

单髁置换术固定平台假体对膝关节自发性骨坏死的生物力学研究进展

丁中奥*, 林子怡

山东大学齐鲁第二医院关节外科/运动医学科, 山东 济南

收稿日期: 2025年9月21日; 录用日期: 2025年10月14日; 发布日期: 2025年10月21日

摘 要

膝关节自发性骨坏死是一种由于局部血液供应中断导致的骨组织坏死,其晚期严重影响患者的生活质量。而针对这种疾病,单髁置换术作为一种保膝手术,已逐渐成为治疗晚期膝关节自发性骨坏死的有效手段。然而,该手术的预后受到多种因素的影响,尤其是与骨坏死的大小和骨水泥套层应力分布的变化密切相关。有限元分析作为一种工程数学方法,通过模拟材料或结构在不同条件下的力学行为,可为膝关节自发性骨坏死的研究和治疗提供了有力工具。本文旨在探讨采用有限元分析方法研究单髁置换术固定平台假体在治疗膝关节自发性骨坏死的术后并发症和临床意义,为临床实践提供理论依据。

关键词

膝关节自发性骨坏死, 单髁置换, 生物力学, 有限元分析

Advances in Biomechanical Research on Fixed-Bearing Unicompartmental Knee Arthroplasty for Spontaneous Osteonecrosis of the Knee

Zhong'ao Ding*, Ziyi Lin

Department of Orthopedic Surgery/Sports Medicine, The Second Qilu Hospital of Shandong University, Jinan Shandong

Received: September 21, 2025; accepted: October 14, 2025; published: October 21, 2025

*通讯作者。

文章引用: 丁中奥, 林子怡. 单髁置换术固定平台假体对膝关节自发性骨坏死的生物力学研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(10): 1953-1959. DOI: 10.12677/acm.2025.15102968

Abstract

Spontaneous Osteonecrosis of the Knee (SONK) is a condition characterized by necrosis of bone tissue due to interruption of local blood supply, which severely affects patients' quality of life in its advanced stages. As a knee-preserving procedure, unicompartmental knee arthroplasty (UKA) has gradually emerged as an effective treatment for advanced spontaneous osteonecrosis of the knee. However, the prognosis of this surgery is influenced by various factors, particularly the size of the osteonecrosis and changes in stress distribution within the cement mantle. Finite element analysis, as an engineering mathematical method, simulates the mechanical behavior of materials or structures under different conditions and provides a powerful tool for the study and treatment of SONK. This paper aims to investigate the postoperative complications and clinical implications of using fixed-bearing UKA in the treatment of spontaneous osteonecrosis of the knee through finite element analysis, thereby providing a theoretical basis for clinical practice.

Keywords

Spontaneous Osteonecrosis of the Knee, Unicompartmental Knee Arthroplasty, Biomechanics, Finite Element Analysis

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

膝关节自发性骨坏死(spontaneous osteonecrosis of the knee, SONK)是一种进行性骨破坏疾病, 在 1968 年由 Ahlback [1]等首次提出, 当时他注意到“一种软骨下骨射影可透过的病变”。如今, SONK 被认为是一种相对常见的疾病, 通常被描述为局灶性软骨下病变, 可能导致膝关节终末期骨性关节炎[2]。在最新的放射学出版物中, 指出 SONK 是一种已经发展为塌陷的软骨下功能不全骨折(SIF) [3]。迄今为止, 已有研究证实 SONK 与女性性别、年龄、软骨变性、低骨密度和内侧半月板后根撕裂有关[1] [4]-[7]。SONK 多见于 55 岁以上的女性, 其中女性的发病率几乎是男性的 3~5 倍[8]-[10]。其主要的临床特征是无明显诱因下突然发作的一侧膝关节内侧剧烈疼痛和肿胀, 通常在负重和夜间时疼痛加重, 休息后症状有所缓解。股骨内侧髁触诊时局灶性压痛是 SONK 患者最常见的表现[11]。患者既往无长期激素使用史、过量饮酒及血液病等明确的骨坏死诱因。

SONK 治疗方法较多, 主要包括药物治疗、关节镜下钻孔减压、软骨移植、膝关节单髁置换术(UKA)和全膝关节置换术(TKA)。由于患者诊治时该疾病多进展为晚期, 所以临床上多选择关节置换术作为其主要治疗措施。SONK 病变以单间室受累为主要特征, 多发生于股骨内侧髁负重面, 很少累及多个间室。因此, 当膝关节交叉韧带完整且外侧间室未受累的情况下, 通常将 UKA 作为 SONK 最合适的治疗方案 [12]。关于 UKA 在 SONK 中的应用已有诸多临床报道[13] [14]。

