

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.06.017

## 变压器用丁腈橡胶与氟橡胶密封材料的溶胀特性研究

周鸿铃, 杜钢, 杨杰, 李光茂, 郑服利, 杨森

(广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510420)

**摘要:** 密封件是油浸式变压器中防止变压器油渗漏的重要设备,在变压器油中,密封橡胶的性能会发生改变,有可能导致渗漏事故的发生。为研究密封材料在变压器油中的溶胀特性,文中选取变压器常用的丁腈橡胶、氟橡胶进行溶胀实验和去溶胀试验。对溶胀和去溶胀后密封材料的重量、体积、硬度和力学性能变化进行测试和分析,并用热分析仪、扫描电镜对溶胀前后和去溶胀后的密封材料进行了分析。通过试验得出结论:丁腈橡胶受到变压器油的侵入更强,且变压器油对丁腈橡胶中的填料、添加剂、小分子基团的提取作用很强,造成重量、体积和硬度不可逆的降低,力学性能也明显下降,油分的侵入对丁腈橡胶各项性能和化学结构造成了较大影响。氟橡胶在变压器油中重量、体积略有增加,但总体来说基本不变,且增加的重量和体积可通过去溶胀试验恢复,其力学性能、化学结构和组成基本不变,体现出了良好的耐油性能。

**关键词:** 变压器油; 溶胀; 丁腈橡胶; 氟橡胶

### Study on Swelling Characteristics of Nitrile Rubber and Fluororubber Sealing Material of Transformer

ZHUO Hongling, DU Gang, YANG Jie, LI Guangmao, ZHENG Fuli, YANG Sen

(Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510420, China)

**Abstract:** Seals are important element to prevent transformer oil leakage in oil-immersed transformers. The performance of the sealing rubber will change in the transformer oil, which may lead to leakage. In order to study the swelling characteristics of the sealing materials in transformer oil, the nitrile rubber and fluorinerubber, which are commonly used in transformers, are selected for swelling experiment and de-swelling test. The weight, volume, hardness and mechanical properties of the sealing material after swelling and de-swelling are tested and analyzed. The thermal analyzer and scanning electron microscope are used to analyze the sealing material before and after swelling and after de-swelling. The conclusion is drawn through the experiment: the nitrile butadiene rubber is more invaded by the transformer oil, and the transformer oil has a strong extraction effect on the fillers, additives, and small molecular groups in the nitrile butadiene rubber, resulting in irreversible reduction of weight, volume and hardness. The mechanical properties are also significantly reduced. The invasion of oil contents has a great impact on the properties and chemical structure of nitrile rubber. The weight and volume of fluorine rubber in transformer oil increase slightly, but generally remains unchanged, and the increased weight and volume can be recovered through de-swelling test. Its mechanical properties, chemical structure and composition remain basically unchanged, which show a good oil resistance performance.

**Key words:** transformer oil; swelling; nitrile butadiene rubber; fluororubber(FKM)

## 0 引言

油浸式变压器是一类重要的电力设备,其中变

压器油起到绝缘和散热的作用。变压器油渗漏会影响变压器的安全稳定运行,目前密封失效已经成为变压器严重缺陷的一大成因,严重影响运行安全

收稿日期:2022-01-27; 修回日期:2022-03-29

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(GZHKJXM20190110)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(GZHKJXM20190110).

和设备寿命<sup>[1-3]</sup>。国产的橡胶容易因为工艺和配方的原因,在变压器运行中失去弹性、开裂和老化<sup>[4-8]</sup>,橡胶老化变形导致与密封结构配合不佳也易引起渗漏<sup>[9-10]</sup>。

其中变压器油对密封橡胶的影响不可忽视,如文[11]研究了氟橡胶在油中的老化行为,发现油和温度的耦合会导致氟橡胶的劣化更严重,并且发现了油在氟橡胶中的3个阶段物理扩散过程。文[12-13]设置热油老化、热空气老化、热油压缩老化、热空气压缩老化4种条件对丁腈橡胶进行老化,发现不同条件下橡胶老化程度不同,在变压器油中丁腈橡胶老化程度更高。

