

文章编号: 1004-7220(2024)04-0768-07

颈前路手术治疗颈椎病的有限元研究进展

田雪丰, 吕俊桥, 尉哲铭, 刘阳, 孙麟

(山西医科大学第三医院(山西白求恩医院 山西医学科学院 同济山西医院), 太原 030032)

摘要: 不同颈前路手术治疗颈椎病对患者颈椎生物力学特征的影响因手术方法而异, 但临床上较难精细地测量颈椎各部分或内植物的力学属性。因此, 有限元法被广泛应用于颈前路手术的研究, 可以通过计算机精确分析不同部分的应力和应变分布, 为研究不同颈前路术式的生物力学特征提供便利。本文回顾了有限元法在颈前路手术中的研究进展, 对有限元研究在融合或非融合术式、混合手术及微创手术等方面的现状进行归纳总结, 以期为不同颈前路手术的选择提供生物力学角度的理论参考。

关键词: 颈椎病; 颈椎前路手术; 生物力学; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.04.029

Progress of Finite Element Study on Anterior Cervical Surgery for Cervical Spondylosis

TIAN Xuefeng, LÜ Junqiao, YU Zheming, LIU Yang, SUN Lin

(Third Hospital of Shanxi Medical University, Shanxi Bethune Hospital, Shanxi Academy of Medical Sciences, Tongji Shanxi Hospital, Taiyuan 030032, China)

Abstract: The impact of various anterior cervical surgeries on biomechanical properties of cervical vertebrae varies depending on the specific surgical techniques employed. However, accurately measuring the mechanical characteristics of individual parts of the cervical vertebrae or implants within them in a clinical setting can be challenging. As a result, the finite element method is commonly utilized in studies on anterior cervical surgery, allowing for the precise analysis of stress and strain distributions in different areas of interest through computer simulations. This method facilitates the study of biomechanical properties associated with different anterior cervical surgical approaches. This review discusses the progress of finite element analysis in anterior cervical surgery, summarizes current research findings on fusion and non-fusion procedures, hybrid surgeries, and minimally invasive techniques, so as to provide theoretical references for the selection of different anterior cervical surgical interventions from a biomechanical perspective.

Key words: cervical spondylosis; cervical anterior surgery; biomechanics; finite element analysis

颈椎病的主要病理基础是颈椎退变引起的椎间盘突出, 以及相邻椎体后缘骨赘的形成, 造成脊髓、神经根或血管受压^[1]。颈前路是简单易行的入

路方法, 通过手术从脊髓前方切除突出的椎间盘及椎体后缘骨赘, 同时切除后纵韧带及其粘连的增厚或骨化部分, 再附加内固定, 使颈椎稳定性得以重

建^[2]。随着颈前路术式的不断改进,不同术式对颈椎结构、传统内固定装置及新型植入物应用所带来的术后颈椎生物力学改变,需要进行进一步的探索。

有限元思想起源于1943年Courantz尝试在一系列三角形区域上定义分片连续函数的设想^[3],并于1956年首先应用于飞机结构的静力学和动力学分析^[4]。1972年,Brekelmans和Rybicki首次将有限元分析(finite element analysis, FEA)方法应用于骨科生物力学研究^[5-6],随后Belytschko等^[7]建立了椎间盘二维有限元模型,标志着有限元法在脊柱研究中开始应用。但由于颈椎复杂的生物力学特性,直到20世纪90年代才出现了颈椎的相关模型开发^[8]。随着计算机技术的进步,利用FEA在已建立的颈椎有限元模型基础上模拟手术,可以对术后颈椎及内植物各方面的生物力学特性进行计算,包括不同条件下的应力、应变和载荷,为颈椎前路手术术前规划、术中操作及术后指导,以及手术方案、内植物的改良等提供生物力学证据。本文阅读相关文献,对与颈椎前路手术相关FEA的研究进展进行综述。

