

半月板的损伤与修复有限元分析研究进展

王 阳, 王大麟*

北华大学附属医院骨外科一疗区, 吉林 吉林

收稿日期: 2025年3月22日; 录用日期: 2025年4月15日; 发布日期: 2025年4月23日

摘要

随着近年来科技的进步, CT及MRI设备的图层越来越精细, 有限元分析软件不断更新, 处理建立各种人体模型能力的逐渐强大, 有限元分析法在生物力学方面展现出更多的优势。越来越多的学者将其应用于骨科生物力学的研究。半月板不同类型损伤会导致膝关节各部位应力分布发生改变, 是膝关节骨性关节炎进展的一种危险因素, 近年来更多针对半月板损伤的修复逐渐得到重视, 相关有限元分析研究表明, 半月板损伤的修复可以改善甚至恢复膝关节原有的生物力学特性, 从而延缓骨性关节炎的发生发展。膝关节半月板的有限元模型可以通过医学图形处理软件MIMICS构建, 利用有限元前处理软件可获得不同半月板损伤及半月板修复模型, 通过有限元分析软件ANSYS, 可以分析不同类型半月板损伤及半月板损伤修复的生物力学特性, 为半月板损伤及修复的研究提供了一种新的思路和方法。因此本文就半月板不同损伤与修复的有限元分析研究进展进行综述性总结, 为临床医师及科研工作者提供参考依据。

关键词

有限元分析, 半月板损伤, 半月板修复, 膝关节骨关节炎, 生物力学

Research Progress of Finite Element Analysis of Meniscus Injury and Repair

Yang Wang, Dalin Wang*

Ward 1 of Orthopedic Surgery, The Affiliated Hospital of Beihua University, Jilin Jilin

Received: Mar. 22nd, 2025; accepted: Apr. 15th, 2025; published: Apr. 23rd, 2025

Abstract

With the advancement of science and technology in recent years, the layers of CT and MRI equipment have become more and more refined, the finite element analysis software has been continuously

*通讯作者。

updated, and the ability to process and build various human body models has become increasingly powerful. The finite element analysis method has shown more potential in biomechanics advantages. More and more scholars are applying it to the study of orthopedic biomechanics. Different types of meniscal injuries will lead to changes in stress distribution in various parts of the knee joint, which is a risk factor for the progression of knee osteoarthritis. In recent years, more repairs for meniscal injuries have gradually received more attention. Related finite element analysis studies have shown that, repair of meniscal damage can improve or even restore the original biomechanical properties of the knee joint, thereby delaying the occurrence and development of osteoarthritis. The finite element model of the knee meniscus can be constructed through the medical graphics processing software MIMICS, using the different meniscal injury and meniscal repair models available with the finite element pre-processing software, and using the finite element analysis software ANSYS to analyze different types of meniscal injuries and the biomechanical properties of meniscal injury and repair provide a new idea and method for the study of meniscal injury and repair. Therefore, this article provides a review summary of the research progress of finite element analysis of different meniscal injuries and repairs to provide a reference for clinicians and scientific researchers.

Keywords

Finite Element Analysis, Meniscal Injury, Meniscal Repair, Knee Osteoarthritis, Biomechanics

Copyright © 2025 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

膝关节骨关节炎是一种常见的关节疾病，通常影响中老年人群，造成疼痛、功能障碍和生活质量下降。半月板是位于膝关节内侧和外侧的股骨和胫骨表面之间的两个纤维软骨。半月板在膝关节内具有抵抗张力、压缩和剪切应力的能力。许多的临床随访研究及相关生物力学研究证明，半月板在膝关节中可以发挥吸收震荡，均匀分配应力维持膝关节稳定，保护关节软骨发挥至关重要[1]。近年来各种半月板损伤相关有限元分析研究表明，半月板不同程度及不同类型的损伤会导致膝关节内各部位应力分布发生改变，从而引起膝关节骨性关节炎的发生发展。大量关于半月板不同损伤的修复有限元分析研究中证实，半月板的修复可以较好的恢复半月板原有的生物力学特性，重新恢复半月板在膝关节内分配载荷和保护关节软骨的重要作用[2]。半月板有限元模型是依据高分辨率 MRI 在膝关节有限元模型对半月板进行提取分析，利用医学图像处理软件 MIMICS 在 CT 及 MRI 中提取膝关节几何模型、利用 Geomagic 进行模型优化、利用 SolidWorks 对模型进行装配、最后利用 Ansys 有限元分析软件进行力学分析[3][4]。既往很多医生未重视半月板的作用，针对有病理改变的半月板进行全切除手术，然而在临床实践中逐渐发现，半月板切除后会显著加速膝关节骨关节炎的进展，这使得骨科医师们近年来慢慢重视膝关节中半月板发挥着重要的生物力学作用[5][6]。因此关于半月板的生物力学及临床相关研究近年逐渐成为科研热点，因此本文旨在对半月板的损伤与修复有限元分析研究进展进行综述并分析其应用前景，为进一步的研究提供思路。

