

桡骨远端骨折内固定的生物力学研究进展

王宇¹ 王国强¹ 王爱国²

(1.天津中医药大学研究生院, 天津 301617; 2.天津市中医药研究院附属医院骨科, 天津 300120)

摘要: 桡骨远端骨折是临床常见的腕部骨折, 内固定的主要目标是在维持关节面复位和桡骨高度的同时, 控制关键骨块移位并减少软组织并发症。本文围绕骨折形态、固定构型、力学响应和临床转化, 对人工骨、尸体试验、有限元研究及代表性临床证据进行归纳。掌侧锁定钢板**依靠固定角结构支撑**远端骨块, 临床应用较多。背侧钢板适合于背侧骨块或者背侧塌陷严重的病例。经皮克氏针创伤小, 可用于复位后稳定、骨块相对完整且能够配合外部制动的病例。当单一构型不能控制关键骨块, 或骨折存在多方向失稳时, 可考虑联合或辅助固定。不同模型的刚度、位移和失效载荷不可直接横向比较, **实验中的力学优势不能直接推定为临床获益**。内固定的选择**应**以主要失稳方向和关键骨块控制为基础, 并结合软组织安全及术后负荷管理。

关键词: 桡骨远端骨折; 内固定; 生物力学; 有限元分析; 综述

中图分类号: R683.41

前言

桡骨远端骨折 (distal radius fracture, DRF) 是成人常见的腕部骨折, 老年患者多由骨质疏松症或低能量跌倒引发, 年轻患者则多见于高能量损伤。DRF 治疗目的主要包括恢复桡骨高度、掌倾角、尺偏角和关节面的匹配, 维持**下尺桡关节稳定**, 并促进恢复腕手功能^[1]。国内循证指南和**美国骨科医师学会 (American Academy of Orthopaedic Surgeons, AAOS)** /**美国手外科学会 (American Society for Surgery of the Hand, ASSH)** 指南均强调, 治疗方案**应**根据患者的年龄、功能需求、移位幅度、关节面有无受累、骨质情况、患者意愿等进行综合考虑^[1, 2]。

目前常用的内固定方法有掌侧锁定钢板、背侧钢板、经皮克氏针和对特定骨块的联合或者辅助固定。不同方案在抗轴向塌陷、抗弯抗旋转、螺钉骨界面负荷、关键骨块控制、肌腱安全等方面**存在差异**。本文沿“骨折形态—固定构型—力学评价—临床转化”主线, 归纳不同方案的力学特点、适用边界及研究局限。

本文主要查阅与桡骨远端骨折内固定相关的人工骨和尸体标本试验、有限元研究、循证指南及部分临床研究。**本文为叙述性综述, 未进行荟萃分析和证据质量分级。**

1 桡骨远端骨折内固定的生物力学评价基础

1.1 解剖形态与失稳模式

桡骨远端包括桡骨茎突、舟骨窝、月骨窝及掌、背侧关节缘, 其尺骨切迹参与构成下尺桡关节。**计算机体层成像 (computed tomography, CT)** 有助于识别月骨窝、掌侧缘及背尺侧骨块与桡骨干之间的连接关系, 为确定主要支撑部位提供依据^[3-5]。

关节内粉碎骨折、掌侧边缘骨块或者背尺侧骨块，单纯依靠恢复正、侧位影像上常用参数难以获得可靠的三维稳定性。因此，力学构型优化要服务于具体患者的功能需要，不能只重视影像参数的改善^[6]。

1.2 桡骨远端骨折稳定性的评价指标

内固定系统稳定性通常根据其在载荷作用下的形变和失效表现来评价。应力是指单位面积上所受的内力，应变反映局部变形程度。对于 DRF，常用的指标有轴向、弯曲和扭转刚度，骨折端位移，关节面塌陷量，桡骨高度丢失，循环加载后的复位维持及失效载荷。刚度反映构型抵抗变形的能力，失效载荷反映承载上限，但二者均受骨折间隙、骨密度、加载方向和失效判定标准等因素影响。较高的轴向刚度并不代表该构型能够同时控制边缘骨块的剪切和旋转，也不能说明其软组织并发症更少。

人工骨模型一致性好，便于横向比较不同内固定构型之间的差异，但难以反映个体骨密度和软组织约束^[7]。尸体标本可以较好地反映皮质厚度、松质骨分布和解剖形态，但常受样本量及标本差异的限制。因此，DRF 内固定生物力学研究不能只报告刚度和失效载荷，还应说明模型对应的骨折类型及临床适用范围。

