

文章编号: 1004-7220(2024)04-0670-07

# 单间室与全膝关节置换术对膝骨关节炎患者 楼梯行走时生物力学特征的影响

曹传宝<sup>1,2</sup>, 史东林<sup>2,3</sup>, 柴光伟<sup>2,3</sup>, 王鑫<sup>2,3</sup>, 张艳红<sup>2,3</sup>, 马刚<sup>3,4</sup>, 闫士芳<sup>1</sup>(1. 河北体育学院 武术系, 石家庄 050041; 2. 河北省体育技术研究与重点应用重点实验室, 石家庄 050041;  
3. 河北体育学院 运动人体科学系, 石家庄 050041; 4. 中国人民武装警察部队后勤学院 卫生勤务系, 天津 300309)

**摘要:**目的 探究单间室膝关节置换术(unicompartmental knee arthroplasty, UKA)与全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)对膝骨关节炎术后的临床疗效。方法 随机招募TKA患者21例、UKA患者15例。分别在术前以及术后6、12个月进行生物力学测试。采用Vicon红外动作捕捉系统和Kistler三维测力台同步采集受试者楼梯行走的运动学和动力学数据。结果 在上楼梯时,TKA组受试者术前膝屈曲力矩峰值显著低于UKA组,术后6个月到达膝屈曲/内收力矩峰值时间、膝屈曲力矩冲量及膝内收力矩峰值负载率显著小于UKA组。在下楼梯时,UKA组术前和术后6个月伸膝功率峰值显著较小,垂直地面反作用力峰值负载率术前显著较大,膝伸展力矩峰值术后6个月显著较大;在术后12个月,楼梯行走的生物力学特征未出现明显的差异性。结论 TKA组和UKA组在手术后表现出相似的膝关节功能,但TKA组可能采取不同于UKA组的下肢生物力学模式。在楼梯行走时,UKA组术后表现出更好的股四头肌控制能力,提高了楼梯行走尤其是下楼梯的姿势控制能力,而TKA组则采取保守的楼梯步态策略以降低楼梯行走的膝关节负荷。相比于力矩峰值,到达力矩峰值的时间及力矩峰值负载率是发现膝关节负荷差异性更灵敏的指标。

**关键词:** 单间室膝关节置换术; 全膝关节置换术; 楼梯行走; 膝骨关节炎; 负载率; 冲量

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.04.015

## Effects of Unicompartmental and Total Knee Arthroplasty on the Biomechanical Characteristics of Patients with Knee Osteoarthritis During Stair Ascent and Descent

CAO Chuanbao<sup>1,2</sup>, SHI Donglin<sup>2,3</sup>, CHAI Guangwei<sup>2,3</sup>, WANG Xin<sup>2,3</sup>, ZHANG Yanhong<sup>2,3</sup>, MA Gang<sup>3,4</sup>, YAN Shifang<sup>1</sup>

(1. Department of Wushu, Hebei Sport University, Shijiazhuang 050041, China; 2. Hebei Key Laboratory of Sports Technology Research and Application, Shijiazhuang 050041, China; 3. Department of Human Science in Sports, Hebei Sport University, Shijiazhuang 050041, China; 4. Department of Health Services, Logistics University of People's Armed Police Force, Tianjin 300309, China)

**Abstract: Objective** To explore the clinical efficacy of single unicompartmental knee arthroplasty (UKA) and total knee arthroplasty (TKA) for the treatment of knee osteoarthritis. **Methods** A total of 21 patients who

收稿日期: 2024-01-21; 修回日期: 2024-02-29

基金项目: 河北省重点研发计划项目(22375701D)

通信作者: 马刚, 讲师, E-mail: sdsngm@qq.com

underwent TKA and 15 who underwent UKA were randomly recruited. Biomechanical tests were performed before surgery and at 6<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> month after surgery. A Vicon infrared motion capture system and Kistler three-dimensional force plate were used to simultaneously acquire the kinematic and kinetic data of the patients during stair walking. **Results** During stair ascent, the peak knee flexion moment in the TKA group was significantly lower than that in the UKA group; the time to peak knee flexion/adduction moment, knee flexion moment impulse, and load rate of the peak knee adduction moment in the UKA group were significantly lower than those in the UKA group. During stair descent, the peak knee extension power in the UKA group was significantly lower before surgery and at 6<sup>th</sup> month after surgery; the load rate of the peak vertical ground reaction force was significantly higher before surgery and the peak knee extension moment was significantly greater at 6<sup>th</sup> month after surgery; at 12<sup>th</sup> month after surgery, there was no significant difference in the biomechanical characteristics during stair ascent and descent. **Conclusions** The TKA and UKA groups showed similar knee joint function after surgery; however, compared with the UKA group, the TKA group may adopt a different lower extremity biomechanical pattern. The UKA group showed better quadriceps control after surgery and improved postural control during stair descent, whereas the TKA group adopted a conservative stair gait strategy to reduce the knee load. Compared with the peak moment, the time to peak moment and load rate of the peak moment were more sensitive indicators for determining the difference in the knee load.

