

脱气时间对电缆绝缘中交联副产物含量和直流特性的影响

白健¹, 张亚², 詹陶², 杨海艳², 程明亮², 阮康杰², 李飞¹, 高景晖¹

(1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 西安 710049; 2. 重庆泰山电缆有限公司, 重庆 401120)

摘要: 直流电缆的交联过程会在绝缘中产生大量副产物, 影响电缆的电气性能。通常采用脱气工艺脱去电缆绝缘中的交联副产物, 但随着直流电缆电压等级的升高, 绝缘厚度进一步增加, 脱除副产物变的越来越困难。文中以不同脱气时间的 500 kV 高压直流 XLPE 电缆绝缘切片试样为研究对象, 确定了交联副产物相对含量的半定量分析方法, 研究了脱气过程电缆绝缘中交联副产物含量的变化和副产物对 XLPE 电缆绝缘直流性能的影响。结果表明, 脱气可以减少电缆绝缘中的副产物, 但无法将副产物完全脱除。并且在整个脱气过程中, 中绝缘处副产物含量最多, 内绝缘和外绝缘处副产物含量最少。脱气 75 天后, 电缆绝缘电导率随副产物含量的降低呈指数形式从 10^{-13} S/m 减少至 10^{-15} S/m, 电缆绝缘的直流击穿场强随副产物含量的变化不明显, 平均电荷密度和最大场强畸变率分别由最大值 $8.3 \text{ C}\cdot\text{m}^{-3}$ 、113% 线性减少至 $6.4 \text{ C}\cdot\text{m}^{-3}$ 、55%, 同时陷阱密度从 367 pC 减少至 102 pC, 陷阱深度从 0.45 eV 减少至 0.04 eV。

关键词: 高压直流 XLPE 电缆; 交联副产物; 直流电导率; 直流击穿场强; 空间电荷; 陷阱

Effect of Degassing Time on Byproducts Content and DC Characteristics of Cable Insulation

BAI Jian¹, ZHANG Ya², ZHAN Tao², YANG Haiyan², CHENG Mingliang², RUAN Kangjie², LI Fei¹, GAO Jinghui¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Chongqing Taishan Cable Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: The crosslinking process of DC cable will produce a lot of byproducts in the insulation, which will affect the electrical performance of the cable. The crosslinking byproducts are usually removed by degassing process, but with the increase of voltage level of DC cable and the further increase of insulation thickness, it becomes more and more difficult to remove byproducts. In this paper, 500 kV HVDC XLPE cable insulation slices are selected as research samples, and a semi-quantitative analysis method for the relative content of crosslinking byproducts was established. The change of crosslinking byproducts content in cable insulation during degassing and the effect on the DC feature of insulation were studied. The results show that degassing can reduce the by-products in cable insulation, but can not completely remove the byproducts. In the whole degassing process, the content of byproducts in the middle insulation is the highest, and the content of by-products in the inner insulation and the outer insulation is the least. After 75 days of degassing, the DC conductivity of insulation decreases exponentially from 10^{-13} S/m to 10^{-15} S/m with the decrease of byproducts content. DC breakdown field strength does not change significantly with the content of byproducts. The average charge density and maximum field strength distortion respectively decreased linearly from $8.3 \text{ C}\cdot\text{m}^{-3}$ and 113% to $6.4 \text{ C}\cdot\text{m}^{-3}$ and 55%. Meanwhile, the trap density decreased from 367 pC to 102 pC, and the trap depth decreased from 0.45 eV to 0.04 eV.

Key words: HVDC XLPE cable; crosslinking byproducts; DC conductivity; DC breakdown field strength; space charge; trap

0 引言

在中国国民经济快速发展, 电力分布不均衡的大背景下, 直流输电技术由于其输电距离长、输电效率高、输电容量大等优势迅速发展, 高压

直流电缆也应运而生并被迅速投入使用。交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆制作工艺简单、成本低、绝缘性能优良、传输容量大、具有低空间电荷聚集特性, 受到广泛应用, 已经成为构建高压直流输电线路的关键纽带^[1-2]。

目前大尺寸绝缘电缆交联过程通常将同时挤出的导体屏蔽层—绝缘层—绝缘屏蔽层加热采用过氧化二异丙苯(Dicumylperoxide, DCP)进行交联, DCP 受热分解形成的高活性过氧化物自由基与聚乙烯分子链结合, 会生成水、甲烷、枯基醇、苯乙酮、 α -甲基苯乙烯等交联副产物^[3]。这些交联副产物会在外加电场作用下发生电离, 使电介质中载流子浓度增加, 增加电缆绝缘的直流电导率, 同时部分载流子被陷阱捕获形成空间电荷引起电场畸变^[4], 造成局部放电, 进一步发生击穿^[5], 使交联聚乙烯电缆的直流特性劣化, 因此必须进行脱气处理去除电缆绝缘中的副产物。脱气是指在将电缆线芯部分放入具有气体循环和加热功能的脱气室中加快副产物逸出^[6]。理论上脱气时间越长越有利于副产物的逸出从而保证电缆的绝缘特性, 但考虑到生产周期和经济效益, 脱气时间不宜过长^[7-9]。于是研究脱气过程中高压直流 XLPE 电缆的副产物含量变化及其对直流特性的影响至关重要, 可以对生产工艺提供理论指导。

