

基于三维有限元分析寰枢关节紊乱症对上颈椎生物力学平衡的影响

李锐¹ 张兆杰^{1△} 张琰朕¹ 张世民¹ 王朝鲁¹ 刘劲松¹
黎作旭¹ 刘昱彰¹ 马明¹ 靳蛟¹ 杨灿¹ 黄菊英²

[摘要] 目的:分析寰枢关节紊乱症患者上颈椎的生物力学特征,探讨骨错缝在寰枢关节紊乱症发病中的作用。方法:基于 1 例寰枢关节紊乱症患者的影像资料构建有限元模型并验证其有效性,分析关节面、椎间盘、肌肉的应力情况,并与正常颈椎的有限元模型进行比较。结果:与正常模型相比,寰枢关节紊乱症模型的整体应力分布不均,模型右侧应力大于左侧;寰枢关节紊乱症有限元模型的寰枢外侧关节、椎间盘、肌肉有明显的应力分布不均匀现象,偏歪侧的寰枢侧方关节、椎间盘后侧、头后大直肌止点处有明显的应力集中现象。结论:寰枢关节紊乱症会破坏上颈椎整体的力学平衡,导致关节面、椎间盘和肌肉的应力分布不均匀,可能导致颈痛和脊柱退变。

[关键词] 有限元;寰枢关节紊乱症;生物力学;寰枢侧方关节;骨错缝

[中图分类号] R681.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1005-0205(2024)03-0059-06

DOI: 10.20085/j.cnki.issn1005-0205.240312

Biomechanical Analysis of Atlantoaxial Joint Dysfunction Syndrome Based on Three-Dimensional Finite Element Model

LI Rui¹ ZHANG Zhaojie^{1△} ZHANG Yanzhen¹ ZHANG Shimin¹ WANG Chaolu¹ LIU Jingsong¹
LI Zuoxu¹ LIU Yuzhang¹ MA Ming¹ JIN Jiao¹ YANG Can¹ HUANG Juying²

¹Wangjing Hospital, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100102, China;

²School of Biological Engineering, Capital Medical University, Beijing 100069, China.

Abstract Objective: To analyze the biomechanical characteristics of the upper cervical spine in patients with atlantoaxial joint dysfunction syndrome. **Methods:** A finite element model of atlantoaxial joint dysfunction syndrome was constructed based on the imaging data of a patient and its validity was verified. The model was applied to simulate the movement of the cervical spine in all directions, and the stress maxima and stress distributions of the articular surface, C_{2/3} intervertebral disc and muscle were analyzed under physiological load. The stress status of the model was compared with that of the previously established normal finite element model of the upper cervical spine, so as to determine the influence of atlantoaxial joint dysfunction syndrome on the biomechanics of the upper cervical spine. **Results:** Compared with the normal model, the global stress distribution of the atlantoaxial joint dysfunction syndrome model was uneven, and the right side of the model was greater than the left side. In the finite element model of atlantoaxial joint disorder, there were obvious stress inhomogeneity in the lateral atlantoaxial joint, intervertebral disc and muscle, and obvious stress concentration in the lateral atlantoaxial joint on the oblique side, the posterior side of the intervertebral disc and the insertion of the major rectus muscle behind the head. **Conclusion:** Atlantoaxial joint disorders can destroy the overall mechanical balance of the upper cervical spine, resulting in uneven stress distribution of the articular surface, intervertebral disc and muscle, which may lead to neck pain and spinal degeneration.

Keywords: finite element; atlantoaxial joint dysfunction syndrome; biomechanics; lateral atlantoaxial joint; bone misalignment

基金项目:中国中医科学院科技创新工程重大攻关项目
(CI2021A02007)

¹ 中国中医科学院望京医院(北京,100102)

² 首都医科大学生物工程学院

△通信作者 E-mail: zhangzhaojie2010@163.com

寰枢关节紊乱症 (Atlantoaxial Joint Dysfunction)

