

## . 实验研究 .

## 齿状突切除术后两种后路内固定方式的生物力学比较

谢天浩 马生辉 丁慧超 姚国杰 宋 健 徐国政 马廉亭

**【摘要】目的** 比较齿状突切除术后枕骨~颈<sub>2</sub>内固定及颈<sub>1-2</sub>内固定的生物力学特点,为临床选择内固定治疗方案提供生物力学依据。**方法** 基于前期已构建的带枕骨全颈椎有限元模型,进一步构建齿状突切除模型,继而在齿状突切除模型中分别加载枕骨~颈<sub>2</sub>内固定及颈<sub>1-2</sub>内固定构建两种内固定模型,在ABAQUS 6.12.-1软件中计算手术模型各个节段前屈-后伸、左右旋转及左右侧屈的活动度及内固定应力情况。**结果** 齿状突切除术可引起枕骨~颈<sub>1</sub>后伸及侧弯活动度较正常模型增加,均增加超过50%。枕骨~颈<sub>2</sub>内固定模型及颈<sub>1-2</sub>内固定模型颈<sub>1-2</sub>节段的内固定效果基本相同,均可明显限制颈<sub>1-2</sub>的活动度。枕骨~颈<sub>2</sub>内固定可明显限制枕骨~颈<sub>1</sub>节段各方向活动度,使其处于相对固定状态;而颈<sub>1-2</sub>内固定对枕骨~颈<sub>1</sub>节段无明显限制作用。**结论** 齿状突切除后枕骨~颈<sub>1</sub>节段稳定性存在一定程度下降,而枕骨~颈<sub>2</sub>内固定会造成枕颈活动度严重下降;对于术前枕骨~颈<sub>1</sub>节段相对稳定的病人,可仅行颈<sub>1-2</sub>节段内固定,术后动态复查X线检查严密随访枕骨~颈<sub>1</sub>节段的稳定性;对于术前枕骨~颈<sub>1</sub>已经存在畸形或存在不稳定因素(如关节脱位等)的病人,应采用枕颈固定融合。

**【关键词】** 颅颈交界区;齿状突切除术;脊柱稳定性;枕骨~颈<sub>2</sub>内固定;颈<sub>1-2</sub>内固定;生物力学

**【文章编号】** 1009-153X(2020)07-0447-04 **【文献标志码】** A **【中国图书资料分类号】** R 651

## Biomechanical comparison of two posterior internal fixation methods after dentectomy

XIE Tian-hao, MA Sheng-hui, DING Hui-chao, YAO Guo-jie, SONG Jian, XU Guo-zheng, MA Lian-ting. Department of Neurosurgery, General Hospital of Central Theater Command, PLA, Wuhan 430070, China

**【Abstract】 Objective** To compare the biomechanical characteristics of occipito (C0)-cervical 2 (C2) fixation and posterior C1~C2 fixation after the odontoidectomy in order to provide biomechanical basis for the clinical selection of internal fixation treatment plan. **Methods** Based on the pre-constructed finite element model of the cervical spine with occipital bone, the odontoidectomy model was further constructed, and then the C0~C2 fixation and C1~C2 fixation were respectively loaded in the odontoidectomy model to construct two kinds of internal fixation model. The flexion-extension, left-right rotation, left-right rotation and left-right lateral flexion activity and internal fixation stress of each segment of the surgical model were calculated using the ABAQUS 6.12.-1 software. **Results** The motion of C0~C1 in extension and lateral bending increased by more than 50% after the odontoidectomy than the intact model. The motion of the C0~C2 fixation model and the C1~C2 fixation model were almost the same, both with a low mobility. C0~C2 fixation can significantly reduce the range of motion in all directions at C0~C1 level, while the C1~C2 fixation model showed no effect on C0~C1. **Conclusions** The stability of C0~C1 will decrease to a certain extent after the odontoidectomy, and C0~C1 fixation will cause significant decrease in the occiput-cervical mobility. Therefore, we suggest that C1~C2 fixation should be performed for patients with preoperative stable C0~C1, and the follow up of postoperative X-ray should be performed to observe the stability of C0~C1. For patients with pre-exist deformity or unstable factors of C0~C1, occipito-cervical fixation and fusion should be used.

