



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高 职 高 专 系 列 教 材

仪器分析

(第二版)

INSTRUMENTAL ANALYSIS

韦进宝 钱沙华 编著

中国环境科学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

仪器分析/韦进宝, 钱沙华编著. —北京: 中国环境科学出版社, 2008.12

(高职高专系列教材)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-80209-881-7

I. 仪… II. ①韦… ②钱… III. 仪器分析—高等学校: 技术学校—教材 IV. 0657

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 192301 号

责任编辑 陈金华
责任校对 刘凤霞
封面设计 龙文视觉

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京东海印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2004 年 11 月第 1 版 2008 年 12 月第 2 版
印 次 2008 年 12 月第 2 次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 20.75
字 数 370 千字
定 价 35.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

分析化学是研究物质化学组成、含量及结构的科学，包括化学分析和仪器分析两大部分。仪器分析是依据物质的某些物理或物理化学性质，应用电子学、微电子学、计算机科学等不断发展的高新技术设计和制造的各种分析仪器获取物质化学组成和结构信息，具有检出限低、准确度高、选择性好、操作简便、分析速度快、易于实现自动化等优点，在工业、农业、医学、生命科学、环境科学等诸多领域中发挥了重大作用。例如，在国家环境保护局颁布的大气、水质监测项目 150 多种标准方法中，主要是仪器分析方法。仪器分析所提供的环境中化学物质的信息为评价环境质量、污染控制和治理的成效，制订环境保护政策以及解决环境问题等提供了重要依据。

仪器分析分为光学分析法、电化学分析法和色谱分析法三大类别，涉及相当多的分析方法。在《仪器分析》这本书中，我们主要系统介绍一些常用仪器分析方法的基本原理、技术、特点及应用，共有 11 章（每章介绍一种方法）。本书既可作为大专院校的教材或参考书，也可作为从事仪器分析的技术人员学习与培训的教材或参考书。

本书为教育部大专类“十一五”规划教材。本书在编写、出版过程中，陈金华编辑给予了大力支持并对全书的质量进行了认真把关；张旭、肖玫、吴峰、张琳、胡超珍等教师参与了本书的打印与校对工作，在此一并表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，本书难免存在缺点和错误，欢迎读者批评指正。

编 者

2008 年 6 月于珞珈山

目 录

第一章 原子发射光谱分析	1
第一节 光学分析法概述	1
第二节 原子发射光谱基本原理	5
第三节 原子发射光谱仪	9
第四节 原子发射光谱分析方法	21
第五节 原子发射光谱法的应用	29
第二章 原子吸收光谱分析	33
第一节 基本原理	33
第二节 原子吸收分光光度计	35
第三节 原子吸收光谱分析方法	46
第四节 原子吸收光谱法的应用	51
第三章 原子荧光光谱法	59
第一节 方法原理	59
第二节 原子荧光分析技术	61
第四章 紫外-可见吸收光谱法	65
第一节 分子吸收光谱概述	65
第二节 有机化合物的紫外-可见吸收光谱	71
第三节 紫外-可见吸收光谱分析法	73
第四节 紫外-可见分光光度计	85
第五节 双波长分光光度法	87
第六节 紫外-可见吸收光谱法的应用	91

第五章 红外吸收光谱法	100
第一节 基本原理	100
第二节 红外吸收光谱法的应用	102
第三节 红外光谱仪	106
第六章 电导分析	113
第一节 电导分析的基本原理	113
第二节 电导分析	118
第七章 电位分析	121
第一节 电位分析概述	121
第二节 电位法测量溶液的 pH 值	130
第三节 离子选择性电极	136
第四节 电位滴定法	155
第八章 库仑分析	161
第一节 电解的基本原理	161
第二节 库仑分析	171
第九章 极谱分析与溶出伏安法	178
第一节 极谱分析的基本原理	178
第二节 极谱定量分析	183
第三节 极谱波的半波电位及影响因素	196
第四节 极谱催化波	202
第五节 溶出伏安法	209
第六节 单扫描极谱	216
第七节 交流极谱、方波极谱和脉冲极谱	219
第八节 有机化合物的极谱分析	229
第九节 化学修饰电极	236
第十章 气相色谱分析	243
第一节 概 述	243
第二节 气相色谱的基本理论	244

