

# 谢式夹板和解剖夹板外固定治疗伸直型桡骨远端骨折的生物力学特性比较

谢澄铖<sup>1△</sup> 薛俊伟<sup>1</sup> 黄晨阳<sup>1</sup> 王俊<sup>1</sup> 胡威<sup>1</sup> 陈尚冀<sup>1</sup>

**[摘要]** 目的:探究谢式夹板外固定对 Colles 骨折(伸直型桡骨远端骨折)手臂的皮肤、骨骼及夹板等结构的生物力学特性影响。方法:对谢式夹板和解剖夹板外固定的手臂桡骨 Colles 骨折患者,采集两种夹板形式下的 CT 数据并进行影像重建,基于有限元方法建模仿真手臂皮肤及骨骼、夹板等结构的应力云图,并进行生物力学特性分析。结果:采用谢式夹板对手臂外固定后,在手臂皮肤表面不同区域出现明显的应力集中现象,同时由于受绷带压力、棉压垫、竹板、包裹纸板及侧向纸板的共同约束作用,导致谢式夹板本身结构应力分布也相对较显著。相比较而言,在桡骨骨折处手臂内侧、背侧对应的皮肤上谢式夹板的整体应力分布明显高于解剖夹板。结论:谢式夹板对手臂桡骨 Colles 骨折外固定后在桡骨骨折附近抵抗骨折错位移动有着较好的治疗作用。

**[关键词]** 谢式夹板;解剖夹板;伸直型桡骨远端骨折;生物力学

**[中图分类号]** R683.41 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1005-0205(2024)01-0042-06

**DOI:** 10.20085/j.cnki.issn1005-0205.240108

## Biomechanical Study of External Fixation of Xie's Splint and Anatomical Splint in the Treatment of Colles Fracture

XIE Chengcheng<sup>1△</sup> XUE Junwei<sup>1</sup> HUANG Chenyang<sup>1</sup>

WANG Jun<sup>1</sup> HU Wei<sup>1</sup> CHEN Shangji<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Orthopaedics, Jiangyin Traditional Chinese Medicine Bone Injury Hospital, Jiangyin 214422, Jiangsu China.

**Abstract Objective:** To study the biomechanical properties of Xie's splint external fixation on the skin, bone, splint and other structures of Colles' fractured arm. **Methods:** Xie's splint and anatomical splint were used for the external fixation of Colles fracture of arm radius. CT data of the two groups in the form of splint were collected and image reconstruction was carried out. The stress nebulogram of arm skin, bone, splint and other structures were simulated based on finite element method, and biomechanical analysis and research were carried out. **Results:** When the arm was externally fixed with the Xie's splint, significant stress concentration appeared in different areas of the arm skin surface. The structural stress distribution of the splint itself was also relatively significant. In comparison, the overall stress distribution of Xie's splint on the skin on the medial and dorsal sides of the arm at the radial fracture was significantly greater than that of the anatomical splint. **Conclusion:** Xie's splint has a good therapeutic effect on resisting fracture dislocation movement near radial fractures after external fixation of Colles fractures of the arm.

**Keywords:** Xie's splint; anatomical splint; extension distal radius fracture; biomechanics

Colles 骨折又称之为伸直型桡骨远端骨折,属于临床上常见的一类骨折,对于稳定的关节外骨折及部分关节内骨折,在获得良好复位后采用外固定方法效果更佳<sup>[1-2]</sup>。谢式夹板为江苏省非物质文化遗产谢式

正骨的主要外固定材料,在 Colles 骨折等骨伤外固定中具有重要作用。谢式夹板为自行设计制作的夹板,采用竹板、硬纸板、棉压垫外固定,具有使用方便及制作简单等优点<sup>[3]</sup>。作为新式夹板与广泛使用的解剖夹板相比,具有可调性高及舒适性强等优点,更好地契合人体解剖结构,其疗效及安全性尚无相关报道<sup>[4-5]</sup>。本研究采用有限元方法比较谢式夹板和解剖夹板两种外固定方法下的生物力学模型差异,比较谢式夹板与解

剖夹板疗效,现报告如下。

1 研究对象和方法

1.1 研究对象

选取江苏省江阴市中医骨伤医院诊治的 1 例桡骨骨折患者为研究对象,排除手臂畸形、肿瘤、感染等疾病,无手臂及腕关节手术病史,知情并同意本研究。提取手臂 CT 医学影像扫描数据 DICOM 文件。

