

锁骨骨折内固定有限元分析的研究进展

郝旌博¹, 董乐乐²

(1. 包头医学院, 内蒙古 包头 014000; 2. 包头医学院第一附属医院, 内蒙古 包头 014000)

【摘要】 锁骨骨折为常见的上肢骨折, 由于其特殊解剖结构直接影响着肩关节的功能。锁骨骨折不同的损伤机制影响着内固定的力学效果, 因此选择何种内固定方式一直困扰着骨科医生。有限元分析作为现代计算机力学软件分析, 通过对锁骨骨折内固定的有限元分析, 不仅能够了解骨折病因机制、内固定物的生物力学性能及骨折并发症等因素, 还能为术前规划上提供指导意见, 有利于术前规划并进行手术方式的个体化选择, 有望成为锁骨骨折术前规划中不可缺少的一部分。该文就有限元分析在锁骨骨折的病因机制、相关影响因素、内固定的选择、术后并发症以及有限元分析过程中出现的问题进行综述。

【关键词】 锁骨骨折; 生物力学; 内固定; 有限元

中图分类号: R683.4

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.2020.06.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress on finite element analysis of internal fixation for clavicular fracture HAO Jing-bo and DONG Le-le*. The First Affiliated Hospital of Baotou Medical College, Baotou 014000, Inner Mongolia, China

ABSTRACT Clavicular fracture is a common upper-limb fracture. Because of its special anatomical structure, it directly affects the function of the shoulder joint. The different injury mechanisms of clavicular fracture affect the mechanical effect of internal fixation, so the selection of internal fixation method has been puzzling orthopedists. As a modern computer-based mechanical analysis, finite element analysis application in the internal fixation of clavicular fracture can not only clarify the pathogenesis of fractures, biomechanical properties of internal fixators and complications of fractures, but also provide guidance for preoperative planning. Therefore, it is beneficial to preoperative planning and individualized selection of surgical methods, and is expected to become an indispensable part in preoperative planning for clavicular fracture. In this paper, the pathogenesis, related influencing factors, selection of internal fixation and postoperative complications of clavicular fracture based on finite element analysis and problems during finite element analysis were reviewed.

KEYWORDS Clavicle fracture; Biomechanics; Internal fixation; Finite element

骨骼的结构和功能在很大程度上依赖所处的力学环境, 当环境改变时, 骨组织也会发生相应改变, 并在新的环境下达到平衡^[1]。与传统应力分析相比, 有限元分析能够充分模拟骨折及其内固定时存在的状况, 并进行多因素的分析, 弥补了标本试验成本高、重复性差等不足。临床治疗锁骨骨折的方法较多, 主要分为保守治疗和手术治疗。随着生活水平的提高, 人们对锁骨术后早期康复以及术后美观等要求也相应提高, 致使越来越多的患者尤其是年轻患者更偏向选择手术治疗。近年来, 随着骨折固定技术的成熟及材料的多元化发展, 锁骨骨折的手术方式以及内固定物的选择日益增多, 但术后内固定物断裂、骨不连等并发症的发生率依旧居高不下。因此, 通过有限元分析, 模拟并比较各种手术方式对锁骨骨折生物力学的影响, 针对个体化差异选择不同的

手术方式, 从而降低远期并发症是十分必要的。本文旨在通过回顾国内外相关文献, 针对近年来有限元分析在锁骨骨折中的应用进展, 现存问题以及未来进展进行综述。

1 锁骨骨折分型

Allman 根据骨折部位可分为 3 型: I 型为中 1/3 骨折, 由于锁骨胸锁端相对固定, 锁骨远端有多数肌肉韧带附着, 锁骨中段成为骨折主要变形区, 约占锁骨骨折的 80%; II 型为外侧 1/3 骨折, 常伴喙锁韧带损伤; III 型为内侧 1/3 骨折, 每种类型可以分为 A(无移位)型和 B(移位)型 2 个亚型, 锁骨中段还有 C(粉碎性)型。Craig 在这个分类基础上再次进行细化, I 为锁骨中 1/3; II 型为锁骨外 1/3, 再根据骨折移位情况及与喙锁韧带的关系分为 5 型; III 型为锁骨内 1/3 骨折, 根据骨折移位程度及是否在关节内分为 5 型。唐佩福^[2]认为, Craig 分型对锁骨外 1/3 骨不连和延迟愈合等能进行更好的评估。

