

高等学校試用教科書

熔 化 电 焊 設 备

西安交通大学焊接教研組編

只限学校內部使用

中国工业出版社

高等学校試用教科書



熔 化 电 焊 設 备

西安交通大学焊接教研組編

中国工业出版社

本书共分三篇。第一篇是焊接电弧，讲述电弧的物理本质、焊接电弧的性质和电弧稳定（連續）燃燒的条件及其影响因素；第二篇是电弧焊电源，討論了对电弧焊电源的基本要求，分析并比較了各种交直流弧焊电源和輔助引弧装置的工作原理及性能特点；第三篇是自动焊設備，重点地討論等速送进式焊机和均匀調节式焊机的工作原理，介紹了目前最常用的自动和半自动焊机。

书中对熔化电焊設備作了系統的理论上的分析和比較，对熔化电焊設備的选择、安装、維修、技术保护等等实际知識也作了必要的介紹。

本书可供高等工业学校焊接专业作为教材，亦可供从事焊接的技术人員参考。

熔化电焊設備

西安交通大学焊接教研組編

*

中国工业出版社出版（北京佟麟閣路丙10号）

（北京市书刊出版事业許可証出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 787×1092¹/₁₆ 印张 16⁷/₈·字数 378,000

1961年9月北京第一版 1961年9月北京第一次印刷

印数 0001—2,237 定价（10—6）2.00元

統一书号 15165·857（一机—190）

前 言

熔化电焊设备是焊接专业中一門主要的专业课程，在培养焊接专业干部中起着重要的作用。現有的熔化电焊设备教学参考书已不能滿足本門課程的教学需要，乃編輯此书以应急需。

本书是根据一九五九年教育部委托哈尔滨工业大学制訂的“熔化电焊设备指导性教学大綱(草案)”而編写的。編写时考虑到本书不仅可以作为教材，同时也可以作为有关工程技术人員的参考书，因此在內容上稍超出課堂讲授的范围。本书包括如下內容：

第一篇——焊接电弧。本篇詳細地介紹了电弧的物理本質、焊接电弧的性質和电弧穩定燃燒的条件及其影响因素；

第二篇——电弧焊电源。本篇首先討論了对电弧焊电源的基本要求，进而对各种交直流弧焊电源及輔助引弧装置，分別从构造、工作原理、性能特点等方面作了詳細的闡述和分析比較。此外，对于弧焊电源設備的选择、安装、維修、技术保安以及簡易焊机的制作等实际知識也作了重点介紹；

第三篇——自动电弧焊設備。本篇首先对电弧焊接过程的自动調节原理进行了討論，重点地分析了等速送进式和均匀調节式两类自动焊机的工作原理。然后对目前最常用的自动和半自动焊机作了介紹。

本书在編写过程中选取了如下材料：第一篇第一章，采用了哈尔滨工业大学“手弧焊工艺学”讲义中的电弧部分；第二章的第一、二、六节，第二篇的第一章的第一、三节，第二章的第一、二、四、十一节和第三章的第二节，采用了哈尔滨工业大学“电弧焊設備”讲义中的有关部分，只略加修改与整理；第三篇第二章的大部分內容直接取材于A·N·瓦因包姆著自动电弧焊机一书。其余各章节都是編写的。

由于知識水平有限，教学經驗不足，加以時間仓促，书中的缺点和錯誤在所难免，恳切地希望各校在使用过程中給予批評和指正，为进一步提高教学质量而共同努力。关于本书在內容上和出版上的意見請寄西安交通大学焊接教研組。

目次

前 言

第一篇 焊接电弧

第一章 焊接电弧的物理本质 7

- 第一节 气体内带电质点的类别与性质 7
- 第二节 气体的电离与激发 7
- 第三节 电子发射 12
- 第四节 气体中的放电现象 14
- 第五节 焊接电弧的性质 18
- 第六节 磁场对焊接电弧的影响 23
- 第七节 电弧中的化学反应 27

第二章 焊接电弧的电特性 29

- 第一节 焊接电弧的静特性 29
- 第二节 焊接电弧的动特性 32
- 第三节 交流电弧的特点 33
- 第四节 交流电弧连续燃烧的条件及其影响因素 37
- 第五节 交流电弧的功率和功率因数 39
- 第六节 交流电弧电路上的直流分量 41
- 第七节 三相电弧 43

第二篇 电弧焊电源

第一章 对电弧焊电源的基本要求 46

- 第一节 概述 46
- 第二节 对电源外特性形状的要求 46
- 第三节 对电源空载电压的要求 50
- 第四节 对焊接规范调节的要求 50
- 第五节 对电源动态品质的要求 53

第二章 交流电弧焊电源设备——弧焊变压器 55

- 第一节 交流电源的优越性 55
- 第二节 单相焊接变压器的基本原理及分类 55
- 第三节 焊接变压器的基本方程式 57
- 第四节 分离式弧焊变压器 59
- 第五节 同体式弧焊变压器 67

