

# 侧方入路腰椎内固定的生物力学研究进展

杨舟, 朱青安

(南方医科大学南方医院 脊柱骨科, 广州 510515)

**摘要:**极外侧椎体融合术(extreme lateral interbody fusion, XLIF)可用于治疗腰椎间盘突出、椎体滑脱、椎管狭窄等腰椎疾病。此术式从侧方腹膜后建立手术通道,与其他手术方式相比,术中出血少,创伤小,康复时间短,并发症少,既可避免前方大血管损伤的风险,也可减少后方肌肉、关节突等组织的破坏,因而受到越来越多的关注和应用。但此术式在临床治疗效果、并发症发生率等方面是否优于其他入路尚无定论。从生物力学角度总结 XLIF 重建腰椎稳定的效果,并比较 XLIF 与相关经典术式在生物力学上的特点。

**关键词:**侧方入路; 椎间融合术; 腰椎; 脊柱稳定性; 生物力学

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2019.06.014

## Progress in Biomechanics of Lumbar Fixation with Lateral Approaches

YANG Zhou, ZHU Qingan

(Department of Spinal Surgery, Nanfang Hospital, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China)

**Abstract:** Extreme lateral interbody fusion (XLIF) can be used to treat various lumbar diseases, such as lumbar facet joints intervertebral disc herniation, spondylolisthesis, stenosis. Compared with other approaches, XLIF establishes the surgical channel behind the peritoneum through lateral abdomen, with the advantages of less bleeding in the surgery, smaller invasion, lower complications rate and shorter rehabilitation period. Meanwhile, this technique can not only reduce the risk of vascular injury, but also avoid the damage of back structures, such as muscles and facet joints. Therefore, XLIF has been attracting more and more attention and application. However, there is no conclusive evidence to prove that XLIF is better than other surgical approaches in terms of clinical results and complications rates. This paper reviewed the effects of XLIF for reconstructing spinal stability, as well as its biomechanical properties compared with other classical surgeries.

**Key words:** lateral approach; lumbar interbody fusion; lumbar vertebra; spinal stability; biomechanics

过去 20 年中,椎体融合术被越来越多地用于治疗腰椎间盘突出、椎体滑脱、椎管狭窄等腰椎疾病<sup>[1]</sup>,并分化发展为腰椎后外侧融合术 (posterolateral fusion, PLF)、后路腰椎椎体间融合术 (posterior lumbar interbody fusion, PLIF)、经椎间孔

椎体融合术 (transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF)、前路腰椎椎体融合术 (anterior lumbar interbody fusion, ALIF)、极外侧椎体融合术 (extreme lateral interbody fusion, XLIF) 和侧前方椎体融合术 (oblique lateral interbody fusion, OLIF) 等<sup>[2]</sup>。上述

各种术式都有其优缺点。例如,ALIF的优点是植骨接触面积大,可有效恢复椎间高度及腰椎前凸,通过扩大椎间孔间接减压神经根,避免硬膜外瘢痕形成。但ALIF具有损伤腹部大血管、肠道及交感神经丛等潜在风险,不能有效地彻底减压神经根管,且同时行后路内固定会增加手术创伤<sup>[3]</sup>。TLIF通过后路实施单侧关节突关节切除术,可保留部分骨性及棘间韧带组织结构,减少对脊柱稳定性的破坏,降低对神经损伤的风险,有利于患者早期下床进行功能恢复锻炼。但传统开放式TLIF对椎旁肌进行剥离与牵拉,术后易发生椎旁肌水肿、萎缩,影响腰椎功能恢复<sup>[4]</sup>。XLIF不经腹腔,无需游离和牵开大血管,也不进入椎管,从而避免了常规前路或后路手术的风险,且具有手术时间短和出血量少等优点。但XLIF的潜在并发症包括腰大肌分离后的屈髋无力、腰骶神经根损伤、生殖股神经损伤等<sup>[5]</sup>。该术式自2006年由Ozgun等<sup>[6]</sup>学者提出后,在临床上得到越来越多的应用。然而,XLIF术式对腰椎的稳定效果和与其他经典术式相比在生物力学上的优劣问题一直为相关学者和手术医生所关注。本文从腰椎内固定生物力学角度综述此领域的进展。

