油浸绝缘纸损伤与局部放电相位分布模式演化的关系

廖瑞金 严家明 杨丽君 刘斌 孙才新
（重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 400044）

摘要 文章对油浸绝缘纸损伤过程中的表面形貌、表面粗糙度、表面电导率和气隙气体与局部放电相位分布（PRPD）模式演化的关系进行了研究。根据 PRPD 模式变化将放电损伤过程划分为五个阶段，利用显微镜、扫描电镜、原子力显微镜、高阻仪和气体测量装置，对比分析了每一阶段的表面损伤情况及气隙气体变化。研究结果表明：五个损伤阶段中，电负性气体含量交替下降上升，气隙内的主要放电形式在亚辉光（或辉光）放电和脉冲放电之间交替转换；亚辉光放电的 PRPD 模式主要由生成的弱电负性气体自身性质决定；脉冲放电的 PRPD 模式主要由表面损伤决定；脉冲放电的 PRPD 模式均拥有不同程度的“兔耳”特征和周期特征，“兔耳”特征强弱主要由表面电导率决定，周期特征强弱主要由表面陷阱密度决定；表面粗糙度不改变 PRPD 模式形状，但随着其值下降放电量呈上升趋势。

关键词：局部放电 油浸绝缘纸 损伤 相位分布 演化
中图分类号：TM835

Relationship Between Damage of Oil-Immersed Paper and Evolution of Phase-Resolved Partial Discharge Patterns

Liao Ruijin Yan Jiaming Yang Lijun Liu Bin Sun Caixin
（State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology
Chongqing University Chongqing 400044 China）

Abstract This paper respectively studies relationships between evolution of phase-resolved partial discharge(PRPD) patterns and surface topography, surface roughness, surface conductivity of oil-immersed insulation paper and gas constituents within cavity during the damaging process caused by partial discharge(PD). According to PRPD patterns, the damaging process can be divided into five stages. At each stage, surface conditions of insulation are analyzed by optical microscopy, scanning electron microscopy, atomic force microscopy, and high-resistance meter. Gas volume is analyzed by gas-measuring model, as well. Meanwhile, PRPD patterns of different gas constitution are compared, and analyzed, as well as those of different surface-damaging conditions. The results reveal that during the damaging process, main discharging form within cavity alters between pseudo-glow (or glow) and spark; PRPD pattern for pseudo-glow chiefly depends on properties of weak electronegative gases generated during PD; while PRPD patterns for spark mainly determined by different surface damage conditions; PRPD patterns for spark manifest different levels of “rabbit-ear” and periodical features, whose levels mainly depends on surface trap density and surface conductivity, respectively, surface roughness will not change shapes of PRPD patterns, but discharge amount declines as its value increases.

Keywords：Partial discharge, oil-immersed paper, damage, PRPD, evolution

国家重点基础研究发展计划 973 项目 (2009CB724505-1)；输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目 (2007DA10512708103)。
收稿日期 2010-07-02 改稿日期 2011-02-10

1 引言

随着数字技术发展，局部放电图谱在绝缘状态诊断中受到了广泛关注，其中放电相位分布模式（Phase-Resolved Partial Discharge, PRPD）是使用最广泛、发展最成熟的一种放电模式； PRPD 模式特征量与近现代数学方法相结合，在变压器故障状态诊断中起到了重要作用[1-3]。

但局部放电是复杂的物理化学过程，局部放电的发展规律与绝缘类型及其损伤程度的内在联系尚未明确。深入研究 PRPD 模式与绝缘材料损伤之间的关系，为进一步研究局部放电新特征量及提高故障状态诊断的可靠性和准确性，无疑具有理论和实际价值。

目前国内外对绝缘材料中气隙局部放电发生发展机理开展了大量的研究工作，并取得了一些研究成果。文献[4-6]对放电过程中的放电类型或放电形式进行了研究，得到了放电类型或放电形式转换的规律；文献[7-9]对气隙中放电波形和放电模式进行了研究，提出了在劣化过程中放电脉冲上升沿和下降沿的变化规律，并提出了放电的五个阶段；文献[10-12]研究了劣化过程中放电图谱及其统计特征量的变化，得到了放电特征量与绝缘劣化之间的关系联系；文献[13-15]采用蒙特卡罗等数学方法，模拟了放电图谱并计算了材料参量。这些研究主要着眼于局部放电信号，通过放电信号探究材料的放电机理，但绝缘材料的损伤对 PRPD 模式的影响及其关联机制目前还鲜见深入报道。

