论著·临床医学

3D打印导板辅助内侧单髁置换术后早期步态改善但伸膝功能仍不全:一项观察性自身对照研究

王志鹏[1],黄海洪[1],何 锐[1,2],杨鹏飞[1],眭 文[1] [1]陆军军医大学(第三军医大学)第一附属医院创伤关节外科,重庆;[2]重庆市中医院骨伤科(关节与运动医学科),重庆

[摘要] **目的** 内侧单髁置换术(unicompartmental knee arthroplasty,UKA)是治疗膝关节内侧间室骨关节炎的有效保膝术式,3D打印导板辅助技术可提升假体安放精准度,但术后功能恢复尚缺乏客观量化证据,且缺乏与正常人群的对比研究。本研究旨在通过三维步态分析,评估导板辅助内侧UKA术后早期膝关节矢状面运动学恢复规律,明确术后步态异常的具体表现。**方法** 采用观察性自身对照(患/健侧)研究设计方案,纳入2024年11月至2025年5月于西南医院创伤关节外科行3D打印导板辅助内侧UKA的24例(25侧膝盖)患者为观察组,选择15侧无症状对侧膝盖作为对照组。分别于术前及术后3个月进行采集髋-膝-踝(hip-knee-ankle,HKA)角、美国西部Ontario与McMaster大学骨关节炎指数(Western Ontario and McMaster University Osteoarthritis Index,WOMAC)评分及矢状面膝关节运动学参数,作组内(观察组术前与术后比较)及组间(观察组术前、术后分别与对照组比较)对比分析。**结果** 观察组患者随访时间为2.90~6.73个月,平均(4.15±1.12)个月。观察组术后WOMAC评分(0.92±1.44 *vs* 12.76±3.94)、僵硬评分(0.88±1.09 *vs* 2.84±2.34)、功能评分(2.72±3.02 *vs* 47.80±12.08)较术前均显著改善($P<0.001$);观察组术后HKA角较术前显著增加[(177.14±2.48) *vs* (171.44±4.21)°,$P<0.001$],内翻畸形明显矫正,较对照组[(177.02±3.11)°]无统计学差异。观察组术后摆动相最大屈曲角度[(60.51±5.20) *vs* (47.13±12.68)°,$P<0.001$]与术前相比显著增加,承重反应期占比(10.36%±3.32% *vs* 15.84%±11.43%,$P=0.029$)与术前相比显著缩短,与对照组比较无统计学差异;观察组术后支撑相最小屈曲角度[(10.63±5.85) *vs* (6.14±5.04)°,$P=0.018$]、摆动相最小屈曲角度[(7.62±5.28) *vs* (3.26±5.24)°,$P=0.015$]、承重反应期屈曲范围[(6.84±3.03) *vs* (9.75±2.89)°,$P=0.005$]与对照组比较仍存在统计学差异,提示伸膝功能尚未完全恢复。其余步态参数差异无统计学意义。**结论** 3D打印导板辅助UKA术后早期,患者步态过程中承重反应期占比、膝关节摆动相最大屈曲角度明显改善。但与对照健侧相比,步态过程中仍存在伸膝不全,主要表现为支撑相最小屈曲角度、摆动相最小屈曲角度的增大。

[关键词] 运动医学;3D打印技术;导板;单髁膝关节置换术;步态分析
[中图法分类号] R318.17;R684.05;R687.4 [文献标志码] A

Early gait improvement but persistent knee extension deficit after medial unicompartmental knee arthroplasty assisted by 3D-printed patient-specific instrumentation: an observational self-controlled study

Wang Zhipeng[1], Huang Haihong[1], He Rui[1,2], Yang Pengfei[1], Sui Wen[1] [1]Department of Trauma and Joint Surgery, First Affiliated Hospital, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing; [2]Department of Orthopedics and Traumatology (Department of Joint and Sports Medicine), Chongqing Hospital of Traditional Chinese Medicine, Chongqing, China

[**Abstract**] **Objective** Medial unicompartmental knee arthroplasty (UKA) is an effective knee-

[基金项目] 重庆科卫联合面上项目(2024MSXM062)
[通信作者] 何 锐,E-mail:abba315@163.com

2097-0927/Copyright © 2026,陆军军医大学(第三军医大学)。这篇开放获取文章遵循CC BY许可协议(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
引用格式:王志鹏,黄海洪,何锐,等.3D打印导板辅助内侧单髁置换术后早期步态改善但伸膝功能仍不全:一项观察性自身对照研究[J].陆军军医大学学报,2026,48(17):2476-2484.DOI:10.16016/j.2097-0927.202606113.
Citation: Wang Z P, Huang H H, He R, *et al*. Early gait improvement but persistent knee extension deficit after medial unicompartmental knee arthroplasty assisted by 3D-printed patient-specific instrumentation: an observational self-controlled study[J]. J Army Med Univ, 2026, 48(17): 2476-2484. DOI: 10.16016/j.2097-0927.202606113.

