

解剖型纸质支架夹板治疗 Colles 骨折的有限元分析

华臻¹ 陆振飞¹ 潘娅岚² 马剑威³ 王建伟^{1△}

[摘要] **目的:**评判解剖型纸质支架夹板治疗 Colles 骨折的优越性及安全性,为解剖型纸质支架夹板的推广和改进提供生物力学依据。**方法:**基于一志愿者腕部的 CT 图像建立包括尺桡骨、腕骨、掌骨及腕关节主要韧带、关节面软骨在内的前臂及手部三维有限元模型,通过与文献对比验证模型的有效性。将上述有限元模型调整至腕关节掌屈尺偏位,分别与柳木夹板、塑形纸质支架夹板及解剖型夹板数字模型完成装配,观察三种夹板在 28 N 载荷固定下的肢体软组织表面应力云图与峰值、骨骼表面应力云图与峰值以及皮肤表面桡骨茎突、尺骨头、大鱼际部位同一节点的应力值。**结果:**成功建立并验证了前臂及手部的三维有限元模型。三种夹板在掌屈尺偏位固定前臂模型,应力均集中作用于腕部周围,柳木夹板固定的肢体软组织及骨骼多处出现应力集中,尺桡骨远端、大小鱼际及骨突等部位也有较大的应力集中;塑形纸质支架夹板固定的肢体软组织应力分布较均匀,骨突、鱼际部位的应力小于柳木夹板;解剖型纸质支架夹板固定下的肢体应力分布更为均匀,骨突鱼际等易卡压部位的应力最小。**结论:**解剖型纸质支架夹板更贴合肢体,能有效避免局部软组织压迫,具有一定的优越性。

[关键词] Colles 骨折;夹板;有限元分析;刘氏骨伤

[中图分类号] R-33 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1005-0205(2017)07-0016-05

Finite Element Analysis of Anatomical Paper Splints Treating for Colles Fracture

HUA Zhen¹ LU Zhenfei¹ PAN Yalan² MA Jianwei³ WANG Jianwei^{1△}

¹Wuxi Hospital, Affiliated to Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, Wuxi 214071, Jiangsu China;

²Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, Nanjing 210023, China;

³Shanghai University, Shanghai 200444, China.

Abstract Objective: To evaluate the superiority and safety of the anatomical paper splints treating with Colles fracture, and to provide theoretical biomechanical basis for the promotion and improvement of anatomical paper splints. **Methods:** Based on a volunteer's wrist CT images, a three-dimensional finite element model of forearm and hand, including the radius, ulna, carpal, metacarpal, main wrist joint ligaments and articular cartilage, was established. The effectiveness of the model was verified by comparing with the literature. The above finite element model was adjusted to the wrist palm flexion and ulnar deviation, which was fitted with the willow splints, the moulding paper splints and the anatomical splints digital model. Von Mises stress, peak of limb soft tissue surface and bones surface of the three splints were observed under load of 28 N, skin surface of styloid process of radius, ulnar head and thenar part of the same unit of stress values were also observed. **Results:** The three-dimensional finite element model of forearm and hand was successfully established and verified. When the three kinds of splints were fixed in the palm flexion and ulnar deviation, the stresses were concentrated around the wrist. Under the same fixed load, the willow splints would produce a larger stress and more stress concentration on both limbs soft tissue and bone tissue, in addition to the distal radius and ulna, thenar, hypothenar. While moulding paper splints' stress distribution was more homogeneous, and had less stress on bone protrusion and thenar part than the willow splints. The stress distribution of anatomical splints was more uniform, and produced

less stress on apophyseal thenar parts which were easily compressed, with a better body fitting. **Conclusion:** The anatomical paper splints is more suitable for the limbs, which can avoid local soft tissue compression, with a certain degree of superiority.

