

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

张振军¹, 廖振华², 孙艺菊³, 孙学君⁴, 刘伟强^{1b,2}

(1. 清华大学 a. 机械工程系, b. 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084; 2. 深圳清华大学研究院 生物医用材料及植入器械重点实验室, 广东 深圳 518057; 3. 辽宁省海城市中心医院, 辽宁海城 114200; 4. 北京盈暖利和科技有限公司, 北京 100085)

摘要:针对腰椎椎间融合术的生物力学研究背景和意义,回顾近年来椎间融合器及其在椎间融合术中的研究进展,并对其发展前景进行展望。主要归纳腰椎生物力学实验方法、椎间融合器和椎间融合术的最新进展,得出椎间融合术生物力学研究的主要方向为:有限元法的建模精细化、传统融合器的几何更优化、新型融合器的临床化和辅助固定方式的多样化。最后对椎间融合术生物力学的发展前景进行展望。通过对腰椎椎间融合术的生物力学研究进行回顾和展望,以期对腰椎疾患的临床手术治疗提供参考依据。

关键词:腰椎; 融合器; 椎间融合术; 生物力学; 辅助内固定

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.05.014

Biomechanical Research Progress of Lumbar Interbody Cage and Lumbar Interbody Fusion

ZHANG Zhenjun¹, LIAO Zhenhua², SUN Yitao³, SUN Xuejun⁴, LIU Weiqiang^{1b,2}

(1. a. Department of Mechanical Engineering, b. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Laboratory of Biomedical Material and Implanted Devices, Shenzhen Institute of Tsinghua University, Shenzhen 518057, Guangdong, China; 3. Haicheng City Central Hospital, Haicheng 114200, Liaoning, China; 4. Beijing Yingnuanlihe Technologies Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Aiming at the background and significance of biomechanical researches on lumbar interbody fusion, the research progress of interbody cage and interbody fusion was reviewed and its prospect was forecasted. The related work was summarized, including research method of lumbar biomechanics, biomechanics of interbody cage, and biomechanics of lumbar interbody fusion. The main research directions on biomechanical study of lumbar interbody fusion were: modeling refinement of finite element method, geometrical optimization of traditional fusion device, clinical application of new porous fusion device, and diversification of the supplemented fixation method. Finally, the prospect of biomechanics of lumbar interbody fusion was discussed. The review and prospect on biomechanics of lumbar interbody fusion will provide references for clinical treatment of lumbar spine diseases.

Key words: lumbar; cage; interbody fusion; biomechanics; supplemented fixation

腰椎椎间融合术目前已经广泛应用于治疗各种临床腰椎疾病,包括腰椎滑脱、腰椎创伤和退行性椎间盘退变等。椎间融合术通过将椎间融合器植入腰椎间隙来提高腰椎前柱的承载能力。为了实现有效的融合,通常在使用椎间融合器的同时也会增加辅助内固定装置^[1]。除了腰椎意外损伤和椎间盘退行性病变等因素外,现代人久坐不动的生活方式导致腰背痛的发病率正在逐年增高^[2-3]。保守治疗无效的情况下,必要时需要采取外科手术治疗,而椎间融合术是目前成熟而有效的主要手术方案之一。腰椎椎间融合术的生物力学研究对于传统融合器的优化设计、新型融合器的性能评价以及不同术式的效果评估具有重要的意义。

腰椎生物力学的实验方法通常包括体内和体外两大类。体内实验主要包括人体实验和动物实验,体外实验主要包括标本实验和有限元实验等。由于人体腰椎复杂的生理环境和承载特征,椎间融合术的生物力学研究通常采用标本实验或有限元实验,以及两种方法的相互结合。传统的椎间融合器根据手术方式不同而几何形态不同,通常采用的材料分为金属和非金属两大类,如钛合金、钽合金和聚醚醚酮树脂(polyetheretherketone, PEEK)等。近年来,随着3D打印技术的兴起,新型多孔椎间融合器也逐步进入临床应用。多孔融合器因其具有类似骨小梁的孔隙结构,理论上可以取得类似于椎体骨的力学强度,而且可能更加有利于骨长入^[4]。椎间融合术根据入路方式的不同,通常包括后路腰

椎椎间融合术 (posterior lumbar interbody fusion, PLIF)、前路腰椎椎间融合术 (anterior lumbar interbody fusion, ALIF)、经椎间孔腰椎椎间融合术 (transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF),以及最近出现的直接外侧椎体间融合术 (direct lateral interbody fusion, DLIF) 或极外侧椎间融合术 (extreme lateral interbody fusion, XLIF) 等。

