

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

等离子技术 在材料加工中的 应用

李德元 赵文珍 董晓强 等著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

等离子技术在材料加工中的应用

李德元 赵文珍 董晓强 等著



机械工业出版社

本书共分 13 章,简要地介绍了等离子技术在材料加工中的一些应用,内容主要包括等离子电源和枪体的设计以及等离子技术在材料切割、喷涂、焊接、堆焊、表面淬火、加热切削、旋压、熔炼、扩渗及气相沉积等方面的应用。在本书的各章中,分别叙述了每种技术的发展概况、基本原理、相关设备及工艺等,并举出了一些应用实例。此外,本书还介绍了一些有关等离子体物理和等离子加工过程数值模拟的内容。

本书可供从事等离子加工的科研人员和工程技术人员阅读,也可作为高等院校研究生和大中专学生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

等离子技术在材料加工中的应用/李德元等著. —北京:机械工业出版社, 2005.1

ISBN 7-111-16027-4

I. 等… II. 李… III. 工程材料—等离子体加工 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 004094 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 余茂祚

责任编辑: 余茂祚 于奇慧 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 洪汉军

北京原创阳光印业有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·8.875 印张·344 千字

定价: 26.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

等离子态被称为物质的第四态，是物质存在的基本形态之一。从燃烧的火焰到滋生万物的太阳，从美丽的极光到闪烁的星系，等离子态物质在宇宙中普遍存在，据印度著名天体物理学家沙哈的计算，宇宙中99.9%的物质都处于等离子体状态。

从20世纪30年代开始，科技工作者研究人工产生等离子体的方法，并逐渐将其应用到科学研究和生产实践中。现在等离子技术已经在航空航天、核能、军事、电子与电器、光学照明、材料制备和材料加工等很多领域中获得了广泛的应用。

本书重点介绍了等离子技术在材料加工中的应用，所涉及的加工方法有等离子弧切割、喷涂、焊接、堆焊、表面淬火、加热切削、旋压、熔炼、扩渗、气相沉积等。为了保持内容的完整性，书中还介绍了一些关于等离子体物理和等离子弧物理方面的基础理论知识，并介绍了多种等离子枪体和电源的结构及其工作原理。

本书的几位作者都是多年从事等离子加工技术相关理论和应用研究的高校教师，在该领域中曾获得过多项科研成果，并在国内外期刊上发表了几十篇相关的学术论文，本书中有大量数据来源于这些科研成果和工作实践。

本书第1、2、10、13章由李德元撰写；第4、5、6、7章由董晓强撰写；第8、9章由赵文珍撰写；第3章由常云龙撰写；第11章由康煜平撰写；第12章由宋贵宏撰写。在本书的写作过程中，得到了沈阳工业大学刘正教授、邵成吉教授、李晨希教授、张剑副教授、赵铁军副教授、张忠礼高级工程师和上海交通大学王伟明博士的帮助，在本书审校过程中，得到了机械工业出版社余茂祚编辑、于奇慧编辑的指点和帮助，在此表示衷心的感谢！

由于作者水平所限，书中难免存在各种疏漏和不当之处，敬请读者批评指正。

最后，本书作者谨向书中所援引文献的作者们深表谢意！

作 者

目 录

前言

第1章 等离子体及其产生	1
1.1 电离气体和等离子体	1
1.2 等离子体中粒子的运动与 碰撞	5
1.3 等离子体的平衡	9
1.4 单粒子在电场和磁场中的 运动	11
1.5 等离子体产生方法概述	17
参考文献	21
第2章 等离子弧及其发生器	22
2.1 电弧的特性	22
2.2 轴线式等离子发生器中的 电弧	28
2.3 电弧通道模型及电弧压缩 效应	32
2.4 电弧等离子体发生器的 结构	38
参考文献	41
第3章 等离子弧的供电 及维持装置	42
3.1 等离子弧的伏—安特性	42
3.2 对等离子弧供电电源的 要求	43
3.3 等离子弧的稳定	47
3.4 直流等离子弧电源	50
3.5 交流及变极性等离子弧 电源	56
3.6 反极性等离子电源	67
参考文献	68
第4章 等离子弧切割	70
4.1 等离子弧切割技术简介	70

