

# 高频变压器绝缘材料的环氧预浸处理对放电特性的影响

赵义焜<sup>1,2</sup>, 张国强<sup>1,2</sup>, 李 康<sup>1</sup>, 刘 洋<sup>3</sup>, 杨富尧<sup>3</sup>

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 国家电网全球能源互联网研究院, 北京 102209)

**摘要:** 高频变压器长期运行于频率 1~20kHz 的非正弦电压下, 绕组层间绝缘材料的合理选取对样机可靠性具有重要意义。为此以 GHG 纸、GHG 环氧预浸纸、DMD 纸以及 DMD 环氧预浸纸为研究对象, 在 0~20kV、1~20kHz 双极性方波电压下开展层间绝缘材料放电特性实验, 对比材料在环氧预浸处理前后高频绝缘特性, 基于热击穿机理解释高频下预浸处理前、后的击穿场强变化规律, 利用 SEEA 模型分析预浸处理技术对闪络电压的影响, 最后提出环氧预浸技术在绕组层间绝缘中的应用建议。实验测试及理论分析结果表明, 预浸处理后材料内部及表层的气隙被填充, 在介电损耗尤为显著的高频条件下, 发热点与周围环境有效散热面积下降, 加速了材料热老化, 导致击穿场强下降; 对 GHG 纸预浸处理后, 电子陷阱俘获作用减弱, 导致闪络电压显著下降, 而 DMD 纸在预浸处理前后表面状况变化较小, 闪络电压基本不变; 在利用环氧预浸技术提升材料机械、电气性能的同时, 应充分考虑高频下预浸处理对材料散热性能、表面状况的影响, 上述研究为高频变压器层间绝缘材料选取与绕组绝缘优化设计提供借鉴。

**关键词:** 高频变压器; 环氧预浸; 热击穿机理; SEEA 模型

**DOI:** 10.12067/ATEEE1903025      **文章编号:** 1003-3076(2020)03-0001-08      **中图分类号:** TM433

## 1 引言

近年来, 电力电子变压器以其体积小、重量轻、功率因数可调等显著优势, 被逐渐应用于智能电网、能源互联网当中<sup>[1-4]</sup>。作为电力电子变压器的核心器件, 高频变压器起着隔离和传输功率的重要作用, 其绝缘性能决定着电力电子变压器性能的优劣, 也成为限制其大容量化、高频化发展的重要因素<sup>[5,6]</sup>。目前, 干式高频变压器的绕组结构主要有利兹线绕组、箔式绕组、空心绕组, 其绝缘材料一般采用合成绝缘纸、环氧树脂等<sup>[7-9]</sup>。绝缘材料长期工作在上升时间短、幅值大、频率高的非正弦电压下, 承受着高频电应力冲击, 电-热耦合效应也会加剧绝缘劣化, 发生击穿、闪络的概率大幅增加<sup>[10]</sup>, 故电气、耐热性能成为决定高频下材料绝缘性能的关键因素。研究高压高频条件下绝缘材料的放电机理以及预浸处理对放电特性的影响, 对进一步提升高频变压器

整体绝缘性能, 推动电力电子变压器向大容量化、高压高频化发展具有重要意义。

绝缘材料的击穿和沿面闪络是绕组内部绝缘故障的主要成因<sup>[11]</sup>, 也成为高频变压器匝间、层间绝缘材料选取的重要依据。因此, 国内外针对绝缘材料在高压高频下的放电特性开展了大量研究工作。在理论分析方面, B. Matthias 等人分析了频率对聚合物绝缘材料击穿电压的作用机理, 指出高频电应力下介质内部放电活动加剧, 介质损耗增加, 最终导致热击穿<sup>[12]</sup>; J. H. Mason 提出当电压频率升高, 电介质的放电重复频率显著增加, 导致绝缘强度降低<sup>[13]</sup>; 张冠军、严璋等人对沿面闪络机理与两种传统模型进行了对比和总结, 提出抑制体外过程可能是提高闪络电压的新途径, 表面陷阱分布是影响沿面放电特性的重要因素<sup>[14]</sup>。在实验研究方面, K. Elans 等人测试了聚四氟乙烯和聚丙烯的耐受电压, 发现 83kHz 下击穿电压值仅为 50Hz 下的 25%<sup>[15]</sup>;

**收稿日期:** 2019-03-11  
**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFB0903902)  
**作者简介:** 赵义焜(1993-), 男, 黑龙江籍, 博士研究生, 研究方向为高频变压器绝缘材料特性与散热方法;  
张国强(1964-), 男, 河北籍, 研究员, 博导, 研究方向为高压绝缘、新型输变电设备研究等。