2 常用内固定方式的生物力学特点

2.1 掌侧锁定钢板

掌侧锁定钢板通过螺钉与钢板的固定角连接支撑远端骨块，在松质骨较多的骨块下方对抗轴向压缩，阻止关节面再次塌陷。与传统依靠钢板贴附、螺钉加压骨皮质来达到稳定的构型不同，在干骺端粉碎或者骨质条件不佳的病例中，该种固定角结构可提供较稳定的远端支撑。有限元研究提示，减少螺钉需要结合保留螺钉的位置和骨密度综合评判，而不能机械地追求较少数量^[8]。

远端螺钉长度、数量和支撑区域是掌侧锁定钢板构型优化的重要因素^[9]。尸体研究提示，远端螺钉长度应结合局部骨块复位维持和整体稳定性综合评价^[10, 11]。即使复位后钢板型号看似合适，但当远端骨块过小、螺钉未达到有效支撑区域或者遇到骨质较差的情况时，仍可发生复位丢失^[12]。因此，螺钉长度、数量和分布应依据骨折形态共同确定。Harris 等^[13]在骨质疏松尸体桡骨模型中比较掌侧钢板最近端孔采用单皮质与双皮质锁定螺钉的力学表现，结果显示两种构型的弯曲刚度、扭转刚度及失效载荷均无显著差异，提示单纯改用单皮质螺钉尚不能获得明确的围植入物骨折预防优势。由于该研究模拟的是骨折愈合后保留钢板的状态，其结果不能直接用于判断急性粉碎性骨折的固定强度。

掌侧钢板在关注稳定支撑的同时，还应兼顾软组织安全^[14, 15]。临床上，标准正、侧位影像对背侧穿出的识别并不充分，增加背侧切线位或背侧地平线位（dorsal horizon view）有助于发现过长螺钉^[16]。因此，掌侧钢板优化不应仅追求刚度，还应保证关键骨块支撑和螺钉长度安全，降低肌腱损伤风险。

2.2 背侧及骨块特异性固定

背侧钢板可以直接显露和支撑背侧关节面或者背尺侧骨块，在背侧塌陷的骨折模式中具有一定价值^[17]。该方法并非复杂骨折的常规替代方案。生物力学研究显示，当月骨窝背侧较大范围被骨折线分离时，掌背侧联合固定较单纯掌侧固定更具稳定性^[18]。

当掌侧尺侧角骨块体积小、掌侧皮质短时，常规掌侧钢板可能难以充分覆盖。三维 CT 研究提示，这类骨块虽然占关节面比例有限，但却可以伴随掌侧腕骨半脱位^[4]。背尺侧骨块的固定要求同样与骨块大小、位置及螺钉覆盖有关^[5]。

有限元研究显示，在按国际内固定研究学会（Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen, AO）分型建立的 23-C1 型骨折模型中，掌侧钢板联合背侧克氏针可降低尺背侧骨块在弯曲和扭转载荷下的位移^[19]。这些证据支持针对未被主固定控制的骨块进行补充固定，但不足以支持对所有复杂关节内骨折常规增加背侧植入物。

2.3 经皮克氏针

经皮克氏针固定创伤相对较小，器械成本较低。对可闭合复位、复位后骨块相对完整的 DRF 仍具有临床价值。其稳定性与进针方向、交叉构型、骨块是否完整、外部制动方式有关。火鸡跗跖骨替代模型研究比较 4 种常用构型后发现，3 枚骨折块间克氏针构型的刚度较高，而单独采用 2 枚 Kapandji 骨折端内支撑针的稳定性较弱^[20]。该替代模型的结论主要反映构型间的相对差异，不能直接规定临床进针方案。对于复位满意、骨折相对稳定且能够配合制动保护的患者，克氏针仍是可选方案。

2.4 联合固定

当月骨窝骨块、桡骨茎突骨块、掌侧边缘或者背尺侧骨块不稳定时，单个钢板很难同时对抗轴向塌陷、剪切和旋转移位。此时可以在掌侧钢板的基础上联合克氏针、背侧辅助钢板、独立螺钉或者有针对性的支撑构型。联合固定应以增强关键骨块稳定性为目的^[21, 22]。增加辅助固定也可能加重软组织刺激、手术创伤及植入物相关风险。因此，应该根据 CT 识别出的骨折形态、主要失稳方向以及固定后影像学稳定性来决定是否需要增加辅助固定^[5, 18]。

