



普通高等教育“十二五”创新型规划教材

仪器分析

YIQI FENXI

主 编 李继萍

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

013041072

0657-43

24

普通高等教育“十二五”创新型规划教材

仪器分析

主编 李继萍
副主编 莫国莉
参编 许哲峰 吴海霞
主审 尤美云 石艳菊
李赞忠



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



北航

C1648741

0657-43
24

570140810

普通高等教育“十二五”规划教材

内 容 简 介

本教材结合“仪器分析”课程的教学目标、指导大纲和几年来实施项目化教学方法改革的工作经验,安排了绪论、项目化教学和其他分析方法等教学内容。其中项目化教学内容有光学分析法、色谱分析法和电化学分析法,包括背景知识、项目化教学参考方案和习题。选编的入门项目、基础项目和自主项目在仪器分析技能操作和理论知识的掌握上体现了层层递进、相互衔接、相互补充、由易到难、由简到繁的特点,有利于全面提高学生自主探索的学习能力。

本书可作为普通高等院校化学、医学、生物、环境等相关专业的教材,也可供从事化工、环境等工作的人员参考使用。

外 器 代 理

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

仪器分析/李继萍主编. —北京:北京理工大学出版社, 2013. 4
ISBN 978-7-5640-7255-1

I. ①仪… II. ①李… III. ①仪器分析—高等学校—教材 IV. ①O657

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 319936 号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本/710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张/17.75

字 数/336 千字

版 次/2013 年 4 月第 1 版 2013 年 4 月第 1 次印刷

定 价/49.00 元

责任编辑/陈莉华

责任校对/周瑞红

责任印制/王美丽

图书出现印装质量问题,本社负责调换



前言

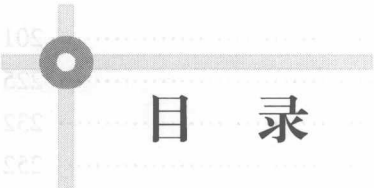
“仪器分析”是高等院校化学、医学、生物、环境等相关专业的专业基础课程，是研究物质的组成、状态和结构的分析测试及表征方法的学科。它在化工产品、食品、药物、环境等学科中得到广泛应用，实践性极强。

本教材的几位编者深入企业进行岗位调研，结合“仪器分析”课程的教学目标、指导大纲和几年来实施项目化教学方法改革的工作经验，安排了绪论、项目化教学和其他分析法等教学内容。其中项目化教学内容有光学分析法、色谱分析法和电化学分析法，包括模块背景知识、项目化教学参考方案和习题。选编的入门项目、基础项目和自主项目在仪器分析技能操作和理论知识的掌握上体现了层层递进、相互衔接、相互补充、由易到难、由简到繁的特点，服务于全面提高学生自主探索的学习能力。使用者可结合教学实际情况设计工作场景，转换教学者与学习者的角色，注重学生自主学习能力、团队合作意识以及表达能力的培养。附录中提供的学生成绩评定的方案仅供参考。其他分析法的编写使本教材涉及的仪器分析方法内容比较全面，可供使用者根据需要进行相应的选择，旨在加强学生实践操作能力的同时，强化学生对理论知识的掌握，提升学生职业生涯可持续发展的潜能。

本教材由李继萍担任主编，莫国莉担任副主编，许哲峰、吴海霞参与编写。李继萍编写了项目化教学中的模块二和其他分析方法部分的红外吸收光谱法、质谱分析法。项目化教学中的模块一、附录由许哲峰编写；项目化教学中的模块三、其他分析方法部分的库仑分析法由吴海霞编写；项目化教学中的模块四、五、六由莫国莉编写。李赞忠教授为本教材编写了绪论，帮助搭建了教材的框架结构。全书由尤美云、石艳菊和李赞忠审阅，这三位主审在项目选定方面和教学组织过程中提供了许多建设性的宝贵意见和无私的帮助，编者在此深表谢意。本教材所引用的资料和图表的原著均已一一列入参考文献，在此向原著作者致谢。本教材的编写还得到了赵幼琨、李纯毅、殷刚等专家的帮助与支持，一并表示感谢。

