

冷热循环条件下不同纯净度 XLPE 电缆绝缘 低频介损变化机理研究

朱晓辉¹, 孟峥峥¹, 宋鹏先¹, 韩冲², 李忠磊²

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384;

2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要:本文提出了一种电缆绝缘杂质含量微观性能的评价方法,可有效避免纯净度评估过程中人工显微观测主观因素的影响。基于宽频介电阻抗谱法,研究 35 kV 和 110 kV 电压等级的 XLPE 电缆绝缘样品在不同程度冷热循环试验条件下介质损耗因数随测试频率的变化规律,仿真计算冷热循环过程中 XLPE 基体与杂质缺陷的界面应力特性,分析 XLPE 电缆绝缘的宽频介质损耗宏观物理量参数与材料纯净度等微观性能的相关性。结果表明:35 kV 的 XLPE 电缆绝缘经过-196~50℃ 下 10 次冷热循环处理后,0.1~1.0 Hz 低频介质损耗因数增大 1 倍以上,而 110 kV 的 XLPE 绝缘试样介质损耗因数未发生明显变化。仿真分析表明,冷热循环过程中聚乙烯绝缘与微观杂质间产生界面应力,界面区机械应力疲劳导致缺陷扩大,加剧低频介质损耗因数增大。

关键词:XLPE 绝缘;杂质;介质损耗因数;冷热循环

中图分类号:TM247 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)12-0087-07

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.12.014

Study on Change Mechanism of Low Frequency Dielectric Loss of XLPE Cable Insulation with Different Purity During Thermocycling Process

ZHU Xiaohui¹, MENG Zhengzheng¹, SONG Pengxian¹, HAN Chong², LI Zhonglei²

(1. Electric Power Research Institute of Tianjin Electric Power Corporation, Tianjin 300384, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The paper proposes a evaluation method for the micro properties of impurity content for cable insulation, which can effectively avoid the effect of subjective factors of manual microscopic observation in the purity evaluation process. On the basis of broadband dielectric impedance spectroscopy method, the change law of dielectric loss factor of 35 kV and 110 kV XLPE cable insulation samples with the test frequency during different thermocycling processes were investigated, and the stress characteristics at the interface between XLPE insulation and impurity during the thermocycling process were simulated. The correlation between the macrophysical parameter broadband dielectric loss and the microscopic property cleanliness for XLPE cable insulation were analyzed. The results show that after 10 cycles of thermocycling between -196℃ and 50℃, the low-frequency dielectric loss factor of 35 kV XLPE cable insulation at 0.1-1.0 Hz is more than doubled, while the dielectric loss factor of 110 kV XLPE sample does not change obviously. The simulation analysis shows that during the thermocycling process, there is interface stress between the polyethylene insulation and the micro-impurities, the stress fatigue enlarges the microscopic defects in the interface area and then accelerates the increase of low-

收稿日期:2021-02-03 修回日期:2021-09-16

基金项目:国网天津市电力公司科技项目(KJ21-1-08)

作者简介:朱晓辉(1963-),男(汉族),天津人,教授级高工,博士,主要从事电力电缆老化机理及局部放电在线监测的研究

frequency dielectric loss factor.

Key words: XLPE insulation; impurity; dielectric loss factor; thermocycling

0 引言

交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)绝缘电力电缆已经广泛应用于输电线路和配电网中。国家电网公司已投入运行的66 kV及以上的高压电缆线路已经超过86 000 km,最高电压等级已达500 kV。随着电缆电压等级的提升,电缆绝缘水平不断提高,其中电缆绝缘纯净度是影响其绝缘水平的关键。研究表明,XLPE绝缘中微孔、杂质颗粒等缺陷的存在,是影响电缆承受电场强度和寿命的重要因素^[1-4],因此,对电缆原材料进行微孔、杂质颗粒的检测,评估其纯净度对于保证电缆产品的绝缘质量具有十分重要的意义。