preserving procedure for medial compartment knee osteoarthritis. Procedures assisted by 3D-printed patient-specific instrumentation (PSI) can improve the accuracy of prosthesis positioning. However, objective quantitative evidence regarding postoperative functional recovery remains insufficient, and few studies have included comparisons with normal populations. This study aims to evaluate the early postoperative recovery pattern of sagittal knee kinematics following PSI-assisted medial UKA *via* 3D gait analysis, and to identify specific manifestations of postoperative gait abnormalities. **Methods** An observational self-controlled (affected *vs* contralateral limb) study design was adopted. Twenty-four patients (25 knees) who underwent 3D-printed PSI-assisted medial UKA in Department of Trauma and Joint Surgery of First Affiliated Hospital of Army Medical University between November 2024 and May 2025 were enrolled as the observation group, and 15 asymptomatic contralateral knees were selected as the control group. The hip-knee-ankle (HKA) angle, Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index (WOMAC) score, and sagittal knee kinematic parameters were collected preoperatively and at 3 months postoperatively. Intragroup comparisons (preoperative *vs* postoperative data within the observation group) and intergroup comparisons (preoperative and postoperative data of the observation group *vs* the control group) were performed. **Results** The patients in the observation group were followed up for 2.90 to 6.73 (4.15±1.12) months. Regarding functional scores and radiographic outcomes: postoperative WOMAC score (0.92±1.44 *vs* 12.76±3.94), stiffness score (0.88±1.09 *vs* 2.84±2.34), and function score (2.72±3.02 *vs* 47.80±12.08) in the observation group were significantly improved compared with preoperative values (all $P<0.001$). The postoperative HKA angle in the observation group was significantly larger than the preoperative value [(177.14±2.48) *vs* (171.44±4.21)°, $P<0.001$], with obvious correction of varus deformity, but there was no significant difference in the angle between the postoperative HKA angle and the control group [(177.02±3.11)°]. In gait analysis: the peak knee flexion angle during swing phase was significantly increased postoperatively compared with preoperatively [(60.51±5.20) *vs* (47.13±12.68)°, $P<0.001$], and the proportion of loading response phase was decreased significantly (10.36%±3.32% *vs* 15.84%±11.43%, $P=0.029$), both recovering to the levels of the control group. However, significant differences were observed between postoperative patients and the control group in term of the minimum knee flexion angle during stance phase [(10.63±5.85) *vs* (6.14±5.04)°, $P=0.018$], minimum knee flexion angle during swing phase [(7.62±5.28) *vs* (3.26±5.24)°, $P=0.015$], and knee flexion range during loading response [(6.84±3.03) *vs* (9.75±2.89)°, $P=0.005$], which suggested that knee extension function had not been fully restored. No statistically significant differences were found in the remaining gait parameters. **Conclusion** In the early postoperative period after 3D-printed PSI-assisted UKA, the patients present significant improvement in the loading response phase proportion and the maximum knee flexion angle during swing phase. However, incomplete knee extension persists during gait relative to the control group, as evidenced by increased minimum knee flexion angles during both stance and swing phases.

[**Key words**] sports medicine; 3D printing technology; guide; unicompartmental knee arthroplasty; gait analysis

Supported by the General Joint Project of Chongqing Science and Technology Commission and Chongqing Health Commission (2024MSXM062).
Corresponding author: He Rui, E-mail: abba315@163.com

膝关节骨关节炎(knee osteoarthritis,KOA)是一种以关节软骨退变、软骨下骨硬化及骨赘形成为特征的退行性关节疾病,好发于中老年人群。该病以膝关节疼痛、活动受限及负重功能障碍为主要临床表现,显著影响患者生活质量,已成为骨科临床的重点诊治病种。流行病学研究表明,KOA常呈间室性分布,其中内侧间室受累最为常见。单髁置换术(unicompartmental knee arthroplasty,UKA)是治疗膝关节内侧间室骨关节炎的一种有效方法,与全膝关节置换术(total knee arthroplasty,TKA)相比,UKA能够保留交叉韧带和减少截骨量[1],更好地恢复患肢正常的生物力学[2],同时还具有手术切口微创,术中失血量少,术后恢复快等优势[3],现已成为临床治疗内侧间室膝骨关节炎的优选术式。

随着3D打印技术的快速发展及其在临床医学中的应用,3D打印辅助导板已广泛应用于骨关节外科领域,依托三维重建、个性化术前规划的技术优势,在TKA中取得了良好的临床和步态改善效果[4-6]。在UKA手术应用中,该技术也能有效提升手术精准度,保障患者术后短期临床疗效与长期植入物存活率[7-8],为优化UKA假体定位、改善术后下肢力线重建

提供了可行策略。

尽管3D打印导板辅助UKA的临床应用价值已得到初步认可,但当前相关研究体系仍存在明显局限。既往研究多通过影像学与主观量表评估疗效,缺乏客观步态运动学证据。三维步态分析可量化膝关节行走屈伸运动特征,现有相关研究多仅对比手术前后指标,缺少正常对照,难以判定术后步态是否恢复正常生理状态。因此,本研究采用观察性自身对照(患/健侧)研究设计方案,纳入行3D打印导板辅助内侧UKA的患者为观察组,无症状的对侧膝盖为对照组,通过比较观察组术前、术后3个月及对照组的膝关节矢状面运动学参数,探讨3D打印导板辅助内侧UKA术后患者步态的运动学特点。本研究假设:3D打印导板辅助UKA能够有效改善患者术后屈膝功能,但术后早期步态中仍存在伸膝不全。旨在客观揭示UKA术后早期步态恢复规律,为手术精准化优化与个体化康复方案制定提供理论参考。

1 资料与方法

1.1 研究设计方案与病例来源

本研究采用观察性自身对照(患/健侧)研究设计方案,筛选2024年11月至2025年5月于西南医院创伤关节外科行3D打印导板辅助内侧UKA的24例(25侧膝盖)患者为观察组(手术患侧),选择15侧无症状的对侧膝盖作为对照组(对照健侧)。分别于术前及术后3个月进行采集髋-膝-踝(hip-knee-ankle,HKA)角、美国西部Ontario与McMaster大学骨关节炎指数评分(Western Ontario and McMaster University Osteoarthritis Index,WOMAC)评分及矢状面膝关节运动学参数,作组内(观察组术前与术后比较)及组间(观察组术前、术后分别与对照组比较)对比分析。研究方案经陆军军医大学第一附属医院医学伦理委员会批准[(B)KY2026252]。

