

PP电树枝起始电压测试方法及电压稳定剂作用效果研究

孟 飞^{1,2}, 邵满智¹, 牛 越³, 万玉鑫¹, 李春阳¹, 赵 洪¹

(1. 哈尔滨理工大学 工程电介质及其应用技术教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 国网黑龙江省电力有限公司哈尔滨供电公司, 黑龙江 哈尔滨 150000;

3. 国网内蒙古东部电力有限公司赤峰供电公司, 内蒙古 赤峰 024000)

摘要:针对透明度较低的共聚聚丙烯(PP)材料,设计制作了基于高频电流传感器(HFCT)的电树枝起始电压测试系统,通过实验确定该测试系统能检测到最小为5 pC的局部放电信号,测试灵敏度较高,并通过局部放电信号的辨识试验发现电树枝引发时的放电主频谱在12.9 MHz左右,与测试系统中其他可能会产生影响的局部放电频谱均不同,可以证明测得的具有特定频谱特征的局部放电信号是由试样电树枝引发导致的。利用透明XLPE试样进行了试验验证,发现该测试系统与电树枝显微观测系统测得的电树枝起始电压几乎相同,证明了该基于HFCT的电树枝起始电压测试系统的可靠性。然后分别探究了AOHBP、RBBT、RQCT 3种芳香酮电压稳定剂对共聚PP绝缘材料交流电树枝起始电压的影响。结果表明:3种电压稳定剂在适当添加量下均能提高PP电树枝引发过程的局部放电起始电压与熄灭电压,最优组分分别为PP+0.6份AOHBP、PP+0.4份RBBT、PP+0.6份RQCT,其中PP+0.6份AOHBP抑制电树枝引发的效果最好,使得电树枝起始电压提高了33.0%。

关键词:共聚聚丙烯;电压稳定剂;高频电流传感器;局部放电;电树枝

中图分类号:TM215 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9239(2022)07-0041-09

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.07.007

Electrical Tree Initiation Voltage Test Method of Polypropylene and Effects of Voltage Stabilizers

MENG Fei^{1,2}, SHAO Manzhi¹, NIU Yue³, WAN Yuxin¹, LI Chunyang¹, ZHAO Hong¹

(1. Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Harbin Power Supply Company, State Grid Heilongjiang Electric Power Co., Ltd., Harbin 150000, China; 3. Chifeng Power Supply Company, State Grid Inner Mongolia Eastern Electric Power Co., Ltd., Chifeng 024000, China)

Abstract: Aiming to the copolymerized polypropylene (PP) material with low transparency, an electrical tree initiation voltage test system based on high frequency current sensor (HFCT) was designed. It was confirmed that the test system could detect partial discharge signal as low as 5 pC, and the test sensitivity was higher. Through the identification test of partial discharge signal, it was found that the main spectra of discharge caused by electrical tree initiation located at 12.9 MHz, which were different from the other disruptive partial discharge signals probably generated in test system. It was proved that the obtained partial discharge signal with a specific frequency characteristic was caused by the electrical tree initiation of sample. The transparent XLPE sample was conducted verification experiment, it was found that the electrical tree initiation voltage measured by the test system was

收稿日期:2021-07-16 修回日期:2021-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U20A200815)

作者简介:孟飞(1996-),男(汉族),黑龙江绥化人,硕士生,研究方向为高压电缆用聚合物绝缘材料;通信作者:李春阳(1991-),男(汉族),黑龙江哈尔滨人,讲师,研究方向为高压电力电缆及其附件用聚合物绝缘材料。

almost the same as that measured by microscopic observation system, which confirmed the practicability of the electrical tree initiation voltage test system based on HFCT. Then, the effects of three voltage stabilizers of AOHBP, RBBT, and RQCT on the AC electrical tree initiation voltage of copolymerized PP material were investigated, respectively. The results show that three kinds of voltage stabilizers can all increase the initiation voltage and quenching voltage of partial discharge in the process of electrical tree initiation of PP with appropriate addition amounts. The optimal components are PP+0.6 phr AOHBP, PP+0.4 phr RBBT, and PP+0.6 phr RQCT, respectively. Among them, PP+0.6 phr AOHBP has the best inhibiting effect of electrical tree initiation, making the initial voltage of electrical tree increase by 33.0%.

Key words: copolymer polypropylene; voltage stabilizer; HFCT; partial discharge; electrical tree

0 引言

近年来,环保型电力电缆绝缘材料这一名词不断出现在大众视野中,且目前多数XLPE电缆线路使用寿命已超过40年^[1],大量废弃电缆的出现会对环境造成污染。同时,XLPE生产过程中的交联工序使得电缆持续挤出时间较短,难以制成大长度无接头电缆。以上因素使得在工艺上可连续挤出生产、可通过熔融方式回收、更符合环境保护绿色理念的热塑性材料聚丙烯(PP)被越来越多的学者关注^[2]。对于电缆用聚合物绝缘材料而言,电树枝是一种最典型的电致破坏形式。通过材料改性手段提高PP绝缘材料的电树枝耐受性能,对于延长电缆工作寿命,提高电缆运行稳定性具有重要意义。

