

· 基础研究 ·

锁骨近端骨折解剖钢板固定的有限元分析

郑轶, 张嘉锴, 吴君龙, 袁欣华

(宁波市第二医院骨科, 浙江 宁波 315010)

【摘要】 目的:探讨个性化锁骨近端解剖钢板螺钉固定有限元模型建立及有限元分析。方法:选择 1 例 40 岁男性健康志愿者,运用三维重建软件 Mimics 15.01 软件,Hypermesh 2019 及 Abaqus 2020 软件的有限元分析模块,初步建立锁骨近端解剖钢板有限元模型并在锁骨长轴远端 15 mm 位置处施加 250 N 垂直方向的载荷观察整体结构,钢板、螺钉位移云图,Mises stress 应力分布等有限元分析数据。结果:整体结构位移分布可看出最大的位移分布在锁骨远端,正常人体上肢重量,锁骨纵行、斜行骨折及摔倒时肩部撞击暴力、锁骨纵行、斜行骨折 4 种条件下最大位移分别为 1.04、1.03、1.35、1.33 mm;从钛合金钢板位移云图中可知最大的位移分布在靠近锁骨远端位置,最大位移分别为 0.89、0.88、1.10、1.09 mm。从钛合金螺钉位移云图中可知最大的位移分布在远端螺钉的根部,最大位移分别为 0.88、0.87、1.08、1.06 mm。Mises Stress 应力分布来看最大的应力主要分布在钛合金钢板和螺钉上,锁骨上的应力非常小。从应力分布云图中可以观察钢板最大主应力分布在锁骨近端第 2 排螺孔位置,最大的 Mises 应力分别为 673.1、678.1、648.5、654.4 MPa,钛合金螺钉最大应力分别为 414.5、417.4、415.8、419.7 MPa。结论:利用计算机模拟三维有限元计算方法表现个性化锁骨近端解剖钢板的生物力学变化,为个性化锁骨近端解剖钢板提供生物力学数据。

【关键词】 锁骨近端; 三维有限元; 钢板; 骨折; 个性化

中图分类号:R687

DOI:10.12200/j.issn.1003-0034.20220970

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**Finite element analysis of anatomic plate fixation for proximal clavicular fractures**

ZHENG Yi, ZHANG Jia-kai, WU Jun-long, YUAN Xin-hua (Department of Orthopaedics, Ningbo No.2 Hospital, Ningbo 315010, Zhejiang, China)

ABSTRACT **Objective** To explore establishment and finite element analysis of personalized proximal clavicular anatomical plate screw fixation model. **Methods** A 40-year-old male healthy volunteer was selected and the finite element analysis modules of 3D reconstruction software Mimics 15.01, Hypermesh 2019 and Abaqus 2020 were used. The finite element model of anatomic plate at the proximal clavicle was established, and a vertical load of 250 N was applied to the distal end of long axis of clavicle about 15 mm, then the overall structure, plate and screw displacement cloud image, Mises stress distribution were observed. **Results** The displacement distribution of the overall structure shows the maximum displacement was distributed on the distal clavicle. Under the four conditions of normal upper limb weight, longitudinal clavicle fracture, oblique fracture and shoulder impact violence during fall, longitudinal clavicle fracture and oblique fracture, the maximum displacement were 1.04 mm, 1.03 mm, 1.35 mm and 1.33 mm, respectively. The displacement cloud map of titanium alloy steel plate showed the largest displacement was distributed near the distal clavicular bone, and the maximum displacement were 0.89 mm, 0.88 mm, 1.10 mm and 1.09 mm, respectively. The displacement cloud map of titanium alloy screw showed the largest displacement was distributed at the root of the distal screw, and the maximum displacement were 0.88 mm, 0.87 mm, 1.08 mm and 1.06 mm, respectively. Mises stress distribution showed the maximum stress was mainly distributed on titanium alloy plates and screws, and the stress on the clavicle was very small. Mises stress distribution cloud showed the maximum Mises stress was distributed at the second row of screw holes near the clavicle, and the maximum Mises stress were 673.1, 678.1, 648.5, 654.4 MPa, respectively. The maximum stresses of titanium alloy screws were 414.5, 417.4, 415.8 and 419.7 MPa, respectively. **Conclusion** The biomechanical changes of personalized proximal clavicular anatomical plates are demonstrated by using 3D finite element method to provide biomechanical data for personalized proximal clavicular anatomical plates.

