

油浸式变压设备灌装密封技术改进及效能研究

南如强 童荣焰 黄宇 何威
共信电力科技有限公司 浙江乐清 325600

【摘要】油浸式变压设备是电力传输系统的核心设备，灌装密封性能直接决定其运行稳定性、安全性及使用寿命。针对现有灌装密封技术存在的渗漏、密封失效、效率低下等问题，本文结合密封试验标准及实际运行需求，从密封材料、灌装工艺、结构设计三方面提出改进方案，通过对比试验验证改进技术的可行性与优越性。结果表明，改进后的技术可显著降低渗漏率，提升密封稳定性，延长设备运维周期，降低运维成本，为油浸式变压设备的安全高效运行提供技术支撑。

【关键词】油浸式变压设备；灌装密封技术；技术改进；密封效能；渗漏控制

Improvement and Performance Study on Filling and Sealing Technology for Oil-Immersed Voltage Transformers

Nan Ruqiang Tong Rongyan Huang Yu He Wei

Gongxin Electric Power Technology Co., Ltd. Yueqing City, Zhejiang Province 325600

【Abstract】Oil-immersed voltage transformers are core components of power transmission systems, where filling and sealing performance directly determines operational stability, safety, and service life. Addressing existing issues in current sealing technologies—including leakage, seal failure, and low efficiency—this paper proposes improvement measures based on sealing test standards and practical operational requirements, focusing on three key aspects: sealing materials, filling processes, and structural design. Comparative experiments validated the feasibility and superiority of the enhanced technology. Results demonstrate that the improved method significantly reduces leakage rates, enhances sealing stability, extends equipment service life, and lowers maintenance costs, providing robust technical support for the safe and efficient operation of oil-immersed voltage transformers.

【Key words】Oil-immersed pressure transformer; Filling and sealing technology; Technical improvement; Sealing efficiency; Leakage control

引言

在电力系统中，油浸式变压设备承担着电压转换、电能传输的关键作用，其运行状态直接影响电力系统的稳定性和可靠性。灌装密封作为该设备制造与运维的核心环节，核心作用是将绝缘油稳定封装于设备内部，隔绝外界有害物质，保障绝缘油的绝缘和散热效能，防止渗漏引发的设备故障、能源浪费及安全隐患。当前，现有灌装密封技术存在诸多不足，传统密封材料易老化开裂、灌装工艺参数控制不精准、密封结构适配性差，难以长期维持合格密封状态，导致运维频率和成本上升，甚至影响电力供电。随着电力系统向高电压、大容量、长周期方向发展，对灌装密封技术要求不断提高，因此开展相关技术改进及效能研究，解决现有缺陷、提升密封效能，具有重要工程实践意义和理论价值，本文将通过分析问题、提出改进方案并验证效能，为技术优化升级提供参考。

一、油浸式变压设备灌装密封技术现状及存在问题

1.1 灌装密封技术现状

目前，油浸式变压设备灌装密封技术主要由密封材料、灌装工艺和密封结构三部分组成，三者协同作用保障设备的

密封性能。密封材料主要采用传统橡胶密封件和普通密封胶，其中橡胶密封件以丁腈橡胶为主，密封胶多为通用型耐油胶；灌装工艺主要采用真空注油方式，流程包括预处理、抽真空、注油、静置、密封检测等环节；密封结构主要采用螺栓连接+密封件的组合形式，重点针对油箱箱沿、法兰接缝、螺栓缝隙等关键部位进行密封。

1.2 现有技术存在的主要问题

通过对现有油浸式变压设备灌装密封技术的调研和分析，结合密封试验数据和运行反馈，发现其主要存在以下三方面问题，严重影响设备的密封效能和运行稳定性。

首先，密封材料性能不足。传统丁腈橡胶密封件耐油、耐温、耐候性较差，长期处于绝缘油浸泡和环境温度变化的工况下，易发生老化、硬化、开裂现象，通常使用1-2年就需更换；普通密封胶致密性不足，固化后易产生孔隙，无法完全填充法兰接缝、螺栓缝隙等隐蔽部位，易形成渗漏通道，且耐盐雾、耐酸碱性能较差，在恶劣环境下密封失效速度加快。

