

· 综 述 ·

有限元法在颈椎生物力学研究中的应用进展

林福¹, 付坤飞¹, 全仁夫²

(1. 浙江中医药大学第三临床医学院, 浙江 杭州 310053;

2. 杭州市萧山区中医院, 浙江 杭州 311201)

摘 要 在颈椎生物力学研究中,有限元法起到了重要作用。颈椎疾病的发病机制、颈椎手术和非手术疗法的生物力学问题是脊柱生物力学研究的重要内容,有限元法是进行此类研究的有效方法。本文从有限元法在颈椎疾病发病机制研究中的应用、在颈椎手术生物力学研究中的应用、在颈椎非手术疗法生物力学研究中的应用 3 个方面,对有限元法在颈椎生物力学研究中的应用进展进行了综述。

关键词 颈椎;生物力学;有限元分析;综述

颈椎作为连接人体头颅和躯干的枢纽结构,其活动度明显大于胸、腰椎,但与有骨骼和肌肉等保护的胸、腰椎相比,仅有软组织保护的颈椎脆弱而极易受损^[1]。近年来,随着生活及工作方式的改变,颈椎疾病的发病呈年轻化趋势,患病人数也不断攀升^[2]。对颈椎疾病的发病机制和各种治疗方法的力学机制进行研究是目前此类疾病研究的热点,但由于颈椎各椎体之间及周围肌肉和韧带之间的作用力错综复杂,而动物模型与尸体模型均存在一定的缺陷,开展此类研究还面临诸多困难。有限元法是一种最初用于分析复杂工程力学结构问题的方法。20 世纪 70 年代,有限元法被引入骨科生物力学研究领域后,开始受到研究人员的青睐^[3-4],并逐渐应用于各种脊柱生物力学的研究中^[5-7]。有限元法可用于分析颈椎疾病的发病机制、各种颈椎手术的生物力学原理^[8],还可用于建立特定情形的颈椎三维有限元分析模型,以确定个体化治疗方案和评估治疗效果。为进一步了解有限元法在颈椎生物力学研究中的应用进展,我们从有限元法在颈椎疾病发病机制研究中的应用、在颈椎手术生物力学研究中的应用、在颈椎非手术疗法生物力学研究中的应用 3 个方面进行了综述。

1 有限元法在颈椎疾病发病机制研究中的应用

椎间盘的髓核在承受外力时,能够将力均匀地传递到周围的纤维环上,避免椎间盘的某一部位因承载过度而发生损伤,以维持脊柱在旋转、屈伸、侧弯等状态下的稳定性^[9]。椎间盘的承载作用是维持颈椎稳

定的关键,外部载荷的变化将直接影响颈椎间盘的承载功能,进而影响颈椎的稳定性。颈椎力学失衡会引起某些颈椎退行性病变的发生。Kumaresan 等^[10]通过三维有限元模型成功模拟了颈椎间盘的 3 种不同退变状态,即轻度退变、中度退变、重度退变,发现颈椎骨赘的产生与长时间椎体内压力过大所导致的颈椎间盘退行性变的严重程度有直接关系。Lopez - Espina 等^[11]通过有限元法证实了持续性负荷加载能直接加快颈椎间盘退变及椎体骨赘产生。

2 有限元法在颈椎手术生物力学研究中的应用

2.1 人工颈椎间盘置换术 人工颈椎间盘置换术在临床的应用已得到充分发展,此术式的优势主要在于可保留责任节段的活动度进而减少因椎体融合导致的邻椎退变^[12-15]。国外诸多学者采用有限元法,对人工椎间盘置换术后责任椎的活动情况、韧带张力、假体活动轨迹及关节突关节和髓核的应力变化等进行了生物力学分析,发现置换后的人工颈椎间盘生物力学特性与正常颈椎椎间盘相似,无明显应力下降或集中的情况^[16-18]。国内学者也通过建立有限元模型,在不同扭矩及工况下施加载荷,分析人工颈椎间盘置换术后椎体、椎间盘、关节突关节的应力及颈椎活动度等相关生物力学指标,同样证实此术式对于维持颈椎的活动度有积极作用,并且发现术后骨性及非骨性结构的应力改变与正常颈椎模型相比无明显差异^[19]。这点与离体生物力学实验及临床观察的结论相一致^[16,18,20-21]。

