

心血管外科临床治疗的体外循环技术

成一鸣, 张博乐, 邓雅哲

华北理工大学 河北唐山

【摘要】体外循环是心血管外科手术的核心生命支持技术,但其非生理过程易引发炎症反应、凝血障碍及器官损伤等并发症。本文系统讲述该技术的演进,重点分析其在心肌保护、血液管理与抗凝监测、器官损伤防护等关键环节的最新进展。通过对国内外文献的梳理与对比,探讨微创体外循环系统、目标导向精准灌注等前沿趋势。

【关键词】体外循环; 心肌保护; 血液管理; 微创化; 精准灌注

【收稿日期】2026 年 2 月 17 日 **【出刊日期】**2026 年 3 月 31 日 **【DOI】**10.12208/j.ijmd.20260013

Extracorporeal circulation techniques in clinical treatment of cardiovascular surgery

Yiming Cheng, Bole Zhang, Yazhe Deng

North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei

【Abstract】 Extracorporeal circulation serves as the core life support technology in cardiovascular surgery, yet its non-physiological nature predisposes patients to complications such as inflammatory responses, coagulation disorders, and organ injury. This paper systematically reviews the evolution of this technology, focusing on recent advancements in critical areas including myocardial protection, blood management and anticoagulation monitoring, and organ injury prevention. Through a systematic review and comparison of domestic and international literature, it explores cutting-edge trends such as minimally invasive extracorporeal circulation systems and goal-directed precision perfusion.

【Keywords】 Extracorporeal circulation; Myocardial protection; Blood management; Minimally invasive techniques; Targeted perfusion

1 引言

1.1 研究背景与意义

心血管疾病 (CVD) 是全球范围内导致人类死亡的首要原因,其高发病率和死亡率对公共卫生系统构成了严峻挑战^[1]。根据世界卫生组织 (WHO) 的报告,每年有近 1800 万人死于心血管疾病,占全球总死亡人数的 30%以上。在我国,随着人口老龄化进程加速及居民生活方式的改变,CVD 的患病率与死亡率持续上升,已成为重大的公共卫生问题^[2]。对于终末期心脏病、严重冠心病、复杂先天性心脏病及瓣膜病等,外科手术仍是不可替代的核心治疗手段。

体外循环 (Cardiopulmonary Bypass, CPB) 技术,自上世纪五十年代由 John Gibbon 成功应用于临床以来,彻底改变了心脏外科的面貌。它通过一系列人工装置 (包括血泵、氧合器、滤器等) 临时替代患

者的心肺功能,将静脉血液引流至体外,进行氧合和二氧化碳排除后,再回输到动脉系统,从而在心脏停跳、手术野无血的状态下,为外科医生实施精细的心内操作提供了可能^[3]。因此,CPB 技术被誉为现代心脏外科的“生命线”,是绝大多数心内直视手术得以安全实施的先决条件和基石。

然而,我们必须清醒地认识到,CPB 本身是一种非生理性的循环支持过程。血液与体外循环管路的异物表面接触、非搏动性灌注、全身性抗凝与再灌注损伤等,均可触发强烈的全身炎症反应综合征 (SIRS),进而导致凝血功能紊乱、内皮细胞损伤,最终可能引起脑、肺、肾等重要器官的功能障碍^[4]。近年来,随着外科技术的进步,接受心脏手术的患者群体呈现出显著的高龄化、合并症多 (如糖尿病、慢性肾功能不全)、手术复杂化 (如再次手术、主动

脉手术)等特点。这一趋势对 CPB 技术的安全性与精细化程度提出了前所未有的更高要求。CPB 管理已不再仅仅是简单的“维持生命”,而是演进为一门涉及生理学、工程学、药理学和重症医学的复杂艺术。其技术水平的优劣,直接关系到手术的即时成功率、并发症发生率以及患者的远期生活质量和生存率。因此,对 CPB 技术进行系统性的回顾、总结其最新进展并展望未来方向,具有极其重要的临床意义与学术价值。

