

有机光谱分析

朱淮武 编

贵州教育出版社

有机光谱分析

朱淮武 编

* * *

贵州教育出版社出版发行

(贵阳市中华北路 289 号)

贵州省侗学会印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 26.5 印张 640 千字

印数: 1—1000 (册)

1997 年 5 月第 1 版 1998 年 10 月 第 1 次印刷

* * *

ISBN 7-80583-781-3/G·775 定价: 28.00 元

如发现印、装质量问题, 影响阅读, 请与印刷厂联系调换。

厂址: 贵阳市市北路 68 号附 1 号 电话: 6828993 邮编: 550001

内 容 简 介

本书以有机化合物的结构鉴定为目的，较系统地阐述了紫外吸收光谱、红外吸收光谱、核磁共振光谱和质谱的基本原理及其谱图分析方法。编排简明扼要，由浅入深，通俗易懂，没有繁琐的数学推导或复杂的理论探讨。每章均配有较多的练习并附有答案，供读者练习使用。书后附录列有光谱分析所需的数据，以资读者参考。

本书可供高等院校有机化学、分析化学、药物化学、应用化学、环境监测等专业用作教学参考书，也可供从事光谱分析工作的科技人员参考。

前 言

有机光谱分析是由紫外吸收光谱、红外吸收光谱、核磁共振光谱和质谱分析组成的用于鉴别有机化合物结构的定性分析方法。与经典的化学分析法相比较,光谱分析法具有微量、快速、灵敏、准确与信息丰富等特点,是当代化学工作者测定有机化合物结构的一种重要工具。根据发展的趋向,光谱分析法和色谱分析法已成为现代有机分析的两大支柱,是今后发展的主流。由于色谱分析法具有高效的分离能力,可把组成复杂的有机混合物分离成单一的纯组分,从而为光谱分析法提供纯样品,这就解决了在有机结构分析中需要纯样品的难题。在应用光谱进行结构分析时,由于实现了样品的微量化,测定速度快,谱图解析的结果准确,重复性好,从而使有机化合物的结构鉴定工作达到了新水平,这也是经典的化学分析法所不能比拟的。

鉴于光谱分析的重要性,目前不少高等院校的有关专业都已陆续将光谱分析列为必修课程或选修课程。但遗憾的是,国内有关这方面的教材至今仍比较少,与学科的发展不相适应。为满足这方面的需要,编者积数年讲授“有机结构分析”课的教学经验,并以所讲内容为基础加以整理、充实编写而成本书。书中注重介绍各种光谱与有机化合物结构的关系、各种光谱在有机化合物结构分析中的解析技术以及这些技术的综合应用,而不涉及仪器的描绘,只是在讲清楚光谱必需的情况下,简单地叙述一些仪器的基本原理。事实上,除非专门从事光谱工作,对一般的化学工作者来说,只要具备分析光谱的能力就行了,并不一定要求对仪器有详细的了解。这就是编者所依据的宗旨。

用光谱分析法鉴定有机化合物结构的历史虽然不长,至今不过 30 余年,但它的发展在 60 年代以后是极其迅速的。本书因篇幅所限,对 70 年代中期迅速发展的核磁共振碳谱,近年发展起来的激光拉曼光谱、核磁共振二维谱、串联质谱等新方法和新技术未加以介绍,读者若有兴趣,可参阅有关专著。

最后，对需要掌握光谱分析的化学工作者来讲，必须首先掌握各种光谱测定的基本原理、谱图解析的方法和特点，进而掌握应用多种谱图综合解析未知物的能力。总之，要想成为精通谱图解析和准确判断分子结构的能手，必须经过相当多的亲身实践，培养对谱图外形的敏感，牢记关键数据，不断总结解析的经验，逐步积累解析谱图技术的关键，最终才能达到所期望的目标。