Ganbat 等^[22]通过建立 C₅₋₆ 人工颈椎间盘置换术后有限元模型,对责任椎的终板应力与异位骨化的关

系进行了研究,发现术后责任椎终板的应力不均匀与异位骨化的发生有直接关系。Rong 等^[23]采用有限元法分析 C₅₋₆人工颈椎间盘置换术后责任椎关节突关节的对称程度对椎间盘和关节突关节应力的影响,发现关节突关节越不对称,责任椎椎间盘及关节突关节的应力越大,这提示颈椎双侧关节突关节的对称程度可能是颈椎退行性变的重要影响因素。

Yu 等^[24]采用有限元法分析了不同类型的 C₅₋₆植入假体对责任椎及邻椎的生物力学影响,发现不同类型的假体对于术后责任椎及邻椎的生物力学影响不同。这一结果与体外生物力学实验的结果基本一致^[25-26]。

2.2 颈椎前路融合术 颈椎前路融合术是治疗颈椎间盘突出症、颈椎骨折等的有效方法,目前临床应用的主流术式是颈椎前路椎间盘切除植骨融合术(anterior cervical discectomy with fusion, ACDF)和颈椎前路椎体次全切植骨融合术(anterior cervical corpectomy and fusion, ACCF)。李浩曦等^[27]通过建立颈椎 ACDF 有限元模型,分析了此术式中螺钉置入位置对颈椎活动度和邻椎椎间盘的应力的影响,发现螺钉置入位置偏椎体前方时,颈椎的活动度会增加,且邻椎椎间盘的应力会有一定程度的下降,认为这一现象有利于维持颈椎的稳定。卢腾等^[28]采用有限元法对 ACDF、ACCF 术后颈椎与正常颈椎的生物力学特点进行了比较,发现 2 种术式术后全颈椎的活动度均小于正常颈椎,但手术相邻椎的活动度代偿性增大,相邻椎椎间盘和关节突关节的应力变大,说明颈椎融合术会对颈椎的正常生理特性造成不可逆影响。柏磊磊^[29]采用有限元法进行研究,发现 ACDF 术后手术节段的活动度减小,且人工颈椎间盘置换术较 ACDF 更有利于维持邻椎的活动度。赵改平等^[30]通过建立颈椎 ACCF 术式有限元模型,发现各工况下颈椎活动度均有不同程度的减小,认为该术式有利于维持下颈椎的整体稳定。Ha^[16]构建了 C₄₋₅融合的颈椎有限元模型,发现与正常颈椎模型相比,在同一扭矩不同工况下,融合模型手术节段的活动度、关节突关节的应力及韧带张力都有一定程度的下降。李忠海等^[31]建立了 4 种颈椎前路手术有限元模型,即 ACDF 模型、颈前路间盘切除减压单纯 Cage 置入融合模型、ACCF 模型、颈前路减压混合模型,通过观察 4 种术式对邻椎椎间盘及内置物应力的影响,发现若前方不配合钛板固定而单

纯置入 Cage 融合,对于邻椎的影响较小,理论上有利于减少邻椎退变的发生,而 ACCF 模型组中钛板及螺钉的应力集中较其他模型组明显,提示该术式术后发生内植物断裂、不稳等情况的可能性较大。

2.3 颈椎内固定术 运用有限元法进行颈椎内固定术的力学分析亦是目前研究的热点之一。Chun 等^[32]构建寰枢椎有限元模型,分析了经寰枢关节固定、寰椎侧块-枢椎椎弓根固定、寰椎侧块-枢椎峡部固定及寰椎侧块-枢椎椎板固定 4 种不同寰枢椎内固定方法的力学特点,发现采用经寰椎侧块-枢椎椎弓根固定法颈椎屈伸状态时的活动度最小,认为此方法较其他 3 种方法固定颈椎更为稳定。李杰等^[33]通过建立 C₃₋₇有限元模型,比较了前路椎弓根螺钉内固定和前路椎体螺钉钛板内固定的生物力学特点,发现前者固定后颈椎椎间活动度较后者小,应力分布也更均匀,认为前路椎弓根螺钉内固定更有利于维持颈椎的稳定。胡勇等^[34]构建了 I 型 Hangman 骨折伴 II 型齿状突骨折联合 C₂₋₃椎间盘损伤有限元模型,并在此基础上构建了 4 种内固定方法固定后的有限元模型,分析发现齿状突钢板螺钉内固定模型内置物的应力分布相对均匀,而其他 3 种模型在钉板或棒连接部位出现应力集中。Liu 等^[35]采用有限元法研究发现, C₁侧向螺钉固定能保证枕寰枢椎的融合率,还提出此固定方法可能有益于老年骨质疏松患者。

