

## 微放电发射电流法测量灭弧室真空度

赵子玉<sup>1</sup>, 宋焕生<sup>2</sup>, 江秀臣<sup>1</sup>, 马乃祥<sup>1</sup>, 罗利文<sup>1</sup>, 王建伯<sup>1</sup>, 刘崇方<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学电气系, 上海市 徐汇区 200030; 2. 长安大学信息工程学院, 陕西省 西安市 710064;  
3. 广东必达电器有限公司, 广东省 顺德市 528308)

### Measurement of Internal Pressure of Vacuum Tubes by Micro-discharge Emission Current

ZHAO Zi-yu<sup>1</sup>, SONG Huan-sheng<sup>2</sup>, JIANG Xiu-chen<sup>1</sup>, MA Nai-xiang<sup>1</sup>, LUO Li-wen<sup>1</sup>,  
WANG Jian-bo<sup>1</sup>, LIU Chong-fang<sup>3</sup>

(1. Department of Electric Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Xuhui District, Shanghai 200030, China;  
2. Information Engineering College, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi Province, China;  
3. Guangdong Bida Electric Co. LTD, Shunde 528308, Guangdong Province, China)

**ABSTRACT:** The traditional methods for measuring internal pressure of vacuum tubes of breakers are the magnetron and power frequency voltage withstand test. A magnet coil is needed by magnetron and only very bad tubes can be picked out by voltage withstand test. A new method—the ratio of inception voltage  $U_d$  of micro-discharge to inception voltage  $U_e$  of emission current can be used to measure internal pressure  $p$  of vacuum tubes. By this method, internal pressure of vacuum tubes can be measured without using magnetic coil, but with following process: firstly, vacuum gap 0.2~0.3 mm is obtained by forced pulling the closed contacts, secondly, power frequency voltage is applied to the gap and inherent gas adsorption layers are polished by micro-discharge current, finally, the  $U_d$  and  $U_e$  of the vacuum gap is measured. Theoretical study shows that the bigger  $U_d/U_e$  is, the smaller  $p$  is. So by measuring the value of  $U_d/U_e$ , the value of  $p$  can be obtained. The relationships of  $U_d$ ,  $U_e$ ,  $U_d/U_e$  with  $p$  are measured in laboratory, the test results show that the measuring ranges of  $p$  can be  $10^0\sim 10^{-3}$  Pa by this new method.

**KEY WORDS:** vacuum breakers; internal pressure; micro-discharge; emission current; measurement

**摘要:** 真空灭弧室真空度的传统测试方法主要有磁控放电法及工频耐压法。磁控放电法需要使用磁场线圈, 而工频耐压法只能检出严重漏气的灭弧室。该文使用微放电起始电压  $U_d$  与发射电流起始电压  $U_e$  之比  $U_d/U_e$  测量灭弧室的真空度。该方法不需要施加磁场, 而是使用下述方法进行测量: 将闭

合的灭弧室触头强行拉开 0.2~0.3 mm, 然后在触头间隙上施加工频高电压, 利用间隙微放电电流对触头表面进行老练, 以除去触头表面原有的吸附层, 最后再测量间隙的微放电起始电压  $U_d$  与发射电流起始电压  $U_e$ 。理论研究表明, 真空灭弧室内的真空压强  $p$  越小,  $U_d/U_e$  越大, 故通过测量  $U_d/U_e$  的大小, 就可以获得真空灭弧室内的真空度。文中在实验室的真空比对系统上对不同管型灭弧室的  $U_d$ 、 $U_e$ 、 $U_d/U_e$  与真空压强  $p$  的关系进行了测试, 测试结果表明, 该文提出的  $U_d/U_e$  法, 其真空度测量范围能达到  $10^0\sim 10^{-3}$  Pa。