4.2 等离子弧切割方法	71
4.3 等离子弧切割设备	76
4.4 等离子弧切割工艺	81
4.5 应用实例	88
参考文献	89
第5章 等离子弧焊接	91
5.1 等离子弧焊接技术简介	91
5.2 直流等离子弧焊接设备	94
5.3 小孔法焊接	98
5.4 微束等离子弧焊接	103
5.5 其它等离子弧焊接方法	106
5.6 应用实例	109
参考文献	111
第6章 等离子弧喷涂	113
6.1 等离子弧喷涂技术简介	113
6.2 等离子弧喷涂方法	115
6.3 等离子弧喷涂设备	119
6.4 等离子弧喷涂材料	124
6.5 等离子弧喷涂工艺分析	128
6.6 应用实例	133
参考文献	139
第7章 等离子弧堆焊	140
7.1 等离子弧堆焊技术简介	140
7.2 等离子弧堆焊方法的分类	142
7.3 等离子弧堆焊装置	144
7.4 等离子弧堆焊材料	152
7.5 等离子弧堆焊工艺	154
7.6 应用实例	156
参考文献	158
第8章 等离子弧表面淬火	160
8.1 等离子弧表面淬火技术 简介	160

8.2 等离子弧表面淬火装置	161	11.3 离子渗氮	211
8.3 等离子弧表面淬火工艺	165	11.4 其它离子化学热处理	224
8.4 等离子弧表面淬火层的组织 和性能	168	11.5 应用实例	229
8.5 应用实例	173	参考文献	234
参考文献	174	第 12 章 等离子技术在气 相沉积中的应用	236
第 9 章 等离子弧加热切削和 加热辅助旋压	176	12.1 相关技术概述	236
9.1 等离子弧加热切削	176	12.2 溅射镀膜技术	237
9.2 等离子弧加热辅助旋压	185	12.3 离子镀镀膜技术	246
参考文献	187	12.4 化学气相沉积技术	251
第 10 章 等离子弧熔炼	189	参考文献	258
10.1 等离子弧熔炼方法简介	189	第 13 章 等离子加工过程 的数值模拟	261
10.2 等离子弧熔炼枪体的结构 及供电	194	13.1 等离子枪体内部流场和 温度场的模拟实例	261
10.3 应用实例	199	13.2 颗粒在等离子射流中的 运动与加热的模拟实例	268
参考文献	206	13.3 颗粒撞击基体过程的模 拟实例	274
第 11 章 等离子化学热处理	207	参考文献	277
11.1 等离子化学热处理简介	207		
11.2 离子化学热处理设备	209		

第 1 章 等离子体及其产生

1.1 电离气体和等离子体

等离子体是由电子、正离子和中性原子所组成，对外界呈电中性的电离气体。等离子体这个名词是由美国物理学家郎谬尔（Irving Langmuir）于 1928 年首次使用^[1]。

自然界中的宏观物质在一定的压力下，随着温度升高，其存在状态一般会呈现出固态→液态→气态三种物态的转化过程，我们把这三种基本形态称为物质的三态。温度升高，气态分子热运动加剧，当温度足够高时，双原子气体分子中的原子由于获得了足够大的动能，便开始彼此分离，分子受热时分裂成原子状态的过程称为离解。若进一步提高温度，原子的大量外层电子会摆脱原子核的束缚成为自由电子，失去电子的原子变成带电的离子，这个过程称为电离。

实际上，在热力学温度不为零的任何气体中，都有一定量的原子会发生电离。但只有当大量的原子发生电离，且带电粒子密度足够大时，才会对其性质产生明显的影响。

等离子体被称为物质的第四态。据印度天体物理学家沙哈（M.Saha）的计算，宇宙中的 99.9% 的物质处于等离子体状态^[2]。例如，自然界中闪电、电离层、极光、日冕、太阳风、星际物质等都是等离子体的存在方式。人工生成的等离子体也有多种形式，诸如荧光灯、霓虹灯、电火花、电弧等。图 1-1 给出了几种不同类型等离子体的密度和温度的数值范围。获得等离子体最自然的方法是将气体加热，随着气体温度的升高，其粒子平均能量随之提高，离子密度与原子密度的比值也随之上升，当粒子的平均能量接近其电离能时，气体可以转变为基本上完全电离的等离子体。图 1-2 以水被加热时的状态变化反映了获得不同形态等离子体所需要的温度。为了便于进行比较，在图中还给出了其它类型等离子体的温度分布情况。除了加热的方法以外，还可以靠光照、放电、燃烧、冲击波激发、与高温介质接触等方法获得等离子态的物质。

通常，等离子体中存在电子、正离子和中性粒子，其中中性粒子包括了所有不带电的粒子如原子、分子和原子团。假定它们的密度分别为 n_e 、 n_i 和 n_a ，由于等离子体对外呈电中性，可知 $n_e \approx n_i$ 。我们可以用电离度 $\eta = n_e / (n_i + n_a)$ 来衡量等离子体的电离程度。通常把电离度小于 0.1% 的气体称弱电离气体，也称低温等离子体；电离度大于 1% 的称为强电离等离子体，也称高温等离子体。