本文首先深入分析了绝缘材料中发生局部放电的基础理论，并设计油浸绝缘纸内部扁平气隙模型进行了长时间局部放电损伤试验；由 PRPD 模式划分放电损伤阶段，采用显微镜、扫描电镜、原子力显微镜和高阻仪等分析了不同损伤阶段的表面形貌、表面三维粗糙度和表面电导率，同时分析了气隙气体体积和组分变化；探讨了表面损伤、气体组分和 PRPD 模式三者之间的有机关联特性。

2 气隙局部放电理论分析

本文采用的气隙放电损伤模型根据 CIGRE Method II 标准制作，气隙局部放电的发生须满足两个条件[16]：①场强须超过最小起始放电场强（即巴申电场）；②须产生激发电子崩的有效起始电子。

气隙局部放电发生在由绝缘材料密封的气体中，有效起始电子由绝缘表面或气体内部产生，最小起始放电场强由气体自身性质决定。故气隙局部放电与“绝缘表面”和“气隙气体”相关联。

2.1 理想气隙放电

局部放电理想气隙模型基于绝缘表面或气体内部储蓄了无限多的“准有效起始电子”（即：能脱陷且激发电子崩的电子）这一假设[17]，即气隙场强一旦达到最小起始放电场强，就产生 有效起始电子引发电子崩而产生局部放电，此时放电统计时延 $\tau_s \to 0$ 或电子发射概率 $P \to 1$。在外加电压的单个周期中，理想模型放电脉冲呈周期性出现。

2.2 实际气隙放电

绝缘表面产生的有效起始电子主要来自于储存在绝缘表面陷阱中的电子；在光、热、电或离子碰撞等作用下，绝缘表面产生有效起始电子的概率 P_{wall} 近似遵守 Richardson-Schottky 定律[18]，如

$$P_{\text{wall}}(t) = N_t \upsilon_0 \exp\left(-\frac{\phi - \sqrt{e|E(t)|/(4\pi\varepsilon_0)}}{kT}\right) \tag{1}$$

$$N_t = N_{t_0} \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \tag{2}$$

$$N_{t_0} = \xi\left(\frac{q}{e}\right) \tag{3}$$

$$-\frac{\mathrm{d}N_t(e)}{\mathrm{d}t} = \frac{\pi}{2}\sigma_s E(2h) \tag{4}$$

式中，描述表面电荷消逝的式（2）可由式（4）的欧姆定律近似； P_{wall} 为表面电子发射概率； N_t 为 t 时刻表面可用于脱陷的电子数； N_{t0} 为 t_0 时刻发生一次放电产生的可用于脱陷的电子数； q 为 t_0 时刻单次局部放电量； $E(t)$ 为 t 时刻气隙内电场强度； h 为气隙半高； $E(2h)$ 为气隙内瞬时电动势差； ϕ、ζ 和 σ_s 分别为脱陷功函数、电子吸收因数（$\zeta \leqslant 1$）和表面电导率，它们均由材料自身性质决定；其他如消逝常数 τ、基本声子频率 υ_0、真空介电常数 ε_0、玻耳兹曼常数 k 和基本电荷 e 等。

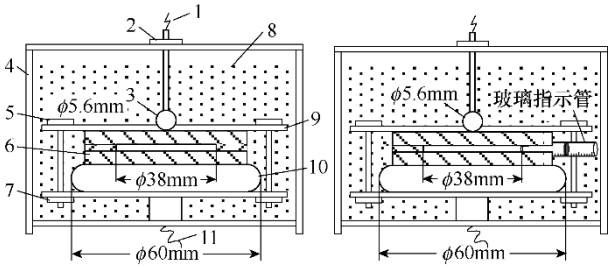
气体产生有效起始电子的概率 P_{gas} 主要受气体种类影响，气体种类可由表征电负性强弱的电子附着系数 η 描述， η 越大则其发射首电子的概率 P_{gas} 越低；同时， η 越大，气体抑制电子崩发展的能力也越强，从而引起最小起始放电场强升高。

3　试验设计

3.1　局部放电损伤试验

油浸绝缘纸放电损伤模型如图 1a 所示。其中试验电极根据 CIGRE Method II 标准制作；试品上、下两层采用 1mm 厚普通绝缘纸板，中间层采用 0.125mm 厚普通绝缘纸，并在中间裁剪出直径 38mm 的圆形气隙，用硅胶密封，模拟油纸绝缘内部扁平气隙；试品平放于不锈钢地电极上方，并由环氧装置固定，高压球电极紧贴于气隙上方绝缘纸；整个模型置于盛有 25#矿物油的密闭有机玻璃容器中。绝缘纸使用之前经过真空干燥、浸油预处理。