Keywords: Colles fracture; splints; finite element analysis; Liu's department of traumatology

基金项目:无锡市科技发展资金项目(CSE31N1514)

无锡市卫计委科研项目(Q201504)

¹ 南京中医药大学无锡附属医院(江苏 无锡, 214071)

² 南京中医药大学

³ 上海大学

△通信作者 E-mail: wangjianwei1963@126.com

Colles 骨折是临床常见骨折之一,其发生率约占急诊骨折的 17%^[1],对于简单、稳定的关节外骨折及部分关节内骨折,通常手法复位后使用夹板固定即可获得较为满意的疗效^[2]。前期笔者以传统塑形纸质支架夹板为蓝本,研制了更符合桡骨远端解剖特点的解剖型纸质支架夹板,以方便、规范 Colles 骨折的临床治疗^[3]。为评估该夹板的治疗效应及安全性,本研究借助有限元分析进一步探讨其固定 Colles 骨折的应力变化,并与传统柳木夹板及塑形纸质支架夹板比较,为解剖型纸质支架夹板的推广和改进提供生物力学依据。

1 材料与方法

1.1 前臂有限元模型的建立与验证

健康男性志愿者俯卧于扫描床,右肩关节外展位外旋上举 180°,右侧前臂及手掌中立位。利用 CT 机对志愿者右上肢进行扫描,范围自右侧肘关节以近至肢体末端,扫描参数:电压 120 kV,电流 75 mA,重建层厚 0.6 mm,时间 1 000 ms。将获得二维的断面图像导入 Mimics 15.0 软件中,对选定结构进行图像分割与重建,对于骨髓腔及松质骨进行规则化处理,手工擦除肱桡、肱尺、桡尺、桡腕等关节间的连接,保持腕骨间为融合状态。自动计算生成数字化前臂及手部骨骼三维重建模型,以相似方法获得除骨以外的软组织。

将模型导入 Imageware 5.0 软件中,对模型进行平滑、除噪点、铺面等修饰处理,分别得到优化后的骨组织、软组织模型。将优化的模型导入 PRO/E 软件中完成装配,在零件库中选择合适零件,参照文献[4-8]描述的解剖位置添加韧带、软骨、纤维软骨盘等结构,制作出前臂及手部的三维几何曲面实体模型。

将上述模型导入 ANSYS Workbench 软件,参照文献[7-9],将骨骼定义为各向同性均质弹性材料模型,将韧带设定为壳单元,赋予各部分材料属性见表 1。利用软件自动网格划分功能,选择高阶四面体网格模型实现对模型网格的划分。

表 1 人体各部分组织参数

材料	弹性模量(MPa)	泊松比
骨骼	1 000	0.30
软骨	10	0.45
韧带	300	0.48
骨间膜	950	0.45
软组织	10	0.45

参考文献[10-12]将骨与骨之间设置为 Contact,关节面间设置为 Contact,骨与软组织间设置为 Tie,忽略关节内摩擦系数。将模型中的桡骨和尺骨近端全自由度固定约束。参考文献[10,12]于第二掌骨头、第三掌骨头分别沿前臂施加 100 N 的轴向压力载荷,观察桡腕关节面应力分布。

