

文章编号:1004-7220(2021)05-0829-06

颈椎解剖与钛质网笼生物力学研究进展

郭川, 刘庆鹏

(哈尔滨医科大学附属第二医院 脊柱外科, 哈尔滨 150001)

摘要:钛质网笼作为颈前路椎体次全切除减压融合术(anterior cervical corpectomy and fusion, ACCF)中使用的融合器之一,不仅能够在术中即刻重建颈椎稳定性、维持椎间高度及生理曲度,而且可以避免自体取骨造成供骨区并发症的问题,故成为 ACCF 术中较为常用的内植物。但传统钛笼多存在应力遮挡、钛笼下沉等问题,在一定程度上影响了手术效果,甚至导致严重术后并发症,需要行翻修手术。目前已有多种新型钛笼问世,一定程度上解决了传统钛笼带来的问题。生物力学评价及其测试方法是评判一款新型脊柱融合器能否应用于临床必不可少的过程。综述颈椎解剖相关生物力学、传统钛笼与新型钛笼生物力学特性的相关研究,为传统钛笼的改进以及新型钛笼的研发提供新思路。

关键词:颈前路椎体次全切除减压融合术;钛质网笼;生物力学

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.05.026

Recent Advances of Biomechanical Studies on Cervical Spine Anatomy and Titanium Mesh Cage

GUO Chuan, LIU Qingpeng

(Department of Spine Surgery, the Second Affiliated Hospital of Harbin Medical University, Harbin 150001, China)

Abstract: Titanium mesh cage is one of the fusion devices used in anterior cervical corpectomy and fusion (ACCF). It can not only immediately rebuild the stability of cervical spine during the operation, maintain the height and physiological curvature of intervertebral vertebrae, but also avoid the complications of bone donor area caused by autologous bone extraction. Therefore, titanium mesh cage has become the most commonly used internal plant in ACCF. However, there exist many problems in traditional titanium cage, such as stress shielding and titanium cage sinking, which will affect the surgical effect to a certain extent, and even lead to serious postoperative complications requiring revision surgery. At present, a variety of new titanium cages have been invented, which can solve the problems caused by traditional titanium cage to a certain extent. Biomechanical evaluation and its testing methods are an indispensable process for judging whether a new type of spinal fusion cage can be used in clinical practice. This article reviews the biomechanical studies related to cervical spine anatomy, the biomechanical properties of traditional titanium cages and new titanium cages, so as to provide new ideas for the improvement of traditional titanium cages and the development of new titanium cages.

Key words: anterior cervical corpectomy and fusion (ACCF); titanium mesh cage; biomechanics

颈椎前路间盘切除融合术 (anterior cervical discectomy and fusion, ACDF) 于 1955 年由 Smith 和 Robinson^[1] 首次报道。该术式最初是将髂骨块植入椎间隙内用于椎间融合并恢复椎间隙高度, 以此神经根获得间接减压; 经过不断改良后, 目前 ACDF 成为治疗颈椎间盘突出症等多种颈椎退行性疾病的首选术式^[2]。作为另一种颈前路手术的主流术式, 颈前路椎体次全切除减压融合术 (anterior cervical corpectomy and fusion, ACCF) 是在 Bailey-Badgley 减压术的基础上发展而来, 主要适用于颈椎骨折、脱位、颈椎后纵韧带骨化症以及无法经椎间隙进行彻底减压的大块颈椎间盘突出^[3-4]。两种术式均存在植骨块移位、脱落、假关节形成以及植骨不融合等缺陷, 且自体取骨也会造成供骨区的骨折、疼痛、血肿、皮神经损伤等并发症^[5-7]。

钛质网笼 (titanium mesh cage, TMC) 的应用显著降低了颈前路术后并发症的发生率, 尤其是降低了供骨区并发症的发生率^[8]。TMC 联合颈椎锁定钢板 (cervical spine locking plate, CSLP) 能够增强颈椎稳定性, 维持椎间高度及生理曲度, 大大提高植骨融合率, 目前已广泛应用于 ACCF 中^[9]。但钛笼也有其相关的并发症, 如存在钛笼下沉、术后邻近节段退变 (adjacent segment degeneration, ASD) 等问题。目前研发的多种新型钛笼, 在降低应力遮挡效应、减少钛笼下沉、提高植骨融合率以及维持良好的术后颈椎生物力学性能等方面发挥重要作用。一款新型脊柱融合器必须通过生物力学评价及相关试验测试后才能应用于临床, 故深入了解颈椎解剖以及不同钛笼的生物力学性能能够为钛笼的改进和设计提供一定的参考依据。

