

组合电器局部放电与放电量关系研究

超高频 (Ultra High Frequency, UHF) 检测法以其高灵敏度和抗干扰能力广泛应用于气体绝缘组合电器 (Gas Insulated Switchgear, GIS) 的现场检测。本文研究局部放电信号与视在放电量之间的关系, 理论推导证明了UHF信号累积能量和峰峰值与视在放电量之间的关系。同时, 建立检测系统, 采集不同气压的空气和六氟化硫中针板间隙的放电数据, 绘制关系谱图。通过研究发现, 在不同气压条件下, UHF信号峰峰值与视在放电量、累积能量与放电量平方均始终存在线性函数关系, 对超高频法定量检测电力设备局部放电程度具有重要的参考价值和指导作用。

张亚扶¹ 柏瑜² 汪正江² 贾玫¹ 王珊¹ 张赋累¹ / 1. 国网重庆市电力公司市区供电公司 2. 重庆大学 输配电装及系统安全与新技术国家重点实验室

0 引言

气体绝缘全封闭组合电器GIS因其具有很好的绝缘性能和较小的体积在城市电网中被广泛安装并使用, 是目前国内外非常普及的高压电力设备。以SF₆为绝缘介质的全封闭组合电器, 也称气体绝缘金属封闭开关设备和气体绝缘变电站。它是将变电站中除变压器以外的电气设备, 包括断路器、接地开关、隔离刀闸、电压互感器、电流互感器、避雷线、母线 (三相或单相)、连接管和过渡元件 (电缆头、空气套管、油套管) 等全部封闭在一个接地的金属外壳内, 壳内以0.3 MPa~0.5 MPa的SF₆气体作为绝缘和灭弧介质。

开展GIS局部放电在线监测研究具有十分重要的现实意义。国内外的研究者

根据对GIS内部故障放电检测方法作了研究, 主要包括有超声波检测法^[1]、光检测法、化学检测法等非电气检测法和脉冲电流法及超高频等电气检测法^[2,3]。而目前最常用的两种方法是脉冲电流法和超高频检测法。高频法灵敏度高, 抗干扰能力强, 适合于运行中的设备。视在放电量是以IEC标准为依据, 是当前确定设备绝缘状况严重程度的唯一标准。因此我们有必要找出超高频信号与放电量的关系, 为更准确监测电力设备绝缘状态打下基础。而它一直是局部放电UHF检测研究的难点。

本文针对不同气压下的针板间隙局部放电UHF信号, 探讨不同气压对超高频放电量标定的影响。为此采用脉冲电流法和超高频检测法相结合, 构建出常见的气体绝缘组合电器针板缺陷物理模型, 研究在不同气压的空气和六氟化硫中, 针板间隙局部放电超高频信号与视在放电量之间的关系, 为探究它们之间的准确关系, 构建超高频信号与视在放电量之间的关系。

1 超高频信号与视在放电量关系的推导

本文结合电磁场与电磁波理论、天线与辐射理论, 对UHF信号与放电量关系的作如下推导^[4,11]。

1.1 超高频能量与放电量的关系

间距为 d 的针板电极发生局部放电, 产生放电量 Q , 在放电通道正负电荷移动中和产生脉冲电流。我们可以把它看作赫兹偶极子, 则 $I=j\omega q$, 如图1所示, M



张亚扶/工程师

关键词/Keywords

超高频 ·
局部放电 ·
脉冲电流法 ·
气体绝缘组合电器 ·

国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2009CB724508-1) Project Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB724508-1); 重庆市电器检测工程技术研究中心 (CSTC2011pt-gc70009)

是 p 点在 xOy 平面上的投影, γ, θ, φ 为 p 点的球面坐标。偶极子周围空间任一点 p 的微分矢位

$$dA = a_z \frac{\mu I e^{-j\beta r}}{4\pi r} dz \quad (1)$$

式中, β 为无界媒质中的波数, μ 为介质磁导率, ε 是介电常数, 其中 $\beta = \omega \sqrt{\mu \varepsilon}$; a_z 表示直角坐标沿 z 轴方向的单位矢量, a_r, a_θ, a_φ 表示球面坐标下的单位矢量; A_z 是 z 轴方向分量, A_r, A_θ 是微分矢位的球坐标分量。根据直角坐标和球面坐标系转换公式得