周远翔、邢晓亮等人观测了高频正弦信号下聚乙烯击穿物理过程,发现材料的极化、疲劳和热效应导致其内部绝缘性能下降,使电树枝形态向击穿型发展的概率大幅增加<sup>[16]</sup>;S. N. Rao 等人在 10~30kHz 频率范围内先后对绝缘材料施加正弦波、三角波及方波电压,发现高频下电压波形对材料的击穿场强具有显著影响<sup>[17]</sup>;李庆民、刘涛等人研究了聚酰亚胺沿面放电形态及发展过程,发现频率升高导致闪络电压的降低和沿面寿命的缩短<sup>[10,18]</sup>。

目前,环氧预浸绝缘材料以其优异的电气性能、机械性能以及耐热性能被广泛应用于工频变压器层间绝缘当中,然而国内外尚未对绝缘材料在预浸处理前、后的高频放电特性进行对比研究。同时,现有研究<sup>[7-22]</sup>表明,高频下绝缘材料的热效应、介质表面状况等因素对放电特性的影响比工频条件下更为显著。据此,本文以双极性高频方波电压模拟高压高频变压器的实际运行工况,对环氧预浸处理前、后的层间绝缘材料开展放电特性对比实验,利用高频热击穿机理、二次电子发射雪崩模型分别解释环氧预浸处理对层间绝缘材料高频击穿、沿面放电特性的影响,以上为高频变压器层间绝缘材料的合理化选取提供借鉴。

## 2 实验方法

### 2.1 实验平台

高频放电测试平台如图 1 所示,为模拟高频变压器实际运行工况,研制 AIYS-20kV/100mA 型号的高频高压电源,可输出峰-峰值为 0~40kV、频率为 1~20kHz 连续可调的双极性高频方波信号,信号的幅值过冲低于 $\pm 5\%$ ,占空比 50%,最小方波宽度为 25 $\mu\text{s}$ ,上升、下降沿时间小于 5 $\mu\text{s}$ ,且无死区时间或直流偏置现象。在放电电极的高压输入端接入分压比为 1000、带宽为 75MHz、可测电压范围为 0~40kV 的泰克 P6015A 型高压探头,采集输出电压波形,利用罗氏线圈检测闪络瞬间的电流值。电压、电流测试信号被送至带宽为 300MHz 的泰克 MSO3034 型示波器对应监测通道,与计算机配合完成信号的采集和存储。

参考现有研究及相关标准<sup>[23,24]</sup>,设计用于层间绝缘材料放电特性实验的电极结构,如图 2 所示。等直径圆柱电极结构用于击穿实验,其直径为  $(25 \pm 1)\text{mm}$ ,高 25mm,边缘倒成半径  $(3.0 \pm 0.2)\text{mm}$  的圆弧。指型电极结构用于沿面闪络实验,电极前端曲

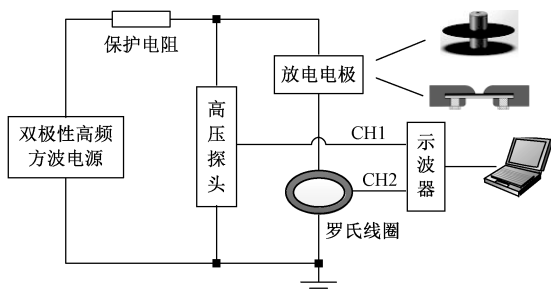
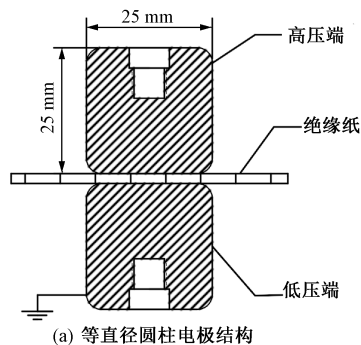


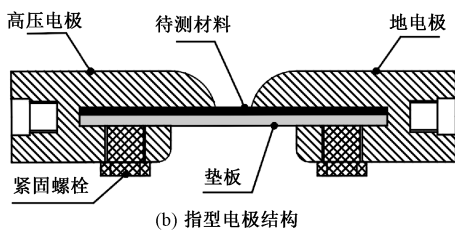
图 1 高频放电实验平台框图

Fig.1 Structure of high frequency discharge test platform

率半径为 10mm,内侧开有 4mm 宽的槽,待测材料放置 3mm 厚环氧树脂垫板上,通过调节紧固螺栓保证电极前端与材料表面紧密接触。



(a) 等直径圆柱电极结构



(b) 指型电极结构

图 2 放电电极结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of discharge electrode structure