本书在编写过程中，查阅了大量有关光谱分析的专著和文献。现将其主要参考书目列于书后，同时向各位编著者表示深切的谢意。

限于编者水平，书中错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1997年8月于贵州师范大学化学系

目 录

第一章 分子光谱概述.....	(1)
第一节 光的特性.....	(1)
一、 光的波动性.....	(2)
二、 光的微粒性.....	(2)
第二节 吸收光谱的来源.....	(3)
一、 转动光谱.....	(3)
二、 振动光谱.....	(4)
三、 电子光谱.....	(4)
第三节 吸收光谱的强度.....	(5)
练习.....	(6)
第二章 紫外吸收光谱.....	(8)
第一节 紫外吸收光谱的基本知识.....	(8)
一、 紫外吸收光谱的表示方法.....	(8)
二、 紫外吸收光谱中常用的几种术语.....	(9)
第二节 紫外吸收光谱的基本原理	(10)
一、 电子跃迁产生紫外吸收光谱	(10)
二、 电子跃迁类型	(10)
三、 共轭体系与吸收波长的关系	(11)
四、 加合原则.....	(12)
第三节 影响紫外吸收光谱的因素	(12)
一、 溶剂对吸收波长的影响	(12)
二、 分子离子化对吸收波长的影响	(14)
第四节 各类有机化合物的紫外吸收光谱	(15)

一、 非共轭体系的简单分子	(15)
二、 含有共轭体系的分子	(17)
三、 芳香族化合物分子	(23)
第五节 紫外吸收光谱在有机结构分析中的应用	(27)
一、 未知物的鉴定	(27)
二、 化合物纯度的鉴定	(28)
三、 确定共轭体系, 区分同分异构体	(28)
四、 确定构型, 区分顺反及互变异构体	(29)
五、 确定化合物的骨架	(30)
练习	(34)

第三章 红外吸收光谱 (38)

第一节 红外吸收光谱的基本知识	(38)
一、 红外吸收光谱的表示方法	(38)
二、 红外吸收光谱中常用的几种术语	(39)
第二节 红外吸收光谱的基本原理	(41)
一、 双原子分子的振动光谱	(41)
二、 多原子分子的振动光谱	(45)
三、 振动光谱产生的条件	(47)
第三节 影响红外吸收峰位和峰强变化的因素	(49)
一、 影响峰位变化的因素	(49)
二、 影响峰强变化的因素	(56)
第四节 各类有机化合物的红外特征吸收频率	(57)
一、 烷烃和环烷烃的特征吸收频率	(58)
二、 烯烃的特征吸收频率	(59)
三、 炔烃的特征吸收频率	(60)
四、 芳烃的特征吸收频率	(61)
五、 醇和酚类的特征吸收频率	(64)
六、 醚类的特征吸收频率	(66)
七、 羰基化合物的特征吸收频率	(67)
八、 胺类的特征吸收频率	(74)
九、 硝基化合物的特征吸收频率	(75)
十、 腈类的特征吸收频率	(76)
十一、 其他各类化合物的特征吸收频率	(76)
第五节 红外光谱图的解析	(77)
一、 解析红外光谱图的先行知识	(78)
二、 解析红外光谱图的程序	(80)
三、 解析红外光谱图的要点	(82)
四、 解析红外光谱图的实例	(83)
第六节 红外吸收光谱的应用	(86)

一、	确定未知物的结构	(86)
二、	监视化学反应	(88)
三、	物质纯度的检查	(88)
练习		(89)
第四章	核磁共振光谱	(100)
第一节	核磁共振基本原理.....	(101)
一、	原子核的自旋和磁矩.....	(101)
二、	核的进动和核磁能级.....	(103)
三、	核磁共振条件.....	(104)
四、	弛豫过程.....	(105)
第二节	化学位移.....	(107)
一、	化学位移的产生及表示方法.....	(107)
二、	影响化学位移的因素.....	(110)
三、	各类质子的化学位移.....	(119)
第三节	自旋偶合与自旋裂分.....	(124)
一、	自旋偶合及自旋裂分的起因.....	(125)
二、	$n+1$ 规律	(127)
三、	偶合常数.....	(128)
四、	核的等价性质.....	(132)
五、	自旋体系分类的定义和表示方法.....	(134)
六、	一级谱.....	(135)
七、	二级谱.....	(140)
第四节	常见的几种复杂谱图.....	(145)
一、	取代苯环.....	(145)
二、	取代杂芳环.....	(147)
三、	单取代乙烯.....	(147)
四、	正构长链烷基.....	(148)
第五节	简化复杂谱图的几种方法.....	(149)
一、	使用高磁场的核磁共振仪.....	(150)
二、	自旋去偶.....	(151)
三、	核 Overhauser 效应	(152)
四、	化学位移试剂.....	(153)
五、	溶剂效应.....	(155)
第六节	核磁共振谱的解析.....	(156)
一、	解析核磁共振谱的先行知识.....	(156)
二、	解析核磁共振谱的程序.....	(160)
三、	解析核磁共振谱的实例.....	(161)
练习		(168)

