

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.10.013

力热应力下电缆绝缘用乙丙橡胶的介电谱研究

刘兆贵, 雷志鹏, 王 业, 石志杰, 韩坤莹, 王思宇, 刘 洋

(太原理工大学矿用智能电器技术国家地方联合工程实验室, 煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 太原 030024)

摘要: 采煤机拖拽电缆在实际运行中常受到电、热、机械应力的共同作用, 致使其绝缘性能变差。为了能掌握力热应力同时作用下采煤机拖拽电缆用乙丙橡胶绝缘的性能, 文中测量了挤压力与温度作用下乙丙橡胶的介电频谱, 并研究了其复介电常数和复电导率实部受温度和挤压力的影响规律。随后用 Havriliak-Negami 函数拟合了复介电常数虚部频谱, 并提取了函数模型的特征参数, 分析了特征参数与温度和挤压力的关系。结果表明: 乙丙橡胶绝缘的复介电常数和复电导率实部不仅与温度和频率密切相关, 复介电常数还与挤压力相关, 而复电导率实部与挤压力负相关。乙丙橡胶绝缘的复介电常数虚部频谱满足 Havriliak-Negami 函数, 分析特征参数可得出, 温度对直流电导率的影响和挤压力对损耗强度的影响是造成乙丙橡胶绝缘复介电常数变化的原因。

关键词: 乙丙橡胶; 介电谱; 温度; 挤压力; 电缆

Study on Dielectric Spectroscopy of EPR for Cable Insulation Under Mechanical and Thermal Stresses

LIU Zhaogui, LEI Zhipeng, WANG Ye, SHI Zhijie, HAN Kunying, WANG Siyu, LIU Yang

(Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, National & Provincial Joint Engineering Laboratory of Mining Intelligent Electrical Apparatus Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The towing cable for coal cutters is always subjected to the joint effects of electric, thermal and mechanical stresses in actual operation, which severely deteriorates its insulation performance. In order to be able to master the insulation performance of ethylene propylene rubber (EPR) for the towing cable of coal cutter under simultaneous action of mechanical and thermal stress, the dielectric spectroscopy of the EPR under the action of the extrusion force and temperature is measured in this paper, and the influence of temperature and extrusion force on the real part of complex permittivity and complex conductivity of EPR is studied. Then, the spectroscopy of imaginary part of complex permittivity is fitted by Havriliak-Negami function, the characteristic parameters of the Havriliak-Negami function are extracted and the relationship among the characteristic parameters, temperature and the extrusion force is analyzed. The result shows that the complex permittivity and the real part of complex conductivity of EPR are not only closely related to temperature and frequency, but the complex permittivity is also related to extrusion force and the real part of the complex conductivity is negatively related to the extrusion force. The imaginary part of complex permittivity of EPR is in good agreement with the Havriliak-Negami function. It is concluded from the analysis of the characteristic parameters that the influence of temperature on DC conductivity and of the extrusion force on loss strength is the main cause leading to complex permittivity variation of EPR insulation.

Key words: EPR; dielectric spectroscopy; temperature; extrusion force; cable

收稿日期: 2024-01-20; 修回日期: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51977137)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51977137).

0 引言

乙丙橡胶(ethylene propylene diene monomer, EPDM)作为乙烯、丙烯和非共轭二烯烃为主要成分的三元共聚物,以其优异的电性能、耐热耐腐蚀等性能已成为核电站、煤矿、船用电缆的主要绝缘材料^[1-9]。受益于电牵引综合机械化采煤装备的国产化和智能化,中国已建成千万吨级煤矿50余处,采煤机装机功率也已达3 000 kW,供电电压达到3.3 kV。采煤机拖拽电缆在运行过程中会跟随采煤机沿整个工作面在狭窄的空间中来回连续移动。因此要求采煤机拖拽电缆用乙丙橡胶绝缘在保证优异绝缘性能的同时,又要具有良好的耐弯曲、抗拉伸、高抗剪强度、耐热等性能,以适应综采工作面运行工况。然而,综采工作面环境恶劣,潮湿、粉尘、瓦斯、冒顶、积水等因素给电气设备的可靠运行带来安全隐患^[10-11]。在实际运行中,乙丙橡胶绝缘不仅会遭受电和热应力的作用,各种拉拽、挤压等机械应力也会频繁出现,严重影响乙丙橡胶的性能和电缆的使用寿命^[12-19]。

针对于乙丙橡胶在多应力下的研究,国外学者研究得较早。MAZZANTI G介绍了适用于高压电缆用交联聚乙烯和乙丙橡胶的单应力和复合应力加速寿命试验方法,为研究力、热应力和多应力下乙丙橡胶的耐久性提供了评价指标^[20]。FABIANI D等对核电站电缆的可靠性进行建模,并开发一个模型,用于预测核电站低压电缆在伽马辐射应力下的剩余可靠性,该模型估计了此类电缆在运行中承受随机应力超调的概率^[21]。国内主要集中在单应力下的研究,刘英等对交联聚乙烯与乙丙橡胶界面中的绝缘试样施加了不同电应力与机械应力,并用红外光谱等技术进行分析,结果表明机械拉伸应力与电应力协同促进试样部分基团破坏并氧化^[22]。雷志鹏等研究了乙丙橡胶介电常数、电导率和介电模量等参数对频率和温度的依赖关系,结果表明,乙丙橡胶的介电常数和电导率与温度和频率密切相关^[23]。韩永进等采用热重分析法研究了三元乙丙橡胶材料的热分解特性,并计算出材料的热分解活化能,然后参照ASTM E1877中的方法建立了绝缘材料的热寿命方程^[24]。李志辉使用核磁共振氢谱与红外光谱对乙丙橡胶在紫外光老化下进行了研究,得出老化后的试样抗紫外光老化的性能变差^[25]。王安迎等采用热空气加速老化对乙丙橡胶进行了不同温度下的老化试验,并对其寿命进行了预测^[26]。综上可见,国内外主要研究单应力或电热应力作用下乙丙

