

有限元分析在椎弓根钉固定治疗胸腰椎骨折中的应用及进展

郑小波, 杨圣, 汪峰云

<https://doi.org/10.12307/2023.245>

投稿日期: 2022-02-14

采用日期: 2022-04-18

修回日期: 2022-05-06

在线日期: 2022-05-28

中图分类号:

R459.9; R318; R683.2

文章编号:

2095-4344(2023)13-02104-06

文献标识码: A

文章快速阅读: 椎弓根钉固定治疗胸腰椎骨折的有限元分析

研究来源

- 胸腰椎骨折
- 有限元分析
- 生物力学
- 骨折固定术
- 椎弓根钉

皮质骨

生物力学

胸腰椎骨折

中心问题

有限元分析

松质骨

骨折模型

研究去脉

- 胸腰椎骨折
- 器械治疗
- 骨科生物力学
- 有限元分析
- 椎体成形术

文题释义:

有限元分析: 是将复杂的结构看成由有限个单元仅在节点处连接的整体, 再根据几何材料的特性和应力情况, 集合不同类型的小单元, 再得出每个小单元的作用方程, 然后将整个自由连续体的单元组合成系统方程, 最终求解系统方程问题。

胸腰椎骨折: 是指由于外力造成胸腰椎骨质连续性的破坏, 是最常见的脊柱损伤。在青壮年患者中, 高能量损伤是其主要致伤因素, 如车祸、高处坠落伤等。老年患者由于本身存在骨质疏松, 致伤因素多为低暴力损伤, 如滑倒、跌倒等。胸腰椎骨折患者常合并神经功能损伤, 且由于致伤因素基本为高能损伤, 常合并其他脏器损伤, 这为治疗带来了极大的困难和挑战。

摘要

背景: 椎弓根钉固定方法在治疗胸腰椎骨折中因其简单便于操作而在临床广泛应用。寻找一种能术前模拟评估后路椎弓根钉固定治疗胸腰椎骨折安全性的方法一直是研究的热点。而有限元分析目前是评估长节段和短节段椎弓根钉固定模型并分析其安全性的常用方法。

目的: 对近些年椎弓根钉固定治疗胸腰椎骨折的有限元研究进展进行分析, 以期找到一种合适、安全、有效的胸腰椎骨折有限元伤椎模型。

方法: 在PubMed数据库中以“finite element analysis, pedicle screw, thoracolumbar fractures”为关键词进行相关文献检索, 在CNKI数据库中以“有限元分析, 椎弓根钉, 胸腰椎骨折”为关键词进行相关文献检索, 通过快速浏览文章题目及摘要进行筛选, 排除与主题关系不密切的文章, 最终筛选出57篇文章进行精读并撰写。

结果与结论: 截至目前为止, 通过三维有限元模型来模拟胸腰段骨折尚没有确定的标准。以往相关研究的有限元模型相对简化且与临床实际脱离, 对伤椎真实情况不能进行准确地展现, 可重复性差。基于脊柱载荷评分系统的中度和重度骨折的有限元模型更符合实际情况, 因此进行量化评估的椎体损伤程度、骨折块范围及移位程度、伤椎后凸畸形矫正度都能通过有限元方法很好地模拟出来。因此, 基于此种骨折模型进行胸腰椎骨折椎弓根固定的有限元研究也更加接近于临床实际。

关键词: 有限元分析; 椎弓根钉; 胸腰椎骨折; 椎弓根钉内固定; 综述

Application and progress of finite element analysis in the treatment of thoracolumbar fractures with pedicle screw fixation

Zheng Xiaobo, Yang Sheng, Wang Fengyun

Zhongshan Hospital Affiliated to Dalian University, Dalian 116000, Liaoning Province, China

Zheng Xiaobo, Master candidate, Zhongshan Hospital Affiliated to Dalian University, Dalian 116000, Liaoning Province, China

Corresponding author: Yang Sheng, MD, Chief physician, Zhongshan Hospital Affiliated to Dalian University, Dalian 116000, Liaoning Province, China

Abstract

BACKGROUND: Pedicle screw fixation is widely used in the treatment of thoracolumbar fractures because of its simplicity and easy operation. It has always been a research hotspot to find a method that can preoperatively simulate and evaluate the safety of posterior pedicle screw fixation in the treatment of thoracolumbar fractures. Finite element analysis is currently a common method for evaluating long-segment and short-segment pedicle screw fixation models and analyzing their safety.

OBJECTIVE: It is hoped that a suitable, safe and effective finite element model of thoracolumbar fractures can be found by analyzing the existing finite element studies of pedicle screw fixation for thoracolumbar fractures.

大连大学附属中山医院, 辽宁省大连市 116000

第一作者: 郑小波, 男, 1995年生, 重庆市人, 汉族, 大连大学在读硕士, 主要从事胸腰椎骨折有限元方面的研究。

通讯作者: 杨圣, 博士, 主任医师, 大连大学附属中山医院, 辽宁省大连市 116000

<https://orcid.org/0000-0002-5070-9718> (郑小波)

引用本文: 郑小波, 杨圣, 汪峰云. 有限元分析在椎弓根钉固定治疗胸腰椎骨折中的应用及进展 [J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(13):2104-2109.



METHODS: In the PubMed database, “finite element analysis, pedicle screw, thoracolumbar fractures” were used as the key words to carry out the relevant literature search. In the CNKI database, the relevant literature search was carried out with the key words of “finite element analysis, pedicle screw, thoracolumbar fractures”. The articles that were not closely related to the topic were excluded by quickly browsing the article titles and abstracts. Finally, 57 articles were screened out for intensive reading and writing.

RESULTS AND CONCLUSION: So far, there is no established standard for simulating thoracolumbar fractures through three-dimensional finite element models. The models of previous related studies are relatively simplified and out of touch with clinical practice, so they cannot accurately display the real situation of injured vertebrae, and the repeatability is poor. The finite element model of moderate and severe fractures based on the load sharing classification scoring system is more in line with the actual situation, because the quantitative assessment of the degree of vertebral body injury, the extent and displacement of the fracture fragments, and the correction of the kyphosis of the injured vertebra can all be determined by the finite element method. The method is well simulated. Therefore, the finite element study of pedicle fixation for thoracolumbar fractures based on this fracture model is also closer to clinical practice.