目前,对于电缆料生产厂家、电缆生产厂家和电力部门,电缆绝缘杂质含量的检测主要是借助显微镜采用人工目力,依据我国现行的电力电缆产品检测标准(GB/T 11017.1—2014、GB/T 18890.1—2015和GB/T 22078.1—2008)进行检测^[5-7]。目前,基于显微镜观测的检测方式往往依赖操作人员的经验,且检测耗费时间长。为更精确测试高压电缆绝缘的杂质尺寸和含量,文献[8-9]基于电子耦合摄像器件(CCD)的挤带式杂质检测系统,该系统通过将XLPE绝缘料挤出压膜制成厚度约为1 mm的薄带试样,经CCD扫描与图像识别获得绝缘中杂质尺寸及数量,识别获得杂质缺陷的最小尺寸可达到20 μm ,但该系统适用于绝缘薄膜的纯净度检测,对于电缆绝缘的纯净度检测依然存在局限性。范玉军^[10]基于绝缘局部放电与电树枝起始场强,采用理论研究方法研究了电缆绝缘材料的微孔、杂质和突起尺寸的限值。文献[11-13]研究表明,电缆绝缘材料中的杂质和微孔的尺寸、含量等是影响绝缘材料介电性能、电气强度和寿命指数的关键因素。由于电缆绝缘材料及电缆的生产技术和工艺不尽相同,依据上述常规检测标准中规定的方法,无法区分由于电缆产品的细微品质差异对材料宏观性能的影响。

本文探究XLPE电缆绝缘纯净度与宏观介电性能的关系,提出一种基于冷热循环的XLPE电缆绝缘低频介质损耗变化的纯净度评估方法。基于宽频介电阻抗谱法,检测对比冷热循环处理后的XLPE绝缘材料介质损耗性能差异,以冷热循环前后试样的试验结果变化规律为判据,实现对绝缘纯

净度等微观性能的评估,避免人为主观因素的影响,并提高工作效率。

1 试验

1.1 冷热循环试验方法

采用35 kV和110 kV的XLPE绝缘电缆绝缘层进行切片,制成长度为150 mm、宽度为30 mm的长条状试样。将试样放置于底部镂空,直径为45 mm的圆柱状漏斗中,再将漏斗置于盛满液氮的容器中,试样在漏斗中与液氮充分接触,浸泡约5 min后取出。将从液氮中取出的条状试样悬挂于50℃恒温箱中,在箱内停留5 min,使其受热均匀,然后将试样从恒温箱中取出,进行下一次的液氮浸泡和加热循环。采用上述冷热循环过程对35 kV和110 kV的XLPE绝缘电缆试样分别进行5次和10次循环,如图1所示。



(a)液氮冷却

(b)恒温箱加热

图1 XLPE绝缘试样冷热循环处理

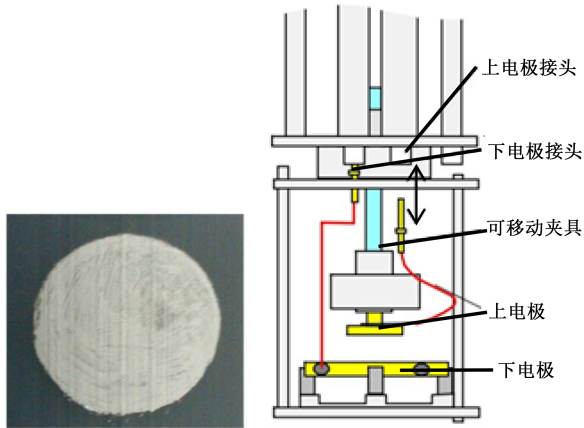
Fig.1 Thermocycling process of XLPE insulation samples

1.2 宽频介电谱测试

采用德国Novcontrol公司的Concept 40型宽频介电阻抗谱仪测量绝缘试样的介质损耗频谱。对试样进行宽频介电阻抗谱测试前,首先将试样加工成直径为25 mm的圆片状试样,然后将试样在无乙醇中清洗,再进行超声清洗处理,去除表面杂质对试验结果的影响。选取试样表面平整区域,对试样上、下表面对称位置直径为20 mm区域内涂上导电银胶,待导电银胶干固后(如图2(a)所示),将样品放置于电极夹具之间(如图2(b)所示),进行宽频介电频谱测试。