2. UKA 治疗 SONK 的研究现状

针对膝关节单髁置换术来讲, 它是非常典型的膝关节置换术, 根据垫片设计理念不同, UKA 采用活动平台(mobile bearing, MB)和固定平台(fixed bearing, FB)两种不同的假体。这种手术方式很大程度上继承

了常规膝关节所表现出的特性[15], 与全膝关节置换术进行对比, 其创伤不大、自身骨质丢失少、恢复期短、活动度恢复好[16], 是治疗单间室膝关节病变的有效方法[17]-[19]。在上世纪 90 年代初, 人工假体的设计较为简易导致很多功能无法实现, 因此手术失败率近 12.5% [20]。但伴随设计技术的成熟, UKA 的成功率也逐渐升高, 主要通过单髁置换技术对内侧间隙骨性关节炎展开治疗, 这种方法在欧美国家得到了有效推广[21][22], 相关数据显示, 只要能够对手术指征进行有效的掌握, 通过单髁置换技术对骨关节炎能够发挥十分出众的治疗效果, 而且假体生存率也更为理想[23]-[25]。

Foran 等学者[26]在进行实验分析的过程中, 对大量 SONK 病人接受 UKA 的实际疗效展开研究, 得到的数据显示, 病人接受手术之后 6 年美国特种外科医院评分(Hospital for Special Surgery, HSS)优良率大概为 98%, 只有 1 例出现翻修的情况; 除此之外, 病人接受手术之后 15 年 HSS 优良率大概为 69%, 取得的效果十分理想。结合 Koshino [27]分期法, Heyse 等学者[13]对大量影像学分期为 Koshino III~IV 的 SONK 病人展开研究, 在随访 10.9 年之后, 膝关节功能评分(Keen Society Score, KSS)从术前(85 ± 30)分不断提升至(173 ± 27)分, 10 年生存率大约为 93.1%, 病人对手术治疗的满意度大幅度提升。Bruni 等学者[14]在进行研究分析的过程中, 对大量 SONK 晚期病人接受 UKA 之后的疗效展开研究, 得到的数据表明, 在接受 UKA 之后, 病人 KSS 评分有效增加至(87.1 ± 13.8)分, 而相应的视觉模拟评分(Visual Analogue Scales, VAS 分数)也减少至(1.7 ± 2.5)分, 10 年生存率大约为 89%。Heyse 等学者[28]经过长期研究, 对 52 例目标患者随访 6~15 年, 美国膝关节协会评分从接受手术之前的(85 ± 30)分增加到(173 ± 27)分, 其假体在 10 年内的生存率大致为 93.1%。

3. FB-UKA 的临床应用现状

TKA 一直以来被公认为治疗膝 OA 的“金标准”。然而近年来, 随着 UKA 的不断优化, 其临床应用也逐渐增多, 2023 年美国关节置换登记处年度报告显示, 近 5 年 UKA 在初次膝关节置换术中的占比约为 4% [29]。大量临床研究数据显示, UKA 取得了良好的中长期随访结果, UKA 术后 7 年的假体生存率为 74.4%~80.9%, TKA 的假体生存率为 91.9%~95.7% [30]。UKA 所采用的 FB 假体是将聚乙烯垫片通过锁定机制固定到胫骨假体上, 股骨假体在垫片表面滑动, 其设计理念与 TKA 假体相似; 另一种所采用的 MB 假体的两个面能够同时与胫骨假体、股骨假体高度匹配, 在膝关节屈伸活动时 can 随股骨假体在胫骨假体上滑动及内外旋转。FB 假体不能充分分散应力, 假体锁定区负荷过重, 反复微动, 从而增加磨损; MB 假体凭借其 with 胫骨假体、股骨假体的高度适配, 能够更好地恢复膝关节的自然运动轨迹、充分分散应力, 从而减少磨损, 理论上可以提高假体生存率[31][32]。Migliorini [33]等认为 FB-UKA 与 MB-UKA 在术后膝关节功能、假体生存率、假体翻修率和翻修原因方面的差异均无统计学意义。Burger 等[34]的系统综述纳入 28 项研究共 2265 例 UKA 患者, 与 FB 假体相比, MB 假体的翻修率更高, 但临床效果差异无统计学意义。笔者一项关于 UKA 的回顾性分析显示, MB-UKA 患者可获得较高的关节遗忘评分(forgotten joint score, FJS), 而垫片脱位率和翻修率均较 FB-UKA 患者高, 但术后两组间膝关节活动度、疼痛视觉模拟评分、美国特种外科医院膝关节评分等差异均无统计学意义[35]。研究认为, FB-UKA 的术后功能满意、并发症发生率低、手术翻修率低, 是治疗终末期膝内侧间室 OA 的良好选择。

