

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240760

硫化压力对 500 kV 超高压直流 XLPE 电缆工厂接头恢复绝缘性能的影响

张添胤¹ 陈向荣¹ 王恩哲¹ 阴凯¹ 夏峰^{1,2} 黄若彬²

(1. 浙江大学电气工程学院 杭州 310027 2. 宁波东方电缆股份有限公司 宁波 315800)

摘要 为了研究硫化压力变化对 500 kV 超高压直流交联聚乙烯 (XLPE) 电缆工厂接头恢复绝缘特性的影响, 该文选用商用 500 kV 超高压直流电缆绝缘颗粒, 采用热压法分别在 1.3 MPa、1.6 MPa、1.9 MPa 和 2.5 MPa 的压力下对材料进行平板热压, 制备了不同硫化压力作用下的 XLPE 试样。对所得试样进行傅里叶变换红外光谱、凝胶含量、差示扫描量热和 X 射线衍射测试及分析, 并测试了试样的电流密度、空间电荷分布和直流击穿强度。研究结果表明: 随着硫化压力的增加, 试样的交联度和结晶度逐步增加, 空间电荷注入阈值电场强度和直流击穿场强先增大后减小, 在 1.9 MPa 硫化压力下阈值电场强度和直流击穿场强达到最大值。当硫化压力大于 1.9 MPa 时, 不断增多的交联副产物会给试样引入更多浅陷阱, 同时片晶会因硫化压力的增加而发生热膨胀, 晶面间距增加, 进而导致试样内部空间电荷明显积聚并加剧电场畸变。提高工厂接头的硫化压力有助于改善其恢复绝缘的电气性能, 但过高的硫化压力将不利于增强工厂接头的恢复绝缘性能。

关键词: 硫化压力 交联聚乙烯 超高压直流电缆 工厂接头 恢复绝缘

中图分类号: TM215; TM85

0 引言

随着海上风电、海岛电网互联等一系列海洋输电工程的投资建设, 海底电缆的敷设和投运数量快速增长。高压直流交联聚乙烯 (Cross-Linked Polyethylene, XLPE) 海缆系统作为深远海风电大规模集成并网的最佳电力传输解决方案, 已成为海上风电并网的核心电力装备^[1-3]。当前近海风电场址日趋紧张, 海上风电建设离岸距离不断增加, 大长度、大容量超高压直流电缆研发迫在眉睫, 而考虑到生产过程中海缆的持续挤出会引发海缆绝缘料的焦化, 通常采用工厂接头连接两段海缆以实现大长度海缆系统的制造, 因此对于海缆工厂接头技术的研究已成为发展大长度海缆线路的关键^[4-5]。2016年, ABB 公司开发了 525 kV 直流 XLPE 电缆工厂接头^[6]; 国内部分电缆厂家已实现了 500 kV 以下电压等级交流海缆工厂接头的研发、生产和商用^[7]。但是, 对于 500 kV XLPE 直流海缆, 由于其电压等级较高,

海缆内部电场分布较为集中, 工厂接头绝缘层恢复绝缘与本体绝缘的微小差异以及界面绝缘的存在都可能会引起绝缘击穿。因此, 对海缆工厂接头 XLPE 恢复绝缘进行研究, 掌握其关键生产工艺与性能变化规律, 对于发展超高压大长度大容量海缆系统、实现海缆工厂接头核心技术国产化具有重要意义。

海缆工厂接头通常在工厂或类似环境下完成生产制作, 示意图如图 1 所示。制作时首先把需要连接的两段海缆的导体进行无缝焊接, 并将两端电缆连接部分的本体绝缘打磨成锥形, 随后将商用 XLPE 电缆绝缘料熔融, 通过挤出机注入锥形部位进行高温高压硫化, 最终形成 XLPE 恢复绝缘^[5]。硫化过程中交联剂过氧化二异丙苯 (Dicumyl Peroxide, DCP) 受热分解, 使聚乙烯进行交联, 该过程是决定 XLPE 恢复绝缘性能的关键。目前国内学者主要研究了脱气时间^[8]和界面粗糙度^[9-10]对工厂接头交接层试样绝缘性能的影响, 并提出了在界面喷涂微量纳米材料来改善工厂接头交接层耐电特性的调控方法^[11], 而针对硫化加工工艺在超高压直流 XLPE 电缆工厂接头恢复绝缘性能方面作用的研究还较少。目前国内电缆厂商主要通过生产经验

浙江省“尖兵领雁”研发攻关计划 (2024C01244(SD2)) 和国家自然科学基金 (51977187) 资助项目。

收稿日期 2024-05-12 改稿日期 2024-07-29

和型式试验来确定海缆工厂接头的硫化加工过程,通常在 1.5 MPa 压强下对 XLPE 绝缘进行恢复,而硫化过程中压力对工厂接头恢复绝缘材料和电气特性的影响及其作用机理尚不清楚。因此,研究硫化过程中压力变化对工厂接头恢复绝缘空间电荷、电导电流、直流击穿等绝缘性能的影响,明确硫化压力对工厂接头恢复绝缘性能的作用规律,对于 500 kV 及以上电压等级的超高压直流大长度 XLPE 海缆系统的开发与工程应用具有重要意义。

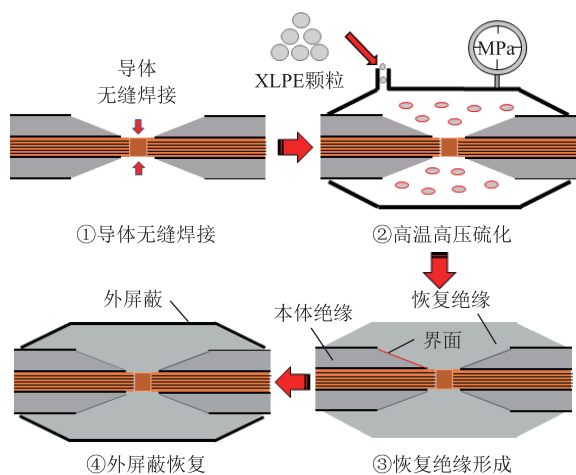


图1 工厂接头生产示意图

Fig.1 Schematic diagram of factory joint production

本文选取商用 500 kV 超高压直流 XLPE 电缆料,在不同压力下利用热压法对材料进行平板热压,制备了不同硫化压力作用下的 XLPE 试样。通过傅里叶变换红外(Fourier Transform Infrared, FTIR)光谱、差示扫描量热(Differential Scanning Calorimetry, DSC)、X 射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)、凝胶含量、电导电流、空间电荷和直流击穿测试,研究硫化压力变化对 XLPE 试样绝缘性能的影响和作用规律,为 500 kV 超高压直流 XLPE 电缆工厂接头的开发和生产提供理论基础。

1 试验方法

1.1 试样制备

通过平板热压法在实验室模拟工厂接头恢复绝缘生产过程,采用商用 500 kV 高压直流 XLPE 电缆料,制备不同硫化压力作用下的 XLPE 恢复绝缘试样,具体过程如下:首先,将 XLPE 颗粒均匀放置于大小为 25 cm×25 cm 的两块铁板之间,利用平板硫化机在 120℃ 下预热 5 min;然后升温至 180℃,分别在 8 t、10 t、12 t 和 16 t (1 t=1 000 kg,可近似等价于 9 800 N) 的压力下交联 15 min,再冷却至室温;最后,将制备好的试样裁剪成尺寸为 5 cm×

5 cm×0.2 mm 的方形试样。

压强计算公式为 $p=F/S$, 其中 p 为压强 (Pa), F 为物体所受力的大小 (N), S 为受力面积 (m^2)。当硫化施加压力分别为 8 t、10 t、12 t 和 16 t 时,试样所受的硫化压力分别为 1.3 MPa、1.6 MPa、1.9 MPa 和 2.5 MPa,与电缆厂商制作海缆工厂接头 XLPE 恢复绝缘时所用的硫化压力一致^[12]。