XLPE作为电力电缆绝缘层应用最为广泛,对于XLPE绝缘材料耐电树枝性能及其改善方法的研究已较为广泛和深入。为提高XLPE绝缘材料的耐电树枝性能,通常采用添加电压稳定剂的方法。电压稳定剂大多是指一类可以显著改善聚合物绝缘材料耐电树枝性能的芳香族有机化合物。李忠华^[3]通过添加受阻胺类电压稳定剂和弱电解质类电压稳定剂显著抑制了XLPE电树枝的引发,并探讨了其作用机理。Y YAMANO等^[4-5]报道了稠环芳香烃类电压稳定剂对聚乙烯电气强度的改善作用。V ENGLUND等^[6-11]报道了苯偶酰类电压稳定剂对XLPE电树枝引发场强的改善作用。李春阳等^[12]按照作用机理将电压稳定剂分为3类,基于自由基加成反应原理设计了可接枝型电压稳定剂,改善了电压稳定剂易迁出的问题,并尝试了将该电压稳定剂接枝应用于直流电缆XLPE绝缘材料中。SU J G等^[13]、CHEN X R等^[14]也设计了一系列新型电压稳定剂,并研究了其对XLPE直流电学性能的影响和机理。GAO Y H等^[15]采用电压稳定剂修饰无机纳米颗粒,并将纳米颗粒均匀混入PP,发现经过电压

稳定剂修饰的无机纳米颗粒具有较好的分散性并能显著改善PP绝缘的直流电学性能。

综上,电压稳定剂在改善聚合物绝缘材料电学性能尤其是耐电树枝性能方面表现优异。虽然聚丙烯电缆绝缘材料近年来得到广泛研究,但其电学性能的改善主要依赖于无机纳米颗粒掺杂手段,电压稳定剂掺杂手段主要使用在透明的均聚PP材料中^[16],鲜有研究者尝试将电压稳定剂用于改善透明度较低的共聚PP绝缘材料的性能。从工艺上看,采用电压稳定剂改善共聚PP材料的耐电树枝性能具有较高的可实现性,探究电压稳定剂对共聚PP耐电树枝性能的改善效果对于进一步研发高电压等级电缆用共聚PP绝缘材料具有重要价值。

常规均聚PP韧性较差,需要采用弹性体聚合物共混方法对其力学性能进行改良,才能作为电缆绝缘层用绝缘材料,但弹性体共混改性复合物中,弹性相材料多以孤岛形式存在,这对材料的电学性能往往会产生负面影响^[17]。相比之下,共聚PP相比均聚PP的耐冲击性较好,很大程度上改善了均聚PP力学性能上的不足,成为PP电缆绝缘材料基础树脂的备选方案之一。

本文旨在探究电压稳定剂对于共聚PP绝缘材料耐电树枝性能的影响。共聚PP绝缘材料透明度较低,采用常规的显微观察方法很难观察到针板电极试样中是否出现了电树枝,难以准确判定电压稳定剂是否对于电树枝起始电压有提高作用。因此,本文基于电树枝引发常常伴随局部放电的基本原理^[18],以局部放电起始作为电树枝引发的判断依据^[19],设计制作高频电流传感器(HFCT),基于HFCT设计非透明试样电树枝起始电压(起树电压)测试方法。之后探究了3种电压稳定剂对于共聚PP绝缘材料电树枝引发电压的影响。通过设计试验方法,初步探索芳香酮电压稳定剂在PP基高压电缆

绝缘材料中应用的可行性。

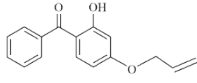
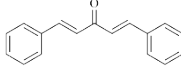
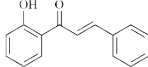
1 试验

1.1 原材料与试样制备

基料采用中国石化生产的聚丙烯 K8003, 熔融指数为 2.5 g/10 min; 110 kV XLPE 绝缘料, 青岛汉缆股份有限公司; 电压稳定剂为本课题组初步验证有效的 3 种芳香酮化合物, 其分子式、熔点及沸点如表 1 所示, 分别用 AOHBP、RBBT、RQCT 表示。

表 1 电压稳定剂分子式、熔点及沸点

Tab.1 Molecular formula, melting point, and boiling point of voltage stabilizers

名称	分子式	熔点/°C	沸点(标准大气压)/°C
AOHBP		67~70	403.04
RBBT		111~114	396.6
RQCT		87~90	400.7

将转矩流变仪温度设置为 190°C、转速为 60 r/min, 加热至 190°C 恒温后, 在混料筒中先加入质量为 35 g 的 PP 混炼 2 min, 再分别加入 0.2、0.4、0.6 份的电压稳定剂(AOHBP、RQCT、RBBT)进行混炼。有机添加剂熔点低, 容易实现均匀分散, 且 PP 在混炼过程中容易发生降解, 因此混炼时间不宜过长; 添加剂加入后处于熔融态, 足以在短时间内完成均匀分散, 且作为有机低熔点小分子添加剂, 与纳米电介质有所不同^[20], 不存在团聚现象, 因此电压稳定剂混炼时间为 3 min。分别制得纯 PP 材料和含有不同组分电压稳定剂的 PP 材料共计 10 种。

