

环氧及其复合物的空间电荷研究进展

吴 锴, 董金华, 苏 芮

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 空间电荷在电介质内部的积聚会导致其内部电场的畸变,从而明显的影响绝缘电介质其他方面的电性能,如电导、老化和击穿特性等。环氧树脂由于具备优异的机械性能、热性能和介电性能,所以在电气绝缘领域被广泛使用,其空间电荷的研究,也是近几十年来国际研究的一个热点。文中综述了环氧及其复合物中空间电荷的研究概况。从固化剂类型、电场强度、电极材料、温度、湿度、掺杂粒子等方面论述了这些因素对环氧中空间电荷的影响,并探讨了这些因素影响空间电荷的原因和影响的强弱。

关键词: 空间电荷; PEA法; 环氧; 复合材料

Review of Research on Space Charge Behavior in Epoxy Resin and Its Composites

WU Kai, DONG Jinhua, SU Rui

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The space charge distribution in the dielectrics can distort the electric field and influence the electrical properties of the insulation materials, such as conductivity, degradation and breakdown characteristics. Epoxy resin is widely used in the field of electrical insulation due to its excellent mechanical, thermal and electrical properties. Study of the behavior of space charge in epoxy resin is very important and it has drawn a lot of interest in recent decades. This paper summarizes the recent advances of the researches on the space charge behavior in epoxy resin and its composites. The effect of curing agent, electrical field, electrode materials, temperature, humidity and fillers on space charge in epoxy resin is reviewed, and the reasons are discussed.

Key words: space charge; PEA method; epoxy resin; composites

0 引言

环氧树脂由于其优异的机械性能、热性能、介电性能,以及易于加工成型、经济实惠等优点,从而在电气绝缘领域被广泛使用,如电机的主绝缘、干式变压器、高压套管、绝缘子、印刷电路板等^[1-3]。对环氧材料空间电荷的研究有助于理解其内部的电荷输运过程,分析材料破坏与电荷输运特性之间的关联。近些年,随着高压直流输电的推广与应用,环氧材料内部空间电荷特性直接影响其在直流绝缘中的应用,更加受人关注。

为了增强环氧树脂某些方面性能如阻燃性、柔韧性、抗开裂性、导热性等等,过去常常在环氧中掺

杂其他材料(微米粒子,玻璃纤维,皱纹纸等)而制成环氧复合材料。近几十年来,纳米材料由于其表现出来的优异性能而受到广泛的关注。实验发现,在环氧中掺杂一定量的纳米粒子后,能够在提高材料机械性能、热性能的同时,不损失甚至提高聚合物的某些介电性能。而环氧/纳米复合物中空间电荷特性的研究,能够有助于理解其内部电荷输运及介电性能提升的机理,是国内外研究的一个热点。

文中综述了国内外学者在环氧及其复合物中空间电荷研究的概况。从固化剂类型、电场强度、电极材料、温度、湿度、掺杂粒子等方面论述了这些因素对环氧中空间电荷的影响,探讨了其中的原因并展望了今后的研究方向。

收稿日期:2016-03-14; 修回日期:2016-03-20

基金项目:国家自然科学基金资助(51521065)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51521065).

1 空间电荷的测量技术

从最初的有损测量发展到后来的无损测量,空间电荷测量技术在最近几十年来取得了巨大的发展和进步^[4]。最初的有损测量技术有热刺激电流法(thermally stimulated current, TSC), 热致发光法(thermo luminescence, TL), 热刺激表面电位法(thermally stimulated surface potential, TSSP)等,其原理是通过对试样的缓慢升温,检测升温过程中电荷释放所引发的电、光等信号,从而获得电荷的陷阱深度等信息。

