

文章编号:1004-7220(2018)03-0212-06

# 不同单节段颈椎前路椎间融合系统对 邻近节段的生物力学影响

赵齐通, 靳林煜, 李新锋

(上海交通大学医学院附属仁济医院 脊柱外科, 上海 200120)

**摘要:**目的 对比 Zero-P 零切迹颈椎前路椎间融合固定系统和 Cage-Plate 融合系统对相邻节段的生物力学影响,为单节段颈椎病的治疗远期临床疗效提供参考。**方法** 选择正常人 CT 扫描数据建立颈椎 C1~7 有限元模型,在验证模型的有效性后,分别建立在颈椎 C5~6 植入 Zero-P 和 Cage-Plate 融合系统的有限元模型。分别加载 1.5 N·m 扭矩模拟颈椎前屈、后伸、侧弯和旋转运动,对比正常情况下颈椎和分别植入 Zero-P 与 Cage-Plate 融合系统后相邻节段活动范围(range of motion, ROM)变化和椎间盘髓核、纤维环、终板及小关节上的应力。**结果** 两种颈椎融合器植入后,C4~5 椎间 ROM 增大 20%,但 C6~7 椎间 ROM 增大 120%,C4~5、C6~7 髓核上的应力分别增大 78%、110%,相邻节段终板和纤维环上的应力均有所增大。**结论** Cage-Plate 和 Zero-P 融合系统植入后均会引起相邻节段 ROM 增大,以及相邻椎间盘髓核、纤维环和小关节上应力增大,长远上会引起邻近节段的病变。但 Cage-Plate 和 Zero-P 融合系统对邻近节段的生物力学影响没有本质区别。

**关键词:**椎间融合术;零切迹椎间融合固定系统;颈椎;生物力学;有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.03.004

## Biomechanical Effects of Different Single-Level Anterior Cervical Discectomy and Fusion Systems on the Adjacent Segments

ZHAO Qitong, JIN Linyu, LI Xinfeng

(Department of Spine Surgery, Renji Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200120, China)

**Abstract: Objective** To compare biomechanical effects of Zero-Profile anterior cervical intervertebral fusion system and Cage-Plate fusion system on the adjacent segments, so as to provide references for the long-term clinical efficacy of single segment cervical spondylosis. **Methods** The finite element model of cervical spine C1-7 was established based on CT scan data of normal people. After the validity of the model was validated, two finite element models of C5-6 segment implanted with Zero-P fusion system and Cage-Plate fusion system were built. The physiological torque 1.5 N·m was loaded respectively on the normal model, Zero-P implanted model and Cage-Plate implanted model to simulate cervical flexion, extension, lateral bending and rotation. Changes in the ranges of motion (ROMs) of adjacent segments and stresses on nucleus pulposus, endplate and annulus, facet joints of intervertebral disc were compared for the three models. **Results** After the two kinds of anterior cervical intervertebral fusion systems were implanted, ROMs of C4-5 segments increased by 20%, but ROMs of C6-7 segments in-

收稿日期:2018-02-27; 修回日期:2018-03-20

基金项目:上海交通大学“医工交叉研究基金”项目(YG2012MS25, YG2016MS54)

通信作者:李新锋,副主任医师, E-mail: lxfrenji@126.com

creased up to 120%. The stresses on C4-5 nucleus increased by 78%, while the stresses on C6-7 nucleus increased up to 110%. The stresses on the adjacent endplates and the fiber ring also increased. **Conclusions** The implantation of Cage-Plate and Zero-P fusion system both increased the ROMs of the adjacent segments, and the stresses on annulus, fiber rings and facet joints of the adjacent discs increased as well, which would cause lesions of the adjacent segments in the long run. However, there was no essential difference in biomechanical effects of the Cage-Plate and Zero-P cage fusion system on the adjacent segments.

