

# 脉冲电压下聚酰亚胺空间电荷密度对电荷激发分子振动的影响

侯健健<sup>1</sup>, 陈晨<sup>1</sup>, 郭昊鑫<sup>2</sup>, 王婵娟<sup>1</sup>, 刘学民<sup>3</sup>, 何东欣<sup>2</sup>

(1. 国网山东省电力公司广饶县供电公司, 山东 东营 257300; 2. 山东大学 电气工程学院  
山东省特高压输变电技术与装备重点实验室, 山东 济南 250061;  
3. 国网山东省电力公司东营供电公司, 山东 东营 257000)

**摘要:** 脉冲电压下绝缘更易发生早期失效, 严重威胁电力电子器件及装备运行的稳定性。为探究脉冲电压下绝缘失效的微观机理, 本文探究了聚酰亚胺中空间电荷密度对脉冲边沿时刻电荷激发分子振动的影响, 并从频域的角度阐述了脉冲电压边沿时刻分子振动机理。结果表明: 在直流电压的作用下聚酰亚胺试样内部积聚大量异极性空间电荷, 导致分子振动波形极性发生反转; 在脉冲电压上升沿频谱中,  $5 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$  Hz 频段的电压分量对分子振动起主要作用。电荷激发分子振动会使得绝缘缺陷扩大, 并最终导致绝缘失效。

**关键词:** 脉冲电压; 聚酰亚胺; 空间电荷密度; 电荷激发分子振动

中图分类号: TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.08.011

## Effect of space charge density in polyimide on charge-excited molecular vibration under pulsed voltage

HOU Jianjian<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>, GUO Haoxin<sup>2</sup>, WANG Chanjuan<sup>1</sup>, LIU Xuemin<sup>3</sup>, HE Dongxin<sup>2</sup>

(1. State Grid Shandong Guangrao Power Supply Company, Dongying 257300, China;  
2. Shandong Provincial Key Laboratory of UHV Transmission Technology and Equipment, School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;  
3. State Grid Shandong Dongying Power Supply Company, Dongying 257000, China)

**Abstract:** Insulating materials are more prone to early failure under pulsed voltage, which seriously threatens the stability of power electronic devices and equipment. In order to explore the microscopic mechanism of insulation failure under pulsed voltage, the effect of space charge density in polyimide on the charge-excited molecular vibration at the pulse edge was explored in this paper, and the molecular vibration mechanism at the pulse voltage edge was expounded from the perspective of frequency domain. The results show that there is a large amount of heteropolar space charges accumulated inside the polyimide sample under DC voltage, which leads to the reversal of polarity of the molecular vibration waveform. In the frequency spectrum of pulse voltage rising edge, the voltage component in the frequency band of  $5 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$  Hz plays a major role in the molecular vibration. The charge-excited molecular vibration will expand the insulation defects and eventually lead to insulation failure.

**Key words:** pulsed voltage; polyimide; space charge density; charge-excited molecular vibration

## 0 引言

随着新能源发电并网、特高压和柔性直流输电、变频负荷以及电容器储能技术的不断发展, 电力系统在电源、电网、负荷、储能的各个方面都呈现出含高比例电力电子装备的特征<sup>[1-3]</sup>。因此, 提升电力电子装备的安全性对保障电力系统的安全稳定运行具有重要意义。

在电力电子技术中, 半导体开关器件的导通和关断会引起电压突变, 在器件本身、电力电子装备以及相连接的设备上产生高频、陡上升沿脉冲电场<sup>[4]</sup>, 可见电力电子装备长期处于脉冲电压的运行工况下。研究表明, 脉冲电压下绝缘更容易发生早期劣化<sup>[5-7]</sup>, 并且脉冲电压上升沿对电介质的绝缘特性有显著影响<sup>[8-10]</sup>。脉冲电压下的局部放电行为通常发生在上升沿和下降沿处, 并且随着脉冲边沿时间的减小, 放电后的残余电荷量增加, 放电初始电

子产生概率增加,致使放电次数增多<sup>[11]</sup>。此外,由于电荷的驻留效应会形成反向叠加电场,从而使得局部放电幅值明显增大<sup>[12]</sup>。随着脉冲电压上升时间的缩短,由电极注入电荷的能量增大,电荷在入陷和复合时释放的能量会增多,电树枝的起树概率和生长速度也会大幅增加<sup>[13-15]</sup>。