因为腰椎在人体脊柱中起着特殊的承重作用,而且具有很高的损伤或发病率,目前腰椎椎间融合术已经得到较为广泛的应用。本文归纳了近年来国内外腰椎椎间融合术生物力学研究的相关进展,主要阐述腰椎生物力学实验方法、椎间融合器和椎间融合术等几个方面的研究现状。得出几个重点的研究方向为:有限元法的建模精细化、传统融合器的几何更优化、新型融合器的临床化和辅助固定方式的多样化。本文对腰椎椎间融合术的生物力学研究进行回顾和展望,以为临床腰椎融合术中融合器、内固定装置以及术式方案的选择提供参考依据。

1 腰椎生物力学的实验方法

图1归纳了腰椎生物力学的常用实验方法。考虑到体内实验的局限性,目前较多采用的为体外实验方法。体外标本实验因与人体生理状态接近而较为真实可靠,有限元实验因力学评估全面和可重复性的优点也被广泛应用。当然,有限元法也存在模型单一和参数设置简化等局限性,故最好将其与体外标本实验相互结合。

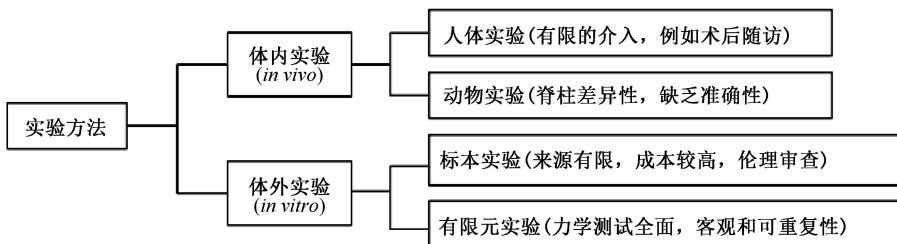


图1 腰椎生物力学的实验方法

Fig. 1 Experimental methods of lumbar biomechanics

1.1 体外标本实验方法

为了进行有效的腰椎生物力学研究,人体腰椎标本固然是最佳选择。国内外不少学者都进行了腰椎标本相关的生物力学实验或验证。国云鹏等^[5]选择1具人体腰椎标本L1~5节段放置在材

料试验机上进行测试,研究结果为高速列车人机工程座椅的设计提供生物力学依据。Fogel等^[1]以10具人体腰椎标本L1~5节段为研究对象,进行椎间融合术辅助内固定方式的对比,为腰椎融合术中内固定装置的选择提供实验依据。鉴于人体标本

存在取材困难、成本高昂和伦理限制的局限性,寻找尽可能与人体腰椎特性接近的动物标本就成为备选性方案。刘俭涛等^[6]选择24个新鲜山羊腰椎标本进行融合组和非融合组的生物力学实验对比,为人工腰椎假体动物模型的建立与研究提供基础。李慧等^[7]选用羊腰椎的双节段样本,研究ALIF术后持续性前屈工况下邻近节段的黏弹力学特性,进一步了解椎间融合术后邻近节段的退变机制。虽然动物腰椎标本在一定条件下可以作为人体腰椎标本的替代品,但是由于动物与人体在腰椎承载方面存在较大区别,故动物标本实验存在一定的局限性。

关于腰椎体外标本实验的测试方法和设备,通常根据实验目的不同而采用力学试验机或多自由度脊柱模拟测试机等设备。为了进行简单的轴向压缩或剪切实验,可以采用力学试验机,从而测量获得腰椎的压缩-位移关系等。当进行各种腰椎手术验证或对比实验时,通常需要施加压缩和扭矩的混合载荷来模拟前屈、后伸、侧弯和旋转等工况,此时更为专业的多自由度脊柱模拟测试机就成为更好的选择^[8]。本课题组通常采用的脊柱生物力学实验设备主要有CMT6014(国产MTS动态试验机)和Bionix370.02 A/T(美国MTS液压轴向/扭转动态试验机)^[9-10]。

综上所述,采用MTS等动态脊柱实验平台,可以模拟腰椎不同工况下的生物力学特性,输出腰椎活动范围(range of motion, ROM)、应变、压力和力矩等参数。通过对ROM变化量的评估分析,可以预测腰椎融合术后的融合效果和稳定性等。

