

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.05.008

直流 XLPE 电缆绝缘中空间电荷的抑制方法综述

李欢, 徐磊, 刘涛, 杨章勇

(陕西理工大学电气工程学院, 陕西 汉中 723001)

摘要:交联聚乙烯(XLPE)因其优异的介电、理化性能而被广泛应用于电缆绝缘领域。在电缆的服役过程中,电缆绝缘内部会积聚空间电荷,严重时可引发电场畸变,导致电缆击穿事故发生。对于直流 XLPE 电缆,空间电荷的积聚及影响更加不容忽视。针对直流 XLPE 电缆绝缘中产生的空间电荷积聚效应,目前学界主要采用共混改性、聚合物链段接枝极性基团、纳米掺杂改性及制备高纯净绝缘料等方法来进行控制,改性后的直流 XLPE 电缆绝缘对空间电荷产生的抑制效果均有所提升。文中首先对上述直流 XLPE 电缆绝缘中空间电荷的抑制方法进行综述,介绍其抑制原理以及相应的抑制效果,然后对比总结不同抑制空间电荷方法的优缺点,最后对未来直流 XLPE 电缆绝缘中空间电荷抑制方法的研究发展作出展望。

关键词:直流电缆;交联聚乙烯(XLPE);空间电荷;电场畸变;抑制方法;高纯净绝缘料

中图分类号:TM852

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)05-0054-09

0 引言

近年来,国内对电力需求量急剧增加,高压直流电缆的投入使用可以加快高压、超高压、远距离、大容量电力网络的构建^[1]。2012年至2015年,中国高压直流输电线路完成了从 ± 160 kV到 ± 320 kV的跳跃,到目前 ± 500 kV直流电缆的研制,中国的高压直流输电能力更进一步^[2]。交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电力电缆由于电气性能和理化性能优良,传输容量大,结构轻便,附件接头制作相对简单,安装敷设方便,不受高度落差限制等优点,逐渐替代架空线、充油电缆和乙丙橡胶电缆^[3]。但是,直流 XLPE 绝缘电缆在输电过程中会有空间电荷持续积聚,电缆绝缘中由于空间电荷的存在,易引发电缆内部局部场强畸变,导致电缆绝缘击穿。即使短时间内未造成明显的损害,长此以往也会为电缆绝缘的寿命缩短埋下隐患,如何有效抑制空间电荷产生是目前亟待解决的问题之一^[4]。针对空间电荷产生的问题,抑制的主要方法有:接枝、共混和纳米掺杂等^[5]。有效抑制空间电荷在电缆中积聚可以延长电缆寿命,减少更换电缆的频率,同时能够节约资源。因此,如何有效抑制空间电荷在电缆中积聚更具有研究意义。

文中将针对多种直流 XLPE 电缆绝缘中抑制空间电荷的方法进行综述,在此基础上结合实际工程应用对其抑制原理和抑制效果进行介绍,并将各种直流 XLPE 空间电荷的抑制方法的优劣性进行对比

总结,最后展望其未来的研究发展。

1 直流电缆中空间电荷的产生及危害

1.1 空间电荷的产生方式

电缆绝缘中空间电荷问题于1978年首次出现在日本海底电缆工程中,因空间电荷积聚过多导致电缆绝缘被击穿,引发电力事故^[6]。因此,国内外学者对直流电缆的空间电荷分布特性及抑制方法进行了大量研究。研究表明,空间电荷通常指入陷后存在于聚合物表面或内部的电荷,或因极化不均匀产生的界面极化电荷。空间电荷主要来自3个方面:其一是因空间不均匀产生界面极化电荷,如偶极子极化、界面极化等双层介质的介电性能不同而在界面处形成电荷层。其二是通过外施电场作用,从电极处注入聚合物材料内部^[7]。高场强下,电子和空穴通过 Schottky 效应和隧道效应从电极注入,并逐渐向绝缘材料内部移动^[8]。其三是绝缘内部所含杂质、离子自身电离产生的电荷。XLPE 绝缘在投入运行前存在大量 α -甲基苯乙烯、枯基醇等交联副产物,而交联副产物属极性基团,在电场作用下易发生电离导致空间电荷积聚^[9]。另外, XLPE 交联过程中,因交联不完全产生的支链、杂质等都可能产生陷阱电荷。再者,电缆运行过程中,受热老化影响,绝缘内部会有如羰基等极性基团产生,易在电场作用下发生解离,导致绝缘内部异极性电荷积聚^[10-11]。

XLPE 电缆中积聚的空间电荷类型分为同极性积聚和异极性积聚。同极性空间电荷一般由电极注入,积聚于 XLPE 内部,而杂质、离子、断链等物质

收稿日期:2021-03-19;修回日期:2021-05-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877016)

的解离是异极性空间电荷的产生方式^[12]。同极性电荷的积聚有助于抑制空间电荷注入,而异极性电荷的积聚会改变 XLPE 电缆绝缘的场强,促进空间电荷注入^[13]。XLPE 在未完全交联状态下,同、异极性空间电荷均出现在试样中,而完全交联后,试样内部只有异极性空间电荷积聚。结果表明,交联过程中产生的不饱和键可能是同极性电荷来源,而 XLPE 中交联剂及交联时产生的副产物则是异极性空间电荷来源^[14]。在以往研究中发现,低场强条件下, XLPE 绝缘内部往往表现为同极性空间电荷积聚;高场强条件下,则变为异极性电荷积聚。不同场强条件下,空间电荷积聚类型的主导地位不同。低场强条件下,同极性电荷注入含量大于解离出的异极性电荷含量;而在高场强条件下,杂质、化学物质、交联副产物等解离出的异极性电荷则为电荷积聚的主要产生方式^[9,15-16]。

