

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.04.021

高载流量柔性直流电缆绝缘料关键性能研究

朱智恩, 曾浩, 杨黎明, 高凯, 李栋, 陈龙啸, 王传博
(南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要:为实现高压柔性直流电缆绝缘材料国产化,文中通过添加纳米粒子方法制备了高载流量(工作温度90℃)柔性直流电缆绝缘料试样,开展了空间电荷、电阻率、直流击穿电场强度等关键电气性能指标的试验研究,并与高压交流电缆绝缘料和国外柔直电缆绝缘料这2种材料的相应试验结果进行了对比分析。结果表明,该柔直电缆绝缘料在常温(20℃)和高温(90℃)下具有良好的空间电荷抑制性能,电场畸变率小于5%;与其他2种材料相比,该绝缘料在高温下的电阻率增加约10倍、电阻率温度系数下降约1/3,能够降低柔直电缆的热损耗并有利于整个柔直电缆系统的绝缘设计;该绝缘料在高温下的直流击穿电场强度为其他2种材料的1.27~1.6倍。研究表明,该柔直电缆绝缘料电气性能优异,能够用于工作温度90℃的柔直电缆绝缘。

关键词:高载流量;柔性直流电缆绝缘料;空间电荷;电阻率;直流击穿电场强度

中图分类号:TM21

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)04-0149-06

0 引言

近年来,随着柔性直流输电技术的发展,柔性直流电缆系统技术,尤其是高载流量柔性直流电缆技术成为整个电缆行业的热点研究方向,可解决远海风电进网、海岛供电、城市增容等柔直输电领域的输电线路问题^[1-3]。

目前,国内已经建设了多个柔直输电工程,工程所用柔性直流电缆的绝缘材料全部来自进口。电缆的通常工作温度为70℃^[4],因此开发工作温度为90℃的高载流量柔性直流电缆绝缘料能提高柔直电缆系统输送容量,进而满足电网建设中大容量输送的需求。例如,对于±320 kV柔直电缆,工作温度由70℃提高至90℃,其输送容量能够提高10%~20%。

在国外,美国陶氏化学公司、日本和韩国等电缆材料公司正致力于研发工作温度为90℃的柔直电缆绝缘材料,而北欧化工也有开发90℃材料的计划。在国内,南瑞集团一直从事工作温度90℃的柔直电缆绝缘料及其电缆系统的核心技术研究。目前,交联聚乙烯(cross linked polyethylene, XLPE)直流电缆绝缘料的研究主要集中于通过物理或者化学改性的方法以实现绝缘中的空间电荷抑制。具体来说,主要包括纳米材料添加技术和分子接枝技术^[5]。这2种方法均是通过在电缆树脂基料中引入极性原子/基团,通过调控材料中的深/浅陷阱浓

度及载流子迁移率,以实现空间电荷的抑制^[6]。

柔直电缆绝缘材料主要电气性能指标包括空间电荷、电阻率、直流击穿电场等。空间电荷性能研究起于上个世纪80年代,主要测试方法包括压力波法和电声脉冲法^[7-8]。科研工作者针对柔直电缆绝缘材料从不同方面开展了大量的研究,包括电极材料对空间电荷注入影响^[9]、绝缘界面对空间电荷的影响^[6,10]、温度梯度对空间电荷的影响^[11]等。电阻率也是其关键指标之一,其绝对值决定了电缆绝缘泄漏电流,即绝缘热损耗。温度对电阻率的作用将直接影响电缆绝缘的电场分布^[12]。直流击穿电场强度直接决定了柔直电缆绝缘厚度设计及绝缘可靠性。许多科研工作者针对柔直电缆绝缘材料性能进行了大量的研究,但大部分研究仅关注材料的部分性能,未从产品的角度全面考虑其电气综合性能。