2. 正常半月板有限元模型建立及力学分析

首先收集正常人膝关节 CT 和 MRI 图像信息，利用医学图像处理软件 MIMICS 在 CT 中通过阈值分割提取出包括股骨、胫骨、腓骨和髌骨，在 MRI 数据中分别构建股骨软骨、胫骨软骨，前交叉韧带、后

交叉韧带、内侧半月板、外侧半月板、内侧副韧带、外侧副韧带及髌韧带。将建立膝关节各部位几何模型以 STL 格式导入逆向工程软件 Geomagic Studio 软件对比较粗糙的模型优化，尽可能保持各模型的完整性，将优化后的模型以 IGES 格式导入 Soildwork 建模软件对优化后的模型进行装配，半月板撕裂、后根部损伤、盘状半月板等损伤及修复模型可以在 Solidworks 软件中进行模拟。因 ANSYS 本身具有网格划分功能，直接将处理后的模型导入 Ansys 有限元分析软件进行网格划分、设定材料属性和参数、确定边界条件、载荷设置、最终进行有限元模型的力学分析[3]-[8]。金波等[8]关于半月板三维有限元模型建立及力学分析中，在膝关节模型股骨近端模型的中点施加 1150 N 的轴向载荷模拟正常状态下半月板的生物力学，结果显示在静止状态下内侧半月板及外侧半月板均发生形变，主要位于半月板的体部，内侧半月板的形变明显大于外侧半月板，最大位移值为 0.33 mm。内侧半月板应力接触面积明显大于外侧半月板，分别为 771.05 mm² 和 634.31 mm²，内侧半月板应力分布比较均匀，但应力也高于外侧半月板，其中半月板应力分布最高点分别位于内侧半月板角及外侧半月板前角，压力峰值分别为 2.9 MPa 及 1.45 MPa。因此可以证实内侧半月板应力接触面积更大，承担应力分布更多，出现内侧半月板损伤的风险更高，阐明了大多数膝关节骨性关节更易发生在内侧胫股关节内的原因[4] [7] [8]。综上，在正常膝关节中，内外侧间室的压力分配比较均匀，由于内侧半月板承受更大接触面积和更大的接触压力，所以临幊上内侧半月板也更容易损伤，这需要临幊医生更加对其引起注意。