**Key words:** total knee arthroplasty (TKA); unicompartmental knee arthroplasty (UKA); stair walking; knee osteoarthritis; load rate; impulse

全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)作为最有效的膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)治疗手段之一,施行TKA后膝关节功能及生活质量显著提高<sup>[1]</sup>。相比于TKA,单间室膝关节置换术(unicompartmental knee arthroplasty, UKA)更适合单间室KOA患者。因为UKA保留的十字韧带为膝关节神经肌肉控制提供了力学感受器,有利于术后神经肌肉控制能力的恢复<sup>[2]</sup>。纵向研究显示,KOA患者患侧膝关节伸膝强度UKA术后1年恢复至健侧水平,而施行TKA后术3年恢复至健侧水平<sup>[3-4]</sup>。有研究发现,KOA病情的发展与膝关节内外侧受力不均有关,膝内收力矩峰值反映膝关节内侧负荷,而膝关节屈伸力矩峰值反映膝关节肌群的步态表现<sup>[5-7]</sup>。关节力矩虽然是力学的主要指标之一,但其可以被视为神经控制信号反映神经肌肉控制特征<sup>[8]</sup>。尽管膝内收力矩峰值与膝屈伸力矩峰值能有效反映膝关节内侧负荷与股四头肌活动,但不能充分描述TKA或UKA的临床疗效及术后膝关节神经肌肉控制能力,故可能需要更灵敏的指标来描述膝关节负荷及其神经肌肉控制。研究表明,膝关节力矩峰值负载率或冲量均与KOA的发展有关<sup>[9-10]</sup>。因此,应采用多种指标评估膝关节内侧负荷。楼梯行走作为老年人的日常活动之一,需要更大的关节

活动度和肌肉力量<sup>[11]</sup>。而KOA患者由于膝关节活动受限、肌肉力量下降、疼痛等原因,在楼梯行走时往往存在诸多的限制。研究显示,KOA患者施行TKA与UKA后在水平行走时的生物力学特征并未出现显著的差异性<sup>[12]</sup>。因此,有必要设置更具挑战性的楼梯行走,以发现两种术式后的生物力学差异。

本文通过对比施行UKA与TKA两种术式后KOA患者在术前以及术后6、12个月楼梯行走时矢状面和冠状面的膝关节生物力学变化,进一步探究两种术式治疗KOA的临床疗效。本研究假设,与TKA组相比,UKA组楼梯行走时,膝屈伸力矩峰值、屈伸力矩峰值负载率、屈伸力矩峰值冲量显著降低;膝内收力矩峰值、内收力矩峰值负载率、内收力矩峰值冲量显著降低;垂直地面反作用力(vertical ground reaction force, vGRF)峰值、vGRF负载率、伸膝功率峰值显著降低。

## 1 研究对象和方法

### 1.1 研究对象

随机招募TKA患者23例,UKA患者17例,共40膝。其中,4人在术后流失,最终TKA组21例(男9例,女12例),UKA组15例(男5例,女10例),受

试者基本信息组间差异无统计学意义(见表 1)。纳入标准:① 手术时年龄在 75 岁以下;② 无心脑血管、呼吸系统等疾病;③ 无既往下肢骨折或关节置换术史;④ 单侧膝关节 KOA 患者;⑤ 能独立完成楼梯行走。所有受试者均了解实验流程及潜在风险,并签署知情同意书。

表 1 受试者基本信息

Tab. 1 Basic information of the subjects

参数	TKA 组 (n=21)	UKA 组 (n=15)	P
年龄/岁	64.47±3.26	63.86±4.79	0.126
身高/m	1.65±0.09	1.68±0.08	0.403
体质量/kg	76.46±15.14	81.02±14.03	0.239
BMI/(kg·m <sup>-2</sup> )	28.14±5.26	29.35±4.16	0.290

## 1.2 仪器设备

同步采集 KOA 患者楼梯行走时的运动学与动力学数据;采用 Vicon Nexus 2.5 红外动作捕捉系统(Vicon 公司,英国)配合 Kistler-9287 三维测力台(Kistler 公司,瑞士)同步采集 KOA 患者楼梯行走时的运动学和动力学数据,采集频率分别设为 240、1 000 Hz;采用含 5 级台阶的模拟楼梯进行楼梯行走实验,每级台阶宽 200 cm×高 17 cm×深 29 cm, Kistler 三维测力台置于第 3 级台阶内并与第 3 级台阶平面平齐。

## 1.3 测试流程

受试者着统一的测试服鞋,由工作人员按照 Vicon 模型将 39 个标志点粘贴于人体骨性标志点上。受试者进行 3~5 min 热身,分别以自适应步速分别进行上、下楼梯测试,每次测试间隔 5 min,每名受试者保留 5 次有效测试数据,术后 6、12 个月的测试流程与术前要求一致。

