

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.022

基于图像特征提取的低气压介质阻挡放电均匀性表征研究

杨昊^{1,2}, 陈苗苗¹, 周福升^{2,3}, 张昊天¹, 孙凡¹, 胡文秀¹

(1. 西安工程大学电子信息学院, 西安 710048; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 3. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663;)

摘要:近年来,介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)的均匀放电模式在工业等领域具有较大的应用潜力。通过提取DBD放电图像的特征,提出了周向环差法和径向极差法两种方法对低气压DBD的放电均匀性进行判别,并利用极差值与环差值表征DBD放电均匀程度,给出了不同电压、频率、气压参数条件下DBD放电均匀性的演化规律,验证了周向环差法和径向极差法在评价DBD放电均匀性方面的适用性。结果表明:当周向DBD放电均匀性降低时,放电图像的环差值将显著升高;当径向DBD放电均匀性降低时,放电图像的极差值亦将升高。同时,外施电压和放电频率均与放电强度相关,但对DBD放电均匀性影响较小;气压对DBD放电均匀性影响显著,且随着气压的升高,放电均匀性将呈降低趋势。提出的周向环差法与径向极差法可以实现对DBD放电均匀性的评估,为进一步实现均匀稳定的介质阻挡放电提供依据,对于均匀DBD在材料表面改性等领域应用具有实用性价值。

关键词:介质阻挡放电;放电图像;放电均匀性;周向环差法;径向极差法

Study on Uniformity Characterization of Low Pressure Dielectric Barrier Discharge Based on Image Feature Extraction

YANG Hao^{1,2}, CHEN Miaomiao¹, ZHOU Fusheng^{2,3}, ZHANG Haotian¹, SUN Fan¹, HU Wenxiu¹

(1. School of Electronic Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: In recent years, the uniform discharge mode of dielectric barrier discharge (DBD) has shown significant application potential in industry and other fields. In this paper such two methods as circumferential ring difference and radial range difference are proposed to distinguish the discharge uniformity of DBD at low pressure by extracting the characteristics of DBD discharge images, the range and ring difference are used to characterize the discharge uniformity of DBD, the evolution of the discharge uniformity of DBD under different voltage, and frequency and pressure parameters is given. The applicability of circumferential ring difference method and radial range method in evaluating the discharge uniformity of DBD is verified. The results show that in case of decrease of the uniformity of discharge in circumferential DBD, the ring difference of discharge image will increase significantly. In case of decrease of the uniformity of radial DBD discharge, the range of discharge image will also increase. At the same time, both the applied voltage and discharge frequency are related to the discharge intensity, but have little effect on the discharge uniformity of DBD. The effect of air pressure on the discharge uniformity of DBD is significant, and the discharge uniformity tends to decrease with the increase of air pressure. The proposed circumferential ring difference method and radial range difference method can achieve the assessment of the discharge uniformity of DBD, provide a basis for further realizing uniform and stable dielectric barrier discharge and have practical value for the application of uniform DBD in the field of material surface modification.

收稿日期:2025-09-18; 修回日期:2025-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007138)。

Project Supported by National Nature Science Foundation of China(52007138).

Key words: dielectric barrier discharge; discharge image; discharge uniformity; circumferential ring difference method; radial range method

0 引言

低气压 DBD 放电在材料表面处理、环境工程、医疗器械等领域具有广泛的应用前景^[1-5],但在工业中通常对等离子体的均匀性比较高,不能出现较强的放电细丝。因此如何实现和评价均匀的 DBD 放电形式已成为研究热点^[6-7]。为了进行 DBD 放电均匀性识别及诊断方法研究,国内外研究学者通过电气参数、光谱分析、图像处理等方法研究 DBD 放电均匀性。

在电气参数测量方面,Okazaki 等最先提出用电气参数图形来区分 DBD 的丝状和均匀放电模式^[8]。在此基础上,Massines 等人进一步区分了 DBD 均匀放电的模式^[9]。Hong-Yu Chu 等人通过实验研究了空气 DBD 放电模式的转变,对 DBD 放电模式进行了进一步区分^[10]。徐旭等人通过对实验测量方法进行改进,系统地分析了大气压 DBD 不同放电模式下的电学特性^[11]。此外,王德真等人提出可以依据伏安特性曲线的微分电导判断 DBD 放电模式^[12]。蔡忆昔等人通过建立介质阻挡放电试验系统,研究了放电间隙对介质阻挡放电电学参数的影响^[13]。通过电气参数的测量能够诊断 DBD 模式,但电气参数测量法只能判断 DBD 是否在时间上同时进行,对于 DBD 空间上的均匀程度无法判断。

在光谱分析方面,Gherardi 等人通过光谱分析区分了丝状放电及均匀放电模式^[14]。Kozlov 等人在光谱分析中采用了 ns、 μ s 两种不同的时间尺度,构成了二维的时间—时间图像,并将均匀放电与丝状放电区分开来^[15]。董丽芳等人通过光谱法研究了 DBD 放电过程温度的空间均匀性^[16-17]。李雪辰等人通过光谱诊断对 DBD 放电模式进行了评判^[18-19]。杨富祥等人采用等离子体发射光谱研究了气流和频率对 DBD 放电的影响,并深入讨论了 DBD 放电模式转变机理^[20]。光谱分析容易受到光学系统内部或外部各参数的影响,操作不便且价格昂贵,因而对于 DBD 均匀性的评判还需进行进一步的研究。

