

单髁置换术的临床现状和生物力学研究进展

孙皓然¹, 李昊轩¹, 孙晓新^{2*}

¹华北理工大学研究生院, 河北 唐山

²华北理工大学附属医院骨关节与运动医学科, 河北 唐山

收稿日期: 2024年6月17日; 录用日期: 2024年7月11日; 发布日期: 2024年7月19日

摘要

单髁置换术(UKA)、全膝关节置换术(TKA)和胫骨高位截骨(HTO)三种技术在治疗膝关节单间室骨性关节炎方面均有不俗表现。相比较于TKA, UKA有着手术创伤更小、保留原有膝关节运动形态、术后恢复速度更快、对年轻患者友好、经济高效等优势。HTO更适合下肢畸形患者, 对于无畸形患者, UKA可以更好降低术后翻修和并发症风险。利用有限元技术对UKA的手术方案、假体评估、术后并发症等方面进行生物力学探究, 为临床实践提供参考。

关键词

骨性关节炎, 单髁置换术, 全膝置换术, 胫骨高位截骨, 有限元分析

The Clinical Status and Biomechanical Research Progress of Unicompartmental Knee Arthroplasty

Haoran Sun¹, Haoxuan Li¹, Xiaoxin Sun^{2*}

¹Graduate School, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

²Department of Orthopedics and Sports Medicine, The Affiliated Hospital of North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

Received: Jun. 17th, 2024; accepted: Jul. 11th, 2024; published: Jul. 19th, 2024

Abstract

Unicompartmental knee arthroplasty (UKA), total knee arthroplasty (TKA) and high tibial os-

*通讯作者。

文章引用: 孙皓然, 李昊轩, 孙晓新. 单髁置换术的临床现状和生物力学研究进展[J]. 临床医学进展, 2024, 14(7): 764-771. DOI: 10.12677/acm.2024.1472078

teotomy (HTO) are all effective in the treatment of single-compartment osteoarthritis of the knee. Compared with TKA, UKA has the advantages of less surgical trauma, retaining the original knee joint motion pattern, faster postoperative recovery, friendly to young patients, and economical and efficient. HTO is more suitable for patients with lower limb malformations, and UKA can better reduce the risk of postoperative revision and complications for patients without malformations. The biomechanical study of UKA's surgical plan, prosthesis evaluation and postoperative complications was carried out by using finite element technique to provide reference for clinical practice.

Keywords

Osteoarthritis, Unicompartmental Knee Arthroplasty, Total Knee Arthroplasty, High Tibial Osteotomy, Finite Element Analysis

Copyright © 2024 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. 前言

膝关节骨性关节炎(osteoarthritis, OA)是危害中老年人健康、引发膝关节疼痛和功能障碍的最常见疾病[1], 而终末期膝关节 OA 也是人工关节置换术的主要适应证。全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)能有效改善终末期膝关节 OA 患者的关节疼痛和功能, 近期和远期疗效确切, 因此备受临床推崇, 数十年来一直是治疗膝关节 OA 的主流技术[2]。然而, 越来越多的证据表明, 膝关节 OA 并不总是累及膝关节多个间室, 反而大多数病例首先经历以前内侧软骨磨损为特征的骨性关节炎阶段, 而患者的疼痛症状也主要来自内侧间室[3]。因此, 针对膝关节前内侧 OA 阶段治疗的单髁置换术(unicompartmental knee arthroplasty, UKA)和胫骨高位截骨术(high tibial osteotomy, HTO)应运而生[4], 并且 UKA 技术发展尤为迅速。据 2007~2011 年美国某数据库显示: 相较 HTO (-3.9%), UKA 的年应用增长率明显更高(+4.7%) [5]。