### 2.2 待测材料选取

由于高频变压器的绝缘结构紧凑,同时局放、发热问题相较于工频电力变压器更为显著,故高频变压器的绝缘材料选取应具备标称厚度小、电气强度高、耐热性能好、化学性质稳定等特点。目前,常用于干式变压器绕组层间绝缘的固体绝缘材料主要有 410 型 Nomex 绝缘纸、6641F 型 DMD 绝缘纸以及 N650 型 GHG 绝缘纸等,在浇注型干式变压器中,也将浇注环氧树脂作为绕组绝缘材料,表 1 列出以上 4 种层间绝缘材料的典型性能指标。

对比各类层间绝缘材料的性能指标,发现浇注环氧树脂的介质损耗因数较高,故高频下热效应将尤为明显。而对于 3 种绝缘纸,除具有相对较低的

表 1 层间绝缘材料典型性能指标

Tab.1 Typical parameters of inter-layer insulation materials

绝缘材料	型号	电气强度 /(kV/mm)	耐热 等级	介质损耗 因数(%)
Nomex 纸	T410	17~33	H	0.7
DMD 纸	6641F	≥30	F	0.8
GHG 纸	N650	≥32	H	0.7
环氧树脂	双酚 A	16~18	F	3.8

介质损耗因数,耐热性能均达到 F 级(155℃)以上。另外,对 Nomex 纸、DMD 纸、GHG 纸以及浇注环氧树脂各进行了少量预实验,击穿预实验结果如图 3 所示。在 1~20kHz 频率范围内,Nomex 纸的击穿场强为 10.64~25.08kV/mm,明显低于 DMD 纸的高频击穿场强(17.75~35.65kV/mm)和 GHG 纸的高频击穿场强(13.9~28.65kV/mm)。与此同时,DMD 绝缘纸与 GHG 绝缘纸的最小标称厚度为 0.15mm,满足绕组绝缘结构紧凑的要求,故将本文的待测材料选为 DMD 绝缘纸和 GHG 绝缘纸。

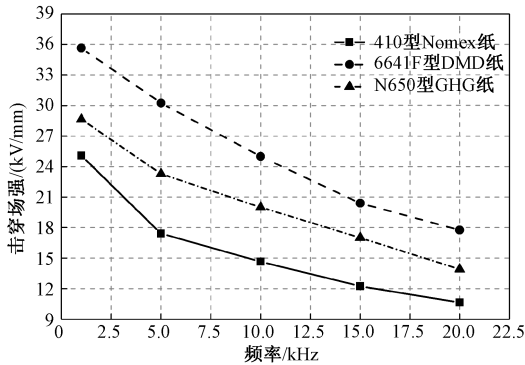


图 3 待测材料选取的高频击穿预实验  
Fig.3 Pre-experiment results for material selection

随着新型绝缘材料制备技术的发展,环氧预浸技术被逐步应用于变压器绝缘材料的性能提升方面。GHG/DMD 环氧预浸纸是由聚酯薄膜或聚酰亚胺薄膜、GHG/DMD 浸渍耐热改性环氧树脂烘焙而成,所涂覆环氧树脂含有环氧基、胺基等活性基团,在中高温时快速固化,与铜箔粘结牢固,在烘干固化时无低分子挥发物产生,形成收缩率极小的绝缘结构<sup>[25]</sup>。环氧预浸处理后的绝缘材料具有更好的机械、电气及耐热性能,在工频常温条件下绝缘寿命较长。参考干式变压器层间绝缘实际标称厚度,将 GHG 纸与 DMD 纸的样本厚度选为 0.20mm,将预浸绝缘纸样本厚度选为 0.23mm,基于图 1 所示的高频放电测试平台开展击穿、沿面放电研究。

3 实验结果及分析

3.1 环氧预浸处理对击穿场强的影响

为研究环氧预浸处理前、后的层间绝缘材料在高压高频下击穿特性的变化规律,在 1~20kHz 电压频率范围内开展击穿特性实验,采用 0.2kV/s 的升压速率进行匀速升压,直至待测绝缘材料发生击穿现象,各频率下对每种绝缘材料开展 20 组击穿实验,图 4 为 GHG 绝缘纸、DMD 绝缘纸、GHG 环氧预浸纸、DMD 环氧预浸纸的击穿场强随电压频率的变化情况。从图 4 可以看出,以上四类层间绝缘材料的击穿场强均随着频率的提升而显著下降,此外,在环氧预浸处理后,绝缘材料在高压高频条件下的击穿场强值下降至预浸处理前的 85.5%~89.2%。这与工频、常温下预浸处理前、后电气性能变化情况不一致。以下从电介质热击穿机理的角度对该实验结果进行解释。

