

高温热处理对环氧聚合物介电松弛的影响

李明儒¹, 冯 阳¹, 朗建宇¹, 高雅芳¹, 王 琨², 陈 贇², 杨 威², 李盛涛¹

(1. 西安交通大学 电工材料电气绝缘全国重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 国网智能电网研究院有限公司, 北京 102211)

摘 要: 为了揭示热处理对环氧树脂介电松弛的影响, 本文制备了环氧树脂试样, 对其进行 210°C/48 h 的热处理, 并研究热处理前后环氧树脂化学结构、玻璃化转变温度、热分解参数、体积电阻率与介电松弛的变化。结果表明: 热处理并未改变环氧树脂的化学结构与热分解温度, 但使其玻璃化转变温度由 134°C 下降至 108°C。同时, 热处理后试样的介电常数变大, 其中高频(10⁶ Hz)介电常数增幅较小, 而低频(10⁻¹ Hz)介电常数增幅明显。

关键词: 环氧树脂; 热处理; 介电松弛; 热性能; 介电常数

中图分类号: TM215 **DOI:** 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.03.009

Effect of high temperature thermal treatment on dielectric relaxation of epoxy polymers

LI Mingru¹, FENG Yang¹, LANG Jianyu¹, GAO Yafang¹,
WANG Kun², CHEN Yun², YANG Wei², LI Shengtao¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Grid Smart Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: In order to investigate the effect of thermal treatment on the dielectric relaxation of EP, a EP sample was prepared and conducted thermal treatment at 210°C/48 h. The changes of chemical structures, glass transition temperatures, thermal decomposition parameters, volume resistivities, and dielectric relaxation of the EP before and after thermal treatment were studied. The results show that the thermal treatment does not change the chemical structures and thermal decomposition temperatures of the EP, but the glass transition temperature decreases from 134°C to 108°C. Furthermore, the dielectric constant of the sample increases after thermal treatment, with a smaller increase at high frequency (10⁶ Hz) and a more significant increase at low frequency (10⁻¹ Hz).

Key words: epoxy resin; thermal treatment; dielectric relaxation; thermal properties; dielectric constant

0 引言

环氧树脂及其复合材料由于具有优异的电气绝缘性能、热性能与力学性能, 在高压电工装备领域作为绝缘介质与支撑介质得到了广泛应用^[1-6]。绝缘材料在长期工作中受到电、热和力的多重作用会发生老化, 其绝缘性能不可避免地会发生劣化, 影响电力设备的稳定性, 进而影响系统供电的可靠性^[7]。为了有效降低绝缘老化对电力设备运行稳定性的影响, 研究人员提出绝缘状态在线检测与寿命预测的方法^[8], 由于该类方法的应用与发展需要以相应的绝缘老化理论研究为支撑, 近半个世纪以来包括环氧树脂在内的绝缘材料老化研究备受关注。

谢伟等^[9]研究发现, 经电老化后固体绝缘开关

柜用环氧树脂材料的介质损耗因数和局部放电量随老化时间的延长而增加, 且介质损耗因数和局部放电量与老化寿命之间存在正态分布的关系。他们进一步研究了热氧老化对环氧复合材料性能的影响, 发现在老化前期复合材料的介电常数下降, 而在老化后期, 复合材料的介电常数上升。研究表明老化前期介电常数的变化主要是高温老化引发了材料的后固化, 使得介电常数下降, 而老化后期分子键断裂是介电常数上升的主要原因^[10]。李庆民等^[11]对环氧树脂高频电热联合老化后的局部放电特性进行了研究, 并总结了老化对局放信号的影响规律。结果表明随着老化时间的增加, 高相位上的最大放电幅值增大。张星宇等^[12]通过仿真研究了环氧树脂在局部放电活性产物作用下的热裂解机理, 认为局部放电产生的活性产物是加剧环氧树脂裂解