**关键词:** 真空断路器; 真空度; 微放电; 发射电流; 测量

### 0 引言

目前, 真空断路器真空度的停电测试方法主要有磁控放电法<sup>[1-4]</sup>和工频耐压法<sup>[5-6]</sup>。在用常规磁控放电法测试灭弧室的真空度时, 需从断路器上卸下灭弧室, 并置于螺线管线圈内。这样一来, 灭弧室在重新装回断路器时需要调整机械参数, 工作量很大并需专业人员。为此, 国内外开展了使用磁控放电法进行断路器不拆卸灭弧室的真空度测量研究, 研制了很多特殊型式的磁场线圈, 将其放置在断路器灭弧室的周围, 以便给灭弧室施加纵向磁场, 国内这种特殊型式的磁场线圈主要有排线插接式<sup>[6]</sup>、侧靠式<sup>[7-9]</sup>、两半组合式<sup>[10]</sup>、和瓦状<sup>[11]</sup>线圈。对于侧靠式线圈来说, 线圈产生的轴向磁场不很均匀, 使测量数据分散性变大; 对于排线插接式线圈来说, 线圈产生的轴向磁场均匀性好, 但强度较弱, 若增大插接式线圈的电流, 可提高其轴向磁场, 但大电流时插接件易烧坏; 对于两半组合式线圈来说, 可以较准确地测试  $10^{-1}\sim 10^{-4}$  Pa 的灭弧室, 但

基金项目: 国家自然科学基金项目(50377024)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50377024).

由于某些真空开关的无障碍空间较小, 套装不上两半组合式线圈, 这就使其适用范围受到限制, 改用瓦状线圈时可使其适用范围变宽。虽然上述磁控放电不拆卸测量的精度较高, 但对于现在的紧凑型变电站, 为了节省空间和提高相间耐压水平, 通常在灭弧室上套装绝缘筒或采用环氧浇注, 这样, 这些特殊形式的磁场线圈就无法靠近灭弧室, 磁控放电法就无能为力了。工频耐压法就是在停电状态下, 将灭弧室触头拉开额定开距, 在触头间施加 1 min 工频耐压, 然后看其是否击穿(对于 10 kV 真空断路器, 1 min 工频耐压为 42 kV), 若击穿说明真空度已经严重劣化。工频耐压法只能测出严重漏气的灭弧室, 而对处于半真空状态的灭弧室( $10^{-2} \sim 10^0$  Pa), 虽然击穿电压没有降低, 但灭弧室已不合格。

因此, 有必要探索一种非磁控放电的、高灵敏度的真空灭弧室真空度测量方法。在这方面国内外已经做了许多研究, 提出的主要测量方法有: 弧后发射电流法<sup>[12]</sup>、发射电流衰减法<sup>[13-14]</sup>、高频预击穿电流法<sup>[15]</sup>、高频电流开断法<sup>[16]</sup>、电弧电压法<sup>[17]</sup>、场致发射电流法<sup>[18]</sup>。上述测量方法中, 弧后发射电流法在  $10^{-2} \sim 10^{-5}$  Pa 的高真空范围, 测量精度较高。但是, 文献[12]中的弧后发射电流法是利用了几百安的真空电弧清除触头表面原有的气体吸附层, 该几百安的真空电弧是使用合成回路产生的, 故这种测量方法在现场难以实用化。文献[13-14]中提出的发射电流衰减法是一种较实用的测量新方法, 它是利用发射电流衰减时间  $\Delta t$  与真空压强  $p$  的关系测量真空度, 该方法在  $10^0 \sim 10^{-2}$  Pa 的低真空范围测量精度较高, 但对于  $10^{-2}$  Pa 以上的高真空, 其测量精度较差。本文提出了利用一相对值  $U_d/U_c$  测量真空度的新方法, 即利用较小真空间隙(0.2~0.3 mm)上的微放电起始电压与发射电流起始电压的比值  $U_d/U_c$  与真空压强  $p$  的关系测量真空度。  $U_d/U_c$  对管型和真空间隙的敏感性较小。本文在实验室的真空比对系统上, 对不同管型灭弧室的  $U_d/U_c$  与真空压强  $p$  的关系进行了实验研究, 结果表明, 本文提出的  $U_d/U_c$  法其真空度测量范围可达到  $10^0 \sim 10^{-3}$  Pa。

10 kV 真空开关的额定开距为 10 mm 左右, 若要在间隙为 10 mm 的触头上产生一定量的工频发射及微放电电流, 触头间需要施加 100 kV 左右的工频电压, 这在现场是难于接受的。本文通过拉伸真空开关的触头压力弹簧, 将真空间隙调整到了 0.2~0.3 mm, 这时, 施加 0~25 kV 的交流高电压就可以产生一定量的发射电流或微放电电流, 且较小真空间隙

