



刘培来,医学博士,主任医师,教授,博士研究生导师,博士后合作导师。山东大学齐鲁医院关节与运动医学科主任、骨科副主任,山东大学齐鲁医院德州医院副院长。中国医师协会骨科医师分会骨科康复学组副组长、山东省康复医学会骨与关节分会主任委员、山东省医学会骨科学分会副主任委员、中国医药教育协会骨科规范化培训山东基地主任委员、山东省医学会骨科分会关节外科学组骨关节炎工作委员会副主席、山东省膝关节炎阶梯治疗工作委员会主任委员等。作为首位完成人获得山东省科学技术进步奖二等奖一项,作为首位项目负责人承担各类纵向、横向项目累计经费逾300万元。近年以第一作者或通信作者先后在《Journal of Nanobiotechnology》《Angewandte Chemie International Edition》《Biomaterials》《International Journal of Molecular Medicine》等期刊发表多篇高水平学术论文,主编或副主编专著3部,主译骨科专著3部,作为主要发明人获得国家发明或实用新型专利11项。《实用骨科杂志》第四届编委会编委,《中华骨与关节杂志》《中国组织工程研究》《山东大学学报(医学版)》等多家期刊编委或审稿专家。

膝关节置换术后常用康复器具的应用与疗效分析

刘培来*,李学州*,卢群山,孙厚义,杨杰,李哲

(山东大学齐鲁医院骨科,山东 济南 250012)

摘要:系统总结膝关节置换术后康复过程中的常用康复器具及其在不同康复阶段的作用。膝关节置换术是治疗膝关节骨关节炎的主要手段,术后康复对患者的功能恢复和生活质量改善至关重要。根据康复的不同阶段,将术后康复目标分为缓解疼痛和减少肿胀、恢复关节活动度、增强肌肉力量以及改善步态和平衡,并详细介绍了各阶段常用的康复器具,如冷疗装置、患者自主控制镇痛泵、连续被动运动机、经皮电刺激仪、神经肌肉电刺激仪、步态训练设备等。尽管部分器具的疗效存在争议,尤其是在疼痛管理和关节活动度恢复方面,但它们在加速术后康复和提升患者满意度方面展现出一定的积极作用。随着虚拟现实技术和机器人辅助康复设备的应用前景逐步展现,未来个性化康复方案将进一步优化患者的康复体验与效果。

关键词:膝关节置换术;康复器具;冷疗;连续被动运动机;电刺激设备;步态分析

中图分类号:R608 **文献标志码:**A

Application and efficacy analysis of common rehabilitation devices used after knee replacement surgery

LIU Peilai*, LI Xuezhou*, LU Qunshan, SUN Houyi, YANG Jie, LI Zhe

(Department of Orthopedic, Qilu Hospital of Shandong University, Jinan 250012, Shandong, China)

Abstract: This review systematically summarizes the common rehabilitation devices used in postoperative rehabilitation of knee replacement and their roles at different stages of recovery. Knee replacement is a primary treatment for knee osteoarthritis, and postoperative rehabilitation is crucial for functional recovery and improvement in patients' quality of life. Based on the different stages of rehabilitation, the goals are categorized into pain relief and swelling reduction, restoration of joint mobility, strengthening of muscle power, and improvement of gait and balance. This paper provides a detailed overview of the commonly used medical devices at each stage, such as cold therapy devices, patient-controlled analgesia pumps, continuous passive motion machines, transcutaneous electrical nerve stimulation devices, neuromuscular electrical stimulation devices, and gait training equipment. Although the efficacy of some devices remains controversial, particularly in pain management and joint mobility restoration, they have demonstrated positive effects in accelerating postoperative recovery and enhancing patient satisfaction. With the promising prospects of virtual reality and robot-assisted rehabilitation devices, future personalized rehabilitation plans are expected to further optimize the recovery experience and outcomes for patients.