$$dA_r = dA_z \cos \theta \quad (2)$$

$$dA_\theta = -dA_z \sin \theta \quad (3)$$

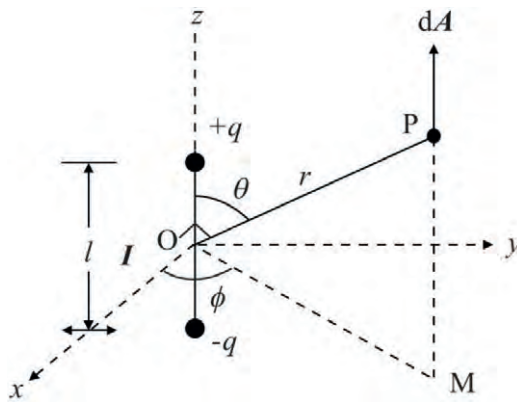


图1 赫兹偶极子

因此偶极子磁场强度可表示为

$$dH = \frac{dB}{\mu} = \frac{\nabla \times (dA)}{\mu} = \frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} \frac{a_r}{r^2 \sin \theta} & \frac{a_\theta}{r \sin \theta} & \frac{a_\varphi}{r} \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 \\ dA_r & r dA_\theta & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= a_\varphi \frac{Idz}{4\pi} e^{-j\beta r} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \sin \theta$$

电场强度可表示为

$$dE = \frac{1}{j\omega \varepsilon} \nabla \times (dH) = a_r dE_r + a_\theta dE_\theta \quad (5)$$

$$dE_r = \frac{Idz}{4\pi} e^{-j\beta r} \left(\frac{2\eta}{r^2} + \frac{2}{j\omega \varepsilon r^3} \right) \cos \theta \quad (6)$$

$$dE_\theta = \frac{Idz}{4\pi} e^{-j\beta r} \left(\frac{j\omega \mu}{r} + \frac{\eta}{r^2} + \frac{1}{j\omega \varepsilon r^3} \right) \sin \theta \quad (7)$$

式中, η 为均匀平面波的本征阻抗, $\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ 。

实验中天线安放在针板放电模型附近, 可看作近场区, $e^{-j\beta r} \approx 1$, 积分后磁场强度和电场强度

分别为

$$H \approx a_\varphi \frac{Il \sin \theta}{4\pi r^2} \quad (8)$$

$$E \approx \frac{Il}{j\omega 4\pi \varepsilon r^3} (a_r 2 \cos \theta + a_\theta \sin \theta) \quad (9)$$

从而求出近场区辐射强度, 即坡印亭矢量

$$S = \frac{1}{2} [E \times H^*] = -j \frac{I^2 l^2}{32\pi^2 r^5 \omega \varepsilon} \sin^2 \theta a_r \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 能量密度只与到辐射源的球面半径 r 有关, 对坡印亭矢量 S 求面积分得到电磁波能量, 结果仍是关于电流源 I 的二次函数。把式(10)代入冲击电流公式可得

$$S = \frac{1}{2} [E \times H^*] = -j \frac{\left(\frac{Q}{k_c}\right)^2 l^2}{32\pi^2 r^5 \omega \varepsilon} \sin^2 \theta a_r \quad (11)$$

所以电磁波能量与视在放电量的平方呈线性关系。

1.2 超高频信号幅值与放电量的关系

通常情况下, UHF放电信号的峰值与放电量之间的关系是最直接的。UHF信号的幅值取决于PD电流脉冲的上升时间和下降时间, 因此局放电流脉冲幅值是UHF信号的幅值的决定性因素。根据天线检测电磁波的原理可知, 感应电压为

$$U = k_1 E \quad (12)$$

式中, k_1 是与天线形状和位置有关的系数。联立式

$$(2)、(9)、(12) \text{ 可得} \quad U = \frac{k_1 l (a_r 2 \cos \theta + a_\theta \sin \theta)}{j\omega 4\pi \varepsilon r^3 k_c} Q = kQ \quad (13)$$

其中, k 是由天线摆放位置, 针板间隙距离, 线路参数等因素决定的, 实验过程只改变电压、气压, 所以 k 是常量。由此可得天线的感应电压幅值与视在放电量成正比。

2 实验平台建立

为研究UHF信号和视在放电量之间的内在关系, 本文建立了基于超高频和脉冲电流的局部放电联合检测系统^[12,13], 实验装置如图2所示, 脉冲电流法回路采用并连接线, 缺陷模型为针板间隙。

实验采用圆筒密封容器模拟GIS同轴腔体结构, 实物如图3所示, 腔体由有机玻璃做成, 能承受4个大气压以上的气体压力, 其内部安放由黄铜制成的针板电极。试品为针板间隙放电模型, 用