的发射电流稳定性好, 故本文在实验中选用了较小的真空间隙。

## 1 测量原理

### 1.1 离子交换理论

微放电是由触头表面污染或气体吸附层引起的一种自限性电荷猝发, 当真空间隙上施加工频电压时, 微放电表现为叠加在工频电流上的微秒级宽度的电流脉冲。微放电现象可以使用离子交换理论来解释<sup>[19]</sup>。离子交换理论是从早期的电子-正离子-光子交换理论发展而来的。

假定开始时场致发射的某一个电子从阴极出发打到阳极上, 并撞击阳极气体吸附层而产生  $A$  个正离子和  $C$  个光子。当正离子和光子抵达阴极时, 又导致阴极释放出二次电子, 并假定一个正离子产生  $B$  个电子, 而一个光子产生  $D$  个电子。如此循环, 若  $AB+CD \geq 1$  时就出现了电流不断增长的过程,  $AB+CD \geq 1$  可看作为维持微放电的判据。

在上述过程中, 若一个正离子碰撞阴极, 除了产生  $B$  个电子以外, 还产生出  $F$  个负离子, 而一个负离子在阳极上碰撞出  $E$  个正离子, 则可以得到离子流连续增长的判据  $AB+EF \geq 1$ 。显然  $EF \geq 1$  时, 离子流也连续增长。离子流在增长过程中, 伴随有溅射作用, 大量释放出气体, 同时气体被电离, 形成大量正离子及电子。据此, 史密斯(W.A.Smith)经过计算, 假定  $\gamma_0=EF$  为常数, 导出了微放电电流  $I$  的表达式为

$$I = \frac{(1+F+B)e}{\tau} \gamma_0^{\left(\frac{t}{t_0} - \frac{1}{2}\right)} \quad (1)$$

式中:  $e$  为电子电荷;  $t_0$  为总渡越时间, 即负离子通过间隙的时间加上产生的正离子返回的时间;  $t$  为微放电开始的时间。  $A$ 、 $B$ 、 $E$ 、 $F$  主要取决于真空间隙距离、所加电压、触头材料、触头表面的污染状况和气体吸附量。

由式(1)可见, 如果将  $\ln(I) \sim t$  作图, 便得到一条直线, 故只要  $\gamma_0=EF > 1$ , 微放电电流会无限增长。实际上, 根据改进的离子交换理论, 随着时间的延续,  $EF$  不会维持不变, 而是在不断降低, 亦即电流的增长将受到限制, 由于引起微放电的吸附层被不断溅射掉, 微放电电流会逐渐下降, 直到为零。

### 1.2 微放电起始电场 $E_d$ 与真空压强 $p$ 的关系

当真空间隙之间的电场超过  $E_d$  时, 间隙之间出现微放电电流脉冲, 这时, 微放电电流脉冲出现的频率较低。当电场继续升高时, 微放电电流脉冲出

现的频率逐渐增大。从前面的离子交换理论可知，在无污染的触头表面，气体吸附量 $\sigma$ 越大， $EF$ 越大，微放电越容易发生，用公式可表示为

$$E_d = k_E \sigma^{-\alpha} \quad (2)$$

式中 $k_E$ 、 $\alpha$ 为正的系数。

真空灭弧室中的少量残留气体分子会吸附于灭弧室的内表面，特别是触头表面。当表面的吸附和脱附达到动态平衡，即单位时间内吸附在表面上的分子数与自表面脱附的分子数相等时，表现的吸附速率等于零，这时，触头表面上动态平衡吸附量 $\sigma_p$ 保持不变。动态平衡吸附量 $\sigma_p$ 可以用单位时间落到单位面积上的分子数 $\xi_v$ 和吸附时间 $\tau$ 的乘积来表达(假定粘附几率为 1)，即<sup>[19]</sup>

$$\sigma_p = \xi_v \tau \quad (3)$$

对于真空压强为  $p$ ，绝对温度为  $T$ ，分子量为  $m$  的气体和吸附能为  $q$  的表面， $\xi_v = \frac{p}{\sqrt{2\pi mkT}}$ ；

