复合材料学报 第19卷 第5期 10月 2002年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 19 No. 5 October 2002

文章编号: 1000-3851(2002)05-0102-06

# 大电机定子复合绝缘材料老化的动态力学分析

宋建成[1,2], 高乃奎[1], 成永红[1], 乐 波[1], 谢恒坤[1]
(1.西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 2. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 太原 030024)

**摘 要:** 对大电机定子环氧云母复合绝缘材料进行了长时间多因子应力老化,采用动态力学分析仪对不同老化阶段的复合绝缘材料进行了动态力学实验,分析了各力学参量与复合绝缘材料老化时间的关系。根据 Eyring 绝对反应速度理论,推导了复合绝缘材料玻璃化转变活化能的计算公式并计算了不同老化阶段复合绝缘材料的表观活化能。

**关键词:** 大电机; 复合绝缘材料; 多因子老化; 动态力学分析
**中图分类号:** TM85 **文献标识码:** A

# DYNAMIC MECHANICAL ANALYSIS OF DEGRADATION OF ROTATING MACHINE COMPOSITE INSULATION

SONG Jian-cheng[1,2], GAO Nai-kui[1], CHENG Yong-hong[1], YUE Bo[1], XIE Heng-kun[1]
(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The long-term accelerated aging test in laboratory environment has been conducted on the composite insulating materials of actual rotating coils subjected to combined stresses including electrical, thermal, mechanical vibration and thermal cycling factors under simulated conditions. The dynamic mechanical experiment of composite insulating materials has been carried out in different aging periods using Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) and the relationship between mechanical parameters and the aging time of composite insulating materials is also analyzed in this paper. Based on the Eyring absolute reaction speed theory, a method calculating the apparent activation energy of glass transition (AAEGT) is developed, which is used to calculate the AAEGT of composite insulating materials according to its mechanical dissipation curve in different aging periods.

Key words: large generator; composite insulating materials; multi-stress aging; DMA

七十年代以来,国内大型发电机定子绝缘普遍采用国际上流行的合成树脂云母复合绝缘结构,取代了沥青云母复合绝缘系统。合成树脂复合绝缘材料在发电机运行期间要遭受电、热、机械振动和冷热循环等多因子应力的联合作用,致使其绝缘性能逐渐下降,最终导致击穿,这是发电机电气故障的主要原因。对于运行时间较长的发电机,其复合绝缘的老化、诊断和剩余寿命评估问题日益突出。所以,研究大电机定子复合绝缘老化的诊断技术,评估其剩余寿命,对提高发电机的运行可靠性具有重要的现实意义。

对大电机定子复合绝缘老化的评定,长期以来采用绝缘电阻、介质损耗因子、直流泄漏电流、局部放电最大量等电气参量。这些电气参量仅能反映复合绝缘的某个侧面,并不能反映复合绝缘的整体老化程度,更不能预测复合绝缘的剩余寿命。Terase. H 在 60 年代就提出了用第一电流急增点和第二电流急增点电压以及交流复合参量来表征复合绝缘的老

收稿日期: 2001-02-14; 收修改稿日期: 2001-04-27
基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(59837260),国家重点实验室访问学者基金资助项目
作者介绍: 宋建成(1957),博士,教授,主要从事电力系统自动化、电力设备电气绝缘故障诊断、寿命评估及在线检测技术的研究。

化状态[1, 2]。

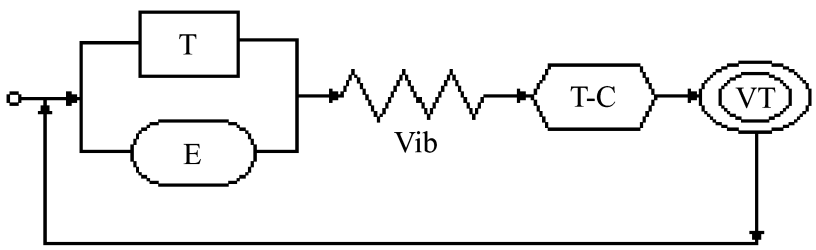
进入九十年代后，Kimura. K 等日本学者提出大电机定子复合绝缘的剩余击穿电压与介质损耗因数、介质损耗增量、交流电流急增率和最大局部放电量等参量之间有一定的相关性，而且与交流电流急增率相关性最大[3, 4]。而 Stone. G 通过现场试验认为复合绝缘的剩余击穿电压与上述参量没有相关性[5]。由此可见，电参量与复合绝缘剩余击穿电压有无相关性还需进一步的实验研究。