1 生物力学评价基本方法

随着生物力学的发展, 生物力学评价成为评估一款新型脊柱器械性能的重要方法, 也是新型脊柱器械应用于临床前必须进行的过程。目前, 脊柱器械生物力学评价实验方法主要分为 3 种: ① 强度实验。将试件装置在万能材料测试仪上, 持续增加载荷直至试件破坏, 由此得到载荷-位移曲线、极限承载强度等数据, 据此分析测试材料的薄弱点并进行改进。② 疲劳实验。材料测试仪按照一定的频率对试件反复施加载荷直至试件破坏, 每次施加的最

大载荷远小于极限载荷。试件破坏时的加载次数即为该负载下的疲劳寿命。通过施加不同载荷进行重复实验能够得到该试件的疲劳曲线, 疲劳曲线反映了试件的疲劳特性, 为脊柱器械的改进提供依据。由于强度实验和疲劳实验均为破坏性实验, 故只能在某些特定载荷模式下对试件进行测试, 得到的数据信息十分有限。③ 稳定性实验。通常是将脊柱器械与伤椎模型结合, 在生理载荷范围内测试脊柱器械在伤椎内的稳定性。由于所加载荷为生理载荷, 不会对试件造成破坏, 故能够获得更多的数据信息。通过收集伤椎融合部位的生物力学参数, 能够反映愈合或融合的潜力^[10-11]。

2 颈椎解剖及相关生物力学

颈椎从解剖和功能上可划分为上下两部分, C1 (寰椎)、C2 (枢椎) 与其余颈椎椎体相比, 是有独特的解剖形态和复杂的运动功能, 称为上颈椎; C3~7 解剖结构和功能基本相似, 称为下颈椎。

2.1 上颈椎

寰椎外形呈环状, 无椎体、棘突及关节突, 由前弓、后弓以及两侧块和横突组成, 枢椎解剖特点是椎体向上有一长 14~18 mm、宽 9~11 mm 的乳突状突起, 称为齿突^[12]。寰枢椎之间无椎间盘, 主要通过附着韧带维持寰枢椎复合体的稳定性, 其中横韧带是维持稳定性最主要的韧带。生物力学实验表明, 当横韧带断裂后, 寰枢关节的前屈运动范围明显增加, 同时侧屈和轴位旋转的运动范围也相应增加^[13]。

2.2 下颈椎

C3~7 颈椎解剖结构基本相似, 均由椎体、椎弓、数个突起和关节突构成^[14]。在 ACCF 术中, 钛笼与颈椎上下终板关系密切, 详细了解颈椎终板解剖对钛笼的植入与固定有重要意义。Panjabi 等^[15] 在测量了 105 个下颈椎椎体切片后发现, 椎体上终板后部最厚 (0.74~0.89 mm), 前部最薄 (0.44~0.56 mm); 椎体下终板前部最厚 (0.61~0.81 mm), 后部最薄 (0.49~0.62 mm)。而在终板中央区, 椎体上终板 (0.42~0.58 mm) 比下终板 (0.53~0.64 mm) 薄。Pitzen 等^[16] 通过测量下颈椎椎体终板厚度后总结出: 下颈椎终板周边区域厚度 (0.72~1.35 mm) 均大于中心区域厚度 (0.65~0.84 mm)。

李光灿等^[17-18]通过测试椎体终板不同位置的最大压缩力后得出结论:①椎体间隙相邻面上一椎体下终板的抗压强度大于下一椎体上终板;②越靠近外侧终板,抗压强度增大越明显;③上终板后部抗压强度大于前部,下终板前后部分抗压强度无显著性差异。这提示临床医生在颈前路术中植入融合器时可将其固定在椎体稍靠后位置,以减少融合器下沉。