1.2 夹板与前臂模型的装配

将前臂模型导入 PRO/E 软件中,以月骨为旋转中心将手部在冠状面内向尺侧旋转 15°,在矢状面内向掌侧旋转 30°,得到掌屈尺偏位的腕部三维模型,分

别与前期研究中获得的柳木夹板、塑形纸质支架夹板及解剖型纸质支架夹板模型在 PRO/E 软件中完成组装,要求夹板折角处对准腕横纹水平。

海绵与夹板设置为一体,之间不可移动;铅丝与夹板设为一体,之间不可移动。夹板与软组织间摩擦系数取 0.3,夹板、海绵垫等材料参数见表 2。

表 2 夹板等材料参数

材料	弹性模量(GPa)	泊松比
柳木夹板	12	0.15
纸质夹板	0.75	0.20
海绵垫	0.008	0.30
铅丝	12	0.40

1.3 工况模拟与计算

将模型导入 ANSYS Workbench 软件,利用软件自动网格划分功能,选择高阶四面体网格模型实现对模型网格的划分。定义模型中的桡骨和尺骨近端全自由度固定约束。参照文献[13]对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,夹板与皮肤接触后开始计算,夹板与皮肤达到力学稳定则计算终止。分别观察三种夹板在 28 N 载荷固定下的肢体软组织表面应力云图与峰值,皮肤表面桡骨茎突、尺骨头及大鱼际部位同一节点的应力值,骨骼表面应力云图与峰值。

2 结果

2.1 前臂模型验证

前臂模型单元数量为 75 392,节点数量为 95 379。文献[10]中计算得到桡腕关节面接触应力最大值为 10 MPa,本研究计算的结果为 9.447 MPa,结果相似(见图 1);桡腕关节面 von Mises 应力云图与文献[12]结果相似(见图 2),证明本模型真实有效。

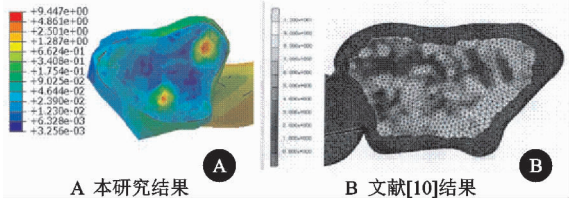


图 1 桡腕关节面应力

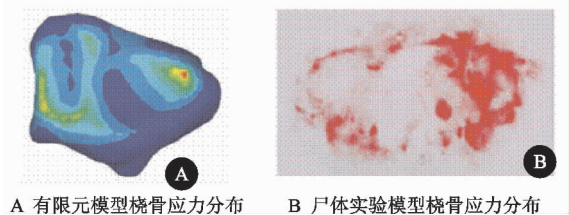


图 2 有限元模型与文献[12]模型验证结果

2.2 三种夹板固定 Colles 骨折的结果

柳木夹板总装配模型单元数量为 135 081,节点数量为 150 903;纸质支架夹板总装配模型单元数量为

115 493,节点数量为 138 992;解剖型纸质支架夹板总装配模型单元数量为 125 932,节点数量为 135 937. 有

限元网格模型见图 3.

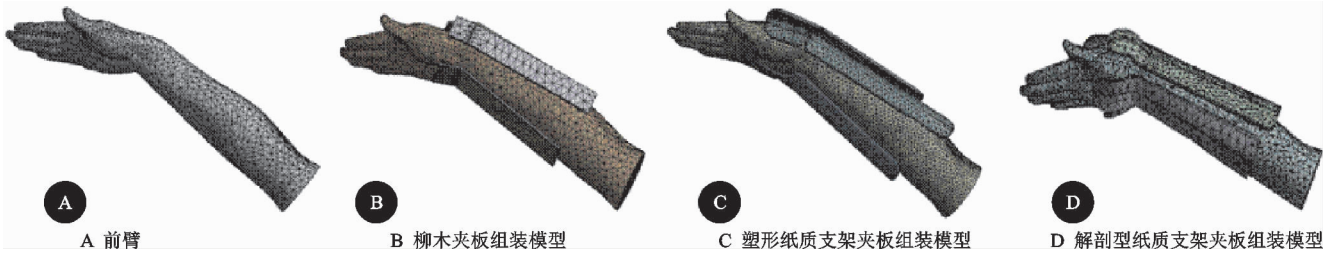


图 3 有限元网格模型

2.2.1 软组织应力分布 柳木夹板固定下的肢体软组织应力分布散乱,腕关节周围存在多处散在应力集中,如大小鱼际、第一掌骨基底部、桡骨茎突、尺骨头等部位,应力最大值为 0.56 MPa. 塑形纸质支架夹板固定下的肢体应力分布尚规整,应力集中于腕关节背侧、

小鱼际、桡骨茎突等部位,应力最大值为0.43 MPa. 解剖型纸质支架夹板固定下的肢体应力分布较规整,大片应力集中于腕关节周围,桡骨茎突、尺骨头及大小鱼际无明显应力集中,应力最大值为0.33 MPa. 软组织应力分布见图 4.

