

浓度梯度驱动的电绝缘副产物扩散模型及应用

陈 静¹, 徐 静¹, 刘 学¹, 唐松柏¹, 吴永昊², 李 飞², 高景晖², 钟力生^{2*}

(1. 远东海缆有限公司, 江苏 南通 226400;

2. 西安交通大学 电工材料电气绝缘全国重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 脱气热处理是交联聚乙烯电缆生产过程中耗时最长的工艺环节, 减少脱气时间是提升电缆生产效率的重要途径。本文针对高压电缆用交联聚乙烯绝缘材料中残留副产物的迁移问题, 建立了基于浓度梯度驱动的电绝缘副产物扩散模型, 通过实测 320 kV 直流电缆脱气后绝缘内的副产物浓度, 将仿真与实验结果进行对比, 并研究了温度和副产物初始浓度对脱气过程的影响。结果表明: 针对 320 kV 直流电缆脱气后甲烷和苯乙酮两种副产物的浓度分布, 仿真与实测结果基本一致, 验证了模型的正确性; 更高的温度可加快副产物的脱气过程, 在 65~75℃ 温度范围内, 温度每提升 5℃, 甲烷脱气时间缩短约 30%、苯乙酮脱气时间缩短约 72 h; 降低副产物初始浓度也可缩短电缆脱气时间。合理地调控副产物初始浓度和脱气温度是优化电缆脱气过程、提高企业效益的重要途径。

关键词: 高压交联电缆; 交联副产物; 气相色谱; 菲克第二定律; 脱气时间

Diffusion model of cable insulation by-products driven by concentration gradient and its application

CHEN Jing¹, XU Jing¹, LIU Xue¹, TANG Songbai¹, WU Yonghao²,

LI Fei², GAO Jinghui², ZHONG Lisheng^{2*}

(1. Far East Submarine Cable Co., Ltd., Nantong 226400, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Degassing heat treatment is the longest process in the production of cross-linked polyethylene (XLPE) cables, and reducing degassing time is an important way to improve cable production efficiency. Focused on the migration of residual by-products in XLPE insulating materials for high-voltage cables, we established a diffusion model of cross-linked by-products driven by concentration gradient. The concentration of by-products in the insulation of a 320 kV DC cable after degassing was measured and compared with the simulation results, and the effects of temperature and initial concentration of by-products on the degassing process were investigated. The results show that the simulation and measured results of the concentration distributions of methane and acetophenone in the 320 kV DC cable after degassing are essentially consistent, verifying the correctness of the model. Higher temperatures can accelerate the degassing process of by-products. Within the temperature range of 65–75℃, for every 5℃ increase in temperature, the degassing time for methane is shortened by approximately 30%, and the degassing time for acetophenone is shortened by approximately 72 h. Reducing the initial by-product concentration can also shorten the cable degassing time. It is an important way to reasonably regulate the initial concentration of by-products and degassing temperature for optimizing the cable degassing process and improving enterprise efficiency.

Key words: high voltage cross-linked cable; cross-linked by-products; gas chromatography; Fick's second law; degassing time

0 引言

近年来, 经济的发展使得城市化进程不断深入, 促使输配电设备向着占地面积小、造价水平低、安装检修方便等新方向发展^[1-2]。电缆具有不影响市容、供电可靠等优势, 在以城市为核心的大型电

网建设中占有极为重要的地位。交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)具有优异的耐热性和电学性能, 常用作高压电缆的绝缘材料。XLPE 的交联方法以过氧化物化学交联法为主, 过氧化二异丙苯(dicumyl peroxide, DCP)是常用的交联剂^[3]。在

过氧化物引发PE交联过程中,DCP分解生成活性极强的不稳定自由基,引发夺取氢并生成聚合物自由基的反应,除产生XLPE外,还会生成甲烷、枯基醇、苯乙酮以及 α -甲基苯乙烯等多种交联副产物,这些副产物可能对电缆性能产生较大影响。甲烷的聚集和扩散可导致屏蔽层与护套间发生膨胀,使电缆终端压力增大,甚至可能发生爆炸^[4]。苯乙酮和枯基醇等极性副产物则会影响交流电缆的介质损耗和直流电缆的电导率等电气性能,在电缆绝缘内形成空间电荷,造成电场畸变,进一步引发局部放电,导致绝缘老化^[5]。

电缆生产厂商常将电缆置于一定温度(如70℃)的环境中进行热处理,以达到去除各类交联副产物的目的,这一工艺流程被称为脱气。实践表明,相比其他电缆制造流程,电缆绝缘层脱气处理环节所耗时间在整个电缆生产周期中占比最大,达到50%~70%^[6]。因此,对耗能又耗时的脱气处理工艺加以优化,对于提高电缆质量、提升厂商生产效率至关重要。此外,在脱气温度选取、脱气装置设计等工艺细节上,厂商往往只能通过经验做出判断和选择。这些都表明对电缆脱气进行系统性研究具有非常重要的现实意义。

目前国内外学术界对电缆绝缘脱气的研究主要集中于脱气对其微观结构和电气性能的影响等方面。在晶体结构研究领域,陈向荣等^[7]通过构建XLPE晶体生长模型,分析了脱气处理过程中材料绝缘特性及其与微观结构变化的关联机理。针对高压直流海缆,REN H Y等^[8]揭示了电缆绝缘脱气后径向存在的电场不均匀分布现象,并指出交联副产物的存在、交联度和结晶度的不均匀分布可能是造成这一现象的原因^[8]。徐庆文等^[9]研究表明,XLPE内部气孔和副产物的浓度共同影响着材料的电树引发和生长特性,更少的气孔以及适宜的苯乙酮浓度可抑制电树引发与生长^[9]。

国内外亦有学者依据菲克第二定律,建立电缆副产物脱气的数学模型,阐述了副产物浓度变化的机理,并对脱气一段时间后的副产物浓度进行预测^[10-11],但其着眼于电缆所含副产物总浓度的下降,不能展现脱气时副产物在绝缘中的具体分布变化过程。

本研究以菲克定律为理论基础,建立浓度梯度驱动的电绝缘副产物脱气模型,研究不同条件下

副产物的扩散规律,然后将该模型与工厂实际脱气过程结合,明确脱气温度和副产物初始浓度对脱气过程的影响规律,以期为电缆脱气工艺优化提供重要参考,从而提高电缆产品质量和生产效率,保证电缆的可靠运行。

