

新一代射频消融系统在特殊高阻抗病灶中的应用

李勇生

绵阳立德电子股份有限公司 四川 绵阳 621000

摘要:射频消融在多类心律失常与局灶性肿瘤治疗中具有可控性强、创伤小的优势。然而,当病灶区域呈现明显高阻抗特征时,传统射频系统往往难以实现稳定的能量沉积,消融深度与范围容易受到限制。本研究围绕一款新一代射频消融系统,结合体外组织模型、凝胶仿体模型与典型病例资料,评估其在特殊高阻抗病灶中的应用表现。实验结果显示,该系统通过阻抗动态补偿与双通道温控策略,使升温过程更为连续,能量利用率明显提升,组织凝固区更均匀,碳化提前发生的情况显著减少。在两例高阻抗相关的实际病例中,该系统均表现出较稳健的输出特性与较好的临床可控性。研究认为,新系统在处理纤维化、低含水或高脂肪组织等高阻抗场景时具有一定优势,为相关临床治疗提供了可参考的工程与应用依据。

关键词:射频消融;高阻抗病灶;阻抗反馈;能量沉积

引言:

射频消融因创伤小、可控性好等优势,已成为多种心律失常的主要导管消融方式,并在指南中被明确推荐^[1]。在部分纤维化瘢痕区、含水量降低区域或脂肪比例偏高部位,局部组织阻抗明显升高,电流难以形成稳定通路,常表现为升温缓慢、重复消融后病灶仍残留活动。传统射频系统多采用固定功率或单通道温控策略,对阻抗变化的响应主要体现在安全保护层面,当阻抗短时间内快速上升时,系统主动降低输出以减少碳化和蒸汽爆破风险,但同时也削弱了能量进入深层组织的可能。既往围绕高功率射频和消融指数的研究表明,合理的能量调控策略有助于在保证安全的前提下改善消融充分性^[2]。

近年来,一些射频平台开始引入阻抗自适应调节、双通道温控和冷却灌注等功能,以在高阻抗环境中改善能量传递过程。与此同时,脉冲电场等非热消融技术在房颤治疗中的研究不断推进^[3],但设备普及率、适应证及长期随访结果仍在积累阶段,传统射频系统在复杂及高阻抗病灶中的优化依然具有现实意义。在我国,心房颤动等心律失常的患病负担持续上升^[6],在这类人群中提高高阻抗病灶消融的可控性和能量利用效率,具有一定临床必要性。本研究以一款具备阻抗动态补偿和双通道温控功能的新一代射频消融系统为对象,通过体外实验及典型临床病例观察,评估其在特殊高阻抗病灶中的应用特点。

1 材料与方法

1.1 新一代射频系统的技术组成

本研究所使用的射频消融系统由射频主机、电极导管、温控模块以及阻抗反馈模块构成。系统工作频率处于常用射频范围之内,以连续输出模式向组织传递能量。与传统仅依靠单一温度传感器的温控方式不同,该

系统在导管远端布置了两路温度传感器,一路紧贴电极表面,另一路更加靠近邻近组织。主机通过综合分析两路温度信号,获得更接近实际组织受热情况的反馈,从而在功率调节时避免仅依据单点温度做出判断。

在阻抗处理上,系统持续监测局部阻抗曲线的变化趋势,并在阻抗升高或波动明显时,对输出波形和幅

新一代射频消融系统的阻抗反馈与温控策略闭环

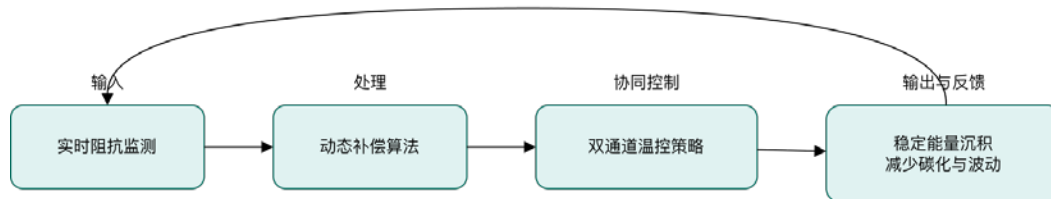


图1 新一代射频消融系统的阻抗反馈与温控策略闭环

值进行细微调整,使电流在高阻抗阶段仍能保持相对稳定的传导路径。为了降低阻抗骤升所带来的碳化和蒸汽爆破风险,设备设置了峰值抑制策略,当检测到阻抗在短时间内快速上升时,主机会在毫秒级时间内调节输出参数,使升温过程保持在预设安全区间。电极部分采用多孔冷却结构,内部通道允许冷却液持续循环,可延缓电极表面过度和碳化的形成。导管材料选用具有良好导电性和热稳定性的铂铱合金,并在厚度上进行优化,使其在较长持续时间的消融过程中仍能维持相对均匀的热分布。

