

低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺优化与缺陷控制研究

林先永

广东 中山 528449

DOI:10.61369/ME.2025120033

摘要：本文聚焦低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺，阐述环氧树脂电气绝缘性能和结构稳定性的重要性，介绍真空动态脱气工艺优化、梯度温控浇注系统设计等多种工艺优化及缺陷控制方法，明确工艺参数与缺陷指标量化关系，提出220kV级浇注工艺规范，指出未来重要研究方向。

关键词：低局放干式变压器；环氧树脂；真空浇注工艺

Research on Optimization and Defect Control of Epoxy Resin Vacuum Casting Process for Low Partial Discharge Dry-type Transformer

Lin Xianyong

Zhongshan, Guangdong 528449

Abstract : This article focuses on the vacuum casting process of epoxy resin for low partial discharge dry-type transformers, elaborates on the importance of electrical insulation performance and structural stability of epoxy resin, introduces various process optimization and defect control methods such as vacuum dynamic degassing process optimization and gradient temperature control casting system design, clarifies the quantitative relationship between process parameters and defect indicators, proposes 220kV level casting process specifications, and points out important research directions in the future.

Keywords : low partial discharge dry-type transformer; epoxy resin; vacuum casting process

引言

在电力行业不断发展的背景下，2020年颁布的《推动能源清洁低碳安全高效利用实施意见》强调了提升电力设备性能与可靠性的重大性。低局放干式变压器作为电力系统关键设备，其环氧树脂真空浇注工艺的优化意义重大。该工艺涉及电气性能、结构稳定性、脱气与浇注系统设计等多方面，各环节紧密关联，共同影响变压器的性能与可靠性。研究如何精准控制工艺参数、抑制微观与宏观缺陷，对提升产品质量至关重要，也与政策中推动电力设备高效利用的要求相契合，对推动行业技术进步具有重要的现实意义。

一、干式变压器环氧树脂材料特性分析

(一) 环氧树脂电气绝缘性能要求

在低局放干式变压器中，环氧树脂的电气绝缘性能至关重要。介电强度决定了材料承受电场而不发生击穿的能力，低局放场景要求其具备较高介电强度，以确保在长期运行的电场环境下，不会因电场强度过高而被击穿，保障变压器安全稳定运行^[1]。体积电阻率反映材料对电流的阻碍能力，较高的体积电阻率能够有效抑制泄漏电流，减少能量损耗，防止因电流泄漏引发的各种故障。介质损耗体现材料在交变电场下的能量损耗情况，

低局放场景下，需严格控制环氧树脂的介质损耗，以降低因能量损耗产生的热量，避免因过热导致材料性能下降及局放问题加剧。这些核心电气性能指标共同作用，为低局放干式变压器的可靠运行提供保障。

(二) 树脂体系结构稳定性要求

在干式变压器中，环氧树脂作为关键材料，其树脂体系结构稳定性至关重要。当变压器运行时，会面临温度梯度与机械应力的复杂工况。在此情况下，材料的收缩率、玻璃化转变温度及热膨胀系数需精准匹配。若收缩率不匹配，在固化过程中易产生内部应力，导致材料出现微裂纹，影响绝缘性能与结构稳定性^[2]。

作者简介：林先永（1979—），男，广东人，本科，研究方向：机电，已发表论文7篇。

玻璃化转变温度若不合理，在高低温交替环境下，材料会发生玻璃态与高弹态转变异常，降低变压器的可靠性。热膨胀系数若与其他组件不匹配，机械应力作用下，会造成界面脱粘等问题。因此，确保这几个参数在不同工况下的良好匹配，是维持环氧树脂树脂体系结构稳定性，实现低局放干式变压器可靠运行的关键。

