

总主编 曹茂盛 李大勇 荆天辅

总主审 吴 林 王 彪 吴 峰

# 材料科学与工程系列教材

根据 1998 年教育部颁布本科最新专业目录编写

主编 邱平善 王桂芳 郭立伟

# 材料近代分析测试方法实验指导

哈尔滨工程大学出版社

02

3

材料科学与工程系列教材

总主编 曹茂盛 李大勇 荆天辅  
总主审 吴 林 王 彪 吴 峰

# 材料近代分析测试方法实验指导

邱平善 王桂芳 郭立伟 主编

刘喜军 王元化 主审

哈尔滨工程大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

材料近代分析测试方法实验指导/邱平善,王桂芳,  
郭立伟主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001.8  
ISBN 7-81073-158-0

I. 材... II. ①邱...②王...③郭... III. ①材料  
-分析(化学)-高等学校-教学参考资料②材料-测  
试-高等学校-教学参考资料 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 033276 号

---

### 内 容 简 介

本书是《材料近代分析测试方法》的配套教材,全书分四章,共 25 个实验。第 1 章是光学显微分析,第 2 章为 X 射线衍射分析,第 3 章为电子显微分析,第 4 章为其他近代材料测试技术(包括俄歇谱仪、X 射线光电子、红外谱仪、核磁共振谱仪、质谱仪、超声波探伤及热分析等),同时摘录了检测分析的常用附录。在每个实验中对实验目的、实验设备结构及工作原理、实验方法和步骤,以及实验报告的要求都做了简要阐述。

本书可作为高等学校材料类专业本科生、研究生实验教材,也可供从事材料检测和材料选用的科技及工程人员参考。

---

哈尔滨工程大学出版社出版发行  
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼  
发行部电话:(0451)2519328 邮编:150001  
新 华 书 店 经 销  
哈 尔 滨 工 程 大 学 印 刷 厂 印 刷

\*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 13.5 字数 321 千字

2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

印数:1~3 000 册

定价:18.00 元

# 序 言

材料科学与工程系列教材是由哈尔滨工业大学出版社组织国内部分高校专家学者共同编写的第二套大型系列教学丛书,被列为国家新闻出版署“十五”重点图书出版计划。编写本套丛书的基本指导思想是:总结已有、通向未来、面向 21 世纪,以优化教材链为宗旨,依照为培养材料科学人才提供一个捷径的原则,确定培养目标,编写大纲、书目及主干内容。为确保图书品位、体现较高水平,编审委员会全体成员对国内外同类教材进行了长期细致的调查研究,广泛征求各参编院校第一线任课教师的意见,认真分析国家教育部新的学科专业目录和全国材料工程类专业教学指导委员会第一届全体会议的基本精神,进而制定了具体的编写大纲。在此基础上,聘请了国内一批知名的科学家,对本套系列教材书目和编写大纲审查认定,最后确定各分册的体系结构。经过全体编审人员的共同努力,现在这套教材即将出版发行,我们热切期望这套大型系列教学丛书能够满足国内高等院校材料工程类专业教育发展的需要,并且在教学实践中得以不断充实、完善和发展。

在本书的编写过程中,注意突出了以下几方面特色:

1. 根据科学技术发展的最新动态和我国高等学校学科归并的现实需求,坚持面向一级学科、加强基础、拓宽专业面、更新教材内容的基本原则。

2. 注重优化课程体系,探索教材新结构,即兼顾材料工程类学科中金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料共性与个性的结合,实现多学科知识的交叉与渗透。

3. 反映当代科学技术的新概念、新知识、新理论、新技术、新工艺,突出反映教材内容的现代化。

4. 注重协调材料科学与材料工程的关系,既加强材料科学基础的内容,又强调材料工程基础,能满足培养宽口径材料学人才的需要。

5. 坚持体现教材内容深广度适中,够用为原则,增强教材的适用性和针对性。

6. 在系列教材编写过程中,进行了国内外同类教材对比研究,吸取了国内外同类教材的精华,重点反映新教材体系结构特色,把握教材的科学性、系统性和适用性。

此外,本套系列教材还兼顾了内容丰富、叙述深入浅出、简明扼要、重点突出等特色,能充分满足少学时教学的要求。

参加本套系列教材编审工作的单位有:清华大学、哈尔滨工业大学、北京科技大学、北京航空航天大学、北京理工大学、哈尔滨工程大学、北京化工大学、燕山大学、哈尔滨理工大学、华东船舶工业学院、北京钢铁研究总院等 22 所院校 100 余名专家学者,他们为本套系列教材的编审付出了大量心血。在此,编审委员会对这些同志无私的奉献致以崇高的敬意。此外,编审委员会特别鸣谢中国科学院资深院士肖纪美教授、中国工程院院士徐滨士少将、中国工程院院士杜善义教授,感谢他们对本套系列教材编审工作的指导与大力支持。

限于编审者的水平,疏漏和错误之处在所难免,欢迎同行和读者批评指正。

材料科学与工程系列教材  
编审委员会  
2001 年 7 月

## 材料科学与工程系列教材编审委员会

总 顾 问	肖纪美	徐滨士	杜善义		
主任委员	曹茂盛				
副主任委员	吴 林	马莒生			
委 员	王 彪	方洪渊	田永君	刘勇兵	
	吴 峰	吴杏芳	李大勇	荆天辅	
	徐文国	徐庭栋	徐惠彬	曹传宝	
	蒋成禹				

# 前 言

材料是制造物品的原料,是人类生产活动和生活所必需的物质基础。材料的利用状况是人类文明的标志。随着人类文明的发展,科学技术在飞速的前进,对材料的需求提出了更高的要求,它不仅要求材料有较好的力学性能,还要求有特殊的物理性能、化学性能和其他特殊性能,如功能材料、复合材料、纳米材料等。这给材料检测提出了新的任务,它不仅要求精确测定材料的各种性能和组织,以满足不同的需求,还通过材料的组织结构和成分的研究,找出材料各种性能产生的机理和材料失效的原因,为研制开发新材料和研究构件失效机理提供了更简捷的手段。