文中研究了柔直电缆绝缘料的空间电荷、电阻率、直流击穿电场强度等关键性能,并与高压交流电缆绝缘料和国外柔直电缆绝缘料的相应性能进行比较分析。

1 电气性能试验

1.1 试样制备

绝缘基料选用国产高压电缆绝缘用低密度聚乙烯(low density polyethylene, LDPE),密度约0.92 g/cm³;添加剂选用空间电荷抑制剂和微量抗氧化剂(质量百分比约为0.2%)。其中,空间电荷抑制剂为通过气相法制备的金属氧化物纳米粒子,粒径为20~50 nm,比表面积约100 m²/g;为保证与LDPE

收稿日期:2020-12-29;修回日期:2021-03-02

基金项目:国家电网有限公司科技项目“90℃柔性直流电缆绝缘料及海底电缆系统关键技术研究”

良好的相容性,纳米粒子表面已经过偶联处理。将LDPE与添加剂在130℃的密式混炼机上熔融共混15 min,制备成分均匀的LDPE纳米复合绝缘料。在复合材料中添加质量百分比约2%的过氧化二异丙苯(dicumyl peroxide,DCP),将材料装入广口瓶并放置烘箱内20 h,温度80℃。为保证DCP充分被LDPE吸收,每隔一段时间需要摇晃广口瓶。通过上述步骤,完成了柔直电缆绝缘料试样制作。

此外文中还选用了其他2种绝缘材料:国内高压交流电缆绝缘料和国外高压柔直电缆绝缘料。为便于简化,文中将新柔直电缆绝缘料命名为S1,国内交流绝缘料命名为S2,国外柔直电缆绝缘料命名为S3。

利用平板硫化机将上述3种含交联剂的绝缘料热压交联成型,交联工艺温度为175℃,压力约为15 MPa,时间15 min。用于空间电荷实验和电阻率实验的圆形试样尺寸为直径200 mm、厚度1 mm,用于直流击穿电场强度实验的圆形试样尺寸为直径10 mm,厚度约0.3 mm。

1.2 测试设备及方法

空间电荷实验利用压力波法测试系统,关于此方法的详细介绍可见文献[7—8]。文中系统的脉冲激光器波长1 064 nm,能量650 mJ;直流发生器最大输出电压60 kV,纹波系数0.5%;示波器带宽为350 MHz,采样频率为2.5 GHz。利用此设备在外加电场40 kV/mm下,分别测试20℃和90℃下试样空间的电荷分布。

电阻率测试设备示意如图1所示,测试装置由ZC36型高阻计、40 kV直流高压源和烘箱3部分组成。

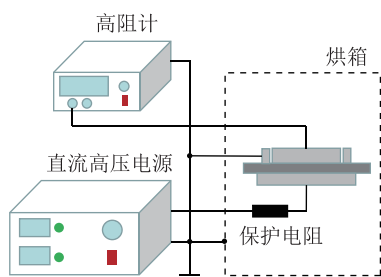


图1 绝缘试样电阻率测试设备示意
Fig.1 Schematic diagram of resistivity test for insulation sample

试验分别测试了30℃,50℃,70℃和90℃时试样的电阻率,其中电场固定为20 kV/mm。为保证实验数据的准确性,每个试验条件下进行5组平行试验,最终试验结果取中值。

直流击穿测试设备由直流电压发生器、恒温油

槽、击穿电极等组成。直流电压发生器的额定电压为200 kV,最大电流为5 mA,纹波系数为0.5%;恒温油槽温度范围为20~100℃,温度误差为±2℃;击穿电极由直径均为20 mm的球-球电极组成。此实验包括2种方法:方法一为连续升压法,直流电压以1~3 kV/s速度升压至试样击穿,为保证试验结果准确性,每组实验取10个试样,并取中间2个值的平均值作为实验值;方法二为阶梯升压法,以 $\Delta E = 10 \text{ kV/mm}$ 的阶梯电场增加,在每个电场下维持时间 $\Delta t = 30 \text{ min}$ 。

2 结果与讨论

2.1 空间电荷性能

根据研究,工程运行的高压超高压柔直电缆绝缘中最大电场约为20 kV/mm。文中将外加电场提高1倍,开展外加电场40 kV/mm下的空间电荷性能研究。利用压力波法空间电荷测试系统测试了自主研发柔直电缆绝缘料S1在20℃及90℃下的空间电荷分布,如图2和图3所示。