**Key words:** interbody fusion; Zero-Profile fusion system; cervical spine; biomechanics; finite element analysis

颈椎病是一种由于颈椎长期劳损、骨质增生或者椎间盘脱出、韧带增大肥厚,使得颈椎脊髓、神经根或椎动脉受到压迫,从而出现的一系列功能障碍的临床综合征<sup>[1]</sup>。Cage-Plate 系统是治疗颈椎病常用的前路减压植骨融合固定系统,在椎体的前方采用固定钢板可有效避免椎间融合器的位移,从而提高椎体的融合率。但是这种传统的前路固定钢板常常会导致患者吞咽困难、相邻节段椎体退变加剧等并发症,手术后会在一定程度上影响患者的生活质量,可能导致需要再次手术<sup>[2]</sup>。Zero-P 零切迹椎间融合固定系统是瑞士 Synthes 公司在 2008 年研制成功的一款同时具备“支撑、固定与融合”的多功能产品。近年来,Zero-P 融合固定系统开始广泛应用于颈椎前路固定融合术中<sup>[3]</sup>。与传统的融合器加钛板组合相比,Zero-P 融合系统可在有效维持手术后颈椎稳定性的同时,降低患者吞咽困难的发生率,并且缩短手术时间和减少手术中的出血量,减缓相邻节段的退变发生<sup>[4-7]</sup>。但 Zero-P 融合固定与 Cage-Plate 椎体前方钢板内固定对颈椎邻近节段生物力学特性影响的对比研究还鲜有报道。本文利用有限元分析方法,建立正常人体颈椎 C1~7 模型及 C5~6 单节段颈椎分别植入 Zero-P 和 Cage-Plate 融

合固定系统后的颈椎有限元模型,通过加载相同生理负荷比较其邻近椎间盘、终板和小关节的应力改变,对比分析颈椎融合术中植入 Zero-P 和 Cage-Plate 融合固定系统对临近节段生物力学特性的影响,为治疗颈椎退行性病变选择合适的融合方法提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 模型建立

选择 1 名没有伤病史的健康男性志愿者,从其枕骨开始到胸椎进行 CT 扫描,扫描设备为美国 GE 公司 Light Speed 16 层螺旋 CT,扫描层间距 0.3 mm,长度 279.3 mm,共计 932 层。利用医学图像处理软件 Mimics 11.0 读入扫描得到的 DICOM 文件,重建人体颈椎 STL 模型。利用 Imageware 12.0 逆向工程软件(EDS 公司,美国)进行椎体实体模型重建,采用三维设计软件 UG NX(Simens 公司,德国)进行 Zero-P 和 Cage-Plate 颈椎融合器的设计,最后利用有限元分析软件 ANSYS 14.0(ANSYS 公司,美国)分别建立正常 C1~7 颈椎模型以及 C5~6 单节段植入 Zero-P 和 Cage-Plate 融合器的有限元模型(见图 1)。

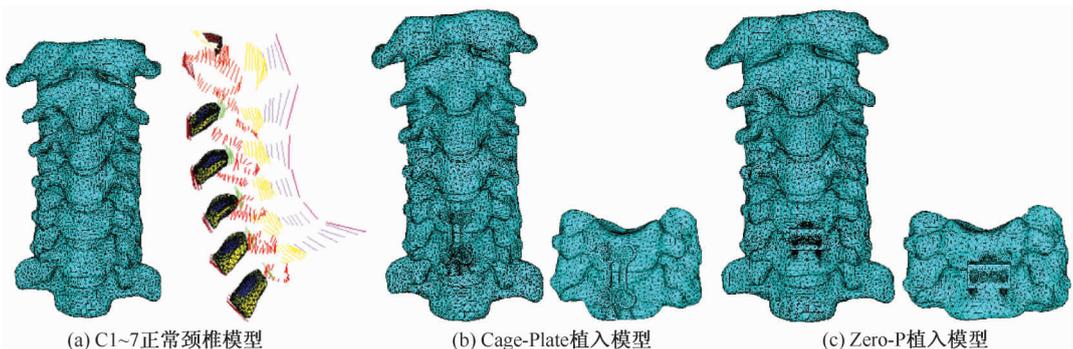


图 1 正常颈椎模型及融合系统有限元模型

Fig. 1 Finite element model of normal cervical spine and fusion system (a) C1-7 normal cervical model, (b) Cage-Plate implanted model, (c) Zero-P implanted model

