

射频消融术治疗脊柱转移瘤的研究进展

曹鹏飞¹, 乔文龙²

¹西安医学院研究生院, 陕西 西安

²杨凌朝阳医院, 陕西 杨凌

收稿日期: 2025年4月8日; 录用日期: 2025年5月2日; 发布日期: 2025年5月9日

摘要

脊柱转移瘤在癌症晚期患者中很常见, 可导致疼痛、神经功能缺损、生活质量下降和接受癌症系统治疗的能力降低。由于脊柱转移瘤患者预期生存期较短, 治疗原则多以姑息性治疗为主。在临床上, 积极的手术干预在局部肿瘤控制方面提供了更好的疗效。但传统手术存在开放创面大、操作出血多、术后康复长等临床问题, 使得术后并发症发生率较高。随着治疗理念的不断进步, 射频消融术开始应用于治疗脊柱转移瘤并取得了优异疗效。本文就射频消融术的工作原理、影像学引导、应用现状进行如下综述。

关键词

射频消融, 脊柱转移瘤, 临床疗效

Research Progress of Radiofrequency Ablation in the Treatment of Spinal Metastases

Pengfei Cao¹, Wenlong Qiao²

¹Graduate School of Xi'an Medical University, Xi'an Shaanxi

²Yangling Chaoyang Hospital, Yangling Shaanxi

Received: Apr. 8th, 2025; accepted: May 2nd, 2025; published: May 9th, 2025

Abstract

Spinal metastases are common in patients with advanced cancer, which can cause pain, neurological deficits, decreased quality of life and reduced ability to receive systemic cancer treatment. Due to the short expected survival of patients with spinal metastases, the treatment principle is mostly palliative. In clinical practice, active surgical intervention provides better local tumor control. However,

文章引用: 曹鹏飞, 乔文龙. 射频消融术治疗脊柱转移瘤的研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(5): 294-299.

DOI: 10.12677/acm.2025.1551370

traditional surgery has clinical problems such as large open wounds, excessive intraoperative bleeding and long postoperative recovery, resulting in a high incidence of postoperative complications. With the continuous progress of treatment concepts, radiofrequency ablation has been applied to the treatment of spinal metastases and has achieved excellent results. This article reviews the working principle, imaging guidance and application status of radiofrequency ablation.

Keywords

Radiofrequency Ablation, Spinal Metastasis, Clinical Efficacy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着肿瘤内科化疗、靶向和免疫治疗的发展,肿瘤骨转移并且长期带瘤生存的患者人数大大增加[1]。骨转移是继肺、肝脏转移之后的第三大常见转移部位,所有骨转移瘤中脊柱转移瘤约占70%,其中10%的病例出现临床症状[2]。由于累及椎体肿瘤进展可表现为疼痛、脊髓或神经脊髓压迫症状。因此早期发现和治疗脊柱转移至关重要[3]。脊柱转移瘤的治疗目标包括局部肿瘤控制、改善生活质量、尽快控制疼痛、维持神经功能和脊柱稳定[4]。早期的脊柱肿瘤后路切刮手术创伤大、风险高使得手术治疗收益较低。因此临床现将外照射放疗作为治疗脊柱转移瘤的标准选择。但放疗存在治疗疼痛缓解期长、肿瘤放射抵抗、再治疗机会少、术后高骨折发生率等缺陷[5]。

针对以上问题,近年来兴起的射频消融技术(RFA, Radiofrequency ablation)是一种理想的微创解决手段。在这篇综合性综述中,我们叙述了射频消融术治疗转移性脊柱肿瘤的研究进展。具体而言,我们强调了射频消融术应用时的关键节点诸如:工作原理、影像引导系统、应用现状。最后我们分析了未来射频消融的发展方向。

