DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.339 **中图分类号**：TM83 **文献标志码**：A

老化时间对电力电子变压器绝缘劣化的影响

陈建福[1]，程 旭[1,2]，陈 勇[1,2]，赵晓燕[1]，陈 武[3](中国电源学会高级会员)，沈 湛[3](中国电源学会会员)

(1.广东电网有限责任公司珠海供电局，珠海 519000；2.广东电网有限责任公司直流配用电研究中心，珠海 519000；3.东南大学电气工程学院，南京 210096)

摘要：电力电子变压器PET(power electronic transformer)绝缘系统在高频、高压、低上升时间脉冲电应力及高温等恶劣环境中不断劣化，绝缘放电和击穿风险与日俱增。为了研究真实工况下PET绝缘高温热老化对绝缘劣化的影响，将变压器典型绝缘聚酰亚胺PI(polyimide)在250 ℃下分别老化3、6、9、12天，然后采用20 kHz、4 kV、300 ns的脉冲电压模拟PET运行工况，测试绝缘局部放电和击穿电压，并使用时间分辨放电谱图TRPD (time-resolved partial discharge)及放电次数、平均放电幅值、最大放电幅值来表征绝缘的劣化程度。结果表明，老化后PI薄膜的TRPD谱图放电形状从单峰变为多峰，呈现出分簇的现象；同时，随着老化时间的增加，局部放电次数、平均放电幅值、最大放电幅值分别提高了47.3%、61.1%和41.9%，绝缘劣化程度显著加深。PI薄膜的击穿电压分布符合Weibull分布，随老化时间的增加而减小，从初始的4 667 V降到4 457 V，下降了4.5%。因此，得到了老化时间对PET绝缘劣化的影响规律，对PET绝缘可靠性分析和优化设计具有重要指导意义。

关键词：电力电子变压器；脉冲电应力；高温劣化；局部放电；击穿电压

Effect of Aging Time on Insulation Deterioration of Power Electronic Transformers

CHEN Jianfu[1], CHENG Xu[1,2], CHEN Yong[1,2], ZHAO Xiaoyan[1], CHEN Wu[3], *Senior Member, CPSS*, SHEN Zhan[3], *Member, CPSS*

(1. Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 2. DC Power Distribution and Consumption Technology Research Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Power electronic transformer (PET) insulation system continue to deteriorate in high frequency, high voltage, short rise time pulse electrical stress and high temperature and other harsh environments; insulation discharge and breakdown risks are increasing significantly. In order to study the effect of high temperature thermal aging for PET on insulation deterioration under real operating conditions, the typical insulation polyimide (PI) of PET was aged at 250 ℃ for 3, 6, 9, 12 days, and then 20 kHz, 4 kV, 300 ns pulsed voltage was used to simulate PET operating conditions. The partial discharge and breakdown voltage of insulation were tested, and time-resolved partial discharge spectrum (TRPD), discharge times, average discharge amplitude, and maximum discharge amplitude were used to characterize the degree of insulation deterioration. The results show that after aging, the TRPD pattern of PI films changes from single peak to multiple peaks, showing a phenomenon of clustering. At the same time, with the increase of aging time, the number of partial discharges, average discharge amplitude and maximum discharge amplitude increase by 47.3%, 61.1% and 41.9%, respectively, and the degree of insulation deterioration was significantly deepened. The breakdown voltage distribution of PI film conforms to Weibull distribution and decreases with aging time, from the

收稿日期：2025-02-09；**修回日期**：2025-03-23；**录用日期**：2025-04-08；**网络首发日期**：2025-04-29

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52207191)；南方电网科技资助项目(030400KK52222021)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52207191；China Southern Power Grid Company Technology Project under the grant 030400KK52222021

initial 4 667 V to 4 457 V, a decrease of 4.5%. Therefore, the effect of aging time on the deterioration of PET insulation is obtained, which has certain guiding significance for the reliability analysis and optimal design of PET insulation.

Keywords: Power electronic transformer; pulsed electrical stress; high temperature deterioration; partial discharges; breakdown voltage

电力电子变压器 PET(power electronic transformer)是电力电子技术与高频变压器深度结合的新型电力电子设备[1]，其因体积小、能量利用率高[2]、能够提供高质量电力而被称为“能量路由器”。随着新型分布式电力系统的构建，使用 PET 替代传统变压器能够大大减小电力系统的复杂度，带来巨大的经济价值。高频变压器是 PET 的核心组成部件，起到电气隔离和能量传输的作用[3-5]。由于 PET 长期处在高频、高压的恶劣工况下，其紧凑的结构导致散热困难，使局部温度较高，故高频变压器的匝间绝缘及浇注绝缘等面临严峻的绝缘失效问题。