目前针对副产物对直流特性影响的研究大多是以浸渍试样开展实验。有研究利用红外光谱法测量 XLPE 绝缘交流电缆脱气过程中交联副产物含量的变化情况, 发现 α -甲基苯乙烯和苯乙酮相对容易脱除, 而枯基醇较难去除^[10]。而通过对脱气过程中的高压直流电缆试样进行气相色谱和质谱联合测试, 发现脱气前期和脱气后期副产物含量的减少速率不同, 同一时间下不同副产物的减少速率也不同^[11]。有关电导率方面的研究发现浸渍苯乙酮和 α -甲基苯乙烯的低密度聚乙烯

(LDPE)试样的电导率相较于纯净试样会增大, 且浸渍时间越长, 电导率越大^[10]。交联副产物也会对击穿场强产生影响, 实验结果表明对于分别单独浸泡苯乙酮、枯基醇以及浸泡混合溶液的 XLPE 试样, 在混合溶液中浸泡过的 XLPE 试样击穿场强最低^[12]。交联副产物在外电场的作用下电离的正负离子会形成空间电荷, 随着电缆切片试样中的交联副产物的减少, 试样平均体电荷密度衰减越来越缓慢^[11], 并且试样中的分子支链端基和小分子杂质是捕获空间电荷的陷阱的主要来源^[13]。

文中将不同脱气时间交联聚乙烯电缆切片, 并测量切片试样中的副产物相对含量以及直流电导率、直流击穿场强、空间电荷分布以及热刺激电流等直流特性, 研究分析不同绝缘位置处的副产物含量在不同脱气时间下的空间分布特性以及交联副产物含量与电缆中 XLPE 绝缘部分直流性能参数的相关性。

1 实验

1.1 试样制备

文中测试用的 0.2 mm 切片试样取自 500 kV 高压直流 XLPE 电缆线芯, 4 个批次的试样分别来自脱气 0、15、45、75 天的电缆段。为了研究交联副产物在电缆绝缘的径向分布特征, 需将不同绝缘位置的试样区分开, 根据试样所处位置距离铜导体的距离, 将试样分为内绝缘、中绝缘和外绝缘 3 部分, 见图 1。

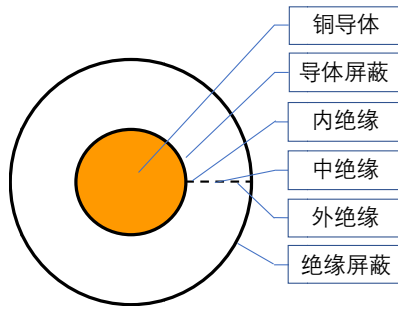


图 1 取样位置示意图

Fig. 1 Sampling position diagram

为了尽可能减少交联副产物的挥发、确保实验结果与脱气时间最大程度对应，切片试样制备后储存在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下。

1.2 实验方法

1.2.1 傅里叶红外光谱测试

文中使用傅里叶变换红外光谱分析仪型号为 Nicolet6700，测试采取透射模式，扫描次数 64，分辨率为 4，测量波数范围为 $4\ 000\sim 400\ \text{cm}^{-1}$ 。测试试样前需要扫描空气的红外吸收光谱作为背景。对于电缆切片试样，每个绝缘位置测量 20 片试样的红外光谱，求取平均值。

1.2.2 直流电导测试

为了排除表面泄漏电流的影响，文中采用包括测量极、高压极和保护极 2 个部分在内的三电极系统测量切片试样直流电导率，见图 2。采用最大输出电压为 40 kV 的直流高压电源施加电压，采用 6517B 高阻计测量试样的电导电流。通常的直流电导率计算公式中电流是指稳态电流。但对于绝缘试样来说，在外电场作用下存在极化过程，即加压后试样中的电流会随着时间呈指数形式衰减，最终减至稳值。文中使用的直流电导测试系统每秒进行一次数据采集，取加压后第 10 min 所测得的 60 个电流数据并计算中位数作为电导

电流计算电导率。

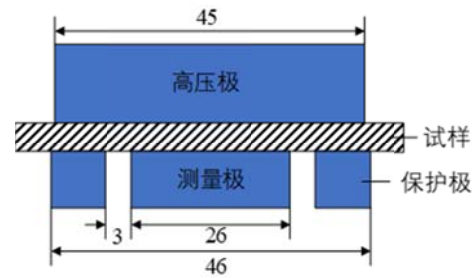


图 2 三电极系统尺寸图(单位: mm)

Fig. 2 Dimensional diagram of three electrode system

考虑到 500 kV 直流电缆绝缘设计场强约为 $20\ \text{kV/mm}$ ，文中直流电导测试选取 $20、30\ \text{kV/mm}$ 两个测试场强，选取 $30、50、70、90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 4 个测试温度，每个测试条件下进行两次测量实验取平均值作为最终结果。