1.2 有限元实验方法

体外标本受到来源、成本和伦理等相关的制约,而且对于力学参数的测量较为有限。有限元法通过建立腰椎模型,具有可以重复利用的优势,而且可以较为全面地预测力学参数^[11-12]。作为生物力学实验的两种方法,有限元实验和体外标本实验可以相互补充和验证,从而得出更加全面而可信的预测结果。特别是随着图像处理技术和计算机硬件技术的发展,有限元法在建模和仿真方面的精度和效率也得到进一步的提高。

腰椎有限元实验通常需要经历腰椎本体建模、前处理(几何清理和网格划分)、有限元分析和后处

理(结果输出和数据处理)等环节。常用的相关软件有逆向建模软件Mimics(Materialise公司,比利时)、前处理软件HyperMesh(Altair公司,美国)或ANSA(BETA CAE System公司,希腊)、有限元分析软件ABAQUS(SIMULIA公司,美国)或ANSYS(ANSYS公司,美国)等。有限元法的主要流程为:采用X光排除腰椎疾病,利用CT进行断层扫描,根据医学图像建立几何模型,然后采用有限单元法进行材料设置和网格划分,最后完成有限元模型的建立和仿真^[12]。关于有限元法在腰椎本体建模中的方法和流程,以及有限元法在腰椎融合术与置换术中的应用研究,本课题组发表的论文中已有详细论述^[12-13]。

综上所述,有限元法不仅可以模拟腰椎不同工况下的生物力学特性,而且可以进行不同手术方案的仿真和预测。由于有限元法强大的力学仿真功能,结果可以输出ROM、植入器械应力、终板应力、椎间盘压强(intervertebral disc pressure, IDP)和小关节应力(facet joint force, FJF)等。通过多参数的耦合分析,可以从多角度评价植入器械的生物力学性能和预测腰椎术后的生物力学变化。但是有限元法作为一种数值仿真手段,必然存在模型单一和仿真参数简化等局限,需要将其与临床观察和术后随访有效结合起来^[12]。

2 椎间融合器的生物力学研究

2.1 传统实体融合器及其生物力学研究

传统融合器结构各异,包括圆形、锥形、矩形和月牙形等。通常融合器形状的选择也可能与手术入路相关,如ALIF采用的椭圆形融合器、PLIF采用的长方体融合器和TLIF采用的月牙形融合器。目前也有学者提出了终板形状适配形融合器,如刘大勇等^[14]提出了椎体终板纹化处理和“象形皮质骨融合器”技术,回顾性分析275例腰椎滑脱后椎间植骨融合,结果显示术后植骨融合优良率超过90%。腰椎椎间融合器结构虽然看似简单,但是产品的安全性和有效性至关重要,故国内外关于融合器结构仍在不断地优化和改善^[15-16]。近年来国外学者针对椎间融合器的前凸角开展了一系列的研究。Kim等^[16]通过临床实验和影像学研究表明,12°前凸融合器可以获得更大的椎间角度,并进一步减小沉降

风险。Uribe 等^[17-18]先后采用体外标本实验和有限元实验研究了超前凸融合器对于腰椎前凸功能恢复的影响,结果显示,使用 20°和 30°超前凸融合器并选择性切除前纵韧带 (anterior longitudinal ligament, ALL),可以实现增加的节段性腰椎前凸角。此外,美国脊椎手术器械公司 Nuvasive 已经将其标准腰椎融合器的前凸角度从 10°增加到 15°,但是尚未见到关于融合器前凸角度增加 50% 后沉降风险变化的相关研究。

传统融合器的材料选择,通常包括钛合金 (titanium alloy, Ti)、PEEK、碳纤维增强 PEEK (carbon fiber PEEK, CFPEEK)、钽合金 (tantalum alloys, Ta)、同种或自体骨等,每种材料在临床应用中都有优劣。Ti 的机械强度和力学性能较优,但其弹性模量 ($E = 110 \text{ GPa}$) 与皮质骨弹性模量 ($E = 12 \text{ GPa}$) 相差较大,从而容易导致应力遮挡;PEEK 材料的弹性模量 ($E = 3.5 \text{ GPa}$) 更加接近于皮质骨,因而目前得到了广泛的应用,但是也存在融合器松动或沉降等问题;Ta 具有良好的生物相容性和骨长入性,但是其对 X 射线有一定阻挡作用^[19]。关于传统椎间融合器的材料改良,国内外学者都已开展了较为广泛的研究^[20-22]。如宋成哲等^[21]针对两组腰椎退行性患者分别植入碳纤维和钛网融合器并进行对比研究,随访结果显示两种材料均具有良好的生物相容性,而且碳纤维融合器的并发症发生率更低。此外,本课题组针对腰椎植入器械用 PEEK 材料的摩擦磨损性能也已开展了较为深入的研究。