1.2 研究内容与结构

鉴于体外循环技术在心血管外科领域的核心地位及其面临的挑战与机遇,本文旨在对 CPB 技术进行一次全面而系统的梳理与展望。本文将首先深入剖析 CPB 系统的核心组件(如动力泵、氧合器)的工作原理与技术演进;继而重点论述 CPB 临床管理中的关键环节,包括预充与血液保护策略、抗凝与拮抗管理、以及心肌保护技术的进展;随后,系统分析 CPB 相关并发症(如 SIRS、凝血紊乱、脑肾损伤)的发生机制与综合防控策略;最后,将聚焦于微创 CPB、智能化监测、ECMO 等前沿进展,并对未来发展趋势进行展望。通过这一结构性的论述,本文期望能为临床工作者和相关研究人员提供一份有价值的参考,共同推动我国心血管外科体外循环技术的持续进步。

2 体外循环临床管理的关键环节

体外循环的成功实施,不仅依赖于性能卓越的设备,更取决于精细、科学的临床管理。CPB 期间,人体内环境发生剧烈变化,如何维持血流动力学稳定、有效抗凝并最小化血液损伤、以及最大限度地保护心肌等重要器官,是 CPB 管理的核心目标。本章将围绕预充与血液保护、抗凝与拮抗、心肌保护这三大关键环节展开系统论述。

2.1 预充与血液保护策略

CPB 管路系统在连接患者前,必须使用液体预先填充以排除空气,此过程称为“预充”。传统的预充方式主要采用晶体液(如乳酸林格液、复方电解质溶液),但其带来的较大预充量会导致显著的血液稀释,使患者血红蛋白浓度下降,增加了围术期异体输血的风险。

现代 CPB 管理的理念已从单纯的“预充”发展为全面的“血液保护综合策略”,其核心目标是减少甚至避免异体输血,从而降低输血相关感染、免疫

抑制和循环超负荷等风险。该策略是一个多模式的组合方案:

(1) 减少预充量与“无血/少血”预充:通过使用微创体外循环(MECC)系统、选择小体积氧合器和细口径管路,能够将预充量大幅降低至 500-800mL,从而减轻血液稀释。对于体重较轻或术前贫血的患者,通过精确计算,有时可实现“无血预充”,即不额外添加晶体液,仅用自身循环血量填充管路。

(2) 急性等容血液稀释:在 CPB 开始前,将患者一定量的自体血液采集出来暂存于抗凝袋中,同时补充等容量的晶体液或胶体液维持血容量。由于血液被稀释,CPB 中丢失的有形成分减少。在 CPB 结束或术后,再将富含凝血因子和血小板的自体血回输给患者。这是一种有效且经济的自体输血方法。

(3) 术中血液回收:使用血液回收机(Cell Saver)将手术野的出血吸引、抗凝、洗涤、浓缩后,得到纯净的红细胞悬液回输给患者。这能显著减少术中红细胞的丢失。

(4) 合理控制最低安全红细胞比容:根据患者年龄、合并症等因素个体化地设定 CPB 期间的红细胞比容(Hct)安全下限(通常成人维持在 22%-24%以上),避免不必要的输血。

(5) 药物性血液保护:术前使用促红细胞生成素(EPO)纠正贫血,术中应用抗纤溶药物(如氨甲环酸)抑制纤溶系统活化,减少术后出血。

2.2 抗凝与拮抗管理

由于血液与 CPB 管路巨大的异物表面接触,必须进行彻底的抗凝以防止致命的血栓形成。肝素是目前 CPB 期间唯一公认的抗凝剂。

(1) 标准流程与肝素抵抗

CPB 抗凝管理的标准流程始于活化凝血时间(ACT)的监测。在肝素化前,先测定基线 ACT 值(通常<130 秒)。然后,经静脉给予一定剂量的肝素(通常 300-400IU/kg),使 ACT 延长至 480 秒以上,方可开始 CPB。在转流过程中,需定期(通常每 30 分钟)监测 ACT,并根据需要追加肝素,以维持足够的抗凝水平。