第六节 动铁分磁式弧焊变压器 73

第七节 磁饱和铁芯增强漏磁式弧焊变压器 78

第八节 动绕组增强漏磁式弧焊变压器 79

第九节 多站式弧焊变压器 82

第十节 三相电弧焊电源设备 84

第十一节 高频电焊机 86

第十二节 交流电弧的稳定装置 88

第三章 直流电弧焊电源设备——弧焊发电机 94

第一节 直流电弧焊发电机的基本原理及其分类 94

第二节 三绕组式直流弧焊发电机 95

第三节 弧焊发电机的过渡过程和动态品质的改善方法 97

第四节 具有他激磁绕组和串联去磁绕组的弧焊发电机 105

第五节 具有并激磁绕组和串联去磁绕组的弧焊发电机 108

第六节 裂极式弧焊发电机 116

第七节 交轴磁场式弧焊发电机 121

第八节 国产 AG—300 AG—500 弧焊发电机 127

第九节 多站弧焊发电机 128

第十节 焊接整流器 131

第四章 电弧焊电源设备的使用 139

第一节 电源设备的并联工作 139

第二节 弧焊电源的选择与安装 142

第三节 焊接电源的维修与合理使用 145

第三篇 自动电弧焊设备

第一章 电弧焊接过程自动调节原理

第一节 电弧焊接过程自动调节的一般介绍 153

第二节 焊丝的熔化过程 154

第三节 等速送进式焊机的工作原理 160

第四节 均匀调节式焊机的工作原理 175

第五节 結論	183
第二章 近代自动焊机	185
第一节 自动焊机发展概述	185
第二节 自动焊机的分类	189
第三节 近代自动焊机的一般介紹	189
第四节 焊接过程自动化的剖解	195
第五节 自动焊机的控制綫路	196
第六节 AAC—1000—2 型自动焊机	199
第七节 AAC—500 型自动焊机	209
第八节 TC—17—M 型自动焊机	212
第九节 QT—1250—1 型自动焊机	219
第十节 自动焊接装置的元件	226
第十一节 自动焊机的工作調整	230
第三章 軟管自动焊机和半自动焊机	235
第一节 軟管自动焊机和半自动焊	

机簡述	
第二节 A/III—500 型軟管自动焊机	236
第三节 A/IIIM—500 型軟管自动 焊机	245
第四节 II/IIIM—500 型軟管半 自动焊机	250
第五节 III—5 型軟管半自动焊机	253
第六节 半自动焊接用的专用可换 焊把	258
第七节 III—54 型軟管半自动焊机	266
第八节 軟管自动焊机和半自动焊 机的工作調整	263
附录 在电气綫路展开图上的符号 (根据 ГOCT7624—55 的規 定)	
参考文献	268

第一篇 焊接电弧

电弧是电弧焊的热源。焊接过程进行得是否成功，焊接质量能否保证，要看电弧是否稳定。另外，电弧又是电源的供电对象，电弧能否稳定，很大程度上取决于电源电气性能的好坏。因此，有必要弄清焊接电弧的物理过程和一些基本特性；掌握电弧放电的基本规律。然后才知道应该创造怎样的条件来利用它进行焊接，为祖国的建设事业服务。

第一章 焊接电弧的物理本质

第一节 气体内带电质点的类别与性质

电弧放电现象，是在1802年由俄罗斯院士华·弗·彼得洛夫教授所发现的。并且，他还进行了用它来熔化金属的试验。其后，在1810年英国化学家戴母弗利·代维也进行了这项工作。

电弧现象发现后，由于那时技术尚不甚发达，故在很长的年代里没有获得广泛的技术上的应用。直到十九世纪的后半期，由于生产力的迅速发展和电力的逐渐应用，电弧才用来加热，取得高温，其中最重要的应用是以电弧来焊接金属。

气体在通常情况下是非导体，电流通过气体只有在气体内存在有带电质点时才可能。这些质点的移动就形成电流，我们在电弧中遇到的是三种带电质点——电子、正离子、负离子。

电子在放电现象中起着特别重要的作用。它是我们所知道的具有最小质量的质点，它带着 e_0 数量的负电荷，它的质量 m_0 相当于氢原子质量的1800分之一：

$m_0 = 9.03 \times 10^{-28}$ 克， $e_0 = 4.77 \times 10^{-10}$ ，CGSE = 1.59×10^{-19} 库伦。电子的电荷与质量之比很大，所以它非常活泼。

正离子，是失去一个或数个外层电子的原子、分子或分子组合。一般我们都只考虑失去一个电子的正离子，因为失去数个电子的正离子比较少见。正离子的质量和原来的原子（或分子、分子组合）的质量，实质上可以说是相等，因为由于失去电子而减少的质量相对讲起来，是小得可以忽略的。所有的原子和分子都有可能变成正离子。

负离子和正离子相反，是获得一个或数个额外电子的原子（或分子或分子组合）。负离子的质量亦可说和原来的原子（或分子或分子组合）相等。并非所有原子都能变成负离子，只有某些称为“负电元素”，如卤族元素、氧等能变成负离子。

