

真空电弧的光谱诊断

董凤宇 王季梅

(西安交通大学电器教研室)

提要 本文在多重态热力学平衡的基础上,通过光谱测量,测得了真空电弧的电子密度、电子温度和蒸气密度,结果说明,真空电弧处于热力学非平衡态。

关键词 非热力学平衡,等离子体,真空电弧,光谱诊断

一、引言

随着真空开关的大量应用,对真空电弧的研究越来越受到重视。由于真空电弧是依靠电极所蒸发的金属蒸气来维持的,具有粒子密度低、温度低的特点,有可能处于热力学非平衡态。随着冷等离子体在科研和生产中的应用,非平衡态等离子体的研究越来越引起人们的注意。

本文作者在研究真空开关电弧过程中,对非平衡态的真空电弧等离子体进行了光谱分析,以确定电弧的电子密度、电子温度和金属蒸气的密度。尽管处于非平衡态的等离子体的电子密度比较低,但电子密度和电子温度仍是两个主要参数,对等离子体的其它参数起着决定性作用,当知道了这两个参数后,才可能知道粒子的温度和各种解离、激发、电离过程。

二、光谱诊断的物理基础

在处于非平衡态下的等离子体中,平衡态下的玻尔兹曼公式、沙哈方程不再适用。文献[1,2,3]给出了一些非平衡态下的公式。T. L. Eddy^[4]在电子密度低到不能满足热力学平衡的要求时,引入了多重态热力学平衡(MTE),即这种等离子体没有一个同一的温度,原子的各激发态之间不再遵从玻尔兹曼分布律,玻尔兹曼公式所联系的两个激发态之间,用一激发温度表示,它既不是电子温度也不是粒子温度,可以说每两个激发态之间对应一个激发温度,但实际用于某一测量时,不必考虑所有激发态和各不相同的激发温度。

这种情况下的状态方程为:

$$P = (N_a T_a + N_i T_i + N_e T_e) k \quad (1)$$

其中 N 表示粒子密度, T 表示温度,下标 a, i, e 分别表示原子,离子和电子。
德拜长度为:

本文于1988年12月31日收到第一次稿,于1989年6月30日收到修改稿。

$$\rho_0 = \left[4\pi e^2 \left(N_e / kT_e + \sum_i Z_i N_i / kT_i \right) \right]^{-1/2} \quad (2)$$

其中的 Z_i 为电离阶数。

用激发态原子数密度表示的电离方程为:

$$\frac{N_e \cdot N_i}{N_m} = \frac{2Z_{exi}}{g_m} \frac{(2\pi m_e kT_e)^{3/2}}{h^3} \exp \left[-\frac{E_\infty - E_m}{kT_{ex\beta}} \right] \quad (3)$$

受激态原子之间的玻尔兹曼关系为:

$$\frac{N_m}{N_n} = \frac{g_m}{g_n} \exp \left[-\frac{E_m - E_n}{kT_{ex\beta}} \right] \quad (4)$$

$$E_\infty = E_i - \Delta E = E_i - 2e^2/\rho_D \quad (5)$$

其中 m, n 为两个不同的激发态, E_i 为电离能, Z_{exi} 为离子的配分函数, 是离子温度 T_i 的函数. $T_{ex\beta}$ 为激发温度. 令(3)式中的 $m \rightarrow \infty$, 对应的激发能为 $E_\infty = E_\infty$, (3)式成为:

$$\frac{N_e \cdot N_i}{N_\infty} = \frac{2Z_{exi}}{g_\infty} \frac{(2\pi m_e kT_e)^{3/2}}{h^3}$$

如忽略高次电离, 有 $N_e = N_i$, 解出电子温度

$$T_e = \left[\frac{N_e^2}{2Z_{exi}(N_\infty/g_\infty)} \right]^{2/3} \cdot h^2/2\pi m_e \cdot k \quad (6)$$

