

有限元分析法在胸腰椎骨折领域的研究进展

郭 圳, 暴丽慧*

内蒙古医科大学研究生院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2024年7月17日; 录用日期: 2024年8月11日; 发布日期: 2024年8月20日

摘 要

目的: 通过对胸腰段骨折的有限元分析, 寻求一种适用于胸腰段骨折的安全、可靠的有限元模型。方法: 回顾、总结、归纳国内外有关胸腰椎骨折有限元分析的相关文献。结果: 由于有限元法能全面地反应脊柱及邻近组织的受力情况, 故在研究胸腰段骨折的发病机理、治疗和预后等方面具有较大的优势。能较好地替代传统的生物力学实验, 使实验条件的可控更加容易。结论: 采用有限元法指导胸腰段脊柱骨折研究是可行的。

关键词

有限元分析, 胸腰椎骨折, 生物力学, 综述

Research Progress of Finite Element Analysis in the Field of Thoracolumbar Fractures

Zhen Guo, Lihui Bao*

Graduate School of Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Jul. 17th, 2024; accepted: Aug. 11th, 2024; published: Aug. 20th, 2024

Abstract

Objective: Through the thoracic lumbar fracture finite element analysis, to find a safe and reliable finite element model for thoracic lumbar fracture. **Methods:** To review, summarize, and conclude the domestic and foreign related-literature about thoracolumbar fracture finite element analysis. **Results:** The finite element method can fully reflect the stress of the spine and adjacent tissues, so

*通讯作者。

it has great advantages in the study of the pathogenesis, treatment and prognosis of thoracolumbar fractures. It can better replace the traditional biomechanical experiment and make the experimental conditions easier to control. Conclusion: It is feasible to use the finite element method to guide the study of thoracolumbar spinal fractures.

Keywords

Finite Element Analysis, Thoracolumbar Fractures, Biomechanics, Review

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

有限元法(finite element method, FEM)作为一种高效的计算手段[1],最早于 50 年代用于飞行器结构的静、动态力学分析。其理论思路是将复杂对象分解成若干个单元,各单元之间以特定自由度的节点相连,并通过计算机对这些单元、节点的材料属性、刚度等参数进行仿真,从而实现对人体脊椎骨的力学分析[2]。脊柱的有限元模型首先是在航空医疗和结构设计领域中出现的,自上世纪 70 年代 Brekelmans 提出有限元分析(finite element analysis, FEA)至骨科临床, Belytschko 等[3]率先将其用于脊柱生物力学研究,并在模型试验中获得了一系列科学发现[4]。

胸腰段骨折(T10-L2)是最常见的脊柱骨折,其发生率高达 75% [5],胸腰椎骨折会引起脊柱的不稳定、后突畸形、神经损伤等,严重者的还会导致瘫痪[6]。胸腰椎是人体较为脆弱的部位,传统的试验手段难以对其进行研究,给临床和科研带来极大的困难,因此,FEA 在研究脊柱脊椎骨的生物力学方面发挥着至关重要、无可替代的作用,与传统的试验方法相比,它更具可重复性、更客观真实性等优势[7]。因此,本文回顾了近年来国内外关于胸腰段骨折的 FEA 的研究进展,并对其今后在脊柱外科领域的研究方向进行了探讨。

2. 资料和方法

2.1. 资料来源

本论文第一作者于 2023 年 11 月在 PubMed 和 CNKI 数据库进行了检索,时间范围:2018.11~2023.11。英文检索词是“finite element analysis, thoracolumbar fractures”,中文检索词是“有限元分析,胸腰椎骨折”。检索文献类型:研究原著、综述和述评,检索文献量:CNKI 数据库中文文献 79 篇,PubMed 英文文献 50 篇。

2.2. 纳入和排除标准

- 1) 纳入标准:有关有限元分析、胸腰椎骨折的文献。
- 2) 排除标准:与研究目标不符,内容重复或无新意的文献。

2.3. 质量评估及数据的选取

经电脑初检后,共获得 $79 + 50 = 129$ 篇,采用快速扫查论文标题、摘要等方法,将不符合入选条件者剔除。在此基础上,对符合入选条件的文献进行详细分析,最终选择 48 篇相关的文献进行回顾。

