

电工设备局部放电 及其测试技术

主 编 邱昌容 王乃庆

编写人 邱昌容 王乃庆 龚义华
范作义 曲 岩 程正禹
龚家卿 张陞儒 郑嘉松
张定国



机械工业出版社

第一章 局部放电的特性

§1-1 局部放电的定义及产生的原因

一、定义

在电场作用下，绝缘系统中只有部分区域发生放电，而没有贯穿施加电压的导体之间，即尚未击穿，这种现象称之为局部放电。对于被气体包围的导体附近发生的局部放电，可称之为电晕。局部放电可能发生在导体边上，也可能发生在绝缘体的表面或内部，发生在表面的称为表面局部放电，发生在内部的称为内部局部放电。

二、产生的原因

当绝缘体局部区域的电场强度达到击穿场强时，该区域就发生放电。在电工产品中，绝缘体各区域承受的电场一般是不均匀的，而且电介质也是不均匀的，有的是由不同材料组成的复合绝缘体，如气体-固体复合绝缘；液体-固体复合绝缘，以及固体-固体复合绝缘等。有的虽是单一的材料，但在制造或使用过程中会残留一些气泡或其他杂质；于是在绝缘体内部或表面就会出现某些区域的电场强度高于平均电场强度，某些区域的击穿场强低于平均击穿场强，因此在某些区域就会首先发生放电，而其他区域仍然保持绝缘的特性，这就形成了局部放电。

最经常造成局部放电的是绝缘体内部或表面存在气泡，因为气体的介电常数总是小于液体或固体材料的介电常数，在交变电场下，电场强度的分布反比于介电常数，这就是说，如果在液体或固体介质中含有气泡，则气泡中的电场强度要比周围介质的高，而气泡的击穿场强，在大气压力附近，总是比液体或固体介质低很多，因此气泡就首先发生放电，而其他介质仍然保持绝缘性能，这就形成了局部放电。干式绝缘的互感器、电机线棒、电瓷等等，在制造过程中总是在不同程度上残留气隙。液体-固体

的组合绝缘比较好些，但也难以完全消除微量的气泡，即使有些产品在制造中很大程度上已去除了气泡，但在运行过程中，由于热胀冷缩，不同材料特别是导体与介质的膨胀系数不同，也会逐渐出现裂缝；或者在运行中由于有机高分子的老化，分解出各种挥发物；或者在高场强的作用下，电荷不断地由导体注入到介质中，在注入点上就会使介质气化。这些都可能使绝缘体中出现气泡而导致局部放电。

除了气泡之外，绝缘体中若有导电杂质存在，则在此杂质边缘电场集中，也会出现局部放电。针尖状的导体，或导体表面有毛刺，则在针尖附近电场集中，也会产生局部放电。此外在电工产品中，若有某一金属部件没有电的连接，成为一个悬浮电位体，或是导体间连接点接触不好，都会在该处出现很高的电位差，从而产生局部放电。

上述情况往往是发生在电工设备的内部。在电工设备的高电压端头上，如电缆的端头，电机线棒的出槽口等部位，由于电场集中，而且沿面放电的场强又比较低，往往就沿着介质与空气的交界面上产生表面局部放电。若高压导体的周围都是气体，如高压电压架空线和高压设备的高压出线端头，由于导体附近的电场强度达到了周围大气的击穿场强，于是就在导体附近出现电晕。

近年来，要求电力设备绝缘系统承受的工作场强愈来愈高，要求超高压设备完全不发生局部放电是不实际的，因此须进行局部放电的检测，把它限制在一定的水平，以保证设备能安全运行，并有足够长的使用寿命。

§1-2 气体放电的机理

局部放电经常是发生在气隙中，要了解局部放电出现的各种现象，必须对气体放电的机理和放电的各种形式有所了解。气体放电的机理随气压及电极系统的变化而异，基本的放电机理有电子碰撞电离放电和流注放电两类。