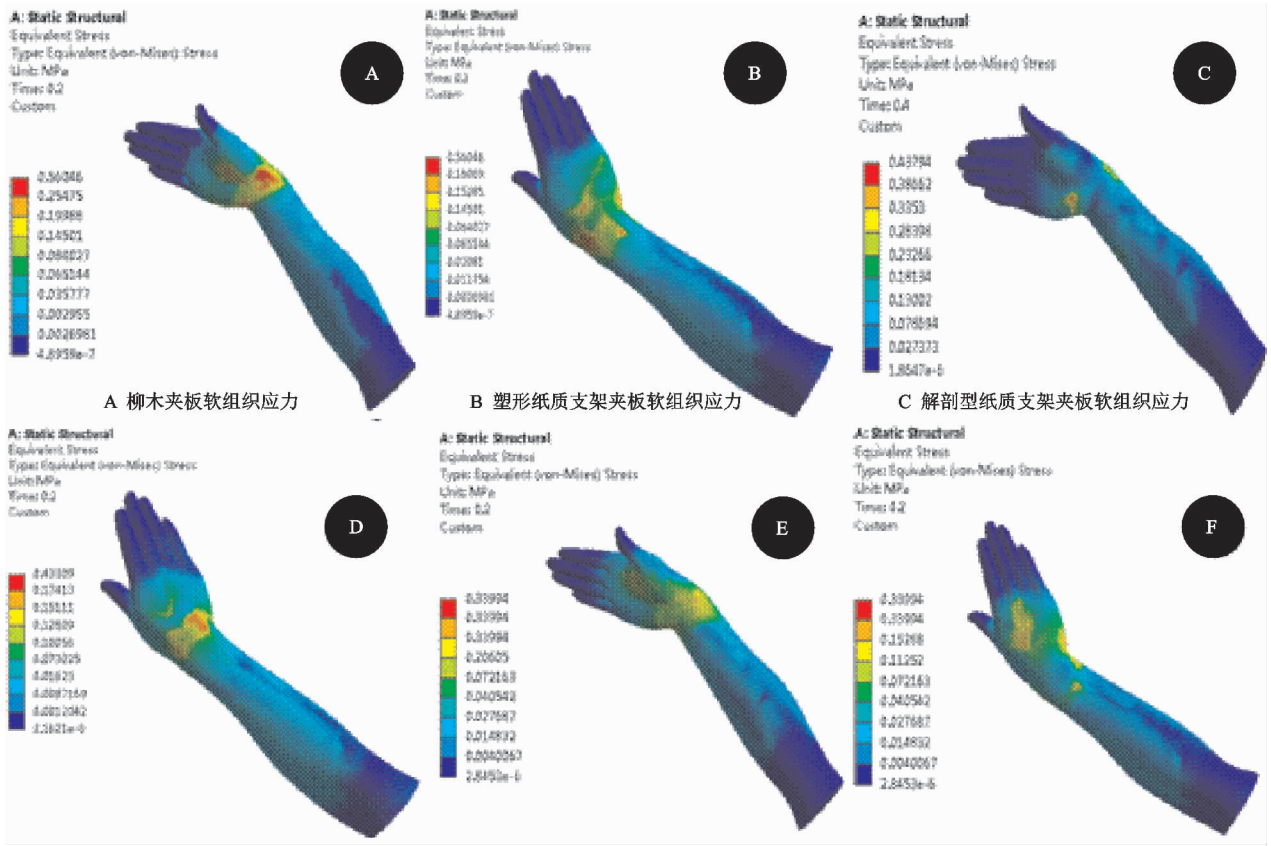


图 4 软组织应力分布云图

2.2.2 不同部位皮肤应力值 在临床中易受夹板卡压的几处部位,选择皮肤表面同一节点,比较三种夹板固定下的皮肤应力值,发现柳木夹板皮肤应力值在各部位均大于两种纸质夹板的,可能与木材弹性模量大、柳木夹板没有预防卡压措施有关。解剖型夹板皮肤应力值在桡骨茎突及大小鱼际处均小于纸质支架夹板的,但尺骨头处皮肤应力值大于纸质支架夹板的。不同部位皮肤应力值见图 5.