近年来, 作为逐渐兴起与完善的治疗技术, UKA 因其显著的临床优势, 被认为是解决膝关节疼痛及恢复良好功能的有效方法。薛华明等人根据 4000 多例 UKA 手术经验及最新研究进展, 在严格遵循 UKA 开展 4 个基本要素(退变程度重、可复性畸形、韧带功能和对侧间室软骨完好)的前提下, 肥胖(BMI ≥ 30 kg/m²)、年轻(<60 岁)或老年(≥ 75 岁)患者、无沟槽样变的髌股 OA 或外侧髌骨半脱位、严重内翻和屈曲挛缩畸形(<20°)、无膝关节失稳的前交叉韧带功能缺失、HTO 手术失败及单间室创伤后骨关节炎并不是 UKA 的绝对禁忌症[6]。然而, 目前 UKA 治疗膝关节骨性关节炎的手术适应证以及其与 TKA、HTO 孰优孰劣仍没有定论。为此, 本文将对 UKA 与 TKA、HTO 的疗效进行对比分析, 并对 UKA 的生物力学研究进展进行综述, 以期为该领域的临床实践提供参考。

2. UKA 与 TKA 的疗效分析

UKA 作为常用的保膝治疗术之一, 出现于 20 世纪 70 年代, 随着关节外科的不断发展以及假体技术的不断改进, 近几年 UKA 发展迅猛。对于膝关节单间室 OA 患者的手术治疗, UKA 和 TKA 在术后早期内都获得了较好的术后功能恢复。TKA 需要牺牲同侧正常关节间隙, 且创伤较大。而 UKA 相比 TKA, 手术暴露的侵入性更小, 保留交叉韧带, 保留正常外侧间室骨储备、术后恢复速度更快, 更有利于患者康复[7] [8]。对于老年性膝关节单间室 OA 患者, 该手术已成为最佳治疗方法之一。

Knif Sund 等人评估 UKA 与 TKA 在膝关节单间室 OA 患者中的临床效果, 他们招募了 143 名有症状的膝关节单间室 OA 患者接受 UKA 或者 TKA, 结果 UKA 与 TKA 的主要结局相当。但与 TKA 相比, UKA 术后的恢复更快[9]。此外, Bagherifard 等人通过回顾性研究, 调查 17 名接受 UKA 并可用于最终评估的膝关节单间室 OA 患者, 中期结果显示所有患者都对结果非常满意或满意, 随访期间无术后并发症或再次手术记录。因此, 作者认为单间室膝关节置换术提供了令人满意的结果和高生存率[10]。由于该手术保留了膝关节的生物学特征, 因此患者术后的膝关节活动度接近正常。Crawford, DA 等人认为 UKA 是前内侧 OA 的治疗选择, 与 TKA 相比, UKA 可改善膝关节的活动范围, 恢复功能并减少医疗并发症[11]。

于年轻患者, UKA 可显著改善年轻膝内侧单间室 OA 患者的临床症状和膝关节功能, 保留膝关节的非退行性关节, 具有良好的患者满意度, 早期疗效满意[12]。Greco, Nicholas J 等人专门调查了 50 岁以下患者的 UKA 结果, 对 2003~2014 年在单一数据库中进行 UKA 的患者进行回顾性分析, 研究活动平台 UKA 在年轻患者群体中的临床结果和存活率。该研究纳入 340 个膝关节, 其中 20 名患者需要再次手术, 预计 6 年假体生存率为 96%, 10 年假体生存率为 86%, 7 例患者术后平均 5.6 年出现无菌性松动, 4 例患者因 OA 进展需要转为 TKA, 平均 6.6 年。Greco, Nicholas J 等人认为: 对于 50 岁以下的膝关节单间室 OA 患者, 应考虑采用内侧活动平台 UKA 作为治疗选择[13]。

UKA 具有更短的住院时间和更快的恢复速度, 这意味着患者能够更快地回到工作岗位或者日常生活中, 减少因长期治疗而导致的经济负担[14]。Soohoo, Nelson 等人比较 UKA 术作为仅限于内侧或外侧间室的 OA 患者与 TKA 的成本效益, 他们认为当 UKA 的耐久性和功能与初次 TKA 相似时, 通过适当的患者选择, 支持 UKA 作为治疗单间室 OA 的一种经济高效的替代方案[14]。

3. UKA 与 HTO 的疗效分析

膝关节单间室 OA 可导致下肢力线的异常, 加重已退变关节软骨处的压力, 导致骨性关节炎加重, HTO 通过截骨术矫正下肢力线, 使内侧间室受力重新分布到膝关节的健康部位, 以减缓膝关节的退行性改变, 降低膝关节内侧间室的负重, 从而改善 OA 的症状, 延缓 OA 的进展, 推迟、甚至避免膝关节置换[15][16]。