1.2 理化测试

傅里叶变换红外(FTIR)光谱:采用美国 Thermo Fisher Scientific 公司的 Nicolet iS50 型傅里叶变换红外光谱仪进行测试,研究硫化过程中压力对 XLPE 内部交联副产物含量的影响。测试光谱范围为 4 000~400 cm^{-1} , 光谱分辨率优于 0.09 cm^{-1} 。

差示扫描量热(DSC)分析:采用美国 TA 公司生产的 Q200 型差示扫描量热分析仪对不同硫化压力下制备的 XLPE 试样进行分析,将试样剪碎称重 10 mg,置于测试坩埚中,于氮气氛围下进行测试,升温速率与降温速率均为 10℃/min。测试时首先将温度稳定在 30℃,之后将样品升温至 150℃,恒温保持 5 min 后降温至 30℃,然后第二次升温至 150℃,记录试样测试过程中的升温 and 降温曲线。

X 射线衍射(XRD):采用德国布鲁克公司的 D2 PHASER 型 X 射线衍射仪进行试验。试验时扫描速率为 5°/min,扫描范围为 10°~30°。

凝胶含量测试:测试前将 30 mm×30 mm 的 120 目不锈钢滤网折成网袋,采用梅特勒托利多公司生产的 ME104T/02 型精密电子天平称量网袋质量并记为 M_1 ;将待测 XLPE 试样剪碎后放入网袋,称量其总质量并记为 M_2 。测试时将装有试样的网袋放入装有二甲苯的圆底烧瓶中,在油浴锅中连续加热,通过回流冷凝管萃取 10 h。加热结束后将网袋用酒精冲洗,放入烘箱中烘干 2 h 至质量不发生变化,称量装有试样的网袋质量记为 M_3 。试样的凝胶含量 G 计算式^[13]为

$$G = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \times 100\% \quad (1)$$

1.3 电学测试

电导电流密度测试:采用三电极系统进行测试,用 Keithley 6517B 电流表进行数据采集。将 XLPE 试样放置在三电极上,并将其整体放入温度为 30℃ 的恒温箱。测试电场强度分别为 3、5、8、10、15、20、25、30、35、40 kV/mm,测试时极化时间为 30 min,去极化时间为 20 min,记录试样电导电流随时间的变化情况。

空间电荷测试：采用实验室研制的脉冲电声法 (Pulse Electro-Acoustic, PEA) 空间电荷测试系统对试样内部的空间电荷分布进行测试。测试系统的下电极和上电极分别为铝 (Al) 电极和半导电 (Semi-Conductive, SC) 电极，为保证试样与电极间良好的信号传输，测试前将黏度为 100 mPa·s 的二甲基硅油涂抹于试样两面，并通过温控设备控制测试温度为 30℃。测试分为极化过程和去极化过程，极化时间为 30 min，去极化时间为 15 min，极化时电场强度为 20 kV/mm，通过 LabVIEW 软件记录试样空间电荷的变化情况。

直流击穿测试：采用球-板电极进行测试，其中球电极直径为 25 mm，测试前将电极整体放入长城 25 号变压器油中，并通过温控设备控制测试温度为 30℃。每种样品需要进行 15 次击穿试验，测试时设置升压速率为 1 kV/s，持续升压直至试样被击穿，根据测试样品厚度和击穿时的电压计算得到试样的直流击穿场强。采用双参数 Weibull 分布分析测试结果，公式^[14]为

$$F(y) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{y}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

式中， $F(y)$ 为试样的击穿概率； y 为试样的击穿场强； α 为尺寸参数，表征试样绝缘失效概率为 63.2%时的击穿场强； β 为形状参数，表征试样击穿场强的分散性。

2 不同硫化压力下 XLPE 试样绝缘特性

2.1 傅里叶变换红外光谱

XLPE 交联过程中交联剂 DCP 主要分解为苯乙酮、枯基醇和 α -甲基苯乙烯。其中苯乙酮的特征吸收峰主要体现在 1724 cm^{-1} (羰基的伸缩振动峰) 处，枯基醇特征吸收峰体现在 3300 cm^{-1} (羟基 (-OH) 基团) 附近， α -甲基苯乙烯特征吸收峰体现在 1560~1650 cm^{-1} (C=C 双键) 附近^[15]。不同硫化压力下 XLPE 试样的 FTIR 光谱测试结果如图 2 所示。由图 2 可知，随着硫化压力的增加，苯乙酮特征吸收峰的高度逐渐增加。定义羰基指数为羰基吸收强度与亚甲基吸收强度的比值，可以由其定量分析硫化压力变化对交联副产物的影响^[15]。计算可得羰基指数由 1.3 MPa 时的 0.019 增加至 1.9 MPa 时的 0.023，呈现持续增加的趋势，说明随着硫化压力的增加，试样内部交联副产物的含量不断增加。

在光谱图中并未发现枯基醇和 α -甲基苯乙烯所

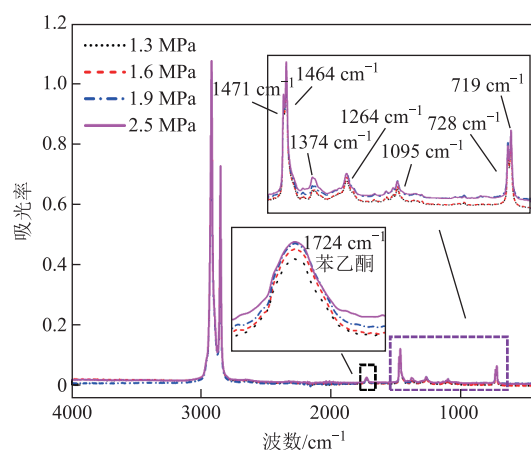


图 2 不同硫化压力下 XLPE 试样的 FTIR 光谱
Fig.2 FTIR spectra of XLPE samples under different vulcanization pressures

对应的特征峰，说明这两种交联副产物在试样中的含量较低。这是因为高温高压硫化使枯基醇分解为 α -甲基苯乙烯，而 α -甲基苯乙烯挥发性极强容易脱出基体。苯乙酮可能受自身在 XLPE 中无定形区分布的影响较大，导致其难以脱出。对于聚乙烯自身的特征峰：在 1471 cm^{-1} 和 1464 cm^{-1} 处 CH_2 基团的弯曲振动吸收峰、在 1374 cm^{-1} 处 $-\text{CH}_3$ 基团的对称弯曲振动吸收峰、在 1264 cm^{-1} 和 1095 cm^{-1} 处 $-\text{CH}$ 基团的摇摆振动特征吸收峰、在 728 cm^{-1} 和 719 cm^{-1} 处 CH_2 的摇摆振动吸收峰^[16]均随着硫化压力的增大呈上升趋势。所以随着硫化压力的增大，聚乙烯自身特征峰强度逐渐增加。同时不断增加的硫化压力也会导致交联副产物难以分解和挥发，使试样内部交联副产物的含量不断增加。

2.2 差示扫描量热分析

为研究不同硫化压力作用下试样的结晶特性，对试样进行 DSC 分析，结果如图 3 所示。由 DSC

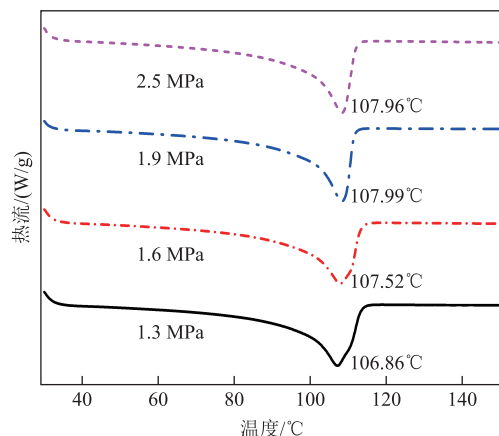


图 3 不同硫化压力下 XLPE 试样的 DSC 曲线
Fig.3 DSC curves of XLPE samples under different vulcanization pressures