Key words: finite element analysis; pedicle screw; thoracolumbar fracture; pedicle screw fixation; review

How to cite this article: ZHENG XB, YANG S, WANG FY. Application and progress of finite element analysis in the treatment of thoracolumbar fractures with pedicle screw fixation. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2023;27(13):2104-2109.

0 引言 Introduction

胸腰段(T₁₁-L₂)脊柱骨折约占整个脊柱骨折的90%，其中爆裂骨折可高达30%-60%^[1-10]。胸腰椎骨折的诊断、治疗与分型和评分标准密切相关，目前普遍认可的分型有脊柱载荷评分系统(load sharing classification, LSC)、胸腰椎损伤分类及严重程度评分系统(thoracolumbar injury classification and severity score, TLICS)、AOspine评分系统(thoracolumbar AO Spine injury score, TL AOSIS)^[11-14]。骨折严重时常常需要手术治疗，目前常用的手术方式包括前路、后路和前后路联合等方法^[15-17]。由于胸腰椎骨折的多样性和复杂性，这些手术方式各有优缺点：前路及前后路联合稳定性好，缺点是手术操作难度高、暴露复杂、损伤较大，对脊柱的后凸畸形矫正也不是很直接，同时存在术中出血多、胸膜及神经损伤等并发症等问题^[18-19]；后路相对简单、创伤小、出血量少且能同时矫正和固定前中后三柱而在临床广泛应用^[4, 20-23]，但骨折严重(脊柱载荷评分>7)时短节段固定的钉棒出现断裂和松动情况并不少见^[5, 24-25]。因此，虽然目前前路椎弓根螺钉内固定是胸腰椎骨折最常用的手术方式，但针对胸腰椎骨折目前仍然没有最佳治疗方案^[8, 26-31]。

椎弓根钉固定方法因其简单便于操作而在临床广泛应用^[32]。寻找一种能术前模拟评估后路椎弓根钉固定治疗胸腰椎骨折安全性的方法一直是研究的热点。而有限元分析目前是评估长节段和短节段椎弓根钉固定模型并分析其安全性的常用方法。尽管有限元方法在评估内固定安全性方面有良好的应用前景，但目前胸腰椎骨折伤椎和内固定物的模拟尚无统一标准，该综述对近些年椎弓根钉固定治疗胸腰椎骨折的有限元研究进展进行分析，以期找到一种合适、安全、有效的胸腰椎骨折有限元伤椎模型。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源 第一作者于2021年10月检索PubMed、CNKI数据库，检索时间范围为2010-2021年。以“finite element analysis, pedicle screw, thoracolumbar fractures”为英文检索词，以“有限元分析, 椎弓根钉, 胸腰椎骨折”为中文检索词进行检索。检索文献类型：研究原著、综述和述评，检索文献量：中文文献91篇，英文文献660篇。PubMed数据库检索策略，见图1。

```
#1 finite element analysis [Title/Abstract]
#2 FEA [Title/Abstract]
#3 Finite Element Analysis [Title/Abstract]
#4 #1 OR #2 OR #3
#5 pedicle screw [Title/Abstract]
#6 thoracolumbar fractures [Title/Abstract]
#7 #5 OR #6
#8 #4 AND #7
```

图1 | PubMed数据库检索策略图

1.2 纳入和排除标准

1.2.1 纳入标准 与有限元分析、椎弓根钉、胸腰椎骨折相关的文献。

1.2.2 排除标准 与研究目的无关、内容重复或观点不新颖的文献。

1.3 质量评估及数据的提取 计算机初检得到751篇文献，通过快速浏览文献题目和摘要进行初步筛选，排除与纳入标准不符合的文献。精读全文，进一步判断与纳入标准一致的文献，最后选取57篇文献进行综述。资料检索流程见图2。

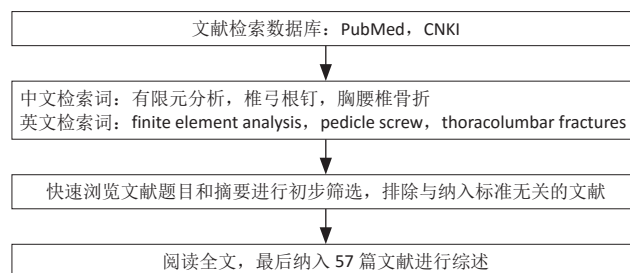


图2 | 资料检索流程图

2 结果 Results

由于胸腰椎骨折的有限元模拟是基于原有骨折分型标准上的模拟，所以作者首先简要介绍并比较常用的3种分型标准以及适于伤椎有限元模拟的骨折分型标准，主要从以下几个方面进行阐述。

2.1 胸腰椎骨折分型及评分系统 目前普遍认可的分型有脊柱载荷评分系统(LSC)、胸腰椎损伤分类系统(TLICS)、AOspine评分系统。

2.1.1 脊柱载荷评分系统^[11] 该系统从伤椎椎体损伤程度、CT轴位椎体碎骨移位程度、椎体后凸矫正角3个方面进行评分。每项根据损伤严重程度分为1-3分，总分最高为9分(脊柱载荷评分≥7分为重度骨折)，从而评估脊柱骨折的稳定性。但脊柱载荷评分系统缺乏神经和伤椎后柱情况的评估。

2.1.2 胸腰椎损伤分类及严重程度评分系统^[12] 该系统对骨折形态、后纵韧带复合体完整性、神经功能状态进行评分，分数越高表示骨折损伤越严重，此系统为骨折的临床治疗方案选择提供了指导意见，缺点是对椎体碎裂程度和椎管占位以及椎体后凸畸形未予以足够的重视。

2.1.3 AOspine评分系统(TL AOSIS)^[13-14] 该分型包括了骨折的形态、神经功能以及临床修正参数，并对原AO分型的骨折形态描述进行了简化。该系统整合了Magerl分类系统和胸腰椎损伤分类系统的优势，使分类更接近伤情，从而为后期指导临床实践、规范临床诊疗等提供参考。因其具体评分情况较为复杂，不在此过多赘述。以上3种分型优缺点见表1。