1 试验

1.1 交联聚乙烯绝缘切片试样制备

试验所用样品取自DC-HYJQ41-F型320 kV直流电缆(简称320 kV直流电缆),电缆直接取自工厂,结构完整,包括铜芯、内屏蔽层、XLPE绝缘层、外屏蔽层,如图1所示。电缆截面直径约为122 mm,铜芯导体截面积约为2 500 mm²。将电缆截为长度约为200 mm的若干小段,除保留一份作为未脱气电缆段进行对比研究外,其余均置于恒温烘箱中进行70℃脱气热处理,脱气处理时间分别为72、168、240 h。脱气热处理结束后,将电缆段取出并置于室温环境中冷却。自内屏蔽层外侧起,对电缆绝缘每隔5 mm取1个点,共取5个点,自内向外分别标记为1#~5#,使用切片机沿轴向取样后即刻进行测试。

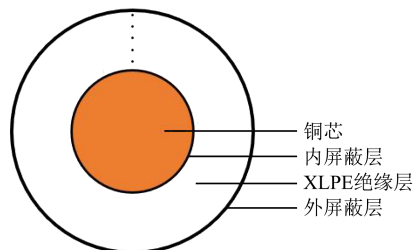


图1 电缆结构与绝缘取样示意图

Fig.1 Schematic diagram of cable structure and insulation sampling

1.2 副产物浓度测试方法

1.2.1 傅里叶红外光谱分析

实验仪器为ThermoFisher Scientific公司生产的显微红外光谱仪,型号为Nicolet iN10。实验采用透射模式,对经不同脱气时间电缆绝缘制成的XLPE薄片试样进行红外光谱扫描,记录不同试样的红外光谱图并进行分析。

交联副产物种类多样,其中甲烷与水容易脱出,而苯乙酮和枯基醇则是主要的残留副产物。苯乙酮在1 690 cm⁻¹处存在特征峰,枯基醇在3 370 cm⁻¹处存在特征峰。作为XLPE主链骨架的亚甲基的吸收峰位于2 020 cm⁻¹处,其吸光度不受脱气的影

响,故可以作为标准峰。以标准峰的峰高变化比例作为基准,可以排除试样厚度、环境湿度以及操作等产生的系统误差。红外光谱测试依据的 Lambert-Beer 定理,如式(1)所示。

$$A = \lg\left(\frac{1}{T}\right) = Kbm \quad (1)$$

式(1)中: A 为吸光度; T 为透射比; K 为摩尔吸光系数; b 为吸收层厚度,cm; m 为吸光物质的浓度, mol/L。

针对同一次测试结果,副产物特征峰吸光度与主链亚甲基吸光度的比值,即可代表试样内部副产物的相对浓度,计算公式如式(2)所示。其中吸光系数、吸收层厚度和亚甲基浓度均为常数,副产物的相对浓度 n_i 与其摩尔浓度 m_i 成正比。

$$\frac{A_i}{A_0} = \frac{K_i b m_i}{K_0 b m_0} = n_i \quad (2)$$

式(2)中: A_i 为某种副产物吸光度; A_0 为主链亚甲基吸光度; K_i 为该种副产物的摩尔吸光系数; K_0 为主链亚甲基的摩尔吸光系数; m_i 为该种副产物的摩尔浓度, mol/L; m_0 为主链亚甲基的摩尔浓度, mol/L; n_i 为副产物的相对浓度。

将完全脱气的 XLPE 试样浸入纯净的苯乙酮或枯基醇中,通过控制浸渍时间制备含不同浓度副产物的 XLPE 试样。通过测量浸渍副产物前后 XLPE 试样的质量,可计算获得副产物的质量分数,而通过傅里叶红外光谱图则可获得副产物的相对浓度,由此可拟合得到 XLPE 中副产物质量分数和相对浓度的函数关系。根据文献[12]可知,副产物的质量分数 w_i 与相对浓度 n_i 成正比,如式(3)所示,则副产物在交联聚乙烯中的浓度 C_i 可表示为式(4)。

$$w_i = B_i n_i \quad (3)$$

$$C_i = \rho w_i \quad (4)$$

式(3)~(4)中: w_i 为某种副产物的质量分数,%; B_i 为该种副产物质量分数与相对浓度间的拟合系数,对于苯乙酮, B_b 取值为0.13,对于枯基醇, B_k 取值为1.35^[12]; C_i 为该种副产物的浓度, kg/m³; ρ 为交联聚乙烯的密度,取值为0.98 g/cm³。

1.2.2 气相色谱测试

按1.1节所述方法切片后,使用裁具在样片中截取圆饼状试样,称量记录其质量为 m ,之后迅速置于密封良好的容积为100 mL的针管内。针管头部使用硅橡胶塞密封,活塞处涂有适量的硅脂,保证针管中气体不泄漏的同时,活塞能顺利滑动,如

图2所示。将针管置于烘箱内加热60 min后取出,固体绝缘中残留的甲烷几乎可以忽略不计,可认为电缆切片试样中剩余的甲烷已全部逸散在针管中^[13]。

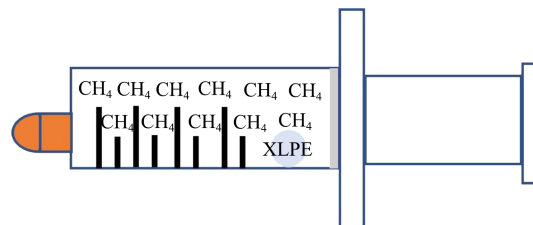


图2 涂有硅脂密封的100 mL 针管示意图

Fig.2 Schematic diagram of a 100 mL syringe sealed with silicone grease

使用型号为中分2 000的气相色谱仪进行气体测试,用容量为1 mL的小型取样器,扎入针管端部的硅橡胶后抽取气体,取样完成后注入色谱仪通道测试气体成分。气相色谱分析依据 GB/T 17623—2017 进行,试样中甲烷的质量浓度可由式(5)~(7)来计算。

$$C_j = \frac{D_j \rho_j V n_p n_v c_j}{m} \quad (5)$$

$$n_p = \frac{P}{P_0} \quad (6)$$

$$n_v = D_a + D_v \quad (7)$$

式(5)~(7)中: C_j 为试样中甲烷的质量浓度, mg/kg; D_j 为浓度校正系数,取值为0.929; ρ_j 为甲烷的密度, 0.716 kg/m³; V 为容器即针管的体积,0.1 L; n_p 、 n_v 均为系数; c_j 为气相色谱仪测得的甲烷浓度, μL/L; m 为交联聚乙烯试样的质量, g; P 为试验时的气压, kPa; P_0 为标准大气压,101.3 kPa; D_a 为奥斯瓦尔德系数,取值为0.43; D_v 为体积修正参数^[14]。