由于聚丙烯硬度较大, 插针法制备电树枝试样较难, 采用埋针法制备针板电极电树枝引发试样, 将平板硫化机的温度设置为 190°C, 待温度升温至恒温后, 将钨针电极和材料放入模具, 在平板硫化机上逐渐从 5 MPa 加压至 15 MPa 制得如图 1 所示规格的针板电极试样备用; 然后在每个试样底部均匀地涂抹导电漆后, 放入 80°C 的真空烘箱中脱气 24 h, 使导电胶固化的同时消除试样内部的残余应力。

1.2 基于 HFCT 的电树枝测试系统

由于共聚 PP 材料的透明度低, 在交流起树电压

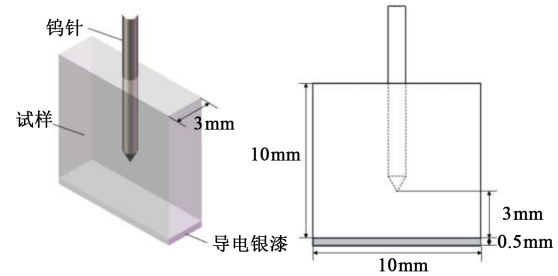


图 1 电极与试样结构

Fig.1 Diagram of electrodes and specimen structure

测定的过程中, 无法利用显微镜直接观察其电树枝的起树和生长过程, 本文设计制作了基于 HFCT 的局部放电起始电压测试系统, 如图 2 所示, 以局部放电起始电压作为起树电压。地电极引出地线穿过 HFCT 绕线两匝后接地, HFCT 与示波器用双层屏蔽传输线连接, 输出端连接电脑。在油槽内放入硅油, 将 10 个针板电极试样的针电极末端完全嵌入 10 个圆角铜柱电极, 用球形螺帽固定好作为高压电极, 高压电极顶端用含内屏蔽层的橡皮绝缘电缆与高压交流电源连接, 针板电极试样底端的导电漆与铜板地电极保持良好接触。

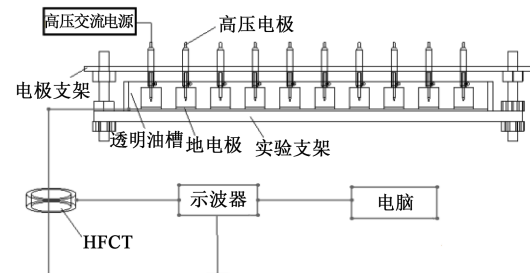


图 2 基于 HFCT 的起树电压测试系统

Fig.2 Test system of electrical tree initiation voltage based on HFCT

聚合物在电树枝引发时会伴有局部放电信号产生, 此局部放电信号会在地线上产生脉冲电流^[21]。利用局部放电信号定性地判断有无电树枝引发, 已经有研究者进行了报道, 其原理是: 在针板电极提供的极不均匀电场作用下, 聚合物大分子在强电场和载流子冲击作用下逐渐降解破坏, 形成低密度区, 低密度区逐步扩展形成微观缺陷, 随后将引发局部放电, 在局部放电和强电场下加速的载流子的共同作用下, 将进一步导致缺陷呈树枝状发展, 电树枝由此引发。因此, 电树枝引发通常是以局部放电信号出现为标志的。当局部放电测试灵敏度足够高时, 即可将局部放电引发电压视为试样的起树

电压^[18-19]。HFCT检测局部放电是通过耦合电气设备接地引线上的脉冲电流来实现的。局部放电信号在地线上引起的高频脉冲电流信号可以用HFCT感应采集,当系统具有足够高的灵敏度时,一旦检测到局部放电信号,即可认为电树枝在此时引发,称此时在试样上施加的电压为局部放电起始电压,即基于HFCT测试系统的起树电压。这种基于HFCT检测电树枝引发局部放电的方法不仅保障了测量的安全性,还不会受限于试样的透明度,是一种适用于测试非透明试样起树电压的试验方法。

通常HFCT可分为外积分式和内积分式电流传感器。外积分式电流传感器对积分电路的频率特性响应十分敏感,传感器检测频带被限制;而内积分式电流传感器直接采用并联积分电阻,检测频带范围不受限制,可适用于测量ns级的脉冲信号,因此本文制作的HFCT采用内积分式电流传感器,积分电阻为100 Ω。磁芯材质采用灵敏度较高的镍锌铁氧体材料NiZn200。磁芯外径为85 mm,内径为55 mm,厚度为15 mm,线圈匝数 N 为10匝。

2 电树测试系统性能测试

2.1 测试系统的最小放电量标定

在完成HFCT的制作后,需要对系统可测试的最小放电量进行标定。测试原理图如图3所示,采用JZF-10型校正电量发生器进行放电量标定,将校正脉冲发生器替换电树枝试样连接在放电模型两端,标定过程中以输出电压幅值作为衡量放电强弱的参数,调节校正脉冲发生器分别输出5、10、50、100 pC的标准脉冲波,不同校准放电信号对应的脉冲信号如图4所示。