第三节	气相色谱仪	251
第四节	气相色谱固定相	265
第五节	定性分析	274
第六节	定量分析	276
第七节	气相色谱联用技术及气相色谱的应用	282
第十一章	高效液相色谱	288
第一节	概述	288
第二节	高效液相色谱的基本理论	289
第三节	高效液相色谱的类型	292
第四节	高效液相色谱流动相	294
第五节	高效液相色谱固定相	295
第六节	高效液相色谱仪	297
第七节	高效液相色谱分析应用及联用技术	300
第八节	离子色谱法	303
第九节	毛细管电泳	310
第十节	毛细管电色谱	315
附录一	部分物理常数	318
附录二	元素的电离电位	319
附录三	几种原子光谱分析法检出限的比较	320
附录四	元素标准溶液的配制	321

第一章 原子发射光谱分析

第一节 光学分析法概述

一、光的基本性质

光是一种辐射能，也称电磁辐射，近代物理学的研究表明：光既具有波动性又具有微粒性即波粒二象性。

(一) 光的波动性

光以波的形式进行传播，可发生干涉、衍射等现象，其波动性可用下列参数来描述。

1. 波长 λ

波的相邻极大或两极小间的直线距离称为波长。所用单位随着不同的波谱区而不同，最常用的单位有厘米 (cm)、微米 (μm)、纳米 (nm) 和埃 (\AA)。

2. 波数 $\tilde{\nu}$

波长的倒数，即每厘米长度中包含波动的数目称为波数，单位为 cm^{-1} 。

3. 周期 T

完成一次振动所需要的时间为一个周期，单位为 s。

4. 频率 ν

每秒钟振动的次数称为频率，它等于周期 T 的倒数。单位为 s^{-1} ，这一量值称为赫兹，用符号 Hz 表示。

5. 传播速度 v

将频率 ν 乘以波长，就得到辐射的速度，即 $v = \nu\lambda$ ，单位为 cm/s。

辐射的频率只决定于辐射源，而与介质无关。无论辐射通过什么介质，它的频率保持不变。与此相反，传播速度 v 和波长 λ 则与介质有关，随着辐射通过不同的介质而不同。

真空中所有电磁辐射传播速度相同，是它们的极大值，这一速度用符号 c 表示，其数值为 $2.997\ 92 \times 10^{10}$ cm/s。

(二) 光的微粒性

1900 年普朗克在关于黑体辐射的假设中提出光子概念。认为光是由一粒粒运动着的粒子流（称光子）组成，光的能量不是连续分布在波面上，而是集中于一个个的光子上，每个光子都具有一份能量 E （光能的最小单位）。因此，光能是不连续的，即量子化的。此外，1923 年，康普顿发现：光子不但具有能量 E ，还具有动量 P 。

(三) 波粒二象性的联系

单个光子的行径是无规则的，间或落在这一点，间或落在那一点，测不准。但用统计的方法可找到大量光子在空间的几率分布（运动的轨迹）。也就是说，光的波动性是微粒性的统计性表现。更重要的是，光的这两种性质可以通过普朗克常数 h 定量地联系起来，即：

$$E = h\nu$$

式中： E ——光量子能量；

ν ——光子的频率；

h ——普朗克常数，它的数值为 6.626×10^{-34} J·s。

二、电磁波谱

按波长次序排列的系列电磁波称为电磁波谱，各种波谱的特性见表 1-1。

表 1-1 各种波谱的特性

λ	电磁波	跃迁类型
<0.005 nm	γ 射线区	核能级
0.005~10 nm	X 射线区	内层电子能级
10~200 nm	真空紫外光区	外层电子能级
200~400 nm	近紫外光区	
400~750 nm	可见光区	
0.75~2.5 μ m	近红外光区	分子振动能级
2.5~25 μ m	中红外光区	
25~1 000 μ m	远红外光区	分子转动能级
1~300 mm	微波区	
>300 mm	无线电波区	电子和核的自旋

