

一起换流变压器压力释放阀密封失效原因分析

邓志斌¹,朱 玉²,戴灵越²,张 莉²,曾磊磊³

(1. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330077; 2. 南昌科晨电力试验研究有限公司, 江西 南昌 330096;
3. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘 要:近年来,变压器密封失效、漏油乃至放电击穿等严重故障时有发生,威胁电网的安全稳定运行。文中通过对一起换流变压力释放阀密封失效的故障开展解体检测,并对密封圈进行红外光谱、工业用计算机断层成像、扫描电镜和热重分析等测试,结果表明,本次漏油密封圈与2019年更换退役的密封圈材质主要成分均含有不耐油的天然橡胶。根据相似相溶原理,长期运行过程中,变压器油会渗入密封圈,使其溶胀变软。一方面,密封圈膨胀后挤出密封槽,在缝隙处会产生应力集中;另一方面,小分子的变压器油渗入橡胶大分子交联网络结构,使得橡胶大分子间的作用力下降,导致橡胶硬度下降以及模量降低,材料变得脆弱,在长期运行过程中缺陷逐渐发展,最终造成密封件开裂甚至断裂,引发漏油。基于此,提出密封圈投运前应开展常规试验和材料分析测试等抽检手段,确保质量合格,方可投运。

关键词:换流变压器;密封失效;热重分析;红外光谱

中图分类号:TM 855 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)03-0073-03

0 引言

随着新型电力系统加速构建,对变电装备可靠性的要求日益凸显。大型变压器等充油电工装备的电气性能已与国外同步,但在关键密封位置却频发密封件老化失效问题,绝缘油泄漏给电工装备运行带来极大的安全隐患。统计表明,在充油电工装备中因密封件失效导致的设备故障占全部故障的30%以上。密封失效轻则浪费油料、提高生产成本、污染机体和环境,重则让潮气和空气进入设备,造成设备绝缘性能下降,酿成设备事故,引起爆炸、失火,甚至危害人们生命安全。因此,研究变压器密封失效的原因具有重要意义。

文中针对一起换流变压力释放阀密封失效的故障,开展解体检测,并对密封圈进行红外光谱、工业用计算机断层成像(industrial computerized tomography,工业CT)、扫描电镜和热重分析等测试。结果表明,密封圈材质存在问题是本次故障的主要原因,并基于此,提出了防范措施。

1 故障概况

2023年9月1日,运维人员现场检查发现某站一台换流变压器分接开关顶部有严重漏油情况(见图1),分接头开关油枕油位持续下降,油枕油位表示数为2.4%。



图1 压力释放阀漏油

拆解压力释放阀,发现内部密封圈严重变形并存在断裂现象,与其他更换的压力释放阀密封圈对比有明显的膨胀,如图2所示。

收稿日期:2025-01-21

作者简介:邓志斌(1973),男,大学本科,高级工程师,主要研究方向为绝缘材料状态评估及缺陷诊断。



图2 密封圈断裂情况

为分析密封圈膨胀、断裂并导致漏油的故障原因,对该站漏油密封圈、同批生产的2019年退役密封圈和备用密封圈开展红外光谱、扫描电镜、工业CT和热重分析等试验,样品信息如表1所示。需要指出的是,2019年该站发生过一次换流变压器压力释放阀漏油故障,并对所有密封圈进行更换,样品中2019年退役密封圈为当时更换的密封圈。

表1 样品信息

类型	生产时间	退役时间	运行时间/年	运行环境温度/℃
2023年断裂密封圈	2011年	2023年	4	-15~25
2019年退役密封圈	2011年	2019年	8	-15~25
备用密封圈	2019年	/	0	/