1 颈前路手术 FEA 方法

1.1 建立完整或部分节段颈椎模型

首先,通过CT扫描等医学成像技术获取颈椎图像,使用三维重建软件(如Mimics或Geomagic)将图像转换成三维模型并进行打磨细化,确保模型真实反映颈椎结构^[9-10];在三维模型基础上,使用HyperMesh等软件进行有限元网格划分前处理,将连续的三维实体分割成小单元(称为节点和单元),随后为模型中的不同组织(如椎体、韧带、椎间盘等)赋予相应的材料属性^[10]。

1.2 对术前颈椎模型进行生物力学有效性验证

在ANSYS、ABAQUS等FEA软件中,通常采取将颈椎模型末节椎体下表面进行完全约束、在最上位椎体上表面及关节突等部位添加力矩和转矩的方法,模拟头部重量及不同工况下颈椎活动(一般为前屈、后伸、侧屈、旋转工况)^[11-12],测量颈椎相应节段的活动度(range of motion, ROM)并与经典文献数据比较,以验证模型有效性。

1.3 手术模拟及术后模型的建立

在3-Matic、SolidWorks等正向工程软件中设计与颈椎模型匹配的手术内植物,如椎间融合器、钛网笼(titanium mesh cage, TMC)、钛板螺钉或新型器械,根据不同术式切除颈椎模型上的相应结构,在相应位置将颈椎模型与内植物模型装配^[9,13],再次行网格划分及材料赋值步骤得到术后模型。

1.4 边界条件与载荷施加

设定合适的边界条件,根据手术的实际需求,施加特定的力学载荷(如轴向压力和力偶矩),模拟复杂的生物力学行为。

1.5 分析生物力学响应

通过FEA软件计算并分析,可以比较不同固定系统在不同工况下的生物力学响应,如手术前后颈椎的应力分布、ROM变化、内植物-椎体界面应力等,进一步评估手术对颈椎稳定性的影响以及邻近节段退变(adjacent segment disease, ASD)等并发症风险。

研究显示,材料属性对模拟结果的具有显著影响。对于椎体本身,荀福星等^[14]研究了不同材料属性分配梯度对椎体有限元模型力学性能的影响,认为材料属性划分不宜过多或过少,10份左右的划分梯度既保证了运算结果的精确性,也可相对提高运算速度。王宏博等^[15]对一种颈前路记忆加压固定器与传统钛板固定器赋予不同的材料参数,结果发现,在邻近节段椎间盘ROM及应力影响上产生了明显差异,颈前路记忆加压固定器一定程度上可减缓ASD的进程。因此,对于颈椎各部位及内植物材料属性的选择和分配,应当参考足够严谨的文献数据,有条件的情况下也可以采取体内外生物力学相关测试确定参数。

2 颈前路融合手术

2.1 颈前路椎间盘切除融合术

颈前路椎间盘切除融合(anterior cervical discectomy and fusion, ACDF)术是当前治疗脊髓型颈椎病的金标准,其概念和实践可以追溯到1958年。通过前路去除椎间盘并进行椎体间融合,可以治疗颈椎疾病^[16]。当时通过取髂骨植骨,此后也采用同种异体骨进行植骨,如此操作虽然融合率高,免疫排斥反应低,但移植骨下沉、塌陷的机率也相

对较高。因此,目前的手术在切除椎间盘后,采用对椎间隙撑开、置入融合器的方法,不仅可以减少下沉率、保证融合率,也能一定程度恢复颈椎生理曲度。一些外科医生倾向于使用较大尺寸的椎间融合器,但过度撑开可能会适得其反,导致 ASD。Cheng 等^[17]通过植入不同高度的椎间融合器,观察到过度撑开超过 2 mm 会引起相邻节段的生物力学响应变化,建议手术时应选择合适的撑开程度,以维持最佳稳定性、降低潜在并发症风险。基于此,张童童等^[18]优化设计了一种利用连杆机构调节高度的聚醚醚酮材料 3D 打印融合器,计算融合节段在生理载荷下的终板应力分布与 ROM,以分析其颈椎中的稳定性;并在体外进行压缩性能测试,获得良好效果。同时,对于伴有上肢神经症状的患者,如存在钩突增生的情况,术中应去除部分钩突,打开神经根管,以缓解根性疼痛症状,但是过度去除钩突也会影响颈椎的稳定性^[19]。Guo 等^[20]在 ACDF 模型上将单侧或双侧钩椎关节进行不同程度的切除,设置不同工况。结果发现,术后屈伸活动时椎体的应力分布和峰值位移无明显差异,而在侧弯和旋转工况下明显增加;并且双侧切除影响大于单侧切除,双侧切除小于 30% 的或单侧切除小于 40% 的钩椎关节对颈椎的稳定性影响较小。

