

高等学校机械类学科“十二五”规划教材

现代金相显微分析及仪器

萧泽新 陈奕高 编著
刘心宇 主审



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校机械类学科“十二五”规划教材

现代金相显微分析及仪器

萧泽新 陈奕高 编著
刘心宇 主审

西安电子科技大学出版社

前 言

教育部启动的“质量工程”像和煦的春风吹动着神州高等教育千帆竞发的春潮。桂林电子科技大学机电综合工程训练中心有幸成为国家级实验教学示范中心，成为涌动春潮中的一朵浪花。时任中心主任的我，在中心建设的历程中深感责任重大，常常思考着如何办出自己的特色，希冀能为中国高等教育事业添砖加瓦！于是，本人通过产学研结合，主持研发了用于工程训练中心的与热加工工艺链接的金相显微分析、硬度检测、焊接件显微分析的新型光学计量仪器，主要有：自动正置金相显微镜、自动显微系统多媒体互动实验平台、硬度压痕光电测量装置和连续变倍单筒视频显微镜等。这些新型仪器具有如下鲜明特色：记录手段视频化、数字化，操作手段自动化，图像分析手段智能化，能实现动态实时检测等。这些仪器在清华大学、天津大学、大连理工大学、华南理工大学、桂林电子科技大学、广西师范大学、桂林电子科技大学信息科技学院（独立二级学院）等众多高校的工程训练中心或教学单位得到了推广应用。自己的科研成果能为高校教育质量的提高尽一份微薄之力，本人感到很欣慰。

为了配合这些新型教学装备的应用，承蒙中国教育名师、教育部机械基础课程指导分委员会副主任、清华大学傅水根教授的热情鼓励和支持，本人编写了校内配套讲义《显微图像光电检测技术及应用》。本书就是在该校内讲义的基础上拓展而成的。

全书分为三部分，共 13 章。第 1、6、12 章为现代金相显微分析装备，不仅基本上涵盖了传统工业用显微镜，也包括了一系列新机型；第 2 章为金相试样的制备和组织显示；第 3 章为常用金属材料金相组织；第 4 章为金相定量分析；第 5、7、8、9、10 章为基于显微图像光电检测技术的金相组织、硬度、表层成分与组织梯度检测，以及焊接质量和断口分析。第三部分金相显微分析实训，包含第 11、12 和 13 章。第 11 章为实验汇编，列举了 8 个实验，既有传统的验证性实验，也有设计性实验和综合性实验，部分实验可借助具有自主知识产权的“显微图像几何量光电检测软件”（可从出版社网站下载）辅助实施。尽管显微摄影装置加上暗房技术所获得的传统金相照片基本上已完成了其历史使命，但考虑到有些读者可能有实际需求，于是作为实训的一个“实用环节”，在第 13 章对其进行了简单介绍。

本书由萧泽新、陈奕高共同编著。其中，第 1、4、6、7、11、12、13 章和第

5 章的部分内容由萧泽新编写，第 2、3、8、9、10 章和第 5 章的部分内容由陈奕高编写。萧泽新负责全书的统稿工作。

感谢桂林电子科技大学材料科学与工程学院原院长、博士生导师刘心宇教授审阅全书；感谢桂林电子科技大学学术委员会原主任郑继禹教授的热情鼓励与支持。研究生李明东、黄寅、叶鹏和陈朋波等为书稿录入、插图制作做了大量的工作，广州粤显光学仪器有限责任公司、广西梧州市澳特光电仪器有限公司和广东珠海市金湾区环保局韦洋副局长等为本书提供了相关参考资料，在此一并致谢！

尽管书中所涉及的新型仪器是本人主持研发的，但在应用上缺乏足够的经验，加之本人水平有限，书中可能还存在一些不足之处，恳请读者批评指正。

萧泽新

于桂林电子科技大学
光机电一体化研究所

2015 年 2 月

内 容 简 介

光电检测技术是先进成像、光电传感和计算机图像处理技术的系统集成,它在金相显微分析中扮演着越来越重要的角色。本书围绕着“借助现代化光电检测技术及仪器实施金相定量分析”这一主题展开阐述,以简明扼要的理论为基础,提纲挈领地阐述金相分析原理,强调理论联系实际和可操作性,力求在深化理论知识的同时,加强对学生的工程实践能力的培养。本书介绍的光学仪器不仅基本上涵盖了传统工业用的显微镜,也包括了作者依据光电检测技术自主研发的自动金相显微镜等多种新型光学计量仪器。实践证明,这些新型仪器的应用不仅为金相显微分析创造了新条件,也给本书增色不少!

