

电负性混合气体临界电场强度的确定

李 正 瀛

华中理工大学

1989年1月21日收到

本文讨论了确定电负性混合气体临界电场强度的两种方法。一是用电负性混合气体中各组成气体的预放电参数来确定按任意比例混合的气体之临界电场强度。另一是由高能脉冲激光释放电子,记录预放电电子电流波形来确定混合气体的临界电场强度。用这两种方法确定 N_2 和 SF_6 混合气体的临界电场强度,其结果十分符合。

一、引 言

对电负性混合气体的放电过程和特性的研究,在近年来得到很普遍的重视^[1,2]。主要原因是,电负性混合气体已经或者将在诸如电气设备,气体激光器等装置中广泛使用。例如 CO_2 激光器要 N_2 和 CO_2 的混合气体。在充 SF_6 气体的电力设备中,为了改善性能,降低造价,已经或者正在采用 SF_6 的混合气体(特别是 SF_6 和 N_2 的混合)代替纯 SF_6 。所以,对电负性混合气体的基本放电参数(如电离、电附、放电截面、电荷转移、扩散系数等)和基本特性(如电晕放电、临界击穿电场强度等)的研究,是有重要实际意义的。本文主要讨论两种确定电负性混合气体临界击穿电场强度的方法,并用这两种方法确定 SF_6 和 N_2 的混合气体之临界电场强度。

确定电负性气体的临界电场强度的方法,主要是 Townsend 方法^[3,4]。根据这种方法,为了确定某一种电负性混合气体的临界电场强度,就要在 Townsend 放电条件下,测定这种混合气体的预放电电流,然后绘制 $\log I-d$ 曲线(I 为放电电流, d 为均匀放电间隙距离)。再将已知的 Townsend 电流方程式,经配给适当的电离系数 α 和电附系数 η ,使之与测得的 $\log I-d$ 曲线相符合。这样,满足 $\alpha = \eta$ 的 $\log I-d$ 曲线所对应的电场强度,才是这种电负性混合气体的临界电场强度。

用这种方法确定临界电场强度,有两个缺点:一是 $\log I-d$ 曲线与 Townsend 电流方程的配定,需要参数的很多次选择,才有可能达到较高的准确度。这是十分繁重的工作,而且误差较大;二是当混合气体的比例改变后,上述测量和参数配定过程就要重复。本文讨论的两种方法比 Townsend 方法不仅简便,而且准确度高。

二、电子电流脉冲法

从实际应用的观点看,电负性混合气体在预放电条件下,电子的二次过程,电荷转移和电子扩散过程等可以略去不计,而认为在放电过程中,起主导作用的是电离和电子附着

过程,即 α 和 η 过程. 这样,在电场强度一定的均匀电场中,离开阴极的电子在到达阳极之前,电极之间的电流可表示为

$$i = \frac{n_0 e_0}{T_e} \exp[(\alpha - \eta) v_e t], \quad (1)$$

式中 n_0 为离开阴极的初始电子数目; e_0 为单位电荷量; v_e 为电子漂移速度, T_e 为电子由阴极到阳极的漂移时间.

当 $\alpha = \eta$, 即在临界电场强度下, 电流为

$$i = \frac{n_0 e_0}{T_e}$$

它是一常数. 如果 n_0 个电子是在 $t = 0$ 时全部离开阴极, 则所记录的电流是一上升时间为零, 脉宽为 T_e , 幅值为 $n_0 e_0 / T_e$ 的脉冲, 即平顶脉冲. 图1为在 SF_6/N_2 混合气体中记录的这种平顶脉冲示波图. SF_6 和 N_2 的混合比例为50%:50%, 电场强度为 $92\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$.



图1 电子电流波形 横标 20ns/div;
纵标 20 μA /div

图1所示波形的装置和回路见文献[5]. n_0 个初始电子是由准分子激光器所产生激光脉冲从放电室中的阴极上释放的. 由于激光脉冲的脉宽为20ns, 所以 n_0 个电子不是在 $t = 0$ 时瞬即放出, 而是按激光脉冲波形分布形式放出. 所以, 图1波形的上升和下降部分均为20ns. 当然, 希望激光脉冲的脉宽小, 例如1—5ns. 但是, 从确定混合气体的临界电场强度观点看, 我们关心的是脉冲波形的平顶部分. 因为这时所对应的电场强度就是临界值.

这样, 当要确定某一电负性混合气体的临界场强时, 只须将这种混合气体充入放电室, 保持气体压力, 均匀场电极距离等条件不变, 改变施加的电压, 直至所记录的电子电流波形是平顶脉冲时, 其电场就是该混合气体的临界电场强度.

还应指出, 这种方法也可用于两种以上气体混合的气体和非电负性气体的临界电场强度的确定.