1.2 纳入排除标准

1.2.1 观察组 纳入标准:①符合膝内侧间室骨关节炎诊断标准(影像学诊断要点为退变局限于内侧间室,外侧间室及髌股间室无明显骨关节炎征象);②Kellgren-Lawrence分级Ⅳ级;③符合UKA手术指征并成功进行UKA的患者,接受移动轴承骨水泥牛津膝关节假体;④临床资料完整,包括人口学特征、步态分析数据及影像学资料,并完成随访。排除标准:①膝关节感染;②类风湿性关节炎;③交叉韧带断裂或功能不全;④严重关节外畸形;⑤既往膝关节手术史;⑥关节周围软组织功能障碍和神经病变。

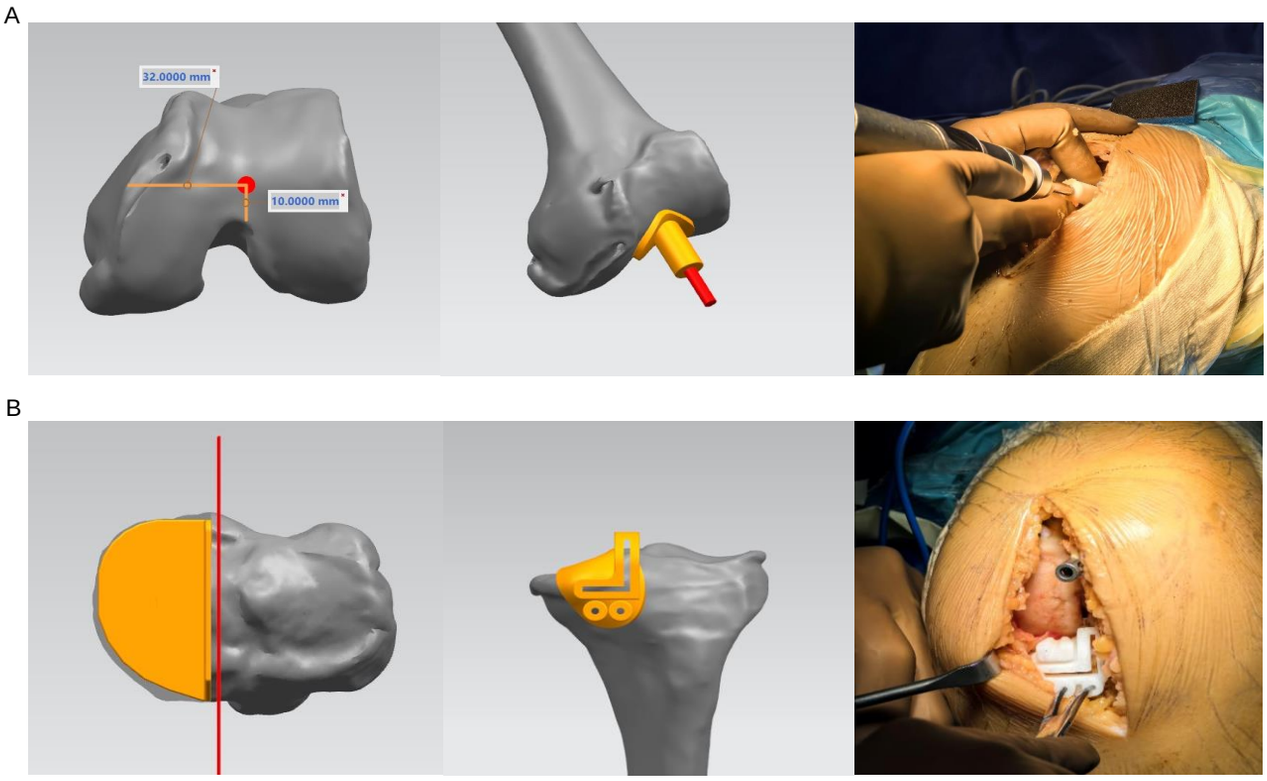
1.2.2 对照组 纳入标准:①膝关节无既往手术及外伤史;②膝关节活动正常,无周围神经肌肉疾病;③膝关节无明显畸形;④膝关节正侧位X线片检查膝关节内外侧间隙未见明显狭窄、失衡;⑤下肢无影响正常行走的其他不适症状。排除标准:①影响步态的前庭疾病、平衡障碍病史;②既往髋、踝、足手术及外伤史;③严重关节外畸形。

1.3 3D打印导板制备、UKA手术方法及术后处理

1.3.1 基于CT三维重建的个体化导板设计与打印

观察组患者术前均行三维CT薄层,扫描范围为下肢全长。将CT扫描数据导入MIMICS软件(Materialise公司,比利时),重建患者膝关节解剖结构的个体化模型。将模型数据导入E-3D大师版x64 V18.02软件(Video Copilot公司,美国)进行导板轮廓的绘制和初步设计,再导入SIEMENSNX软件(Siemens PLM Software公司,德国)优化得到最终导板轮廓。髓腔导板与股骨远端进行形态匹配,导板按照股骨解剖轴在股骨远端的投影点设计股骨入髓孔。同样胫骨截骨导板与胫骨近端前内侧进行形态匹配,根据术前规划设计胫骨截骨导向孔,为实现更好导向效果,导板的导向孔外侧设计突出,在表面形成明显的导向通道。根据胫骨假体大小设计股骨假体导向导板,在冠状位,股骨假体2颗螺钉中心确定平面位于胫骨假体中间位置,以更好地定位股骨假体位置。确定导板模型后,提取并导入3D打印系统,用聚乳酸高分子材料熔融沉积成型打印机(Bambu Lab P1S,深圳拓竹科技有限公司)打印患者个体化导板,术前导板设计及术中应用见图1。

