

文章编号:1004-7220(2024)02-0187-10

· 专家论坛 ·

## 脊柱生物力学 2023 年度研究进展

吴爱澜, 郭振宇, 王向阳

(温州医科大学附属第二医院 脊柱外科, 浙江 温州 325027)

**摘要:** 脊柱是人体最重要的骨骼结构之一。它具有保护脊髓、支持体重、减缓冲击,并允许躯干灵活运动的功能。脊柱生物力学研究对于全面认识脊柱结构功能、疾病发病机制意义重大。2023年,国内外学者开展了大量脊柱相关的生物力学研究,包括脊柱基础生物力学的认知,病理条件下脊柱力学特性改变,以及基于生物力学研究基础设计的各种治疗脊柱疾病办法。本文着重分析脊柱生物力学 2023 年度研究进展,并以几种较为典型的脊柱疾病或病理状态为例进行详解介绍。

**关键词:** 脊柱生物力学; 椎间盘退变; 脊柱侧弯; 力学生物学

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2024.02.001

### Research Progress of Spinal Biomechanics in 2023

WU Aimin, GUO Zhenyu, WANG Xiangyang

(Department of Spine Surgery, the Second Affiliated Hospital of Wenzhou Medical University, Wenzhou 325027, Zhejiang, China)

**Abstract:** Spine is one of the most important skeletal structures in human body. It has the function of protecting the spinal cord, supporting body weight, slowing impact and allowing flexible movement of the trunk. The study of spinal biomechanics is very important for a comprehensive understanding of the structure and function of the spine and the pathogenesis of spinal diseases. In 2023, scholars at home and abroad have done a lot of researches on spine related biomechanics, including the cognition on basic biomechanics of the spine, the changes in mechanical properties of the spine under pathological conditions, and the design of various treatment methods of spinal diseases based on biomechanical researches. This review focuses on the research progress of spinal biomechanics in 2023, and several typical spinal diseases or pathological states are introduced in detail as examples.

**Key words:** spinal biomechanics; intervertebral disc degeneration; scoliosis; mechanobiology

脊柱生物力学属于生物力学众多分支中的一个,其主要是应用生物力学原理和工程技术,研究及防治脊柱相关疾病。作为人体的中轴骨,脊柱是人体主要的支撑结构,由椎骨和椎间盘(intervertebral disc, IVD)组成。IVD、椎骨之间的关

节、韧带和周围的肌肉,构成了脊柱最基本的运动单位,IVD在正日常活动及力学支撑中起着最重要的作用。IVD、椎骨、关节突、韧带以及周围肌肉组织的结构和功能各不相同。在正常的生理状态下,这些结构共同协调作用,使脊柱起到承载、运动、保

收稿日期:2024-04-02; 修回日期:2024-04-16

基金项目:国家自然科学基金项目(82272555),浙江省自然科学基金项目(LGF21H60010),温州市重大科技创新攻关项目(ZY2022010)

通信作者:王向阳,教授,主任医师,E-mail:xiangyangwang@126.com

护脊髓的作用。由于任何一个部分的结构功能或运动发生异常都有可能诱发疾病的发生,因此,了解脊柱结构的生物力学特性是脊柱相关医师和研究者必须具备的基础知识。

## 1 脊柱基本结构及生物力学研究

### 1.1 脊柱基本结构

人体脊柱由30多块不同椎体组成(7块颈椎、12块胸椎、5块腰椎、5块融合的骶椎、3~5块融合的尾骨),构成脊柱的基本单位。正常人体脊柱中,胸椎存在一定程度的后凸,颈椎和腰椎存在一定程度的前凸。椎体由外层较硬的皮质骨与内部较软的松质骨组成。一般情况下,椎体的长度、宽度和高度从上到下逐渐增加,原因是较低水平的椎骨需要承受更大的压力。椎体截面积逐渐增大,生物力学强度也逐渐增大。

韧带通过连接相邻的椎骨,维持脊柱的稳定性和正常形态。脊柱共有7条韧带,从前向后分别为前纵韧带、后纵韧带、横突间韧带、关节囊韧带、黄韧带、棘间韧带和棘上韧带,所有韧带的生物力学参数都随着年龄的增长而退化。例如,韧带吸收冲击的能力随着年龄增加而下降。韧带在脊柱的功能活动中起着两个不同的作用:正常情况下,以最小的阻力和能量消耗保证脊柱在生理范围内一定程度的平稳运动;创伤情况下,提供脊髓的最大保护。

IVD位于两节椎骨之间,由髓核(nucleus pulposus, NP)、纤维环(annulus fibrosus, AF)和软骨板构成,起到缓冲和稳定脊柱的作用。NP位于IVD中央,主要由水、II型胶原和弹性蛋白纤维、蛋白质、多糖和脊索细胞组成。随着年龄的增长,脊索细胞完全降解,水仍然占据约85%的体积,使其具有黏弹性,以及抗压缩变形性。NP在吸收和扩散应力方面发挥各向异性的均匀性,并通过变形将压力扩散到AF,从而减轻对下位椎体的冲击。AF是一种无细胞、无血管的结构,主要由纤维软骨细胞和软骨细胞组成,形态类似成纤维细胞。其细胞外基质(extracellular matrix, ECM)从内到外平滑过渡,外层主要包含I型胶原蛋白,而内层主要包含II型胶原蛋白。II型胶原蛋白因其缺氧、亲水和富含蛋白聚糖的特性,与AF硬外层和软内层的物理学特

性一致,其在弯曲和扭转期间结合NP的外层,内层在轴向压缩期间结合NP。从形态学角度来看,AF包括15~25个同心环形板层,主要构成整齐排列的胶原纤维束,这些胶原纤维的方向与水平面成 $30^\circ$ 。不同层之间的层间基质相互连接,通过分割边界连接。软骨终板是薄的透明软骨层,厚度为0.6~1.2 mm,具有最薄和最多孔的中心区域。虽然NP、AF和软骨终板在解剖学上是不同的,但它们的精细结构彼此交叉。AF中靠近NP的胶原纤维与软骨终板中的胶原纤维连续,有助于减少过度集中的应力,例如IVD拉伸、压缩和剪切,并防止不可逆的IVD损伤。软骨终板还充当了IVD和椎体之间在多个方向上传递力的媒介。软骨终板将NP产生的静水压力均匀地分布在椎体表面上,以防止NP局部扩张到椎体中。

