

文章编号: 1004-7220(2024)03-0400-07

内镜下单侧小关节分级切除对颈椎节段稳定性影响

杨广南^{1,2}, 刘江², 蒋强², 张晗硕², 李土胜², 马靖博², 丁宇^{1,2}

(1. 华南理工大学医学院, 广州 510006; 2. 中国人民解放军总医院第六医学中心 中医学部骨伤科, 北京 100048)

摘要:目的 探究颈椎内镜下不同范围小关节切除对颈椎节段稳定性的影响, 为临床手术提供生物力学理论基础。方法 基于CT数据建立颈椎C5~6正常有限元模型, 并模拟颈椎内镜手术操作获得不同范围(0、25%、50%、75%、100%)单侧小关节切除椎板开窗模型(模型1~5), 分析比较各组模型节段活动度(range of motion, ROM)及椎间盘 von Mises 应力情况。结果 除前屈工况外, 模型1、2较正常模型各方向下ROM及椎间盘 von Mises 应力改变不明显, 模型3较正常模型各方向下ROM及椎间盘 von Mises 应力出现较为明显增加, 前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左旋转及右旋转时ROM分别增加27%、4%、3%、13%、5%、16%, von Mises 应力分别增加32%、4%、2%、5%、9%、5%。模型4、5较正常模型各方向下ROM及椎间盘 von Mises 应力增加显著, 模型4的ROM分别增加27%、14%、6%、24%、7%、167%, von Mises 应力分别增加33%、13%、3%、32%、10%、130%; 模型5的ROM分别增加27%、17%、6%、25%、7%、167%, von Mises 应力分别增加33%、29%、8%、33%、12%、138%。结论 随着单侧小关节切除范围的增加, 颈椎节段ROM和椎间盘 von Mises 应力极值逐渐增加。当单侧小关节切除超过1/2时, 颈椎出现较大的ROM增加及应力改变。临床手术中应尽量保留1/2以上颈椎小关节, 避免医源性失稳。

关键词: 颈椎内镜手术; 颈椎管狭窄症; 小关节; 分级切除

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.03.004

Effects of Unilateral Graded Facetomy of Facet Joints under Endoscope on Stability of Cervical Spine

YANG Guangnan^{1,2}, LIU Jiang², JIANG Qiang², ZHANG Hanshuo², LI Tusheng², MA Jingbo², DING Yu^{1,2}

(1. School of Medicine, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Orthopedics of TCM Senior Department, the Sixth Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100048, China)

Abstract: Objective To investigate the effect of facet joint resection at different ranges under endoscopy on the stability of the cervical spine and provide a biomechanical theoretical basis for clinical surgery. **Methods** A normal finite element model of the cervical spine C5-6 was established based on CT data, and unilateral facetomy models with different ranges (0, 25%, 50%, 75%, and 100%) of laminectomy were obtained (Models 1-5) by simulating cervical endoscopic surgery. The ranges of motion (ROMs) of C5-6 and the von Mises stresses of the discs for the models in each group were compared and analyzed. **Results** Except for flexion, Models 1 and 2 showed insignificant changes in ROMs and disc von Mises stresses in each direction compared with those of the normal model. Model 3 showed a noticeable increase in ROMs and disc von Mises stresses in each direction compared with those of the normal model; ROMs under flexion, extension, left lateral

收稿日期: 2023-10-17; 修回日期: 2023-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(82274637)

通信作者: 丁宇, 教授, 主任医师, E-mail: dingyu@301hospital.com.cn

bending, right lateral bending, left rotation, and right rotation increased by 27%, 4%, 3%, 13%, 5%, and 16%, respectively, and von Mises stresses increased by 32%, 4%, 2%, 5%, 9%, and 5%, respectively. Models 4 and 5 exhibited a significant increase in the ROMs and disc von Mises stresses in each direction compared to the normal model. For Model 4, ROMs were increased by 27%, 14%, 6%, 24%, 7%, 167%, and von Mises stresses were increased by 33%, 13%, 3%, 32%, 10%, 130%. For Model 5, ROMs were increased by 27%, 17%, 6%, 25%, 7%, 167%, and von Mises stresses were increased by 33%, 29%, 8%, 33%, 12%, 138%. **Conclusions** As the range of unilateral facetomy increased, cervical ROM and disc von Mises stress extremum gradually increased. The cervical spine shows a significant ROM increase and stress changes when facet joint resection on one side exceeds 1/2. More than 1/2 of the facet joint should be preserved during surgery to avoid medical instability.

