

SF₆气体绝缘电容式套管芯子材料绝缘性能研究

在 $10^{-1} \sim 10^6$ Hz频率和 $20 \sim 150$ °C温度范围内测量了SF₆气体绝缘套管芯子材料的频谱和温谱曲线。利用改进Havriliak-Negami (HN) 方程的非线性数值计算, 对实测数据进行曲线拟合, 获取了介电谱HN数学模型的特征参数。研究表明: 试样击穿场强随其厚度的增加而降低, 且在 $10^{-1} \sim 10^6$ Hz频率范围内, $20 \sim 60$ °C温度区间芯子材料主要为 β 弛豫作用过程, $70 \sim 90$ °C温度区间可同时发现 α 、 β 弛豫过程, $100 \sim 150$ °C温度区间 α 弛豫、直流电导作用过程占主导地位。

张施令/国网重庆市电力公司电力科学研究院 宁 鑫/国网四川省电力公司电力科学研究院 周晓刚/国家电网公司华中分部

0 引言

目前大量SF₆气体绝缘套管已用于我国高压直流输电线路的建设, 其运行状态直接决定了输电线路的安全稳定性, 因此在实际运行中对套管进行状态监测和性能评估具有重要意义^[1]。较常用的套管无损监测方法一般为介电谱测量, 而该方法主要依赖于对套管芯子用环氧浸渍纸复合材料介电性能的准确测量, 并对测量结果进行后处理以提取表征材料性能的特征参数。

文献[2]对环氧/皱纹纸复合材料击穿特性及空间电荷进行了研究, 文献[3]分析了玻璃化温度 T_g 附近纯环氧的空间电荷分布特性, 但鲜有文献专门对高压套管芯子用环氧浸渍纸的绝缘性能进行测量研究。鉴于此, 本文通过试验得到了复合材料交流击穿场强, 在 $20 \sim 160$ °C温度区间内试验测得复合材料导热性能参数^[4]。进一步在 $10^{-1} \sim 10^6$ Hz频率和 $20 \sim 150$ °C温度范围内测量了芯子材料

的频谱和温谱特性。试验室环境下研究SF₆气体绝缘套管主绝缘材料介电谱拟合方法并获取其特征参数值, 为深入了解套管主绝缘介电性能提供了一种有效方法, 可指导套管在实际运行中状态监测和性能评估^[5-7]。

1 绝缘性能理论分析

以下将在导热性能、击穿性能试验数据基础上, 重点介绍套管芯子材料的介电性能。因此, 首先对适用于介电性能分析的修正Havriliak-Negami (HN) 模型参数原理进行简要分析。对于环氧浸渍纸复合材料, 复介电常数 ϵ_{HN}^* 可表示为

$$\epsilon_{HN}^*(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\Delta\epsilon}{[1 + (i\omega\tau_{HN})^\beta]^\gamma} \quad (1)$$

式中, ϵ_∞ 为光频相对介电常数; $\Delta\epsilon = \epsilon_s - \epsilon_\infty$, 且 ϵ_s 为静态相对介电常数; τ_{HN} 为HN模型下的松弛极化时间; β 、 γ 为松弛时间的分布参数, 满足 $0 < \beta$, $\beta\gamma \leq 1$ 。又 $\epsilon_{HN}^*(\omega) = \epsilon'_{HN}(\omega) - i\epsilon''_{HN}(\omega)$, ϵ'_{HN} 和 ϵ''_{HN} 分别为复介电常数的实部和虚部^[8]

$$\epsilon'_{HN} = r(\omega) \cos[\gamma\Psi(\omega)]\Delta\epsilon + \epsilon_\infty \quad (2)$$

$$\epsilon''_{HN} = r(\omega) \sin[\gamma\Psi(\omega)]\Delta\epsilon \quad (3)$$

其中

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

$$\Psi(\omega) = \arctan \frac{\sin(\beta\pi/2)}{(\omega\tau_{HN})^{-\beta} + \cos(\beta\pi/2)} \quad (5)$$

