第 52 卷 第 7 期：3426-3436 高电压技术 Vol.52, No.7: 3426-3436
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250590

直流电压下干式直流电容器用 BOPP 薄膜典型缺陷局部放电特性

宋家乐，陈向荣，李卓函，刘嘉浩，陈萧何，陈楠清
（浙江大学电气工程学院，杭州 310027）

摘　要：双向拉伸聚丙烯(biaxially oriented polypropylene，BOPP)薄膜作为干式直流电容器的关键绝缘介质，在长期运行过程中易发生局部放电，导致绝缘性能劣化。为了研究电力电容器内部典型缺陷的直流局部放电发展过程，设计了 3 种薄膜典型局部放电缺陷，采用脉冲电流法研究了正极性直流电压下局部放电特性，根据放电量与时间的关系图谱，进一步提取出 4 类统计特征图谱。结果表明：沿面放电缺陷中 *Q-t* 图谱中表现出明显的“局部放电簇”特征；随着外施电压时间的提高，电晕放电的放电重复率呈现出先增后降的趋势；内部放电缺陷 *Q-t* 图谱则呈现出“山丘状”特征。在放电量幅值占比最大的区间内，电晕放电缺陷的相邻 2 次局部放电之间存在相关性；电晕放电和沿面放电缺陷本次放电量与后续放电时间间隔均值存在显著相关性。内部放电缺陷的大多数放电幅值小于平均放电幅值，表现为小幅值主导放电模式；沿面放电时间间隔的分布更为集中。研究发现金属化膜内部放电特性与 BOPP 基膜相符，研究结果为电力电容器直流局部放电在线监测及故障诊断提供了理论依据和试验数据参考。
关键词：干式直流电容器；聚丙烯薄膜；直流局部放电；典型缺陷；统计特征图谱

Typical Partial Discharge Characteristics of Defects in BOPP Films for Dry DC Capacitors Under DC Voltage

SONG Jiale, CHEN Xiangrong, LI Zhuohan, LIU Jiahao, CHEN Xiaohe, CHEN Nanqing
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract：Biaxially oriented polypropylene (BOPP) films, as the key insulation medium for dry DC capacitors, is prone to partial discharge during long-term operation, leading to deterioration of insulation performance. In order to study the development process of DC partial discharge of typical defects inside capacitors, we designed three types of typical partial discharge defects. The pulse current method was used to study the characteristics of partial discharge under positive polarity DC voltage. Based on the relationship between discharge amount and time, four types of statistical characteristic spectrums were further extracted. The results show that the *Q-t* spectrum of surface discharge defects shows obvious characteristics of partial discharge cluster. With the increase of applied voltage time, the discharge repetition rate of corona discharge increases first and then decreases. The *Q-t* spectrum of internal discharge defects shows hill-like characteristics. In the interval with the largest proportion of discharge amplitude, there is a correlation between two adjacent partial discharges of corona discharge defects. There is a significant correlation between the discharge amount of corona discharge and surface discharge defects and the mean value of subsequent discharge time interval. Most of the discharge amplitudes of internal discharge defects are smaller than the average discharge amplitude, showing a small amplitude dominant discharge mode. The distribution of discharge time intervals along the surface is more concentrated. It is found that the internal discharge characteristics of the metallized films are consistent with the BOPP base films. The research results provide a theoretical basis and experimental data reference for on-line monitoring and fault diagnosis of DC partial discharge of power capacitors.
Key words：dry DC capacitor; BOPP films; DC partial discharge; typical defects; statistical characteristic spectrums

0　引言

干式直流电容器作为新型电力系统的重要组成部分，承担着调节电能质量、改善电压分布、降低电能损耗的关键作用[1-2]。双向拉伸聚丙烯(biaxially oriented polypropylene，BOPP)薄膜因其优异的电气特性，已成为电力电容器领域最广泛应用的绝缘介质[3]。然而，在长期的电-热-力多物理场作用下聚丙

基金资助项目：国家重点研发计划(2021YFB2401503)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2401503).

烯薄膜缺陷将不断产生和扩大，引发局部放电(partial discharge，PD)，致使其物理和电学性能发生不可逆劣化，进而演变成击穿故障[4-5]。因此，研究直流电压下电力电容器用 BOPP 薄膜局部放电特性具有一定的工程意义和学术价值。

国内外学者针对 BOPP 局部放电特性开展了一些研究。法国 Nemamcha 等采用球-板间隙电极结构开展交流电压下油浸式电容器用聚丙烯薄膜的局部放电特性[6]，认为较小的局部放电放电(<1 pC)会引起薄膜氧化和羰基生成，并导致薄膜绝缘性能显著降低。刘浩梁等设计并开展磁场下干式电容器用聚丙烯薄膜多种局部放电类型测试[7]，研究发现磁场作用下平均局部放电量基本不变，总放电量会随着放电次数的增加而提高。林丽妲等分析了金属化薄膜电容器局部放电的时间序列谱图和相位分布谱图特性[8]，并提出不同缺陷的平均放电量和放点重复率变化趋势存在差异，具有不同的局部放电发展规律。米彦等对采用球-板电极模拟膜层间气隙缺陷，开展了不同电压频率下 BOPP 薄膜的 PD 试验研究，结果表明局部放电起始电压、放电次数、上升段放电幅值和下降段放电时延均随着脉冲频率的增加呈现先增大后减小的趋势[9]。Chen 等开展了高上升速率纳秒脉冲电压下双向拉伸聚丙烯薄膜的局部放电特性试验[10]，提出局部放电主要集中在纳秒脉冲的上升阶段和下降阶段。

当前国内外针对电力电容器用聚丙烯薄膜的局部放电特性的研究，主要集中于交流条件下的聚丙烯基膜局部放电特性，对直流条件下 BOPP 局部放电特性的研究尚少，同时缺少 BOPP 基膜与金属化膜局部放电结果对比，难以与电容器实际条件联系起来。为了研究直流电压下干式直流电容器用 BOPP 薄膜的局部放电特性，本文设计制作了电容器用 BOPP 薄膜沿面放电、电晕放电、内部放电 3 种典型缺陷，开展基于脉冲电流法的薄膜样品直流电压局部放电测试，分析电容器典型缺陷的局部放电时间分布(time resolved partial discharge，TRPD)谱图特性，获得直流电压下 BOPP 薄膜局部放电发展规律以及相应统计特征图谱，通过金属化膜内部放电缺陷测试验证结论准确性，研究结果为电力电容器直流局部放电检测和故障诊断提供了理论依据和试验数据参考。

1 试样、测试平台和试验方法

1.1 试样

试验基膜样品采用厚度为 5.8 μm 干式直流电容器用聚丙烯薄膜，上述基膜经蒸镀铝锌电极、卷绕、浇注、封装后得到金属化膜电容器组，随后从经过出厂检测后的电容器剥离得到所用金属化膜。

1.2 局部放电测试系统

本文采用的局部放电测试回路如图 1 所示。其中，直流电源选用 Matsusada K12-R 型高压电源，额定电压/电流为 30 kV/5 mA，R_0(100 kΩ)为保护电阻，耦合电容 C_c(1 000 pF)用于耦合局部放电测试过程的脉冲电流信号，Z 为连接 MPD600 局部放电测试系统的检测阻抗。所建立的局部放电测试线路符合 IEC 60270 标准，测试精度可达 0.1 pC。