早期 ACDF 术后保留前纵韧带防止植骨块脱出,但颈椎稳定差,有学者提出了使用钛板联合椎间融合器增加颈椎稳定性^[21]。经过多年发展,切除病变节段前纵韧带,置入钛板螺钉支撑已成为颈前固定的常规手段。Guo 等^[10]比较了不同钛板-椎间盘距离(plate-to-disc distance, PDD)对椎体、椎间盘及内植物应力的影响,发现较短的 PDD 有助于预防融合器下沉、假关节形成和内固定失效。而对于固定钛板的螺钉,季兴华等^[22]通过在连续两节段上将螺钉对以不同方向置入椎体,研究不同螺钉放置角度对应力的传递效果。结果发现,在不同工况下,内固定装置均相对稳定,且不同螺钉置入方向导致位移变化小,故认为置入螺钉的方向无须刻意追求。

另一方面,传统的钢板联合融合器固定有时会造成吞咽困难及周围组织损伤,使用由融合器和椎体锁定螺钉组成的零切迹(zero-profile, ZP)系统进行固定,可以有效减少上述并发症,同时 ASD 及螺

钉松动的发生率也较低^[23]。林宏衡等^[12]在 C4~5 与 C5~6 节段设定 ZP 固定模型与传统固定模型,发现应用 ZP 固定对手术节段 ROM 的限制更小,但融合器及中间椎体应力却更大。Zhang 等^[24]研究表明,两节段 ACDF 中的 ZP 固定更多地依赖终板传导应力,可导致椎体中部松质骨应力增加,故需要更多的骨终板保护,但常规的术中刮除导致骨性终板前缘缺损、终板下的松质骨支撑不足,最终导致椎体塌陷。基于以上发现,研究者们普遍建议在 ACDF 中选择植入物时,应充分考虑患者特征,合并颈椎不稳及骨质疏松的患者应尽量选择传统内固定。

针对不同的患者,刘伟等^[25]开发了包括矩形、梯度和八面体 3 种多孔结构的 3D 打印钛合金解剖学椎间融合器模型。这些融合器能够适应个性化的定制需求,通过在最大压力下进行应力应变分析计算其弹性模量。研究表明,此类融合器减小因弹性模量差异过大而对融合过程造成的影响,在孔隙率为 60% 时,该结构表现出较好的性能,并有望进行进一步优化。

2.2 颈前路椎体次全切除减压融合术

颈前路椎体次全切除减压融合(anterior cervical corpectomy and fusion, ACCF)术由 ACDF 衍生而来,于 1991 年由 Okada 等^[26]首先提出,其通过切除受累椎间盘及大部分椎体,更充分和广泛地解除颈脊髓压迫。ACCF 术中切除椎体后,通常植入 TMC 作为常规的椎体间支撑及融合装置,但术后 TMC 下沉会导致颈椎弯曲和椎体高度的改变,甚至加重脊髓受压^[27]。TMC 置入的角度及前后缘高度可能影响 TMC 的下沉。李智斐等^[9]模拟了 C5 椎体次全切后置入不同倾斜角度的 TMC,在上位椎体施加不同应力,结果发现,在矢状位上当 TMC 前缘长于后缘且倾斜角度在 1°~5° 内时, TMC 对椎体的支撑更稳定,更大的角度则容易造成 TMC 下沉。此外,通过改进 TMC 的结构,可以降低其下沉风险。Zhang 等^[13]设计了一种新型融合器,能在两端匹配上下终板形状,与 TMC 组合使用,其对终板的应力相对传统 TMC 明显减小。