1.2 方法

1.2.1 手臂模型建立 将 2D 的 CT 数据转换为 3D 数据,基于逆向后的手臂骨骼 STP 模型,将谢式夹板组、解剖夹板组对应的 STP 完整几何实体模型装配完成。在距离桡腕关节面 2 cm 位置设置桡骨骨折。三维 CT 影像数据三维重建模型、谢式夹板及解剖夹板组对应的模型逆向几何实体模型见图 1-图 3。对逆向处理好的手臂模型,基于手臂 3Dbody 解剖关系(见图 4)补充手臂内重点考虑的韧带及肌腱。手臂内各

韧带均采用 Spring 弹簧单元等效模拟,并将逆向的谢式夹板、解剖夹板几何模型导入有限元前处理软件 MSC.Patran2019 中(见图 5)。将谢式夹板组、解剖夹板组对应的几何模型进行网格划分(见图 6),各组有限元网格模型以谢式夹板组为例(见图 7)。本研究着重从定性角度分析对比谢式夹板和解剖夹板对手臂结构(皮肤、骨骼)的应力分布规律,由于受皮肤、肌肉相关材料力学实验条件限制,因此参考公开发表的实验测量皮肤弹性模量和泊松比数据<sup>[6]</sup>。本研究将皮肤层、肌肉层、脂肪层看作一个整体,并设置为各向同性、均匀、连续的线弹性材料,其他结构材料参数参考已发表文献(见表 1 及表 2)<sup>[7-8]</sup>。对谢式夹板组和解剖夹板组手臂模型进行荷载施加、边界约束设置(见图 8)。参照郭欣等<sup>[9]</sup>绷带力荷载数据,对谢式夹板及手腕内外侧局部纸板、解剖夹板每块夹板上,均匀施加 28 N 载荷模拟绷带约束力,方向垂直于夹板表面向内。