## 1.2 网格划分与材料属性

整个 C1~7 颈椎模型包括: C1~7 颈椎、髓核、纤维环以及前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、横突间韧带、棘间韧带、棘上韧带、关节囊韧带共 7 种韧带。椎体、髓核、纤维环采用 Solid 92 单元, 皮质骨和终板采用 Shell 93 单元, 皮质骨厚度设为 0.5 mm, 终板厚度为 0.3 mm。考虑到韧带的受力特性, 采用受拉不受压的 Link 10 单元模拟。小关节采用面与面接触单元模拟, 摩擦系数为 0.1<sup>[8-9]</sup>。终板用实体单元模拟, 椎间盘由中间的髓核和外围的纤维环组成, 而纤维环又包括纤维环基质和纤维环纤维。在所建 C1~7 完整颈椎模型中, 椎间盘简化为髓核和纤维环两部分, 均用实体单元模拟。其中, 髓核采用泊松比为 0.499 的实体单元, 模拟其不可压缩的属性<sup>[10-11]</sup>。小关节的建模根据文献[12]并且结合 CT 图像选择合理的小关节面, 在小关节面上通过偏置方法建立厚度为 0.9 mm 的关节软骨层。

## 1.3 模型有效性验证

利用 Panjabi 等<sup>[11]</sup>的实验数据和 Zhang 等<sup>[12]</sup>的计算机模型模拟试验数据对本研究的有限元模型进行有效性验证。载荷及边界条件: 在 C1 椎体上施加 1.0 N·m 力矩, 同时固定 C7 下端面上的所有自由度。计算此过程中各个椎间功能单元的扭矩-转角关系。结果表明, 本模型的各个椎间功能单元扭矩-转角结果与文献[11-12]中的实验数据吻合较好(见图 2), 故本模型可靠有效, 可以用于后面的对照性研究。

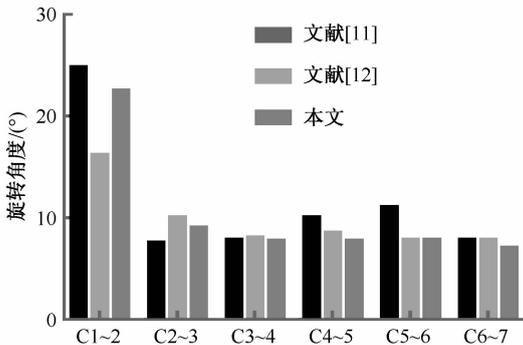


图2 正常颈椎各节段旋转角度与文献数据对比

Fig. 2 Comparison of rotation angle in normal cervical spine and data reported in the literature

## 1.4 实验方案

在 C1~7 全颈椎模型的寰椎上端面施加

41 N 载荷模拟人体头部质量, 同时在 C1 上施加 1.5 N·m 力矩分别模拟颈椎前屈、后伸、侧弯、旋转运动, 以此研究 Cage-Plate 和 Zero-P 融合器分别植入后的相邻节段椎体活动范围 (range of motion, ROM) 以及髓核、纤维环、终板和小关节上的力学响应<sup>[13-15]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 ROM 对比

施加 1.5 N·m 相同载荷, 在植入 Cage-Plate 和 Zero-P 融合器后, 由于 C5、C6 颈椎融合在一起, 使相邻 C4~5 和 C6~7 椎体间 ROM 发生变化。前屈时, 融合后 C4~5、C6~7 椎体间 ROM 分别增加了 25%、125%。后伸时, 融合后 C4~5 椎体间 ROM 增加了 16%~18%, 但 C6~7 椎体间 ROM 增加了 51%。侧弯和旋转时, C4~5 椎体间 ROM 在融合前后基本没有变化, 但 C6~7 椎体间 ROM 均增加了 33% (见图 3)。

