

# 新型解剖锁定钢板治疗肱骨远端骨折的有限元分析

胡维界<sup>1△</sup> 豆娟<sup>2</sup> 王振运<sup>2</sup> 李毛毛<sup>1</sup> 周峰<sup>1</sup> 刘峰<sup>1</sup>

**[摘要]** 目的:通过有限元模型分析新型解剖锁定钢板固定肱骨远端骨折模型的稳定性,验证该新型解剖锁定钢板的固定效果,为钢板生产及临床应用提供理论依据。方法:将右肘关节 CT 断层扫描数据以 dicom 格式导入 mimics19.0 中,可以得到三个不同的视图(即原始的轴向视图和由切层数据得到的冠状面和矢状面)。将 mimics 导出的 STL 文件导入 ANSA14.0 中,将网格模型导出 inp 格式文件,导入 Abaqus2016 中进行计算,生成新型解剖锁定钢板网格模型。网格模型限制肱骨近端自由度,肱骨远端施加垂直向下 50 N 集中载荷,观察其应力及位移情况。结果:肱骨远端施加垂直向下载荷(50 N)条件下,新型解剖锁定钢板及螺钉最大应力为 12.53 MPa,最大位移为 6.62  $\mu\text{m}$ 。结论:有限元分析结果表明,新型解剖锁定钢板固定肱骨远端骨折稳定性良好,可满足临床使用要求,达到固定条件。

**[关键词]** 肱骨远端骨折;骨折固定;钢板固定;有限元分析

**[中图分类号]** R683.41 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1005-0205(2023)09-0045-05

**DOI:**10.20085/j.cnki.issn1005-0205.230908

## Finite Element Analysis on the Novel Anatomical Locking Plate for Distal Humerus Fractures

HU Weijie<sup>1△</sup> DOU Juan<sup>2</sup> WANG Zhenyun<sup>2</sup> LI Maomao<sup>1</sup> ZHOU Feng<sup>1</sup> LIU Feng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Orthopedic, Qingyang Second People's Hospital, Qingyang 745000, Gansu China;

<sup>2</sup>Department of Orthopedic, Qingyang People's Hospital, Qingyang 745000, Gansu China.

**Abstract Objective:** To verify the fixation efficacy of the new anatomical locking steel plate, and to provide theoretical basis for steel plate production and clinical application, by finite element analysis of the stability of a new anatomical locking plate for fixation of distal humeral fractures in a model. **Methods:** CT scan dicom format data of the right elbow joint were imported into mimics19.0, and three different views were obtained, the original axial view and the coronal plane and sagittal plane obtained from the sectional data. The mimics exported STL file import into ANSA14.0, export the grid model into inp format, import it into Abaqus2016 for calculation, and generate the novel anatomical locking plate grid model. The grid model limited the degree of freedom of the proximal humerus, and the distal humerus was subjected to concentrated loads of 50 N vertically downward and observe its stress and displacement. **Results:** Under the vertical downward load (50 N) applied to the distal humerus, the maximum stress of the new anatomic locking plate and screw is 12.53 MPa and the maximum displacement is 6.62  $\mu\text{m}$ . **Conclusion:** The results of finite element analysis show that the new anatomic locking plate has good stability and can meet the requirements of clinical and the fixed conditions.

**Keywords:** distal humerus fracture; fracture fixation; steel plate fixation; finite element analysis

肱骨远端骨折约占成人骨折 2%,其中 30%骨折涉及肱骨远端关节面<sup>[1]</sup>。切开复位内固定技术是治疗

肱骨远端骨折的主流选择<sup>[2]</sup>,但其术后并发症发生率较高,例如内固定失效、尺神经损伤、关节僵硬、异位骨化、骨不连、畸形愈合、感染等<sup>[3]</sup>。因此,应积极探索新的治疗肱骨远端骨折的思路与方法。笔者研制了一款新型肱骨远端解剖锁定钢板,其最大优势在于更小的手术创伤,更简单的钢板植入,同时可保留伸肘装置完整性。本研究通过有限元模型分析新型钢板固定肱骨

基金项目:甘肃省陇原青年创新创业人才项目(2020RCXM168)

<sup>1</sup>庆阳市第二人民医院骨科(甘肃 庆阳,745000)