一、电子碰撞电离理论

在电场中被加速的自由电子与气体中性分子碰撞，当电子的动能足够高时，就会使中性分子激发出电子，形成新的自由电子和正离子。新的自由电子和原来的自由电子在电场下继续加速，并和其他的中性分子碰撞，又可能激发出新的自由电子。这样自由电子数将会成 α 倍地增长，这种现象称为电子雪崩。电子的质量比离子小得多，因此，电子移动的速度比离子快得多，电子总是在朝向正电极的前方，形成电子崩的头部不断向前扩展。假设在阴极界面单位面积每秒钟内产生 n_0 个电子，单位时间通过离阴极 x 距离处单位面积电子数增长为 n_x ，在 x 和 $x+dx$ 之间增加电子数为 dn_x ，则 dn_x 正比于 n_x ，即

$$dn_x = \alpha n_x dx$$

上式中 α 为碰撞电离系数。上式两边都取积分，并代入边界条件 $x=0$ 时， $n_x=n_0$ ，则得

$$n_x = n_0 e^{\alpha x}$$

设电极间的距离为 d ，则在阳极处 $x=d$ 时的电子数

$$n_d = n_0 e^{\alpha d}$$

上式两边均乘以电子的电荷数，即为 d 点的电流密度

$$j_d = j_0 e^{\alpha d}$$

碰撞电离产生的正离子向阴极移动，使阴极附近的场强提高，正离子被加速轰击阴极表面，使阴极发射出电子，这部分电子称为二次电子 n_e 。这时阴极单位面积的电子 n_e 就应包括两部分，即

$$n_e = n_0 + n_i$$

n_0 个电子经碰撞电离到达阳极时应有 $n_0 e^{\alpha d}$ 个电子，正离子数应为 $n_0 e^{\alpha d} - n_0$ ，这些正离子跑到阴极时打出的电子数是与正离子数成正比的，设比例系数为 γ ，则

$$n_i = \gamma n_0 (e^{\alpha d} - 1)$$

$$n_e = n_0 + \gamma n_0 (e^{\alpha d} - 1)$$

$$n_e = \frac{n_0}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

在阳极处的电子数

$$n_d = \frac{n_0 e^{ad}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)}$$

阳极电流密度

$$j_d = \frac{j_0 e^{ad}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)}$$

当 $\gamma(e^{ad} - 1) = 1$ 时, j_d 为无穷大, 这时出现气体自持放电。 $\gamma(e^{ad} - 1) = 1$ 是说明至少会产生一个二次电子, 因此, 就可以不依赖外来的自由电子维持电子雪崩持续进行, 也就是维持气体放电。

二、流注理论

在长间隙的放电中, 除了电子碰撞电离之外, 光致电离对放电的发展起了主要作用。当电场足够高时, 先是电子碰撞电离而形成电子雪崩, 这部分电子雪崩称之为初崩。在电子雪崩中, 电子集中在崩头, 加强了崩头到阳极附近的场强。正离子集中在崩尾, 加强了崩尾到阴极附近的场强。在电子崩的中部近似为等离子区, 该区域内电场很弱, 当离子、电子的浓度很高时, 就会产生复合而放出光子, 光子进入电子崩的两端高场强区中, 很快就会激发中性分子电离, 放出电子并产生二次电子雪崩, 这就是光致电离。二次电子雪崩和初始电子雪崩汇合, 很快扩大等离子区, 当这等离子区贯通两个电极时, 就出现气体放电。这等离子通道是可以观察到的狭窄的放电通道, 这就是流注放电。由于光致电离的速度比电子碰撞电离的速度快, 所以流注放电比单靠电子碰撞电离的放电速度要快。同时形成流注放电要有很密集的空间电荷, 据估计, 一次流注放电约需 10^6 个电子崩, 每个电子崩约有 10^4 个自由电子, 因此, 每一次放电相当于有上百个皮库(pC)的电荷量。

在大气中的放电, 当电极的距离比较大、气压比较高时, 就可能出现流注放电。在绝缘体内部的气隙, 一般都是很薄的, 通常都是电子碰撞电离放电, 但由于绝缘体的表面电阻很高, 放电

