

机械循环辅助治疗心力衰竭进展

李平 董念国*

华中科技大学同济医学院附属协和医院心脏大血管外科,湖北武汉 430022

摘要 心力衰竭已成为严重威胁人类生命健康的全球性疾病,发病率及死亡率持续上升。机械循环辅助(MCS)可有效改善患者血流动力学状态,成为目前心力衰竭患者的有效治疗手段。但机械循环辅助装置(MCSD)的选择,合适的时机和运行管理仍是目前临床工作中的难点。本文主要介绍几种常见 MCSD 的原理、特点,并就其适应证、应用时机和运行管理等方面加以论述。

关键词 心力衰竭;机械循环辅助装置;主动脉内球囊反搏;体外膜肺氧合;心室辅助装置;人工心脏

中图分类号 R541.6 **文献标识码** A **DOI** 10.11768/nkjwzzzz20230601

Progress and application of mechanical circulatory support devices in heart failure LI Ping, DONG Nian-guo*. Department of Cardiovascular Surgery, Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Hubei Wuhan 430022, China

Corresponding author: DONG Nian-guo, E-mail: 1986xh0694@hust.edu.cn

Abstract Heart failure has become one of the major global diseases threatening human health. The prevalence and the mortality are still rising. Mechanical circulatory support has become an effective treatment for patients with advanced heart failure because it can correct the patient's hemodynamic disorders. However, the selection, the appropriate timing, and management of mechanical circulatory support devices are still the difficulties in clinical practice. This review will outline the application and management of mechanical circulatory support devices in patients with heart failure.

Key words Heart failure; Mechanical circulatory support devices; Intra-aortic balloon pump; Extracorporeal membrane oxygenation; Ventricular assisted devices; Artificial heart

心力衰竭是各种心脏疾病发展到终末期的一种复杂临床综合征,是目前威胁全球人类生命安全和健康的头号杀手,患病率及死亡率持续上升。患者通常伴随胸闷、水肿、呼吸困难及运动耐力明显下降等临床症状,5 年生存率类似于恶性肿瘤,因而也被称为心血管疾病治疗的最后一个战场^[1]。心脏移植是目前心力衰竭患者的有效治疗手段,但受限于供体严重短缺,全球心脏移植数量每年仍不到 10 000 例,远不能满足巨大的需求量,导致诸多心力衰竭患者在等待供体中死去^[2]。机械循环辅助(mechanical circulatory support, MCS)经过 50 余年发展,技术日趋成熟,可部分或者完全替代心脏功能,已成为心力衰竭患者的有效治疗手段,可帮助患者安全过渡到心脏移植(bridge-to-transplant, BTT)、恢复期过渡(bridge-to-recovery, BTR)或替代移植治疗(destination therapy, DT)^[3]。但机械循环辅助装置(mechanical circulatory support devices, MCSD)的

选择,合适的时机和运行管理仍是目前临床工作中的难点。本文主要介绍目前国内外临床主要使用的 MCSD 的原理、特点,并就其适应证、应用时机和运行管理等方面加以论述。

机械循环辅助装置概述

MCSD 主要包括主动脉内球囊反搏(intra-aortic balloon pump, IABP)、体外膜肺氧合(extracorporeal membrane oxygenation, ECMO)、心室辅助装置(ventricular assist device, VAD)和全人工心脏(total artificial heart, TAH)等。

MCSD 的使用策略 BTT 适用于药物治疗无效的等待移植的心力衰竭患者;BTR 适用于急性暴发性心肌炎、顽固性恶性心律失常、急性广泛性心肌梗死、心脏术后低心排出量、心脏移植失败、药物治疗无效的患者;DT 适用于无法行心脏移植却又需循环辅助的终末期心力衰竭患者^[4]。

* 通信作者:董念国, E-mail: 1986xh0694@hust.edu.cn, 湖北省武汉市江汉区解放大道 1277 号

MCS D 的分类 MCS D 可根据辅助时限分为长期和短期装置;根据是否植入体内分为体外和体内装置;根据血流流体力学特点分为连续流和搏动流装置;根据辅助部位分为左心室辅助装置(left ventricular assist device, LVAD)、右心室辅助装置(right ventricular assist device, RVAD)和双心室辅助装置(bi-ventricular assist device, BVAD)^[5]。