## 1 生理状态下腰椎稳定的支持结构

生理状态下的腰椎稳定性由韧带、小关节、椎间盘、脊柱周围相关神经肌肉共同维持<sup>[7]</sup>。韧带包括前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘上韧带、棘间韧带、关节囊韧带等,连接相邻椎骨,连同椎椎周围肌肉一起维持脊柱稳定性<sup>[8]</sup>。研究表明,最坚强的韧带为前纵韧带和后纵韧带<sup>[9]</sup>,术中操作中若损伤上述韧带可能对脊柱稳定性造成一定影响<sup>[10]</sup>。

腰椎小关节面与水平面约呈 $90^\circ$ ,与冠状面约呈 $45^\circ$ ,此成角能允许腰部的屈伸和侧弯,但对轴向旋转有限制。腰椎小关节承受载荷的功能随节段三维运动变化,承担 $0\% \sim 33\%$ 脊柱轴向载荷,尤其是后伸时可承受高达 $65\%$ 载荷<sup>[11]</sup>。因此,术式选择时应考虑损伤韧带或小关节对脊柱稳定性的影响。

椎间盘由髓核、纤维环和上下终板组成。髓核是一种凝胶样物质,由纤维环所包围,组织中水分含量较高,由此产生的渗透性膨胀是髓核力学作用的一个典型特征。当椎间盘受压时,髓核承受 $75\%$ 压力,其余 $25\%$ 压力分布到纤维环<sup>[12]</sup>。纤维环是椎

间盘的外层结构,包含 $15 \sim 25$ 层紧密排列的环形胶原纤维板层,各板层由平行排列的纤维及其间的基质构成<sup>[13]</sup>。在直立状态下,纤维环承担着多个方向的力,抵抗来自髓核在水平方向的“膨出”是纤维环的主要力学作用<sup>[14]</sup>。

腰椎间盘退变是椎间盘内组织进行性结构破坏的一种异常表现,导致亲水性下降,弹性变差,储存能量和传递负荷能力降低,进而承受应力的能力降低。研究发现,无论是部分或全部摘除髓核,都会造成腰椎运动节段的运动范围(range of motion, ROM)明显增加。髓核全部摘除后,节段运动增加明显大于部分摘除,故节段ROM增加与髓核切除量直接相关<sup>[15-16]</sup>。而纤维环退变主要表现为糖化、脱水变硬及出现纤维环裂隙(环状裂隙或放射状裂隙)。纤维环撕裂增加了受累节段ROM,放射状和横向撕裂对轴向旋转运动比对屈伸或侧弯运动的影响更大<sup>[17]</sup>。侧方入路腰椎椎体间融合手术需要切开纤维环,切除髓核和终板,在一定程度上影响了脊柱的稳定性。

相比其他腰椎椎体间融合术入路,XLIF从侧方腹膜后建立手术通道,避免了损伤前纵韧带、后纵韧带、棘上棘间韧带或者小关节。从理论上讲,XLIF比ALIF、PLIF或TILF在生物力学上更有优势。

## 2 单独椎间融合器固定的脊柱稳定性

椎体间融合术的主要步骤是建立手术通道、切除椎间盘组织、准备移植床、放置椎间融合器和置入附加稳定装置<sup>[18]</sup>。椎体间融合术的目的是提供足够的稳定性、促进骨融合、恢复椎间高度和脊柱生理曲度、神经减压等<sup>[19]</sup>,其生物力学稳定性由切除结构的类型和范围、融合器的材质、种类和大小以及附加稳定装置的类型等共同决定<sup>[20]</sup>。