本文作者对不同老化阶段试样线棒合成树脂复合绝缘进行了动态力学分析，提出用动态力学参量来表征试样线棒复合绝缘老化状态的新方法。实验结果表明：动态力学参量如动态模量、玻璃化转变温度、动态力学损耗峰值、半峰值宽度和玻璃化转变活化能随复合绝缘老化时间而变化，能够有效地表征复合绝缘的老化状态。

## 1 复合绝缘的多因子老化试验

用于多因子老化的试样线棒取自谏壁发电厂 7 号机组，型号为 QFS-300-2，功率为 300MW，电压为 18kV，它采用环氧粉云母 B 级复合绝缘结构。该机组由上海电机厂 1975 年生产，于 1980 年 12 月投入运行，已有 19 年的运行历史。

按照图 1 所示的老化模型，试样线棒在文[6]所研制的老化装置上经历了长时间多因子老化。在不同的老化阶段，对试样线棒的复合绝缘进行了动态力学实验。




T—热；E—电；Vib—振动；T-C—热机械应力；VT—交流试验

图 1 发电机定子复合绝缘多因子应力老化模型

Fig. 1 Model of multistresses aging for generator stator winding insulation

## 2 动态力学分析的基本原理

动态力学分析是在程序控制温度下，研究材料在正弦振动载荷作用下的有关动态力学性能，如动态模量、力学损耗、动态粘度等随温度和频率变化的技术。

试验线棒的合成树脂复合绝缘材料是粘弹体，在正弦交变应力 $e(t) = e_m e^{ikt}$ 的作用下，其所产生的应变 $X(t)$ 滞后于应力一个角度 $W$。它们之间的关系可用复数模量 $E^*$ 表示

$$E^* = \frac{e(t)}{X(t)} = \text{烯}E^*\text{烯}(\cos W + i\sin W) = E'(k) + iE''(k) \quad (1)$$

式中：烯$E^*$烯是复数模量 $E^*$ 的绝对值；$e_m$ 为应力的幅值，N；$X_m$ 为形变的幅值，mm；k 为角频率，1/s；$E'(k)$ 表示复合绝缘在形变过程中由于弹性变形而存储的能量，称储能模量；$E''(k)$ 表示复合绝缘在形变过程中已热损耗的能量，称损耗能量。

损耗能量与存储能量之比就是力学损耗 $\tan W$，该量是复合绝缘材料的特征量，表示材料在形变过程中本身损耗能量的能力，即

$$\tan W = \frac{E''(k)}{E'(k)} \quad (2)$$

合成树脂复合绝缘的另一个力学特征参量是动态粘度，它是损耗模量与频率的比值，即

$$Z'(k) = E''(k)/k \quad (3)$$

合成树脂复合绝缘的结构很复杂，具有多重结构运动单元。由于分子运动将弹性能转变为分子运动的热能而损耗掉，使得 $E''(k)$ 或 $\tan W$ 和动态粘度 $Z'(k)$ 均出现内耗峰，内耗峰的位置和形状是具有指纹特征的。

在定子线棒环氧云母复合绝缘材料中，由于多因子应力的作用，使其内部产生了气隙、分层和剥离现象，改变了材料界面相的结构，从而影响了复合材料的动态力学性能。它可以通过改变聚合物的玻璃化转变及阻碍聚合物大分子链侧基旋转或主链局部运动而间接地表现出来，也可以通过复合材料的动态模量和动态粘度的变化量来表征界面的粘结强度，因而动态力学分析也是研究复合材料结构变化、老化状态和性能的有效手段。

发电机定子线棒复合绝缘属于典型的层状多相体系结构。在多相体系中各相都是按一定的聚集态形式存在，因为相互交错，所以连续性较小的相或不连续的相就被分割成很多小区域，称为相畴。随着复合绝缘的不断老化，其相畴也发生相应的变化。相畴的大小、形状与分布，相界面的结构与形态，以及组成多相材料各组分的性能均对多相体系的动态力学性能有决定性影响。参考传统复合材料的三相模型，根据两相混合定律，考虑老化后复合绝缘界面相的影响，合成树脂复合绝缘材料的力学损耗可表示为

$$\tan\delta = \frac{E_f' V_f \tan\delta_f + E_i' V_i \tan\delta_i + E_m' V_m \tan\delta_m}{E_f' V_f + E_i' V_i + E_m' V_m} \quad (4)$$

