

文章编号:1004-7220(2013)03-0528-05

关节盘移位对颞下颌关节内应力分布的影响

刘 展^{1,2}, 钱英莉^{3*}, 张远理¹, 樊瑜波⁴

(1. 四川大学 生物力学工程省重点实验室, 成都 610065; 2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059; 3. 中航工业 611 所二部, 成都 610041; 4. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要: **目的** 通过对不同关节盘移位的数值模拟, 探究各种移位情况下颞下颌关节 (temporomandibular joint, TMJ) 内各结构的应力分布规律。 **方法** 依据 CT 图像, 建立包含下颌骨、全牙列、关节盘和关节软骨的正常 TMJ 三维有限元模型; 参考关节盘前、后、外、内移位的临床特征, 建立对应的 4 个模型。关节盘与关节软骨间考虑接触, 用缆索元模拟下颌韧带和关节盘附着, 施加正中咬合荷载。 **结果** 前移位将导致关节盘中带产生过高的压应力, 达到 3.23 MPa; 后、内、外移位时关节盘的整体应力水平比前移位和正常 TMJ 高; 各种移位都使关节结节后斜面的应力值大幅度增加, 但对髁突关节面的影响却不大。 **结论** 各种移位都将导致关节盘和关节结节后斜面产生过高的应力, 且后、内、外移位更为危险, 更容易造成关节结构和功能的损伤。

关键词: 颞下颌关节; 有限元分析; 应力分布; 关节盘移位; 接触

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Effects of disc displacement on stress distributions in temporomandibular joint

LIU Zhan^{1,2}, QIAN Ying-li^{3*}, ZHANG Yuan-li¹, FAN Yu-bo⁴ (1. Key Laboratory for Biomechanical Engineering of Sichuan Province, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Second Department, AVIC 611 Institute, Chengdu 610041, China; 4. Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: **Objective** To investigate stress distributions on temporomandibular joint (TMJ) with different disc displacements through numerical simulation. **Methods** A three-dimensional finite element model of normal TMJ including the mandible, teeth, discs and articular cartilage was established according to CT images of a volunteer with asymptomatic joints. Based on the model, four corresponding models with the anterior, posterior, lateral and medial displacement of the disc were developed. Contact elements were considered to simulate the interaction between the discs and articular cartilages of the condyle and the temporal bone. Cable elements were used to simulate the ligaments and attachments of the disc. The muscle forces and boundary conditions corresponding to the centric occlusions were applied on the models. **Results** The maximum compressive stress occurred at the intermediate zone due to the anterior displacement of the disc, which was as high as 3.23 MPa. The model with the posterior, lateral and medial displacements of the disc had higher stresses than the model with the anterior displacement of the disc and healthy TMJ model. The stresses at the back of the articular eminences in four models with disc displacements were much higher than those in healthy TMJ model. However, the effects of disc dis-

收稿日期:2012-11-29; 修回日期:2013-01-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11202143), 中央高校基本科研业务费重点基础研究专项(2010SCU21017)。

通信作者:樊瑜波, 教授, 博士研究生导师, E-mail: yubofan@buaa.edu.cn。

* 为共同第一作者

placements on the stresses of the condyles were not obvious. **Conclusions** Disc displacements could cause higher stresses in the discs and at the back of the articular eminences, especially in the model with the posterior, lateral and medial displacements of the disc, which was likely to cause damage to TMJ structure and function.

Key words: Temporomandibular joint (TMJ); Finite element analysis; Stress distribution; Disc displacement; Contact

颞下颌关节紊乱病 (temporomandibular disorder, TMD) 是最常见的颞下颌关节疾病,其发病率较高,主要病征为关节区疼痛、异常关节音、下颌运动障碍等。据报道,20% ~ 25% 的人群有不同程度的 TMD 症状,多发生于 20 ~ 40 岁^[1]。最常见的 TMD 则是关节盘移位(约占 TMD 患者的 70%^[1]),其关节盘位置的改变将严重影响颞下颌关节(temporomandibular joint, TMJ)的生物力学环境。TMJ 是负重关节,其生物力学环境对关节的形态结构将产生重要的影响。因此,对关节盘移位的生物力学研究也逐渐受到人们的关注。