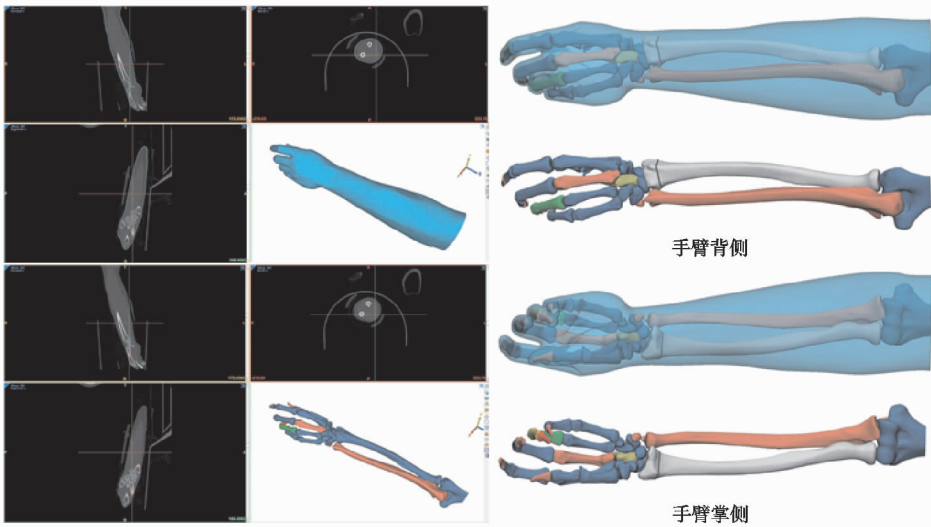


图 1 CT 影像数据三维重建手臂及皮肤肌肉软组织

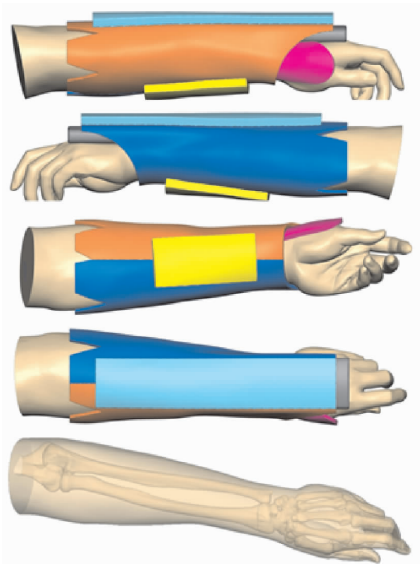


图 2 谢式夹板组结构逆向图

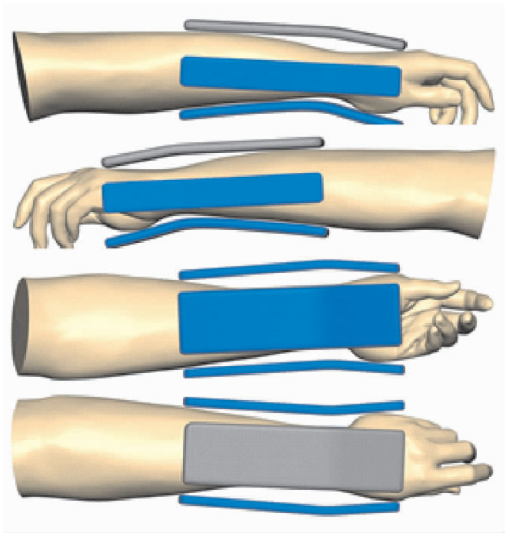


图 3 解剖夹板组结构逆向图

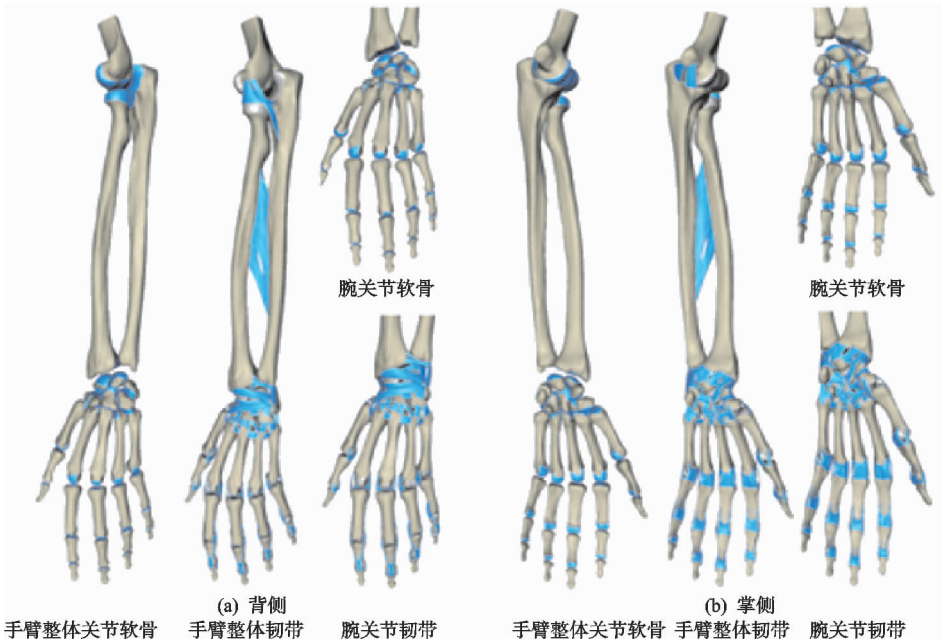


图 4 手臂 3Dbody 医学结构解剖示意图

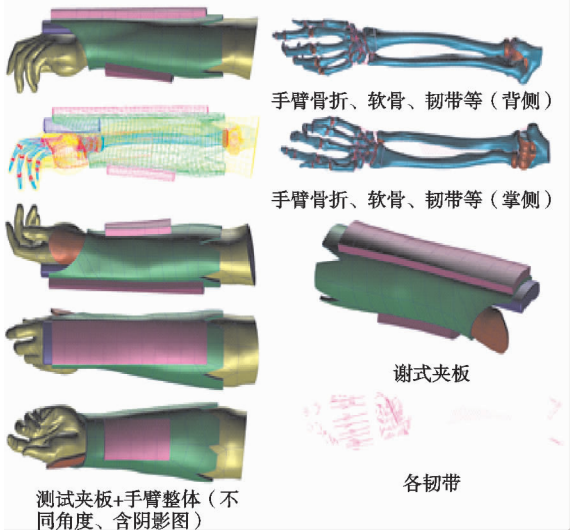


图 5 谢式夹板组有限元几何模型图

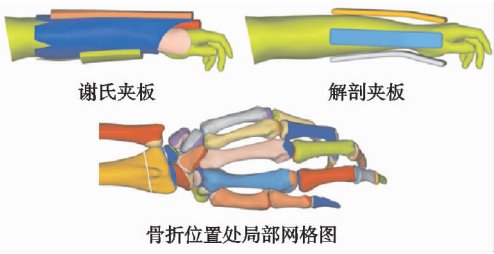


图 6 两组模型在 Hypermesh 软件中划分网格

表 1 有限元模型网格划分(个)