由此可见,脉冲电压下的空间电荷行为是导致绝缘发生劣化的关键影响因素。在脉冲电压的激励作用下,空间电荷发生入陷、脱陷、迁移等行为,在这些过程中伴随着能量的转移与释放,电荷与分子链发生碰撞,破坏绝缘材料的微观结构,导致绝缘劣化速度加快<sup>[16-18]</sup>。西南交通大学曹开江<sup>[19]</sup>、法国图卢兹大学J P BELLOMO等<sup>[20]</sup>、日本松江工业学校M FUKUMA等<sup>[21]</sup>对不同脉冲电压上升时间下的空间电荷积聚特性进行了探究,认为上升时间缩短会导致电荷密度增大,增加绝缘击穿概率。上述研究重点关注了脉冲电压下空间电荷的稳态积聚特性,对于脉冲上升沿和下降沿处电荷动态特性尚不明确。本课题组此前对脉冲边沿时刻聚酰亚胺中的空间电荷动态行为进行了探究,发现在脉冲电压的上升沿、下降沿前后绝缘内部空间电荷密度存在差异<sup>[21]</sup>,并且在纳秒脉冲电压上升沿和下降沿处存在电荷激发分子振动行为<sup>[22]</sup>。然而,对于空间电荷激发分子振动特性的探究仅处于初步探索阶段,相关特性及内在机理仍需进一步探究完善。

本课题组的初步工作<sup>[23]</sup>已经清楚地证明,陡脉冲电场会导致绝缘材料中的电荷激发分子发生振动并释放声波,可以对脉冲电场下空间电荷的行为进行检测。然而,在之前的实验中对聚酰亚胺试样施加的电压及场强比较低,并且加压时间很短,试样内部不会有大量空间电荷积累,因此振动波形主要由在外施脉冲电场的作用下靠近聚酰亚胺试样表面的极化电荷激发分子振动所产生。本文将扩展这项初步工作,对振动波形随试样内部空间电荷积累、衰减的变化情况进行探究,从而对电极向材料内部注入的空间电荷以及材料内部电离产生的空间电荷对振动波形的影响机制有一个更深的理解。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

本研究所采用的聚酰亚胺薄膜试样厚度为180  $\mu\text{m}$ ,长度、宽度均为5 cm。在实验之前,用经无水乙醇湿润过的无尘布对试样进行清理并烘干,以去除试样表面杂质。实验时,在聚酰亚胺薄膜试样上方

放置一个内径为4 cm、外径为10 cm的圆环型绝缘片,防止测试设备内部发生沿面闪络损坏实验设备,影响实验结果的准确性。

### 1.2 实验平台

实验平台示意图如图1所示,该系统主要由高压方波脉冲电源、高压直流电源、PEA测试脉冲电源、耦合电路、触发控制电路、电荷测试单元、示波器、计算机组成。实验过程中既要实现对方波脉冲电压上升沿和下降沿处电荷激发的分子振动信号进行测试,同时也要对相应时刻的空间电荷密度进行测量。分子振动信号的测试原理如文献[22]所述,通过触发控制电路检测方波脉冲边沿时刻PVDF压电传感器测得的电声信号。试样内部积累的空间电荷密度变化采用电声脉冲法进行测试。耦合电路由电阻、电容、高压整流硅堆等器件组成,通过耦合电路可以实现将方波脉冲电源、直流电源和PEA测试用脉冲电源进行连接,避免三路信号互相干扰。

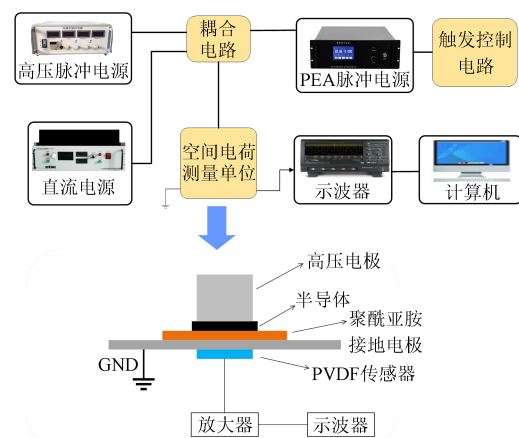


图1 实验平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental platform

### 1.3 实验方案

本课题组此前对脉冲边沿时刻电荷激发的分子振动特性进行测试时发现:在上升时间为50 ns时,1 kV直流叠加1 kV脉冲下分子振动最大幅值接近4 V,受放大器输出电压限制,当信号幅值大于4 V后示波器所测波形将发生失真<sup>[23]</sup>。本实验采用的测试系统与文献[23]为同一测试系统,为了避免发生波形失真影响测试结果的准确性,同时确保输出信号在设备承受范围内,防止损坏实验设备,本实验中采用施加频率为500 Hz、幅值为-1 kV、上升时间为50 ns、占空比为50%的方波脉冲电压。

