

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.06.014

乙丙橡胶表面电痕腐蚀对极化/去极化电流的影响

王少飞, 雷志鹏, 宋建成, 冯 晨, 田慕琴, 耿蒲龙

(太原理工大学, 煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 矿用智能电器技术国家地方联合工程实验室, 太原 030024)

摘要: 为了探究乙丙橡胶绝缘的表面电痕放电对其极化去极化电流的影响,文中依据 IEC 60587:2007 模拟乙丙橡胶在实际运行中的表面污秽环境,对乙丙橡胶绝缘试样进行了电痕放电试验,分析了电痕的形成机理,测量了不同电痕腐蚀程度的试样的极化/去极化电流。试验结果表明:绝缘的潮湿污秽区域极易产生泄漏电流,并导致干燥区的形成。在干燥区内引发的重复放电会进一步破坏绝缘表面,从而形成电痕放电。乙丙橡胶的极化电流与其表面电痕腐蚀程度有关:随着乙丙橡胶表面电痕腐蚀程度加重,乙丙橡胶电导率升高,极化电流逐渐增大。

关键词: 乙丙橡胶; IEC 60587:2007; 电痕放电; 极化/去极化电流

Influence of Electrical Trace on Polarization/Depolarization Current of Ethylene-propylene Rubber

WANG Shaofei, LEI Zhipeng, SONG Jiancheng, FENG Chen, TIAN Muqin, GENG Pulong

(Shanxi Key Laboratory of Coal Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, National & Provincial Joint Engineering Laboratory of Mining Intelligent Electrical Apparatus Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To investigate the surface trace and surface discharge of the ethylene-propylene rubber (EPR) and the influence of the trace on polarization/depolarization current (PDC), an aging experiment was conducted according to the standard IEC 60587:2007 to simulate the surface dirty environment and to analyze the formation mechanism of surface electrical trace. Then, the PDC of EPR with different state of erosion was measured. The results indicated that the leakage current was easy to occur in the wet and dirty area, resulting in the formation of dry zone. Repetitive discharge in the dry zone could further damage the surface of insulation and lead to surface discharge. The insulation resistance of EPR was related to the erosion degree of the surface electrical trace. With the increase of erosion degree of surface trace on EPR, its conductivity and PDC increased.

Key words: ethylene-propylene rubber(EPR); IEC 60587:2007; trace discharge; polarization/depolarization current

0 引言

电力电缆作为输送电能的媒介,其运行安全性直接影响着输配电系统的运行可靠性。为了保证各用户的可靠供电,就必须要保证电缆一直处于正常运行状态。然而,在长期运行过程中,电缆绝缘表面会出现灰尘堆积。绝缘受潮后,表面的可溶物质溶解于水膜中,从而形成绝缘表面污渍。与洁净的绝缘表面相比,脏污的绝缘表面更容易引起局部电场集中,从而产生较大的泄漏电流,使绝缘表面

形成电痕,对绝缘造成不可逆转的损害,严重影响其绝缘性能和供电可靠性。

随着电缆制造技术的发展,挤包电缆以其制造周期短、安装工艺简便、允许运行温度较高等优点,得到越来越广泛的应用。挤包电缆的绝缘层通常使用聚乙烯(PE)、聚氯乙烯(PVC)、交联聚乙烯(XLPE)和乙丙橡胶(EPR)等高分子聚合物制成^[1-2]。因此,很多学者对高分子绝缘材料的耐漏电起痕性能进行了研究,但是大部分都聚焦于高分子聚合物和改性材料的耐电痕性能研究上。国外学者 Mohammed Adnane Douar 以高密度聚乙烯(HDPE)为

收稿日期:2019-01-09; 修回日期:2019-03-12

基金项目:国家自然科学基金(51577123)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51577123).