组别	节点数	单元数
谢式夹板组	155 031	844 845
解剖夹板组	144 302	777 567

**1.2.2 观察指标及方法** 图 9-图 11 通过有限元方法对谢式夹板组和解剖夹板组进行生物力学仿真模拟分析,得出各组对应的皮肤表面、腕关节骨骼及夹板 von Mises 应力云图。

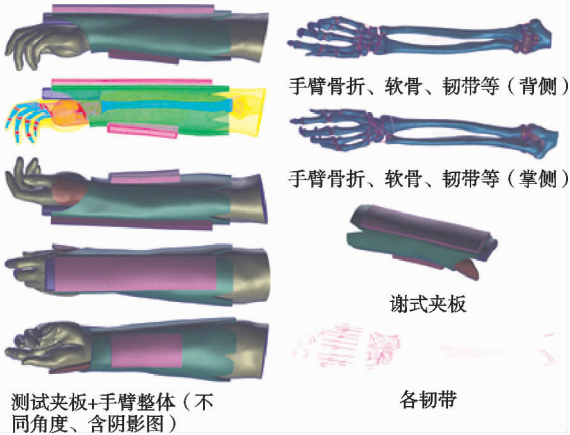


图 7 谢式夹板组有限元网格模型图

表 2 骨骼、软组织材料参数表

材料	弹性模量/MPa	泊松比
骨骼	10 000	0.30
关节软骨	1	0.49
皮肤/肌肉软组织	0.1	0.48
竹板	11 400	0.30
棉压垫	8	0.30
纸板	750	0.20
解剖夹板	13 600	0.26

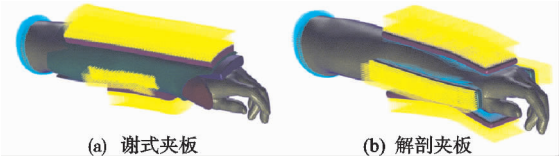


图 8 两组夹板模型边界条件

2 结果

2.1 模型有效性验证

参考已发表理论验证方法<sup>[9]</sup>,对正常腕关节模型沿第二、第三掌骨轴向施加 100 N,并在桡骨、尺骨截断处设置固定约束,桡骨骨折处由于建模时有骨折缝,故采



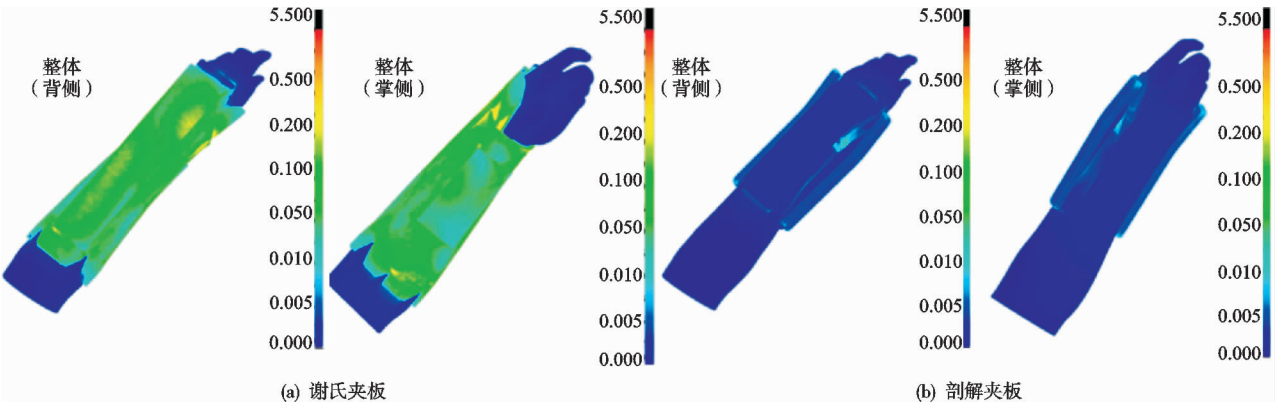


图 9 两夹板组整体结构 von Mises 应力云图(MPa)

