

等离子体概念、分类及基本特性

王利娟

(内江师范学院物理与电子信息工程学院, 四川内江 641112)

摘要: 通过讨论等离子体的概念及其分类, 并给出关于等离子体特性的时空判据。

关键词: 等离子体; 准电中性; 德拜半径

中图分类号: O53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5365(2009)06-0041-03

自然界的物质有三种状态: 固态、液态和气态。将固体加热到熔点时, 粒子的平均动能超过晶格的结合能, 固体会变成液体; 将液体加热到沸点时, 粒子的动能会超过粒子之间的结合能, 液体会变成气体。如果把气体进一步加热, 气体则会部分电离或完全电离, 即原子的外层电子会摆脱原子核的束缚成为自由电子, 而失去外层电子的原子变成带电的离子。当带电粒子的比例超过一定程度时, 电离气体凸现出明显的电磁性质, 而其中正离子和负离子的数目相等, 因此被称之为等离子体, 物质的这种状态也称为物质的第四态^[1]。等离子体与气体的最大区别就是其成分带正负电荷的粒子, 而不是其结合体。它有很高的电导率, 与电磁场的耦合作用也极强: 带电粒子既可与电场耦合, 又可与磁场耦合。等离子体与固体表面相互作用, 具有独特光、热、电等物理性质, 可产生多种物理、化学过程^[2]。

1 等离子体概念

等离子体是由电子、离子等带电粒子以及中性粒子(原子、分子、微粒等)组成的, 宏观上呈现准中性, 且具有集体效应的混合气体。所谓准中性是指在等离子体中的正负离子数目基本相等, 系统在宏观上呈现中性, 但在小尺度上则呈现出电磁性, 而集体效应则突出地反映了等离子体与中性气体的区别^[3]。

2 等离子体的分类

2.1 按产生方式分类

按产生方式可分为天然等离子体和人工等离子体。天然等离子体: 宇宙中 99.9% 的物质处于等离子体状态, 如恒星星系、星云等。地球比较特别, 物质大部分以凝聚态形式存在, 能量水平低。可是在大气中, 由于宇宙射线等外来高能射线的作用, 在每立方厘米内每秒会产生 20 个离子。

当然, 对密度为每立方厘米 10^{10} 个分子的大气来讲, 这种电离程度太微弱了。但是雷雨时的闪电, 可使大气达到很高的电离度, 形成可观的等离子体。大气上部出现的极光, 以及黑夜天空中的余辉, 则是另一种形式的等离子体。人工等离子体: 人们周围随处可见人工产生的等离子体, 如日光灯、霓虹灯中的放电等离子体, 等离子体炬(焊接、新材料制备、消除污染)中眩目的电弧放电等离子体, 爆炸、冲击波中的等离子体以及气体激光器和各种气体放电中的电离气体。

2.2 按电离度分类

等离子体中存在电子、正离子和中性粒子(包括不带电荷的粒子, 如原子或分子以及原子团)等三种粒子。设其密度分别为 n_e 、 n_+ 、 n_0 , 定义电离度 $\beta = n_e / (n_e + n_0)$, 以此来衡量等离子体的电离程度, 这时等离子体可分为以下三类: 当 $\beta = 1$ 时, 称为完全电离等离子体, 如日冕、核聚变中的高温等离子体, 其电离度是 100%; $0.01 < \beta < 1$ 时, 称为部分电离等离子体, 如大气电离层、极光、雷电、电晕放电等都属于部分电离等离子体; $\beta < 0.01$ 时, 称为弱电离等离子体, 如火焰中的等离子体大部分是中性粒子, 带电粒子成分较少, 属于弱电离等离子体。

2.3 按热力学平衡分类

根据离子温度与电子温度是否达到热平衡, 可把等离子体分为三类: 完全热力学平衡等离子体: 当整个等离子体系统温度 $T > 5 \times 10^3$ K 时, 体系处于热平衡状态, 各种粒子的平均动能都相同, 这种等离子体称为热力学平衡等离子体, 简称平衡等离子体; 局域热力学平衡等离子体: 就是局部处于热力学平衡的等离子体; 非热力学平衡等离子体: 通过低气压放电获得等离子体时, 气体分子的间距非常大, 自由电子可在电场方向得到较大加速度, 从而获得

收稿日期: 2008-09-23

作者简介: 王利娟(1975-), 女, 四川攀枝花人, 讲师, 硕士研究生, 主要从事材料物理与化学研究

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

较高的能量.而质量较大的离子在电场中则不会得到电子那样大的动能,气体分子也一样.所以,电子的平均动能远远超过中性粒子和离子的动能,电子的温度可高达 10^4 K 而中性粒子和离子的温度却只有 $300-500$ K 这种等离子体处于非平衡状态,所以称为非热力学平衡等离子体,简称非平衡等离子体.