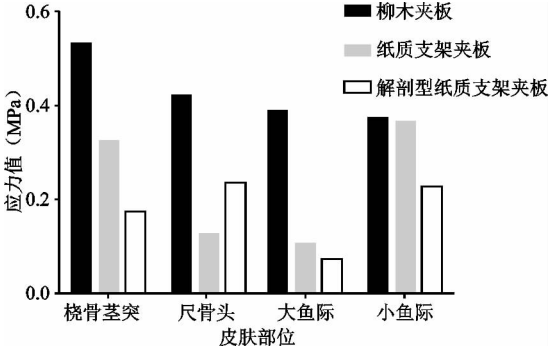


图 5 肢体各部位皮肤应力值

2.2.3 骨骼应力分布 三种夹板固定下传导至骨骼应力均较皮肤应力相应减小,应力集中作用于腕部周围。柳木夹板固定下应力分布较不均匀,多处出现应力集中,主要分布于腕骨、腕掌关节、尺骨头、桡骨茎突等部位,局部应力最大值为 485 kPa,掌骨部分应力较小且较均匀;纸质支架夹板应力分布较均匀,应力集中区域

位于掌骨、腕掌关节、腕骨、尺桡骨远端等部位,局部应力最大值为 385 kPa,其中第一和第 5 掌骨应力也较大;解剖型夹板应力分布较为均匀,应力集中区域位于掌骨、腕掌关节、腕骨、尺桡骨远端等部位,局部应力最大值为 270 kPa,骨突部位及各指也未见明显应力集中。不同夹板固定下的骨骼应力分布云图见图 6。

