

文章编号: 1004-7220(2024)05-0903-07

## 复合手法治疗胸腰椎骨折(A3)的有限元研究

李稳超<sup>1,2</sup>, 俞鹏飞<sup>2</sup>, 马智佳<sup>2</sup>, 朱广晔<sup>2</sup>, 占戴昕鹏<sup>2</sup>, 李超<sup>2</sup>, 李子航<sup>2</sup>, 唐振宇<sup>2</sup>, 李红卫<sup>2</sup>

(1. 安徽中医药大学 研究生院, 合肥 230038; 2. 南京中医药大学附属苏州市中医医院 骨伤科, 江苏苏州 215008)

**摘要:** **目的** 通过有限元方法分析多种手法治疗胸腰椎骨折(A3), 探讨复合手术手法治疗胸腰椎骨折(A3)可行性及优势。**方法** 通过对胸腰椎骨折(A3)进行三维重建, 在模型上分别采用模拟过伸体位复位、单纯按压复位、过伸体位下按压复位以及复合手法进行加载, 观察模型的应力分布以及骨折椎体位移情况。**结果** 复合手法等效应力为111.88 MPa, 大于其他手法, 且复合手法的应力更能集中于椎体前柱以及中柱; 复合手法应力峰值为122.53 MPa, 大于其他手法, 集中分布于骨折椎体的骨折区域; 复合手法骨折位移为3.94 mm, 大于其他手法, 位移分布由后柱向前中柱递减; 复合手法下骨折椎体前纵韧带、横突间韧带应力最大, 而过伸体位复位、单纯按压复位、过伸体位下按压复位, 关节囊韧带的应力最大。**结论** 复合手法治疗胸腰椎骨折(A3)相对于其他手法复位具有明显优势, 是当前治疗胸腰椎骨折(A3)的合理方案。

**关键词:** 胸腰椎骨折; 手法复位; 复合手法; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.05.016

## Composite Manipulation in the Treatment of Thoracolumbar Vertebral Fractures (A3): A Finite Element Study

LI Wenchao<sup>1,2</sup>, YU Pengfei<sup>2</sup>, MA Zhijia<sup>2</sup>, ZHU Guangye<sup>2</sup>, ZHAN Daixinpeng<sup>2</sup>, LI Chao<sup>2</sup>, LI Zihang<sup>2</sup>, TANG Zhenyu<sup>2</sup>, LI Hongwei<sup>2</sup>

(1. Graduate School, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230038, China; 2. Department of Orthopedics, Suzhou Hospital of Traditional Chinese Medicine Affiliated to Nanjing University of Chinese Medicine, Jiangsu Suzhou 215008, China)

**Abstract:** **Objective** To analyze thoracolumbar vertebral fractures (A3) treated by multiple manipulations using the finite element method and to explore the feasibility and advantages of the composite surgical method for treating thoracolumbar vertebral fractures (A3). **Methods** For three-dimensional reconstruction of thoracolumbar vertebral fractures (A3), the model was loaded with simulated hyperextension posture restoration, simple press restoration, press restoration under hyperextension posture, and composite manipulation. Subsequently, the stress distribution of the model and displacement of the fractured vertebral body were observed. **Results** The equivalent stress under composite manipulation was 111.88 MPa, which was greater than that under other manipulations, and the stress under composite manipulation was more concentrated in the anterior and middle columns of the vertebral body. The peak stress under composite manipulation was 122.53 MPa, which was greater than that under other manipulations, and the stress was centrally distributed in fracture region of the

收稿日期: 2024-04-18; 修回日期: 2024-05-15

基金项目: 江苏省老年健康科研项目(LKM2022055), 江苏省中医药科技发展计划重点项目(ZD202326), 苏州市卫生健康委员会科技项目(LCZX202113)

通信作者: 李红卫, 主任医师, E-mail: hongwei\_li151@163.com

fractured vertebral body. The fracture displacement under composite manipulation was 3.94 mm, which was greater than that under other manipulations, and the displacement distribution decreased from the posterior column to the anterior mid-column. The anterior longitudinal and intertransverse interligamentous ligaments of the fractured vertebral body experienced the greatest stress under composite manipulation, and the joint capsule ligaments experienced the greatest stress under hyperextension postural restoration, simple press restoration, and press restoration under the hyperextension posture. **Conclusions** Compound manipulation for treating thoracolumbar vertebral fractures (A3) has obvious advantages over other manipulative restorations and is a reasonable program for the current treatment of thoracolumbar vertebral fractures (A3).