无损测量技术在 20 世纪 80 年代提出,到目前为止,发展的很成熟和具有代表性的测量方法主要有压力波法(pressure wave propagation, PWP)和电声脉冲法(pulsed electro-acoustic technique, PEA)。PWP 法根据压力波激发方式的不同,又可分为激光诱导压力波法^[5](laser induced pressure pulse technique, LIPP) 和压电诱导压力波法^[6] (piezoelectric induced pressure pulse technique, PIPWP)。PEA 法由日本武藏工业大学 T. Takada 教授提出,经过这么多年的发展,已经成为应用最广泛的空间电荷测量技术。其基本原理见图 1^[7]。介质中的空间电荷在高压电脉冲的作用下,会有发生微小的位移,这一微小位移产生声波传播到下电极上,被压电传感器接受转换成电信号,通过数据恢复,处理和分析,最终得到空间电荷的分布信息。环氧及其复合物中空间电荷的测量,基本上也是以 PEA 法为主。

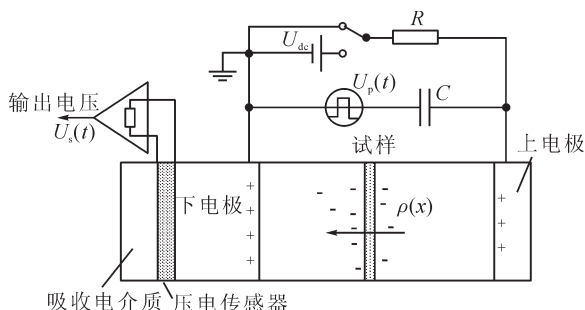


图 1 PEA 法空间电荷测量技术原理图

Fig. 1 Principle of PEA method

2 环氧及其复合物中空间电荷的研究

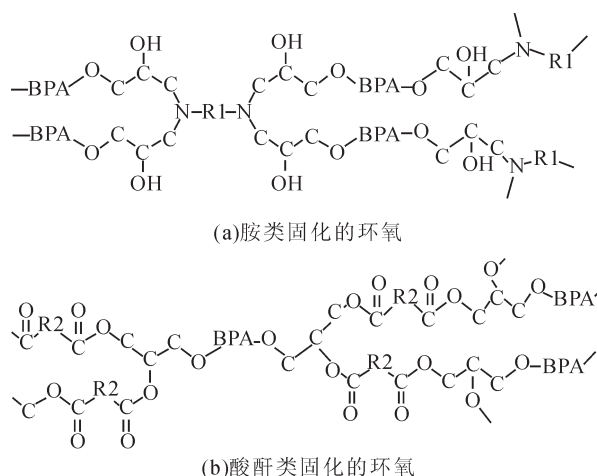
在空间电荷的研究方面,聚乙烯以其在高压直流电缆绝缘方面的运用,而成为被研究的最多的材料。而随着环氧及其复合物在高压直流设备中被运用的越来越多,其空间电荷的研究也受到越来越多的关注。大量的实验表明,环氧中空间电荷受影响的因素有很多,如固化剂类型、电场强度、电极材

料、温度、湿度、掺杂粒子等。

2.1 固化剂类型

环氧树脂只有通过固化剂进行固化后生成三维交联网状结构才具有实用价值,而不同的固化剂往往决定着环氧的具体性能和用途。加成聚合型固化剂是最常见的固化剂类型,有多元胺、酸酐、多元酚、聚硫醇等。多元胺和酸酐是最重要而且也是最广泛使用的固化剂,前者占到全部固化剂的 71%,后者占全部固化剂的 23%^[9]。因此,对环氧中空间电荷的研究,基本上针对胺类固化和酸酐类固化的两种环氧材料。

文[8]中选用双酚 A 型环氧作为基体,然后分别用胺类和酸酐类固化剂固化(固化后的化学结构见图 2),并研究了在直流高压下各自的空间电荷分布(见图 3)。实验发现,在电场强度为 80 kV/mm 和室温下加压 90 min 后,在酸酐类固化的环氧中阴极和阳极附近都发现明显的同极性电荷积聚,而在胺类固化的环氧中,仅在阴极发现少量的同极性电荷积聚,在阳极处却发现大量的异极性电荷积聚,并且在这两种环氧—固化剂体系中掺杂少量的纳米粒子(5wt%),发现胺类固化的环氧体系中,空间电荷抑制明显,而酸酐类固化的体系中,空间电荷抑制不明显。结合其他的实验,发现对于环氧/纳米复合物的介电性能,固化剂的影响最大,其次是纳米粒子,最后才是在环氧中分散纳米粒子的方法。



