

[DOI]10.12016/j.issn.2096-1456.2018.10.013

· 综述 ·

## 三维有限元分析在单侧上颌骨缺损修复中的应用进展

魏雅楠<sup>1,2</sup> 综述; 曹志云<sup>3</sup> 审校

1. 青海大学附属医院口腔科, 青海 西宁(810001); 2. 昆明医科大学口腔医学院, 云南 昆明(650500);  
3. 昆明医科大学附属口腔医院修复科, 云南 昆明(650106)

**【摘要】** 单侧上颌骨缺损是临床常见的颌面畸形,因其缺损范围较大及结构的复杂性,在修复重建时常使修复体及支持组织应力分布不均导致患者口内软组织出现压痛、破溃、甚至基牙的松动脱落等。因此,近年来常用三维有限元法指导修复体的设计和植体的植入,该方法有利于修复体的固位、稳定,有利于保护余留组织的健康,以提高修复体的使用质量和患者的满意度。本文就单侧上颌骨缺损有限元模型的建立,及三维有限元在传统式修复体、种植支持式修复体、外科组织瓣移植联合修复体修复单侧上颌骨缺损中的应用及进展进行综述。

**【关键词】** 单侧上颌骨缺损; 三维有限元分析; 应力分布; 修复体

**【中图分类号】** R782.1 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 2096-1456(2018)10-0677-04

**【引用著录格式】** 魏雅楠,曹志云. 三维有限元分析在单侧上颌骨缺损修复中的应用进展[J]. 口腔疾病防治, 2018, 26(10): 677-680.

**Research progress of three-dimensional finite element analysis in unilateral maxillary defect restorations** WEI Yanan<sup>1,2</sup>, CAO Zhiyun<sup>3</sup>. 1. Department of Oral Medicine, The Affiliated Hospital, Qinghai University, Xining 810001, China; 2. College of Stomatology, Kunming Medical University, Kunming 650500, China; 3. Department of Prosthodontics, The Affiliated Stomatological Hospital of Kunming Medical University, Kunming 650106, China  
Corresponding author: CAO Zhiyun, Email: 626296441@qq.com, Tel: 0086-871-65330099

**【Abstract】** Unilateral maxillary defects are common clinical maxillofacial deformities. Because of their large area and the complexity of the maxillary structure, the distribution of pressure from dental prostheses and on the sustentacular tissue is usually uneven, which often results in pain or ulceration of the soft tissue and agomphiasis during the therapeutic process. Recently, the finite element method has been used to guide prosthesis design and implantation. This method is conducive to the restoration and stability of the dental prosthesis and the protection of the remaining tissue, which improves restoration quality and patient satisfaction. This paper summarizes the establishment of a three-dimensional finite element model of unilateral maxillary defects and its application in repairing unilateral maxillary defects with traditional prostheses, implant-supported prostheses and surgical flap transplantation combined with prostheses.

**【Key words】** Unilateral maxillary defects; Three-dimensional finite element analysis; Stress distribution; Obturator prosthesis

颌面部的良恶性肿瘤、外伤等会造成单侧上颌骨缺损,致口鼻腔相通,影响咀嚼、发音等生理

功能,降低患者的生活质量,影响身心健康。目前,常用传统修复体和游离皮瓣联合种植体或传统修复体重建颌面部缺损的三维结构及功能。但因缺损范围较大及周围组织结构的复杂性,为了保证修复体及支持组织受力更加均匀,对其进行三维有限元的应力分析,以减轻修复体对口内余留软组织的压痛,提高修复体的固位和稳定性,从

**【收稿日期】** 2017-11-22; **【修回日期】** 2018-04-24

**【作者简介】** 魏雅楠,住院医师,硕士,Email: 971718277@qq.com

**【通信作者】** 曹志云,副主任医师,本科,Email: 626296441@qq.com,  
Tel: 0086-871-65330099

而保护软硬组织健康。因此,本文就单侧上颌骨缺损有限元模型的建立及其在修复单侧上颌骨缺损中的应用进行综述。

### 1 单侧上颌骨缺损三维有限元模型的建模方式

三维有限元分析是将一个复杂的个体分解为多个小单元,并赋予每种材料特有的弹性模量和泊松比等生物学性质,以产生的数学公式为基础,通过对每个小单元的分析,获得整个研究个体性质的一种分析法<sup>[1]</sup>。其不会对机体及修复体造成损害;研究对象在体外的模拟体被赋予生物学材料性能更接近实体,具有高度可重复性<sup>[2]</sup>。