在图像处理技术方面,郝艳捧等人利用增强型电子耦合器件拍摄放电的侧面短时曝光照片来诊断放电模式,分析了等离子体放电的演化过程^[21]。吴云飞等人利用数字图像处理技术对 DBD 放电均匀性进行了评价研究,能够有效地识别 DBD 放电均匀性^[22-23]。杨蒂藜利用图像灰度化技术对 DBD 放电

图像进行了分析研究,有效识别了 DBD 放电模式^[24]。胡嘉慧基于可见光的放电图像对不同气体氛围下的 DBD 放电均匀性开展了研究,有效判别了 DBD 放电均匀程度^[25]。通过数字图像处理技术能够进行 DBD 放电均匀性评价,但如何提高 DBD 放电均匀性评价方法的准确性和高效性还有待研究。

针对目前 DBD 放电均匀性评价方法存在的问题,文中从图像学角度提出了周向环差法和径向极差法两种新方法去评价低气压 DBD 放电均匀性,克服了以往 DBD 评价手段昂贵又难以操作的困难。为验证上述两种方法适用性,以氦气 DBD 为例,利用光学诊断仪器拍摄放电图像,对拍摄的图像进行标准化处理,通过电学和光学测量方法相结合分析图像的色度信息和位置信息实现放电的均匀性评价。通过实验研究了电压幅值、放电频率及大气压强变化对于低气压 DBD 放电均匀性的影响规律,能够有效识别低气压 DBD 放电过程的放电形貌及演化趋势。

1 实验平台及表征方法

1.1 实验平台搭建

1.1.1 平台整体结构

DBD 放电整体实验平台由纳秒脉冲电源、DBD 放电结构、光学诊断系统、真空系统等组成,实验平台示意图见图 1。ns 脉冲电源采用参数化高压脉冲电源,实验采用正弦波,电源电压范围为 0~20 kV,频率范围 0~100 kHz,实验中均固定脉冲宽度为 200 ns,上升沿和下降沿均为 50 ns。真空系统包括:真空泵、真空计、真空放电室以及其他气压测量仪表等。使用真空系统保证了惰性气体的纯度,使得误差干扰更小。

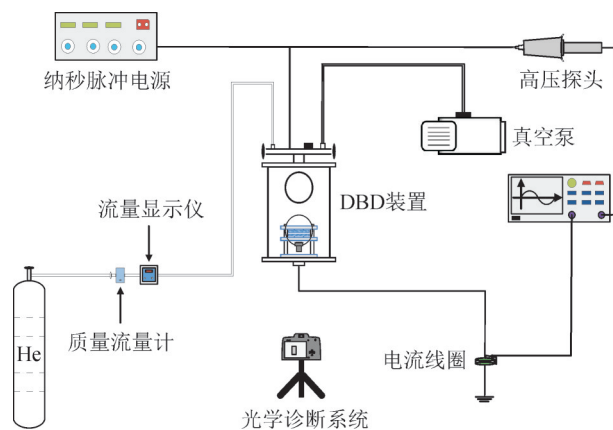


图 1 实验平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental platform

1.1.2 放电电极构成

DBD放电电极示意图见图2, 电极由圆形平板电极上电极通过放电室器壁的尼龙材料套管接高压, 电极结构为直径60 mm的普通圆形平板, 电极材料选用导电性能好且重量轻的硬铝。下电极为圆形平板透明电极, 透明电极是由直径60 mm厚2 mm的铜环、与涂有掺锡氧化钨薄膜的石英玻璃粘结而成。电极结构通过螺丝柱与螺母固定, 兼顾调节高度的作用, 采用绝缘材料聚四氟乙烯平板作为结构支撑通过在下电极的支架底面放置一块与垂直方向成45°夹角的反光镜观测底面放电图像。文中选定放电间隙间距为2 mm。

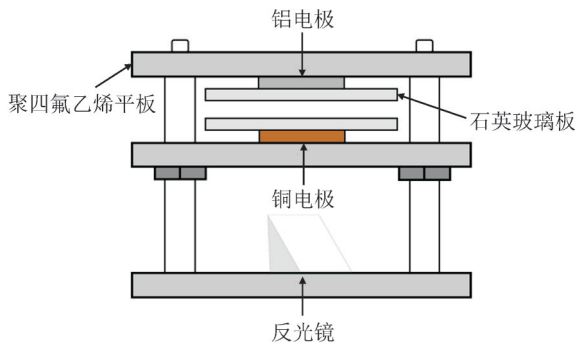


图2 DBD放电电极示意图

Fig. 2 DBD discharge electrode diagram

1.1.3 均匀性诊断实验方法

将设备调试完毕, 在实验开始之前使用真空泵把放电室抽成负压状态, 用气瓶向仓内充气可得到不同的气压。介质侧面的放电图像可由观察窗直接观测, 底面的放电图像是通过反光镜窗口观测。在DBD装置内充入惰性气体He, 气体流量利用质量流量计控制, 在不同幅值、频率、气压等参数下进行DBD放电均匀性实验, 利用光学诊断系统拍摄放电间隙底面放电的短时曝光图像, 提取图像的数据信息并进行标准化处理, 从而利用周向环差法和径向极差法进行低气压DBD的放电均匀性的评判。