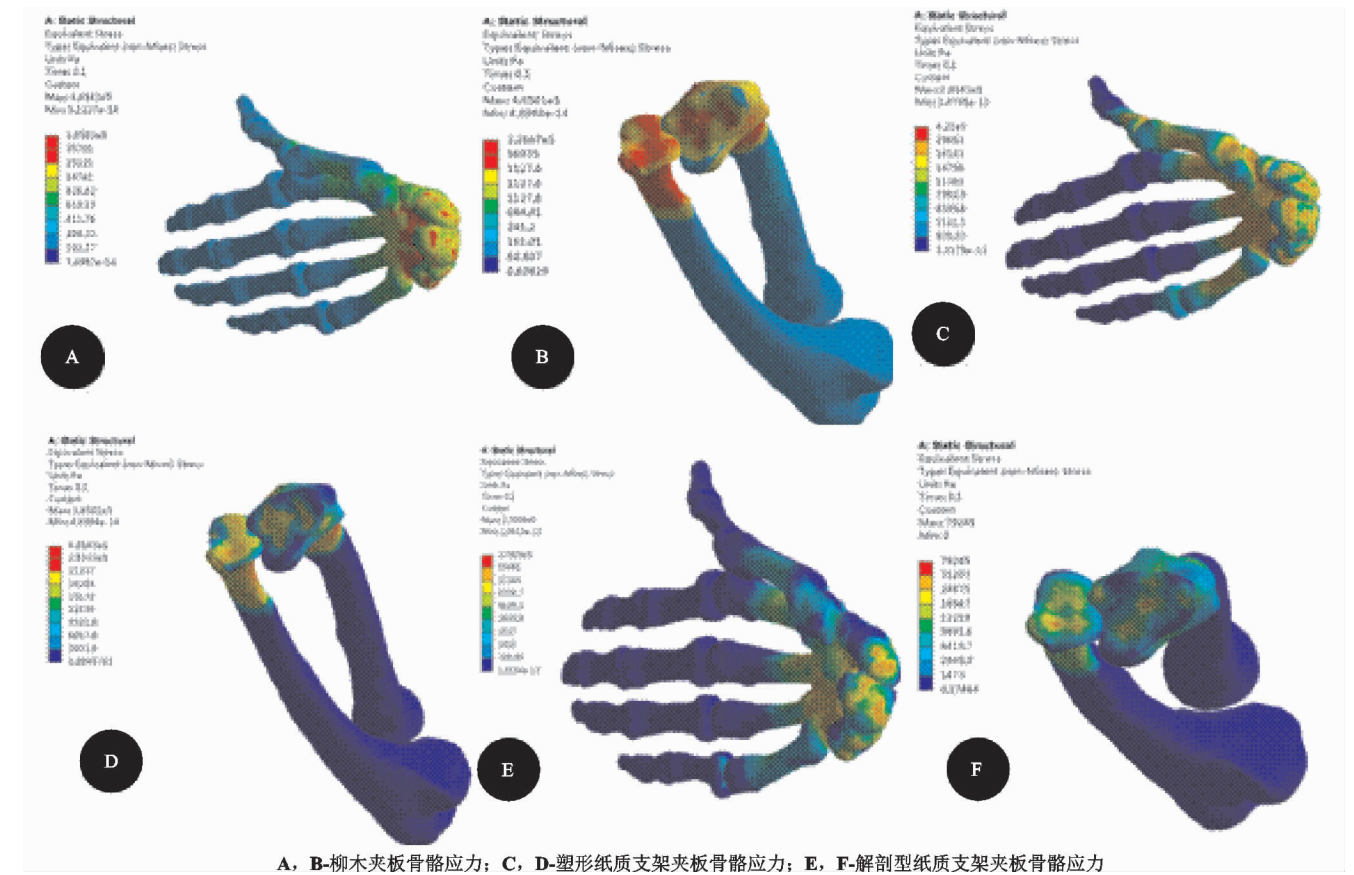


图 6 不同夹板固定下的骨骼应力分布云图

3 讨论

Colles 骨折是临床最常见的骨折之一,治疗不当易导致腕关节慢性疼痛和僵硬,严重影响手的功能。夹板外固定一直是桡骨远端骨折治疗的标准方法,对于简单、稳定的关节外骨折及部分关节内骨折,手法复位后夹板固定可获得较为满意的疗效^[1,2]。本院骨伤科传承江苏省非物质文化遗产——“刘氏骨伤”塑形纸质支架夹板固定 Colles 骨折,数十年的临床应用证实其是一种简便、有效的方法,但也存在夹板与肢体欠贴合、操作较繁琐、易致局部压迫等不足^[14-16]。针对这些现实问题,前期改良研制定了解剖型纸质支架夹板^[3]。为了评判解剖型纸质支架夹板治疗 Colles 骨折的优越性及安全性,笔者进行了上述三种夹板固定 Colles 骨折的有限元仿真研究。

生物力学研究常以活体或尸体标本为材料,但受限于技术操作与伦理学等因素,活体生物力学实验无法大规模开展;尸体标本也存在组织属性不稳定、复制生理环境困难、过分依赖检测设备、实验成本高等劣势。Brekelmans 等^[17]和 Rybicki 等^[18]将有限元分析

