

## 锁骨骨折及其内固定的生物力学研究进展

费晗 李庭

北京积水潭医院创伤骨科, 北京 100035

通信作者: 李庭, Email: liting2000@sina.com

**【摘要】** 锁骨骨折是临床常见的骨折, 其生物力学特点与临床治疗密切相关。本文就锁骨本身及其骨折的生物力学特点、各种内固定生物力学特性的比较、内固定应用细节的研究进展进行综述。

**【关键词】** 锁骨骨折; 内固定; 生物力学

DOI:10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2020.05.018

锁骨是连接上肢与躯干的唯一支架, 对上肢有支撑作用。锁骨骨折是常见的骨折, 常需内固定治疗, 恢复锁骨的解剖和生物力学平衡。其治疗存在很多争议, 近年来随着内固定技术的发展, 出现了更多的治疗方法, 使临床医生在选择时出现困扰。多数锁骨中段骨折保守治疗可取得满意效果, 本文仅从手术治疗的生物力学的角度, 就近年来的研究进展予以综述。

### 一、锁骨的生物力学特点

锁骨外、中、内 1/3 分别呈扁平状、管状、漏斗状, 中段最厚, 可抵抗轴向的力。各段分别有不同的肌肉附着, 还有上肢重力、韧带拉力的影响, 其复杂的解剖、受力机制决定了锁骨复杂的生物力学特点。

锁骨中段骨折常见于手伸展位跌倒, 外力沿上肢传导到锁骨产生骨折; 远端骨折多为肩外侧受伤后受到向下的力导致; 而近端骨折多由于锁骨外侧受到间接外力导致内侧骨折。有关锁骨及其骨折本身的生物力学参数的研究较少。Hararongroj 等<sup>[1]</sup>在锁骨标本上模拟上肢重力、内侧模拟胸锁乳突肌拉力, 并施加轴向压力, 发现锁骨骨折的平均负荷是 1 526.19 N, 骨折发生在中 1/3 段两个弯曲交界处, 骨折远段平均占锁骨长度的 49%。而 Kemper 等<sup>[2]</sup>报道锁骨在不同方向的载荷下结构刚度存在差异, 在弯曲时的生物力学参数: 平均失效载荷为 (732±175) N, 平均失效应变 19 738±2 927 微应变; 卸载相线性区的平均弹性模量 (20.8±5.7) GPa。三维有限元模型显示锁骨在轴向载荷状态下应力集中于中 1/3 区域的下表面, 为“结构危险区”, 与临床上锁骨骨折易发生于中 1/3 的现象相符。

一些治疗会影响锁骨结构的完整, 如肩峰成型时切除内侧肩峰骨刺和远端锁骨下方 (coplaning), 修复锁骨不愈合、口腔癌术后缺损时可能会切取锁骨瓣等<sup>[3]</sup>, 而锁骨结构的缺损会对其生物力学特性产生影响; 切除锁骨使肩部的不稳定性增加, 上肢外展时肩胛骨会向前移位<sup>[4]</sup>; Beaver 等<sup>[5]</sup>认为在单通道喙锁韧带、肩锁韧带重建时, 切除锁骨远端对肩锁关节运动无明显影响, 还可以通过韧带增强、保留关节

囊等方式缓解潜在不稳定, 但隧道的应用可能会降低锁骨骨折的所需应力。

对于锁骨骨折, 钢板螺钉可以提供足够的稳定性<sup>[6]</sup>, 锁骨中段骨折钢板固定后三点弯曲、扭转强度和刚度与正常标本无显著差异<sup>[7]</sup>。钢板周围尤其是螺钉周围存在应力集中, 有利于早期维持骨折断端的稳定<sup>[8]</sup>, 尤其是钢板与锁骨接触面的内侧旋转稳定性不足可导致内固定失效<sup>[9-10]</sup>, 所以内固定需要具有足够的抗旋转能力。

### 二、不同内固定物的生物力学特点及比较

克氏针固定经济简便、对血供影响小, 但相对不稳定。张栋等<sup>[11]</sup>发现中空加压螺钉在强度、刚度、应力遮挡方面优于克氏针固定; 陆耀宇等<sup>[12]</sup>比较了经皮克氏针、六孔钢板、记忆合金等材料治疗锁骨中外 1/3 骨折, 发现克氏针组在扭转和拉伸方面较弱; 王诗波等<sup>[13]</sup>发现体外钢板在强度、刚度和稳定性方面优于单枚克氏针固定。所以, 虽然克氏针固定已在临床上应用并取得了一定效果, 但需注意其生物力学稳定性的不足。