MCS D 的选择 选择合适的 MCS D 及时干预,使心脏部分或充分休息,从而安全渡过急性期。MCS D 适应证和装置的选择必须在充分评估患者心力衰竭阶段、血流动力学反应、严重程度以及前期临床疗效基础上进行。临时 MCS D 的选择和使用应由专业的心脏病专家、重症监护医生、外科医生、专科护士和其他医疗保健人员联合评定,并尽可能在发生难治性心源性休克之前尽早使用^[6]。

短期机械循环辅助装置

短期 MCS D 主要用于急性心力衰竭或心源性休克患者,特别是对正性肌力药不敏感的急性血流动力学紊乱患者,短期 MCS D 能快速改善全身关键脏器灌注,提供有效循环支持。短期 MCS D 多采用经皮穿刺植入。

IABP 装置 IABP 工作原理是经股动脉穿刺,将球囊放置于胸降主动脉部位,在心脏舒张早期球囊充气,提高舒张压,优化冠状动脉血流,在心脏收缩期前球囊放气,降低心室射血阻力,最终增加心输出量,有效辅助循环。IABP 适用于急性心力衰竭的短期临时治疗,优点是操作简单快捷、并发症少,但 IABP 对终末期心力衰竭的帮助有限,主要因为:① IABP 不能改善左室功能,若左室功能严重降低, IABP 无法增加心输出量;② IABP 需要稳定的心脏节律才能有效运行,对于严重心力衰竭导致的心律失常无法提供有效支持;③ IABP 对肾脏微循环和下肢的改善也较弱,不适用于严重心力衰竭患者^[7]。IABP 对主动脉瓣关闭不全或外周血管病患者禁用,其常见并发症包括感染、卒中、出血等。

ECMO 装置 ECMO 的原理是将静脉血引出体外,在体外膜式氧合器氧合后再泵入体内,以替代心肺功能,能够为暴发性心肌炎、急性心肌梗死与心肺衰竭患者提供充足的氧供和循环支持,为心肺功能的恢复赢得时间,是国内急性心肺衰竭和低心排患者进行短期循环支持较为常用的 MCS D^[8,9]。ECMO 分为静脉-静脉插管辅助 ECMO (veno-venous ECMO, VV-ECMO) 和静脉-动脉插管辅助 ECMO

(veno-arterial ECMO, VA-ECMO) 2 种类型,其中 VA-ECMO 常用于重症心力衰竭患者在等待心脏移植时的过渡及围术期急性心肺衰竭的循环支持,对心源性休克患者,VA-ECMO 辅助的长期预后也较好。VA-ECMO 的优点是可床旁进行动静脉插管,操作简易,易于拔除,能同时辅助心肺功能。常见并发症包括出血、脑卒中、下肢栓塞及缺血、急性肾损伤、严重感染等。但 VA-ECMO 对左心室无直接卸负荷的作用,且逆行动脉血流会增加左心室后负荷,造成左心室腔压力升高,阻止左心室射血,可能导致左心室扩张、缺氧甚至肺水肿。研究表明,采用更细的 VA-ECMO 插管和更小的血流量可减轻这种影响,必要时可联合 IABP、Impella、外科左心室引流或房间隔打孔等方法降低左心室压力和肺水肿,降低死亡率^[10]。此外,外周动脉插管可能导致远端肢体缺血坏死,需要常规监测远端肢体灌注情况,必要时需放置远端肢体灌注管。由于 VA-ECMO 使用有一定的并发症及病死率,应根据患者的个体危险分层来决定是否使用该装置。