对材料进行检测不仅要懂得检测的原理,更重要的是掌握其实验技术,这对工科院校的学生尤为重要。因为工科院校培养的人材面向工矿、科研院所,面向生产第一线,直接操作或指导进行材料检测工作,以便对材料性能进行评定和正确选用。

近代物理检测技术是 20 世纪初诞生,在 20 世纪末已日趋成熟的检测方法。它对材料的性能检测和新材料的研制起到举足轻重的作用。21 世纪是科技突飞猛进的时代,新材料日新月异的出现,近代物理检测更需长足发展。为此我们编写了这本教材,为工科院校的本科生、研究生提供实验教材,也为从事检测工作的科技人员和技术工人提供参考,以提高他们的亲自动手和实践能力。

本教材讲述了四部分内容,即光学显微分析、X 射线衍射分析、电子显微分析和其他常用的近代物理检测分析(包括俄歇谱仪、X 射线光电子、红外谱仪、热分析、质谱仪、核磁共振仪及超声波探伤等)。对材料的表面形貌、组织、结构、成分、相转变及其能量变化等进行各种分析。从而探讨材料的强化机理和失效原因,为发挥材料性能的潜力和开发研制新材料奠定了理论基础。

本教材是在多年的教学实践基础上,参考兄弟院校有关教学资料而编写的,本书由哈尔滨理工大学邱平善、哈尔滨工程大学王桂芳和哈尔滨理工大学郭立伟主编,其中第 1、2 章由王桂芳编写,第 3 章及第 4 章的核磁共振、超声波探伤由郭立伟编写,其余部分由邱平善编写并进行了统稿。全书由齐齐哈尔大学刘喜军和哈尔滨工程大学王元化主审。

在教材的编写过程中,得到了材料科学与工程系列教材总主编曹茂盛教授的亲自指导与策划。同时得到燕山大学荆天辅、华东船舶工业学院陈铮、吉林工业大学曹占义、青岛化工学院李树尘等老师的亲切帮助,他们对该教材的内容提出了宝贵的意见,在此表示谢意。

由于作者水平所限,难免有许多不当之处,敬请读者批评指正。

编 者  
2001 年 1 月

# 目 录

第1章 光学显微分析 .....	1
1.1 金相试样的制备 .....	1
1.2 光学显微镜的构造和使用 .....	4
1.3 偏光和相衬显微分析 .....	13
1.4 显微摄影和暗室技术 .....	20
1.5 定量金相分析 .....	30
第2章 X射线衍射分析 .....	35
2.1 德拜照像法及单相立方系粉末相的计算 .....	35
2.2 用X射线衍射仪进行多相物质的相分析 .....	42
2.3 点阵参数的精确测定 .....	48
2.4 用直接对比法测定钢中残余奥氏体含量 .....	54
2.5 用劳埃法测定单晶体取向 .....	57
2.6 宏观应力的测定 .....	65
2.7 微观应力的测定 .....	70
第3章 电子显微分析 .....	77
3.1 复型制造技术 .....	77
3.2 透射电镜的构造及显微组织观察 .....	83
3.3 金属薄膜的制备及薄晶体显微分析 .....	93
3.4 电子衍射试验分析 .....	98
3.5 扫描电镜及其观察 .....	105
3.6 电子探针的结构及应用 .....	113
第4章 其他近代材料测试技术 .....	124
4.1 俄歇电子能谱实验 .....	124
4.2 X射线光电子能谱实验 .....	128
4.3 红外光谱法实验 .....	137
4.4 热分析实验 .....	143
4.5 质谱法实验 .....	149
4.6 超声波探伤的原理及操作 .....	157
4.7 核磁共振原理及应用 .....	164
附录 .....	169
参考文献 .....	207

# 第 1 章 光学显微分析

## 1.1 金相试样的制备

### 一、实验目的

掌握试样制备的方法,学会电解抛光、化学抛光,力求在短时间内完成金相试样的制备过程,达到组织清晰,无人为假象。

### 二、实验方法

金相显微试样的制备过程包括取样、镶嵌、磨制、抛光、浸蚀等工艺。下面分别加以简要说明。

#### 1. 取样

显微试样的选择应根据研究的目的,取其具有代表性的部位。例如在检验和分析失效零件的损坏原因时,除了在损坏部位取样外,还需要在距破坏处较远的部位截取试样以便比较;在研究金属铸件组织时,由于存在偏析现象,必须从表面层到中心同时取样进行观察;对于轧制和锻造材料则应同时截取横向(垂直轧制方向)及纵向(平行轧制方向)的金相试样,以便于分析比较表层缺陷及非金属夹杂物的分布情况;对于一般热处理后的零件,由于金相组织比较均匀,试样的截取可在任一截面进行。

确定好部位后就可截下试样,试样的尺寸通常采用直径 $\phi 12\sim 15\text{mm}$ ,高 $12\sim 15\text{mm}$ 的圆柱体或边长 $12\sim 15\text{mm}$ 的方形试样(如图 1-1 所示)。

试样的截取方法视材料的性质不同而异,软的金属可用手锯或锯床切割,硬而脆的材料(如白口铸铁)则可用锤击打下,对极硬的材料(如淬火钢)则可采用砂轮片切割或电脉冲加工。不论采用哪种方法,在切取过程中均不宜使试样的温度过于升高,以免引起金属组织的变化,影响分析结果。

