

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.05.023

热老化前后 LDPE/SiO₂ 纳米复合材料空间电荷积聚分析

李玉栋¹, 张占喜¹, 肖坤², 陆云才³, 陶风波³

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 国网成都供电公司, 四川 成都 611130; 3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:在实际运行中,直流场强和热环境都会对聚乙烯电缆内空间电荷积聚行为产生影响,过量的空间电荷会威胁其绝缘性能,虽然纳米复合材料具备抑制空间电荷的能力,但对于热老化后其空间电荷的积聚特性仍有待进一步研究。采用电声脉冲法对热老化前后不同浓度的低密度聚乙烯(LDPE)/二氧化硅(SiO₂)纳米复合材料内空间电荷的积聚行为进行分析。结果表明,热老化会降低电极注入势垒并产生随机分布的深陷阱和杂质,增加空间电荷积累。纳米SiO₂引入的大量界面区域会产生均匀分布的深陷阱,并形成界面反电场,从而抑制载流子的运输和注入,且纳米粒子可以提高材料稳定性,提升电极注入势垒并延缓热老化进程。相比于纯LDPE,LDPE/SiO₂材料在热老化前后都具有明显的抑制空间电荷的能力。

关键词:纳米复合材料;空间电荷;热老化;低密度聚乙烯

中图分类号:TM211

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)05-0164-06

0 引言

在高压直流输电中,聚乙烯电缆内会积累空间电荷,过多的空间电荷导致局部电场畸变,加速绝缘劣化,限制高压直流电缆向更高电压等级的发展^[1-2]。此外,电缆在长期运行过程中会受到热、电等因素的影响,使材料劣化,加剧空间电荷的积累,严重威胁电缆的可靠运行^[3-7]。研究表明聚乙烯纳米复合材料可以抑制空间电荷的积聚行为,延长材料的使用寿命^[2,8-9],但对于热老化前后,特别是对长期热老化的纳米复合材料内空间电荷积聚特性的研究较少。因此,研究热老化前后纳米复合材料内空间电荷的积聚特性对直流电缆的发展具有重要意义。

一般认为材料内空间电荷主要有两大来源,一是由电极注入的载流子,二是介质内杂质的电离产物,都会被材料内的陷阱捕获而形成空间电荷^[10]。在纳米复合材料抑制空间电荷能力的研究方面,部分学者着重对纳米粒子和基体间界面区域进行研究,以“介电双层模型”等理论对纳米复合材料内空间电荷的行为进行分析^[11]。另一部分研究者主要从陷阱对载流子的影响出发,其中,陷阱电势模型认为纳米粒子在高电场下形成的深陷阱不仅会限制载流子的迁移,还会产生宏观偶极矩,提高同极性电荷的注入势垒,抑制空间电荷的积聚。以前的研究很少涉及到热老化环境,缺乏老化前后空间电

荷积聚行为的对比分析。聚乙烯在热氧反应过程中会产生含氧杂质和低分子链等物质,对空间电荷行为产生较大影响^[12],但聚乙烯纳米复合材料在热老化后空间电荷行为的变化情况仍有待进一步研究。

文中选用电学性能、抗老化和分散性较优的纳米二氧化硅(SiO₂)作为掺杂材料^[13],利用电声脉冲法(PEA)对热老化前后不同掺杂浓度的低密度聚乙烯/二氧化硅(LDPE/SiO₂)纳米复合材料的空间电荷积聚行为进行对比分析,结合热氧老化和电荷陷阱等理论,探究其抑制空间电荷能力的变化规律和内在机理。

1 纳米材料的制备及测试

1.1 样品制备与处理

采用熔融共混法制备LDPE薄膜样品,纳米颗粒的掺杂质量分数分别为0.5%、1%、3%和5%。所用基料为2426H型LDPE颗粒;SiO₂纳米颗粒的粒径为50 nm;纳米粒子表面偶联剂为乙烯基三甲氧基硅烷(A-171),分子式为CH₂=CH-Si(OCH₃)₃,偶联剂不仅可以抑制纳米粒子间的团聚作用,还可以提高粒子在基体内的分散性,保证掺杂效果。