不同种类的橡胶在运行环境下,受到温度、压力等外界因素对其溶胀行为也有不同影响。如丁腈橡胶的耐油性取决于丙烯晴的含量,文[14]研究了N18和N41丁腈橡胶在环己烷中的溶胀老化和摩擦磨损行为,发现N41丁腈橡胶交联密度更高,因此有着更好的溶胀老化性能和耐磨性能。文[15]通过核磁共振波谱和核磁共振弛豫研究橡胶与有机油的相互作用机理,发现丁腈、氟橡胶、乙丙橡胶等不同橡胶和有机油的相互作用不同,油迁移率不同,丁腈橡胶的油迁移率最高,而乙丙橡胶最低。文[16]研究了不同炭黑份数丁腈橡胶的溶胀行为,发现随着炭黑份数的增加,丁腈橡胶的溶胀质量变化率降低,相同试验条件下的摩擦因数和磨损量也降低。在密封圈的实际使用中,密封圈会受到压力和温度的影响<sup>[9-10]</sup>,而温度对于丁腈橡胶和氟橡胶的溶胀影响较大,温度越高,变压器油渗入橡胶的速率越高<sup>[17]</sup>,但温度较高时(超过90℃),橡胶受溶胀影响的质量变化差距较小<sup>[18]</sup>。同时,温度一定时,压力对溶胀过程中油分的渗透速率影响不明显<sup>[19]</sup>。

有研究发现变压器油对密封橡胶的影响在一定情况下是可以恢复的,文[20]在15号变压器油中对丁腈橡胶密封圈进行溶胀试验,发现密封圈内外径及截面尺寸增大,硬度降低,通过自然放置,密封圈的内外径和截面尺寸逐渐降低,硬度也逐渐增大。文[21]对氢化丁腈橡胶进行溶胀实验,溶胀后性能降低,拉伸强度、定伸应力等降低了50%,同时质量增加,密度降低,但在去溶胀后特性恢复。溶胀时推测存在聚合物链的解联,橡胶和填料相互作用的解粘、链的塑化,去溶胀后得到恢复。但也有学者认为变压器油对橡胶的劣化是不可逆的,文[22]对RTV进行油浸试验后,RTV质量增加、硬度明显降低,疏水性先减小后增大,但始终保持疏水状态,且变压器油在橡胶中扩散严重,还产生了一些耐温

性差的物质,并且通过气相色谱—质谱联用技术进行了成分分析,结果表明,室温硫化硅橡胶的劣化是不可逆的。

文中选取丁腈橡胶和氟橡胶,对其进行溶胀试验和去溶胀试验,测试了质量、体积、硬度、拉伸强度和拉伸伸长率,并利用热分析仪、扫描电镜试验研究变压器油对其的影响。

## 1 试验设计和试验过程

### 1.1 试样选取

文中选取的丁腈橡胶(NBR)、氟橡胶(FKM)进行试验,同种材料已用于部分变压器密封。所用变压器油为克拉玛依25号变压器油。

### 1.2 实验过程

#### 1.2.1 溶胀试验

将不同材料的试样分别置于不同密闭瓶中,用变压器油将其完全浸没,试样之间不相互接触,将密闭瓶放入恒温箱中。油浸式变压器的运行温度往往在60℃左右,有时能达到70℃以上<sup>[23]</sup>,因此设置温度为75℃进行溶胀试验,可对极端工况进行较好模拟,对密封件的运行具有较好参考性。在2、4、24、48、96、144、192、240 h取出测试,直到试样质量基本不变,最终油浸试验时间为10 d。具体试验细节按照GB/T 1690—2010《硫化橡胶或热塑性橡胶耐液体试验方法》进行。由于此标准规定的试样尺寸较小,无法在溶胀后裁取出所需哑铃型试样进行拉伸测试,故每种材料所用试样改为厚度2 mm,尺寸为100×100 mm<sup>2</sup>的平板试样,数量为每种材料12个,平板试样溶胀后,依据GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶 拉伸应力应变性能的测定》制成2型标准哑铃型试样,数量为每种材料6个。

#### 1.2.2 去溶胀试验

将溶胀试验后的试样下方铺上定性滤纸放入烘干箱,设置温度为75℃。每隔8 h取出测试,直到试样质量基本不变,则认为去溶胀完成。之后对去溶胀的样品进行测试,以研究变压器油对橡胶的影响是否可逆。

#### 1.2.3 质量、体积、硬度测试

溶胀实验或去溶胀试验中,每次取出试样,静置30 min,使用定性滤纸擦干样品表面,测试平板试样的质量、体积和硬度,最终结果取平均值。质量的测定使用Sartorius BS224S天平。体积的测定采用浮力法。硬度测量实验依据GB/T 531.1—2008《硫化橡胶或热塑性橡胶 压入硬度试验方法 第1部分:邵氏硬度计法(邵尔硬度)》进行。

### 1.2.4 热分析

为了对比丁腈橡胶和氟橡胶在溶胀试验前后和去溶胀试验后的热力学行为,文中利用梅特勒—托利多的热分析热失重分析(TGA/DSC) 1型热重分析仪进行热分析热失重分析。