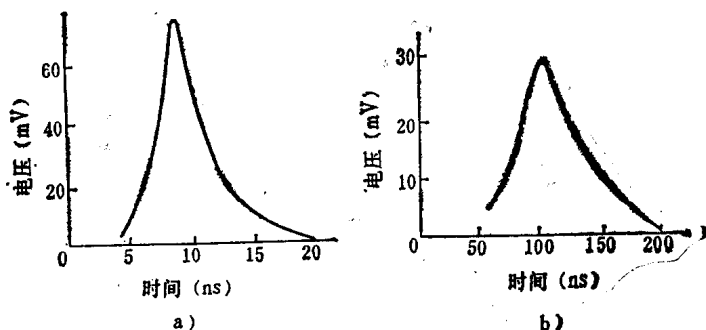


图1-1 气体放电波形
a)流注放电 b)电子碰撞电离放电

产生的空间电荷累积在气隙两端的介质表面上，使电场集中，从而可能产生流注放电。图1-1a是流注放电，放电过程较快，放电量较大。图1-1b是电子碰撞电离放电，放电过程较慢，放电量较小。

三、放电形式

气体放电可分为脉冲型（火花型）放电和非脉冲型（辉光型）放电两种基本形式。在一般情况下，局部放电都属于脉冲型放电，这种放电可以在一定的外加电压的相位上观察到单个分离的脉冲。在低气压小气隙中有可能出现辉光放电，这种放电观察不到单个分离脉冲，但可以观察到发出的辉光，也可以检测到低频放电电流及放电发生的声波。

在辉光放电和火花放电之间，有时会出现一种称之为亚辉光的放电。这种放电是由一群小脉冲组成，脉冲的幅值很小，脉冲上升的时间很慢，因此也很难分离出单个脉冲，用一般检测脉冲型放电的仪器也检测不出这种放电。

在低气压下工作的器件和设备中，绝缘体表面的放电有时会同时出现上述三种不同型式的放电。图1-2是在一个气隙中三种放电都同时存在时，气隙上电压的变化。大的电压变化是脉冲型放电；使基线变粗的小脉冲群是亚辉光放电；正弦电压畸变是由于辉光放电使气隙上电压降低。

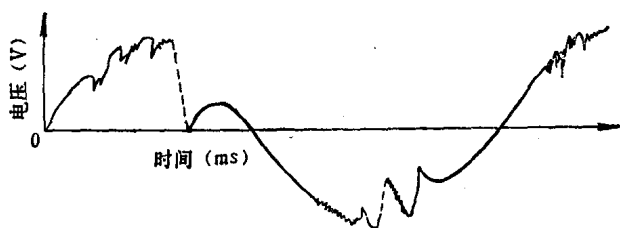


图1-2 三种放电同时存在时气隙上的电压变化

§1-3 局部放电的过程

由于局部放电是发生在电极间的局部空间内，放电产生的空间电荷将会在此空间内累积，从而改变这一空间内的电场，使得放电变成断续的过程，在试品的两端将会出现一系列电脉冲。对于绝缘体内部及表面的局部放电过程是很相似的，而电晕的放电过程却有明显差别。

一、内部放电的过程

在绝缘体内部气隙中放电时，气隙中电荷的交换和累积目前尚无法直接测量，但这种电荷的变化，必然会反映到绝缘体两端电极（或导体）上电荷的变化。这两者之间的关系，可以通过等效电路予以分析。

以最简单的平行板电容器为例，假定在一平板电容器中，固体介质的内部有一个气泡，如图1-3所示，则此绝缘系统可用气泡的等效电阻 R_g 与电容 C_g 、气泡与介质串联部分介质的等效电阻 R_b 及电容 C_b 以及其他部分介质的等效电阻 R_a 和电容 C_a 组成的串并联等效电路来表示，如图1-3所示。由于气泡中每次放电时间都是很短暂的，大约为 $10^{-8} \sim 10^{-7}s$ ，即放电产生的脉冲频率是很高的，因此，在分析这一信号在等效电路中的响应时，可以忽略电阻，只考虑由 C_g 、 C_b 及 C_a 组成的等效电路。