研究对象,通过电痕试验研究了不同电极间距对闪络电压的影响。研究表明,闪络电压与电极间距成正比关系^[3]。Hidayatullah Khan等将硅橡胶(SiR)中加入纳米和微米级 SiO_2 颗粒,利用“斜板电痕试验法”研究了纳米和微米级 SiO_2 颗粒对硅橡胶耐电痕性能的影响。试验结果表明,添加微米级 SiO_2 颗粒的硅橡胶的耐电痕性能明显提高,但添加了纳米级 SiO_2 颗粒的硅橡胶的耐电痕性能不如前者^[4]。英国学者 M.Ugur 等针对固体绝缘材料击穿后的不可修复性,提出用神经网络(NN)来提前预判绝缘材料表面的泄漏电流和有害放电来预防电痕化的发展,以防绝缘材料因电痕放电被击穿^[5]。

尽管国内外学者针对聚合物的耐漏电起痕性能对比做了很多研究,但是对单一聚合物的耐漏电起痕性能研究并不完善,对其绝缘性能的定量评估很少涉及。因此,文中以 10 kV 矿用移动监视型橡胶软电缆的绝缘材料乙丙橡胶作为研究对象,基于国际电工委员会提出的工频下电气绝缘材料耐电痕化和蚀损测量的试验方法,对乙丙橡胶的耐漏电起痕性能进行了测试,并根据试验时间对其电痕的发展情况进行了归纳;理论分析了电痕的发展过程以及能量的传递方式,测量了乙丙橡胶绝缘不同电痕腐蚀程度下的极化/去极化电流,分析了表面电痕化程度对极化去极化电流的影响。

1 试样制备及试验流程

1.1 试样制备

试验使用 DCJ30M 型乙丙橡胶绝缘材料作为原始试样。试样制作过程中需经过硫化处理,硫化温度为 165 $^{\circ}\text{C}$,硫化时间 15 min。制作完成的乙丙橡胶试样尺寸为 140 mm×120 mm,厚度约为 2 mm。试验前将试样裁剪为 120 mm×60 mm 的方形薄片。为确保试验具有重复性,每组试验采用 5 个试样进行。

1.2 试验装置

乙丙橡胶耐电痕试验电路原理图见图 1。图 1 中 U_s 是工频交流电源,用于提供 220 V 交流电压; T 是试验变压器,容量为 100 MVA,输出电压可达 100 kV,用于将工频电压转换为试验用高压; R 是分流电阻,阻值为 20 Ω ,用于限制因试样击穿短路时的电流,以免烧坏变压器; C 是分压器,用于试验过程中的工频交流高压测量; V 是千伏表,用于读取试验过程中的外加交流高压; S 是试样, E_h 、 E_c 分别为高压电极和地电极; D 为分液漏斗,用于将 NH_4Cl 溶液匀速滴入试样上端的高压电极。

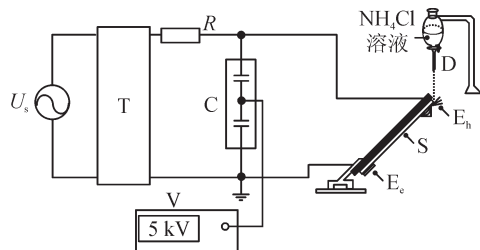


图1 耐电痕试验电路原理图

Fig. 1 Schematic diagram of electrical tracking test

漏电起痕试验电极结构实物见图 2。根据 GB/T 6553—2014《严酷环境条件下使用的电气绝缘材料评定耐电痕化和蚀损的试验方法》中对于升压方式和试验电压大小的规定,选择升压方式为恒定电压法^[6-7],经过多次的前期试验,最终选择试验电压为 4.5 kV,试样在该电压等级下可在 6 h 内破坏,在此电压下的串联电阻为 33 Ω ,污染液流速为 0.6 mL/min。经计算污染液以 30 s/滴的速度滴下符合试验要求^[8-9]。试验时的温度为 24 $^{\circ}\text{C}$,开始前首先确保污染液以选定的速度沿试样表面均匀流下,然后匀速将电压升至 4.5 kV 后保持恒定,此时开始计时,直到试样表面发生穿孔或击穿致使试验回路短路时停止计时。将电痕尺寸相近的试样作为一组试验结果,每组各有 5 个试样。试验结束后选择 3 组不同电痕尺寸的试样和一组原始试样作为对比。