法引入骨科领域,为生物力学研究提供了新的途经。目前生物力学有限元研究通常将影像数据重建后的三维几何模型赋予材料属性、载荷、边界条件等,建立近似人体生理状态的三维模型,通过改变部分结构、参数和载荷,模拟任意处的位移和应力,获得全域性的信息,具有成本低、运算周期短、仿真精度高、可重复性强等优势,同时也符合现代中医药研究“微观辨证”的理论^[19,20]。近年来有限元分析在骨伤科领域的应用日益增多,主要集中于骨关节应力分析、预测骨折发生风险、指导内固定物的设计和指导手术方案等方面^[21-24]。关于夹板固定骨折的有限元分析则较少,张爱平等^[25]改良研制定了塑形夹板,在用于治疗前臂双骨折的有限元分析中认为:塑形夹板能在一定程度上增强分骨作用力,有利于骨折的稳定。但受限于软件条件,该研究无直观应力分析云图。

骨骼与周围组织灰度值差别较大,边界容易提取,本研究采用 CT 扫描获得模型。由于相关的力学实验和基础研究尚无法提供人体各种组织的本构方程,因此将人体不均质性、各向异性的组织材料设定为匀质

及各向同性的线弹性材料。本研究的主要目的是静态分析夹板对软组织及骨骼的应力影响,模型采用手工添加韧带与软骨,分别定义不同材料属性。由于腕部骨骼结构几何形态很不规则,不断调整、修改模型的网格密度有困难,本研究采用 ANSYS Workbench 自适应网格划分,生成元素形状,特性较好,对于形态不规则的区域会自动调整网格密度,保证网格的高质量。

本研究结果显示,柳木夹板固定下的肢体软组织高应力区域分布散乱,大小鱼际、第一掌骨基底部、桡骨茎突、尺骨头等高应力区与临床中压疮好发部位相吻合;而解剖型纸质支架夹板固定下的肢体应力分布较规整,骨突、鱼际等部位无明显应力集中,因此笔者认为解剖型夹板具有与肢体最好的贴合度,能有效避免局部压迫,符合设计初衷。由于柳木夹板弹性模量较大,外部载荷作用后传递至软组织的应力也相应较大,同时柳木夹板平直,无法避免对局部的压迫,因此体表应力值较大;解剖型纸质支架夹板相应位置设计有凹陷,相应部位压应力随之减小;塑形纸质支架夹板在尺骨头处应力最小,可能与其裁剪有豁口有关。三种夹板固定下传导至骨骼应力集中于尺桡骨远端及腕骨附近,有利于维持骨折局部的稳定;且桡骨的桡腕关节面应力偏向于月骨凹的尺侧及尺骨头,桡骨远端应力也较集中,与掌屈尺偏的体位相关,如此应力分布可能有利于尺偏角的维持。

解剖型纸质支架夹板模拟固定 Colles 骨折,肢体软组织应力分布均匀,骨突、鱼际等易卡压部位的应力较小,说明其具有较好的肢体贴合度,理论上能减少压疮等相应并发症的发生,为解剖型纸质支架夹板的临床研究提供了可靠的生物力学依据。本研究中有限元模型较为简单,忽略了肌肉、肌腱等动力性结构的内部作用因素,也未能模拟功能锻炼时各部分材料的应力应变情况,这将是今后探索的方向。

参考文献

- [1] 苏建才. 闭合手法复位 U 形螺旋石膏功能位固定治疗 Colles 骨折[J]. 中国骨伤, 2016, 29(1): 18-20.
- [2] 姜保国, 张殿英, 付中国, 等. 桡骨远端骨折的治疗建议[J]. 中华创伤骨科杂志, 2010, 12(11): 1053-1056.
- [3] 华臻, 尹恒, 马勇, 等. 桡骨远端“解剖型”塑形纸质支架夹板的设计及人体贴合研究[J]. 中国全科医学, 2016, 19(15): 1856-1860.
- [4] White NJ, Rollick NC. Injuries of the scapholunate interosseous ligament; an update[J]. J Am Acad Orthop Surg, 2015, 23(11): 691-703.
- [5] 王怀经. 奈特人体解剖彩色图谱[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2005: 441.
- [6] 谢仁国, 汤锦波, 唐天骊, 等. 三角纤维软骨复合体的大体解剖和腕关节镜对比观察研究[J]. 中华关节外科杂志, 2011, 5(1): 60-67.
- [7] Çelik A, Kovaci H, Saka G, et al. Numerical investigation of mechanical effects caused by various fixation positions on a new radius intramedullary nail[J]. Comput Methods

