

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.07.002

方波脉冲下聚酰亚胺绝缘破坏机理研究进展

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: 变频电机广泛应用于电力牵引以及风力发电。变频器输出的一系列方波脉冲电压有可能导致变频电机绝缘材料过早失效。方波条件下绝缘材料破坏过程、绝缘材料性能的改善成为研究热点。为此,综合国内外研究成果,从局部放电、空间电荷两个方面论述了聚酰亚胺(PI)绝缘破坏的原因,采用扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)观察了PI薄膜破坏的微观形貌,并解释了纳米粒子对PI绝缘性能影响机理。最后从目前研究成果出发,介绍了用纳米粒子改善绝缘材料性能、优化电磁线绝缘结构等延长变频电机绝缘寿命的措施。

关键词: 变频电机; 聚酰亚胺; 绝缘破坏; 局部放电; 空间电荷

Progress of Research into the Polyimide Insulation Failure Mechanism Under Square Impulse Stress

LIU Yang, WU Guangning, GAO Guoqiang, ZHANG Xueqin

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

Abstract: Inverter-fed motor is widely used in electric traction and wind power. A series of pulse voltage that export from the inverter can lead to premature aging of insulation materials of inverter-fed motor. The research about destruction process of the insulation material under square wave has become a hotspot as well as the research of the improvement of insulation materials. Therefore, this paper has synthesized the domestic and overseas research achievements, and expounded the reasons that cause the insulation destruction of the PI in the angle of partial discharge and space charge. This paper has also observed the microstructure of the damage on polyimide film with SEM, and explained the mechanism that how nanoparticles effect the insulation performance of PI. Finally, based on the current research results, this paper introduces the measures that can extend the life of insulation in inverter-fed motor, which are using nanoparticles to improve the insulation performance, and optimizing the insulation structure of electromagnetic wire.

Key words: inverter-fed motor; polyimide; insulation damage; partial discharge; space charge

0 引言

近年来,中国高速铁路建设成效显著,2010年沪杭和京沪高速铁路分别创造了416.6 km/h和486.1 km/h的世界试运营速度,中国高速铁路正在向超高速(时速500 km以上)方向发展,超高速动车组的研制已列入国家计划。高速动车组普遍采用变频调速交流传动系统,变频调速牵引电机是高速动

车组的九大关键技术之一,其绝缘系统工作在高频陡脉冲电压环境中^[1-3],电机绕组端部的过电压以及运行过程中电磁线所受到的短时过冲的温度场使现有绝缘系统难以满足实际要求。文中针对变频电机匝间绝缘材料PI薄膜破坏严重的情况,综合了国内外在脉冲波条件下绝缘材料破坏的研究成果,阐述了PI绝缘的破坏过程,分析了纳米粒子对于PI薄膜绝缘性能的影响,为进一步改善变频电机绝缘性能提供了支持。

收稿日期:2016-01-19; 修回日期:2016-03-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51177136)。

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

1 严酷的电气环境

目前 PI 薄膜广泛应用于变频电机电磁线的匝间绝缘,采用三分之二缠绕方式绕包,绕包方式见图 1。

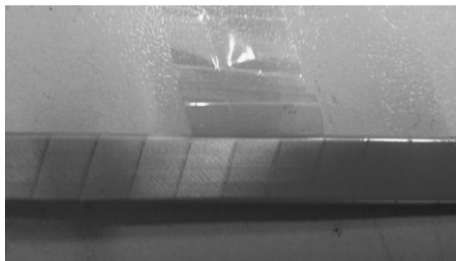


图 1 变频电机电磁线绕包方式

Fig. 1 Winding way of electromagnetic wire in inverter-fed motor

前期研究表明: PWM(脉冲宽度调制)高电压作用下,电机绕组端部过电压形成的场强可能超过击穿场强,引起绝缘破坏^[3-6]。文[7]中通过仿真与试验,研究了电缆长度、电机额定功率与开关速度对脉冲过电压的影响,发现电机的额定功率越大,及冲过电压幅值越小。通过缩短电机与变流器之间的连接电缆及加强绕组端部绝缘,该问题已得到较好解决;文[8-14]中认为电场幅值的增加以及电压上升时间的缩短都将加强电荷的注入,导致介质内部电场畸变,促进电机匝间局部放电,其所导致的热、辐射、机械和化学能使得绝缘系统裂化,研究表明,采用耐局部放电的纳米电介质能有效提高变频电机的绝缘性能;文[15-17]中指出表面层无机物的高热导率和保护作用是材料耐电晕的主要原因;文[18-19]中认为纳米颗粒与高分子聚合物的“相互作用区域”对纳米电介质的电荷输运特性起了关键作用,能有效抑制空间电荷积聚,防止电场畸变;文[20]中提出了无机纳米颗粒多壳模型来解释其耐电晕性能。

近年来,文[21-27]中通过研究发现,脉冲方波下载流子在不断入陷与脱陷时发出的能量是导致绝缘材料分子键断裂的主要因素。综上所述,局部放电、空间电荷是导致匝间绝缘老化的主要原因。

