



西安交通大学 本科“十二五”规划教材  
“985”工程三期重点建设实验系列教材

# 工程材料基础实验指导书

(第2版)

主编 席生岐

参编 顾美转 郝亚明 赵军荣 高 圆

主审 范群成



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



西安交通大学 本科“十  
“985”工程

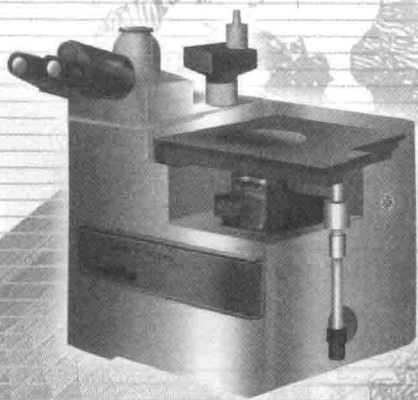
# 工程材料基础实验指导书

(第2版)

主编 席生岐

参编 顾美转 郝亚明 赵军荣 高 圆

主审 范群成



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

## 内容摘要

本书是为配合理工类非材料专业学生学习“工程材料基础”课程的课内教学实验所编写的实验指导书。内容包括两节预备知识,3个实验和主要相关设备的操作规程,部分钢铁材料的金相图谱以及数码金相显微镜中数字图像与处理知识,工程材料的成分分析与力学性能测试实验。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

工程材料基础实验指导书/席生岐主编. —2版.

—西安:西安交通大学出版社,2014.8

ISBN 978-7-5605-6448-7

I. ①工… II. ①席… III. ①工程材料-材料试验—  
高等学校—教学参考资料 IV. ①TB3-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 144322 号

---

书 名 工程材料基础实验指导书(第2版)  
主 编 席生岐  
责任编辑 屈晓燕

出版发行 西安交通大学出版社  
(西安市兴庆南路10号 邮政编码710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>  
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)  
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82668280  
印 刷 西安明瑞印务有限公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 6.25 字数 107千字  
版次印次 2014年9月第1版 2014年9月第1次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5605-6448-7/TB·82  
定 价 12.00元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82668133

读者信箱:jdjgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

# 编审委员会

主任 冯博琴

委员 (按姓氏笔画排序)

邓建国 何茂刚 张建保 陈雪峰

罗先觉 郑智平 徐忠锋 黄辰

## Preface

## 序

教育部《关于全面提高高等教育质量的若干意见》(教高〔2012〕4号)第八条“强化实践育人环节”指出,要制定加强高校实践育人工作的办法。《意见》要求高校分类制订实践教学标准;增加实践教学比重,确保各类专业实践教学必要的学分(学时);组织编写一批优秀实验教材;重点建设一批国家级实验教学示范中心、国家大学生校外实践教育基地……。这一被我们习惯称之为“质量30条”的文件,“实践育人”被专门列了一条,意义深远。

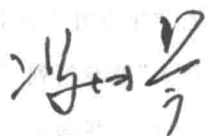
目前,我国正处在努力建设人才资源强国的关键时期,高等学校更需具备战略性眼光,从造就强国之才的长远观点出发,重新审视实验教学的定位。事实上,经精心设计的实验教学更适合承担起培养多学科综合素质人才的重任,为培养复合型创新人才服务。

早在1995年,西安交通大学就率先提出创建基础教学实验中心的构想,通过实验中心的建立和完善,将基本知识、基本技能、实验能力训练融为一炉,实现教师资源、设备资源和管理人员一体化管理,突破以课程或专业设置实验室的传统管理模式,向根据学科群组建基础实验和跨学科专业基础实验大平台的模式转变。以此为起点,学校以高素质创新人才培养为核心,相继建成8个国家级、6个省级实验教学示范中心和16个校级实验教学中心,形成了重点学科有布局的国家、省、校三级实验教学中心体系。2012年7月,学校从“985工程”三期重点建设经费中专门划拨经费资助立项系列实验教材,并纳入到“西安交通大学本科‘十二五’规划教材”系列,反映了学校对实验教学的重视。从教材的立项到建设,教师们热情相当高,经过近一年的努力,这批教材已见端倪。