### 1.2.5 扫描电镜试验

为了进一步直观地观察丁腈橡胶和氟橡胶在溶胀试验前后和去溶胀试验后的具体形貌,文中利用HITACHI SU8010扫描电镜观察试样表面的形貌。

## 2 结果分析和讨论

### 2.1 质量、体积、硬度分析

将丁腈橡胶和氟橡胶于75℃浸没在变压器油中,可以发现丁腈橡胶的质量在100h内迅速降低7%,之后保持不变,而氟橡胶在浸没10d后增重也仅有0.23%,可以认为基本没有变化,过程见图1。

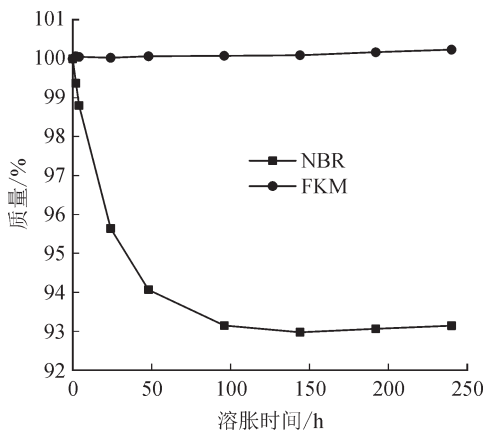


图1 丁腈橡胶和氟橡胶在变压器油中质量变化

Fig. 1 Weight change of NBR and FKM in transformer oil

丁腈橡胶的质量明显减少,这是因为变压器油渗透到丁腈橡胶聚合物链的网络中后,变压器油分子的扩散和存在引起聚合物链的解缠、弹性体和填料相互作用的解粘<sup>[21]</sup>,填料和小分子基团在变压器油的作用下被提取析出。氟橡胶的质量变化较小,因为氟橡胶和丁腈橡胶极性不同,对变压器油分子的相互作用强弱不同,氟橡胶对变压器油的相互作用更强,因此油迁移率更低,变压器油分子不容易扩散到氟橡胶网络中<sup>[15]</sup>。