介质损耗因数 $\tan\delta$ 仅取决于材料特性,与材料

的尺寸和几何形状无关。测试电压为 1 kV, 试验频率范围为 0.1~1 000 Hz, 测试温度为室温。所进行宽频介电阻抗谱测试的 6 组试样, 包括进行了 0、5、10 次冷热循环处理的 35 kV 和 110 kV 试样, 每种试样检测 3 片, 并对每组试样的检测结果进行算术平均计算。



(a)绝缘试样与银胶电极 (b)宽频介电谱测试用电极系统

图2 宽频介电谱试验试样与电极系统

Fig.2 Experimental sample and electrode system of broadband dielectric spectroscopy test

2 试验结果

2.1 冷热循环对宽频介电谱的影响规律

图 3 为 35 kV 和 110 kV 的 XLPE 绝缘试样经不同冷热循环处理的介质损耗频谱。从图 3 可以看出, 35 kV 试样的介质损耗因数明显大于 110 kV 试样的介质损耗因数, 特别在 10 Hz 以下的中低频区差别更为明显。经过相同程度冷热循环处理的两种试样, 35 kV 试样的介质损耗因数也均明显大于 110 kV 试样的介质损耗因数, 且随着循环次数的增加, 两种试样在低频区域的介质损耗因数的区别度更加明显。

2.2 XLPE 绝缘杂质与缺陷表征

采用体式显微镜对 35 kV 和 110 kV 的 XLPE 电缆绝缘试样进行观测, 发现 35 kV 的 XLPE 绝缘试样中有明显的杂质缺陷, 选取具有代表性的杂质和缺陷试样的光学显微照片如图 4 所示。从图 4 可以看出, 35 kV 绝缘电缆试样中存在不透明杂质和半透明棕色缺陷, 不透明杂质最大尺寸达到 200 μm; 而所有 110 kV 的 XLPE 绝缘试样中均未观测到尺寸大于 100 μm 的缺陷。

结合宽频介电谱试验结果表明, 两种 XLPE 样品经过 5 次、10 次冷热循环处理的试样介质损耗因

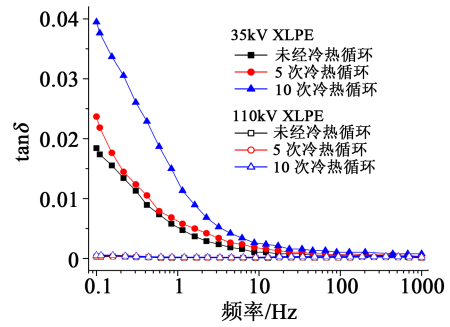
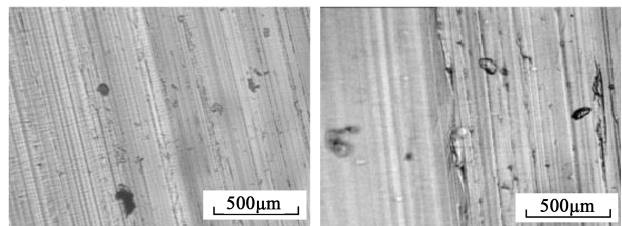


图3 35 kV 和 110 kV 的 XLPE 绝缘试样的介质损耗频谱

Fig.3 Dielectric loss spectra of 35 kV and 110 kV XLPE insulation samples



(a)不透明杂质

(b)半透明杂质

图4 35 kV 的 XLPE 绝缘试样光学显微照片

Fig.4 Optical microscope photos of 35 kV XLPE insulation sample

数均有所上升, 其中 35 kV 试样介质损耗因数在 0.1~1.0 Hz 低频范围内的变化显著, 在 10 次冷热循环后, 0.1 Hz 低频介质损耗因数增大 1 倍以上; 而 110 kV 试样的介质损耗因数测试结果变化率较小。分析认为, 冷热循环过程中 XLPE 试样的介质损耗因数变化与内部杂质含量、微孔之间存在明显的相关性。

