

半导体屏蔽材料对高压 XLPE 电缆绝缘电气性能的影响

徐 曙¹, 张成巍¹, 张 繁¹, 胡力广¹, 侯 帅²,
胡 晨², 展云鹏², 朱闻博², 冯 宾²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000;
2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663)

摘 要:为研究半导体屏蔽材料对高压 XLPE 电缆绝缘中电荷输运行为的影响,本研究选用国内外3种不同型号的半导体屏蔽材料配合同一 XLPE 绝缘,模拟实际电缆结构试制了屏蔽-绝缘-屏蔽的三明治结构试样,并对其进行高场强电导测试以及空间电荷测量。结果表明:屏蔽层的引入使绝缘内部的电导方式发生了改变。相较于纯 XLPE 绝缘试样,含屏蔽层配合的绝缘试样电荷注入明显增加,其中进口屏蔽料配合的试样绝缘-屏蔽界面对电荷注入的抑制能力较强,电荷注入程度较弱。电荷注入会对空间电荷在绝缘内部的积聚程度产生影响,其中,含国产屏蔽料配合的试样的空间电荷积聚较为严重,含进口屏蔽料配合的试样空间电荷积聚程度较轻。此外,空间电荷测量还需要注意因试样结构的特殊性带来的阻抗不匹配问题。

关键词:半导体屏蔽料;绝缘-屏蔽界面;电导机制;空间电荷;阻抗匹配

中图分类号:TM215;TM247 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.06.006

Influence of semiconductive shielding material on electrical properties of high voltage XLPE cable insulation

XU Shu¹, ZHANG Chengwei¹, ZHANG Fan¹, HU Liguang¹, HOU Shuai²,
HU Chen², ZHAN Yunpeng², ZHU Wenbo², FENG Bin²

(1. Shenzhen Power Supply Bureau, Shenzhen 518000, China;
2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to study the influence of semi-conductive shielding materials on the charge transport behavior in insulation, we selected three different types of semi-conductive shielding materials made in and out of China to cooperate with the same insulation, and trial-produce a shield-insulation-shield sandwich structure sample by simulating the actual cable structure, and conducted high-field conductance tests and space charge measurements. The results show that the introduction of the shielding layer changes the conduction mode inside the insulation. Compared with the pure insulation sample, the charge injection of the insulation sample with shielding layer increases significantly. The insulation-shielding interface of the imported shielding material sample has a stronger ability to inhibit charge injection, and the charge injection degree is weaker. The measurement of the space charge of each sample shows the impact of charge injection on the degree of space charge accumulation inside the insulation, the space charge accumulation of the shielding material sample made in China is more serious, while that of the imported sample is lower. It is needed to concern the impedance mismatch problem caused by the particularity of the sample structure in the measurement of space charge.

Key words: semi-conductive shielding material; insulation-shielding interface; conductance mechanism; space charge; impedance matching

0 引言

电缆用半导体屏蔽料为复合型半导体高分子材料,这类材料以高分子聚合物为基体,将导电填料引入基体内部形成复合材料^[1-3],其基体树脂一般

为聚烯烃树脂,导电填料的主要成分则是碳系填料。半导体屏蔽层在高压绝缘电缆中占据着重要地位,能够避免导体表面因不光滑、气隙、尖端毛刺等原因引起的表面电场不均现象,降低绝缘因局部放电进而发展至击穿的概率^[4-7]。

电缆中的半导体屏蔽层对于绝缘电导及其空间电荷的注入有着不同程度的影响。闫志雨等^[8]采

基金项目:南方电网公司科技项目(SZKJXM20190588);
网科研院“高潜计划”(SEPRI-K206002)

