

脉冲消融治疗阵发性房颤的研究进展

黄浩峰¹ 巫颖^{2*}

1. 右江民族医学院 广西百色 533000

2. 百色市人民医院 广西百色 533000

摘要: 目前治疗阵发性房颤的主要治疗策略是导管消融, 射频消融具有安全性高、复发率低等优点现已成为常用的传统消融术式, 近期兴起的一种非热消融术式, 脉冲消融具有更短的手术时间, 更高的成功率、自主选择性高等优势被认为是房颤消融技术领域的变革, 现以检索近期相关文献, 对脉冲消融治疗阵发性房颤的最新研究进展进行归纳。

关键词: 心律失常; 阵发性房颤; 脉冲消融; 综述

前言

心房颤动 (atrial fibrillation, AF), 作为临床中常见的心律失常类型, 可导致心力衰竭、心绞痛、心源性休克等严重并发症, 显著影响患者的生活质量。美国心脏病学会 (ACC) 及心律协会 (HRS) 围绕房颤患者管理更新的指南指出, 导管消融术相比于药物治疗能更好控制患者的心率, 有效减少复发, 减少并发症的发生, 是目前治疗房颤的有效手段^[1]。在心房颤动的发生机制中, 肺静脉异常电活动触发占据主导, 进而肺静脉电隔离构成了其治疗策略的基石^[2]。目前传统的房颤导管消融术临床应用主要是射频消融和冷冻球囊消融。近年来, 一种新型的非热能消融技术应运而生, 脉冲消融 (Pulsed Field Ablation, PFA) 作为一项新技术, 通过其组织选择性、安全性等优于传统术式的优势, 在临床上广泛应用, 被认为是房颤消融技术的重大变革, 本文旨在通过检索和梳理近期相关文献, 对脉冲消融治疗阵发性房颤的研究进展进行系统性综述, 探讨其面临的挑战与未来发展方向。

一、脉冲消融的机制与特性

脉冲消融机制和射频、冷冻球囊消融等传统术式不

一样, 它是通过传递超快速也就是微秒至纳秒的电脉冲来产生强电场, 以高于特定阈值的剂量施加到细胞上, 在电场作用下细胞膜的磷脂双分子层会产生纳米级微孔, 当电场达到一定强度时这些微孔将产生永久性改变进而导致细胞凋亡, 这被称为不可逆性电穿孔^[3]。如果电场强度适中并且持续时间较短, 这些孔隙是可逆的细胞功能可以恢复, 这称为可逆电穿孔, 这种损伤机制主要针对细胞膜并非细胞内的蛋白质或核酸, 所以对细胞外基质结构的破坏比较小, 这有助于维持组织的完整性减少瘢痕形成和组织收缩^[4]。

PFA最引人注目的特性是其组织选择性及安全性。不同类型的细胞对电场的敏感性存在差异, 即具有不同的电穿孔阈值。心肌细胞对电场相对敏感, 其电穿孔阈值低于神经细胞、血管平滑肌细胞和食管上皮细胞等, 通过设计电脉冲的参数, 可以在损伤心肌细胞的同时, 最大限度地保护周围的神经、血管和空腔脏器^[5]。多项动物实验研究证实了PFA的组织选择性及安全性。例如, 在犬模型中进行的实验表明, PFA能够有效损伤心肌组织, 而对膈神经和食管的损伤远小于射频消融^[6]。另一项在兔食管模型中的研究也显示, 非热不可逆电穿孔技术在食管组织中未引起明显的急慢性损伤^[7]。翟宗旺等人^[8]在犬模型中探索了可逆性脉冲电场 (RPEF) 的应用, 发现RPEF能暂时抑制心肌电传导, 引起可逆性损伤, 这为精准定位心律失常关键部位提供了新的思路, 体现了电场对心肌电活动的特异性影响。

PFA还有一个重要特性就是它是非热性的, 和射频消融以及冷冻消融不一样, PFA产生的热量非常少, 少到不足以引起热损伤。陆凌峰等人^[9]通过仿真和体外实

作者简介:

1. 黄浩峰 (2000-), 男, 壮族, 广西壮族自治区百色市人, 硕士研究生, 右江民族医学院, 住院医师, 心血管内科。

2. 巫颖 (1977-), 女, 壮族, 广西壮族自治区百色市人, 大学本科, 百色市人民医院, 教授, 心血管内科, 为本文的通讯作者。

验,验证了脉冲电场消融的非热特性,就算是在实现透壁消融深度的情况下,温度升高也并不显著,这种非热性避免了和热损伤相关的并发症,像碳化、血栓形成等情况都能避免,还可能减少术后的炎症反应,非热性也表明消融效果不会受血流冷却效应的影响,这或许有助于提高消融的效率和透壁性。