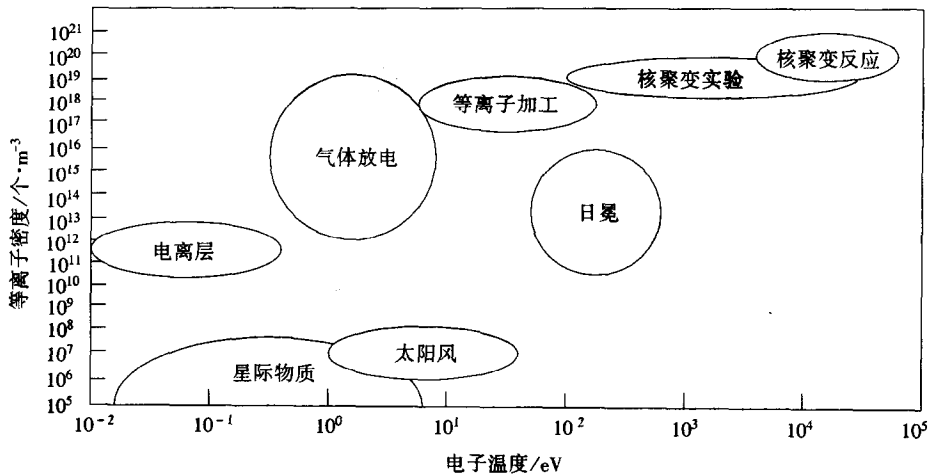


图 1-1 各种等离子体的密度和温度

高温等离子体主要应用于受控核聚变，中低温等离子体用于切割、焊接、喷涂以及制造各种新型的电光源与显示器等，低温等离子体用于表面聚合和材料的表面改性等。

等离子体既可以是同一类中性原子（及由该种原子形成的单电荷离子和电子组成），也可以含有不同类别的原子和离子，其中前者称为简单等离子体。由于等离子体中的带电粒子间存在相互作用，因此，它们的性质与一般平衡气体是有差别的。但是，由于在大多数的等离子体中，这种离子间的相互作用相对较弱，

因此，仍然可以用研究平衡气体的方法来对其进行分析。每个粒子的平均动能仍用 $E_{av} = 3/2 kT$ 表征，其中 $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ，为玻耳兹曼常量。等离子体的状态可以用它的密度和温度来表征。等离子体温度 T 通常采用能量单位来表示，它与通常定义的热力学温度 T_k （单位为 K）的关系为 $T = kT_k$ 。在表示等离子体温度时，也可用电子伏特表示，其单位为 $1\text{eV} = 11\,600\text{K}$ 。

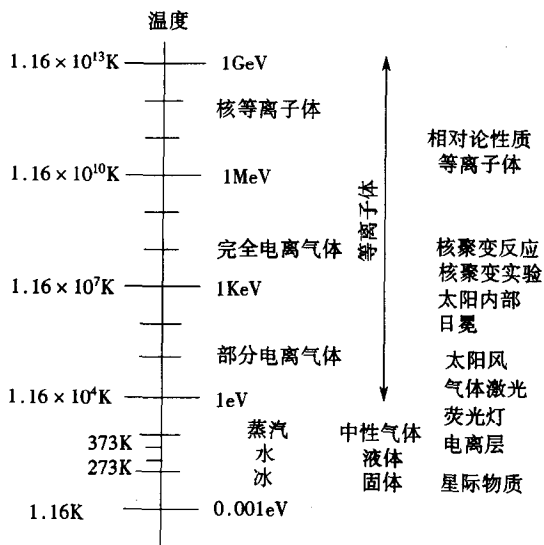


图 1-2 水被加热时的状态变化示意图

等离子体粒子的速度分布仍符合麦克斯韦速度分布定律^[3], 即

$$dN = N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv_x dv_y dv_z \quad (1-1)$$

式中 dN ——质心速度处于 (v_x, v_y, v_z) 周围 (dv_x, dv_y, dv_z) 范围内的粒子数;

N ——粒子总数;

m ——粒子的质量。

如果不考虑速度的方向, 则可在空间内取球坐标, 将式 (1-1) 写成

$$dN = N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 \sin\theta dv d\theta d\varphi \quad (1-2)$$

然后对 θ 和 φ 积分, 便得到质心速度在间隔 $(v, v + dv)$ 内的粒子数为

$$dN = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv \quad (1-3)$$

利用式 (1-3) 可以计算粒子的特征速度, 常用的特征速度有最可几速度 v_m 、平均速度 $\bar{v}$ 和方均根速度 $\sqrt{\bar{v}^2}$ 。

最可几速度是速度分布函数

$$F(v) = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (1-4)$$

取得最大值的速度, 将 $F(v)$ 求极值, 即可得

$$v_m = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (1-5)$$

粒子的平均速度是 v 的统计平均值, 即

$$\bar{v} = \int_0^\infty 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^3 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (1-6)$$