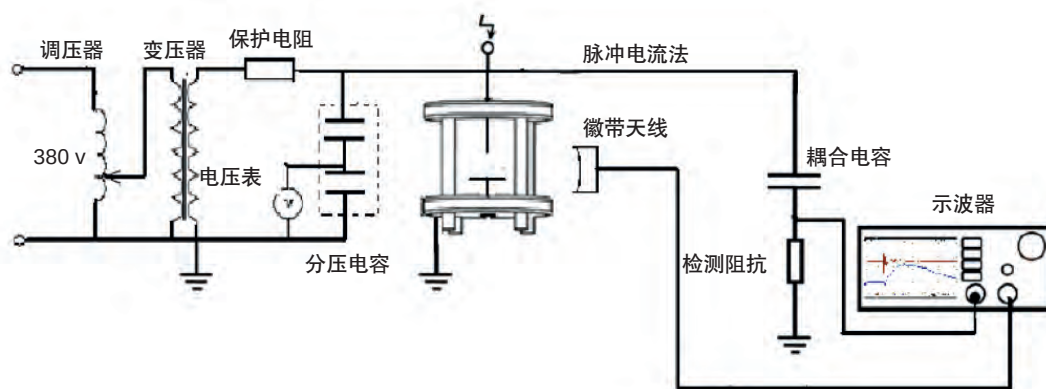


图2 实验接线图



图3 GIS腔体模型

以模拟GIS中常见的金属突出物缺陷。针电极与电源高压端相连，板电极接地。通过改装不同长度的针电极，就可以实现针板之间气体间隙距离的调整。另外，该装置对高压引线和电极均有防晕处理，避免设备本身可能产生的电晕影响实验结果的可靠性。

本文采用了外置微带天线传感器：工作频带340~440MHz，中心频率为390 MHz，相对带宽25.6%，达到宽频带天线范围，符合实验研究的要求。

3 实验结果分析

3.1 数据处理

为了研究 UHF 信号与其视在放电量的联系，需做以下数学处理^[14,15]：对每组脉冲电流信号读取最大值，根据前面得到校准函数关系，可以算出视在放电量 q ；对UHF信号读取其峰峰值，由式(14)计算其放电累积能量

$$E_s = \frac{\Delta t}{R} \sum_N U_n^2 \quad (14)$$

实验中采样频率为2.5 GS/s，数据长度为10 μ s，采样时间间隔 Δt 为0.4 ns；负载阻抗 $R=50 \Omega$ ； N 为天线测得单次波形的点数，为2.5 GS/s $\times$ 10 μ s=25 000个； U_n 表示UHF信号的第 n 个采样点的电压值。

所有实验数据都进行了回归分析，为定量描述回归的好坏程度，本文采用一元线性回归分析中定义的相关系数 r^2 验证其相关性。所谓相关系数是在统计学中检验样本回归方程可靠性所采用的判定拟和程度的指标，具体而言是指用来判断样本观测值聚集在样本回归线周围的紧密程度的指标，取值范围在0~1之间。 r^2 等于1时，所有观测值落在一条直线上； $r^2=0$ 时，则 x 和 y 线性不相关。总之 r^2 越大，则样本观测值越聚集在回归线附近，相关性越好。

$$r^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \cdot \bar{y} \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2 \right)} \quad (15)$$

3.2 SF₆间隙局部放电

SF₆气体是GIS的主要绝缘介质，是目前使用最优良的绝缘介质和灭弧介质。它不但具有高耐电强度，还有良好的理化特性。它是无色、无毒、无味及不可燃的惰性气体；在常温常压下，化学性能稳定。由于其在电气绝缘中被广泛使用。我们有必要探究以SF₆作为绝缘介质的UHF局部放电信号与放电量的关系，从而实现放电量的准确标定。

3.2.1 同一电压作用下超高频信号与放电量关系

在同一气压作用下，通过施加不同试验电压，获得不同放电量水平下的局部放电信号。然后，描绘出各个电压下UHF信号的峰峰值电压U_{pp}、放电累积能量Es与视在放电量q的关系，并用最小二乘法进行曲线拟合，分别计算各自相关系数如表1所示。以每个气压下某一电压下的放电为例，图4是UHF信号峰峰值与放电量的关系图，图5是UHF信号累积能量与放电量平方的关系图。从中可以看出上述参量之间始终有比较高的线性度，与理论推导结果一致，并且电压升高时，放电分散性没有变化，放电稳定性保持不变，这些可以为UHF信号放电量标定提供依据。

表1 SF₆介质下检测参量间的相关系数

气压/atm	电压/kV	U _{pp} 与q	Es与q ²
0.5	8.6	0.8745	0.8642
	11.2	0.7126	0.8251
	12.8	0.6651	0.6491
1.0	16.1	0.8188	0.8528
	20	0.9009	0.8975
	24	0.8051	0.7939
1.5	20.2	0.6510	0.8078
	25	0.8248	0.8168
	30	0.7721	0.7999