研究表明只有当施加的电场达到某一阈值时,空间电荷才会大量在绝缘介质内部积聚<sup>[24-25]</sup>。然而,在该方波脉冲电压幅值下对应的电场强度仅为

5.5 kV/mm, 电场强度较低会导致空间电荷积累速度较慢。因此, 在电荷积累的过程中可以考虑采用一个具有较高场强的直流电压进行电荷积累, 之后再改为-1 kV的方波脉冲电压进行电荷激发分子振动特性的测试。西南交通大学周力任等<sup>[26]</sup>对普通型聚酰亚胺薄膜试样 100HN 和耐电晕型聚酰亚胺薄膜试样 100CR 的电荷积聚阈值场强进行了探究, 结果表明 100HN 与 100CR 两种类型聚酰亚胺薄膜对应的阈值场强分别为 31.5 kV/mm 和 35 kV/mm。在本实验中用到的试样为 180 μm 厚的普通型聚酰亚胺薄膜, 进行空间电荷积累时施加幅值为-7.2 kV 的直流电压, 对应场强为-40 kV/mm, 该场强远大于上述研究中测得的聚酰亚胺试样内部空间电荷积聚的阈值场强, 可用于进行空间电荷积累实验。

为了避免振动幅值超出放大器的输出范围以及防止设备损坏, 直流电压与脉冲电压不能同时加到空间电荷测量单元上, 当完成内部空间电荷积累后, 需要撤掉高场强的直流电压, 改为幅值为-1 kV、上升和下降时间为 50 ns、频率为 500 Hz 的脉冲电压进行分子振动信号测试。因此在进行空间电荷积累对振动波形的影响实验时, 基本步骤如下: ①施加直流电压加速电荷积聚; ②撤掉直流电压; ③改用脉冲测试振动波形。测试完成后施加直流继续使空间电荷积聚, 然后重复上述②③的操作。具体实验流程如图 2 所示。

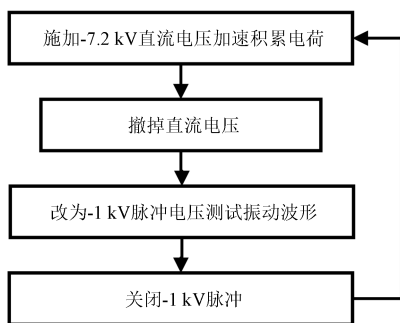


图2 空间电荷积聚对振动波形的影响实验流程图

Fig.2 Experimental flow chart of the effect of space charge accumulation on the vibration waveforms

为了进一步阐明空间电荷密度与振动波形之间的关系, 还需进行空间电荷去极化实验, 即探究空间电荷消散与电荷激发分子振动波形变化之间的关系。撤掉施加的-7.2 kV 直流极化电压, 内部积聚空间电荷则会随着时间消散, 在电荷消散的过程中每隔一定的时间对试样施加幅值为-1 kV、上升和下降时间为 50 ns 的脉冲电压进行一次振动波形的测试, 测试完成后撤掉脉冲电压继续等待内部空

间电荷的消散, 再间隔一段时间后重复上述操作, 以此获得聚酰亚胺试样内部空间电荷衰减后振动波形的变化情况。实验流程如图 3 所示。

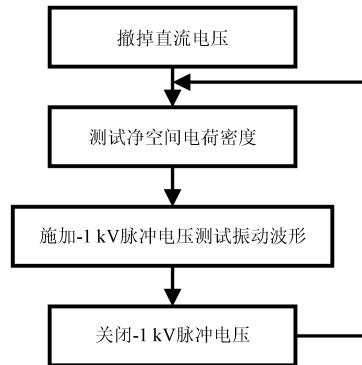
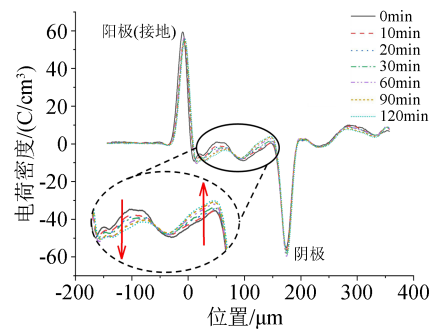