3. 半月板损伤相关有限元分析

3.1. 半月板撕裂的生物力学影响有限元分析

半月板撕裂是半月板的最常见的损伤，Zhang 等[9]针对半月板退行性和放射状撕裂进行有限元分析研究中显示，退化性和放射状撕裂都会导致关节软骨和半月板的接触应力峰值和剪切应力增加以及半月板的突出程度更大，内侧半月板撕裂引起的应力和突出程度比外侧半月板撕裂增加的更加明显。在静态姿势模拟下，对于内侧半月板的退行性撕裂，股骨软骨的剪切应力提高到 1.87 MPa，胫骨软骨的剪切应力提高到 1.86 MPa，略高于外侧半月板。股骨软骨的压应力为 7.73 MPa，低于外侧软骨的压应力。胫骨软骨的压应力为 6.43 MPa，比外侧软骨高 22.5%。在内侧半月板切除术后，关节软骨的应力峰值和半月板突出程度进一步升高，应力分布从完整的半月板关节转移到内、外侧半月板损伤的半月板关节，同时半月板会导致半月板外突值明显增加，其中内侧半月板撕裂半月板外突值更大。对于内侧半月板的放射状撕裂，观察到与退行性撕裂类似的结果，两个软骨上的剪切应力略高，半月板上的应力减小，而股骨软骨和半月板上的压力较低，而胫骨软骨上的应力增加。值得注意的是，放射状撕裂的半月板外突幅度大于退行性撕裂。半月板的撕裂会导致膝关节的稳定性降低，增加关节软骨的应力，半月板病变可能会导致膝关节骨关节炎发生发展。膝关节骨关节炎也会由于半月板结构的退行性改变和减弱而导致半月板进一步撕裂[10]。Wang 等[11]研究发现内侧半月板的撕裂主要发生在半月板的前角，后角和体部，内侧半月板较宽的放射状撕裂在撕裂的末端容易发生高应力集中，在半月板前角损伤模型中半月板的剪切应力分布随着前角撕裂的扩大显著增加，最终导致发生完全半月板撕裂的潜在风险。此外，半月板撕裂虽然没有引起软骨负荷分布的改变，但破坏了半月板的周向应力传递功能，因此导致膝关节骨关节炎发展[11][12]。Xu 等[13]一项研究结果表明，一旦半月板的完整性被完全或部分破坏，胫股骨内侧关节软骨表面的负荷就会增加，部分半月板切除术对改善胫股骨接触没有好处，半月板修复可以恢复半月板吸收环状应激的能力，并有效降低胫股骨关节的接触压力。膝关节内侧骨关节炎的退行性改变使半月板发生更大的形变，增加了内侧半月板内侧边缘的应力。高应力水平是半月板撕裂的危险因素，反过来半月板撕裂也加速了膝关节骨关节炎的进程[14]。总之，无论是半月板的放射状撕裂，水平裂以及退行性撕裂都会导致胫股关节之间应力分布发生改变，这种应力的改变会导致膝关节在剧烈运动，后某一特定损伤情况

下导致关节软骨骨坏死的发生，最终进展至膝关节骨性关节炎的发生发展。目前各种损伤修复方法尚未达成一致，但都不建议对损伤的半月板进行半月板切除术。

3.2. 半月板后根部损伤的生物力学影响有限元分析

半月板根部是指半月板前角或后角与胫骨平台髁间区的附着部位，这种附着对于维持半月板的正常排列和生理功能十分重要。半月板在负重时承受胫骨和股骨两侧的负荷，产生滑动力使半月板向周边移动，因此半月板通过产生环形张力来抵抗外周定向滑动力，并通过半月板前根和后根之间的牢固连接将载荷向胫骨转移。环向张力的存在使得轴向胫股载荷能够均匀地穿过关节面并保护关节软骨。半月板根部撕裂和撕脱伤导致环带张力功能丧失，关节软骨失去保护可能导致膝关节退行性变化。正常半月板的关节接触面积最大，接触压力和接触应力最小，外侧半月板全切时外侧间室接触面积最小，接触压力和应力最大。半月板后根部撕裂的最大接触压力和应力介于完整膝关节与外侧半月板全切除术后膝关节的接触压力和应力之间，外侧间室压力和应力保持相对较小[15]-[18]。Wang 等[15]一项关于内外侧半月板后根部损伤有限元力学研究，结果显示在 1000 N 压缩载荷下，正常膝关节胫骨关节软骨内侧间室的最大接触压力为 2.97 MPa，外侧间室的最大接触压力为 3.09 MPa，内侧和外侧间室的最大压力分别为 2.36 MPa 和 2.25 MPa。当半月板后根部损伤时膝关节内侧和外侧胫骨软骨的最大接触压力分别为 3.28 MPa 和 3.92 MPa。胫骨内侧和外侧软骨的最大应力分别为 2.62 MPa 和 3.79 MPa。内外侧半月板根部发生损伤后，最大压力和最大剪切应力均会得到明显的提高，膝关节在长时间压力作用下容易导致软骨营养不良、关节摩擦力增加等，进一步造成软骨退变。徐志等[17]对健康模型和内侧半月板后根撕裂模型进行了对比研究，结果显示，在步态载荷作用下，半月板的各种病理性改变都会增加内侧胫骨平台的压力，如果在内侧半月板后根撕裂患者的日常活动中发生，则与半月板突出的结果相似。随着病程迁延，极有可能使膝关节自发性骨坏死或骨关节炎的危险性增大，这种损伤积累效应会随着病程的迁延而逐渐加重。Yang 等[18]在完整内侧半月板模型的基础上，建立半月板后根部撕裂的静态和动态模型来分析内侧半月板后根撕裂后膝关节的力学改变。结果显示在静态分析过程中半月板后根部撕裂发生时，胫骨内侧软骨和股骨内侧软骨之间的载荷为 580.2 N，较内侧半月板完整时 194.2 N 大大增加，半月板后根部撕裂后内侧半月板的最大等效应力增加了 23.6%，与内侧半月板完整相比，在半月板后根部撕裂后，胫骨内侧软骨和股骨内侧软骨的最大接触压力分别增加了 24.3% 和 45.8%，而内侧半月板的最大接触压力下降了 52%。在半月板后根部撕裂后，胫骨内侧软骨和股骨内侧软骨的最大接触压力进一步增加，内侧半月板的最大接触压力进一步降低。在动态分析过程中半月板后根部撕裂后，半月板上的载荷减小，内侧胫骨软骨上的载荷增大，半月板中间内缘的应力明显大于正常半月板。在静态状态下，应力集中在胫骨内侧软骨的前部，而在动态状态下，应力从前部转移到中部和后部。综上所述，所有研究共同证明半月板后根部的损伤会引起比半月板撕裂更大的应力改变，半月板后根部撕裂会导致半月板环形张力丧失，从而产生更大的形变。因此，在临床治疗中，首先推荐恢复半月板后根部的自然结构，特别是对于体力活动的患者。

