

7、TGF-β1、bFGF 水平与骨折愈合的关系[J]. 中国伤残医学, 2020, 28(8):8-10.

CHEN Y, YUAN T Z, CHEN S. Relationship between serum OPG, RANKL, PDGFs, BMP-2, BMP-7, TGF-β1 and bFGF levels and fracture healing[J]. Chin J Trauma Disabil Med, 2020, 28(8):8-10. Chinese.

[20] 曹洪国, 刘跃华, 陈岩. 接骨续筋胶囊联合复方骨肽注射液治

疗四肢骨折的临床研究[J]. 现代药物与临床, 2019, 34(11): 3347-3351.

CAO H G, LIU Y H, CHEN Y. Clinical study on Jiegu Xujin Capsules combined with Compound Ossotide Injection in treatment of limbs fracture [J]. Drugs Clin, 2019, 34(11):3347-3351. Chinese.

(收稿日期:2022-08-20 本文编辑:王玉蔓)

·综述·

功能学对线机器人辅助膝关节置换术研究进展

杨永泽, 程晴灏, 张安任, 邱怡, 郭洪章
(甘肃省人民医院骨科四病区, 甘肃 兰州 730000)

【摘要】 膝关节的正确对线被认为是决定全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)后长期预后的最具影响的因素之一,为了达到正确的对准目标,已经建立了许多不同的对准理念和外科技术,如机械对线(mechanical alignment, MA)、运动学对线(kinematic alignment, KA)和功能学对线(functional alignment, FA)3种对线技术各有特点,MA注重实现肢体的中性对齐,伸展和屈曲时平行且相等的骨间隙;KA以恢复患者的天然关节线为目标,使关节水平和角度正常并使生理性软组织平衡得到改善,努力重现接近正常的膝关节功能;其中随着机器人辅助手术技术而发展起来的功能学对线FA,功能学对线是一种相对较新的对齐理念,它不仅考虑到机体的下肢生理对齐,而且还旨在实现屈伸平衡,同时尊重原生软组织包膜。既做到了术中精确的恢复原位关节线的平面和斜度,又兼顾了软组织平衡,是一种更佳的对线方式。因此,正确构建患者下肢力线,有助于恢复膝关节功能、缓解疼痛症状和延长假体使用寿命具有十分重要的意义。但与传统TKA相比,机器人辅助FA-TKA手术时间延长,这意味着术后感染发生概率可能性会更大,并且目前大多数研究报道的FA技术都是短期结果,对患者远期疗效尚不清楚,因此,需要长期的研究结果来支持这项技术的应用。

【关键词】 功能学对线; 机器人辅助; 全膝关节置换术
中图分类号:R687.42

DOI:10.12200/j.issn.1003-0034.2023.11.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress of functional alignment robot assisted knee replacement

YANG Yong-ze, CHENG Qing-hao, ZHANG An-ren, QIU Yi, GUO Hong-zhang(Orthopedic Ward Four, Gansu Provincial People's Hospital, Lanzhou 730000, Gansu, China)

ABSTRACT The correct alignment of the knee joint is considered to be one of the most influential factors in determining the long-term prognosis after total knee arthroplasty (TKA). In order to achieve the correct alignment goal, many different alignment concepts and surgical techniques have been established. For example, mechanical alignment (MA), kinematic alignment (KA) and functional alignment (FA) have their own characteristics. MA focuses on achieving neutral alignment of the limbs, parallel and equal bone gaps during stretching and flexion. KA aims to restore the patient's natural joint line, make the joint level and angle normal and improve the physiological soft tissue balance, and strive to reproduce the normal knee function; among them, functional alignment (FA) developed with robot-assisted surgery technology is a relatively new alignment concept. It not only considers the alignment of the body, but also aims to achieve flexion and extension balance, while respecting the native soft tissue capsule. It not only restores the plane and slope of the in situ joint line accurately during the operation, but also takes into account the balance of soft tissue, which is a better alignment method. Therefore, it is of great significance to correct-