1.3.2 导板辅助UKA术中操作 观察组均使用活动平台牛津单髁膝关节系统。椎管内麻醉后患者平卧于手术台。手术肢体悬挂在大腿支架上自然下垂,术中使用气动止血带止血,采用微创方法,做髌骨内侧切口,暴露股骨内侧髁,去除骨赘。根据术前三维设计将胫骨截骨导向器在胫骨近端定位,并用克氏针固定,使用摆锯,首先进行矢状切割,然后进行轴向切割。取下胫骨骨块后,用股骨钻孔导引器在胫骨截骨区域,评估关节间隙。在胫骨截骨处放置股骨假体导向导板,缓慢屈伸膝关节,并标记导向器在股骨内侧髁表面滑动轨迹,使用3D打印髓腔导板根据术前三维设计在股骨远端定位,延髓腔导板的钻孔导向器钻孔,插入髓内杆,用髓内杆连接器连接髓内杆和股骨钻孔导引器的外侧孔,将股骨内侧髁标记置于钻孔中间位置,定位钻孔导向器并进行股骨钻孔。手术的其余步骤,包括股骨铣削、屈伸间隙均衡和骨水泥技术,



A: Femoral intramedullary; B: Tibial osteotomy

图1 术前导板设计及术中应用

Figure 1 Preoperative design and intraoperative application of patient-specific instrumentation (PSI)

均按照制造商的建议进行。

1.3.3 术后处理 常规行术后对症支持治疗,回病房后在病床上行直腿抬高及踝泵训练;术后第1天拔除引流管,然后开始行全身负重行走及屈膝功能锻炼。根据患者术后营养、感染等检验指标及影像学复查评估患者情况,如无特殊情况,术后第4天出院。

1.4 影像学评估、功能评分与三维步态分析

观察组术前及术后行站立位下肢全长X线片,评估手术整体效果,于X线片测量HKA角(股骨与胫骨机械轴相交形成的内侧钝角);术后3个月的随访中,采集手术患侧WOMAC评分,包括疼痛、僵硬和关节功能3部分。2名不参与患者诊疗工作的工程师进行角度测量,以控制测量偏倚。

步态数据采集系统包括带有8个摄像头的Vicon 3D运动捕捉系统和2个测力平台。使用Vicon Nexus和Vicon Polygon软件进行步态数据采集和分析。术前和术后3个月分别在西南医院步态分析检查室收集患者步态模式数据,具体步骤包括:①摄像头调试,覆盖周围反光点;②系统调试,标定相机,定位坐标原点,测力平台归0;③使用红外反射标记定位双侧下肢共16个解剖标志:髂后上棘、髂前上棘、大腿外侧中点、股骨外侧髁、小腿外侧中点、外踝、第一和第二趾骨中点、足跟中点;④测量身高、体质量、腿长、膝宽、踝宽等基本参数并输入系统;⑤患者站在测力平台上校准坐标并收集静态数据;⑥患者按自适应行走速度行走收集运动学、动力学和时空参数。截取患者在自适应行走过程中的1个完整步态时段,导出该段的运动学数据。步态数据采集由同一位受过培训的技师操作完成,每个受试者均选取5个完整步态周期的检测数据,取平均值进行统计分析。对比各组矢状面膝关节运动模式的变化,并对初始着地期膝关节角度、支撑相膝关节最大/小屈曲角度、摆动相膝关节最大/小屈曲角度、承重反应期占比进行对比分析。

1.5 统计学分析

本研究为观察性研究,样本量固定。针对差异无统计学意义的指标,采用事后效能分析评估阴性结果的可靠性。以G*Power软件计算,设定α=0.05,双尾检验,效应量设定为中等水平(Cohen's d=0.5)。结果显示:独立样本比较(观察组:n=25,对照组:n=15)的效能为0.58,配对比较(观察组术前与术后,n=25)的效能为0.78,2者均未达到推荐效能水准0.80,提示部分阴性结果可能受样本量限制,不排除存在临床意义

差异的可能,结论尚需进一步验证。

使用SPSS 26.0软件对研究数据进行分析。数据以$\bar{x}\pm s$表示,并记录其95%*CI*,同一患者手术前、后比较采用配对t检验,对照组与观察组(前、后)比较采用独立样本t检验,检验水准α=0.05,*P*<0.05表示差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 患者基本特征比较

观察组所有患者术后均无手术相关并发症,并完成功能评分和步态数据采集。观察组和对照组基本特征比较,差异无统计学意义(表1)。

2.2 术后WOMAC评分显著降低、内翻畸形明显矫正

随访时间为2.90~6.73个月,平均4.15个月。术后WOMAC各部分评分显著优于术前,差异有统计学差异意义(*P*<0.001);下肢全长正侧位片显示,术后HKA角与术前比较,差异有统计学意义(*P*<0.001,表2),内翻畸形均得到明显矫正(图2)。

2.3 术后早期承重反应期及屈膝功能改善,但伸膝角度仍大于对照组

对照组及观察组手术前、后矢状面膝关节平均活动曲线如图3所示。步态分析显示,与对照组相比,术前观察组患者的摆动相膝关节最大屈曲角度、摆动相膝关节最小屈曲角度及承重反应期差异有统计学意义(*P*<0.05),其他指标差异无统计学意义,见表3。

与术前相比,术后观察组患者膝关节的摆动相膝关节最大屈曲角度、承重反应期差异有统计学意义(*P*<0.05),其他指标差异无统计学意义,见表4。

与对照组相比,术后观察组患者的支撑相膝关节最小屈曲角度、摆动相膝关节最小屈曲角度、承重反应期膝关节屈曲范围差异有统计学意义(*P*<0.05),其他指标差异无统计学意义,见表5。

表1 对照组和观察组之间基本特征比较($\bar{x}\pm s$)

Table 1 Comparison of baseline characteristics between the control group and the observation group ($\bar{x}\pm s$)

