

# 微米氧化铝填料对环氧树脂高温介电松弛行为的影响

李少龙<sup>1</sup>, 王忠军<sup>2</sup>, 刘绍光<sup>2</sup>, 陈超<sup>1</sup>

(1. 云南电网有限责任公司信息中心, 云南 昆明 650000;

2. 南方电网数字平台科技(广东)有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:**制备了填料质量分数分别为0、20%、40%的环氧微米氧化铝复合材料,通过常温及高温的介电试验,对高温介电谱进行拟合计算,分析微米氧化铝填料对环氧树脂高温介电松弛行为的影响。结果表明:与常温相比,微米氧化铝对环氧树脂高温介电松弛影响尤为显著。微米氧化铝填料增加了环氧树脂高温下的光频介电常数,而基本不影响松弛过程 $\alpha$ 的松弛强度。随着填料质量分数的提升,松弛过程 $\alpha$ 的松弛时间减小。此外,微米氧化铝填料的少量加入使得高温下松弛过程 $\delta$ 的松弛强度大幅度提升。但随着填料质量分数的提升,松弛过程 $\delta$ 的松弛强度反而下降,松弛时间不断提升。

**关键词:**环氧树脂;介电松弛;氧化铝;微米复合材料

中图分类号:TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.02.016

## Effect of micro-alumina filler on dielectric relaxation behavior of epoxy resin at high temperature

LI Shaolong<sup>1</sup>, WANG Zhongjun<sup>2</sup>, LIU Shaoguang<sup>2</sup>, CHEN Chao<sup>1</sup>

(1. Information Center of Yunnan Electric Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China;

2. China Southern Power Grid Digital Platform Technology Company, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** Epoxy resin micro-alumina composite materials with micro-alumina mass fraction of 0, 20%, and 40% were prepared. The effect of micro-alumina filler on the dielectric relaxation behavior of epoxy resin at high temperature was analyzed by dielectric test at room temperature and high temperature and fitting calculation of high temperature dielectric spectra. The results show that the effect of micro-alumina on the dielectric relaxation at high temperature is more obviously than that at room temperature. With the introduction of alumina, the optical frequency dielectric constant increases, while the relaxation strength of relaxation process  $\alpha$  shows little change. With the increase of mass fraction of filler, the relaxation time of relaxation process  $\alpha$  decreases. Besides, the micro-alumina filler significantly increases the relaxation strength of relaxation process  $\delta$ . However, with the increase of mass fraction of micro-alumina, the relaxation strength of relaxation process  $\delta$  decreases, while the relaxation time increases continuously.

**Key words:** epoxy resin; dielectric relaxation; alumina; micro composite material

## 0 引言

环氧树脂(EP)及其复合材料因良好的电气、力学与热性能,作为主要绝缘介质在电气绝缘领域广泛应用<sup>[1-6]</sup>。为了进一步增强材料的力学性能,工业上,通常向环氧树脂中添加大量的金属氧化物填料如氧化铝、氧化钛等。但大量填料的引入,在提升材料力学性能的同时,也会改变其介电性能。

绝缘材料的介电性能与其击穿、闪络与老化等电气性能密切相关,介电性能的变化可能会使得设备如盆式绝缘子发生沿面闪络,导致表面的材料绝缘劣化,加速降解与老化,最终引发绝缘击穿,影响电力设备长期稳定的运行<sup>[1-6]</sup>。因此,研究人员对环

氧树脂及其复合材料的介电性能开展了相关研究。吉雅坤等<sup>[7]</sup>对低温下环氧树脂及微米氧化铝复合材料的介电性能进行了研究,发现试样的介电常数随着微米氧化铝质量分数的增加而增大,随着温度的下降而减小。宁晓秋等<sup>[8]</sup>对不同质量分数环氧树脂/微米氧化铝复合材料的介电性能与热性能进行了实验研究,认为微米氧化铝的引入导致材料中界面极化增强,是试样介电常数随着微米氧化铝质量分数增加而增大的主要原因。电力设备由于运行工况及自身发热,可能导致绝缘材料温度升高,而环氧材料高温的介电松弛行为与常温相比,存在很大差异<sup>[8-10]</sup>。林生军等<sup>[9]</sup>通过研究高温下环氧树脂介电松弛行为,发现与低温相比,高温下环氧树脂主要

