

文章编号:1004-7220(2021)02-0177-07

·脊柱生物力学专栏·

3D 打印高度可调聚醚醚酮颈椎椎间融合器的 优化设计与评价

张童童¹, 董恩纯¹, 郑纪豹¹, 李涤尘¹, 康建峰^{1,2}, 石磊³, 王玲¹

(1. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710054;
2. 季华实验室, 广东 佛山 528000; 3. 空军军医大学西京医院 骨科, 西安 710032)

摘要:目的 针对传统颈椎融合器与患者解剖形貌匹配程度较低的临床问题, 建立一款具备高度调节功能且外形与椎体相匹配的颈椎融合器, 并对其生物力学性能进行评价。方法 按照颈椎前路减压术 (anterior cervical discectomy and fusion, ACDF) 建立颈椎 C4~5 节段融合模型, 模拟前屈、后伸、左右侧弯、左右旋转不同运动工况, 计算融合器与椎体终板的应力。3D 打印制备融合器后进行体外力学实验, 探究融合器的安全性与稳定性。结果 该融合器可保持融合 C4~5 节段颈椎活动度 (range of motion, ROM) 为 $1^{\circ} \sim 2.8^{\circ}$, 降低至自然节段 ROM 的 40%~80%。在体外压缩试验中, 融合器屈服载荷为 $(2\ 721.67 \pm 209)$ N, 满足服役状态下生理载荷的最大需求。结论 所设计的高度可调融合器显示出较优的生物力学性能, 且可以减少手术中的选型步骤。

关键词: 颈椎; 可调高度; 融合器; 有限元分析; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.02.002

Optimization Design and Evaluation of Three-Dimensional Printed PEEK Cervical Interbody Fusion Cage with Adjustable Height

ZHANG Tongtong¹, DONG Enchun¹, ZHENG Jibao¹, LI Dichen¹, KANG Jianfeng^{1,2},
SHI Lei³, WANG Ling¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China; 2. Jihua Laboratory, Foshan 528000, Guangdong, China; 3. Department of Orthopedics, Xijing Hospital, Air Force Medical University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Objective Aiming at the clinical problem of the low matching degree with the patient's anatomical morphology for traditional cervical fusion cage, a cervical fusion cage with the function of adjustable height and the shape matched with the vertebral body was established, and its biomechanical properties were evaluated. **Methods** A cervical C4-5 segment fusion model was established according to anterior cervical discectomy and fusion (ACDF), so as to simulate different motion conditions, i.e. anterior flexion, posterior extension, left/right lateral flexion, left/right rotation, and stress of the fusion cage and vertebral endplate was calculated. After three-dimensional (3D) printing of the fusion cage, an *in vitro* mechanical experiment was conducted to explore safety

收稿日期:2020-09-15; 修回日期:2020-10-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFE0207900), 自然科学基金重点项目(51835010), 广东省重点领域研发计划项目(2018B090906001), 国家重点研发计划项目(2018YFB1107000), 中央高校基本科研业务费, 陕西省青年创新团队, 军事提升项目(2016TSB-005)

通信作者:王玲, 教授, 博士生导师, E-mail: menlwang@mail.xjtu.edu.cn

and stability of the fusion cage. **Results** The fusion cage could keep the range of motion (ROM) of cervical vertebrae at the fusion segment with 1° - 2.8° and reduce the ROM to 40%-80% of the natural segment. In the *in vitro* compression test, the yield load of the fusion cage was $(2\ 721.67 \pm 209)$ N, which met the maximum demand of the physiological load in service state. **Conclusions** The designed fusion device with adjustable height shows better biomechanical properties and can reduce the selection step in operation.