随着 UKA 和 TKA 技术的日益成熟, HTO 的价值开始受到质疑。但是对于某些特定的患者, 该术式疗效依然优良[15]。在下肢畸形患者中, HTO 有很好的预后。结果与年龄、身体质量指数(BMI)或骨性关节炎的等级无关。膝关节活动和韧带稳定性是支持 HTO 的次要标准。Lobenhoffer 和 Agneskirchner 对 533 名患者进行了一项多中心研究, 认为: HTO 与 UKA 的主要标准是股骨或胫骨的下肢畸形。没有下肢畸形的内侧膝关节单间室 OA 患者应采用 UKA 治疗[17]。HTO 和 UKA 在选定的内侧膝关节单间室 OA 病例中具有相同的适应证。这些适应证包括以下患者: 1) 55 至 65 岁; 2) 适度活跃; 3) 非肥胖; 4) 轻度内翻畸形; 5) 无关节失稳; 6) 良好的活动范围; 7) 中度单室关节病。Dettoni 等人认为: 在正确的适应证下, 这两种治疗方法都能产生持久的、可预测的治疗结果。没有证据表明一种治疗方法优于另一种治疗方法[18]。

卫鹏斌等人将 94 例膝关节单侧 OA 患者分为 AB 两组, A 组行 UKA, B 组行 HTO, 术后均随访 1 年并比较两组临床相关指标。卫鹏斌认为 HTO 及 UKA 治疗膝关节单侧 OA 的效果均显著, UKA 在缩短手术时间、促进术后康复方面效果更佳, 而 HTO 在改善膝关节活动度方面具有优势; 但对于术后疼痛评分和术后并发症发生率方面, 两种手术治疗无明显差异[19]。

Stukenborg-Colsman 等人在一项前瞻性随机研究中, 比较了采用 HTO 或 UKA 治疗内侧膝关节单间室 OA 患者的临床结果。总共有 32 例患者接受了 HTO, 28 例患者接受了 UKA, 患者在术后平均 2.5 年

(1.6~5 年)、4.5 年(3.6~7 年)和 7.5 年(6.6~10 年)接受评估。使用膝关节社会评分, 71%的 HTO 患者和 65% 的 UKA 患者术后 7~10 年的膝关节评分为优秀或良好。术后 7~10 年 Kaplan-Meier 生存分析显示, UKA 的生存率为 77%, HTO 的生存率为 60%。HTO 术后观察到更多的内、术后并发症。Stukenborg-Colsman 等人认为, 随着单室假体的先进设计, UKA 提供了更好的长期成功[20]。

Zhan 等人从国内外文献中检索 UKA 和 HTO 的比较研究并进行 meta 分析。meta 分析结果显示: UKA 的优良率比例高于 HTO, 合并 OR 为 2.43, 95% CI (1.46, 4.05) ($P = 0.0006$), UKA 组的翻修和并发症风险低于 HTO 组, 合并 OR 分别为 0.47 和 0.24, 95% CI 分别为(0.23, 0.97)、(0.10, 0.56)。Zhan 等人认为 UKA 降低了术后翻修和并发症的风险, 并提供了良好的结果[21]。

4. UKA 的生物力学研究

随着计算机技术的发展, 我们探求一种可以客观可靠地分析结果, 不受所研究生物体的结构限制, 减少动物实验及人体试验的花费的实验方法: 有限元分析。有限元仿真模拟已经逐渐代替传统的生物力学分析模式, 广泛地应用在骨科和生物力学领域。研究者利用有限元分析, 以深入了解 UKA 膝关节内部结构的应力分布和大小[22], 从而优化手术设计和提高治疗效果。

4.1. 优化手术方案

研究者通过有限元模型, 可以模拟 UKA 手术的全过程, 包括截骨、假体植入、关节间隙调整等步骤。这有助于医生更好地理解手术过程中的力学变化, 预测手术效果, 并优化手术方案。