## 1.4 观察指标

选取上(下)楼梯的步态周期为受试者患侧脚在第 3(3)级台阶着地开始,至同侧脚在第 4(2)级台阶着地结束。运动学指标通过 Vicon 红外动作捕捉系统采集,动力学指标利用测力台测得的数据结合运动学数据通过逆向动力学公式计算得到<sup>[13]</sup>。将膝关节绕冠状轴和矢状轴进行屈伸和内收的力矩定义为膝关节屈伸力矩和内收力矩<sup>[14]</sup>。力矩峰值负载率为力矩曲线中到达第 1 峰值时的最大瞬时斜率<sup>[9]</sup>,力矩冲量为步态周期中力矩在时间的积

分<sup>[15]</sup>,关节功率为关节力矩与关节角速度的乘积<sup>[16]</sup>。观察术后 3 个时间点受试者楼梯行走时的相关生物力学特征变化。

## 1.5 统计分析

使用 SPSS 22.0 软件进行统计分析。术前对两组 KOA 患者的基本信息进行独立样本 *t* 检验,以确定组间基本特征的差异性。采用 Shapiro-Wilk 检验进行数据的正态性检验。若数据不符合正态分布,采用非参数检验;若数据符合正态分布,则采用参数检验。采用双因素重复(组别×时间)测量方差分析对组别效应(TKA 组和 UKA 组)、时间效应(不同的时间点),以及两者的交互效应对相关生物力学指标进行检验。在分析时,采用 Manuchly 球形度检验,当  $P < 0.05$  时采用 Greenhouse-Geisser 法进行校正。采用偏  $\eta^2$  衡量效应量,效应量的区分临界点分别为 0.02(小)、0.13(中)、0.26(大)<sup>[17]</sup>。显著性水平  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果

在上楼梯过程中,膝内收力矩峰值( $\eta^2 = 0.314$ ,  $P = 0.000$ )、到达膝内收力矩峰值时间( $\eta^2 = 0.322$ ,  $P = 0.000$ )、膝内收力矩冲量( $\eta^2 = 0.354$ ,  $P = 0.366$ )、膝屈曲角度峰值( $\eta^2 = 0.006$ ,  $P = 0.013$ )、到达膝屈曲力矩峰值时间( $\eta^2 = 0.214$ ,  $P = 0.002$ )、vGRF 峰值( $\eta^2 = 0.128$ ,  $P = 0.053$ )时间主效应显著;膝内收力矩峰值负载率( $\eta^2 = 0.129$ ,  $P = 0.012$ )、膝内收力矩冲量( $\eta^2 = 0.113$ ,  $P = 0.043$ )、膝屈曲角度峰值( $\eta^2 = 0.0107$ ,  $P = 0.025$ )、膝屈曲力矩峰值( $\eta^2 = 0.149$ ,  $P = 0.004$ )、膝屈曲力矩冲量( $\eta^2 = 0.091$ ,  $P = 0.054$ )组别主效应显著。

各时间点组间两两比较显示,在上楼梯过程中,对于膝屈曲力矩峰值,TKA 组受试者术前显著低于 UKA 组( $\eta^2 = 0.199$ ,  $P = 0.007$ ),术后 6 个月和 12 个月差异性不显著( $P > 0.05$ );对于到达膝屈曲力矩峰值时间,组间在术前和术后 12 个月未见显著性差异( $P > 0.05$ ),但在术后 6 个月,TKA 组显著小于 UKA 组( $\eta^2 = 0.156$ ,  $P = 0.018$ );对于膝屈曲力矩冲量,组间在术前和术后 12 个月未见显著性差异( $P > 0.05$ ),但在术后 6 个月,TKA 组显著小于 UKA 组( $\eta^2 = 0.147$ ,  $P = 0.027$ );对于到达膝内收力矩峰值时间,组间在术前和术后 12 个

月未见显著性差异 ( $P>0.05$ ),但在术后 6 个月, 12 个月未见显著性差异 ( $P>0.05$ ),但在术后 6 个月,TKA 组显著小于 UKA 组 ( $\eta^2=0.149, P=0.025$ ); 对于膝内收力矩峰值负载率,组间在术前和术后 0.041),见表 2 和图 1。

表 2 TKA 组与 UKA 组术前、术后 6 个月及 12 个月上楼生物力学特征变化

Tab.2 Changes in biomechanical characteristics of TKA and UKA groups during stair ascent before surgery, and at 6<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> month after surgery