骨质疏松症如何影响 ACCF 后 ASD 的发展,目前尚有争议。Li 等^[28]通过降低椎体材料的弹性模量模拟骨质疏松,发现骨质疏松反而会减少术后邻

近节段水平旋转及屈曲角度的增加,其应力和运动范围也相应降低,表明骨质疏松可能反而能对邻近节段起到一定的保护作用。但是对于老年性骨质疏松症的患者,传统颈前路固定的稳定性常受到批评。单纯使用椎体螺钉的持力不够,甚至会出现早期固定失败或植骨不融合。Koller 等^[29]创新性地提出下颈前路经椎弓根内固定术概念,这项兼具前路手术优势的技术经过不断发展,不仅适用于骨质疏松患者,也适用于多节段前路减压后的稳定性重建。Huang 等^[11]研究发现,前椎弓根螺钉(anterior transpedicular screw, ATPS)固定系统在颈椎运动时能够承受更大的应力,从而减轻对 TMC 的应力,并且在不同运动负荷下,螺钉的最大位移明显减小,有助于在椎体的三柱之间提供更高的稳定性,证明 ATPS 系统适用于减压后的两节或多节段稳定性重建。

2.3 颈前路椎体骨化物复合体前移融合术

颈前路椎体骨化物复合体前移融合术(anterior controllable antedisplacement and fusion, ACAF)是近年新兴的一种颈前路减压手术,目前主要由海军军医大学史建刚教授团队开展。对于多节段脊髓型颈椎病、严重的颈椎后纵韧带骨化症,通过将椎体骨化物前移、切除并进行融合,以减轻压迫脊髓和神经根的症状,被认为更加安全有效^[30]。Kong 等^[31]研究发现,ACAF 相对于上述两种术式,可以获得比 ACCF 更好的术后稳定性,并且 ACAF 内固定失效、头尾端螺钉拔出、松动及内置物下沉的风险都比 ACCF 要小。但上述风险还是比 ACDF 要大,特别是在旋转活动中。而在骨融合方面,ACAF 要比 ACDF 更好。因为 ACAF 开展时间尚短,这些 FEA 结果与临床研究相辅相成,将进一步推动该术式的进步与成熟。

3 颈前路非融合手术

通常来说,非融合的颈前路术式主要是指颈椎人工间盘置换术(artificial cervical disc replacement, ADR),目前对于 ADR 是否可以作为 ACDF 可靠的代替方案尚存争议。ADR 的优势包括减少相邻节段的椎间盘内压力和小关节突应力,在单节段或连续两节段 ADR 后 ASD 的风险较 ACDF 都明显降低^[32]。另一方面,临床上也不能忽视跳跃型颈椎间

盘突出症,手术方法可能对术后未处理节段产生不同影响。有研究者在 C3~4 和 C5~6 上模拟跳跃节段的 ACDF 和 ADR,结果发现,融合模型 ROM 在手术节段显著降低,中间节段(C4~5)各方向 ROM、椎间盘应力和小关节压力显著增加;而 ADR 模型相应 ROM 在所有方向上与完整脊柱的 ROM 相似,未处理节段的 ROM 则均匀增加,中间节段也没有出现附加应力^[33-34]。上述研究证明,相比 ACDF,ADR 治疗跳跃节段颈椎退行性椎间盘疾病在生物力学方面更具优势。

在进行 ADR 时,人工椎间盘假体的设计、假体材料的选择以及假体高度都应进行充分考虑。Chen 等^[35]将不同材料椎间盘假体分别植入不同矢状面颈椎模型,发现前凸正常情况下假体材料并不影响颈椎 ROM,且均能维持颈椎稳定;但是当脊柱失去前凸角时,金属-金属或金属-聚乙烯假体仍能提供相似的节段稳定性,而弹性假体倾向于出现明显的颈椎不稳情况。对于病变节段的椎间隙高度,Yuan 等^[36]研究认为,人工颈椎间盘的高度增加可能会增加其失效的风险,假体高度超过正常高度 2 mm 可能导致颈椎生物力学和骨-假体界面应力的显著变化。