1.2.3 直流击穿场强测量

直流击穿试验使用直径 25 mm、倒角半径为 3 mm 的不锈钢柱—柱电极，将电极浸在油浴锅中控温。高压直流电源最大输出电压为 200 kV。测试温度条件分别为 $30、50、70、90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于直流击穿结果具有一定程度的分散性，文中各个试样均进行相同条件的 20 次击穿实验并记录数据，采用 Weibull 分布对测试数据进行统计处理。

1.2.4 空间电荷测量

空间电荷的测量方法采用对试样无损的电声脉冲法。实验采用 SL130PN600/220 直流高压源，最高输出电压为 130 kV。通过超声脉冲发生器对试样施加宽为 20 ns、频率为 400 Hz 的脉冲，利用空间电荷测量系统采集声信号，并将声信号转化为电信号。电压波形由 Tektronix DPO3054 型示波器采集。空间电荷测量试验在室温条件下进行，测试场强与直流电导测试场强保持一致。

且试验开始前需进行 10 kV/mm 的参考测量。

1.2.5 热刺激电流测量

文中对脱气 0 天和 75 天的取自电缆内、中、外绝缘位置处的试样进行热刺激电流(TSDC)测量,极化温度为 80 °C,极化电压为 250 V,极化时间为 15 min,极化后迅速降温至-100 °C,去掉电压,以 3 °C/min 的升温速率升温至 100 °C,采用 6517B 高精度静电计记录去极化电流。

2 交联副产物在 XLPE 电缆绝缘随脱气时间的分布特性

2.1 交联副产物的半定量分析

对取自 500 kV XLPE 直流电缆内、中、外绝缘位置的片状试样进行红外光谱测试,结果见图 3。1 693、3 370 cm^{-1} 处的红外峰分别对应的是苯乙酮的羰基(C=O)和枯基醇的羟基(-OH)。而在 1 630 cm^{-1} 处没有发现 α -甲基苯乙烯红外吸收峰,这可能是因为在运输制样过程中 α -甲基苯乙烯挥发导致的。物质含量与吸光度的关系由比尔-朗伯定律给出

$$A = \kappa C d \quad (1)$$

式(1)中: κ 为物质的摩尔吸光系数, $\text{L/mol}\cdot\text{cm}^{-1}$; C 为对应官能团摩尔浓度, $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; d 为材料厚度, cm 。

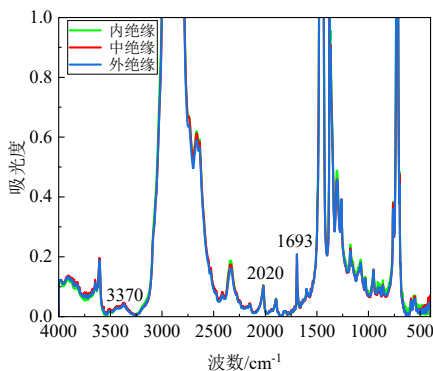


图 3 XLPE 直流电缆不同绝缘位置处的红外吸收光谱图

Fig. 3 Infrared absorption spectra of XLPE DC cables at different insulation positions

由式(1)得,在厚度一致的电缆切片试样中,交联副产物特征峰的吸光度与特征官能团含量成正比,特征官能团含量即代表副产物含量。由于制取切片试样时总有微小误差,无法保证厚度严格一致。亚甲基(-CH₂-)是交联聚乙烯分子链的组成单元,选取位于 2 020 cm^{-1} 处的-CH₂-吸收峰为基准峰。用交联副产物特征官能团的吸收峰高度与亚甲基吸收峰高度的比值,表示副产物相对含量大小

$$\text{副产物相对含量} = \frac{A_{\text{副产物官能团吸收峰}}}{A_{\text{亚甲基吸收峰}}} \quad (2)$$

此方法得到的副产物相对含量为一个比值,只便于对比同一种副产物含量的增减变化,不可用于不同副产物的对比。

2.2 交联副产物径向分布

根据上节提出的方法计算,得到的苯乙酮和枯基醇的相对含量随脱气时间变化见图 4。经过 75 天脱气后,电缆外绝缘位置处副产物含量减少最多,苯乙酮降低 62%,枯基醇降低 30%;内绝缘位置处次之,苯乙酮降低 44%,枯基醇降低 30%;中绝缘位置处副产物含量下降最少,苯乙酮降低 37%,枯基醇降低 17%。