1.2 空间电荷的危害

直流输电过程中,电缆内部易出现空间电荷效应,引发局部场强畸变,畸变场强甚至可达外施电场的 8 倍,导致电缆绝缘在额定电压下即发生击穿,引发严重事故^[17]。

聚合物内空间电荷积聚现象导致材料内的电场发生畸变,易被击穿^[18]。XLPE 电-热老化 DMM (Dissado-Montanari-Mazzanti) 空间电荷模型因其合理性被众多学者认同,其认为空间电荷的存在会造成聚合物老化,空间电荷积聚导致聚合物内部场强发生改变,从而加快聚合物劣化速度直至击穿现象发生。在电缆运行过程中,电、热等老化形式的参与使空间电荷更易在电缆内部积聚。整体表现为,随着老化时间增加, XLPE 中空间电荷的注入与积聚逐渐向绝缘内部迁移,同时引发内部场强畸变。XLPE 为半结晶聚合物,在热老化条件下, XLPE 分子链存在较活跃的链段运动,链间的自由体积受链段运动影响而扩大,当电子在自由体积中运动时便会获得更大的电子能,碰撞至介质内的分子链后,使其更易发生断裂,造成材料损耗过快^[19-20]。在电缆实际运行过程中, XLPE 绝缘距缆芯位置不同导致热老化程度不同,因此空间电荷积聚程度也不同。近缆芯侧因受热老化更严重,电导率会增高,引发电场反转,造成热损耗增加,使电缆有热击穿的风险^[21-22]。

另外,空间电荷于绝缘内部积聚过多也会对电荷输运特性造成一定影响,从而损害绝缘材料。聚合物中,电子迁移的路径为聚合物分子链间的自由体积,空穴的传导主要表现为链内特性^[23]。当聚合物中同时积聚的空穴和电子在化学阶段发生复合

时,将会引发电致发光,并产生紫外光辐射,导致聚合物的分子链断链,阻碍电荷输运^[24]。

最后, XLPE 绝缘中局部电场强度的大小会受到空间电荷密度影响而改变。当 XLPE 绝缘中电荷密度过高时,局部场强将高于 XLPE 的阈值场强,导致初始电击穿发生,空间电荷的积聚最终会使绝缘在低场强下也发生老化,生成绝缘缺陷^[25]。

2 空间电荷的抑制方法

2.1 接枝改性方法

运用自由基向大分子链转移原理来实现接枝是当前工业生产最常使用的方法。高压聚乙烯含有自由基向大分子转移过程,因此所含支链数较多^[26]。据链转移原理显示,接枝部位可以为另一单元体的主链或侧链。乙烯基大分子接枝过程如图 1 所示。接枝是化学改性的方法之一,其原理在于极性化合物中含有极性基团,将其与聚合物大分子链相接后,可以使聚合物中深陷阱数量提升,达到抑制电荷积聚的效果。

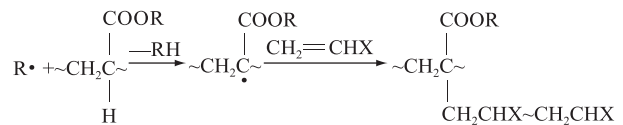


图 1 乙烯基大分子接枝示意

Fig.1 Schematic diagram of vinyl macromolecules graft

日本 Viscas 企业在 ±500 kV 的直流 XLPE 绝缘材料中采用接枝的方式引入极性基团,改善电缆绝缘陷阱分布的同时抑制空间电荷积聚^[27]。为改善 XLPE 的直流介电性能,很多学者尝试在 XLPE 分子链上接枝带有极性基团的物质,并对接枝后的介质材料进行电声脉冲法 (pulsed electro-acoustic, PEA) 测试。经过不断研究后发现,在 XLPE 分子链上接枝极性基团能够有效抑制空间电荷的积聚。将氯乙酸烯丙脂 (allyl chloroacetate, CAAE)^[28]、顺丁烯二酸酐 (maleic anhydride, MAH)^[29] 等接枝在 XLPE 大分子链上制成介质材料,经 PEA 测试后发现,接入极性基团后的介质材料,试样两极及内部的空间电荷积聚明显减少。XLPE 与 XLPE-g-CAA E 加压极化下的空间电荷分布曲线^[28]如图 2 所示,可以看出,1.5% 的 CAAE 接入 XLPE 后,抑制空间电荷的能力较纯 XLPE 电缆绝缘得到很大提升。

接枝改性通过接枝不同类型的极性基团达到调控 XLPE 陷阱特性的目的,从而改善 XLPE 内部的空间电荷积聚。极性基团的引入会使更多的深陷阱出现在试样中,注入的电荷因为深陷阱数量增

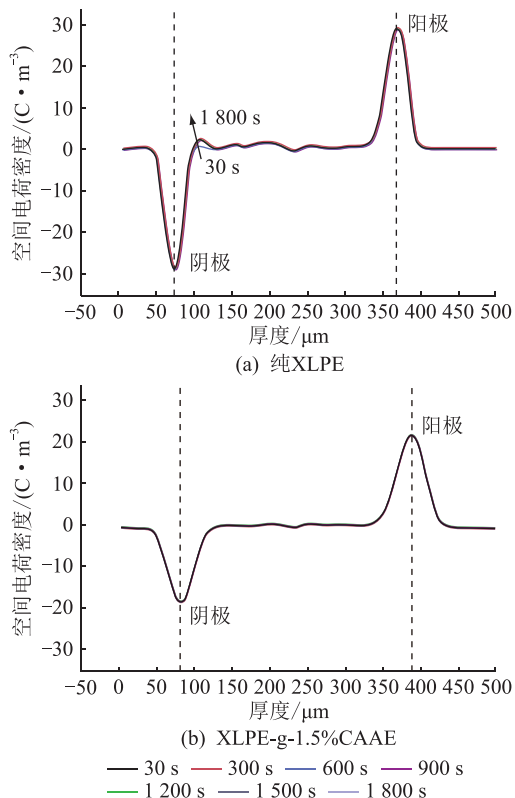


图2 XLPE与XLPE-g-CAAE加压极化的空间电荷分布

Fig.2 Spatial charge distribution of XLPE and XLPE-g-CAAE under pressure polarization