Key words: cervical spine; adjustable height; fusion cage; finite element analysis; biomechanics

研究表明,颈椎退行性改变导致的颈椎功能障碍在中国的患病率为 10%~15%,其中 50 岁以上人群患病率为 25%^[1]。对于保守治疗无效的患者,采取手术减压融合,使用椎间融合器来代替病变椎间盘,可达到维持椎间高度、促进融合的目的^[2]。

由于人颈椎在形貌上具有较大的个体差异,同一尺寸的融合器通常很难满足临床需求,故需要不同的融合器来适配^[3]。临床中,通常通过试模选择型号来解决上述问题,这不仅增加了手术步骤,而且不能保证尺寸的完全合适。植入的融合器高度过大,可能会引起患者颈部疼痛,导致终板所受接触压力增大,产生破坏,进而发生融合器下沉;而植入的融合器高度偏小,则无法达到维持椎间原本高度的目的,最终导致颈椎生理曲度发生变化,进而损伤神经^[4]。因此,适合的融合器高度有利于提高与椎间间隙的匹配程度,维持颈椎原本的生理前凸,保证脊髓功能正常,从而降低融合器下沉、融合失败的风险^[4-5]。具备高度调节功能的融合器具有非常好的临床应用前景。

颈椎融合器按照结构可分为螺纹型、垂直环型和盒型。其中,螺纹型融合器具有较高的即刻稳定性和足够的强度,但由于相邻椎骨的横向宽度限制,导致支撑高度与终板强度降低,使得融合器下沉率增高^[6];环型融合器在前屈及侧弯时稳定性较好,但由于直立环型设计降低了终板-假体的接触面积,导致其旋转刚度较差^[7];盒型融合器起初为有粗糙接触面的矩形容器,此种设计有更好的节段刚度,一般拥有规则的几何外形。研究表明,贴合椎体的弧形融合器与盒型融合器相比,可以将下沉率从 20% 降至 6%^[8]。因此,根据正常颈椎解剖结构来设计外形的盒型融合器较为理想^[9]。

目前,对融合器性能评价的方法主要分为体内与体外评价。体内评价,如人体实验与动物实验,可以检测融合率与生物反应,但由于伦理与样品获

得难度较高等问题,限制了其可行性。体外评价包括假体力学测试和有限元分析。假体力学测试根据美国材料实验协会(American Society of Testing Materials, ASTM) F2077 标准来进行,该临床前标准的制定是为了评估设备在静态和动态负载条件下压缩、剪切和扭转结构机械性能^[10]。有限元分析则是可在完全可控与可重复的环境下对融合器的力学性能及内部参数进行评价^[11-12];此外,还可以对椎体应力和应变分布进行研究,通过计算椎体活动度(range of motion, ROM)来评价融合的稳定性^[13]。

针对融合器高度和形状与椎间隙不匹配而导致融合器下沉率升高的问题,本文设计一款具有高度可调、形状贴合终板的颈椎椎间融合器。参照颈椎前路减压融合术(anterior cervical discectomy and fusion, ACDF)建立颈椎融合模型,研究椎间融合器在不同生理载荷下的稳定性与安全性,并与平面型融合器进行对比。通过熔融沉积技术,制备椎间融合器,并根据 ASTM F2077 标准,对其承载能力进行评估。

1 材料与方 法

1.1 高度可调融合器设计

本文提出了一种可以连续调节高度的聚醚醚酮(poly-ether-ether-ketone, PEEK)融合器,通过提高与椎体的匹配度来降低终板应力,达到降低下沉率的目的。PEEK 材料融合器是市场较为主流的一类非金属融合器,具备与骨相当的弹性模量,应力遮挡小,并且可以透 X 线观测成骨^[3];另外,PEEK 作为打印材料,具备自润滑性,即打印出的部件有较低的摩擦因数,利于成型装配件,故比较适合用来制备 3D 打印的椎间融合器。融合器外形设计基于椎体的两大特征——终板和钩突。由于颈椎退行性变发生人群多为 40 岁以上患者,故