2 材料分析测试

2.1 红外光谱分析

对上述3个样品进行红外光谱分析,并根据《橡胶鉴定 红外光谱法》(GB/T 7764—2017)^[1],标注红外吸收峰对应的化学基团,结果如图3所示。

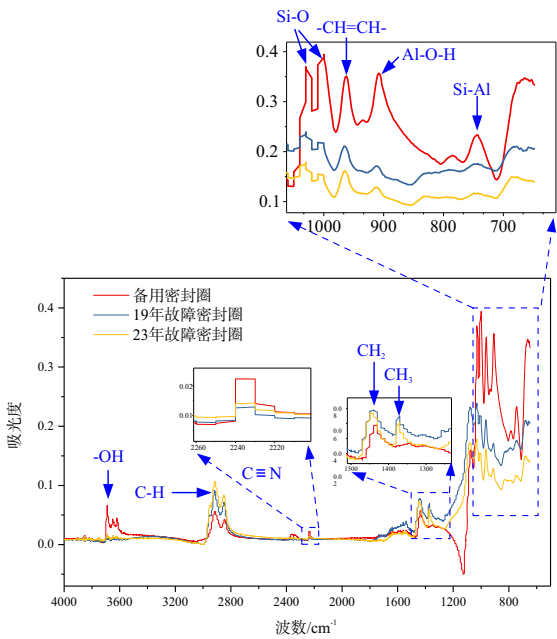
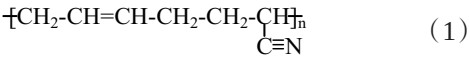


图3 红外光谱分析结果

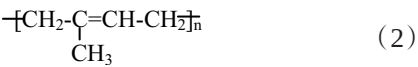
分析图3有如下结论:

1) -CN和-CH=CH-为丁腈橡胶的特征基团,丁腈橡胶由丁二烯与丙烯晴共聚而成,其化学式如式(1)所示。



三个样品中均含有-CN和-CH=CH-,且红外吸收峰高表现为备用密封圈>2019年退役密封圈>2023年断裂密封圈,说明检测的三个密封圈中含有丁腈橡胶,且初步推测备用密封圈中的丁腈橡胶含量最高,2019年退役密封圈丁腈橡胶含量其次,2023年断裂密封圈丁腈橡胶含量最低。

2) 2019年退役密封圈及2023年断裂密封圈检测到-CH₃基团,备用密封圈中未检测到该基团,根据《橡胶鉴定 红外光谱法》(GB/T 7764—2017),-CH₃基团体现为天然橡胶的特征基团,天然橡胶的成分为聚异戊二烯,如式(2)所示。



说明2019年退役密封圈及2023年断裂密封圈除丁腈橡胶外,还含有天然橡胶成分。

3) 图3中-OH、Si-O、Al-O-H、Si-Al等基团来源于密封圈的高岭土(主要成分为硅酸铝,理论化学式为Al₂[OH]₄Si₂O₅)等填料物质,上述基团的吸收峰高均表现为备用密封圈>2019年退役密封圈>2023年断裂密封圈,说明备用密封圈中高岭土含量最高,2019年退役密封圈其次,2023年断裂密封圈高岭土含量最低。

2.2 工业CT分析

对上述3个样品进行工业CT检测,如图4所示。结果显示,2019年退役密封圈和备用密封圈未见异常,2023年断裂密封圈内部存在数条裂纹(长度2~5 mm)。

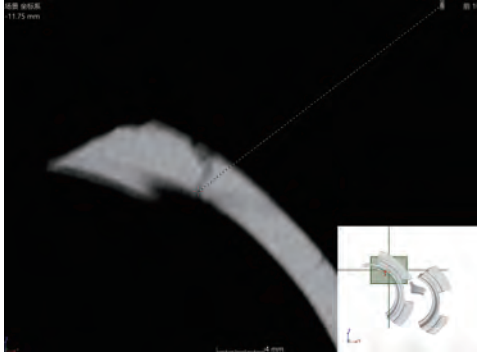
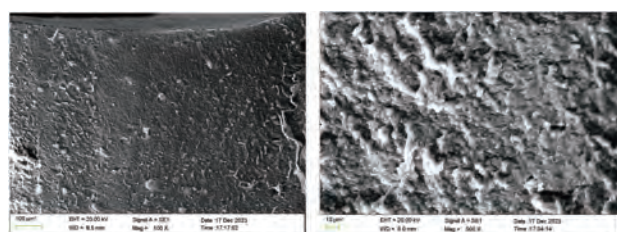


