

· 实验研究 ·

有限元生物力学分析对眶颧颌骨折不同内固定方式稳定性的评价

李岩¹ 吴鹏森¹ 马越¹ 唐美婷¹ 曾薛颖¹ 唐媛媛² 于申³ 卢苇¹¹大连医科大学附属第二医院眼科 116027; ²大连医科大学附属第二医院耳鼻喉科 116027; ³大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 116024

通信作者: 于申, Email: yushenking@sina.com; 卢苇, Email: drluweicn@163.com

【摘要】 目的 通过有限元生物力学分析方法评价眶颧颌骨折不同内固定方式的稳定性, 为选择最佳内固定方式提供新的研究方法和客观的量化依据。 **方法** 选择 2016 年 10 月于大连医科大学附属第二医院确诊为眶颧颌骨折 (Zingg B 型) 的患者 1 例, 术中固定颧额缝、眶下缘, 术后功能恢复良好, 无张口受限、咬合功能正常、无复视、无内固定植入物移位、面部外观对称。收集术前眼眶 CT 图像, 利用 Mimics、Geomagic、Solidworks、Abaqus 软件对健侧镜像处理模拟构建正常的颅面部骨骼有限元模型 (FEM/intact) 并进行验证, 在此基础上根据骨折位置进行分割、装配, 结合临床手术固定位点构建骨折内固定模型, 分别为固定颧额缝有限元模型 (FEM/ZFS)、固定眶下缘有限元模型 (FEM/IOE)、固定颧额缝及眶下缘有限元模型 (FEM/ZFS+IOE) 和固定颧额缝、眶下缘及颧上颌缝有限元模型 (FEM/ZFS+IOE+ZMS)。对不同内固定模型加载咬肌牵拉力, 分析材料与骨折段的应力及位移、计算颧骨的旋转角度。并根据患者实际的手术情况建立术后模型 (FEM/Post), 与术前模拟的 FEM/ZFS+IOE 分析结果进行对比。 **结果** 建立的 FEM/intact 外观逼真, 几何相似性好, 模型通过准确性验证。FEM/ZFS+IOE 与 FEM/ZFS+IOE+ZMS 内固定钛板的最大应力分别为 396 MPa 和 426 MPa, 均低于其屈服强度 483 MPa, 骨折线最大位移分别为 0.10 mm 和 0.06 mm, 均 ≤ 0.1 mm, 颧骨旋转角度均 $< 2^\circ$; FEM/ZFS 与 FEM/IOE 内固定钛板的最大应力分别为 730 MPa 和 501 MPa, 均高于其屈服强度, 骨折线最大位移分别为 0.27 mm 和 0.15 mm, 均 > 0.1 mm, 颧骨旋转角度均 $> 2^\circ$ 。FEM/Post 应力及位移情况与 FEM/ZFS+IOE 分析结果一致。 **结论** 有限元生物力学分析方法可以在术前对眶颧颌骨折不同内固定方式的稳定性进行数字化分析评价从而选择出最佳固定方式, 为眶颧颌骨折的精准治疗提供新的研究方法和客观的量化依据。

【关键词】 颧骨骨折; 眶骨折; 骨折内固定; 生物力学; 有限元分析**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (81700874、11572079); 辽宁省自然科学基金指导计划项目 (20170540278)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20200727-00529

Stability evaluation of different internal fixation methods for zygomaticomaxillary complex fractures by finite element biomechanical analysisLi Yan¹, Wu Pengsen¹, Ma Yue¹, Tang Meiting¹, Zeng Xueying¹, Tang Yuanyuan², Yu Shen³, Lu Wei¹¹Department of Ophthalmology, The Second Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116027, China; ²Department of Otorhinolaryngology, The Second Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116027, China; ³Department of State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China
Corresponding authors: Yu Shen, Email: yushenking@sina.com; Lu Wei, Email: drluweicn@163.com

【Abstract】 Objective To analyze the stability of different internal fixation methods for zygomaticomaxillary complex fracture using finite element biomechanical analysis and to provide a quantitative basis for the option of optimal internal fixation methods. **Methods** One patient with zygomaticomaxillary complex ZMC fracture (Zingg B type) was enrolled from the Second Hospital of Dalian Medical University in October 2016. The zygomaticofrontal suture and the inferior orbital rim were fixed during the surgery, and the postoperative function was well recovered with no mouth opening restriction, diplopia or implant displacement, and had a symmetrical facial appearance. The preoperative orbital CT images were collected. The normal craniofacial bones finite element model (FEM/intact) was reconstructed through Mimics, Geomagic, Solidworks and Abaqus softwares based on the non-fractured side and

verified. Based on the verified model, the segmentation and assembling was performed according to the fracture location, and the internal fixation models were established according to the methods of surgery, including fixed zygomaticofrontal suture model (FEM/ZFS), fixed inferior orbital rim model (FEM/IOR), fixed zygomaticofrontal suture and inferior orbital rim model (FEM/ZFS+IOR), fixed ZFS and IOR and zygomaticomaxillary suture model (FEM/ZFS+IOR+ZMS). The masseter muscle strength was applied to the model. The stress and displacement were analyzed and the rotation angle of zygoma was calculated to compare the stability of different operative methods. The postoperative model (FEM/post) was established according to the actual operative method and was compared with FEM/ZFS+IOR. This study protocol was approved by the Ethic Committee of The Second Hospital of Dalian Medical University (2020-33), and written informed consent was obtained from the subject before entering the study.