用熔融共混法制备了炭黑/低密度聚乙烯(CB/LDPE)复合介质,测试了LDPE与CB/LDPE复合介质的空间电荷分布以及直流电导特性,结果表明炭黑颗粒的陷阱作用能够对CB/LDPE复合介质的空间电荷和电导特性起改善作用。陈铮铮等^[9]对比研究了不同交、直流电缆用交联聚乙烯的介电性能,发现不同材料的电缆绝缘具有不同的陷阱特性,进而影响其电导特性和空间电荷特性。高凯等^[10]将超导炭黑填充至乙烯-丙烯酸乙酯(EEA)中,通过与填充普通炭黑的进行对比,发现高结构的超导电炭黑聚集体直径较小、粒子间距小,绝缘材料中空间电荷的注入量较小。

高压XLPE电缆绝缘中的电荷输运行为涉及固体介质的强场电导与击穿问题。当电介质处于强电场环境下时,自由载流子迁移速度增大,同时还将引起电荷从电极注入、载流子在介质体内倍增和空间电荷积聚等^[11-13]。电介质在强电场下的电导现象可以从载流子浓度和迁移率两方面进行研究。然而,目前针对绝缘材料的研究分析很少涉及屏蔽层的配合。实际高压绝缘电缆在运行过程中电缆内部绝缘配合有屏蔽层,因此半导体屏蔽材料对电缆绝缘中电荷输运行为的影响研究是有必要的。

本文对含屏蔽层的XLPE绝缘试样进行不同温度不同场强下的电导率测试、空间电荷测量,研究不同半导体屏蔽材料对XLPE绝缘电荷特性的影响。通过了解强电场下电介质中载流子的增加与输运问题,研究在屏蔽层配合下的绝缘电导过程。

1 试验

1.1 绝缘-屏蔽试样制备

选取3种220 kV电压等级的交流屏蔽料,分别命名为屏蔽料1[#]、2[#]、3[#]。其中屏蔽料1[#]和2[#]为国产屏蔽料,屏蔽料3[#]为进口屏蔽料,且屏蔽料3[#]中炭黑颗粒的石墨化程度最高,1[#]次之,2[#]最低。绝缘料为进口交联聚乙烯(XLPE),命名为LEJY。试样制备步骤如下:首先分别将屏蔽料与绝缘料放入平板硫化机中在5 MPa、120℃下预压预热10 min,然后加压至15 MPa后保持压力水冷15 min定形,得到屏蔽层与绝缘层。将屏蔽层裁剪后放置于绝缘层上、下两侧,将试样放入平板硫化机中在170℃、15 MPa下热压15 min,保持压力不变水冷15 min得到最后的三明治结构试样。试样截面的示意图如图1所示,上、下屏蔽层的厚度均为0.15 mm,边长均为10 mm,中间绝缘层厚度为0.20 mm,试样总厚度为0.50 mm。

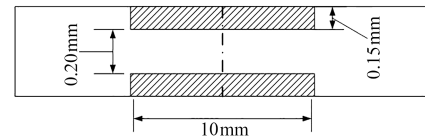


图1 三明治结构试样的截面示意图

Fig.1 Schematic diagram of the cross section of sandwich structure specimen

各试样中绝缘部分相同,因此将各试样的命名分别对应于屏蔽料,标记为试样1[#]、2[#]、3[#],将纯绝缘料LEJY压制的试样设置为空白对照组。将试样放置于烘箱中,在60℃下静置8 h消除试样中的内应力,以备后续试验。

1.2 试验方法

所用屏蔽料虽应用于交流系统,但在直流电压下由电导以及空间电荷所能体现出的屏蔽料对绝缘的电荷注入在交流电场下同样存在,因此通过以下空间电荷测试来研究屏蔽料对绝缘内部电荷注入以及输运机制的影响。

1.2.1 高场强电导测量系统

高场强电导测量系统示意图如图2所示。试验使用三电极系统,测量电极直径为20 mm,采用了Keithley 6514型静电计,测量系统放置于烘箱中,并利用计算机对测量曲线进行采集和保存试验数据。在不同的测试温度与场强下,每组试样记录加压1 h,并根据试验得到的电流曲线选择最终稳定阶段5 min内的数据取平均值,以此作为该温度与场强条件下的稳定电流值。选择不同温度测试时,在烘箱升温达到设定温度后,恒温保持1 h再进行相应的试验操作。对同类型试样分别进行3次测量,同时在每完成1次测试后,需短路20 min以释放试样内部的残余电荷。