因此单一HN模型函数存在五个特征参量: ϵ_∞ 、 $\Delta\epsilon$ 、 τ_{HN} 、 β 和 γ 。依据宽带介电谱试验数据可拟合得到上述五个特征参量具体数值, 并由式(6)计算 ϵ''_{HN} 出



张施令/工程师

关键词/Keywords

干式套管 ·
介电性能 ·
Havriliak-Negami方程 ·
曲线拟合 ·

现峰值的频率点 ω_p

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

当测试温度低于干式套管芯子材料的玻璃化转变温度 T_g 时,一般用式(1)~式(6)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)

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

式中, σ_0 为表征材料直流电导率的特征参量; ε_0 为真空介电常数; f 为测试频率。对于介电性能较复杂的复合材料,可同时引入多项式HN方程,用于表征多个独立的松弛极化过程^[9]。如式(8)所示

$$\varepsilon_{HN}^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_{i=1}^m \frac{\Delta\varepsilon_i}{[1 + (i\omega\tau_{HN_i})^{\beta_i}]^{\gamma_i}} + \frac{\sigma_0}{i\varepsilon_0\omega^s} \quad (8)$$

式中, m 为同时发生的松弛极化过程的数量。

2 工频击穿试验

击穿试验中所用电极为铜制,电极表面经抛光处理。制备试样的厚度包括0.25 mm、1.08 mm和2.69 mm三种情况,击穿试验中升压速度为4 kV·s⁻¹,试验结果如图1所示。应用含两参数的威布尔(Weibull)分布函数对击穿试验数据进行统计处理分析^[10-12]。按照Weibull概率统计理论,环氧浸纸材料在电场 E 下发生击穿概率为

$$F(E; \alpha, \beta) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{E}{\alpha} \right)^\beta \right\} = 0.632 \quad (9)$$

式中, E 为击穿场强, kV·mm⁻¹; α 为击穿概率为63.2%时的击穿场强,即尺度参数, kV·mm⁻¹; β 为分布参数,图1表明试样击穿场强随其厚度的增

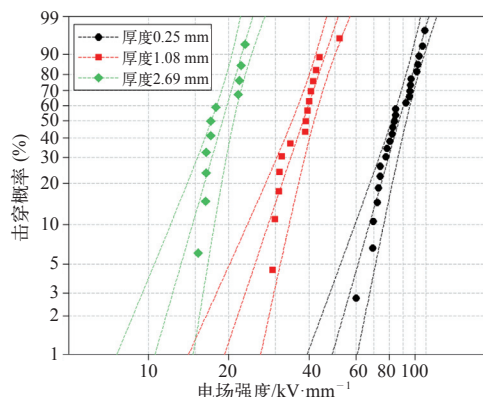
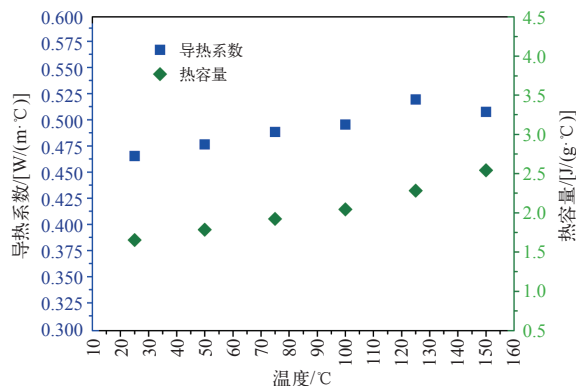


