

基于 FDS 的电机线棒环氧云母绝缘电老化特性

陈庆国^{*1}, 单志铎¹, 付强^{2, 3, 4, 5}, 池明赫¹

(1. 哈尔滨理工大学 电介质工程国家重点实验室培育基地, 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨大电机研究所, 哈尔滨 150040;
3. 水力发电设备国家重点实验室, 哈尔滨 150040; 4. 国家水利发电设备工程技术研究中心,
哈尔滨 150040; 5. 哈尔滨电机厂有限责任公司, 哈尔滨 150040)

摘要: 为解决目前大型电机定子线棒主绝缘现场无损检测手段缺乏的问题, 本文采用基于介电响应理论的频域介电谱法(Frequency Domain Spectroscopy, FDS), 对大型电机定子线棒真空压力浸渍(Vacuum Pressure Impregnating, VPI)少胶云母绝缘进行测试。通过对不同老化时间和温度下线棒电性能参数的对比分析, 研究电老化对电机线棒绝缘介电性能的影响规律。结果表明, 电老化使环氧云母绝缘材料介电性能下降, 其中环氧胶所受影响最为明显, 在电老化过程中分子链发生断裂使粘接能力下降, 在绝缘结构中形成更多介质分界面, 同时使绝缘材料中极性分子活性增强, 加剧了界面极化与转向极化, 使介损和介电常数随电老化时间增长而增大。

关键词: 电老化; 频域介电谱; 定子线棒主绝缘; 少胶模压; 环氧云母复合绝缘

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2017)09-1926-08

Electrical ageing characteristics of epoxy-mica insulation of generator based on FDS

CHEN Qingguo^{*1}, SHAN Zhiduo¹, FU Qiang^{2, 3, 4, 5}, CHI Minghe¹

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Dielectrics Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Harbin Institute of Large Electric Machinery, Harbin 150040, China;
3. State Key Laboratory of Hydropower Equipment, Harbin 150040, China;
4. National Engineering Research Center Hydropower Equipment, Harbin 150040, China;
5. Harbin Electric Machinery Company Limited, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to solve the problem of absent nondestructive test methods, the frequency domain spectroscopy (FDS) based on dielectric response theory had been used to test Vacuum Pressure Impregnating (VPI) less resin epoxy mica insulation of large generator stator bars. The effect of electrical aging of insulation dielectric properties was studied through comparing and analyzing the dielectric loss and dielectric constant curves in different ageing time and temperature. Result shows that the dielectric properties of epoxy-mica insulation decrease because of electrical aging, especially the epoxy resin. Molecular chain failure leads to the decrease of the bonding ability after the electrical ageing. More medium interfaces appear inside insulation material and the polar molecule activity improves at the same time. Interface polarization and turning-direction polarization are intensified. Dielectric loss and dielectric constant increase with electrical aging time.

Keywords: electrical aging; frequency domain spectroscopy; main insulation of stator bar; resin-less molding; epoxy-mica insulation

大型发电机定子线棒主绝缘是保证发电机长时间安全稳定运行的关键部件, 其绝缘强度、机械强

度、热传导性和耐热性等是决定发电机寿命的重要因素, 因此要求大型电机定子线棒主绝缘在长期电

收稿日期: 2016-09-20; 录用日期: 2016-11-11; 网络出版时间: 2016-12-02 14:37

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20161202.1437.008.html

基金项目: 国家自然科学基金(51407051); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20132303110006)

通讯作者: 陈庆国, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高电压绝缘、电力设备绝缘检测与诊断和高电压应用新技术
E-mail: qgchen@263.net

引用格式: 陈庆国, 单志铎, 付强, 等. 基于 FDS 的电机线棒环氧云母绝缘电老化特性[J]. 复合材料学报, 2017, 34(9): 1926-1933.
CHEN Qingguo, SHAN Zhiduo, FU Qiang, et al. Electrical ageing characteristics of epoxy-mica insulation of generator based on FDS[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(9): 1926-1933 (in Chinese).

场、温度场和频繁启动力场等综合场作用下依然保持良好的绝缘性能。局部放电是影响绝缘寿命的重要因素,云母作为一种耐电晕性能良好的材料,多年来被广泛应用于电机的主绝缘结构中^[1-3],但随着运行年限的增长,其绝缘老化问题也越来越突出。引起电机线棒绝缘材料老化的因素主要有电老化、热老化、机械振动及冷热循环作用的应力老化等。虽然上述因素对不同用途发电机的老化作用程度不同,但电老化是影响各种大型发电机定子线棒主绝缘性能的最主要因素,因此需要寻找无损高效的方法来评估环氧云母复合绝缘的电老化状态^[4-5]。