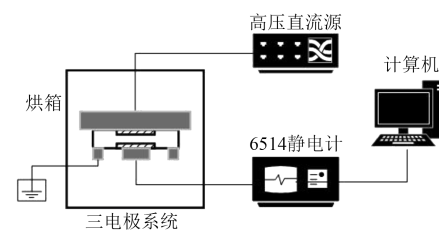


图2 高场强电导测量系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the high-field conductance measurement system

1.2.2 PEA空间电荷测量系统

采用了电声脉冲法(PEA)进行空间电荷测量。脉冲发生器部分同时包含双路信号发生器和纳秒脉冲发生器。脉冲源的工作频率为1~1 000 Hz,输出脉冲电压峰值为0~2 kV,脉宽为20 ns。每种类

型试样分别进行 5 次测量以保证试验结果的可重复性。试验时,对试样施加 25 kV/mm 场强并保持 30 min,分别记录 1、10、20、30 min 时的空间电荷分布波形。去极化阶段,分别记录不同场强下去压 5 min 后的空间电荷分布波形。

2 试验结果

2.1 高场强电导测量结果

图 3 为各试样的电流-温度($I-T$)关系曲线图,电流幅值取对数坐标处理。从图 3 可以看出,在 30℃ 时,含有屏蔽层结构的试样的电流幅值均比纯绝缘对照试样的小。而随着温度的升高,在 45℃ 时,试样 1#、2# 的电流幅值开始超过纯绝缘 LEJY 空白对照组,且该现象在高场强下更为明显。在 20 kV/mm 下,试样 3# 的电流幅值在 60℃ 开始超过 LEJY,而在 75℃ 以及 90℃ 时,这一对比现象更为显

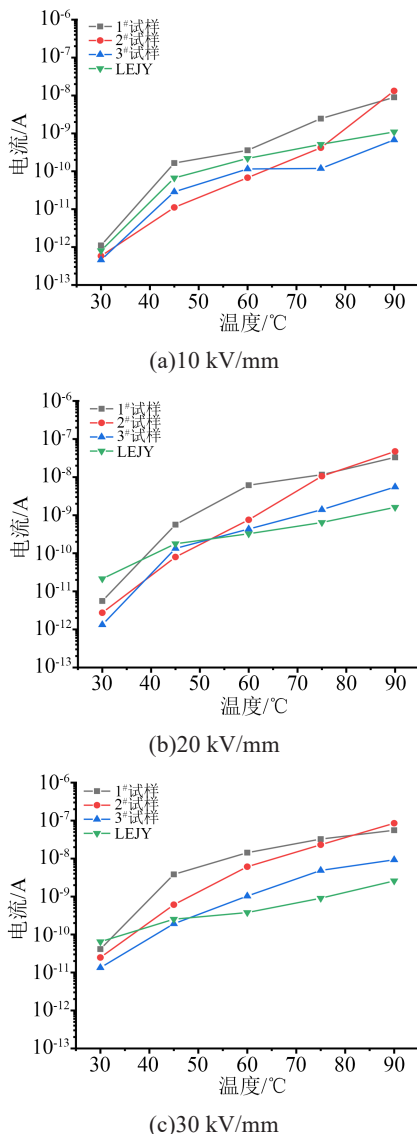


图3 试样的 $I-T$ 关系曲线图

Fig.3 $I-T$ relationship curves of the samples

著。这表明屏蔽层的引入对载流子在绝缘介质中的输运过程产生了影响,特别是半导体屏蔽材料对绝缘内部的电荷注入情况的影响。

从图 3 还可以看出,LEJY 试样在 30~90℃ 的电流幅值数量级变化最小,在场强为 20 kV/mm 和 30 kV/mm 下尤为明显,表明绝缘材料在配合半导体屏蔽料后其内部的导电机理发生了变化。LEJY 在 30~90℃ 的电流幅值仅增加了一个数量级左右,该数量级程度的电流变化与离子电导随温度的变化相符,表明离子电导是影响 XLPE 电荷输运的主要原因^[14]。一般来说,高聚物中既存在着弱束缚离子,包括少量活化势垒较低的杂质以及弱束缚的本征离子引起的热活化跳跃电导,同时又存在着热离子极化^[15]。在引入屏蔽层后,除可能引入弱束缚的杂质离子外,还有可能对电子电导产生影响。含有屏蔽层结构的试样在整个升温过程中,电流幅值跨越了 3~4 个数量级,表明绝缘介质中的导电类型并非单一,可能同时存在电子电导与离子电导作用。