丁腈橡胶在溶胀前后已经去溶胀后的质量、体积和邵氏硬度变化见图2。可见丁腈橡胶的质量和体积在溶胀后降低,而硬度在溶胀后增高,且去溶胀后质量、体积和硬度都没有恢复。

氟橡胶在溶胀前后已经去溶胀后的质量、体积和邵氏硬度变化见图3。可见氟橡胶的质量和体积

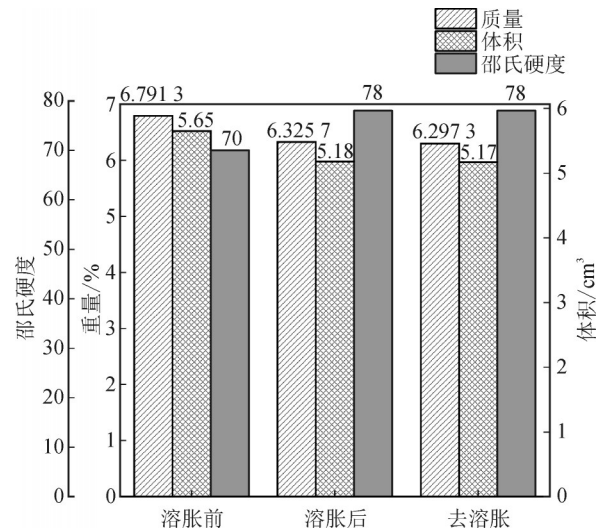


图2 丁腈橡胶的质量、体积和邵氏硬度变化

Fig. 2 Changes of weight, volume and shore

hardness of NBR

在溶胀后略有增加,但溶胀前后差别不大,在去溶胀后降低到溶胀前的水平,而硬度则基本无变化。

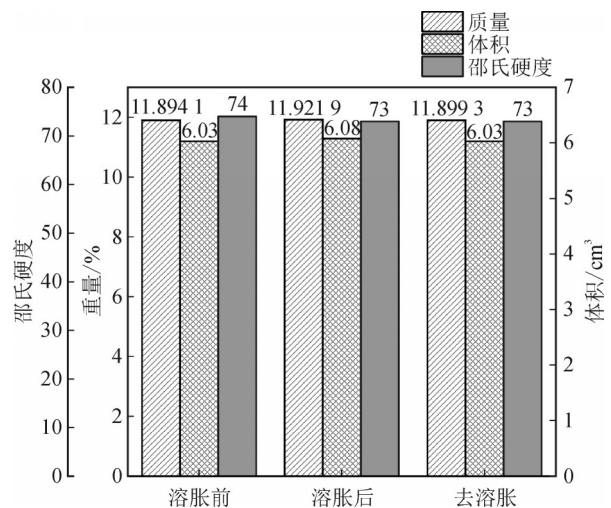


图3 氟橡胶的质量、体积和邵氏硬度变化

Fig. 3 Changes of weight, volume and shore

hardness of FKM

总体而言,氟橡胶受到变压器油的影响不大,溶胀后体积和质量略有增加,也可通过去溶胀试验恢复,说明氟橡胶耐油性好。而丁腈橡胶填料和小分子基团在变压器油的作用下被提取析出,导致丁腈橡胶的质量和体积不可逆的降低,硬度也不可逆的增加则说明在变压器油中丁腈橡胶发生了交联反应,整体变脆<sup>[24-25]</sup>。

### 2.2 拉伸测试试验

丁腈橡胶在溶胀前后已经去溶胀后的拉伸强度和拉断伸长率变化见图4。

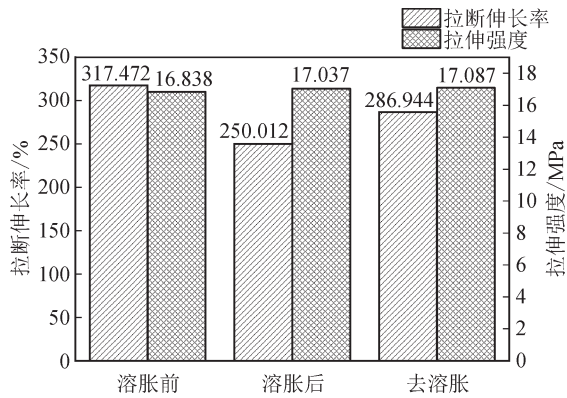


图4 丁腈橡胶的拉伸伸长率和拉伸强度变化

Fig. 4 Change of elongation at break and tensile strength of NBR

丁腈橡胶的拉伸伸长率在溶胀后明显下降,而去溶胀后虽然有一定恢复,但依然低于溶胀前的水平,拉伸强度则基本不变。这说明变压器油分子侵入丁腈橡胶网络,对于丁腈橡胶的力学性能会造成破坏,且去溶胀后,丁腈橡胶的力学性能可以有一定恢复,但依然低于初始水平。

氟橡胶在溶胀前后已经去溶胀后的拉伸强度和拉伸伸长率变化见图5。

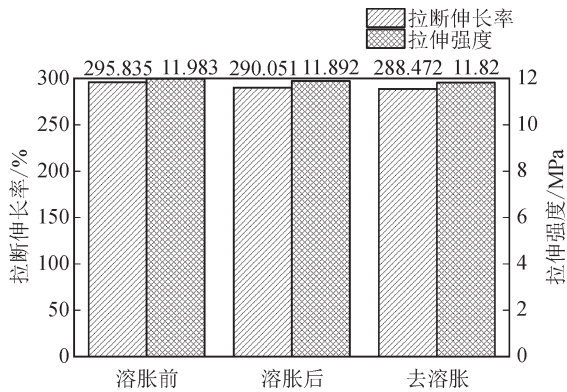


图5 氟橡胶的拉伸伸长率和拉伸强度变化

Fig. 5 Change of elongation at break and tensile strength of FKM

氟橡胶在溶胀前后以及去溶胀后拉伸强度和拉伸伸长率都基本不变,说明氟橡胶的力学性能受到变压器油的影响较小,耐油性强。

### 2.3 TG/DTG分析

对溶胀前后及去溶胀后的丁腈橡胶进行TG/DTG分析,见图6。

未溶胀前,存在两个失重阶段,从220℃开始的第1个失重阶段是丁腈橡胶中增塑剂、填料、挥发性有机物和一些小分子基团的失重,而从400℃开始的第2个失重阶段是丁腈橡胶基体的失重。溶胀后,220℃失重阶段的失重百分比减少,而400℃失重阶段的失重百分比提高,且在35℃开始出现了一个

