

# 丁腈橡胶热空气和热油老化力学性能研究及服役寿命预测

韩哲文<sup>1</sup>, 季昌国<sup>1</sup>, 林 林<sup>2</sup>, 王振龙<sup>3</sup>, 宋子博<sup>1</sup>, 刘 娟<sup>4</sup>, 康 举<sup>3,5</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045; 2. 国网冀北电力有限公司, 北京 100045;  
3. 北京石油化工学院 机械工程学院, 北京 102617; 4. 西安大有检测技术有限公司,  
陕西 西安 710018; 5. 清华大学 高端装备界面科学与技术全国重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:**为探究丁腈橡胶制品的耐高温、耐变压器油和耐热压缩等耐老化性能,本文在 90、120、135℃ 高温条件下开展丁腈橡胶(NBR)在热空气、热油、热空气压缩和热油压缩中的加速老化试验,研究了老化温度、老化时间和老化环境对 NBR 力学性能的影响,并以压缩永久变形作为评价指标预测 NBR 的实际使用寿命。结果表明:老化温度越高,NBR 老化速率越快。NBR 在老化过程中邵氏硬度和压缩永久变形随着老化时间增加而增大,断裂伸长率随着老化时间增加而减小。25# 变压器油可以减缓 NBR 的邵氏硬度和压缩永久变形性能下降,对断裂伸长率下降的影响为先减缓后加速。基于 Arrhenius 定律预测 NBR 在热油压缩环境下使用温度为 40、50、60、70、80℃ 时的服役寿命分别为 3.726、1.877、0.985、0.542、0.303 年。

**关键词:**丁腈橡胶;加速老化;热油压缩;压缩永久变形;寿命预测

## Mechanical properties research and service life prediction of nitrile rubber in thermal air ageing and oil ageing

HAN Zhewen<sup>1</sup>, JI Changguo<sup>1</sup>, LIN Lin<sup>2</sup>, WANG Zhenlong<sup>3</sup>, SONG Zibo<sup>1</sup>, LIU Juan<sup>4</sup>, KANG Ju<sup>3,5</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100045, China;  
2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100045, China;  
3. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;  
4. Xi'an Dayou Testing Technology Co., Ltd., Xi'an 710018, China;  
5. State Key Laboratory of Tribology in Advanced Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to explore the ageing resistance of nitrile rubber products, such as high-temperature resistance, transformer oil resistance, and heat-compression resistance, we conducted accelerated ageing tests on nitrile rubber (NBR) under high temperature conditions of 90, 120, and 135℃ in hot air, hot oil, hot air compression, and hot oil compression, respectively. The effects of ageing temperature, ageing time, and ageing environment on the mechanical properties of NBR were researched, and compression set was used as an evaluation index to predict the actual service life of NBR. The results show that the ageing rate of NBR increases with the increase of temperature. During the ageing process, with the increase of ageing time, the Shore hardness and compression set of NBR increase, while the elongation at break decreases. 25# transformer oil can slow down the decrease in Shore hardness and compression set performance of NBR, while it slows down the decrease at first and then accelerates the decrease in fracture elongation. Based on the Arrhenius law, the predicted service life of NBR in hot oil compression environment at temperatures of 40, 50, 60, 70, and 80℃ is 3.726, 1.877, 0.985, 0.542, and 0.303 years, respectively.

**Key words:** nitrile rubber; accelerated ageing; thermal oil compression; compression set; life prediction

## 0 引言

近年来,随着国内经济高速发展,电力变压器

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52175286);国网冀北电力有限公司科技项目(52018K22001L);清华大学高端装备界面科学与技术全国重点实验室开放基金资助项目(SKLTkf20B16)。

制造业也得到快速发展,变压器生产总量稳居世界前列<sup>[1]</sup>。然而,近年全国输变电设施可靠性统计分析显示,变压器为其中可靠性系数较低的设备之一,约 23% 的电力变压器故障会产生火灾、爆炸等危害<sup>[2-4]</sup>。变压器作为输配电的基础设备,在电力系统中承担着重要的调控作用,其可靠性是电网稳定

运行的重要保障。通过对变压器部件的失效行为和剩余寿命进行研究,对提高其运行可靠性有重要意义。

丁腈橡胶(NBR)因分子中带有独特的氰基<sup>[5]</sup>,使其耐热性、耐油性和耐磨性等性能优于其他品种的橡胶<sup>[6-8]</sup>,因此NBR被广泛应用于对耐油性能要求苛刻的工作环境中,其中包括变压器行业中的减震垫和密封圈<sup>[9]</sup>。但由于NBR主链中含有双键<sup>[10]</sup>,如长期与变压器热油接触会发生交互作用,不仅会产生CH<sub>4</sub>气体,降低变压器油的绝缘性能和导热性能,甚至造成变压器击穿<sup>[9,11]</sup>,而且老化的NBR会表现出变形、硬化、脆化及龟裂等问题,进一步导致变压器油性能下降,引发漏油等问题,极大地影响变压器的稳定运行<sup>[10,12-14]</sup>。因此,关于NBR的老化问题和寿命预测一直受到研究人员的广泛关注。