3 传统钛笼及相关生物力学

1986年钛笼首次用于脊柱外科手术中,此后钛笼被广泛运用于多种脊柱融合术中,取得了良好的手术效果^[19-22]。目前,脊柱手术中最为常用的钛笼外形呈一中空圆柱体,其侧面有菱形或圆形制孔,柱体内部可填充术中切除的椎体骨或同种异体骨,有不同直径规格适配各种脊柱外科手术,钛笼长度可根据术中减压槽大小进行截取。Kandziora等^[23]研究了在绵羊颈椎模型中自体髂骨植骨、圆柱形钛笼植骨和箱形钛笼植骨的融合特点,通过对比分析不同椎间融合方式在维持术后的撑开能力、生物力学稳定性和椎间骨基质形成的组织学特征上的差异,圆柱形钛笼显示出更高的生物力学稳定性、更强的生物力学刚度和更快速的椎间植骨融合性能。

相比于其他椎间融合方式,钛笼植骨具有显著优势,但传统钛笼仍有不足之处:①钛笼的弹性模量(110 GPa)远高于自然骨的弹性模量(0.05~30 GPa)^[24],故会形成应力遮挡效应,大部分应力由钛笼向下传递,而其中的植骨颗粒由于缺少应力刺激会被逐渐吸收,导致植骨不融合。②ACCF术后发生邻近节段退变,严重者需要进行二次手术治疗。③根据影像学特征来判断钛笼植骨是否达到骨性融合较为困难。Das等^[8]基于影像学特征将骨性融合定义为:在螺钉或钛笼-终板界面无透光或光晕形成,无螺钉脱出、钢板断裂或移位,以及在钛笼周围或者内部可见骨生长现象。④钛笼下沉问题。钛笼下沉是ACCF术后最主要的并发症。Chen等^[25]随访了300例行ACCF术的患者,术后12个月内钛笼下沉有239例,下沉率高达79.7%。

4 新型钛笼及相关生物力学

表1给出了不同新型钛质网笼的优缺点比较。

4.1 新型解剖型钛笼(AA-TMC)

传统钛笼的上下两端与终板之间为点-面接触,容易造成接触部位的应力集中,从而导致钛笼下沉^[26]。为解决这一问题,卢腾等^[27]设计了一种新型解剖型钛笼(anatomical adaptive titanium mesh cage, AA-TMC),该型钛笼有两种形态结构,分别适用于单节段和双节段ACCF术,钛笼上下两端在冠状面和矢状面上为弧形,并在上下两端增加了环形支撑结构。尾端为斜型,适用于单节段ACCF术的倾斜角度为12°,双节段为16°。AA-TMC在水平面近似为方形,两侧为平面,前方及后方向前方稍突起。单节段及双节段AA-TMC的直径均设计成12、14 mm各两种,单节段AA-TMC的设计高度为21~29 mm,双节段AA-TMC的设计高度为41~49 mm,以适应不同患者的手术需要。对AA-TMC和传统钛笼进行轴向压缩沉陷实验对比,结果显示,单节段AA-TMC支撑强度为(875.8±5.2) N,传统钛笼为(719.7±5.5) N;双节段AA-TMC支撑强度为(873±6.1) N,传统钛笼为(634.3±5.9) N,故两种形态结构AA-TMC的终板支撑强度远高于传统钛笼。AA-TMC通过多种设计增加了钛笼两端与终板接触面积,提高了终板支撑强度,促进手术节段的植骨融合,恢复手术节段角度,有效降低了钛笼下沉的发生率。此外,由于AA-TMC背侧向前方稍突起,增加了术后脊髓的活动空间,可适用于伴有颈椎椎管狭窄的患者。