Key words: Knee replacement; Rehabilitation devices; Cold therapy; Continuous passive motion machine; Electrical stimulation devices; Gait analysis

膝关节骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)严重影响老年人的生活质量与身体健康,据报道我国症状性膝关节骨关节炎的总体发病率高达14.6%^[1]。膝关节置换术作为治疗终末期KOA的有效手术方式,已被证实可以显著提高患者的活动能力和生活满意度^[2],但据统计有17%患者在膝关节置换术后存在不满意^[3]。手术的成功不仅取决于患者的原始病情和手术执行的精准性,术后康复同样起着决定性作用,一个系统的康复计划和方案对于恢复关节功能和提高患者生活质量至关重要^[4]。

膝关节置换术术后在不同阶段具有不同的康复特征,例如早期的主要康复目的是缓解疼痛和减少肿胀,后期是恢复患者的正常步态和协调能力,促使患者重返日常生活和工作。随着医疗技术的进步,为了达到目的,众多康复器具如连续被动运动机(continuous passive motion, CPM)^[5]、冷疗设备^[6]、电刺激设备^[7]、步态分析和训练设施等^[8]发明出来,已广泛集成应用于膝关节置换术后的康复训练中,以期提高康复效率并缩短恢复时间。

本文将根据膝关节术后康复的不同阶段及其康复目标,综述膝关节置换术后常用的康复器具及其在促进术后康复中的作用和效果。

1 膝关节置换术后的康复目标和常用康复器具

根据膝关节置换术后康复的早期到最终阶段,大致可以将康复目标分为以下四种:①缓解疼痛和减少肿胀;②恢复关节活动度;③增强肌肉力量;④改善步态和平衡。在不同阶段部分目标可能会略有

重合,本综述依据以下四大目标总结不同训练目标的常用康复器具及其作用。

1.1 缓解疼痛和减少肿胀

术后早期,患者经常遭受手术引起的疼痛和肿胀,这不仅影响其日常活动,而且可能延缓整体康复进程。因此,有效管理初期疼痛和肿胀是提升患者术后康复体验和效果的关键。除了传统药物治疗,多种康复器具在这一阶段对疼痛和肿胀的控制中起到重要作用,其中常用设备包括:冷疗设备、患者自主控制镇痛泵(patient controlled analgesia, PCA)、经皮电刺激仪(transcutaneous electrical nerve stimulation, TENS)等。

1.1.1 冷疗装置

冷疗通过减少局部血流、降低组织代谢速率、抑制炎症介质的释放及减慢神经传导速度,有效控制术后疼痛和肿胀^[9-11]。常见的设备包括冰敷袋和冷疗机,冷疗机通过循环冷却液体提供持续的低温治疗。但是临床研究对于冷疗装置对膝关节置换术后的疼痛和肿胀的控制疗效仍存争议。Wyatt等^[12]对全膝关节置换术后的冷疗疗效进行了系统综述,结果显示,冷疗治疗组可以减少术后第一周阿片类药物的用量,疼痛评分也持续下降,但疼痛减轻的程度可能在临床上并不显著。另一项针对冷疗装置在膝关节置换术后疗效的综述也显示,术后冷疗在对失血、疼痛和运动范围的潜在益处可能不大,需要进行更多设计良好的随机对照试验进行验证^[6]。此外,冷疗装置使用时需要注意温度和使用时间,有报道显示,冷疗装置引起髌前皮肤坏死^[13],一定要在康复医师指导下使用,常用的使用方法:术后立即开始,10~20 min/次,1~3次/d。尽管冷疗装置在膝