脊柱功能单元(functional spinal unit, FSU)是脊柱的基本生物力学单元,包括相邻的两个椎体及其IVD、关节突关节、韧带肌肉等非单一结构,它们共同在支撑和传递生物力学载荷、维持机体活动稳定性和保护脊髓神经安全等方面发挥重要作用。

### 1.2 脊柱生物力学进展

**1.2.1 不同条件下脊柱生物力学变化** 在日常身体活动过程中,脊柱执行灵活性和承载身体的双重功能。目前,鲜有生物力学数据来表征在枕骨处支撑并通过扁平撞击器在顶点处压缩的孤立股骨头力-变形响应。Thompson-Bagshaw等<sup>[1]</sup>研究了冲击速度(1、2、3 m/s)对由刚性枕骨支架支撑的人头部在顶点冲击下响应的影响。结果显示,1、2 m/s冲击引起两个线性区域的力-变形响应,而3 m/s冲击导致单个线性区域和颅底环骨折。峰值力和刚度随着冲击速度的增加而增加。从1 m/s到2 m/s时,峰值力处的变形及吸收能量增加,而从2 m/s到3 m/s时二者下降。

机动车碰撞(motor vehicle collisions, MVC)是急性脊柱损伤的主要原因。Kent等<sup>[2]</sup>根据损伤率和针对些损伤的生物力学机制分析来确定MVC脊柱病理原因。结果表明,IVD突出是循环载荷引起的疲劳损伤,IVD几乎从来不是冲击载荷中第1个受伤的结构。除非IVD高度弯曲和压缩,大多数碰撞主要涉及脊柱的拉伸载荷,但这不会导致单独的IVD突出。

Coppock 等<sup>[3]</sup>选取了 18 名无腰痛 (low back pain, LBP)、损伤或手术史的健康参与者,让参与者在跑步机行走(即压力测试)前或后,使用腰椎磁共振(magnetic resonance, MR)对其腰椎进行成像检查。在运动前和运动后获取解剖(SPACE、FLASH)MR 图像,并用于测量 IVD 变形。运动前进行定量(T1rho)成像以反映 IVD 成分,运动前的解剖图像也被用来根据改良的 Pfirrmann 量表评估 IVD 退行性状态。结果发现,IVD 压缩应变增加与 NP 的 T1rho 弛豫时间缩短相关。该结果提示,体内 IVD 力学功能和成分的量化有助于深入了解 IVD 健康状况。

AF 紧密排列的结构可以抵抗脊柱在弯曲和旋转过程中产生的张力和拉伸应变,以及 IVD 受压时 NP 产生的周向应力。Chen 等<sup>[4]</sup>为研究 AF 十字形和方形切口对牛 IVD 多自由度力学稳定性的影响,使用手术刀在样本瓣环右侧制作十字形和方形切口(见图 1),然后使用材料试验机对牛尾侧运动节段进行三维 6 自由度的生物力学测试。结果发现,AF 的十字形和方形切口明显减少了轴向压缩和轴向旋转,但它们没有改变牛尾侧 IVD 的屈伸和侧弯刚度。

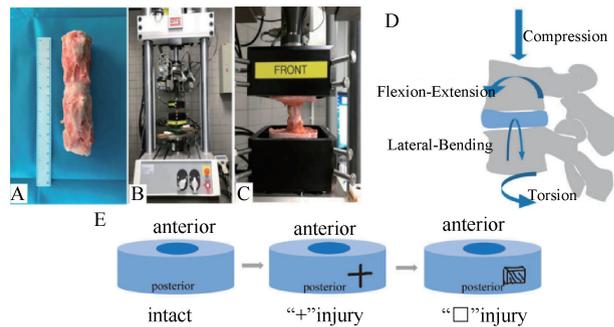


图 1 牛尾骨模型、力学测试及切口示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Model of the oxtail bone, mechanical testing, and schematic diagram of the incision<sup>[4]</sup>

宋亮等<sup>[5]</sup>利用三维动态捕捉系统和地面反作用力采集设备,对比分析正常步态和穿戴小腿假肢者步态下的脊柱生物力学特征,包括时空参数、地面反作用力、脊柱骨盆关节角度和重心高度。结果表明,小腿假肢穿戴者在行走时骨盆倾斜角度与正常人有明显差异,并在整个步态周期中表现出显著不同。这些改变旨在弥补截肢后小腿和足部功能

损失引起的不稳定,导致穿戴者步态异常,进而影响脊柱相关肌肉和骨骼状态。此外,假肢设计也可能影响穿戴者的脊柱生物力学参数,小腿假肢穿戴很大可能导致 LBP 的发生。

**1.2.2 有限元建模分析** 有限元法(finite element method, FEM)分析是一种用于求解微分或积分方程的技术。FEM 的理论基础是变分原理和加权边值法,其解的基本原理是将边值问题转化为相应的变分问题,用许多子域来表示解的连续区域。

为开发和验证用于生物力学研究的腰椎有限元模型,Wiczenbach 等<sup>[6]</sup>使用 50% 成年男性总体人体安全模型 THUMS 6.1 有限元模型来实施修改。主要修改包括:对韧带应用正交各向异性材料特性和非线性应力应变行为,对 AF 和 NP 应用超弹性材料特性,AF 基质中胶原纤维的具体含量。此外,将 NP 与周围的骨骼和组织分离。使有限元模型承受不同的加载模式,计算椎间旋转和椎间盘内压力(intradiscal pressure, IDP)。加载模式包括作用于腰部的轴向力(压缩和拉伸)、剪切力、纯力矩,以及轴向力和纯力矩的组合加载模式。结果显示,从修改后数值模型获得的运动范围(range of motion, ROM)与所有加载模式的实验数据一致。

目前方法很少考虑男性和女性脊柱的差异。为了比较男性和女性脊柱的载荷分布,Stott 等<sup>[7]</sup>开发了男性和女性两种脊柱有限元模型,包括性别特异性几何形状和材料特性。该模型由 IVD、椎骨、肌腱、周围脊柱肌肉和胸腰椎筋膜组成,承受模拟屈曲和伸展的载荷条件,并根据已发表的文献成功进行了验证。此外,有限元模型比较表明,女性身体可能会受到明显高于男性身体的负荷,印证了女性患有腰痛或者其他肌肉骨骼疾病的风险更大。

