

GIS 中快速暂态过电压幅值对电力电缆终端用三元乙丙橡胶电气绝缘性能的影响

韩为宏¹, 李超胜¹, 赵小平¹, 苏宏伟², 魏 健²

(1. 国网甘肃省电力公司武威供电公司, 甘肃 武威 733000;

2. 湖北安源安全环保科技有限公司, 湖北 武汉 430021)

摘 要: 本文搭建快速暂态过电压 (very fast transient overvoltage, VFTO) 放电模拟平台, 以大量雷电冲击波模拟 VFTO 对电力设备的影响, 研究放电幅值对三元乙丙橡胶 (EPDM) 电气绝缘性能的影响规律。结果表明: 经 200 次脉冲放电后, EPDM 表面生成羧酸盐基团, 介电常数与介质损耗因数上升, 而交流电气强度与表面水接触角明显下降。上述性能劣化程度随放电场强增大而加剧。当场强达到 40 kV/mm 时, 经 200 次脉冲放电后 EPDM 试样的交流电气强度由 42.28 kV/mm 下降至 37.16 kV/mm, 降幅为 12.11%, 水接触角由 100.53° 下降至 88.63°。

关键词: VFTO; 三元乙丙橡胶; 交流电气强度; 水接触角

Influence of VFTO amplitude on electrical insulation performance of EPDM for power cable terminals in GIS

HAN Weihong¹, LI Chaosheng¹, ZHAO Xiaoping¹, SU Hongwei², WEI Jian²

(1. State Grid Gansu Electric Power Company Wuwei Electric Power Supply Company, Wuwei 733000, China;

2. Hubei Anyuan Safety and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan 430021, China)

Abstract: In this paper, a very fast transient overvoltage (VFTO) discharge simulation experiment platform was established. The effect of VFTO on power equipment was simulated by multiple lightning shock waves, and the effect of discharge amplitude on the electrical insulation performance of ethylene propylene diene monomer (EPDM) was studied. The results show that after 200 times of pulsed discharges, carboxylate salt groups are formed on the EPDM surface, and the dielectric constant and dielectric loss factor increase, while the AC electric strength and surface water contact angle decrease significantly. The degradation degree of above performance increases with the increase of discharge electric field strength. When the field strength reaches 40 kV/mm, the AC electric strength of the EPDM sample decreases from 42.28 kV/mm to 37.16 kV/mm after 200 times of pulse discharges, with a decrease of 12.11%, and the water contact angle decreases from 100.53° to 88.63°.

Key words: VFTO; EPDM; AC electric strength; water contact angle

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备 (gas insulated switchgear, GIS) 中, 隔离开关执行分合操作时会产生瞬态过电压, 并以电磁波的形式沿母线向隔离开关两侧传播, 当传播至绝缘子、套管、电缆终端等位置时会因电磁波的折射与反射形成快速暂态过电压 (very fast transient overvoltage, VFTO)^[1-2]。VFTO 可能引发绝缘失效, 甚至导致设备损坏^[3], 严重危及周边设备运行的安全性与稳定性。三元乙丙橡胶

(ethylene propylene diene monomer, EPDM) 作为乙烯、丙烯、非共轭二烯烃的三元共聚物, 因其优异的绝缘性能与耐腐蚀性, 广泛用于 GIS^[4] 及高压电缆^[5-6] 的密封与绝缘。值得注意的是, EPDM 所在位置通常是 VFTO 作用的重灾区, 然而关于 VFTO 对 EPDM 性能影响的研究迄今鲜有报道。

为了降低电力系统中 VFTO 对设备的影响, 诸多研究聚焦于采用抑制策略, 包括加装阻尼母线结构^[7-8]、增设阻尼电阻^[9] 或加装铁氧体磁环^[10] 等。王欢等^[7] 研究表明, 加装阻尼母线可显著降低 VFTO 的平均幅值, 并有效减少 GIS 内部电气击穿次数。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目 (52272810005)。

胡洋等^[10]研究发现,在母线或隔离开关处加装铁氧体磁环,可分别使VFTO的最大幅值降低32.3%和36.7%,并指出当隔离开关处磁环饱和时,在母线最优位置再改装,磁环可进一步削弱VFTO对设备的影响。然而,上述研究聚焦于优化电力设备的结构以降低VFTO对设备的影响,尚未从设备关键绝缘材料本身出发,探索提升电力设备耐受VFTO能力的途径。

