

## · 临床研究 ·

## 三枚交叉桥架埋头钉与锁定接骨板固定 Mason III 型桡骨头骨折稳定性的有限元分析

殷浩<sup>1</sup>, 李燕<sup>1</sup>, 赵改<sup>1</sup>, 谢杰<sup>1</sup>, 宁仁德<sup>1</sup>, 周恩昌<sup>2</sup>

(1. 安徽医科大学第三附属医院骨科, 安徽 合肥 230061; 2. 山东省聊城市第二人民医院骨科, 山东 临清 252600)

**【摘要】** 目的: 利用有限元方法比较 3 枚交叉桥架埋头钉和锁定接骨板(锁定钢板)固定 Mason III 型桡骨头骨折的生物力学稳定性。方法: 利用逆向建模技术, 将 1 例 25 岁健康男性青年桡骨 CT 数据及内固定数据导入相关软件, 分别建立 Mason III 型桡骨头骨折的 3 枚交叉桥架构型埋头钉与锁定钢板的三维有限元模型, 对桡骨头进行 100 N 轴向加载, 比较两组模型最大位移、内固定上最大 Von Mises 应力及应力分布等指标。结果: 3 枚交叉桥架埋头钉组和锁定钢板组最大位移分别为 0.069 mm 和 0.087 mm, 内固定上 Von Mises 应力峰值分别为 18.59 MPa 和 31.85 MPa, 3 枚交叉桥架埋头钉组应力分布更加均匀。结论: 两种内固定方式均能提供良好的固定强度, 3 枚交叉桥架埋头钉较锁定钢板固定方式更具稳定性, 应力分布更均匀。

**【关键词】** 桡骨头骨折; 埋头钉; 锁定钢板; 有限元分析

中图分类号: R683.41

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.20221010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**Finite element analysis of the stability of Mason type III radial head fracture fixed with three cross-bridge headless compression screw and locking plate**

YIN Hao<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, ZHAO Gai<sup>1</sup>, XIE Jie<sup>1</sup>, NING Ren-de<sup>1</sup>, ZHOU En-chang<sup>2</sup> (1. Department of Orthopaedics, The Third Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei 230061, Anhui, China; 2. Department of Orthopaedics, the Second Hospital of Liaocheng, Linqing 252600, Shandong, China)

**ABSTRACT** **Objective** To compare the biomechanical stability of three cross-bridge headless compression screws and locking plates in the fixation of Mason type III radial head fractures by finite element method. **Methods** Using reverse modeling technology, the radial CT data and internal fixation data of a healthy 25-year-old male were imported into the relevant software. Three-dimensional finite element model of 3 cross-bridge headless compression screws and locking plates for Mason III radial head fractures were established, and the radial head was loaded with 100 N axial loading. The maximum displacement, maximum Von Mises stress and stress distribution of the two groups were compared. **Results** The maximum displacements of the three cross-bridge screws group and locking plate group were 0.069 mm and 0.087 mm respectively, and the Von Mises stress peaks were 18.59 MPa and 31.85 MPa respectively. The stress distribution of the three screws group was more uniform. **Conclusion** Both internal fixation methods can provide good fixation effect. Compared with the locking plate fixation method, the 3 cross-bridge headless compression screws fixation is more stable and the stress distribution is more uniform.

**KEYWORDS** Radial head fracture; Headless compression screw; Locking plate; Finite element analysis

成人桡骨头骨折是运动和生活中的常见的骨折类型, 约占所有肘关节骨折的 33%<sup>[1]</sup>, 全身骨折的 5%<sup>[2]</sup>。最常见的桡骨头分型为 Mason 分型<sup>[3]</sup>, 一般认为 I 型骨折可采用保守治疗, II 型行切开复位内固定术, III 型骨折多需要手术治疗。随着现代内固定技术的进步发展和生物力学研究的深入, 切开复位内

