

· 综述 ·

膝活动平台内侧单髁置换术后生物力学的研究进展[△]

任鹏鹏¹, 张启栋^{2*}

(1. 苏州市中西医结合医院骨伤一科, 江苏苏州 215000; 2. 中日友好医院骨科, 北京 100029)

摘要: 膝关节单髁置换术是治疗膝关节内侧单间室病变的一种有效方法, 临床随访结果显示其可以缓解关节疼痛、纠正关节畸形、恢复关节功能。膝关节单髁置换术后临床效果满意, 但其一定程度上改变了膝关节生物力学。本文就膝关节牛津活动平台内侧单髁置换术后生物力学的研究现状进行综述, 包括尸体研究、有限元分析、步态分析及其他研究方法等。

关键词: 单髁置换术, 生物力学, 尸体研究, 有限元分析, 步态分析

中图分类号: R687.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2022) 04-0329-04

Research progress on biomechanics secondary to Oxford mobile-bearing medial unicompartmental knee arthroplasty // REN Peng-peng¹, ZHANG Qi-dong². 1. The First Department of Orthopaedics, Suzhou Hospital of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, Suzhou 215000, China; 2. Department of Orthopaedics, China-Japan Friendship Hospital, Beijing 100029, China.

Abstract: Unicompartmental knee arthroplasty (UKA) is an effective treatment for medial unicompartmental knee osteoarthritis. Large number of literatures have proved that the UKA does relieve joint pain, correct joint deformity and restore joint function, However, UKA leads to biomechanical changes of the knee in some extent despite of its satisfactory clinical outcomes. This paper will systematically review postoperatively biomechanical variations of Oxford mobile-bearing medial UKA, involving cadaveric study, finite element analysis, gait analysis and others.

Key words: unicompartmental knee arthroplasty, biomechanics, cadaveric study, finite element analysis, gait analysis

膝关节单髁置换术 (unicompartmental knee arthroplasty, UKA) 是治疗晚期单间室膝骨关节炎 (knee osteoarthritis, KOA) 的有效手段, 通过对病变间室进行表面置换, 可以有效缓解疼痛、改善功能, 具有创伤小、康复快等优点, 大量的中长期随访结果显示疗效满意^[1-4]。随着假体设计的改进、微创手术器械的开发、手术技术的提高及患者选择更加合理, 临床效果更好, 在国内外得到迅速发展^[5]。正常膝关节解剖学属于多半径关节, UKA 假体设计为单半径假体, 在一定程度上改变了膝关节的生物力学^[6]。本文将从尸体研究、有限元分析、步态分析及其他研究方法等方面综述膝关节牛津活动平台内侧单髁置换术后生物力学的研究现状。

1 尸体研究

尸体研究是一种应用广泛的体外研究方法, 可有效模拟活体膝关节运动, 也可进行人体体内研究所禁

止的有创操作。在尸体研究中, 可以进行膝关节浅层内侧副韧带张力、股四头肌张力及外侧间室接触应力的测量, 这是人体体内研究时所禁止的有创操作^[7, 8]。尸体研究一般应用新鲜冷冻膝关节标本, 去除膝关节皮肤及皮下组织, 保留膝关节周围肌肉群、膝关节囊及关节囊内组织等。尸体研究的实验装置主要有三部分组成: (1) 运动模拟系统主要通过控制运动模拟试验机驱动膝关节标本模拟活体膝关节运动; (2) 载荷系统主要模拟膝关节负荷; (3) 接触测量系统主要采集并传输膝关节运动轨迹及膝关节间室接触应力等数据^[9]。离体膝关节标本组织的性质与活体非常相似, 包括固有的解剖变异和局部的机械变异, 在一段合理的测试时间内, 关节软骨、韧带和半月板在离体膝关节标本上的表现都与活体相似。Peersman等^[7]研究离体膝关节标本 UKA 术后在运动模拟试验机上进行被动活动、开放铰链活动及深蹲活动的生物力学变化, 分别收集并分析三种活动状态下膝关节内

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2022.04.09

[△]基金项目: 首都卫生发展科研专项项目 (编号: 2020-2-4067); 国家自然科学基金项目 (编号: 82072494、81972107、81902203、81972130); 北京市科技计划 (首特) 课题项目 (编号: Z171100001017209)