本书可作为高等院校材料、仪器、机械制造等专业的教科书或实验教材,也可作为工程训练中心的实训教材,还可供从事金属热处理、理化检验工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代金相显微分析及仪器/萧泽新,陈奕高编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2015.5

高等学校机械类学科“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3678 - 8

I. ① 现… II. ① 萧… ② 陈… III. ① 金相组织—金属分析 IV. ① TG115.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 080094 号

策 划 秦志峰

责任编辑 许青青 秦志峰

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2015年5月第1版 2015年5月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 13

字 数 303千字

印 数 1~2000册

定 价 25.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3678 - 8/TG

XDUP 3970001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

目 录

第一部分 现代金相显微分析

第 1 章 现代金相显微分析装备(I)	1
1.1 金相显微镜的原理和结构	1
1.1.1 显微镜成像光学系统	1
1.1.2 金相显微镜的光学原理	2
1.1.3 显微镜的基本零部件及其光学性能	4
1.1.4 金相显微镜的照明系统	10
1.1.5 金相显微镜系列	12
1.2 特种显微术的集成及其在金相显微分析中的应用	13
1.2.1 暗场显微术及其在金相显微分析中的应用	13
1.2.2 落射偏振光照明在金相显微分析中的应用	16
1.2.3 相衬显微术及其在金相显微分析中的应用	20
1.2.4 微分干涉相衬显微术及其在金相显微分析中的应用	25
1.2.5 多功能金相显微镜和特型金相显微镜简介	32
1.3 光机电算有机融合提升现代金相显微分析水平	35
1.3.1 金相显微镜的现代化与现代化金相显微术	35
1.3.2 自动图像分析仪及其应用	36
1.3.3 新型金相显微镜系列产品简介	36
第 2 章 金相试样的制备和组织显示	43
2.1 取样原则与方法	43
2.1.1 取样原则	43
2.1.2 试样的截取方法	44
2.1.3 金相试样砂轮切割机	44
2.2 试样的镶嵌	45
2.2.1 热镶嵌	45
2.2.2 冷镶嵌	46
2.2.3 机械夹持	46
2.3 试样的磨平与磨光	46
2.3.1 试样的磨平	46
2.3.2 试样的磨光	46
2.4 试样的抛光	48
2.4.1 抛光方法	48
2.4.2 MP-1 型双速磨抛机的结构与使用	49

2.5 试样的浸蚀	50
2.6 使用胶泥镶嵌法获得水平向上的观察面	52
第3章 常用金属材料的金相组织	54
3.1 钢铁材料中常见组织及其形态	54
3.2 常用钢铁材料金相组织	56
3.2.1 钢中非金属夹杂物	56
3.2.2 碳素钢在不同热处理条件下的典型组织	57
3.2.3 常用铸铁的金相组织	68
3.2.4 不锈钢的奥氏体组织	70
3.2.5 焊接金相组织	71
3.3 常用有色金属及其合金的金相组织	73
第4章 金相定量分析	76
4.1 定量金相分析基础	76
4.1.1 定量体视学和定量金相学	76
4.1.2 金相定量分析应实施的基本工艺操作	76
4.2 金相定量分析的基本符号、标准符号和基本方程	78
4.3 金相定量分析的基本方法	81
4.4 金相定量分析应用举例	84
4.5 金相定量测量误差的统计分析	86
第5章 基于显微图像光电检测的金相定量分析	90
5.1 概述	90
5.2 金相显微图像光电检测原理	91
5.3 显微图像的定量分析	92
5.3.1 显微图像的采集与保存	92
5.3.2 显微光电系统定标	93
5.3.3 金相显微图像的几何量测量	95
5.3.4 金相显微图像相含量的测量	97
5.3.5 金属平均晶粒度的测定	99

第二部分 宏观组织的低倍显微分析

第6章 现代金相显微分析装备(Ⅱ)	103
6.1 体视显微镜	103
6.1.1 概述	103
6.1.2 体视显微镜的光学系统结构	105
6.1.3 体视显微镜的基本参数和技术性能	106
6.1.4 体视显微镜的产品结构和使用方法	108
6.2 连续变倍单筒视频显微镜	111
6.2.1 概述	111

6.2.2 变焦距(变倍)光学原理	112
6.2.3 连续变倍显微光学系统	113
6.2.4 连续变倍单筒视频显微镜	116
6.3 显微硬度检测装置	118
6.3.1 硬度和硬度试验	118
6.3.2 显微硬度试验	121
6.3.3 显微硬度检测装置	122
6.3.4 显微硬度计产品介绍	125
第7章 硬度压痕尺寸光电测量	127
7.1 概述	127
7.2 基于金相显微镜的硬度压痕光电测量	127
7.3 硬度光电测量装置	128
第8章 钢的表面热处理组织变化层深度测定	133
8.1 表面高频淬硬层深度测量	133
8.2 表面渗碳层深度测量	134
第9章 基于低倍显微图像的焊接质量分析	137
9.1 焊接接头的区域分析	137
9.2 焊接接头的宏观缺陷分析	138
9.3 焊缝厚度及熔深、熔宽的测定	139
第10章 基于低倍显微图像的金属断口分析	141
10.1 断口分析的方法	141
10.2 典型金属断口分析	142