介电响应法作为一种无损检测方法被广泛应用于绝缘领域,以实现高压电力设备绝缘状态的评估(如:油纸绝缘变压器、高压绝缘套管、高压电力电缆等)^[6-8]。目前所采用的介电响应法主要包括:回复电压法(Return Voltage Method, RVM)、极化去极化电流法(Polarization and Depolarization Current, PDC)和频域介电谱法(Frequency Domain Spectroscopy, FDS)等^[9-10]。相对于 RVM 法和 PDC 法,FDS 法是测量交流电场下的极化响应,可以对不同激励频率进行逐点或扫频测量,测试所需电源电压低、受噪音干扰小、携带信息丰富^[11]。国内学者姚森敬、王晓剑、段宗超等^[12-14]利用 FDS 方法研究高压套管及变压器油纸绝缘的介电性能,国外学者 Shayegani 等及 Lundgaard 等^[15-16]也利用 FDS 法研究了含水量对油纸绝缘介电性能的影响。鉴于 FDS 在其它电力设备绝缘诊断中的优点,目前国内外已经开始将其应用于电机绝缘老化状态诊断中。国外学者 Fernando 等及 Subocz^[17-18]利用直流耐压、绝缘电阻、FDS 分别对运行几十年的沥青绝缘体系和环氧粉云母绝缘体系的定子线棒,进行无损检测定子绝缘缺陷。FDS 的参数(损耗角)与绝缘含水量相关,可以直接评估绝缘含水量,这个结果为我们利用 FDS 法检测大型电机定子绝缘状态提供参考。哈尔滨大电机研究所已经开展了利用 FDS 分析大型电机定子线棒主绝缘耐盐雾湿热老化性能^[2]。本文主要利用 FDS 法对大型发电机定子线棒主绝缘试样进行测试,以红外光谱和扫描电镜为辅助手段研究环氧云母绝缘介电性能受电老化影响的规律。

1 Havriliak-Negami 介电弛豫模型

频域介电谱法是在一定频率范围内测试绝缘试

样的复介电常数 ϵ 随角频率 ω 变化规律,以分析不同老化状态下绝缘电性能参数变化规律及其受温度和湿度等外界条件的影响。

如果将电介质复阻抗 Z 表示成复电容 C 与角频率 ω 的复数关系形式:

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \tag{1}$$

由于电介质的复电容 C 和复介电常数 ϵ 直接相关,设该介质为真空时的电容为 C_0 ,因此可定义

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \frac{C}{C_0} \tag{2}$$

电介质的介质损耗因数 $\tan\delta$ 定义为复电容虚部 C'' 与实部 C' 的比值,即

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{C''}{C'} \tag{3}$$

在 Debye 迟豫模型中,复介电常数被描述为角频率 ω 的函数,表达式如下:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \tag{4}$$

式中: τ 为弛豫时间常数; ϵ_s 为静态介电常数; ϵ_∞ 为高频介电常数。以 ϵ' 为自变量对 ϵ'' 作图,将得到位于 y 轴正半轴的半圆曲线,即 Cole-Cole 图。

Debye 弛豫模型假定松弛过程具有单一弛豫时间,吸收电流随时间变化服从单项指数关系,但实际电介质中每个偶极子在某个瞬态都具有各自的松弛时间,实验测得的是总体的平均值,实际介质的松弛时间是围绕这个最大概率值的分布。Havriliak 和 Negami 所提出的 HN 模型对 Debye 模型进行了修正^[14],表达式如下:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{(1 + (j\omega\tau)^\alpha)^\beta} \tag{5}$$

式中: α 、 β 为形状参数且满足 $\alpha, \beta \in [0, 1]$, α 表示松弛时间的分散程度, α 越大,松弛时间分布越宽, β 表示 Cole-Cole 图的不对称程度。

2 环氧云母复合绝缘的电老化试验

为了研究大型发电机定子线棒主绝缘电老化状态,本文对 4 根 J 厂生产进行过不同时间加速电老化实验的真机线棒进行 FDS 测试,分析其电性能参数受实验温度和电老化程度影响的规律,所有线棒绝缘均为真空压力浸渍(Vacuum Pressure Impregnating, VPI)环氧云母少胶带浸渍 Hexion 漆后热压成型,额定电压 U_N 均为 16 kV,线棒电老化参数如表 1 所示,线棒绝缘使用的云母带参数如表 2 所示。

表 1 发电机实验线棒参数

Table 1 Parameters of testing bars

Serial number of stator bar	Aging time/h	Aging voltage/kV	Aging field strength/(kV·mm ⁻¹)
Y1 [#]	0	0	0
Y2 [#]	219	48	12
Y3 [#]	623	48	12
Y4 [#]	846	48	12

表 2 J 厂发电机线棒云母带性能参数

Table 2 Parameters of mica tape of J plant

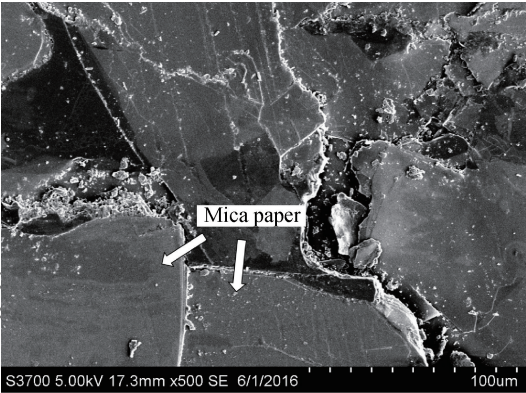
Items	Von roll	J plant
Thick/mm	0.15±0.02	0.132
Wide/mm	25±0.3	25
Mass/(g·m ⁻²)	198±19	198.8
Mass of mica paper/(g·m ⁻²)	160±10	159.7
Mass of epoxy resin/(g·m ⁻²)	15±4	16.4
Mass of glass fiber cloth/(g·m ⁻²)	23±2	22.6
Tensile strength/(N·(10m) ⁻¹)	≥80	107.6
Breakdown voltage/kV	≥1.5	2.5
Permeability/(S·(100ml) ⁻¹)	<1000	676.4

