

# 焊接等离子体 辐射光谱理论 及其工业应用基础

李志勇◇著



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书详细阐述了焊接过程中等离子体的特点, 等离子体光谱诊断的基本理论和方法, 不同焊接方法等离子体光谱的时域、频域、空域分布特征, 光谱测控技术在焊接质量测控上的典型应用方面的内容。从光谱测控的理论基础到应用实例, 形成了完整的体系。

本书可以作为从事焊接加工的科研、工程应用等人员的技术用书, 也可作为等离子体加工技术、先进激光技术、材料制备过程中的等离子体技术等相关专业人员的参考用书, 并可为企业工程技术人员从事相关应用开发提供理论指导和技术参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

焊接等离子体辐射光谱理论及其工业应用基础/李志勇著. —北京: 北京大学出版社, 2013. 1  
ISBN 978-7-301-21681-1

I. ①焊… II. ①李… III. ①等离子焊—光谱—应用—工业技术 IV. ①TG456.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 282674 号

**书 名:** 焊接等离子体辐射光谱理论及其工业应用基础

**著作责任者:** 李志勇 著

**策划编辑:** 童君鑫

**责任编辑:** 童君鑫 黄红珍

**标准书号:** ISBN 978-7-301-21681-1/TG·0040

**出版发行:** 北京大学出版社

**地 址:** 北京市海淀区成府路 205 号 100871

**网 址:** <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

**电子信箱:** pup\_6@163.com

**电 话:** 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

**印 刷 者:** 三河市博文印刷厂

**经 销 者:** 新华书店

720 毫米×1020 毫米 16 开本 13.5 印张 312 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

**定 价:** 38.00 元

---

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

# 前 言

焊接电弧物理是焊接过程测控和焊接质量在线检测的重要理论基础。焊接等离子体辐射是焊接电弧物理的基本现象，在现代自动化焊接生产制造中，其光谱信息可作为重要的信息源用于焊接过程的测控。近年来，在自动化焊接生产和精确制造要求的推动下，关于焊接等离子体辐射光谱的理论和应用研究，成为世界各先进工业国家焊接制造的一个热点。目前，西班牙、美国、德国、意大利等国家已经有相关的工业产品应用；我国学者也开展了不少相关研究工作。但迄今为止，关于焊接等离子体辐射光谱理论及其应用方面，国内外还没有一本专著给予系统阐述。研究者和应用者大多借助零散的资料来开展相关工作，缺乏关于焊接电弧辐射光谱的基础理论知识，而且无法准确掌握其应用现状及前景，成为制约其推广应用和深入研究的主要障碍之一。

自 2000 年开始，有幸在导师李俊岳先生的天津大学电弧物理研究室就读博士学位，研究室在焊接电弧物理领域深厚的研究积累，为我了解和学习电弧光谱测控的理论和应用提供了良好的条件。2004 年以来，结合光谱技术在焊接质量检测领域的研究现状，在国家自然科学基金(50505048)、山西省自然科学基金(两项)、山西省优秀青年学术带头人资助课题(2009)、山西省回国留学人员科研资助项目(2012-69)等项目的支持下，开始从事焊接电弧辐射光谱理论、焊接质量光谱在线检测、激光-电弧复合焊等离子体辐射光谱、药芯焊丝光谱辐射方面的系列研究工作；积累了大量的一手研究资料和理论知识，并且对国内外该领域的研究现状有较深刻的认识。本书在近年来研究积累的基础上，着眼于焊接电弧辐射光谱基础理论与工业应用的结合，较为详尽地介绍焊接等离子体测控方法的原理和应用案例。

在本书写作过程中，一些基础理论内容和应用案例参考了国内外公开发表的著作和文献，在此对著者表示感谢。向恩师李俊岳先生表示最诚挚的敬意和感谢，是先生将我引入光谱测控领域的大门，并为我开展研究提供了很好的平台。同时感谢李桓教授在多年的研究合作中的帮助，感谢多位师兄和同仁在研究过程中的建议和鼓励。感谢天津大学、哈尔滨焊接研究所等合作单位提供的相关支持。

