

大气压非平衡等离子体中非平衡度的探讨

林烈 吴承康

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

讨论了大气压非平衡等离子体中的非平衡度及它和各种参数的关系, 并针对几类重要的大气压非平衡等离子体的产生技术, 分析了每种产生技术的特点及和非平衡度的关系。

关键词 非平衡等离子体 非平衡度

1 引言

由于大气压非平衡等离子体具有较高的能量利用率, 又适合在大气压或更高气压的环境中工作, 因此它在环境工程、材料制备及材料表面改性等领域有着广泛的应用前景。近年来, 这一领域中的一些问题已日益受到国内外研究人员的重视。传统的非平衡等离子体(或称冷等离子体)是在低气压下产生的。一般来说, 当气压大于10kPa时, 由于等离子体中电子和重粒子的碰撞频率已相当高, 因此电子和重粒子的温度已逐渐趋于平衡。为了在气体压力较高的工况下也能得到非平衡等离子体, 就必须采用一些不同于常规的方法。到目前为止, 从国内外的情况看, 与热等离子体、冷等离子体的研究相比, 大气压非平衡等离子体的一些基本问题的研究还比较欠缺。文献[1]只是简单地提到了关于等离子体非平衡的问题。在电弧热等离子体发生器的射流中, 已观察到一些非平衡现象, 但从总体上看, 对这类等离子体的产生机理、参数诊断、非平衡度和各种参数之间的关系、理论模型及数值计算方法等方面的研究都还需要进一步深入。只有对这些基本问题有了比较全面、深刻的了解, 才能更有效地开展应用性研究, 争取尽早将这门技术推向生产应用领域。

2 等离子体的非平衡度

等离子体是处于热力学平衡态还是处于非平衡态, 从本质上讲取决于等离子体中各种粒子之间以及它们与外部的能量交换过程。在气体放电等离子体中, 外部电源所提供的能量大部分被等离子体中的电子所吸收, 然后通过电子与重粒子的弹性碰撞传递给重粒子。这个能量传递过程可用图1来表示, 其中 Q_r 代表电子辐射引起的能量损失, $\nabla \lambda \nabla T_e$ 代表电子热传导引起的能量损失。

从图1可以看出, 电子和重粒子的温度取决于它们之间以及它们与外界的能量交换过程。如果用 T_e 、 T_h 分别代表电子温度和重粒子温度, 那么等离子体的非平衡度就可以用 $(T_e - T_h)/T_e$ 来表示, 其值在0—1之间。对于完全热力学平衡等离子体, $T_e = T_h$, $(T_e - T_h)/T_e = 0$; 对于冷等离子体, $T_e \gg T_h$, $(T_e - T_h)/T_e \approx 1$; 对于一般的局域热力学平衡等离子体, $(T_e - T_h)/T_e \ll 1$ 。

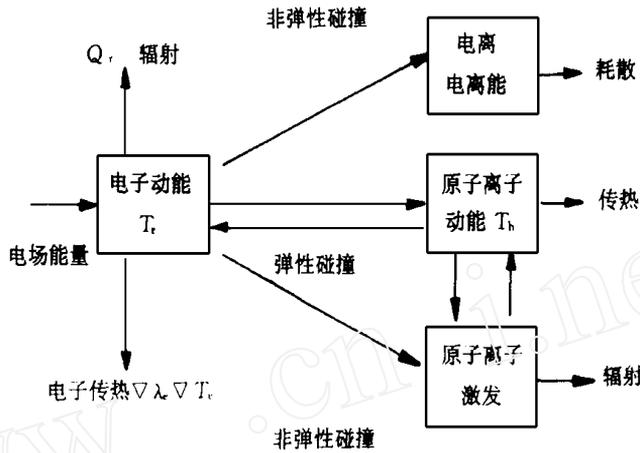


图1 等离子体中能量传递过程

下面我们从基本的能量平衡方程式研究非平衡度的定量表达式。考虑等离子体的双温度模型, 其电子和重粒子的能量平衡方程可以表示为:

$$\rho_e C_{pe} \frac{\partial T_e}{\partial t} = \sigma E^2 - \gamma(T_e - T_h) + \nabla \lambda_e \nabla T_e - Q_r \tag{1}$$

$$\rho_h C_{ph} \frac{\partial T_h}{\partial t} = \gamma(T_e - T_h) + \nabla \lambda_h \nabla T_h - \rho_h v C_{ph} \nabla T_h \tag{2}$$

式中 ρ_e 、 ρ_h 分别代表电子和重粒子的密度; C_{pe} 、 C_{ph} 分别代表电子和重粒子的比热; σ 代表等离子体的电导率; E 代表电场强度; γ 代表电子和重粒子之间的能量交换系数; λ_e 、 λ_h 分别代表电子和重粒子的导热系数; Q_r 为等离子体的辐射损失; v 代表气流速度。