曲线可知, 试样仅有一个晶体熔融峰, 且随着硫化压力的增加, 熔融峰向高温方向移动, 在硫化压力达到 2.5 MPa 时材料的熔融温度出现小幅降低, 但材料的熔融温度随着硫化压力的增加整体呈现上升趋势。

XLPE 是一种半结晶材料, 其结构包含晶区和无定形区域。晶区由多个沿径向生长的长条状片晶组成, 片晶在不断生长后最终堆叠形成球晶^[13]。根据 XLPE 试样的 DSC 曲线信息可分别计算出试样的结晶度和片晶厚度。结晶度 X_c 的计算公式^[17]为

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_f^*} \times 100\% \quad (3)$$

式中, ΔH_m 为试样的熔融焓; ΔH_f^* 为聚乙烯结晶度为 100% 时的熔融焓, $\Delta H_f^* = 287.3 \text{ J/g}$ 。

片晶厚度 l_c 可以通过 Thompson-Gibbs 方程计算获得, 表示为^[18]

$$l_c = \frac{2\sigma_e T_{m0}}{\Delta H_0 (T_{m0} - T_m)} \quad (4)$$

式中, σ_e 为晶体单位面积的表面自由能, 取 $\sigma_e = 60.9 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$; T_{m0} 为厚度为无限大的晶体平均熔融温度, $T_{m0} = 414.6 \text{ K}$; T_m 为片晶熔融峰温度, K; ΔH_0 为单位体积聚乙烯晶体的熔融焓, 取 $\Delta H_0 = 2.88 \times 10^8 \text{ J/m}^3$ ^[5]。

不同硫化压力下, XLPE 试样的结晶度和片晶厚度如图 4 所示。由图 4 可知, 随着硫化压力的提高, XLPE 分子链反复折叠形成片晶, 片晶厚度随着硫化压力的增加整体呈上升趋势。试样的晶体形态不断完善, 片晶成核生长形成球晶, 试样结晶度从硫化压力为 1.3 MPa 时的 27.94% 上升至 2.5 MPa

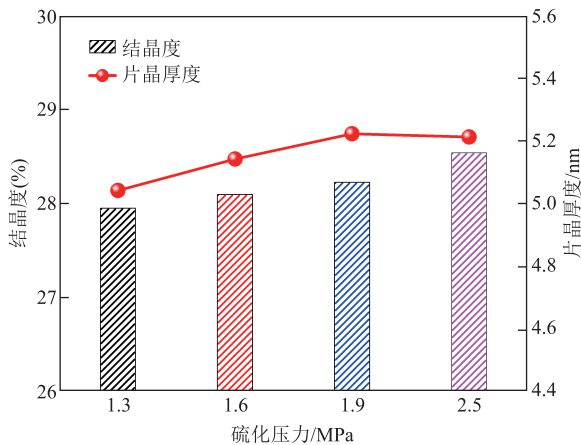


图 4 不同硫化压力下 XLPE 试样的结晶度和片晶厚度
Fig.4 The crystallinity and crystallite thickness of XLPE samples under different vulcanization pressures

时的 28.53%, 可见结晶度随着硫化压力的增加呈上升趋势。

2.3 X 射线衍射

不同硫化压力下 XLPE 试样的 XRD 曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 衍射角 24.0° 和 21.5° 附近有两个结晶衍射峰, 分别对应 XLPE 中(200)晶面和正交晶型(110)晶面的衍射峰^[13]。在衍射角 26.7° 附近出现的小衍射峰可能对应(020)晶面的衍射峰, 考虑到该峰衍射强度太低, 且衍射角度并没有随着硫化压力的改变发生明显变化, 因此本文不对该峰随硫化压力变化的规律进行分析。

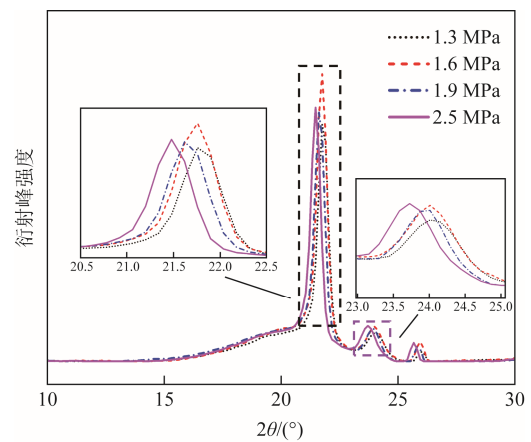


图 5 不同硫化压力下 XLPE 试样的 XRD 曲线
Fig.5 XRD curves of XLPE samples under different vulcanization pressures

X 射线照射小晶体时引发的衍射线条将呈现散射和宽化, 晶体晶粒越小, 衍射线的宽化效应越显著。因此可以通过 X 射线衍射峰的半峰宽 (Full Width at Half Maxima, FWHM) 对不同硫化压力下 XLPE 试样的晶粒大小进行研究。为了分析硫化压力变化对 XLPE 试样结晶形态的作用规律, 从图 5 中提取(110)晶面和(200)晶面的衍射角 2θ 与半峰宽 FWHM, 见表 1。

表 1 不同试样结晶衍射峰的衍射角和半峰宽

Tab.1 Diffraction angles and FWHM of crystalline diffraction peaks for different samples

硫化压力/ MPa	(110)晶面		(200)晶面	
	$2\theta/(\circ)$	FWHM/ (\circ)	$2\theta/(\circ)$	FWHM/ (\circ)
1.3	21.78	0.551	24.01	0.845
1.6	21.75	0.536	23.99	0.828
1.9	21.59	0.539	23.74	0.752
2.5	21.48	0.522	23.72	0.751

由表 1 可知, 随着硫化加工过程中压力的增大, 试样(110)晶面的半峰宽从 1.3 MPa 时的 0.551° 下

降到 2.5 MPa 时的 0.522°；(200)晶面的半峰宽从 1.3 MPa 时的 0.845° 下降到 2.5 MPa 时的 0.751°。由 Scherrer 公式^[19]可知，垂直于 X 射线反射面的晶粒平均尺寸与 X 射线衍射半峰宽成反比，随着硫化过程中压力的增大，XLPE 试样的半峰宽逐渐减小，由此可知试样的晶粒尺寸逐渐增大，这表明硫化压力的增加使得 XLPE 试样中的晶体结构趋于完善，这与 DSC 测试结果中 XLPE 试样结晶度逐渐增加的结果一致。

为进一步分析硫化压力变化对 XLPE 试样晶型的作用规律，通过 Bragg 方程表征衍射线方向与晶体结构之间的关系^[19]，表示为

$$2d_c \sin \theta = n\lambda \quad (5)$$

式中， d_c 为晶面间距； θ 为 X 射线与晶面的夹角； n 为衍射级数； λ 为 X 射线的波长。

由式 (5) 可知，晶面间距与 X 射线衍射角度成正比。随着硫化压力的增加，X 射线衍射曲线逐渐向左移动，衍射角逐渐减小，XLPE 试样晶面间距不断增加。由此可知，硫化压力的增加使得 XLPE 试样晶体结构进一步完善，晶粒尺寸增加，但同时也会使片晶间膨胀，晶面间距不断增加。

2.4 凝胶含量测试

为了研究硫化压力变化对试样交联程度的影响，本文通过凝胶含量测试衡量了不同硫化压力下制备的 XLPE 试样的交联程度，结果如图 6 所示。从图 6 可知，随着硫化压力的不断增加，试样的交联度整体呈上升趋势，从 1.3 MPa 时的 54.1% 增加至 2.5 MPa 时的 56.5%，表明硫化压力的增加有助于交联剂的分解，进而促进交联过程的进行，增加试样内的凝胶含量，提高试样的交联度。