由于作者水平有限，对光谱研究领域也只是管中窥豹，书中难免有不妥之处，敬请各位专家、读者批评指正。

李志勇

2012 年 9 月

# 目 录

<b>第 1 章 电弧等离子体基础</b> .....	1	2.1.2 等离子体辐射的传递 <sup>[2,7,8]</sup> .....	30
1.1 等离子体的特点及分类 <sup>[1,2]</sup> .....	1	2.2 等离子体的平衡性质 <sup>[2,9~11]</sup> .....	33
1.1.1 等离子体的特点 .....	1	2.2.1 完全热力学平衡(CTE) .....	33
1.1.2 等离子体的分类 .....	2	2.2.2 局部(域)热力学平衡(LTE) .....	38
1.2 电弧等离子体的产生 <sup>[3~5]</sup> .....	5	2.2.3 双温等离子体 .....	40
1.2.1 气体放电现象及分类 .....	5	2.3 电弧等离子体的辐射光谱 <sup>[2,7,15]</sup> .....	41
1.2.2 气体粒子的运动 .....	6	2.3.1 复合辐射(自由-束缚, f-b 跃迁) .....	42
1.2.3 气体的电离及电弧的产生 .....	9	2.3.2 韧致辐射(自由-自由, f-f 跃迁) .....	44
1.3 电弧等离子体的组成及特性 <sup>[3~5]</sup> .....	16	2.3.3 自发辐射(束缚-束缚, b-b 跃迁) .....	45
1.3.1 阴极区 .....	17	2.3.4 热辐射 .....	47
1.3.2 弧柱区 .....	17	2.4 电弧辐射线谱和基本参数 .....	48
1.3.3 阳极区 .....	18	2.4.1 关于谱线的基本描述 .....	49
1.3.4 电弧的伏安特性和最小电压原理 .....	18	2.4.2 谱线的展宽 .....	50
1.4 电弧等离子体的其他物理现象 <sup>[5,6]</sup> .....	20	2.4.3 谱线参数的查找 .....	53
1.4.1 电子发射 .....	20	2.4.4 谱线的物理计算和预测 .....	54
1.4.2 电弧中电子的运动和导电 .....	23	<b>第 3 章 等离子体辐射诊断及焊接电弧测控理论</b> .....	56
1.4.3 电弧的温度分布 .....	24	3.1 等离子体的光谱诊断方法 <sup>[2,18~20]</sup> .....	56
<b>第 2 章 电弧等离子体辐射及其光谱</b> .....	26	3.1.1 谱线绝对强度法 .....	57
2.1 电弧等离子体的辐射 .....	26		
2.1.1 辐射的基本概念 <sup>[2]</sup> .....	26		

3.1.2	标准温度法	58	4.1.3	探测器	85
3.1.3	谱线相对强度法	60	4.2	光谱仪的选择	88
3.1.4	玻尔兹曼图法	62	4.2.1	波长范围	88
3.1.5	谱线与连续谱间的 相对强度法	63	4.2.2	光学分辨率	89
3.1.6	谱线轮廓法(谱线 展宽法)	64	4.2.3	灵敏度	91
3.1.7	吸收谱线法	65	4.2.4	采集速度	92
3.1.8	谱线反转法	66	4.3	光谱仪应用中的问题	92
3.2	等离子体空间状态诊断的 数学方法 <sup>[22~25]</sup>	68	4.3.1	谱线标定的问题	93
3.2.1	对称等离子体的 Abel 逆变换原理	68	4.3.2	光谱测量时的 精度和误差	95
3.2.2	Abel 逆变换的 计算	69	4.3.3	检测距离、角度、 位置的影响	97
3.2.3	非对称等离子体的 空间变换	71	4.3.4	辐射饱和与过弱的 问题	97
3.3	其他等离子体诊断 方法 <sup>[26~28]</sup>	72	4.3.5	噪声等效功率和动态 范围问题	98
3.3.1	探针法	72	4.4	辐射空域和同步时域信息的 采集方法	98
3.3.2	微波诊断	73	4.4.1	辐射空域信息的 采集方法	99
3.3.3	激光诊断	73	4.4.2	光谱时域信息采集及 多信息同步时域 采集方法	101
3.4	焊接电弧等离子体光谱测控的 理论和方法 <sup>[19,29,30]</sup>	75	4.4.3	发射光谱层析法重建 等离子体场 <sup>[39,40]</sup>	105
3.4.1	电弧光谱测控的基本 理论	76	<b>第 5 章</b>	<b>钨极惰性气体保护焊电弧 光谱及其典型应用</b>	107
3.4.2	电弧光谱信息的基本 测控方法	78	5.1	TIG 焊电弧辐射分布	
3.4.3	电弧物理光谱诊断 系统 <sup>[30]</sup>	79	规律	107	
<b>第 4 章</b>	<b>电弧光谱信息传感的 方法和手段</b>	81	5.1.1	TIG 焊电弧辐射频域 分布	107
4.1	光谱仪的工作原理及组成	81	5.1.2	TIG 焊辐射光谱的 空域分布	114
4.1.1	光纤和狭缝	82	5.1.3	TIG 焊辐射光谱的 时域分布	118
4.1.2	光栅	83			