$\tau = \tau_0 \exp[q/(RT)]$ 。故动态平衡吸附量

$$\sigma_p = k_p p \quad (4)$$

式中： $k_p = \frac{1}{\sqrt{2\pi mkT}} \tau_0 \exp[q/(RT)]$ ； $R$  为气体普适常数； $k$ 为波尔兹曼常数； $\tau_0$ 为吸附态分子垂直于表面的振动周期。

触头表面的吸附 $\sigma$ 可分为 2 层，即 $\sigma = \sigma_p + \sigma_h$ ，其中的 $\sigma_p$ 参与分子的动态平衡，它与真空压强 $p$ 成正比，可认为它是物理吸附(其吸附能为零)或吸附能很小的化学吸附。而其中 $\sigma_h$ 不参与分子的动态平衡，它是个未知量，可认为它是吸附能较大的化学吸附。

通过升高真空间隙所加电压，在触头间产生微放电电流，利用其老炼作用去除 $\sigma_h$ ，此时 $\sigma = \sigma_p$ ，即式(4)变为 $\sigma = k_p p$ ，将其代入式(2)，可得

$$E_d = k_d p^{-\alpha} \quad (5)$$

式中 $k_d = k_E k_p^{-\alpha}$ ，由式(5)可见微放电起始电场 $E_d$ 与灭弧室内的真空压强 $p^\alpha$ 成反比。

### 1.3 $U_d/U_e$ 与真空压强 $p$ 的关系

经过推导<sup>[15]</sup>，可以获得发射电流起始电场 $E_{ip}$ ：

$$E_{ip} = k_e p + E_{i0} \quad (6)$$

式中： $E_{i0}$ 为清洁触头表面的发射电流起始电场； $k_e = k_p k_c$ 为一系数， $k_c = 3/2C\phi_0^{1/2}k_1^{-1}\beta^{-1}$ ， $C$ 、 $k_1$ 为常数， $\phi_0$ 为清洁触头表面( $\beta=0$ )的功函数， $\beta$ 为电场增强系数。

由式(5)和式(6)，可获得微放电起始电压 $U_d$ 与发

射电流起始电压 $U_e$ 之比：

$$U_d/U_e = E_d / E_{ip} \approx k_d p^{-\alpha} / (k_e p + E_{i0}) \quad (7)$$

式中 $k_d$ 、 $\alpha$ 、 $k_e$ 、 $E_{i0}$ 为正的常数，其数值大小与灭弧室结构、触头材料、真空间隙 $d$ 等有关。由式(7)可见，真空灭弧室内的真空压强 $p$ 越小， $U_d/U_e$ 越大。故通过检测 $U_d/U_e$ 的大小，就可以获知灭弧室内的真空度。

## 2 测量装置与测试步骤

如图 1 所示，真空比对系统由真空池、机械泵、分子泵、进气微调阀、储气瓶、复合真空计和副标真空计组成。将灭弧室与真空比对系统相连接，本实验是通过改变真空比对系统的抽气量来使灭弧室内的真空压强在  $10^0 \sim 10^{-5}$  Pa 之间变化，所以灭弧室内残留气体为空气。