第五章 质谱	(180)
第一节 质谱的基本知识	(181)
一、 质谱计的一般原理.....	(181)
二、 质谱计的分辨率及质量范围.....	(183)
三、 质谱的表示方法.....	(184)
第二节 质谱中离子的主要类型	(185)
一、 分子离子.....	(185)
二、 同位素离子.....	(189)
三、 碎片离子.....	(192)
四、 亚稳离子.....	(192)
五、 多电荷离子.....	(193)
六、 离子与分子相互作用产生的离子.....	(194)
第三节 分子式的确定	(194)
一、 高分辨质谱法.....	(194)
二、 同位素丰度法.....	(195)
第四节 离子的裂解过程	(197)
一、 裂解的基本概念.....	(197)
二、 裂解类型.....	(198)
三、 裂解的一般规律.....	(204)
第五节 常见各类有机化合物的质谱裂解特性	(207)
一、 烷烃类.....	(207)
二、 烯烃类.....	(209)
三、 炔烃类.....	(210)
四、 芳烃类.....	(210)
五、 醇类.....	(211)
六、 酚和芳香醇类.....	(213)
七、 醚类.....	(215)
八、 醛类.....	(217)
九、 酮类.....	(218)
十、 羧酸类.....	(220)
十一、 羧酸酯类.....	(221)
十二、 胺类.....	(223)
十三、 酰胺类.....	(225)
十四、 腈类.....	(226)
十五、 硝基化合物.....	(227)
十六、 卤化物.....	(228)
十七、 含硫化合物.....	(229)
第六节 质谱图的解析	(231)
一、 解析质谱图的先行知识.....	(231)
二、 解析质谱图的程序.....	(232)

三、 解析质谱图的实例.....	(233)
练习.....	(244)
第六章 四种光谱的综合解析.....	(250)
第一节 四谱综合解析的一般程序.....	(251)
一、 分子量和分子式的确定.....	(251)
二、 根据分子式计算不饱和度.....	(251)
三、 不饱和类型的判断.....	(251)
四、 结构式的推定.....	(252)
五、 结构式的最终确定.....	(252)
第二节 四谱综合解析的实例.....	(253)
练习.....	(265)
各章练习参考答案.....	(278)
主要参考文献.....	(289)
附录一 常见各类有机化合物的红外特征吸收频率.....	(290)
附录二 常见各类有机化合物的质子化学位移.....	(303)
附录三 各种类型质子的偶合常数.....	(313)
附录四 分子离子峰的相对丰度与化合物类别及分子量的关系.....	(316)
附录五 有机化合物中常见元素的同位素质量和丰度.....	(318)
附录六 普通碎片离子系列 (主要为偶电子离子)	(319)
附录七 从分子离子丢失的中性碎片.....	(320)
附录八 有机化合物质谱中一些常见碎片离子.....	(322)
附录九 贝农 (Beynon) 表	(325)
附录十 化合物的谱图索引.....	(406)

第一章 分子光谱概述

吸收光谱是研究电磁波与物质分子相互作用的科学。当电磁波照射物质时，物质的分子或原子将吸收一定波长的电磁波而产生相应的吸收光谱。吸收光谱的特征与分子或原子的内部结构有着密切的关系，因此，深入研究物质对电磁波的吸收特征，就可以获得物质内部结构的重要信息。