关节置换术术后作用存在争议,但仍出现在很多的膝关节置换术术后康复指导协议中。

1.1.2 PCA 泵

PCA 泵是一种允许患者根据自身疼痛需求自主控制镇痛药物输送的系统,通常连接至静脉导管。这种系统通过预设的药物剂量提供镇痛效果。患者可以根据疼痛情况按下按钮自行给药,PCA 泵会自动注入预设剂量的镇痛药物,如吗啡或其他阿片类药物。PCA 泵已广泛用于膝关节置换术术后患者的疼痛管理中,允许患者根据自己的疼痛程度随时给药,避免了等待护理人员给药的延迟,提供了更个性化和即时的镇痛效果^[14]。该设备根据所使用的镇痛药、身体特征和患者的基线疼痛进行编程,常用镇痛药物主要是阿片类药物,例如羟考酮、吗啡、芬太尼和氢吗啡酮等^[15-16]。研究显示,PCA 给药的阿片类药物比传统阿片类药物治疗引起的不良反应更少^[17]。在接受膝关节置换术治疗的患者中,PCA 的使用越来越受欢迎。但在使用中还需警惕药物过量、技术故障和不良反应,如恶心、呕吐、便秘和呼吸抑制等。

1.1.3 TENS 仪

TENS 仪是一种通过皮肤表面电极传递低频电流以缓解疼痛的技术。TENS 主要通过脉冲电流穿过完整的皮肤表面,激活下层神经阿片受体的内源性抑制机制,从而起到镇痛效果^[18-20]。研究显示,膝关节置换术后 TENS 的使用显著降低了术后急性期的 VAS 评分和整体疼痛^[19,21-22]。TENS 器件发射可变的电脉冲,大多数使用 40~150 Hz 之间的较高频率,短矩形脉冲持续时间通常约为 50 μ s。鉴于应用方案的可变性,TENS 证据受到参数、剂量和检测人群不一致的影响,而这些在已报道的试验中尚未标准化^[23]。建议膝关节置换术患者术后急性期接受 TENS 干预,但需要进一步的研究来确定最佳的持续时间和强度。

1.2 恢复关节活动度

恢复膝关节的活动度是术后康复的一个关键目标。临床中主要通过自主或康复师手法训练来逐步恢复患者膝关节的屈曲和伸展功能;此外还通过使用 CPM 机,促进活动角度的更快恢复。这一过程有助于预防关节的僵硬和黏连,确保维持正常的关节活动范围。

1.2.1 CPM 机

CPM 机是通过机械装置被动地移动膝关节的设备,用于辅助术后恢复。Salter 等^[24]在 1970 年首次通过使用兔子模型研究早期运动对关节损伤后恢

复的积极作用,从而引入了 CPM 的使用。此后,CPM 设备被广泛应用于术后康复,以帮助提高关节活动度,减少术后关节僵硬和黏连。有研究发现,CPM 有助于改善膝关节手术后的运动范围,预防关节僵硬和黏连,保持正常的关节活动范围^[25-26]。然而,也有研究显示,CPM 在 TK 术后改善屈曲活动性、减轻疼痛和提高患者满意度方面无明显益处,还会增加患者的平均住院费用^[5,27-28]。CPM 使用不当还可能会产生并发症,例如,一些研究记录了使用 CPM 时出现的并发症,如急性股四头肌肌腱撕裂、深部血肿和切口愈合不良等^[29-30]。但也有研究表明,相对于未使用 CPM 组,不良事件并没有显著增加^[5]。尽管存在一些疑问和潜在的风险,CPM 仍然是许多术后康复协议的一部分,其普遍的使用反映了对患者个体康复预期的考虑。为了更全面地理解 CPM 的效果及其适用性,还需要进行更多严谨和大样本量的随机对照试验。

1.3 增强肌肉力量

在膝关节置换术术后康复中,增强膝关节周围的肌肉力量,尤其是股四头肌和腘绳肌至关重要。有效的肌肉恢复不仅支持膝关节的稳定性,还有助于改善步态和降低再次受伤的风险。常用设备包括神经肌肉电刺激仪(neuromuscular electrical stimulation, NMES)和各类阻力训练设备。