Syndrome, AADS)是由于颈部退变和劳损导致寰枢椎相对位置改变,刺激神经血管出现眩晕、颈痛或交感神经症状,也称寰枢关节错缝,属于中医“筋出槽,骨错缝”的范畴^[1]。近年来由于电子设备的普及和人们生活方式的改变,该病的发病率逐年升高^[2]。以往研究认为椎动脉供血减少和神经受压可能是其发病机制^[3],这些机制可以解释寰枢关节错缝后如何引起各种症状,但错缝的寰枢椎对上颈椎的其他结构造成怎样的影响尚不明确。颈椎是一个整体,任何一个结构的改变均会对整个颈椎的应力产生影响,关节应力异常往往导致疼痛的发生。本研究基于1例症状典型的寰枢关节紊乱症患者的影像资料构建有限元模型,仿真计算生理载荷下寰枢关节紊乱症模型中关节面、椎间盘、肌肉的应力,并与建立的正常颈椎模型的结构应力进行比较,通过数值模拟的方法分析骨错缝对上颈椎生物力学平衡的影响。本

研究通过望京医院伦理委员会审查(批件号为 WJEC-KT-2022-027-P002),并且研究方案已在中国临床试验注册中心(<https://www.chictr.org.cn/>)完成注册(注册号为 ChiCTR2200060903)。

1 研究对象和方法

1.1 研究对象

在望京医院脊柱一科门诊选取1名症状典型的寰枢关节紊乱症患者并详细记录患者的临床资料。患者为女性,32岁,身高为162 cm,体重为53 kg,2022年5月7日以“颈痛伴眩晕1个月”为主诉来本科门诊就诊,颈椎触诊发现颈2棘突右侧、颈2右侧椎板处压痛阳性,并且右侧椎板有明显隆起。颈部X线和CT检查示颈椎生理曲度消失,枢椎齿突向右侧偏歪,并且排除颈椎创伤、骨折、结核、肿瘤或发育畸形,患者的X线资料见图1。

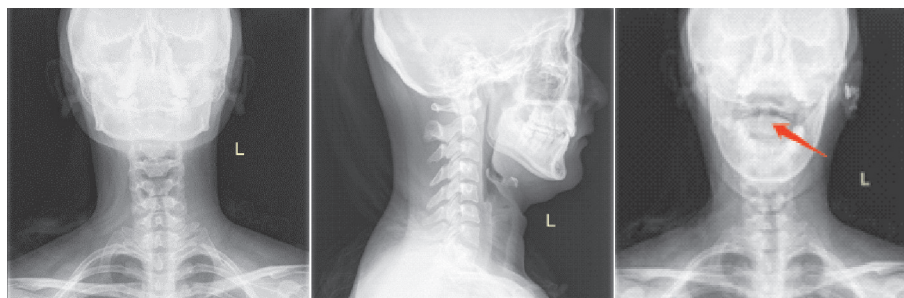


图1 患者的X线片资料(从左到右依次为正位、侧位、开口位,其中开口位片可见枢椎齿突偏向右侧)

1.2 诊断标准

参照《脊柱骨伤科学》^[4]及《中医病证诊断疗效标准》^[5]制定:1)有颈部慢性劳损史;2)有持续或间歇发作的眩晕病史;3)伴有耳鸣耳聋、恶心呕吐、心悸胸闷、咽部异物感、眼部不适等交感神经症状;4)枢椎横突及椎板交界处隆起点压痛明显;5)正位开口位示左、右侧枢椎齿突与寰椎侧块间距不等,旋转 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 开口位示寰枢椎间旋转运动异常。

1.3 寰枢关节紊乱症有限元模型的建立

1.3.1 影像数据采集 采用德国西门子公司64排螺旋CT对患者的颈椎进行扫描,横断面图像用于构建颈椎有限元模型。患者仰卧保持颈椎中立位,设定层厚为0.625 mm;扫描范围包括颅底-第七颈椎,共获得图像338张(见图2)。将颈椎CT扫描后的原始数据导出为Dicom格式并存储于U盘。

1.3.2 模型建立 将DICOM格式的CT图像数据导入三维重建软件MIMICS 15.0建立 $C_0\sim C_3$ 的模型,将此图像导入逆向工程软件Geomagic2016进行