**Key words:** thoracolumbar vertebral fractures; manual restoration; composite manipulation; finite element analysis

脊柱骨折临床中复杂多样,制定合理的治疗方式要严格依据患者骨折椎体的形态、椎体稳定性、神经功能是否完整以及患者身体素质<sup>[1]</sup>。临床中,胸腰椎压缩骨折数量最多<sup>[2]</sup>。根据 2013 年 AO 分型,稳定、神经功能未见明显损伤的 A3 型胸腰椎骨折具备保守治疗指征<sup>[3-4]</sup>。常规保守治疗是在卧床的基础上适当使用类固醇、神经节苷酯等药物缓解临床症状,但是存在椎体后凸畸形、椎体高度丢失等问题<sup>[5-6]</sup>。相对于卧床休息等保守治疗,传统手法治疗胸腰椎骨折在促进椎体高度恢复方面具有明显的优势<sup>[6-7]</sup>。手法操作主要以过伸体位、手法按压复位为主,复合手法通过将体位与按压复位有机结合,可以有效促进椎体高度恢复<sup>[8]</sup>,但是,当前仍然缺乏结构应力研究证明复合手法治疗胸腰椎骨折(A3)的合理性。本文通过分析 4 种常用手法治疗胸腰椎骨折(A3)的应力变化以及位移情况,探究不同手法治疗胸腰椎骨折(A3)的生物力学差异,为复合手法治疗胸腰椎骨折(A3)提供更有说服力的依据。

## 1 材料及方法

### 1.1 研究对象

选取 1 名 28 岁健康男性志愿者,身高 177 cm,体质量 80 kg。向志愿者告知研究流程以及可能存在的不良影响,签署知情同意书。采用 CT 扫描仪 (Optima CT660, GE 公司, 美国) 对志愿者进行胸腰椎 CT 薄层平扫,图层厚度设置为 0.625 mm,图像序列选择冠状位、矢状位以及轴位,目标节段设置为 T11~L2,将获得的所有图像以 DICOM 格式全部保存。本研究经苏州市中医医院伦理委员会审核

批准(2021 伦研批 057)。

### 1.2 几何模型建立

① 建立初步三维模型:把所有 Dicom 格式 CT 图像资料导入 Mimics 软件;② 胸腰椎的提取:识别图像模型的灰度值;③ 椎体分割和填充:通过 Mimics 软件去除噪点;④ 模型蒙版转化:通过 Mimics 软件进行实体化;⑤ 模型外形优化:把所有数据导入 Geomagic 软件中,再通过删除、去噪、光滑等命令调整模型;⑥ 曲面拟合形成实体模型:拟合格栅与模型表面;⑦ 附属结构和韧带重建:通过点线面以及凸台拉伸重构椎间盘,测量髓核组织体积约占椎间盘 50%,使用等距曲面命令切割出髓核组织。关节软骨的重构与椎间盘相同。韧带组织采用弹簧韧带进行平替,以线性弹性材料设定所有韧带的特性;⑧ 模型插入 SolidWorks 软件进行装配。

### 1.3 相关分析材料赋值

在 ANSYS 中建立创建静力分析模块,在 Workbench 中建立材料,根据既往相关文献[9-12]获得材料的力学参数进行赋值(见表 1)

表 1 材料赋值

Tab. 1 Material assignments

材料	E/MPa	$\nu$	材料	E/MPa	$\nu$
皮质骨	12 000	0.3	黄韧带	19	0.3
松质骨	100	0.2	棘间韧带	11.6	0.3
关节软骨	10	0.3	棘上韧带	15	0.3
纤维环	4.2	0.45	横突间韧带	58.6	0.3
终板	24	0.4	关节囊韧带	32.	0.3
髓核	1	0.49	皮肤	0.1	0.48
前纵韧带	20	0.3	肌肉	1.08	0.49
后纵韧带	20	0.3			