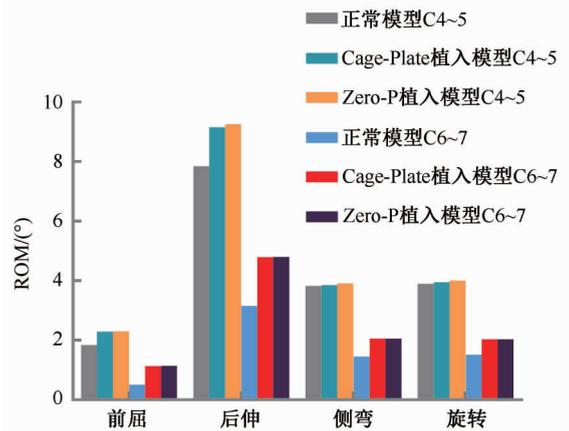


图3 不同模型 4 种工况下 C4~5 和 C6~7 椎体间 ROM 对比

Fig. 3 ROM comparison between C4-5 and C6-7 segment for different models under four working conditions

### 2.2 髓核上最大等效应力对比

施加 1.5 N·m 相同载荷, 分别植入 Cage-Plate 和 Zero-P 融合器将 C5、C6 颈椎融合在一起后, 相邻 C4~5 和 C6~7 椎体间髓核的最大等效应力发生变化。前屈时, 融合后 C4~5 椎体间髓核的最大等效应力增加了 29.5%, 但 C6~7 椎体间髓核的最大等效应力增加了 40%~44%。后伸时, 融合后 C4~5、C6~7 椎体间髓核的最大等效应力分别增加了

185%、110%。侧弯时,C4~5、C6~7椎体间髓核的最大等效应力分别增加了111%、24%。旋转时,C4~5、C6~7椎体间髓核的最大等效应力分别增加了78%、15%(见图4)。

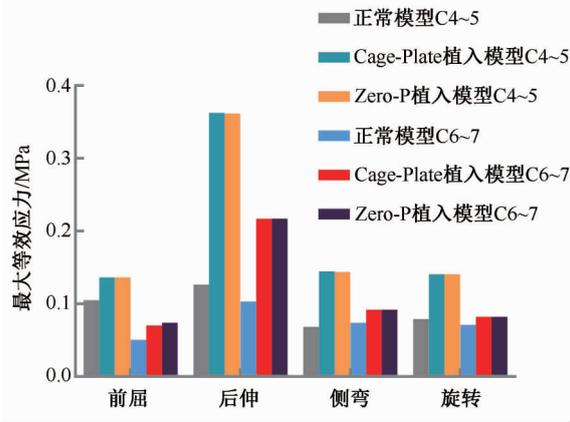


图4 不同模型4种工况下C4~5和C6~7髓核最大应力对比  
 Fig.4 Comparison of the maximum stress on nucleus pulposus between C4-5 and C6-7 segment for different models

### 2.3 纤维环最大等效应力对比

施加1.5 N·m相同载荷,计算纤维环在前屈、后伸、侧弯和旋转4种工况下的最大等效应力。在两种融合器植入后,C4~5和C6~7椎间盘纤维环的最大应力均有所增加。其中,前屈时,C4~5、C6~7纤维环应力均约增加27%;后伸时,C6~7纤维环应力增加了27.6%,C4~5纤维环应力增加了

17%;但侧弯和旋转时,C4~5、C6~7纤维环应力增加较小(见表1)。

表1 不同模型4种工况下纤维环最大应力

Tab.1 Maximum stresses on annulus fibrosus for different models under four working conditions

模型		MPa			
模型		前屈	后伸	侧弯	旋转
C4~5	正常模型	0.888	2.796	0.926	0.874
	Cage-Plate 植入模型	1.134	3.268	0.978	0.906
	Zero-P 植入模型	1.135	3.257	0.975	0.906
C6~7	正常模型	0.380	1.156	0.736	0.667
	Cage-Platee 植入模型	0.484	1.479	0.850	0.726
	Zero-P 植入模型	0.483	1.477	0.851	0.725

### 2.4 终板上最大等效应力对比

施加1.5 N·m相同载荷,前屈、后伸、侧弯和旋转4种工况下C4~5椎间盘终板上的最大等效应力如图5所示。后伸、侧弯和旋转时,C4~5终板上的最大等效应力比正常时减少50%~70%,但前屈时应力增加了25%。前屈时,C6~7终板上的最大等效应力在植入融合器后增加了10%~19%。