表 1 | 胸腰椎骨折各分型系统优缺点

骨折分型	作者	发表年份	优点	缺点
LSC	MCCORMACK 等 ^[11]	1994	对椎体的骨折损伤严重程度进行定量分析	缺乏神经和伤椎后柱情况的评估
TLICS	VACCARO 等 ^[12]	2005	为骨折的临床治疗方案的选择提供了指导意见	对椎体碎裂程度和椎管占位以及椎体后凸畸形未予以足够的重视
TL AOSIS	VACCARO 等 ^[13-14]	2013, 2016	更接近伤情, 从而为后期指导临床实践、规范临床诊疗等提供参考	发展时间短, 临床应用的可靠性有待进一步验证

表注: LSC 为脊柱载荷评分系统; TLICS 为胸腰椎损伤分类系统; TL AOSIS 为 AOSpine 评分系统

迄今为止, 脊柱载荷评分系统和 AOSpine 评分系统已获得普遍认同。脊柱载荷评分系统分型对椎体的骨折损伤严重程度进行定量分析, 在临床中预测后路短节段椎弓根钉内固定断钉风险以及手术方法的选择中有重要意义^[11]。AOSpine 评分系统分型虽然是在 AO 分型和胸腰椎损伤分类系统分型上的改进, 对椎体爆裂骨折程度进行了更为细化分类, 但其发展时间短, 临床应用的可靠性有待进一步验证。先前的一项研究表明, 这两种分类相互补充, 在临床上它们的组合可用于确定胸腰椎爆裂型骨折的最佳治疗方案^[33]。

2.2 胸腰椎骨折的治疗

2.2.1 保守治疗 适用于脊柱载荷系统评分 < 4 分、胸腰椎损伤分类系统评分 ≤ 3 分及 AOSpine 评分系统评分 ≤ 3 分的骨折。治疗方法主要有支具保护下功能锻炼、促骨生长及对症止痛。

2.2.2 手术治疗 适用于胸腰椎损伤分类系统评分 ≥ 5 分或 AOSpine 评分系统评分 > 5 分的骨折。手术方式有前路、后路和前后路联合等。脊柱载荷评分系统 4-6 分的骨折患者多采用后路短节段固定融合术; 脊柱载荷评分系统 > 7 分的患者常常需要后路长节段、前路内固定或前后路联合治疗, 见图 3。



图 3 | 手术治疗方式选择示意图

2018-2021 年以来 YANG 等^[21, 34-36]发表了胸腰椎骨折系列的临床和有限元分析研究后提出: 脊柱载荷系统评分 > 7 分的 A 型爆裂骨折使用临近上下椎 Schanz 椎弓根钉固定联合胸腰骶支具就能获得良好的疗效。

2.3 有限元方法的应用

2.3.1 有限元分析介绍 有限元分析是将复杂的结构看成由有限个单元仅在节点处连接的整体, 再根据几何材料的特性和应力情况, 集合不同类型的小单元, 得出每个小单元的作用方程, 然后将整个自由连续体的单元组合成系统方程, 最终求解系统方程问题^[37-41]。有限元分析已经成为骨科生物力学中不可缺少的重要研究方法, 特别是在脊柱内固定植入物中具有无可比拟的优势^[42-44]。有限元分析可以帮助外科医生更好地了解健康和病理条件下的生物力学^[45]。它还有一个额外的好处, 可以预测螺钉植入区域周围机械应力分布的变化, 有助于防止由于错误的植入位置而导致的相关并发症^[46]。

2.3.2 正常脊柱有限元模型的建立 正常胸腰段脊柱有限元模型的建立一般选取经临床检查及 X 射线片检查无脊柱相关疾病的健康青年男性志愿者。使用 CT 对全腰椎进行薄层扫描, 将采集的 DICOM 影像数据导入 MIMICS 中, 通过设定合适的灰度值, 再通过阈值分割、动态区域增长、Mask 编辑以及 3D calculate 等功能, 得到最初的骨性三维几何模型; 在 Geomagic studio 软件中对原始三

维模型表面孔状或钉状结构进行填充、修复与光滑, 经点阶段、多边形阶段和精确曲面阶段, 转化为 NURBS 曲面, 以 IGES 格式保存; 将保存的模型导入 Hypermesh 软件中进行网格划分 (包括骨组织网格), 并对不合格网格进行修复, 控制其质量; 对椎间盘、韧带、关节软骨等软组织进行建立并网格划分; 在椎间盘和相邻的椎体之间以及对应的关节软骨之间建立接触对, 椎间盘与椎体间设为绑定关系, 临近关节软骨间设为摩擦接触关系; 根据前人的研究, 建立合适的材料及属性, 并分配到每个对应的结构中, 见图 4。



图 4 | 正常脊柱有限元模型的建立流程图

2.3.3 胸腰椎骨折有限元模型 在使用有限元分析胸腰椎骨折内固定生物力学特征时, 建立准确的、与临床实际情况相符合的胸腰段椎体骨折模型是实验的重点之一, 如果骨折模型不准确, 则无法起到指导临床工作的作用。然而, 由于胸腰段骨折的分型较多以及软件模拟技术有限, 截至目前为止, 通过三维有限元模型来模拟胸腰段骨折尚没有确定的标准。

以往的相关研究大多通过机械性、抽象的去掉椎体的一部分来模拟胸腰椎骨折, 见表 2。

表 2 | 既往胸腰椎骨折模型模拟方法汇总表

作者	发表年份	胸腰椎骨折模型模拟方法
XU 等 ^[47]	2014	去除了椎体皮质骨的上半部分, 并在椎体骨折处移除了后半的后纵韧带、黄韧带、棘间韧带和棘上韧带
LIAO 等 ^[48]	2017	去除了 T ₁₂ 椎体内部的一半松质骨, 以减弱椎体的强度, 保留了皮质骨及后段结构
ZHAO 等 ^[49]	2018	在 T ₁₂ 椎体中部以平行于上下终板的水平切线去除椎体中间部分
SU 等 ^[50]	2018	在正常 L ₁ 椎体模型的前缘中部 1/3 处和前后径的上部 2/3 处进行 V 形截骨
WU 等 ^[51]	2019	直接将椎体的上、下终板之间进行部分切除来模拟 A3 爆裂型骨折
LIU 等 ^[52] 和 WANG 等 ^[53]	2019、2018	利用布尔运算将 T ₁₂ 下半部完全切除, 保留后端结构从而模拟 T ₁₂ 爆裂骨折
WANG 等 ^[1]	2019	在侧位上将椎体前缘下半部分大约一半的松质骨和皮质骨以前宽后窄进行楔形切除