提升绝缘材料的抗VFTO能力,首先要掌握VFTO劣化其绝缘性能的机理。然而,关于VFTO作用下绝缘材料的性能劣化机理及其提升方法的研究相对匮乏。潘绍明等^[11]研究了VFTO对环氧树脂介电性能的影响,指出随VFTO放电场强的增强,环氧树脂的电气强度因内部缺陷增多呈现持续劣化的趋势。刘熊^[12]研究了VFTO对环氧绝缘子表面形貌和沿面闪络性能的影响。何顺等^[13]研究发现,降低盆式绝缘子用环氧绝缘料中氧化铝填料的含量,有助于减小其表面VFTO幅值,从而提高绝缘子对VFTO的耐受能力。作为重要的绝缘材料之一,EPDM在电缆应用领域已获得广泛研究^[14-17],但其在VFTO工况下的性能变化规律及提升其VFTO耐受能力的方法研究鲜有报道。

为此,本研究搭建VFTO放电模拟平台,以大量雷电冲击波模拟VFTO放电对绝缘材料的影响。通过对EPDM试样施加不同幅值的雷电脉冲放电(累计200次),测量脉冲放电作用前后试样的化学结构、介电常数、交流电气强度及静态水接触角等关键性能参数的变化规律,深入分析放电场强对EPDM电气绝缘性能的影响规律,并探讨其内在机理,为提升GIS设备的绝缘可靠性提供理论依据。

1 试验

1.1 试样

本研究所用的EPDM是110 kV GIS用电缆终端的主要绝缘与密封介质,其厚度为0.6 mm,直径为100 mm。

1.2 VFTO放电模拟平台

VFTO放电模拟平台如图1所示,主要由脉冲电源发生器、分压电容与腔体组成,其中腔体内装有放电电极。试验时将试样夹紧在电极中,并在腔体内充满SF₆气体,保持腔体内气压为0.2 MPa。

考虑到试验成本以及雷电冲击波与VFTO对电介质的作用均有累积效应,本研究用负极性雷电冲

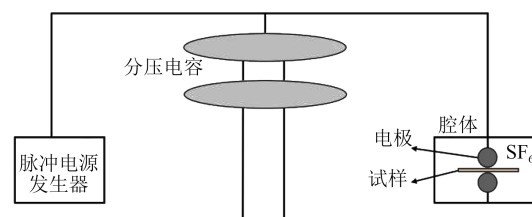


图1 VFTO放电模拟平台

Fig.1 VFTO discharge simulation platform

击波代替VFTO进行试验。用雷电冲击波的波头、波尾时间分别为1.2 μs、50 μs,分别设置雷电冲击波场强为20 kV/mm与40 kV/mm,随后对试样进行200次放电。将脉冲放电前和经受不同场强(分别为20 kV/mm和40 kV/mm)脉冲放电的试样分别记为试样1、试样2和试样3。

1.3 试验方法

使用VEG800S型扫描电子显微镜(SEM)观测试样的表面形貌,放大倍率为500倍,观测前需对试样表面喷镀导电电极。

使用红外光谱仪的投射模式表征试样的化学结构,测试波数为3 000~600 cm⁻¹,扫描次数为32,分辨率为4 cm⁻¹。

使用Novontrol Concept 80型宽带介电谱仪测量试样的介电常数与介质损耗因数,测试温度为20℃,频率为10⁻¹~10⁶ Hz。测试前需对试样两端喷镀导电电极,电极直径为30 mm。

交流击穿试验在绝缘油中进行,温度为30℃,电极为铜制球-球电极,半径为10 mm。每一种试样选择2个样片进行10次有效击穿,记录击穿电压并计算电气强度,然后用Weibull分布统计试验数据。

使用座滴法测量试样的静态水接触角,测试用水为去离子水。每一种试样选择2个样片,对表面的不同位置进行5次测量,取5次结果的平均值作为最终结果。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌

图2为EPDM试样经200次脉冲放电前后的SEM图。从图2可以看出,脉冲放电前试样(试样1)的表面存在橡胶颗粒,整体纹路清晰,没有出现明显的裂纹;经20 kV/mm脉冲放电200次后,试样2表面出现明显裂纹;当脉冲放电的场强进一步增大至40 kV/mm时,试样3的表面裂纹密度增大且更清晰。SEM结果表明,脉冲放电对EPDM的表面形貌

有影响,且这种影响随着放电场强的增大而增强。本文中 EPDM 表面形貌的变化与王雪婷^[18]报道的 EPDM 经辐照后表面形貌的变化相似。脉冲放电与高能电子辐照类似,均会产生大量高能电子,这些电子会冲击试样表面,导致试样表面出现裂纹及缺陷,使性能劣化。

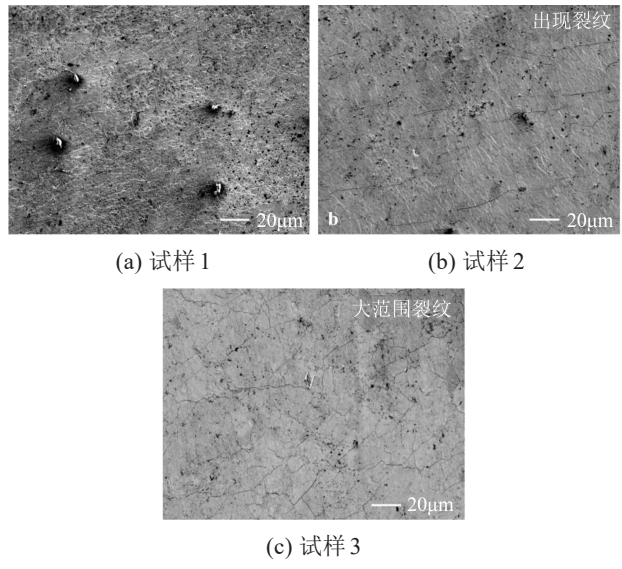


图2 脉冲放电前后 EPDM 试样的 SEM 图
Fig.2 SEM images of EPDM samples before and after pulse discharge

2.2 化学结构

图3为EPDM试样经200次脉冲放电前后的红外光谱。从图3可以看出,脉冲放电显著改变了EPDM的化学结构。试样1的光谱特征峰主要归属于乙烯、丙烯和非共轭二烯烃组分,其中 2918 cm^{-1} 与 2848 cm^{-1} 处的吸收峰归属于分子链中 $\text{-CH}_2\text{-}$ 的伸缩振动^[18-19]; 1462 cm^{-1} 与 1374 cm^{-1} 处的吸收峰主要归属于 -CH_3 的弯曲振动^[18-19]; 1080 cm^{-1} 与 802 cm^{-1} 处的吸收峰同时出现,表征Si-O-Si键的不对称伸缩振动和Si-C键的伸缩振动特征可能性最大^[19],表明EPDM试样中很可能添加了含硅添加剂。

经脉冲放电后,红外光谱中位于 1537 cm^{-1} 处的特征峰显著增强,同时在 1398 cm^{-1} 处出现了新的特征峰。通过查阅文献,认为 1398 cm^{-1} 处新产生的特征峰与羧基团有关^[9]。EPDM配方中通常含有氧化锌,其作为促进剂以提升试样在制备过程中的交联效率。当EPDM在 SF_6 气氛下经历多次脉冲放电时,有机分子链将断裂并产生自由基,这些自由基可与气体中的含氧杂质发生反应,生成羧酸,而羧酸可与含锌的添加剂反应生成羧酸盐,因此 1537

