

# 有限元分析在桡骨远端骨折研究中的应用进展

毛昭冲, 李福伟, 杨风云, 李典, 杨文龙

(江西中医药大学附属医院, 江西 南昌 330006)

**摘要** 桡骨远端骨折临床较为常见, 好发于老年骨质疏松症患者。有限元分析具有无创、方便、可重复、数据可靠等优点, 并能够模拟各种载荷情况, 是桡骨远端骨折生物力学研究的首选实验方法。在桡骨远端骨折研究中应用有限元分析, 有助于阐明骨折发生机制、评估骨折愈合情况、评估及优化治疗方法。本文对有限元分析在桡骨远端骨折生物力学分析、桡骨远端骨折愈合情况评估及小夹板固定治疗桡骨远端骨折方面的应用进展进行了综述, 并对桡骨远端骨折有限元分析的影响因素进行了分析。

**关键词** 桡骨骨折; 限定因素分析; 有限元; 生物力学现象; 综述

桡骨远端骨折临床较为常见, 好发于老年骨质疏松症患者<sup>[1]</sup>。开展桡骨远端骨折的生物力学研究, 对于明确骨折机制、选择和优化治疗方法具有重要意义<sup>[2]</sup>。传统生物力学研究多采用尸体解剖、实验室静态力学分析等方法, 可重复性较差<sup>[3]</sup>。有限元分析具有无创、方便、可重复、数据可靠等优点, 并能够模拟各种载荷情况, 是桡骨远端骨折生物力学研究的首选实验方法<sup>[4]</sup>。许多学者开展了这方面的研究, 并取得了丰富的研究成果<sup>[5-6]</sup>。本文对有限元分析在桡骨远端骨折生物力学分析、桡骨远端骨折愈合情况评估及小夹板固定治疗桡骨远端骨折中的应用进展进行了综述, 并对桡骨远端骨折有限元分析的影响因素进行了分析。

## 1 有限元分析在桡骨远端骨折生物力学分析中的应用

桡骨远端骨折有限元模型的建立有助于分析桡骨远端骨折的生物力学特点, 进而明确其发生机制, 为临床上治疗方法的选择提供依据。张朝驹等<sup>[7]</sup>为了探讨伸直型桡骨远端骨折的生物力学特点, 建立腕关节背伸位有限元模型, 并给予模型垂直手掌面向下的载荷, 结果显示载荷作用后腕关节软组织应力集中在小鱼际和腕背侧, 骨骼应力背侧集中在尺桡骨远端、掌侧集中于尺桡骨中下段交界偏下处及腕中部。

夏长江等<sup>[8]</sup>建立了尺桡骨三维有限元模型, 并模拟手腕掌屈、背伸、尺偏、桡偏状态加载外力, 分析不同状态下外力作用导致桡骨远端骨折的发生部位及骨折线走向, 结果显示骨折发生起始于松质骨与密质骨交界处桡骨远端表面张力最大的一侧, 而骨折线走向与切应力和张应力的方向有关。程方荣等<sup>[9]</sup>建立了儿童和成人的桡骨有限元模型, 比较儿童和成人伸直型桡骨远端骨折的骨折线走向、骨折移位, 结果显示成熟骨和未成熟骨的骨折线走向、骨折移位均不同; 提示应采用不同复位手法治疗儿童和成人伸直型桡骨远端骨折。

## 2 有限元分析在桡骨远端骨折愈合情况评估中的应用

有限元分析能够模拟骨折愈合过程, 进而为预测骨折愈合时间、早期诊断骨折不愈合提供依据<sup>[10]</sup>。童梁成等<sup>[11]</sup>研究发现, 建立有限元模型进行骨承载力分析与壁厚分析, 可以对骨愈合进行连续性观察, 进而为骨折预后提供一个清晰和客观的判断指标。de Jong 等<sup>[12-13]</sup>采用高分辨率外周定量 CT (high-resolution peripheral quantitative CT, HR-pQCT) 结合有限元分析模拟女性桡骨远端骨折愈合过程中骨密度、骨硬度及骨骼微结构随时间的变化, 结果显示有限元分析得到的骨折愈合结果与临床观察骨折愈合情况相一致。Spanswick 等<sup>[14]</sup>利用 HR-pQCT 数据建立桡骨远端骨折有限元模型, 通过骨硬度精确预测了骨折愈合时间。