本文利用宽频介电阻抗仪(德国 Novocontrol Concept40)测量环氧云母复合绝缘试样的介电谱,测试频带范围为 10⁻²~10⁷ Hz,测试时将试样放入屏蔽金属腔体中防止外界电磁干扰,将液氮气化后通入腔体中以控制试样温度。

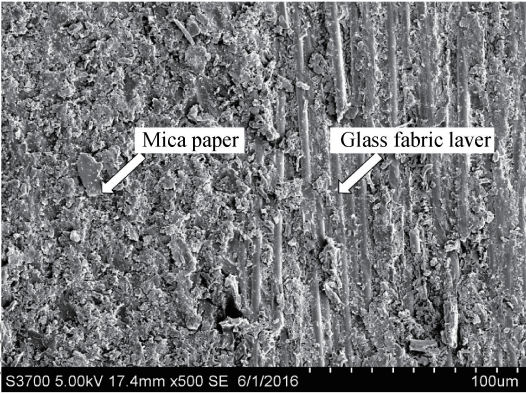
将试样切割成长宽均为 40 mm 的方形片状,厚度控制在 1~1.8 mm 之间,试样表面用砂纸打磨平整,以保证电极与试样间接触良好,实验前将试样置于真空干燥箱中,在 40~60℃(本文选取 50℃)下干燥 5~6 h,取出后需放入干燥皿中保存,防止试样受潮影响测试结果。由于用于测试的电机绝缘实验试样为具有一定机械强度的固体,因此在切割时很难保证试样与电极接触面完全光滑,除了在制作试样时需要用细砂纸打磨表面外还需要多次测试取平均值,本文在单根线棒上连续截取 10 枚试样测试后取平均值绘制介电谱曲线,尽量减小取样厚度不均导致的实验误差。

3 老化前后环氧云母绝缘微观结构变化

图 1 为 5 908 h 电老化前后环氧云母绝缘表面微观结构。可见,未老化的环氧云母复合绝缘表面较为平整,环氧胶黏剂粘接良好,而经过 5 908 h 电老化实验后,绝缘材料中的环氧树脂粘接强度下降,玻璃纤维、粉云母纸、环氧树脂间出现剥离,露出了绝缘结构中的玻璃纤维,绝缘结构中气隙数量增加,说明在长时间高场强作用下环氧云母绝缘



(a) Before aging



(b) After aging

图 1 5 908 h 电老化前后环氧云母绝缘表面微观结构
Fig. 1 Surface microstructure change of epoxy-mica insulation before and after 5 908 hours aging

材料中的环氧树脂最先发生老化,而环氧树脂的电老化则直接导致环氧云母绝缘的绝缘性能下降,因此可以考虑通过改进固化工艺来增强环氧树脂的耐电老化性,从而达到增强环氧云母复合绝缘耐电老化性能的目的。

4 环氧云母绝缘的电老化特性

4.1 电老化时间对环氧云母绝缘电性能的影响
40℃下,Y1[#]、Y2[#]、Y3[#]、Y4[#]真机线棒在场强 12 kV/mm、电压 3U_N 即 48 kV 的电场中,介质损耗(以下简称介损)和介电常数实部随老化时间的变化规律,如图 2 所示。
随着电老化时间的增长,线棒的介损总体呈增大趋势,其中在 10⁻¹~10¹ Hz 频带范围内,介损随老化时间增大明显,随着频率增大,介损变化逐渐减小,在 10² Hz 后,介损几乎不受老化时间的影响;工频下该复合绝缘材料介损也会随老化时间的增长而增大,但 Y2[#] 和 Y3[#] 电老化时间相差 404 h,介损曲线变化较小,Y3[#] 与 Y4[#] 老化时间相差仅有 223 h,