侧方入路由于保留了前纵韧带和后纵韧带,仅切开一侧纤维环以及切除椎间盘,对脊柱稳定性的影响小于其他入路。Heth等<sup>[10]</sup>研究发现,后侧方入路切除L4~5椎间盘后,L4~5节段前屈、后伸和轴向旋转ROM分别增加到 $8^\circ$ 、 $3^\circ$ 和 $3^\circ$ ;前方入路后,前屈、后伸和轴向旋转ROM分别增加到 $12^\circ$ 、 $5^\circ$ 和 $4^\circ$ ,说明侧方入路对脊柱ROM的影响较小。Kim等<sup>[21]</sup>的实验结果同样支持以上结论。Huec等<sup>[22]</sup>测试了侧方入路单独置入椎间融合器对人脊柱生

物力学的影响,发现其固定刚度比完整节段在屈伸、侧弯、轴向旋转上分别增强了1.6、1.3、1.0倍,可提供初步的脊柱稳定。Pimenta等<sup>[20]</sup>在L2~3节段比较不同尺寸椎间融合器对固定节段稳定性的影响,发现单独椎间融合器固定后的ROM在各运动方向上均显著减少,认为在合适尺寸椎间融合器和良好骨质的情况下,可以适当减少附加固定装置。Laws等<sup>[23]</sup>在防腐人体标本的生物力学研究中发现,侧方入路单独椎间融合器固定分别显著地减少了在屈、伸、侧弯和轴向旋转工况下55%、38%、49%和26%的ROM。Basra等<sup>[24]</sup>研究发现,侧方入路单独椎间融合器减少了L3~4节段在屈伸、侧弯、轴向旋转工况下34%、38%、71%的ROM。Cappuccino等<sup>[18]</sup>也发现,侧方入路单独置入椎间融合器L3~4节段ROM显著降低,在屈伸、侧弯、轴向旋转ROM分别为完整节段的32%、33%、69%<sup>[18]</sup>。侧方入路单独置入椎间融合器L4~5节段ROM也显著减少,屈伸、侧弯、轴向旋转ROM分别为完整节段的68%、67%、31%<sup>[25]</sup>。其他研究也得到与上述研究相似的结果<sup>[26-31]</sup>。

侧方入路单独置入椎间融合器能够提供一定的脊柱稳定性,但是目前大多数学者都认为单独置入椎间融合器后,脊柱的稳定性不足以确保植骨融合,还需要联合其他脊柱固定以提高稳定性。

### 3 椎间融合器联合其他前后路固定的生物力学

目前临床上XLIF椎间融合器都需要联合前路或者后路固定装置,以加强固定节段的稳定性,提高植骨融合率。常用的联合前路或后路固定装置包括单、双侧椎弓根螺钉、侧方钢板、小关节螺钉、棘突间钢板等。

Cappuccino等<sup>[18]</sup>比较XLIF椎间融合器联合单侧或双侧椎弓根螺钉固定、侧方钢板固定的生物力学性能,结果表明这3种附加固定相较于完整脊柱,都显著降低了屈伸(分别为20%、13%、33%)、侧弯(分别为22%、14%、16%)、轴向旋转(分别为51%、41%、53%)运动ROM,其中椎弓根螺钉对于屈伸ROM的限制最大,且双侧螺钉相比单侧螺钉在3个运动工况下稳定性均更高<sup>[18]</sup>。Nayak等<sup>[19]</sup>在人标本L4~5节段比较了XLIF椎间融合器联合

双侧椎弓根螺钉和侧方钢板的稳定性,联合双侧椎弓根螺钉固定的屈伸、侧弯、轴向旋转ROM分别减少了86%、91%和61%,而联合侧方钢板固定的屈伸、侧弯、轴向旋转ROM相应减少了50%、67%和48%,证实XLIF椎间融合器联合双侧椎弓根螺钉固定能提供更高的稳定性。其他类似研究也支持侧方入路椎间融合器联合双侧椎弓根螺钉固定比侧方钢板更加稳固的结论<sup>[23,32]</sup>。