3.2.2 不同气压下的放电

为了提高气体介质的绝缘能力，实际中采用不同的气体压力满足工程需要。例如，通常

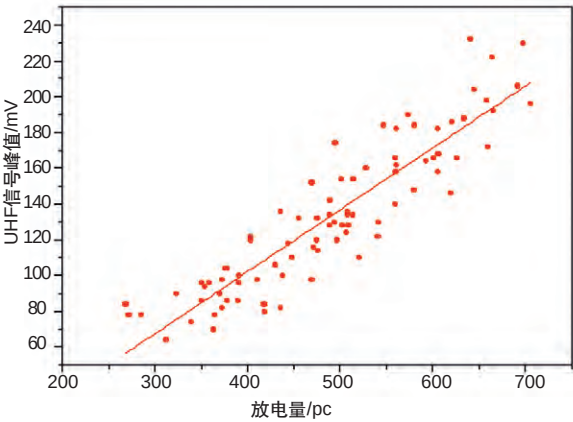


图4 同一电压下UHF信号峰峰值与放电量的关系

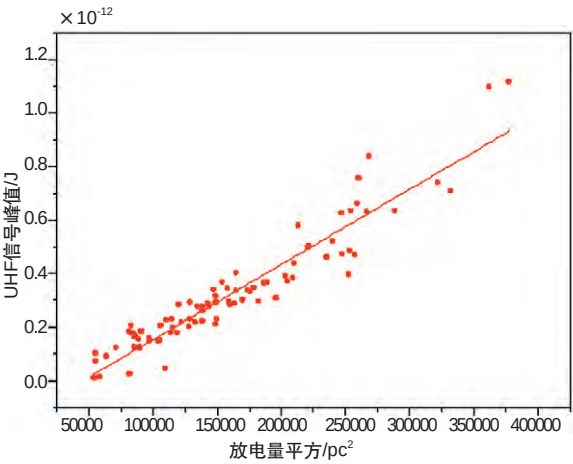


图5 同一电压下UHF信号累积能量与放电量平方的关系

在GIS金属外壳内充以0.3~0.5 MPa的SF₆气体。由流注理论可知，气压对电子崩形成，电荷移动，流注放电通道发展等有一定影响，不同气压下局部放电的发展情况、放电量水平是不同的。

以图6(c)为例，它是同一PD源在20.2、25和30 kV下的UHF峰峰值与放电量的关系，图7(c)是同一PD源在20.2、25和30 kV下的UHF放电能量与放电量的关系。可以看到，在同一气压下，随着电压的升高，UHF峰峰值和放电能量都有增大的趋势，但其趋势是一致的，不同电压下的数据基本回归到同一条直线上。由图6和7可得，当改变气压时，UHF信号峰峰值与放电量、累积能量与放电量平方之间仍然保持线性关系，不同气压下参量之间依然存在可靠的相关性。但不同气压下的线性关系

