

变压器耐高温型匝间绝缘材料的放电特性研究

赵义焜^{1,2}, 张国强^{1,2}, 郭润睿¹, 韩 钰³, 巩学海³

(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: 变压器匝间绝缘长期处于不均匀电场下,既是绕组绝缘结构中最薄弱的环节之一,也是电力变压器绝缘设计的重点。为此以 Nomex 绝缘纸、改性 DMD 绝缘纸、PET 薄膜以及聚酰亚胺薄膜等耐高温型绝缘材料为研究对象,在 0~20kV 正弦波电压下开展了固体匝间绝缘材料的放电特性实验,利用 $V-t$ 特性曲线对比各种绝缘材料的击穿特性,通过沿面闪络实验探究放电间距对沿面闪络电压的影响规律,并采用双参数 Weibull 统计方法计算待测材料绝缘失效的 Weibull 分布密度表达式,为电力变压器匝间绝缘材料的合理选取提供依据。实验测试及理论分析的结果表明,在不均匀电场下,薄膜材料的击穿场强远高于绝缘纸,但同时其电老化速率也较高;沿面闪络电压随放电间距的变化规律与材料类型的关联性较大,纤维类绝缘纸闪络电压呈近似线性变化;四种绝缘材料的闪络电压远低于各自的绝缘击穿电压,且呈现出较大分散性,利用 Weibull 分布密度表达式可有效估算绝缘失效率,上述研究为电力变压器的耐高温型匝间绝缘材料的寿命预测提供了理论支持。

关键词: 匝间绝缘; $V-t$ 特性; 沿面闪络; Weibull 分布

DOI: 10.12067/ATEEE1804025 **文章编号:** 1003-3076(2019)03-0001-09 **中图分类号:** TM854

1 引言

电力变压器是电力系统中核心设备之一,在电网中担负着电能传输的重要任务,其能否安全可靠运行,对电力系统至关重要^[1-4]。据统计,在电力变压器发生事故时,其损坏部位主要集中于绕组上,而作为绕组绝缘结构的重要组成部分,匝间绝缘的击穿、沿面放电往往是造成变压器绝缘破坏的主要原因^[5,6]。由于绕组导线边缘的圆角半径很小,造成该处的电场集中,使匝间绝缘材料长期工作于稍不均匀电场乃至极不均匀电场中,其绝缘失效率大幅增加。因此,研究极不均匀电场下匝间绝缘材料的放电特性,对提升匝间绝缘性能、提高变压器运行可靠性具有重要意义。

击穿强度是表征绝缘材料电气性能最直接的参数,也是电介质绝缘性能的重要评估指标之一^[7-9]。目前,针对绝缘材料在工频正弦激励下的击穿特性,国内外现有研究大多将单一种类绝缘材料作为研究

对象,探究老化、应力等因素对击穿特性的影响规律。C. H. Park 等人研究了机械应力对 PET 薄膜电击穿强度的影响规律,指出薄膜击穿强度在弹性变形区域随应力的增加而增加,在非弹性变形区域随应力的增加而减小^[10,11];廖瑞金等人研究了交流电压下油纸绝缘的针-板放电特性,得出不同老化状态的油纸绝缘对放电量、放电频率的影响规律^[12]。在绝缘材料沿面放电特性方面,国内外现有研究趋于微观,考虑电荷分布、温度等诸多因素的变化对材料开展沿面放电实验。R. Sharma 等人自行设计了一套电性能测试装置,分别在空气、氦气环境中对 GFRP 材料进行沿面放电实验,发现泄漏电流、电荷分布对材料绝缘失效率具有显著影响^[13]。李元等人搭建了油纸绝缘沿面放电系统,获得了放电发展过程中 PRPD 谱图和放电脉冲序列,研究不同热老化程度下油纸绝缘沿面放电的发展特性^[14];金福宝、周远翔等人利用柱-板电极模型,对不同温度下油纸绝缘沿面放电过程中放电信号的特征谱图进行

收稿日期: 2018-04-10
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,研究方向为大容量高频变压器绝缘与散热结构设计;
张国强(1964-),男,河北籍,研究员,博导,研究方向为高压绝缘、新型输变电技术与装备研究等。

了分析,探索温度对交直流复合电场下油纸绝缘沿面放电特性的影响机制^[15]。在绝缘实验数据处理及分析方面,现有研究认为固体电介质绝缘失效电压常具有较大分散性,Weibull 分布可有效解决此问题,并提出乘幂函数与双对数函数模型在击穿实验 $V-t$ 特性的求取及分析中较为适用^[16-18]。

已有文献^[10-15]对固体电介质绝缘特性的研究,因各自分别进行的实验测试采用的电极结构和尺寸差异较大,且很少涉及多种材料对比,故难以为工程应用中的匝间绝缘材料选取提供直观的参考和借鉴。本文模拟匝间绝缘极不均匀电场条件,对 4 种用于 SF₆、变压器油绝缘电力变压器匝间绝缘的固体绝缘材料开展了击穿、沿面放电实验。采用 $V-t$ 特性曲线表征和对比各绝缘材料的击穿特性,通过沿面放电实验研究电极间距对材料沿面闪络电压的影响,并利用 Weibull 分布密度表达式计算材料的绝缘失效率。本文研究可为电力变压器匝间绝缘优化设计与绝缘寿命预测提供理论依据。

2 实验方法

2.1 实验平台

固体绝缘材料放电特性实验平台如图 1 所示。试验变压器型号为 YDTW-15kVA/150kV,用于正弦电压输出。高压探头选用泰克 P6015A,可测电压范围 0~20kV,带宽为 75MHz,分压比为 1000,接于放电装置高压输入端。电压测试信号送至泰克 MSO3034 型示波器对应通道,示波器带宽为 300MHz,用于实时观察和记录加压值。

