

负压辅助静脉引流技术在心脏外科应用进展与挑战

宋 扬,田仁斌,王 波,张 黔,张晓迪,刘达兴,张登沈
(遵义医科大学附属医院心脏大血管外科,遵义 563000)

摘要 负压辅助静脉引流(VAVD)技术是一种通过在密闭的储血器内施加负压以增加静脉引流量的技术。在心脏外科手术中,特别是微创心脏手术和低体重患者的手术中,VAVD技术因其能够提高静脉回流效率、减少体外循环(CPB)预充量及改善手术视野的显著优势而得到广泛应用。本文综述了VAVD技术的基本原理、在心脏外科中的临床应用及其带来的技术优势,包括提高手术安全性和减少术中并发症。此外,还探讨了VAVD技术在实际应用中所面临的挑战,如气体栓塞风险、血液损伤、设备的复杂性及较高的操作要求等。为解决这些问题,本文提出了改进措施和未来研究方向,以期进一步优化VAVD技术的应用,提高其在心脏外科手术中的可靠性和安全性,促进VAVD技术在心脏外科中的广泛应用和持续改进。

关键词 负压辅助静脉引流;体外循环;心脏外科;血液保护;微创心脏手术;气体栓塞

中图分类号:R654.2 文献标志码:A 文章编号:1005-930X(2024)08-1220-07

DOI:10.16190/j.cnki.45-1211/r.2024.08.017

Progress and challenges in the application of vacuum assisted venous drainage in cardiac surgery

SONG Yang, TIAN Renbin, WANG Bo, ZHANG Qian, ZHANG Xiaodi, LIU Daxing, ZHANG Dengshen. (Department of Cardiovascular Surgery, Affiliated Hospital of Zunyi Medical University, Zunyi 563000, China)

Abstract Vacuum assisted venous drainage (VAVD) is a technique that increases the volume of venous drainage by applying negative pressure in a closed blood reservoir. In cardiac surgery, especially in minimally invasive cardiac surgery and low-weight patients, VAVD technology has been widely used because of its significant advantages of improving venous drainage efficiency, reducing cardiopulmonary bypass (CPB) priming and improving the clarity of the surgical field. This article reviews the basic principles of VAVD technology, its clinical application in cardiac surgery, and its technical advantages, including improving surgical safety and reducing intraoperative complications. In addition, the challenges faced in the practical application of VAVD technology, such as gas embolism risk, blood injury, device complexity, and high operational requirements, are discussed. In order to solve these problems, this article proposes improvement measures and future research directions, so as to further optimize the application of VAVD technology, improve its reliability and safety in cardiac surgery, and promote the widespread application and continuous improvement of VAVD technology in cardiac surgery.

Keywords vacuum assisted venous drainage; extracorporeal circulation; cardiac surgery; blood conservation; minimally invasive cardiac surgery; gas embolism

在传统的的心脏外科体外循环(cardiopulmonary bypass, CPB)手术中,静脉引流常依赖于重力或虹吸作用来实现,然而在某些复杂的心脏手术中,尤其是涉及到低心排量、低静脉回流或特殊体位的情况下,传统的静脉引流可能会遇到瓶颈,导致手术视野受限、静脉血回流不畅等问题^[1]。负压辅助静

脉引流(vacuum assisted venous drainage, VAVD)作为一种将负压加载到密闭的储血器内,通过调整储血器内负压来增加静脉血引流量的新兴技术,已经逐渐被引入心脏外科手术中,其不仅能够提高手术视野的清晰度、降低术中血液损失,还能减少CPB预充量以及血液制品使用,特别是在腔镜手术、复

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(No. 82360086;No. 82160060)