肝素抵抗是指给予标准初始剂量肝素后,ACT 未能达到目标值的现象。其原因包括:抗凝血酶 III(AT-III)缺乏、肝素使用史导致肝素抗体形成、血小板计数过高、感染等。处理方案包括:追加肝素剂量、或补充新鲜冰冻血浆(提供 AT-III),在极少数

情况下需使用替代抗凝剂(如比伐卢定)。

(2) 个体化抗凝监测进展

传统的单一 ACT 监测存在局限性,它不能反映肝素的实际血浆浓度,且受低温、血液稀释、血小板功能等多种因素影响。因此,更为精准的肝素浓度-剂量反应曲线(Heparin Concentration-Response Curve)监测技术正在被推广。该技术通过测定不同肝素浓度下的 ACT 值,绘制出患者的个体化剂量反应曲线,从而可以同时监测肝素浓度(维持 2.0-4.0IU/mL)和抗凝效果(ACT>480 秒),实现真正的个体化抗凝管理,尤其适用于肝素抵抗或出血高风险患者。

CPB 结束后,需用鱼精蛋白完全中和肝素的抗凝作用。鱼精蛋白剂量通常根据体内残余肝素量(通过滴定法测定)或初始肝素总量按比例(1: 1 至 1: 1.3)给予。中和后需再次测定 ACT,确认其恢复至基线水平。

3 体外循环相关并发症及其防控进展

尽管体外循环技术为心脏手术提供了不可或缺的支持,但其作为一种非生理性过程,不可避免地会引发一系列病理生理反应,导致多种并发症。这些并发症是影响患者术后恢复速度、住院时间甚至远期预后的关键因素。因此,深入理解其发生机制并采取积极的防控策略,是现代 CPB 管理的核心内容。本章将重点探讨全身炎症反应综合征、凝血功能紊乱以及脑、肾等重要器官功能障碍的机制与最新防控进展。

3.1 全身炎症反应综合征

体外循环(CPB)触发的全身炎症反应综合征(SIRS)是术后多器官功能障碍的关键诱因,其机制主要涉及血液与异物表面接触激活凝血及补体系统、缺血-再灌注损伤导致氧自由基与中性粒细胞活化,以及肠道屏障功能受损引起的内毒素移位,共同促使促炎细胞因子风暴爆发,进而造成组织损伤。在防控方面,已形成多层次策略:通过肝素涂层管路从硬件上改善生物相容性;药物上酌情使用皮质激素或乌司他丁等以抑制炎症;并对危重患者应用连续性肾脏替代治疗(CRRT),以清除炎症介质并稳定内环境。

3.2 凝血功能紊乱与血液损伤

体外循环(CPB)所致的凝血功能紊乱主要表现为血小板数量减少与功能下降、纤溶系统激活及凝

血因子消耗,其发生与血液同异物表面接触、机械剪切力损伤及全身炎症反应密切相关。为精准管理这一复杂问题,血栓弹力图(TEG)/旋转血栓弹力仪(ROTEM)等粘弹性凝血监测技术已广泛应用于围术期,能够快速鉴别出血原因并针对性指导血液成分输注及止血药物应用,从而实现个体化凝血管理并有效减少异体输血。