R1—胺类固化剂; R2—酸酐类固化剂。

图 2 固化后环氧中的化学结构

Fig. 2 Chemical structures of cured epoxy resins

同极性电荷的产生一般被认为是由于电极上电荷的注入并且在电极附近积聚而成,而异极性电荷的产生,一般被认为有两个原因:①电介质中所含的杂质电离形成离子,在电场作用下传输到极性相反的电极处,从而形成异极性电荷^[9-11];②电极上注入的电荷传输到另一侧的电极,由于部分抽出受

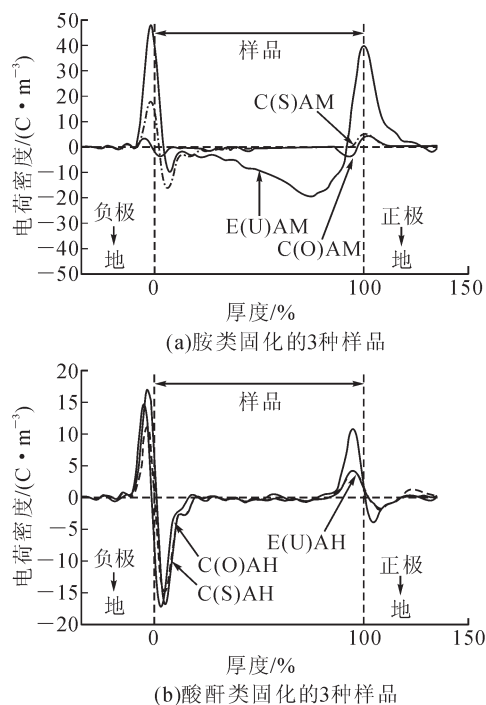


图3 胺类及酸酐类固化的样品中空间电荷分布的去压图
(直流加压 90 min 后)

Fig. 3 Space charge distributions right after the shortcircuit following the DC voltage application for 90 min

限而形成异极性电荷^[12-13]。文[8]中认为胺类固化剂中存在的大量具有亲水性的 OH 键,容易吸附杂质,杂质在电场下的电离形成的离子是胺类固化剂中异极性电荷的来源。而在酸酐类固化的环氧中,主要存在的是酯键,不存在 OH 键,杂质电离在空间电荷的形成中的贡献极小,所以在介质中主要是同极性电荷的积聚。

在文[14-15]中所采用的固化剂也都是胺类,同样在室温下加压发现异极性空间电荷的积聚,然而在这两种胺类中并没有存在大量的 OH 键。而在酸酐类固化的环氧中,室温下往往发现只有同极性空间电荷的存在。用抽出受限同样可以解释为什么胺类固化的环氧中容易产生异极性电荷。相较于酸酐类固化的环氧,胺类固化的环氧中载流子具有更高的迁移率,电荷更容易从注入极传输到另一侧电极,受电极与电介质界面的阻挡作用而抽出受限,从而形成异极性空间电荷。这与实验中所测得的胺类固化的环氧中视在电导率往往比酸酐类固化的环氧中高 1~2 个数量级是相符的。

2.2 电场强度

大量的文献显示,电场强度越高,空间电荷量就越大。文[16]中指出,在固体电介质中空间电荷的积聚存在一个阈值电场。在此阈值电场之下,空间电荷积聚量很小,当所加的电场高于阈值电场后,

空间电荷量迅速增加,而且此空间电荷积聚的阈值与泄漏电流、电致发光的相关性很强。文[17]中测得在 20 °C 时环氧中空间电荷积聚的阈值电场为 12.5 kV/mm,并且随着温度的升高,阈值电场随之降低。此外,文[18]中测量环氧中空间电荷分布时,所加电场从 18 kV/mm 到最高 180 kV/mm,加压时间为半个小时。他们发现在两侧电极处始终都积聚着同极性电荷,其电荷量随着电场的增高而增大。另外,他们还发现阳极处的正电荷随着电场的增强,有向电介质体内迁移的趋势,在电场强度高于 100 kV/mm 时变得尤为明显。