2.2 空间电荷测量结果

图 4 给出了含屏蔽层配合试样 1#、2#、3# 在 25 kV/mm 下的空间电荷密度分布变化。从图 4 可以看出,试样 1# 的空间电荷密度分布曲线存在较为明显的谐波现象,产生该现象的原因在于屏蔽料 1# 作为半导电极与整个测量系统的阻抗不匹配。

分析试样 1#、2#、3# 在不同时间节点的空间电荷密度分布变化情况可知,试样 1# 和 3# 内部并没有太多的空间电荷积累,而试样 2# 绝缘内部的空间电荷曲线基准整体存在着较为明显的抬升,阳极附近的正极性电荷在 1 min 内便已完成了注入,并在后续试验过程中随着时间的增加,正极性电荷逐渐减少。相较于试样 2#,试样 1# 在阳极附近同样存在着正极性电荷注入的现象,但是这一现象并不显著。试样 3# 的电荷注入情况则完全不同,阴极附近出现了异极性电荷积累。极化过程中的异极性电荷通常由材料内部的偶极子极化或可电离杂质在电场作用下电离产生^[16-19]。此外,从图 4 还可以看出,各试样电极电荷峰之间的距离,该距离均已超过绝缘层的厚度,表明产生电极电荷峰的位置处于屏蔽内部而非绝缘内部。其中,试样 3# 的峰间距与实际的绝缘厚度最为接近,表明该电极电荷峰更靠近于绝缘-屏蔽界面。

3 分析与讨论

3.1 含屏蔽层结构试样内部的跳跃电导变化

常见的绝缘高分子介质材料多由非晶体或非晶体与晶体相共存所构成。由原子周期性排列所形成的能带仅能在各个局部区域内存在,电子从一个小晶区的导带迁移到相邻小晶区的导带需要克

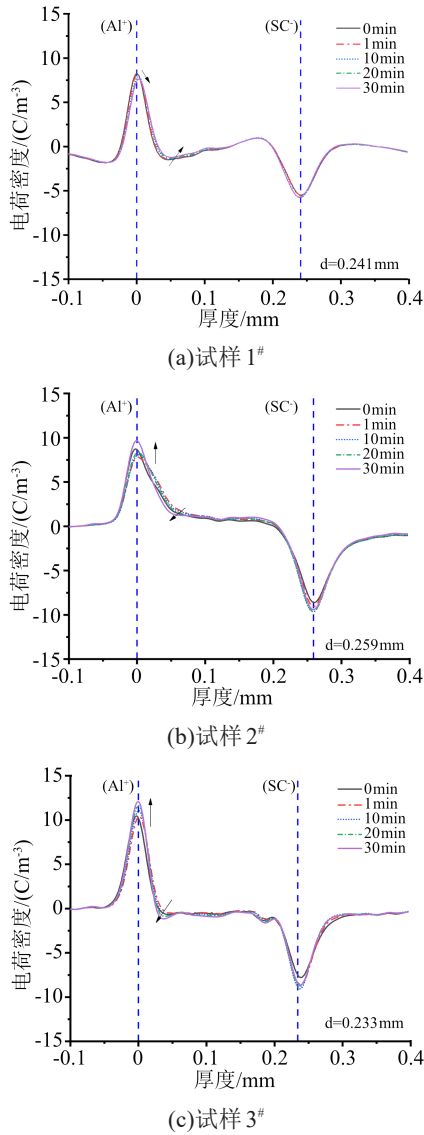


图4 不同试样在25 kV/mm场强下的空间电荷密度分布变化

Fig.4 Variation of space charge density distribution of different samples under 25 kV/mm of field strength