由图4可知,HFCT检测到的脉冲信号幅值分别为0.002 9、0.004 0、0.033 0、0.047 0 V,其与放电量

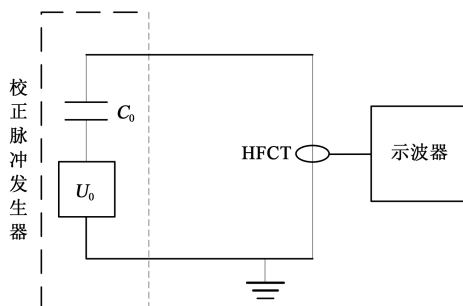


图3 最小放电量标定测试原理图

Fig.3 Schematic diagram of minimum discharge calibration test

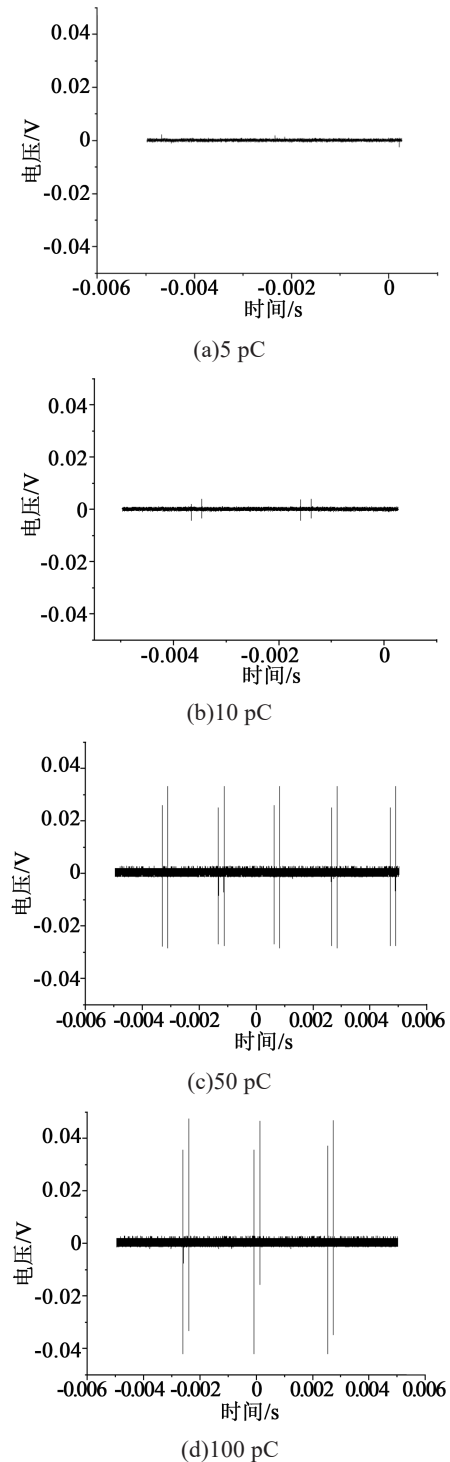


图4 不同校准放电信号对应的脉冲信号

Fig.4 Pulse waveforms triggered by different calibration discharge signals

的相关度如图5所示。可见该HFCT能可靠地检测到小至5 pC的信号,背景噪声较小。虽然其测得电压信号幅值与放电量的线性相关度较弱,但是对于局部放电起始和熄灭电压的定性判断具有很高的可靠性,可以通过放电信号判定电树枝引发电压的

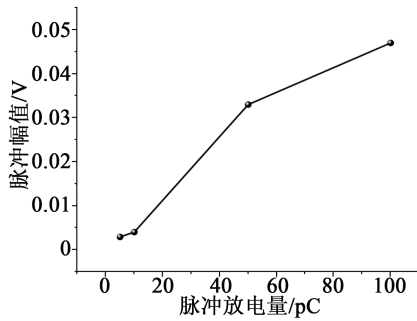


图5 放电量与输出电压幅值关系图

Fig.5 Relationship between discharge capacity and output voltage amplitudes

大小。因高压接引线上存在放电,故局部放电系统的最大无局部放电电压以小于变压器的最大无局部放电电压进行标定,同时为保障测试可靠性,该最大值须远大于试验材料的起树电压。基于此,本文选取的高压接引线为含有内屏蔽层的定制高压乙丙橡胶电缆,经测试,系统最大无局放电压大于20 kV,远高于测得的试样局部放电起始电压最大值,满足本文的测试条件。电树枝引发试验过程为:依次对每个电树枝试样以0.5 kV/s的升压速率对针电极施加工频高压,当HFCT检测到大于0.002 9 V的放电信号时,立即停止升压,记录当前电压为该试样的电树枝引发电压。