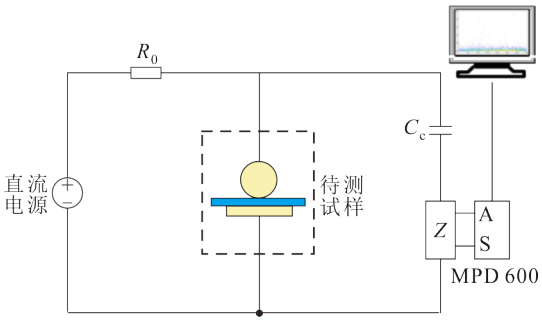


图 1 试验电路

Fig.1 Experimental circuit diagram

本文采用的电极结构如图 2 所示。使用板-板电极模拟薄膜生产过程中引入的杂质造成内部电场扭曲，引发内部放电；采用球-板电极模拟薄膜边缘“留边”引起的表面放电；利用针-板电极模拟金属化膜表面自愈区电离造成的电晕放电，针尖曲率半径为 25 μm，针尖与样品间隙为 1 mm[7]。

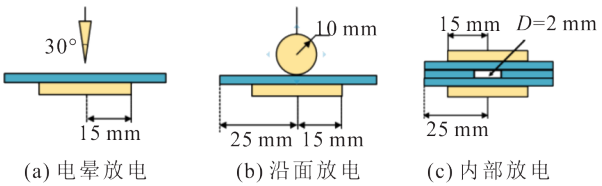


图 2 3 种典型缺陷结构示意图

Fig.2 Three typical defect structure diagram

1.3 试验方法

在试验准备阶段，将薄膜裁剪为 50 mm×50 mm 的样品备用。为减少膜层间空气的影响，将 3 层裁

剪好的样品叠加后，使用平板硫化机施加 4 MPa、55 ℃压制 10 min，制成内部放电缺陷样品[11]。将不同缺陷待测样品放入真空干燥箱干燥保存，以此减少水分的影响。

在研究不同聚丙烯缺陷模型局部放电发展规律之前，首先需要确定正极性直流电压下对应模型的局部放电起始电压(partial discharge unception voltage，PDIV)。根据 ASTM-D-1868 及 IEC 60270 规定，在测试周期内每分钟重复放电超过一次时，对应的外施电压设定为 PDIV。根据上述规定，本文采用阶梯升压法确定 3 种缺陷模型的 PDIV(如图 3 所示)，具体如下：首先缓慢升压至 U_0=1 kV，随后以 0.1 kV 的步长逐级升压，每级持续 10 min，直至在 10 min 内出现 10 次以上放电量大于 10 pC(测试系统设定阈值)的局部放电信号，记录该级电压为对应缺陷模型的局部放电起始电压[12]。

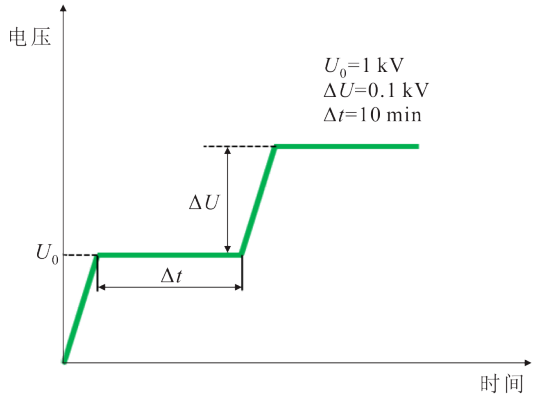


图 3 阶梯升压法

Fig.3 Step-up voltage method

试验前，依据 IEC 60270 标准校准局部放电测试仪，随后使用相同规格聚丙烯无缺陷模型开展加压测试，结果显示在施加 2 kV 直流电压 1 h 内，测试得到的环境噪声低于 3 pC，意味着本试验系统无局部放电源，可用于局部放电测试。3 种缺陷模型局部放电测试均重复 3 次，试验加压时长设定为 60 min，每次测试后更换试样。试验温度为 20 ℃，环境湿度为 30%。

2 试验结果

电力电容器局部放电检测及诊断的核心问题之一是准确识别不同内部缺陷及故障对应的局部放电信号特征。针对此问题，本文记录了沿面放电、电晕放电和内部放电 3 种聚丙烯薄膜典型缺陷模型放电量 Q 随加压时间 t 的发展过程，同时绘制了 4 类统计特征图谱，综合比较了各类缺陷放电特征异同。

2.1 缺陷模型直流局部放电发展过程

2.1.1 聚丙烯沿面放电缺陷模型

沿面放电缺陷模型对应的 PDIV 为 1.5 kV，在外施电压为 1.2 倍 PDIV 下其局部放电发展过程如图 4 所示。可以看出，沿面放电缺陷中放电量 Q 与时间 t 的图谱中存在明显的“局部放电簇”特征[13]。在放电发展过程初期(前 15 min)放电次数较少，仅有个位数放电出现；随着放电的发展，在 15~25 min 内出现密集的放电活动；在经历一个短暂的放电真空期(25~30 min)后，放电再次出现，并且放电量和放电重复率均有所提升。整个放电过程中放电量幅值分布范围广泛，随机性较强。

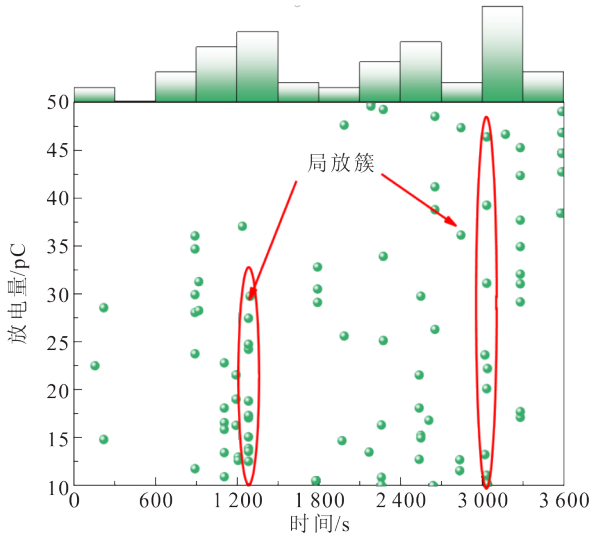
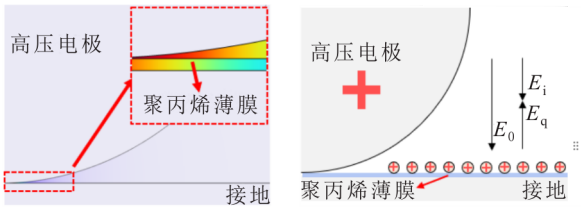


图 4 沿面放电缺陷局部放电发展过程

Fig.4 PD development process of surface discharges

薄膜介质产生局部放电需要满足两个关键条件，首先外施电场强度应大于介质缺陷处局部放电的最小场强，以维持放电持续性；其次，介质缺陷应存在初始电子[14]。现有研究表明，初始电子的来源主要有 3 个，一是外界影响导致缺陷处发生热辐射或者光电离；二是在高场强作用下缺陷处电离生成场致发射电子；三是前次局部放电发生后残余的空间电荷。基于上述理论分析易得，聚丙烯薄膜沿面放电是出现在电极-薄膜-空气三点结合附近电场集中区域的气体侧放电(如图 5(a)所示)[9]。在初始加压阶段，球电极边缘和聚丙烯薄膜接触面附近的间隙电场强度很高，满足空气电离的要求，产生场致发射电子，产生的电荷积聚在三点结合区域附近，