### 1.4 模型材料赋予和网格设置

分别将材料库中的所有结构在对应的实体位

置上逐个赋予,再借助四面体网格单元进行划分,具体数量依据实际模型,最终得到完整的 T11~L2 模型包括 782 586 个节点和 437 190 个网格。

### 1.5 模型有效性验证

将构建好的有限元模型与既往的有限元研究结果进行比较验证有效性。对模型中 L2 椎体以下进行固定;L2 椎体平面以下的自由度为 0,对模型 T12 椎体上终板施加 200 N 轴向应力,200 N 应力方向垂直于 T12 椎体,分别对模型的 X、Y 以及 Z 轴施加 7.5 N·m 扭矩力用模拟前后屈伸、左屈右屈以及左右旋转的活动状态,计算有限元模型在这 6 种状态下的活动度,并与既往研究[13-15]进行比较。结果表明,本文模型的验证结果在合理的区间中,证明了本文构建的有限元模型真实有效(见图 1)。

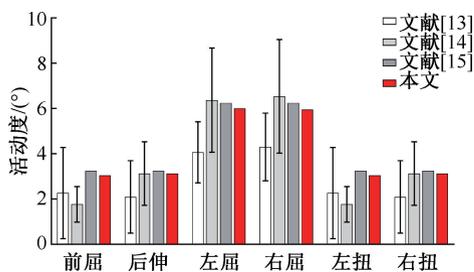


图1 模型有效性验证

Fig. 1 Validation of the model validity

### 1.6 胸腰椎骨折(A3)模型建立

本文主要借鉴既往研究的造模方法<sup>[16-17]</sup>,并且结合 LSC 评分<sup>[18]</sup>,确定模型建立方案。胸腰椎骨折(A3)主要波及前中柱,骨折缺损部位:前缘是伤椎前缘,上缘横断面是平行于上位终板,最下缘切面是平行于椎体后凸角。骨折缺损的体积:① 骨缺损上方椎体前高度( anterior upper vertebral body height above the bony defect, AUVH)占 15%;② 骨缺损高度( anterior bony defect height, ADH)占 30%;③ 骨缺损下方椎体前高度( anterior lower vertebral body height below the bony defect, ALVH)占 55%;④ 椎体后凸矫正角( kyphotic correction angle, KCA)为 6°;⑤ 后柱椎体后壁完整,十字切割骨折缺损上部所有结构,保证上部皮质骨、松质骨还有软骨终板彻底爆裂,通过接触设置,最真实的重构胸腰椎骨折(A3)(见图 2)。

### 1.7 复合手法操作步骤

复合手法主要分为 3 步:① 患者取俯卧位,四

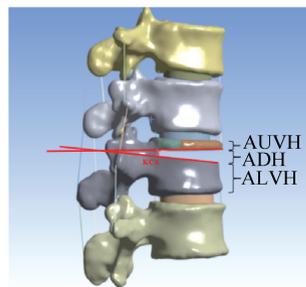


图2 胸腰椎骨折(A3)模型

Fig. 2 Thoracolumbar fracture (A3) model

注:L1 骨折的截骨伴十字分割, AUVH、ADH、ALVH 分别占椎体前缘高度的 15%、30%、55%,骨缺损后凸角为 6°,L1 缺损上部分做十字切割。

肢伸展,嘱患者双手紧抓床头,术者定位骨折节段,一助手牵拉患者的双踝做持续牵引 5 min,使患者处于过伸位,要求发力持续、柔和;术者通过体表定位,定位伤椎后双手叠加,掌根部置于伤椎棘突部位按压复位,嘱患者深呼吸,呼气时按压,吸气时回弹[见图 3(a)]。② 术者在助手的协助下翻动患者,改为仰卧位[见图 3(b)]。③ 使用宽绳索悬吊患者,着力位置为骨折节段,牵拉宽绳索,充分借助患者自身重力,使脊柱呈过伸状态,持续 3 min[见图 3(c)]。



(a) 闭合复位 (b) 轴位翻身 (c) 再次复位

图3 复合手法操作

Fig. 3 Operation of composite manipulation (a) Closed restoration, (b) Axial turning, (c) Re-restoration

### 1.8 手法力学加载

人体胸腰椎的运动状态以及运动机制非常复杂,为了尽可能模拟真实运动以及受力状态,手法力学加载中需要对模型 L2 椎体以下进行固定,自由度限制为 0<sup>[19]</sup>。复合手法治疗胸腰椎骨折的步骤分为 3 步:通过将 7.5 N·m 正向扭力围绕 L1 椎体的 X 轴向后施加模拟体位过伸载荷;通过多次对研究者复位体位下按压力的测量,得出平均按压力为 400 N;在手法操作的体位转变中,需要取消第 1 步固定及载荷,重新固定棘突。本研究所纳入的志愿者体质量为 80 kg,进而得出第 3 步仰卧位下的向