XU 等^[47]为了模拟 T₁₂ 椎骨的轻度骨折, 去除了椎体皮质骨的上半部分, 同时将松质骨的上半部分弹性模量降为正常的 10%, 并在椎体骨折处移除了后半的后纵韧带、黄韧带、棘间韧带和棘上韧带。LIAO 等^[48]去除了 T₁₂ 椎体内部的一半松质骨, 以减弱椎体的强度, 保留了皮质骨及后段结构。这些模型相对简化且与临床实际脱离, 对伤椎真实情况不能进行准确地展现, 可重复性差。ZHAO 等^[49]在 T₁₂ 椎体中部以平行于上下终板的水平切线去除椎体中间部分, 形成一条 0.5 mm 宽的骨折线, 以此来模拟 T₁₂ 椎体压缩型骨折模型。SU 等^[50]通过在正常 L₁ 椎体模型的前缘中部 1/3 处和前后径的上部 2/3 处进行 V 形截骨创建了胸腰椎稳定性爆裂骨折有限元模型。这类模型相对简化, 与临床实际情况不一致。

WU 等^[51]则直接将椎体的上、下终板之间进行部分切除来模拟 A3 爆裂型骨折, 与之类似 LIU 等^[52]和 WANG 等^[53]利用布尔运算将 T₁₂ 下半部完全切除, 保留后端结构从而模拟 T₁₂ 爆裂骨折。WANG 等^[1]在侧位上将椎体前缘下半部分大约一半的松质骨和皮质骨以前宽后窄进行楔形切除从而获得不稳定的胸腰椎爆裂骨折有限元模型。这些模型直接简单机械去除椎体中下部, 而临床骨折常常为前上部压缩, 严重时中部爆裂、终板碎裂。手术复位后中下部压缩骨折仍然存在, 但局部有骨质缺损区, 此类模型与实际术后伤椎情况有一定差异, 并且难以分析伤椎

骨质缺损区活动/位移情况。

目前为止, LIU 等^[35]的骨折模型最为接近临床实际情况, 其随机选取了 1 例 L₁爆裂型骨折患者经后路短节段 Schanz 钉固定复位后的 CT 影像, 计算出伤椎椎体前柱和中柱的缺损体积, 然后在 L₁ 椎体有限元模型上等效去除前柱和中柱缺损区的骨质来建立伤椎有限元模型。

尽管胸腰段骨折有限元方面的研究有很多, 但目前鲜有基于脊柱载荷评分系统的中度和重度骨折的有限元模型报道。LIU 等^[34]和 ZHOU 等^[36]基于脊柱载荷评分系统分型给予中、重度骨折模型参数标准化设定: 中度骨折模型(脊柱载荷评分系统 5-6 分), 该模型椎体前缘高度压缩 45%, 伤椎完全复位后, 侧视图上骨质缺损区前缘高度占椎体高度 30%, 骨质缺损区上端前缘高度占 15%, 骨质缺损区下端前缘高度占 55%, 后凸矫正角为 6°, 同时伤椎终板粉碎性骨折; 重度骨折模型(脊柱载荷评分系统 ≥ 7 分), 该模型椎体前缘高度压缩 65%, 伤椎完全复位后, 侧视图上骨质缺损区前缘高度占椎体高度 50%, 骨质缺损区上端前缘高度占 15%, 骨质缺损区下端前缘高度占 35%, 后凸矫正角为 12°, 终板粉碎性骨折。作者认为, 脊柱载荷评分系统能够很好地指导建立更符合实际情况胸腰段骨折模型, 因此进行量化评估的椎体损伤程度、骨折块范围及移位程度、伤椎后凸畸形矫正度都能通过有限元方法很好地模拟出来。

2.3.4 胸腰椎骨折椎弓根固定有限元模型 胸腰段脊柱骨折后的手术方式要根据其评分情况来综合选择, 一般可分为前路、后路和前后路联合, 其中后路又包括后路短节段椎弓根钉固定、后路长节段椎弓根钉固定和后路经皮椎弓根钉固定, 既往研究不同内固定方式见表 3。

表 3 | 既往胸腰椎骨折椎弓根固定有限元模型汇总表

作者	发表年份	内固定方式	结论
LI 等 ^[54]	2017	传统短节段 4 钉、单节段螺钉、中间双侧螺钉、椎弓根螺钉和棒结构更硬和 von Mises 应力更小	额外双侧椎弓根螺钉可能导致骨折的椎弓根螺钉和棒结构更硬和 von Mises 应力更小
LIAO 等 ^[48]	2017	后路短节段钉、后路短节段钉 + 双侧伤椎螺钉、后路短节段螺钉 + 硫酸钙骨水泥、后路短节段螺钉 + 双侧伤椎螺钉 + 硫酸钙骨水泥	骨折的椎弓根螺钉和硫酸钙水泥的短节段固定可以提供更坚硬的结构以及椎弓根螺钉和杆更小的 von Mises 应力
LIU 等 ^[52] 和 WANG 等 ^[55]	2019、2017	单轴椎弓根螺钉固定、多轴椎弓根螺钉固定	多轴椎弓根螺钉模型的 von Mises 应力更小, 骨折水平固定可显著矫正后凸, 减少矫正丢失
WANG 等 ^[53]	2018	不同固定范围和位置的后路短节段或长节段椎弓根钉固定	建议使用双侧单轴 3 螺钉固定治疗胸腰椎骨折, 而当骨折更为严重时则应考虑使用双侧单轴 4 螺钉或双侧单轴 5 螺钉固定方式
LIU 等 ^[35]	2018	短节段 Schanz 螺钉固定	螺钉插入深度达到 60% 以上可获得足够的支撑强度, 且 60% 以上的不同深度之间无显著差异
CHEOLJEONG 等 ^[56]	2021	椎弓根钉和皮质短节段与长节段固定	使用皮质螺钉的 T ₁₀ -T ₁₁ -L ₁ -L ₂ 固定方法治疗骨折, 脊柱对螺钉和椎骨的负担最小
WONG 等 ^[57]	2021	1 节或 2 节上、下节段内固定 (U1L1、U1L2、U2L1 和 U2L2)	双节段上侧和单节段下侧椎弓根螺钉和棒固定是标准长节段固定的良好替代, 能更好地保留生理活动, 且不会增加植入物失效风险
ZHOU 等 ^[36]	2020	传统椎弓根钉固定与 Schanz 固定	不稳定骨折推荐后路短节段内固定 Schanz 椎弓根螺钉

