

. 实验研究 .

寰枢椎关节间融合器的拓扑优化设计

王作伟 张一可 菅凤增 吴 浩 王兴文 段婉茹 王 凯 关 健 刘振磊 陈 赞

【摘要】目的 探讨结构拓扑优化技术在寰枢椎关节间融合器设计的应用效果。方法 选择 1 名健康志愿者,进行寰枕交界部位 CT 扫描,建立寰枢椎三维几何模型;对寰枢椎内固定系统模型基于边界反演法进行材料参数反演,构建各向同性材料参数下的简化模型,采用变密度法对植骨窗部分进行拓扑优化设计,获得植骨窗体积最大且结构刚度满足要求的结构,并几何重构为新型寰枢椎侧块关节间融合器(Cage A)。模拟融合器植入,比较 CageA 与传统融合器(Cage B)植入后,椎体、融合器及植骨内部应力响应,对植入融合器和椎体力学响应进行评估。结果 与传统融合器(Cage B)相比,Cage A 模型最大应力明显降低,且应力较均匀分布在支撑面上;在后伸状态下,植入 Cage B 的整体模型形变峰值明显降低;Cage B 植入的椎体最大应力值、植骨体积占比无明显变化。结论 借助结构拓扑优化技术设计的寰枢椎关节间融合器,应力分布均匀,椎体受力小。该方法可以实现具有针对性的个体化融合器设计。

【关键词】 颅颈交界区疾病;寰枢椎融合术;结构拓扑优化设计;寰枢椎融合器

【文章编号】 1009-153X(2022)11-0917-04 【文献标志码】 A 【中国图书资料分类号】 R 681.5; R 651

Topology optimization design of atlantoaxial interarticular cage

WANG Zuo-wei¹, ZHANG Yi-ke², JIAN Feng-zeng¹, WU Hao¹, WANG Xing-wen¹, DUAN Wan-ru¹, WANG Kai¹, GUAN Jian¹, LIU Zhen-lei¹, CHEN Zan¹. 1. Department of Neurosurgery, Xuanwu Hospital, Capital Medical University (Neurospine Center, China International Neuroscience Institute), Beijing 100530, China; 2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology Dalian 116024, China

【Abstract】 Objective To investigate the application value of topology optimization technology in the design of atlantoaxial interarticular cage. Methods Three dimensional model of atlantoaxial vertebrae was established by scanning CT in a healthy volunteer. Based on this simplified model, topology optimization design was carried out for the atlantoaxial interarticular cage device. A new atlantoaxial cage (Cage A) was designed through topology optimization. The internal stress responses of Cage A and the traditional cage to the vertebral body were compared, and the mechanical properties of the fusion apparatus were evaluated. Results Compared with the traditional cage, the maximum stress of Cage A model was significantly reduced, and the stress was evenly distributed on the support surface. In the posterior extension state, the deformation peak value of the overall model with Cage B was significantly reduced. There were no significant changes in the maximum stress value and the proportion of bone graft volume in the vertebrae implanted by Cage B. Conclusions Compared with the traditional cage, the atlantoaxial interarticular cage designed by topological optimization technology has a more uniform stress distribution and reduces the risk of fusion cage settlement. This method can realize individualized cage design.

【Key words】 Craniocervical junction disease; Atlantoaxial interarticular cage; Structural topology optimization

寰枢椎脱位(atlantoaxial dislocation, AAD)是一种临床常见的颅颈交界区畸形,后路寰枢椎复位+固定融合术为主要的术方式^[1,2]。寰枢椎侧块关节融合器植入可以解除寰枢椎后路融合时产生的张力问题,更符合生物力学要求,侧块融合的稳定性能优

于椎板融合^[3,4]。寰枢椎解剖变异大、结构复杂,对关节间融合器的适用性和功能性提出了更高的设计要求^[4,5]。当前,寰枢椎椎间融合器设计的报道较少,未对融合器的刚性、应力分布以及植骨面积等问题做出综合考虑,导致现有的椎间融合器很难完全适应具有个体化要求的临床需要。结构优化基于结构数值分析方法,在给约束条件下,以所关注的性能指标为目标,设计出某种力学性能最优且满足约束条件的结构^[6],为结构创新设计的重要手段之一,其中拓扑优化技术以寻求结构材料最优拓扑分布形式为目标,因其创造设计能力而成为现代结构设计技术与方法的重要组成^[7,8]。本研究充分考虑手术方

doi:10.13798/j.issn.1009-153X.2022.11.011
作者单位:1100053 北京,首都医科大学宣武医院神经外科/中国
国际神经科学研究所神经脊柱中心(王作伟、菅凤增、吴 浩、王兴文、
段婉茹、王 凯、关 健、刘振磊、陈 赞);116024 大连,大连理工大
学工程力学系(张一可)
通讯作者:陈 赞,E-mail:13911712120@163.com