**【Key words】** Craniocervical junction; Odontectomy; Spinal stability; Occipital-cervical 2 fixation; Cervical 1~2 fixation; Biomechanics characteristics

齿状突切除术后极易发生枕寰枢失稳,一般主张同期行内固定融合术<sup>[1,2]</sup>。因治疗比较困难且缺乏相关的基础研究,目前尚没有统一的内固定治疗方

案<sup>[3]</sup>。不少学者主张采用后路内固定融合术,也有学者主张后路颈<sub>1</sub>侧块钉+颈<sub>2</sub>椎弓根钉固定,还有学者采用后路枕颈融合术<sup>[1,2,4]</sup>。本文基于前期已构建的带枕骨全颈椎有限元模型<sup>[5]</sup>,分析齿状突切除术后枕骨~颈<sub>1</sub>的生物力学改变,为临床选择内固定治疗方案提供参考。

## 1 材料与方法

## 1.1 正常带枕骨全颈椎有限元模型的构建及验证

doi:10.13798/j.issn.1009-153X.2020.07.011

基金项目:国家自然科学基金(81701355);武汉市中青年医学骨干人才培养工程

作者单位:430070 武汉,中国人民解放军中部战区总医院神经外科(谢天浩、马生辉、丁慧超、姚国杰、宋 健、徐国政、马廉亭)

通讯作者:马廉亭, E-mail: mlt1937@163.com

基于健康男性志愿者(25岁,身高175 cm,体重72 kg)枕颈区CT构建带枕骨全颈椎有限元模型,将CT的DICOM数据导入Mimics 17软件(Materialise Inc., Leuven, Belgium),构建三维点云模型。进而导入Geomagic Studio 12.0软件(Geomagic Inc., Research Triangle Park, NC, USA)进行曲面构建及曲面优化,从而构建可编辑的NURBS全颈椎曲面模型(枕骨~胸<sub>1</sub>)。将全颈椎曲面模型导入Hyperworks v10.0软件(Altair engineering Inc., Executive Park, CA, USA)进行实体网格划分、韧带及椎间盘构建、材料属性赋值、定义关节面接触以及设定载荷和边界条件等过程,从而得到枕骨~胸<sub>1</sub>的全颈椎实体模型。最终构建模型包含颅颈交界区及颈椎所有解剖学结构,包括椎体、椎间盘、所有韧带、小关节等,同时各解剖结构均具有正确的材料属性,且通过有限元验证<sup>[5]</sup>。最终所得模型见图1。

1.2 不同内固定模型的建立

1.2.1 齿状突切除模型的构建 依照临床中齿状突切除术的操作过程,切除颈<sub>1</sub>椎体前弓及与其相连的颈<sub>1-2</sub>前纵韧带及寰枕前膜,切除齿状突及与齿状突紧密相连的翼状韧带和齿状突尖韧带及齿状突后方的横韧带。

1.2.2 颈<sub>1-2</sub>内固定模型的建立 按照临床中后路颈<sub>1</sub>

侧块钉+颈<sub>2</sub>椎弓根钉的使用方法,建立后路颈<sub>1</sub>侧块钉+颈<sub>2</sub>椎弓根钉模型,螺钉的直径为3.5 mm(图2A)。然后,在齿状突切除模型的基础上,按照文献及临床实际中内固定的方法,建立齿状突切除术后颈<sub>1</sub>侧块钉+颈<sub>2</sub>椎弓根钉有限元模型(图2B、2C)。

1.2.3 枕骨~颈<sub>2</sub>内固定模型 按照临床中枕颈融合的使用方法,建立枕颈融合内固定模型,椎弓根螺钉的直径为3.5 mm(图3A)。然后,在齿状突切除模型的基础上,按照枕颈融合内固定的方法,建立齿状突切除术后枕颈融合术(枕骨~颈<sub>1</sub>)有限元模型(图3B、3C)。

1.3 手术模型生物力学的分析 载荷及边界条件和正常模型相同。边界条件为胸<sub>1</sub>椎体下缘全部节点各方向固定,位移为0。载荷条件为在枕骨上表面对各种手术模型分别施以三个方向(矢状方向、轴周方向及冠状方向)1.5 Nm的纯扭矩载荷,在ABAQUS