1.3.1 NMES 仪

NMES 通过皮肤表面电极传递电流直接刺激肌肉,诱发肌肉收缩,这种方法被认为可以增强因疼痛和不活动而导致萎缩的肌肉力量,从而促进肌肉力量和耐力的恢复,改善膝关节的功能和稳定性。但是其在膝关节置换术后的应用效果上存在一定争议。2010 年 Brenda 等^[31]研究显示,这种应用 NMES 组与对照组之间的最大自主等长扭矩或耐力均未报告显著差异,但是与单独运动组相比,NMES 组报告的股四头肌激活更好,这种差异在 6 周时最明显,但在 12 周后无明显差异,研究认为使用神经肌肉刺激以加强股四头肌的证据尚不清楚。但是有研究显示,NMES 能够有效提高膝关节置换术后中早期的肌肉力量,加速功能恢复^[32-33]。Luciana 等^[34]总结发现,NMES 对膝关节置换术后的股四头肌力量恢复有效,且恢复效果与 NMES 强度和持续时间有关。一般来说,高强度与更好的力量恢复成果相关联,但是患者的耐受性可能限制了 NMES 的使用刺激强度^[7]。未来研究需要进一步探索如何优化 NMES 的应用策略,以最大化其在术后恢复中的效用。

1.3.2 阻力训练装置

阻力训练装置,如阻力带、哑铃、抗阻训练机和其他康复器械,是阻力训练中常用的增强膝关节周围肌肉的康复器具。这种训练通常包括一系列渐进性的抗阻训练,训练时间和强度会根据患者的具体情况进行调整。阻力训练在术后康复中具有重要作用,适当的阻力训练能够显著提高患者的肌肉力量,还可以显著改善患者的运动范围和生活质量^[35]。

1.3.3 水疗设备

利用水疗设备进行水中抗阻训练对膝关节置换术后肌肉力量恢复具有积极影响。首先,水的浮力有效减少了关节负荷,使患者在锻炼时能够降低术后疼痛和不适感。其次,水的阻力特性为肌肉提供了有效的抗阻训练环境,研究显示,水中训练可以提高膝关节的膝关节伸肌和屈肌力量^[36-37]。另有研究显示,水中抗阻训练的效果与传统地面训练相当,甚至在增强肌肉力量方面更具优势^[38]。安全性也是水中抗阻训练的一大优势,研究发现,其能有效减少跌倒和受伤的风险,为患者提供一个安全的锻炼环境。此外,水中抗阻训练不仅能够增强局部肌肉力量,还有助于改善患者的日常活动能力^[39]。心理效益方面,水中锻炼通常被认为更轻松且有趣,能提高患者的锻炼积极性和心理状态^[40]。总体而言,水中抗阻训练是一种有效的康复方式,能够显著促进膝关节置换术后患者的肌肉力量恢复,改善其功能,并提升整体康复效果。

1.4 改善步态和平衡

改善步态和平衡能力是术后康复的另一个重要目标。适当的步态和平衡训练可以帮助患者恢复正常的行走模式,增强稳定性,从而减少跌倒风险,特别是对老年患者和平衡能力受损的患者来说尤为关键。

1.4.1 步态训练设备

膝关节置换术后正常步态的恢复主要涉及两个方面:一是对术后步态的分析,常用的设备是步态分析仪;二是步态训练设备,例如跑步机、步态分析仪等。步态分析仪通过提供实时反馈帮助患者识别和纠正步态异常,近年来步态分析仪或可穿戴型新步态分析设备在膝关节置换围手术期的相关研究应用逐渐增多,研究涉及膝关节手术前后的步态恢复、影响步态的因素、步态异常对临近关节的影响等方面^[41-45]。而跑步机、步态训练仪等训练设备则允许患者在安全的环境中进行有控制的行走练习。根据患者的具体康复需求和身体状况,康复专家会制定

个性化的训练计划,这些训练计划通常包括在这些设备上进行的定期练习,以确保达到最佳康复效果。

1.4.2 平衡训练设备

平衡训练设备,如平衡板和平衡球,用于提高患者的平衡控制能力^[46-48]。通过这些设备的训练,患者能够在安全的条件下加强核心肌群和下肢肌肉力量,对于提高整体稳定性和减少摔倒风险至关重要。训练通常需要根据患者的进展逐步调整难度和复杂性,确保患者在提高平衡能力的同时不会受伤。