2.3 XLPE 绝缘试样红外光谱测试

为了进一步探究冷热循环过程对 XLPE 绝缘试样的影响, 采用傅里叶红外光谱分析仪(德国 BRUKER, TENSOR-27 型)对冷热循环前、后的 35 kV 和 110 kV 的 XLPE 绝缘试样进行红外光谱与 XLPE 官能团分析, 结果如图 5~6 所示。从图 5~6 可以看出, 冷热循环前后, 两种试样的红外光谱吸收峰无明显变化。结果表明, 冷热循环处理未导致 XLPE 绝缘官能团发生明显变化。常用于考核 XLPE 绝缘试样热老化性能的羰基指数, 即羰基吸收峰强度(波数为 1 720 cm⁻¹)与甲基吸收峰强度(波数为 1 850 cm⁻¹)的比值, 在这 4 组试样的测试结果中也未见有明显变化, 冷热循环处理没有使材料发生明显的老化。

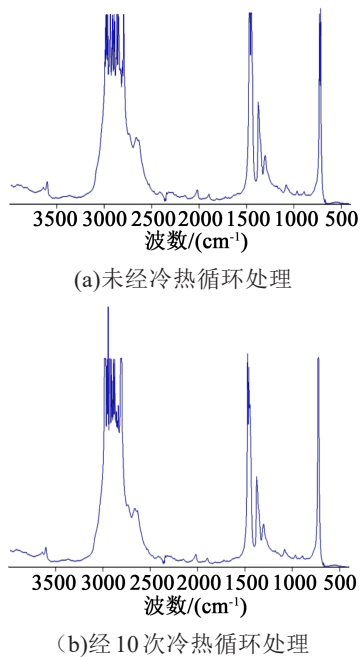


图5 35 kV的XLPE绝缘试样红外光谱测试图谱

Fig.5 ATR-IR spectra of 35 kV XLPE insulation sample

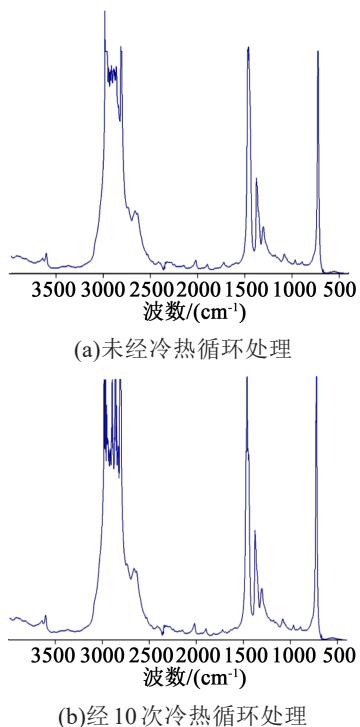


图6 110 kV的XLPE绝缘试样红外光谱测试图谱

Fig.6 ATR-IR spectra of 110 kV XLPE insulation sample

3 冷热循环仿真

3.1 仿真模型

聚乙烯是一种由结晶相和无定形相组成的非极性聚合物,无定形区中存在微孔、杂质(包括不透

明杂质或半透明棕色琥珀状物质)。这些缺陷都会导致空间电荷局部积累,进而诱发绝缘材料发生老化和击穿,成为限制电缆耐电强度和寿命的主要因素。因此,有效地评价与控制电缆绝缘中的微孔、杂质等是保证高压电缆绝缘品质的重要手段。现行的高压电缆相关国家标准 GB/T 11017.1—2014、GB/T 18890.1—2015 和 GB/T 22078.1—2008 分别对额定电压 110、220、500 kV 电缆绝缘中的微孔、杂质等缺陷允许的最大尺寸做出相应规定,如表 1 所示;而对于额定电压不高于 35 kV 的挤包绝缘电力电缆,国家标准未对绝缘中微孔、杂质等做出相关要求。