存在 $\alpha$ 与 $\delta$ 两种松弛过程。在此基础上,HUANG Yin等<sup>[10]</sup>定性解释了微米氧化铝填料改变环氧复合材料松弛过程 $\alpha$ 的松弛时间的原因。

目前针对环氧树脂及微米氧化铝复合材料介电性能的研究尚不够深入,研究多是定性针对介电谱的变化趋势,或只针对某种单一松弛过程,没有对全频域的介电松弛行为进行系统研究<sup>[11-13]</sup>。为了深入研究微米氧化铝填料对环氧树脂介电松弛行为的影响,本研究制备含有微米氧化铝质量分数为0、20%、40%的环氧微米氧化铝复合材料并测量其在常温及高温下的介电谱,利用介电拟合的方式,对高温下全频段的介电松弛行为进行研究。

## 1 试验

### 1.1 主要原材料

Araldite CT5531 CL型环氧树脂、Aradur HY5533 CL型固化剂,协励行(厦门)绝缘科技有限公司;微米氧化铝填料,粒径为20  $\mu\text{m}$ ,泰安盛源粉体有限公司。

### 1.2 试样制备

将脱模剂均匀涂抹在模具表面后,将模具放入120 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱预热2 h。称取100 g环氧树脂加入三口烧瓶中加热至液态,然后称取 $A$  g(通过式(1)计算)微米氧化铝填料加入烧瓶,加热至130 $^{\circ}\text{C}$ 搅拌并脱气,持续1 h;随后,关闭加热装置,使烧瓶中混合物降温至100 $^{\circ}\text{C}$ ,称取38 g固化剂加入烧瓶,并于100 $^{\circ}\text{C}$ 搅拌脱气20 min。最后,将烧瓶中混合物倒入预热完毕的模具中,放入烘箱进行固化,固化程序为120 $^{\circ}\text{C}/3$  h+140 $^{\circ}\text{C}/14$  h。固化结束后,将试样取出,用去离子水清洗干净后,放入烘箱干燥。试样为直径50 mm,厚度1 mm的圆片。

$$X = \frac{A}{100 + 38 + A} \quad (1)$$

式(1)中: $A$ 为微米氧化铝填料的质量,g; $X$ 为复合材料中微米氧化铝填料的质量分数,分别为0、20%、40%。

将含有微米氧化铝填料质量分数为0、20%、40%试样分别记为EP-0、EP-20、EP-40。

### 1.3 试验方法

使用Novocontrol Concept 80型宽频介电谱仪测量试样的介电谱,测试温度分别为20 $^{\circ}\text{C}$ 与160 $^{\circ}\text{C}$ ,频率为 $10^{-1} \sim 10^6$  Hz,测试前需对试样两端喷镀导电电极,电极直径分别为30 mm与40 mm;使用VE9800S型扫描电子显微镜观测试样断面的显微形貌,观测前需对断面喷镀金电极。

## 2 结果及讨论

### 2.1 微观形貌

图1为含有不同质量分数微米氧化铝填料的环氧微米氧化铝复合材料断面的显微形貌图。从图1可以看出,未加填料的复合材料试样断面平整光洁,而加入微米氧化铝填料后,显微形貌发生明显变化。对比图1发现,EP-20试样中填料基本分布均匀,而EP-40试样由于填料较多,存在氧化铝粒子的团聚现象。