2 脱气电缆副产物扩散过程的分析

对不同脱气时间处理的电缆段进行红外光谱和气相色谱测试,其中未脱气电缆的部分测试原始曲线如图3和图4所示。

将各试样的原始测试数据代入式(2)~(7)进行计算,获得副产物的浓度分布,结果如图5所示,其中横坐标表示绝缘距内屏蔽层的距离。从图5可以看到,电缆绝缘中的初始甲烷、苯乙酮呈现出中间绝缘浓度高、内外两侧绝缘浓度低的分布,而枯基醇呈现出内部绝缘浓度高、外部绝缘浓度低的分布。各电缆绝缘试样的各种副产物浓度均随着脱

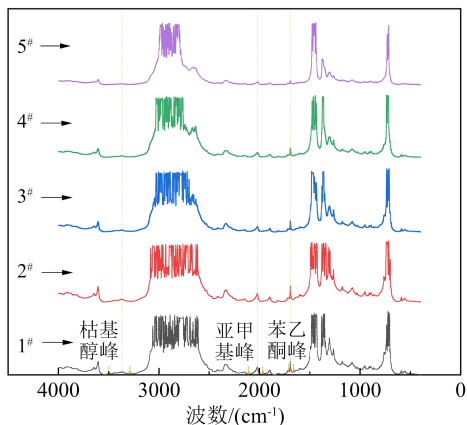


图3 未脱气电缆段红外测试结果

Fig.3 Infrared test results of non-degassing cable section

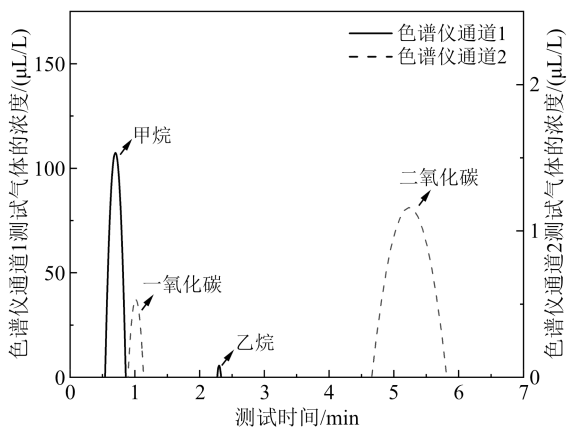
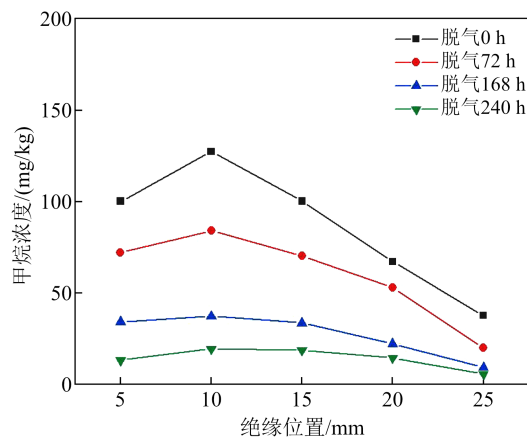


图4 未脱气电缆段气相色谱测试结果

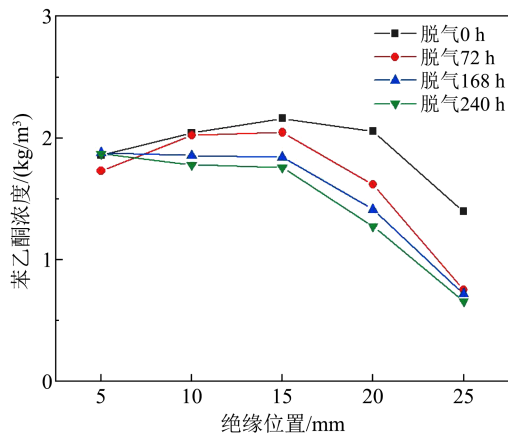
Fig.4 Gas chromatography test results of non-degassing cable section

气时间的增加而逐渐降低。其中,甲烷浓度始终呈现中间绝缘浓度高、内外两侧绝缘浓度低的分布状态,脱气 168 h 使电缆绝缘各处的甲烷浓度降至 50 mg/kg 以下,脱气 240 h 降至 25 mg/kg 以下。苯乙酮的分布由初始的中间绝缘浓度高、内外两侧绝缘浓度低的分布逐步转变为内部绝缘浓度高,自内向外逐渐降低的分布。脱气 168 h 后,中间绝缘到外侧绝缘的苯乙酮浓度已大幅度下降,而内侧绝缘的苯乙酮浓度变化很小。枯基醇的分布始终呈现内部绝缘浓度高、自内向外逐渐降低的特点,且内侧绝缘的枯基醇浓度随着脱气时间的增加逐渐降低。经过 240 h 的脱气后,电缆绝缘中整体的枯基醇浓度略有降低。

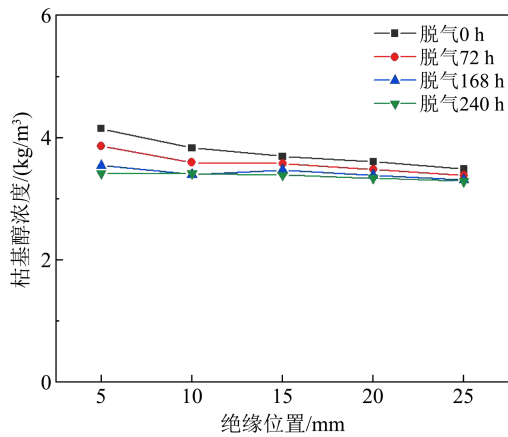
电缆线芯挤出后在交联管道内被高压氮气加热,DCP 受热分解引发聚乙烯的交联反应。交联反应产生的副产物种类与反应温度有关,在较低的反应温度下,交联副产物主要是枯基醇,而部分枯基



(a) 甲烷



(b) 苯乙酮



(c) 枯基醇

图5 不同脱气时间处理的 320 kV 电缆副产物浓度测试结果

Fig.5 Test results of by-product concentration in 320 kV cables treated with different degassing times