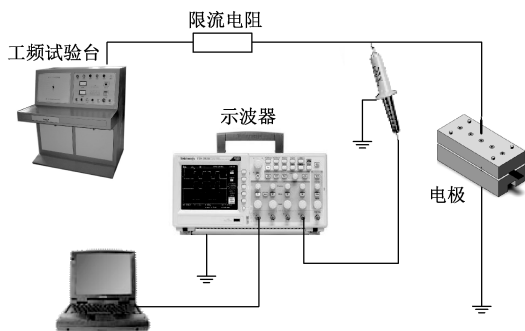


图 1 固体绝缘材料放电特性实验平台

Fig. 1 Experimental platform for discharge characteristics

参考现有研究及相关标准^[19,20],考虑到变压器匝间绝缘长期运行在不均匀电场下的实际工况,分别设计用于不均匀电场下击穿实验的针-板、夹板式电极以及用于沿面放电实验的圆柱体电极结构,如

图 2 所示。针-板电极用于厚度小于 3mm 绝缘纸击穿实验,夹板式电极用于材料厚度小于 0.2mm 且难于固定的薄膜击穿实验。将上述电极装配于图 3 所示的放电装置上,该装置由导电杆、屏蔽盖、材料支柱、盘状绝缘盖板等部分构成。

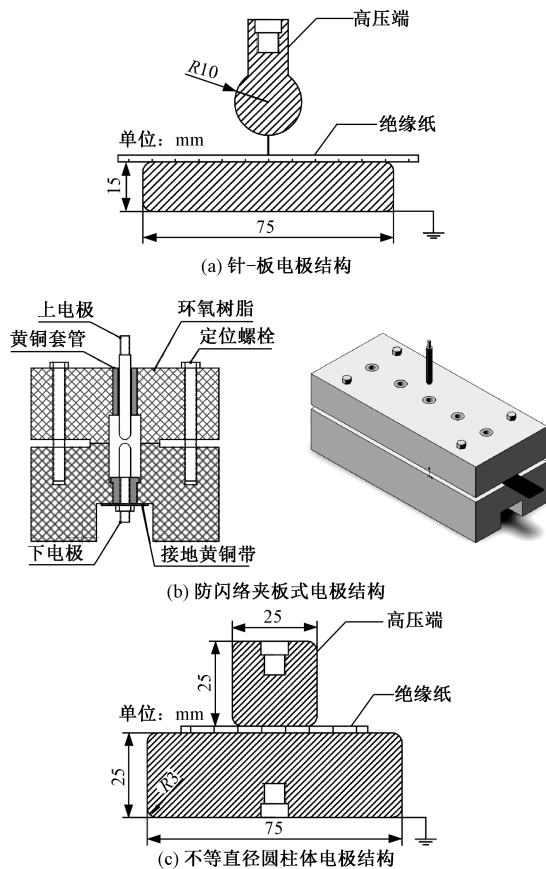
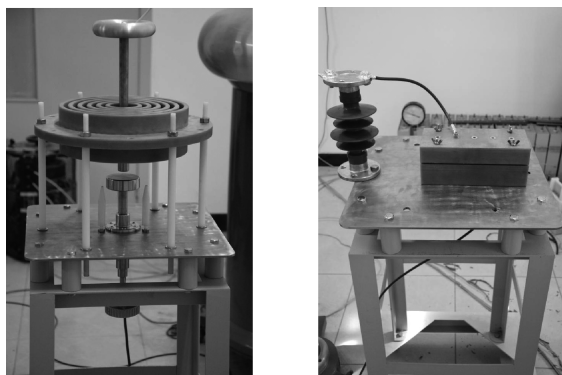


图 2 放电电极结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of discharge electrode structure



(a) 材料沿面放电实验

(b) 薄膜击穿实验

图 3 固体绝缘材料放电装置

Fig. 3 Solid insulating material discharge device

2.2 待测材料选取

应用于变压器绕组的导线按照截面类型可分为

圆形导线和矩形导线。其中, 矩形导线又称为“扁导线”, 在绕组中用途最为广泛, 所有不同的绕组型式均可以用扁导线进行绕制。当变压器的容量较大时, 绕组中需要流过较大的电流, 根据损耗控制和制造工艺的要求, 设计上往往采用两根、三根或多根扁导线并联绕制的方法, 此时组合导线的绝缘主要由较薄的单根导线匝间绝缘与组合导线外包绝缘组成, 其基本结构如图 4 所示。

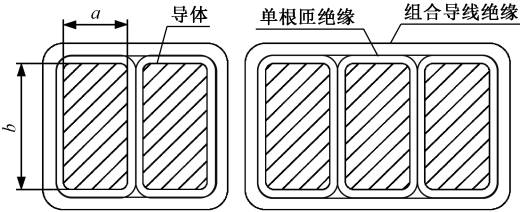


图 4 组合导线匝间绝缘结构示意图
Fig. 4 Combined inter-turn insulation structure

导线匝间绝缘材料的选取通常需满足绝缘强度、耐热强度和机械强度等几方面的要求。目前, 大容量电力变压器采用 SF₆ 气体绝缘或变压器油绝缘, 两者的匝间固体绝缘材料一般选用薄膜和绝缘纸^[21]。在气体绝缘变压器导线匝间绝缘中, 国内通常采用耐热等级为 E 级的 PET 聚酯薄膜; 在硅油绝缘变压器匝间绝缘结构中, 常选用电气、化学性能较为良好的 T410 型 Nomex 绝缘纸作为绝缘材料, 而随着新型绝缘材料的研发, H 耐热等级的聚酰亚胺薄膜与 F 耐热等级的改性 DMD 复合绝缘纸也逐渐被用于电力变压器匝间绝缘当中。据此, 本文选用上述 4 种电气性能较为优良、应用相对广泛的绝缘材料进行实验, 其典型电气性能基本参数如表 1 所示^[22-24]。参考常温下各类绝缘材料的击穿场强范围, 将 Nomex 绝缘纸、改性 DMD 复合绝缘纸、PET 薄膜、聚酰亚胺薄膜的标称厚度分别选定为 0.51mm、0.30mm、0.125mm 和 0.10mm, 将击穿电压理论值控制在 10~20kV。