第一节 光的特性

光是一种电磁波，而 x 射线、γ 射线和无线电波也是电磁波，所有这些电磁波在本质上完全相同，只是波长或频率有所差别。如果把自然界存在的各种不同波长的电磁波按波长顺序排列成一谱，即称为电磁波谱（表 1-1）。

表 1-1 电磁波谱

电 磁 波	γ 射 线	x 射 线	真 空 紫 外	近 紫 外	可 见 光
波 长*	0.01~0.1 Å	0.1~100 Å	10~200nm	200~400nm	400~800nm
跃迁类型	核跃迁	内层电子	外层电子		外层电子
光谱类型	莫斯鲍尔谱	x 射线谱	紫外吸收光谱		可见吸收光谱
电 磁 波	近 红 外	中 红 外	远 红 外	微 波	射 频
波 长	0.8~2.5μm	2.5~50μm	50~1000μm	0.1~10cm	10cm~
跃迁类型	分子振动		分子转动	分子转动 电子自旋	核 自 旋
光谱类型	红外吸收光谱 激光拉曼光谱		远红外吸收 光 谱	微波波谱 顺磁共振	核磁共振 光 谱

* 波长范围的划分并不是很严格的，在不同的文献资料中会有所出入。

无论何种电磁波都具有波、粒二像性，即既有波动性，又有微粒性。在传播运动过程中波动性突出（例如光的偏振、干涉、衍射等现象就是波动性的体现），而与物质相互作用时微粒性就突出（例如光电效应、光的吸收和散射等现象就是微粒性的体现）。对于电磁波的波动性和微粒性的特性，下面将分别进行讨论。

一、光的波动性

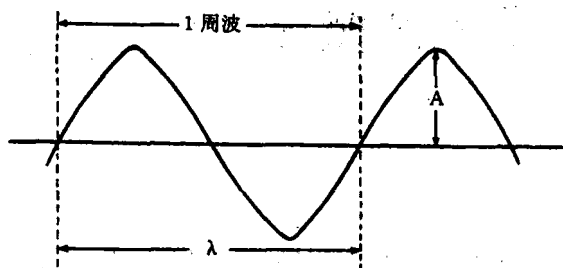


图 1-1 光的波性特征

$\bar{\nu}$ ——波数：每一厘米距离中通过波的个数。波数是波长的倒数： $\bar{\nu}=1/\lambda$ ；

λ ——波长：光波移动一周的距离。单位：长度单位/周。

λ 的单位因波谱区域的不同，而在习惯上采用不同的单位。例如在 x 射线区常用埃 ($\text{\AA}$) 为单位。紫外-可见光区常用纳米 (nm) 为单位。红外区常用微米 (μm) 为单位。微波区常用厘米 (cm) 为单位。无线电波区常用米 (m) 为单位。它们的相互关系为：

$$1 \text{\AA} = 10^{-8} \text{cm}$$

$$1 \text{nm} = 10 \text{\AA}$$

$$1 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{cm}$$

$$1 \text{nm} = 10^{-7} \text{cm}$$

任何一种波长的光，其 λ 和 ν 之间的关系为：

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1-1)$$

式中： c 为光速。 $c=3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ 或 $3.0 \times 10^{10} \text{cm/s}$ 。

二、光的微粒性

在讨论光或电磁辐射与原子及分子的相互作用时，又可把光看成是一种从光源射出的能量量子流或者是以高速 ($3.0 \times 10^{10} \text{cm/s}$) 移动的粒子。这种能量量子也叫光量子或光子。光子具有能量，各种不同波长光子的能量用 E 表示，光子的能量与波长或频率有关，这一关系由著名的普朗克公式 (Planck's equation) 给出：

$$E = h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} = h \cdot c \cdot \bar{\nu} \quad (1-2)$$