L1 表面施加作用力为  $800\text{ N}^{[20-22]}$ 。为了更好地比较不同手法治疗胸腰椎骨折的疗效,设计加载工况如下:

(1) 过伸体位复位(工况 1)。固定 L2 椎体以下平面,通过将  $7.5\text{ N}\cdot\text{m}$  正向扭力围绕 L1 椎体的 X 轴向后施加[见图 4(a)]。

(2) 单纯按压复位(工况 2)。固定 L2 椎体以下平面,向 L1 椎体施加垂直于 Y 轴的  $400\text{ N}$  加载荷载[见图 4(b)]。

(3) 过伸体位下按压复位(工况 3)。固定 L2 椎体以下平面,通过将  $7.5\text{ N}\cdot\text{m}$  正向扭力围绕 L1 椎

体的 X 轴向后施加模拟体位过伸,向 L1 椎体施加垂直于 Y 轴的  $400\text{ N}$  加载荷载[见图 4(c)]。

(4) 复合手法复位(工况 4)。首先固定 L2 椎体以下平面,通过将  $7.5\text{ N}\cdot\text{m}$  正向扭力围绕 L1 椎体的 X 轴向后施加模拟体位过伸,向 L1 椎体施加垂直于 Y 轴的  $400\text{ N}$  加载荷载,然后取消第 1 步固定及荷载,重新固定棘突,再向 L1 上下表面施加作用力为  $800\text{ N}$ [见图 4(d)]。

## 1.9 观测指标

观察等效应力、应力峰值分布情况以及 L1 位移情况。

## 2 结果

### 2.1 不同工况下 L1 等效应力以及应力峰值

等效应力比较,复合手法等效应力为  $111.88\text{ MPa}$ ,大于其他手法;在应力分布方面,过伸体位加载下应力大部分集中在 L1 椎体骨折区域,这与既往过伸体位辅助治疗脊柱骨折能够取得良好的复位效果吻合<sup>[23-25]</sup>。过伸体位下按压复位应力出现了分散,单纯按压复位应力无法准确集中到骨折椎体,复合手法应力更能集中到椎体前柱以及中柱。

应力峰值比较,复合手法应力峰值最大,为  $122.53\text{ MPa}$ ,集中分布于 L1 椎体的骨折区域;过伸体位复位应力峰值也位于伤椎的骨折区域;单纯按压复位应力峰值出现在下位椎体;过伸体位下按压复位手应力峰值位于骨折区域以及下位椎体(见图 5)。

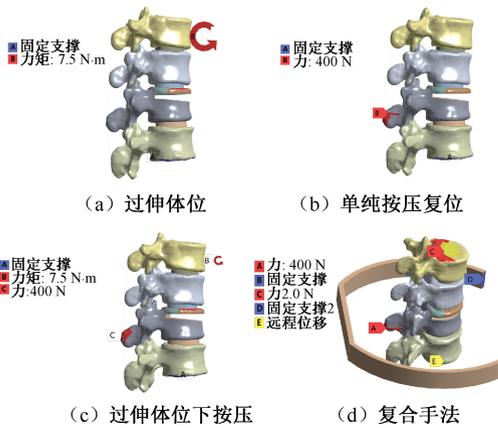


图 4 不同工况加载负荷示意图

Fig. 4 Schematic of loading under different operating conditions

- (a) Hyperextension posture, (b) Simple press restoration, (c) Press restoration under hyperextension posture, (d) Composite manipulation