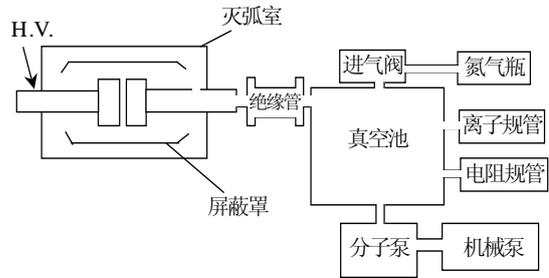


图 1 与真空灭弧室相连的真空比对系统  
Fig. 1 Vacuum tube joined to vacuum system

如图 2 所示，在真空间隙上施加工频电压，由  $C_1$  支路进行容性电流的补偿。 $C_2$  代表真空灭弧室，依据真空间隙大小的不同，其电容在 15 至几十 pF 之间。 $R_1' = R_2' = 1 \text{ k } \Omega$  是取样电阻。 $R_{lim} = 3.3 \text{ M } \Omega$  是限流电阻。 $R_1 = R_2 = 800 \text{ k } \Omega$  为保护电阻，TVS<sub>1</sub>、TVS<sub>2</sub> 为快速恢复二极管，是用来保护示波器的。如图 2 所示，从  $R_2'$ 、 $R_1'$  两端用数字示波器采样 2 个通道的信号 CH2、CH1，然后取其差分信号 CH2-CH1 作为输出信号。通过调压器和升压器对  $C_2$  和  $C_1$  2 条支路施加工频电压，当施加的交流电压  $U = U_e$  时，真空间隙间将出现一个几微安的可测发射电流，这里， $U_e$  称为发射电流起始电压， $E_i = U_e/d$  称为发射电流起始电场。发射电流通过以下方法测得：首先在某型号的灭弧室真空间隙(例如： $d = 0.3 \text{ mm}$ )上施加较低的电压，即施加电压  $U < U_e$ ，此时发射电流应为零，故通过调节  $C_1$  的大小可使 CH2-CH1 为零，当 CH2-CH1 为 0 时，就完全补偿掉了容性电流，此时的  $C_1 \approx 8.85 \times 10^{-12} \times \pi \times 0.025^2 / 0.0003 \approx 58 \text{ pF}$ 。然后，再升高电压使  $U > U_e$ ，此时 CH2-CH1 的输出就是发射电流  $j_e$ 。

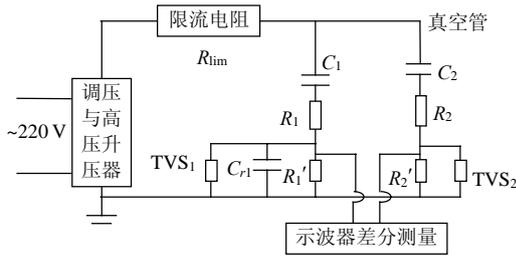


图2 发射电流测量电路

Fig. 2 Measurement circuit of emission current

在正常操作条件下真空开关只有2种状态,即触头“闭合”与“分开”。对于10kV真空开关,在触头“分开”后触头间隙为10mm左右。如图3所示,对于本实验中使用的ZN22B-12/T1250-31.5型户内高压真空断路器,在“闭合”状态下,通过下述方法可以调节真空间隙 $d$ 的大小:首先,将一自制垫块垫入超程调节螺母下,然后调节超程螺母来拉伸触头压力弹簧,强迫触头处于闭合与分离的临界点(即触头接触电阻由低阻态转化为高阻态时),然后再旋紧超程螺母 $\alpha^\circ$ ,真空间隙 $d(\approx S \times \alpha^\circ / 360^\circ, S$ 为螺距)就产生了。

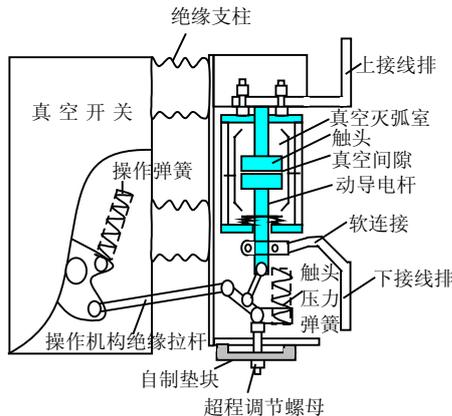


图3 真空开关小真空间隙的形成示意图

Fig. 3 Formation of small vacuum contacts gap

可通过调节真空间隙 $d$ 来改变触头间的电容 $C_2$ ,当完全补偿掉容性电流,即CH2-CH1为零, $C_2=C_1=58$  pF时,真空间隙 $d=\varepsilon_0 A/C_2=\varepsilon_0 A/C_1=0.3$  mm ( $\varepsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$ ,  $A$ 为触头面积)。

如前所述,触头表面的吸附量 $\sigma=\sigma_p+\sigma_h$ ,其中,吸附能较大的吸附层 $\sigma_h$ 将不参与分子的吸附与脱附动态平衡过程。故在测量微放电起始电压 $U_d$ 与发射电流起始电压 $U_e$ 之前,需要去除吸附层 $\sigma_h$ 。

$U_d$ 、 $U_e$ 测量步骤:先在真空间隙上施加较低的工频电压 $U$ ,调节补偿电容补偿掉触头间的容性电流。然后逐步升高电压 $U$ ,使真空间隙产生少量的微放电,此后,微放电可能会消失,若微放电消失就继续升高电压 $U$ 。或者将电压 $U$ 升高到较高数