通过实验对 TMJ 内各结构的生物力学分析将会造成关节损伤,也影响其结果的准确性,而数值模拟则可以避免这些伤害,且结果比较直观和准确。近年来,一些学者对关节盘前移位进行了有限元分析。Tanaka 等^[2]针对关节盘前移位建立 TMJ 的有限元模型,以张口时髁突的位移作为载荷条件,分析关节盘的应力分布和位移;并对咬合时 TMJ 内的应力分布规律进行研究,结果表明,关节盘中带的中心和侧面将出现高应力区^[3]。文献[4]中对可复位与不可复位性关节盘前移位进行分析,并对比健康的 TMJ,结果发现关节盘前移位将在关节盘后带产生较高的压应力;并对单侧关节盘前移位进行研究,结果发现关节盘移位将会对关节盘的拉、压应力产生较大的影响,且最大应力区域转移到关节盘后带^[5]。

上述关于关节盘移位的研究都集中在关节盘前移位,尚没有关于关节盘其他形式移位的生物力学研究。而关节盘其他方向的移位也是临床常见病症^[6-7],同样会导致 TMJ 内一些结构的损害,使一些口腔功能受限甚至丧失,给人们的生活带来诸多不便。因此,本研究考虑关节盘前移位、后移位、外移位、内移位对 TMJ 内应力分布的影响,比较不同关节盘移位情况下 TMJ 内的应力分布与正常 TMJ 的差异,为临床治疗和预防提供理论参考。

1 材料与方 法

基于一位牙列完整、咬合关系正常、无任何颞下颌关节病症状和体征的男性青年志愿者的头部横断位 CT 图像,根据不同的灰度值,在 Mimics 软件中分别建立皮质骨、松质骨和各牙齿的模型,再将其导入 ANSYS 中,逐步构建起含皮质骨、松质骨和牙列的下颌骨三维实体模型(见图 1)。用同样的方法建立颞骨模型。根据前期研究,髁突和颞骨表面覆着一层关节软骨,在关节功能区域(髁突前斜面和关节结节后斜面)最厚,采用 0.5 mm,逐步过渡到关节窝顶部的 0.2 mm^[8]。依据关节盘的解剖特征和两个关节面的形状,建立关节盘的实体模型,前带、中带、后带的厚度分别为 2、1 和 3 mm。

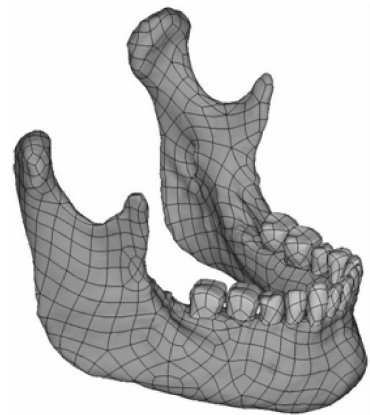


图 1 下颌骨的三维实体模型

Fig. 1 Three-dimensional model of the mandible

模型中,皮质骨、松质骨、关节软骨和牙齿均考虑为各向同性的均质线弹性体^[9],关节盘考虑为非线性材料^[10],材料属性见表 1。采用二次四面体单元对模型进行网格化分,考虑到研究的重点是 TMJ 部分,故采用较密的网格密度对 TMJ 内各结构进行划分;经单元优化后,最终生成 186 772 个实体单元和 285 210 个节点。根据文献[11],采用非线性缆

索元模拟颞下颌韧带、蝶下颌韧带和茎突下颌韧带,以及颞前附着、下颌前附着和双板区;在关节盘和髁突软骨之间、关节盘和颞软骨之间添加接触单元,以模拟关节盘与两个关节面的接触问题,摩擦系数选用 10^{-3} ^[10-11],共生成接触单元 5 961,对应节点 12 529。

表1 材料属性

Tab.1 Material properties

	E/MPa	ν	备注
皮质骨	13 700	0.3	
松质骨	7 930	0.3	
牙齿	18 600	0.31	
关节软骨	0.79	0.49	
关节盘	44.1	0.4	$\sigma \leq 1.5 \text{ MPa}$
	92.4	0.4	$\sigma > 1.5 \text{ MPa}$

根据关节盘移位的临床病征及其解剖结构,通过对正常 TMJ 模型右侧关节盘的改建,建立与关节盘前、后、内、外移位相对应的模型,左侧始终考虑为健侧,保持正常情况的设置。由于双板区的承载能力不如关节盘,长期处于过度拉伸状态容易导致其穿孔、附着撕裂而使之不再承载,即使双板区没有损坏其拉伸力度已很微弱,故在模拟关节盘前移位时不考虑双板区的作用。同样,通过对关节盘实体模型的改建来模拟关节盘后移位(不考虑关节盘前附着的作用)、外移位、内移位(不考虑颞下颌韧带内