作者简介: 任鹏鹏, 住院医师, 医学硕士, 研究方向: 关节外科, (电话) 18801238830, (电子信箱) 1748310421@qq.com

* 通信作者: 张启栋, (电话) 010-84206074, (电子信箱) tjzhd@163.com

外翻, 胫骨内外旋、股骨位移及深蹲活动时外侧间室接触应力等数据。该研究表明 UKA 术后大多数膝关节运动学与正常接近, 特别是在被动活动时; 但是在开放铰链活动时, UKA 术后内侧间室股骨上下位移、外侧间室股骨前后位移及胫骨内外翻差异有统计学意义; 在深蹲活动时, UKA 术后外侧间室接触应力比正常较高, 但是无论膝关节屈曲角度如何, 差异均无统计学意义。与 Peersman 等^[7]研究相似, Heyse 等^[10]也发现在被动活动、开放铰链活动时, UKA 术后的股骨“回滚”模式与正常膝关节非常接近; 深蹲活动时, UKA 术后胫骨内旋轻度减小。这些研究结果说明膝关节 UKA 术后生物力学与正常高度相似, 是 UKA 术后临床功能评分高、临床效果满意度高的佐证。与上述传统尸体研究相比, 导航系统的应用使尸体研究更容易、更便捷^[11]。尸体研究有很多优点, 在生物力学研究中被广泛应用, 但是也有缺点^[7, 8, 10-12]: (1) 尸体标本量少、花费高、获取困难, 能应用于尸体研究的更少, 一个尸体标本被多次使用; 而且尸体标本质量受年龄、健康状态、存储时间、标本准备方法的影响, 质量参差不齐, 不同研究结果之间可比性较差; (2) 运动模拟试验机模拟少数简单运动, 但是不能模拟日常生活中复杂运动, 比如跳跃、上楼梯、步态等, 复杂运动结果可能与简单运动结果不同; (3) 经过处理的离体膝关节标本部分组织是缺损的, 离体膝关节标本的内侧副韧带不能发挥作为感受器的作用, 离体膝关节标本无内侧单间室病变, 这与活体是不同的; (4) UKA 术后只能测量外侧间室的接触应力, 不能了解内外侧间室接触应力分布的变化。

2 有限元分析

有限元分析 (finite element analysis, FEA) 常被用来解决骨科研究中许多复杂问题, 主要包括影像数据获取、有限元模型建立及网络划分、材料属性赋值、边界条件设置、模拟膝关节负荷、生物力学变化分析及有限元模型验证等过程^[13]。传统研究方法是通过使用复合人工骨材料或尸体标本进行生物力学实验, 这需要特殊的复杂实验装置, 实验条件比较苛刻, 费用较高且较为耗时, 难以对不同患者及各种复杂情况下手术效果进行评估^[14]。与传统的体外或体内研究相比, FEA 不需要昂贵的复杂实验装置, 可自主设置各种复杂的边界条件, 模拟膝关节负荷并进行生物力学分析, 对膝关节内部各种结构的应力、应