沈彦等^[36]在进行颈椎棘突骨折内固定的有限元分析时发现,固定后在各工况下颈椎活动度均有一定程度增加,且内固定物的应力均处于正常的弹性范围,故而认为内固定手术治疗棘突骨折的有效性及安全性基本可以保证,应当临床推广。陈树金等^[37]在进行寰枢椎椎弓根螺钉内固定的有限元分析中发现,模型在各工况下特别是旋转时,螺钉与连接棒相接点及螺钉根部会出现不同程度的应力集中,提出为避免术后出现此类情况,术中置入螺钉应尽可能加深,术后应当减少颈椎的旋转运动。

3 有限元法在颈椎非手术疗法生物力学研究中的应用

3.1 推拿 推拿治疗颈椎病已被临床实践证明有效,但由于施行的手法并无统一标准,且患者个体情况及医师手法、水平存在差异,疗效并不统一,治疗失误还可能对患者造成伤害^[38]。对各种颈椎推拿手法进行力学分析,为其临床应用提供生物力学依据,有

利于推拿应用于颈椎病治疗的规范化、科学化和标准化^[39-40]。Deng 等^[41]采用有限元法对定点旋转扳法对颈椎应力的影响进行了研究,发现定点旋转扳法能够减小颈椎间盘的应力集中。王辉昊等^[42]利用颈椎有限元模型比较了定位旋转手法与非定位旋转手法的力学特性,发现前者的力学作用较后者更直接,认为对于颈椎间盘退变患者,定位旋转手法的有效性 & 安全性更好。

3.2 牵引 牵引是治疗颈椎病的常用方法,采用有限元法可进一步研究牵引的作用机制,指导临床对牵引力度和牵引角度的选择。李雪迎等^[43]构建了 $C_1 \sim T_1$ 有限元模型,分析比较了不同大小牵引力及不同牵引角度对颈椎作用的力学特点,发现牵引时颈椎的应力集中位置是椎体后缘,且椎间隙的形变与牵引力度和牵引角度均呈正相关。

4 小 结

有限元法主要用于对几何形状复杂的组织结构进行生物力学研究,比较适合用于颈椎的生物力学研究,目前在此方面的应用已较为成熟。且较之传统的脊柱生物力学研究方法,有限元法不仅能重建复杂的颈椎结构,而且还能对颈椎结构的内部应力特性及形变进行评估。模型可重复使用是有限元法一个突出的特点,颈椎生物力学研究中需考虑椎间盘的应力松弛及蠕变等因素,采用有限元模型,只需修改相关参数(杨氏模量、密度等)即可进行另一种工况下的力学研究,不用重复建模。上述优势使得有限元法成为脊柱生物力学研究中不可或缺的手段,并与动物实验及大体标本实验相互验证及补充^[6,44-45]。但因为各种原因,当前所建立的颈椎有限元模型尚有一些不足之处:①人体脊柱的先天性及病理性畸形与脊椎退行性变均可引起脊柱不稳和矢状面失衡^[46]。但目前脊柱有限元模型建模及力学分析时未将椎体骨量减少及退行性变等情况考虑在内。②当前使用二维线性元素进行软组织建模,不能反映这些组织实际的解剖特征,且在肌肉、韧带等软组织建模中因研究者的认知及参考的解剖学文献的差异,实验数据与人体真实状态有一定差距^[47]。③当前颈椎有限元模型并未将肌肉维持颈椎稳定的作用考虑在内,忽略肌肉收缩的负荷加载所建立的模型并不符合人体正常的生理状态^[48]。随着医学影像技术、运动医学及计算机数字技术的进一步发展,构建更为详细和适合的韧带、肌