Group	Age/years	Height/cm	Weight/kg	BMI/(kg/m^2)
Control group(n=15)	64.53±6.80	155.73±5.62	63.87±14.62	26.17±4.90
Observation group(n=25)	62.60±5.58	155.16±6.26	66.10±10.53	27.36±3.15
t	0.977	0.291	−0.560	−0.932
P	0.335	0.773	0.579	0.357

BMI: body mass index

表2 观察组患者手术前后WOMAC评分及HKA角比较(n=25,$\bar{x}\pm s$)

Table 2 Comparison of preoperative and postoperative WOMAC scores and HKA angles in the observation group (n=25,$\bar{x}\pm s$)

Group	WOMAC score			HKA angle/°
	Pain	Stiffness	Function	
Observation group, preop.	12.76±3.94	2.84±2.34	47.80±12.08	171.44±4.21
Observation group, postop.	0.92±1.44	0.88±1.09	2.72±3.02	177.14±2.48
t	13.164	4.478	17.275	−8.779
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

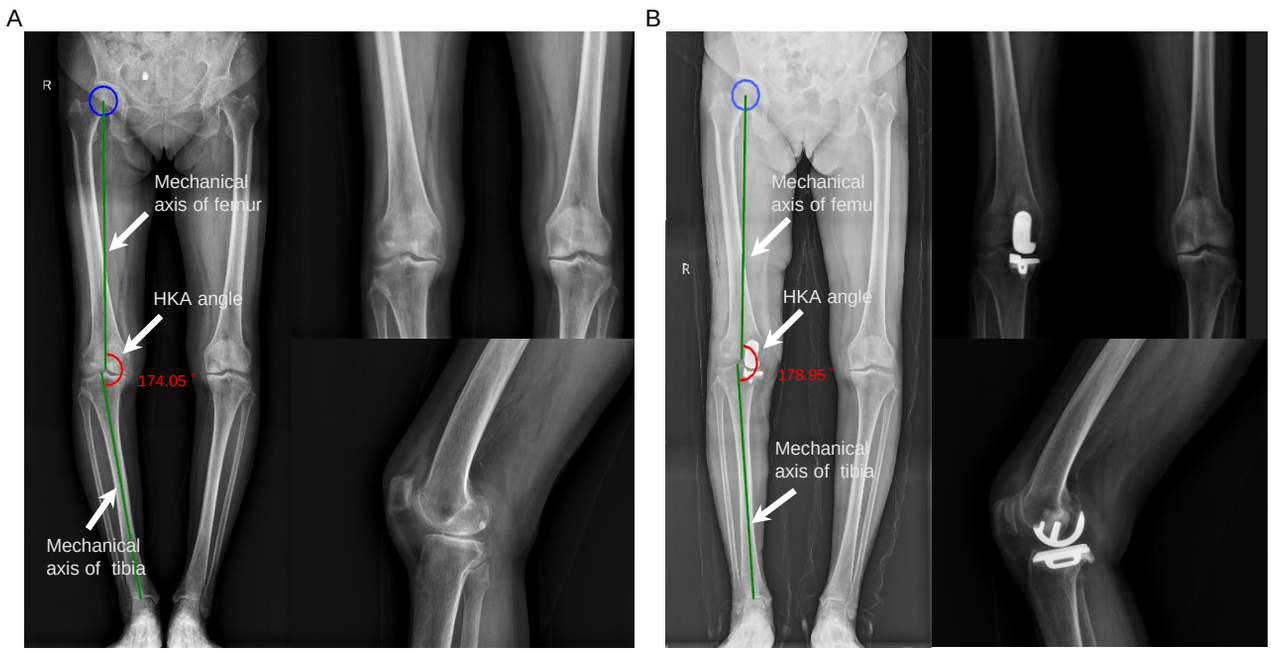
WOMAC: Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index; HKA: hip-knee-ankle; preop.: preoperative; postop: postoperative

表3 对照组与观察组术前步态数据对比($\bar{x}\pm s$)

Table 3 Comparison of preoperative gait data between the control group and the observation group($\bar{x}\pm s$)

Group	Knee angle at IC/°	Peak knee flexion-Stance/°	Min knee flexion-Stance/°	Peak knee flexion-Swing/°	Min knee flexion-Swing/°	Flexion range-LR/°	LR phase/%
Control group(n=15)	6.13±6.07	15.88±6.20	6.14±5.04	58.55±5.87	3.26±5.24	9.75±2.89	10.67±1.84
Observation group, preop.(n=25)	7.81±9.83	14.12±10.89	7.81±10.25	47.13±12.68	8.63±7.98	6.31±8.34	15.84±11.43
t	−0.595	0.649	−0.688	3.863	−2.569	1.534	−2.216
P	0.555	0.520	0.496	<0.001	0.014	0.133	0.036

IC: initial contact; LR: loading response; preop.: preoperative; postop.: postoperative



A: Preoperative radiographic data and hip-knee-ankle angle measurement; B: Postoperative radiographs and HKA angle measurement

图2 观察组患者手术前后影像学资料对比

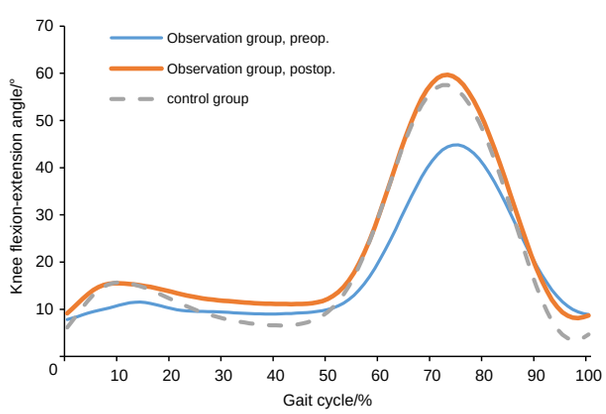
Figure 2 Comparison of radiographic data before and after surgery in the observation group