图3 空间电荷消散对振动波形的影响实验流程图

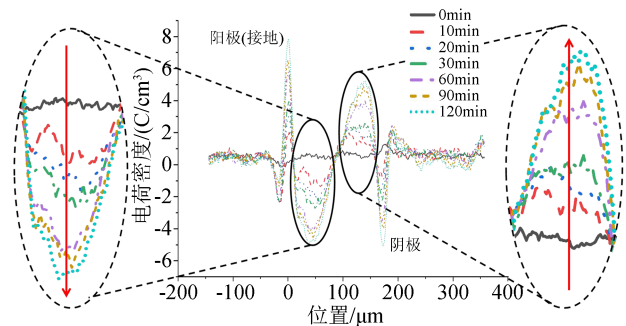
Fig.3 Experimental flow chart of the effect of space charge dissipation on the vibration waveforms

## 2 实验结果

图 4 为试样内部空间电荷密度随加压时间的变化趋势, 图 5 为空间电荷激发的分子振动波形随加压时间即随空间电荷密度的变化趋势。其中图 4(a) 为叠加直流时测得的空间电荷密度分布, 图 4(b) 为撤掉直流电压后测得的试样内部净空间电荷密度分布。图 5(a) 为 PVDF 压电传感器测得的空间电荷激发分子振动波形变化, 图 5(b) 为波形局部放大图。



(a)空间电荷密度分布

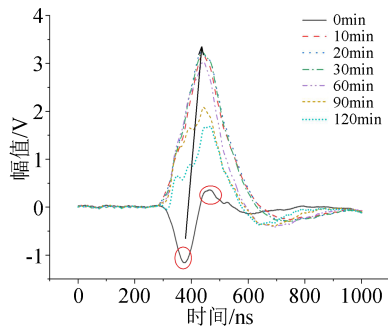


(b)净空间电荷密度分布

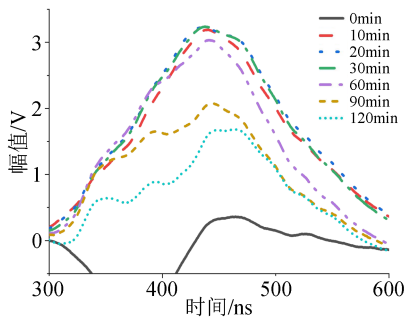
图4 试样内部空间电荷密度随加压时间的变化

Fig.4 Variation of space charge density in samples with time

由图4可知,在加压时间为0 min时,聚酰亚胺试样中无空间电荷注入,仅在上下表面处存在极化电荷,且上下表面处极化电荷的极性相反,因此分子振动波形存在两个极性相反的振动峰,如图5(a)中圆圈标注部分所示。随着加压时间的增加,电荷从电极注入到试样中去,在表面附近逐渐积累空间电荷。对于阳极而言(下表面),注入的电荷是异极性电荷,随着加压时间的增加,内部空间电荷密度大于表面极化电荷密度,因此阳极附近分子振动峰的极性发生反转。而对于阴极表面而言,注入的空间电荷与表面处的极化电荷为同极性电荷,因此阴极附近分子振动峰的幅值随加压时间的增加而增大。



(a)PVDF压电传感器测得的空间电荷激发分子振动波形

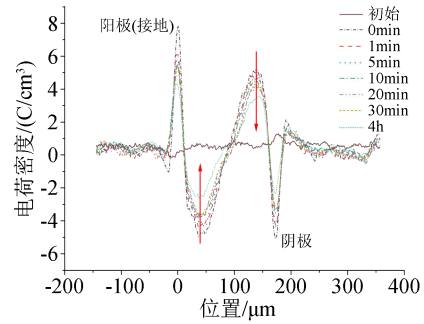


(b)波形局部放大图

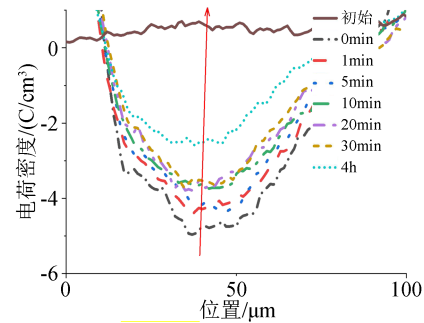
图5 空间电荷激发的分子振动波形随加压时间的变化  
Fig.5 Variation of space charge-excited molecular vibration waveform with time