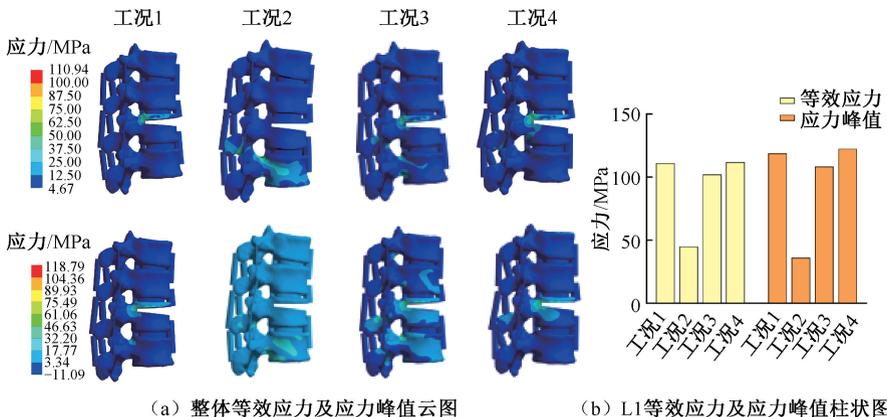


图 5 不同工况下等效应力和应力峰值

Fig. 5 Equivalent stresses and peak stresses of L1 segment under different operating conditions (a) Contours of overall equivalent stresses and peak stresses, (b) Histograms of equivalent stresses and peak stress for L1 segment

## 2.2 不同工况下胸腰骨折模型位移

复合手法 L1 位移为 3.942 3 mm,大于其他手法,位移分布由骨折区域上部向下递减;过伸体位

复位以及过伸体位下按压复位位移分布主要由前柱向后中后柱递减;单纯按压复位最大位移主要分布在后柱(见图6)。

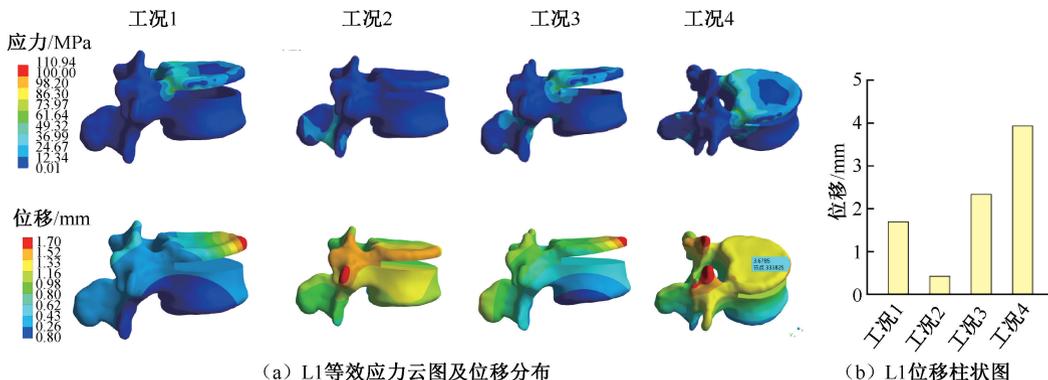


图6 不同工况下 L1 等效应力及位移分布

Fig. 6 Equivalent stress and displacement distributions of L1 segment under different operating conditions

(a) Contours of equivalent stresses and displacement distributions, (b) Histograms of L1 segment

## 2.3 不同工况下 L1 髓核及韧带的应力分布

手法复位治疗胸腰椎骨折除了直接按压力,更为重要的是借助牵拉韧带以及髓核等产生纵向作用力作用于骨折椎体<sup>[21,21]</sup>。计算4种工况加载下 L1 髓核及韧带的应力,结果显示,复合手法 L1 椎体的前纵韧带、横突间韧带应力最大,而过伸体位复位、单纯按压复位、过伸体位下按压复位,关节囊韧带的应力最大(见表2)。

表2 不同工况下 L1 髓核及韧带应力

Tab. 2 Stress of L1 nucleus pulposus and ligament under different working conditions

材料	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
L1 上髓核	0.09	0.00	0.08	0.16
L1 下髓核	0.05	0.05	0.12	0.18
前纵韧带 1	0.09	0.01	0.11	3.01
前纵韧带 2	0.83	0.02	0.81	0.00
前纵韧带 3	0.21	0.18	0.58	0.28
后纵韧带 1	0.02	0.00	0.03	0.00
后纵韧带 2	0.18	0.00	0.17	0.00
后纵韧带 3	0.00	0.00	0.00	0.00
黄韧带	0.13	0.10	0.53	0.64
横突间韧带	0.41	0.10	1.41	3.30
棘间韧带	0.31	0.26	1.30	1.53
棘上韧带	0.21	0.10	0.84	0.29
关节囊韧带	2.39	5.93	9.27	0.00