三、电子系数法

在一般情况下, 电负性混合气体放电中可以只考虑 α 和 η 过程. 这样做对结果不会产生过大的误差. α 和 η 为电场强度 E/N (电场强度/气体分子密度)的函数. 在临界电场强度 $(E/N)_{\text{lim}}$ 时, 可得

$$\alpha[(E/N)_{\text{lim}}] = \eta[(E/N)_{\text{lim}}]. \quad (2)$$

对于特定的电负性混合气体, 作为 E/N 函数的 α 和 η , 可以用实验方法或计算方法确定^[6,7]. 当然, 各单一气体的 α 和 η 同样可以确定. α 和 η 随 E/N 变化曲线的交点, 就是所求的临界电场强度. 如果 α 曲线和 η 曲线有多个交点, 则第一个交点(对应于最低的 E/N 值)才是临界电场强度. 在临界电场强度 $(E/N)_{\text{lim}}$ 附近, 电子的增多或减少取

决于有效电离或有效电附系数 α 和 η , 即对于某种电负性气体, 有

$$\bar{\alpha} = (\alpha - \eta) = -\eta. \quad (3)$$

因此

$$\bar{\alpha}[(E/N)_{lim}] = 0. \quad (4)$$

相应地, 对于电负性混合气体, 有

$$\bar{\alpha}_m[(E/N)_{lim}] = 0, \quad (5)$$

式中 $\bar{\alpha}_m$ 为电负性混合气体的有效电离系数. 在一定的 E/N 范围内, 在 $(E/N)_{lim}$ 处, $\bar{\alpha}_m(E/N)$ 将改变符号.

实验结果表明^[6], 在电负性混合气体放电中, 各组成气体对放电的 α 和 η 过程的贡献与它们各自在混合气体中的比例(百分数)成正比关系, 可根据它们所占的百分数作加权求和. 其关系可表示为

$$\left[\frac{\bar{\alpha}}{N}(E/N) \right]_m = \sum x_i \left[\frac{\bar{\alpha}}{N}(E/N) \right]_i, \quad (6)$$

式中 x_i 为第 i 种气体在混合气体中的百分数. 由(4)和(6)式, 可得

$$\sum x_i \left\{ \frac{\bar{\alpha}}{N}[(E/N)_{m,lim}] \right\} = 0. \quad (7)$$

对于由两种气体组成的电负性混合气体, 上式变为

$$x_1 \left\{ \frac{\bar{\alpha}}{N}[(E/N)_{m,lim}] \right\}_1 = -x_2 \left\{ \frac{\bar{\alpha}}{N}[(E/N)_{m,lim}] \right\}_2. \quad (8)$$

为了满足此式, 混合气体中各个气体的 $\bar{\alpha}/N$ 变化范围, 不能全为正或全为负. 因此, $(E/N)_{m,lim}$ 值应该在临界电场强度大的那种气体的 $(E/N)_{i,lim}$ 和临界电场强度小的那种气体的 $(E/N)_{w,lim}$ 值之间, 即 $(E/N)_{i,lim} > (E/N)_{m,lim} > (E/N)_{w,lim}$. 所以, 随着气体在混合气体中成分的变化, $(E/N)_{m,lim}$ 将在 $(E/N)_{i,lim}$ 和 $(E/N)_{w,lim}$ 之间单调地变化.

从理论上讲, 在很低的 E/N 时, 电子附着过程 (η) 在放电中将起主导作用, 而在高 E/N 值时, 电离过程 (α) 将起主导作用. $\bar{\alpha}$ 和 η 曲线有可能不是单调变化的. 这样, 有可能存在多个交点. 这时, 只有最低的 E/N 值, 才是 $(E/N)_{m,lim}$. 但是, 至今所研究的混合气体, 还未遇到有多个交点的情况. 所以, 从工程观点看, 没有研究的必要.

下面举一个应用这个方法的例子(图2). 以 SF_6 和 N_2 两种气体的混合为例, 图2中曲线 BAC_1 为 SF_6 气体的 $|\eta/N|$ 随 E/N 的变化. C_2A 为 N_2 的 α/N (即 $|\bar{\alpha}/N|$) 随 E/N 的变化曲线. C_1 和 C_2 分别对应于 SF_6 和 N_2 的 $(E/N)_{lim}$ 值. 坐标为半对数坐标. 应注意, 图2中只给出 SF_6 的 η/N 曲线, 实际上应是负值. 但为了作图的方便, 将其取绝对值, 以便和 N_2 的 $\bar{\alpha}/N$ 曲线相交. SF_6 的 $\bar{\alpha}/N$ 曲线未画出, 因为当这两种气体混合后, 其 $(E/N)_{m,lim}$ 一定在 C_1 点的左方, 而 SF_6 的 $\bar{\alpha}/N$ 一定在 C_1 的右方. 所以, 在决定 $(E/N)_{m,lim}$ 时, 用不着 SF_6 的 $\bar{\alpha}/N$ 值.