Fogel等<sup>[25]</sup>比较L3~4节段分别运用XLIF联合椎间融合器、单双侧螺钉、侧方钢板、棘突间钢板固定后的生物力学性能。结果显示,相较于单独的椎间融合器,侧方钢板显著降低了侧弯ROM,单、双侧螺钉在各个运动方向的稳定性都显著增加,且双侧螺钉在所有附加固定中最为稳定,棘突间钢板显著增加屈伸运动稳定性,且在屈伸运动稳定性上比侧方钢板更加稳定,而在侧弯和轴向旋转方向则侧方钢板更稳定。侧方钢板联合棘突间钢板也能提供较为坚强的固定。

Basra等<sup>[24]</sup>对比XLIF椎间融合器联合单双侧椎弓根螺钉、侧方钢板、双侧小关节螺钉的生物力学性能。结果表明,单、双侧椎弓根螺钉、双侧小关节螺钉都比单独椎间融合器显著增强了稳定性,且双侧椎弓根螺钉最为稳定。例如,在屈伸、侧弯、轴向旋转方向上,XLIF椎间融合器联合单侧椎弓根螺钉ROM分别为单独XLIF椎间融合器的18%、28%、53%;联合双侧螺钉分别为10%、20%、37%;而联合双侧小关节螺钉分别为13%、24%、36%。

Liu等<sup>[33]</sup>采用有限元方法分析XLIF椎间融合器、椎间融合器联合附加固定的生物力学特点。结果表明,单独椎间融合器、椎间融合器联合侧方钢板或单、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,而联合单侧椎弓根螺钉已经能够提供足够的稳定性,联合侧方钢板不如联合单、双侧椎弓根螺钉稳定。单独椎间融合器对终板的压力大于椎间融合器联合双侧椎弓根螺钉,例如单独椎间融合器对L4上终板的压力比椎间融合器联合双侧椎弓根螺钉在前屈、后伸、侧弯、轴向旋转方向分别增加了64%、40%、175%、46%。椎间融合器联合单侧椎弓根螺钉比联合侧方钢板和双侧椎弓根螺钉对终板的压力稍大。此外,XLIF椎间融合器比TLIF椎间融合器、ALIF

椎间融合器对终板的压力更小,其主要原因可能是侧方入路椎间融合器的尺寸较大,使得接触压力分散。在 Zhang 等<sup>[34]</sup>的有限元模拟实验中,除了得到上述相似的结论外,还发现椎间融合器联合侧方钢板和棘突钢板的联合固定方法相较于椎间融合器联合双侧椎弓根在屈伸、侧弯、轴向旋转上更加稳定,且椎间融合器压力和终板压力更小。

另外,还有很多的研究均同样支持附加固定装置比单独椎间融合器更加稳固,且双侧椎弓根螺钉提供最坚强固定的结论<sup>[26-31]</sup>。但相对弱化的联合固定、例如侧方钢板固定,棘突间钢板固定等也能够有效加强脊柱稳定性,值得临床上尝试。