SU 等^[50]通过有限元方法表明后路短节段内固定联合单侧椎弓根短钉内固定是治疗稳定型胸腰椎骨折最简单的方法。与之类似 LI 等^[54]通过有限元方法创建了 4 种 T₁₂ 不稳定性骨折后路短节段椎弓根螺钉内固定模型: 传统短节段 4 椎弓根螺钉固定、单节段椎弓根螺钉固定、中间双侧椎弓根螺钉固定、中间

单侧椎弓根螺钉固定, 然后通过施加不同的载荷模拟前屈、后伸、侧弯和旋转等活动, 结果表明在上述 4 种固定方式中传统短节段 4 椎弓根螺钉固定组、单节段椎弓根螺钉固定组上椎弓根螺钉最大应力大于下椎弓根螺钉, 传统短节段 4 椎弓根螺钉固定组、单节段椎弓根螺钉固定组上椎弓根螺钉 von Mises 应力最大, 而中间双侧椎弓根螺钉固定组、中间单侧椎弓根螺钉固定组下椎弓根螺钉 von Mises 应力最大, 双侧椎弓根螺钉在传统短节段 4 椎弓根螺钉固定骨折水平上的附加可使椎弓根螺钉和棒的结构更坚固, von Mises 应力更小。LIAO 等^[48]同样创建了 4 种不同的 T₁₂ 不稳定性骨折后内固定模型: 后路短节段椎弓根钉、后路短节段椎弓根钉 + 双侧伤椎椎弓根钉、后路短节段椎弓根钉 + 硫酸钙骨水泥、后路短节段椎弓根钉 + 双侧伤椎椎弓根钉 + 硫酸钙骨水泥, 然后通过施加不同的载荷模拟前屈、后伸、侧弯和旋转等活动, 结果表明在上述 4 种固定方式中, 后路短节段椎弓根钉 + 双侧伤椎椎弓根钉 + 硫酸钙骨水泥的承重能力最强, 椎弓根钉所受最大应力最小, 而后路短节段椎弓根钉的螺钉应力最大, 可能会导致固定失败。

LIU 等^[52]和 WANG 等^[55]研究发现与单轴椎弓根螺钉固定脊柱模型相比, 多轴椎弓根螺钉模型的 von Mises 应力更小, 相邻节段的椎间盘内压力更低, 骨折水平固定可显著矫正后凸, 减少矫正丢失, 中间多轴椎弓根螺钉固定组不太可能出现邻近节段退变。

ZHAO 等^[49]则模拟了骨质疏松性椎体压缩性骨折骨水泥椎体成形术后不同椎体高度的有限元模型, 推测术后椎体高度在一定范围内越高, 其所承受的最大负荷越小, 尽管该技术不能完全恢复椎体高度到解剖学标准。

WANG 等^[53]使用有限元法模拟了 T₁₂ 不稳定性骨折后不同固定范围和位置的后路短节段或长节段椎弓根钉固定模型, 提出当选择短节段椎弓根螺钉固定治疗胸腰椎骨折时, 建议使用从 T₁₁-L₁ 的双侧单轴 3 螺钉固定, 而当骨折更为严重时则应考虑使用从 T₁₀-L₁ 的双侧单轴 4 螺钉或从 T₁₁-L₂ 的双侧单轴 5 螺钉固定方式。LIU 等^[35]使用有限元模型模拟了 L₁ 爆裂型骨折后使用 Schanz 螺钉固定的不同螺钉插入深度对椎体强度和螺钉应力的影响, 结果表明, 插入深度达到 60% 以上可获得足够的支撑强度, 且 60% 以上的不同深度之间无显著差异。

CHEOLJEONG 等^[56]采用有限元方法创建了 T₁₁-L₁、T₁₀-T₁₁-L₁、T₁₁-L₁-L₂、T₁₀-T₁₁-L₁-L₂ 四种 T₁₂ 胸腰椎骨折固定融合模型, 考虑螺钉类型: 椎弓根钉和皮质钉, 计算螺钉、种植体周围骨和椎间盘所受的应力和活动范围, 结果表明在 T₁₀-T₁₁-L₁-L₂ 固定模型中腰椎活动范围最低, 而使用椎弓根钉的 T₁₁-L₁-L₂ 固定模型获得了最接近完整的情况; 在 T₁₀-T₁₁-L₁-L₂ 固定模型中, 螺钉和种植体周围骨应力最低。与之固定方式类似 WONG 等^[57]通过有限元方法创建了 4 种 L₁ 爆裂骨折后路椎弓根螺钉内固定模型: 包括 1 节或 2 节上、下节段内固定 (U1L1、U1L2、U2L1 和 U2L2), 结果显示 2 节段下位固定 (U1L2 和 U2L2) 导致了更大的整体运动减少, 范围为 66.0%-87.3%, 而 1 节段下位固定 (U1L1 和 U2L1) 则是 32.0%-47.3%; 与 U1L1 和 U1L2 相比, U2L1 和 U2L2 椎弓根螺钉的 von Mises 应力平均减少 25.3% 和 24.8%, U2L1 结构能更好地保留脊柱的生理运动, 同时在骨折水平提供足够的运动复位范围。