1.2 高阻抗病灶的定义与建模

为了在实验环境中尽可能贴近临床高阻抗病灶的特征,并保证研究条件具有良好可复现性,本研究构建了两类高阻抗模型。一类为离体心肌组织模型,选取新鲜猪心组织,经脱水和定向干燥处理后,使其在室温条件下的阻抗稳定维持在 $180 \sim 250 \Omega$,用于模拟纤维化程度较高或含水量明显降低的心肌区域。另一类为凝胶仿体模型,在基础凝胶材料中加入一定比例的脂质成分,通过调整配比控制整体电阻值,模拟临床中脂肪含量偏高或放疗后纤维化改变的局部组织。

这两种模型在阻抗水平上均表现出明显高于普通组织的特点,同时具备参数可控、重复性较好等优势。离体心肌模型主要用于观察组织消融后的形态变化与凝固深度,凝胶仿体模型则更侧重于记录温度场分布及能量沉积特征,为后续结果分析提供基础。

1.3 对照系统与操作方法

为客观比较新一代射频系统与传统设备在高阻抗组织中的表现,本研究选用一款临床常用射频消融系统作为对照。两套系统在设定功率、目标温度和输出模式时尽量保持一致,消融操作均由同一名具有丰富经验的术者完成,以减少操作者差异的影响。导管接触方式、接触面积以及接触压力在实验前通过预实验进行校准,正式实验中在不同点位尽量保持稳定。

在离体心肌组织实验中,每个点位的消融时间控制在 $30 \sim 45\text{s}$,消融结束后立即对组织进行标记和切取,通过纵向和横向切片测量凝固性坏死区的深度和范围。在凝胶仿体实验中,同样采用统一的消融时间和功率设置,利用红外成像设备连续记录消融过程中的温度分布变化,通过对比不同系统在温度场形态和高温区范围上

的差异,评估能量沉积效率。

1.4 临床典型病例收集方式

临床部分的病例资料来源于合作医疗机构的实际消融手术。所有数据在纳入前均经过去标识化处理,不含患者姓名、住址等敏感信息。病例选择时重点关注靶点是否位于疑似高阻抗区域,例如房颤患者左房后壁瘢痕区,或室性早搏患者右室流出道中脂肪成分较多的部位,本研究最终纳入房颤和室性早搏各1例,用于展示新系统在此类特殊病灶中的应用经过与初步效果。

相关研究方案和数据使用流程已经过当地伦理委员会审批,或依据公开病例数据库的使用规范执行。病例分析的目的在于从真实临床场景出发,观察新系统在高阻抗病灶中的输出特性和操作体验,不进行统计学意义上的推断,也不作为疗效优劣的定量证据。

2 结果

2.1 体外组织消融效果

在离体高阻抗心肌组织模型中,新一代射频系统启动后,阻抗在消融初期呈缓慢而稳定的下降趋势。消融开始约 $5 \sim 7\text{s}$ 内,局部阻抗由平均 $(210 \pm 8) \Omega$ 降至 $(180 \pm 7) \Omega$ 左右,曲线走势平滑,没有出现突发性尖峰。与之相比,对照设备在相同设置下阻抗下降幅度较小,部分点位在消融中后期还出现阶段性回升,表明表层组织可能已提前发生碳化,影响了后续能量传递。

组织切片观察进一步印证了这一差异。新系统作用下,绝大多数点位形成轮廓相对规则、边界清晰的凝固性坏死区,深度集中 $4.0 \sim 4.8\text{mm}$,横向范围分布较为均匀。对照系统下的凝固区则明显不规则,有的点位仅在表层形成浅薄的坏死区,深度多在 $2.5 \sim 3.2\text{mm}$ 之间,局部边缘出现“断层”或跳变,提示消融过程受阻抗变化影响更大,能量在组织中的沉积不够连续。

2.2 凝胶仿体温度分布与能量沉积

在高阻抗凝胶仿体模型中,新系统作用下的温度场呈现出较为集中的分布特征。红外成像显示,靶点周围高温区呈近似同心层状向外扩展,温度梯度自内向外逐步递减,说明热量在组织内部的传导较为充分。对照系统在同一阻抗水平和功率设定下,表层升温更快、更高,而深层升温相对缓慢,高温区形态不够规则,整体温度场表现出“表热内冷”的特点。