尽量选取 40~50 岁人群的椎体参数^[14-15];而对于更大年龄的患者,同样可以通过去除少量终板来植入本设备。其中,钩突前脚和钩突后脚间距决定融合器水平面的长宽;上下终板倾斜角决定融合器上下表面与水平面所呈角度;穹窿高度决定融合器上表面曲面的高度,而可调融合器高度考虑市场上的高度尺寸设置为 6~8 mm,这也是椎间隙高度的平均值^[16]。

如图 1 所示,该融合器高度调节机构为连杆机构,以螺钉拧入的形式使推入杆 3 向内移动,令与其铰接的支撑杆 4 转动,达到令与支撑杆 4 铰接的融合器上盖 1 在受外壳 2 约束下平行抬升的目的,同时保证机构在调节范围内的稳定性。运动仿真证明,每旋入 1 mm,融合器高度上升 0.67 mm,即一般旋入 2~3 圈就可实现从最低到最高的高度调节。

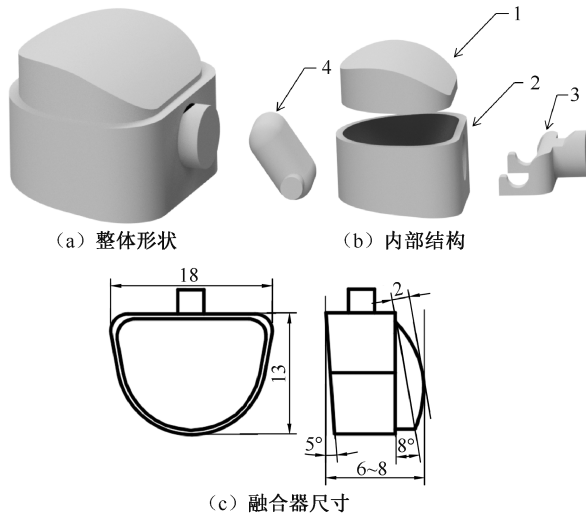


图 1 融合器设计外形

Fig.1 Shape of the fusion cage (a) Overall shape, (b) Internal structure, (c) Dimension of fusion cage

1.2 生物力学性能分析

构建有限元模型,对 C4~5 融合节段在生理载荷下的终板应力分布与椎段 ROM 进行分析,以此作为评价融合器功能的依据。首先,将患者 CT 数据导入 Mimics 16.0 (Materialise 公司,比利时),对患者颈椎 C4~5 节段进行三维模型重建;然后,将模型导入 Geomagic Studio 2012 (Geomagic 公司,美国)进行光滑处理,得到颈椎节段实体模型;在 HyperMesh 12.0 (Altair 公司,美国)中对颈椎节段模型采用四面体单元 (C3D4) 进行网格划分;颈椎模

型与融合器模型导入 ABAQUS 6.14 (Simulia 公司,美国)中进行装配。仿照颈椎前路减压术的实施方式,去除前纵韧带,植入融合器并调节其高度;根据解剖学中韧带的连接点,在 ABAQUS 中使用线 (lines) 将韧带附着的点连接,建立 C4~5 椎间后纵韧带、囊韧带、棘间韧带、黄韧带;对所有韧带划分杆单元 (T3D2) 网格,并最终得到颈椎融合三维模型^[17]。

模型中皮质骨和松质骨均采用各向同性、均质的线弹性材料模拟^[17-18]。对韧带赋予不可压缩的材料特性^[17]。融合器为 PEEK 材质,各部件的材料属性如表 1 所示。

表 1 融合颈椎模型材料属性^[17]

Tab.1 Material properties of the cervical fusion model^[17]

部件	弹性模量/MPa	泊松比	横截面积/mm ²
皮质骨	12 000	0.29	—
松质骨	450	0.29	—
后纵韧带	20	0.30	5.4
囊韧带	20	0.30	50.1
黄韧带	1.5	0.30	46.6
棘间韧带	1.5	0.30	13.1
融合器	3 800	0.33	—