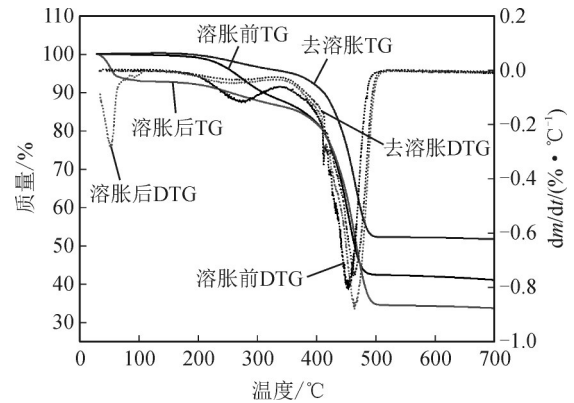


图6 NBR溶胀前后及去溶胀后TG/DTG对比

Fig. 6 TG/DTG comparison of NBR before and after swelling and after de swelling

新的失重阶段。溶胀后,35℃开始的失重为丁腈橡胶中所吸收的变压器油的挥发,220℃失重阶段的失重百分比减少反映出溶胀后丁腈橡胶各种填料、添加剂和小分子单体被变压器油提取析出,这一点解释了丁腈橡胶溶胀前后的质量变化,400℃失重阶段的失重百分比提高了7.7%,这是因为填料、添加剂和小分子单体被变压器油提取后,丁腈橡胶基体的占比增大。溶胀前后剩余质量百分比从41.2%降低到了33.8%,这主要是由于溶胀后丁腈橡胶吸收了变压器油,而变压器油在升温过程中挥发,导致最终灰分比重降低。去溶胀后,剩余质量百分比相比溶胀前提高了9.75%,相比溶胀后提高了17.57%,说明去溶胀的过程排除了丁腈橡胶中的变压器油,且在变压器油迁移挥发的过程中,丁腈橡胶内部残存的填料、添加剂和小分子单体被进一步带走<sup>[18]</sup>,导致丁腈橡胶基体的比重进一步提高,这也可以解释去溶胀后丁腈橡胶的体积和质量变化。

对溶胀前后及去溶胀后的氟橡胶进行TG/DTG分析,见图7。

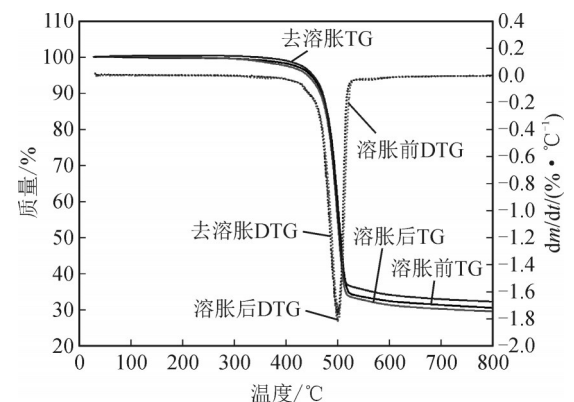


图7 FKM溶胀前后及去溶胀后TG/DTG对比

Fig. 7 Comparison of TG/DTG of FKM before and after swelling and after de swelling

在溶胀前后以及去溶胀后, 氟橡胶的 TG/DTG 曲线几乎无差别, 溶胀后氟橡胶的剩余质量略有降低提高, 这是因为氟橡胶略有吸收变压器油所致。去溶胀后, 所吸收的变压器油迁移挥发, 同时可能存在部分填料、添加剂被变压器油提取也同样损失<sup>[26]</sup>, 氟橡胶基体比重增大, 因此剩余质量又略有提升, 但总的来说氟橡胶在溶胀前后及去溶胀后组分变化不大, 与丁腈橡胶相比耐油性较好。

#### 2.4 扫描电镜分析

文中对丁腈橡胶和氟橡胶在溶胀前后、去溶胀后的样品进行了表面形貌的观察。对丁腈橡胶和氟橡胶的表面形貌选取了 450~1 100 倍的放大倍数进行观察, 溶胀后和去溶胀后的部分区域选取了 3 000 倍以上的放大图。