钱艺华等<sup>[10]</sup>研究了NBR在70℃下老化后的力学性能,结果表明随着老化时间的延长,NBR断裂伸长率及抗压缩永久变形能力持续下降;与热氧老化相比,在油介质中老化的NBR表现出相对较低的硬度及断裂伸长率、较高的压缩永久变形。阙刚等<sup>[12]</sup>开展了热氧老化时间及温度对NBR力学性能的影响分析,并基于Arrhenius方程利用温度外推的方法预测了NBR的贮存寿命,得到以断裂伸长率为寿命预测评价指标时,NBR在23℃下的老化失效时间约为13年。游海军等<sup>[15]</sup>研究了NBR的热氧老化性能并进行了寿命预测,结果表明NBR热氧老化以交联反应为主,且随着热氧老化时间的延长,NBR总交联密度、定伸应力增大,断裂伸长率下降;以断裂伸长率作为评价指标时,预测其在25℃下的使用寿命为2年。以上研究表明,如要准确预测NBR的寿命需要综合考虑多方面的因素,如实验条件和性能指标等。李秀杰等<sup>[16]</sup>以拉伸强度作为评价指标,结合Arrhenius模型与Eyring模型,建立了航天器用NBR材料的湿热老化寿命预测模型,并利用该模型预测在20℃、相对湿度为60%条件下NBR的贮存寿命为5.71年。结合已有文献,国内外学者在NBR加速老化试验及寿命预测方面开展了大量的研究工作。但大部分研究者所设计的试验条件比较单一,不能综合地模拟实际工况下NBR的服役情况。此外,由于针对的应用场所不同,研究者们所设计的试验条件和评价指标不同,导致所预测的寿命也不相同,已有研究方法不适用于对现役500 kV油浸

式变压器中NBR的实际使用寿命进行预测。另外,关于NBR在高温变压器油中的老化问题和使用寿命预测更是鲜有报道。

因此,本文通过对NBR在高温(90、120、135℃)条件下进行热空气、热油、热空气压缩和热油压缩加速老化试验,开展老化温度、老化时间和变形条件对NBR力学性能的影响研究。同时通过傅里叶红外光谱探究老化机理,在综合比较邵氏硬度、压缩永久变形和断裂伸长率等评价指标的基础上,依据“短板效应”选出一个最能反映NBR失效的指标。最后进一步基于Arrhenius方程预测NBR在变压器实际工作中的寿命。

## 1 试验

### 1.1 原材料及试样制备

试验所用材料为江苏神马电力股份有限公司生产的NBR,用于500 kV油浸式变压器。按照GB/T 528—2009进行拉伸测试,拉伸试样采用I型哑铃状试样,总长度为115 mm(其中试验长度为25 mm),端部宽度为25 mm,狭窄部分长度和宽度分别为33 mm和6 mm,厚度为2 mm。按照GB/T 7759.1—2015进行压缩永久变形测试,压缩试样采用B型圆柱体试样,直径为13 mm,高度为6.5 mm。拉伸试样和压缩试样均通过橡胶切片机或压片机进行裁切制备。

### 1.2 加速老化试验方案

综合考虑NBR在变压器中的实际工作环境以及25#变压器油(中石化长城润滑油公司生产)的特性等因素,参照GB/T 2941—2006,选择3组加速老化温度,分别为90、120、135℃;加速老化试验为期14 d,按照“前紧后疏”的取样原则<sup>[5]</sup>,分别取第1、2、4、6、8、10、14 d老化后的试样进行检测。按照有无被压缩和是否变压器油浸泡分为4组,如表1所示(其中热空气压缩和热油压缩实验组中的试样放置于压缩永久变形装置中,压缩装置符合GB/T 7759.1—2015,保证试样上下表面均匀受力;热油和热油压缩实验组试样需完全浸没在25#变压器油中)。加速老化试验在HS-1226型老化箱中进行,老化箱符合GB/T 3512—2014,试样总体积不超过老化箱体积的10%,悬挂的试样间距至少为10 mm,试样与老化箱壁间距至少50 mm。

表1 试验分组

Table 1 Experimental grouping

| 组别 | 加速老化环境 | 试样类型  | 介质      | 试验温度/℃     | 试验周期/d | 取样时间/d          | 力学性能指标 |
|----|--------|-------|---------|------------|--------|-----------------|--------|
| 1  | 热空气    | I型哑铃型 | 空气      | 90、120、135 | 14     | 1、2、4、6、8、10、14 | 断裂伸长率  |
| 2  | 热油     |       | 25#变压器油 |            |        |                 |        |
| 3  | 热空气压缩  | B型圆柱体 | 空气      |            |        |                 | 压缩永久变形 |
| 4  | 热油压缩   |       | 25#变压器油 |            |        |                 |        |

### 1.3 性能测试

#### 1.3.1 邵氏硬度测试

对试样进行热空气和热油老化试验后,按照GB/T 531.1—2008进行邵氏硬度测试。采用LX-A型邵氏硬度计,选用1 kg加压砝码,试验力保持时间为3 s,对每个试样表面不同位置测试5次硬度值,取平均值并求标准差。

#### 1.3.2 压缩永久变形测试

选取3个尺寸一致的B型圆柱体试样放入压缩永久变形装置中,通过限制器保持25%的压缩率,按照表1所列方案进行热空气压缩和热油压缩老化试验,在达到取样时间后取出压缩装置,立即解除压缩并将试样取出置于木板上,在室温下恢复30 min,然后使用YJC106型数显橡胶测厚仪测量每个试样中心部位的高度,即恢复高度( $h_1$ ),每个试样测量5次,测量完3个试样后,取平均值并求标准差,采用式(1)计算压缩永久变形。

$$C = \frac{h_0 - h_1}{h_0 - h_s} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: $C$ 为压缩永久变形; $h_0$ 为试样原始高度,mm; $h_s$ 为压缩装置限制器高度,mm。