在低温等离子体中, 由于电子密度低, 碰撞效应相应减弱, 由于能级差较大, 激发态与基态之间不再遵从玻尔兹曼规律, 出现基态原子个数多于用粒子温度表示的玻尔兹曼公式所确定的基态原子个数, 即所谓的基态“过剩”. 处于较高能级的受激态原子之间, 由于能级差较小, 可能有一部分仍能满足玻尔兹曼公式, 我们说该种等离子体处于部分局域热力学平衡, 电子密度越低, 满足玻尔兹曼分布的受激态原子部分越小, 直至完全不满足玻尔兹曼分布. 在处理具体问题时, 可假设高于能级 m 的能级, 具有相同的激发温度 $T_{ex\beta}$. 实际试验时, 选两个高于 m 能级的能级所对应的谱线, 用相对强度法求出其对应的激发温度, 如果这两个温度相等, 证明假设是正确的. 做这样的假设以后, 可以按以下方式求出 N_∞/g_∞ , 将(4)式两边取对数:

$$\ln \left[\frac{N_m/g_m}{N_n/g_n} \right] = \frac{E_n - E_m}{kT_{ex\beta}} \quad n > m$$

由此式可以看出, 激发态原子数密度与其统计权重的比值的对数与激发能成线性关系, 在半对数坐标系内为一直线, 这一直线的斜率的倒数即为激发温度 $T_{ex\beta}$. 这一直线在 $E_n = E_\infty$ 的地方所对应的值即为 N_∞/g_∞ 的倒数, 如图 1 所示.

由图可得:

$$\ln \left(\frac{N_\infty}{g_\infty} \right) = \frac{\ln(N_n/g_n) - \ln(N_m/g_m)}{E_n - E_m} (E_\infty - E_m) + \ln \left(\frac{N_m}{g_m} \right) \quad (7)$$

激发温度 $T_{ex\beta}$ 为:

$$T_{ex\beta} = \frac{E_n - E_m}{k \ln [(N_m/g_m)/(N_n/g_n)]} \quad (8)$$

由以上关系,通过光谱测量,测得对应于 N_m, N_s 的辐射系数 $\varepsilon_{m,\lambda}, \varepsilon_{s,\lambda}$, 可以求出 $T_{e,\beta}$. 应用下式可以求出 N_m, N_s :

$$\varepsilon_{\lambda,m} = 10^{10} \times N_m \cdot A_{m,\lambda} \cdot h \cdot c / 4\pi\lambda \quad (9)$$

(W/cm³ · Sr)

其中 c (m/s) 为光速, λ (Å) 为波长, h 为普朗克常数, N_m 以 (1/cm³) 为单位. 求得 N_m, N_s 后,应用(7)式可求出 N_{∞}/g_{∞} .

这一方法的优点在于,可以用来检验等离子体是否处于热力学平衡态,而且当被测等离子体为平衡态时,上述确定参数的方法同样是可用的.将(9)式代入(8)式可得:

$$T_{e,\beta} = (E_s - E_m) / k \ln [B(\varepsilon_{\lambda,m} / \varepsilon_{\lambda,s})] \quad (10)$$

$$B = A_{s,\lambda} \cdot g_s \cdot \lambda_m / A_{m,\lambda} \cdot g_m \cdot \lambda_s$$

在平衡态等离子体中, $T_{e,\beta} = T_e$, 这时的沙哈方程可以写成:

$$\frac{N_s \cdot N_i}{N_m} = \frac{2Z_{e,s}}{g_m} \frac{(2\pi m_e \cdot k \cdot T_e)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_{\infty} - E_m}{kT_e}\right) \quad (11)$$

对上式做类似于(3)式到(6)式的处理,令 $m \rightarrow \infty$, 同样可得到求取电子温度的(6)式. 因此在平衡态,用(6)式和(10)式求得的是同一个温度,即电子温度,而当等离子体处于非平衡态时,利用(6)式和(10)式求得的温度将不相同,由此可以检验等离子体是否处于热力学平衡态.

在我们的试验中,通过求解连续辐射系数,确定电子数密度,连续辐射系数为:

$$\varepsilon_{\lambda} = 1.632 \times 10^{-27} \frac{Z^2 N_e^2}{\lambda^2 (T_e)^{1/2}} \xi \text{ (W/cm}^3 \cdot \text{Å} \cdot \text{Sr)} \quad (12)$$

其中的 Z 为有效电荷数,在真空电弧中,可以认为只有一阶电离,即 $Z = 1$, N_e 的单位为 (1/cm³),波长的单位为 Å,电子温度 T_e 以 K 为单位, ξ 为岗特因子,在 2900 Å ~ 3400 Å 的波长范围内, $\xi = 1^{[9]}$.