丁腈橡胶试样表面微观形貌见图 8。

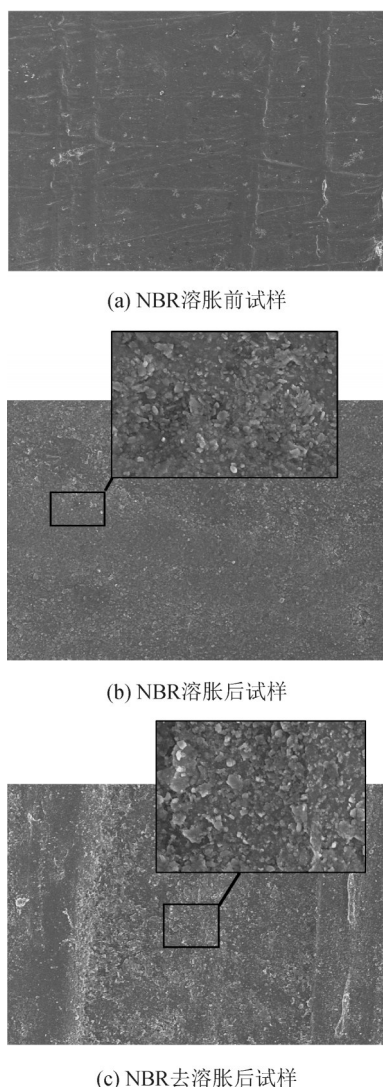


图 8 丁腈橡胶试样扫描电镜结果

Fig. 8 SEM results of NBR sample

从图 8 中可以看出, 溶胀前, 丁腈橡胶表面相对平整, 溶胀后, 丁腈橡胶表面变得粗糙不平, 出现了

较多杂质, 表面也出现了片状剥离, 产生了大量的孔隙和裂纹。结合之前的分析, 随着变压器油在丁腈橡胶中的扩散, 出现空洞, 导致橡胶网络膨胀, 这有利于填料的迁移, 同时变压器油对于填料和橡胶之间有解粘作用, 这同样促进了填料、添加剂的迁移<sup>[11, 27]</sup>, 填料和添加剂的聚集和迁移进一步对橡胶表面产生破坏。去溶胀后, 橡胶表面的破坏无法恢复, 变压器油提取填料和添加剂的过程也不可逆的, 甚至在去溶胀过程中, 随着变压器油和剩余填料的迁移和析出, 橡胶表面会受到进一步破坏, 因此在去溶胀样品的表面, 片状剥离、孔隙和裂纹的现象更加严重。

氟橡胶试样表面形貌见图 9。

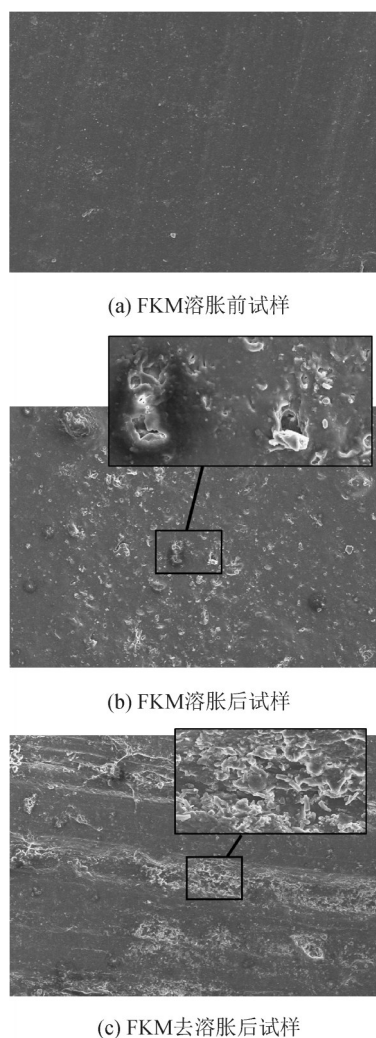


图 9 氟橡胶试样扫描电镜结果

Fig. 9 SEM results of FKM sample

从图 9 中可以看出, 溶胀前丁腈橡胶表面平整、杂质较少, 溶胀后, 氟橡胶表面出现了较多杂质和孔隙, 说明变压器油的迁移和扩散同样对氟橡胶的表面结构产生了一定的破坏。去溶胀后, 氟橡胶试样的表面形貌出现了大量粗糙不平的区域, 同时产

生了大量孔隙、裂纹、片状剥离的现象,这可能是由于橡胶基体由于在溶胀过程中产生膨胀,在溶胀平衡时聚合物链和填料之间、聚合物链和聚合物链之间形成新的构象,而去溶胀后,链交联重新调整,同时填料析出,膨胀和降解的耦合作用对橡胶网络产生破坏<sup>[8]</sup>,在综合作用下氟橡胶的表面结构受到了破坏。

### 3 结论

文中通过对丁腈橡胶、氟橡胶进行溶胀试验和去溶胀试验,测试其质量、体积、硬度、拉伸性能,并进行TG/DTG分析、扫描电镜的测试,可以得出:

1)所选用丁腈橡胶在变压器油中由于变压器油对填料、添加剂、小分子基团的提取作用而失重,与此同时丁腈橡胶的体积降低,硬度增加,这一过程不可逆,通过去溶胀试验也无法恢复。而所选用氟橡胶的变压器油中质量、体积略有增加,但总体来说基本不变,且增加的质量和体积可通过去溶胀试验恢复。