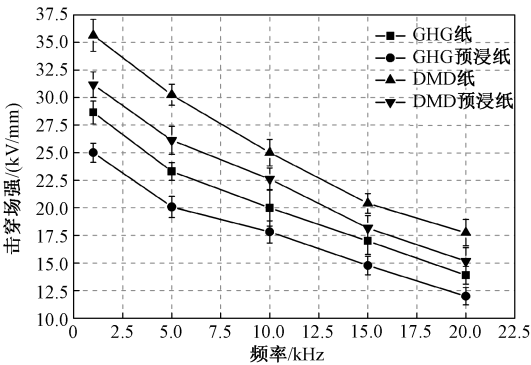


图 4 环氧预浸处理前、后击穿场强变化规律  
Fig.4 Variation of breakdown field strength before and after epoxy prepreg treatment

固体电介质的击穿类型可分为电击穿、热击穿和电化学击穿,根据现有研究,高频电应力下介质损耗大幅增加,使电介质以热击穿为主<sup>[22, 26]</sup>。计及频率影响的固体电介质发热量  $\theta_F$ 、散热量  $\theta_s$  以及击穿场强  $E$  计算式为:

$$\theta_F = b f U^2 \frac{S_1}{d} \varepsilon \tan \delta \tag{1}$$

$$\theta_s = B \Delta t S_2 \tag{2}$$

$$E^2 = \frac{B \Delta t S_2}{b f d S_1 \varepsilon \tan \delta} \tag{3}$$

式中, $b$  为常数; $f$  为实验频率; $S_1$  为介质表面积; $S_2$  为有效散热面积; $d$  为介质厚度; $\varepsilon$  为电介质的介电常数; $\tan \delta$  为介质损耗因数; $B$  为介质导热系数; $\Delta t$  为介质内部发热点与环境温度之差。

根据式(1)~式(3)可知,固体电介质的发热量主要受到频率、介电常数以及介质损耗因数的影响。其中, $\varepsilon$ 反映了电场作用下介质内部各种带电粒子的束缚运动状态,当电场频率升高,分子的极化受到抑制甚至来不及随频率作完全定向,使介电常数下降。而  $\tan\delta$  是衡量电介质内部能量损耗的参数,高频下电-热耦合效应将导致介质损耗因数的增大。同时,散热量主要与介质内外温度差、介质有效散热面积相关,与电压频率无直接相关性。此外,虽然环氧预浸处理使 GHG 绝缘纸、DMD 绝缘纸内部绝缘结构更加致密,使其工频、常温下耐压性能得到一定程度的提升,但频率的升高导致介质内部放电活动加快而产生热不稳定现象。在环氧预浸处理后,形成的致密表层结构使材料内部发热点与周围环境的有效散热面积  $S_2$  减小,根据式(2)可知,散热量会随有效散热面积的减小而下降。据此,经过环氧预浸处理的绝缘材料在高频下同时受到发热量剧增、散热量减小的影响,热击穿场强的下降幅度大于环氧预浸处理前的绝缘材料,图 5 表征环氧预浸处理对高频下绝缘材料热击穿过程中关键参量的影响。

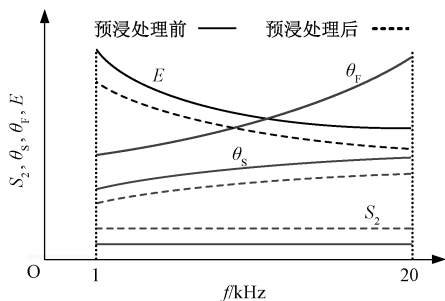


图 5 预浸处理前后关键参量变化情况

Fig.5 Variation of  $S_2$ ,  $\theta_F$ ,  $\theta_S$  and  $E$  before and after prepreg

### 3.2 频率对沿面放电发展的作用机理讨论

为深入分析环氧预浸处理对沿面闪络电压的影响,首先需要讨论电压频率对绝缘材料沿面放电发展过程的作用机理。固体绝缘材料沿面闪络的形成可分为起始阶段、发展阶段以及闪络击穿阶段。目前,国内外学者对于闪络形成过程的第一、三阶段的物理机制已基本达成共识,而对于放电发展阶段,被普遍接受的是二次电子发射雪崩 (Secondary Electron Emission Avalanche, SEEA) 模型<sup>[27]</sup>。该模型认为沿面闪络是由电子轰击材料表面所致,具体的放电过程为:当高压施加到材料表面,由于绝缘表面、阴极、空气三者交界处局部场强较高,引起场致发射,形成初始电子;初始电子在电场作用下获得能量

并撞击材料表面,在入射路径附近引起原子电离并释放二次电子,二次电子逸出表面后被电场加速引起新的电离,这个过程的持续进行会发展成二次电子雪崩;电子对绝缘表面不断撞击使被吸附在表面的部分气体分子获得能量而被释放出来或被电离,形成脱附气体,随雪崩向阳极移动直至最终形成闪络。图 6 表述了沿面闪络形成的整体过程。