服一定的势垒。局部能带的导带上电子在热振动的作用下,跃过势垒向相邻的微晶带跃迁便形成了电子跳跃电导(γ)^[20-21],其计算公式如式(1)所示。

$$\gamma = \frac{nq^2 a^2 v}{6kT} \exp\left(-\frac{\mu_0}{kT}\right) \quad (1)$$

式(1)中: n 为导电电子浓度, m^{-3} ; q 为载流子电荷量, $q=1.6\times 10^{-19} C$; a 为微晶体间相隔的平均距离, m ; v 为电子热振动的频率, s^{-1} ; k 为玻尔兹曼常数, $k=1.380\ 649\times 10^{-23} J/K$; T 为温度, K ; μ_0 为初始活化能, eV 。

由式(1)可知,在 $\lg\gamma-1/T$ 坐标系下,不同温度、相同场强下的电导率测量值最终应呈直线分布,如图5所示,其斜率为 $-\mu_0/k$ 。可由此对比活化能大小,如图5所示。从图5可以看出,含有屏蔽层配合的绝缘试样活化能高于纯绝缘试样,结合第2节电导

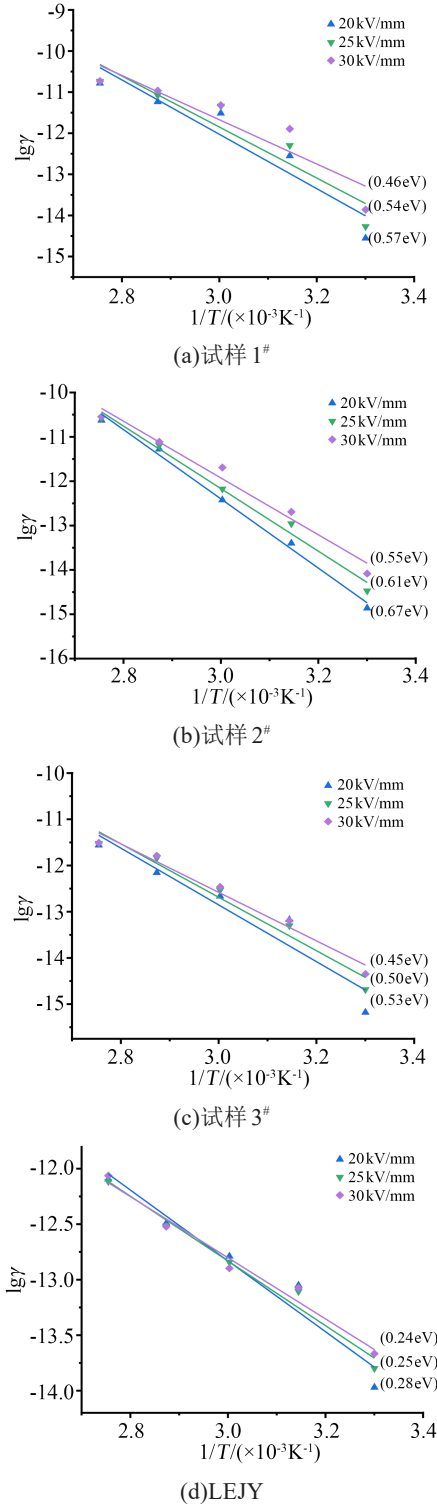


图5 各试样在不同场强下的 $\lg\gamma-1/T$ 曲线
Fig.5 The $\lg\gamma-1/T$ curves of each sample under different field strengths

率数量级的变化可知,引入屏蔽层后绝缘内部的电导机制发生改变,由纯绝缘的离子电导为主发展为电子电导与离子电导共同存在。随着场强的增大,各试样的活化能均逐渐降低,表明各试样的活化能对场强具有依赖性,也表明高场强下发生了肖特基注入过程^[22-24]。此外,试样1#与3#的活化能相差不