2.2 局部放电频谱特性

由于HFCT能检测到小至5 pC的信号,测试灵敏度较高,测试时,在外加电压的作用下,高压线路中电场分布不均匀处均有可能产生干扰放电信号。为验证放电信号是否源于电树枝引发,并借此确定交流起树电压试验结果的准确性,分别模拟线路中其他介质发生放电时检测到的放电信号,对液体绝缘介质放电(无试样)、液体绝缘介质放电(有试样)、高压接引线绝缘层放电及尖端空气放电等进行试验,采集其对应的放电脉冲信号,利用傅里叶变换得到对应干扰放电信号的放电频谱,并与电树枝试样引发的放电频谱作比较,结果如图6所示。从图6可以看出,电树枝引发放电的主频谱为12.9 MHz左右,对应幅值为50 mV时的频率大约为2.5 MHz;高压接引线绝缘层放电的主频谱在13.0 MHz左右,与电树枝放电的主频谱相近,但对应幅值50 mV时的频率为9.1 MHz,大于电树枝引发放电幅值为50 mV时的频率,且高压接引线由于采用了含内屏蔽层的橡皮绝缘电缆,绝缘层中电场分布较为均匀,使其局部放电电压远高于电树枝被引发时的局

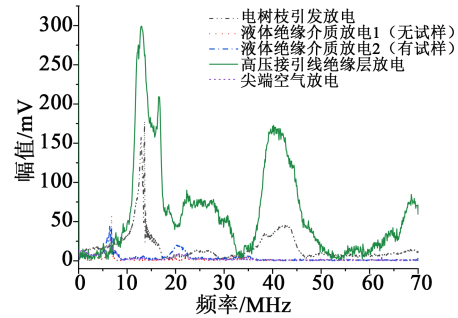


图6 电树枝与不同干扰信号局部放电的幅频特性曲线

Fig.6 Amplitude-frequency characteristic curves of partial discharge of electrical tree and different interference signals

部放电电压,因此实际试验过程中不会出现该放电信号;无试样存在时,针电极尖端处的液体绝缘介质放电主频谱在6.8 MHz左右;有试样时,试样电极边缘处液体绝缘介质放电的主频谱在6.4 MHz左右,当针电极暴露于空气中,尖端空气出现局部放电的主频谱在6.6 MHz左右,以上3种干扰信号的局部放电主频谱均不同于聚合物电树枝引发放电的主频谱,因此可以证明基于HFCT的起树电压测试系统在特定频率下测得的局部放电信号均是由试样电树枝引发所致。

对5个PP试样进行电树枝引发测试,测试过程中在示波器上采集电树枝引发时的放电脉冲,经傅里叶变换后得到放电频谱,放入同一坐标系中进行比较,幅频特性曲线如图7所示。

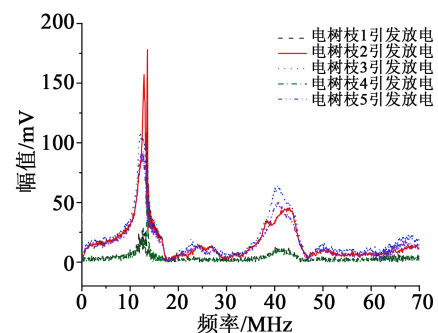


图7 多个电树枝引发放电的幅频特性曲线

Fig.7 Amplitude-frequency characteristic curves of electrical tree induced discharges

由图7可知,电树枝引发的放电频谱除幅值上略有差异外(幅值越大,特征起树电压越高),主频谱均在12.9 MHz左右,这一现象验证了电树枝放电图谱的一致性。因此,采用本测试系统进行电树枝引发试验时,只需分析其放电频谱即可排除线路中

其他放电信号对基于HFCT的测试系统的起树电压测试结果的影响,排除因此导致的结果误判。

2.3 测试系统可靠性验证

为验证基于HFCT的测试系统对起树电压的测试结果可靠性,用透明材料XLPE加以验证,具体方法如下:在基于HFCT的起树电压测试系统上再连接CCD与显微镜头系统,加压过程中同时记录摄像系统与示波器信号的变化,当摄像系统观察到XLPE试样起树时,记录此时的电压为视觉起树电压(即在计算机显示屏上观察到试样引发 $10\ \mu\text{m}$ 电树枝时施加的电压),与此同时当示波器出现连续的放电脉冲时,记录此时的电压为局部放电起始电压,即基于HFCT测试系统的起树电压,加压时采取线性升压方式,试验结果采用两参数Weibull分布处理,如图8所示。

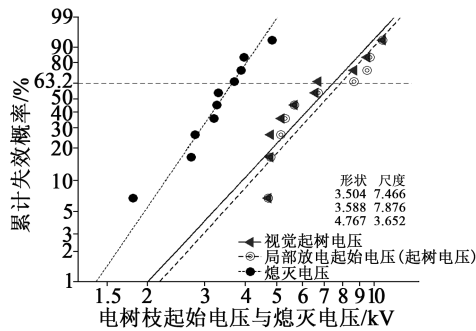


图8 XLPE试样视觉起树电压与局部放电起始电压、熄灭电压的Weibull分布图

Fig.8 Weibull distribution of electrical tree initiation voltage determined by vision, partial discharge initiation voltage, and extinction voltage of XLPE samples