表 1 桡骨远端骨折代表性内固定生物力学研究比较

研究	模型与比较构型	加载与指标	主要结果	证据边界
Synek 等 ^[8] (2021)	有限元：掌侧钢板不同螺钉数量与位置	轴向加载；轴向刚度、远端螺钉周围骨应变	3 枚螺钉最佳/最差配置：刚度较基准降低 11.2%/46.2%；周围骨应变分别降低 35.0%/增加 112.4%	计算模型；需实体试验与临床验证
Hong 等 ^[10] (2024)	24 具尸体前臂；粉碎性关节内骨折；同远端螺钉长度	轴向循环加载及失效加载；整体刚度、背尺侧骨块复位丢失与位移	背尺侧骨块复位丢失：75% 长度组 86%，双皮质组及 100% 骨宽单皮质组均为 0%；刚度及失效载荷组间未见统计学差异	小样本尸体模型；适用特定骨折线
Zeng 等 ^[11] (2025)	24 具尸体桡骨；背侧粉碎性关节内模型螺钉/光滑钉长度	1000 次轴向循环加载后加载至 2 mm 位移；刚度、达到 2 mm 位移的载荷	达到 2 mm 位移的载荷：100%/75%螺钉 308/351 N；100%/75%光滑钉 127/150 N；原研究报告，同类植入物的两种长度组表现相当	体外结果不能直接规定临床螺钉长度

研究	模型与比较构型	加载与指标	主要结果	证据边界
Hadzhinikolova 等 ^[18] (2022)	30 根人工桡骨；掌侧钢板与掌背侧双钢板	中立位及屈、伸各 40°，10~100 N 加载；刚度、月骨窝角位移	中立位、背侧小骨块组：刚度由掌侧固定的 158.5±44.4 N/mm 增至联合固定的 196.5±50.5 N/mm；月骨窝相对桡骨干的角位移由 1.23±0.35°降至 0.31±0.13°，均 $P<0.01$ 。	人工骨模型；缺少软组织和骨质差异
殷浩等 ^[19] (2023)	有限元；AO 23-C1 型骨折；掌侧钢板±背侧克氏针	轴向 100 N、弯曲及扭转各 1 N·m；尺背侧骨块最大位移	尺背侧骨块最大位移，单纯掌侧钢板/联合背侧克氏针：轴向 0.056/0.047 mm，弯曲 0.90/0.38 mm，扭转 3.53/1.30 mm。	材料和边界条件简化；缺少实体试验

注：表中数值均为各研究在特定骨折模型和加载条件下所得，不同研究之间不宜直接比较数值大小；“未见统计学差异”不等同于已证实两种构型等效；含±的数值以均值±标准差表示。

3 影响内固定稳定性的临床决策因素

3.1 骨折形态与定向支撑

骨折形态影响关节面骨块受力和固定后的稳定性。Hadzhinikolova 等^[18]比较不同月骨窝分块模式发现，月骨窝背侧 1/3 独立分离时，补充背侧钢板可提高中立位刚度，并减小月骨窝相对桡骨干的角位移。当月骨窝分为掌背侧等大两块时，掌侧单钢板与背侧联合固定刚度差异无统计学意义（表 1）。这一差异提示，补充固定应针对掌侧钢板未充分支撑的独立骨块。该研究采用人工骨及 10~100 N 非破坏性加载，不能据此推断所有关节内骨折均需双钢板。

受力方向同样影响局部骨块的稳定性。殷浩等^[19]在 AO 23-C1 型有限元模型中发现，联合背侧克氏针后，尺背侧骨块在弯曲和扭转载荷下的位移相较于单纯掌侧钢板减小，而轴向加载下的差别较小（表 1）。因此，辅助固定需针对目标骨块的主要移位方向，不能只依据整体轴向指标。该研究基于单一前臂模型，骨质较差或骨折形态不同时，仍须结合骨块覆盖及软组织情况判断^[1, 23]。