如图 2 所示,在有限元模型中,融合器内各零件接触关系是摩擦因数为 0.33 的面面接触^[17]。植入颈椎后,为了模拟其与椎体的配合,将融合器上表面与终板绑定约束。而对于椎体间关系,则是将颈椎关节突处的接触定义为摩擦因数为 0.1 的面面接触^[18],将韧带端点与周围骨的网格端点进行耦合。

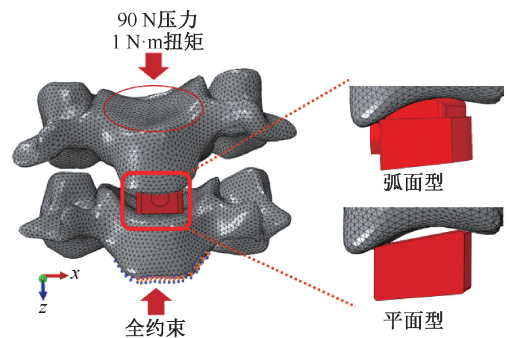


图 2 融合模型边界条件与载荷设置

Fig.2 Boundary conditions and load setting of the fusion model

为了准确检测融合节段椎体不同运动工况下 ROM,将 C5 下表面固定,于 C4 上终板处设置一参

考点与终板耦合,在参考点处施加 90 N 压力,以及 1 N·m 扭矩模拟颈椎前屈、后伸、左右侧弯、左右旋转 6 种不同运动工况^[18]。并输出融合器与椎体的应力,判断融合器的安全性以及椎体终板应力分布的均匀程度。

另外,设计平面盒型融合器作为对照组,输出椎体终板应力分布,用以与高度可调融合器的弧形设计进行对比。平面盒形融合器的长宽高和材料属性均与弧面融合器植入状态相同,且两者在椎体中的位置和有限元模拟的边界条件均一致。

1.3 机械性能测试

在压缩实验前,通过中国陕西聚高增材智造科技发展有限公司 3D 打印机 (Surgeon 2003D) 打印制备 5 个融合器。打印温度为 420 °C,使用 0.4 mm 直径的喷头,填充率为 100%,在确定装配关系的正确性与部件表面的完整性后作为样品。压缩性能测试按照 ASTM F2077 标准设置。如图 3 所示,融合器置于外形匹配的专用夹具中,并使用生物力学试验机 (PLD-5) 进行位移加载。

把装配好的融合器置于夹具中,并检查融合器上下面与夹具的贴合程度,再将装配体安装于生物

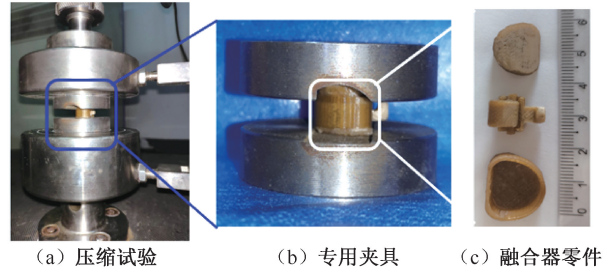


图 3 压缩试验实物装夹图

Fig.3 Picture of physical clamping in compression test

(a) Compression test, (b) Special fixture, (c) Fusion cage parts

力学试验机压板的中央,保证加载力落于融合器的几何中心。将实验参数调整为生物器械常用的位移加载速度 1 mm/min 后进行加载,收集实验数据,观察力-位移曲线,在融合器出现崩溃或力学传感器达到上限值 28 kN 时停止实验,导出数据。