限于编者的肤浅教学经验，书中难免存在疏漏和错误，恳请专家和读者批评指正，不胜感谢。

编者



目 录

绪论	1
项目化教学	8
模块一 紫外-可见分光光度法	8
一、背景知识	9
二、项目化教学参考方案	44
习题	49
模块二 原子吸收光谱法	55
一、背景知识	55
二、项目化教学参考方案	86
习题	88
模块三 电位分析法	92
一、背景知识	92
二、项目化教学参考方案	120
模块四 气相色谱法	129
一、背景知识	129
二、项目化教学参考方案	166
习题	172
模块五 高效液相色谱法	175
一、背景知识	175
二、项目化教学参考方案	192
习题	195
模块六 综合项目	199
一、综合项目一：景观水的部分水质指标的测定	199
二、综合项目二：乳制品中部分质量指标的测定	199

其他分析方法	201
一、红外吸收光谱法	201
二、库仑分析法	225
三、质谱分析法	232
习题	252
附录	256
附录一 国际相对原子质量表	256
附录二 标准电极电位表	258
附录三 常用缓冲溶液的配制方法	260
附录四 项目化教学成绩评定参考评分表	266
附表1 项目组任务得分表	266
附表2 单项任务评价表	267
附表3 组员工作表现自评表	269
附表4 工作组成员互评表	270
附表5 组长对组内成员评价表	271
附表6 测试中心主任对工作组组长评价表	272
附表7 项目工作汇报答辩评价表	273
附表8 学生学期总成绩得分汇总表	274
参考文献	275

绪 论

分析化学作为化学的重要分支，是一门有悠久发展历史的基础学科。它的中心研究内容是通过化学量测对物质的化学组成、结构及相关性质进行表征。现代分析化学还发展了基于光、电、磁、声以及生物等各类化学、物理学、生物学等量测方法，而对物质的化学表征则由单纯的定性、定量分析发展到对微观结构、状态等更全面深入的研究。

分析化学的发展经历了三次巨大变革，第一次是随着分析化学基础理论，特别是物理化学的基本概念（如溶液理论）的发展，使分析化学从一种技术演变成为一门科学；第二次变革是由于物理学和电子学的发展，改变了经典的以化学分析为主的局面，使仪器分析获得蓬勃发展；目前，分析化学正处在第三次变革时期，生命科学、环境科学、新材料科学发展的要求，生物学、信息科学，计算机技术的引入，使分析化学进入了一个崭新的境界。

仪器分析是以测量物质的物理性质或物理化学性质为基础来确定物质的化学组成、含量以及化学结构的一类分析方法，由于这类分析方法需要比较复杂且特殊的仪器设备，故称之为仪器分析。仪器分析是从 20 世纪初发展起来的，相对于化学分析法而言，它又有近代分析法之称。近年来，随着电子技术、计算机技术和激光技术等迅猛发展，仪器分析发生了深刻的变化，古老的仪器分析法出现了新面貌，新的仪器分析方法不断涌现，即使是经典的化学分析法也在不断地仪器化。在化学学科本身的发展上以及和化学有关的各科学领域中，仪器分析正起着越来越重要的作用。因此，了解仪器分析方法的基本原理，掌握仪器分析的实验技术已成为一切化学化工工作者必须掌握的基础知识和基本技能。

1. 仪器分析的内容及分类

仪器分析所包含的方法很多，目前已有数十种，按照测量过程中所观测的性质进行分类，可分为光学分析法、电化学分析法、色谱分析法、质谱分析法、热分析法、放射化学分析法和电镜分析法等，其中以光学分析法、电化学分析法及色谱分析法的应用最为广泛。