我很高兴地看到这次立项教材有几个优点：一是覆盖面较宽，能确实解决实验教学当中的一些问题，系列实验教材涉及全校 12 个学院和一批重要的课程；二是质量有保证，90%的教材都是在多年使用的讲义的基础上编写而成的，教材的作者大多是具有丰富教学经验的一线教师，新教材贴近教学实际；三是按西安交大《2010 版本科培养方案》编写，紧密结合学校当前教学方案，符合西安交大人才培养规格和学科特色。

最后，我要向这些作者表示感谢，对他们的奉献表示敬意，并期望这些书能受到学生欢迎，同时希望作者不断改版，形成精品，为中国的高等教育做出贡献。

西安交通大学教授  
国家级教学名师



2013 年 6 月 1 日

## 第 2 版前言

时光飞逝,本实验指导书出版至今已近 10 年了,每年仅我校使用它的学生就有近千人,影响面大,在这 10 年里,“工程材料基础”课程在课程组努力下已建设成为国家精品课程,并入选国家精品资源共享课程。随着课程建设的发展,结合多年来教学工作中的实际情况,本次对第一版的实验指导书在保持原有基本特色的前提下,进行了修订。

修订的内容包括:①将原实验 3“综合实验”,具体更名为“碳钢热处理与组织及性能测试分析综合实验”,并根据实际实验修订了部分实验规范和设备;②由于采用新的数码显微镜系统,相应地更换了附录 I 中的操作规程。除此外,本次修订的重点是:1)附录 2 中增加了部分常见的金属工程材料金相图谱;2)增加了附录 3“数码金相显微镜中数字图像与处理知识介绍”;3)增加了附录 4“工程材料的成分分析与力学性能测试实验介绍”。本次修订希望通过增加的这三方面内容,能对非材料专业的工科学生,在学习“工程材料基础”这门课程的基础上,结合实验和实验指导书的学习,增加他们对实际工作中涉及材料方面的研究开发与服役失效分析工作的基本处理思路,提高处理相应问题的能力,使非材料专业的工科学生也能够和材料方面的专家在分析实际问题时有一个较高的沟通讨论平台。

本次修订工作中,实验员高圆老师承担了全书中文字订正、部分工程材料金相图谱收集整理和附录 4 的初稿撰写等多方面工作,全书由席生岐教授统筹负责,范群成教授主审。

由于编者水平有限,修订后的实验指导书难免还有不当之处,敬请读者批评指正。

编者

2014 年 3 月

于西安交通大学

# 第 1 版前言

本实验指导书是配合理工类非材料专业学生学习“工程材料基础”课程的课内文学实验所编写的,目的是加强学生动手实践能力,加深理解课堂学习的知识,特别是通过开放性的学生自主综合实验,使非材料专业的工科学生也能深刻理解材料的成分—工艺—组织—性能之间的关系,为学生以后在工作中研究解决工程材料方面的相关问题打下良好的科学基础,从实验的角度配合实现“工程材料基础”课程的教学目标。

从培养理工类非材料专业学生能够合理选材并正确制定零件的加工工艺路线能力的目标出发,以钢铁材料为例,围绕工程材料的成分—工艺—组织—性能之间的关系主线,本实验指导书安排了“金相显微镜的使用与金相样品的制备”(实验 1)和“碳钢和铸铁的平衡组织与非平衡组织的观察与分析”(实验 2)两个基本实验和一个“综合实验”(实验 3)。鉴于非材料专业的学生在材料实验方面缺乏基本知识,在正式实验内容之间安非了“金相分析基础知识”和“材料硬度试验相关知识”两节预备知识。为保证安全正确地完成实验内容,指导书中还节选了部分主要设备的操作规程以及部分钢铁材料的金相图谱,供学生在实验时特别是自主实验时参考。

由于编者水平有限,加之时间要求紧迫,本实验指导书难免有不当之处,敬请读者批评指正。

编者

2005 年 7 月



# 目 录

预备知识 1 金相显微分析基础知识 .....	(1)
预备知识 2 材料硬度试验相关知识 .....	(17)
实验 1 金相显微镜的使用与金相样品的制备 .....	(26)
实验 2 碳钢和铸铁的平衡组织与非平衡组织的观察与分析 .....	(38)
实验 3 碳钢热处理及组织与性能测试分析综合实验 .....	(51)
附录 1 XJP-6A 金相显微镜新型数字图像采集系统操作规程 .....	(58)
附录 2 部分材料的金相图谱与金相样品缺陷 .....	(61)
附录 3 数码金相显微镜中数字图像与处理知识介绍 .....	(76)
附录 4 工程材料的成分分析与力学性能测试实验介绍 .....	(83)
参考文献 .....	(90)