KEYWORDS Proximal clavicle; Three-dimensional finite element; Steel plate; Fractures; Personalization

基金项目:宁波市医学科技计划项目(编号:2021Y08)

Fund program: Ningbo Medical Technology Foundation (No.2021Y08)

通讯作者:郑轶 E-mail: 15967868807@163.com

Corresponding author: ZHENG Yi E-mail: 15967868807@163.com

锁骨近端骨折通常为高能量损伤或者直接暴力损伤, 占有锁骨骨折的 10%, 容易漏诊, 保守治疗效果一般, 锁骨近端畸形愈合或者不愈合影响肩关节功能^[1]。锁骨近端骨折内固定物为非解剖钢板, 如

锁骨远端钢板倒置、桡骨远端钢板、掌骨钢板等,由于钢板不敷贴容易出现钢板激惹造成伤口感染及胸锁关节炎等不良反应,跨关节固定钢板骨折愈合后容易出现钢板断裂需要二次取出^[2]。目前尚无锁骨近端解剖钢板,笔者已经研制出锁骨近端解剖钢板(专利号:ZL 2020 2 1810036.3),但该钢板的生物力学强度尚不明晰,本研究通过有限元研究分析锁骨近端骨折内固定钢板的力学分布。

1 资料与方法

1.1 建立模型

CT 图像:选择 1 名 40 岁健康男性志愿者。经 X 线检查排除骨质疏松等器质性病变,签署知情同意书,对锁骨行 CT 连续扫描,层厚 1 mm,选取 25 张 CT 薄层图片导入 Mimics Medical 软件中,CT 扫描数据中包含了韧带、骨骼等组织。本研究模拟两类锁骨近端骨折的骨折线:锁骨骨折线与水平方向垂直,锁骨斜形骨折线与水平方向成 120°钝角,两种骨折线的宽度均为 1 mm(图 1a)。有限元材料赋值见表 1。

表 1 钛合金钢板、螺钉以及锁骨的弹性模量和泊松比

Tab.1 Elastic modulus and Poisson's ratio of titanium alloy plates, screws and clavicle

材料名称	弹性模量/MPa	泊松比
皮质骨	17 000	0.3
松质骨	1 600	0.3
钛合金钢板	110 000	0.3
钛合金螺钉	110 000	0.3

1.2 有限元分析接触关系设定

钛合金螺钉与锁骨近端锁定钢板通过螺纹固定连接,螺纹固定连接在有限元分析时处理成共节点或绑定约束,在利用 Abaqus 2020 软件分析时将钛合金螺钉和固定钢板接触关系设定成 Tie 连接。固定钢板与锁骨皮质骨之间为接触关系,有限元分析时设定罚函数形式的接触关系,固定钢板与皮质骨之间的摩擦系数设为 0.37。

1.3 有限元分析条件限定

本研究分析锁骨近端骨折以下 4 种工况:(1)正常人体上肢重量,锁骨纵行骨折模式,锁骨近端固定后在锁骨长轴远端 15 mm 处施加 250 N 的垂直方向的载荷应力。(2)正常人体上肢重量,锁骨斜形骨折模式,锁骨近端固定后在锁骨长轴远端 15 mm 处施加 250 N 的垂直方向的载荷。(3)摔倒时肩部撞击暴力,锁骨纵行骨折,锁骨近端固定后在锁骨长轴远端 15 mm 处施加 250 N 的轴向和垂直方向的载荷。(4)摔倒时肩部撞击暴力,锁骨斜形骨折模式,锁骨近端

固定后在锁骨长轴远端 15 mm 处施加 250 N 的轴向和垂直方向的载荷(图 1b)。

1.4 网格划分

固定钢板为钛合金材料,由于结构非规则,因此,利用 Hypermesh 2019 软件划分网格时将固定钢板网格处理成四面体。钛合金螺钉利用 Hypermesh 2019 软件划分网格时将钛合金螺钉网格处理成六面体。锁骨包含皮质骨和松质骨,其中皮质骨厚度为 2 mm,皮质骨内部为松质骨。锁骨结构不规则,利用 Hypermesh 2019 软件划分锁骨网格时网格类型选用四面体网格。见表 2。