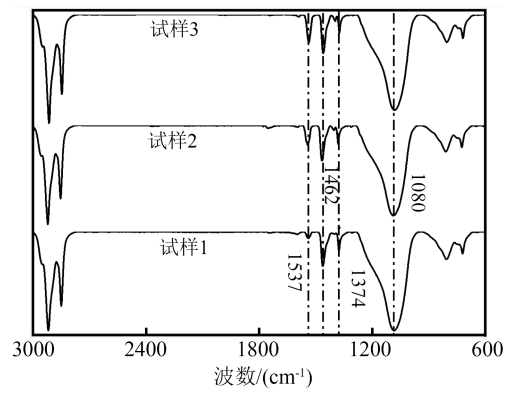


图3 EPDM试样的红外光谱测试结果
Fig.3 Infrared spectra test results of EPDM samples

cm^{-1} 与 1398 cm^{-1} 处为羧酸盐的特征峰,且峰值随着放电场强的提升而增大。

2.3 介电常数与介质损耗因数

试样在常温下的介电常数与介质损耗因数($\tan\delta$)测试结果如图4所示。从图4可以看出,试样1的介电常数大于3.4,随着脉冲放电场强的增大,试样的介电常数持续上升。经 40 kV/mm 脉冲放电

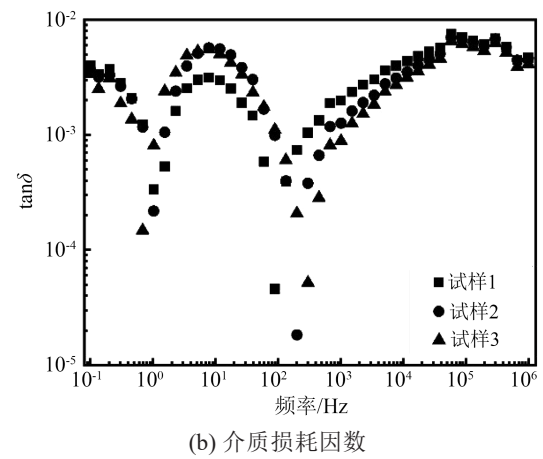
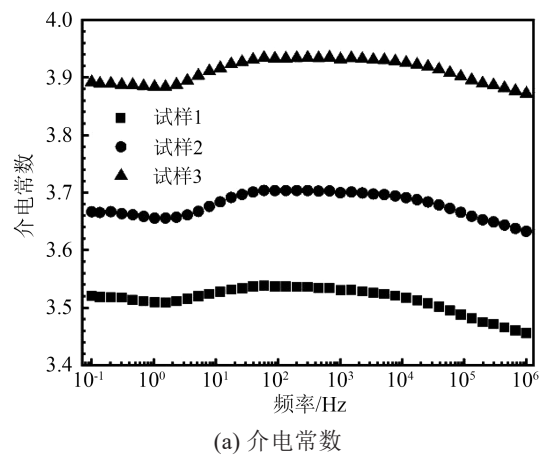


图4 EPDM试样的介电常数和介质损耗因数
Fig.4 The dielectric constant and $\tan\delta$ of EPDM samples

200次后,试样3的介电常数已超过3.8。纯EPDM属于非极性材料,其介电常数理论值应低于3.0^[20]。然而,部分EPDM试样在制备过程中因添加极性组分,可能导致其介电常数高于3.0,这与文献[21]报道的EPDM常温介电常数范围(3~4)相符。本文介电常数测试结果大于3.4,亦印证了EPDM试样在制备过程中加入了额外的添加剂,与图3中的红外光谱测试结果相匹配。

经历200次脉冲放电后,试样的介电常数随脉冲场强增大而显著增大,但tanδ的变化则主要表现为损耗峰向高频方向略有偏移。结合红外光谱测试结果,认为在脉冲放电下EPDM发生了分子链断裂与重组,表现为大分子断裂后生成新的含氧小分子基团。这些小分子更容易在电场作用下发生极化,导致EPDM介电常数上升、损耗峰向高频方向偏移。鉴于本文选用的EPDM材料主要用于交流电缆,特此对比了50 Hz下(工频)EPDM试样的介电常数与tanδ,结果汇总于表1。

表1 EPDM试样在50 Hz时的介电常数与介质损耗因数

Table1 Dielectric constant and tanδ of EPDM samples at 50 Hz			
介电参数	试样1	试样2	试样3
介电常数	3.54	3.70	3.93
tanδ	5.86×10 ⁻⁴	1.67×10 ⁻³	1.76×10 ⁻³

