

# 高压电力设备用环氧树脂材料绝缘性能研究

张施令<sup>1</sup>, 宁 鑫<sup>2</sup>, 彭宗仁<sup>3</sup>

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072; 3. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘 要:**通过 Havriliak-Negami(HN)方程对特高压电力设备用环氧树脂材料介电频谱实验数据进行曲线拟合,建立环氧树脂材料HN数学模型参数。在频率为 $10^{-1}\sim 10^6$  Hz和温度为 $-40\sim 200^\circ\text{C}$ 内,使用宽带介电谱仪测量环氧树脂的频谱和温谱,并利用基于改进HN方程的非线性数值计算,对实测数据进行曲线拟合,获取介电频谱数学模型特征参数值。结果表明:应用遗传算法结合最小二乘法的曲线拟合方法可保证拟合参数值的唯一性和准确性;介电频谱特征参数包括直流电导率和松弛极化时间均具有显著的温度依赖性,基本符合Arrhenius公式。

**关键词:**特高压;环氧树脂;介电频谱;Havriliak-Negami(HN)方程;曲线拟合

中图分类号:TM215 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)01-0060-06

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.01.011

## Study on Insulating Properties of Epoxy Resin Material for UHV Power Equipment

ZHANG Shiling<sup>1</sup>, NING Xin<sup>2</sup>, PENG Zongren<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610072, China; 3. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The dielectric spectrum experimental data of epoxy resin material for ultra high voltage (UHV) power equipment was fitted by Havriliak Negami (HN) equation, and the HN mathematical model parameters of epoxy resin material were established. In the frequency range of  $10^{-1}\sim 10^6$  Hz and temperature range of  $-40\sim 200^\circ\text{C}$ , the frequency spectra and temperature spectra of epoxy resin were measured using broadband dielectric spectrometer. Then the experimental data was fitted by the improved HN equation, and the characteristic parameters of dielectric spectrum mathematical model were obtained. The results show that the uniqueness and accuracy of the fitting parameters can be guaranteed combining with genetic algorithm and least square method. The characteristic parameters of dielectric spectra, including direct current conductivity and relaxation polarization time, have significant temperature dependence, which basically accords with Arrhenius formula.

**Key words:** ultra high voltage; epoxy resin; dielectric spectrum; Havriliak-Negami (HN) equation; curve fitting

## 0 引 言

目前,随着我国特高压直流输电线路的建设,大量特高压环氧树脂绝缘电力设备用于换流阀厅、

变电站等,对其性能进行实时评估具有一定的实用意义<sup>[1-3]</sup>。对于环氧树脂绝缘电力设备,较常用的无损监测方法一般为介电频谱测量,而该方法的基础是对环氧树脂绝缘介电性能的准确测量,然后对其进行合理处理后提取用于表征材料性能的特征参数<sup>[4-5]</sup>。本研究制备环氧树脂材料试样,在频率为 $10^{-1}\sim 10^6$  Hz和温度为 $-40\sim 200^\circ\text{C}$ 的条件下,使用宽带介电谱仪测量其频谱和温谱。通过Havriliak-Ne-

收稿日期:2020-02-13 修回日期:2020-03-31

作者简介:张施令(1986-),男(汉族),重庆人,高级工程师,研究方向为超/特高压绝缘结构的优化设计及SF<sub>6</sub>气体绝缘设备运行状态检测和寿命评估。

gami(HN)方程函数,结合非线性数值计算,对实测数据进行曲线拟合,获取介电频谱数学模型特征参数值<sup>[6]</sup>。采用介电频谱拟合方法获取高压电力设备用环氧树脂材料各特征参数值,为深入了解高压电力设备的介电性能提供一种有效方法。

## 1 修正HN模型及特征参量

环氧树脂在HN模型函数下的复介电常数 $\varepsilon_{\text{HN}}^*$ 可表示为式(1)。

$$\varepsilon_{\text{HN}}^*(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\Delta\varepsilon}{(1 + (i\omega\tau_{\text{HN}})^{\beta})^{\gamma}} \quad (1)$$