有时“离子”这名词用得意义较广，任何带电的质点皆称为离子，其中也包括了电子。

气体中存在的带电质点，来自气体本身原子及分子的电离，以及从周围固体、液体物质中发射出电子。这些现象分述于后。

第二节 气体的电离与激发

由气体的原子及分子释放电子，形成离子的过程，叫作气体的电离。为使电子释放，

得消耗一定的能量，这叫电离功。以“电子伏特”^{*}来衡量它时，称为电离势(V_i)。若气体的原子和分子中的电子，所得到的能量小于它的电离势，尚不足以形成电离，则电子移动到能量级较高的轨道上去，此种现象称为被激发。而产生激发所必须的能量，以电子伏特为单位的时，称作激发势。

激发状态，对于分子来讲，是不稳定的状态，称作介稳状态。过一些时候，电子回到原来的轨道上，而分子复趋于稳定。先前所得的能量则以光或电磁射线形式放出到周围的空周去。

表 1 常用元素之电离势(V_i)

元素名称	符 号	电离势(伏特)	元素名称	符 号	电离势(伏特)	元素名称	符 号	电离势(伏特)
钾	K	4.33	钼	Mo	7.35	氢	H	13.5
钠	Na	5.11	锰	Mn	7.40	氦	He	15.4
铍	Ba	5.19	镁	Mg	7.61	氧	O	13.6
锂	Li	5.4	镍	Ni	7.64	臭氧	O ₂	12.5
铝	Al	5.95	铜	Cu	7.7	氮	N	14.5
钙	Ca	6.1	铁	Fe	7.83	氮气	N ₂	15.8
铬	Cr	6.74	硅	Si	7.94	氩	Ar	15.7
钒	V	6.76	硫	S	10.3	氟	F	16.9
钛	Ti	6.8	碳	C	11.22	氖	Ne	21.5
镉	Cd	7.3	氯	Cl	13.00	氦	He	24.5

* 电子伏特：相当于一个电子，在电场内移动了有一个伏特的电位差的途径，所起的能量变化。它等于 1.59×10^{-19} 瓦特·秒（即焦耳），或等于 1.59×10^{-12} 尔格，为了方便，将它简称为伏特。

气体的电离可能在碰撞、光射线和热的作用下进行，因此可分为以下几种：

1. 撞击电离 是指某些气体质点（离子、原子、分子、电子），在相互碰撞中得到足够的能量，而发生电离的现象。

电子、离子、原子和分子之间互相碰撞，与普通所见的，例如铁球的碰撞，是有不同的，因为它们相接近时，有互相吸引，或互相排斥的力的作用。但是用古典力学来研究它还是相当准确的。

相撞可以是弹性的和非弹性的。如果相撞是非弹性的，相撞时部分动能传入原子（或分子）内部，使它获得额外能量而被电离。也就是放出自由电子。为了便于讨论，假定被撞质点是静止的，撞上去的质点的动能为 K_0 。这动能在相撞后传入质点内部的最大值为 δ_{\max} ，被撞质点的质量为 m_1 ，撞上去的质点的质量为 m_2 ，则按力学公式得

$$\delta_{\max} = K_0 \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (1-1)$$

要使质点电离，必须使 $\delta_{\max} \geq A$ 。如果撞上去的质点的质量 (m_2) 较小，则 δ_{\max} 较大。如 m_2 和 m_1 相比极小，可以忽略，则 δ_{\max} 最大，它几乎等于 K_0 。这就是电子撞到原子上去的情况。因此，电子撞击上去容易产生电离。如果相撞质点的质量相差不多，例如 m_1 等于 m_2 ，则 $\delta_{\max} = \frac{1}{2} K_0$ ，这种情况下就要求有较大的 K_0 ，否则不易产生电离，所以原子、离子和分子的互撞就不易产生电离。

如果相撞质点原先的动能较小，不能发生电离，则可能产生激发。如果动能更小，则激发亦不产生，也就是说，相撞后动能不传入质点（原子、分子、离子）内部，动能不起变化，此即为弹性碰撞。

2. 光电离 原子吸收了光（正确的说是射线）的量子能，可能发生激发，以致产生电离现象。在这情况下，电离的条件可以用下面的公式表示之：

$$h\nu \geq 1.6 \cdot 10^{-12} V_j, \quad (1-2)$$

式中 h ——白朗克常数（尔格秒）；

ν ——频率（1/秒）；

V_j ——电离势（伏特）。

从上式可见，频率大的（亦即波长短的）射线，才能引起电离。而各种物质因电离势不同，能引起它电离的最小频率也不同。对于某一种气体分子来说，最小能引起电离的频率，称为该气体分子的极限频率，以 ν_0 表示之。而相应的波长则称为极限波长，以 λ 表示。以波长代替频率，上式变为：

$$h \cdot \frac{c}{\lambda} \geq 1.6 \cdot 10^{-12} V_j, \quad (1-3)$$

式中 c ——光速（厘米/秒）；

λ ——波长（厘米）。

所有气体分子的极限波长，都比紫外綫短。也就是说，只有紫外綫或波长比紫外綫更短的射线才能引起电离。

例如：钠原子的电离势是 5.12 伏特，极限波长 $\lambda_0 = 2410 \text{ \AA}$ ；又如：氮原子的电离势是 24.5 伏特，其极限波长 $\lambda_0 = 505 \text{ \AA}$ 。