胫骨假体后倾角是胫骨假体排列重要参数之一, 与膝关节稳定性、垫片磨损和其他间室 OA 进展密切相关[23]。Yong Nie 等人利用有限元技术在冠状面共采用 5 种不同的 UKA 胫骨后倾角构型(中性、3° 内翻、6° 内翻、3° 外翻和 6° 外翻), 研究胫骨平台和胫骨近端 von Mises 应力, 并比较 5 种不同构型下胫骨内侧和外侧腔室的载荷分布, 认为冠状面中性内翻或 3° 内翻是 UKA 的最佳对准方式[24]。Kyoung-Tak Kang 等人建立有限元模型, 然后将胫骨后倾角度(PTS)从-1° 发展到 15°, 并以 2° 的 PTS 模型为增量。通过验证的有限元模型, 研究了 PTS 变化对内侧垫片和外侧软骨接触应力的影响, 证明从初始解剖胫骨倾斜 $\pm 2^\circ$ 的偏移不会影响生物力学结果[25]。

Ma, P 等人认为: 内侧 UKA 固定平台 UKA 股骨假体应尽量避免冠状面平移或内翻/外翻倾斜。股骨假体的明显错位会显著影响膝关节内部结构, 特别是垫片和软骨表面的应力。股骨假体冠状面倾斜大于 6° 可显著增加垫片应力, 内翻大于 6° 可显著增加软骨面应力。股骨假体位置, 建议放置在股骨髁远端中心位置[26]。Kang KT 使用有限元分析评估 UKA 股骨假体位置在垫片和关节软骨中的接触应力, 得出同样结论: UKA 中股骨假体的最佳位置是股骨远端髁的中心。股骨假体位置是影响垫片和关节软骨接触应力的敏感因素之一[27]。Yang, Yuzhu 等人建立正常人体膝关节有限元模型, 将活动平台 UKA 股骨假体从 0° 矢状面至 15° 屈曲位以 3° 间隔置入, 观察各部件的生物力学变化。根据截骨量和站立位各部件的峰值应力, 认为股骨假体更合适的矢状面安装位置为 9°~12° [28]。Zhang, Z.H.等人研究发现: 在 UKA 中, 活动平台假体的股骨和胫骨假体具有较好的整合度, 可以减少假体的磨损, 而固定平台假体在 UKA 中应避免因过度整合而引起的局部应力集中, 防止假体加速磨损。建议在 4° 内翻至 4° 外翻的冠状位植入活动负重假体, 在 0° 中立位植入固定负重假体[29]。

有限元分析方法得到较为精确的仿真结果, 弥补了传统力学方法在膝关节研究中的不足。通过优化手术设计, 以期达到更好的治疗效果。

4.2. 评估假体设计与磨损

随着先进的计算机系统的出现, 越来越多的骨科植入物通过有限元分析来评估其失效模式和临床局

限性,以提高临床安全性。有限元分析可以评估不同假体设计的力学性能和生物相容性。通过模拟不同材料和形状的假体在膝关节中的行为,可以选择最适合患者的假体设计,提高手术的成功率和患者的满意度。Shantanu Patil 等人将 18 例尸体下肢随机分为两组: A 组植入患者特异性植入物; B 组为对侧膝关节,分别模拟膝关节运动。与 B 组相比, A 组在主动股骨回滚、主动胫股内收和被动内翻松弛方面与正常运动学的差异较小。Shantanu Patil 等人认为:与标准膝关节设计相比,采用患者特异性植入物的膝关节产生的运动学更接近于正常膝关节的运动学,术后恢复正常运动学可改善功能和患者满意度[30]。Kang 等人通过有限元技术验证了同样的结论,比较患者特异性植入假体和标准现成假体在 UKA 中的生物力学效果,评估垫片、关节软骨和外侧半月板在患者特异性假体和标准的 UKA 假体中的接触应力。采用步态周期负荷来评估特异性和标准 UKA 的生物力学效果。与标准假体相比,患者特异性植入假体术后关节软骨和外侧腔室半月板上的接触应力值更接近健康膝关节[31]。该特殊假体尤其适用于年轻和活动量大的患者,并且在理论上可以完美覆盖截骨面,从而避免骨面过度覆盖或覆盖不足,这也是该假体的最大优点。