三维有限元是对三维数据进行力学分析,常用的三维重建软件有 Mimics、3D-Doctor 等。以往常对患者的二维螺旋CT进行三维重建<sup>[3]</sup>。近年来,对CBCT(cone beam computed tomography)的二维数据进行重建或直接利用CAD/CAM扫描仪来获得研究对象的三维数据成为了新趋势<sup>[4-5]</sup>。CBCT对硬组织的分辨率虽较螺旋CT高,但不足以区分所有相关细节,因此对于一些牙齿表面细微结构,咬合状况等,多结合3D扫描技术获得,以提高模型的精确度<sup>[6]</sup>。单纯用扫描仪所获得的三维数据,只有被扫描物体表面的信息,而无法获得内部的结构。三维重建后,将三维数据导入Abaqus、ANSYS等软件,进行建模及生物力学分析。在此之前,需赋予生物力学性能,施加载荷,模拟接近真实的口腔环境,所得出的结论更客观。目前研究中,对天然牙、种植体等施加载荷为50 N~600 N<sup>[4,7]</sup>。

三维有限元虽是一项成熟的技术,但尚存在以下不足:①由于建模工作量繁琐,几乎所有研究只建立一个模型;②研究对象假设为各向同性材料、小变形及简化边界约束的设定,这些过程可能对模型的几何和力学相似性造成影响;③大多只考虑了咀嚼过程中主要力的方向,但咀嚼力是不断变化和循环的;④忽略面颊部软组织对修复体的作用,目前研究均未涉及软组织部分。主要是因为头面部解剖结构复杂,螺旋CT和CBCT对软组织的分辨率低,三维重建无法精确对各种软组织准确区分。Micro-CT(micro computed tomography)对软硬组织的空间分辨率可达20 μm,但仅用于离体小样本及小动物的研究<sup>[8]</sup>,对重建完整人类颅颌面部有一定的困难。其次,MRI(magnetic resonance imaging)对软组织的分辨率较高,但费用昂贵。国内学者表示三维重建时,为提高模型的精

度,建议将螺旋CT和CBCT数据融合<sup>[9]</sup>。Dettnerbeck等<sup>[10]</sup>研究发现,应用MR数据三维重建后的模型清晰度较螺旋CT、CBCT好,但其实验对象为动物,有待于进行临床研究。因此,寻求一种对颌面部软硬组织分辨率均高的设备至关重要目前尚无完全模拟复杂口腔生物力学环境的有限元软件,仍需进一步研究。

### 2 三维有限元分析在恢复单侧上颌骨缺损修复中的应用

#### 2.1 三维有限元分析在传统赈复体中的应用

由于每例上颌骨的缺损各异,加大了外科重建的难度,而传统赈复体可克服这些不足,且制作简便,缩短了患者手术和住院时间,因此作为上颌骨缺损重建的首选<sup>[11]</sup>。传统赈复体可较快修复患者缺失组织,重建其自信心,关闭口鼻腔交通,明显改善吞咽、发音等功能,可方便探查术后肿瘤有无复发,最重要的是保护余留牙及组织的健康<sup>[12-13]</sup>。

Dong等<sup>[14]</sup>研究发现,赈复体能增加鼻腔气体流通,减小气道阻力,从而改善患者的呼吸功能。Sun等<sup>[15]</sup>认为对于有Mini-SG/F附着固位体和铸造圈型卡环的两种赈复体,前者的固位力及对周围组织的保护性更佳。但Mini-SG/F固位体的使用寿命有待进一步研究。孙嘉悻等<sup>[16]</sup>用三维有限元分析法研究卡环、精密附着体及颧种植体三种固位技术对上颌骨单侧缺损修复的生物力学影响,发现当健侧余留牙情况较差时,建议使用附着体固位的赈复体修复,以保护余留牙的健康。初晓阳<sup>[17]</sup>研究指出三连冠联合冠外附着体更有利于应力均匀分散,但却破坏了余留牙的完整性。

综上所述,采用传统赈复体修复缺损时,需根据患者自身具体情况合理设计固位体的种类及分布,以保护口颌系统的健康。虽赈复体的卡环对健侧基牙产生扭转力矩,但其弹性会减弱赈复体产生的杠杆作用。同时,目前缺少对不同数量的固位体生物力学的研究。

#### 2.2 三维有限元分析在种植支持式赈复体中的应用

无牙颌患者单侧上颌骨缺损后,传统修复体的固位与稳定仍是巨大挑战。Amer等<sup>[5]</sup>研究发现,植体的植入可明显改善这些不足。不同牙植体上部结构对植体及周围骨组织所产生的应力也不同。另一方面,在牙槽骨不足的缺损侧,最大主

应力不能超过上颌骨所承受的生理范围,否则会导致植体周围骨吸收、骨结合失败等<sup>[4]</sup>。

Amer等<sup>[5]</sup>分别建立了由球帽、磁性和杆卡精密附着体等上部结构连接的种植支持式赈复体的三种有限元模型,应力值显示,杆卡附着体所产生的应力最大,磁性附着体的应力值最小。Pesqueira等<sup>[18]</sup>经成像光弹应力分析后也得出了相同的结论。因此,对于单侧上颌骨缺损的无牙颌患者,建议此种修复方式的应用。尽管多个种植体提供的支持、固位与稳定效果更佳,但考虑到外科风险、费用等,植体的数量需合理。且随着植体直径及长度的增加,牙槽嵴所受的应力相应减小,更加均匀<sup>[19]</sup>。

对于部分无足够牙槽骨为种植体提供固位,及不适合外科移植手术的患者,便引入了颧种植体。研究显示,目前颧种植体的成功率大于90%<sup>[20]</sup>。Akay等<sup>[4]</sup>认为在缺损侧与非缺损侧各植入一颧种植体,较植入牙种植体更有优势,同时随着牙种植体数量的增加,其对Von Mises应力无明显影响。Freedman等<sup>[7]</sup>研究了上颌牙槽骨对颧种植体应力分布的影响,发现颧种植体在有牙槽骨支持时,更有利于应力的分布。同时,孙嘉怿等<sup>[16]</sup>认为当健侧上颌骨骨质较差时,建议使用颧种植体固位修复。

由于外科风险、技术难度大,术后恢复时间长及多种并发症等因素,限制了颧种植体在临床的广泛应用。但与传统赈复体及牙种植体相比,考虑到缺损侧骨量不足等因素,颧种植体在单侧上颌骨缺损重建中值得推广。

### 2.3 三维有限元分析在外科组织瓣移植联合赈复体中的应用

近来,随着显微外科、新生物类材料的发展及数字化外科技术在口腔领域的引进,游离组织瓣已成为修复单侧上颌骨缺损的最常用方法<sup>[21]</sup>。对于口腔颌面部缺损的重建,邱蔚六院士提出了“多学科综合序列治疗的观念”,以期实现单侧上颌骨缺损的功能性和美学的重建。

Sun等<sup>[22]</sup>用游离软组织瓣和赈复体修复上颌缺损,发现应力集中于腭与软组织瓣交界处,虽然游离瓣可关闭口鼻腔交通,但严重影响了后续赈复体的稳定性,导致牙列修复困难,因此颌骨缺损的重建,还需持有多学科综合序列治疗的观念。国内学者通过有限元分析法,对传统赈复体修复后和腓骨肌皮瓣重建修复后的上颌骨受力状态进

行了评价,认为后者更有利于上颌骨的缺损重建,为避免病情复发及减轻上颌骨负担,后期可继续佩戴固位卡环类修复体<sup>[23]</sup>。甄恩明等<sup>[24]</sup>建立了腓骨肌皮瓣移植结合颧种植体的有限元模型,认为此种修复方式能将咬合力更合理地分散传导。Mertens等<sup>[25]</sup>用肩胛骨尖游离瓣联合种植支持式赈复体进行修复重建,取得了较好的临床效果,但未评估肩胛骨尖与健侧上颌骨结合处的最大应力。总之,目前自体骨肌皮瓣已成为单侧上颌骨缺损重建的主要趋势,但为了避免健侧基牙和上腭应力集中,建议联合使用种植支持式修复体或有多种固位装置的修复体。外科重建修复手术风险高,术后并发症多,修复期较长,要求术者有较高外科技术,因此要严格掌握适应证。

### 3 小结

综上所述,因单侧上颌骨缺损后修复的复杂性,为保证修复体的固位、稳定效果更佳,保护周围组织的健康,目前自体骨肌皮瓣移植联合种植支持式修复体或有多种固位装置的修复体已成为单侧上颌骨缺损修复的发展趋势。笔者认为,对于缺损的重建,除考虑患者自身健康状况的同时,他们对手术的耐受性,经济能力及个人意愿等因素也不容忽视。

建模方面,虽然目前MRI和CBCT分别对软硬组织的分辨率很高,但寻求一种对两种组织分辨率均高的影像设备也至关重要。现在三维有限元软件建模繁琐,由此期望有限元软件得以改进,以简化建模步骤,使以后的研究纳入更多的研究对象,实验结果更具代表性;以纳入更多的组织结构,使实验结果更接近客观;可充分考虑口腔软硬组织完全非线性、黏弹性、载荷以及咬合情况,真实的反应口腔组织的生物力学特性,为生物力学研究提供更有利的帮助,为临床修复体最优化设计开拓广阔的前景。

### 参考文献

- [1] 尚晓江,邱峰,赵海峰. ANSYS结构有限元高级分析方法与范例应用-第2版[M]. 中国水利水电出版社, 2008.
- [2] Jafari A, Shetty KS, Kumar M. Study of stress distribution and displacement of various craniofacial structures following application of transverse orthopedic forces--a three-dimensional FEM study [M]. A history of the Roumanians :The University Press, 2003.
- [3] Eom JW, Lim YJ, Kim MJ, et al. Three-dimensional finite element analysis of implant-assisted removable partial dentures[J]. J Pros-