[通信作者] 张登沈,E-mail:xwkzds2021@163.com

[收稿日期] 2024-07-24

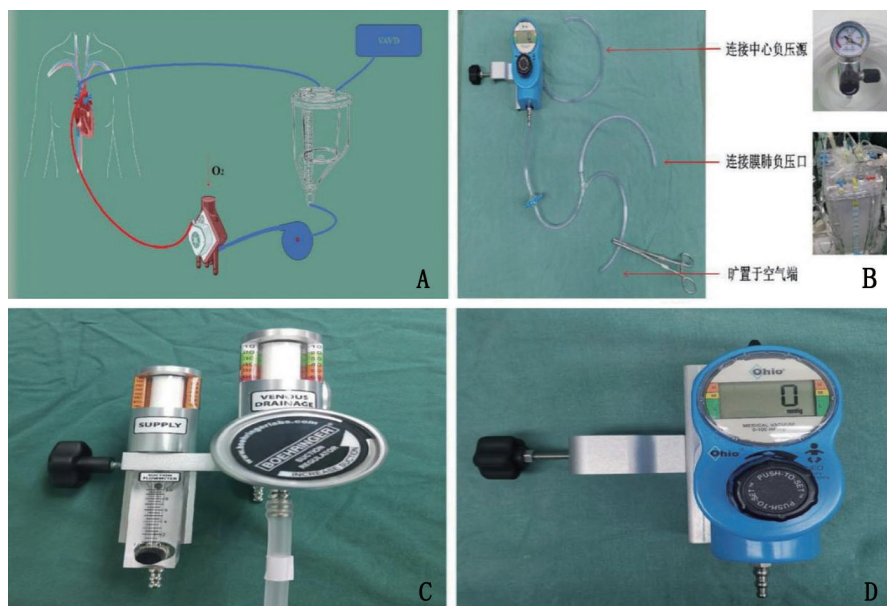
杂先天性心脏病矫治术等领域,VAVD的优势更加明显^[2],然而,该技术在实际应用中仍存在一些挑战和争议,例如气栓风险的增加、血液创伤以及操作要求高等^[3]。因此,对VAVD技术在心脏外科中的应用进行系统综述,有助于进一步了解其临床效果、安全性及优化应用策略。本综述将从VAVD的基本原理、临床应用现状、技术优势及潜在风险等方面进行综述,并探讨其在未来心脏外科中的发展前景。通过对现有文献的系统梳理与分析,为临床实践提供科学依据,并为进一步研究和改进该技术提供参考。

1 VAVD 技术原理

心脏外科手术旨在通过围术期每一个环节来保证手术的成功,作为心脏外科团队的一员,灌注医生应在实施手术前对患者的病情特征、手术的方式类型、CPB所需物品耗材进行仔细评估和精心准备,尤其是对影响静脉引流的各种因素进行认真评估,从而采取合理灌注策略及转流措施,这对能否安全快速建立CPB并平稳运行极为重要^[4]。在CPB中,静脉引流量取决于中心静脉压、储血器内液体平面高度与心脏水平高度的差值以及静脉插管和静脉回路中的阻力,相应公式为 $F=0.051 2D + 8.501 6C-2.609 3-1.223 1L$,其中 F 为静脉流量(L/min)、 D 为引流负荷(cmH_2O)、 C 为管路系统的横截

面积(cm^2)、 L 为管路长度(m)^[5]。由此可见,若要获得满足CPB平稳运行的静脉流量需要满足3点,即增加引流负荷、减少管路横截面积、减少管路长度,而VAVD正好可以满足这3点。所以,合理应用VAVD技术于心脏手术,使心脏得以充分引流、术野得以充分暴露、管路迷你化,从而减小组织创伤,无疑是为心脏手术保驾护航^[6]。

VAVD系统包括一个带负压减压阀的静脉储血器、一个负压调节器、一个负压源、一个压力传感器和一个VAVD套件(包括带1/4接口的Y型连接器管路、一个蒸馏水收集罐和一个正压减压阀)。临床常用的静脉储血器有Maquet、Medtronic、Terumo、Sorin等品牌的产品,负压调节器有Baxter、Ohio等品牌的产品。负压调节器包括负压输入和输出口、快速启动开关、负压调节旋钮、压力安全释放阀,负压调节器压力调节区间为 $-13.3\sim 0\text{ kPa}$ 。设置VAVD时,静脉储血器上的所有端口用肝素帽密封,静脉储血器顶部的端口连接压力传感器,用于监测静脉储血器内部压力,带Y型的压力快速释放管(主要用于负压突然过高时储血器内压力快速释放,使静脉储血器与大气相通)和蒸馏水收集罐(主要用于收集管路中的蒸馏水,避免蒸馏水回流至储血器造成血液污染或蒸馏水吸入负压调节器)的负压端连接到静脉储血器的排气口,蒸馏水收集罐上的另一个端口连接到负压调节器,负压调节器连接到负压源上^[7],见图1。



A: CPB连接图; B: VAVD连接图; C、D: 负压调节器。

图1 VAVD装置示意图

使用VAVD时,应先根据标准程序启动CPB,观察中心静脉压、右心房内血液量、贮血器液体平面等情况,若静脉引流不佳,再开启负压辅助装置,负压调节器可以打开到 -2.66 kPa 或更低的负压,同时监测静脉储血器的液体平面是否增加,并相应增加泵流量,直到获得足够的灌注。当患者手术需要停止CPB时,需在停止CPB前终止VAVD,首先打开压力快速释放管,关闭负压调节器,方可停止VAVD,CPB的停止可以按常规方式进行,见图2。