# 预备知识 1

## 金相显微分析基础知识

金相分析在材料研究领域占有十分重要的地位,是研究材料内部组织的主要手段之一。金相显微分析法就是利用金相显微镜来观察为分析而专门制备的金相样品,通过放大几十倍到上千倍来研究材料组织的方法。现代金相显微分析的主要仪器为光学显微镜和电子显微镜两大类。这里仅介绍常用的光学金相显微镜及金相样品制备的一些基础知识。

### 1.1 光学金相显微镜基础知识

#### 1.1.1 金相显微镜的构造

金相显微镜的种类和型式很多,最常见的有台式、立式和卧式三大类。金相显微镜的构造通常由光学系统、照明系统和机械系统三大部分组成,有的显微镜还附带有多种功能及摄影装置。目前,已把显微镜与计算机及相关的分析系统相联接,能更方便、更快捷地进行金相分析研究工作。

##### 1. 光学系统

该系统的主要构件是物镜和目镜,它们主要起放大作用,并获得清晰的图像。物镜的优劣直接影响成像的质量,而目镜是将物镜放大的像再次放大。

##### 2. 照明系统

该系统主要包括光源和照明器以及其它主要附件。

###### (1) 光源的种类

光源包括白炽灯(钨丝灯)、卤钨灯、碳弧灯、氙灯和水银灯等。常用的是白炽灯和氙灯光源。一般白炽灯适合作为中、小型显微镜上的光源使用,电压为 6~

12 V,功率 15~30 W。而氙灯通过瞬间脉冲高压点燃,一般正常工作电压为 18 V,功率为 150 W,适合作为特殊功能的观察和摄影之用。一般大型金相显微镜常同时配有两种照明光源,以适应普通观察和特殊情况的观察与摄影之用。

#### (2) 光源的照明方式

光源照明方式主要有临界照明和科勒照明,而散光照明和平行光照明只适用于特殊情况。

① 临界照明:光源的像聚焦在样品表面上,虽然可得到很高的亮度,但对光源本身亮度的均匀性要求很高,目前很少使用。

② 科勒照明:特点是光源的一次像聚焦在孔径光栏上,视场光栏和光源一次像同时聚焦在样品表面上,提供了一个很均匀的照明场,目前广泛使用。

③ 散光照明:特点是照明效率低,只在投射型钨丝灯做光源时,才用这种照明方式。

④ 平行光:照明的效果较差,主要用于暗场照明,各类光源均可用此照明方式。

#### (3) 光路形式

按光路设计的形式,显微镜有直立式和倒立式两种。凡样品磨面向上,物镜向下的为直立式;而样品磨面向下,物镜向上的为倒立式。

#### (4) 孔径光栏和视场光栏

孔径光栏位于光源附近,用于调节入射光束的粗细,以改变图像的质量。缩小孔径光栏可减少球差和轴外像差,加大衬度,使图像清晰,但会使物镜的分辨率降低。视场光栏位于另一个支架上,调节视场光栏的大小可改变视域的大小。视场光栏愈小,图像衬度愈佳。观察时应将视场光栏调至与目镜视域同样大小。

#### (5) 滤色片

滤色片用于吸收白光中不需要的部分,只让一定波长的光线通过,以获得优良的图像。滤色片一般有黄色、绿色和蓝色等。

### 3. 机械系统

机械系统主要包括载物台、镜筒、调节螺丝和底座。

① 载物台:用于放置金相样品。

② 镜筒:用于联结物镜、目镜等部件。

③ 调节螺丝:有粗调和细调螺丝,用于图像的聚焦调节。

④ 底座:起支承镜体的作用。

## 1.1.2 光学显微镜的放大成像原理及参数

### 1. 金相显微镜的成像原理

显微镜的成像放大部分主要由两组透镜组成。靠近观察物体的透镜叫物镜,

而靠近眼睛的透镜叫目镜。通过物镜和目镜的两次放大,就能将物体放大到较高的倍数。图 1 为显微镜的放大光学原理图。物体 AB 置于物镜前,离其焦点略远处,物体的反射光线穿过物镜折射后,得到了一个放大的实像  $A_1B_1$ ,若此像处于目镜的焦距之内,通过目镜观察到的图像是目镜放大的虚像  $A_2B_2$ 。