当工频交流电压施加于这平板电容器的电极上时，如果气泡

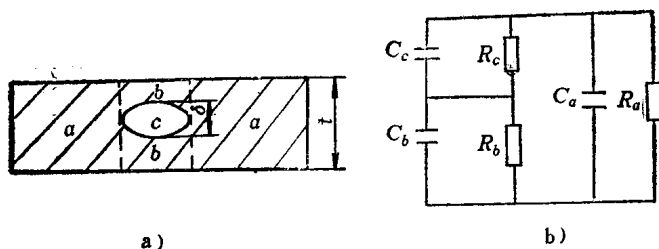


图1-3 试品中气隙放电的等效电路

a) 试品中的气隙 b) 放电等效电路

的电压没有达到气泡上的击穿电压，则气泡上的电压就跟随外加电压的变化而变化，如图1-4中 u_c 所示。若外加电压足够高，则当 u_c 上升到气泡的击穿电压 u_{CB} 时，气泡发生放电，放电过程使大量中性气体分子电离，变成正离子和电子或负离子，形成了大量的空间电荷，这些空间电荷，在外加电场作用下迁移到气泡的

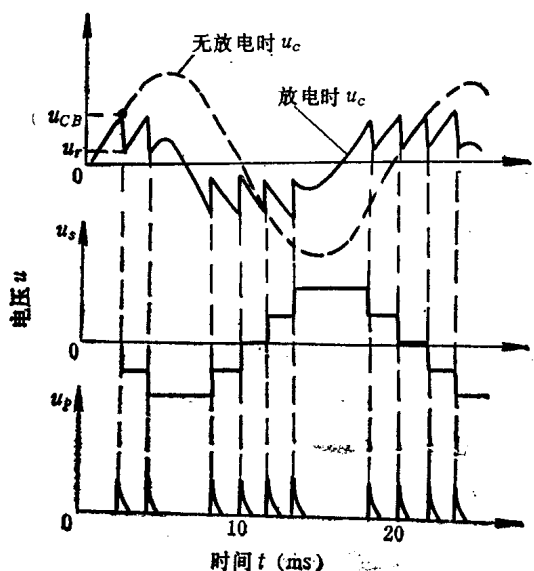


图1-4 放电过程示意图

u_c —施加于试品的电压 u_s —放电产生的反向电压 u_p —放电产生的脉冲电压

壁上,形成了与外加电场方向相反的内部电压 $-\Delta u_c$, 见图1-4, 这时气泡上的电压 u_r 应是两者的叠加

$$u_r = u_{CB} - \Delta u_c < u_{CB} \quad (1-1)$$

即气泡上的实际电压小于气泡的击穿电压, 于是气泡的放电暂停, 气泡上的电压又跟随外加电压的上升而上升, 直到重新到达 u_{CB} 时, 又出现第二次放电。第二次放电过程产生的空间电荷, 同样又建立起反向电压 Δu_c , 假定第一次放电累积的电荷都没有泄漏掉, 这时气泡中反向电压为 $-2\Delta u_c$; 又使气泡上实际的电压下降到 u_r , 于是放电又暂停。之后气泡上的电压又跟随外加电压上升而上升, 当它达到 u_{CB} 时又产生放电。这样在外加电压达到峰值之前, 若放电 n 次, 则放电产生的空间电荷所建立的内部电压为 $-n\Delta u_c$ 。在外加电压过峰值后, u_c 开始下降, 当气隙上的电压达到 $-u_{CB}$ 时, 即

$$-n_D u_c + u_c = -u_{CB} \quad (1-2)$$

时, 气泡又发生放电, 但这时放电产生的空间电荷的移动方向决定于内部空间电荷所建立的电场方向, 于是中和掉一部分原来累积的电荷, 使内部电压减少了一个 Δu_c 。气隙上的电压降达到 $-u_r$, 放电又暂停。之后气隙上的电压又跟随外加电压下降向负值升高, 直到重新达到 $-u_{CB}$ 时; 放电又重新发生。假定每次放电产生的 Δu_c 都一样, 并且 $u_{CB} = |-u_{CB}|$, 则当外加电压过零 (瞬时值) 时放电产生的电荷就消失, 于是在外加电压的下半周期, 从新开始一个新的放电周期。通常介质内部气泡的放电, 在正负两个半周内基本上是相同的, 在示波屏上可以看到正负半周放电脉冲的图形基本上是对称的, 如图1-5所示。