ZHOU 等^[36]使用有限元方法创建了 4 种 L₁ 骨折后内固定模型: 传统椎弓根螺钉中度骨折组 (MC), Schanz 螺钉中度骨折组 (MS), 传统椎弓根螺钉不稳定/严重骨折组 (UC), Schanz 螺钉不稳定/严重骨折 (US) 组, 结果表明相同骨折情况下, 传统椎弓根螺钉 (MC/UC) 最大 von Mises 应力大于 Schanz 椎弓根螺钉

(MS/US), Schanz 椎弓根螺钉 (MS/US)_{L1} 位移 / 微动大于常规椎弓根螺钉 (MC/UC); 在相同螺钉下, 不稳定骨折 (UC/US) 的最大 von Mises 应力和位移 / 微动均大于中度骨折 (MC/MS)。

3 有限元研究在胸腰椎骨折方面的前景与展望 Prospects of finite element research in thoracolumbar fractures

3.1 既往他人在该领域研究的贡献和存在的问题 文章主要回顾了有限元分析在椎弓根钉固定治疗胸腰椎骨折中的应用及进展。研究表明, 基于脊柱载荷评分系统的有限元骨折模型更符合临床实际, 因其进行量化评估的椎体损伤程度、骨折块范围及移位程度、伤椎后凸畸形矫正度都能通过有限元方法很好地模拟出来。虽然近年来关于有限元骨折模型报道很多, 从一定程度上带动了有限元在胸腰椎骨折治疗中的发展, 但大多数胸腰椎骨折模型相对简化且与临床实际脱离, 对伤椎真实情况不能进行准确地展现, 可重复性差。找到一种更符合临床实际的骨折模型是未来研究有限元在胸腰椎骨折治疗中应用的热点。

3.2 作者综述区别于他人他篇的特点 作者系统地回顾了胸腰椎骨折的分型及其治疗, 为读者更好地理解常用的 3 种分型标准以及适于伤椎有限元模拟的骨折分型标准提供了理论依据。之后, 作者论述了骨折有限元模型的研究进展, 分别介绍了通过机械去除椎体上部、中部、下部以及通过 CT 影像计算出伤椎椎体前柱和中柱的缺损体积, 然后在 L₁ 椎体有限元模型上等效去除前柱和中柱缺损区的骨质来建立伤椎有限元模型的方法, 随后作者详细论述了胸腰椎骨折椎弓根钉固定的有限元模型, 分别从短节段与长节段、单轴与双轴、不同螺钉插入深度、常规椎弓根钉与 Schanz 钉等方面比较了不同固定方式下螺钉的应力及伤椎的位移情况。

作者还探讨了目前存在的问题及未来的发展方向。虽然目前通过三维有限元模型来模拟胸腰椎骨折尚没有确定的标准, 但是脊柱载荷评分系统能够很好地指导建立更符合实际情况胸腰椎骨折模型, 因其进行量化评估的椎体损伤程度、骨折块范围及移位程度、伤椎后凸畸形矫正度都能通过有限元方法很好地模拟出来。有限元分析在骨科学中的发展必定朝着精细化、个性化、精准化和智能化的方向发展。而在骨科方面的有限元研究还需多与临床实践相结合, 为临床中疾病的诊断及选择相应的术式提供参考, 相信未来关于胸腰椎骨折的有限元研究也会更加符合实际, 从而更好地指导临床。

3.3 该综述的局限性 由于此综述重在论述有限元分析在椎弓根钉固定治疗胸腰椎骨折中的应用及进展, 因此文中对于胸腰椎骨折的分型及治疗仅进行了系统总结。

3.4 综述的重要意义 文章简明系统地介绍了有限元分析在椎弓根钉固定治疗胸腰椎骨折中的应用及进展情况, 同时探讨了现阶段存在的问题和未来的发展方向, 推进了有限元分析在胸腰椎骨折中更好地应用。

作者贡献: 杨圣负责综述构思设计, 郑小波负责文章写作校对, 郑小波和汪峰云参与文献收集、分析总结, 杨圣负责项目指导。

利益冲突: 文章的全部作者声明, 在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章, 根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享 4.0”条款, 在合理引用的情况下, 允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展, 同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献, 并为之建立索引, 用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

版权转让: 文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。
出版规范: 该文章撰写遵守国际医学期刊编辑委员会《系统综述和荟萃分析报告规范》(PRISMA 指南); 文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行 3 次文字和图表查重; 文章经小同行外审专家双盲审稿, 同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