为预防和改善脊柱相关疾病提供理论依据,郭云强等<sup>[8]</sup>通过 FEM 分析了坐姿人体动态特性,研究人体脊髓不同部位在振动环境中的反应特征,基于人体解剖结构建立包括头部、脊椎、肋骨、骨盆的人体上部三维有限元模型。提取该模型和多种脊椎节段(L3~4、L1~5 和 C1~L5)的 30 阶模态,采用随机响应法计算垂直方向上 0~20 Hz 白噪声激励下各脊椎节段在 X、Y、Z 方向上的加速度。结果表明,对人体影响较大的振动模态主要分布在 0~12 Hz; z 向加速度均方根值从颈椎到腰椎递减, x 向

加速度均方根值在 T7~8 椎体附近最小,在 L4~5 椎体处最大。

通常认为,举重等运动对于腰椎的损伤较大。于乐乐等<sup>[9]</sup>基于 FEM 对举重运动员腰椎关节内部的力学特征进行研究。结果发现,在正常生理功能情况下,腰部力矩代表肌肉产生的最大功率输出,腰部肌肉产生的最大功率输出与腰部应力形成比例关系。腰椎皮质骨是腰椎承重能力的主要组成部分。当腰椎受到较大的伸力矩时,L2、L5 椎体后部及椎弓根存在应力集中现象,长期反复的高应力刺激可能会引起细微骨折。腰椎间盘最大应力集中在最容易损伤和拉伤的 L4~5 处。相同重量同一硬拉动作下,从 L1 到 L5,腰椎椎体应力呈现先增大后减小再增大的趋势。从 L1~2 到 L4~5,腰椎间盘应力从上到下依次增大。同样的,重量不同的硬拉直腿牵拉组腰椎椎体及 IVD 受力最高,传统牵拉组次之,六角形杠铃牵拉组应力最低。

黄吉军等<sup>[10]</sup>建立了颈椎 C2~7 节段有限元模型,通过测定颈椎各个阶段屈伸、侧屈、旋转角度位移,发现和既往颈椎生物力学模型测试结果基本一致。该结果表明,所建模型可靠,经验证具有良好的生物力学性能。髓、腰椎退行性变的发病率随年龄增长而增加,常同时发生,并且可能相互影响,表现为髓、腰椎综合征。文鹏飞等<sup>[11]</sup>通过 FEM 建立了腰椎-骨盆-髌关节有限元模型,并对该模型进行生物力学检验。结果发现,从站立位变为坐位后,该模型 L4~5、L5~S1 应力均增加,其中 L5~S1 应力变化最明显。对于髌关节,站立位时应力主要分布在髌臼的前、上、后 3 个方向,而坐位时应力主要集中在髌臼前部。该研究为了解腰椎-骨盆-髌关节的生物力学特性提供了模型。

**1.2.3 通过其他建模分析脊柱生物力学** 逆动力学(inverse dynamics, ID)分析是一种广泛用于研究脊柱生物力学和估计肌肉力量的方法。Meszaros-Beller 等<sup>[12]</sup>为了确定建模被动结构(韧带和 IVD)对剩余关节力和扭矩的影响,将先前在 DemoA 软件中开发的脊柱模型转移到肌肉骨骼模型 OpenSim 中(见图 2)。利用前向动力学(forward dynamics, FD)模拟的胸腰椎模型,提供屈伸运动的完整运动学描述。利用得到的计算机数据进行 ID 分析。通过增加脊柱的单个生物结构,逐步评估被动元件对

广义净关节力和扭矩的单个贡献。结果表明,IVD 和韧带的实施显著降低了压缩载荷和前向扭矩,充分表明纳入被动脊柱结构的重要性。

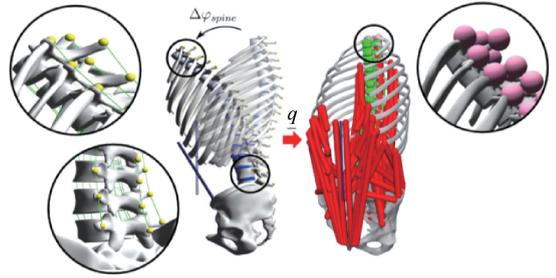


图 2 用于评估脊柱运动学的计算机生成的运动数据<sup>[12]</sup>  
Fig. 2 In silico generated motion data used for the assessment of spinal kinematics<sup>[12]</sup>

Akhavanfar 等<sup>[13]</sup>对 4 种使脊柱力正常化以消除体重影响的技术的有效性开展研究。使用 OpenSim 脊柱肌肉骨骼模型测试了 11 个比例模型和 13 个躯干在屈曲任务下所有腰椎水平的脊柱力。使用原始力和标准化力与体重的皮尔逊相关性,评估每种标准化技术的有效性。结果表明,偏移归一化成功地消除了体重的影响,并保持了屈曲角度对脊柱力的影响。

脊柱的几何特征对于确定其有限元结果很重要。Kassab-Bachi 等<sup>[14]</sup>采用基于主成分分析(principle component analysis, PCA)的统计形状建模(statistical shape modeling, SSM)方法(见图 3),研究形状特征对 L4~5 组合功能脊柱单元中在轴向压缩下 IDP 和小面接触压力(facet contact pressure, FCP)的贡献。该研究量化了有限元结果的不确定性,以及各个形状模式对这些结果的贡献。结果表明,这种参数化方法能够捕获真实群体中相关解剖特征的变异性,并采样合理的合成几何形状。

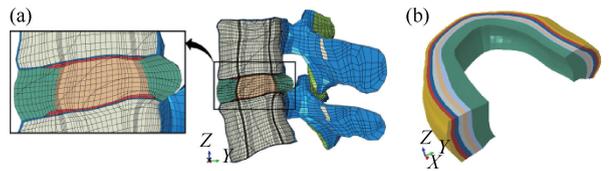


图 3 L4~5 脊柱节段示例中的 FEM 材料定义<sup>[14]</sup>  
Fig. 3 FEM materials definition in an exemplar L4-5 spinal segment<sup>[14]</sup>