层的作用)。各模型中,除了右侧关节盘,其他结构都完全相同;各模型中右侧关节盘采用相同的网格密度。采用正中咬合时的载荷条件,肌肉力向量作为载荷^[10-11];边界条件包括对两侧颞骨外表面和牙冠咬合处的约束。

2 结果与讨论

正常 TMJ 模型是进行一系列比较的基础。TMJ 内的应力分布与各部分之间的接触作用相关,关节盘中带应力最高,其最大 Von Mises 应力为 0.32 MPa(见图 2),且主要承受压应力;前带的应力也较大,后带的应力水平相对较低,这与关节盘特殊的解剖结构相符合。Oberger 等^[12]通过人体标本的解剖学研究发现,在下颌骨功能运动中关节盘中带(最薄处)承受高压。相关有限元研究也得到一致的结果^[13-14]。前斜面为髁突的高应力区,最大压应力出现在该处,达到 0.75 MPa。颞骨的高应力区出现在与关节盘接触较为明显的颞骨前部(即关节结节后斜面),且该区域主要承压。临床研究也表明髁突前斜面与关节结节后斜面构成一对关节功能区,是承受压力的集中部位。Beek 等^[13]研究表明髁突前斜面和关节结节后斜面为高应力区。王美青等^[15]研究发现正中咬合时髁突前斜面承受较大的压应力,最大值达到 0.92 MPa。由此可见,正常 TMJ 的模型中髁突、颞骨、关节盘的应力分布与其解剖结构和功能相符合。

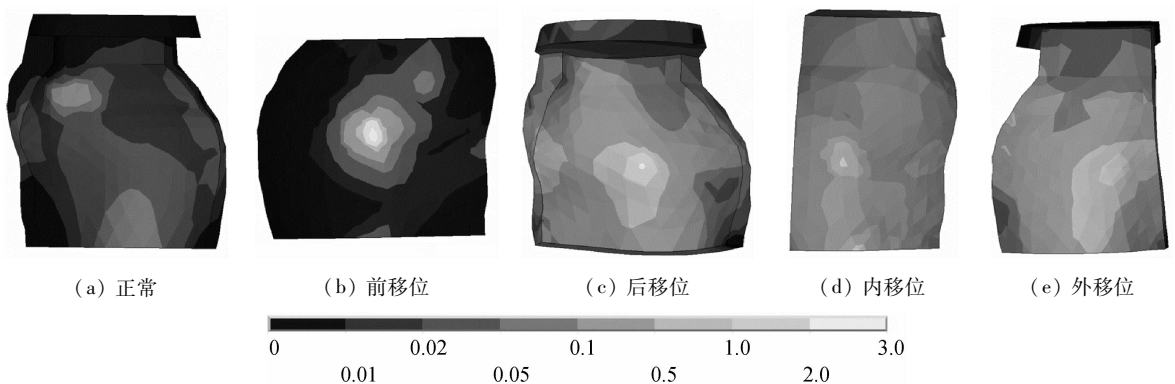


图2 正常和各种移位的关节盘 Von Mises 应力分布图(单位:MPa)

Fig.2 von Mises stress distributions on healthy TMJ model and model with different displacements (a) Normal disc, (b) Anterior displacement of the disc, (c) Posterior displacement of the disc, (d) Lateral displacement of the disc, (e) Medial displacement of the disc

关节盘前移位时,中带也为关节盘的高应力区,其应力水平远高于正常情况,而其他区域的应力水平与正常 TMJ 的模型相当(见图 2)。关节盘的最大压应力高于其他移位情况,达到 3.23 MPa,出现在中带(见图 3)。相关研究也表明,正中咬合时关节盘前移位导致其压应力增大,容易引起关节盘变薄和穿孔^[4,16]。康宏等^[17]通过实验研究得到人关节盘中带的拉伸破坏应力约为 1.53 MPa。本研究得到关节盘中带的最大拉应力为 1.43 MPa,接近其拉伸破坏应力;若长期作用在关节盘上,则很可能造成关节盘的损伤甚至穿孔。

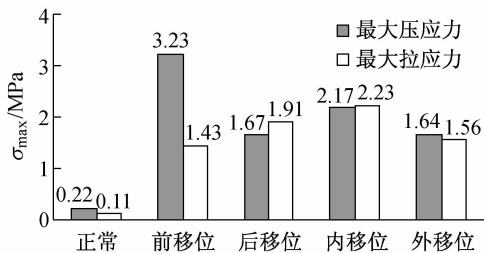


图3 正常和各种移位关节盘的最大应力

Fig.3 The maximum stresses on healthy TMJ model and model with different displacements

后、内和外移位时关节盘各带的应力水平明显高于正常和前移位的情况(见图 2)。关节盘后移位和外移位状态下,关节盘的应力分布规律较为接近,高应力区都出现在中带和前带,中带都承受较大的拉应力,最大值分别达到 1.91 和 1.56 MPa(见图 3),高于其拉伸破坏应力 1.53 MPa^[17],很可能造成关节盘损伤。关节盘前带的拉应力小于压应力,而关节盘前带的抗拉能力较强,在咬合状态下主要承受拉应力,可见这种应力分布规律不符合关节盘前带的解剖特征;且后移位时关节盘前带的最大拉应力达到 1.47 MPa,接近其破坏应力 1.85 MPa^[17]。内移位对关节盘各带的影响都较大,特别是前带和后带,前带的应力水平明显高于关节盘其他方向移位的情况(见图 2),最大拉应力为 2.23 MPa,高于其破坏应力 1.85 MPa;关节盘后带主要承受拉应力,不符合其抗压强度较强的解剖特征,其最大拉应力为 2.13 MPa,远高于其 1.35 MPa 的破坏应力,容易引起该部位穿孔等病变。

在正常情况和各种移位时,髁突和颞骨软骨层

的前部都是高应力区。然而,各种关节盘移位状态下,关节盘与髁突软骨之间的接触挤压作用都不及关节盘与颞软骨之间的接触挤压作用显著,与正常关节盘相反。前移位和后移位时,髁突软骨层的平均 Von Mises 应力不及正常情况的一半,内移位和外移位时与正常情况接近(见表 2)。各种移位都将导致颞软骨层的 Von Mises 应力远高于正常情况,特别是后移位和内移位,分别达到正常 TMJ 的 59 和 46 倍。可见关节盘各种移位对髁突关节面的影响不大,而使关节结节后斜面的应力大幅度增加,可能造成该区域的损伤。各种移位时关节结节后斜面都将产生应力集中,以后移位最为明显,其最大压应力和拉应力分别高达 3.98 和 5.08 MPa,高于其他移位和正常的情况,远高于其拉伸强度 2.15 MPa。可见关节盘后移位可能导致关节结节后斜面变得扁平或软骨穿孔,甚至是骨质吸收。

表 2 正常和各种移位时髁突软骨和颞软骨的高应力区及其平均 Von Mises 应力

Tab.2 High stress regions in cartilages of the condyle and temporal bone and the average Von Mises stresses in these regions

	髁突软骨层		颞软骨层	
	高应力区	平均 Von Mises 应力/kPa	高应力区	平均 Von Mises 应力/kPa
正常	前部	9.42	前部	1.57
前移位	前部	4.39	前部	32.59
	中部	3.06		
后移位	前部	4.52	前部	92.74
	前部	8.16	前部	72.55
内移位	中部	8.02	中部	20.01
	前部	5.06		
外移位	中部	4.84	前部	32.32
	外侧	10.81		

综上所述,关节盘各方向的移位都将导致关节盘和关节结节后斜面的高应力,很容易引起这些部位的病变,影响关节的结构和功能。关节盘和髁突的不正常位置关系将导致 TMJ 内应力分布规律的改变,而这些改变又可能加剧这种不正常的位置关系,从而使 TMJ 内部功能紊乱更加严重。如果关节负重过大或承载时间过长,超过其适应能力,将会导致关节进行性改建的停止,代之以关节组织的病理

性改变,如进一步加重关节盘的移位、骨或关节软骨的退行性变、关节盘的永久变形或穿孔等,随即会出现更严重的TMD症状。临床上,TMJ弹响被认为是TMJ内部紊乱的初始征兆,此时就应进行治疗,以能减少TMJ负荷的保守治疗为主。