从表1可以看出,经脉冲放电处理后,EPDM试样在工频下的介电常数与介质损耗因数均呈上升趋势。结合红外光谱分析表明,EPDM经历多次脉冲放电后,其分子链发生断裂并产生自由基。这些自由基与气体中的含氧杂质及添加剂发生一系列化学反应,最终生成极性羧酸盐产物,导致试样整体极性增强,进而引起其介电常数与介质损耗因数上升。

2.4 交流电气强度

根据GB/T 29310—2012相关要求,采用双参数Weibull分布模型分析脉冲放电前后EPDM试样的交流击穿性能。双参数Weibull函数见式(1)^[22-23]。

$$P_f(E_0; \alpha, \beta) = 1 - e^{-(\frac{E_0}{\alpha})^\beta}$$

(1)

式(1)中: P_f 是试样在交流电压作用下的击穿概率,%; E_0 是交流电气强度,kV/mm; α 是尺寸参数,代表击穿概率为63.2%时试样的电气强度,kV/mm; β 是形状参数,表征试样击穿性能的稳定性。

图5为EPDM试样交流电气强度的Weibull分

布,相对应的Weibull分布参数见表2。从图5和表2可以看出,未经受脉冲放电的EPDM试样绝缘性能最好,其交流电气强度为42.28 kV/mm。当经历200次脉冲场强分别为20 kV/mm和40 kV/mm的脉冲放电后,EPDM试样的电气强度出现劣化,分别下降至38.66 kV/mm和37.16 kV/mm。相较于试样1,试样3的交流电气强度劣化程度最大,下降了12.11%。

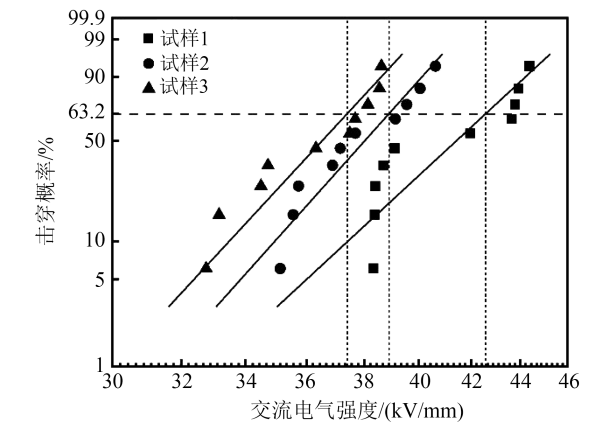


图5 EPDM试样交流电气强度的Weibull分布图
Fig.5 Weibull distribution of AC electric strength for EPDM samples

表2 EPDM试样交流电气强度的Weibull分布参数

Table 2 Weibull distribution parameters of AC electric strength for EPDM samples		
试样	α /(kV/mm)	β
1	42.28	18.48
2	38.66	22.31
3	37.16	21.60

2.5 水接触角

试样脉冲放电前后表面水接触角的变化如图6所示。从图6可以看出,试样1表面表现出疏水性,其水接触角为100.53°。但经200次脉冲放电后,试样表面的水接触角下降,试样2和试样3的表面水接触角分别为91.74°与88.63°,表明经过脉冲放电后EPDM试样表面疏水性受到破坏。

电介质表面的水接触角与其极性基团的含量密切相关。通常极性基团含量增加会导致电介质的水接触角下降^[24]。红外光谱测试结果表明,经历多次脉冲放电后,试样中极性基团含量显著增加,该变化直接导致EPDM试样表面水接触角下降。鉴于EPDM在电缆终端中主要起绝缘与密封作用,其水接触角的降低会削弱材料表面的疏水性,导致