但即使 ADR 在生物力学角度具有诸多优点,其在实际应用中却频频遇冷。现实中 ADR 术后广泛出现异位骨化、骨磨损碎屑和组织反应等并发症的原因,尚不能完全通过 FEA 解释。

4 颈前路混合术式

对于多节段颈椎病,有时临床医生对各节段按退变程度分别处理,将融合与非融合术式联合应用,寄望其长处互补,形成颈椎前路混合术式(hybrid surgery, HS)。由于不同术式的混用,不同节段颈椎表现出更复杂的生物力学特性。周维等^[37]为了研究连续节段颈椎 HS 的生物力学特性及其对相邻节段的影响,在 C3~6 节段模拟了不同组合的 HS。通过计算发现,AFA 模型(C3~4、C5~6 行 ADR,C4~5 行 ACDF)相邻节段 ROM 与正常颈椎模型接近,而 FAF 模型(C3~4、C5~6 植入 Zero-P,C4~5 植入 Prestige LP)和 FFF 模型(C3~6 行 ACDF)相邻节段 ROM 则增大,以弥补融合节段运动的损失。由于相邻节段之间存在的运动差异,

导致不同模型中相邻节段产生不同的椎间盘内压力和小关节接触力,故临床医生在连续节段上选择HS术式时,应考虑这些差异。

5 颈前路微创手术

作为治疗颈椎病的一种趋势,颈前路的微创手术在减少医源性创伤的同时,也保留了术后颈椎的运动能力,避免相邻节段ROM过度增加,降低其后期可能继续发生退变的机会^[38]。但这种部分切除的非融合手术也会导致术后稳定性下降、后方小关节突压力增大等问题。目前,针对前路微创术后的研究较少。有研究者通过模拟单节段的经皮脊柱内镜下前路颈椎间盘摘除术(percutaneous full-endoscopic anterior cervical discectomy, PEACD)和颈椎后路椎间孔切开术(posterior cervical foraminotomy, PCF),发现两种手术均对术后颈椎稳定性的影响较小,但PEACD手术引起ROM和椎间盘压力显著增加,并且改变了小关节突力的传递路径;而PCF术后可降低关节突的压力负荷^[38-39]。上述研究认为,与PEACD相比,PCF可能更适合治疗颈椎病。与相对成熟的后路微创手术相比,各种颈前路微创手术仍具有争议,其相关生物力学研究还需要更加深入,来推动术式的不断进步。

6 总结与展望

FEA作为一种高效、准确的计算方法,广泛应用于评估颈椎生物力学和运动学。通过对各种颈前路手术进行有限元建模和分析,可以精确计算许多通过体内或体外研究在人体难以获取的生物力学特征,为不同手术的规范化提供重要参考,也为未来研发更符合人体力学的内植物提供进一步的保障。

但是,目前研究多是以正常人颈椎形态为基础,赋予基于文献的材料参数来建立有限元模型,其与在真实退变颈椎上进行手术相比仍存在一定差异。即使考虑到颈椎的退变,也往往仅涉及到形态变化或骨质变化的某一方面。例如,Li等^[28]考虑了骨质疏松,Chen等^[35]考虑了不同的矢状位颈椎,但这些变化往往同时存在且更复杂。此外,大多数有限元模型的构建基于个体的CT影像资料,能更为精准地进行变量控制,但同时模型的普适性也有

所下降。目前的有限元模型仍缺乏统一、更好的韧带和肌肉建模方法,亟需进一步探索。

希望随着未来技术的进步,可以建立更符合实际的有限元模型,以应用于更广泛的医学生物力学研究领域。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:田雪丰负责检索融合类手术的文献以及阅读、观点提炼,并汇总各部分文献观点,撰写论文;吕俊桥负责论文修改;尉哲铭、刘阳负责检索非融合手术、混合术式及微创手术相关文献,并进行阅读、观点提炼;孙麟对论文选题、结构设计、修改提供指导。

参考文献:

- [1] WANG L, BAI M, LI X B, *et al.* Does the sizing of current cervical disc arthroplasty systems match Chinese cervical anatomic dimensions? [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022 (10): 1036223.
- [2] 李赓, 吴奉梁, 刘晓光. 颈椎前路术式选择对多节段颈椎病术后邻近节段退变的影响[J]. *中国医刊*, 2020, 55(3): 255-258.
- [3] COURANT RL. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibration [J/OL]. *B Am Math Soc*, 1943, DOI: 10.1090/S0002-9904-1943-07818-4.
- [4] TURNER MJ. Stiffness and deflection analysis of complex structures [J]. *J Aeronaut Sci*, 1956(23): 805-823.
- [5] BREKELMANS WA, POORT HW, SLOOFF TJ. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts [J]. *Acta Orthop Scand*, 1972, 43(5): 301-317.
- [6] RYBICKI EF, SIMONEN FA, WEIS EJ. On the mathematical analysis of stress in the human femur [J]. *J Biomech*, 1972, 5(2): 203-215.
- [7] BELYTSCHKO T, KULAK RF, SCHULTZ AB, *et al.* Finite element stress analysis of an intervertebral disc [J]. *J Biomech*, 1974, 7(3): 277-285.
- [8] GROSLAND NM, SHIVANNA KH, MAGNOTTA VA, *et al.* IA-FEMesh: An open-source, interactive, multiblock approach to anatomic finite element model development [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2009, 94(1): 96-107.
- [9] 李智斐, 杨尹, 陈华龙, 等. 颈椎前路椎体次全切除减压融合钛笼倾斜角度与术后钛笼下沉的有限元分析[J]. *中国组织工程研究*, 2024, 28(9): 1313-1319.
- [10] GUO X, ZHOU J, TIAN Y, *et al.* Biomechanical effect of different plate-to-disc distance on surgical and adjacent segment in anterior cervical discectomy and fusion—A