放电损伤过程中气体测量模型如图 1b 所示，试品中间嵌入一玻璃指示管并用硅油密封。



（a）放电损伤模型　　（b）气体测量模型

图 1　试验模型

1—高压引出端　2—铜螺母　3—铜球　4—有机玻璃容器　5—环氧螺栓　6—试品　7—环氧螺母　8—矿物油　9—环氧板　10—不锈钢地电极　11—地线

Fig.1　Experimental model

将 30 个放电损伤模型和 6 个气体测量模型同时放入 70℃热老化箱中，并施加工频交流电压。试验模型平均起始放电电压为 7.5kV，本文选取 10kV 作为试验电压。试验过程中利用 LeCroy Wavepro7100 示波器采集 RC 检测阻抗感应的脉冲放电信号。

3.2　气体组分变化试验

油浸绝缘纸放电损伤试验过程中，根据气体测量模型的玻璃指示管中硅油移动表征气体体积变化；同时，在不同损伤阶段，取出一个气体测量模型并分别向气隙中注入空气和氮气后密封，在 70℃环境温度、AC10kV 电压条件下测量 RC 检测阻抗感应的局部放电。

4　试验结果及分析

4.1　放电信号 PRPD 模式分析

PRPD 模式是一种广泛使用的局部放电相位分布模式，本文在油浸绝缘纸局部放电损伤持续约 500h 中，监测到不同试品的 PRPD 模式均表现出了如图 2 所示的五种变化，与文献 [14]的监测结果相吻合。根据 PRPD 模式的变化划分五个损伤阶段。

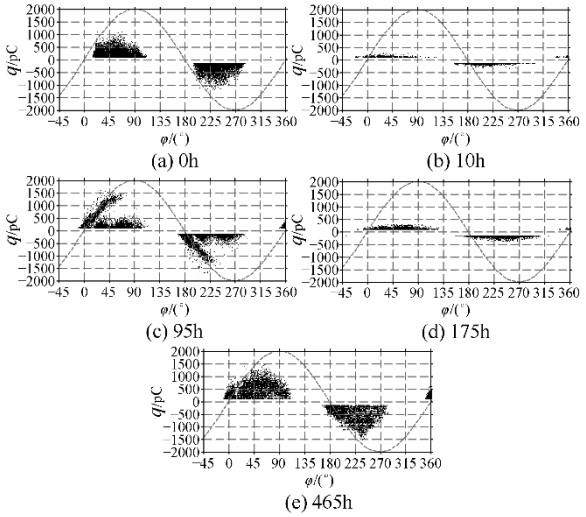


图 2　PRPD 模式变化

Fig.2　Transition of PRPD patterns

第一阶段放电持续约 90min，放电图像呈“龟背”状[19]（见图 2a），放电相位较窄且起始相位滞后于 0°和 180°，此后各阶段放电相位变宽且起始相位均超前于 0°和 180°；第二阶段放电持续约 2 天，放电量下降，放电图像呈 “带”状（见图 2b），放电量的下降甚至可能超出 RC 检测阻抗的灵敏度而“消失”；第三阶段放电持续约 5 天，放电量增长，放电图像呈 “兔”状（见图 2c）；第四阶段放电持续约 12 天，是放电损伤的主要阶段，放电量下降，放电图像和第二阶段相似呈 “带”状（见图 2d）；第五阶段放电量增加，放电图像类似“三角”状（见图 2e），三角出现后短时间内就有绝缘击穿发生。

根据局部放电发生的基本理论，放电信号的 PRPD 模式发生的上述变化主要与 “气隙气体”和“绝缘表面”相关联。

4.2　气体对局部放电影响分析

根据参考文献 [6]的研究成果，气隙中主要局部放电形式可在脉冲放电和亚辉光（或辉光）放电之间转换，这二种放电形式在本质上均属于汤逊放电（Townsend discharge）；电负性气体如 O_2 等含量

的增加或减少影响这种转换。所以有必要研究局部放电损伤过程中气隙气体的变化。

气体测量模型监测五个损伤阶段中气隙气体体积的变化如图 3 所示（标准大气压下测量）。从图 3 中可以看出，油浸绝缘纸损伤过程中，气体体积交替下降上升呈现出了五种变化，表明不断出现了气体的消耗和生成，气体组分不断地发生变化。这五种变化对应图中 五个阶段（a～e）。