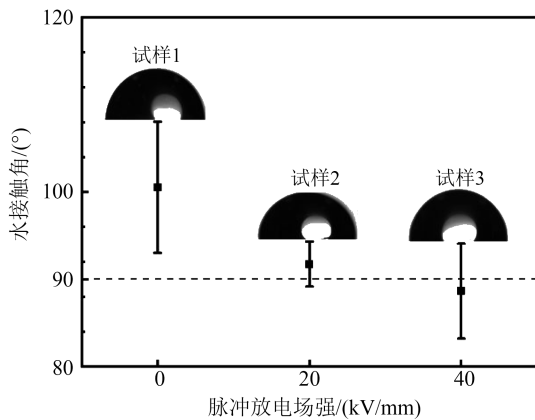


图6 EPDM 试样的水接触角

Fig.6 Water contact angle of EPDM samples

水分侵入电缆内部,进而加速绝缘介质的老化并损害其绝缘性能^[25],最终对电力设备的长期稳定运行构成风险。

2.6 讨论

固体电介质的击穿性能受其内部杂质与缺陷的影响^[11,26]。SEM 结果表明,未经受脉冲放电的 EPDM 试样表面结构均匀、无明显缺陷。然而,经历脉冲放电冲击后,试样表面出现明显裂纹,且裂纹密度与严重程度随脉冲场强增大而增加。这将导致环境中的气体分子可沿裂纹渗入 EPDM 内部,且裂纹越多,气体渗入越容易、渗入量越多,将导致材料内部气体杂质增多。

图7为脉冲放电作用下 EPDM 中缺陷演变的示意图,其中对于没有经受脉冲放电的 EPDM 试样,用一个无缺陷的固体表示,而经历脉冲放电后,会在固体表面乃至内部存在一些气泡。

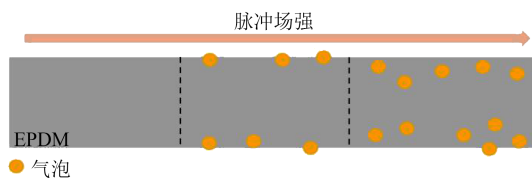


图7 脉冲放电作用下 EPDM 中缺陷演变示意图

Fig.7 Schematic diagram of defect evolution in EPDM under pulse discharge

从图7可以看出,随着脉冲场强的增大,气泡含量增多且会向内部延伸。鉴于气体电介质的电气强度远低于固体电介质,这些富含气体的区域将成为 EPDM 本体绝缘的薄弱位置^[27]。在施加电场后,试样中的绝缘缺陷(气泡处)将率先发生放电。

在交流电场作用下,复合电介质中各组分承受的电场强度与其介电常数成反比^[28]。试验测得 50

Hz 下试样 1、试样 2、试样 3 的介电常数分别为 3.54、3.70、3.93。因此,在相同外施电压下,介电常数更高的试样(试样 2 和试样 3)内部气隙需承受更强的电场,显著增加了固体材料内部气隙发生击穿与局部放电的风险,从而在电介质内部产生大量电子。这些电子可作为初始电子,引发固体电介质发生击穿^[11,26-27]。

试样 1 的介电常数最低且表面完好无损,因而具有最高的交流电气强度(42.28 kV/mm)。经 200 次脉冲放电后,随着脉冲场强增大(20 kV/mm 和 40 kV/mm),试样内部缺陷数量增多且介电常数增大(分别达到 3.70 与 3.93),导致其绝缘性能劣化,交流电气强度下降至 38.66 kV/mm(试样 2)和 37.16 kV/mm(试样 3)。

3 结论

本文基于搭建的 VFTO 放电模拟平台,通过大量负极性雷电脉冲放电试验模拟 VFTO 对电力设备的冲击效应,研究了不同放电幅值对 EPDM 绝缘性能的劣化规律,主要得出如下结论:

(1)脉冲放电后 EPDM 表面产生显著裂纹,同时材料内部生成极性羧酸盐产物,破坏了其表面疏水性。

(2)脉冲放电后 EPDM 的介电常数上升、介质损耗峰向高频区域偏移。

(3)脉冲放电导致 EPDM 的交流电气强度显著下降。经 200 次 40 kV/mm 脉冲放电后,EPDM 的电气强度由 42.28 kV/mm 下降至 37.16 kV/mm,降幅达到 12.11%。

(4)脉冲放电后 EPDM 表面水接触角下降,经 200 次 40 kV/mm 脉冲放电后,EPDM 的水接触角由 100.53°下降至 88.63°。

参考文献 References

- [1] 高有华.雷电冲击和快速暂态过电压对 GIS 及相连设备影响的研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2004.
GAO Youhua. Research of influence on GIS and adjacent device under lightning impulse and very fast transient over-voltage[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology,2004.
- [2] 施围,邱毓昌,张乔根.高电压工程基础[M].北京:机械工业出版社,2006.
SHI Wei, QIU Yuchang, ZHANG Qiaogen. Fundamentals of high voltage engineering[M]. Beijing: China Machine Press,2006.
- [3] 李云阁,尚勇,韩彦华,等.关于极快速暂态过电压(VFTO)研究的现状[J].电网与清洁能源,2024,40(10):1-12.