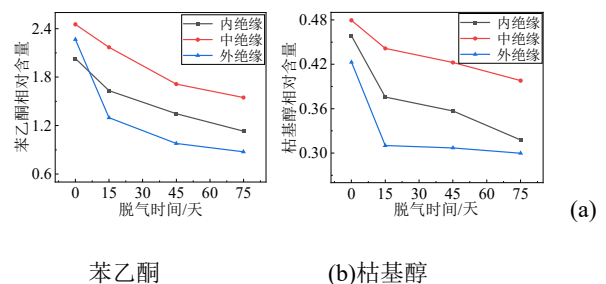


图 4 副产物相对含量随脱气时间变化规律

Fig. 4 Variation of relative content of byproducts with degassing time

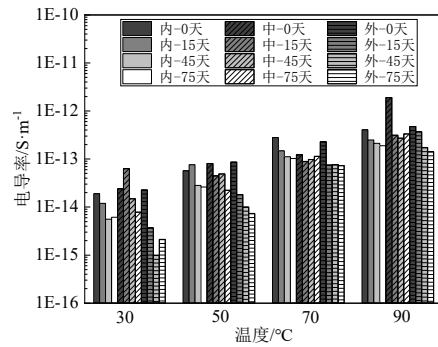
从图 4 可以看出, 开始脱气时, 电缆各绝缘位置处苯乙酮和枯基醇含量较为接近, 径向差异性不大, 随着脱气时间增加, 副产物含量在径向分布的不均匀性逐渐明显。在整个脱气过程中, 副产物均在中绝缘位置相对含量最高, 在内绝缘和外绝缘处含量最低。随着脱气时间的增加, 副产物含量均体现减少的趋势, 但在内绝缘和外绝缘处副产物减少的程度最大, 这是因为副产物分别从导体屏蔽和绝缘屏蔽逸出。脱气 75 天后, 苯乙酮减少 25%~65%左右, 枯基醇减少 33%左右, 说明脱气处理可以降低 XLPE 电缆试样内部的副产物, 但考虑到生产效率, 现有脱气工艺无法完全脱除 500 kV 直流电缆绝缘中的副产物。

3 交联副产物对 XLPE 电缆绝缘直流特性的影响

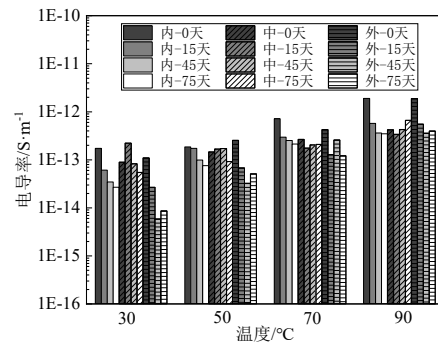
3.1 交联副产物含量对直流电导率的影响

由于 500 kV 直流电缆工作平均场强约为 20 kV/mm, 此外考虑电场畸变情况, 电缆绝缘可能工作在更高的场强下, 测量电场强度选取为 20、30 kV/mm。不同脱气时间、不同绝缘位置处, 厚度为 0.2 mm 的试样在不同温度和不同场强下加压 10 min 后的电导率结果见图 5。直流电导率随着温度和场强的升高而增大。在其他条件不变时, 电缆中绝缘处的直流电导率最大, 并且电导率在脱气过程中逐渐下降。这是因为 XLPE 电缆绝缘的电导率受载流子浓度、载流子电荷量、载流子迁移率影响。电缆绝缘中存在的交联副产物会在外电场的作用下电离产生正负离子对形成载流

子^[14], 并且副产物含量越高, 电离产生的载流子越多。电缆中绝缘处的副产物含量均是最高, 因此中绝缘处的直流电导率最大。副产物在脱气过程中逐渐逸出, 试样中载流子浓度减少, 随之直流电导率下降。



(a) 20 kV/mm



(b) 30 kV/mm

图 5 不同脱气时间的 XLPE 电缆绝缘直流电导率
Fig. 5 DC conductivity of XLPE cable insulation with different degassing time

以脱气 45 天试样为例, 当电场强度为 20 kV/mm 时, $\ln \gamma$ 与 $1/T$ 拟合曲线见图 6。从图 6 可以看出 $\ln \gamma$ 与 $1/T$ 符合式(3)所示电介质中电导率与温度的关系, 当温度增高时, 载流子电离加剧, 且载流子跃迁克服势垒降低, 电导率增加。

$$\ln \gamma = \ln A - \frac{B}{T} \quad (3)$$

式(3)中: A、B 为常数; T 为温度/K。

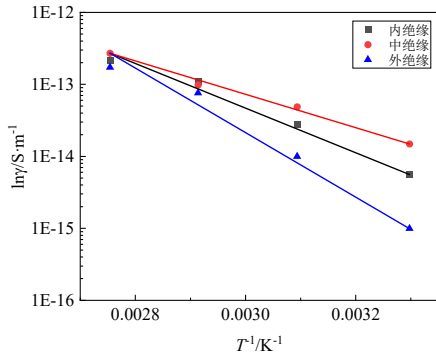


图6 脱气45天试样在20 kV/mm时的 $\ln\gamma$ 与 $1/T$ 拟合曲线

Fig. 6 The fitting curve of $\ln\gamma$ and $1/T$ at 20 kV/mm after 45 days of degassing

为了进一步探究副产物含量与直流电导率的相关性，文中采用皮尔逊相关系数法来衡量交联副产物含量与直流电导率的相关程度。分别用 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 、 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 表示某种副产物含量与直流电导率，则皮尔逊相关系数 r 的计算式为

$$r = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

相关系数 r 的取值范围为 $[-1, 1]$ ，其绝对值越大表示用于计算的两组数据相关性越大。当 $r > 0$ 时代表两组数据呈正相关，反之则负相关。计算得到枯基醇和苯乙酮相对含量与直流电导率的皮尔逊相关系数见表1、2。