表1 XLPE绝缘缺陷允许的最大尺寸

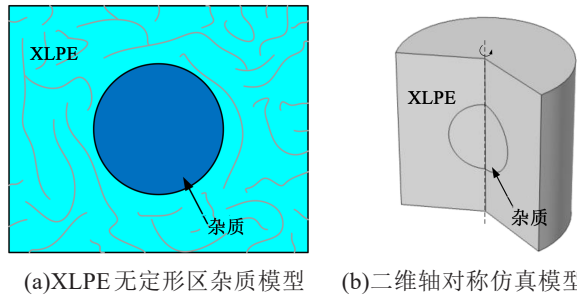
Tab.1 Maximum size allowed for XLPE insulation defects

电压等级/kV	缺陷尺寸/ μm		
	微孔	不透明杂质	半透明棕色物质
35	—	—	—
110	50	125	250
220	50	125	160
500	20	75	—

分析认为,冷热循环过程导致 XLPE 绝缘内部微观缺陷增多,使得低频介质损耗因数进一步增大。为此,开展基于 COMSOL Multiphysics 的多物理场仿真计算,建立聚乙烯绝缘与杂质模型。本研究采用电缆粒料经热压交联过程制备绝缘样品,因此忽略绝缘中存在微孔缺陷,主要考虑杂质经冷热循环过程对绝缘介质损耗因数变化的影响。XLPE 绝缘中不透明杂质主要为电缆料生产、包装、运输过程中引入的外部杂质,半透明棕色琥珀状物质主要为电缆交联过程产生的焦化杂质。

图 7(a)表示 XLPE 基体中的杂质模型,其中矩形区域代表 XLPE 绝缘无定形区,并将杂质简化为理想的球形。在多物理场仿真分析软件中建立二维轴对称模型如图 7(b)所示,设定 XLPE 绝缘与杂质的理化参数如表 2 所示^[14];将固体传热和固体力学物理场进行耦合,设定室温(25℃)—液氮(-196℃)—干燥箱(50℃)的冷热循环暂态过程,仿真得到冷热循环过程中 XLPE 绝缘与不同尺寸的杂质界面应力的变化过程。需要说明的是,有限元仿真中将冷热循环的升温与降温暂态过程简化为匀

速升/降温过程,并设定仿真计算步长为0.1 s。



(a)XLPE 无定形区杂质模型 (b)二维轴对称仿真模型
图7 XLPE 绝缘与杂质界面模型

Fig.7 Model of the interface between XLPE insulation and impurity

表2 XLPE 绝缘与杂质的密度与热学参数
Tab.2 Density and thermal parameters of XLPE insulation and impurities

参数	XLPE 绝缘	杂质
密度/(g/cm ³)	0.92	50
热导率/(W/(m·K))	0.29	125
热容/(J/(kg·°C))	1 980	250
热膨胀系数/(1/K)	3×10 ⁻⁴	1×10 ⁻⁵

3.2 冷热循环过程对界面应力影响研究

图8为冷热循环过程中110 kV XLPE 绝缘与杂质(直径为50 μm)界面区最大应力与温度随时间的变化情况。

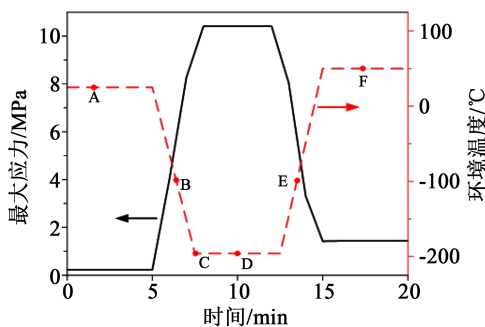


图8 冷热循环过程中110 kV XLPE 绝缘与杂质界面最大应力的演变规律

Fig.8 Maximum stress at the interface between 110 kV XLPE insulation and impurity during the thermocycling process

从图8可以看出,冷热循环过程中,两者界面间产生机械应力;且界面最大应力随着环境温度的降低而不断增大,并在温度达到液氮温度(-196°C)稳态后达到最大值 10.42 MPa;随着温度的升高,界面