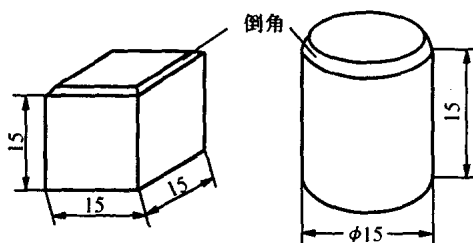


图 1-1 金属试样的尺寸

#### 2. 镶嵌

若试样的尺寸太小(如金属丝、薄片等)时,直接用手来磨制很困难,需要使用试样夹或利用样品镶嵌机,把试样镶嵌在低熔点合金或塑料(如胶木粉、聚乙烯及聚合树脂、牙托粉与牙托水的混合物)中,如图 1-2 所示。

#### 3. 磨制

试样的磨制一般分粗磨和细磨两道工序。

(1)粗磨:粗磨的目的是为了获得一个平整的表面。钢铁材料试样的粗磨通常在砂轮机上



进行,但在磨制时应注意:试样对砂轮的的压力不宜过大,否则会在试样表面形成很深的磨痕,增加精磨和抛光的困难;要随时用水冷却试样,以免受热引起组织变化;试样边缘的棱角若无保留必要,可进行倒角,以免在细磨及抛光时撕破砂纸或抛光布,甚至造成试样从抛光机上飞出伤人。

(2)细磨:经粗磨后试样表面虽较平整,但仍还存在有较深的磨痕(如图1-3所示)。细磨的目的就是为了消除这些磨痕,以得到平整而光滑的磨面,为下一步的抛光作好准备。

将粗磨好的试样用水冲洗干净后就开始进行细磨,细磨是在一套粗细程度不同的金相砂纸上,由粗到细依次顺序进行。

细磨时将砂纸平放在玻璃板上,手指紧握试样,并使磨面朝下,均匀用力向前推行。在回程时,应提起试样不与砂纸接触,以保证磨面平整而不产生弧度。

每更换一号砂纸时,须将试样的研磨方向调转 $90^\circ$ ,即与上一道磨痕方向垂直,直到将上一号砂纸所产生的磨痕全部消除为止。为了加快磨制速度,除手工磨制外,还可以将不同型号的砂纸贴在带有旋转圆盘的预磨机上,实现机械磨制。

#### 4. 抛光

细磨后的试样还需进一步抛光。抛光的目的是去除细磨时遗留下来的细微磨痕而获得光亮的镜面。

金相试样的抛光方法一般可分为机械抛光、电解抛光和化学抛光三种。

(1)机械抛光:在专用的抛光机上进行。抛光机主要由电动机和抛光圆盘组成,抛光盘转速为 $300\sim 500\text{rad/min}$ 。抛光盘上铺以细帆布、呢绒、丝绸等。抛光时在抛光盘上不断滴入抛光液。抛光液通常采用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 或 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 等细粉末在水中的悬浮液。机械抛光就是靠极细的抛光粉末与磨面间产生相对磨削和滚压作用来消除磨痕的。

操作时将试样磨面均匀地压在旋转的抛光盘上,并沿盘的边缘到中心不断作径向往复运动。抛光时间一般为 $2\sim 6\text{min}$ 。抛光结束后,试样表面应看不出任何磨痕而呈光亮的镜面。

(2)电解抛光:是利用阳极腐蚀使试样表面变得平滑光亮的一种方法。将试样浸入电解液中作为阳极,用铝片或不锈钢片作阴极,使试样与阴极之间保持一定距离( $20\sim 30\text{mm}$ ),接通直流电源。当电流密度足够时,试样磨面即由于电化学反应而发生选择性溶解,从而获得光滑平整的表面。这种方法的优点是速度快,只产生纯化学的溶解作用而无机械力的影响,因此可避免在机械抛光时可能引起的表层金属的塑性变形,从而能更确切地显示真实的金相组织。

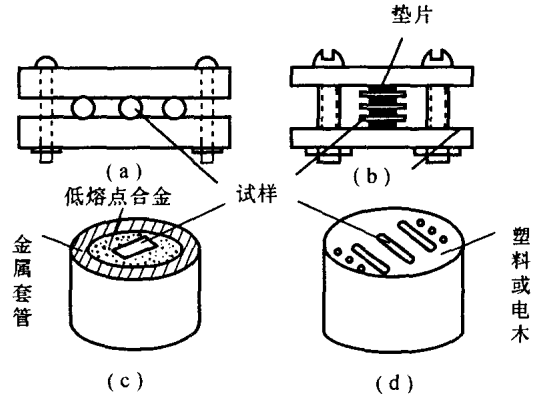


图1-2 金相试样的镶嵌方法

- (a)(b)机械镶嵌;
- (c)低熔点合金镶嵌;
- (d)塑料镶嵌

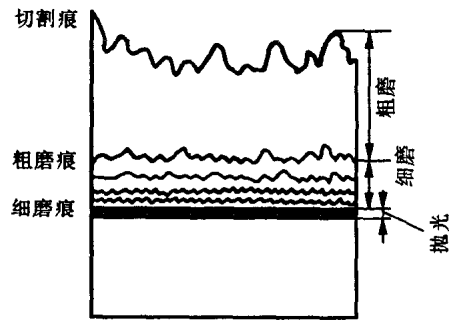


图1-3 试样磨面上磨痕变化示意图

但电解抛光操作时工艺规程不易控制,如电解液选择不当会达不到理想的效果。

(3)化学抛光:其实质与电解抛光相类似,也是一个表层溶解过程。它是将化学试剂涂在试样表面上约几秒至几分钟,依靠化学腐蚀作用使表面发生选择性溶解,从而得到光滑平整的表面。