3.3. 半月板外突的生物力学影响有限元分析

半月板外突(Medial Meniscus Extrusion, MME)诊断标准是半月板外周缘与胫骨平台边缘之间的距离 > 3 mm [19]。半月板的损伤会导致半月板明显突出，导致关节内压力分布不均匀，加速关节软骨退化，加速骨关节炎的发展[20] [21]。Gokkus 等[22]根据内侧半月板突出的量(从 1 mm 到 10 mm，每个模型增加 1 mm)，共创建 10 个 3D 模型。测量半月板边缘与胫骨平台边缘之间的突出距离。在人体模型膝关节伸直和直立时进行静态分析。从股骨头中心向下肢的机械轴施加 1000 N 的负荷应力。结果显示随着内侧半月板突出程度的增加，所有结构的最大等效应力都增加，与参考值相比，10 mm 突出模型中受影响最

大的是胫骨软骨，最大等效应力增加了 22.73 倍。这就证实内侧半月板突出与所有膝关节结构负荷增加有关，尤其是胫骨软骨。内侧半月板突出的程度与胫骨软骨的分布和负荷有关，这可能是膝关节骨关节炎的突出特征。半月板突出与半月板退行性改变、半月板撕裂、膝关节积液及其他经 MRI 鉴定的膝关节病变相关。Ma 等[23]利用有限元分析方法模拟 72 个膝关节模型内侧及外侧半月板不同程度的突出，研究平衡站立位下健康膝关节和受伤膝关节软骨和半月板最大等效应力的变化以及胫骨平台半月板和软骨的压力分布。结果显示与健康膝关节相比，内侧间室组织在半月板突出 4 mm 时应力峰值增加 40%以上，外侧间室组织在半月板突出 2 mm 时应力峰值增加 40%以上。半月板突出降低了半月板与股骨软骨之间的接触载荷，增加了胫骨与股骨软骨之间的接触载荷，最大增加可达 5 倍。值得注意的是，内侧半月板突出也显著增加了胫骨外侧软骨的峰值应力。这种软骨应力的增加加速了基质降解，损害了软骨细胞功能，降低了软骨的弹性和减震能力，从而促进了骨关节炎的进展，导致关节疼痛、僵硬和活动受限。Chen 等[24]报道了根据加载周期和加载量的重复加载对软骨组织的损伤，在 20 MPa 以上的载荷下，2 分钟的时间足够造成宏观损伤，5 MPa 在 120 分钟内发生显微损伤，10 MPa 在较短的时间内发生显微损伤。总之，半月板外突包括生理性和病理性外突，无论哪种情况，半月板的外突都会导致半月板在胫骨平台的覆盖率减少，导致胫骨软骨应力发生改变，胫骨软骨和股骨软骨直接接触，短时间的高压下就会引起软骨的损伤，也会进一步加速骨性关节炎的发生发展。目前针对半月板外突治疗方案首选半月板中央化技术，半月板外突需尽早进行干预，以防止或延缓骨性关节炎的发生发展。