髓内固定较克氏针在强度、刚度和稳定性、扭矩、极限载荷上有优势<sup>[14-15]</sup>。而与钢板螺钉固定相比, 髓内固定切口较小, 且因骨膜剥离少、增加微动而可能有利于愈合。文献报道与钢板螺钉相比钛制弹性髓内钉在强度、刚度、稳定性及应力遮挡方面有优势<sup>[14]</sup>, 空心钉髓内固定更能抵抗轴向负荷及三点弯曲负荷<sup>[16]</sup>, 交锁髓内钉在锁骨弯曲强度、刚度、扭矩、极限载荷等方面与钢板相似<sup>[15]</sup>。但也有研究发现了髓内固定的不足, Wilson 等<sup>[10]</sup>发现生理负荷下内固定失败源于旋转稳定性不足, 而许多研究发现髓内钉的力学特性存在不足, 尤其是抵抗旋转能力<sup>[17-19]</sup>, 这使其更容易导致内固定失效<sup>[10]</sup>。此外, 一项对 15 个锁骨中段骨折内固定研究的系统回顾表明钢板固定比髓内固定在刚度和失效负荷方面更强<sup>[20]</sup>。但也有文献报道髓内钉的内固定失败率与钢板螺钉无显著差异<sup>[21]</sup>, 因此旋转稳定性不足对髓内固定的疗效的影响有待验证。

钢板螺钉是目前临床上主流的内固定方式。虽然

Renfree 等<sup>[19]</sup>发现锁定和非锁定固定提供相似的坚强固定,但更多的文献支持锁定钢板的应用<sup>[22]</sup>。Drosdowech 等<sup>[18]</sup>发现 LCDC 和 LCP 可抵抗较大的弯曲和扭转负荷,而重建钢板的刚度和强度值较低(尤其在有皮质缺损时);Eden 等<sup>[23]</sup>发现锁骨 LCP 比重建钢板治疗锁骨中段骨折的生物力学稳定性更佳;Iannotti 等<sup>[24]</sup>认为 LCDC 钢板的稳定性优于重建钢板和 DC 钢板;窦庆寅等<sup>[25]</sup>发现锁定钢板在各级载荷下的应变及位移、轴向刚度、应力遮挡率、挠度值、板侧和对侧加载弯曲刚度、扭转角度等指标均优于重建钢板。因此在有条件的情况下,锁定钢板的使用可以提供更好的生物力学稳定性。

随着材料技术的发展,文献报道了更多的固定方法,如钉棒外固定、防滑锁骨钉、多平面弯曲刚度更好的双迷你钢板、应力遮挡更小的体外钢板、用于小儿锁骨骨折的可吸收接骨板等,其临床效果还有待研究。除了上述常见的锁骨中段骨折研究,对于锁骨远端的骨折,传统钩钢板的深度、长度、角度变化可改变肩峰和锁骨的应力分布。对于合并韧带损伤的患者,不同情况下的治疗方法较多,生物力学特性复杂,应用时需根据实际情况做出选择。而对于临床上相对少见的锁骨近端骨折,治疗方式也常常选择保守,有关生物力学的研究较少。

### 三、内固定的应用细节

钢板放置的位置存在争论。上表面显露方便,不容易损伤血管神经等结构,且三维有限元模型发现锁骨产生断裂的弯矩位于冠状面,认为钢板放置于上表面相对于前方能有效抵抗这一弯矩<sup>[26]</sup>。多数文献证实钢板位于上方相对于前方可获得更好的和扭转及轴向载荷下的刚度<sup>[20,24,27]</sup>,而前上方与上方钢板在旋转力下刚度相当<sup>[6]</sup>。但部分学者认为钢板前置下抗拉强度、抗拔出力、应力遮挡优于钢板上置,其原因可能是锁骨外侧扁平,从前方可置入较长的螺钉<sup>[7,28]</sup>。也有学者支持钢板置于下方:锁骨中段和前下方皮质最厚,可能承受了更大的应力,而锁骨三维有限元模型也显示轴向载荷下应力集中于下表面<sup>[26]</sup>。Taylor 等<sup>[29]</sup>的电脑模型显示上肢与进食相关的运动对锁骨中段施加了双轴弯曲和扭转的应力,认为内外方钢板能更好地抵抗锁骨在肩外展和屈曲时的轴向压力。一些文献报道了锁骨中段骨折中,前下位钢板比上位钢板有更好的生物力学特性<sup>[22]</sup>,尤其是抗弯曲刚度<sup>[6]</sup>。但是也有学者认为前下方钢板失效负荷和弯曲失效刚度较差<sup>[30-31]</sup>。