注:图 3(a)为横截面图,图 3(b)为环带的横截面图,显示同心层。

为了评估人体脊柱节段在循环力矩载荷下结构生物力学行为的变化,包括温度和暴露时间的影响,并将这些结果用于使用人工神经网络预测循环加载下 ROM 变化,Blomeyer 等<sup>[15]</sup>将人体脊髓节段(L4、L5)以高达 7.5 N·m 纯矩加载 30 min,卸载 15 min,加载 3 次循环。该程序在屈伸、轴向旋转和侧向弯曲中进行,每个方向重复 6 次,每个节段总共测试 18 h。利用长短期记忆(long short-term memory, LSTM)递归神经网络(recurrent neural network, RNN),预测循环载荷下生物力学响应的变化,成功地证明了利用 RNN 预测循环弯矩加载下弯矩-ROM 曲线变化的可行性。Moore 等<sup>[16]</sup>开发了一种成本合适的压缩和弯曲(屈伸和侧弯)脊柱测试系统,将 1 个离轴加载夹具(OLaF)安装到现有的单轴测试框架上,不需要额外的执行器。该研究解释了 OLaF 的设计原理,并且可通过动作捕捉来进行运动学分析。同时,证明了该系统能够应用生理相关、无伤害的轴向压缩和弯曲。

## 2 脊柱相关疾病生物力学及治疗进展

### 2.1 椎间盘退变

LBP 是一个重大的全球性公共卫生问题,给医疗保健和社会系统带来了巨大的经济负担。虽然导致 LBP 的因素很多,但椎间盘退变(intervertebral disc degeneration, IVDD)是主要原因之一。

**2.1.1 IVDD 下生物力学研究进展** Azril 等<sup>[17]</sup>采用了一种将纳米压痕与拉曼光谱测量相结合的系统,将生物力学与纳米颗粒生化组成的细微变化联系起来。结果表明,随着 IVDD 程度增加,胶原蛋白交联率增加,蛋白多糖减少,以及矿物质积累等因素,可加重 NP 损伤。力学特性的评估表明,IVDD 程度增加使纳米颗粒失去弹性,变得更加黏稠,表明了该组织的承重能力出现异常,从而导致脊柱不稳定。Kenawy 等<sup>[18]</sup>从雄性和雌性 Sprague-Dawley 大鼠的多个脊髓水平中分离出尾骨-盘-骨运动节段,评估正常状态下以及化学损伤(脂多糖)或离体穿刺损伤后,运动节段生物力学和 ECM 生物化学(糖胺聚糖、胶原蛋白、水和 DNA 含量)的变化。结果发现,大鼠 IVD 运动节段存在性别差异,并且炎症、生物力学、生化和组织学结果对损伤的反应也表现出性别差异。

为了研究不同负载下退行 IVD 的受力情况,赵希云等<sup>[19]</sup>对腰椎间盘结构和生物力学特点、退变 IVD 组织特点、退变 IVD 有限元建模及应用进展进行综述,分析不同运动载荷(压缩、屈伸、旋转及各种复杂运动模式)下 IVD 的应力分布情况,为今后临床制定相关治疗方案提供了重要的参考。

在飞行的潜在风险中,LBP 在宇航员和军事飞行员中发病率很高,通常与 IVDD 有关。为了确定微重力与 IVDD 之间的关系,Marfia 等<sup>[20]</sup>综述了几项研究,揭示了微重力和一般空间条件在 IVD 病理生理学中的有效作用,包括结构和功能改变,以及炎症微环境的发生(见图 4)。

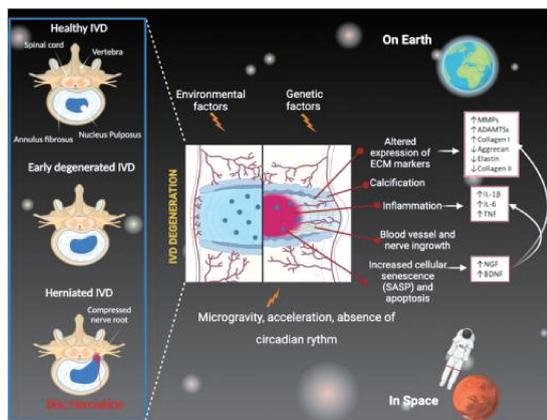


图 4 地球条件下以及航天飞行和任务期间 IVD 退化机制<sup>[20]</sup>

Fig. 4 IVD degeneration mechanisms under earth's conditions and during spaceflight and missions<sup>[20]</sup>

为探究腰椎定点旋转手法对 L4~5 不同退变程度 IVD 的生物力学影响,苏少亭等<sup>[21]</sup>建立了正常、轻度、中度、重度 IVDD 的 L4~5 有限元模型,模型假设为左侧旁中央突出。以 L4~5 椎间盘左侧旁中心区和左侧关节下区为观察点,观察腰椎在该区域的应力和位移。结果发现,在相同操作力下,随着 IVDD 程度的增加,椎间盘 von Mises 应力及位移逐渐减小。IVDD 会影响腰椎固定旋转手法的疗效,提示应谨慎增加手法的旋转力。

Wang 等<sup>[22]</sup>基于数值模拟研究了不同退变程度 L4~5 腰椎的生物力学效应,根据普通成年男性 CT 图像建立正常 L2~S1 腰椎三维有限元模型,并通过修改参数,构建了不同退化程度(1~4 级)的 L4~5 模型。结果发现,不同姿势下,随着 L4~5 退变程度的增加,L4~5 退变节段 ROM 呈下降趋势(其中,

4级退变程度模型在不同姿势下较正常下降41.9%~65.2%)。随着退变程度的增加,不同姿势下L4~5退变段NP压力持续下降(其中,4级退变程度模型较正常下降25%~134.6%)。不同姿势下,3个节段最大 von Mises 应力随着退化程度的增加而增加(其中,4级退变程度模型L4~5在不同姿势下增加到正常的1.75~4倍)。