### 5. 浸蚀

经抛光后的试样若直接放在显微镜下观察,只能看到一片亮光,除某些非金属夹杂物(如MnS及石墨等)外,无法辨别出各种组成物及其形态特征。必须使用浸蚀剂对试样表面进行“浸蚀”,才能清楚地显示出显微组织的真实情况。钢铁材料最常用的浸蚀剂为3%~5%硝酸酒精溶液或4%苦味酸酒精溶液。

最常用的金相组织显示方法是化学浸蚀法。其主要原理是利用浸蚀剂对试样表面的化学溶解作用或电化学作用(即微电池原理)来显示组织。

对于纯金属或单相合金来说,浸蚀是一个纯化学溶解过程。由于金属及合金的晶界上原子排列混乱,并有较高能量,故晶界处容易被浸蚀而呈现凹沟(如图1-4所示),同时由于每个晶粒原子排列的位向不同,表面溶解速度也不一样,因此试样被浸蚀后会呈现轻微的凹凸不平,在垂直光线的照射下将显示出明暗不同的晶粒。

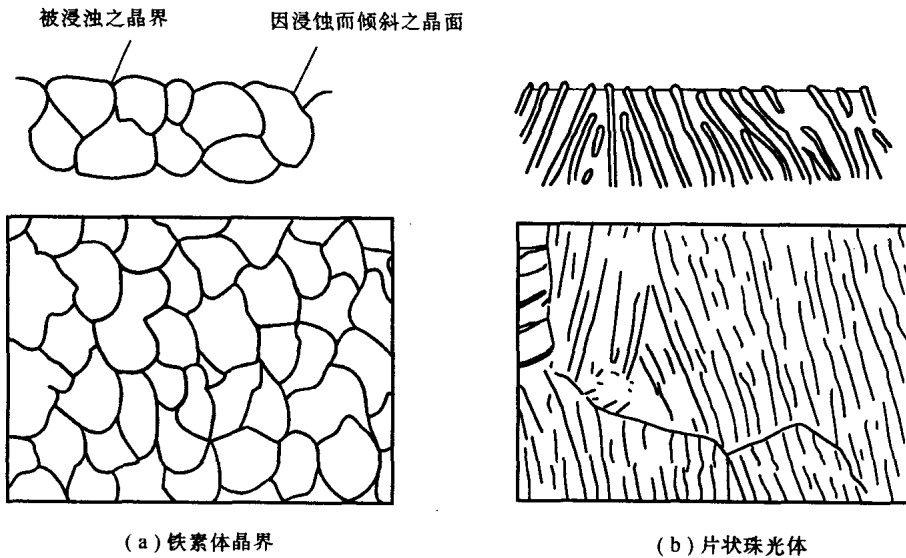


图1-4 组织浸蚀情况

对于两相以上的合金而言,浸蚀主要是一个电化学腐蚀过程。由于各组成相具有不同的电极电位,试样浸入浸蚀剂中就在两相之间形成无数对“微电池”。具有负电位的一相成为阳极,被迅速溶入浸蚀剂中形成凹洼,具有正电位的另一相则为阴极,在正常电化学作用下不受浸蚀而保持原有平面。当光线照射到凹凸不平的试样表面时,由于各处对光线的反射程度不同,在显微镜下就能看到各种不同的组织和组成相(如图1-4所示)。

浸蚀方法是将试样磨面浸入浸蚀剂中,或用棉花沾上浸蚀剂擦拭表面。浸蚀时间要适中,一般试样磨面发暗时可停止浸蚀,如果浸蚀不足可重复浸蚀。浸蚀完毕后立即用水冲洗,接着用酒精冲洗,最后用吹风机吹干。这样制得的金相试样即可在显微镜下进行观察和分析研究。

### 三、实验报告要求

1. 每人制备一块金相试样,要电解抛光、机械抛光混合使用,或化学抛光、机械抛光混合应用。
2. 简述电解抛光的原理和过程。

## 1.2 光学显微镜的构造和使用

### 一、实验目的

通过学习及实际操作,了解显微镜的种类、构造、原理及应用。

### 二、显微镜的种类

普通光学显微镜的类型很多,常分台式、立式和卧式三大类。若按用途的不同来分,还有各类特种显微镜,如偏光显微镜、相衬显微镜、干涉显微镜及高温、低温金相显微镜等。台式显微镜主要由一镜筒(包括上装目镜和下配物镜)、镜体(包括座架和调焦装置)、光源系统(包括光源、灯座及垂直照明器)和样品台四部分组成。

台式显微镜具有体积小、重量轻、携带方便等优点,多用钨丝灯泡作光源,分直立式光程和倒立式光程两种。

图 1-5 为上海光学仪器厂生产的 4XA 型台式显微镜。

立式金相显微镜是按倒立式光程设计的,并带有垂直方向的投影摄影箱。与台式显微镜相比,立式金相显微镜具有附件多、使用性能广泛,可做明视场、暗视场、偏光观察与摄影等。图 1-6a 为国产 XJL-02 型立式显微镜外形。

大型卧式金相显微镜是按倒立式光程设计的,并带有可伸缩水平投影暗箱。卧式金相显微镜由倒立式光程镜体、照明系统和照相系统三部分组成,并配有暗箱、偏光、相衬、干涉及显微硬度、低倍分析等附件,设计较为完善,具有优良的观察和摄影像质。图 1-6b 为国产 XJG-05 型卧式金相显微镜。