基金项目:甘肃省自然科学基金(编号:20JR10RA358)

Fund program:Gansu Provincial Natural Science Foundation of China(No. 20JR10RA358)

通讯作者:郭洪章 E-mail:g_hz@163.com

Corresponding author:GUO Hong-zhang E-mail:g_hz@163.com

ly construct the lower limb force line of patients, which is helpful to restore knee joint function, relieve pain symptoms and prolong the service life of prosthesis. However, compared with traditional TKA, the operation time of robot-assisted FA-TKA is prolonged, which means that the probability of postoperative infection will be greater. At present, most studies of FA technology report short-term results, and the long-term efficacy of patients is not clear. Therefore, long-term research results are needed to support the application of this technology. Therefore, the author makes a review on the research status of functional alignment.

KEYWORDS Functional alignment; Robotic surgical procedures; Arthroplasty, replacement, knee

随着生活水平提高,人口老龄化和寿命增加,膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)的患者逐年增加^[1-2],全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)作为治疗晚期 KOA 的有效方法,需求也在逐年增加,TKA 能够在很大程度上缓解患者的疼痛,改善患者的生存质量。且近年来,机器人辅助膝关节置换术(robot-assisted total knee arthroplasty, RA-TKA)在膝关节置换手术治疗上取得成效,有证据表明 RA-TKA 在术后早期能够更有效减轻关节疼痛,改善及恢复患者运动机能,有望成为治疗 KOA 的一种更佳手术方式^[3-4]。并且下肢对线是全膝关节置换术后患者满意度、临床功能结局、植入物稳定性和长期植入物存活率的重要影响因素^[3]。应用更符合生物力学的下肢对线方式,有助于屈伸间隙平衡、适当的韧带张力和关节周围软组织包膜的保留。因此,临床上需要更佳的力线对齐技术,以提高术后关节功能水平,这也是关节置换领域的工作重点。其中由机器人技术而发展起来的功能学对线^[5-7],FA 做到了术中精确重建原生冠状排列、在中立 5°以内恢复动态矢状位排列、维持关节线倾斜度和高度、种植体尺寸以匹配解剖结构以及通过操纵种植体定位而不是软组织释放来平衡屈曲和伸展的关节,兼顾了软组织平衡实现平衡的内侧软组织张力,从而获得良好的下肢对线,是一种新颖的膝关节置换术对线技^[8-12]。

1 膝关节置换术功能学对线的概念

在过去的十几年中,使用哪种下肢对线方式技术进行全膝关节置换术变得更加严谨。机械对线(mechanical alignment, MA)和运动学对线(kinematic alignment, KA)的 TKA 患者术后满意度不足促使一种新的对准理念发展,即功能学对线(functional alignment, FA)^[5]。FA 是一种计算机辅助手术(computer assisted surgery, CAS)技术,包括导航或机器人,其中 RA-TKA 是 CAS 的延伸,它使用机械臂和计算机导航技术来执行全膝关节置换术,这些系统具有在一定范围内动态评估软组织的能力,同时兼有在骨切除中使用触觉控制的能力^[13]。从概念上讲,具有 FA 的全膝关节置换术旨在通过操纵骨切除和微调植入物定位来恢复关节线高度,保持自然倾斜度,并实现平衡的屈伸间隙和相等的内侧软组织张力,使患者在最小软组织损伤的情况下获得最“正

常”的膝关节运动学^[14]。FA 是对具有运动对齐方式的 TKA 的改进,该技术保持患者特定的对齐方式和膝关节运动学,同时可以降低 KA 中的腓总神经麻痹的风险,并在早期临床和功能结果研究报告了具有功能学对线的 TKA 的良好结果^[15-17]。

2 FA、MA 和 KA 对线的分析

2.1 机械对线的特点

不管是何种力线技术,其目的是为种植体构建一个合适人体生物力学的对线,以获得胫骨间室之间的平衡负载分布,防止加速聚乙烯磨损和早期种植体松动,构建一个稳定的、有功能的膝关节,获得良好的术后效果,提高患者的满意度^[18]。