对于锁骨远端骨折常用分型为 Neer 分型, 将斜

通讯作者: 董乐乐 E-mail: Dong_le_le@126.com

Corresponding author: DONG Le-le E-mail: Dong_le_le@126.com

方韧带近中性的边界以远的骨折定义为锁骨外端骨折^[3]。Ⅰ型喙锁韧带完整,为稳定骨折;Ⅱ型喙锁韧带完全分离,为不稳定骨折;Ⅲ型为锁骨外端关节内骨折,喙锁韧带完整。由于Ⅱ型骨折失去喙锁韧带限制,骨折移位,增加了骨不连风险,多建议手术治疗。此外还有 Rockwood 分型、Jager 分型和 Breitner 分型。一般认为 Neer 分类更为实用,根据韧带的附着将其分为稳定性和不稳定性骨折,因为在一些特殊病例中,虽然无韧带损伤,但骨折是不稳定的。在进行有限元分析时对骨折进行仔细分型将有助于提高骨折间的可比性,并为后续手术治疗提供可靠依据。

2 有限元分析在锁骨骨折相关领域的应用

2.1 损伤机制分析

杨晓霞等^[4]通过 Mimics 软件建立肩胛骨和锁骨三维模型,导入 Ansys 软件并添加韧带信息,建立完整的肩锁关节三维有限元模型,分析锁骨骨折及骨裂的易发部位,结果显示锁骨上表面中 1/3 靠近远端处 Mises 等效应力及最大主应力均较大,此处最大主应力为拉应力,易出现骨断裂即骨折。而下表面中 1/3 靠近近端处 Mises 等效应力较大,此处最大主应力为压应力,易出现骨碎裂即骨裂。此外,杨予等^[5]通过空间曲梁简化分析法从锁骨内部研究了锁骨内应力分布特征,说明锁骨中部区域为弯矩和转矩的组合变形区,受力更复杂,与锁骨骨折临床观察结果一致,可以个体化解释锁骨骨折的不同机制。

2.2 相关因素分析

影响锁骨骨折的相关因素很多,包括锁骨形状、性别、冲击力方向等。Duprey 等^[6]应用个性化锁骨形态来模拟肩侧撞击,进而评估锁骨抵抗骨折的能力,结果表明锁骨几何形态(形状和厚度)和材料特性对其破坏响应起着重要作用。此外,Li 等^[7]采用力学试验加有限元分析的方法,得出同样的结论。Duprey 等^[8]在另一项研究中评估年龄相仿(年龄>80 岁)的男性和女性锁骨受冲击力的影响,结果男性和女性在锁骨断裂冲击力值上有显著差异:男性大于女性,可见也要考虑性别对结果的影响。Favre 等^[9]研究了冲击力的大小和方向对锁骨的影响,在相同的外力大小下,完整锁骨的峰值应力在悬臂弯曲时比轴向压缩时要高得多,在不同受力环境下应设置对应的冲击力值。应用有限元分析还可对有特殊因素的患者进行分析,包括老年性骨质疏松、低龄儿童及患有骨相关疾病等患者,而这些,都可以通过量化纳入有限元分析。

2.3 术前规划

2.3.1 内固定选择 选择治疗方法时,需考虑多种因素,合适的修复方式以及合适的固定位置可以降低

术后并发症发生率^[10]。目前,锁骨远端内固定方式常用张力带、锁骨远端解剖板、锁骨钩钢板等固定,而锁骨中段常用钢板固定和髓内钉固定^[11]。

锁骨骨折钢板内固定被认为是“金标准”,可为骨折提供坚强的内固定,但术中软组织剥离过多,有损伤神经血管的风险^[12]。Robinson 等^[13]研究表明,钢板治疗移位的锁骨中段骨折有较低的骨折不愈合率,并可提早进行社会活动。常见内固定物有:螺旋钢板,解剖钢板,重建钢板,经皮微创锁定加压钢板,记忆合金环抱器等。20 世纪 50 年代有学者报道使用髓内针进行髓内固定后,髓内固定装置不断更新,目前分别有克氏针、Rockwood 针、Hagie 针、钛制弹性髓内针、空心螺钉以及弹性锁定髓内钉等,与钢板内固定比较,组织剥离及血运破坏较少,有限元分析中应力分布与锁骨钢板相似,但对手术技术有更高的要求^[14]。