空间电荷去极化实验结果如图6~7所示,其中图6(a)为聚酰亚胺试样内部积聚的净异极性空间电荷消散过程,图6(b)、(c)分别为阳极和阴极附近波形局部放大图,图7(a)为分子振动波形变化过程,图7(b)为振动波形局部放大图。

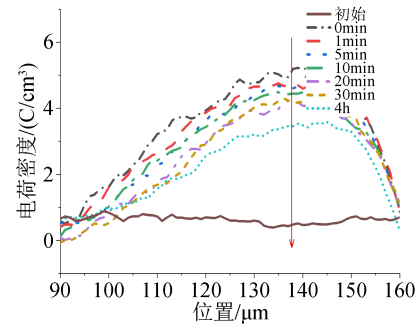
由图6~7可知,与电荷的积累过程相反,随着去极化时间的增加,受电荷从电极中被抽出、正负电荷复合等因素的影响,试样内部积聚的异极性空间电荷密度逐渐减小。同时,分子振动波形也逐渐从极性反向状态向初始状态恢复。



(a)试样内部积聚的净异极性空间电荷消散过程



(b)阳极附近波形局部放大图



(c)阴极附近波形局部放大图

图6 撤压后净空间电荷消散过程

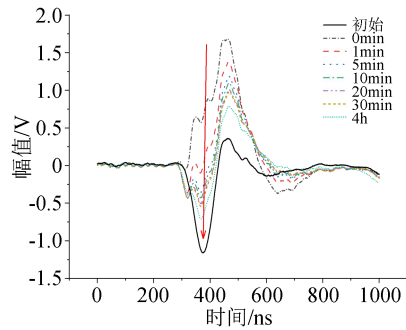
Fig.6 Dissipation process of net space charge after depressurization

### 3 分析与讨论

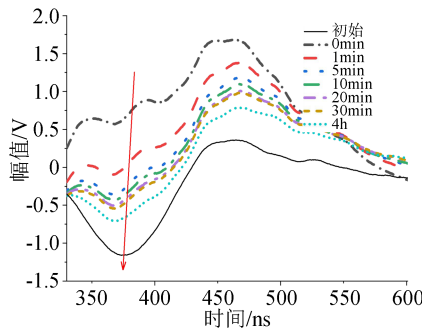
#### 3.1 实验结果分析

在不施加高场强的直流极化电压,仅施加幅值为1 kV、上升和下降时间为50 ns的方波脉冲电压时测得的分子振动波形如图8所示,该波形由极性相反的两个峰组成,分别对应试样内部两端靠近界面处的极化电荷。脉冲电压边沿时刻电场力突变会导致电荷受力平衡状态被打破,使电荷受到一个较大合力的作用从而引发振动<sup>[22-23]</sup>。由于试样两端极化电荷的极性相反,在脉冲电压上升沿或下降沿到来时二者受到的合力方向也相反,产生极性相反的两个振动峰。电荷受力如图9所示。

施加一段时间高场强直流电压后,聚酰亚胺试样内部积聚大量异极性空间电荷,由于异极性空间



(a)分子振动波形变化过程



(b)振动波形局部放大图

图7 撤压后空间电荷激发分子振动波形变化

Fig.7 Variation of space charge-excited molecular vibration waveform after depressurization

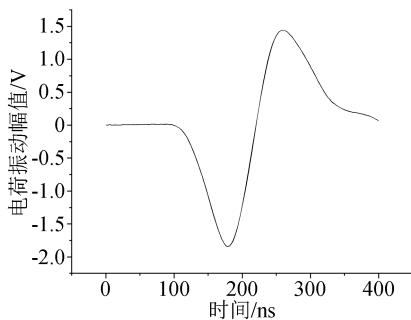


图8 上升沿处电荷激发分子振动波形

Fig.8 Space charge-excited molecular vibration waveform at the rising edge

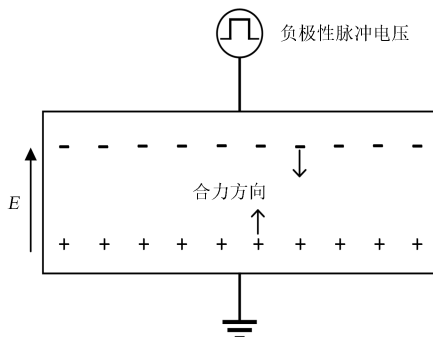


图9 上升沿处空间电荷受力方向示意图

Fig.9 Schematic diagram of the force direction acting on space charge at the rising edge