### 2.5 小关节上最大等效应力对比

施加1.5 N·m相同载荷,前屈、后伸、侧弯和旋转4种工况下小关节上的最大等效应力见表2。当在C5~6植入融合器后,C5~6小关节上最大应力明显减小,减小量达到88%;但在临近的C4~5和C6~7,小关节上最大应力均明显增大,不同工况下应力增加范围为8%~62%。

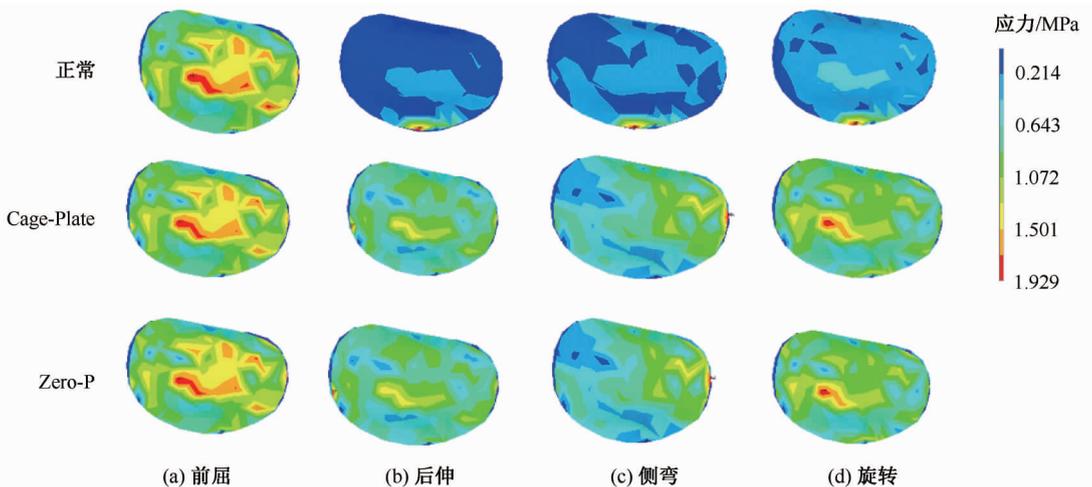


图5 不同模型在4种工况下C4~5终板上最大应力云图

Fig.5 Maximum stress of the C4-5 endplate for different models under four working conditions (a) Flexion, (b) Extension, (c) Bending, (d) Rotation

表2 不同模型小关节最大应力对比

Tab.2 Maximum stresses on facet joints for different models

		MPa			
模型		前屈	后伸	侧弯	旋转
C4 ~ 5	正常模型	2.188	11.833	8.603	7.545
	Cage-Plate 植入模型	3.549	16.383	9.514	8.140
	Zero-P 植入模型	3.549	16.386	9.521	8.143
C5 ~ 6	正常模型	2.102	13.962	8.771	7.911
	Cage-Plate 植入模型	0.343	2.245	1.518	0.987
	Zero-P 植入模型	0.417	2.950	2.057	1.371
C6 ~ 7	正常模型	1.400	12.829	13.425	11.637
	Cage-Plate 植入模型	2.605	16.829	14.959	13.047
	Zero-P 植入模型	2.604	16.818	14.949	13.039

## 2.6 固定螺钉最大应力

4种工况下, Zero-P 螺钉的最大应力比 Cage-Plate 螺钉大 75% ~ 231%。前屈时, Zero-P 与 Cage-Plate 螺钉的应力相差最大高达 231%; 后伸时, Zero-P 螺钉受到的最大应力高达 107.9 MPa。从长远看, Zero-P 螺钉松动甚至折断的概率比 Cage-Plate 螺钉大。