### 三、显微镜的成像原理

众所周知,放大镜是最简单的一种光学仪器,它实际上是一块会聚透镜(凸透镜),利用它就可以将物体放大。其成像光学原理如图 1-7 所示。

当物体  $AB$  置于透镜焦距  $f$  以外时,得到倒立的放大实像  $A'B'$ (如图 1-7(a)),它的位置在 2 倍焦距长度以外。如果将物体  $AB$  放在透镜焦距之内,就可看到一个放大的正虚像  $A'B'$ (如图 1-7(b))。映像的长度与物体长度之比  $\left(\frac{A'B'}{AB}\right)$  就是放大镜的放大倍率也就是放大率。由于放大镜到物体之间的距离  $a$  近似地等于透镜的焦距( $a \approx f$ ),而放大镜到像间的距离  $b$  近似地相当于人眼的明视距离(250mm),故放大镜的放大倍数为:

$$N = \frac{b}{a} = \frac{250}{f}$$

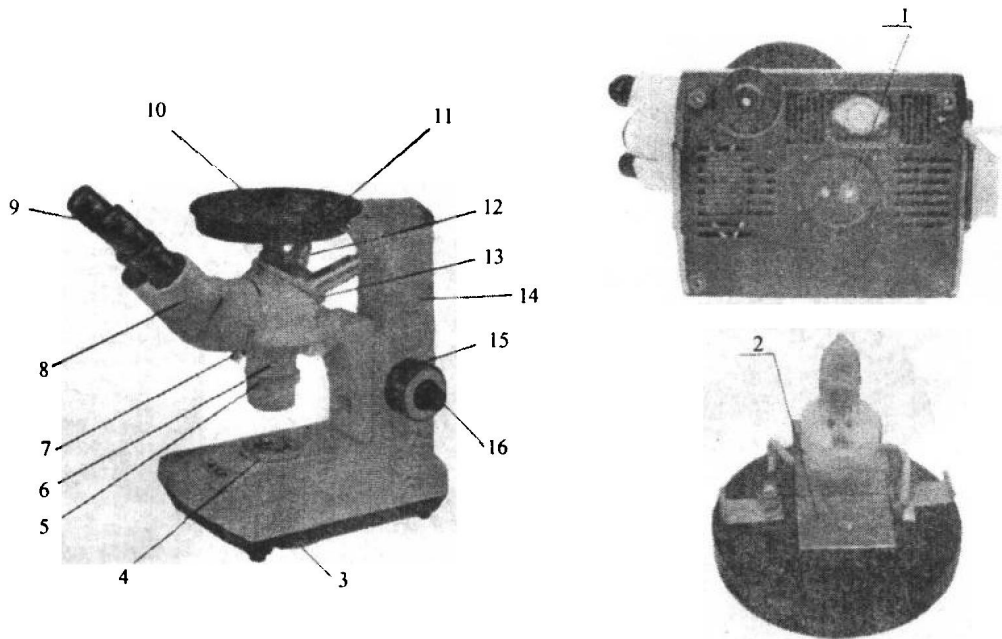


图 1-5 4XA 台式显微镜

1. 滚花螺钉; 2. 照明灯座; 3. 电源开关; 4. 孔径光阑; 5. 视域光阑; 6. 视域光阑调整螺钉; 7. 目镜筒锁紧螺钉; 8. 目镜筒; 9. 目镜; 10. 载物台; 11. 载物台固定螺丝孔; 12. 物镜; 13. 物镜转换器; 14. 显微镜支架; 15. 粗调轮; 16. 微调轮

由上式可知,透镜的焦距  $f$  越短,则放大镜的放大倍数越大。一般采用的放大镜焦距在  $10\sim 100\text{mm}$  范围内,因而放大倍数在  $2.5\sim 25$  倍之间。进一步提高放大倍数,将会由于透镜焦距缩短和表面曲率过分增大而使形成的映像变得模糊不清。为了得到更高的放大倍数,就要采用显微镜,显微镜可以使放大倍数达到  $1500\sim 2000$  倍。

显微镜不像放大镜那样由单个透镜组成,而是由两组透镜组成。靠近所观察物体的透镜叫做物镜,而靠近眼睛的透镜叫做目镜。借助物镜与目镜的两次放大,就能将物体放大到很高的倍数 ( $40\sim 2000$  倍)。图 1-8 所示是在显微镜中得到的放大物像的光学原理图。

被观察的物体  $AB$  放在物镜之前距其焦距略远一些位置,由物体反射的光线穿过物镜,经折射后得到一个放大的倒立实像  $A'B'$ ,再经目镜将实像  $A'B'$  放大成倒立虚像  $A''B''$ ,这就是我们在显微镜下研究实物时所观察到的经过二次放大后的物像。

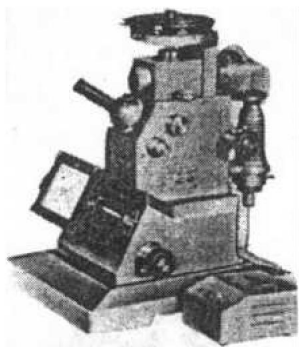
在显微镜设计时,让目镜的焦点位置与物镜放大所成的实像位置接近,并使最终的倒立虚像在距眼睛  $250\text{mm}$  (约等于人眼的正常明视距离) 处成像,这样就可以看得最为清晰。