MA 方法来说,机械对齐全膝关节置换术(MA-TKA)的目的是实现肢体的中性对齐:髌-膝-踝角(HKA)为 $(180\pm 3)^\circ$,在伸展和屈曲时平行且相等的骨间隙,以到达将负载均匀地分布在种植体上,以优化种植体存活,并通过膝关节周软组织包膜平衡力,以保证膝关节的正常功能,这为下肢屈曲方面提供了机械优势,并限制了不对称轴承表面磨损等优势^[14,19]。MA 虽然提供了令人满意的种植体存活,但 10%~20%的患者对 TKA 治疗不满意^[20-21],33%~54%的患者报告持续症状或功能问题^[20]。可能归于其没有考虑到自然下肢力线在冠状面的个体差异^[22],因此可能导致严重偏离生理软组织平衡和髌股-股股生物力学^[23-25]。已有研究表明,在人群中只有 5%~5.5%的人具有天然中性机械对准^[23,26],而大多数人不具有天然中性机械对准,HSU 等^[27]研究表明,相当一部分人的下肢力线并不完全处于机械中立位,而是呈膝内翻的状态,普通健康人群中有 32%男性和 17%女性下肢存在 $\geq 3^\circ$ 的膝内翻,并且下肢力线会随着膝关节负重的变化及屈膝程度而发生改变。同时 MA-TKA 为实现平等和平行的间隙对软组织松懈,而不管患者自身的软组织平衡和对齐。因此,绝大多数接受 MA-TKA 的患者将迫使膝关节进入一个非自然的力线,从而导致膝关节生物力学发生变化,只能简单地模拟膝关节运动模式^[23-24],并不能完全恢复膝关节的正常运动状态^[28]。

2.2 运动学对线的特点

因 MA-TKA 的一系列术后存在的问题,HOWELL 等^[29]报道了一种新的方法,即 KA,KA 与 MA 方

法不同,KA 方法旨在通过定制的股骨和胫骨组件以恢复患者的天然关节线,理论上不受患者发病前的力线状态的限制。该方法恢复发病前的关节水平和角度并且使生理性软组织平衡得到改善,努力重现接近正常的膝关节功能,从而改善患者的步态、膝关节感觉和运动范围,获得更好的临床预后^[30-32]。KA 对不同的患者手术最终的目标是不同的,因此它被认为是一种个性化的、个体化的或针对患者的方法。因此 KA 受到了广泛关注,许多骨科医生报告了应用此法取得良好的短期和中期临床结果。一些研究报告,运动学对齐方法比机械对齐方法更接近正常的膝关节运动学,患者感觉这种运动是自然的^[17,30]。一项随机对照研究表明^[33],与机械对齐 TKA 相比,运动学对齐 TKA 可获得更好的屈曲和更高的临床结果评分。然而 KA 高接触应力,可能会产生对长期结果的担忧,主要基于计算机建模(而不是临床研究)发现在运动学对线的模型中,股骨和胫骨组件的内部旋转会导致膝关节早期屈曲期间髌骨组件的横向移位和倾斜,这将很大程度上增加了髌骨股骨的接触应力,从而增加了髌骨畸形错位的风险。髌骨畸形错位是导致半脱位并增加聚乙烯磨损的主要问题,而聚乙烯磨损引起假体松动又是导致 TKA 翻修的常见原因。虽然目前没有实验研究表明运动学对线 TKA 与机械轴中立位对线 TKA 在假体生存率上差异并没有统计学意义,但仍需警惕这些潜在的危险因素^[30]。此外,与所有其他对齐方式相比,运动学对齐的 TKAs 具有相似的翻修率^[34],但对 KA 方法的分析突出表明,它忽略了整体的肢体对齐,使患有严重冠状面畸形的受试者面临着与对齐相关的早期失败的风险^[18]。虽然这在最近的组件迁移和负荷分布的研究中没有显示,但这个另一个潜在的危险因素^[5]。