的主要原因。高坤等^[13]对环氧复合材料湿热老化前后的性能进行了研究,发现老化使得复合材料的介质损耗因数增加,而介电常数的变化无明显规律。P PREETHA 等^[14]对环氧树脂及其纳米复合材料进行加速老化,发现在电老化作用下,环氧树脂的介电常数明显增加,而介质损耗因数变化不大。目前,老化对环氧树脂介电常数与介质损耗因数影响的相关研究有很多,但结论并不统一,且研究仍存在不足,尤其是目前的研究并未深入到材料具体的介电松弛行为。材料的介电松弛行为不仅影响着其介电常数、介质损耗因数等参数,还与其分子链松弛活化能和老化状态等密切相关^[15-17]。因此,有必要对材料老化前后的介电松弛行为进行研究。

通常,在进行正式老化前,需对环氧复合材料试样进行一段时间的热处理,且热处理的温度应低于正式老化温度。目前的研究聚焦在长期老化对材料的整体影响,而关于热处理对材料的性能,尤其是介电松弛行为的影响尚不清楚。为此,本文以电工装备用双酚 A 环氧酸酐交联体系为研究对象,对其进行高温热处理,通过实验手段,研究热处理前后环氧树脂化学结构、热性能以及介电松弛行为的变化并阐明其变化机理,从而为环氧绝缘材料的热老化、寿命预测及状态评估等研究提供理论依据。

1 试验

1.1 主要原材料

0164DA 型双酚 A 环氧树脂,国网智能电网研究院有限公司; JH-910 型甲基四氢苯酐固化剂、*N,N*-二甲基苯胺(BDMA),上海雄润树脂有限公司。环氧树脂与固化剂的分子结构如图 1 所示。

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

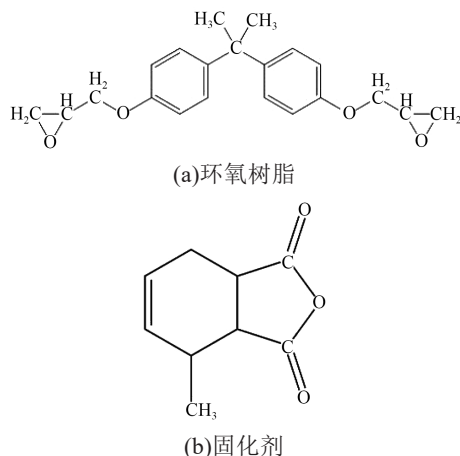


图1 原材料的分子结构式

Fig.1 Molecular structure of material

130℃烘箱预热 2 h。称取 100 g 环氧树脂与 83.51 g 固化剂倒入三口烧瓶中,于 40℃下搅拌脱气 2 h,随后加入 0.6 g 促进剂,搅拌 5 min。将搅拌好的混合物倒入预热完毕的模具中,放入真空烘箱常温脱气 10 min,随后进行固化,固化程序为 80℃/4 h+140℃/12 h。固化结束后开模取样,将试样自然冷却 24 h 后备用。

1.3 高温热处理

采用高温试验箱对环氧树脂试样进行热处理。热处理的老化温度应高于材料的玻璃化转变温度,低于材料的热分解温度。环氧酸酐体系的玻璃化转变温度通常高于 100℃,热分解起始温度通常高于 300℃^[7]。同时考虑到现有实验条件与实验安全性,本研究将热处理温度设置为 210℃,持续时间为 48 h。

1.4 试验方法

使用 Thermo Scientific K-Alpha 型 X 射线光电子能谱仪表征试样的化学结构,测试元素为 C。使用 Mettler Toledo TGA/DSC-1 型同步热分析仪对试样进行热分析测试,升温速率为 10℃/min,测试温度为 50~600℃,保护气为氮气。使用 6517b 型电阻率测试仪测量试样的体积电阻率,环境湿度约为 55%,温度为室温。使用 Novocontrol Concept 80 型宽频介电谱仪测量试样的介电谱,测试的温度间隔为 20℃,温度为 20~200℃,频率为 10⁻¹~10⁶ Hz,施加 1 V 交流电压,测试前对试样两面喷镀金电极,正反两面电极的直径分别为 30 mm 与 40 mm。