三、试验方法与测试结果

试验在一可拆真空灭弧室中进行,真空度为 3×10^{-5} 托,为便于分析,选用了无氧铜做电极,电极直径 60mm,开距 12mm. 在真空开关中,加纵向磁场能明显提高开关的开断能力,为对比,我们用一对没有磁场的电极,和一对带有通过试验电流的整匝线圈的电极,经计算^[6],极间的磁场强度可达 20mT/kA. 试验电流由电容、电感组成的振荡回路提供,频率 50Hz. 试验原理图如图 2 所示.

试验可同时对两个波长的光信号进行实时测量. 用第二部分的方法,选定两条原子谱线和一个连续辐射波长,通过定量测量,可求出电子密度,电子温度. 再应用部分局域热力学平衡态下的通用玻尔兹曼分布公式^{[8],[9]}:

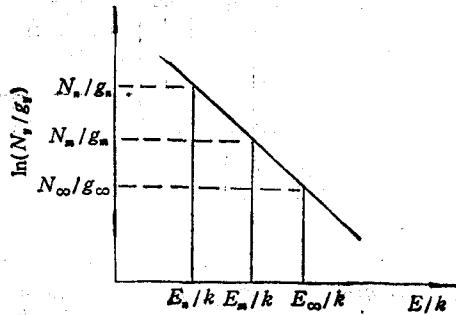


图 1 求取 N_{∞}/g_{∞} 的示意图

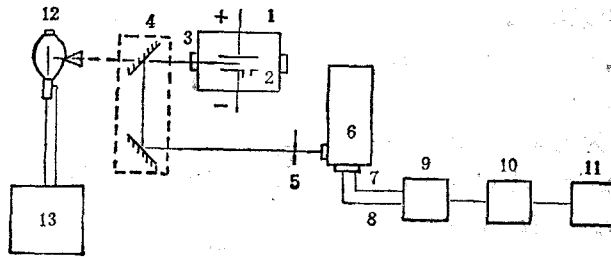


图 2 光谱测量原理图

1.可拆灭弧室 2.触发电极 3.石英玻璃窗口 4.反射镜转像机构 5.透镜 6. WSP-1.2米平面光栅摄谱仪 7.出射狭缝 8.石英导光束 9.光电倍增管 10.记忆示波器 11. x-y记录仪 12.钨带灯 13.恒流源。

$$\frac{N_a}{N_e} \approx \frac{N_a}{N_1} = \frac{1}{a(T_e, N_e)} \frac{g_a}{g_1} \exp(-E_a/kT_{eH}) \quad (13)$$

用此式求出中性粒子密度 $N_e \approx N_1$ 。其中的 $a(T_e, N_e)$ 为修正偏离热力学平衡而引入的修正系数,按文献[8]通过求解速率方程所给出的值。在处理试验数据过程中,认为电弧呈圆柱状轴对称体,测取不同半径处的量,然后应用阿贝变换,可得以上各量的空间分布。试验中,原子谱线选用了 5105 \AA , 5153 \AA 和 5218 \AA 三条原子谱线。连续辐射选用了四个波长,分别为 2913 \AA , 3010 \AA , 3500 \AA , 3605 \AA 。试验过程中,认为电弧是光性薄的,即不存在吸收。用钨带灯对光学系统进行标定,以实现定量测量。试验结果列于图 3、4、5、6、7 中。