由于此时尚未存在足够的初始电子，没有出现大规模局部放电现象。随着时间的推移，电极附近的电荷逐渐增加，当有足够的电离时，在三点结合区域内迅速发生放电，并且表现出典型的“簇状放电”特征。由于放电密集且强度较高，显著消耗了三点结合区内的初始电子，同时放电产生的电荷积聚在聚丙烯表面，电荷产生的电场 E_q 与外施电场 E_0 方向相反，使得三点结合区域内实际电场强度 E_i 降低(如图 5(b)所示)，不利于放电持续发生，因此在 25~30 min 出现短暂的真空期。然而，随着表面积聚的电荷消散，电场强度逐渐恢复，初始电子随之生成，局部放电现象再次出现，表现为在 30~60 min 内出现间歇性放电现象。研究表明，簇状放电是由于多流注放电引起[15]，由于多流注发展情况不同，到达薄膜表面先后顺序存在差异，引起薄膜表面电场与电荷分布不均，导致薄膜表面电荷的定向注入，使表面某区域发生强电离，严重时会使薄膜表面性能劣化，引发沿面放电。



(a) 三点结合处电场分布 (b) 三点结合处电荷行为

图 5 沿面放电缺陷电场分布示意图

Fig.5 Electric field distribution of surface discharges

2.1.2 聚丙烯电晕放电缺陷模型

电晕放电缺陷模型对应的 PDIV 为 1.7 kV，在外施电压 U 为 1.2 倍 PDIV 下其局部放电发展过程如图 6 所示。可以看出，在放电前期电晕放电重复率和放电量均较小，随着外施电压时间的延长，放电重复率呈现出先增后降的趋势。同时，电晕放电强度较低，放电量完全集中在 10~20 pC 范围内。

为了进一步分析电晕放电发展过程内部机理，基于针-板间隙结构，利用多物理场耦合仿真软件，建立了流体动力学漂移-扩散模型来研究电晕发展过程中的电场和电荷分布行为，控制方程如式(1)—式(5)所示[16]。模型结构及边界条件设置如图 7 所示，针电极曲率半径及间隙距离与试验条件相同，采用非均匀化网格划分。

$$\frac{\partial n_e}{\partial t}+\frac{1}{r}\frac{\partial (rj_{er})}{\partial r}+\frac{\partial j_{ez}}{\partial z}=S_{ph}+S_i-S_{att}-L_{ep} \tag{1}$$

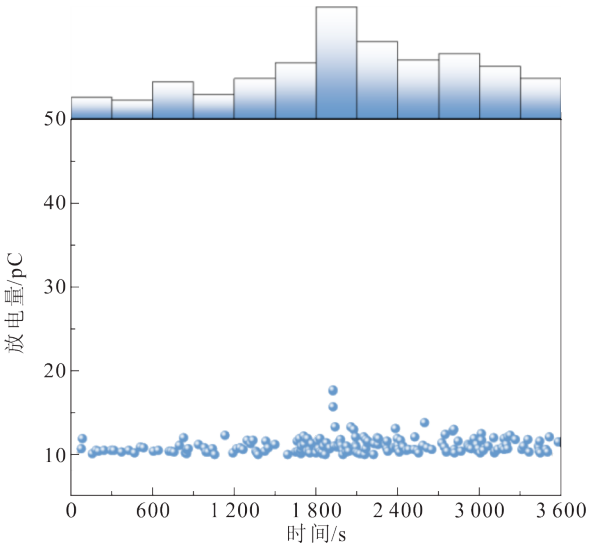


图 6 电晕放电缺陷局部放电发展过程

Fig.6 PD development process of corona discharges

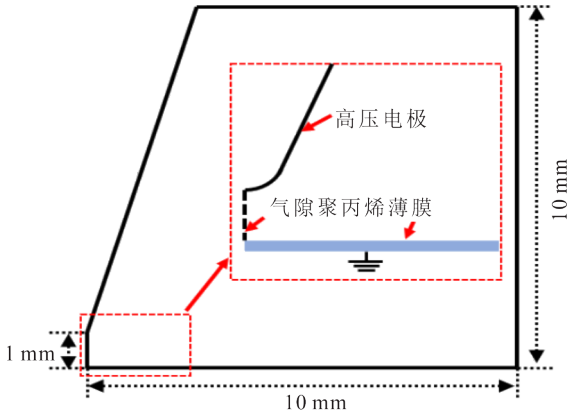


图 7 电晕放电仿真模型示意图

Fig.7 Simulation model of corona discharges

$$\frac{\partial n_p}{\partial t}=S_{ph}+S_i-L_{ep}-L_{pn} \tag{2}$$

$$\frac{\partial n_n}{\partial t}=S_{att}-L_{pn} \tag{3}$$

$$\Delta V=-\frac{e}{\varepsilon_0}(n_p-n_e-n_n) \tag{4}$$

$$\boldsymbol{j}_e=-D_e\nabla n_e-u_e n_e\boldsymbol{E} \tag{5}$$

式中：j_{er}、j_{ez} 为电流密度的 r、z 分量；n 为密度；D、μ 为扩散系数和迁移率，其中 D 取 0.18 m^2/s。下标 e、p、n 分别代表电子、正离子、负离子；S_{ph} 为光致电离产生带电粒子速率；S_i 为碰撞电离的速率；S_{att} 为电子附着速率；L_{ep} 为电子-离子复合速率，取 5×10^{-8} m^3/s；L_{pn} 为离子-离子复合的速率，取 2×10^{-6} m^3/s。本文以约化电场 E/N 为中间值[16]，其

中 E 为电场模，N 为气体分子的数密度。设定 μ=1 526×$(E/N)^{-0.25}$，S_i=3 430×$e^{-660/(E/N)}$，S_{att}=14.7×$e^{-100/(E/N)}$+96×$(E/N)^{-1.1}$。

由图 6 可知，在前 30 min 内电晕放电放电重复率和放电量均较低，此时针尖处的电场满足电离和解离条件，产生大量电子和离子，在电场作用下正电荷向 BOPP 薄膜迁移，负电荷进入电极内部，电离区域残余大量正离子和负离子，形成如图 8(a)—8(b)所示的电晕层。产生的电晕层一方面增强边界处电场并弱化针尖处电场，另一方面在电场作用下快速扩散。考虑到对称轴处电场强度最大，此处积累的电荷密度最高并且具有较高的迁移速度，驱动扩散态的电晕层沿着电晕发展通道朝向薄膜表面运动，即定向发展阶段(如图 8(b)—8(c)所示)，在此阶段电场强度仍保持较高的水平，使得局部放电不断发生，放电重复率达到峰值。当电晕层到达 BOPP 表面后，BOPP 和空气界面将积累大量电荷，引起电场畸变和表面电离，使得表面电荷密度进一步提高，最终形成阻碍电晕发展的电荷屏蔽层，导致电晕逐渐消散并最终消失(如图 8(c)—8(d)所示)[17]。