醇可能进一步分解成水和 α -甲基苯乙烯(即图 6 中的路径 A);随着反应温度的升高,交联反应产生苯乙酮和甲烷(即图 6 中的路径 B)的比例逐渐升高^[15]。由于绝缘层导热性能较差,绝缘温度呈现从外向内逐渐降低的梯度分布^[16],使得温度较高的外侧绝缘

中交联反应产生的苯乙酮浓度更高,而越靠内侧的绝缘温度越低,交联反应产生的枯基醇浓度越高。同时由于交联过程中绝缘层的温度很高,交联副产物还会发生剧烈的扩散现象,而绞合的电缆导体间存在空隙,绝缘中的交联副产物除通过绝缘屏蔽向外扩散到交联管道外,还可以通过导体屏蔽向导体方向扩散,使得未脱气电缆绝缘中的甲烷、苯乙酮浓度径向分布最终呈现出图 5(a)和 5(b)中所示的中间高、内外侧低的结果,而枯基醇浓度的径向分布则呈现出图 5(c)中所示的内侧高、外侧低的结果。

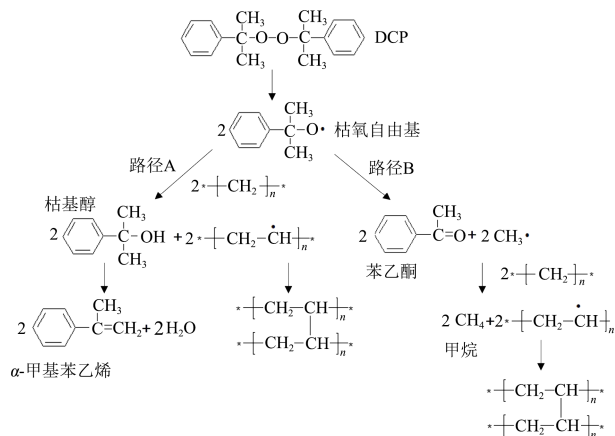


图6 交联过程中生成副产物的两条反应路径

Fig.6 Two reaction pathways for generating by-products during crosslinking process

3 浓度驱动的副产物迁移模型及扩散规律

3.1 副产物迁移模型建立

(1)理论基础

根据菲克第二定律,在微观结构不发生变化的前提下,稀物质在各向同性介质中的传递扩散是自高浓度向低浓度进行,物质浓度对时间的偏导数与其拉普拉斯算子成正比,具体见式(8)^[17]。交联副产物的扩散应当符合这一扩散规律^[7,15,18-19]。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

式(8)中: C 为物质的浓度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; D 为扩散系数, m^2/s ; x, y 为电缆平面模型二维坐标。

扩散系数 D 是与温度相关的函数,二者的关系符合阿伦尼乌斯方程^[15,17-19],如式(9)所示。3种主要副产物在交联聚乙烯中的扩散系数可在片状绝缘试样脱气过程中通过分离变量法求得,由已知的部分温度下各种副产物的扩散系数可推算出不同温度下的扩散系数^[15,19],结果见图7和表1。

$$D = D_0 e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (9)$$

式(9)中: D_0 为扩散系数极限值, m^2/s ; E_a 为活化能, J/mol ; R 为理想气体常数,取值为 $8.314, \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为热力学温度, K 。

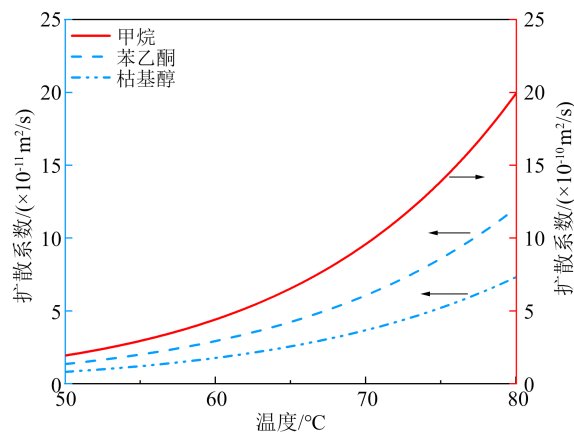


图7 不同温度下各副产物的扩散系数

Fig.7 Diffusion coefficients of various by-products at different temperatures

表1 不同温度下3种副产物的扩散系数

Table 1 Diffusion coefficients of three kinds of by-products at different temperatures

温度/ $^{\circ}\text{C}$	扩散系数 $D/(\times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s})$		
	甲烷	苯乙酮	枯基醇
80	201.5	12.8	7.3
75	138.7	8.6	5.2
70	97.0	6.1	3.7
65	65.3	4.2	2.6
60	44.1	3.0	1.8

(2)仿真模型

使用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件建立电缆脱气的二维平面模型,以苯乙酮的扩散为例,如图8所示。最外侧绝缘中的苯乙酮通过绝缘屏蔽向空气中扩散,内侧绝缘中的苯乙酮由高浓度区域向低浓度区域扩散。由于电缆导体为绞合型铜芯,存在空隙,导体屏蔽中的苯乙酮可以向内沿着导体方向继续扩散。

(3)仿真所作假设与条件设置

仿真作如下假设:电缆绝缘是均匀的各向同性材料;理论上电缆模型可视为同心圆柱结构;副产物只在径向上进行扩散,不计其在电缆轴向的差异;电缆处于通风良好的环境中;电缆绝缘各处温度相同。

副产物的初始浓度根据前述未脱气电缆的测

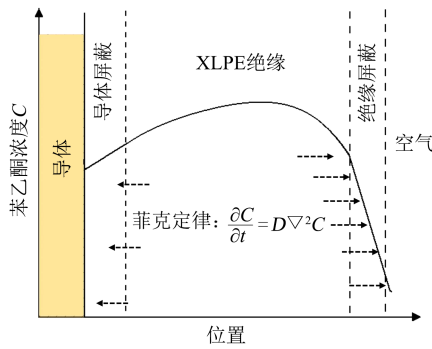


图8 电缆线芯径向由浓度梯度驱动的扩散模型

Fig.8 Diffusion model driven by concentration gradient in the radial direction of cable core

试结果设置：对未脱气电缆的副产物测试结果使用 Origin Pro 软件进行函数拟合，以此作为副产物初始浓度分布，并输入仿真模型。未脱气的 320 kV 电缆绝缘副产物浓度分布的测试结果显示，甲烷和苯乙酮呈现出中部绝缘浓度高、内外侧绝缘浓度低的分布，可对其进行二次函数拟合；枯基醇呈现出内部浓度高、自内向外浓度逐渐降低的分布，可对其进行线性函数拟合，具体拟合结果如图9所示。各函数的拟合优度均大于0.9，拟合效果较好。