式(1)中: $\varepsilon_{\infty}$ 为光频相对介电常数; $\varepsilon_s$ 为静态相对介电常数<sup>[7]</sup>; $\Delta\varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}$ ; $\tau_{\text{HN}}$ 为HN模型下的松弛极化时间; $\beta$ 、 $\gamma$ 为松弛时间的分布参数,满足 $0 < \beta, \beta\gamma \leq 1$ 。又有 $\varepsilon_{\text{HN}}^*(\omega) = \varepsilon'_{\text{HN}}(\omega) - i\varepsilon''_{\text{HN}}(\omega)$ ,其中 $\varepsilon'_{\text{HN}}$ 和 $\varepsilon''_{\text{HN}}$ 分别为复介电常数的实部和虚部,如式(2)~(5)所示。

$$\varepsilon'_{\text{HN}} = r(\omega) \cos[\gamma\psi(\omega)] \Delta\varepsilon + \varepsilon_{\infty} \quad (2)$$

$$\varepsilon''_{\text{HN}} = r(\omega) \sin[\gamma\psi(\omega)] \Delta\varepsilon \quad (3)$$

$$r(\omega) = [1 + 2(\omega\tau_{\text{HN}})^{\beta} \cos(\beta\pi/2) + (\omega\tau_{\text{HN}})^{2\beta}]^{-\gamma/2} \quad (4)$$

$$\psi(\omega) = \arctan\left\{ \frac{\sin(\beta\pi/2)}{[(\omega\tau_{\text{HN}})^{\beta} + \cos(\beta\pi/2)]} \right\} \quad (5)$$

因此单一HN模型函数存在5个特征参量: $\varepsilon_{\infty}$ 、 $\Delta\varepsilon$ 、 $\tau_{\text{HN}}$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 。根据宽带介电谱试验数据可拟合得到上述5个特征参数的具体数值<sup>[8-9]</sup>,并由式(6)计算 $\varepsilon''_{\text{HN}}$ 出现峰值的频率点 $\omega_p$ 。

$$\omega_p = (1/\tau_{\text{HN}}) [\sin((\beta\pi)/(2 + 2\gamma))]^{1/\beta} [\sin((\beta\gamma\pi)/(2 + 2\gamma))]^{1/\beta} \quad (6)$$

当测试温度低于环氧树脂材料的玻璃化转变温度( $T_g$ )时,一般用式(2)~(6)共5个特征参数即可表征该材料的介电性能。当测试温度高于 $T_g$ 后,材料直流电导过程显著,需在式(3)中引入式(7)。

$$\varepsilon'' = \sigma_0 / (2\pi f \varepsilon_0) \quad (7)$$

式(7)中: $\sigma_0$ 为表征材料直流电导率的特征参量; $\varepsilon_0$ 为真空介电常数。对于环氧树脂材料,在高温(高于170℃)条件下,由于电极和M-W极化(Maxwell-Wagner polarization)的综合作用<sup>[10]</sup>,需对前述HN模型进一步修正,如式(8)~(9)所示。

$$\varepsilon'_{\text{HN}} = r(\omega) \cos[\gamma\psi(\omega)] \Delta\varepsilon + \varepsilon_{\infty} + A\omega^{-n} \quad (8)$$

$$\varepsilon''_{\text{HN}} = r(\omega) \sin[\gamma\psi(\omega)] \Delta\varepsilon + a(\sigma_0 / (i\varepsilon_0 \omega^s)) \quad (9)$$

式(8)~(9)中: $A$ 、 $n$ 、 $a$ 、 $s$ 为表征上述极化过程的特征参量。

## 2 试样制备与测试

试样制备中使用的环氧树脂与高压电力设备用环氧树脂绝缘材料一致。将其制作成边长为90 mm的正方形试样,然后装入模具中,在110℃下真空干燥72 h,去除试样中的水分。将完成脱气的环氧树脂在适当的真空度和温度下浇注到模具中。浇注结束后,加热模具使样品固化,降温后即得试验用材料试样。用扫描电子显微镜(SEM)观察试样表面和截面的微观结构。使用宽带介电谱仪测试其介电频谱和温谱,圆片试样直径为20 mm,厚度约为1 mm,频率和温度范围分别为 $10^{-1} \sim 10^6$  Hz和 $-40 \sim 200$ ℃。