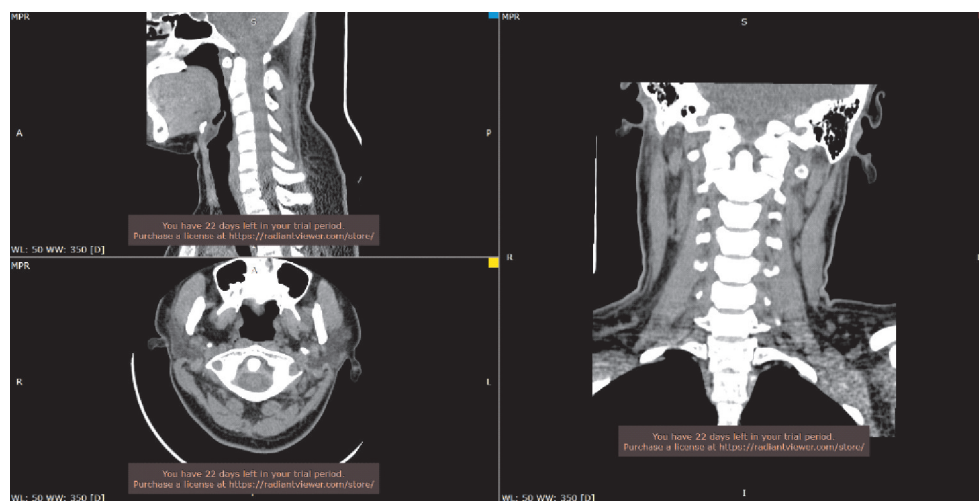


图2 患者的颈椎CT图像

平滑处理,便于下一步划分网格。由于 CT 图像对软组织的显影能力不能满足建模需求,为了保证运算的可靠性,本研究使用逆向工程软件 Geomagic2016 在 C_2 和 C_3 间构建了椎间盘的 3D 模型。随后根据解剖知识在模型中加入横韧带、黄韧带、关节囊韧带、棘上韧带和棘间韧带、前纵韧带和后纵韧带;根据上颈椎肌肉的解剖位置添加头后大直肌、头后小直肌、头上斜肌、头下斜肌等肌肉。将三维椎骨模型、椎间盘模型及韧带导入 Solid-works 软件系统,生成实体模型(见图 3)。

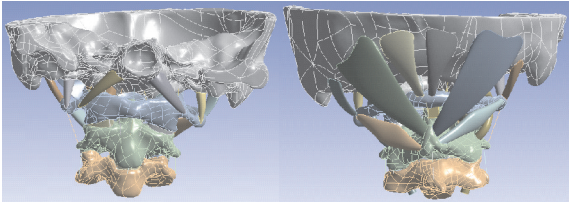


图 3 带有肌肉、韧带的上颈椎模型

1.3.3 网格划分、赋予材料属性 将实体模型导入 Ansys 19.0 有限元软件对其进行有限元网格划分,形成 $C_0 \sim C_3$ 运动节段的有限元模型,包括枕骨、寰椎、枢椎、第三颈椎、椎间盘、韧带和肌肉(见图 4)。

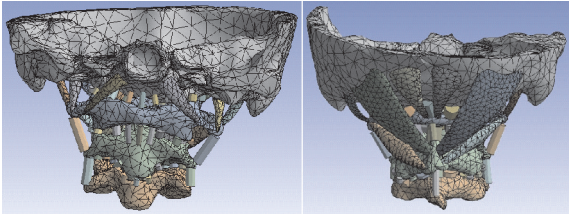


图 4 划分网格后的模型

模型的骨性结构部分选择四面体单元模拟并简化为连续、均匀和各向同性的线性弹性材料;韧带和肌肉仅能承受张力载荷,因此采用仅具有张力性质的线性膜单元模拟;椎间盘的纤维环采用四面体壳单元划分,髓核主要承受压应力,故采用线性黏弹性材料属性描述。模型中各结构的材料参数参见文献[6-7]及表 1。

表 1 有限元模型的材料属性

材料	弹性模量/MPa	泊松比	截面积/ mm^2
皮质骨	12 000	0.300	
松质骨	500	0.300	
纤维环	8.4	0.490	
髓核	1.3	0.499	
关节软骨	10.4	0.300	
终板	2 000	0.300	
横韧带	20	0.300	46.6
翼状韧带	7	0.300	6.8
前纵韧带	30	0.300	6.1
后纵韧带	20	0.300	5.4
关节囊韧带	20	0.300	13.1
棘间韧带	8	0.300	12.6
黄韧带	9	0.300	50.1
横突间韧带	10	0.300	18.9

1.3.4 定义接触 模型中共存在 4 个关节接触面,分别是寰枕关节、寰枢外侧关节、寰齿关节及 $C_{2/3}$ 关节突关节。寰齿关节设定为滑动接触方式,摩擦系数设定为 0.10;其余关节面及椎间盘和椎体表面间的接触则采用面-面接触方式,摩擦系数也设定为 0.10。