2 局部放电破坏机理

2.1 方波条件下局部放电测量以及信号提取

文[28]中指出绝缘材料缺陷的局部放电是导致变频电机绝缘破坏的主要原因,局部放电是从电磁线匝间以及薄膜间隙开始发生的,放电大小与施加电压的大小和频率有关;文[29]中指出电晕放电使得绝缘材料发生降解,产生粗糙的“界面”会进一步导致局部放电的发生,最终使得绝缘材料从外部到

内部发生裂化。

与工频测试局部放电不同,高频方波脉冲电源具有极陡上升沿,传感器耦合得到的局部放电信号有大量的低频干扰成分。文[30]中模拟了电磁线匝间绝缘放电系统,并且给出了放电数学模型,见图2。

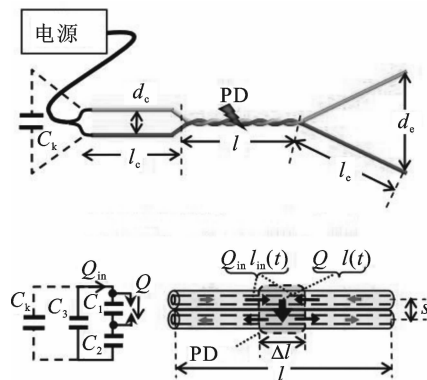


图 2 局部放电信号

Fig. 2 Partial discharge signals

设 C_1 为放电气隙的电容值, C_0 为单位长度下无局部放电的电位电容值, Q_a 为放电过程中的真实放电,根据经典气隙局部放电理论可得:

$$t_0 = \frac{T_h}{2\sqrt{\ln 2}} = 0.601 T_h; \quad (1)$$

$$Q_{in} = \frac{l - \Delta l}{l} Q_a. \quad (2)$$

式(1)、(2)中, Q_{in} 指电磁线两端向放电区域注入电荷。设 U_s 为电磁线两端电压值,可以计算视在放电电量 Q 为

$$Q = \frac{l \Delta l C_i C_0}{(l - \Delta l) C_0 + \Delta l C_i} U_s.$$

如果假定放电电流复合高斯波形^[31],可以进一步得到放电电流的表达式以及注入电流的表达式:

$$I(t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi} t_0} \exp \left[- \left(\frac{t}{t_0} \right)^2 \right]; \quad (3)$$

$$I_{in}(t) = \frac{Q_{in}}{\sqrt{\pi} t_0} \exp \left[- \left(\frac{t}{t_0} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

式(3)、(4)中, t_0 与半峰宽 T_h 的关系为 $t_0 = 0.601 T_h$ 。

为了采集局部放电信号,国内周凯试验了不同铁心材料对脉冲电压下的 PD 信号测量,自制的 ZnNi 铁心传感器下限截止频率较高,能够有效地滤除低频干扰^[32]。文[33]中设计一种套筒单极子天线传感器来采集高频下局部放电信号。罗杨利用柱板电极研究了 PI 表面放电,测试系统见图 3。

文[34]中通过采集方波脉冲下绝缘材料内部(气隙)局部放电的光信号来表征局部放电的强弱。光信号采集器为 PMT(R943-02,响应速率为 160~930 nm)。实验框图见图 4。

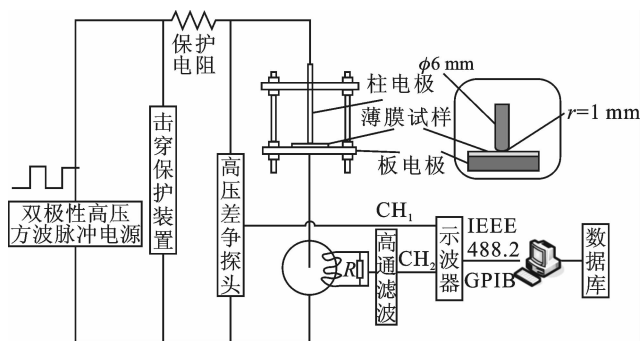


图3 电晕放电试验框图

Fig. 3 Schematic diagram of corona discharge

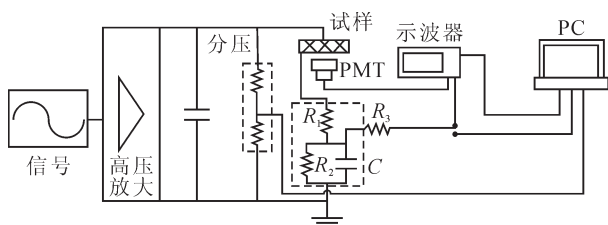


图4 光信号表征局部放电试验框图

Fig. 4 Schematic diagram of signal light under the partial discharge

2.2 波形因素对局部放电的影响

方波条件下波形因素对PI膜局部放电影响较大。文[35]中比较了纯PI薄膜与耐电晕纳米PI薄膜在不同脉冲电压频率与不同上升沿时间作用的平均放电量与放电次数,实验结果见图5、6。