## 3 讨论

### 3.1 有限元法研究胸腰椎骨折的特征

在生物力学以及设备快速发展的背景下,有限元分析依托于不断精细化、智能化的影像学系统及仪器,相对于传统的实体模型,有限元分析通过计算机重构三维模型,具有更高的重复性、便捷性以及说服力<sup>[26]</sup>。有限元分析最早出现在工程力学研究,随着材料生物力学的深入发展,有限元分析逐步运用于骨生物力学研究,并为当代骨生物力学研究提供了更多的可能性。胸腰椎骨折作为常见的骨折类型,由于致病因素复杂,临床中骨折类型多样,关于椎体骨密度、椎间盘组织以及关节突关节等结构的生物力学机制尚未明确<sup>[27-28]</sup>。为了提高研究的准确性,模型重建时必须筛选出健康的志愿者拍摄更为薄层且完整的影像学图像;有限元建模中,将所有的结构划分为网格单元,再根据不同的结构赋予不同的材料参数,材料参数通常是参考既往研究,但是当前对于肌肉组织、韧带等结缔组织的生物力学应用尚不成熟,不能通过原始的影像学资料直接识别,需要后期赋予,也就为有限元研究带来了更多的不确定性。既往传统的生物力学研究仅仅能够获取不同结构的应力分布,而有限元分析能够直接观察到胸腰椎骨折中不同结构的应力分布云图,获得不同结构的最大应力。

### 3.2 手法治疗胸腰椎骨折(A3)的生物力学依据

在本研究纳入的重建模型为胸腰椎骨折(A3),在建模的过程中保留了韧带的完整性,骨折碎块未侵占椎管,具备保守治疗指征。既往对胸腰椎压缩性骨折的临床研究以及有限元分析较多,但是对于胸腰椎骨折(A3)的手法复位治疗的有限元研究有限。稳定且神经功能完整的胸腰椎骨折具备保守治疗指征,本文从生物力学角度探讨手法治疗胸腰椎骨折(A3)的合理性与有效性。本研究加载工况共涉及4种,结果显示,过伸体位加载下的等效应力更大,多能集中在骨折节段,且由前柱向中后柱递减,这与椎体位移趋势相对应;过伸体位加载下的骨折椎体位移更大,过伸体位复位、过伸体位下按压复位以及复位手法加载下的模型位移趋势主要由前柱向中后柱递减,而胸腰椎骨折区域多位于前中柱<sup>[29]</sup>,这也为手法治疗胸腰椎骨折提供了可靠的生物力学依据。而单纯按压复位应力出现了分散以及位移不理想的情况,也间接地证实了过伸体位的重要意义。在韧带以及关节囊的等效应力分布方面,过伸体位复位、过伸体位下按压复位以及单纯按压复位下的关节囊韧带的应力最大,相对于传统观点中手法复位治疗胸腰椎骨折中前纵韧带的牵张力作用最大<sup>[30]</sup>,本文认为,俯卧位下手法复位胸腰椎骨折发挥主要复位作用力的韧带为关节囊韧带。

### 3.3 复合手法治疗胸腰椎骨折(A3)优势的生物力学依据

复位手法治疗胸腰椎骨折临床操作分为3步,注重“筋骨并重”,手法复位治疗多需要与患者进行充分沟通,舒缓患者紧张情绪,再通过手法按摩松懈骨折部位肌肉的紧张状态。通过生物力学模拟复合手法作用于胸腰椎骨折(A3)后发现,相对于过伸体位复位、单纯按压复位、过伸体位下按压复位这3种治疗方法,复合手法复位应力更为集中,骨折椎体位移更为明显;在应力分布方面,复合手法复位应力峰集中在骨折椎体前柱上缘,通过力学的传导集中在中柱,且应力分布与移位趋势相呼应,峰值均位于骨折区域上缘,为更好恢复伤椎高度提供了理论支持。本文推测,这也是复合手法复位治疗胸腰椎骨折临床疗效更优的生物力学证据。在韧带以及关节囊的应力分布方面,相对于俯卧位下

应力峰值集中在关节囊韧带,复合手法复位前纵韧带、横突间韧带应力最大,这可能与复合手法最后体位为仰卧位的有关,体位的变动可能会改变手法复位治疗胸腰椎骨折发挥主要作用力的韧带。