用双螺旋杆挤出机使LDPE颗粒与偶联剂处理后的SiO₂纳米粒子充分混合,使用切粒机将混合物剪成粒料,利用平板硫化机在15 MPa、160 ℃条件下将粒料热压成薄膜样品,压制时间为5 min。为了消除样品的残余水分和应力,须将样品放置于80 ℃的真空干燥箱中真空(0.01 Pa)干燥24 h。

收稿日期:2019-03-07;修回日期:2019-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777018)

根据 IEC 60502-2 规定,实际运行中聚乙烯电缆承受的最高温度为 90 ℃,文中选择热老化温度为 90 ℃。根据 IEC 60811-1-4 标准,文中采用热老化实验取样的周期为 0 d,7 d,21 d,35 d,56 d。

1.2 空间电荷测量

采用 PEA 对样品热老化前后的空间电荷积聚特性进行测量,测试系统如图 1 所示。外加直流电源型号为 AU-20R3-LC,输出电压幅值为 0~20 kV;脉冲电压源型号为 AVIR-1-C,脉宽为 2~5 ns,输出电压幅值为 0~200 V。

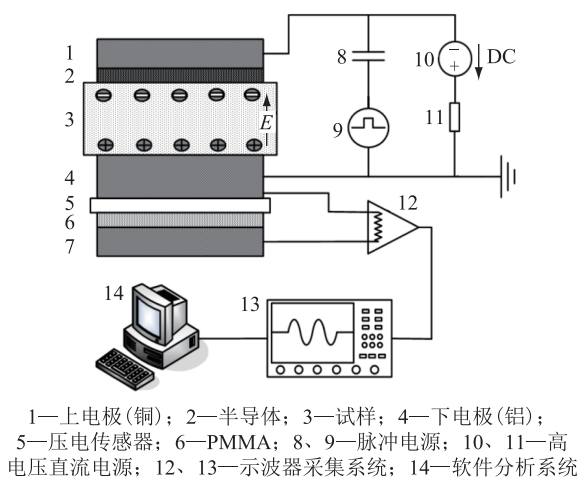


图 1 空间电荷测量系统

Fig.1 Space charge measurement system

预加电压为 0.4~1 kV,以样品内部空间电荷积累量少,电场无畸变作为参考信号选择其标准;加压测试施加电场强度为 20 kV/mm,采集时间范围为 0~20 min,采集时间间隔为 10 s。每组实验重复 5 次以上,保证空间电荷积累的重现。

2 热老化前后材料内空间电荷的积聚行为

2.1 未热老化下样品内空间电荷的积聚行为

图 2 为未热老化纯 LDPE 样品内空间电荷积聚的分布图。其中 2 条竖线分别为阳极和阴极的位置,两极之间的距离为被测样品的实际厚度,加压时间分别取 10 s,1 min,5 min,10 min,20 min。在电极与样品界面处积累了大量异极性电荷,与文献 [14] 指出的空间电荷行为相一致。样品中部出现了 2 个明显的电荷峰,靠近阳极侧为正电荷峰,靠近阴极侧为负电荷峰,样品内部的电荷峰值随加压时间的增加明显增大。

不同掺杂浓度的未老化 LDPE/SiO₂样品内空间电荷积聚的分布如图 3 所示。与图 2 中未老化纯 LDPE 样品相比,掺杂 SiO₂ 纳米粒子后样品的异极性空间电荷和正、负电荷峰都明显降低,证明 SiO₂

