

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.01.013

方波脉冲下纳米氧化硅掺杂对聚酰亚胺绝缘性能的影响

刘 洋, 吴广宁, 高国强, 张血琴

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 聚酰亚胺纳米复合薄膜(polyimide, PI)广泛应用于电机绝缘。方波脉冲下的局部放电是变频电机绝缘失效的主要原因之一。为了研究高频脉冲电压下PI膜的老化,探讨纳米粒子在PI膜中的作用机理,文中将粒径为30 nm的SiO₂无机填料掺杂到PI膜中。利用场发射扫描电镜(SEM)观察纳米SiO₂在PI膜中的分散情况,并在方波脉冲电压下对复合薄膜进行了耐压和耐电晕实验,最后运用纳米复合3层结构解释了PI膜绝缘破坏的过程。研究表明:纳米粒子均匀分散到PI基体中,纳米SiO₂的加入可以提高PI膜的电导率和介电常数,影响电子迁移率;PI/SiO₂膜耐压特性随着SiO₂纳米粒子体积分数的增加先增强后减小,在体积分数为5%时达到最大值。耐电晕特性随着SiO₂纳米粒子体积分数的增加而上升。SiO₂纳米粒子会在试样中产生大量的有机—无机界面以及复合结构,影响了电子在介质中的作用机理,导致PI膜绝缘性能发生改变。

关键词: PI/SiO₂纳米复合膜; 双极性方波电压; 击穿电压; 电晕老化; 纳米复合结构

Influences of Nano Silica on the Insulating Property of Polyimide Under the Square Impulse Stress

LIU Yang, WU Guangning, GAO Guoqiang, ZHANG Xueqin

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

Abstract: Polyimide(PI) film is widely used in the insulation of PWM inverter motor. The partial discharge under the square impulse is one of the main causes in insulation failure of inverter fed motors. In this paper, PI film with nano silica (30 nm) content has been made for the research of PI film's aging under the square impulses and PI film's action under the nano particle. The micro-morphology and structure of nano silica in PI film is investigated by scanning electron microscopy (SEM). We can get the life span and withstand voltage strength through the square wave voltage withstand test and corona aging experiment, and explain PI film's dielectric breakdown process by taking advantage of nano composite three-layer structure. Results reveal that particles are uniformly dispersed in PI matrix. The nano silica can improve the conductivity and dielectric constant of PI film and influence the electron mobility. What's more, the withstand voltage strength of SiO₂/PI film ascends and then declines (5% reach the top) while at the same time corona resistant ascends with the increase of particle content of SiO₂. SiO₂ nano particle would generate in sample abundant organic-inorganic interface and sophisticated complex affects the electron's action in dielectric, which at last changes the insulting property of PI film.

Key words: PI/SiO₂ nano composite film; bipolar continuous square impulse voltage; breakdown voltage; corona aging; nano composite structure

0 引言

随着电力电子技术的不断发展,脉宽调制(PWM)

在控制领域被广泛运用。交流传动变频电机作为高速铁路动车组的核心设备,其绝缘的安全性与稳定性直接影响到动车组运行的性能^[1]。在机车运行时,变频电机中的变频器输出的一系列脉冲形式的方波电压有可能导致变频电机中绝缘材料过早老化

收稿日期:2015-06-09; 修回日期:2015-07-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51177136)。

Project Supprted by National Natural Science Foundation of China(51177136).

而损坏。近年来,该问题已经引起了国内外学者广泛关注^[2-4]。

PI 薄膜因其卓越的电气绝缘性能而成为交流传动变频电机绝缘材料的首选,其在工频电压下的应用日益广泛^[5-6]。纳米材料改性 PI 膜是改善 PI 膜绝缘性能的有效手段^[7-10],但这种改性材料在方波脉冲电压下绝缘性能还鲜有文献报道。与工频电压不同,双极性方波脉冲条件下电机匝间绝缘承受两倍于峰值的电压,电子的频繁入陷使得纳米粒子和 PI 分子相互作用的机理更加复杂。研究表明,PI 薄膜在方波老化的过程中,局部放电、高频脉冲电压引起的介质弛豫损耗以及空间电荷积累导致的局部电场畸变是绝缘失效的主要原因^[11-19]。