2.3 加压方式

参照标准 GB/T 1408.1-2006 对工频实验加压方法的相关规定, 本文选取快速升压与逐级升压相配合的加压方式。在绝缘材料 V-t 特性实验中, 为准确测试不同恒定应力下的击穿时间范围, 降低升压过程中待测材料老化对实验结果的干扰, 采取升压速率为 0.5kV/s 的快速升压法; 在绝缘材料 1min 击穿实验与沿面放电实验过程中, 测试对象为给定时间下的绝缘失效电压, 为此采用逐级升压法。所

表 1 绝缘材料电气性能指标

| Tab. 1 Electrical properties of insulating materials | | | | |
|--|-----------------|-----------------------|------------|------------------------------|
| 绝缘材料 | 击穿强度 /(MV/m) | 体积电阻率 /(Ω·m) | 相对介电 常数 | 介电损耗 因数/×10 ⁻³ |
| Nomex 纸 (T410 型) | 17~33 | ≥2.0×10 ¹⁴ | 1.6~3.7 | 4~7 |
| DMD 纸 (6641F 型) | 6~22 | ≥1.0×10 ¹⁴ | ≤3.0 | ≤8.0 |
| PET 薄膜 (6020 型) | ≥100 | ≥1.0×10 ¹⁴ | 2.9~3.4 | ≥5.0 |
| 聚酰亚胺 (6050 型) | 60~100 | ≥1.0×10 ¹⁰ | 3.1~3.9 | ≤4.0 |

谓逐级升压法, 即设定一个固定时间 T, 加压 T 时间后将所施电压按照给定百分比增加, 再加压 T 时间, 以此类推, 直至发生击穿或沿面闪络, 记录下击穿、闪络瞬间的电压值及放电时间。实验所参照的升压梯度如表 2 所示。

表 2 逐级升压梯度参照表

| Tab. 2 Gradient reference table of step by step boost | |
|---|-----------|
| 起始电压值/kV | 级间增量/kV |
| $U_0 \leq 1$ | 10% U_0 |
| $1 < U_0 \leq 2$ | 0.1 |
| $2 < U_0 \leq 5$ | 0.2 |
| $5 < U_0 \leq 10$ | 0.5 |
| $10 < U_0 \leq 20$ | 1.0 |

3 实验结果

3.1 极不均匀电场中匝间绝缘材料 V-t 特性

V-t 特性即击穿电压与放电时间之间的关系, 表征绝缘系统的绝缘性能, 并具有预测绝缘系统在给定时间和电压下击穿概率的作用, 适用于材料 V-t 特性的乘幂函数模型及对数模型可表示为:

$$tV^n = C_1 \tag{1}$$

$$\lg V = -\frac{1}{n} \lg t + C_2 \tag{2}$$

式中, n 为电老化寿命指数, 与绝缘电老化速率呈负相关; C₁、C₂ 为常数。

由于放电时间具有分散性, 每级电压下可测得一系列放电时间, 故 V-t 特性是以上、下包络线为界的带状区域。为此, 将击穿时间作为测试对象, 合理选取加压值, 将针-板电极作为 Nomex 纸和 DMD 绝缘纸的放电电极, 夹板式电极作为 PET 薄膜和聚酰亚胺薄膜的放电电极, 采用快速升压法对 4 种待测材料开展恒定应力工频击穿实验, 图 5 为匝间绝缘材料在极不均匀电场下的 V-t 特性曲线带。