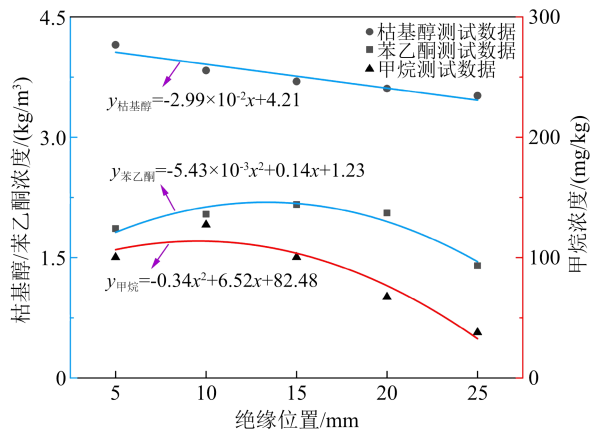


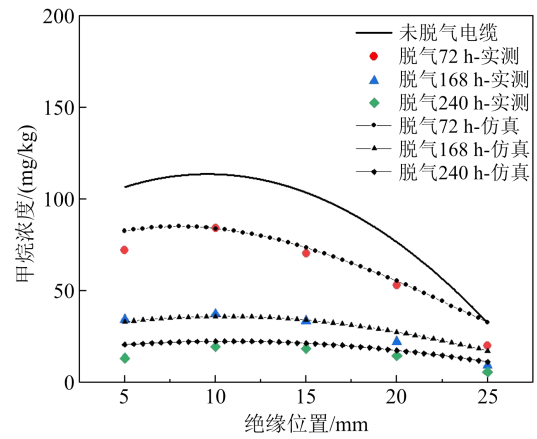
图9 未脱气 320 kV 电缆副产物浓度分布测试与拟合结果

Fig.9 Concentration distribution test and fitting results of by-products in non-degassing 320 kV cables

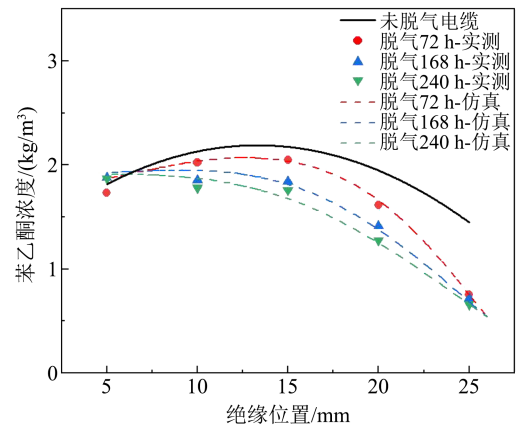
设置电缆与空气接触的外边界副产物浓度为0，绝缘中副产物的扩散满足菲克定律，其扩散系数如表1所示。由于本模型为二维平面模型，在整个模型中直接采用自由三角形进行网格划分。

3.2 脱气 320 kV 电缆实测与仿真结果对比分析

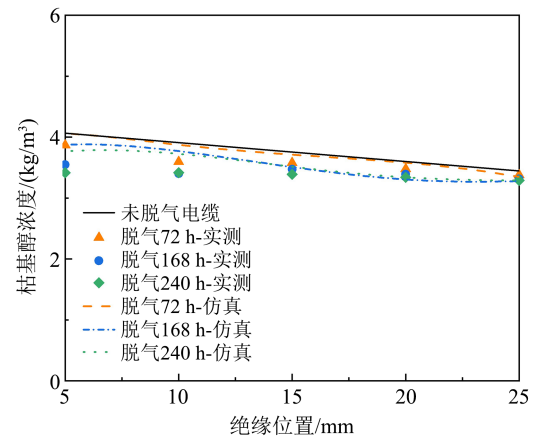
图10为320 kV电缆脱气后副产物浓度分布实测与仿真结果图。从图10可以看出，甲烷、苯乙酮两种副产物的仿真和实测结果基本一致，验证了基



(a) 甲烷



(b) 苯乙酮



(c) 枯基醇

图10 320 kV 电缆副产物浓度分布实测与仿真结果对比

Fig.10 Comparison on measured and simulated results of by-product concentration distribution in 320 kV cables

于菲克第二定律建立模型仿真两种副产物扩散过程的正确性。枯基醇的仿真和实验结果差异较大。这可能意味着枯基醇的扩散过程并不适合用仅与温度相关的扩散系数作简单解释。A EINSTEIN 将粒子的运动视为一个随机行走的过程，导出了与位置、时间相关的扩散方程，其形式与菲克第二定律

一致,其中扩散系数 D 不仅与温度相关,亦受粒子的质量、黏滞系数的影响^[20]。对方程中的扩散系数进行修正,可能可以更好地解释枯基醇的扩散。

4 不同脱气条件下320 kV 电缆绝缘脱气过程仿真结果

电缆绝缘脱气过程的影响因素有:副产物初始浓度、电缆结构尺寸、扩散系数等。其中扩散系数与副产物的种类和脱气温度有关^[11]。脱气前副产物的初始浓度分布与副产物的生成、副产物在硫化管道中的扩散相关,初始浓度受交联剂、抗氧剂等各类化学添加剂的种类、用量^[6]以及硫化过程中各类工艺参数^[13]的综合影响。电缆生产厂商一般依据经验,选择70℃作为脱气温度,允许有±5℃的偏差,即脱气温度范围为65~75℃。本文选取脱气温度与副产物初始浓度分布为变量,仿真研究其对电缆绝缘脱气过程的影响。考虑到枯基醇仿真与实测结果的差异,仅对甲烷和苯乙酮两种副产物进行分析。

4.1 不同温度与初始浓度的甲烷脱气仿真结果

经验表明,电缆附件的气压应以不超过0.1 MPa为宜。以此为据,室温下,交联聚乙烯中的甲烷浓度应低于50 mg/kg;90℃下,甲烷浓度应低于30 mg/kg^[4]。图11为不同脱气温度下脱气72 h、168 h后电缆绝缘中甲烷残余浓度分布的模型仿真结果。