## 3 有限元分析在小夹板固定治疗桡骨远端骨折中的应用

手法复位小夹板固定具有创伤小、疗效确切等优

基金项目: 全国名老中医药专家传承工作室建设项目 (国中医药人教函[2022]75 号); 江西省科技计划项目 (20212BCG74004); 江西省中医药管理局重点研究室、临床研究基地建设项目 (2020GJ01); 江西省中医药管理局科技计划项目 (2021A162); 江西省大学生创新创业训练计划项目 (202210412002); 江西省研究生创新专项资金项目 (YC2021-S518)

通讯作者: 杨文龙 E-mail: y378759501@163.com

点,在临床上被广泛应用于桡骨远端骨折<sup>[15-16]</sup>。小夹板是中医学发展的特色产物,体现了“动静结合”“筋可束骨”的中医治疗理念。华臻等<sup>[17]</sup>采用有限元分析评估解剖型纸质支架夹板治疗 Colles 骨折的生物力学特点,结果显示解剖型纸质夹板受力更加均匀,尺骨茎突、桡骨茎突和鱼际等易发生卡压的部位应力较小,提示解剖型纸质支架夹板更贴合患肢,能够有效避免软组织压迫,增加佩戴的舒适度。临床上采用手法复位桡骨远端骨折,常会残余一定的侧方移位。魏成建等<sup>[18]</sup>采用有限元分析定量评估动力气囊压垫纠正残余侧方移位的有效性,结果显示通过动力气囊压垫调节压强能够有效纠正桡骨远端骨折残余侧方移位,避免二次复位。姜自伟等<sup>[19]</sup>在探索数字化夹板的设计中应用有限元分析进行数字化夹板的特点分析,结果显示数字化夹板更加贴合患肢,受力更加均匀,在功能锻炼过程中发生移位的概率更小。有限元分析在小夹板固定治疗桡骨远端骨折的疗效评价及新型夹板的特点分析方面发挥着重要作用。

#### 4 桡骨远端骨折有限元分析的影响因素

**4.1 建模方法选择** 目前腕关节有限元模型建立的方法有切片法、测量法和图像处理法。切片法和测量法操作复杂、精确度较差,临床研究应用较少;而图像资料丰富且易获取,图像处理法成为有限元模型建立的主要方法<sup>[20]</sup>。姜昆等<sup>[21]</sup>利用 CT 数据资料建立桡骨远端的有限元三维模型,并根据 AO 分型画出骨折线,建立了 9 个 C 型骨折模型。然而,由于 CT 对软组织的成像较差,对于肌腱、韧带、关节囊及关节盘的建模效果并不理想,模型不能全面反映骨折周围组织的情况。MRI 能够清晰地显示软组织的结构,采用 MRI 数据资料建立的腕关节三维模型更加准确和精细。艾登超<sup>[22]</sup>利用 CT 和 MRI 数据资料建立包括骨组织、韧带及三角纤维软骨盘的正常人体腕关节三维有限元模型,模型解剖结构精确。

**4.2 组织属性定义** 桡骨由骨髓、松质骨和皮质骨组成,各自的属性并不完全相同。但在有限元模型建立过程中,通常将这些组织的属性定义为同性、均质的弹性材料<sup>[23-24]</sup>。这种定义组织属性的方法能够减少模型建立的程序、降低建模难度,但模型的精确度亦随之下降。San Antonio 等<sup>[25]</sup>研究发现,对骨骼整体进行力学分析,采用各向异性或各向同性定义骨组织对研究的精确度影响很小,但对于骨骼局部力学关

系的分析,骨组织定义方式的不同将会产生较大影响。Synek 等<sup>[26]</sup>验证了桡骨远端骨折有限元模型的准确性,结果显示正交各项同性和正交各向异性几乎不影响模型的预测能力。

**4.3 模型参数赋值** 弹性模量和泊松比是有限元模型分析中的主要参数,这两个参数的赋值对于有限元模型的准确性有较大影响。对于桡骨远端三维有限元模型的建立,通常皮质骨弹性模量设定为 10 000 MPa,泊松比为 0.30;松质骨弹性模量设定为 1700 MPa,泊松比为 0.30;关节软骨弹性模量设定为 10 MPa,泊松比为 0.45;纤维软骨弹性模量设定为 20 MPa,泊松比为 0.45;韧带弹性模量设定在 300 MPa,泊松比为 0.48;骨间膜弹性模量设定为 950 MPa,泊松比为 0.45<sup>[27-28]</sup>。Rho 等<sup>[29]</sup>建立了 CT 图像灰度与骨密度、弹性模量之间的关系方程,进而可依据 CT 图像灰度进行骨密度和弹性模量的赋值。