5.2	TIG 焊电弧辐射与焊接参数的关系 .....	121	6.3.1	弧光辐射强度控制熔滴过渡方法 .....	159
5.2.1	不同参数下的 TIG 电弧辐射 .....	122	6.3.2	光谱法实现的熔滴过渡控制 .....	161
5.2.2	电弧辐射与参数关系的理论基础 .....	126	6.4	焊接电弧辐射光谱在 GMAW 焊质量监测上的应用 .....	165
5.3	TIG 电弧辐射在弧长控制上的应用 .....	129	6.4.1	电子温度法及多谱段辐射比值方法 .....	165
5.4	电弧光谱在 TIG 焊质量检测上的应用 .....	131	6.4.2	特征谱段法 <sup>[59]</sup> .....	167
5.4.1	电子温度法在 TIG 焊质量检测上的应用 .....	132	6.4.3	二次选频法 <sup>[72]</sup> .....	170
5.4.2	特征谱线法在 TIG 焊质量检测上的应用 .....	133	<b>第 7 章</b>	<b>光谱在激光焊接及其复合焊接上的应用 .....</b>	<b>171</b>
<b>第 6 章</b>	<b>熔化极气体保护焊电弧光谱及其典型应用 .....</b>	<b>141</b>	7.1	激光焊光致等离子体的辐射光谱 .....	171
6.1	熔化极气体保护焊的电弧辐射光谱 .....	141	7.1.1	激光焊原理及分类 .....	171
6.1.1	熔化极气体保护焊辐射光谱的频域分布 .....	142	7.1.2	激光焊接过程中的等离子体 .....	174
6.1.2	熔化极气体保护焊辐射光谱的时域分布 .....	146	7.1.3	激光光致等离子体的辐射光谱 .....	175
6.1.3	熔化极气体保护焊辐射光谱的空域分布 .....	150	7.2	辐射光谱在激光焊测控上的应用 .....	180
6.2	熔化极气体保护焊电弧辐射与参数间的关系 .....	153	7.3	激光-电弧复合焊等离子体的辐射光谱 .....	185
6.2.1	熔化极气体保护焊电弧辐射与电压、电流的关系 .....	154	7.3.1	激光-电弧复合焊的原理和特点 .....	185
6.2.2	脉冲 MIG 焊的等离子体辐射特点 .....	155	7.3.2	激光- GTAW 电弧复合焊接的辐射光谱 .....	187
6.3	脉冲 GMAW 焊接熔滴过渡的辐射光谱测控 .....	158	7.3.3	激光- GMAW 电弧复合焊接的辐射光谱 .....	191
			<b>结束语</b> .....	<b>203</b>	
			<b>参考文献</b> .....	<b>204</b>	

# 第 1 章

## 电弧等离子体基础

等离子体(plasma)一词源于希腊语,英文译为“to mold”,意即将流体注入成形,英文 plasma 也被用于生物学中描述血浆。现在人们提到的等离子体,最早的概念起始于 1928 年,当时朗缪尔(Langmuir)描述真空放电管中的辉光放电正柱区,认为辉光放电的电离气体也有流体成形特性,将其引入来描述这种放电现象。而目前在物理学和工业领域,等离子体一词已被广泛地应用,来描述对外呈现电中性的电离气体。

### 1.1 等离子体的特点及分类<sup>[1,2]</sup>

#### 1.1.1 等离子体的特点

我们都知道,自然界中物质存在的状态有较大差异,如固态、液态、气态以及等离子体。这些状态都与其自身粒子间的结合能相对应,不同结合能状态对应不同的物质存在形态。通常人们把固态称为物质的第一态,它具有固定的形状和体积;当固态中分子的平均动能超过其在晶体中的结合能时,固体所固有的晶体结构会被破坏,从而转化成液体(第二态)或直接转化为气体(第三态);当液体中分子平均动能超过范德瓦耳键结合能时,液态就转化为气态;而当粒子的平均动能大于电离能时,在轨道上运动的束缚态电子将脱离原子或分子,成为自由电子而形成气体的电离,进而产生等离子体。等离子体具有与固态、液态、气态截然不同的特性,被称为物质的第四态。

仅靠气体电离往往不能产生稳定的等离子体，等离子体要稳定存在需要满足一些内外部条件。首先，激发的电离气体必须达到一定的电离度，使得气体处于导电状态；同时，电离气体中每一带电粒子的运动都会影响到其周围带电粒子，也受到其他带电粒子的约束。由于电离气体整体表现出电中性，也就是电离气体内正负电荷数相等，所以这种稳定的电离气体状态被称为等离子体态。作为物质存在的一种独立形态，等离子体具有以下基本特性。

### 1. 导电性

等离子体中由于存在自由电子和带正、负电荷的离子，质量很轻的自由电子摆脱了原子核的约束，很容易在电场的作用下定向移动，这就使得等离子体具有很强的导电性。

### 2. 电准中性

虽然等离子体内部具有很多带电粒子，但这些粒子在足够小的空间和时间尺度上，所带的正电荷数总是等于负电荷数，对外呈现电中性。如果等离子体中任何微小的空间内存在电荷的聚集而呈现非电中性，就将产生巨大的电场强度，使其带电粒子移动，恢复原状而保持电中性，所以等离子体中电荷分离的空间尺度和时间尺度很小。热等离子体中的电中性仅在很小尺度上有所违背，定义这个尺度为德拜(Debye)长度，其数值与等离子体温度及带电粒子数密度有关。

### 3. 与磁场作用

等离子体是由带电粒子组成的导体，因此可用磁场控制它的位置、形状和运动，例如电弧等离子体的旋转、电弧等离子体的稳定及熄灭等。磁控电弧偏转焊接方法正是利用这一现象，来改善焊缝成形和组织性能。与此同时，带电粒子集体运动产生的电流又可形成电磁场，进一步影响等离子体的空间分布。