#### 4 侧方入路与其他手术入路的生物力学比较

不同手术入路所暴露的手术视野、操作区域大小不同,相应切除的脊柱结构也不同,因此,置入椎间融合器后,不同手术入路对脊柱稳定性的影响有差异。

研究证实,XLIF 联合单独椎间融合器固定比 ALIF 或 TLIF 联合单独椎间融合器固定的稳定性高。例如,Heth 等<sup>[10]</sup>研究表明,XLIF 联合单独椎间融合器固定后前屈、后伸 ROM 分别为 2.1°和 1.4°,左、右侧弯 ROM 分别为 2.3°和 1.4°,左、右轴向旋转 ROM 分别为 1.4 和 1.6°;而 ALIF 联合单独椎间融合器固定后,前屈、后伸 ROM 分别为 3.5°和 2.2°,左、右侧弯 ROM 分别为 2.9°和 2.4°,左、右轴向旋转 ROM 分别为 1.8°和 1.6°,说明 XLIF 比 ALIF 脊柱稳定性更高一些。Laws 等<sup>[23]</sup>研究表明,XLIF 比 ALIF 在前屈、后伸、侧弯和轴向旋转运动方向上 ROM 分别减少 39%、22%、64% 和 50%,XLIF 比 ALIF 的脊柱稳定性要高。Mantell 等<sup>[35]</sup>在 L4~5 腰椎滑脱模型上证实了 XLIF 在屈、伸、侧弯、轴向旋转上都比 ALIF 稳定。Pimenta 等<sup>[20]</sup>研究发现,XLIF 大尺寸的单独椎间融合器甚至比 TLIF 椎间融合器联合后路椎弓根螺钉固定的稳定性更高。

ALIF 从前方入路需切开腰椎前纵韧带,TLIF 则要求切除小关节,这两种手术入路都不可避免地损伤了维持腰椎稳定的结构。XLIF 从侧方建立手术通道,只损伤椎间盘的纤维环,减少对脊柱稳定结构的干扰,理论和实验结果都支持 XLIF 具有更好的生物力学稳定性。

#### 5 椎间融合器尺寸对侧方入路腰椎内固定的影响

纤维环和韧带有足够的紧张度是椎间融合器为脊柱提供稳定作用的前提,较大的融合器可最大程度恢复椎间高度以及脊柱生理曲度和纤维环、韧带张力,从而重建脊柱稳定性,减少对神经根的卡压。侧方入路相较于后方入路的优点之一是它能更多地暴露和切除椎间盘,置入更大尺寸的椎间融合器,在不损伤后部肌肉的前提下可最大程度恢复椎间高度,恢复脊柱生理曲度和韧带张力<sup>[2]</sup>。尺寸更大的融合器可以更广泛地分散身体质量的压力,起到防止融合器沉降的作用<sup>[20]</sup>。

Pimenta 等<sup>[20]</sup>比较 18、26 mm 两种尺寸 XLIF 椎间融合器的生物力学稳定性,单独 26 mm 椎间融合器在屈伸上比单独 18 mm 椎间融合器稳定,甚至比 18 mm 椎间融合器联合单侧椎弓根螺钉固定更稳定,26 mm 椎间融合器联合椎弓根螺钉固定能够取得更大的脊柱稳定性。然而,Mantell 等<sup>[35]</sup>将小关节软骨削削,建立间隙为 4 mm 腰椎滑脱模型,结果发现,18、22 mm XLIF 椎间融合器的生物力学稳定性差异没有显著性,说明更大尺寸 XLIF 椎间融合器的生物力学稳定作用可能与小关节的作用相关。在 Godzik 等<sup>[28]</sup>的研究中,尽管 XLIF 所用的椎间融合器尺寸更大,但是与 PLIF 相比对脊柱的稳定性相似。

TLIF 经椎间孔切除椎间盘,因其建立的操作空间过小而限制了可置入的椎间融合器大小,而 ALIF 从腹侧入路,虽然可在直视下获得较大的操作空间,但是会损伤前纵韧带。XLIF 综合了上述两种入路的优点,在尽量减少损伤屈伸稳定结构的前提下获得较大的操作空间,可置入尺寸更大的融合器。

#### 6 新型侧方入路椎间融合器的生物力学特点

除了传统 PEEK 和钛合金材质的椎间融合器外,很多研究都在探究各种新型的椎间融合器,以提高脊柱稳定性和融合率。

Mantell 等<sup>[35]</sup>在腰椎滑脱模型上比较单独可膨胀 XLIF 椎间融合器,结果发现,在屈伸和轴向旋转等运动方向上,可膨胀 XLIF 椎间融合器比单独 TLIF 椎间融合器稳定,而在侧弯上则没有差异。Perez-Orribo