#### 1.3.3 拉伸试验

按照表1所列方案对拉伸试样进行老化试验,达到取样时间后,分别随机取出3个试样,在室温下放置1 d后,采用MTS-CET400型微型电子万能试验机进行室温拉伸测试获得断裂伸长率,取平均值并求标准差,拉伸速度为500 mm/min。

#### 1.3.4 红外光谱检测

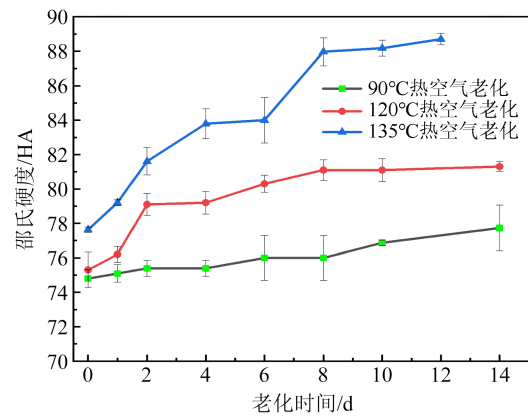
为研究NBR加速老化前后官能团的变化情况,利用Nicolet iS50型傅里叶变换红外光谱仪测试试样表面的红外光谱,采用衰减全反射(ATR)附件,测量波数范围为4 000~700  $\text{cm}^{-1}$ ,分辨率为2  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数为32次。

## 2 结果与讨论

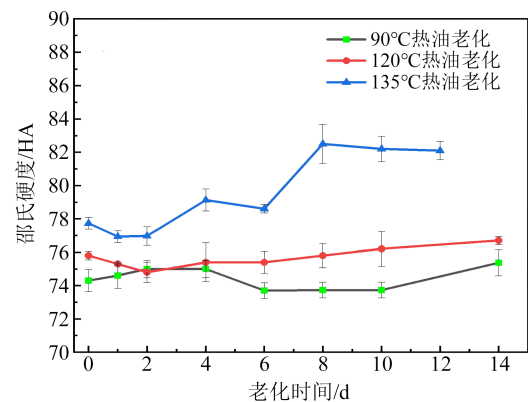
### 2.1 邵氏硬度结果分析

图1为NBR在不同老化环境和老化温度下的

硬度变化曲线。从图1可以看出,NBR的邵氏硬度总体上随老化时间的延长和老化温度的升高而提高,反映出温度可加速NBR老化。已有研究指出,NBR分子在老化过程中会发生链切割和链传递的现象,使得分子链段数减少、弹性减弱,从而导致硬度增加<sup>[13]</sup>。此外,图1中老化试验后期的斜率基本比前期的大,说明老化速率随着时间的增加而增大,即存在加速老化的现象。这是因为NBR在老化过程中,内部的交联结构发生破坏,导致NBR内部结构松散,交联结构减少,并形成新的自由基,新的自由基会进一步加速老化反应<sup>[17]</sup>。



(a) 热空气中



(b) 热油中

图1 NBR在不同老化环境和老化温度下的硬度变化  
Fig.1 Hardness changes of NBR under different ageing environments and ageing temperatures

对比NBR在热空气中和热油中加速老化的硬度变化趋势可知,在相同温度不同介质中,热油老化的硬度变化趋势总体上比热空气老化的平缓,且最终硬度值更低。这是由于25#变压器油中添加了如抗氧化剂等助剂,这些助剂会渗入NBR中,阻碍NBR分子与氧发生反应,延缓了NBR的老化过程,并同时改变橡胶的结构和性能,增加了橡胶的柔软度<sup>[18]</sup>,导致老化后硬度没有明显提高,甚至还有低于初始硬度的情况,如图1(b)中90℃曲线6~10 d区间。然而随着老化时间的增长,溶胀到达平衡,加之交联结构的破坏以及链断裂逐渐增多<sup>[10,19]</sup>,最终导致硬度逐渐上升。需要说明的是,135℃下的老化试样均在第12天后出现了明显的脆化,性能严重下降,故未测试到第14天的硬度。下文压缩永久变形和断裂伸长率测试结果同理。

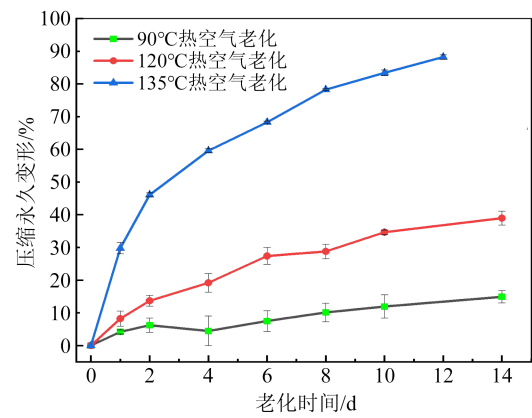
### 2.2 压缩永久变形分析

图2为NBR在不同老化环境和老化温度下的压缩永久变形曲线。从图2可以看出,在热空气压缩和热油压缩下,随着温度的升高和老化时间的延长,NBR的压缩永久变形均增大,并且趋势相同,即试验前期增速较快,后期趋于平缓。另外,老化温度越高,压缩永久变形增加得越快。对比图2(a)和(b)可以看出,在相同温度下热油中的压缩永久变形明显比热空气中的小。