Key words: cervical endoscopic surgery; cervical spinal stenosis; facet joints; graded facetomy

颈椎管狭窄症(cervical spinal stenosis, CSS)是多种因素导致颈椎管容积减小,继而压迫脊髓或神经根的疾病。临床表现为上肢疼痛麻木、四肢肌张力增高和下肢运动障碍,严重可致残。对于保守治疗无效或有脊髓损害的 CSS 患者,应尽早进行颈椎管减压手术干预^[1]。行颈椎管后路减压时常需要不同程度小关节切除,确保充分释放受压迫的脊髓或神经根。但过度切除颈椎小关节可能引发医源性不稳,与术后轴性颈部疼痛密切相关^[2]。近年来,随着脊柱内镜技术发展,内镜下颈椎椎板开窗治疗单节段 CSS 显示出良好的临床疗效^[3]。相较开放手术,该手术能在较小切口和基本不破坏周围正常软组织情况下完成颈椎管充分减压^[4]。特别是镜下视野被清晰放大,结合水介质冲洗及术中透视,能准确且清楚地辨认靶点部位结构,实现颈椎小关节精确可控的切除,减少术后并发症及实现术后快速康复。

既往研究报道了开放手术颈椎小关节过度切除导致术后颈椎活动度(range of motion, ROM)过度增加、颈椎应力分布情况改变、正常生理曲度消失等问题^[5-6]。然而关于内镜下多大范围的小关节切除能够不过度影响术后节段稳定性,以及小关节不同范围切除后颈椎生物力学情况,需要进一步明确。颈椎有限元分析具有良好的拟真性、精确性及可重复性等优势,能有效分析颈椎各部结构切除与节段 ROM、结构应力变化及形变的关系^[7]。本文通过构建内镜下不同范围小关节切除的颈椎椎板开窗手术模型,分析比较生物力学情况,探究内镜下小关节切除边界,为临床提供生物力学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象

招募 1 名无颈椎疾患男性志愿者,年龄 24 岁,身高 176 cm,体质量 70 kg,身体质量指数(body mass index, BMI) 22.6 kg/m²,既往无颈椎手术史, X 线、CT 及 MRI 均未见明显颈椎畸形及退变。志愿者签署知情同意书。本研究通过中国人民解放军总医院第六医学中心伦理委员会审查。

1.2 主要设备及软件

Siemens 256 排螺旋 CT 机(Siemens 公司,德国); Mimics 21(Materialise 公司,比利时); Geomagic Wrap 2021(3D Systems 公司,美国); SolidWorks 2021(Dassault Systèmes 公司,法国); ANSYS 17.0(ANSYS 公司,美国)。

1.3 模型建立

1.3.1 正常颈椎有限元模型建立 采用 256 排螺旋 CT 对志愿者颈椎进行横断面扫描,扫描范围为枕骨大孔层面至胸 1(T1)水平,图像以 DICOM 文件格式保存。将 DICOM 格式文件导入 Mimics 中进行三维重建,使用蒙版、填充等工具提取 C5~6 点云模型,后将模型保存为 MCS 格式输出。将 MCS 文件导入 Geomagic 中,先通过偏移皮质骨模型得到松质骨模型,皮质骨平均厚度为 0.5 mm^[8],然后使用删除钉状物、松弛、降噪等工具初步调整及打磨模型,再进一步进行手动光滑曲面操作,使模型更拟合真实情况,最后进行划分轮廓线以及构造曲面片等处理,将各结构分别输出为 STP 格式的零件体模型。将各结构 STP 格式零件体模型导入 SolidWorks 中,