4. 半月板修复的有限元分析

目前，手术治疗半月板损伤的修复主要有以下几种方案：半月板切除术(包括部分切除，次全切及全切)、半月板缝合术，半月板后根部重建术、半月板中央化技术以及半月板移植术等。

4.1. 半月板切除术有限元分析

Chen 等[25]通过实验发现，无论切除撕裂半月板的哪一部分、股骨髁软骨和胫骨平台软骨上的受力面积都会减少，其中半月板撕裂的上下两部分全去除后面积减少最大，单独切除撕裂的上半部分与切除下半部分相比，膝关节内压力或剪切力的变化与水平半月板撕裂缝合后的压力变化最接近，发生这种情况可能是因为半月板上半部分与股骨髁的形状匹配，形成弯曲的凹面，而半月板下半部分与胫骨平台更匹配，更接近平坦表面。在去除上半部分后，半月板接触面积可以更多地通过受力变形来补偿，而去除半月板下半部分后的变形只能失去更多的匹配，导致接触面积减少，峰值压力增加。Yang 等[18]关于半月板切除术后有限元分析显示，半月板切除术后，相当于扩大半月板撕裂范围，导致峰值剪切应力和峰值压缩应力进一步增大。这种应力和半月板突出的变化趋势可能解释了早期半月板退变症状的缺失，以及过度的负荷在半月板退变晚期如何影响膝关节，从而导致 OA 的发生。因此，虽然既往半月板切除术是半月板撕裂最常用的治疗方法，但它对膝关节内的应力分布发生改变。所有类型的半月板切除术除了增大的剪切应力外，都促进了半月板挤出，复杂撕裂后的半月板切除术显示出最大的半月板位移，切除面积的增加加剧了半月板突出。陈媛等[26]分析膝关节不同屈曲角度和载荷下的半月板应力和位移的生物力学特征，研究表明，在 0° 到 60° 的屈膝范围内，随着膝关节屈膝角度的增加内侧半月板的最大应力值逐渐增高。在屈膝 60° 时，外侧半月板位移明显大于内外侧半月板，此时受到的最大应力值显著增高。内侧半月板在外翻和内旋联合力矩，屈膝 60° 时所受最大应力最高，外侧半月板在膝关节屈曲 30° 伴外翻运动时所受最大应力最高。在 1150 N 轴向压力联合 4 Nm 内旋应力下，屈曲 0°、30°、90° 时内侧半月板最大应力均小于外侧半月板。对于股骨髁和胫骨平台，在不同膝关节屈曲角度和旋转角度下，软骨内部的最大应力均大于软骨外部。与以往研究的峰值应力结果相似。但随着屈

曲角度的增加，有限元模型中关节软骨和半月板的最大应力均大于健康模型。随着屈曲角度的增大，最大应力值逐渐向后移动。更多的应力集中在切除的半月板边缘，胫骨内侧平台的最大应力增加，这可以解释及关节 OA 进展的力学机制[27][28]。半月板后根部切除术在静态分析中对关节软骨没有明显的生物力学影响，但在动态状态下对内侧和外侧腔室均有显著影响，这种改变可能加重关节退变，加速膝关节骨性关节炎的进展[13][18]。综上所述，无论半月板哪一类型的损伤，进行半月板切除术都会使膝关节内外侧间室应力显著增加，对于半月板撕裂程度较重的，更应该尽可能的保留半月板的上半部分，或者保留更多的半月板组织，但在临床工作中，针对损伤的半月板进行半月板切除术，切除范围与切除面积尚未达成统一，尚需进一步研究。