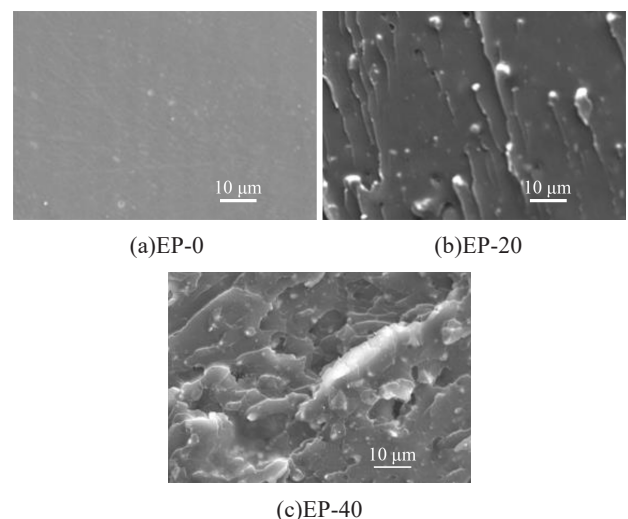


图1 环氧复合材料显微形貌图

Fig.1 Micrographs of epoxy composites

### 2.2 介电性能

图2为20 $^{\circ}\text{C}$ 时,3种环氧微米氧化铝复合材料试样的介电谱。从图2(a)可以看出,常温下复合材料复介电常数实部随着微米氧化铝填料质量分数的增加而变大。但在测试频段,复介电常数实部没有出现明显的松弛过程,无法判定填料对环氧树脂介电松弛行为产生何种影响。从图2(b)可以看出,随着填料的增加,复合材料的复介电常数虚部变大,但在高频与低频区域,这种现象并不明显。综上所述,仅凭20 $^{\circ}\text{C}$ 的介电谱测试结果很难分析微米氧化铝填料对环氧树脂松弛行为的影响,而文献[9-10]研究表明,高温下环氧树脂的松弛行为更易于研究与观察,因此进一步测试并分析160 $^{\circ}\text{C}$ 下,复合材料的介电谱。

图3为160 $^{\circ}\text{C}$ 环氧微米复合材料的介电谱。从图3(a)发现,高温下复合材料主要存在两个松弛过程,其中松弛过程 $\alpha$ 位于高频区域,这是因为在玻璃化转变温度之上,环氧树脂极性大分子链运动导致的偶极子极化<sup>[9]</sup>。松弛过程 $\delta$ 位于低频区域,有研究认为, $\delta$ 过程是由环氧树脂内部杂质离子<sup>[9]</sup>或界面极

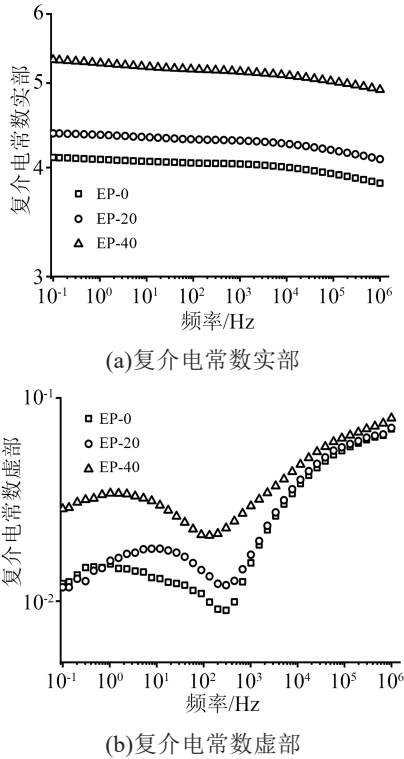


图2 环氧树脂氧化铝微米复合材料20℃介电谱  
Fig.2 Dielectric spectrum of epoxy alumina micron composite at 20℃

化<sup>[4]</sup>导致。通过对比发现,微米氧化铝填料的加入使得复合材料的复介电常数实部提升,但对高频与低频区域的复介电常数实部影响存在差异。对于高频区域,随着微米氧化铝填料质量分数的提升,复介电常数实部变大。但对于低频区域,当微米氧化铝质量分数为20%时,复介电常数实部达到最大值。

从图3(b)可以看出,复介电常数虚部在高频区域图像存在重叠,难以辨别,但低频区域的直流电导过程存在明显的差异。加入20%微米氧化铝填料后,试样在低频区域的复介电常数虚部明显增大,而进一步增加氧化铝填料时,复介电常数虚部反而减小。

### 2.3 介电性能拟合

为了对复合材料的介电松弛行为进行定量表征与深入分析,通常要对介电谱数据进行拟合与计算<sup>[4-17]</sup>。常用的拟合公式包括 Cole-Cole (C-C) 公式、Cole-David (C-D) 公式与 Havriliak-Negami (H-N) 公式<sup>[17]</sup>。其中 H-N 公式是最常用的介电拟合方法,通过调整 H-N 公式的参数,可将 H-N 公式转换为 C-C 公式与 C-D 公式。