显微镜质量的好坏,主要取决于:①放大倍数;②透镜的质量;③显微镜的分辨能力。

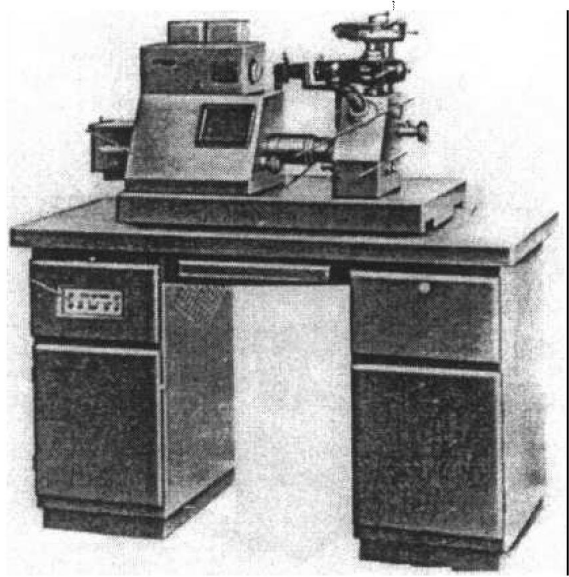
#### 四、显微镜的放大倍数

显微镜包括两组透镜——物镜和目镜。物镜的放大倍数可由下式得出,即

$$M_{\text{物}} = \frac{L}{F_1}$$

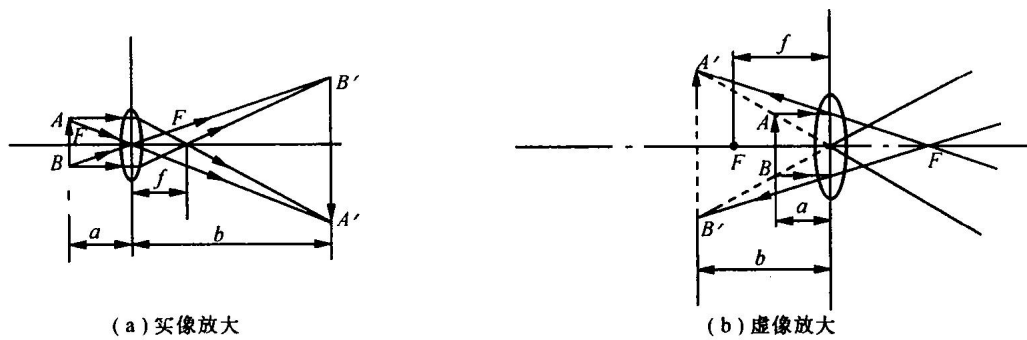


(a)



(b)

图 1-6 国产立、卧式金相显微镜



(a) 实像放大

(b) 虚像放大

图 1-7 放大镜光学原理图

式中  $L$ ——显微镜的光学筒长度(即物镜后焦点与目镜前焦点的距离);

$F_1$ ——物镜焦距。

而  $A'B'$  经目镜放大后的放大倍数则可由公式计算:

$$M_{目} = \frac{D}{F_2}$$

式中  $D$ ——明视距离(250mm);

$F_2$ ——目镜焦距。

显微镜的总放大倍数应为物镜与目镜放大倍数的乘积,即:

$$M_{总} = M_{目} \times M_{物} = \frac{250L}{F_1 \cdot F_2}$$

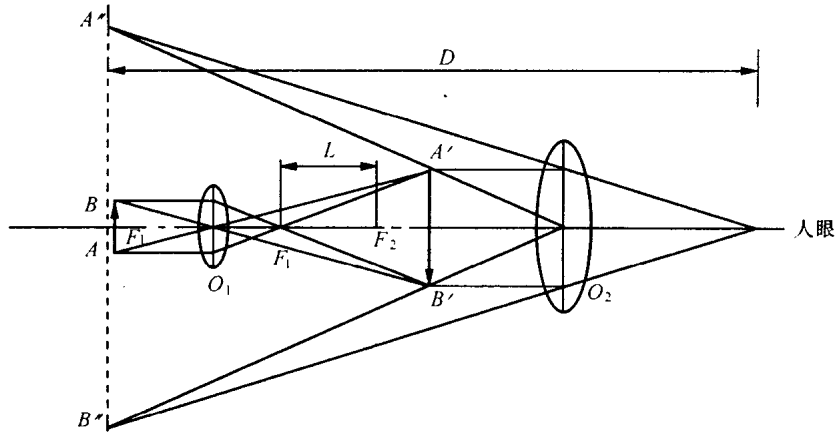


图 1-8 放大物像的光学原理图

显微镜主要放大倍数通过物镜来保证,物镜最高放大倍数可达 100 倍,目镜的放大倍数可达 25 倍。

放大倍数用符号“X”表示,例如物镜的放大倍数为 40X,目镜的放大倍数为 10X,则显微镜的放大倍数为  $40 \times 10 = 400X$ 。放大倍数均分别标注在物镜与目镜的镜筒上。

在使用显微镜观察物体时,应根据其组织的粗细情况,选择适当的放大倍数。以细节部分观察清晰为准,不要盲目追求过高的放大倍数。因为放大倍数与透镜的焦距有关,放大倍数越大,焦距必须越小,结果会带来许多缺陷,同时所看到的物体区域也越小。

### 五、透镜成像的质量

单个透镜在成像过程中,由于几何光学条件的限制,映像会变得模糊不清或发生畸变,这种缺陷称为像差。像差主要包括球面像差和色像差。像差的产生降低了光学仪器的精确性。

球面像差的产生是由于透镜的表面呈球曲形,通过透镜中心及边缘的光线折射后不能交于一点(如图 1-9(a)所示),而变成几个交点呈前后分布;来自透镜边缘的光线靠近透镜交集,而靠近透镜中心的光线则交集在较远的位置,这样得到的映像显然是不清晰的。球面像差的程度与光通过透镜的面积有关。光圈放得越大,则光线通过透镜的面积越大,球面像差就越严重;反之,缩小光圈,限制边缘光线射入,使通过透镜的光线只有中心的一部分,则可减小球面像差。但是光圈太小,也会影响成像的清晰度。

校正透镜球面差的方法是采用多片透镜组成透镜组,即将凸透镜和凹透镜组合在一起(称为复合透镜),由于这两种透镜有着性质相反的球面差,因此可以相互抵消。

色像差的产生是由于组成的光线由各种不同波长的光线在穿过透镜时折射率不同,其中紫色光线波长最短,折射率最大,在离透镜最近处成像;红色光线的波长最长,折射率最小,在离透镜最远处成像;其余的黄、绿、蓝等有色光线则在它们之间成像。这些光在平面上成的像不能集中于一点,而呈现带有彩色边缘的光环(如图 1-9(b)所示)。色像差的存在也会降低透镜成像的清晰度,应予以校正。通常采用单色光源(或加滤光片)。

