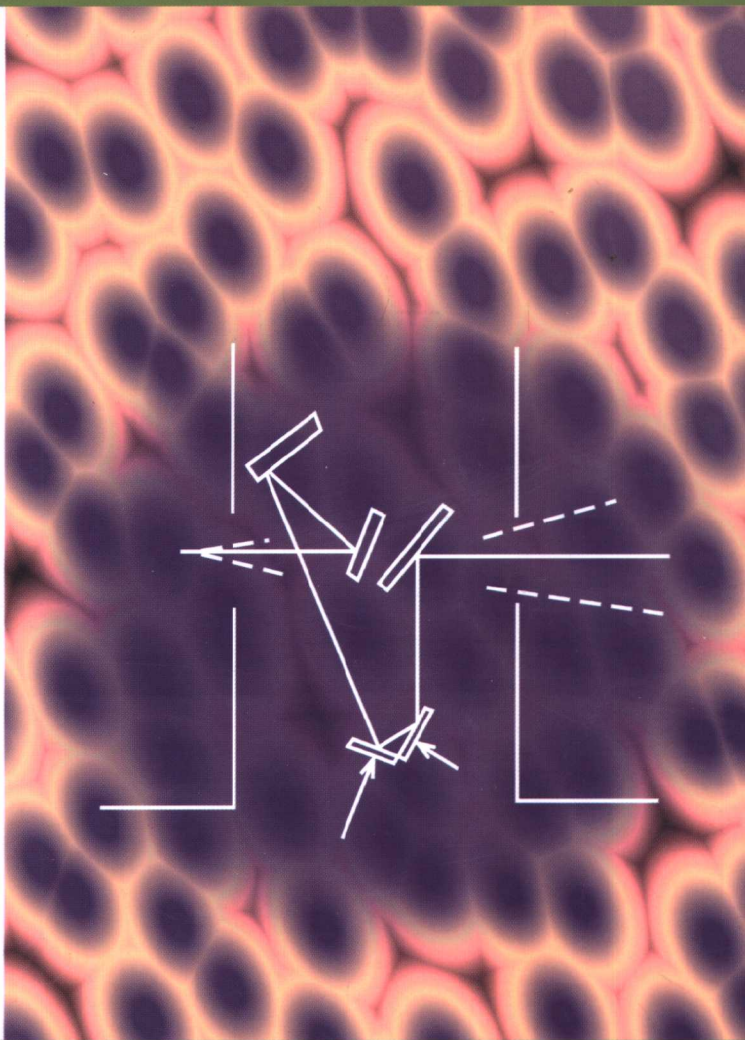


21世纪高等院校教材

# 材料研究方法

王培铭  
许乾慰

主编



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

## 内 容 简 介

本书介绍了材料研究常用的分析测试方法,包括光学显微分析、X射线衍射分析、电子衍射分析、电子显微分析、热分析、光谱分析、核磁共振分析、色谱分析、质谱分析等分析方法以及这些方法在材料测试中的综合应用。本书着重论述分析测试方法的基本原理、样品制备及应用,内容力求简明实用,具有适应学科范围广的教学特点,并尽可能展现最先进的分析测试方法,如环境扫描电镜和原子力显微镜等。

本书能适应现代社会对宽知识面的人才的培养要求,能满足大材料专业研究生的教学用书需要,同时可作为材料类及相关专业本科生和工程技术人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

材料研究方法/王培铭,许乾慰主编. —北京:科学出版社,2005

21世纪高等院校教材

ISBN 7-03-014488-0

I. 材… II. ①王…②许… III. 材料科学-研究方法-高等院校-教材  
IV. TB30

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第117845号

责任编辑:刘俊来 杨向萍 王日臣 宛楠/责任校对:朱光光  
责任印制:安春生/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2005年4月第一版 开本:B5(720×1000)

2005年4月第一次印刷 印张:24 1/4

印数:1—4 000

字数:467 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

## 前 言

本书为同济大学“十五”规划教材,由同济大学教材、学术著作基金委员会资助。

测试方法在材料的发展中起着非常重要的作用。随着科学技术的发展,人们对材料性能的要求日益广泛和苛刻,对材料性能及其组分和微观结构的关系越来越感兴趣,因而不断出现新的研究方法。测试手段也越来越多样化,实验方法的数量随着科学技术的发展而急速增加。

本书介绍了材料研究常用的分析测试方法,包括光学显微分析、X射线衍射分析、电子衍射分析、电子显微分析、热分析、光谱分析、核磁共振分析、色谱分析、质谱分析等分析方法以及这些方法在材料测试中的综合应用。本书着重论述分析测试方法的基本原理、样品制备及应用,内容力求简明、实用,具有适应学科范围广的教学特点,并尽可能展现最先进的分析测试方法,如环境扫描电镜和原子力显微镜等。

本书根据拓宽专业口径、加强专业基础的需要,为适应材料学和材料加工工程专业的教学而编写。本书能适应现代社会对宽知识面的人才的培养要求,能满足大材料专业研究生的教学用书需要,同时也可作为材料类及相关专业本科生和工程技术人员的参考用书。

本书由同济大学部分教师编写,王培铭编写第1、4、9章,林健编写第2、5章,吴建国编写第3、9章,许乾慰编写第6~8章。

本书在编写和出版过程中,得到同济大学的大力支持,在此表示衷心的感谢!