聚合物的每个单一松弛过程可用一个 H-N 公式描述<sup>[17]</sup>。通常情况,聚合物在宽频域内存在多个

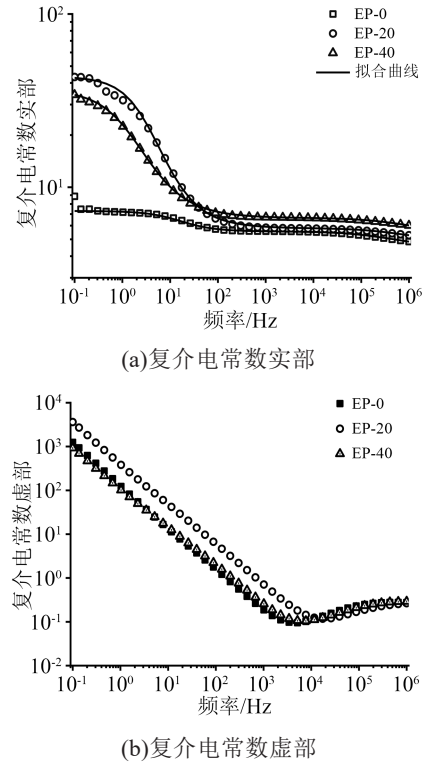


图3 环氧树脂氧化铝微米复合材料160℃介电谱  
Fig.3 Dielectric spectrum of epoxy alumina micron composite at 160℃

松弛过程,可用多个 H-N 函数叠加表示。根据图3可知,高温下环氧微米氧化铝复合材料在测试频段具有两个松弛过程,因此,本研究选用双 H-N 函数分别描述松弛过程 $\alpha$ 与松弛过程 $\delta$ 。除两个松弛过程外,环氧树脂中还存在着电子位移极化与原子位移极化,二者对介电常数的贡献合称为光频介电常数<sup>[18]</sup>,因此,本文的介电拟合公式如式(2)所示。

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon_\alpha}{[1 + (i\omega\tau_\alpha)^\beta]^\gamma} + \frac{\Delta\varepsilon_\delta}{[1 + (i\omega\tau_\delta)^\beta]^\gamma} \quad (2)$$

式(2)中: $\varepsilon^*$ 为复介电常数; $\varepsilon_\infty$ 为光频介电常数; $\omega = 2\pi f$ 为角频率, $f$ 为频率; $\tau$ 为松弛时间; $\Delta\varepsilon_\alpha$ 与 $\Delta\varepsilon_\delta$ 分别为松弛过程 $\alpha$ 与 $\delta$ 的松弛强度; $\beta$ 与 $\gamma$ 为图形系数, $0 < \beta \leq 1, 0 < \alpha \times \beta \leq 1$ 。

拟合结果如图3(a)中曲线所示,拟合参数见表1。从图3(a)中拟合曲线与试验值对比发现,曲线与试验值重合,表明 H-N 函数的参数选取正确,可用计算参数对环氧树脂微米复合材料高温下的介电松弛行为进行深入分析。

### 2.4 讨论

#### 2.4.1 氧化铝填料对光谱介电常数的影响

图4为160℃时,3种复合材料试样光频介电常数与微米氧化铝填料质量分数的关系。从图4可以看出,随着微米氧化铝含量的增加,复合材料的光

表1 160℃时环氧微米氧化铝复合材料介电拟合参数  
Tab.1 Dielectric fitting parameters of epoxy micron Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites at 160℃

试样	$\epsilon_\infty$	$\Delta\epsilon_\alpha$	$\Delta\epsilon_\delta$	$\tau_\alpha$	$\tau_\delta$	$\beta_\alpha$	$\beta_\delta$	$\gamma_\alpha$	$\gamma_\delta$
EP-0	3.55	2.00	1.75	$1.00 \times 10^{-5}$	$6.67 \times 10^{-2}$	0.725	0.88	0.230	0.9
EP-20	3.80	2.00	38	$0.50 \times 10^{-5}$	$3.57 \times 10^{-1}$	0.720	0.88	0.215	0.9
EP-40	4.60	2.05	30	$0.36 \times 10^{-5}$	0.833	0.700	0.80	0.305	0.9

频介电常数呈现上升的趋势。材料的光频介电常数由电子位移极化与原子位移极化构成,由材料自身决定,几乎不受温度影响<sup>[18]</sup>。纯环氧树脂试样的电子位移极化与原子位移极化主要由固化后的环氧分子贡献,而复合材料由于加入了大量的微米氧化铝填料,内部原子与电子数目增多,使得其电子位移极化与原子位移极化增强。填料质量分数为20%时,所加微米氧化铝质量为34.5 g,而填料质量分数为40%,加入微米氧化铝质量分数为92.0 g,导致光频介电常数随填料质量分数变化的增幅变大。