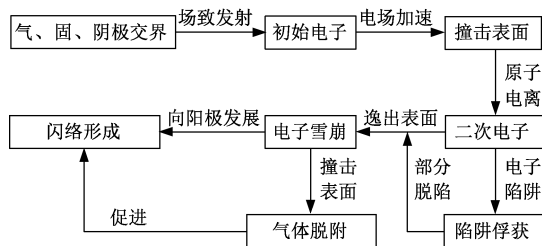


图 6 基于 SEEA 理论的闪络形成过程

Fig.6 Flashover formation process based on SEEA theory

目前,SEEA 模型已被广泛用于直流、工频条件下固体电介质沿面放电特性分析当中。根据现有实验研究结果,直流电压下电子雪崩撞击材料表面所诱导的气体脱附环节是影响沿面放电发展的主要因素,据此,有研究者采用材料表面涂层、改变表面粗糙度等方法,使直流沿面闪络电压大幅提高<sup>[28,29]</sup>。而对于工频交流电压,介质表面的二次电子发射、二次电子倍增阶段均会对沿面闪络电压产生重要影响,其中,二次电子倍增过程受到介质表层的电荷捕获/脱附特性、介质体电荷输运特性以及气体脱附特性的影响<sup>[30,31]</sup>。由于国内外尚未针对高频下固体电介质的沿面放电发展过程建立起成熟的理论,下文将重点参考工频电压下沿面放电发展机制,研究频率的提升、环氧预浸处理对沿面放电特性的影响。

将电极前端间距设置为 10mm,在 1~20kHz 频率下对 DMD 绝缘纸开展沿面放电实验研究,记录起始放电、闪络电压值,如图 7 所示。从图 7 可以看出,在双极性高频方波电压下,绝缘材料的起始放电电压基本不受电压频率的影响,而闪络电压随着频率的升高而显著下降,当频率由 1kHz 提升至 20kHz,闪络电压值由 14.65kV 下降至 11.7kV。该结果表明频率对初始电子的形成阶段影响较小,而在电子倍增阶段,频率的增加导致二次电子雪崩的发展速率大幅提高,导致绝缘材料的闪络电压大幅下降。由此可见,频率对闪络形成的第二阶段影响最为显著,此时材料表面状况成为沿面闪络电压的主要影响因素。

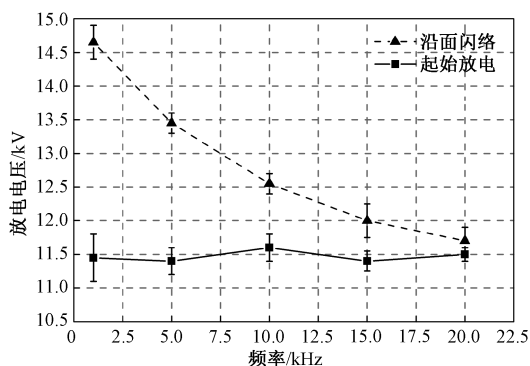


图7 起始放电电压和闪络电压随频率变化情况

Fig.7 Inception and flashover voltage versus frequency

### 3.3 环氧预浸处理对闪络电压的影响

为研究绝缘材料在环氧预浸处理前、后闪络电压变化规律,对 GHG 纸及 GHG 预浸纸、DMD 纸及 DMD 预浸纸开展沿面放电实验,图 8 为绝缘材料在预浸处理前、后的闪络电压平均值变化情况。从图 8 可以看出,DMD 绝缘纸与 DMD 预浸纸在各频率下闪络电压值相近,差值在 0.1kV 以内。而 GHG 纸与 GHG 预浸纸的闪络电压相差较大,在 1~20kHz 频率范围内,GHG 绝缘纸的闪络电压比 GHG 预浸纸高出 0.88~1.18kV。

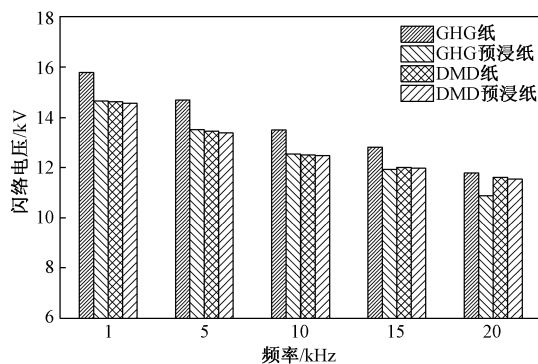


图8 环氧预浸处理前、后闪络电压对比

Fig.8 Comparison of flashover voltage before and after epoxy prepreg treatment

基于 SEEA 模型及电子陷阱理论分析实验结果,在二次电子碰撞材料表面进而发展成为电子雪崩的过程中,材料表层存在着电荷入陷、脱陷行为,部分二次电子在被陷阱俘获后没有足够的能量脱离电子陷阱,导致参与后续电子雪崩发展的电子数减少,而电子俘获过程与材料表层状况密切相关。图 9 为两种绝缘材料在预浸前、后材料表面状况,由于预浸处理后 GHG 绝缘材料表层形成更为致密的绝缘结构,减弱了电子陷阱对二次电子的俘获作用,在