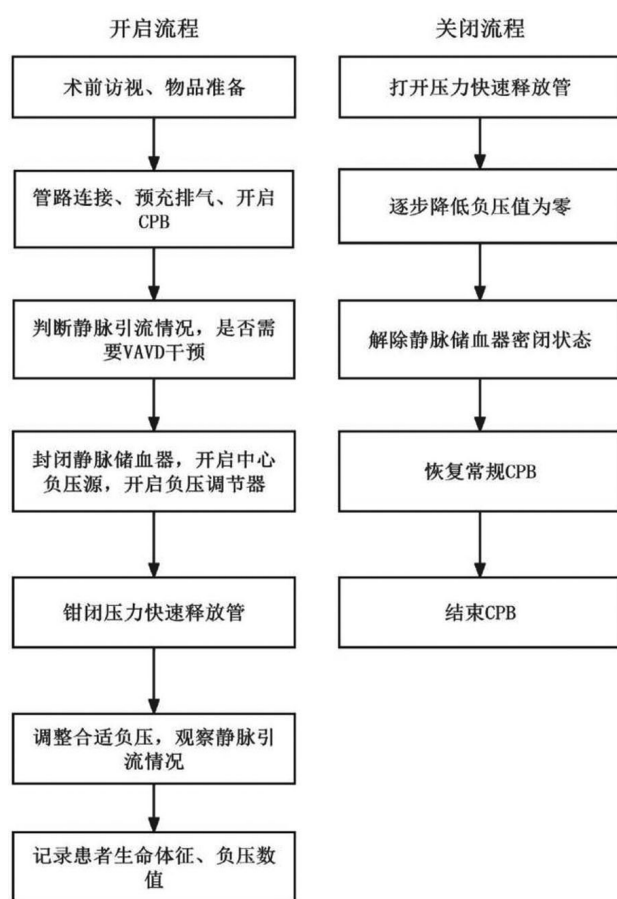


图2 VAVD开启及关闭流程

2 临床应用

2.1 微创心脏手术中的应用 微创技术在心脏外科领域的应用始于20世纪90年代中期,克利夫兰诊所和哈佛医学院首先开启心脏手术微创化^[8],并逐步将其发展为常规手术方式。近年来国内多个心脏中心也逐步开展微创心脏外科手术,获得了与传统手术方法相当的疗效和安全性^[9]。随着心脏外科手术技术不断进步、微创医疗器械不断发展、医患双方对于微创理念不断更新,心脏外科手术入路逐渐由正中开胸至微创小切口转变,如胸腔镜心脏

手术、腋路、胸骨上段、下段小切口,左、右前外侧切口等不同的手术入路,此类入路规避了手术切口大、瘢痕不美观、伤口恢复慢等传统开胸带来的问题^[3]。开展微创心脏手术,外科医生需严格把握手术禁忌证与适应证,并由具备相应手术资质、丰富临床经验、熟练掌握微创手术操作技巧的医生进行手术,且术中需注意以下两点:一是根据患者具体病情,选择合适型号插管,顺利建立CPB,以保证手术进行;二是创造良好手术视野,合理选择操作孔的位置,术中应用经食道超声对静脉引流管的位置、瓣膜置换状态、心内排气等予以观察^[3]。

鉴于微创手术大都需要建立外周血管体外循环(peripheral extracorporeal circulation, PECC),外周插管管径小、管路长,给静脉引流带来更大的阻力。常规体外循环静脉引流完全靠重力或虹吸作用来实现,而在腔镜手术等微创手术中,仅靠重力引流显然不能达到需要的流量,因此需要VAVD辅助才能达到满意的静脉引流,从而保证组织的有效灌注。VAVD的使用,让术野暴露更充分、使术者操作更便利,且VAVD技术本身是通过从静脉凹流端进行负压吸引、主动引流,不受重力等影响,从而缩短管路长度并且可以减小静脉管道的口径,升高体外循环设备的整体高度,减少预充量,实现CPB管路的迷你化,因此合理应用VAVD技术于心脏外科手术,对于CPB的顺利实施十分重要。一项研究总结了股静脉插管引流技术在微创三尖瓣手术中应用VAVD的经验^[10],将动脉插管插入股动脉,同时将静脉插管插入股静脉,经食管超声心动图引导静脉插管到达上腔静脉内,术中配合使用VAVD技术,心脏获得充分的引流,保证了良好的手术视野,这一研究说明在微创三尖瓣手术中,使用进行VAVD技术进行静脉引流是可行的^[10]。