- thet Dent, 2017,117(6): 735-742.
- [4] Akay C, Yaluğ S. Biomechanical 3-dimensional finite element analysis of obturator protheses retained with zygomatic and dental implants in maxillary defects[J]. Med Internet Res, 2015, 21: 604-611.
- [5] Amer MM, Rashad HA, Abdallah S. Stress distribution of implant retained obturators using different types of attachments: a three dimensional finite element analysis[J]. J Tanta Dent, 2015, 12: S30-S40.
- [6] Park JC, Shin HS, Cha JY. A three-dimensional finite element analysis of the relationship between masticatory performance and skeletal malocclusion[J]. J Periodontal Implant Sci, 2015, 45(1): 8-13.
- [7] Freedman M, Ring M, Stassen L. Effect of alveolar bone support on zygomatic implants: a finite element analysis study[J]. Int J Oral Maxillofac Surg, 2013, 42(5): 785-790.
- [8] Hambli R. Micro-CT finite element model and experimental validation of trabecular bone damage and fracture[J]. J Bone, 2013, 56(2): 363-374.
- [9] 王娇, 刘洋, 李旭, 等. PC机上基于CT、MRI图像构建的颌面部三维数字模型[J]. 中国组织工程研究, 2014, 18(36): 5788-5792.
- [10] Detterbeck A, Hofmeister M, Hofmann E, et al. MRI vs. CT for orthodontic applications: comparison of two MRI protocols and three CT (multislice, cone-beam, industrial) technologies[J]. J Orofac Orthop, 2016, 77(4): 1-11.
- [11] Moreno MA, Skoracki RJ, Hanna EY. Microvascular free flap reconstruction versus palatal obturation for maxillectomy defects[J]. Head & Neck, 2010, 32(7): 860-868.
- [12] Omo JO, Sede MA, Enabulele JE. Prosthetic rehabilitation of patients with maxillary defects in a Nigerian Tertiary hospital[J]. Ann Med Health Sci Res, 2014, 4(4): 630-633.
- [13] Vero N, Mishra N, Singh BP. Assessment of swallowing and masticatory performance in obturator wearers: a clinical study[J]. J Adv Prosthodont, 2015, 7(1): 8-14.
- [14] Dong X, Zhu C, Qian Y, et al. The Influence of obturators on the respiration of patients with maxillary defects: a clinical study[J]. Plos One, 2015, 10(5): e0127597.
- [15] Sun J, Jiao T, Tie Y. Three-dimensional finite element analysis of the application of attachment for obturator framework in unilateral maxillary defect[J]. J Oral Rehabil, 2008, 35(9): 695-699.
- [16] 孙嘉恂, 都承斐, 徐鹏, 等. 不同固位技术修复单侧上颌骨缺损的生物力学研究[J]. 医用生物力学, 2014(4): 327-333.
- [17] 初晓阳. 单侧上颌骨缺损前牙附着体固位腭复体三维有限元研究[D]. 中国人民解放军医学院, 2014.
- [18] Pesqueira AA, Goiato MC, Da SE, et al. Stress analysis in oral obturator protheses, part II: photoelastic imaging[J]. J Biomed Opt, 2014, 19(6): 066012.
- [19] Ohyama T, Yasuda H, Shibuya N, et al. Three-dimensional finite element analysis of the effects of implant diameter and photofunctionalization on peri-implant stress[J]. J Oral Sci, 2017, 59(2): 273-278.
- [20] Vashisht R, Bhalla HK, Prithviraj DR. From maxilla to zygoma: a review on zygomatic implants[J]. J Oral Implantol, 2014, 4(1): 44-47.
- [21] 于森, 王洋, 毛驰, 等. 1107例上颌骨缺损的临床分类及修复方法分析[J]. 北京大学学报(医学版)医学版, 2015, 47(3): 509-513.
- [22] Sun J, Jiao T. Three-dimensional finite element analysis of the prosthetic rehabilitation for unilateral maxillary defect after free flap reconstruction[J]. Int Conf Biomed Eng Inf, 2010, 3(5): 1886-1888.
- [23] 孙嘉恂, 徐鹏, 王丽珍, 等. 基于有限元的单侧缺损上颌骨不同修复方法的生物力学研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2014(3): 590-595.
- [24] 甄恩明, 吴昌敬, 邵军. 双侧上颌骨缺损颧种植体修复的有限元探讨[J]. 中国口腔种植学杂志, 2016, 21(3): 107-110.
- [25] Mertens C, Freudlsperger C, Bodem J, et al. Reconstruction of the maxilla following hemimaxillectomy defects with scapular tip grafts and dental implants[J]. J Craniomaxillofac Surg, 2016, 44(11): 1806-1811.

(编辑 罗燕鸿, 曾曙光)