Impella 装置 Impella 是目前最小的主动式微型轴流泵机械辅助装置,通过股动脉穿刺或腋动脉置入,将其导管送至左室心尖部,轴流泵跨越主动脉瓣,将来自左心室的血泵入主动脉,以增加心输出量,降低心室压力和容量负荷,同时增加冠状动脉血流,改善心肌灌注。根据流量不同可分为 Impella 2.5、Impella CP、Impella 5.0 和 Impella 5.5 等不同型号。与 IABP 不同,Impella 不需要与心动周期同步,无需心电图或动脉波形,在快速性心律失常或机械电分离状态下也保持稳定性能。目前 Impella 通常用于高风险经皮冠状动脉介入术,在术中提供额外的心脏支持,维持血流循环,或心源性休克患者的短期治疗。Impella 并发症主要包括移位、出血、主动脉瓣损伤、心律失常、血栓、溶血、脑卒中和肢体缺血等。Impella 和 ECMO 在治疗急性心肌梗死与心源性休克方面,两者在 30d 及长期死亡率方面没有差异,且比 ECMO 并发症更少^[11]。同时,心源性休克 ECMO 支持期间使用 Impella 进行左心卸负荷能显著提高生存率且不增加大出血风险^[12]。既往多中心前瞻性随机对照研究对比了 IABP 和 Impella 用于围术期心肌梗死患者的治疗效果,发现 2 组 30 d 不良事件发生率无显著差异,但随访 90 d 时 Impella 组患者的重大不良事件显著减少,预后更好,生存率得到显著改善^[13]。然而,对于使用 Impella 的时机、指征及选择都存在一定的争议,还需大规模临床随机

对照试验进一步验证。

TandemHeart 装置 TandemHeart 是一种经皮穿刺过房间隔的 VAD,由动脉导管、机械轴承离心泵和穿隔膜导管等组成,可无需麻醉经股静脉过房间隔达左心房,有效降低左心负荷,主要应用于心脏术后心力衰竭、高风险经皮冠状动脉介入治疗和临时桥接或心脏移植^[14]。TandemHeart 可提供更高的流量辅助支持,所以在更复杂的手术围术期,比 Impella 更有优势。但是经房间隔穿刺的 TandemHeart 植入术具有一定挑战性,同时由于机械轴承的血液相容性更差,易导致血栓或溶血的发生。

CentriMag 装置 CentriMag 是一种磁悬浮离心泵,能与各类型插管连接,因使用磁悬浮转子,较少出现血液溶血、湍流或血栓,机械故障几乎为零^[15],并且能在较低转速下产生最高 10 L/min 连续流量。CentriMag 是一种可靠、简便、具有多功能的短期 MCS,能提供单心室或双心室支持,可作为急性心力衰竭的 BTT 或心源性休克患者的 BTR/桥接决策(bridge to decision,BTD)。CentriMag 安全使用期限可以超过 30 d,且并发症很少。其不足之处在于植入时需在外科手术室内进行正中切开胸骨,创伤较大,植入技术要求较高。CentriMag 产品尚未进入国内市场。国内和 CentriMag 同类的产品有心擎医疗自主研发的 MoyoAssist® 磁悬浮体外心室辅助系统(Extra-VAD)。至 2022 年底,华中科技大学同济医学院附属协和医院累计完成 14 例 Extra-VAD 植入(全国累计 40 例临床试验病例),平均辅助时间为 9.1 d(最短 5 d,最长 17 d),患者平均年龄为 52.8 岁(最小 24 岁,最大 71 岁),微创插管率为 57.1%(经股静脉或颈静脉穿房间隔置引流管)。在这 14 例患者中,有 5 例桥接心脏移植(BTT),6 例心脏术后无法脱机桥接恢复(BTR),用 Extra-VAD 辅助 5~9 d 后撤机,还部分应用于术前心源性休克 BTD,最长辅助 17 d^[16]。

长期机械循环辅助装置

长期 MCS 一般指辅助超过 3 个月的 MCS,以体内植入式 LVAD 为主,目前国外以 HeartMate 3 为主流,随着近年快速发展,国内主要有 HeartCon、CH-VAD、Evaheart 等产品,目前重量最轻、体积最小的磁悬浮离心式 LVAD-CorHeart 6 也已上市。长期 MCS 适应证主要有:①晚期心力衰竭依赖正性肌力药物者;②频繁入院治疗的有低氧血症的心力衰竭者;③进行性心源性恶病质者;④继发于低心输出