由图8可知,视觉起树电压与基于HFCT测试系统测得的起树电压特征值和数据分散性几乎一致,因为HFCT可测得的最小放电电压稍高一些,所以HFCT测得的起树电压比视觉起树电压大一些,但相差甚微,可以证明对于XLPE针板电极试样,视觉起树电压和基于HFCT测试系统测量的起树电压具有较高的一致性。PP和XLPE同属于聚烯烃绝缘材料,本研究采用的PP是乙烯和丙烯的共聚物,其半结晶的聚集态结构和化学成分上均与XLPE具有较高相似度,同时测试中发现,XLPE试样的局部放电主频谱与PP试样的局部放电主频谱均在12.9 MHz附近,因此可以认为,对于PP的针板电极试样而言,排除杂散局部放电信号的影响后,采用局部放电起始电压作为PP试样起树电压在测试误差上

是可以接受的。

3 结果及讨论

3.1 电压稳定剂对PP起树电压的影响

AOHBP、RBBT和RQCT 3种电压稳定剂不同含量对PP电树枝引发过程局部放电起始电压的影响如图9所示。

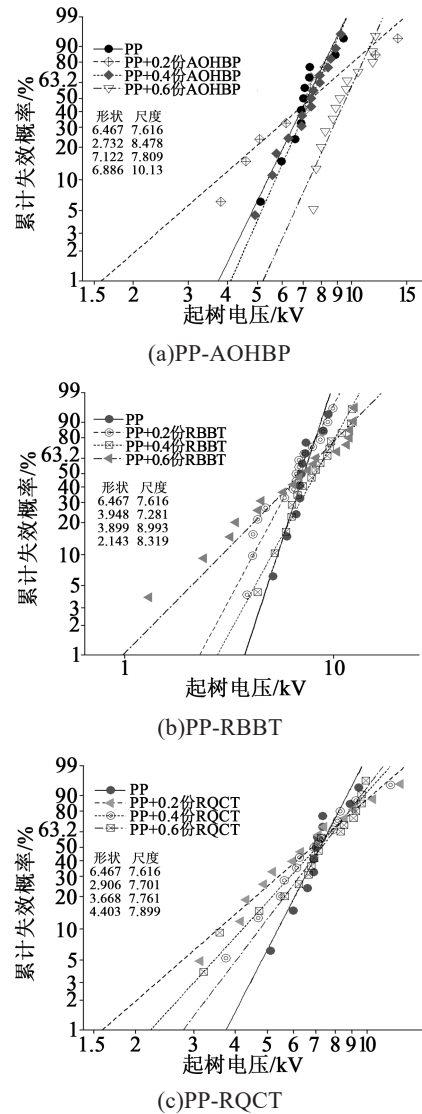


图9 3种电压稳定剂含量对PP起树电压的影响

Fig.9 Effects of three voltage stabilizers content on the electrical tree initiation voltage of PP

从图9可以看出,未经改性的纯PP特征起树电压为7.6 kV,当电压稳定剂添加量为0.2份时,电压稳定剂AOHBP、RQCT都提高了PP的起树电压,提高比例分别为11.3%和1.1%,而RBBT未能提高PP的起树电压;当添加0.4份电压稳定剂时,3种电压稳定剂对PP的起树电压分别提高了2.5%、18.1%、

1.9%;当添加0.6份电压稳定剂时,AOHBP对PP的起树电压提高得最多,为33.0%,而RBBT提高了9.2%,RQCT提高了3.7%。

3.2 电压稳定剂对PP局部放电熄灭电压的影响

AOHBP、RBBT和RQCT 3种电压稳定剂不同含量对PP局部放电熄灭电压的影响如图10所示。

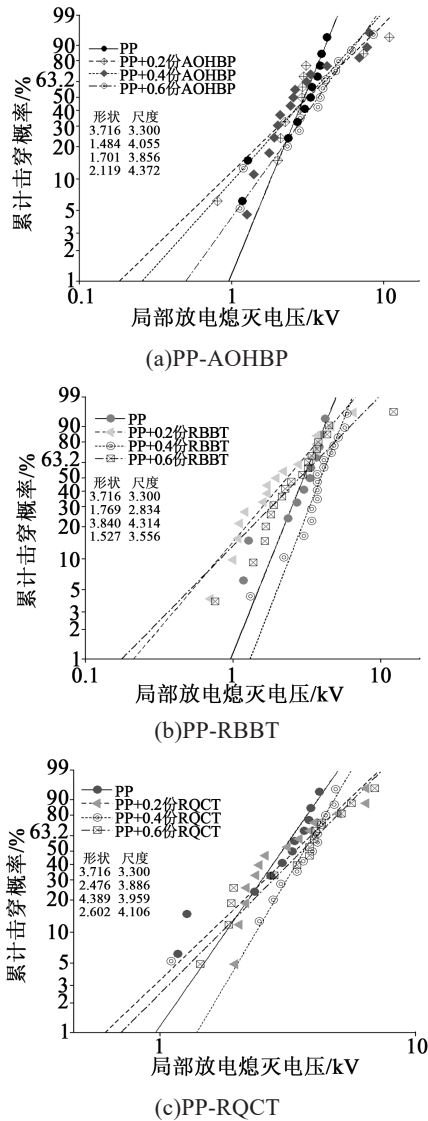


图10 3种电压稳定剂含量对PP局部放电熄灭电压的影响

Fig.10 Effects of three voltage stabilizers content on the partial discharge extinction voltage of PP