2. 射频消融工作原理

19世纪初,Arsonval于1891年首次报道了RFA技术[6]。随后RFA的应用范围不断扩展,其应用范围包括疼痛介入、心脏疾病、神经外科、普通外科、骨科学和肿瘤学等。RFA使用时需要先将远端电极插入目标组织。其电极通过传导400~500 kHz的交流电至病变组织,使得电极尖端附近的组织细胞水分子振动。振动由电极尖端向外延伸,导致摩擦能量逐渐沉积到组织中。并且热量与电流强度成正比,最终将产生不可逆的细胞死亡(凝血坏死)[7]。热对肿瘤有直接的杀灭作用,并对肿瘤血管有相当大的影响。血管损伤代表了对热消融的另一重要组织反应。热暴露后,常见的组织病理学变化是微血管细胞肿胀和破裂,血管内血栓形成,以及中性粒细胞粘附到微静脉内皮[8]。RFA期间观察到的微血管灌注减少和RFA后的血管闭塞。同时血管损伤会致使持续性的肿瘤组织坏死。除了RFA的热破坏作用外,消融后肿瘤特异性T淋巴细胞的激活而产生的免疫反应也发挥了作用[9]。

RFA的理想化工作中,为确保肿瘤细胞发生凝固性坏死,需将目标组织核心温度精确调控到至少50℃并维持4至6分钟。同时需要避免温度的快速升高及超过100℃,因为它们会导致组织蒸发和炭化,从而在电极周围产生绝缘效果[10]。有许多电极设计功能可供选择,包括水冷却、单极、双极或可扩展电极,这些都有助于增加单位时间内消融病变组织体积。在临床工作中,最常使用的消融温度约为80℃,持续

约 90 秒。PFA 起初采用 20 ms 的持续短高压射频电流, 随后是 480 ms 的“静默”阶段。工作时允许电极散热, 将周围正常组织温度保持在 42℃ 以下预防副损伤。RFA 的治疗目标都是最大限度地提高病变组织破坏率, 同时最大限度地减少正常组织副损伤。为此, 电极、能量发生器和针头不断发展以期能实现这一目标。

3. 射频消融的影像引导系统

影像技术在 RFA 术前规划、术中经皮电极定位的指导、手术的实时监测和术后疗效评价中发挥了重要作用[11]。RFA 是一种微创经皮手术, 需要通过影像学引导下将电极插入病变组织内。早期 RFA 的电极多由超声进行引导, 但由于消融后细胞内水汽化产生的微泡, 因此对 RFA 消融边缘难以进行实时超声监测[12]。

目前而言, CT 和 X 线透视是最常用的引导方式, 而 MRI 引导使用频率较低, 但在某些情况下具有明显优势。其中 CT 引导是脊柱转移瘤治疗中引导热消融最广泛使用和最有效的成像方式, 因为其具有高空间分辨率和骨与软组织可视化能力, 成为美国介入学会推荐影像引导方式[13]。虽然 X 线透视可用于实时调整, 但其在软组织对比度方面存在局限性, 这可能导致在复杂的脊柱转移瘤术中不良事件发生率较高。尽管使用频率较低, 但 MRI 引导可提供更好的软组织可视化, 并可减少特定病例的并发症, 尤其是在脊柱转移瘤中[14]。

但在使用 X 线透视或 CT 引导消融针过程中, 临床医生发现存在放射暴露时间长、操作无法动态显示、显示模态单一等问题。为此有研究者使用计算机导航技术引导射频消融针置入, 实现了精准匹配病变消融的治疗效果。导航辅助 RFA 的核心优势在于其三维透视引导与术中实时动态监测。计算机导航技术通过术前影像学扫描, 将患者的病变及解剖结构三维建模[15]。随后借助术中电磁追踪系统, 将示踪器与穿刺套件及射频消融针结合, 实现术中实时动态监测。同时手术导航系统精度可达 1~2 毫米内, 显著降低术中损伤神经根、甚至椎管脊髓的风险。术中整合射频消融仪器的阻抗监测, 实时反馈消融区域温度及阻抗变化, 确保消融范围覆盖肿瘤范围的同时避免损伤周围正常组织。但计算机导航系统也有缺陷存在, 导航图像依赖术前影像与患者解剖匹配, 若术中患者呼吸运动或体位变化可能出现导航偏差造成灾难性后果[16]。