文中通过溶胶—凝胶法制作了不同纳米粒子含量的 PI/SiO₂ 纳米复合薄膜,观察了不同纳米 SiO₂ 粒子在 PI 膜中的分散情况,对试样进行耐压试验和电晕老化试验,得到了绝缘性能和纳米掺杂量的关系并从微观的角度解释了纳米粒子对电荷的入陷、脱陷以及对复合 PI 膜物理性质影响。为 PI 纳米复合膜的生产、改善变频电机绝缘结构设计以及延长变频电机的使用寿命提供理论依据。

1 试验系统

1.1 电晕老化与击穿系统

放电老化测试系统包括一个双极性高压方波电源、故障保护装置、试样。电极均采用不锈钢制作,并且进行磨砂抛光处理,保持电极表面光滑平整。试样为掺杂不同含量的 SiO₂ 纳米粒子的 PI/SiO₂ 纳米复合薄膜

为了观测记录试样放电情况,采用双通道数字示波器采集放电信号以及脉冲信号。传感器使用高频的铁氧体铁心传感器耦合,R 为无感积分电阻。通过积分电阻以及高压差分探头连接外部设备到计算机进行数据处理。实验系统框图见图 1。

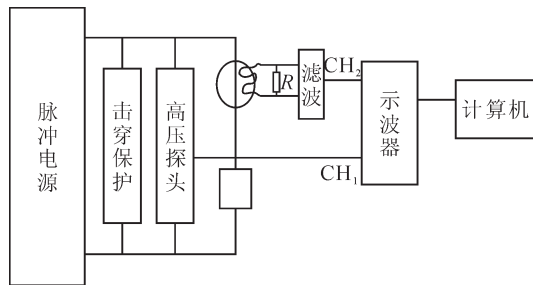


图 1 电晕放电系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the partial discharge system

1.2 试验电极

电晕放电试验电极采用 ASTM D2275 01 标准

制作,包括上下电极以及绝缘板。上电极为直径 6 mm、边缘曲率半径为 1 mm 的圆柱电极,下电极为直径 51 mm 的板电极。

击穿电压试验电极采用 GB1408—1989 标准制作,包括上下电极以及绝缘板。上电极直径 25 mm 的圆柱电极,为减小空气气隙,边缘曲率半径为 2.5 mm。下电极为直径 75 mm 的板电极。

2 试样制备

首先制备有机硅溶胶。将一定量的 N,N'-二甲基乙酰胺(DMAC)、正硅酸乙酯(TEOS)和二苯基二甲氧基硅烷(DDS)按一定比例混合后倒入 3 颈瓶,然后将混合溶液进行机械搅拌使其完全的溶解。溶解完全后加入一定量蒸馏水,保持溶液在 90 ℃的条件下回流 4 h。然后将溶液升温至 110 ℃回流 2 h 后减压蒸馏得到浓度为 30%~40%的有机硅溶胶,并进行密封保存。

称取质量不同的有机硅胶溶液,根据试样要求加入适量溶剂并进行高速机械搅拌使其均匀混合。然后将溶液放入盛有 4,4'-二氨基二苯醚(ODA)的 3 颈瓶中,将溶液冰水浴使试样充分溶解。随即多次加入与 ODA 等摩尔质量的均苯四甲酸二酐(PMDA),直到溶液的粘度急速增大。最后将溶液机械搅拌一天,并在室温下进行超声波处理 12 h,得到含有纳米 SiO₂ 的 PI 酸溶胶。

