

低温等离子体处理对聚酰亚胺纳米复合薄膜表面特性的影响

徐 萌¹, 安 钊², 王 野¹, 尹豪杰², 程高远², 张兴涛²

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062;

2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:本文利用介质阻挡放电(DBD)试验平台产生低温等离子体,用低温等离子体改性聚酰亚胺(PI)纳米复合薄膜,对低温等离子体改性前后的纳米复合薄膜进行表面形貌、化学键结构、表面电导及耐电晕性能测试,研究薄膜表面特性的变化规律。结果表明:表面改性后,纳米复合薄膜表面逐渐变粗糙,并出现微孔、不连续凸起物。合理的等离子体改性时间可以在薄膜表面引入极性基团。随着改性时间的增加,接触角逐渐减小,表面能和表面电导率逐渐加大,耐电晕寿命增加到一定程度随后逐渐减小。当等离子体改性时间为10 s时,改性后的纳米复合薄膜的耐电晕寿命比未改性的纳米复合薄膜提高了15.7%。经过低温等离子体改性后,纳米复合薄膜表面相比纯PI薄膜表面更加均匀,改性后的纳米复合薄膜具有表面能小、表面电导率大的特性。较大的表面电导率会加快纳米复合薄膜表面电荷消散的速度,避免局部场强的集中产生表面放电,从而提高了薄膜的耐电晕寿命。要获得相同的改性效果,纳米复合薄膜需要的低温等离子体处理时间比纯PI薄膜稍长。

关键词:等离子体处理;聚酰亚胺;纳米复合;耐电晕寿命

中图分类号:TM215.3;TQ323.7 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)05-0047-07

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.05.007

Effect of Non-thermal Plasma Modification on Surface Characteristics of Polyimide Nanocomposites Film

XU Meng¹, AN Zhao², WANG Ye¹, YIN Haojie², CHENG Gaoyuan², ZHANG Xingtiao²

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In this paper, the low-temperature plasma was generated by DBD test platform, and the polyimide (PI) nanocomposite film was modified by the low-temperature plasma. The surface morphology, chemical bond structure, surface conductivity, and corona resistance of the nanocomposite film before and after the low-temperature plasma modification were tested to study the change law of the film surface characteristics. The results show that after surface modification, the nanocomposite film surface becomes rough gradually, and there are micropores and discontinuous protrusions appeared. Polar oxygen-rich groups were introduced on the surface by plasma modification with appropriate modification time. With the increase of modification time, the contact angle decreases, the surface energy and surface conductivity increase, and the corona resistance life increases at first and then decreases. When the low-temperature plasma modification time is 10 s, the corona resistance life of the modified nanocomposites film is 15.7% higher than that of the unmodified nanocomposites film. After modified by the low-temperature plasma, the nanocomposite film has more uniform surface than the pure PI film, and the modified nanocomposite film has the characteristics of small surface energy and large surface conductivity. The large surface conductivity will accelerate the dissipation speed of surface charge of the nanocomposite film, avoid

收稿日期:2020-08-21 修回日期:2020-10-31

作者简介:徐萌(1988-),男(蒙古族),辽宁葫芦岛人,工程师,主要从事轨道交通牵引系统的研究。

the surface discharge produced by the concentration of local field strength, thereby improving the corona resistance life of the film. To obtain the same modification effect, the nanocomposite film need longer low-temperature plasma modification time than pure PI film.

Key words: plasma modification; polyimide; nanocomposites; corona lifetime

0 引言

现代高速铁路在速度、重载和环保方面得到了很大提升,使其在全世界的应用越来越广泛。动车组的高速持续运行依靠变频调速牵引电机,因此对牵引电机的稳定性及可靠性提出了更高的要求^[1]。随着脉宽调制(pulse width modulation, PWM)技术的快速发展, PWM 技术越来越多地应用在电机控制中。虽然 PWM 技术可以较好地提高牵引电机的性能,但是 PWM 脉冲会在极短时间对变频电机绝缘材料造成剧烈冲击,加快绝缘材料老化,从而间接造成牵引电机损坏^[2-4]。聚酰亚胺(polyimide, PI)因其具有较好的热稳定性、力学性能以及电气绝缘性能,广泛应用于各行各业。随着高速铁路的快速发展,变频牵引电机受到动车组轴距的限制将向高功率、小型化、轻量化发展,使得变频牵引电机绝缘性能亟需进一步提高,其中提高 PI 薄膜的耐电晕性能是重中之重。

国内外众多学者开展了提高 PI 薄膜耐电晕性能的研究,结果表明,通过在 PI 基体中添加 MMT-AlN、SiO₂、纳米 TiO₂、纳米 Al₂O₃ 等填料,可提高 PI 复合薄膜的耐电晕寿命^[5-9]。

PI 薄膜在 PWM 脉冲下的耐电晕性能与其表面电荷输运能力密切相关。因此,可利用表面处理的方式,改变 PI 薄膜表面特性,达到提高耐电晕性能的目的。低温等离子体具有较高的化学活性,对聚合物表面进行改性时只改变其表面特性,不对聚合物内部产生热破坏,还兼具经济、环保和安全性,因此在聚合物表面改性中得到了较为广泛应用^[10-12]。然而,利用等离子体对聚合物表面进行改性,提高薄膜电性能的研究较少,有少量研究表明,等离子体改性可有效提高聚合物真空中的沿面闪络电压^[13]和击穿电压^[14]。本课题组前期研究表明,等离子体改性可提高 PI 薄膜的耐电晕性能^[15],因此亟需开展等离子体改性纳米复合薄膜的相关工作。

本文利用低温等离子体对 PI 纳米复合薄膜表面进行改性,研究其表面特性的变化规律,分析低温等离子体对 PI 复合薄膜耐电晕寿命的影响,探究进一步提高 PI 纳米复合薄膜耐电晕寿命的方法。

1 试验

1.1 PI/Al₂O₃ 复合薄膜的制备

首先,将硅烷偶联剂(KH550)处理过的纳米氧化铝粒子加入 N,N 二甲基乙酰胺(DMAc)溶剂中,超声振动,使纳米氧化铝粒子分散均匀。再加入适量 4,4'-二氨基二苯醚(ODA),并机械搅拌直至溶解。然后,称取一定质量的 1,2,4,5-均苯四甲酸二酐(PMDA),保证 ODA 和 PMDA 的摩尔比为 1:1.02,分 3 次加入 PMDA,并保持机械搅拌。为了保证反应充分,在加完 PMDA 后继续机械搅拌 6~7 h。搅拌完成后,利用真空泵抽取溶胶中的气泡,然后进行铺膜,并置于烘箱内梯度升温进行亚胺化反应。最终,得到 Al₂O₃ 质量分数为 5% 的 PI 纳米复合薄膜,试样厚度为 50 μm。在等离子体处理之前,使用无水乙醇擦拭薄膜表面,待其充分干燥后裁剪成尺寸为 2 cm×2 cm 的试样。

1.2 低温等离子体改性

大气压介质阻挡放电(DBD)试验系统由电源、高低压电极、陶瓷片及示波器等装置组成。该试验系统用于产生试验所需的低温等离子体。采用的电源为 CTP-2000K,频率范围为 5~20 kHz,电压范围为 0~30 kV。高、低压电极均由直径为 51 mm 的不锈钢圆柱体制作而成。介质阻挡材料为陶瓷片,陶瓷片的规格:96% 氧化铝含量,厚度为 1 mm。示波器型号为 Tektronix MDO3024。试验在大气压、相对湿度 67% 和室温 25℃ 下进行。低温等离子体电源电压峰值设为 22.9 kV,频率为 8 kHz,气隙距离固定为 1 mm,放电的功率密度为 24.5 W/cm³。将干燥后的 PI 纳米复合薄膜放置于 DBD 试验平台的气隙中,利用产生的低温等离子体对 PI 纳米复合薄膜表面进行改性处理,改性时间分别设置为 0、10、20、30、60、90 s,并依次标记为 PI-A、PI-A-10、PI-A-20、PI-A-30、PI-A-60、PI-A-90。

1.3 微观形貌及化学键结构测试

采用扫描电镜(SEM, JSM-7001F, 日本电子株式会社)对低温等离子体改性前后 PI 纳米复合薄膜的微观形貌进行测试。采用傅里叶红外光谱仪(FTIR, Nicolet iZ10)对改性前后 PI 纳米复合薄膜的

化学键结构进行测试,波数为4 000~700 cm⁻¹。

1.4 接触角及表面能测试

薄膜表面的接触角与其表面能成反比关系,薄膜表面接触角越小,其表面能越大。计算薄膜接触角时,前提条件是不计重力以及将薄膜表面的液滴视作球形物体,接触角计算公式如式(1)所示^[16]。

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{2h}{D}\right) \quad (1)$$

式(1)中: θ 为薄膜表面接触角; h 为薄膜表面液滴球截形高度; D 为薄膜表面液滴球截形直径。

试验过程中,高度 h 和直径 D 都是从4个方向测量计算得到,将 h 和 D 的数值代入式(1)即可求得接触角 θ 。表面能的计算依据Owens理论,薄膜的表面能由极性分量和色散分量组成,极性分量影响薄膜表面的亲水性,色散分量影响薄膜表面的憎水性^[17]。

1.5 耐电晕性能测试

耐电晕寿命测试系统如图1所示,由高压脉冲电源、击穿保护装置、棒板电极等组成。耐电晕寿命测试系统中的双极性高频方波发生器依据IEC 60034-18-42:2017设计。高压脉冲电源输出的方波脉冲电压峰值在0.5~10 kV可调,输出频率为1~20 kHz,上升沿时间为100~520 ns连续可调,方波电压占空比为0.5。依据ASTM D2275-01:2008设计试验用棒板电极,上电极即棒电极直径6 mm的不锈钢柱电极,电极的边缘曲率半径为1 mm;下电极即板电极直径51 mm的不锈钢板电极。对薄膜进行耐电晕寿命测试时,电压峰峰值设为1 200 V,电源频率设为20 kHz,上升时间设置为100 ns,试验在25℃下进行,每种试样在相同试验条件下测试5个,结果取平均值。

1.6 表面电导率测试

PI纳米复合薄膜电导率测试参照GB/T 1410—

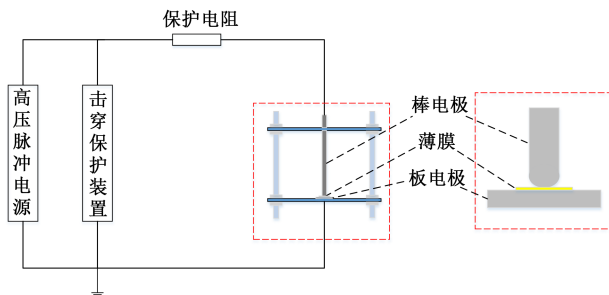


图1 耐电晕寿命试验系统

Fig.1 System of corona lifetime test

2006进行,所用设备为AVO型绝缘电阻测试仪,美国MEGGER有限公司。电源电压设为500 V,测试时间为1 min。

2 结果与分析

2.1 微观形貌及化学键结构

等离子体改性前后薄膜表面的微观形貌变化如图2所示。

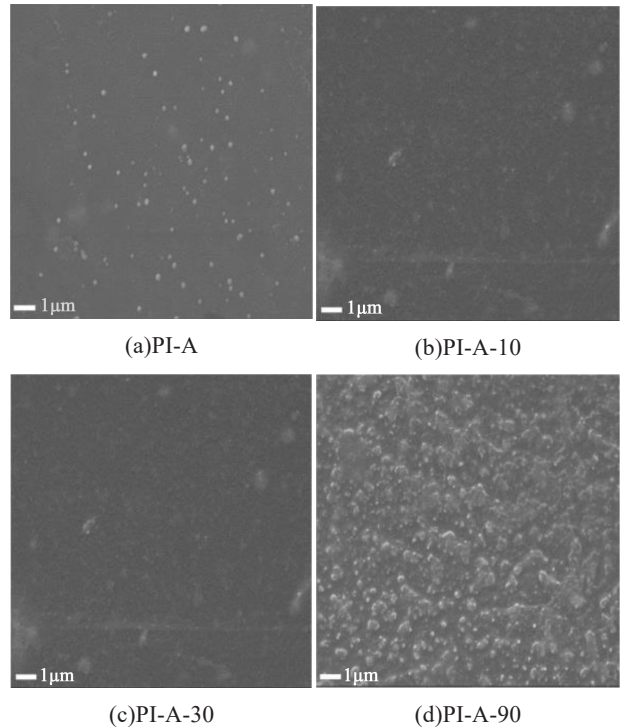


图2 等离子体改性前后薄膜微观形貌

Fig.2 Microstructure of films before and after plasma modification

从图2可以看出,未经过等离子体处理的试样PI-A,其表面较为平整,纳米粒子较为均匀地分布在PI薄膜中;薄膜在DBD试验平台被低温等离子体改性10 s之后,PI-A-10薄膜表面依旧平整,但是薄膜表面粗糙度增加,较多的沙粒状物质密集分布在薄膜表面,活性物质暴露;薄膜被低温等离子体改性30 s之后,发现微孔开始出现在PI-A-30薄膜表面,并且大量连续凸起物较为均匀地分布在表面;当改性时间增加到90 s时,PI-A-90薄膜表面的微孔变大、汇聚,薄膜表面的凸起物分布不再连续和均匀,而是呈岛屿状分布。

等离子体改性前后薄膜的FTIR测试结果如图3所示。

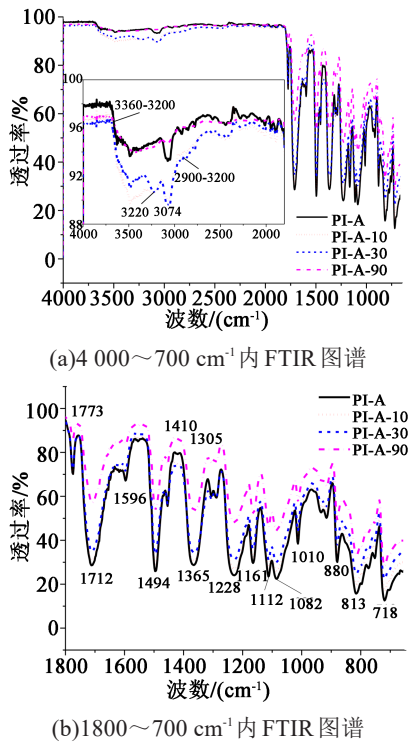


图3 等离子体改性前后薄膜FTIR图谱

Fig.3 FTIR of the films before and after plasma modification

从图3(a)可以看出,在高波数段,当等离子体改性时间为10 s和30 s时,在 3220 cm^{-1} 处出现新的吸收峰,对应 $-\text{NH}_2$,并且 $-\text{COOH}$ 上 $-\text{OH}$ 的宽峰($2900\sim 3200\text{ cm}^{-1}$)以及纳米粒子引入的 $-\text{OH}$ 峰($3200\sim 3360\text{ cm}^{-1}$)均出现增强。但等离子体改性时间为90 s时,上述特征峰均消失。以上结果表明,只有采取合理的等离子体改性时间,才能在薄膜表面引入极性基团。

从图3(b)可以看出,在低波数段,随着等离子体改性时间的增加,特征峰逐渐减弱,在前30 s变化不大,30 s后减弱趋势逐渐增大。这些特征峰均对应PI的本征化学结构,如波数 1773 、 1712 、 718 cm^{-1} 处的吸收峰与PI分子上的酰亚胺环有关;波数 1596 、 1494 、 1305 、 1161 、 1082 、 1010 cm^{-1} 等处的吸收峰与苯环有关;波数 1112 cm^{-1} 代表酰亚胺环上 $\text{C}-\text{N}-\text{C}$ 键的横向拉伸;波数 1365 cm^{-1} 代表酰亚胺环上 $\text{C}-\text{N}-\text{C}$ 键的轴向拉伸;PI分子链上的醚键 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 则与波数 1228 cm^{-1} 处的吸收峰相关。由此证明等离子体改性时间过长,会对PI纳米膜的本征结构造成破坏。

2.2 接触角及表面能

图4为薄膜表面接触角与等离子体改性时间的关系,试验所用液体分别为蒸馏水和丙三醇。从图4可以看出,随着等离子体改性时间的增加,PI纳米复合薄膜表面接触角逐渐减小,这表明薄膜表面的亲水性逐渐增加。

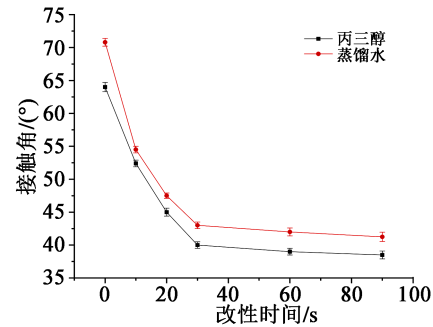


图4 接触角与等离子体改性时间关系

Fig.4 Relationship between contact angle and plasma modification time

图5为根据接触角测量结果计算得到的表面能及其分量,图中 γ_s^p 、 γ_s^d 、 γ_s 分别表示薄膜的极性分量、色散分量及表面能。

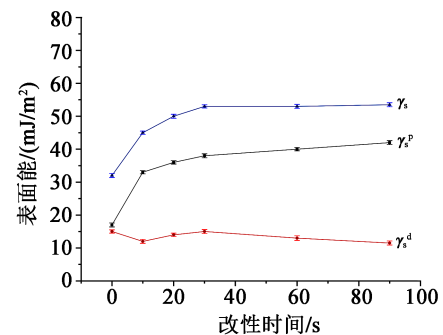


图5 表面能与等离子体改性时间的关系

Fig.5 Relationship between surface energy and plasma modification time

从图5可以看出,随着等离子体改性时间的增加,薄膜的表面能逐渐增大。可以注意到,随着改性时间的增加,与薄膜亲水性相关的极性分量逐渐增加,而与薄膜表面憎水性相关的色散分量基本不变。这表明当低温等离子体改性薄膜的时间增加时,薄膜表面的亲水性呈现逐渐增强的变化规律,其表面能增加的主要因素是极性分量随改性时间增加而增加。DBD试验平台制备的低温等离子体会让空气中的分子或中性粒子发生电离,这些电离

的粒子会撞击PI分子链中比较脆弱的C-N及C-O-C(醚键),并与空气中的氧原子和氢原子等发生作用,在PI分子链中引入-OH、-COOH、-NH₂等极性基团^[18-19],从而增强了PI纳米复合薄膜表面的亲水性以及表面能。

2.3 耐电晕寿命

薄膜耐电晕寿命随等离子体改性时间的变化曲线如图6所示。从图6可以看出,随着低温等离子体改性时间的增加,薄膜耐电晕时间呈现出先增大后减小的变化规律。低温等离子体改性时间为10 s时,PI纳米复合薄膜的耐电晕时间达到最大值,比未改性的PI纳米复合薄膜耐电晕时间提高了15.7%,说明低温等离子体改性可以提高PI纳米复合薄膜的耐电晕寿命。

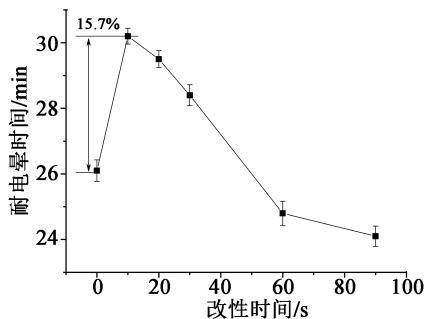


图6 耐电晕寿命与改性时间的关系

Fig.6 Relationship between corona lifetime and modification time

表面电导率是衡量绝缘材料表面特性的重要参数之一,它可以用来表征电荷在材料表面移动的难易程度,表面电导率越高,则电荷在材料表面越容易移动。图7为薄膜表面电导率与低温等离子体改性时间的关系。从图7可以看出,随着等离子体改性时间的增加,薄膜的表面电导率逐渐增加。以等离子体改性时间30 s为界限,前后两段曲线的增长率明显不同。可以归结于二者的机理不同,当等离子体改性时间小于30 s时,等离子体改性在薄膜表面引入的极性基团使薄膜表面电导增大;等离子体改性时间大于30 s时,表面电导的增大与PI本体的劣化有关。

当低温等离子体改性纳米复合薄膜的时间小于10 s时,薄膜表面会引入羟基、羧基等极性基团,薄膜的表面极性增加,薄膜的介电常数随着表面极性的增加而增大,根据文献[20]可知,介电常数越大,则电子从电极注入到薄膜内部所需克服的势垒

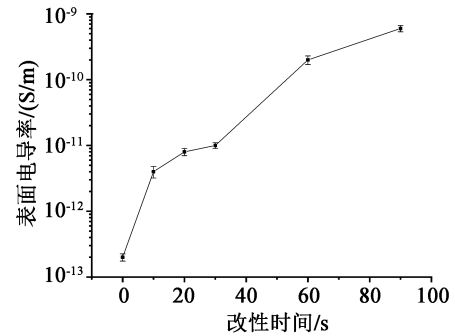


图7 表面电导率与改性时间的关系

Fig.7 Relationship between surface conductivity and modification time

越大,电子需要更大的能量才能注入到薄膜内部,因此减少了一部分电子的注入,从而减少了薄膜内部空间电荷的形成,进而减少了电荷入陷时的能量释放,并降低了局部电场不均和局部温度过热,延长了薄膜的耐电晕寿命。

当低温等离子体改性纳米复合薄膜的时间大于20 s时,改性时间过长破坏了先前在薄膜引入的极性基团,加之薄膜长时间被低温等离子体作用,薄膜表面产生了大量微孔,表面变得极为疏松,导致薄膜表面致密性降低,使得电子更容易注入到薄膜内部,破坏了薄膜的绝缘性能^[21]。因此,薄膜的耐电晕寿命随之缩短。

3 分析与讨论

采用低温等离子体改性PI纳米复合薄膜,可以提高PI纳米复合薄膜的耐电晕寿命。与低温等离子体改性纯PI薄膜相比^[13],改性前后纳米复合薄膜性能的变化呈现以下5个特点:

(1)低温等离子体改性时间为10 s时,未掺杂纳米的纯PI薄膜表面出现连续线状凸起物但表面较为光滑,而较多的沙粒状物质密集分布在纳米复合薄膜表面;当改性时间增加到90 s时,未掺杂纳米的纯PI薄膜表面微孔逐步变大且表面为连续的凸起物,呈带状分布,大部分是沟壑,而纳米复合薄膜表面的微孔在慢慢变大,微孔变大的程度小于纯膜,薄膜表面的凸起物分布不再连续和均匀,而是呈岛屿状分布,大部分是凸起。这表明等离子体对纳米复合薄膜的表面改性更为均匀,复合薄膜中引入的纳米粒子起到了减缓等离子体灼伤薄膜表面的作用。

(2)化学键变化方面,在PTIR谱图的高波数段,当低温等离子体改性纳米复合薄膜90 s时,-NH₂等

吸收峰才消失,而低温等离子体改性纯PI薄膜仅30 s时, $-\text{NH}_2$ 等吸收峰已观测不到。这是由于低温等离子体对纳米复合薄膜的表面改性比对纯PI薄膜的表面改性更为均匀,减缓了局部能量集中造成的薄膜表面局部劣化。在低波数段,复合薄膜与纯PI薄膜吸收峰的变化趋势大致相同,均呈现单调减小的变化规律,并且减小速率从30 s后迅速增大。

(3)纳米复合薄膜和纯PI薄膜在等离子体处理后的接触角和表面能变化趋势相同,只是在相同的改性时间下,纳米复合薄膜的接触角和表面能较纯PI膜小。其原因在于:①纳米复合薄膜表面较纯PI薄膜更加粗糙;②纳米粒子的添加本身引入了亲水性的羟基。

(4)对比纳米复合薄膜和纯PI薄膜耐电晕时间随改性时间变化的关系,并计算出相邻改性时间段两种薄膜耐电晕寿命的差值,如图8所示。

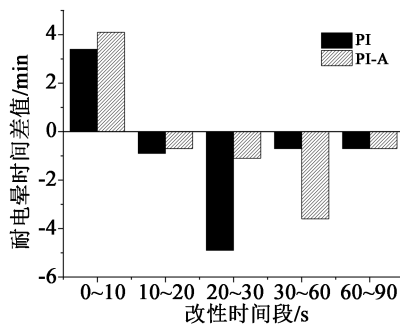


图8 耐电晕时间差值与改性时间的关系

Fig.8 Relationship between the difference value of corona resistance time and modification time

从图8可以看出,纳米复合薄膜与纯PI薄膜的耐电晕寿命均先增大后减小;改性时间为0~10 s时,纳米复合薄膜的增长幅值大于纯PI薄膜,表面改性对纳米复合薄膜的效果更明显;纯PI薄膜的最大负数值在改性时间为20~30 s时出现,而纳米复合薄膜则出现在30~60 s时间段,表明纳米复合薄膜具有延迟等离子体破坏时间的作用,即获得相同改性效果需更长的改性时间。

(5)纳米复合薄膜和纯PI薄膜表面电导率随改性时间的变化趋势基本一致,在相同改性时间下,纳米复合薄膜的表面电导率大于纯PI薄膜的表面电导率。其原因在于:①添加的纳米粒子使纳米复合薄膜中存在较多杂散离子;②纳米粒子在纳米复合薄膜中引入的界面区发生重叠,形成了导电通道。薄膜表面电导率的增加,有利于表面电荷在脉

冲电压极性反转时的及时消散,从而避免局部场强的集中并产生表面放电,有效提高了薄膜的耐电晕寿命。但是,改性时间过长,导致PI本体劣化之后,薄膜耐电晕寿命会随之降低。因此,需要选择合理的等离子体改性时间,才能使纳米复合薄膜耐电晕寿命得到提高。

4 结 论

(1)采用低温等离子体改性PI纳米复合薄膜,增加了表面的粗糙度并引入极性基团。随着改性时间的增加,薄膜表面接触角逐渐减小,表面能逐渐增大,表面电导率逐渐增加,耐电晕寿命呈现先增大后减小的变化规律。

(2)与低温等离子体改性纯PI薄膜相比,低温等离子体对纳米复合薄膜的表面改性更为均匀,减缓了薄膜表面局部劣化,纳米复合薄膜呈现较小的表面能和较大的表面电导率。

(3)表面电导率的增加有利于表面电荷在脉冲电压极性反转时及时消散,从而避免因局部场强集中而产生表面放电,有效提高了薄膜耐电晕寿命。

(4)为避免PI本体的劣化,需要选择合理的改性时间。要获得与纯PI薄膜相同的改性效果,等离子体改性纳米复合薄膜所需的时间稍长。

参考文献:

- [1] WU G N, CAO K J, YANG L, et al. Partial discharge characteristics of interturn insulation used for inverter-fed traction motor under bipolar impulses[J]. Science China Technological Sciences, 2012,55(8):2346-2354.
- [2] YIN W J. Failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(6): 18-23.
- [3] 吴广宁,彭佳,刘继午,等. 方波脉冲下聚酰亚胺材料的老化特性[J]. 高电压技术,2014,40(7):1957-1962.
- [4] CHEN M H, YIN J H, BU W B, et al. Microstructure changes of polyimide/MMT-AlN composite hybrid films under corona aging[J]. Applied Surface Science,2012,263(15):302-306.
- [5] ZHONG J H, ZHANG M Y, JIANG Q B, et al. Synthesis and characterization of silica - alumina co-doped polyimide film[J]. Materials Letters,2006,60(5):585-588.
- [6] ZHA J W, SONG H T, DANG Z M, et al. Mechanism analysis of improved corona-resistant characteristic in polyimide/TiO₂ nanohybrid films[J]. Applied Physics Letter,2008,93(19):192911-192913.
- [7] LI H Y, LIU G, LIU B, et al. Dielectric properties of polyimide/Al₂O₃ hybrids synthesized by in-situ polymerization[J]. Materials Letter,2007,61(7):1507-1511.
- [8] 张兴涛,吴广宁,杨雁,等. 聚酰亚胺纳米复合薄膜耐电晕机理研

- 究[J]. 绝缘材料,2016,49(8):17-20.
- [9] 李鸿岩,郭磊,刘斌,等. 聚酰亚胺/纳米氧化钛复合薄膜的介电性能研究[J]. 绝缘材料,2005,38(6):30-33.
- [10] CHAN C M, KO T M, HIRAOKA H. Polymer surface modification by plasmas and photons[J]. Surface Science Reports, 1996, 24(1):1-54.
- [11] BÁRDOS L, BARÁNKOVÁ H. Cold atmospheric plasma: Sources, processes, and applications[J]. Thin Solid Films, 2010, 518(23):6705-6713.
- [12] MASON N J. The status of the database for plasma processing [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(19):194003-194013.
- [13] SHAO T, YANG W J, ZHANG C, et al. Enhanced surface flash-over strength in vacuum of polymethylmethacrylate by surface-modification using atmospheric-pressure dielectric barrier discharge[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(7):071607.
- [14] BINDER M, WADE W L, CYGAN P, et al. Breakdown voltages of commercial polymer films following exposure to various gas plasmas[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(2):399-401.
- [15] 张兴涛,吴广宁,杨雁,等. 介质阻挡放电等离子体处理对聚酰亚胺表面放电影响研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(9):3097-3104.
- [16] ZHENG P C, LIU K M, WANG J M, et al. Surface modification of polyimide (PI) film using water cathode atmospheric pressure glow discharge plasma[J]. Applied Surface Science, 2012, 259(16):494-500.
- [17] OWENS D K, WENDT R C. Estimation of the surface free energy of polymers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1969, 13(8):1741-1747.
- [18] 章程,邵涛,于洋,等. 纳秒脉冲介质阻挡放电特性及其聚合物材料表面改性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5):31-37.
- [19] WU J, MIYAHARA A, KHAN A R, et al. Effects of ultraviolet irradiation and atomic oxygen erosion on total electron emission yield of polyimide[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(1):191-198.
- [20] 钟力生,李盛涛,徐传骧,等. 工程电介质物理与介电现象[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2013.
- [21] 罗杨,吴广宁,刘继午,等. 环境温湿度对聚酰亚胺介电强度的影响机制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36):6578-6584.