编 者  
2005年2月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 材料研究的意义和内容 .....	(1)
1.2 材料结构和研究方法的分类 .....	(2)
<b>第 2 章 光学显微分析</b> .....	(8)
2.1 概述 .....	(8)
2.2 晶体光学基础 .....	(9)
2.3 光学显微分析方法.....	(20)
2.4 特殊光学显微分析法.....	(40)
2.5 光学显微分析样品的制备.....	(44)
2.6 光学显微分析技术的突破——近场光学显微镜.....	(47)
2.7 光学显微分析在材料科学中的应用.....	(51)
<b>第 3 章 X 射线衍射分析</b> .....	(58)
3.1 X 射线的物理基础.....	(58)
3.2 X 射线衍射原理.....	(69)
3.3 X 射线衍射束的强度.....	(74)
3.4 实验方法及样品制备.....	(77)
3.5 X 射线粉末衍射物相定性分析.....	(93)
3.6 X 射线物相定量分析.....	(98)
3.7 晶体结构分析 .....	(103)
3.8 X 射线衍射技术在其他方面的应用 .....	(121)
<b>第 4 章 电子显微分析</b> .....	(124)
4.1 概述 .....	(124)
4.2 透射电镜 .....	(127)
4.3 扫描电镜 .....	(169)
4.4 电子探针仪 .....	(182)
4.5 电镜的近期发展 .....	(197)
4.6 电子光学表面分析仪 .....	(204)
<b>第 5 章 热分析</b> .....	(208)
5.1 概述 .....	(208)
5.2 热分析技术的分类 .....	(208)

5.3	差热分析 .....	(210)
5.4	差示扫描量热分析法 .....	(217)
5.5	热重分析 .....	(223)
5.6	热膨胀和热机械分析 .....	(230)
5.7	热分析技术的应用 .....	(235)
5.8	热分析技术的发展趋势 .....	(248)
<b>第 6 章</b>	<b>光谱分析</b> .....	<b>(251)</b>
6.1	吸收光谱分类及基本原理 .....	(251)
6.2	紫外光谱 .....	(252)
6.3	红外吸收光谱分析 .....	(261)
6.4	激光拉曼散射光谱法 .....	(303)
<b>第 7 章</b>	<b>核磁共振分析</b> .....	<b>(317)</b>
7.1	概述 .....	(317)
7.2	核磁共振的基本原理 .....	(318)
7.3	质子的化学位移 .....	(323)
7.4	自旋偶合 .....	(327)
7.5	核磁共振的信号强度 .....	(329)
7.6	图谱解释 .....	(330)
7.7	构造和样品制备 .....	(331)
7.8	NMR 技术的进展 .....	(333)
7.9	核磁共振谱在材料分析研究中的应用 .....	(335)
<b>第 8 章</b>	<b>质谱分析</b> .....	<b>(342)</b>
8.1	概述 .....	(342)
8.2	质谱技术基本原理 .....	(343)
8.3	离子的类型 .....	(352)
8.4	质谱定性分析及图谱解析 .....	(356)
8.5	质谱定量分析 .....	(360)
8.6	气相色谱-质谱联用技术 .....	(361)
8.7	质谱分析在材料研究中的应用 .....	(362)
<b>第 9 章</b>	<b>材料测试方法的综合应用</b> .....	<b>(372)</b>
9.1	材料结构的测试 .....	(372)
9.2	材料显微术及其样品制备方法的选择 .....	(374)
9.3	材料形成过程研究 .....	(377)
9.4	材料剖析 .....	(378)
	<b>主要参考文献</b> .....	<b>(380)</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 材料研究的意义和内容

材料科学的主要任务是研究材料。材料一般是指可以用来制造有用的构件、器件或其他物品的物质,也可以说是将原料通过物理或化学方法加工制成的金属、无机非金属、有机高分子和复合材料的固体物质。它们一方面作为构件、器件或物品的原材料或半成品,如金属、硬质材、有机高分子、木材、人造纤维、天然石材和某些玻璃等;另一方面可以在单级工艺过程中作为最终产品,如陶瓷和玻璃制品。