大, 试样2#的活化能较高, 表明其电子电导对总电流的贡献程度更大。

3.2 空间电荷阻抗匹配问题与去极化过程

由于添加的屏蔽层与整个测量系统的阻抗并不匹配, 试样的空间电荷分布曲线会与正常测试时的曲线产生较大差异, 具体差异可以体现为试样中间区域的基线并不处于零甚至发生倾斜, 亦或是整体测量曲线存在较大的谐波影响, 如图4中试样1#的测量结果所示。在电声脉冲法中, 电荷运动产生声脉冲在包含试样在内的整个系统装置中需要经历多个界面的传播^[25]。由于本研究的PEA空间电荷测量系统设计时为保证阻抗匹配, 针对的测试材料仅为聚乙烯材料, 而实测材料包含了屏蔽层, 当含屏蔽层配合的绝缘试样应用于电声脉冲法测量装置时, 所得电信号必定会发生畸变。

图6为各试样在较低场强(5 kV/mm)下的瞬时空间电荷密度分布。

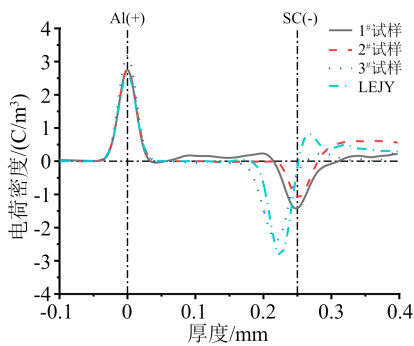
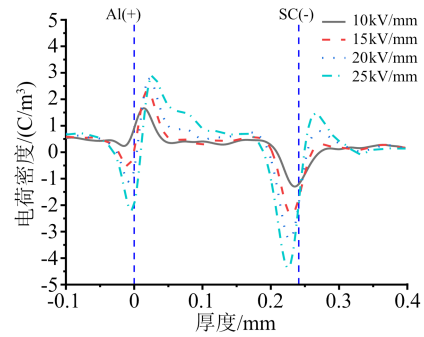


图6 各试样在5 kV/mm场强下的瞬时空间电荷分布

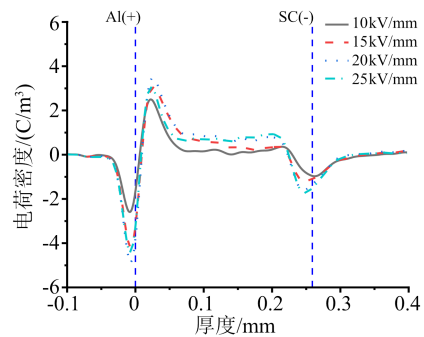
Fig.6 Instantaneous space charge density distribution of each sample under 5 kV/mm of field strength

从图6可以看出, 相比LEJY, 试样1#、2#在半导体层界面处的电荷密度峰值有明显的下降。由于使用的绝缘片均相同, 暂不考虑声信号在介质内部的色散和衰减过程, 造成该现象的原因并不是该界面处的电极电荷密度真实降低, 而是界面处所配合的屏蔽层其声阻抗与交联聚乙烯绝缘的声阻抗差异较大, 传递系数减小, 从而使得该界面处产生的声波信号幅值降低。而试样3#在半导体层界面处的电荷密度峰值下降程度较小, 表明其配合的屏蔽层声阻抗与交联聚乙烯绝缘的声阻抗相近。声阻抗同样也被称为材料的波阻抗, 属于力学阻抗。声阻抗反映了材料的弹性模量^[26], 该数值相近在一定程度上说明屏蔽料3#与绝缘料之间力学性能相近。

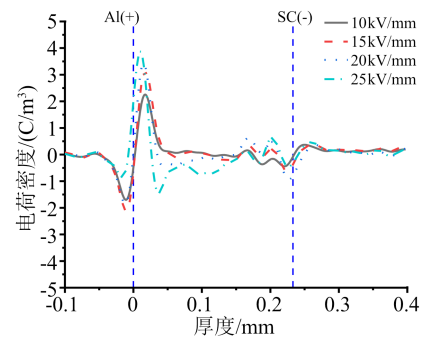
图7是各试样在不同场强下去极化5 min后的空间电荷密度分布情况。从图7可以看出, 各试样的绝缘-屏蔽界面处均存在阳极的正负峰, 而仅有试样1#存在明显的阴极正负峰, 试样2#、3#尚不明显。同时, 试样1#、2#内部存在着较为明显的空间电