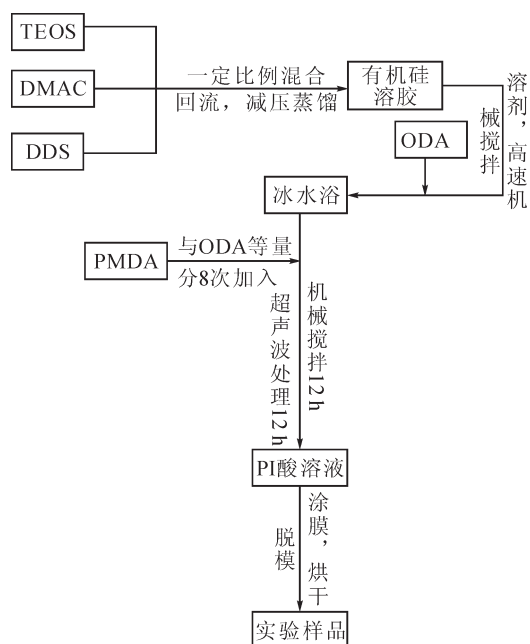
利用梯度升温使 PI 酸溶液亚胺化。在室温下,将制备好的 SiO₂ 纳米粒子体积分数分别为 2%、5%、10%、15%、20%的 PI 酸溶胶倾倒在层析玻璃板上,用涂膜机在层析玻璃板上涂膜后放入真空烘箱中抽真空并进行温度分别为 60、120、160 ℃各 1 h,240、320、360 ℃各 2 h 的梯度升温。当试样充分亚胺化后将涂有 PI 酸溶液的层析玻璃板放入蒸馏水中浸泡脱膜。再将脱膜经过干燥处理就可以得到含有 SiO₂ 纳米粒子的 PI 薄膜。表 1 为实验试样参数。图 2 为 PI/SiO₂ 薄膜制作流程图。

表 1 试样参数

Table 1 Sample parameters

样品编号	厚度/ μm	SiO ₂ /%
1号	24	0
2号	21	2
3号	26	5
4号	25	10
5号	28	15
6号	25	20

实验前将 PI/SiO₂ 复合薄膜用酒精清洗,并且置

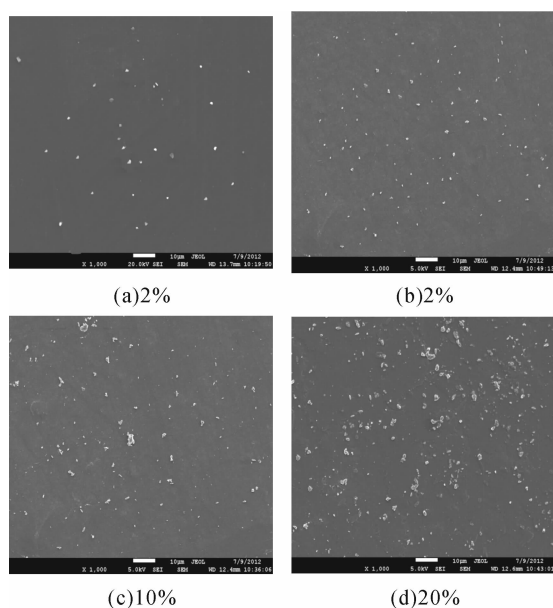
图2 SiO_2/PI 膜制造流程图Fig. 2 The production flow chart of SiO_2/PI film

于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中充分干燥 10 h , 以消除 PI/SiO_2 薄膜内残余应力和水分。

3 实验结果与讨论

3.1 试样 SEM 图

图 3 为不同 SiO_2 体积分数 PI 薄膜的 SEM 测试图。 SiO_2 体积分数分别为 2%、5%、10%、20%。图 3 中白色球状点为 SiO_2 纳米粒子

图3 不同 SiO_2 体积分数的 PI 膜表面形貌图Fig. 3 Surface micrographs of PI film with different content about SiO_2

从图 3 可以看出, SiO_2 纳米粒子与 PI 膜具有良

好的相容性。当 SiO_2 体积分数为 2% 和 5% 时, SiO_2 在 PI 基体中弥散分布。随着 SiO_2 纳米粒子体积分数增加到 10% 和 20% 时, 团聚现象越来越严重。原因随着 SiO_2 纳米粒子体积分数升高, 粒子之间距离缩短, 相互间的分子引力使得纳米粒子相互吸引发生团聚。且纳米粒子形状不规则, 有较大的表面能, 能量处于不稳定状态, 粒子的聚集可以使得其处于稳定状态。