二、真空浇注工艺关键参数研究

(一) 真空动态脱气工艺优化

在低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺中，真空动态脱气工艺的优化至关重要。通过建立真空气度 – 脱气时间 – 树脂黏度的三维数值模型，可深入探究三者之间的内在联系与相互影响。该模型能够模拟不同真空气度和脱气时间下树脂黏度的变化情况，从而精准确定最佳脱气工艺窗口。在此工艺窗口内，能有效降低树脂中的气体含量，减少因气体残留导致的局部放电等缺陷。经研究发现，在此三维数值模型基础上所确定的工艺参数，可显著提升真空动态脱气效果^[3]。这不仅有助于提高环氧树脂的浇注质量，更能有效控制低局放干式变压器生产过程中的缺陷，为生产高质量的产品提供有力保障。

(二) 梯度温控浇注系统设计

梯度温控浇注系统设计对于低局放干式变压器环氧树脂真空浇注至关重要。开发基于 PID 算法的模具分区温控策略，能够实现对树脂流动前沿形态的精准控制。该系统通过对模具不同区域进行温度梯度设置，利用 PID 算法根据树脂在模具内的流动状态实时调整各区域温度^[4]。在浇注开始阶段，较高温度区域可加速树脂流动，促使其快速填充复杂部位；随着浇注推进，调整温度梯度，使树脂在整个模具内均匀分布，避免局部堆积或过薄。如此一来，精确的温度控制能有效改善树脂流动状态，进而优化真空浇注工艺，减少因树脂流动不均引发的缺陷，提高低局放干式变压器的浇注质量。

三、典型缺陷形成机理与抑制方法

(一) 微观孔隙缺陷控制技术

1. 气隙成因与局放关联性

通过 X 射线断层扫描可实现对气隙尺寸分布的量化，这为深入探究气隙成因与局放关联性奠定基础^[5]。气隙的形成主要源于环氧树脂在真空浇注过程中，气体未能充分排出，或固化过程中产生小分子气体。气隙相当于绝缘介质中的薄弱环节，会导致电场畸变。建立气隙密度与局部放电起始电压的数学模型，能直观反映二者关系。气隙密度越高，局部放电起始电压越低，更易引发局部放电。基于此，要抑制因气隙导致的微观孔隙缺陷，一方面需优化真空浇注工艺参数，提高真空气度、延长抽真空时间，确保气体充分排出；另一方面，合理选择环氧树脂及固化剂，优化固化工艺，减少固化过程中气体产生，以此降低气隙密度，提升变压器绝缘性能，有效控制微观孔隙缺陷。

2. 多级加压浸渍工艺

在低局放干式变压器环氧树脂真空浇注过程中，微观孔隙缺陷的产生主要源于树脂在浸渍时未能充分填充微小间隙，气体未能有

效排出。为抑制此类缺陷，多级加压浸渍工艺发挥关键作用。该工艺通过分阶段加压保压方案，在浇注初期以较低压力使树脂初步渗透，避免因压力过高致使气体被困于材料内部^[6]。随后逐步提升压力，促使树脂进一步渗入微观孔隙。配合开发基于超声振动辅助的树脂渗透强化技术，利用超声振动产生的空化效应与机械搅拌作用，增强树脂流动性，降低其表面张力，更有效地驱赶孔隙内气体，使树脂能够更好地填充微观孔隙，从而显著减少微观孔隙缺陷，提升环氧树脂浇注质量，保障低局放干式变压器的性能与可靠性。

(二) 宏观裂纹缺陷消除策略

1. 固化应力分布数值模拟

通过运用 ANSYS 进行树脂 – 铁芯结构热 – 力耦合分析，预测不同冷却速率下的内应力分布，能够深入探究宏观裂纹缺陷形成机理^[7]。在环氧树脂真空浇注过程中，由于固化反应和冷却过程的不均匀性，会产生较大的固化应力，当此应力超过材料的极限强度时，便易引发宏观裂纹。要抑制该缺陷，可基于模拟所得内应力分布结果，优化冷却速率，使固化过程更均匀，从而降低内应力集中。比如，在温度变化大的区域，适当降低冷却速度，避免应力突变。还可在浇注材料中添加合适的增韧剂，增强材料韧性，提高其抗裂能力，以此消除宏观裂纹缺陷，优化低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺。