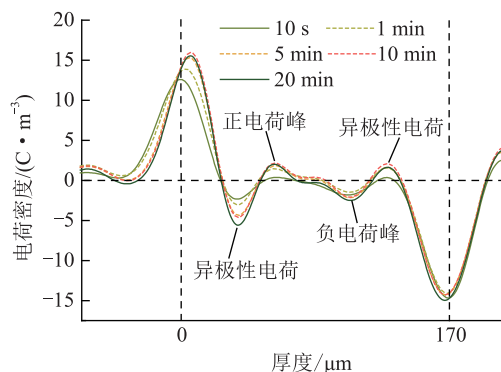


图 2 未老化纯 LDPE 样品空间电荷积聚特性

Fig.2 Space charge accumulation characteristics for unaged pure-LDPE samples

纳米粒子具有抑制空间电荷积聚的作用。通过对比不同掺杂浓度的样品可知,当 SiO₂ 纳米粒子掺杂浓度(质量分数)为 1% 时,其抑制空间电荷积累的效果最佳,在任意加压时间下复合材料样品内几乎无空间电荷积累。因此,实验将重点对纯 LDPE 和 LDPE/SiO₂-1% 样品在热老化下的空间电荷行为进行研究。

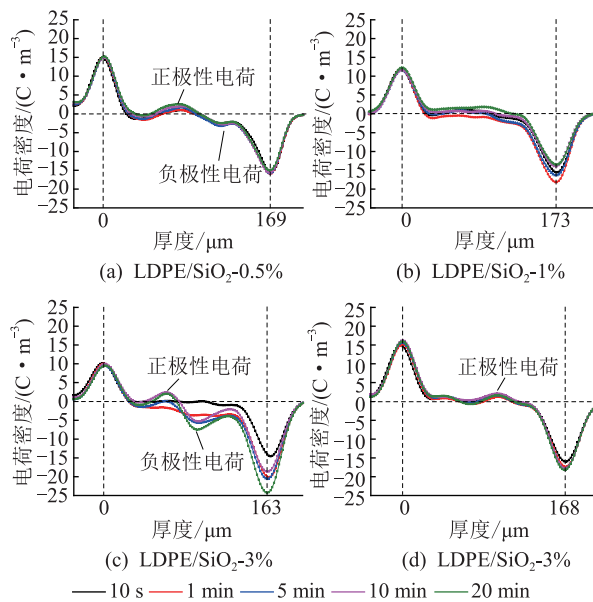


图 3 未老化 LDPE/SiO₂ 样品空间电荷积聚特性

Fig.3 Space charge accumulation characteristics for unaged LDPE/SiO₂ samples

2.2 热老化下样品内空间电荷的积聚行为

图 4 为不同热老化时间纯 LDPE 样品内空间电荷积聚的分布。从中可得,与图 2 内未老化纯 LDPE 样品相比,热老化 7 d 的纯 LDPE 样品内部仅积累了少量负极性空间电荷,总体含量分布较为平均,但在热老化 21 d 后,出现明显的异极性空间电荷峰,且正极性电荷注入增多;热老化 35 d 后,阴极处出现明显同极性电荷累积,且样品内负极性空间