不论何种材料,都有一定的性能。如大多数金属材料导电性、塑性和韧性好;无机非金属材料硬度高,韧性差,大多为电绝缘体;高分子材料韧性好,但强度、弹性模量和塑性都很低。

这些材料的不同性能是材料内部因素在一定外界因素作用下的综合反映。材料的内部因素一般来说包括物质的组成和结构。从原子级结构来说,这些材料的不同性能主要是由化学键的差异决定的。金属材料以典型的金属键结合,内部有大量能自由运动的电子,因而导电性好;在变形时不会破坏键的结合,因而塑性好;原子排列紧密,因而密度高。无机非金属材料通常以离子键、共价键或这两种键的混合结合,所以一般不导电;键的结合力强且有方向性,变形时要破坏局部的键结合,因而硬度高且很脆;原子排列不够紧密,因而密度低。因此可以说,物质的组成和结构直接决定了材料的性能和效能。

物质的组成和结构取决于材料的制备和使用条件。在材料制备和使用过程中,物质经历了一系列物理、化学或物理化学变化。因此,材料的制备工艺和使用过程,特别是前者直接决定了材料的组成和结构,从而决定了材料的性能和使用效能。例如,一根化学组成相同的铜棒,分别用铸造方法和轧制方法成型后,其显微结构完全不同,前者含辐射状排列的长晶粒,且含有气孔和气泡;后者含圆形晶粒,且含有被拉长的非金属夹杂物和内部原子排列缺陷。因此,这两者的性能是不相同的:铸造件强度较低,容易发生脆性开裂;轧制件的强度则高得多,但也可因存在夹杂物和缺陷而发生开裂。如果通过热处理改变结构,会使金属的强度和韧性大幅度提高。再如,同样是聚氨酯,可制成橡胶和纤维,也可作塑料和胶黏剂,这也主要取决于结构的改变。化学组成相同的水泥浆体分别在 5℃ 和 20℃ 下养护形成的结构完全不同,前者的水化产物粒子尺寸大,浆体密实度高,后期强度高;后者粒子尺寸较小,浆体密实度小,随着使用时间的延长,后者在环境介质的影响下,更容易

发生结构上的变化,使性能下降。正是由于制备工艺和使用过程的这种重要性,材料研究应着重于探索制备过程前后和使用过程中的物质变化规律,也就是在此基础上探明材料的组成(结构)、合成(工艺过程)、性能和效能及其相互关系(图 1.1),或者说找出经一定工艺流程获得的材料的组成(结构)对于材料性能与用途的影响规律,以达到对材料优化设计的目的,从而将经验性工艺逐步纳入材料科学与工程轨道。

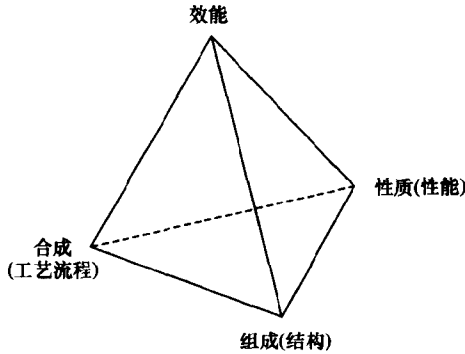


图 1.1 材料科学四要素关系示意图

研究材料必须以正确的研究方法为前提。研究方法从广义来讲,包括技术路线、实验技术、数据分析等。具体来说,就是在充分了解研究对象所处的现状的基础上,根据具体目标,详细制定研究内容、工作步骤及所采用的实验手段,并将实验获得的数据进行数学分析和处理,最后得出规律或建立数学模型。其中,技术路线的制定是至关重要的,实验方法的选择也是非常关键的。譬如说,虽然制定出完整的技术路线,但若没有相应的实验方法或先进的测试手段与之对应,则难以达到预期的目的;反过来,若仅有先进的测试手段,而没有正确的技术路线,也同样难以达到预期目的。两者相辅相成,缺一不可。

从狭义来说,研究方法就是某一种测试方法,如 X 射线衍射分析、电子显微术、红外光谱分析等,包括实验数据(信息)获取和分析。因为每一种实验方法均需要一定的仪器,所以也可以说,研究方法指测试材料组成和结构的仪器方法。