由测量结果可以看出,电弧的电离度是很高的,应用完全电离时的电导率公式(7),可以求出沿电极半径电导率的分布,如图 8 所示。

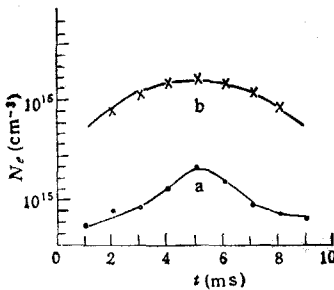


图 3 电子密度与时间的关系

a. 无磁场电极 6kA b. 纵磁场电极 16kA

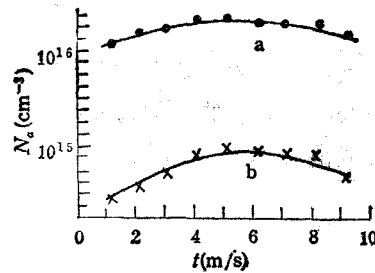


图 4 原子密度与时间的关系

a. 无磁场电极 6kA b. 纵磁场电极 16kA

电导率公式:

$$\sigma = \frac{1.56 \times 10^{-4} T_e^{3/2}}{\ln(1.23 \times 10^4 T_e^{3/2} / N_e^{1/2})} \quad (\Omega \cdot \text{cm})^{-1} \quad (14)$$

在忽略电弧电流的径向和切向分量的情况下,可以认为电流密度与电场强度之间有关系:

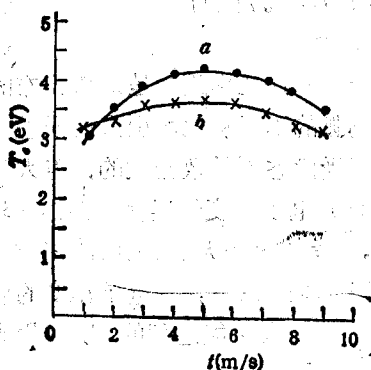


图 5 电子温度与时间的关系

●—无磁场电极 6kA b—纵磁场电极 16kA

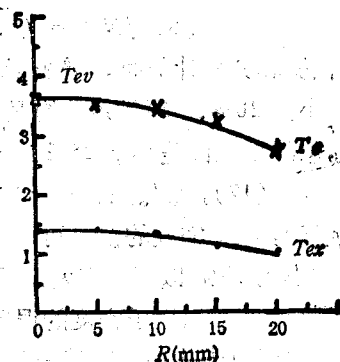


图 6 电子温度和激发温度与电弧半径的关系

纵磁场电极 16kA

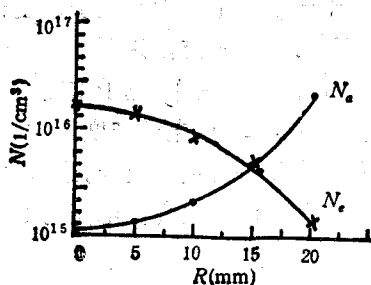


图 7 电子密度和蒸气密度与电极半径的关系,纵磁触头, 16kA 电流最大值时刻

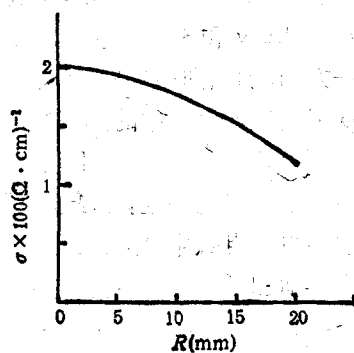


图 8 电导率沿电弧半径的变化曲线

$$J = \sigma E \tag{15}$$

电弧中纵向电场强度可以认为是不随电弧半径变化的, 所以 σ 的分布可以近似认为是电流密度的分布。由图 8 可以看出, 即使不考虑电流的径向和切向分量, 由于电子密度和电子温度的分布不均匀也将使电流密度分布不均匀。

试验中为准确确定电弧的位置, 应尽量增大电流, 以增加电弧半径, 但又不形成阳极斑点, 故无磁场电极的试验电流用 6kA 有效值, 纵磁场电极用 16kA 有效值。

四、讨 论

根据误差分析^[6], 把可能产生误差的项做为变量, 经分析, 上述方法所产生的误差可表达为:

$$\Delta N_n / N_n = [(\Delta \varepsilon_1 / \varepsilon_1)^2 + (\Delta A_{n,t} / A_{n,t})^2]^{1/2} \tag{16}$$

$$\left[\frac{\Delta(N_\infty / g_\infty)}{N_\infty / g_\infty} \right]^2 = \left(\frac{E_\infty - E_m}{\Delta E_{m,n}} \right)^2 \frac{\Delta^2 N_n}{N_n^2} + \left(1 - \frac{E_\infty - E_m}{\Delta E_{m,n}} \right)^2 \left(\frac{\Delta N_m}{N_m} \right)^2 \tag{17}$$