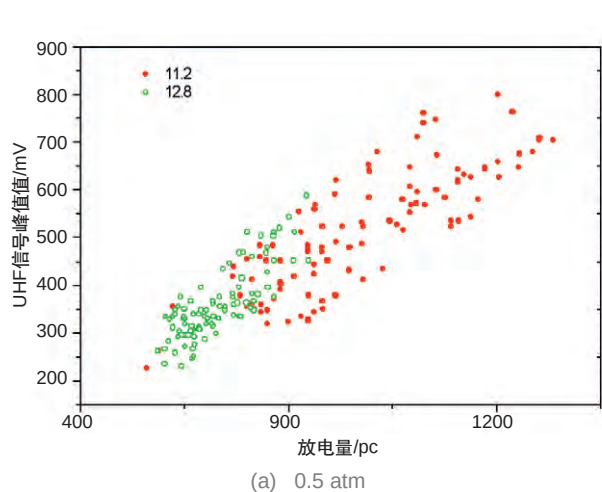
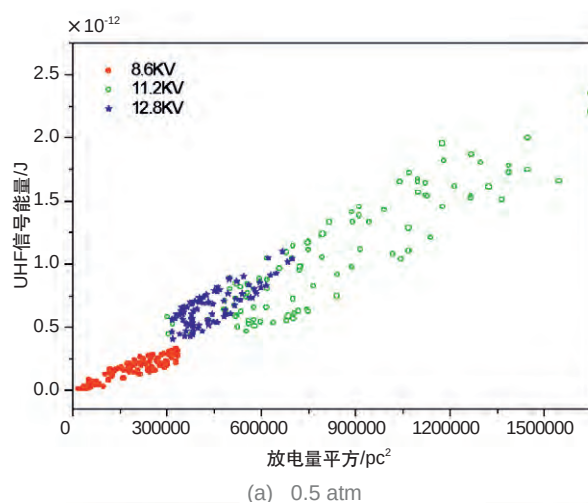
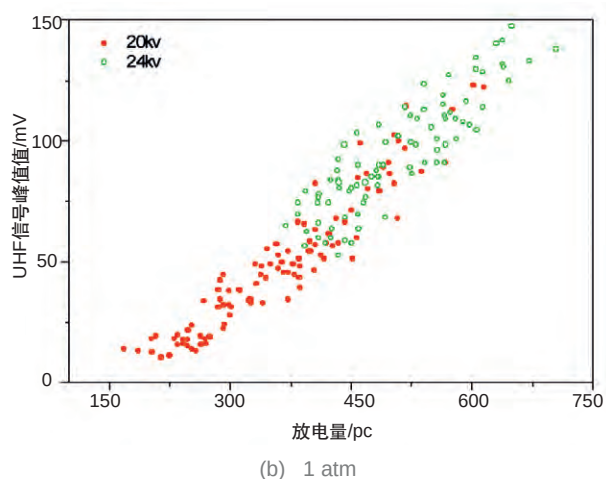
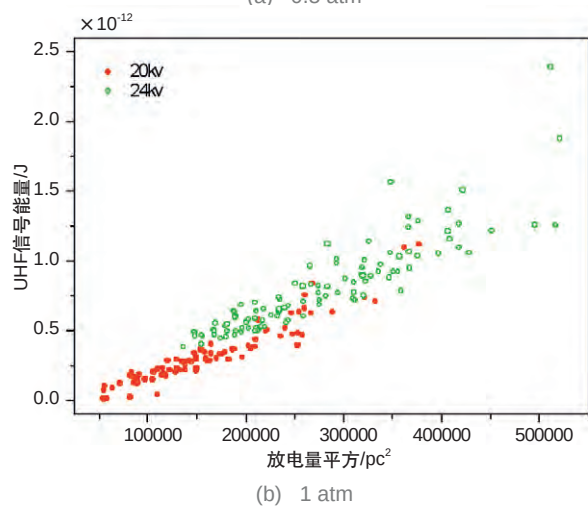
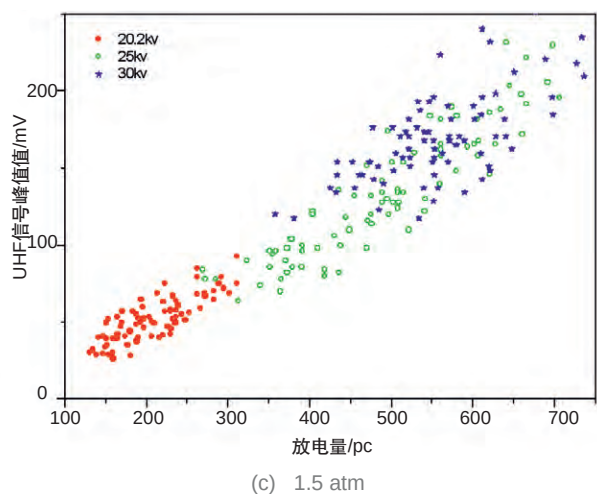
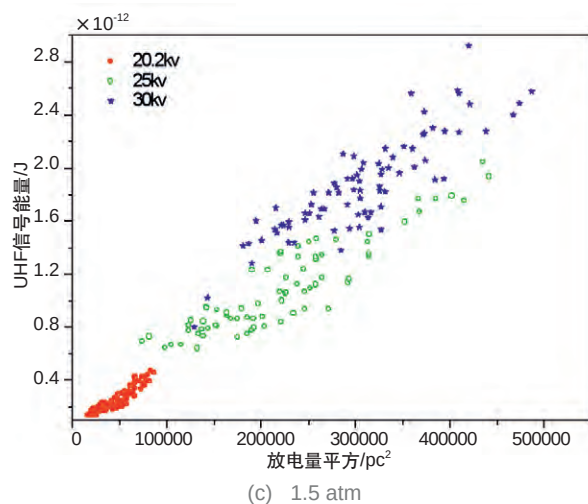


图6 各个气压下UHF信号峰峰值与放电量的关系

图7 各个气压下UHF信号累积能量与放电量平方的关系

存在差异的,这是因为气压越大,自由带电粒子运行的自由行程越小,带电粒子碰撞过程中累积能量越少,电离强度越弱。

3.3 空气间隙的局部放电

为进一步研究不同气压下的普遍规律,还需探讨空气间隙的UHF局部放电信号与视在放

电量的关系，为探究SF₆等其它气体的规律提供对比和参考。以1.5 atm下施加电压7.5 kV为例，图8和9是空气间隙下的UHF信号峰值电压与视在放电量、放电能量与放电量平方的关系谱图，表2是这些对应参量之间的相关系数。从图中可以明显的看到，它们之间始终保持着很好的一次函数关系。空气的线性度相对较好些，是因为SF₆是高电强度气体，电气强度比空气高得多，发生局部放电时施加的试验电压相对高些，这样可能引发其他部位的电晕放电，造成放电源不单一，放电不是很稳定。