3. 结果

3.1. 胸腰椎骨折的分型及治疗

目前胸腰椎骨折的治疗方法并不统一, 主要是依据骨折的分型来选择治疗方式。近百年来, 胸腰段骨折分型逐渐完善, 现已有 5 种分型方式被临床普遍使用[8]。1983 年 Denis 将 Holdsworth “二柱理论”发展到“三柱理论”[9], 首次将神经损伤纳入了骨折分级中, 但并未涉及到椎间盘病变。AO 分型在 1994 年被 Magerl 等人提出[10], 在胸腰段骨折的分型中, 以椎间盘、韧带损伤为主要参考因素, 同时也突出了软组织损害对病人长期预后的影响。但因其分类复杂, 限制了其在临床上的应用。19 世纪晚期, McCormack 在总结了短节段后路椎弓根内固定不足的基础上, 提出载荷评分系统(Load-sharing classification system, LCS) [11]用以评价后路短节段内固定失效的危险性。这一分型体系可以作为脊柱手术中的一个重要参考。由 Vaccaro 于 2005 年建立的胸腰椎损伤分型及评分系统(thoracolumbar injury classification and severity score, TLICS)已成为一种较为可靠和实用的评分方法[12]。TLICS 采用描述性分类来评价每个病人的神经系统状况, 包括后方韧带复合体的完整性以及损伤的形貌, 但忽略了对邻近椎间盘的影响。最新的胸腰椎损伤的胸腰椎 AO 脊柱损伤评(thoracolumbar AOSpine injury score, TLAOSIS) [13], 根据骨折形态、神经功能状态及临床校正后的指标, 对不同类型的骨折进行了数字化等级评定, 但目前对椎间盘和椎间融合手术时机仍不明确。对胸腰段骨折进行分型, 可明确其损伤严重程度, 并根据不同分型, 制定个性化诊疗方案, 便于统计疗效, 评价预后, 便于沟通。

目前对于胸腰段骨折的治疗方法存在较多分歧, 目前的治疗方法有两种: 保守治疗、手术治疗。在住院时 TLICS 评分小于 4 分的患者通常被视为行保守治疗[14]。一些学者[15]提出, 在住院时 TLICS 为 4 分且 LSC 评分为 7 分或更高的病人应该进行外科手术。非手术疗法具有避免手术危险和减少有关费用的优点[16]。

3.2. 胸腰椎骨折三维有限元模型的建立及意义

由于胸腰段处于脊柱的特定部位, 其运动范围大, 受到的应力也相对集中, 因此在老年人及骨质疏松患者中, 当其受到外力作用时, 极易发生椎体压缩性骨折[17]。对于不稳定骨折或者骨折块压迫引起脊髓损伤的病人, 通常采用手术方式, 往往都是通过内固定或者外固定来恢复其即刻稳定, 这是术后恢复的基础, 但对于不同的固定方式, 一般都是通过力学方法进行验证的。应用三维有限元法对不同类型植入物的受力情况进行建模, 能较好的替代传统的生物力学实验, 使实验条件的可控更加容易。

采用最新的磁共振成像技术, 对胸腰段脊柱骨折病人的伤椎上下段进行了连续扫描, 获取了 Dicom 格式的影像资料。在此基础上, 引入反向工程软件 Mimics 或 Simpleware, 构建包含椎间盘、后纵韧带在内的胸腰段脊柱的完整 3D 几何模型, 并通过曲面化等方法对其进行优化, 最后将其引入 FEA 软件进行网格划分, 形成完整的三维有限元模型。在有限元模型构建过程中, 将整个物体划分为多个小的、有限的、互连的子域或元素, 使其进一步细化, 从而获得更精确的试验结果[18]。

3.3. FEA 在胸腰段骨折机制上的应用

胸腰段骨折是脊柱创伤中最常见的一种, 其发生的解剖原因在于此部位的运动幅度大而陡峭, 且这一部位的小关节面朝向变化的交界处。有一半以上的脊柱骨折位于此处[5] [19] [20], 要治疗骨折, 首先要明确其原因。

骨质疏松症是导致脊柱骨折的主要病因, 却又是最不易察觉的一种。秦大平[21], 通过构建骨质疏松性 T11~L2 椎体的 3D 有限元模型, 发现骨质疏松(osteoporosis, OP)患者胸腰椎椎体受力不均匀, 受力集中, 导致椎体、椎间盘、髓核、纤维环等周围附属结构出现异常应力变化, 导致骨弹性模量的异常变化,