局部放电和击穿电压是衡量绝缘劣化的重要因素[6-8]。绝缘材料中存在气泡、杂质或裂纹会导致设备内部电场应力集中，从而引发局部放电。尽管短期的局部放电不会立即导致整体击穿，但放电会不断侵蚀周围的绝缘介质，从而加速劣化，当绝缘劣化到一定程度或者电压到达其耐受阈值时，就会导致绝缘击穿，引发设备故障。目前，对于绝缘劣化的研究主要集中在电压参数对局部放电的影响上，如电压波形[9-12]、频率[13]、上升时间[14]、占空比[15-16]等。例如，李欣潞等[17]对比了不同直流偏置电压对匝间电机绝缘局部放电起始电压和绝缘寿命的影响；刘涛等[18]研究了高频正弦电压下，不同频率耦合下，聚酰亚胺 PI (polyimide)薄膜局部放电次数和幅值存在“频致拐点”的现象；程弛宙等[19]分析了 50~200 ns 重复脉冲电压下，变频电机匝间绝缘局部放电起始时间及放电能量分布规律；进一步，面对脉宽调制技术[20]带来的占空比改变，徐洪英等[21]测试了 0.005%~ 50%占空比对绝缘局部放电统计特征的影响。而对于气压[22]和温度[23]等环境因素，张本栋[24]探究了 400 Hz 正弦电压在 1~101 kPa 气压范围航空电机绕组的局部放电行为；尚星宇等[25]研究了电力电子变压器环氧树脂绝缘在 25~110 ℃下的绝缘放电和击穿特性。然而现有研究主要集中在正弦电压下的局部放电检测，未充分考虑电力电子变压器所经受的高频(10 kHz 以上)、快速上升时间(数百纳秒)的特殊运行工况，且缺乏对高温下长期热积累造成的绝缘老化后的绝缘放电和击穿研究。因此，亟待厘清电力电子高频高压模拟工况下的绝缘规律，从而指导 PET 设计，保证其长期可靠运行。

本文针对上述问题，构建了电力电子变压器绝缘局部放电与击穿电压测试平台，通过施加 20 kHz、4 kV、300 ns 脉冲电应力来模拟电力电子变压器实际工况。同时，进一步聚焦电力电子变压器紧凑结构造成的温度积累和热老化问题，对 PET 典型绝缘 PI 薄膜在 250 ℃高温下进行长达 12 天的老化，最终对处理式样进行绝缘局部放电和击穿特性实验，研究不同老化时间下的绝缘劣化规律，为绝缘优化设计提供支撑。

1 试验平台

本文搭建电力电子变压器绝缘测试平台，模拟高频变压器所面临的高频、高压、快上升时间工况，测试不同老化时间下电力电子变压器典型绝缘的局部放电和击穿电压，以衡量绝缘劣化程度。

1.1 放电与击穿平台

绝缘局部放电与击穿平台主要由高频高压脉冲电源、放电模型、高压探头、高精度示波器和数据处理平台构成，如图 1 所示。

高频高压脉冲电源的参数范围为：频率 0~100 kHz、电压 0~20 kV、上升时间 50~500 ns；放电模型采用球形−平板结构，由金属铜制成，其球形直径为 20 mm，符合相应国家标准[26]；局部放电测量采用特高频传感器 UHF(ultra-high frequency)[27]，其频率范围为 30 MHz~3 GHz，具有分辨率高的特点；放电信号通过高精度示波器采集，其带宽为

350 MHz、采样率为 2.5 GS/s，可以实现局部放电信号的有效采集。将采集到的多组放电信号保存至数据处理平台，通过 MATLAB 程序设置高通滤波器的滤除噪声信号，提取出放电信号。

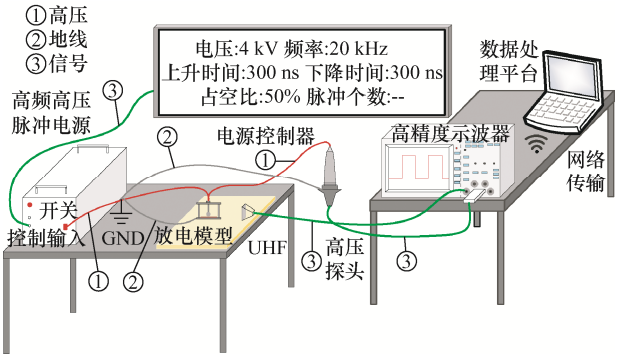


图 1　绝缘劣化测试平台

Fig. 1 Insulation degradation test platform

1.2　样品选择与处理

本次试验中的绝缘材料选用 PI，其因具有优异的耐热和耐压性能，被广泛用作电力电子变压器匝间绝缘材料。

对于局部放电测试，由于需要测试的组数较多，故需要施加的时间一般为 6~8 min。为防止在测试过程中，高频电压将试样击穿或由于劣化程度加深对结果产生影响，因此选用 0.2 mm 的 PI 薄膜。而对于击穿测试，为了能尽快达到击穿电压，则选用更薄的 0.02 mm 的 PI 薄膜。