以往的研究往往应用单纯横行骨折模型,而对于斜形、楔形、粉碎性等骨折模型,Toogood 等<sup>[32]</sup>发现轴向加压和扭转负荷时多数情况下上方钢板更稳定,而悬吊弯曲时前方钢板更稳定。因此钢板放置于不同的位置可能有不同的优势和特点,有待于研究锁骨内固定后承受的各种载荷及其重要性,以进一步指导内固定的放置。

对于术中钢板预弯的影响,Worhacz 等<sup>[27]</sup>发现预弯锁定钢板的生物力学特性更佳;彭远来等<sup>[33]</sup>发现弯制 1 次的重建板固定刚度和强度更佳。所以手术时进行有限次数的预

弯,可增加其生物力学稳定性。

随着内固定材料技术的发展,一些学者尝试对内固定进行简化。单皮质螺钉固定可减轻远侧皮质穿透,保护附近解剖结构,减小内固定去除难度,一些学者发现单皮质固定(或与远侧皮质接触)的一些力学特性与双皮质固定相当<sup>[34-35]</sup>,但也有体外实验发现相比之下单皮质锁定钢板在较低的载荷下会失效<sup>[36-37]</sup>。为降低钢板厚度,Pulos 等<sup>[37]</sup>发现 3.5 mm 的前下方重建钢板刚度高于 2.7 mm 钢板,而二者在加载负荷实验中均未失效,所以有望在刚度需求较小的情况下使用较薄的钢板。空心髓内固定相对于实心髓内固定的机械强度不足,可能导致早期失效<sup>[38]</sup>。随着锁定钢板的应用,Larsen 等<sup>[39]</sup>发现了锁骨中段骨折一侧放 2 枚锁定钉和传统认为最少放置的 3 枚普通螺钉在生物力学和临床效果上无显著差异,所以有望减少螺钉数量和钢板长度。总之,内固定技术的进步使固定方式的简化成为可能,并希望借此减少手术创伤和对软组织的刺激,但其生物力学稳定性可能会有不同程度的减弱,所以内固定的简化需谨慎,简化的类型和程度有待于更多相关的研究。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

### 参 考 文 献

- [1] Harmroongroj T, Tantikul C, Keatkor S. The clavicular fracture: a biomechanical study of the mechanism of clavicular fracture and modes of the fracture[J]. J Med Assoc Thai, 2000, 83(6):663-667.
- [2] Kemper A, Stitzel J, Gabler C, et al. Biomechanical response of the human clavicle subjected to dynamic bending[J]. Biomed Sci Instrum, 2006,42:231-236.
- [3] Edwards SL, Wilson NA, Flores SE, et al. Arthroscopic distal clavicle resection: a biomechanical analysis of resection length and joint compliance in a cadaveric model[J]. Arthroscopy, 2007, 23(12): 1278-1284. DOI: 10.1016 / j.arthro.2007.07.004. DOI: 10.1016/j.arthro.2007.07.004.
- [4] Kemper AR, Stitzel JD, McNally C, et al. Biomechanical response of the human clavicle: the effects of loading direction on bending properties[J]. J Appl Biomech, 2009, 25(2): 165-174. DOI: 10.1123/jab.25.2.165.
- [5] Beaver AB, Parks BG, Hinton RY. Biomechanical analysis of distal clavicle excision with acromioclavicular joint reconstruction[J]. Am J Sports Med, 2013, 41(7): 1684-1688. DOI: 10.1177/0363546513488750.
- [6] Chen Y, Yang Y, Ma X, et al. A biomechanical comparison of four different fixation methods for midshaft clavicle fractures [J]. Proc Inst Mech Eng H, 2016,230(1):13-19. DOI: 10.1177/0954411915611159.
- [7] 石继祥, 曹成福, 石文俊, 等. 前置与上置重建钢板固定锁骨中段骨折生物力学性能比较[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(13): 2333-2336. DOI: 10.3969 / j.issn.1673-8225.2010.13.014.
- [8] 阮国模, 苏佳灿, 苏忠良, 等. 重建钢板固定锁骨中段骨折的三维有限元生物力学分析[J]. 浙江医学, 2012, 34(5): 323-325. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2785.2012.05.005.
- [9] Werner CM, Favre P, van Lenthe HG, et al. Pedicled vascularized rib transfer for reconstruction of clavicle