2.3 电极材料

电极材料影响着电荷的注入与抽出,从而影响着聚合物材料中的空间电荷特性。文[19-20]中研究了在聚乙烯中不同电极材料对空间电荷的影响,发现相对于金属 Al、Au 电极,半导体(实验中用来匹配声阻抗的半导体层)更容易注入电荷,而且半导体注入电子的速率要强于空穴。文[21]中在环氧空间电荷测量实验中分别采用了 Al 电极和溅射的 Au 电极,发现在前者中注入的电荷要远大于后者。这是因为 Au 电极的功函数要高于 Al 电极(Au:4.70 eV, Al:4.08 eV),Au 电极注入电荷的能力要弱于 Al 电极。另外,电极注入电荷的能力跟试样与电极接触的方式也有关系。溅射电极与试样紧密接触,不存在任何气隙,而未溅射的金属电极与试样是在压力下挤靠在一起,接触面可能存在微小气隙,在加压下放电从而促进了电荷的注入。

2.4 温度

一般来说,温度的升高,将使得电荷的注入、传输及抽出等都随之增大,但是具体到空间电荷的变化,情况变得非常复杂。如文[17]中发现,在 20 kV/mm 电场下,随着温度的升高,在环氧中同极性电荷积聚量变得越来越大。文[22]中发现,温度升高时,无论是在纯环氧,还是在环氧/纳米 MgO 复合材料中,空间电荷积聚量都变大。而文[23]中发现,与 20 °C 相比较,60 °C 下纯环氧、环氧/微米 SiO₂、环氧/纳米 SiO₂、环氧/微米 SiO₂+纳米 SiO₂ 这几种材料中,同极性空间电荷量都变小。文[24]中也发现,在 50 kV/mm 的条件下,随着温度的升高(20~60 °C),环氧中积聚的同极性空间电荷量是逐渐变少的。在文[21]中,所加电场为 40 kV/mm 且在室温下,环氧中仅积聚同极性空间电荷,而在 72 °C 加同样强度的电场,环氧中观测到电极两侧电荷由同极性变为异极性,其具体的过程见图 4(黑色的长箭头和短箭头显示了负电荷从阴极向阳极迁移的过程^[21])。文中认为,温度

的升高,明显提升了环氧中电荷的传输能力,使电荷更容易地从注入端传输到另一侧电极处,由于电极与电介质界面的阻挡作用,电荷抽出部分受限,而形成异极性空间电荷。

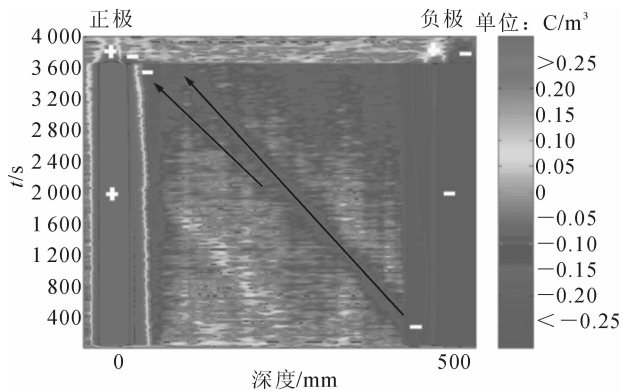


图4 在温度 72 °C 场强 40 kV/mm 条件下环氧体内空间电荷随加压时间变化图

Fig. 4 Cartographic vision of space charge density in the bulk of the insulation, obtained under 40 kV/mm at 72 °C

对于不同的环氧材料,温度升高空间电荷表现如此不一致的原因是:电介质中的空间电荷是由电荷的注入、传输、入陷/脱陷、复合、抽出,包括杂质电离等这些基本活动共同作用下决定的,他们之间相对的强弱才决定着空间电荷分布的特性。而不同的环氧材料,温度的升高对这些活动量的影响差别非常大,所以使得空间电荷的分布也表现的非常不一致。

另外长时的高温作用于聚合物材料后,会导致绝缘材料的热老化。文[25]中发现,相较于老化前的环氧(仅在电极两侧积聚少量的空间电荷),老化后的环氧体内积聚着大量的空间电荷。而且随着老化时间的加长,材料中积聚的空间电荷量越大,电场畸变也就越严重,从而使得绝缘材料的电性能大大下降。