电荷激发的分子振动方向与界面处极化电荷激发的分子振动方向相反,当内部异极性空间电荷密度

超过界面极化电荷密度后,振动波形的极性便会随之发生反转。而当撤去外施直流极化电压后,试样内部积聚的异极性空间电荷逐渐消散,振动波形的极性也逐渐恢复至初始状态。

本课题组在此前的研究中通过将示波器实测到声波信号的延时时间与理论计算得到的PVDF压电传感器接收到声信号的延时时间进行对比,论证了实验中测得的波形为空间电荷激发分子振动所产生<sup>[23]</sup>。通过本实验中将电荷积聚、消散情况与振动波形变化进行对比可以发现,PVDF压电传感器测得的分子振动波形变化与试样内部积聚的电荷密度变化相关联:试样内部积聚异极性空间电荷密度大于界面极化电荷密度后振动波形极性发生反转,而当试样内部积聚的异极性空间电荷消散后,振动波形也逐渐向初始状态恢复。该现象也进一步证实了PVDF压电传感器所接收到的信号为试样内部空间电荷激发分子振动所产生。

### 3.2 电荷激发分子振动机理讨论

脉冲边沿时刻电荷所受合力的冲击作用是导致其激发分子振动的根本原因,脉冲上升沿和下降沿处电荷受力变化与分子振动幅值之间的关系已在文献[23]中进行了详细阐述。下面从频域共振的角度进一步对电荷激发分子振动机理进行讨论与分析。

物体振动幅值与外施激励的频率有关,当外施激励的频率接近物体本身的固有频率时会产生共振现象,此时物体的振动幅值将达到最大值。然而,方波脉冲电压的上升沿和下降沿为非周期信号,仅仅通过观察不同边沿时间的脉冲电压上升沿和下降沿无法精确判断其频率特性。为了进一步阐明聚酰亚胺中空间电荷激发分子振动与方波脉冲电压上升沿的关系,对脉冲电压的上升沿和分子振动波形进行了傅里叶变换,对比分子振动波形与电压波形傅里叶分解后频谱中各分量之间的关系。

线性坐标下上升时间为50 ns时的脉冲电压上升沿以及分子振动波形的傅里叶分解频谱结果分别如图10和11所示。从图10~11可以看出,电压波形频谱中包含很大成分的直流分量,然而在电荷激发的分子振动波形频谱中却没有与之对应的直流分量,这表明直流分量不会引起电荷激发分子振动,因此可将频谱图改为对数坐标进行表示,分析高频分量对振动幅值的影响机理。

对数坐标下脉冲电压上升沿波形以及电荷激发分子振动波形的傅里叶分解频谱结果分别如图12和13所示。由共振频率的概念可知,当系统振动频率等于物体本身的共振频率(固有频率)时,其振

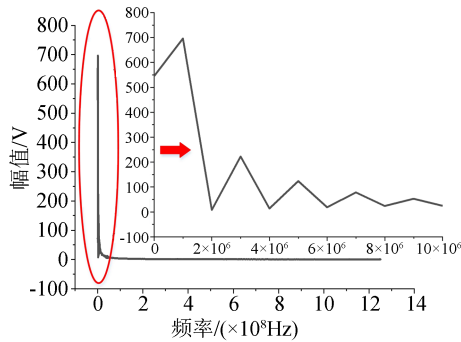


图10 线性坐标下脉冲电压上升沿波形频谱图

Fig.10 Spectrogram of pulse voltage rising edge waveform in linear coordinates

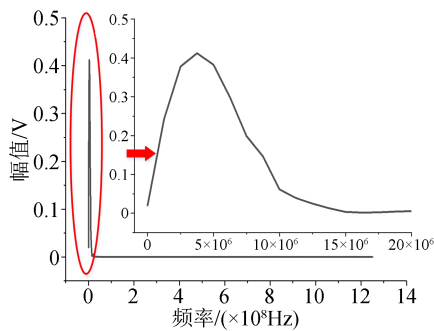


图11 线性坐标下电荷激发分子振动波形频谱图

Fig.11 Spectrogram of charge-excited molecular vibration waveform in linear coordinates