## 3 讨论

颈椎间融合是常见的治疗颈椎退行性病变的手术方法。随着微创技术的不断发展以及颈椎内固定器械的不断改良, Zero-P 融合固定系统在颈椎退行性疾病手术治疗中的应用逐渐得到推广。与传统的 Cage-Plate 颈椎前路内固定系统相比, Zero-P 融合系统对临近组织的生物力学影响是本文研究的问题。本文通过 Mimics 软件对获取的颈椎数据进行模型重建, 利用 ANSYS 软件建立两种不同颈椎融合器模型, 并建立正常颈椎 C1 ~ 7 模型及在单节段 C5 ~ 6 分别植入 Cage-Plate 和 Zero-P 融合器的 C1 ~ 7 颈椎有限元模型, 分别模拟 C1 ~ 7 正常颈椎和进行 Cage-Plate 融合术与 Zero-P 融合术后在相同生理载荷作用下进行前屈、后伸、侧弯和旋转 4 种工况下的生物力学效应。结果显示, 当分别在 C5 ~ 6 植入 Cage-Plate 和 Zero-P 融合器后, 由于 C5、C6 颈椎融合为一体, 相应会引起 C4 ~ 5 和 C6 ~ 7 椎间 ROM 增加, 以此来补偿 C5 ~ 6 融合的活动损失。不同工况下, ROM 增加不尽相同, 其中后伸时增加最大, 侧弯和旋转时增加较少。无论在 C5 ~ 6 植入何种融合器, 相邻 C4 ~ 5 和 C6 ~ 7 髓核和纤维环上的应力均有较大增加。不同工况下, 髓核上应力增加范围为

29.5% ~ 111.0%, 纤维环上应力增加范围为 17% ~ 27%。这一研究结果与 Barbagallo 等<sup>[7]</sup> 在尸体模型中测量得到的融合手术后相邻节段椎间盘内压力增加范围为 45.3% ~ 73.2% 一致。融合器植入 C5 ~ 6, 相邻小关节上的应力会明显增加, 而融合颈椎间小关节上承载应力明显减小。同时由于应力遮挡的作用, 在相邻 C4 ~ 5 间终板上的应力减小达 50% 以上, 但在 C6 ~ 7 终板上的应力增加近 20%。因此, C4 ~ 5、C6 ~ 7 这对相邻节段终板应力的改变, 会相应引起融合节段椎体骨质疏松和增加椎体凹陷的风险。

通过 Cage-Plate 和 Zero-P 融合系统对相邻节段髓核、纤维环、小关节、终板最大等效应力的比较可以发现, 这两种融合器对相邻节段的生物力学影响本质上没有区别。本模型及文献的尸体模型生物力学研究结果均表明, 颈椎融合术后邻近节段椎间盘应力增加, 直接影响纤维环、髓核和终板的正常结构和生理代谢, 从而加速其退变。Cage-Plate 与 Zero-P 融合系统在临床应用上均有各自的优势与不足。既往文献报道使用 Cage-Plate 的患者有较高吞咽困难与邻椎病的发生率, 而使用 Zero-P 的患者有较低的吞咽困难和邻椎病的发生率<sup>[6,16]</sup>。但是由于 Zero-P 融合系统的成角问题, 其在 C3 ~ 4、C6 ~ 7 节段置入有较高难度, 尤其是针对存在短颈或者高位胸骨的患者<sup>[17]</sup>。此外, 针对应用 Zero-P 融合系统患者的两年随访发现, 患者融合节段有较高的塌陷率<sup>[18-20]</sup>。因此, 在选择颈椎融合方式时, 临床医生应根据患者的责任节段、解剖学特点、椎体骨量等情况灵活选择不同的融合系统。

## 参考文献:

- [1] EDWARDS C, RIEW K, ANDERSON P, *et al.* Cervical myelopathy. Current diagnostic and treatment strategies [J]. *Spine J*, 2003, 3(1): 68-81.
- [2] 许艺荠, 张雪松, 孙太存, 等. 新型 Zero-P 与 cage 钛板椎间融合器修复颈椎病: 早期稳定性对比 [J]. *中国组织工程研究*, 2016, 20(22): 3227-3234.
- [3] 张亮, 王静成, 冯新民, 等. 零切迹颈前路椎间融合固定系统早期疗效分析 [J]. *实用骨科杂志*, 2013, 19(11): 961-965.
- [4] TONG M, XIANG G, HE Z, *et al.* Zero-profile spacer versus cage-plate construct in anterior cervical discectomy and fusion for multilevel cervical spondylotic myelopathy:

- Systematic review and meta-analysis [J]. *World Neurosurg*, 2017, 104: 545-53.
- [ 5 ] YANG Y, MA L, LIU H, *et al.* A Meta-analysis of the incidence of patient-reported dysphagia after anterior cervical decompression and fusion with the zero-profile implant system [J]. *Dysphagia*, 2016, 31(2): 134-145.
- [ 6 ] YUN D, LEE S, PARK S, *et al.* Use of a zero-profile device for contiguous 2-level anterior cervical discectomy and fusion: Comparison with cage with plate construct [J]. *World Neurosurg*, 2017, 97: 189-198.
- [ 7 ] BARBAGALLO G, ROMANO D, CERTO F, *et al.* Zero-P: A new zero-profile cage-plate device for single and multi-level ACDF. A single institution series with four years maximum follow-up and review of the literature on zero-profile devices [J]. *Eur Spine J*, 2013, 22(Suppl 6): S868-878.
- [ 8 ] TEO E, NG H. Evaluation of the role of ligaments, facets and disc nucleus in lower cervical spine under compression and sagittal moments using finite element method [J]. *Med Eng Phys*, 2001, 23(3): 155-164.
- [ 9 ] KUMARESAN S, YOGANANDAN N, PINTAR F. Finite element modeling approaches of human cervical spine facet joint capsule [J]. *J Biomech*, 1998, 31(4): 371-376.
- [10] YOGANANDAN N, KUMARESAN S, PINTAR F A. Biomechanics of the cervical spine. Part 2. Cervical spine soft tissue responses and biomechanical modeling [J]. *Clin Biomech*, 2001, 16(1): 1-27.
- [11] PANJABI MM. Cervical spine models for biomechanical research [J]. *Spine*, 1998, 23(24): 2684-700.
- [12] ZHANG QH, TEO EC, NG HW, *et al.* Finite element analysis of moment-rotation relationships for human cervical spine [J]. *J Biomech*, 2006, 39(1): 189-193.
- [13] REIS MT, REYES PM, CRAWFORD NR. Biomechanical assessment of anchored cervical interbody cages: Comparison of 2-screw and 4-screw designs [J]. *Neurosurgery*, 2014, 10(3): 412-417.
- [14] RONG X, WANG B, DING C, *et al.* The biomechanical impact of the facet tropism on the intervertebral disc and facet joints in the cervical spine [J]. *Spine J*, 2017, 17(12): 1926-1931.
- [15] WU L P, HUANG Y Q, MANAS D, *et al.* Real-time monitoring of stresses and displacements in cervical nuclei pulposi during cervical spine manipulation: A finite element model analysis [J]. *J Manipulative Physiol Ther*, 2014, 37(8): 561-568.
- [16] ALIMI M, NJOKU I, HOFSTETTER C, *et al.* Anterior cervical discectomy and fusion (ACDF): Comparison between zero profile implants and anterior cervical plate and spacer [J]. *Cureus*, 2016, 8(4): e573.
- [17] YANG H, CHEN D, WANG X, *et al.* Zero-profile integrated plate and spacer device reduces rate of adjacent-level ossification development and dysphagia compared to ACDF with plating and cage system [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2015, 135(6): 781-787.
- [18] NJOKU I, ALIMI M, LENG L, *et al.* Anterior cervical discectomy and fusion with a zero-profile integrated plate and spacer device: A clinical and radiological study: Clinical article [J]. *J Neurosurg Spine*, 2014, 21(4): 529-537.
- [19] LEE YS, KIM YB, PARK SW. Risk factors for postoperative subsidence of single-level anterior cervical discectomy and fusion: The significance of the preoperative cervical alignment [J]. *Spine*, 2014, 39(16): 1280-1287.
- [20] LEE YS, KIM YB, PARK SW. Does a zero-profile anchored cage offer additional stabilization as anterior cervical plate? [J]. *Spine*, 2015, 40(10): 563-570.