综上所述,传统椎间融合器的研究主要是针对结构优化和材料改良等方面。国内在传统融合器的设计方面,从早期的仿制正在向自主研发转变,如清华大学与四川大学合作研制的 PEEK 椎间融合器等。虽然国外针对融合器前凸角的相关研究较多,但是椎间融合器的前凸角与沉降风险之间的关系仍有待进一步探究。

2.2 新型多孔融合器及其生物力学研究

随着新兴材料和 3D 打印技术的发展,使用钛合金打印金属多孔融合器成为当前的热点。多孔融合器内部的细柱和孔隙结构类似于椎体中骨小梁的支撑结构,而且更加有助于骨长入。3D 打印技术可以灵活调整孔径和孔隙率等参数,从而使得多孔融合器的力学性能和多孔率达到更优化。近年

来,国内外针对多孔融合器开展了广泛的研究,如多孔制备工艺、多孔孔径和孔隙率的优化等。王佳琦^[4]研究多孔钛合金椎间融合器的真空固相烧结法工艺,实验制备了孔径 200 ~ 500 μm 、孔隙率 45% ~ 65% 的多孔融合器,结合人体腰椎结构参数对多孔体材料进行力学测试,结果发现多孔体在 1 250 °C 烧结温度时具有最大的抗压强度。张雅宾^[23]采用电子熔融技术打印出多孔钛合金椎间融合器,然后将其植入小猪体内进行融合实验,验证了多孔钛合金融合器具有良好的生物相容性和骨融合能力。Tsai 等^[24]通过全腰椎有限元模型和力学实验方法比较分析不同结构的多孔融合器与实体融合器,结果显示孔径 400 μm 、孔隙率 60% 和 80% 的多孔融合器表现出更加优越的生物力学性能。此外,美国医疗器械公司 K2M 公司公布其 3D 打印 MOJAVE 脊柱植入物获得美国食品药品监督管理局批准;该设计引入有助于骨生长的材料,包括 3 ~ 5 μm 表面粗糙度和约 70% 内部孔隙率,适用于脊柱靠下的后路腰椎部分,而且具有可扩展、可调节和可定制等优点^[25]。

综上所述,由于多孔金属融合器可以进行个性化定制,可能是传统椎间融合器的良好替代选择。但是,关于金属多孔融合器的生物力学性能和临床效果仍然有待进一步的研究验证。2016 年,爱康医疗基于 3D ACT 技术打印的脊柱椎间融合器得到了中国国家食品药品监督管理总局的批准,成为国内首例获得上市许可的金属多孔椎间融合器^[26]。目前,包括清华大学、四川大学和纳通医疗集团等多家机构均在多孔椎间融合器方面开展了较为深入的研究。

2.3 椎间融合器的生物力学研究小结

由于传统的腰椎椎间融合术存在术中创伤大、出血多及术后可能并发症多的缺点,加之医学图像技术的不断进步,适于微创植入的椎间融合器如组合式融合器和扩张式融合器也得到了较快发展^[27-28]。占新华等^[29]针对腰椎微创和开放椎间融合的回溯性对比研究表明,两组患者术后效果无统计学差异,均为治疗腰椎退变性疾病的有效术式。

椎间融合器的结构形式通常会因入路方式不同而有所差异。PLIF 和 TLIF 均为目前最常用的手术方法,但是多数学者倾向于 TLIF,关于 TLIF 的详

细论述也可参考本课题组最近的相关研究成果^[12]。TLIF手术既可以采用双枚的长方体融合器,也可采用单枚的较长规格月牙形融合器。DLIF/XLIF可以充分发挥微创手术的优势,进一步减少患者创伤和相关并发症,有望得到更进一步的临床应用,但同时也要持续关注其经腰大肌入路可能造成的损伤。DLIF/XLIF手术通常可以采用角度参数适当的前凸融合器,有助于融合术后腰椎生理曲度的恢复。