参数	术前		术后 6 个月		术后 12 个月	
	TKA 组	UKA 组	TKA 组	UKA 组	TKA 组	UKA 组
支撑时间/s	1.21±0.22	1.25±0.31	0.94±0.16	1.08±0.13	0.97±0.16	0.91±0.11
膝内收角度峰值/(°)	9.78±9.11	11.59±4.24	5.37±4.77	6.24±4.75	5.73±4.22	8.58±4.99
膝内收力矩峰值/[ (N·m)·kg <sup>-1</sup> ]	0.45±0.23	0.58±0.17	0.39±0.13	0.33±0.17	0.37±0.15	0.39±0.11
到达膝内收力矩峰值时间/s	0.71±0.28	0.76±0.23	0.48±0.16	0.63±0.14*	0.54±0.21	0.58±0.18
膝内收力矩峰值负载率/[ (N·m)·(kg·s) <sup>-1</sup> ]	0.72±0.1	0.89±0.34	0.95±0.49	0.61±0.33*	0.82±0.41	0.74±0.28
膝内收力矩冲量/[ (N·m·s)·kg <sup>-1</sup> ]	0.22±0.17	0.37±0.13	0.18±0.09	0.15±0.12	0.17±0.10	0.17±0.09
膝屈曲角度峰值/(°)	71.14±5.11	68.52±4.83	65.75±5.97	70.53±8.09	67.82±4.93	71.99±6.87
膝屈曲力矩峰值/[ (N·m)·kg <sup>-1</sup> ]	0.56±0.20	0.83±0.23*	0.57±0.18	0.69±0.17	0.68±0.21	0.66±0.14
到达膝屈曲力矩峰值时间/s	0.35±0.22	0.35±0.18	0.20±0.06	0.27±0.06*	0.23±0.09	0.21±0.05
膝屈曲力矩峰值负载率/[ (N·m)·(kg·s) <sup>-1</sup> ]	3.65±5.30	2.84±1.30	3.28±1.57	2.90±1.01	3.38±1.64	3.14±1.10
膝屈曲力矩冲量/[ (N·m)·kg <sup>-1</sup> ]	0.22±0.18	0.33±0.23	0.15±0.11	0.25±0.11*	0.21±0.11	0.17±0.09
vGRF 峰值/(N·kg <sup>-1</sup> )	1.07±0.05	1.03±0.03	1.10±0.05	1.10±0.06	1.07±0.06	1.13±0.07
vGRF 峰值时间/s	0.35±0.12	0.32±0.18	0.31±0.11	0.26±0.09	0.29±0.08	0.22±0.07
vGRF 负载率/[ (N·s)·kg <sup>-1</sup> ]	6.05±3.08	8.32±4.58*	5.53±3.13	7.74±4.17	6.53±4.26	9.41±5.33
向心伸膝功率峰值/(W·kg <sup>-1</sup> )	1.44±0.53	1.88±0.57	1.46±0.52	1.71±0.49	1.70±0.55	1.70±0.45

注: \*表示 UKA 组与 TKA 组比较,  $P<0.05$ 。

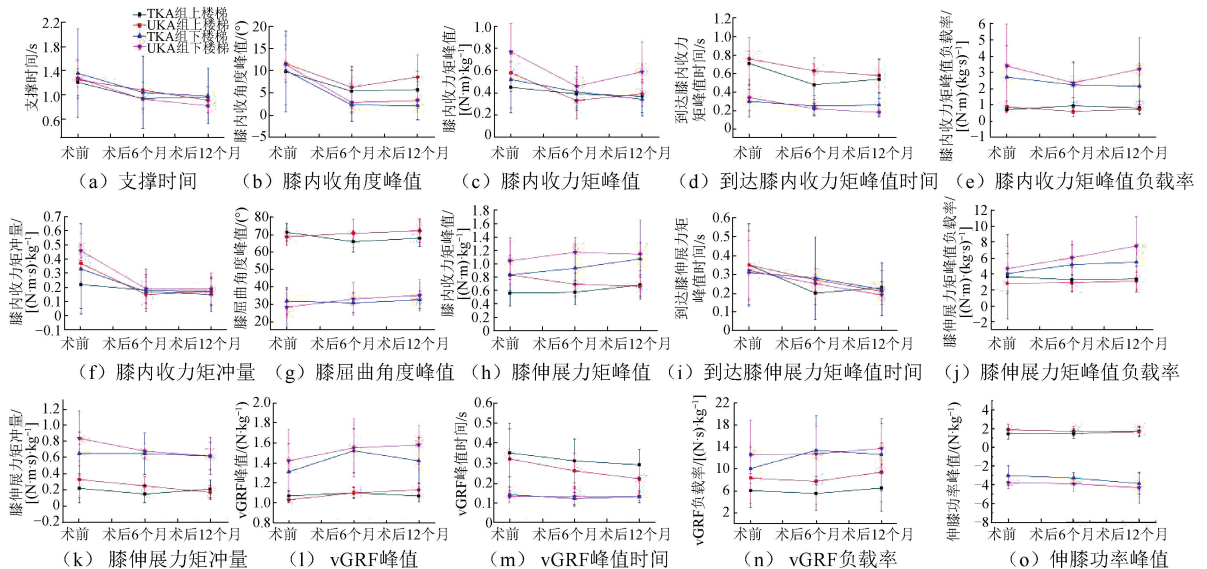


图 1 TKA 组与 UKA 组术前、术后 6 个月及 12 个月上楼行走生物力学特征变化

Fig.1 Changes in biomechanical characteristics of TKA and UKA groups during stair walking before surgery, and at 6<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> month after surgery (a) Support time, (b) Peak knee adduction angle, (c) Peak knee adduction moment, (d) Time to peak knee adduction moment, (e) Load rate of peak knee adduction moment, (f) Knee adduction moment impulse, (g) Peak knee flexion angle, (h) Peak knee flexion moment, (i) Time to peak knee flexion moment, (j) Load rate of peak knee flexion moment, (k) Knee flexion moment impulse, (l) Peak vGRF, (m) Time to peak vGRF, (n) Load rate of vGRF, (o) Peak knee extension power