橡胶绝缘老化机理,对于多应力下研究较少,尤其是在机械应力和热因子同时作用时电缆用乙丙橡胶的性能研究更少。

为了进一步掌握力热应力同时作用下乙丙橡胶的介电性能,文中以复介电常数为主,测量了在挤压力和热因子同时作用下的矿用高压电缆用乙丙橡胶绝缘的复介电常数频谱,分析了复介电常数以及复电导率实部随温度和挤压力的变化规律,然后通过对复介电常数虚部的拟合,提取特征参量,为电缆用乙丙橡胶在多应力作用下的绝缘性能评估提供参考价值。

1 实验设置

1.1 试样制备

文中根据《GB 7594.8—1987 电线电缆橡皮绝缘和橡皮护套第8部分:90℃橡皮绝缘》标准,使用经过密炼和滤橡的DCJ30M型乙丙橡胶胶片制作试样。制样时先将模具放在平板硫化机上预热至120℃,然后使未被硫化的胶片在模具上预热1 min,最后在压力不低于10 MPa和160℃下对胶片热压硫化15 min。完成后,取出试样,放入温度为80℃的真空干燥箱静置48 h,消除硫化产生的副产物和机械应力。测量时将试样裁剪成厚度约为0.5 mm,直径为25 mm的圆片。

1.2 多应力介电谱测量方法

力热应力下的宽频介电谱测量系统原理图见图1。所用宽频介电阻抗谱测量系统为NOVOCONTROL Concept 80,测量电压为3 V,测量电极直径为20 mm。分别测量了温度为30~150℃(温度间隔30℃)和挤压力为1、2、4、6、8 bar下乙丙橡胶的复介电常数频谱。

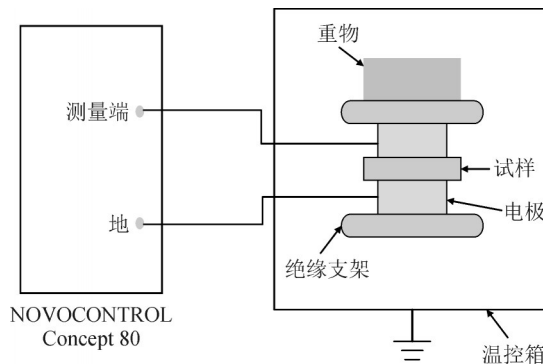


图1 介电谱测试系统

Fig. 1 Dielectric spectroscopy measurement system

为避免温度和挤压力施加瞬间的不确定性对测量带来影响,测量时对试样施加挤压力且温度达到预定值30 min后再开始测量。同时,施加挤压力

后试样厚度会随挤压程度不同, 发生变化。如挤压力为 8 bar 时厚度会减小约 13%。然而, 在文中的测量条件下, 与温度和挤压力相比, 厚度变化引起介电谱变化并不明显。另外, 温度升高后, 试样会发生轻微膨胀, 厚度反而有所恢复, 进一步减小了因厚度造成的影响。因此, 在文中的介电谱测量时, 同一温度下不同挤压力的介电谱均采用同一试样, 复介电常数计算时使用的厚度均也为未施加挤压力时的试样厚度, 以保证误差的一致性。

2 实验结果与分析

2.1 温度对 EPDM 介电频谱的影响

不同温度下 EPDM 的复介电常数频谱见图 2。从图 2 可以得出, 当频率低于约 10 Hz 时, 随着温度的升高 EPDM 的复介电常数实部和虚部均逐渐升高。频率越低温度升高引起的复介电常数实部和虚部增大越明显。当温度升高到 150 °C 时, 复介电常数实部从约 3 最大升高到约 26, 虚部则最大升高到约 80。这是因为温度的升高使得 EPDM 内参与极化的载流子数增多, 即低频下受温度主要影响的直流电导升高, 损耗增大。此外, 频率较低时, EPDM 绝缘内部的参与偶极子极化或界面极化的电荷, 以及外部积聚的可参与电极极化的电荷都能跟上电场频率的变化, 能充分地完成极化过程, 是造成频率较低时, 温度升高后, 复介电常数实部和虚部升高的另一个原因。相反, 当频率增大后, 参与极化过程的电荷无法跟随电场的变化, 所以复介电常数实部和虚部均未随温度发生明显的变化。

不同温度下 EPDM 复电导率实部频谱见图 3。由图 3 可知, 随着频率的升高, 复电导率实部 σ' 逐渐增大。在频率较低时, 随温度的升高, σ' 也逐渐明显增大, 每一个温度等级都比低一个温度等级的复电导率实部值高出一个数量级。此时的复电导率实部近似等于 EPDM 的直流电导率。根据电导率 σ 与载流子的电荷量 q 、介质中载流子的浓度 n_0 和电场作用下的载流子迁移率 μ 的关系, 即 $\sigma = qn_0\mu$ 可知, 在一定场强下, 随着温度的升高, EPDM 内的极性基团和离子数增多, 内部的载流子数目增加, 使得 EPDM 内部载流子浓度或者迁移率提高, 从而导致其电导率的增加。而直流电导率的增加也是频率较低时 EPDM 的复介电常数虚部随温度升高而增大的原因^[27-28]。