Results The established FEM/intact had a realistic appearance and good geometric similarity, and the validity and accuracy of model was verified. In the FEM/ZFS+IOR and FEM/ZFS+IOR+ZMS, the maximal stress of the titanium plate was 396 MPa and 426 MPa, respectively, which was lower than the yield strength 483 MPa of pure titanium, and the maximal displacement of the fracture line was 0.10 mm and 0.06 mm, respectively, which was both ≤ 0.1 mm, and the rotation angle of zygoma was both $< 2^\circ$. In the FEM/ZFS and FEM/IOR, the maximal stress of the titanium plate was 730 MPa and 501 MPa, respectively, which was higher than the yield strength of pure titanium; the maximal displacement of fracture line was 0.27 mm and 0.15 mm, respectively, which was > 0.1 mm, and the rotation angle of zygoma was $< 2^\circ$. The results of FEM/post were consistent with those of FEM/ZFS + IOR.

Conclusions The finite element analysis can perform digital analysis and evaluation of the stability of different internal fixation methods before surgery, which is available for the selecting of the optimal fixation methods. Finite element analysis can provide an objective quantitative basis for the precise treatment of zygomaticomaxillary complex fractures.

[Key words] Zygomatic fractures; Orbital fractures; Fracture fixation/internal; Biomechanics; Finite element analysis

Fund program: National Natural Science Foundation of China (81700874, 11572079); Science and Technology Plan of Liaoning Province (20170540278)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20200727-00529

眶颧颌骨折是同时涉及眼眶、上颌骨、颧骨和鼻窦、鼻泪管等结构的复合型眼眶骨折,约占面中部骨折的 40%^[1]。眶颧颌骨折不仅造成颜面部畸形、眼球内陷等外观改变,而且导致视功能受损、眼球运动障碍及咬合错乱等功能障碍,严重影响患者的生活^[2]。近来随着计算机辅助设计、制作和术中导航技术的应用,骨折复位的准确性明显提高,然而目前对于眶颧颌骨折内固定方式的选择仍缺乏客观量化的指标,主要依靠术者的临床经验,无法做到精准的个性化修复,常导致术后出现骨折复位不佳、内固定装置移位、断裂等并发症,治疗状况仍待改善^[3-4]。眶周的力学环境是眶颧颌骨折修复的重要影响因素。正常情况下,眶周附着的咬肌、表情肌等肌肉完成咬合、表情等生理功能,同时牵拉着眶缘,使眶缘承受一定的负荷。在选择内固定方式时,若选用的固定角度及位点与骨折处力学环境不相符,当周围牵引力持续存在时,会导致修复材料变形、移位,甚至断裂,造成骨折复位不佳、骨组织畸形愈合等并发症。有限元法是把一个复杂整体分解为有限个简单物体的组合来模拟、计算、分析的方法,即是先化整为零分析,然后积零为整的研究方法,其优势在

于可将具有不规则外形结构的物体分割成许多可以单独负载的简单小单元,从而评估整个不规则物体结构的受力情况,先离散、后整合的方法是有限元法的基本思想^[5]。近年来有限元法被广泛应用于正常人体四肢脊柱及软组织的生物力学研究、骨折的受力机制、骨科内固定器械的生物力学、内植物应力遮挡研究及内固定器械设计等^[6]。目前有限元法在眼科被成熟应用于眼眶有限元模型构建、爆裂性眼眶骨折修复的生物力学研究,与传统的力学实验手法相比,数字化有限元模型具有可重复计算、节约时间经费、结果精确度高等优点,使骨折发生机制、手术方式的研究取得新的进展^[7-9]。目前鲜见将有限元生物力学分析方法用于眶颧颌骨折不同内固定方式评价的相关研究。本研究尝试将有限元生物力学分析方法应用于眶颧颌骨折的临床治疗研究中,以为骨折复位效果提供客观的评估指标,为研究手术方式以及内固定的选择提供新的途径。

1 材料与方法

1.1 实验对象

纳入 2016 年 10 月于大连医科大学附属第二医院

确诊为眶颧颌骨折 (Zingg B 型) 的患者 1 例, 女, 31 岁。术中固定颧额缝、眶下缘, 术后功能恢复良好: 无张口受限、咬合功能正常、无复视、无内固定植入物移位、面部外观对称。患者知晓本实验目的和步骤, 并签署知情同意书。本研究方案经大连医科大学附属第二医院伦理委员会审核通过 (批文号: 2020 第 33 号)。

1.2 方法

1.2.1 CT 影像数据收集

本研究在大连医科大学附属第二医院眼科生物力学实验室进行。获得患者术前眼眶 64 排螺旋 CT 平扫图像 (美国 GE 公司), 扫描层厚为 0.625 mm, 扫描范围为下颌骨至眉弓上 6 cm, 共 117 张图片, 数据以 DICOM 格式保存。

1.2.2 正常颅面部骨骼有限元模型的建立

将以 DICOM 格式保存的 CT 数据导入 Mimics19.0 软件 (比利时 Materialise 公司), 设定适当的灰度阈值, 对图像进行分割, 应用镜像功能依据健侧建立正常的颅面部骨骼三维模型, 输出为 STL 格式文件, 导入 Geomagic Studio12.0 软件 (美国 Geomagic 公司) 进行光滑降噪处理并进行曲面模拟, 生成 NURB 曲面模型。