图1 试样击穿场强与厚度的关系

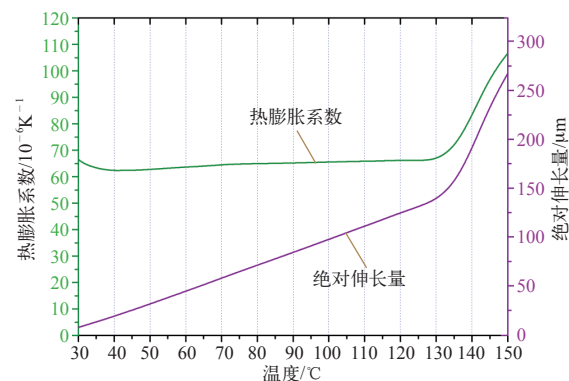
加而降低。

3 导热系数试验

使用激光导热分析仪和热膨胀分析仪测量故障套管芯子环氧浸纸材料热性能参数如图2所示。



(a) 导热系数和热容量随温度变化关系



(b) 环氧浸纸材料的热膨胀曲线

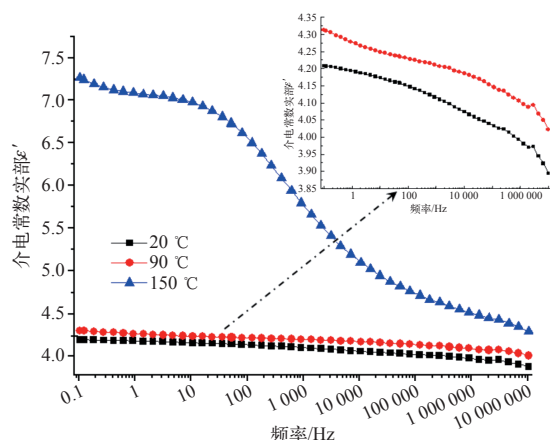
图2 环氧浸纸材料热性能参数随温度关系

图2a中环氧浸纸材料在室温25℃下的导热系数约为0.463 W/(m·℃),复合材料中皱纹纸纤维素的有序排列有利于热流量的传导。在25~150℃的温度域内,环氧浸纸材料的导热系数呈现先增大而后下降的趋势,且在125℃附近出现最大值,表明换流变套管芯子在实际运行中,温度应控制在25~125℃的范围内,此时材料导热系数具有“负反馈”效应:假设芯子温度略有升高,则导热系数也随之增大,材料的导热性能增强,温度将出现下降趋势。若材料运行温度超过125℃,则由于导热系数的降低,而使芯子内部热量难以有效导出,不利于套管的安全运行。环氧浸纸材料的热容量在25~150℃的温度域内基本保持在1.5~2.5 J/(g·℃)之

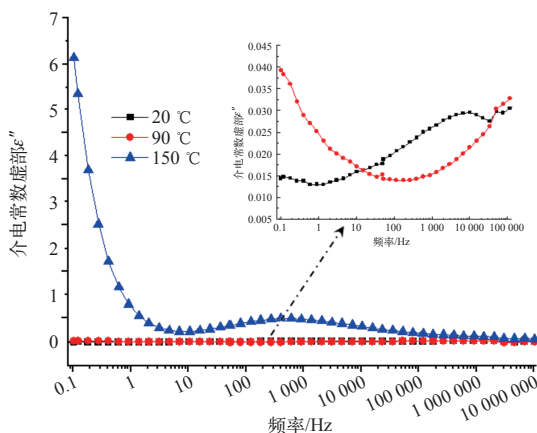
间。图2b中环氧浸纸材料的热膨胀系数在30~150 ℃的温度域内,呈现先缓慢上升,而后骤然增加的变化趋势,且这种变化的“拐点”位于130 ℃附近,说明环氧浸纸材料内部皱纹纸的纤维素结构对热应力具有一定缓冲作用。

4 介电谱数据测量

套管芯体出厂例行试验一般在室温(20 ℃)下进行,且对于实际套管在运行中,芯体内部最热点温度大致为90 ℃,为说明在高温150 ℃下套管芯体绝缘材料介电性能的变化情况,分别列出20 ℃、90 ℃和150 ℃下频域介电谱试验结果,如图3所示。



(a) 介电常数实部频域介电谱



(b) 介电常数虚部频域介电谱

图3 材料参数频域介电谱特性

图3表明频域介电谱随温度发生显著变化。在20 ℃和90 ℃情况下,介电常数实部随频率的增加而呈现减小趋势,原因是SF₆气体绝缘套管主绝缘材料介电常数实部可表示为

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (10)$$

从式(10)可以看出,在低频区($\omega\tau \ll 1$)时,绝缘介质中位移极化、松弛极化等均来得及建立,因此介电常数实部趋近于介质静态介电常数 ε_s ,但在频率升高过程中,松弛极化来不及建立,而介质极化主要由位移极化所贡献,因此介电常数实部呈现减小趋势。而对于环氧绝缘试品的 ε'' 和 $\tan \delta$ 值会随频率的增加先减小后增大,原因在于损耗角正切值可表示为

$$\tan \delta = \left[\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \right] / \left(\varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \right) \quad (11)$$