2.1.3 聚丙烯内部放电缺陷模型

内部放电缺陷模型对应的 PDIV 为 1.6 kV，在外施电压 U 为 1.2 倍 PDIV 下其局部放电发展过程如图 9 所示。可以看出，内部放电缺陷模型直流局部放电发展过程表现为明显的“山丘状”特征，在放电初期放电量和放电重复率最大，随着放电的发展，放电重复率逐渐降低，在放电发展中期(30 min)处，达到最低；随后放电重复率逐渐提高，该间歇性发展过程在加压期间重复出现。在整个放电发展过程中，放电量基本分布于 10~15 pC 内，占比达到 95%，放电量最大值为 46 pC，表明内部放电幅值较为集中。

分析可知，当直流电压施加在缺陷样品上时，聚丙烯薄膜建立瞬时极化，此时聚丙烯薄膜与中间气隙部分呈现电容分压，薄膜极化使内部气隙中电场增强，诱发内部放电[18]；在内部放电的同时，一方面薄膜内的长时极化逐渐建立，导致内部电场强度进一步提高，另一方面内部气隙中因放电产生的电荷在电场的驱动作用下向气-固界面运动并沉积在界面上，降低了气隙内的电场强度。在理想情况下随着时间逐渐延长，薄膜内的长时极化建立完成，长时极化强度达到峰值，同时因持续的放电产生的

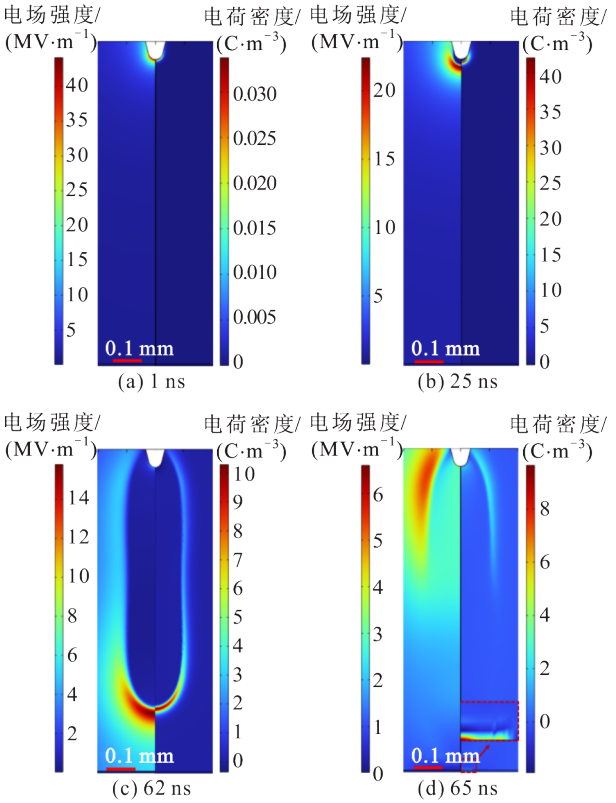


图 8 电晕放电仿真结果图

Fig.8 Simulation results of corona discharges

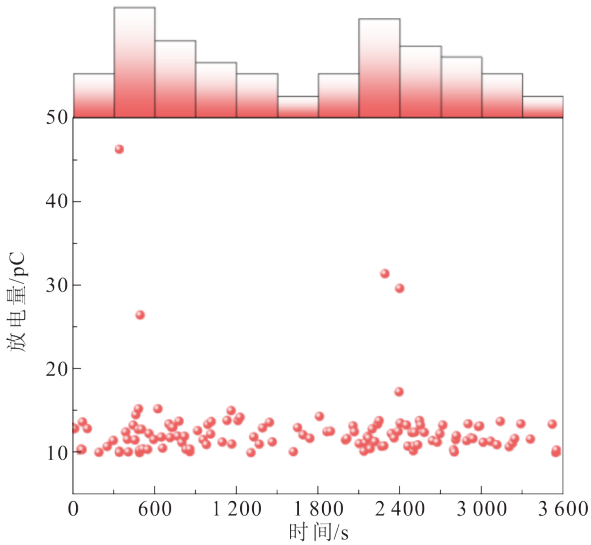


图 9 内部放电缺陷局部放电发展过程

Fig.9 PD development process of internal discharges

电荷沉积在气-固界面处作为束缚电荷，与薄膜中的瞬时极化和长时极化达到平衡，此时薄膜内部缺陷试样的气隙部分和薄膜绝缘部分演变为电阻分压，因此气隙内电场强度很小而不会产生放电。然而在实际情况中，因固体电导的作用，一部分沉积电荷

降低了内部电场，另一部分电荷迁移至电极极板上与异极性电荷复合，导致气隙内电场强度再次增大，因此直流电压下的内部缺陷局部放电重复率呈现出波动趋势。相较于直流电压下电缆、环氧树脂内部气隙缺陷[19]，聚丙烯薄膜气隙厚度极薄，导致界面沉积电荷对外施电场的抑制作用较弱，因此并没有出现放电死区的现象。

2.1.4 金属化膜内部放电缺陷模型

为了验证本文规律有效性，选取相同基膜材料的金属化膜开展内部放电缺陷局部放电测试，外施电压与基膜测试条件相同，设定为 1.6 kV，获得的局部放电发展过程如图 10 所示。可以看出，金属化膜的内部放电缺陷模型直流局部放电发展过程与基膜相同，均呈现出“山丘状”特征，并且相较于聚丙烯基膜，其特征更为明显。在放电初期放电量和放电重复率最小，随着放电的发展，放电重复率逐渐提高，在 25 min 处达到第 1 个峰值；随后放电重复率有所降低，在放电发展中期(35 min)处达到峰谷；之后放电重复率呈上升趋势，并在 50min 处达到第 2 个峰值，即存在一周期性的发展过程。其放电量基本分布于 40~50 pC 内，占比达到 99.2%，放电量最大值为 96 pC。相较于聚丙烯基膜，一方面表面喷镀电极后的金属化膜电容值增大，其储存电荷的能力增强，在发生放电时经耦合电容检测得到的放电量更为明显，并且会增加系统背景噪声，降低信噪比；另一方面金属化膜经过长时间 1.4 倍额定电压的出厂检测，内部缺陷增加，并且存在铝电极氧化成氧化铝的可能性，此时电荷会留在导电率较低的氧化铝表面的一个非常有限的区域，致使在不受表面电荷影响的其他区域处存在较大的过电压，从而引起较大幅值的放电脉冲[20]。两者共同作用导致相同电压下金属化膜局部放电量及放电重复率均显著提高。