加而被大量捕获,空间电荷在绝缘内部积聚减少,从而提升了XLPE抑制空间电荷的能力。MAH接枝到低密度聚乙烯(low-density polyethylene, LDPE)后,使用PEA进行空间电荷短路测试得出,试样内空间电荷含量随着MAH含量的增加而减少^[30]。

但是极性基团接入深陷阱是否对电缆绝缘性能真正有利仍需验证。另外,接枝不充分所带来的杂质问题也是接枝改性面临的一大困难,因接枝过程中的工艺问题造成接枝不完全所带来的杂质问题不利于电缆绝缘正常工作。如何保证极性官能团充分接枝于聚合物分子链也是未来需要考虑的问题。

2.2 共混改性方法

高分子混合物根据混合组份的不同可分为3类,分别是:高分子-增塑剂混合物、高分子-填充剂混合物和高分子-高分子混合物^[26]。通常认为的共混便是上述第3类。由于高分子-高分子混合物的黏度很大,导致聚合物聚集态结构发生变化。聚乙烯经过交联后,虽然部分性能得到提升,但是交联过程中所产生交联副产物及脱气处理所带来的杂质会对电缆绝缘的寿命产生一定影响,并且经过交联后,XLPE并不满足环保回收的要求。采用共混的方法对聚乙烯进行改性处理,使聚乙烯在保留机

械性能、提升热性能的同时满足在无交联过程中环保回收的要求,另一方面对空间电荷积聚也产生了一定的抑制能力。

为使共混后产物的性能达到最佳,选择何种共混物以及共混含量的控制一直都是学者们研究的重点。文献[31]将不同含量茂金属聚乙烯(metallocene polyethylene, MPE)与LDPE做共混处理,如图3所示,1%MPE与LDPE共混抑制空间电荷的能力最佳,当MPE含量为5%时,空间的电荷积聚程度大于纯LDPE。

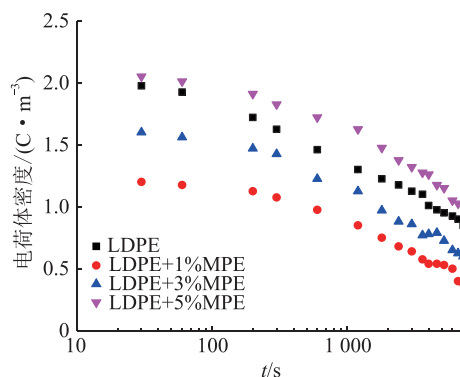


图3 极化场强50 kV/mm作用2 h后短路30 s时试样的去极化特性

Fig.3 Depolarization characteristic in samples first applied stress of 50 kV/mm for 2 h and then shorted circuit for 30 s

上述结果表明,MPE作为成核剂能减小LDPE的结晶尺寸,改善结晶度,从而较大提升电缆绝缘抑制空间电荷的能力。但是当共混物含量过高后,LDPE体内的不完整支链结构受到MPE中高支链的影响,形成新的陷阱,导致电荷积聚。也从侧面反映出介质是否可以有效抑制空间电荷的积聚与共混物的含量有一定关系。文献[32]将纳米二氧化钛(TiO_2)与XLPE熔融共混制得复合材料,并对XLPE和XLPE/ TiO_2 进行PEA测试。研究得出,XLPE/ TiO_2 拥有更佳的抑制空间电荷积聚能力,由于 TiO_2 与XLPE之间形成交互区的同时聚合物的聚集态结构也发生改变,导致更高能级的深陷阱出现在复合介质内,明显抑制了电荷的注入。

纳米炭黑(carbon black, CB)和LDPE熔融共混后,相较于纯LDPE试样,在抑制空间电荷积聚方面得到了显著改善,如图4所示^[33],纳米CB含量为0.03%时,试样空间电荷抑制能力最佳。阳极附近异极性空间电荷较其他试样积累量更少,阴极附近几乎没有电荷积聚。引入纳米CB能使聚合物内部深陷阱密度提高,从而提升试样捕获空间电荷的能力。

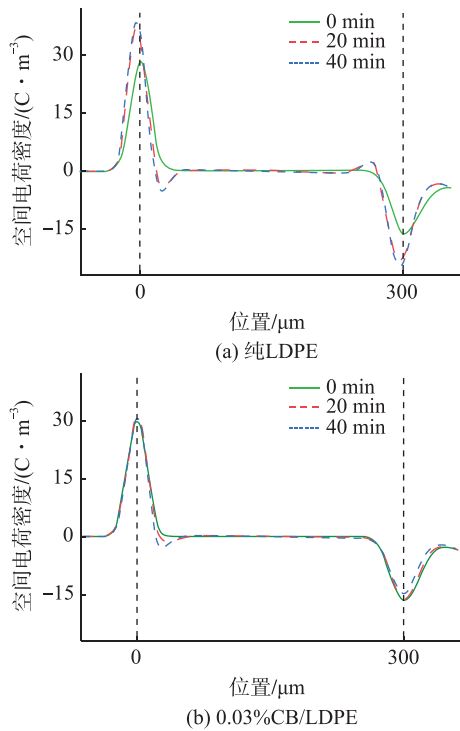


图4 各试样在加压极化过程中的空间电荷分布
Fig.4 The spatial charge distribution of each sample during pressurized polarization