第三部分 金相显微分析实训

第11章 实验汇编	145
11.1 金相显微镜的原理、构造及使用	145
11.2 金相试样的制备	146
11.3 用光电检测法测显微组织几何量、球墨铸铁石墨大小分级和球化分级评定	148
11.4 维氏硬度压痕光电测量	151
11.5 铸钢铸态、正火态、退火态组织观察及铁素体平均晶粒度测量	153
11.6 碳钢热处理前后组织变化的观察及其硬度测量	154
11.7 渗碳件组织和渗碳层深度的测定	157
11.8 焊接接头的质量检验	160
第12章 现代金相显微分析装备(Ⅲ)	163
12.1 光波的干涉与干涉显微镜	163
12.1.1 光波的干涉	163

12.1.2 干涉显微镜	164
12.2 透射偏光显微镜	167
12.2.1 概述	167
12.2.2 偏光显微镜的光学原理	168
12.2.3 偏光显微镜的结构	169
12.2.4 偏光显微镜参考系统和无应力物镜性能	169
12.2.5 偏光显微镜产品结构和基本操作	172
第 13 章 显微摄影和金相照片制作	177
13.1 显微摄影光学系统及显微摄影装置	177
13.2 金相照片制作	180
附录 A 常用金相检验标准索引	181
附录 B 常用金相显微分析装备相关标准索引	182
附录 C 纯金属合金中各相、硬质合金和常见化合物的显微硬度值(HM)	183
附录 D 各种硬度压痕尺寸和硬度的换算表	188
附录 E 布氏、维氏、洛氏硬度值的换算表	197
参考文献	198

第一部分

现代金相显微分析

第 1 章 现代金相显微分析装备(I)

显微分析是材料科学与工程领域重要的研究方法和技术手段,利用它研究材料时能观测到用宏观分析无法观测到的组织细节及缺陷。“工欲善其事,必先利其器”,本章以及第 6 章现代金相显微分析装备(II)和第 12 章现代金相显微分析装备(III)就是专门从装备(仪器)的角度来展开阐述的,只是这 3 章的侧重点不一样,第 1 章主要讲述显微分析最常用的分析工具——金相显微镜以及相关的显微图像的仪器装备。

1.1 金相显微镜的原理和结构

1.1.1 显微镜成像光学系统

显微镜指能提高人们获得微小信息能力的光学仪器。显微镜系统通常由物镜和目镜两部分组成。显微物镜的作用是把被观察的物体放大为一个位于目镜的焦平面上的实像,然后通过目镜成像。

图 1-1 是显微镜成像的光路原理图。图中的物镜和目镜均用薄透镜表示。物体 AB 处于物镜的两倍焦距之内、一倍焦距之外,它首先经过物镜成一放大的倒立实像 $A'B'$ 于目镜的物方焦平面上或很靠近焦平面的地方,然后目镜将这一实像再次放大成倒立虚像 $A''B''$ 于无限远或人眼的明视距离以外,以供人眼观察。显微镜对物体进行两次放大,因此与放大镜相比,它具有更大的放大倍率,能观察到肉眼所不能直接观察到的微小物体,分辨更微小的细节。

在一台显微镜上通常都配有若干个不同倍率的物镜和目镜以供互换使用。为保证物镜的互换性,要求不同倍率的显微镜的共轭距离(即物平面到像平面的距离,简称共轭距)相等。GB/T 2609—2006《显微镜 物镜》规定显微物镜的共轭距(即物-像距离)为 185 mm、

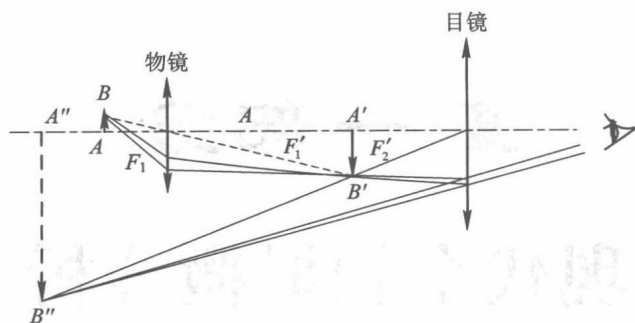


图 1-1 显微镜成像的光路原理图

195 mm、210 mm 和无限远。这就界定了常规的两种显微成像光学系统的规格，即共轭距为有限筒长(见图 1-2)和无限筒长(见图 1-3)的成像光学系统。所谓“无限筒长”(“无限像距”)的显微物镜，是指被观察物体通过物镜成像以后成像在无限远处。在物镜的后面，另有一镜筒透镜(辅助物镜)，再把像成在目镜的焦平面上。