### 4. 气氛可控

改变等离子体的工作气体可以形成氧化性、中性、还原性、惰性气氛，以满足工业和技术上的需要。如可采用 Ar 和 CO<sub>2</sub> 作为弧焊时的保护气体。

## 1.1.2 等离子体的分类

等离子体独特的存在状态和物理特性使得它在各个行业中都得到应用和研究。但实际上，等离子体存在的状态并不是完全相同的。不同条件下产生的等离子体具有不同的特点，人们根据等离子体的自身特点、产生条件和应用领域不同，将其分成不同的种类。其中主要的分类方法有以下几种。

### 1. 按等离子体温度分类

自然界中存在的等离子体温度差别非常大，从外太空高达 10<sup>8</sup> K 的等离子体



到室温下辉光放电的等离子体。图 1.1 给出了不同温度下，等离子体的不同存在方式及其电子密度。这些等离子体的特性差别很大，因此，研究者按照等离子体的温度差别，将其分为高温等离子体和低温等离子体。

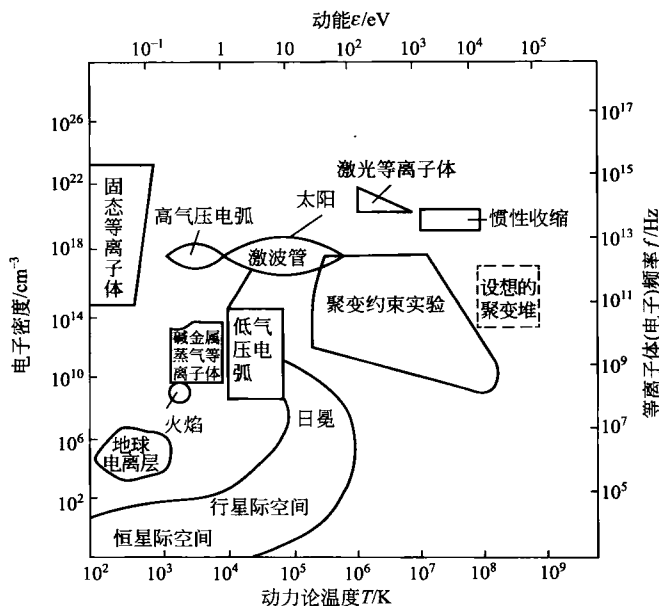


图 1.1 等离子体的电子密度-温度图

### 1) 高温等离子体

高温等离子体是指粒子温度在  $10^6 \sim 10^8$  K 之间的等离子体，这类等离子体产生需要很高的能量，并且具有高的电离度。如太阳、核聚变和激光聚变等产生的等离子体均属于高温等离子体。

### 2) 低温等离子体

低温等离子体是指粒子温度从室温到  $3 \times 10^4$  K 左右的等离子体。低温等离子体按重粒子温度水平又可分为热等离子体和冷等离子体。

(1) 热等离子体是指低温等离子体中重粒子温度在  $3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$  K 间的等离子体，其电子温度接近重粒子温度，达到热力学平衡 (CTE) 或局部热力学平衡 (LTE) 状态，可以认为具有统一的热力学温度，这类等离子体被称为热等离子体。在材料加工领域广泛应用的电弧等离子体、高频等离子体等均属于热等离子体。

(2) 冷等离子体是指低温等离子体中重粒子温度较低的等离子体。其等离子体的重粒子温度只有室温左右，而电子温度可达上万开 (K)。冷等离子体内带电粒子没有通过充分的能量交换达到平衡，远离热力学平衡状态或局部热力学平衡状态。如在照明上的辉光放电产生的等离子体就属于冷等离子体。

## 2. 按粒子密度分类

### 1) 致密等离子体(或高压等离子体)

当粒子密度  $n > 10^{15} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时, 就可称为致密等离子体或高压等离子体。由于粒子密度很高, 这时粒子间的碰撞对能量的传递起主要作用, 例如,  $p = 0.1$  个大气压以上的电弧, 均可看作致密等离子体。

### 2) 稀薄等离子体(低压等离子体)

当粒子密度  $n < 10^{12} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  时, 粒子间碰撞基本不起作用, 粒子间能量无法通过碰撞充分交换, 这时称其为稀薄等离子体或低压等离子体。例如, 辉光放电就属于此类型。

## 3. 按等离子体的产生途径分类

电离气体形成时, 产生电离的能量提供方式是不同的。因此, 根据等离子体不同的产生方式, 工业中常见的等离子体主要包括燃烧等离子体、电弧等离子体、高频等离子体、激波等离子体、激光等离子体、聚变等离子体等。由图 1.1 可知不同分类等离子体的温度、电子密度参数范围。

除了具体的产生途径分类外, 还可将不同途径产生的等离子体分为两大类: 自然等离子体和实验室等离子体(指人工产生的等离子体)。

自然等离子体广泛存在于宇宙, 宇宙中几乎 99.9% 以上的物质是以等离子体状态存在的, 如恒星星系、星云, 又如地球附近的闪电、极光、电离层, 范·阿伦(Van Allen)带等。然而, 地球上自然等离子体比较少, 其主要原因是地球“寒冷”、温度低。研究表明, 热平衡时气体的电离度  $\alpha$  (表示中性气体原子或分子中电离成带电粒子的比例), 可由沙哈(Saha)方程确定。在室温左右, 如温度在 300K 时, 空气的电离度仅为  $\alpha \approx 10^{-122}$ 。而在天体上, 温度高达上百万开(K), 物质都处于等离子体态。