2.3 FA 的特点

对于 MA 寻求严格生物力学对齐的膝关节作为终点和 KA 寻求提供更功能性对齐的膝关节,而 FA 的 TKA 旨在通过操纵骨切除和微调植入物定位来恢复关节线高度,保持自然倾斜度,并实现平衡的屈伸间隙和相等的内侧软组织张力。换句话说,FA 相对于 KA 和 MA 方法的关键区别在于,FA 不仅试图在伸展时在冠状面对膝关节进行重新排列,而且还旨在在屈曲时进行同样的排列,同时还考虑了关节线的整体高度、倾斜度和髌股关节形态,以弥补 KA 对患者冠状位的下肢力线对齐的忽略,避免使患有严重畸形的患者面临与对齐相关的早期失败的风险^[33]。同时 FA 通过 CAS 持续进行术中软组织平衡评估来实现这一目标,以优化种植体位置并避免软

组织释放。此外,FA 允许对植入体对齐或位置上调,以恢复合适的运动学;通过膝关节的运动范围曲线来预测和调整膝关节,可以使软组织保持适当的张力,恢复正常的运动特征,如内侧枢轴。而在术前或术后很难测量屈曲对齐,这就是 CAS 如此重要的原因。

3 FA-RTKA 临床应用现在现状

基于机器人辅助手术精度的提高,机器人辅助功能对齐全膝关节置换术(FA-RTKA)得以恢复关节炎前的原生膝关节生物力学,并通过操纵骨切除和微调植入物定位,以实现平衡的屈伸间隙^[5,35]。最近,CHOI 等^[36]在一项回顾性分析研究中,比较 FA-RTKA 与机械对齐人工全膝关节置换术(MA-TKA)患者植入物位置的准确性和短期临床结果。将 60 例传统 MA-TKA 与 60 例 FA-RTKA 进行比较,结果发现与传统 TKA 相比,FA-RTKA 在疼痛减轻、早期功能恢复和缩短出院时间方面做得更好,并且 FA-RTKA 组,术后 2 年临床结果差异有统计学意义,FA-RTKA 组在胫骨椎体矢状面对齐方面的准确性高于 MA-TKA 组(分别为 1.0 ± 2.3 vs 0.7 ± 1.6 , $P < 0.001$),患者报告的结果和满意度均高于使用手动器械的机械对齐 TKA。在一项回顾性研究中,ZAMBIANCHI 等^[18]以患者的术前后对照评估遵循 FA 原则的 RA-TKA 术中股骨-胫骨关节线对齐情况,并将其与术前股骨和胫骨膝关节表型进行比较。结果显示 115 例 RA-TKA,胫骨内翻 1.8° ($SD=1.3$),而股骨外翻 0.8° ($SD=2.2$)和外旋 0.6° ($SD=2.6$)相对于手术髁间轴。术前胫骨冠状面对齐与胫骨切口朝向($r=0.7$, $P < 0.0001$)、术前股骨冠状面和轴向面朝向与术中股骨切口朝向($r=0.7$, $P < 0.0001$; $r=0.5$, $P < 0.0001$)之间存在中度至强烈的统计学意义相关。另外,一项最新研究中 CHANG 等^[37]在 FA 下进行的 RA-TKA 确定性组件植入后,使用传感器引导技术评估术中软组织平衡,可实现平衡的内外侧软组织张力,术后患者满意度和结果改善。在 CLARK 等^[9]一项前瞻性队列中对 300 例接受十字保留全膝关节置换术的 KOA 患者进行评估机械轴对齐和运动轴对齐方案所能达到的平衡,以及调整元件位置至功能对齐后所能达到的平衡实验,结果显示与 MA 和 KA 对齐相比,功能性对齐在伸展、中间和整体上获得了明显更好的平衡;97% 的 FA 膝关节、73% 的 KA 膝关节和 55% 的 MA 膝关节观察到整体平衡。这可能表明 FA 提供了一个比 MA 或 KA 更平衡的 TKA,而不需要改变膝盖的软组织包膜。