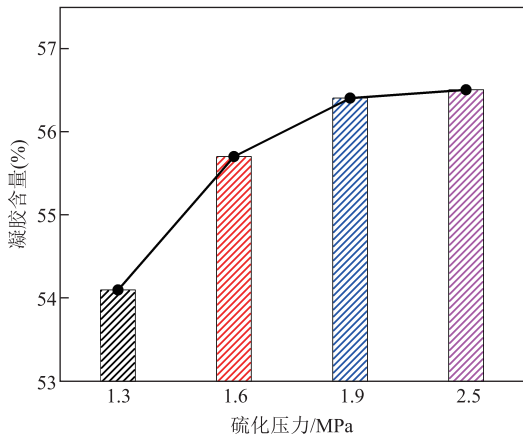


图 6 不同硫化压力下 XLPE 试样的凝胶含量

Fig.6 Gel content of XLPE samples under different vulcanization pressures

随着交联度的增加，XLPE 试样内部的三维网状分子链结构会使其规整性变差，从而抑制了试样的结晶过程。但是随着硫化压力的增加，XLPE 试样的结晶度一直呈上升趋势，这是因为随着交联剂的分解，XLPE 中苯乙酮的含量不断上升（见图 2），而不断增多的苯乙酮含量会一定程度地促进结晶时区域成核，因此结晶度仍不断上升。

2.5 电流密度

不同硫化压力下 XLPE 试样在不同电场强度下的电流密度如图 7 所示。由图 7 可知，试样存在 A、B 两个不同的导电区域，根据空间电荷限制电流理论（Space Charge Limited Current, SCLC），A 区域为欧姆区，B 区域为有陷阱的 Mott 区，两区域之间交点的横坐标即为由欧姆区向 Mott 区转变的阈值电场强度。

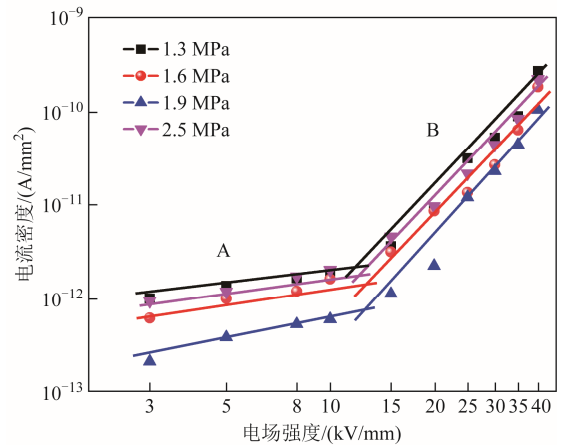


图 7 不同硫化压力下 XLPE 试样的电流密度

Fig.7 Current density of XLPE samples under different vulcanization pressures

当试样内部载流子处于欧姆区时，试样内部陷阱不会对电导电流密度大小产生影响，当极化电场强度增加时，电流密度也不会发生突变。此时电流密度与极化电场强度在双对数坐标系下呈斜率为 1 的线性关系，表现为欧姆特性。当外施电场超过阈值电场强度时，试样内部的载流子进入有陷阱的 Mott 区，此时拟合曲线斜率大于 1，当介质内部只存在一种陷阱时，函数关系可以表达为^[20]

$$j_{\Omega} = n_r q \mu_r \frac{V_{\Omega}}{d} = \frac{9}{8} \epsilon_0 \epsilon_r \mu_r \theta_{\text{trap}} \frac{V_{\Omega}^2}{d^3} \quad (6)$$

式中， j_{Ω} 为空间电荷限制电流； V_{Ω} 为由欧姆区转向有陷阱的 Mott 区的阈值电压； d 为试样的厚度； θ_{trap} 为陷阱的调制参数； μ_r 为电子在导带中的迁移率； n_r 为导带中的载流子浓度； q 为单位电荷所带电荷

量; $n_r q \mu_r$ 即为试样的电导率。但因 XLPE 能级分布较为复杂, 电流密度和电压的关系由陷阱密度和能级决定, 电流密度与电压的拟合曲线斜率通常大于 2, 此时随着极化电场强度的增加, 试样的电导电流密度也增加, 陷阱被快速注入的电荷填满。

由图 7 可知, 在不同电场强度下, 随着硫化压力的增加, 电流密度先减小后增大。当硫化压力为 1.3 MPa 时, 试样的电流密度最大; 当硫化压力增加至 1.9 MPa 时, 试样电流密度减小到最小值; 而当硫化压力进一步增加时, 试样的电流密度又呈现上升趋势。电流密度回归曲线的斜率和 A 区域向 B 区域转变的阈值电场强度见表 2。

表 2 不同硫化压力下试样的阈值电场强度和电流密度回归曲线斜率

Tab.2 Threshold electric field strength and slope of the current density regression curves for different samples under different vulcanization pressures

硫化压力/ MPa	斜率		阈值电场强度 $E_{A-B}/(kV/mm)$
	A 区域	B 区域	
1.3	0.51	3.23	11.15
1.6	0.68	3.25	11.38
1.9	0.94	3.87	12.80
2.5	0.62	3.28	11.31

由表 2 可知, 随着硫化压力的增加, A 区域和 B 区域的斜率均先增大后减小, 并且 A 区域向 B 区域转变的阈值电场强度也呈现先增大后减小的趋势。可以看出当硫化压力为 1.9 MPa 时, 试样的阈值电场强度最高, 达到 12.80 kV/mm, 此时试样内陷阱区域最难被载流子填充。随着试样晶体结构的不断完善, 其绝缘性能不断提升, 电导电流密度不断降低。但是硫化压力的进一步增加促进了交联剂的分解, 试样内交联副产物增加而产生的陷阱降低了试样的阈值电场强度, 增加了试样的电导电流密度。

2.6 空间电荷

不同硫化压力下 XLPE 试样的空间电荷分布如图 8 所示, 选取极化时间为 10 s、900 s 和 1800 s 三个时间点的空间电荷分布和电场畸变情况进行研究。由图 8 可知, 当硫化压力为 1.3 MPa 时, 随着极化时间的增加, 试样的阴极和阳极处出现同极性空间电荷积聚; 当硫化压力为 1.6 MPa 时, 试样内开始出现正极性空间电荷积聚; 当硫化压力为 1.9 MPa 时, 试样内正极性空间电荷的积聚量进一步增加, 试样内的电场畸变最大, 电场强度达到 45.8 kV/mm; 当硫化压力为 2.5 MPa 时, 试样阴极

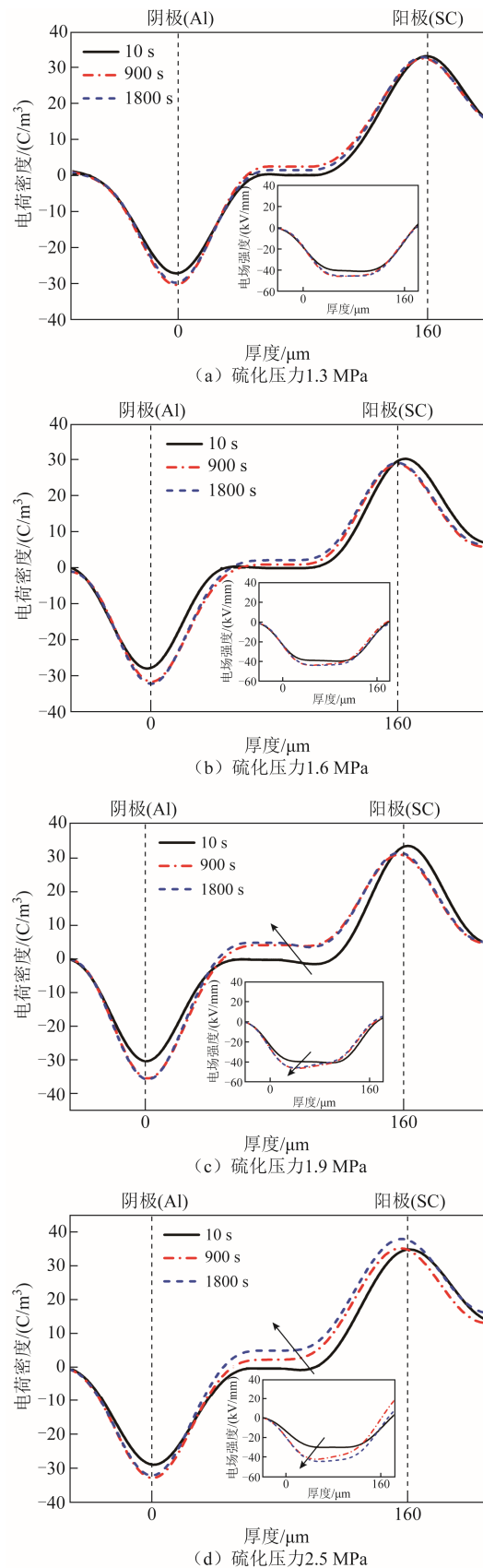


图 8 不同硫化压力下 XLPE 试样的空间电荷分布
Fig.8 Space charge distribution of XLPE samples under different vulcanization pressures