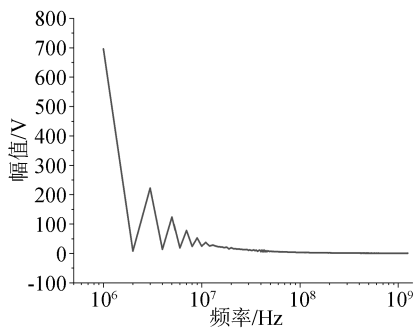


图12 对数坐标下脉冲电压上升沿波形频谱图

Fig.12 Spectrogram of pulse voltage rising edge waveform in logarithmic coordinates

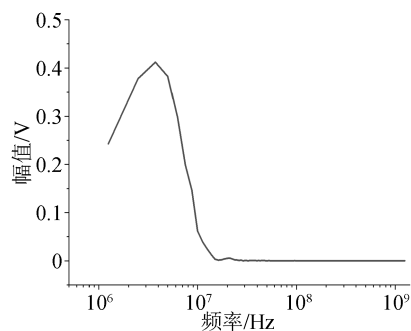


图13 对数坐标下分子振动波形频谱图

Fig.13 Spectrogram of charge vibration waveform in logarithmic coordinates

动幅值将达到最大值,而在其他频率作用下振动程度将减弱。若系统存在多种频率共同作用,则系统会将其他频率“过滤”掉,仅保留固有频率分量,使其按照固有频率发生振动。由图12~13可知,电压波形与分子振动波形的频谱主要分布在 $10^6 \sim 10^7$  Hz范围内,在电压波形频谱中,随着谐波频率增大,其幅值减小,但是对应频率下分子振动的幅值非但没有减小反而增大。例如, $3 \times 10^6$  Hz对应的电压频谱幅值约为223 V,与之对应的分子振动频谱幅值约为0.37 V,而当频率增至 $5 \times 10^6$  Hz时,对应的电压频谱幅值仅为124 V,但是与之对应的分子振动频谱幅值却为0.38 V。即在较小的幅值激励下却产生了更大的振动信号,表明频率增大的方向靠近其共振频率,当频率超过 $10^7$  Hz后分子振动频谱的幅值减小至接近零,表明频率超过 $10^7$  Hz后增大的方向为远离共振频率的方向。由此可以进一步推断出该聚酰亚胺试样的固有频率在 $5 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$  Hz。

### 3.3 电荷激发分子振动与绝缘劣化

随着加压时间的增加,绝缘材料内部逐渐积累空间电荷。然而,对试样在交流电压下进行测试,并未检测到电荷激发分子振动信号,而在脉冲边沿处却检测到强烈的分子振动信号。考虑到绝缘材料脉冲电场下的寿命远小于在交流电场下的寿命,据此推测脉冲电场下的绝缘失效机理与电荷激发分子振动行为密切相关。空间电荷通常在微观绝缘缺陷处累积,而缺陷处电场畸变严重,产生强烈的电致机械应力,这会导致缺陷处绝缘薄弱。而脉冲电场会导致空间电荷产生振动,并进一步带动分子链振动。在电致机械应力作用下损伤逐渐扩大,形成宏观孔隙,产生电树枝,诱发绝缘击穿。

## 4 结论

本文探究了脉冲边沿时刻聚酰亚胺试样空间电荷密度对电荷激发分子振动波形的影响,并对分子振动机理进行了分析,主要得到如下结论:

(1)施加直流极化电压后聚酰亚胺试样内部积聚大量异极性空间电荷。异极性空间电荷激发的分子振动方向与界面极化电荷激发的分子振动方向相反,当试样内部积聚异极性空间电荷后,测得分子振动波形极性与初始时刻振动波形极性相反,而当撤去外施极化电压后,试样内部积聚的异极性空间电荷逐渐消散,分子振动波形极性也随之向初始状态恢复。

(2)通过将电压和电荷激发分子振动波形频谱进行对比,可以发现电压频谱中的直流分量对分子

振动不起作用,而 $5 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$ 频带范围内的电压分量对分子振动行为起主要作用。