通过其非热性、安全性及组织选择性的特点,为房颤导管消融提供新的方向。

二、脉冲消融治疗阵发性房颤的临床应用与效果

脉冲消融技术在阵发性房颤治疗里临床应用起步比较晚,不过发展的速度相当迅速,早期的临床研究大多集中于评估它在实现肺静脉隔离的即刻有效性与初步安全性,有一项研究^[10]报道了PFA用于阵发性房颤患者肺静脉隔离的首次人体试验结果,显示PFA能够达成超快速的肺静脉隔离且具备良好组织选择性、急性成功率较高,随后开展的研究进一步验证了PFA在阵发性房颤患者中实现PVI的高效性。余锂镭等人^[11]报道了国内自主研发的LEAD-PFA系统治疗5例阵发性房颤患者的初步临床应用结果,所有患者均成功完成PFA,20根肺静脉全部实现隔离达100%,且术后左房与肺静脉交界处电压明显降低、出现双向传导阻滞证实了其即刻有效性,岳鑫迪等人^[12]进行的一项多中心回顾性研究纳入了151例接受LEAD-PFA治疗的阵发性房颤患者,结果显示该系统能够实现快速有效的肺静脉隔离。

除了有效性之外,中期和长期疗效也是评估消融技术的关键指标。Badertscher等学者^[13]比较了PFA与单导管高功率短时程射频消融治疗房颤的中期结果,发现二者在无房颤复发率方面表现相似。薛玉梅等学者^[14]提到,PFA在阵发性房颤中的1年随访无房颤发生率可达78.5%。这些数据表明,PFA治疗阵发性房颤的中期疗效和传统消融技术相当或者略优。邵宝兴等学者^[15]在Meta分析中比较了PFA与冷冻球囊消融治疗房颤的有效性,结果显示在房性心律失常复发率方面差异无统计学意义,但在≤65岁患者亚组中PFA显著降低了复发率,提示PFA可能在特定患者群体中具有优势。

PFA在提升手术效率这方面也展现出一定的潜力,多项研究结果表明,与传统射频消融或者冷冻消融相比,PFA能够明显缩短整个手术所需的时间,像Campanelli等人^[16]比较PFA与超高功率短时程射频消融后发现,PFA组总手术时间显著缩短为 80 ± 29 分钟对比 108 ± 39 分钟,这主要是得益于PFA快速且高效的能量递送方式,通常在短短数秒内就能完成一个区域的消融操作,进而大大

缩短了肺静脉隔离的具体操作时间。随着技术不断进步,结合3D电解剖标测系统或超声心动图引导的PFA手术流程也正在快速发展,有望进一步减少甚至实现零X线曝光^[17]。比如Liu等人^[18]报道了经食管超声心动图引导下全程零X线完成PFA治疗房颤的可行性并显示出良好即刻安全性和有效性。

从整体情况来看,目前已有的临床研究显示出脉冲消融在治疗阵发性房颤时能取得较高的肺静脉隔离成功率,并且在缩短手术所需时间方面展现出一定优势,随着技术持续不断地成熟以及临床经验逐步进行积累,脉冲消融有望成为阵发性房颤导管消融的一线治疗办法。

三、脉冲消融技术的发展

脉冲消融技术发展不只是体现于能量形式创新,还包括导管设计、系统使用与操作流程的创新,不同PFA系统采用不同电极配置和脉冲波形,这直接影响电场分布、消融区域形状大小以及对周围组织潜在影响。目前临床上使用的PFA导管主要有环形导管和多电极篮状或花瓣状导管^[19],环形导管通常用于肺静脉口部的环形消融操作,而多电极导管能提供更大消融覆盖范围或更灵活消融模式,王际凯等人^[20]详细介绍花瓣状PFA导管手术流程和操作技巧,涵盖房间隔穿刺、导管置入、消融策略以及肺静脉隔离验证等内容,还探讨提高成功率技巧并强调规范化操作重要性。

早期的PFA系统或许需要额外的标测导管来确认肺静脉隔离情况,新型系统可能把标测功能集成到消融导管上面,或者能够与三维电解剖标测系统(如Carto)更好地相互兼容,从而实现实时位置追踪以及消融区域的可视化呈现^[21]。三维标测系统的应用明显减少了传统射频消融过程中的X线暴露情况,有效提高了手术效率和安全性。将PFA与成熟的3D标测技术进行结合,有望进一步优化PFA手术流程,减少透视时间并且提高消融的精准程度。

总的来说新型导管消融技术和3D标测结合起来,一起提升了PFA手术的效率精准性和安全性,为PFA在阵发性房颤治疗里的广泛应用奠定基础。

四、未来方向与挑战

虽然脉冲电场消融在治疗阵发性房颤上取得显著进展且展现很大潜力,但它作为一项相对较新的技术,还面临一些挑战需要进一步研究完善。首先,房颤复发是个长期过程,需长期的进行随访来评估PFA远期有效性。其次,PFA的生物物理机制仍需要更深入理解,不同组织对电场反应及不同脉冲参数对消融区域精确影响需实