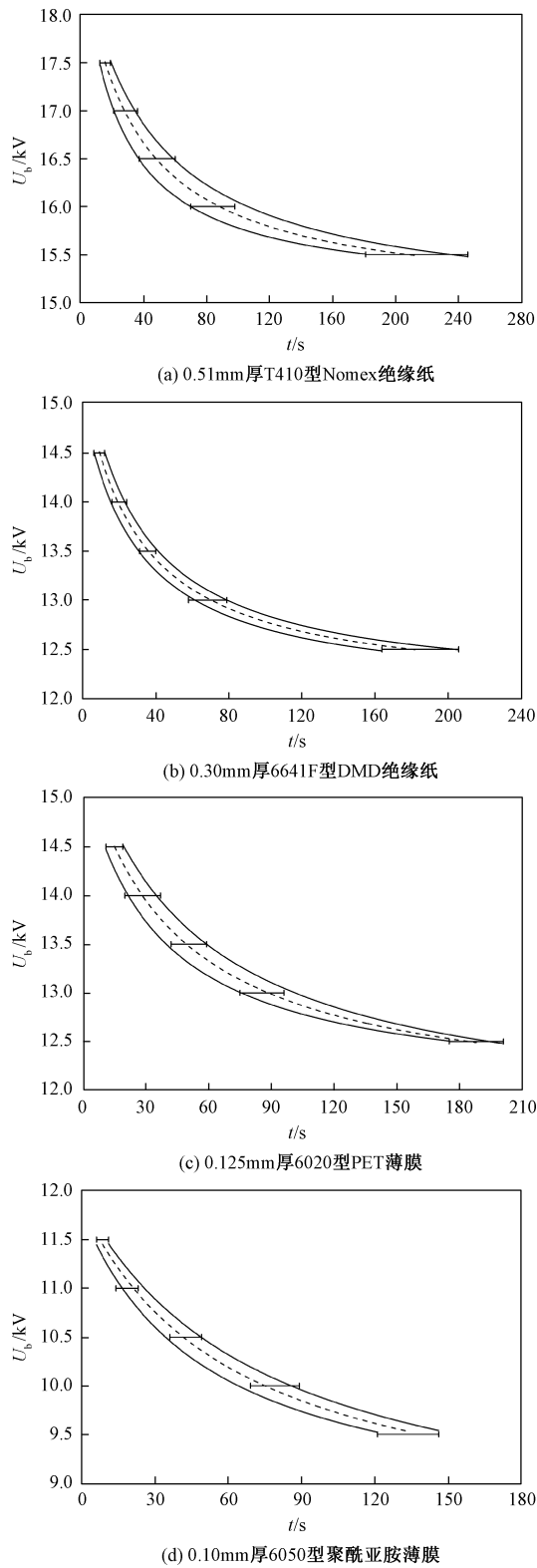


图5 匝间绝缘材料 $V-t$ 特性曲线带

Fig. 5 $V-t$ characteristic curves of turn-to-turn insulation

工程上往往采用 50% $V-t$ 特性表征绝缘材料的击穿特性,由于恒定应力实验下击穿时间分布范围较广,以 50% 概率放电时间为横坐标、击穿电压为

纵坐标,利用乘幂函数拟合得到工频下 50% $V-t$ 特性曲线,如图 6 所示。依据 $V-t$ 特性实验结果,拟合计算关键参数 n 、 C_1 ,进一步得到施加电压与击穿时间的特征关系式,如表 3 所示。由表 3 可知,T410 型 Nomex 纸与 6641F 型 DMD 绝缘纸的电老化速率相近,均低于薄膜材料,聚酰亚胺薄膜电老化速率相对较高。

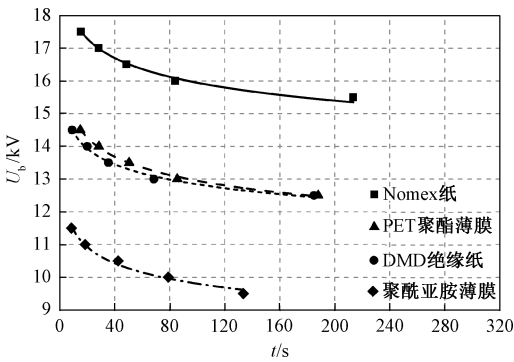


图6 50% $V-t$ 特性乘幂函数拟合曲线

Fig. 6 50% $V-t$ characteristic fitting curves

表 3 $V-t$ 特征关系式计算

Tab. 3 Calculation of $V-t$ characteristic

| 绝缘材料 | 厚度 /mm | n | C_1 | $V-t$ 特征关系 |
|---------|-----------|-------|-----------------------|---------------------------------------|
| Nomex 纸 | 0.51 | 19.80 | 6.45×10^{25} | $V^{19.80} = 6.45 \times 10^{25} / t$ |
| DMD 纸 | 0.30 | 19.70 | 6.93×10^{23} | $V^{19.70} = 6.93 \times 10^{23} / t$ |
| 聚酯薄膜 | 0.125 | 16.63 | 3.14×10^{20} | $V^{16.63} = 3.14 \times 10^{20} / t$ |
| 聚酰亚胺 | 0.10 | 14.91 | 6.07×10^{16} | $V^{14.91} = 6.07 \times 10^{16} / t$ |

式(2)所示的双对数函数模型可实现 $V-t$ 特性曲线由非线性到线性的转换,图 7 为折算后对数坐标下表征击穿场强与击穿时间关系的 E_b-t 特性曲线,其中 E_b 的单位为 kV/mm, t 的单位为 s。可以看出,在双对数坐标下,各类绝缘材料击穿场强数据样本点的线性度良好($R>0.9558$),表明乘幂函数模型对于极不均匀电场下介质的绝缘特性具有适用性。此外,6020 型 PET 薄膜与 6050 型聚酰亚胺薄膜具有相近的高绝缘强度,两者在 120s 耐压时间内的击穿场强分别为 102.46kV/mm、96.89kV/mm,远高于绝缘纸材料。T410 型 Nomex 绝缘纸的击穿场强低于 6641F 型改性 DMD 绝缘纸,在相同耐压时间下, Nomex 纸击穿场强约为 DMD 纸的 74.1%。

3.2 放电间距对闪络电压影响规律

将放电间距先后设置为 10mm、15mm、20mm 以及 25mm,分别对 4 种匝间绝缘材料进行沿面放电实验,图 8 为各绝缘材料沿面闪络电压随放电间距

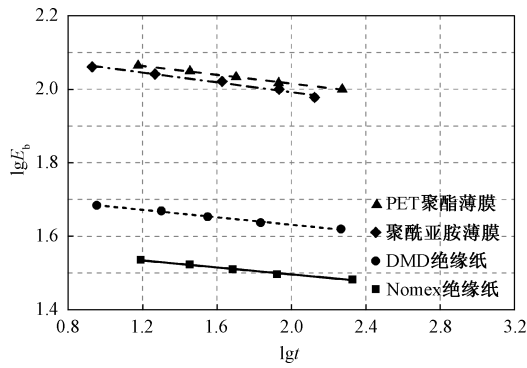
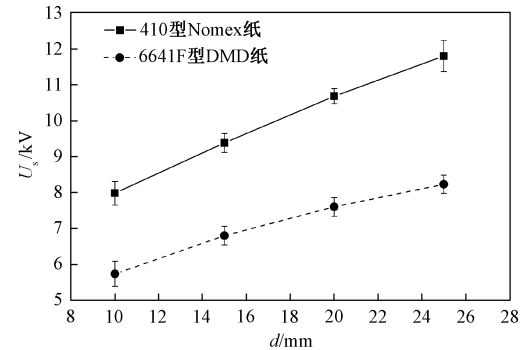