<sup>2</sup>庆阳市人民医院骨科

<sup>△</sup>通信作者 E-mail:huweijie175@163.com

远端骨折模型的稳定性,进而验证固定效果,为钢板生产及临床应用提供理论依据。

### 1 研究对象和方法

#### 1.1 研究对象

选择一名健康志愿者,右肘关节无明显外伤史,X线片检查未见关节畸形、退变。该志愿者身高为175 cm,体重为75.2 kg,愿意接受试验,并签署试验知情同意书,右侧肘关节伸直位,CT扫描,层厚为1 mm。本研究CT设备为德国SIEMENS公司生产,64排128层;建模及分析软件包括mimics19.0(瑞典Materialise公司)、ANSA14.0(瑞士贝塔公司)和Abaqus2016(法国dassault公司)。本研究参考的技术规范为《GBT31054—2014机械产品计算机辅助工程有限元数值计算术语》。

#### 1.2 肱骨远端三维模型的建立

将志愿者右肘关节CT断层扫描的312张原始数据,以dicom格式导入mimics19.0中,可以得到三个不同的视图即原始的轴向视图和由切层数据得到的冠状面和矢状面。建立多个任务,调节阈值范围。使得骨模型各断层达到最高清晰度。点击创建3D模型按钮,生成新的3D模型,经过光滑处理。对存在破洞、凸点、粘连的三维肘关节模型,分别采用编辑中的消除功能及多洞填补操作,从而实现各部分整体表面完整。

#### 1.3 建立内固定模型

在mimics中的3-matic模块中,打开建好的肱骨远端模型,建立模拟切割平面,以尺骨鹰嘴窝上缘向近端模拟一个宽度为10 mm的骨缺损区,建立不稳定骨折模型,新型肱骨远端解剖钢板外侧参考肱骨远端背外侧解剖锁定钢板设计,其内侧形态根据肱骨内髁轮廓建立,生成模型(见图1a)。

#### 1.4 建立内固定网格模型

选择壳单元模块中的表面化处理功能,生成几何模型。由于mimics导出的stl壳网格单元质量较差,需要重新在ANSA中划分高质量网格,选择合适的种子尺寸,肱骨远端各部件逐一划分生成壳网格,网格单元为混合单元。定义壳模型为实体模型,选择裂变功能,将模型划分成高质量的四面体网格模型,对每种部件赋予对应材料参数(见表1)。创建接触面集合,选择实体表面,根据实际情况将紧密连接的面设定为绑定关系。将肱骨远端表面耦合成一点,并将该点创建集合,约束肱骨近端自由度。将此网格模型导出inp格式,导入Abaqus2016中进行计算,网格划分三维模型见图1b。