验仿真研究来优化。第三，成本效益评估也是未来需要考虑的因素，PFA或缩短手术时间提高效率但设备成本可能高于传统系统。最后，将PFA与影像学和标测技术进一步融合去提高手术精准性和安全性仍需长期开展。

参考文献

- [1]January C T, Wann L S, Calkins H, et al. 2019 AHA/ACC/HRS focused update of the 2014 AHA/ACC/HRS guideline for the management of patients with atrial fibrillation: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines and the Heart Rhythm Society[J]. Heart Rhythm, 2019,16(8):e66-e93.
- [2]Kowalewski C. Mapping atrial fibrillation : An overview of potential mechanisms underlying atrial fibrillation[J]. Herz, 2021,46(4):305-311.
- [3]Reddy V Y, Neuzil P, Koruth J S, et al. Pulsed Field Ablation for Pulmonary Vein Isolation in Atrial Fibrillation[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2019,74(3):315-326.
- [4]Jiang S, Qian F, Ji S, et al. Pulsed Field Ablation for Atrial Fibrillation: Mechanisms, Advantages, and Limitations[J]. Rev Cardiovasc Med, 2024,25(4):138.
- [5]路桥, 张先林, 王洪巨.脉冲场消融在房颤中的应用进展[J].实用心电学杂志, 2021, 30 (5): 322-327.
- [6]Yavin H, Shapira-Daniels A, Barkagan M, et al. Pulsed Field Ablation Using a Lattice Electrode for Focal Energy Delivery: Biophysical Characterization, Lesion Durability, and Safety Evaluation[J]. Circ Arrhythm Electrophysiol, 2020,13(6):e8580.
- [7]Song Y, Zheng J, Fan L. Nonthermal Irreversible Electroporation to the Esophagus: Evaluation of Acute and Long-Term Pathological Effects in a Rabbit Model[J]. J Am Heart Assoc, 2021,10(22):e20731.
- [8]翟宗旺, 姜浩, 石亮, 等.脉冲电场消融对犬普通心肌可逆性损伤的实验研究[J].中国心血管杂志, 2024, 29 (3): 233-237.
- [9]陆凌峰, 陈惠铭.花瓣结构电极用于脉冲消融下心肌组织消融效果研究[J].中国医疗器械杂志, 2025, 49 (2): 125-133.
- [10]Auf D H C, Bejinariu A G, Kelm M, et al. Hemolysis after pulsed-field ablation in pulmonary vein isolation for atrial fibrillation: A prospective controlled trial[J]. Heart Rhythm, 2025.
- [11]余锂镭, 王松云, 袁晓玲, 等.脉冲电场消融治疗阵发性心房颤动的初步临床应用[J].中国心脏起搏与心电生理杂志, 2021, 35 (5): 434-438.
- [12]岳鑫迪, 周玲, 赵春霞.脉冲电场消融治疗心房颤动的安全性及有效性[J].临床心血管病杂志, 2025, 41 (4): 300-304.
- [13]Badertscher P, Weidlich S, Serban T, et al. Pulsed-field ablation versus single-catheter high-power short-duration radiofrequency ablation for atrial fibrillation: Procedural characteristics, myocardial injury, and mid-term outcomes[J]. Heart Rhythm, 2023,20(9):1277-1278.
- [14]浦思嘉, 林炜东, 薛玉梅.脉冲电场消融在心房颤动治疗中的应用[J].中国实用内科杂志, 2024, 44 (2): 109-113.
- [15]邵宝兴, 陈良华, 郝燕.脉冲场消融与冷冻球囊消融治疗心房颤动的Meta分析[J].介入放射学杂志, 2025, 34 (4): 362-369.
- [16]Dello R A, Compagnucci P, Anselmino M, et al. Pulsed field vs very high-power short-duration radiofrequency ablation for atrial fibrillation: Results of a multicenter, real-world experience[J]. Heart Rhythm, 2024,21(9):1526-1536.
- [17]刘俊, 李超, 江勇, 等.超声心动图引导经皮心房颤动脉脉冲电场消融术一例[J].中国循环杂志, 2024, 39 (9): 910-912.
- [18]Liu J, Tang M, Niu G, et al. Initial experience of transoesophageal echocardiography-guided percutaneous pulsed field ablation of atrial fibrillation[J]. Open Heart, 2025,12(1).
- [19]Kezeviciute M, Marinskis G, Sudaviciene D, et al. Comparative Studies of Different Ablation Techniques for Atrial Fibrillation[J]. Rev Cardiovasc Med, 2025,26(5):33490.
- [20]王际凯, 刘梓瑞, 路瑜, 等.花瓣状脉冲电场消融导管手术流程及操作技巧[J].实用心电与临床诊疗, 2025, 34 (1): 25-28.
- [21]陆兆华, 叶少武, 赖俊龙, 等.Carto3指导下导管射频消融术治疗心房颤动的临床研究[J].中西医结合心脑血管病杂志, 2018, 16 (22): 3327-3329.