在下楼梯过程中,支撑时间( $\eta^2 = 0.412, P = 0.000$ )、膝内收角度峰值( $\eta^2 = 0.594, P = 0.000$ )、膝内收力矩峰值( $\eta^2 = 0.351, P = 0.000$ )、到达膝内收力矩峰值时间( $\eta^2 = 0.175, P = 0.012$ )、膝内收力矩冲量( $\eta^2 = 0.442, P = 0.000$ )、膝屈曲角度峰值( $\eta^2 = 0.185, P = 0.002$ )、膝伸展力矩峰值( $\eta^2 = 0.120, P = 0.022$ )、到达膝伸展力矩峰值时间( $\eta^2 = 0.146, P = 0.029$ )、膝伸展力矩峰值负载率( $\eta^2 = 0.210, P = 0.002$ )、膝伸展力矩冲量( $\eta^2 = 0.175, P = 0.013$ )、vGRF 峰值( $\eta^2 = 0.214, P = 0.007$ )、vGRF 峰值负载率( $\eta^2 = 0.174, P = 0.019$ )、伸膝功率峰值( $\eta^2 = 0.159, P = 0.014$ )时间主效应显著;膝屈曲角

度峰值( $\eta^2 = 0.107, P = 0.032$ )组别主效应显著。

各时间点组间两两比较显示,在下楼梯过程中,对于膝伸展力矩峰值,相比于 TKA 组,UKA 组在术前和术后 12 个月未见显著性差异( $P > 0.05$ ),但在术后 6 个月显著增加( $\eta^2 = 0.154, P = 0.026$ );对于伸膝功率峰值,相比于 TKA 组,UKA 组在术前( $\eta^2 = 0.141, P = 0.039$ )和术后 6 个月( $\eta^2 = 0.155, P = 0.030$ )显著降低,但在术后 12 个月差异不明显( $P > 0.05$ );对于 vGRF 峰值负载率,相比于 TKA 组,UKA 组在术前显著较大( $\eta^2 = 0.145, P = 0.039$ ),但在术后 6 个月和 12 个月差异性不显著( $P > 0.05$ ),见表 3 和图 1。

表 3 TKA 组与 UKA 组术前、术后 6 个月及 12 个月下楼梯的生物力学特征变化

Tab. 3 Changes in biomechanical characteristics of TKA and UKA groups during stair decent before surgery, and at 6<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> month after surgery

参数	术前		术后 6 个月		术后 12 个月	
	TKA 组	UKA 组	TKA 组	UKA 组	TKA 组	UKA 组
支撑时间/s	1.36±0.73	1.28±0.31	1.04±0.60	0.93±0.17	0.98±0.46	0.82±0.12
膝内收角度峰值/(°)	10.05±7.78	11.38±3.37	2.24±3.73	2.81±2.49	2.11±3.20	3.27±4.32
膝内收力矩峰值/[ (N·m)·kg <sup>-1</sup> ]	0.52±0.26	0.77±0.26	0.41±0.17	0.46±0.18	0.34±0.15	0.59±0.27
到达膝内收力矩峰值时间/s	0.30±0.17	0.34±0.14	0.25±0.11	0.22±0.06	0.26±0.13	0.18±0.03
膝内收力矩峰值负载率/[ (N·m)·(kg·s) <sup>-1</sup> ]	2.71±1.93	3.39±2.59	2.24±1.41	2.36±1.22	2.15±1.24	3.20±1.94
膝内收力矩冲量/[ (N·m·s)·kg <sup>-1</sup> ]	0.33±0.32	0.46±0.12	0.17±0.12	0.19±0.14	0.15±0.12	0.19±0.11
膝屈曲角度峰值/(°)	31.94±7.60	28.35±10.03	30.84±5.62	33.09±9.22	32.60±5.11	35.14±8.99
膝伸展力矩峰值/[ (N·m)·kg <sup>-1</sup> ]	0.83±0.29	1.04±0.35	0.93±0.24	1.17±0.22*	1.07±0.24	1.14±0.51
到达膝伸展力矩峰值时间/s	0.31±0.17	0.32±0.16	0.28±0.22	0.25±0.08	0.22±0.14	0.19±0.05
膝伸展力矩峰值负载率/[ (N·m)·(kg·s) <sup>-1</sup> ]	4.05±2.52	4.66±2.79	5.17±2.46	6.03±2.09	5.49±2.07	7.50±3.72
膝伸展力矩冲量/[ (N·m·s)·kg <sup>-1</sup> ]	0.65±0.27	0.84±0.34	0.65±0.26	0.68±0.09	0.62±0.17	0.62±0.23
vGRF 峰值/(N·kg <sup>-1</sup> )	1.31±0.28	1.42±0.31	1.52±0.22	1.55±0.29	1.42±0.23	1.58±0.19
vGRF 峰值时间/s	0.14±0.04	0.13±0.03	0.12±0.03	0.13±0.05	0.13±0.03	0.13±0.02
vGRF 负载率/[ (N·s)·kg <sup>-1</sup> ]	10.07±3.89	12.54±6.23*	13.37±6.26	12.72±5.03	12.62±6.55	13.70±4.61
离心伸膝功率峰值/(W·kg <sup>-1</sup> )	-3.01±1.05	-3.77±0.62*	-3.28±0.57	-3.89±0.82*	-3.87±1.13	-4.32±1.65