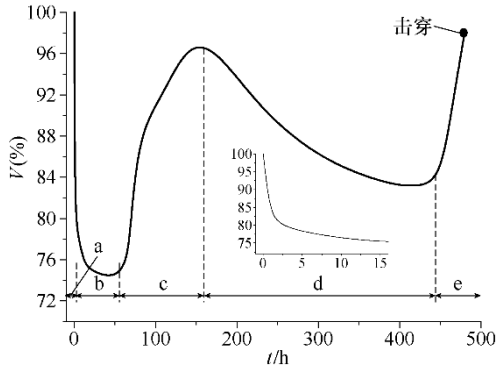


图 3 气体体积随时间变化

Fig.3 Change in gas volume in the cavity with time

由于空气中 O_2 的体积百分含量为 20.95%，从而其电负性较强，气隙注入空气后的放电形式主要为脉冲放电[6]；由于氮气电负性很弱，气隙注入氮气后的放电形式主要为亚辉光放电[6]。向不同损伤阶段的气隙中分别注入空气和氮气而改变气隙气体的电负性后，测得的 PRPD 模式及其对应的主要放电形式列于表 1。

表 1 不同气隙气体的 PRPD 模式

Tab.1 PRPD pattern shapes in void with different gases

	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段	第五阶段
注入空气（脉冲放电）	龟背	龟背	兔	簇*	三角
损伤过程中气隙气体	龟背	带	兔	带	三角
注入 N_2（亚辉光放电）	带	带	带	带	带

* “簇”是周期性特征。

根据表 1，在不同的损伤阶段，气隙注入空气产生脉冲放电后，其 PRPD 分别表现为“龟背”、“兔”、“簇”和“三角”状；注入氮气产生亚辉光放电后，其 PRPD 模式均表现为“带”状。但在损伤过程中气隙气体本身变化的情况下，第一、第三和第五阶段的 PRPD 模式分别表现为脉冲放电的“龟背”、“兔”和“三角”状，而第二和第四阶段的 PRPD 模式表现为亚辉光的 “带”状。由此可见，在油浸绝缘纸损伤过程中，气隙内的 主要放电形式在脉冲放电和亚辉光放电之间交替转换；气隙中电负性气体含量交替下降上升，第一、三和五阶段，电负性气体含量较高，而第二和第四阶段电负性气体含量较低。同时，从图 2 中的 PRPD 模式的五种变化也可以看出：第一、三和五阶段放电较强，属脉冲放电；第二和四阶段放电较弱，属亚辉光放电；并交替转换。

4.3 表面损伤对 PRPD 模式影响分析

在损伤过程中，分别利用显微镜（型号 XTZ–B）和扫描电镜（SEM，型号 TESCAN VEGA II LUM）对不同损伤阶段试品的表面形貌进行分析。

五个损伤阶段的绝缘纸表面 SEM 形貌如图 4 所示，其中图 4a～4d 的放大倍数为 1000 倍，而图 4e 的放大倍数为 100 倍以便于观测表面损伤的全貌。从图中可以看出，放电之初绝缘纸表面存在大量不规则分布的纤丝状物质（见图 4a）；随着放电时间增长，表面纤丝因 “烧蚀”而逐渐消失，绝缘表面变得整洁光滑（见图 4b）；当放电损伤发展到第三阶段时，表面纤维逐渐出现 “剥皮”现象（见图 4c），并在绝缘表面开始聚集液滴（见图 5a）；第四阶段表面纤维 “裂化分丝”，绝缘表面开始出现晶状固体（见图 4d 和图 4e），通过对比发现，随着时间增长晶状固体的体积逐渐增大；最后在晶状固体周围出现 “凹坑”（见图 4f），绝缘表面呈现树枝化现象（见图 5b）。五个损伤阶段中，每一损伤阶段的绝缘表面均表现出了各自的变化特征，它们构成了表面形貌的变化。