其次，灌装工艺不合理。现有真空注油工艺中，抽真空环节真空度控制不精准，部分设备抽真空不彻底，导致设备内部残留空气，注油过程中空气无法完全排出，形成气泡，气泡破裂后会在密封部位产生空隙，引发渗漏；注油速度控制不稳定，过快易导致绝缘油飞溅，产生冲击，破坏密封结构，过慢则会延长灌装周期，降低生产效率；

静置环节时间不足，密封胶未完全固化就进行后续操作，导致密封效果不佳。

最后，密封结构设计存在缺陷。传统密封结构采用螺栓连接，螺栓间距不合理，易导致密封面受力不均，出现局部缝隙；密封面加工精度不足，粗糙度超标，存在划痕、凹陷等缺陷，影响密封贴合度；密封结构未考虑设备运行过程中的振动和温差变化，热膨胀系数与设备金属部件不匹配，长期运行后易出现密封件脱落、开裂，导致密封失效。

1.3 问题成因分析

现有灌装密封技术存在问题的成因主要包括三个方面。一是材料选型缺乏针对性，未结合油浸式变压设备的运行工况（如绝缘油浸泡、温度波动、环境腐蚀等）选择专用密封材料，盲目采用通用型材料，导致材料性能与实际需求不匹配；二是工艺管控不严格，灌装过程中对真空度、注油速度、静置时间等关键参数的控制缺乏精准性，未建立完善的工艺管控体系，且操作人员专业水平参差不齐，操作不规范；三是结构设计理念落后，未充分考虑设备运行过程中的各种不利因素，密封结构与设备整体适配性不足，且缺乏对隐蔽密封部位的针对性设计，导致密封存在薄弱环节。

二、油浸式变压设备灌装密封技术改进方案

2.1 密封材料改进

针对密封材料性能不足的问题，结合油浸式变压设备的运行工况和相关标准要求，对密封材料进行优化选型，采用专用密封材料替代传统材料，提升密封材料的耐油、耐温、耐候性和致密性。

密封件选用氟橡胶材料，该材料耐油温可达 150℃，与绝缘油兼容性良好，长期浸泡不会发生溶胀、老化，且耐盐雾、耐酸碱性能优异，能够适应恶劣运行环境；同时，对密封件尺寸进行精准控制，尺寸公差控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内，无破损、气泡等缺陷，使用前采用耐油剂浸泡 30 分钟，增强材料韧性，去除表面杂质，提升密封贴合度。

密封胶选用单组份耐高温环氧树脂胶，该材料分子结构致密，固化后形成无孔隙的连续防护层，可塑性极强，能够完美填充法兰接缝、螺栓缝隙等隐蔽空隙，彻底封死渗漏通道；同时，该材料耐油、耐高温、耐振动性能优异，热膨胀系数与设备金属部件接近，能够适配设备运行过程中的温差变化和振动冲击，且固化速度快，24 小时即可完全固化，大幅提升密封效率和密封稳定性。

2.2 灌装工艺改进

针对灌装工艺不合理的问题，结合现有工艺存在的缺陷，对灌装工艺流程进行优化，完善工艺管控体系，提升工艺执行的精准性和规范性，具体改进措施如下。

优化抽真空环节，采用精准真空度控制系统，将真空度严格控制在 $\leq 200\text{Pa}$ ，确保设备内部空气完全排出，避免注油过程中产生气泡；同时，抽真空时间根据设备容量进行合理调整，确保抽真空彻底，为后续注油环节奠定基础。优化注油环节，采用匀速注油控制系统，将注油速度控制在合理范围，避免注油过快或过慢带来的问题，同时注油过程中实