## 3 环氧树脂热学及电气性能研究

特高压环氧树脂绝缘电力设备在直流稳态条件下的内部电场分布取决于环氧树脂材料的体积电阻率,而材料的体积电阻率对温度较为敏感,因此在运行条件下电力设备内部的温度分布将导致不同的电场分布<sup>[11]</sup>,有必要研究环氧材料体积电阻率与温度的定量关系。首先,将试样放在预设温度的烘箱中,试样通过三电极与高阻计连接。当烘箱内部温度达到稳定后,记录电阻值,然后应用经典公式计算体积电阻率。在设定温度下,测试试样的3个电阻值,取其平均值作为试样的最终电阻值。图1为纯环氧材料体积电阻率与温度的关系曲线。

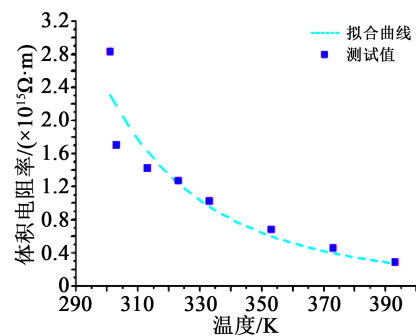


图1 环氧材料体积电阻率与温度的关系

Fig.1 The relationship between volume resistivity and temperature of epoxy materials

从图1可以看出,环氧材料体积电阻率随温度的升高而显著降低,可通过式(10)定量描述该试验结果。

$$\rho = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (10)$$

式(10)中: $\rho$ 为体积电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $T$ 为绝对温度,K;

$A$ 、 $B$ 为常数。用式(10)拟合上述试验数据,可得常数 $A$ 、 $B$ 分别为 $2.519 \times 10^{11}$ 和2746。

一般来说,特高压电力设备内部绝缘厚度为0.5~3.0 mm,而实际工程应用中,易发生设备绝缘间径向绝缘击穿,因此有必要研究环氧试样击穿概率与电场强度的定量关系,用于电力设备绝缘结构设计,以厚度为0.25 mm的试样为例,其结果如图2所示。

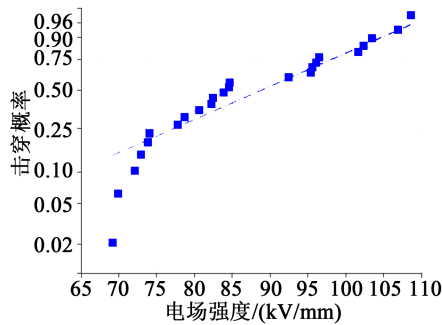


图2 环氧试样击穿概率与电场强度的关系

Fig.2 The relationship between breakdown probability of epoxy and electrical field intensity

击穿试验中采用球-球电极,试样置于变压器油中。考虑到换流变套管一般在1 min工频试验中发生芯体内部径向击穿,因此在套管设计中主要考虑材料工频条件下的电气强度。图2表明环氧试样击穿概率随电场强度增大而增大,因此在套管设计中需要尽可能优化其结构尺寸,降低套管芯子环氧材料承受的电场强度。

使用激光导热分析仪测量纯环氧材料和环氧浸纸复合材料的导热参数,不同温度下的导热系数和热容如图3所示。从图3可见,在室温(25℃)下,纯环氧材料的导热系数约为0.213 W/(m·K)。在25~150℃内随着温度的升高,导热系数和热容呈现先增大后减小的趋势,且均在125℃附近出现最大