3.2 螺钉构型与局部骨块控制

远端螺钉的位置和长度会影响骨块支撑，但整体与局部稳定性应分别评价。Synek 等^[8]的关节外骨折有限元研究显示，同为 3 枚远端螺钉，最佳与最差配置较 6 枚基准构型的轴向刚度分别降低 11.2%和 46.2%（表 1）。Hong 等^[10]在粉碎性关节内骨折尸体模型中发现，各组整体刚度、背尺侧骨块达到 2 mm 位移时的载荷及最终失效载荷差异均无统计学意义，但 75%长度螺钉组的背尺侧骨块复位丢失比例为 86%，其余两组均为 0%。这提示整体指标相近时，局部骨块仍可能固定不足。Zeng 等^[11]在另一模型中报告，100%与 75%长度螺钉达到规定 2 mm 位移终点的载荷分别为 308 N 和 351 N，原文认为两组表现相当。由于模型和评价终点不同，尚不能确定统一的螺钉长度比例。术中应核对螺钉对关键骨块的覆盖，通过适当投照排查关节内穿入和背侧突出^[1, 16]。

3.3 生物力学证据与术后功能管理

10.12201/bmr.202610.00012V1

术后功能管理需结合骨折的失稳特点和固定后的局部稳定性。骨折形态影响主要受力及移位方向，螺钉布局和辅助固定则影响关键骨块的支撑效果。因此，构型的整体刚度较高，并不意味着所有骨块在活动载荷下均能维持复位。体外试验所得的刚度、位移及失效载荷，可用于比较特定条件下的固定效果，但尚不能直接转化为患者的活动或负重阈值。

Blomstrand 等^[24]纳入 AO A 型或 C1 型骨折患者，比较术后前 2 周石膏与可拆卸支具保护的效果。两组多数随访结局达到预设的临床等效范围，但术后 6 周患者自评腕关节功能未达到等效标准。该研究未比较提前活动，也未纳入 C2、C3 型骨折，其结果仅能为所研究骨折类型的保护方式选择提供参考。术后应根据关键骨块固定、软骨下支撑及骨质情况，结合早期复查时的复位维持情况，逐步调整主动活动和保护措施^[1, 23]；局部稳定性存疑时，应避免过早增加负荷并加强随访。

4 研究局限与发展方向

目前的 DRF 内固定研究大多用人工骨模型、尸体标本和有限元分析。人工骨模型标准化程度高，可以在相同实验条件下比较不同构型的力学性能，却不能再现骨质疏松的状态以及复杂的骨块。尸体标本更接近真实的解剖，但受样本量及骨密度个体差异限制。有限元分析可比较不同钢板设计、螺钉位置和载荷条件下的力学响应，但其结果受材料参数、接触关系及边界条件影响，仍需结合实体实验和临床资料验证。

5 总结

结合现有证据，桡骨远端骨折内固定的选择应该综合考虑主要失稳方向、关键骨块位置及骨质状态。掌侧锁定钢板可为多数不稳定骨折提供有效支撑，但对于掌侧边缘、背尺侧或月骨窝等难以被主构型控制的骨块，仍需根据术中稳定性选择针对性的辅助固定。由于现有生物力学研究在骨折模型、加载方式和结局指标方面存在较大差异，某一构型在实验中的力学优势尚不足以证明其具有临床优势。未来研究应在规范实验条件的基础上，加强力学指标与复位维持、内固定相关并发症及患者报告结局之间的关联分析，从而进一步明确不同固定构型的适用范围。

利益冲突声明： 本文所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] 国家骨科医学中心（北京积水潭医院），中华医学会骨科学分会创新与转化学组，中国康复医学会骨与关节康复专业委员会创伤学组，等. 成人桡骨远端骨折诊断与治疗循证指南（2024）[J]. 骨科临床与研究杂志, 2024, 9(5): 257-274.

[2] Kamal R N, Shapiro L M. American Academy of Orthopaedic Surgeons/American Society for Surgery of the Hand clinical practice guideline summary management of distal radius fractures[J]. J Am Acad Orthop Surg, 2022, 30(4): e480-e486.

[3] Gullborg E J, Ahmad F, Ward C M, et al. Distal radius volar shear fractures: a computed tomography characterization and analysis[J]. J Hand Surg Am, 2026, 51(7): 761.e1-761.e9.

[4] Hubbard J, Berry D, Chauhan A, et al. A three-dimensional computed tomography study of the palmar ulnar corner fragment in distal radial fractures[J]. J Hand Surg Eur Vol, 2024, 49(3): 300-309.

[5] Ji J Q, Zhang X, Cai T, et al. Size and fixation options of dorsoulnar fragments in distal radius fractures[J]. Injury, 2024, 55(6): 111513.