图1 全颈椎有限元模型的侧位观

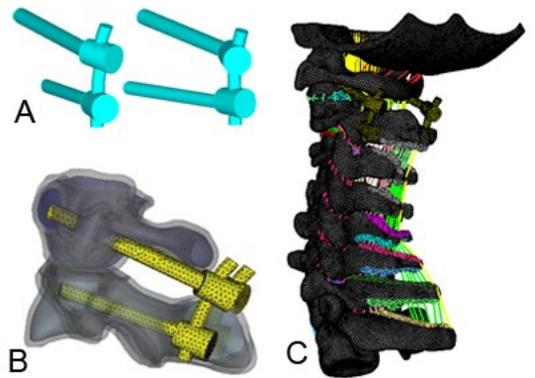


图2 颈<sub>1-2</sub>内固定模型

A. 后路颈<sub>1</sub>侧块钉及颈<sub>2</sub>椎弓根螺钉模型;B. 齿状突切除术后颈<sub>1</sub>侧块钉+颈<sub>2</sub>椎弓根钉有限元模型;C. 模型的整体图

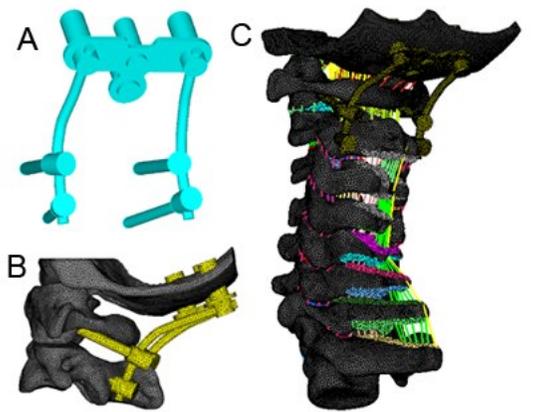


图3 枕骨~颈<sub>1</sub>内固定模型

A. 枕颈融合内固定模型;B. 齿状突切除术后枕颈融合术模型的侧位观;C. 模型的整体图

6.12.-1 软件中计算手术模型各个节段前屈-后伸、左右旋转及左右侧屈的活动度及内固定应力情况, 所得结果同正常模型的结果进行对比。

## 2 结果

2.1 齿状突切除术后两种内固定方式对上颈椎活动度的影响 齿状突切除术可引起枕骨~颈<sub>1</sub>及颈<sub>1-2</sub>活动度在各个方向发生变化, 尤其是颈<sub>1-2</sub>节段。颈<sub>1-2</sub>后伸及侧弯活动度较正常模型明显增加, 均增加超过100%; 前屈活动度亦明显增加, 较正常模型增加55%。枕骨~颈<sub>1</sub>后伸及侧弯较正常模型明显增加, 均增加超过50%。枕骨~颈<sub>2</sub>内固定模型及颈<sub>1-2</sub>内固定模型颈<sub>1-2</sub>节段的内固定效果基本相同。枕骨~颈<sub>2</sub>内固定模型枕骨~颈<sub>1</sub>节段各方向活动度明显减低, 处于相对固定的状态; 而颈<sub>1-2</sub>内固定模型枕骨~颈<sub>1</sub>节段各方向活动度基本同齿状突切除模型。四种模型颈<sub>2-7</sub>节段的活动度基本相同。

在矢状方向活动度方面, 正常模型、齿状突切除模型、枕骨~颈<sub>2</sub>内固定模型、颈<sub>1-2</sub>内固定模型的枕骨~颈<sub>1</sub>节段前屈活动度分别为10.6°、9.6°、0.0002°、10.7°, 枕骨~颈<sub>1</sub>节段后伸活动度分别为13.8°、22.9°、0.09°、21.0°, 颈<sub>1-2</sub>节段前屈活动度分别为16.1°、25.3°、0.69°、0.93°, 颈<sub>1-2</sub>节段后伸活动度分别为10.8°、24.7°、3.0°、4.8°。同正常模型相比, 齿状突切除模型颈<sub>1-2</sub>节段后伸活动度增加128.2%, 而两种内固定模型后伸活动度明显降低; 齿状突切除模型和颈<sub>1-2</sub>内固定模型均可造成枕骨~颈<sub>1</sub>节段的后伸活动度明显增加, 分别增加65.9%和52.1%, 而枕骨~颈<sub>2</sub>内固定模型则可使枕骨~颈<sub>1</sub>节段的前屈及后伸活动度接近0°。

在侧弯方向活动度上, 正常模型、齿状突切除模型、枕骨~颈<sub>2</sub>内固定模型、颈<sub>1-2</sub>内固定模型的枕骨~颈<sub>1</sub>节段左侧弯+右侧弯活动度分别为6.7°、10.6°、2.1°、11.6°, 颈<sub>1-2</sub>节段左侧弯+右侧弯活动度分别为9.3°、23.9°、1.6°、1.6°。