$$\Delta E_{m,n} = E_n - E_m$$

$$(\Delta T_e/T_e)^2 = (\Delta \varepsilon_1/\varepsilon_1)^2 + [\Delta(N_\infty/g_\infty)/(N_\infty/g_\infty)]^2 \quad (18)$$

$$(\Delta N_e/N_e)^2 = (\Delta \varepsilon_1/2\varepsilon_1)^2 + (\Delta T_e/4T_e)^2 \quad (19)$$

在试验和分析计算时,谱线用的是常用谱线,原子的跃迁几率用的是最新公布的数据,误差小于20%。辐射系数的误差包括:读数误差电弧的不重复性所引入的误差和标定误差,总的累积误差小于25%。这样计算得到,引起受激态原子数密度的误差大约为30%,代入式(17), N_∞/g_∞ 的误差可能有36%,代入式(18),电子温度的误差可能达43%,代入式(19),电子密度的误差可能有27%。总的来看,误差是比较大的,但如能将测量系统误差减小到10%以下,自发跃迁几率的不准确也降到10%以下,则电子温度的误差可减小到18%以下,电子密度的误差可减小到7%以下,这是有可能达到的,所以用光谱的方法确定等离子体的参数是一种有前途的方法。

试验结果表明,真空电弧在所测试的电流范围内,根据公式(10),由原子谱线亮度所确定的温度远低于由(6)式所确定的温度,即电弧中的电子温度远高于激发温度,无磁场时,激发温度为0.8—0.9eV,加纵向磁场后,激发温度为1.1—1.4eV,而同样情况下的电子温度分别为4.0eV和3.2eV左右,由此说明真空电弧不处于热力学平衡态。

另一方面,加纵向磁场后,电弧中的电子密度远高于无磁场电弧中的电子密度;蒸气密度远低于无磁场电弧中的蒸气密度,电子温度略有下降。这一方面说明了纵向磁场对逃离电子的束缚作用,另一方面也表明了与平衡态的不同。在平衡态,电子密度由电子温度和中性原子数密度决定,电子温度和中性粒子密度的下降都会使电子密度下降。而在非平衡态的真空电弧中,中性粒子密度和电子温度下降,电子密度反而上升,这可解释为,磁场的作用增加了电弧的压力,碰撞更频繁,致使中性原子的温度提高,电弧的电离度增加。

参 考 文 献

- [1] Benenson, D. M. and Kwok, H. S., On plasma diagnostics Pure and Appl. Chem 54, 6(1982), 1157—1180, 朱文清、晏名文译,关于等离子体诊断,《力学进展》,5,4(1985),504.
- [2] Heberlein, J. V. and Pfender, E., Investigation of the anode boundary layer of an atmospheric pressure argon arc, IEEE. Trans., PS—5, No. 3 (1977), 171.
- [3] Eddy, T. L., Cremers, C. J. and Hsia, H. S., The MTE Continuum Relation With Application to an Argon Arc at Atmospheric Pressure Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 17, (1977), 287.
- [4] Eddy, T. L., Critical review of plasma spectroscopic diagnostics via MTE, IEEE Trans. PS-4, 2(1976), 103.
- [5] Hans Schellekens Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven (1983).
- [6] 张冠生主编,电器学,机械工业出版社(1980).
- [7] 金佑民、樊友三,低温等离子体物理基础,清华大学出版社(1983).
- [8] P. R. 贝文顿,数据处理和误差分析,仇继礼、徐根兴、赵恩广、陈生忠译,知识出版社(1986).

THE SPECTROSCOPIC DIAGNOSTICS ON VECUUM ARC

Dong Fongyu Wang Jimei

(Division of the Electric Apparatus, Dept. of the Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University)

Abstract In this paper, according to multi-thermodynamic equilibrium, the electron density and temperature and atom density of the vacuum arc are measured through spectroscopic measurement. The results show that the vacuum arc is in non-thermodynamic equilibrium.

Key words non-thermodynamic, equilibrium plasma, vacuum arc, spectroscopic diagnostics