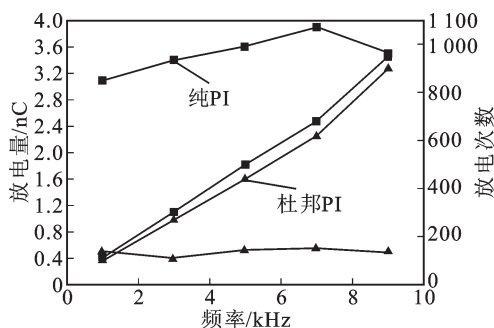


图5 不同频率下局部放电特性

Fig. 5 Partial discharge characteristics under different impulse frequency

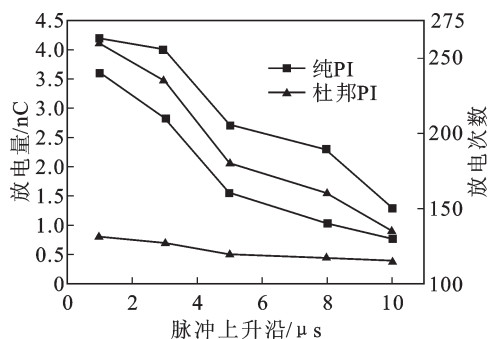


图6 不同脉冲上升沿时间局部放电特性

Fig. 6 Partial discharge characteristics under different rise line

随着脉冲电压频率的增加,纳米PI的放电量远小于纯PI,是因为纳米粒子属于无机粒子,其掺入增加了PI的表面电导率,使得电荷不易在复合材料表面与内部积累,导致极性翻转时电场叠加效应减弱,放电量减小^[35]。放电主要发生在脉冲的上升沿和下降沿,频率的增加导致单位时间内上升沿和下降沿数目增加,放电次数增加。

随着上升沿时间的增加,复合材料的放电次数与平均放电量都减小,主要是因为上升沿时间变长使得电荷驻留效应减小,导致平均放电量减小。上升沿时间的增加也降低了残余电场的积累,导致下一次放电时初始电子的产生概率降低,放电次数降低^[35-36]。

2.3 局部放电下PI膜微观形貌

PI薄膜具有耐高温、耐辐射以及优秀的介电性能,在电热化学作用和物理作用下微观结构发生明显变化。哈尔滨理工大学雷清泉、武汉大学熊锐利用傅里叶变换红外光谱研究了PI薄膜在老化过程中分子结构的变化^[37]。西南交通大学吴广宁、罗杨研究了表面放电对PI薄膜电气损伤机理,并利用SEM观察了PI薄膜降解过程^[13]。

表面放电的试验电压为峰—峰值2 000 V,频率为1 kHz的脉冲波^[33]。试样为杜邦耐电晕PI薄膜。其薄膜具有3层结构,外两层添加了纳米粒子。所用电极柱板电极,电极边缘曲率半径较大,局部放电主要发生在电极边缘气隙处^[32]。试验温度为80℃,老化后杜邦耐电晕PI横截面SEM镜见图7^[38]。

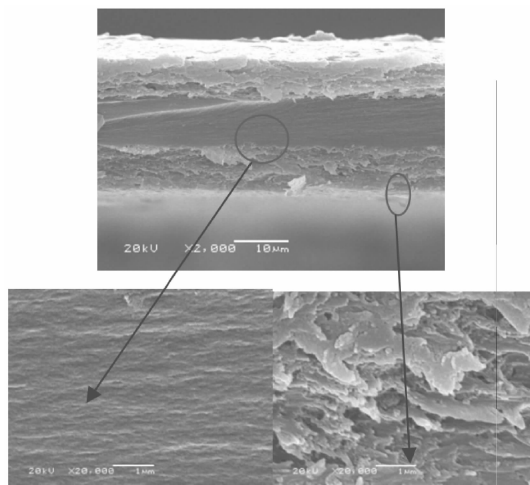


图7 击穿试样横截面形貌图

Fig. 7 Section micrographs of breakdown samples

老化击穿后,杜邦耐电晕PI薄膜的3层结构微观形貌发生改变,表面的纳米复合层变得比较粗糙且发生裂解,中间PI基体层变得疏松。试样表面有明显的侵蚀痕迹,有机物分子降解^[13,37]。老化击穿点

SEM见图 8^[38]。

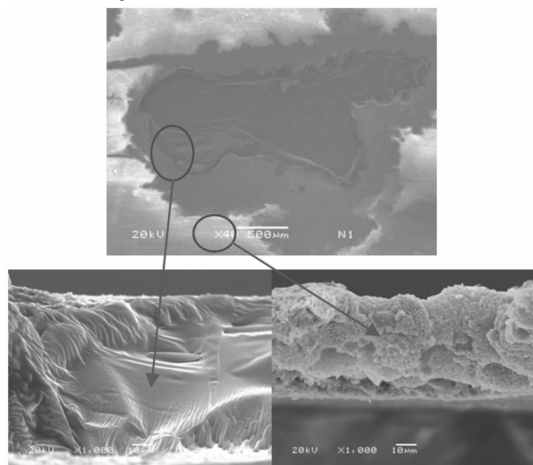


图 8 击穿试样击穿点形貌图

Fig. 8 Yielding point of breakdown samples

左下角是击穿点 PI 基体的微观形貌,形状疏松并且呈絮状。右下角是击穿点附近纳米 PI 纳米层形貌图,可以看出表面有大量的纳米粒子堆积,基体内部有网状气孔出现^[38]。