2 技术创新和未来展望

随着技术的进步,康复器具在膝关节置换术后康复中的应用将更加广泛和高效。近年来一些新兴技术也在膝关节置换术后康复中表现出重要作用,例如虚拟现实和机器人辅助康复等。

2.1 虚拟现实技术

虚拟现实技术在膝关节置换术后康复中的应用正逐渐成为一个重要的研究领域。研究表明,虚拟现实技术能够显著增强患者的运动参与感,提高康复动机,使训练过程更具趣味性和吸引力^[49-50]。个性化的训练计划能够根据患者的具体需求和康复进度进行调整,确保每例患者得到适合自己的康复方案。此外,虚拟现实技术提供实时反馈,帮助患者及时纠正动作,从而提高训练效果。心理层面上,虚拟环境能够减轻患者的焦虑和疼痛感,改善整体心理状态^[51]。有研究显示,虚拟现实训练能够有效提高患者的平衡和协调能力,降低术后跌倒风险^[52],并通过数据记录与分析,帮助医生评估康复效果并优化治疗方案。也有研究显示膝关节置换术后2周和3个月虚拟现实康复组与传统康复之间的疼痛评分无差异^[49]。虚拟现实技术在膝关节置换术后康复中展现出广阔的应用前景,在促进患者恢复和生活质量的提高上仍需进一步研究。

2.2 机器人辅助康复

机器人辅助康复在膝关节置换术后的应用逐渐受到关注,主要指的是在患者膝关节置换术后康复训练中可利用的机器人设备,例如:步态机器人^[53]、混合辅助肢体^[54]等。主要通过机械臂与肢体进行连接固定,按照预先设定好的步态方式进行相应关节的活动度训练,期间可以连接相关检测设备,以监控患者的生理指标。相关研究显示,机器人辅助膝关节置换术后康复训练可以在短期和中期获得良好的肌肉力量、更好的活动度和行走能力^[54-55]。此外,这些设备通过实时反馈和数据监测,增强了患者

的参与感和动机,进一步改善了康复效果^[56]。因此,机器人辅助技术在膝关节置换术后的康复中展现出良好的临床应用前景。

未来科技设备的辅助和个性化康复方案是膝关节置换术后康复的发展趋势,个性化康复将根据患者的具体情况制定,包括年龄、性别、健康状况和手术类型等因素,针对性的应用康复器具辅助康复将会进一步促进膝关节置换术后康复的发展。

3 结 论

康复器具在整个膝关节置换术后的康复训练过程中发挥着重要作用,对于改善患者的术后恢复效果具有重要的促进作用。不同类型的康复器具在恢复关节活动度、增强肌肉力量、管理疼痛和改善功能等方面具有各自的优势。但是在一些方面,康复效果也存在一定争议,需要更多高质量的研究进一步验证其长期效果和经济效益。未来,随着技术的进步和个性化康复方案的发展,相信康复器具在膝关节置换术后康复中的应用将更加科学、广泛和高效。

参考文献:

[1] Li D, Li S, Chen Q, et al. The prevalence of symptomatic knee osteoarthritis in relation to age, sex, area, region, and body mass index in China: a systematic review and Meta-analysis [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2020, 16(7): 304.

[2] Canovas F, Dagneaux L. Quality of life after total knee arthroplasty [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2018, 104(1S): S41-S46.

[3] Dunbar MJ, Richardson G, Robertsson O. I can't get no satisfaction after my total knee replacement: rhymes and reasons [J]. *Bone Joint J*, 2013, 95-B(11 Suppl a): 148-152.

[4] Mistry JB, Elmallah RD, Bhave A, et al. Rehabilitative guidelines after total knee arthroplasty: a review [J]. *J Knee Surg*, 2016, 29(3): 201-217.