肉三维非线性体积模型,可更准确地预测各种情形下的颈椎力学特性。通过整合从运动捕捉系统得到的生理上真实的载荷条件,建立动态有限元模型,尽可能真实地模拟颈椎的动态力学特点,可提高我们对颈椎在各种活动中的生物力学特性的认识。基于个体化的实验数据,对生理和病理条件下颈椎的生物力学特性进行精确测定,构建能够有效用于治疗规划的个性化的颈椎有限元模型亦将是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 姜广宗,李学锋,聂林,等. 利用 MIMICS 和 ABAQUS 建立正常人颈椎的三维有限元模型[J]. 中国矫形外科杂志, 2013, 21(11): 1114-1120.
- [2] 中华外科杂志编辑部. 颈椎病的手术治疗及围手术期管理专家共识(2018)[J]. 中华外科杂志, 2018, 56(12): 881-884.
- [3] BREKELMANS W A, POORT H W, SLOOFF T J. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts[J]. Acta Orthop Scand, 1972, 43(5): 301-317.
- [4] RYBICKI E F, SIMONEN F A, WEIS E B Jr. On the mathematical analysis of stress in the human femur[J]. J Biomech, 1972, 5(2): 203-215.
- [5] LOTZ J C, COLLIOU O K, CHIN J R, et al. Compression-induced degeneration of the intervertebral disc: an in vivo mouse model and finite-element study[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1998, 23(23): 2493-2506.
- [6] 牛雷, 贺瑞, 张文志, 等. 枕寰枢关节三维有限元模型的建立及其有效性验证[J]. 实用骨科杂志, 2018, 24(5): 427-430.
- [7] KALLEMEYN N, GANDHI A, KODE S, et al. Validation of a C2-C7 cervical spine finite element model using specimen-specific flexibility data[J]. Med Eng Phys, 2010, 32(5): 482-489.
- [8] BISWAS J K, RANA M, MAJUMDER S, et al. Effect of two-level pedicle-screw fixation with different rod materials on lumbar spine: a finite element study[J]. J Orthop Sci, 2018, 23(2): 258-265.
- [9] NG H W, TEO E C, LEE K K, et al. Finite element analysis of cervical spinal instability under physiologic loading[J]. J Spinal Disord Tech, 2003, 16(1): 55-65.
- [10] KUMARESAN S, YOGANANDAN N, PINTAR F A, et al. Contribution of disc degeneration to osteophyte formation in the cervical spine: a biomechanical investigation[J]. J Orthop Res, 2001, 19(5): 977-984.
- [11] LOPEZ-ESPINA C G, AMIROUCHE F, HAVALAD V.