2.4 按系统温度分类

按系统温度可分为高温等离子体和低温等离子体.高温等离子体中的粒子温度 $T > 10^8 - 10^9$ K 粒子有足够的能量相互碰撞,达到了核聚变反应的条件.低温等离子体又分为热等离子体和冷等离子体两种.热等离子体是稠密气体在常压或高压下电弧放电或高频放电而产生的,温度也在上千乃至数万开,可使分子、原子离解、电离、化合等.冷等离子体的温度在 $100-1000$ K 之间,通常是稀薄气体在低压下通过激光、射频或微波电源发辉光放电而产生的.

2.5 按产生方法和途径分类

除自然界本身产生的等离子体外,人为发生等离子体的方法主要有气体放电法、射线辐射法、光电离法、热电离法、冲击波法等.其中化工中最为常见的是气体放电法.根据所加电场的频率,气体放电可分为直流放电、低频放电、高频放电、微波放电等多种类型;根据其放电形式又可分为电晕、辉光、弧光等离子体等;根据气压可分为低压等离子体和常压等离子体^[4].

3 等离子体的特性

3.1 德拜长度

假设偏离电中性的区域为积累正电荷 Q 的球形区域,则过剩的正离子将受到斥力移自球外,而周围的电子受到引力移向正电荷球.正离子和电子定向移动的结果,使得正电荷的周围包围一层过剩电子,形成一个紧围正电荷球的负电荷球壳层.当球壳内过剩电子足够多时,将会阻止壳内正离子向球外移动^[5].设球心正电荷和球壳负电荷所产生的电场中的电势分布为 U 则由泊松方程得

$$\nabla^2 U = -\rho/\epsilon_0 \quad (1)$$

式中 ρ 为场内净余电荷体密度.在以正电荷中心为坐标原点的球坐标系中,可把式(1)改写成径向方程

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU}{dr} \right) = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

设半径 r 处的电子密度为 n_e ,离子密度平均值为 \bar{n}_i 且 $\bar{n}_i = \bar{n}$ 则

$$\rho = (n_e - \bar{n}_i) e = (n_e - \bar{n}) e \quad (3)$$

假定等离子体可看作理想气体,电子数随 $U(r)$ 的分布遵从玻尔兹曼分布,即

$$n_e = n \exp[-eU/(kT)] \quad (4)$$

因 $eU \ll kT$ 故式(4)可按级数展开,取其前两项,得:

$$n_e = [1 - eU/(kT)] \quad (5)$$

将式(5)代入(3)得

$$\rho = -\frac{n e U}{kT} \quad (6)$$

将式(6)代入(2)得

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU}{dr} \right) = -\frac{n e}{\epsilon_0 kT} U$$

令 $\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{n e^2}}$, 则

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU}{dr} \right) - \frac{U}{\lambda_D^2} = 0 \quad (7)$$

若取无限远处为电势的零参考点,则式(7)的通解为

$$U = \left| \frac{A}{r} \right| \exp \left| -\frac{r}{\lambda_D} \right|$$

式中 A 为积分常数,可由边值关系确定.为使该解收敛且过渡到一般库仑电势表示式,可令 $A = q/(4\pi\epsilon_0)$, 这时式(7)的特解为

$$U = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \exp \left| -\frac{r}{\lambda_D} \right| \quad (8)$$

式中 λ_D 具有长度的量纲,称为德拜半径,它是描述等离子体特性的物理量.以正电荷中心为球心,以 λ_D 为半径的球称为德拜球.式(8)表明,等离子体内球形正电荷和球壳负电荷所产生的电势分布比真空中点电荷所产生的电势分布衰减得更快.由式(8)可知,在德拜球外, $U \approx 0$ $\vec{E} = -\frac{\partial U}{\partial r} \approx 0$ 这表明球形正电荷和球壳负电荷在壳外产

生的合场强近似为零,即内球正电荷被负电荷球壳层所屏蔽,使其对壳外电子不再发生作用,因此,壳外等离子体仍保持电中性.可见,德拜球就是由正电荷内球和负电荷外球壳所组成的球,它是等离子体内产生偏离电中性的最大范围,而德拜半径是静电作用的屏蔽半径,也是由热运动而引起的电荷分离的空间尺度.