SEM 分析可知,局部放电对 PI 的侵蚀破坏机理主要过程是:绝缘材料在制作过程中不可避免地会引入缺陷,这些缺陷包括微小的气隙、杂质等^[37]。在高频方波脉冲下由于空气的介电常数较小,且气隙或缺陷直径很小,所以缺陷位置承受的电场较大,容易发生局部放电^[33]。放电过程中产生的热以及紫外辐射会导致基体发生降解,产生气体以及小分子物质,这些物质会导致局部放电的强度进一步增加,形成放电通道,导致基体发生电树枝击穿,电树枝击穿过程见图 9^[35]。



图 9 电树枝

Fig. 9 Electrical tree

3 空间电荷对 PI 膜绝缘性能影响

3.1 空间电荷的测量与积累

高频方波脉冲下,电荷的迟滞和积累效应会增强。变频电机绝缘膜内存在的缺陷会捕捉电荷,使得绝缘介质内部场强发生畸变,局部放电增强,放电导致分子基体进一步破坏从而产生更多的缺陷,加剧了空间电荷的积累,最终导致变频电机绝缘失效^[32-33]。目前,空间电荷对绝缘的影响最有代表性的理论有电荷的注入和抽出理论、热电子理论等。日

本武藏工业大学 Takada 利用电声脉冲法测试技术成果测试了绝缘材料内部空间电荷的分布情况。文[39]中利用热刺激电流法研究了 PI 薄膜中的陷阱分布以及陷阱深度,此方法在测量老化后绝缘材料陷阱比较灵敏;文[40]中对脉冲电压下空间电荷和局部放电关系进行了研究,通过对不同材料退极化电流的测试,发现在脉冲电压下电荷的运动能力以及陷阱的能级对局部放电的平均放电量有较大影响,电荷的迟滞所形成的反向电场会使得局部放电加剧。

变频电机工作在方波脉冲条件下,其空间电荷作用机理十分复杂。文[41]中研究了一种测量 PI 薄膜空间电荷的 PEA 装置,见图 10。

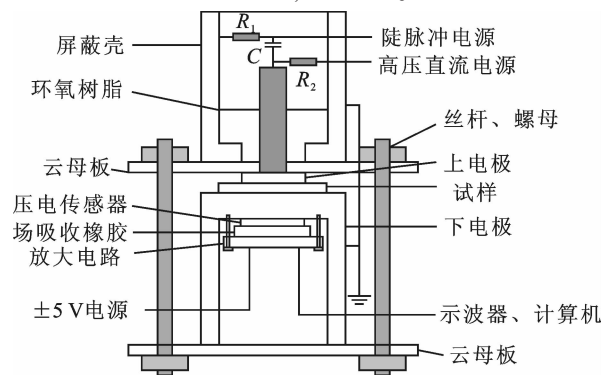


图 10 PEA 测量装置

Fig. 10 PEA testing system

文[42]中比较了耐电晕 PI 薄膜和普通 PI 薄膜空间电荷积累阈值,并且研究了不同老化时间(试验温度为 180 °C,老化电压峰峰值 5 kV,频率 1 kHz)下空间电荷在纳米 PI 薄膜中积累程度,见图 11。

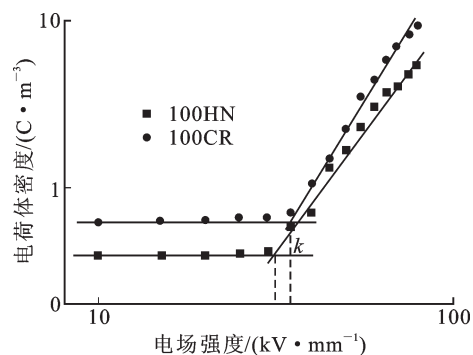


图 11 空间电荷积累阈值场强

Fig. 11 Threshold field of space charge accumulation

空间电荷在纯 PI 薄膜积累场强低于在纳米 PI 薄膜中的积累场强^[42],而且电荷在纳米 PI 薄膜中积累速率较快。这是由于当载流子从一种材料注入到另外一种材料时,势垒功函数决定了载流子的注入难易程度^[44]。因为纳米 PI 薄膜为两相材料,其介电常数位于纯 PI 膜和纳米 PI 膜之间,势垒功函数值比较小,电荷积累速率较快。

图12为不同老化时间下空间电荷分布(试样老化环境:电压峰值5 kV、电压频率1 kHz、温度为180 ℃)^[14,42]。可知薄膜不同位置处的空间电荷密度随着老化时间的增长而逐渐增大,且空间电荷出现的位置有向薄膜内部发展的趋势。主要原因是老化的时间越长,PI基体破坏越严重,导致基体中的陷阱数量增多,使得基体内部积累电荷的数量也增多^[14]。