从图10可以看出,PP的局部放电熄灭电压为3.3 kV,当电压稳定剂添加量为0.2份时,AOHBP和RQCT都提高了PP的局部放电熄灭电压,提高比例分别为22.9%和15.1%,而RBBT没有提高PP的局部放电熄灭电压;当添加0.4份电压稳定剂时,3种电压稳定剂对PP的局部放电熄灭电压分别提高了

16.9%、30.7%、19.9%;当添加0.6份电压稳定剂时,AOHBP对PP的局部放电熄灭电压提高得最多,为32.5%,而RBBT提高了7.8%,RQCT提高了24.4%。

为了更清晰地展现3种电压稳定剂抑制电树枝引发的效果强弱,绘制了柱状图,如图11所示。

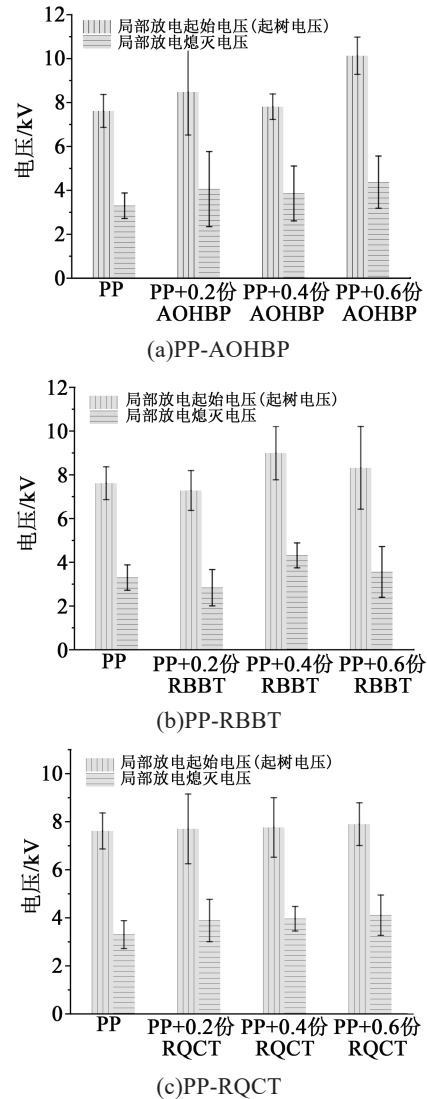


图11 3种电压稳定剂对PP起树电压与局部放电熄灭电压的影响柱状图

Fig.11 Effect of three voltage stabilizers on the electrical tree initiation voltage and partial discharge extinction voltage of PP

从图11可以看出,电压稳定剂抑制电树枝引发的作用效果随添加量而变化,3种电压稳定剂的最优组分分别为PP+0.6份AOHBP、PP+0.4份RBBT、PP+0.6份RQCT,其中PP+0.6份AOHBP抑制电树枝引发的效果最好。

电压稳定剂对PP电树枝引发的抑制作用主要

体现在局部放电起始电压(起树电压)和局部放电熄灭电压两个参数上。局部放电起始电压越高,材料在强电场下引发电树枝越难;局部放电熄灭电压越大,说明材料出现局部放电缺陷后,越容易抑制其进一步破坏。局部放电熄灭电压显著低于放电起始电压的原因是,当PP承受的电场超过绝缘介质内缺陷的承受能力时,就会产生局部放电,这时相当于在介质内打开了一个电子自由移动的通道,呈不规则树枝状;当电压逐步降低至电子失去活性,无法再击穿瑕疵,局部放电停止,此时的电压称为熄灭电压,局部放电发生之前,缺陷较小或不存在缺陷,而局部放电之后,放电导致损伤累积,缺陷尺寸放大,残余放电电荷较多,使得局部放电可以在相对较低的电压下保持。

关于电压稳定剂抑制聚合物电树枝化的机理,国内外学者以LDPE或XLPE作为对象做了较为深入的研究。本研究选取的芳香酮类电压稳定剂具有较高的电子亲和能、较低的电离势和较小的HOMO-LUMO能隙,相比PP的脂肪族大分子,电压稳定剂分子更易接受强电场下加速的高能电子冲击,当高能电子与电压稳定剂分子发生碰撞后,电压稳定剂分子会通过激发(主要过程)或电离(次要过程)吸收高能电子能量,以光子或热量等方式耗散,削弱高能电子对PP大分子的破坏,抑制随后的大分子降解和低密度缺陷的形成。对比电压稳定剂在不同聚合物基体中的作用效果可知,同一类电压稳定剂在XLPE中的作用效果相对更优,例如AOHBP在XLPE中至多可提高起树电压约1倍^[22],而在本研究的共聚PP中仅能提高起树电压约33.0%,这是由于电压稳定剂的作用效果不仅取决于电压稳定剂分子本身的量子化学特性,同时也对聚合物微观结构及其在材料中的分散性有所依赖。相比XLPE,PP不存在交联键,且结晶度更高,球晶尺寸更大,电压稳定剂主要分布于较大球晶之间,其分散性相比在XLPE中可能有所削弱,这可能是其对PP电树枝引发抑制效果相对较弱的原因。