4 参考文献 References

- [1] WANG W, PEI B, PEI Y, et al. Biomechanical effects of posterior pedicle fixation techniques on the adjacent segment for the treatment of thoracolumbar burst fractures: a biomechanical analysis. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2019;22(13):1083-1092.
- [2] AONO H, TOBIMATSU H, ARIGA K, et al. Surgical outcomes of temporary short-segment instrumentation without augmentation for thoracolumbar burst fractures. *Injury.* 2016;47(6):1337-1344.
- [3] MI J, SUN XJ, ZHANG K, et al. Prediction of MRI findings including disc injury and posterior ligamentous complex injury in neurologically intact thoracolumbar burst fractures by the parameters of vertebral body damage on CT scan. *Injury.* 2018;49(2):272-278.
- [4] AONO H, ISHII K, TOBIMATSU H, et al. Temporary short-segment pedicle screw fixation for thoracolumbar burst fractures: comparative study with or without vertebroplasty. *Spine J.* 2017;17(8):1113-1119.
- [5] HAIYUN Y, RUI G, SHUCAI D, et al. Three-column reconstruction through single posterior approach for the treatment of unstable thoracolumbar fracture. *Spine (Phila Pa 1976).* 2010;35(8):E295-302.
- [6] LIN B, CHEN ZW, GUO ZM, et al. Anterior Approach Versus Posterior Approach With Subtotal Corpectomy, Decompression, and Reconstruction of Spine in the Treatment of Thoracolumbar Burst Fractures: A Prospective Randomized Controlled Study. *J Spinal Disord Fractures.* 2012;25(6):309-317.
- [7] DE IURE F, LOFRESE G, DE BONIS P, et al. Vertebral body spread in thoracolumbar burst fractures can predict posterior construct failure. *Spine J.* 2018;18(6):1005-1013.
- [8] DING S, LU X, LIU Z, et al. Reduce the fractured central endplate in thoracolumbar fractures using percutaneous pedicle screws and instrumental maneuvers: Technical strategy and radiological outcomes. *Injury.* 2021;52(4):1060-1064.
- [9] LEE KY, KIM MW, SEOK SY, et al. The Relationship between Superior Disc-Endplate Complex Injury and Correction Loss in Young Adult Patients with Thoracolumbar Stable Burst Fracture. *Clin Orthop Surg.* 2017;9(4):465-471.
- [10] LIAO JC, CHEN WJ. Short-Segment Instrumentation with Fractured Vertebrae Augmentation by Screws and Bone Substitute for Thoracolumbar Unstable Burst Fractures. *Biomed Res Int.* 2019;2019:4780426.
- [11] MCCORMACK T, KARAIKOVIC E, GAINES RW. The load sharing classification of spine fractures. *Spine (Phila Pa 1976).* 1994;19(15):1741-1744.
- [12] VACCARO AR, ZEILLER SC, HULBERT RJ, et al. The thoracolumbar injury severity score: a proposed treatment algorithm. *J Spinal Disord Tech.* 2005;18(3):209-215.
- [13] VACCARO AR, SCHROEDER GD, KEPLER CK, et al. The surgical algorithm for the AOSpine thoracolumbar spine injury classification system. *Eur Spine J.* 2016;25(4):1087-1094.
- [14] VACCARO AR, ONER C, KEPLER CK, et al. AOSpine thoracolumbar spine injury classification system: fracture description, neurological status, and key modifiers. *Spine (Phila Pa 1976).* 2013;38(23):2028-2037.
- [15] RICHARDSON B, PAULZAK A, RUSYNIAK WG, et al. Anterior Lumbar Corpectomy with Expandable Titanium Cage Reconstruction: A Case Series of 42 Patients. *World Neurosurg.* 2017;108:317-324.
- [16] LI C, PAN J, GU Y, et al. Minimally invasive pedicle screw fixation combined with percutaneous vertebroplasty for the treatment of thoracolumbar burst fracture. *Int J Surg.* 2016;36(Pt A):255-260.
- [17] SAGLAM N, DOGAN S, OZCAN C, et al. Comparison of Four Different Posterior Screw Fixation Techniques for the Treatment of Thoracolumbar Junction Fractures. *World Neurosurg.* 2019;123:e773-e780.
- [18] KWON WK, PARK WB, LEE GY, et al. Decompression with Lateral Pediclectomy and Circumferential Reconstruction for Unstable Thoracolumbar Burst Fractures: Surgical Techniques and Results in 18 Patients. *World Neurosurg.* 2018; 20:e53-e62.