Vedantam 等<sup>[23]</sup>为轻度( $n=2$ )、中度( $n=2$ )和重度( $n=2$ )6名退行性颈脊髓病患者创建了患者特异性三维有限元模型。使用 $2\text{ N}\cdot\text{m}$ 纯力矩载荷模拟颈椎的屈曲和伸展,测量节段性脊髓 von Mises 应力和最大主应变。回归分析中纳入了脊髓压迫和节段 ROM 测量,以确定与脊髓应力和应变的关联。结果发现,与脊髓受压相比,节段 ROM 与脊柱应力和应变的相关性更强。与脊髓受压的严重程度相比,节段 ROM 是脊髓应力和应变更强的决定性因素。

**2.1.2 IVDD 体外生物力学治疗进展** 体外生物材料修复 IVDD 及治疗 LBP 等也取得一些进展。Chen 等<sup>[24]</sup>设计了一种基于锌氧化海藻酸钠-明胶(ZOG)的高强度生物水凝胶作为多功能核酸传递平台。负载 antagomir-204-3p 的 ZOG (ZOGA) 具有良好的吸附性、抗菌活性、生物相容性和生物降解性。ZOGA 可以与 NP 组织交联,形成高强度胶原网络,改善 IVD 力学性能。此外,ZOGA 为基因表达提供了有利的微环境,Antagomir-204-3p 可以在其中有效地发挥维持 ECM 代谢平衡的作用。放射学和组织学分析结果表明,ZOGA 恢复了 IVD 高度,保持了 IVD 中的水分,并保持了组织结构。Luo 等<sup>[25]</sup>将四氢-降冰片烯生物正交结扎与明胶结合,制备了一种可注射的生物正交水凝胶(BIOGEL)。液体水凝胶前体在很宽的温度范围内保持自由流动,并在5~10 min 后交联成坚固的水凝胶,允许操作人员轻松地将治疗结构注入退化的 IVD,恢复了退变 IVD 的生物力学性能,并改善了 LBP(见图5)。

由于 IVD 组织的再生能力有限,AF 缺损可能仍然是一个持续的缺陷,并导致术后复发性突出。生物胶粘剂是一种很有前途的替代品,Li 等<sup>[26]</sup>报道了一种混合生物粘合剂,结合了可注射胶和坚韧密封胶,同时修复和再生核切除后的 IVD。胶水填充 NP 空腔,密封胶密封 AF 缺陷。与 IVD 组织形成强

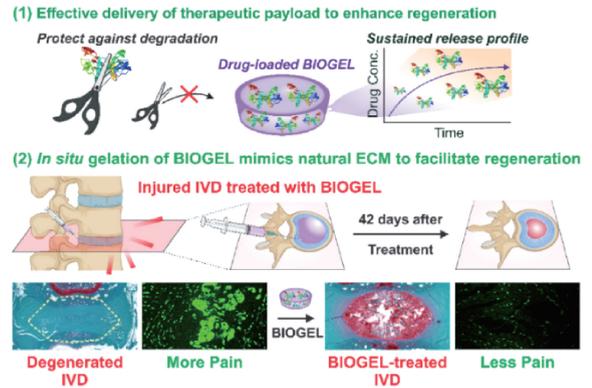


图5 BIOGEL 被用于治疗 IVDD 的概念模式<sup>[25]</sup>

Fig. 5 BIOGEL was adopted to treat IVDD as a proof-of-concept<sup>[25]</sup>

大的粘连,并在极端的 IVD 负荷下存活。此外,该胶可以机械地匹配天然 NP 组织,并支持被包被细胞的活性和基质沉积,是促进 NP 再生的合适细胞递送载体。此外,对牛 IVD 运动节段进行的生物力学试验表明,混合生物粘合剂能够恢复牛 IVD 在循环载荷下的生物力学性能,并防止极端载荷下的永久性突出。陈晓东等<sup>[27]</sup>研发了一款自主研发 AF 成形器,通过对实验组行 NP 摘除 AF 成形术,对照组行单纯 NP 摘除术,发现实验组均未出现 AF 成形器松动、后退等失效现象,证明了这款成形器能够有效修复破损的 AF,维持良好的脊柱力学功能。

## 2.2 脊柱侧弯

脊柱侧弯,也被称为脊柱侧凸,是脊柱的三维畸形,包括冠状面、矢状面和轴面的序列异常。正常人的脊柱从后面看,躯干应该笔直,在两侧对称。当脊柱的某几节椎体发生位置异常,在冠状面、矢状面和/或轴面发生偏倚,则应考虑脊柱侧弯。

脊柱几何排列在稳定性、生物力学负荷以及由此产生的疼痛中发挥着不可或缺的作用,并且已经确定了一系列健康的矢状曲率。Stott 等<sup>[28]</sup>制作了健康胸腰椎模型。将胸椎和腰椎曲率调整 50%,以创建具有不同矢状面轮廓的模型:脊柱前凸(HypoL)、脊柱前凸过度(HyperL)、后凸过低(HypoK)和后凸过度(HyperK)。该研究还针对前3种剖面构建了腰椎模型,模拟弯曲和伸展负载条件的影响。验证后,对所有模型的 IVD 应力、椎体应力、IVD 高度和节段间旋转进行比较。总体趋势表明,与健康模型相比,HyperL 和 HyperK 模型的

IVD 高度显著降低,椎体应力更大。相比之下, HypoL 和 HypoK 模型表现出相反的趋势。考虑到腰椎模型, HypoL 模型降低了 IVD 应力和灵活性,而在 HyperL 模型中观察到相反的情况。曲率过大的模型可能会承受更大的应力,而较直的脊柱模型可能会减少这些应力。

成人退行性脊柱侧凸 (adult degenerative scoliosis, ADS) 是一种影响成年人,尤其是女性的脊柱畸形。其特征是 IVD 不对称和关节突关节退变,导致脊柱失衡,可导致剧烈疼痛和神经功能缺损,从而显著降低生活质量。Petrosyan 等<sup>[29]</sup>综述了先前的研究,详细介绍了 ADS 的分子机制,重点是血管生成、炎症、ECM 重塑、骨质疏松症、肌肉减少症和生物力学应力。

青少年特发性脊柱侧凸 (adolescent idiopathic scoliosis, AIS) 是一种复杂的脊柱三维畸形,常发生于 10~16 岁青少年。楼斐等<sup>[30]</sup>针对 AIS 的生物力学研究进展表明,肌筋膜、肌肉、韧带、关节(含椎体)和 IVD 既相互独立,又离不开彼此,需要共同辅助完成任务。