式和融合器植入位置等差异因素,以寰枢椎关节间融合器为设计对象,采用边界反演法构建具有近似力学性能的简化分析模型,借助结构拓扑优化技术,开展融合器个性化定制设计的理论与方法研究。

1 材料和方法

1.1 几何模型的建立 选择1名健康志愿者,进行颅颈交界区CT扫描,将DICOM扫描数据导入Mimics软件,重建获得寰枢椎椎体渲染模型(图1)。将所生成的几何模型进行光滑化处理后,导入3-Matic软件进行精细化建模,获得结构分析可用的三维寰枢椎几何模型。

1.2 基于边界反演的寰枢椎简化分析模型的建立 首先对寰枢椎椎体施加两组工况,分别为100 N的轴向压缩力和100 N的侧向挤压力,固定C2椎体底面所有自由度进行分析(三维模型下,每个节点包含6个自由度)。两组工况下的结构位移数据、边界条件信息保存为正问题,已知信息用于边界反演。为确保简化模型的计算精度,反演时将上椎体的皮质骨和松质骨、下椎体的皮质骨和松质骨分别绑定,作为2个独立集合进行反问题求解。反问题计算得到的材料参数:寰椎弹性模量为2456.22 MPa,泊松比为0.5;枢椎弹性模量为1788.48 MPa,泊松比为0.5。

1.3 寰枢椎侧块融合器有限元模型的建立 参考寰枢椎椎间隙解剖学测量参数和传统寰枢椎椎间融合器的尺寸,在3-Matic软件中建立子弹型PEEK融合器的三维模型。该志愿者寰枢关节左右间隙大小不同,右侧平均为3.0 mm,左侧平均为3.8 mm。参考左右两侧间隙高度值,本文需设计的右侧融合器高度

平均为4.3 mm,左侧融合器高度平均为3.5 mm。建立传统寰枢椎融合器模型(Cage B;图2)。

1.4 寰枢椎侧块融合器拓扑优化设计 依据人体颈椎运动的典型受力特性,约束枢椎椎体下表面自由度,模拟其无法沿各个方向平移和转动限制;在寰椎上表面创建耦合点施加大小为73.6 N的竖直向下载荷,模拟头部生理条件下的自重载荷,施加1.8 Nm后伸弯曲扭矩模拟生理状态下颈椎有效负载。完整结构分析流程基于ABAQUS软件进行。拓扑优化基于变密度法思想编制程序,具体流程为:设定优化目标为植骨窗体积最大化,约束为融合器结构刚度。调用ABAQUS完成结构分析,获得优化所需目标函数值、约束函数值及相应灵敏度信息,开展当前迭代步下的优化设计,更新优化后的设计变量,判断收敛条件,更新优化。所设计的侧块融合器右侧尺寸设定为为10 mm×8 mm×4.3 mm,左侧尺寸设定为为10 mm×8 mm×3.5 mm。经拓扑优化设计出个体化寰枢椎侧块融合器,采用后处理对植骨窗轮廓完成修剪调整,获得满足刚度条件且植骨窗体积最大的新型融合器模型(Cage A;图3)。在上述个体化环境下,具有不规则边界后的异形融合器为最佳设计。

1.5 融合器植入力学性能评估 分别对传统寰枢椎融合器Cage B植入后模型和个体化设计的新型融合器Cage A植入后模型进行结构响应分析,对比两种融合器植入后以及在后伸运动时寰枢椎模型的植骨表面应力分布。