有限元分析还可以预测 UKA 术后的长期效果。通过模拟不同时间点和活动条件下的膝关节行为,可以评估假体的耐久性、关节面的磨损情况以及患者的运动功能恢复情况等。这有助于医生为患者制定个性化的康复计划,提高治疗效果。Koh YG 等人认为活动平台股骨和胫骨假体形合性较好,能够减少假体磨损;而固定平台假体 UKA 应避免过度形合引起局部应力集中导致的加速假体磨损[32]。随着 UKA 假体类型不断更新换代,假体生存率也明显提高,通过有限元技术对假体磨损进行临床验证成为一种有效手段。

4.3. 预测术后并发症

与 TKA 比较,UKA 的翻修率更高,假体生存率更低[33]。当 UKA 失败确实发生时,需要复杂的翻修和限制患者活动。有限元分析可以分析 UKA 术后膝关节内部结构的应力分布,这有助于了解哪些区域可能承受过高的应力,从而预测潜在的并发症。假如能提高传统 UKA 的假体生存率和降低其翻修率,UKA 将会发挥独特的优势。

UKA 术后假体周围骨折虽然罕见,但也是可能的并发症之一。先前的一项研究报道,超过 6° 内翻或任何胫骨部件外翻的冠状排列会大大增加内侧腔室骨折的风险[34]。Hou 根据计算机断层扫描图像分割并重建下肢模型,通过有限元分析模拟了为放置胫骨切割导向器而创建的两个销孔的四种组合,探讨不同两针孔分布的单 UKA 术后胫骨的生物力学特征,结果发现胫骨平台近端内侧缘处的定位孔应力值最高,定位孔靠近胫骨平台内侧缘的位置出现应力集中[35]。Elvis 等人通过有限元分析不同钉孔位置的相关应力,得出和 Hou 相同的结论:胫骨切割导向固定钉放置在中心位置,可降低胫骨平台内侧假体周围骨折的风险[36]。

胫骨植入物对线是 UKA 并发症的一个重要原因。Sasatani K 使用三维有限元分析来研究 UKA 后胫骨近端应力分布在多个胫骨植入物排列中的变化,以期研究胫骨植入物的最佳排列。在没有松动的情况下,内翻对线模型中软骨下骨外侧缘的应力分布较高,并且高应力分布从前向后移动,向后倾斜 0° 至 10°。随着松动,外翻对齐模型中近端胫骨内侧皮质的应力分布较高。Sasatani K 认为:为了减少 UKA 并发症,目前的研究结果表明,胫骨植入物的最佳排列是在冠状面的中间位置,后倾角与矢状面的原始倾角相似[37]。Sano 为确定 UKA 后影响胫骨近端应力分布的因素,采用胫骨近端有限元分析来评估膝关节应力,认为 UKA 必须实现正确的术后对线。截骨平面应设置在靠近关节线的松质骨处,并应最大限度地保存骨量[38]。

Zhang G 用有限元技术计算 OA 患者关节骨软骨组织节点的应变,建立了可以预测 UKA 翻修风险的综合模型,该模型结合了生物力学和统计学习方法,创建了一个可以支持未来临床决策的手术计划工具,

具有理论上的高准确度,体现了其作为膝关节 OA 手术复位决策辅助的高价值[39]。与传统的力学研究方法相比,有限元分析方法能够得到较为精确的仿真结果,弥补了传统力学方法在膝关节研究中的不足。通过优化手术设计和假体选择,可以降低这些并发症的风险。

5. 小结

UKA 在膝关节单间室 OA 患者的临床研究中显示出了非凡的成功率。由于前交叉韧带、健侧间室和髌股间室的完整性在 UKA 中得以保留,使 UKA 术后膝关节的运动学与天然膝关节相似[40]。但 UKA 的适应证和禁忌症仍存在争议,与 TKA 和 HTO 的疗效对比需要进一步研究,并且植入物的功能结局和寿命可能受到多种因素的影响。有限元技术有利于深入研究 UKA 患者膝关节内部结构的应力分布和大小,从而优化手术设计和提高治疗效果,但其结果可能受到模型精度、边界条件设置、材料属性等多种因素的影响。因此,在进行有限元分析时,需要综合考虑,确保分析结果的准确性和可靠性。同时,有限元分析的结果也需要结合临床实际进行验证和修正,以更好地指导临床实践。