电荷积累明显增强,但老化至 56 d 后,负极性空间电荷的积累明显减弱,且靠近阳极侧出现正极性电荷峰。

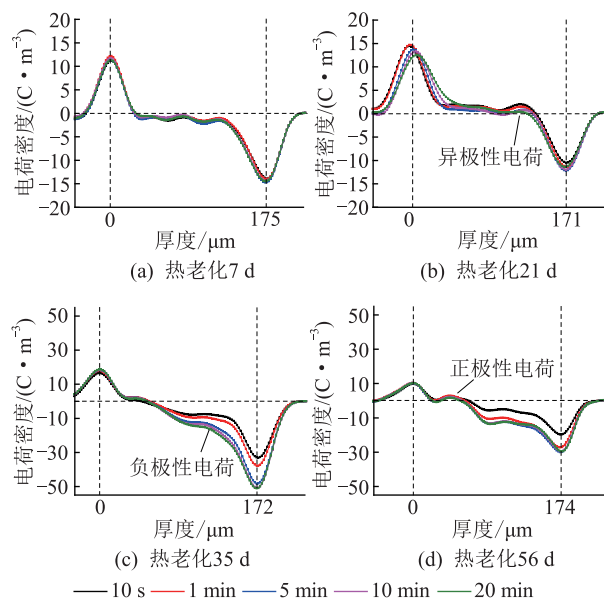


图 4 不同老化时间的纯 LDPE 样品空间电荷的积聚特性

Fig.4 Space charge accumulation characteristic for aged Pure-LDPE samples

不同热老化时间的 LDPE/SiO₂-1%样品内空间电荷积聚的分布如图 5 所示。与图 4 热老化纯 LDPE 样品对比可得,老化初期,纳米粒子具有较好抑制空间电荷积累的能力,复合材料内无明显异极性电荷积累和正负电荷峰;热老化 35 d 时,样品阴极处有明显异极性电荷积累,随着加压时间增加,正电荷累积量先增后降;热老化 56 d 时,阴极处同极性电荷注入显著增加,但积累量明显小于纯 LDPE 材料,且随着加压时间的增加,负极性电荷的注入开始减少。与图 3(b)中未热老化的 LDPE/SiO₂-1%样品相比,热老化后的纳米复合材料内空间电荷仍保持较低水平。总体上看,LDPE/SiO₂纳米复合材料在热老化前后空间电荷累积量较少,说明该纳米粒子在热老化后仍有明显抑制空间电荷的能力。

3 分析与讨论

3.1 未老化样品空间电荷的积聚特性和抑制机理

3.1.1 空间电荷的积聚行为

针对聚乙烯的空间电荷积聚行为,根据空间电荷的来源,从电极注入和杂质分解两方面进行分析。

一方面, Montanar 等人认为电极注入的电子“孤波”和空穴“孤波”是电极附近异极性电荷形成的主要原因^[15]。“孤波”在电场作用下向对侧电极

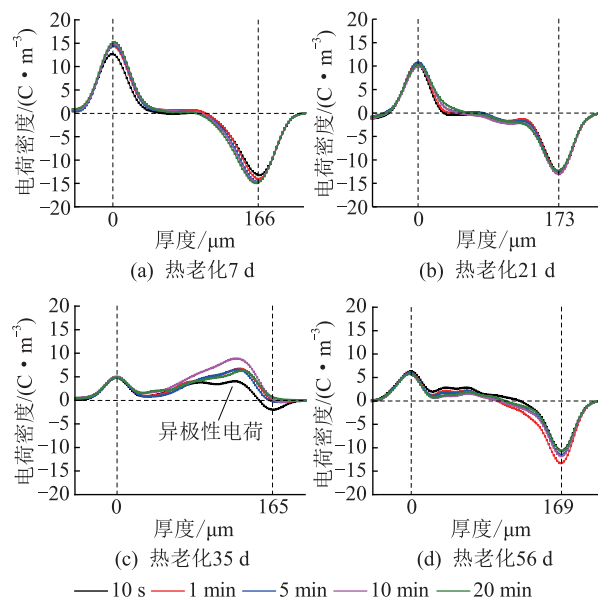


图 5 不同老化时间 LDPE/SiO₂-1%样品空间电荷的积聚特性

Fig.5 Space charge accumulation characteristics for aged LDPE/SiO₂-1wt% samples

快速迁移,由于样品和电极界面间存在势垒,使得从样品内部流入电极的电荷量小于“孤波”的电荷量,在电极侧形成了异极性空间电荷(如图 2)。

另一方面,纯 LDPE 样品内部存在抗氧化剂等杂质,在高场下发生分解,产生大量正、负离子,且在电场作用下离子向相反极性的电极侧迁移。快速 PEA 测试表明,“孤波”到达相反电极并建立平衡的时间为微秒级,由于正负离子质量分数较大和介质内部存在大量局域态限制的影响,正负离子的迁移速率更加缓慢,更容易被介质内部的陷阱捕获,从而在到达电极之前就形成正、负空间电荷峰(如图 2 所示)。