从实际测得的放电图可以看出, 放电没有出现在试验电压的过峰值的一段相位上, 这与上述放电过程的解释是相符的, 但每次放电的大小, 即脉冲的高度并不相等, 而且放电多是出现在试验电压幅值绝对值的上升部分的相位上, 只有在放电很剧烈时, 才会扩展到电压绝对值下降部分的相位上, 这可能是由于实际试品中往往存在多个气泡同时放电, 或者是只有一个大气泡, 但每

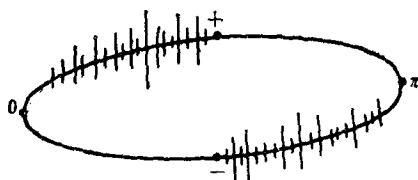


图1-5 内部气泡的放电图形

次放电不是整个气泡面积上都放电，而只是其中的一部分，显然每次放电的电荷不一定相同，何况还可能在反向放电时，不一定会中和掉原来累积的电荷，而是正负电荷都是累积在气泡壁的附近，因此，产生沿气泡壁的表面放电。另外气泡壁的表面电阻也不是无限大，放电时气泡中又会产生窄小的导电通道，这都使得一部分放电产生的空间电荷泄漏掉，累积的反向电压要比 $n\Delta u$ 小得多，如果 $|-n\Delta u| < |-u_{CB}|$ ，则在电压的下降部分的相位上就不会出现放电。这些实际情况就使得实际的放电图形与理论上分析的不完全一样。

二、表面局部放电

绝缘体表面的局部放电过程与内部放电过程是基本相似的如图1-6所示。只要把电极与介质表面之间发生放电的区域所构成的电容记为 C_0 ，与此放电区域串联部分介质的电容记为 C_s ，其它部分介质的电容记为 C_a ，则上述的等效电路及放电过程同样适用于表面局部放电。不同的是现在的气隙只有一边是介质，而另一边是导体，放电产生的电荷只能累积在介质的一边，因此累积的电荷少了，更不容易在外加电压绝对值的下降相位上出现放电。另外，如果电极系统是不对称的，放电只发生在其中一个电极的边缘，则出现的放电图形是不对称的。当放电的电极是接高压，不放电的电极是接地时，在施加电压的负半周出现的放电图是放电量少，放电次数多；而正半周是放电量多，而次数少，见图1-6b。这是因为导体在负极性时容易发射电子，同时正离子撞击阴极产生二次电子发射，使得电极周围气体的起始放电电压

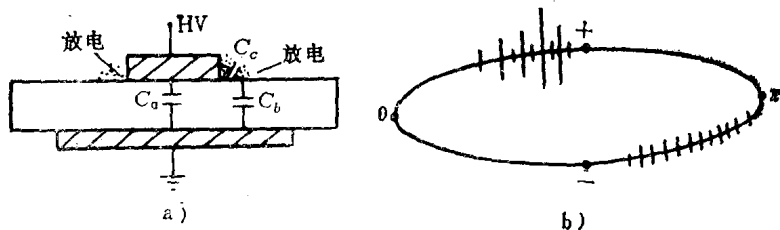


图1-6 表面局部放电图形

a) 放电部位 b) 放电图形

低，因而放电次数多而放电量小。如果将放电的电极接地，不放电的电极接高压，则放电的图形也反过来，即正半周放电脉冲是小而多，负半周放电脉冲是大而少。若电极是对称的，即两个电极边缘场强是一样的，那么放电的图形也是对称的，即正负两半周的放电基本上相同。

三、电晕放电

电晕放电是发生在导体周围全是气体的情况下，气体中的分子是自由移动的，放电产生的带电质点也不会固定在空间的某一位置上，因此放电过程与上述固体或液体绝缘中含有气泡的放电过程不同。以针对板的电极系统为例，如图1-7a所示，在针尖附近场强最高，当外加电压上升到该处的场强达到气体的击穿场强时，在针尖附近就发生放电，由于在负极性时容易发射电子，同时正离子撞击阴极发生二次电子发射，使得放电总是在针尖为负极性时先出现，这时正离子，很快移向针尖电极而复合，电子在移向平板电极过程，附着于中性分子而成为负离子，负离子迁移的速度较慢，众多的负离子在电极之间，使得针尖附近的电场强度降低，于是放电暂停。之后，随着负离子移向平板电极，或外加电压上升，针尖附近的电场又升高到气体的击穿场强，于是又出现第二次放电。这样，电晕的放电脉冲就出现在外加电压负半周的 90° 相位的附近，几乎是对称于 90° ，出现的放电脉冲几乎是