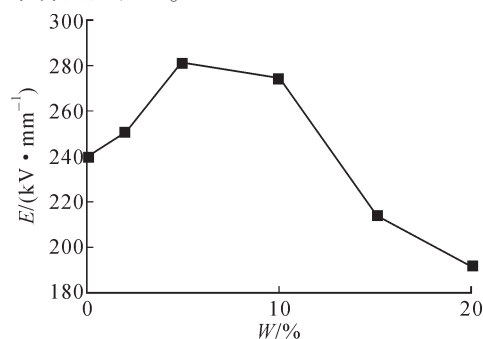
3.2 击穿电压

用镊子将边长为 20 mm 的正方形试样移到试验台中, 使上电极和试样充分接触并将试样浸泡在二甲硅油中, 消除电极和薄膜间的气泡。在 20 s 内将电压从 0 V 升至击穿电压, 当保护装置发出警报时, 试样被击穿, 停止实验, 记录电压击穿值。多次试验后对不同试样进行分批测量取平均值, 结果见表 2。

表 2 不同 SiO_2 体积分数 PI 膜击穿场强Table 2 Breakdown field strength about different PI/SiO_2

样品编号	击穿电压/ kV	场强/ $(\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$
1 号	5.76	240
2 号	5.27	251
3 号	7.33	282
4 号	6.87	275
5 号	6.02	215
6 号	4.80	192

在 SiO_2 体积分数为 5% 时, 复合薄膜的击穿场强达到最大值, 耐压性能比纯的 PI 薄膜提高了 19%。但随着 SiO_2 纳米粒子体积分数继续升高, 复合薄膜的耐压性能显著下降。不同 SiO_2 体积分数 PI 膜击穿场强见图 4。

图4 不同 SiO_2 体积分数的 PI 膜击穿场强Fig. 4 Breakdown field strength of different PI/SiO_2

由图 4 可知, 随着 SiO_2 纳米粒子体积分数的上升, 击穿电压先上升后下降。这是因为 SiO_2 粒子属于无机粒子, 当 PI 膜中添加纳米 SiO_2 后, 在薄膜内部会形成有机—无机界面, 这些界面会产生缺陷以及陷阱。在高频的交流电场下, 这些缺陷和陷阱会

捕获大量的电荷,从而形成空间电荷,使电场发生畸变,导致局部放电。随着电压的上升,注入电荷的增加,电场畸变严重。由于极性的不断变化,电荷不断的被抽出和注入,碰撞PI分子产生大量热电子,且伴随强烈的松弛极化,形成大量的热量^[20]。由于实验过程中电压幅值上升很快,在很短的时间里热量不能及时的散出,从而使PI分子结构最终被破坏,试样被击穿。

纳米SiO₂粒子与PI基体的相容性较好,在薄膜中弥散分布。在纳米粒子体积分数比较低时,由SEM图可以看出纳米粒子分布比较分散而且均匀。在粒子体积分数在5%以下时,随着SiO₂体积分数的增加,纳米粒子在薄膜中的密度增大,形成的无机—有机界面区结构也越来越紧密。当体积分数继续增加到5%时,有助于SiO₂纳米粒子和基体PI分子更好的结合,形成了更为紧密的界面结构。电子在跃迁时需要更高的势垒,使复合材料击穿场强增大。另一方面,SiO₂粒子的介电常数较高。掺杂了SiO₂纳米粒子的PI薄膜介电常数高于纯PI薄膜。从而提高了复合薄膜的介质损耗。根据Maxwell Wagnae界面极化模型^[21]可知,复合材料的击穿场强随着介电常数的增加而下降,从而使综合的击穿电压升高。

$$\frac{\varepsilon'_m+2}{3}E_{\text{break},m}=\frac{\varepsilon'_c+2}{3}E_{\text{break},c} \quad (1)$$

式(1)中: ε'_m 和 $E_{\text{break},m}$ 分别表示未处理材料的介电常数和击穿场强; ε'_c 和 $E_{\text{break},c}$ 分别表示复合材料的介电常数和击穿场强。