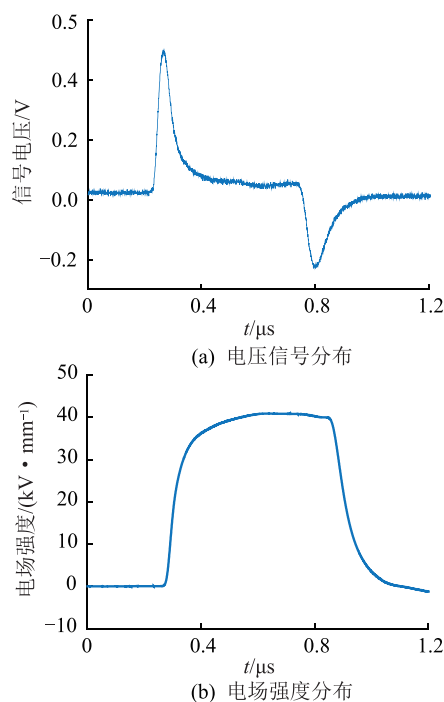


图2 20℃下S1试样的空间电荷分布(1 h时刻)

Fig.2 The distribution of space charge of S1 sample at 20℃ (at 1 h)

图2和图3显示的是S1试样在1 h时刻的空间电荷分布,图2(a)和图3(a)为压力波法测试系统产生的原始信号(以电压形式表示),图2(b)和图3(b)为根据处理软件转换的试样中电场分布。由图2和图3可知,在不同的温度下,S1试样均显示了良好的空间电荷抑制性能,试样内部电场均

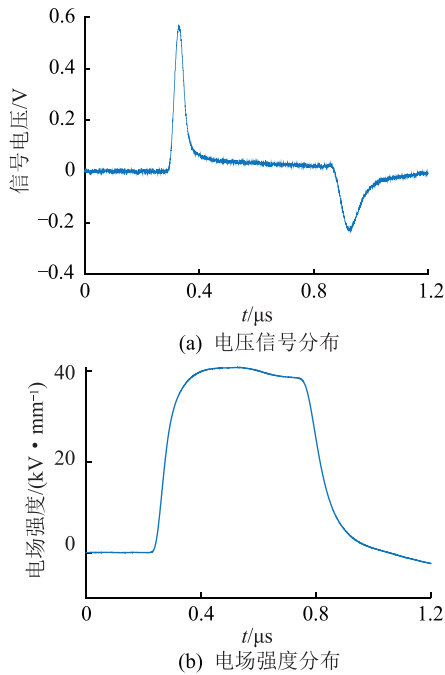


图3 90 °C下 S1 试样的空间电荷分布(1 h 时刻)

Fig.3 The distribution of space charge of S1 sample at 90 °C (at 1 h)

匀,电场畸变率(最大电场与外加电场差值除以外加电场)不超过5%。

为研究空间电荷与加压时间的关系,进一步研究了 S1 试样在 90 °C 下并加压 24 h 后的空间电荷分布情况,如图 4 所示。

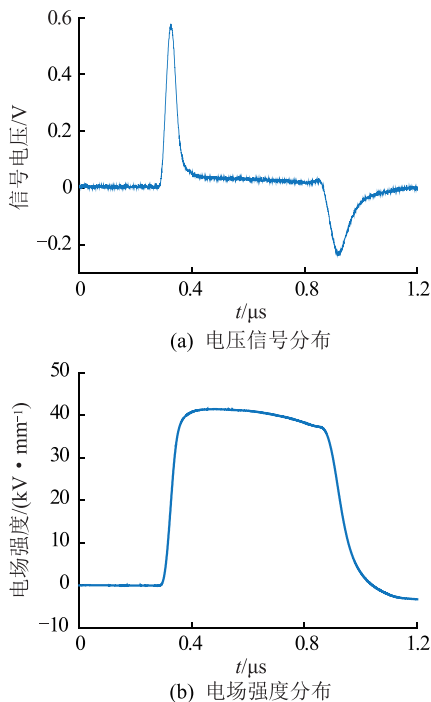


图4 90 °C下 S1 试样的空间电荷分布(24 h 时刻)