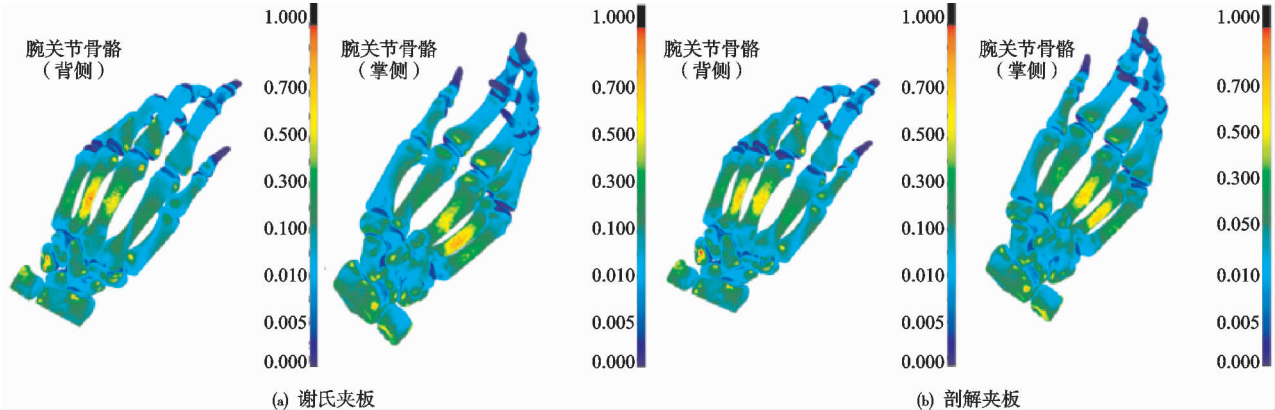


图 10 两夹板组腕关节骨骼 von Mises 应力云图(MPa)

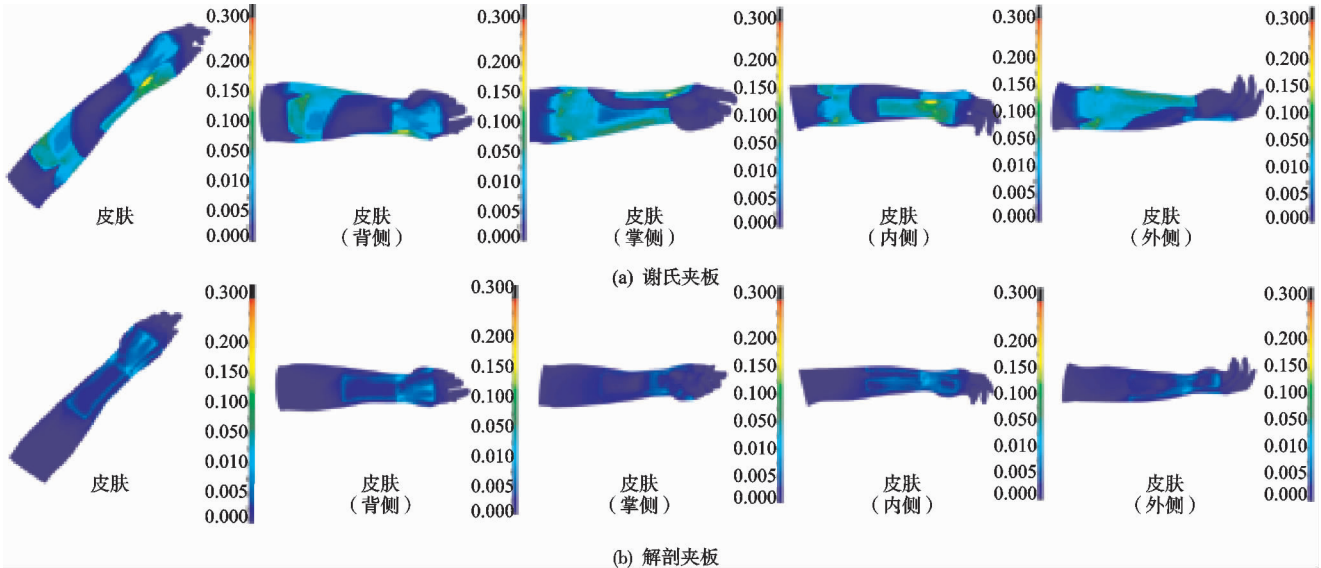


图 11 两夹板组皮肤表面 von Mises 应力云图(MPa)