2 结果

2.1 颈椎融合节段有限元分析结果

不同运动工况下,高度可调融合器内部结构以及植入平面对照组 C4~5 融合节段上下终板的应力分布如图 4 所示。

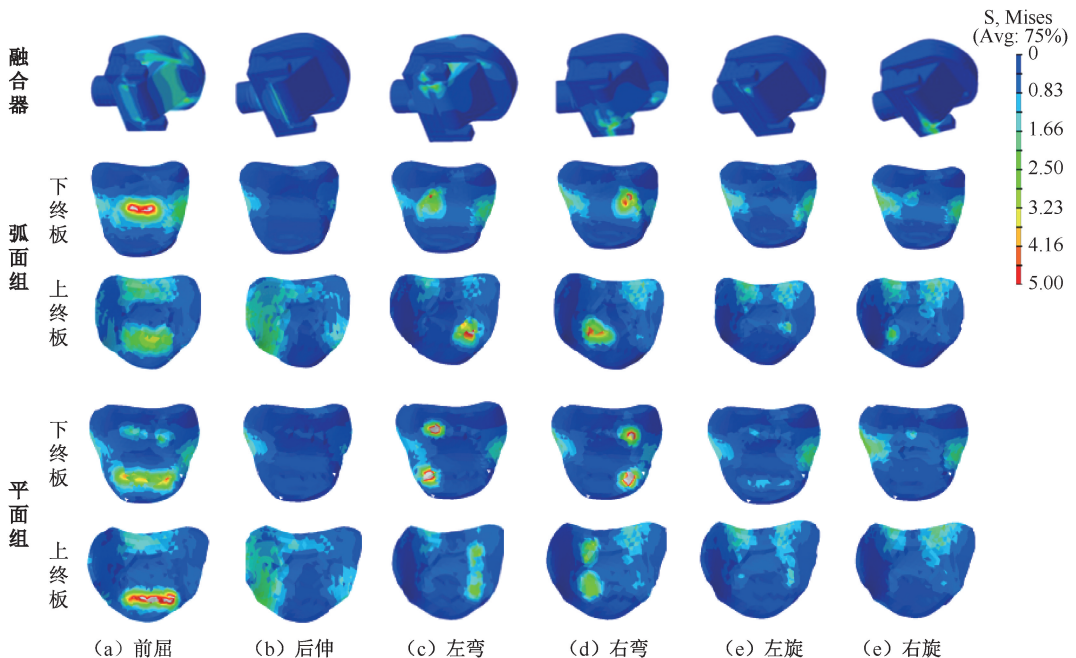


图 4 不同运动工况下融合节段应力分布

Fig.4 Stress distributions on the fused segments under different motion conditons (a) Flexion, (b) Extension, (c) Left lateral bending, (d) Right lateral bending, (e) Left axial rotation, (f) Right axial rotation

弧面型融合器(高度可调融合器)在不同运动工况下的最大应力为 45.8 MPa, C4 节段椎体下终板与 C5 节段椎体上终板的最大应力为 1.7~6.2 MPa。平面型融合器植入时,终板的最大应力为 2.1~10.9 MPa(见表 2)。

表 2 不同运动工况下融合器和椎体终板最大应力

Tab.2 Maximum stress of fusion cage and vertebral endplate under different motion conditions 单位:MPa

分组	前屈	后伸	左弯	右弯	左旋	右旋
融合器	45.8	10.6	40.5	34.8	33.7	31.4
弧面组						
上终板	6.2	1.7	5.8	5.3	2.2	2.4
下终板	3.5	2.2	6.1	5.7	1.9	2.1
平面组						
上终板	4.7	2.1	10.9	8.6	2.2	2.8
下终板	6.5	2.4	3.8	3.9	2.1	2.2

如图 5 所示,在有限元边界与载荷条件设置相同的情况下,与 C4~5 自然节段不同运动工况最大 ROM($1.8^{\circ}\sim 4.2^{\circ}$)相比^[19],植入本装置后,ROM 降至 $1^{\circ}\sim 2.8^{\circ}$ 。