#### 1.5 内固定模型材料属性、参数设置、边界及载荷

钢板、螺钉材料属性模型为钛合金,骨质采用均质同向的线性模型(见表1)。新型解剖锁定钢板模型单

元格类型、单元数目、节点数目见表2。本研究模型载荷模拟肱骨远端关节面施加50 N集中载荷,方向为沿肱骨纵轴垂直向下,同时约束肱骨近端自由度(见图1c)。

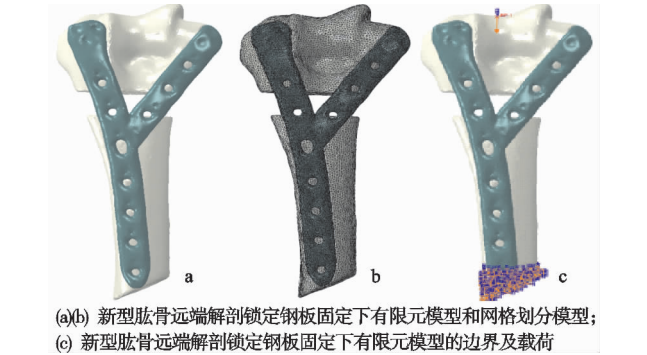


图1 三维模型

表1 内固定模型材料属性

部件	弹性模量/MPa	泊松比
肱骨皮质骨	2 370	0.3
肱骨松质骨	8 000	0.3
钢板及螺钉	210 000	0.3

表2 单元参数设置

部件	单元类型	单元数目	节点数目
肱骨远端	C3D4	89 940	24 803
钢板、螺钉	C3D4	117 214	35 493

### 2 结果

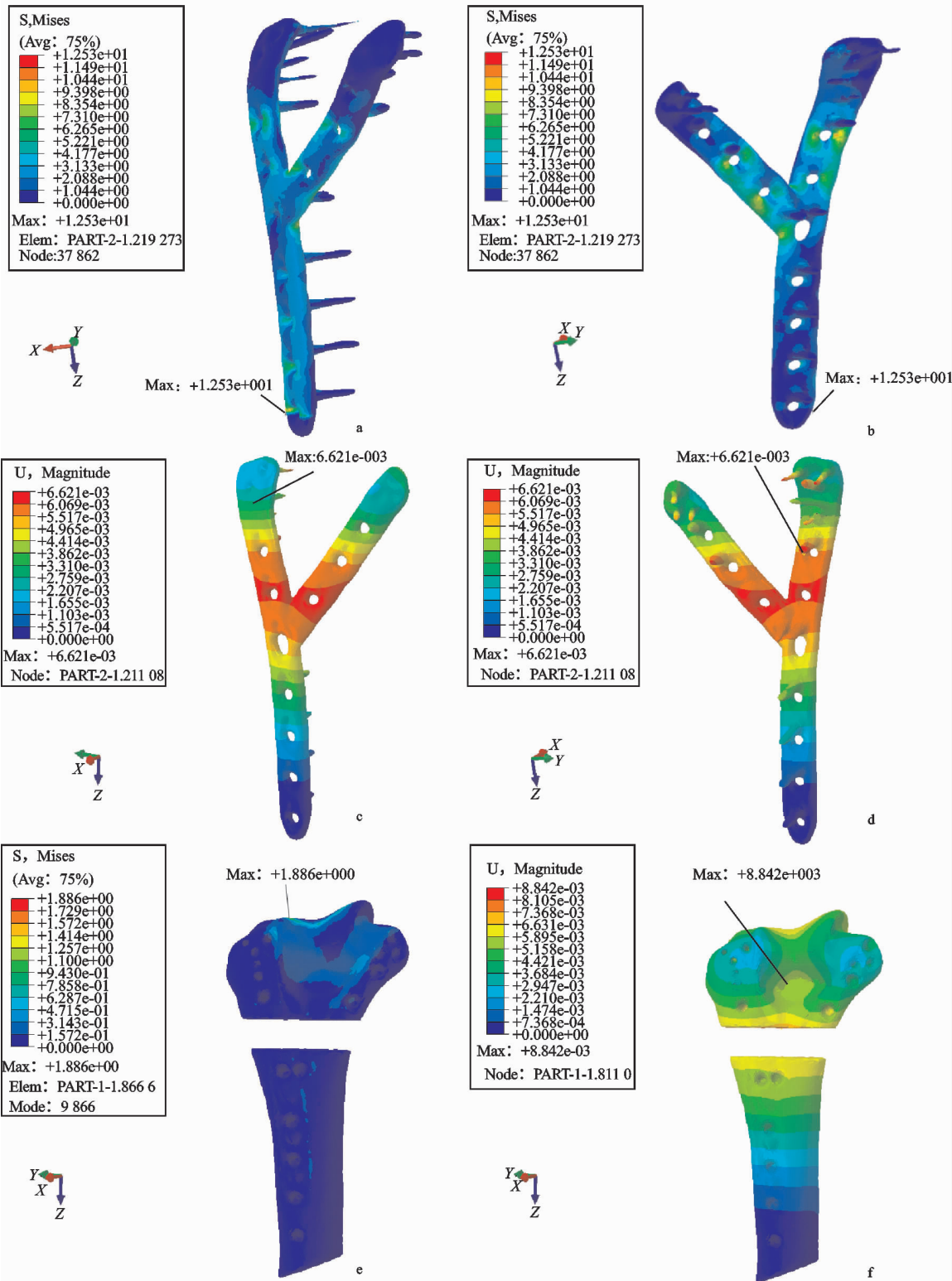
对骨折内固定模型的肱骨远端施加垂直向下载荷(50 N)条件下,新型肱骨远端解剖锁定钢板最大应力为12.53 MPa,最大位移为6.62 μm,肱骨远端最大应力为1.89 MPa,最大位移为8.84 μm(见图2)。