4. FB-UKA 在 SONK 中常见的术后并发症

当 SONK 发展至软骨下骨塌陷阶段时则需要进行 UKA。与 TKA 相比, UKA 通过保留前后交叉韧带和以及更多的骨量, 使其保留更多的原生关节运动学和本体感觉。尽管有研究表明 UKA 是治疗 SONK 的可靠方法, 然而 UKA 治疗 SONK 与 MOA 的疗效是否有差异还存在争议。有研究发现行 UKA 治疗的部分患者术后出现了假体的松动和脱位等, 少数患者行 TKA 翻修治疗。CHALMERS 等[35]对 45 例(46 膝)单髁

置换治疗的 SONK 患者进行平均 5 年(2~12 年)的随访, 研究发现单髁置换假体 10 年和 15 年翻修率均为 7%, 其中 2 例由于外侧间室病变加剧而翻修, 1 例因为股骨外侧坏死病变进展而翻修。Bruni 等[14]对 84 例 SONK 患者进行了平均 98 个月的随访, 共进行了 10 例翻修手术: 4 例因胫骨假体下沉, 3 例因胫骨假体无菌性松动, 1 例因股骨假体无菌性松动, 1 例因胫骨内侧骨折, 1 例因假体感染, 没有患者因膝关节外侧间室和髌股间室的进展而行翻修。此外, 有研究发现 SONK 导致的坏死区域较大时进行 UKA 时需慎重。Choy 等[30]报道了 1 例发生股骨假体松动, 该病例术前坏死区域占比 49.3%, 且体积较大(22.8 cm³)。

FB-UKA 在 sonk 术后常见的并发症之一为股骨关节假体无菌性松动或脱位, 其发生机制主要包括: (1) 生物性因素: 磨损颗粒、趋化因子、Toll 样受体、自噬、细菌病原体相关分子模式和细菌副产物; (2) 机械性因素: 骨水泥和种植体设计、下肢力线、应力遮挡效应。结合临床实践发现, 其中机械性因素中的骨水泥为其主要因素[36]。

因此, 当骨坏死体积多大时, 选择行 UKA 治疗时, 其超过骨水泥套层所能承受的最大应力, 则行 UKA 治疗术后并发症发生率高, 进而选择 TKA 进行治疗, 缺乏此类相关研究的理论依据。

5. 有限元仿真在生物力学研究中的应用进展

在上个世纪七十年代之后, 该方法逐步在骨科生物力学方面进行应用[37][38], 最开始主要应用于脊柱, 而在上个世纪八十年代之后, 其应用区间得到进一步拓宽。在 1972 年, Brekelmans 等学者[39]经过大量研究, 对股骨内部应力分布的整体状况进行分析, 其得到的结果为骨科生物力学的相关研究提供了重要的依据。与西方国家进行对比, 我国在该领域的研究具有一定滞后性。在 2005 年, 赵峰等学者[40]经过大量的研究分析, 将 Mimics 与 Ansys 进行有效衔接, 进而构建了标准化的三维有限元模型。除此之外, 姜海波等学者[41]经过长期研究, 以 CT 扫描为基础, 提出在进行运算的过程中可以将股骨视为分布较为理想的材料, 进而对其展开更深入的分析。因为骨骼是通过若干材料构建的复合体, 并且此类材料很大程度上表现出非均匀性的特点, 因此, 有一部分学者将股骨材料属性划分为多种类型, 进而对其展开有限元分析[42]。当前来讲, 该方法在我国实现了有效推广, 并获得了丰富的学术与实践成果。相关学者以不同的临床角度作为切入点, 对各类问题构建了规范化的力学模型, 进而仿真分析多样性的临床问题, 得到的学术成果对临床治疗工作提供了诸多帮助, 表现出不可忽视的指导意义。