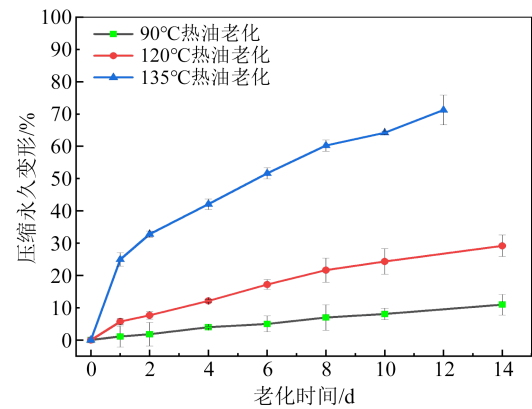
橡胶的压缩永久变形主要受其分子链恢复能力的影响。NBR在受到压缩力作用时,分子链之间的距离会变小,内部温度升高,从而促进交联反应的进行<sup>[20]</sup>,此时新形成的交联键对橡胶网络结构的固定作用会使得橡胶部分或完全不能恢复<sup>[21]</sup>,导致NBR在老化过程中压缩永久变形的增加。由于热油压缩试样完全沉浸在25#变压器油中,有效阻止了空气与NBR的接触,降低了交联反应的程度,减缓了老化过程。因此,在热空气介质中的交联反应比在热油介质中的更加明显。此外,由于溶胀作用,热油压缩试样的恢复高度高于热空气压缩试样。综上,NBR在热油介质中的压缩永久变形低于热空气介质中的压缩永久变形。

### 2.3 断裂伸长率分析

图3为NBR在不同老化环境和老化温度下的断裂伸长率。由图3可知,随着老化温度的升高和老化时间的延长,NBR在热空气和热油中老化后的断裂伸长率均降低,并且老化温度越高,下降速率



(a) 热空气中



(b) 热油中

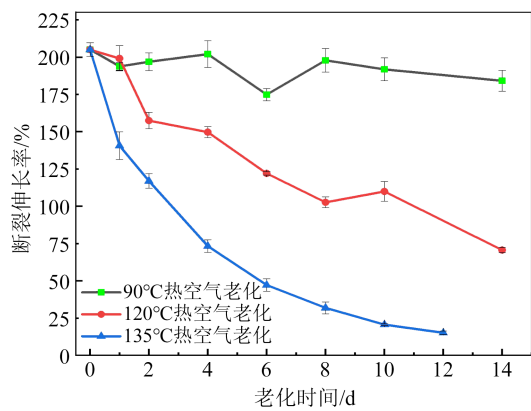
图2 NBR在不同老化环境和老化温度下的压缩永久变形变化

Fig.2 The compression set changes of NBR under different ageing environments and ageing temperatures

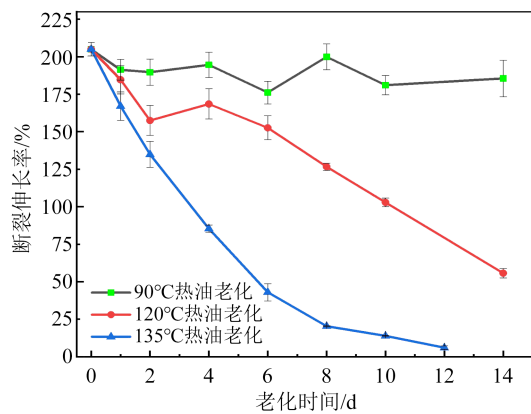
越快,试验前期(0~6 d)的下降速率比试验后期的快。对比图3(a)和(b)可以看出,对于120℃和135℃两个老化温度的曲线,在试验前期、相同老化时间下,热油中的断裂伸长率稍高于热空气中的断裂伸长率;在试验后期(6 d后),热油中的断裂伸长率比热空气中下降得更快,断裂伸长率更低。这主要是因为一方面NBR长时间浸泡在25#变压器油中,油分子的侵入使橡胶大分子链之间的相互作用减小,导致大分子链结构解缠,短时间内会增加其弹性和韧性,但长时间的浸泡会导致性能下降;另一方面25#变压器油在老化过程中会发生分解,产生一些对NBR有害的氧化物质,这些物质会进一步促进NBR的老化,导致橡胶的断裂伸长率急剧降低<sup>[22]</sup>,而高温会加速上述过程,故在热油中老化后期,断裂伸长率下降得更快。

### 2.4 傅里叶红外光谱分析

图4为NBR初始母材和经热油压缩、热空气压



(a) 热空气中

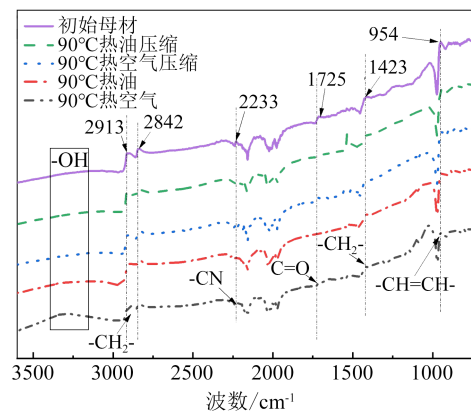


(b) 热油中

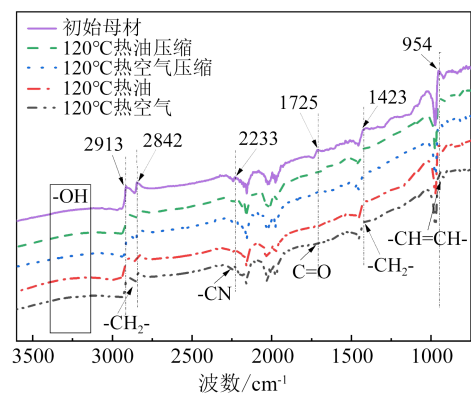
图3 NBR在不同老化环境和老化温度下的断裂伸长率  
Fig.3 The elongation at break of NBR under different ageing environments and ageing temperatures

