumbar interbody fusion, before and after removal of the spinal fixator: a finite element analysis [J]. BMC Musculoskelet Disord, 2019, 20(1): 470.
- [49] MESBAH M, BARKAOUI A. Biomechanical investigation of the effect of pedicle – based hybrid stabilization constructs: a finite element study [J]. Proc Inst Mech Eng H, 2020, 234(9): 931 – 941.

- sion with sliding corrective osteotomy[J]. *Foot Ankle Int*, 1999, 20(3):166-170.
- [20] 孟显举,陈秀林,邓存宁,等.三面矫正截骨和距下关节融合治疗跟骨畸形愈合[J]. *中医临床研究*, 2015, 7(27):110-112.
- [21] 杨锁平,侯晓进,孟泽祖,等.距下关节融合并跟骨关节外截骨矫形术治疗陈旧性跟骨关节内骨折[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2020, 35(8):808-811.
- [22] 俞光荣,李兵,杨云峰,等.跟骨骨折畸形愈合致平足症的手术治疗[J]. *中华医学杂志*, 2010, 90(33):2308-2312.
- [23] 杨茂清,毕宏政,黄明利.截骨矫形治疗跟骨畸形愈合[J]. *中医正骨*, 2004, 16(9):9-10.
- [24] 王次俭,丛杰,杨荣,等.陈旧性跟骨骨折的矫形治疗[J]. *中国矫形外科杂志*, 2002, 9(7):18-19.
- [25] 宁运乾,刘宇河,罗军.截骨矫形关节融合治疗Ⅲ型跟骨骨折畸形愈合[J]. *实用骨科杂志*, 2013, 19(11):1043-1045.
- [26] 李逸群,包杭生,吴峰,等.跟骨骨折畸形愈合治疗现状与展望[J]. *中国矫形外科杂志*, 2011, 19(8):643-645.
- [27] 薛剑锋,梅国华,邹剑,等.跟骨体楔形截骨结合距下关节融合术治疗跟骨骨折后反屈畸形[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2017, 19(12):1019-1023.
- [28] 李兴华,王爱国,王天旭.跟骨旋转截骨丘部重建距下关节融合治疗陈旧性跟骨骨折畸形愈合[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2011(12):1196-1198.
- [29] 马富强,王爱国,李兴华,等.两种手术方法治疗陈旧性跟骨骨折疗效分析[J]. *中国矫形外科杂志*, 2014, 22(2):115-120.
- [30] 朱梁豫,李兴华,王爱国.陈旧性跟骨骨折畸形愈合的手术治疗:五种手术方式的疗效分析[J]. *足踝外科电子杂志*, 2018, 5(3):15-21.
- [31] SINGH S P, VARGHESE K J, QURESHI F M. Commentary: meta-analysis of 3D printing applications in traumatic fractures[J/OL]. *Front Surg*, 2021, 8 [2021-8-10]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34859045>.
- [32] YANG S, LIN H, LUO C. Meta-analysis of 3D printing applications in traumatic fractures[J/OL]. *Front Surg*, 2021, 8 [2021-8-10]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34532337>.
- [33] ZOU W, LI X, LI N, et al. A comparative study of autogenous, allograft and artificial bone substitutes on bone regeneration and immunotoxicity in rat femur defect model[J]. *Regen Biomater*, 2020, 8(1):40.
- [34] EL-HAWARY A, KANDIL Y R, AHMED M, et al. Distraction subtalar arthrodesis for calcaneal malunion: comparison of local versus iliac bone graft[J]. *Bone Joint J*, 2019, 101-B(5):596-60-2.
- [35] SAVORY K M, WÜLKER N, STUKENBORG C, et al. Biomechanics of the hindfoot joints in response to degenerative hindfoot arthrodeses[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 1998, 13(1):62-70.
- [36] YU G R, HU S J, YANG Y F, et al. Reconstruction of calcaneal fracture malunion with osteotomy and subtalar joint salvage: technique and outcomes[J]. *Foot Ankle Int*, 2013, 34(5):726-733.

(收稿日期:2021-08-19 本文编辑:杨雅)

(上接第 50 页)

- [50] 曹亮亮,徐建广,梅伟.三维有限元法分析腰骶区椎间融合联合置入棘突间动态内固定装置后腰椎的生物力学变化[J]. *中国组织工程研究*, 2020, 24(12):1905-1910.
- [51] HUANG Y P, DU C F, CHENG C K, et al. Preserving posterior complex can prevent adjacent segment disease following posterior lumbar interbody fusion surgeries: a finite element analysis[J]. *PLoS One*, 2016, 11(11):1-13.
- [52] 侯继春,曹杨.经椎间孔腰椎椎间融合结合不同椎弓根螺钉固定在单节段腰椎及邻近节段的生物力学特征[J]. *中国组织工程研究*, 2020, 24(27):4297-4304.
- [53] TAN Q C, LIU Z X, ZHAO Y, et al. Biomechanical comparison of four types of instrumentation constructs for revision surgery in lumbar adjacent segment disease: a finite element study[J/OL]. *Comput Biol Med*, 2021, 134 [2021-08-07]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34010793/>.
- [54] ZHANG C, SHI J, CHANG M, et al. Does osteoporosis affect the adjacent segments following anterior lumbar interbody fusion? A finite element study[J]. *World Neurosurg*, 2021, 146:e739-e746.
- [55] KUMARAN Y, SHAH A, KATRAGADDA A, et al. Iatrogenic muscle damage in transforaminal lumbar interbody fusion and adjacent segment degeneration: a comparative finite element analysis of open and minimally invasive surgeries[J]. *Eur Spine J*, 2021, 30(9):2622-2630.
- [56] 张钰,刘家明,周扬,等.椎弓根螺钉钉道对椎体强度影响的有限元分析[J]. *中国矫形外科杂志*, 2017, 25(2):158-162.
- [57] 魏兵,许泽川,常山.有限元法分析腰椎椎弓根螺钉的生物力学特征[J]. *中国组织工程研究*, 2018, 22(19):3091-3096.

(收稿日期:2021-08-07 本文编辑:郭毅曼)