只考虑稳态情况, 即 $\partial T_e / \partial t = 0$, 同时忽略辐射损失, 在温度不是很高的情况下, 电子导热也可以不计, 这样方程(1)就简化为:

$$\sigma E^2 = \gamma(T_e - T_h) \tag{3}$$

式中左边表示电场给予电子的能量, 右边表示电子由于和重粒子碰撞而损失的能量。从式(3)就可以导出非平衡度的一种表达式。单位体积、单位时间内电子和重粒子碰撞损失的总能量为:

$$\gamma(T_e - T_h) = \frac{3m_e n_e v_e k (T_e - T_h)}{m_h} \tag{4}$$

式中 n_e 为电子密度; m_e 、 m_h 分别为电子和重粒子的质量; k 为玻耳兹曼常数; v_e 为电子的碰撞频率。电子在单位时间、单位体积内从电场获得的能量为^[2]:

$$\sigma E^2 = \frac{e^2 n_e v_e E^2}{m_e (\omega^2 + v_e^2)} \tag{5}$$

式中 ω 为等离子体的振荡频率。式(3)表示电子从电场获得的能量全部用于加热重粒子, 此时可以得到下列表达式:

$$\frac{T_e - T_h}{T_e} = \frac{\sigma m_h E^2}{3m_e n_e v_e k} = \frac{m_h e^2 E^2}{3k T_e m_e^2 (\omega^2 + v_e^2)} \tag{6}$$

从式(6)可以看出, 等离子体的非平衡度和电场强度 E 、气体种类、电子温度及气体压力有关。显然, 在大气压条件下, 对于稳态放电, 增加非平衡度的主要手段是提高电场强度 E 。在大气压下的电弧光放电中, E/p 值一般只有 $10^{-2} \text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$, 而在辉光放电中可达到 $10^5 \text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ 。在一般的电弧热等离子体中, 很难提高 E 的数值, 所以产生大气压非平衡等离子体还需要采用一些特殊的技术。

3 几种主要产生技术中非平衡度的探讨

目前研究得较多的产生大气压非平衡等离子体的方法有: (1) 滑动弧放电; (2) 介质阻挡放电; (3) 高压脉冲电晕放电; (4) 高压辉光放电。

3.1 滑动弧放电

滑动弧放电是在高速气流推动下产生的一种脉冲放电, 脉冲周期与器件的结构、气流速度等参数有关。在这类产生等离子体的技术中, 高速气流与放电区的相互作用对于非平衡起着重要作用。为了比较清楚、直观地说明非平衡度与气流参数的关系, 从重粒子的能量平衡方程(2)出发来讨论这一问题, 并用一维简化模型来模拟放电区和气流的相互作用。假定某一定体积的气体在外电场的作用下产生放电形成等离子体, 在该过程中, 电子温度 T_e 基本保持不变, 这时另外有一股冷气流吹入等离子体, 现在来研究冷气流中重粒子温度的变化。

冷气流吹入等离子体区后, 重粒子与电子产生碰撞并得到能量, 温度逐步上升。现在可用分段线性化的方法来计算气流速度、气体种类、电子温度及进入深度等参数与非平衡度的关系。根据上述假设对方程(2)进行简化, 并算出重粒子的温度变化数据, 结果见图2。图2表示同一种气体以不同的质量流量进入等离子体后非平衡度的变化。从图2可以看出, 质量流量越大(气流速度越大), 重粒子趋向平衡温度的距离越长; 质量流量越小, 冷气流可以较快地达到平衡温度, 这也说明较大的气流速度有利于达到较大的非平衡度。上述结果虽然只是通过简化方法得到的, 但是对理解滑动弧放电中气流对非平衡的影响有一定帮助。从物理概念上讲, 由于电场的存在, 即使受到冷气流的强烈掺混, 电子仍可维持较高的温度, 而冷气流中的重粒子由于与电子碰撞, 其温度逐步上升, 它的上升速率与气体种类、流速大小及电子温度等参数有关。只要选择适当的参数, 就可以得到大气压下的非平衡等离子体。从另一种角度看, 在滑动弧放电中, 由于气流和放电的强烈掺混, 使电场强度 E 比一般的电弧放电中的高得多, 这有助于提高非平衡度。从非平衡度的表达式(6)可以看出, 非平衡度和电场强度 E 的平方成正比, 提高 E 可以大大增加非平衡度。