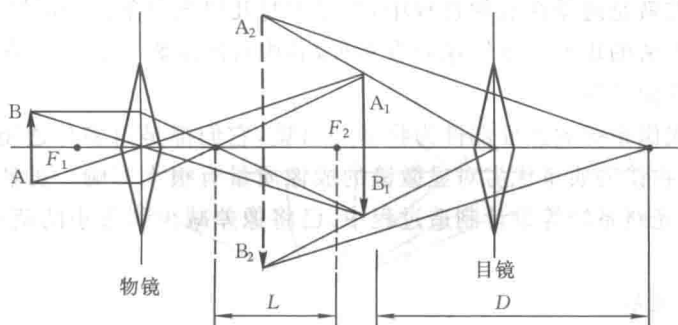


图 1 显微镜放大光学原理图

AB—物体; $A_1B_1$ —物镜放大图像; $A_2B_2$ —目镜放大图像; $F_1$ —物镜的焦距; $F_2$ —目镜的焦距; $L$ —光学镜筒长度(即物镜后焦点与目镜前焦点之间的距离); $D$ —明视距离(人眼的正常明视距离为 250 mm)

## 2. 显微镜的放大倍数

物镜的放大倍数

$$M_{\text{物}} = A_1B_1 / AB \approx L / F_1$$

目镜的放大倍数

$$M_{\text{目}} = A_2B_2 / A_1B_1 \approx D / F_2$$

则显微镜的放大倍数为:

$$\begin{aligned} M_{\text{总}} &= M_{\text{物}} \times M_{\text{目}} \\ &= (L / F_1) \times (D / F_2) \\ &= (L \times 250) / (F_1 \times F_2) \end{aligned}$$

显微镜总的放大倍数等于物镜放大倍数和目镜放大倍数的乘积。一般金相显微镜的放大倍数最高可达 1 600~2 000 倍。

由此可看出,因为光学镜筒长度  $L$  为定值,物镜的放大倍数越大,其焦距越短。在显微镜设计时,目镜的焦点位置与物镜放大所成的实像位置接近,并使目镜所成的最终倒立虚像在距眼睛 250 mm 处成像,这样使所成的图像看得很清楚。

显微镜的主要放大倍数一般通过物镜来保证,物镜的最高放大倍数可达 250 倍,目镜的最高放大倍数可达 25 倍。放大倍数分别标注在物镜和目镜的镜筒上。

在用金相显微镜观察组织时,应根据组织的粗细情况,选择适当的放大倍数,以使组织细节部分能观察清楚为准,不要只追求过高的放大倍数,因为放大倍数与透镜的焦距有关,放大倍数越高,焦距越小,会带来许多缺陷。

### 3. 透镜像差

透镜像差就是透镜在成像过程中,由于本身几何光学条件的限制,图像会产生变形及模糊不清的现象。透镜像差有多种,其中对图像影响最大的是球面像差、色像差和像域弯曲3种。

显微镜成像系统的主要部件为物镜和目镜,它们都是由多片透镜按设计要求组合而成,而物镜的质量优劣对显微镜的成像质量有很大影响。虽然在显微镜的物镜、目镜及光路系统等设计制造过程中,已将像差减少到很小的范围,但其依然存在。

#### (1) 球面像差

①产生原因:球面像差是由于透镜的表面呈球曲面,来自一点的单色光线,通过透镜折射以后,中心和边缘的光线不能交于一点,靠近中心部分的光线折射角度小,在离透镜较远的位置聚焦,而靠近边缘处的光线偏折角度大,在离透镜较近的位置聚焦,所以形成了沿光轴分布的一系列的像,使图像模糊不清。这种像差称球面像差,如图2所示。

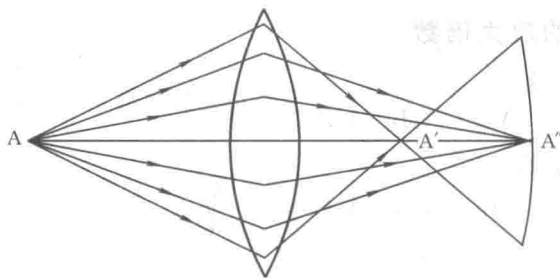


图2 球面像差示意图

#### ②校正方法:

a. 采用多片透镜组成透镜组,即将凸透镜与凹透镜组合形成复合透镜,产生性质相反的球面像差来减小这种像差。

b. 通过加光栏的办法,缩小透镜的成像范围。因球面像差与光通过透镜的面积大小有关。在金相显微镜中,球面像差可通过改变孔径光栏的大小来减小。孔径光栏越大,通过透镜边缘的光线越多,球面像差越严重。而缩小光栏,限制边缘光线的射入,可减少球面像差。但光栏太小,显微镜的分辨能力降低,也使图像模糊。因此,应将孔径光栏调节到合适的大小。