须注意的是虽然现有研究强调了机器人辅助 FA-TKA 的种种优势,但都不是随机对照研究,就目

前研究深度其仍有些许隐患,除了显示早期改善外,与传统 TKA 相比,机器人辅助 FA-TKA 手术时间延长,这意味着术中出血可能性会更多,术后感染发生概率可能性会更大。并且由于 FA 技术目前大多数研究报道的都是短期结果,对患者远期疗效不清楚,因此需要长期的研究结果来支持这项技术的应用。同时目前 RA-TKA 在国内外普及率较低,主要集中在中心城市及医学院校的教学医院使用,远远不能满足广大患者的实际需求。此外,我国尚未将手术机器人的使用及维护费用纳入医保系统中,这将增加医疗成本及患者经济负担。

4 总结与展望

TKA 是一种非常成功和广泛使用的手术,它彻底改变了终末期 KOA 的致残,但是现有的力线对齐技术的患者不满意率接近 20%^[21,38],留下了很大的改善空间和对患者不满意的病因的担忧。而力线对齐技术被认为是决定 TKA 术后长期预后的最具影响的因素之一,它可以减少承载表面以及骨-假体界面上的机械应力和剪切应力;有助于平衡通过软组织包膜传递的力,这对关节的正常功能至关重要。因此,实现更准确地力线对齐是 TKA 的重要目标。相对于机械对准目标可以实现机械-健全的对准而忽略软组织包膜;运动学对齐尊重软组织包膜而忽略机械环境,功能性对齐作为一种混合技术,随着机器人技术而发展起来,既做到了术中精确的机械轴中立位对线,又实现软组织友好的对齐目标^[5],是一种更加先进的对线方式。采用 FA 对齐的 TKA 术后达到高水平的患者满意度,改善功能预后,增加种植体存活,提高成本效益,减少并发症。但由于目前大多数研究报道的都是短期临床疗效结果,仍然需要长期的研究结果来支持这项技术的应用。并且为实现 FA 需要先进的骨科机器人作为依托,就目前膝关节置换手术机器人在我国普及程度而言,无法开展大范围的以功能学力线对齐的 TKA 使患者受益。另外,在临床上 MA 依然被大多数骨科医师认为是 TKA 的金标准,因此,骨科医师在进行 TKA 时,还是应当把恢复机械轴中立位对线作为主要目标之一;同时也应该避免术中对过度软组织的软组织释放,尽可能地达到一个良好的软组织平衡,从而提高患者的术后满意度,而不是相信单一的对线技术。因此,如何选择对患者更有利的对线技术对于临床骨科医师而言需要深思熟虑。