## 1.2 材料结构和研究方法的分类

如图 1.2 所示,材料的组成和结构的测试方法有多种,应根据不同的应用场合选择。其中,显微术的选择又与材料的结构及其层次有关。

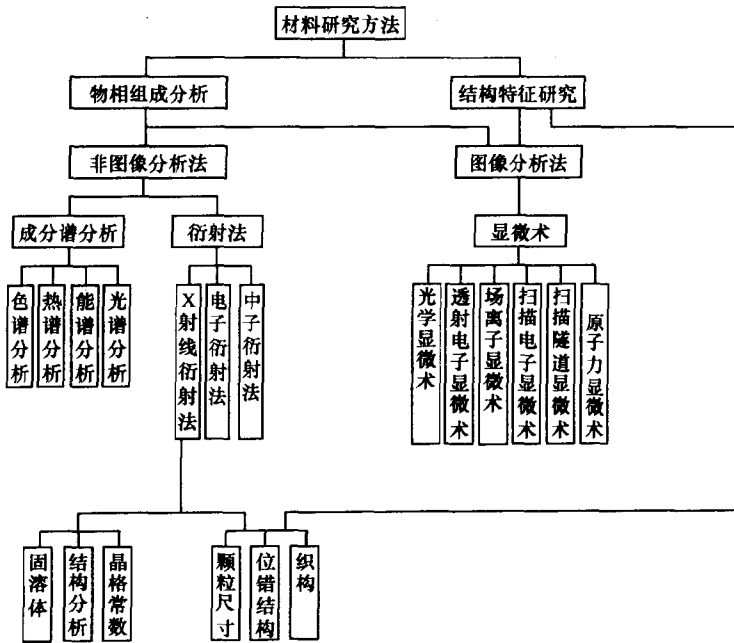


图 1.2 显微结构分析的研究方法

### 1.2.1 材料结构及其层次

所谓结构,是指材料系统内各组成单元之间的相互联系和相互作用方式。材料的结构从存在形式来讲,无非是晶体结构、非晶体结构、孔结构及它们不同形式且错综复杂的组合或复合;而从尺度上来讲,又分为微观结构、亚微观结构、显微结构和宏观结构等四个不同的层次。每个层次上观察所用的结构组成单元均不相同。

结构层次大体上是按观察用具或设备的分辨率范围来划分的,如宏观与显微结构的划分以人眼的分辨率为界,显微结构和亚显微结构的划分以光学显微镜的分辨率为界,亚显微结构和微观结构的分界相当于普通扫描电子显微镜的分辨率。结构层次的尺寸范围列于表 1.1。

微观结构是指高分辨电子显微镜所能分辨的结构范围,结构组成单元主要是原子、分子、离子或原子团等质点。所谓微观结构就是这些质点在相互作用力下的聚集状态、排列形式(也称为原子级结构或分子级结构),如结晶物质的单胞、晶格特征,硅酸盐中 Si-O 四面体所组成的格架、空穴、氧离子配位等。

亚微观结构是指在普通电子显微镜(透射电子显微镜和扫描电子显微镜)下所能分辨的结构范围,结构组成单元是微晶粒、胶粒等粒子。这里的结构主要是单个



粒子的形状、大小和分布,如晶体的构造缺陷、界面结构、CSH凝胶粒子的形貌等。

表 1.1 材料结构层次的划分及所用观察设备

物体尺寸	结构层次	观测设备	研究对象	举 例
$>100\mu\text{m}$	宏观结构 (大结构)	肉眼 放大镜 实体显微镜	大晶粒 颗粒集团	断面结构 外观缺陷 裂纹、空洞
$100\sim 10\mu\text{m}$	显微结构	偏光显微镜 反光显微镜 相衬显微镜 干涉显微镜	晶粒 多相集团	相分定性和定量晶形、分布及 物相的光学性质
$10\sim 0.2\mu\text{m}$			微晶集团	物相或颗粒形状、大小、取向、 分布和结构 物相的部分光学性质:消光、 干涉色、延性、多色性等
$0.2\sim 0.01\mu\text{m}$	亚显微结构 (细观结构)	暗场显微镜 超视显微镜 干涉相衬显微镜 电子显微镜 扫描电子显微镜	微晶 胶团	液相分离体,沉积,凝胶结构 界面形貌 晶体构造的位错缺陷
$<0.01\mu\text{m}$	微观结构	场离子显微镜 高分辨电子显微镜	晶格点阵	钨晶格 高岭石点阵

显微结构是指在光学显微镜下分辨出的结构范围,结构组成单元是该尺度范围的各个相,结构是在这个尺寸范围内试样中所含相的种类、数量、颗粒的形貌及其相互之间的关系,如陶瓷和水泥熟料中多种晶体粒子聚集方式、分布及其相互结合的状况等。

宏观结构是指用人眼(有时借助放大镜)可分辨的结构范围,结构组成单元是相、颗粒,甚至是复合材料的组成材料,结构包括材料中的大孔隙、裂纹、不同材料的组合与复合方式(或形式)、各组成材料的分布等,如岩石层理与斑纹、混凝土中的砂石、纤维增强材料中纤维的多少与纤维的分布方向等。材料的宏观结构是影响材料性质的重要因素。材料的宏观结构不同,即使组成与微观结构等相同,材料的性质与用途也不同,如玻璃与泡沫玻璃、密实的灰砂硅酸盐砖与灰砂加气混凝土,它们的许多性质及用途有很大的不同。材料的宏观结构相同或相似,则即使材料的组成或微观结构等不同,材料也具有某些相同或相似的性质与用途,如泡沫玻璃、泡沫塑料、加气混凝土等。

