电晕放电等离子体处理对聚丙烯/硅橡胶界面击穿强度的影响

近年来，聚丙烯作为电缆主绝缘材料的研究成为热点之一。在电缆系统中，附件内由于结构复杂、电场畸变严重，易引发在主绝缘和附件绝缘界面处的击穿现象。探讨界面击穿的形成机制并找到抑制界面绝缘击穿的方法，对于保障聚丙烯电缆系统的安全可靠运行具有重要意义。选取等规聚丙烯材料和高温硫化硅橡胶材料为试样，构建界面击穿实验平台，研究了交流电压作用下聚丙烯/硅橡胶界面的击穿特性。采用交流电晕等离子体激发活性基团，对聚丙烯材料表面进行预处理，探讨了等离子体预处理对界面击穿的影响。实验结果表明，经电晕放电等离子体处理的样品，其界面击穿强度比未处理样品提高了一倍以上。分析认为，电晕放电等离子处理，改变了聚丙烯材料的表面物理、化学结构，加快了表面电荷的消散速率，从而使击穿时间显著延长。

郝春艳[1] 孟 健[2] 苏 展[1] 于金山[1]/1.国网天津市电力公司电力科学研究院
2.国网天津滨海供电公司

郝春艳/工程师

关键词/Keywords
聚丙烯·
硅橡胶·
界面放电·
电晕·
等离子体·

0 引言

随着国民经济的快速发展，电力用户对供电可靠性要求越来越高。与架空线路相比，地下电力电缆具有占地面积少、可靠性高和不影响环境美观度等优点，被越来越广泛地应用于城市电力系统中，其绝缘可靠性也受到关注。在电缆系统中，电缆附件扮演着重要的角色。作为连接单根电缆段的部件，长电缆线路往往包含多个电缆接头。由于电缆接头的几何结构十分复杂，在其中容易产生电场的畸变，诱发电离并导致击穿。研究表明，发生在电缆附件中的界面击穿现象是导致电缆故障的重要因素之一[1]。为提高电缆线路的运行可靠性，有必要深入探究电缆附件中界面击穿的现象，并探寻可有效提高界面击穿电压的方法。

在过去的几十年间，已有大量涉及电缆接头的研究成果，研究者同样认同电缆本体绝缘和附件绝缘的交界面在整个电缆系统的绝缘性能中起着至关重要的作用。研究表明，材料界面的状态对于界面击穿有着明显的影响。文献[2]研究发现，随着界面粗糙度的增大，界面放电的电压值明显增大。文献[3]的研究发现，随着界面压强的提高，界面处的局部放电不断加剧。文献[4]提出了界面处切向电场和击穿强度计算的理论，认为界面击穿电场强度由放电起始阶段气隙的起始电场强度高低来决定。

近年来，聚丙烯绝缘材料作为电缆主绝缘的研究逐步得到研究人员的关注。聚丙烯是一种热塑性材料，具有熔点高、击穿强度及介质损耗低等特点，此前多用作电容器的绝缘。尝试将聚丙烯用作电缆绝缘，有益于提高电缆的载流量，并有望在电缆运行周期的末端进行回收利用。对于聚丙烯电缆而言[5]，其运行过程中仍然存在同样的问题，即电缆附件的界面处容易出现击穿破坏，影响电缆的安全使用。因此，探讨聚丙烯电缆附件的界面击穿具有理论和工程意义。

研究显示，通过电晕放电可以产生多种活性粒子，这些活性粒子对聚合物材料进行处理后，会改变材料的表面结构，使其电气性能也发生变化。能否采

用电晕放电方法对聚丙烯材料的表面进行处理从而改善其界面击穿强度，目前此方面的研究还较少。本文选取等规聚丙烯和高温硫化硅橡胶为试样，制备了界面击穿实验试样，探讨了交流电晕放电等离子体对界面击穿的影响。结果表明，处理后界面击穿的时间较处理之前提高了约一倍。分析认为，电晕放电等离子体产生的各种活性粒子，使得材料表面的物理、化学结构发生变化，有效地抑制了电荷的迁移，从而使界面击穿的时间延长。