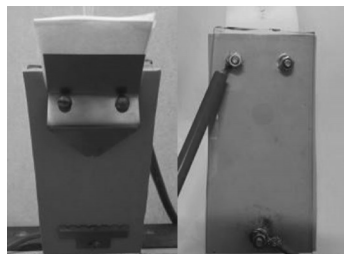


图2 电极结构

Fig. 2 Electrode structure

试验开始前将硫化好的试样表面用酒精擦拭干净。每次试验结束后,清洁电极表面以保证试验结果的可重复性。若发现电极表面有可见的微小损伤,则立即更换电极。

1.3 极化/去极化电流测量

用三电极系统和 Keithley 6517B 分别对这些试样的极化电流进行测量,测量原理见图 3。图 3 中 E 代表 6517B 内置直流高压电源,最大输出电压为 1 kV; S 代表乙丙橡胶试样; e_1 、 e_2 和 e_3 分别表示测量电极、保护电极和高压电极,电极材料为不锈钢,用于测量极化电流。测量时保持干燥箱中的相对湿度恒定为 10%。测量极化电流时,闭合 k_1 和 k_2 ,断开 k_3 。经过约 5 s 后,保持 k_1 闭合同时关断 k_2 。极化电

流测试时间为 300 s。极化电流测量完毕后立即断开 k_1 , 闭合 k_2 , 保持约 8 s 后将 k_3 闭合, k_2 断开, 此后为去极化电流的测量, 测量时间为 1 000 s^[10-13]。

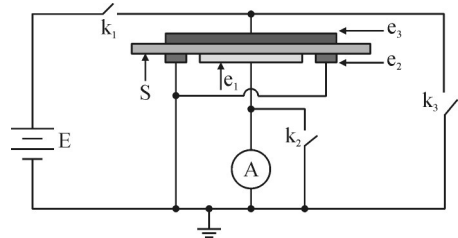


图3 极化电流测量电路图

Fig. 3 Schematic diagram of insulation resistance measurement

2 电痕结果及形成机理分析

2.1 电痕试验结果

4 组试样的电痕尺寸测量结果平均值见表 1。表 1 中 L 和 W 分别表示电痕的最大长度与最大宽度。其中, 1 号试样为未进行电痕试验的原始试样, 2-4 号试样进行电痕试验后测得的电痕长度和宽度依次增大。

表 1 乙丙橡胶试样的电痕尺寸

Table 1 Electrical tracking parameters of EPR samples

试样编号	L/mm	W/mm
1	0	0.0
2	32	4.0
3	39	7.0
4	46	7.5

4 组试样的电痕图片见图 4。与 1 号(未老化)试样相比, 电痕试验后的试样(2-4 号)中间部分出现了明显的腐蚀痕迹, 且越靠近地电极, 腐蚀面积越大, 腐蚀的形状大致呈水滴状。

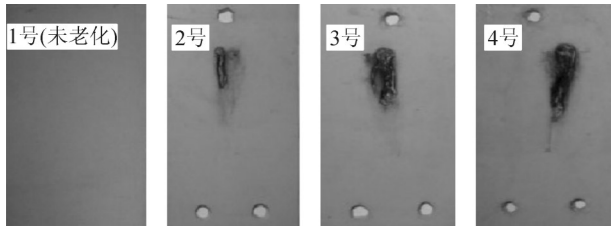


图4 不同老化阶段的乙丙橡胶试样电痕腐蚀图

Fig. 4 The tracking of EPR at different erosion degree

2.2 电痕形成机理分析

电痕的形成分为两个过程: 表面经受电和污染液的联合作用以及热量的积累。试验初期, 在外加电压的作用下, 污染液流过试样表面, 附着于试样表面的污秽物在电场的作用下产生微小的电导电流, 因为该导电通道在试验初期时断时续, 因此易

产生火花放电。随着试验的进行, 试样表面的微小电流由于热效应会于试样表面产生热量, 该热量会将污染液蒸发, 于是试样表面产生由污秽物形成的干燥带, 在外加电压的作用下干燥带易产生持续的火花放电, 进一步对试样表面造成劣化。试验后期, 由于放电和微小泄漏电流的长期作用, 在试样表面积聚了大量的热, 热量使得试样表面分子链断裂, 由此形成的游离碳在试样表面的聚集, 表面电导率增加, 泄漏电流增大, 但火花放电会使游离碳变少, 此阶段是试样表面游离碳动态平衡的过程, 在此过程下试样表面进一步劣化。接近试验终点时, 表面游离碳打破了前一个阶段的动态平衡, 逐渐向地电极伸展, 最终形成贯穿两电极的导电通路, 试验达到终点, 试样表面形成腐蚀痕迹^[14-18]。