变进行准确计算, 操作性及可重复性强^[15]。Innocenti 等^[16]对同一个离体膝关节标本进行尸体研究和 FEA, 尸体研究发现给予离体膝关节标本 2 000 N 负荷后, 测量内外侧间室载荷, 外侧间室载荷占总负荷 39.5%, 与既往尸体研究文献结果相似; 同时, FEA 测量内外侧间室载荷分布, 发现外侧间室载荷占总负荷 40%, 与该实验尸体研究结果相似, 证明了 FEA 的可信性。Kang 等^[17]应用 FEA 探讨 UKA 术后不同关节线位置 ($\pm 6, \pm 4, \pm 2, 0$ mm) 对膝关节生物力学的影响, 与 0 mm 关节线位置比较, 关节线位置增高时活动垫片上、下接触面的最大接触应力均增加; 相反, 关节线位置减低时活动垫片上、下接触面的最大接触应力均较少。该研究说明关节线位置的恢复是提高假体生存率、获得满意临床效果的关键因素, 因此建议 UKA 时要保持良好的关节线位置。朱广铎等^[18]对正常膝关节及中立位 UKA 行 FEA, 对正常膝关节模型及 UKA 模型统一边界条件后施加相同载荷, 结果显示 UKA 模型外侧间室股骨软骨、外侧半月板及胫骨软骨最大接触应力分别为 2.71、2.93、2.84 MPa, 而正常膝关节模型外侧间室股骨软骨、外侧半月板及胫骨软骨最大接触应力分别为 2.60、2.68、2.63 MPa。该实验说明 UKA 术后中立位外侧间室接触应力较正常膝关节轻度增加。但是, UKA 在轻度内翻位时, 膝关节外侧间室接触应力较正常膝关节无明显变化, 说明 UKA 术后轻度内翻位是被推荐的。FEA 可以评估不同因素对 UKA 术后生物力学的影响, 以优化假体设计、预防并发症、提高假体生存率及手术效果满意度等, 但尚存在局限性^[13, 14, 17-19]: (1) FEA 以一名志愿者影像数据为基础, 所构建有限元模型只反映个人膝关节特性, 个体体型、体重、身高、年龄、性别、种族等因素会影响研究结果; (2) 若需要增加有限元模型, 大量影像数据的获取是困难的, 这需要花费大量的时间、金钱, 而且对大量志愿者进行 CT 检查是违背伦理的; (3) FEA 只进行单一负荷下的静力学分析, 缺乏复杂负荷条件下的动力学分析, 需要进一步完善 UKA 有限元模型在各种屈曲角度、内外翻及内外旋情况下的生物力学分析; (4) FEA 过程中需要计算大量的数据, 会出现计算困难、图像失真、运算时间长、大量伪影和误差等情况。

3 步态分析

步态分析是一个体内研究, 目前应用最广泛的方

法是基于红外追踪技术的三维步态分析系统,通常由追踪反光标记三维运动轨迹的动作捕捉系统、采集地面反作用力的测力台和皮肤表面肌电图采集装置等三大部分组成^[20]。三维步态分析系统采集的数据主要包括身体各个部分的相对位置与方向、足与地面的作用力、时间-空间关系和下肢肌肉的阶段性活动,这些数据由计算机软件整合分析。步态分析不仅能获取患肢膝关节的生物力学参数,还能同时获取健肢膝关节生物力学参数,能对患肢术前、术后不同随访时间及健肢膝关节生物力学参数进行对比分析。与体外研究相比,步态分析能真实反映生理状态,进行多种运动的动力学分析,比如平地行走、上坡、下坡等^[21]。步态分析作为一种客观性、量化性的评估方法,可以作为临床功能评分评估的补充,为临床决策提供更多信息。Catani等^[20]及Wiik等^[22]通过步态分析结合临床功能评分发现活动平台UKA术后膝关节与正常膝关节高度相似,较固定平台UKA及全膝关节置换术后膝关节功能恢复更好,效果满意度更高。Seeger等^[23]将步态分析与临床功能评分结合对UKA术前及术后进行评估,膝关节活动度由术前的117.3°提高到123.0°($P=0.0483$),步长由术前76.5 cm增加到81.9 cm($P=0.028$);而且所有临床功能评分,美国膝关节学会评分(American Knee Society Score, AKSS)、牛津12项评分(Oxford-12 Score)、Devane评分(Devane Score)和汉诺威骨关节炎功能能力问卷[Hannover functional ability questionnaire for osteoarthritis (FFbH-OA) score, FFBH-OA]均有显著变化($P<0.01$)。该研究说明UKA术后患肢功能明显改善,更接近正常膝关节。步态分析可以对UKA患者下肢运动功能进行动态量化评估,能够更加精准地获知患者术后的康复情况,进而达到指导手术与探索康复新方法的目的,但是亦具有自身的局限性^[23-26]:(1)步态分析最大的缺点是反光标记粘贴于皮肤表面,在运动过程中软组织的滑动会对后续数据分析带来较大误差,无法实现精细测量,只能获取近似的运动学数据;(2)步态分析的结果与硬件设备、软件分析流程和测试者本身之间有一定关联,还受到步行速度、年龄、性别、身高、种族等混杂因素的影响,很难形成统一标准并进行比较;(3)由于安全原因,UKA术后患者在进行步态分析过程中需要扶持栏杆或扶手,避免跌倒摔伤,这与正常无扶持运动测试者的结果无法进行比较分析;(4)不可控因素影响较大,测试者本身在检测过程中主观意识对研究结果也有一定影响。