对周围辅助结构的约束力降低, 进而导致筋骨系统的不平衡, 远期稳定性降低, 从而加重了椎体骨折退变的进程与危险。因此, 对老年患者进行积极的抗骨质疏松治疗, 可以有效地防止其发生。

而暴力是造成脊柱骨折的最直接原因, 因此, 对其机理进行深入研究是十分必要的。晏礼等[22]采用 FEA 研究: 脊柱受力主要集中在终板中央, 证实了上终板骨折在临床上更常见; 椎体前缘、椎弓根及周边的骨皮质也为应力最大的部位。进一步证实了压缩性骨折及爆裂性骨折在临床上较常见。

3.4. FEA 在胸腰椎骨折治疗上的应用

胸腰段骨折(T10-L2)是最常见的脊柱骨折, 虽然目前有多种分型指导其治疗[8]-[16], 但仍然缺乏个体化意思, 有限元分析能结合病人实际情况, 指导患者进行最优的个体化治疗。

3.4.1. 保守治疗

陈华等[23]在前期研究基础上, 采用 FEA 与数字成像相结合的方法, 对传统中医伤科治疗手段(手法整复辅助外固定架)进行分析, 设计, 研制出一种可用于单纯胸腰椎骨折的、可有效固定的新型胸腰段外固定架, 有助于病人早日康复, 降低并发症发生率。

刘迎军、舒先涛、李孝林等[24] [25]构建了具有逼真几何外形和综合生物力学性能的胸腰段压缩骨折的三维有限元模型, 证实了过伸复位治疗法具有较好的临床效果。秦大平等[26]有限元分析研究表明, 中医过伸复位手法治疗骨质疏松性椎体压缩骨折(osteoporotic vertebral compression fracture, OVCF)患者的疗效明确并与椎体成形术相比而言, 其对邻近椎体的应力变化、动静力性平衡系统的影响优于后者。张宏伟等[27] FEA 辅助手法治疗单节段胸腰椎压缩骨折合并骨质疏松症效果肯定。

采用 FEA 对传统手法的机理进行研究, 不仅实验结果可靠, 结果直观, 节省资源, 而且可以准确地进行手法仿真, 在骨折治疗中具有广阔的应用前景。

3.4.2. 内固定手术治疗

目前临床上对胸腰椎骨折的治疗仍以重建其生物力学稳定为基础, 为术后神经功能恢复创造条件, 改善患者生活质量。对胸腰椎骨折的治疗多以手术为主, 其优势在于: 可减轻因长期卧床而引起的各种并发症、防止迟发性神经系统损伤、纠正脊柱畸形等。

前路、后路和前后联合是胸腰椎骨折应用较多的手术入路方式, 其中以后路椎弓根螺钉内固定术治疗胸腰段骨折最为常用[28]。Zhou 等[29]提出了在不稳定骨折的情况下, 应用 Schanz 椎弓根螺钉作后路短节段固定的方法。潘俊等[30]通过建立正常 T12-L2 节段的三维有限元模型, 研究表明, 在适当的术后卧床康复理疗下, 采用后路椎弓根内固定系统治疗重度胸腰椎爆裂骨折可获得较好的生物力学效果, 为其在临床上的推广应用奠定基础。此外, 王志彬等[31]通过 FEA 研究证实, 后路单侧椎弓根钉植入联合前路植骨固定可明显改善胸腰椎骨折椎体的刚性与稳定性, 与单纯后路椎弓根钉固定术相比, 具有更好的治疗效果。但是, 由于其出血量大、手术时间长、并发症多、住院时间长、费用高和对术者的技术要求更高, 制约了该术式在临床上的广泛采用。有学者提出向 Kambin 三角椎体内植骨治疗胸腰椎爆裂性骨折在强化骨折椎体, 减轻椎体高度丢失具有更好的生物力学优势[32]。