测试前先用酒精对 PI 试样进行清洗，以清除试样表面的杂质；然后将 PI 薄膜试样裁剪成 4 cm×4 cm 的正方形放置在干燥加热箱中，如图 2 所示。

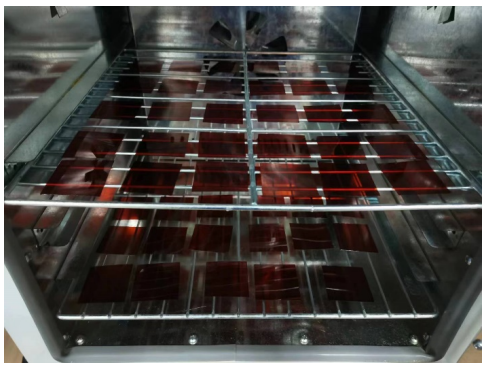


图 2　试验样品老化

Fig. 2 Aging of test samples

由于 PI 薄膜耐温可达 200 ℃以上，故设置老化温度为 250 ℃，接着分别将试样老化 3、6、9、12 天；最后将老化后的 PI 薄膜放在球-板电极中间，保证绝缘与球-板电极中线在同一条直线上，同时与电极充分接触，继而开展绝缘放电与击穿实验。

2　绝缘局部放电劣化评估

电信号对绝缘劣化的反应较为敏感，当绝缘处于高频电应力和高温等恶劣工况环境下时，其内部产生缺陷，在电场的作用下发生放电，其放电的强弱在一定程度上能够表征绝缘劣化的程度。

2.1　电应力参数确定

由于电力电子变压器的工作频率通常大于 10 kHz，因此选择施加的电压频率为 20 kHz。经测试，0.2 mm PI 薄膜的局部放电起始电压约为 3 kV，放电电压一般选择 1.2~1.5 倍局部放电起始电压 PDIV(partial discharge inception voltage)，保证放电现象显著，故选择电压 4 kV 作为施加电压，占空比均设定为 50%。

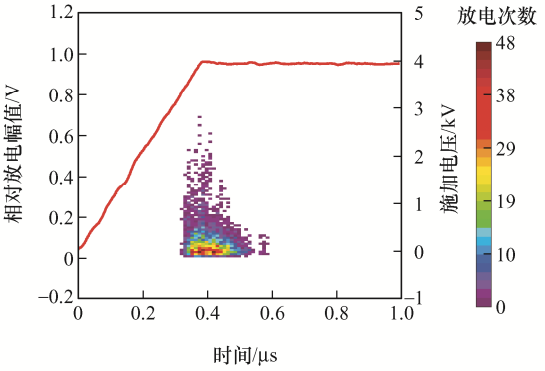
电压的上升时间也是影响绝缘局部放电的重要因素之一。本文重点研究绝缘老化时间：一方面为了模拟 SiC 等第三代半导体应用于电力电子变压器带来的高 du/dt 电应力；另一方面避免较短上升时间带来的脉冲干扰。本文选择的上升和下降时间均为 300 ns。

确定电源参数后，将 PI 薄膜放置在球-板电极之间，施加电压后采集放电信号。由于单次放电仅有数个电压脉冲信号，且局部放电具有很强的随机性，故在同一条件下，本文采集 200 组放电信号进行后续分析。

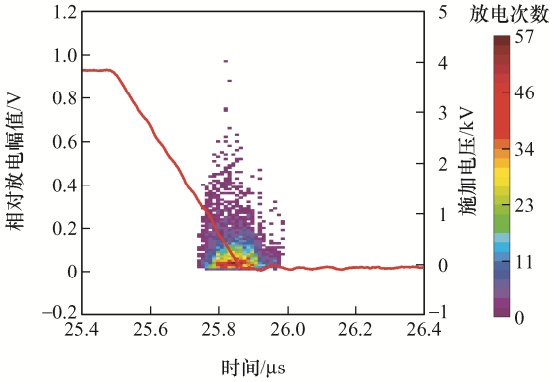
2.2　时间分辨局部放电谱图分析

时间分辨局部放电 TRPD(time-resolved partial discharge)谱图作为一种统计特征，在不同条件下具有特定的差异，已在模式识别与故障诊断方面得到重要应用。

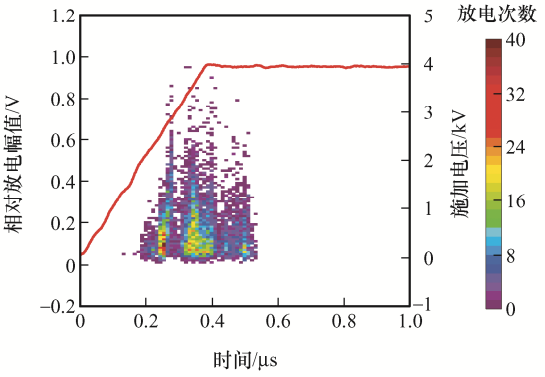
为了表征不同老化时间下绝缘的劣化程度，使用同一条件下采集的 200 组放电信息，绘制了不同老化时间下 PI 薄膜的 TRPD 谱图，如图 3 所示。