长期以来,人们对结构层次的划分、理解和认识并不一致,如有的并不是将结构分成上述四个层次,而是三个层次,即微观结构、亚微观结构(细观结构)和宏观结构或者原子级结构、显微结构和宏观结构,也有的干脆分成显微结构和宏观结构

两个层次,将亚微观结构和微观结构均包含在显微结构内。仅就“显微结构”一词来说,人们的理解和认识也有差异,常将其与“构造”、“织构”、“微观结构”、“细观结构”、“形貌”等术语混为一谈。其实,这些术语均具有特定含义,并有所区别。

“构造”是用来描述构成材料的组成矿物在空间分布排列关系的;“织构”则是指组成矿物在空间做定向排列,使物质具有特种性能的一类特殊的显微结构;“细观结构”是矿物晶体颗粒自身的各项结构特征;“形貌”是指组成相的形状、大小和分布。

### 1.2.2 研究方法的种类

除宏观结构可直接用肉眼观察外,其他层次结构的研究手段一般需借助于仪器。仪器分析按信息形式可分为图像分析法和非图像分析法;按工作原理,前者主要是显微术,后者主要是衍射法和成分谱分析(图 1.2)。显微术和衍射法均基于物理方法,其工作原理是以电磁波(可见光、电子、离子和 X 射线等)轰击样品激发产生特征物理信息,这些信息包括电磁波的透射信息、反射信息和吸收信息(图 1.3),将其收集并加以分析从而确定物相组成和结构特征。基于这种物理原理的具体仪器有光学显微镜、电子显微镜、场离子显微镜、X 射线衍射仪、电子衍射仪、中子衍射仪。

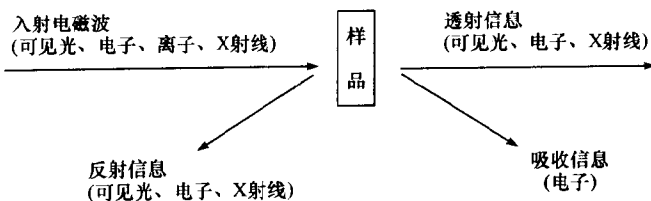


图 1.3 样品特征物理信息示意图

#### 1. 图像分析法

图像分析法是材料结构分析的重要研究手段,以显微术为主体。光学显微术是在微米尺度观察材料结构的较普及的方法,扫描电子显微术可达到亚微观结构的尺度,透射电子显微术把观察尺度推进到纳米甚至原子尺度(高分辨电子显微术可用来研究原子的排列情况)。图像分析法既可根据图像的特点及有关的性质来分析和研究固体材料的相组成,也可形象地研究其结构特征和各项结构参数的测定。其中最具有代表性的是形态学和体视学研究。形态学是研究材料中组成相的几何形状及其变化,进一步探究它们与生产工艺及材料性能间关系的科学。体视学是研究材料中组成相的二维形貌特征,通过结构参数的测量,确定各物相三维空间

的颗粒的形态和大小以及各相百分含量的科学,它需借助于辅助接口将显微镜与其他电子仪器及计算程序结合起来,构成自动的结构图像分析系统。

场离子显微术利用被检测材料做成针尖表面原子层轮廓边缘的电场不同,借助惰性气体离子轰击荧光屏可以得到对应原子排布的投影像,也达到原子尺度的分辨率。20世纪80年代中期发展起来的扫描隧道显微镜和原子力显微镜,在材料表面的高度方向和平面方向的分辨率分别达到0.05nm和0.2nm,为材料表面的表征技术开拓了新的领域。

电子显微术还可与微区分析方法(如电子探针显微分析、波谱、能谱等)相结合,定性甚至定量研究材料的化学组成及其分布情况。

## 2. 非图像分析法

如前所述,非图像分析法分为衍射法和成分谱分析,前者主要用来研究材料的结晶相及其晶格常数,后者主要测定材料的化学成分。

### (1) 衍射法

衍射法包括X射线衍射、电子衍射和中子衍射等三种分析方法。无机非金属材料的结构测定仍以X射线衍射法为主。这一技术包括德拜粉末照相,背发射和透射劳厄照相,高温、常温、低温衍射仪法,四圆衍射仪法等。X射线衍射分析物相较简便、快捷,适于多相体系的综合分析,也能对尺寸在微米量级的单颗晶体材料进行结构分析。由于电子与物质的相互作用比X射线强4个数量级,而且电子束又可以在电磁场作用下会聚得很细小,所以微细晶体或材料的亚微米尺度结构测定特别适于用电子衍射来完成。与X射线、电子受原子的电子云或势场散射的作用机理不同,中子受物质中原子核的散射,所以轻重原子对中子的散射能力差别比较小,中子衍射有利于测定材料中轻原子的分布。总之,这三种衍射法各有特点,应视分析材料的具体情况作选择。不过目前中子衍射仪价格较高,只有少数实验室能进行试验。

