

文章编号:1004-7220(2018)01-0013-05

# 动力气囊压垫纠正桡骨远端 AO C3.1 型骨折 残余侧方移位的三维有限元分析

魏成建<sup>1</sup>, 陶宝琛<sup>2\*</sup>, 张满臣<sup>2</sup>, 夏均青<sup>2</sup>, 梅伟<sup>1</sup>

(1. 江苏省中医院 骨伤科, 南京 210029; 2. 西安市中医医院 骨伤科, 西安 710021)

**摘要:**目的 运用有限元分析法对动力气囊压垫纠正桡骨远端 AO C3.1 型骨折手法复位后残余侧方移位的压强调整进行量化研究,验证其纠正侧方残余移位的有效性。方法 采用 Imageware 13.0、Mimics 15.0、ANSYS Workbench 15.0 等建模、分析软件,高效仿真模拟动力气囊压垫纠正桡骨远端骨折手法复位后残余 1 cm 侧方移位,对纠正残余侧方移位距离与动力气囊压垫压强的相关性进行量化分析。结果 气囊扎带约束载荷恒定情况下,在动力气囊压垫的压强调整过程中,应力主要分布在骨折断端气囊压垫放置部位。纠正桡侧 1 mm 残余移位所需压强约为 2.4 kPa,纠正背侧 1 mm 残余移位所需压强约为 1.3 kPa。残余移位复位后,动力气囊压垫进行泄压,此时气囊扎带的恒定约束载荷与骨折断端的摩擦载荷可有效防止其再移位。结论 在气囊扎带恒定约束载工条件下,智能气囊小夹板可通过动力气囊压垫进行压强调节,有效纠正桡骨远端 AO C3.1 型骨折手法复位后的残余侧方移位,并防止其再移位。

**关键词:**动力气囊压垫; 桡骨远端骨折; 残余侧方移位; 有限元分析; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI:10.16156/j.1004-7220.2018.01.003

## Three-Dimensional Finite Element Analysis on Residual Lateral Displacement of Distal Radius AO C3.1 Fracture Corrected by Dynamic Airbag Pad

WEI Chengjian<sup>1</sup>, TAO Baochen<sup>2\*</sup>, ZHANG Manchen<sup>2</sup>, XIA Junqing<sup>2</sup>, MEI Wei<sup>1</sup>

(1. Department of Orthopedics and Traumatology, Jiangsu Province Hospital of TCM, Nanjing 210029, China; 2. Department of Orthopedics and Traumatology, Xi'an Hospital of TCM, Xi'an 710021, China)

**Abstract: Objective** To quantitatively study the pressure of residual lateral displacement in distal radius AO C3.1 fracture after manual reduction corrected by dynamic airbag pad using finite element analysis and to verify its effectiveness for correcting the residual displacement of fractures. **Methods** Imageware 13.0, Mimics 15.0 and ANSYS Workbench were used to simulate 1 cm residual lateral displacement after manual reduction of distal radius fracture corrected by dynamic airbag pad. Then the correlation between the distance of residual lateral displacement and the adjustment of dynamic airbag pad pressure were quantitatively analyzed. **Results** In the case of constant load restrained by airbag ribbon, during the process of pressure adjustment by splint pad, the stress was mainly distributed in the fracture end where the airbag pad was located. About 2.4 kPa pressure was needed

收稿日期:2017-04-25; 修回日期:2017-06-27

基金项目:江苏高校优势学科建设工程项目(0350620022003A)

通信作者:陶宝琛,住院医师,E-mail:taobaochen89@163.com

\* 为共同第一作者

to correct 1 mm displacement on radial side, while about 1.3 kPa pressure was needed to correct 1 mm displacement on dorsal side. The dynamic airbag pad was depressurized after the restoration of residual shift. At this time, displacement could be effectively prevented due to the constant load of airbag ribbon and the frictional load at the fracture end. **Conclusions** In the case of constant load constrained by airbag ribbon, intelligent airbag splint can effectively correct the residual lateral displacement after the manual reduction of the distal radius AO C3.1 fracture and prevent it from being displaced by adjusting pressure of the dynamic airbag pad.