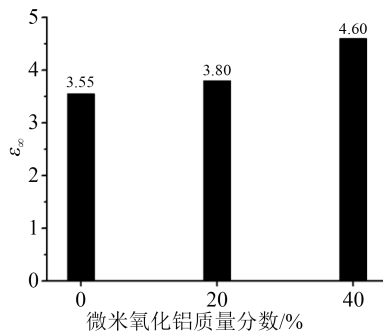


图4 160℃时 $\epsilon_\infty$ 与微米氧化铝填料质量分数关系

Fig.4 Relationship between  $\epsilon_\infty$  and mass fraction of micron alumina filler at 160℃

#### 2.4.2 氧化铝填料对松弛过程 $\alpha$ 的影响

图5为松弛过程 $\alpha$ 的松弛强度 $\Delta\epsilon_\alpha$ 与微米氧化铝填料质量分数的关系。从图5可以看出,松弛过程 $\alpha$ 的松弛强度基本不受填料影响。松弛过程 $\alpha$ 是发生在玻璃化转变温度之上,环氧树脂中极性大分子基团的松弛运动为偶极极化,受环境温度与材料自身分子特性影响<sup>[9,18]</sup>。因为氧化铝为离子晶体,并未向试样中引入新的偶极分子,也未改变环氧树脂的分子结构,所以氧化铝填料的引入不会影响材料的偶极极化行为。因此加入微米氧化铝填料前后,试样在160℃下拟合得到的 $\Delta\epsilon_\alpha$ 基本不变。

图6为松弛过程 $\alpha$ 的松弛时间 $\tau_\alpha$ 与微米氧化铝填料的关系。从图6可以看出,纯环氧树脂的 $\tau_\alpha$ 为 $1 \times 10^{-5}$ ,而加入微米氧化铝填料后, $\tau_\alpha$ 大幅下降。文

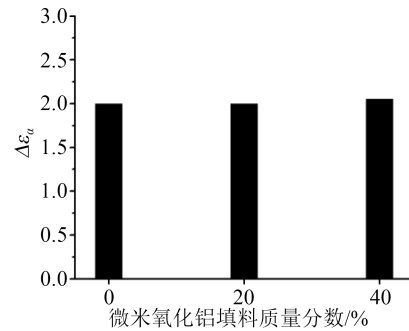


图5 160℃时 $\Delta\epsilon_\alpha$ 与微米氧化铝填料质量分数关系

Fig.5 Relationship between  $\Delta\epsilon_\alpha$  and mass fraction of micron alumina filler at 160℃

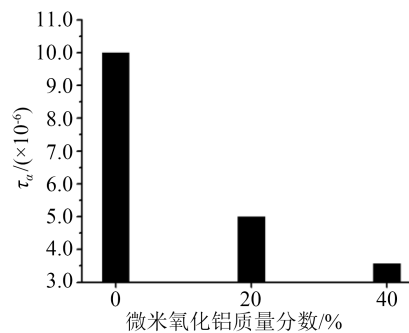


图6 160℃时 $\tau_\alpha$ 与微米氧化铝填料质量分数关系

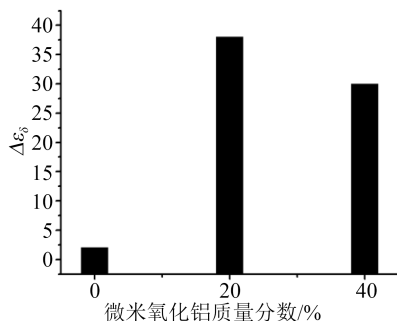
Fig.6 Relationship between  $\tau_\alpha$  and mass fraction of micron alumina filler at 160℃

献[8]研究表明,大量微米氧化铝填料加入后,体系黏度增大,使固化剂分子无法与环氧树脂分子充分接触,降低了材料的交联度。环氧树脂交联度的降低导致大分子链受到的束缚力下降,相同条件下,松弛过程 $\alpha$ 更容易在高频区域发生,松弛时间下降。

#### 2.4.3 氧化铝填料对松弛过程 $\delta$ 的影响

图7为松弛过程 $\delta$ 的松弛强度 $\Delta\epsilon_\delta$ 与微米氧化铝填料质量分数的关系。从图7可知,加入微米氧化铝填料前后,松弛过程 $\delta$ 的松弛强度变化很大。EP-0试样的 $\Delta\epsilon_\delta$ 为1.75,而加入20%微米氧化铝填料后,复合材料试样的 $\Delta\epsilon_\delta$ 增至38。当微米氧化铝填料进一步增加到40%后,试样的 $\Delta\epsilon_\delta$ 反而减小到30。