等<sup>[36]</sup>研究证实,XLIF 椎间融合器联合新型的皮质骨螺钉相较于 XLIF 椎间融合器联合传统椎弓根螺钉,两者稳定性相当。Basra 等<sup>[24]</sup>测试一款新型椎间融合器—钢板耦合(IPS-L)稳定装置,结果显示,单独 IPS-L 在屈伸、侧弯和轴向旋转上 ROM 分别为完整节段的 25%、30% 和 43%。IPS-L 联合单侧椎弓根螺钉在屈伸、侧弯和轴向旋转上 ROM 分别为完整节段的 14%、24% 和 39%,而 IPS-L 联合双侧椎弓根螺钉分别为 11%、16% 和 28%。IPS-L 联合小关节螺钉在屈伸、侧弯和轴向旋转上的 ROM 分别为完整节段的 10%、20%、20%。在与标准固定方式比较中,IPS-L 展示了比椎弓根螺钉更高的稳定性。Zhang 等<sup>[37]</sup>通过有限元分析发现,不同孔隙率的多孔钛椎间融合器、钛质椎间融合器、聚醚醚酮椎间融合器(PEEK 椎间融合器)等都减少了 90% 以上的 ROM。相对而言,多孔钛椎间融合器的孔隙率不影响 ROM,但多孔钛椎间融合器 ROM 比 PEEK 椎间融合器大,且其 ROM 随着孔隙率的增大而增大,而实体钛质椎间融合器 ROM 最小。

虽然一些新型器材在生物力学测试上得到令人满意的结果,但是其实际的临床治疗效果和远期疗效还需在实践中进一步验证。

## 7 展望和总结

脊柱生物力学测试使用新鲜标本,没有考虑脊柱周围肌肉的作用和负重的影响。尽管采用脊柱跟随压力能够在一定程度上模拟肌肉力和身体质量的影响,但与临床力学环境相比仍然有一定差距。今后的生物力学测试应更好地模拟在体力学环境,以评价和指导临床实践。

脊柱的稳定性由椎体、椎间盘、相关韧带、小关节、肌肉组织等共同维持,手术中避免损伤上述结构可以保留脊柱的稳定性。XLIF 建立侧方手术通道,经腹膜后间隙到达椎间盘表面,保留了前/后纵韧带、关节突关节、棘上与棘间韧带、棘突、椎板和背部肌肉,理论上比 ALIF 或 PLIF 有更好的稳定性,且得到许多相关研究的证实。目前的主流观点认为,XLIF 椎间融合器固定不足以提供足够的稳定性,需要其他附加的固定装置,例如椎弓根螺钉系统、侧方钢板、棘突间钢板、经小关节螺钉固定等。联合附加固定装置比单独椎间融合器固定的稳定性更高,其中联合双侧椎弓根螺钉固定的稳定最

高。XLIF 能够较大地暴露病椎椎间盘,置入更大尺寸的椎间融合器,利于更好地恢复椎间高度和神经减压、恢复韧带张力和脊柱生理曲度,还可以更广泛地分散接触压力,防止椎间融合器沉降。