Fig.4 The distribution of space charge of S1 sample at 90 °C (at 24 h)

由图 4 可知,随着加压时间的增加,S1 试样中

的空间电荷分布几乎没有发生明显变化,电场畸变率也不超过5%。

为了与柔直电缆绝缘试样 S1 进行对比,同时研究了未添加纳米粉末的交流电缆绝缘料 S2 试样以及国外柔直料 S3 的空间电荷性能,这 2 种试样的空间电荷分布如图 5 所示。

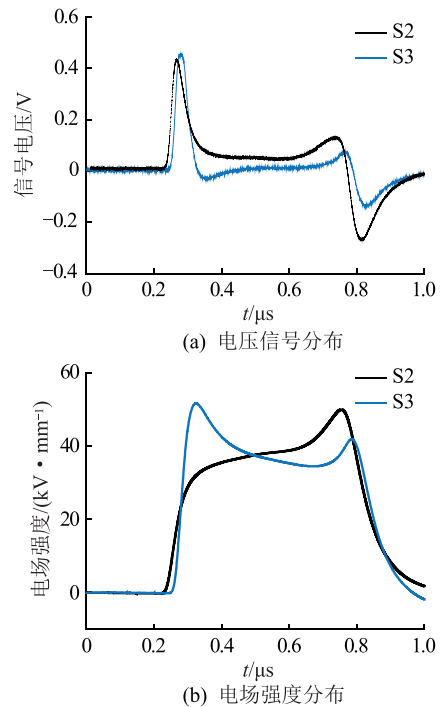


图5 20 °C下 S2 和 S3 试样的空间电荷分布(1 h 时刻)

Fig.5 The distribution of space charge of S2 and S3 samples at 20 °C (at 1 h)

由图 5 可知,S2 试样在靠近负极位置积累了较多的异极性电荷——正电荷,并引起了负极峰明显增高;S3 试样在正极和负极附近均出现了异极性电荷。由其电场分布可知,S2 试样在靠近负极位置存在明显的电场畸变,最大电场畸变率约 25%;S3 试样在靠近正极和负极位置也出现了明显的电场畸变,最大电场出现在正极附近,电场畸变率约 30%。

研究表明^[13],通过在 LDPE 中添加纳米粒子,由于两者介电常数差异引起了电场的变化,可进而形成 1.5~5 eV 的较深陷阱。在 S1 试样加压的初期,电极附近的深陷阱能够迅速捕获少量的同极性电荷,同极性电荷形成的电场降低了界面电场,并显著降低了电极电荷的注入^[14]。故在 S1 试样中几乎不存在空间电荷注入,且空间电荷分布较为稳定,几乎不随时间变化。在 S2 试样中,由于 LDPE 结晶形态的不完整性^[15],容易引起空间电荷注入,且存在抗氧剂、交联分解残留物,易形成较浅的陷阱,进一步引起空间电荷积累。国外直流料通过在材料中引入浅陷阱,提高载流子迁移率并防止空间

电荷积累,这样仅在较低电场(例如 20 kV/mm)下就具有较好的空间电荷抑制性能。因此,文中新绝缘材料在较高电场下具有更优异的空间电荷抑制性能。

2.2 电阻性能

在温度 30 °C, 50 °C, 70 °C 和 90 °C 下,测试了 S1, S2 和 S3 试样电阻率与温度的关系,电场为 20 kV/mm,实验结果如图 6 所示。纵坐标规定电阻率最小值(即 S2 试样 90 °C 下电阻率)为 1,并以此最小值为基值进行倍数关系标示。

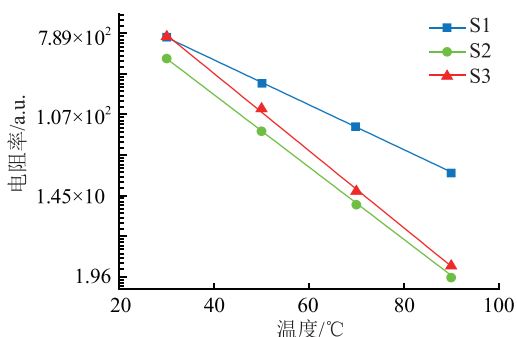


图 6 S1 和 S2 及 S3 试样在不同温度下的电阻率(测试电场 20 kV/mm)