两曲线的交点 A , 对应于 50% SF_6 -50% N_2 混合气体的临界电场强度, 或混合比为 1:1 时的临界电场强度. 同理, 可以确定以其他比例混合时的临界电场强度. 例如 25% SF_6 -75% N_2 混合气体, 即混合比为 1:3 时, 只须 N_2 的 $\bar{\alpha}/N$ 曲线在有关部分乘以系数 3,

得相应的 N_2 的 $\bar{\alpha}/N$ 曲线, 它与 SF_6 的 $|\eta/N|$ 曲线的交点 B 所对应的电场强度, 就是这种混合比时的临界电场强度. 由图 2 可见, A, B 点都在 C_1, C_2 点之间. 由此类推, 可以确定各种比例混合气体的 $(E/N)_{m,lim}$ 值. 这种方法也可称为作图法.

四、结果与讨论

分别用上述的两种方法对 SF_6/N_2 混合气体的 $(E/N)_{m,lim}$ 做了研究. SF_6 在混合气体中的比例分别为 10, 30, 50, 70 和 90%. 结果如表 1 所列. 表 1 中方法 I 是指电子电流脉冲波形法, 方法 II 为电子系数法或作图法. 作为比较, 表 1 中还给出用 Townsend 方法确定的结果^[9].

在采用方法 II 确定 $(E/N)_{m,lim}$ 时, SF_6 的 η/N 和 N_2 的 α/N 曲线是文献[5]的方法测得的.

方法 I 在理论上是适用于任何气体的混合情况的. 但应注意, 当混合气体中的某一气体含量很小时, 需要有足够的混合时间. 否则将引起较大的误差. 因为在放电室中, 均匀电场的放电区域只是一小部分. 在气体尚未均匀地混合前, 这个小区域的放电条件往往不能代表整个放电室的情况. 一般当放电室较大 (如 10^5cm^3) 时, 1—4h 的混合时间是必要的.

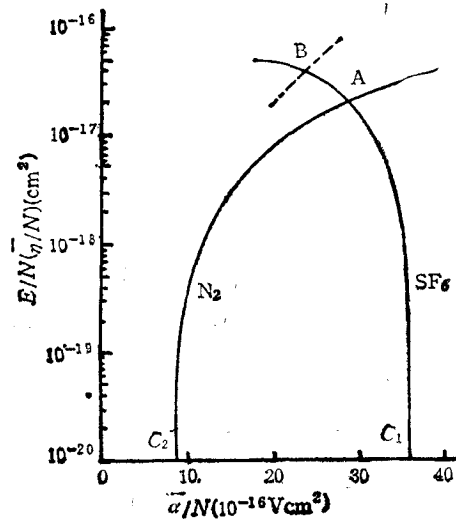


图 2 $(E/N)_{m,lim}$ 的确定方法

表 1 SF_6/N_2 的 $(E/N)_{m,lim} (10^{-16} \text{V cm}^2)$

$SF_6(\%)$	10	30	50	70	90
方法 I	18.2	24.9	28.5	32.2	34.6
方法 II	19.1	23.7	28.3	30.5	33.2
Townsend 方法	18.5	24.3	28.0	31.0	35.0

方法 II 不仅可用于两种气体的混合气体, 而且也可以用于三种气体的混合气体. 其作图原理同上.

五、结 语

电负性混合气体的临界电场强度是一个有重要意义的参数. 本文讨论的两种方法确定的临界电场强度值十分符合. 与 Townsend 方法所得结果比较, 也非常接近. 但上述

两种方法比 Townsend 方法要简便,准确度要高。

- [1] A. Pedersen, I. W. McAllister, G. C. Crichton and S. Vibholm, *Archiv für Elektrotechnik*, **67**(1984), 395.
- [2] G. C. Crichton, J. Drimal, I. W. McAllister and S. Vibholm, Proc. IX International Conference on Gas Discharges and their Applications, (1988).
- [3] M. S. Bhalla and J. D. Craggs, *Proc. Physical Society*, **80**(1962), 151.
- [4] G. Raju and M. A. Dincer, *J. Appl. Phys.*, **53**(12)(1982), 8562.
- [5] 李正瀛,物理学报,**33**(1984),1529.
- [6] A. Wieland, *Elektrotechnische Zeitschrift-A*, **94**(1973), 370.
- [7] H. Itoh, M. Shimosuma, H. Tagashira and S. Sakamoto, *J. Phys. D*, **12**(1979), 2167.
- [8] G. Baumgartner, Proc. III International Conference on Gas Discharges, (1974), p. 366.
- [9] Z. Y. Lee, *IEEE Tran.*, **EI-18**(1983), 637.

DETERMINATION OF CRITICAL FIELD STRENGTH IN ELECTRONEGATIVE GAS MIXTURES

LI ZHENG-YING

Huazhong University of Science & Technology, Wuhan

(Received 21 January 1989)

ABSTRACT

Presented in this paper are two methods used for determining the critical field strengths in electronegative gas mixtures. One of the two methods is to use the predischARGE parameters of the gases for the determination of the mixtures with any concentrations. And the other is to use the recordings of the electron current waveforms in the gas mixtures studied in a discharge chamber. The critical strengths in mixtures of SF₆ and N₂ were determined by the two methods and good agreement has been achieved.