三、光学分析法

利用待测物质发射电磁辐射以及与电磁辐射的相互作用而建立的分析方法称为光学分析法。

(一) 物质发射电磁辐射

当外界能量(除光能外的其他能量,如电能、热能)作用于物质时,物质可以以光的形式释放所得到的能量,产生发射光谱。利用物质发射光谱建立的分析方法有原子发射光谱法、火焰光度法等。

(二) 物质与电磁辐射相互作用产生的效应

1. 吸收效应

辐射能作用于物质时,物质选择性地吸收某些频率的辐射能的现象称为吸收效应。如钙原子吸收波长为 422.7 nm 的光,汞原子吸收波长为 253.7 nm 的光。原子吸收、分子吸收光谱法就是利用吸收效应建立的分析方法。

2. 散射效应

光通过某种介质时,引起介质内带电粒子受迫振动,使光向四周辐射形成散射光的现象称为散射效应。利用散射效应建立的分析方法有比浊法、拉曼光谱法。

3. 折射效应

光从一种介质斜射进入另一种介质中时传播方向发生改变的现象称为折射效应。利用折射效应建立的分析方法有折射法。

4. 衍射效应

光在传播途中遇到微小障碍物时传播方向发生改变。X 射线衍射法是利用 X 射线与晶体作用产生的衍射效应建立的分析方法。

5. 偏振效应

天然光是向各个方向振动的非偏振光,但它通过某些物质后可使某一方向的振动保留,而另一方向的振动消除。利用偏振效应建立的分析方法是偏振法。

6. 荧光、磷光效应

当电磁波(一次光)作用于物质时,物质可发射出电磁波(二次光)。发光时间很短的($10^{-8}\sim 10^{-6}$ s)的二次光称为荧光;发光时间较长的($10^{-2}\sim 10^2$ s)称为磷光。利用荧光、磷光效应建立的分析方法有原子荧光法、分子荧光法、分子磷光法。

7. 光电效应

物体受光照射后，可将接受到的部分光能转化为电子的动能。光电子能谱是建立在光电效应基础上的分析方法。

四、光学分析法的分类

光学分析法包括的方法很多，它们可分为两大类。

(一) 光谱分析法

这类方法是通过测量物质产生的特征光谱的波长、强度进行物质的定性、定量或结构分析。根据所检测的电磁辐射的基本性质，又可将光谱分析法分为吸收、发射、散射光谱 3 类。

光谱分析法灵敏度较高、选择性较好、所涉及的方法多、应用广泛，本书中介绍的原子发射、原子吸收、原子荧光、紫外-可见以及红外光谱等几种光学分析法均为光谱分析法。

(二) 非光谱分析法

这类方法不涉及特征光谱的测定，而是利用光的传播方向和其他物理量的变化对物质进行分析。例如，X 射线衍射法进行晶体结构分析，测量的是 X 射线通过晶体后衍射峰的 2θ 角。由于非光谱分析法具有较大的局限性，应用不及光谱分析法广泛。

各种光学分析法归纳于表 1-2。

表 1-2 光学分析法

光谱分析法			非光谱分析法
发射光谱法	吸收光谱法	散射光谱法	
原子发射光谱法	原子吸收光谱法	拉曼光谱法	折射法
火焰光度法	紫外-可见吸收光谱法		比浊法
分子荧光光度法	红外吸收光谱法		干涉法
原子荧光光谱法	X 射线吸收光谱法		偏振法
分子磷光光谱法	核磁共振波谱法		旋光法
X 射线荧光光谱法	顺磁共振波谱法		圆二向色性法
化学发光分析法	电子自旋共振波谱法		X 射线衍射法
γ 射线光谱法	穆斯堡尔谱法		光电子能谱法
	激光吸收光谱法		
	激光光声光谱法		
	激光热透镜光谱法		