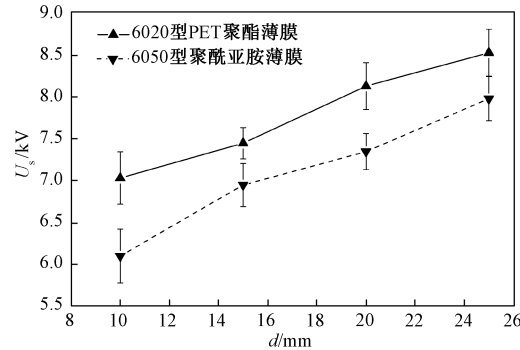
图 7 双对数坐标下 E_b-t 特性曲线

Fig. 7 E_b-t characteristic curves in logarithmic coordinates

的变化规律,其中 d 表示放电间距, U_s 表示闪络电压。从图 8 可以看出,在极不均匀电场下,不同种类绝缘材料的闪络电压随放电间距的变化规律具有差异性。一方面,与薄膜材料相比,绝缘纸材料的闪络电压随放电间距变化曲线的线性度较高且各间距下闪络电压数据分散性较小。由于 Nomex 纸与 DMD 纸分别为纤维绝缘纸、非织布复合绝缘纸,同属于纤维制品类绝缘材料,而 PET 薄膜和聚酰亚胺薄膜同属薄膜类柔软复合材料,表明纤维制品类绝缘材料的闪络电压比薄膜类材料更趋近于线性变化。



(a) 绝缘纸类材料闪络电压变化规律



(b) 薄膜类材料闪络电压变化规律

图 8 沿面闪络电压随放电间距变化规律

Fig. 8 Variation of flashover voltage with discharge spacing

利用二次电子发射雪崩 (Secondary Electron Emission Avalanche, SEEA) 模型^[25]对线性度差异性进行解释,SEEA 模型认为沿面闪络是由电子轰击材料表面引起的,图 9 为电子与材料表面作用的示意图。具体的沿面闪络过程为:电子在电场作用下超过一定的能量后进入到材料表层,在其入射路径附近引起原子电离,从而释放二次电子,二次电子逸出表面后会被电场加速引起新的电离,进而引发电子倍增直至最终闪络。在二次电子向表面逃逸的过程中,容易与电子陷阱发生作用,被陷阱俘获的电子将无法参与闪络过程。对于厚度、表面粗糙度较小的薄膜材料,入射电子在进入材料内部的行程较短,与原子作用时间较短,引起原子激发的概率较低且向表面逃逸过程中与电子陷阱的作用行程较短,在放电发展过程中电子崩发展的速率难以维持恒定;而对于厚度、粗糙度较大的纤维制品类材料,二次电子向表面逃逸的行程较长,二次电子的激发与陷阱作用概率较大,整个闪络形成过程中电子崩发展速率相对稳定。同时,薄膜类绝缘材料较为柔软,放电过程中介质表面状态极易受到环境因素的影响。以上原因导致纤维制品类材料闪络电压与放电间距的线性度优于薄膜类绝缘材料。

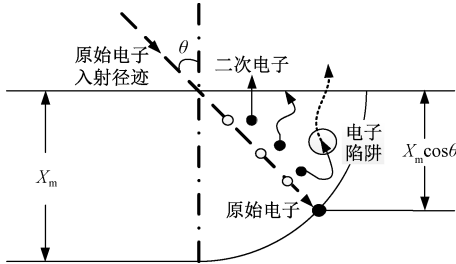


图 9 二次电子发射物理过程示意图

Fig. 9 Schematic view of secondary electrons emitting

此外,在 4 种绝缘材料中,T410 型 Nomex 绝缘纸的闪络电压受放电间距影响最为显著,当间距由 25mm 降为 10mm,其闪络电压仅为原值的 67.63%;PET 薄膜的闪络电压受电极间距影响最小,电压均值仅由 8.53kV 下降至 7.03kV。因此,在工程应用中,对于绝缘材料的选取应充分考虑到不同材料沿面闪络电压随放电间距变化的差异性,合理选取适用于特定绝缘结构的绝缘材料。

3.3 绝缘失效电压 Weibull 分布

目前,绝缘实验的数据统计方法主要有 Weibull 分布、Gumbel 分布和对数正态分布^[26]。其中,Weibull 分布具有广泛的应用性,对最薄弱点出现故

障的极值分布类型具有极为重要的参考价值,是固体绝缘实验常采用的数据统计方法。双参数 Weibull 分布密度函数表达式为:

$$F(u;\alpha,\beta) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{u}{\alpha}\right)^\beta\right] \tag{3}$$

式中, u 为试样击穿或闪络电压; $F(u)$ 为外施电压小于或等于 u 时的绝缘失效概率; α 为尺度参数,代表失效概率 63.2% 所对应的外施电压值; β 为形状参数,与闪络电压的变化范围呈负相关。

对式(3)两边取对数,并整理后可得:

$$\ln\ln\frac{1}{1-F(u)} = \beta\ln u - \beta\ln\alpha \tag{4}$$

设

$$Y = \ln\ln\frac{1}{1-F(u)}, X = \ln u, C = -\beta\ln\alpha$$

则有:

$$Y = \beta X + C \tag{5}$$

以 X 作为横坐标, Y 作为纵坐标,得到 Nomex 纸在极不均匀电场下击穿电压的 Weibull 分布线性度检验图,如图 10 所示,其中 u 的单位为 kV。由图 10 可知,数据样本点的线性度良好($R=0.9685$)。采用相同方法检验其余 3 种待测材料击穿、闪络电压的 Weibull 分布线性度,结果均满足 $R>0.93$,证明在本实验构造的极不均匀电场条件下,绝缘材料击穿电压及闪络电压均服从 Weibull 分布。