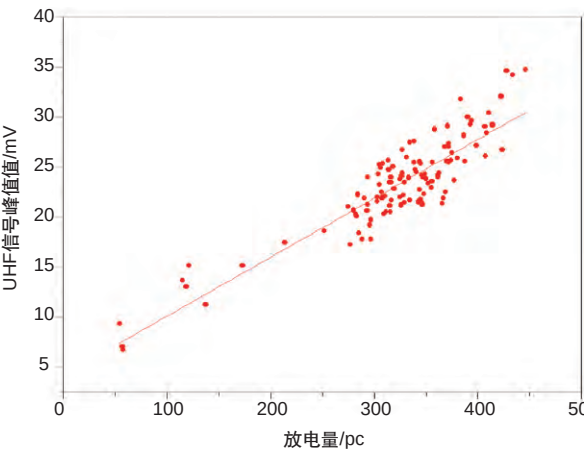


图8 同一电压下UHF信号峰峰值与放电量的关系

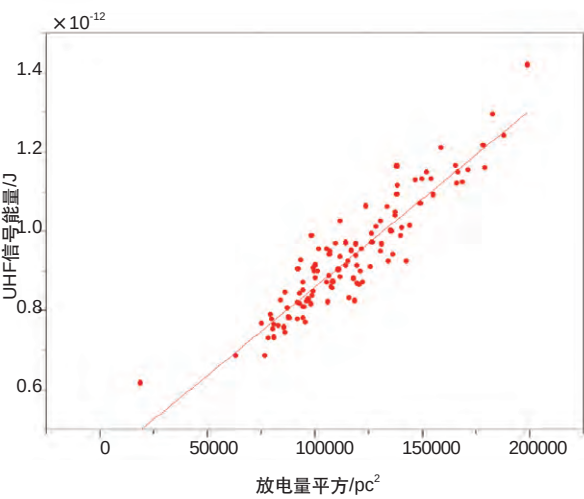
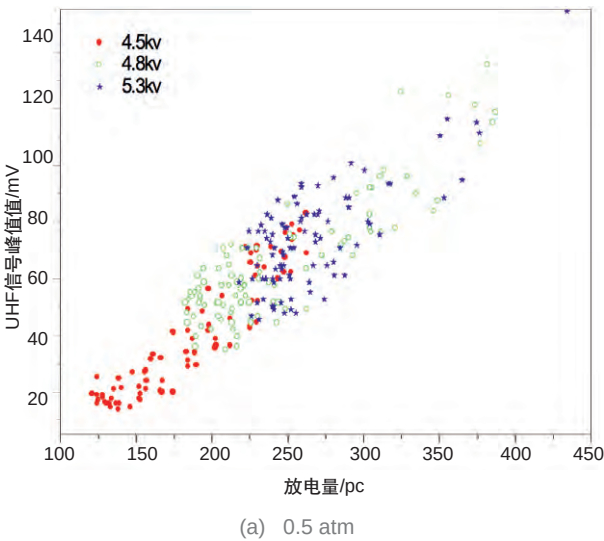
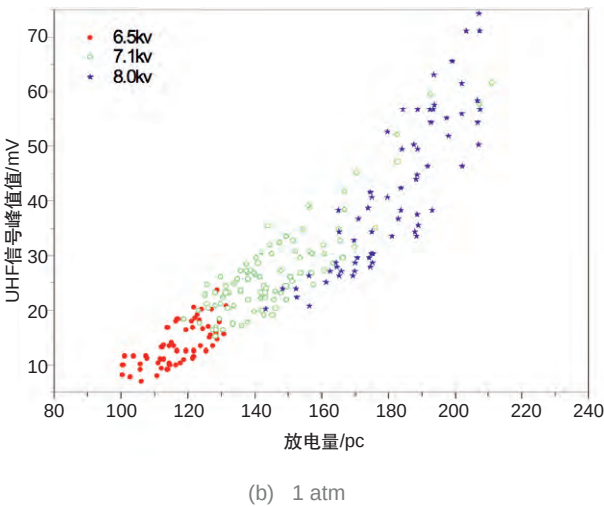