和阳极处积聚了同极性空间电荷，试样内积聚了正极性空间电荷，此时试样内空间电荷的积聚量达到最大值。

由此可知，当硫化压力小于 1.9 MPa 时，仅在试样阴极和阳极处有同极性空间电荷积聚，而试样中部是正负电荷分界点，因此中部位置的电场强度增加。随着硫化压力进一步增加，试样内开始出现明显的正极性空间电荷积聚，使得正负空间电荷的分界线向试样的阴极侧偏移，同时电场畸变位置也向阴极侧偏移，畸变电场强度也随之增加。

为了定量分析硫化压力对 XLPE 试样极化过程中空间电荷的积聚情况和去极化过程中空间电荷的消散特性的影响，本文计算了极化与去极化过程中试样内部积聚的平均电荷密度 $Q(t)$ ，计算式为

$$Q(t) = \frac{1}{d} \int_0^d |\rho(x,t)| dx \quad (7)$$

式中， $\rho(x,t)$ 为试样内部厚度 x 处在 t 时刻的空间电荷密度。

不同硫化压力下，极化与去极化过程中 XLPE 试样内的平均电荷密度如图 9 所示。由图 9 可知，随着硫化压力的增加，试样内的平均电荷密度呈先减小后增加的趋势，且所有试样的平均电荷密度在极化 400 s 后都趋于稳定。当硫化压力为 1.3 MPa 时，试样内平均电荷密度约为 14.8 C/m³；当硫化压力增加至 1.6 MPa 时，试样内平均电荷密度下降到约 13.5 C/m³；而随着硫化压力进一步增加，试样内平均电荷密度呈上升趋势，当硫化压力为 2.5 MPa 时，试样内平均电荷密度达到最大值 16.7 C/m³。这表明适当地增加硫化压力可以减少试样内空间电荷的积聚，但过大的硫化压力反而会增加空间电荷的积聚。

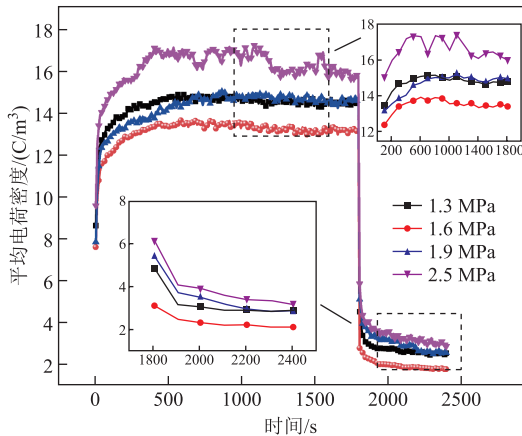


图 9 不同硫化压力下 XLPE 试样的平均电荷密度

Fig.9 Average space charge density of XLPE samples under different vulcanization pressures

XLPE 试样内部陷阱密度和陷阱能级可以通过去极化过程中空间电荷的消散进行计算，陷阱能级 E_t 和陷阱密度 $N(E_t)$ 可以分别表示为^[21]

$$E_t = kT \ln(vt) \quad (8)$$

$$N(E_t) = \frac{2tA}{qdkTf_0(E_t)\tau} e^{-\frac{E_t}{kT}} \quad (9)$$

式中， τ 和 A 为常数； k 为 Boltzmann 常数； T 为热力学温度； v 为电子振动频率； t 为时间； $f_0(\cdot)$ 为陷阱的初始占有率。

不同硫化压力下 XLPE 试样的陷阱分布特性如图 10 所示。由图 10 可知，当硫化压力为 1.3 MPa 时，试样的陷阱能级为 0.89 eV，陷阱密度为 $4.3 \times 10^{23} \text{ m}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ ；当硫化压力增加至 1.6 MPa 时，试样的陷阱能级提升至 0.92 eV，陷阱密度显著降低，达到最小值 $1.7 \times 10^{23} \text{ m}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ ；当硫化压力为 1.9 MPa 时，试样的陷阱能级提升至最大值 0.93 eV，同时试样的陷阱密度开始上升，增加至 $3.5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ ；随着硫化压力进一步增加，试样的陷阱能级开始降低，当硫化压力为 2.5 MPa 时，试样的陷阱能级降低至 0.92 eV，陷阱密度增加至 $4 \times 10^{23} \text{ m}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ 。通过 XLPE 试样的陷阱分布特征可以发现，随着硫化压力的增加，试样的陷阱能级呈现先增加后减小的趋势，试样的陷阱密度呈现先减少后增加的趋势。当硫化压力为 1.6 MPa 时，试样的陷阱密度达到最小值；而当硫化压力为 1.9 MPa 时，试样的陷阱能级达到最大值。改变硫化压力所引起的试样晶体结构与交联副产物的变化影响了试样的陷阱分布特性。

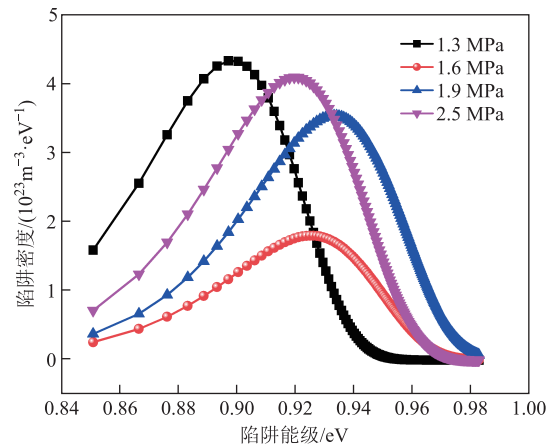


图 10 不同硫化压力下 XLPE 试样的陷阱分布特性

Fig.10 Trap characteristics of XLPE samples under different vulcanization pressures

2.7 直流击穿

不同硫化压力下 XLPE 试样的直流击穿场强

Weibull 分布如图 11 所示, 计算得到的直流击穿场强 Weibull 分布的形状参数与尺寸参数见表 3。由图 11 和表 3 可知, 当硫化压力为 1.3 MPa 时, 直流击穿尺寸参数为 365.11 kV/mm; 随着硫化压力的增加, 试样直流击穿场强的尺寸参数也逐渐增加, 当硫化压力为 1.9 MPa 时, 试样的尺寸参数达到最大值 414.73 kV/mm, 增加了 49.62 kV/mm; 随着硫化压力进一步增加, 当硫化压力为 2.5 MPa 时, 试样的尺寸参数下降到 385.90 kV/mm, 减小了 28.83 kV/mm。这表明在进行海缆工厂接头 XLPE 绝缘恢复时, 增加硫化压力虽然有助于提高 XLPE 试样的击穿场强, 但并不是持续提高, 其中存在作用拐点, 当硫化压力超过拐点值后, 试样的直流击穿场强会明显下降。对比直流击穿场强 Weibull 分布的形状参数可知, 当硫化压力为 1.3 MPa 时, 形状参数仅为 12.51; 而随着硫化压力的增加, 试样的形状参数相对 1.3 MPa 时进一步增加, 表明硫化压力过小时, 试样直流击穿场强分散性变大, 不利于 XLPE 绝缘直流击穿的稳定性。