- [19] LINDTNER RA, MUELLER M, SCHMID R, et al. Monosegmental anterior column reconstruction using an expandable vertebral body replacement device in combined posterior-anterior stabilization of thoracolumbar burst fractures. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2018;138(7):939-951.
- [20] LIAO JC, FAN KF. Posterior short-segment fixation in thoracolumbar unstable burst fractures- Transpedicular grafting or six-screw construct. *Clin Neurol Neurosurg.* 2017;153:56-63.
- [21] YANG S, SHANG DP, LU JM, et al. Modified Posterior Short-Segment Pedicle Screw Instrumentation for Lumbar Burst Fractures with Incomplete Neurological Deficit. *World Neurosurg.* 2018;119:e977-e985.
- [22] SMITS AJ, NOOR A, BAKKER FC, et al. Thoracoscopic anterior stabilization for thoracolumbar fractures in patients without spinal cord injury: quality of life and long-term results. *Eur Spine J.* 2018;27(7):1593-1603.
- [23] HAO D, WANG W, DUAN K, et al. Two-year follow-up evaluation of surgical treatment for thoracolumbar fracture-dislocation. *Spine (Phila Pa 1976).* 2014;39(21):E1284-1290.
- [24] LIANG C, LIU B, ZHANG W, et al. Clinical Effects of Posterior Limited Long-Segment Pedicle Instrumentation for the Treatment of Thoracolumbar Fractures. *J Invest Surg.* 2020;33(1):25-30.
- [25] KAPOEN C, LIU Y, BLOEMERS FW, et al. Pedicle screw fixation of thoracolumbar fractures: conventional short segment versus short segment with intermediate screws at the fracture level-a systematic review and meta-analysis. *Eur Spine J.* 2020;29(10):2491-2504.
- [26] XIONG C, HUANG B, WEI T, et al. Effect of the short-segment internal fixation with intermediate inclined-angle polyaxial screw at the fractured vertebra on the treatment of Denis type B thoracolumbar fracture. *J Orthop Surg Res.* 2020;15(1):182.
- [27] BASARAN R, EFENDIOGLU M, KAKSI M, et al. Finite Element Analysis of Short- Versus Long-Segment Posterior Fixation for Thoracolumbar Burst Fracture. *World Neurosurg.* 2019;128:e1109-e1117.
- [28] DOBRAN M, NASI D, BRUNOZZI D, et al. Treatment of unstable thoracolumbar junction fractures: short-segment pedicle fixation with inclusion of the fracture level versus long-segment instrumentation. *Acta Neurochir (Wien).* 2016;158(10):1883-1889.
- [29] KOCANLI O, KOMUR B, DUYMUŞ TM, et al. Ten-year follow-up results of posterior instrumentation without fusion for traumatic thoracic and lumbar spine fractures. *J Orthop.* 2016;13(4):301-305.
- [30] D'ORO A, SPOONAMORE MJ, COHEN JR, et al. Effects of fusion and conservative treatment on disc degeneration and rates of subsequent surgery after thoracolumbar fracture. *J Neurosurg Spine.* 2016;24(3):476-482.
- [31] ANKOMAH F, IKPEZE T, MESFIN A. The Top 50 Most-Cited Articles on Thoracolumbar Fractures. *World Neurosurg.* 2018;118:e699-e706.
- [32] SENSALE M, VENDEUVRE T, SCHILLING C, et al. Patient-Specific Finite Element Models of Posterior Pedicle Screw Fixation: Effect of Screw's Size and Geometry. *Front Bioeng Biotechnol.* 2021;9:643154.
- [33] MACHINO M, YUKAWA Y, ITO K, et al. The complement of the load-sharing classification for the thoracolumbar injury classification system in managing thoracolumbar burst fractures. *J Orthop Sci.* 2013;18(1):81-86.
- [34] LIU J, YANG S, ZHOU F, et al. The feasibility of short-segment Schanz screw implanted in an oblique downward direction for the treatment of lumbar 1 burst fracture: a finite element analysis. *J Orthop Surg Res.* 2020;15(1):537.
- [35] LIU J, YANG S, LU J, et al. Biomechanical effects of USS fixation with different screw insertion depths on the vertebrae stiffness and screw stress for the treatment of the L1 fracture. *J Back Musculoskelet Rehabil.* 2018;31(2):285-297.
- [36] 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 fracture. *Neurosurg Rev.* 2020;43(12):301-312.
- [37] WELCH-PHILLIPS A, GIBBONS D, AHERN DP, et al. What Is Finite Element Analysis? *Clin Spine Surg.* 2020;33(8):323-324.
- [38] YE Y, YOU W, ZHU W, et al. The Applications of Finite Element Analysis in Proximal Humeral Fractures. *Comput Math Methods Med.* 2017;2017:4879836.
- [39] GOEL VK, NYMAN E. Computational Modeling and Finite Element Analysis. *Spine (Phila Pa 1976).* 2016;41 Suppl 7:S6-7.
- [40] QUAH C, YEOMAN MS, CIZINAUSKAS A, et al. Finite element investigation of the effect of a bifid arch on loading of the vertebral isthmus. *Spine J.* 2014;14(4):675-682.
- [41] WEBB JD, BLEMKER SS, DELP SL. 3D finite element models of shoulder muscles for computing lines of actions and moment arms. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2014;17(8):829-837.
- [42] BENCA E, AMINI M, PAHR DH. Effect of CT imaging on the accuracy of the finite element modelling in bone. *Eur Radiol Exp.* 2020;4(1):51.
- [43] KULDUK A, ALTUN NS, SENKOYLU A. Biomechanical comparison of effects of the Dynesys and Coflex dynamic stabilization systems on range of motion and loading characteristics in the lumbar spine: a finite element study. *Int J Med Robot.* 2015;11(4):400-405.
- [44] HAN Y, WANG X, WU J, et al. Biomechanical finite element analysis of vertebral column resection and posterior unilateral vertebral resection and reconstruction osteotomy. *J Orthop Surg Res.* 2021;16(1):88.
- [45] EGGERMONT F, VAN DER WAL G, WESTHOFF P, et al. Patient-specific finite element computer models improve fracture risk assessments in cancer patients with femoral bone metastases compared to clinical guidelines. *Bone.* 2020;130:115101.
- [46] WIDMER J, FASSER MR, CROCI E, et al. Individualized prediction of pedicle screw fixation strength with a finite element model. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2020;23(4):155-167.
- [47] XU G, FU X, DU C, et al. Biomechanical comparison of mono-segment transpedicular fixation with short-segment fixation for treatment of thoracolumbar fractures: a finite element analysis. *Proc Inst Mech Eng H.* 2014;228(10):1005-1013.
- [48] LIAO JC, CHEN WP, WANG H. Treatment of thoracolumbar burst fractures by short-segment pedicle screw fixation using a combination of two additional pedicle screws and vertebroplasty at the level of the fracture: a finite element analysis. *BMC Musculoskelet Disord.* 2017;18(1):262.
- [49] ZHAO WT, QIN DP, ZHANG XG, et al. Biomechanical effects of different vertebral heights after augmentation of osteoporotic vertebral compression fracture: a three-dimensional finite element analysis. *J Orthop Surg Res.* 2018;13(1):32.
- [50] SU Y, WANG X, REN D, et al. A finite element study on posterior short segment fixation combined with unilateral fixation using pedicle screws for stable thoracolumbar fracture. *Medicine (Baltimore).* 2018;97(34):e12046.
- [51] WU Y, CHEN CH, TSUANG FY, et al. The stability of long-segment and short-segment fixation for treating severe burst fractures at the thoracolumbar junction in osteoporotic bone: A finite element analysis. *PLoS One.* 2019;14(2):e0211676.
- [52] LIU H, WANG H, LIU J, et al. Biomechanical comparison of posterior intermediate screw fixation techniques with hybrid monoaxial and polyaxial pedicle screws in the treatment of thoracolumbar burst fracture: a finite element study. *J Orthop Surg Res.* 2019;14(1):122.
- [53] 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. *Medicine (Baltimore).* 2018;97(26):e11244.
- [54] LI C, ZHOU Y, WANG H, et al. Treatment of unstable thoracolumbar fractures through short segment pedicle screw fixation techniques using pedicle fixation at the level of the fracture: a finite element analysis. *PLoS One.* 2014;9(6):e99156.
- [55] WANG H, ZHAO Y, MO Z, et al. Comparison of short-segment monoaxial and polyaxial pedicle screw fixation combined with intermediate screws in traumatic thoracolumbar fractures: a finite element study and clinical radiographic review. *Clinics (Sao Paulo).* 2017;72(10):609-617.
- [56] CHEOLJEONG K, MIN SS, HOON CS, et al. Numerical Evaluation of Spinal Stability after Posterior Spinal Fusion with Various Fixation Segments and Screw Types in Patients with Osteoporotic Thoracolumbar Burst Fracture Using Finite Element Analysis. *Applied Sciences.* 2021;11(7):3243.
- [57] WONG CE, HU HT, TSAI CH, et al. Comparison of Posterior Fixation Strategies for Thoracolumbar Burst Fracture: A Finite Element Study. *J Biomech Eng.* 2021;143(7):071007.

(责任编辑: MZH, ZN, ZH)