氧化铝为离子晶体,且与环氧树脂属于不同介质,因此加入微米氧化铝填料后,可能会对试样的热离子极化与界面极化产生较大影响。热离子极化是由材料中的导电离子在热运动作用下,脱离平衡位置发生迁移引发的带电现象<sup>[18]</sup>。氧化铝晶体在熔融状态下会电离出阴、阳离子,而试验温度为160℃,远低于氧化铝的熔点2054℃,因此微米氧化铝填料不可能在复合材料中引入热离子极化,判断松弛过程 $\delta$ 主要为界面极化。

图7 160℃时 $\Delta\epsilon_2$ 与微米氧化铝填料质量分数关系Fig.7 Relationship between  $\Delta\epsilon_2$  and mass fraction of micron alumina filler at 160℃

界面极化是不均匀电介质中,电荷在分界面聚集,使得介质中自由电荷分布不均匀产生宏观偶极矩的现象<sup>[18-19]</sup>。从图1(a)的显微形貌可知,未掺杂填料的环氧树脂,断面光滑无明显缺陷,其内部的界面主要由环氧分子与少量杂质分子如环氧合成副产物、促进剂和未完全反应的固化剂等形成。而从图1(b)可知,当加入填料质量分数为20%时,断面出现可观测到的氧化铝填料,这将导致内部界面大量增多,如图8所示,环氧树脂分子可与微米氧化铝填料形成界面,捕获迁移电荷,产生界面极化,导致加入填料后的试样松弛过程 $\delta$ 的松弛强度明显增大。当进一步增加填料质量分数至40%时,界面极化略有下降,这是因为在图1(c)中,部分填料彼此重叠,而同种介质的接触不会产生界面极化现象,如图8所示,导致内部可发生界面极化的界面并未明显上升。同时,进一步增加填料的质量分数会导致复合材料体系的黏度上升,增加自由电荷迁移的阻力,因此降低了界面区捕获自由电荷的概率,导致界面极化反而下降。因此,加入微米氧化铝填料后 $\Delta\epsilon_2$ 急剧增大,而进一步增加填料含量后, $\Delta\epsilon_2$ 反而减小。

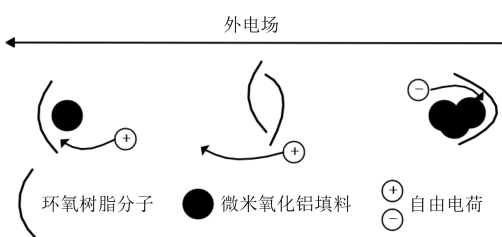
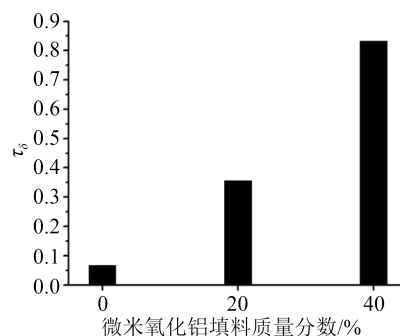


图8 环氧微米氧化铝复合材料界面极化发生原理图

Fig.8 Schematic diagram of interface polarization of epoxy micron  $\text{Al}_2\text{O}_3$  composite

图9为松弛过程 $\delta$ 的松弛时间 $\tau_\delta$ 与填料质量分数的关系。从图9可以看出,未加入填料时,试样的 $\tau_\delta$ 最小,而加入填料后, $\tau_\delta$ 增大。这是因为加入微米

氧化铝填料使得复合材料体系黏度变大,界面极化的松弛时间与界面捕获自由电荷载费的时间有关。微米粒子引入后,体系黏度增大,自由电荷迁移速率下降,导致松弛过程 $\delta$ 产生的时间相应延长。因此,随着微米氧化铝填料质量分数的增加,试样松弛过程 $\delta$ 的松弛时间 $\tau_\delta$ 增大。

图9 160℃时 $\tau_\delta$ 与微米氧化铝填料质量分数关系Fig.9 Relationship between  $\tau_\delta$  and mass fraction of micron alumina filler at 160℃