Fig.6 The resistivity of S1, S2 and S3 samples at different temperatures (testing field 20 kV/mm)

由图 6 可知,交流电缆绝缘料 S2 试样电阻率最低,柔直电缆绝缘料 S1 试样电阻率最高,其在较高温度下的电阻率超过了国外柔直料 S3 试样的电阻率。这是由于 S1 试样中添加的纳米粒子形成了更深的陷阱,降低了载流子迁移率,引起电导率下降或电阻率升高。这意味着文中的柔直电缆绝缘料在高温下具有较低的电导电流,能够降低绝缘热损耗。

对纵坐标(电阻率)取自然对数坐标并进行线性拟合,可发现电阻率对数与温度存在良好的线性关系,即可近似地认为电阻率与温度存在指数关系,可表示为:

$$\rho = k_1 e^{-aT} \quad (1)$$

式中: ρ 为电阻率; k_1 为系数; a 为电阻率温度系数; T 为温度。通过线性拟合,可得出 S1, S2 和 S3 试样的电阻率温度系数 a 分别为 0.06, 0.08, 0.09 (1/°C)。

研究表明^[12, 16-17],电阻率温度系数与柔直电缆绝缘电场分布存在较大的关系。在柔直电缆工作温度下,较大的温度系数不但会增加绝缘电场畸变程度,还会引起柔直电缆绝缘电场发生反转,即最大电场由绝缘内层位置转移至绝缘外层位置。这将加速电缆绝缘老化,从而导致击穿破坏。更重要的是,绝缘外部位置的较大电场给柔直电缆连接件

(接头和终端)的设计带来较大的困难。电缆绝缘外部靠近电缆绝缘/连接件应力锥绝缘的界面是整个柔直电缆系统的薄弱位置,易发生电击穿。进一步的研究表明^[12],在绝缘电阻率温度系数一致的情况下,随着柔直电缆工作温度提高(例如从 70 °C 到 90 °C),电场反转现象更明显,绝缘外层电场越高。因此,从工作温度 90 °C 的柔直电缆系统设计角度考虑,应尽量减小电缆绝缘电阻率温度系数。综合以上可知,文中开发的柔直电缆绝缘料在高温下具有较高的电阻率,即较低的热损耗;还有较低的电阻率温度系数,不但能降低电场畸变承担,还有利于整个柔直电缆系统的绝缘设计。

2.3 直流击穿性能

利用 1.2 节描述的连续升压法测试了 S1, S2 和 S3 试样在温度 30 °C, 50 °C, 70 °C, 90 °C 下的直流击穿电场强度,如图 7 所示。图中纵坐标规定最小值(即 S2 试样在 90 °C 下击穿电场)为 100,并以此最小值为基值进行倍数关系标示。

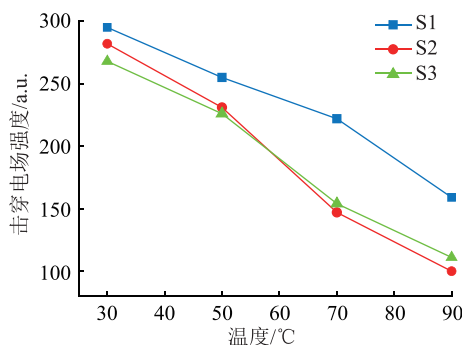


图 7 S1 和 S2 及 S3 试样在不同温度下的直流击穿电场强度(连续升压法)

Fig.7 The DC breakdown strength of S1, S2 and S3 samples at different temperatures (continuous increasing voltage method)