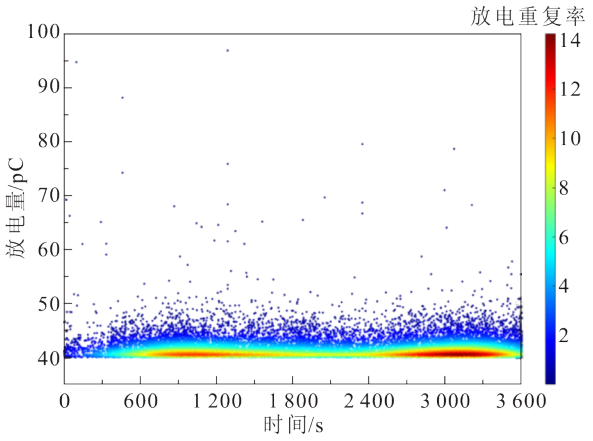


图 10 内部放电缺陷局部放电发展过程

Fig.10 PD development process of internal discharges

2.2 缺陷模型的统计特征图谱

2.2.1 沿面放电缺陷

聚丙烯薄膜沿面放电缺陷模型直流局部放电的统计特征图谱如图 11 所示。图 11(a)、11(b)分别表示放电量 q 以及放电时间间隔Δt 的密度分布图谱 $H(q)$、$H(\Delta t)$。为了进一步揭示缺陷模型放电量的分布特性，采用偏斜度 S_k 以及峰度 K_u 表征密度分布图谱形貌。由图可知，沿面放电缺陷在 10~50 pC 放电量范围内广泛分布，$H(q)$图谱偏斜度为 0.5，峰度为–1；放电时间间隔Δt 主要分布在 2.5 s 以内，$H(q)$图谱偏斜度为 4.1，峰度为 19.6。图 11(c)为后一次放电量均值 Q_{suc} 与本次放电量的关系图谱，该图用来表征后续放电量与本次放电量 q 的关系，即相邻两次局部放电间的记忆效应[21]。结果表明后一次放电量均值表现出明显的分散性，即本次放电幅值不影响后一次放电进程，放电之间无记忆效应。图 11(d)为后一次放电时间间隔Δt_{suc} 与本次放电量 q 的关系图谱，可以看出在 10~15 pC 范围内，较大的局部放电往往伴随一个较小的放电时间间隔，这是由于在电极-薄膜-空气三点结合处发生局部放电后间隙内部电离系数提高，局部放电临界场强降低造成的，因簇状放电的特性，在放电量大于 15 pC 时后一次放电间隔Δt_{suc} 较小，放电量 q 不影响放电间隔。

2.2.2 电晕放电缺陷

聚丙烯薄膜电晕放电缺陷模型直流局部放电的特征图谱如图 12 所示。电晕放电放电量主要集中在 10~12 pC 内，占比达到 88%，$H(q)$图谱偏斜度为 3.2，峰度为 15.3；放电时间间隔分布广泛，$H(\Delta t)$图谱偏斜度为 1.6，峰度为 2.2。由图 12(c)可知，在 10~11 pC 范围内表现为一次放电后会引起下一次更大幅值的放电，推测原因可能是电晕通道内空间电荷积累导致放电时延增加引起的[22]，在 11~20 pC 范围内呈现出较大的局部放电引起下一次更小幅值的放电。进一步图 12(d)可知，在放电量占比最大的 10~12 pC 范围内，较大的放电量会产生较多的空间电荷，不利于放电的继续发生，需要更长时间达到局部放电的最小阈值场强，导致后一次放电时间间隔Δt_{suc} 提高。