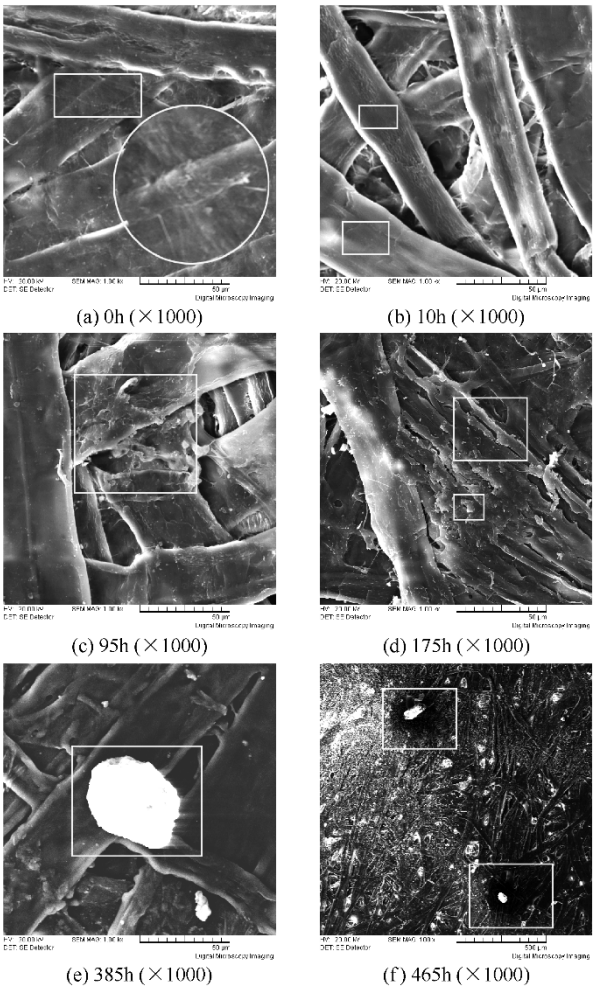
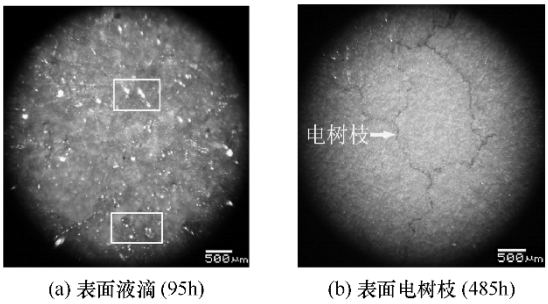


图 4　绝缘纸表面 SEM 图

Fig.4　SEM images of insulation paper surface



(a) 表面液滴 (95h)　　(b) 表面电树枝 (485h)

图 5　油浸绝缘纸表面显微镜图片

Fig.5　Microscopy images of oil-immersed insulation paper surface

通过绝缘表面形貌变化过程的分析可以看出，在五个损伤阶段中，绝缘表面形貌和气体一样表现出了五种变化特征，故 PRPD 模式可以用于判断绝缘的表面状况及缺陷的发展状况。

根据局部放电发生的基本理论，气隙局部放电与“气隙气体”和“绝缘表面”相关联。五个阶段的绝缘纸表面、气体组分和 PRPD 模式的变化关系见表 2。

表 2　不同损伤阶段的表面情况和气隙气体

Tab.2　Surface conditions and gas in cavity at different damaging stages

	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段	第五阶段
表面损伤	纤丝	光滑	剥皮，液滴	分丝，固体	凹坑，树枝
电负性气体含量	高	低	高	低	高
PRPD 模式	龟背	带	兔	带	三角

根据表 2，在第二、四阶段，虽然表面形貌产生了不同的变化，但其气隙因电负性气体含量较低均产生亚辉光型放电。根据局部放电发生的基本理论，电负性气体含量较低，气体产生有效起始电子的概率 P_{gas} 将变大，最小起始放电场强将变小，由此导致起始放电场强更加接近于最小起始放电场强，从而放电脉冲微弱，放电相位展宽且起始相位前移；虽然少量相对较大的脉冲进入了 RC 检测灵敏度范围，但它们的视在放电量也仅局限在一个狭小的范围内，故 PRPD 模式呈“带”状。

在第一、三和五阶段，表面形貌产生了不同的变化，虽然气隙中因电负性气体含量较高均产生脉冲型放电，但 PRPD 模式在“龟背”、“兔”和“三角”之间演化。

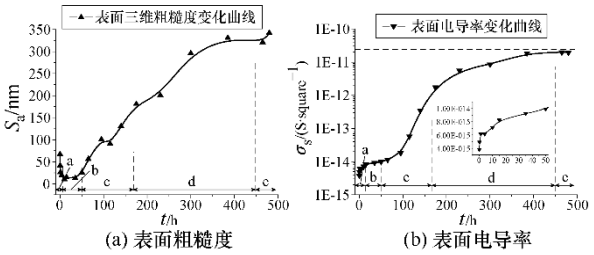
由此可见，亚辉光放电 PRPD 模式主要由弱电负性气体自身性质决定，而脉冲放电 PRPD 模式演化主要由表面损伤决定。同时从表 1 中也可以看出，在五个阶段绝缘表面发生了不同程度损伤的情况下，注入弱电负性的氮气产生亚辉光放电后，其 PRPD 模式单一不变；而注入强电负性的空气产生脉冲放电后，其 PRPD 模式发生变化，这也进一步验证了“亚辉光放电 PRPD 模式主要由弱电负性气体自身性质决定，而脉冲放电 PRPD 模式演化主要由表面损伤决定”这一结论。