内固定节段选择。胸腰椎骨折的手术方式以后路短节段固定为主, 但邓英虎等[33]后路短节段椎弓根钉固定(PF)固定治疗胸腰段椎体压缩骨折, 由于其固定节段数目过少, 容易造成内固定失败和骨量减少。有文献报道长节段的固定, 不但可以重建椎体的顺序、减少椎体高度损失、还可以降低伤椎椎体的应力, 从而避免了局部后凸畸形, 并通过有限元分析方法, 认为, 伤椎固定和长节段固定能最大限度地降低内固定的负荷, 降低螺钉的松动和断钉的发生率, 还能减轻伤椎的变形, 促进骨折的愈合和矫正, 但其限制了腰椎的活动度[34]。为了避免此缺点, Wang、Xu 等[35] [36]建议选择短节段椎弓根螺钉加骨折椎体

螺钉内固定治疗, 可以优化内固定的载荷, 降低术后损伤椎体再次塌陷的风险, 替代长节段单轴向椎弓根固定结构的治疗方法。

微创手术。经皮椎体强化术是胸腰椎压缩骨折的主要治疗方法, 徐桂军等[37]构建了人脊柱胸腰段 T10-L2 五个节段的三维有限元模型, 研究表明, 椎体成形术可以显著提高严重胸腰椎爆裂骨折患者的力学强度, 减少了内固定材料和脊柱的应力, 从而避免了远期并发症。Yan、Shang 等[38]在患者身上验证了经皮椎体成形术和经皮椎体后凸成形术既满足了胸腰椎正常功能运动学的要求, 又恢复了胸腰椎的稳定性。具有良好的生物力学性能和显著的应用效果。注意骨水泥注入量不宜过多, T12 椎体压缩性骨折在经皮椎体后凸成形术治疗过程中, 加大骨水泥注射量不仅不能减轻疼痛, 还可能引起应力集中, 加快退变的风险[39]。随着我国人口老龄化问题加剧, 骨质疏松症已经成为迫切需要解决的问题。OVCF 患者常规使用保守治疗。但是, 若保守治疗失败且三周后疼痛缓解不明显, 则应考虑手术治疗。程明等[40]经有限元分析显示, 对于 OVCF 患者, 采用微创手术治疗可以获得较好疗效, 与保守治疗相比, 能提高脊柱稳定性, 可以作为一种首选治疗方法, 有助于改善患者预后。经皮穿刺椎体成形术(percutaneous vertebro plasty, PVP)具有创伤小、手术时间短、止痛效果好、椎体高度恢复稳定等优势, 被临床广泛使用[41]。基于 PVP 术式改进而来的经皮椎体后凸成形术(percutaneous kyphoplasty, PKP), 可显著增加脊柱胸腰段刚度, 在恢复椎体高度及防止椎体塌陷、减少骨水泥的泄漏方面更具有优势[42]。微创手术无需大范围的切口和大范围的剥离, 具有出血量小、手术时间短等优点, 同时也能减轻患者的痛苦[43]。同时使受压椎体获得较好的力学稳定性, 快速止痛, 但也会出现椎体高度丢失、后凸成角等问题。

3.4.3. 外固定手术治疗

新型脊柱外固定系统对胸腰椎压缩性骨折效果显著。欧炳金等[44]研究表明, 可调式脊柱外固定器通过有限元分析模型(脊柱 T11~L3 椎体有限元模型), 验证了其可限制胸腰段椎体的活动, 减少伤椎及椎间盘的最大应力, 获得良好的外固定生物力学效应。廖亦佳硕士等[45]本研究通过三维有限元分析进一步验证了, 与椎弓根螺钉钉棒内固定系统比较, 脊柱外固定系统应力相对分布均衡, 具有更大的活动度, 理论上可以减少相邻节段椎间盘的应力集中和骨折椎体的应力遮挡, 为其在腰椎骨折外科治疗中的进一步临床应用提供了相应的生物力学依据。冯其金等[46]通过建立三维有限元模型, 胸腰椎体外撑开复位器, 胸腰椎体外撑开复位为微创术式, 创伤小, 出血少, 不破坏后方韧带复合体结构, 不破坏后柱稳定性, 不剥离肌肉、骨膜, 减少不必要的慢性疼痛。但新型脊柱外固定系统结构仍需进一步简化, 以利于术中操作。

3.5. FEA 对脊柱骨折术后疗效的研究

关于胸腰椎术后内固定是否去除, Wang 等[47]通过建立有限元模型研究分析, 发现, 当伤椎上级终板缺损体积达前柱 4/5 时, 为避免再次损伤伤椎前柱, 需谨慎处理, 慎重取出。在胸腰椎骨折术后畸形矫正丢失的研究中, He 等[48]通过有限元分析发现, 小关节加棘突间融合比单节段小关节融合能更有效地模拟三维脊柱稳定性, 在防止胸腰椎骨折手术中术后晚期矫正丢失的骨融合方面具有上级优势。