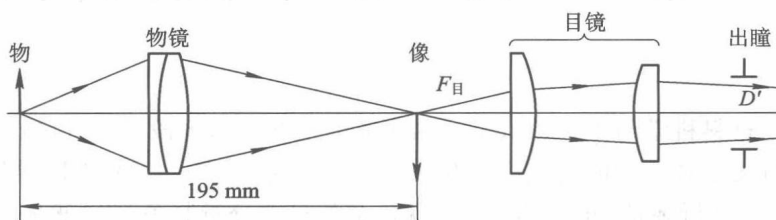


图 1-2 共轭距为 195 mm 的显微镜光路图

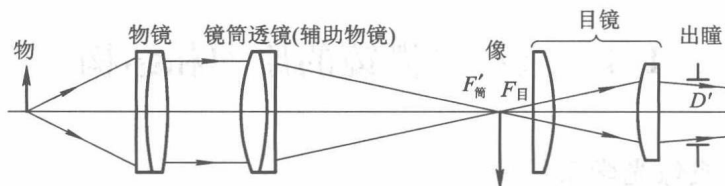


图 1-3 无限远像距的显微镜光路图

由上述可见，两种常规的显微光学系统的区别是：有限筒长系统的基本组成是“物镜+目镜”；而无限远像距光学系统的基本组成是“物镜+辅助物镜+目镜”。

1.1.2 金相显微镜的光学原理

光学显微镜经过四百多年的发展已形成庞大的“家族”，主要有生物显微镜、体视显微镜、工具显微镜、金相显微镜和偏光显微镜五大类。金相显微镜指用入射(落射)照明来观察金属试样表面(金相组织)的显微镜。1831 年俄国学者安诺索夫用生物显微镜斜照明观察钢的组织，从而诞生了金相显微研究方法。1872 年冯·朗格发明了真正意义的金相显微镜。一百多年过去了，目前金相显微镜已经成为显微镜“家族”中重要的一员。

金相显微镜种类繁多，下面以普遍使用的结构简单的国产 XJ-16 型初级金相显微镜

为例,阐述金相显微镜的光学原理。

图1-4为XJ-16型金相显微镜的外形图。XJ-16型金相显微镜为倒置式,即物镜由下向上观察样品,载物台位于显微物镜的上方,试样在水平放置平面上作二维运动,以改变所观察试样的部位;手动调焦使用粗调同轴机构,外轮用于粗调,中心手轮用于微调。

该显微镜的物镜为消色差物镜,放大率有 $10\times$ 、 $45\times$ 、 $100\times$ (油浸)三种。3个物镜能同时放在可以转动的物镜转换器上,目镜都是惠更斯目镜。

显微镜光源为6~8V的钨丝灯,采用柯勒照明(明场照明)系统,孔径光阑和视场光阑连续可调。这种显微镜还带有显微摄影装置,可拍120底片的金相照片。

图1-5为JX-16型金相显微镜光学系统的示意图。由图1-5可见,灯泡1发出的光线经过聚光镜组2及反射镜13被汇聚在孔径光阑12上,随后经过聚光镜组3,穿过半反半透镜4后经辅助物镜5再度将光线汇聚在物镜6的物方焦平面上,最后光线通过物镜,