一定程度上促进了沿面放电发展,因此 GHG 绝缘纸在预浸处理后闪络电压显著下降。图 10 显示了环氧预浸处理对 GHG 绝缘纸沿面放电过程中电子陷阱俘获的影响,在环氧预浸处理后,二次电子的脱陷数与入射电子数比值增大。而对于 DMD 绝缘纸,在预浸处理前、后材料表层结构变化较小,故闪络电压未发生明显变化。

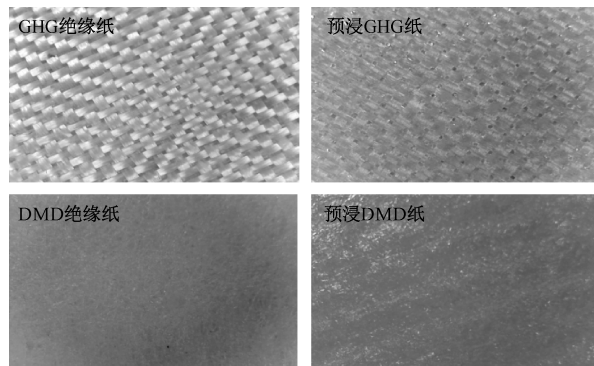


图9 预浸处理前、后材料表面状况对比

Fig.9 Surface conditions of materials before and after prepreg treatment

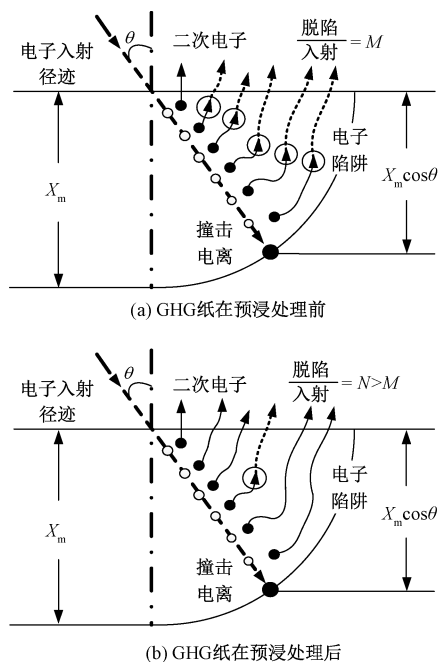


图10 预浸处理对电子陷阱俘获的影响

Fig.10 Effect of prepreg treatment on electronic trap capture

## 4 结论

(1)在双极性高频方波电压下,介质发热量远高于散热量,热失衡的加剧导致击穿场强随频率提升而显著下降。环氧预浸处理后,GHG 绝缘纸与

DMD 绝缘纸内部及表层气隙被填充,虽然工频、常温下耐压性能得到提升,但在热效应较为严重的高频条件下,环氧预浸处理后,材料的击穿场强值下降至预浸处理前的 85.5%~89.2%。

(2)当频率由 1kHz 提升至 20kHz 时,起始放电电压基本不变,闪络电压下降至原值的 79.8%。表明频率对初始电子的形成阶段影响较小,但频率升高使电子倍增阶段过程中二次电子雪崩发展速率大幅提高,导致沿面闪络电压大幅下降,高频下介质表面状况是闪络电压的主要影响因素。

(3)DMD 纸在预浸处理前后,闪络电压变化较小,预浸处理后 GHG 纸表层状况发生明显变化,电子陷阱俘获行为受到抑制,其闪络电压下降 0.88~1.18kV,下降幅度为 DMD 经预浸处理后降幅的 8 倍以上。

(4)高频变压器绕组绝缘材料选取时,应综合考虑高频电-热耦合效应、介质表面状况对击穿、沿面放电特性的影响,同一种预浸处理方法未必适用于不同运行工况下材料绝缘性能的提升。通过预浸处理方法的改进或材料表面改性技术的应用,有望使介质表层状况向预期目标改善,从而实现高频下闪络电压的提高。

**致谢:**本文得到许继变压器有限公司提供的绝缘材料支持,谨此致谢。

## 参考文献 (References):

[1] Xu S, Alex Q H, Burgos R. Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1 (3): 186-198.