2.3.2 术后并发症比较 锁骨远端骨折常见的并发症主要包括肩峰应力高导致骨溶解和假体周围骨折^[15]。由于锁骨远端的解剖结构以及韧带附着,使得锁骨远端骨折所使用的内固定物较中段骨折内固定物较为复杂和局限。在一般临床上,由于锁骨钩钢板有较好的性能以及普及率广的优势,常被用作首选。Sakai 等^[16]通过在尸体标本试验并结合有限元分析,比较了张力带、LCP 锁骨钩板和 Scorpion 板固定锁骨骨折的力学稳定性,最终结果显示张力带固定下锁骨弯曲和扭转刚度水平明显高于钢板固定。Hung 等^[15]、Shih 等^[17]、Lee 等^[18]应用有限元分析法验证钩钢板长度、钩深度、钩角度是否对骨折有影响,结果表明使用较长较深的锁骨钩可以减轻锁骨体及肩峰作用力,钩角度增大,锁骨中部的应力减小但肩峰应力增大。因此,使用较深较长的锁骨钩钢板进行固定,并依照实际骨和肩峰的关系选择合适的钩角度,这样可以减轻锁骨的应力,降低并发症。

锁骨中段骨折常见并发症为骨折不愈合与内固定物断裂。曾浪青等^[19]、樊友亮等^[20]应用有限元分析比较了钢板与髓内钉的效果,钢板固定能显著稳定骨折间隙,降低植入物应力,减少不愈合风险,而髓内钉在所有载荷条件下表现出与完整锁骨相似的应力分布,但稳定性不如钢板。但目前这类研究存在纳入研究数量较少,结果可靠性不高等问题。Cronskär 等^[21]、Marinescu 等^[22]对骨折不愈合以及钢板断裂的病例进行有限元分析,发现孔的边缘和钢板中段的重建段应力最大,自由孔应力增加,可能导致钢板断裂发生。在螺钉使用上,Pendergast 等^[23]研究认为厚钢板,在所允许的位置上使用双皮质锁定螺钉,可以使骨折愈合部位承受最小的应变。为了减少应力屏

蔽,对于单纯骨折且术后无过多肩部活动和负重的患者可以选择髓内钉治疗。因此,对于需要尽早恢复活动的患者,选择中间厚两端薄的钢板,并进行双皮质螺钉固定,可使其在皮肤下更光滑、侵入性更小,锁骨中段可以得到最佳固定,可见术前进行有限元分析降低患者术后并发症发生率是必要的。随着数字医学发展,建立锁骨个性化内固定物也成了目前热门的方向。对个性化接骨板和髓内钉进行研究,得出个性化内固定物较商用内固定物有一定优势^[24-25]。其优势体现在个性化内植物受力更均匀,与患者骨骼贴合度好,创伤更小,并能减少预弯带来的金属疲劳,在获得坚强固定的同时,患者满意度更高。

2.3.3 内固定物位置 对于锁骨远端骨折,由于钢板形态原因,其放置位置相对固定。在治疗锁骨中段骨折时,钢板放置位置一般为上置或前置。Calisal 等^[26]、Favre 等^[9]、刘栋等^[10]、朱昌荣等^[27-28]通过有限元验证了钢板前置和上置在肩关节运动中的效果,结论是,钢板上置比前置在扭转和弯曲载荷条件下具有一定的生物力学优势,前置中的钢板、螺钉以及韧带应力都较低,但压缩载荷下二者无差别,对骨折断端产生的应力也无差别。此外,螺旋钢板结合了钢板上置与前置的各自特点,Huang 等^[29]在钢板上置与前置的基础上,增加了螺旋钢板的有限元分析,结果显示,在轴向压缩下,螺旋板表现出较大的应力;轴向旋转下,钢板上置应力最大,钢板前置次之。而刘川等^[30]应用有限元分析比较重建钢板前置与上置的生物力学差异,发现前置位顺时针扭转和弯曲最大应力显著大于上置位,得出内固定前置更可靠的结论。因此,治疗时应考虑患者的骨质情况、职业风险及运动习惯等。对于需长时间固定并对于有高肩关节撞击(轴压)风险的患者可以使用锁骨钢板上置;对于可能出现较多肩部旋转活动的患者,选择螺旋钢板更有优势;其他可根据实际情况选择钢板前置。