4. 总结及展望

自 FEA 技术初次应用于脊柱生物力学研究已有近 50 年历史, 其在脊柱骨折的发病机制、治疗、预后等方面研究不断深入, 辅助临床医生在脊柱领域的救治更加高效、准确、快速。FEA 还能通过对病人的影像学资料进行分析, 构建有限元模型, 从而更精确地预测病人的恢复状况及存活率。此外, FEA 还能帮助医生对患者病情进行评估, 规划手术方案, 辅助手术, 确保手术的成功率与安全性。

事实上, 当前的有限元研究对于关节突关节、终板、椎间盘等的建模都较为成熟, 绝大多数文献也都对这些部位进行了建模。但是, 现有的有限元模型中肌肉、韧带、血管、神经以及相邻器官被广泛忽略, 其建模往往过于简单或直接忽略其对脊柱的生物力学影响。对组织内部采取均一特性假定, 与生理实际情况有一定差距, 因此有限元研究还需紧密联系临床实践。目前, 由于其建模与分析过程中所需的大量数据操作, 导致建模时间过长, 制约了其在临床上的应用。随着电脑科技的进步, 以及人们对于各种结构特征的了解, 有限元模型将会越来越完善, 有限元分析的手段也将越来越先进。相信今后对胸腰段骨折的有限元分析将更接近于现实, 从而更好地指导临床。

利益冲突

在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

作者贡献声明

郭圳: 论文的写作和修改; 暴丽慧: 观点的形成及文献资料的收集及整理, 对文章专业性内容进行批判性审阅。

基金项目

数字化技术应用于后纵韧带及椎间盘在胸腰椎骨折后路手术复位中的作用机制研究(项目编号 2022ZY0226)。

参考文献

- [1] Berman, A. (1979) Optimal Weighted Orthogonalization of Measured Modes. *AIAA Journal*, **17**, 927-928. <https://doi.org/10.2514/3.7529>
- [2] Zhang, Q., Chon, T., Zhang, Y., Baker, J.S. and Gu, Y. (2021) Finite Element Analysis of the Lumbar Spine in Adolescent Idiopathic Scoliosis Subjected to Different Loads. *Computers in Biology and Medicine*, **136**, Article ID: 104745. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104745>
- [3] Belytschko, T., Kulak, R.F., Schultz, A.B. and Galante, J.O. (1974) Finite Element Stress Analysis of an Intervertebral Disc. *Journal of Biomechanics*, **7**, 277-285. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(74\)90019-0](https://doi.org/10.1016/0021-9290(74)90019-0)
- [4] 赵文韬, 张晓刚, 秦大平, 等. 有限元分析在骨质疏松症临床研究的应用进展[J]. 中国骨质疏松杂志, 2016, 22(8): 1058-1062.
- [5] Hu, C., Zhong, W., Chen, Z., Peng, J., Li, J., Tang, K., et al. (2022) Comparison of the Outcomes between AO Type B2 Thoracolumbar Fracture with and without Disc Injury after Posterior Surgery. *Orthopaedic Surgery*, **14**, 2119-2131. <https://doi.org/10.1111/os.13400>
- [6] 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.
- [7] 费琦, 王炳强, 杨雍, 等. 椎体后凸成形对邻近节段力学影响的有限元分析[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(35): 6461-6465.
- [8] 郝定均. 脊柱损伤的分型[J]. 中华创伤骨科杂志, 2018, 20(4): 277-279.
- [9] Baker, A.D.L. (2013) The Three Column Spine and Its Significance in the Classification of Acute Thoracolumbar Spinal Injuries. In: Banaszkiwicz, P. and Kader, D., Eds., *Classic Papers in Orthopaedics*, Springer, 289-292. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5451-8_71
- [10] Magerl, F., Aebi, M., Gertzbein, S.D., Harms, J. and Nazarian, S. (1994) A Comprehensive Classification of Thoracic and Lumbar Injuries. *European Spine Journal*, **3**, 184-201. <https://doi.org/10.1007/bf02221591>
- [11] McCormack, T., Karaikovic, E. and Gaines, R.W. (1994) The Load Sharing Classification of Spine Fractures. *Spine*, **19**, 1741-1744. <https://doi.org/10.1097/00007632-199408000-00014>
- [12] Vaccaro, A.R., Zeiller, S.C., Hulbert, R.J., et al. (2005) The Thoracolumbar Injury Severity Score: A Proposed Treatment Algorithm. *Journal of Spinal Disorders and Techniques*, **18**, 209-215.
- [13] 丁少成, 曹家俊, 魏学忠, 等. 后路长节段与短节段椎弓根螺钉固定治疗胸腰椎骨折的疗效比较[J]. 中国修复重