使用原点装配组合并构建装配体模型,而后按照真实情况构建 C5~6 椎间盘、C5 下终板、C6 上终板及双侧关节突关节软骨。椎间盘由包裹在外层的纤维环及内部的髓核构成(髓核和纤维环之比为 4:6)^[8],终板平均厚度为 0.6 mm^[9]。检查无异常干涉后,保存输出 STEP 格式的仿真实体模型。使用 ANSYS 软件读取仿真实体模型文件,赋予仿真模型各结构参数^[9-11](见表 1),并检查各结构接触符合真实情况。其中,小关节面采用非线性面对面滑动接触,摩擦因数为 0.01,其余各接触设置为绑定接触^[12]。使用仅限制拉伸的非线性弹簧原件模拟前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘突间韧带及关节囊韧带^[13](见表 1)。以正四面体为基础,对上述实体仿真模型进行网格划分,共得到网格单元 65 274 个,网格单元节点 12 0674 个。

表 1 颈椎各结构及椎间各韧带材料参数

Tab. 1 Material parameters of cervical structures and intervertebral ligaments

结构	E/MPa	ν	韧带	$K/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$
皮质骨	12 000	0.29	前纵韧带	16.0
松质骨	100	0.29	后纵韧带	25.4
终板	500	0.40	黄韧带	25.0
纤维环	3.4	0.40	棘突间韧带	7.74
髓核	1	0.49	关节囊韧带	33.6
关节突软骨	10	0.40		

注: E 为弹性模量; ν 为泊松比; K 为刚度。

1.3.2 不同范围小关节切除椎板开窗手术模型建立 模型验证成功后,对手术实际操作,模拟单侧椎板开窗伴小关节不同程度切除^[3,14](本文选定左侧为手术侧),当骨性结构被切除后,关节囊韧带相应附着点减少,相应比例关节囊韧带被移除。以正常模型为基础,通过 SolidWorks 软件使用草图、拉伸凸台、组合、删减等功能,建立以下 5 个模拟手术模型(见图 1):单纯 C5~6 左侧椎板开窗模型(模型 1)、C5~6 左侧椎板开窗+切除 25% 左侧小关节模型(模型 2)、C5~6 左侧椎板开窗+切除 50% 左侧小关节模型(模型 3)、C5~6 左侧椎板开窗+切除 75% 左侧小关节模型(模型 4)、C5~6 左侧椎板开窗+切除 100% 左侧小关节模型(模型 5)。

1.4 模型计算

1.4.1 载荷及边界条件加载 有限元仿真模型构

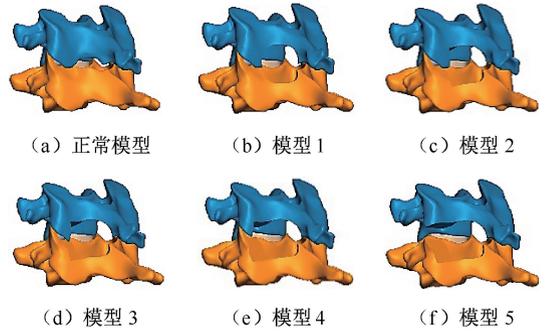


图 1 正常颈椎与不同范围小关节切除椎板开窗有限元模型

Fig. 1 Normal cervical spine and cervical laminectomy model with different ranges of facetectomy

(a) Normal model, (b) Model 1, (c) Model 2, (d) Model 3, (e) Model 4, (f) Model 5

建完成后,在 ANSYS 中对 C6 椎体下表面进行固定约束,在 C5 椎体上表面施加 75 N 垂直向下的压力负荷^[15],同时在该表面上根据右手螺旋法则沿 X、Y、Z 坐标轴正反方向分别向 6 个方向施加 1.5 N·m 纯扭力负荷^[16],其他约束条件不变,模拟前屈、后伸、左侧弯、右侧弯、左旋转及右旋转 6 种不同工况。

1.4.2 正常模型验证 利用 C5~6 颈椎节段间 ROM 为指标,将本文模型与既往文献的实验结果对照,验证模型在相同加载条件下的有效性。

1.4.3 各模型在不同工况下邻近椎体节段 ROM 及椎间盘应力极值测量 仿真模型中邻近椎体节段运动范围可认为是上下椎体的相对位移。成功加载载荷及边界条件后,选取 C5 椎体上表面中点构建远程点探针,使用命令流在 ANSYS 中直接得出远程点在空间坐标轴中的相对位移,并根据角度公式计算 ROM。使用 ANSYS 中 von Mises 应力测量工具测量不同工况下椎间盘区域最大 von Mises 应力。