现有的影像学引导多为单一影像模式。对于脊柱外科而言, 现有引导仅能实现骨性结构的清晰显示, 无法显示肿瘤的消融边界与周围血管、神经的毗邻关系, 极大地依赖于医生的经验和与骨性组织的相对位置关系来辅助判断[17]。而混合成像模式, 如 CT-MRI 融合多模态显示, 可进一步提高骨性结构与软组织结构的显示精度与空间分辨率, 但仍需要算法改进及影像学融合研究来验证其疗效。

4. 射频消融的临床应用现状

随着治疗理念的不断进步, 各种微创技术开始应用于治疗脊柱转移瘤。早期微创技术常用于治疗退行性脊柱疾病, 但现已拓展于脊柱转移瘤的治疗。微创治疗是发生严重并发症、严重营养不良、严重疼痛、免疫系统减弱和预期寿命有限的患者的有利选择。微创手术具有几个优势, 包括减少术中副损伤、术中出血和缩短住院天数减轻医疗负担[18]。相较开放手术, 微创手术能够实现快速康复, 及时恢复原发性肿瘤系统治疗[19]。与此同时, 在短期内缓解疼痛和改善生活质量方面, 微创手术的结果与开放手术疗效相近, 且手术风险与术后恢复速度更容易令患者接受。常见的微创治疗包括经皮椎弓根螺钉固定、经皮椎体成形术、微创减压和内放射物植入术。此外, 微创消融技术已显示出对脊柱转移瘤的优异治疗效果, 得到了临床医生的广泛应用[20]。

微创消融技术中, RFA 相较其它消融技术具有应用广、成本低、临床证据多的独特优势。因此 RFA

被诸多科室医生广泛应用于肿瘤治疗中。除了在肝癌、肺癌、肾癌和甲状腺癌中的常见应用外,骨肿瘤也迅速被 RFA 纳入使用范围。Rosenthal 等人于 1992 年首次报告了 RFA 在骨肉样骨瘤治疗中的应用[21]。目前, RFA 治疗骨转移瘤的技术亦日趋成熟。目前 RFA 已被用于脊柱转移癌患者的外科微创治疗中,主要用于快速缓解疼痛、控制局部肿瘤进展。RFA 的绝对禁忌症很少见,常见的相对禁忌症是不稳定骨折和转移性硬膜外脊髓压迫[22]。经皮射频消融仅需皮肤切口约 5~10 毫米,经椎弓根或椎旁入路置入射频消融针,避免开放手术的广泛剥离,减少术中出血及术后感染风险。同时缩短住院时间,多数患者术后 1 天即可出院,相比传统脊柱开放手术,显著降低医疗成本与住院时间。在 2014 年进行的一项回顾性研究中,有 92 例接受 RFA 的脊柱转移癌患者在术后 1 周、1 个月和 6 个月的随访期间获得了显著的疼痛缓解疗效。关于随访术后止痛药物的用量,54% 的患者表示用量减少,30% 表示无变化,16% 表示增加。在这 92 例患者中,有 34 例获得了详细的手术信息及随访数据[23]。随后 Praveen 等人对这 34 例患者进行了一项回顾性研究,每个接受治疗病变椎体的消融时间范围为 55~653 s,平均消融时间为 361 s。每处病变平均使用 4.3 个重叠消融区进行治疗。记录的术中消融针近端平均温度为 50℃,远端平均温度为 73℃ [24]。34 名患者中有 21 名(62%)接受了椎体后缘病变消融的治疗。