4 其他研究方法

除了尸体研究、有限元分析、步态分析等常用研究方法外,还有一些研究的应用越来越广泛。Kono等^[27]采用双荧光成像系统研究活体活动平台UKA术后膝关节的深蹲运动,可对膝关节运动学及运动模式进行精确分析。与传统X射线立体成像分析相比,双荧光成像系统不需预先置入不透射线的体内标记便可获取高度精确的人体运动学轨迹,但是该研究需要承受的辐射暴露量较大。除了X线进行膝关节体内研究外,部分研究者应用磁共振成像技术研究膝关节生物力学,但是目前缺乏对UKA术后生物力学的研究^[28, 29]。与X线相比,磁共振成像具有无辐射的特点,在未来UKA生物力学研究中会越来越受青睐。Bucek等^[30]应用术中导航系统研究患者UKA术前及术后的运动学变化,同时应用膝关节镜研究志愿者正常膝关节的运动学变化。术中导航系统及膝关节镜都可以动态研究膝关节的运动学变化,但是膝关节镜检查可能会影响膝关节功能。

综上所述,在UKA术后生物力学研究中,上述研究结果说明牛津活动平台内侧UKA术后膝关节与正常膝关节高度相似。在生物力学研究中,尸体研究、有限元分析、步态分析、X射线立体成像、双荧光成像系统、磁共振成像技术、术中导航系统、膝关节镜等方法各具优缺点,但是整体上可信度高。因此,需要改进现有研究方法,探索新的可信度更高的方法来研究牛津活动平台内侧UKA术后生物力学变化,获得更真实的结果,进而达到指导手术与探索康复新方法的目的,提高假体生存率、临床效果满意度。

参考文献

- [1] Witjes S, Gouttebauge V, Kuijer PP et al. Return to sports and physical activity after total and unicompartmental knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis [J]. Sports Med, 2016, 46 (2): 269-292.
- [2] Walker T, Hetto P, Bruckner T, et al. Minimally invasive Oxford unicompartmental knee arthroplasty ensures excellent functional outcome and high survivorship in the long term [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2019, 27: 1658-1664.
- [3] 谢国庆,任忠明,金文孝,等.单髁置换术治疗膝内侧间室骨关节炎近中期疗效[J].中国矫形外科杂志,2019,27(21):1998-2000.
- [4] Johal S, Nakano N, Baxter M, et al. Unicompartmental knee arthroplasty: the past, current controversies, and future perspectives [J]. J Knee Surg, 2018, 31 (10): 992-998.

