

产品·设计

变压器用丁腈橡胶密封圈失效分析

杨孝志¹, 叶飞², 丁国成¹, 骆星智², 宫杨非³, 方振邦¹

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601; 2. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022;
3. 国网安徽省电力有限公司物资分公司, 安徽 合肥 230061)

摘要:对某电站变压器的排油注氮灭火阀体丁腈橡胶密封圈失效进行分析。结果表明,本研究开裂橡胶密封圈胶料添加了大量异形填料,且分散不均匀,填料与橡胶基体界面存在较大缝隙,甚至有明显相分离现象,导致橡胶密封圈受力后发生开裂。针对橡胶密封圈的失效问题提出相应解决措施,包括根据具体设备以及服役环境进行橡胶密封圈的合理选材并严格控制生产质量、在设备安装阶段保证橡胶密封圈的质量、严格按照要求进行橡胶密封圈的安装和更换等。

关键词:丁腈橡胶;密封圈;变压器;失效分析

中图分类号:TQ336.4⁺²

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2023)06-0451-05

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2023.06.0451



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

橡胶作为有机高分子化合物广泛应用于电网设备密封圈,例如气体绝缘全封闭组合电器开关密封圈、变压器密封圈以及户外机构箱密封圈等。目前电网设备主要为变压器、断路器和组合电器,据统计某省该三大设备失效中密封圈失效分别占26%,23%和23%,因此密封圈失效已然成为影响电网设备安全稳定运行的重要因素之一。而这些设备密封圈一旦失效,轻则造成油料泄漏,增加企业生产成本、污染设备本体以及附近环境,重则导致外界潮湿空气进入设备内部,造成其绝缘性能大幅度下降,进而引发设备失效、爆炸,甚至造成人员伤亡^[1-4]。

造成电力设备橡胶密封圈的失效原因主要有4个方面^[5-7]:(1)密封圈材质不当,主要体现在密封圈材质与密封介质环境相容性较差;(2)密封圈本身存在质量问题,例如由于制造工艺不良导致密封圈表面存在大量缺陷或者粗糙度较高等,无法满足使用要求;(3)密封圈结构设计不当,例如密封圈与安装槽或者设备尺寸不匹配,造成

密封圈的压缩量过大或过小等;(4)保管和使用不当以及安装工艺不当,例如密封圈储存时间过长导致胶料老化和暴力安装导致密封圈表面被划伤等。电网设备中适用于不同工作环境和密封介质的耐油密封圈胶料主体材料主要有丁腈橡胶(NBR)、丙烯酸酯橡胶、氟橡胶、氟硅橡胶和氢化丁腈橡胶五大类^[8-10]。其中NBR由于具有良好的耐油性能、物理性能和弹性而被广泛使用,但缺点在于其分子主链含有不饱和的双键结构,导致其密封圈的耐候性能和耐臭氧老化性能较差,使用过程中易发生龟裂现象^[11],严重影响电网设备的美观及密封性能。因此,NBR密封圈多用于紫外线强度较弱、不产生臭氧和化学污染物的设备区域^[12-15]。

本工作以某电站变压器的排油注氮灭火阀体橡胶密封圈为研究对象,通过形貌检测、成分检测、物理性能检测和耐油性能检测对失效橡胶密封圈进行分析,揭示其失效原因,并提出相应解决措施,以保障电力设备安全稳定的运行。

作者简介:杨孝志(1976—),男,安徽怀宁人,国网安徽省电力有限公司电力科学研究院高级工程师,硕士,主要从事电力设备质量监督工作。

E-mail:zjh0522@163.com

引用本文:杨孝志,叶飞,丁国成,等.变压器用丁腈橡胶密封圈失效分析[J].橡胶工业,2023,70(6):451-455.

Citation: YANG Xiaozhi, YE Fei, DING Guocheng, et al. Failure analysis of NBR sealing ring for transformer[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(6): 451-455.