## 参考文献:

- [1] SARAPH V, LERCH C, WALOCHNIK N, *et al.* Comparison of conventional versus minimally invasive extraperitoneal approach for anterior lumbar interbody fusion [J]. *Eur Spine J*, 2004, 13(5): 425-431.
- [2] WINDER MJ, GAMBHIR S. Comparison of ALIF vs. XLIF for L4/5 interbody fusion: Pros, cons, and literature review [J]. *J Spine Surg*, 2016, 2(1): 2-8.
- [3] BRAU SA. Mini-open approach to the spine for anterior lumbar interbody fusion: Description of the procedure, results and complications [J]. *Spine J*, 2002, 2(3): 216-223.
- [4] 方旭, 陆生林, 白宇, 等. 脊柱微创通道镜系统辅助下行 TLIF 术治疗腰椎退行性疾病的疗效 [J]. *疑难病杂志*, 2018, 17(1): 67-70.
- [5] 贺石生. 极外侧椎间融合术的适应证与并发症 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2011, 21(3): 183-184.
- [6] OZGUR BM, ARYAN HE, PIMENTA L, *et al.* Extreme lateral interbody fusion (XLIF): A novel surgical technique for anterior lumbar interbody fusion [J]. *Spine J*, 2006, 6(4): 435-443.
- [7] PANJABI MM. The stabilizing system of the spine. Part I. Function, dysfunction, adaptation, and enhancement [J]. *J Spinal Disord*, 1992, 5(4): 383-389.
- [8] 卢微, 张守罗, 姜其为, 等. 腰椎板切除对腰椎稳定性影响的实验研究 [J]. *医用生物力学*, 1996, 11(1): 34-37.  
LU W, ZHANG SL, JIANG QW, *et al.* Biomechanical study for the stability of lumbar spine after multiple segmental laminectomies [J]. *J Med Biomech*, 1996, 11(1): 34-37.
- [9] PINTAR FA, YOGANANDAN N, MYERS T, *et al.* Biomechanical properties of human lumbar spine ligaments [J]. *J Biomech*, 1992, 25(11): 1351-1356.
- [10] HETH JA, HITCHON PW, GOEL VK, *et al.* A biomechanical comparison between anterior and transverse interbody fusion cages [J]. *Spine*, 2001, 26(12): E261-E267.
- [11] 于柏龙, 陈更新. 腰椎生物力学研究进展 [J]. *中国急救医学*, 1999, 19(9): 574-576.
- [12] 魏晓宁, 王艳, 裴飞. 腰椎间盘结构、盘内压力及不同载荷的影响: 生物力学研究进展 [J]. *中国组织工程研究*, 2015, 19(20): 3242-3247.
- [13] 朱东. 腰椎间盘纤维环走向与力学性能 [J]. *医用生物力学*, 2003, 18(S1): 63.  
ZHU D. Orientation of fibrous ring of lumbar intervertebral disc and mechanical properties [J]. *J Med Biomech*, 2003, 18(S1): 63.