2 结果

2.1 模型有效性验证

对比 Panjabi 等^[17]、Finn 等^[18]实验结果发现,本文所建正常模型在各工况下 ROM 处于正常值区间内(见图 2),证明了正常模型的有效性。

2.2 各组模型 ROM 比较

颈椎各方向 ROM 随着小关节切除范围增大呈

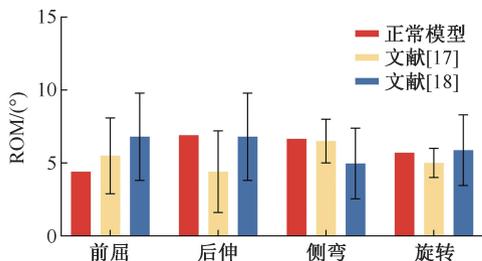


图2 正常模型不同工况下 ROM 与既往研究对比

Fig. 2 Comparison of ROM between normal model and previous studies under different working conditions

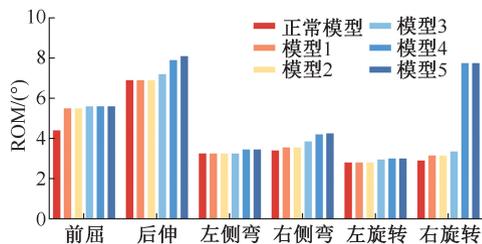


图3 各组模型不同工况下 ROM 比较

Fig. 3 Comparison of ROM for each group of models under different working conditions

上升趋势。当单纯行 C5~6 左侧椎板开窗后,模型 1 在前屈、右侧弯、右旋转工况下 ROM 较正常模型增加 25%、4%、9%,在后伸、左侧弯、左旋转工况下 ROM 未发生明显变化。当行 C5~6 左侧椎板开窗+切除 25% 左侧小关节后,模型 2 在不同工况下各方向 ROM 与模型 1 基本相同。当行 C5~6 左侧椎板开窗+切除 50% 左侧小关节后,模型 3 在 6 种不同工况下 ROM 与正常模型相比均有明显增加,较正常模型分别增加 27%、4%、3%、13%、5%、16%。当行 C5~6 左侧椎板开窗+切除 75% 左侧小关节后,模型 4 在不同工况下 ROM 进一步增加,较正常模型分别增加 27%、14%、6%、24%、7%、167%,特别是在右旋时,模型 4 因小关节滑脱而失去对活动的限制,导致 ROM 激增。当行 C5~6 左侧椎板开窗+切除 100% 左侧小关节后,模型 5 在后伸和右侧弯时 ROM 较模型 4 稍有增加,在前屈、左侧弯、左旋转时 ROM 与模型 4 相当,而在右旋转时与模型 4 一样,出现小关节滑脱(见表 2、图 3)。

表 2 各组模型不同工况下 ROM

Tab. 2 ROMs for each group of models under different working conditions 单位:(°)

工况	正常模型	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5
前屈	4.40	5.50	5.50	5.60	5.60	5.60
后伸	6.90	6.90	6.90	7.20	7.90	8.10
左侧弯	3.25	3.25	3.25	3.35	3.45	3.45
右侧弯	3.40	3.55	3.55	3.85	4.20	4.25
左旋转	2.80	2.80	2.80	2.95	3.00	3.00
右旋转	2.90	3.15	3.15	3.35	7.75	7.75

2.3 各组模型椎间盘 von Mises 应力分布情况

2.3.1 正常模型椎间盘 von Mises 应力分布情况

正常模型在 6 种不同工况下模拟相应方向运动时,椎间盘应力主要集中在相应运动方向侧,即当正

常模型在前屈活动时,椎间盘前方应力集中明显,椎间盘最大 von Mises 应力也出现在椎间盘前方。同时,无论何种工况下,颈椎间盘 von Mises 应力分布主要集中在外周的纤维环区域,而椎间盘中央髓核区域应力较小(见图 4)。