- LI Yunge, SHANG Yong, HAN Yanhua, et al. Current progress in research on very fast transient overvoltage (VFTO)[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(10): 1-12.
- [4] 王欣欣, 何成, 陈军, 等. GIS设备用三元乙丙橡胶密封材料老化前后力学性能变化研究[J]. *高压电器*, 2024, 60(8): 106-112.
- WANG Xinxin, HE Cheng, CHEN Jun, et al. Study on mechanical property variation of EPDM sealing materials for GIS equipment before and after aging[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(8): 106-112.
- [5] 纪多, 李春阳, 杨旭, 等. 表面接枝电压稳定剂改善三元乙丙橡胶界面绝缘性能[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(15): 4941-4953.
- JI Duo, LI Chunyang, YANG Xu, et al. Enhanced interface insulation performance of EPDM by surface grafting of voltage stabilizer[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(15): 4941-4953.
- [6] 缪林鑫, 吴建东, 戴畅, 等. 热处理温度对三元乙丙橡胶交流电场特性的影响研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(15): 5043-5050.
- MIU Linxin, WU Jiandong, DAI Chang, et al. Influence of thermal treatment temperature on the characteristics of ethylene propylene diene monomer under AC field[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(15): 5043-5050.
- [7] 王欢, 刁赢龙, 吴细秀, 等. 抑制VFTO用阻尼母线设计与抑制效果验证[J/OL]. *高电压技术*, 2025: 1-9. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250315>.
- WANG Huan, DIAO Yinglong, WU Xixiu, et al. Design of damping bus for VFTO suppression and verification of suppression effect[J/OL]. *High Voltage Engineering*, 2025: 1-9. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250315>.
- [8] 韩林汕. 特快速暂态过电压高频成分特性与主动抑制方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- HAN Linshan. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [9] 杨喜龙, 穆双录, 王浩, 等. 特高压GIS用磁环型阻尼母线VFTO抑制性能试验研究[J]. *高压电器*, 2024, 60(8): 77-84.
- YANG Xilong, MU Shuanglu, WANG Hao, et al. Experimental study on VFTO suppression performance of magnetic ring damping bus for UHV GIS[D]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(8): 77-84.
- [10] 胡洋, 张文斌, 欧阳娇, 等. 铁氧体磁环加装位置对VFTO抑制效果研究[J]. *电气工程学报*, 2023, 18(1): 258-264.
- HU Yang, ZHANG Wenbin, OUYANG Jiao, et al. Research on the suppression effect of ferrite magnetic ring on VFTO[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2023, 18(1): 258-264.
- [11] 潘绍明, 张磊, 赵坚, 等. 快速暂态过电压老化对环氧树脂电气强度的影响[J]. *绝缘材料*, 2024, 57(1): 46-50.
- PAN Shaoming, ZHANG Lei, ZHAO Jian, et al. Effect of VFTO ageing on electric strength of epoxy resin[J]. *Insulating Materials*, 2024, 57(1): 46-50.
- [12] 刘熊. 微秒脉冲下环氧树脂沿面闪络与老化特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- LIU Xiong. Study on surface flashover and aging characteristics of epoxy resin under microsecond pulses[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [13] 何顺, 郑易谷, 林川杰, 等. 氧化铝掺杂量对环氧盆式绝缘子VFTO耐受能力的影响[J]. *高电压技术*, 2020, 46(11): 4006-4013.
- HE Shun, ZHENG Yigu, LIN Chuanjie, et al. Effect of alumina doping content on VFTO tolerance of epoxy resin cone-type insulators[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(11): 4006-4013.
- [14] SUN K S, NAM J H, KIM J H, et al. Interfacial properties of XLPE/EPDM laminates[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2000, 7(2): 216-221.
- [15] CHI Q G, HAO Y Y, ZHANG T D, et al. Study on nonlinear conductivity and breakdown characteristics of zinc oxide-hexagonal boron nitride/EPDM composites[J]. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 2018, 29(23): 19678-19688.
- [16] LI Z Y, SUN W F, ZHAO H. Significantly improved electrical properties of photo-initiated auxiliary crosslinking EPDM used for cable termination[J]. *Polymers*, 2019, 11(12): 2083.
- [17] 刘泳斌, 高景晖, 钟力生, 等. ± 320 kV直流电缆交联聚乙烯/三元乙丙橡胶附件击穿特性[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(3): 72-80.
- LIU Yongbin, GAO Jinghui, ZHONG Lisheng, et al. Breakdown property of ± 320 kV HVDC cable system XLPE/EPDM accessories[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(3): 72-80.
- [18] 王雪婷. 三元乙丙橡胶辐照老化研究及寿命预测[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2024.
- WANG Xueting. Study on radiation aging and life prediction of ethylene propylene diene monomer[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2024.
- [19] 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- WENG Shifu. Fourier transform infrared spectroscopy analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [20] 王业, 李蔚, 雷志鹏, 等. 挤压应力和热应力下电缆绝缘用三元乙丙橡胶的介电频谱分析[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(12): 94-100.
- WANG Ye, LI Wei, LEI Zhipeng, et al. Dielectric spectroscopy analysis of ethylene propylene diene monomer for cable insulation under force and thermal stress[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(12): 94-100.
- [21] 王强, 李昊泽, 李秀峰, 等. 三元乙丙橡胶自熔式绝缘拉伸性能和介电性能的老化演变规律[J]. *绝缘材料*, 2025, 58(4): 52-61.
- WANG Qiang, LI Haoze, LI Xiufeng, et al. Ageing evolution of tensile and dielectric properties of ethylene propylene diene monomer self-fusing insulation[J]. *Insulating Materials*, 2025, 58(4): 52-61.
- [22] LI M R, SHANG K, ZHAO J H, et al. Constructing fluorine hybrid epoxy polymers with excellent breakdown strength by surface fluorination[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(12): 10226-10233.
- [23] 张健, 王鹏飞, 李中原, 等. 热老化对环氧/玻璃纤维复合材料电气强度的影响[J]. *绝缘材料*, 2025, 58(7): 121-128.
- ZHANG Jian, WANG Pengfei, LI Zhongyuan, et al. Influence of thermal ageing on electric strength of epoxy/glass fiber composites[J]. *Insulating Materials*, 2025, 58(7): 121-128.