实验室等离子体诸如日光灯、霓虹灯的放电, 高速飞行器尾迹, 火箭发动机喷管中的燃气, 等离子体炬中的电弧, 气体激光、激波管中的电离气体, 受控核聚变时产生的高温等离子体, 原子弹或氢弹爆炸时产生的高温等离子体, 某些化学反应(燃烧)产生的燃气等离子体, 紫外线和 X 射线辐射电离产生的等离子体等, 都属于人工产生的等离子体。

## 4. 按电离程度分类

等离子体按气体电离的程度分类, 可分成完全电离气体、部分电离气体、弱电离气体等。

完全电离气体中, 几乎所有分子(或原子)都电离成电子和离子。部分电离气体中, 部分分子(或原子)电离成电子和离子, 其他为中性分子, 实际上 1% 的电

高度就可使等离子体的电导率接近完全电离时的电导率。弱电离气体中只有少量分子(或原子)电离。

按照不同电离度分类与按照温度分类的方法有相似的地方。一般情况下,对于同种粒子,温度越高,电离度越大。但应该指出,不同原子在不同的温度下才能达到相同的电离度。例如,铯(Cs)蒸气在1500K时电离度已相当大,而氩气(Ar)要达到与铯差不多大小的电离度,则需要约6000K的高温。在平衡条件下,当温度在20000K以上时,几乎所有的气体均高度电离。当气体处于非平衡状态时,特别是在低压稀薄气体中放电时,在很低的气体温度下就可以有显著的电离度。

本书涉及的等离子体以电弧等离子体为主,因此需要对电弧等离子体的产生、特点、辐射规律有清楚的认识。焊接电弧属高压、热等离子体,粒子间的碰撞起主要作用,放电电压较低(10~100V),而电流则可很大(0.1~1000A)。在电极间整个弧柱区发出很强的光和热,并具有特定的伏安特性。通常情况下,焊接电弧等离子体处于局部热力学平衡状态,可以用麦克斯韦速度分布、玻尔兹曼粒子能态概率分布和沙哈方程等确定电弧等离子体的状态和参数。

## 1.2 电弧等离子体的产生<sup>[3~5]</sup>

电弧现象最早被发现于1808年,Davy和Ritter在两个碳极间产生了电弧,并对其进行了观察。由于产生的自由电弧具有向上的拱形,因此用德文的“Elektrischer Bogen”来描述它,意即点的拱形物,对应的英文为“electric arc”,中文即为电弧。

### 1.2.1 气体放电现象及分类

那么,气体是如何导电并形成等离子体呢?正常状态的气体是由中性分子或原子组成的,没有带电粒子,它们虽可自由移动,但不会受电场作用而产生定向运动,是不导电的。要使正常状态的气体导电,必须产生带电粒子,这就是气体的放电和等离子体的形成过程。气体放电在形式上和性质上是各种各样的,这与气体的种类和压力、电极的材料和几何形状、两电极的间距离及施加在两电极间的电压等有关。

气体放电的形式取决于放电时电流值的大小。气体放电可按是否需要外界电离源来维持放电,分为非自持放电和自持放电两大类。在非自持放电中,带电粒子是由外界电离源所引起的,呈暗放电状态,当外界电离源取消后,放电就立刻停止。当电流大于一定数值时,气体导电过程本身就可产生维持导电所需要的带电粒子,即使取消了外界电离源,放电过程仍可继续维持下去,这种过程称为自持放电。在自持放电区间,又可分为自持暗放电、辉光放电和电弧放电3种基本

形式。图 1.2 给出了不同放电形式的存在区间和伏安特性曲线。

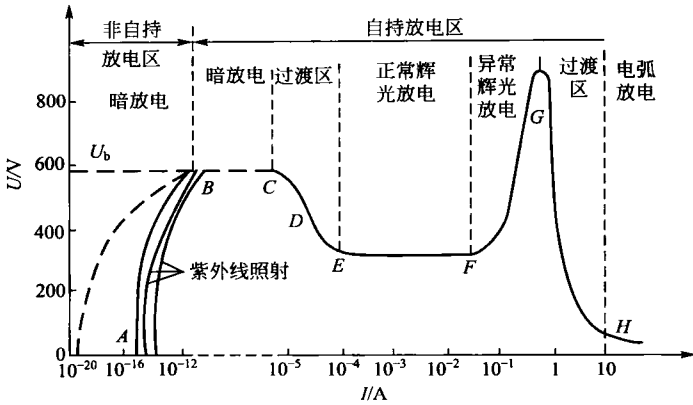


图 1.2 不同放电形式的伏安特性曲线

由图 1.2 可知，电弧放电的特点是电流密度大、电弧阴极电压低。辉光放电的电流密度为几十微安，而电弧则每平方厘米有几百至几万安培。辉光放电的阴极电压降为 200~300V，电弧阴极电压降仅约为 10V；常压下电弧在低电压下(约几十伏)就可以燃烧，而复燃辉光放电在低气压时需要几百伏电压，在高气压时则需几万伏电压。由上述分析可知，电弧等离子体从本质上讲是一种气体持续放电现象，并产生较高温度(5 000~30 000K)。因此，电弧被广泛应用于等离子焊接、切割、喷涂，粉末材料制备，工程加热，冶炼，煤的气化，同位素分离等多个领域。