有限元分析通过建立人体有限元模型, 赋予模型材料力学性质, 同时模拟人体力学条件, 进行人体结构的应力、应变及模态分析, 是仿真人体结构力学功能的有效实验方法之一。近年来多项研究采用有限元分析方法建立单髁置换条件下膝关节三维(3D)有限元模型, 模拟不同干预措施下膝关节的生物力学特性, 对于膝关节生物力学研究起到了推动作用。

6. 单髁置换术治疗膝关节自发性骨坏死的生物力学研究进展

国内对 SNOK 治疗的研究起步相对较晚, 目前有关 UKA 治疗 SONK 的生物力学研究较少, 在 2021 年屠星磊等学者[43]考虑 UKA 术中一般使用骨水泥填充股骨内侧髁骨缺损, 但是既往研究认为骨水泥可用于小范围的包容性骨缺损的重建, 大范围缺损使用骨水泥填充则会造成远期的假体松动失败, 原因包括: 骨水泥与假体及骨床界面应力分布不均、骨水泥疲劳断裂等。多数文献建议使用金属增强块填补缺损, 可以平衡应力分布, 降低填充物载荷, 减少假体松动可能。针对其中的骨水泥和金属填充物进行相关的生物力学研究, 最终研究显示金属材料填充骨缺损可以增加 UKA 股骨假体的稳定性。

7. 总结与展望

关节置换术是膝关节自发性坏死较为重要的治疗方案, 其中单髁置换术因其良好的临床疗效, 更亦

得到临床医生的青睐。UKA 凭借其突出的优势在临床应用中迅速增加; 同时 UKA 的手术适应证有所扩展, 年龄过大/过小、肥胖、髌股关节退行性变、前交叉韧带功能不全等不再是手术禁忌证。FB 假体稳定性好、无垫片脱位风险, 尽管术后仍存在垫片磨损、感染、假体松动、疼痛等并发症, 但凭借其锁定垫片的特点在膝外侧间室 UKA 及 MB-UKA 失败后翻修术中的表现优异。

在所构建的膝关节有限元模型中, 还需着重考虑的是材料属性、线性及非线性和各接触对之间的连接的问题。材料属性可根据既往文献整理, 对于线性及非线性问题, 根据既往文献, 多将韧带定义为超弹性各向同性橡胶材料并使用 Hookean 模型表示。半月板定义为横向各向同性材料, 其余的组织结构定义为线弹性各向同性材料。膝关节各接触对之间, 多建立股骨软骨与胫骨软骨、胫骨软骨与半月板、股骨软骨与半月板 6 种接触对。其中, 骨与韧带之间、骨与软骨之间、胫骨软骨与半月板之间定义为绑定连接, 股骨软骨与半月板之间、股骨软骨与胫骨软骨之间定义为无摩擦有限滑动的表面接触, 这种接触方式可以保证膝关节的稳定性是由各结构间的平衡状态而非摩擦力提供。

对于采用 FEA 方法构建的正常膝关节有限元模型, 需对模型有效性进行验证, 验证成功后即可在此正常膝关节模型的基础上进行下一步处理, 目前多采用以下两种方式进行有效性验证: 验证方法一: 沿股骨机械轴方向向下施加 1000 N 载荷, 观察膝关节内外侧间室中关节软骨和半月板的等效应力的分布、峰值以及两间室载荷比例。验证方法二: 模拟前后抽屉实验, 将正常膝关节有限元模型的边界条件改为胫腓骨只约束屈曲活动, 股骨活动完全约束, 过胫骨平台内外侧缘连线的中点施加垂直于冠状面的 134 N 前向载荷, 观察载荷方向在胫骨前缘交点的位移距离。

然而关于在 SONK 中骨坏死大小对两种关节置换术式的选择没有明确的治疗原则和理论依据。采用有限元分析方法研究单髁置换术固定平台假体对膝关节自发性骨坏死的生物力学, 如何将 FEA 结果转化为临床可用的决策工具? 有限元分析可以通过模拟术后膝关节区域及假体的力学分布, SONK 患者行单髁置换术治疗时需去除坏死的骨质后用骨水泥填充其中, 然后鉴于术后所见, 其股骨侧假体的松动和脱位多因骨水泥套层的疲劳断裂, 因此, 可通过比较所测得的术后骨水泥套层的最大应力与骨水泥最大承受应力进行比较, 进而有望通过生物力学分析对膝关节自发性骨坏死的临床治疗方案的选择提供理论依据, 提高手术疗效, 改善患者术后效果。