2.2 先天性心脏病手术中的应用 随着外科诊疗水平的提高和外科医生对围术期手术细节的精准把控,手术团队对先天性心脏病,尤其是低龄、低体重先天性心脏病手术的认识也越来越深刻。先天性心脏病患儿体重轻、各器官功能发育不成熟、代谢率高,CPB灌注流量至少需要达到 $160\text{ mL}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ 才能满足机体需要,且患儿血容量少、对血液稀释耐受性差,组织结构疏松,容易造成CPB后组织水肿^[7],VAVD技术因有显著减少CPB预充容量的优势,所以在儿童心脏手术中也应用广泛^[11]。应用VAVD技术可降低储血器内液体平面高度与心脏水平高度的差值,缩短管路长度,减少预充量,减轻患儿血液稀释对内环境改变的影响,避免由于血液

稀释及毛细血管静水压升高而增加组织液渗漏引起的组织水肿,保证了各脏器的有效灌注,平衡了因储血器液体平面过低、液体过少而无法同时进行超滤的冲突。超滤技术可迅速排除患儿体内多余水分,提高血浆胶体渗透压,减少毛细血管渗漏,排出炎性介质和内毒素,减轻因血液稀释引起的红细胞压积降低,保证其携氧能力,避免组织器官缺氧,有助患儿康复,同时节约了血液制品用量,减少输血并发症,防止输血缺陷,减少婴幼儿因无血液制品而暂停手术的发生率^[12]。在一项收集了158例小儿先天性心脏病体外循环手术的临床病例资料研究中,观察患儿预充红细胞量、术后血液学检查结果及临床结局,结果显示,通过VAVD干预,CPB中预充红细胞的使用量明显减少,术后血红蛋白浓度和血小板计数仍能维持较高水平,有利患儿术后恢复,值得推广^[13]。

2.3 冠心病(coronary heart disease, CHD)搭桥手术中的应用 CHD是临床常见的缺血性心脏病,近年来发病率不断升高,且呈年轻化趋势发展,药物治疗、介入支架植入和冠脉搭桥(coronary artery bypass grafting, CABG)是其主要的治疗方法,而CABG是目前治疗复杂多支病变的重要方法,其有利于改善患者的心肌血液供应,缓解心绞痛症状,使患者的心脏功能得以改善^[14]。复杂多支病变冠心病的治疗往往需要在CPB下行CABG,充分的静脉引流、手术视野的暴露尤为重要,合理使用VAVD,适当的心脏减压,形成一个“无血”的手术野,提供良好的手术操作环境^[15],最大限度地为手术安全实施提供便利,提高手术成功率。

2.4 大血管疾病手术中的应用 大血管疾病主要包括各种主动脉病变,如主动脉瘤、马凡氏综合征、主动脉夹层等,往往病情凶险复杂,其外科手术难度大、并发症多。大血管手术的CPB方法有很多,从插管部位的选择、温度的管理到脏器保护等多个方面都值得深究^[16]。近年来,包括VAVD技术在内的各种技术应用于大血管手术,取得良好的临床疗效,为大血管手术CPB的开展创造良好条件,比如在再次主动脉根部置换术中采用腋动脉—腋静脉联合股动脉—股静脉CPB的经验,配合使用VAVD技术,获得良好的减压心脏实现左心排气,在不剥离心脏的情况下获得近端主动脉的干净手术视野^[17]。

2.5 心脏移植手术中的应用 心脏移植是治疗终末期心力衰竭最有效的策略之一^[18]。心脏移植手术风险极大,围术期精密的灌注管理对手术成功起重

要作用。合理的供心保护技术、避免再灌注损伤和积极维护各脏器功能是心脏移植手术CPB管理的关键^[19]。术中需要使用多种手段与技术,保证CPB顺利进行,终末期心脏病患者大多伴有水钠潴留,合理使用VAVD和超滤技术,可以充分引流心脏,减轻心脏和组织水肿,呈现清晰手术视野,保证充足组织灌注,避免组织缺氧及酸中毒。