应力快速减小,并在达到50°C时产生约为1.23 MPa的残余应力。为进一步分析冷热循环过程中XLPE 基体与杂质微球界面应力变化过程,选取图8中A(25°C)、B(-100°C)、C(-196°C)、D(-196°C)、E(-100°C)、F(50°C)点共6个温度点,其二维轴对称的界面应力分布如图9所示。

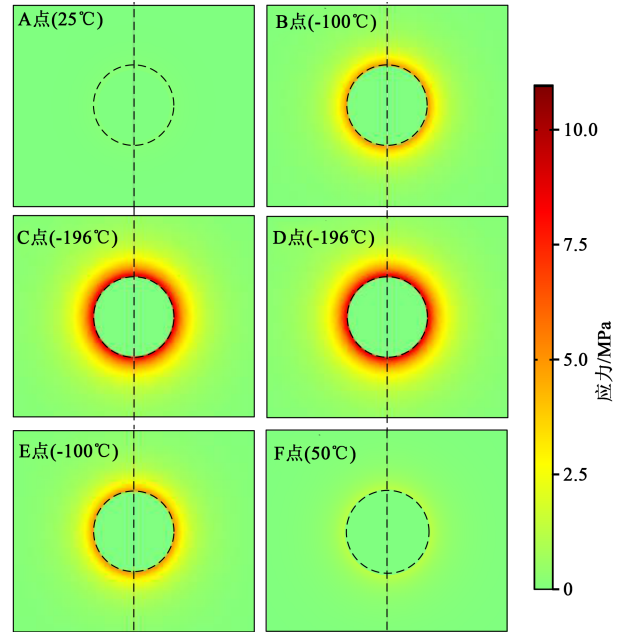


图9 冷热循环过程中XLPE 绝缘与杂质的界面应力分布及变化规律

Fig.9 Mechanical stress distribution at the interface between XLPE insulation and impurity during the thermocycling process

由图9可见,在温度下降过程中(A-B-C过程),XLPE 绝缘基体与杂质因热膨胀系数不同而产生不同的收缩形变,形变 ΔL 可表示为式(1)。

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L \quad (1)$$

式(1)中: α 为热膨胀系数; ΔT 为温度变化量; L 为初始长度。XLPE 绝缘基体与杂质微球由于外在约束与内部各部分之间相互约束从而在界面处产生内应力。随着温度的降低,XLPE 基体与杂质间收缩形变加剧,界面应力不断增大;当温度达到D点(-196°C)时,界面应力达到准稳态;随着温度由-196°C升高至50°C(D-E-F过程),界面应力逐渐减小。快速冷热循环处理过程中,界面应力不断变化导致XLPE 基体与杂质微球之间产生机械疲劳。

同时,聚合物基体与杂质界面结合性较差,冷热循环作用导致杂质与聚合物之间界面缺陷增大。在0.1~10 Hz 低频交变电场作用下,缺陷界面极化

率增大,导致绝缘介质损耗因数增大,从而进一步放大了内部微观缺陷的影响。

3.3 杂质尺寸对界面应力影响研究

针对不同电压等级的 XLPE 电缆绝缘缺陷,进一步开展杂质尺寸对冷热循环过程界面应力的影响研究。基于表 1 中 35、110、220 kV 电缆绝缘相关国家标准中对于缺陷尺寸限定值,选取直径分别为 10、20、50、100、160、250 μm 的杂质,并建立 XLPE 绝缘与杂质界面应力仿真模型。

图 10 为冷热循环过程中在温度为 -196°C (D 点) 时,不同尺寸杂质缺陷与 XLPE 绝缘界面最大应力分布图。图 11 为冷热循环过程中 XLPE 绝缘与杂质界面最大应力与杂质尺寸的关系。