表 2 有限元分析时的单元数量和单元类型

Tab.2 Elements numbers and element types for finite element analysis

部件名称	单元类型	网格数量
钛合金钢板	C3D10	39 060
钛合金螺钉	C3D8S	7 120
锁骨横断骨折模型	C3D10	186 913
锁骨斜面骨折模型	C3D10	186 494

2 结果

2.1 位移云图结果

整体结构位移分布来看最大位移分布在锁骨远端,最大位移出现在远离固定端的加载区域,4 种条件下最大位移分别为 1.04、1.03、1.35、1.33 mm(图 1c-1f)。钢板位移云图显示最大的位移分布在靠近锁骨远端位置,4 种工况下的最大位移分别为 0.89、0.88、1.10、1.09 mm(图 1g-1j)。螺钉位移云图显示最大的位移分布在远端螺钉的根部,4 种工况最大位移分别为 0.88、0.87、1.08、1.06 mm(图 1k-1n)。

2.2 Mises Stress 分析

Mises Stress 应力分布来看最大的应力主要分布在钛合金钢板和螺钉上,锁骨上的应力非常小。固定钢板 Mises Stress 应力分布云图可以看出最大 Mises Stress 应力分布在锁骨近端第 2 排螺孔尖端位置(图 1k, 1l),4 种工况下最大 Mises Stress 应力分别为 673.1、678.1、648.5、654.4 MPa。钛合金螺钉 Mises Stress 应力云图可以看出最大的应力出现在锁骨近端钢板第 2 排螺钉根部位置,4 种工况下应力分别为 414.5、417.4、415.8、419.7 MPa。见表 3。

2.3 钛合金钢板最大主应力分布

从应力分布云图中可以观察钢板最大主应力分布在锁骨近端第 2 排螺孔(滑动孔)位置,4 种工况条件下最大主应力分别为 391.4、392.4、408.4、409.3 MPa(图 1o-1r)。