固定治疗 Mason III 型骨折越来越普遍, 常见方法有锁定钢板和无头加压螺钉(埋头钉), 前者固定牢靠, 但创伤较大, 对多块骨折固定效果欠佳, 且需二次取出<sup>[4]</sup>; 后者可多角度固定, 刺激性小, 无须取出<sup>[5]</sup>, 但两种固定方式的稳定性差异尚不明确。为此, 笔者建立 Mason III 桡骨头骨折的三维有限元模型, 比较埋头钉与锁定钢板固定的生物力学稳定性, 为临床应用提供参考。

**1 材料与方法****1.1 桡骨头骨折模型的构建**

选取 1 名, 25 岁健康男性志愿者, 身高 175 cm,

基金项目: 安徽省医疗卫生重点专科建设项目支持 (编号: 2022-105-26)

Fund program: Key Medical and Health Specialty Construction Project in Anhui Province (No. 2022-105-26)

通讯作者: 宁仁德 E-mail: nrd192@126.com

Corresponding author: NING Ren-de E-mail: nrd192@126.com

体重 75 kg。无肘关节外伤及手术史,CT 扫描及拍片检查前臂骨质无异常,签订知情同意书。GE 公司 64 排螺旋 CT 沿桡骨中段向上至桡骨头扫描,层厚 0.625 mm,CT 图像资料以 DICOM 格式保存,导入 Mimics 14.0,构建桡骨上段骨骼的点云模型并光滑处理,输出到 Geomagic Studio 10.0 软件行点云拟合、光顺、栅格化,形成 Nurbs 曲面,以 Iges 格式文件输出有限元处理软件 Hypermesh 13.0。模拟截骨法建立 Mason III 型 3 部分骨折模型,桡骨头部纵行骨折线位于临床最常见的外侧部位,内外侧骨折块比例 2:1,颈部骨折线为横行,位于头颈结合部(图 1)。

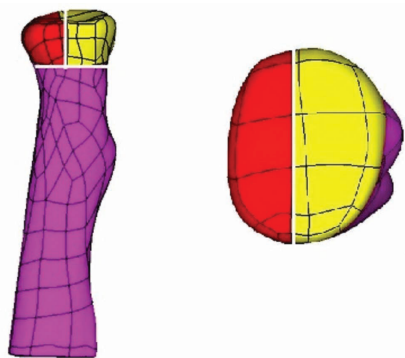


图 1 Mason III 型桡骨头骨折截骨示意图  
Fig.1 Schematic diagram of Mason type III radial head fracture

### 1.2 内固定模型构建及分组

依据产品说明书(北京理贝尔医疗器械公司),在 Creo6.0 软件中设计出内固定的计算机模型,其中埋头钉头部直径 2.8 mm,尾部直径为 2.5 mm,长 20 mm。桡骨头锁定钢板:3 孔“T”形解剖锁定钢板长度 30 mm,厚度 1.2 mm,直径 2.7 mm 的锁定螺钉共 5 枚。将模型以 Iges 格式导入 Hypermesh 13.0 与桡骨头骨折模型进行装配,建立桡骨头骨折内固定的三维有限元模型。

锁定钢板模型组(以下简称钢板组)近端置入 2 枚锁定螺钉,远端 3 枚均为双皮质固定。埋头钉模型组(以下简称埋头钉组)呈 3 枚交叉桥架构型,其中 1 枚螺钉在矢状面上垂直于桡骨头部骨折线固定,2 枚在冠状面上交叉固定桡骨颈骨折线,均为双皮质固定。

### 1.3 有限元分析

在 Hypermesh 13.0 完成三维单元网格划分,单元类型采用 C3D4。材料属性参数按文献<sup>[6]</sup>:皮质骨弹性模量 17 GPa,泊松比 0.3;松质骨弹性模量 1.3 GPa,泊松比为 0.3,钢板、螺钉定义为钛合金,弹性模量 200 GPa,泊松比为 0.3。螺钉与骨质之间采用绑定接触,骨折端之间采用面面接触,摩擦系数 0.1。