利益冲突声明

本文所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] Arokoski, J.P.A., Jurvelin, J.S., Väättäinen, U. and Helminen, H.J. (2000) Normal and Pathological Adaptations of Articular Cartilage to Joint Loading. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, **10**, 186-198. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2000.010004186.x>
- [2] Ranawat, C.S., Flynn Jr., W.F. and Deshmukh, R.G. (1994) Impact of Modern Technique on Long-Term Results of Total Condylar Knee Arthroplasty. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **309**, 131-135.
- [3] 王根, 梁杰, 魏国. 内侧间室膝骨性关节炎的手术治疗进展[J]. 沈阳医学院学报, 2018, 20(6): 545-549.
- [4] 冯健, 班吉鹤, 高均宏. 单髁置换治疗对膝关节单间室骨关节炎的临床疗效[J]. 浙江创伤外科, 2021, 26(3): 535-536.
- [5] Nwachukwu, B.U., McCormick, F.M., Schairer, W.W., Frank, R.M., Provencher, M.T. and Roche, M.W. (2014) Unicompartamental Knee Arthroplasty versus High Tibial Osteotomy: United States Practice Patterns for the Surgical Treatment of Unicompartamental Arthritis. *The Journal of Arthroplasty*, **29**, 1586-1589. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2014.04.002>
- [6] 薛华明, 马童, 文涛. 再议膝关节单髁置换术的适应证[J]. 中华医学杂志, 2024, 104(5): 319-324.
- [7] 李程, 张骏, 李强. 全膝关节置换术与单髁置换术治疗膝关节单间室骨关节炎的疗效比较[J]. 中华解剖与临床杂志, 2017, 22(2): 121-126.
- [8] 陈墨, 张贤祚, 阿巴斯·麦提阿布拉. 观察同一患者单髁与全膝关节置换治疗单间室膝骨关节炎的对比效果[J]. 骨科临床与研究杂志, 2023, 8(6): 329-335.
- [9] Knif Sund, J., Niinimäki, T., Nurmi, H., Toom, A., Keemu, H., Laaksonen, I., et al. (2021) Functional Results of Total-Knee Arthroplasty versus Medial Unicompartamental Arthroplasty: Two-Year Results of a Randomised, Assessor-Blinded Multicentre Trial. *BMJ Open*, **11**, e046731. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-046731>
- [10] Bagherifard, A., Jabalameli, M., Yahyazadeh, H., et al. (2023) Midterm Outcomes of Unicompartamental Knee Arthroplasty for the Treatment of Knee Medial Compartment Osteoarthritis: A Retrospective Study. *The Archives of Bone and Joint Surgery*, **11**, 326-329.
- [11] Crawford, D.A., Berend, K.R. and Thienpont, E. (2020) Unicompartamental Knee Arthroplasty. *Orthopedic Clinics of North America*, **51**, 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.ocl.2019.11.010>
- [12] 王兴山, 柳剑, 蒋毅. 应用 Oxford 单髁置换术治疗年轻膝内侧单间室骨关节炎患者的早期疗效[J]. 骨科临床与研究杂志, 2020, 5(1): 32-36.
- [13] Greco, N.J., Lombardi, A.V., Price, A.J., Berend, M.E. and Berend, K.R. (2018) Medial Mobile-Bearing Unicompartamental Knee Arthroplasty in Young Patients Aged Less than or Equal to 50 Years. *The Journal of Arthroplasty*, **33**, 2435-2439. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2018.03.069>