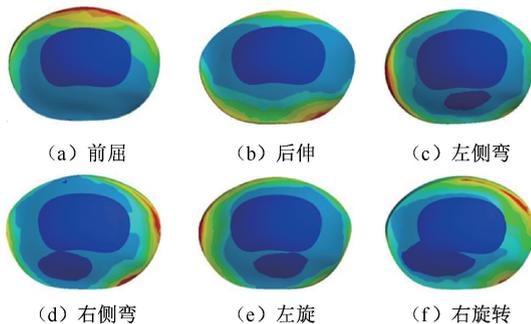


图 4 正常模型 C5~6 椎间盘不同工况下 von Mises 应力分布

Fig. 4 Von Mises stress distributions on C5-6 intervertebral disc of normal model under different working conditions (a) Flexion, (b) Extension, (c) Left lateral bending, (d) Right lateral bending, (e) Left rotation, (f) Right rotation

2.3.2 各组模型椎间盘 von Mises 应力极值比较

颈椎间盘 von Mises 应力极值随着小关节切除范围增大而增加。在前屈工况下,随着小关节切除增加,模型 1~5 颈椎间盘 von Mises 应力极值较正常模型分别增加 29%、29%、32%、33%、33%。在后伸工况下,随着小关节切除增加,模型 1~5 颈椎间盘 von Mises 应力极值较正常模型分别增加 3%、4%、4%、13%、29%。在左侧弯工况下,随着小关节切除增加,模型 1~5 颈椎间盘 von Mises 应力极值较正常模型分别增加 2%、2%、2%、3%、8%;在右侧弯工况下,随着小关节切除增加,模型 1~5 颈椎间盘 von Mises 应力极值较正常模型分别增加 1%、2%、

5%、32%、33%；在左旋转工况下，随着小关节切除增加，模型1~5 颈椎间盘 von Mises 应力极值较正常模型分别增加 0%、0%、9%、10%、12%；在右旋转工况下，随着小关节切除增加，模型1~5 颈椎间盘 von Mises 应力极值较正常模型分别增加 0%、2%、5%、130%、138%（见表3、图5）。

表3 各组模型不同工况下椎间盘 von Mises 应力极值
Tab. 3 Von Mises stress extremum of models in each group under different working conditions 单位:MPa

工况	正常模型	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5
前屈	2.256	2.918	2.922	2.985	2.991	2.995
后伸	2.517	2.589	2.618	2.626	2.857	3.253
左侧弯	3.130	3.198	3.199	3.202	3.236	3.382
右侧弯	3.042	3.073	3.103	3.203	4.021	4.045
左旋转	2.933	2.933	2.935	3.195	3.221	3.288
右旋转	2.756	2.765	2.821	2.901	6.345	6.567

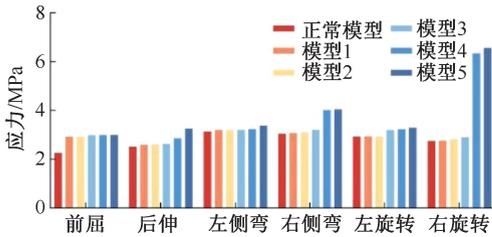


图5 各组模型不同工况下椎间盘 von Mises 应力极值比较

Fig. 5 Comparison of von Mises stress extremum for models in each group under different working conditions

3 讨论

CSS 是脊柱外科常见疾病，且近年来发病率呈逐渐上升趋势^[19]。开放颈椎椎板切除减压是治疗单节段 CSS 的有效手术方式。然而，传统开放颈椎椎板切除存在诸如严重破坏颈部结构完整性与稳定性、手术并发症多、术后易瘢痕形成等问题^[20]。相比之下，脊柱内镜下颈椎椎板开窗术能够在实现颈椎管充分减压的同时，最大限度地减少正常组织结构的损伤，更好地维持颈椎正常生物力学特性^[21]。

颈椎小关节成形是获得足够手术操作空间和良好减压效果的关键，但小关节过度切除将导致颈椎节段稳定性丧失。Zdeblick 等^[22]在尸体模型上发现，颈椎椎板切除时，超过 50% 关节面切除会导

致颈椎屈曲和旋转时稳定性丧失。而 Nowinski 等^[23]的尸体研究表明，当涉及多节段颈椎椎板切除时，仅 25% 关节面切除就会对颈椎稳定性产生影响。然而，关于颈椎内镜手术中不同范围小关节切除对颈椎生物力学情况和稳定性的影响却鲜有报道。因此，本文通过建立内镜下颈椎椎板开窗有限元模型，模拟开窗时单侧小关节分级切除，比较和分析内镜下单侧小关节不同范围切除后生物力学情况。本文还特别模拟了单纯开窗的手术方式，分析对比正常模型及小关节切除开窗手术模型，以排除开窗术中椎板成形的影响。