量的可逆性终末器官功能障碍;⑤ 6 min 步行距离 < 300 米;⑥在最佳药物治疗的情况下,生活质量较差,纽约心脏协会的心功能分级(New York Heart Association,NYHA)Ⅲ~Ⅳ级;⑦心脏再同步化治疗无效者等^[17]。

HeartMate II (HM II) 装置 HM II 作为第二代连续血流轴流泵,与淘汰的第一代相比,结构简化,体积缩小,泵内仅包含一个活动部件-叶轮,可在 100 mmHg 后负荷下产生 10 L/min 高流量,工作效率更高,被广泛使用。HM II 轴流泵重量约 400 g,使用寿命 5 年以上,血液从左室流入泵体,经过泵到达升主动脉。HM II 的红宝石轴承有利于散热,用钛微珠涂覆管道接头和血液接触面,显著提升血液相容性,血细胞破坏程度明显减轻。HM II 轴流泵是较常用的第二代 LVAD,2008 年和 2010 年分别获得美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration,FDA)批准用于 BTT、DT,迄今已经治疗超过 26 600 例患者^[18]。据国际机械循环辅助协会报道,植入 HM II 的患者 1 年生存率为 80%,2 年生存率为 69%,并且出血、感染、神经功能障碍等并发症较少,唯一不足是泵血栓问题^[19]。研究表明,HM II 植入 3 个月泵血栓发生率从 2.2% 升到 8.4%^[20],但临床上可通过提高抗凝标准[(国际标准化比值(INR)升高至 2.0~3.0)]、肝素桥接疗法等降低泵内血栓形成和脑卒中风险

HeartMate 3 (HM3) 装置 HM3 是第三代磁悬浮离心泵,采用全磁悬浮叶轮,其转子靠主动磁悬浮悬挂在泵的主体腔内,悬浮和旋转驱动靠同一个定子完成,各部件之间无接触,减少磨损和电源消耗,降低溶血风险,泵的耐久性显著提高,使用寿命至少 10 年^[21]。血泵重量 200 g,可安装在心包腔内,引流管经心尖插入左心室,流出管与升主动脉吻合。HM3 2015 年获得欧盟 CE 认证用于长期循环辅助治疗,2017 年通过 FDA 认证用于 BTT 治疗,2018 年开始用于 DT 治疗。多中心、随机对照试验比较植入 HM II 和 HM3 治疗终末期难治性心力衰竭患者的效果与安全性,2 年随访结果显示,HM3 组脑卒中风险降低了 58%,大出血风险降低了 36%,设备故障率和泵血栓形成等风险也显著降低^[22]。

TAH 装置 TAH 是迄今唯一双心室辅助的植入式 MCS。70ccSynCardia 是世界上首个、也是目前唯一获得 FDA 许可和商业认证的 TAH,适合体表面积(body surface area,BSA) > 1.7 m² 的患者,它由 4 个人工瓣膜和 2 个半刚性聚氨酯心室构成,属于

气动搏动流人工心脏,植入时需切除原有心脏,左右人工心室分别与肺动脉和主动脉连接^[23]。尺寸更小的50ccSynCardia则适合BSA较小的女性或儿童患者使用。TAH术后1年生存率可高达70%,双心室衰竭患者BTT的有效率为79%。SynCardia TAH的常见并发症包括感染、出血、脑卒中、血栓形成、慢性贫血等,其中感染是影响患者术后生存时间的重要因素。

ChinaHeartVAD(CH-VAD)装置 CH-VAD是我国具有自主知识产权的第三代磁悬浮离心泵,由苏州同心医疗器械有限公司研发,该装置体积迷你化,厚度26 mm,直径50 mm,质量轻,仅186 g。CH-VAD具有良好的流量稳定性,血液相容性好,在最高转速4 500转/min(压力差为100 mmHg)时可提供11 L/min的高流量支持,性能优良,辅助过程中几乎很少发生与器械植入相关的缺血或栓塞情况^[24]。CH-VAD于2017年6月完成了4例人体植入,患者年龄为23~46岁,其中2例扩张型心肌病患者分别于辅助第116、193天成功移除设备,1例心肌炎患者辅助34 d后死亡,死亡原因与装置无关。2021年CH-VAD®植入式左心室辅助系统获得国家药品监督管理局批准上市。