1.2 放电均匀性表征方法

为了更好地评价放电图像, 文中采用图像处理技术中较为常用的方式图像标准化法, 对放电图像进行图像标准化处理。将图像数据按比例缩放, 使之落入一个小的特定区间, 实现数据的中心化, 并符合数据分布规律, 实现放电图像定性分析。

图像学中使用距离度量各点分布时, 将沿着圆周方向的环周称周向, 沿直径或半径的直线方向称为径向。为了实现圆形图像散点分布均匀程度评判, 文中提出了周向环差法, 以中心为起点, 利用微元法将每个小圆环的像素作为采集点, 从而反映从中心到放电圆边界的放电强度变化, 将放电图像

以沿着周向的数据形式呈现; 采用径向极差法, 选取放电图像0°至360°的像素, 将处理后的放电图像径向方向的灰度值以数据形式呈现, 从而反映整体放电图像的放电均匀性, 旨在说明图像灰度值与灰度平均值的偏移程度, 进而通过极差平均值和环差平均值来表征放电图像的均匀程度, 实现了低气压DBD的均匀性评判。具体研究方法示意图见图3。

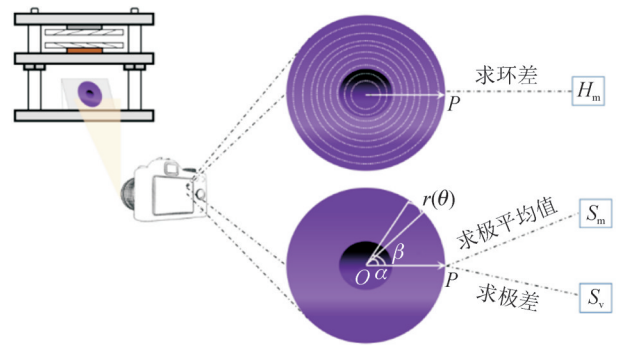


图3 周向环差法和径向极差法流程图

Fig. 3 Flow chart of circumferential ring difference and radial range method

1.2.1 图像周向环差法

为了反映从DBD放电图像中心到放电圆边界的放电强度变化, 利用环差法对放电空间进行分析。如图3所示, 以中心圆点为基准, 取离中心圆点距离为 r , 距 OP 轴角度为 θ 的像素点, 并对放电图像 $H(\theta, r)$ 进行标准化处理, 处理后的像素值为 H_n , 具体计算式为

$$H_n = \int_{\Delta} h(\theta, r) \quad (1)$$

然后, 对图像标准化处理后的DBD放电图像像素值 H_n , 即圆环上所有存在的像素点, 对其所有像素点进行累加, 并求平均值, 用于表征放电强度, 从中心到边界的环差值 H_m 变化越小表明放电越均匀, 环差值 H_m 可由式(2)求得

$$H_m = \frac{\sum_1^n H_n}{n} \quad (2)$$

1.2.2 图像径向极差法

首先, 为了表征DBD放电整体放电图像的放电均匀性, 利用径向极差法对放电空间进行分析, 如图3。选取放电空间 OP 轴方向0°至360°的像素, 对 $\Delta\theta$ 内的放电图像 $r(\theta)$ 进行图像标准化处理, 处理后像素值为 S_n , 具体计算式为

$$S_n = \frac{1}{2} \int_{\Delta\theta} r_2^2(\theta) - r_1^2(\theta) d\theta \quad (3)$$

式(3)中: $\alpha \leq \theta \leq \beta$, $r_1(\theta) \leq r \leq r_2(\theta)$ 。文中 α 取0°, β 取360°, $r_1(\theta)$ 取0, $r_2(\theta)$ 取圆的边界。

然后, 对图像标准化后得到的DBD放电图像像

素值 S_n 求平均值,极平均值 S_m 为

$$S_m = \frac{1}{2} \int_{\beta}^{\alpha} r_2^2(\theta) - r_1^2(\theta) d\theta \quad (4)$$

最后,对 S_m 进行处理求得极差 S_v, S_s 计算公式为

$$S_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n (S_n - S_m)^2}{n}} \quad (5)$$

2 电压幅值对氦气DBD均匀性的影响研究

文中通过以低气压氦气氛围中的DBD放电图像为例,利用径向极差法和周向环差法对放电图像均匀性进行分析。通过分析不同距离下氦气放电强度从而进一步判断电压幅值、频率及压强对DBD放电均匀性的影响,验证周向环差法及径向极差法的可行性,频率固定在1 kHz,大气压强固定在0.02 MPa,曝光时间选取为0.05 s。不同电压下的氦气放电图像见图4,从放电图像可以看出,随着电压升高,放电图像亮度增强,放电强度增强的原因是随着电压升高时微放电通道电荷传输不断加快,造成高能电子与其他粒子碰撞几率增加,形成电子雪崩,导致放电强度增加。