经过不断研究后,证明了共混改性方法的可行性。一方面,共混改性使共混物的结晶度发生改变;另一方面,结晶过程中形成的浅陷阱使聚合物中空间电荷分布得到改善。但是共混物之间的相容性问题会造成聚合物缺陷增多,导致击穿场强下降。目前聚乙烯的共混改性方法虽然取得一定进展,但是仍然处于探索阶段。

2.3 纳米掺杂改性方法

掺杂无机纳米粒子对抑制 XLPE 绝缘材料中的空间电荷积聚同样是一种较为有效的方法。纳米粒子表面能较大,引入聚合物后会与其产生界面,通过对界面进行有效调控,能提升聚合物的介电性能。近年来,学者们尝试在 LDPE 中加入 TiO_2 、氧化镁 (MgO)、二氧化硅 (SiO_2)、石墨烯等纳米粒子^[34-37],再经交联后制成 XLPE,使其介电性能得到改善。

纳米掺杂改性会在聚合物能带中形成以陷阱为中心的局域态结构,引入更高能级的深陷阱,使聚合物内部陷阱特性发生变化,达到阻碍电荷输运特性的目的,从而提升聚合物的空间电荷抑制能力。已有研究表明,改变掺杂纳米颗粒的种类、配比等都能对复合介质的空间电荷特性产生一定影响。文献[38]将 MgO 纳米颗粒与 LDPE 共混,制得 MgO/LDPE 复合材料,并对复合材料进行空间电荷

测试。如图5所示,当纳米 MgO 填料含量为4%时,空间电荷注入得到有效的抑制。

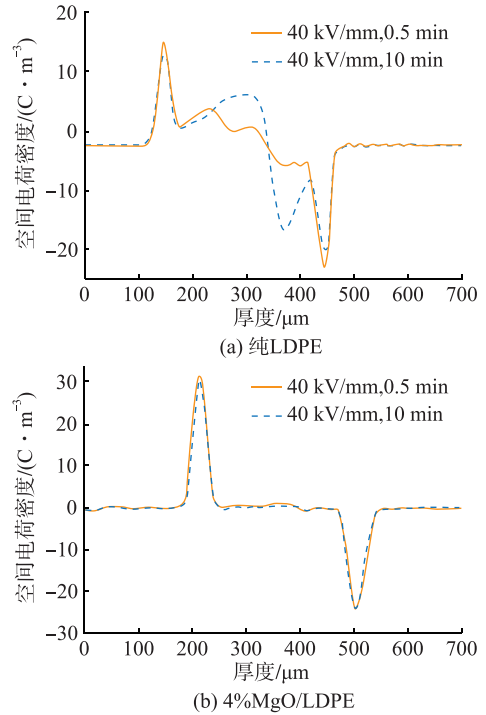


图5 不同填量复合介质加压极化过程中空间电荷分布
Fig.5 Spatial charge distribution in the pressurized polarization process of composite media with different loads

基于以纳米粒子为球状中心,由内而外依次为键合区、过渡区的交互区模型,纳米掺杂能改变交互区中的陷阱特性,改善空间电荷分布^[39-40]。 MgO 与聚乙烯形成的交互区带有负电,导致该电层附近的阴极电场强度减弱,电子注入势垒提升,从而使空间电荷难以注入。通过数学计算得出,具有高介电常数的纳米粒子由感应引起的陷阱深度通常为 $1\sim 5\text{ eV}$, 0.1 eV 陷阱位垒作用范围为 $50\sim 1\ 000\text{ \AA}$ 。相较于化学缺陷永久偶极矩所引起的 0.45 eV 的陷阱深度及 0.1 eV 陷阱位垒仅 10 \AA 的作用范围^[41],由感应引起的陷阱深度及陷阱位垒在作用范围上有很大提升。

21 世纪初期,日本在以“Hokkaido-Honshu DC link line”命名,电压等级为 $\pm 250\text{ kV}$ 的工程应用中,采用 XLPE/MgO 纳米复合材料为电缆绝缘层,在实际运行过程中,空间电荷特性得到较好的提升^[42]。另有研究表明,将纳米钛酸钡 (BaTiO_3) 掺杂进聚乙烯可以有效减少空间电荷积聚,且此研究成果已经在 $\pm 500\text{ kV}$ 高压直流电缆绝缘中应用^[43]。

近年来,新型纳米粒子逐渐被学者们加入到聚合物中,如纳米石墨烯、纳米蒙脱土 (nano-montmorillonite, MMT) 等,以求改变聚合物的电荷输运特

性^[44]。将不同含量的纳米石墨烯掺入 XLPE 中,制成 XLPE/纳米石墨烯。结果表明,少量石墨烯掺杂于 XLPE 中,可以有效增大陷阱能级,增大 XLPE 分子间作用力,进一步提升 XLPE 的击穿性能^[45]。文献[46]将纳米氧化锌(ZnO)添加进 LDPE 内,制成纳米 ZnO/LDPE 复合材料,并对试样进行 PEA 加压测试。如图 6 所示^[46],将纳米 ZnO 掺入 LDPE 后,纳米 ZnO/LDPE 复合材料抑制空间电荷的能力较 LDPE 有了明显提升。

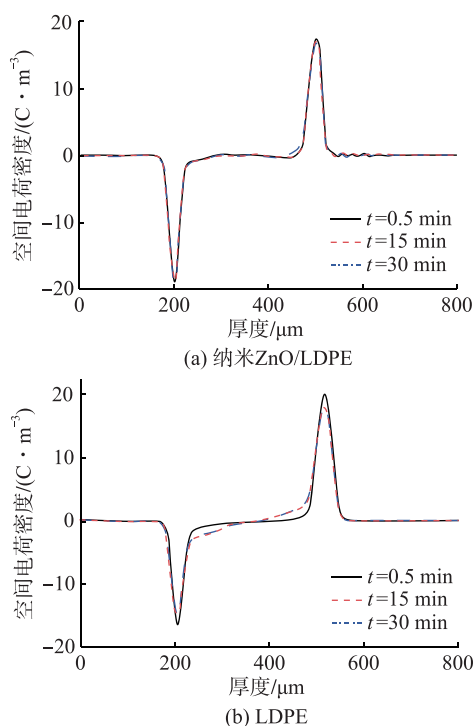


图 6 30 kV/mm 电场下纳米 ZnO/LDPE 复合材料和 LDPE 空间电荷密度与加压时间的关系

Fig.6 The relationship between the space charge density of nano-ZnO/LDPE composites and LDPE under an electric field of 30 kV/mm and the pressing time