表1 不同测量条件下电导率与苯乙酮相对含量线性相关系数

Table 1 Linear correlation coefficient between conductivity and relative content of acetophenone under different measurement conditions				
电场强度 (kV·mm ⁻¹)	线性相关系数			
	30 °C	50 °C	70 °C	90 °C
20	0.919	0.893	0.681	0.743

30 0.892 0.866 0.615 0.493

表2 不同测量条件下电导率与枯基醇相对含量线性相关系数

Table 2 Linear correlation coefficient between conductivity and relative content of cumyl alcohol under different measurement conditions

电场强度 (kV·mm ⁻¹)	线性相关系数			
	30 °C	50 °C	70 °C	90 °C
20	0.916	0.857	0.705	0.512
30	0.815	0.824	0.794	0.393

从表1、2可以看出，除了在90 °C的条件下，其它绝大多数相关系数都大于0.6甚至接近1。说明直流电导率与副产物含量呈正相关关系，并且相关度相近。值得注意的是，皮尔逊相关系数随着测量条件的不同而发生大幅度变化，在高温时计算得到的皮尔逊相关系数大大降低，副产物含量与直流电导率相关性较弱。这是因为，低温时弱束缚离子电导占据主要地位，而副产物就是弱束缚离子的主要来源，此时交联副产物对电导产生较大影响。高温时本征离子电导为主，交联副产物等杂质的影响减弱。而且高温会加速副产物的挥发，使得实验过程副产物含量发生较大变化。

3.2 交联副产物含量对直流击穿场强的影响

不同温度下不同脱气时间、不同绝缘位置处试样的击穿场强见图7。从图7可以明显看到30 °C时，最外层试样击穿场强随脱气时间而增加，最内层试样击穿场强随脱气时间下降。有研究表明脱气会使XLPE电缆绝缘的交联度、结晶度和晶粒尺寸发生改变。而这些因素都会影响击穿场强^[15-17]。此外副产物含量增加时，空间电荷急剧增

多^[18]，局部电场畸变，导致击穿场强下降；当试样中的副产物含量超过某一限度时，会导致陷阱深度增大，降低载流子迁移率，在击穿过程中阻碍二次电子崩的形成^[19]，此时击穿场强提高。

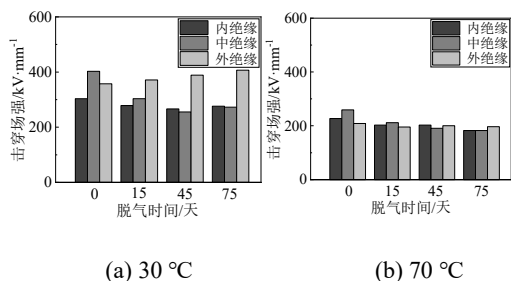


图 7 不同温度下直流击穿场强随脱气时间和径向距离变化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of DC breakdown field strength with degassing time and radial distance at different temperatures

70 °C时，直流击穿场强在各绝缘位置的数值差异性逐渐减小，不同绝缘位置处试样的击穿场强较为接近，此时温度对击穿场强的影响占主导因素，脱气时间不再是主要影响因素。击穿场强与副产物含量没有显著关系，因此不再分析交联聚乙烯电缆绝缘的击穿场强与交联副产物含量的线性关系。

3.3 交联副产物含量对空间电荷的影响

对不同脱气时间的内、中、外绝缘试样在外加 20 kV/mm 和 30 kV/mm 场强条件下进行空间电荷试验测试。其中脱气 75 天绝缘切片试样在 20 kV/mm 下加压 30 min 的空间电荷分布和电场畸变情况见图 8。从图 8 可以看出随着外加电压的升高，出现在试样内部的空间电荷现象和场强畸变程度也逐渐强烈。

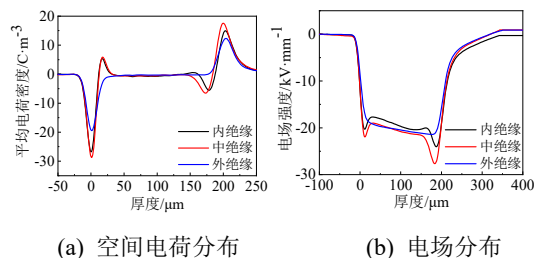


图 8 脱气 75 天时 20 kV/mm 下试样的空间电荷分布和电场分布

Fig. 8 Space charge distribution and electric field distribution of the sample at 20 kV/mm after 75 days of degassing

计算得到的平均电荷密度和最大场强畸变率变化情况见图 9、10。在电缆脱气 0 天到脱气 15 天的过程中，平均电荷密度和最大场强畸变率均出现增大现象，这可能是由于脱气的加热过程加速了物质的热运动，使得杂质从半导体屏蔽层扩散到交联聚乙烯中。已有的研究表明，电缆半导体屏蔽层中的添加剂及其他小分子，在脱气室内加热过程中可能进入到交联聚乙烯部分^[20]。脱气 75 天试样的平均电荷密度和最大场强畸变率较脱气 15 天的最大值分别下降了约 60%与 80%，同时相比于脱气 0 天的试样也大大下降。副产物的存在会导致绝缘中陷阱增多，于是空间电荷增多。脱气处理可以有效减少副产物的含量，使电离产生的载流子数量减少，而且陷阱数目也会减少，从而使电荷积累少，同时电场的均匀性降低，最大场强畸变率也随之降低。图中也可以发现在其他条件一致的情况下，更高的电场强度会导致在试样中出现更大的平均电荷密度与场强畸变率。这是因为电场越高，副产物电离出正负离子数越多，导致平均电荷密度和场强畸变率增大^[21]。