取多点约束(MPC)功能使得骨折缝两侧结构受力一致,边界约束及荷载施加见图 12。通过有限元方法模拟手腕关节结构组织的生物力学特性及桡腕关节应力分布见图 13。经有限元分析得出桡腕关节最大接触应力约为 4.26 MPa,与文献[10-13]的桡腕关节最大接触应力(理论值 5.60 MPa、力学实验值4.37 MPa)对比,其接触应力均分布在偏向于掌侧的位置;桡舟、桡月关节面传递载荷量约占整个腕关节载荷传递总量的 60.2%和 39.8%,本计算结果与以往发表的研究结

果较为接近,可证明本模型是正确、有效的。

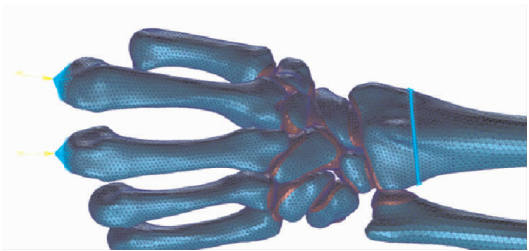


图 12 腕关节模型验证边界条件

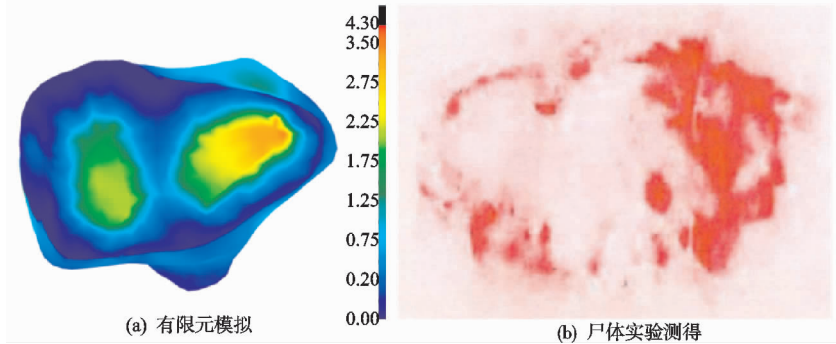


图 13 桡腕关节应力分布云图 (MPa)

2.2 数据汇总

通过有限元方法对谢式夹板、解剖夹板进行生物力学仿真模拟分析,得出各组对应的皮肤表面、腕关节骨骼、夹板等结构 von Mises 应力数据,汇总于表 3 中,手臂各结构 von Mises 等效应力对比见图 14 及图 15。

表 3 手臂各结构 von Mises 等效应力峰值 (MPa)

结构	解剖夹板组	谢式夹板组
桡骨骨折处手臂内侧皮肤	0.023	0.135
桡骨骨折处手臂背侧皮肤	0.025	0.212
手腕关节骨骼	0.887	0.955
夹板	0.021	0.427

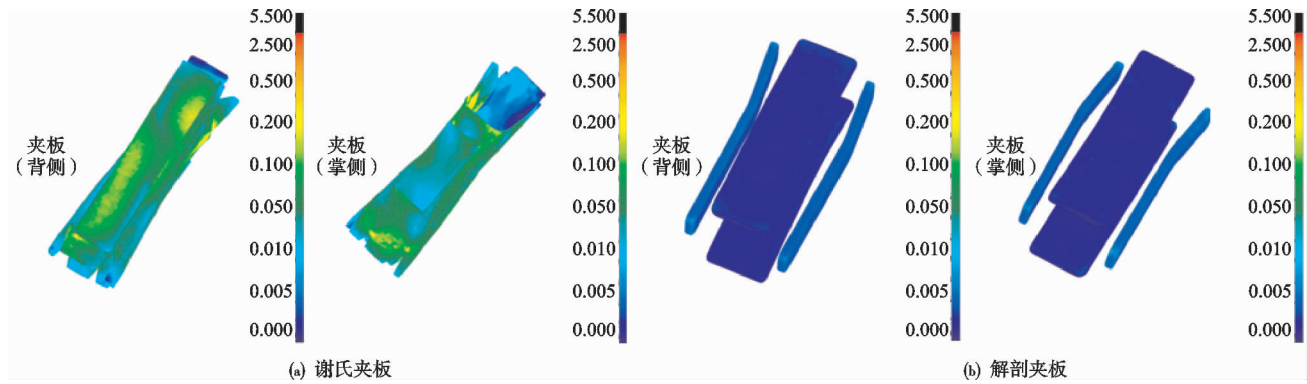


图 14 两夹板组谢式夹板 von Mises 应力云图 (MPa)