2.2 挤压力与温度联合作用对 EPDM 介电频谱的影响

不同挤压力以及不同温度下 EPDM 的复介电常数频谱见图 4。从图 4 可以得出, 当频率低于 10 Hz

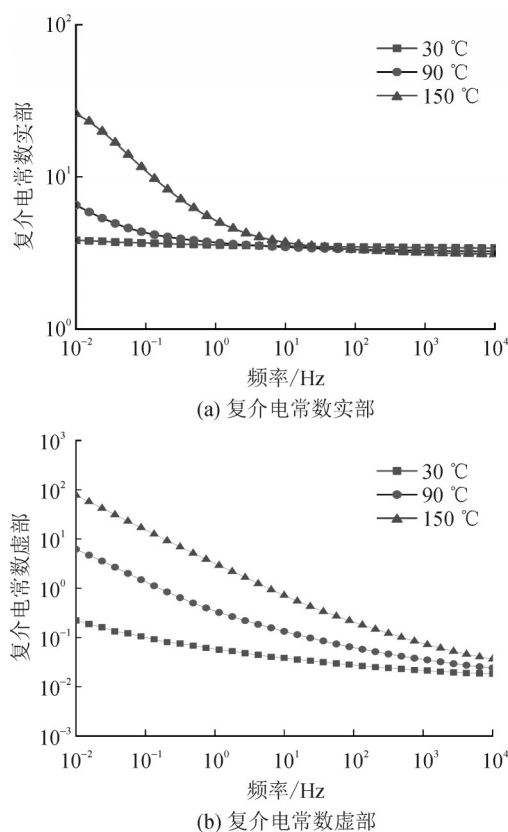


图 2 不同温度下 EPDM 复介电常数频谱

Fig. 2 Complex permittivity spectroscopy of EPDM at different temperatures

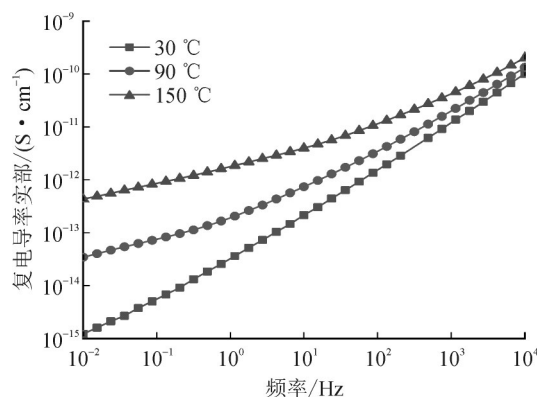
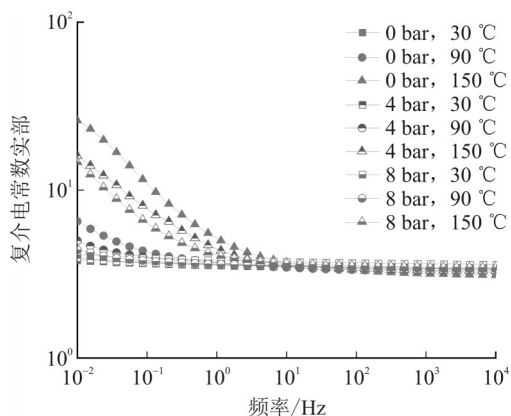


图 3 不同温度的复电导率实部频率曲线

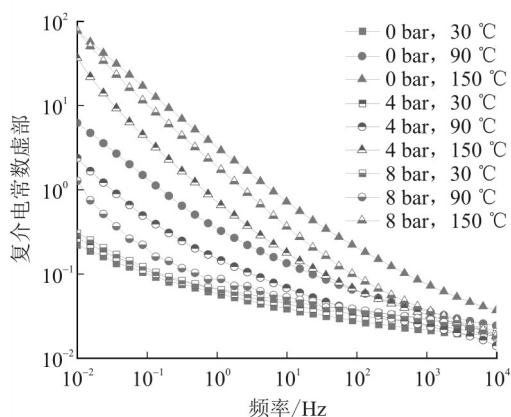
Fig. 3 Real frequency curve of complex conductivity at different temperatures

时, 随着温度的升高, 挤压力对 EPDM 的复介电常数实部和虚部影响逐渐明显了起来。频率越低, 挤压力对复介电常数实部和虚部影响也越大。对于复介电常数实部, 当温度为 150 °C 时, 未施加挤压力的值约 26, 施加 4、8 bar 挤压力的值约 15、16, 可知施加挤压力后复介电常数实部值明显减小。原因是 EPDM 在承受挤压力后, 微观粒子发生规则运动, 导致原本形成的电容结构遭到破坏, 存储能量减小, 而复介电常数实部正比于 EPDM 每周期重复存储的能量, 因此复介电常数实部随着压强的增大而减

小。EPDM复介电常数低频温谱图见图5。由图5(a)复介电常数实部温谱图可知,在低频0.01 Hz时,整体趋势呈现出挤压力越大,复介电常数实部值越小的规律。对于复介电常数虚部,在温度为30 ℃时,挤压力对其值从数量级来看影响不大,且此时无规律可循;而当温度为150 ℃时,在频率较低时压强对其影响很大。