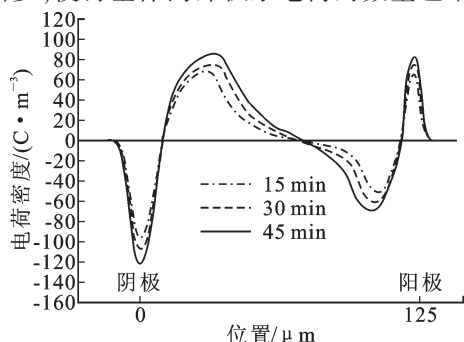


图12 不同老化时间下空间电荷分布

Fig. 12 Space charge distribution under various ageing time

3.2 空间电荷对PI作用机理

空间电荷对聚合物破坏有3种作用过程:一种是直接与薄膜高分子链相互作用,可能使薄膜高分子链断裂或者降解,生成小分子物质与自由基,增大薄膜内部的陷阱密度;第2种是与异性电荷复合,并在复合过程中释放出能量;第3种是被薄膜内部的陷阱所捕获,形成空间电荷,电荷在入陷的同时释放出能量^[14,42]。被陷阱捕获的电荷如果受到外作用的激励,如吸收了电荷复合或入陷时释放的能量,或者受到其他电荷的撞击作用等,电荷将脱离陷阱的束缚,成为自由载流子,脱陷过程中也可能对薄膜高分子链造成破坏。而生成的自由基以及电子脱陷、入陷所产生的紫外辐射对聚合物的降解有催化作用,加上氧气的参与,从而导致了更大范围的降解,形成了低密度区^[43]。低密度区载流子自由行程大,电子易发生碰撞电离,其释放的能量部分转化为光,部分能量使更多的聚合物分子断裂。随着老化时间的增加,最终形成贯穿的放电通道,聚合物被击穿。

当PI膜添加纳米颗粒以后,聚合物的绝缘性能有了提高,空间电荷对聚合物的破坏得到了抑制^[44]。纳米颗粒对空间电荷的影响主要有两种模型解释。

3.2.1 多核模型

Tanaka提出的纳米粒子多核模型指出,纳米粒子和高分子基体作用结构可以分为3层,见图13。最里层是成键层,和PI薄膜互相组合形成键能较大的氢键或者离子键^[44]。SiO₂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^[45]。

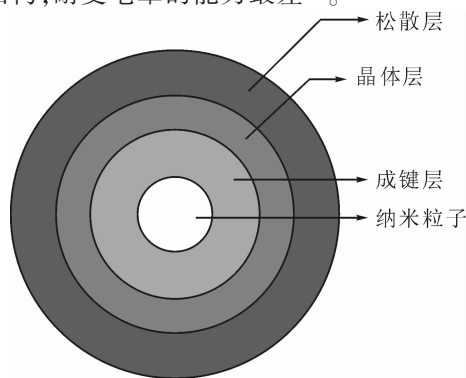


图13 复合3层结构

Fig. 13 Composite three-layer structure

纳米粒子的加入会使得复合材料结构变为两相,且纳米粒子和PI分子复合后增加了PI分子末端官能团的键能,提高了复合材料的稳定性^[46]。由于放电时间比较长,空间电荷运动路径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地遭遇复合结构,撞击过程从外层向内层发展。外层和中间层在破坏中吸收了电子的一部分能量,使得复合材料中分子链主要存在的第一层受破坏程度小。随着撞击过程的发展,电子的能量降低,逐渐被缺陷捕获或被抽出。电子运动过程见图14。

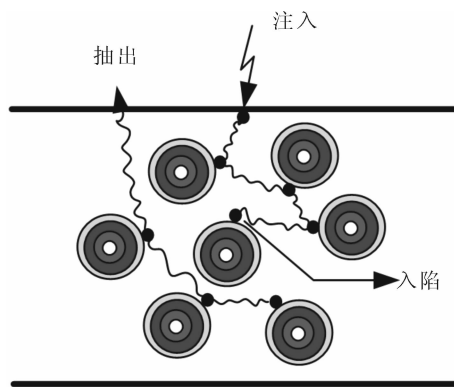


图14 电子在纳米PI薄膜中运动过程

Fig. 14 Process of electron motion in nano polyimide film

3.2.2 陷阱模型

文[47]中认为纳米的掺入降低了复合材料局部放电的能量。文[48]中通过添加纳米粒子抑制绝缘材料中空间电荷的积聚。吴广宁等人认为纳米粒子的掺入增加了复合材料浅陷阱的数量,浅陷阱捕捉电荷形成空间电荷,这对内部场强起到畸变作用^[38]。以耐电晕PI薄膜为例,其横断面SEM见图15。

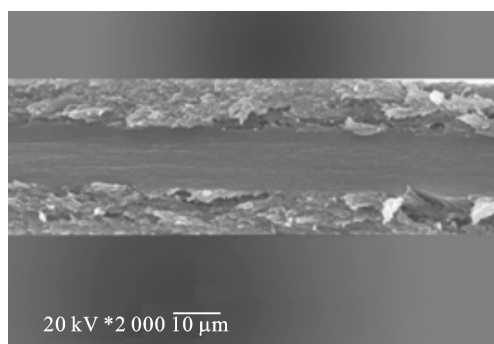


图 15 耐电晕 PI 薄膜横截面 SEM 图

Fig. 15 SEM image of corona resistant polyimide film

可以看出纳米粒子掺入在 PI 基体最外层形成了许多晶体状的复合材料, 其中含有大量的陷阱, 这里称为浅陷阱。在高频脉冲下, 聚合物外层的陷阱为捕捉大量的空间电荷, 阻止了电荷向基体内的运动, 防止聚合物内部受到空间电荷的破坏, 提高了绝缘性能^[49-50]。