(a)1#试样



(b)2#试样



(c)3#试样

图7 各试样去极化5min后的空间电荷分布

Fig.7 Space charge distribution of each sample after depolarization for 5 min

荷积聚, 在去极化阶段空间电荷并不能快速消散, 这与各试样在极化阶段的空间电荷密度变化趋势一致。在本试验条件下该现象与不同屏蔽料向绝缘中的电荷注入有关, 并不会因为屏蔽料的不同而改变绝缘料的陷阱特性, 试验结果表明了试样1#、2#的屏蔽层作为半导体对绝缘的电荷注入较为严重, 试样3#的屏蔽层对于绝缘内部的电荷注入抑制能力要优于试样1#、2#。

由于选用半导体屏蔽料中的填料成分并不一致, 3#屏蔽料的石墨化程度更高, 其内部的炭黑颗粒表面的无序程度较低, 炭黑颗粒内部的微晶结构表现出平面化。与绝缘部分接触的屏蔽料表面的场强较低, 高场强的延伸范围更小, 电荷注入绝缘内部的程度更低^[27-28]。而试样2#屏蔽料中炭黑颗粒的无序程度较高, 对于电荷注入的抑制能力较弱, 导

致空间电荷积聚较为严重。

4 结论

(1)纯绝缘的电导与含屏蔽层配合的绝缘电导存在着较大的差异,该差异本质上属于两种不同电极系统对载流子的增加与输运产生的不同影响所致。屏蔽层的引入导致电导机制发生改变,其中纯绝缘主要以离子电导为主,而含屏蔽层试样则存在着电子电导与离子电导的共同作用。

(2)不同试样活化能的差异体现了以不同载流子为对象的跳跃电导类型的变化,该变化能够体现不同半导体屏蔽材料对绝缘内部电荷注入程度影响的差异。相较于国产屏蔽料,含进口屏蔽料配合的试样活化能最低,表明了其电子电导对总电流的贡献程度更低,屏蔽材料抑制电荷注入的能力更强。

(3)以PEA为基础的含屏蔽层配合绝缘试样的空间电荷测量存在着较为明显的阻抗不匹配问题,需要注意由此对试验本身结果分析带来的影响。各试样空间电荷的密度分布较为直观地展现了空间电荷在绝缘内部的积聚情况,其中含进口屏蔽料配合的绝缘试样的空间电荷积聚程度较轻,而含国产屏蔽料配合的绝缘试样空间电荷积聚程度较高,表明由进口屏蔽料配合形成的绝缘-屏蔽界面的电荷注入程度更低。

参考文献:

- [1] 孙博阳,陈哲,谢傲,等.高碳黑含量聚丙烯电力电缆屏蔽材料[J].高电压技术,2020,46(5):1625-1632.
- [2] 李忠磊,赵宇彤,韩涛,等.高压电缆半导体屏蔽材料研究进展与展望[J].电工技术学报,2022,37(9):2341-2354.
- [3] 欧阳本红,华明,邓显波.高压交联电缆材料及工艺发展综述[J].绝缘材料,2016,49(7):1-6,13.
- [4] 方也.新型中高压半导体屏蔽料的制备与性能研究[D].北京:北京化工大学,2012.
- [5] WEI Y, HAN W, LI G C, et al. Research progress of semiconductive shielding layer of HVDC cable[J]. High Voltage, 2020, 5(1): 1-6.
- [6] LI W, YAN H D, ZHOU Y, et al. Supersmooth semiconductive shielding materials use for XLPE HVDC cables[C]//2017 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. Xi'an, China: IEEE,2017:447-451.
- [7] ZHANG W, QIULIN M U, MAN X U. Effects of DC cable shielding materials on space charge in XLPE insulation[J]. Southern Power System Technology,2015,9(10):19-25.
- [8] 闫志雨,赵洪,韩宝忠,等.CB/LDPE复合介质抑制空间电荷机制及电导特性对电场分布的影响[J].中国电机工程学报,2017,37(14):4254-4264,4305.
- [9] 陈铮铮,赵健康,张良,等.高压直流电缆用交联聚乙烯介电性能的对比研究[J].绝缘材料,2017,50(9):56-61,67.
- [10] 高凯,曾浩,朱智恩,等.超导电炭黑复合半导体屏蔽材料对直流电缆绝缘材料空间电荷注入的影响[J].绝缘材料,2018,51