- finite element analysis [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22(1): 340.
- [11] HUANG S, LING Q, LIN X, *et al.* Biomechanical evaluation of a novel anterior transpedicular screw-plate system for anterior cervical corpectomy and fusion (ACCF): A finite element analysis [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2023(11): 1260204.
- [12] 林宏衡, 方志超, 梁梓杨, 等. 双节段颈前路椎间盘切除融合术应用零切迹系统或钢板联合融合器固定后颈椎生物力学变化的三维有限元研究[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2023, 33(2): 148-154.
- [13] ZHANG K, YANG Y, MA L, *et al.* Biomechanical effects of a novel anatomic titanium mesh cage for single-level anterior cervical corpectomy and fusion: A finite element analysis [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022(10): 881979.
- [14] 荀福兴, 刘雄, 张美超. 材料属性分配梯度对椎体有限元模型力学性能的影响[J]. *医用生物力学*, 2013, 28(4): 432-435.
- XUN FX, LIU X, ZHANG MC. Influence from different assigned gradients of material attributes on mechanical properties of the vertebral finite element model [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(4): 432-435.
- [15] 王宏博, 刘俭涛, 李昂, 等. 颈前路记忆加压固定器置入后对邻近节段影响的三维有限元分析[J]. *中华骨科杂志*, 2020, 40(16): 1098-1108.
- [16] SMITH GW, ROBINSON RA. The treatment of certain cervical-spine disorders by anterior removal of the intervertebral disc and interbody fusion [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1958, 40-A(3): 607-624.
- [17] CHENG CH, CHIU PY, CHEN HB, *et al.* The influence of over-distraction on biomechanical response of cervical spine post anterior interbody fusion: A comprehensive finite element study [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2023(11): 1217274.
- [18] 张童童, 董恩纯, 郑纪豹, 等. 3D打印高度可调聚醚醚酮颈椎椎间融合器的优化设计与评价[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(2): 177-183.
- ZHANG TT, DONG EC, ZHENG JB, *et al.* Optimization design and evaluation of three-dimensional printed peek cervical interbody fusion cage with adjustable height [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(2): 177-183.
- [19] GROB D, PEYER JV, DVORAK J. The use of plate fixation in anterior surgery of the degenerative cervical spine: A comparative prospective clinical study [J]. *Eur Spine J*, 2001, 10(5): 408-413.
- [20] GUO W, JIANG Y, ZHU Y, *et al.* Effect of ACDF combined with different degrees of partial resection of uncovertebral joints on cervical stability and degeneration: A three-dimensional finite element analysis [J]. *J Orthop Surg Res*, 2022, 17(1): 551.
- [21] WANG ST, GOEL VK, FU CY, *et al.* Comparison of two interbody fusion cages for posterior lumbar interbody fusion in a cadaveric model [J]. *Int Orthop*, 2006, 30(0341-2695): 299-304.
- [22] 季兴华, 魏金政, 郝帅, 等. 有限元法预测颈椎前路椎间盘切除融合螺钉置入位置对内固定稳定性的影响[J]. *中国组织工程研究*, 2024, 28(30): 4777-4782.
- [23] SCHOLZ M, SCHNAKE KJ, PINGEL A, *et al.* A new zero-profile implant for stand-alone anterior cervical interbody fusion [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2011, 469(3): 666-673.
- [24] ZHANG J, CHEN W, WENG R, *et al.* Biomechanical effect of endplate defects on the intermediate vertebral bone in consecutive two-level anterior cervical discectomy and fusion: A finite element analysis [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2023, 24(1): 47.
- [25] 刘伟, 赵京生, 王祎霖, 等. 3D打印不同骨密度的椎间融合器优化设计[J]. *中国医疗器械杂志*, 2024, 48(1): 20-25.
- [26] OKADA K, SHIRASAKI N, HAYASHI H, *et al.* Treatment of cervical spondylotic myelopathy by enlargement of the spinal canal anteriorly, followed by arthrodesis [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1991, 73(3): 352-364.
- [27] HUR JW, RYU KS, AHN S, *et al.* Comparative analysis of 2 different types of titanium mesh cage for single-level anterior cervical corpectomy and fusion in terms of postoperative subsidence and sagittal alignment [J]. *Clin Spine Surg*, 2020, 33(1): E8-E13.
- [28] LI Y, CHEN Q, SHU X, *et al.* Biomechanical effect of osteoporosis on adjacent segments after anterior cervical corpectomy and fusion [J]. *World Neurosurg*, 2023(171): e432-e439.
- [29] KOLLER H, ACOSTA F, TAUBER M, *et al.* Cervical anterior transpedicular screw fixation (ATPS)—Part II. Accuracy of manual insertion and pull-out strength of ATPS [J]. *Eur Spine J*, 2008, 17(4): 539-555.
- [30] SUN J, SHI J, XU X, *et al.* Anterior controllable antedisplacement and fusion surgery for the treatment of multilevel severe ossification of the posterior longitudinal ligament with myelopathy: Preliminary clinical results of a novel technique [J]. *Eur Spine J*, 2018, 27(6): 1469-1478.
- [31] KONG Q, LI F, YAN C, *et al.* Biomechanical comparison of anterior cervical corpectomy decompression and fusion, anterior cervical discectomy and fusion, and anterior controllable antedisplacement and fusion in the surgical treatment of multilevel cervical spondylotic myelopathy: A finite element analysis [J]. *Orthop Surg*, 2024, 16(3): 687-699.