5　讨论

表面粗糙度和表面电导率是描述绝缘表面的两个重要参量，它们分别通过畸变电场结构或改变电子转移速度而影响放电的发生和发展。

在油浸绝缘纸损伤过程中，利用原子力显微镜（型号 AFM.IPC–208B）测量不同损伤阶段绝缘纸表面微区形貌，并计算三维表面粗糙度 [20]；采用高阻仪（型号 Agilent 4339B）测量不同损伤阶段绝缘

纸表面电导率，环境温度 20℃，空气湿度 40%±2%，电压 DC100V，1min 电化时间。五个损伤阶段中，表面损伤导致表面粗糙度和表面电导率发生如图 6 所示的变化。



(a) 表面粗糙度 (b) 表面电导率

图 6 绝缘纸表面三维粗糙度和表面电导率随时间变化

Fig.6 Change of three-dimensional surface roughness and surface conductivity of insulation paper with time

由于“损伤过程中脉冲放电 PRPD 模式演化主要由表面损伤决定”，但根据图 6，损伤过程中表面粗糙度和表面电导率均发生变化，为了进一步分析它们分别与脉冲放电 PRPD 模式演化的关系，利用空气隙产生脉冲放电，进行了“表面电导率和粗糙度影响脉冲放电 PRPD 模式演化”的补充试验。

5.1 补充试验

5.1.1 试验模型及测量

将厚度均为 1mm，初始含水量分别为 1.578 8%和 6.627 4%的两种普通绝缘纸板分别标号为 I 类和 II 类，将部分 I 类绝缘纸板置于喷碳设备（型号 Quorum Q150TE）中吸收碳粉，并记绝缘纸标号为 III 类。将 I、II 和 III 类绝缘纸在 25#矿物油中真空浸渍后，以同类油浸绝缘纸板作为气隙上、下层，0.125mm 厚油浸绝缘纸作为气隙中间层，分别制作带有“空气”隙的三组试验模型 A、B 和 C，试验模型尺寸、结构同气体测量模型 （见图 1b）。

在 70℃环境温度、AC10kV 电压下，测量三组模型气隙中脉冲放电的 PRPD 模式；在相同条件下局部放电“预处理”45min 后，抽出气隙气体并注入“空气”后密封，再次在相同条件下测量 PRPD 模式。“预处理”前后，分别测量表面粗糙度和表面电导率。

5.1.2 试验结果

“预处理”前后，表面粗糙度、表面电导率和 PRPD 模式变化分别见表 3 和图 7 所示。

表 3 放电“预处理”前后的表面参数

Tab.3 Surface parameters before and after being pretreated by partial discharge

油浸绝缘纸	W_g（%）	预处理时间/min	S_a/nm	σ_s/S	空气隙放电图谱
A 组	1.5788	0	75.23	5.17×10^{-15}	图 7a
		45	8.17	7.85×10^{-15}	
B 组	6.6274	0	81.29	1.85×10^{-13}	图 7b
		45	9.25	2.17×10^{-13}	
C 组	1.5778，且表面喷碳	0	83.18	3.62×10^{-11}	图 7c
		45	10.17	2.59×10^{-11}	

* W_g 为初始含水量。

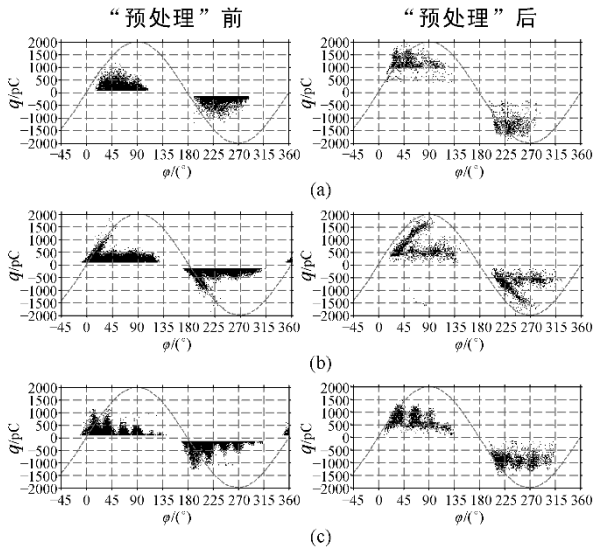


图 7 放电“预处理”前后的 PRPD 模式

Fig.7 PRPD patterns of different surfaces before and after being pretreated by partial discharge