**4.4 模型有效性验证** 验证有限元模型的有效性是确保有限元分析结果准确性的必要条件。目前,有限元模型有效性的验证方法有 3 种。第 1 种验证方法是通过比较有限元分析的结果和尸体标本测定结果进行有限元模型的验证<sup>[30]</sup>。Matsuura 等<sup>[31]</sup>利用手腕标本的 CT 数据资料建立腕关节有限元模型,并施加与前臂轴线平行的机械载荷模拟骨折,结果显示有限元模型测量的桡骨远端骨折载荷与实际测量的结果无显著差异,认为该有限元模型有效。这种验证方法步骤严格,结果可靠,但尸体标本价值高昂,且不易获取,在临床研究中应用并不广泛。第 2 种验证方法是与已有文献中类似的实验结果进行对比。钟环等<sup>[32]</sup>建立桡骨远端有限元模型,将模型分析结果与已有文献中的尸体标本实验结果进行对比,以验证模型的有效性。该方法极大地减少了工作量,研究结果亦具有较强的可靠性。第 3 种验证方法是将有限元分析的结果与临床观察的现象进行比较。该方法操作简单,但缺乏可靠性。因此,选择高质量的实验研究进行有限元模型有效性的验证,对于保证有限元分析研究结果的可靠性具有重要意义。

#### 5 小 结

近年来有限元分析在骨科研究中被广泛应用,从单一骨骼模型的有限元分析发展到囊括肌肉、韧带、血管等软组织的整体模型的有限元分析,使得人体的生物力学分析更加完善和细致。在桡骨远端骨折研

究中应用有限元分析,有助于分析桡骨远端骨折的生物力学特点,进而明确其发生机制,为临床上治疗方法的选择提供依据。应用有限元分析评估患者的骨折愈合情况,为预测骨折愈合时间、早期诊断骨折不愈合提供依据。采用小夹板固定治疗桡骨远端骨折时,有限元分析在疗效评价及新型夹板的特点分析方面发挥着重要作用。此外,建模方法选择、组织属性定义、模型参数赋值、模型有效性验证等均是桡骨远端骨折有限元分析的影响因素。