(a) 复介电常数实部

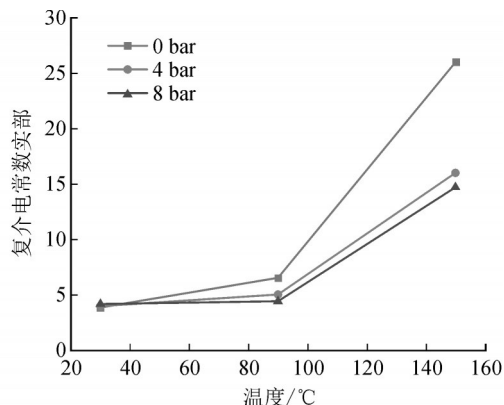


(b) 复介电常数虚部

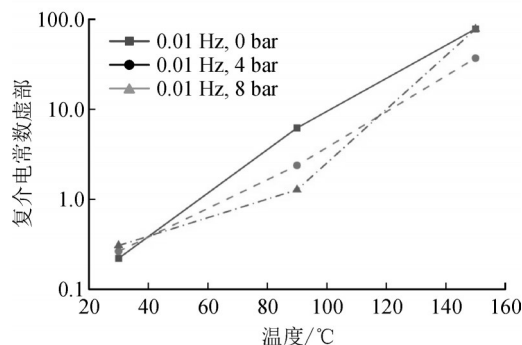
图4 不同挤压力 and 不同温度下EPDM复介电常数频谱

Fig. 4 Spectroscopy of complex permittivity of EPDM under different extrusion force and temperature

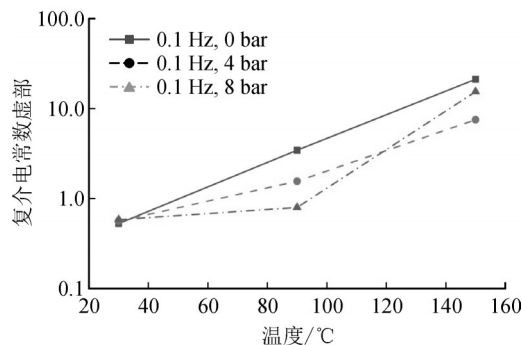
因此为了进一步分析挤压力对EPDM复介电常数的影响,挑选低频0.01、0.1、1 Hz的数据得到如图5(b)–(d)所示复介电常数虚部温谱图。由图5(b)–(d)中可以观察到温度为30 ℃时,挤压力引起复介电常数虚部改变值明显小于150 ℃的值。因此温度较低时,挤压力对复介电常数虚部影响不大,但在温度较高时如90 ℃,表现出随挤压力升高,复介电常数虚部减小的变化;温度为150 ℃时,呈现先减小后增大的趋势,但仍小于未施加挤压力时的值。由于在低频时,复介电常数虚部与直流电导率相关,当施加挤压力后并温度较高时,虽然温度的升高使参与直流电导的载流子数目和载流子迁移率都增大,但是受挤压力作用,当挤压力超过一定值以后,分子链间的自由体积缩小,反而会限制载流子的运动,



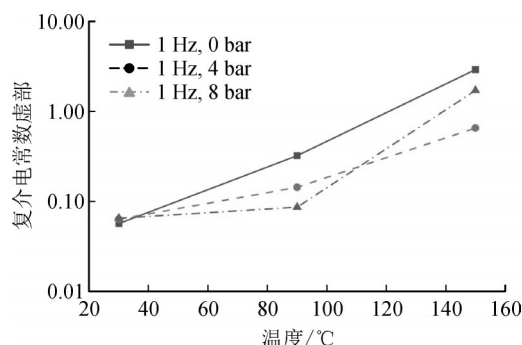
(a) 0.01 Hz时复介电常数实部温谱图



(b) 0.01 Hz时复介电常数虚部温谱图



(c) 0.1 Hz时复介电常数虚部温谱图



(d) 1 Hz时复介电常数虚部温谱图

图5 EPDM复介电常数低频温谱图

Fig. 5 Low frequency temperature spectroscopy of complex permittivity of EPDM

可以参与极化的载流子减少,介电常数实部和虚部均减小。仅有当频率足够低时,载流子才有足够的时间随电场发生运动,使得较低频率下(如0.01 Hz)的复介电常数虚部受挤压力的影响变化不大。

不同挤压力度和不同温度下乙丙橡胶复电导率实部频谱可以进一步证实电导率对复介电常数的影响, 见图6。由图6可知, 随着频率的减小, 复电导率实部受温度与挤压力的影响逐渐增大, 且整体趋势呈现出随着挤压力增大而减小。频率为0.01、0.1、1 Hz时复电导率实部温谱图见图7。由图7可得出, 温度越高时, 挤压力越大, 复电导率实部减小越明显。