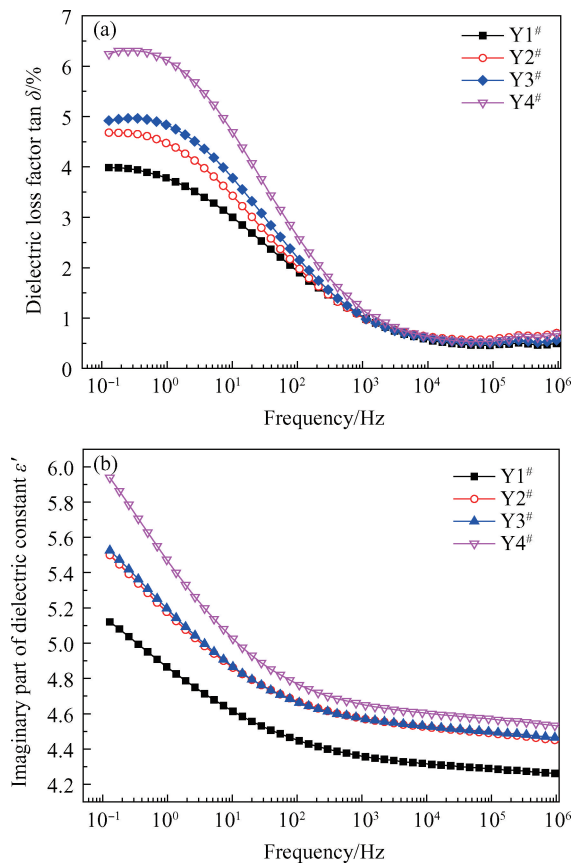


图 2 40℃时环氧云母绝缘电性能参数变化规律

Fig. 2 Dielectric performance parameters of epoxy-mica insulation changing rule at 40℃

介损曲线却变化较明显, 这说明环氧云母复合绝缘的电老化速度先减小后增大, 在 200 h 内直流电场使复合绝缘快速老化, 在 200~600 h 间电老化速度明显减慢, 而超过 600 h 后绝缘材料电老化速度明显上升。

定子线棒主绝缘的绝缘材料组成主要有三种: 粉云母纸、玻璃丝布、环氧胶黏剂(环氧-酸酐类)。云母为离子式结构的无机化合物晶体, 在外电场作用下会发生离子位移极化, 这种瞬时位移极化的建立时间非常短, 几乎没有损耗, 当测试频率升高, 界面极化逐渐减弱时, 离子位移极化占主要地位, 导致介损逐渐降低; 玻璃丝布主要成分为玻璃丝纤维无机材料, 它不含弱联系离子和极性基团, 因此, 在外电场作用下只有电子位移极化, 由于其电导率很小, 因此在 60~10⁹ Hz 频带范围内介损随频率变化不明显且数值很小; 环氧胶黏剂的主要成分为双酚 A 环氧树脂和酸酐树脂, 是极性有机介质, 分子量较大, 分子间相互作用较强, 在固化后分子转向难以建立, 其损耗主要来自极性基团的松弛损耗, 无论在低频段还是高频段损耗都较大。

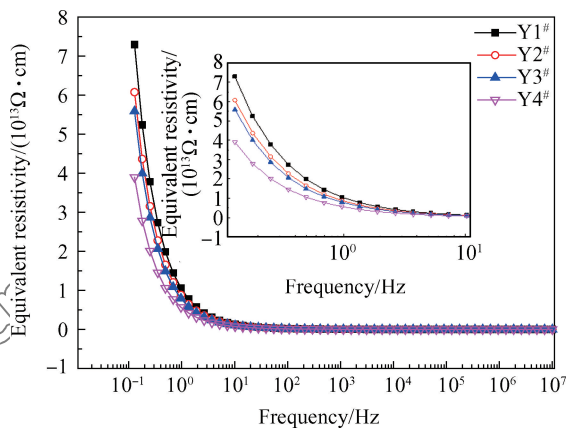


图 3 40℃时环氧云母绝缘等效电阻率随电老化时间的变化规律
Fig. 3 Electrical resistivity of epoxy-mica insulation changing rule with aging time at 40℃

介电常数在低频段随老化时间变化主要由界面极化引起, 而在高频段则与转向极化有关^[9]。大型发电机定子线棒主绝缘材料采用玻璃丝布补强粉云母带浸渍漆后热压成型, 属多层电介质组成的复合绝缘结构, 由于玻璃粉云母带与环氧胶黏剂的介电常数不同, 因此在外施电场作用下, 介质分界面会产生宏观上的空间电荷积聚, 这种复合绝缘结构中存在特殊的松弛极化即界面极化, 其弛豫时间由几秒到几十分钟不等, 且伴随有较高的能量损耗。由扫描电镜得到的环氧云母复合绝缘经电老化后表面结构改变可知, 在电老化过程中, 环氧胶的粘接强度降低, 使原本粘接牢固的部位产生气隙, 从而形成更多介质分界面, 导致界面极化加剧, 使介电常数实部在低频段随老化时间增长而增大。图 3 为 40℃时环氧云母绝缘等效电阻率随电老化时间的变化规律, 可见, 该种复合绝缘材料的等效电阻率会随着老化时间增长而减小, 且频率越低, 电阻率减小越明显, 即电导率随老化时间增长而增加。由后又红外光谱所得结论可知: 这是由于电老化使复合绝缘材料中极性基团活性增强, 偶极子转向极化随电老化时间增长而加剧, 同时使介电常数增大。

综上所述, 云母复合绝缘的介损主要有三方面: 粉云母纸、玻璃丝布、环氧胶黏剂三种介质相互接触产生介质分界面, 界面极化引起的介损; 环氧胶黏剂和玻璃丝布中含有的环氧树脂及其他极性杂质引起的松弛损耗; 云母材料位移极化引起的损耗。其中, 中低频段以界面极化损耗和极性介质松弛损耗为主, 高频段以位移极化损耗为主。