[5] Yang X, Li GH, Wang HJ, et al. Continuous passive motion after total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of associated effects on clinical outcomes [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2019, 100(9): 1763-1778.

[6] Aggarwal A, Adie S, Harris IA, et al. Cryotherapy following total knee replacement [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2023, 9(9): CD007911.

[7] Yue C, Zhang X, Zhu Y, et al. Systematic review of three electrical stimulation techniques for rehabilitation

after total knee arthroplasty [J]. *J Arthroplasty*, 2018, 33(7): 2330-2337.

[8] Fukui J, Matsui Y, Mizuno T, et al. Comparison of gait analysis before and after unilateral total knee arthroplasty for knee osteoarthritis [J]. *J Orthop Surg Res*, 2024, 19(1): 506.

[9] Schaebel HJ. The local use of ice after orthopedic procedures [J]. *Am J Surg*, 1946, 72(5): 711-714.

[10] Lee JM, Warren MP, Mason SM. Effects of ice on nerve conduction velocity [J]. *Physiotherapy*, 1978, 64(1): 2-6.

[11] 刘玉, 张楠心, 戴丽群, 等. 全膝关节置换后冷疗有效性的 Meta 分析 [J]. *中国组织工程研究*, 2020, 24(9): 1443-1448.

[12] Wyatt PB, Nelson CT, Cyrus JW, et al. The role of cryotherapy after total knee arthroplasty: a systematic review [J]. *J Arthroplasty*, 2023, 38(5): 950-956.

[13] Dundon JM, Rymer MC, Johnson RM. Total patellar skin loss from cryotherapy after total knee arthroplasty [J]. *J Arthroplasty*, 2013, 28(2): 375-377.

[14] Li JW, Ma YS, Xiao LK. Postoperative pain management in total knee arthroplasty [J]. *Orthop Surg*, 2019, 11(5): 755-761.

[15] Walder B, Schafer M, Henzi I, et al. Efficacy and safety of patient-controlled opioid analgesia for acute postoperative pain: a quantitative systematic review [J]. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2001, 45(7): 795-804.

[16] Motamed C. Clinical update on patient-controlled analgesia for acute postoperative pain [J]. *Pharmacy (Basel)*, 2022, 10(1): 22.

[17] Franzoni S, Rossi S, Cassinadri A, et al. Perioperative pain management in total knee arthroplasty: a narrative review of current multimodal analgesia protocols [J]. 2023, 13(6): 3798.

[18] Zhu Y, Feng Y, Peng L. Effect of transcutaneous electrical nerve stimulation for pain control after total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis [J]. *J Rehabil Med*, 2017, 49(9): 700-704.

[19] 李凯明, 李玲慧, 梁龙, 等. 经皮电刺激改善全膝关节置换术后疼痛与功能的系统评价与 Meta 分析 [J]. *海南医学院学报*, 2019, 25(24): 1872-1877.

[20] Vance CGT, Dailey DL, Chimenti RL, et al. Using TENS for pain control: update on the state of the evidence [J]. *Medicina (Kaunas)*, 2022, 58(10): 1332.

[21] Li J, Song Y. Transcutaneous electrical nerve stimulation for postoperative pain control after total knee arthroplasty: a meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Medicine (Baltimore)*, 2017, 96(37): e8036.

[22] 司建洛, 杨木强, 司马靓杰, 等. 经皮电刺激耳神门穴对全膝关节置换后镇痛效果的影响 [J]. *中国组织工*

程研究. 2017, 21(27): 4294-4299.