2. 应力缓冲层设计

在低局放干式变压器环氧树脂真空浇注过程中，宏观裂纹缺陷的产生往往与浇注体内部应力集中密切相关。当环氧树脂固化收缩以及温度变化引起热应力时，若应力无法有效释放，就容易在绕组端部等部位形成宏观裂纹。

为消除该缺陷，应力缓冲层设计至关重要。在绕组端部设置柔性过渡层，并进行弹性模量梯度化设计是关键手段。通过这种方式，能使不同材料间的应力传递更为平缓，有效消解界面应力。弹性模量梯度化设计可确保缓冲层从靠近绕组的高模量区域逐渐过渡到靠近环氧树脂的低模量区域，从而降低应力突变，抑制宏观裂纹的产生^[8]，保证干式变压器的浇注质量，提升其电气性能与可靠性。

四、低局放特性综合优化路径

(一) 材料改性技术路径

1. 纳米填料复配方案

研究 Al2O3/SiO2 纳米粒子掺杂对树脂陷阱能级分布的改善效果，是低局放特性综合优化路径中材料改性技术路径里纳米填料复配方案的关键。纳米粒子具有独特的小尺寸效应和表面效应，Al2O3 和 SiO2 纳米粒子各自具备不同优良特性。将二者复配掺杂到环氧树脂中，能协同改变树脂内部微观结构^[9]。Al2O3 纳米粒子可提升树脂的热导率与机械性能，而 SiO2 纳米粒子能增强其电气绝缘性能。通过合理调整 Al2O3 与 SiO2 纳米粒子的比例，可精准调控树脂陷阱能级分布，优化载流子输运过程，抑制局部放电的发生与发展，从而有效提升低局放干式变压器环氧树脂的整体性。

能，实现低局放特性的综合优化。

2.界面处理剂开发

为实现低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺优化与缺陷控制，在界面处理剂开发方面，研制含硅氧烷偶联剂的表面处理剂至关重要。硅氧烷偶联剂具有独特的化学结构，一端可与树脂发生化学反应，另一端能与导体表面的活性基团相互作用，从而增强树脂-导体界面结合强度。这种处理剂的使用，能有效改善界面状态，减少因界面结合不良导致的局部放电隐患。通过对硅氧烷偶联剂的种类、用量及处理工艺等进行系统研究，找到最适配的参数组合，提升界面结合力，进而优化低局放特性。此方法为低局放干式变压器的性能提升提供了有力技术支持^[10]。

(二) 工艺升级技术路径

1.智能浇注控制系统

构建基于机器视觉的树脂流动监测系统对实现浇注参数动态补偿至关重要。该系统利用先进的机器视觉技术，实时捕捉环氧树脂在浇注过程中的流动状态，如流速、流向及分布情况等。通过获取的精确数据，系统能够迅速分析当前浇注状态与理想状态的差异，并据此自动对浇注参数进行动态补偿。例如，当发现树脂流速过快可能导致局部气泡难以排出时，系统自动调整浇注速度；若监测到树脂在模具内分布不均，可及时调节浇注位置或流量。这种智能调节机制可有效避免因浇注参数不合理而引发的缺陷，确保浇注过程稳定、精确，从而提升低局放干式变压器的整体性能，优化其低局放特性。

2.多物理场耦合固化工艺

开发利用电磁-热场协同作用的定向固化技术，是优化低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺的关键一环。在该工艺中，利用电磁场与热场的协同作用，能够对环氧树脂分子链的排列产生影响。热场为分子提供足够的能量使其具有一定的活动能力，而电磁场则在此基础上，通过特定的作用方式，引导分子链沿特定方向排列，从而优化分子链排列有序度。这种有序度的提升对降低局部放电特性意义重大，因为有序排列的分子链结构更加稳定，能有效减少因分子结构无序导致的电场畸变，进而降低局部放电的可能性，提高低局放干式变压器的整体性能与可靠性。