3.2 等离子体频率

假设等离子体内某处有一群电子稍微偏离它们的平衡位置,则它们会受到该处正离子施于它们的回复力(电场力)而返回原平衡位置,此时它们的振荡动能等于它们振荡到最大位移时的电势能,然后电子由平衡位置继续向前运动,直到全部动能转变成电势能为止.显然,这群电子在围绕平衡位置作周期性的振荡,这种振荡称为等离子体振荡,其振荡频率称为等离子体频率^[6].

设等离子体振荡时的场强为: $\vec{E} = \vec{E}_0 \exp(i\omega_e t)$ 则电子在该电场中的运动方程为

$$m_e \frac{d^2 \vec{v}}{dt^2} = -e \vec{E}_0 \exp(i\omega_e t)$$

由初始条件 $\vec{v}|_{t=0} = 0$ 可求出该方程的解为

$$\vec{v} = -\frac{e\vec{E}_0}{\omega_e m_e} \exp(i\omega_e t)$$

略去离子电流, 由 $\vec{j} = -en\vec{v}$ 可求出等离子体的电流密度为

$$\vec{j} = \frac{ne}{\omega_e m_e} \vec{E}_0 \exp(i\omega_e t)$$

若无磁场, 则由麦克斯韦方程

$$\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \vec{j} = 0$$

可得

$$\left[i\omega_e + \frac{ne}{\omega_e m_e} \right] \vec{E} \exp(i\omega_e t) = 0$$

进而可求出电子振荡的角频率 ω_e

$$\omega_e = \sqrt{\frac{ne}{\epsilon_0 m_e}} \quad (9)$$

同理, 可求得离子振荡的角频率 $\omega_i = \sqrt{\frac{ne}{\epsilon_0 m_i}}$

因离子质量 $m_i \gg m_e$, 故 $\omega_i \ll \omega_e$. 因此, 常把 ω_e 称为等离子体振荡角频率, 并用 ω_p 表示, 而等离子体频率为

$$\nu_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{ne}{\epsilon_0 m_e}} \approx 9.98 \sqrt{n}$$

等离子体电荷分离的时间尺度可以理解为一个电子以热

运动平均速率 $v = \sqrt{\frac{kT}{m_e}}$ 穿越距离 λ_D 所需要的时间, 即

$$\lambda_D = \frac{r_D}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 m_e}{ne}} \quad (10)$$

将式 (10) 与式 (9) 相比较得

$$\lambda_D = \frac{1}{\omega_p}$$

计算表明, 若某处偏离电中性, 则该处的电子或正离子会以等离子体振荡的形式发生相互作用. 经过多次振荡, 该区域的电中性得以恢复. 因此, 要使等离子体具有维持电中性的特性, 就必须经过一个远大于 λ_D 的时间间隔, 以保证大量电子和正离子有充分的相互作用时间.

4 结语

确定等离子体准电中性的条件是: 电离气体在空间的特征线度远大于德拜半径, 维持电离气体的特征时间间隔远大于等离子体角频率的倒数. 因 $\lambda_D \propto 1/\sqrt{n}$, $\lambda_D \propto 1/\sqrt{n}$, 故上述条件确定了带电粒子的极限值, 此即等离子体准电中性的时空判据. 可见, 带电粒子的密度超过该极限的电离气体才能被称为等离子体, 这就使得等离子体的定义有了更确切的含义.

参考文献:

- [1] 孙杏凡. 等离子体及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1982: 2-4.
- [2] 项仕标. 激光点火原理与实践 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2004: 34-36.
- [3] 李定, 陈银华, 马锦秀, 等. 等离子体物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 2-3.
- [4] 郑启光, 辜建辉. 激光与物质相互作用 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996: 247-254.
- [5] 胡希伟, 等. 离子体理论基础 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2006: 264-265.
- [6] 张家泰. 激光等离子体相互作用物理 [M]. 北京: 中国工程物理研究院北京研究生部, 1994: 30-39.

[责任编辑: 许洁]