3 有限元分析锁骨骨折的影响因素

3.1 锁骨数据的提取

生物力学数据提取方式较多,有限元分析常用解剖学数据、影像学数据等。解剖学数据直接测得更加准确,但是由于解剖标本获取较难,每个数据都有其唯一性,只能单一化的研究,无法大规模地试验,所以仅在有条件时选择。影像学方法包括 X 线摄影、电子计算机断层扫描(CT)、磁共振成像(MR)等。早期,X 线凭借成本低廉成为首选方法。随着影像技术的发展,CT 及 MR 更能够满足人们对数据精度的要求,成为目前的首选方法。将扫描的数据以医学数字成像和通信(digital Imaging and communications in medicine, DICOM)格式存储在各类存储设备中。此

外,Lu 等^[31]应用 LM-ICP(levenberg-marquardt iterative closest point)方法来统计锁骨形态,这种统计方法可以基于线性缩放或基于特定几何形状来替代传统方法。LM-ICP 方法获得锁骨形态符合人群平均形态可为研究者提供新的有限元建模方法,但计算相对复杂。CT 操作时间短,能够更好地对骨骼成像,因此,CT 数据更有优势。

3.2 材料定义

对于单一锁骨,根据以往文献把其假定为均质连续、各向同性的线性弹性单元,这种定义可以减少建模程序及难度,但模型真实度会减低。Krone 等^[32]指出,以扭转为特征的正交各向异性材料产生的应力和应变结果更接近文献值,但 Pendergast 等^[23]指出,材料在某些加载条件下,采用正交各向异性和各向同性的骨材料性能可能不会导致应力/应变预测上的显著差异。因此,需要确定分析的精确程度来确定材料定义。

3.3 有限元模型参数

分析中 2 个主要参数为弹性模量(E)和泊松比(μ)。骨骼方面:精确地参数数据因锁骨材料获得较难、标本保存环境不同,再加上锁骨形态个性,所以获得的标本数据差异较高,因此,骨骼参数设置上目前没有统一标准。根据文献报道^[21,33],通常将锁骨皮质骨弹性模量设定在 8 100~18 000 MPa 之间,泊松比 0.28~0.3,松质骨弹性模量设定在 445~1 600 MPa 之间,泊松比为 0.28~0.30。也可通过 Rho 等^[34]建立的 CT 扫描灰度与骨密度、弹性模量之间的方程(密度=1.067×灰度值-961.608 和弹性模量=0.01×密度 186)进行赋值,研究表明方程赋值可能在松质骨方面有更好的性能,因此通过获取大量文献,并与方程参照对比,可能会提高参数的精确程度。内固定方面:材料获得容易,在工业领域应用广泛,参数能够依照标准设置。

3.4 肌肉及韧带

在骨折方面:锁骨在杠杆作用下骨折线是不相同的,模拟简单的横形或斜形骨折与实际骨折会有偏差。肌肉方面:因锁骨有 6 条肌肉附着^[35],使有限元模型更为复杂。韧带方面:桂斌捷等^[36]通过有限元研究认为,重建喙锁韧带没有改变外力下锁骨应力和应变分布,但骨折的稳定不能忽视喙锁韧带的作用,尤其是锁骨远端骨折。因此,动态力学分析及高精度要求的有限元分析不能仅以单根锁骨为研究对象,需要加入足够的肌肉或韧带进行全面分析。