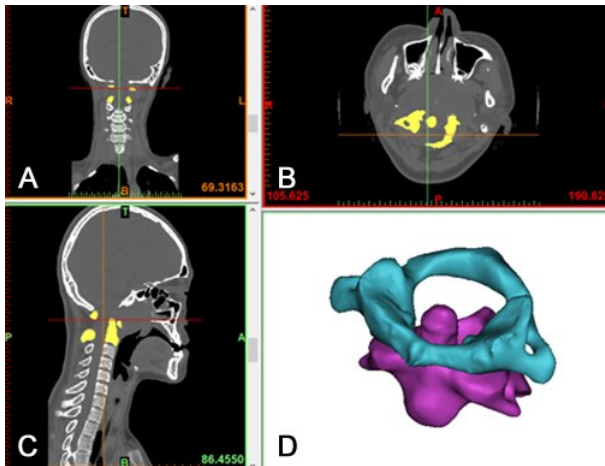


图1 根据CT扫描数据计算生成寰枢椎椎体模型
A. 寰枢椎CT扫描后方位展示;B. 寰枢椎CT扫描结果局部放大;
C. 寰枢椎CT扫描侧方位展示;D. 重建后的寰枢椎几何模型

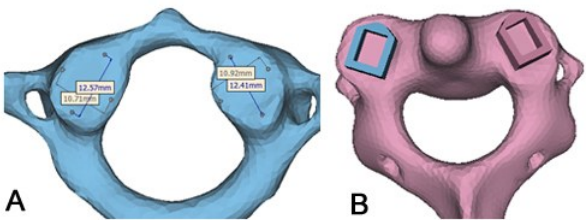


图2 根据寰枢椎三维模型建立传统寰枢椎融合器模型
A. 寰枢椎三维模型;B. 传统寰枢椎融合器模型

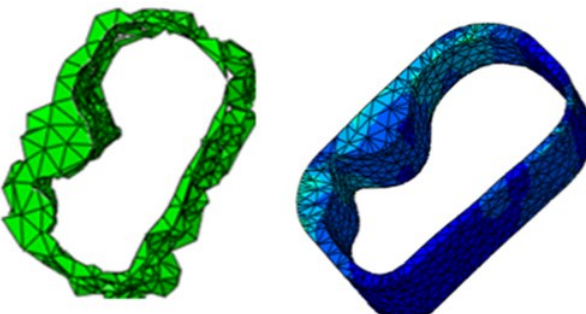


图3 拓扑设计结构的融合器植骨轮廓为不规则形

2 结果

植入传统融合器 Cage B 的模型最大 Von Mises 应力值为 7.888 MPa, 出现在融合器的边缘; 拓扑优化设计的融合器 Cage A 模型的最大 Von Mises 应力值为 5.489 MPa, 明显小于 Cage B ($P<0.05$), 且应力较均匀分布在支撑面上, 无明显的应力集中现象。Cage A 的椎体部分最大 Von Mises 应力值为 3.034 MPa, Cage B 植入的椎体最大 Von Mises 应力值为 3.221 MPa。Cage A 应力分布的状态较为均匀, 无明显应力集中; Cage B 植骨空间的体积占比为 65.48%, Cage A 为 67.03%。见图 4。

后伸运动时, 最大应力分布主要在接触面上, 其中 Cage A 的植骨应力分布面积较大、应力分布较均匀。在后伸工况下, Cage B 的整体模型形变峰值为 0.1371 mm, 而 Cage A 的整体模型形变峰值为 0.09745 mm, 明显低于 Cage B 模型 ($P<0.05$)。

3 讨论

AAD 手术的主要目的是解除齿状突对脊髓或脑干造成的压迫, 手术方式主要分两类, 即前路手术和后路手术。目前, 随着对 AAD 发病机制认识的逐

渐提高, 后路寰枢椎复位联合固定、融合术已经成为主要的手术方式^[9]。研究表明, 寰枢椎间的纵向压缩负荷主要是通过两侧寰枢椎侧块向下颈椎传递, 而应力刺激可以促进植骨融合^[4]。因此, 较为合理的骨融合应该在寰枢椎侧块关节上, 寰枢椎侧块融合更符合生物力学要求, 可以避免后路融合时植骨块的张力, 侧块融合的稳定性的要优于椎板融合^[10]。

使用寰枢椎侧块融合器进行侧块关节融合具有较大的优势, 但是临床上使用受到限制, 一个重要的原因就是寰枢椎解剖结构较为复杂、变异大, 使融合器的设计较困难。另外, 置入寰枢侧块关节融合器的手术比较复杂, 可能会损伤周围重要组织结构, 这也对融合器的设计提出了更高的要求。