将得到的 NURB 曲面模型经 Abaqus17.0 软件 (法国 Dassault Systemes 公司) 进行网格划分、材料赋值、边界约束。材料赋值: 皮质骨、松质骨的相关材料均为均质、各向同性, 设置皮质骨弹性模量为 13 500 MPa, 泊松比为 0.3^[10]。网格划分: 采用平均边长为 1.0 mm 的二次四面体单元对颅面部骨骼进行网格划分, 通过网格无关性检验后, 该模型节点数约为 3.6×10^5 , 单元数约为 2.4×10^5 。边界约束: 固定颧骨颧突的根部, 眼眶的上部, 上颌骨的后部、内侧, 使各节点在 X、Y、Z 轴上的位移为 0。在咬肌附着点模拟施加咬肌作用力, 肌力大小参考文献 [11], 由公式计算施加载荷: $F_{i, \max} = P \cdot A_i$ 。其中, $F_{i, \max}$ 为生理活动时咬肌肌力, P 为肌内在强度强数, $P = 0.37 \times 10^6 \text{ N/m}^2$; A_i : 为第 i 块咬肌的生理横断面积。计算得到正常生理活动时咬肌肌力约为 120 N, 肌力线方向参考文献 [12], 即矢状平面向后 12.3°、冠状平面向外 4.1°, 建立正常的咬肌牵拉状态下颅面部骨骼有限元模型 (finite element model/intact, FEM/intact)。

1.2.3 4 种模拟内固定模型及术后实际内固定有限元模型的建立

在 FEM/intact 模型的基础上, 根据患者的骨折情况, 即骨折线位于颧额缝、眶下缘、颧上颌缝、颧弓和颧蝶缝, 建立 ZinggB 型骨折模型^[13]。运用 SolidWorks2016 软件 (法国 Dassault Systemes 公司) 模拟临床常用的手术方式分别建立固定颧额缝、固定眶下缘、固定颧额缝及眶下缘和固定颧额缝、眶下缘及颧

上颌缝的模型。应用 Abaqus17.0 软件赋予钛板纯钛材料属性, 赋予钛钉钛合金材料属性, 弹性模量为 110 GPa, 泊松比为 0.3^[6]。采用平均边长为 0.1 mm 的线性六面体单元生成钛板和螺钉网格。设置骨折断端为摩擦接触, 摩擦系数为 0.2。固定颧骨颧突根部、眼眶上部、上颌骨后部及内侧, 施加咬肌肌力 120 N, 建立 4 种内固定有限元模型即固定颧额缝有限元模型 (finite element model/fixed zygomatico-frontal suture, FEM/ZFS)、固定眶下缘有限元模型 (finite element model/fixed inferior orbital rim, FEM/IOR)、固定颧额缝+眶下缘有限元模型 (finite element model/fixed zygomaticofrontal suture+inferior orbital rim, FEM/ZFS+IOR) 和固定颧额缝+眶下缘+颧上颌缝有限元模型 (finite element model/fixed zygomaticofrontal suture+inferior orbital rim+zygomaticomaxillary suture, FEM/ZFS+IOR+ZMS)。同理, 根据患者术后内固定材料的实际放置情况, 建立术后有限元模型 (finite element model/post, FEM/Post), 各模型网格划分结果见表 1。

表 1 不同固定方式有限元模型网格划分结果
Table 1 The nodes and element numbers of different fixation method models

有限元模型	节点数	单元数
FEM/intact	360 405	240 627
FEM/ZFS	476 564	340 282
FEM/IOR	481 432	350 180
FEM/ZFS+IOR	613 288	467 022
FEM/ZFS+IOR+ZMS	449 369	604 374
FEM/Post	700 783	3 759 246

注: FEM/ZFS: 固定颧额缝有限元模型; FEM/IOR: 固定眶下缘有限元模型; FEM/ZFS+IOR: 固定颧额缝+眶下缘有限元模型; FEM/ZFS+IOR+ZMS: 固定颧额缝+眶下缘+颧上颌缝有限元模型; FEM/Post: 术后有限元模型

Note: FEM/ZFS: finite element model/fixed zygomaticofrontal suture; FEM/IOR: finite element model/fixed inferior orbital rim; FEM/ZFS+IOR: finite element model/fixed zygomaticofrontal suture+inferior orbital rim; FEM/ZFS+IOR+ZMS: finite element model/fixed zygomaticofrontal suture+inferior orbital rim+zygomaticomaxillary suture; FEM/Post: finite element model/post

1.2.4 模型的验证及分析

应用 Abaqus 软件, 通过施加 3 种不同的载荷, 对正常的颅面部骨骼有限元模型进行验证: (1) 根据生理状态下咬肌牵拉力施加载荷 120 N; (2) 根据最大咬肌牵拉力施加载荷 400 N; (3) 根据均匀咬合状态上颌骨牙槽突下面受到向上的力施加载荷 500 N。分析各模型的应力及位移, 与既往文献 [14] 和 [15] 中的实验数据进行对比验证。

应用 Abaqus 软件分析 FEM/ZFS、FEM/IOR、

FEM/ZFS+IOR、FEM/ZFS+IOR+ZMS 和 FEM/Post 内固定材料及骨折段的应力及位移。内固定钛板的材料设为纯钛 (CP-Ti), 螺钉的材料设为钛合金 (Ti-6Al-7Nb), 其力学特性抗拉强度、屈服强度参考 ASTM 和 ISO 标准^[16-17]。参照 Deveci 等^[18]进行体外实验研究采用的公式计算颧骨的旋转角度, 评价标准: 颧骨特征线旋转角度 < 2° 为稳定; 在 2° ~ 5° 内为可接受; > 5° 为不确切。