- 建外科杂志, 2013, 27(6): 690-695.
- [14] Choi, H.J., Park, S.H., Choi, J.I., Kim, J.Y. and Seo, M. (2022) Assessment of Instability in Thoracolumbar Burst Fractures Using a New Bone Scan Scoring System. *Medicina*, **58**, Article 979. <https://doi.org/10.3390/medicina58080979>
 - [15] Alan, N., Donohue, J., Ozpinar, A., Agarwal, N., Kanter, A.S., Okonkwo, D.O., et al. (2021) Load-sharing Classification Score as Supplemental Grading System in the Decision-Making Process for Patients with Thoracolumbar Injury Classification and Severity 4. *Neurosurgery*, **89**, 428-434. <https://doi.org/10.1093/neuros/nyab179>
 - [16] Lee, N., Kim, S., Seo, H., Park, E.T. and Jang, W. (2021) How Should Patients with a Thoracolumbar Injury Classification and Severity Score of 4 Be Treated? *Journal of Clinical Medicine*, **10**, Article 4944. <https://doi.org/10.3390/jcm10214944>
 - [17] 李强, 薄连洪. 胸腰段骨折的分型回顾[J]. 河北联合大学学报(医学版), 2013, 15(2): 231-232.
 - [18] Lee, C., Landham, P.R., Eastell, R., Adams, M.A., Dolan, P. and Yang, L. (2017) Development and Validation of a Subject-Specific Finite Element Model of the Functional Spinal Unit to Predict Vertebral Strength. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, **231**, 821-830. <https://doi.org/10.1177/0954411917708806>
 - [19] Joaquim, A.F., Maslak, J.P. and Patel, A.A. (2018) Spinal Reconstruction Techniques for Traumatic Spinal Injuries: A Systematic Review of Biomechanical Studies. *Global Spine Journal*, **9**, 338-347. <https://doi.org/10.1177/2192568218767117>
 - [20] 章荣. 不同椎弓根螺钉内固定方式治疗胸腰段骨折的疗效分析[D]: [硕士学位论文]. 芜湖: 皖南医学院, 2019.
 - [21] 秦大平, 张晓刚, 权祯, 等. 骨质疏松症患者脊柱胸腰段椎体力学稳定性变化与椎体压缩性骨折风险预测的有限元分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2021, 38(4): 485-494.
 - [22] 晏礼. 胸腰段脊柱三维有限元模型的建立及其应力分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西医科大学, 2013.
 - [23] 陈华. 3D 打印外固定支具治疗单纯性胸腰椎骨折的有限元分析及临床应用研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京中医药大学, 2018.
 - [24] 刘迎军, 李孝林. 有限元分析过伸复位治疗胸腰椎压缩性骨折的椎间盘动态力学[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(4): 589-592.
 - [25] 李孝林, 任伯绪. 过伸复位治疗胸腰椎单纯压缩性骨折的有限元分析[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(17): 3127-3130.
 - [26] 秦大平. 模拟不同复位法对骨质疏松性胸腰椎压缩骨折椎体高度恢复与脊柱力学稳定作用差异性的有限元分析[Z]. 兰州: 甘肃中医药大学, 2021.
 - [27] 张宏伟, 张晓刚, 毛兰芳, 等. 有限元分析指导手法治疗单节段胸腰椎压缩骨折伴骨质疏松症 29 例[J]. 中医研究, 2015(4): 51-53.
 - [28] 刘清平, 陈少坚, 陈晓亮, 等. 改良长 U 形空心椎弓根钉及配套锁定插销的力学分析[J]. 中国现代医生, 2021, 59(15): 156-159.
 - [29] Zhou, F., Yang, S., Liu, J., Lu, J., Shang, D., Chen, C., et al. (2019) Finite Element Analysis Comparing Short-Segment Instrumentation with Conventional Pedicle Screws and the Schanz Pedicle Screw in Lumbar 1 Fractures. *Neurosurgical Review*, **43**, 301-312. <https://doi.org/10.1007/s10143-019-01146-9>
 - [30] 潘俊. 后路椎弓根内固定系统治疗严重胸腰椎爆裂型骨折有限元分析及临床应用[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2012.
 - [31] 王志彬. 前路植骨固定 + 后路单侧椎弓根钉固定治疗胸腰椎骨折的三维有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 中国医科大学, 2010.
 - [32] 肖广润. 不同植骨方式治疗胸腰椎爆裂性骨折的有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连医科大学, 2023.
 - [33] 邓英虎, 夏虹, 马立敏. 两种不同经椎弓根螺钉内固定治疗胸腰段椎体压缩骨折的生物力学研究[J]. 中国数字医学, 2012, 7(10): 48-50, 53.
 - [34] 李鹏飞. 腰椎骨折椎弓根固定的有限元分析与临床研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2014.
 - [35] Wang, H., Mo, Z., Han, J., Liu, J., Li, C., Zhou, Y., et al. (2018) 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*, **97**, e11244. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000011244>
 - [36] Information, V.F.A., Zhang, C., et al. (2023) Comparative Finite Element Analysis of Posterior Short Segment Fixa-