4.2. 半月板缝合有限元分析

Chen 等[25]在用有限元分析方法制作了内、外侧半月板水平撕裂模型、半月板缝合模型，模拟膝关节在 0°、10°、20°、30° 和 40° 屈曲角度下股骨髁软骨、半月板和胫骨软骨的压力和剪切力的变化趋势，结果显示在半月板缝合模型中观察到的膝关节内压力和剪切力峰值最低，这些结果表明半月板的缝合修复是维持膝关节内应力关系的最佳方式。针对半月板后根部损伤的修复，目前多采用半月板后根部重建术[13]。Wang 等[15]在采用单针技术重建外侧半月板的后根时，内侧和外侧胫骨软骨的最大接触压力分别为 2.762 兆帕和 3.75 兆帕。胫骨内侧和外侧的最大应力分别为 3.759 兆帕和 3.644 兆帕。采用双针技术重建外侧半月板后根时，内侧、外侧胫骨软骨最大接触压力分别为 2.76 MPa 和 3.255 MPa，最大应力分别为 3.755 MPa 和 3.587 MPa。采用单针和双针技术重建后根部附着点，两种方式都可有效降低关节接触压力和应力，使膝关节的接触力学和运动学可以有效地恢复到类似于完整膝关节的水平，与单针技术相比，双针技术在恢复半月板稳定性、保护关节软骨和延缓关节退化方面更有效[29]。综上，各种半月板修复技术都可以基本恢复半月板原有的生物力学特性，使膝关节内外侧间室的压力分布更均匀，针对半月板不同位置的撕裂都应该尽量修复，而不是一味的进行半月板切除术，修复后的半月板可以恢复胫股关节接触生物力学的有效性。在延缓或预防胫股骨关节炎发展方面具有重要的临床意义。这种技术在生物力学中展现出其优越性，但是在临床结局尚有争议，需要更多的随访研究进行比较。

4.3. 仿生的半月板假体的有限元分析

左建林等[30]设计一种人体仿生的内侧半月板假体，将无法修复的半月板更换为人工半月板，用于恢复半月板的正常生理功能。分析结果表明，半月板假体对膝关节产生的最大接触应力(16.28 MPa)明显高于健康的膝关节(5.10 MPa)。半月板假体对关节软骨产生的最大接触应力(股骨内侧软骨为 15.23 MPa；胫骨内侧软骨为 12.89 MPa)明显高于健康的膝关节(股骨内侧软骨为 5.10 MPa；胫骨内侧软骨为 2.40 MPa)。半月板假体膝关节内产生的最大接触应力区域集中在假体的后内部，与正常人体半月板生物力学特性相同，健康半月板的应力分布也在同样的区域。这证明设计的半月板假体在承担力学载荷能力方面与健康半月板相似。Wei 等[31]设计了一种新的人工编织半月板模型，对半月板施加了 400 N、600 N、800 N、1200 N 和 1400 N 的负荷，以模拟行走、跑步、跳跃和高海拔跌倒时膝关节半月板的应力状态进行了有限元分析，结果显示人工半月板的设计结构可以很好地模仿原生半月板的内部纤维分布，可以显著改善以前半月板分层和断裂的特征。这种半月板的创新编织结构为制备新的仿生半月板提供了一种新的方法。近年来仿生半月板假体逐渐成为研究热点，因其对于一些不可修复的半月板可以进行半月板置换手术，继续在膝关节分配负荷中发挥正常力学作用，各种仿生半月板假体与正常人体半月板生物力学相近，同时仿生半月板假体也存在挑战，要确保材料植入后是否会发生排斥反应，假体的耐久性，使用年限等临床报道较少尚存在争论。

5. 小结和展望

综上所述，临床医生应该更重视半月板在膝关节中发挥的生物力学作用，临床工作者针对有半月板损伤的患者，首先应尽量选择修复半月板的手术，避免一味的对可修复的半月板进行各种切除手术，对于不能修复的半月板进行切除时应尽量保留更多体积的半月板，如进行半月板全切后可以选择半月板假体植入，以求恢复膝关节内生物力学特征，避免膝关节骨性关节炎的患者加速进展至膝关节置换的结局。有限元分析技术因其独特的生物力学特性，在骨科力学研究中可以通过计算机模拟不同类型损伤模式，进一步计算出各种手术方案的优缺点，从而指导手术方案的选择。在临床工作中，各种类型的半月板损伤既往都采取半月板切除术，这导致医学患者在术后早期再次出现膝关节疼痛症状，在生物力学方面，半月板的各种损伤都会导致膝关节内生物力学的改变，从而进一步加速膝关节骨性关节炎的发生发展，而针对半月板进行缝合修复，包括半月板后根部重建术各种保留半月板的手术技术，在生物力学方面都展示出其优势，通过修复半月板可以改善甚至恢复膝关节内完整的生物力学特性。未来将通过有限元分析优化半月板中央化技术的设计，各种半月板修复技术，和辅助治疗膝关节骨性关节炎需要长期临床数据证实其安全性和有效性。未来希望可以与人工智能相结合，在半月板修复中提供更多经验。