当SiO₂粒子体积分数超过5%时,纳米粒子团聚情况比较强烈,此时产生的两相界面的界面效应变大,陷阱中的空间电荷增加较快,局部电场畸变的强度变大。弛豫响应增加,产生大量的热,使得PI分子链破坏严重。当SiO₂纳米粒子体积分数到了20%后,形成大量的团聚粒子,整个试样的电导上升,击穿电压下降比较快。

3.3 电晕放电

实验前将棒电极和下电极磨平抛光处理,防止电极缺陷导致电场强度不均匀。将试样移到电极表面,使其紧贴电极,然后将上电极和试样充分接触,调整电极位置使与试样之间产生空气间隙。设置电场强度为60 kV/mm,频率为1 kHz,上升沿时间1 μ s,占空比为50%,试验温度为室温。测试电晕放电击穿时间。结果见表3。

当电极通电时,电极和试样间的空气气隙被击穿,空气发生电晕放电。PI复合膜耐电晕性能随着SiO₂纳米粒子体积分数增加变化见图5。

表3 不同SiO₂体积分数PI膜耐电晕时间

Table 3 The corona resistance time about different PI/SiO₂

样品编号	电场/(kV·mm ⁻¹)	电晕时间/min
1号	60	35
2号	60	92
3号	60	110
4号	60	157
5号	60	230
6号	60	271

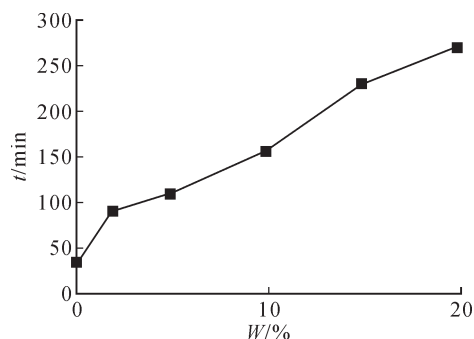


图5 不同SiO₂体积分数PI膜耐电晕时间

Fig. 5 The corona resistance time about different PI/SiO₂

随着SiO₂体积分数增加,耐电晕放电时间增加。在放电过程中,可以听到明显的空气电晕放电的声音,空气气隙和试验接触的区域有明显的烧灼痕迹,见图6。

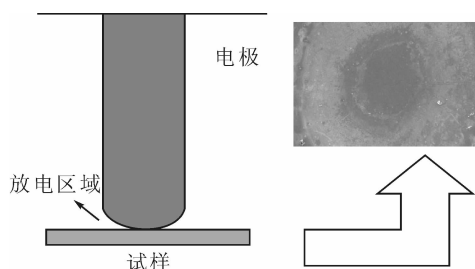


图6 实验电极以及侵蚀试样表面

Fig. 6 Test electrode and surface of eroded sample

经过统计,击穿点主要发生在PI复合薄膜烧灼区域,击穿的原因是由于烧灼区域的温度过高,热量来不及扩散,导致试样绝缘结构发生破坏。同时空气会在强场强下产生臭氧,在高温状态下进一步对薄膜产生腐蚀。

从纳米粒子物理性质分析,电晕放电过程中,由于电子的平均自由行程小,禁带中局域态密度大,这些电子在经过一次或几次散射后很容易被陷阱捕获。会产生如下两个影响:

1)随着注入电子数目的增多,会在试样表面形成一个稳定的空间电荷场,使电子注入的自由行程减短,减小电子注入速率,从而使电子对试样分子结构的冲击减少,防止绝缘被进一步破坏。同时SiO₂

纳米粒子的掺入使得复合材料的浅陷阱数目增多, 这些浅陷阱能够束缚电子, 使其不容易发生脱陷。且浅陷阱内束缚的电荷也起到均衡外部电场的作用。

2) 电子在被陷阱捕获以后, 会形成自由行程大的低密度区, 随后使得注入的电子会在这些区域发生碰撞电离。在碰撞电离过程中伴随着电子的入陷。这种从高能状态到低能复合过程中会产生能量差, 这些能量差以热量的方式释放出来。然而 SiO_2 纳米粒子是无机粒子, 耐热性大于 PI 分子。同时 SiO_2 纳米粒子分布在试样内部, 提高了复合材料的导热性, 能及时将热量传导出, 避免了试样由于温度过高发生破坏。而且 SiO_2 纳米粒子具有一定导电性, 使在电晕放电过程中载流子迁移所需要克服的势垒降低, 电导率得到提高, 从而表面电位下降较快, 提高耐电晕强度。