2.5 湿度

在聚乙烯和油/纸绝缘材料中,水分是影响材料中空间电荷特性的一个重要因素^[26-28]。文[29]中发现,柔性环氧中随着水分含量的增高空间电荷出现变快,而且电荷量随之变大;文[30]中发现,在 80 °C 下,未经过干燥处理的环氧试样中出现正的异极性电荷,而经过干燥处理不含水分的环氧在同样条件下却未发现异极性电荷;文[31]中发现,采用不同固化剂固化的环氧中,水分的影响也有所不同。在胺类固化的环氧中,水分的存在使得电荷更容易从两侧电极处注入,而且向绝缘体内迁移;而在酸酐类固化的环氧中,水分的存在影响基本很小,绝缘体

内始终没有明显的空间电荷的注入。

2.6 掺杂粒子

为了提高环氧材料的某些特定性能如柔韧性、耐热性、阻燃性等,往往会在环氧中掺杂大量的无机微米粒子,而这些微米粒子的添加,往往会造成体电导率的升高,击穿场强的降低^[32-33]。而在聚合物中掺杂少量的纳米粒子时,可以在提高聚合物机械性能、热性能的同时,不降低甚至提高聚合物中的某些介电性能,因此聚合物/纳米复合材料受到极大的关注。

在环氧/纳米粒子复合物中,由于掺杂的纳米粒子的种类,形状,质量百分比的不同,对复合物的空间电荷特性的影响也不一样。文[14]中在环氧中分别掺杂质量分数为 5wt% 的 SiO₂、TiO₂、AlO(OH) 粒子,然后测量其介电特性。结果发现:纳米 SiO₂、纳米 AlO(OH) 对环氧体内的异极性空间电荷都有明显的抑制作用,然而纳米 TiO₂ 反而促进了环氧体内异极性空间电荷的积聚,不过在去电压后,掺杂纳米 TiO₂ 的复合物中空间电荷消散速度最快,见图 5(在场强 25 kV/mm 下加压两小时后短路 10 s 时所测的)^[14]。纳米 AlO(OH) 虽然在抑制空间电荷方面效果最好,不过在其纳米复合物中击穿场强明显降低,因此总体说来,掺杂纳米 SiO₂ 的复合物具有最好的介电性能。

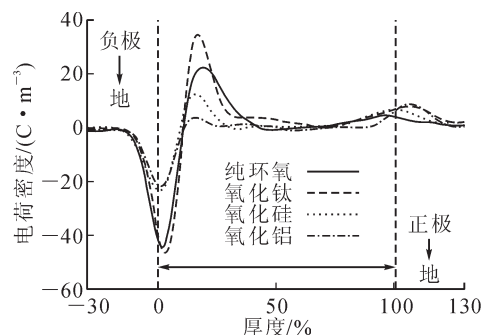


图5 掺杂不同纳米粒子的环氧试样中空间电荷分布去压图

Fig. 5 Space charge distributions in different nanoparticles doped epoxy samples

文[15]中在环氧中掺杂 3wt% 的纳米粘土,制备出插层型和剥离型纳米环氧复合材料,发现这两种纳米复合材料中空间电荷积聚都得到了有效的抑制,其中剥离型纳米环氧复合材料中的空间电荷积聚量不仅最小,而且在去压后,电荷消散速度也是最快。文[22,34]中发现环氧中掺杂纳米 MgO 和 Al₂O₃ 粒子时,都能使得环氧中的空间电荷量变低,而且发现当掺杂质量分数为 2wt% 时效果最好。文[35-36]中发现在环氧中掺杂纳米勃姆石粒子质量分数为 3wt% 时,空间电荷量相比纯环氧反而增