2)丁腈橡胶的拉伸性能在溶胀后劣化,通过去溶胀也无法完全恢复,而氟橡胶的拉伸性能在溶胀前后几无差别,即丁腈橡胶的力学性能容易受到变压器油影响而劣化,氟橡胶具有较好的耐油性,力学性能受变压器油影响小。

3)丁腈橡胶的组分在变压器油中变化较大,丁腈橡胶吸收变压器油更多,同时大量填料、添加剂和小分子基团被变压器油提取而比重下降,而氟橡胶吸收变压器油很少,且在变压器油中组分变化很小。

4)丁腈橡胶、氟橡胶的表面在变压器油中都会因油的迁移和填料、添加剂的析出而变粗糙并产生孔隙、裂纹,尤其在去溶胀后这一现象会更加明显。比较而言,丁腈橡胶的表面形貌会受到变压器油的影响更大,劣化更严重。

### 参考文献:

- [1] 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 Hongsong. Failure cause analysis and countermeasures of rubber seals in electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 234-239.
- [2] 张宗喜, 刘睿, 聂鸿宇, 等. 微氧作用下天然酯变压器油热老化特性研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(12): 63-67.  
ZHANG Zongxi, LIU Rui, NIE Hongyu, et al. Study on thermal aging characteristics of natural ester transformer oil under micro-oxygenation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(12): 63-67.
- [3] 黄芝强, 李锦彪, 方石明. 天然酯绝缘油与变压器常用橡胶材料的相容性研究[J]. 变压器, 2021, 58(3): 36-38.  
HUANG Zhiqiang, LI Jinbiao, FANG Shiming. Study on compatibility of natural ester insulation oil with common rubber materials used in transformer[J]. Transformer, 2021, 58(3): 36-38.3
- [4] 苏习琴, 聂军涛, 马有新. 油浸式变压器渗漏油原因及其预防措施[J]. 机电技术, 2010, 33(4): 74-75.  
SU Xiqin, NIE Juntao, MA Youxin. Causes and preventive measures of oil leakage from oil-immersed transformer[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2010, 33(4): 74-75.
- [5] 范晓丹, 付炜平, 赵智龙, 等. 基于长短时记忆网络油浸式变压器故障诊断研究[J]. 变压器, 2021, 58(9): 27-32.  
FAN Xiaodan, FU Weiping, ZHAO Zhilong, et al. Study on fault diagnosis of oil-immersed transformer based on long-short term memory network[J]. Transformer, 2021, 58(9): 27-32.
- [6] 吴杰, 吴兴旺, 尹睿涵, 等. 一起500 kV变压器非典型性漏油故障演变分析[J]. 变压器, 2021, 58(6): 78-80.  
WU Jie, WU Xingwang, YIN Ruihan, et al. Analysis on evolution of an atypical oil leakage fault in a 500 kV transformer[J]. Transformer, 2021, 58(6): 78-80.
- [7] 周榆晓, 王冠宇, 赵君娇, 等. 一起500 kV电抗器低压套管渗漏油原因分析及建议[J]. 电瓷避雷器, 2021(6): 201-206.  
ZHUO Yuxiao, WANG Guanyu, ZHAO Junjiao, et al. Cause analysis and suggestions on oil leakage of low voltage bushing of 500 kV reactor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(6): 201-206.
- [8] 李丰, 姒天军, 何建明, 等. 一起220 kV变压器套管渗油故障原因分析及处理[J]. 电瓷避雷器, 2021(2): 90-94.  
LI Feng, SI Tianjun, HE Jianming, et al. Analysis and treatment of an oil-leakage fault of 220 kV transformer bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(2): 90-94.
- [9] 黎卫国, 张长虹, 杨旭, 等. 500 kV断路器用均压电容器渗漏油故障分析及改进措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 53-58.  
LI Weiguo, ZHANG Changhong, YANG Xu, et al. Oil leakage fault analysis and improvement measures of voltage equalizing capacitor for 500 kV circuit breaker[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 53-58.
- [10] 陈晓鹏, 孙勇, 王柱. 特高压换流变压器油务处理品控技术研究及工程应用[J]. 变压器, 2021, 58(1): 43-46.  
CHEN Xiaopeng, SUN Yong, WANG Zhu. The technology research for quality control of oil filling and engineering practice for UHV converter transformer[J]. Transformer, 2021, 58(1): 43-46.
- [11] WANG Q L, PEI J K, LI G, et al. Accelerated aging behaviors and mechanism of fluoroelastomer in lubricating oil me-