1 实验

1.1 试验样品

开裂橡胶密封圈和未损坏橡胶密封圈各一。

1.2 主要设备和仪器

870FT-IR型傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 仪, 美国尼高力公司产品; WRT-12型热重 (TG) 分析仪, 北京北光宏远仪器有限公司产品; KYLX-A型橡胶硬度计, 沧州欧普检测仪器有限公司产品; 5967型万能材料试验机, 美国英斯特朗公司产品; Q800型动态力学分析 (DMA) 仪, 美国TA公司产品; Zeiss Sigma 300型表面扫描电子显微镜 (SEM), 德国蔡司公司产品。

1.3 测试分析

(1) FTIR分析。采用FTIR仪进行测试, 波数范围为 $400\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$, 波数精度 $\leq 0.1\text{ cm}^{-1}$, 波数分辨率为 $0.2\sim 16\text{ cm}^{-1}$ 。

(2) TG分析。称取5 mg试样置于坩埚内, 采用TG仪进行测试, 测试温度范围为 $20\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, 升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

(3) 压缩永久变形。从未损坏橡胶密封圈上剪取同等大小的胶块叠放一起, 胶块叠加厚度为11.2 mm, 垫片厚度为9.42 mm, 测试条件为 $125\text{ }^{\circ}\text{C}\times 24\text{ h}$, 压缩器如图1所示。

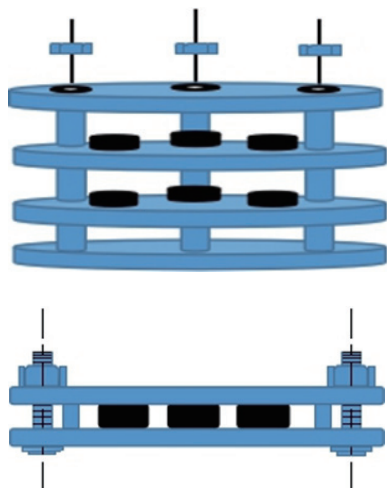


图1 压缩永久变形测试用压缩器

Fig. 1 Compressor for compression set test

(4) 动态力学性能。采用DMA仪进行测试, 试样尺寸为 $20\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 2\text{ mm}$, 测试温度范围为 $-50\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加热速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, 频率为1 Hz, 振幅为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 。

(5) SEM分析。从密封圈上取样条, 用液氮低温脆断, 采用SEM观察脆断表面微观形貌。

(6) 其余性能。均按照相应的国家标准进行测试。

2 结果与讨论

2.1 外观

橡胶密封圈的外观如图2所示。



(a) 未损坏密封圈

(b) 开裂密封圈

图2 橡胶密封圈的外观

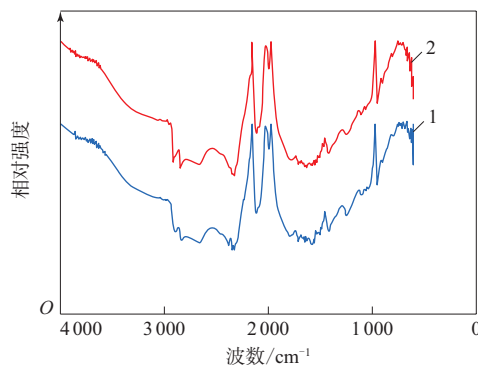
Fig. 2 Appearances of rubber sealing rings

从图2可以看出: 未损坏橡胶密封圈的表面压痕纹路清晰、对称; 开裂橡胶密封圈的表面压痕纹路一侧清晰、对称, 另一侧则不对称, 这表明表面失效密封圈在加工或者使用过程中发生变形。

2.2 成分分析

2.2.1 FTIR分析

橡胶密封圈的FTIR谱如图3所示。



1—未损坏密封圈; 2—开裂密封圈。

图3 橡胶密封圈的FTIR谱

Fig. 3 FTIR spectra of rubber sealing rings

从图3可以看出: $2\,117\text{ cm}^{-1}$ 处为不饱和的—CN伸缩振动峰; 913 cm^{-1} 附近为单取代烯的—C—H变形振动峰, 对应1,2-结构的聚丁二烯

链段中乙烯基;962 cm⁻¹处为二取代烯的—C—H 变形振动峰,对应聚丁二烯反式1,4-结构 的—C—H变形振动;724 cm⁻¹处的聚丁二烯顺式 1,4-结构吸收峰因为发生硫化已经基本消失(如 果加氢,1,2-结构链节加氢特性优于1,4-结构); 1 426 cm⁻¹处的特征峰归属于—CH₂—变形振动; 2 920和2 860 cm⁻¹附近特征峰归属于—CH伸缩振 动。基于以上分析,推断所测橡胶密封圈胶料的 主体材料为NBR,其分子的化学结构式见图4。