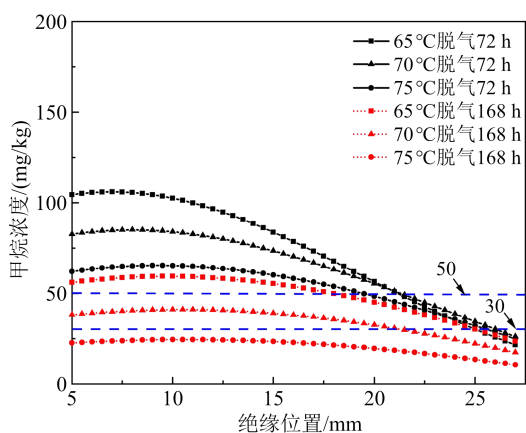


图11 不同温度下脱气72 h、168 h时甲烷浓度分布

Fig.11 Concentration distribution of methane at different temperatures degassing for 72 h and 168 h

从图11可以看出,在相同的脱气时间下,脱气温度越高,甲烷的脱气速度越快。脱气72 h时,不同脱气温度电缆绝缘中甲烷浓度均大于50 mg/kg。

脱气168 h后,75℃脱气电缆绝缘中的甲烷浓度已降低至30 mg/kg以下,70℃脱气电缆绝缘中的甲烷浓度已降低至50 mg/kg以下,而65℃脱气电缆绝缘中的甲烷浓度仍高于50 mg/kg。

脱气温度的选取需要综合考虑能耗与生产效率,以实现最优的经济效益。脱气过程需要使大长度电缆长期保持高温状态,巨大的能耗无疑是生产成本的重要组成部分。更低的脱气温度是降低加热功率的重要措施,但也会延长脱气时间,一般不为厂商所接受。

图12对比了不同温度下甲烷脱气时间(分别以浓度为50 mg/kg、30 mg/kg为脱气终点)的差异。从图12可以看到,采用更低的脱气温度延长了脱气时间。当脱气终点为50 mg/kg时,若将脱气温度自70℃降低至65℃,脱气时间将延长63 h,相对增加45%;当脱气终点为30 mg/kg时,若将脱气温度自70℃降低至65℃,达到30 mg/kg的甲烷脱气时间为307 h,相对70℃脱气时间增加91 h,相对增加29%;脱气温度自65℃降低至60℃,脱气时间将延长136 h,相对增加44%。与之相对,更高的脱气温度可以缩短脱气时间,若将脱气温度自65℃升高至70℃,达到30 mg/kg的甲烷脱气时间为216 h,相对65℃脱气时间缩短91 h,相对减少29%;脱气温度自70℃升高至75℃,仅需148 h即可使绝缘各位置的甲烷浓度控制在30 mg/kg以下,用时缩短68 h,相对减少31%。然而,由于大长度电缆多采用多圈层盘绕堆叠方式进行脱气,更高的脱气温度会带来更高的能耗以及可能的电缆质量隐患,需要谨慎考虑选用。

总之,综合考虑能耗成本与生产效率,电缆绝

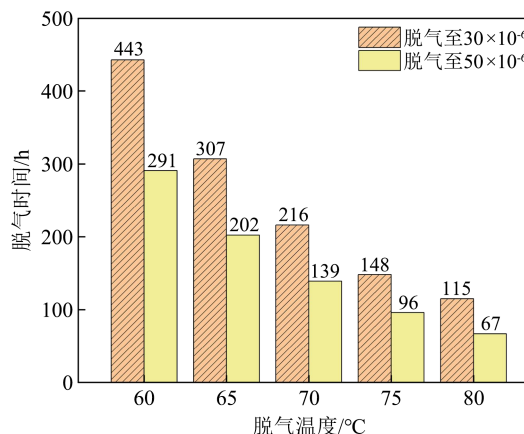


图12 不同温度下甲烷脱气时间

Fig.12 Methane degassing time at different temperatures

缘的脱气温度适合控制在 65~75℃ 范围内。

更改生产工艺及绝缘料类型等会使副产物的初始浓度发生变化^[15-16]。不过,不同类型电缆的副产物初始浓度虽然在数值上存在差异,但其分布均呈现相同的函数形式。本研究中的 320 kV 直流电缆使用的是 DCP 含量较低的绝缘料,其副产物含量较少。除了这种电缆,本研究还对另外一种使用不同绝缘料的 220 kV 电缆进行了副产物的浓度测试,结果表明该类电缆副产物浓度相对较高,副产物浓度分布符合与 320 kV 直流电缆类似的二次函数分布。这说明可以将图 5(a)中未脱气电缆甲烷初始浓度拟合函数在纵坐标方向进行平移,获得一组二次函数 $y_n(n=1,2,3)$,以此表示不同的副产物初始浓度,如式(10)~(12)所示,其中式(12)为 320 kV 直流电缆段实测初始甲烷浓度分布的拟合函数。

$$y_1 = -0.34x^2 + 6.52x + 230 \quad (10)$$

$$y_2 = -0.34x^2 + 6.52x + 150 \quad (11)$$

$$y_3 = -0.34x^2 + 6.52x + 80 \quad (12)$$

式(10)~(12)中: y_n 为甲烷浓度; x 为绝缘位置,即径向某点距内屏蔽层的距离。

脱气温度设置为 70℃,不同初始甲烷浓度的电缆绝缘脱气 0 h、264 h 的结果对比见图 13。将 y_3 向纵轴正方向平移得到函数 y_1 、 y_2 ,代表副产物初始浓度更高的电缆。仿真结果显示,脱气 264 h 后,各电缆绝缘中的甲烷浓度均大幅度降低。

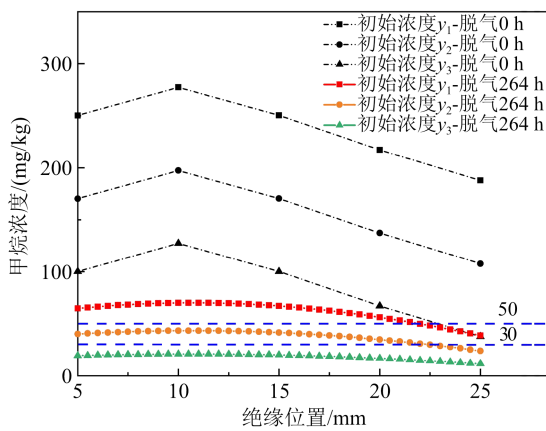


图 13 不同初始甲烷浓度的电缆绝缘 70℃ 脱气结果对比
Fig.13 Comparison on degassing results of cable insulations with different initial methane concentrations at 70℃