显微镜的放大作用主要取决于物镜,物镜质量的好坏直接影响显微镜映像的质量,所以对物镜的校正是很重要的。物镜的类型,根据对透镜球面像差和色像差的校正程度不同而分为

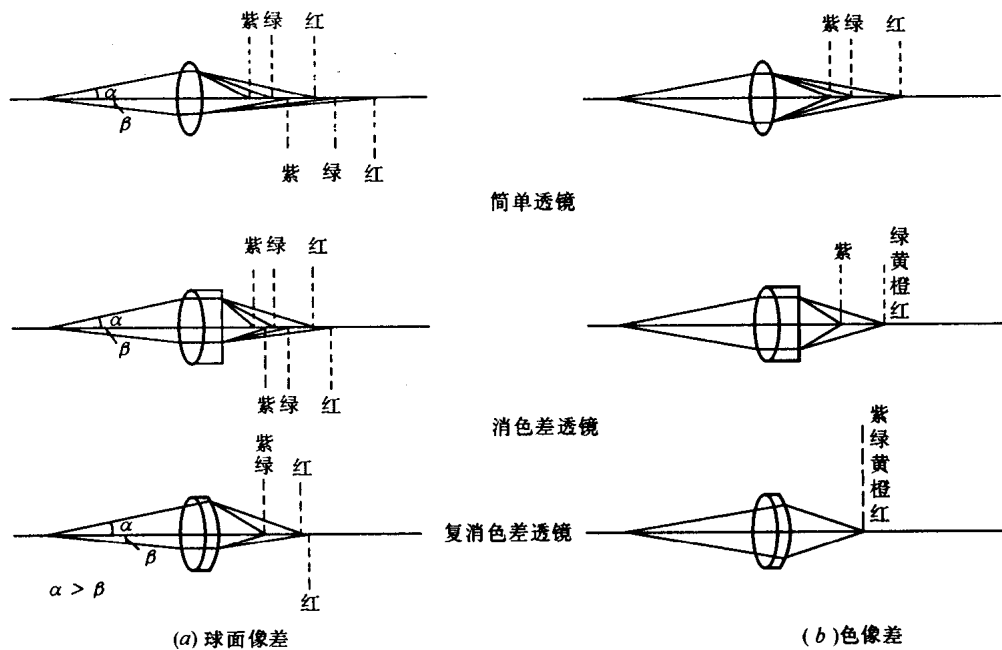


图 1-9 透镜产生像差示意图

消色差物镜、复消色差物镜和半复消色差物镜等。

目镜也是显微镜的主要组成部分,它的主要作用是将由物镜放大所得的实像再度放大,因此它的质量将最后影响到物像的质量,按照目镜的构造型式,一般可分为普通目镜、补偿目镜和测微目镜等。普通目镜其映像未被校正,应与消色差物镜配合使用。补偿目镜须与复消色差物镜或半复消色差物镜配合使用,以抵消这些物镜的残余色像差。

## 六、显微镜的分辨能力

显微镜的分辨能力是由物镜决定。它是指显微镜对于试样上最细微部分所能获得清晰映像的能力,通常用可以辨别物体上两点间的最小距离  $d$  来表示。被分辨的距离越短,表示显微镜的分辨能力越高。

显微镜的分辨能力可由下式求得:

$$d = \frac{\lambda}{2 \cdot N \cdot A}$$

式中  $\lambda$ ——入射光源的波长;

$N \cdot A$ ——物镜的数值孔径,表示物镜的聚光能力。

可以看出,波长越短,数值孔径越大,分辨能力就越高,在显微镜中就能看到更细微的部分。数值孔径可用下列公式求出:

$$N \cdot A = \eta \cdot \sin \phi$$

式中  $\eta$ ——物镜与物体间介质的折射率;

$\phi$ ——通过物镜边缘的光线与物镜轴线所成的角度(见图 1-10)。

一般物镜与物体之间的介质是空气,光线在空气中的折射率  $\eta \approx 1$ ,若一物镜的角孔径为  $60^\circ$ ,则其数值孔径为:

$$N \cdot A = \eta \cdot \sin \phi = 1 \cdot \sin 30^\circ = 0.5$$

若在物镜与试样之间滴入一种松柏油( $\eta = 1.52$ ),则其数值孔径为:

$$N \cdot A = 1.52 \cdot \sin 30^\circ = 0.76$$

这样就增大了物镜的数值孔径。物镜在设计和使用中指定以空气为介质的称为“干系物镜”(或干物镜),以油为介质的称为“油浸系物镜”(或油物镜)。从图 1-10 可以看出,油镜具有较高的数值孔径,因为当光线沿光轴方向射向试样时,试样的反射光透过油进入到物镜的光线比透过空气进入的多,使物镜的聚光能力增强,从而提高了物镜的分辨能力。

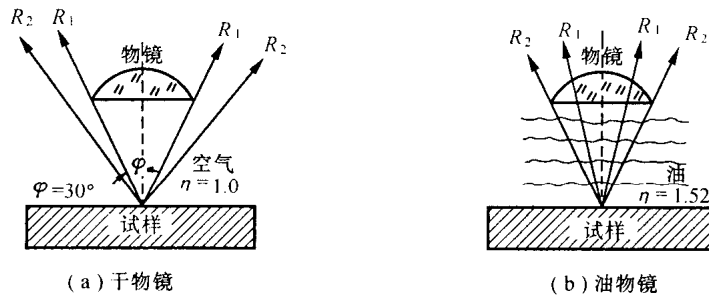


图 1-10 不同介质对物镜聚光能力的比较

物镜的数值孔径与放大倍数一起刻在镜头外壳上,例如镜头上刻有 10X/0.25 或在 40X 的下面刻有 0.65 等数字,这里“0.25”或“0.65”即表示物镜的数值孔径。高倍物镜通常都为油浸系,油镜头用“油”或(Oil),或外壳涂一黑圈来表示。