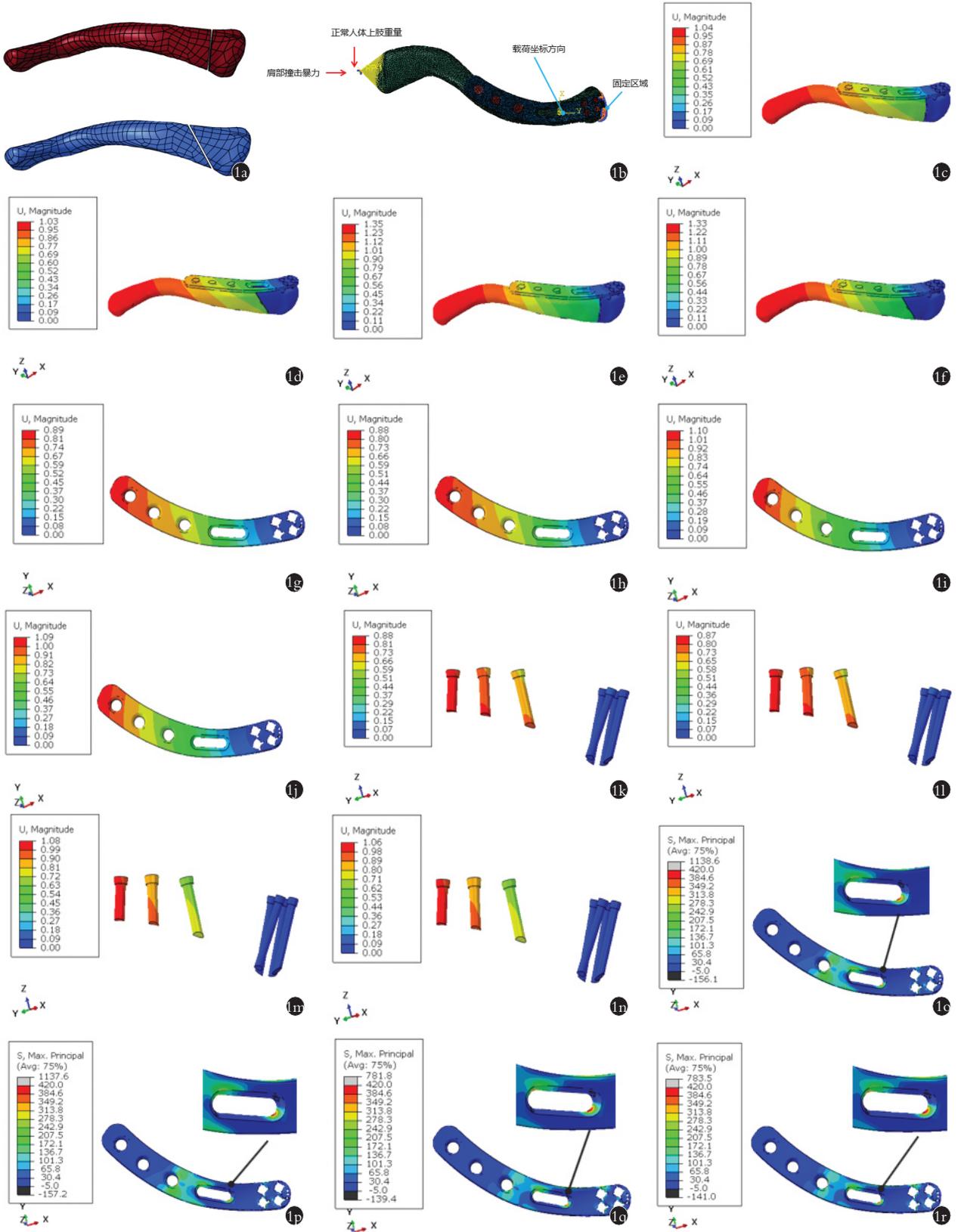


图 1 锁骨近端解剖钢板有限元分析 1a. 锁骨近端骨折线 1b. 施加载荷方向 1c, 1d, 1e, 1f. 整体结构位移 1g, 1h, 1i, 1j, 1k. 钛合金钢板的位移云图 1l, 1m, 1n. 螺钉位移云图 1o, 1p, 1q, 1r. 钛合金钢板最大主应力分布

Fig.1 Finite element analysis of proximal clavicular anatomical plate 1a. Proximal end of clavicle fracture line 1b. Direction of applied load 1c, 1d, 1e, 1f. Overall structural displacement 1g, 1h, 1i, 1j, 1k. Displacement cloud diagram of titanium alloy plate 1l, 1m, 1n. Screw displacement cloud map 1o, 1p, 1q, 1r. Maximum principal stress of titanium alloy steel plate

表 3 Mises Stress 分析
Tab.3 Mises Stress analysis

工况	单位:MPa		
	钛合金钢板	钛合金螺钉	锁骨
工况 1	673.1	414.5	76.9
工况 2	678.1	417.4	70.0
工况 3	648.5	415.8	73.0
工况 4	654.4	419.7	67.3

3 讨论

3.1 锁骨近端骨折治疗方法的选择

锁骨近端骨折容易漏诊,常用的分型为 AO 分型和 Throckmoton 分型^[3]。锁骨近端骨折多由直接暴力所致,较少累及胸锁关节^[4]。对于明显移位的锁骨近端骨折容易出现骨折不愈合、畸形愈合、胸锁关节功能障碍等并发症,目前倾向于手术治疗^[5]。锁骨近端后方解剖结构复杂,有肺尖、头臂干、臂丛神经等重要组织,切开复位内固定手术治疗存在血管神经损伤的风险^[6]。目前尚无锁骨近端骨折专用解剖钢板,既往有学者^[7]采用锁骨近端切除、胸锁关节融合术等方法进行治疗,但患者术后胸锁关节功能恢复不良。而目前内固定钢板的选择主要为腓骨远端解剖钢板倒置、锁骨远端钢板倒置、桡骨远端钢板跨关节固定及掌骨钢板固定等,存在钢板贴合性差,螺钉强度弱,容易进入关节腔等弊端^[8]。随着 3D 金属打印技术的发展,笔者团队通过逆向工程技术设计锁骨近端解剖钢板,并可用 3D 金属打印机进行打印,贴合性佳,螺钉固定可靠。