永仁心(EVAHEART I)装置 EVAHEART最初是日本东京女子医科大学、早稻田大学、日本产业技术研究所和太阳医疗研究所共同研发的由纯钛制成的离心式血泵,重量约420 g,叶轮直径40 mm,正常转速为1 800~2 400转/min,最大流量可达10~15 L/min。EVAHEART的特色之一在其纯水密封系统,它通过经皮驱动装置将水循环到血泵内,可有效润滑轴承、消除杂质和散热^[25]。此外,其平缓的流量压力曲线使得血泵可配合患者心率供血,形成有效脉动血流。EVAHEART I 2017年8月获批中国国内首家植入式左室辅助系统临床试验批件,2019年8月26日成为国内首款获批的人工心脏产品。EVAHEART I的心室内引流管进入心室腔,管壁与心室壁之间易形成血栓,EVAHEART 2采用具有双缝合环、不进入心室腔的心室内引流管,显著降低血栓形成,降低了脑卒中风险及室间隔偏移的发生率^[26]。

据国际数据(The STS Intermaacs数据库)显示,自2005~2018年HeartMate II共计植入约2.7万例,2016~2018年HeartMate 3植入约4 000例。目前国内LVAD植入尚处于起步阶段,先后有30余家医院开展超过200余例LVAD植入手术。至2022年底,武

汉协和医院共计已完成20例LVAD植入手术,患者以扩张性心肌病为主,近中期生存率达到国际先进水平,其中深圳核心医疗Corheart 6植入11例,苏州同心医疗CH-VAD植入7例,重庆永仁心医疗Evaheart植入2例^[16]。

左心室辅助装置植入后的运行管理

术后抗凝及抗血小板聚集治疗 LVAD植入术后第1天如无明显出血,即可肝素抗凝,术后24~72 h内开始应用阿司匹林,并通过血小板聚集率监测。研究表明,长期应用抗血小板药物可降低脑卒中发生率,专家共识推荐使用阿司匹林(81~325 mg/d)进行长期抗血小板聚集治疗^[27]。

术后并发症及处理措施 血泵植入1年内最常见并发症是出血、感染及脑血管意外。

1. 出血。LVAD植入后最常见并发症是出血,主要因凝血系统中血小板、凝血蛋白和血管性Ⅷ因子等异常所导致。乳酸脱氢酶水平>500 IU/L且持续增高,高度提示存在出血风险。术后2周内外源性凝血途径的激活导致凝血因子大量消耗,加上血管性血友病因子多聚体大量丢失,导致患者在术后容易引发出血。针对以上出血并发症,术后应暂缓并逐渐恢复抗凝治疗。对于出血所引起的贫血,必要时可予以红细胞输注^[28]。

2. 感染。血泵植入相关感染发生率仅次于出血,是导致患者远期败血症和死亡的重要因素。感染多始于经皮导线进出体内部分的浅层组织,但也可迁延数月演变成深层组织感染^[29]。虽血行感染可导致患者死亡,但若患者能及时接受心脏移植,仍能取得远期良好效果。抗感染方案原则是预防为主,关口前移,尽可能内外科结合,减缓其演变进程。

3. 脑卒中。LVAD植入后脑卒中是常见的脑血管意外并发症,相对而言,缺血性脑卒中的发生率较高,但出血性脑卒中的致残率或致死率更高。研究表明,平均动脉压>90 mmHg、阿司匹林剂量<81 mg/d或INR>3.0是出血性脑血管意外的高危因素,要及时调整干预^[30]。

机械循环辅助装置的选择

在临床应用时要根据患者具体情况对MCS进行选择。短期MCS要根据患者心功能和全身情况进行选择,如左心功能差,右心功能正常,可选择离心泵(如Extra-VAD)或轴流泵(如Impella)。如左右双心室功能均较差,应选择VA-ECMO(结合