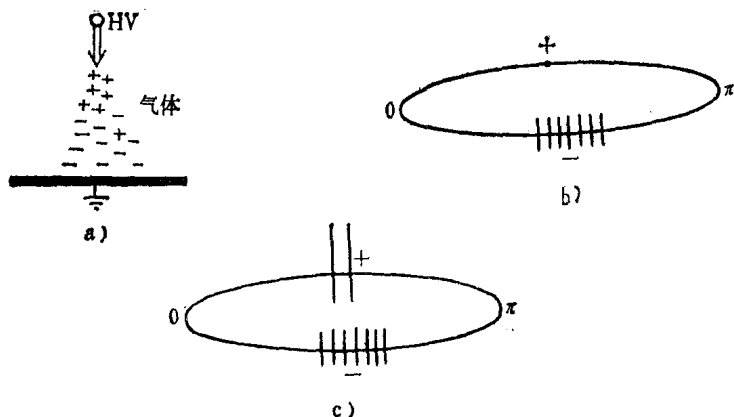


图1-7 电晕放电图

等幅值、等间隔的，如图1-7b所示。随着电压的提高，放电大小几乎不变，而次数增加。当电压足够高时，在正半周也会出现少量幅值大的放电。正负半周波形是极不对称的，如图1-7c所示。

以上三种放电是电工和电子设备中最基本的放电。此外，在电工设备中也可能出现导体联接不好而产生的接触不良的放电，和金属体没有电的联接，成为一个浮动电位体而产生的感应放电等。

§1-4 局部放电的表征参数

局部放电是比较复杂的物理现象，必须通过多种表征参数才能全面地描绘其状态，同时局部放电对绝缘破坏的机理也是很复杂的，也需要通过不同的参数来评定它对绝缘的危害。

一、基本参数

(1) 视在放电电荷 q_a 。在绝缘体中发生局部放电时绝缘体上施加电压的两端出现的脉动电荷称之为视在放电电荷。视在放电电荷的大小是这样测定的：将模拟实际放电的瞬变已知电荷注入试品的两端（施加电压的两端），在此两端出现的脉冲电压与局部放电时产生的脉冲电压相同，则注入的电荷量即为视在放电电

荷量。单位用皮库 (pC) 表示, 在一个试品中可能出现大小不同的视在放电电荷, 通常以稳定出现的最大的视在放电电荷作为该试品的放电量。

视在放电电荷 q_a 与实际放电电荷 q_c 之间的关系, 可以通过等效电路推出。当气泡中产生放电时, 气泡上的电压变化为 Δu_c , 这时气泡两端电荷的变化即实际放电电荷

$$q_c = \Delta U_c \left(C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \right)$$

式中各符号见图1-3, 通常 $C_a \gg C_b$

$$\therefore q_c = \Delta u_c (C_c + C_b) \quad (1-3)$$

由于一次放电过程时间很短, 远小于电源回路的时间常数, 即电源来不及补充电荷, 因而 C_a 、 C_b 上的电荷要重新分配, 使 C_a 两端电压变化为 ΔU_a 、 C_b 上的电压变化为 ΔU_b , 显然

$$\Delta U_c = \Delta U_a + \Delta U_b = \Delta U_a \frac{C_a + C_b}{C_b} \approx \Delta U_a \frac{C_a}{C_b}$$

试品两端瞬变的电荷即视在放电电荷

$$q_a = \Delta U_a \left(C_a + \frac{C_c C_b}{C_c + C_b} \right) \approx \Delta U_a C_a \approx \Delta U_c C_b \quad (1-4)$$

代入式(1-3)得

$$q_a = \frac{C_b}{C_b + C_c} q_c \quad (1-5)$$

由此可见, 视在放电电荷总比实际放电电荷小。在实际产品测量中, 有时放电电荷只有实际放电电荷几分之一甚至几十分之一。

(2) 放电重复率 N 在测量时间内, 每秒钟出现放电次数的平均值称为放电重复率, 单位为次/s, 实际上受到测试系统灵敏度和分辨能力所限, 测得的放电次数只能是视在放电电荷大于一定值时放电间隔时间足够大的放电脉冲数。