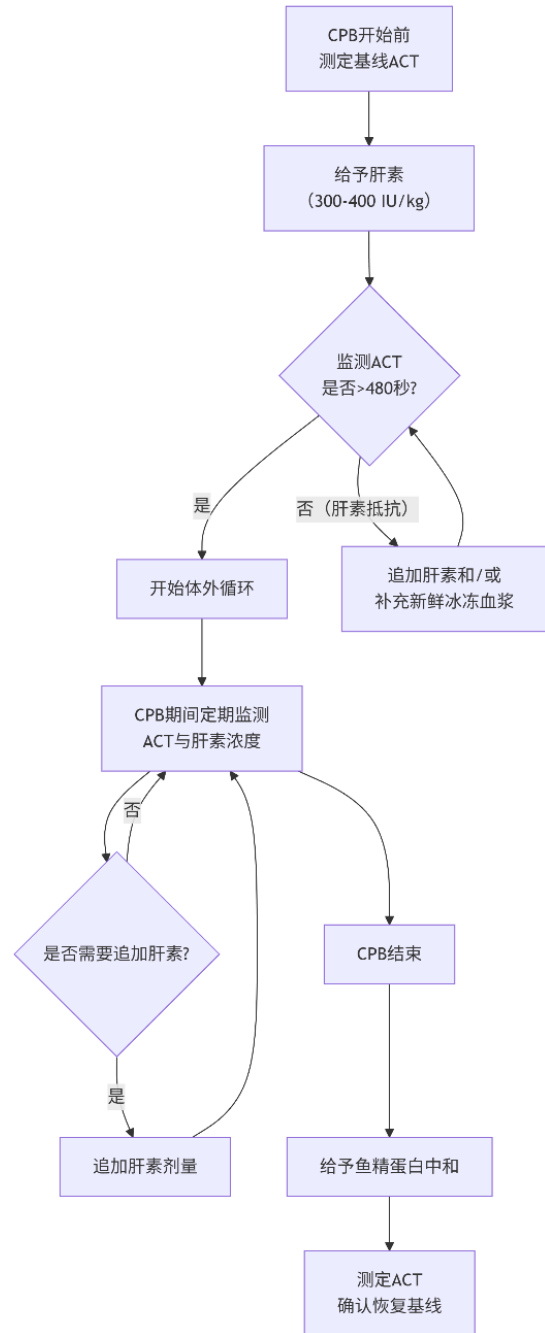


图1 体外循环期间抗凝管理流程图

3.3 器官功能障碍

体外循环(CPB)相关器官功能障碍以脑与肾脏损伤最为常见。脑损伤主要由微栓(气栓、血栓)栓塞及脑低灌注引发,可通过术中经颅多普勒(TCD)监测微栓、应用近红外光谱(NIRS)行脑氧饱和度导向灌注等神经保护策略进行防控。急性肾损伤(AKI)则与非搏动性灌注、炎症反应及缺血再灌注等因素相关,其保护潜力在于优化灌注压力、采用搏动灌注技术及避免肾毒性药物等综合管理措施。

4 结论

本研究系统回顾了体外循环技术的发展历程,全面阐述了其核心组件工作原理、临床管理关键环节及相关并发症的防控策略。分析表明,当前体外循环技术正朝着微创化、精准化和智能化的方向快速发展,微创体外循环系统、目标导向灌注等创新技术不断推动着该领域的进步。未来,随着组织工程、人工智能等前沿技术的深度融合,个体化与损伤最小化将成为主要发展趋势,这必将进一步改善患者预后,推动心血管外科整体治疗水平的持续提升。

参考文献

- [1] Virani S S, et al. Heart Disease and Stroke Statistics—2020 Update: A Report From the American Heart Association. *Circulation*, 2020.
- [2] 《中国心血管健康与疾病报告 2022》编写组. 《中国心血管健康与疾病报告 2022》概要. *中国循环杂志*, 2023.
- [3] Hessel E A, et al. A Brief History of Cardiopulmonary Bypass. *Seminars in Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*, 2014.
- [4] Warren O J, et al. The Inflammatory Response to Cardiopulmonary Bypass: Part 1—Mechanisms of Pathogenesis. *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*, 2009.
- [5] Murphy G S, et al. The Use of Cerebral Oximetry for the Detection of Cerebral Desaturation in Cardiac Surgery: A Systematic Review. *Anesthesia & Analgesia*, 2018.
- [6] Li Y, Wang H, Zhang J, et al. Safety and efficacy of a novel spiral flow-integrated membrane oxygenator in cardiopulmonary bypass: a multicenter randomized controlled trial [J]. *Chin Med J (Engl)*, 2025, 138 (11): 1321-1329.
- [7] Dayama A, Sugano D, Reeves JG, et al. Early outcomes and perioperative risk assessment in elective open thoracoabdominal aortic aneurysm repair with extracorporeal circulation[J]. *Vascular*, 2016, 24(1): 3-8.
- [8] Calero A, Illig KA. Endovascular vs. open repair of aortic aneurysms: the role of extracorporeal circulation in the modern era[J]. *Semin Vasc Surg*, 2016, 29: 3-17.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS