

心脏磁共振成像在室性心动过速消融治疗中的应用进展

王芯梦 崔凯军

(四川大学华西医院心内科, 四川 成都 610041)

【摘要】 室性心动过速(VT)是心脏性猝死最常见的病因。虽然近年来在标测和消融策略上有诸多改进,但 VT 的复发率仍居高不下。先进的磁共振成像技术,如心肌延迟强化,能为基质消融提供重要的补充信息,不仅能提高 VT 消融手术的即刻成功率,而且能显著减少术后 VT 的复发。磁共振成像在 VT 治疗中的有效性已在多项研究中得到证实。现对磁共振成像技术在 VT 消融治疗中取得的进展做一综述。

【关键词】 心脏磁共振成像;室性心动过速;消融

【DOI】 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2024.01.013

Cardiac Magnetic Resonance Applied in Ablation of Ventricular Tachycardia

WANG Xinmeng, CUI Kaijun

(Department of Cardiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, Sichuan, China)

【Abstract】 Ventricular tachycardia (VT) is the most common cause of sudden cardiac death. Despite significant improvements in mapping and ablation strategies in recent years, the recurrence rate of VT remains high. Advanced magnetic resonance imaging techniques, such as late gadolinium enhancement, can provide important additional information for substrate ablation, not only improving the immediate success rate of VT ablation, but also significantly reducing the recurrence of VT after ablation. The effectiveness of magnetic resonance imaging in VT treatment has been confirmed in numerous studies. This article will review the progress of magnetic resonance imaging technique in VT ablation therapy.

【Keywords】 Cardiac magnetic resonance imaging; Ventricular tachycardia; Ablation

室性心动过速(ventricular tachycardia, VT)是心脏性猝死最常见的病因,需积极干预,导管消融已成为多种药物难治性 VT 的标准治疗方法^[1]。在窦性心律或起搏期间进行基质标测和消融,是目前 VT 消融治疗的重要策略,在复发率方面的表现优于单纯使用激动标测的 VT 消融^[2]。虽然近年来在标测和消融策略上有诸多改进,但 VT 的复发率仍居高不下。致心律失常基质不仅是 VT 治疗的关键^[3],而且是术后复发的预测因素^[4]。而心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)成像可能在 VT 的消融治疗中起优化作用。现将 CMR 在 VT 消融术前、术中及术后的应用价值做一综述,为临床实践和进一步研究提供参考。

1 CMR 成像用于 VT 评价的基本原理

VT 有多种分类方式,一般根据发病机制分为瘢痕相关折返性 VT 和局灶性 VT,后者主要包括微折返、触发活动和异常自律性^[5]。除此之外,还可根据是否合并有器质性心脏病将 VT 分为结构性心脏病 VT 和

特发性 VT,以及较为特殊的遗传性离子通道病相关的 VT。

临床上以结构性心脏病 VT 多见,并且其治疗相较于以局灶性机制为主的特发性 VT 而言更具挑战性。这一方面是由于结构性心脏病 VT 常出现血流动力学不稳定的情况,仅小部分患者能进行激动标测和拖带标测;另一方面是因为瘢痕相关折返环路的标测和消融更为复杂。无法激动的瘢痕核心区域、瘢痕边界区的缓慢传导区域和穿插在其中存活的心肌传导通道,这 3 个区域使电传导出现各向异性,促发折返^[6]。缺血性心肌病(ischemic cardiomyopathy, ICM)患者中诱发 VT 的瘢痕多分布在病变冠状动脉支配区,一般可经心内膜途径标测和消融到关键峡部。而非缺血性心肌病(non-ischemic cardiomyopathy, NICM) VT 患者的瘢痕部位取决于原发疾病,多位于心肌中层和心外膜,因此其消融后复发率较 ICM VT 患者更高^[7]。近年来借助 CMR 成像评估 VT 基质并辅助消

融的临床实践大量涌现,并取得了良好成效^[3,8]。

CMR 是一种较为理想的非侵入式影像技术,能准确地评估心脏的结构和功能。它通过各种脉冲序列,无辐射地进行多组织参数和多空间方位成像,从而区别正常心肌、水肿和纤维化瘢痕等不同组织。CMR 成像的组织特异性是其应用于 VT 基质标测和消融的独特优势。心肌延迟强化(late gadolinium enhancement, LGE)是目前临床应用中主要的 CMR 技术,其原理是注射钆螯合物后进行 T1 加权成像,钆剂是间质性对比剂,正常心肌将其快速排出后信号降低;而在细胞间质体积增大的坏死心肌和梗死瘢痕处,会由于对比剂滞留而在图像上呈现高信号。LGE 是活体检测心肌纤维化影像学的“金标准”^[9]。在 Codreanu 等^[10]首次发现 CMR 成像中的瘢痕组织和心脏电解剖标测(electroanatomic mapping, EAM)的低电压区大部分重合后,有研究^[11]进一步表明 CMR 成像还能识别 EAM 检测不到的非透壁性瘢痕和梗死灰色区,为基质消融提供重要的补充信息。

2 CMR 成像在 VT 消融治疗中的临床应用

2.1 CMR 成像在 VT 消融术前的应用

术前 CMR 成像能预判部分特殊 VT 基质的部位,达到协助手术规划和瘢痕测绘的目的。由于脂肪组织的存在会影响双极电图的记录质量,心外膜标测可能存在困难,甚至可能由于心包粘连而无法进行^[12]。作为一种能提供心外膜瘢痕位置的非侵入性手段,LGE-CMR 成像在此时能发挥重要意义。Acosta 等^[13]的一项非随机对照研究发现,在经影像学确认有心外膜基质的 ICM VT 患者中,经心内膜联合心外膜途径消融比单纯经心内膜消融在 VT 复发率方面有更好的表现。不仅如此,在 NICM VT 患者中术前使用 LGE-CMR 成像,还能筛选出哪些心外膜瘢痕可经冠状静脉系统(coronary venous system, CVS)进行消融。Ghannam 等^[14]对 41 例 NICM VT 患者消融术前行 LGE-CMR 成像检查发现,能否经 CVS 途径消融主要取决于心外膜瘢痕与 CVS 及其分支的接近程度,而与瘢痕大小或患者特征无关。从 CVS 到瘢痕边缘区域的最小距离为 9 mm 能准确地预测经 CVS VT 消融的可能性。

另一个研究热点是通过整合 EAM 与术前 CMR 成像而获得更多信息以辅助消融,能显著减少术后 VT 的复发^[15-16]。值得注意的是,近期 Soto-Iglesias 等^[3]发表了仅用 LGE-CMR 成像信息引导基质消融在 28 例瘢痕相关性 VT 患者中的治疗结果:显著地缩短手术时间、透视时间和射频消融时间,同时具有更低的 VT 诱发率和复发率。这项开创性的研究表明 EAM 在基

质识别中并不是必需的,而仅根据 LGE-CMR 成像信息选择消融靶点的方法可行且安全。意大利 Lilli 团队^[17]正在开展的 VOYAGE 试验是一项多中心、前瞻性、开放标签、随机临床研究,对比仅依据 CMR 成像的解剖信息消融、依据 CMR 成像和 EAM 的电解剖信息消融和仅依据 EAM 标测消融的 3 组结构性心脏病 VT 患者,评估随访 1 年的复发率,结果令人期待。