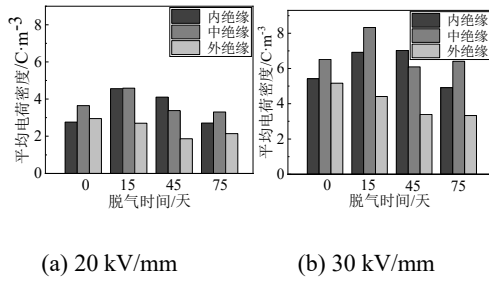


图9 不同电场强度下平均电荷密度随脱气时间变化示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the variation of average charge density with degassing time under different electric field strength

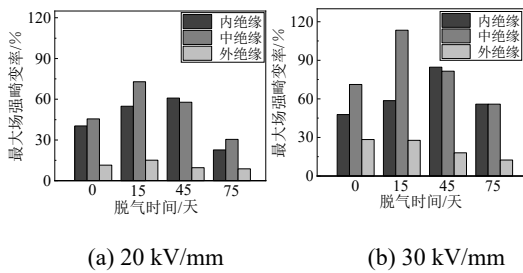


图10 不同电场强度下最大场强畸变率随脱气时间变化示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the variation of maximum field strength distortion rate with degassing time under different electric field strength

进一步对副产物含量与平均电荷密度和最大场强畸变率的相关性做定量的评估, 计算得到的皮尔逊相关系数分别见表 3、4。3、4 表中可以看出, 平均电荷密度和最大场强畸变率与副产物含量都表现出较强的相关性。

表3 平均电荷密度和最大场强畸变率与苯乙酮相对含量的线性相关系数

参数	线性相关系数	
	20 kV/mm	30 kV/mm
平均电荷密度	0.785	0.832
最大场强畸变率	0.970	0.912

表4 平均电荷密度和最大场强畸变率与枯基醇相对含量的线性相关系数

Table 4 The linear correlation coefficient between the average charge density and the maximum field strength distortion rate and the relative content of cumyl alcohol

参数	线性相关系数	
	20 kV/mm	30 kV/mm
平均电荷密度	0.910	0.866
最大场强畸变率	0.888	0.896

3.4 交联副产物含量对 XLPE 电缆绝缘陷阱特性的影响

若电介质加压后产生多种极化, TSDC 曲线将会存在多个电流峰, 不同的峰表征不同的极化过程。脱气 0 天以及脱气 75 天的电缆试样测得的热刺激去极化电流见图 11。试样在 90 °C 附近存在较明显的峰, 在 25、75 °C 存在两个较小的峰。脱气 0 天的 TSDC 图谱比脱气 75 天试样的 TSDC 图谱所包围的面积大, 其中脱气 0 天试样中绝缘位置处 TSDC 峰的面积最大, 脱气 75 天试样外绝缘位置处 TSDC 峰的面积最小, 而峰面积与陷阱密度成正比, 说明脱气后试样陷阱密度减小, 可能与副产物含量有关。

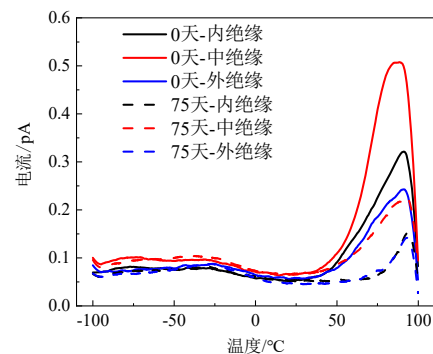


图11 不同脱气时间试样的 TSDC 谱

Fig. 11 TSDC spectra of samples with different degassing times

活化能 H 可以通过求解直线斜率得到, 用来

表征陷阱深度^[22]。热刺激电流峰值一定程度上可以表征陷阱密度。陷阱电荷量通过对 TSDC 曲线

积分求得。脱气 0 天和脱气 75 天的热刺激电流峰值、活化能和陷阱电荷量的计算结果见表 5。

表 5 脱气 0 天和 75 天试样的热刺激电流峰值、活化能和陷阱电荷量

Table 5 Peak thermal stimulation current, activation energy, and trap charge of samples at 0 and 75 days of degassing

试样编号	0 d-中	0 d-内	0 d-外	75 d-中	75 d-内	75 d-外
苯乙酮相对含量	2.45	2.03	2.27	1.55	1.13	0.88
枯基醇相对含量	0.48	0.46	0.42	0.40	0.32	0.30
陷阱电荷量/pC	367	241	227	192	106	102
活化能/eV	0.45	0.38	0.40	0.12	0.04	0.10
电流峰值/pA	5.08	3.21	2.93	2.27	1.52	1.41