4 PI 降解过程

PI 分子是以共价键链接的芳香族线性结构, 其复合结构单元见图 16。

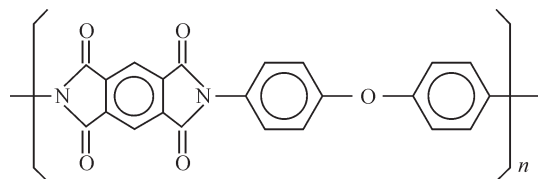


图 16 复合结构单元

Fig. 16 Composite structure unit

将纯 PI 薄膜分别老化 1、3、5 h 后进行 FTIR 分析^[51], 见图 17。在老化 1 h 后, 代表分子团内不同键的吸收峰均有减弱, 但未出现新峰; 老化 3 h 后代表酰亚胺环的 1 376、1 112、723、1 776、红外吸收峰不断减弱^[52]。1 112 峰消失与 1 240 峰消失表明 C-N-C 与 C-O-C 发生断裂。新生成的峰与断裂后生成的 C-O 键和 C-H 键有关^[53]。老化 5 h 后, 吸收峰进一步减弱, 新的吸收峰加强。

由于电气环境恶劣, 放电产生的能量使得聚合物裂解生成自由基。C-H 以及 C-O-C 断裂使得聚合度降低, 生成的小分子基体会在氧气条件下生成羧酸、酮类、醛类有机物以及 CO、CO₂、H₂O 气体等。最终聚合物化学结构被破坏^[53]。

5 结论

变频电机工作在高频方波脉冲电压下, 其严酷的电气环境导致电机中的绝缘材料过早老化而失

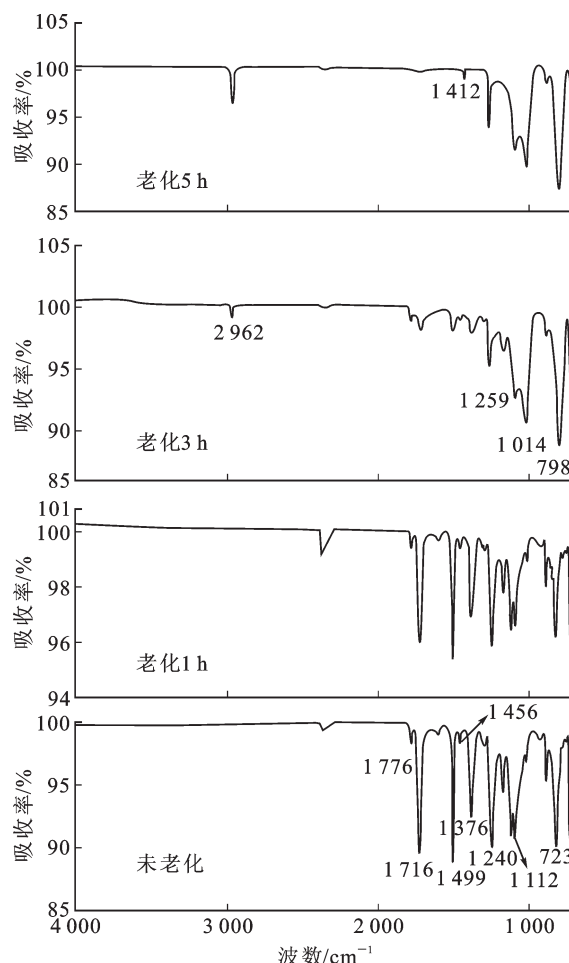


图 17 FTIR 测试图

Fig. 17 Testing of FTIR

效。纳米材料改性 PI 薄膜是改善变频电机匝间绝缘的有效手段。文中通过对国内外研究成果的总结, 结论如下:

1) 材料内部的局部放电以及空间电荷积累引起的局部电场畸变是导致 PI 薄膜绝缘失效的主要原因。放电过程中产生的热量促进了绝缘老化失效。

2) 与工频电压不同的是, 在双极性高频方波脉冲电压下, 电子入陷与脱陷对于分子链的撞击以及所释放的能量会导致 PI 基体加速分解。

3) PI 分子在方波脉冲下损伤严重, 电应力下化学结构发生改变, 生成大量自由基以及气体。

目前研究主要停留在脉冲方波对绝缘材料破坏机理研究。进一步的研究可以从以下方向开展:

1) 制备不同纳米颗粒成分、形状及含量的复合电介质绝缘材料试样, 分析复合电介质的微观结构特性对宏观电、热性能(电性能及热导率、耐热指数等热性能)的影响;

2) 探寻最佳成分比例参数以制备具有优异电—热等综合性能的纳米电介质;

3)采用不同热导率及耐电晕性能的复合电介质按不同绕包方式研制电磁线多种绝缘结构,分析其热传导机制和耐放电特性等,并探索能满足超高速动车组运行工况的新型绝缘系统。

参考文献:

- [1] WANG Peng, CAVALLINI A, MONTANARI G C, et al. Effect of rise time on PD pulse features under repetitive square wave voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(1): 245-254.
- [2] WANG Peng, WU Guangning, LUO Yang, et al. Effect of repetitive square voltage frequency on partial discharge features[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(6): 1313-1321.
- [3] PETRARCA C, MAFFUCCI A, TUCCI V, et al. Analysis of the voltage distribution in a motor stator winding subjected to steep-fronted surge voltages by means of a multiconductor lossy transmission line model[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(1): 7-17.
- [4] YIN W J. Failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(6): 18-23.
- [5] YIN Weijun. Dielectric properties of an improved magnet wire for inverter-fed motors[J]. Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(4): 17-23.
- [6] KAUFHOLD M, BORNER G, EBERHARDT M, et al. Failure mechanism of the interturn insulation of low voltage electric machines fed by pulse-controlled inverters[J]. Electrical Insulation Magazine, 1996, 12(5): 9-16.
- [7] MOREIRA A F, LIPO T A, VENKATARAMANAN G, et al. High-frequency modeling for cable and induction motor overvoltage studies in long cable drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(5): 1297-1206.
- [8] CAVALLINI A, LINDELL E, MONTANARI G C, et al. Off-line PD testing of converter-fed wire-wound motors: When IEC TS 60034-18-41 May fail[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(5): 1385-1395.
- [9] FABIANI D, CAVALLINI A, MONTANARI G C. A UHF technique for advanced PD measurements on inverter-fed motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2546-2556.
- [10] HAQ S U, JAYARAM S H, CHERNEY E A. Insulation problems in medium-voltage stator coils under fast repetitive voltage pulses[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(4): 1004-1012.
- [11] HAQ S U, JAYARAM S H, CHERNEY E A, et al. Space charge analysis in enamelled wires by using thermally stimulated depolarization current(TSDC)[J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67(1): 12-17.
- [12] HAYAKAWA N, MORIKAWA M, OKUBO H. Partial discharge inception and propagation characteristics of magnet wire for inverter-fed motor under surge voltage application[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 39-45.
- [13] WU G N, WU J D, ZHOU L R, et al. Microscopic view of the aging mechanism of polyimide film under pulse voltage in presence of partial discharge[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(1): 125-132.
- [14] ZHOU L R, WU G N, GAO B, et al. Study on charge transport mechanism and space charge characteristics of polyimide films[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(4): 1143-1149.
- [15] ZHANG P H, FAN Y, LEI Q Q, et al. Conduction current characteristics and carrier mobility of both original and corona-resistant polyimide film[J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22(5): 1253-1255.
- [16] ZHANG M Y, ZENG S J, LEI Q Q. Dielectric and conduction properties of polyimide/silica nano-hybrid films[J]. Polymer Composites, 2008, 29(6): 617-622.
- [17] 雷清泉, 王 暄, 何丽娟, 等. 工程电介质理论的回顾-思考及对策[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 1-4.
LEI Qingquan, WANG Xuan, HE Lijuan, et al. Review, thinking and countermeasure about engineering dielectric theory[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 1-4.
- [18] LEWIS T J. Interfaces are the dominant feature of dielectrics at the nanometric level[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(5): 739-753.
- [19] ROY M, NELSON J K. Polymer nanocomposite dielectrics-the role of the interface[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(6): 1273-1273.
- [20] TANAKA T. Dielectric nanocomposites with insulating properties[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 914-928.
- [21] KIKUCHI Y, MURATA T, UOZUMI Y, et al. Effects of ambient humidity and temperature on partial discharge characteristics of conventional and nanocomposite enameled magnet wires[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1617-1625.
- [22] FABIANI D, MONTANARI G C, LAURENT C, et al. HVDC cable design and space charge accumulation. Part 3: Effect of temperature gradient[J]. Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(2): 5-14.
- [23] CHAO Tang, CHEN G, FU M, et al. Space charge behavior in multi-layer oil-paper insulation under different DC voltages and temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 775-784.
- [24] CHONG Y L, CHEN G, HO Y F F. Temperature effect on space charge dynamics in XLPE insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1):