3.1.2 抑制空间电荷的机理

针对纳米粒子对聚乙烯内空间电荷的抑制作用,文中从纳米粒子和材料界面处形成的深陷阱出发进行分析。

一方面,深陷阱会捕获材料内的电子或空穴,缩短载流子迁移的有效距离,降低载流子的迁移率。迁移率的降低使样品内异极性空间电荷的数量大大减少,且高场强下存在中和作用,正负电荷在较低迁移率下更易发生中和,削弱材料内杂质的电离过程,进而抑制正负电荷峰。

另一方面,在靠近电极侧位置,由于样品内深陷阱捕获电荷后会形成同极性电荷累积,在电极和样品界面处形成界面反电场,抑制电子或空穴的进一步注入。如图 6 所示,图中 E_1 , E_2 分别为阳极界面反电场和阴极界面反电场, E 为外加电场。

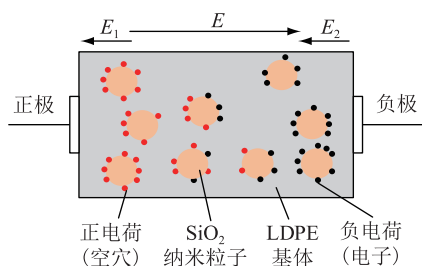


图6 界面电场模型

Fig.6 Interface electric field model

此外,界面反电场会增强材料的内部电场,有利于材料内空间电荷的及时排出。因此,纳米粒子能有效抑制材料内空间电荷的积累。

3.1.3 纳米粒子浓度对抑制能力的影响

对于较低掺杂浓度的样品,纳米粒子形成的深陷阱数量不够,不能完全抑制空间电荷的注入和累积。

纳米粒子浓度过高时,多个纳米粒子的扩散层可能相互重叠,载流子以入陷脱陷的方式在重叠区沿着电场的作用方向运动,即载流子有更大的几率在材料内部积聚,且过高的浓度会导致纳米粒子团聚作用明显,减少界面区域,增加粒子直径,使其小尺寸效应下降,直接制约其抑制空间电荷的能力。因此,只有当纳米粒子的浓度合适时,才能较好的发挥其抑制空间电荷的能力。

3.2 热老化样品空间电荷的积聚特性和抑制机理

3.2.1 热老化对空间电荷积聚的影响

在热氧条件下,LDPE 会逐渐出现热氧老化现象,产生大量深陷阱。在热老化初期,深陷阱数量较少且分布均匀,其作用与 SiO₂ 纳米粒子所形成的陷阱类似,一方面可以降低电荷的迁移率,另一方面会增强电荷的中和作用,使得在热老化初期的样品内无明显异极性空间电荷积累。

老化严重时,阴极电子注入明显增强,主要与样品的电子注入势垒降低有关。电子注入势垒如式(1)所示。可以看出,当电极材料确定后,聚乙烯电子亲和能与势垒高度呈负相关。

$$V(x) = \Psi_m - \chi \quad (1)$$

式中: $V(x)$ 为电极与介质间的势垒高度; Ψ_m 为电极材料功函数; χ 为聚合物的电子亲和能。

由文献[16—17]可知,电子亲和能与材料结晶度呈负相关,所以,势垒高度与结晶度呈正相关,且热老化会破坏材料的晶区,降低其结晶度^[18]。

由此可得,热老化会降低 LDPE 的电子注入势垒高度,宏观表现为阴极同极性电荷积累明显增大。但随着热老化程度的进一步加深,在老化 56 d

后,样品内深陷阱的数量增多,过多的深陷阱形成的界面反电场会减缓阴极处电子的注入,而阳极侧形成的正极性电荷峰主要与材料热老化下形成的杂质的电离有关。

3.2.2 热老化后空间电荷的抑制能力

对比未热老化的 LDPE/SiO₂ 样品,热老化后纳米粒子仍具有较好的抑制空间电荷的能力,表明纳米粒子和基体间的界面可以承受热老化的影响,并且由于纳米粒子对周围分子链的吸引和排序,利于提升材料总体性能的稳定性,即纳米粒子可以提高材料结晶度,提升势垒高度并抑制热氧老化进程。