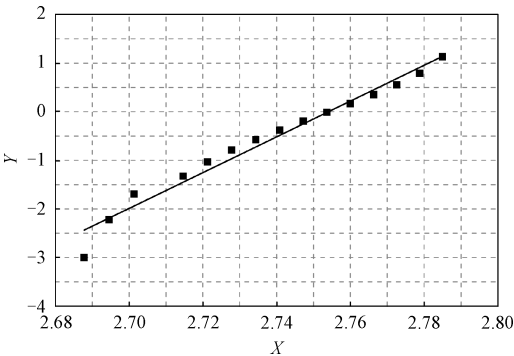


图 10 Weibull 分布线性度检验图

Fig. 10 Weibull distribution linearity test diagram

图 11 为 4 种匝间绝缘材料的 1min 击穿实验数据 Weibull 分布,其中 U_b 表示 1min 击穿电压。从图 11 可以看出,在极不均匀电场中,0.30mm 厚 DMD 绝缘纸与 0.125mm 厚 PET 薄膜具有较为接近的绝缘失效率,0.51mm 厚 Nomex 绝缘纸的击穿概率远低于其余绝缘材料。同时,在 Weibull 统计计算方法下,DMD 绝缘纸、聚酰亚胺薄膜的绝缘失效率与电压值线性度较为良好,绝缘失效上升率均约为

65.6%/kV,而 Nomex 绝缘纸与 PET 薄膜击穿实验数据分散性较大。

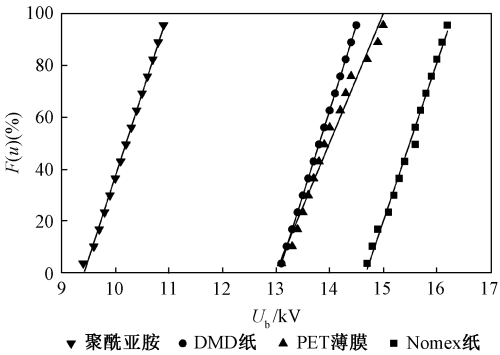


图 11 击穿实验数据 Weibull 分布

Fig. 11 Weibull distribution of breakdown experiment

将放电间距设置为 10mm,分别对 4 种匝绝缘材料进行 20 组沿面闪络实验,结果如图 12 所示,其中 N 表示实验序号, U_s 表示沿面闪络电压。从图 12 可以看出,材料在各放电间距下沿面闪络电压均呈现出较大分散性,4 种绝缘材料中,T410 型 Nomex 绝缘纸的沿面绝缘特性最优,然而其数据分散性也最大。下面从 SEEA 模型的角度分析闪络电压数据分散性问题。SEEA 模型中,阴极电极、空气和材料表面三者结合处发射的初始电子对绝缘表面的碰撞引起二次电子发射,二次电子再次碰撞绝缘表面导致电子崩,进而引起表面吸附气体脱附并电离而引发闪络。在加压过程中,绝缘表面二次电子发射的时刻以及电子崩发展速度均与粒子碰撞概率相关,导致每组实验闪络发生时刻不一致,使所测数据呈现出较强分散性。采用 Weibull 分布统计方法对闪络电压数据进行处理,如图 13 所示,其中 U_s 表示沿面闪络电压。通过对比图 11 与图 13 可知,在极不均匀电场中,改性 DMD 绝缘纸的击穿电压远高于聚酰亚胺薄膜,而后的沿面闪络特性优于前者。

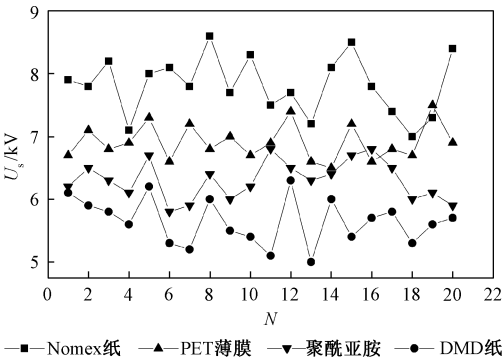


图 12 绝缘材料沿面放电实验

Fig. 12 Flashover experiment of insulating material

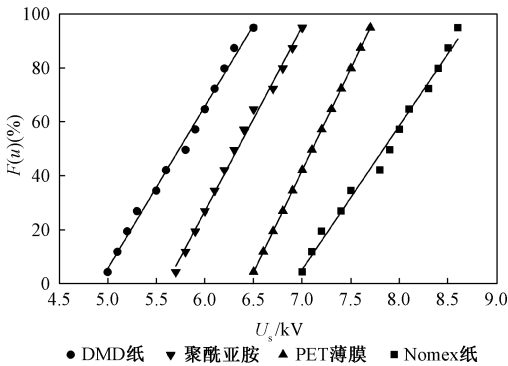


图 13 沿面闪络电压 Weibull 分布

Fig. 13 Weibull distribution of flashover voltage

利用式(4)、式(5)得到匝间绝缘材料在两种放电形式下的 $Y-X$ 关系图,斜率即为形状参数 β ,通过截距 C 计算尺度参数 α ,进而获得 4 种匝间绝缘材料发生击穿、沿面闪络概率的 Weibull 分布密度表达式,如表 4 所示。表 4 可为给定电压下绝缘材料失效概率的估算提供理论依据。