- dium[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2020, 38(8): 853-866.
- [12] 钱艺华, 肖红照, 赵耀洪, 等. 模拟变压器工作环境下的丁腈橡胶老化研究及寿命预测[J]. 变压器, 2017, 54(11): 19-25.  
QIAN Yihua, XIAO Hongzhao, ZHAO Yaohong, et al. Study on aging and life prediction of nitrile butadiene rubber under simulated transformer working environment [J]. Transformer, 2017, 54(11): 19-25.
- [13] 胡啸宇, 丁国成, 张晨晨, 等. 一起 500 kV 变压器局放超标及油色谱异常的分析与处理[J]. 变压器, 2021, 58(3): 80-83.  
HU Xiaoyu, DING Guocheng, ZHANG Chenchen, et al. Analysis and treatment of PD of 500 kV transformer exceeded standard and oil chromatogram abnormality[J]. Transformer, 2021, 58(3): 80-83.
- [14] LYU X R, WANG H M, WANG S J. Effect of swelling nitrile rubber in cyclohexane on its ageing, friction and wear characteristics[J]. Wear, Lausanne: Elsevier Science Sa, 2015(328): 414-421.
- [15] BAVIN R R, FURTSOV D I, ZABRODIN V A, et al. The oil-swelling processes characterization in rubbers studied by <sup>1</sup>H NMR relaxation[J]. Applied Magnetic Resonance, 2017, 48(2): 135-142.
- [16] 纪红, 王勇, 庞永华. 油润滑下炭黑增强丁腈橡胶的溶胀与磨损行为[J]. 润滑与密封, 2020, 45(8): 115-119.  
JI Hong, WANG Yong, PANG Yonghua. Carbon black enhances swelling and wear behavior of nitrile butadiene rubber under oil lubrication[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(8): 115-119.
- [17] LOU W, ZHANG W, LIU X, et al. Effects of medium phases on the thermal degradation of hydrogenated nitrile rubber O-rings under compression[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(7): 45864.
- [18] LOU W, ZHANG W, WANG H, et al. Influence of hydraulic oil on degradation behavior of nitrile rubber O-rings at elevated temperature[J]. Engineering Failure Analysis, 2018 (92): 1-11.
- [19] 徐广丽, 刘彤, 霍富永, 等. 集输油环境氟橡胶 O 形圈老化行为实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16 (11): 26-32.  
XU Guangli, LIU Tong, HUO Fuyong, et al. Experimental study on aging behavior of fluorine rubber O-ring in oil collecting environment[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(11): 26-32.
- [20] 马文博. 丁腈橡胶密封圈耐 15 号液压油性能探讨[J]. 特种橡胶制品, 2021, 42(3): 35-37.  
MA Wenbo. Discussion on the resistance of nitrile rubber sealing ring to No.15 hydraulic oil[J]. Special Purpose Rubber Products, 2021, 42(3): 35-37
- [21] BALASOORIYA W, SCHRITTESSER B, PINTER G, et al. Induced material degradation of elastomers in harsh environments[J]. Polymer Testing, 2018(69): 107-115.
- [22] WEN X, YUAN X, LAN L, et al. Effect of transformer oil on room temperature vulcanized silicone rubber[J]. IEEE-Inst Electrical Electronics Engineers Inc., 2017, 24(4): 2337-2343.
- [23] 邓永清, 阮江军, 龚宇佳, 等. 基于参数热等效的 10 kV 变压器温度流体场三维仿真计算[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 212-218.  
DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, GONG Yujia, et al. Three dimensional simulation calculation of temperature fluid field of 10 kV transformer based on parameter thermal equivalence[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 212-218
- [24] QIAN Y, XIAO H, NIE M, et al. Lifetime prediction and aging behaviors of nitrile butadiene rubber under operating environment of transformer[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, The Korean Institute of Electrical Engineers, 2018, 13(2): 918-927.
- [25] 俞进涛, 王占彬, 范金娟, 等. 丁腈橡胶在液压油中的加速老化行为[J]. 机械工程材料, 2017, 41(4): 103-105.  
YU Jintao, WANG Zhanbin, FAN Jinjuan, et al. Accelerated aging behavior of nitrile rubber in hydraulic oil[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(4): 103-105.
- [26] LIU X, ZHAO J, YANG R, et al. Effect of lubricating oil on thermal aging of nitrile rubber[J]. Polymer Degradation and Stability, 2018(151): 136-143.
- [27] PERVEZ T, QAMAR S Z, VAN DE VELDEN M. Comparison between fresh and exposed swelling elastomer[J]. Journal of Elastomers and Plastics, 2012, 44(3): 237-250.

周鸿铃(1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高压试验技术研究工作(E-mail: 1961981002@qq.com)。