在图 1-2 中可看出，这些波长都在紫外綫，和波长比紫外綫短的区域里。

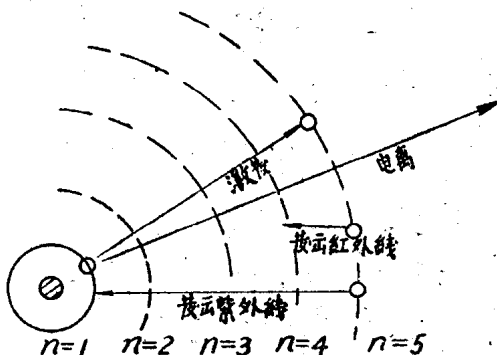


图 1-1 氢原子之电离、激发及激发回复发出射线示意图

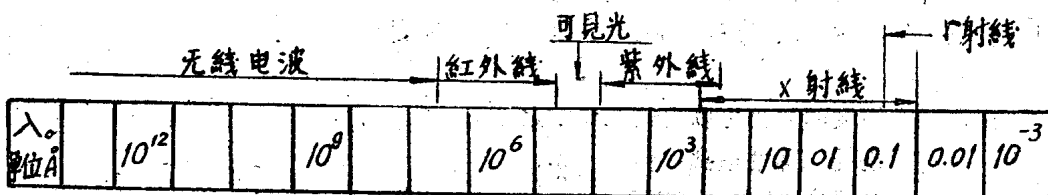


图 1-2 射线谱

在表 2 中举出常见气体分子的极限波长。

3. 热电离 在高温下，气体分子具有很高的动能，这些分子互相碰撞，产生电离称为热电离。热电离在 2000°K 的温度时就已有发生。而在弧柱的温度下（在 6000°K 左右）就非常显著了。

气体达到一定的高温后，由于分子互相碰撞、分子和离子碰撞、而更多的是分子和电子碰撞发生电离，一面则又中和而使离子和电子消失，产生和消失的速度相等时，就达到具有一定电离程度的平衡。达到平衡是很迅速的。

表2 几种气体分子的极限波长

气 体	Vj 伏 特	λ_0 A	气 体	Vj 伏 特	λ_0 A
N ₂	15.8	780	Ar	15.7	785
N	14.5	850	Ne	21.5	570
O ₂	12.5	900	Cl ₂	13.5	940
O	13.6	910	CO ₂	14.3	860
H ₂	15.4	800	CO	14.1	880
H	13.5	910	NO	9.5	1200
He	24.5	505	H ₂ O	13.2	940

印度物理学家沙格在1921年，首先提出热电离可看作是一个热力学过程，可以用下面的公式表示之：

$$M^+ + e_0 = M^0 + A_j, \tag{1-4}$$

式中 M^+ ——正离子；
 e_0 ——电子；
 M^0 ——中性原子；
 A_j ——电离功。

设 x 表示电离程度，即已电离的分子（即正离子）数和原有全部分子数的比例。根据沙格的推导，可以得到电离程度和气压及温度的关系如下：

$$\frac{x^2}{1-x^2} \cdot p = 4.9 \times 10^{-4} \frac{gM^+}{gM^0} T^{\frac{5}{2}} e^{-\frac{11600 V_j}{T}}, \tag{1-5}$$

式中 p ——气体压力（在温度 T 下）以毫米水银柱为单位；
 T ——绝对温度 $^{\circ}K$ ；
 gM^+ ——正离子量子重量；
 gM^0 ——原子量子重量。

按此式可计算，在既定温度下（并一定压力下），气体的电离程度。例如：钠的蒸汽，根据计算结果可知，在1大气压，6000 $^{\circ}K$ 时，其电离程度 $x = 0.212$ 而氩气则 $x = 2.26 \times 10^{-5}$ 。

电离程度随温度的变化可以用曲线表示之（图1-3）。

上面所述的是纯气体的电离，但实际上遇到的常是混合的气体 and 蒸汽。在气体内，具有各种不同电离势的气体。其电离势愈小的，电离得愈多。因此得引入平均电离势和平均电离程度的概念。

假设在单位体积气体内，有第一种气体 n_1 个分子，它的电离势是 V_{j1} ，在当时条件下，它的电离程度为 x_1 ；有第二种气体 n_2 个分子，它的电离势