2.6 机器人心脏手术中的应用 微创化已经成为目前心脏外科手术的发展方向,而机器人辅助心脏手术则是该领域的前沿技术之一^[20],通过增强医生的视觉、精度、控制和技能,机器人系统为医生提供了更好的可视化、精度和控制,并最大限度地减少患者创伤,从而提高了患者的治疗效果^[9]。机器人心脏手术的顺利实施需要CPB技术支持,与常规心脏手术需要打开胸腔不同,机器人微创心脏手术只需在胸部打几个1~3 cm大小的洞作为操作孔即可,外科医师通过在控制台操作,在狭小的术野中进行精准的动作,为胸腔内操作提供了较大的空间,提高了操作精度和手术安全性。由于无法开胸插管,需采用外周插管技术经外周血管建立CPB,为机器人心脏手术CPB提供了良好的替代方案^[21]。同常规心脏手术相比,外周插管直径偏小,单纯依靠被动性引流不能提供有效的血液回流量,难以满足组织灌注需求,需采用VAVD技术,使得插管及管路迷你化,并提供充分静脉引流,营造清晰手术视野,保障围术期患者安全。

3 VAVD优势

3.1 插管及管路迷你化 VAVD的使用,允许医生使用型号更小的插管和长度更短的管路来维持CPB的进行,最大限度地提高手术的可视性,这在微创心脏手术中应用广泛,尤其是在胸腔镜心脏手术和小儿心脏手术中^[22]。一项研究在优化儿童CPB管路方面贡献了智慧,在CPB中使用VAVD技术时,研究者将管路直径从1/2#过渡到3/8#的静脉管路进行引流,描述了能够使用VAVD引流的3/8#静脉管路所需的各种参数,目前已经成功地将3/8#直径静脉管路用于不同体重的患者(35~90 kg)^[23]。

3.2 血液保护 近年来,人们越来越关注心脏手术中同种异体输血的安全性,通过术前输注促红细胞生成素、使用血液回收系统、超滤和逆行自体预充等技术来减少对血液制品的需求,甚至在较大婴儿和儿童中进行无血手术的技术,已取得了相当大的进展^[24],其中VAVD在降低微创心脏手术和儿科患

者手术输血率方面的疗效确切^[2]。与传统的重力虹吸式引流不同,VAVD不依赖于患者心脏和静脉储血器之间的高度差。此外,使用VAVD期间可以提高静脉储血器的水平高度,缩短储血器入血口与手术台面距离,缩短了CPB管路,显著减少启动体积,降低患者血液稀释度,术中血液制品使用量减少和术后胸管引流量减少。一项临床实验证实了使用VAVD技术,升高了术中和术后红细胞压积数值,降低了对红细胞需求量和血液制品输注率的结论,而这一结论近年来多次被成功验证^[2,5]。

3.3 充分引流、心脏减压 心脏手术中当静脉引流不佳时,心脏过度充盈,对患者心脏功能、肝肾功能影响极大,且心脏过度充盈,影响术者视野,应积极处理以避免心脏过度充盈,导致心脏功能、肝肾功能进一步恶化^[25]。在CPB期间,合理使用VAVD技术,可以充分静脉引流,降低中心静脉压,减少对患者心脏及肝肾功能影响。一项回顾性倾向评分匹配分析评估VAVD对接受心脏手术的成人患者肝肾功能的影响,结论为VAVD与较低的中心静脉压和较好的肝肾功能相关,表明其可保护成人心脏病患者免受肝肾功能不良结局的影响^[26]。

4 VAVD劣势

4.1 血液损伤 使用VAVD时,较高的负压会导致更高的剪切应力和溶血可能^[15],使用VAVD技术期间负压的阈值为-5.32 kPa,超过该阈值,负压与血液损伤之间呈线性关系^[15],需要注意的是,静脉导管内存在的负压是静脉储血器负压和虹吸重力压力的总和,合理使用负压促进静脉完全回流,可以最大限度地减少红细胞损伤^[27]。一项研究明确了在使用VAVD期间不同负压下的溶血程度,以确定在儿童心脏手术中提供有效静脉引流而无显著溶血的适当负压,在心脏手术期间,使用-2.66 kPa、-3.99 kPa和-5.32 kPa的负压进行有效的静脉引流和理想的手术视野时,溶血水平几乎相同,当负压超过-5.32 kPa,机体溶血增加^[28]。溶血可能由多个因素引起,包括灌注泵的松紧程度、术区大量血液通过吸引器吸入储血器引起的血液破坏、手术时间、术前患者肝肾功能等因素。因此,需进一步研究CPB的标准化指南,以产生更多的可比性研究,使用更具体的参数进行分析,以尽量减少对血液损伤的影响因素^[15]。