随着苯乙酮和枯基醇相对含量的增加，陷阱深度与密度也随之增加。以前文提到的方法分析 20 kV/mm、30 °C 时的直流电导率、平均电荷密度、最大场强畸变率分别和陷阱电荷量的相关性，计算得到的线性相关系数分别为 0.888、0.956、0.941。说明直流电导率、平均电荷密度、最大场强畸变率均和陷阱密度具有很强的线性相关性，副产物含量高时，会引入较多陷阱以及杂质^[23]，导致电场的畸变严重，直流电导率增大，会严重影响电缆绝缘的正常工作。

4 结论

文中以 500 kV 高压直流电缆 XLPE 绝缘切片试样为研究对象，首先确定了切片试样中交联副产物相对含量的表征方法，其次研究了脱气时 XLPE 绝缘中交联副产物的径向分布，然后研究了副产物含量对 XLPE 电缆绝缘的直流电导率、击穿场强、空间电荷、陷阱特性的影响。得到的主要结论如下：

1) 交联副产物随脱气时间和绝缘径向距离存在不均匀性，脱气 75 天后，苯乙酮减少 25%~65%

左右，枯基醇减少 33% 左右，但现有脱气工艺无法完全脱出 500 kV 直流电缆绝缘中的副产物。

2) 苯乙酮和枯基醇会对 XLPE 电缆绝缘的直流特性产生影响。在不同温度和电场下，不同位置绝缘电导率的变化差异可从几倍增加到两个数量级，脱气 75 天后，电缆绝缘电导率随副产物含量的降低从 10^{-13} S/m 减少至 10^{-15} S/m；直流击穿场强随副产物含量的变化不明显。

3) 脱气 75 天后，电缆绝缘试样的平均电荷密度和最大场强畸变率分别由最大值 $8.3 \text{ C}\cdot\text{m}^{-3}$ 、113% 线性减少至 $6.4 \text{ C}\cdot\text{m}^{-3}$ 、55%；陷阱密度从 102 pC 增加至 367 pC，陷阱深度从 0.04 eV 增加至 0.45 eV。

参考文献：

- [1] 邓雯玲, 卢继平, 苟鑫, 等. 适用于高压电缆-架空线混合线路的新型重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 126-132.
DENG Wenling, LU Jiping, GOU Xin, et al. Novel reclosing scheme for hybrid lines with high-voltage cable and overhead lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 126-132.
- [2] 王孟夏, 周生远, 杨明, 等. 计及海底电缆热特性的可接纳海上风电装机容量评估方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(6): 195-202.

- WANG Mengxia, ZHOU Shengyuan, YANG Ming, et al. Assessment method for acceptable installed capacity of offshore wind farms considering thermal characteristics of submarine cables[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(6): 195-202.
- [3] 范路, 陈萌, 张洪亮, 等. 型式试验对高压直流电缆交联副产物迁移过程及电导特性的影响[J]. *电气工程学报*, 2018, 13(11): 44-51.
FAN Lu, CHEN Meng, ZHANG Hongliang, et al. Effect of type test on migration process of cross-linked by-products and conduction characteristics of HVDC cables[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2018, 13(11): 44-51.
- [4] 侯帅, 张逸凡, 赵远涛, 等. 脱气对 525 kV 交联聚乙烯绝缘直流电缆空间电荷特性的影响[J]. *南方电网技术*, 2021, 15(12): 78-85.
HOU Shuai, ZHANG Yifan, ZHAO Yuantao, et al. Effect of degassing on space charge properties of 525 kV XLPE insulated DC cable[J]. *Southern Power System Technology*, 2021, 15(12): 78-85.
- [5] 苏鹏飞, 吴建东, 祝曦, 等. 脱气处理对直流电缆绝缘击穿场强的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(2): 663-671.
SU Pengfei, WU Jiandong, ZHU Xi, et al. Effect of degassing treatment on breakdown strength in direct current cable insulation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(2): 663-671.
- [6] 王文超, 王海洋, 赵隼林, 等. 220 kV XLPE 绝缘海缆脱气效率和低碳性研究[J]. *电线电缆*, 2023(3): 12-17.
WANG Wenchao, WANG Haiyang, ZHAO Youlin, et al. Study on degassing efficiency of green and low-carbon 220 kV XLPE insulated submarine cables[J]. *Electric Wire & Cable*, 2023(3): 12-17.
- [7] 岳振国, 钱朝晖, 孙亚斌, 等. 交联聚乙烯高压电缆脱气效率研究[J]. *电线电缆*, 2018(5): 15-19.
YUE Zhenguo, QIAN Chaohui, SUN Yabin, et al. Study on degassing efficiency of crosslinked polyethylene high voltage cable[J]. *Electric Wire & Cable*, 2018(5): 15-19.
- [8] 王志辉. 应用于交联电缆的热泵去气室恒温节能系统[J]. *自动化与信息工程*, 2017, 38(3): 6-11.
WANG Zhihui. Constant temperature and energy saving system for heat pump degassing chamber applied to cross-linked cable[J]. *Automation & Information Engineering*, 2017, 38(3): 6-11.
- [9] 赵隼林, 张建民, 胡明, 等. 大长度 500 kV XLPE 超高压海底电缆关键技术研究[J]. *电线电缆*, 2020(2): 12-16.
ZHAO Youlin, ZHANG Jianmin, HU Ming, et al. Key technology research for large length 500 kV XLPE UHV submarine cable[J]. *Electric Wire & Cable*, 2020(2): 12-16.
- [10] OHKI Y, HIRAI N, KOBAYASHI K, et al. Effects of byproducts of crosslinking agent on space charge formation in polyethylene-comparison between acetophenone and alpha-methylstyrene[C]//2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Victoria, Canada: IEEE, 2000: 535-538.
- [11] 屠亦军, 张洪亮, 高震, 等. 脱气处理对交联聚乙烯中交联副产物及空间电荷特性的影响[J]. *绝缘材料*, 2018, 51(4): 58-63.
TU Yijun, ZHANG Hongliang, GAO Zhen, et al. Effects of degassing treatment on crosslinking byproducts and space charge characteristics in cross-linked polyethylene[J]. *Insulating Materials*, 2018, 51(4): 58-63.
- [12] KANAI T, FUJITOMI T, MIYAKE H, et al. Reduction effect of cross-linking by-products on dielectric strength in polyethylene under dc stress[C]//2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM). Toyohashi, Japan: IEEE, 2017: 489-492.
- [13] 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.
- [14] 沈耀军, 陈振新, 易姝慧, 等. 预鉴定试验对高压直流电缆绝缘电导特性的影响[J]. *绝缘材料*, 2018, 51(9): 61-69.
SHEN Yaojun, CHEN Zhenxin, YI Shuhui, et al. Effects of pre-qualification tests on conductivity characteristics in HVDC cable insulation[J]. *Insulating Materials*, 2018, 51(9): 61-69.