值使真空间隙产生大量的微放电后再降低电压 $U$ 。这些微放电对触头的老炼或调理作用可去除未知量 $\sigma_h$ ,这样通过反复调节电压 $U$ ,就可以找到维持少量微放电的最大电压值,该电压值即为微放电起始电压 $U_d$ 。然后再减少电压 $U$ ,使触头间的发射电流 $j_e$ 为十几微安。在真空压强 $p$ 较大时,十几微安的 $j_e$ 会逐渐衰减,所以要维持较小 $j_e$ 不衰减,就需要不断提升电压 $U$ ,当 $j_e$ 稳定,即吸附量稳定到 $\sigma_p$ 之后,吸附与脱附相平衡。此时,降低电压 $U$ 使 $j_e$ 为最小可测值(约几微安),记录此时的电压 $U$ 即发射电流起始电压 $U_e$ 。

### 3 测量结果与分析

应用图2所示的电路测量发射电流。实验过程为:将真空灭弧室开封后通过管路与真空比对系统相连,使 $d$ 分别等于0.2和0.3mm,应用图1所示的真空比对系统改变灭弧室内的真空度,在动态真空压强 $p_1$ 下,测量其微放电起始电压 $U_{d1}$ 与发射电流起始电压 $U_{e1}$ ,获得 $U_d \sim p$ 、 $U_e \sim p$ 及 $U_d/U_e \sim p$ 3条曲线上的第1个实验点( $p_1, U_{d1}$ )、( $p_1, U_{e1}$ )、( $p_1, U_{d1}/U_{e1}$ )。然后调节动态真空压强为 $p_2$ ,再测量 $U_{d2}$ 与 $U_{e2}$ ,获得3条曲线上的第2个实验点( $p_2, U_{d2}$ )、( $p_2, U_{e2}$ )、( $p_2, U_{d2}/U_{e2}$ )。依此类推,就可获得3条曲线上的所有实验点。本文测量了3只10kV的灭弧室(TD-12/1250一只,TD3462两只)的 $U_d \sim p$ 、 $U_e \sim p$ 及 $U_d/U_e \sim p$ 曲线,测试结果见图4。

由图4(a)、(b)、(c)可见,3只灭弧室的真空压强 $p$ 越大,其 $U_d$ 越小,而 $U_e$ 及 $U_d/U_e$ 越大,考虑到 $E_d=U_d/d$ 和 $E_e=U_e/d$ ,将上述测试结果与理论式(2)、(5)和(7)进行比较,可见它们是一致的。图4(d)所示为不同真空间隙( $d=0.2$  mm或0.3 mm)下,3只灭弧室的 $U_d/U_e \sim p$ 曲线。故通过测试灭弧室的 $U_d/U_e$ ,再查询图4(d)所示的 $U_d/U_e \sim p$ 曲线,就可以估算出该灭弧室的真空度。

### 4 结论

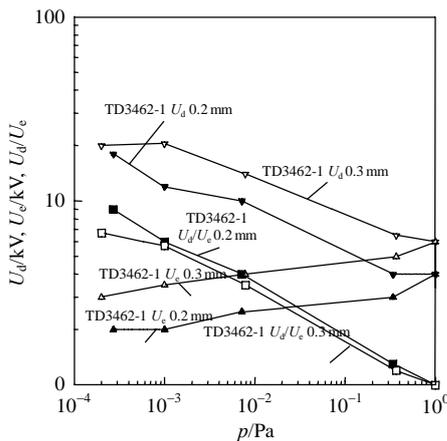
本文提出了一种非磁控放电的、实用化的灭弧室真空度测量新方法—— $U_d/U_e$ 法。即该方法是利用微放电起始电压 $U_d$ 与发射电流起始电压 $U_e$ 之比—— $U_d/U_e$ 测量灭弧室的真空度,其真空度测量范围能达到 $10^0 \sim 10^{-3}$  Pa。本文对 $U_d/U_e$ 法进行了理论分析和实验室研究,得到如下结论:

$U_d/U_e$ 法需要将灭弧室触头真空间隙调整到0.2~0.3 mm。在“闭合”状态下,通过拉伸真空开

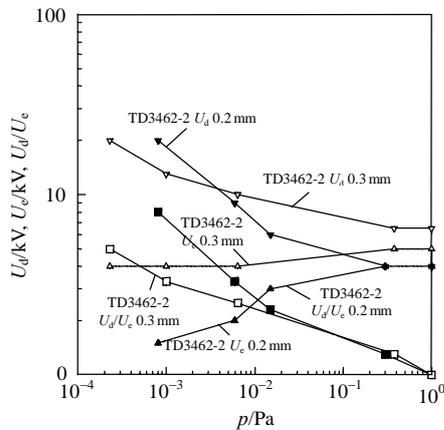
关的触头压力弹簧,可获得 0.2~0.3 mm 的真空间隙,这时,施加 0~25 kV 的交流高电压就可以产生一定量的发射电流或微放电电流。

$U_d/U_e$ 法首先需要利用真空间隙之间的微放电电流对触头表面进行老炼,然后再测量微放电起始电压  $U_d$  和发射电流起始电压  $U_e$ 。

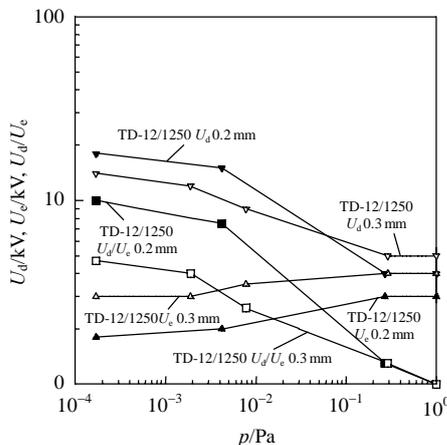
灭弧室内的真空压强  $p$  越小,微放电起始电压  $U_d$  与发射电流起始电压  $U_e$  之比就越大,故通过检测  $U_d/U_e$  是否增大,就可以获知灭弧室内的真空度。



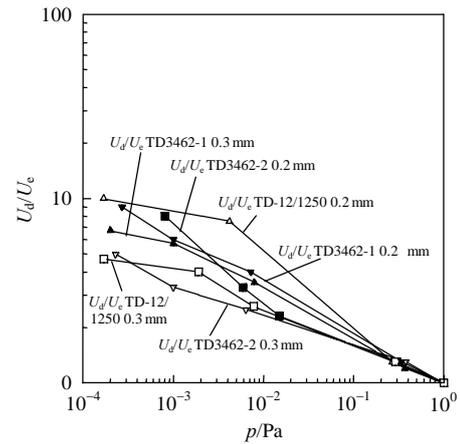
(a) TD3462-1  $U_d$ 、 $U_e$ 、 $U_d/U_e$



(b) TD3462-2  $U_d$ 、 $U_e$ 、 $U_d/U_e$



(c) TD-12/1250  $U_d$ 、 $U_e$ 、 $U_d/U_e$



(d) 3 种管型的  $U_d/U_e$

图 4 微放电起始电压  $U_d$ 、发射电流起始电压  $U_e$  及  $U_d/U_e$  与真空灭弧室内真空压强  $p$  的关系  
Fig. 4 Relationship of micro-discharge inception voltage  $U_d$ , emission current inception voltage  $U_e$ ,  $U_d/U_e$  with internal pressure  $p$  of vacuum tubes