方均根速度 $\sqrt{\bar{v}^2}$ 是 v^2 的统计平均值的平方根, 由

$$\bar{v}^2 = \int_0^\infty 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^4 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv = \frac{3kT}{m} \quad (1-7)$$

$$\sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (1-8)$$

图 1-3 是一个等离子体速度分布函数 $F(v)$ 与速度 v 的关系图, 从图中可以看出等离子体在不同温度下粒子的速度分布。

在平衡等离子体条件下, 给定密度和温度就完全表征了它的状态, 而且根据密度和温度就可以求得电离度, 并可以推导出离

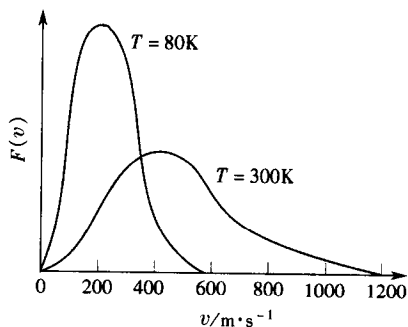


图 1-3 等离子体速度分布函数 $F(v)$ 与速度 v 的关系

子、激发态原子和光子等粒子的密度。但是，实际上并不是所有的等离子体都是处于平衡态的，此时带电粒子的速度分布很可能与麦克斯韦分布相差很多。而且等离子体可能是非等温的。此时电子和重粒子（如正离子和中性原子）具有不同的温度。

等离子体对外呈现宏观电中性，这是由于其内部正离子和电子电荷互相抵消的结果，因此可以说等离子体是准电中性的物质。但是，这种准电中性是有条件的，只有在足够大的体积和足够长的时间内，这种电中性才能维持。在此，需要提及德拜（Debye）半径和郎缪尔（Langmuir）频率，这是两个在等离子物理研究中经常要用到的概念。

德拜半径（ r_D ）是维持等离子体准电中性的最小空间尺度

$$r_D = \sqrt{T/4\pi n_e e^2} \quad (1-9)$$

郎缪尔频率的（ ω_p ）的倒数 t_D 是维持等离子体准电中性的最小时间尺度

$$t_D = 1/\omega_p = \sqrt{m_e/4\pi n_e e^2} \quad (1-10)$$

式中 T ——等离子体的温度（eV）；

n_e ——等离子体中的电子密度（ cm^{-3} ）；

m_e ——电子质量（kg），取 $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$ ；

e ——电子的电荷量（C），取 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{C}$ 。

有了上述两个概念以后，就可以比较精确地表述等离子体的准电中性特性了。即在空间线尺寸度显著大于 r_D 的体积内和时间间隔显著大于 t_D 的时间内，等离子体能够维持电中性。

表 1-1 给出了几种不同等离子体的状态参数，由表中数字可见，不同离子体的电子密度、温度和电离度彼此相差很大。

表 1-1 几种不同等离子体的状态参数^[4]

对 象	电子密度/个· cm^{-3}	电子温度/eV	电离度	德拜半径/cm
电离层（E 层）	10^5	0.03	$10^{-8} \sim 10^{-7}$	0.3
电离层（F 层）	$10^5 \sim 10^6$	0.03 ~ 0.1	$10^{-7} \sim 10^{-4}$	0.2
太阳光球	10^{14}	1	1	5×10^{-4}
日冕	$10^4 \sim 10^8$	100	1	1 ~ 100
星际物质	$10^{-3} \sim 10$	0.01 ~ 1	0.1 ~ 1	$10^2 \sim 10^4$
低压放电	10^{11}	3 ~ 7	3×10^{-4}	3×10^{-3}
辉光放电	10^{10}	1 ~ 3	3×10^{-7}	5×10^{-2}
弧光放电	10^{13}	0.5 ~ 2	3×10^{-4}	3×10^{-4}
超高频放电	10^{12}	1 ~ -3	3×10^{-6}	5×10^{-3}

(续)

对 象	电子密度/ $\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$	电子温度/eV	电离度	德拜半径/cm
高压放电	10^{15}	$0.5 \sim 1$	3×10^{-5}	10^{-5}
超高压放电	10^{17}	$0.5 \sim 1$	3×10^{-5}	10^{-7}
稳态激光等离子体	10^{17}	$1 \sim 3$	3×10^{-3}	10^{-7}
激光实验	10^{22}	300	1	5×10^{-8}
准稳热核反应堆	10^{14}	10^4	1	10^{-3}
激光热核反应堆	$10^{22} \sim 10^{24}$	10^4	1	$10^{-6} \sim 10^{-7}$