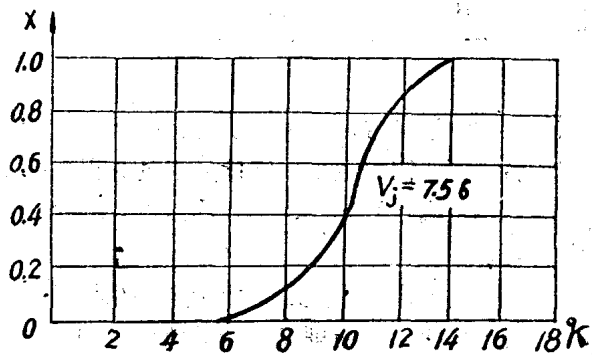


图1-3 钠的蒸汽电离程度和温度的关系曲线

是 V_{ji} ，在当时条件下，它的电离程度是 x_i 等，共有 K 种气体。

令 x_0 代表平均电离程度

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^k n_i x_i}{\sum_{i=1}^k n_i}, \quad (1-6)$$

把前面热电离公式 (1-5) 略去分母 $1-x^2$ 中的 x^2 项 (因温度不很高时 x^2 数值很小)。

又假设混合气体内所有气体的 $\frac{gM^+}{gM^0}$ 比值都相等，而以 a^2 代表之。这样可以得出：

$$x_i = 2.2 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{1}{P_i}} a T^{\frac{5}{4}} e^{-\frac{5800V_{ji}}{T}}, \quad (1-7)$$

代入 (1-6) 式可得：

$$x_0 = \frac{2.2 \times 10^{-2} a T^{\frac{5}{4}} \left(n_1 \sqrt{\frac{1}{P}} e^{-\frac{5800V_{j1}}{T}} + n_2 \sqrt{\frac{1}{P}} e^{-\frac{5800V_{j2}}{T}} + \dots \right)}{\sum_{i=1}^k n_i}, \quad (1-8)$$

(1-8) 式中的分压可以用浓度表示之，即

$$P_i = \frac{n_i}{\sum n_i} P = r_i P \quad \text{代入 (1-8) 式,}$$

整理之后则得

$$x_0 = 2.2 \times 10^{-2} a T^{\frac{5}{4}} P^{-\frac{1}{4}} \sum_{i=1}^k r_i^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{5800V_{ji}}{T}}. \quad (1-9)$$

又设 V_{j0} 为平均电离热，

$$\text{则} \quad x_0 = 2.2 \times 10^{-2} a T^{\frac{5}{4}} P^{-\frac{1}{4}} e^{-\frac{5800V_{j0}}{T}}, \quad (1-10)$$

把 (1-9) (1-10) 二公式合并起来得到：

$$2.2 \times 10^{-2} a T^{\frac{5}{4}} P^{-\frac{1}{4}} e^{-\frac{5800V_{j0}}{T}} = 2.2 \times 10^{-2} a T^{\frac{5}{4}} P^{-\frac{1}{4}} \sum_{i=1}^k r_i^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{5800V_{ji}}{T}},$$

$$\text{故} \quad V_{j0} = -\frac{T}{5800} \ln \sum_{i=1}^k r_i^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{5800V_{ji}}{T}}. \quad (1-11)$$

根据所得公式计算，在铁的蒸汽中加入不同量电离势小的钾蒸汽时，平均电离势的变化如下图 (图 1-4)。

从图 1—4 可以看出, 当开始加钾时平均电离势下降甚速, 也就是说在同样条件下电离程度会增加很多, 但等到加入了一定量的钾后, 再增加则电离势只徐徐下降, 而逐渐趋近于钾的电离势的数值 (4.32 伏特)。

根据这个公式, 在理论上说来, 我们可以推算在焊接时, 电弧中存在的混合气体 (蒸汽) 的平均电离势和电离程度。但是在实际上因焊接电弧中各气体有互相化合和消离等过程, 使变得很复杂。计算是不可能的, 只能根据上述原理推测其趋势。

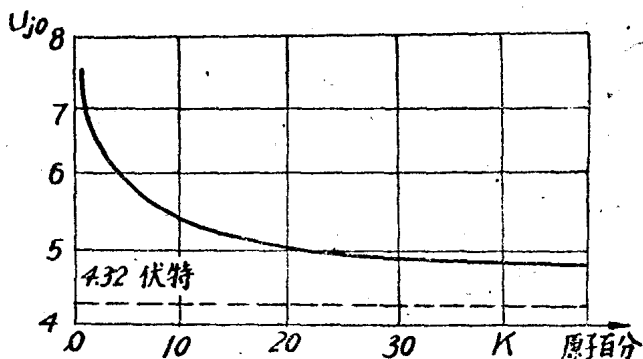


图 1—4 k—Fe 混合蒸汽中平均电离势变化 (钾的电离势是 4.32 伏特, 铁的电离势是 7.83 伏特)

第三节 电子发射

固体或液体表面的原子 (或分子), 接受了额外的能量, 而释放出电子到空间去的现象, 称为发射。发射产生时, 所需能量较电离为小。所需能量称为逸出功, 以 V_{au} 表示之, 单位为伏特 (电子伏特)。物质的逸出功一般比它的电离势小, 约为电离势 $1/2 \sim 1/4$ 。逸出功在很大程度上取决于物质表面状态, 如表面有否氧化物或其他杂质, 这些都会减少逸出功。