常用仪器分析方法见表 0-1。

表 0-1 常用仪器分析方法

方法类型	测量参数或有关性质	相应的分析方法
光学分析法	辐射的发射 辐射的吸收 辐射的散射 辐射的衍射 辐射的转动	原子发射光谱法, 荧光光谱法 原子吸收光谱法, 分光光度法 (紫外、可见、红外), 核磁共振波谱法 拉曼光谱法, 散射浊度法 X 射线衍射法, 电子衍射法 偏振法, 旋光色散法
电化学分析法	电导 电位 电流 电流-电压 电量	电导分析法 电位分析法, 计时电位法 电流滴定法 伏安法, 极谱分析法 库仑分析法
色谱法	两相间分配	气相色谱法, 液相色谱法

2. 仪器分析的特点及局限性

1) 仪器分析的特点

(1) 分析速度快, 适于批量试样的分析。许多仪器连续自动进样装置, 采用数字显示和电子计算机技术, 可在短时间内分析几十个样品, 适于批量分析。有的仪器可同时测定多种组分。

(2) 灵敏度高, 适于微量成分的测定。灵敏度由 $1 \times 10^{-6}\%$ 发展到 $1 \times 10^{-12}\%$; 可进行微量分析和痕量分析。

(3) 容易实现在线分析和遥控监测。在线分析以其独特的技术和显著的经济效益引起人们的关注与重视, 现已研制出适用于不同生产过程的各种不同类型的在线分析仪器。例如, 中子水分计就是一种较先进的在线测水仪器, 可在不破坏物料结构和不影响物料正常运行状态下准确测量, 并用于钢铁、水泥和造纸等工业流程的在线分析。又如, 高聚物的高熔点和高黏度, 使聚合物生产过程的本身及聚合物改性直至形成产品的一系列过程都要在高温、高压条件下进行, 这使对聚合物的采样分析十分困难。利用光纤探头式分光光度计可监测聚合过程中聚醚的羟基浓度, 反射式探头直接插入反应罐内, 仪器离探测点达 50 m。

(4) 用途广泛, 能适应各种分析要求。除能进行定性分析及定量分析外, 还能进行结构分析、物相分析、微区分析、价态分析和剥层分析等。

(5) 样品用量少, 可进行不破坏样品的无损分析, 并适于复杂组成样品的分析。

2) 仪器分析的局限性

(1) 仪器设备复杂, 价格及维护费用比较昂贵, 对维护及环境要求较高。

(2) 仪器分析是一种相对分析方法, 一般需用已知组成的标准物质来对照,

而标准物质的获得常常是限制仪器分析广泛应用的问题之一。

(3) 相对误差较大, 通常在百分之几至百分之几十, 不适用于常量和高含量组分的分析。因此, 仪器分析法和化学分析法是相辅相成的, 在使用时应根据具体情况, 取长补短, 互相配合, 充分发挥各种方法的特长, 才能更好地解决分析化学中遇到的各种各样实际问题。

3. 仪器分析技术的发展及趋势

1) 仪器分析技术的发展过程

化学科学自产生以来, 经历了三个发展阶段, 实现了三次变革。

第一阶段: 16 世纪, 天平的出现, 使分析化学具有了科学的内涵。20 世纪初, 依据溶液中四大反应平衡理论, 形成分析化学的理论基础, 分析化学由一门操作技术变成一门科学, 实现了分析化学的第一次变革; 20 世纪 40 年代前, 化学分析占主导地位, 仪器分析种类少、精度低。

第二阶段: 20 世纪 40 年代后, 仪器分析的大发展时期。仪器分析使分析速度加快, 促进化学工业发展; 化学分析与仪器分析并重, 仪器分析自动化程度低; 这一时期一系列重大科学发现, 为仪器分析的建立和发展奠定基础, 仪器分析的发展引发了分析化学的第二次变革。与分析化学有关的诺贝尔奖见表 0-2。