1.2 等离子体中粒子的运动与碰撞

1.2.1 带电粒子的运动

在对等离子体中的电子、离子和中性分子的运动行为进行研究时,所采用的基本理论和方法与研究气体中原子运动时是相同的。当等离子体电离度不高时,带电粒子的存在对于体系的影响并不明显。因此,对于弱等离子体来说,在不存在外场的情况下,粒子的运动经常被看作与原子在普通气体中的运动是相似的。此时,仍采用理想气体的基本假设,即粒子的空间尺度与粒子之间的平均距离相比,小得可以忽略不计;粒子间和粒子与四壁间的碰撞是完全弹性碰撞;粒子间的平均距离较大,除碰撞外,相互间及其与四壁间的作用力可以忽略,重力的影响也可以忽略。此时等于把等离子体看作是自由自在、杂乱无章运动着的大量弹性小球的集合。且粒子数密度处处均匀,沿各个方向运动的机会均等,无速度优势方向。这时,粒子的运动轨迹将是由一些长短不同的直线段所组成的折线,粒子在运动过程中方向和速度的改变完全是由于粒子间的相互碰撞引起的,如图 1-4a 所示。

描述粒子的运动和研究气体原子的运动一样,也要用到粒子的平均自由程 $\bar{\lambda}$ 和粒子的平均碰撞频率 $\bar{Z}$ 等参数。粒子的平均自由程 $\bar{\lambda}$ 是指在一定的宏观条件下,一个粒子在连续两次碰撞之间所可能经过的各段自由路程的平均值。粒子的平均碰撞频率 $\bar{Z}$ 是一个粒子在单位时间内所受到的平均碰撞次数。二者关系为

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{v}}{\bar{Z}} \quad (1-11)$$

式中 $\bar{v}$ ——粒子的平均速度。

需要注意的是由于电子、正离子和中性原子的质量

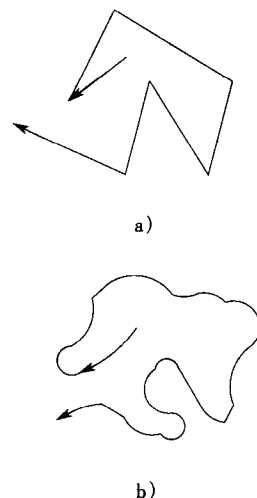


图 1-4 等离子体中粒子的运动轨迹

不同,虽然它们处于同一体系中,但它们的平均自由程 $\bar{\lambda}_e$ 、 $\bar{\lambda}_i$ 和 $\bar{\lambda}_a$ 是不同的。

但是,由于等离子体中大量带电粒子的存在,其性质与仅由中性粒子组成的气体毕竟是有区别的。首先,当有外电场和磁场存在时,带电粒子的运动必然受到作用,例如,外电场会使带电粒子受到加速作用,使其产生明显的定向运动特征。即使在没有外电场和磁场存在时,由大量带电粒子自身产生的空间电荷场也会对带电粒子的运动产生作用。

在电离度较高的强等离子体中,带电粒子数在粒子总数中已经占有相当大的比例,即使在一个半径小于 r_D 的空间球中,也会有多个带电粒子存在。这时,带电粒子之间的库仑力的作用已经不能忽略,带电粒子之间的相互作用再也无法用简单的刚性球之间的碰撞来描述。此时粒子的运动轨迹已经不能再用简单的折线来表示,而会呈现出复杂得多的运动特征,如图1-4b所示。

1.2.2 等离子体中粒子间的碰撞

等离子体中同时存在着电子、正离子和中性原子,它们总是在不停地运动,也不可避免地要发生相互碰撞。由于这些粒子的质量和能量的不同,对它们之间碰撞的研究是比较复杂的。对于由简单气体电离得到的简单等离子体进行分析研究时,相对比较简单。如果等离子体中存在气体离解过程或当等离子体存在多个气体组元时,由于更多组元的存在,这个过程将更为复杂。

在大多数关于等离子体中粒子碰撞的研究中,为了使研究过程简化,仍是采用简单的两体碰撞的模型。在此研究过程中,仅考虑两个碰撞粒子之间的相互作用,不考虑与其它粒子的作用,也不考虑粒子自身本质的变化。

现在假定一个 α 粒子和一个 β 粒子之间发生了碰撞,且在碰撞过程中不存在外力对粒子的作用。如果用带撇的变量表征碰撞后粒子的运动状态,则根据动量守恒定律,在碰撞前后有

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}' \quad (1-12)$$

或者

$$m_\alpha \mathbf{v}_\alpha + m_\beta \mathbf{v}_\beta = m_\alpha \mathbf{v}'_\alpha + m_\beta \mathbf{v}'_\beta \quad (1-13)$$

式中 m_α 、 m_β —— α 、 β 粒子的质量;