有限元分析结果表明,新型肱骨远端解剖锁定钢板及骨折模型的应力及位移均较小,稳定性良好,可满足临床应用要求,达到固定条件。

### 3 讨论

#### 3.1 肱骨远端骨折切开复位内固定技术的现状

目前临床应用于肱骨远端骨折的钢板大致分为解剖钢板和重建钢板两类。解剖钢板指根据肱骨远端骨骼特殊形态及结构而设计,比较主流的有肱骨远端背外侧锁定钢板和肱骨远端内侧锁定钢板。重建钢板塑形容易,能根据术中导板及时调整,可实现钢板对内外侧柱的精准贴服,从而实现对内外侧柱的解剖重建。根据钢板的固定方式可分为单钢板和双钢板固定,双钢板固定可采用解剖钢板或重建钢板,根据钢板放置位置可分为平行固定和垂直固定。但无论双钢板采用何种放置位置,其固定的生物力学稳定性均优于单钢板及克氏针、螺钉固定。Virani等<sup>[4]</sup>采用双钢板固定治疗肱骨远端骨折,研究结果表明切开复位内固定技术治疗肱骨远端C型骨折,可以取得极好的临床疗



(a)(b) 新型钢板应力分布图的正视图和反视图; (c)(d) 新型钢板位移云图的正视图和反视图; (e)(f) 肱骨远端骨骼的应力分布图和位移云图

图 2 新型肱骨远端解剖锁定钢板固定模型

效。Shih 等<sup>[5]</sup>通过 Meta 分析,比较双钢板平行固定与垂直固定在治疗肱骨远端骨折的生物力学特性,结果表明平行固定可提供更好的轴向和旋转稳定性。Bhayana 等<sup>[6]</sup>对采用双钢板平行固定治疗肱骨远端 C 型骨折的并发症进行对照研究,结果平均手术时间为 2 h 15 min,并发症发生率为 31.9%,认为平行钢板固

定需采用尺骨鹰嘴截骨入路,但术后并发症发生极为常见,术前需向患者告知,降低其对预后疗效的期望值。Athanaselis 等<sup>[7]</sup>同样对肱骨远端 C 型骨折采取了尺骨鹰嘴截骨植入双钢板平行固定,认为影响术后疗效的先决条件为恢复肱骨远端关节面的平整。Kumbaraci 等<sup>[8]</sup>对肱骨远端 C 型骨折治疗术后疗效良

好,但术后无法再从事重体力劳动。对于肱骨远端骨折,应根据骨折类型的具体情况,采用个体化的切开复位内固定方案,可采用螺钉、钢板的多样化组合完成手术,以尽量恢复由肱骨远端关节面和肱骨内外侧柱形成的三角结构,实现肱骨远端的解剖复位、坚固内固定,术后尽早功能锻炼,积极预防并发症为治疗原则。

3.2 该新型肱骨远端解剖锁定钢板的设计与试验

近年来研究表明,影响肱骨远端骨折术后疗效及并发症发生的原因主要包括两个方面:1)手术入路的选择;2)内固定方式的选择。前者通过不同手术入路实现骨折复位和内固定物的植入,但不同手术入路破坏的组织结构不同,造成创伤大小、术后并发症也各异<sup>[9-10]</sup>。

后者需要利用钢板、螺钉、克氏针的组合来重建肱骨远端关节面和肱骨内外侧柱构成的稳定三角形结构。肱骨远端骨折通常为粉碎性骨折,需要双钢板联合克氏针、无头螺钉、空心螺钉固定,固定过程相当复杂<sup>[11-12]</sup>。基于以上原因,要提高肱骨远端骨折治疗的效果,必须改良手术入路和改进内植物。笔者提出以“更小手术创伤的手术入路和更简单的钢板放置技术”的研究思路,自主设计一款新型肱骨远端解剖锁定钢板(见图 3),该钢板已经进行解剖入路及生物力学预实验部分的研究(见图 4)。有限元分析结果表明,新型解剖锁定钢板在治疗肱骨远端骨折中稳定性良好,可满足临床需要,达到固定条件,但仍需要进一步的生物力学试验及临床研究证据支持。