几种金属和氧化物的逸出功, 以及能使它们放射的射线的极限波长如下表。

表 3 几种金属的逸出功和能使它们放射的射线的极限波长

金属名称		逸出功	极限波长	金属名称		逸出功	极限波长
		V_0 伏特	λ_0 Å			V_0 伏特	λ_0 Å
锂	Li	2.58—2.34	5180—5200	锌	Zn	4.10—3.02	3010—4080
钠	Na	2.12—1.80	5820—6860	铁	Fe	4.79—3.92	2580—3150
钾	K	2.20—0.46	6110—6800	镍	Ni	4.57—3.68	2700—3360
镁	Mg	3.74—1.77	3910—6980	钼	Mo	4.33—3.22	2850—3830
钙	Ca	3.34—1.7	3700—7270	钨	W	5.36—4.31	2300—2860
钡	Ba	2.29—1.59	5380—7700	FaO		1.00	2350
铝	Al	3.95—1.77	3130—6980	CuO		5.34	2310
铜	Cu	4.80—3.89	2560—3210	Cu ₂ O		5.17	2390

发射现象, 因其获得能量的来源不同, 而分为热发射、光电发射、自发发射、及由于撞击而产生的发射等等。

1. 光电发射 液体或固体表面, 接受射线的能量之后, 从表面逸出电子来。能使几种金属及氧化物发射的射线的极限波长如表 3 所列。

2. 撞击发射 是高动能的质点, 打击在液体或固体的表面上使放出电子。

3. 热发射 液体或固体受热，其中某些电子具有大于逸出功的动能，足以克服对它的静电引力，而逸出到表面外的空间中去的现象，叫热发射。

热发射现象极易见到，例如：许多电子管的阴极，即因加热而发射电子。在焊接电弧中它起着重要作用。当金属加热时，特别容易发生热发射，因为金属原子的外层电子并不固定，而是流动于原子之间。

从理论上说，无论在什么温度下，都会有某些数量的电子能够逸出的〔如果当时没有电场存在，则电子逸出以后又会因金属失去电子带有 e_0 正电荷被吸回去（图1—5）〕。但是，在室温 and 比室温高得不多的温度下，这种逸出的电子数量极少而不能觉察。温度增高以后，平均动能增加，于是具有较高动能而可能逸出的电子数目也增加了。

根据理查逊——代西门公式热发射现象与温度的关系可用下式表示之，

$$j_0 = AT^2 e^{-\frac{V_{au}}{KT}}, \quad (1-12)$$

式中 j_0 —每单位面积在单位时间内放出的电子所带的电量，也就是电流密度（安培/平方厘米）；

T —绝对温度（°K）；

V_{au} —逸出功（尔格）；

K —波尔兹曼常数（尔格/°K）；

A —常数（安培/平方厘米·°K）。

常数 A 须由实验测定，常数 K 等于 1.38×10^{-16} 尔格/°K。由此公式可以计算，在不同温度下放射的电量。例如钨的逸出功 $V_{au} = 4.54$ 伏特，化为以尔格为单位时等于 $4.54 \times 1.6 \times 10^{-12}$ ， $A = 60$ 安培/平方厘米·°K；计算结果如下表（表4）。

表4 钨在不同温度下的热发射

温 度	°K	1500	2000	2500	3000	3500	3600
电 流 密 度	安培/平方厘米	10^{-7}	10^{-2}	3×10^{-1}	14	225	356

由上表可知，在温度不高时，热发射极弱，其后随着温度的上升，热发射作用增加极为迅速，到了温度很高后，增加的速度又逐渐缓慢下来。

金属表面上有杂质时（氧化物、硫化物、其他金属的掺杂）逸出功有很大的变化。例如钨含有0.5%的氧化钍（ ThO_2 ）时，它在高温时的热发射能力将增加几千倍。因此，在焊接中，电极上的热放射就不能用由纯金属导出的上面的公式计算，当电极上有熔化了并被氧化了的金属存在时热发射将大为增加。

4. 自发射 如上所述，热发射现象要在足够高的温度下才显著，但是在有电场存在并有大的电位降时，则在阴极表面虽然温度不甚高，亦有多量的电子发射出来，特称为自发射。因为强电场吸引着电子，使它容易从阴极逸出，也就是说降低了电子的逸出功。

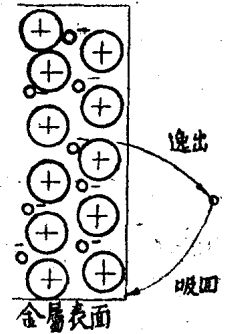


图1—5 金属表面电子放射示意图

如果在外面沒有電場存在時，發射電流密度和溫度的關係可以下式表示：

$$j_0 = AT^2 e^{-\frac{V_{au}}{KT}},$$

那麼，當加上電場後，公式將變為下式

$$j_E = AT^2 e^{-\frac{V_{au} - \Delta V_{au}}{T}}, \quad (1-13)$$

式中的 ΔV_{au} 是表示由於電場存在而逸出功減低的數值。將 $\Delta V_{au} = e^{\frac{1}{2}} \cdot E_k^{\frac{1}{2}}$ (E_k 為電場強度) 代入 (1-13) 並代入各項常數值整理之後則得：

$$j_E = AT^2 e^{-\frac{V_{au}}{KT} + \frac{4.39\sqrt{E_k}}{T}} = j_0 e^{\frac{4.39\sqrt{E_k}}{T}}. \quad (1-14)$$