表 0-2 与分析化学有关的诺贝尔奖

编号	年份	获奖者	获奖项目
1	1901 年	Rontgen, Wilhelm Conrad	首次发现了 X 射线的存在
2	1901 年	Van't Hoff, Jacobus Henricus	发现了化学动力学的法则及溶液渗透压
3	1902 年	Arrhenius, Svante August	对电解理论的贡献
4	1906 年	Thomson, Sir Josep John	对气体电导率的理论研究及实验工作
5	1907 年	Michelson, Albert Abraham	首先制造了光学精密仪器及对天体所做的光谱研究
6	1914 年	Von Laue, Max	发现结晶体 X 射线的衍射
7	1915 年	Bragg, Sir William Henry 及 Bragg, William Lawrence	共同采用 X 射线技术对晶体结构的分析
8	1917 年	Barkla, Charles Glover	发现了各种元素 X 射线的不同
9	1922 年	Aston, Francis William	发明了质谱技术可以用来测定同位素
10	1923 年	Pregl, Fritz	发明了有机物质的微量分析法
11	1924 年	Einthoven, Willen	发现了心电图机制
12	1924 年	Siegbahn, Karl Manne Georg	在 X 射线仪器方面的发现及研究
13	1926 年	Svedberg, The(Theodor)	采用超离心机研究分散体系

续表

编号	年份	获奖者	获奖项目
14	1930 年	Raman, Sir Chandrasekhara Venkata	发现了拉曼效应
15	1939 年	Lawrence, Ernest Orlando	发明并发展了回旋加速器
16	1944 年	Rabi, Isidor Isaac	用共振方法记录了原子核的磁性
17	1948 年	Tiselius, Arne Wilhelm Kaurin	采用电泳及吸附分析法发现了血浆蛋白质的性质
18	1952 年	Bloch, Felix 及 Purcell, Edward Mills	发展了核磁共振的精细测量方法
19	1952 年	Martin, Archer John Porter 及 Synge, Richard Laurence Millington	发明了分配色谱法
20	1953 年	Zernike, Frits (Frederik)	发明了相差显微镜
21	1959 年	Heyrovsky, Jaroslav	首先发展了极谱法
22	1979 年	Cormack, Allan M. 及 Hounsfield, Sir Godfrey N.	发明计算机控制扫描层析诊断法 (CT)
23	1981 年	Siegbahn, Kai M.	发展了高分辨电子光谱法
24	1981 年	Bloembergen, Nicolaas 及 Schawlow, Arthur L.	发展了激光光谱学
25	1982 年	Klug, Sir Aaron	对晶体电子显微镜的发展
26	1986 年	E. Ruska	研制成功第一台电子显微镜
27	1986 年	Binnig, Gerd 及 Rohrer, Heinrich	扫描隧道显微镜的创始者
28	1991 年	Ernst, Richard R.	对高分辨核磁共振方法的发展
29	1993 年	F · Pregl	开创有机物质的微量分析法

第三阶段：20 世纪 80 年代初，实现了以计算机应用为标志的分析化学第三次变革。

① 计算机控制的分析数据采集与处理：实现分析过程的连续、快速、实时、智能；促进化学计量学的建立。

② 化学计量学：利用数学、统计学的方法设计选择最佳分析条件，获得最大程度的化学信息。化学信息学：化学信息处理、查询、挖掘、优化等。

③ 以计算机为基础的新仪器的出现：傅里叶变换红外光谱仪；色谱 - 质谱联用仪。

2) 现代仪器分析的发展趋势

现代仪器分析技术正向智能化、数字化方向发展。发展趋势主要表现是：基于微电子技术和计算机技术的应用实现分析仪器的自动化，通过计算机控制器和数字模型进行数据采集、运算、统计、分析、处理，提高分析仪器数据处理能