由图 7 可知,柔直电缆绝缘料 S1 具有更高的直流击穿电场强度,而在较低温度下高压交流电缆绝缘料 S2 的直流击穿电场稍高于国外柔直电缆绝缘料 S3,但在较高温度下则相反。相比于 S2 试样, S1 试样的直流击穿电场明显提高,尤其是在较高温度下,90 °C 下后者约为前者的 1.6 倍。这说明通过添加纳米粒子抑制了空间电荷积累,降低了局部电场畸变,间接地提高了击穿电场。为进一步研究绝缘材料在相对较长时间、高温下的直流击穿性能,利用阶梯升压法(阶梯电压 $\Delta E = 10$ kV/mm,维持时间 $\Delta t = 30$ min)开展了 3 种试样在 90 °C 的直流击穿电场实验。为保证试验结果的准确性,共开展了 5 组实验,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,在 90 °C 下, S1 试样直流击穿电场

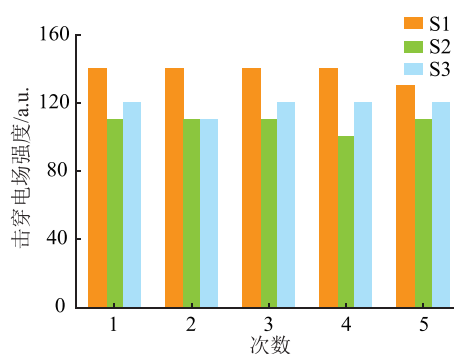


图8 S1和S2及S3在90 °C下的直流击穿电场强度(阶梯升压法)

Fig.8 The DC breakdown strength of S1, S2 and S3 samples at 90 °C (step increasing voltage method)

强度最高,约为S2试样的1.27倍;S3试样直流击穿电场次之,约为S2试样的1.09倍;S2试样直流击穿电场最低。图8结果也表明柔直电缆绝缘料在较高温度下具有良好的长时间空间电荷抑制性能,故在较长时间的直流电场下具有较高的击穿性能。

3 结论

文中基于空间电荷、电阻率、直流击穿电场强度3个关键性能指标对研发的高载流量柔性直流电缆绝缘料进行了大量的研究,结论如下:

(1) 该柔直电缆绝缘料在20 °C和高温(90 °C)下具有良好的长期空间电荷抑制性能,明显优于高压交流电缆绝缘料和国外柔直电缆绝缘料;

(2) 与交流电缆绝缘料和国外柔直电缆绝缘料相比,该柔直电缆绝缘料(尤其在高温下)具有较高的电阻率及较低的电阻率温度系数。

(3) 相比于其他2种绝缘材料,该柔直电缆绝缘料(尤其在高温下)具有较高的直流击穿电场强度。

参考文献:

- [1] ROJAS C A, KOURO S, PEREZ M A, et al. DC-DC MMC for HVDC grid interface of utility-scale photovoltaic conversion systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 352-362.
- [2] 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.
- [3] 张泽卉, 李岩, 郑永, 等. 基于空间电荷特性的高压直流电缆绝缘老化状态评估方法[J]. 广东电力, 2019, 32(12): 98-105.
ZHANG Zehui, LI Yan, ZHENG Yong, et al. Insulation aging as-

essment method for HVDC cable based on space charge characteristics[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(12): 98-105.