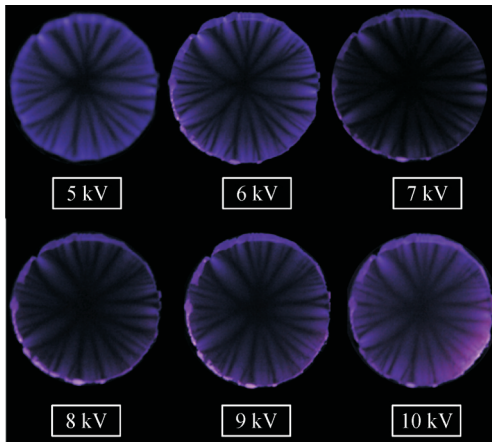


图4 不同电压下氦气DBD放电图像

Fig. 4 Image of helium DBD discharge at different voltages

2.1 基于周向环差法的DBD均匀性诊断

为了更加直观地分析放电图像特征,以拍摄间隙侧面和底部放电图像为研究对象,以放电中心为圆心,取300×100个像素的区域放电图像,提取区域放电图像的灰度值。利用计算机软件计算不同条件下图像环差平均值和环差值,环差值表征距圆心不同距离的环周放电均匀性。讨论分析了氦气DBD在空间下的放电过程演化机理,通过研究电压幅值 U 、频率 f 及压强 P 等参数对放电均匀性的影响来验证周向环差法的适用性。

通过计算得到的不同电压幅值下的环差值见

图5,图5中 d 表示从放电图像中心像素点到周边像素点的距离。从图中可以看出,环差值 H_m 随 U 的增加几乎呈线性增加, U 值越高, H_m 增加的越快,放电均匀性越差, H_m 与放电均匀性成反比。 H_m 的变化曲线类似于弧形,由曲线可知从放电图像中心到放电图像边界的环周随着 U 的升高,均匀性依次略微降低, U 越低,绕着放电图像中心的环周放电均匀性越好。产生上述现象的原因是电压升高使得电子碰撞加剧,放电强度增大。初始放电时刻边缘放电强度最大使得放电图像边缘极不均匀,放电向电极中心扩散,最终均匀地分布在电极,因而整个放电间隙图像中心均匀性最好。由上可知,电压变化对低气压DBD的放电均匀性有着一定的影响,环差值也随着 U 的变化有着较小的改变。因而文中提出的周向环差法评价指标可以实现在电压幅值改变下的低气压DBD放电均匀性有效评价。

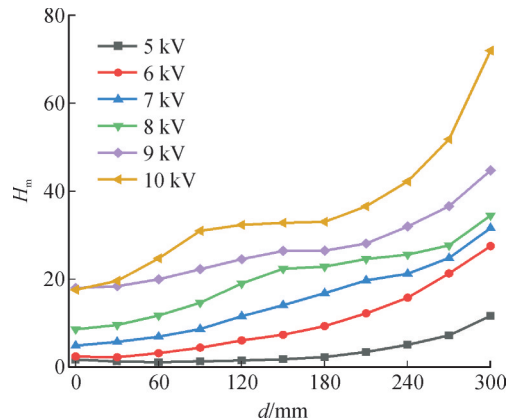


图5 不同电压下氦气DBD环差图

Fig. 5 Helium DBD loop difference at different voltages

2.2 基于径向极差法的DBD均匀性诊断

从图4中的低气压DBD放电图像中可以看出,随着电压的增加,从DBD装置电极间隙边界开始放电,进而向中心扩散,最后放电逐渐充满整个间隙。文中采用极平均值 S_m 表征放电强度,极差 S_v 表征均匀度大小,实现DBD放电均匀性评判。

随着电压 U 增大,不同电压下氦气的 S_m 变化曲线如图6, S_m 值在0.05~0.18之间变化, S_m 值随电压的增加起初缓慢增加而后增加速率增大,是因为外加电压的增加使得介质电极上电荷电场增长,维持介质上电荷电场的增长,而使得气隙电压升高,随着电压增加放电强度变大。

对 S_m 进行标准化处理后可得不同电压下的氦气极差值 S_v 见图7,极差值在0.02~0.04之间波动,极差值随着电压增加在初期先缓慢增加,中期涨幅增大,后期则增长速率减慢。其主要原因是 U 增加可能会导致放电间隙积聚越来越多的电子,从而产生

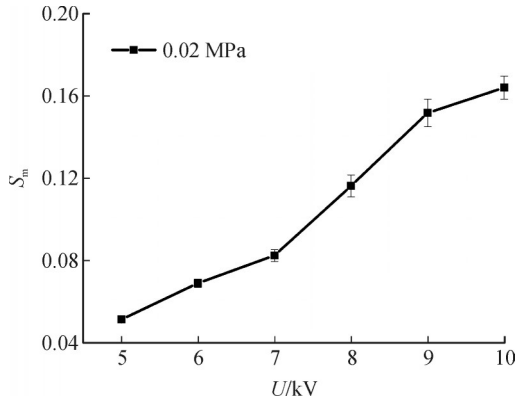


图6 不同电压下氦气DBD极平均值图
Fig. 6 Polar mean value of helium DBD at different voltages

较多丝状放电,减小放电间隙中粒子接触距离,使得放电强度增加,放电开始缓慢充满整个间隙,因而 S_p 增加的斜率略微平缓。随着 U 增加到10 kV,放电充满整个间隙, S_p 曲线将会越来越平缓。 S_p 与放电均匀度呈反比, S_p 越小,放电均匀度越大。因此,电压对放电均匀性影响较小,文中提出的极差值评价指标随着电压的升高变化较小,径向极差法可以有效评价改变电压幅值下对低气压DBD放电均匀性的影响。