- [32] KHALAF K, NIKKHO M. Comparative biomechanical analyses of lower cervical spine post anterior fusion versus intervertebral disc arthroplasty: A geometrically patient-specific poroelastic finite element investigation [J]. *J Orthop Translat*, 2022(36): 33-43.
- [33] 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.
- [34] WU T, MENG Y, WANG B, *et al.* Biomechanics following skip-level cervical disc arthroplasty versus skip-level cervical discectomy and fusion: A finite element-based study [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2019, 20(1): 49.
- [35] CHEN WM, JIN J, PARK T, *et al.* Strain behavior of malaligned cervical spine implanted with metal-on-polyethylene, metal-on-metal, and elastomeric artificial disc prostheses—A finite element analysis [J]. *Clin Biomech*, 2018(59): 19-26.
- [36] YUAN W, ZHANG H, ZHOU X, *et al.* The influence of artificial cervical disc prosthesis height on the cervical biomechanics: A finite element study [J]. *World Neurosurg*, 2018(113): e490-e498.
- [37] 周维, 张亚丽, 戎鑫, 等. 颈椎连续三节段 Hybrid 手术与融合术的生物力学研究[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(1): 45-51.
- ZHOU W, ZHANG YL, RONG X, *et al.* Biomechanical study on contiguous three-level cervical hybrid surgery and anterior cervical discectomy and fusion [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(1): 45-51.
- [38] CHEN C, YUCHI CX, GAO Z, *et al.* Comparative analysis of the biomechanics of the adjacent segments after minimally invasive cervical surgeries versus anterior cervical discectomy and fusion: A finite element study[J]. *J Orthop Translat*, 2020, (23): 107-112.
- [39] YUCHI CX, SUN G, CHEN C, *et al.* Comparison of the biomechanical changes after percutaneous full-endoscopic anterior cervical discectomy versus posterior cervical foraminotomy at C5-C6: A finite element-based study [J]. *World Neurosurg*, 2019(128): e905-e911.

(上接第 767 页)

- [54] WANG M, CHENG B, YANG Y, *et al.* Microchannel stiffness and confinement jointly induce the mesenchymal-amoeboid transition of cancer cell migration [J]. *Nano Lett*, 2019, 19(9): 5949-5958.
- [55] LIU W, SUN Q, ZHENG ZL, *et al.* Topographic cues guiding cell polarization via distinct cellular mechanosensing pathways [J]. *Small Methods*, 2022, 18(2): 2104328.
- [56] BIAN W, LIAU B, BADIE N, *et al.* Mesoscopic hydrogel molding to control the 3D geometry of bioartificial muscle tissues [J]. *Nat Protoc*, 2009, 4(10): 1522-1534.
- [57] SHI N, LI Y, CHANG L, *et al.* A 3D, magnetically actuated, aligned collagen fiber hydrogel platform recapitulates physical microenvironment of myoblasts for enhancing myogenesis [J]. *Small Methods*, 2021, 5(6): 2100276.
- [58] JIA Y, HU J, AN K, *et al.* Hydrogel dressing integrating fak inhibition and ros scavenging for mechano-chemical treatment of atopic dermatitis [J]. *Nat Commun*, 2023, 14(1): 2478.
- [59] ZOU F, WANG Y, TANG T, *et al.* Synergistic strategy constructed hydrogel-aerogel biphasic gel (hab-gel) with self-negative-pressure exudate absorption, m2 macrophage-polarized and antibacterial for chronic wound treatment [J]. *Chem Eng J*, 2023(451): 138952.
- [60] WU X, CHEN H, LUO T, *et al.* Designing a dual-function skin-stretching device with 3D printing for mechanotransduction analysis and scar prevention: A preliminary study [J]. *Mater Des*, 2022(220): 110862.
- [61] MUSAH S, WRIGHTON PJ, ZALTSMAN Y, *et al.* Substratum-induced differentiation of human pluripotent stem cells reveals the coactivator YAP is a potent regulator of neuronal specification [J]. *Proc Natl Acad Sci*, 2014, 111(38): 13805-13810.
- [62] HU Y, JIA Y, WANG S, *et al.* An ECM-mimicking, injectable, viscoelastic hydrogel for treatment of brain lesions [J]. *Adv Healthc Mater*, 2023, 12(1): 2201594.
- [63] RAJPURKAR P, CHEN E, BANERJEE O, *et al.* AI in health and medicine [J]. *Nat Med*, 2022, 28(1): 31-38.
- [64] 季葆华. 生命系统中的力化耦合定量机制与力医学路径初探 [J]. *医用生物力学*, 2023, 38(3): 433-450.
- Jl BH. Mechano-chemical coupling in living organisms and possible road map of mechanomedicine [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(3): 433-450.