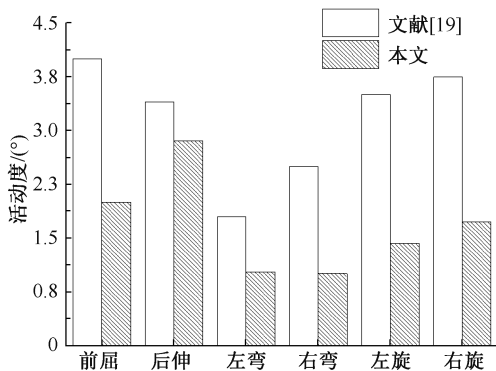


图 5 不同运动工况下颈椎自然与融合 C4~5 节段活动度对比

Fig.5 Range of motion comparison for natural and fused C4-5 segments under different motion conditions

2.2 体外力学测试结果

当椎间融合器产生的残余变形等于椎间盘高度 2% (颈椎椎间盘高度为 6 mm) 时,对应的力与位移即为屈服位移与屈服载荷。如图 6 所示,计算出力-位移曲线的一阶导数曲线,在导数的最大值处做垂线 l_1 找到力-位移曲线上的拐点,做出此点的切线 l_2 并平移椎间盘原始高度的 2% (0.16 mm) 得到直线 l_3 , 直线 l_3 与曲线的交点处读出屈服载荷^[10]。

在融合器的压缩试验中,测得其屈服强度为 $(2\ 721.67\pm 209)$ N, 刚度为 $(3\ 026.67\pm 182)$ N/mm。

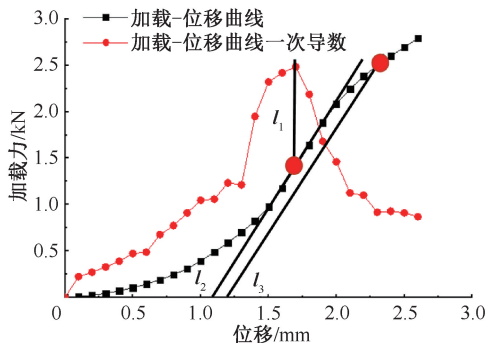


图 6 压缩实验中屈服载荷读取方式

Fig.6 Reading method of yield load in compression test

3 讨论

本文基于一种高度可调、外形贴合颈椎终板的融合器设计,进行 PEEK 融合器的性能评价,分析其在颈椎中的稳定性,力学实验则是根据 ASTM F2077 标准进行压缩性能测试。

本文模拟颈椎前路椎间盘摘除术,建立融合器植入椎骨后的有限元模型。结果表明,融合器整体的应力分布比较均匀,最大应力为 45.8 MPa,就 PEEK 的破坏载荷(95.2 MPa)而言^[20],安全系数为 2.07。由椎体终板的应力分布可知,前屈运动时终板最大应力为 6.2 MPa,显著小于皮质骨的疲劳极限(26.5 MPa)^[19]。总体来看,融合器在颈椎中的工作状态具有一定的安全性与稳定性。

在体外力学实验中,未能计算出极限载荷的原因是 PEEK 材料为塑性材料,在加载末期,融合器配合零件间的间隙被压实,变为单纯的 PEEK 材料柱体,使得其受力可以不断上升。研究表明,在典型的脊柱弯曲过程中,颈椎体内压缩载荷范围为 $120\sim 1\ 200\text{ N}$ ^[21];相比之下,本文设计的融合器平均屈服载荷为 $(2\ 721.67\pm 209)$ N,超出生理载荷需求,安全系数为 2.26。

与平面型融合器植入时的椎体终板应力相比,高度可调融合器在左右弯曲运动工况下使终板最大应力降低 34%~44%,其余工况差异不大,证明高度可调融合器在提高与终板的匹配度后降低了融合器的下沉风险,并且左右弯曲可能是融合器服役时的危险姿态。而在颈椎后伸运动时,ROM 降低最少,为自然节段的 80%,说明在无外加钢板固定的