针对寰枢椎融合器的设计和使用的困难, 有学者对寰枢关节融合器进行了探索研究, 显示后路侧块关节融合器提升了临床治疗效果, 提高了植骨融合率^[2,10]。但在临床应用上仍多有诸多不足, 特别是目前的融合器不适应于一些特殊的颅颈交界区疾病, 如侧块关节关节面狭小或关节面错位角度较大, 这种情况造成手术植入融合器困难。当前, 寰枢椎侧块融合器设计普遍缺乏具备严格理论、经过实验验证的有效设计方法。本研究目的为改良寰枢椎间融合器的设计理念, 通过结构优化设计出最优的个性化融合器。

结构优化借助结构分析技术, 在给定的条件下, 按某种性能最大/最小为目标, 设计出性能最优的结构, 可以提供改进结构设计的有效方案, 是创新设计的重要手段之一^[6]。根据优化对象分类, 结构优化可分三个层次, 即尺寸优化、形状优化和拓扑优化, 其中以材料最优分布形式为目标的结构拓扑优化方法, 以其突出的创造性设计能力成为现代结构设计的重要组成部分^[7,8]。结构拓扑优化根据给定的目标、限制条件及相应力学边界条件, 在给定设计域内进行材料的全新分布的优化方法^[11], 即保留设计域内对优化目标有用的部份, 删除对优化目标贡献较小的材料, 以形成全新结构设计。通常, 结构拓扑优化不仅可以改变结构的材料分布, 还可以改变结构的尺寸及形状。

为了提高融合器植骨融合率, 有学者针对现有的融合器进行了自行设计, 改变了融合面和支撑面尺寸^[12]。这种尺寸上改变的设计多数是经验式的设计, 缺少严格的理论依据和实验验证。拓扑优化方法因具有根据力学需要来调整材料布局的功能, 使得将其应用到骨科植入物的优化设计当中成为可

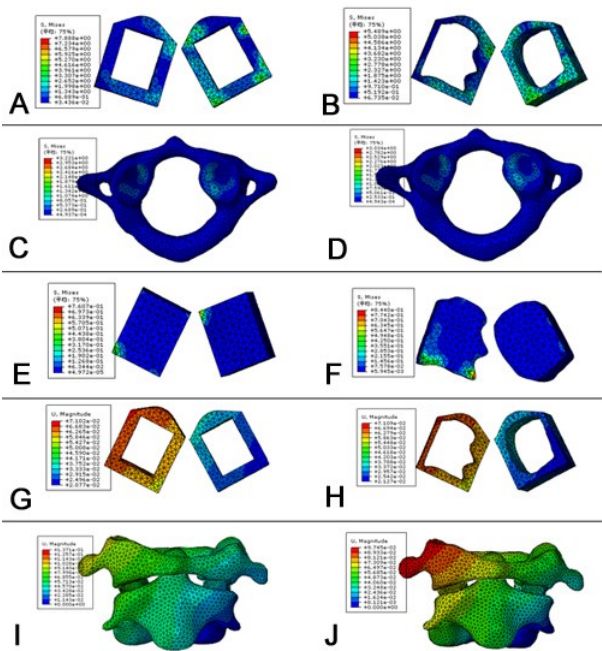


图4 寰枢椎融合器分析结果示意图

A、B. 融合器 Von Mises 应力值 7.888、5.489 MPa; C、D. 椎体 Von Mises 应力值、3.221、3.034 MPa; E、F. 植骨 Von Mises 应力值 0.7607、0.8440 MPa; G、H. 融合器位移峰值 0.07102、0.07109 mm; I、J. 模型整体位移峰值 0.1371、0.09745 mm; A、C、E、G、I. CageB; B、D、F、H、J. 优化后 CageA

能。拓扑优化设计的植入物可以针对不同的力学要求来设置限制条件,在给定的植人工况下,设置优化目标,对植入物进行设计,使用更少的材料就可以拥有更合理的结构布局。设计的新型结构可以降低植入式治疗器械的应力遮挡效应,更好地刺激骨生长来促进骨融合。拓扑优化设计技术应用于椎间融合器的优化,改变了以往经验式的设计,具有更高的创造能力,可实现面向病人的创生式设计。