$\mathbf{v}_\alpha$ 、 $\mathbf{v}_\beta$ —— α 、 β 粒子的速度矢量;

$\mathbf{p}$ ——粒子的动量。

而根据能量守恒定律,在碰撞前后有

$$m_\alpha v_\alpha^2/2 + m_\beta v_\beta^2/2 = m_\alpha v_\alpha'^2/2 + m_\beta v_\beta'^2/2 + \Delta E \quad (1-14)$$

式中 m_α 、 m_β ——粒子的质量;

v_α 、 v_β —— α 、 β 粒子的速度;

ΔE ——碰撞引起粒子内能的总改变量。

粒子之间的碰撞可分为弹性碰撞和非弹性碰撞。对于弹性碰撞来说, $\Delta E = 0$;

而对于非弹性碰撞来说, ΔE 可能大于零或小于零。例如, 导致原子由基态跃迁到激发态的过程就属于 $\Delta E > 0$ 的情况, 而使原子由跃迁态返回基态的碰撞则是 $\Delta E < 0$ 的情况。

即使仅研究一个简单等离子体系统中粒子的两体碰撞, 由于其中有电子、正离子和中性原子, 它们之间的碰撞也可以有多种不同的组合。在这些碰撞的过程中, 碰撞的效果不但取决于粒子的种类, 还取决于两个粒子的速度和两个粒子的运动方向, 而碰撞又有弹性碰撞和非弹性碰撞, 使等离子体中粒子碰撞的研究变得相当复杂, 下面仅就几种最基本的情况进行一下分析。

等离子体中可能发生的碰撞有多种类型, 包括原子—原子; 原子—电子; 原子—离子; 电子—电子; 电子—离子; 离子—离子。离子之间的弹性碰撞通常只会导致粒子运动方向和速度的变化。但是, 在某些特定的情况下, 碰撞时粒子间也会发生电荷的交换过程。此时, 对于两个碰撞粒子而言, 可能仍满足 $\Delta E = 0$, 因此仍属于弹性碰撞的类型。

根据等离子体的电离度, 可以推断, 对于大多数等离子体来说, 中性原子仍然是系统中占有最大比例的粒子, 原子—原子之间的弹性碰撞也是最可能发生的碰撞过程。通常, 完全可以用研究气体中原子碰撞的方法对这些过程进行描述。但是, 原子之间的非弹性碰撞也可能发生, 由于在气体被加热形成等离子体的过程中, 原子被电离成离子的方式也包括了碰撞电离, 因此, 等离子体中原子—原子之间的非弹性碰撞会导致原子失去外层电子, 并变成离子。等离子体的温度越高, 这种电离过程发生的几率也将越大。

原子—电子之间的非弹性碰撞会导致中性原子的激发或电离, 这是等离子体中产生带电粒子的主要源泉。由于电子的质量远远小于原子的质量, 而且在一般的情况下, 原子的运动速度远远小于电子的运动速度。因此, 在有关的研究中经常把这个过程简化成电子在静止的原子场中运动和碰撞的问题。碰撞后对原子的影响主要取决于与之发生碰撞的电子的动能和碰撞的角度。原子—电子的碰撞可能会导致原子的激发, 这是指碰撞后的原子吸收了电子的部分能量受到激发, 处于较高的能级, 此过程可以用下式来表示:



式中 e ——代表电子;

A ——代表原子;

A^* ——代表受激发的原子。

原子—电子之间的碰撞也可以直接导致原子的电离, 使原子失去一个外层电子变成离子, 同时产生一个自由电子。这个过程叫做原子的一次电离, 可用下式来表示:



式中 A^+ ——代表被电离的原子；

e' ——自由电子。

除了上述两个过程外，碰撞中还可能发生逐级电离的过程，即第一次碰撞导致原子激发，第二次碰撞才导致其电离，其通式为



在电子与复杂原子碰撞时，还可能导致原子同时释放两个或更多个电子，形成多电荷离子的多次电离过程。

碰撞过程产生激发或电离的前提条件是：原子通过碰撞所吸收的能量要大于该种原子的激发能或电离能。表 1-2 给出了一些原子的激发能和电离能的数据（表中 E_1 代表从基态跃迁到最低能级的激发能， E_i 代表基态电离能）。

表 1-2 若干原子的激发能和电离能数据 (单位: eV)

能量	H	H ₂	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Cs	Hg
E_1	10.2	11.2	21.2	16.7	11.6	10.0	8.5	1.5	4.9
E_i	13.6	15.4	24.5	21.6	15.8	14.0	12.1	3.9	10.4