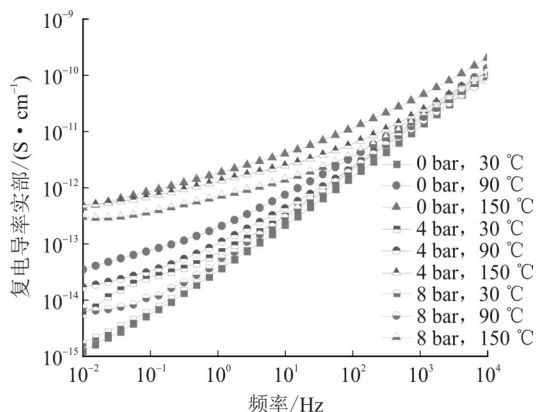


图6 不同挤压力、不同温度下EPDM复电导率实部频谱

Fig. 6 Real part of complex conductivity of EPDM

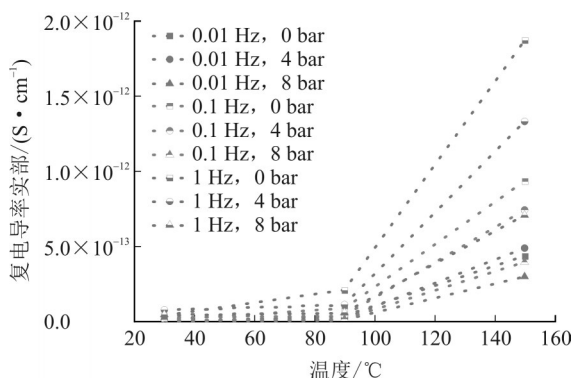


图7 乙丙橡胶复电导率实部温谱图

Fig. 7 Temperature spectroscopy of Real part of complex conductivity for EPDM

3 讨论

介电弛豫过程通常采用模型函数来分析, 常用的模型函数有Debye方程、Cole-Cole方程、Davidson-Cole方程以及Havriliak-Negami方程等。其中Havriliak-Negami函数是Cole-Cole函数与Davidson-Cole函数的结合, 能够很好地解释高分子体系的介电弛豫过程^[29-30]。乙丙橡胶属于高分子体系, 可采用Havriliak-Negami函数描述其极化过程。Havriliak-Negami模型函数可表示为

$$\varepsilon_{\text{HN}}^*(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{[1 + (i\omega\tau_{\text{HN}})^{\alpha}]^{\beta}} \quad (1)$$

式(1)中: $0 < \alpha \leq 1$, $0 < \beta \leq 1$, α, β 都为与弛豫时间分布相关的参数; ω 为电场的角频率; τ_{HN} 为特征弛豫时间; ε_{∞} 为光频介电常数; ε_s 为静态介电常数。 $\Delta\varepsilon$ 为电介质损耗强度, 且 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}$ 。

通常观察到的弛豫带都比较宽, 其中常常含有电导率的贡献, 因此Havriliak-Negami函数可表示为

$$\varepsilon^*(\omega) = -ia\left(\frac{\sigma_0}{\omega^s \varepsilon_0}\right) + \varepsilon_{\text{HN}}^*(\omega) \quad (2)$$

式(2)中: σ_0 为直流电导率; a 为具有 Hz^{-1} 量纲的因子, 文中将其值取为1; s 为与离子电荷载体引起的电极极化相关的参数, 对于纯电子导体, $s=1$ 。

Havriliak-Negami函数的实虚部分别为:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \Delta\varepsilon r(\omega) \cos[\beta\varphi(\omega)] \quad (3)$$

$$\varepsilon''(\omega) = a\left(\frac{\sigma_0}{\omega^s \varepsilon_0}\right) + \Delta\varepsilon r(\omega) \sin[\beta\varphi(\omega)] \quad (4)$$

式(3)、(4)中:

$$r(\omega) = [1 + 2(\omega\tau)^{\alpha} \cos(\frac{\alpha\pi}{2}) + (\omega\tau)^{2\alpha}]^{-1/2} \quad (5)$$

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\sin(\frac{\alpha\pi}{2})}{(\omega\tau)^{-\alpha} + \cos(\frac{\alpha\pi}{2})} \quad (6)$$

由于复介电常数虚部与实部之间可通过Kramers-Kronig关系获得, 且含有相同信息, 因此下文只对复介电常数虚部提取特征参量。文中拟合思路如下: ①频率较低时, 频域谱特性由电导过程主导, 故用 $\varepsilon''(\omega) = \sigma_0/(\omega^s \varepsilon_0)$ 对复介电常数虚部拟合; ②频率较高时, 频域谱特性由极化过程主导, 故用公式 $\Delta\varepsilon \times r(\omega) \times \sin[\beta \times \varphi(\omega)]$ 拟合。

为了明确挤压力与温度的作用, 取0、4、6、8 bar挤压力下, 温度在30、60、90、150 °C时的复介电常数虚部频谱, 对其进行Havriliak-Negami模型函数拟合, 并采用非线性最小二乘法中Levenberg-Marquardt算法, 提取模型参量 σ_0 、 s 、 $\Delta\varepsilon$ 、 τ 、 α 和 β , 各参量数值见表1-4。

表1 0 bar时不同温度下Havriliak-Negami模型参数

Table 1 Parameters of Havriliak-Negami model

under 0 bar						
温度/°C	$\sigma_0/(\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	s	$\Delta\varepsilon$	τ/s	α	β
30	7.609×10^{-13}	0.335	0.612	85.00	0.985	0.145
60	2.160×10^{-12}	0.562	0.926	15.02	1.000	0.226
90	8.867×10^{-12}	0.664	5.360	70.01	1.000	0.359
150	9.887×10^{-11}	0.698	25.498	2.849	1.000	0.657