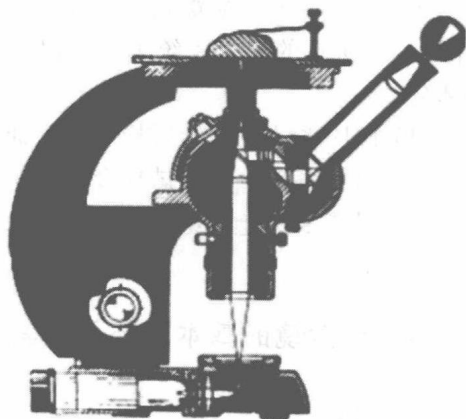


图1-4 XJ-16型金相显微镜的外形图

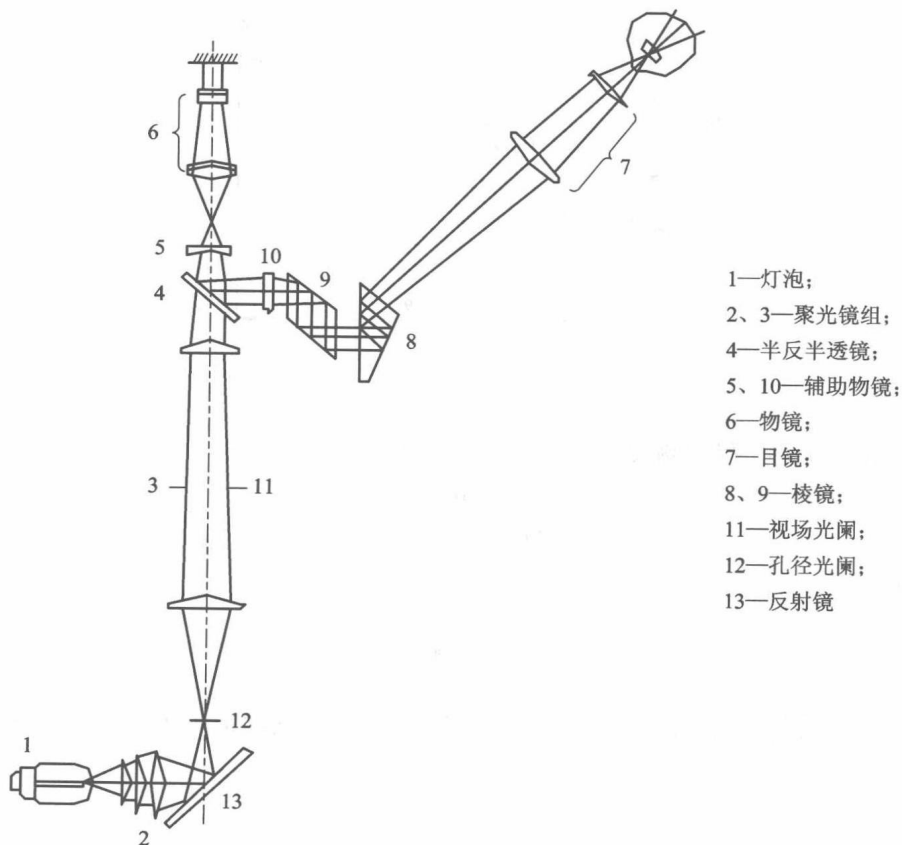


图1-5 JX-16型金相显微镜光学系统的示意图

用平行光照亮试样，使其表面得到充分而均匀的照明。从试样反射回来的光线经过物镜 6、辅助物镜 5、半反半透镜 4、辅助物镜 10 及棱镜 8 成一放大实像，该像被目镜 7 再度放大。从图 1-5 所示的光学系统可以看出，传统的金相显微镜的光学系统大致可分为三个主要的部分：

- (1) 照明系统——给试样被观察面以均匀充足的照明，建立显微镜最佳的工作环境。
- (2) 物镜系统——给试样金相组织结构成一清晰的、衬度高的放大实像。
- (3) 目镜系统——用以观察试样经过物镜放大的实像，目镜实质上是观察物镜所成实像的放大镜。

1.1.3 显微镜的基本零部件及其光学性能

1. 物镜

物镜指显微镜中最先对实际物体成像的光学系统。

1) 显微镜的光学特性

显微镜能将近距离的物体放大成一放大实像，它的孔径光阑在物镜组附近或后焦平面上。短焦距、大孔径、小视场是显微镜的特点。图 1-6 所示为显微物镜成像。

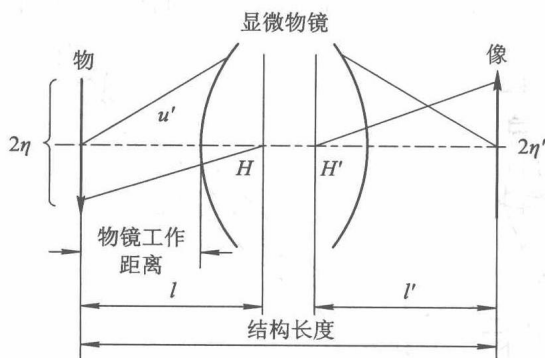


图 1-6 显微物镜成像

(1) 物镜放大率。根据物镜成像规律可知，以下关系式成立：

$$\text{物镜共轭距 } L = l' - l$$

$$\text{结构长度} = G + HH'$$

物镜放大率：

$$\beta_{\text{物}} = \frac{\text{像高}}{\text{物高}} \approx \frac{l'}{l} (\text{共轭距离为 } 195 \text{ mm 时})$$

$$\beta_{\infty \text{物}} = \frac{250 \text{ mm}}{\text{物镜焦距 (mm)}} (\text{共轭距为无限远时, 此时辅助物镜焦距 } f' = 250 \text{ mm})$$

物镜焦距：

$$f' = \frac{-G}{\beta_{\text{物}} + \frac{1}{\beta_{\text{物}}} - 2} \quad (1-1)$$

物镜共轭距又称物-像距离，是光学安装的基本尺寸。它是物面和第一次像面之间在

空气中的沿轴距离。国家标准规定物-像距离为 185 mm、195 mm、210 mm 和无限远。其中, 195 mm 和无限远为最常用的两种, 前者通常结构长度是一定的, 主面 HH' 很小, 所以可以认为 $L \approx G = 195$ mm。由式(1-1)可见, 高倍物镜焦距短。为便于选用, 显微物镜以放大率为标志, 也相当于给出了焦距。