参考文献

- [1] Allen, C.R., Wong, E.K., Livesay, G.A., Sakane, M., Fu, F.H. and Woo, S.L. (2000) Importance of the Medial Meniscus in the Anterior Cruciate Ligament-Deficient Knee. *Journal of Orthopaedic Research*, **18**, 109-115. <https://doi.org/10.1002/jor.1100180116>
- [2] Koga, H., Muneta, T., Watanabe, T., Mochizuki, T., Horie, M., Nakamura, T., et al. (2016) Two-Year Outcomes after Arthroscopic Lateral Meniscus Centralization. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, **32**, 2000-2008. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2016.01.052>
- [3] 杨骏良, 路坦, 徐彪, 等. 前交叉韧带部分断裂对膝关节应力影响的三维有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(9): 1347-1353.
- [4] 杭声琪, 张文韬, 王泰淇, 等. 基于 CT 和 MRI 膝关节有限元模型建立与不同载荷下生物力学特性分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2021, 38(3): 370-374.
- [5] 金波, 胡云根, 韩雷. 半月板有限元分析的研究进展[J]. 中国骨伤, 2019, 32(5): 485-488.
- [6] 傅德杰, 杨柳, 郭林. 半月板损伤与下肢力线[J]. 中国矫形外科杂志, 2021, 29(4): 330-333.
- [7] 董跃福, 牟志芳, 蒋胜波, 等. 膝关节有限元解剖模型的构建及其力学分析[J]. 临床骨科杂志, 2015, 18(6): 686-692.
- [8] 金波, 胡云根, 韩雷. 半月板三维有限元模型建立及力学分析[J]. 中国骨伤, 2020, 33(8): 766-770.
- [9] Zhang, K., Li, L., Yang, L., Shi, J., Zhu, L., Liang, H., et al. (2019) Effect of Degenerative and Radial Tears of the Meniscus and Resultant Meniscectomy on the Knee Joint: A Finite Element Analysis. *Journal of Orthopaedic Translation*, **18**, 20-31. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2018.12.004>
- [10] Englund, M., Guermazi, A. and Lohmander, S.L. (2009) The Role of the Meniscus in Knee Osteoarthritis: A Cause or Consequence? *Radiologic Clinics of North America*, **47**, 703-712. <https://doi.org/10.1016/j.rcl.2009.03.003>
- [11] Sentong, W., Kazunori, H., Shunsuke, K., et al. (2022) Biomechanical Effects of Medial Meniscus Radial Tears on the Knee Joint During Gait: A Concurrent Finite Element Musculoskeletal Framework Investigation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **10**, Article 957435.
- [12] Zhang, K., Li, L., Yang, L., et al. (2019) The Biomechanical Changes of Load Distribution with Longitudinal Tears of Meniscal Horns on Knee Joint: A Finite Element Analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **14**, Article No. 237.
- [13] Xu, Z., Li, Y., Rao, J., Jin, Y., Huang, Y., Xu, X., et al. (2022) Biomechanical Assessment of Disease Outcome in Surgical Interventions for Medial Meniscal Posterior Root Tears: A Finite Element Analysis. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **23**, Article No. 1093. <https://doi.org/10.1186/s12891-022-06069-z>
- [14] Li, L., Yang, L., Zhang, K., Zhu, L., Wang, X. and Jiang, Q. (2020) Three-Dimensional Finite-Element Analysis of