2 结果

2.1 FEM/intact 模型验证

本研究建立的正常颅面部骨骼的有限元模型外观逼真, 几何相似性好 (图 1)。共包含 240 627 个单元, 360 405 个节点。对该模型施加 3 种不同载荷后的应力及位移分布与既往研究中发表的分析结果基本一致 (表 2)。

2.2 骨折段及内固定材料的应力分析

FEM/ZFS、FEM/IOR 内固定钛板的最大应力分别为 730 和 501 MPa, 均高于纯钛材料的屈服强度 483 MPa。FEM/ZFS + IOR、FEM/ZFS + IOR + ZMS、FEM/Post 内固定钛板的最大应力分别为 396、426 和 394 MPa, 均低于纯钛材料的屈服强度 483 MPa。且螺钉的最大应力分别为 571、292 和 176 MPa, 均低于钛合金材料的屈服强度 773 MPa (图 2, 表 3)。

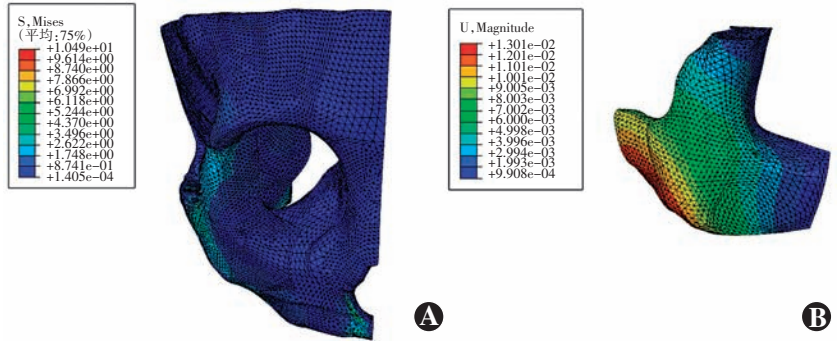


图 1 颅面部骨骼有限元模型 加载 120 N 咬肌牵拉力, 应力及位移分析显示颧弓区最大应力为 10.49 N, 颧骨复合体的最大位移为 0.01 mm A: 应力分布云图 B: 位移分布云图

Figure 1 Finite element model of craniofacial bones The force of 120 N was applied to the model to simulate the masseter muscle strength. The stress and displacement analysis showed that the maximal stress of zygomatic arch was 10.49 N, and the maximal displacement of zygoma was 0.01 mm A: the distribution nephogram of stress B: the distribution nephogram of displacement

表 2 本研究与既往文献 FEM/intact 施加不同载荷后应力大小及分布比较 Table 2 Comparison of the magnitude and distribution of stress in FEM/intact under different loads between this study and the previous literature

FEM/intact 模型	120 N 咬肌牵拉力下		
	颧上颌缝处应力 (MPa)	颧弓区应力 (MPa)	最大应力分布
本研究	4.55	10.49	颧弓区
文献 [15]	22.18	14.83	颧弓区
FEM/intact 模型	400 N 咬肌牵拉力下		
	颧上颌缝处应力 (MPa)	颧弓区应力 (MPa)	最大应力分布
本研究	16.56	34.71	颧弓部位
文献 [14]	16.95	71.20	颧弓部位
FEM/intact 模型	500 N 均匀咬合力下		
	颧上颌缝处应力 (MPa)	颧弓区应力 (MPa)	最大应力分布
本研究	14.33	8.60	眼眶、上颌骨内侧部
文献 [14]	13.42	10.35	眼眶、上颌骨内侧部