(2) 物方视场:

$$2\eta = \frac{2\eta'}{\beta_{\text{物}}} \quad (\text{mm}) \quad (1-2)$$

像方视场 $2\eta'$ 由于受镜筒直径限制, 是一定值。GB 9242-88《金相显微目镜和镜筒的配合尺寸》规定: 显微镜目镜外壳直径 d_1 分别为 $\phi 23.2\text{h}8$ (生物显微镜、金相显微镜、偏光显微镜等)、 $\phi 30\text{h}8$ (偏光显微镜、体视显微镜和广角目镜)、 $\phi 34\text{h}8$ (体视显微镜), 上述直径单位均为 mm。由此可知, 视场实际尺寸为上述规定尺寸减去目镜筒厚度。例如, 对 $\phi 23.2\text{h}8$ 生物显微镜, 视场 ≤ 20 mm。

(3) 数值孔径(NA)。数值孔径指物方孔径角的一半的正弦与物点所在介质的折射率的乘积。它的大小直接影响分辨率和像的光亮度, 它是物镜的主要指标。数值孔径基本上决定了显微物镜的结构和校正像差的复杂程度。

当共轭距 L 一定时, β 和 f' 有如下关系:

$$f' = \frac{-\beta}{(1-\beta)^2} \cdot L$$

对无限筒长物镜来说, GB/T 2609-2006《显微镜 物镜》指出: 共轭距为无限远的物镜, 其镜筒透镜焦距可为 160 mm、180 mm、200 mm、250 mm。

$$f'_{\infty} = \frac{\text{镜筒透镜焦距}}{\beta}$$

$$f' = \frac{-250}{\beta}$$

从以上两式可以看出: β 的绝对值越大, f' 越短。因此倍率的内涵与焦距是一致的。

数值孔径(NA)的计算式如下:

$$\text{NA} = n \sin u \quad (1-3)$$

式中, n 为物方所在的介质折射率, u 为物方孔径角的一半。显微物镜的视场由目镜视场决定, 对无限筒长显微镜来说, 当镜筒透镜 $f' = 250$ mm 时, 物方视场角(等于物镜像方视场角)的一半的正切 $\tan \omega = y'/f'_{\text{辅}} = 0.04$, $\omega = 2.3^\circ$, 所以物镜视场角 2ω 不大于 5° , 有限筒长显微镜也大致相当。

(4) 物方介质。前面已指出了普通显微物镜的物方介质($n=1$), 为了提高数值孔径, 可选用高折射率的物方介质, 例如杉木油($n=1.515$)、水($n=1.333$)、甘油($n=1.463$)、溴代萘($n=1.656$)等。

(5) 盖玻片厚度。盖玻片指在显微标本片中覆盖生物标本的玻璃片。观察生物或化学标本时, 宜用盖玻片将其展平, 以免脏污和干裂, 便于保存。盖玻片在物方成像的光路内, 应按 GB 6273-86《显微镜用盖玻片》的要求, 控制它的折射率($n_g = 1.525 \pm 0.0015$)和厚度。厚度一般为 $0.17_{-0.04}^0$ mm, $40\times$ 以上的高倍物镜要求厚度为 $0.17_{-0.02}^0$ mm。

(6) 机械筒长。对有限像距的物镜, 机械筒长是从物镜的安装定位面到显微镜镜筒上端面的距离, 镜筒上端面是安装目镜的定位面。GB/T 2609-2006《显微镜 物镜》指出: 共

焦距规定为 185 mm、195 mm、210 mm 的物镜，其机械筒长规定为 160 mm。对无限像距的物镜，机械筒长可认为是无限远。

显微物镜是按一定的机械筒长设计的。当然，也有一些特殊的物镜允许改变筒长。在选用互换物镜时必须注意。对于物镜后面需加棱镜等光学零件的系统，棱镜的等效空气层厚度应计算在机械筒长之内。有些反射照明的显微镜后常加斜放的平行平面玻璃板，它应在平行光路内工作，以免引入像差，需要有无限远筒长的物镜，然后再由会聚的镜筒透镜成实像。

(7) 工作距离。物镜的工作距离是指物镜前表面顶点到物平面的沿轴距离。物镜倍率高，焦距短，工作距离小，如 $100\times$ 物镜的工作距离为 0.19 mm。

标准显微镜筒表面都有标记，写明放大倍率、数值孔径、机械筒长及盖玻片厚度（均以 mm 作单位）。盖玻片厚度处若刻为“—”，表明盖玻片可用可不用；若刻为“0”，表明不用盖玻片。机械筒长与盖玻片厚度常刻在一起，因为它们与物镜的像差校正有关。此外，常用物镜的外壳表面有不同的颜色圈，一眼可认出其放大倍率。长工作距离物镜、相衬物镜、偏光物镜在物镜类别前分别加 C、X、P 作为标志；物镜用螺纹与显微镜本体连接，螺纹均为英制尺寸（如 $WS4/5''\times 1/36''$ ），国际通用。