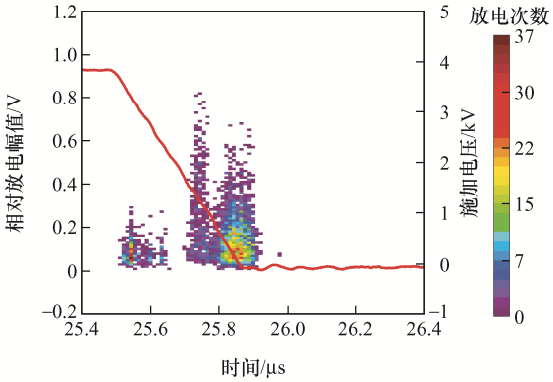
(a) 老化时间0天−上升沿



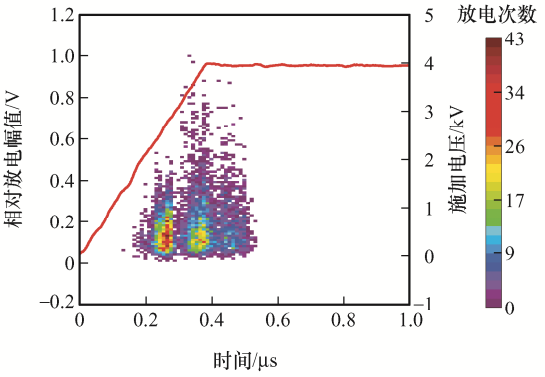
(b) 老化时间0天−下降沿



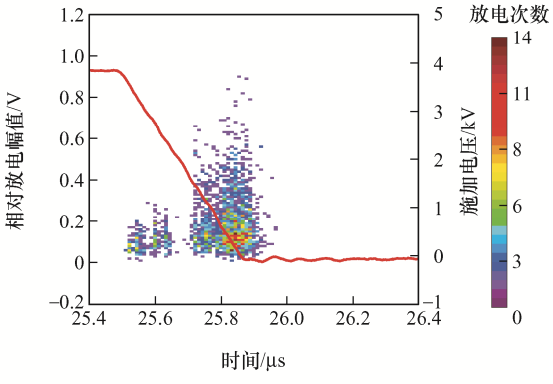
(c) 老化时间3天−上升沿



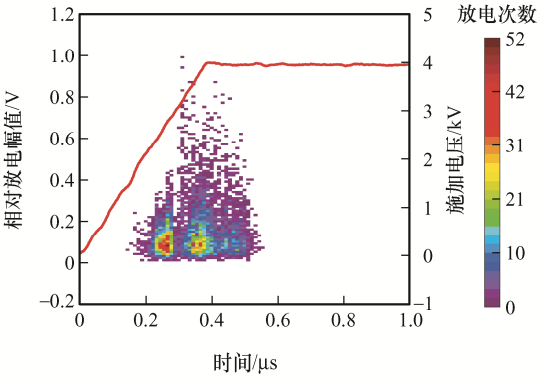
(d) 老化时间3天−下降沿



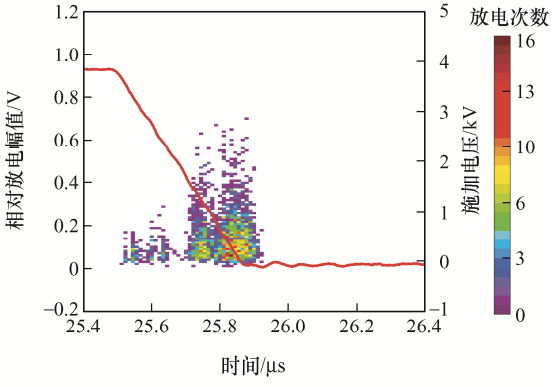
(e) 老化时间6天−上升沿



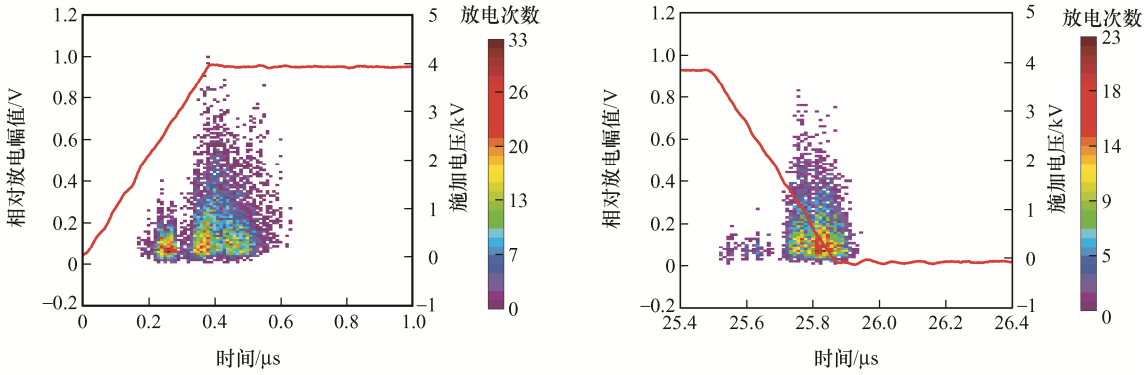
(f) 老化时间6天−下降沿



(g) 老化时间9天−上升沿



(h) 老化时间9天−下降沿



(i) 老化时间12天–上升沿　　(j) 老化时间12天–下降沿

图 3　不同老化时间下 PI 薄膜的 TRPD 谱图

Fig. 3 TRPD of PI films at different aging times

从 TRPD 谱图中不仅能得到放电形状、起始和终止放电时间，还能统计放电次数、平均放电幅值、最大放电幅值等信息，可用来描绘老化时间变化对局部放电的影响。

如图 3 所示，不同老化时间下的 TRPD 谱图具有差异性。由于上升时间较短，放电较为集中，因此将上升沿和下降沿的放电信号分开绘制。可以明显看出，无论老化时间怎样变化，局部放密度电均由下到上、由内到外减小，且放电呈下宽上窄的形状，具有一定的统一性。