模拟日常生活状态,通过桡骨头凹处纵向加载 100 N,近似于提拉质量 10 kg 物体。固定桡骨中下端,设置边界条件为全约束(图 2)。有限元分析软件 Abaqus 6.14 进行计算分析及后处理。

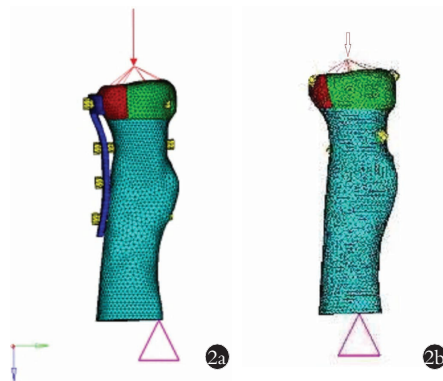


图 2 模型加载示意图 2a. 钢板组 2b. 埋头钉组  
Fig.2 Schematic diagram of model loading 2a. Plate group 2b. Headless compression screw group

### 1.4 测量指标

(1) 两模型整体及内固定应力峰值及应力分布情况。(2) 两模型整体最大位移变化。

## 2 结果

### 2.1 骨折内固定的有限元模型建立与验证

对骨折内固定后实体模型进行有限元网格划分,埋头钉组生成实体单元 50 327 个,节点 11 375 个;钢板组生成实体单元 58 195 个,节点 11 528 个(图 3)。STRAFUN 等<sup>[7]</sup>建立 5 例桡骨头骨折患者的有限元模型,发现在 100 N 轴向加载下,桡骨头上应力不超过  $(2.00 \pm 0.17)$  MPa,这与笔者对原始桡骨颈骨折模型加载时的最大应力为 1.9 MPa 相符。XU 等<sup>[6]</sup>对桡骨颈骨折用 2 枚埋头钉以各种交叉角度的固定,发现螺钉上最大应力范围为 19.54~24.63 MPa,这也与本试验埋头钉组中应力峰值为 18.59 MPa 基本一致,以上说明了本模型的试验可靠性。

### 2.2 两组模型应力分布情况

两组模型最大应力均集中在骨折断端周围的内固定物上,桡骨承担应力较小,内固定物承受应力远大于正常骨质,表明骨折早期内固定物承担了较大应力,有利于骨折愈合。钢板组钢板表面应力远大于螺钉和骨质,体现了偏心固定的特点;埋头钉组最大应力同样分布在骨折断端周围,但明显小于钢板组,且 3 枚螺钉承受的应力更分散和均衡(图 4)。钢板组和埋头钉组 Von Mises 应力峰值分别为 31.85 MPa 和 18.59 MPa,钢板组最大应力位于“T”形钢板结合处,埋头钉组应力分布较均匀;最大应力位于远端 2 枚交叉螺钉中段,且数值仅为钢板组的 58%(图 5)。

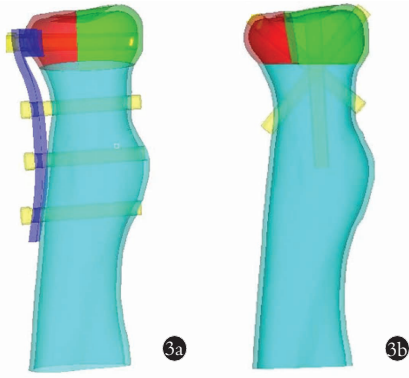


图 3 骨折内固定术后示意图 3a. 钢板组 3b. 埋头钉组  
Fig.3 Schematic diagram after internal fixation of fracture 3a. Plate group 3b. Headless compression screw group