国产显微镜的放大率和数值孔径的适配关系通常应符合 GB/T 2609—2006《显微镜物镜》的规定。

2) 物镜的基本类型

显微物镜根据用途不同分为消色差物镜、半平场消色差物镜、平场消色差物镜、平场半复消色差物镜、平场复消色差物镜。不同类型的显微镜要求的配置是有所不同的。《中华人民共和国机械行业标准 金相显微镜》(JB/T 10077—1999)规定：用普通金相显微镜观察时，选用消色差物镜、半平场消色差物镜即可；实验室金相显微镜用平场消色差物镜；研究用金相显微镜用平场消色差物镜、平场半复消色差物镜、平场复消色差物镜。对于生物显微镜，也有类似的要求。

(1) 消色差物镜。消色差物镜指对两条谱线校正轴向色差的物镜。现有的普及型显微镜物镜大多属于消色差型，能满足一般的显微观察需要。它用于校正近轴区域的球差、彗差和位置色差，边缘像质较差。消色差物镜按 NA 大小有四种形式，见图 1-7。

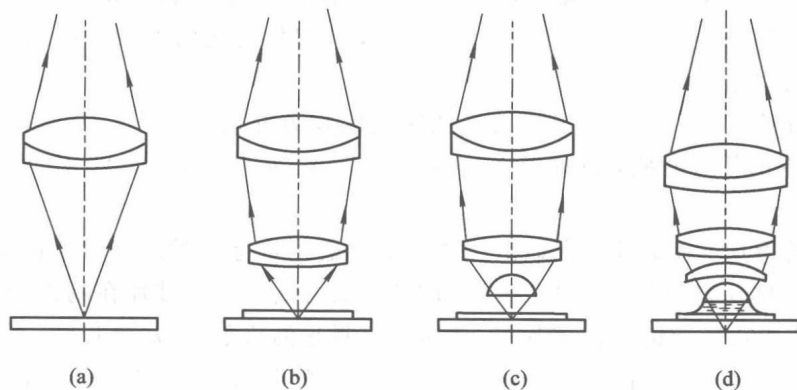


图 1-7 消色差物镜

① 双胶合物镜：用于低倍显微物镜，放大倍数为 $1\sim 5$ ，NA 为 $0.1\sim 0.15$ 。

② 两组双胶合-李斯特型(Lister)：用于中倍显微物镜，放大倍数为 $8\sim 20$ ，NA 为 $0.25\sim 0.3$ 。前后双胶合组分别用于消位置色差，倍率色差可自动校正。前后两组联解消除球差、彗差和像散，但场曲不能校正。

③ 阿米西型：在李斯特型物镜前加一不晕半球型透镜，用于中倍及高倍显微物镜，放大倍数为 $25\sim 40$ ，NA 为 $0.4\sim 0.65$ 。

④ 阿贝型油浸物镜：在阿米西型前片与中组之间加一块弯月正透镜，放大倍数可达 $90\sim 100$ ，NA 为 $1.25\sim 1.4$ 。

(2) 平场消色差物镜与半平场消色差物镜。消色差物镜残留严重场曲，为了适应显微镜摄影和 CCD 摄录的需要，发展为平(像)场消色差物镜，简称平场物镜，它是指场曲和像散都得到很好校正的消色差物镜(见图 1-8)。