- [14] Soohoo, N.F., Sharifi, H., Kominski, G. and Lieberman, J.R. (2006) Cost-Effectiveness Analysis of Unicompartmental Knee Arthroplasty as an Alternative to Total Knee Arthroplasty for Unicompartmental Osteoarthritis. *The Journal of Bone and Joint Surgery-American*, **88**, 1975-1982. <https://doi.org/10.2106/00004623-200609000-00011>
- [15] 阎峻, 许建中. 胫骨高位截骨治疗内侧间室骨性关节炎[J]. 中原医刊, 2007, 34(10): 61-62.
- [16] 恽常军, 钱文杰, 王岩峰. 胫骨高位截骨联合关节镜手术治疗膝关节内侧骨关节炎[J]. 中华创伤骨科杂志, 2020, 22(9): 808-812.
- [17] Lobenhoffer, P. and Agneskirchner, J.D. (2014) Umstellungsosteotomie vs. unikondyläre Prothese bei Gonarthrose. *Der Orthopäde*, **43**, 923-929. <https://doi.org/10.1007/s00132-014-3011-x>
- [18] Dettoni, F., Bonasia, D.E., Castoldi, F., et al. (2010) High Tibial Osteotomy versus Unicompartmental Knee Arthroplasty for Medial Compartment Arthrosis of the Knee: A Review of the Literature. *Iowa Orthopedic Journal*, **30**, 131-140.
- [19] 卫鹏斌, 高虎方, 朱广伟, 等. 胫骨上端高位截骨术与单髁置换术治疗膝关节单侧骨性关节炎的效果比较[J]. 临床医学, 2024, 44(5): 16-19.
- [20] Stukenborg-Colsman, C., Wirth, C.J., Lazovic, D. and Wefer, A. (2001) High Tibial Osteotomy versus Unicompartmental Joint Replacement in Unicompartmental Knee Joint Osteoarthritis. *The Knee*, **8**, 187-194. [https://doi.org/10.1016/S0968-0160\(01\)00097-7](https://doi.org/10.1016/S0968-0160(01)00097-7)
- [21] Zhang, Q.D., Guo, W.S., Liu, Z.H., et al. (2009) Meta-Analysis of Unicompartmental Knee Arthroplasty versus High Tibial Osteotomy in the Treatment of Unicompartmental Knee Osteoarthritis. *Chinese Medical Journal*, **89**, 2768-2772.
- [22] Besier, T.F., Gold, G.E., Beaupré, G.S. and Delp, S.L. (2005) A Modeling Framework to Estimate Patellofemoral Joint Cartilage Stress in vivo. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **37**, 1924-1930. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000176686.18683.64>
- [23] Hernigou, P. and Deschamps, G. (2004) Posterior Slope of the Tibial Implant and the Outcome of Unicompartmental Knee Arthroplasty. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, **86**, 506-511. <https://doi.org/10.2106/00004623-200403000-00007>
- [24] Nie, Y., Yu, Q. and Shen, B. (2021) Impact of Tibial Component Coronal Alignment on Knee Joint Biomechanics Following Fixed-Bearing Unicompartmental Knee Arthroplasty: A Finite Element Analysis. *Orthopaedic Surgery*, **13**, 1423-1429. <https://doi.org/10.1111/os.12927>
- [25] Kang, K., Park, J., Koh, Y., Shin, J. and Park, K.K. (2019) Biomechanical Effects of Posterior Tibial Slope on Unicompartmental Knee Arthroplasty Using Finite Element Analysis. *Bio-Medical Materials and Engineering*, **30**, 133-144. <https://doi.org/10.3233/bme-191039>
- [26] Ma, P., Muheremu, A., Zhang, S., Zheng, Q., Wang, W. and Jiang, K. (2022) Biomechanical Effects of Fixed-Bearing Femoral Prostheses with Different Coronal Positions in Medial Unicompartmental Knee Arthroplasty. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **17**, Article No. 150. <https://doi.org/10.1186/s13018-022-03037-0>
- [27] Kang, K., Son, J., Koh, Y., Kwon, O., Kwon, S.K., Lee, Y.J., et al. (2018) Effect of Femoral Component Position on Biomechanical Outcomes of Unicompartmental Knee Arthroplasty. *The Knee*, **25**, 491-498. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2018.03.003>
- [28] Yang, Y., Guo, Y., Wang, C., Zhang, X., Zhang, K. and Ji, B. (2024) Finite Element Analysis of Sagittal Angles of Unicompartmental Knee Arthroplasty. *Clinical Biomechanics*, **114**, Article 106232. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2024.106232>
- [29] Zhang, Z., Qi, Y., Wei, B., Bao, H. and Xu, Y. (2023) Application Strategy of Finite Element Analysis in Artificial Knee Arthroplasty. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **11**, Article 1127289. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1127289>
- [30] Patil, S., Bunn, A., Bugbee, W.D., Colwell, C.W. and D'Lima, D.D. (2015) Patient-Specific Implants with Custom Cutting Blocks Better Approximate Natural Knee Kinematics than Standard TKA without Custom Cutting Blocks. *The Knee*, **22**, 624-629. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2015.08.002>
- [31] Kang, K., Son, J., Suh, D., Kwon, S.K., Kwon, O. and Koh, Y. (2018) Patient-Specific Medial Unicompartmental Knee Arthroplasty Has a Greater Protective Effect on Articular Cartilage in the Lateral Compartment. *Bone & Joint Research*, **7**, 20-27. <https://doi.org/10.1302/2046-3758.71.bjr-2017-0115.r2>
- [32] Koh, Y., Park, K., Lee, H. and Kang, K. (2019) Influence of Tibiofemoral Congruency Design on the Wear of Patient-Specific Unicompartmental Knee Arthroplasty Using Finite Element Analysis. *Bone & Joint Research*, **8**, 156-164. <https://doi.org/10.1302/2046-3758.83.bjr-2018-0193.r1>
- [33] Asada, S., Inoue, S., Tsukamoto, I., Mori, S. and Akagi, M. (2019) Obliquity of Tibial Component After Unicompartmental Knee Arthroplasty. *The Knee*, **26**, 410-415. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2018.12.013>
- [34] Crawford, D.A., Berend, K.R. and Lombardi, A.V. (2018) Management of the Failed Medial Unicompartmental Knee Arthroplasty. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, **26**, e426-e433.