表2 4 bar时不同温度下 Havriliak-Negami模型参数

Table 2 Parameters of Havriliak-Negami model

under 4 bar						
温度/℃	$\sigma_0/(\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	s	$\Delta\epsilon$	τ/s	α	β
30	8.226×10^{-13}	0.370	0.582	30.01	1	0.130
60	1.440×10^{-12}	0.544	0.662	15.01	1	0.175
90	2.937×10^{-12}	0.684	1.752	42.00	1	0.305
150	2.330×10^{-11}	0.870	15.458	21.59	1	0.584

表3 6 bar时同温度下 Havriliak-Negami模型参数

Table 3 Parameters of Havriliak-Negami model

under 6 bar						
温度/℃	$\sigma_0/(\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	s	$\Delta\epsilon$	τ/s	α	β
30	8.134×10^{-13}	0.364	0.576	25.000	1	0.127
60	1.308×10^{-12}	0.560	0.802	55.000	1	0.153
90	1.641×10^{-12}	0.582	1.010	55.000	1	0.207
150	4.481×10^{-11}	0.900	10.242	3.155	1	0.621

表4 8 bar时不同温度下 Havriliak-Negami模型参数

Table 4 Parameters of Havriliak-Negami model

under 8 bar						
温度/℃	$\sigma_0/(\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	s	$\Delta\epsilon$	τ/s	α	β
30	8.941×10^{-13}	0.388	0.700	45.000	0.99	0.138
60	1.934×10^{-12}	0.567	0.890	30.000	1.00	0.163
90	1.276×10^{-12}	0.684	0.858	60.000	1.00	0.169
150	6.007×10^{-11}	0.854	3.108	0.249	1.00	0.717

为方便分析 Havriliak-Negami 模型参数的变化趋势,将参数与温度之间的关系绘制成散点图,0 bar下拟合参数与温度的变化关系图见图8。

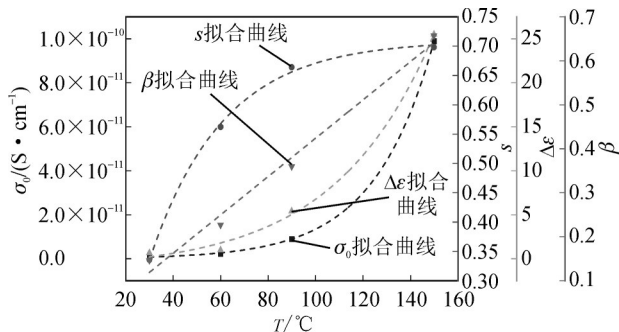


图8 σ_0 、 s 、 $\Delta\epsilon$ 、 β 与温度的关系

Fig. 8 Relationship between σ_0 、 s 、 $\Delta\epsilon$ 、 β and temperature

由图8可知,随着温度的升高, σ_0 、 s 、 $\Delta\epsilon$ 、 β 有着明显的变化且有规律性。由此可见,温度不仅会影响高频段的极化过程,而且对低频段的电导过程也有着一定的影响。由于 $\Delta\epsilon$ 与挤压有关,因此为了有效区分温度与挤压力对EPDM复介电常数的影响,故 σ_0 、 s 、 β 可以作为特征参量来表征EPDM所承受温度的高低。为了进一步研究 σ_0 、 s 、 β 这些特征参数与温度的关系,采用最小二乘法对他们之间的关系进

行拟合。图8中虚线为拟合结果,各参数拟合方程如下:

$$\sigma_0 = A_0 \exp(-x/t_0) + y_0 \quad (7)$$

$$s = A_1 \exp(-x/t_1) + y_1 \quad (8)$$

$$\beta = a + bx \quad (9)$$

式(7)–(9)中, A_0 、 t_0 、 y_0 、 A_1 、 t_1 、 y_1 、 a 、 b 都为与温度相关的参数,且根据拟合结果, $A_0=2.486 \times 10^{-13}$, $t_0=-25.047$, $y_0=-2.667 \times 10^{-13}$, $A_1=-0.992$, $t_1=30.865$, $y_1=0.709$, $a=-0.013$, $b=0.004$ 。

由式(7)–(9)可以得出, σ_0 随着温度的上升呈指数式增加; s 随着温度增加也呈指数式上升,但斜率越来越小; β 则随温度线性增加。故可以通过提取特征参量 σ_0 、 s 、 β 反应温度对EPDM介电性能的影响。

除此之外,从表1–4可以进一步得出, $\Delta\epsilon$ 随着挤压力增大按一定的规律变化。图9以90℃下 $\Delta\epsilon$ 随挤压力的变化曲线为例进行说明。同时,采用最小二乘法拟合曲线,得到如图9中所示的点划线拟合曲线。 $\Delta\epsilon$ 与挤压力的关系为

$$\Delta\epsilon = A_2 \exp(-x/t_2) + y_2 \quad (10)$$

式(10)中, A_2 、 t_2 、 y_2 都为与温度、压强相关的参数,其中 $A_2=4.853$, $t_2=2.859$, $y_2=0.510$ 。由式(10)可以看出, $\Delta\epsilon$ 随着挤压力增大呈指数式衰减,因此,证实挤压力与较高频域的极化过程也有着一定关系,可选取 $\Delta\epsilon$ 来表征一定温度下EPDM承受挤压力的大小,可以反映挤压力对EPDM性能的影响。