心房分流器)或 bi-ExtraVAD 等。对于伴有恶性心律失常者则轴流泵(Impella)是首选。

长期 MCSD 和心脏移植之间的选择也是个难题,可以从以下几个方面考量和评估:限制性心脏病、右心衰竭、存在抗凝禁忌、左室舒张末期内径 < 45 mm 以及拒绝植入 LVAD 的患者,首选心脏移植;体重指数 >35、糖化血红蛋白 >7.5、群反应性抗体强阳性、重度肺动脉高压、精神心理障碍或超过年龄限制的患者,应先行植入 LVAD 治疗,后期再做进一步评估;如果患者既适合 LVAD 治疗也适合心脏移植,在等待供心过程中,若出现心功能衰竭,则可先植入 LVAD,病情稳定后,再评估行心脏移植^[31]。

总结与展望

MCSD 目前已经成为终末期心力衰竭患者有效治疗手段,在全世界应用广泛,虽国内尚处于起步阶段,但发展迅速,已有多款设备投入使用或已上市。

小型化、智能化、便携化、高生物相容性和适用人群广泛是所有新型 MCSD 未来发展方向。相信不久的将来 MCSD 将会最大程度改善终末期心力衰竭患者的生存率和生活质量。未来我国 MCSD 国产装置的研发还要着重于多学科团队的积极合作和整合,开展前瞻性注册登记研究,产、学、研一体化深度融合,使我国广大心力衰竭患者获益的同时,也可提升国产设备在全球高端医疗器械领域的竞争力。

参考文献

- Boorsma EM, Ter Maaten JM, Damman K, et al. Congestion in heart failure: a contemporary look at physiology, diagnosis and treatment [J]. *Nat Rev Cardiol*, 2020, 17(10): 641-655.
- Shah KS, Kittleson MM, Kobashigawa JA. Updates on heart transplantation[J]. *Curr Heart Fail Rep*, 2019, 16(5): 150-156.
- Simon MA, Bachman TN, Watson J, et al. Current and future considerations in the use of mechanical circulatory support devices: an update, 2008-2018[J]. *Annu Rev Biomed Eng*, 2019, 21: 33-60.
- Dardas TF. Impact of mechanical circulatory support on posttransplant outcomes[J]. *Cardiol Clin*, 2018, 36(4): 551-560.
- Ferrari MW. Mechanical circulatory support in cardiogenic shock[J]. *Med Klin Intensivmed Notfmed*, 2019, 114(1): 77-90.
- Chera HH, Nagar M, Chang NL, et al. Overview of Impella and mechanical devices in cardiogenic shock[J]. *Expert Rev Med Devices*, 2018, 15(4): 293-299.
- Parissis H, Graham V, Lampridis S, et al. IABP: history-evolution-pathophysiology-indications: what we need to know[J]. *J Cardiothorac Surg*, 2016, 11(1): 122.
- Chakaramakkil MJ, Sivathanan C. ECMO and short-term support for cardiogenic shock in heart failure[J]. *Curr Cardiol Rep*, 2018, 20(10): 87.
- Ratnani I, Tuazon D, Zainab A, et al. The role and impact of extracorporeal membrane oxygenation in critical care[J]. *Methodist Debakey Cardiovasc J*, 2018, 14(2): 110-119.
- Vieira JL, Ventura HO, Mehra MR. Mechanical circulatory support de-

vices in advanced heart failure: 2020 and beyond[J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2020, 63(5): 630-639.