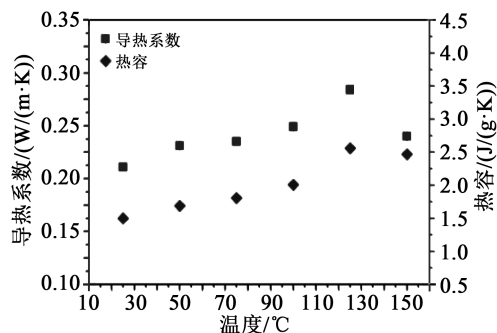


图3 环氧材料导热系数和热容随温度的变化

Fig.3 Variation of thermal conductivity and heat capacity of epoxy materials with temperature

值。环氧热容在25~150℃内基本保持在1.5~2.5 J/(g·K)。对纯环氧材料使用热膨胀分析仪测量热膨胀参数,线膨胀系数及绝对伸长量变化曲线如图4所示。

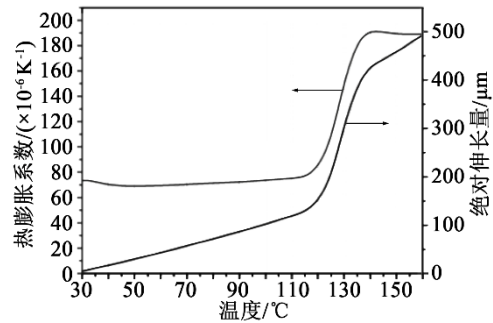


图4 环氧材料的热膨胀曲线

Fig.4 Thermal expansion curves of epoxy materials

从图4可以看出,纯环氧材料的热膨胀系数和绝对伸长量在30~150℃均呈现先缓慢上升,之后骤然上升的变化趋势。这个现象表明,在高压电力设备运行中,若温度在30~120℃,则设备内部由于热应力导致的形变相对较小;但若长时间超过130℃,则内部将由于热应力作用而产生“裂纹”等绝缘缺陷。

#### 4 环氧树脂介电性能研究

在20、90、170℃条件下对环氧树脂介电谱的试验结果进行讨论,分别对应特高压直流套管芯子在空载、额定、过载运行下的典型温度值。

##### (1) 20℃下的拟合结果

图5为20℃下环氧材料介电常数实部 $\epsilon'$ 、虚部 $\epsilon''$ 的频率依赖曲线,用单一HN方程对实测值进行拟合。从图5可以看出,随着频率的增加,介电常数实部 $\epsilon'$ 逐渐减小,而虚部 $\epsilon''$ 却逐渐增大,符合 $\beta$ 介电弛豫特征。在 $10^{-1}$ ~ $10^5$  Hz的中低频段,单一HN方程对实测值拟合效果良好。在 $10^5$ ~ $10^6$  Hz的高频段,虚部 $\epsilon''$ 与理论曲线未能完全拟合,因为该频段发生了 $\gamma$ 松弛极化。

图6是20℃下以环氧材料介电常数实部 $\epsilon'$ 为横坐标、虚部 $\epsilon''$ 为纵坐标绘制的复数平面图,又称Cole-Cole图。

图6中隐含着频率参数,当频率从低向高增加时,呈现出从右向左的“偏弧型”特征。圆弧曲线与横坐标相变的左截距是光频相对介电常数 $\epsilon_\infty$ ,右截距是静态相对介电常数 $\epsilon_s$ 。大部分实测点位于右侧圆弧上,表征 $\beta$ 极化过程,偏离圆弧的少量数据点为发生的 $\gamma$ 极化过程,单一HN方程中5个拟合参数的具体数值示于图6中。

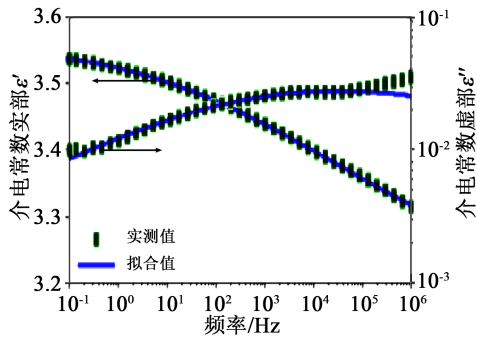


图5 20℃下介电谱的频率依赖曲线  
Fig.5 Frequency dependence curves of dielectric spectra at 20℃