原子与离子的碰撞过程中，可能会发生原子与离子间的电荷交换过程，这个过程可用下式表示：



这种电荷交换不会改变两个粒子的内能之和，因此仍属于弹性碰撞的过程。这种电荷交换作用对于正离子的运动有较大的影响，当被外电场或空间电荷场加速的快离子与中性的慢原子发生弹性碰撞时，由于电荷的交换，快离子变成了慢原子，而新产生的离子又会被加速成为快离子。这种电荷交换的接力效果，使更多的粒子能够被电场加速。

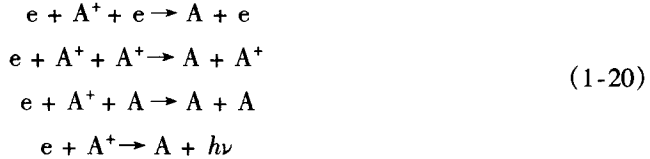
原子与离子也会发生非弹性碰撞，可以导致二者的内能发生多种变化。当内能的变化值较大时，也可能会导致原子的激发或电离。但是，在普通的弱等离子体中，发生这种非弹性碰撞的几率很小，主要还是弹性碰撞和能量变化很小的非弹性碰撞。只有在高温的热核等离子体中，这种碰撞才会对原子的激发和电离产生很大的作用。

电子与离子在碰撞过程中会发生复合过程，即离子俘获电子形成中性原子。电子的运动速度越慢，碰撞时二者作用时间越长，这个过程越容易发生。可以用下式表示这个过程：



但是由于这个过程是一个能量和动量非守恒的过程，要使这个过程成立，总是需要有第三个粒子参与这个过程。第三个粒子可以是电子 (e)、离子 (A^+)、

原子 (A)，也可以是复合过程中产生的光子 ($h\nu$)。可以用下式表示这些过程：



在上述几种过程中，以两个电子参与的复合过程最容易发生。当电子密度较低，而电子温度又较高时，产生一个光子的辐射复合将起到重要的作用。

电子—电子和离子—离子的碰撞过程，要涉及到粒子之间库仑斥力相互作用的问题。随着两个粒子的接近，在近程下，两个粒子之间的电荷斥力将持续阻碍二者继续接近，由于这个过程比较复杂，本书将不对这些过程作出分析。

1.3 等离子体的平衡

根据统计热力学的推导，如果等离子体要达到热力学平衡状态，则所有粒子的速度分布均应满足麦克斯韦分布，见式 (1-1)。它们的能态几率应符合玻耳兹曼分布^[5]。即

$$\frac{N_A}{N_B} = \frac{g_A}{g_B} \exp\left(-\frac{E_B - E_A}{kT}\right) \quad (1-21)$$

式中 N_A ——能态为 E_A 的粒子数；

N_B ——能态为 E_B 的粒子数；

g_A 、 g_B ——该能态下的允许存在的能态数；

T ——温度；

k ——玻耳兹曼常量。

此外，还要求该体系中任何过程（如辐射、离解、电离等）都要与其反过程（如吸收、复合等）相平衡。下面以两个在等离子体中发生的可逆过程为例，分析一下这个平衡的意义。

首先分析以碰撞电离和它的可逆过程三体复合，即可逆反应为



正反应的进行速率 Q_{il} 应正比于中性原子密度和电子的密度，即 $Q_{il} = k_{il} n_a n_e$ ；逆反应进行的速率 Q_{rl} 应正比于电子密度的平方和离子密度，即 $Q_{rl} = k_{rl} n_e^2 n_i$ ；对于在封闭体系中处于平衡的体系，其正、逆反应的速率应当相等，即 $Q_{il} = Q_{rl}$ 。联立两式解得

$$n_e n_i / n_a = k_{il} / k_{rl} = K_1 \quad (1-23)$$

然后再分析以光致电离和它的逆过程辐射复合，即可逆反应为



它的正反应的速率应正比于中性原子的密度和平衡辐射强度 I , 即 $Q_{12} = k_{12} n_a I$; 逆反应的速率应正比于离子密度和电子密度, 即 $Q_{21} = k_{21} n_i n_e$; 其正、逆反应的速率也应当相等, 即 $Q_{12} = Q_{21}$ 。联立两式解得

$$n_e n_i / n_a = I k_{12} / k_{21} = K_2 \quad (1-25)$$

式 (1-23) 中 K_1 和式 (1-25) 中 K_2 是各自反应的平衡常数。由于这两个反应发生在同一个平衡体系中, 此体系中 $n_e n_i / n_a$ 只能有一个确定值 K , 因此有

$$K_1 = K_2 = K \quad (1-26)$$

这说明在一个热力学平衡等离子体系中, 带电粒子密度与中性粒子密度的比与电离及复合的具体形式无关, 仅取决于温度和粒子的内部结构。

为了计算粒子密度比, 可以利用由质量作用定律所推出的沙哈公式^[6], 即

$$\frac{n_i n_e}{n} = 2 \frac{g_i}{g_a} \left(\frac{2\pi m_e T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_i}{T}\right) \quad (1-27)$$