2.2.3 内部放电缺陷

聚丙烯薄膜和金属化膜内部放电缺陷模型特

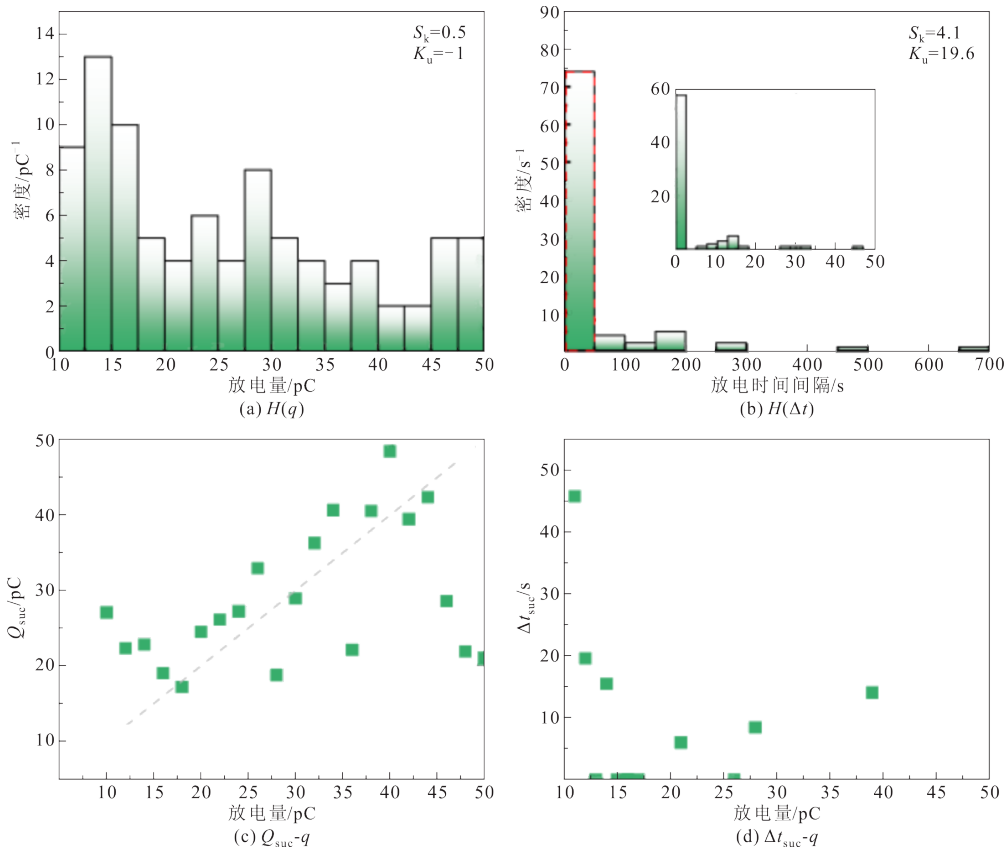


图 11 沿面放电缺陷统计特征图谱

Fig.11 Statistical characteristic spectra of surface discharge defects

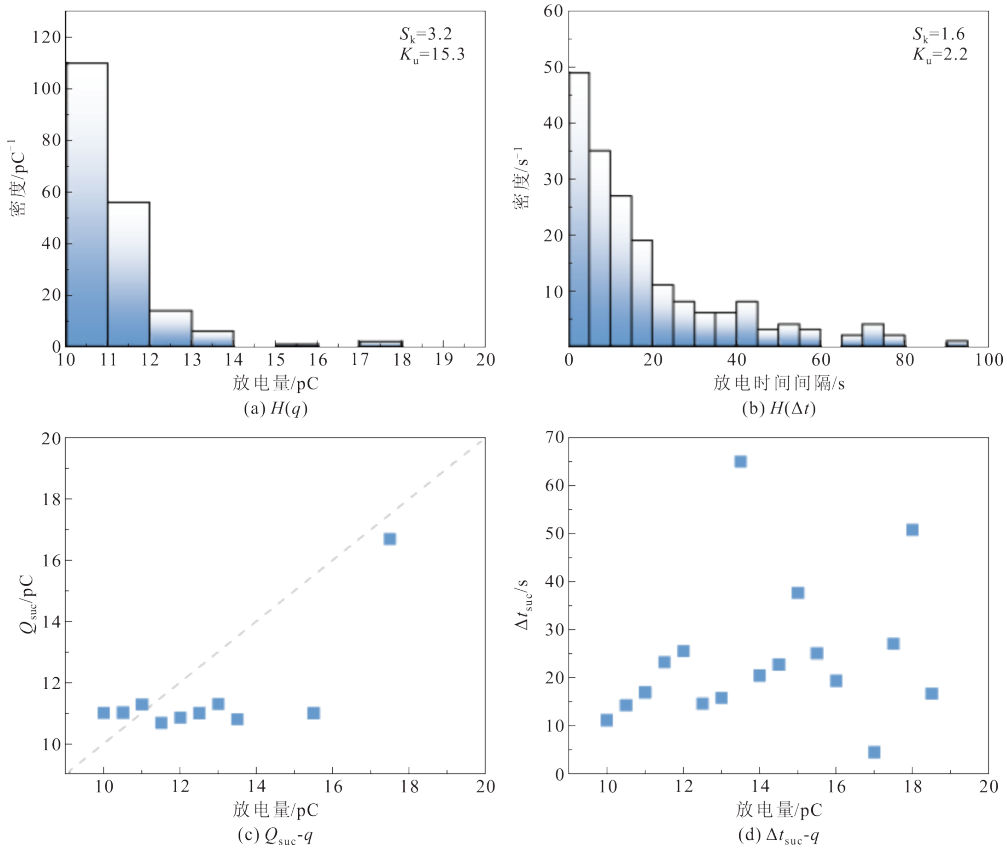


图 12 电晕放电缺陷统计特征图谱

Fig.12 Statistical characteristic spectra of corona discharge defects

征图谱如图 13 和图 14 所示。聚丙烯薄膜内部放电缺陷放电量主要集中在 10~15 pC 内，对应 $H(q)$图谱偏斜度为 5.5，峰度为 36.2，金属化膜 $H(q)$图谱同样表现出集中于较低放电量的特征；聚丙烯薄膜相邻两次放电间隔Δt 主要分布在 0~40 s 之间，对应的 $H(\Delta t)$图谱偏斜度为 2.3，峰度为 7.4，因放电重复率远高于聚丙烯基膜，金属化膜的Δt 主要分布在 0~1 s。由于聚丙烯薄膜内部放电次数较少，存在一定的分散性，因此在 Q_{suc}-q 及Δt_{suc}-q 图谱中规律并不明显，而在金属化膜 Q_{suc}-q 和Δt_{suc}-q 图谱规律显著。其中 Q_{suc}-q 表现出明显的本次放电伴随较小的下一次放电，这是由于本次放电产生的电荷在电场的驱动作用下向界面运动，降低了气隙内的电场强度，导致下一次放电强度降低。Δt_{suc}-q 图谱显示在 40~55 pC 范围内，本次放电量与下一次放电时间间隔呈线性关系。

2.3 典型缺陷模型的综合比较分析

综合对比聚丙烯薄膜 3 种典型缺陷的放电特性，电晕放电缺陷放电量最小，沿面放电缺陷放电量最大；电晕放电缺陷放电次数最多，沿面放电缺陷放电次数最少。分析易得，不同缺陷模型的电场畸变程度和空间电荷作用机制是引起上述现象的直接原因。进一步提取了 3 种典型缺陷 $H(q)$和 $H(\Delta t)$图谱偏斜度与峰度值，结果分别见图 15(a)、15(b)。

可以看出，内部放电缺陷 $H(q)$图谱的偏斜度和峰度最大，意味着内部放电缺陷的局部放电发展过程中，大多数放电的幅值小于平均放电幅值，小幅值放电居多，放电量分布更为集中，而沿面放电与之相反，表现为明显的随机性。此外，3 种典型缺陷中沿面放电缺陷的 $H(\Delta t)$图谱的偏斜度和峰度最大，表明沿面放电十分密集，且放电时间间隔Δt 的分布范围最小，这也是簇状放电的典型特征。

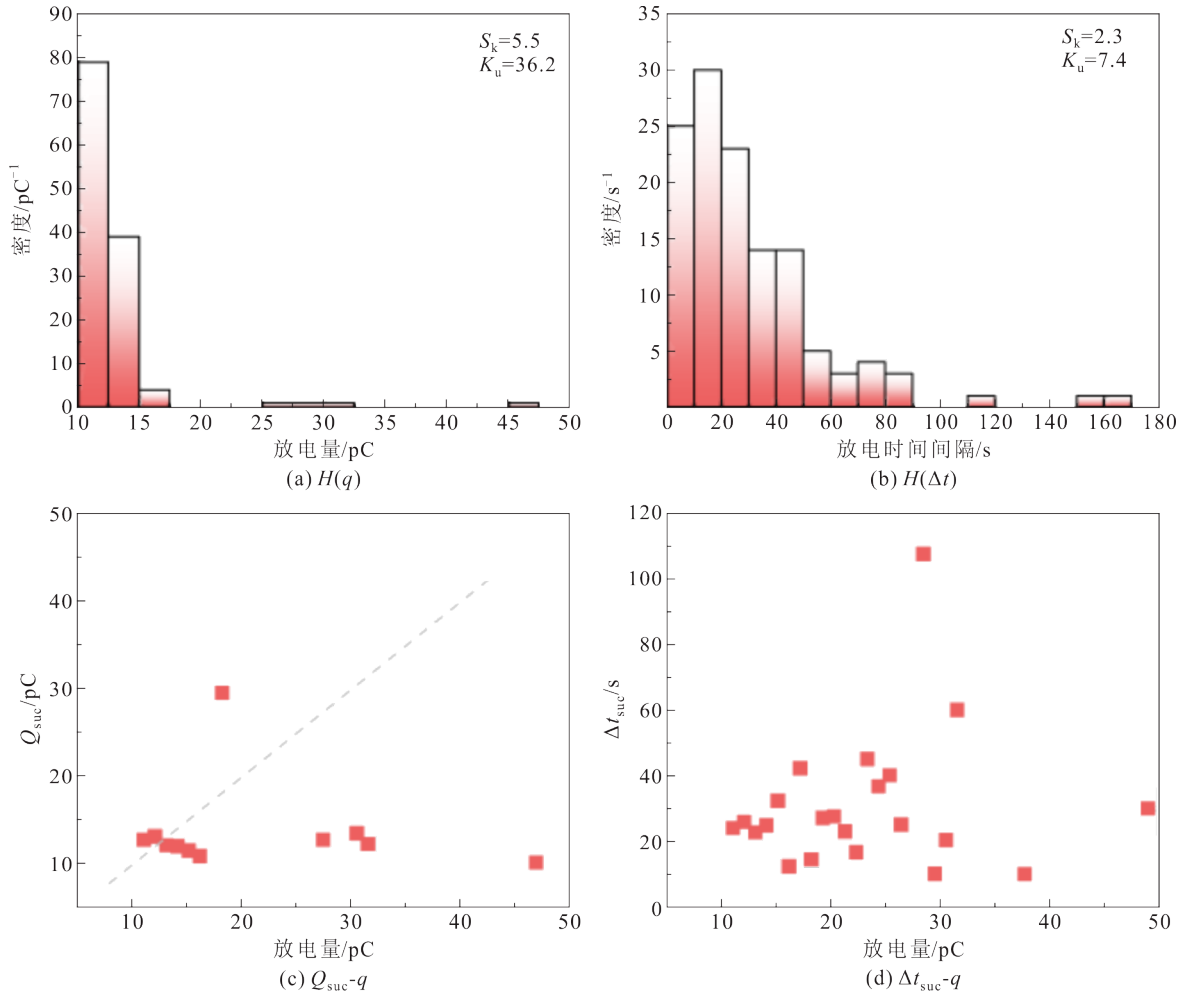


图 13 聚丙烯薄膜内部放电缺陷统计特征图谱

Fig.13 Statistical characteristic spectrums of internal discharge defects in PP films