缩、热油、热空气4种条件加速老化14 d后的全反射红外(ATR-FTIR)谱图。以NBR初始母材为例,图4中 $3\,500\sim 3\,300\text{ cm}^{-1}$ 处为 $-\text{OH}$ 宽峰, $2\,913\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,842\text{ cm}^{-1}$ 处分别为 $-\text{CH}_2-$ 的不对称和对称伸缩振动峰, $2\,233\text{ cm}^{-1}$ 处为氰基( $-\text{CN}$ )的伸缩振动峰, $1\,725\text{ cm}^{-1}$ 处为 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动峰, $1\,423\text{ cm}^{-1}$ 处是 $-\text{CH}_2-$ 的弯曲振动峰, $954\text{ cm}^{-1}$ 处尖峰体现了反式1,4- $-\text{CH}=\text{CH}-$ 的变形振动<sup>[14,19,22]</sup>。

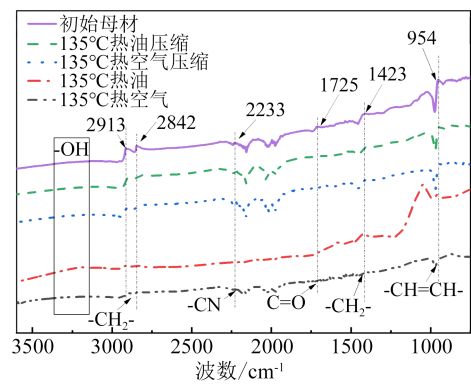
从图4可以看出,NBR老化后,位于 $2\,913\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,842\text{ cm}^{-1}$ 处 $-\text{CH}_2-$ 的不对称和对称伸缩振动峰强度明显降低,且温度越高特征峰强度的降幅越大;位于 $3\,500\sim 3\,200\text{ cm}^{-1}$ 处的 $-\text{OH}$ 吸收峰强度与初始母材相比,有明显的升高突起,而 $-\text{OH}$ 来自氧化产物,结合 $-\text{CH}_2-$ 的伸缩振动峰强度降低说明有其它基团产生<sup>[23-24]</sup>;位于 $954\text{ cm}^{-1}$ 处的反式1,4- $-\text{CH}=\text{CH}-$ 吸收峰强度也有所降低,表明分子间的双键发生断裂,形成了新的氧化物<sup>[25-26]</sup>。综上表明,



(a) 90°C



(b) 120°C



(c) 135°C

图4 NBR在不同条件和温度下老化14 d后的红外光谱  
Fig.4 Infrared spectra of NBR after ageing 14 days under different conditions and temperatures

NBR老化过程中存在氧化、断链和交联反应:NBR中的不饱和双键与氧发生氧化反应,形成羟基等含氧官能团;在高温环境下,NBR分子链因热裂解而断裂,产生自由基和碳碳双键,自由基的产生则会引发交联反应。氧化、断链反应如图5所示<sup>[27]</sup>。

利用峰高度法,进一步对图4中典型特征基团在加速老化试验前后的浓度变化进行分析,以120°C老化试样为例,分析结果如图6所示。从图6

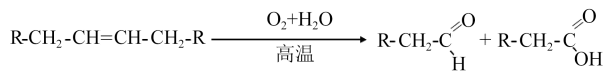


图5 NBR老化过程中的氧化、断链反应

Fig.5 Oxidation and chain breakage reactions during NBR ageing process

可以看出,各特征基团在不同条件下老化后的吸光度差值均低于初始母材的吸光度差值,表明各特征基团在加速老化试验后浓度普遍降低。其中,  $-CH_2-$  浓度降低表明NBR老化过程中发生交联、氧化和断裂反应<sup>[28]</sup>;  $-C=O-$  浓度降低是因为NBR中的增塑剂在老化过程中逐渐渗出并挥发<sup>[22]</sup>;  $-CH=CH-$  浓度降低是发生氧化、断链反应导致,进一步对比发现,  $-CH=CH-$  在热油压缩和热油条件下的吸光度差值明显高于热空气压缩和热空气条件下,再次印证了变压器油隔绝了NBR与氧气的接触,可使氧化、断链反应减弱。

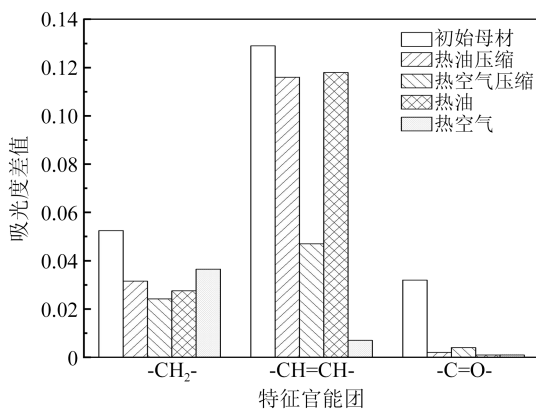


图6 NBR在不同条件下老化14 d前后的典型特征基团吸光度差值(120℃)