表4 观察组术前、术后步态数据对比(n=25,$\bar{x}\pm s$)

Table 4 Comparison of preoperative and postoperative gait data in the observation group (n=25,$\bar{x}\pm s$)

Group	Knee angle at IC/°	Peak knee flexion-Stance/°	Min knee flexion-Stance/°	Peak knee flexion-Swing/°	Min knee flexion-Swing/°	Flexion range-LR/°	LR phase/%
Observation group, preop.	7.81±9.83	14.24±10.89	7.81±10.25	47.13±12.68	8.63±7.98	6.31±8.34	15.84±11.43
Observation group, postop.	9.16±5.28	15.99±5.70	10.63±5.85	60.51±5.20	7.62±5.28	6.84±3.03	10.36±3.32
t	−0.693	−0.906	−1.579	5.778	0.640	−0.308	2.322
P	0.495	0.374	0.127	<0.001	0.529	0.761	0.029

IC: initial contact; LR: loading response; preop.: preoperative; postop.: postoperative.



preop.: preoperative; postop.: postoperative

图3 矢状面膝关节平均活动曲线

Figure 3 Sagittal plane of the knee joint mean curve of motion

3 讨论

UKA基于“重建”理念,主要通过“修补”的方法对软骨损伤区域进行填充,纠正因此导致的下肢力线与膝关节生物力学的改变,避免对膝关节的进一步损伤,是目前KOA“保膝”治疗理念中最重要的手术方式。随着手术技术的进步,器械、假体设计的改进以及辅助手段的加入,临床效果越来越好,相关研究表明,牛津活动平台内侧UKA术后膝关节与正常膝关节高度相似[9],UKA术后假体生存率明显升高,10年与15年分别达到93%与89%[10]。然而,尽管UKA有着诸多优势,但在技术上有较高的要求,手术过程中,医生需要在小手术区域情况下进行精准截骨以实现组件的精确定位,现有研究表明,UKA中股骨与胫骨组

表5 对照组与观察组术后步态数据对比($\bar{x}\pm s$)

Table 5 Comparison of postoperative gait data between the control group and the observation group($\bar{x}\pm s$)

Group	Knee angle at IC/°	Peak knee flexion-Stance/°	Min knee flexion-Stance/°	Peak knee flexion-Swing/°	Min knee flexion-Swing/°	Flexion range-LR/°	LR phase/%
Control group(n=15)	6.13±6.07	15.88±6.20	6.14±5.04	58.55±5.87	3.26±5.24	9.75±2.89	10.67±1.84
Observation group, postop.(n=25)	9.16±5.28	15.99±5.70	10.63±5.85	60.51±5.20	7.62±5.28	6.84±3.03	10.36±3.32
t	−1.660	−0.061	−2.468	−1.101	−2.539	2.990	0.328
P	0.105	0.952	0.018	0.278	0.015	0.005	0.745

IC: initial contact; LR: loading response; preop.: preoperative; postop.: postoperative

件定位均显示出较大偏差[11-12]。本研究中,根据患者术前CT三维重建规划制作个性化导板,可以辅助定位股骨入髓点,确定胫骨截骨的位置及方向,并在术中依靠股骨假体导向导板在膝关节活动过程中动态定位股骨假体,以力求实现股骨假体和胫骨假体在活动中的良好匹配关系。3D打印导板在UKA术中应用,能够有效定位股骨入髓孔及胫骨截骨位置,同时能够减少交叉韧带等周围软组织的损伤,使UKA更加安全、精准、微创。

3.1 术后早期症状和功能显著改善,下肢力线矫正效果满意

手术前后对比发现,患者UKA术后膝关节疼痛症状、关节活动及功能均得到了明显改善,术后WOMAC各项评分显著优于术前。HKA角较术前明显增加,内翻畸形得到矫正。现有研究表明,正常人群下肢力线并非一条直线,股骨及胫骨机械轴会因膝关节轻度内翻成一定角度[13]。本研究中术后HKA角与对照组比较差异无统计学意义[(177.14±2.48) *vs* (177.02±3.11)°,P=0.892],下肢力线接近于同年龄段正常人,恢复了膝关节稳定性,使得膝关节平面的受力更加均匀,避免了膝关节受力的明显外移而对外侧间室造成不良影响。

3.2 术后早期承重反应期占比趋于正常,屈膝功能明显恢复,但伸膝能力并未改善

通过UKA术前和对照组之间步态数据的比较,能够看到KOA对矢状面膝关节运动的影响。与对照组相比,UKA术前初始着地期膝关节角度、支撑相最大/小屈曲角度、承重反应期膝关节屈曲范围无明显变化,差异无统计学意义,但是初始着地期膝关节角度、支撑相最小屈曲角度较对照组有增大的趋势,而且摆动相最小屈曲角度的增大与对照组有统计学差异(P<0.05),这些说明KOA患者步态过程中伸膝能力明显下降。造成这种变化的原因可能与膝关节疼痛主动回避完全伸直、股四头肌肌力下降以及关节炎导致的内翻畸形、骨赘屈曲挛缩等因素有关[14]。同时,KOA患者膝关节摆动相最大屈曲角度较对照组明显减小(P<0.01),支撑相最大屈曲角度也有减小的趋势,这与之前KOA步态运动学参数的研究结果一致[15-18],这些研究表明,KOA患者屈膝幅度下降主要由于疼痛规避、膝关节神经肌肉功能紊乱及结构改变,这种改变使患者出现疼痛、僵硬、功能受限等症状,也是引起步态改变的根本原因。数据比较发现,虽然2组承重反应期膝关节屈曲范围差异无统计学意义,但观察组术前较对照组仍有减小的趋势[(9.75±2.89) *vs* (6.31±8.34)°,P=0.133],这种变化削弱了肢体缓解震荡的能力,同时也会导致关节压缩载荷增加,进而加重关节软骨的损伤[18-20],而UKA术前承重反应期较对照组明显增加(P<0.05),可能与代偿膝关节缓冲能力的下降、减少疼痛及膝关节载荷有关。