未来研究方向应着重于 SONK 相关的生物力学研究结合此类疾病的临床长期随访数据, 将有助于更全面地帮助临床医生选择合适的术式, 并为其优化提供科学依据。

参考文献

- [1] Ahlbäck, S., Bauer, G.C.H. and Böhne, W.H. (1968) Spontaneous Osteonecrosis of the Knee. *Arthritis & Rheumatism*, **11**, 705-733. <https://doi.org/10.1002/art.1780110602>
- [2] Debi, R., Mor, A., Elbaz, A., Segal, G., Lubovsky, O., Kahn, G., et al. (2017) Correlation between Gait Analysis and Clinical Questionnaires in Patients with Spontaneous Osteonecrosis of the Knee. *Clinical Biomechanics*, **44**, 90-93. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2017.03.008>
- [3] Gorbachova, T., Melenevsky, Y., Cohen, M. and Cerniglia, B.W. (2018) Osteochondral Lesions of the Knee: Differentiating the Most Common Entities at MRI. *Radio Graphics*, **38**, 1478-1495. <https://doi.org/10.1148/rg.2018180044>
- [4] Akamatsu, Y., Kobayashi, H., Kusayama, Y., Aratake, M., Kumagai, K. and Saito, T. (2017) Predictive Factors for the Progression of Spontaneous Osteonecrosis of the Knee. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **25**, 477-484. <https://doi.org/10.1007/s00167-015-3839-6>
- [5] Aglietti, P., Insall, J., Buzzzi, R. and Deschamps, G. (1983) Idiopathic Osteonecrosis of the Knee. Aetiology, Prognosis and Treatment. *The Journal of Bone and Joint Surgery, British Volume*, **65**, 588-597. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.65b5.6643563>
- [6] Lotke, P.A. and Ecker, M.L. (1988) Osteonecrosis of the Knee. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, **70**, 470-473. <https://doi.org/10.2106/00004623-198870030-00027>
- [7] Jureus, J., Lindstrand, A., Geijer, M., Roberts, D. and Tägil, M. (2012) Treatment of Spontaneous Osteonecrosis of the