式中： h 为普朗克常数。 $h=6.626 \times 10^{-34} \text{焦耳} \cdot \text{秒} (\text{J} \cdot \text{s})$ 或 $6.626 \times 10^{-27} \text{尔格} \cdot \text{秒} (\text{erg} \cdot \text{s})$ 。

从 (1-2) 式可以看出，电磁波的频率愈高，波长愈短，则光子的能量就愈高，所以电磁波的频率、波长或波数也是其能量高低的量度标尺。

例：波长为 400nm 的紫外线，其能量是多少？

$$\text{解：} E = h \cdot \frac{c}{\lambda} = 6.626 \times 10^{-34} \times \frac{3.0 \times 10^{10}}{400 \times 10^{-7}} = 4.97 \times 10^{-19} (\text{J})$$

当电磁波与物质相互作用时，所被吸收能量的大小及强度都与物质分子的结构有关，如果用发射连续波长的电磁波照射物质，并测量该物质对各种波长的吸收程度，就能得到反映分子结构特征的吸收光谱图。这就是利用光谱法测定分子结构的依据。

第二节 吸收光谱的来源

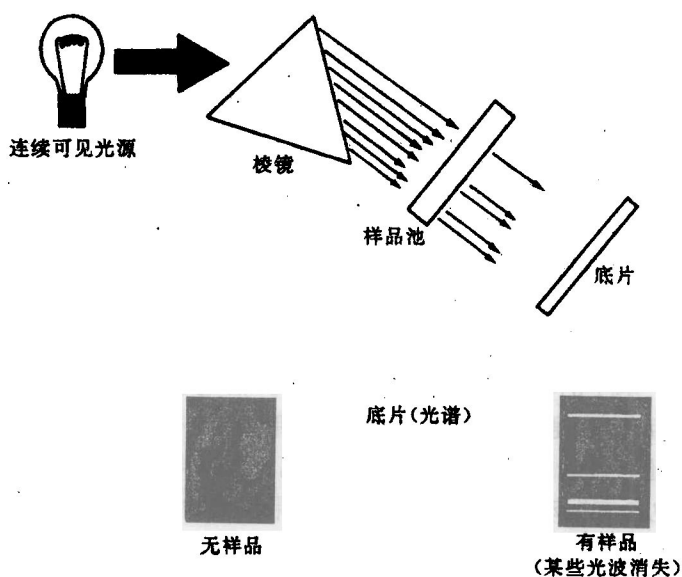


图 1-2 吸收光度法示意图

(由一定区域内所有波长的光线组成的光束) 通过棱镜 (图 1-2)，光线即被分解成各个波长组分。这些分解的波长组分在通过含有原子或分子的样品池时，透过的光线就不再是连续的了。其中有些光波可与池内的原子或分子相互作用并被吸收。被吸收光波的波长可以通过把透过样品池的光线照在照像底片或其他鉴定设备上而予以鉴定。记录下来的图像就叫做吸收光谱，光谱中的“线”即是被吸收的光线波长。

分子的吸收光谱基本上分为三类——转动、振动和电子光谱。

一、转动光谱

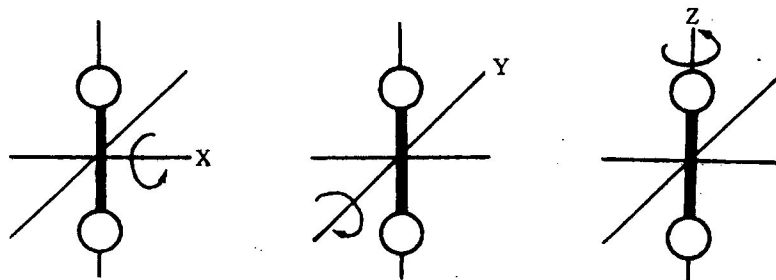


图 1-3 分子过重心绕轴旋转示意图

所有的原子或分子均能吸收电磁波，且对吸收的波长有选择性。这种现象的产生主要是因为分子的能量具有量子化的特征。在正常状态下原子或分子处于一定能级即基态，经光激发后，随激发光子能量的大小，其能级提高一级或数级，即分子由基态跃迁到激发态。也就是说，分子不能任意吸收各种能量，只能吸收相当于两个或几个能级之差的能量。换言之，即原子或分子只吸收具有一定能量或其倍数的光子。当以某一连续光源