根据表 3 和图 7，局部放电“预处理”改变了表面粗糙度；初始含水量和碳粉改变了表面电导率；三组试品预处理前后的 PRPD 模式与损伤过程中脉冲放电的 PRPD 模式相似（见表 1），呈现“龟背”、“兔”和“簇”状。

5.2 表面粗糙度对 PRPD 模式影响分析

放电“预处理”前后，虽然每组试品的表面电导率处于同一数量级范围（近似相等），但其表面粗糙度发生了明显改变（见表 3）；且随着粗糙度下降对应的 PRPD 模式均呈上移趋势，且形状基本不变（见图 7）。由此可见，粗糙度是影响放电量的重要因素，且随着粗糙度下降放电量呈上升趋势。

5.3 表面电导率对 PRPD 模式影响分析

“预处理”前或后，虽然三组试品的表面粗糙度近似相等（见表 3），但脉冲放电的 PRPD 模式分别呈“龟背”、“兔”和“簇”状（见图 7）。

三组试品的 PRPD 模式均拥有不同程度的“兔耳”特征，即每半周期放电中初始部分放电量较其

余部分大。根据式（4），表面电子的消逝由消逝时间和表面电导率决定。半周期放电过程中，每组试品的表面电导率不变，但“极性的转换时间”远大于“连续放电时间间隔”，前者消逝的电子数量大于后者；因此根据 Richardson-Schottky 定律，极性转换后，半周期中表面产生第一次放电的有效起始电子的概率较低，从而其放电量较大，形成“兔耳”部分。同时，随着表面电导率增加，三组试品 PRPD 模式的“兔耳”特征越来越显著；根据式（4），表面电导率增加导致表面电子有更快的消逝速度，“极性转换时间”内与“连续放电时间间隔”内电子消逝数量的差异进一步加大，从而“兔耳”特征更加趋于明显。由此可见，表面电导率是决定 PRPD 模式“兔耳”特征强弱的重要因素。

除“兔耳”特征外，每组试品的 PRPD 模式也均呈现出不同程度的周期性“簇”特征（见图 7），且随着表面电导率升高周期性“簇”特征越来越明显；三组试品对应的放电次数相位分布模式更加明确地呈现了这种变化特征，如图 8 所示。根据局部放电发生的基本理论，周期特征的增强主要是由于表面产生有效起始电子的概率 P_{wall} 升高所致；再由 Richardson-Schottky 定律，随着表面电导率升高，概率 P_{wall} 的升高主要由脱陷功函数 ϕ 的下降或电子吸收因数 ζ 的升高所致。脱陷功函数 ϕ 和电子吸收因数 ζ 由表面陷阱密度决定，随着陷阱密度增加，放电过程中绝缘表面能够储存更多的放电电子，从而导致电子吸收因数 ζ 相应增加；同时陷阱密度的升高引入了数量不等的浅陷阱，其脱陷功函数 ϕ 较小；ζ 的增加和 ϕ 的减小都将引起表面产生有效起始电子的概率 P_{wall} 增加，使得 PRPD 模式的周期特征加强。由此可见，表面陷阱密度是决定 PRPD 模式周期特征强弱的重要因素。

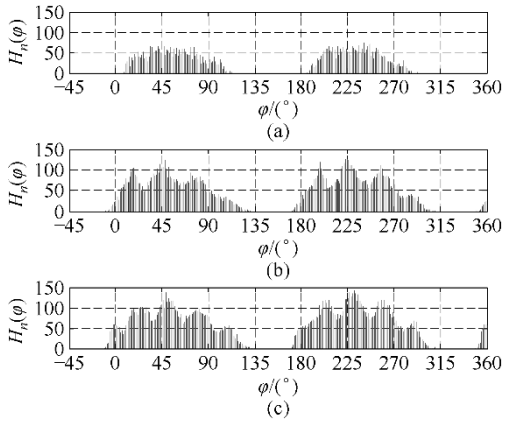


图 8 “预处理”前放电次数相位分布

Fig.8　Two-dimensional phase distribution of discharge numbers before being pretreated by PD

6　结论

本文对损伤过程中油浸绝缘纸的表面形貌、表面粗糙度、表面电导率和气隙气体与放电信号 PRPD 模式演化的关系进行了研究，得出如下结论：

（1）不同阶段的局部放电引起不同的表面损伤特性和气体变化特征，PRPD 模式可以用于判断绝缘的表面状况及缺陷的发展状况。

（2）气体体积和电负性气体含量交替下降上升，气隙内的主要放电形式在脉冲放电和亚辉光（或辉光）放电之间交替转换。在第一、第三和第五损伤阶段，放电形式为脉冲放电；在第二和第四损伤阶段，放电形式为亚辉光（或辉光）放电。