力, 数字图像处理系统实现了分析仪器数字图像处理功能的发展; 分析仪器的联用技术向测试速度超高速化、分析试样超微量化、分析仪器超小型化的方向发展。重点研究方向包括: 一是高通量分析, 即在单位时间内可分析测试大量的样品。二是极端条件分析, 其中单分子、单细胞分析与操纵为目前热门的课题。三是在线、实时、现场或原位分析, 即从样品采集到数据输出, 实现快速的或一条龙的分析。四是联用技术, 即将两种 (或两种以上) 分析技术联结, 互相补充, 从而完成更复杂的分析任务。联用技术及联用仪器的组合方式, 特别是三联甚至四联系统的出现, 已成为现代分析仪器发展的重要方向。五是阵列技术, 如果把联用分析技术看成计算机中的串行运算方法, 那么阵列技术就等同于计算机中的并行运算方法。和计算机一样, 阵列方法是大幅度提高分析速度或样品批处理量的最佳方案。一旦将并行阵列思路与集成和芯片制作技术完美结合, 仪器分析技术就将向新的领域进发。

(1) 提高灵敏度。

这是各种分析方法长期以来所追求的目标。当今许多新的现代技术被引入分析化学, 都是与提高分析方法的灵敏度有关, 如激光技术的引入, 促进了激光共振电离光谱、激光拉曼光谱、激光诱导荧光光谱、激光光热光谱、激光光声光谱和激光质谱的发展, 大大提高了分析方法的灵敏度, 使得检测单个原子或单个分子成为可能。多元配合物、有机显色剂和各种增效试剂的研究与应用, 使吸收光谱、荧光光谱、发光光谱、电化学及色谱等分析方法的灵敏度和分析性能得到大幅度提高。

(2) 解决复杂体系的分离问题及提高分析方法的选择性。

迄今, 人们所认识的化合物已超过 1 000 万种, 而且新的化合物种类仍在快速增长。复杂体系的分离和测定已成为分析化学家所面临的艰巨任务。由液相色谱、气相色谱、超临界流体色谱和毛细管电泳等所组成的色谱学是现代分离、分析的主要组成部分, 并获得了很快的发展。以色谱、光谱和质谱技术为基础所开展的各种联用、接口及样品引入技术已成为当今分析化学发展中的热点之一。在提高方法选择性方面, 各种选择性试剂、萃取剂、离子交换剂、吸附剂、表面活性剂、各种传感器的接着剂、各种选择检测技术和化学计量学方法等是当前研究工作的重要课题。

(3) 扩展时空多维信息。

现代分析化学的发展已不再局限于将待测组分分离出来进行表征和测量, 而是成为一门为物质提供尽可能多的化学信息的科学。随着人们对客观物质的认识的深入, 某些过去所不甚熟悉的领域, 如多维、不稳态和边界条件等也逐渐提到分析化学家的日程上来。例如现代核磁共振波谱、红外光谱、质谱等的发展, 可

提供有机物分子的精细结构、空间排列构型及瞬态等变化的信息,为人们对化学反应历程及生命过程的认识展现了光辉的前景。化学计量学的发展,更为处理和解析各种化学信息提供了重要基础。

(4) 微型化及微环境的表征与测定。

微型化及微环境分析是现代分析化学认识自然从宏观到微观的延伸。电子学、光学和工程学向微型化发展,人们对生物功能的了解,促进了分析化学深入微观世界的进程。电子显微技术、电子探针 X 射线微量分析、激光微探针质谱等微束技术已成为进行分析的重要手段。在表面分析方面,电子能谱、次级离子质谱、脉冲激光原子探针等的发展,可检测和表征一个单原子层,因而在材料科学、催化剂、生物学、物理学和理论化学研究中占据重要的位置。此外,对于电极表面修饰行为和表征过程的研究,各种分离科学理论、联用技术、超微电极和光谱电化学等的应用,为揭示反应机理,开发新体系,进行分子设计等开辟了新的途径。