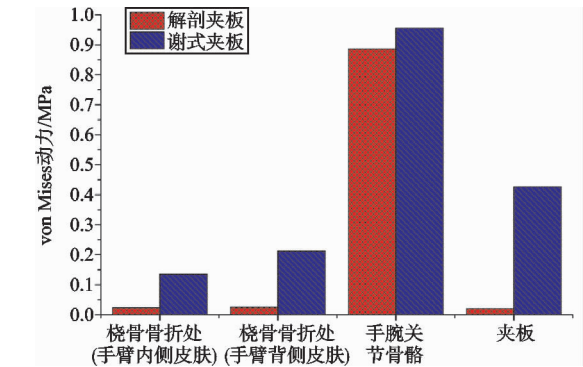


图 15 手臂各结构 von Mises 等效应力对比

2.3 对比分析

由图 15 及表 3 可知:采用有限元方法进行生物力学仿真模拟分析谢式夹板、解剖夹板外固定手臂桡骨 Colles 骨折,采用谢式夹板对手臂外固定后,在手臂皮肤表面不同区域出现明显应力集中现象,应力集中较为显著的区域主要在桡骨骨折处手臂内侧及背侧,其中在桡骨骨折处手臂内侧皮肤的 von Mises 应力峰值约为 0.135 MPa,在桡骨骨折处手臂背侧皮肤的 von Mises 应力峰值约为 0.212 MPa,且在两侧包裹纸板包裹的皮肤表面在绷带压力作用下也会局部产生一些

区域应力集中,且整体应力值也相对较明显,但明显低于桡骨骨折处手臂内侧及背侧的应力峰值,主要是由于近手腕端的桡骨骨折在实际过程中发生一定程度的向拇指侧及向背侧的错位移动,同时受侧向纸板及包裹纸板的约束导致的,桡骨骨折体与皮肤挤压使得桡骨骨折端附近产生较为明显的应力集中。

3 讨论

解剖夹板为 Colles 骨折常见的外固定材料,但因为舒适性差及契合度差等缺点而限制其疗效<sup>[14-16]</sup>。采用 CT 影像重建技术对手臂骨骼、皮肤组织结构进行三维重建,并通过逆向处理技术补充了谢式夹板、解剖夹板、各韧带等结构,完成了谢式夹板+手臂模型和解剖夹板+手臂模型。通过三维有限元仿真模拟绷带力、骨折错位荷载作用下夹板对皮肤、骨骼的受力得出结论:谢式夹板对手臂桡骨 Colles 骨折外固定后在桡骨骨折附近抵抗骨头错位移动有着较好的治疗作用,抗骨折移动效果要明显比解剖夹板优越。谢式夹板设置了棉压垫,在棉压垫下方的手腕背侧皮肤表面应力也比周围皮肤要高一些,棉压垫下方的皮肤应力平均值约为 0.015 MPa,谢式夹板组由于受绷带压力、棉压

垫、竹板、包裹纸板及侧向纸板的共同约束作用,导致谢式夹板本身结构应力分布也相对较显著,其夹板 von Mises 应力峰值约为 0.427 MPa;手腕关节骨骼在第三掌指、第四掌指上也出现了一定程度的应力集中现象,应力峰值约为 0.955 MPa。采用解剖夹板对手臂外固定后,在手臂皮肤表面不同区域也出现一定的应力集中现象,应力集中较为显著区域主要在桡骨骨折处手臂内侧及背侧,其中在桡骨骨折处手臂内侧皮肤的 von Mises 应力峰值约为 0.023 MPa,在桡骨骨折处手臂背侧皮肤的 von Mises 应力峰值约为 0.025 MPa,解剖夹板结构本身 von Mises 应力峰值约为 0.021 MPa,手腕关节骨骼在第三掌指、第四掌指上也出现了一定程度的应力集中现象,应力峰值约为 0.887 MPa。