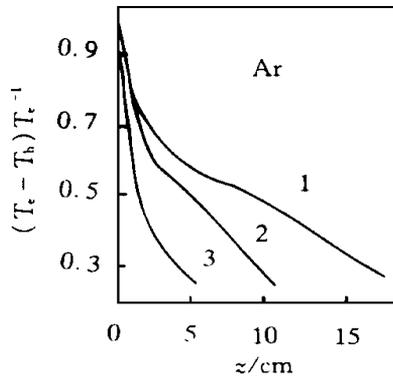


图2 气体流量对非平衡度的影响

$T_e = 10^4 \text{K}$; 1 — $\rho_h v = 1 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;
 2 — $\rho_h v = 0.5 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 3 — $\rho_h v = 0.2 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.2 介质阻挡放电和高压脉冲电晕放电

虽然介质阻挡放电及高压脉冲电晕放电在原理及结构上有所不同,但它们都属于脉宽很窄的脉冲放电,气体介质的流速都很小或根本不流动,它们产生非平衡的机理基本上是相同的。对于脉宽很窄的脉冲放电,可采用从方程(1)得到的简化电子能量平衡方程

$$\sigma E^2 = \gamma(T_e - T_h) + \rho_e C_{pe} \frac{dT_e}{dt} \quad (7)$$

来讨论。从方程(7)中可以看出,在脉冲放电中,电子从电场吸收的能量并不全部用于加热重粒子,其中一部分用于提高电子本身的温度。脉冲宽度越窄、前沿越陡、电场强度越大,用于提高电子温度的能量所占的比例也越大,即方程(7)中右边第二项比右边第一项大得多。从物理概念上讲,由于脉冲宽度很窄,在放电周期结束之前,电子从电场获得的能量还来不及全部传给重粒子。这样,在每个放电周期中,电子从电场获得的能量都多于电子传给重粒子的能量,因此电子和重粒子的温度差也就很大。脉冲放电中,当脉宽达到 μs 量级或更小时,脉冲放电引起的非平衡已非常明显。在介质阻挡放电及脉冲电晕放电中,较高的电压、较窄的脉宽有利于提高等离子体的非平衡度。

对于高压辉光放电,许多问题还有待进一步研究,已有一些文献报道了这方面的研究成果^[3,4],这里就不讨论了。

4 结论

上述讨论中,我们从基本的电子能量平衡方程导出了非平衡度的表达式(6)。在稳态放电中,非平衡度只与电场强度 E 和气体压力有关。在大气压条件下,当然不能用降低气压来保持非平衡,只有设法提高电场强度 E 来达到非平衡。在滑动弧及高压辉光放电等情况下,利用冷气流和放电区的强烈掺混来大大提高 E 值,从而达到非平衡的目的。但是在脉宽很窄的脉冲放电中,从式(7)可以看出,电子从电场获得的能量已有很大部分用于电子自身的加热,而传给重粒子的能量已大大减少,这是在介质阻挡放电及高压脉冲电晕放电中达到大气压下非平衡的一个主要原因。

参考文献

- 1 Maheri B, Pierre F, Emil P. Thermal Plasma Fundamentals and Applications. New York: Plenum Press, 1994. Vol 1, 4
- 2 Raizer Yu P. Foundations of Modern Physics of Gas Discharge Processes. Moscow: Nauka Press, 1967. 132
- 3 Harrey J E, Evans D R. Magnetic Stabilization of a Rotating Glow Discharge. J. Appl Phys, 1987, 62(12): 4708
- 4 Truns I, Suhr H, Harry J E, et al. Application of Rotation High-Pressure Glow Discharge for Dissociation of Hydrogen Sulfide. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1993, 13(1): 77.

编辑部1997年5月3日收稿
1997年12月17日收到修改稿

(下转第56页)

ABSTRACT

RFP experimental results with high plasma current density and enhanced plasma temperature have been obtained in discharges with slow ramping current. Long time enhancement of the toroidal magnetic flux and MHD activities are observed. Toroidal flux is increased as the plasma current ramps up. It is observed that the enhancement of the toroidal magnetic flux is not uniform. In the discharges there is a MHD dynamo effect. Discharge parameters (plasma current of 100kA, plasma sustained time of 800 μ s, T_e of 70eV and T_i of 85eV) are obtained in RFP experiments.

Key words RFP plasma Ramping discharge Dynamo effect Siliconization of wall

(上接第60页)

STUDY OF DEGREE OF NONEQUILIBRIUM IN PLASMA AT ATMOSPHERIC PRESSURE

L N L i e W U Chengkang

(Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

ABSTRACT

The relationship between the degree of nonequilibrium and other factors in plasma at atmospheric pressure is discussed. The characteristics of the degree of nonequilibrium for four different types of plasma generating of nonequilibrium plasma at atmospheric pressure are analyzed.

Key words Nonequilibrium plasma Degree of nonequilibrium