(5) 形态、状态分析及表征。

在环境科学中,同一元素的不同价态和所生成的不同的有机化合物分子的不同形态都可能存在毒性上的极大差异。在材料科学中物质的晶态、结合态更是影响材料性能的重要因素。目前已报道利用诸如阳极溶出伏安法、X 射线光电子能谱、X 射线荧光光谱、X 射线衍射、热分析、各种吸收光谱方法和各种联用技术来解决物质存在的形态和状态问题。

(6) 生物大分子及生物活性物质的表征与测定。

20 世纪 70 年代以来,世界各发达国家都将生命科学及其有关的生物工程列为科学研究中最优先发展的领域,在欧、美、日等地区和国家具有战略意义的宏大研究规划“尤利卡计划”“人类基因图”及“人体研究新前沿”中,生物大分子的结构分析研究都占据重要的位置。我国在 2000 年前发展高技术战略的规划中,也把生物技术列为七个重点领域之一。一方面生命科学及生物工程的发展向分析化学提出了新的挑战;另一方面仿生过程的模拟又成为现代分析化学取之不尽的源泉。当前采用以色谱、质谱、核磁共振、荧光、磷光、化学发光和免疫分析以及化学传感器、生物传感器、化学修饰电极和生物电分析化学等为主体的各种分析手段,不但在生命体和有机组织的整体水平上,而且在分子和细胞水平上来认识和研究生命过程中某些大分子及生物活性物质的化学和生物本质方面,已日益显示出十分重要的作用。

(7) 非破坏性检测及遥测。

它是分析方法的又一重要外延。当今的许多物理和物理化学分析方法都已发展为非破坏性检测。这对于生产流程控制,自动分析及难于取样的诸如生命过程

等的分析是极端重要的。遥测技术应用较多的是激光雷达、激光散射和共振荧光、傅里叶变换红外光谱等,已成功地用于测定几十千米距离内的气体、某些金属的原子和分子、飞机尾气组成、炼油厂周围大气组成等,并为红外制导和反制导系统的设计提供理论和实验根据。

(8) 自动化及智能化。

微电子工业、大规模集成电路、微处理器和微型计算机的发展,使分析化学和其他科学与技术一样进入了自动化和智能化的阶段。机器人是实现基本化学操作自动化的重要工具。专家系统是人工智能的最前沿。在分析化学中,专家系统主要用作设计实验和开发分析方法,进行谱图说明和结构解释。20 世纪 80 年代兴起的过程分析已使分析化学家摆脱传统的实验室操作,进入到生产过程甚至生态过程控制的行列。分析化学机器人和现代分析仪器作为“硬件”,化学计量学和各种计算机程序作为“软件”,其对分析化学所带来的影响将会是十分深远的。

现代仪器分析技术正在不断地朝着快速、准确、自动、灵敏及适应特殊分析的方向迅速发展。仪器分析技术还将不断地吸取数学、物理学、计算机科学以及生物学中的新思想、新理念、新方法和新技术,改进和完善现有的仪器分析技术,并逐步研究和开发一批新的仪器分析技术,这就是当今仪器分析技术发展的总趋势!

项目化教学

模块一 紫外-可见分光光度法

学习目标

(一) 知识目标

- (1) 掌握文献检索的相关知识。
- (2) 了解方案设计的相关知识。
- (3) 了解分子吸收光谱的产生及特征。
- (4) 掌握朗伯-比尔定律,熟悉吸光系数的意义。
- (5) 掌握目视比色法、可见分光光度法的原理和测定方法。
- (6) 掌握紫外-可见分光光度计的主要部件及其类型。
- (7) 理解紫外-可见分光光度法的显色反应条件和测量条件的选择。
- (8) 掌握紫外-可见分光光度法的定性分析和定量分析方法及其应用。

(二) 能力目标

(1) 能利用多种手段查找紫外-可见分光光度法对未知物定性及定量的测定方法。

- (2) 能结合实际检测要求确定测定方案。
- (3) 能熟练运用目视比色法解决实际问题。
- (4) 能熟练操作紫外-可见分光光度计。
- (5) 能正确进行数据记录与处理。
- (6) 能按要求出具正确的检测报告。