3 极化电流测量结果与分析

3.1 极化电流测量结果

极化电流可用于评估绝缘材料的绝缘性能。文中选择 400 V 作为测量极化电流的试验电压见图 5。由图 5 可知, 1-4 号试样极化电流初始值和稳定值依次增大, 其中 1 号(未老化)试样的极化电流稳定值明显小于其余 3 组试样, 说明未经过电痕试验的试样绝缘状态最好。试样腐蚀程度越大, 所测得的极化电流稳定值越大, 说明可以用极化电流评估乙丙橡胶的电痕化程度。

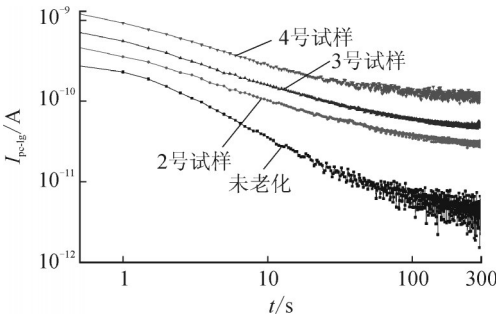


图5 极化电流测量曲线

Fig. 5 Polarization current curve of EPR

4 组试样的去极化电流原始测量散点与拟合曲线结果见图 6。从图 6 中可以看出, 电痕腐蚀越严重, 测得的去极化电流($t < 10$ s)曲线斜率越大。去极化电流原始散点拟合公式见式(1)^[19-20]。

$$I_{dpc} = \sum_{i=1}^3 \beta_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (1)$$

式(1)中, i 表示 3 种极化种类, $i=1$ 为松弛时间较长的界面极化; $i=2$ 表示与转向极化; $i=3$ 表示电子位移极化; I_{dpc} 表示去极化电流; β_i 表示 3 种极化种类的拟合系数; τ_i 表示 3 种极化的拟合时间常数。

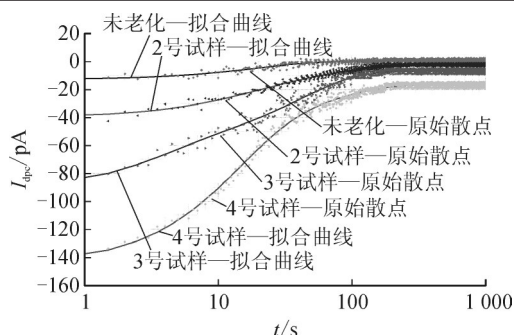


图6 去极化电流测量曲线

Fig. 6 Depolarization current curve of EPR

从图5、6中提取的电腐蚀状态下及未老化的乙丙橡胶试样的极化/去极化电流初始值及稳定值见表2;去极化电流拟合曲线的参数整理见表3。

表2 不同老化状态下EPR试样极化

去极化电流初始/稳定值

Table 2 Initial/stable value of PDC of EPR sample under different aging degree

试样编号	$I_{p\text{initial}}/\text{pA}$	$I_{p\text{stable}}/\text{pA}$	$I_{d\text{pinitial}}/\text{pA}$	$I_{d\text{pstable}}/\text{pA}$
1号(未老化)	270.7	5.4	-12.7	-0.1
2号	456.5	30.2	-42.1	-2.2
3号	696.8	52.2	-91.4	-6.6
4号	1 195.2	116.1	-140.2	-16.5

表3 去极化电流特征量

Table 3 Characteristic parameters of depolarization current curve

参数	编号			
	1	2	3	4
β_1	-7.522 8	-25.268 5	-54.624 7	-62.687 8
τ_1/s	22.118 8	29.907 1	40.417 0	64.900 1
β_2	-5.503 4	-8.134 6	-31.306 2	-36.605 7
τ_2/s	16.235 6	244.914 1	500.455 6	780.567 0
β_3	-0.030 4	-10.130 4	-17.141 2	-26.605 7
τ_3/s	16.234 6	4.765 5	4.351 4	3.629 2