结合温度-时间曲线分析,新系统在相近表面最高

温度水平下,能够在更大体积范围内维持有效温度区间,表层过热和局灶极高温发生的频率反而较低。根据温度积分估算的能量利用情况,新系统在高阻抗仿体中的有效能量沉积量约为对照系统的1.3~1.4倍,这与离体组织实验中观察到的更深、更均匀的凝固区相互对应。

2.3 阻抗变化与能量输出关系

在相同设置下记录的阻抗-时间曲线表明,新系统在高阻抗组织中能够维持相对连续的阻抗下降,仅见小幅波动;对照系统则出现较多锯齿样波动和阶段性回升。与设备输出日志对照可见,新系统在阻抗升高阶段通过动态补偿维持了较稳定的输出,而对照系统在阻抗快速上升时多次主动降低输出功率。

2.4 临床病例观察

在房颤病例中,靶点位于左房后壁瘢痕区域,既往消融时多次出现阻抗升高和升温困难。本次手术采用新系统后,在导管接触良好的前提下,局部阻抗由约200Ω稳定下降至170Ω左右,电极表面未见明显炭化,术后标测显示局部电活动被有效隔离,3个月随访未见房颤复发。室性早搏病例中,靶点位于右室流出道脂肪比例较高区域,传统设备消融时升温缓慢且效果有限,改用新系统后,在相近功率设置下阻抗下降更稳定、温度更易达到目标区间,术后室早负荷较术前明显减少。

3 讨论

本研究结果提示,在组织阻抗明显升高的环境中,新一代射频消融系统在阻抗变化控制、温度分布及凝固

区形态等方面较传统设备更为稳定和可控。与对照系统相比,新系统在相似功率与温度设定下获得了更深且轮廓较为规则的凝固区,并在高阻抗凝胶仿体中形成更集中的温度场和更大的有效温度体积。近年来脉冲电场消融在房颤治疗中的安全性和有效性已有临床证据支持^[4],但在高阻抗组织中如何实现稳定能量沉积仍是热消融系统需要重点解决的问题。

高阻抗病灶的难点在于电流路径不稳定和表层组织过早碳化,一旦形成高阻“壳层”,即使提高功率或延长长时间,深层受热程度仍然有限。本研究中,对照系统在阻抗快速上升阶段多次主动降低输出,客观上加剧了“表热内冷”的问题。新系统通过阻抗动态补偿和双通道温控,将部分调节前移到输出控制层面,在高阻环境下保持更连续的电流传递过程,并通过冷却灌注减轻表层过热,有利于在安全边界内实现更充分的能量沉积。既往高功率射频和消融指数相关研究也表明,合适的能量调控策略有助于在保障安全前提下改善消融充分性^[5]。

需要强调的是,新系统的改进并不能替代对解剖安全边界的判断,尤其在临近冠状动脉、房室传导系统或心外膜脂肪层较厚区域时,仍需在功率设定、消融时间和导管接触力等方面保持谨慎,并结合影像和电生理信息综合评估。本研究样本量有限,体外模型与真实体内环境在血流灌注和散热条件方面仍存在差异,后续有必要在更大样本、多中心的前瞻性研究中,对不同类型高阻抗病灶的长期疗效、安全性及复发率进行系统评估。

结 论:

在高阻抗组织环境下,具备阻抗动态补偿和双通道温控功能的新一代射频消融系统,与传统设备相比,在阻抗变化控制、温度分布及凝固区形态等方面表现出一定优势。体外模型显示,该系统在控制表层温度和降低碳化风险的同时,能够实现更充分的能量沉积;初步临床病例观察提示,其在纤维化、含水量降低或脂肪比例较高等高阻抗病灶中具有一定应用潜力,后续仍需在更大样本研究中进一步验证其长期疗效与安全边界。

参考文献:

[1] 中华医学会心血管病学分会,中国生物医学工程学会心律分会.心房颤动诊断和治疗中国指南[J].中华心血管病杂志,2023,51(6):572-618.

[2] 甄一博,郝杰,祖秀光.消融指数指导下心房颤动高功率射频消融有效性和安全性的meta分析[J].临床心血管病杂志,2023,39(4):282-289.

[3] 曹子钧,尹宗涛.心脏脉冲电场消融治疗心房颤动的研究进展[J].临床心血管病杂志,2023,39(8):597-600.

[4] 甄一博,郝杰,祖秀光.消融指数指导下心房颤动高功率射频消融有效性和安全性的meta分析[J].临床心血管病杂志,2023,39(4):282-289.

[5] 胡晓芹,李承宗,李菲,等.消融指数指导下导管高功率射频消融在肺静脉隔离中的短期疗效及安全性[J].徐州医科大学学报,2022,42(9):666-671.

[6] 国家心血管病中心.中国心血管健康与疾病报告2023[R].北京:国家心血管病中心,2024.