纳米掺杂技术在抑制电缆绝缘空间电荷方面取得了一定的进展,但是掺杂物种类及掺杂物含量的不同使复合材料所表现出的空间电荷抑制效果略有差异,掺杂物的表面态、类型及含量等对交互区的影响较大,变量过多使得交互区的结构更复杂,研究更困难。界面交互区是纳米掺杂研究的重心,多因素的改变对界面交互区性质、结构的影响依旧是今后研究的重点。

2.4 采用高纯净绝缘料方法

关于直流电缆绝缘材料空间电荷抑制研究,高纯净绝缘材料概念的提出为学者们指明了新的道路^[3,5]。电缆基料 LDPE 经硅烷交联、过氧化物交联等方法实现由线性分子链到三维空间网状的结构转化,最终成为 XLPE 绝缘材料。上述抑制方法如

共混改性、接枝改性等均是在高纯净电缆基料的基础上进行改性研究,故电缆基料洁净度的重要性可见一斑。在对直流 XLPE 绝缘和交流 XLPE 绝缘进行直流电导和 PEA 加压试验后发现,直流 XLPE 绝缘的耐压等级更高,内部空间电荷含量更少,这是由于直流 XLPE 中所含添加剂更少,洁净度更高,故绝缘性能更好^[47]。

影响 XLPE 纯净度的因素主要分为 3 部分。其一,电缆基料生产过程中产生的羰基、双键等不饱和基团。不饱和基团易在高场强下发生解离,引发空间电荷产生。对于电缆基料中不饱和基团的产生现象,工业上常采用优化生产工艺的方式尽量减少其含量。其二,生产运输过程中所接触到的杂质,易引发局部场强畸变,导致电缆绝缘击穿现象的发生。关于杂质的产生,工业上主要采用更加洁净的生产线来控制。其三,交联过程中如抗氧化剂、交联剂等添加剂的加入。添加剂的含量是超净绝缘材料生产的难点之一。其中,交联过程中所产生的交联副产物解离是产生异极性空间电荷的来源之一,学者们在交联副产物对电缆绝缘材料性能影响方面研究较多^[7,10,44]。针对交联副产物的产生,常采用脱气的方式减少交联副产物的含量。但是对于较厚的绝缘层,以±500 kV 直流电缆为例,其绝缘厚度近 30 mm,采用脱气方式所达效果不尽人意,因此需要研究新的添加剂来减少交联过程中副产物的产出,进一步减少空间电荷的产生。而北欧化工通过调整添加剂参数,有效降低了±525 kV 直流绝缘基料的交联副产物浓度,同时缩短了电缆生产过程中的脱气时间^[48]。

目前我国自主生产的高纯净绝缘基料无法满足高压直流电缆绝缘材料的使用标准。一方面,我国对高纯净电缆基料研究较少,起步较晚,使得国内高纯净电缆基料供应匮乏。另一方面,生产高纯净电缆基料的核心技术被国外垄断,国内高纯净直流电缆用料长期依赖进口。长此以往,对我国高压直流电缆绝缘材料的开发造成很大的制约。所以,实现高纯净绝缘料的自主研究和生产对我国高压、超高压的战略部署具有重要意义。

2.5 不同抑制方法的对比总结

不同空间电荷抑制方法的优缺点对比总结如下。

(1) 共混改性。优势为工作温度及电压得到改善;共混物于聚合物中引入深陷阱,限制空间电荷注入;制作简单,取消交联过程的同时解决 XLPE 无法循环利用问题;设计性多元化,避免单一基体性

能不足。缺点为机械性能不足,无法完全满足电缆运行条件;材料难以达到分子层面均匀共混,相容性问题将会导致聚合物缺陷增多,共混材料击穿场强有所下降;长期服役特性空白较多。

(2) 接枝改性。优势为通过接入不同类型极性基团,提升电学性能;深陷阱的引入使空间电荷注入减少。缺点为接枝改性中有机基团所调控的陷阱特性无法被证实全面有利于直流绝缘性能;接枝不完全会导致多余接枝物成为“杂质”,影响聚合物电场分布;接枝导致聚合物电导率活化能增大,不利于直流电场下的电场分布。

(3) 纳米掺杂改性。优势为能够抑制不同电场下的空间电荷积聚;一定程度上可以提高聚合物的直流电导率温度特性、直流击穿强度等介电性能。缺点为相容性问题一直存在于极性颗粒与非极性有机物之间,易造成团聚现象发生;不同种类的纳米掺杂所得结果不同,差异性较大。

(4) 采用高纯净绝缘材料。优势为电缆基料制备过程中较少的引入缺陷、交联副产物等杂质,有利于抑制空间电荷的产生。缺点为纯净电缆基料的使用使电缆内部深陷阱含量减少,直流场下会注入少量同极性空间电荷。

3 结论与展望

文中以直流 XLPE 电缆为研究对象,研究了其服役过程中空间电荷的积聚原因、危害及抑制方法,得到结论:

(1) 直流 XLPE 电缆绝缘中空间电荷的来源主要是外施电场通过电极注入和聚合物杂质离子自身电离产生的电荷。直流电缆内部积聚空间电荷,易引发局部场强畸变,导致电缆绝缘在额定电压下即发生击穿,引发严重的事故。