前提下,高度可调融合器表现出与零切迹融合器相同的性质,即在前后弯曲中具有较高 ROM^[22-23]。因此,使用本设计时,应考虑与固定设备一同使用。但是本文在有限元分析时未考虑肌肉对颈椎稳定性的影响,而在实际应用中,该融合器可能会表现出更好的稳定性。体外力学实验中测试的屈服载荷小于文献[10]中 PEEK 盒型颈椎融合器,其压缩屈服载荷可达到8 396 N,原因是虽然材料相同,但设计为装配件有一定的间隙存在,使得高度可调融合器的变形更容易达到屈服位移,如果对本融合器的各零件进行抛光处理后,可能会提高屈服载荷。此外,市面上融合器高度的梯度一般为 1 mm,植入人体的间隙可能达到 0.5 mm,本融合器则补充了此间隙,故较传统融合器有更好的安全性。

本文提出一种高度可调的融合器设计并进行性能评价,数值分析和体外力学实验均反映该融合器具有安全性,而体外力学实验结果也在一定程度证明了数值分析的准确性。本文的局限性如下:①在有限元分析中将压缩载荷设为恒定值,而将压缩载荷根据生理姿态动态改变方向与大小,可能会提高与真实生理载荷的相近程度^[24];②未考虑肌肉组织的影响,并且根据手术方式的不同可能需要外加固定,均可能影响融合器力学性能测试的准确度;③本测试只反映了融合器的体外力学特征,后期还需研究探讨随植入时间增加的力学性能改变情况,以及对融合器进行进一步的在体或离体动物模型实验,提供更接近人体内的工作环境,通过更全面的性能分析,为高度可调融合器提供更多参考依据。

4 结论

本文设计了一种高度可调、外形贴合椎体的融合器,使用数值分析与体外力学实验的方法对其进行性能评价。结果表明,融合器在颈椎各个生理运动状态下都可以保持安全,并且可以在一定程度提高颈椎的稳定性,表现出比平面型融合器更优良的特性。在体外的压缩试验中,融合器的屈服载荷也高于人体一般状态可以施加的最大荷载。因此,该融合器设计力学性能符合要求,但仍需进一步的临床研究来验证其疗效。

参考文献:

- [1] 王立公,常双超.广州市中青年不同人群颈椎病发病率的调查研究[J].中国疗养医学,2010,19(5):473-474.
- [2] RAJAEI SS, BAE HW, KANIM LE, *et al.* Spinal fusion in the united states: Analysis of trends from 1998 to 2008 [J]. Spine, 2012, 37(1): 67-76.
- [3] NIU CC, LIAO JC, CHEN WJ, *et al.* Outcomes of interbody fusion cages used in 1 and 2-levels anterior cervical discectomy and fusion: Titanium cages versus polyetheretherketone (PEEK) cages [J]. J Spinal Disord Tech, 2010, 23(5): 310-316.
- [4] FERCH RD, SHAD A, CH TAD, *et al.* Anterior correction of cervical kyphotic deformity: Effects on myelopathy, neck pain, and sagittal alignment [J]. J Neurosurg, 2004, 100(1): 13-19.
- [5] YIN M, MA J, HUANG Q, *et al.* The new zero-P implant can effectively reduce the risk of postoperative dysphagia and complications compared with the traditional anterior cage and plate: A systematic review and meta-analysis [J]. BMC Musculoskeletal Disord, 2016, 17(1): 430.
- [6] PFLUGMACHER R, SCHLEICHER P, GUMNIOR S, *et al.* Biomechanical comparison of bioabsorbable cervical spine interbody fusion cages [J]. Spine, 2004, 29(16): 1717-1722.
- [7] KAST E, DERAKHSHANI S, BOTHMANN M, *et al.* Subsidence after anterior cervical inter-body fusion. A randomized prospective clinical trial [J]. Neurosurg Rev, 2009, 32(2): 207-214.
- [8] KIM HS, SONG JS, HEO W, *et al.* Comparative study between a curved and a wedge peek cage for single-level anterior cervical discectomy and interbody fusion [J]. Korean J Spine, 2012, 9(3): 181-186.
- [9] HETTLICH BF, ALLEN MJ, GLUCKSMAN GS, *et al.* Effect of an intervertebral disk spacer on stiffness after monocortical screw/polymethylmethacrylate fixation in simulated and cadaveric canine cervical vertebral columns [J]. Vet Surg, 2014, 43(8): 988-994.
- [10] AYERS S, BENKOVICS T, MARSHALL J, *et al.* Development of a low-cost polymethylmethacrylate stand-alone cervical cage: Technical note [J]. J Neurol Surg, 2014, 75(4):317-322.
- [11] KWON SW, KIM CH, CHUNG CK, *et al.* The formation of extragraft bone bridging after anterior cervical discectomy and fusion: A finite element analysis [J]. J Korean Neurosurg Soc, 2017, 60(6): 611-619.
- [12] KANDZIORA F, PFLUGMACHER R, SCHAEFER J, *et al.* Biomechanical comparison of cervical spine interbody