表 4 Weibull 分布密度表达式计算

Tab. 4 Calculation of Weibull distribution density

| 绝缘材料 | 形式 | α | β | $F(u)$ |
|---------------------|----|----------|---------|--|
| Nomex 纸 (T410 型) | 击穿 | 15.66 | 33.09 | $F(u) = 1 - \exp[1 - (u/15.66)^{33.09}]$ |
| | 沿面 | 8.09 | 16.09 | $F(u) = 1 - \exp[1 - (u/8.09)^{16.09}]$ |
| DMD 纸 (6641F 型) | 击穿 | 14.01 | 35.26 | $F(u) = 1 - \exp[1 - (u/14.01)^{35.26}]$ |
| | 沿面 | 5.96 | 13.25 | $F(u) = 1 - \exp[1 - (u/5.96)^{13.25}]$ |
| PET 薄膜 (6020 型) | 击穿 | 14.21 | 25.28 | $F(u) = 1 - \exp[1 - (u/14.21)^{25.28}]$ |
| | 沿面 | 7.28 | 20.65 | $F(u) = 1 - \exp[1 - (u/7.28)^{20.65}]$ |
| 聚酰亚胺 (6050 型) | 击穿 | 10.51 | 25.07 | $F(u) = 1 - \exp[1 - (u/10.51)^{25.07}]$ |
| | 沿面 | 6.05 | 16.67 | $F(u) = 1 - \exp[1 - (u/6.05)^{16.67}]$ |

对比表 4 中尺度参数 α 计算值可知,各绝缘材料的 63.2%绝缘失效率对应的闪络电压远低于击穿电压;对比形状参数 β 计算值可知,沿面闪络数据形状参数远小于击穿电压数据形状参数,说明材料的沿面闪络电压分散性较大。因此,变压器匝间绝缘优化设计时,除了对材料击穿强度进行考量,还应充分考虑到固体绝缘材料沿面放电特性,降低匝间绝缘破坏发生的概率。

4 结论

(1)乘幂函数模型与双对数模型对匝间绝缘材料在极不均匀电场下击穿特性的表征极具适用性。对比各类绝缘材料的 50% $V-t$ 特性曲线,发现聚酰亚胺薄膜的电老化寿命指数 n 显著高于其余绝缘材料,表明其电老化速率较高。由双对数坐标下 E_b-t 特性曲线可知,PET 薄膜与聚酰亚胺薄膜在极不均匀电场中表现出相近的击穿强度,Nomex 纸的击穿

场强约为改性 DMD 纸的 74.1%。

(2)在极不均匀电场中,固体绝缘材料沿面绝缘性能随放电间距的减小而显著下降,当放电间距由 25mm 减小至 10mm,待测材料的闪络电压下降至原值的 67.63%~79.42%。T410 型 Nomex 绝缘纸的沿面绝缘性能受放电间距影响最为严重,闪络电压均值由 11.8kV 下降至 7.98kV。

(3)根据二次电子发射雪崩模型,对于厚度、粗糙度较大的纤维制品类绝缘材料,二次电子在向表面逃逸的过程中行程较长,二次电子的激发与陷阱作用概率较大,使整个闪络形成过程中电子崩的发展速率相对稳定。因此,初步推断,介质表面状况以及厚度的差异性是导致纤维制品类材料闪络电压与放电间距的线性度远优于薄膜类绝缘材料的主要原因。

(4)经过双对数坐标下 Weibull 分布线性度检验,证实固体绝缘材料在极不均匀电场下的击穿、闪络电压数据仍服从双参数 Weibull 分布。与击穿电压相比,绝缘材料在极不均匀电场中的闪络电压具有数值小、分散性大的特点。在工程应用中,应同时考虑到绝缘击穿、沿面闪络给变压器匝间绝缘失效带来的隐患。

参考文献 (References):

[1] 刘有为, 马麟, 吴立远, 等 (Liu Youwei, Ma Lin, Wu Liyuan, et al.). 电力变压器经济寿命模型及应用实例 (Economic life model of power transformer and its application) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2012, 36 (10): 235-240.

[2] 王有元, 龚森廉, 廖瑞金, 等 (Wang Youyuan, Gong Senlian, Liao Ruijin, et al.). 电力变压器油纸绝缘可靠性与老化特征参量间的相关性 (Relationship between power transformer oil-paper insulation reliability and aging characteristic parameters) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2011, 37 (5): 1100-1105.

[3] Morais R M, Mannheimer W A, Carballeira M, et al. Furfural analysis for assessing degradation of thermally up-graded papers in transformer insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6 (2): 159-163.

[4] 黄云程, 蔡金锭 (Huang Yuncheng, Cai Jinding). 应用去极化能量谱评估变压器绝缘老化受潮状态 (Diagnosis of transformers by using depolarization energy spectrum) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technol-