3.2 有限元方法分析锁骨近端解剖钢板力学变化

本研究通过 Abaqus 2020 软件对锁骨近端 4 种条件下的载荷分布进行虚拟有限元分析,分别为正常人体上肢重量和摔倒时在锁骨远端 15 mm 处施加 250 N 的载荷应力,骨折线的形态为锁骨近端斜行和纵行骨折线。位移云图结果显示,4 种工况下最大的位移分布在靠近锁骨远端位置,有限元最大位移为 1.35 mm,而螺钉最大的位移分布在远端螺钉的根部,分析原因与摔倒时人的受力传导分布有关。

Mise Stress 应力分布最大应力主要分布在钛合金钢板和螺钉上,锁骨上应力小,而最大 Mise Stress 应力分布在第 2 排螺钉的尖端位置,最大应力为 678.14 MPa。本研究所研制的锁骨近端解剖钢板也存在应力遮挡问题,后续的研究还有进一步改良的

空间,对于钢板第 2 排螺钉的强度可进一步优化以对抗应力载荷。

各种工况条件下钢板的最大应力分布均出现在滑动孔附近,这个位置靠近锁骨近端的骨折线,符合生物力学分布,依据有限元分析结果对滑动孔周围区域需引起重视,后期的钢板改良设计可加强该力学薄弱区的优化减少钢板断裂的可能性。

3.3 本研究不足及展望

本实验的研究对象为理想化模型,去除锁骨近端周围软组织的影响,仅对锁骨近端 2 个方向的骨折进行有限元分析,真实的标本包含肌肉、韧带等软组织包裹,实验结果可能与真实的标本存在差距,后续可进一步丰富细化,以期获得更加准确的研究结果。未来可参照本方法对锁骨远端粉碎性骨折及肩锁关节脱位等进行相关有限元力学分析。

参考文献

- [1] ZHANG Y D, XING B R, HOU X X, et al. A novel sternoclavicular hook plate for treatment of proximal clavicle fracture with dislocation of sternoclavicular joint[J]. BMC Surg, 2022, 22(1):250.
- [2] ZUÑIGA D G, GARCÍA L F, LEAL J A. Biplanar osteosynthesis for severely displaced proximal-third clavicle fracture: a case report[J]. JBJS Case Connect, 2021, 11(2).
- [3] GRANTHAM W J, HALVERSON S J, LEE D H. Medial clavicle osseous dimensions with implication on plate fixation[J]. Tech Shoulder Elb Surg, 2019, 20(1):26-29.
- [4] MULDER F J, MELLEMA J J, RING D. Proximity of vital structures to the clavicle: comparison of fractured and non-fractured side[J]. Arch Bone Jt Surg, 2016, 4(4):318-322.
- [5] 蔡国平, 徐春丽, 邓波, 等. 胸锁钩钢板治疗锁骨近端骨折伴胸锁关节脱位[J]. 中国骨伤, 2021, 34(6):563-567. CAI G P, XU C L, DENG B, et al. Novel sternoclavicular hook-plate for treatment of proximal clavicle fracture with dislocation of sternoclavicular joint[J]. China J Orthop Traumatol, 2021, 34(6):563-567. Chinese.
- [6] SIEBENLIST S, SANDMANN G, KIRCHHOFF C, et al. Anatomically precontoured LCP for delayed union of a medial third clavicle fracture. Case report with review of the literature[J]. Acta Chir Orthop Traumatol Cech, 2013, 80(6):407-410.
- [7] TENG H G, LIU A L J. Partial claviclectomy after non-union of proximal clavicle fracture[J]. BMJ Case Rep, 2013, 2013:ber2013008874.
- [8] 孙方贵, 刘瑞, 熊新为, 等. 胸锁关节钩接骨板治疗急性不稳定性锁骨近端骨折[J]. 中国骨伤, 2022, 8(10):1004-1007. SUN F G, LIU R, XIONG X W, et al. Treatment of acute unstable proximal clavicular fracture with hook plate of sternoclavicular joint[J]. China J Orthop Traumatol, 2022, 8(10):1004-1007. Chinese.

(收稿日期:2023-01-30 本文编辑:李宜)