4.2 温度对环氧云母绝缘电性能的影响

定子线棒试样(Y2#)电老化 219 h 经不同温度

下的 FDS 测试后, 所得到其介损随频率变化曲线如图 4 所示。可知, Y2[#] 线棒绝缘材料的介损总体变化趋势为随着温度的升高而升高, 而在不同频率范围内的变化幅度有所不同, 在低频段($10^{-2} \sim 10^0$ Hz)温度由 20℃ 升高至 60℃ 的过程中介损变化不明显, 曲线在该频段存在峰值, 而当温度由 60℃ 升高至 80℃ 过程中, 该峰值逐渐消失; 中频段($10^0 \sim 10^3$ Hz)介损随温度上升明显上升, 原因是温度升高使绝缘材料分子热运动加剧, 载流子迁移率升高, 导致界面极化加剧; 高频段($10^3 \sim 10^6$ Hz)介损随温度变化不明显, 且四条曲线在该频段均出现另一峰值。

Y2[#] 的介电常数实部与虚部频谱曲线如图 5 所示。测试温度由 20℃ 升高至 80℃ 过程中, 复介电常数实部曲线在低频段随温度升高明显上移, 这种现象在高频区不明显, 复介电常数虚部曲线也随温度的升高而上移, 但在 20℃、 $10^{-1} \sim 10^2$ Hz 频率范围内曲线斜率变化不大, 当温度升高时, 该频率范围内曲线向上突出产生拐点, 该现象在 40℃ 和 60℃ 两个实验温度点处表现尤为明显, 而当温度升高至 80℃ 时, 曲线低频段斜率随频率降低逐渐增大, 曲线呈上扬趋势。复介电常数变化规律则与图 4 所示的介损曲线变化规律相似, 这符合介电常数虚部与介损相关。

以上分析表明, 该环氧云母复合绝缘材料的介电性能受温度影响明显, 在测试过程中应保证温度的一致性, 防止局部温度变化引起测试结果偏差。温度对电机绝缘的频谱曲线影响在 20~40℃ 间相对较小, 因而本文选择 40℃ 为参考温度点, 对复合绝缘 Cole-Cole 图进行拟合。

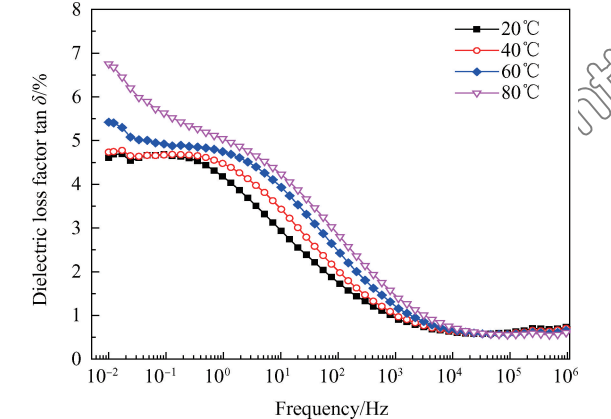


图 4 不同温度下环氧云母绝缘 Y2[#] 试样介损测试结果
Fig. 4 Dielectric loss of epoxy-mica insulation sample Y2[#] at different temperatures

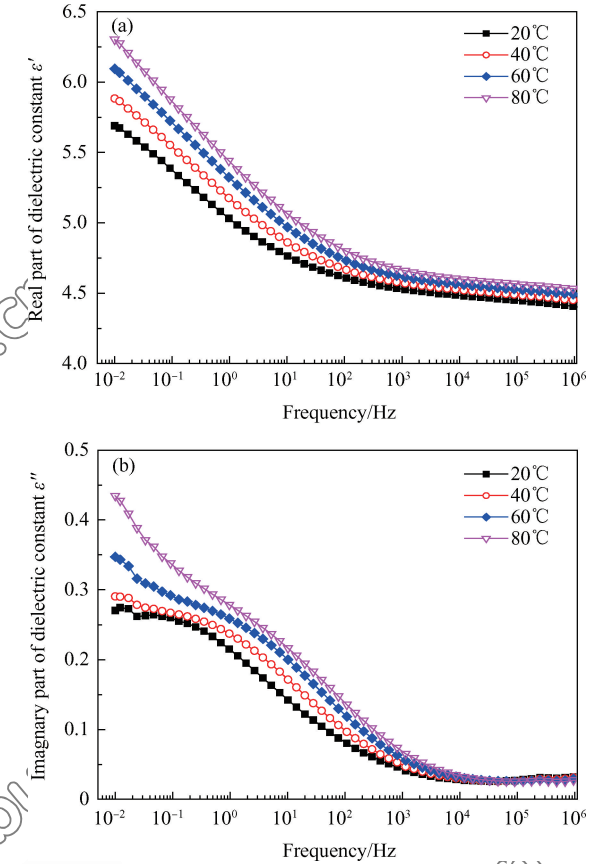


图 5 环氧云母绝缘相对介电常数 FDS 曲线
Fig. 5 FDS test result of dielectric constant of epoxy-mica insulation