- Alushi B, Douedari A, Froehlig G, et al. Impella versus IABP in acute myocardial infarction complicated by cardiogenic shock [J]. *Open Heart*, 2019, 6(1): e000987.
- Fiorelli F, Panoulas V. Impella as unloading strategy during VA-ECMO: systematic review and meta-analysis [J]. *Rev Cardiovasc Med*, 2021, 22(4): 1503-1511.
- Shinar Z. Is the "Unprotected Heart" a clinical myth? Use of IABP impella and ECMO in the acute cardiac patient[J]. *Resuscitation*, 2019, 140: 205-206.
- Neragi-Miandoab S, Goldstein D, D'Alessandro DA. TandemHeart device as rescue therapy in the management of acute heart failure[J]. *Heart Surg Forum*, 2014, 17(3): E160-E162.
- Mehta V, Venkateswaran RV. Outcome of centriMag™ extracorporeal mechanical circulatory support use in critical cardiogenic shock (INTERMACS 1) patients[J]. *Indian J Thorac Cardiovasc Surg*, 2020, 36(Suppl 2): 265-274.
- 刘鹏,王世杰,王寅,等.机械辅助循环装置的应用现状与选择[J]. *实用器官移植电子杂志*, 2023, 11(3): 266-269.
- Vieira JL, Ventura HO, Mehra MR, et al. Mechanical circulatory support devices in advanced heart failure: 2020 and beyond[J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2020, 63(5): 630-639.
- Sakamoto H, Kato H, Tsukada T, et al. Twisting of HeartMate II outflow graft 2.5 years after implantation-HM2 is still ongoing[J]. *J Artif Organs*, 2023, 20. doi: 10.1007/s10047-023-01387-y.
- Kirklin JK, Naftel DC, Kormos RL, et al. Interagency registry for mechanically assisted circulatory support (INTERMACS) analysis of pump thrombosis in the HeartMate II left ventricular assist device [J]. *J Heart Lung Transplant*, 2014, 33(1): 12-22.
- Kirklin JK, Naftel DC, Pagani FD, et al. Pump thrombosis in the thoracic heartMate II device: an update analysis of the INTERMACS registry[J]. *J Heart Lung Transplant*, 2015, 34(12): 1515-1526.
- Pettit SJ. HeartMate 3: real-world performance matches pivotal trial [J]. *Eur Heart J*, 2020, 41(39): 3810-3812.
- Pienta MJ, Knott K, Bitar A, et al. Late HeartMate 3 thrombosis [J]. *ASAIO J*, 2022, 68(5): e87-e89.
- Henn MC, Mokadam NA. Total artificial heart as a bridge to transplantation[J]. *Curr Opin Organ Transplant*, 2022, 27(3): 222-228.
- Zayat R, Moza A, Grottko O, et al. Tim grzanna tamara fechter tadashi motomura christian schmidt-mewes thomas breuer rüdiger autschbach rolf rossaint andreas goetztenich christian bleilevens. In vitro comparison of the hemocompatibility of two centrifugal left ventricular assist devices [J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2019, 157(2): 591-599. e4.
- Kitano T, Iwasaki K. Long-term durability test for the left ventricular assist system EVAHEART under the physiologic pulsatile load [J]. *ASAIO J*, 2018, 64(2): 168-174.
- Ushijima T, Tanoue Y, Sonoda H, et al. Potential of the EVAHEART 2 double-cuff tipless inflow cannula for prevention of thromboembolic events [J]. *ASAIO J*, 2022, 68(10): e168-e171.
- Mehra MR, Crandall DL, Gustafsson F, et al. Aspirin and left ventricular assist devices: rationale and design for the international randomized placebo-controlled non-inferiority ARIES HM3 trial [J]. *Eur J Heart Fail*, 2021, 23(7): 1226-1237.
- Gurbel PA, Shah P, Desai S, et al. Antithrombotic strategies and device thrombosis [J]. *Cardiol Clin*, 2018, 36(4): 541-550.
- O'Horo JC, Abu Saleh OM, Stulak JM, et al. Left ventricular assist device infections: a systematic review [J]. *ASAIO J*, 2018, 64(3): 287-294.
- Thakkar S, Rupareliya C, Doshi R. Incidence and impact of ischemic and hemorrhagic stroke after left ventricular assist device implantation: A nationwide study [J]. *Indian Heart J*, 2019, 71(5): 422-424.
- 董念国,王寅.中国医师协会心血管外科医师分会第十七届年会主题报告概述[J]. *中国心血管病研究*, 2022, 20(12): 1057-1061.