从两种不同夹板对手臂外固定的应力分布、应力峰值观察,解剖夹板对手臂表面皮肤的应力作用相当均匀,且整体应力分布也明显比谢式夹板小,尤其是在桡骨骨折处手臂内侧和背侧对应的皮肤上,由此可见谢式夹板对手臂桡骨 Colles 骨折外固定后在桡骨骨折附近抵抗骨头错位移动有着较好的治疗作用,抗骨头移动效果要明显比解剖夹板优越。笔者采用有限元方法对手臂谢式夹板、解剖夹板等结构进行了定量和定性的生物力学研究,并进行了详细对比分析。通过应用生物力学原理和结构工程思想,笔者对手臂皮肤、骨骼和夹板等结构的生物力学特性进行了三维仿真模拟,得出了一些有意义的生物力学结论。有限元方法的应用减少了临床对大量尸体或动物实验或临床测试的依赖,并从理论角度分析手臂骨折外固定的力学行为变化,可为推动其临床应用提供帮助。

## 参考文献

- [1] WANG L L, WU W L, XIE X L, et al. Removing *Escherichia coli* from water using zinc oxide-coated zeolite[J]. *Water Res*, 2018, 141: 145-151.
- [2] 段超, 周细江, 车国良, 等. 手法复位小夹板固定联合中药三期辨证外治法治疗 C3 型 Colles 骨折的临床研究[J]. *中国中医急症*, 2021, 30(9): 1562-1566.
- [3] 谢澄铖, 谢春祥, 谢永明, 等. 谢氏流派竹片压垫固定 Colles 骨折 100 例[J]. *按摩与康复医学*, 2015, 6(1): 78-79.
- [4] LIANG X, BOPPART S A. Biomechanical properties of in vivo human skin from dynamic optical coherence elastography[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2010, 57(4): 953-959.
- [5] 华臻, 陆振飞, 潘娅岚, 等. 解剖型纸质支架夹板治疗 Colles 骨折的有限元分析[J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2017, 25(7): 16-20.
- [6] LI C, GUAN G, REIF R, et al. Determining elastic properties of skin by measuring surface waves from an impulse mechanical stimulus using phase-sensitive optical coherence tomography[J]. *J Royal Soc Interface*, 2012, 9(70): 831-841.
- [7] PISTOIA W, VAN RIETBERGEN B, LOCHMÜLLER E M, et al. Estimation of distal radius failure load with micro-finite element analysis models based on three-dimensional peripheral quantitative computed tomography images[J]. *Bone*, 2002, 30(6): 842-848.
- [8] 华臻, 王建伟, 张亚峰, 等. 中医社区综合干预退行性腰椎不稳症的近期疗效观察[J]. *南京中医药大学学报*, 2014, 30(5): 434-437.
- [9] 郭欣, 樊瑜波, 李宗明. 掌骨受轴向压力作用下的腕部生物力学分析[J]. *航天医学与医学工程*, 2008, 21(1): 45-49.
- [10] TENCER A F, VIEGAS S F, CANTRELL J, et al. Pressure distribution in the wrist joint[J]. *J Orthop Res*, 1988, 6(4): 509-517.
- [11] SCHUIND F, COONEY W P, LINSCHIED R L, et al. Force and pressure transmission through the normal wrist: a theoretical two-dimensional study in the posteroanterior plane[J]. *J Biomech*, 1995, 28(5): 587-601.
- [12] DACHO A K, BAUMEISTER S, GERMAN G, et al. Comparison of proximal row carpectomy and midcarpal arthrodesis for the treatment of scaphoid nonunion advanced collapse (SNAC-wrist) and scapholunate advanced collapse (SLAC-wrist) in stage II [J]. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*, 2008, 61(10): 1210-1218.
- [13] 钦斌, 黄永火, 欧阳羽, 等. 轴向应力作用下的舟骨有限元分析[J]. *第三军医大学学报*, 2010, 32(11): 1213-1215.
- [14] 李海波, 马宝通. 老年桡骨远端骨折保守治疗的研究进展[J]. *中国中西医结合外科杂志*, 2023, 29(3): 406-410.
- [15] 毛昭冲, 李福伟, 杨风云, 等. 有限元分析在桡骨远端骨折研究中的应用进展[J]. *中医正骨*, 2023, 35(2): 30-32.
- [16] 李琰, 孙晋客, 张峻玮, 等. 闭合复位经皮穿针三角构型内固定治疗 C 型桡骨远端骨折 55 例[J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2022, 30(11): 49-53.

(收稿日期: 2023-04-06)