图9 同一电压下UHF信号累积能量与放电量平方的关系

当把同一气压下所有采集数据点描绘在一张图上时（图10和11），可以观察到电压的改变主

表2 下检测参量间的相关系数

气压/atm	电压/kV	U_{pp} 与 q	E_s 与 q^2
0.5	4.5	0.8699	0.8516
	4.8	0.7464	0.7759
	5.3	0.7676	0.8451
1.0	6.5	0.7539	0.8776
	7.1	0.7851	0.8177
	8.0	0.7571	0.7317
1.5	6.6	0.7897	0.8570
	7.5	0.8063	0.9139
	8.5	0.7233	0.8619



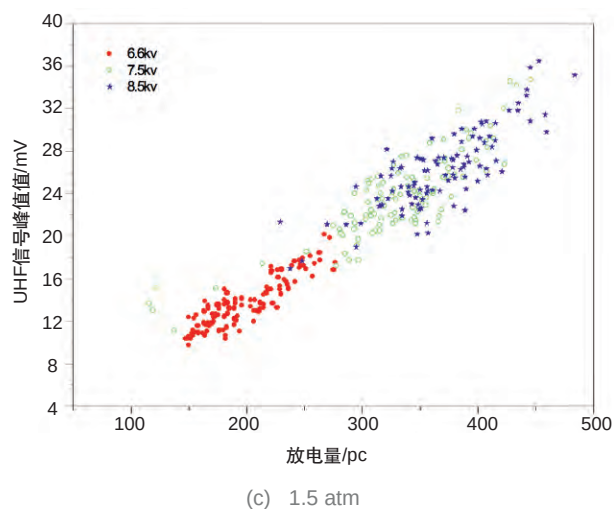


图10 各个气压下UHF信号峰峰值与放电量的关系

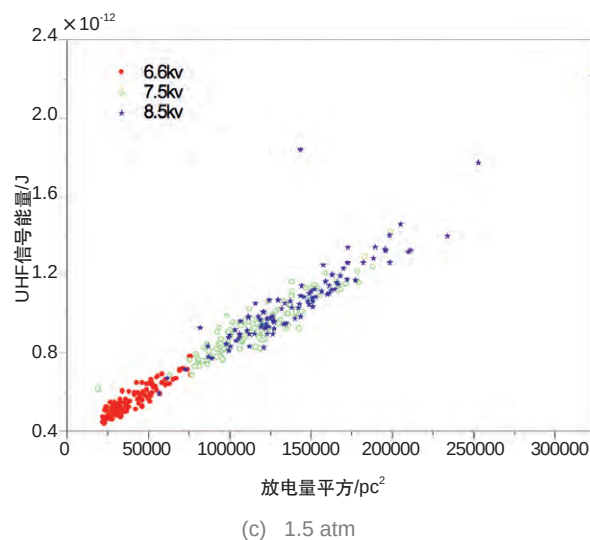
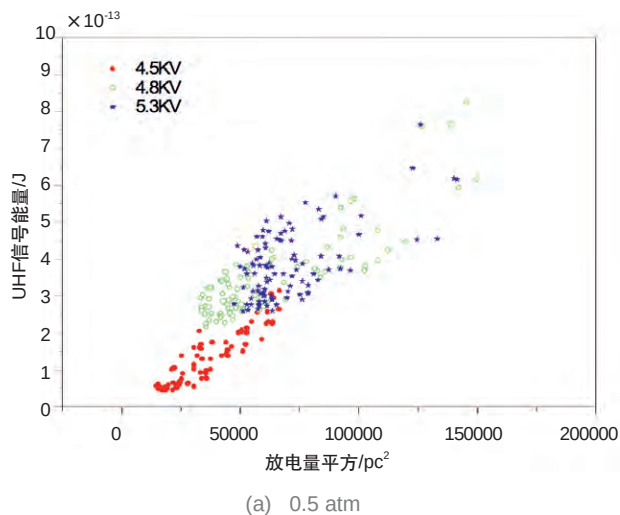
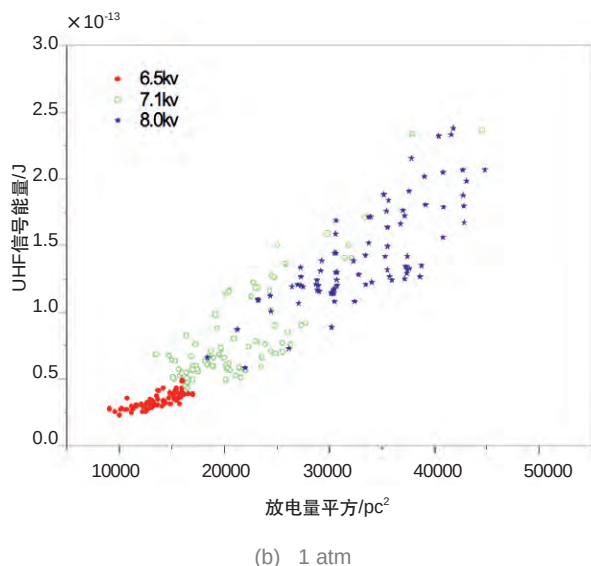