注: FEM/intact: 颅面部骨骼有限元模型
Note: FEM/intact: finite element model/intact

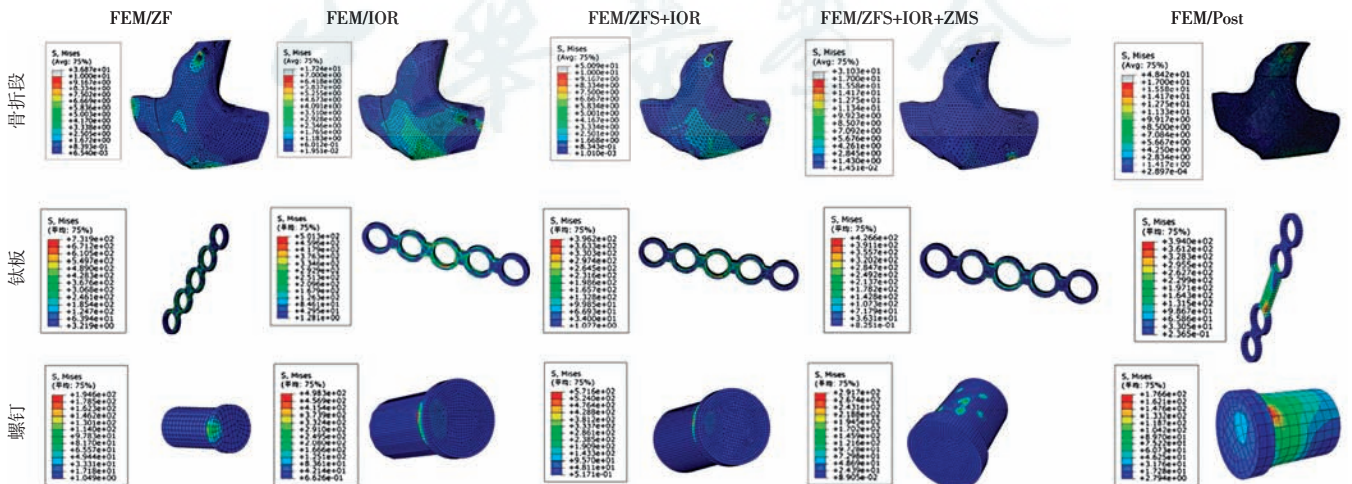


图 2 各模型骨折段、钛板、螺钉的应力分布云图 FEM/ZFS: 固定颧额缝有限元模型; FEM/IOR: 固定眶下缘有限元模型; FEM/ZFS+IOR: 固定颧额缝+眶下缘有限元模型; FEM/ZFS+IOR+ZMS: 固定颧额缝+眶下缘+颧上颌缝有限元模型; FEM/Post: 术后有限元模型
Figure 2 The stress distribution nephogram of the fracture segment, titanium plate and screw in different models FEM/ZFS: finite element model/ fixed zygomaticofrontal suture; FEM/IOR: finite element model/ fixed inferior orbital rim; FEM/ZFS+IOR: finite element model/ fixed zygomaticofrontal suture+inferior orbital rim; FEM/ZFS+IOR+ZMS: finite element model/ fixed zygomaticofrontal suture+inferior orbital rim+zygomaticomaxillary suture; FEM/Post: finite element model/post

2.3 骨折段、内固定材料的位移分析及颧骨旋转角度
通过位移分布云图查看各个结构的位移, FEM/
ZFS+IOR、FEM/ZFS+IOR+ZMS 和 FEM/Post 骨折段的

最大位移均 ≤ 0.1 mm (图 3); FEM/ZFS 与 FEM/IOR
骨折段最大位移均 > 0.1 mm。各模型最大位移均位于
颧额缝。各模型颧骨旋转角度均 < 2° (表 3)。

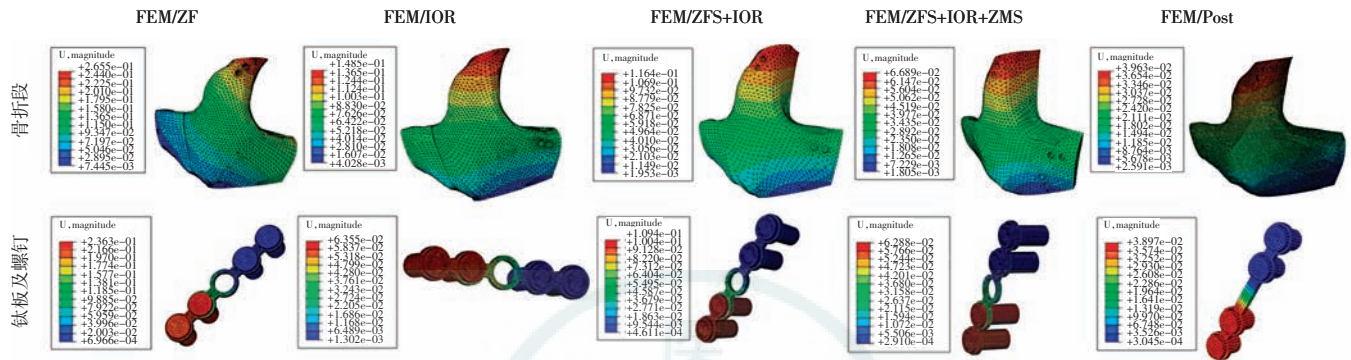


图 3 各模型骨折段、钛板及螺钉位移分布云图 FEM/ZFS: 固定颧额缝有限元模型; FEM/IOR: 固定眶下缘有限元模型; FEM/ZFS+IOR: 固定颧额缝+眶下缘有限元模型; FEM/ZFS+IOR+ZMS: 固定颧额缝+眶下缘+颧上颌缝有限元模型; FEM/Post: 术后有限元模型

Figure 3 The displacement distribution nephogram of the fracture segment, titanium plate and screw in different models FEM/ZFS: finite element model/fixed zygomaticofrontal suture; FEM/IOR: finite element model/fixed inferior orbital rim; FEM/ZFS + IOR: finite element model/fixed zygomaticofrontal suture+inferior orbital rim; FEM/ZFS+IOR+ZMS: finite element model/fixed zygomaticofrontal suture+inferior orbital rim+ zygomaticomaxillary suture; FEM/Post: finite element model/post

表 3 各模型骨折段及内固定材料的应力、位移及颧骨旋转角度比较

Table 3 Comparison of stress and displacement of implants and the fracture segment, the rotation angle of zygoma among various models

模型	应力 (MPa)			位移 (mm)				颧骨旋转角度 (°)
	骨折段	钛板	螺钉	ZFS	IOR	钛板	最大值	
FEM/ZFS	36	730	582	0.25	0.18	0.23	0.27	0.57
FEM/IOR	17	501	498	0.14	0.06	0.06	0.15	0.34
FEM/ZFS+IOR	50	396	571	0.10	0.05	0.10	0.10	0.26
FEM/ZFS+IOR+ZMS	31	426	292	0.06	0.03	0.06	0.06	0.16
FEM/Post	48	394	176	0.04	0.02	0.03	0.04	0.10

注: FEM/ZFS: 固定颧额缝有限元模型; FEM/IOR: 固定眶下缘有限元模型; FEM/ZFS+IOR: 固定颧额缝+眶下缘有限元模型; FEM/ZFS+IOR+ZMS: 固定颧额缝+眶下缘+颧上颌缝有限元模型; FEM/Post: 术后有限元模型