针对热老化 35 d 时,材料阴极处有明显的异极性电荷积累现象,分析认为是由在该热老化时间段内材料中某些杂质更容易电离导致的,但随着加压时间的增加,电离的粒子与电极注入的电荷中和,加之界面反电场对内部电荷的排出,电荷积累量下降。与相同老化时间的纯 LDPE 相比,纳米复合材料的电子注入势垒较高,所以正电荷残余较多。

3.3 热老化样品内电荷陷阱与空间电荷积聚关系

由空间电荷测试结果可以看出,LDPE 材料内的空间电荷积聚特性与材料内的电荷陷阱的深度和分布有着密切的关系。

3.3.1 热老化对电荷陷阱的影响

文献[19]的分子模拟结果表明,部分基团会在热老化下发生较大程度的振动与扭曲,长时间的热老化作用会导致化学键的断裂。说明热老化初期会引入浅陷阱,当热老化程度加深时,深陷阱数量会增多,且在热老化过程中,LDPE 易发生氧化、降解,产生碳碳双键、羧基和羰基等基团。因此,热老化一方面会使材料发生热氧反应,产生较多杂质分子,另一方面会破坏杂质分子链的形态,在热老化过程中不断产生电荷陷阱。

较低能级的陷阱对空间电荷的束缚作用不强,而较深能级的陷阱对空间电荷具有较强的捕获作用,且深陷阱因热老化而展现出的随机性会使材料内空间电荷的分布变得更为复杂。

由此可见,聚乙烯材料内热氧老化的程度和随机性是决定材料深电荷陷阱数量和分布的关键。随着热老化程度的加深,材料内深陷阱也会增多,而大量随机的深陷阱会俘获材料内的载流子形成空间电荷。

3.3.2 纳米 SiO₂ 对电荷陷阱的影响

一方面,添加纳米 SiO₂ 后,材料内均匀分布了大量深陷阱,深陷阱的均匀分布会极大的缩短载流子的迁移,增加电荷的中和作用,且在电极和样品

界面处形成界面反电场,抑制电荷注入。另一方面,纳米 SiO₂会推迟热老化进程,即在相同老化时间下,纳米复合材料的热氧反应产物量低于纯 LDPE,减少因热老化而形成的随机深陷阱。

纳米粒子和基体间界面区域形成了大量局域态,即可以增强材料结晶度,延缓热老化进程,又可以吸引氧化产物,使得分子链排列较规律,抑制热老化影响。此外,有研究表明热老化后 LDPE/SiO₂纳米复合材料具有较高的直流电导率^[20],即虽然材料内因热老化而形成的随机深陷阱会俘获载流子,形成空间电荷,但是由于该材料热老化后的直流电导率较高,载流子也有较大的几率达到异极性电极,降低材料内空间电荷积累量。因此,与纯 LDPE 相比,该纳米复合材料在热老化后仍然保持较好的抑制空间电荷累积的能力。

综上,热老化会产生大量杂乱分布的深陷阱,增大空间电荷积累,但纳米 SiO₂会形成均匀分布的深陷阱并抑制热老化进程,从而抑制空间电荷积累。

4 结论

文中利用 PEA 测试了热老化前后 LDPE 纳米复合材料空间电荷的积聚行为,从载流子运输、势垒高度和电荷陷阱等方面出发,分析了热老化前后材料抑制空间电荷的能力。具体结论如下:

(1) 热老化前后,LDPE/SiO₂纳米复合材料内的异极性空间电荷的积累量和正负电荷峰都明显低于纯 LDPE 样品,且当 SiO₂质量分数为 1%时,其抑制空间电荷积聚的效果最佳。因此,在工程应用中为降低空间电荷对电缆绝缘材料的影响,应优先考虑纳米粒子在 0.5%~3%范围内的聚乙烯复合材料。