4.2 可固定式钛笼

由于钢板的弹性模量同样远高于自然骨,由此形成的应力遮挡效应也会影响植骨颗粒的融合,并且钢板对食道的侵及会对患者造成一些刺激性症状。可固定式钛笼未使用钢板固定这一方式,而是采用插片固定模式^[28]。钛笼两端有延伸出来的尾翼结构,插片可从尾翼口处斜行插入上下椎体中,插片尾部有倒齿状结构可防止插片脱出。通过对比可固定式钛笼和传统钛笼+锁定钢板在人体颈椎标本的三维运动范围,结果显示,可固定式钛笼可显著提高固定节段的稳定性,但其各运动模式稳定性均不及传统钛笼+锁定钢板坚强,尤其是在伸展运动模式中。由于可固定式钛笼不需要钢板进行固定,应力完全由钛笼及植骨颗粒进行传递,一定程度上能够促进植骨颗粒的融合,降低假关节形成

及内固定失败的风险,而且可最大程度的减少对食道的侵及。

4.3 n-HA/PA66 融合器

新型材料的研发为融合器的研制提供了更加广阔的思路。Wang 等^[29]制备了一种新型仿生复合材料,纳米羟基磷灰石/聚六亚甲基己二酰胺(n-HA/PA66)。n-HA/PA66 的弹性模量为 6.2 GPa,与自然骨的弹性模量较为接近,一定程度上能够降低应力遮挡效应。并且 n-HA/PA66 具有良好的生物相容性和生物活性,植入人体后,可通过骨传导等机制促进骨的形成。利用这一新型复合材料,梁勇等^[30]设计了一种椎间融合器,其外形呈一中空圆柱体,直径 9 mm,高度 10 mm,中间孔径 3 mm,表面进行粗糙处理。将该融合器与自体髂骨块分别植入山羊颈椎中,对两组椎体标本进行三维 6 度非破坏性生物力学测试。结果显示,两组的最大载荷差异无统计学意义,说明 n-HA/PA66 融合器与自体髂骨块的生物力学稳定性接近,具有良好的融合效果。Hu 等^[31]对 107 例在 ACCF 术中使用 TMC 或 n-HA/PA66 的患者进行回顾性分析,至少随访 8 年,发现 n-HA/PA66 较 TMC 具有更低的下沉率和更好的临床效果。Zhang 等^[32]回顾性分析 117 例行 ACCF 术患者,术中分别使用 TMC 或 n-HA/PA66,在随访 1 年时发现 n-HA/PA66 具有更高的融合率。n-HA/PA66 融合器相较于 TMC 有诸多优势,但仍存在一些缺陷。例如:n-HA/PA66 由于缺乏骨诱导活性,新生骨组织形成量较少,早期椎间融合的稳定性的稍差;作为一种新型材料,其在

人体内的安全性尚不清楚,仍需长时间、多样本的临床观察研究^[30,33]。

4.4 多孔钛笼

钛笼与自然骨的弹性模量不匹配可能会导致植骨不融合。研究显示,多孔材料能够显著降低弹性模量,并且可以通过设置孔隙率使弹性模量接近于自然骨的弹性模量^[34]。Wu 等^[24]将 Ti-6Al-4 V 作为制备材料,通过电子束熔合法将其制成多孔钛笼。经过测定,多孔钛笼的弹性模量为 (2.5 ± 0.2) GPa,接近于自然骨的弹性模量。多孔钛笼与 PEEK 融合器在绵羊颈椎标本中的三维运动范围结果显示,在所有测试模式下,多孔钛笼的活动度都显著低于 PEEK 融合器,表明多孔钛笼有更好的融合效果和更高的生物力学稳定性,并且由于多孔钛笼不需要填充自体骨,对于自体移植骨不足的患者较为适用。

4.5 3D 打印钛笼

3D 打印技术近年来在医学领域发展迅速,特别是在脊柱外科有着广阔的应用前景^[35-36]。由于 3D 打印钛笼成本高,所需技术复杂,尚未在临床广泛应用,目前仅用于儿童脊柱畸形矫正手术、脊柱翻修手术以及椎体肿瘤切除等复杂手术当中^[37-38]。在颈椎手术中,3D 打印钛笼目前主要被用于颈椎肿瘤切除术后的脊柱稳定性重建。Mobbs 等^[39]使用 3D 打印钛笼治疗 1 例脊索瘤侵犯 C1~2 椎体的患者,在整块切除病变椎体后,将 3D 打印钛笼植入缺损部位并用螺钉进行固定。在术后 9 个月的随访中,X 线片显示在颈部的屈