UKA术前、术后及对照组步态数据对比发现,术后膝关节屈曲能力明显改善,对比发现摆动相最大屈曲角度较术前明显增加(P<0.001),与对照组相比差异无统计学意义。支撑相最大屈曲角度、承重反应期膝关节屈曲范围与术前相比虽然差异无统计学意义,但能观察到该角度增大的趋势,且屈曲活动方面的稳定性增加,这一变化说明UKA增加了患肢在承重反应期膝关节屈曲角度,从而减轻术前因膝关节减低震荡能力的弱化和关节压缩载荷的增加而对膝关节的进一步损伤。同时也能降低术后关节假体及衬垫的磨损,进而对假体使用寿命产生积极影响。疼痛症状的减轻使术后承重反应期较术前明显缩短(P<0.05),且恢复至对照组水平。但是我们也发现,术后步态过程中患者伸膝能力并无明显改善,支撑相最小屈曲角度、摆动相最小屈曲角度与术前相比差异均无统计学意义,且在支撑相有增大趋势。术后两者角度相比对照组有明显增大,差异有统计学意义(P<0.05)。这可能与以下3个方面有关:一是患者因膝关节长期疼痛、股四头肌力量减弱、本体感觉损伤等原因而形成的病

理性步态,术后因疼痛残留及心理因素等原因,不能完全纠正不良步态习惯[21]。二是可能与术后残留的膝关节屈曲畸形有关,有研究表明,即使在UKA术后一年仍存在一定程度的屈曲畸形[22],这可能会导致自然状态下不能充分伸膝。三是与术后康复锻炼密切相关,在随访过程中发现,病人在术后的功能锻炼中更注重术后膝关节屈曲角度的变化和锻炼,而对于主动伸膝的锻炼较少,现有相关研究证实,TKA后的康复过程可划分为早期初始康复阶段与后期完全康复阶段,2个阶段下患者的步态参数存在显著差异。经过阶段性的主动联合被动康复训练干预后,完全康复阶段的患者,其步态模式相较于早期康复阶段会得到明显改善,基本可以恢复至接近健康人群的正常步态水平[6,23],在UKA术后康复阶段可能也存在这种情况。

3.3 本研究的局限性

本研究存在以下不足:①本研究仅评估了膝关节步态特征,未评估踝关节、髋关节关节活动等情况,这些对步态过程中膝关节伸屈功能有影响;②步态分析仅限于矢状面膝关节时空参数,未能充分考虑步速、步频等因素对步态过程中膝关节屈伸角度的影响;③随访时间短,平均随访时间仅为术后4.15个月,随着术侧肢体功能的恢复,UKA术后远期临床效果和步态需要更长的随访时间;④本研究的样本量固定且较小,存在一定统计效能不足问题。因此本研究结论需开展多中心、更大样本量的队列研究以进一步验证。

综上所述,3D打印导板辅助UKA术后早期,患者步态过程中承重反应期占比、膝关节摆动相最大屈曲角度明显改善。但与对照组相比,步态过程中仍存在伸膝不全,主要表现为支撑相最小屈曲角度、摆动相最小屈曲角度的增大。

利益冲突 本文所有作者声明不存在利益冲突

参考文献:

[1] Franz A, Boese C K, Matthies A, *et al*. Mid-term clinical outcome and reconstruction of posterior tibial slope after UKA [J]. J Knee Surg, 2019, 32(5): 468-474. DOI: 10.1055/s-0038-1651528.

[2] Heyse T J, El-Zayat B F, De Corte R, *et al*. UKA closely preserves natural knee kinematics *in vitro* [J]. Knee Surg Phys Traumatol Arthrosc, 2014, 22(8): 1902-1910. DOI: 10.1007/s00167-013-2752-0.

[3] Patient relevant outcomes of unicompartmental versus total knee replacement: systematic review and meta-analysis [J]. BMJ, 2019, 365: l1032. DOI: 10.1136/bmj.l1032.

[4] Woon J T K, Zeng I S L, Calliess T, *et al*. Outcome of kinematic alignment using patient-specific instrumentation versus mechanical alignment in TKA: a meta-analysis and subgroup analysis of randomised trials [J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2018, 138(9): 1293-1303. DOI: 10.1007/s00402-018-2988-8.

[5] Sun M L, Zhang Y, Peng Y, *et al*. Gait analysis after total knee arthroplasty assisted by 3D-printed personalized guide [J]. BioMed Res Int, 2020, 2020: 6485178. DOI: 10.1155/2020/6485178.

[6] 孙茂淋, 杨柳, 何锐, 等. 3D打印导板辅助人工全膝关节置换术后患者步态分析[J]. 中国修复重建外科杂志, 2019, 33(8): 953-959. DOI: 10.7507/1002-1892.201902068.
Sun M L, Yang L, He R, *et al*. Gait analysis after total knee arthroplasty assisted by three-dimensional printing navigation template [J]. Chin J Reparative Reconstr Surg, 2019, 33(8): 953-959. DOI: 10.7507/1002-1892.201902068.