汪飞等<sup>[31]</sup>为了研究探讨 AIS 主弯 Cobb (main curvature cobb, MCC) 角与矢状位及轴位参数的相关性,回顾了该医院既往 2021 年 5 月~2022 年 5 月符合标准的 AIS 患儿,通过比较分析,发现 AIS 患者 MCC 与患者性别、顶椎旋转 (apical vertebra rotation, AVR) 及胸椎后凸角 (thoracic kyphosis, TK) 间存在明显相关性,冠状位脊柱畸形与矢状位侧凸及轴位 AVR 存在相关性。Wang 等<sup>[32]</sup>建立了有限元分析模型,模拟人体生理工况,对比相同边界条件下宏观皮质骨与细观骨单元生物力学性能差异,分析细观尺度下融合器植入对骨组织生长的影响。在骨单元宏细观上对特发性脊柱侧弯进行生物力学分析,可为特发性脊柱侧凸手术方案的设计与融合器优化提供理论依据。AIS 患者常接受支具干预治疗,这可能是基于 Hueter-Volkman 定律,即压缩程度越小,椎体生长越快。支具用于调节椎体生长板和肌肉的应力,以达到脊柱两侧的生物力学平衡。

王笛等<sup>[33]</sup>构建了 AIS 肌肉骨骼三维有限元模型,分析矫正前后张拉整体下生物力学变化特征。该研究显示,在临床常用矫正力作用下,脊柱冠状面主、次曲度 Cobb 角得到改善,顶椎偏移减小,脊

柱整体平衡得到改善,脊柱矢状面不减小 TK 角。顶椎上表面生长板应力趋于平衡,而下表面生长板应力不平衡,这可能与支撑轴向延长和脊柱椎旁肌轴向应力的联合作用有关。

### 2.3 骨质疏松与骨折

正常的椎体松质骨的骨密度约为 15%,受单向压缩时,松质骨屈服应力约为 5 MPa,弹性模量约为 300 MPa。随着全球老年人口的迅速增加,骨质疏松作为一个主要的医疗考虑因素,越来越重要。它增加了椎体骨折、进行性脊柱畸形和神经系统并发症的风险,并显著增加了发病率和死亡率。Chaddha 等<sup>[34]</sup>通过文献综述了骨质疏松与脊柱的关系,分别从脊柱骨质疏松症的病理生理学、骨质疏松脊柱的生物力学、脊柱骨质疏松症的临床表现、脊柱骨质疏松症的治疗等方面进行分析,同时概述了骨质疏松后椎体骨折的发病机制。

椎体骨折治疗的目的是解剖复位,以恢复脊柱的生理生物力学和骨折的稳定,使骨愈合。Sensale 等<sup>[35]</sup>开发并验证一种基于奇异值分解方法,从 T12 和 L2 椎体形状预测 L1 椎体形状。结果显示,与目前手术室常用的 CT 分辨率相比,通过相邻两个椎体的形状可以很好预测 L1 椎体形状。

骨质疏松症对近端交界性后凸影响的潜在生物力学机制仍不清楚。Zhao 等<sup>[36]</sup>构建不同骨质疏松程度下后路长节段 T8~L5 融合的胸腰椎 T1~L5 有限元模型,分析不同运动过程中 IVD 应力特征、椎体力学传递和椎弓根螺钉系统载荷。结果发现,与正常骨量相比,屈、伸、侧弯时 T7、T8 最大 von Mises 应力分别增加 20.32%、22.38%、44.69%、4.49% 和 29.48%、17.84%、40.95%、3.20%、轻度骨质疏松模型轴旋转时增加了 21.21%、18.32%、88.28%、2.94% 和 37.76%、15.09%、61.47%、-0.04%。严重骨质疏松模型侧向弯曲时, T6~7、T7~8 和 T8~9 峰值应力分别为 14.77、11.55、2.39 MPa。随着骨质疏松症严重程度的增加, T8、T9 椎弓根螺钉模型的压力水平在各种运动过程中都会加剧。该结果提示,骨质疏松症对近端交界性后凸有不良影响。随着骨质流失, IVD、皮质骨和螺钉的应力水平增加,很容易导致 IVDD、骨质破坏以及螺钉脱出,这些因素均显著影响或加速了近端交界性后凸的发生。

## 2.4 椎弓根内固定

赵杰<sup>[37]</sup>发表了关于脊柱生物力学专栏论著评述,详细报道了8篇相关脊柱生物力学的研究,涉及传统与皮质骨轨迹椎弓根螺钉内固定术的生物力学对比、枕颈畸形后路内固定性能比较、多节段颈椎退变疾病手术设计、斜外侧椎间融合技术联合不同内固定方式影响、腰椎手法整复效果研究、颈椎整骨技术模拟分析、水平负向加速度下不同靠背角对飞行员假人模型颈部损伤的作用以及过载下飞行员峡部裂腰椎应力分析及损伤预测等,反映了国内脊柱生物力学研究的最新进展。

椎弓根螺钉器械已成为许多脊柱疾病手术治疗的最先进技术。优化椎弓根螺钉结构的生物力学特性以及骨质疏松症患者脊柱手术后的结果是未来手术治疗的关键因素。Weber等<sup>[38]</sup>调查了聚甲基丙烯酸甲酯(poly-methyl methacrylate, PMMA)增强椎弓根螺钉杆结构在PMMA偏差分布情况下的稳定性,该结构应用于骨质疏松人类尸体椎骨的器械。结果发现,PMMA增强椎弓根螺钉杆结构比非增强椎弓根螺钉结构更稳定。此外,单侧增强椎弓根螺钉似乎比非增强椎弓根螺钉存在更大的螺钉松动风险。因此,应避免高度不对称分布的PMMA。目前,有学者讨论刚性棘突间固定(rigid interspinous process fixation, RPIF)作为椎弓根螺钉固定(pedicle screw fixation, PSF)的替代方案,以减少腰椎椎间融合(lumbar interbody fusion, LIF)手术中的创伤。