参考文献

- [1] CHEN H B, WU J H, WANG Z J, et al. Trends and patterns of knee osteoarthritis in China: a longitudinal study of 17.7 million adults from 2008 to 2017[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18 (16): 8864.
- [2] WANG L M, LU H, CHEN H B, et al. Development of a model for predicting the 4-year risk of symptomatic knee osteoarthritis in China: a longitudinal cohort study[J]. *Arthritis Res Ther*, 2021, 23 (1): 65.
- [3] VAIDYA N V, DESHPANDE A N, PANJWANI T, et al. Robotic-assisted TKA leads to a better prosthesis alignment and a better joint line restoration as compared to conventional TKA: a prospective randomized controlled trial[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2022, 30 (2): 621-626.
- [4] DECKEY D G, ROSENOW C S, VERHEY J T, et al. Robotic-assisted total knee arthroplasty improves accuracy and precision compared to conventional techniques[J]. *Bone Joint J*, 2021, 103-B(6 Supple A): 74-80.
- [5] OUSSEDIK S, ABDEL M P, VICTOR J, et al. Alignment in total knee arthroplasty[J]. *Bone Joint J*, 2020, 102-B(3): 276-279.
- [6] LUSTIG S, SAPPEY-MARINIER E, FARY C, et al. Personalized alignment in total knee arthroplasty: current concepts[J]. *SICOT J*, 2021, 7: 19.
- [7] FERREIRA J P, BUTLER J, ZANNAD F, et al. Mineralocorticoid receptor antagonists and empagliflozin in patients with heart failure and preserved ejection fraction[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2022, 79 (12): 1129-1137.
- [8] SHATROV J, BATTELIER C, SAPPEY-MARINIER E, et al. Functional Alignment Philosophy in Total Knee Arthroplasty-Rationale and technique for the varus morphotype using a CT based robotic platform and individualized planning[J]. *SICOT J*, 2022, 8: 11.
- [9] CLARK G, STEER R, WOOD D. Functional alignment achieves a more balanced total knee arthroplasty than either mechanical alignment or kinematic alignment prior to soft tissue releases[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2023, 31 (4): 1420-1426.
- [10] HAMPP E L, SODHI N, SCHOLL L, et al. Less iatrogenic soft-tissue damage utilizing robotic-assisted total knee arthroplasty when compared with a manual approach: a blinded assessment[J]. *Bone Joint Res*, 2019, 8 (10): 495-501.
- [11] AGARWAL N, TO K, MCDONNELL S, et al. Clinical and radiological outcomes in robotic-assisted total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Arthroplasty*, 2020, 35 (11): 3393-3409.e2.
- [12] KHLOPAS A, SODHI N, HOZACK W J, et al. Patient-reported functional and satisfaction outcomes after robotic-arm-assisted total knee arthroplasty: early results of a prospective multicenter investigation[J]. *J Knee Surg*, 2020, 33 (7): 685-690.
- [13] KAYANI B, HADDAD F S. Robotic total knee arthroplasty: clinical outcomes and directions for future research[J]. *Bone Joint Res*, 2019, 8 (10): 438-442.
- [14] KAYANI B, KONAN S, TAHMASSEBI J, et al. A prospective double-blinded randomised control trial comparing robotic arm-assisted functionally aligned total knee arthroplasty versus robotic arm-assisted mechanically aligned total knee arthroplasty[J]. *Trials*, 2020, 21 (1): 194.
- [15] DOSSETT H G, ESTRADA N A, SWARTZ G J, et al. A randomised controlled trial of kinematically and mechanically aligned total knee replacements: two-year clinical results[J]. *Bone Joint J*, 2014, 96-B(7): 907-913.
- [16] HOWELL S M, PAPAPOPOULOS S, KUZNIK K, et al. Does varus