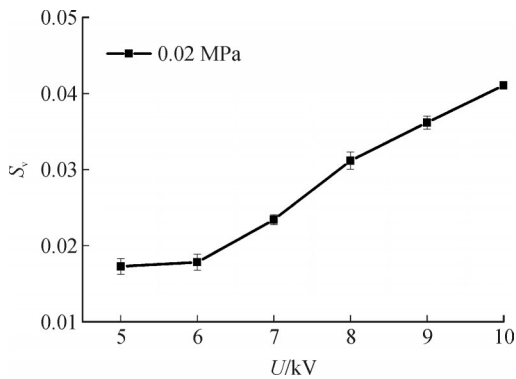


图7 不同电压下氦气DBD极差图
Fig. 7 Helium DBD range map at different voltages

3 放电频率对氦气DBD均匀性的影响研究

固定电压为8 kV,大气压强为0.02 MPa,曝光时间选取为0.05 s。低气压下不同频率氦气的DBD放电图像见图8。从图8中可以看出,随着放电频率的增加,放电图像由蓝紫色逐步变为紫色,放电细丝逐渐充满整个间隙。

3.1 基于周向环差法的DBD均匀性诊断

不同频率下氦气环差值见图9。从图9中可以看出,当 f 为1 kHz时, H_m 在0~20范围内变化,圆周中心和圆周边界的放电均匀性相差不大,在初始放电时刻放电并不明显;当 f 增加到6 kHz时,环差值

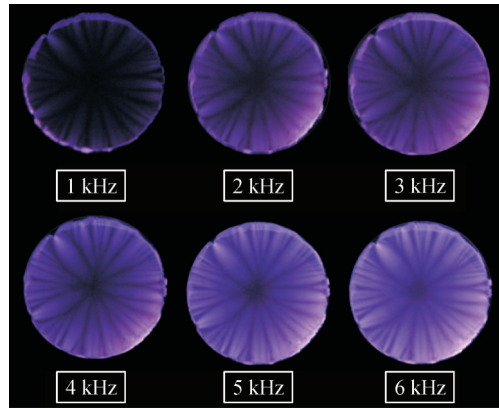


图8 不同频率下氦气DBD放电图像
Fig. 8 Helium DBD discharge images at different frequencies

H_m 呈指数形式增加,表明从放电图像中心到图像边界选取的环周均匀性逐渐降低。产生此现象的原因是频率越大,短时间内发生放电的次数越多,从而容易发生放电不均匀的现象,出现部分放电区域放电强度较大的现象。

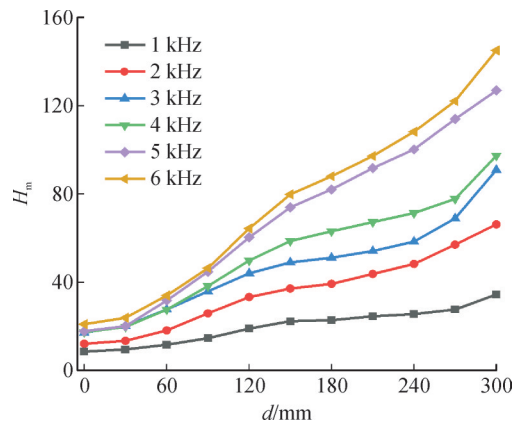


图9 不同频率下氦气DBD环差图
Fig. 9 Helium DBD ring difference at different frequencies

随着 f 增加,在单位时间内,放电的次数和放电数量都会增加,从而使平均放电电流增大,可认为此时间隙间的电压是恒定的。因此,频率增大使得间隙间放电功率也会随之增加,导致放电电流幅值增加。此外,DBD放电间隙更容易捕获放电空间中的带电粒子,使得每次放电后介质表面积聚的电荷增多,从而更容易出现放电不均匀的现象,使得 H_m 随之增大。由上可知,放电频率对DBD放电均匀性有显著影响,文中提出的环差值评价指标也随着频率的变化而改变,验证了周向环差法评价低气压DBD放电均匀性的高度适用性。

3.2 基于径向极差法的DBD均匀性诊断

不同频率下氦气DBD的极平均值图见图10,极差值图见图11。从图10中可以看出,极平均值 S_m 随着频率线性增加。随着 f 增加,短时间内的放电次

数和细丝放电个数均增加,使得放电电流增加,此时认为气隙间电压不变,所以气隙间放电功率随着 f 的增大而增大,使得放电强度增大,从而表征放电强度的 S_m 随之也是增大的。由图11可知,低气压氦气DBD的极差值 S_r 随着 f 增大而呈现先线性增加而后涨幅又放缓, S_r 值在0.03~0.1之间变化。其原因是在放电初始时刻, f 的增加导致单位时间内的放电次数增加,缩短带电粒子距离,碰撞加剧,使得放电强度增加,均匀性下降;当 f 增加至5 kHz时,在放电间隙会积累更多的放电粒子,使得在放电间隙中形成弥散放电,相对均匀性增加, S_r 曲线呈现如图11所示的变化趋势。因此,放电频率的改变对放电均匀性有明显影响,极差评价指标也随着频率的变化而变化,验证了径向极差法在评价低气压下DBD放电均匀性时的适用性。