虽然 RFA 可以提供快速的疼痛缓解,但它不能改善或预防椎体压缩性骨折。对于稳定的病理性椎体压缩性骨折, RFA 通常与椎体成形术(PVP)联合使用。RFA 后即刻行椎体成形术(PVP),可于消融后填充肿瘤坏死空腔,同时提高椎体稳定性,降低病理性骨折风险。RFA 通过热凝固破坏肿瘤内神经末梢,并减少炎症因子(如 P 物质、前列腺素)释放。Wallace 等人的研究中,对 55 例椎体转移瘤患者实施射频消融(RFA)联合椎体成形术的治疗术式[25]。随访数据显示,术后 3 个月、6 个月及 1 年时分别达到 89%、74% 和 70% 的局部肿瘤控制率,且随访期间未观察到严重并发症,提示该联合术式兼具肿瘤控制有效性和安全性。John Stone 等人研究表示, RFA 联合骨水泥增强术治疗脊柱转移瘤患者后,顽固性疼痛缓解速度明显快于传统分次外照射放疗(脊柱转移性疾病的标准治疗)结束后 4~6 周才出现的疼痛明显缓解[26]。Greenwood 等人开展一项多中心研究,纳入 110 例经 RFA 治疗的脊柱转移瘤患者,其中 95%(105/110)患者消融后进行了椎体增强术[27]。患者随访回报提示在术后 1 周($P < 0.0001$)和 4 周($P < 0.0001$)时疼痛评分均出现临床显著性降低,治疗前和治疗后 VAS 评分分别为 8.0 和 1.9。并且无重大并发症发生。射频消融后病灶肿瘤血管破坏可能增强后续放疗的氧合效应协助杀灭肿瘤细胞[28]。由于术后康复时间短,可迅速序贯肿瘤系统治疗。与受到放射剂量累积限制的放疗及高风险的开放手术相比,射频消融术可实现低成本、重复治疗的治疗优势。

5. 射频消融术的未来发展及展望

未来需要开展大规模随机对照试验来明确评估 RFA 与放疗等标准治疗相比的疗效,来为临床提供有关 RFA 对临床结局的高等级循证医学数据,尤其是肿瘤控制和死亡率(例如生存分析和包括死因)。这将为如何与放疗一起使用甚至在放疗之前使用 RFA 提供更高质量的证据。此类试验也可包括患有特定原发性肿瘤的参与者,例如靶向典型放射耐药性肿瘤(如肾细胞癌)的脊柱转移。如果没有此类试验,就很难在当前标准治疗(如放疗)之前评估 RFA 治疗的作用。综上,射频消融技术的迭代将与多学科交叉深度融合,推动脊柱转移瘤治疗向精准化、个体化及微创化持续迈进,最终实现患者生存质量与肿瘤控制的协同提升。

参考文献

- [1] Islami, F., Guerra, C.E., Minihan, A., Yabroff, K.R., Fedewa, S.A., Sloan, K., *et al.* (2021) American Cancer Society's Report on the Status of Cancer Disparities in the United States, 2021. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, **72**, 112-143. <https://doi.org/10.3322/caac.21703>
- [2] Van den Brande, R., MJ Cornips, E., Peeters, M., Ost, P., Billiet, C. and Van de Kelft, E. (2022) Epidemiology of Spinal