- [15]金海云, 曾 颀, 马佳炜, 等. 脱气热处理对 110 kV 交流 XLPE 电缆绝缘力学性能和介电性能的影响[J]. 绝缘材料, 2019, 52(8): 24-31.
JIN Haiyun, ZENG Yang, MA JIA Wei, et al. Effect of degassing heat treatment on mechanical and dielectric properties of 110 kV AC XLPE insulation[J]. *Insulating Materials*, 2019, 52(8): 24-31.
- [16]李志伟, 金海云, 张 涛, 等. 脱气时间对交联聚乙烯电缆绝缘材料聚集态结构与链结构的影响[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(4): 15-23.
LI Zhiwei, JIN Haiyun, ZHANG Tao, et al. Effect of degassing time on aggregation structure and chain structure of XLPE cable insulation material[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(4): 15-23.
- [17]李 飞, 钟力生, 李文鹏, 等. 挤包绝缘高压直流电缆制造与应用中的径向梯度效应[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 63-71.
LI Fei, ZHONG Lisheng, LI Wenpeng, et al. The radial gradient effect of HVDC extruded cables in manufacturing and application[J]. *Electric Power*, 2021, 54(4): 63-71.
- [18]罗 兵, 孟繁博, 王婷婷, 等. 脱气处理对高压直流电缆绝缘特性的影响[J]. 电工技术学报, 2021, 36(s2): 730-735.
LUO Bing, MENG Fanbo, WANG Tingting, et al. Effect of degassing treatments on insulation characteristics of high voltage DC cables[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(s2): 730-735.
- [19]聂永杰, 赵现平, 李盛涛. 聚乙烯陷阱特性对真空直流沿面闪络性能的影响[J]. 物理学报, 2019, 68(22): 351-360.
NIE Yongjie, ZHAO Xianping, LI Shengtao. Influence of trap characteristics on DC surface flashover performance of low density polyethylene in vacuum[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(22): 351-360.
- [20]MEUNIER M, QUIRKE N, BINESTI D, et al. Identification of space charge in cable insulation: a new approach using molecular simulation[C]//IEEE 1997 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Minneapolis, USA: IEEE, 1997: 68-71.
- [21]陈 萌. XLPE 电缆中交联副产物对空间电荷影响的定量表征参数研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
CHEN Meng. Study on quantitative characterization parameters for the effect of cross-linked byproducts on space charge in XLPE cables[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [22]申作家, 罗智奕, 詹威鹏, 等. 基于介质体内陷阱参数与松弛过程的 XLPE 电缆绝缘热老化行为分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5382-5388.
SHEN Zuojia, LUO Zhiyi, ZHAN Weipeng, et al. Analysis on thermal aging behaviors of XLPE cable insulation based on trap parameters and relaxation process[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(19): 5382-5388.
- [23]高俊国, 张 豪, 李丽丽, 等. 交联聚乙烯/蒙脱土纳米复合物空间电荷特性研究[J]. 高分子学报, 2013(1): 126-133.
GAO Junguo, ZHANG Hao, LI Lili, et al. Study on space charge characteristics of XLPE/O-MMT nanocomposites[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2013(1): 126-133.
- 白 健(1997—), 男, 硕士, 从事高压交直流电缆绝缘关键技术方面研究(E-mail: 2427279840@qq.com)。
- 张 亚(1988—), 男, 本科, 工程师, 从事高压电缆设计及制造研究(E-mail: 454401339@qq.com)。