由 (1-14) 式即可看出，電場強度愈大，則在既定溫度下發射電流密度愈大。而要得到同樣的電流密度，則所需溫度就愈較低。當電場 E_k 達到 10^6 伏特/厘米 強度時，即在室溫下，亦有顯著發射現象。這就是自發射或稱為冷陰極發射。

自發射在焊接電弧中起着重要作用，特別是在電極溫度還不足以使產生足夠激烈程度的熱發射的場合下。

5. 重質點碰撞發射 能量大的重質點撞到陰極上，引起陰極發射電子，稱作重質點碰撞發射。重質點撞擊到陰極表面，將它的位能 eV_j 或 eV_B (電離能或激發能) 及動能 ϵ 傳與陰極，但必須是質點的總能量大於逸出功 V_{au} ，被撞的陰極才有電子逸出。

當離子撞擊陰極時，只有它被中和時才放出位能。因此離子的碰撞發射，必須是陰極最少逸出 2 個電子，一個電子與離子中和，一個電子作為陰極發射的電子，在這種情況下必須是

$$eV_j + \epsilon > 2V_{au}, \quad (1-15)$$

根據 (1-15) 可知 $eV_j + \epsilon$ 項愈大，則陰極發射出之電子愈多。

第四節 氣體中的放電現象

這是指在氣體介質中有二電極，當它們之間有一定電位差時，產生電流，能從一極穿過氣體而通到另一極的現象 (見圖 1-6)。

氣體放電包括了氣體電離、中和和電子發射的過程，而且這是處在電場作用的特殊條件下進行的。

1. 氣體在電場中的電離 電極之間具有的帶電質點，在電場作用下將分別向兩極移動，並且以加速度向兩極運行，行進的速度逐漸增加，因之動能也逐漸增加。同時因為是在氣體中，所以走一段距離後將和別的原子 (或分子) 相碰，如果具有足夠的動能，就會發生電離 (即相碰的原子或分子將變為離子和自由電子) 或激發。相碰之後一部分動能用於激發或電離了，所以速度減小，但因係在電場影響下，所以以後速度又漸增，產生第二次相碰。

相碰而生出電離的可能性多少取決於下面的條件：電場強度愈大則加速度愈高，相碰時速度和動能愈大，電離的可能就大。氣體密度較稀 (或者說氣壓較小) 則二次相碰之間的距離較大，在同樣電場強度和同樣的加速度情況下，相碰時的動能較大，電離的可能也

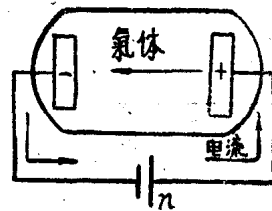


圖 1-6 放電電路示意圖

就较大（因相撞时动能不够大则不产生电离）。但是在过于稀薄的气体（例如接近真空）中电离可能性亦减少，因为相撞的机会过少了。

设 α 代表一个电子在电场內沿电场方向前进一个厘米长度距离所能产生的电子数（当然产生一个电子同时也必然产生一个正离子）。根据上面的叙述可知 α 为气压 P 和电场强度 E 的函数。

同样可设 β 代表一个离子在电场內沿电场方向前进一个厘米长度距离所能产生的电子数，它同样也是气压 P 和电场强度 E 的函数。

但是离子质量大，故在同样电场下，前进时加速度要比电子小得很多，并且在相撞时传出的动能部分也比电子小（见第二节之2.）所以 β 比 α 小得很多，一般可以忽略。

一个电子沿电场方向前进中一次相撞可以生出一个新电子（同时也生一个正离子）这两个电子前进时各再相撞一次，可生出二个新电子，再各一次相撞可生出四个新电子，为此类推，电子增加极为迅速。

电子增加情况可以按下列方法计算。设开始时电子数量为 N ，这些电子沿电场方向前进一个微小距离 dx ，在这途程中原有的一个电子将产生出 $\alpha \cdot dx$ 个新电子，原有电子数是 N 故将生出 $N \cdot \alpha \cdot dx$ 个新电子。

而产生的新电子数应为 dN 。

故 $dN = N\alpha dx$,

进行积分（在行径距离为 d 的途程中）

$$\int_{N_0}^{N_d} \frac{dN}{N} = \int_0^d \alpha dx,$$

$$N_d = N_0 e^{\alpha d}.$$

如果二个电极的距离是 d ，则从阴极放射出的每一个电子在途中将产生出 $e^{\alpha d} - 1$ 个新电子（和同样数量的正离子）。或者说从阴极出来的电子流 i_0 ，在经过 d 距离长度的电场到达阳极时，增加到 $i = i_0 e^{\alpha d}$ 。