正常颈椎模型模拟不同方向运动时，颈椎间盘因受到上下椎体相对位移发生的挤压产生形变，自上而下的应力传导则集中在椎间盘形变区域，即应力主要集中在相应运动方向侧。同时，椎间盘中纤维环组织弹性模量远大于髓核组织，由于应力遮挡效应存在，更多应力被集中到外层纤维环组织上，这与临床中观察到的纤维环破裂导致髓核突出的现象相印证^[24]。本文发现，当对一侧颈椎椎板行单纯开窗后，颈椎节段前屈活动范围增加明显，推测原因是椎板开窗时必须去除黄韧带实现充分减压，这将削弱颈椎后部韧带对屈曲活动的限制作用^[25]。颈椎椎板开窗后，随着切除一侧小关节范围逐渐增加，颈椎节段各方向 ROM 均有所增加，特别是后伸、右侧弯和右旋时 ROM 增加明显，当一侧小关节切除超过 1/2 时，上述 3 种工况下颈椎出现过度活动。颈椎小关节是由矢状面平行的上、下关节突及其中软骨及纤维囊共同构成的椎体后方力学结构，其限制颈椎椎体冠状轴方向运动及过度后伸，并防止椎体相互半脱位^[26-27]。当颈椎小关节被过度破坏，相应节段在后伸、侧弯及旋转时 ROM 增加明显。本文还发现，随着一侧颈椎小关节被切除范围逐渐增加，相应节段椎间盘在 6 种工况下所受应力呈上升趋势，当一侧颈椎小关节切除超过 1/2 时，椎间盘在后伸、右侧弯和右旋转时所受应力明显增加。颈椎小关节是脊柱三柱理论中后柱的重要组成部分，承载自上而下的应力传导，当一侧小关节被过度破坏后，更多的应力将被传导至前柱及中柱，出现椎间盘区域应力负荷增加现象^[28]。

颈椎小关节作为椎体重要的力学结构，具有维持颈椎节段稳定性的作用^[29]。在颈椎后路椎管减

压手术中,往往需要去除部分小关节以获得更充足的操作空间及更充分的减压范围,这势必会改变颈椎正常力学结构,甚至导致术后医源性不稳的发生。本文结果表明,小关节在颈椎节段 ROM 及应力承载上具有重要作用,超过 1/2 颈椎小关节切除将导致颈椎节段 ROM 及椎间盘区域应力显著增加。在传统颈椎后路开放减压手术中,难以精确控制小关节切除,且往往需要过度剥离小关节后方软组织以充分暴露术区结构,这可能会损伤到小关节中关节囊韧带等软性结构。Zdeblick 等^[30]关于单纯颈椎小关节关节囊切除而不破坏骨性结构的研究发现,即使是单纯切除一侧超过 50% 关节囊,也会显著增加颈椎节段 ROM,破坏颈椎正常生物力学结构,不利于术后快速康复及颈椎生理稳定性的维持。脊柱内镜系统一方面可放大镜下视野,同时水介质的冲洗及止血下可清晰分辨手术区域解剖结构,术中配合内镜器械及透视技术,可实现精准可控的减压,而无需过度损伤正常神经肌肉韧带等组织,有利于术后快速康复及维持颈椎节段稳定性。此外,在不过度破坏颈椎小关节情况下,颈椎椎板扩大开窗范围并不会影响颈椎节段稳定性。因此,在临床中为实现颈椎管充分减压应尽可能扩大椎板开窗范围,达到黄韧带止点被认为是开窗范围最基本的要求。临床实践中还发现,对于重度中央管狭窄或椎间孔严重狭窄患者,颈椎小关节的有限切除往往不足以实现充分减压,而过度的小关节切除不仅会导致术后颈椎医源性不稳,甚至可能加速颈椎间盘退变。对于此类患者,若充分减压后无法保留足够颈椎小关节以维持颈椎正常生物力学稳定性,建议以后柱结构融合固定作为辅助,以避免颈椎术后医源性不稳及椎间盘突出等并发症^[31]。