由图 13 可知,随着初始浓度的增加,完成脱气所需的时间逐渐延长,初始浓度为 y_3 的电缆绝缘脱气 264 h 后可以满足 30 mg/kg 的脱气标准,而初始

浓度为 y_2 的电缆绝缘脱气 264 h 可以满足 50 mg/kg 的脱气标准,初始浓度为 y_1 的电缆绝缘脱气 264 h 后浓度仍明显大于 50 mg/kg。

4.2 不同温度与初始浓度的苯乙酮脱气仿真

与甲烷的仿真过程相似,设置脱气温度分别为 65、70、75℃,绘制电缆脱气 72、168、240 h 时电缆绝缘中苯乙酮的浓度分布情况,结果如图 14 所示。

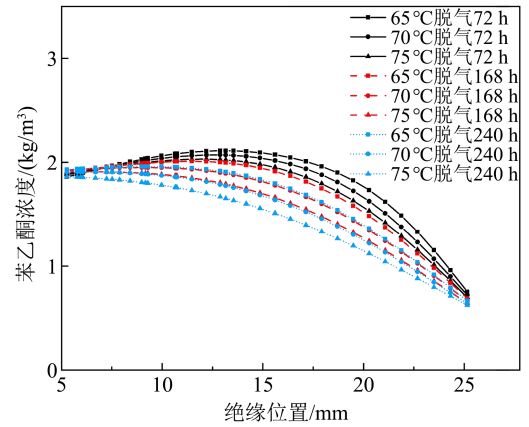


图 14 不同温度脱气 72、168、240 h 后苯乙酮浓度分布
Fig.14 Distributions of acetophenone concentration after degassing at different temperatures for 72, 168, and 240 h

从图 14 可以看出,脱气时间越长、脱气温度越高,剩余苯乙酮浓度越低。脱气 168 h 后,除脱气温度为 65℃ 的电缆绝缘外,其余电缆绝缘的苯乙酮分布均由中间高、内外两侧低的初始分布转变为内部高、外部低的分布状态。温度为 65℃、脱气 240 h 的电缆绝缘与温度为 70℃、脱气 168 h 的电缆绝缘中苯乙酮浓度分布基本一致;温度为 70℃、脱气 240 h 的电缆绝缘与温度为 75℃、脱气 168 h 的电缆绝缘中苯乙酮浓度分布相近,温度每提升 5℃,苯乙酮脱气用时等效缩短约 72 h。

与甲烷的分布相同,苯乙酮的初始浓度分布也呈现类二次函数的形式,可采用相同的分析方法,将苯乙酮初始浓度分布的拟合函数沿纵坐标方向平移得到不同初始苯乙酮浓度分布的拟合函数,如式(13)~(15)所示,以探究不同初始苯乙酮浓度对脱气过程的影响,其中式(15)为 320 kV 直流电缆段实测初始苯乙酮浓度分布的拟合函数。

$$z_1 = -5.43 \times 10^{-3}x^2 + 0.14x + 2.9 \quad (13)$$

$$z_2 = -5.43 \times 10^{-3}x^2 + 0.14x + 2.0 \quad (14)$$

$$z_3 = -5.43 \times 10^{-3}x^2 + 0.14x + 1.2 \quad (15)$$

式(13)~(15)中: z_i 为苯乙酮浓度; x 为绝缘位置,即径向某点到内屏蔽层的距离。

脱气温度设置为70℃,不同初始苯乙酮浓度的电缆脱气0、240 h的结果对比见图15。从图15可以看到,脱气240 h后各电缆中苯乙酮浓度均大幅度降低,但3种电缆的苯乙酮浓度分布差异较大。脱气240 h后,初始浓度 z_1 与 z_2 对应的电缆绝缘中苯乙酮浓度仍然较高,其分布也呈现与初始状态类似的二次函数形式。初始浓度 z_3 对应的电缆绝缘中苯乙酮浓度则呈现出由内向外逐渐降低的分布。

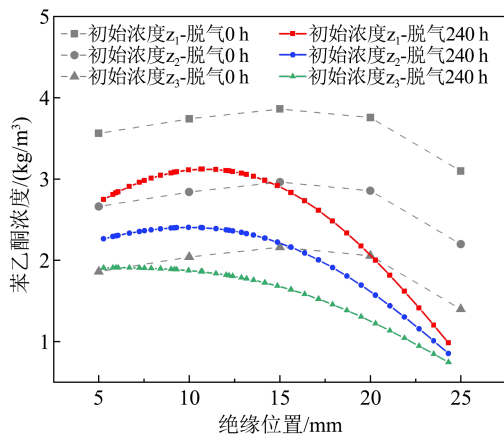


图15 不同初始苯乙酮浓度的电缆绝缘70℃脱气结果对比
Fig.15 Comparison on degassing results of cable insulations with different initial acetophenone concentrations at 70℃

基于上述研究结果,一方面,可以考虑通过使用新型交联辅助剂^[6,21]、降低交联剂用量等措施^[22-23],从源头上减少副产物的生成;另一方面,调整硫化管道温度,促进以甲烷为代表的副产物的扩散^[15],使硫化完成后残留在绝缘中的副产物含量减少,由此减少脱气时间,提升电缆的生产效率。

5 结论

本研究以菲克第二定律为基础,建立了交联副产物在高压电缆绝缘中的扩散模型,并通过320 kV XLPE绝缘电缆70℃脱气后副产物的实验测试结果验证了仿真模型的正确性。在此基础上研究了脱气温度和副产物初始浓度对脱气过程的影响,得到以下结论:

(1)70℃脱气72、168、240 h后,电缆中剩余的甲烷和苯乙酮两种副产物浓度的实验和仿真结果较为一致,而枯基醇浓度的实验与仿真结果存在差异,说明菲克定律更适用于解释副产物甲烷与苯乙酮的扩散。