### 参考文献

- [1] OCHEN Y, PEEK J, VAN DER VELDE D, et al. Operative vs nonoperative treatment of distal radius fractures in adults: a systematic review and meta-analysis [J]. JAMA Network Open, 2020, 3(4): e203497.
- [2] 赖福崇, 李具宝, 廖建青, 等. 桡骨远端骨折治疗的生物力学研究进展[J]. 云南中医学院学报, 2019, 42(3): 98-102.
- [3] 朱立军, 何柏康, 吕维佳, 等. AOC3 型桡骨远端骨折固定方法研究的生物力学模型[J]. 中华创伤骨科杂志, 2002, 4(4): 282-284.
- [4] 刘琦, 李凡. 有限元分析小夹板对老年 FrykmanⅧ型桡骨远端骨折尺侧柱干预的生物力学机制[J]. 中国老年学杂志, 2021, 41(6): 1213-1218.
- [5] 章浩伟, 吕琳, 裴潇倜, 等. 桡骨远端钢板联合拉力钉固定治疗 SanderⅢ型跟骨骨折的生物力学分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2021, 38(4): 505-510.
- [6] LUISIER B, DALL'ARA E, PAHR D H. Orthotropic HR-pQCT-based FE models improve strength predictions for stance but not for side-way fall loading compared to isotropic QCT-based FE models of human femurs [J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2014, 32: 287-299.
- [7] 张朝驹, 何川, 陈洪卫, 等. 基于有限元模型分析伸直型桡骨远端骨折的生物力学特点[J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(12): 1898-1902.
- [8] 夏长江, 袁志峰, 方宁. 基于尺桡骨三维有限元模型分析桡骨远端骨折的生物力学特征[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(6): 893-897.
- [9] 程方荣, 崔红新, 王学昌, 等. 用有限元法研究桡骨远端伸直型骨折的机理[J]. 中医正骨, 2005, 17(6): 21-22.
- [10] 岳肖华, 李晏乐, 程灏, 等. 尺骨茎突骨折有限元模型的建立与力学分析[J]. 中国中医骨伤科杂志, 2018, 26(10): 6-9.
- [11] 童梁成, 杨智伟, 汪剑龄, 等. 有限元骨承载力分析法与壁厚分析法预测骨愈合程度的比较研究[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2021, 36(10): 1035-1039.
- [12] DE JONG J J, WILLEMS P C, ARTS J J, et al. Assessment of the healing process in distal radius fractures by high resolution peripheral quantitative computed tomography [J]. Bone, 2014, 64: 65-74.
- [13] GEUSENS P, CHAPURLAT R, SCHETT G, et al. High-resolution in vivo imaging of bone and joints: a window to micro-architecture [J]. Nat Rev Rheumatol, 2014, 10(5): 304-313.
- [14] SPANSWICK P J C, WHITTIER D E, KWONG C, et al. Improvements in radiographic and clinical assessment of distal radius fracture healing by FE-estimated bone stiffness [J]. Bone Rep, 2021, 14: 100748.
- [15] 孙铁韬, 马奇翰, 戴宇祥, 等. 桡骨远端骨折的中医非手术治疗及相关并发症的研究进展[J]. 中医正骨, 2021, 33(1): 43-45.
- [16] 张容超, 徐卫国, 万春友, 等. 手法整复小夹板固定治疗桡骨远端骨折 168 例[J]. 中医正骨, 2015, 27(11): 61-64.
- [17] 华臻, 陆振飞, 潘娅岚, 等. 解剖型纸质支架夹板治疗 Colles 骨折的有限元分析[J]. 中国中医骨伤科杂志, 2017, 25(7): 16-20.
- [18] 魏成建, 陶宝琛, 张满臣, 等. 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[J]. 医用生物力学, 2018, 33(1): 13-17.
- [19] 姜自伟, 黄枫, 成思源, 等. 数字化夹板设计及有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21(7): 1052-1056.
- [20] 李永耀, 赵勇, 程灏, 等. 夹板弹性固定桡骨远端 FrykmanⅧ型骨折尺侧柱稳定性的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(30): 4769-4774.
- [21] 姜昆, 陶宝琛, 魏成建. 小夹板治疗桡骨远端关节内骨折的有限元分析[J]. 医用生物力学, 2018, 33(3): 206-211.
- [22] 艾登超. 腕关节三维有限元精细模型的建立及其验证[D]. 天津: 天津医科大学, 2017.
- [23] 何剑颖, 吴小辉, 舒勇, 等. 冲击载荷作用下腕部损伤的有限元分析[J]. 中国矫形外科杂志, 2015, 23(12): 1112-1116.
- [24] 董谢平, 王冬梅, 何剑颖, 等. 腕保护器抗冲击载荷的有限元分析[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(30): 5531-5534.
- [25] SAN ANTONIO T, CIACCIA M, MÜLLER-KARGER C, et al. Orientation of orthotropic material properties in a femur FE model: a method based on the principal stresses directions [J]. Med Eng Phys, 2012, 34(7): 914-919.

(下转第 45 页)