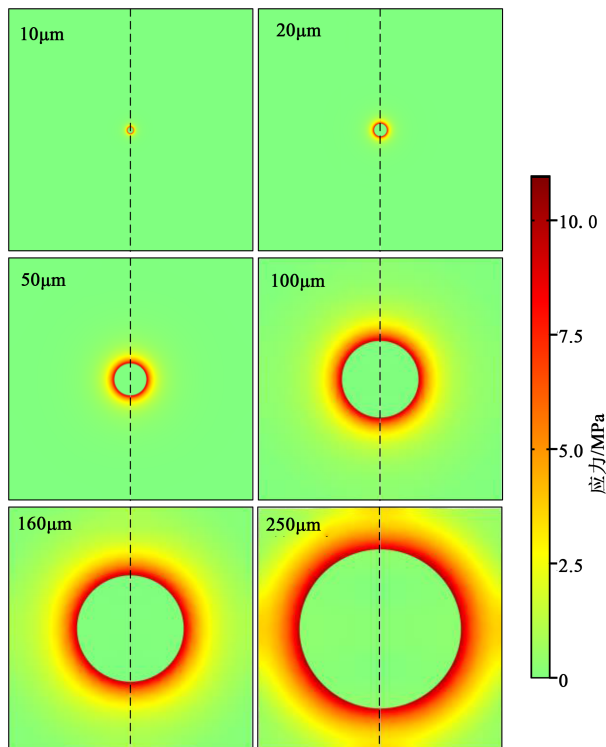


图 10 不同尺寸的杂质与 XLPE 绝缘的界面最大应力分布

Fig.10 Relationship between maximum stress at the interface between XLPE insulation and impurity with different size during the thermocycling process

从图 10~11 可以看出,随着绝缘杂质尺寸的增大,界面应力最大值增大,且应变区域不断扩大。特别当杂质尺寸超过 100 μm 时, XLPE 绝缘与杂质界面区域应力显著增大。多次冷热循环处理后,杂质与 XLPE 基体界面因机械疲劳而导致缺陷进一步扩大;在 0.1~10 Hz 的电压频率下,缺陷的界面极化增强,绝缘介质损耗因数增大。因此,110 kV 电缆

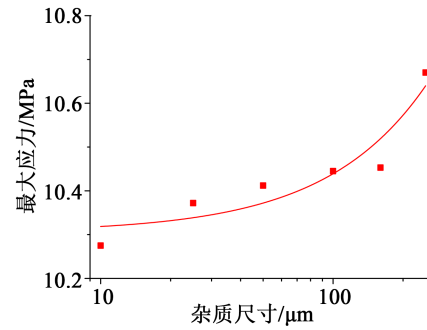


图 11 冷热循环过程中 XLPE 绝缘与杂质界面最大应力与杂质尺寸的关系

Fig.11 Relationship between interface maximum stress and impurity size during the thermocycling process

料的杂质尺寸小于 125 μm ,绝缘经多次冷热循环后低频介质损耗因数未发生明显变化;而 35 kV 电缆料含有大尺寸缺陷,其低频介质损耗因数随冷热循环次数增加而显著增大。

4 分析与讨论

在外施电场作用下,介质中的自由电荷载流子在界面和缺陷处聚集,形成空间电荷的局部积累,从而产生界面极化。在电场频率低于 1.0 Hz 时,绝缘介质有足够的时间来完成偶极子转向极化并且达到稳定状态,此时基本不存在转向极化滞后电场变化的现象,相应的介质损耗也主要由界面极化产生,偶极子转向极化产生的介质损耗因数很小,可以忽略,介质内部杂质含量与介质损耗因数之间存在明显的相关性。

当电场频率逐渐增大,转向极化开始滞后于电场变化,这时电介质放出的能量小于吸收的能量,能量差消耗于克服偶极子转向时所受的摩擦阻力,相应的介质损耗转为以偶极子转向极化为主。从图 3 中所示的 0.1~1 000 Hz 频率的介质损耗因数谱变化曲线可以看到,低于 10 Hz 的曲线值能够通过表征界面极化相对程度来体现绝缘材料中所存在缺陷的相对量。