表2中: $I_{p\text{initial}}$ 表示极化电流初始值, $I_{p\text{stable}}$ 表示极化电流稳定值; $I_{d\text{pinitial}}$ 表示去极化电流初始值, $I_{d\text{pstable}}$ 表示去极化电流稳定值。从表2中可以得到,电痕腐蚀程度越严重,极化/去极化电流的初始值及稳定值的绝对值越大。

3.2 电痕腐蚀程度对极化/去极化电流的影响

电痕腐蚀程度越严重,其极化/去极化电流越大,这主要是由两方面原因造成的:绝缘结构的破坏和游离碳的导电性。

由极化/去极化电流的测量原理可知,极化与去

极化的过程可分别等效为介质内部能量的积聚与消耗过程,可由储能元件(电容 C)和耗能元件(电阻 R)分别表示。所以乙丙橡胶的极化/去极化过程可由扩展 Debye 等效模型表示,该模型由多个电容和电阻串并联组成,见图7^[21-24]。图7中 R_0 表示绝缘电阻; C_0 表示绝缘介质的几何电容; R_i 和 C_i 分别表示第 i 条支路的极化电阻和极化电容。

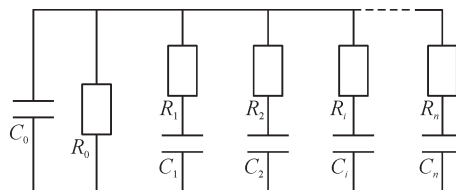


图7 扩展Debye等效模型

Fig. 7 Extended Debye equivalent model

电痕腐蚀程度对极化电流的影响可由 R_0 和各分支的极化电阻值表征,去极化电流的衰减过程则是几何电容 C_0 和各分支极化电容的放电过程。乙丙橡胶电痕化过程中由于表面火花放电和泄漏电流热效应产生了大量的热量,这些热量长期作用造成介质表面分子结构的改变,即分子链的断裂与重组。研究表明,高速运动的电子撞击C-H键(键能低于电子)从而导致其断裂产生自由碳^[25-28]。所以乙丙橡胶介质表面由于电和热的联合作用产生了大量可导电的自由碳。乙丙橡胶表面电痕腐蚀程度增大,表面自由碳大量堆积,导致绝缘电阻 R_0 和各个分支的极化电阻减小,这提高了乙丙橡胶的直流电导率,外加直流电场作用下,介质内部载流子的注入和迁移更加明显,传导电流增大。同时电痕腐蚀造成大量的表面凹坑,外加电场产生的电荷附着于凹坑处,形成附加电流,这也将增大极化电流的初始值和稳定值。另外自由碳积聚于电痕腐蚀处,使乙丙橡胶成为一种多层复合绝缘介质。文[29-32]表明,多层复合绝缘在介质交界面的电荷积累多于单层绝缘。乙丙橡胶电痕腐蚀程度越严重,表面蚀损处的分层数量越多,在介质交界面越容易积累大量电荷,在极化时间相同的条件下,去极化电流初始值和稳定值越大。

4 结论

文中以矿用高压电缆绝缘层的乙丙橡胶绝缘为研究对象,根据IEC 60587:2007对乙丙橡胶的漏电起痕性能进行了研究,并分析了电痕产生原因和机理,测量了不同电痕腐蚀情况下乙丙橡胶的极化电流,分析了电痕腐蚀程度对极化过程的影响,得到如下研究结论:

1)由电痕试验可知,乙丙橡胶表面电痕的形成是电热联合作用的结果。沿面放电和泄漏电流使试样表面产生大量的热,电热联合作用使试样表面产生物理和化学变化,导致分子链断裂产生游离碳,形成的碳化通道不断发展最终造成试样表面击穿,从而形成电痕。

2)乙丙橡胶介质的表面腐蚀程度越严重,乙丙橡胶的极化电流、去极化电流测量值越大。试验表明可由极化去极化电流对乙丙橡胶电痕腐蚀的严重程度进行评估。

参考文献:

- [1] ZUIDEMA C, KEGERISE W, FLEMING R, et al. A short history of rubber cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(4): 45-50.
- [2] ORTON H. History of underground power cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(4): 52-57.
- [3] DOUAR M A, BEROUAL A, SOUCHE X. Assessment of the resistance to tracking of polymers in clean and salt fogs due to flashover arcs and partial discharges degrading conditions on one insulator model[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(4): 986-994.
- [4] KHAN H, AMIN M, AHMAD A, et al. Erosion/tracking resistance investigation of micro/nano-SiO₂ filled RTV-SiR composites for outdoor high voltage insulations[C]//14th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology(IBCASP). Islamabad, Pakistan: IEEE, 2017: 15-19.
- [5] UGUR M, AUCKLAND D W, VARLOW B R. Neural networks to analyze surface tracking on solid insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(6): 763-766.
- [6] 固体绝缘材料耐电痕化指数和相比电痕化指数的测定方法: GB/T 4207—2012[S]. 2013.
Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials: GB/T 4207—2012[S]. 2013.
- [7] 在严酷环境条件下使用的电气绝缘材料耐电痕化和蚀损的试验方法: GB/T 6553—2003[S]. 2003.
Electrical insulating materials used under severe ambient conditions-test methods for evaluating resistance to tracking and erosion: GB/T 6553—2003[S]. 2003.
- [8] 杜伯学. 有机绝缘耐电痕性的评定与发展[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 10-13.
DU Boxue. Research and development of test method on tracking resistance of polymer insulating materials[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5): 10-13.
- [9] ZHANG G B, WU Q H, QU B J. Effects of organic colorants on photo-initiated crosslinking and photo-oxidation degradation of polyethylene and related mechanism[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2008, 26(3): 311-319.
- [10] 冯晨. 基于绝缘电阻的电缆用乙丙橡胶绝缘表面电痕故障诊断方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016: 22-23.
FENG Chen. Study on surface electrical tracking fault diagnosis of the cable used ethylene propylene rubber based on insulation resistance[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016: 22-23.
- [11] SESHADRI S R. Effect of insulation on the radiation resistance of an electric dipole in a simple anisotropic medium[J]. Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of, 1966, 113(4): 593-600.
- [12] 硫化橡胶绝缘电阻率测定: GB/T 1692—1992[S]. 1992.
Vulcanized rubber - determination of the insulation resistivity: GB/T 1692—1992[S]. 1992.
- [13] 固体绝缘材料在高温下绝缘电阻和体积电阻率的试验方法: GB/T 10581—1989[S]. 1989.
Method of test for insulation resistance and volume resistivity of insulating materials at elevated temperature: GB/T 10581—1989[S]. 1989.
- [14] 肖军. 高分子绝缘材料电痕特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2005: 22-32.
XIAO Jun. Research on tracking characteristics of organic insulating materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005: 22-32.
- [15] 董典帅. 聚合物绝缘材料耐电痕性研究及其非线性分析[D]. 天津: 天津大学, 2008: 12-20.
DONG Dianshuai. Resistance to tracking of polymer materials and nonlinear analysis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008: 12-20.
- [16] DU B X, XIAO M. Effects of thermally conducting particles on resistance to tracking failure of polyimide/BN composites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4): 1565-1572.
- [17] DU B X, GUO Y G. Tracking resistance of epoxy/Al₂O₃ nanocomposites under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 109-116.
- [18] LOGANATHAN N, MUNIRAJ C, CHANDRASEKAR S. Tracking and erosion resistance performance investigation on nano-sized SiO₂ filled silicone rubber for outdoor insulation applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(5): 2172-2180.
- [19] 张良莹. 电介质物理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991: 25-40.
ZHANG Liangying. The dielectric physics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000: 25-40.
- [20] ABOU-DAKKA M, BULINSKI A, BAMJI S S, et al. Depolarization current measurements on field-aged XLPE cable insulation[C]//Annual Report Conference on Electrical Insu-