- [4] 严有祥, 方晓临, 张伟刚, 等. 厦门±320 kV柔性直流电缆输电工程电缆选型和敷设[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1147-1153.
YAN Youxiang, FANG Xiaolin, ZHANG Weigang, et al. Cable section and laying of Xiamen ±320 kV flexible DC cable transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1147-1153.
- [5] TERASHIMA K, SUKUKI H, HARA M, et al. Research and development of /spl plusmn/250 kV DC XLPE cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 7-16.
- [6] FABIANI D, MONTANARI G C, LAURENT C, et al. Polymeric HVDC cable design and space charge accumulation. part 1: insulation/semicon interface[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2007, 23(6): 11-19.
- [7] 郑飞虎, 张治文, 吴长顺, 等. 用于固体介质中空间电荷的压电压力波法与电声脉冲法[J]. 物理学报, 2003, 52(5): 1137-1142.
ZHENG Feihu, ZHANG Yewen, WU Changshun, et al. Piezo-PWP and PEA methods for measuring space charge in solid dielectric[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(5): 1137-1142.
- [8] 张治文, 潘佳萍, 郑飞虎, 等. 固体绝缘介质中空间电荷分布测量技术及其在电气工业中的应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2603-2618.
ZHANG Yewen, PAN Jiaping, ZHENG Feihu, et al. Distribution measurement for space charge in solid insulation medium and its application in electrical industry[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2603-2618.
- [9] 肖春, 宣华芸, 张治文. 电极材料对聚乙烯中空间电荷注入影响的比较[J]. 材料科学与工程学报, 2008, 26(5): 709-712.
XIAO Chun, XUAN Huayun, ZHANG Yewen. Comparison on space charge injection in LDPE influenced by electrode material [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2008, 26(5): 709-712.
- [10] DELPINO S, FABIANI D, MONTANARI G C, et al. Polymeric HVDC cable design and space charge accumulation. part 2: insulation interfaces[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(1): 14-24.
- [11] FABIANI D, MONTANARI G C, LAURENT C, et al. HVDC cable design and space charge accumulation. part 3: effect of temperature gradient [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(2): 5-14.
- [12] 刘子玉. 电气绝缘结构设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981: 302-310.
LIU Ziyu. Design principle of electrical insulation structure [M]. Beijing: China Machine Press, 1981: 302-310.
- [13] 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 [C]//IEEE

Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. IEEE: 152-160.

[14] JIANG Y, AN Z L, LIU C X, et al. Influence of oxyfluorination time on space charge behavior in polyethylene [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17 (6): 1814-1823.

[15] 高观志, 黄维. 固体中的电运输 [M]. 北京: 科学出版社, 1991: 34.
GAO Guanzhi, HUANG Wei. Electrical transport in solids [M]. Beijing: Science Press, 1991: 34.

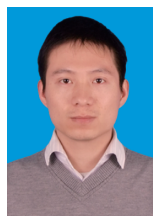
[16] MAZZANTI G, MARZINOTTO M. Extruded cables for high-voltage direct-current transmission [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

[17] 钟力生, 任海洋, 曹亮, 等. 挤包绝缘高压直流电缆的发展

[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3473-3489.

ZHONG Lisheng, REN Haiyang, CAO Liang, et al. Development of high voltage direct current extruded cables [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3473-3489.

作者简介:



朱智恩

朱智恩(1983),男,博士,高级工程师,从事柔性直流电缆绝缘料及其电缆系统、空间电荷相关工作(E-mail: zhuzhien@sgepri.sgcc.com.cn);

曾浩(1988),男,硕士,工程师,从事柔性直流电缆绝缘料相关工作;

杨黎明(1955),男,学士,研究员级高级工程师,从事高压交流及直流电缆系统相关工作。

Investigation on the key properties of flexible HVDC cable insulating materials with the high carrying capacity

ZHU Zhien, ZENG Hao, YANG Liming, GAO Kai, LI Dong, CHEN Longxiao, WANG Chuanbo
(NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to realize the localization of high voltage direct current (HVDC) cable insulating materials, the insulating materials of HVDC flexible cable with the high carry capacity (90 °C of the working temperature) are prepared by nano filler doping method in this paper. The key parameters including space charge, resistivity, DC breakdown strength are investigated, and the results are compared with that of HVAC insulating materials and external HVDC insulating materials. It is found that the developed insulating materials have good space charge suppression performance at 20 °C and high temperature (90 °C), and the electric field distortion ratio is less than 5%. Comparing to the two other materials, its resistivity increases by 10 times and the resistivity temperature coefficient decreases by 1/3 at high temperature, so it decreases the insulation heat loss and fits to the design of the cable system. Its DC breakdown strength at high temperature is 1.27~1.6 times as much as that of the two other materials. The research shows that the materials are suitable for the insulation of HVDC flexible cable with the working temperature of 90 °C for its perfect electrical performance.

Keywords: high carrying capacity; the insulating materials of high voltage direct current (HVDC) flexible cable; space charge; resistivity; DC breakdown strength

(编辑 李栋)