5 HN 模型拟合

取各线棒 40℃ 时的介电常数实部为横坐标, 虚部为纵坐标作 Cole-Cole 图, 如图 6 所示。

利用 HN 模型对 Cole-Cole 图进行参数拟合, 所得参数如表 3 所示, 弛豫时间 τ 随电老化时间变化规律如图 7 所示。

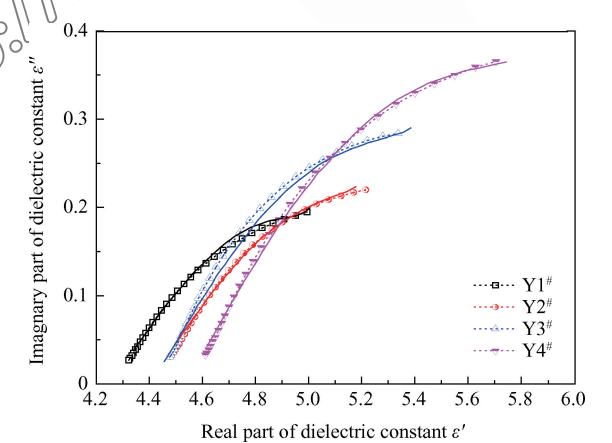


图 6 不同老化时间下环氧云母绝缘的 Cole-Cole 图
Fig. 6 Cole-Cole of epoxy-mica insulation of different aging time

表 3 HN 模型参数

Table 3 Parameters of HN model

Serial number	τ	ϵ_s	ϵ_∞	α	β	$\Delta\epsilon$
Y1#	0.430	4.247	5.153	0.697	0.358	0.906
Y2#	0.450	4.399	5.540	0.520	0.530	1.141
Y3#	0.474	4.409	5.737	0.572	0.534	1.328
Y4#	0.505	4.540	6.276	0.557	0.579	1.736

Notes: τ —Relaxation time; ϵ_s —Static dielectric constant; ϵ_∞ —Infinite dielectric constant; α —Width parameter; β —Asymmetry parameter; $\Delta\epsilon$ — $\Delta\epsilon = \epsilon_s - \epsilon_\infty$.

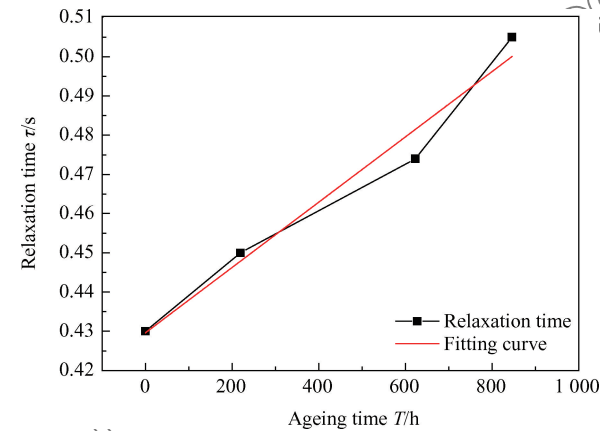


图 7 环氧云母绝缘弛豫时间随老化时间变化规律

Fig. 7 Relaxation time of epoxy-mica insulation changes with ageing time

弛豫时间按式(6)所示线性拟合，所有参数保留两位有效数字，所得参数如下：

$$\tau = \tau_0 + AT \quad (6)$$

$$\tau = 0.43 + 8.32 \times 10^{-5} T \quad (7)$$

J 厂制作的实验线棒，其复合绝缘材料弛豫时间总体上随电老化时间增加而增大，变化规律近似满足式(7)所示的线性关系，影响弛豫时间的因素可能有两种：其一是由于环氧云母复合绝缘中的有机材料在电老化过程中发生分子链断裂，产生新的极性基团，因此使单位体积内极性基团浓度增加，更易受外电场影响而发生极化，其二是由于环氧胶黏剂劣化导致网状空间结构破坏，原有极性基团活性增强，在外电场作用下转向速度加快。

形状参数随电老化时间变化规律如图 8 所示，其中形状参数 α 随电老化时间增长先由 0.697 大幅度减小至 0.520，而后在 0.550~0.6 之间波动，说明弛豫时间离散性随电老化时间增长而有所减小，这是由于电老化导致环氧云母绝缘中气隙增多，弛豫时间较长，界面极化逐渐占据主要地位；形状参数 β 单纯代表 Cole-Cole 图的不对称程度，与材料