第二节 原子发射光谱基本原理

原子发射光谱分析是利用原子受电能或热能激发，外层电子跃迁所发射的特征光谱来研究物质的组成及含量的方法。

一、原子发射光谱的产生

原子由原子核与核外电子组成。在无外界能量作用时，原子中的电子按一定的规律排布在各自的轨道中，作绕核和自旋运动，此时，原子处于最低能量状态（基态）。但当原子获得一定能量后，原子中的外层电子就从它原来运动的能级被激发到能量较高的能级（这种状态称激发态）。原子处于激发态时是很不稳定的，停留 10^{-8} s 左右，被激发到高能级的电子又返回到（跃迁）原来的能级，与此同时，以光子的形式释放出多余的能量——产生发射光谱，即一条谱线是原子的价电子在两个能级之间跃迁而产生的。

原子的核外层，存在若干能量不同的能级，当原子获得能量后，这些能级之间若符合选择定则，电子均可产生跃迁，从而发射多条谱线。由于电子的轨道是不连续的，即量子化的，因此原子所发射的谱线也是不连续的，称作线光谱。

原子所发射的光波的波长取决于发生跃迁的两个能级之间的能量差 ΔE ，即：

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$

式中： h ——普朗克常数， $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ；

c ——光速；

ΔE ——发生跃迁的两个能级间的能量差；

λ ——波长。

ΔE 的大小与原子结构有关，不同元素的原子，由于原子结构不同，能级之间的 ΔE 便不同，因而，不同的原子具有不同的特征光谱线及谱线组。

原子的外层电子由基态激发到激发态所需要的能量称激发电位，原子的光谱线各有其相应的激发电位，这些激发电位可在元素谱线表中查得，以电子伏特表示。

同一元素的原子有多种激发态，激发电位各不相同，原子的最低激发电位称为共振电位（由基态激发到第一激发态所需要的能量）。

由激发态直接跃迁到基态所辐射的谱线称为共振线。每个元素有多条共振

线，由第一激发态跃迁至基态所辐射的谱线，称为第一共振线。

原子的外层电子获得足够能量后有可能脱离原子而形成自由电子，失去电子的原子即成为离子。使原子电离所需要的电离能要比使原子激发的能量大。这个使原子变为离子所需的最低能量称为电离电位。在中性原子的外层电子中，失去一个电子，称为一次电离。一次电离的原子，再失去一个电子，就称为二次电离，依此类推。元素的电离电位可从手册或谱线表中查到。

二、谱线强度

原子发射线是原子的外层电子在符合选择定则的两个能级之间跃迁产生的。若高能级以 i 表示，低能级以 j 表示， i 与 j 两能级间的能量差为：

$$E_i - E_j = h\nu_{ij}$$

则 i 与 j 两能级间跃迁产生的谱线强度 (I_{ij}) 为：

$$I_{ij} = N_i A_{ij} h\nu_{ij} \quad (1.1)$$

式中： N_i ——单位体积内处于高能级的原子数（激发态原子数目）；

A_{ij} —— i 、 j 两能级间的跃迁几率；

h ——普朗克常数；

ν_{ij} ——发射线的频率。

若激发处于热力学平衡状态下，各激发态和基态的原子数目 N_i 与 N_0 的分配，应遵守统计力学中的麦克斯韦-玻尔兹曼分布定律：

$$N_i = N_0 \frac{g_i}{g_0} e^{-\frac{E_i}{kT}} \quad (1.2)$$

式中： N_i ——单位体积内处于激发态的原子数；

N_0 ——单位体积内处于基态的原子数；

g_i 、 g_0 ——激发态和基态的统计权重，也称激发态和基态能级的简并度；

E_i ——激发态的能量（激发电位）；

k ——玻尔兹曼常数，其值为 $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ；

T ——激发温度，用热力学温度 K 表示。

把式 (1.2) 代入式 (1.1) 得到下式：

$$I_{ij} = \frac{g_i}{g_0} A_{ij} h\nu_{ij} N_0 e^{-\frac{E_i}{kT}} \quad (1.3)$$