参考资料

- [1] Lucek J R. Apparatus and method for measuring the pressure inside a vacuum circuit interrupter: US, 3263162[P]. 1962-04-20.
- [2] Okawa M, Tsutsumi T. Reliability and field experience of vacuum interrupters[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1987, 2(7): 799-804.
- [3] 程仲元, 邹积岩. 用于真空度测量的脉冲磁控放电研究[J]. 电工技术学报, 1996, 11(1): 60-63.  
Cheng Zhongyuan, Zou Jiyan. Research on pulsed magnetron discharges for vacuum measurement[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 1996, 11(1): 60-63(in Chinese).
- [4] 杨初, 王季梅, 卢江平, 等. 高压真空断路器真空度测量方法的探讨[J]. 西北电力技术, 2003, 31(5): 1-4, 15.  
Yang Ren, Wang Jimei, Lu Jiangping, et al. Discussion on vacuum measurement method for high voltage vacuum circuit interrupter [J]. Northwest China Electric Power, 2003, 31(5): 1-4, 15(in Chinese).
- [5] Kong D, Heinemeyer R. Prebreakdown current of vacuum tubes with increased pressure stressed with AC voltage[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1989, 24(12): 937-941.
- [6] 孟忠, 宋玉萍. 真空断路器灭弧室真空度的判定及分析[J]. 华北电力技术, 2003, (1): 1-5  
Meng Zhong, Song Yüping. Judgement and analysis on vacuity of arc extinguish chambers in vacuum circuit breakers[J]. North China Electric Power, 2003, (1): 1-5(in Chinese).
- [7] 赵子玉, 邹积岩, 何俊佳, 等. 从真空开关上不拆卸真空灭弧室测量其真空度的机理研究[J]. 电工技术学报, 1999, 14(6): 20-22.  
Zhao Ziyu, Zou Jiyan, He Junjia, et al. Study on mechanism for the undetached measurement of internal pressure of vacuum interrupters [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 1999, 14(6): 20-22(in Chinese).
- [8] 赵子玉, 邹积岩, 何俊佳, 等. 真空灭弧室真空度现场测试技术研究[J]. 高压电器, 1999, 35(2): 10-12, 16.  
Zhao Ziyu, Zou Jiyan, He Junjia, et al. Study on measurement technology of internal pressure for vacuum interrupters on site [J]. High Voltage Apparatus, 1999, 35(2): 10-12, 16(in Chinese).

- [9] Zhao Ziyu, Jiang Xiuchen, Jin Zhijian, et al. Study on internal pressure measurement of vacuum interrupter[C]. XIXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Xi'an, China, 2000.
- [10] 赵子玉, 陈雾, 李兆治, 等. 不拆卸灭弧室测量真空度的技术研究[J]. 电工技术杂志, 2003, (8): 32-35.  
Zhao Ziyu, Chen Wu, Li Zhaozhi, et al. Study on internal pressure measurement without detaching vacuum tube from circuit breaker [J]. Electrotechnical Journal, 2003, (8): 32-35(in Chinese).
- [11] 李曼, 赵子玉. 真空灭弧室内部气体压力测试仪励磁线圈磁场计算[J]. 高压电器, 2004, 40(6): 439-441, 445.  
Li Man, Zhao Ziyu. Magnetic field calculation of coil used in internal pressure measurement of vacuum interrupter[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(6): 439-441, 445(in Chinese).
- [12] Frontzek F R, Konig D. The measurement of emission currents immediately after arc-polishing of contacts[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1993, 28(4): 700-705.
- [13] 赵子玉, 宋焕生, 江秀臣, 等. 一种测量真空开关灭弧室的真空度的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 144-149.  
Zhao Ziyu, Song Huansheng, Jiang Xiuchen, et al. Study on new method for measurement of internal pressure of vacuum interrupters [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 144-149(in Chinese).
- [14] Zhao Ziyu, Song Huansheng, Jiang Xiuchen, et al. Study on new method for measurement of internal pressure of vacuum interrupters [C]. XXIIth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, Japan, 2006: 169-172
- [15] Kong D, Heinemeyer R. Prebreakdown current of vacuum tubes with increased pressure stressed with AC voltage[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1989, 24(6): 937-941.
- [16] Frontzek F R, Konig D. Electrical methods for verifying internal pressure of vacuum interrupters after long time service[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1993, 28(4): 635-641.
- [17] Merck W F H, Damstra G C, Bouwmeester C E, et al. Methods for estimation of the vacuum status in vacuum circuit breakers[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(4): 400-404.
- [18] Walczak K. Method for vacuum state evaluation based on analysis of dynamics changes of electron field emission current and X-radiation in time[C]. XXth Int. Sympos. on Discharges a. Electr. Insul. in Vacuum, Tours, France, 2002: 231-234.
- [19] 胡汉泉, 王迁. 真空物理与技术及其在电子器件中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.



赵子玉

收稿日期: 2007-10-25。

作者简介:

赵子玉(1961—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为真空灭弧室真空度测量技术, Zhao-zi-yu@163.com。

(责任编辑 车德竞)