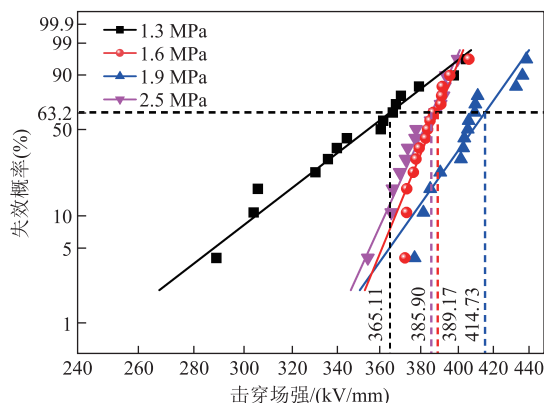


图 11 不同硫化压力下 XLPE 试样的击穿 Weibull 分布

Fig.11 Weibull distribution of XLPE samples under different vulcanization pressures

表 3 不同硫化压力下试样的 Weibull 分布参数

Tab.3 Weibull distribution parameters of XLPE samples under different vulcanization pressures

硫化压力/MPa	尺寸参数/(kV/mm)	形状参数
1.3	365.11	12.51
1.6	389.17	39.62
1.9	414.73	23.06
2.5	385.90	29.15

3 分析与讨论

3.1 硫化压力对 XLPE 交联过程的影响

XLPE 是由聚乙烯交联改性而来的高分子材

料, 通过采用过氧化物交联剂 DCP 对聚乙烯进行交联, 使聚乙烯间的化学键形成网状结构, 此时聚乙烯的热性能和力学性能均会得到提高^[22]。根据凝胶含量测试结果可知, 硫化压力的增加对 XLPE 凝胶含量的提升起到了促进作用。随着 XLPE 恢复绝缘硫化制备过程中所加压力的不断提高, XLPE 交联度也不断提高, XLPE 试样由线性分子结构转变为三维网状结构, 试样内部陷阱能级不断提高^[23]。从空间电荷测试结果可知, 试样的陷阱能级从硫化压力 1.3 MPa 时的 0.89 eV 提升到 1.9 MPa 时的 0.93 eV。此时在绝缘材料两端施加电压后, 电极会向材料内部注入空穴和电子, 在电场的作用下, 这些载流子在试样内部发生迁移, 而试样内部的陷阱会捕获载流子, 使自由载流子数量减少。XLPE 试样内部电荷输运示意图如图 12 所示。由于试样内部陷阱对载流子的捕获增加, 自由载流子数量减少, 进而使自由载流子的平均自由行程缩短, 导电通道难以形成, 最终提高了 XLPE 试样的击穿场强。此时增加硫化压力可提升 XLPE 的绝缘性能。

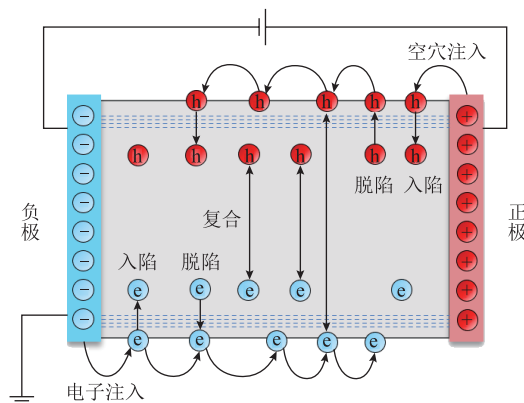


图 12 XLPE 试样内部电荷输运示意图

Fig.12 Schematic of internal charge transport in XLPE samples

从不同硫化压力下 XLPE 试样的傅里叶红外光谱测试和凝胶含量测试结果可知, 随着硫化压力的增大, XLPE 交联度不断增加, 同时 XLPE 试样内部残余的交联副产物含量也不断增多。聚乙烯交联过程示意图如图 13 所示。在 XLPE 交联的过程中, DCP 受热分解形成具有较高活性的过氧化物自由基, 过氧化物自由基有两种不同的反应方式: ①过氧化物自由基夺取聚乙烯分子链上的氢原子, 形成聚乙烯自由基和交联副产物枯基醇, 枯基醇受热分解为 α -甲基苯乙烯和水; ②过氧化物自由基在高温下分解为甲基和交联副产物苯乙酮, 甲基会和聚乙烯反应生成聚乙烯自由基和甲烷, 聚乙烯自由基相互交联反应形成 XLPE。

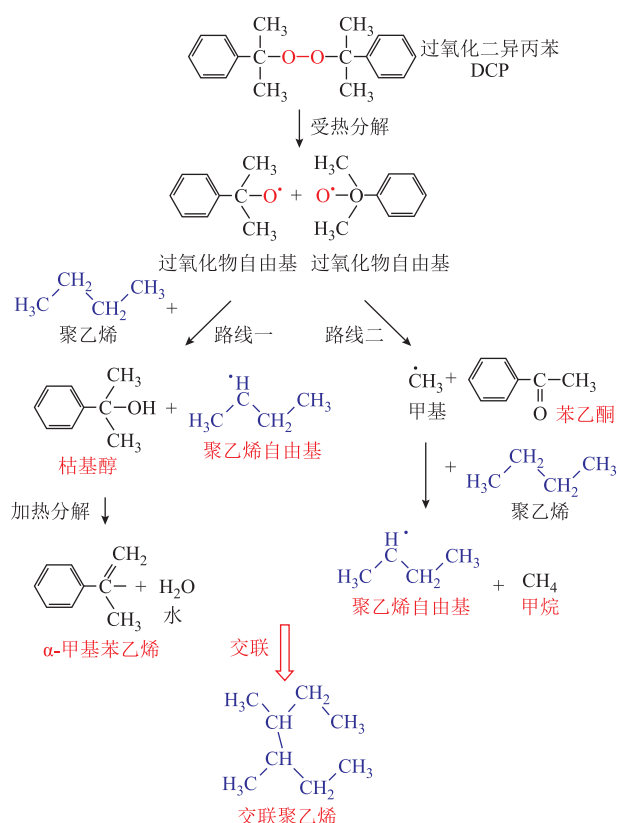


图 13 聚乙烯交联过程示意图

Fig.13 Schematic diagram of the cross-linking process of polyethylene

由此可知，聚乙烯的交联过程同时还为试样内部引入了枯基醇、 α -甲基苯乙烯、甲烷和苯乙酮等多种交联副产物。由傅里叶红外光谱测试结果可知，随着硫化压力的增加，交联副产物苯乙酮中的羰基（ $C=O$ ）含量也不断增加。羰基等老化产物的增加会给试样引入陷阱中心约为 0.95 eV 的浅陷阱^[24]，根据去极化过程中空间电荷平均电荷密度计算结果可知，随着硫化压力的增加，XLPE 试样内的陷阱能级呈现先增大后减小的趋势，表明随着硫化压力的增加，XLPE 试样中逐渐增加的交联副产物为试样内部引入了浅陷阱，这与文献^[24]的测试结果一致。

综上所述，随着硫化压力的增加，XLPE 试样交联度的提升使得试样内的陷阱能级不断提高，当硫化压力为 1.9 MPa 时，试样的陷阱能级达到最大值。同时硫化压力的增加会导致交联副产物难以分解和挥发，使试样内部交联副产物的含量不断增加，当硫化压力提高到 2.5 MPa 时，试样陷阱能级降低到 0.92 eV，陷阱密度增加至 $4 \times 10^{23} \text{ m}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ 。从而降低了空间电荷的注入势垒，形成空间电荷的注入与积聚，导致试样内部电场发生畸变，击穿场强降低。