图11 各个气压下UHF信号累积能量与放电量平方的关系



要是影响峰峰值和能量水平，而不影响这些参量之间原有的线性关系，即直线斜率不变。与 SF_6 一样，不同气压的空气中，局部放电超高频信号各参量与视在放电量（或放电量平方）之间都保持一定的比例关系，气压的变化并不会破坏其线性度。

实验发现针板间隙 UHF PD 信号的峰峰值、累积能量与视在放电量分别存在一次函数和二次函数统计关系，同一局部放电源在不同电压下的实验数据均可回归至一条直线上，电压变化对放电性质没有影响。

当改变气压时，结果发现UHF信号峰峰值、累积能量水平等也发生明显变化，这是因为高压可以减少电子的平均自由行程，削弱碰撞电离及附着过程，致使不同气压下局部放电信号参量之间关系存在差异。但各种气压下，UHF信号峰峰值、累积能量与根据电流脉冲得到的放电量（或放电量的平方）始终保持着一定的线性关系，相关系数基本在0.8左右，该关系给UHF检测的放电量标定提供了参考价值。

4 结束语

本文结合电磁场与电磁波传播理论、天线辐

射理论和局部放电测量基本原理,通过理论推导出针板空气间隙产生的 UHF PD 信号峰值电压和累积能量分别与视在放电量之间存在一次函数和二次函数关系。在实验室用脉冲电流法和超高频法获取针板不同电压下的 UHF PD 信号和视在放电量,通过大量数据的统计结果显示,实验与理论推导的结果完全一致。

改变气体压力重复测量,结果发现局部放电水平存在差异,但UHF信号峰峰值与放电量、累积能量与放电量平方之间始终保持比较高的线性度,在任何气压下它们各自的线性关系依然存在,该规律对空气和SF₆都可以适用。

参考文献

- [1] 李德军,沈威,郭志强.GIS局部放电常规检测和超声波检测方法的应用比较[J].高压电器,2009,45(3):99-103.
- [2] 侍海军,张少炎,王光前.气体绝缘组合电器现场试验现状与发展[J].绝缘材料,2004,37(6):44-51.
- [3] 肖燕,郁惟镛.GIS中局部放电在线监测研究的现状与展望[J].高电压技术,2005,31(1):47-49.
- [4] Shinya Ohtsuka, Takashi Teshima, etc. Relationship between PD induced electromagnetic wave measured with UHF method and charge quantity obtained by PD current waveform in model GIS. 2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006:pp615-618.
- [5] 唐炬,吴建蓉,卓然,等.针板局部放电VHF信号与放电量之间的等量关系[J].高电压技术,2010,36(5):1083-1089.
- [6] 赵晓辉,杨景刚,路秀丽,等.油中局部放电检测脉冲电流法与超高频法比较[J].高电压技术,2008,34(7):1041-1404.
- [7] 张晓星,唐俊忠,唐炬,等.GIS中典型局放缺陷的UHF信号与放电量相关分析[J].高电压技术,2012,38(1):59-65.
- [8] 钱勇,黄成军,江秀臣,等.基于超高频法的GIS局部放电在线监测研究现状及展望[J].电网技术,2005,29(1):40-43.
- [9] M. D. Judd, etc. Contact Discharge Test Cell: "A Means of Generating Signals for Sensitivity Verification of UHF PD Detection in GIS". Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, April 7-10, 2002:pp407-410.
- [10] 唐炬,魏钢,侍海军,等.气体绝缘组合电器局部放电的超高频检测[J].重庆大学学报,2004,27(4):1-5.
- [11] 吴建蓉.组合电器局部放电模式识别与放电量的高频信号校准研究[D].重庆:重庆大学,2011.
- [12] 中华人民共和国,GB/T 7354-2003.局部放电测量.北京:中国标准出版社,2004.
- [13] Lixing Zhou, Weiguo Li, Sheng Su. The Deduction of Partial Discharge Pulse Current from Its Radiating UHF Signal. 2005 International Power Engineering Conference, 2005:pp1-5.
- [14] 谢颜斌.超高频局部放电信号等效源数学模型及其与放电量关联分析[D].重庆:重庆大学,2011.
- [15] A.J.Reid, etc. Simultaneous Measurement of Partial Discharges Using IEC60270 and Radio-frequency Techniques. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, April 2011, Vol. 18, No. 2:pp444-455.

(收稿日期:2015-5-21) EA

作者简介

张亚扶(1980-),男,本科,从事电力工程检测技术。

柏瑜(1989-), (通信作者)女,研究生,研究方向为电力工程检测技术。