(2)脱气温度越高,副产物扩散越快。在65~75℃的温度范围内,温度每提升5℃,将使甲烷脱气

用时相对缩短约30%、苯乙酮脱气用时等效缩短约72 h。

(3)副产物初始含量越低,脱气过程耗时越短,降低副产物初始含量是提升电缆生产效率的重要途径。

参考文献 References

- [1] 王若愚,毛森茂,王涛,等.城市电网超大容量500 kV地下输电技术经济比较[J].电力与能源,2021,42(4):633-637.
WANG Ruoyu, MAO Senmao, WANG Tao, et al. Technical and economic comparison of 500 kV underground transmissions for urban power grid[J]. Power & Energy, 2021, 42(4): 633-637.
- [2] 陶毅刚,李小伟,张俊成,等.智能电网发展与城市配网的规划改造策略研究[J].电力设备管理,2021,42(4):34-35,47.
TAO Yigang, LI Xiaowei, ZHANG Juncheng, et al. Research on smart grid development and urban distribution network planning and transformation strategies[J]. Electric Power Equipment Management, 2021, 42(4): 34-35, 47.
- [3] 李银格,曹亮,刘相辰,等.低交联度LLDPE用于XLPE绝缘的机械及直流电气性能[J].电力工程技术,2023,42(2):154-160.
LI Yingge, CAO Liang, LIU Xiangchen, et al. Mechanical and DC electrical properties of low crosslinking degree LLDPE for XLPE insulation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 154-160.
- [4] ANDREWS T, HAMPTON R N, SMEDBERG A, et al. The role of degassing in XLPE power cable manufacture[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2006, 22(6): 5-16.
- [5] HUSSIN N, CHEN G. Analysis of space charge formation in LDPE in the presence of crosslinking byproducts[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 126-133.
- [6] 李盛涛,王诗航,杨柳青,等.高压电缆交联聚乙烯绝缘的关键性能与基础问题[J].中国电机工程学报,2022,42(11):4247-4255.
LI Shengtao, WANG Shihang, YANG Liuqing, et al. Important properties and fundamental issues of the crosslinking polyethylene insulating materials used in high-voltage cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4247-4255.
- [7] 陈向荣,孟繁博,夏峰,等.脱气处理对高压直流用500 kV XLPE绝缘特性及其聚集形态的影响[J].中国电机工程报,2021,41(10):3645-3656,3688.
CHEN Xiangrong, MENG Fanbo, XIA Feng, et al. Effect of degassing treatment on 500 kV XLPE insulation characteristics and aggregation structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3645-3656, 3688.
- [8] REN H Y, ZHONG L S, YANG X, et al. Electric field distribution based on radial nonuniform conductivity in HVDC XLPE cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 121-127.
- [9] 徐庆文,周凯,伍亚萍,等.脱气时间对XLPE电树引发和生长特性的影响[J].高电压技术,2023,49(4):1685-1692.
XU Qingwen, ZHOU Kai, WU Yaping, et al. Effect of degassing

- time on initiation and growth characteristics of electrical tree in XLPE[J]. High Voltage Engineering,2023,49(4):1685-1692.
- [10] SUN Y B. Crosslinked polyethylene insulation materials technology for reduction of cable degassing time[C]//2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Dallas,USA:IEEE,2016.
- [11] 任虹光,金海云,管新元,等. 高压交联电缆副产物释放过程研究[J]. 绝缘材料,2019,52(5):65-68,74.
REN Hongguang, JIN Haiyun, GUAN Xinyuan, et al. Research on release process of crosslinking by-products in high-voltage cable[J]. Insulating Materials,2019,52(5):65-68,74.
- [12] 钟力生,高景晖,李飞,等. 一种交联聚乙烯电缆绝缘中副产物快速定量测试方法:CN202311502919[P].2024-11-29.
ZHONG Lisheng, GAO Jinghui, LI Fei, et al. A rapid quantitative testing method for by-products in cross-linked polyethylene cable insulation: CN202311502919[P]. 2024-11-29.
- [13] 黎柳月,陈余道,吴圣华,等. 快速检测水样中甲烷含量的气相色谱法[J]. 环境科学与技术,2018,41(11):143-148.
LI Liuyue, CHEN Yudao, WU Shenghua, et al. A rapid gas chromatography method for determination of methane in water sample[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(11): 143-148.
- [14] 全国电气化学标准化技术委员会. 绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法:GB/T 17623—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
National Technical Committee 322 on Electrical Chemistry Administration of China. Determination of componental contents of gases dissolved in insulating oil by gas chromatography method: GB/T 17623—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [15] RUSLAN M F A C, YOUN D J, AARONS R, et al. Numerical study of CH₄ generation and transport in XLPE-insulated cables in continuous vulcanization[J]. Materials,2020,13(3):2978.
- [16] 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.
- [17] CRANK J. The mathematics of diffusion[M]. London: Oxford University Press,1975:1-18,44.
- [18] SMEDBERG A, BOSTRÖM J O, BOREALIS A B, et al. The degassing process of HV XLPE cables and its influence on selected electrical properties[C]//9th International Conference on Insulated Power Cables. Versailles,France:Jicable,2015.
- [19] SAHYOUN J, CREPET A, GOUANVE F, et al. Diffusion mechanism of byproducts resulting from the peroxide crosslinking of polyethylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017,134(9):44525.
- [20] 魏文杰,陈文龙,戴晓彬,等. 生物大分子介质中的反常扩散动力学理论[J]. 化学学报,2023,81(8):967-978.
WEI Wenjie, CHEN Wenlong, DAI Xiaobin, et al. Theory of anomalous diffusion dynamics in biomacromolecular media[J]. Acta Chimica Sinica,2023,81(8):967-978.
- [21] CARONIA P J, COGEN J M, DLUZNESKI P. Novel polymer crosslinking chemistries for cable insulation[C]//Proceedings of 2014 IEEE Electrical Insulation Conference. Philadelphia,USA: IEEE,2014:392-396.
- [22] 刘美兵,杨凯军,屠德民. 高压XLPE电缆绝缘料综合性能的对比分析[J]. 电线电缆,2014(2):21-25.
LIU Meibing, YANG Kaijun, TU Demin. Comparative analysis of performances in HV XLPE cable materials[J]. Wire & Cable, 2014(2):21-25.
- [23] 刘浩,刘红剑,楼铁城,等. 交联聚乙烯绝缘料耐焦烧性能的对比研究[J]. 绝缘材料,2024,57(1):29-34.
LIU Hao, LIU Hongjian, LOU Tiecheng, et al. Comparative study on scorching resistance of cross-linked polyethylene insulating materials[J]. Insulating Materials,2024,57(1):29-34.

收稿日期:2025-03-21;修回日期:2025-05-07。

作者简介:

陈静(1979-),女(汉族),浙江金华人,高级工程师,研究方向为电线电缆产品及材料;

通信作者:钟力生(1961-),男(汉族),四川内江人,教授,研究方向为电介质与电气绝缘技术。