- [5] Campi S, Tibrewal S, Cuthbert R, et al. Unicompartmental knee replacement –current perspectives [J]. *J Clin Orthop Trauma*, 2018, 9 (1): 17–23.
- [6] Jaeger S, Helling A, Bitsch RG, et al. The influence of the femoral force application point on tibial cementing pressure in cemented uka: an experimental study [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2012, 132 (11): 1589–1594.
- [7] Peersman G, Slane J, Vuylsteke P, et al. Kinematics of mobile–bearing unicompartmental knee arthroplasty compared to native: results from an in vitro study [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2017, 137 (11): 1557–1563.
- [8] Heyse TJ, Slane J, Peersman G, et al. Balancing mobile–bearing unicompartmental knee arthroplasty in vitro [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthroscopy*, 2017, 25 (12): 3733–3740.
- [9] Victor J, Glabbeek FV, Vander SJ, et al. An experimental model for kinematic analysis of the knee [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2009, 91 (suppl 6): 150–163.
- [10] Heyse TJ, El–Zayat BF, De Corte R, et al. UKA closely preserves natural knee kinematics in vitro [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthroscopy*, 2014, 22 (8): 1902–1910.
- [11] Tapasvi S, Shekhar A, Patil S, et al. Limb position influences component orientation in oxford mobile bearing unicompartmental knee arthroplasty: an experimental cadaveric study [J]. *Bone Joint Res*, 2020, 9 (6): 272–278.
- [12] Heyse TJ, El–Zayat BF, De Corte R, et al. Balancing UKA: overstuffing leads to high medial collateral ligament strains [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2016, 24 (10): 3218–3228.
- [13] Pfeiffer FM. The use of finite element analysis to enhance research and clinical practice in orthopedics [J]. *J Knee Surg*, 2016, 29 (2): 149–158.
- [14] Taylor M, Bryan R, Galloway F. Accounting for patient variability in finite element analysis of the intact and implanted hip and knee: a review [J]. *Int J Numerical Method Biomed Engin*, 2013, 29 (2): 273–292.
- [15] Completo A, Fonseca F, Simões JA. Finite element and experimental cortex strains of the intact and implanted tibia [J]. *J Biomech Engin*, 2007, 129 (5): 791–797.
- [16] Innocenti B, Bilgen OF, Labey L, et al. Load sharing and ligament strains in balanced, overstuffing and understuffed uka. a validated finite element analysis [J]. *J Arthroplasty*, 2014, 29 (7): 1491–1498.
- [17] Kang KT, Kwon OR, Son J, et al. Effect of joint line preservation on mobile–type bearing unicompartmental knee arthroplasty: finite element analysis [J]. *Austr Physical Engin Sci Med*, 2018, 41 (1): 201–208.
- [18] 朱广铎. 单髁膝关节置换有限元分析[D]. 北京协和医学院, 2016.
- [19] Galbusera F, Freutel M, Dürselen L, et al. Material models and properties in the finite element analysis of knee ligaments: a literature review [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2014, 2 (1): 54.
- [20] Catani F, Benedetti MG, Bianchi L, et al. Muscle activity around the knee and gait performance in unicompartmental knee arthroplasty patients: a comparative study on fixed– and mobile–bearing designs [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthroscopy*, 2012, 20 (6): 1042–1048.
- [21] Komnik I, Peters M, Funken J, et al. Non–sagittal knee joint kinematics and kinetics during gait on level and sloped grounds with unicompartmental and total knee arthroplasty patients [J]. *PLoS One*, 2016, 11 (12): e168566.
- [22] Wiik AV, Aqil A, Tankard S, et al. Downhill walking gait pattern discriminates between types of knee arthroplasty: improved physiological knee functionality in UKA versus TKA [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthroscopy*, 2015, 23 (6): 1748–1755.
- [23] Seeger JB, Schickschneit JP, Schuld C, et al. Instrumented gait analysis in patients with medial osteoarthritis of the knee after mobile–bearing unicompartmental knee arthroplasty [J]. *Knee*, 2018, 25 (3): 392–397.
- [24] Yue L, Lamontagne M, Xiong Z, et al. Evaluation of knee kinematics and moments during active deep flexion activity after oxford mobile–bearing medial UKA–A two–year follow–up study [J]. *J Knee Surg*, 2021, 27 (3): 878–883.
- [25] Kim MK, Yoon JR, Yang SH, et al. Unicompartmental knee arthroplasty fails to completely restore normal gait patterns during level walking [J]. *Knee Surgery Sports Traumatol Arthroscopy*, 2018, 26 (11): 3280–3289.
- [26] 郝朋, 杨柳, 何锐, 等. 人工单髁关节置换术后步态及临床疗效分析 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2020, 34 (11): 1369–1375.
- [27] Kono K, Inui H, Tomita T, et al. In vivo kinematic comparison before and after mobile–bearing unicompartmental knee arthroplasty during high–flexion activities [J]. *Knee*, 2020, 27 (3): 878–883.
- [28] Lee KY, Slavinsky JP, Ries MD, et al. Magnetic resonance imaging of in vivo kinematics after total knee arthroplasty [J]. *J Magnetic Resonance Imaging*, 2005, 21 (2): 172–178.
- [29] Rao Z, Zhou C, Kernkamp WA, et al. In vivo kinematics and ligamentous function of the knee during weight–bearing flexion: an investigation on mid–range flexion of the knee [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthroscopy*, 2020, 28 (3): 797–805.
- [30] Bucek F, Komzák M, Hart R. Rotational knee joint kinematics before and after unicompartmental medial arthroplasty, comparison with a healthy knee joint [J]. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech*, 2019, 86 (1): 33–38.

(收稿:2021–03–01 修回:2021–06–22)
(同行评议专家: 郭万首)
(本文编辑: 宁 桦)