除了常用的 LGE 外,其他 CMR 技术也有助于识别 VT 的致心律失常基质。T1 mapping 能定量显示心肌纤维化,相较于基于健康和病变心肌对比的 LGE-CMR 成像,更适合于评估弥漫性心肌纤维化。2021 年有研究团队^[18]发现无 LGE 瘢痕证据的 NICM VT 患者术前 T1 mapping 评估的弥漫性心肌纤维化部位与术中 EAM 电压异常区域具有相关性。T2 加权成像对组织的水肿及充血敏感,具有检测急性炎症的能力,可能对于心肌炎^[19]或结节病^[20]并发 VT 的治疗具有指导意义。Peretto 等^[19]依据病史和 T2 加权成像等将 125 例有心肌炎病史的 VT 患者分为以炎症活动为主的急性组和残留瘢痕的慢性组,消融术后回顾性分析发现急性组的 VT 复发率明显更高,并且急性炎症是为期 1 年随访中 VT 复发的唯一预测因素,这表明有心肌炎病史的 VT 患者在消融前应进行心内膜活检或 CMR 成像分期。

Hendriks 等^[21]对 7 748 例接受了影像辅助或传统消融的 ICM VT 患者进行荟萃分析后发现,术前 CMR 成像对 VT 消融的指导作用能提高 ICM 患者的无 VT 生存期和总生存期。鉴于越来越多的证据表明在 VT 消融术前行 CMR 成像检查能使患者受益,《2019 室性心律失常导管消融专家共识》^[5]中给出了两条 II a 级推荐的 CMR 成像适应证:一是建议 ICM 和 NICM 患者在 VT 消融术前行 CMR 检查以减少复发,二是将术前 CMR 成像用于协助手术规划。

2.2 CMR 成像在 VT 消融术中及术后的应用

术中使用实时 CMR 成像引导消融的优势是显而易见的,不仅可同时显示解剖结构、基质和消融病灶,引导消融导管到达合适的位置,而且术者在改进手术规划的同时不会暴露于电离辐射。相较于术前图像融合,EAM 与 CMR 成像实时配准可从根本上减小误差。Nazarian 等^[22]首次报道了实时 CMR 成像用于电生理手术的可行性,该研究使用被动追踪技术指引导管从右心房进入右心室。数年前,实时 CMR 成像引导下的心室标测和消融已在动物模型上取得成功^[23-24]。但令人遗憾的是,磁共振技术和 VT 病情的复杂性导致临床实践进展缓慢,到目前为止还无临床研究将这种方法用于 VT 患者的消融治疗^[25]。在迄今为止样

本量最大的临床研究中,Paetsch 等^[26]对 30 例三尖瓣峡部依赖性心房扑动患者进行了实时 CMR 成像引导下消融,93% 的患者无需 X 射线透视检查就消融成功且结局指标与常规相似,有力地证明了其安全性和有效性。不难预想,如果能在术中实时评估消融损伤,对手术的安全性和有效性结局均有益处。不同于在急性期可能高估消融损伤大小的 LGE-CMR 成像和 T2 加权成像,动物实验表明非对比增强 T1 加权成像更具优势。Guttman 等^[27]研究发现急性损伤核心区在消融数分钟后呈高信号,数周内持续存在且大小和对比度保持稳定。研究人员在解剖后进一步验证 CMR 成像影像提示的损伤部位与大体标本相一致。非对比增强 T1 加权成像不依赖对比剂且结果的可重复性强,如果能将实时 CMR 成像引导消融应用在 VT 的治疗中将会带来更大的获益,尽管面临诸多挑战,但不失为一个很有前景和应用价值的研究方向。