在轴向旋转方向, 正常模型、齿状突切除模型、枕骨~颈<sub>2</sub>内固定模型、颈<sub>1-2</sub>内固定模型枕骨~颈<sub>1</sub>节段左旋转+右旋转活动度分别为19.1°、31.3°、0.5°、30.3°, 颈<sub>1-2</sub>节段左旋转+右旋转活动度分别为68.0°、90.3°、5.5°、6.7°。

2.2 植入物最大应力 枕骨~颈<sub>2</sub>内固定模型植入物最大应力位于后伸方向颈<sub>2</sub>螺钉, 其他方向应力较低。颈<sub>1-2</sub>内固定模型植入物较大应力位于后伸及轴向旋转方向, 后伸方向的最大应力部位同样位于颈<sub>2</sub>

螺钉。见表1。

## 3 讨论

颅颈交界区的稳定性是由上颈椎复杂的关节和韧带结构所决定的, 由于没有椎间盘结构<sup>[6]</sup>, 韧带对颅颈交界区的稳定性起着至关重要的作用。齿状突是维持颈<sub>1-2</sub>正常活动度的关键结构。正常情况下, 齿状突受腹侧颈<sub>1</sub>前弓和背侧横韧带所限制而保持颈<sub>1-2</sub>的稳定性。一旦切除齿状突, 颈<sub>1</sub>前弓和横韧带则不能通过齿状突来限制颈<sub>2</sub>的过度活动。此外, 齿状突切除包括颈<sub>1</sub>前弓、翼状韧带、齿状突尖韧带、覆膜、颈<sub>1-2</sub>前纵韧带、寰枕前膜等结构<sup>[7]</sup>。这些结构是维持颅颈交界区稳定的重要结构。因此, 基于以上解剖学基础, 齿状突切除术极可能造成颅颈交界区的不稳。Dickman等<sup>[8]</sup>应用8个狒狒和5个人类尸体标本分析经口齿状突切除术对上颈椎的生物力学影响, 结果发现, 齿状突切除术后颈<sub>1-2</sub>节段前屈、后伸和侧弯的活动度明显增加。本研究结果显示齿状突切除术后颈<sub>1-2</sub>前屈活动度增加57.0%, 后伸活动度增加128.2%, 侧弯活动度增加178%, 轴向旋转活动度增加32.8%。这与Dickman等<sup>[8]</sup>结果相似。

颅颈交界区活动度的异常增加意味着术后脊柱的不稳定。Dickman等<sup>[7]</sup>研究发现70%的病人在经口齿状突切除术后需要行内固定治疗。后路枕颈融合是齿状突切除术后最常推荐的固定技术<sup>[9-11]</sup>, 也有学者建议颈<sub>1-2</sub>固定或融合<sup>[9, 12]</sup>。本文结果显示, 齿状突切除术后颈<sub>1-2</sub>节段活动度增加非常显著, 因此进行颈<sub>1-2</sub>的固定是非常必要的。Chang等<sup>[13]</sup>研究枕颈融合伴或不伴颈<sub>1-2</sub>固定和单纯颈<sub>1-2</sub>固定对齿状突切除术减压程度的影响, 结果发现后路固定伴颈<sub>1-2</sub>固定的减压效果更好。这也从侧面反映颈<sub>1-2</sub>固定的重要性。

然而, 对于枕骨~颈<sub>1</sub>节段不稳尚没有一个标准的生物力学研究与评价。Dickman等<sup>[8]</sup>并没有分析枕骨~颈<sub>1</sub>的活动度, 既往也没有研究关注齿状突切除术后枕骨~颈<sub>1</sub>的稳定性。本研究结果发现枕骨~颈<sub>1</sub>的生物力学变化并没有颈<sub>1-2</sub>显著, 但在后伸和侧

表1 两种内固定模型各方向最大应力值(MPa)

活动方向	颈 <sub>1-2</sub> 内固定模型	枕骨~颈 <sub>2</sub> 内固定模型
后伸	255	279.5
前屈	109.7	119.3
侧弯	174.4	130.65
轴向旋转	230.7	109.9