(9):6-10.

- [11] 李国倡,魏艳慧,雷清泉,等.高压电缆半导体屏蔽料关键问题及研究进展[J].中国电机工程学报,2022,42(4):1271-1285.
- [12] SHUKLA N, THAKUR A K, SHUKLA A, et al. Ion conduction mechanism in solid polymer electrolyte: An applicability of almond-west formalism[J]. International Journal Electrochemical Science,2014,9:7644-7659.
- [13] ZHANG G J, LI W D, LIU Z, et al. Research progress on dielectric functionally graded materials for electrical insulation[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering,2017, 37(14):4232-4245.
- [14] 李大伟.聚乙烯的高场电导机制和空间电荷输运行为研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2021.
- [15] 雷清泉,李盛涛.关于工程电介质中几个经常涉及的问题与思考[J].高电压技术,2015,41(8):2473-2480.
- [16] 朱文卫,王彦峰,范星辉,等.热循环处理下电缆绝缘空间电荷特性研究[J].广东电力,2021,34(8):94-102.
- [17] 田冀煊,周远翔.聚乙烯载流子迁移率与空间电荷包形成机理[J].高电压技术,2010,36(12):2882-2888.
- [18] MIZUTANIM T. Behavior of charge carriers near metal/polymer interface[C]//Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2005.
- [19] NEAGU E, DIAS C. Charge injection/extraction at a metal-dielectric interface: Experimental validation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2009,25(1):15-22.
- [20] LI D, ZHOU L, WANG X, et al. Effect of crystallinity of polyethylene with different densities on breakdown strength and conductance property[J]. Materials,2019,12(11):1746.
- [21] 郭文敏.聚乙烯/无机填料复合材料非线性电导特性及机理研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2010.
- [22] 王霞,王陈诚,孙晓彤,等.高温高场强下XLPE及其纳米复合材料电导机制转变的实验研究[J].中国电机工程学报,2016,36(7):2008-2017.
- [23] ZHOU Y X, WANG N H, YAN P, et al. Annealing effect on DC conduction in polyethylene films[J]. Journal of electrostatics, 2003,57(3-4):381-388.
- [24] MONTANARI G C, LAURENT C, TEYSSEDRE G, et al. From LDPE to XLPE: Investigating the change of electrical properties. Part I. Space charge, conduction and lifetime[J]. IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation,2005,12(3):438-446.
- [25] 高田达雄.电声脉冲法测量空间电荷的原理与方法[M].西安:西安交通大学出版社,1994.
- [26] 谭华.实验冲击波物理导引[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [27] 郭巍,吴行,郑振忠,等.导电炭黑/天然橡胶力学和导电性能研究[J].绝缘材料,2011,44(1):58-60,65.
- [28] 武洁,樊林祺,屠幼萍,等.CB/LDPE纳米复合材料的空间电荷抑制特性[J].绝缘材料,2020,53(4):27-32.

收稿日期:2022-06-08 修回日期:2022-07-07

作者简介:徐曙(1986-),男(汉族),湖北武汉人,高级工程师,主要从事输电线路、地下电缆隧道和综合管廊的运维管理以及输电数字化建设应用的研究工作;通信作者:侯帅(1988-),女(汉族),广东广州人,高级工程师,主要从事交、直流电缆绝缘技术的研究。