Note: FEM/ZFS: finite element model/fixed zygomaticofrontal suture; FEM/IOR: finite element model/fixed inferior orbital rim; FEM/ZFS + IOR: finite element model/fixed zygomaticofrontal suture+inferior orbital rim; FEM/ZFS + IOR + ZMS: finite element model/fixed zygomaticofrontal suture+inferior orbital rim+zygomaticomaxillary suture; FEM/Post: finite element model/post

3 讨论

3.1 生物力学分析在眶颧颌骨折修复中的应用价值

目前眶颧颌骨折的内固定方式的选择主要依据术者的经验而缺乏客观量化的评判指标。临床上对于不完全性的颧骨骨折多提倡单点固定; 对于完全性颧骨骨折, 则视骨折的具体情况决定内固定植入物的位置和数量, 常用的固定方式分为 2 点固定和 3 点固定, 但是选择的适应证仍有争议^[3, 19-20]。虽然理论上固定点越多固定效果相对更稳定, 但是更多的固定点需要增加手术切口、延长手术时间及放置更多的内植入物, 因此在保证手术效果的前提下减少固定位点和修复材料

的使用并缩短手术时间对患者更为有利。

Nasr 等^[19]在临床治疗中发现 2 点与 3 点内固定方式在颧骨对称性、解剖学复位、咬合功能恢复和患者满意度方面没有显著差异, 并且 3 点内固定方式增加了手术时间和患者的费用。Lee 等^[21]采用经结膜切口 2 点 (颧额缝+眶下缘) 内固定的方式对 53 例眶颧颌骨折患者进行治疗, 结果发现 6 例患者需增加口内前庭切口 3 点固定以达到稳定复位, 其余患者经过长期随访整体外观及功能恢复良好。在本研究组过去 5 年的临床诊疗中, 共对 48 例 Zingg B 型眶颧颌骨折患者采用 2 点内固定方式治疗, 经过长期随访发现, 患者术后张口、咬合功能及外观均恢复良好, 术后复查 CT 示内植入物无移位。对于这些患者, 2 点内固定方式可以提供足够的稳定性, 患者术后生理功能和外观恢复良好, 并且该内固定方式可减轻手术创伤, 缩短手术时间, 降低手术费用。理想的内固定方式是使用较少的固定位点同时还要保障内固定的稳定性及安全性, 因此我们拟在术前对固定点的选择进行预见性评估。

结合目前的临床需要, 我们发现有限元生物力学分析方法具备可行性: (1) 有限元模型可以准确模拟眶周的力学环境。颧骨复合体结构复杂且受咬肌牵

动,在咬肌牵拉的作用下可发生内固定材料移位、颧骨体旋转、面部外观不对称等并发症^[22],因此研究咬肌肌力的作用对眶颧颌骨折修复手术具有重要意义。本研究通过构建眶颧颌骨折数值模型,模拟生理状态下咬肌肌力大小、作用位点及肌力线方向,可准确模拟骨折区域咬肌肌力作用情况。(2)有限元分析方法可进行多种术前模拟,如模拟不同术式、不同植入物材料以及它们之间的不同组合,具有成本低、耗时少、可重复性强、信度高的优势,可行性远高于通常的力学实验方法。(3)有限元分析可实现应力及位移的可视化,清晰地展示高应力区域和位移大小。对于骨折内固定的研究,应力云图可清晰显示应力集中的区域,提示术者此区域应注意材料的强度是否足够承受;位移云图可直观反应各骨折线的位移大小,位移大的位置应注意术中稳定固定。同时也可以查询关注节点在空间中各个方向的位移值,如颧骨旋转角度就是通过查询颧额缝处特定点在 X 轴方向的位移值计算得到。综上所述,有限元分析方法可以在术前客观评估眶颧颌骨折的最佳内固定方式。

3.2 眶颧颌骨折不同内固定方式的生物力学评价及临床意义

通常每个有限元模型的建立都需要验证其有效性,在输入真实的几何数据情况下,需要通过与体外实验、生物力学实验或者文献报道的已经公认的有限元模型进行比较验证。本研究将建立的颅面部骨骼有限元模型与柳大烈等^[14]和许崇涛等^[15]的分析数据比较,在材料属性、边界条件、施加载荷一致的前提下,得出的结果基本一致。

本研究在已验证模型的基础上模拟临床常用的眶颧颌骨折内固定方式,建立了 4 种骨折内固定模型。结果分析主要包括以下几个方面:首先分析内固定材料的稳定性,判断其是否足够承受骨折处的应力,是否会发生变形及失效;然后分析其骨折段位移情况,判断术后骨折线能否良好愈合;最后分析颧骨旋转角度,判断颧骨复合体在咬肌牵拉作用下发生的旋转移位情况,以评价术后面部外观的对称性。研究表明,在 FEM/ZFS 与 FEM/IOR 中内固定材料的最大应力均高于其屈服强度,有发生术后内固定材料移位、变形的风险;骨折线最大位移均 $>0.1\text{ mm}$,其中颧额缝位移值最大,有术后双侧颧骨高度不对称的风险,虽然颧骨旋转角度均 $<2^\circ$,但仍考虑其内固定不稳定;在 FEM/ZFS+IOR、FEM/ZFS+IOR+ZMS 中,内固定材料的最大应力均明显低于其屈服强度,且骨折段的应力通过内固定钛板、螺钉传递,使骨折段应力较小。骨折线位移值均