- [14] 单治, 范顺武, 赵凤东. 腰椎间盘突出纤维环的生物力学性能研究进展[J]. 中华骨科杂志, 2014, 34(3): 330-335.
- [15] GOEL VK, NISHIYAMA K, WEINSTEIN JN, et al. Mechanical properties of lumbar spinal motion segments as affected by partial disc removal [J]. Spine, 1986, 11(10): 1008-1012.
- [16] KUROKI H, GOEL VK, HOLEKAMP SA, et al. Contributions of flexion-extension cyclic loads to the lumbar spinal segment stability following different discectomy procedures [J]. Spine, 2004, 29(3): E39-E46.
- [17] HAUGHTON VM, SCHMIDT TA, KEELE K, et al. Flexibility of lumbar spinal motion segments correlated to type of tears in the annulus fibrosus [J]. J Neurosurg, 2000, 92 (Suppl 1): 81-86.
- [18] CAPPUCINO A, CORNWALL GB, TURNER AW, et al. Biomechanical analysis and review of lateral lumbar fusion constructs [J]. Spine, 2010, 35(26 Suppl): S361-S367.
- [19] 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(10): 1331-1338.
- [20] PIMENTA L, TURNER AW, DOOLEY ZA, et al. Biomechanics of lateral interbody spacers: Going wider for going stiffer [J]. Scientific World J, 2012, 2012: 1-6.
- [21] KIM SM, LIM TJ, PATERNO J, et al. Biomechanical comparison: Stability of lateral-approach anterior lumbar interbody fusion and lateral fixation compared with anterior-approach anterior lumbar interbody fusion and posterior fixation in the lower lumbar spine [J]. J Neurosurg Spine, 2005, 2(1): 62-68.
- [22] LE HUEC J, LIU M, SKALLI W, et al. Lumbar lateral interbody cage with plate augmentation: *In vitro* biomechanical analysis [J]. Eur Spine J, 2002, 11(2): 130-136.
- [23] LAWS CJ, COUGHLIN DG, LOTZ JC, et al. Direct lateral approach to lumbar fusion is a biomechanically equivalent alternative to the anterior approach [J]. Spine, 2012, 37(10): 819-825.
- [24] BASRA S, BUCKLEN B, MUZUMDAR A, et al. A novel lateral lumbar integrated plate-spacer interbody implant: *In vitro* biomechanical analysis [J]. Spine J, 2015, 15(2): 322-328.
- [25] FOGEL GR, PARIKH RD, RYU SI, et al. Biomechanics of lateral lumbar interbody fusion constructs with lateral and posterior plate fixation: Laboratory investigation [J]. J Neurosurg Spine, 2014, 20(3): 291-297.
- [26] DOULGERIS JJ, AGHAYEV K, GONZALEZ-BLOHM SA, et al. Biomechanical comparison of an interspinous fusion device and bilateral pedicle screw system as additional fixation for lateral lumbar interbody fusion [J]. Clin Biomech, 2015, 30(2): 205-210.
- [27] REIS MT, REYES PM, AITUN I, et al. Biomechanical evaluation of lateral lumbar interbody fusion with secondary augmentation [J]. J Neurosurg Spine, 2016, 25(6): 720-726.
- [28] GODZIK J, KALB S, REIS MT, et al. Biomechanical evaluation of interbody fixation with secondary augmentation: Lateral lumbar interbody fusion versus posterior lumbar interbody fusion [J]. J Spine Surg, 2018, 4(2): 180-186.
- [29] GODZIK J, MARTINEZ-DEL-CAMPO E, NEWCOMB A GUS, et al. Biomechanical stability afforded by unilateral versus bilateral pedicle screw fixation with and without interbody support using lateral lumbar interbody fusion [J]. World Neurosurg, 2018, 113: e439-e445.
- [30] GONZALEZ-BLOHM SA, DOULGERIS JJ, AGHAYEV K, et al. *In vitro* evaluation of a lateral expandable cage and its comparison with a static device for lumbar interbody fusion: A biomechanical investigation [J]. J Neurosurg Spine, 2014, 20(4): 387-395.
- [31] KRETZER RM, MOLINA C, HU N, et al. A comparative biomechanical analysis of stand alone versus facet screw and pedicle screw augmented lateral interbody arthrodesis [J]. Clin Spine Surg, 2016, 29(7): E336-E343.
- [32] NAYAK A, SANTONI B, CABEZAS A, et al. Kinematic comparison of lateral plate versus pedicle screw construct in lumbar spine instrumented with lateral cage at two levels [J]. Spine J, 2011, doi: 10.1016/j.spinee.2011.08.241.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] MANTELL M, CYRIAC M, HAINES CM, et al. Biomechanical analysis of an expandable lateral cage and a static transforaminal lumbar interbody fusion cage with posterior instrumentation in an *in vitro* spondylolisthesis model [J]. J Neurosurg Spine, 2016, 24(1): 32-38.
- [36] PEREZ-ORRIBO L, KALB S, REYES PM, et al. Biomechanics of lumbar cortical screw-rod fixation versus pedicle screw-rod fixation with and without interbody support [J]. Spine, 2013, 38(8): 635-641.
- [37] ZHANG Z, LI H, FOGEL GR, et al. Biomechanical analysis of porous additive manufactured cages for lateral lumbar interbody fusion: A finite element analysis [J]. World Neurosurg, 2018, 111: e581-e591.