2 结果与讨论

2.1 化学结构

X 射线光电子能谱技术(XPS)是一种表征材料化学结构的有效方法,通过对测试结果的分峰分析,可得到各化学键的电子能谱图^[18-19]。本文使用 XPS PEAK 41 软件对 XPS 的 C1s 能谱图进行分峰拟合,并以 C-C/C-H 键的键能为 284.6 eV 对其余化学键进行校正,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,未处理试样与热处理试样的化学键成分完全相同,包括 C-C/C-H 键,C=C 键,C-O 键和 C=O 键,其键能分别为 284.6、284.2、285.1、286.6 eV,表明热处理并未在环氧树脂内部引入新的化学结构。以各化学键 XPS 能谱图中对应峰的面积定量表征各个化学键的含量^[9],如图 2(c)所示。从图 2(c)可以看出,热处理前后试样各化学键的含量仅发生小幅变化,予以忽略。因此,可以认为热处理阶段试样的化学结构不发生变化。

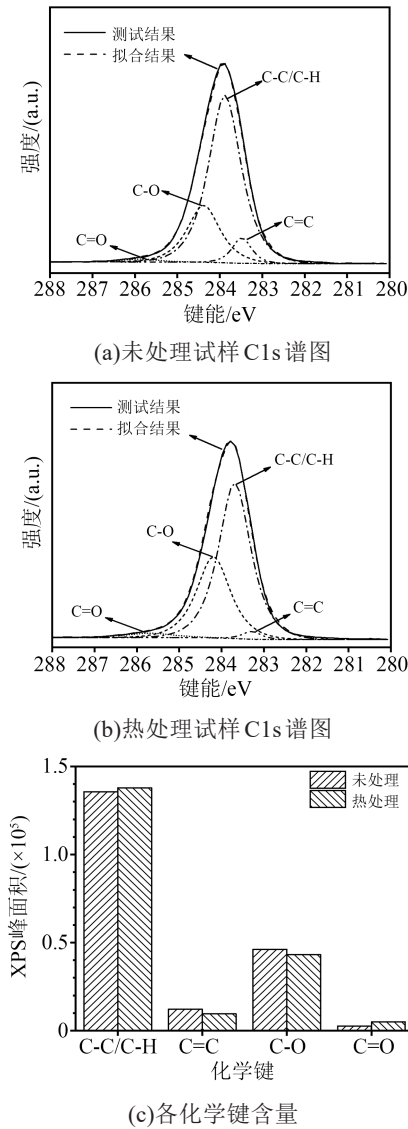


图2 热处理前后试样化学结构
Fig.2 The chemistry structure of samples before and after thermal treatment

2.2 热性能

玻璃化转变温度(T_g)是聚合物由玻璃态转变成高弹态的临界温度,在此温度附近,材料的力学性能与电气性能呈现巨大差异。本文将 T_g 记为材料发生相变时曲线前基线与后基线延长线交点对应的温度。图3为试样热处理前后的热性能测试结果。

从图3(a)可以看出,热处理改变了环氧树脂的玻璃化转变行为。热处理后试样的 T_g 由老化前的134℃下降到108℃,下降了19.4%。环氧树脂的 T_g 主要受交联度与分子内部自由体积的影响^[20],热处理后试样 T_g 的下降,表明热处理引发了材料内部自由体积的变化。在高温作用下,材料表面及内部可能蒸发出小分子基团,如制样过程脱气不完全会导致内部残余气体或材料中具有挥发性的小分子杂