图4 工业CT检测结果

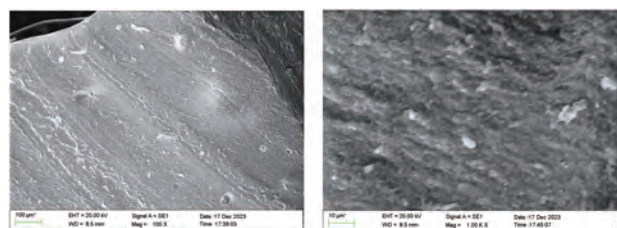
2.3 扫描电镜分析

对上述3个样品切面进行扫描电镜分析,三个样

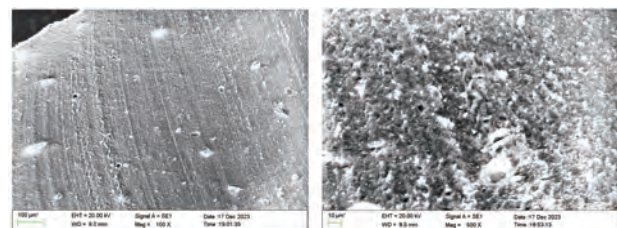
品的微观形貌未见明显差异,如图5所示。



(a) 2023年断裂密封圈



(b) 2019年退役密封圈



(c) 备用密封圈

图5 样品微观形貌

进一步对各样品进行元素分析,结果如表2所示。

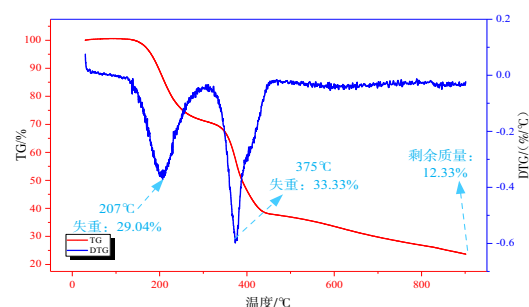
表2 样品元素含量

类型	C	O	Al	Si	S
2023年断裂密封圈	32.29	47.26	4.09	11.97	4.40
2019年退役密封圈	31.01	46.65	3.82	11.84	6.69
备用密封圈	15.59	48.12	15.19	16.36	4.75

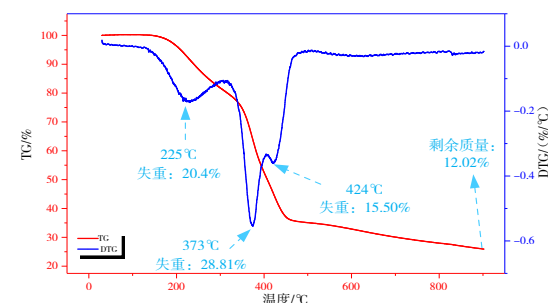
由表2可知,2023年断裂密封圈与2019年退役密封圈的Al、Si元素含量接近,且均低于备用密封圈,这与红外光谱分析结果一致,两个故障密封圈高岭土含量均较低。此外,2023年断裂密封圈、2019年退役密封圈C元素含量约为备用密封圈的两倍,怀疑为故障密封圈渗入变压器油(饱和烃类)引起其C元素含量上升。其他元素含量比较接近。

2.4 热重分析

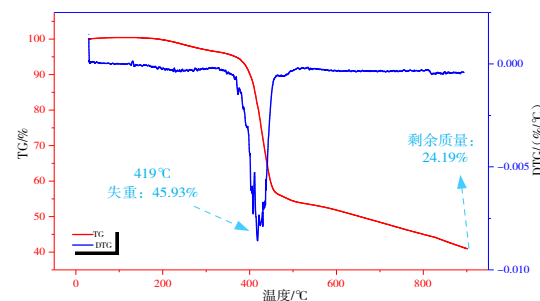
对上述3个样品进行热重分析,反应气氛为 N_2 ,温度范围为30~900℃,升温速率为20℃/min,并于900℃保持40 min,试验结束前各样品均质量达到稳定,试验结果如图6所示。



(a) 2023年断裂密封圈



(b) 2019年退役密封圈



(c) 备用密封圈

图6 热重分析结果

查阅相关文献[2-4]得到变压器油、天然橡胶和丁腈橡胶的热分解峰值温度分别为:237℃、390℃和450℃。因此,图6中各热分解峰可分别对应变压器油、天然橡胶和丁腈橡胶的分解进程。可以看到,各样品的分解峰值温度均稍低于文献给出的参考温度,这是因为样品运行及储存过程中发生老化,导致其热分解峰提前。

3 综合分析

综合热重分析、红外光谱及元素分析,可得出以下结论:

1) 2023年断裂密封圈中含有变压器油(约29%)和天然橡胶(约33%)热解峰,而丁腈橡胶热解峰不明显,表明2023年断裂密封圈中丁腈橡胶极低(<5%),其热解峰被天然橡胶热解峰掩盖。(下转第80页)

保持最小净空距离(±800 kV、1000 kV 线路为 20 m, 500 kV 线路为 13 m, 220 kV 线路为 7 m)。

一般线路:将超高树木进行砍伐,各电压等级线路与树木最小净空距离以《架空输电线路运行规程》(DL/T 741—2019)^[6]要求为准。

参考文献:

[1] 顾先丽.江西森林火点时空特征及其变化趋势[D].南昌:江西师范大学,2019.