- ogy of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (1): 53-59.
- [5] 魏新劳, 李林鹭, 聂洪岩, 等 (Wei Xinlao, Li Lin'ao, Nie Hongyan, et al.). 500kV 电力变压器匝间绝缘模型线圈的电老化特性 (Electrical aging characteristic of 500kV power transformer turn-to-turn insulation model coils) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2017, 21 (3): 17-24.
- [6] 刘亚茹, 廖继宏 (Liu Yaru, Liao Jihong). 变压器匝间绝缘故障的分析 (Analysis insulating faults of transformer inter-turn) [J]. 黑龙江电力 (Heilongjiang Electric Power), 2009, 31 (2): 123-125.
- [7] 曹晓珑, 钟力生 (Cao Xiaolong, Zhong Lisheng). 电气绝缘技术基础 (Principles of electrical insulation technology) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2009.
- [8] Li Jian, Grzybowaki S, Sun Yanfei, et al. Dielectric properties of rapeseed oil paper insulation [A]. 2007 Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP) [C]. Vancouver, BC, Canada, 2007. 178-182.
- [9] Fofana I, Wasserberg V, Borsi H, et al. Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformer [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18 (4): 5-16.
- [10] Park C H, Hara M, Akazaki M. Effects of temperature and voltage on dielectric breakdown strengths of PET and FPR under mechanical stresses [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1982, E1-17 (6): 546-553.
- [11] Park C H, Kaneko T, Hara M. Effects of mechanical on the dielectric breakdown strengths of PET and FPR [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1982, E1-17 (6): 234-240.
- [12] 廖瑞金, 段炼, 汪可, 等 (Liao Ruijin, Duan Lian, Wang Ke, et al.). 交流电压下油纸绝缘针板放电特性 (Partial discharge characteristics of point-plane model in oil-paper insulation under AC voltage) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 40 (3): 648-654.
- [13] Sharna R, Tanna V L, Amardas A, et al. Electrical design analysis and breakdown voltage test aspects of indigenously developed electrical breaks at cryo temperature [A]. 2014 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV) [C]. Vancouver, BC, Canada, 2007. 178-182.
- [14] 李元, 张冠军, 梁钰, 等 (Li Yuan, Zhang Guanjun, Liang Yu, et al.). 不同热老化程度下油纸绝缘沿面放电发展特性 (Evolutionary characteristics of surface discharge within oil-paper insulation under different thermally aged conditions) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2017, 43 (3): 923-930.
- [15] 金福宝, 周远翔, 黄建文, 等 (Jin Fubao, Zhou Yuanxiang, Huang Jianwen, et al.). 温度对交直流复合电场下油纸绝缘沿面放电特性的影响 (Effects of temperature on creepage discharge characteristics of paper-oil insulation under combined AC-DC voltage) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2017, 43 (3): 931-939.
- [16] 李盛涛, 张拓, 黄奇峰, 等 (Li Shengtao, Zhang Tuo, Huang Qifeng, et al.). 变压器油纸绝缘结构的击穿电压与频率和时间的关系 (Relation among breakdown voltage, frequency and time in oil-paper insulation of transformer) [J]. 变压器 (Transformer), 2009, 46 (4): 39-43.
- [17] 詹绪海, 肖林华, 于钦学, 等 (Zhan Xuhai, Xiao Linhua, Yu Qinxue, et al.). 换流变压器油纸绝缘的 V-t 特性试验研究 (V-t test of oil-paper insulation for converter transformer) [J]. 绝缘材料 (Insulation Materials), 2013, 28 (1): 7-13.
- [18] 李晓虎, 李剑, 孙才新, 等 (Li Xiaohu, Li Jian, Sun Caixin, et al.). 植物油-纸绝缘的电老化寿命试验研究 (Study on electrical aging lifetime of vegetable oil-paper insulation) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2007, 27 (9): 18-22.
- [19] 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].
- [20] 王琼, 齐波, 陈波, 等 (Wang Qiong, Qi Bo, Chen Bo, et al.). 交直流复合场针板模型局部放电发展过程中相位分布的特点 (Phase distribution in evolution of partial discharge in needle-plate model under combined AC-DC electric field) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (7): 43-48.
- [21] 谢毓城 (Xie Yucheng). 电力变压器手册 (The handbook of power transformer) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2014.
- [22] 李英葆, 陈京生 (Li Yingbao, Chen Jingsheng). 绝缘材料便查手册 (The handbook of insulation materials) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2010.
- [23] 王树森 (Wang Shusen). 变压器绝缘材料 (Transformer insulation material) [J]. 变压器 (Transformer), 2003, 40 (3): 44-46.
- [24] 张道洪, 陈小随, 王晶, 等 (Zhang Daohong, Chen Xiaosui, Wang Jing, et al.). 绝缘高分子材料 (Insu-

- lating polymer materials) [M]. 北京: 化学工业出版社 (Beijing: Chemical Industry Press), 2015.
- [25] 张冠军, 赵文斌, 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 flash-over phenomena across solid insulation in vacuum) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2007, 33(7): 30-35.
- [26] GB/T 29310-2012, 电气绝缘击穿数据统计分析导则 (Guide for the statistical analysis of electrical insulation breakdown data) [S].

Study on discharge characteristics of heat resistant inter-turn insulation materials in power transformers

ZHAO Yi-kun^{1,2}, ZHANG Guo-qiang^{1,2}, GUO Run-rui¹, HAN Yu³, GONG Xue-hai³

- (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, State Grid, Beijing 102209, China)

Abstract: The inter-turn insulation often runs in an inhomogeneous electric field. This is the weakest link in the insulation structure of the winding, and it is also the focus of the insulation design of the power transformer. In order to obtain insulation properties of insulating materials, we conducted insulation characteristics tests with Nomex insulation paper, modified DMD composite insulation paper, PET film and polyimide film under 0~20kV excitation voltage. We plotted the $V-t$ characteristic curve to compare the breakdown characteristics of various insulating materials and explored the influence rule of discharge distance on flashover voltage along the surface by creepage experiment. The two-parameter Weibull statistical method was used to calculate the Weibull distribution density of insulation failure of materials, which provided the basis for the reasonable selection of insulation materials for power transformers. The experiment results show that, the breakdown strength of the film material is much higher than that of the insulation paper, but the electrical aging rate of the film is higher than that of the insulating paper under the inhomogeneous electric field. The variation of the surface flashover voltage with the discharge distance is related to the type of material, and the change of fiber insulation paper is approximately linear. The flashover voltages of the four insulation materials are much lower than their respective breakdown voltages, and they all exhibit a large dispersion. The Weibull distribution density expression can be used to estimate the insulation failure rate and provides theoretical support for the prediction of insulation life of power transformers.

Key words: inter-turn insulation; $V-t$ characteristics; flashover; Weibull distribution