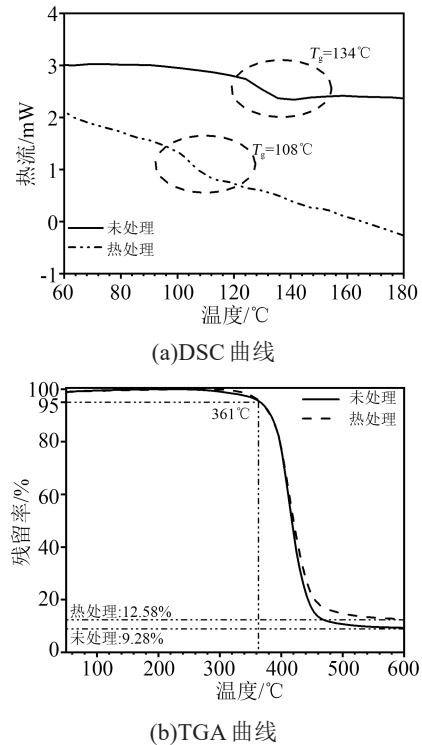


图3 热处理前后试样的热分析曲线
Fig.3 Thermal analysis curves of samples before and after thermal treatment

质,这些物质在热的作用下会挥发,从而在材料内部留下“孔洞”,导致材料内部自由体积变大,从而降低了材料的玻璃化转变温度。从图3(b)可以看出,热处理后试样的残留率由老化前的9.28%上升至老化后的12.58%,表明热处理使得试样中可热降解或挥发的物质含量下降。在TGA测试中,虽然热处理改变了环氧树脂的残留率,但并未改变试样的热分解温度。热处理前后试样的5%分解温度($T_{5\%}$)均为361℃。由此可见,试样的热分解温度主要由材料的化学结构决定,热处理前后热分解温度不变,表明环氧树脂内部分子的化学结构并未发生实质性变化,这一结论可与XPS的结果相互印证。

在TGA曲线240~360℃的温度区间内,热处理前后试样的质量损失行为存在细微差异。在该温度区间,未处理试样存在少量的质量损失,而热处理后试样质量较为稳定,直至发生热分解。这种差异表明热处理后使得环氧树脂在该温度区间可热分解的物质减少。热处理的条件为210℃/48 h,在长时间的高温作用下,材料内部部分基团可能发生了热分解,从环氧树脂中以气体的形式“消失”,并在原处留下“孔洞”,从而使得材料内部自由体积分数增大,导致 T_g 下降,这可与DSC的测试结果相互印证。

2.3 介电性能

2.3.1 体积电阻率

图4为热处理前后环氧树脂的体积电阻率。对试样以相同条件重复测量8次,体积电阻率为8次测量结果的平均值。从图4可以看出,热处理后试样的体积电阻率下降,表明热处理增强了环氧树脂内部载流子的迁移。由2.2节可知,热处理后试样内部自由体积可能增大,有利于载流子迁移,从而导致体积电阻率下降,电导率上升^[21]。