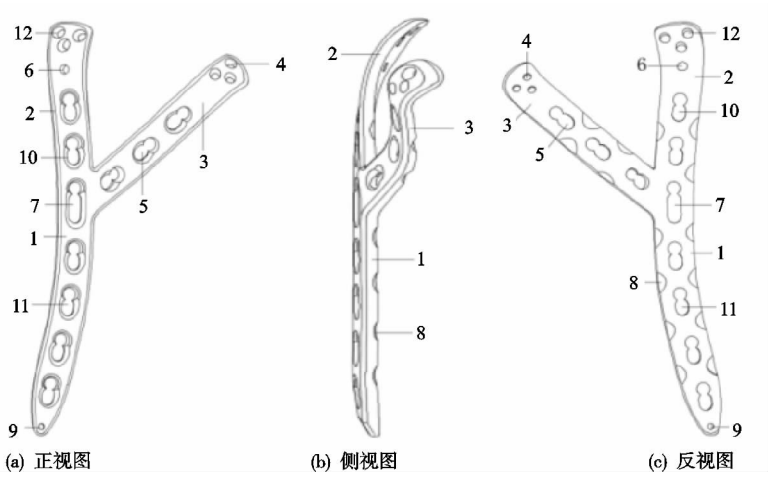
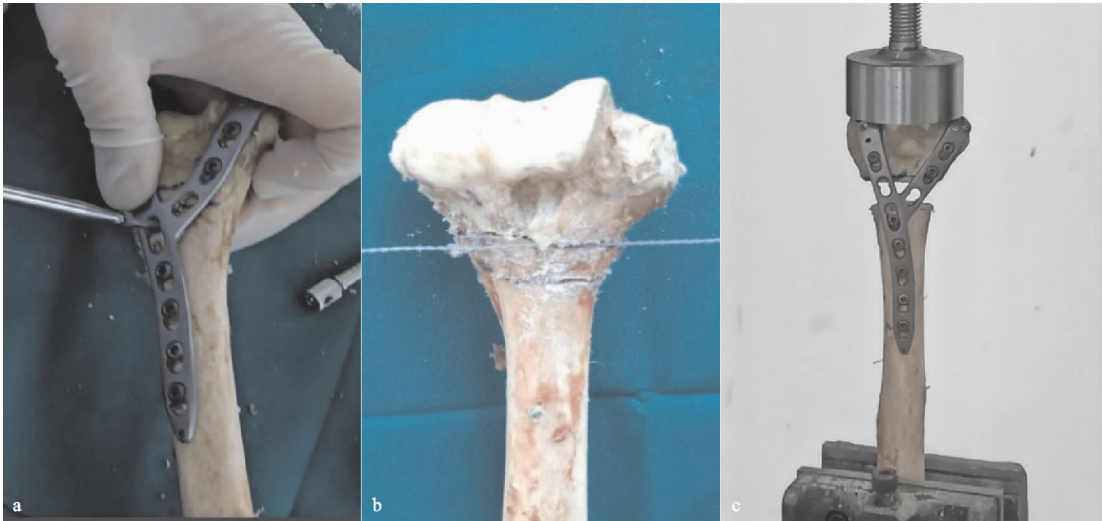


图 3 新型肱骨远端解剖锁定钢板的设计图



(a) 将新型钢板安装于成人新鲜冰冻尸体肱骨标本; (b) 用线锯截取长10 mm骨缺损区域, 建立不稳定骨折模型; (c) 肱骨远端骨折钢板内固定标本固定在BOSE 3510-AT试验机进行生物力学测试

图 4 新型肱骨远端解剖锁定钢板解剖入路及生物力学预实验

3.3 新型肱骨远端解剖锁定钢板与传统 Y 型肱骨远端钢板的异同

两者均由肱骨钢板、外髁钢板和内髁钢板三部分组成,其外形均为类 Y 型,主要适用于 AO/ASIF 分型

的 B1 型、B2 型、C1 型和部分 C2 型内外侧髁及髁上骨块较大的肱骨远端骨折的手术治疗。位于肱骨内外髁的钢板固定在生物力学特性最佳的内外侧柱上,同时可以避免前臂屈伸肌群牵拉,引起骨折移位及内外翻



畸形。但对于复杂 C3 型骨折,必须联合贯通内外髁的空心螺钉使用。两者的不同主要表现在两个方面:第一,钢板外形的解剖设计,传统 Y 型钢板为平面钢板,在使用前需精准塑形,其困难较大、耗时较长。此外,放置肱骨钢板分支需位于肱骨中线,其位置高低不易把握,太高内外髁分支钢板固定不牢固,太低阻挡鹰嘴窝,导致肘关节术后屈伸障碍。而新型钢板利用计算机辅助设计技术,以肱骨远端背外侧解剖锁定钢板为参考,设计新型肱骨远端解剖锁定钢板外侧部分,其内侧钢板形态根据肱骨内髁轮廓设计。换言之,新型钢板为解剖钢板,完全符合肱骨远端解剖形态,新型解剖锁定钢板与肱骨外侧柱精准贴附后,其内侧髁钢板必然会沿内侧髁最宽处放置,钢板锁定孔的应用可使螺钉植入的位置与方向唯一,使得术中钢板放置、螺钉植入相对容易,易实现最大的固定强度。第二,手术入路更加微创。传统 Y 型钢板因钢板必须沿肱骨中线放置,所以必须采用尺骨鹰嘴截骨入路、肱三头肌腱膜舌形瓣入路、肱三头肌劈开入路、肱三头肌翻转入路之一,但均破坏了伸肘装置的完整性,导致术后易发生关节粘连、骨化性肌炎,肌肉萎缩、截骨平面骨折不愈合等并发症<sup>[13-14]</sup>。而新型钢板植入仅采用肱骨远端外侧入路联合内侧小切口,避免了传统 Y 型钢板手术入路对肱三头肌腱及尺骨鹰嘴的破坏,保留了伸肘装置的完整性,同时也避免了相关并发症的发生。