纯粹的转动光谱只涉及分子转动能级的改变，不产生振动和电子状态的改变。分子的转动是分子的重心绕轴旋转时所具有的动能，如图

1-3 所示。转动能级间距离很小,吸收光子的波长长,频率低。通常两个转动能级的间距约在 0.05 电子伏特以下 ($1\text{eV}=1.602\times 10^{-19}\text{J}$)。单纯的转动光谱出现在远红外区和微波区。

二、振动光谱



图 1-4 弹簧两侧各连一个小球的谐振子

振动光谱的产生起源于分子振动能级的跃迁,振动能是分子由于振动而具有的位能和动能。为了便于理解,可以把分子中由化学键相联的两个原子模拟地看成为被

弹簧连接的两个小球(图 1-4)。使弹簧发生伸展振动时,小球即离开原位。这里,弹簧强度(或化学键的键强)越大,则伸展弹簧需要的能量(或使分子发生振动能级跃迁需要的能量)也将越大。

由于振动能级的间距大于转动能级,因此在每一振动能级改变时,还伴有转动能级改变,谱线密集,显示出转动能级改变的细微结构,吸收峰加宽,称为“振动-转动”吸收带,或“振转”吸收。通常两个振动能级的间距约为 0.05~1 电子伏特,其吸收出现在波长较短,频率较高的红外区域,故振动光谱又称红外光谱。

三、电子光谱

电子光谱是因分子吸收光子后使电子跃迁,产生电子能级的改变而形成的。电子能是分子及原子中的电子具有的位能和动能。电子的动能是电子运动的结果,而电子的位能则起因于电子与原子核及其他电子之间的相互作用。通常两个电子能级的间距约为 1~20 电子伏特,故当电子能级改变时,不可避免地伴随有振动能级和转动能级的变化。所以电子光谱中既包括因价电子跃迁而产生的吸收谱线,也含有振动谱线和转动谱线。如果仪器的分辨能力不够,电子跃迁谱线和相应的振动和转动谱线将密集在一起,在光谱吸收曲线(以吸收强度对波长作图所得到的曲线)上就会出现较宽的吸收峰,而不是尖锐的峰。当样品在气态或非极性溶剂的稀溶液中有时可以观察到吸收峰上有明显的锯齿状振动吸收的精细结构。图 1-5 (a) 是苯的 B 吸收带, (b) 是苯蒸气的相应吸收带,显示了清晰的振动结构。