- Knee (SPONK) by a Bisphosphonate. *Acta Orthopaedica*, **83**, 511-514. <https://doi.org/10.3109/17453674.2012.729184>
- [8] Akamatsu, Y., Mitsugi, N., Hayashi, T., Kobayashi, H. and Saito, T. (2012) Low Bone Mineral Density Is Associated with the Onset of Spontaneous Osteonecrosis of the Knee. *Acta Orthopaedica*, **83**, 249-255. <https://doi.org/10.3109/17453674.2012.684139>
 - [9] Zaremski, J.L. and Vincent, K.R. (2016) Spontaneous Osteonecrosis of the Knee. *Current Sports Medicine Reports*, **15**, 228-229. <https://doi.org/10.1249/jsr.0000000000000271>
 - [10] Karim, A.R., Cherian, J.J., Jauregui, J.J., et al. (2015) Osteonecrosis of the Knee: Review. *Annals of Translational Medicine*, **3**, Article 6.
 - [11] LaPrade, R.F. and Noffsinger, M.A. (1990) Idiopathic Osteonecrosis of the Patella: An Unusual Cause of Pain in the Knee. A Case Report. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, **72**, 1414-1418. <https://doi.org/10.2106/00004623-199072090-00025>
 - [12] Xue, H., Tu, Y., Ma, T., Wen, T., Yang, T. and Cai, M. (2017) Up to Twelve Year Follow-Up of the Oxford Phase Three Unicompartamental Knee Replacement in China: Seven Hundred and Eight Knees from an Independent Centre. *International Orthopaedics*, **41**, 1571-1577. <https://doi.org/10.1007/s00264-017-3492-4>
 - [13] Heyse, T.J., Khefacha, A., Fuchs-Winkelmann, S. and Cartier, P. (2011) UKA after Spontaneous Osteonecrosis of the Knee: A Retrospective Analysis. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, **131**, 613-617. <https://doi.org/10.1007/s00402-010-1177-1>
 - [14] Bruni, D., Iacono, F., Raspugli, G., Zaffagnini, S. and Marcacci, M. (2012) Is Unicompartamental Arthroplasty an Acceptable Option for Spontaneous Osteonecrosis of the Knee? *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **470**, 1442-1451. <https://doi.org/10.1007/s11999-012-2246-2>
 - [15] 马路遥, 郭万首, 程立明. 单髁关节置换术后膝关节运动学研究现状[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2015, 8(1): 97-100.
 - [16] 张启栋, 郭万首, 刘朝晖, 等. 单髁与全膝关节置换术治疗高龄患者的配对病例对照研究[J]. 中华关节外科杂志(电子版), 2017, 11(1): 4-8.
 - [17] Lunebourg, A., Parratte, S., Galland, A., Lecuire, F., Ollivier, M. and Argenson, J. (2016) Is Isolated Insert Exchange a Valuable Choice for Polyethylene Wear in Metal-Backed Unicompartamental Knee Arthroplasty? *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **24**, 3280-3286. <https://doi.org/10.1007/s00167-014-3392-8>
 - [18] Fabre-Aubrespy, M., Ollivier, M., Pesenti, S., Parratte, S. and Argenson, J. (2016) Unicompartamental Knee Arthroplasty in Patients Older than 75 Results in Better Clinical Outcomes and Similar Survivorship Compared to Total Knee Arthroplasty. A Matched Controlled Study. *The Journal of Arthroplasty*, **31**, 2668-2671. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2016.06.034>
 - [19] 朱广铎. 单髁膝关节置换有限元分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京协和医学院, 2016.
 - [20] 卢明峰, 杨伟铭, 朱东平, 曹学伟. 微创单髁置换术治疗膝关节自发性骨坏死的中短期疗效分析[J]. 中国中医骨伤科杂志, 2017, 25(10): 32-37.
 - [21] van der List, J.P., Chawla, H., Villa, J.C., Zuiderbaan, H.A. and Pearle, A.D. (2017) Early Functional Outcome after Lateral UKA Is Sensitive to Postoperative Lower Limb Alignment. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **25**, 687-693. <https://doi.org/10.1007/s00167-015-3877-0>
 - [22] Staats, K., Merle, C., Schmidt-Braekling, T., Boettner, F., Windhager, R. and Waldstein, W. (2016) Is the Revision of a Primary TKA Really as Easy and Safe as the Revision of a Primary UKA? *Annals of Translational Medicine*, **4**, 532-532. <https://doi.org/10.21037/atm.2016.11.01>
 - [23] Ko, Y.B., Gujarathi, M.R. and Oh, K.J. (2015) Outcome of Unicompartamental Knee Arthroplasty: A Systematic Review of Comparative Studies between Fixed and Mobile Bearings Focusing on Complications. *Knee Surgery & Related Research*, **27**, 141-148. <https://doi.org/10.5792/ksrr.2015.27.3.141>
 - [24] Ollivier, M., Parratte, S. and Argenson, J. (2013) Results and Outcomes of Unicompartamental Knee Arthroplasty. *Orthopedic Clinics of North America*, **44**, 287-300. <https://doi.org/10.1016/j.ocl.2013.03.004>
 - [25] Ollivier, M., Parratte, S., Lunebourg, A., Viehweger, E. and Argenson, J. (2016) The John Insall Award: No Functional Benefit after Unicompartamental Knee Arthroplasty Performed with Patient-Specific Instrumentation: A Randomized Trial. *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **474**, 60-68. <https://doi.org/10.1007/s11999-015-4259-0>
 - [26] Foran, J.R.H., Brown, N.M., Della Valle, C.J., Berger, R.A. and Galante, J.O. (2013) Long-Term Survivorship and Failure Modes of Unicompartamental Knee Arthroplasty. *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **471**, 102-108. <https://doi.org/10.1007/s11999-012-2517-y>
 - [27] Koshino, T. (1982) The Treatment of Spontaneous Osteonecrosis of the Knee by High Tibial Osteotomy with and without Bone-Grafting or Drilling of the Lesion. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, **64**, 47-58. <https://doi.org/10.2106/00004623-198264010-00008>