大,而质量分数为 5wt%及 7wt%时,对空间电荷有抑制作用。文中认为纳米粒子的引入,造成了深陷阱密度的降低或者增加了浅陷阱的密度,电荷更容易在电介质体内传输到达另一侧电极抽出,从而抑制了复合物中空间电荷的积聚。而在聚乙烯中,纳米粒子对空间电荷的抑制作用,文[37-38]中认为是由于纳米粒子引入了大量的深陷阱,使得注入的电荷在电极附近就被这些深陷阱所捕获,不能继续迁移,降低了此处的电场强度,从而削弱了电荷的注入,最终抑制了纳米复合物中空间电荷的积聚。到目前为止,纳米粒子抑制空间的作用机理尚未十分明确,还待进一步地研究。

除了掺杂微米/纳米粒子的环氧复合物,适用在高压套管的环氧/皱纹纸复合物的介电性能也受到极大的关注^[39]。文[40]中通过测量不同场强下环氧/皱纹纸的空间电荷分布发现,环氧/皱纹纸复合物由于极化或者杂质电离的影响在环氧—纸的界面处产生异极性电荷的积聚。另外,在低场强下环氧/皱纹纸复合材料体内的电场畸变要高于纯环氧,而在高场强下环氧/皱纹纸复合材料体内的电场畸变反而低于纯环氧。文中认为,在高场下,从电极处注入的电荷增大,使得电极附近积聚同极性的空间电荷,或者注入的电荷和环氧—纸界面处异极性的电荷发生复合,从而表现出异极性电荷变小,使得内部电场均一化。

3 结语

电介质中空间电荷的分布由电荷的注入、传输、入陷/脱陷、复合、抽出包括杂质电离等基本活动所决定,而空间电荷的存在又反过来会影响电荷的这些基本活动,所以电介质中空间电荷的产生及运动是一个复杂的动态过程。在环氧中,空间电荷受固化剂、电场强度、电极材料、温度、湿度、掺杂粒子等这些因素的影响,他们通过影响电荷的注入、传输、抽出、杂质电离等某个或者数个电荷的基本活动来影响电介质中空间电荷的分布。其中固化剂的类型对环氧中空间电荷的特性影响往往是最大的,而掺杂一定量的纳米粒子,能够有效的抑制空间电荷的产生。

但是,现有的研究还处于实验和定性的分析解释阶段。面向直流绝缘中的应用,需要进一步研究环氧及其复合物中空间电荷产生及抑制,并定量地描述在不同影响因素下的空间电荷特性。这将对绝缘材料的开发和实际工作运行中绝缘的选择和设计,提供重要的指导作用。

参考文献:

- [1] BOLON D A. Epoxy chemistry for electrical insulation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1995, 11(4): 10-18.
- [2] GORUR R S, CHERNEY E A, BURNHAM J T. Outdoor insulators[M]. Phoenix, USA: Ravi S Gorur Inc, 1999.
- [3] 陈平. 环氧树脂及其运用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [4] 周远翔, 王宁华, 王云杉, 等. 固体电介质空间电荷研究进展[J]. 电工技术学报, 2008, 23(9): 16-25.
ZHOU Yuanxiang, WANG Ninghua, WANG Yunsha, et al. Review of research on space charge in solid dielectrics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(9): 16-25.
- [5] LAURENCEAU P, DREYFUS G, LEWINER J. New principle for determination of potential distributions in dielectrics[J]. Physical Review Letters, 1977, 38(1): 46-49.
- [6] EISENMENGER W, HAARDT M. Observation of charge compensated polarization zones in polyvinylidenefluoride (PVDF) films by piezoelectric acoustic step-wave response [J]. Solid State Communications, 1982, 41(12): 917-920.
- [7] LI Y, YASUDA M, TAKADA T. Pulsed electroacoustic method for measurement of charge accumulation in solid dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(2): 188-195.
- [8] TAGAMI N, OKADA M, HIRAI N, et al. Dielectric properties of epoxy/clay nanocomposites-effects of curing agent and clay dispersion method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(1): 24-32.
- [9] SUH K S, KOO J H, LEE S H, et al. Effects of sample preparation conditions and short chains on space charge formation in LDPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(2): 153-160.
- [10] FU M, CHEN G, DISSADO L A, et al. Influence of thermal treatment and residues on space charge accumulation in XLPE for DC power cable application[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 53-64.
- [11] 秦少瑞. 高压直流下 XLPE 的绝缘特性研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2010.
- [12] LE ROY S, TEYSSEDE G, LAURENT C, et al. Relative importance of trapping and extraction in the simulation of space charge distribution in polymeric insulators under DC potentials[C]//IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Winchester: IEEE, 2007: 494-497.
- [13] LYU Zepeng, CAO Junzheng, WANG Xia, et al. Mechanism of space charge formation in cross linked polyethylene (XLPE) under temperature gradient[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6): 3186-3196.
- [14] KATAYAMA J, OHKI Y, FUSE N, et al. Effects of nanofiller