(2) 接枝改性可以抑制 XLPE 电缆绝缘中空间电荷积聚的主要原因为接入物质大多含有极性基团,极性基团的接入能够在试样内部引入更多的深陷阱,使外电场在向电缆内部注入电荷时将其捕获,从而达到减少电缆内部空间电荷积聚的目的。

(3) 适量共混物的加入使 XLPE 电缆绝缘的聚集态发生变化,从而起到抑制空间电荷积聚的作用。但是过量的共混物加入电缆绝缘,使 XLPE 电缆绝缘内部不完整链结构数量增多,形成新陷阱,从而形成新的空间电荷。

(4) 无机纳米粒子在 XLPE 电缆绝缘的添加,使聚合物产生大量界面。纳米粒子较大的表面可以对界面进行有效调控,使复合材料的宏观性能

发生变化。纳米颗粒的添加在 XLPE 电缆绝缘的内部引入更深的陷阱能级,使注入的空间电荷难以脱陷,从而达到抑制作用。

(5) 从生产、运输及交联多方面共同提升电缆基料纯净度能起到抑制空间电荷产生的效果,研究最多的便是通过脱气来减少电缆内部交联副产物含量。但由于国内对此方面研究过少,高纯净绝缘材料生产核心技术尚不成熟,故在国内此法运用受到限制。

通过采用接枝、纳米掺杂等方式引入适当含量极性基团来改变直流 XLPE 电缆绝缘中的陷阱特性,从而抑制空间电荷效应。但是引入多少含量的极性基团可以达到最优的抑制效果需在今后继续探究。另外在高温、高电场作用下,入陷电荷易脱陷形成新的空间电荷。如何有效预防类似现象发生,还需进一步探索。掌握高纯净绝缘材料的制备能够有效抑制直流电缆中空间电荷的产生,但由于我国尚未完全掌握超净绝缘材料的核心技术,难以攻克添加剂的掺入比例技术,导致生产高纯净直流电缆绝缘料来抑制空间电荷的方式难以施行,在后续研究中对此问题需要深入研究。

本文得到陕西省教育厅专项科研项目(18-JK0512),陕西理工大学研究生创新基金(SLGYCX-2023)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 李珊珊,严有祥,陈丽安,等. 高压 XLPE 电缆缓冲层结构对载流量的影响研究[J]. 供用电,2018,36(1):87-92.
LI Shanshan, YAN Youxiang, CHEN Li'an, et al. Influence of high-voltage cable buffer layer structure on current carrying capacity[J]. Distribution & Utilization, 2018, 36(1):87-92.
- [2] 谢书鸿,傅明利,尹毅,等. 中国交联聚乙烯绝缘高压直流电缆发展的三级跳:从 160 kV 到 200 kV 再到 320 kV[J]. 南方电网技术,2015,9(10):5-12.
XIE Shuhong, FU Mingli, YIN Yi, et al. Triple jumps of XLPE insulated HVDC cable development in China: from 160 kV to 200 kV and then to 320 kV[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(10):5-12.
- [3] 杜伯学,韩晨磊,李进,等. 高压直流电缆聚乙烯绝缘材料研究现状[J]. 电工技术学报,2019,34(1):179-191.
DU Boxue, HAN Chenlei, LI Jin, et al. Research status of polyethylene insulation for high voltage direct current cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1):179-191.
- [4] 张翀,查俊伟,王思蛟,等. 高压直流电缆绝缘材料的发展与展望[J]. 绝缘材料,2016,49(2):1-9.
ZHANG Chong, ZHA Junwei, WANG Sijiao, et al. Development and outlook of insulating materials for high voltage direct current cables[J]. Insulating Materials, 2016, 49(2):1-9.