- Metastases, Metastatic Epidural Spinal Cord Compression and Pathologic Vertebral Compression Fractures in Patients with Solid Tumors: A Systematic Review. *Journal of Bone Oncology*, **35**, Article ID: 100446. <https://doi.org/10.1016/j.jbo.2022.100446>
- [3] Laufer, I., Rubin, D.G., Lis, E., Cox, B.W., Stubblefield, M.D., Yamada, Y., *et al.* (2013) The NOMS Framework: Approach to the Treatment of Spinal Metastatic Tumors. *The Oncologist*, **18**, 744-751. <https://doi.org/10.1634/theoncologist.2012-0293>
 - [4] Houston, R., Desai, S., Takayanagi, A., Quynh Thu Tran, C., Mortezaei, A., Oladaskari, A., *et al.* (2024) A Multidisciplinary Update on Treatment Modalities for Metastatic Spinal Tumors with a Surgical Emphasis: A Literature Review and Evaluation of the Role of Artificial Intelligence. *Cancers*, **16**, Article 2800. <https://doi.org/10.3390/cancers16162800>
 - [5] Husain, Z.A., Sahgal, A., De Salles, A., Funaro, M., Glover, J., Hayashi, M., *et al.* (2017) Stereotactic Body Radiotherapy for De Novo Spinal Metastases: Systematic Review: International Stereotactic Radiosurgery Society Practice Guidelines. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **27**, 295-302. <https://doi.org/10.3171/2017.1.spine16684>
 - [6] McCormick, Z.L. and Hurley, R. (2021) The Evolution of Radiofrequency Denervation for Pain Indications. *Pain Medicine*, **22**, 1465-1467. <https://doi.org/10.1093/pm/pnab180>
 - [7] Hadzipasic, M., Giantini-Larsen, A.M., Tatsui, C.E. and Shin, J.H. (2020) Emerging Percutaneous Ablative and Radio-surgical Techniques for Treatment of Spinal Metastases. *Neurosurgery Clinics of North America*, **31**, 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.nec.2019.08.017>
 - [8] Ni, Y., Mulier, S., Miao, Y., Michel, L. and Marchal, G. (2005) A Review of the General Aspects of Radiofrequency Ablation. *Abdominal Imaging*, **30**, 381-400. <https://doi.org/10.1007/s00261-004-0253-9>
 - [9] Lee, J., Kim, S., Chung, G., Lee, S., Han, Y. and Kim, C. (2003) Open Radio-Frequency Thermal Ablation of Renal VX2 Tumors in a Rabbit Model Using a Cooled-Tip Electrode: Feasibility, Safety, and Effectiveness. *European Radiology*, **13**, 1324-1332. <https://doi.org/10.1007/s00330-002-1658-x>
 - [10] Gillams, A.R. (2005) The Use of Radiofrequency in Cancer. *British Journal of Cancer*, **92**, 1825-1829. <https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6602582>
 - [11] Ierardi, A.M., Carnevale, A., Stellato, E., De Lorenzis, E., Uccelli, L., Dionigi, G., *et al.* (2023) Cone Beam Computed Tomography Image Fusion with Cross Sectional Images for Percutaneous Renal Tumor Ablation: Preliminary Data. *Technology in Cancer Research & Treatment*, **22**. <https://doi.org/10.1177/15330338231154994>
 - [12] Boehm, T., Malich, A., Goldberg, S.N., Reichenbach, J.R., Hilger, I., Hauff, P., *et al.* (2002) Radio-Frequency Tumor Ablation: Internally Cooled Electrode versus Saline-Enhanced Technique in an Aggressive Rabbit Tumor Model. *Radiology*, **222**, 805-813. <https://doi.org/10.1148/radiol.2223010573>
 - [13] Kurth, D.A., Karmazyn, B.K., Waldrip, C.A., Chatfield, M. and Lockhart, M.E. (2021) ACR Appropriateness Criteria® Methodology. *Journal of the American College of Radiology*, **18**, S240-S250. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2021.03.021>
 - [14] Barat, M., Tselikas, L., de Baère, T., Gravel, G., Yevich, S., Delpla, A., *et al.* (2019) Thermal-Ablation of Vertebral Metastases Prevents Adverse Events in Patients with Differentiated Thyroid Carcinoma. *European Journal of Radiology*, **119**, Article ID: 108650. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2019.108650>
 - [15] Chen, Z., Meng, L., Xiao, Y., Zhang, J., Zhang, X., Wei, Y., *et al.* (2024) Clinical Application of Optical and Electromagnetic Navigation System in CT-Guided Radiofrequency Ablation of Lung Metastases. *International Journal of Hyperthermia*, **41**, Article ID: 2300333. <https://doi.org/10.1080/02656736.2023.2300333>
 - [16] Wood, B.J., Kruecker, J., Abi-Jaoudeh, N., Locklin, J.K., Levy, E., Xu, S., *et al.* (2010) Navigation Systems for Ablation. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, **21**, S257-S263. <https://doi.org/10.1016/j.jvir.2010.05.003>
 - [17] Aslan, S., Al-Smadi, M.W., Al-Khafaji, M.Q., Gati, A., Al-Khafaji, M.Q., Viola, R., *et al.* (2024) Evaluating the Accuracy and Efficiency of Imaging Modalities in Guiding Ablation for Metastatic Spinal Column Tumors: A Systematic Review. *Cancers*, **16**, Article 3946. <https://doi.org/10.3390/cancers16233946>
 - [18] Chen, Y., He, Y., Zhao, C., Li, X., Zhou, C. and Hirsch, F.R. (2019) Treatment of Spine Metastases in Cancer: A Review. *Journal of International Medical Research*, **48**, 1-12. <https://doi.org/10.1177/0300060519888107>
 - [19] Bourassa-Moreau, É., Versteeg, A., Moskven, E., Charest-Morin, R., Flexman, A., Ailon, T., *et al.* (2020) Sarcopenia, but Not Frailty, Predicts Early Mortality and Adverse Events after Emergent Surgery for Metastatic Disease of the Spine. *The Spine Journal*, **20**, 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2019.08.012>
 - [20] Barzilai, O., Bilsky, M.H. and Laufer, I. (2020) The Role of Minimal Access Surgery in the Treatment of Spinal Metastatic Tumors. *Global Spine Journal*, **10**, 79S-87S. <https://doi.org/10.1177/2192568219895265>
 - [21] Rosenthal, D.I., Alexander, A., Rosenberg, A.E. and Springfield, D. (1992) Ablation of Osteoid Osteomas with a Percutaneously Placed Electrode: A New Procedure. *Radiology*, **183**, 29-33. <https://doi.org/10.1148/radiology.183.1.1549690>
 - [22] Roberts, D.W., Strohhahn, J.W., Hatch, J.F., Murray, W. and Kettenberger, H. (1986) A Frameless Stereotaxic Integration of Computerized Tomographic Imaging and the Operating Microscope. *Journal of Neurosurgery*, **65**, 545-549.