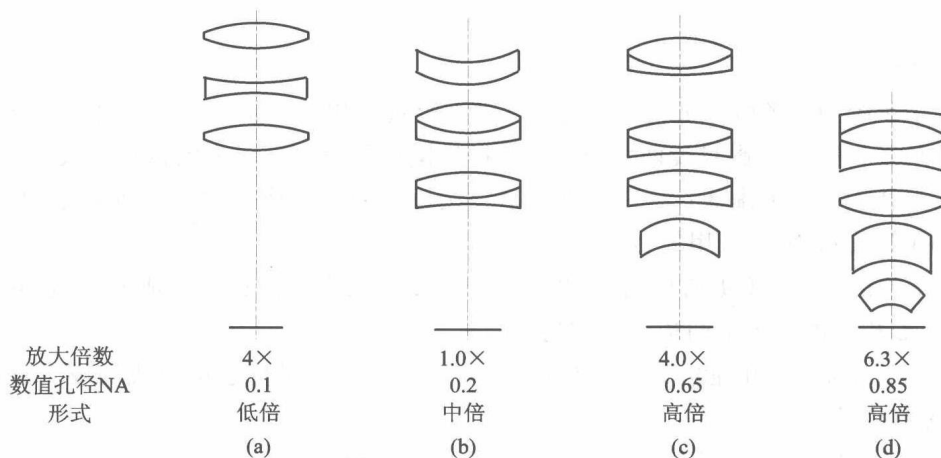


图 1-8 平场消色差物镜

半平场消色差物镜的场曲和像散校正程度介于消色差物镜和平场消色差物镜之间。

(3) 平场复消色差物镜与平场半复消色差物镜。大孔径、高分辨率显微物镜不允许有大的二级光谱和色球差等缺陷，于是出现了复消色差物镜，它是对三条谱线校正轴向色差的物镜。设计制造高分辨率、大孔径显微物镜的困难在于校正二级光谱、色球差和倍率色差。校正二级光谱常选用萤石(CaF_2 ，晶体，为低折射率、低色散材料)作正透镜。然而受成像规律的制约，倍率色差不可能完全校正。为此在使用复消色差物镜时应配备“补偿目镜”，以补偿倍率色差，才能取得更好平场复消色差光学系统的成像效果。目前高级研究显微镜广泛采用平场复消色差物镜。它是一种场曲和像散都得到很好校正的复消色差物镜。如图 1-9 所示，平场复消色差物镜的像质非常好，如对染色体标本进行彩色摄影，高倍物镜放大倍数为 100，NA 为 1.35。因为平场复消色差物镜采用的萤石材料多，价格昂贵，于是出现了平场半复消色差物镜。这是一种二级光谱比消色差物镜小的物镜，它采用的特种材料少，像差介于平场消色差与平场复消色差物镜之间，有相当高的性价比，近年来在研究用显微镜中得到了广泛的应用。

此外,还有按特殊要求设计的折反射显微物镜。

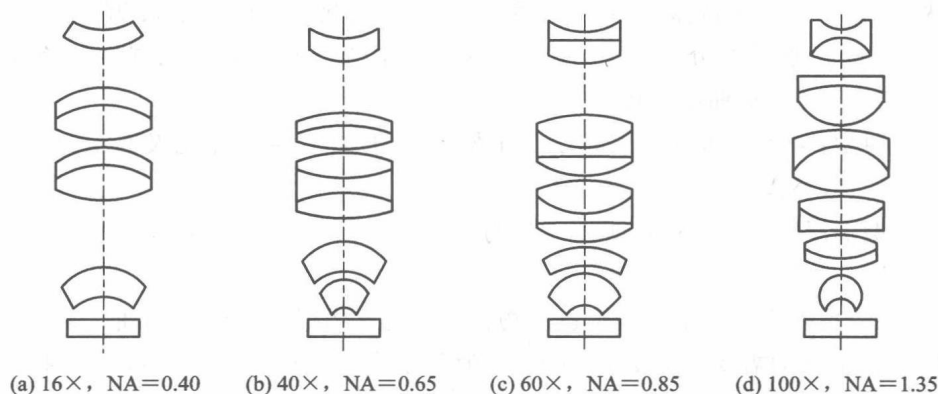


图 1-9 平场复消色差物镜

2. 目镜

在光学系统中,将物镜所成的像放大后供人眼观察用的透镜叫目镜。目镜按能实现的功能分为观察目镜和投影目镜两大类。前者将物镜成的第一次放大实像再次放大,观察时在明视距离处成一放大虚像;后者把物镜第一次成的像再次成像并投影到有限距离(如照相底片、CCD 光敏面)。常用的目镜有:

(1) 简单目镜:如惠更斯目镜(由凸面向着物镜的两个平凸透镜组成的目镜)和冉斯登目镜(由凸面相对的两个平凸透镜组成的目镜)。

(2) 平场目镜:如开涅尔目镜(前组是凸透镜,后组是正负透镜组成的胶合透镜的目镜)和对称目镜等。

(3) 广视场目镜(视场比同焦距的普通目镜大的目镜)。

此外,还有装分划板的分划目镜、与复消色差物镜配合使用的补偿目镜等。

3. 光阑与滤色片

要获得清晰的物像,除了制作良好的试样外,还必须掌握物镜的性能参数、显微镜的有效放大率,并能正确地使用光阑及滤色片,才能如愿以偿。下面介绍光阑和滤色片的功能与使用要点。

1) 光阑的功能与使用

实际的光学系统只能在一定空间和一定光束孔径范围内获得满意的物像,因此,在光学系统中采用光阑来限制成像空间和光束孔径。光阑的作用是:改善系统的成像质量;决定通过系统的光通量;拦截系统中有害的杂散光等。光学零件的镜框或专门设置在系统中带孔的金属板都是光阑,它的对称中心一般都在系统的光轴上。光阑按其用途可分为孔径光阑、视场光阑及消杂光光阑等。这里着重介绍前两种光阑在金相显微镜中的应用。

(1) 孔径光阑。

孔径光阑就是用来控制物镜的孔径角的光阑。当孔径光阑缩小时,进入物镜的光束的孔径角亦随之变小,这对提高显微镜的景深、消除宽光束单色像差、提高像的衬度(又称对比或反差,指物镜和像不同部位的明暗差异)有好处,但会使显微镜的分辨能力有所降低。