为了解电弧产生的本质，有必要对电弧中带电粒子产生过程进行分析。电弧产生过程伴随两电极间气体电离、电极发射电子两个基本物理过程，同时伴随着一些其他过程，如解离、激励、扩散、复合、负离子产生等现象。其中气体的电离与复合是存在于电弧中的主要物理现象，要了解这种现象，必须从了解气体运动的本身规律及其电离过程开始。

### 1.2.2 气体粒子的运动

#### 1. 气体粒子动能和温度的关系

理论上讲，在绝对温度 0K 以上，气体粒子总是处于不规则运动中。各个粒子以某一速度运动时，具有一定动能；而且在具有一定气体密度时，互相频繁地碰撞。如果把气体盛在容器中，其粒子就要碰撞容器壁从而产生压力，这种压力随碰撞粒子运动速度或质量增大而增大。实际上，气体温度与其压力成正比关系，单原子气体粒子的动能与温度之间的关系如式(1-1)所示。

$$\frac{1}{2}mC^2 = \frac{3}{2}kT \quad (1-1)$$

式中,  $C$  为气体粒子运动的均方根速度。

式(1-1)给出了温度的基本概念, 它表示从整体上观察气体粒子总动能的大小。相同温度( $T$ )下, 气体粒子的质量( $m$ )越小, 运动速度越大。例如, 相同温度下, 氢的导热性比氧大是由于其质量小、运动速度大, 通过碰撞能量传递快造成的。电弧中的电子也可被看作是一种粒子, 由于电子与其他粒子相比质量很小, 所以在电弧中, 除了电场作用下产生的定向移动影响外, 相同温度下电子的运动速度比其他粒子要大得多。

## 2. 麦克斯韦速度分布规律

由气体粒子的运动与温度的关系可以知道, 气体粒子具有一定的均方根速度, 该速度取决于温度。但在一个气体体系中, 各个粒子的速度在瞬间各不相同, 有高有低。虽然各粒子的速度大小随碰撞现象的发生而时刻变化, 但如果把许多粒子作为一个整体来考虑, 所有粒子的速度分布是有规律的。就统计意义而言, 可以认为粒子速度大体是以平均速度为中心, 遵循一定规律分布的。麦克斯韦(C. Maxwell)研究了这种速度分布并导出重要的关系式:

$$F\left(\frac{c}{C_0}\right) = F(\beta_0) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \beta_c^2 e^{-\beta_c^2} \quad (1-2)$$

式中,  $\beta_c = c/C_0$  为某一速度粒子数与总粒子数之比;  $c$  为气体粒子的实际速度;  $C_0$  为气体粒子的基准速度, 大小为  $\sqrt{\frac{2}{3}}C$ ;  $C$  为气体粒子的平均速度。

图 1.3 给出了这种分布的曲线, 图中横坐标是粒子的相对速度, 纵坐标是具有某一速度粒子存在的概率。从图 1.3 可知, 速度为  $C_0$  的粒子数目最多, 而速度大于  $3C_0$  的粒子极少。坐标中曲线下围成的面积表示粒子总数。

## 3. 平均自由程

气体粒子具有不同的运动速度, 并且由于相互碰撞而不断改变运动方向, 在空间做不规则运动。两次碰撞之间能够自由地做直线运动的距离(即自由程)是不同的, 各个粒子自由程的平均值, 被称为平均自由程  $\lambda$ 。假设有半径分别为  $r_A$  和  $r_B$  的两种粒子, B 粒子静止且在空间的密度为  $n$ , A 粒子以一定速度  $v_A$  运动, 则粒

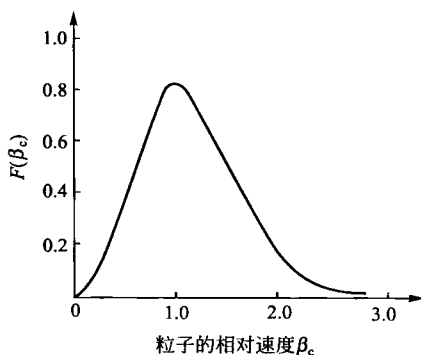


图 1.3 气体粒子运动速度的麦克斯韦曲线分布

子 A 自由程大小可表示为：

$$\lambda = \frac{v_A}{n\pi(r_A+r_B)^2 v_A} = \frac{1}{n\pi(r_A+r_B)^2} \quad (1-3)$$

式(1-3)中假设 B 粒子静止，如果 B 粒子运动，只需将 A 粒子运动速度替换为两种粒子相对运动速度的矢量和即可。若 A、B 为同一种粒子，则其自由程可表示为：

$$\lambda = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi r^2 n} \quad (1-4)$$