椎间融合器在临床应用中通常会辅以各种内固定方式,从而提高腰椎稳定性。常用的辅助固定方式包括椎弓根钉棒系统、椎体侧板和棘突板等^[1]。虽然已知一些因素如腰椎不稳定、骨小梁和终板的骨质量以及手术史等均会影响固定方法的选择,但其生物力学机制尚未被完全了解。椎间融合器辅以不同内固定方式,可能产生不同的生物力学效应,包括稳定性差异和终板沉降风险差异等。因此,采用有限元法或影像学方法进一步系统地验证各种组合固定方式的生物力学性能十分必要。

3 总结和展望

作为腰椎生物力学实验的主要方法,体外标本实验和有限元实验各有所长。体外标本实验的研究结果更加真实可靠,但是测量力学参数相对有限。有限元法因其强大的力学仿真功能正好成为一种有效的补充工具。特别是随着图像处理和有限元建模技术的不断进步,更加逼真的三维非线性有限元模型在腰椎生物力学研究中将会发挥积极作用。

随着椎间融合器结构形式的不断改进,针对不同术式的传统实体椎间融合器日趋成熟。超前凸融合器的使用可以获得更大的前凸角,在脊柱前凸功能恢复方面具有较好的效果。但是增加的腰椎前凸角可能伴随着终板沉降风险的增加,故关于超前凸融合器的生物力学性能仍有待进一步的研究。随着3D打印技术的发展,金属多孔椎间融合器为腰椎椎间融合术提供了一种新的备选方案。多孔椎间融合器的孔径和孔隙率易于调整控制,具有良好的骨长入功能,而且适合于个性化定制,相信在未来会获得更快的发展。

针对不同入路方式的椎间融合术,椎间融合器的结构形式各异,而且不同入路方式和不同融合器

具有不同的适应症和优缺点。同时可以确信的是,各种适于微创治疗方法的椎间融合器将会成为椎间融合术中新的发展趋势。腰椎融合器的持续优化和各种新型辅助固定装置不断出现,为腰椎融合术的发展提供了更多的选择方案。但是针对各种组合固定方式的生物力学性能有待更加深入的研究。

最后,需要提及的就是关于腰椎融合术与非融合术的选择。虽然相关研究已经表明,非融合术在ROM方面更加接近真实的生理状态,但是长期临床随访结果显示两者并无显著性差异^[12]。考虑到腰椎非融合术的手术难度和长期的可能并发症,目前外科医生在大规模实施非融合术时多数采取谨慎态度^[30]。因此,椎间融合器和椎间融合术的生物力学研究目前仍然具有普遍而积极的意义。

参考文献:

- [1] 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): 1-7.
- [2] 柯昌保, 廖振华, 刘伟强. 人工腰椎间盘研究进展[J]. *国际骨科学杂志*, 2014, 35(6): 371-373.
- [3] 王刚, 周劲松. 腰背肌功能锻炼治疗非特异性下腰痛 32 例疗效观察[J]. *湖南中医杂志*, 2017, 33(7): 78-80.
- [4] 王佳琦. 新型多孔钛椎间融合器的研制[D]. 北京: 中国人民解放军医学院, 2015.
- [5] 国云鹏, 宋桂秋. 基于高速铁路随机振动环境对人体腰椎影响的人机工程座椅设计[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(3): 389-393.
- [6] 刘俭涛, 张峰, 李宇欢, 等. 山羊可动腰椎复合体的设计及体外生物力学研究[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2017, 27(4): 345-352.
- [7] 李慧, 王川, 刘振瑶, 等. 前路融合术后持续性前屈载荷下邻近节段黏弹特性研究[J]. *医用生物力学*, 2016, 31(1): 50-55.
LI H, WANG C, LIU ZY, et al. Viscoelastic properties of adjacent segments during prolonged flexion after anterior intervertebral fusion [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(1): 50-55.
- [8] DOOLEY ZA, TURNER AW, CORWALL GB. Multiaxial spine testing apparatus: System characterization by evaluation of analogue and cadaveric lumbar spines [J]. *Int J Exp Comput Biomech*, 2013, 2(2): 189-203.
- [9] LIAO ZH, FOGEL GR, WEI N, et al. Biomechanics of ar-