1 实验装置和过程

1.1 样品制备与电极结构

选取等规聚丙烯iPP（PPH-T03）（中石化北海公司）和高温硫化硅橡胶（SiR）（110）（夕美硅橡胶材料）为实验材料的基材。两种材料的长度均为8 cm，宽度为5 cm，厚度为5 mm。为去除在两个样品中间的气泡，将样品的接触面处理得尽量光滑。如图1所示，采用针－板电极系统作为实验电极，模拟实际工程中电缆绝缘界面的不均匀电场分布形式。此外，为了模仿实际电缆结构之间的压力，将iPP和SiR试样之间的压力设定为0.12 MPa。实验电极采用厚55 μm的铝铂电极制备，将其通过导电胶贴敷在iPP试样的表面。针电极的尖角为30°，尖角的曲率半径约为60 μm。针－板电极之间的绝缘间隙为4 mm。实验中，针电极与交流高压电源相连，板电极接地。

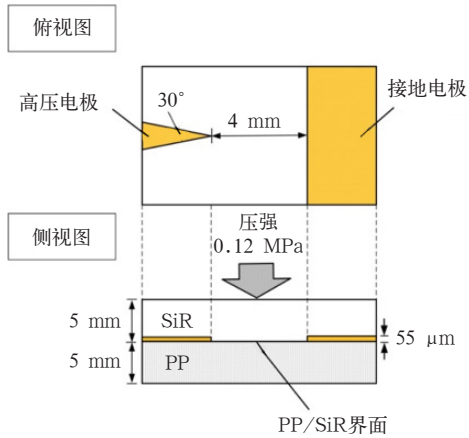


图1 实验电极设置示意图

1.2 电晕放电处理电极结构

采用如图2所示的多针电极系统对iPP试样的表面进行处理。此处，针电极选取粗为0.8 mm、针尖曲率半径为15 μm的不锈钢针。将针电极以正六边形的布局排列在环氧树脂基座上，并以印制铜线连接。针尖间距约为6.35 mm，共计61根针电极。实验中，将针电极阵列连接于高频交流电压源上，电压源的输出为15 kV、频率为7.5 kHz。本文选取此实验电压频率的原因是此前的预实验结果显示，该电压频率下电晕具有较好的稳定性。针尖距离iPP表面的距离设定为4 mm。电晕放电处理材料表面的实验在室温环境、相对湿度40%的条件下进行，处理时间为30 min。

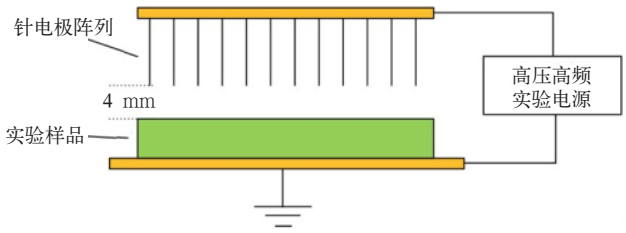


图2 电晕处理电极系统

1.3 实验电路和实验过程

实验电路示意图如图3所示。将高频电流互感器(HFCT)卡接到地线上测量放电脉冲，采用高速数据采集卡来采集数据。通过CCD相机实时观测界面放电的发展过程。实验前，采用无水乙醇对样品表面进行清洗，之后在干燥箱中40 ℃温度下干燥1 h。界面击穿实验在相对湿度45%的室温环境下进行。将有效值为20 kV的工频交流电压施加在电极两端诱发表面放电，采用HFCT测量放电击穿过程中的放电脉冲，并统计放电幅值与频率的关系，记录界面击穿时间。

为了深入分析高频电晕放电等离子体对界面击穿的影响，本文还针对电晕处理后聚丙烯表面的物理化学结构进行了测量。采用衰减全反射傅里叶变换红外光谱（ATR-FTIR）技术测量了iPP表面的基团变化，设备为美国Thermo Scientific Instrument公司的红外光谱仪，测量波数范围为4 000～5 000 cm^{-1}，分辨率为0.5 cm^{-1}。采用

Veeco公司生产的Dektak 6M台式探针轮廓仪测量iPP表面的粗糙度，测量距离为100 μm。采用座滴法测量iPP表面的接触角，先采用1 mL的无菌注射器在距离试样表面上3 mm的位置将水滴垂直滴在试样表面形成座滴，水滴中的水量控制在30 μL；然后采用相机拍摄其侧视图，量取试样表面与液滴边界切线的夹角，即静态接触角θ。每组样品做五次，取其平均值作为试样的静态接触角。

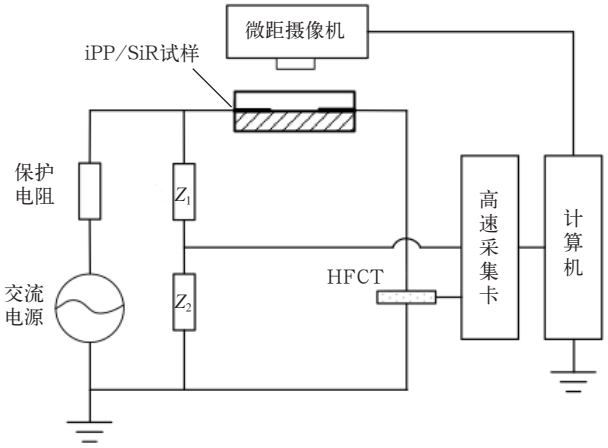


图3 界面击穿实验电路图

2 实验结果与讨论

随着工频电压施加在针－板电极之间，界面放电形成并不断发展。对于未经电晕等离子体处理的iPP样品，其界面放电的总时长约为40 s。在整个界面的击穿过程中，根据放电通道的特点，可将放电过程分为三个阶段，分别为放电起始阶段、放电通道伸展阶段和击穿。图4给出了未经电晕等离子体处理的iPP样品界面击穿的过程形貌图。从图4中可以看出，在放电起始阶段，并未观察到有明显的放电通道，但针电极的位置有明显的放电火花亮点，表明放电现象已经发生。这一过程共持续15 s。在放电通道伸展阶段，放电火花通道从针电极不断伸展至接地电极，放电通道的亮度不断加大。这一过程从15 s持续至38.1 s。当放电通道到达对面电极时，两电极被短路，绝缘材料的表面被短路电流产生的热量烧蚀，形成绝缘破坏。对于经电晕等离子处理过的iPP样品，其iPP/SiR界面的放电发展过程与上述未处理试样相同，其典型发展过程如图5所示。从图5中可以看出，放电的起始阶段历时约为8 s，说明与未处理样品相比，其起始阶段明显加快。但放电通道的伸展时间从8 s持续到81.3 s，比未处理样品显著延长。总体上看，经电晕等离子体处理的iPP/SiR试样的界面击穿时间要显著长于未处理的iPP/SiR。

(a) 0～15 s (b) 15～38.1 s (c) 38.1 s击穿

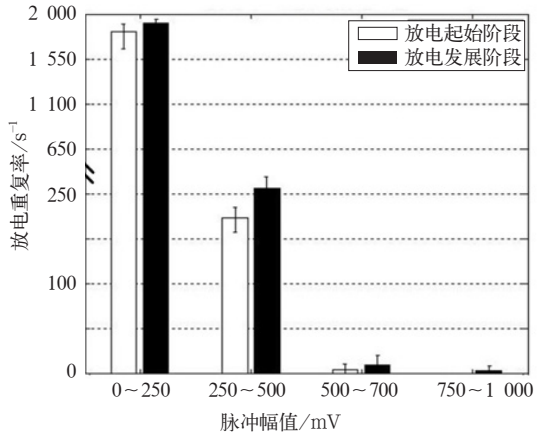
图4 未经电晕等离子体处理的iPP/SiR界面击穿过程

(a) 0～8 s (b) 8～81.3 s (c) 81.3 s击穿

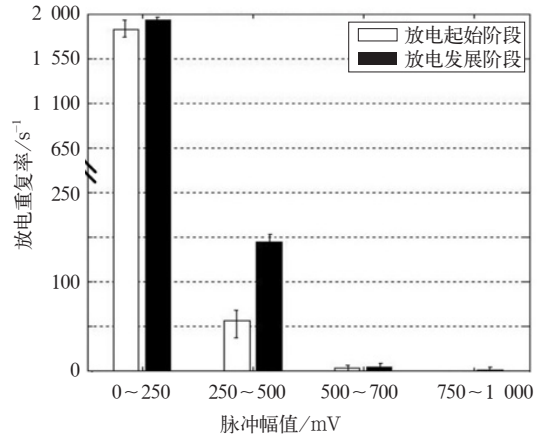
图5 经电晕等离子体处理的iPP/SiR界面击穿过程

此外，本文统计了不同放电阶段的放电重复率N和脉冲幅值Q的关系，如图6所示。为便于分析，将脉冲幅值划分为四个范围，分别为0～250 mV、250～500 mV、500～750 mV及750～1 000 mV。无论iPP是否经过电晕等离子处理，随着脉冲幅值的增大，其重复率显著降低。绝大部分放电脉冲集中在500 mV以下。放电发展阶段的脉冲幅值要高于放电起始阶段的幅值。而经过电晕等离子体处理的iPP，其放电脉冲的幅值在0～200 mV区间，与未处理样品的差异并不大；但在250～500 mV区间明显低于未处理样品，这与处理后样品的放电通道伸展时间延长相印证。综上所述，经电晕等离子体处理后的iPP样品，其iPP/SiR界面击穿的时间明显延长，界面绝缘性能得到改善。

为进一步解释电晕放电等离子提高iPP/SiR界面击穿强度的原因，本文分别进行了ATR-FTIR、水接触角和表面粗糙度的测量。电晕放电等离子体处理前后的iPP表面化学结构特征如图7所示。经电晕等离子体处理后，iPP表面的化学结构出现了明显的变化。一方面，在1 725 cm^{-1}处出现了明显的特征峰，表明有大量的C=O基团生成。其反应原理为：在电晕等离子体的处理过程中，伴随着电晕放电的产生，将形成原子氧等氧化性较强的物



(a) 未处理iPP



(b)处理后iPP

图6　电晕处理前后iPP/SiR界面放电的*N-Q*图谱

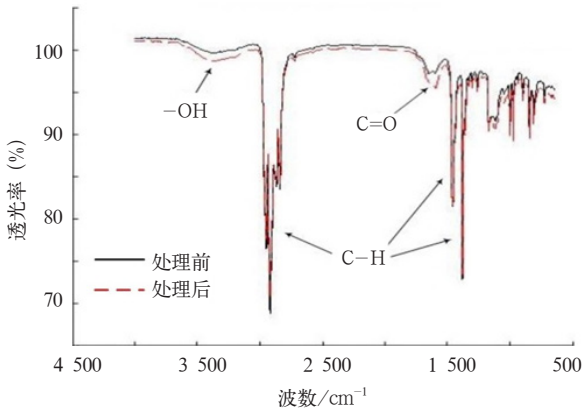


图7　电晕处理前后iPP表面的红外光谱图

质。当它们与iPP表面作用时，将对iPP分子结构中α−碳原子进行氧化，形成含氧官能团C=O。另一方面，位于3 400 cm^{-1}处的吸收峰在电晕处理后显著增强，表明OH的含量增多。C=O和OH作为极性基团，对于载流子起到浅陷阱的作用[6]。在放电起始阶段，由于放电通道尚未形成，载流子的入陷/脱陷和复合作用导致的界面劣化，对于放电的形成具有至关重要的作用。由于电晕处理后，载流子陷阱变浅，故由针电极注入界面的电荷将频繁地入陷/脱陷，引起能量的释放，加速iPP材料的劣化。因此，这种浅陷阱的形成，导致处理后样品的放电起始时间缩短。

在放电通道的伸展阶段，通道电流密度逐渐增大，电流热效应在放电发展过程中的作用不容忽视。由于热的作用，放电通道伸展方向上的接触面间的微孔将膨胀增大，导致微孔间的间距减小。此时，载流子入陷/脱陷的作用将减弱，而带电粒子碰撞引发的击穿将占据主导地位。带电粒子的碰撞过程，对于宏观参数具有较大的依赖性。如图8所示，经电晕等离子体处理后，iPP的表面接触角从87°增大至104°，说明表面能降低，故此iPP表面吸附的水分减少，有利于阻碍电荷的迁移，从而延缓放电通道向对面电极的伸展。如图9所示，经电晕等离子处理后，iPP的表面粗糙度从

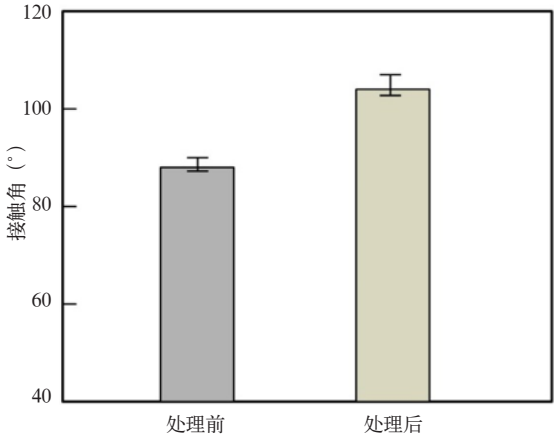


图8　电晕处理前后iPP试样的接触角

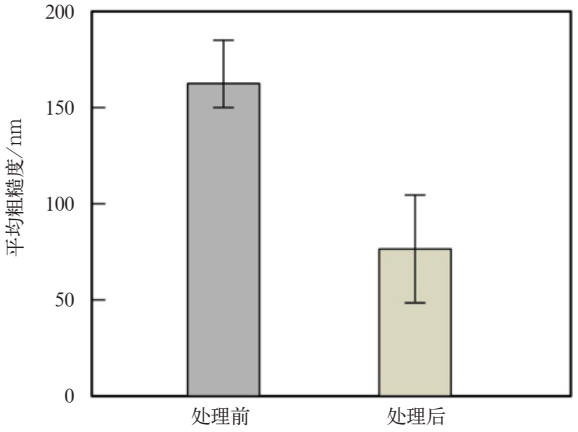


图9　电晕处理前后iPP试样的表面粗糙度

约160 nm减小至约75 nm。根据H. Majid等人的研究结果，在固体绝缘材料界面间的微孔击穿电场强度E_a与微孔尺寸d成反比关系。随着表面粗糙度的下降，微孔尺寸d也显著减小，故微孔的击穿强度增大。这也对放电通道的伸展过程起到阻碍作用[4]。综上所述，iPP经电晕处理后，其表面能降低、表层微孔尺寸减小，从而导致放电通道的伸展过程得到延缓，界面的总体击穿时间延长。

3 结束语

本文采用高频交流高压电源诱发电晕放电等离子体，对iPP材料进行表面处理，研究了处理前后iPP/SiR在交流电压作用下的界面击穿特征，分析了处理前后界面放电时延差异的主要原因，主要结论如下。

1）电晕放电等离子体处理后，iPP的表面出现大量的C=O和OH基团，对表面陷阱分布产生影响；iPP表面的接触角从87° 增大至104°，表面能减小；iPP表面的平均粗糙度从约160 nm减小至约75 nm，iPP/SiR界面间的微孔尺寸减小。

2）经电晕放电等离子体处理后，iPP/SiR界面的放电击穿时间从未处理时的约40 s提高到约80 s，界面击穿时间显著提高。与未处理iPP相比，处理后的iPP/SiR界面放电起始阶段缩短，但放电通道伸展时间延长。这是由于粗糙度降低，放电通道的发展变得不顺畅所致。

实验结果表明，电晕放电处理可以提高iPP/SiR界面的电气强度。该发现有助于聚丙烯绝缘电缆的安全运行。

参考文献

[1] 吴明祥，欧阳本红，李文杰．交联电缆常见故障及原因分析 [J]．中国电力，2013，46(5)：66-70．

[2] Du B X，Zhu X H，Guand H，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．

[3] 邹林，涂扬，孟永鹏，等．界面压强和表面粗糙度对聚乙烯与SiR界面的局部放电的影响[J]．绝缘材料，2014(3)：94-98．

[4] Majid H，Ildstad E．Application of contact analysis on evaluation of breakdown strength and PD inception field strength of solid-solid interfaces[J]．IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2012，19(1)：1-7．

[5] Zhou Y，He J，Hu J，et al．Evaluation of polypropylene/polyolefin elastomer blends for potential recyclable HVDC cable insulation applications[J]．IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2015，22(2)：673-681．

[6] 高宇，李莹，杜伯学．伽玛线辐射对低密度聚乙烯表面电导率的影响[J]．电工技术学报，2013，28(12)：125-129．

（收稿日期：2018－05－08）EA