若 A 粒子为电子，B 粒子为气体原子，由于同一温度下电子的运动速度要远大于气体粒子的运动速度，因此可将气体粒子看作是静止的，得到电子的自由程如式(1-5)所示：

$$\lambda_e = \frac{1}{\pi r^2 n} \quad (1-5)$$

由此，电子运动的自由程与气体粒子运动的自由程大小存在式(1-6)所示关系：

$$\frac{\lambda_e}{\lambda} = 4\sqrt{2} \quad (1-6)$$

表 1-1 列举了一些气体粒子在 1 标准大气压(atm)下的平均自由程。从表 1-1 可看出，不同种类粒子的平均自由程不同。另外，对于同种环境下的同类粒子，各个粒子的自由程也不同，有的比平均自由程长，有的比平均自由程短。现以某一气体体系内的  $N_0$  个粒子为考察对象。假定以这些粒子刚发生碰撞的瞬间为出发点，开始新的自由程，则各个粒子发生自由程的分布规律如式(1-7)所示：

表 1-1 标准状态下一些气体粒子的平均自由程

气体种类	平均自由程 $\lambda \times 10^{-8}$	温度 T/K	摩尔质量/(g/mol)
空气	9.6	111	29
Ar	10.0	170	40
Cl	4.57	199	71
CO	9.27	100	28
CO <sub>2</sub>	6.29	240	44
H <sub>2</sub>	18.3	72	2
He	28.5	80	4
H <sub>2</sub> O	7.22	550	18
Hg	3.72	—	201
N <sub>2</sub>	9.44	110	28
O <sub>2</sub>	9.95	127	32

$$N = N_0 e^{-x/\lambda} \quad (1-7)$$

将  $x=\lambda$  带入式(1-7), 可得  $N/N_0=e^{-1}\approx 0.368$ , 即在自由程为  $\lambda$  的距离内, 未发生碰撞的粒子数只占到总粒子数的 36.8%, 大部分粒子发生碰撞。如果设自由程为  $10\lambda$ , 则在两万个粒子中, 仅有一个粒子未发生碰撞。上述规律也说明了在具有一定平均自由程的气体粒子系统中, 具体的一个粒子在不同自由程下发生的概率密度。

### 1.2.3 气体的电离及电弧的产生

#### 1. 气体粒子的碰撞

气体粒子在运动中会发生碰撞, 以这种形式传递能量称为碰撞传递。气体粒子的相互碰撞有两种情况: 非破坏性的弹性碰撞和破坏性的非弹性碰撞。弹性碰撞时气体粒子只产生动能的传递和再分配, 碰撞后两个粒子的动能之和基本不变, 不发生能量存在方式的改变, 粒子的内部结构不发生任何变化。这种碰撞的结果只使粒子的运动速度变化。因此, 弹性碰撞只能引起粒子温度的变化, 不能产生电离与激励过程, 它是在气体粒子的动能较低时产生的。当气体粒子拥有较大动能时, 则产生非弹性碰撞, 使被碰撞的气体粒子内部结构发生变化。在非弹性碰撞时部分或全部动能转换为内能, 如果此内能大于激励电压则粒子被激励, 如果此能量大于电离电压则粒子将被电离。被激励的粒子如果继续受到非弹性碰撞, 内能积累达到电离电压时也产生电离。只有非弹性碰撞才产生电离过程, 为气体空间制造带电粒子。

在电弧气氛中, 电子运动速度比气体粒子运动速度大得多, 故碰撞时可视为气体粒子处于静止状态; 如果是弹性碰撞, 电子碰撞一次传递给对方的能量只占极小的比例, 但是碰撞次数多, 传递的能量当然也会增多。在电弧放电时, 电子在空间沿电场作用力方向移动而获得动能, 然后通过碰撞再将能量传递给中性气体粒子, 并使温度上升。如果碰撞充分, 电子将能量传递给其他粒子, 具有统计学上大致相同的温度, 可以认为处于局部热力学平衡状态。

如果电子的运动速度超过临界值, 具有较大的动能, 将与气体粒子发生非弹性碰撞。由于电子的质量远远小于气体原子、离子或分子, 因此当具有足够动能的电子与中性粒子进行非弹性碰撞时, 电子的动能基本上全部传递给气体粒子, 转换为中性粒子的内能, 引起其电离或激发, 成为破坏粒子结构的最有效碰撞。当中性粒子之间进行碰撞时, 则只能将部分能量传递给被碰撞的粒子, 最多不超过原动能的一半, 因此在电弧中通过碰撞传递使气体粒子电离的过程中, 电子的作用是所有粒子中最主要的。

由上面的讨论可以看到, 要通过粒子间碰撞增加中性粒子的内能使之达到电离, 需要提高粒子的动能, 尤其是提高电子的动能。电弧中的高温和电场的存在

都是提高粒子动能的有利条件。高温可以提高粒子(中性粒子、电子、离子)的动能,而电场强度是提高带电粒子(电子、离子)动能的条件。实际电弧等离子体中,通过粒子间的碰撞将能量传给中性粒子并使之电离,就是使电弧本身产生带电粒子,维持其导电的主要途径。