- materials on the dielectric properties of epoxy nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(1): 157-165.
- [15] THELAKKADAN A S, COLETTI G, GUASTAVINO F, et al. Effect of the nature of clay on the thermo-mechanodynamical and electrical properties of epoxy/clay nanocomposites[J]. Polymer Composites, 2011, 32(10): 1499-1504.
- [16] DISSADO L A, LAURENT C, MONTANARI G C, et al. Demonstrating a threshold for trapped space charge accumulation in solid dielectrics under dc field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(3): 612-620.
- [17] LIU Peng, NING Xin, PENG Zongren, et al. Effect of temperature on space charge characteristics in epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 65-71.
- [18] GRISERI V, DISSADO L A, FOTHERGILL J C, et al. Electroluminescence excitation mechanisms in an epoxy resin under divergent and uniform field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(1): 150-160.
- [19] FLEMING R J, HENRIKSEN M, HOLBOLL J T. The influence of electrodes and conditioning on space charge accumulation in XLPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(4): 561-571.
- [20] CHEN G, TAY T, DAVIES A E, et al. Electrodes and charge injection in low-density polyethylene-using the pulsed electroacoustic technique[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 867-873.
- [21] GALLOT-LAVALLEE O, TEYSSÉDRE G, LAURENT C, et al. Space charge behaviour in an epoxy resin: The influence of fillers, temperature and electrode material[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2005, 38(12): 2017-2025.
- [22] ANDRITSCH T, KOCHETOV R, LENNON B, et al. Space charge behavior of magnesium oxide filled epoxy nanocomposites at different temperatures and electric field strengths [C]//2011 Electrical Insulation Conference (Eic). Annapolis, USA: [s.n.], 2011: 136-140.
- [23] KRIVDA A, TANAKA T, FRECHETTE M, et al. Characterization of epoxy microcomposite and nanocomposite materials for power engineering applications[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2012, 28(2): 38-51.
- [24] DONG J H, WU K, SHAO Z H, et al. Space charge distribution in XLPE and epoxy resin under different temperature [C]//2005 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Australia: IEEE, 2015: 879-882.
- [25] DAS S, GUPTA N. Effect of ageing on space charge distribution in homogeneous and composite dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 541-547.
- [26] MONTANARI G C, PALMIERI F. The effect of humidity on space charge accumulation in XLPE [C]//2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 2003: 205-208.
- [27] MAENO Y, HIRAI N, OHKI Y, et al. Effects of crosslinking byproducts on space charge formation in crosslinked polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(1): 90-97.
- [28] HAO Jian, CHEN G, LIAO Ruijin, et al. Influence of moisture on space charge dynamics in multilayer oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(4): 1456-1464.
- [29] CHALASHKANOV N M, DODD S J, ZHENG H, et al. Influence of water absorption in flexible epoxy resins on the space charge behaviour [C]//2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). [S.l.]: IEEE, 2012: 677-680.
- [30] GUILLERMIN C, RAIN P, ROWE S W. Influence of Tg on space charge development in epoxy resin [C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD). Toulouse, France: IEEE, 2004: 229-232.
- [31] IIZUKA T, YOSHIMOTO K, TAKAI H, et al. Measurement of space charge distribution in epoxy resin[J]. Electrical Engineering in Japan, 1999, 129(3): 9-16.
- [32] CASTELLON J, NGUYEN H, AGNEL S, et al. Electrical properties analysis of micro and nano composite epoxy resin materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3): 651-658.
- [33] NELSON J K, FOTHERGILL J C. Internal charge behaviour of nanocomposites[J]. Nanotechnology, 2004, 15(5): 586-595.
- [34] ANDRITSCH T, KOCHETOV R, MORSHUIS P, et al. Dielectric properties and space charge behavior of mgo-epoxy nanocomposites [C]//Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (Icsd 2010). Germany: IEEE, 2010: 1-4.
- [35] FABIANI D, MONTANARI G C, DARDANO A, et al. Space charge dynamics in nanostructured epoxy resin [C]//2008 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Canada: IEEE, 2008: 355-358.
- [36] SANGERMANO M, DEORSOLA F, FABIANI D, et al. Epoxy-boehmite nanocomposites as new insulating materials[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 114(4): 2541-2546.
- [37] TAKADA T, HAYASE Y, TANAKA Y, et al. Space charge trapping in electrical potential well caused by permanent and induced dipoles for LDPE/MgO nanocomposite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(1): 152-160.