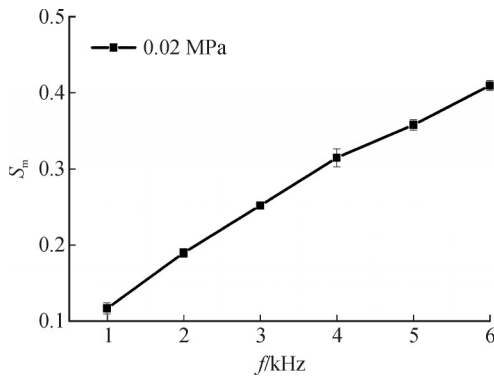


图10 不同频率下氦气DBD极平均值图

Fig. 10 Polar mean of helium DBD at different frequencies

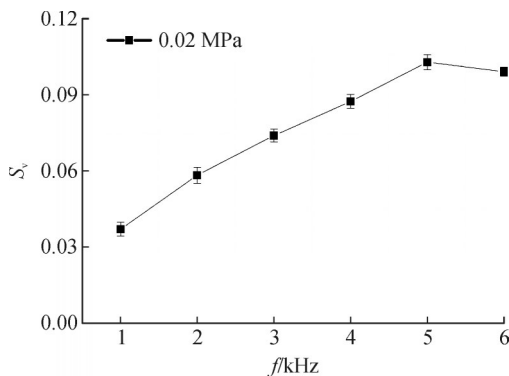


图11 不同频率下氦气DBD极差图

Fig. 11 Helium DBD range map at different frequencies

4 气体压强对氦气DBD均匀性的影响研究

固定电压为8 kV,放电频率为1 kHz,曝光时间选取为0.05 s。低气压氦气不同气压下的DBD放电图像见图12。从图12中可以看出,随着气压的增加,放电细丝逐渐充满整个图像间隙。

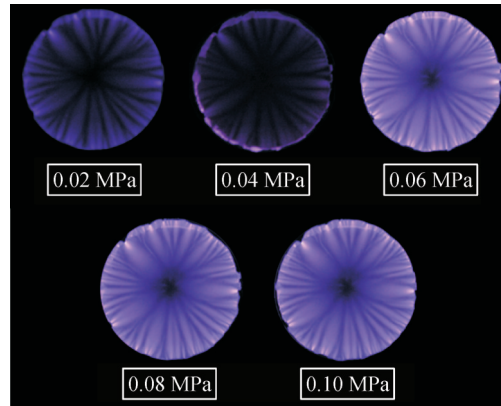


图12 不同压强下氦气DBD放电图像

Fig. 12 Image of helium DBD discharge under different pressures

4.1 基于周向环差法的DBD均匀性诊断

不同压强下氦气DBD环差图见图13。当 P 在0.02~0.08 MPa下变化时, P 的增加对 H_m 的影响较小,在10~30之间变化。由于低气压下DBD放电时, P 增大将导致气体的击穿电压升高,造成电子减小与电子密度下降,更加难以产生放电。放电细丝充满放电空间,放电较为均匀,故 P 的变化对于 H_m 影响较小,对放电的均匀性也有着较小的影响;而当 P 达到0.1 MPa时, H_m 随着 P 的增大而线性增加,造成此现象的原因是在大气压下DBD放电更容易产生丝状放电,放电均匀性变差, H_m 线性增加。因此,压强改变对放电均匀性有明显影响,环差值评价指标也随着压强的变化而显著变化,周向环差法能够较好的评价DBD放电的均匀性。

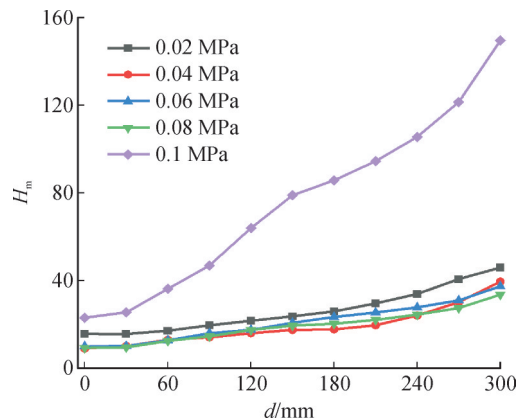


图13 不同压强下氦气DBD环差图

Fig. 13 Helium DBD ring difference at different pressures

4.2 基于径向极差法的DBD均匀性诊断

不同气体压强 P 下氦气DBD极差平均值图见图14,氦气下极差平均值 S_m 随着 P 增大而减小。当 P 增大时,气体的击穿电压升高(P_d 值位于帕邢曲线的右支),放电强度减小,则极平均值开始下降。