2. 电弧中气体的电离与激励现象

在一定条件下,中性气体分子或原子分离为正离子和电子的现象称为电离。气体分子或原子在常态下由数量相等的正电荷(原子核)和负电荷(电子)构成一个稳定的系统,对外呈中性。要使其电离就要破坏这种稳定系统,常态下的气体粒子(分子或原子),受外来能量作用失去一个或多个电子后则成为正离子。使中性气体粒子失去第一个电子所需要的最低外加能量称为第一电离能,通常以电子伏(eV)为单位,一个电子伏(eV)就是一个电子通过 1V 电位差空间所取得的能量。为计算方便起见,把用电子伏为单位的能量转换为数值上相等的电压来处理,称为电离电压,常直接用电离电压来表示气体电离的难易。

失去一个电子生成的正离子称为一价正离子,这种电离称为一次电离;要使中性气体粒子失去第二个电子则需要更大的电离电压,称为第二电离电压;依此类推。在焊接电弧中,当焊接电流较小时只存在一次电离,而在大电流或压缩焊接电弧中,可能出现二次或三次电离,但一次电离仍居主要地位。电弧气氛中可能遇到的某些气体粒子电离电压见表 1-2。

表 1-2 常见分子和原子的电离电压(括号中为二次电离电压)

粒子种类	电离电压/V	粒子种类	电离电压/V	粒子种类	电离电压/V
H	13.5	Ar	15.7	H <sub>2</sub>	15.4
He	24.5(54.2)	K	4.3	O <sub>2</sub>	12.2
Li	5.4(75.3)	Ca	6.1	N <sub>2</sub>	15.5
B	8.30	Ni	7.6	H <sub>2</sub> O	12.6
C	11.26(24.4)	Cr	7.7	Cl <sub>2</sub>	13
N	14.53	Mo	7.4	CO	14.1
O	13.5(35)	Cs	3.9	NO	9.6
F	17.4(35)	Fe	7.9	OH	13.8
Na	5.1(47)	W	8.0	La	5.61
Cl	13(22.5)	Al	5.96	Ti	6.81
CO <sub>2</sub>	13.7	Mg	7.61	Cu	7.68
NO <sub>2</sub>	11	Mn	7.43	Si	8.15
HF	15.7				



从表 1-2 可以看出, 不仅原子状态的气体粒子可以被电离, 分子状态的气体也可直接被电离。当电子从气体分子中被分离出来时, 一般情况下需要克服两层约束(原子对电子的约束和分子对电子的约束), 所以需要的电离电压比原子状态时的电离电压要高一些, 如 H(原子)为 13.5V, 而 H<sub>2</sub>(分子)为 15.4V。然而, 也有些气体原子结合为分子时反而使电子与原子的联系减弱, 故分子的电离电压反而比原子的电离电压低, 如 NO 分子的电离电压为 9.6V, 而 N 原子和 O 原子的电离电压分别为 14.53V 和 13.5V。

当外来能量作用不足以使气体发生电离, 但能使电子从低的能级转移到较高的亚稳定能级时, 则中性粒子内部的原有稳定状态被破坏, 这种状态称为激励。使中性粒子激励所需要的最低外加能量对应的电压称为最低激励电压, 激励电压数值低于该元素电离电压的数值, 常见气体的最低激励电压见表 1-3。

表 1-3 常见气体的最低激励电压

粒子种类	激励电压/V	粒子种类	激励电压/V	粒子种类	激励电压/V
H	10.2	K	1.6	CO	6.2
He	19.8	Fe	4.43	CO <sub>2</sub>	3.0
Ne	16.6	Ca	1.4	H <sub>2</sub> O	7.6
Ar	11.6	H <sub>2</sub>	7.0	O	2.0
N	2.4	N <sub>2</sub>	6.3	O <sub>2</sub>	7.9

由于原子的外层结构具有多个亚稳态能级, 所以激励状态的粒子可具有不同的能级, 此时电子尚未脱离粒子, 粒子对外界呈中性。因为粒子的激励状态是一种亚稳定状态, 它处于激励状态的时间很短。处于较高能级的激励粒子, 如果继续接受外来能量, 可使其电离, 也可通过能级跃迁将能量以辐射的形式释放出来, 表现为电弧的辐射光, 而粒子恢复到原来的稳定状态。这种辐射在第 2 章中将详细讨论。能级低的激励粒子, 可能与其他粒子碰撞, 将能量传递给其他粒子而恢复其稳定状态。接受其能量的粒子则可能解离、激励或电离。因此, 粒子的激励过程虽不是直接产生带电粒子的过程, 但也与电离过程和电弧特性有密切关系。

中性粒子接受外界能量, 在满足条件的情况下会产生电离与激励。外加能量可通过不同方式施于中性粒子, 但使之电离与激励所必需的最低能量, 并不因施加能量方式不同而改变, 即电离和激励电压都是固定数值。外界能量传递给自由运动的气体粒子, 从本质上讲只有两种传递能量途径: 一种是碰撞传递, 另一种是光辐射吸收。