**Key words:** dynamic airbag pad; distal radius fracture; residual lateral displacement; finite element analysis; biomechanics

桡骨远端骨折在急诊骨折中约占17%<sup>[1]</sup>。除部分骨折复位后仍不稳定或复杂桡骨远端骨折需要手术外,多数桡骨远端骨折可以通过保守治疗达到治疗目的<sup>[2]</sup>。长期临床观察发现,急诊手法复位可完成桡骨远端骨折保守治疗中的功能复位,但仍有部分残余移位未完全纠正。智能气囊小夹板[见图1(a)]是获得中国国家专利的外固定装置(专利号:ZL 2008 2 0159625. 2),前期实验证明,其可用于治疗桡骨远端不稳定骨折<sup>[3]</sup>。相比传统小夹板,智能气囊小夹板的气囊扎带可维持恒定载荷,动力气囊压垫压强的可调性可对骨折手法复位后残余移位进行复位[见图1(b)]。本文应用有限元方法对智能气囊小夹板通过动力气囊压垫纠正桡骨远端AO C3.1型骨折手法复位后残余侧方移位所需调整压强进行仿真量化研究,为智能气囊夹板的实际应用提供量化数据,避免二次复位创伤,以期广泛应用于桡骨远端骨折手法复位后残余移位纠正的无创治疗中。

## 1 研究对象及建模工具

### 1.1 研究对象

采用飞利浦16排螺旋CT平扫1名成年健康男性左前臂腕部屈曲位夹板固定后的CT资料,剪切夹板外尺桡骨靠近肘关节CT平扫层数,建模应用共213层,提前对志愿者严格筛选,排除骨代谢疾病、外伤、畸形等病史。

### 1.2 建模工具

采用工程力学仿真建模软件 Mimics 15.0、ANSYS Workbench 15.0、Imageware 13.0 建模及生物力学模拟分析软件,计算机配置为:戴尔(DEL) Precision T5810 图像工作站,E5-1603V3。

## 2 建模分析方法

### 2.1 图像处理阶段

由影像读片系统导出的DICOM格式CT数据文件需经三维实体化处理转换,将二维平扫数据进行三维实体化转化才可直接用于医用生物力学的计算处理。将导出的CT平扫数据导入Mimics 15.0软件,定义二维平面方向以及矢状面、冠状面和横截面,系统将平面数据归类窗口显示。通过对分辨率和皮质骨、松质骨的灰度进行定义,提高桡骨远端皮质骨、松质骨及周围组织的平滑度与分辨率。对自动选取的骨、夹板、软组织等不符合健康成人正常骨结构的部分采用Mimics 15.0工具栏擦除功能进行特殊处理,这是提取三维图像骨骼及软组织夹板等工具的成败关键。通过相同的方法分离出尺桡骨、软组织及夹板等影像数据。最终得到包含骨周围软组织、骨组织的3D模型,并保存文件。

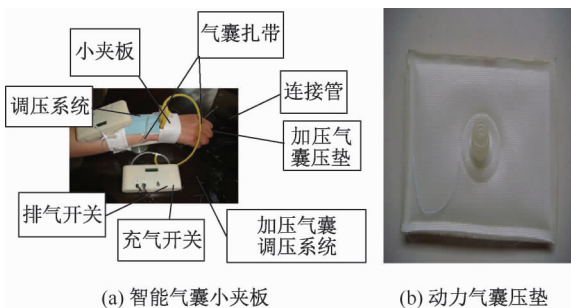


图1 夹板构件示意图及动力气囊压垫实体图

Fig. 1 Component diagram of the splint and picture of dynamic airbag pad (a) Small splint with intelligent airbag, (b) Dynamic airbag pad

## 2.2 建模参数

建立骨组织、夹板及软组织模型时,设置同类组织的材质属性为匀质、各向同性<sup>[4]</sup>,气囊夹板、皮质骨、松质骨、软组织、骨折线的弹性模量分别为 6.25、13.4、1.7、0.01 GPa 和 50 kPa,气囊夹板、皮质骨、松质骨的泊松比均为 0.3,软组织和骨折线的泊松比分别为 0.49、0.05<sup>[5-6]</sup>,单元类型均为 Solid 186。

## 2.3 曲面拟合和仿真建模分析阶段

Mimics 通过相同方法提取的骨、软组织及夹板三维模型为三角面片模型,比较粗糙。将 STL 文件导入 Imageware,对其进行模型曲面、删格、曲面拟合处理,利用 Imageware 对构件粗糙模型细分、降噪、光

顺化处理,并通过精确曲面等过程对其进行曲面化,建立健康成人桡骨远端夹板固定后的三维有限元模型,以利于后续的骨折建模及有限元结果分析。

## 2.4 骨折及侧方残余移位建模

将 Imageware 导出的 STP 格式三维模型数据导入 Pro/E 中进行模型组装。研究表明,智能气囊小夹板对桡骨远端 AO C3.1 型骨折固定稳定<sup>[7]</sup>。依据《骨折分类三维图鉴》中桡骨远端 AO 分型,建造 C3.1 型骨折模型<sup>[8]</sup>。导入上述重建的模型,对模型偏移一定厚度(0.5 mm),获得皮质骨与松质骨,通过曲面切割的方法建造骨折及桡骨远端残余桡侧与背侧 1 cm 侧方移位模型(见图 2)。