Fan等<sup>[39]</sup>基于完整的腰骶椎有限元模型,开发了带有RPIF或传统PSF的单级LIF模型,并使用混合测试计算了对4种生理运动时力矩的生物力学响应。为了研究RPIF腰椎的生物力学,比较术后两个阶段(骨融合前后)的生物力学差异。结果发现,与PSF相比,RPIF手术水平相邻节段ROM、IDP和小关节力(facet joint force, FJF)分别降低了8.4%、2.3%和16.8%,但手术段ROM和终板应力分别增加了285.3%和174.3%。腰椎骨性融合前后对比RPIF结果显示,达到骨性融合后,手术节段ROM和终板应力分别降低了62.6%和40.4%。该结果表明,与PSF相比,采用RPIF的腰椎有可能降低邻近节段退变的风险,但手术节段的稳定性可能较低,并且椎间融合器下沉的风险增加;当实现骨

融合时,RPIF腰椎可能有助于增加手术节段的稳定性,并减少骨与融合器接触的失败。

为了探究腰椎常见减压和融合手术前后节段ROM, Burkhard等<sup>[40]</sup>对14具新鲜冰冻人体L1~2( $n=4$ )、L3~4( $n=5$ )、L5~S1( $n=5$ )在6个加载方向(屈曲/伸展、侧弯、侧向剪切、前向剪切、轴向旋转和轴向压缩/牵引)进行ROM评估。在使用或不使用后路器械的情况下,在自然状态、单侧椎板切开后、中线减压后、NP切除术后4个条件下测试ROM。结果发现,后路减压量显著影响腰椎ROM。单侧椎板切开后、中线减压和NP切除术后,节段ROM预计分别增加约10%、20%和50%。使用后路器械的情况下,弯曲力矩的范围减少约80%,并且减压对器械的稳定性影响不大。

此外,刘金玉等<sup>[41]</sup>、史经甫等<sup>[42]</sup>通过建立有限元模型,探讨经皮内镜下脊柱微创治疗脊髓型颈椎病有限元生物力学特性,以及椎间孔镜术中行关节突成形对腰椎生物力学的影响。

## 3 总结

本文综述了2023年度关于脊柱生物力学方面国内外学者的研究进展。主要从脊柱的基本结构出发,分析脊柱几个重要的基本结构及功能;总结脊柱生物力学的最新进展,包括一些关于脊柱生物力学的新认知,新的测量模型及工具,不同条件下脊柱力学特性的变化;简单介绍几种与脊柱生物力学较为相关的疾病,以及病理状态下的脊柱生物力学进展;同时,比较了当前较常见的手术方式及IVDD治疗中生物材料的进展。然而,脊柱生物力学相关的疾病还有很多,如椎间管狭窄等,未来还需要跟进这些方面的研究。此外,利用计算机技术模拟并预测脊柱生物力学各方面数据,可以更好地了解疾病的动态发展过程。未来,还需要更深层次了解IVDD、脊柱侧弯、康复训练等方面,探究脊柱生物力学发展。

**利益冲突声明:**无

**作者贡献声明:**吴爱悯、郭振宇负责文献检索、整理和撰写论文;吴爱悯、王向阳负责文献整理和论文修改。

**参考文献:**

[1] THOMPSON-BAGSHAW DW, QUARRINGTON RD,

- DWYER AM, et al. The structural response of the human head to a vertex impact [J]. *Ann Biomed Eng*, 2023, 51(12): 2897-2907.
- [ 2 ] KENT R, CORMIER J, MCMURRY TL, et al. Spinal injury rates and specific causation in motor vehicle collisions [J]. *Accid Anal Prev*, 2023(186): 107047.
- [ 3 ] COPPOCK JA, ZIMMER NE, ENGLANDER ZA, et al. *In vivo* intervertebral disc mechanical deformation following a treadmill walking " stress test" is inversely related to T1rho relaxation time [J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2023, 31(1): 126-133.
- [ 4 ] CHEN JX, LI YH, WEN J, et al. Annular defects impair the mechanical stability of the intervertebral disc [J]. *Global Spine J*, 2023, 13(3): 724-729.
- [ 5 ] 宋亮, 纪婷婷, 杨荣, 等. 小腿假肢穿戴者步态中的脊柱生物力学分析[J]. *中国康复医学杂志*, 2023, 38(8): 1114-1119.
- [ 6 ] WICZENBACH T, PACHOCKI L, DASZKIEWICZ K, et al. Development and validation of lumbar spine finite element model [J]. *Peer J*, 2023(11): e15805.
- [ 7 ] STOTT B, DRISCOLL M. Development and evaluation of sex-specific thoracolumbar spine finite element models to study spine biomechanics [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2024, 62(4): 1191-1199.
- [ 8 ] 郭云强, 刘忠, 杨先海, 等. 坐姿人体动态特性的有限元法研究[J]. *应用力学学报*, 2023, 40(6): 1445-1152.
- [ 9 ] 于乐乐, 鲍春雨, 杨星星. 基于有限元法的不同硬拉动作对举重运动员腰椎关节受力的生物力学分析[C]//第十三届全国体育科学大会. 天津: [s.n.], 2023.
- [10] 黄吉军, 张恒柱, 王永祥, 等. 正常颈椎有限元模型建立及有效性验证[J] *中国医学物理学杂志*, 2023, 40(4): 487-495.
- [11] 文鹏飞, 李亚宁, 路玉峰, 等. 腰椎-骨盆-髋关节有限元模型建立及生物力学分析[J] *中国组织工程研究*, 2023, 27(36): 5741-5746.
- [12] MESZAROS-BELLER L, HAMMER M, SCHMITT S, et al. Effect of neglecting passive spinal structures: A quantitative investigation using the forward-dynamics and inverse-dynamics musculoskeletal approach [J]. *Front Physiol*, 2023(14): 1135531.
- [13] AKHAVANFAR M, UCHIDA TK, GRAHAM RB. Evaluation of spinal force normalization techniques [J]. *J Biomech*, 2023(147): 111441.
- [14] KASSAB-BACHI A, RAVIKUMAR N, WILCOX RK, et al. Contribution of shape features to intradiscal pressure and facets contact pressure in L4/L5 FSUs: An *in-silico* study [J]. *Ann Biomed Eng*, 2023, 51(1): 174-188.
- [15] BLOMEYER N, TANDALE SB, NICOLINI LF, et al. Prediction of temperature and loading history dependent lumbar spine biomechanics under cyclic loading using recurrent neural networks [J]. *Ann Biomed Eng*, 2023, 51(6): 1244-1255.
- [16] MOORE AC, HOLDER DA, ELLIOTT DM. Off-axis loading fixture for spine biomechanics: Combined compression and bending [J]. *J Biomech Eng*, 2023, 145(10): 105001.
- [17] AZRIL, HUANG KY, HOBLEY J, et al. Correlation of the degenerative stage of a disc with magnetic resonance imaging, chemical content, and biomechanical properties of the nucleus pulposus [J]. *J Biomed Mater Res A*, 2023, 111(7): 1054-1066.
- [18] KENAWY HM, NUNEZ MI, MORALES X, et al. Sex differences in the biomechanical and biochemical responses of caudal rat intervertebral discs to injury [J]. *JOR Spine*, 2023, 6(4): e1299.
- [19] 赵希云, 温萌, 高国栋, 等. 腰椎间盘退行性变及不同载荷影响的生物力学研究进展[J]. *中国医学物理学杂志*, 2023, 40(8): 1026-1032.
- [20] MARFIA G, GUARNACCIA L, NAVONE SE, et al. Microgravity and the intervertebral disc: The impact of space conditions on the biomechanics of the spine [J]. *Front Physiol*, 2023(14): 1124991.
- [21] 苏少亭, 周红海, 侯召猛. 腰椎定点旋转手法对 L4~5 不同退变程度椎间盘的生物力学影响[J]. *中华中医药杂志*, 2023, 38(10): 4964-4967.
- [22] WANG H, LI N, HUANG H, et al. Biomechanical effect of intervertebral disc degeneration on the lower lumbar spine [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2023, 26(14): 1669-1677.
- [23] VEDANTAM A, HARINATHAN B, PURUSHOTHAMAN Y, et al. Determinants of spinal cord stress and strain in degenerative cervical myelopathy: A patient-specific finite element study [J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2023, 22(6): 1789-1799.
- [24] CHEN T, QIAN Q, MAKVANDI P, et al. Engineered high-strength biohydrogel as a multifunctional platform to deliver nucleic acid for ameliorating intervertebral disc degeneration [J]. *Bioact Mater*, 2023(25): 107-121.
- [25] LUO J, DARAI A, PONGKULAPA T, et al. Injectable bioorthogonal hydrogel ( BIOGEL ) accelerates tissue regeneration in degenerated intervertebral discs [J]. *Bioact Mater*, 2023(23): 551-562.
- [26] LI X, LIU Y, LI L, et al. Tissue-mimetic hybrid bioadhesives for intervertebral disc repair [J]. *Mater Horiz*, 2023, 10(5): 1705-1718.
- [27] 陈晓东, 万婷, 杨洪杰, 等. 自主研发纤维维成形器对家猪腰椎影像学及生物力学的影响[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2023, 38(9): 936-940.