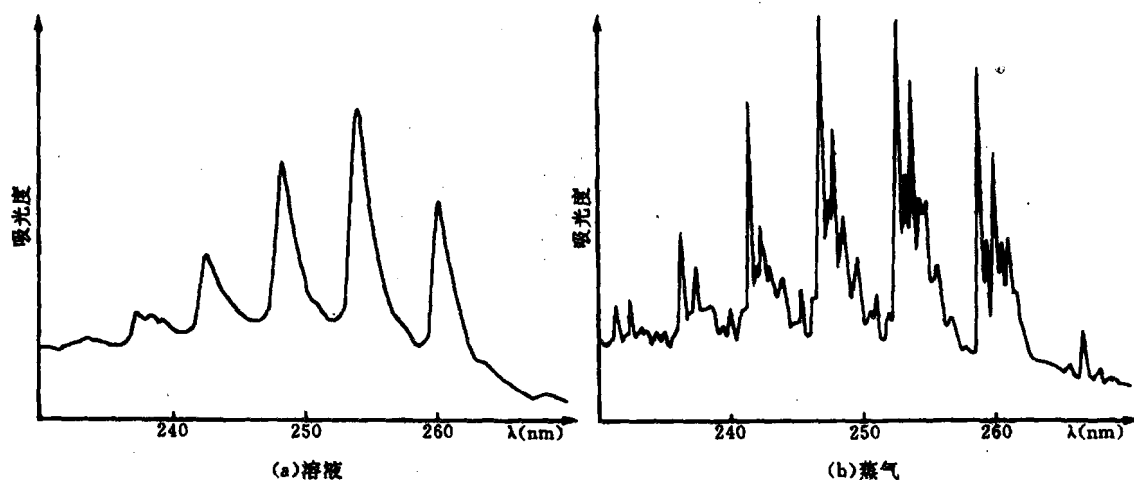


图 1-5 苯的紫外吸收光谱

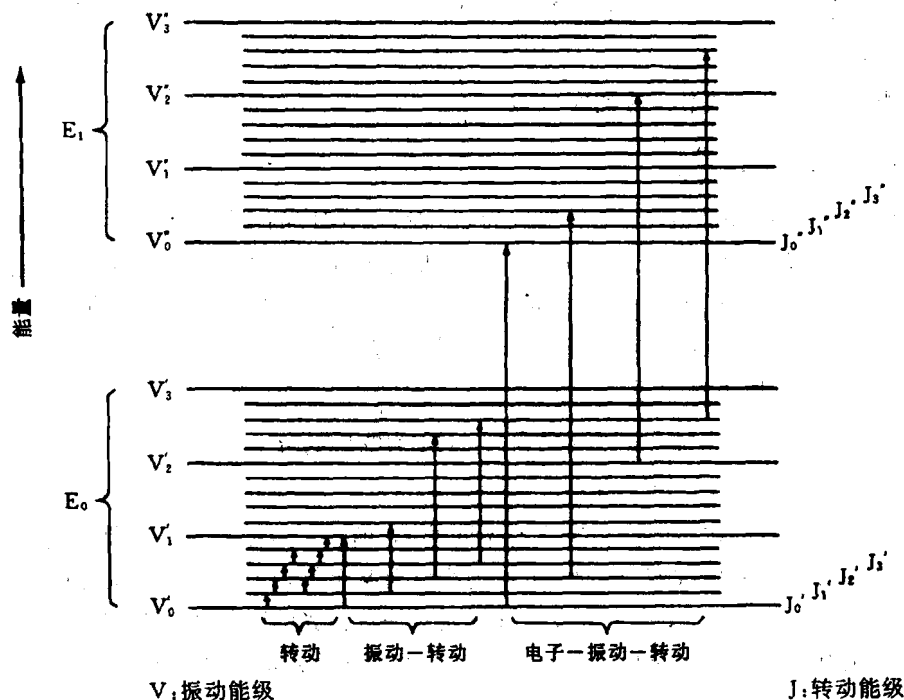


图 1-6 分子能级示意图

由于电子能级跃迁产生的吸收出现在紫外区及可见光区,故电子光谱又称为紫外-可见光谱。

上述三种光谱能级的改变,可以图 1-6 来说明。图中的 E_0 和 E_1 是两个电子能级;在同一电子能级中还因振动能量不同而分为若干 $V=0, 1, 2, 3, \dots$ 等振动能级;在同一电子能级和同一振动能级中,还因转动能量不同而分为若干 $J=0, 1, 2, 3, \dots$ 等转动能级。

第三节 吸收光谱的强度

关于吸收光谱的吸收强度在实验上可用比耳-朗伯特 (Beer-Lambert) 定律来描述。这条定律是吸收光的基本定律,也是测量吸收光的理论基础。

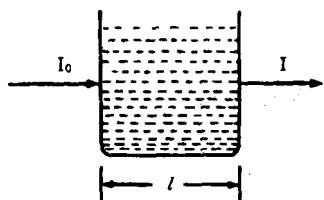


图 1-7 光线透过吸收池示意图

当一束单色光透过溶液时,光被吸收的程度(即吸光度)与溶液的光程长度及溶液浓度有关。如一个吸收池的厚度为 l ,内装浓度为 c 的溶液。当强度为 I_0 的入射光透过时,一部分光线被吸收,透射光的强度变为 I ,则在一定浓度范围内有以下关系存在:

$$A = \log \frac{I_0}{I} = a \cdot c \cdot l = \log \frac{1}{T} \quad (1-3)$$

(1-3) 式就是比耳-朗伯特定律的数学表述式。式中：

A——吸光度；

T——透射比（或透射率、透光度）。 $T = \frac{I}{I_0}$ ；

a——吸光系数。 $a = \frac{A}{c \cdot l}$ 。

如果 c 的单位采用 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ， l 的单位为 cm 时，则相应的吸光系数称为摩尔吸光系数，用符号 ϵ 表示（ ϵ 的单位为 $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ，但一般不写单位）；如果 c 的单位用重量-体积百分浓度（ $\text{g}/100\text{ml}$ ）， l 的单位为 cm ，则相应的吸光系数用符号 $E_{1\%}^{1\text{cm}}$ 表示。在有机及药物化学中常采用这一方法，其优点在于对分子量未定的物质适用。

$E_{1\%}^{1\text{cm}}$ 和 ϵ 的关系可用下式表示：

$$E_{1\%}^{1\text{cm}} = \frac{10 \times \epsilon}{M} \quad (M \text{ 为物质的分子量}) \quad (1-4)$$

$$\text{或} \quad \epsilon = E_{1\%}^{1\text{cm}} \times 0.1M \quad (1-5)$$

对一个化合物而言，在不同波长下具有不同的 ϵ ，但在一定波长下，它是一个特征常数，不随溶液浓度或吸收池厚度改变。因此 ϵ 可作为物质对某个特定波长光吸收能力的量度。对不同物质而言，在同一波长下， ϵ 愈大，表示该物质对该波长光的吸收能力愈强。 ϵ 是定性鉴定化合物，特别是有机化合物的重要参数之一。它的值在紫外光谱和红外光谱中用于表示峰强的含义如下：

在紫外光谱中：

$\epsilon > 10^4$ 时，为强吸收；

$\epsilon: 10^3 \sim 10^4$ ，为较强吸收；

$\epsilon: 10^2 \sim 10^3$ ，为较弱吸收；

$\epsilon < 10^2$ 时，为弱吸收。

在红外光谱中：

$\epsilon: 200$ 以上，很强的峰，用 vs 表示 (very strong)；

$\epsilon: 200 \sim 75$ ，强峰，用 s 表示 (strong)；

$\epsilon: 75 \sim 25$ ，中强峰，用 m 表示 (medium)；

$\epsilon: 25 \sim 5$ ，弱峰，用 w 表示 (weak)；

$\epsilon: 5 \sim 0$ ，很弱的峰，用 vw 表示 (very weak)。

应当指出，红外光谱用于定性所指的峰强是每一峰的相对强度。

练 习

1. 指出下列波数所处的电磁辐射区域： 983cm^{-1} ， $3.0 \times 10^4\text{cm}^{-1}$ ， 5.0cm^{-1} ， $8.7 \times 10^4\text{cm}^{-1}$ 。
2. 波长为 500nm 的绿色光线，其频率是多少？
3. 波数为 $2.5 \times 10^5\text{cm}^{-1}$ 的光子的能量是多少？
4. 试按能量递增顺序排列下列光线区域：微波，x 射线，可见光区，紫外区，红外区。
5. 一个原子可吸收相当于 $5.0 \times 10^{-19}\text{J}$ 的能量，则在该原子光谱图上，吸收的谱“线”波数是多少？

6. 苯胺水溶液在波长 280nm 处的 ϵ 为 1430。现欲制备一苯胺水溶液，使其在波长 280nm 处的透射率为 30%（用 1 厘米厚的吸收池）。试问制备 100 毫升该溶液需取多少毫克苯胺？

7. 将 10 毫克化合物溶于 100 毫升溶剂中，在一指定的波长下测得透射比为 35%，如吸收池厚为 1 厘米。

(1) 求该溶液的吸光度；

(2) 如果池厚为 2 厘米，透射比是多少？吸光度又是多少？

(3) 求该溶液的百分浓度吸光系数 $E_{1\text{cm}}^{1\%}$ 。