### (2) 成分谱分析

成分谱用于材料的化学成分分析,成分谱种类很多:①光谱,包括紫外光谱、红外光谱、荧光光谱、激光拉曼光谱等;②色谱,包括气相色谱、液相色谱、凝胶色谱等;③热谱,包括差热分析仪、热重分析仪、示差扫描量热计等;此外,还有原子吸收光谱、质谱等。上述谱分析的信息来源于整个样品,是统计性信息。与此不同的是用于表面分析的能谱和探针,前者有X射线光电子能谱、俄歇电子能谱等,后者包括电子探针、原子探针、离子探针、激光探针等。另有一类谱分析是基于材料受激发的发射谱与具体缺陷附近的原子排列状态密切相关的原理而设计的,如核磁共振谱、电子自旋共振谱、穆斯堡尔谱、正电子湮没分析等。

### 思考题与习题

1. 材料是如何分类的？材料的结构层次有哪些？
2. 材料研究的主要任务和对象是什么？有哪些相应的研究方法？
3. 材料研究方法是如何分类的？如何理解现代研究方法的重要性？

## 第 2 章 光学显微分析

### 2.1 概 述

自古以来,人们对微观世界充满了敬畏和好奇心。光学显微分析技术则是人类打开微观物质世界之门的第一把钥匙。通过 500 多年来的发展历程,人类利用光学显微镜步入微观世界,绚丽多彩的微观物质形貌逐渐展现在人们的面前。

15 世纪中叶,斯泰卢蒂(Francesco Stelluti)利用放大镜,即所谓单式显微镜研究蜜蜂,开始将人类的视角由宏观引向微观世界的广阔领域。此后,人们从简单的单透镜开始学会组装透镜具组,进而学会透镜具组、棱镜具组、反射镜具组的综合使用。约在 1590 年,荷兰的詹森父子(Hans and Zacharias Janssen)创造出最早的复式显微镜。17 世纪中叶,物理学家胡克(R. Hooke)设计了第一台性能较好的显微镜,此后惠更斯(Christian Huygens)又制成了光学性能优良的惠更斯目镜,成为现代光学显微镜中多种目镜的原型,为光学显微镜的发展做出了杰出的贡献。19 世纪德国的阿贝(Ernst Abbe)阐明了光学显微镜的成像原理,并由此制造出的油浸系物镜,使光学显微镜的分辨本领达到了  $0.2\mu\text{m}$  的理论极限,制成了真正意义的现代光学显微镜。目前,光学显微镜已由传统的生物显微镜演变成诸多种类的专用显微镜,按照其成像原理可分为:

1) 几何光学显微镜,包括生物显微镜、落射光显微镜、倒置显微镜、金相显微镜、暗视野显微镜等。

2) 物理光学显微镜,包括相差显微镜、偏光显微镜、干涉显微镜、相差偏振光显微镜、相差干涉显微镜、相差荧光显微镜等。

3) 信息转换显微镜,包括荧光显微镜、显微分光光度计、图像分析显微镜、声学显微镜、照相显微镜、电视显微镜等。

随着显微光学理论和技术的不断发展,又出现了突破传统光学显微镜分辨率极限的近场光学显微镜,将光学显微分析的视角伸向纳米世界。

在材料科学领域中,大量的材料或生产材料所用的原料都是由各种各样的晶体组成的。不同材料的晶相组成直接影响到它们的结构和性质;而生产材料所用原料的晶相组成及其显微结构也直接影响着生产工艺过程及产品性能。因此对于各种材料及其原料的性能、质量的评价,除了考虑其化学组成外,还必须考虑它的晶相组成及显微结构。所谓显微结构就是指构成材料的晶相形貌、大小、分布以及它们之间的相互关系。

利用光学显微分析技术进行物相分析就是研究材料和其原料的物相组成及显微结构,并以此来研究形成这些物相结构的工艺条件和产品性能间的关系。

## 2.2 晶体光学基础

### 2.2.1 光的物理性质

光是键合电子在原子核外电子能级之间激发跃迁产生的自发能量变化,导致发射或吸收辐射能的一种形态。在麦克斯韦电磁理论中,认为光是叠加的振荡电磁场承载着能量以连续波的形式通过空间。按照量子理论,光能量是由一束具有极小能量的微粒即“光子”不连续地输送着,表明光具有微粒与波动的双重性,即波粒二象性。由于光学显微分析所观察到的光与物质的相互作用效应,在特性上像波,故利用光的波动学说解决晶体光学问题。