4 结论

本文通过构建脊柱内镜下颈椎椎板开窗术有限元模型,分析不同范围小关节切除对术后颈椎责任节段生物力学稳定性的影响。结果表明,当一侧颈椎小关节切除超过 1/2 时,颈椎节段会出现过度活动,相应椎间盘应力明显增加。因此,进行脊柱内镜下颈椎椎板开窗术时,应尽量保留颈椎小关节在 1/2 以内,以维持颈椎节段的正常生物力学稳定性。值得注意的是,本文采用简化颈椎有限元模

型,用于分析标准化椎板开窗手术操作对颈椎稳定性的影响,而实际临床中患者存在个体差异性。因此,在制定手术方案时,应充分考虑具体情况,以确保最佳治疗效果。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:杨广南负责研究设计、研究实施、数据分析及论文撰写;刘江、张晗硕协助研究实施;蒋强负责数据采集及论文修改;李土胜、马靖博负责协助数据分析;丁宇负责研究设计指导、论文写作指导和论文修改。

参考文献:

- [1] INVESTIGATORS O, CHIKUDA H, KOYAMA Y, et al. Effect of early vs delayed surgical treatment on motor recovery in incomplete cervical spinal cord injury with preexisting cervical stenosis: A randomized clinical trial [J]. *JAMA Netw Open*, 2021, 4 (11): e2133604.
- [2] ITA ME, ZHANG S, HOLSGROVE TP, et al. The physiological basis of cervical facet-mediated persistent pain: Basic science and clinical challenges [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2017, 47 (7): 450-461.
- [3] 丁宇, 蒋强, 卢正操, 等. 全脊柱内镜椎板开窗减压术治疗颈椎管狭窄症[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2022, 37 (11): 1121-1125.
- [4] KIM J, HEO DH, LEE DC, et al. Biportal endoscopic unilateral laminotomy with bilateral decompression for the treatment of cervical spondylotic myelopathy [J]. *Acta Neurochir*, 2021, 163 (9): 2537-2543.
- [5] SEO J, SUK KS, KWON JW, et al. Cervical foraminal stenosis as a risk factor for cervical kyphosis following cervical laminoplasty [J]. *Spine J*, 2022, 22 (8): 1271-1280.
- [6] 黄菊英, 黄勇, 张璨, 等. 羊颈椎半椎板切除、全椎板切除及椎板回植成形的实验研究[J]. *医用生物力学*, 2021, 36 (6): 929-934.
- [7] HUANG JY, HUANG Y, ZHANG C, et al. Experimental study of hemilaminectomy, total laminectomy and recapping laminoplasty of cervical spine in sheep [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36 (6): 929-934.
- [7] 张童童, 董恩纯, 郑纪豹, 等. 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[J]. *医用生物力学*, 2021, 36 (2): 177-183.
- [7] ZHANG TT, DONG EC, ZHENG JB, et al. Optimization design and evaluation of three-dimensional printed PEEK cervical interbody fusion cage with adjustable height [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36 (2): 177-183.