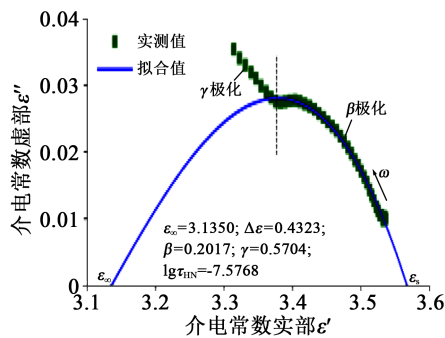


图6 20℃下的复数平面图  
Fig.6 Complex plane at 20℃

(2)90℃下的拟合结果

图7为90℃下环氧材料介电谱的频率依赖曲线,用不考虑电导项的二项式HN方程对实测值进行拟合。

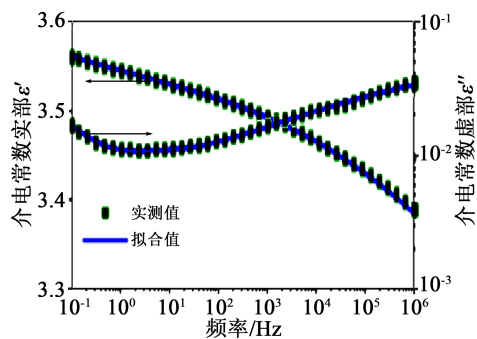


图7 90℃下介电谱的频率依赖曲线  
Fig.7 Frequency dependence curves of dielectric spectra at 90℃

从图7可以看出,随着频率的增加,介电常数实部ε'逐渐减小,虚部ε''在10<sup>-1</sup>~10<sup>0</sup>的低频段呈减小趋势,在10<sup>0</sup>~10<sup>6</sup>的中高频段增大,符合α、β介电弛豫相叠加的特征。绘制90℃下的复数平面图如图8所示,可分别观察到α、β极化过程的局部Cole-Cole

圆弧,两极化过程的拟合参数同样示于图8中。从图8可以看出,实测值与拟合值吻合较好,证明无电导项的二项式HN方程在该温度下具有适用性。

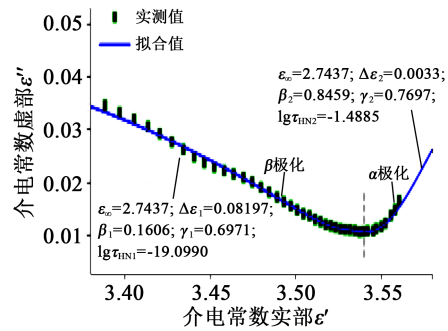


图8 90℃下的复数平面图  
Fig.8 Complex plane at 90℃

(3)170℃下的拟合结果

图9为170℃下环氧材料介电谱的频率依赖曲线,用考虑电导项的单项HN方程对实测值进行拟合。从图9可以看出,随着频率的增加,α极化过程显著:在10<sup>-1</sup>~10<sup>1</sup> Hz的低频区,各种极化均来得及建立,ε'→ε<sub>∞</sub>。在10<sup>1</sup>~10<sup>5</sup> Hz的松弛区,外施电场的周期与松弛时间相近,在α松弛极化建立过程中ε'显著减小。在10<sup>5</sup>~10<sup>6</sup> Hz的高频区,松弛极化来不及建立,介质极化全部由位移极化所贡献,ε'→ε<sub>∞</sub>。虚部ε''表现出单峰特点,介质损耗峰值ε''<sub>max</sub>出现在特征频率f<sub>c</sub>=10<sup>3</sup> Hz附近。在10<sup>-1</sup>~10<sup>1</sup> Hz的低频段,ε''在双对数坐标下的斜率为-0.9404,主要是由于直流电导极化的影响。图10为复数平面图,给出了9个拟合参数的具体值,可见实测值与拟合值吻合较好,且存在电导极化引起的“翘尾”现象。