- Biomech Biomed Engin, 2015, 18(3): 316-324.
- [8] Mouzakis DE, Rachiotis G, Zaoutsos S, et al. Finite element simulation of the mechanical impact of computer work on the carpal tunnel syndrome[J]. J Biomech, 2014, 47(12): 2989-2994.
- [9] 孙培栋, 陈春, 吴长福, 等. 有限元分析中软组织力学参数的设定及验证[J]. 医用生物力学, 2012, 27(1): 27-31.
- [10] 周晓宁. 腕关节三维有限元模型的建立及桡骨远端骨折发生机制的生物力学分析[D]. 北京: 北京中医药大学, 2014.
- [11] Matsuura Y, Kuniyoshi K, Suzuki T, et al. Accuracy of specimen-specific nonlinear finite element analysis for evaluation of distal radius strength in cadaver material[J]. J Orthop Sci, 2014, 19(6): 1012-1018.
- [12] 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, 15(11): 1213-1215.
- [13] 李想. 小夹板治疗老年桡骨远端骨折中夹板束缚力的量化研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2011.
- [14] 蔡建平, 胡钢. 塑性铅丝纸质夹板治疗桡骨远端骨折[J]. 军医进修学院学报, 2010, 31(11): 1102-1103.
- [15] 陆振飞, 邹文浩, 蔡建平, 等. 纸质塑形支架夹板超关节固定治疗上肢关节周围骨折[J]. 安徽中医学院学报, 2011, 30(2): 25-28.
- [16] 严松鹤, 胡钢, 蔡建平, 等. 闭合手法整复塑性铅丝纸质夹板外固定治疗桡骨远端骨折的疗效分析[J]. 浙江中医药大学学报, 2013, 37(7): 861-863.
- [17] Brekelmans WA, Poort HW, Slooff TJ. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts[J]. Acta Orthop Scand, 1972, 43(5): 301-317.
- [18] Rybicki EF, Simonen FA, Weis EB Jr. On the mathematical analysis of stress in the human femur[J]. J Biomech, 1972, 5(2): 203-215.
- [19] Pfeiffer FM. The use of finite element analysis to enhance research and clinical practice in orthopedics[J]. J Knee Surg, 2016, 29(2): 149-158.
- [20] 姜自伟, 黄枫, 庞智晖, 等. 辨稳论治_从有限元分析角度探讨微观辨证在中医骨伤领域的发展[J]. 中医正骨, 2012, 24(12): 77-78.
- [21] 兰美兵, 敖俊, 张美超. 两种植骨方式治疗 L-1 椎体爆裂骨折的有限元研究[J]. 中国临床解剖学杂志, 2016, 34(1): 91-95.
- [22] Yu B, Chen WC, Lee PY, et al. Biomechanical comparison of conventional and anatomical calcaneal plates for the treatment of intraarticular calcaneal fractures - a finite element study[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2016(1): 1-8.
- [23] Burt LA, Macdonald HM, Hanley DA, et al. Bone microarchitecture and strength of the radius and tibia in a reference population of young adults; an HR-pQCT study[J]. Arch Osteoporos, 2014, 9(1): 1-9.
- [24] Noda M, Saegusa Y, Takahashi M, et al. Biomechanical study using the finite element method of internal fixation in pauwels type III vertical femoral neck fractures[J]. Arch Trauma Res, 2015, 4(3): e23167.
- [25] 张爱平, 许书亮, 周恩昌. 塑形夹板治疗尺桡骨双骨折的有限元分析[J]. 福建中医学院学报, 2002, 12(4): 25-27.

(收稿日期: 2017-02-02)