从图1-4可以看出, 放电重复率可以大致估算如下:

$$N = 4f \left(\frac{u_m - u_r}{u_{CB} - u_r} \right) \quad (1-6)$$

式中 f ——外加电压的频率(Hz)。

(3) 放电能量 W 气泡中每一次放电发生电荷交换所消耗的能量称之为放电能量(μJ)。气泡放电时, 气泡上的电压由 u_{cB} 下降到 u_r , 相应的能量变化

$$\begin{aligned} W &= -\frac{1}{2} \left(C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \right) (u_{cB}^2 - u_r^2) \\ &\approx -\frac{1}{2} (C_c + C_b) u_{cB} \Delta u_c \end{aligned} \quad (1-7)$$

设外加电压上升到幅值为 u_{im} 时, 出现放电, 将 $u_{cB} = \frac{u_{im} C_b}{C_b + C_c}$ 代入上式, 可得

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} (C_c + C_b) \frac{u_{im}}{C_b + C_c} C_b \Delta u_c \\ &\approx \frac{1}{2} u_{im} q_a = \frac{\sqrt{2}}{2} U_i q_a = 0.7 U_i q_a \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中 U_i ——外加电压的有效值。

每次放电所消耗的能量, 在起始放电电压下, 放电能量可用外加电压的幅值或有效值与视在放电电荷的乘积来表示。当施加电压高于起始放电电压时, 在半个周期内可能出现多次放电。这时放电能量可用视在放电电荷与该次放电时外加电压的瞬时值乘积来表示。

二、累积参数

为了表征局部放电在一定期间的平均综合效应而提出各种累积参数。

(1) 平均放电电流 设在测量时间 T 内出现放电 m 次, 各次相应的视在放电电荷为 q_{a1} 、 $q_{a2} \cdots q_{am}$, 则平均放电电流

$$I = \sum_{i=1}^m |q_{ai}| / T \quad (\text{A}) \quad (1-9)$$

这个参数综合反映了放电量及放电次数。

(2) 放电功率 设在测量时间 T 内, 出现 m 次放电, 每次放电对应的视在放电电荷和外加电压瞬时值的乘积分别为 $q_{a1}u_{r1}$ 、 $q_{a2}u_{r2}$ 、……、 $q_{am}u_{rm}$, 则放电功率

$$P = \sum_{i=1}^m u_{ri} q_{ai} / T \quad (\text{W}) \quad (1-10)$$

这个参数综合表征了放电量、放电次数以及放电时外加电压值, 它与其它表征参数相比, 包含有最多的局部放电信息。

三、起始和熄灭电压

(1) 起始放电电压 当外加电压逐渐上升, 达到能观察到局部放电时的最低电压, 即为起始放电电压。并以有效值 u_i 来表示。为了避免测试系统灵敏度的差异造成测试结果的不可对比, 实际上各种产品都规定了一个放电量的水平, 当出现的放电达到或一出现就超过这个水平时, 外加电压的有效值就作为放电起始电压值。

几种典型绝缘结构的放电起始电压, 可以大致估算如下: 平板电容器中, 固体介质内含有偏平小气泡时, (图1-3) 起始放电电压

$$U_i = \frac{E_{CB}}{e_r} [d + (e_r - 1)\delta] \quad (\text{kV}) \quad (1-11)$$

式中 E_{CB} ——气隙的击穿场强(kV/mm);

e_r ——固体介质的相对介电常数;

d ——介质的厚度(mm);

δ ——气泡的厚度(mm)。

在平板电容器中, 若固体介质内含有球形气泡时, 起始放电电压

$$u_i = E_{CB} \left[\delta + \frac{d(2e_r + 1)}{3e_r} \right] \quad (1-12)$$

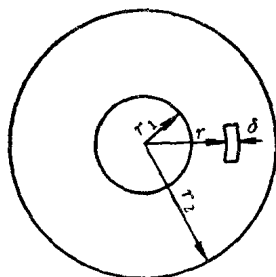
对于圆柱体绝缘结构, 含有与圆柱形导体圆轴同一弧形的薄层气泡时, 起始放电电压(图1-8)

$$U_i = E_{CB} r \left[\frac{1}{e_r} \ln \left(1 + \frac{r_2}{r_1} \right) + \left(1 - \frac{1}{e_r} \right) \ln \left(1 + \frac{\delta}{r} \right) \right] \quad (1-13)$$