（3）亚辉光放电的 PRPD 模式呈“带”状，主要由生成的弱电负性气体自身性质决定；脉冲放电的 PRPD 模式在“龟背”、“兔”、“簇”和“三角”之间演化，主要由表面损伤决定。

（4）脉冲放电 PRPD 模式均具有不同程度的“兔耳”特征和周期特征，“兔耳”特征和周期特征的强弱变化导致了脉冲放电 PRPD 模式的演化。

（5）表面电导率是决定 PRPD 模式“兔耳”特征强弱的重要因素，表面电导率越大“兔耳”特征越显著；表面陷阱密度是决定 PRPD 模式周期特征强弱的重要因素，陷阱密度越高则周期特征越明显；粗糙度是影响放电量的重要因素，随着粗糙度下降放电量呈上升趋势但 PRPD 模式的形状基本不变。

参考文献

[1] Jian L, Caixin S, Grzybowski S. Partial discharge image recognition influenced by fractal image compression[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 496-504.

[2] 廖瑞金，杨丽君，孙才新，等. 基于局部放电主成分因子向量的油纸绝缘老化状态统计分析 [J]. 中国电机工程学报 , 2006, 26(14): 114-119.
Liao Ruijin, Yang Lijun, Sun Caixin, et al. Aging condition assessment of oil-paper based on Principal component and factor analysis of partial discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 114-119.

[3] 杨丽君，廖瑞金，孙才新，等. 矢量量化在局部放电

模式识别中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 122-127.
Yang Lijun, Liao Ruijin, Sun Caixin, et al. Application of vector quantization to partial discharge pattern recognition[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 122-127.

[4] Morshuis P H F, Kreuger F H. Transition from streamer to Townsend mechanisms in dielectric voids[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1990, 23(12): 1562-1568.

[5] Morshuis P. Assessment of dielectric degradation by ultrawide-band PD detection[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 744-760.

[6] Bartnikas R. Partial discharges their mechanism, detection and measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(5): 763-808.

[7] Florkowski M, Florkowska B. Phase-resolved rise-time-based discrimination of partial discharges[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2009, 3(1): 115-124.

[8] Kim C S, Kondo T, Mizutani T. Change in PD pattern with aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 13-18.

[9] Wu K, Okamoto T, Suzuoki Y. Effects of discharge area and surface conductivity on partial discharge behavior in voids under square voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(2): 461-470.

[10] 周凯, 吴广宁, 吴建东, 等. 连续方波脉冲下局部放电信号测量与绝缘老化分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 88-92.
Zhou Kai, Wu Guangning, Wu Jiandong, et al. Measurement for partial discharge and analysis on insulation aging under continuous square pulse voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 88-92.

[11] 周凯, 吴广宁, 吴建东, 等. 基于局部放电统计参量的脉冲电压下绝缘老化分析 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(4): 6-12.
Zhou Kai, Wu Guangning, Wu Jiandong, et al. Analysis of aging properties for insulation based on statistical parameters of partial discharge under pulse voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(4): 6-12.

[12] 张百华, 高乃奎, 马小芹, 等. 基于运行历史的大电机主绝缘老化特性的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 134-137.
Zhang Baihua, Gao Naikui, Ma Xiaoqin, et al. Study on the aging characteristics of stator winding insulation in large generator based on operating history[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 134-137.

[13] Cavallini A, Montanari G C. Effect of supply voltage frequency on testing of insulation system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(1): 111-121.

[14] Junhao L, Wengrong S, Xiu Y, et al. Measurement and simulation of partial discharge in oil impregnated pressboard with an electrical aging process[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(10), 1-7.

[15] Niemeyer L. A generalized approach to partial discharge modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 510-528.

[16] Fruth B, Niemeyer L. The importance of statistical characteristics of partial discharge data[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1992, 27(1): 60-69.

[17] Crichton G C, Karlsson A, Pedersen A. Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1989, 24(2): 335-342.

[18] Gutfleisch F, Niemeyer L. Measurement and Simulation of PD in epoxy voids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 729-743.

[19] Wu K, Ijichi T, Kato T, et al. Contribution of surface conductivity to the current forms of partial discharges in voids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(6): 1116-1124.

[20] Schmahling J, Hamprecht F A, Hoffmann D M P. A three-dimensional measure of surface roughness based on mathematical morphology[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(14): 1764-1769.

作者简介:廖瑞金　男，1963 年生，教授，博士生导师，长江学者奖励计划特聘教授，从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断研究和高电压测试技术工作。 严家明　男，1977 年生，博士研究生，从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断研究。