从纳米粒子结构分析, 在双极性脉冲波下, 电子的频繁注入和抽出对 PI 分子基体破坏很强。根据纳米粒子多核模型, 纳米粒子和 PI 基体作用结构可以分为 3 层: 最里层为成键层, 和 PI 薄膜互相组合形成键能较大的氢键或者离子键^[22], SiO_2 粒子具有很高的稳定性, 它和 PI 分子作用形成的键有强大的键能以及很强的抗局部放电能力; 第 2 层大多为网状结构的晶体结构, 键能较小, 耐受能力较小; 最外层是一系列的松散结构, 耐受电晕的能力最差。当试样表面发生电晕放电时, 电荷首先破坏复合结构的最外层, 当最外层被完全破坏后会通过最外层和中间层的薄弱处到第 2 层, 然后再到第 1 层。3 层结构见图 7。

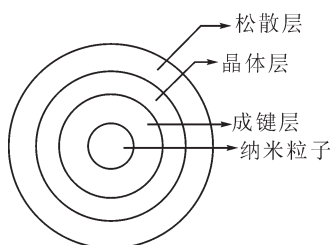


图 7 复合 3 层结构

Fig. 7 Composite three-layer structure

纳米粒子含量的增加可以使得复合材料的结构更加紧密, 且纳米 SiO_2 和 PI 分子复合后加强了 PI 分子末端官能团的键能, 使得纳米颗粒和 PI 复合材料之间的分子键断裂需要更多能量, 提高了复合材料的稳定性^[23]。随着 SiO_2 纳米粒子的增加, 纳米粒子间距较小, 相邻纳米粒子周围的松散层和晶体层相互重叠, 成键层的区域增大, 复合 3 层结构增加, 分子力增大。提高了复合材料的耐电晕性能。

由于电晕放电时间比较长, 局部放电的路径是沿着结构薄弱的路径发展。多层结构的增加使得电子在进入试样后会不断的遭遇复合结构, 撞击从外层向内层发展。外层和中间层在破坏中吸收了一部分能量, 使得复合材料中分子链主要存在的第一层破坏程度小。随着撞击过程的发展, 电子的自由运动降低, 逐渐被缺陷捕获或被抽出。电子运动过程见图 8。

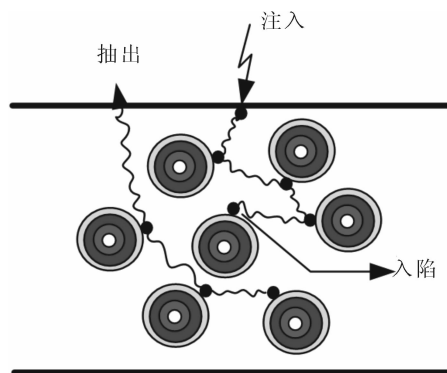


图 8 电子在 SiO_2/PI 膜中运动过程

Fig. 8 Process of electron motion in SiO_2/PI film

在电子频繁入陷和抽出的过程中有些电子将获得足够的动力, 不断的撞击分子使 PI 链裂解, 生成低分子产物和气体^[24]。气体的存在会在 PI/ SiO_2 膜中形成一个中空的放电通道, 气体放电得以建立, 导致局部放电在材料基体内部产生, 最终发展成为电树枝。电树枝进一步发展, 形成贯穿性的放电通道, 导致试样被击穿。电树枝见图 9。



图 9 电树枝

Fig. 9 Electrical tree

4 结论

文中制备了不同 SiO_2 纳米粒子体积分数的 PI/ SiO_2 薄膜, 利用 SEM 镜得到不同 SiO_2 体积分数下 PI 薄膜的表面形貌, 评估了复合薄膜耐方波脉冲电压性能, 有如下结论:

1) 复合材料的耐压强度随着 SiO_2 纳米粒子的体积分数增加先上升后下降, 耐电晕强度随着 SiO_2 纳米粒子体积分数的增加而增强。

2) 在 SiO_2 粒子体积分数比较低时, 不容易产生团聚。随着纳米粒子体积分数的增加, 纳米粒子密度增加, 会发生强烈的二次团聚。团聚会降低复合

材料的绝缘性能。

3)弥散的纳米粒子会在试样中产生大量的有机—无机界面,这些界面会捕获大量的电荷导致材料电场畸变,发生局部放电,降低复合材料的耐压性能。

4) SiO_2 纳米粒子属于无机粒子,掺杂会增加PI的表面电导率以及扩散温度的能力。有机—无机界面形成的缺陷所捕获的空间电荷可以减小电子自由行程,阻止电子对于PI基体的进一步破坏。

5) SiO_2 纳米粒子的掺入会和PI分子形成大量复合3层结构。这种3层结构可以提高PI膜的绝缘性能。

参考文献:

- [1] AHMED T, NISHIDA K, NAKAOKA M. Advanced control of PWM converter with variable-speed induction generator[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42 (4): 934-945.
- [2] WHEELER J. Effects of converter pulses on the electrical insulation in low and medium voltage motors[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation Magazine, 2005, 21 (2):22-29.
- [3] FABIANI D, MONTANARI G C, CONTIN A. Aging acceleration of insulating materials for electrical machine windings supplied by PWM in the presence and in the absence of partial discharges[C]//Proceedings of the 2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics. Eindhoven, Netherlands: IEEE, 2001:283-286.
- [4] KAUFHOLD M, ANINGER H, BERTH M, et al. Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low-voltage induction motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(2):396-402.
- [5] 乐波, 李俭. 用最大放电量增加率评定定子绝缘老化状态[J]. 高电压技术, 2001, 27(1):1-3.
YUE Bo, LI Jian. Study on the evaluation of aging condition of stator insulation based on the increasing rate of maximum PD quantity[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27 (1):1-3.
- [6] 张晓虹, 张亮, 乐波, 等. 基于局部放电的矩特征分析大电机绝缘的老化[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (5):94-98.
ZHANG Xiaohong, ZHANG Liang, YUE Bo, et al. Analysis on aging condition of stator winding insulation of generator based on the moment characteristics of partial discharge [J]. Proceeding of the CSEE, 2002, 22(5):94-98.
- [7] 李敏, 张佐光, 仲伟虹, 等. 聚酰亚胺树脂研究与应用进展[J]. 复合材料学报, 2000, 17(4):48-53.
LI Min, ZHANG Zuoguang, ZHONG Weihong, et al. Progress in research and application of polyimide resin[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(4):48-53.
- [8] JIONG H. Characterization of polyimide gels crosslinked with hexamethylene di-isocyanate[J]. Polymer, 2000 (4): 4793-4802.
- [9] LEWIS T J. Nanometric dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5):812-825.
- [10] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [11] YIN W J. Failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(6):18-23.
- [12] 佟来生, 吴广宁, 温凤香. 变频牵引电机端子过电压产生原理及影响因素[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5):673-676.
TONG Laisheng, WU Guangning, WEN Fengxiang. Mechanism and influencing factors of over voltage on inverter fed traction motor terminal[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(5):673-676.
- [13] FARAHANI M, BORSI H, GOCKENBACH E, et al. Partial discharge and dissipation factor behavior of model insulating systems for high voltage rotating machines under different stresses[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(5):5-19.
- [14] HAYAKAWA N, OKUBO H. Partial discharge characteristics of inverter-fed motor coil samples under AC and surge voltage conditions[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(1):5-10.
- [15] PALONIEMI P. Isothermal differential calorimetry as a means to measure insulation aging rate down to the operating temperatures[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1972, EI-7(3):126-132.
- [16] YOUNG L. Temperature rise during formation of anodic oxide films[J]. Transactions of the Faraday Society, 1957, 51(2): 229-234.
- [17] TANAKA T, GREENWOOD A. Effects of charge injection and extraction on tree initiation in polyethylene[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, 97 (5):1749-1759.
- [18] 王霞, 吴超一, 何华琴, 等. 茂金属聚乙烯改性低密度聚乙烯中空间电荷的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7):158-162.
WANG Xia, WU Chaoyi, HE Huaqin, et al. Study on mechanism of space charge in low density polyethylene modified by metallocene catalyzed polyethylene[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26 (7):158-162.
- [19] 周凯, 吴广宁, 邓桃, 等. 纳米复合绝缘材料的热刺激电流测试研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(18): 76-82.