- [23] Jauregui JJ, Cherian JJ, Gwam CU, et al. A meta-analysis of transcutaneous electrical nerve stimulation for chronic low back pain[J]. *Surg Technol Int*, 2016, 28: 296-302.
- [24] Salter RB, Simmonds DF, Malcolm BW, et al. The biological effect of continuous passive motion on the healing of full-thickness defects in articular cartilage. An experimental investigation in the rabbit[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1980, 62(8): 1232-1251.
- [25] Harvey LA, Brosseau L, Herbert RD. Continuous passive motion following total knee arthroplasty in people with arthritis[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2014, 2014(2): Cd004260.
- [26] Liao CD, Huang YC, Lin LF, et al. Continuous passive motion and its effects on knee flexion after total knee arthroplasty in patients with knee osteoarthritis[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2016, 24(8): 2578-2586.
- [27] Gil-González S, Barja-Rodríguez RA, López-Pujol A, et al. Continuous passive motion not affect the knee motion and the surgical wound aspect after total knee arthroplasty[J]. *J Orthop Surg Res*, 2022, 17(1): 25.
- [28] Jia ZF, Zhang Y, Zhang WP, et al. Efficacy and safety of continuous passive motion and physical therapy in recovery from knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Orthop Surg Res*, 2024, 19(1): 68.
- [29] Denis M, Moffet H, Caron F, et al. Effectiveness of continuous passive motion and conventional physical therapy after total knee arthroplasty: a randomized clinical trial[J]. *Physical Therapy*, 2006, 86(2): 174-185.
- [30] Wirries N, Ezechieli M, Stimpel K, et al. Impact of continuous passive motion on rehabilitation following total knee arthroplasty[J]. *Physiother Res Int*, 2020, 25(4): e1869.
- [31] Monaghan B, Caulfield B, O'Mathúna DP. Surface neuromuscular electrical stimulation for quadriceps strengthening pre and post total knee replacement[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2010, 2010(1): Cd007177.
- [32] Stevens-Lapsley JE, Balter JE, Wolfe P, et al. Early neuromuscular electrical stimulation to improve quadriceps muscle strength after total knee arthroplasty: a randomized controlled trial[J]. *Phys Ther*, 2012, 92(2): 210-226.
- [33] Klika AK, Yakubek G, Piuze N, et al. Neuromuscular electrical stimulation use after total knee arthroplasty improves early return to function: a randomized trial[J]. *J Knee Surg*, 2022, 35(1): 104-111.
- [34] Labanca L, Bonsanto F, Raffa D, et al. Does adding neuromuscular electrical stimulation to rehabilitation following total knee arthroplasty lead to a better quadriceps muscle strength recovery? a systematic review[J]. *Int J Rehabil Res*, 2022, 45(2): 118-125.
- [35] Monsegue AP, Emans P, van Loon LJC, et al. Resistance exercise training to improve post-operative rehabilitation in knee arthroplasty patients: a narrative review[J]. *Eur J Sport Sci*, 2024, 24(7): 938-949.
- [36] Valtonen A, Pöyhönen T, Sipilä S, et al. Effects of aquatic resistance training on mobility limitation and lower-limb impairments after knee replacement[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2010, 91(6): 833-839.
- [37] Valtonen A, Pöyhönen T, Sipilä S, et al. Maintenance of aquatic training-induced benefits on mobility and lower-extremity muscles among persons with unilateral knee replacement[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2011, 92(12): 1944-1950.
- [38] Lee CH, Kim IH. Aquatic exercise and land exercise treatments after total knee replacement arthroplasty in elderly women: a comparative study[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2021, 57(6): 589.
- [39] Giaquinto S, Ciotola E, Dall'Armi V, et al. Hydrotherapy after total knee arthroplasty. a follow-up study[J]. *Arch Gerontol Geriatr*, 2010, 51(1): 59-63.
- [40] Kim S, Hsu FC, Groban L, et al. A pilot study of aquatic prehabilitation in adults with knee osteoarthritis undergoing total knee arthroplasty - short term outcome[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22(1): 388.
- [41] Elbaz A, Mor A, Segal G, et al. Novel classification of knee osteoarthritis severity based on spatiotemporal gait analysis[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2014, 22(3): 457-463.
- [42] Knowlton CB, Lundberg HJ, Wimmer MA, et al. Can a gait-dependent model predict wear on retrieved total knee arthroplasty components? [J]. *Bone Joint J*, 2020, 102-b(6_Supple_A): 129-137.
- [43] Yeung S, Kim HK, Carleton A, et al. Integrating wearables and modelling for monitoring rehabilitation following total knee joint replacement[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2022, 225: 107063. doi:10.1016/j.cmpb.2022.107063.
- [44] 赵伟, 苏鹏, 张力, 等. 三维步态分析在髌膝关节置换术中的应用[J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30(20): 1863-1867.
- [45] Rühling M, Kirschbaum SM, Perka C, et al. Increased ankle pain after total knee arthroplasty is associated with a preoperative lateralized gait and talar tilt, but not with ankle laxity or the range of motion of the subtalar joint[J]. *Bone Joint J*, 2023, 105-b(11): 1159-1167.
- [46] Pua YH, Liang Z, Ong PH, et al. Associations of knee extensor strength and standing balance with physical