寰枢椎中的材料构成为具有强烈非线性的各向异性材料。为便于后续拓扑优化设计方案实施,我们将其等效为具有近似力学响应的各向同性多材料简化模型。基本思路为:基于既往研究的几何模型,赋值寰枢椎结构实际材料属性,构建精确有限元分析模型,获得真实结构响应信息(正问题求解)。基于同一几何模型和边界条件,基于反演求解所关心的简化材料属性(各向同性),使该简化模型与真实的正问题求解模型具有近似的结构响应(反问题求解)。本研究建立寰枢椎几何模型,并构建材料参数简化的寰枢椎侧块融合器植入模型,建立与发展了融合器的个性化结构设计方法。比较分析传统融合器与个体化设计的新型融合器的力学响应情况,结果显示新型椎间融合器提高了椎体的稳定性,降低了发生沉陷的风险。本研究基于目前的研究现状,改变既往的设计方法,通过现代影像学技术,准确把握变异解剖结构,通过图像处理方法,建立了椎体高精度几何模型;采用边界反演法,建立了可表征椎体生理力学特征的简化仿真模型,借助结构拓扑优化方法与数值仿真手段,发展了椎间融合器的个体化设计方法,获得了综合性能优异的椎间融合器个性化设计方案。

本研究初步在理论上设计出较为理想的融合器,但是在临床中是否可以应用还有待测试,例如,异形的融合器在实际手术可能对植入造成一定影响,所以临床应用效果还有待验证,这需要我们进一步行动物试验及临床试验来验证。

总之,借助于结构拓扑优化技术设计出的寰枢椎椎间融合器,在个体化条件下力学性能优于传统融合器,且具有更大的植骨体积。该方法可以针对病人不同病理条件,实现具有针对性的个体化设计。

【参考文献】

- [1] Salunke P, Karthigeyan M, Sahoo SK, *et al.* Improvise, adapt and overcome—challenges in management of pediatric congenital atlantoaxial dislocation [J]. Clin Neurol Neurosurg, 2018, 171: 85–94.
- [2] Guan J, Chen Z, Wu H, *et al.* Effectiveness of posterior reduction and fixation in atlantoaxial dislocation: a retrospective cohort study of 135 patients with a treatment algorithm proposal [J]. Eur Spine J, 2019, 28(5): 1053–1063.
- [3] 马向阳,杨进城,邱 锋,等. 寰枢椎脱位后路植骨材料的选择与融合效果评价[J]. 中国骨科临床与基础研究杂志, 2015, 7(1): 5–9.
- [4] 李松凯,倪 斌,张军华,等. 寰枢椎侧块关节融合器的研制及其生物力学研究[J]. 中华骨科杂志, 2015, 35(6): 656–662.
- [5] Yoshizumi T, Murata H, Ikenishi Y, *et al.* Occipitocervical fusion with relief of odontoid invagination: atlantoaxial distraction method using cylindrical titanium cage for basilar invagination—case report [J]. Neurosurg Rev, 2014, 37(3): 519–524.
- [6] Cheng KT, Olhoff N. An investigation concerning optimal design of solid elastic plate [J]. Int J Solids Struct, 1981, 17: 305–323.
- [7] Bendsoe MP, Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method [J]. Comput Meth Applied Mech Engin, 1988, 71: 197–224.
- [8] Rozvany GIN. A critical review of established methods of structural topology optimization [J]. Struct Multidiscipl Optimiz, 2009, 37: 217–237.
- [9] Goel A, Dhar A, Shah A, *et al.* Central or axial atlantoaxial dislocation as a cause of cervical myelopathy: a report of outcome of 5 cases treated by atlantoaxial stabilization [J]. World Neurosurg, 2019, 121: 908–916.
- [10] Chen Z, Duan W, Chou D, *et al.* A safe and effective posterior intra-articular distraction technique to treat congenital atlantoaxial dislocation associated with basilar invagination: case series and technical nuances [J]. Oper Neurosurg (Hagerstown), 2021, 20(4): 334–342.
- [11] Zhang WS, Yuan J, Zhang J, *et al.* A new topology optimization approach based on Moving Morphable Components (MMC) and the ersatz material model [J]. Struct Multidiscipl Optimiz, 2016, 53: 1243–1260.
- [12] 赵兴华,夏之远,营凤增,等. 适用于BI-AAD患者的寰枢椎侧块关节融合器的研究与设计[J]. 中华神经外科疾病研究杂志, 2017, 16(6): 485–489.

(2022-06-04收稿, 2022-08-15修回)