[2] 李子欣, 高范强, 赵聪, 等 (Li Zixin, Gao Fanqiang, Zhao Cong, et al.). 电力电子变压器技术研究综述 (Research review of power electronic transformer technologies) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38 (5): 1274-1289.

[3] 刘向龙, 刘友波, 张宸宇, 等 (Liu Xianglong, Liu Youbo, Zhang Chenyu, et al.). 基于电力电子变压器的交直流混合配电网功率-电压协调控制 (Coordinating voltage regulation for AC-DC hybrid distribution network with multiple power electronic transformer) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (2): 35-43.

[4] 卢子广, 赵刚, 杨达亮, 等 (Lu Ziguang, Zhao Gang, Yang Daliang, et al.). 配电网电力电子变压器技术综

述 (Overview of research on power electronic transformer in distribution network) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSCA), 2016, 28 (5): 48-54.

[5] 王鹏, 赵政嘉, 刘雪山, 等 (Wang Peng, Zhao Zhengjia, Liu Xueshan, et al.). 电力电子设备中的电气绝缘问题 (Electrical insulation problems in power electronics devices) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2018, 44 (7): 2309-2322.

[6] 陈彬, 李琳, 刘海军, 等 (Chen Bin, Li Lin, Liu Haijun, et al.). 基于有限元法的高频变压器漏电感和绕组损耗计算与分析 (Calculation and analysis of leakage inductance and winding loss of high-frequency transformer based on finite element method) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (1): 8-14.

[7] 张征 (Zhang Zheng). 大容量中频变压器的设计与研究 (Design and research of high power medium frequency transformer) [D]. 上海: 上海交通大学 (Shanghai: Shanghai Jiao Tong University), 2015.

[8] 郭云翔 (Guo Yunxiang). 大功率中频变压器特性研究与优化设计 (Characteristics research and optimal design of high power medium frequency transformer) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2017.

[9] Kjellqvist T, Norrga S, Ostlund S. Design considerations for a medium frequency transformer in a line side power conversion system [A]. Proceedings of the 35th Annual Power Electronics Specialists Conference [C]. Aachen, Germany, 2004. 704-710.

[10] 刘涛, 韩帅, 李庆民, 等 (Liu Tao, Han Shuai, Li Qingmin, et al.). 频变电应力下高频电力变压器绝缘沿面放电形态及发展过程 (Patterns and development of the surface discharge of high frequency power transformer insulation under frequency-dependent electric stress) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (19): 199-207.

[11] 赵义焜, 张国强, 郭润睿, 等 (Zhao Yikun, Zhang Guoqiang, Guo Runrui, et al.). 变压器耐高温型匝间绝缘材料的放电特性研究 (Study on discharge characteristics of heat resistant inter-turn insulation materials in power transformers) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (3): 1-9.

[12] Matthias Birle, Carsten Leu. Breakdown of polymer dielectrics at high direct and alternating voltages superimposed by high frequency high voltages [A]. International Conference on Solid Dielectrics (ICSD) [C]. Bologna,