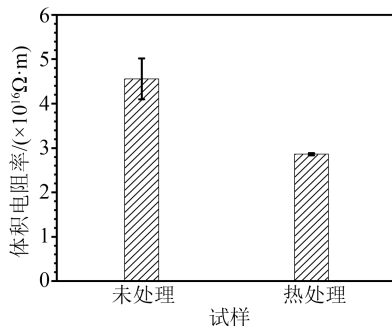


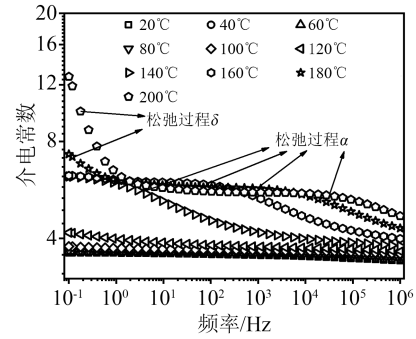
图4 热处理前后试样的体积电阻率

Fig.4 Volume resistivity of samples before and after thermal treatment

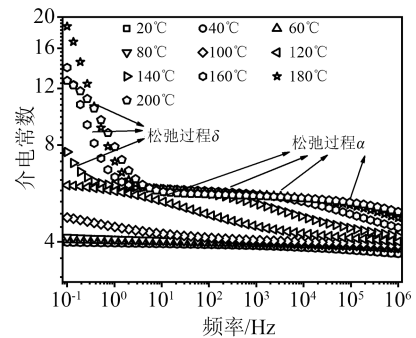
2.3.2 介电温谱

介电常数是材料最基本的介电性能参数,与材料的宏观电气性能,如沿面闪络电压和电气强度等密切相关^[22-23]。而老化对材料内部微观结构的影响,会在其宽频介电谱上予以体现。因此,通过对电介质的宽频介电谱进行介电松弛行为分析,可深入研究材料内部分子结构的变化,进而为绝缘系统的在线监测与寿命预测提供理论支撑。

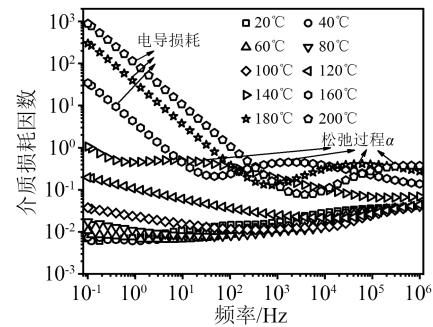
图5为环氧树脂热处理前后的介电常数(复介电常数实部)和介质损耗因数(复介电常数虚部)温谱图。从图5可以看出,热处理前后环氧树脂介电常数的变化趋势并未发生改变。在测试频段,环氧树脂最多存在两个松弛过程,分别为与玻璃化转变温度以上大分子链运动有关的松弛过程 α ,以及与界面极化或热离子极化有关的松弛过程 δ ^[15-16]。从图5(a)~5(b)可以看出,未处理试样的松弛过程 α 出现在140℃及以上,而热处理后试样的松弛过程 α 出现在120℃及以上,且热处理后试样松弛过程 α 的损耗峰明显向高频区域发生偏转。当温度低于 T_g 时,环氧树脂内部的分子链处于“冻结”状态,无法在外电场作用下发生定向偏转,仅在有限的空间内发生微弱的振动,引发偶极子振动极化,参与极化行为。当温度高于 T_g 时,分子内部的自由体积膨胀,主分子链开始“解冻”,极性分子链的偶极矩在外电



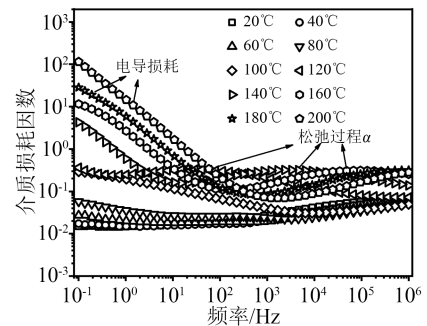
(a)未处理试样介电常数



(b)热处理后试样介电常数



(c)未处理试样介质损耗因数



(d)热处理后试样介质损耗因数

图5 热处理前后试样不同温度下的介电性能

Fig.5 Dielectric properties of samples before and after thermal treatment at different temperatures

场作用下,沿着电场方向发生转向,产生宏观偶极矩,引起转向极化^[15,24]。由于热处理后试样的 T_g 低于未处理试样,因此,热处理后试样的松弛过程 α 率先出现。此外,由于热处理后试样的自由体积要大于未处理试样,因此在相同温度下,其内部分子链