1.4 力学加载

对 C_3 下表面进行 Fixed Support 空间 6 个方向完全约束,在 C_0 上表面施加向下 40 N 的力模拟头部重力,同时施加 $2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的力矩,模拟人体头部前屈后伸和左右侧弯的运动,仿真计算模型中各部分的应力并与本团队先前建立的正常颈椎模型对比。

2 结果

2.1 模型有效性验证

建立的寰枢关节紊乱症有限元模型共包含 50 913 个单元,130 005 个节点,模型外观上可以明显观察到寰枢椎的错位。将模型各运动节段的活动度与 Panjabi 等^[8-9]在尸体标本中测得的运动节段活动范围对比,来验证模型的有效性(见图 5)。结果表明本研究建立模型的运动范围与既往离体试验的运动范围基本符合,表明本研究建立的有限元模型在几何形态和力学特性上是真实可靠的,可用于寰枢关节紊乱症的生物力学分析。

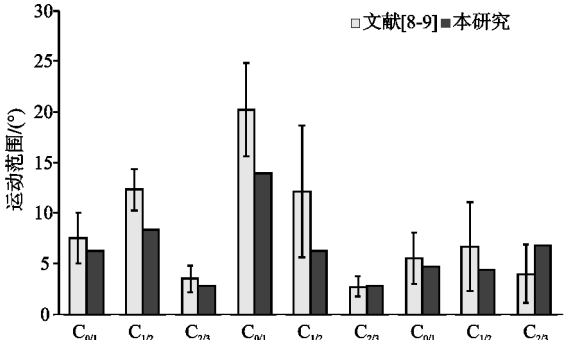


图 5 模型不同节段的运动范围

2.2 模型的应力分析

2.2.1 模型整体的应力 图 6 为寰枢关节紊乱症有限元模型在前屈、后伸载荷下的应力云图。前屈载荷时应力集中于右侧寰枢侧方关节的前外侧和 $C_{2/3}$ 关节突关节的前侧;后伸载荷时应力集中于右侧寰枢侧方关节外侧与 $C_{2/3}$ 关节突关节的后侧。

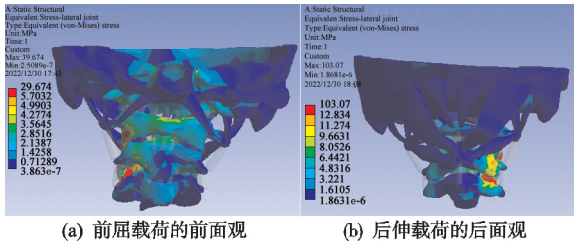


图 6 上颈椎应力云图

2.2.2 寰枢侧方关节 寰枢关节紊乱症模型和正常颈椎模型的寰枢侧方关节在不同载荷下的应力最大值

比较见图 7。在右旋载荷下,寰枢关节紊乱症模型的寰枢侧方关节面最大应力高于正常模型;其余载荷下,寰枢关节紊乱症模型的寰枢侧方关节面最大应力均低于正常模型。前屈后伸载荷下两模型的寰枢侧方关节面应力云图见图 8,正常模型的寰枢侧方关节应力分布均匀,寰枢关节紊乱症模型两侧的寰枢侧方关节应力分布不均,右侧应力高于左侧。