注: \* 表示 UKA 组与 TKA 组比较,  $P < 0.05$ 。

### 3 讨论

#### 3.1 TKA 与 UKA 后上楼梯生物力学特征变化

在上楼梯过程中,TKA 组和 UKA 组受试者在矢状面上的生物力学特征发生变化。在同一时间点内,TKA 组各项生物力学指标一般都略低于 UKA 组,尤其是膝屈曲力矩峰值和 vGRF 峰值负载率,但在术后 6、12 个月两个时间点差异性消除。TKA 组在术后 6 个月表现出较低的膝屈曲力矩冲量和膝内收力矩峰值负载率,但在术前和术后 12 个月

差异性不明显。该结果表明,与 UKA 组相比,TKA 组在术后 6 个月内持续采取保守的楼梯步态策略,以降低膝关节负荷。膝关节内收力矩是反映胫骨平台负荷分布的主要预测因子<sup>[18]</sup>。在上楼梯过程中,3 个时间点内支撑时间并未出现显著性差异,TKA 组到达膝屈曲、内收力矩峰值的时间较短。本文认为,TKA 组在术后 6 个月内持续采取一种保守的楼梯步态策略,而且力矩表现出的差异性是受力矩峰值负载率的影响。该结果在 Kito 等<sup>[15]</sup>研究中也得到了证实:TKA 组在术后持续采取减轻膝关节

疼痛的步态模式。本文发现,膝屈曲、内收力矩峰值虽未见显著性差异,但到达膝屈曲、内收力矩峰值的时间较短。研究表明,相比于力矩峰值,到达力矩峰值的时间及力矩峰值负载率是发现差异性更灵敏的指标<sup>[10]</sup>。Morgenroth 等<sup>[9]</sup>研究发现,膝关节峰值负载率与膝关节负荷呈现显著的相关性,在矢状面和冠状面力矩峰值出现的时间越长,越利于降低膝关节负荷。本文发现,TKA 组在术后 6 个月表现出更高的膝内收力矩峰值负载率;然而在术前和术后 12 个月,膝内收力矩负载率的差异性并不明显。由此推测,TKA 组比 UKA 组到达峰值时刻所需的时间更短,即 TKA 组的膝关节负荷更大。本文还发现,与 UKA 组相比,TKA 组在术后 6、12 个月表现出较小的膝屈曲角度峰值,但在术前略大于 UKA 组,这可能不是股四头肌神经肌肉控制能力不足的结果,而是受到楼梯空间的限制,因为楼梯行走需要更大的膝屈曲角度<sup>[7]</sup>。另外,与 UKA 相比,TKA 的创伤性更大,这可能也是导致 TKA 组膝屈曲角度峰值减小的原因。虽然两种不同的术式改变股四头肌神经肌肉控制能力的内在机制尚不清楚,但 UKA 已表现出明显的临床优势<sup>[19]</sup>。尽管在术前和术后 6 个月有着部分生物力学特征的差异性,但在术后 12 个月,上楼梯的生物力学特征并不明显。

### 3.2 TKA 与 UKA 后下楼梯生物力学特征变化

在下楼梯过程中,TKA 组和 UKA 组在矢状面的生物力学特征几乎没有差异性。Reeves 等<sup>[20]</sup>研究显示,下肢关节的力学表现能有效反映受试者楼梯行走的姿势控制能力。与水平行走相比,楼梯行走需要更大的下肢关节力矩,且在矢状面上力矩增加最大的关节为膝关节,即膝关节在楼梯行走过程中提供了主要的动力输出<sup>[21]</sup>。与 UKA 组相比,TKA 组术后 6 个月膝伸展力矩峰值显著降低,在 3 个时间点组间的膝伸展力矩峰值负载率并未出现显著性差异,但术后 12 个月膝伸展力矩峰值检测到中小型效应。虽然没有统计学意义,但表明 TKA 受试者可能在术后 12 个月内的膝伸展力矩峰值负载率较低。Kline 等<sup>[22]</sup>研究认为,较低的膝伸展力矩负载率是保守步态的重要表现,更高的膝伸展力矩峰值负载率表明股四头肌的神经肌肉控制能力更强。因此,本文认为,仅靠膝伸展力矩峰值可能无法充分说明股四头肌的神经肌肉控制能力。