Fig.6 The absorbance difference of typical characteristic group of NBR before and after ageing for 14 days under different conditions (120℃)

### 2.5 服役寿命预测

根据现有对NBR热空气(热氧)寿命预测的文献<sup>[12,15-16,23]</sup>,大部分以压缩永久变形和断裂伸长率的性能变化作为指标来预测实际寿命,由于NBR在变压器中主要作为密封圈使用,常受到压缩作用,本文以压缩永久变形作为评价指标来预测NBR的实际使用寿命。参考GB/T 20028—2005,在硫化橡胶老化过程中,性能保持率( $P$ )与老化时间( $t$ )的关系可用式(2)描述。

$$P = Ae^{-Kt} \quad (2)$$

式(2)中: $A$ 为常数; $K$ 为速率常数; $t$ 为老化时间,d。

速率常数( $K$ )与老化温度( $T$ )之间的关系服从Arrhenius方程,如式(4)所示。

$$K = Ze^{-E/RT} \quad (3)$$

式(3)中: $Z$ 为频率因子, $d^{-1}$ ; $E$ 为活化能, $J/mol$ ; $R$ 为气体常数, $8.314 J/(mol \cdot K)$ ; $T$ 为老化温度, $K$ 。

结合式(2)~(3),可推出式(4)。

$$\ln t = E/RT + B \quad (4)$$

式(4)中, $B$ 为常数。

本文以压缩永久变形作为评价指标,故式(2)中 $P$ 为橡胶的压缩永久变形性能保持率。通常,以初始性能降低到50%作为临界值,即认为此时橡胶已经失去使用价值<sup>[12,15]</sup>,因此本文在预测NBR在25#变压器油中的使用寿命过程中,取压缩永久变形保持率为50%作为失效临界值,即 $P=50%$ 。由式(4)可知, $\ln t$ 与热力学温度的倒数( $1/T$ )呈线性关系,直线斜率为 $E/R$ ,进一步可用外推法推算NBR在实际工作环境中的使用寿命<sup>[26,29]</sup>。

NBR在25#变压器油中不同老化温度下的压缩永久变形保持率随时间变化的拟合曲线如图7所示。根据拟合曲线,可以得到NBR在热油压缩老化过程中不同温度下压缩永久变形保持率达到临界值(50%)的时间,即NBR的预测使用寿命,结果如表2所示。

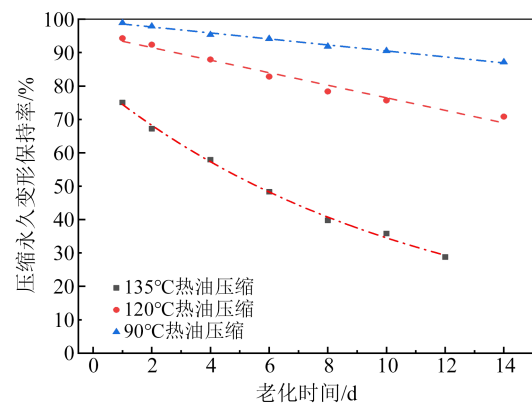


图7 NBR在不同老化温度下的压缩永久变形保持率拟合曲线

Fig.7 Fitted curves of compression set retention rate of NBR under different ageing temperatures

表2 NBR在不同老化温度下压缩永久变形保持率下降至临界值的时间

Table 2 The time for the compression set retention rate of NBR decrease to the critical value under different ageing temperatures

| 老化温度 /℃ | 线性回归决定系数 ( $R^2$ ) | 达到临界值的时间/d | $\ln t$  |
|---------|--------------------|------------|----------|
| 90      | 0.995 9            | 55.131 2   | 4.009 71 |
| 120     | 0.977 0            | 24.067 0   | 3.180 84 |
| 135     | 0.993 0            | 5.5863 3   | 1.720 32 |

根据表2代入 $\ln t$ 与 $1/T$ 数值,得到拟合公式如式(5)所示。

$$\ln t = 6931.35/T - 14.92968 \quad (5)$$

通常油浸式电力变压器的工作环境温度在 $-25 \sim 40^\circ\text{C}$ ,内部温升在 $55 \sim 60^\circ\text{C}$ <sup>[30]</sup>,本工作选定所预测的NBR工作温度为 $40 \sim 80^\circ\text{C}$ ,代入式(5)可得到不同服役温度下的预测使用寿命,如表3所示。

表3 NBR在25#变压器油中的预测使用寿命

Table 3 Service life prediction of NBR in 25# transformer oil

| 服役温度/ $^\circ\text{C}$ | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 寿命预测/年                 | 3.726 | 1.877 | 0.985 | 0.542 | 0.303 |

### 3 结论

(1)NBR在老化过程中邵氏硬度和压缩永久变形随着老化时间的增加而增大,断裂伸长率随着老化时间的增加而减小。老化温度越高,老化速率越快。25#变压器油可以减缓NBR的邵氏硬度和压缩永久变形增大的进程,但对断裂伸长率下降的影响为先减缓后加速。相比在热空气中,25#变压器油阻碍了NBR与氧气的接触,减缓了氧化和断裂反应。