从式 (1.3) 可看出谱线强度与下列因素有关:

(1) 激发电位。谱线强度与激发电位的关系是负指数关系, 激发电位愈大, 谱线强度就愈小。这是由于随着激发电位的增高, 处于该激发态的原子数迅速减少。实验证明, 绝大多数激发电位较低的谱线都是比较强的, 激发电位最低的第一共振线往往是最强线。

(2) 跃迁几率。谱线强度与跃迁几率成正比, 跃迁几率可通过实验数据计算得到, 对于遵循选择定则的那些跃迁, A_{ij} 的数值是 $10^6 \sim 10^9 \text{ s}^{-1}$, 一般情况下, 跃迁几率等于激发态寿命的倒数。

(3) 统计权重。谱线强度与激发态、基态统计权重的比值 $\frac{g_i}{g_0}$ 成正比。

(4) 激发温度。激发温度升高, 体系的运动能增大, 有利于原子激发, 因此谱线强度增大。但是, 温度太高, 体系中被电离的原子数目将增多, 中性原子数目减少, 导致原子线强度减弱。

图 1-1 为某些元素谱线强度和温度的关系曲线。曲线表明, 各元素有其最适合的激发温度, 在此温度时, 谱线强度最大; 高于该温度, 谱线强度反而减小。

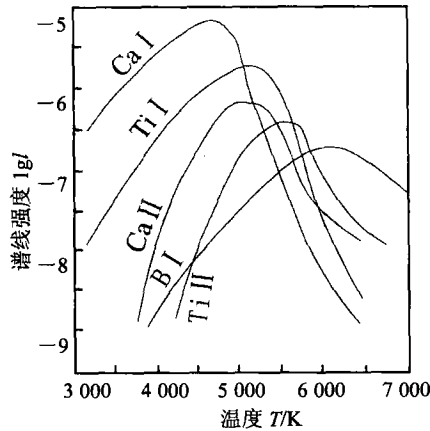


图 1-1 谱线强度和温度的关系

I. 原子线; II. 离子线

(5) 基态原子。谱线强度与基态原子数目 N_0 成正比, 而 N_0 是由元素的浓度 (c) 决定的, 在一定条件下 $N_0 \propto c$, 所以谱线强度与元素的浓度成正比, 这就是光谱定量分析的依据。

三、自吸与自蚀

原子获得一定能量后被激发，发射某一波长的谱线，被处于基态的同类原子吸收的现象称为自吸。

以电弧为激发源的原子发射光谱分析中，待测元素在激发源产生的弧焰高温中蒸发为气态原子，然后激发，跃迁、发射光谱线。弧焰具有一定的厚度（图 1-2），弧焰中心（a）的温度最高，边缘（b）的温度较低。弧焰中心发射出来的辐射光必须通过整个弧层射出。由于边缘的温度较低，因而处于基态的原子较多，这些低能态的原子能够对高能态同类原子发射出来的光产生吸收。自吸既影响谱线形状，又影响谱线强度。

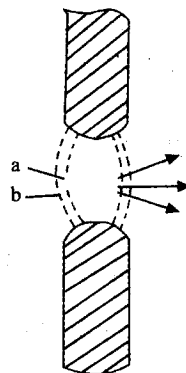


图 1-2 弧焰示意图

自吸对谱线强度的影响可用朗伯-比尔定律描述：

$$I = I_0 e^{-ad} \tag{1.4}$$

式中： I ——射出弧层的谱线强度；

I_0 ——弧焰中心发射的谱线强度；

a ——吸收系数（与基态原子数目有关）；

d ——弧层厚度。

从式（1.4）可见：弧层越厚，弧焰中被测元素的原子浓度越大，则自吸现象越严重，使谱线强度减弱的程度越大。此外，自吸的大小还与谱线的性质有关，基态原子对于共振线的吸收最为严重。