## 4 结论

本文通过有限元法分析多种手法治疗胸腰椎骨折(A3),在生物力学上验证了手法治疗胸腰椎骨折(A3)的有效性,同时也证明了复合手法治疗胸腰椎骨折(A3)具有明显优势,是当前治疗胸腰椎骨折(A3)合理方案。但是,有限元法在研究过程中进行了一定数量的科学假设,且腰背部软组织在手法复位中会影响受力以及传导,导致本文无法完全真实模拟手法作用于腰背部的真实受力和位移情况。研究结果为进一步从生物力学探究手法的科学性提供了方向。

**利益冲突声明:**无。

**作者贡献声明:**李稳超负责论文撰写;李稳超、马智佳、占戴昕鹏负责模型建立;李子航、唐振宇负责计算分析;俞鹏飞、朱广晔、李超负责论文审阅和修改;李红卫负责研究设计及论文指导。

## 参考文献:

- [1] SPIEGL UJ, FISCHER K, SCHMIDT J, *et al.* The conservative treatment of traumatic thoracolumbar vertebral fractures: A systematic review [J]. *Dtsch Arztebl Int*, 2018, 115(42): 697.
- [2] SHARIF S, ZILELI M. Introduction to thoracolumbar spine fractures: WFNS spine committee recommendations [J]. *Neurospine*, 2021, 18(4): 651.
- [3] REINHOLD M, AUDIGÉ L, SCHNAKE KJ, *et al.* AO spine injury classification system: A revision proposal for the thoracic and lumbar spine [J]. *Eur Spine J*, 2013 (22): 2184-2201.
- [4] LONG Z, ZHOU J, XIONG L, *et al.* Finite element study on three osteotomy methods for treating thoracolumbar osteoporotic fracture vertebral collapse complicated with neurological dysfunction [J]. *Medicine*, 2024, 103(7): e36987.
- [5] PEEV N, ZILELI M, SHARIF S, *et al.* Indications for nonsurgical treatment of thoracolumbar spine fractures: WFNS spine committee recommendations [J]. *Neurospine*, 2021, 18(4): 713-724.
- [6] VIKAS P, EVALINA B, PAGE PS, *et al.* Radiographic