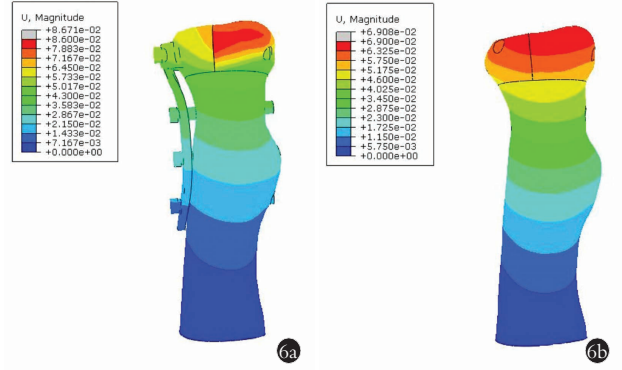


图 6 骨折内固定术后位移图 6a. 钢板组 6b. 埋头钉组  
Fig.6 Displacement of fractures after internal fixation 6a. Plate group 6b. Headless compression screw group

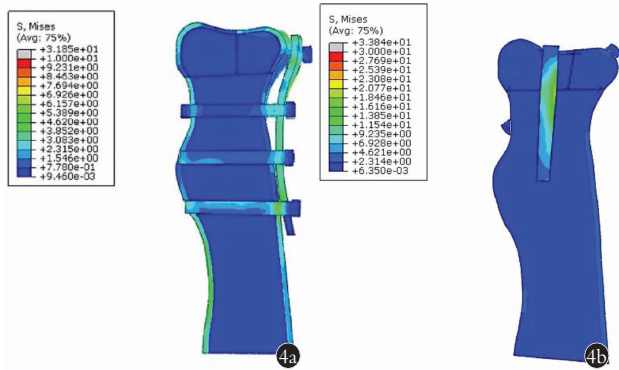


图 4 骨折内固定术后应力分布图 4a. 钢板组 4b. 埋头钉组  
Fig.4 Stress distribution of fractures after internal fixation 4a. Plate group 4b. Headless compression screw group

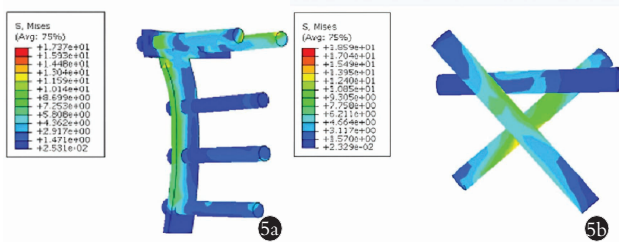


图 5 内固定上应力分布图 5a. 钢板上 5b. 埋头钉上  
Fig.5 Stress distribution on internal fixation 5a. On plate 5b. On headless compression screw