2.2.3 $C_{2/3}$ 椎间盘 寰枢关节紊乱症模型和正常颈椎模型的椎间盘在不同载荷下的应力最大值对比见图

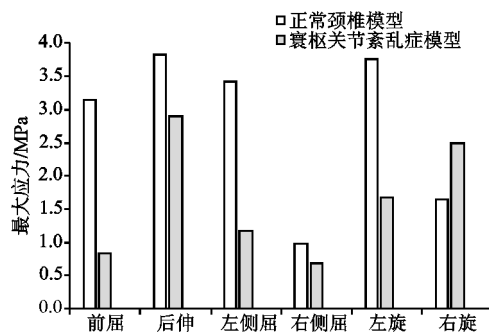


图 7 寰枢侧方关节的应力最大值

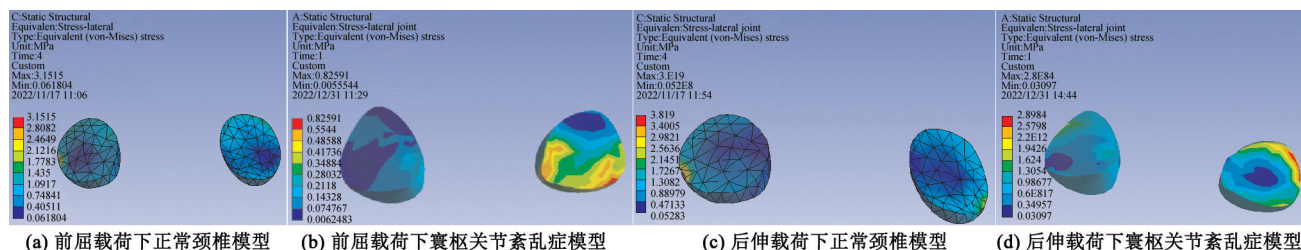


图 8 寰枢侧方关节的应力云图

9。在所有载荷下寰枢关节紊乱症模型的椎间盘最大应力均高于正常颈椎模型。前屈载荷和后伸载荷下两模型的 C_{2-3} 椎间盘应力云图见图 10,正常颈椎模型的椎间盘应力分布均匀,寰枢关节紊乱症模型的椎间盘后侧有明显的应力集中。

2.2.4 寰齿关节 寰枢关节紊乱症模型和正常颈椎模型的寰齿关节在不同载荷下的应力最大值对比见图 11。在所有载荷下,寰枢关节紊乱症模型的寰齿关节最大应力均低于正常颈椎模型。前屈载荷和后伸载荷

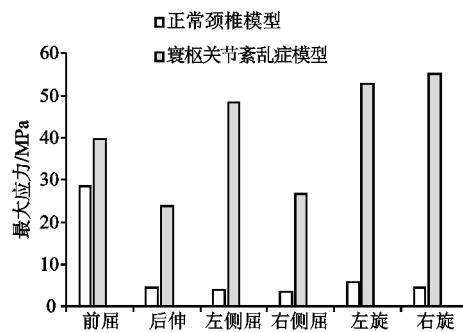


图 9 椎间盘的应力最大值

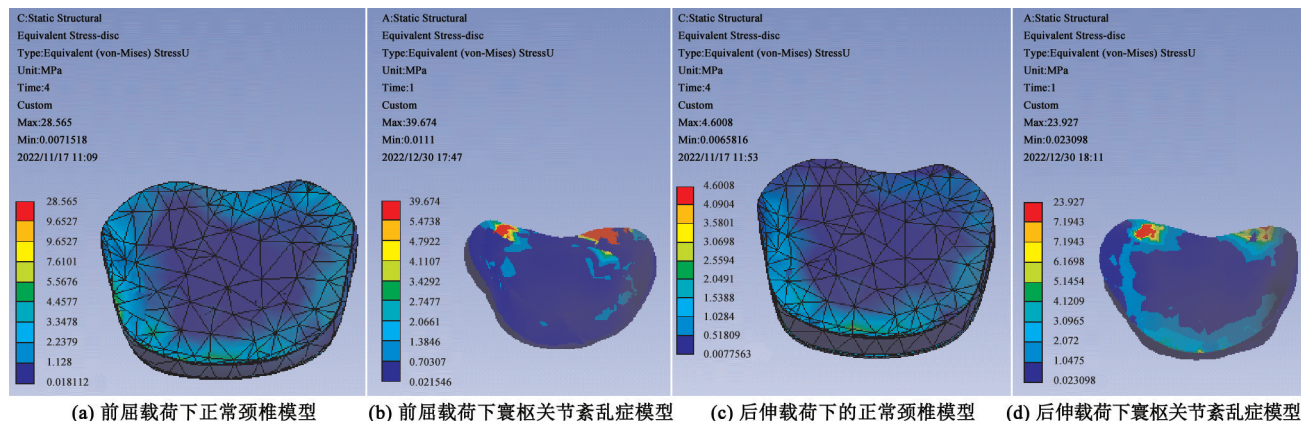


图 10 椎间盘的应力云图

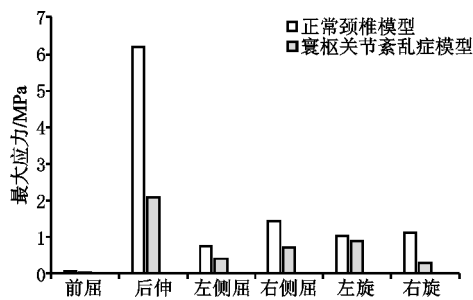


图 11 寰齿关节的应力最大值

下的寰齿关节应力见图 12,前屈后伸载荷下两模型的应力分布情况无明显差异。

2.2.5 上颈部肌肉 生理载荷下寰枢关节紊乱症模型和正常颈椎模型的肌肉应力分布见图 13。正常颈椎模型的肌肉应力分布较为均匀,寰枢关节紊乱症模型中头后大直肌、头下斜肌承受了较大的应力,并且肌肉在枢椎棘突附着点处有明显的应力集中。