Lukoschek 等<sup>[23]</sup>研究表明,负载率与关节损伤高度相关,即使关节负荷在正常范围内,较大的关节负载率也会导致关节损伤。UKA 组在术前表现出更高的 vGRF 负载率和离心伸膝功率峰值,但 vGRF 峰值并未出现差异性。该结果表明,TKA 组可能采取不同于 UKA 组的下肢生物力学模式,以避免下肢负荷的增加。此外,关节功率作为评估下肢能量转换的主要指标,能够反映人体应对外界环境的能力<sup>[24]</sup>。本文发现,UKA 组在术后 6 个月内保持了更大的离心伸膝肌功率峰值,但两组在术后 12 个月差异性不明显。更大的离心伸膝功率峰值是完成楼梯行走的动作的保证。本文结果进一步证明 UKA 组比 TKA 组更早恢复膝关节功能,这与 UKA 表现出的临床优势相一致<sup>[25]</sup>。膝关节负荷对 KOA 的发展起着重要的作用<sup>[5]</sup>。由于在水平行走时,膝关节内侧接触力明显大于外侧接触力,故内侧间室比外侧间室更容易受到影响<sup>[18]</sup>。膝关节接触力很大程度上取决于膝关节冠状面力矩,膝内收力矩是反映水平行走过程中膝关节内侧负荷的有效指标,也是反映 KOA 病情进展的关键指标<sup>[26]</sup>。本文发现,在冠状面上,虽然所有受试者在术后的膝内收力矩峰值总体上都出现下降,但 UKA 组在所有时间点的膝内收力矩峰值、负载率及冲量都略大于 TKA 组的总体水平,这可能是 UKA 患者需要进行单一内侧间室置换的原因。因此,UKA 组膝关节内侧负荷水平可能更高。

## 4 结论

TKA 组和 UKA 组在手术后表现出相似的膝关节功能,但 TKA 组可能采取不同于 UKA 组的下肢生物力学模式。在楼梯行走时,UKA 组采取增加膝屈伸力矩峰值负载率及伸膝功率的策略,提高楼梯行走尤其是下楼梯的姿势控制能力;而 TKA 组则采取保守的楼梯步态策略,通过降低膝屈伸力矩峰值、冲量及膝内收力矩峰值负载率,降低楼梯行走的膝关节负荷。UKA 组通过更高的膝屈伸力矩峰值负载率表现出更好的股四头肌控制能力。虽然两组受试者在术后通过降低膝内收力矩峰值降低膝关节负荷,但 UKA 组术后在下楼梯时表现出更高的内侧膝关节负荷,推测与 UKA 组进行单一内侧间室置换有关。另外,相比于力矩峰值,到达力矩峰