- [5] 李盛涛,王诗航,李建英. 高压直流电缆料的研发进展与路径分析[J]. 高电压技术,2018,44(5):1399-1411.
LI Shengtao, WANG Shihang, LI Jianying. Research progress and path analysis of insulating materials used in HVDC cable [J]. High Voltage Engineering,2018,44(5):1399-1411.
- [6] 赵一枫,刘刚,谢月,等. 退役高压 XLPE 电缆绝缘空间电荷行为研究[J]. 电力工程技术,2020,39(3):151-157,172.
ZHAO Yifeng, LIU Gang, XIE Yue, et al. Space charge behavior of retired high-voltage XLPE cables [J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(3):151-157,172.
- [7] 欧阳本红,赵健康,李欢,等. 交联副产物对高压 XLPE 电缆绝缘介电和力学性能的影响[J]. 绝缘材料,2015,48(5):31-34,39.
OUYANG Benhong, ZHAO Jiankang, LI Huan, et al. Influence of crosslinking by-products on dielectric and mechanical properties of XLPE cable insulation[J]. Insulating Materials,2015,48(5):31-34,39.
- [8] 屠德民,王霞,吕泽鹏,等. 以能带理论诠释直流聚乙烯绝缘中空间电荷的形成和抑制机理[J]. 物理学报,2012,61(1):409-415.
TU Demin, WANG Xia, LYU Zepeng, et al. Formation and inhibition mechanisms of space charges in direct current polyethylene insulation explained by energy band theory[J]. Acta Physica Sinica,2012,61(1):409-415.
- [9] 张梦甜,玉林威,陈向荣,等. 高压直流 XLPE 电缆绝缘的介电性能研究[J]. 广东电力,2019,32(12):12-18.
ZHANG Mengtian, YU Linwei, CHEN Xiangrong, et al. Study on dielectric properties of HVDC XLPE cables [J]. Guangdong Electric Power,2019,32(12):12-18.
- [10] 钟琼霞,兰莉,吴建东,等. 交联副产物对交联聚乙烯中空间电荷行为的影响[J]. 中国电机工程学报,2015,35(11):2903-2910.
ZHONG Qiongxia, LAN Li, WU Jiandong, et al. The influence of cross-linked by-products on space charge behaviour in XLPE [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11):2903-2910.
- [11] 李欢,李建英,欧阳本红. 热老化对 XLPE 电缆绝缘空间电荷分布特性的影响研究[J]. 绝缘材料,2017,50(11):27-33.
LI Huan, LI Jianying, OUYANG Benhong. Effect of thermal ageing on space charge distribution of XLPE cable insulation [J]. Insulating Materials,2017,50(11):27-33.
- [12] 王亚林. 聚合物空间电荷与陷阱能态密度联合测试技术的研究与应用[D]. 上海:上海交通大学,2018.
WANG Yalin. Research and application of the simultaneous measurement of space charge and trap energy density in polymers [D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2018.
- [13] 徐航. 基于聚丙烯的高压直流电缆绝缘改性及空间电荷特性研究[D]. 天津:天津大学,2017.
XU Hang. Modification and space charge investigation of polypropylene composites for HVDC cables [D]. Tianjin:Tianjin University,2017.
- [14] LI J X,ZHANG Y W,ZHENG F H, et al. The effect of degree of cross-linking on accumulation of space charge in cross-linked polyethylene (XLPE) [C]//Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001). 2001 Asian Conference on Electrical Insulating Diagnosis (ACEID 2001). 33rd Symposium on Electrical and Electronic Insulating Materials and Applications in Systems-Himeji, Japan. IEEE,2001:164-166.
- [15] LAU K Y, VAUGHAN A S, CHEN G, et al. On the space charge and DC breakdown behavior of polyethylene/silica nanocomposites [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(1):340-351.
- [16] 唐炬,潘成,王邸博,等. 高压直流绝缘材料表面电荷积聚研究进展[J]. 电工技术学报,2017,32(8):10-21.
TANG Ju, PAN Cheng, WANG Dibo, et al. Development of studies about surface charge accumulation on insulating material under HVDC [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(8):10-21.
- [17] 王威望,李盛涛. 工程固体电介质绝缘击穿研究现状及发展趋势[J]. 科学通报,2020,65(31):3461-3474.
WANG Weiwang, LI Shengtao. Research status and development of insulation breakdown in engineering solid dielectrics [J]. Chinese Science Bulletin,2020,65(31):3461-3474.
- [18] GHORBANI H, CHRISTEN T, CARLEN M, et al. Long-term conductivity decrease of polyethylene and polypropylene insulation materials [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(3):1485-1493.
- [19] LI S T, WANG W W, YU S H, et al. Influence of hydrostatic pressure on dielectric properties of polyethylene/aluminum oxide nanocomposites [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(2):519-528.
- [20] 刘云鹏,刘贺晨,钟平,等. 直流电老化对 160 kV 直流电缆材料空间电荷分布特性的影响分析[J]. 绝缘材料,2017,50(3):37-42,48.
LIU Yunpeng, LIU Hechen, ZHONG Ping, et al. Study on impact of DC electrical ageing on space charge distribution of 160 kV DC cable materials [J]. Insulating Materials,2017,50(3):37-42,48.
- [21] 刘云鹏,刘贺晨,高丽娟,等. 电声脉冲法研究热老化对 160 kV 直流电缆绝缘材料陷阱特性的影响[J]. 电工技术学报,2016,31(24):105-112.
LIU Yunpeng, LIU Hechen, GAO Lijuan, et al. Influence of thermal stress on the traps energy properties of 160 kV HVDC cable insulation material based on pulsed electro-acoustic method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016,31(24):105-112.
- [22] 李忠华,刘乐乐,郑欢,等. HVDC 电缆电场分布影响因素的仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2563-2571.
LI Zhonghua, LIU Lele, ZHENG Huan, et al. Simulation on the influence factors of electric field distribution in HVDC cable [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(9):2563-2571.