- [28] STOTT B, DRISCOLL M. Biomechanical evaluation of the thoracolumbar spine comparing healthy and irregular thoracic and lumbar curvatures [J]. *Comput Biol Med*, 2023(160): 106982.
- [29] PETROSYAN E, FARES J, LESNIAK MS, *et al*. Biological principles of adult degenerative scoliosis [J]. *Trends Mol Med*, 2023, 29(9): 740-752.
- [30] 楼斐, 王伟, 谢罗军, 等. 青少年特发性脊柱侧弯的生物力学研究进展[J]. *中国现代医生*, 2023, 61(15): 118-21.
- [31] 汪飞, 黄赞程, 刘特熹, 等. 青少年特发性脊柱侧凸症脊柱三维形态结构参数的相关性研究[J]. *重庆医学*, 2023, 52(24): 3741-3745.
- [32] 王召耀, 富荣昌, 马原, 等. 特发性脊柱侧凸骨单元宏观生物力学分析[J]. *生物医学工程杂志*, 2023, 40(2): 303-312.
- [33] 王笛, 张晓辉, 沈会芳, 等. 青少年特发性脊柱侧凸支具矫正的“张拉整体”生物力学特征:有限元分析[C]//第十三届全国体育科学大会. 天津: [s. n.], 2023.
- [34] CHADDHA R, AGRAWAL G, KOIRALA S, *et al*. Osteoporosis and vertebral column [J]. *Indian J Orthop*, 2023, 57(Suppl 1): 163-175.
- [35] SENSALÉ M, VENDEUVRE T, GERMANEAU A, *et al*. Prediction of the 3D shape of the L1 vertebral body from adjacent vertebrae [J]. *Med Image Anal*, 2023 (87): 102827.
- [36] ZHAO G, HE S, CHEN E, *et al*. Biomechanical effects of osteoporosis severity on the occurrence of proximal junctional kyphosis following long-segment posterior thoracolumbar fusion [J]. *Clin Biomech*, 2023 (110): 106132.
- [37] 赵杰. 脊柱生物力学专栏论著评述[J]. *医用生物力学*, 2023, 38(1): 1-3.
- ZHAO J. A brief review on special column of spine biomechanics [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(1): 1-3.
- [38] WEBER M, LENZ M, EGENOLF P, *et al*. Increased stability due to symmetric cement volume in augmented pedicle screws? A biomechanical study [J]. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 2024, 112(1): e35339.
- [39] FAN W, ZHANG C, ZHANG D X, *et al*. Biomechanical evaluation of rigid interspinous process fixation combined with lumbar interbody fusion using hybrid testing protocol [J]. *J Biomech Eng*, 2023, 145(6): 064501.
- [40] BURKHARD MD, CALEK AK, FASSER MR, *et al*. Biomechanics after spinal decompression and posterior instrumentation [J]. *Eur Spine J*, 2023, 32(6): 1876-1886.
- [41] 刘金玉, 张晗硕, 崔洪鹏, 等. 脊柱微创治疗脊髓型颈椎病的有限元生物力学分析及精准化运动康复方案[J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(9): 1359-1364.
- [42] 史经甫, 吴东迎, 袁峰, 等. 椎间孔镜术中行关节突成形有限元模型的建立及生物力学分析[J]. *颈腰痛杂志*, 2023, 44(6): 912-916.