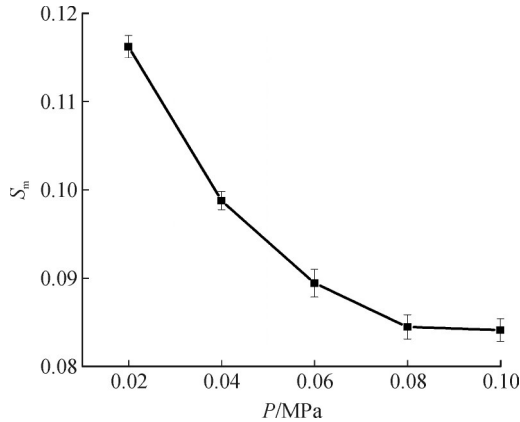


图14 不同压强下氦气DBD极平均值图

Fig. 14 Polar mean of helium DBD at different pressures

不同压强下氦气DBD极差图见图15。通过对不同压强下氦气极差值 S_r 分析,可以看出 S_r 分布于0.02~0.04之间。 S_r 呈U字形,先减小后增加,表明在标准大气压下均匀性要比低气压下DBD均匀性差。其主要原因在标准大气压下很容易产生丝状放电,实现均匀放电要比在低气压下略微困难,这与空气中的气体成分、气体放电机制有关,在此时放电细丝充满放电空间,放电均匀。因此,压强的改变对放电均匀性有明显影响,极差值评价指标也随着频率的变化而变化,验证了径向极差法在评价低气压下DBD放电均匀性时的适用性。

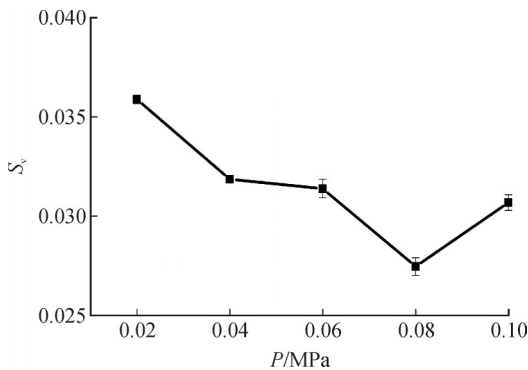


图15 不同压强下氦气DBD极差图

Fig. 15 Helium DBD range map at different pressures

5 结论

文中提出了周向环差法与径向极差法两种评价低气压DBD放电均匀性的方法,研究了不同电压、频率、气压参数条件下放电均匀性的演化规律,主要结论如下:

1)随着电压 U 的增加,图中环差值呈线性增加,表明了从放电图像中心到放电图像边界的环周放电强度逐渐增大,放电均匀性依次略微降低, U 越低,绕着放电图像中心的环周放电均匀性越好; U 与极差值呈正比, U 越大,极差值越大,沿着放电图像

径向空间下均匀性越差。

2)当频率 f 较小时,DBD放电均匀性变化很小,当 f 增大到一定时,环差值迅速增加,放电均匀性变差;极差值随着 f 增大而呈现先线性增加而后涨幅又放缓,放电均匀性先下降而后趋势变缓。

3)环差值在低气压下随着压强 P 增大,放电均匀性几乎无变化,当 P 增大到大气压时,环差值呈线性增加,原因是在大气压下更容易产生丝状放电,因而放电均匀性变差; P 增加,极差值先减小后增加,放电均匀性在达到大气压时略微变差。

4)通过进行不同电压、频率及压强下的DBD放电实验,验证了文中提出的周向环差法和径向极差法在低气压DBD放电均匀性评价方面的有效性,为进一步实现均匀稳定的DBD提供依据。

参考文献:

- [1] FANG Zhi, HAO Lili, YANG Hao, et al. Polytetrafluoroethylene surface modification by filamentary and homogeneous dielectric barrier discharges in air[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(16): 7279-7285.
- [2] 张国治,王文祥,张磊,等. 介质阻挡放电等离子体处理变压器废弃绝缘油的实验探究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(1): 325-334. ZHANG Guozhi, WANG Wenxiang, ZHANG Lei, et al. Experimental exploration of dielectric barrier discharge plasma treatment of transformer waste insulating oil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(1): 325-334.
- [3] 许光可,房新振,刘勇,等. 用于电流体动力气流控制的等离子体发生器[J]. 高压电器, 2011, 47(1): 95-99. XU Guangke, FANG Xinzhen, LIU Yong, et al. Plasma actuator used for electrohydrodynamic(EHD) flow control[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(1): 95-99.
- [4] 袁娜娜,马雪飞,李妍,等. 常压共面介质阻挡放电对聚乙烯隔膜表面改性研究[J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(1): 89-94. YUAN Nana, MA Xuefei, LI Yan, et al. Surface modification of polyethylene membrane by coplanar dielectric barrier discharge plasma in atmospheric pressure[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2021, 41(1): 89-94.
- [5] 卢洪伟,倪志娇,查学军. 不同电极结构对DBD降解亚甲基蓝废水的影响[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 62-69. LU Hongwei, NI Zhijiao, ZHA Xuejun. Effect of different electrode structures on degradation of methylene blue wastewater by DBD plasma[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 62-69.
- [6] SHAO Tao, LIU Feng, HAI Bin, et al. Surface modification of epoxy using an atmospheric pressure dielectric barrier discharge to accelerate surface charge dissipation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1557-1565.
- [7] OKAZAKI S, KOGOMA M, UEHARA M, et al. Appearance of stable glow discharge in air, argon, oxygen and nitrogen atmospheric pressure using a 50 Hz source[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 1993, 26(5): 889-892.