更容易运动,导致其松弛峰对应的频率向高频方向偏移。随着温度进一步升高,环氧树脂中出现另一个松弛过程,即热离子极化^[24]或界面极化^[26]引起的松弛过程 δ 。在图5(a)中,未处理试样的松弛过程 δ 出现在180℃及以上,而在图5(b)中热处理后试样的松弛过程 δ 出现在140℃及以上,说明热处理后低频段的极化更为明显。热离子极化受温度、杂质离子种类与含量的影响^[2],而热处理过程不可能在材料内部引入更多的杂质,因此,认为本文环氧树脂中松弛过程 δ 主要由界面极化构成。界面极化是不均匀介质中的电荷在界面处产生宏观偶极矩的极化现象^[26-27]。由图4可知,热处理后试样的体积电阻率下降,电导率上升,表明载流子迁移能力增强。因此,热处理后将有更多的载流子流经分界面,被试样内的分界面捕获,导致电荷积累增多,使得界面的极化强度增强。同时,由于载流子迁移能力的提升,环氧树脂内部的分界面可在较低的温度下积累足够产生界面极化的电荷,导致热处理后试样界面极化出现的温度相比未处理试样降低。

从图5(c)~(d)可以看出,高温时低频区域环氧树脂电导损耗占主导,而高频区域松弛过程 α 占主导。此外还发现,未处理试样的电导损耗明显强于热处理试样,而且热处理后试样的松弛过程 α 与松弛过程 δ 也存在一定变化。在未处理试样中,低频区域的松弛过程 δ 被电导损耗完全掩盖。而在热处理试样中,电导损耗与松弛过程 δ 对低频损耗均有贡献。

2.4 讨论

从图5中的介电温谱可以发现,热处理对环氧树脂的介电松弛行为有较为明显的影响。聚合物内部存在多种形式的松弛行为与极化行为,包括电子位移极化、原子位移极化、偶极极化和界面极化等^[26]。各个极化所需要的极化时间存在差异,使得材料在不同频段呈现不同的极化行为。因此,不同频率下电介质的介电性能往往存在较大差异。从图5可以看出,环氧树脂的松弛过程 α 出现在高频区,而松弛过程 δ 出现在低频区,因此本文对环氧树脂热处理前后,测试频段的高频(10^6 Hz)介电常数与低频(10^1 Hz)介电常数进行对比与分析。

2.4.1 热处理对环氧树脂高频介电常数的影响

图6为高频下环氧树脂热处理前后的介电常数。低温下环氧树脂高频下的极化行为主要包括电子位移极化、原子位移极化和偶极振动极化^[26],而高温下,除上述3种极化外,还包括偶极转向极化。从图6可以看出,热处理后环氧树脂的高频介电常

数变大,且高频介电常数随温度的变化趋势存在明显的转折点。通过对高频介电常数与温度的变化关系进行线性拟合发现,转折点对应的温度与 T_g 相近。热处理后试样的介电常数上升,表明热处理使得环氧树脂中部分极化得到增强。电介质的电子位移极化和原子位移极化与材料内部的分子结构有关。由上文分析可知,热处理并未改变环氧树脂的分子结构,因此,热处理前后试样的电子位移极化与原子位移极化不会发生明显变化。由热分解曲线可知,热处理后环氧树脂内部小分子蒸发,自由体积增大。这种变化有利于偶极子在原位振动或跳跃极化,导致热处理试样的介电常数增大。随着温度升高,图6中热处理后试样的高频介电常数先进入转折,与其较低的 T_g 对应。

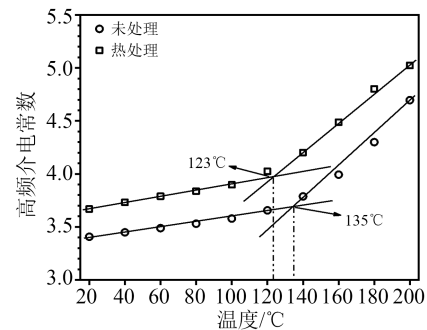


图6 热处理前后试样的高频介电常数

Fig.6 High-frequency dielectric constant before and after thermal treatment

2.4.2 热处理对环氧树脂低频介电常数的影响

图7为环氧树脂热处理前后低频介电常数随温度的变化图。对比图6与图7可以发现,热处理前后,环氧树脂的低频介电常数与高频介电常数存在明显差异。聚合物低频段的极化行为,除高频段的电子、原子等极化外,还存在界面极化与电极极化等^[28-29]。由前文分析可知,环氧树脂在低频区域主要是界面极化,因此,热处理前后环氧树脂低频介电常数的差异主要是界面极化的变化导致。