(2)在热油压缩环境下,以压缩永久变形为评价指标,预测NBR在使用温度为 $40、50、60、70、80^\circ\text{C}$ 时的服役寿命分别为3.726、1.877、0.985、0.542、0.303年。

### 参考文献 References

- [1] 姚学军. 我国变压器行业的现状和发展趋势研究[J]. 经济师, 2023(9):282-283.  
YAO Xuejun. Research on the current situation and development trends of the transformer industry in China[J]. Economic Researcher, 2023(9):282-283.
- [2] 国家能源局,中国电力企业联合会. 2022年全国电力可靠性年度报告[R/OL]. 北京:中国,2023.  
National Energy Administration, China Electricity Council. 2022 National Electricity Reliability Annual Report[R/OL]. Beijing: China, 2023.
- [3] 国家能源局,中国电力企业联合会. 2021年全国电力可靠性年度报告[R/OL]. 北京:中国,2022.  
National Energy Administration, China Electricity Council. 2021 National Electricity Reliability Annual Report [R/OL]. Beijing: China, 2022.
- [4] 令宁,杜旭东,安旺成,等. 配电变压器可靠性评估研究综述[J]. 电气应用, 2023,42(8):45-52.  
LING Ning, DU Xudong, AN Wangcheng, et al. Review of reliability assessment of distribution transformers[J]. Electrical Applications, 2023,42(8):45-52.
- [5] 张保卫. 碳纤维/炭黑/丁腈橡胶复合材料的物理性能和导电性能[J]. 橡胶工业, 2017,64(12):709-713.  
ZHANG Baowei. Physical properties and conductive performance of carbon fiber/carbon black/nitrile rubber composites[J]. Rubber Industry, 2017,64(12):709-713.
- [6] 宋立,王鑫,赵颂,等. 抗穿刺丁腈橡胶/纤维复合材料的制备与性能[J]. 应用化工, 2019,48(8):1901-1903.  
SONG Li, WANG Xin, ZHAO Song, et al. Preparation and properties of puncture-resistant nitrile rubber/fiber composites[J]. Applied Chemistry, 2019,48(8):1901-1903.
- [7] ZIRNSTEIN B, TABAKA W, FRASCA D, et al. Graphene/hydrogenated acrylonitrile-butadiene rubber nanocomposites: dispersion, curing, mechanical reinforcement, multifunctional filler[J]. Polymer Testing, 2018,66(4):268-279.
- [8] 杨凯,王鑫,赵雄燕,等. 丁腈橡胶复合材料的研究进展[J]. 应用化工, 2018,47(9):2005-2009.  
YANG Kai, WANG Xin, ZHAO Xiongyan, et al. Research progress on nitrile rubber composites[J]. Applied Chemistry, 2018,47(9):2005-2009.
- [9] 胡方,汤丽文,张松. 丁腈橡胶在变压器油中产生甲烷的机理及消除方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2014,36(1):34-38.  
HU Fang, TANG Liwen, ZHANG Song. Mechanism of methane generation from nitrile rubber in transformer oil and its elimination methods[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2014,36(1):34-38.
- [10] 钱艺华,聂明浩,赵耀洪. 热油压缩下丁腈橡胶老化性能研究[J]. 应用化工, 2016,45(11):2043-2046,2051.  
QIAN Yihua, NIE Minghao, ZHAO Yaohong. Study on the aging performance of nitrile rubber under hot oil compression[J]. Applied Chemistry, 2016,45(11):2043-2046,2051.
- [11] 王文昌,郑春林,曹阳,等. 丁腈橡胶制品在变压器油中产生甲烷的机理[J]. 变压器, 1996(6):26-30.  
WANG Wenchang, ZHENG Chunlin, CAO Yang, et al. Mechanism of methane generation from nitrile rubber products in transformer oil[J]. Transformer, 1996(6):26-30.
- [12] 阙刚,彭旭东,沈明学,等. 丁腈橡胶热空气老化化学性能分析及贮存寿命预测[J]. 润滑与密封, 2018,43(2):18-25.  
QUE Gang, PENG Xudong, SHEN Mingxue, et al. Mechanical performance analysis and storage life prediction of nitrile rubber under thermal air aging[J]. Lubrication and Sealing, 2018,43(2):18-25.
- [13] LIU X, ZHAO J H, YANG R, et al. Effect of lubricating oil on thermal ageing of nitrile rubber[J]. Polymer Degradation and Stability, 2018,151:136-143.
- [14] DE LIMA D R, LIMA A P, CHAVES E G, et al. Application of ATR-FTIR spectroscopy to characterize the acrylonitrile content of degraded filled nitrile rubber compounds[J]. Polymer Bulletin, 2023,81(4):1-19.
- [15] 游海军,张保岗,刘晓,等. 丁腈橡胶热氧化性能研究及寿命预测[J]. 弹性体, 2015,25(5):60-64.  
YOU Haijun, ZHANG Baogang, LIU Xiao, et al. Study on thermal oxidative aging performance of nitrile rubber and life prediction[J]. Elastomers, 2015,25(5):60-64.
- [16] 李秀杰,孙书,刘丽霞,等. 基于湿热老化试验的航天器用丁腈橡胶贮存寿命预测[J]. 航天器环境工程, 2022,39(5):539-544.  
LI Xiujie, SUN Shu, LIU Lixia, et al. Prediction of storage life