3.5 模型有效性验证

为保证有限元分析准确性,需要进行有限元模型验证。肖进等^[37]提出验证有限元模型有效性的方

法一般有 3 种:(1) 取尸体标本建立同样的模型,进行同样条件下的力学试验,结果进行对比。这种方法较严格,结果最可靠。但由于不同标本间的差异较大,样本量也较大,工作量相应增加。Duprey 等^[8]、Sakai 等^[16]、Untaroiu 等^[33]的研究中,尸体试验得到的力-位移曲线与有限元模型数据有最佳拟合。(2)与文献中类似的试验结果进行比较。这种方法工作量大,但由于不同学者采用的试验条件及观察指标不同,故不如第 1 种方法严格,而且类似的文献往往也较难找到。Zhang 等^[38]、Zeng 等^[11]的研究中,通过与已发表文献中的数据进行对比,有限元模型结果与文献试验结果可以保持一致。(3)将试验得到的结果与临床观察到的现象进行验证。这种方法便于操作,但验证的效果则最差。因此,为了提高模型有效性,在引用数据时,尽量足量地选择有解剖数据的高质量文献,可以保证数据的充足及精度。

4 总结与展望

有限元分析表明,影响锁骨骨折手术并发症的主要因素是内固定物的选择以及内固定物的放置位置。锁骨远端骨折选择钩钢板能够更好地匹配不同骨折类型,医师在术中根据患者的骨折情况可使用合适深度和长度的钩钢板治疗。锁骨中段骨折选择锁骨钢板并上置可获得坚固的内固定,适合重体力劳动以及需要长时间固定患者。对其他患者可以选择钢板上置或髓内钉来进行治疗,其优势是创伤更小更符合锁骨解剖特性。另一方面,个性化的内固定物可以为特殊患者提供精准治疗。综上所述,使用有限元分析能够在术前规划与降低并发症上提供理论依据,发现并避免可能出现的不恰当治疗,为患者提供更精准、更舒适的治疗方案。有限元分析法可为今后老年骨质疏松患者的骨折防治、提供个性化功能康复方案以及个性化内固定物设计提供新线索、新技术。

参考文献

[1] 范宁,藏磊,海涌,等. 脊柱侧凸有限元建模方法的应用进展[J]. 中国骨伤 2018,31(4):391-394.
FAN N,ZHANG L,HAI Y,et al. Progression on finite element modeling method in scoliosis[J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma,2018,31(4):391-394. Chinese with abstract in English.

[2] 唐佩福. 锁骨骨折治疗方法的选择与思考[J]. 中国骨伤 2015,28(2):97-100.
TANG PF. Choice and thinking of treatment of clavicle fractures [J]. Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma,2015,28(2):97-100. Chinese with abstract in English.

[3] Stegeman SA,Nacak H,Huvenaars KHJ,et al. Surgical treatment of Neer type- II fractures of the distal clavicle:a meta-analysis[J]. Acta Orthop,2013,84(2):184-190.

[4] 杨晓霞,许金泉,张二虎. 锁骨三维有限元应力分析[J]. 力学季刊,2012,33(4):584-589.

YANG XX,XU JQ,ZHANG EH. Three-dimensional finite element stress analysis of clavicle[J]. Li Xue Ji Kan,2012,33(4):584-589. Chinese.

[5] 杨予,沈进稳,徐定华. 锁骨内力分布特征的空间曲梁简化分析法[J]. 中国组织工程研究与临床康复,2010,14(39):7246-7250.
YANG Y,SHEN JW,XU DH. Curved beam simplified analysis of clavicle internal force distribution[J]. Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu Yu Lin Chuang Kang Fu,2010,14(39):7246-7250. Chinese.

[6] Duprey S,Bruyere K,Verriest JP. Clavicle fracture prediction:simulation of shoulder lateral impacts with geometrically personalized finite elements models[J]. J Trauma,2010,68(1):177-182.

[7] Li ZP,Kindig MW,Kerrigan JR,et al. Development and validation of a subject-specific finite element model of a human clavicle[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin,2013,16(8):819-829.

[8] Duprey S,Bruyere K,Verriest JP. Influence of geometrical personalization on the simulation of clavicle fractures[J]. J Biomech,2008,41(1):200-207.

[9] Favre P,Kloen P,Helfet DL,et al. Superior versus anteroinferior plating of the clavicle:a finite element study[J]. J Orthop Trauma,2011,25(11):661-665.