- Multilevel cervical fusion and its effect on disc degeneration and osteophyte formation[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2006, 31(9): 972 - 978.
- [12] KAYE I D, HILIBRAND A S. Adjacent level disease - background and update based on disc replacement data[J]. Curr Rev Musculoskelet Med, 2017, 10(2): 147 - 152.
- [13] ZHOU F, JU K L, ZHAO Y, et al. Progressive bone formation after cervical disc replacement; minimum of 5-year follow-up[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2018, 43(3): E163 - E170.
- [14] HISEY M S, BAE H W, DAVIS R J, et al. Prospective, randomized comparison of cervical total disk replacement versus anterior cervical fusion; results at 48 months follow-up[J]. J Spinal Disord Tech, 2015, 28(4): E237 - E243.
- [15] LOU J, LI Y, WANG B, et al. Biomechanical evaluation of cervical disc replacement with a novel prosthesis based on the physiological curvature of endplate[J]. J Orthop Surg Res, 2018, 13(1): 41.
- [16] HA S K. Finite element modeling of multi - level cervical spinal segments(C3 - C6) and biomechanical analysis of an elastomer - type prosthetic disc[J]. Med Eng Phys, 2006, 28(6): 534 - 541.
- [17] GALBUSERA F, BELLINI C M, RAIMONDI M T, et al. Cervical spine biomechanics following implantation of a disc prosthesis[J]. Med Eng Phys, 2008, 30(9): 1127 - 1133.
- [18] WOMACK W, LEAHY P D, PATEL V V, et al. Finite element modeling of kinematic and load transmission alterations due to cervical intervertebral disc replacement[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2011, 36(17): E1126 - E1133.
- [19] 何俊波, 刘浩, 吴廷奎, 等. 颈椎前路椎间盘切除融合术与人工颈椎椎间盘置换术治疗跳跃型颈椎椎间盘突出症的生物力学效应有限元分析[J]. 脊柱外科杂志, 2021, 19(1): 38 - 45.
- [20] GALBUSERA F, FANTIGROSSI A, RAIMONDI M T, et al. Biomechanics of the C5 - C6 spinal unit before and after placement of a disc prosthesis[J]. Biomech Model Mechanobiol, 2006, 5(4): 253 - 261.
- [21] LIN C Y, KANG H, ROULEAU J P, et al. Stress analysis of the interface between cervical vertebrae end plates and the Bryan, Prestige LP, and ProDisc - C cervical disc prostheses; an in vivo image - based finite element study[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2009, 34(15): 1554 - 1560.
- [22] GANBAT D, KIM Y H, KIM K, et al. Effect of mechanical loading on heterotopic ossification in cervical total disc replacement; a three - dimensional finite element analysis[J]. Biomech Model Mechanobiol, 2016, 15(5): 1191 - 1199.
- [23] RONG X, WANG B, DING C, et al. The biomechanical impact of facet tropism on the intervertebral disc and facet joints in the cervical spine[J]. Spine J, 2017, 17(12): 1926 - 1931.
- [24] YU C C, LIU P, HUANG D G, et al. A new cervical artificial disc prosthesis based on physiological curvature of end plate; a finite element analysis[J]. Spine J, 2016, 16(11): 1384 - 1391.
- [25] STAUDT M D, DAS K, DUGGAL N. Does design matter? Cervical disc replacements under review[J]. Neurosurg Rev, 2018, 41(2): 399 - 407.
- [26] 李蕊, 王松, 廖振华, 等. 人工椎间盘机械性能评估研究现状与进展[J]. 生物医学工程学杂志, 2018, 35(3): 493 - 500.
- [27] 李浩曦, 巴兆玉, 刘涛, 等. ACDF 术中螺钉位置与邻近节段退变关系的三维有限元分析[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2018, 33(1): 1 - 4.
- [28] 卢腾, 张廷, 董军, 等. 颈前路融合手术对相邻节段影响的有限元分析[J]. 南方医科大学学报, 2017, 37(1): 49 - 55.
- [29] 柏磊磊. 人工颈椎间盘置换术与颈椎前路减压植骨融合术内植入物的有限元分析[D]. 上海: 上海理工大学, 2016.
- [30] 赵改平, 陈楠心, 宋燕美, 等. 前路椎体次全切除减压融合术治疗下颈椎的有限元分析[J]. 医用生物力学, 2017, 32(3): 227 - 234.
- [31] 李忠海, 林斌, 唐家广, 等. 有限元法分析多节段颈椎病 4 种颈前路修复方式的生物力学特点[J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(44): 6612 - 6619.
- [32] CHUN D H, YOON D H, KIM K N, et al. Biomechanical comparison of four different atlantoaxial posterior fixation constructs in adults; a finite element study[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2018, 43(15): E891 - E897.
- [33] 李杰, 赵刘军, 祁峰, 等. 下颈椎前路椎弓根螺钉固定系统的有限元法生物力学研究[J]. 中华外科杂志, 2015, 53(11): 841 - 846.
- [34] 胡勇, 董伟鑫, 许建忠, 等. 不同内固定方式治疗 II 型齿状突骨折伴 I 型 Hangman 骨折联合 C2/3 椎间盘损伤稳定性的有限元分析[J]. 中华医学杂志, 2018, 98(31): 2489 - 2495.
- [35] LIU H, ZHANG B, LEI J, et al. Biomechanical role of the C1 lateral mass screws in occipitatlantoaxial fixation; a finite element analysis[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2016, 41(22): E1312 - E1318.

- WOMAC 评分、关节活动度、炎性因子的影响[J]. 中外医学研究, 2020, 18(3): 166-168.
- [13] 赵岩, 薛志鹏, 李泰贤, 等. 基于文献计量学分析中成药治疗膝骨关节炎研究现状[J]. 世界中西医结合杂志, 2020, 15(3): 449-453.
- [14] 许蓓, 林进. 骨关节炎发病机制及治疗进展[J]. 浙江医学, 2017, 39(21): 1833-1835.
- [15] 吴晓龙, 刘培建, 李瑞奇, 等. 平乐壮骨膏外敷治疗膝骨关节炎[J]. 中医正骨, 2020, 32(5): 65-66.
- [16] 陈玮, 李璟, 刘桂珍. 温针灸对膝骨性关节炎的作用机制研究进展[J]. 现代中西医结合杂志, 2019, 28(19): 2157-2161.
- [17] 王莹莹, 陈晓军. 取类比象取穴法治疗膝关节骨性关节炎患者 21 例[J]. 浙江中西医结合杂志, 2019, 29(9): 763-765.
- [18] 武旭刚. 防风膝痹汤结合温针灸辨证治疗痛痹型膝骨性关节炎患者的疗效观察[J]. 辽宁中医杂志, 2019, 46(4): 828-831.
- [19] 邝高艳, 严可, 柴爽, 等. 加味独活寄生合剂治疗膝骨关节炎临床疗效及对关节液中 IL-1, IL-6, TNF- α 及 NO 的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(1): 174-178.
- [20] 孙鹏, 李建, 樊炜骏, 等. 独活寄生汤含药血清对膝骨性关节炎大鼠关节软骨细胞凋亡及 GRP78, CHOP, HIRA 及 ASFla 表达的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(13): 158-163.
- (收稿日期: 2021-02-08 本文编辑: 郭毅曼)