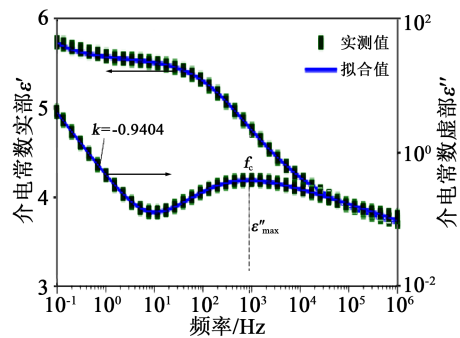


图9 170℃下介电谱的频率依赖曲线  
Fig.9 Frequency dependence curves of dielectric spectra at 170℃

5 分析及讨论

5.1 温度平移特性

在温度连续变化过程中,材料介电谱具有温度

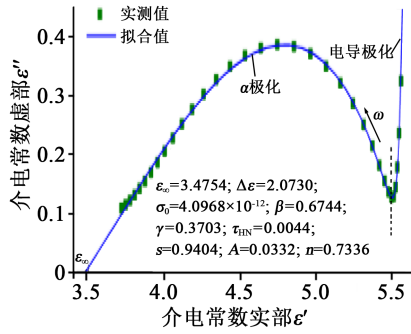


图 10 170℃下的复数平面图  
Fig.10 Complex plane at 170℃

平移特性。以 160~200℃的高温区域为例，以 10℃为温度间隔，对 5 个温度下的介电谱数据进行拟合，结果如图 11 所示。

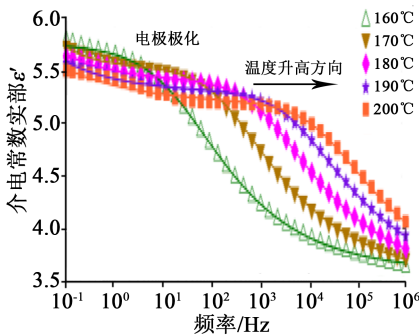


图 11 介电谱的温度平移特性  
Fig.11 Temperature shift characteristics of dielectric spectra

从图 11 可以看出，随着温度的升高， $\epsilon'$ 表现出温度平移特性，即具有向高频区域移动的趋势。同时随着温度的升高，电导极化加剧， $\alpha$ 极化的损耗峰向高频区域移动，这主要是由于松弛时间 $\tau$ 与温度 $T$ 近似成指数关系( $\tau \propto e^{u/kT}$ ,  $k$ 为玻耳兹曼常数,  $u$ 为分子活化能, 与温度基本无关):  $T$ 升高,  $\tau$ 降低, 特征频率 $f_c$ 往高频方向移动。将 Cole-Cole 图存在的温度平移特性示于图 12 中。

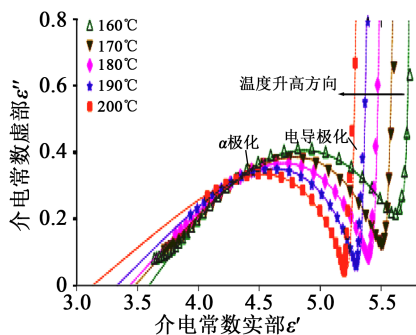


图 12 复数平面的温度平移特性  
Fig.12 Temperature shift characteristics of complex plane

从图 12 可以看出，若温度进一步升高， $\alpha$ 松弛时间 $\tau$ 很小， $\alpha$ 极化建立得很快，可以跟上电场变化，使得 $\alpha$ 松弛极化损耗很小因而可以忽略，电导损耗则随温度的升高而迅速增加，此时介质损耗主要是电导损耗。