表 1 不同新型钛质网笼比较

Tab.1 Comparison of different new type titanium mesh cages

钛笼名称	优点	缺陷	生物力学评价
新型解剖型钛笼(AA-TMC)	降低了钛笼-终板界面应力集中现象的发生,有效防止钛笼下沉	—	相较传统钛笼,可显著提高终板支撑强度
可固定式钛笼	去除了钢板所造成的应力遮挡效应,一定程度上促进了植骨融合	插片固定钛笼模式的稳定性较差	三维运动范围测试的结果显示稳定性不及钛笼+钢板模式坚强
n-HA/PA66 融合器	弹性模量与自然骨接近,降低了应力遮挡效应,且具有良好的生物相容性和生物活性	新生骨形成较少,早期椎间稳定性稍差,且该材料安全性未知	生物力学测试显示该融合器与自体髂骨的最大载荷值相近
多孔钛笼	弹性模量与自然骨接近,降低了应力遮挡效应,且无需填充自体骨	制备方法复杂	三维运动范围测试显示多孔钛笼的椎间活动度显著低于 PEEK 融合器
3D 打印钛笼	根据不同患者情况定制内植物,最大限度恢复其解剖结构和生理功能	成本高,所需技术复杂,制备材料安全性未知	术后运动范围测试显示钛笼未产生位移,具有良好的生物力学稳定性

伸活动中钛笼没有产生位移。Xu 等^[40]和 Li 等^[41]也报告了两例接受病椎切除+3D 打印钛笼修复重建手术的患者,术后均获得了牢固的融合和颈椎稳定性。与传统钛笼相比,3D 打印钛笼最大的优势在于能够根据患者病情、手术及生物力学需求进行定制,更好匹配患者的解剖结构,增加脊柱生物力学稳定性,尽可能恢复脊柱的生理功能,最大限度改善患者预后。目前由于 3D 打印所需材料在人体内的安全性尚未得到广泛验证,3D 打印钛笼作为一种人体内植物,其安全性和有效性仍需进行长期随访^[37-38]。

5 结论

传统钛质网笼作为目前最为常用的脊柱内植物之一,其安全性和有效性已得到广泛证实。但由于传统钛笼本身存在的缺陷,会不可避免地出现应力遮挡、钛笼下沉等问题。在传统钛笼的基础对钛笼进行改进,无论是改变其外观形态,还是增加元件,都在一定程度上解决了上述问题。而且随着新型材料和 3D 打印技术的快速发展,在此基础上设计的新型钛笼具有更加优良的生物力学性能,尤其是 3D 打印钛笼,其个体化和精准化的设计更加符合患者的脊柱生物力学特点,未来将会有巨大的应用前景。

参考文献:

- [1] SMITH GW, ROBINSON RA. The treatment of certain cervical-spine disorders by anterior removal of the intervertebral disc and interbody fusion [J]. *Bone Joint Surg Am*, 1958, 40A(3) : 607-624.
- [2] GOFFIN J, GEUSENS E, VANTOMME N, *et al.* Long-term follow-up after interbody fusion of the cervical spine [J]. *Spinal Disord Tech*, 2004, 17(2) : 79-85.
- [3] BAILEY RW, BADGLEY CE. Stabilization of the cervical spine by anterior fusion [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1960, 42-A : 565-94.
- [4] 何达, 赵经纬, 田伟. 下颈椎前路间盘切除融合术与椎体次全切除融合术 [J]. *骨科临床与研究杂志*, 2018, 3(1) : 52-56.
- [5] SHRIVER MF, LEWIS DJ, KSHETTRY VR, *et al.* Pseudoarthrosis rates in anterior cervical discectomy and fusion: A meta-analysis [J]. *Spine J*, 2015, 15(9) : 2016-2027.
- [6] KAWAOKA T, HANAKITA J, TAKAHASHI T, *et al.* Three case reports of donor site iliac bone fracture as a complication of anterior cervical fixation surgery [J]. *NMC Case Rep J*, 2015, 2(3) : 109-113.
- [7] WANG JC, HART RA, EMERY SE, *et al.* Graft migration or displacement after multilevel cervical corpectomy and strut grafting [J]. *Spine*, 2003, 28(10) : 1016-1021.
- [8] DAS K, COULDWELL WT, SAVA G, *et al.* Use of cylindrical titanium mesh and locking plates in anterior cervical fusion. Technical note [J]. *Neurosurg*, 2001, 94(1 Suppl) : 174-178.
- [9] 袁文, 贾连顺, 倪斌, 等. 前路椎体次全切除减压及带锁钢板固定治疗脊髓型颈椎病 [J]. *中华外科杂志*, 2000(3) : 21-23+82.
- [10] PANJABI MM. Biomechanical evaluation of spinal fixation devices: I. A conceptual framework [J]. *Spine*, 1988, 13(10) : 1129-1134.
- [11] PANJABI MM. Three-dimensional testing of the stability of spinal implants [J]. *Orthopade*, 1991, 20(2) : 106-111.
- [12] 胡勇, 谢辉, 杨述华. 寰枢椎复合体解剖学研究及临床意义 [J]. *中国骨伤*, 2007, 20(3) : 208-210.
- [13] 胡勇, 谢辉, 杨述华. 人工寰齿关节生物力学及临床前期研究进展 [J]. *医用生物力学*, 2006, 21(4) : 334-337.
- [14] HU Y, XIE H, YANG SH. Biomechanics and preclinical phase study of artificial atlanto-odontoid joint [J]. *J Med Biomech*, 2006, 21(4) : 334-337.
- [15] 赵建华, 刘鹏. 下颈椎前路手术的解剖与临床 [J]. *局解手术学杂志*, 2010, 19(5) : 353-355.
- [16] PANJABI MM, CHEN NC, SHIN EK, *et al.* The cortical shell architecture of human cervical vertebral bodies [J]. *Spine*, 2001, 26(22) : 2478-2484.
- [17] PITZEN T, SCHMITZ B, GEORG T, *et al.* Variation of endplate thickness in the cervical spine [J]. *Eur Spine J*, 2004, 13(3) : 235-240.
- [18] 李光灿, 李靖年, 郑连杰, 等. 颈椎终板抗压强度分布规律的生物力学研究 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2011, 19(15) : 1287-1290.
- [19] 李光灿, 李康华, 郑连杰, 等. 全脊柱终板抗压强度分布规律的生物力学研究 [J]. *医用生物力学*, 2011, 26(6) : 521-526.
- [20] LI GC, LI KH, ZHENG LJ, *et al.* Biomechanical study of compressive strength distribution on the whole spine endplates [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(6) : 521-526.
- [21] MIAO DC, ZHANG BY, LEI T, *et al.* Clinical efficacy of anterior partial corpectomy and titanium mesh fusion and internal fixation for treatment of old fracture dislocation of the lower cervical spine [J]. *Med Sci Monit*, 2017, 23 : 5675-5682.
- [22] DORIA C, MOSELE GR, BALSANO M, *et al.* Anterior decompression and plate fixation in treatment of cervical myelopathy: A multicentric retrospective review [J]. *Acta Orthop Traumatol Turc*, 2018, 52(3) : 185-190.
- [23] YANG HS, KIM KW, OH YM, *et al.* Usefulness of titanium mesh cage for posterior C1-C2 fixation in patients with