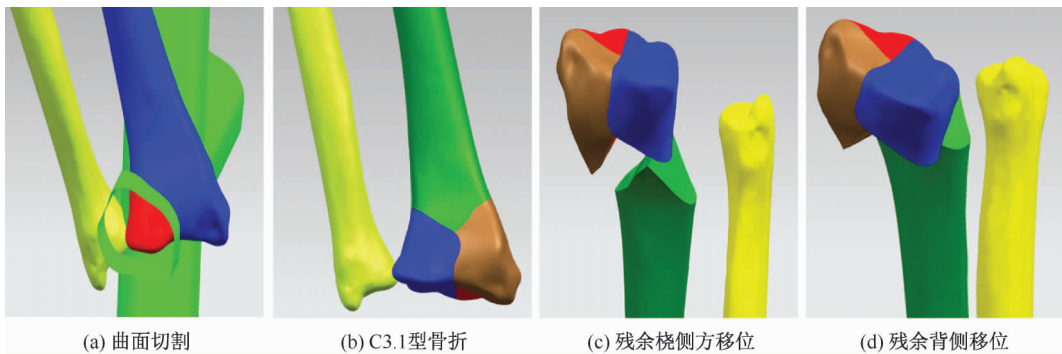


图 2 骨折与残余侧方移位建模

Fig. 2 Simulation of fracture and residual lateral displacement

(a) Curve incision, (b) C3.1 fracture, (c) Residual radial lateral displacement, (d) Residual dorsal displacement

## 2.5 计算边界

对上肢手臂采用的高阶四面体网格模型,桡骨和尺骨近端全自由度固定约束,即 X、Y、Z 3 个方向的位移全部固定。

## 3 观察指标

### 3.1 桡骨远端受力云图

前期实体生物力学试验研究证实,使用智能气囊小夹板扎带,关节内不稳定骨折获得骨折稳定的气囊扎带压强为 28 kPa<sup>[3]</sup>。桡骨远端骨折夹板固定后,通过动力气囊扎带压强调整纠正手法复位后的残余侧方移位,纠正残余移位过程中对桡骨远端骨折的受力进行分析。

### 3.2 动力气囊压垫压强调整与纠正骨折残余侧方移位距离关系

维持气囊扎带压强恒定 28 kPa,气囊压垫压强

通过有限元仿真由 0 kPa 逐步上调,至骨折残余 1 cm 侧方移位完全纠正。复位过程定义骨折间复位为滑动状态,摩擦系数最高达到 0.51<sup>[9]</sup>。总结动力气囊压垫压强调整与残余侧方移位纠正距离的关系,并绘制压强-位移曲线。

## 4 结果

### 4.1 受力云图

采用有限元建模及分析软件工具对桡骨远端 AO C3.1 型骨折侧方移位进行分析,桡侧移位、腕背侧移位分别如图 3、4 所示。结果表明,智能气囊小夹板可通过动力气囊压垫进行压强调整,有效纠正桡骨远端手法复位后残余桡侧方与背侧方残余 1 cm 移位;气囊压垫泄压后,试验夹板的气囊扎带恒定约束力与骨折间摩擦力可有效维持复位效果,未见再移位。