### 5.2 温谱特性及特征参数的 Arrhenius 拟合

对环氧材料介电谱温度依赖特性进行分析，在-100~200℃取 50 Hz 频率下的温谱曲线绘于图 13 中。从图 13 可以看出，介电常数实部 $\epsilon'$ 在-100~130℃基本不变，高于 130℃后 $\epsilon'$ 迅速上升，并在 188℃附近出现峰值  $D$ 。介电常数虚部 $\epsilon''$ 在-100~200℃温度域内存在两个峰值  $A$  和  $B$ ，分别在-25℃和 170℃附近，同时在 110℃附近存在 $\epsilon''$ 最低值  $C$ 。实部 $\epsilon'$ 的峰值  $D$ 滞后于虚部 $\epsilon''$ 的峰值  $B$ ，原因在于在高温区尽管极化建立的速度很快，但并不表示极化已经完全建立，只有当温度升高到使极化完全建立时 $\epsilon'$ 才能达到最大值。

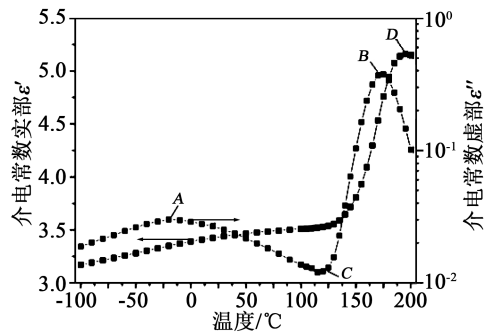


图 13 50 Hz 下介电谱的温度依赖曲线  
Fig.13 Temperature dependence curve of dielectric spectra at 50 Hz

在电力设备设计中，环氧材料在额定运行状态下的温度处于 110℃附近，此时 $\epsilon'$ 基本保持稳定，且 $\epsilon''$ 处于最小值附近。在各温度点下对介电谱频率特性进行拟合处理，结果如图 14 所示，并获取拟合参数，包括直流电导率 $\sigma(T)$ 和松弛极化时间 $\tau(T)$ ，发现其具有温度依赖性，基本符合 Arrhenius 公式，如式 (11)~(12)所示。

$$\frac{1}{\tau(T)} = A_\tau \exp\left(-\frac{E_\tau}{RT}\right) \quad (11)$$

$$\sigma(T) = A_\sigma \exp\left(-\frac{E_\sigma}{RT}\right) \quad (12)$$

式(11)~(12)中: $A_\tau$ 和 $A_\sigma$ 分别为 Arrhenius 方程的指前函数; $E_\tau$ 和 $E_\sigma$ 为活化能; $R$ 为玻耳兹曼常数; $T$ 为绝对温度<sup>[12]</sup>。

从图 14 可以看出，直流电导率随温度倒数的增加而减小，平均极化时间随温度倒数的增加而增

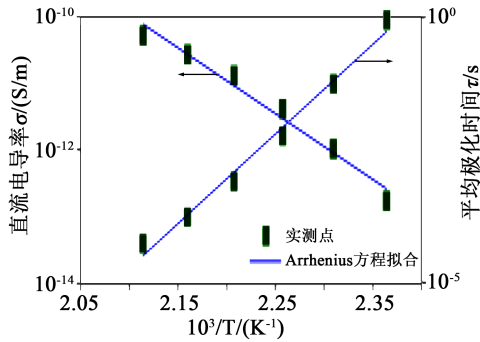


图 14 直流电导率及平均极化时间与温度倒数的关系

Fig.14 Relationship between the reciprocal of temperature and DC conductivity and average polarization time

大, 试验数据与 Arrhenius 方程拟合较好。平均极化时间  $\tau(T)$  在  $10^{-5} \sim 10^0$  s, 较一般绝缘材料在相同温度下的极化时间长, 原因在于环氧材料介质界面上存在电荷积聚而发生界面极化过程。实际上, 介质的松弛时间是围绕其最大概率值的一个分布, 绘制出环氧材料的介电松弛时间分布如图 15 所示。从图 15 可以看出, 材料的松弛时间分布随温度的升高而变窄, 同时中心介电松弛极化时间向高频移动, 这与理论预测结果一致。根据分子松弛相关理论, 当温度足够高时, 高聚物松弛时间分布趋向于单松弛时间模型。松弛时间分布参数  $\beta$ 、 $\gamma$  值随温度的变化也示于图 15 中, 其中  $\beta$  表征松弛时间分布宽度, 其值越大分布越窄;  $\gamma$  表征松弛时间分布的对称性, 其值越小分布对称性越差。