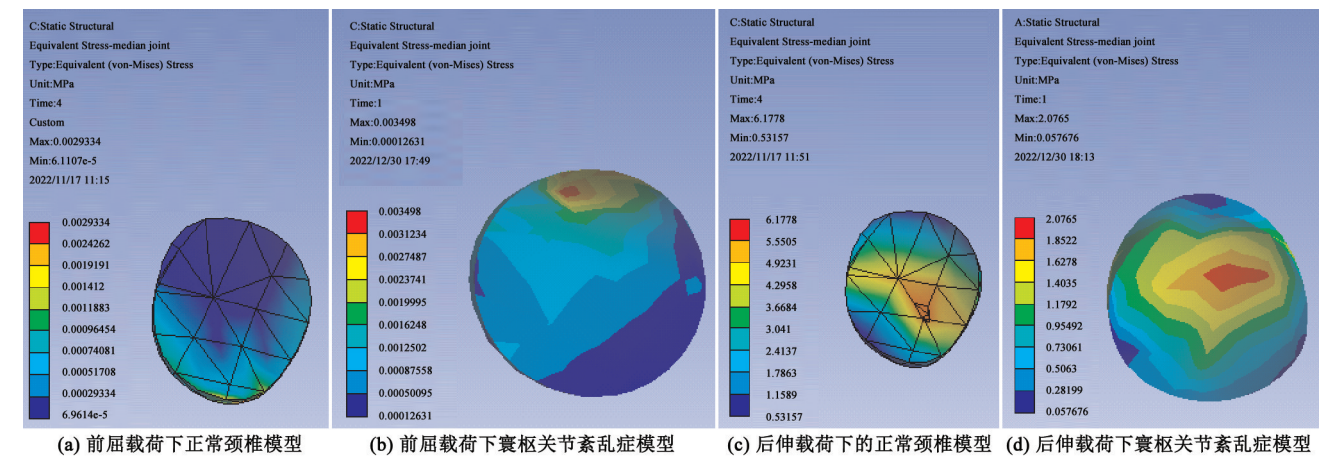


图 12 寰齿关节的应力云图

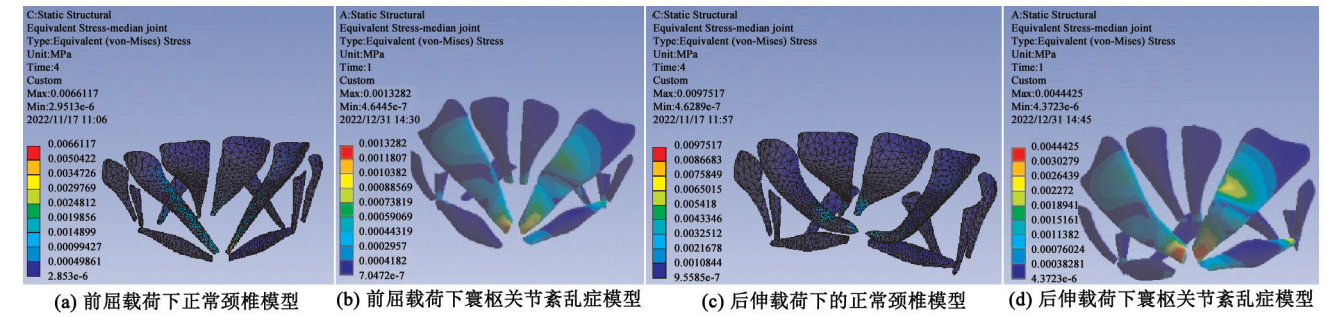


图 13 肌肉的应力云图

3 讨论

寰枢关节紊乱症的典型症状为颈枕部疼痛伴眩晕,对患者的工作生活造成严重的影响。目前对于颈性眩晕的研究较为深入,已从椎动脉、交感神经、本体感觉传入障碍等方面阐述了颈性眩晕的发病机制^[10],但有关寰枢关节错缝对椎间盘、关节面、肌肉作用的研究相对较少,一定程度上限制了治疗手段的发展进步。既往研究发现颈椎错缝会对椎体、关节面、椎动脉、脊髓等造成异常应力,这些异常应力可能引起各型颈椎病。张明才等^[11]通过有限元方法探讨颈椎错缝对各结构的影响,发现椎体平移错缝会对椎动脉、脊髓及关节突关节产生异常应力。张明才等^[12]发现颈 5“后仰+旋转”错缝会导致上下位关节突和椎间盘应力增大,而手法可以矫正异常应力分布。但由于寰枢椎的解剖结构和功能有其特殊性,已有关于其他椎体错缝的生物力学研究不足以指导寰枢关节紊乱症的临床治疗和科研,因此有必要开展寰枢关节紊乱症相关的生物力学研究。

筋骨失衡是寰枢关节紊乱症的核心病机,主要包含经筋病和骨错缝,其中骨错缝的特点是关节功能异常和影像学意义上的解剖结构异常^[13]。《医宗金鉴》云“或因跌扑闪失,以致骨缝开错,气血瘀滞,为肿为痛”,骨错缝在寰枢关节紊乱症中主要表现为颈痛、颈部活动障碍和齿突偏歪。颈椎是一个整体,部分结构的改变可能破坏颈椎整体的力学平衡,骨错缝导致颈

痛、活动受限可能与生物力学改变相关。

本研究建立的有限元模型具有良好的几何形态和材料特性,可以明显观察到寰枢椎向右错位,并且在生理载荷下能够逼真地模拟颈椎各种运动,表明本研究建立的模型是真实可靠的。但与既往文献数据相比,本模型运动节段的活动度略小于既往研究,表明寰枢关节紊乱症可能导致颈椎的活动受限,这与笔者先前的临床研究结果一致,即寰枢关节紊乱症患者的颈椎活动度会减小^[1]。当加载生理载荷模拟颈椎前屈后伸运动时,可以发现模型右侧(齿突偏歪侧)的整体应力均大于左侧,表明寰枢关节错缝破坏了颈椎整体的力学平衡,齿突偏歪侧有明显的应力集中现象。