- of nitrile rubber for spacecraft based on humid heat aging tests [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2022, 39(5): 539-544.
- [17] 范在乾, 咸日常, 边继辉, 等. 硫化体系对硅橡胶热老化性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(3): 1259-1269.  
FAN Zaiqian, XIAN Richang, BIAN Jihui, et al. Influence of vulcanization systems on the thermal aging performance of silicone rubber[J]. *Journal of Composite Materials*, 2024, 41(3): 1259-1269.
- [18] 胡学超, 薛守洪, 孙利强, 等. 变压器油中抗氧化剂类型对绝缘纸热老化性能的影响[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(11): 47-52.  
HU Xuechao, XUE Shouhong, SUN Liqiang, et al. Influence of antioxidant types in transformer oil on the thermal aging performance of insulation paper[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(11): 47-52.
- [19] 刘文凤, 郑雪梅, 张子琦, 等. 高压电力变压器用NBR密封圈极端低温老化研究[J]. *绝缘材料*, 2022, 55(8): 72-75.  
LIU Wenfeng, ZHENG Xuemei, ZHANG Ziqi, et al. Study on extreme low temperature aging of NBR seals for high voltage power transformers[J]. *Insulating Materials*, 2022, 55(8): 72-75.
- [20] 王玲, 魏小琴, 余祖新, 等. 丁腈橡胶密封圈热氧化及性能的关联性[J]. *弹性体*, 2019, 29(4): 35-38.  
WANG LING, WEI Xiaoqin, SHE Zuxin, et al. Correlation between thermal oxidative aging and performance of nitrile rubber seals[J]. *Elastomers*, 2019, 29(4): 35-38.
- [21] 李波, 李圣鑫, 张执南, 等. 热氧化作用对丁腈橡胶力学性能和摩擦学行为的影响[J]. *材料工程*, 2021, 49(5): 114-121.  
LI Bo, LI Shengxin, ZHANG Zhinan, et al. Effects of thermal oxidative aging on the mechanical properties and tribological behavior of nitrile rubber[J]. *Materials Engineering*, 2021, 49(5): 114-121.
- [22] 李杲, 卓文越, 杨国, 等. 多因素耦合作用下丁腈橡胶的老化行为和机理研究[J]. *高分子学报*, 2021, 52(7): 762-774.  
LI Gao, ZHUO Wenyue, YANG Guo, et al. Aging behavior and mechanisms of nitrile rubber under multi-factor coupling effects [J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2021, 52(7): 762-774.
- [23] 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. Aging study and lifetime prediction of nitrile rubber under simulated transformer operating conditions[J]. *Transformer*, 2017, 54(11): 19-25
- [24] GAO C, PENG J H, ZHANG Z M, et al. Ageing characteristics of GIS seal ring (O-ring)[C]//2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Nanjing, China: IEEE, 2020: 20-23.
- [25] 刘璇, 杨睿, 杨文, 等. 丁腈橡胶热氧化过程结构性能关系研究[J]. *合成材料老化与应用*, 2020, 49(6): 1-3.  
LIU Xuan, YANG Rui, YANG Wen, et al. Study on the relationship between structure and performance of nitrile rubber during thermal oxidative aging[J]. *Journal of Synthetic Materials Aging and Applications*, 2020, 49(6): 1-3.
- [26] LIU J, LI X B, XU L K, et al. Investigation of ageing behavior and mechanism of nitrile-butadiene rubber (NBR) in the accelerated thermal ageing environment[J]. *Polymer Testing*, 2016, 54: 59-66.
- [27] 赵惠霞, 刘雄民, 段鹏志, 等. 丁二烯在氧气中的氧化反应特性及产物[J]. *应用化工*, 2020, 49(10): 2425-2431.  
ZHAO Huixia, LIU Xiongmin, DUAN Pengzhi, et al. Oxidation reaction characteristics and products of butadiene in oxygen[J]. *Applied Chemistry*, 2020, 49(10): 2425-2431.
- [28] 高维, 杜钢, 范伟男, 等. 变压器密封用丁腈橡胶湿热老化特性及机理[J]. *高电压技术*, 2023, 49(2): 608-617.  
GAO Wei, DU Gang, FAN Weinan, et al. Moisture and heat aging characteristics and mechanisms of nitrile rubber for transformer sealing[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(2): 608-617.
- [29] 朱卫东, 谢庆. 基于 Arrhenius 公式的电缆附件硅橡胶寿命预测模型[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(10): 107-111.  
ZHU Weidong, XIE Qing. Lifetime prediction model for cable accessories silicone rubber based on the arrhenius equation[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(10): 107-111.
- [30] 苏玎, 于学莲. 浅析油浸变压器温度在线测量技术[J]. *科技资讯*, 2015, 13(5): 88.  
SU Ding, YU Xuelian. A brief analysis of online temperature measurement technology for oil-immersed transformers[J]. *Science and Technology Information*, 2015, 13(5): 88.

收稿日期: 2023-12-13; 修回日期: 2024-02-21。

#### 作者简介:

韩哲文(1986-), 女(汉族), 内蒙古呼和浩特人, 高级工程师, 主要从事电站、电网材料的监督检验、故障分析、寿命评估等的研究;

通信作者: 康举(1983-), 男(满族), 河北承德人, 副教授, 主要从事电网金属材料 and 绝缘电介质材料的故障分析、寿命评估等的研究。