4.2 气泡侵入 在使用VAVD期间,VAVD的负压可能会意外地到达氧合器内,并将气泡吸入血液

中,这被称为气泡侵入,其可能导致动脉血液管路中的空气栓塞,且气体微栓是CPB后神经认知功能障碍发生的可能原因,应尽可能避免或减少其进入患者体内^[29]。研究证实,在CPB期间,空气进入静脉管路是比较常见的,在使用VAVD时,静脉管路夹带的空气是动脉管路中气态微栓子的主要来源。在一个模拟成人CPB实验中使用VAVD,将一根皮下注射针插入静脉管,模拟心房插管部位的小口裂隙,管路可产生气泡,虽然动脉微栓过滤器可对气态微栓进行过滤,但仍有部分微气泡进入患者体内^[30]。在动脉管路内发现气泡后,必须终止VAVD,并调查可能的泄漏源。若离心泵作为主动脉泵且同时使用VAVD时,如果前向血流停止,负压可能会传导至氧合器,通过氧合器将气体吸入管路,这时更应注意在停CPB前必须关闭负压。为了避免气泡侵入并最大限度地降低患者损伤风险,了解储血器对负压负载的耐受性,设计更为合理的静脉储血器是至关重要的。动脉微栓过滤器对减少气体微栓子的过滤效果显著,其在CPB中的应用很有必要^[31],同时也有研究证实,在心脏直视手术期间,向手术区域输注CO₂可能有助于降低VAVD带来的气泡侵入风险^[32]。随着手术技术和灌注技术的提高、灌注设备的改进,心脏手术期间气体微栓的产生已显著降低,但手术医生和灌注医生都应该意识到栓塞的风险,并严格规范临床行为,以消除或减少CPB中的气泡侵入^[30]。

4.3 流量减少 当离心泵用作主动脉泵时,随着负压数值的增加,前向动脉流量的减少量也增多,VAVD的抽吸作用可能会减少离心泵的前向血液流量。在CPB过程中,独立的流量探头对于监测泵流量是十分必要的。研究表明,负压大于-6.65 kPa的VAVD可能减少主动脉泵的流量,所以建议在管路上使用流量探头,时刻监测管路内血液流量变化^[7]。

4.4 压力骤变 使用VAVD过程中,储血器中的负压数值会随着左、右心吸引器的吸入血量的改变而变化,储血器内负压值会降低甚至变为正压,从而导致静脉引流不佳,需要灌注医生在术前物品准备时选择配备有压力释放阀的储血器,术中密切关注储血器内压力和动脉流量的变化,并与术者及时沟通^[2]。基于上述原因,需选择具备压力释放阀功能的VAVD设备和硬质储血器,以保证CPB安全运行。

4.5 设备复杂性和操作要求高 VAVD技术的开展高度依赖于设备的精密性和操作的熟练性,VAVD系统的设置和调节需要专门的设备和技术人

员,增加了手术的复杂性和成本,设备的故障或不当操作可能导致严重的并发症,因此需要专业的培训和经验丰富的团队来管理^[4,7]。VAVD系统由多个组件组成,这些组件需要在手术过程中协调工作,以维持稳定的负压环境和足够的静脉引流量,为了应对负压源和吸引装置等设备可能出现的故障,手术团队需要制定详细的应急预案,并配备备用装置。通过进一步优化设备和操作流程,未来有望降低VAVD技术的复杂性,提升其在心脏外科中的应用效果和安全性。

5 小结与展望

VAVD技术因具有改善静脉引流、心脏减压、减少血制品使用量和管路迷你化等优点,在心脏外科手术中已展现出显著的临床优势,然而也存在设备依赖性高、潜在血液损伤和气泡侵入等问题。其未来的发展仍有诸多值得探索的方向和改进点,首先,技术优化和设备改良是关键,现有的VAVD装置在使用过程中有增加血液创伤、气体栓塞和流量变化的风险,因此开发新型材料和改进设备结构以减少以上弊端,是未来研究的重要方向之一。其次,针对不同类型心脏手术,结合患者的病情及术中实时监测数据,个性化VAVD方案的制定也有待深入研究。再次,结合人工智能和机器学习技术来实时监控和优化引流参数也是一个潜在的研究方向,通过分析大量手术数据,预测最佳的负压参数设置,从而提高手术的成功率,并减少并发症的发生^[33-34]。未来,技术优化和设备改良、个性化方案的制定以及与人工智能的结合将是进一步提升VAVD技术应用效果的关键。

综上所述,VAVD技术在心脏外科中的应用仍有广阔的发展前景,但仍需要进一步的研究和完善,其未来的进步不仅有助于提高手术安全性,还将进一步推动心脏外科手术技术的发展和革新,最终造福更多的患者。

参考文献:

- [1] HOLMAN W L, TIMPA J, KIRKLIN J K. Origins and evolution of extracorporeal circulation: jacc historical breakthroughs in perspective[J]. *Journal of the American college of cardiology*, 2022, 79(16):1606-1622.
- [2] GAO S, LI Y, DIAO X, et al. Vacuum-assisted venous drainage in adult cardiac surgery: a propensity-matched study[J]. *Interactive cardiovascular and thoracic surgery*, 2020, 30(2):236-242.
- [3] ÇAYNAK B, SICIM H. Minimally invasive multi-vessel coronary artery bypass grafting and concomitant mitral valve replacement via bilateral mini-thoracotomy: An alternative to sternotomy[J]. *Turk gogus kalp damar cerrahisi dergisi*, 2023, 31(4):573-576.
- [4] KUNST G, MILOJEVIC M, BOER C, et al. 2019 EACTS/EACTA/EBCP guidelines on cardiopulmonary bypass in adult cardiac surgery[J]. *British journal of anaesthesia*, 2019, 123(6):713-757.
- [5] AYDIN S, CEKMECELIOGLU D, CELIK S, et al. The effect of vacuum-assisted venous drainage on hemolysis during cardiopulmonary bypass[J]. *American journal of cardiovascular disease*, 2020, 10(4):473-478.
- [6] SILVANO R, MALVINDI P G, MAZZOCCA F, et al. Vacuum assisted and gravitational venous drainage in aortic valve surgery: a propensity-match study[J]. *Perfusion*, 2024:2676591241230610.
- [7] GUIMARãES D P, CANEO L F, MATTE G, et al. Impact of vacuum-assisted venous drainage on forward flow in simulated pediatric cardiopulmonary bypass circuits utilizing a centrifugal arterial pump head[J]. *Brazilian journal of cardiovascular surgery*, 2020, 35(2):134-140.
- [8] BACCANELLI F, ALBANO G, CARRARA A, et al. Risk factors for higher postoperative myocardial injury in minimally invasive mitral valve surgery patients: a cohort study[J]. *Journal of clinical medicine*, 2024, 13(6):1591.
- [9] ILCHEVA L, RISTESKI P, TUDORACHE I, et al. Beyond conventional operations: embracing the era of contemporary minimally invasive cardiac surgery[J]. *Journal of clinical medicine*, 2023, 12(23):7210.
- [10] CHEN J, MA W, MING Y, et al. Minimally invasive valve replacement for late tricuspid regurgitation after left-sided valve surgery[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2021, 111(5):e381-e383.
- [11] WANG Q, LIU H, ZOU L, et al. Early predictors of bacterial pneumonia infection in children with congenital heart disease after cardiopulmonary bypass: a single-centre retrospective study[J]. *BMJ open*, 2024, 14(3):e076483.
- [12] DE JONG A, POPA B A, STELIAN E, et al. Perfusion techniques for minimally invasive valve procedures[J]. *Perfusion*, 2015, 30(4):270-276.
- [13] BRANCACCIO G, PERRI G, DELLA PORTA M, et al. Use of carotid artery cannulation during redo sternotomy in congenital cardiac surgery: a single-centre experience [J]. *Interactive cardiovascular and thoracic surgery*, 2021, 33(1):119-123.
- [14] ZHANG R J, YU X Y, WANG J, et al. Comparison of in-hospital outcomes after coronary artery bypass graft surgery in elders and younger patients: a multicenter retro-