- 65-76.
- [25] 郑飞虎, 张治文, 宫斌, 等. 低密度聚乙烯中空间电荷包的形成与迁移过程[J]. 中国科学 E 辑: 工程科学材料科学, 2005, 35(7): 701-707.
- ZHENG Feihu, ZHANG Yewen, GONG Bin, et al. Formation and migration process of space charge packet in low density polyethylene[J]. Science in China Ser. E: Engineering Materials Science, 2005, 35(7): 701-707.
- [26] YU Zheng, WANG Qiaohua, YI Yin, et al. Temperature effect on space charge dynamics in LDPE/MgO nanocomposite under DC stress[C]//2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD). Germany: IEEE, 2010: 1-4.
- [27] SCHIFANI R, CANDELA R, ROMANO P. On PD mechanisms at high temperature in voids included in an epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(4): 589-597.
- [28] 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.
- [29] BEECKMAN R J, HARBER J J, WENTZ S J. Studies on magnet wire degradation with inverter driven motors[C]//Proceedings of Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference. New York: IEEE, 1997: 383-387.
- [30] SHIBUYA Y, MATSUMOTO S, KONNO T, et al. Electromagnetic waves from partial discharges in windings and their detection by patch antenna[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(6): 2013-2023.
- [31] SHIBUYA Y, MATSUMOTO S, TANAKA M, et al. Electromagnetic waves from partial discharges and their detection using patch antenna[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 862-871.
- [32] 周凯, 吴广宁, 何景彦, 等. 脉冲电压下局部放电信号的提取和统计[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(3): 319-324.
- ZHOU Kai, WU Guangning, HE Jingyan, et al. Extraction and counting of partial discharges under pulse voltage[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(3): 319-324.
- [33] 王鹏, 吴广宁, 罗杨, 等. 连续高压脉冲方波下局部放电测试系统设计[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 587-593.
- WANG Peng, WU Guangning, LUO Yang, et al. Design of partial discharge testing system under continuous square pulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 587-593.
- [34] WU Kai, PAN Cheng, MENG Yongpeng, et al. Study on the characteristics of partial discharges in voids under square voltage by detecting light emission intensity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1651-1657.
- [35] 曹开江, 吴广宁, 罗杨, 等. 高频脉冲下牵引电机绝缘的局部放电特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1376-1382.
- CAO Kaijiang, WU Guangning, LUO Yang, et al. Partial discharge characteristics of insulation used in inverter-fed traction motor under high frequency impulse[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1376-1382.
- [36] 王琼, 付文光, 杨波. 不同电压形式下油纸绝缘柱板模型局部放电的特征[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 183-190.
- WANG Qiong, FU Wenguang, YANG Bo. Features of partial discharge of plane plate model in oil paper insulation under different types of applied voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 183-190.
- [37] YANG Yang, YIN Di, XIONG Rui, et al. FTD and dielectric studies of electrical aging in polyimide under AC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(2): 574-581.
- [38] 罗杨, 吴广宁, 刘继午, 等. 表面放电对 PI 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): 187-193.
- LUO Yang, WU Guangning, LIU Jiwu, et al. Electrical damage characteristics of polyimide film caused by surface discharge[J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(25): 187-193.
- [39] HUDON C, AMYOT N, KANDEV N. Evidence of charge injection resulting from fast pulse operation of inverter drives[C]//1998 IEEE Annual Report-conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Atlanta: IEEE, 1998: 714-718.
- [40] FABIANI D, MONTANARI G C, CAVALLINI A, et al. Relation between space charge accumulation and partial discharge activity in enameled wires under PWM-like voltage waveforms[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(3): 393-405.
- [41] 刘君, 吴广宁, 周凯, 等. 基于电声脉冲法的空间电荷测量装置[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 607-612.
- LIU Jun, WU Guangning, ZHOU Kai, et al. Space charge measurement device based on PEA method[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 607-612.
- [42] 周力任, 吴广宁, 高波, 等. PI 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.
- [43] WU Guangning, CAO Kaijiang, LUO Yang, 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.
- [44] 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 Insula

- tion, 2005, 12(4): 669-681.
- [45] TANAKA T. Dielectric nanocomposites with insulating properties[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 914-928.
- [46] 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.
- [47] TANAKA T, OKAMOTO T, HOZUMI N, et al. Interfacial improvement of XLPE cable insulation at reduced thickness[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(3): 345-350.
- [48] TERASHIMA K, SUKUKI H, HARA M, et al. Research and development of plusmn: 250 kV DC XLPE cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 7-16.
- [49] WU G N, WU J, ZHOU L R, et al. Microscopic view of aging mechanism of polyimide film under pulse voltage in presence of partial discharge[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(1): 125-132.
- [50] 于润泽, 刘正英, 尹 波, 等. 纳米粒子的分散状态对聚丙烯结晶行为的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 22(5): 147-150.
- YU Runze, LIU Zhengying, YIN Bo, et al. Effect of nano- CaCO_3 particle dispersion on the crystallization behavior of PP[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2006, 22(5): 147-150.
- [51] LUO Yang, WU Guangning, LIU Jiwu, et al. Microscopic degradation mechanism of polyimide film caused by surface discharge under bipolar continuous square impulse voltage[J]. Chinese Physics B, 2014(2): 85.
- [52] 丁孟贤. 聚酰亚胺化学结构与性能的关系及材料[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- DING Mengxian. The relationship between chemical structure and properties of polyimide and materials[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [53] MORENO V M, GORUR R S. Impact of corona on the long-term performance of nonceramic insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(1): 80-95.
- 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。

(上接第9页)

neering, 2005, 31(4): 61-63.

安韵竹(1988—), 女, 博士, 讲师, 主要从事电力系统过电压、长间隙放电方面研究。

胡元潮(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事电力系统防雷与过电压防护、电磁材料等研究工作。

文习山(1962—), 男, 教授, 博导, 主要从事电力系统防雷与接地、绝缘检测、纳米新技术、长间隙放电等研究工作。

姜志鹏(1983—), 男, 工程师, 博士, 主要从事电力系统运行工作。

蓝 磊(1969—), 女, 教授, 博导, 主要从事电力系统防雷与过电压、绝缘计策、纳米新技术、长间隙放电等研究工作。

王 羽(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事电力系统防雷及过电压等研究工作。

鄂盛龙(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统防雷、外绝缘等研究工作。