- tion Constructs with or without Intermediate Screws in the Fractured Vertebrae for the Treatment of Type a Thoracolumbar Fracture. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 27, 1398-1409.
- [37] 徐桂军. 胸腰椎爆裂骨折后路内固定结合椎体成形术的有限元分析及可视化术前计划[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津医科大学, 2014.
- [38] Yan, J., Liao, Z. and Yu, Y. (2022) Finite Element Analysis of Dynamic Changes in Spinal Mechanics of Osteoporotic Lumbar Fracture. *European Journal of Medical Research*, 27, Article No. 142. <https://doi.org/10.1186/s40001-022-00769-x>
- [39] 李石头, 鲜文峰. 不同骨水泥注入量下 PKP 治疗 T12 椎体压缩性骨折的疗效与有限元分析[J]. 颈腰痛杂志, 2020, 41(6): 669-672.
- [40] 程明, 彭诗语, 江娇, 等. 不同治疗方法对骨质疏松性胸腰椎压缩骨折椎体力学稳定性影响的有限元分析[J]. 中国修复重建外科杂志, 2022, 36(12): 1519-1523.
- [41] 吴登将, 陈为坚, 张远华, 等. 椎体增强术后骨水泥分布指数对手术椎体及邻边椎体再发骨折的影响[J]. 中国老年学杂志, 2022, 42(6): 1392-1395.
- [42] 杨小彬, 贺宝荣, 郝定均, 等. 不同骨水泥量在 PKP 术后对相邻节段生物力学影响的有限元分析[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2016, 31(1): 40-43.
- [43] 胡家瑞, 宋明, 余来. 经皮微创与开放手术治疗胸腰椎骨折的疗效及安全性分析[J]. 临床外科杂志, 2023, 31(9): 881-884.
- [44] 欧炳金, 周云帆, 程顺达, 等. 可调式脊柱外固定器固定胸腰段脊椎骨折的有限元分析[J]. 临床骨科杂志, 2023, 26(6): 885-889.
- [45] 廖亦佳. 脊柱外固定器治疗腰椎骨折的三维有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 衡阳: 南华大学, 2022.
- [46] 冯其金. 胸腰椎体外撑开复位器的生物力学研究及有限元分析[Z]. 天津: 天津中医药大学, 2018.
- [47] Wang, P. and Hu, X. (2020) Biomechanical Finite Element Analysis of Superior Endplate Collapse after Thoracolumbar Fracture Surgery. *Annals of Translational Medicine*, 8, 753-753. <https://doi.org/10.21037/atm-20-4091>
- [48] He, D., Wu, L., Chi, Y. and Zhong, S. (2011) Facet Joint Plus Interspinous Process Graft Fusion to Prevent Postoperative Late Correction Loss in Thoracolumbar Fractures with Disc Damage: Finite Element Analysis and Small Clinical Trials. *Clinical Biomechanics*, 26, 229-237. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2010.10.009>