- [8] 杨昊,张昊天,张璐,等. 氩气氛围下介质阻挡放电均匀度表征方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4667-4677.
YANG Hao, ZHANG Haotian, ZHANG Lu, et al. Characterization method of dielectric barrier discharge uniformity in Argon atmosphere[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4667-4677.
- [9] MASSINES F, RABEHI A, DECOMPS P, et al. Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmospheric pressure controlled by dielectric barrier[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 1998, 31(6): 2950-2957.
- [10] CHU Hongyu, BO-SHIUN H. Gap-dependent transitions of atmospheric microplasma in open air[J]. Physics of Plasmas, 2011, 18(4): 043501.
- [11] 徐旭, 欧琼荣, 舒兴胜, 等. 大气压介质阻挡放电三种模式的电学特征[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 63-64.
XU Xu, OU Qiongrong, SHU Xingsheng, et al. Electrical characteristics of three models of dielectric barrier discharges under atmospheric pressure[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1): 63-64.
- [12] 张燕, 顾彪, 王文春, 等. 常压He气和N₂气均匀介质阻挡放电的伏安特性[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5532-5538.
ZHANG Yan, GU Biao, WANG Wenchun, et al. Current-voltage relationship for homogeneous dielectric barrier discharge in Helium and Nitrogen at atmospheric pressure[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(8): 5532-5538.
- [13] 蔡忆昔, 王军, 庄凤芝, 等. 放电间隙对介质阻挡放电电学参数的影响[J]. 高压电器, 2009, 45(2): 80-83.
CAI Yixi, WANG Jun, ZHUANG Fengzhi, et al. Effects of discharge gap on dielectric barrier discharge parameters[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2): 80-83.
- [14] GHERARDI N, GOUDA G, GAT E, et al. Transition from glow silent discharge to micro-discharges in nitrogen gas[J]. Plasma Sources Science & Technology, 2000, 9(3): 340-346.
- [15] KOZLOV K V, BRANDENBURG R, WAGNER H E, et al. Investigation of the filamentary and diffuse mode of barrier discharges in N₂/O₂ mixtures at atmospheric pressure by cross-correlation spectroscopy[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 2005, 38(4): 518-529.
- [16] 董丽芳, 李立春, 齐玉妍, 等. 空气介质阻挡放电不同放电模式的光谱特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(4): 745-747.
DONG Lifang, LI Lichun, QI Yuyan, et al. Spectral characteristics of different discharge modes in air dielectric barrier discharge[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(4): 745-747.
- [17] 董丽芳, 王帅, 刘为远, 等. 光谱法研究低气压空气介质阻挡放电均匀性[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(2): 328-330.
DONG Lifang, WANG Shuai, LIU Weiyuan, et al. Study on homogeneity of low-pressure air dielectric barrier discharge by optical emission spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(2): 328-330.
- [18] 李雪辰, 吴凯玥, 张琦, 等. 锯齿波频率对介质阻挡放电光谱特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(5): 1380-1383.
LI Xuechen, WU Kaiyue, ZHANG Qi, et al. Effect of frequency on spectral characteristics of dielectric barrier discharge excited by a saw-tooth voltage[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(5): 1380-1383.
- [19] 李雪辰, 吴凯玥, 贾鹏英, 等. 介质阻挡放电点燃大气压直流均匀放电的光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(3): 722-726.
LI Xuechen, WU Kaiyue, JIA Pengying, et al. Spectral investigation on the direct-current uniform discharge ignited by a dielectric barrier discharge at atmospheric pressure[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(3): 722-726.
- [20] 杨富翔. 介质阻挡放电均匀性及模式转变研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
YANG Fuxiang. Study on the uniformity and mode transition of dielectric barrier discharge[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [21] 郝艳捧, 刘耀阁, 涂恩来, 等. 大气压氦气多脉冲辉光放电径向光学演化过程[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 189-195.
HAO Yanpeng, LIU Yaoge, TU Enlai, et al. Radial optical development of a multiplex glow discharge in atmospheric-pressure Helium[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 189-195.
- [22] 吴云飞, 叶齐政, 李兴旺, 等. 利用不同曝光时间放电图像的灰度直方图识别介质阻挡放电模式[J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1120-1125.
WU Yunfei, YE Qizheng, LI Xingwang, et al. Classification of the discharge modes of dielectric barrier discharge using gray level histogram of discharge images under different exposure times[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5): 1120-1125.
- [23] 吴云飞. 介质阻挡放电图像识别方法及均匀性影响研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
WU Yunfei. Research on the image classification methods and influences of the uniformity of dielectric barrier discharge[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [24] 杨芾蓁. 基于旋转电极的DBD图像灰度分布的暂态过程研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
YANG Feili. Study of the transient process on the dielectric barrier discharge's image of gray level distribution basing on rotating electrode[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [25] 胡嘉慧. 基于可见光图像形态和色度特征的介质阻挡放电均匀性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
HU Jiahui. Study on the uniformity of dielectric barrier discharge based on morphology and chromaticity characteristics of visible image[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

杨昊(1988—),男,博士,副教授,主要从事高电压绝缘技术、输变电设备状态监测与故障诊断、气体放电与放电等离子体技术(通信作者)(E-mail: yanghao@xpu.edu.cn)。

陈苗苗(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向为气体放电与放电等离子体技术(E-mail: 2213505305@qq.com)。