(上接第 63 页)

- [36] 沈彦, 王朝阳, 吴荣, 等. 有限元分析颈椎棘突骨折内固定有效性[J]. 中国生物医学工程学报, 2017, 36(4): 456-463.
- [37] 陈树金, 马向阳, 杨进城, 等. 有限元法分析寰-枢椎椎弓根螺钉内固定的生物力学变化[J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(31): 4970-4974.
- [38] LING T H, ZAKARIA A F B, ABDULLAH A T B. Is neck massage safe? A rare case of tetraplegia and spinal shock after neck manipulation[J]. J Orthop Surg (Hong Kong), 2017, 25(1): 2309.
- [39] 王志鹏, 张晓刚, 赵文韬, 等. 有限元分析在腰椎手法治疗中的生物力学研究进展[J]. 医用生物力学, 2017, 32(3): 293-298.
- [40] LASSWELL T L, CRONIN D S, MEDLEY J B, et al. Incorporating ligament laxity in a finite element model for the upper cervical spine[J]. Spine J, 2017, 17(11): 1755-1764.
- [41] DENG Z, WANG K, WANG H, et al. A finite element study of traditional Chinese cervical manipulation[J]. Eur Spine J, 2017, 26(9): 2308-2310.
- [42] 王辉昊, 王宽, 邓真, 等. 定位与非定位颈椎旋转手法应
- 力作用比较: 三维有限元分析[J]. 医用生物力学, 2019, 34(S1): 55.
- [43] 李雪迎, 王春明, 殷秀珍, 等. 颈椎牵引过程的三维有限元分析[J]. 中国理疗杂志, 1999, 22(6): 350.
- [44] ANDERST W J, DONALDSON W F 3rd, LEE J Y, et al. Three-dimensional intervertebral kinematics in the healthy young adult cervical spine during dynamic functional loading[J]. J Biomech, 2015, 48(7): 1286-1293.
- [45] ZAFARPARANDEH I, ERBULUT D U, LAZOGLU I, et al. Development of a finite element model of the human cervical spine[J]. Turk Neurosurg, 2014, 24(3): 312-318.
- [46] ROUSSOULY P, PINHEIRO - FRANCO J L. Biomechanical analysis of the spino-pelvic organization and adaptation in pathology[J]. Eur Spine J, 2011, 20(Suppl 5): 609-618.
- [47] 霍莉峰, 倪衡建. 数字骨科应用与展望: 更精确、个性、直观的未来前景[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(9): 1457-1462.
- [48] TANG S. Does TLIF aggravate adjacent segmental degeneration more adversely than ALIF? A finite element study[J]. Turk Neurosurg, 2012, 22(3): 324-328.
- (收稿日期: 2021-01-16 本文编辑: 杨雅)

(上接第 66 页)

- [21] 金浙凯. InterTAN 与 DHS 治疗高龄不稳定型股骨转子间骨折临床疗效比较[J]. 浙江医学, 2020, 42(8): 844-846.
- [22] 曾锦源, 叶君健, 谢响, 等. 股骨近端防旋髓内钉内固定治疗老年不稳定型股骨转子间骨折中螺旋刀片位置的研究[J]. 中国修复重建外科杂志, 2020, 34(5): 569-573.
- [23] 梅晓亮, 张震祥, 唐炬, 等. 生物型加长柄半髋关节置换治疗高龄不稳定型股骨转子间骨折[J]. 临床骨科杂志, 2019, 22(6): 681-683.
- [24] SHIN Y S, CHAE J E, KANG T W, et al. Prospective randomized study comparing two cephalomedullary nails for elderly intertrochanteric fractures: Zimmer natural nail versus proximal femoral nail antirotation II[J]. Injury, 2017, 48(7): 1550-1557.
- [25] MAKKI D, MATAR H E, JACOB N, et al. Comparison of the reconstruction trochanteric antigrade nail (TAN) with the proximal femoral nail antirotation (PFNA) in the management of reverse oblique intertrochanteric hip fractures[J]. Injury, 2015, 46(12): 2389-2393.
- (收稿日期: 2020-12-25 本文编辑: 时红磊)