- function in knee osteoarthritis [J]. *Arthritis Care Res (Hoboken)*, 2011, 63(12): 1706-1714.
- [47] Domínguez-Navarro F, Silvestre-Muñoz A, Igual-Camacho C, et al. A randomized controlled trial assessing the effects of preoperative strengthening plus balance training on balance and functional outcome up to 1 year following total knee replacement [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2021, 29(3): 838-848.
- [48] Yau WP. Corr insights[®]: No benefit to sensor-guided balancing compared with freehand balancing in TKA: a randomized controlled trial [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2022, 480(8): 1545-1546.
- [49] Gazendam A, Zhu M, Chang Y, et al. Virtual reality rehabilitation following total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2022, 30(8): 2548-2555.
- [50] 高海香, 王蕾, 陈萍, 等. 虚拟现实技术对全膝关节置换术后患者康复锻炼镇痛与康复效果的影响 [J]. *中华疼痛学杂志*. 2023, 19(5): 764-769.
- [51] Gür O, Başar S. The effect of virtual reality on pain, kinesiophobia and function in total knee arthroplasty patients: a randomized controlled trial [J]. *Knee*, 2023, 45: 187-197. doi:10.1016/j.knee.2023.09.012.
- [52] Pournajaf S, Goffredo M, Pellicciari L, et al. Effect of balance training using virtual reality-based serious games in individuals with total knee replacement: a randomized controlled trial [J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2022, 65(6): 101609.
- [53] Koo KI, Hwang CH. Five-day rehabilitation of patients undergoing total knee arthroplasty using an end-effector gait robot as a neuromodulation blending tool for deafferentation, weight offloading and stereotyped movement: Interim analysis [J]. *PLoS One*, 2020, 15(12): e0241117.
- [54] Yoshikawa K, Mutsuzaki H, Sano A, et al. Training with hybrid assistive limb for walking function after total knee arthroplasty [J]. *J Orthop Surg Res*, 2018, 13(1): 163.
- [55] Kotani N, Morishita T, Saita K, et al. Feasibility of supplemental robot-assisted knee flexion exercise following total knee arthroplasty [J]. *J Back Musculoskeletal Rehabil*, 2020, 33(3): 413-421.
- [56] Wu K, Pan HH, Lin CH. Robotic exoskeletons and total knee arthroplasty: the future of knee rehabilitation and replacement—a meta-analysis [J]. *Medicine (Baltimore)*, 2024, 103(17): e37876.

(编辑:徐苗蓁)

读者·作者·编者

量和单位

单位符号可以与非物理量的单位(例如件、台、人等)的汉字构成组合形式的单位。例如:件/d(件每天)。在一个组合单位符号中,斜线不应多于一条。例如:mg/kg/d应写为mg/(kg·d)或mg·kg⁻¹·d⁻¹。表示离心加速作用时,应以重力加速度(g)的倍数的形式表达。例如:6 000×g离心10 min。或者在给出离心机转速的同时给出离心半径。例如:离心半径8 cm,12 000 r/min离心10 min。不能把ppm、pphm、ppb等缩写词作为单位使用。

(本刊编辑部)