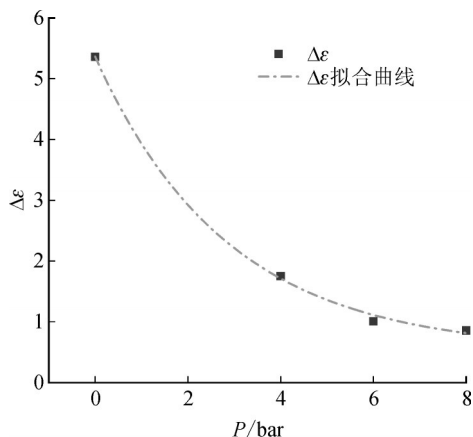


图9 $\Delta\epsilon$ 与压强的关系

Fig. 9 Relationship between $\Delta\epsilon$ and extrusion force

4 结论

1)温度对EPDM介电频谱影响很大,且频率越低温度升高引起的复介电常数实部和虚部增大越明显。复电导率实部随着频率的增大而增大,且频率越低,温度越高,增加越明显。

2)当施加挤压力之后,热因子与机械应力共同

影响试样的介电性能。当温度一定时,随着挤压力的增大,复介电常数实部反而减小,且在低频表现十分明显。而对于复介电常数虚部,在温度较高时,施加挤压力之后,复介电常数虚部值减小,然而之后随着挤压力的增大,复介电常数虚部值反而有了增加的趋势,但仍小于未施加挤压力时的值。对于复电导率实部,随着压强的增大,整体呈现出减小的趋势。

3)用 Havriliak-Negami 函数对复介电常数虚部拟合,分析拟合参数得出, σ_0 随着温度的上升呈指数式增加; s 随着温度增加也呈指数式上升,但斜率越来越小; β 则随温度线性增加。在温度一定时, $\Delta\epsilon$ 与挤压之间也具有指数关系,且随着挤压力的增大而减小。

参考文献:

- [1] 林晨, 齐伶俐, 雷志鹏, 等. 基于 PDC 的多应力老化乙丙橡胶电缆绝缘状态评估[J]. 绝缘材料, 2020, 53(1): 70-75.
LIN Chen, LIN Lingyan, LEI Zhipeng, et al. State evaluation of multi-stress aged EPR cable insulation based on PDC[J]. Insulating Materials, 2020, 53(1): 70-75.
- [2] 牛慧, 刘姝慧, 何宗科, 等. 乙丙橡胶可逆交联研究进展[J]. 石油化工, 2019, 48(6): 642-651.
NIU Hui, LIU Shuhui, HE Zongke, et al. Research progress of reversible cross-linked ethylene/propylene rubbers[J]. Petrochemical Technology, 2019, 48(6): 642-651.
- [3] 汤浩, 陈照峰, 纪荣华, 等. 三元乙丙橡胶性能的优化研究[J]. 特种橡胶制品, 2020, 41(2): 11-15.
TANG Hao, CHEN Zhaofeng, JI Ronghua, et al. Study on properties optimization of EPDM compound[J]. Special Purpose Rubber Products, 2020, 41(2): 11-15.
- [4] 李登淑, 王昕, 吴健儿, 等. 基于特征检测量的 XLPE 电缆绝缘老化寿命预测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 168-177.
LI Dengshu, WANG Xin, WU Jian'er, et al. XLPE cable insulation aging based on feature detection life prediction method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 168-177.
- [5] 吕安强, 李静, 张振鹏, 等. 夹具对高压绝缘电缆热学特性影响的有限元分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 283-290.
LYU Anqiang, LI Jing, ZHANG Zhenpeng, et al. Finite element analysis for the influence of clamp on the thermal characteristics of high voltage insulated power cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 283-290.
- [6] 邓红雷, 杨浩, 谢月, 等. 基于高温介电谱测量的 XLPE 老化状态评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 156-161.
- [7] 王昊月, 王晓威, 孙茂伦, 等. XLPE 电缆绝缘热老化的高压频域介电谱诊断方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17): 4497-4507.
WANG Haoyue, WANG Xiaowei, SUN Maolun, et al. High voltage frequency domain dielectric spectroscopy diagnosis method for thermal aging of XPLE cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4497-4507.
- [8] 王科, 项恩新, 曹伟东, 等. 基于图像特征和深度森林的乙丙橡胶电缆绝缘老化状态识别[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 32-36.
WANG Ke, XIANG Enxin, CAO Weidong, et al. Identification of aging state of EPR cable insulation based on image feature and deep forest[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 32-36.
- [9] 周远翔, 张征辉, 张云霄, 等. 热-力联合老化对硅橡胶交联网络及力学和耐电特性的影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17): 4474-4486.
ZHOU Yuanxiang, ZHANG Zhenghui, ZHANG Yunxiao, et al. The effect of combined thermal-mechanical aging on the cross-linking network and mechanical and electrical properties of silicone rubber[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4474-4486.
- [10] 王少飞, 雷志鹏, 宋建成, 等. 乙丙橡胶表面电痕腐蚀对极化/去极化电流的影响[J]. 高压电器, 2019, 55(6): 99-104.
WANG Shaofei, LEI Zhipeng, SONG Jiancheng, et al. Influence of electrical trace on polarization/depolarization current of ethylene-propylene rubber[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 99-104.
- [11] 冯晨, 雷志鹏, 任鸿秋, 等. 乙丙橡胶表面电痕腐蚀对极化-去极化电流的影响[J]. 高压电器, 2017, 53(10): 136-141.
FENG Chen, LEI Zhipeng, REN Hongqiu, et al. Effect of surface electrical tracking of ethylene propylene rubber on Polarization-depolarization current[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 136-141.
- [12] 李艳文, 李媛媛, 田慕琴, 等. 矿用典型绝缘材料击穿特性及寿命模型的研究[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 104-109.
LI Yanwen, LI Yuanyuan, TIAN Muqin, et al. Study on breakdown characteristic and life model of typical insulation materials used in coal mine[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 104-109.
- [13] LIN Lingyan, LIN Chen, GENG Pulong, et al. Aging life