[2] 周志宇.山火灾害下电网输电线路跳闸风险评估研究[D].北京:华北电力大学(北京),2019.

[3] 国家林业局.全国森林火险区划等级:LY/T 1063—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.

[4] 卢威.模拟高风险植被火焰条件下间隙击穿特性试验研究[D].武汉:武汉大学,2019.

[5] 杨康,陈海翔,桑荣剑,等.输电线路山火跳闸机理的模拟实验研究[J].火灾科学,2016,25(2):73-78.

[6] 国家能源局.架空输电线路运行规程:DL/T 741—2019[S].北京:中国电力出版社,2019.

(上接第 67 页)

[7] 陈宇,符劲松,肖佩,等.一起 500 kV 换流变乙炔异常增长案例的分析及处理[J].变压器,2025,62(3):13-17.

[8] 唐振,谷应科,曾祥君,等.±800 kV 特高压换流变异常产气故障分析及处理[J].变压器,2023,60(6):54-58.

[9] 王仁,李林达,李正绪,等.换流变压器内部短路电流有限元仿真及能量评估[J].变压器,2022,59(10):26-31.

[10] 张冠军,田丰,杜振斌,等.一起特高压换流变压器调压绕

组击穿故障的原因探究[J].变压器,2022,59(7):61-65.

[11] 李斌,白翔旭.多策略改进 COA 算法优化 LSSVM 的变压器故障诊断研究[J].电工电能新技术,2025,44(4):112-119.

[12] 单敬,程养春,刘孟君,等.变压器过热故障特征气体演化规律的 Wiener 模型[J/OL].高电压技术,2025:1-13[2025-04-30].<https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241531>.

[13] 国家能源局.变压器油中溶解气体分析和判断导则:DL/T 722—2014[S].北京:中国电力出版社,2015.

(上接第 75 页)

2) 2019 年退役密封圈中含有变压器油(约 20%)、天然橡胶(约 29%)和丁腈橡胶(约 16%)。

3) 备用密封圈中含有丁腈橡胶(约 46%),不含变压器油和天然橡胶。

4) 2023 年断裂密封圈与 2019 年退役密封圈中高岭土等填料含量基本一致(约 12%),且低于备用密封圈(约 24%),与表 2 元素分析结果一致。

4 结语

文中通过对一台发生漏油换流变的密封圈开展红外光谱、工业 CT、扫描电镜和热重分析等试验测试,结果表明,本次漏油密封圈与 2019 年更换退役的密封圈材质主要成分均含有不耐油的天然橡胶。根据相似相溶原理,在长期运行过程中,变压器油会渗入密封圈,密封圈因为吸油发生溶胀变软。一方面,密封

圈膨胀后挤出密封槽,在缝隙处会产生应力集中;另一方面,小分子的变压器油渗入橡胶大分子交联网络结构,使得橡胶大分子间的作用力下降,导致橡胶硬度下降以及模量降低,材料变得脆弱,在长期运行过程中缺陷逐渐发展,最终造成密封件开裂甚至断裂,引发漏油。基于此,密封圈投运前,应开展常规试验和材料分析测试等抽检手段,质量合格后方可使用。

参考文献:

[1] 国家质量监督检验检疫总局.橡胶鉴定 红外光谱法:GB/T 7764—2017[S].北京:中国标准出版社,2017

[2] 陈曦,于钦学,任文娥,等.变压器油的热分解动力学研究及其寿命预测[J].西安交通大学学报,2009,43(8):112-115,134.

[3] 宋帅帅,杨帆,徐云慧.热重分析法测定乳液共沉法天然橡胶复合材料的组分含量[J].橡胶科技,2018,16(12):50-54.

[4] 刘莉,王炳昕,瞿永涛,等.丁腈橡胶热降解的影响因素分析[J].橡胶工业,2013,60(4):211-215.