在140℃以下,环氧树脂热处理前后的低频介电常数随温度的变化趋势相同,但当温度升至140℃以上时,二者出现明显差异。对于未处理试样,其低频介电常数在140℃时存在一个小幅度上升,这是由于温度高于 T_g 时,发生了偶极子转向极化所致。但当温度为160℃时,未处理试样的低频介电常数保持不变。未处理试样的界面极化仅在180℃以上得以体现,因此在此温度之前,低频介电常数存在一个平稳期,此时低频介电常数由电子位移极化、原子位移极化与偶极子极化贡献。但当温

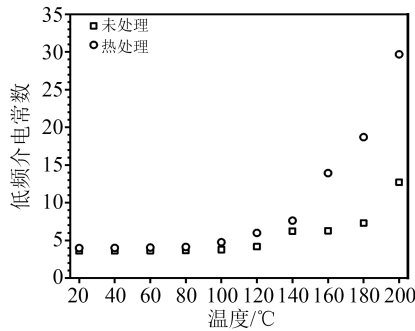


图7 热处理前后试样的低频介电常数

Fig.7 Low-frequency dielectric constant of samples before and after thermal treatment

度高于 180℃ 时,试样介电常数的构成发生变化,除上述极化形式外,还包括界面极化的贡献,导致图 7 中未处理试样的低频介电常数上升至 7.29 和 12.71。对于热处理试样,其界面极化出现的温度为 140℃,且界面极化强度远高于未处理试样,导致 140℃ 以上热处理试样的低频介电常数大幅增加。当温度为 180℃ 和 200℃ 时,热处理试样的低频介电常数分别为 18.69 和 29.67,是未处理试样的 2.56 倍和 2.33 倍。由此可见,热处理使得环氧树脂低频下的介电常数大幅增加。

3 结论

(1) 热处理前后试样的化学键种类不变,且各化学键的含量并未发生明显变化,表明热处理并未使环氧树脂结构发生明显变化。

(2) 热处理使试样的玻璃化转变温度由 134℃ 下降至 108℃,残留率由 9.28% 增大至 12.58%,而 5% 热分解温度不变。在热处理过程中,材料内部部分小分子基团在热的作用下被蒸发,使得内部自由体积增大,导致玻璃化转变温度下降,残留率增加。

(3) 热处理改变了环氧树脂的介电松弛行为,且对材料低频介电常数的影响更为显著。热处理后,环氧树脂的界面极化出现在更低的温度,且极化强度大幅增强,导致高温下的低频介电常数大幅上升,在温度为 180℃ 和 200℃ 时,热处理试样的低频介电常数分别为未处理试样的 2.56 倍和 2.33 倍。

参考文献:

- [1] LI S T, YU S H, FENG Y. Progress in and prospects for electrical insulating materials[J]. High Voltage, 2016, 1(3): 122-129.
- [2] LI M R, SHANG K, ZHAO J H, et al. Constructing fluorine hybrid epoxy polymers with excellent breakdown strength by surface fluorination[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5(12): 10226-10233.
- [3] LI S T, YIN G L, BAI S N, 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, AGNEL S, et al. Electrical properties analysis of micro and nano composite epoxy resin materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3): 651-658.
- [5] 郭鹏翔,李进,孔晓晓,等. 混合酸酐固化双酚 A 环氧树脂介电性能研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(6): 16-21.
- [6] 宁晓秋,王立地,王宇,等. 微米 Al₂O₃/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.
- [7] 杨丽君,廖瑞金,孙会刚,等. 油纸绝缘热老化特性及生成物的对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 22(28): 53-58.
- [8] 孙才新. 输变电设备状态在线监测与诊断技术现状和前景[J]. 中国电力, 2005, 2: 1-7.
- [9] 谢伟,李文博,程显,等. 固体绝缘开关柜环氧树脂电老化绝缘特性研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(6): 115-120.
- [10] 谢伟,杨征,程显,等. 环氧树脂材料热氧老化特性研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(20): 4397-4404.
- [11] 李庆民,刘伟杰,韩帅,等. 环氧树脂绝缘高频电热联合老化中局部放电特性分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 389-395.
- [12] 张星宇,张小明,陈雅琦,等. 复合绝缘子芯棒环氧树脂材料裂解机理研究[J]. 电气技术, 2022, 23(2): 1-6, 25.
- [13] 高坤,史汉桥,孙宝岗,等. 湿热老化对玻璃纤维/环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6): 1147-1152.
- [14] PREETHA P, THOMAS M J, RANJAN R. Electrothermal ageing of epoxy nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 19(6): 2081-2089.
- [15] 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): 304-310.
- [16] 李少龙,王忠军,刘绍光,等. 微米氧化铝填料对环氧树脂高温介电松弛行为的影响[J]. 绝缘材料, 2023, 56(2): 104-109.
- [17] 张施令,宁鑫,彭宗仁. 高压电力设备用环氧树脂材料绝缘性能研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(1): 60-65.
- [18] LI M R, NIU H, SHANG K, et al. Mechanism of ozone-improved surface flashover performance of epoxy composites[J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 289: 126426.
- [19] LI M R, NIU H, SHANG K, et al. Surprising hydrophobic polymer surface with a high content of hydrophilic polar groups[J]. Langmuir, 2022, 38(49): 15353-15360.
- [20] ARAMOON A, BREITZMAN T D, WOODWARD C, et al. Correlating free-volume hole distribution to the glass transition temperature of epoxy polymers[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2017, 121(35): 8399-8407.
- [21] LI Z, MIN D M, NIU H, et al. Enhanced DC breakdown strength of epoxy nanocomposites at elevated temperature and its mechanisms[J]. Journal of Applied Physics, 2021, 130: 065101.
- [22] LI S T, ZHANG T, HUANG Q F, et al. Improvement of surface flashover performance of Al₂O₃ ceramics in vacuum by adopting A-B-A insulation system[J]. Plasma Science and Technology, 2011, 13(2): 235-241.
- [23] 张福州,廖瑞金,袁媛,等. 低介电常数绝缘纸的制备及其击穿性能[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 691-696.

- [24] HUANG Y, MIN D M, LI S T, 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.
- [25] AMOR I B, AROUS M, KSLLEL A. Interfacial polarization phenomena in palm tree fiber-reinforced epoxy and polyester composites[J]. Journal of Composite Materials, 2014, 48(21): 2631-2638.
- [26] 金维芳. 电介质物理学[M]. 第2版. 北京:科学出版社,2003.
- [27] 马万里,田付强,熊雯雯,等. 环氧树脂/氮化硼微纳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.
- [28] MIN D M, LI S T, HIRAI N, et al. Dielectric spectroscopic analysis of degradation in ethylene-propylene-diene copolymer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017, 23(6):3620-3630.
- [29] TIAN F Q, OHKI Y. Charge transport and electrode polarization in epoxy resin at high temperatures[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2014,47(4):045311.

收稿日期:2023-02-26;修回日期:2023-04-06。

作者简介:李明儒(1993-),男(汉族),辽宁鞍山人,博士生,主要从事环氧基电工材料的研究;通信作者:冯阳(1992-),女(汉族),江苏南通人,助理教授,主要从事聚合物电介质的研究;李盛涛(1963-),男(汉族),四川邛崃人,教授,主要从事电介质物理及其应用的研究。