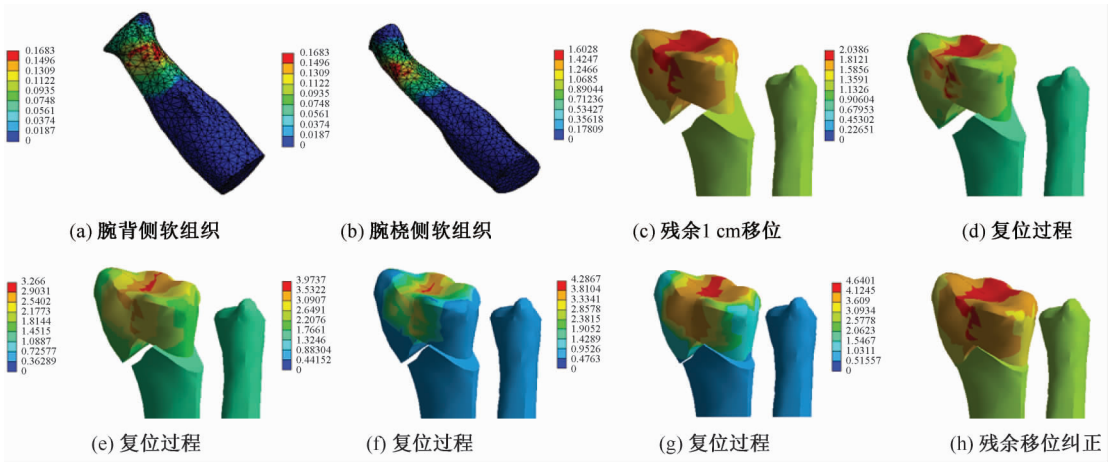


图3 纠正桡侧方残余移位骨与软组织受力云图

Fig.3 Stress nephogram of bone and soft tissues by correction of radial lateral residual displacement (a) Carpal dorsal soft tissues, (b) Carpal radialis soft tissues, (c) 1 cm residual displacement, (d) - (g) Reduction process, (h) Complete correction of the residual displacement

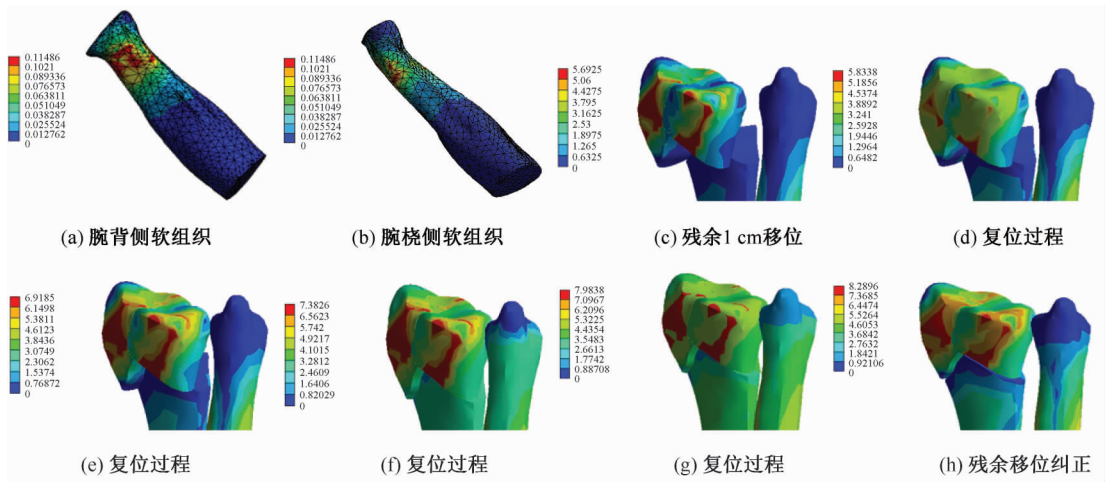


图4 纠正腕背侧方残余移位骨与软组织受力云图

Fig.4 Stress nephogram of bone and soft tissues by correction of dorsal carpal residual displacement (a) Carpal dorsal soft tissue, (b) Carpal radialis soft tissues, (c) 1 cm residual displacement, (d) - (g) Reduction process, (h) Complete correction of the residual displacement

## 4.2 压强-位移曲线

气囊扎带压强维持恒定 28 kPa, 动力气囊压垫由 0 kPa 均匀加压, 测量骨折残余桡侧方与背侧方移位复位距离与动力气囊压垫压强的关系 (见图 5)。在残余移位的纠正过程中, 压强与纠正残余移位的距离大致呈直线关系, 纠正桡侧 1 mm 残余移位所需压强约为 2.4 kPa, 纠正背侧 1 mm 残余移位所需压强约为 1.3 kPa。残余骨折移位复位后气囊压垫泄压至 0 kPa, 当气囊压垫泄压后, 气囊扎带环形约束载荷

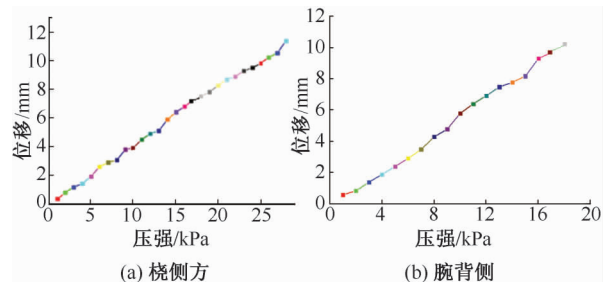


图5 气囊压垫压强与位移曲线

Fig.5 Intelligent airbag pad pressure and displacement curve (a) Radial side, (b) Dorsal side