(三) 素质目标

- (1) 培养查阅文献并汇总形成检测方案的职业素质。
- (2) 培养实事求是的科学态度。
- (3) 培养谦虚、好学的学习态度。
- (4) 培养团结协作的职业情操。

一、背景知识

(一) 基本原理

1. 概述

紫外-可见分光光度法是利用物质对紫外-可见光的吸收特征和吸收强度,对物质进行定性和定量分析的一种仪器分析方法。该方法具有较高的灵敏度和准确度,仪器设备简单,操作方便,在化工、医药、冶金、环境监测等领域广泛应用。

2. 基本特性 (波粒二象性)

光是一种电磁波,实验证实,电磁波(电磁辐射)是一种以极高速度传播的光量子流。它既具有粒子性,也具有波动性。

1) 波动性

其特征是每个光子具有一定的波长,可以用波的参数如波长(λ)、频率(ν)、周期(T)等来描述。由于在真空中,所有电磁波均以同样的最大速度“ C ”传播($C=2.998 \times 10^8$ m/s)。

$$\text{波长:} \quad \lambda = \frac{C}{\nu} \quad (1-1)$$

电磁波按频率(或波长)可分为各种不同的电磁波,见表1-1。

表1-1 各种电磁波谱的波长范围

区 域	波长单位		区 域	波长单位	
	m	常用单位		m	常用单位
γ 射线	$10^{-12} \sim 10^{-10}$	$10^{-3} \sim 0.1$ nm	红外	$7.6 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-5}$	$0.76 \sim 50$ μm
X 射线	$10^{-10} \sim 10^{-8}$	$0.1 \sim 10$ nm	远红外	$5 \times 10^{-5} \sim 10^{-3}$	$50 \sim 1\,000$ μm
远紫外	$10^{-8} \sim 2 \times 10^{-7}$	$10 \sim 200$ nm	微波	$10^{-3} \sim 1$	$0.1 \sim 100$ cm
紫外	$2 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-7}$	$200 \sim 400$ nm	无线电波	$1 \sim 10^3$	$1 \sim 1\,000$ m
可见	$4 \times 10^{-7} \sim 7.6 \times 10^{-7}$	$400 \sim 760$ nm			

2) 粒子性

电磁辐射与物质之间能量的转移用粒子性来解释。辐射能是由一颗一颗不连续的粒子流传播的,这种粒子叫光(量)子。

光子具有能量 E :

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

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

例如: λ 为 200 nm 的光, 一个光量子的能量是:

$$E = h \frac{C}{\lambda} = 6.626 \times 10^{-34} \times \frac{2.998 \times 10^8}{200 \times 10^{-9}} = 9.923 \times 10^{-19} \text{ (J)}$$

由于光量子能量小 (10^{-19} J), 因此定义: 1 eV (电子伏) = $1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$, 则上例中

$$E = \frac{9.923 \times 10^{-19}}{1.602 \times 10^{-19}} = 6.2 \text{ (eV)}$$

由公式 (1-2) 可知: 波长越长的光所具有的能量越小, 波长越短的光具有的能量越大。

3. 光与物质的作用

1) 单色光和复合光

单色光, 即单一频率 (或波长) 的光。由红到紫的七色光中的每种色光并非真正意义上的单色光, 它们都有相当宽的频率 (或波长) 范围, 如波长为 $0.77 \sim 0.622 \mu\text{m}$ 范围内的光都称为红光, 而氦氖激光器辐射的光波单色性最好, 波长为 $0.6328 \mu\text{m}$, 可认为是一种单色光。由几种单色光合成的光叫做复色光, 又称“复合光”。包含多种频率的光比较多见, 例如太阳光、弧光等。一般的光源是由不同波长的单色光所混合而成的复色光, 自然界中的太阳光及人工制造的日光灯等所发出的光都是复色光。