当然，随着老化程度的加深，起始放电时间和放电形状也呈现一定的差异性。老化后的 PI 薄膜放电相比于老化时间为 0 的放电，其分散性和剧烈程度更大。更显著的差异是，老化后上升沿放电明显提前。未老化时，放电信号的形状呈直角三角形或者等腰三角形，为单峰；而老化后的样品放电呈现多峰，无论是上升沿还是下降沿，放电均有分簇现象发生，且都是先有 1 个小的放电簇，然后再有 1 个大的放电簇。上升沿的放电簇之间连接较为紧密，而下降沿的放电簇完全分开。

2.3　放电统计信息分析

平均放电幅值和最大放电幅值可以表征局部放电造成绝缘损伤的严重程度；同时放电次数越多，绝缘损伤也越严重，因此本文统计了不同老化时间下 PI 薄膜 200 组放电的放电次数、平均放电幅值和最大放电幅值，如图 4 所示。

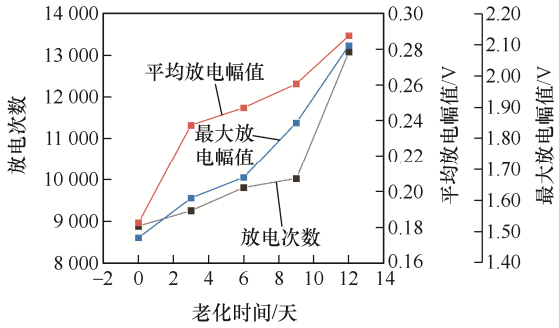


图 4　不同老化时间下的放电信息统计

Fig. 4 Discharge information statistics at different aging times

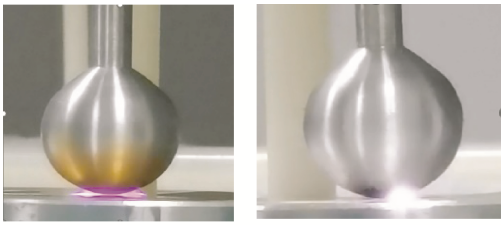
由图 4 可知，随着老化时间的增加，PI 薄膜在高频电压激励下的放电次数、平均放电幅值和最大放电幅值均呈现增大趋势。其中老化 12 天后，放电次数从 8 879 提高到 13 075、平均放电幅值从 0.18 V 增加到 0.29 V、最大放电幅值从 1.48 V 升高到 2.10 V，分别提高了 47.3%、61.1%和 41.9%，绝缘劣化程度显著加深。长期的热积累极易造成绝缘分子的断裂，带来绝缘内部的缺陷，进而加剧内部电场的畸变，更易于发生放电。

3　击穿电压测试

当绝缘产生放电现象后，会造成温度的升高，加剧绝缘的劣化程度，导致绝缘分子键断裂，并生成新的副产物，进而使放电现象更加剧烈。若放电现象得不到有效抑制，外部电压激励增加或者环境

恶化，将产生放电通道，导致绝缘击穿，造成设备损坏。

仍使用放电实验平台，采用逐级加压并以 50 V/s 的速度提高电压幅值，观察示波器，当示波器电压骤降为 0，且放电平台发出闪光并伴随“砰”的声响时，如图 5 所示，绝缘被击穿，记录此刻的电压即为击穿电压。在同样老化时间下，测试 15 次 PI 薄膜的击穿电压，得到不同老化时间下 PI 薄膜的击穿电压箱型图，如图 6 所示。



(a) 绝缘放电 (b) 绝缘击穿

图 5 绝缘放电和击穿现象

Fig. 5 Insulation discharges and breakdown phenomena

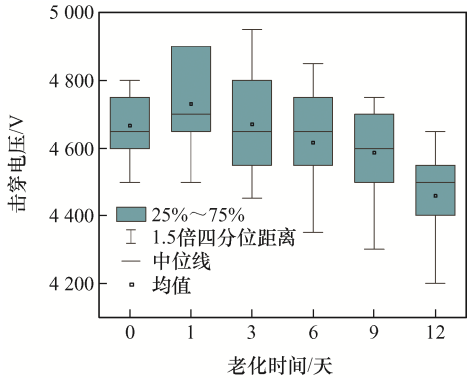


图 6 不同老化时间下的击穿电压

Fig. 6 Breakdown voltage under different aging times

由图 6 可知，随着老化时间的增加，绝缘击穿电压整体呈现减小的趋势。在老化第一天，绝缘击穿电压升高，原因是 1 天的老化还未对绝缘分子造成影响，只是使气泡减小，减弱内部电场强度，从而造成了击穿电压的升高。然而，由于击穿电压对绝缘劣化的灵敏度没有局部放电信号高，同时，老化温度没有远远超过 PI 薄膜的耐受温度，因此其下降幅度较小，仅从初始的平均击穿电压 4 667 V 降到 4 457 V，下降了 4.5%。