3.2 硫化压力对 XLPE 结晶的影响

XLPE 是一种由结晶区和无定形区组成的半结晶聚合物，分析 XLPE 的结晶过程有助于理解硫化压力对 XLPE 结晶形态的影响。XLPE 结晶过程可以分为晶核的形成和晶粒的生长两个部分，当通过均相成核或者异相成核形成晶核后，分子链以晶核为中心，反复折叠进入晶格，以片晶的形式径向生长最终形成直径约为几十微米的球晶^[22]。

在晶核形成方面，随着硫化过程中压力的增大，XLPE 试样内部的交联副产物苯乙酮含量不断提高，而聚乙烯分子会以异相成核的方式与交联副产物分子结合形成晶核^[25]。因此，硫化压力的增加有利于 XLPE 试样结晶过程中晶核的形成。在晶粒生长方面，由 DSC 和 XRD 测试结果可知，随着硫化压力的增加，XLPE 试样的结晶度和熔融温度均呈现上升趋势，同时片晶厚度与晶粒尺寸也会增加。这是因为硫化过程中增大压力会使试样中的一些大分子断裂成移动性更强的小分子，小分子较强的移动性会使其互相接触进而发生重结晶现象，重结晶现象会促进大分子链的形成，完善 XLPE 试样的结晶形态，提高试样的结晶度。重结晶所形成的大分子链的熔融温度较高，XLPE 试样的熔融温度也随之上升。当在试样两侧施加电压后，试样内部的载流子主要在结晶区表面和无定形区迁移，而试样结晶度的升高抑制了载流子的输运过程，电荷难以在试样内运动引发击穿，从而提高了试样的击穿场强。

从 XRD 测试结果可知，硫化压力的增加使得晶面间距增加。这是因为随着硫化压力的增加，高温、高压作用会在垂直于片晶的方向产生热膨胀力^[22]。在高温、高压协同作用下，热膨胀力使得片晶间距增大，范德华键发生断裂，形成更多的无定形区。在无定形区内，载流子具有较大的可移动空间，同时无定形区内存在的杂质会显著降低载流子输运的势垒。因此，过高的硫化压力会降低试样的击穿场强。

硫化压力对 XLPE 结晶的影响过程如图 14 所示。由图 14 可知，硫化压力的增加会促进 XLPE 试样晶核的形成，完善其结晶形态，提高试样的结晶度和熔融温度。然而，过高的硫化压力会使片晶间距增大，导致无定形区增大和 XLPE 绝缘性能降低。

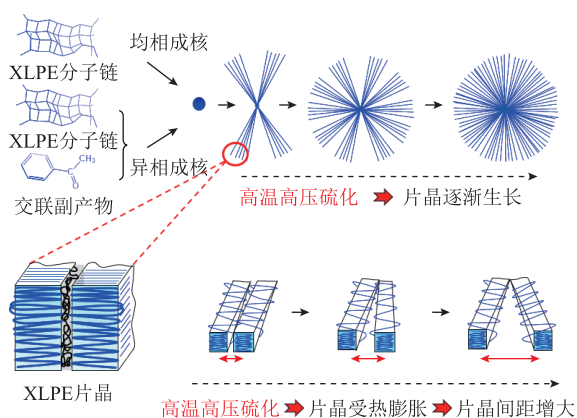


图 14 硫化压力对 XLPE 结晶的影响过程

Fig.14 The influence of vulcanization pressure on the crystallization of XLPE samples

4 结论

本文通过理化性能分析、电气测试等方式，研究了硫化压力变化对 500 kV 超高压直流 XLPE 电缆工厂接头恢复绝缘材料及其电气特性的影响，得出以下结论：

1) 增加硫化压力有助于提高 XLPE 的交联度，同时有利于试样晶核的形成，以及材料的片晶厚度和晶粒大小的增加，使晶体结构趋于完善，提高了试样的结晶度和熔融温度。但是随着硫化压力的不断增加，试样内的交联副产物含量也逐渐增多，片晶因硫化压力的增加而发生热膨胀，晶面间距增加，形成更多无定形区，降低了试样的绝缘性能。

2) 硫化压力的增加使得 XLPE 试样直流击穿场强和空间电荷注入阈值电场强度呈现先增大后减小的变化趋势，而电导电流和空间电荷平均电荷密度却呈现先减小后增大的趋势，其中硫化压力 1.9 MPa 是试样绝缘性能的拐点。在 1.9 MPa 硫化压力下，试样的直流击穿场强和空间电荷注入阈值电场强度均达到最大值，其电导电流为最小值；当硫化压力大于 1.9 MPa 时，随着硫化压力的增加，试样的交联副产物不断增多而形成了更多的浅陷阱，使得试样内部空间电荷积累和电场畸变增加，同时试样无定形区的增加降低了载流子运输的势垒，从而导致试样击穿场强降低。因此，提高工厂接头的硫化压力有助于改善其恢复绝缘的电气性能，但过高的硫化压力将不利于工厂接头恢复绝缘性能的增强。

致谢：感谢浙江大学电气工程学院高电压实验室对本文提供的帮助和支持，并祝贺浙江大学电气工程学院高电压实验室创建 70 周年。

参考文献

- [1] 朱敏慧, 闵道敏, 高梓巍, 等. 直流电缆用交联聚乙烯绝缘的击穿概率及其尺度效应仿真[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 1172-1184.
Zhu Minhui, Min Daomin, Gao Ziwei, et al. Breakdown probability and size effect simulation of XLPE insulation for DC power cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 1172-1184.
- [2] 吴春芳, 陈云, 黄韬, 等. 电力电缆状态感知与检测技术研究综述[J]. 高压电器, 2024, 60(10): 86-103.
Wu Chunfang, Chen Yun, Huang Tao, et al. Overview of condition sensing and detection technology for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 86-103.
- [3] 朱敏慧, 闵道敏, 高梓巍, 等. 直流电缆用交联聚乙烯绝缘的击穿概率及其尺度效应仿真[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 1172-1184.
Zhu Minhui, Min Daomin, Gao Ziwei, et al. Breakdown probability and size effect simulation of XLPE insulation for DC power cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 1172-1184.
- [4] 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.
- [5] Mazzanti G, Castellon J, Chen G, et al. The insulation of HVDC extruded cable system joints. Part 1: Review of materials, design and testing procedures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(3): 964-972.
- [6] Saltzer M, Gustafsson A, Jeroense M, et al. A new voltage level for extruded DC cables[C]//CIGRE Session 2016, Paris, France, 2016: B1-301.
- [7] 赵薇, 张振鹏, 胡列翔, 等. 500 kV 海缆接头绝缘恢复对 XLPE 工频击穿和晶相结构的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3437-3444.
Zhao Wei, Zhang Zhenpeng, Hu Liexiang, et al. Effects of 500 kV submarine cable factory joint