- alignment adversely affect implant survival and function six years after kinematically aligned total knee arthroplasty[J]. *Int Orthop*, 2015, 39(11):2117-2124.
- [17] HOWELL S M, PAPAPOPOULOS S, KUZNIK K T, et al. Accurate alignment and high function after kinematically aligned TKA performed with generic instruments[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2013, 21(10):2271-2280.
- [18] ZAMBIANCHI F, BAZZAN G, MARCOVIGI A, et al. Joint line is restored in robotic-arm-assisted total knee arthroplasty performed with a tibia-based functional alignment[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2021, 141(12):2175-2184.
- [19] 汪小健, 吕帅洁, 李少广, 等. 全膝关节置换术中下肢机械轴的研究进展[J]. *中国骨伤*, 2021, 34(2):191-194.
WANG X J, LYU S J, LI S G, et al. Progress on femorotibial mechanical axis of total knee arthroplasty[J]. *China J Orthop Traumatol*, 2021, 34(2):191-194. Chinese.
- [20] NAM D, NUNLEY R M, BARRACK R L. Patient dissatisfaction following total knee replacement: a growing concern[J]. *Bone Joint J*, 2014, 96-B(11 Supple A):96-100.
- [21] BOURNE R B, CHESWORTH B M, DAVIS A M, et al. Patient satisfaction after total knee arthroplasty: who is satisfied and who is not[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2010, 468(1):57-63.
- [22] HESS S, MOSER L B, AMSLER F, et al. Highly variable coronal tibial and femoral alignment in osteoarthritic knees; a systematic review[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2019, 27(5):1368-1377.
- [23] BLAKENEY W, BEAULIEU Y, PULIERO B, et al. Bone resection for mechanically aligned total knee arthroplasty creates frequent gap modifications and imbalances[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2020, 28(5):1532-1541.
- [24] MACDESSI S J, GRIFFITHS-JONES W, CHEN D B, et al. Restoring the constitutional alignment with a restrictive kinematic protocol improves quantitative soft-tissue balance in total knee arthroplasty: a randomized controlled trial[J]. *Bone Joint J*, 2020, 102-B(1):117-124.
- [25] 吴鹏, 郎俊哲, 吴聪聪, 等. 胫骨冠状面弯曲导致全膝关节置换术后胫骨假体力线不良[J]. *中国骨伤*, 2022, 35(1):54-58.
WU P, LANG J Z, WU C C, et al. Coronal curvature of tibial leads to malalignment of tibial prosthesis after total knee arthroplasty[J]. *China J Orthop Traumatol*, 2022, 35(1):54-58. Chinese.
- [26] HOWELL S M, HOWELL S J, KUZNIK K T, et al. Does a kinematically aligned total knee arthroplasty restore function without failure regardless of alignment category[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2013, 471(3):1000-1007.
- [27] 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.
- [28] HIRSCHMANN M T, HESS S, BEHREND H, et al. Phenotyping of hip-knee-ankle angle in young non-osteoarthritic knees provides better understanding of native alignment variability[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2019, 27(5):1378-1384.
- [29] HOWELL S M, HODAPP E E, KUZNIK K, et al. In vivo adduction and reverse axial rotation (external) of the tibial component can be minimized[J]. *Orthopedics*, 2009, 32(5):319.
- [30] NISAR S, PALAN J, RIVIERE C, et al. Kinematic alignment in total knee arthroplasty[J]. *EFORT Open Rev*, 2020, 5(7):380-390.
- [31] JEREMIC D V, MASSOUH W M, SIVALOGANATHAN S, et al. Short-term follow-up of kinematically vs. mechanically aligned total knee arthroplasty with medial pivot components: a case-control study[J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2020, 106(5):921-927.
- [32] MALAVOLTA M, KLEY K. Kinematic alignment-management of deformities and flexion contractures[J]. *Orthopade*, 2021, 50(3):173-178.
- [33] ISHIKAWA M, KURIYAMA S, ITO H, et al. Kinematic alignment produces near-normal knee motion but increases contact stress after total knee arthroplasty: a case study on a single implant design[J]. *Knee*, 2015, 22(3):206-212.
- [34] BELLAMY J L, GOFF B J, SAYEED S A. Economic impact of ketorolac vs corticosteroid intra-articular knee injections for osteoarthritis: a randomized, double-blind, prospective study[J]. *J Arthroplasty*, 2016, 31(9 Suppl):293-297.
- [35] ROCHE M. The MAKO robotic-arm knee arthroplasty system[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2021, 141(12):2043-2047.
- [36] CHOI B S, KIM S E, YANG M, et al. Functional alignment with robotic-arm assisted total knee arthroplasty demonstrated better patient-reported outcomes than mechanical alignment with manual total knee arthroplasty[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2023, 31(3):1072-1080.
- [37] CHANG J S, KAYANI B, WALLACE C, et al. Functional alignment achieves soft-tissue balance in total knee arthroplasty as measured with quantitative sensor-guided technology[J]. *Bone Joint J*, 2021, 103-B(3):507-514.
- [38] BAKER P N, VAN DER MEULEN J H, LEWSEY J, et al. The role of pain and function in determining patient satisfaction after total knee replacement. Data from the National Joint Registry for England and Wales[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2007, 89(7):893-900.

(收稿日期:2023-06-16 本文编辑:王玉蔓)