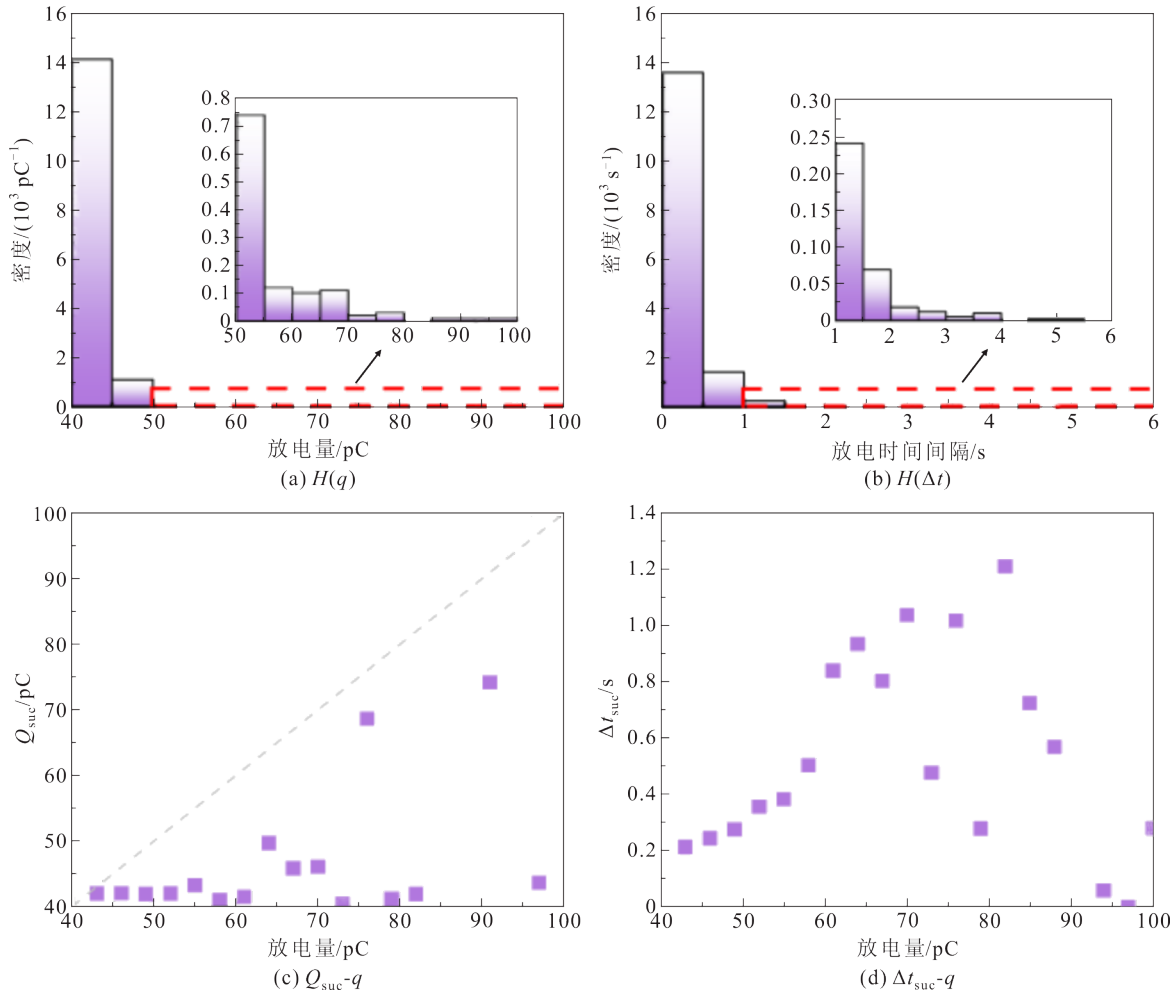


图 14 金属化膜内部放电缺陷统计特征图谱

Fig.14 Statistical characteristic spectra of internal discharge defects in metalized film

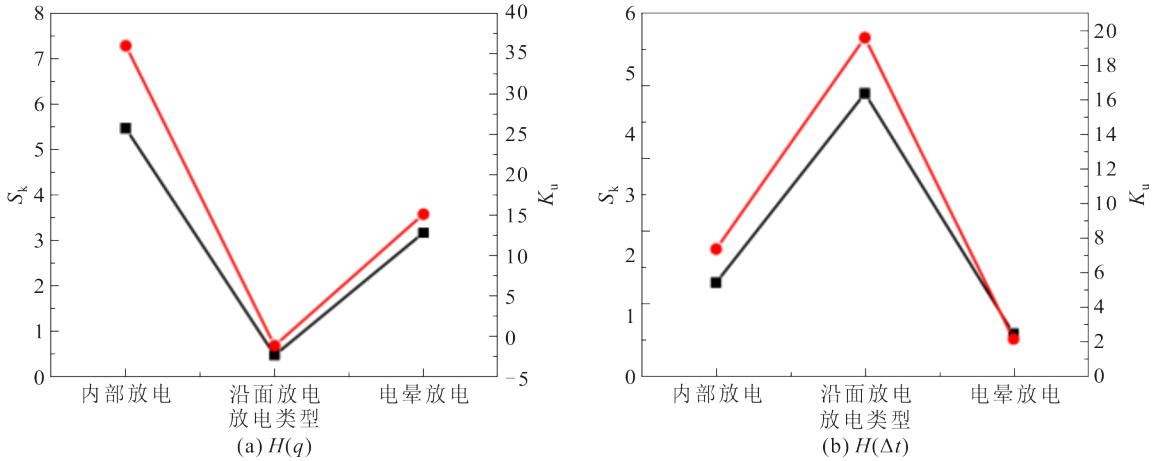


图 15 不同放电缺陷图谱偏斜度 S_k 与峰度 K_u

Fig.15 S_k and K_u of $H(q)$ and $H(\Delta t)$ spectra in different defect models

3 结论

1）基于本文选取的 3 种聚丙烯薄膜典型局部放电缺陷以及试验条件，电晕放电起始电压最高，为 1.65 kV；沿面放电起始电压最低，为 1.5 kV。沿面放电缺陷的 *Q-t* 图谱中表现出明显的“局部放电

簇”特征，这与多流注放电现象有关；随着外施电压时间的提高，电晕放电放电重复率呈现出先增后降的趋势，这归因于电晕层的扩散运动及电荷积聚作用；内部放电缺陷 *Q-t* 图谱则呈现出“山丘状”特征，这是由于气隙内部及薄膜表面电荷积累和消散过程引起的。

2）根据聚丙烯薄膜的 $H(q)$、$H(\Delta t)$、Q_{suc}-q、Δt_{suc}-q 统计特征图谱，在放电量幅值占比最多的范围内，电晕放电缺陷相邻 2 次放电之间存在相关性，表现出记忆效应；电晕放电和沿面放电缺陷本次放电量 q 与后一次放电时间间隔均值 Δt 均存在相关性。3 种放电缺陷模型局部放电发展过程中，电晕放电缺陷的放电次数最多，沿面放电缺陷的放电幅值最大；内部放电缺陷 $H(q)$图谱的偏斜度和峰度最大，沿面放电缺陷的 $H(\Delta t)$图谱的偏斜度和峰度最大。此外，金属化膜内部放电缺陷模型测试规律与聚丙烯基膜相符，研究结果可为电力电容器直流局部放电在线监测及故障诊断提供理论参考。

参考文献 References

[1] 党智敏，杨旻昊. 高储能薄膜电容器用介质材料研发的挑战与思考[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2210-2218.
DANG Zhimin, YANG Minhao. Challenges and reflection on dielectric materials for high-energy-density film capacitor application[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2210-2218.