进一步，同一条件下的击穿电压具有一定的随机性，一般可采用 Weibull 分布进行描述[28]。绘制不同老化时间下的 PI 薄膜击穿电压频次直方图，并采用 Weibull 分布进行拟合，如图 7 所示。由图可见，击穿电压的分布具有一定的偏尾性，故采用 Weibull 分布描述更加合理、准确。

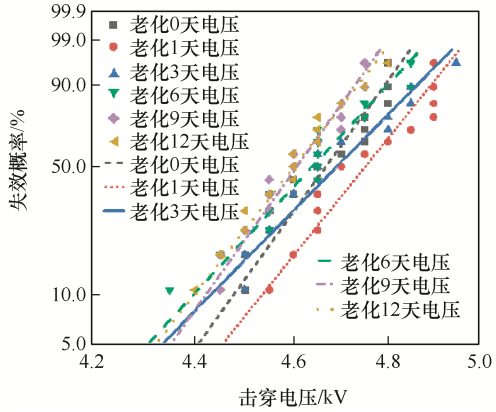
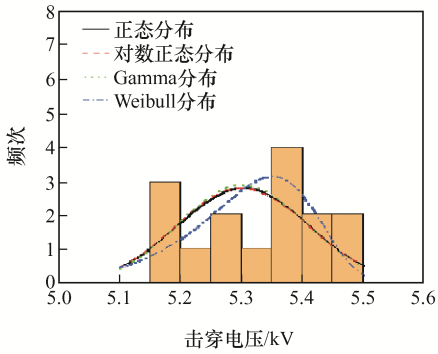


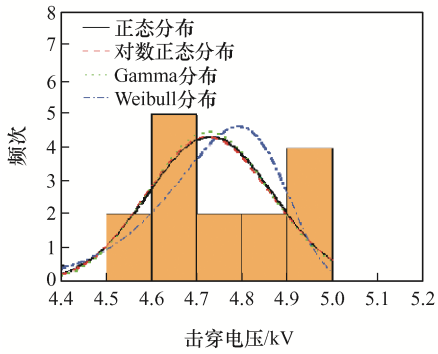
图 7 不同老化时间击穿电压 Weibull 分布拟合

Fig. 7 Breakdown voltage Weibull distribution fitting under different aging times

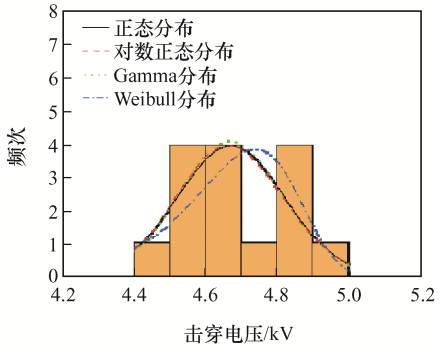
绘制不同老化时间下击穿电压的正态分布、对数正态分布、Gamma 分布和 Weibull 分布 *X*-*Y* 线性拟合，如图 8 所示。由图可看出不同老化时间下其



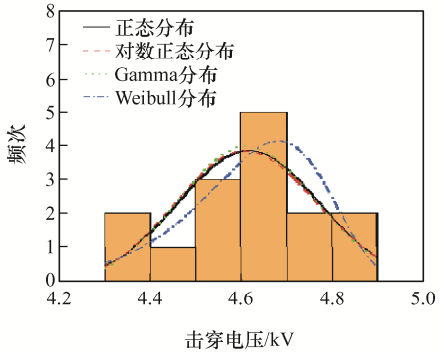
(a) 老化时间0天



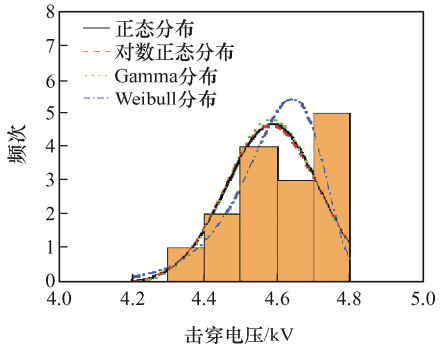
(b) 老化时间1天



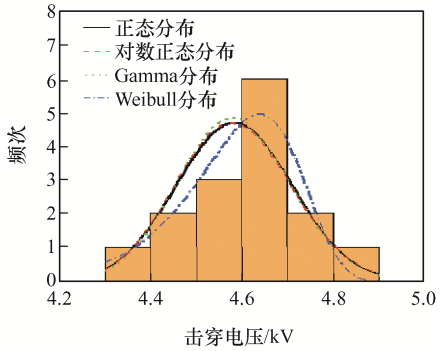
(c) 老化时间3天



(d) 老化时间6天



(e) 老化时间9天



(f) 老化时间12天

图 8　不同老化时间下的击穿电压分布拟合

Fig. 8 Breakdown voltage distribution fitting under different aging times

击穿电压分布界限不明显，具有一定的交叉，但总体随着老化时间的加深，直线向左移动，击穿电压减小。

与局部放电相比，在老化初期，尽管局部缺陷逐渐积累，但材料整体仍能承受较高的电压，击穿电压下降较缓慢。只有当缺陷扩展至临界尺寸(如贯穿性裂纹)时，击穿电压才会显著下降。绝缘介质在结构强度未完全丧失前，可通过局部放电能量耗散、缺陷周围电场重新分布等机制延缓击穿。因此，击穿电压的下降通常滞后于局部放电的显著增长。