有限元分析结果表明寰枢椎骨错缝会导致寰枢外侧关节的应力分布不均,在关节面外缘有明显的应力集中,这种长期的应力异常可能导致颈痛。寰枢关节包含 3 个滑膜关节,分别位于寰椎侧块和正中复合体之间,称为寰枢外侧关节和寰枢正中关节,其中寰枢外侧关节是主要的承重关节,关节内有关节软骨辅助运动和承重。研究表明关节软骨长期异常负荷会破坏软骨完整性,软骨损伤后在促血管生成因子和促神经生长因子的作用下软骨内出现痛觉感受器,并且损伤的软骨在修复过程中会释放炎症介质,这些炎症介质会作用于痛觉感受器,产生疼痛并进一步破坏关节软骨,并且关节周围组织在炎症慢性刺激下还会出现痛觉敏化^[14]。因此,骨错缝可能通过破坏关节软骨结构和关

节面应力不均的途径导致颈痛。

与正常颈椎模型相比,寰枢关节紊乱症有限元模型的椎间盘最大应力值在各种生理载荷下均明显增大,并且在前屈后伸时椎间盘后侧还有明显的应力集中现象,表明寰枢关节错缝可能导致椎间盘的应力异常。研究表明异常应力会促使椎间盘退变提前发生,正常情况下椎间盘受到的压缩应力会促进髓核细胞保持稳态,长时间、高强度及不均匀的应力则可能通过激活 P38 信号通路、降低 PI3K/Akt 通路活性促使髓核细胞凋亡,导致椎间盘发生退变^[15]。

在寰枢关节紊乱症的有限元模型中,枢椎棘突上的头后大直肌止点处也有明显的应力集中,表明此处承受较大的张力,而长期牵张可能导致软组织的张力性疼痛。研究表明长期肌肉紧张会导致局部筋膜腔内张力增高,通过筋膜腔的末梢神经会承受较高的应力从而引起颈痛^[16];并且肌肉疼痛还引起肌肉反射性紧张,造成局部循环障碍,代谢产物在筋膜腔内堆积又加重疼痛,产生了“疼痛-紧张-循环障碍-疼痛”的恶性循环^[17]。因此,在临床中治疗寰枢关节错缝时,应针对应力集中部位即枢椎棘突处重点松解,以达到更好的疗效。