弯的活动度也较正常模型明显增加(均超过 50%)。这种异常的活动度增加是否意味着需行枕骨~颈<sub>1</sub>固定是一个值得商榷的问题,因此本研究进一步分析枕骨~颈<sub>2</sub>内固定模型及颈<sub>1-2</sub>内固定模型的生物力学特点,结果发现,枕骨~颈<sub>2</sub>内固定模型及颈<sub>1-2</sub>内固定模型颈<sub>1-2</sub>节段的内固定效果基本相同,均可有效维持颈<sub>1-2</sub>的稳定性,并明显限制颈<sub>1-2</sub>的活动度;与齿状突切除模型相比,颈<sub>1-2</sub>内固定模型枕骨~颈<sub>1</sub>节段活动度基本相同,而枕骨~颈<sub>2</sub>内固定模型枕骨~颈<sub>1</sub>节段活动度则显著减少,尤其是前屈活动度几乎为零。因此,枕骨~颈<sub>1</sub>固定意味着枕颈活动度的丧失,而不固定则稳定性会存在一定程度下降。因此,我们认为对于齿状突切除术前枕骨~颈<sub>1</sub>节段相对稳定的病人,可仅行颈<sub>1-2</sub>节段内固定,但术后应严密随访,必要时二期固定;而对于术前枕骨~颈<sub>1</sub>已经存在失稳的病人,则应采用枕骨~颈<sub>2</sub>固定融合的方案。

本文有关内固定模型的应力分析显示两种内固定模型均在后伸时产生最大的应力,最大应力部位均位于颈<sub>2</sub>椎弓根螺钉。这提示术后应尽量避免过度后伸,从而避免应力过大致螺钉松动甚至断裂。

综上所述,齿状突切除后会造颈<sub>1-2</sub>的稳定性严重丧失,术后行颈<sub>1-2</sub>节段内固定非常必要。齿状突切除后枕骨~颈<sub>1</sub>节段的稳定性会存在一定程度下降,而枕骨~颈<sub>2</sub>内固定会造成枕颈活动度严重下降,因此,我们建议对于术前枕骨~颈<sub>1</sub>节段相对稳定的病人,可仅行颈<sub>1-2</sub>节段内固定,术后动态复查 X 线检查等严密随访枕骨~颈<sub>1</sub>节段的稳定性;而对于枕骨~颈<sub>1</sub>已经存在畸形或存在不稳定因素(如关节脱位等)的病人,应采用枕颈固定融合。

【参考文献】

[1] Mummaneni PV, Haid RW. Transoral odontoidectomy [J]. Neurosurgery, 2005, 56(5): 1045-1050.  
 [2] Yu Y, Wang X, Zhang X, et al. Endoscopic transnasal odontoidectomy to treat basilar invagination with congenital osseous malformations [J]. Eur Spine J, 2013, 22(5): 1127-1136.  
 [3] Goel A. Progressive basilar invagination after transoral

odontoidectomy: treatment by atlantoaxial facet distraction and craniovertebral realignment [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2005, 30(18): E551-555.  
 [4] Lu G, Passias PG, Li G, et al. Endoscopically assisted anterior release and reduction through anterolateral retropharyngeal approach for fixed atlantoaxial dislocation [J]. Spine, 2010, 35(5): 544-551.  
 [5] 谢天浩,卢玉昭,王在贵,等.带有枕骨全颈椎三维有限元模型的构建及生物力学分析[J].中国临床神经外科杂志,2019,24(11):672-675.  
 [6] Brolin K, Halldin P. Development of a finite element model of the upper cervical spine and a parameter study of ligament characteristics [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2004, 29(4): 376-385.  
 [7] Dickman CA, Locantoro J, Fessler RG. The influence of transoral odontoid resection on stability of the craniovertebral junction [J]. J Neurosurg, 1992, 77(4): 525-530.  
 [8] Dickman CA, Crawford NR, Brantley AG, et al. Biomechanical effects of transoral odontoidectomy [J]. Neurosurgery, 1995, 36(6): 1146-1152.  
 [9] Abbritti RV, Esposito F, Angileri FF, et al. Endoscopic endonasal odontoidectomy and posterior fusion in a single-stage surgery: description of surgical technique and outcome [J]. Acta Neurochir Suppl, 2019, 125: 197-207.  
 [10] Smith JS, Shaffrey CI, Abel MF, et al. Basilar invagination [J]. Neurosurgery, 2010, 66(3 Suppl): 39-47.  
 [11] Menezes AH. Surgical approaches: postoperative care and complications "transoral- transpalatopharyngeal approach to the craniocervical junction" [J]. Childs Nerv Syst, 2008, 24(10): 1187-1193.  
 [12] Ottenhausen M, Alalade AF, Rumalla K, et al. Quality of life after combined endonasal endoscopic odontoidectomy and posterior suboccipital decompression and fusion [J]. World Neurosurg, 2018, 116: e571-e576.  
 [13] Chang PY, Yen YS, Wu JC, et al. The importance of atlantoaxial fixation after odontoidectomy [J]. J Neurosurg Spine, 2016, 24(2): 300-308.

(2020-06-11 收稿,2020-06-20 修回)