- [28] Pape, D., Seil, R., Fritsch, E., Rupp, S. and Kohn, D. (2002) Prevalence of Spontaneous Osteonecrosis of the Medial Femoral Condyle in Elderly Patients. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **10**, 233-240. <https://doi.org/10.1007/s00167-002-0285-z>
- [29] Ryan, S.P., Stambough, J.B., Huddleston, J.I. and Levine, B.R. (2024) Highlights of the 2023 American Joint Replacement Registry Annual Report. *Arthroplasty Today*, **26**, Article 101325. <https://doi.org/10.1016/j.artd.2024.101325>
- [30] Hansen, E.N., Ong, K.L., Lau, E., Kurtz, S.M. and Lonner, J.H. (2019) Unicondylar Knee Arthroplasty Has Fewer Complications but Higher Revision Rates than Total Knee Arthroplasty in a Study of Large United States Databases. *The Journal of Arthroplasty*, **34**, 1617-1625. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2019.04.004>
- [31] Fricka, K.B., Wilson, E.J., Strait, A.V., Ho, H., Hopper, Jr, R.H., Hamilton, W.G., et al. (2024) Outcomes of Fixed versus Mobile-Bearing Medial Unicompartmental Knee Arthroplasty. *The Bone & Joint Journal*, **106**, 916-923. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.106b9.bjj-2024-0075.r1>
- [32] Zhang, W., Wang, J., Li, H., Wang, W., George, D.M. and Huang, T. (2020) Fixed Versus Mobile-Bearing Unicompartmental Knee Arthroplasty: A Meta-Analysis. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 19075. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76124-z>
- [33] Migliorini, F., Maffulli, N., Cuozzo, F., Elsner, K., Hildebrand, F., Eschweiler, J., et al. (2022) Mobile Bearing versus Fixed Bearing for Unicompartmental Arthroplasty in Monocompartmental Osteoarthritis of the Knee: A Meta-Analysis. *Journal of Clinical Medicine*, **11**, Article 2837. <https://doi.org/10.3390/jcm11102837>
- [34] Burger, J.A., Kleeblad, L.J., Siersevelt, I.N., Horstmann, W.G. and Nolte, P.A. (2019) Bearing Design Influences Short-to Mid-Term Survivorship, but Not Functional Outcomes Following Lateral Unicompartmental Knee Arthroplasty: A Systematic Review. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **27**, 2276-2288. <https://doi.org/10.1007/s00167-019-05357-x>
- [35] 孙孟帅, 鞠昌军, 赵锦伟, 等. 活动平台与固定平台假体膝单髁置换术早期临床疗效比较[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2024, 17(11): 1029-1036.
- [36] Chalmers, B.P., Mehrotra, K.G., Sierra, R.J., Pagnano, M.W., Taunton, M.J. and Abdel, M.P. (2018) Reliable Outcomes and Survivorship of Unicompartmental Knee Arthroplasty for Isolated Compartment Osteonecrosis. *The Bone & Joint Journal*, **100**, 450-454. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.100b4.bjj-2017-1041.r2>
- [37] Choy, W.S., Kim, K.J., Lee, S.K., et al. (2011) Medial Unicompartmental Knee Arthroplasty in Patients with Spontaneous Osteonecrosis of the Knee. *Clinics in Orthopedic Surgery*, **3**, 279-284. <https://doi.org/10.4055/cios.2011.3.4.279>
- [38] Liu, Y.K., Ray, G. and Hirsch, C. (1975) The Resistance of the Lumbar Spine to Direct Shear. *Orthopedic Clinics of North America*, **6**, 33-49. [https://doi.org/10.1016/s0030-5898\(20\)31198-6](https://doi.org/10.1016/s0030-5898(20)31198-6)
- [39] Valliappan, S., Svensson, N.L. and Wood, R.D. (1977) Three Dimensional Stress Analysis of the Human Femur. *Computers in Biology and Medicine*, **7**, 253-264. [https://doi.org/10.1016/0010-4825\(77\)90031-2](https://doi.org/10.1016/0010-4825(77)90031-2)
- [40] 赵峰高, 刘震侠, 胡江峰. Dicom 标准和 Mimics 软件辅助建立下颌骨三维有限元模型[J]. 西南国防医药, 2005, 15(5): 479-481.
- [41] 姜海波, 葛世荣. 基于 CT 扫描人体股骨的有限元分析[J]. 工程力学, 2007, 24(10): 156-159.
- [42] 马剑雄, 马信龙, 张清功, 等. 三维有限元模型评价股骨正常站立位的生物力学特性[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2008, 12(35): 6823-6826.
- [43] 屠星磊. 单髁膝关节假体的生物力学有限元分析和优化[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2021.