(2) 熄灭电压 当外加电压逐渐降低到观察不到局部放电时, 外加电压的最高值就是放电熄灭电压, 以有效值 U_e 来表示。在实际测量中, 为了避免因测试系统的灵敏度不同而造成不可对比, 一般也是规定一个放电量水平, 当放电不大于这一水平时, 外加电压的最高值为熄灭电压 U_e 。

对于油纸绝缘, 往往是 $U_i > U_e$, 而对于固体绝缘结构, U_i 与 U_e 相差不大。固体绝缘内部的放电还可能出现 $U_i < U_e$ 。

上述各种局部放电的表征参数, 都是要用专门的测试仪器, 并采用特定的分度方法进行测定的, 只有在仪器特性和图1-8 圆柱形绝缘结构中的气隙测量方法都一样的条件下, 测得的结果才是可比的。



§1-5 影响局部放电特性的诸因素

局部放电的各表征参数与很多因素有关, 除了介质特性和气泡状态之外, 还与施加电压的幅值、波形、作用的时间, 以及环境条件等有关。

一、电压的幅值

随着电压升高, 放电量和放电次数一般都趋向于增加, 这是由于:

(1) 在电工产品中, 往往存在多个气泡, 随着电压升高, 更多更大的气泡开始放电。在有液体的组合绝缘中, 电压愈高, 放电愈剧烈, 产生的气泡愈多, 放电量和放电次数都增大。

(2) 即使是单个气泡, 在较低电压下, 只是气泡中很小的部分面积出现放电, 随着电压升高, 放电的面积增大, 而且有更多的部位出现放电, 于是放电量和放电次数都增加。

(3) 在表面放电中, 随着电压升高, 放电沿表面扩展, 即放电的面积增大, 放电的部位增多。

从式(1-6)中可以明显看出, 当外加电压幅值 u_m 增大, 或气泡的击穿电压 u_{CB} 减小时, 都会明显增加放电次数。

由于气体经电离后击穿电压要降低, 本来在某一电压下没有局部放电的试品, 一旦在更高的电压下发生放电, 即使再将电压降到原来的水平, 放电还可能继续出现。对于含有液体的绝缘系统中, 如果液体的吸气性能不好, 在较高的电压下放电所产生的气体, 也会使放电熄灭电压降低。因此在局部放电测量中, 在进行第二次重复试验时, 必须让试品有足够的“休息”时间。

二、电压的波形和频率

当工频交流电压中含有高次谐波时, 会使正弦波的顶部变为尖顶或平顶, 这决定于谐波与基波的相位差。当畸变为尖顶波时, 其幅值增大, 于是放电起始电压降低, 放电量和放电次数都有明显增加。若畸变为平顶波, 只有当高次谐波分量较大时, 如对于三次谐波而言要大于20%时, 由于峰值被拉宽, 放电次数有较明显增加, 放电量略有增加, 起始电压略有升高。

提高电压频率, 将明显增大放电重复率, 但只要测试系统有足够的分辨能力, 对于测得的放电量不会有明显影响。

三、电压作用时间

气体放电是有一定的随机性, 电压作用的时间长, 如升压的速度慢或用逐级升压法升压, 测得的起始放电电压要偏低。在电压的长期作用下, 局部放电会使绝缘材料发生各种物理和化学效应, 如试品中气泡的含量、气泡中气体的压力、气体的成分、气泡壁上的电导率、介电常数等都可能发生变化, 这些变化都将导致局部放电状态的变化。

在一般情况下, 随着电压作用时间的增加, 局部放电会变得更加剧烈。如在液体和固体的组合绝缘中, 如果液体的吸气性不是很好, 气泡会愈来愈多。在固体材料中会产生新的裂纹, 产生低分子分解物和增塑剂挥发物, 这些都会形成新的气泡。在放电部位出现树枝状的放电, 也会加剧局部放电。在绝缘体表面放电中, 由于放电的范围扩大也会使放电加剧。