式中: $E_f'$, $E_i'$ 和 $E_m'$ 分别为复合材料中填料、界面相和聚合物基体的储能模量; $E_f''$, $E_i''$ 和 $E_m''$ 分别为复合材料中填料、界面相和聚合物基体的力学损耗因子。

松弛活化能是环氧云母绝缘复合材料的玻璃化转变表观活化能, 它表示分子从一个平衡位置到另一个平衡位置所必须的能量。松弛活化能的大小可反映松弛时间与温度之间的关系, 也就是说它可以反映 T松弛与温度之间的关系, 即力学损耗因子与温度的关系。

根据 Eyring 绝对反应速度理论, 由热力学方程和 Maxwell 力学模型可求出力学损耗和玻璃化转变活化能及绝对温度之间的关系为

$$\ln \tan\delta = \ln \frac{T}{kA} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (5)$$

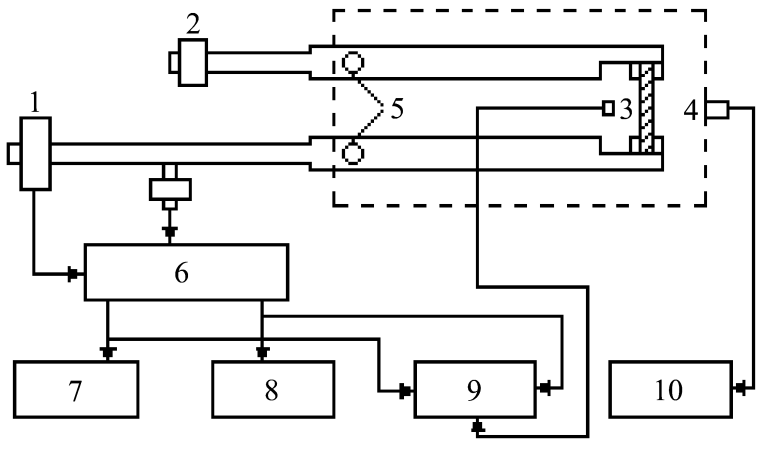
式中: $\tan\delta$ 为力学损耗; $\Delta H$ 为玻璃化转变活化能; T 为绝对温度; R 为气体常数; A 为常数; k 为角频率。若用与温度无关的常数 B 代替 A/T 项, 则上式变为

$$\ln \tan\delta = B - \Delta H / RT \quad (6)$$

由式可见, $\ln\tan\delta$-1/T 为一直线。当然, 由于聚合物分子松弛的复杂性及多重性, 此直线关系只存在于某一限定的较窄的温度范围内, 如力学损耗温度谱的上升过程。由此直线便可求出松弛活化能。

## 3　动态力学特性的实验与测量

复合绝缘的动态力学参数采用美国杜邦公司生产的 Du Pont DMA983 型动态力学分析仪测试, 测试原理如图 2 所示。




1—电力转换器; 2—平衡重量; 3—热电耦; 4—试样; 5—活动支点; 6—驱动器; 7—频率显示; 8—阻尼显示; 9—记录仪; 10—程控器

图 2　动态力学测试原理框图

Fig. 2　Simplified diagram of dynamic mechanics

该测试系统采用固定-固定式强迫共振技术的工作原理, 将一个周期变化的力或力矩施加到片状合成树脂复合绝缘试样上, 同时检测任一温度下振动体系的共振频率和恒幅振动所需补偿的能量(即阻尼), 通过程序计算试样的存储能量、力学损耗和动态粘度等参数。

由于试样线棒复合绝缘经过一定时间的多因子老化后, 其内部出现了气隙、分层和剥离等老化特征。因此, 在制作试样时必须讲究制作工艺, 不能因人为因素而使线棒绝缘产生附加损伤。

为了提高存储能量 $E'$ 和力学损耗 $\tan\delta$ 的测量精度, 必须提高试样尺寸、密度和共振频率的测量精度。为此, 要精心制备均匀的试样, 并用精确的卡尺测量其尺寸。长度精确到 0.1% 以内, 厚度精确到 0.4% 以内, 采用的数字式频率计精确到 0.1 Hz～1 Hz。根据精度要求, 制作试样的基准外形尺寸为 40 mm×11 mm×2 mm。