4 结论

(1)设计制作的用于测试非透明试样电树枝引发电压局部放电的高频电流传感器,可分辨的最小局部放电量为5 pC。

(2)基于HFCT的起树电压测试系统采集到的电树枝引发时局部放电信号的脉冲电流为连续的

衰减震荡波,PP试样中电树枝引发过程导致的局部放电的主频谱在12.9 MHz左右,借助放电频谱的区别可以排除测试线路中其他放电信号对测试结果的影响,能够可靠地测试非透明试样的起树电压。

(3)3种芳香酮电压稳定剂均能提高共聚PP的起树电压和电树枝局部放电的熄灭电压,最优组分分别为PP+0.6份AOHBP、PP+0.4份RBBT、PP+0.6份RQCT,其中0.6份AOHBP抑制PP电树枝引发的效果最好,使得起树电压提高了33.0%。

参考文献:

- [1] 刘刚,刘斯亮,金尚儿,等.基于理、化、电特性的110kV XLPE绝缘电缆剩余寿命的综合评估[J].电工技术学报,2016,31(12):72-79.
- [2] LAU K Y, PIAH M. Polymer nanocomposites in high voltage electrical insulation perspective: A review[J]. Malaysian Polymer Journal,2011,6(1):58-69.
- [3] 李忠华.聚合物电热老化的陷阱理论和电压稳定剂作用机理的研究[D].西安:西安交通大学,1997:47-48.
- [4] YAMANO Y. Control of electrical tree at initiation stage in LDPE by mixed addition of Al₂O₃ nano-particle and azobenzoic compound[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(1):209-216.
- [5] YAMANO Y, IIZUKA M. Improvement of electrical tree resistance of LDPE by mixed addition of nanoparticles and phthalocyanine[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(1):329-337.
- [6] ENGLUND V, HJERTBERG T, HUUVA R, et al. Voltage stabilizers for XLPE in high voltage applications[C]//International Conference on Solid Dielectrics. Winchester, UK: IEEE,2007:203-206.
- [7] ENGLUND V, HJERTBERG T, GUBANSKI S, et al. Voltage stabilizers for improving the electrical treeing resistance of XLPE [C]//International Symposium on Electrical Insulating Materials. Yokkaichi, Japan: IEEE,2008:566-569.
- [8] ENGLUND V, HUUVA R, GUBANSKI S M, et al. High efficiency voltage stabilizers for XLPE cable insulation[J]. Polymer Degradation and Stability,2009,94:823-833.
- [9] ENGLUND V, HUUVA R, GUBANSKI S M, et al. Synthesis and efficiency of voltage stabilizers for XLPE cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2009,16(5):1455-1461.
- [10] JARVID M, JOHANSSON A, ENGLUND V, et al. Electrical tree inhibition by voltage stabilizers[C]//2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Montreal, Canada: IEEE,2012:605-608.
- [11] WUTZEL H, JARVID M, BJUGGREN J M, et al. Thioxanthone derivatives as stabilizers against electrical breakdown in cross-linked polyethylene for high voltage cable applications[J]. Polymer Degradation and Stability,2015,112:63-69.

- [12] 李春阳,于国建,赵洪,等. 电压稳定剂对交联聚乙烯交流绝缘性能的影响[J]. 高电压技术,2018,44(5):1450-1458.
- [13] SU J G, DU B X, HAN T, et al. Multistep and multiscale electron trapping for high-efficiency modulation of electrical degradation in polymer dielectrics[J]. The Journal of Physical Chemistry,2019,123:7045-7053.
- [14] CHEN X R, YU L W, DAI C, et al. Enhancement of insulating properties of polyethylene blends by delocalization type voltage stabilizers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(6):2041-2049.
- [15] GAO Y H, HUANG X Y, MIN D M, et al. Recyclable dielectric polymer nanocomposites with voltage stabilizer interface: Toward new generation of high voltage direct current cable insulation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(1): 513-525.
- [16] 朱乐为. 直流与脉冲复合电压下聚丙烯电树枝生长特性与抑制方法研究[D]. 天津:天津大学,2018.
- [17] 栗松. 聚丙烯/弹性体复合材料的物理机械性能及交流介电特性[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [18] YAMANO Y, IIZUKA M. Suppression of electrical tree initiation in LDPE by additives of polycyclic compound[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2009,16(1): 189-198.
- [19] 尹毅,屠德民,霍振宇,等. 氯化聚乙烯共混对聚乙烯的空间电荷效应的影响[J]. 电工技术学报,2000(4):52-57.
- [20] 艾叶,李春阳,赵洪,等. 纳米SiO₂对交联聚乙烯交/直流击穿强度和耐电树枝性能影响[J]. 复合材料学报,2019,36(9):2031-2041.
- [21] 李盛涛,郑晓泉. 聚合物电树枝化[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [22] LI C, ZHANG C, ZHAO H, et al. Grafted UV absorber as voltage stabilizer against electrical degradation and breakdown in cross-linked polyethylene for high voltage cable insulation[J]. Polymer Degradation and Stability,2021,185:109498.