值的时间及力矩峰值负载率是发现膝关节负荷差异性更灵敏的指标,建议采用更灵敏的到达力矩峰值的时间及力矩峰值负载率指标评价膝关节负荷。

**利益冲突声明:** 无。

**作者贡献声明:** 曹传宝负责实验实施、数据处理、论文写作;史东林负责实验设计;柴光伟、王鑫、张艳红、闫士芳负责实验实施、数据处理;马刚负责实验设计、论文修改。

## 参考文献:

- [ 1 ] LIU L, GUAN QZ, WANG LF. Rehabilitation care for pain in elderly knee replacement patients [ J ]. *World J Clin Cases*, 2024, 12(4): 721-728.
- [ 2 ] BONANO JC, BARRETT AA, AMANATULLAH DF. Medial unicompartmental knee arthroplasty with a mobile-bearing implant [ J ]. *JBJS Essent Surg Tech*, 2021, 11(2): 1-9.
- [ 3 ] LI Y, KAKAR RS, FU YC, *et al*. Knee strength, power and stair performance of the elderly 5 years after unicompartmental knee arthroplasty [ J ]. *Eur J Orthop Surg Tr*, 2018, 28(7): 1411-1416.
- [ 4 ] YOSHIDA Y, ZENI J, SNYDER L. Do patients achieve normal gait patterns 3 years after total knee arthroplasty? [ J ]. *J Orthop Sport Phys*, 2012, 42(12): 1039-1049.
- [ 5 ] VANWANSEEELE B, ECKSTEIN F, SMITH RM, *et al*. The relationship between knee adduction moment and cartilage and meniscus morphology in women with osteoarthritis [ J ]. *Osteoarthr Cartilage*, 2010, 18(7): 894-901.
- [ 6 ] ZHAO D, BANKS SA, MITCHELL KH, *et al*. Correlation between the knee adduction torque and medial contact force for a variety of gait patterns [ J ]. *J Orthop Res*, 2007, 25(6): 789-797.
- [ 7 ] BONNIE S, JOHN DM, DAVID JJ, *et al*. Comparison of knee kinematics and kinetics during stair ascent in single-radius and multiradius total knee arthroplasty [ J ]. *J Knee Surg*, 2018, 32(9): 872-878.
- [ 8 ] MORNIEUX G, GEHRING D, GOLLHOFER A. Is there a sex difference in trunk neuromuscular control among recreational athletes during cutting maneuvers? [ J ]. *J Sports Sci Med*, 2021, 20(4): 743-750.
- [ 9 ] MORGENROTH DC, MEDVERD JR, SEYEDALI M, *et al*. The relationship between knee joint loading rate during walking and degenerative changes on magnetic resonance imaging [ J ]. *Clin Biomech*, 2014, 29(6): 664-670.
- [ 10 ] CREABY MW, WANG Y, BENNELL KL, *et al*. Dynamic knee loading is related to cartilage defects and tibial plateau bone area in medial knee osteoarthritis [ J ]. *Osteoarthr Cartilage*, 2010, 18(11): 1380-1385.
- [ 11 ] ZHANG J, LIU Z, LIU Y, *et al*. Exercise interventions for older people at risk for frailty: A protocol for systematic review and meta-analysis [ J ]. *Medicine*, 2021, 100(20): e25940.
- [ 12 ] KYUNG N, JIN S, KONG BS, *et al*. Gait comparison of unicompartmental knee arthroplasty and total knee arthroplasty during level walking [ J ]. *PLoS One*, 2018, 13(8): 203-210.
- [ 13 ] ASAI T, MISU S, DOI T, *et al*. Effects of dual-tasking on control of trunk movement during gait: Respective effect of manual- and cognitive-task [ J ]. *Gait Posture*, 2014, 39(1): 54-59.
- [ 14 ] VALLABHAJOSULA S, TAN CW, MUKHERJEE M, *et al*. Biomechanical analyses of stair-climbing while dual-tasking [ J ]. *J Biomech*, 2015, 48(6): 921-929.
- [ 15 ] KITO N, SHINKODA K, YAMASAKI T, *et al*. Contribution of knee adduction moment impulse to pain and disability in Japanese women with medial knee osteoarthritis [ J ]. *Clin Biomech*, 2010, 25(9): 914-919.
- [ 16 ] JIN L, HAHN ME. Modulation of lower extremity joint stiffness, work and power at different walking and running speeds [ J ]. *Hum Mov Sci*, 2018, 58(10): 1-9.
- [ 17 ] FRITZ CO, MORRIS PE, RICHLER JJ. Effect size estimates: Current use, calculations, and interpretation [ J ]. *J Exp Psychol Gen*, 2012, 141(1): 2-18.
- [ 18 ] SCHIPPLEIN OD, ANDRIACCHI TP. Interaction between active and passive knee stabilizers during level walking [ J ]. *J Orthop Res*, 2010, 9(1): 113-119.
- [ 19 ] HARBOURNE AD, SANTOS MT, ARDEN NK, *et al*. Predictors of return to desired activity 12 months following unicompartmental and total knee arthroplasty [ J ]. *Acta Orthopaedica*, 2018, 90(1): 74-80.
- [ 20 ] REEVES ND, SPANJAARD M, MOHAGHEGHI AA, *et al*. Older adults employ alternative strategies to operate within their maximum capabilities when ascending stairs [ J ]. *J Electromyogr Kines*, 2009, 19(2): 57-68.
- [ 21 ] MCFADYEN BJ, WINTER DA. An integrated biomechanical analysis of normal stair ascent and descent [ J ]. *J Biomech*, 1988, 21(9): 733-744.
- [ 22 ] KLINE PW, JACOBS CA, DUNCAN ST, *et al*. Rate of torque development is the primary contributor to quadriceps avoidance gait following total knee arthroplasty [ J ]. *Gait Posture*, 2019, 68(1): 397-402.
- [ 23 ] LUKOSCHEK M, SCHAFFLER MB, BURR DB, *et al*. Synovial membrane and cartilage changes in experimental osteoarthritis [ J ]. *J Orthop Res*, 1988, 6(4): 475-492.
- [ 24 ] LIEW BX, MORRIS S, NETTO K. Joint power and kinematics coordination in load carriage running: Implications for performance and injury [ J ]. *Gait posture*, 2016, 47(10): 74-79.
- [ 25 ] RODRÍGUEZ EC, GÓMEZ P. Unicompartmental knee arthroplasty: Current indications, technical issues and results [ J ]. *EFORT Open Rev*, 2018, 3(6): 363-373.
- [ 26 ] KANG SH, LEE SJ, PRESS JM, *et al*. Real-time three-dimensional knee moment estimation in knee osteoarthritis: Toward biodynamic knee osteoarthritis evaluation and training [ J ]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2019, 27(6): 1263-1272.