- [8] CAI XY, SANG D, YUCHI CX, *et al.* Using finite element analysis to determine effects of the motion loading method on facet joint forces after cervical disc degeneration [J]. *Comput Biol Med*, 2020(116): 103519.
- [9] MANICKAM PS, ROY S. The biomechanical study of cervical spine: A finite element analysis [J]. *Int J Artif Organs*, 2022, 45 (1): 89-95.
- [10] MO ZJ, ZHAO YB, WANG LZ, *et al.* Biomechanical effects of cervical arthroplasty with U-shaped disc implant on segmental range of motion and loading of surrounding soft tissue [J]. *Eur Spine J*, 2014, 23 (3): 613-621.
- [11] 黄吉军, 张恒柱, 王永祥, 等. 正常颈椎有限元模型建立及有效性验证[J]. *中国医学物理学杂志*, 2023, 40 (4): 487-495.
- [12] YUCHI CX, SUN G, CHEN C, *et al.* Comparison of the biomechanical changes after percutaneous full-endoscopic anterior cervical discectomy versus posterior cervical foraminotomy at C5-C6: A finite element-based study [J]. *World Neurosurg*, 2019(128): e905-e911.
- [13] YOGANANDAN N, KUMARESAN S, PINTAR FA. Geometric and mechanical properties of human cervical spine ligaments [J]. *J Biomech Eng*, 2000, 122 (6): 623-629.
- [14] WANG QA, GUO C, SUN MJ, *et al.* Three-dimensional spiral CT observation of the facet joints of the lower cervical spine and its clinical significance [J]. *Eur Spine J*, 2021, 30 (6): 1536-1541.
- [15] 郝韵腾, 史君, 刘宇航, 等. 切除不同范围钩突后颈椎关节突的有限元对比分析[J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27 (18): 2789-2796.
- [16] FINN MA, SAMUELSON MM, BISHOP F, *et al.* Two-level noncontiguous versus three-level anterior cervical discectomy and fusion: A biomechanical comparison [J]. *Spine*, 2011, 36 (6): 448-53.
- [17] PANJABI MM, CRISCO JJ, VASAVADA A, *et al.* Mechanical properties of the human cervical spine as shown by three-dimensional load-displacement curves [J]. *Spine*, 2001, 26 (24): 2692-2700.
- [18] FINN MA, BRODKE DS, DAUBS M, *et al.* Local and global subaxial cervical spine biomechanics after single-level fusion or cervical arthroplasty [J]. *Eur Spine J*, 2009, 18 (10): 1520-1527.
- [19] 卜晋辉, 许龙, 王振飞, 等. 可视化环锯减压在老年颈椎管狭窄症合并骨质疏松全脊柱内镜术中应用的效果观察[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2023, 38 (7): 673-677.
- [20] KIM BJ, CHO SM, HUR JW, *et al.* Kinematics after cervical laminoplasty: Risk factors for cervical kyphotic deformity after laminoplasty [J]. *Spine J*, 2021, 21 (11): 1822-1829.
- [21] CARR DA, ABECASSIS IJ, HOFSTETTER CP. Full endoscopic unilateral laminotomy for bilateral decompression of the cervical spine: Surgical technique and early experience [J]. *J Spine Surg*, 2020, 6 (2): 447-456.
- [22] ZDEBLICK TA, ZOU D, WARDEN KE, *et al.* Cervical stability after foraminotomy. A biomechanical *in vitro* analysis [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1992, 74 (1): 22-27.
- [23] NOWINSKI GP, VISARIUS H, NOLTE LP, *et al.* A biomechanical comparison of cervical laminoplasty and cervical laminectomy with progressive facetectomy [J]. *Spine*, 1993, 18 (14): 1995-2004.
- [24] 欧阳钧, 钱蕾, 孙培栋. 脊柱生物力学研究的回顾与展望 [J]. *医用生物力学*, 2021, 36 (2): 169-176.
- [24] OUYANG J, QIAN L, SUN PD. Retrospect and prospect on researches of spine biomechanics [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36 (2): 169-176.
- [25] CORNAZ F, WIDMER J, FARSHAD-AMACKER NA, *et al.* Intervertebral disc degeneration relates to biomechanical changes of spinal ligaments [J]. *Spine J*, 2021, 21 (8): 1399-1407.
- [26] KWEE RM, KWEE TC. Imaging of facet joint diseases [J]. *Clin Imaging*, 2021(80): 167-179.
- [27] JONAS R, DEMMELMAIER R, WILKE HJ. Influences of functional structures on the kinematic behavior of the cervical spine [J]. *Spine J*, 2020, 20 (12): 2014-2024.
- [28] GUPTA S, XIAO R, FAINOR M, *et al.* Level dependent alterations in human facet cartilage mechanics and bone morphometry with spine degeneration [J]. *J Orthop Res*, 2022, 41 (3): 674-683.
- [29] 郭冲, 王秋安, 孟强, 等. 成人颈椎关节突关节螺旋 CT 三维参数的测定[J]. *中国微创外科杂志*, 2021, 21 (2): 145-149.
- [30] ZDEBLICK TA, ABITBOL JJ, KUNZ D N, *et al.* Cervical stability after sequential capsule resection [J]. *Spine*, 1993, 18 (14): 2005-2008.
- [31] REVESZ DF, CHARALAMPIDIS A, GERDHEM P. Effectiveness of laminectomy with fusion and laminectomy alone in degenerative cervical myelopathy [J]. *Eur Spine J*, 2022, 31 (5): 1300-1308.