3 结论

关节盘各种移位都将导致TMJ内应力的增加,后、内、外移位时其整体应力水平的增加更为显著。关节盘前移位引起关节盘中带中部的应力集中,后移位和外移位导致关节盘前带和中带的应力值较高,内移位则使得关节盘各带都有应力集中区,这些高应力的长期作用容易引起关节盘变薄或穿孔。关节盘各种移位都使得关节结节后斜面出现应力集中,特别是关节盘后移位,可能导致该功能区软骨穿孔,甚至是骨质吸收。因此,恢复并维持关节盘的正常位置与功能是防治TMJ疾病的有效方法。

参考文献:

- [1] Ingawalé S, Goswami T. Temporomandibular joint: Disorders, treatments, and biomechanics [J]. *Ann Biomed Eng*, 2009, 37(5): 976-96.
- [2] Tanaka E, del Pozo R, Tanaka M, *et al*. Three-dimensional finite element analysis of human temporomandibular joint with and without disc displacement during jaw opening [J]. *Med Eng Phys*, 2004, 26(6): 503-511.
- [3] Tanaka E, Hirose M, Koolstra JH, *et al*. Modeling of the effect of friction in the temporomandibular joint on displacement of its disc during prolonged clenching [J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2008, 66(3): 462-468.
- [4] Pérez del Palomar A, Doblare M. An accurate simulation model of anteriorly displaced TMJ discs with and without reduction [J]. *Med Eng Phys*, 2007, 29(2): 216-226.
- [5] Pérez del Palomar A, Doblare M. Influence of unilateral disc displacement on the stress response of the temporomandibular joint discs during opening and mastication [J]. *J Anat*, 2007, 211(4): 453-463.
- [6] Ikeda K, Kawamura A. Disc displacement and changes in condylar position [J]. *Dentomaxillofac Radiol*, 2012, [Epub ahead of print].
- [7] Okochi K, Ida M, Honda E, *et al*. MRI and clinical findings of posterior disk displacement in the temporomandibular joint [J]. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 2008, 105(5): 644-648.
- [8] Pullinger AG, Baldioceda F, Bibb CA. Relationship of TMJ articular soft tissue to underlying bone in young adult condyles [J]. *J Dent Res*, 1990, 69(8): 1512-1518.
- [9] 刘展, 牟雁东, 钱英莉, 等. 下颌全牙列-直丝弓矫治器的生物力学建模[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(5): 556-561.
Liu Z, Mu YD, Qian YL, *et al*. Biomechanical modeling of dentulous mandible-straight wire appliance [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(5): 556-561.
- [10] Liu Z, Fan YB, Qian YL. Comparative evaluation on three-dimensional finite element models of the temporomandibular joint [J]. *Clin Biomech*, 2008, 23(S1): 53-58.
- [11] 刘展, 钱英莉, 樊瑜波, 等. 颞下颌关节内软组织的模拟方式[J]. *四川大学学报:工程科学版*, 2011, 43(6): 105-110.
- [12] Oberg T, Carlsson GE, Fajers CM. The temporomandibular joint. A morphologic study on a human autopsy material [J]. *Acta Odontol Scand*, 1971, 29(3): 349-384.
- [13] Beek M, Koolstra JH, van Ruijven L J, *et al*. Three-dimensional finite element analysis of the cartilaginous structures in the human temporomandibular joint [J]. *J Dent Res*, 2001, 80(10): 1913-1918.
- [14] 张钰, 朱伟民, 吕林蔚, 等. Spee曲线改变对颞下颌关节应力分布影响的三维有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2009, 24(S1): 110-111.
Zhang Y, Zhu WM, Lv LW, *et al*. Three-dimensional finite element analysis of the influence of spee curve change on the stress distribution of TMJ [J]. *J Med Biomech*, 2009, 24(S1): 110-111.
- [15] 王美青, 张旻, 王一兵. 七种不同颌型对颞下颌关节应力影响的三维有限元分析[J]. *中华口腔医学杂志*, 2004, 39(3): 242-244.
- [16] Arnerr GW, Milam B, Gottesman L. Progressive mandibular retrusion-idiopathic condylar resorption [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 1996, 110(2): 117-127.
- [17] 康宏, 易新竹, 陈孟诗. 人体颞下颌关节盘拉伸力学特性研究[J]. *华西口腔医学杂志*, 1998, 18(3): 253-255.