电磁波在空间的传播过程中,电磁场振动垂直于其传播方向,因此光是横波,即光波振动与传播方向垂直。电磁波的范围极为广泛,包括无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线和 $\gamma$ 射线等。它们的本质完全相同,只是波长(或频率)不同而特性也不同。按照它们的波长大小依次排列便构成一个电磁波谱,如图2.1所示。

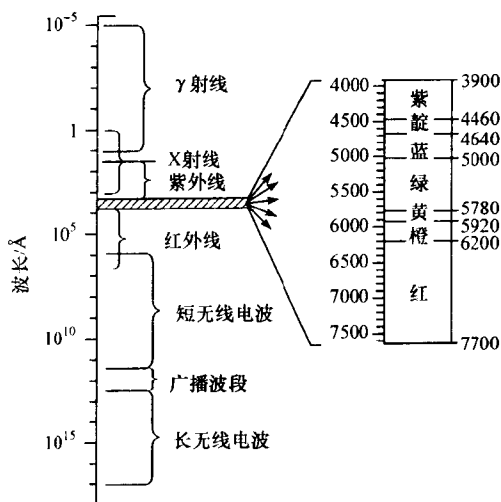


图 2.1 电磁波谱

从电磁波谱中可以看出,可见光只是整个电磁波谱中波长范围很窄的一段,其波长约为  $3900 \sim 7700 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ )。这一小波段电磁波能引起视觉,故称为可见光波。不同波长的可见光波作用在人的视网膜上产生的视觉不一样,因而产生

各种不同的色彩。当波长由大变小时,相应的颜色由红经橙、黄、绿、蓝、靛连续过渡到紫。各种颜色的大致波长范围如图 2.1 所示。通常所见的“白光”实质上就是各种颜色的光按一定比例混合成的混合光。

根据光波的振动特点,光又可以分成自然光和偏振光两种。

所谓自然光就是从普通光源发出的光波,如太阳光、灯光等。光是由光源中的大量分子或原子辐射的电磁波的混合波,光源中的每一个分子或原子在某一瞬间的运动状态各不相同,因此发出的光波振动方向也各不相同。因此自然光的振动具有两方面的性质:一方面它和光波的传播方向垂直,另一方面它又迅速地变换着自己的振动方向,也就是说自然光在垂直于光的传播方向的平面内的任意方向振动,如图 2.2(a)所示。由于发光单元的数量极大,因此自然光各个方向上振动的概率相同,在各个方向上的振幅也相等。

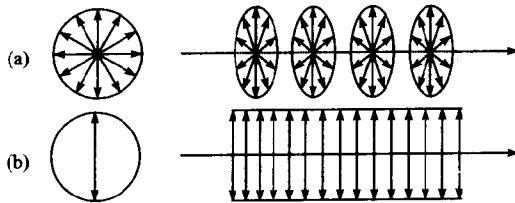


图 2.2 自然光和偏振光振动示意图  
(a) 自然光;(b) 偏振光

偏振光是自然光经过某些物质的反射、折射、吸收或其他方法,使它只保留某一固定方向的光振动,如图 2.2(b)所示。

偏振光的光振动方向与传播方向组成的平面称为振动面。由此也将偏振光称为平面偏光,简称偏光。

### 2.2.2 光与固体物质的相互作用

一束光入射到固体物质的表面,会产生光的折射、反射和吸收等现象,其折射、反射和吸收性能与光的性能、入射方法及固体物质性质有关。

#### 1. 光的折射

无论光是自然光还是偏光,当它从一种介质传到另一介质时,在两介质的分界面上将产生反射和折射现象。反射光将按照反射定律反射回原介质中。而折射光将从一种介质传播到另一种介质中。

光从一种介质进入到另一种介质而发生折射时,入射线、折射线和两种介质分界面的法线同在一个平面内。入射线  $a$  与折射面  $AB$  法线  $N$  的夹角称入射角  $i$ , 折射线  $b$  与法线  $N$  的夹角称折射角  $r$ 。入射角的正弦与折射角的正弦之比等于光

波在入射介质中的波速与折射介质中的波速之比,此比值称为折射介质对入射介质的相对折射率,如图2.3所示,称为折射定律。折射定律可以借惠更斯波前原理证明并可用下列公式表示:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_i}{v_r} = N \quad (2.1)$$