- nonunions with bony defects: anatomical and biomechanical considerations[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2007, 120(1): 173-180. DOI: 10.1097/01.prs.0000263537.57701.8b.
- [10] Wilson DJ, Scully WF, Min KS, et al. Biomechanical analysis of intramedullary vs. superior plate fixation of transverse midshaft clavicle fractures[J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2016, 25(6):949-953. DOI: 10.1016/j.jse.2015.10.006.
- [11] 张栋, 陈海涛, 沈茂荣, 等. 实验性锁骨骨折两种内固定方法的生物力学性能比较[J]. *广西医科大学学报*, 2008, 25(2): 197-199. DOI: 10.3969/j.issn.1005-930X.2008.02.011.
- [12] 陆耀宇, 娄磊, 胡建山, 等. 三种内固定治疗锁骨中外 1/3 骨折的生物力学研究[J]. *右江医学*, 2011, 39(1): 10-13. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1383.2011.01.004.
- [13] 王诗波, 骆宇春, 季航宇, 等. 体外钢板固定治疗锁骨骨折的对比性生物力学研究[J]. *中国矫形外科杂志*, 2011, 19(6): 488-491. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2011.06.14.
- [14] 陈奕, 吕建元, 陈吉, 等. 钛制弹性髓内钉微创治疗锁骨中段骨折的生物力学研究[J]. *中国矫形外科杂志*, 2011, 19(20): 1723-1725. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2011.20.15.
- [15] 罗轶, 彭永岳, 张晓峰, 等. 锁骨交锁髓内钉的生物力学研究[J]. *中国医师进修杂志*, 2012, 35(14): 1-4. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4904.2012.14.001.
- [16] 孙军战, 王光辉, 吴成如, 等. 空心螺钉治疗锁骨骨折的生物力学研究[J]. *东南国防医药*, 2014, 16(5): 482-484. DOI: 10.3969/j.issn.1672-271X.2014.05.011.
- [17] Ackland D, Griggs I, Hislop P, et al. An intramedullary Echidna pin for fixation of comminuted clavicle fractures: a biomechanical study[J]. *J Orthop Surg Res*, 2017, 12(1): 122. DOI: 10.1186/s13018-017-0623-y.
- [18] Drosdowech DS, Manwell SE, Ferreira LM, et al. Biomechanical analysis of fixation of middle third fractures of the clavicle[J]. *J Orthop Trauma*, 2011, 25(1): 39-43. DOI: 10.1097/BOT.0b013e3181d8893a.
- [19] Renfree T, Conrad B, Wright T. Biomechanical comparison of contemporary clavicle fixation devices[J]. *J Hand Surg Am*, 2010, 35(4): 639-644. DOI: 10.1016/j.jhsa.2009.12.012.
- [20] Hulsmans MH, van Heijl M, Houwert RM, et al. Surgical fixation of midshaft clavicle fractures: a systematic review of biomechanical studies[J]. *Injury*, 2018, 49(4): 753-765. DOI: 10.1016/j.injury.2018.02.017.
- [21] 叶勇, 李军, 荆珏华. 钛板与弹性髓内钉修复锁骨中段骨折的 Meta 分析[J]. *中国组织工程研究*, 2016, 20(26): 3938-3945. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.2016.26.021.
- [22] 陈阳, 马信龙, 马剑雄, 等. 锁骨中段 1/3 骨折不同内固定物及固定方式的生物力学研究[J]. *中华创伤杂志*, 2013, 29(10): 986-990. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-8050.2013.10.023.
- [23] Eden L, Doht S, Frey SP, et al. Biomechanical comparison of the Locking Compression superior anterior clavicle plate with seven and ten hole reconstruction plates in midshaft clavicle fracture stabilisation[J]. *Int Orthop*, 2012, 36(12): 2537-2543. DOI: 10.1007/s00264-012-1671-x.
- [24] Iannotti MR, Crosby LA, Stafford P, et al. Effects of plate location and selection on the stability of midshaft clavicle osteotomies: a biomechanical study[J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2002, 11(5): 457-462. DOI: 10.1067/mse.2002.125805.
- [25] 窦庆寅, 仰明莉. 锁定板固定锁骨骨折生物力学测试[J]. *中国医药导报*, 2016, 13(18): 89-92.