从图 3 中所示的 0.1~10 Hz 频率的介质损耗谱曲线得知,35 kV 的 XLPE 绝缘材料的界面极化值高于 110 kV,这意味着 35 kV 的 XLPE 绝缘内部杂质含量等缺陷远高于 110 kV。经过 5 次、10 次冷热循环处理的两种试样,由于电缆绝缘内部杂质和聚乙烯的膨胀系数差异较大,导致聚乙烯基体和杂质的形变不同,两者界面间产生热应力。多次冷热循环后,聚乙烯绝缘基体与杂质间的界面应力将导致两者界面间发生机械疲劳,使得聚乙烯中微观缺陷

增大^[15]。因此,冷热循环作用进一步放大了 35 kV XLPE 内部微观缺陷的影响,从而使介质损耗因数显著增大。而 110 kV 的 XLPE 绝缘试样内部含有的杂质缺陷含量与尺寸明显优于 35 kV,冷热循环处理对其内部微观缺陷影响较小,因此介质损耗因数无明显变化。

5 结论

(1)基于红外光谱法分析结果表明,XLPE 绝缘试样经冷热循环处理后,绝缘材料未发生明显老化或产生新的各类基团,如羟基、羰基等。

(2)对比两种不同纯净度 XLPE 绝缘料在冷热循环处理前、后的介质损耗因数测试结果表明,35 kV 的 XLPE 试样的介质损耗因数随冷热循环处理次数的增加而有所增大,且在 1.0 Hz 以下的低频部分变化趋势更为明显。冷热循环处理显著增大了杂质含量较多试样的低频介质损耗因数。

(3)不同尺寸杂质与 XLPE 绝缘界面应力仿真结果表明,快速冷热循环过程中绝缘缺陷界面产生热应力,导致界面缺陷增大,从而进一步增大了绝缘介质损耗因数;且随着绝缘杂质尺寸的增大,界面应力最大值增大,且应力区域不断扩大。

参考文献:

- [1] 蒋佩南. 国产交联聚乙烯电力电缆击穿故障的评定和分析[J]. 电线电缆,2007(2):1-5.
- [2] 屠德民. 从工程电介质进展看前沿课题[J]. 电工技术学报,2005,

20(1):8-15.

- [3] 刘刚,陈志娟,陆国俊,等. 110kV 交联聚乙烯电缆接头主绝缘含杂质的击穿特性分析[J]. 高压技术,2010,36(10):2450-2453.
- [4] 欧阳本红,华明,邓显波. 高压交联电缆材料及工艺发展综述[J]. 绝缘材料,2016,49(7):1-14.
- [5] 全国电线电缆标准化技术委员会. 额定电压 110kV($U_m=126kV$) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件:GB/T 11017—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [6] 全国电线电缆标准化技术委员会. 额定电压 220kV($U_m=252kV$) 交联聚乙烯绝缘电力电缆:GB/T 18890.1—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [7] 全国电线电缆标准化技术委员会. 额定电压 500kV($U_m=550kV$) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件:GB/T 22078—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [8] 张涛. 高压超高压交联聚乙烯超净绝缘料研究及其应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
- [9] 赵洪,王暄,崔思海,等. 激光扫描式高压电缆绝缘料杂质颗粒测量装置的研究[J]. 中国电机工程学报,1996,16(2):139-142.
- [10] 范玉军. 高压 XLPE 绝缘电缆中微孔、杂质及界面突起尺寸限值研究[J]. 电线电缆,2019(6):7-9,30.
- [11] 朱晓辉. 交联工艺对交联聚乙烯绝缘特性的影响研究[D]. 天津:天津大学,2010.
- [12] 申作家,罗智奕,詹威鹏,等. 铜催化氧化反应对交联聚乙烯绝缘聚集态结构和性能的影响[J]. 绝缘材料,2016,49(8):60-67.
- [13] 王萍萍. 110kV 交联聚乙烯超净电缆料关键问题的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2009.
- [14] 云腾. 110kV 高压 XLPE 电缆护层结构特性分析及优化设计研究[D]. 青岛:山东大学,2020.
- [15] 翁艳艳. 考虑热应力的复合材料界面性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.