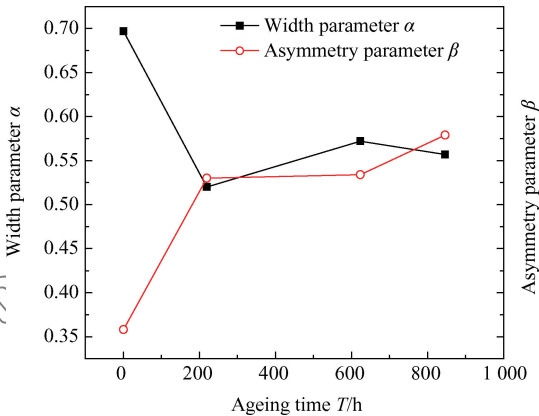


图 8 环氧云母绝缘形状参数变化规律

Fig. 8 Changing rule of shape parameters of epoxy-mica insulation

电老化性能没有明显关系，这里不再赘述。

6 电老化对环氧云母绝缘官能团的影响

电老化前后环氧云母绝缘的 FTIR 谱如图 9 所示。

云母 IR 谱特征吸收峰有 $3\,630\text{ cm}^{-1}$ 羟基， $1\,000\text{ cm}^{-1}$ Si—O 键， $530\sim 410\text{ cm}^{-1}$ 羟基^[19-20]，实验测得云母的 IR 谱波数有 $3\,630\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,027\text{ cm}^{-1}$ ；

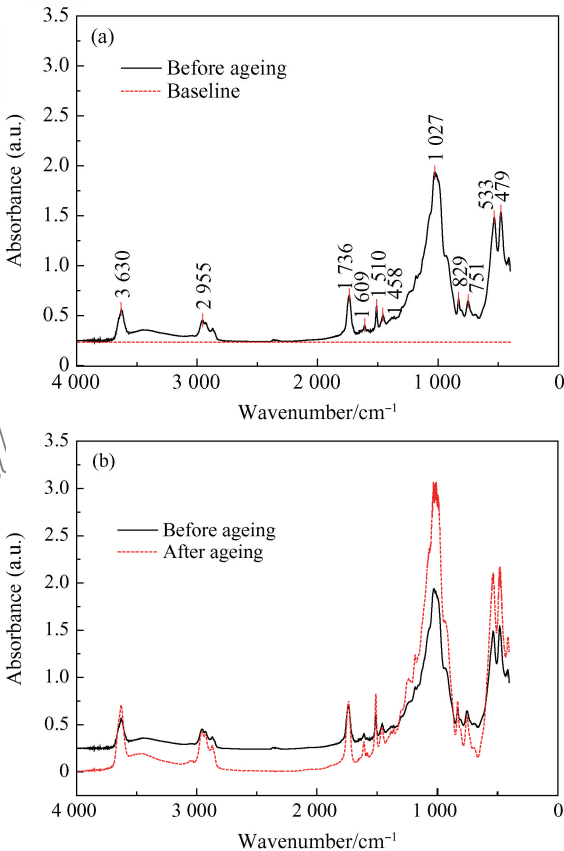


图 9 环氧云母绝缘老化前后红外光谱对比

Fig. 9 FTIR spectrum of epoxy-mica insulation before and after electrical aging

由图 9(a)可以发现,在波数 $1\,000\text{ cm}^{-1}$ 处存在多个吸收峰的叠加,玻璃纤维的 IR 谱通常出现在这个波数;实验测得的环氧固化物 IR 谱波数主要有:羟基 $3\,442\text{ cm}^{-1}$ 、甲基 $2\,955\text{ cm}^{-1}$ 、亚甲基 $2\,928\text{ cm}^{-1}$ 、羰基 $1\,736\text{ cm}^{-1}$ 、苯环 $1\,609\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,510\text{ cm}^{-1}$,苯的对位取代 829 cm^{-1} 。

由图 9(b)老化前后红外光谱对比可以发现,电老化前后没有新的吸收峰出现,说明电老化并没有使环氧云母绝缘发生化学成分改变,除甲基、亚甲基和羰基外,其它吸收峰强度均有不同程度增强,这说明电老化前后,复合绝缘材料的空间网状结构遭到破坏,使得本来因环氧胶黏剂固化而难以转向的极性基团活性增强,偶极子转向极化更容易建立,验证了环氧云母绝缘弛豫时间随电老化时间增长而减小的规律。

7 结 论

(1) 大电机定子线棒中环氧云母绝缘的介质损耗在全频带内随电老化时间增长而增大,在低频段变化明显,随频率升高变化逐渐减缓,介电常数实部随老化时间增长而增大,低频段电阻率随电老化时间增长而减小。

(2) 温度对环氧云母复合绝缘的介电性能影响较大,在中低频段,介损随温度升高而增大,在高频段变化不明显,介电常数随温度升高而增大。

(3) 利用 Havriliak-Negami 介电弛豫模型可以较好的拟合环氧云母绝缘材料的 Cole-Cole 图,所得弛豫时间随老化时间变化规律满足线性关系。

(4) 电老化不会使绝缘材料的化学成分发生改变,而是使绝缘中的环氧胶黏剂发生劣化,使其粘接能力下降,造成玻璃纤维、云母纸、环氧树脂相互剥离,同时在绝缘结构中形成气隙,影响绝缘介电性能。

参考文献:

- [1] 杜林.大电机主绝缘局部放电测量及老化特征研究[D].重庆:重庆大学,2004.
DU L. Study on measurement of partial discharge in large generator stator winding insulation and its aging characteristics [D]. Chongqing: College of Electrical Engineering Chongqing University, 2004 (in Chinese).
- [2] 付强,孔繁荣,陈庆国.桐马环氧玻璃丝粉云母绝缘材料的耐盐雾湿热老化特性[J].复合材料学报,2014,31(3): 851-858.
FU Q, KONG F R, CHEN Q G. Ageing characteristics of

tong-ma epoxy glass fiber power mica insulation materials under salt spray and humidity thermal condition[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 851-858 (in Chinese).