- atlantoaxial instability [J]. *Medicine*, 2017, 96 (36): e8022.
- [22] ZHANG HQ, WANG YX, WU JH, *et al.* Debridement and interbody graft using titanium mesh cage, posterior monosegmental instrumentation, and fusion in the surgical treatment of monosegmental lumbar or lumbosacral pyogenic vertebral osteomyelitis via a posterior-only approach [J]. *World Neurosurg*, 2020, 135: e116-e125.
- [23] KANDZIORA F, SCHOLLMEIER G, SCHOLZ M, *et al.* Influence of cage design on interbody fusion in a sheep cervical spine model [J]. *Neurosurg*, 2002, 96(3 Suppl): 321-332.
- [24] WU SH, LI Y, ZHANG YQ, *et al.* Porous titanium-6 aluminum-4 vanadium cage has better osseointegration and less micromotion than a poly-ether-ether-ketone cage in sheep vertebral fusion [J]. *Artif Organs*, 2013, 37(12): E191-201.
- [25] CHEN Y, CHEN D, GUO Y, *et al.* Subsidence of titanium mesh cage: A study based on 300 cases [J]. *Spinal Disord Tech*, 2008, 21(7): 489-492.
- [26] LU T, LIANG H, LIU C, *et al.* Effects of titanium mesh cage end structures on the compressive load at the endplate interface: A cadaveric biomechanical study [J]. *Med Sci Monit*, 2017, 23: 2863-2870.
- [27] 卢腾, 高中洋, 贺西京, 等. 新型解剖型钛笼可提高终板的支撑强度: 基于影像学及生物力学方法 [J]. *南方医科大学学报*, 2019, 39(4): 409-414.
- [28] 李超, 葛丰, 徐成. 一种新型颈椎前路可固定式钛笼的生物力学评价 [J]. *实用骨科杂志*, 2019, 25(2): 127-130.
- [29] WANG X, LI Y, WEI J, *et al.* Development of biomimetic nano-hydroxyapatite/poly (hexamethylene adipamide) composites [J]. *Biomaterials*, 2002, 23(24): 4787-4791.
- [30] 梁勇, 蒋电明. 纳米羟基磷灰石/聚酰胺 66 椎间融合器对山羊颈椎的融合效果研究 [J]. *第三军医大学学报*, 2007, (24): 2333-2335.
- [31] HU B, WANG L, SONG Y, *et al.* A comparison of long-term outcomes of nanohydroxyapatite/polyamide-66 cage and titanium mesh cage in anterior cervical corpectomy and fusion: A clinical follow-up study of least 8 years [J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2019, 176: 25-29.
- [32] ZHANG Y, QUAN Z, ZHAO Z, *et al.* Evaluation of anterior cervical reconstruction with titanium mesh cages versus nano-hydroxyapatite/polyamide66 cages after 1- or 2-level corpectomy for multilevel cervical spondylotic myelopathy: A retrospective study of 117 patients [J]. *PLoS One*, 2014, 9(5): e96265.
- [33] ZHAO Z, JIANG D, OU Y, *et al.* A hollow cylindrical nano-hydroxyapatite/polyamide composite strut for cervical reconstruction after cervical corpectomy [J]. *Clin Neurosci*, 2012, 19(4): 536-540.
- [34] RYAN G, PANDIT A, APATSIDIS DP. Fabrication methods of porous metals for use in orthopaedic applications [J]. *Biomaterials*, 2006, 27(13): 2651-2670.
- [35] WU AM, LIN JL, KWAN KYH, *et al.* 3D-printing techniques in spine surgery: The future prospects and current challenges [J]. *Expert Rev Med Devices*, 2018, 15(6): 399-401.
- [36] CAI H, LIU Z, WEI F, *et al.* 3D Printing in spine surgery [J]. *Adv Exp Med Biol*, 2018, 1093: 345-359.
- [37] CHOY WJ, PARR WCH, PHAN K, *et al.* 3-dimensional printing for anterior cervical surgery: A review [J]. *J Spine Surg*, 2018, 4(4): 757-769.
- [38] GARG B, MEHTA N. Current status of 3D printing in spine surgery [J]. *Clin Orthop Trauma*, 2018, 9(3): 218-225.
- [39] MOBBS RJ, COUGHLAN M, THOMPSON R, *et al.* The utility of 3D printing for surgical planning and patient-specific implant design for complex spinal pathologies: Case report [J]. *J Neurosurg Spine*, 2017, 26(4): 513-518.
- [40] XU N, WEI F, LIU X, *et al.* Reconstruction of the upper cervical spine using a personalized 3D-printed vertebral body in an adolescent with ewing sarcoma [J]. *Spine*, 2016, 41(1): E50-54.
- [41] LI X, WANG Y, ZHAO Y, *et al.* Multilevel 3D printing implant for reconstructing cervical spine with metastatic papillary thyroid carcinoma [J]. *Spine*, 2017, 42(22): E1326-E1330.