式中, σ 为介质电导率; τ 为松弛极化时间常数; ε_s 为静态介电常数; ε_{∞} 为光频介电常数。通过式(11)可见,随着交变电场频率的升高,开始出现极化滞后电场变化的情况,同样松弛极化不能充分建立,所以每周内引起的损耗减小,使得环氧绝缘试品的 ε'' 和 $\tan \delta$ 值将随频率的增大而减小;而在高频区域,松弛极化同样来不及建立,但每秒内的周波数增加,使介质损耗增加,因此 ε'' 和 $\tan \delta$ 值随频率的增加而增加。

5 介电谱数据拟合

以150 ℃温度条件下为例进行说明,对应套管主绝缘材料在过载运行下的典型温度值。150 ℃下环氧浸纸复合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。实部 ε' 随频率增加, α 极化过程显著:在 $f = 10^{-1} \sim 10^1$ 的低频区,各种极化均来得及建立, $\varepsilon' \rightarrow \varepsilon_s$ 。在 $f = 10^1 \sim 10^5$ 的松弛区,外施电场的周期可与松弛时间相比拟,在 α 松弛极化建立过程中 ε' 显著减小。在 $f = 10^5 \sim 10^6$ 的高频区,松弛极化来不及建立,介质极化全由位移极化所贡献, $\varepsilon' \rightarrow \varepsilon_{\infty}$ 。同时虚部 ε'' 表现单峰特点,介电损耗峰值 $\varepsilon''_{\max}$ 出现在特征频率 $f_c = 10^3$ 附近。在 $f = 10^{-1} \sim 10^1$ 的低频段,虚部 ε'' 在双对数坐标下的斜率为-0.940 4,主要是由于直流电导极化的影响。如图4所示,复数平面图给出了九个拟合参数的具体值,可见实测值与拟合值吻合较好,且在实测Cole-Cole图中观察到了理论

模型中由电导极化引起的“翘尾”现象。

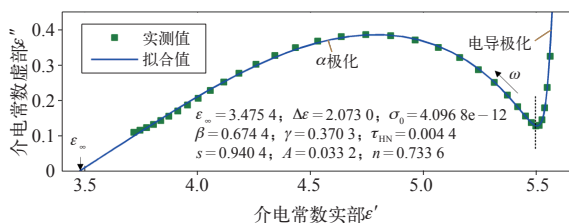


图4 150 °C 下的复数平面图

6 结束语

1) SF₆气体绝缘套管芯子材料试样交流击穿场强随其厚度的增加而降低,且环氧浸纸材料的热膨胀系数在30~150 °C的温度域内,呈现先缓慢上升,而后骤然增加的变化趋势,环氧浸纸材料内部皱纹纸的纤维素结构对热应力具有一定缓冲作用。

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。在套管过载150 °C下,实测与拟合数据均能较好吻合。从低温到高温,γ、β和α极化峰依次出现,且在100 °C以后,观察到显著的直流电导极化过程。

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] Antun Mikulecky. 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] Stefan Wolny, Artur Adamowicz, Marek Lepich. 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] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 68-76.
- [9] Kremer F, Schonhals A. Broadband dielectric spectroscopy [M]. Germany: Springer, 2003: 59-130.
- [10] Vanga Bouanga C, 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.
- [11] 刘鹏, 彭宗仁, 等. 特高压直流套管用环氧树脂/皱纹纸复合绝缘体系介电性能的研究 [J]. 高压电器, 2009, 45 (5): 6-8.
- [12] 宁鑫, 彭宗仁, 冯骅, 等. 特高压直流干式套管用环氧及环氧/皱纹纸复合材料介电特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (4): 995-1001.

(收稿日期: 2016-08-13) **EA**

欢迎订阅

欢迎投稿

欢迎刊登广告