[10] 刘栋,王建明,张德刚,等. 钢板前置位及上置位固定锁骨骨折的有限元分析[J]. 中国组织工程研究,2016,20(26):3903-3908.
LIU D,WANG JM,ZHANG DG,et al. Finite element analysis of clavicle fracture with superior and anterior plate fixation[J]. Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu,2016,20(26):3903-3908. Chinese.

[11] Zeng LQ,Wei HF,Liu YJ,et al. Titanium elastic nail (TEN) versus reconstruction plate repair of midshaft clavicular fractures:a finite element study[J]. PLoS One,2015,10(5):e0126131.

[12] Ni M,Niu WX,Wong DWC,et al. Finite element analysis of locking plate and two types of intramedullary nails for treating mid-shaft clavicle fractures[J]. Injury,2016,47(8):1618-1623.

[13] Robinson CM,Goudie EB,Murray IR,et al. Open reduction and plate fixation versus nonoperative treatment for displaced midshaft clavicular fractures:a multicenter,randomized,controlled trial[J]. J Bone Joint Surg Am,2013,95(17):1576-1584.

[14] 王红光. 锁骨中段骨折行钛制弹性钉髓内固定与重建钢板固定的有限元研究[J]. 吉林医学,2019,40(5):1056-1057.
WANG HG. Finite element analysis of TEN and reconstruction plate fixation for midshaft clavicle fracture[J]. Ji Lin Yi Xue,2019,40(5):1056-1057. Chinese.

[15] Hung LK,Su KC,Lu WH,et al. Biomechanical analysis of clavicle hook plate implantation with different hook angles in the acromioclavicular joint[J]. Int Orthop,2017,41(8):1663-1669.

[16] Sakai R,Matsuura T,Tanaka K,et al. Comparison of internal fixations for distal clavicular fractures based on loading tests and finite element analyses[J]. Sci World J,2014,2014:817321.

[17] Shih CM,Huang KC,Pan CC,et al. Biomechanical analysis of acromioclavicular joint dislocation treated with clavicle hook plates in different lengths[J]. Int Orthop,2015,39(11):2239-2244.

[18] Lee CH,Shih CM,Huang KC,et al. Biomechanical analysis of implanted clavicle hook plates with different implant depths and materials in the acromioclavicular joint:a finite element analysis