自吸现象对谱线形状的影响见图 1-3。当自吸严重时，谱线中心的辐射几乎完全被吸收了，看起来似乎是两条谱线，这一现象称为自蚀。

由于自吸现象影响谱线强度，因此在光谱定量分析中必须注意。

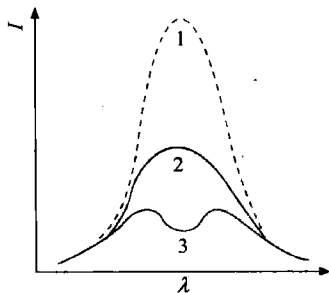


图 1-3 自吸现象对谱线强度及形状的影响

1. 无自吸；2. 自吸；3. 自蚀

第三节 原子发射光谱仪

原子发射光谱仪主要由激发源、分光仪、检测器 3 部分构成。

一、激发源

激发源的作用是提供试样蒸发、激发所需要的能量，使之产生光谱。激发源对于光谱分析的检出限、精密度和准确度均有较大影响。下面介绍用得较多的电弧和电感耦合等离子体激发源。

(一) 电弧激发源

电弧激发源分直流电弧和交流电弧两种。

1. 直流电弧工作原理

直流电弧的线路图如图 1-4 所示。E 是直流电源，可由直流发电机或整流器供给，电压为 220~380V，电流 5~30A。G 为分析间隙，上、下是两个电极，样品通常放在下电极中，电极之间是空气，处于大气压力下。

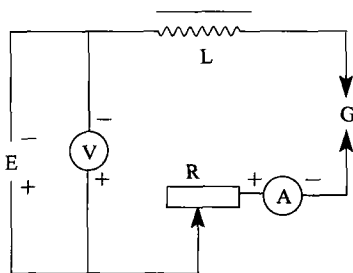


图 1-4 直流电弧线路

R. 镇流电阻；G. 分析间隙；A. 电流表；E. 直流电源；V. 直流电压表；L. 电感

电激发源提供能量的原理是：使电极间的空气电离导电，电极间放电电流过电流，产生电弧，发热发光，使样品在弧焰的高温下蒸发、激发。

大气压力下的空气里几乎没有电子或离子，是不导电的绝缘体。但如果借助于外界力量，使气体中产生离子则气体就变成导体。使气体电离的方法有：紫外线照射、电子轰击等。当气体电离时，在电极两端施加一定的电压才能产生放电。

这种放电的电流很小，它的特点是当外界电离作用停止时便中断（因为气体在被电离的同时还进行着相反的离子复合过程），称为非自持放电。如果电极间的电压增大，电流也随着增大，当电极间的电压增大到某一个定值时，电流突然增大到差不多只受外电路中电阻的控制，即电极间的电阻突然变得很小，这种现象称为击穿。电极间的气体被击穿后，即使将外界电离作用去掉，放电仍能继续，这种放电称为自持放电。光谱分析用的电激发源（电弧或电火花）都属于自持放电类型。

使电极间气体击穿而发生自持放电的最小电压称为“击穿电压”。在 0.1 MPa 大气压力下，空气介质中，欲使 1 mm 的间隙中发生自持放电必须具有 3 300 V 的电压。因此，直流电弧采用 220~380 V 供电是不可能使空气电离的。

直流电弧使空气电离（点弧）产生自持放电采用两种方法：一种是接触起弧，即接通电源后，使上、下电极接触、电路短路片刻，产生瞬间大电流击穿电极间的空气；另一种是高频引燃，利用高频电流产生的高压使空气击穿。高频引燃与交流电弧引燃线路相同。