- Italy, 2013. 656-661.
- [13] Mason J H. Effect of frequency on the electric strength of polymers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1992, 27 (6): 1213-1216.
- [14] 张冠军, 赵文彬, 郑楠, 等 (Zhang Guanjun, Zhao Wenbin, Zheng Nan, et al.). 真空中固体绝缘沿面闪络现象的研究进展 (Research progress on surface flashover phenomena across solid insulation in vacuum) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2007, 33 (7): 30-35.
- [15] Elanseralathan K, Ramalakshmi R, Karthikeyan R. Breakdown of solid insulating materials under high frequency high voltage stress [A]. The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials [C]. Xi'an, China, 2000. 999-1001.
- [16] 周远翔, 邢晓亮, 聂琼, 等 (Zhou Yuanxiang, Xing Xiaoliang, Nie Qiong, et al.). 高频下电树老化引起的高密度聚乙烯击穿现象 (Breakdown phenomena caused by electrical tree degradation in high density polyethylene under high frequency voltage) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2007, 33 (12): 14-18.
- [17] Narasimha Rao S, Elanseralathan K. Influence of switching frequency of the voltage waveforms on breakdown in twisted pairs [A]. International Conference on Electrical Power and Energy Systems [C]. Bhopal, India, 2016. 545-548.
- [18] 鲁杨飞, 李庆民, 刘涛, 等 (Lu Yangfei, Li Qingmin, Liu Tao, et al.). 高频电压下表面电荷分布对沿面放电发展过程的影响 (Effect of surface charge on the surface discharge evolution for polyimide under high frequency voltage) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2018, 33 (13): 3059-3070.
- [19] Wu Jiayang, Jin Huifei, Armando R M, et al. The effect of frequency on the dielectric breakdown of insulation materials in HV cable systems [A]. International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM) [C]. Toyohashi, Japan, 2017. 251-254.
- [20] 吴广宁, 张兴涛, 杨雁, 等 (Wu Guangning, Zhang Xingtao, Yang Yan, et al.). 方波脉冲下不同纳米添加物对聚酰亚胺薄膜电气性能的影响 (Effect of different nano fillers on electrical properties of polyimide films under impulse voltage) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2017, 43 (12): 3819-3826.
- [21] 周利军, 刘继午, 刘洋, 等 (Zhou Lijun, Liu Jiwu, Liu Yang, et al.). 方波脉冲电压下温度对聚酰亚胺薄膜电气绝缘特性的影响 (Effect of temperature on the electrical properties of polyimide films under square impulse voltage) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 (2): 396-402.
- [22] 赵义焜, 张国强, 郭润睿, 等 (Zhao Yikun, Zhang Guoqiang, Guo Runrui, et al.). 高频变压器用耐高温型匝间绝缘材料的击穿特性 (Breakdown characteristics of thermostable inter-turn insulation materials in high frequency transformers) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2020, 46 (2): 657-665.
- [23] GB/T 1408.1-2006, 绝缘材料电气强度试验方法 (Electrical strength test method for insulating materials) [S].
- [24] 齐波, 魏振, 李成榕, 等 (Qi Bo, Wei Zhen, Li Chengrong, et al.). 交直流复合电场中油纸绝缘沿面放电现象及特征 (The phenomena and characteristics of oil-paper insulation surface discharge under AC and DC voltage) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (10): 59-67.
- [25] 李耀星 (Li Yaoxing). 中国绝缘材料产品及应用手册 (The handbook of China's insulation products and applications) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2006.
- [26] GB/T 16935.4-2011, 低压系统内设备的绝缘配合第4部分: 高频电压应力考虑事项 (Insulation coordination for equipment within low-voltage systems - Part 4: Consideration of high-frequency voltage stress) [S].
- [27] 曹晓珑, 钟力生 (Cao Xiaolong, Zhong Lisheng). 电气绝缘技术基础 (The basis of electrical insulation technology) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2009.
- [28] Naruse H, Yamamoto O. Estimation of flashover voltage along cylindrical insulations in vacuum [A]. International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum [C]. Mumbai, India, 2014. 65-68.
- [29] 孟晓波, 梅红伟, 陈昌龙, 等 (Meng Xiaobo, Mei Hongwei, Chen Changlong, et al.). 涂抹RTV的绝缘介质表面流注传播特性的研究 (Research on streamer propagation along RTV coated insulation surfaces) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (10): 318-325.
- [30] 李盛涛, 聂永杰, 闵道敏, 等 (Li Shengtao, Nie Yongjie, Min Daomin, et al.). 固体电介质真空沿面闪络研究进展 (Research progress on vacuum surface flashover of solid dielectrics) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (8): 1-9.
- [31] Miller H C. Flashover of insulators in vacuum: Review of the phenomena and techniques to improved holdoff voltage [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28 (4): 512-527.

## Effect of epoxy prepreg treatment on discharge characteristics of insulation materials in high frequency transformers

ZHAO Yi-kun<sup>1,2</sup>, ZHANG Guo-qiang<sup>1,2</sup>, LI Kang<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>3</sup>, YANG Fu-yao<sup>3</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China)

**Abstract:** High-frequency transformers are usually operated under the non-sinusoidal voltage with a frequency of 1 ~20kHz. The reasonable selection of the inter-layer insulation material is of great significance to the reliability of the prototype. In order to obtain discharge characteristics of inter-layer materials, GHG paper and DMD paper with their prepreg paper are tested under the bipolar square wave voltage. Comparing the insulation properties of materials before and after epoxy prepreg treatment, the variation of breakdown voltage with frequency is explained based on thermal breakdown mechanism, and the influence of prepreg treatment on flashover voltage is analyzed by SEEA model. Finally, the application of epoxy prepreg in the insulation of high-frequency transformers is proposed. Experiment results show that, air gaps inside the material is filled after the prepreg treatment. Under the high-frequency condition the dielectric area of heating point and surrounding environment is reduced, which accelerates the thermal aging of materials, and eventually leads to a decline in breakdown field strength. Prepreg treatment of GHG paper reduces the trapping effect of electron trap, resulting in a decrease in flashover voltage, while the surface condition of DMD paper changes little before and after prepreg treatment. While using epoxy prepreg technology to improve the properties of materials, the effects of prepreg treatment on heat dissipation performance and surface condition should be considered. The research provides a reference for the inter-layer design of windings.

**Key words:** high-frequency transformer; epoxy prepreg; thermal breakdown mechanism; SEEA model