(下转第85页)

- IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(2):328-333.
- [12] OKABE S, KANEKO S, YOSHIMURA M, et al. Partial discharge diagnosis method using electromagnetic wave mode transformation in gas insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(3):702-709.
- [13] SHIUE Guanghua, GUO Weida, LIN Chienmin, et al. Noise reduction using compensation capacitance for bend discontinuities of differential transmission lines[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2006, 29(3):560-569.
- [14] BAHARAK M I, RAMAHI O M. Wideband circuit model for planar EBG structures[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2010, 33(1):169-179.
- [15] HILL A, TRIPATHI V K. Analysis and modeling of coupled right angle microstrip bend discontinuities[C]//IEEE MTT-S International Conference on Microwave Symposium Digest. Long Beach, CA, USA:IEEE, 1989:1143-1146.
- [16] SHU Yinbiao, CHEN Weijiang, LI Zhibing, et al. Experimental research on very-fast transient overvoltage in 110 kV gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1):458-466.
- [17] BOGGS S A, CHU F Y, FUJIMOTO N, et al. Disconnect switch induced transients and trapped charge in gas-insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power App. Syst., 1982, PAS-101(10):3593-3602.
- [18] MEPELINK J, DIEDERICH K J, FESER K, et al. Very fast transients in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1):223-233.
- [19] HOSHINO T, MARUYAMA S, SAKAKIBARA T. Simulation of propagating electromagnetic wave due to partial discharge in GIS using FDTD[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1):153-159.
- [20] ORLANDI A, CLAYTON R. FDTD analysis of lossy, multi-conductor transmission lines terminated in arbitrary loads[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1996, 38(3):388-399.

金银燮(1969—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统的电磁兼容、电机与电器电磁场分析及节能等研究工作。

(上接第 78 页)

- ZHOU Kai, WU Guangning, DENG Tao, et al. The measurement of TSC in nano composite insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(18):76-82.
- [20] 周力任, 吴广宁, 高波, 等. 聚酰亚胺薄膜中电荷运输机理和空间电荷特性[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12):6-11.
- ZHOU Liren, WU Guangning, GAO Bo, et al. Charge transport mechanism and space charge characteristic in polyimide film[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12):6-11.
- [21] CARPI F. Dielectric elastomer cylindrical actuators: Electromechanics modeling and experimental evaluation[J]. Master. Sci. Engi. C, 2004(24):555-562.
- [22] TANAKA T, KOZAKO M, FUSE N, et al. Proposal of a multi-core model for polymer nanocomposite dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(4):669-681.
- [23] 郭洁琳, 张逸凡, 孙强, 等. GIS 用微纳米 Al_2O_3 /环氧树脂复合材料制备及性能研究[C]//第十四届全国工程电介质学术会议论文集.[S.L.]:IEEE, 2013:101-105.
- GUO Jielin, ZHANG Yifan, SUN Qiang, et al. Analysis of production and properties of micro and nano- Al_2O_3 /epoxy resin composites for GIS[C]//Proceedings of the 14th National Conference on Engineering Dielectrics.[S.L.]:IEEE, 2013:101-105.
- [24] 罗杨, 吴广宁, 刘继午, 等. 表面放电对聚酰亚胺薄膜材料的电气损伤特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25):187-195.
- LUO Yang, WU Guangning, LIU Jiwu, et al. Electrical damage characteristics of polyimide film caused by surface discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25):187-195.

刘洋(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事方波脉冲条件下局部放电特性研究(通信作者)。

吴广宁(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高压电气设备的教学与研究工作。