[6] Ter Meulen D P, Selles C A, Kret E J, et al. Cast versus surgery for displaced intra-articular distal radius fractures in the elderly a randomized clinical noninferiority trial (the DART Study)[J]. JB JS Open Access, 2025, 10(3): e25.00060.

[7] Ion N C I, Bocea B A, Zderic I, et al. K-wires as a valid alternative to dual and single headless cannulated

- compression screw fixation of chauffeur fractures: a biomechanical comparison[J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2025, 51(1): 303.
- [8] Synek A, Baumbach S F, Pahr D H. Towards optimization of volar plate fixations of distal radius fractures: using finite element analyses to reduce the number of screws[J]. *Clin Biomech (Bristol)*, 2021, 82: 105272.
- [9] Dietz L, Spiegel C, Kohler F C, et al. Effect of distal screw number on axial deformation and fragment-specific stability in AO/OTA 2R3 C2.1 distal radius fractures[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2026, 146(1): 290.
- [10] Hong T S, Lee D J, Jahani B, et al. Effect of screw length in volar plating for intra-articular distal radius fractures: a biomechanical study[J]. *J Hand Surg Am*, 2024, 49(12): 1186-1195.
- [11] Zeng F, Nayak R, Megalla M, et al. Investigating the effect of distal screw and peg length on stability in volar plating of comminuted, intra-articular distal radius fractures in a cadaveric model[J]. *Clin Biomech (Bristol)*, 2025, 124: 106472.
- [12] Oh C H, Kang S, Lee S W, et al. Reduction loss despite adequate volar locking plate fixation in distal radius fractures: analysis of characteristics and follow-up management[J]. *Clin Orthop Surg*, 2025, 17(3): 478-487.
- [13] Harris M C, Bickley R J, Abbasi P, et al. Unicortical versus bicortical proximal locking screw for prevention of peri-implant fracture: a biomechanical analysis of an osteoporotic distal radius model[J]. *J Hand Surg Glob Online*, 2024, 6(6): 842-846.
- [14] Vasara H, Tarkiainen P, Stenroos A, et al. Higher Soong grade predicts flexor tendon issues after volar plating of distal radius fractures – a retrospective cohort study[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2023, 24(1): 271.
- [15] Zhuang T, Mansuripur K, Shapiro L M, et al. Sagittal and coronal plate position is not associated with flexor tendon irritation, rupture, or need for plate removal after volar locking plate fixation of distal radius fractures[J]. *Hand (N Y)*, 2026, 21(6): 995-1002.
- [16] Lill M, Schauer T, Schultes P, et al. Avoiding screw overlength using dorsal horizon view in palmar plate osteosynthesis of distal radius fractures: a prospective randomized trial[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2024, 144(1): 197-204.
- [17] Tian X, Zhang B, Liu J, et al. Is dorsal vertical double plating an effective alternative to volar plating for distal radius fractures with dorsal collapse?[J]. *Orthop Surg*, 2026, 18(1): 93-100.
- [18] Hadzhinikolova M, Zderic I, Ciric D, et al. Volar versus combined dorsal and volar plate fixation of complex intraarticular distal radius fractures with small dorsoulnar fragment – a biomechanical study[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2022, 23(1): 35.
- [19] 殷浩, 陈光, 李燕, 等. 背侧克氏针增强 AO C 型桡骨远端骨折尺背侧骨折块稳定性的有限元分析[J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(31): 4921-4925.
- [20] Sanders L, Johnson N, Dias J J. Kirschner wire fixation in dorsally displaced distal radius fractures: a biomechanical evaluation[J]. *J Wrist Surg*, 2022, 11(1): 21-27.
- [21] Jäger C F, Spiegel C, Kohler F C, et al. Biomechanical comparison of radiopalmar double plating with conventional palmar plating in comminuted distal radius fractures[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2026, 146(1): 80.
- [22] Riegner P, Spiegel C, Kohler F C, et al. Biomechanical comparison of palmar plate plus headless compression screw versus radiopalmar double plating in AO/OTA 23-C2.1 distal radius fractures[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2026, 146(1): 133.
- [23] Lameijer C M, Teuben M P J, van Delft E A K, et al. ESTES recommendations regarding distal radius fractures[J]. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2026, 52(1): 162.
- [24] Blomstrand J, Sellbrant I, Nellgård B, et al. Removable brace is as good as plaster cast after surgically treated distal radius fracture – a randomised controlled study of pain and wrist function[J]. *J Orthop Surg Res*, 2025, 20(1): 691.