- Aggravating Medial Meniscus Tears on Knee Osteoarthritis. *Journal of Orthopaedic Translation*, **20**, 47-55.
<https://doi.org/10.1016/j.jot.2019.06.007>
- [15] Wang, J., Qi, Y., Bao, H., Xu, Y., Wei, B., Wang, Y., et al. (2021) The Effects of Different Repair Methods for a Posterior Root Tear of the Lateral Meniscus on the Biomechanics of the Knee: A Finite Element Analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **16**, Article No. 296. <https://doi.org/10.1186/s13018-021-02435-0>
- [16] 唐保明, 李钊伟, 杨爱荣, 等. 内外侧半月板后根部损伤有限元力学研究[J]. 中国矫形外科杂志, 2019, 27(22): 2075-2079.
- [17] 徐志, 李豫皖, 金瑛, 等. 步态周期下内侧半月板后根部分撕裂对膝关节生物力学的影响[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(18): 2824-2830.
- [18] Yang, Q., Zhu, X., Bao, J., Zhang, J., Xue, A., Wang, D., et al. (2022) Medial Meniscus Posterior Root Tears and Partial Meniscectomy Significantly Increase Stress in the Knee Joint during Dynamic Gait. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **31**, 2289-2298. <https://doi.org/10.1007/s00167-022-07285-9>
- [19] Cothran, R.L., Major, N.M., Helms, C.A. and Higgins, L.D. (2001) MR Imaging of Meniscal Contusion in the Knee. *American Journal of Roentgenology*, **177**, 1189-1192. <https://doi.org/10.2214/ajr.177.5.1771189>
- [20] Xu, D., van der Voet, J., Waarsing, J.H., Oei, E.H., Klein, S., Englund, M., et al. (2021) Are Changes in Meniscus Volume and Extrusion Associated to Knee Osteoarthritis Development? A Structural Equation Model. *Osteoarthritis and Cartilage*, **29**, 1426-1431. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2021.07.007>
- [21] Krych, A.J., Bernard, C.D., Leland, D.P., Camp, C.L., Johnson, A.C., Finnoff, J.T., et al. (2019) Isolated Meniscus Extrusion Associated with Meniscotibial Ligament Abnormality. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **28**, 3599-3605. <https://doi.org/10.1007/s00167-019-05612-1>
- [22] Gokkus, K., Atmaca, H., Uğur, L., Özkan, A. and Aydin, A.T. (2016) The Relationship between Medial Meniscal Subluxation and Stress Distribution Pattern of the Knee Joint: Finite Element Analysis. *Journal of Orthopaedic Science*, **21**, 32-37. <https://doi.org/10.1016/j.jos.2015.10.001>
- [23] Ma, X., Liu, Q., Xu, D., Fu, J., He, Y. and Huang, J. (2024) Biomechanical Impact of Progressive Meniscal Extrusion on the Knee Joint: A Finite Element Analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **19**, Article No. 754. <https://doi.org/10.1186/s13018-024-05249-y>
- [24] Chen, C., Burton-Wurster, N., Lust, G., Bank, R.A. and Tekoppele, J.M. (2000) Compositional and Metabolic Changes in Damaged Cartilage Are Peak-Stress, Stress-Rate, and Loading-Duration Dependent. *Journal of Orthopaedic Research*, **17**, 870-879.
- [25] Chen, H., Liu, L. and Zhang, Y. (2023) Finite Element Analysis of the Knee Joint Stress after Partial Meniscectomy for Meniscus Horizontal Cleavage Tears. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **24**, Article No. 744. <https://doi.org/10.1186/s12891-023-06868-y>
- [26] 陈媛, 张晓辉, 廖八根. 半月板部分切除术后不同屈膝角度载荷下半月板的生物力学特征: 有限元分析[C]//中国体育科学学会. 第十二届全国体育科学大会论文摘要汇编——墙报交流(运动医学分会). 广州: 广州体育学院, 2022: 3.
- [27] Zhang, X., Yuan, S., Wang, J., Liao, B. and Liang, D. (2021) Biomechanical Characteristics of Tibio-Femoral Joint after Partial Medial Meniscectomy in Different Flexion Angles: A Finite Element Analysis. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **22**, Article No. 322. <https://doi.org/10.1186/s12891-021-04187-8>
- [28] Deng, R., Uzuner, S. and Li, L.P. (2024) Impact of Knee Geometry on Joint Contact Mechanics after Meniscectomy. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 28595. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79662-y>
- [29] Berk, A.N., Cregar, W.M., Wang, S., Habet, N.A., Ifarraguerri, A.M., Trofa, D.P., et al. (2024) The Effect of Lower Limb Alignment on Tibiofemoral Joint Contact Biomechanics after Medial Meniscus Posterior Root Repair: A Finite-Element Analysis. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, **32**, e558-e567. <https://doi.org/10.5435/jaaos-d-23-00702>
- [30] 左建林, 刘恩渤, 贾政斌, 等. 基于内侧半月板结构设计的仿生假体有限元分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(6): 2319-2324.
- [31] Wei, J., Zhang, W. and Ding, X. (2023) Design and Finite Element Analysis of Artificial Braided Meniscus Model. *Materials*, **16**, Article 4775. <https://doi.org/10.3390/ma16134775>