(2) 热老化一方面会降低电极的注入势垒,增加同极性电荷的来源;另一方面会破坏材料结构,虽然在热老化初期会形成少量分布均匀的深陷阱,抑制空间电荷积累,但随着热老化的深入,产生了大量分布杂乱的深陷阱,加之不断增加的杂质电离,增加了异极性电荷的来源。因此,样品内空间电荷的积累量随老化时间增加而增大。

(3) SiO₂纳米粒子引入大量界面区域,形成分布均匀的深陷阱,降低了载流子的迁移率,增强了正负电荷的中和作用,并形成界面反电场,减少了空间电荷的来源。此外,纳米 SiO₂可以提高材料的稳定性和结晶度,增强电极的注入势垒,并延缓材料的热老化进程。因此,LDPE/SiO₂纳米复合材料在热老化前后都具有抑制空间电荷积聚的能力。

参考文献:

- [1] TANAKA Y, CHEN G, ZHAO Y. Effect of additives on morphology and space charge accumulation in low density polyethylene [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(1): 148-154.
- [2] WANG Y, WANG C, XIAO K. Investigation of the electrical properties of XLPE/SiC nanocomposites [J]. Polymer Testing, 2016, 50(1): 145-151.
- [3] 黄涛,文珊,王庭华,等.不同材质电缆支架对电缆运行适用性研究[J].电力工程技术,2017,36(2):104-109.
HUANG Tao, WEN Shan, WANG Tinghua, et al. Research on applicability of different material cable brackets to cable operation [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 104-109.
- [4] 郑建康,赵艾萱,林涛,等.高频冲击电压对 XLPE 电缆介电响应特性的影响[J].智慧电力,2018,46(5):46-52.
ZHENG Jiankang, ZHAO Aixuan, LIN Tao, et al. Effect of high frequency impulse voltage upon dielectric response of xlpe cables [J]. Smart Power, 2018, 46(5): 46-52.
- [5] 杨引虎,罗建勇,韦远涛,等.分布式电缆局部放电在线监测系统的研制[J].智慧电力,2018,46(3):91-94.
YANG Yinhu, LUO Jianyong, WEI Yuantao, et al. Development of distributed on-line pd monitoring system for cables [J]. Smart Power, 2018, 46(3): 91-94.
- [6] 邱伟豪,阳林,郝艳捧,等. XLPE 电缆内置分布式光纤的温度监测试验[J].广东电力,2018,31(8):175-181.
QIU Weihao, YANG Lin, HAO Yanpeng, et al. Temperature monitoring experiment for XLPE built-in distributed optical fiber [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(8): 175-181.
- [7] 李陈莹,李鸿泽,陈杰,等.高压 XLPE 电力电缆缓冲层放电问题分析[J].电力工程技术,2018,37(2):61-66.
LI Chenying, LI Hongze, CHEN Jie, et al. Analysis of high voltage XLPE power cable buffer layer discharge problem [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 61-66.
- [8] MIZUTANI T, SEMI H, KANEKO K. Space charge behavior in low-density polyethylene [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2000, 7(4): 503-508.
- [9] 郑昌佶,时海涛,杨佳明,等.纳米 SiC/低密度聚乙烯复合材料的空间电荷与电导特性[J].复合材料学报,2016,33(10):2166-2173.
ZHENG Changbi, SHI Haitao, YANG Jiaming, et al. Space charge and conductive characteristics of nano-SiC/LDPE composites [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2016, 33(10): 2166-2173.
- [10] MASAYUKI F, KAZUYUKI T, TETSURO T, et al. Space charge behavior in polymer film based on increment of capacitance under AC high field [J]. Electrical Engineering in Japan, 2002, 141(141): 8-16.
- [11] LEWIS T J. Interfaces are the dominant feature of dielectrics at the nanometric level [J]. Dielectrics & Electrical Insulation IEEE Transactions on, 2004, 11(5): 739-753.
- [12] FOTHERGILL J C, MONTANARI G C, STEVENS G C, et al. E-