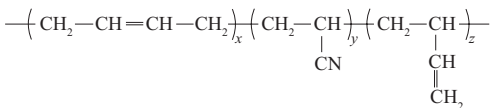


图4 NBR分子的化学结构式
Fig. 4 Chemical structural formula of NBR molecule

2.2.2 TG分析

未损坏和开裂橡胶密封圈的TG曲线基本重 叠,本研究选取开裂橡胶密封圈的TG曲线(如图5 所示)进行分析。

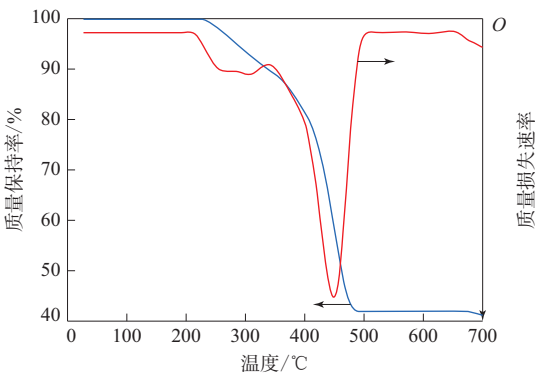


图5 橡胶密封圈的TG曲线
Fig. 5 TG curves of rubber sealing ring

从图5可以看出:试样在230 °C左右开始分解, 350 °C时质量保持率为90%,350 °C后分解速率加 快,460 °C分解速率最快,温度达到500°C时完全分 解;试样分解质量占试样质量的57%左右,分解物 为橡胶基体及其他有机物,残余炭黑及其他无机 填料组分质量占43%左右。

2.3 物理性能

2.3.1 硬度

未损坏和开裂橡胶密封圈的邵尔A型硬度分 别为68和59度,即开裂橡胶密封圈的邵尔A型硬度 较低,不符合JB/T 8448.1—2018《变压器类产品 用密封制品技术条件 第1部分:橡胶密封制品》中

(70±5)度的要求。

2.3.2 拉伸性能

橡胶密封圈的拉伸性能如表1所示。

表1 橡胶密封圈的拉伸性能			
Tab. 1 Tensile properties of rubber sealing rings			
项 目	未损坏密封圈	开裂密封圈	指标
拉伸强度/MPa	17.38	9.26	≥15
拉伸伸长率/%	389	363	≥250

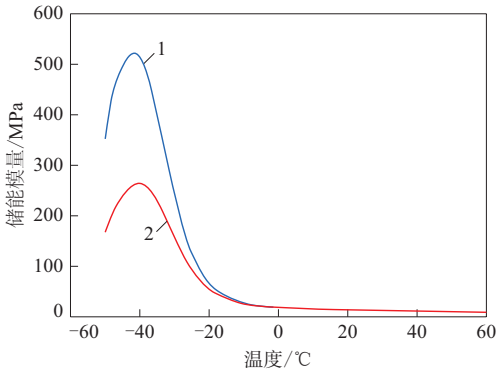
从表1可以看出,未损坏橡胶密封圈的拉伸强 度和拉伸伸长率满足指标要求,但开裂橡胶密封 圈的拉伸强度远低于指标要求。

2.3.3 压缩永久变形

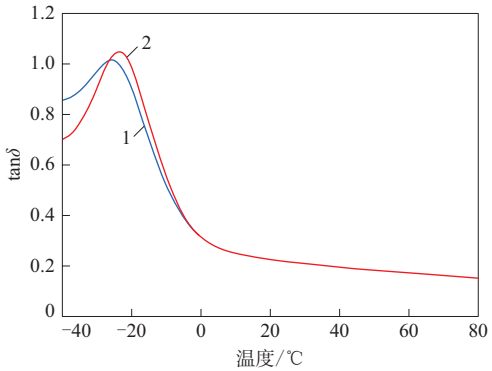
未损坏橡胶密封圈15.89%压缩率下的压缩永 久变形为9.55%,依据本研究结果推断,胶料的耐 热性能应该可以满足指标要求。

2.4 动态力学性能

橡胶密封圈的动态力学性能如图6所示,其中 tanδ为损耗因子。



(a) 储能模量-温度曲线



(b) tanδ-温度曲线

注同图3。

图6 橡胶密封圈的动态力学性能
Fig. 6 Dynamic mechanical properties of rubber sealing rings

从图6(a)可以看出,未损坏橡胶密封圈的储能模量峰值为522 MPa,明显高于开裂橡胶密封圈的265 MPa。

从图6(b)可以看出:开裂橡胶密封圈的 $\tan\delta$ 的峰值出现在 $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$,即玻璃化温度(T_g)为 $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$;未损坏橡胶密封圈的 T_g 为 $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明未损坏橡胶密封圈的耐寒性能优于开裂橡胶密封圈。