- <https://doi.org/10.3171/jns.1986.65.4.0545>
- [23] Ryan, A., Byrne, C., Pusceddu, C., Buy, X., Tsoumakidou, G. and Filippiadis, D. (2022) CIRSE Standards of Practice on Thermal Ablation of Bone Tumours. *CardioVascular and Interventional Radiology*, **45**, 591-605. <https://doi.org/10.1007/s00270-022-03126-x>
- [24] Anchala, P.R., Irving, W.D., Hillen, T.J., Friedman, M.V., Georgy, B.A., Coldwell, D.M., Jennings, J.W., *et al.* (2014). Treatment of Metastatic Spinal Lesions with a Navigational Bipolar Radiofrequency Ablation Device: A Multicenter Retrospective Study. *Pain Physician*, **17**, 317-327.
- [25] Wallace, A.N., Tomasian, A., Vaswani, D., Vyhmeister, R., Chang, R.O. and Jennings, J.W. (2015) Radiographic Local Control of Spinal Metastases with Percutaneous Radiofrequency Ablation and Vertebral Augmentation. *American Journal of Neuroradiology*, **37**, 759-765. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a4595>
- [26] Johnstone, C. and Lutz, S.T. (2013) External Beam Radiotherapy and Bone Metastases. In: Vassiliou, V., Chow, E. and Kardamakis, D., Eds., *Bone Metastases*, Springer, 175-185. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7569-5_9
- [27] Wallace, A.N., Greenwood, T.J. and Jennings, J.W. (2015) Radiofrequency Ablation and Vertebral Augmentation for Palliation of Painful Spinal Metastases. *Journal of Neuro-Oncology*, **124**, 111-118. <https://doi.org/10.1007/s11060-015-1813-2>
- [28] Kozin, S.V. (2022) Vascular Damage in Tumors: A Key Player in Stereotactic Radiation Therapy? *Trends in Cancer*, **8**, 806-819. <https://doi.org/10.1016/j.trecan.2022.06.002>