- lectrical, microstructural, physical and chemical characterization of HV XLPE cable peelings for an electrical aging diagnostic data base[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2003, 10(3):514-527.
- [13] 兰莉, 吴建东, 纪哲强, 等. 纳米 SiO₂/低密度聚乙烯复合介质的击穿特性[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13):138-143, 202.
- LAN Li, WU Jiandong, JI Zheqiang, et al. Breakdown properties of nano-SiO₂/LDPE composite [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13):138-143, 202.
- [14] 吴建东, 尹毅, 兰莉, 等. 纳米掺杂浓度对 LDPE/Silica 纳米复合介质中空间电荷行为的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28):177-183.
- WU Jiandong, YIN Yi, LAN Li, et al. The influence of nano-filler concentration on space charge behavior in LDPE/silica nanocomposites[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28):177-183.
- [15] MONTANARI G C, FABIANI D, DISSADO L A. A new conduction phenomenon observed in polyethylene and epoxy resin; ultra-fast soliton conduction[J]. Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics, 2011, 49(49):1173-1182.
- [16] 乔建良, 徐源, 高有堂, 等. 负电子亲和势 GaN 光电阴极铯吸附机理研究[J]. 光子学报, 2016, 45(4):76-81.
- QIAO Jianliang, XU Yuan, GAO Youtang, et al. Cs adsorption mechanism for negative electron affinity GaN photocathode[J]. Acta Pjotonica Sinica, 2016, 45(4):76-81.
- [17] 田付强. 聚乙烯基无机纳米复合电介质的陷阱特性与电性能研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.
- TIAN Fuqiang. Investigation on the trap characteristics and electrical properties of polyethylene based nanocomposite [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2012.
- [18] LIU J, WANG Y, XIAO K, et al. Research on the thermal aging behaviors of LDPE/TiO₂ nanocomposites[J]. Journal of Nanomaterials, 2017(11):1-11.
- [19] FAN P, WANG Y, TIAN M, et al. Molecular dynamics simulation on the impact of electric field on the yield behavior of insulation paper[C]//International Symposium on Electrical Insulating Materials, IEEE, 2014:457-460.
- [20] WANG Y, WANG C, ZHANG Z, et al. Effect of nanoparticles on the morphology, thermal, and electrical properties of low-density polyethylene after thermal aging[J]. Nanomaterials, 2017, 7(10):320.

作者简介:



李玉栋

李玉栋(1995),男,硕士在读,研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail:yudong_li1995@163.com);

张占喜(1992),男,博士在读,研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail:zhx.zhang@cqu.edu.cn);

肖坤(1992),男,硕士,助理工程师,从事配电运行工作。

Space charge accumulation behavior of Polyethylene/Silica Nanocomposites before and after thermal aging

LI Yudong¹, ZHANG Zhanxi¹, XIAO Kun², LU Yuncai³, TAO Fengbo³

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Grid Chengdu Power Supply Company, Chendu 611130, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: In practical operation, DC field strength and thermal environment can affect the accumulation of space charge in polyethylene cable. And excess space charge can threaten the insulation performance. Although nanocomposites can suppress space charge, the space charge accumulation characteristics after thermal aging still need to be further studied. In this paper, the space charge accumulation behavior in low-density polyethylene (LDPE)/silica (SiO₂) nanocomposites with different SiO₂ mass concentrations before and after thermal aging was studied by the pulse electro-acoustic method. The results show that thermal aging reduces the electrode injection barrier and generates deep traps and impurities with random distribution, increasing the accumulation of space charge. Many interface regions introduced by nano-SiO₂ generate deep traps with uniform distribution and form interfacial anti-electric field, inhibiting the transport and injection of carriers. Moreover, nanoparticles can improve the stability of materials, thereby enhancing the electrode injection barrier and delaying the thermal aging process. Compared with pure LDPE, LDPE/SiO₂ has the obvious ability to suppress space charge before and after thermal aging.

Keywords: nanocomposites; space charge; thermal aging; LDPE

(编辑 杨卫星)