根据时-温等效原理, 实验采用固定振动频率, 逐渐改变试样温度的方式进行。升温速度为 5 ℃/min, 振动频率为 5 Hz, 振幅为 0.3 mm, 热扫描温度范围为 0 ℃～200 ℃, 振动方式为共振方式。

## 4　实验结果与讨论

(1) 动态模量与老化时间的关系

玻璃化转变温度 $T_g$ 是反映聚合物力学性能的重要特征参量, 但是如何确定 $T_g$, 有关文献报道的方法并不相同。本文作者参考文献[7], 将动态模量温度谱玻璃化转变区发生第一个转折处两条直线外延的交点所对应的温度定义为玻璃化起始转变温度 $T_{gs}$; 将玻璃化转变区第二个转折处(转向高弹态)两条直线外延的交点所对应的温度定义为玻璃化转变结束温度 $T_{ge}$。因此, 玻璃化转变区的宽度就是结束温度和起始温度的差, 即 $\Delta T_g = T_{ge} - T_{gs}$。各点温度的对应关系如图 3 所示。

图 4 是不同老化阶段部分试验线棒复合绝缘的动态模量温度谱。图中 1、2、3、4、5、6 分别代表 29#、20#、40#、33#、17# 和 A1(严重热老化的线棒)线棒的动态模量温度谱, 各线棒的老化状况和动态力学特征参量如表 1 和表 2 所示。

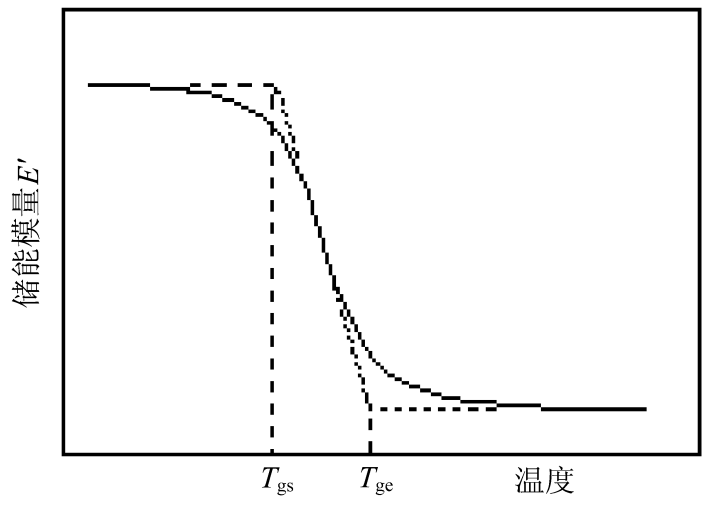



图 3 玻璃化转变温度确定示意图

Fig. 3 The diagram of glass transition temperature

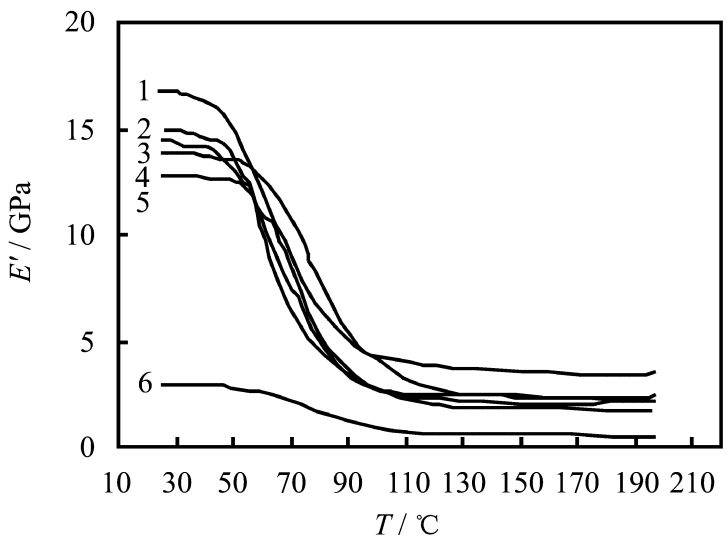



图 4 不同老化阶段动态模量温度谱

Fig. 4 Temperature spectrum in different aging periods

表 1 用于动态力学分析线棒的老化状况

Table 1 Aging condition of the specimen for DMA

| 线棒号 | 电热老化/h | 机械振动/h | 冷热循环/次 |
|---|---|---|---|
| 29 | 284 | 48 | 122 |
| 20 | 390 | 96 | 140 |
| 40 | 537 | 203 | 137 |
| 33 | 763 | 422 | 176 |
| 17 | 1202 | 216 | 92 |
| A1 | 严重热老化 | | |