CMR 成像在消融术后对急性和慢性消融病灶的评价也极具临床应用前景,因为除了基质标测不准确外,消融不彻底是术后复发的常见原因。与只能维持即刻手术成功率的急性炎症和水肿不同,真正能影响手术成功率和复发率的永久性消融病灶数月后将发展为慢性瘢痕^[28-29]。在消融术后慢性期进行 CMR 成像不仅能确认成功消融病灶,而且能区分慢性消融灶和陈旧性梗死灶。最近一项纳入 17 例心肌梗死后 VT 患者的研究^[29]表明,在数月甚至数年后通过 CMR 成像依旧可分辨慢性消融病灶和梗死瘢痕,前者表现为瘢痕组织内不可强化的心内膜下暗核,并且与先前手术的消融区域和重复手术中标测的无电活动区域相对应。成功消融导致的新瘢痕病变也可能形成新的 VT 折返回路。Ghannam 等^[30]在 19 例重复消融的梗死后 VT 患者中分析了 CMR 成像中消融病灶暗核与复发性 VT 之间的关系,结果发现重复消融的 VT 靶点距离先前的消融暗核很近,而且将 CMR 成像信息纳入消融手术的患者在随访 2 年后无 VT 生存率明显提高,这说明记录先前消融术的病灶暗核位置有助于指导复发性 VT 的再次消融。目前这些研究的样本量较小,不能确保结论的可靠性,未来还需更多的工作去确定识别消融后病变的最佳时间和成像方案^[31],通过分析消融病灶以提高 VT 消融的治疗效果。

3 CMR 成像用于 VT 消融治疗的问题与展望

近年来,新技术的出现进一步强调了准确且无创地评估致心律失常基质的重要性,比如立体定向放射治疗通过对难治性 VT 患者进行放射性消融,可减少 VT 发作并提高患者生活质量^[32]。术中磁共振实时成像技术的发展和完善有助于突破 CMR 成像的一些局

限性,如成像后基质在手术前有所变化或图像配准错误。

CMR 成像在 VT 的消融治疗中有广泛前景,但也有诸多挑战。首先,大多数 VT 患者都有植入型心律转复除颤器,虽然已有研究证明这些患者进行 CMR 检查是安全的^[33],且宽带延迟显像序列能克服伪影对图像质量的影响^[34],但长时间扫描的情况下植入型心律转复除颤器可能带来的安全隐患不可忽视。与之相关的另一个安全问题是:VT 消融过程中可能急需除颤,虽然已有研究成功证明在 CMR 检查室中对实验猪进行体外除颤和经皮起搏安全且可行^[35],但市面上目前还无一款能与磁共振影像环境兼容的体外除颤器系统,克服这个阻碍将促进 CMR 成像对高危 VT 消融策略的优化。其次,CMR 成像带来的时间成本和经济成本不容忽视,目前仍缺乏针对医院与患者的成本效益分析。另外,CMR 图像与消融导航系统集成尚无统一方法,如果能探索出标准化且简单的流程将有助于将该技术扩展到更多的电生理诊疗中心。

总之,CMR 成像可提供很多与心律失常基质有关的解剖信息。虽然受成本和安全性等局限,但随着磁共振软件和硬件的发展,CMR 成像的应用场景和价值都将继续拓展。期待后续大量前瞻性随机对照研究及真实世界研究能为 CMR 成像在 VT 治疗中的应用提供更多证据。

参考文献

- [1] Dukkupati SR, Koruth JS, Choudry S, et al. Catheter ablation of ventricular tachycardia in structural heart disease: indications, strategies, and outcomes—Part II [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2017, 70(23):2924-2941.
- [2] Gökoglan Y, Mohanty S, Gianni C, et al. Scar homogenization versus limited-substrate ablation in patients with nonischemic cardiomyopathy and ventricular tachycardia [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2016, 68(18):1990-1998.
- [3] Soto-Iglesias D, Penela D, Jáuregui B, et al. Cardiac magnetic resonance-guided ventricular tachycardia substrate ablation [J]. *JACC Clin Electrophysiol*, 2020, 6(4):436-447.
- [4] Quinto L, Sanchez-Somonte P, Alarcón F, et al. Ventricular tachycardia burden reduction after substrate ablation: predictors of recurrence [J]. *Heart Rhythm*, 2021, 18(6):896-904.
- [5] Cronin EM, Bogun FM, Maury P, et al. 2019 HRS/EHRA/APHRS/LAHRS expert consensus statement on catheter ablation of ventricular arrhythmias: executive summary [J]. *Europace*, 2020, 22(3):450-495.
- [6] de Bakker JM, van Capelle FJ, Janse MJ, et al. Reentry as a cause of ventricular tachycardia in patients with chronic ischemic heart disease: electrophysiologic and anatomic correlation [J]. *Circulation*, 1988, 77(3):589-606.
- [7] Kotake Y, Nalliah CJ, Campbell T, et al. Comparison of the arrhythmogenic substrate for ventricular tachycardia in patients with ischemic vs non-ischemic cardiomyopathy—Insights from high-density, multi-electrode catheter mapping [J]. *J Interv Card Electrophysiol*, 2023, 66(1):5-14.
- [8] Aboud AA, Davogusto G, Adeola O, et al. Substrate mapping alters ventricular tachycardia inducibility [J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2023, 16(2):66-73.
- [9] Hindricks G, Potpara T, Dagres N, et al. 2020 ESC Guidelines for the diagnosis