2.5 耐油性

橡胶密封圈的耐油性能如表2所示。

表2 橡胶密封圈的耐油性能
Tab. 2 Oil resistances of rubber sealing rings

项 目	未损坏密封圈	开裂密封圈	指标
试验前邵尔A型硬度/度	68	70	
试验后邵尔A型硬度/度	65	37	
试验后邵尔A型硬度变化/度	-3	-33	-8~+2
试验前体积/ cm^3	1.58	1.47	
试验后体积/ cm^3	1.64	3.18	
试验后体积变化率/%	3.8	116.3	-2~+8

注:耐油试验采用25号变压器油,试验条件为 $125\text{ }^{\circ}\text{C}\times 168\text{ h}$ 。

从表2可以看出,耐油试验后开裂橡胶密封圈的硬度变化和体积变化率较大,溶胀明显,不满足指标要求。

2.6 微观形貌

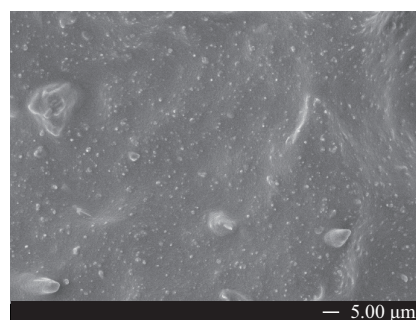
橡胶密封圈断面的SEM照片如图7所示。

从图7可以看出:开裂橡胶密封圈胶料中存在大量异形填料,分散不均匀,尺寸较大,平均尺寸为 $30\sim 50\text{ }\mu\text{m}$,且填料与橡胶基体界面存在较大缝隙,有明显相分离,从而影响橡胶密封圈的力学性能,导致橡胶密封圈受力后容易发生破裂;未损坏橡胶密封圈胶料中填料尺寸及分散都相对均匀。

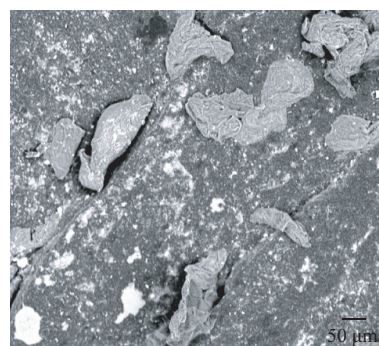
3 失效原因分析及解决措施

3.1 原因分析

本研究橡胶密封圈胶料的主体材料为NBR,其中开裂橡胶密封圈的力学性能较差,不符合指标要求,这主要是由于其胶料中添加了大量尺寸较大的异形填料,导致其分散不均匀,填料与橡胶基体界面存在较大的缝隙,甚至有明显相分离现象,直接影响橡胶密封圈的力学性能,导致橡胶密封圈受力后发生开裂。此外,NBR的耐候性能相对较差,不适合用于对耐候性能要求较高或者可能裸露在环境中的密封圈。



(a) 未损坏密封圈



(b) 开裂密封圈

图7 橡胶密封圈断面的SEM照片

Fig. 7 SEM photos of rubber sealing ring sections

3.2 解决措施

(1) 对于电网设备用橡胶密封圈,应该严格控制其生产质量,根据具体设备以及服役环境进行合理的选材。

(2) 加强对橡胶密封圈的质量验收工作,到货后应进行相关质量检测。

(3) 设备安装阶段应保证橡胶密封圈无扭曲、变形、裂纹和毛刺等缺陷,需要满足规定的橡胶密封圈与法兰面尺寸配合以及安装位置和压缩量等要求。

(4) 设备运维检修阶段,应保证各密封处无渗漏,并结合设备检修对存在裂纹等老化现象的橡胶密封圈进行更换。

参考文献:

- [1] 曹荣辉. 变压器内部故障分析及预防措施研究[J]. 电气传动自动化, 2021, 43(3): 63-65.
CAO R H. Analysis of internal faults of transformer and research on preventive measures[J]. Electrical Drive Automation, 2021, 43(3): 63-65.
- [2] PINEDO B, HADFIELD M, TZANAKIS I, et al. Thermal analysis and tribological investigation on TPU and NBR elastomers applied to