- outcomes following various treatment options of thoracolumbar burst fractures [J]. *Int J Spine Surg*, 2023 (17): 174-178.
- [ 7 ] 黄义专. 早期两次手法整复治疗胸腰椎压缩骨折的临床研究 [J]. *西部中医药*, 2020, 33(8): 126-128.
- [ 8 ] 韩松, 李红卫, 李宇卫, 等. O形臂导航辅助经皮椎弓根螺钉内固定术结合术前两步复位法治疗胸腰椎骨折[J]. *脊柱外科杂志*, 2023, 21(1): 1-6.
- [ 9 ] ALIZADEH M, KADIR MRA, FADHLI MM, et al. The use of X-shaped cross-link in posterior spinal constructs improves stability in thoracolumbar burst fracture: A finite element analysis [J]. *J Orthop Res*, 2013, 31(9): 1447-1454.
- [ 10 ] WANG H, MO Z, HAN J, et al. Extent and location of fixation affects the biomechanical stability of short- or long-segment pedicle screw technique with screwing of fractured vertebra for the treatment of thoracolumbar burst fractures: An observational study using finite element analysis [J]. *Medicine*, 2018, 97(26): e1124.
- [ 11 ] LI CH, GUAN GY, 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 R Soc Interface*, 2012(9): 831-841.
- [ 12 ] YANG ZZ, XU GM, YANG JY, et al. Finite element study of the biomechanical effects on the rotator cuff under load [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2023(11): 1193376.
- [ 13 ] DISCH AC, LUZZATI A, MELCHER I, et al. Three-dimensional stiffness in a thoracolumbar en-bloc spondylectomy model: A biomechanical *in vitro* study [J]. *Clin Biomech*, 2007, 22(9): 957-964.
- [ 14 ] SCHMOELZ W, SCHASER KD, KNOP C, et al. Extent of corpectomy determines primary stability following isolated anterior reconstruction in a thoracolumbar fracture model [J]. *Clin Biomech*, 2010, 25(1): 16-20.
- [ 15 ] ALIZADEH M, KADIR MRA, FADHLI MM, et al. The use of X-shaped cross-link in posterior spinal constructs improves stability in thoracolumbar burst fracture: A finite element analysis [J]. *J Orthop Res*, 2013, 31(9): 1447-1454.
- [ 16 ] ZHOU F, YANG S, LIU J, et al. Finite element analysis comparing short-segment instrumentation with conventional pedicle screws and the Schanz pedicle screw in lumbar 1 fractures [J]. *Neurosurg Rev*, 2020(43): 301-312.
- [ 17 ] MCCORMACK T, KARAIKOVIC E, GAINES RW. The load sharing classification of spine fractures [J]. *Spine*, 1994, 19(15): 1741-1744.
- [ 18 ] 程哲, 何由, 王卫国, 等. 胸腰段爆裂性骨折内固定治疗的生物力学特点[J]. *医用生物力学*, 2019, 34(5): 486-492.
- CHENG Z, HE Y, WANG WG, et al. Biomechanical characteristics of internal fixation methods for treating thoracolumbar burst fractures [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(5): 486-492.
- [ 19 ] ZHU J, YANG S, CAI K, et al. Bioactive poly ( methyl methacrylate ) bone cement for the treatment of osteoporotic vertebral compression fractures [ J ]. *Theranostics*, 2020, 10(14): 6544.
- [ 20 ] 秦大平, 张晓刚, 权祯, 等. 不同方法治疗骨质疏松性胸腰椎压缩骨折椎体力学稳定性变化差异的有限元分析[J]. *中华中医药杂志*, 2021, 36(8): 4886-4895.
- [ 21 ] 权祯. 中医过伸复位联合 PKP 治疗双节段骨质疏松性椎体压缩骨折的生物力学有限元分析[D]. 兰州: 甘肃中医药大学, 2021.
- [ 22 ] 蔡明, 戚颖, 刘肃, 等. 骨水泥不同分布对骨质疏松性椎体压缩性骨折的生物力学影响: 三维有限元分析[J]. *中国医学物理学杂志*, 2022, 39(6): 771-777.
- [ 23 ] 黄金峰, 盛哲剑, 李张, 等. 经皮椎弓根螺钉联合体位复位治疗 A 型胸腰椎骨折短期疗效分析 [J]. *实用骨科杂志*, 2023, 29(9): 819-823.
- [ 24 ] 张威, 陈申跳, 赵胜军. 体位过伸复位 PKP 与传统 PKP 治疗老年骨质疏松性椎体压缩骨折的临床疗效比较 [J]. *大连医科大学学报*, 2023, 45(3): 224-228.
- [ 25 ] 王新刚, 卫建民, 杨俊松, 等. 活血化痰汤联合微创椎弓根螺钉+体位复位治疗对胸腰椎压缩性骨折患者神经功能、下肢功能的影响 [J]. *湖北中医药大学学报*, 2023, 25(2): 86-89.
- [ 26 ] 吴爱娴, 郭振宇, 王向阳. 脊柱生物力学 2023 年度研究进展 [J]. *医用生物力学*, 2024, 39(2): 187-196.
- WU AM, GUO ZY, WANG XY. Research progress of spinal biomechanics in 2023 [J]. *J Med Biomech*, 2024, 39(2): 187-196.
- [ 27 ] XU C, BAI X, RUAN D, et al. Comparative finite element analysis of posterior short segment fixation constructs with or without intermediate screws in the fractured vertebrae for the treatment of type a thoracolumbar fracture [J/OL]. *Comput Method Biomech*, 2023, <https://doi.org/10.1080/10255842.2023.2243360>.
- [ 28 ] XU J, YIN Z, LI Y, et al. Clinic choice of long or short segment pedicle screw-rod fixation in the treatment of thoracolumbar burst fracture: From scan data to numerical study [J]. *Int J Numer Meth Bio*, 2023, 39(9): e3756.
- [ 29 ] ZILELI M, SHARIF S, FORNARI M. Incidence and epidemiology of thoracolumbar spine fractures: WFNS Spine Committee recommendations [J]. *Neurospine*, 2021, 18(4): 704.
- [ 30 ] 王亮, 王璨, 杨海松, 等. 不同复位策略结合经皮椎体成形术治疗老年单节段胸腰椎骨质疏松性椎体压缩性骨折[J]. *脊柱外科杂志*, 2023, 21(3): 151-154.