- study[J]. *Artif Organs*, 2016, 40(11):1062-1070.
- [19] 曾浪清, 陈云丰, 张长青, 等. 重建钢板与钛制弹性钉两种内固定方式治疗锁骨中段骨折的有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2013, 28(4):441-447.
- ZENG LQ, CHEN YF, ZHANG CQ, et al. Finite element analysis on titanium elastic nail and reconstruction plate fixation for mid-shaft clavicular fractures[J]. *Yi Yong Sheng Wu Li Xue*, 2013, 28(4):441-447. Chinese.
- [20] 樊友亮, 吴一雄, 张文, 等. 重建钢板和 Herbert 螺钉内固定治疗锁骨中段骨折的有限元分析[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2015, 30(11):1152-1155.
- FAN YL, WU YX, ZHANG W, et al. Finite element analysis on reconstruction plate and Herbert cannulated screw fixation for mid-shaft clavicular fractures[J]. *Zhongguo Gu Yu Guan Jie Sun Shang Za Zhi*, 2015, 30(11):1152-1155. Chinese.
- [21] Cronskaer M, Rasmussen J, Tinnsten M. Combined finite element and multibody musculoskeletal investigation of a fractured clavicle with reconstruction plate[J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2015, 18(7):740-748.
- [22] Marinescu R, Antoniac VI, Stoia DI, et al. Clavicle anatomical osteosynthesis plate breakage-failure analysis report based on patient morphological parameters[J]. *Rom J Morphol Embryol*, 2017, 58(2):593-598.
- [23] Pendergast M, Rusovici R. A finite element parametric study of clavicle fixation plates[J]. *Int J Numer Method Biomed Eng*, 2015, 31(6):e02710.
- [24] 尹峰, 王晓东, 梁炜, 等. 建立锁骨个性化锁定接骨板模型及有限元分析[J]. *中国组织工程研究*, 2016, 20(35):5244-5249.
- YIN F, WANG XD, LIANG W, et al. Establishment of personalized locking clavicle plate model and finite element analysis[J]. *Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu*, 2016, 20(35):5244-5249. Chinese.
- [25] 张科学, 赵晶鑫, 赵喆, 等. 髓内钉或克氏针与钢板固定治疗锁骨骨折的 Meta 分析[J]. *中国骨伤*, 2015, 28(5):454-461.
- ZHANG KX, ZHAO JX, ZHAO Z, et al. Treatment of clavicular fractures using intramedullary nailing or K-wire versus plating fixation: a meta-analysis[J]. *Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma*, 2015, 28(5):454-461. Chinese with abstract in English.
- [26] Calisal E, Ugur L. Evaluation of the plate location used in clavicle fractures during shoulder abduction and flexion movements: a finite element analysis[J]. *Acta Bioeng Biomech*, 2018, 20(4):41-46.
- [27] 朱昌荣, 章莹, 郭晓泽, 等. 重建钢板前置和上置固定锁骨中段斜形骨折的有限元分析[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2013, 31(1):104-107.
- ZHU CR, ZHANG Y, GUO XZ, et al. Finite element analysis of midshaft, oblique clavicle, fractures fixed with reconstruction plates in anterior and posterior placement[J]. *Zhongguo Lin Chuang Jie Pou Xue Za Zhi*, 2013, 31(1):104-107. Chinese.
- [28] 朱昌荣. 锁骨骨折不同固定方式生物力学特性的有限元分析[D]. 南方医科大学, 2013.
- ZHU CR. Biomechanical properties of different fixation methods for the clavicle fracture: A finite element study[D]. Nanfang Medical University, 2013. Chinese.
- [29] Huang TL, Chen WC, Lin KJ, et al. Conceptual finite element study for comparison among superior, anterior, and spiral clavicle plate fixations for midshaft clavicle fracture[J]. *Med Eng Phys*, 2016, 38(10):1070-1075.
- [30] 刘川. 锁骨中段骨折修复: 重建钢板前置与上置的生物力学差异[J]. *中国组织工程研究*, 2014, 18(53):8646-8650.
- LIU C. Mid-clavicle fracture: biomechanical difference between anterior and superior reconstruction plate[J]. *Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu*, 2014, 18(53):8646-8650. Chinese.
- [31] Lu YC, Untaroiu CD. Statistical shape analysis of clavicular cortical bone with applications to the development of mean and boundary shape models[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2013, 111(3):613-628.
- [32] Krone R, Schuster P. An investigation on the importance of material anisotropy in finite element modeling of the human femur[C]. SAE World Congress Exhibition, 2006.
- [33] Untaroiu CD, Duprey S, Kerrigan J, et al. Experimental and computational investigation of human clavicle response in anterior-posterior bending loading-Biomed 2009[J]. *Biomed Sci Instrum*, 2009, 45:6-11.
- [34] Rho JY, Hobatho MC, Ashman RB. Relations of mechanical properties to density and CT numbers in human bone[J]. *Med Eng Phys*, 1995, 17(5):347-355.
- [35] Marie C. Strength analysis of clavicle fracture fixation devices and fixation techniques using finite element analysis with musculoskeletal force input[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2015, 53(8):759-769.
- [36] 桂斌捷, 刘德宝. 锁骨三维模型构建和力学分析[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2009, 13(30):5827-5830.
- GUI BJ, LIU DB. Three-dimensional modeling construction and biomechanical analysis of the clavicle[J]. *Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu Yu Lin Chuang Kang Fu*, 2009, 13(30):5827-5830. Chinese.
- [37] 肖进, 尹庆水, 张美超, 等. 垂直载荷作用下骨盆的三维有限元分析[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2008, 11(39):7615-7619.
- XIAO J, YIN QS, ZHANG MC, et al. Three-dimensional finite element analysis of pelvis under vertical loading[J]. *Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu Yu Lin Chuang Kang Fu*, 2008, 11(39):7615-7619. Chinese.
- [38] Zhang XJ, Cheng XD, Yin B, et al. Finite element analysis of spiral plate and Herbert screw fixation for treatment of midshaft clavicle fractures[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2019, 98(34):e16898.

(收稿日期: 2020-03-25 本文编辑: 王玉蔓)