$\leq 0.1\text{ mm}$,提示术后骨折线愈合良好,且颧骨特征线旋转角度均 $<2^\circ$,认为这 2 种内固定方法均较稳定;其中 FEM/ZFS+IOR+ZMS 骨折线的位移值 $\leq 0.06\text{ mm}$,接近 FEM/intact 的结果,稳定性较好。患者实际治疗时采用两点内固定颧额缝及眶下缘,依据内固定材料放置的实际情况建立术后有限元模型 FEM/Post,分析结果表明内固定钛板的应力、骨折段的应力、位移及颧骨旋转角度与 FEM/ZFS+IOR 分析结果一致,患者长期随访无张口受限,无咬合功能障碍,面部外观对称,有限元分析结果与患者良好的术后效果相吻合,证实了有限元方法术前模拟预测术后效果的可靠性。另外,各内固定模型的最大位移出现在颧额缝骨折线处,而颧弓骨折线处位移值较小,提示了颧额缝稳定固定的必要性而颧弓处可不予以固定,与临床实际情况相符。

综上所述,本研究将有限元分析方法创新性地应用于眶颧颌骨折修复的生物力学研究中,采用 1 例患者的 CT 图像建模,经过有效性验证证实所建立的眼眶有限元模型真实合理,在此基础上对眶颧颌骨折不同内固定方式进行模拟并评价其稳定性,综合应力、位移分析结果及临床治疗效果发现,对于 Zingg B 型眶颧颌骨折,2 点内固定方式(固定颧额缝+眶下缘)可以提供足够的稳定性,是创伤最小且稳定性最佳的内固定方式,与我们既往临床实践得到的结论相符。但是本研究处于新方法的引入阶段,待成熟应用后我们需要收集更多的临床病例、扩大样本量进行统计学分析,进一步证实该方法的可行性及有效性,为眶颧颌骨折的治疗提供更加客观精准的数值依据,指导最佳内固定方式的选择。

3.3 有限元生物力学分析方法的优点及局限性

有限元法能在相当大的程度上代替传统的生物力学实验,且能控制实验条件和模拟活体运动状态下的力学情况。既往的眶颧颌骨折生物力学研究多采取体外生物力学实验方法,通过测试设备模拟施加咀嚼肌力,对骨骼的表面结构进行研究,而对骨骼内部、眶周肌肉的力学研究稍欠缺,难以做到全面分析眼眶的应力状态。有限元分析能对不同固定位点及咬合状态下的负荷进行较为全面地分析,也能很好地反映钛板、螺钉、内固定系统、眼眶内部及眶周肌肉的力学情况,同时数字化有限元模型具有可重复计算、节约时间经费、结果精确度高、有效回避了伦理学问题等优点,为研究眼眶骨折手术方式以及内固定的选择提供了新的途径。在分析过程中我们发现有以下衍生问题需探讨:眶颧颌骨折的有限元建模需要许多可靠的参数,由于眼眶、眶周肌肉等组织的力学性质极其复杂,目前暂

无统一的标准来真实地反映其生物特性,在接下来的研究中需要探寻眶颧颌骨折患者咬肌肌力的测量方法,完善眶周肌力的个性化准确加载。另外,在模型的构建过程中对于划分单元、加载载荷及边界条件的选择上无统一的规定,使得构建的模型可能存在误差,以后的研究中需要进一步优化完善模型,促使建模流程程序化。