表 2 不同老化阶段线棒的动态力学特征参量

Table 2 DMA characteristic parameters in different aging periods

| 线棒号 | 玻璃态 E′/GPa | 高弹态 E′/GPa | $T_{gs}$/℃ | $T_{ge}$/℃ | $\Delta T_g$/℃ |
|---|---|---|---|---|---|
| 29 | 16.70 | 5.521 | 51.3 | 92.3 | 41.0 |
| 20 | 14.91 | 2.212 | 52.5 | 95.4 | 42.9 |
| 40 | 14.40 | 2.430 | 53.2 | 97.1 | 43.9 |
| 33 | 13.80 | 2.200 | 59.4 | 107.2 | 47.8 |
| 17 | 12.73 | 1.676 | 57.9 | 108.5 | 50.6 |
| A1 | 2.91 | 0.449 | 63.1 | 110.6 | 47.5 |

由表可见, 随着老化时间的增长, 玻璃态的动态存储模量在不断减小, 相应的高弹态动态模量也在减小, 玻璃化转变起始温度逐渐增大, 但玻璃化转变结束温度变化规律不明显。尽管动态力学实验没有按单因子老化时间长短来测试, 但根据多因子老化强度和老化时间分析, 玻璃态存储模量、高弹态存储模量和玻璃化转变起始温度的变化趋势是非常明显的。

根据动态存储模量的定义, 在应变滞后应力相位角一定时, 存储模量是应力幅值与其所产生应变幅值的比。老化时间增长, 合成树脂复合绝缘材料中的气隙增加, 云母带间分层增大, 在很小的应力作用下就会产生很大的应变, 因此, 动态存储模量减小。如表 2 中的 A1 线棒, 它经历了严重的热老化, 复合绝缘分层非常明显, 其动态存储模量在玻璃态和高弹态分别为 2.910 GPa 和 0.4488 GPa, 它较多因子老化一个循环后的 29# 线棒分别降低了 82.6% 和 87.2%。从老化机理分析, 环氧云母复合绝缘材料在高温作用下, 会产生降解和交联两种反应, 降解导致主链断裂, 分子量降低, 力学性能破坏; 交联导致高分子链间的化学键形成, 使聚合物发硬、变脆和聚合度降低。在电压作用下, 会产生局部放电老化, 局部放电又促使放电氧化交联反应加剧, 除了产生羰基和交联氧桥外, 还会产生双键、羟基、酯基及含氮极性基等[8]。在机械振动应力的作用下, 环氧云母复合绝缘材料会产生机械疲劳, 其中最重要的是机械降解作用产生的大游离基, 它对分子主链中化学键的化学本质影响较大, 主链刚性越大, 则越易降解。机械降解作用的产物主要是大分子碎片, 也会形成新的端基, 在局部放电作用下, 这种降解更加明显。另外环氧云母复合绝缘中的界面两侧容易出现应力集中现象, 通过机械降解作用使最初的气隙发展成裂缝、裂纹甚至分层。由此可见, 热降解、化学降解和机械降解是玻璃化转变起始温度升高, 动态模量减小的根本原因。

(2) 力学损耗与老化时间的关系

描述力学损耗的参数有损耗峰值 tanW, 峰值对应温度 $T_m$ 和半峰高宽度 $T_w$, 其定义如图 5 所示。

图 6 是不同老化阶段各线棒绝缘的力学损耗温度谱。图中, 1～6 温度谱的试样与图 4 中的意义相同。由图可见, 随着老化时间的增长, 力学损耗峰向温度增高的方向移动, 玻璃态损耗和峰值损耗 tanW 逐渐下降, 半峰值宽度($T_2$- $T_1$)有所增加, 但增加