式中: $v_i$ 为光在入射介质中的速度; $v_r$ 为光在折射介质中的速度; $N$ 称为折射介质对入射介质的相对折射率(又称折光率)。

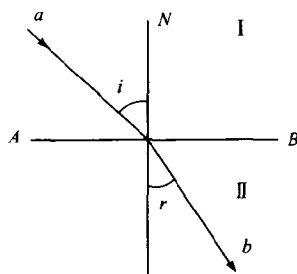


图2.3 光的折射

如果入射介质为真空,则  $N$  称为折射介质的绝对折射率,简称折射率。

从式(2.1)可以看出,介质中光传播的速度越大,则该介质的折射率越小;相反,如介质中光传播的速度越小,则该介质的折射率越大。即介质的折射率与光在介质中的传播速度成反比( $v_i/v_r = N_r/N_i$ )。

光在真空中的传播速度最大,而光在空气中的传播速度与光在真空中的传播速度几乎相等。因此通常也可将空气的折射率视为1(严格说空气的折射率应为1.003)。在其他各种液体和固体中,光的传播速度总是小于真空中光的传播速度,故它的折射率总是大于1。

同一介质的折射率因所用光波的波长而异,这种性质称为折射率色散。对于同一介质,光波的波长与折射率成反比。在可见光谱中,紫光波长最短,红光波长最长。因此同一介质在紫光中测定的折射率最大,而在红光中测定的折射率最小,用其他色光测得的折射率值介于两者之间。

晶体的折射率色散能力,是指晶体在两种波长光波中测定的折射率的差值。差值越大,色散能力越强,反之则越弱。如萤石的色散能力很小, $N_{紫} - N_{红} = 0.00868$ ;金刚石的色散能力很强, $N_{紫} - N_{红} = 0.05741$ 。此外,不同物态的介质,色散能力也有差异。一般来讲液体的色散能力较固体强,这对于用油浸法测定晶体的折射率很重要。为了不受色散的影响,测定折射率时,宜在单色光中进行,通常就是利用黄色光,即用钠光灯作光源(波长在可见光谱的中部)。在一般文献中列出的矿物折射率值,都是指黄色光中测定的数值。

## 2. 光的吸收

一束光线照射到物质的表面,一部分光线被反射,另一部分光线透过(透明材料),还有一部分光线要被物质所吸收。光的吸收主要是光的波动能转换为热能等其他形式的结果。

当光射入吸收性物质后,光的振幅随着透入深度的增大而不断减小,图2.4绘出了这种减弱情况。兰伯特(J. H. Lambert)吸收指数定律则给出了光吸收的数



学表达式

$$I_x = I \exp(-\alpha x) \quad (2.2)$$

式中： $I_x$  为透过厚度为  $x$  的光强； $I$  为入射光强； $x$  为透入深度； $\alpha$  为比例常数。

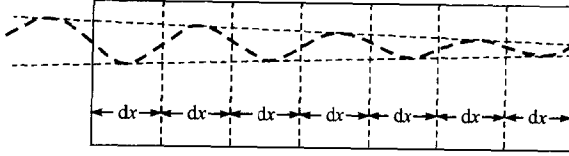


图 2.4 晶体对光的吸收

### 3. 光的反射

根据反射的基本定律,以反射表面法线为基准的入射角和反射角是相等的,入射光线、反射光线和反射表面法线处于同一平面上。

在精抛光平表面上可获得单向反射(表面不平整度小于光波长),而在粗糙表面上则呈漫反射。反射光的强度和波长取决于表面的本性和反射介质的光学性质。通常具有不定域电子的导体或半导体材料是不透明的,并且呈现很好的反射率。而以离子或共价键特征为主的材料是透明的,但有时是有色的。这是由于流动的电子会吸收任何波长的光,而键合电子只与个别波长的光相互作用。

物质对投射在它的表面或磨光面上光线的反射能力称为反射力。表示反射力大小的数值称为反射率

$$R = (I_r/I_i) \times 100\% \quad (2.3)$$

式中： $R$  为反射率； $I_r$  为反射光的强度； $I_i$  为入射光的强度。

如果物质表面对白光中七种色光等量反射,则物质没有反射色,只是根据反射率的大小而呈现为白色或程度不等的灰色;反射率大的物质呈白色,反射率小的物质呈灰色。如果物质对七种色光选择性反射,使某些色光反射多一些,则物质会呈现反射色。所以反射色专指物质表面选择性反射色光而产生的颜色,又称表色,是由于物质表面选择性反射作用的结果,即物质对不同波长的色光的反射力不同而形成的。许多金属材料有很显著的特征反射色,如黄铁矿为黄色反射色,赤铁矿为无色或者蓝灰色反射色。因此,反射色是鉴定不透明物质的重要特征。

有些晶体材料在不同方向上具有不同的折射率,在材料表面的反射力也不相同,而呈现双反射现象。用一束偏振光以不同方位照射这些晶体材料,会产生明显的反射多色性。

一束白光射到矿物表面后,除了一部分光线被反射外,另一部分光线被折射透入矿物内部,若遇到矿物内部的解理、裂隙、空洞及包裹体等不同介质的分界面时,