(3)绝缘缺陷处容易积累空间电荷,而脉冲电场导致的空间电荷激发分子振动会在绝缘缺陷处产生强烈的电机械应力,导致绝缘损伤进一步扩大,并最终导致绝缘击穿。

### 参考文献:

- [1] 黄林彬,辛焕海,鞠平,等. 电力电子并网装备的同步稳定分析与统一同步控制结构[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):10-25.
- [2] 李亚楼,张星,胡善华,等. 含高比例电力电子装备电力系统安全稳定分析建模仿真技术[J]. 电力系统自动化,2022,46(10):33-42.
- [3] 高晖胜,瞿鹏,黄林彬,等. 能量约束下电力电子并网装备的最优频率控制[J]. 电力系统自动化,2020,44(17):9-18.
- [4] 佟辉,臧丽坤,徐菊. 导热绝缘材料在电力电子器件封装中的应用[J]. 绝缘材料,2021,54(12):1-9.
- [5] 王鹏,周婉亚,王科镜,等. 正弦和重复方波电压下变频电机绝缘局部放电特性对比[J]. 高电压技术,2016,42(12):3895-3900.
- [6] MANCINELLI P, CAVALLINI A, CHALASHKANOV N, et al. Electrical treeing in silicone gel under square voltage: Frequency, rise time and crosslinking influence[C]//Electrical Insulation & Dielectric Phenomena. Fornto, Canada:IEEE,2016.
- [7] 张声岚,黎志军,曾志斌,等. 绝缘材料寿命评估用方波脉冲电源问题的探讨[J]. 绝缘材料,2013,46(1):78-82.
- [8] 郭小霞,吴广宁,高波,等. 高压方波脉冲波形参数对局部放电的影响[J]. 绝缘材料,2008,41(5):60-64,68.
- [9] WANG P, MONTANARI G C, CAVALLINI A, et al. Partial discharge phenomenology and induced aging behavior in rotating machines controlled by power electronics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2014,61(12):7105-7112.
- [10] 程驰宙,王鹏,李想. 重复脉冲上升时间对低压散绕变频电机匝间绝缘 PDIV 影响研究[J]. 绝缘材料,2021,54(8):67-73.
- [11] 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.
- [12] 郑昌江,雷勇,王鹏,等. 重复短脉冲上升时间对变频电机绝缘局部放电统计特性的影响[J]. 绝缘材料,2018,51(10):50-56.
- [13] 秦玉文,王鹏,任俊文,等. 脉宽调制电压对环氧树脂电树枝引发及生长特性影响研究[J]. 高电压技术,2021,47(9):3273-3282.
- [14] WANG P, CHEN Y W, AKRAM S, et al. Effects of bipolar repetitive square wave voltage parameters on electrical tree characteristics of epoxy resin[J]. Polymer Testing,2021,103:107371.
- [15] 杨能,王鹏,吴琦,等. 重复脉冲电压频率对环氧树脂电树枝引发特性的影响[J]. 绝缘材料,2019,52(12):58-64.
- [16] LIU Y, CAO X L. Electrical tree growth characteristics in XLPE cable insulation under DC voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,22(6):3676-3684.
- [17] LIU Y, CAO X L. Electrical tree initiation in XLPE cable insulation by application of DC and impulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(5):1691-1698.
- [18] DU B X, HAN T, SU J G. Electrical tree characteristics in silicone rubber under repetitive pulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(2):720-727.
- [19] 曹开江. 高频脉冲电压下牵引电机绝缘电击穿及老化机理的研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- [20] BELLOMO J P, CASTELAN P, LEBEY T. The effect of pulsed voltages on dielectric material properties[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1999,6(1):20-26.
- [21] FUKUMA M, TEYSSERE G, LAURENT C, et al. Millisecond time-range analysis of space-charge distribution and electroluminescence in insulating polymers under transient electric stress[J]. Journal of Applied Physics,2005,98(9):093528.
- [22] HE D X, ZHANG T, MENG F S, et al. Space charge behaviors in cable insulation under a direct current-superimposed pulsed electric field[J]. High Voltage,2021,6(3):426-434.
- [23] ZHANG T, HE D X, WEI J Y, et al. Charge vibration behaviour in polyimide under the pulse voltage with different rise and fall times[J]. High Voltage,2022,7(1):64-74.
- [24] MONTANARI G C, FABIANI D. Evaluation of dc insulation performance based on space-charge measurements and accelerated life tests[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2000,7(3):322-328.
- [25] 赵军,何瑞东,高树国,等. 电力电子模块封装硅胶电荷运输与陷阱特性研究[J]. 绝缘材料,2022,55(8):64-71.
- [26] 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.

收稿日期:2022-09-09 修回日期:2022-11-21

作者简介:侯健健(1985-),男(汉族),山东滨州人,高级工程师,主要从事输配电设备运检技术及故障诊断的研究;通信作者:何东欣(1990-),男(汉族),山东潍坊人,副教授,主要从事固体绝缘空间电荷特性、电气设备在线监测与故障诊断方面的研究。