时监测油位，确保油位达到标准要求，避免油位过高或过低影响密封性能。

优化静置环节，根据密封胶的固化特性，将静置时间调整为 2 小时，静置期间禁止重物压在密封部位，确保密封胶完全固化，提升密封效果；同时，静置过程中实时监测环境温度和湿度，避免在空气湿度 $> 80\%$ 、温度剧烈波动的环境下进行静置操作。优化密封检测环节，采用氦质谱检漏法结合压力密封试验，提升检测精度，能够精准检测出微渗漏问题；同时，明确检测参数，对于容量 $\geq 20\text{MVA}/66\text{kV}$ 的设备，压力密封试验维持时间为 24h，压力波动范围 \geq 规定值 90%，小型设备维持时间为 8h，确保检测结果符合标准要求。

2.3 密封结构改进

针对密封结构设计存在的缺陷，结合设备运行特点和密封要求，对密封结构进行优化设计，提升结构的适配性和密封性，具体改进措施如下。

优化密封面设计，对密封面进行精密打磨，将粗糙度控制在 $Ra1.6\mu\text{m}$ 以内，去除表面划痕、凹陷等缺陷，提升密封贴合度；同时，优化箱沿设计，将箱沿宽度调整为箱体宽度的 1/5~1/6，确保箱体与箱盖的结合效果。优化连接方式，减少螺栓使用数量，合理调整螺栓间距，确保密封面受力均匀；同时，采用螺栓力矩控制技术，将 M10 螺栓力矩控制在 $12\sim 15\text{N}\cdot\text{m}$ ，避免螺栓过松或过紧导致的密封缺陷。

针对内油式金属波纹管储油柜的密封问题，优化密封试验装置和结构，无需拆卸储油柜即可完成密封试验，避免拆卸过程中产生的密封隐患；同时，在密封结构中增加弹性缓冲层，吸收设备运行过程中的振动和热膨胀产生的应力，防止密封件脱落、开裂。

三、改进技术效能试验验证

3.1 试验目的

为验证改进后灌装密封技术的可行性和优越性，通过对比试验，分析改进技术与现有技术密封性能、运行稳定性、运维周期等方面的差异，评估改进技术的效能，为改进技术的推广应用提供数据支撑。试验严格遵循 DL/T 264-2022《油浸式电力变压器(电抗器)现场密封试验导则》等相关标准要求，确保试验结果的准确性和可靠性。

3.2 试验方案

选取两组规格相同的油浸式变压设备，一组采用改进后的灌装密封技术（试验组），另一组采用现有灌装密封技术（对照组），两组设备在相同的运行环境和工况下进行试验，试验周期为 12 个月。试验过程中，重点监测两组设备的渗漏率、密封失效次数、绝缘油损耗量、运维次数等指标，同时记录设备运行过程中的温度、振动等参数，确保试验条件的一致性。

试验内容包括密封性能测试、长期运行稳定性测试和运维成本测算。密封性能测试采用压力密封试验和真空密封试验，检测两组设备的泄漏率和密封维持时间；长期运行稳定性测试监测设备在 12 个月内的运行状态，记录密封失效次数和故障情况；运维成本测算统计两组设备在试验周期内的

运维费用、材料更换费用等,对比分析改进技术的经济性。

试验周期结束后,对两组设备的试验数据进行整理和分析,具体试验结果如下表所示。

3.3 试验结果与分析

表1 改进技术与现有技术试验指标对比表

试验指标	对照组(现有技术)	试验组(改进技术)	改进幅度
渗漏率(Pa·L/s)	850	120	85.9%
密封失效次数(次/12个月)	4	0	100%
绝缘油损耗量(kg/12个月)	18.6	2.3	87.6%
运维次数(次/12个月)	5	1	80.0%
运维成本(元/12个月)	12800	3200	75.0%

从表1可以看出,改进后的灌装密封技术在各项试验指标上均优于现有技术。渗漏率从850Pa·L/s降至120Pa·L/s,改进幅度达85.9%,远低于1000Pa·L/s的泄漏率判定阈值;试验周期内,试验组未出现密封失效情况,而对照组出现4次密封失效,改进幅度达100%;绝缘油损耗量从18.6kg降至2.3kg,改进幅度达87.6%,有效减少了能源浪费;运维次数从5次降至1次,运维成本从12800元降至3200元,改进幅度分别达80.0%和75.0%,显著降低了运维压力和成本。