- [23] WANG W W, MIN D M, LI S T. Understanding the conduction and breakdown properties of polyethylene nanodielectrics: effect of deep traps[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(1):564-572.
- [24] LI S T, ZHAO N, NIE Y J, et al. Space charge characteristics of LDPE nanocomposite/LDPE insulation system[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(1):92-100.
- [25] 李欢, 李建英, 马永翔, 等. 不同温度热老化对 XLPE 电缆绝缘材料晶体结构的影响研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(22):6740-6748, 6787.
LI Huan, LI Jianying, MA Yongxiang, et al. Effects of thermal aging on the crystal structures of the XLPE cable insulating material at different temperatures [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(22):6740-6748, 6787.
- [26] 潘祖仁. 高分子化学: 增强版[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
PAN Zuren. *Polymer chemistry: reinforced version* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [27] LUO S, WANG S H, TU Y P, et al. Direct current electrical characteristics of nano-CB/LDPE composite[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(3):1390-1395.
- [28] 付一峰, 陈俊岐, 赵洪, 等. 交联聚乙烯接枝氯乙酸烯丙酯直流介电性能[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(18):4372-4381.
FU Yifeng, CHEN Junqi, ZHAO Hong, et al. DC dielectric properties of crosslinking polyethylene grafted chloroacetic acid allyl ester[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(18):4372-4381.
- [29] PENG S M, HE J L, HU J, et al. Influence of functionalized MgO nanoparticles on electrical properties of polyethylene nanocomposites[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(3):1512-1519.
- [30] ZHOU Y, HU J, DANG B, et al. Mechanism of highly improved electrical properties in polypropylene by chemical modification of grafting maleic anhydride[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(41):415301.
- [31] 王霞, 陈少卿, 屠德民. 茂金属聚乙烯改性低密度聚乙烯中电荷入陷与传输特性[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(9):26-31.
WANG Xia, CHEN Shaoqing, TU Demin. Charge trapping and transport properties in low-density polyethylene modified by metallocene catalyzed polyethylene[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(9):26-31.
- [32] 陈培星, 王诗航, 陈铮铮, 等. 纳米 TiO₂ 对直流电缆用 XLPE 介电性能的影响[J]. *高电压技术*, 2018, 44(12):3848-3856.
CHEN Peixing, WANG Shihang, CHEN Zhengzheng, et al. Effect of nano-TiO₂ on dielectric properties of XLPE for HVDC cable[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(12):3848-3856.
- [33] 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.
WU Jie, FAN Linzhen, TU Youping, et al. Space charge suppression characteristics of nano-CB/LDPE composite[J]. *Insulating Materials*, 2020, 53(4):27-32.
- [34] ZHU Y, ALLEN G C, ADAMS J M, et al. Statistical analysis of particle dispersion in a PE/TiO₂ nanocomposite film[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(9):2203-2207.
- [35] 杨超尘. SiO₂/LDPE 纳米复合介质直流耐电性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014:75-76.
YANG Chaochen. DC dielectric properties of SiO₂/LDPE nanocomposite[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014:75-76.
- [36] 胡慕. 纳米 MgO/PE 复合材料的制备及其电性能的研究[D]. 南京: 东南大学, 2018:56-57.
HU Mu. Preparation and electrical properties of nano-sized MgO/PE nanocomposites[D]. Nanjing: Southeast University, 2018:56-57.
- [37] 王金辉. 抗氧化剂和石墨烯微片对 XLPE 直流介电性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017:42-43.
WANG Jinhui. The influence of antioxidant and graphite nanoplatelets on DC dielectric properties of XLPE[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017:42-43.
- [38] 赵洪, 徐明忠, 杨佳明, 等. MgO/LDPE 纳米复合材料抑制空间电荷及电树枝化特性[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(16):196-202.
ZHAO Hong, XU Mingzhong, YANG Jiaming, et al. Space charge and electric treeing resistance properties of MgO/LDPE nanocomposite[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(16):196-202.
- [39] LI S T, YIN G L, BAI S N, et al. A new potential barrier model in epoxy resin nanodielectrics[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 18(5):1535-1543.
- [40] LI S T, YIN G L, CHEN G, et al. Short-term breakdown and long-term failure in nanodielectrics: a review[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, 17(5):1523-1535.
- [41] 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.
- [42] WATANABE C, ITOU Y, SASAKI H, et al. Practical application of ± 250 kV DC-XLPE cable for Hokkaido-Honshu HVDC link [J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2015, 191(3):18-31.
- [43] 陈曦, 吴锴, 王霞, 等. 纳米粒子改性聚乙烯直流电缆绝缘材料研究(I) [J]. *高电压技术*, 2012, 38(10):2691-2697.
CHEN Xi, WU Kai, WANG Xia, et al. Modified low density polyethylene by nano-fills as insulating material of DC cable(I) [J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(10):2691-2697.
- [44] TOSELLI M, SACCANI A, PILATI F. Thermo-oxidative resis-

- tance of crosslinked polyethylene (XLPE) coated by hybrid coatings containing graphene oxide[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 258:503-508.
- [45] 郭佳,周凯,任显诚,等. 纳米石墨烯掺杂浓度对XLPE击穿性能的影响[J]. 电测与仪表, 2019, 56(13):91-96.
GUO Jia, ZHOU Kai, REN Xiancheng, et al. Influence of graphene nanosheet concentration on breakdown strength of XLPE [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(13):91-96.
- [46] 程羽佳,郭宁,王若石,等. 纳米ZnO和纳米MMT对低密度聚乙烯介电性能的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32(1):94-100.
CHENG Yujia, GUO Ning, WANG Ruoshi, et al. Effects of nano-ZnO and nano-montmorillonite on dielectric properties of low density polyethylene [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(1):94-100.
- [47] WANG S H, CHEN P X, LI H, et al. Improved DC performance of crosslinked polyethylene insulation depending on a higher purity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3):1809-1817.
- [48] IGI T, MURATA Y, KASHIYAMA S, et al. Advanced HVDC XLPE cable and accessories [C]//9th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2012). Hong Kong, China. Institution of Engineering and Technology, 2012:1-6.

作者简介:



李欢

李欢(1988),男,博士,讲师,研究方向为固体电介质的劣化及失效机制(E-mail:lihuan@snut.edu.cn);

徐磊(1997),男,硕士在读,研究方向为高电压技术;

刘涛(1997),女,硕士在读,研究方向为高电压技术。

Summarization of space charge suppression methods in DC XLPE cable insulation

LI Huan, XU Lei, LIU Tao, YANG Zhangyong

(School of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

Abstract: Cross-linked polyethylene (XLPE) is widely used in the field of cable insulation due to its excellent dielectric and physical and chemical properties. During the service of the cable, space charges accumulate inside the cable insulation, which can cause electric field distortion in severe cases, leading to cable breakdown accidents. Especially for DC XLPE cables, the accumulation and influence of space charge cannot be ignored. Aiming at the space charge accumulation effect generated in DC XLPE cable insulation, the current academic circles mainly adopt methods such as blending modification, polymer segment grafting polar groups, nano-doping modification and preparation of high-purity insulating materials. The modified DC XLPE cable insulation has an improved suppression effect on space charge generation. The suppression methods of space charge in the above-mentioned DC XLPE cable insulation are described in a review, and their suppression principles and corresponding inhibitory effect are introduced. Then, the advantages and disadvantages of different space charge suppression methods are compared and summarized. Finally, the future research and development of space charge suppression methods in DC XLPE cable insulation are prospected.

Keywords: DC cable; cross-linked polyethylene (XLPE); space charge; electric field distortion; suppression method; high purity insulating material

(编辑 陆海霞)