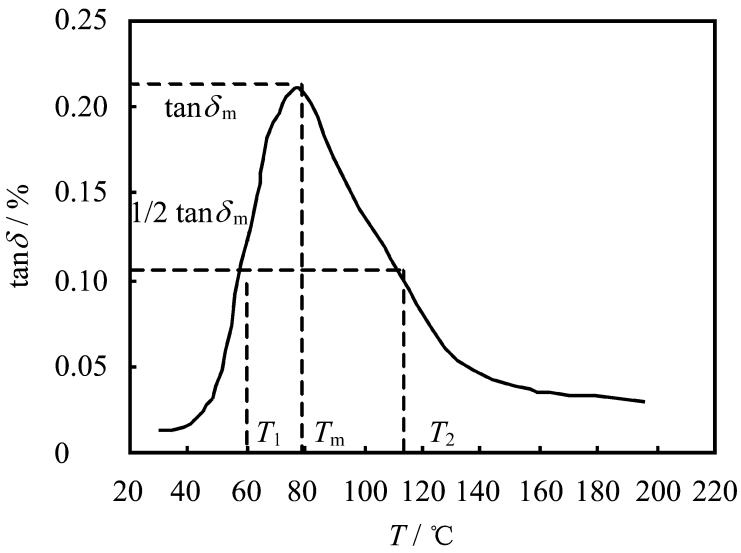



图 5　力学损耗温度谱的物理参数

Fig. 5　Parameters of temperature spectrum of tanW

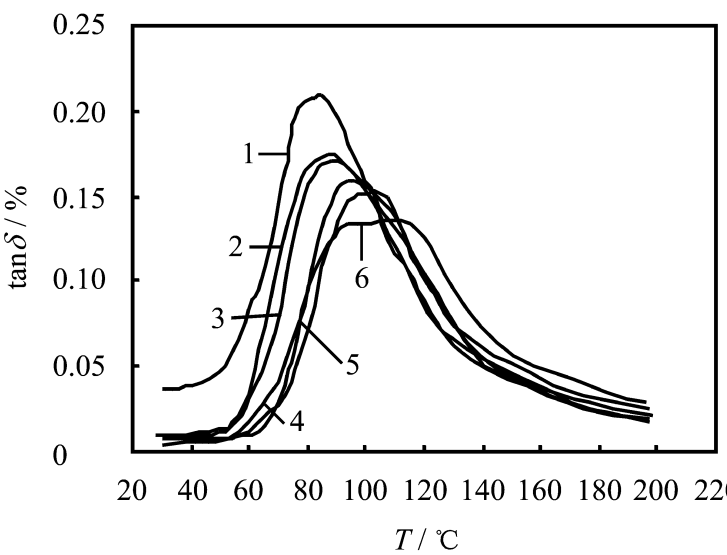
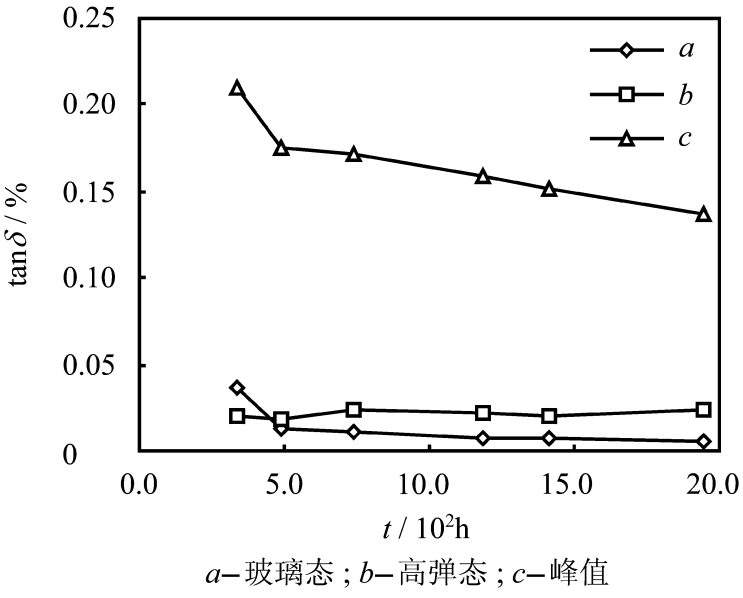