- insulation recovery on power frequency breakdown and crystalline morphology of XLPE[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(11): 3437-3444.
- [8] 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): 663-672.
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): 663-672.
- [9] Du Boxue, Zhu Xiaohui, Gu Liang, et al. Effect of surface smoothness on tracking mechanism in XLPE-Si-rubber interfaces[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 18(1): 176-181.
- [10] Doedens E, Jarvid E M, Frohne C, et al. Enhanced charge injection in rough HVDC extruded cable interfaces[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, 26(6): 1911-1918.
- [11] 孟繁博, 陈向荣, 洪泽林, 等. 界面喷涂 $Mg(OH)_2$ 对直流电缆工厂接头绝缘交接层直流电气性能的影响[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(23): 6471-6482.
Meng Fanbo, Chen Xiangrong, Hong Zelin, et al. Influence of interface spraying $Mg(OH)_2$ on DC electrical properties of DC cable factory joints insulation transition layer[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(23): 6471-6482.
- [12] 周厚强. 含软接头的 220kV 光纤复合海底电缆的研制[J]. *电线电缆*, 2012(6): 4-7, 40.
Zhou Houqiang. Research and development of the factory joint inside optical fiber composite submarine cable for rated voltage of 220 kV[J]. *Electric Wire & Cable*, 2012(6): 4-7, 40.
- [13] 董芸滋, 高嫒, 李秀峰, 等. 交联度对交联聚乙烯/有机化蒙脱土纳米复合材料拉伸性能和介电性能的影响[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(5): 1154-1165.
Dong Yunzi, Gao Yuan, Li Xiufeng, et al. Effect of crosslinking degree on tensile and dielectric properties of cross-linked polyethylene/organic montmorillonite nanocomposite material[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(5): 1154-1165.
- [14] Wei Yanhui, Yang Jingjing, Li Guochang, et al. Influence of molecular chain side group on the electrical properties of silicone rubber and mechanism analysis[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2022, 29(4): 1465-1473.
- [15] Xu Nuo, Zhong Lisheng, Sui Rui, et al. Correlation between terahertz dielectric properties of XLPE and its composition structure during electrothermal aging[J]. *Macromolecules*, 2022, 55(18): 8186-8194.
- [16] 段玉兵, 韩明明, 王兆琛, 等. 不同热老化温度下高压电缆绝缘特性及失效机理[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(1): 45-54.
Duan Yubing, Han Mingming, Wang Zhaochen, et al. Insulation characteristics and failure mechanism of high-voltage cables under different thermal aging temperatures[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(1): 45-54.
- [17] 陶霁韬, 李化, 方田, 等. 基于片晶滑移的水树结晶破坏机理[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(12): 2640-2649.
Tao Xiantao, Li Hua, Fang Tian, et al. Crystalline destruction mechanism caused by water tree based on lamella slip[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(12): 2640-2649.
- [18] Contat-Rodrigo L, Ribes Greus A. Biodegradation studies of LDPE filled with biodegradable additives: Morphological changes. I[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, 83(8): 1683-1691.
- [19] Jiang H G, Rühle M, Lavernia E J. On the applicability of the X-ray diffraction line profile analysis in extracting grain size and microstrain in nanocrystalline materials[J]. *Journal of Materials Research*, 1999, 14(2): 549-559.
- [20] 雷清泉, 刘关宇. 如何理解工程电介质中极化与电导两个基本物理过程及其测量的科学原理与方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(23): 6769-6789, 7113.
Lei Qingquan, Liu Guanyu. How to understand the two basic physical processes of polarization and conductance in engineering dielectrics and scientific principles and methods of their measurement[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(23): 6769-6789, 7113.
- [21] Akram S, Yang Yan, Zhong Xin, et al. Influence of nano layer structure of polyimide film on space charge behavior and trap levels[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, 25(4): 1461-1469.

- [22] Li Guochang, Wang Zhaochen, Lan Rui, et al. The lifetime prediction and insulation failure mechanism of XLPE for high-voltage cable[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(2): 761-768.
- [23] Li Jianying, Zhou Fusheng, Min Daomin, et al. The energy distribution of trapped charges in polymers based on isothermal surface potential decay model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(3): 1723-1732.
- [24] 闫群民, 李欢, 翟双, 等. 不同温度热老化对高压配网交联聚乙烯电缆绝缘表面陷阱参数的影响[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 692-701.
- Yan Qunmin, Li Huan, Zhai Shuang, et al. Effect of thermal aging at different temperatures on the surface trap parameters of HV-XLPE distribution cable insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 692-701.
- [25] 朱晓辉, 杜伯学, 高宇, 等. 交联工艺对交联聚乙烯结晶形态的影响[J]. 绝缘材料, 2010, 43(6): 44-47.
- Zhu Xiaohui, Du Boxue, Gao Yu, et al. Effects of cross-linking process on crystallinity of XLPE[J]. Insulating Materials, 2010, 43(6): 44-47.

作者简介

张添胤 男, 2000 年生, 博士研究生, 研究方向为高压交直流电缆系统绝缘测试和状态监测技术。

E-mail: zhangtianyin_zju@163.com

陈向荣 男, 1982 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为先进电气材料与高压绝缘测试技术, 先进电力装备与新型电缆系统, 高电压新技术等。

E-mail: chenxiangrongxh@zju.edu.cn (通信作者)

Effect of Vulcanization Pressure on the Return Insulation Performance of 500 kV EHVDC XLPE Cable Factory Joints

Zhang Tianyin¹ Chen Xiangrong¹ Wang Enzhe¹ Yin Kai¹ Xia Feng^{1,2} Huang Ruobin²

(1. College of Electrical Engineering Zhejiang University Hangzhou 310027 China

2. Ningbo Orient Wires & Cables Co. Ltd Ningbo 315800 China)

Abstract The increasing distance of offshore wind farms from coastal areas has created an urgent need for the development of long-term extra high voltage direct current (EHVDC) cables. Factory joints are commonly used to connect sections of submarine cables, forming extensive cable systems. Therefore, studying factory joint is crucial for advancing long-length cable lines. This study investigates the physicochemical and dielectric insulation characteristics of XLPE samples under various vulcanization pressures, highlighting the effects of these pressure changes on the properties of 500 kV EHVDC cross-linked polyethylene (XLPE) cable joints.

Commercially available 500 kV EHVDC XLPE pellets were used to prepare the XLPE samples via hot-press method. Initially, a specified quantity of XLPE pellets was distributed between two iron plates. The pellets were preheated at 120°C for 5 minutes and then heated at 180°C. Cross-linking was subsequently performed under different vulcanization pressures of 1.3 MPa, 1.6 MPa, 1.9 MPa and 2.5 MPa respectively. The fabricated XLPE specimens underwent physical characterization through Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), differential scanning calorimetry (DSC), X-ray diffraction (XRD), and gel content analysis. While electrical measurements included current density analysis, pulsed electro-acoustic (PEA) analysis, and DC breakdown test.

The physicochemical results indicate that increasing vulcanization pressure enhances the crosslinking degree of XLPE samples, transforming the material from a linear molecular structure to a 3D network structure and breaking macromolecules into smaller, mobile molecules. The increased mobility of these small molecules leads to improved crystallinity, resulting in a higher crystallinity structure. Additionally, the recrystallized macromolecular chains have higher melting temperatures, raising the overall melting temperature of the samples. However, higher vulcanization pressure also produces crosslinking by-products that are difficult to decompose and volatilize. The combination of high temperatures and pressures causes thermal expansion forces perpendicular to the lamellae, increasing lamella spacing, creating more amorphous regions, and effecting the insulation performance of the samples.

Regarding electric insulation performance, the DC breakdown strength and space charge injection threshold strength of the fabricated XLPE samples initially increase and then decrease with the increase in vulcanization pressure. Conversely, conductivity current and average space charge density first decrease and then increase. An optimal vulcanization pressure of 1.9 MPa was identified, at which the XLPE samples exhibited improved electrical insulation properties. Below this pressure, the increased trap energy levels inhibit carrier transport, thereby reducing the number of free carrier paths and hindering the formation of conductive channels, ultimately increasing the breakdown strength of the XLPE samples. However, at vulcanization pressures above 1.9 MPa, the increased crosslinking byproducts create more shallow traps, which lower space charge injection and accumulation, ultimately distorting the sample's internal electric field. Additionally, the increased lamella spacing creates more amorphous regions, reducing the carrier transport barrier and further decrease the breakdown strength of the prepared XLPE samples.

Based on the results, it can be concluded that appropriately increasing the vulcanization pressure of factory joints improves the physicochemical and electrical properties of XLPE. However, excessively high vulcanization pressure can have a detrimental impact on the electrical insulation properties of cable factory joints.

Keywords: Vulcanization pressure, cross-linked polyethylene, extra high voltage direct current cable, factory joints, return insulation

(编辑 李 冰)