3.4 有限元生物力学分析方法的前景及展望

作为数字医学发展的一部分,有限元生物力学分析为眼眶骨折的研究提供了安全、有效的方法。本研究中眼眶有限元模型的成功建立为今后进行眶颧颌骨折内固定材料的选择、多发性眼眶骨折修复重建稳定性的生物力学研究提供了良好基础。随着数字成像技术和计算机技术的发展以及医学和力学的交叉融合,我们将建立出更精确、详尽的眼眶骨折模型,展现出医学的高精尖特点;并在临床实践中积累更多的病例数据资料,促进数字化眼眶外科平台的构建,总结规律,形成智能化的术前分析,在术前为眶颧颌骨折患者提供精准的内固定治疗方案,实现更加精准的个性化治疗。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- Balakrishnan K, Ebenezer V, Dakir A, et al. Management of tripod fractures (zygomaticomaxillary complex) 1 point and 2 point fixations: A 5-year review [J]. J Pharm Bioallied Sci, 2015, 7 (Suppl 1) : S242-247. DOI:10.4103/0975-7406.155937.
- Farber SJ, Nguyen DC, Skolnick GB, et al. Current management of zygomaticomaxillary complex fractures: a multidisciplinary survey and literature review [J]. Craniomaxillofac Trauma Reconstr, 2016, 9 (4) : 313-322. DOI:10.1055/s-0036-1592093.
- Gadkari N, Bawane S, Chopra R, et al. Comparative evaluation of 2-point vs 3-point fixation in the treatment of zygomaticomaxillary complex fractures—a systematic review [J]. J Craniomaxillofac Surg, 2019, 47 (10) : 1542-1550. DOI:10.1016/j.jcms.2019.07.009.
- Rana M, Warraich R, Tahir S, et al. Surgical treatment of zygomatic bone fracture using two points fixation versus three point fixation—a randomised prospective clinical trial [J]. Trials, 2012, 13 (1) : 36-46. DOI:10.1186/1745-6215-13-36.
- 魏兵,许泽川,常山.有限元法分析腰椎椎弓根螺钉的生物力学特征[J].中国组织工程研究,2018,22(19):3091-3096. DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.0258.
Wei B, Xu ZC, Chang S. Biomechanical properties of the lumbar pedicle screws by finite element analysis [J]. Chin J Tissue Engin Res, 2018, 22 (19) : 3091-3096. DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.0258.
- Zhang W, Zhao J, Li L, et al. Modelling tri-cortical pedicle screw fixation in thoracic vertebrae under osteoporotic condition: a finite element analysis based on computed tomography [J/OL]. Comput Methods Programs Biomed, 2020, 187 : 105035 [2020-07-27]. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31443980. DOI:10.1016/j.cmpb.2019.105035.
- Foletti JM, Martinez V, Haen P, et al. Finite element analysis of the human orbit. Behavior of titanium mesh for orbital floor reconstruction in case of trauma recurrence [J]. J Stomatol Oral Maxillofac Surg, 2019, 120 (2) : 91-94. DOI:10.1016/j.jormas.2018.11.003.
- Foletti JM, Martinez V, Graillon N, et al. Development and validation of an optimized finite element model of the human orbit [J]. J Stomatol Oral Maxillofac Surg, 2019, 120 (1) : 16-20. DOI:10.1016/j.jormas.2018.09.002.
- Al-Sukhun J, Penttilä H, Ashammakhi N. Orbital stress analysis: part III: biomechanics of orbital blowout fracture repair using bioresorbable poly-L/DL-lactide (P [L/DL] LA 70 : 30) implant [J]. J Craniofac Surg, 2011, 22 (4) : 1299-1303. DOI:10.1097/SCS.0b013e31821c6ae9.
- Huempfner-Hierl H, Bohne A, Schaller A, et al. Does facial soft tissue protect against zygomatic fractures? Results of a finite element analysis [J/OL]. Head Face Med, 2015, 11 : 21 [2020-07-27]. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26077866. DOI:10.1186/s13005-015-0078-5.
- Faulkner MG, Hatcher DC, Hay A. A three-dimensional investigation of temporomandibular joint loading [J]. J Biomech, 1987, 20 (10) : 997-1002. DOI:10.1016/0021-9290(87)90329-0.
- Koolstra JH, van Eijden TM, van Spronsen PH, et al. Computer-assisted estimation of lines of action of human masticatory muscles reconstructed in vivo by means of magnetic resonance imaging of parallel sections [J]. Arch Oral Biol, 1990, 35 (7) : 549-556. DOI:10.1016/0003-9969(90)90086-p.
- Zingg M, Laedrach K, Chen J, et al. Classification and treatment of zygomatic fractures: a review of 1,025 cases [J]. J Oral Maxillofac Surg, 1992, 50 (8) : 778-790. DOI:10.1016/0278-2391(92)90266-3.
- 柳大烈,单磊,樊继宏,等.咬肌牵动的颧骨复合体三维有限元模型的建立[J].中国美容医学,2007,16(3):346-349. DOI:10.3760/j.issn.1008-6455.2007.16.346.
Liu DL, Shan L, Fan JH, et al. Three-dimensional finite element modeling of zygomatic complex with masseter forces [J]. Chin J Aesthetic Med, 2007, 16 (3) : 346-349. DOI:10.3760/j.issn.1008-6455.2007.16.346.
- 许崇涛,孙庚林,周健,等.颧上颌复合体三维有限元模型的建立和初步应用[J].实用口腔医学杂志,2009,25(1):51-54. DOI:10.3969/j.issn.1001-3733.2009.01.12.
Xu CT, Sun GL, Zhou J, et al. Establishment and primary analysis of three-dimensional finite element model of cranialmaxillary complex [J]. J Pract Stomat, 2009, 25 (1) : 51-54. DOI:10.3969/j.issn.1001-3733.2009.01.12.
- Shah FA, Trobos M, Thomsen P, et al. Commercially pure titanium (cp-Ti) versus titanium alloy (Ti6Al4V) materials as bone anchored implants—is one truly better than the other? [J]. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl, 2016, 62 : 960-966. DOI:10.1016/j.msec.2016.01.032.
- Watanabe I, Tanaka Y, Watanabe E, et al. Tensile properties and hardness of cast Fe-Pt magnetic alloys [J]. J Prosthet Dent, 2004, 92 (3) : 278-282. DOI:10.1016/j.prosdent.2004.05.019.
- Deveci M, Eski M, Gurses S, et al. Biomechanical analysis of the rigid fixation of zygoma fractures: an experimental study [J]. J Craniofac Surg, 2004, 15 (4) : 595-602. DOI:10.1097/0000166520040700000013.
- Nasr WF, ElSheikh E, El-Anwar MW, et al. Two-versus three-point internal fixation of displaced zygomaticomaxillary complex fractures [J]. Craniomaxillofac Trauma Reconstr, 2018, 11 (4) : 256-264. DOI:10.1055/s-0037-1604199.
- Jazayeri HE, Khavanin N, Yu JW, et al. Fixation points in the treatment of traumatic zygomaticomaxillary complex fractures: a systematic review and Meta-analysis [J]. J Oral Maxillofac Surg, 2019, 77 (10) : 2064-2073. DOI:10.1016/j.joms.2019.04.025.
- Lee PK, Lee JH, Choi YS, et al. Single transconjunctival incision and two-point fixation for the treatment of noncommunitated zygomatic complex fracture [J]. J Korean Med Sci, 2006, 21 (6) : 1080-1085. DOI:10.3346/jkms.2006.21.6.1080.
- Yang RS, Salama AR, Caccamese JF. Reoperative midface trauma [J]. Oral Maxillofac Surg Clin North Am, 2011, 23 (1) : 31-45. DOI:10.1016/j.coms.2010.10.005.

(收稿日期:2020-07-27 修回日期:2020-10-09)

(本文编辑:张宇)