直流电弧的电极头温度较高，阳极可达 4 000 K。这是由于高速运动的电子向阳极轰击，在阳极表面产生一个炽热的斑点（阳极斑点）。温度高有利于试样的蒸发，因此试样通常置于阳极。

2. 交流电弧工作原理

我国广泛采用的是高频高压引火的低压交流电弧，其线路图如图 1-5 所示。

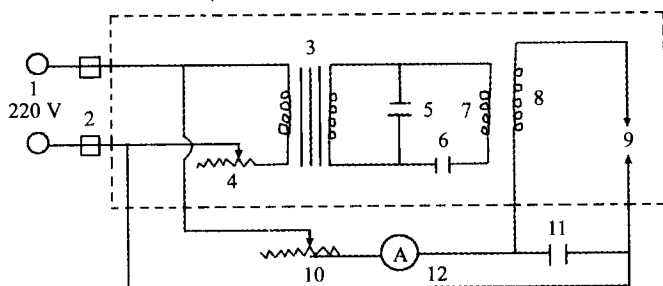


图 1-5 低压交流电弧发生器线路

1. 电源；2. 保险丝；3. 升压变压器可将次级电压升至 3 000V；4. 为 0~400Ω、0.5A 的可变电阻器；5. 硬质金属制成的放电盘，距离可调；6. 振荡电容（0.012 μF，耐压 3 000V）；7、8. 两个感应线圈；9. 分析隙；10. 燃弧线路中的可变电阻；11. 0.01 μF 的旁路电容（避免高频电流流入低频燃弧线路）；12. 0~20 A 的交流电流计

---- 内为 I —— 外为 II

低压交流电弧，不能像直流电弧那样，一经点燃即可持续放电，电极间隙需要周期性地点燃，因此必须用一个引燃装置。

低压交流电弧线路是由高频高压引火线路 I 和低频低压燃弧线路 II，借助于线圈 7、8 耦合所组成。当接通电源 1 后，220 V 的交流电通过保险丝 2 进入变压器 3，经过变压器后，次级电压升至 3 000 V，此高压电流通过高频感应线圈 7 向电容器 6 充电。当其电压在每半周波中逐渐升高至能够击穿放电盘 5 的间隙时，放电盘被击穿而跳过火花，此时 5、6、7 构成一个振荡回路产生高频振荡电流。因高频感应线圈 7、8 有耦合作用，则在其次级线圈 8 中产生高达 10 000 V 的高压，使弧隙之间的空气电离，引燃电弧。此时，低压电流就通过了分析隙进行正常工作。

由于低压交流电弧的放电呈周期性变化，每交流半周强制点弧，且在电极表面有一个新的接触点，电流密度较高，因而，其放电稳定性比直流电弧好，分析的重现性较好。

3. 电弧激发源电学特性

弧隙间气体中通过电流时，电极间电压和电流的关系不遵守欧姆定律，呈反常伏安特性曲线。如当电极间距离不变时，随着线路中电流的增加，电极间的电压相反减小，见图 1-6。这说明弧隙间导电气体的电阻与电学线路中的电阻性质完全相反。

当弧隙增大时，电流会减小，电极间的电压会升高。由于样品在蒸发过程中，弧隙的距离是变化的（样品在电极中逐渐蒸发完，弧隙距离不断增加），因此，使得电弧放电不稳定。为了稳定电弧放电，在直流电弧电路和交流电弧燃弧线路中均串联了一个可调大电阻 R（称镇流电阻）。

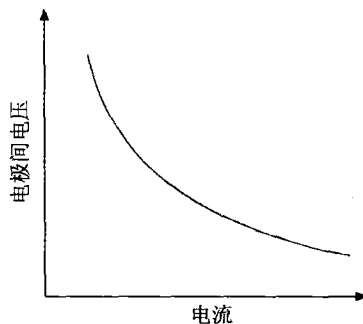


图 1-6 气体放电中电压和电流曲线