- insulation with impurities[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2450-2453.
- [9] 吴畏, 汪泓, 黄智伟, 等. 110 kV 高压电力电缆中间接头电场-温度场的仿真分析[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(8): 15-17.
WU Wei, WANG Feng, HUANG Zhiwei, et al. Simulation analysis of electric-thermo field of 110 kV power cable joint[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(8): 15-17.
- [10] 陆国俊, 熊俊, 阮班义, 等. 用振荡波电压法检测含有缺陷的 10 kV 交联聚乙烯电缆接头实验[J]. 广东电力, 2011, 24(6): 18-22.
LU Guojun, XIONG Jun, RUAN Banyi, et al. Inspection test on defective joints of 10 kV XLPE cables with oscillating wave voltage method[J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(6): 18-22.
- [11] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
FENG Cizhang, MA Xikui. An introduction to engineering electro-magnetic fields[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [12] 徐志钮, 律方成, 李和明, 等. 绝缘子电场有限元分析法的影响因素及其优化[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 944-951.
XU Zhiniu, LYU Fangcheng, LI Heming, et al. Influencing factors of insulator electric field analysis by finite element method and its optimization[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 944-951.
- [13] 陈羽中, 谢忠巍. 冷缩型电力电缆附件的技术与应用[J]. 绝缘材料, 2004, 37(6): 60-63.
CHEN Yuzhong, XIE Zhongwei. The technique & application of cold-shrinkable cable accessories[J]. Insulating Materials, 2004, 37(6): 60-63.
- [14] 朱晓辉, 周凤争, 杜伯学, 等. 运行电缆中典型缺陷的监测及检测技术研究[C]//2010 年苏州电力电缆状态检修技术交流会论文集. 苏州: [s.n.], 2010: 21-29.
- [15] 姜芸, 闵虹, 夏荣, 等. 高压交联电缆接头局部放电的电容耦合检测及分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 2005-2011.
JIANG Yun, MIN Hong, XIA Rong, et al. Capacitive coupling detection and characteristic analysis of partial discharge in high-voltage XLPE power cable joints[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(8): 2005-2011.

刘英(1976—), 女, 博士, 西安交通大学电气工程学院副教授, 主要从事高压绝缘结构设计、电力电缆工程计算及应用方面的研究。

(上接第 21 页)

- [38] TANAKA T, KOZAKO M, FUSE N, et al. Proposal of a multi-core model for polymer nanocomposite dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(4): 669-681.
- [39] 刘鹏, 金海云, 石惠承, 等. 特高压直流套管用环氧树脂/皱纹纸复合绝缘体系介电性能的研究[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 6-8.
LIU Peng, JIN Haiyun, SHI Huicheng, et al. Investigation on dielectric properties of epoxy/crepe paper composites for ultra-high voltage DC bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 6-8.
- [40] SHEN W, WU K, CAO W, et al. Study on the breakdown and space charge properties of epoxy impregnated paper composites[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Electrical Insulating Materials (Iseim). [S.l.]: IEEEJ, 2011: 358-361.
- 吴锴(1969—), 男, 博士, 西安交通大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为绝缘材料电老化及击穿理论、局部放电检测及内在机理研究、聚合物中空间电荷研究、城市能源系统的合理优化。