- [26] 杨志勇, 程黎明, 涂熙, 等. 锁骨三维有限元模型的建立及生物力学分析[J]. *第二军医大学学报*, 2008, 29(11): 1316-1319. DOI: 10.3321/j.issn:0258-879X.2008.11.011.
- [27] Worhacz K, Nayak AN, Boudreaux RL, et al. Biomechanical analysis of superior and anterior precontoured plate fixation techniques for neer type II-A clavicle fractures[J]. *J Orthop Trauma*, 2018, 32(12): e462-e468. DOI: 10.1097/BOT.0000000000001318.
- [28] 汤凌. 前置与上置钢板内固定治疗锁骨中段骨折的生物力学对比分析[J]. *创伤外科杂志*, 2016, 18(6): 334-337. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4237.2016.06.005.
- [29] Taylor PR, Day RE, Nicholls RL, et al. The comminuted midshaft clavicle fracture: a biomechanical evaluation of plating methods[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2011, 26(5): 491-496. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2010.12.007.
- [30] Kontautas E, Gerulis V, Varžaitytė L, et al. Osteosynthesis of the clavicle after osteotomy in brachial plexus surgery: a biomechanical cadaver study[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2015, 51(2): 112-116. DOI: 10.1016/j.medic.2015.02.004.
- [31] Celestre P, Roberston C, Mahar A, et al. Biomechanical evaluation of clavicle fracture plating techniques: does a locking plate provide improved stability? [J]. *J Orthop Trauma*, 2008, 22(4): 241-247. DOI: 10.1097/BOT.0b013e31816c7bac.
- [32] Toogood P, Coughlin D, Rodriguez D, et al. A biomechanical comparison of superior and anterior positioning of precontoured plates for midshaft clavicle fractures[J]. *Am J Orthop (Belle Mead NJ)*, 2014, 43(10): E226-231.
- [33] 彭远来, 马新硕, 危紫翼, 等. 锁骨接骨板预弯塑形的生物力学研究[J]. *医用生物力学*, 2018, 33(1): 1-5. DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.01.001.
- [34] Croley JS, Morris RP, Amin A, et al. Biomechanical comparison of bicortical, unicortical, and unicortical far-cortex-abutting screw fixations in plated comminuted midshaft clavicle fractures[J]. *J Hand Surg Am*, 2016, 41(6): 703-711. DOI: 10.1016/j.jhsa.2016.04.001.
- [35] Looft JM, Corrêa L, Patel M, et al. Unicortical and bicortical plating in the fixation of comminuted fractures of the clavicle: a biomechanical study[J]. *ANZ J Surg*, 2017, 87(11): 915-920. DOI: 10.1111/ans.14139.
- [36] Little KJ, Riches PE, Fazzi UG. Biomechanical analysis of locked and non-locked plate fixation of the clavicle[J]. *Injury*, 2012, 43(6): 921-925. DOI: 10.1016/j.injury.2012.02.007.
- [37] Pulos N, Yoon RS, Shetye S, et al. Anteroinferior 2.7-mm versus 3.5-mm plating of the clavicle: a biomechanical study [J]. *Injury*, 2016, 47(8): 1642-1646. DOI: 10.1016/j.injury.2016.06.002.
- [38] Wang SH, Lin HJ, Shen HC, et al. Biomechanical comparison between solid and cannulated intramedullary devices for midshaft clavicle fixation[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2019, 20(1): 178. DOI: 10.1186/s12891-019-2560-x.
- [39] Larsen CG, Sleasman B, Chudik SC. A biomechanical and clinical comparison of midshaft clavicle plate fixation: are 2 screws as good as 3 on each side of the fracture? [J]. *Orthop J Sports Med*, 2017, 5(9): 2325967117725293. DOI: 10.1177/2325967117725293.

(收稿日期: 2019-07-12)

(本文编辑: 霍永丰)