- and management of atrial fibrillation developed in collaboration with the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS): the Task Force for the diagnosis and management of atrial fibrillation of the European Society of Cardiology (ESC) Developed with the special contribution of the European Heart Rhythm Association (EHRA) of the ESC [J]. *Eur Heart J*, 2021, 42 (5): 373-498.
- [10] Codreanu A, Odille F, Aliot E, et al. Electroanatomic characterization of post-infarct scars comparison with 3-dimensional myocardial scar reconstruction based on magnetic resonance imaging[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2008, 52(10): 839-842.
- [11] Wijnmaalen AP, van der Geest RJ, van Huls van Taxis CF, et al. Head-to-head comparison of contrast-enhanced magnetic resonance imaging and electroanatomical voltage mapping to assess post-infarct scar characteristics in patients with ventricular tachycardias: real-time image integration and reversed registration[J]. *Eur Heart J*, 2011, 32(1): 104-114.
- [12] Piers SR, Tao Q, van Huls van Taxis CF, et al. Contrast-enhanced MRI-derived scar patterns and associated ventricular tachycardias in nonischemic cardiomyopathy: implications for the ablation strategy [J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2013, 6(5): 875-883.
- [13] Acosta J, Fernández-Armenta J, Penela D, et al. Infarct transmural as a criterion for first-line endo-epicardial substrate-guided ventricular tachycardia ablation in ischemic cardiomyopathy[J]. *Heart Rhythm*, 2016, 13(1): 85-95.
- [14] Ghannam M, Siontis KC, Cochet H, et al. Value of mapping and ablation of ventricular tachycardia targets within the coronary venous system in patients with nonischemic cardiomyopathy[J]. *Heart Rhythm*, 2020, 17(4): 520-526.
- [15] Hilbert S, Weber A, Nehrke K, et al. Artefact-free late gadolinium enhancement imaging in patients with implanted cardiac devices using a modified broadband sequence: current strategies and results from a real-world patient cohort [J]. *Europace*, 2018, 20(5): 801-807.
- [16] Siontis KC, Kim HM, Sharaf Dabbagh G, et al. Association of preprocedural cardiac magnetic resonance imaging with outcomes of ventricular tachycardia ablation in patients with idiopathic dilated cardiomyopathy[J]. *Heart Rhythm*, 2017, 14(10): 1487-1493.
- [17] Lilli A, Parollo M, Mazzocchi L, et al. Ventricular tachycardia ablation guided or aided by scar characterization with cardiac magnetic resonance: rationale and design of VOYAGE study[J]. *BMC Cardiovasc Disord*, 2022, 22(1): 169.
- [18] Muser D, Nucifora G, Castro SA, et al. Myocardial substrate characterization by CMR T1 mapping in patients with NICM and no LGE undergoing catheter ablation of VT[J]. *JACC Clin Electrophysiol*, 2021, 7(7): 831-840.
- [19] Peretto G, Sala S, Basso C, et al. Inflammation as a predictor of recurrent ventricular tachycardia after ablation in patients with myocarditis[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2020, 76(14): 1644-1656.
- [20] Kaur D, Roukoz H, Shah M, et al. Impact of the inflammation on the outcomes of catheter ablation of drug-refractory ventricular tachycardia in cardiac sarcoidosis [J]. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2020, 31(3): 612-620.