[7] 孙旭东, 邵安泽, 顾飞, 等. 3D打印个性化截骨模块导板辅助膝关节单髁置换术治疗骨关节炎的临床效果[J]. 医学研究与战创伤救治, 2025, 38(2): 180-185. DOI: 10.16571/j.cnki.2097-2768.2025.02.011.
Sun X D, Shao A Z, Gu F, *et al*. Clinical effect of 3D printed personalized osteotomy module guide plate assisted unicompartmental knee ar-throplasty for the treatment of osteoarthritis[J]. J Med Res Combat Trauma Care, 2025, 38(2): 180-185. DOI: 10.16571/j.cnki.2097-2768.2025.02.011.

[8] Gadeyne S, Menon A, Lustig S. Long-term outcomes of a 3D printed cementless fixed bearing unicompartmental knee arthroplasty[J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2025, 145(1): 339. DOI: 10.1007/s00402-025-05952-3.

[9] 任鹏鹏, 张启栋. 膝活动平台内侧单髁置换术后生物力学的研究进展[J]. 中国矫形外科杂志, 2022, 30(4): 329-332. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.04.09.
Ren P P, Zhang Q D. Research progress on biomechanics secondary to Oxford mobile-bearing medial unicompartmental knee arthroplasty[J]. Orthop J China, 2022, 30(4): 329-332. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.04.09.

[10] El-Galaly A, Kappel A, Nielsen P T, *et al*. Revision risk for total knee arthroplasty converted from medial unicompartmental knee arthroplasty: comparison with primary and revision arthroplasties, based on mid-term results from the Danish knee arthroplasty registry[J]. J Bone J Surg, 2019, 101(22): 1999-2006. DOI: 10.2106/jbjs.18.01468.

[11] Liow M H, Tsai T Y, Dimitriou D, *et al*. Does 3-dimensional *in vivo* component rotation affect clinical outcomes in unicompartmental knee arthroplasty [J]. J Arthroplasty, 2016, 31(10): 2167-2172. DOI: 10.1016/j.arth.2016.03.003.

[12] Servien E, Fary C, Lustig S, *et al*. Tibial component rotation assessment using CT scan in medial and lateral unicompartmental knee arthroplasty[J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2011, 97(3): 272-275. DOI: 10.1016/j.otsr.2010.11.002.

[13] Hsu R W, Himeno S, Coventry M B, *et al*. Normal axial alignment of the lower extremity and load-bearing distribution at the knee[J]. Clin Orthop Relat Res, 1990(255): 215-227.

[14] Favre J, Jolles B M. Gait analysis of patients with knee osteoarthritis highlights a pathological mechanical pathway and provides a basis for therapeutic interventions[J]. EFORT Open Rev, 2016, 1(10): 368-374. DOI: 10.1302/2058-5241.1.000051.

[15] 李伟, 汪宗保, 李国平, 等. 膝关节骨性关节炎患者步态运动学参数的研究[J]. 中国康复医学杂志, 2008, 23(1): 11-13. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2008.01.003.
Li W, Wang Z B, Li G P, *et al*. The research of gait kinematics parameters in the knee osteoarthritis patients[J]. Chin J Rehabil Med, 2008, 23(1): 11-13. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2008.01.003.

[16] 李宏恩, 马恺, 石春花, 等. 步态分析用于膝骨性关节炎诊断与功能评定的研究进展[J]. 生物医学工程与临床, 2024, 28(2): 281-286. DOI: 10.13339/j.cnki.sglc.20240223.019.
Li H E, Ma K, Shi C H, *et al*. Progress in gait analysis for diagnosis and functional assessment of knee osteoarthritis[J]. Biomed Eng Clin Med, 2024, 28(2): 281-286. DOI: 10.13339/j.cnki.sglc.20240223.019.

[17] Mündermann A, Dyrby C O, Andriacchi T P. Secondary gait changes in patients with medial compartment knee osteoarthritis: increased load at the ankle, knee, and hip during walking[J]. Arthritis Rheum, 2005, 52(9): 2835-2844. DOI: 10.1002/art.21262.

[18] Malus J, Urbaczka J, Rygelova M, *et al*. Effect of footwear type on biomechanical risk factors for knee osteoarthritis[J]. Orthop J Sports Med, 2023, 11(7): 23259671231183416. DOI: 10.1177/23259671231183416.

[19] 刘志宏, 何川, 冯建民, 等. 单髁膝关节置换术后膝关节三维运动学特性研究[J/OL]. 中华关节外科杂志(电子版), 2013, 7(4): 438-442. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-134X.2013.04.002.
Liu Z H, He C, Feng J M, *et al*. Three dimentional kinematics study of knee after unicompartmental arthroplasty[J/OL]. Chin J Jt Surg Electron Version, 2013, 7(4): 438-442. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-134X.2013.04.002.

[20] Suter L, Roth A, Angst M, *et al*. Is ACL deficiency always a contraindication for medial UKA Kinematic and kinetic analysis of implanted and contralateral knees[J]. Gait Posture, 2019, 68: 244-251. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.11.031.

[21] 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. DOI: 10.7507/1002-1892.202004076.
Hao P, Yang L, He R, *et al*. Analysis of gait and effectiveness after unicompartmental knee arthroplasty[J]. Chin J Reparative Reconstr Surg, 2020, 34(11): 1369-1375. DOI: 10.7507/1002-1892.202004076.

[22] Nha K W, Shon O J, Kong B S, *et al*. Gait comparison of unicompartmental knee arthroplasty and total knee arthroplasty during level walking[J]. PLoS One, 2018, 13(8): e0203310. DOI: 10.1371/journal.pone.0203310.

[23] Bączkowicz D, Skiba G, Czerner M, *et al*. Gait and functional status analysis before and after total knee arthroplasty[J]. Knee, 2018, 25(5): 888-896. DOI: 10.1016/j.knee.2018.06.004.

(**收稿**:2026-06-30;**修回**:2026-07-24)

(编辑 栾 嘉)