式中 g_i, g_a ——粒子在 i 能级和原子能级下的能态数;

E_i ——第 i 个离子的能级。

利用式 (1-27) 就可以计算出各种等离子体在不同温度下的粒子数比, 以及各种电离过程的平衡常数 K 。

例如, 对于氢 (H) 的电离过程可以计算出粒子数比

$$\frac{n_i n_e}{n} = 2.4 \times 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \exp(-1.58 \times 10^5 T^{-1}) \quad (1-28)$$

对于氦 (He) 的一次电离过程也同样可以计算出粒子数比

$$\frac{n_i n_e}{n} = 9.6 \times 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \exp(-2.85 \times 10^5 T^{-1}) \quad (1-29)$$

表 1-3 和表 1-4 给出了氫等离子体和氦等离子体在不同温度下粒子组成的一些计算数据。由表中数据可以看出, 在 20000K 时, 等离子体中中性原子的比例已经很少了, 此时电离度已经接近于 1。

对于实验室条件下所得到的等离子体来说, 总是要和发生器及环境之间产生很明显的能量交换和物质交换, 在无法满足封闭体系的条件下, 也不可能达到各种正逆反应之间的平衡, 因此总是远离平衡状态的。实际情况往往是等离子体不断地以放热、辐射和输出粒子等方式损失能量和物质, 而同时则靠外源提供能量和物质输入来补偿损失, 从而才能保证等离子体的存在和稳定。虽然对于这样的体系, 不可能得到真正热力学平衡状态, 但是, 在一定条件下, 仍可能得到某些过程的平衡。例如, 在粒子密度不太高的等离子体中, 电子和离子的速度分布仍基本符合麦克斯韦分布, 此时通常有 $T_i \approx T_a$, 但 $T_i \ll T_e$, 即原子温度与离子温度基本相等, 但它们与电子温度相差很大, 这种等离子体被称为非等温等离子

体, 材料加工中所利用的等离子体大多属于这种类型。维持这样一个局部平衡等离子体的关键是要有一个起主导作用的电离和复合过程, 并能通过一定的输入能量过程使之能够稳定维持。例如, 对于某些过程可能是靠重粒子和电子的碰撞及复合; 而另一个过程可能是靠光致电离和辐射复合。这取决于该种类型等离子体的发生原理及具体方法。

表 1-3 常压下氩等离子体各组分的浓度^[6] (单位: 个/cm³)

T/K	Ar	Ar^+	Ar^{++}	e	Σn
4000	1.835×10^{18}	1.272×10^{10}	—	1.272×10^{18}	1.835×10^{18}
8000	9.146×10^{17}	1.450×10^{15}	—	1.450×10^{15}	9.175×10^{17}
12000	4.798×10^{17}	6.665×10^{16}	2.998×10^{10}	6.665×10^{16}	6.131×10^{17}
16000	6.441×10^{16}	1.996×10^{17}	3.938×10^{13}	1.997×10^{17}	4.637×10^{17}
20000	6.278×10^{15}	1.776×10^{17}	2.918×10^{15}	1.834×10^{17}	3.702×10^{17}

表 1-4 常压下氮等离子体各组分的浓度^[6] (单位: 个/cm³)

T/K	N_2	N	N_2^+	N^+	N^-	e
4000	1.84×10^{18}	3.30×10^{15}	1.10×10^7	3.50×10^8	1.50×10^3	1.10×10^{10}
8000	8.80×10^{16}	8.30×10^{17}	7.50×10^{13}	2.00×10^{15}	9.00×10^{10}	2.10×10^{15}
12000	2.30×10^{14}	4.80×10^{17}	2.65×10^{13}	6.20×10^{16}	1.80×10^{12}	6.20×10^{16}
16000	—	6.00×10^{16}	—	2.00×10^{17}	—	2.00×10^{17}
20000	—	4.00×10^{15}	—	1.80×10^{17}	—	1.80×10^{17}

1.4 单粒子在电场和磁场中的运动

1.4.1 带电粒子在恒稳电场中的运动

对于单个带电粒子 q 在电场 E 和磁场 B 中的运动, 作用在粒子上的洛伦兹力为

$$F = q(E + v \times B) \quad (1-30)$$

式中 q ——粒子所带的电荷量;

v ——粒子的运动速度矢量。

在本节中首先分析单个粒子在稳恒电场中的运动, 即 E 等于常量的情况。此时洛伦兹力的等式有以下形式:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= \frac{q}{m} E \\ \frac{dv_y}{dt} &= 0 \\ \frac{dv_z}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-31)$$