- [24] BORMASHENKO E, CHANIEL G, GENDELMAN O. Hydrophilization and hydrophobic recovery in polymers obtained by casting of polymer solutions on water surface[J]. Journal of Colloid Interface Science, 2014, 435: 192-197.
- [25] 王欣欣, 何成, 赵普志, 等. 硫化体系对三元乙丙橡胶耐湿热老化性能的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(12): 51-55.
WANG Xinxin, HE Cheng, ZHAO Puzhi, et al. Effect of vulcanization systems on damp heat aging resistance of ethylene propylene diene monomer rubber[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(12): 51-55.
- [26] 赵玉顺, 何元菡, 杨克荣, 等. Me-THPA 扩链改性环氧树脂对其固化物绝缘特性的影响[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S1): 311-319.
ZHAO Yushun, HE Yuanhan, YANG Kerong, et al. Insulation performance of Me-THPA chain-extended epoxy resin cured products[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 311-319.
- [27] 何柏娜, 孔杰, 宁家兴, 等. 存在气泡缺陷的盆式绝缘子电场仿真分析[J]. 绝缘材料, 2019, 52(5): 86-92.
HE Baina, KONG Jie, NING Jiaxing, et al. Electric field simulation analysis of basin-type insulator with bubble defects[J]. Insulating Materials, 2019, 52(5): 86-92.
- [28] 金维芳. 电介质物理学 第2版[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
JIN Weifang. Dielectric physics 2nd edition[M]. Beijing: Science Press, 2023.
-
- 收稿日期: 2025-08-07; 修回日期: 2025-09-08。
- 作者简介:
- 韩为宏(1984-), 男(汉族), 安徽凤阳人, 高级工程师, 主要从事电网规划与投资方向的研究。