和轴向力学分布可以为腕关节骨折局部提供软的最大组织应力为 80.592 kPa,骨折缝处摩擦应力为 2 125.9 kPa。

## 5 讨论

相比普通小夹板,自制智能气囊小夹板通过压力感受芯片控制气囊扎带及动力气囊压垫的压强,可在避免二次复位情况下通过动力气囊压垫进行压强调整,有效纠正骨折手法复位后的残余移位,减少骨折复位欠佳导致的关节功能障碍发生率,且避免二次复位创伤,解决了老年患者因基础疾病无法耐受反复复位创伤的缺点。桡骨远端骨折智能气囊小夹板固定后,智能气囊压垫通过压力的调节可有效调整骨折复位后残余移位,并将压强进行量化,是桡骨远端骨折普通夹板经验治疗的一个创新深入研究。

本研究结果表明,在智能气囊小夹板通过动力压垫调整压强的过程中,软组织受力主要集中在腕桡侧与腕背侧,夹板近端覆盖部位应力分布较为均匀,受力改变主要集中在桡骨远端。骨组织受力主要集中在关节面的中部、桡骨远端骨折块部位。气囊压垫在增大压强纠正骨折残余移位的过程中,应力集中在气囊压垫存在的部位,此过程的受力主要由腕关节关节面中部向桡侧分布。桡骨远端受力相对集中,为防止骨折的侧方再移位提供约束载荷,关节面的应力分布为桡骨远端骨折复位后的轴向稳定提供生物力学支撑。当气囊压垫泄压后,在气囊扎带维持恒定 28 kPa 的情况下,环形约束载荷和轴向力学分布可以为腕关节局部提供的软组织最大应力为 80.592 kPa,骨折缝处摩擦应力为 2 125.9 kPa,可有效防止骨折的侧方再移位。

在手法复位后残余移位的纠正过程中,智能气囊压垫压强与残余侧方移位距离大致呈直线关系,相比骨折背侧移位的纠正过程,桡侧移位的纠正所需气囊压垫的压强小,纠正 1 mm 桡侧残余移位所需压强约为 2.4 kPa,纠正背侧 1 mm 残余移位所需压强约为 1.3 kPa,推测导致 1 mm 残余侧方移位压强差异的原因是所建骨折模型为桡骨远端伸直型骨

折,其固定为屈曲位固定,掌背侧肌腱及软组织的弹性应力较大。本项纠正残余侧方移位的生物力学量化研究,可为桡骨远端残余侧方移位的纠正提供应用理论指导,避免普通夹板固定后骨折残余移位二次复位创伤大、老年患者耐受差等问题。

本文运用低成本、可控性强的数字分析软件进行生物力学研究,避免了动物实验周期长、费用高的缺点,为中医骨伤科骨折传统夹板治疗方法提供新思路,为小夹板的创新提供新的研究方法。由于试验中软组织建模为整体建模,对周围肌腱的弹性应力、轴向受力分析相比实体标本研究而言尚有一定欠缺。此外,只针对桡骨远端骨折保守治疗手法复位后的残余侧方移位进行研究。后续有限元分析在桡骨远端的应用应进一步深入到旋转移位、成角移位、下尺桡分离移位的生物力学研究中。

## 参考文献:

- [1] ARORA R, GABL M, GSCHWENTNER M, et al. A comparative study of clinical and radiologic outcomes of unstable colles type distal radius fractures in patients older than 70 years: Nonoperative treatment versus volar locking plating [J]. *J Orthop Trauma*, 2009, 23(4): 237-242.
- [2] 徐文婷,倪诚,喻任,等. 桡骨远端骨折手术与非手术治疗的疗效比较[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2014, 29(1): 50-51.
- [3] 魏成建,王以进,张盼,等. 智能气囊小夹板治疗桡骨远端不稳定骨折的生物力学研究[J]. *中华中医药杂志*, 2015, 30(4): 1256-1258.
- [4] DONG XP, WANG DM, HE JY, et al. Finite element analysis of anti-impact loading of wrist protectors [J]. *J Clin Rehabil Tissue Eng Res*, 2011, 15(30): 5531-5534.
- [5] 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.
- [6] 丁国正,徐宏光,王弘,等. 桡骨远端骨折锁定钢板固定的有限元分析[J]. *中国药物经济学*, 2013(5): 233-235.
- [7] 陶宝琛,姜昆,郑斌,等. 智能气囊小夹板治疗桡骨远端伸直型关节内骨折的三维有限元分析研究[J]. *中华中医药杂志*, 2017, 32(4): 1856-1859.
- [8] 顾冬云,戴冠戎. 骨折分类三维图典[M]. 北京:人民军医出版社,2012.
- [9] 于海洋,蔡振兵,朱昱昊,等. 人股骨密质骨横断面的微动磨损特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2004, 25(5): 448-452.