4　结论

本文搭建了电力电子变压器高频脉冲电压局部放电和击穿电压测试平台，并测试了高频变压器 PI 绝缘材料在 250 ℃最长老化 12 天的局部放电和击穿电压，同时着重关注电力电子高频高压模拟工况下的绝缘规律，得到以下结论。

(1)高温老化对 PI 薄膜局部放电 TRPD 谱图具有显著影响。老化后放电形状从单峰变为多峰，呈现出分簇的现象。

(2)随着老化时间的增加，局部放电次数、平均放电幅值、最大放电幅值分别提高了 47.3%、61.1% 和 41.9%，绝缘劣化程度显著加深。

(3)PI 薄膜的击穿电压分布符合 Weibull 分布，随老化时间的增加而减小，从初始 4 667 V 降低到 4 457 V，下降了 4.5%，相比于局部放电受影响程度存在一定的滞后性。

参考文献：

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

[2] 万家伟，陈汉超，廖承，等. 用于智能电网含电力电子

变换器的混合型变压器设计[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 152-160.

Wan Jiawei, Chen Hanchao, Liao Cheng, et al. Hybrid transformer design with power electronic converter for smart grid [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 152-160. (in Chinese)

[3] 傅恺宁, 涂江涛, 陈为. 高频变压器传导共模干扰分析与评估[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 37-43.

Fu Kaining, Tu Jiangtao, Chen Wei. Analysis and evaluation of conducted common-mode interference of high-frequency transformer [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 37-43. (in Chinese)

[4] Lu Rui, Yu Jianxiong, Li Chengmin, et al. High voltage winding internal electric field shielding structure for medium voltage high frequency transformers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(10): 11469-11474.

[5] 徐文林, 肖湘晨, 张璨辉, 等. 电力电子化电力系统电压功角动态稳定性建模分析方法[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 173-180.

Xu Wenlin, Xiao Xiangchen, Zhang Canhui, et al. Modeling and analysis method for voltage power angle dynamic stability of power electronic power system [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 173-180. (in Chinese)

[6] Liu Tao, Li Qingmin, Huang Xuwei, et al. Partial discharge behavior and ground insulation life expectancy under different voltage frequencies [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(2): 603-613.

[7] 杨帆, 张玉琛, 王鹏博, 等. 电容屏破损缺陷局部放电过程规律特征及仿真分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2860-2872.

Yang Fan, Zhang Yuchen, Wang Pengbo, et al. Characteristics and simulation analysis of partial discharge process of condenser foil layer defect [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2860-2872. (in Chinese)

[8] Zhao Yikun, Zhang Guoqiang, Guo Runrui, et al. The breakdown characteristics of thermostable insulation materials under high-frequency square waveform [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4): 1073-1080.

[9] Jiang Jun, Chen Wu, Song Yu, et al. Active control strategy of partial discharge for insulation of high-power high-voltage high-frequency transformers (H3Ts) [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(7): 7521-7524.

[10] 王鹏, 周婉亚, 王科镜, 等. 正弦和重复方波电压下变频电机绝缘局部放电特性对比[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3895-3900.

Wang Peng, Zhou Wanya, Wang Kejing, et al. Comparison of PD characteristics for inverter-fed motor insulation under inusoidal and repetitive square wave voltage conditions [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3895-3900. (in Chinese)

[11] 蒋原, 马速良, 武建文, 等. 中频真空电弧边缘击穿现象及仿真研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2887-2895.

Jiang Yuan, Ma Suliang, Wu Jianwen, et al. Experiment and simulation for edge breakdown in intermediate frequency vacuum arc [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2887-2895. (in Chinese)

[12] Wu Xiaohan, Cao Bin, Li Zong, et al. DC breakdown characteristic of air gap with water droplets [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(6): 1962-1968.

[13] 刘云鹏, 杨超杰, 赵涛, 等. 温度对油-纸界面处微水迁移与局部放电的影响[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5182-5193.

Liu Yunpeng, Yang Chaojie, Zhao Tao, et al. Effect of temperature on moisture migration and partial discharge at the oil-paper interface [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5182-5193. (in Chinese)

[14] Hammarström T J Å. Partial discharge characteristics at ultra-short voltage risetimes [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2241-2249.

[15] 惠苏新, 王鹏, 吴琦, 等. 重复脉冲占空比对环氧树脂电树生长特性影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5383-5391.
Hui Suxin, Wang Peng, Wu Qi, et al. Study of the influence of repetitive impulse voltage duty cycle on the treeing characteristics of epoxy resin [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5383-5391. (in Chinese)

[16] Wang Peng, Xu Hongying, Wang Jian, et al. Effect of repetitive impulsive voltage duty cycle on partial discharge features and insulation endurance of enameled wires for inverter-fed low voltage machines [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2123-2131.