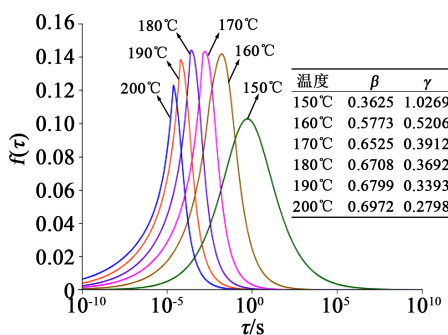


图 15 不同温度下介电松弛时间分布图

Fig.15 Dielectric relaxation time distribution at different temperatures

## 6 结论

(1) 用理论公式  $\rho = Ae^{B/T}$  定量确定了环氧材料体积电阻率与温度的非线性关系: 环氧材料的体积电

阻率随温度的升高降低; 用理论公式  $E_b = Kd^p$  定量确定了环氧材料工频交流电气强度与试样厚度的非线性关系: 环氧材料的工频交流电气强度随试样厚度的增加显著降低。纯环氧试样在导热和热膨胀性能上区别较大, 热学性能试验数据表明特高压环氧树脂绝缘电力设备长时间运行温度最高应保持在 125°C 左右。

(2) 利用改进 HN 方程的非线性数值计算, 对实测数据进行曲线拟合。在空载 20°C、额定 90°C、过载 170°C 的条件下, 实测数据与拟合数据均能较好吻合。从低温到高温,  $\gamma$ 、 $\beta$ 、 $\alpha$  极化峰依次出现, 且在 160°C 以后观察到显著的直流电导极化过程。

(3) 环氧材料介电谱对频率、温度均具有较强的依赖性, 且在 160~200°C 的高温区发现了明显的温度平移特性, 同时材料直流电导率和松弛极化时间均具有显著的温度依耐性, 基本符合 Arrhenius 公式。

## 参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] 申巍, 曹雯, 吴锴. 环氧/纸复合材料击穿特性及空间电荷的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 1-6.
- [3] 陈少卿, 彭宗仁, 王霞. 玻璃化温度对环氧树脂空间电荷分布的影响[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 227-230.
- [4] 刘君, 周利军, 吴广宁. 纳米改性变压器油-纸复合绝缘频率响应特性[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 144-153.
- [5] MIKULECKY A, STIH Z. Influence of temperature, moisture content and aging on oil impregnated paper bushings insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(4): 1421-1427.
- [6] WOLNY S, ADAMOWICZ A, LEPICH M. Influence of temperature and moisture level in paper-oil insulation on the parameters of the Cole-Cole model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 246-250.
- [7] WOLNY S, ZDANOWSKI M. Analysis of recovery voltage parameters of paper-oil insulation obtained from simulation investigations using the Cole-Cole model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(6): 1676-1680.
- [8] 朱文兵, 辜超, 王建, 等. 变压器套管典型缺陷检测技术研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(8): 84-89.
- [9] BOUANGA C V, COUDERC H, FRECHETTE M F, et al. Dielectric study of low glass transition temperature cycloaliphatic UV-curable epoxy networks[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(4): 1269-1282.
- [10] 徐浩, 邵丹, 杨鸿辉, 等. Ti/Sb-SnO<sub>2</sub> 电极电解后的表面状态变化研究[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(2): 77-82.
- [11] 缪金, 董明, 任明. ZnO 纳米改性变压器油的相对介电常数模型[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(8): 121-126.
- [12] 曹有名, 孙军. 聚酯改性环氧复合体系的介电性能[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(8): 75-78.