[2] 张波，易承乾，药育帆，等. 柔直用金属化薄膜电容器多场耦合特性及影响研究综述[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2219-2233.
ZHANG Bo, YI Chengqian, YAO Yufan, et al. Review on multi-field coupling characteristics and effects of metallized film capacitors for flexible DC transmission[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2219-2233.

[3] 刘尚书，吴致远，仝殿杰，等. 多物理场作用下的金属化膜自愈特性试验[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5424-5434.
LIU Shangshu, WU Zhiyuan, TONG Dianjie, et al. Experiment of self-healing properties of metallized films under multiple physical fields[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5424-5434.

[4] 杜伯学，冉昭玉，刘浩梁，等. 干式直流电容器聚丙烯薄膜绝缘性能及其改进方法研究进展[J]. 电工技术学报，2023，38(5)：1363-1374.
DU Boxue, RAN Zhaoyu, LIU Haoliang, et al. Research progress of dielectric properties and improvement methods of polypropylene film for dry-type capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1363-1374.

[5] 肖萌，陈毓妍，赵亦烁，等. 高压直流金属化薄膜电容器绝缘性能提升方法研究进展[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2319-2331.
XIAO Meng, CHEN Yuyan, ZHAO Yishuo, et al. Research progress in improving insulation properties of HVDC metalized film capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2319-2331.

[6] NEMAMCHA M, GOSSE J P, GOSSE B. Effect of partial discharges on impregnated polypropylene films[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(4): 578-584.

[7] LIU H L, DU B X, XIAO M, et al. Effects of electromagnetic field on partial discharge behavior in BOPP film capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(6): 2617-2624.

[8] 林丽妲，李洁，雷梅梅，等. 基于时-相合成谱图的电力电容器薄膜局部放电模式识别方法[J]. 绝缘材料，2023，56(4)：93-99.
LIN Lida, LI Jie, LEI Meimei, et al. Partial discharge pattern recognition method for power capacitor film based on time-phase synthesis spectrogram[J]. Insulating Materials, 2023, 56(4): 93-99.

[9] MI Y, CHEN Y, LIU C H, et al. Influence of frequency on the partial discharge characteristics of biaxially oriented polypropylene film under nanosecond pulse voltage[J]. Journal of Applied Physics, 2023, 134(6): 063301.

[10] CHEN Y, MI Y, LIU C H, et al. Effect of temperature on partial discharge characteristics of BOPP film under nanosecond pulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(6): 3031-3039.

[11] WU Z Y, LIU S S, TONG T, et al. Theoretical and experimental studies on the self-healing properties of metallised capacitor films under multiple stresses[J]. High Voltage, 2024, 9(6): 1347-1356.

[12] 庞培川，孙泽明，张芊，等. 负极性直流电压作用下 SF_6 气体中极不均匀电场局部放电特性研究[J]. 高电压技术，2019，45(4)：1093-1100.
PANG Peichuan, SUN Zeming, ZHANG Qian, et al. Study on partial discharge characteristics of severe non-uniform electric field in SF_6 under negative DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1093-1100.

[13] 周远翔，王明渊，张云霄，等. 雷电冲击电压下典型油纸缺陷局部放电特征[J]. 高电压技术，2015，41(11)：3783-3789.
ZHOU Yuanxiang, WANG Mingyuan, ZHANG Yunxiao, et al. Characteristics of partial discharge of typical oil-paper defects under lightning impulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3783-3789.

[14] 周俊杰，吴治诚，张乔根，等. 油纸绝缘层间气泡局部放电演化特性[J]. 高电压技术，2024，50(5)：2217-2224.
ZHOU Junjie, WU Zhicheng, ZHANG Qiaogen, et al. Evolution characteristics of bubble partial discharge between oil paper insulation layers[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2217-2224.

[15] LI S M, LI Q Q, HE D X. PD classification in oil-pressboard insulation by simulating a needle-plate model with +DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(1): 261-269.

[16] KULIKOVSKY A A. Positive streamer in a weak field in air: a moving avalanche-to-streamer transition[J]. Physical Review E, 1998, 57(6): 7066-7074.

[17] 李斯盟，李清泉，刘洪顺，等. 正极性直流电压下油纸绝缘针板电极局放脉冲波形与局放机理[J]. 中国电机工程学报，2018，38(20)：6173-6187.
LI Simeng, LI Qingquan, LIU Hongshun, et al. PD pulse waveform characteristics and PD mechanism in oil-pressboard insulation with needle-plate model under positive DC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 6173-6187.

[18] WANG M Y, DU B X, HAN X T, et al. Effects of high magnetic field on partial discharge and flashover behavior of epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 7700704.

[19] 杜浩，关弘路，陈向荣，等. 直流电压下交联聚乙烯电缆典型缺陷局部放电特性[J]. 高电压技术，2021，47(2)：555-563.

DU Hao, GUAN Honglu, CHEN Xiangrong, et al. Partial discharge characteristics of typical defects in XLPE cable under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 555-563.

[20] HE Y S, WANG F P, DU G Q, et al. Revisiting the thermal ageing on the metallised polypropylene film capacitor: from device to dielectric film[J]. High Voltage, 2023, 8(2): 305-314.

[21] 杨丰源，许永鹏，钱勇，等. 相关分析技术在直流电压下 XLPE 电缆局部放电信号特征提取与筛选中的应用[J]. 电网技术，2018，42(5)：1653-1660.
YANG Fengyuan, XU Yongpeng, QIAN Yong, et al. Application of correlation analysis techniques in feature extraction and selection for DC partial discharge signals of XLPE cables[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1653-1660.

[22] 李军浩，司文荣，姚秀，等. 油纸绝缘内部气隙缺陷电劣化过程中局部放电的测量与模拟[J]. 中国电机工程学报，2009，29(31)：128-134.
LI Junhao, SI Wenrong, YAO Xiu, et al. Measurement and simulation of partial discharge in disc-void of oil-pressboard insulation with electrical degradation process[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 128-134.



宋家乐
1998—，男，博士生
主要从事介质薄膜材料绝缘测试技术，绝缘结构优化和多物理场仿真技术等
Email: sjl1998@zju.edu.cn

SONG Jiale
Ph.D. candidate



陈向荣(通信作者)
1982—，男，博士，教授，博导
主要从事先进电工材料与高压绝缘测试技术，先进电力装备与新型电力系统，高电压新技术等研究工作
Email: chenxiangrongxh@zju.edu.cn

CHEN Xiangrong
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2025-04-25 在线出版日期 2025-08-26 编辑 曹昭君