[17] 李欣潞, 王鹏, 赵文焕, 等. 偏置电压对变频电机匝间绝缘 PDIV 及绝缘寿命影响研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(11): 48-55.
Li Xinlu, Wang Peng, Zhao Wenhuan, et al. Influence of bias voltage on PDIV and lifetime of turn to turn insulation for inverter-fed motors [J]. Insulating Materials, 2022, 55(11): 48-55. (in Chinese)

[18] 刘涛, 李庆民, 黄旭炜, 等. 聚酰亚胺薄膜局部放电频致拐点现象及形成机制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2750-2758.
Liu Tao, Li Qingmin, Huang Xuwei, et al. Frequency-induced inflection point phenomenon and formation mechanism of partial discharge with polyimide films [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2750-2758. (in Chinese)

[19] 程驰宙, 王鹏, 李想. 重复脉冲上升时间对低压散绕变频电机匝间绝缘 PDIV 影响研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(8): 67-73.
Cheng Chizhou, Wang Peng, Li Xiang. Effect of repetitive impulsive voltage rise time on PDIV of turn to turn insulation for low-voltage random-wound inverter-fed motor [J]. Insulating Materials, 2021, 54(8): 67-73. (in Chinese)

[20] Benmamas L, Teste P, Odic E, et al. Contribution to the analysis of PWM inverter parameters influence on the partial discharge inception voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(1): 146-152.

[21] 徐洪英, 赵莉华, 王鹏, 等. 重复脉冲占空比对变频电机绝缘局部放电统计特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 2159-2166.
Xu Hongying, Zhao Lihua, Wang Peng, et al. Influence of repetitive impulse wave voltage duty cycle on partial discharge statistics in inverter-fed motor insulation [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2017, 37(7): 2159-2166. (in Chinese)

[22] 孙浩, 王亚林, 范路, 等. 低气压方波电压下多电飞机电机绝缘局部放电研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 565-576.
Sun Hao, Wang Yalin, Fan Lu, et al. Research on partial discharge of more electric aircraft propulsion motor insulation under low pressure and square wave voltage [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 565-576. (in Chinese)

[23] 罗杨, 吴广宁, 王鹏, 等. 连续方波脉冲电压下温度对聚酰亚胺薄膜局部放电特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 154-160.
Luo Yang, Wu Guangning, Wang Peng, et al. Effect of temperature on partial discharge properties of polyimide film under continuous square impulse voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 154-160. (in Chinese)

[24] 张本栋, 江军, 李治, 等. 面向未来多电飞机的低气压下局部放电[J]. 航空学报, 2022, 43(7): 268-278.
Zhang Bendong, Jiang Jun, Li Zhi, et al. Partial discharge characteristics of future more electric aircraft under low air pressure [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(7): 268-278. (in Chinese)

[25] 尚星宇, 庞磊, 卜钦浩, 等. 温度对方波电压下环氧树脂局部放电及击穿特性的影响[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3286-3295.
Shang Xingyu, Pang Lei, Bu Qinhao, et al. Effect of temperature on partial discharge and breakdown characteristics of epoxy resin under square wave voltage [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3286-3295. (in Chinese)

[26] 全国电气绝缘材料与绝缘系统评定标准化技术委员会. 绝缘材料 电气强度试验方法 第一部分：工频下试验：GB/T 1408.1—2017 [S]. 北京：中国标准出版社，2017.
National Technical Committee on Electrical Insulating Materials and Insulation System Evaluation. Insulation Material——Test Methods for Electric Strength——Part 1: Test at Power Frequencies: GB/T 1408.1—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)

[27] Fabiani D, Cavallini A, Montanari G C. A UHF technique for advanced PD measurements on inverter-fed motors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2546-2556.

[28] 赵义焜，张国强，韩冬，等. 基于材料绝缘寿命的高频变压器绕组绝缘试验电压确定方法[J]. 电工技术学报，2020, 35(13): 2932-2939.
Zhao Yikun, Zhang Guoqiang, Han Dong, et al. An insulation test method based on the dielectric insulation life for windings in high-frequency transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2932-2939. (in Chinese)



陈建福

作者简介：

陈建福(1965—)，男，博士，教授级高级工程师。研究方向：直流配用电技术。E-mail：whyqsxddc@163.com。

程旭(1994—)，男，硕士研究生，工程师。研究方向：直流配用电技术。E-mail：664157102@qq.com。

陈勇(1982—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：直流配用电技术。E-mail：35665035@qq.com。

赵晓燕(1991—)，女，学士，工程师。研究方向：电网规划技术。E-mail：1536516158@qq.com。

陈武(1981—)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：电力电子功率变换，交直流配电网，新能源发电。E-mail：chenwu@seu. edu.cn。

沈湛(1991—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副研究员。研究方向：高频电力电子及其磁元件。E-mail：zhs@seu.edu.cn，15039812361@139.com。

(责任编辑：孙美菊)