## 参考文献

- [1] ATIF M, HASAN O, MOHIB Y, et al. Does surgical approach affect outcome after fixation of intra-articular fractures of distal humerus? Retrospective cohort study from a level-1 trauma centre in a metropolitan city[J]. *Ann Med Surg (Lond)*, 2019, 43: 48-51.
- [2] JANSEN H, EDEN L, MEFFERT R H, et al. Posttraumatic elbow agility and reduction of muscle force after intra-articular distal fractures of the humerus in adults[J]. *Technol Health Care*, 2019, 27(4): 431-439.
- [3] HAN S H, PARK J S, BAEK J H, et al. Complications associated with open reduction and internal fixation for adult distal humerus fractures: a multicenter retrospective study[J]. *J Orthop Surg Res*, 2022, 17(1): 399.
- [4] VIRANI S R, SONONE S, DAHAPUTE A A, et al. Functional results of comminuted intra-articular distal humerus fractures treated with bicolumnar plating[J]. *J Clin Diagn Res*, 2017, 11(4): RC01-RC03.
- [5] SHIH C A, SU W R, LIN W C, et al. Parallel versus orthogonal plate osteosynthesis of adult distal humerus fractures: a meta-analysis of biomechanical studies[J]. *Int Orthop*, 2019, 43(2): 449-460.
- [6] BHAYANA H, PANDEY R, DHAMMI I K, et al. Comparative study for assessment of functional outcome of intraarticular ao type C distal humerus fractures treated by parallel plating[J]. *Indian J Orthop*, 2019, 53(1): 190-195.
- [7] ATHANASELIS E D, KOMNOS G, DELIGEORGIS D, et al. Double plating in type C distal humerus fractures: current treatment options and factors that affect the outcome[J]. *Strategies Trauma Limb Reconstr*, 2022, 17(1): 7-13.
- [8] KUMBARACI M, BASA C D, TURGUT A. Analysis of factors affecting return to work after surgical treatment in patients with ao type C distal humerus fractures[J]. *Indian J Orthop*, 2020, 55(3): 680-687.
- [9] PATEL S S, MIR H R, HOROWITZ E, et al. ORIF of distal humerus fractures with modern pre-contoured implants is still associated with a high rate of complications[J]. *Indian J Orthop*. 2020; 54(5): 570-579.
- [10] CHANG N, KING G J W. Elbow hemiarthroplasty for the treatment of distal humerus fractures[J]. *Orthop Clin North Am*, 2020, 51(2): 265-277.
- [11] JAMOH K, TONK G. How to choose between the transolecranon and triceps-reflecting approaches to treat distal humerus fractures in adults: a prospective study[J]. *Rev Bras Ortop*, 2022, 57(2): 301-307.
- [12] KU K H, BAEK J H, KIM M S. Risk factors for non-union after open reduction and internal fixation in patients with distal humerus fractures[J]. *J Clin Med*, 2022, 11(10): 2679.
- [13] HAGLIN J M, KUGELMAN D N, LOTT A, et al. Intra-articular distal humerus fractures: parallel versus orthogonal plating[J]. *HSS J*, 2022, 18(2): 256-263.
- [14] KHARBANDA Y, TANWAR Y S, SRIVASTAVA V, et al. Retrospective analysis of extra-articular distal humerus shaft fractures treated with the use of pre-contoured lateral column metaphyseal LCP by triceps-sparing posterolateral approach[J]. *Strategies Trauma Limb Reconstr*, 2017, 12(1): 1-9.

(收稿日期: 2023-01-12)