人的眼睛对不同波长的光的感覺是不一样的。凡是能被肉眼感觉到的光称为可见光, 其波长范围为 $400 \sim 780 \text{ nm}$ 。凡波长小于 400 nm 的紫外光或波长大于 780 nm 的红外光均不能被人的眼睛感觉出, 所以这些波长范围的光是看不到的。在可见光的范围内, 不同波长的光刺激眼睛后会产生不同颜色的感觉, 但由于受到人的视觉分辨能力的限制, 实际上是一个波段的光给人引起一种颜色的感觉。图 1-1 列出了各种色光的近似波长范围。

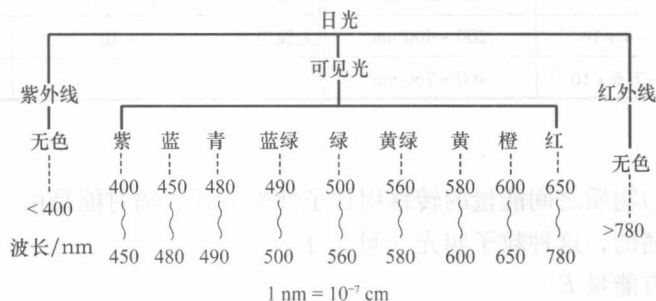


图 1-1 各种色光的波长

日常见到的日光、白炽灯光等白光就是由这些波长不同的有色光混合而成的。这可以用一束白光通过棱镜后色散为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等七色光来证实。

2) 互补色光

如果某两种相对应颜色的光按一定比例混合，可以成为白光，那么这两种色光就称为互补色光。

图 1-2 中两两相对的颜色即为互补色光，如黄光和蓝光。



图 1-2 互补色光示意图

3) 物质的颜色与吸收光的关系

当一束白光作用于某一物质时，如果该物质对可见光各波段的光全部吸收，物质呈黑色；如果该物质对可见光区各波段的光都不吸收，即入射光全部透过，则物质呈透明无色；若物质吸收了某一波长的光，而让其余波段的光都透过，物质则呈吸收光的互补色光的颜色。例如，当一束白光通过 KMnO_4 溶液时，该溶液选择性地吸收了 500 ~ 560 nm 的绿色光，而将其他的色光两两互补成白光而通过，只剩下紫红色光未被互补，所以 KMnO_4 溶液呈现紫红色。同样道理， K_2CrO_4 溶液对可见光中的蓝色光有最大吸收，所以溶液呈蓝色的互补光——黄色。可见物质的颜色是基于物质对光有选择性吸收的结果。而物质呈现的颜色则是被物质吸收光的互补色。

以上是用溶液对色光的选择性吸收说明溶液的颜色。若要更精确地说明物质具有选择性吸收不同波长范围光的性质，则必须用光吸收曲线来描述。

4) 物质的吸收光谱曲线

吸收光谱曲线是通过实验获得的，具体方法是：将不同波长的光依次通过某一固定浓度和厚度的有色溶液，分别测出它们对各种波长光的吸收程度（用吸光度 A 表示），以波长为横坐标，以吸光度为纵坐标作图，画出曲线，此曲线即称为该物质的光吸收曲线（或吸收光谱曲线），它描述了物质对不同波长光的吸收程度。图 1-3 所示的是三种不同浓度的 KMnO_4 溶液的三条光吸收曲线。

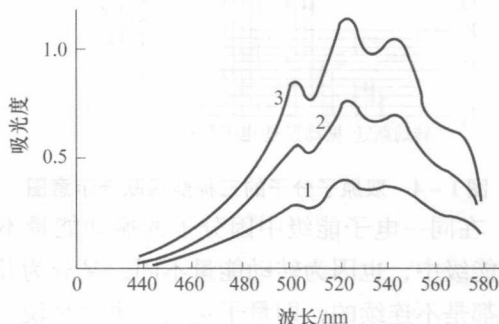


图 1-3 高锰酸钾的吸收光谱曲线