图 6　不同老化阶段力学损耗温度谱

Fig. 6　Temperature spectrum of tanWin different aging periods

幅度不大。力学损耗峰值、玻璃态和高弹态的损耗值随老化时间的变化如图 7 所示。

由图 7 可见, 玻璃态损耗和峰值损耗随老化时间下降趋势比较明显, 而高弹态的变化规律不明显。

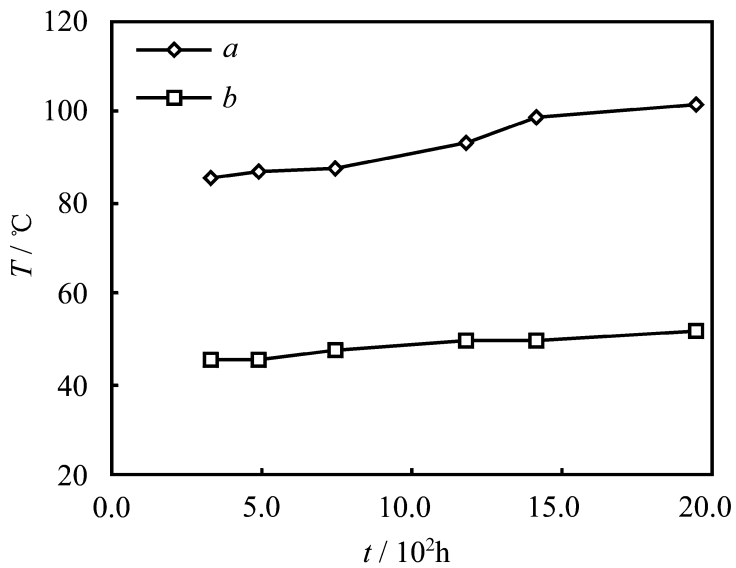



a—峰值温度 ; b—高弹态 ; c—峰值

图 7　不同老化阶段各状态力学损耗的变化

Fig. 7　tanWin different aging periods for different states

力学损耗峰值温度和半峰值宽度随老化时间的变化如图 8 所示。图中, a, b 分别代表峰值温度和半峰值宽度。由图可见, 峰值温度 $T_m$ 随老化时间逐渐升高, 而半峰高宽度 $T_w$ 随老化时间呈增长趋势。




a—峰值温度 ; b—半峰高宽度

图 8　不同老化阶段力学损耗温度特征

Fig. 8　Temperature characteristics of tanW in different aging periods

根据试验结果分析, 聚合物复合材料在老化过程中, 结构主要变化是交联、致密化、分子链断裂和产生新的化合物。由此引起分子运动的主要变化是各分子运动单元的运动活动性受到抑制。力学内耗峰向高温方向移动, 说明多因子老化使分子链断裂严重, 分子链柔性增加; 半峰值宽度增加说明环氧云母绝缘复合材料的均一性变差, 所谓均一性是指复合材料中两种共聚单体在链中的分布情况。由于两种单体活泼性的不同, 在共聚开始时, 较活泼单体所成的链节就较多, 在反应后期就较少, 这就造成了复合材料的不均一性。交联度的增加也是半峰值宽度增加的原因之一。

(3) 松弛活化能与老化时间的关系

由式(18)计算得到试验线棒环氧云母复合绝缘材料玻璃化转变表观活化能随老化时间的关系如图 9中的曲线所示。

由图可以看出, 随着老化时间的增长, 复合材料的总活化能增大。这可能是因为随着绝缘的进一步老化, 其中气隙增多, 使各相之间的界面增大, 产生了明显的界面效应。同时随着老化的进行, 绝缘材料中的分子交联、致密化、分子链断裂现象加重, 并产生新的化合物, 由此使分子运动的活动性受到抑制。另外伴随老化而产生的气隙、分层和剥离现象, 如图 10所示。对复合绝缘材料中分子链结构单元局部

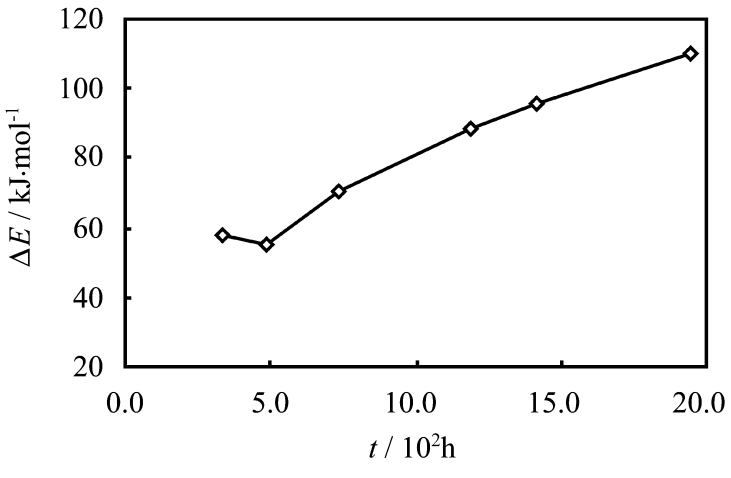



图 9 不同老化阶段线棒绝缘的松弛活化能

Fig. 9 Relaxing activation energy of stator bar insulation in different aging periods