进一步分析密封性能测试数据,试验组压力密封试验中,容量 $\geq 20\text{MVA}/66\text{kV}$ 的设备在0.03MPa压力下维持24h无渗漏,压力波动范围符合标准要求;真空密封试验中,真空度稳定在 $\leq 200\text{Pa}$,泄漏率控制在合理范围,表明改进后的技术能够满足相关标准要求。

四、改进技术的应用价值与推广前景

4.1 应用价值

改进后的油浸式变压器设备灌装密封技术,解决了现有技术存在的渗漏、密封失效、效率低下等问题,具有显著的应用价值。从安全层面来看,改进技术大幅提升了设备的密封性能,杜绝了绝缘油渗漏带来的安全隐患,保障了设备的安全稳定运行,减少了因密封问题导致的设备故障和电力中断事故;从经济层面来看,改进技术延长了密封件使用寿命,减少了绝缘油损耗和运维次数,降低了运维成本,同时提升了灌装效率,缩短了生产和运维周期,为企业节约了大量的人力、物力和财力成本;从技术层面来看,改进技术结合了先进的材料、工艺和结构设计,提升了油浸式变压器设备灌装密封技术的整体水平,为相关技术的优化升级提供了参考。

4.2 推广前景

随着电力系统的不断发展,油浸式变压器的应用范围不断扩大,对灌装密封技术的要求也不断提高。改进后的灌

装密封技术具有密封性能好、运行稳定、运维成本低、适配性强等优点,能够满足不同规格、不同工况下油浸式变压设备的密封需求,适用于电力、化工、冶金等多个领域的油浸式变压设备,推广前景广阔。未来,可进一步优化改进技术,结合智能化技术,实现灌装密封过程的自动化控制和实时监测,提升技术的智能化水平;同时,加强对改进技术的推广力度,完善相关技术标准,推动油浸式变压设备灌装密封技术的规范化、标准化发展。

五、结论

本文针对油浸式变压器设备灌装密封技术存在的密封材料性能不足、灌装工艺不合理、密封结构设计缺陷等问题,从密封材料、灌装工艺、密封结构三方面提出了针对性的改进方案,通过对比试验验证了改进技术的效能,得出以下结论:

1. 采用氟橡胶密封件和单组份耐高温环氧树脂胶替代传统密封材料,能够显著提升密封材料的耐油、耐温、耐候性和致密性,解决了传统材料易老化、密封失效的问题,延长了密封件使用寿命。

2. 优化后的灌装工艺,通过精准控制真空度、注油速度和静置时间,完善密封检测环节,能够有效避免气泡、空隙等缺陷的产生,提升灌装效率和密封性能,确保密封效果符合相关标准要求。

3. 改进后的密封结构,通过优化密封面设计、连接方式和增加缓冲层,提升了结构的适配性和密封性,能够适应设备运行过程中的振动和温差变化,杜绝了隐蔽部位的渗漏问题。

4. 试验结果表明,改进后的灌装密封技术能够显著降低渗漏率和绝缘油损耗,减少密封失效次数和运维成本,提升设备的运行稳定性和安全性,具有显著的优越性和应用价值,可广泛应用于油浸式变压设备的制造和运维中。

参考文献

- [1]唐万菲. 基于一次设备的油浸式变压器状态监测与故障预警研究[J]. 电脑编程技巧与维护,2024(11):61-63.
- [2]刘旦旦,尚宏伟,缙玉霞,等. 变压器油流动传热的数字孪生模拟与理论分析[J]. 湖北电力,2024,48(1).
- [3]周秀,刘宁波,田天,等. 油浸式绝缘系统放电故障下气-液两相特征气体变化规律研究[J]. 绝缘材料,2024,57(4).
- [4]赵延平. 石油化工机械密封技术的发展趋势与应用研究[J]. 石化技术,2025,32(7):160-162.