传统意义上的骨错缝指的是骨骼之间微小的错位,主要表现为关节结构异常、功能异常及脊柱的动静性失衡^[18],而本研究通过对比正常模型和患者模型的关节面应力,进一步明确了“骨错缝”的一个重要特征是负重关节面的应力分布不均。此外,本研究结果表明筋与骨在病理上相互影响,筋伤导致筋束骨的作用减弱,增加骨错缝的风险,而骨错缝又导致肌肉的应力分布异常,进一步加重筋伤,在临床诊治筋骨疾病时应遵循“筋骨并重”的原则。

综上所述,寰枢关节紊乱症发病后上颈椎整体的力学平衡被破坏,在寰枢外侧关节、椎间盘、枢椎棘突处有明显的应力集中,可能导致颈痛和脊柱退变,临床治疗时应重点关注应力集中部位。此外,本研究从生物力学角度佐证了筋与骨在病理上相互影响,丰富了中医“筋出槽,骨错缝”理论的科学内涵。本研究的局限性在于有限元模型是对复杂问题的简单化处理,计算结果与真实情况存在一定的误差,今后的研究应当建立一个更加真实、精确的有限元模型,并在临床进一步验证其分析结果。

参考文献

[1] 李锐,张兆杰,张世民,等.疏筋整复手法治疗寰枢关节错缝所致颈性眩晕 65 例临床观察[J]. 中医杂志,2022,63

(5):450-454.

- [2] 郭金利,张振军,郭国新.寰枢关节紊乱与颈椎病关系的初步研究[J]. 河北中医,2013,35(9):1419-1421.
- [3] 周卫,蒋位庄,章永东,等.环枢关节错缝与上颈段解剖的关系[J]. 中国骨伤,1996(1):5-6.
- [4] 朱立国,李金学.脊柱骨伤科学[M]. 北京:人民卫生出版社,2015:5770-5782.
- [5] 国家中医药管理局.中医病证诊断疗效标准[S]. 南京:南京大学出版社,1994:189-190.
- [6] ZHANG Q H, TEO E C, HONG W N. Development and validation of A C0-C7 FE complex for biomechanical study[J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2005, 127(5): 729-735.
- [7] PANZER M B, FICE J B, CRONIN D S. Cervical spine response in frontal crash [J]. Medical Engineering & Physics, 2011, 33(9): 1147-1159.
- [8] PANJABI M M, NIBU K, CHOLEWICKI J. Whiplash injuries and the potential for mechanical instability[J]. Eur Spine J, 1998, 7(6): 484-492.
- [9] PANJABI M M. Cervical spine models for biomechanical research[J]. Spine, 1998, 23(24): 2684-2700.
- [10] LI Y, PENG B. Pathogenesis, diagnosis, and treatment of cervical vertigo [J]. Pain Physician, 2015, 18(4): E583-E595.
- [11] 张明才,陈博,石印玉,等.颈椎单节椎体平移错缝对颈椎主要结构应力影响的有限元分析[J]. 中医正骨,2020,11(4):1-8.
- [12] 张明才,吕思哲,程英武,等.基于有限元模型研究椎骨错缝对颈椎病患者关节应力的影响[J]. 中国骨伤,2011,24(2):128-131.
- [13] 张明才,石印玉,王翔,等.颈椎“骨错缝筋出槽”临床评价方法[J]. 上海中医药杂志,2010,44(7):29-32.
- [14] 李健雄,张程,辛鹏飞,等.膝关节炎疼痛机制研究进展[J]. 中华关节外科杂志(电子版),2021,15(5):596-600.
- [15] 赵学千,陈江,贾育松,等.应力对椎间盘不同结构的影响及机制研究进展[J]. 中国中医骨伤科杂志,2019,27(3):82-85.
- [16] 于栋,吴俊德,陈兆军,等.软组织张力与疼痛关系的研究进展[J]. 中医正骨,2015,27(2):70-72.
- [17] 张翔,黄明华,雷仲民,等.末梢神经张力性疼痛铍针治疗的疗效观察[J]. 北京中医药,2014,33(2):126-128.
- [18] 朱清广,房敏,洪水棕.“经筋病”和“骨错缝”在颈椎病中的生物力学作用[J]. 北京中医药,2010,29(1):34-36.

(收稿日期:2023-06-13)