- [3] 关玉薇,张连彬,徐冰,等.大型水轮发电机环氧粉云母绝缘的老化诊断和寿命预测[J].大电机技术杂志,1998,2: 26-30.
GUAN Y W, ZHANG L B, XU B, et al. Deterioration diagnosis and life estimation of epoxy-mica paper insulation on large hydrogenerators [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 1998, 2: 26-30 (in Chinese).
- [4] TAYLOR N, EDIN H. Stator end-winding currents in frequency-domain dielectric response measurements[J]. IEEE Dielectric and Electrical Insulation Society, 2010, 17(5): 1489-1498.
- [5] SUMEREDER C, WOSCHITZ R, MUHR M. Polarization-depolarization measurements at insulation systems for rotating machines[J]. International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2005, 3: 706-709.
- [6] 杜振波,刘雨,张连星.基于频域介电谱的变压器油纸绝缘老化机理研究[J].电工电气,2012(12): 6-11.
DU Z B, LIU Y, ZHANG L X. Research on transformer oil-paper insulation aging mechanism based on frequency domain spectrum[J]. Electrotechnics Electric, 2012(12): 6-11 (in Chinese).
- [7] SHAYEGANI A A, GOCKENBACH E, BORSI H, et al. Investigation on the transformation of time domain spectroscopy data to frequency domain data for impregnated press-board to reduce measurement time[J]. Electrical Engineering, 2006, 89(1): 11-20.
- [8] BOINARD P, PETHRICK R A, BANKS W M, et al. Non destructive evaluation of adhesively bonded composite structures using high frequency dielectric spectroscopy[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(6): 1331-1337.
- [9] 唐彪.基于极化去极化电流法的变压器油纸绝缘状态研究[D].上海:上海交通大学,2012.
TANG P. Study of oil-paper insulation transformers' aging state based on PDC method [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012 (in Chinese).
- [10] VOROS C, NEMETH B, CSEPES G, et al. Investigation of complex, in-homogenous insulation system with multiple time constant by recovery voltage measurement (RVM) [C]. Ottawa: Electrical Insulation Conference, 2013: 35-39.
- [11] FARAHANI M, BORSI H, GOCKENBACH E. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain on insulation system of high voltage rotating machines [C]. Toulouse: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2004: 5-8.
- [12] 姚森敬,田杰,汤明杰,等.基于频域介电谱法的变压器油纸绝缘套管受潮状况分析[J].南方电网技术,2014,8(4): 53-55.

- YAO S J, TIAN J, TANG M J, et al. Study on moisture assessment of oil-paper insulation bushings based on frequency domain spectrum[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 53-55 (in Chinese).
- [13] 王晓剑, 彭倩, 刘君, 等. 基于最小二乘法的变压器油纸绝缘频域介电谱法的研究[J]. 绝缘材料, 2012, 45(4): 64-72.
- WANG X J, PENG Q, LIU J, et al. Least square method-based frequency domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation for transformer[J]. Insulating Materials, 2012, 45(4): 64-72 (in Chinese).
- [14] 段宗超, 吴广宁, 崔运光, 等. 铜类产物对油纸绝缘频域介电谱特性的影响[J]. 高压电器, 2014, 50(7): 14-20.
- DUAN Z C, WU G N, CUI Y G, et al. Impacts of copper-based products on the characteristics of frequency domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 14-20 (in Chinese).
- [15] SHAYEGANI A A, MOHSENI H, BORSI H, et al. Diagnostics of power transformers with dielectric response measurements[C]. IEEE International Power System Conference, Columbus, United States, 2005: 1-8.
- [16] LUNDGÅRD E, LINHJELL D, HESTAD L O, et al. High frequency dielectric response of paper/oil insulation [C]. Futuroscope: IEEE 16 th International Conference on Dielectric Liquids, 2008: 1-4.
- [17] FERNANDO M, NARANPANAWA W, RATHNAYAKE R, et al. Condition assessment of stator insulation during drying wetting and electrical aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2081-2090.
- [18] SUBOCZ J. Application of the FDS method for assessment of HV epoxy-mica-glass insulation[J]. Materials Science Poland, 2009, 27: 1229-1236.
- [19] 郝艳捧, 谢恒堃. 基于热重和红外光谱分析研究大电机定子线棒绝缘中环氧的老化过程[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 15-19.
- HAO Y P, XIE H K. Degradation behaviour of epoxy in stator insulation based on thermogravimetry and infrared spectrometry[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(13): 15-19 (in Chinese).
- [20] 郝艳捧, 谢恒堃. 红外光谱法研究运行 23 年大电机定子线棒主绝缘中环氧的老化机理[J]. 电工技术学报, 2008, 23(3): 19-23.
- HAO Y P, XIE H K. Degradation behavior of epoxy in stator insulation of large generators in service for 23 years based on infrared spectrometric analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(3): 19-23 (in Chinese).