- evaluation of coal mining flexible EPR cables under multi-stresses[J]. IEEE Access, 2020(8):53539-53546.
- [14] MEN Rujia, LEI Zhipeng, SONG Jiancheng, et al. Effect of thermal ageing on space charge in ethylene propylene rubber at DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(3):793-800.
- [15] LIU Yang, MEN Rujia, TIAN Muqin, et al. Dielectric strength of ethylene propylene rubber under thermal and mechanical stress[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Beijing, China: IEEE, 2020: 1-4.
- [16] 陈璐. 乙丙橡胶在机械应力下热老化特性实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- CHEN Lu. Experimental study on thermal aging characteristics of ethylene propylene rubber under mechanical stress [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [17] BOUGUEDAD D, MEKHALDI A, JBARA O, et al. Influence of thermal aging on the crystallinity of EPDM used in power cables insulation[C]//2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD). Valencia, Spain: IEEE, 2020:586-589.
- [18] 皮红, 何利万, 杨懿. 应力-热氧作用下三元乙丙橡胶的老化行为[J]. 合成材料老化与应用, 2015, 44(5):1-4.
- PI Hong, HE Liwan, YANG Yi. The aging behavior of EPDM under stress-thermal circumstance in air[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2015, 44(5):1-4.
- [19] WANG Yajian, YANG Yuyou, TAO Mingjiang. Understanding free volume characteristics of ethylene-propylene-diene monomer (EPDM) through molecular dynamics simulations [J]. Materials, 2019, 12(4):612-629.
- [20] MAZZANTI G, MONTANARI G C. Insulation characterization in multistress conditions by accelerated life tests: An application to XLPE and EPR for high voltage cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(6):24-34.
- [21] FABIANI D, MAZZANTI G, SURACI S V, et al. Preliminary development and application of a stress-strength model for reliability estimation of aged LV cables for nuclear power plants[C]//2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD). Valencia, Spain: IEEE, 2020: 37-40.
- [22] 刘英, 汪行, 陈嘉威. 界面多应力作用下乙丙橡胶的特性变化及破坏机理[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(10):86-95.
- LIU Ying, WANG Heng, CHEN Jiawei. Performance change and failure mechanism of ethylene propylene-diene monomer under interfacial multi-stresses[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(10):86-95.
- [23] LEI Zhipeng, SONG Jiancheng, GENG Pulong, et al. Influence of temperature on dielectric properties of EPR and partial discharge behavior of spherical cavity in EPR insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6):3488-3497.
- [24] 韩永进, 洪宁宁, 潘国梁. 热重法评估橡胶绝缘材料的热老化寿命[J]. 电线电缆, 2017, 6(6):21-23.
- HAN Yongjin, HONG Ningning, PAN Guoliang. Thermal aging lives evaluation of rubber insulation materials by TGA [J]. Electric Wire & Cable, 2017, 6(6):21-23.
- [25] 李志辉. 三元乙丙橡胶老化研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- LI Zhihui. Study on aging of EPDM[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [26] 王安迎, 王林林, 王伟. 三元乙丙橡胶热氧老化试验与密封条寿命预测[J]. 弹性体, 2021, 31(1):5-9.
- WANG Anying, WANG Linlin, WANG Wei. Thermal Oxygen ageing test of EPDM and life prediction of rubber sealing strip[J]. China Elastomerics, 2021, 31(1):5-9.
- [27] 雷清泉, 刘关宇. 如何理解工程电介质中极化与电导两个基本物理过程及其测量的科学原理与方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23):6769-6789.
- LEI Qingquan, LIU Guanyu. How to understand the two basic physical processes of polarization and conductance in engineering dielectrics and scientific principles and methods of their measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23):6769-6789.
- [28] 雷志鹏. 乙丙橡胶绝缘介电性能及其气隙和沿面放电机理的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- LEI Zhipeng. Dielectric properties of ethylene propylene rubber insulation and its air gap and surface discharge mechanism[D]. Taiyuan: Taiyuan University of technology, 2015.
- [29] 董明, 刘媛, 任明, 等. 油纸绝缘频域介电谱特征参数提取及绝缘状态相关性研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23):6246-6253.
- DONG Ming, LIU Yuan, REN Ming, et al. Study of characteristic parameter extraction and insulation condition correlation of frequency-domain dielectric spectroscopy for oil-paper insulation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23):6246-6253.
- [30] 刘庆珍, 黄昌硕. 基于FCBF特征选择和XGBoost原则的油纸绝缘介电响应特征量优选研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15):50-59.
- LIU Qingzhen, HUANG Changshuo. Optimization of dielectric response characteristics of oil paper insulation based on FCBF feature selection and the XGBoost principle [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15):50-59.
- 刘兆贵(1999—), 男, 本科, 研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: 1260525240@qq.com)。
- 雷志鹏(1983—), 男, 副教授, 研究方向为高电压与绝缘、矿用智能电器(通信作者)(E-mail: leizhipeng@163.com)。