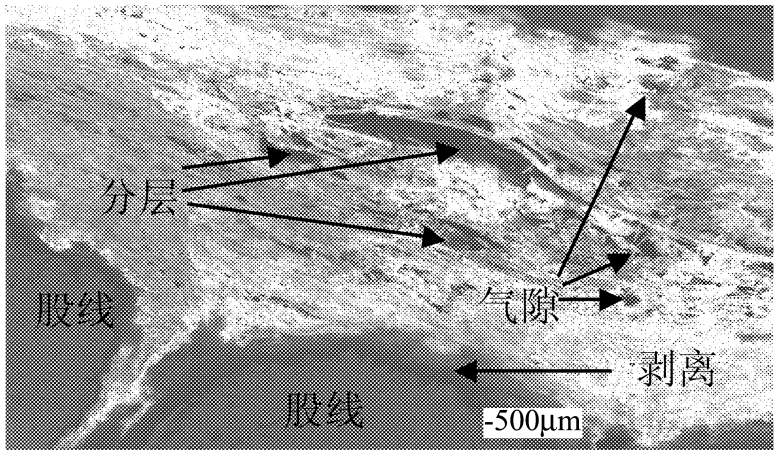



图 10 线棒复合绝缘老化后的气隙和分层现象

Fig. 10 SEM picture of specimen composite insulation

运动的阻碍作用增强, 从而导致复合绝缘材料的表观活化能提高, 使其发生玻璃化转变的力学损耗峰值降低, 峰值温度升高, 半峰高宽度加大。这进一步说明了图 4 和图 6 的实验结果。

## 5 结 论

(1) 提出了一种确定玻璃化转变区间的新方法。实验结果表明: 随着老化时间的增长, 玻璃态的存储模量在不断减小, 相应的高弹态存储模量也在减小, 玻璃化转变起始温度逐渐增大, 但玻璃化转变结束温度变化规律不明显。

(2) 绝缘材料的力学损耗温度谱的峰值、峰值点温度及半峰高宽度可以描述绝缘材料的老化状态。随着试验线棒复合绝缘老化程度的加重, 其谱峰逐渐降低, 谱峰点所对应的温度不断升高, 半峰高宽度进一步增加, 但变化幅度不大。

(3) 根据热力学方程和 Maxwell 力学模型, 导出了用 DMA 力学损耗温度谱计算复合绝缘材料玻璃化转变表观活化能的计算公式, 它与传统的计算方法相比简单方便。试验线棒复合绝缘的玻璃化转变表观活化能与其老化程度有关, 绝缘老化越严重, 其表观活化能越大, 这从另一角度证实了上述结论的正确性。

## 参考文献:

[1] Terase H. Consideration on proportional relations between the 2nd current rapid increase point and ac short-time breakdown voltage by ac testing method of generator coils [J]. JIEE Japan, 1963, 83: 272- 280.

[2] Terase H. A new AC current testing method for non-destructive insulation tests [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1980, 99(4): 1557- 1565.

[3] Kimura K, Kaneda Y, Itoh K. A new approach to breakdown voltage and nondestructive parameters of micaceous insulation systems [A]. Proc 3rd International Conf on PADM [C]. Tokyo, 1991. 769- 772.

[4] Kimura K, Kaneda Y. The role of microscopic defects in multi-stress aging of micaceous insulation [J]. IEEE Trans on DEI, 1995, 2(3): 426- 432.

[5] Stone G C. The ability of diagnostic tests to estimate the remaining life of stator insulation [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1988, 3(4): 833- 841.

[6] 宋建成, 乐 波, 谢恒左方. 大型发电机主绝缘多因子老化试验系统的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 9- 13.

[7] 马德柱, 何平笙, 徐种德, 等. 高聚物的结构与性能 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.

[8] 巫松桢, 谢大荣, 陈寿田, 等. 电气绝缘材料科学与工程 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.