- sealing applications[J]. Tribology International, 2018, 127: 24–36.
- [3] 连鸿松. 电气设备橡胶密封件失效原因分析与对策[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 234–239.
- LIAN H S. Analysis and countermeasures of the failure of rubber seals in electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 234–239.
- [4] 王洪. 电力变压器常见故障分析及预防措施[J]. 电力设备, 2021, 22(5): 176–178.
- WANG Q. Common fault analysis and preventive measures of power transformer[J]. Electrical Equipment, 2021, 22(5): 176–178.
- [5] ZHANG W F, LOU W T, LIU X R, et al. The effect of accelerated aging on the properties of nitrile butadiene rubber (NBR) O-rings[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2019, 47(2): 1533–1550.
- [6] 黄炜昭. 变压器密封失效分析及防治措施研究[J]. 变压器, 2014, 51(5): 59–61.
- HUANG W Z. Research on failure seal and its preventive measures of transformer[J]. Transformer, 2014, 51(5): 59–61.
- [7] 周波, 侯学勤. 受油探头橡胶密封圈失效分析[J]. 失效分析与预防, 2011, 6(1): 40–43.
- ZHOU B, HOU X Q. Failure analysis of rubber seal ring in probe of oil receptacle[J]. Failure Analysis and Prevention, 2011, 6(1): 40–43.
- [8] 张亚茹, 刘静, 黄青丹, 等. 几种橡胶材料对新型绝缘气体全氟异丁腈和二氧化碳的气密性研究[J]. 橡胶工业, 2022, 69(3): 169–174.
- ZHANG Y R, LIU J, HUANG Q D, et al. Study on air tightness of several rubber materials on new insulating gas C_4F_7N and CO_2 [J]. China Rubber Industry, 2022, 69(3): 169–174.
- [9] 樊超, 田一, 韩钰, 等. 特高压单柱并联电抗器用宽阻尼温域耐油氟橡胶胶料的配方设计及性能研究[J]. 橡胶工业, 2023, 70(1): 20–25.
- FAN C, TIAN Y, HAN Y, et al. Formulation design and performance research of fluororubber compound with wide damping temperature range and oil resistance for UHV single-column shunt reactor[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(1): 20–25.
- [10] 周鸿铃, 杜钢, 杨杰, 等. 变压器用丁腈橡胶与氟橡胶密封材料的溶胀特性研究[J]. 高压电器, 2022, 58(6): 121–127.
- ZHOU H L, DU G, YANG J, et al. Study on swelling characteristics of nitrile rubber and fluororubber sealing material of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 121–127.
- [11] 刘娟, 张正国, 孙静宇, 等. 丁腈橡胶溶液加氢催化剂研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2020, 49(1): 90–96.
- LIU J, ZHANG G Z, SUN J Y, et al. The progress of catalyst for nitrile butadiene rubber solution hydrogenation[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2020, 49(1): 90–96.
- [12] 王占彬, 范金娟, 肖淑华, 等. 橡胶密封圈失效分析方法探讨[J]. 失效分析与预防, 2015, 10(5): 314–319.
- WANG Z B, FAN J J, XIAO S H, et al. Discussion on failure analysis methods for rubber seal rings[J]. Failure Analysis and Prevention, 2015, 10(5): 314–319.
- [13] 王思静, 熊金平, 左禹. 橡胶老化机理与研究方法进展[J]. 合成材料老化与应用, 2009, 38(2): 23–33.
- WANG S J, XIONG J P, ZUO Y. Study on aging mechanism of rubbers[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2009, 38(2): 23–33.
- [14] 王艳秋. 橡胶塑炼与混炼[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 139–140.
- [15] 钱同来. 浅析防止油浸式电力变压器渗漏油的技术措施[J]. 科技创新导报, 2014, 3(10): 24–27.
- QIAN T L. Technical measures to prevent oil leakage of oil-immersed power transformer[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2014, 3(10): 24–27.

收稿日期: 2023-02-15

Failure Analysis of NBR Sealing Ring for Transformer

YANG Xiaozhi¹, YE Fei², DING Guocheng¹, LUO Xingzhi², GONG Yangfei³, FANG Zhenbang¹

(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd, Hefei 230022, China; 3. State Grid Anhui Procurement Company, Hefei 230061, China)

Abstract: The failure analysis of the nitrile rubber (NBR) sealing ring of the fire extinguishing valve body of a power station transformer for oil discharge and nitrogen injection was carried out. The results showed that in this study, a large number of special-shaped fillers were used in the compounds for the rubber sealing rings which failed due to cracks, their dispersion was not uniform, and there were large gaps between the filler and the rubber matrix and obvious phase separation phenomenon, which caused the cracks in the rubber sealing ring under stress. The corresponding solutions were then put forward, including material reasonable selection of the rubber sealing ring and strict control production quality according to the requirements of specific equipment and service environment, assurance of quality the rubber sealing ring in the equipment installation stage, and installation and replacement of the rubber sealing ring strictly according to requirement.

Key words: NBR; sealing ring; transformer; failure analysis