### 2.3 两组模型位移情况

埋头钉组和钢板组最大位移分别为 0.069 mm 和 0.087 mm，两组的位移均很小且组间差别不大，表明两种内固定均能提供较好的稳定性(图 6)。

## 3 讨论

### 3.1 切开复位内固定仍是 Mason III 型桡骨头骨折的首选

Mason III 型桡骨头骨折由于骨折粉碎，移位明显，治疗较为困难。传统治疗方法对难以固定的骨折采用桡骨头切除术，虽然可以获得良好的关节屈伸

及旋转功能的短期效果，但远期可出现多种远期并发症，如肘、腕关节疼痛、下尺桡关节脱位和半脱位、肘外翻角增大、创伤性肘关节炎等<sup>[8-9]</sup>。桡骨头是肘关节的主要稳定结构，而内侧副韧带是负责肘关节外翻稳定的第 2 个结构<sup>[7]</sup>。正常情况，经桡骨头传导的应力值约占肘关节总应力值的 58%，桡骨头切除后破坏了肘关节的正常应力分布，对肘、腕关节的稳定性有较大的影响<sup>[10]</sup>。MORREY 等<sup>[11]</sup>指出，桡骨头在内侧副韧带损伤时可作为抗外翻应力的次要稳定结构，即使在肘关节内侧副韧带完好的情况下，切除桡骨头也会改变肘关节的运动学和外翻稳定性，故切除桡骨头应慎重。而桡骨头置换由于假体价格昂贵、远期效果不明及医保限费的情况下，其使用受限。实际上，即使是非常严重的粉碎性桡骨头经 on table 技术结合多种有效的内固定方式，虽然避免出现创伤性关节炎，但很少出现骨不连及桡骨头坏死的情况，远期效果良好<sup>[12-13]</sup>。所以，对于此类骨折采用内固定仍是最好的选择。锁定钢板和埋头钉是临床最常见的固定方法，虽然钢板固定把持力强，但创伤大，需 II 期取出，且由于的桡骨头“安全区”的存在和钢板的设计单一，为避免因钢板放置影响桡骨头的旋转，产生激惹现象，使其使用也受到限制。而埋头钉固定方式灵活，有多个直径可供选择，且可多角度加压，螺钉尾部埋入软骨下，对桡骨头旋转无阻挡，且无须取出，使其应用更为广泛，但其固定强度仍是需要考虑的问题。

### 3.2 本研究临床意义

本研究通过建立 Mason III 型桡骨头骨折的三维有限元模型，分别采用桡骨头锁定钢板及 3 枚交叉桥架埋头钉固定，在 100 N 轴向加载下结果显示：埋头钉和钢板组最大位移分别为 0.069 mm 和 0.087 mm，Von Mises 应力峰值分别为 18.59 MPa 和 31.85 MPa。埋头钉组由 1 枚埋头钉在冠状位上将骨块垂直固定



于桡骨头主体,2枚埋头钉向远端交叉将骨块固定于桡骨干,将桡骨头、颈骨块与桡骨干连接成整体,呈交叉的立体空间结构,其应力峰值仅为钢板组的58%,且应力分布更加均匀,可有效避免钢板偏心固定导致的应力集中,防止内固定物折断,更符合正常桡骨生物力学特点。REBGETZ等<sup>[14]</sup>也通过对MasonⅢ型桡骨头骨折进行生物力学试验也发现,无头加压螺钉和锁定钢板的固定刚度无差异。多个临床研究<sup>[15-16]</sup>也发现,对于MasonⅡ-Ⅲ型桡骨头骨折,埋头钉与钢板比较无论是固定强度、骨折愈合、还是术后功能均无差异,但埋头钉创伤更小,恢复更快。因此,对于MasonⅢ型桡骨头骨折,由于埋头钉与钢板固定骨折的稳定性基本相同,但鉴于埋头钉创伤更小,应力分布均匀,可作为此类骨折的首选内固定物。

### 3.3 注意事项与本研究不足

值得注意的是,埋头钉的固定效果虽然较好,但并非随意置入。临床使用时需注意:(1)解剖复位是基础。(2)螺钉置入方向应位于骨块中央且垂直于骨折线,多枚螺钉的置入方向注意交叉形成空间交叉桥架结构,达到均匀负担应力的作用。(3)骨折端有缺损时需植骨,防止加压时桡骨头容积缩小。本研究的不足是由于有限元分析是骨生物力学测试中较简单、经济、理想化的方法,与临床实际状况存在一定差异。临床工作中发现桡骨头骨折移位的个体化差异大,术中很难达到解剖复位,内固定的样式、位置、材质难以统一,应力的传递更为复杂,本试验模型采用健康人体建模材料理想化为均质、各向同性;同时还忽略了人体各种运动状态下,周围软组织的张力,故试验结果仍需进一步生物力学试验和临床实践来验证。