当然实际情况比这个计算要复杂得多，特别是这计算只是考虑电子和原来未曾电离的原子和分子相碰，实际上除了电离程度很小的场合以外，电子将会有很多的机会和离子相碰等，所以这计算只是便于了解这个概念。

2. 带电质点的中和 与电离的同时，带电质点可以把带电量中和而消失，变成为原子或分子，中和可以在电极上，可以在和气体接触的固体或液体表面上，也可以在气体中间。

在电极上带电质点中和的情况可以有下面几种：

电子到达阳极即穿入阳极成为阳极金属內的电子，因为电子在金属內的位能比在气体內小（相当于该金属的逸出功），所以在这种过程中就把这部分位能放出。同时电子奔向阳极时有很大的速度，在穿入金属后这部分动能也放出，这二种能量的大都都转变为热能，只有小部分以电磁波射线（在能量很大时也可能以伦琴射线）形式放出到空间中去。

正离子到达阴极后，引出一个电子来与自己中和，成为中性原子（或分子）自由地浮游于气体中。已不再受阴极的吸引。在中和时，放出相当于该元素的电离功的能量，但其中一部分相当于电极金属的逸出功的能量，要消耗于使阴极放射出一个电子，但电离功一

一般都大于逸出功，所以中和过程中还是放出能量的。这放出的能量一部分用于使阴极放射出另外电子来，一部分转变为热能。

负离子在奔向阳极的途中极易由于碰撞等原因而成为分子和电子，分子不复向阳极前进而电子则继续前进，待到达阳极即穿入阳极。

在气体中带电质点相碰时亦可能中和，而带电质点的动能愈小愈易中和，所以阴离子比起电子来在气体中，中和的可能性大得多，因它的体积大、速度小，在途中被碰的机会很多，动能不易增大，所以阴离子常在中途被中和而很少能达到阳极。在气体中，中和时放出的能量常以电磁波或其他形式放出。

3. 气体放电 放电现象的主要分类法，是按气体的放出光亮程度来分。光亮程度取决于气体中电离和激发了的质点的多少，气体中电离、激发和中和过程中的激烈程度，以及放电中的电流密度。按这标准来分可以分为暗放电，辉光放电和电弧放电。暗放电中电流密度很小以微安/厘米²衡量，气体的电离程度很弱，气体的光亮极微为眼睛所不能觉察。辉光放电有光辉但是不热，光辉是由于气体分子被电子撞击而激发，当激发消失时放出能量所致。光亮程度可以从弱得刚被觉察到足够强得可以照明，电流密度可以安培/厘米²衡量。

电流密度再增加达到 4 安/厘米²，则辉光放电转变为弧放电，弧放电的特点是具有耀眼的光亮。我们所应用的是普通大气压下的弧放电，它具有很高的温度，可以若干千度衡量。

1) 暗放电 暗放电现象可以由于外来的物理因素而产生，例如由于有紫外线或 X 射线等照射在气体介质或电极材料上（电极以电路相通并有一定电压），引起了气体中的电离和电极表面上的发射（发射较易于产生而电离则较少，故在下面叙述中不考虑电离）。因为二极之间有电位差存在，所以阴极放射出来的电子就可能穿过介质到达阳极。

设阴极受射线照射后每平方厘米面积上，每秒钟放射出 N_0 个电子（每个电子的电量是 e ）。

当两极的电位差很小时，每秒钟所产生的电子还不能在每秒钟时间内全部流向阳极（余下的电子回入阴极）。随着电压的增加，每秒钟流向阳极的电子数逐渐增加（流过去的电量也逐渐增加），因为是以每平方厘米面积来计算的所以用电流密度来表示（图 1-7 曲线 a, b）。

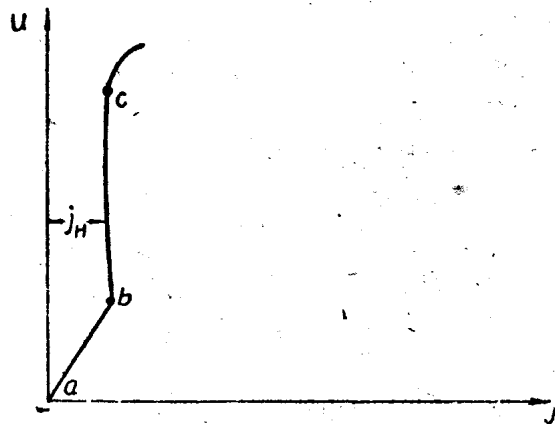


图 1-7 暗放射电压与电流密度关系曲线

当二极间电压高到某一程度，能在每秒钟内把由于射线照射在阴极而发射的电子都流向阳极，此时的电流密度称为饱和电流密度 j_H ，

$$j_H = N_0 \cdot e$$

过此之后则电压虽上升但电流密度不增，因为阴极发射的电子不能再多（除非外来的物理因素如紫外线 X 射线等再加强）。（图 1-7 曲线 b, c）。