### 3 结论

(1)相较于20℃常温介电谱,微米氧化铝填料对环氧树脂高温介电松弛影响更为明显。

(2)加入微米氧化铝填料后,环氧微米复合材料高温下的光频介电常数随微米氧化铝质量分数的增加而变大。

(3)微米氧化铝填料的加入基本不影响环氧树脂高温下松弛过程 $\alpha$ 的松弛强度,但影响松弛过程 $\alpha$ 的松弛时间。填料的引入会降低材料的交联度,导致分子链段受到束缚力下降,大分子链更容易运动,使得松弛时间减小。

(4)微米氧化铝填料的少量加入增强了高温下环氧树脂的松弛过程 $\delta$ ,但随着填料质量分数提升,松弛过程 $\delta$ 的松弛强度反而下降,而松弛过程 $\delta$ 的松弛时间随填料质量分数的提升而增加。

### 参考文献:

- [1] LI Shengtao, YU Shihu, FENG Yangfeng. Progress in and prospects for electrical insulating materials[J]. High Voltage, 2016, 1(3):122-129.
- [2] FABIANI D, MONTANARI G C, KRIVDA A, et al. Epoxy based materials containing micro and nano sized fillers for improved electrical characteristics[C]//2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Potsdam, Germany: IEEE, 2010, 1-4.
- [3] LI Shengtao, YIN Guilai, BAI Suna, et al. A new potential barrier model in epoxy resin nanodielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5):1535-1543.
- [4] CASTELLON J, NGUYEN H N, AGNELGNE S, et al. Electri-

- cal properties analysis of micro and nano composite epoxy resin materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(3):651-658.
- [5] KRIVDA A, TANNKA T, FRECHETTE M, et al. Characterization of epoxy microcomposite and nanocomposite materials for power engineering applications[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2012,28(2):38-51.
- [6] TSEKMES I A, MORSHUIS P H F, SMIT J J, et al. Enhancing the thermal and electrical performance of epoxy microcomposites with the addition of nanofillers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2015,31(3):32-42.
- [7] 吉雅坤,李卫国,张翀,等.低温环境下环氧树脂氧化铝复合材料的介电性能变化规律研究[J].绝缘材料,2018,51(2):35-38.
- [8] 宁晓秋,王立地,王宇,等.微米 $Al_2O_3$ /环氧树脂复合材料介电性能和热性能研究[J].绝缘材料,2020,53(10):32-37.
- [9] 林生军,黄印,谢东日,等.环氧树脂高温分子链松弛与玻璃化转变特性[J].物理学报,2016,65(7):077701.
- [10] HUANG Yin, MIN Daomin, LI Shengtao, et al. Dielectric relaxation and carrier transport in epoxy resin and its microcomposite [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017,24(5):3083-3091.
- [11] 尹桂来,李建英,唐壮,等.GIS用环氧浇注材料的介电松弛特性研究[J].绝缘材料,2015,48(3):51-54.
- [12] 武庆周,罗春明,彭宗仁,等.应用宽频介电谱研究氢氧化铝/环氧树脂复合材料的 $\alpha$ 和 $\beta$ 松弛行为[J].复合材料学报,2018,35(6):1497-1502.
- [13] 张宏亮,金海,张丝钰,等.纳米氧化石墨烯/环氧树脂复合材料的电极极化现象[J].电工技术学报,2018,33(23):5591-5599.
- [14] 张蔚,任鹏,彭鹏,等.求取环氧树脂复合绝缘活化能的改进介电谱法[J].绝缘材料,2020,53(7):98-105.
- [15] 董明,刘媛,任明,等.油纸绝缘频域介电谱解释方法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(4):1002-1008.
- [16] 杨丽君,高思航,高竣,等.油纸绝缘频域介电谱的修正 Cole-Cole 模型特征参量提取及水分含量评估方法[J].电工技术学报,2016,31(10):26-33.
- [17] SCHÖNHALS A, KREMER F. Broadband dielectric measurement techniques ( $10^6$ Hz to  $10^{12}$ Hz) [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag,2003.
- [18] 金维芳.电介质物理学:第2版[M].北京:科学出版社,2003.
- [19] 马万里,田付强,熊雯雯,等.环氧树脂/氮化硼微米复合材料的导热与电气绝缘性能研究[J].绝缘材料,2019,52(7):36-42.

收稿日期:2022-01-05 修回日期:2022-01-29

作者简介:李少龙(1985-),男(汉族),云南保山人,工程师,主要从事电网安全生产领域信息化建设的研究;陈超(1987-),女(汉族),云南弥勒人,高级工程师,主要从事呼叫中心管理、客户服务运营管理工作。