### 参考文献

- [1] KLUG A, GRAMLICH Y, WINCHERINGER D, et al. Epidemiology and treatment of radial head fractures: a database analysis of over 70,000 inpatient cases[J]. *J Hand Surg Am*, 2021, 46(1): 27-35.
- [2] KHAWAR H, CRAXFORD S, OLLIVERE B. Radial head fractures[J]. *Br J Hosp Med*, 2020, 81(4): 1-6.
- [3] AL-TAWIL K, ARYA A. Radial head fractures[J]. *J Clin Orthop Trauma*, 2021, 20: 101497.
- [4] RAVEN T F, BANKEN L, DOLL J, et al. Options and limits of angle stable plates in the treatment of comminuted radial head fractures[J]. *J Orthop*, 2018, 15(4): 957-962.
- [5] 余方正, 张怀保, 陈想想, 等. 无头变径空心螺钉结合微型钢板治疗中青年MasonⅢ型桡骨头骨折[J]. *中华手外科杂志*, 2022, 38(1): 23-26.
- [6] XU G M, LIANG Z Y, LI W, et al. Finite element analysis of insertion angle of absorbable screws for the fixation of radial head fractures[J]. *Orthop Surg*, 2020, 12(6): 1710-1717.
- [7] STRAFUN S, LEVADNYI I, MAKAROV V, et al. Comparative biomechanical analysis of stress-strain state of the elbow joint after displaced radial head fractures[J]. *J Med Biol Eng*, 2018, 38(4): 618-624.
- [8] 李恒超, 杨明, 付中国, 等. 切开复位内固定术与桡骨头切除治疗桡骨头骨折的疗效比较[J]. *中华创伤杂志*, 2011, 27(10): 905-908.
- [9] 韩雷, 胡云根, 方伟利, 等. On table重建联合微型钢板固定与桡骨头置换治疗桡骨头MasonⅢ、Ⅳ型骨折[J]. *中华手外科杂志*, 2021, 37(6): 430-433.
- [10] 张建新, 田洪波, 陈日齐. 成人桡骨头切除术后并发症的三维有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2009, 24(6): 444-447.
- [11] MORREY B F, TANAKA S, AN K N. Valgus stability of the elbow. A definition of primary and secondary constraints[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1991(265): 187-195.
- [12] BUSINGER A, RUEDI T P, SOMMER C. On-table reconstruction of comminuted fractures of the radial head[J]. *Injury*, 2010, 41(6): 583-588.
- [13] EVERDING J, RASCHKE M J, POLGART P, et al. Ex situ reconstruction of comminuted radial head fractures: is it truly worth a try[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2019, 139(12): 1723-1729.
- [14] REBGETZ P R, DANIELE L, UNDERHILL I D, et al. A biomechanical study of headless compression screws versus a locking plate in radial head fracture fixation[J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2019, 28(4): e111-e116.
- [15] 陈鹏, 傅德皓. Herbert螺钉与钢板治疗MasonⅡ型桡骨小头骨折临床分析[J]. *实用骨科杂志*, 2015, 21(2): 160-162.
- [16] 杜星男. 治疗桡骨小头骨折两种方法的对比研究[J]. *中国康复医学*, 2014, 26(21): 49-50.
- [17] LI H X, YANG M, FU Z G, et al. Clinical efficacy of open reduction and internal fixation plus radial head resection in treatment of radial head fractures[J]. *Chin J Trauma*, 2011, 27(10): 905-908. Chinese.
- [18] HAN L, HU Y G, FANG W L, et al. Ontable reconstruction technique combined with mini plate fixation and radial head replacement in the treatment of Mason typeⅢ andⅣ of the radial head fractures[J]. *Chin J Hand Surg*, 2021, 37(6): 430-433. Chinese.
- [19] ZHANG J X, TIAN H B, CHEN R Q. Three-dimensional limited element analysis of the complication after resection of head of radius for adults[J]. *J Med Biomech*, 2009, 24(6): 444-447. Chinese.
- [20] DU X N. Comparative study on two methods for treating radial capitulum fracture[J]. *Med J Chin People's Health*, 2014, 26(21): 49-50. Chinese.

(收稿日期:2022-12-20 本文编辑:朱嘉)