- <https://doi.org/10.5435/jaaos-d-17-00107>
- [35] Chui, E.C., Lau, L.C., Kwok, C.K., Ng, J.P., Hung, Y., Yung, P.S., *et al.* (2021) Tibial Cutting Guide (Resector) Holding Pins Position and Subsequent Risks of Periprosthetic Fracture in Unicompartamental Knee Arthroplasty: A Finite Element Analysis Study. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **16**, Article No. 205.
<https://doi.org/10.1186/s13018-021-02308-6>
- [36] Hou, Z., Lyu, X. and Zhang, J. (2023) Effect of Pin Holes Location of Unicompartamental Knee Arthroplasty on Post-operative Tibial Plateau Mechanical Properties. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, **47**, 502-506.
- [37] Sasatani, K., Majima, T., Murase, K., Takeuchi, N., Matsumoto, T., Oshima, Y., *et al.* (2020) Three-Dimensional Finite Analysis of the Optimal Alignment of the Tibial Implant in Unicompartamental Knee Arthroplasty. *Journal of Nippon Medical School*, **87**, 60-65. https://doi.org/10.1272/jnms.jnms.2020_87-202
- [38] Sano, M., Oshima, Y., Murase, K., Sasatani, K. and Takai, S. (2020) Finite-Element Analysis of Stress on the Proximal Tibia after Unicompartamental Knee Arthroplasty. *Journal of Nippon Medical School*, **87**, 260-267.
https://doi.org/10.1272/jnms.jnms.2020_87-504
- [39] Zhang, G., Smith, B.P., Plate, J.F., Casanova, R., Hsu, F.-C., Li, J., *et al.* (2016) A Systematic Approach to Predicting the Risk of Unicompartamental Knee Arthroplasty Revision. *Osteoarthritis and Cartilage*, **24**, 991-999.
<https://doi.org/10.1016/j.joca.2016.01.004>
- [40] Iriberry, I. and Aragón, J.F. (2014) Alignment of the Tibial Component of the Unicompartamental Knee Arthroplasty, Assessed in the Axial View by CT Scan: Does It Influence the Outcome? *The Knee*, **21**, 1269-1274.
<https://doi.org/10.1016/j.knee.2014.06.008>