## 七、金相显微镜的构造和使用

### 1. 显微镜的构造

金相显微镜通常由光学系统、照明系统和机械系统三大部分组成,有的显微镜还附有摄影装置。现以 4XA 型台式显微镜为例加以说明。

仪器的光路系统见图 1-11 所示,灯源 1 的灯丝经集光镜 2 与反光镜 3 成像在孔径光阑 4 上,接着由照明辅助透镜 5、7,辅助物镜 9 成像在物镜 10 的后焦面附近,然后经物镜以近于平行的光束照明试样,视场光阑 6 位于照明辅助透镜 7 的焦面上,经辅助物镜 9 和物镜 10 成像在试样面 11 上,因此,仪器满足柯勒照明原理,照明均匀,且可减少有害的杂散光,提高成像衬度。

试样 11 的反射光经物镜 10 和辅助物镜 9 以平行光束射向半透反光镜 8,后由辅助物镜 12,棱镜 13,双筒棱镜组 14,成像在目镜 15 的前焦面上,最后以平行光束射向人眼供观察。

### 2. 操作方法(按图 1-5)

①接通电源,旋转拨盘(3)开亮灯源,在孔径光阑(4)处观察灯丝成像状况,若灯丝左右位置有偏差,则旋松滚花螺钉(1),转动照明灯座(2)(不必从仪器中卸下照明灯组),校正灯丝左右位置偏差,后即固紧滚花螺钉,若灯丝前后位置不正确,则需在底座后盖板逆时针转取下照明灯组,将灯泡上下拉动,以改变灯丝上下位置,使灯丝居中。



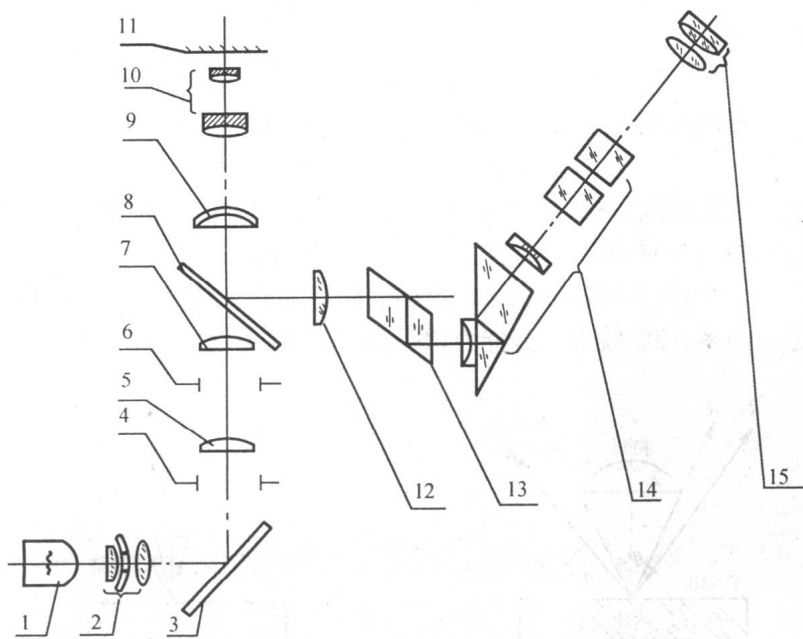


图 1-11 光学原理图(4XA 型)

1. 灯源; 2. 集光镜; 3. 反光镜; 4. 孔径光阑; 5、7. 照明辅助透镜; 6. 视场光阑; 8. 半透反光镜;  
9、12. 辅助透镜; 10. 物镜; 11. 试样; 13. 棱镜; 14. 双筒棱镜组; 15. 目镜

若灯泡用久损坏需调换新灯泡, 则从后盖板取下照明灯泡, 参照上述方法安装上新灯泡。调节可变电位器拨盘(3)可连续改变光源亮度。

②将物镜(12)安装在转换器(13)上。

③在双筒目镜(8)镜管口中插入 10X 目镜(9)。

④转动粗调手轮(15)及微调手轮(16)进行调焦, 直到所观察的像清晰为止。

⑤旋转视场光阑的滚花圈(5), 使光阑缩小直至视场中出现比目镜视场光阑略小的可变光阑像, 转动滚花螺丝(6)使视场光阑居中, 再放大可变视场光阑像, 使目镜的视场光阑内切于可变视场光阑像。

⑥在双筒目镜(8)中抽去目镜(9)可直接用肉眼观察到物镜的孔径光阑(圆形通光孔), 旋转孔径光阑(4)的滚花圈, 使光阑缩小, 直至目视能观察到多边形的可变孔径光阑像, 使可变孔径光阑像略小于物镜的孔径光阑。如图 1-12 所示。

图 1-12 中, a 为不正确的调节, 可变孔径光阑太小, 影响仪器的分辨能力; b 为正确的调节, 可变孔径光阑直径约为物镜孔径光阑直径的  $\frac{3}{4}$  左右。此时, 成像的对比度较好且仪器的分辨能力较高; c 为不正确的调节, 可变孔径光阑过大, 使成像的对比度急剧下降, 仪器的实际分辨能力也随之迅速降低。

为了达到最佳的使用效率, 每个物镜均作上述调整。

⑦将目镜(9)再插入双筒目镜管中即可进行正常的观察。

⑧对照明均匀性要求较高的场合, 可在孔径光阑(4)处安置一块磨砂玻璃。

⑨为了减少油镜观察时像的跳动现象, 仪器尽可能安放在远离震源的地方, 或采取适当的