(三) 结构创新技术路径

1.三维网络屏蔽结构

在低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺优化与缺陷控制

研究中，三维网络屏蔽结构对提升低局放特性至关重要。通过设计嵌入式导电网格结构，可有效建立等电位屏蔽电场均匀化机制。该结构利用在变压器关键部位嵌入特制的导电网格，使电场在三维空间内实现均匀分布。网格的材质、形状及布局等参数经过精心设计，能精准调控电场强度与分布态势。这样，在变压器运行时，可大幅减少局部电场集中现象，避免因电场不均引发的局部放电问题，进而提升变压器的整体绝缘性能与稳定性，确保其在复杂工况下长期可靠运行，有效控制缺陷产生，优化低局放特性。

2.梯度绝缘体系构建

采用介电常数梯度分布设计构建梯度绝缘体系，能有效实现电场强度自然过渡与局放抑制。通过合理调配绝缘材料的成分，使绝缘体系在不同区域具有不同介电常数。在靠近电极等电场集中区域，设置较高介电常数的材料，引导电场线分布，降低电场强度峰值。而在电场相对较弱区域，使用较低介电常数材料，保证整体绝缘性能。如此一来，整个绝缘体系形成介电常数梯度分布，电场强度能自然、平滑地过渡，避免电场集中引发局部放电。这种梯度绝缘体系构建方法，从绝缘结构本身出发，为低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺优化提供了一条重要的结构创新技术路径，有助于从根本上解决局放问题，提升变压器的整体性能与可靠性。

五、总结

本研究聚焦低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺，经深入探讨，明确了工艺参数优化窗口与缺陷控制指标间存在紧密的量化关系。这种关系为精准控制浇注过程、提升产品质量提供了关键依据。在此基础上，提出适用于220kV级干式变压器的浇注工艺规范，为该领域实际生产操作提供了清晰、可行的标准与指导。同时，着眼未来，指出环保型树脂开发以及数字孪生工艺控制系统将是重要研究方向。环保型树脂开发契合绿色发展理念，数字孪生工艺控制系统则有望借助数字化手段实现更高效、智能的工艺控制。这些研究成果与方向，对于推动低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺的持续进步具有重要意义。

参考文献

- [1] 张臣臣.环氧树脂/碳纤维片状模塑料模压成型工艺研究与优化 [D].浙江大学, 2023.
- [2] 沈月. 碳纤维增强环氧树脂基复合材料固化过程研究与模压工艺参数优化 [D]. 中国民航大学, 2021.
- [3] 何晨蔚. 非粘结复合柔性管道接头树脂浇注工艺研究 [D]. 大连理工大学, 2023.
- [4] 王明. 真空灌注协同阻燃环氧树脂及其碳纤维复合材料应用研究 [D]. 东华大学, 2021.
- [5] 霍守超. 界面空隙缺陷对环氧树脂局部放电影响机理的研究 [D]. 华北电力大学(北京), 2023.
- [6] 杨训豹, 丁鑫. 环氧树脂浇注干式变压器局放特性影响因素研究 [J]. 船电技术, 2023, 43(9): 39-43.
- [7] 蔡程帆, 李超群, 张奇, 刘一帆, 于人同, 李雄, 魏忠正. 环氧树脂固化工艺优化研究 [J]. 塑料科技, 2023.
- [8] 俞天波, 徐林峰, 潘必超. 干式变压器环氧树脂热老化特性分析 [J]. 机械管理开发, 2023.
- [9] 冯玉辉, 高超. 环氧树脂浇注封闭母线在核电行业的应用 [J]. 电气技术, 2022.
- [10] 冯军科, 苗建宝, 赵庭. 改性环氧树脂注浆修复材料配比优化及施工工艺研究 [J]. 上海涂料, 2021.