- lation and Dielectric Phenomena. Quebec, QC: IEEE, 2008: 21-24.
- [21] 王 林,周利军,李先浪,等.应用极化/去极化电流法分析油纸绝缘微水扩散暂态过程[J].高电压技术,2013,39(2):354-359.
- WANG Lin, ZHOU Lijun, LI Xianlang, et al. Analysis of transient moisture diffusion in oil-paper insulation using polarization and depolarization current method[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 354-359.
- [22] 汤明杰,雷 敏,白 帆,等.采用向量匹配法的油纸绝缘系统扩展Debye模型参数识别[J].高电压技术,2014,40(2):548-556.
- TANG Mingjie, LEI Min, BAI Fan, et al. parameter identification based on vector fitting method for extended Debye model of oil-paper insulation system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 548-556
- [23] SAHA T K, PURKAIT P, MULLER F. Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 149-157.
- [24] HOUHANESSIAN V D, ZAENGL W S. Time domain measurements of dielectric response in oil-paper insulation systems[C]//Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Montreal, Que: IEEE, 1996: 47-52.
- [25] 宋 伟,申文伟,王国利,等.电晕放电老化对高温硫化硅橡胶材料陷阱特性的影响[J].高电压技术,2013,39(4):979-986.
- SONG Wei, SHEN Wenwei, WANG Guoli, et al. Influence of corona discharge aging on trap characteristics of high temperature vulcanized silicon rubber material[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 979-986.
- [26] 梁 英.高温硫化(HTV)硅橡胶电晕老化特性及机理的研究[D].保定:华北电力大学,2008:20-50.
- LIANG Ying. Study on the corona aging characteristics and mechanism of HTV silicon rubber[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008: 20-50.
- [27] 梁 英,李成榕,丁立健.电晕强度对HTV硅橡胶陷阱特性的影响[J].高电压技术,2009,35(1):135-140.
- LIANG Ying, LI Chengrong, DING Lijian. Influence of corona intensity on the trap characteristics of HTV silicon rubber[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(1): 135-140.
- [28] 张 予,吴光亚,张 锐.高温硫化硅橡胶材料的运行特性及分析[J].电瓷避雷器,2006(3):18-22.
- ZHAN Yu, WU Guangya, ZHANG Rui. Service performance of HTV rubber and its evaluation[J]. Insulator and Surge Arresters, 2006(3): 18-22.
- [29] 刘晨阳,郑晓泉,彭 平.无机微米填料改性聚酰亚胺复合材料非线性电导特性[J].高电压技术,2015,41(12):4137-4143.
- LIU Chenyang, ZHENG Xiaoquan, PENG Ping. Nonlinear conductivity characteristics of modified polyimide composite materials with inorganic filler[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4137-4143.
- [30] 李忠华,索长友,郑 欢.双层a+bE非线性电导介质界面极化特性的理论研究[J].中国电机工程学报,2016,26(24):6635-6646.
- LI Zhonghua, SUO Changyou, ZHENG Huan. A theoretical study on the interface polarization properties of nonlinear double-layered dielectrics with a+bE nonlinear conductance [J]. Proceeding of the CSEE, 2016, 36(24): 6635-6646.
- [31] BHUMIWAT S A. Unusual conduction at oil-paper interface in transformers diagnosed by Polarization depolarization current (PDC) analysis[C]// IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Philadelphia, PA: IEEE, 2014: 185-188.
- [32] 陆小虹. EP/ZnO 双层复合绝缘界面极化特性实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014:16-30.
- LU Xiaohong. A study on interface polarization properties of EP/ZnO double layer composite insulation[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014: 16-30.
- 王少飞(1993—),男,硕士研究生,主要从事矿用高压电缆的电老化分析及其故障诊断预警方面的研究。
- 雷志鹏(1983—),男,讲师,主要从事高压电缆故障的状态评估及其局部放电特性分析的研究(通讯作者)。
- 宋建成(1957—),男,教授,博士生导师,长期致力于电气工程学科矿用智能电器、电力设备寿命评估、电力系统继电保护、煤矿安全监测监控等领域的科学研究。

(上接第98页)

- atmospheric pressure[J]. Chines Journal Vacuum Science and Technology, 2017, 37(2): 194-200.
- [25] 蒋兴良,于 亮,胡建林,等.棒—板长空气间隙在低气压下雷电冲击特性及电压校正[J].中国电机工程学报,2005,25(11):152-156.
- JIANG Xingliang, YU Liang, HU Jianlin, et al. Lightning impulse discharge performance and voltage correction of long air gaps at lower atmospheric pressure[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 152-156.
- 李 熙(1988—),女,工学硕士,工程师,主要研究方向为信息安全及电气设备故障诊断。