- fusion cages [J]. *Spine*, 2001, 26(17): 1850-1857.
- [13] 赵齐通, 靳林煜, 李新锋. 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[J]. *医用生物力学*, 2018, 33(3): 212-217.
- ZHAO QT, JIN LY, LI XF. Biomechanical Effects of different single-level anterior cervical discectomy and fusion systems on the adjacent segments [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(3): 212-217.
- [14] 李伟, 张毅, 高予中, 等. 国人椎体的测量与分析[J]. *河南医学研究*, 1999, 8(2): 109-112.
- [15] 郭永飞, 陈德玉, 王良意, 等. 颈椎椎体终板倾斜角的影像学测量[J]. *中国组织工程研究*, 2003, 7(14): 2006-2007.
- [16] 祝佳, 王松, 廖振华, 等. 零切迹颈椎椎间融合器设计与研究进展[J]. *生物医学工程学杂志*, 2017, 34(1): 150-155.
- [17] ZHANG M, PU F, XU L, *et al.* Development of an integrated CAD-FEA system for patient-specific design of spinal cages [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Eng*, 2017, 20(4): 355-364.
- [18] 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.
- [19] WANG L, WANG Y, SHI L, *et al.* Can the sheep model fully represent the human model for the functional evaluation of cervical interbody fusion cages? [J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2018, 18(3): 607-616.
- [20] FAIZAN A, GOEL VK, GARFIN SR, *et al.* Do design variations in the artificial disc influence cervical spine biomechanics? A finite element investigation [J]. *Eur Spine J*, 2012, 21(S5): 653-662.
- [21] MORNEY SP, SCHULTZ AB, JAA M. Analysis and measurement of neck loading [J]. *J Orthop Res*, 1988, 6(5): 713-720.
- [22] 宋燕美, 赵改平, 李鹏祥, 等. ROI-C 椎间融合器植入对颈椎生物力学的影响[J]. *医用生物力学*, 2018, 33(2): 114-120.
- SONG YM, ZHAO GP, LI PX, *et al.* Effects of ROI-C cervical implantation on biomechanics of cervical vertebra [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(2): 114-120.
- [23] PANCHAL R, GANDHI A, FERRY C, *et al.* A Biomechanical evaluation of a next-generation integrated and modular ACDF device possessing full-plate, half-plate, and no-profile fixation iterations [J]. *Glob Spine J*, 2019, 9(6): 826-833.
- [24] 齐蔚霖, 晏怡果. 脊柱跟随载荷在离体生物力学研究中的应用进展[J]. *医用生物力学*, 2019, 34(6): 662-667.
- QI WL, YAN YG. Advances in application of spine follower loads in biomechanical studies *in vitro* [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(6): 662-667.