- [21] Hendriks AA, Kis Z, Glisic M, et al. Pre-procedural image-guided versus non-image-guided ventricular tachycardia ablation—A review [J]. *Neth Heart J*, 2020, 28(11): 573-583.
- [22] Nazarian S, Kollandaivelu A, Zviman MM, et al. Feasibility of real-time magnetic resonance imaging for catheter guidance in electrophysiology studies [J]. *Circulation*, 2008, 118(3): 223-229.
- [23] Chubb H, Williams SE, Whitaker J, et al. Cardiac electrophysiology under MRI guidance: an emerging technology [J]. *Arrhythm Electrophysiol Rev*, 2017, 6(2): 85-93.
- [24] Mukherjee RK, Roujol S, Chubb H, et al. Epicardial electroanatomical mapping, radiofrequency ablation, and lesion imaging in the porcine left ventricle under real-time magnetic resonance imaging guidance—An in vivo feasibility study [J]. *Europace*, 2018, 20(F12): f254-f262.
- [25] Bauer BK, Meier C, Bietenbeck M, et al. Cardiovascular magnetic resonance-guided radiofrequency ablation: where are we now? [J]. *JACC Clin Electrophysiol*, 2022, 8(2): 261-274.
- [26] Paetsch I, Sommer P, Jahnke C, et al. Clinical workflow and applicability of electrophysiological cardiovascular magnetic resonance-guided radiofrequency ablation of isthmus-dependent atrial flutter[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2019, 20(2): 147-156.
- [27] Guttman MA, Tao S, Fink S, et al. Non-contrast-enhanced T1-weighted MRI of myocardial radiofrequency ablation lesions[J]. *Magn Reson Med*, 2018, 79(2): 879-889.
- [28] Vunnam R, Maheshwari V, Jeudy J, et al. Ventricular arrhythmia ablation lesions detectability and temporal changes on cardiac magnetic resonance [J]. *Pacing Clin Electrophysiol*, 2020, 43(3): 314-321.
- [29] Dabbagh GS, Ghannam M, Siontis KC, et al. Magnetic resonance mapping of catheter ablation lesions after post-infarction ventricular tachycardia ablation [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021, 14(3): 588-598.
- [30] Ghannam M, Liang J, Attili A, et al. Late gadolinium enhancement cardiac magnetic resonance imaging of ablation lesions after postinfarction ventricular tachycardia ablation: implications for ventricular tachycardia recurrence [J]. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2022, 33(4): 715-721.
- [31] Dickfeld T, Vunnam R. Chronic ablation lesions on CMR: is black a red herring? [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021, 14(3): 599-601.
- [32] de la Pinta C, Besse R. Stereotactic ablative body radiotherapy for ventricular tachycardia: an alternative therapy for refractory patients [J]. *Anat J Cardiol*, 2021, 25(12): 858-862.
- [33] Russo RJ, Costa HS, Silva PD, et al. Assessing the risks associated with MRI in patients with a pacemaker or defibrillator [J]. *N Engl J Med*, 2017, 376(8): 755-764.
- [34] Roca-Luque I, van Breukelen A, Alarcon F, et al. Ventricular scar channel entrances identified by new wideband cardiac magnetic resonance sequence to guide ventricular tachycardia ablation in patients with cardiac defibrillators [J]. *Europace*, 2020, 22(4): 598-606.
- [35] Shusterman V, Hodgson-Zingman D, Thedens D, et al. High-energy external defibrillation and transcutaneous pacing during MRI: feasibility and safety [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2019, 21(1): 47.

收稿日期: 2023-04-24