- spective study[J]. *Journal of cardiothoracic surgery*, 2023, 18(1):53.
- [15] BHIROWO Y P, RAKSAWARDANA Y K, SETIANTO B Y, et al. Hemolysis and cardiopulmonary bypass: meta-analysis and systematic review of contributing factors[J]. *Journal of cardiothoracic surgery*, 2023, 18(1):291.
- [16] WANG X, LIU N, WANG H, et al. Femoral artery cannulation increases the risk of postoperative stroke in patients with acute DeBakey I aortic dissection[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2023, 166(4): 1023-1031.e1015.
- [17] UCHIDA T, HAMASAKI A, KURODA Y, et al. Simple redo proximal thoracic aortic surgery with peripheral cardiopulmonary bypass and minimal dissection[J]. *Annals of thoracic and cardiovascular surgery*, 2020, 26(1):55-59.
- [18] MUTSUGA M. Patient management important for long-term support beyond 5 years in the BTT: republication of the article published in the Japanese journal of artificial organs[J]. *Journal of artificial organs*, 2024, 27(3):182-187.
- [19] GOUCHOE D A, GANAPATHI A M, CUI E Y, et al. Is time scheduling important? an analysis of donor heart cross-clamp times during heart transplantation[J]. *Transplantation direct*, 2024, 10(4):e1588.
- [20] ALWATARI Y, RANDALL L, ROWSE P G, et al. Navigating missing link: innovative cannulation for robotic mitral valve repair in the absence of inferior vena cava[J]. *Journal of surgical case reports*, 2024, 2024(3):172.
- [21] AGNINO A, GIROLETTI L, GRANIERO A, et al. Robotic-assisted epicardial hybrid ablation and left appendage closure in persistent atrial fibrillation: first european experience[J]. *Journal of clinical medicine*, 2024, 13(6):1563.
- [22] CONDELLO I. Minimally invasive extracorporeal technologies perspective in pediatric cardiac surgery[J]. *Brazilian journal of cardiovascular surgery*, 2022, 37(1):143.
- [23] DATT B, POURMOGHADAM K K, MUNRO H M, et al. Gravity venous drainage and the 3/8-inch venous line: what would poiseuille do?[J]. *The journal of extra-corporeal technology*, 2019, 51(2):78-82.
- [24] DEPTULA J, OLSHOVE V, OLDEEN M, et al. A novel approach to retrograde autologous priming for infant, pediatric and adult populations undergoing congenital heart surgery[J]. *Perfusion*, 2024:2676591241239820.
- [25] GAMBARDELLA I, GAUDINO M, RONCO C, et al. Congestive kidney failure in cardiac surgery: the relationship between central venous pressure and acute kidney injury[J]. *Interactive cardiovascular and thoracic surgery*, 2016, 23(5):800-805.
- [26] WANG L, ZHANG L J, LIU J, et al. Insight into kidney protection by vacuum-assisted venous drainage in adult cardiac operation- a multicenter study[J]. *Circulation journal*, 2023, 87(4):551-559.
- [27] HALVORSEN S, MEHILLI J, CHOORAPOIKAYIL S, et al. Extract from the 2022 ESC Guidelines on cardiovascular assessment and management of patients undergoing non-cardiac surgery-Patient Blood Management[J]. *Blood transfusion*, 2024, 22(2):122-129.
- [28] KWAK J G, LEE J, PARK M, et al. Hemolysis during open-heart surgery with vacuum-assisted venous drainage at different negative pressures in pediatric patients weighing less than 10 kilograms[J]. *World journal for pediatric & congenital heart surgery*, 2017, 8(2):161-165.
- [29] ZAJONZ T S, KUNZEMANN C, SCHREINER A L, et al. Potentials of acetylcholinesterase and butyrylcholinesterase alterations in on-pump coronary artery bypass surgery in postoperative delirium: an observational trial[J]. *Journal of clinical medicine*, 2023, 12(16):5245.
- [30] JARRY S, COUTURE E J, BEAUBIEN-SOULIGNY W, et al. Clinical relevance of transcranial Doppler in a cardiac surgery setting: embolic load predicts difficult separation from cardiopulmonary bypass[J]. *Journal of cardiothoracic surgery*, 2024, 19(1):90.
- [31] WANG S, CANEO L F, JATENE M B, et al. In vitro evaluation of pediatric hollow-fiber membrane oxygenators on hemodynamic performance and gaseous microemboli handling: an international multicenter/multidisciplinary approach[J]. *Artificial organs*, 2017, 41(9):865-874.
- [32] CONDELLO I, SPEZIALE G, NASSO G. Develop of endocavitary suction device for MiECC on minimally invasive mitral valve surgery[J]. *Journal of cardiothoracic surgery*, 2024, 19(1):157.
- [33] HAMANN J, HERZOG L, WEHRLI C, et al. Machine-learning-based outcome prediction in stroke patients with middle cerebral artery-M1 occlusions and early thrombectomy[J]. *European journal of neurology*, 2021, 28(4): 1234-1243.
- [34] LI J, YANG X, CHU G, et al. Application of improved robot-assisted laparoscopic telesurgery with 5G technology in urology[J]. *European urology*, 2023, 83(1):41-44.

本文引用格式:

宋 扬, 田仁斌, 王 波, 等. 负压辅助静脉引流技术在心脏外科应用进展与挑战[J]. *广西医科大学学报*, 2024, 41(8): 1220-1226. DOI: 10. 16190/j.cnki.45-1211/r.2024.08.017

SONG Y, TIAN R B, WANG B, et al. Progress and challenges in the application of vacuum assisted venous drainage in cardiac surgery[J]. *Journal of Guangxi medical university*, 2024, 41(8): 1220-1226. DOI: 10.16190/j.cnki.45-1211/r.2024.08.017