- [36] 章伟祥,徐琦,李得明,等. 独活寄生汤加减口服联合臭氧关节腔注射治疗膝关节骨性关节炎患者的疗效及对血清炎症因子表达的影响[J]. 广西医学,2021,43(18): 2166-2169.
- [37] 刘圣莲,王凤林. 医用三氧关节腔注射联合口服独活寄生汤治疗膝关节滑膜炎的临床研究[J]. 山东医学高等专科学校学报,2021,43(1):21-23.
- [38] 王波. 独活寄生汤结合玻璃酸钠注射治疗膝骨关节炎的临床效果[J]. 内蒙古中医药,2021,40(11):16-17.
- [39] 薛颖好,陈旭军. 针灸治疗膝骨关节炎疼痛作用机制的研究进展[J]. 中国民间疗法,2022,30(9):118-121.
- [40] 张悦毓,张丽华,宋爱群. 针灸治疗膝骨关节炎的研究进展[J]. 风湿病与关节炎,2022,11(3):77-80.
- [41] 谢祖瑶,秦玮珣,杨改琴. 电针治疗膝骨关节炎作用机制研究进展[J]. 辽宁中医药大学学报,2023,25(1):212-215.
- [42] 苏清君,李鹏,边朝辉,等. 热敏灸联合独活寄生汤治疗膝骨关节炎肝肾亏虚证临床研究[J]. 国际中医中药杂志,2022,44(6):636-640.
- [43] 林凤秀,李志敏,赖智君. 独活寄生汤结合雷火灸治疗膝骨性关节炎风寒湿痹型的疗效及其对关节功能和血清MMP-3、骨桥蛋白水平的影响[J]. 临床和实验医学杂志,2022,21(4):395-399.
- [44] 瞿一新,方芳,叶必宏,等. 温针灸联合独活寄生汤治疗肝肾亏虚型膝骨性关节炎临床研究[J]. 新中医,2019,51(11):240-243.
- [45] 叶煜婉,方园园. 联用艾灸疗法、针刺疗法和独活寄生汤治疗膝关节炎的效果研究[J]. 当代医药论丛,2019,17(10):204-205.
- [46] 常毓文,季晶俊. 放散式体外冲击波穴位治疗联合独活寄生汤对老年膝骨性关节炎疗效的影响[J]. 湖北中医药大学学报,2021,23(4):100-103.
- [47] 谢冲冲,丰哲,朱志华,等. 独活寄生汤联合膝关节松动术治疗肾虚髓亏型膝骨性关节炎的临床效果[J]. 广西医学,2019,41(10):1210-1213.
- [48] 张卓. 独活寄生汤配合腓骨近端截骨术治疗膝骨关节炎的临床观察[D]. 郑州:河南中医药大学,2017.

(收稿日期:2022-08-19 本文编辑:吕宁)

(上接第 32 页)

- [26] SYNEK A, CHEVALIER Y, BAUMBACH S F et al. The influence of bone density and anisotropy in finite element models of distal radius fracture osteosynthesis: evaluations and comparison to experiments [J]. J Biomech, 2015, 48(15):4116-4123.
- [27] 郭欣,樊瑜波,李宗明. 掌骨受轴向压力作用下的腕部生物力学分析[J]. 航天医学与医学工程,2008,21(1):45-49.
- [28] 李永耀,程灏,赵勇,等. 夹板固定治疗尺骨茎突骨折的三维有限元分析[J]. 中国组织工程研究,2018,22(11):1737-1742.
- [29] RHO J Y, HOBATHO M C, ASHMAN R B. Relations of mechanical properties to density and CT numbers in human bone[J]. Med Eng Phys, 1995, 17(5):347-355.
- [30] ARIAS-MORENO A J, HOSSEINI H S, BEVERS M, et al. Validation of distal radius failure load predictions by homogenized- and micro-finite element analyses based on second-generation high-resolution peripheral quantitative CT images[J]. Osteoporos Int, 2019, 30(7):1433-1443.
- [31] MATSUURA Y, KUNYOSHI 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.
- [32] 钟环,欧阳汉斌,魏波,等. 桡骨远端骨折锁定钢板的拓扑优化及有限元分析[J]. 中国矫形外科杂志,2018,26(23):2189-2194.

(收稿日期:2022-08-08 本文编辑:吕宁)

(上接第 40 页)

- [77] ZOU D, ZHANG K, YANG Y, et al. Th17 and IL-17 exhibit higher levels in osteonecrosis of the femoral head and have a positive correlation with severity of pain [J]. Endokrynol Pol, 2018, 69(3):283-290.
- [78] MA J, GUO W, LI Z, et al. Hip osteonecrosis is associated with increased plasma IL-33 level[J]. Mediators Inflamm, 2017:1732638.
- [79] YOKOTA K, SATO K, MIYAZAKI T, et al. Combination of tumor necrosis factor $\alpha$  and interleukin-6 induces mouse osteoclast-like cells with bone resorption activity both in vitro and in vivo[J]. Arthritis Rheumatol, 2014, 66(1):121-129.
- [80] BEKLER H, UYGUR AM, GÖKÇE A, et al. The effect of steroid use on the pathogenesis of avascular necrosis of the femoral head: an animal model [J]. Acta Orthop Traumatol Turc, 2007, 41(1):58-63.
- [81] MATSUI M, SAITO S, OHZONO K, et al. Experimental steroid-induced osteonecrosis in adult rabbits with hypersensitivity vasculitis[J]. Clin Orthop Relat Res, 1992(277):61-72.

(收稿日期:2022-05-06 本文编辑:吕宁)