- tificial disc replacements adjacent to a 2-level fusion in 4-level hybrid constructs: An *in vitro* investigation [J]. *Med Sci Monit*, 2015, 21: 4006-4014.
- [10] LIAO ZH, FOGEL GR, PU T, *et al.* Biomechanics of hybrid anterior cervical fusion and artificial disc replacement in 3-level constructs: An *in vitro* investigation [J]. *Med Sci Monit*, 2015, 21: 3348-3355.
- [11] 王端阳, 奚春阳, 杨辉, 等. 有限元分析法在腰椎生物力学研究中的应用及新进展[J]. *现代生物医学进展*, 2015, 15(9): 1794-1797.
- [12] 张振军, 李阳, 廖振华, 等. 有限元法在腰椎生物力学应用中的研究进展和展望[J]. *生物医学工程杂志*, 2016, 33(6): 1196-1202.
- [13] ZHANG ZJ, SUN YT, LI Y, *et al.* Recent advances in finite element applications in artificial lumbar disc replacement [J]. *J Biomed Sci Eng*, 2016, 9(10): 1-8.
- [14] 刘大勇, 徐兆万, 历锋, 等. 终板纹化处理与“象形皮质骨融合器”的椎间融合术[J]. *中国矫形外科杂志*, 2015, 23(23): 2142-2147.
- [15] MARCHI L, ABDALA N, OLIVEIRA L, *et al.* Radiographic and clinical evaluation of cage subsidence after stand-alone lateral interbody fusion [J]. *J Neurosurg Spine*, 2013, 19(1): 110-118.
- [16] KIM SJ, LEE YS, KIM YB, *et al.* Clinical and radiological outcomes of a new cage for direct lateral lumbar interbody fusion [J]. *Korean J Spine*, 2014, 11(3): 145-151.
- [17] URIBE JS, SMITH DA, DAKWAR E, *et al.* Lordosis restoration after anterior longitudinal ligament release and placement of lateral hyperlordotic interbody cages during the minimally invasive lateral transpoas approach: A radiographic study in cadavers [J]. *J Neurosurg Spine*, 2012, 17(5): 476-485.
- [18] URIBE JS, HARRIS JE, BECKMAN JM, *et al.* Finite element analysis of lordosis restoration with anterior longitudinal ligament release and lateral hyperlordotic cage placement [J]. *Eur Spine J*, 2015, 24(3): 420-426.
- [19] 黎洁. 胸腰椎椎间融合器设计要点[J]. *医学信息*, 2015, 28(4): 204.
- [20] 宋剑, 王松, 廖振华, 等. 聚醚醚酮及其改性的人工关节材料的摩擦磨损性能研究进展[J]. *功能材料*, 2014, 45(23): 23010-23015.
- [21] 宋成哲, 金红旭. 碳纤维椎间融合器与钛网椎间融合器修复腰椎退行性变:生物相容性比较[J]. *中国组织工程研究*, 2015, 19(12): 1909-1913.
- [22] SONG C, LI XF, LIU ZD, *et al.* Biomechanical assessment of a novel L4/5 level interspinous implant using three dimensional finite element analysis [J]. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 2014, 18(1): 86-94.
- [23] 张雅宾. EBM铸造的多孔钛合金椎间融合器的生物相容性及成骨性研究[D]. 北京: 中国人民解放军医学院, 2016.
- [24] TSAI PI, HSU CC, CHEN SY. Biomechanical investigation into the structural design of porous additive manufactured cages using numerical and experimental approaches [J]. *Comput Biol Med*, 2016, 76: 14-23.
- [25] K2M的3D打印MOJAVE脊柱支撑植入物获FDA批准[EB/OL]. <http://tech.sina.com.cn/roll/2017-06-23/docifyhmpew3137585.shtml>. 2017-06-23.
- [26] 国内首例获CFDA许可的金属3D打印椎间融合器[EB/OL]. <http://3dprint.ofweek.com/2017-01/ART-132107-8120-30098071.html>. 2017-01-25.
- [27] 沈凯, 谭祖健. 几种常见腰椎融合术的比较[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2011, 26(11): 1054-1056.
- [28] 高小亮, 杨晓辉, 黄卫民, 等. 微创经椎间孔入路椎间植骨融合术治疗腰椎滑脱的临床疗效[J]. *中华全科医学*, 2017, 15(8): 1289-1291.
- [29] 占新华, 于研, 蔡宗远, 等. 腰椎微创与开放椎间融合的影像学特征及疗效比较[J]. *同济大学学报(医学版)*, 2017, 38(4): 66-70.
- [30] DING F, JIA ZW, ZHAO ZG, *et al.* Total disc replacement versus fusion for lumbar degenerative disc disease: A systematic review of overlapping meta-analyses [J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(3): 806-815.