## (2) 色像差

①产生原因:色像差的产生是由于白光是由多种不同波长的单色光组成,当白光通过透镜时,波长愈短的光,其折射率愈大,其焦点愈近。而波长愈长,折射率愈小,其焦点愈远,这样一来使不同波长的光线形成的像不能在同一点聚焦,使图像模糊所引起的像差,即色像差,如图 3 所示。

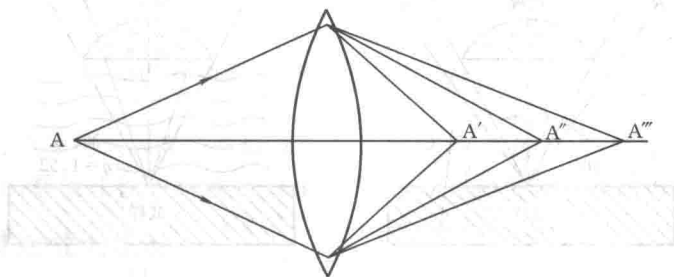


图 3 色像差示意图

②校正方法:可采用单色光源或加滤色片或使用复合透镜组来减小色像差。

## (3) 像域弯曲

①产生原因:垂直于光轴的平面,通过透镜所形成的像,不是平面而是凹形的弯曲像面,称像域弯曲,见图 4 所示。

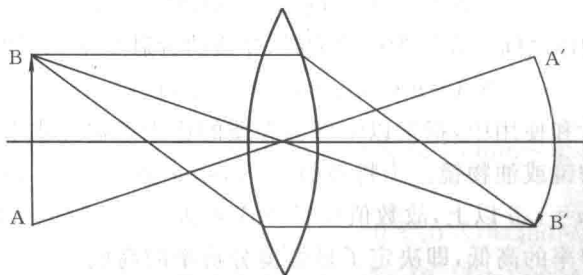


图 4 像域弯曲示意图

②校正办法:像域弯曲的产生,是由于各种像差综合作用的结果。一般的物镜或多或少地存在着像域弯曲,只有校正极佳的物镜才能达到趋于平坦的像域。

## 4. 物镜的数值孔径

物镜的数值孔径用  $NA$  表示(即 Numerical Aperture),表示物镜的聚光能力。数值孔径大的物镜,聚光能力强,即能吸收更多的光线,使图像更加清晰,物镜的数值孔径  $NA$  可用公式表示为

$$NA = n \cdot \sin \varphi$$

式中： $n$ ——物镜与样品间介质的折射率；

$\varphi$ ——通过物镜边缘的光线与物镜轴线所成角度，即孔径半角。

可见，数值孔径的大小与物镜和样品间介质的折射率  $n$  的大小有关，以及孔径半角的大小有关，见图 5 所示。

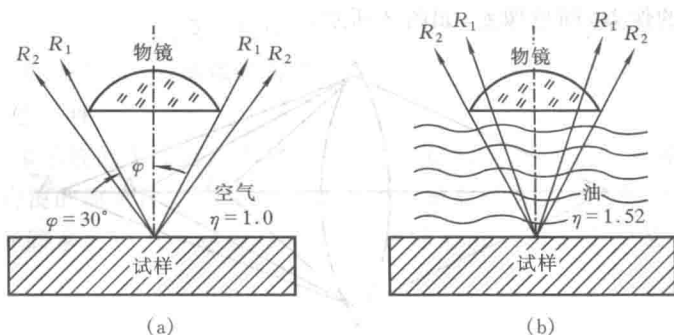


图 5 不同介质对物镜聚光能力的比较

(a) 干物镜； (b) 油物镜

若物镜的孔径半角为  $30^\circ$ ，当物镜与物体之间的介质为空气时，光线在空气中的折射率为  $n=1$ ，则数值孔径为

$$NA = n \cdot \sin\varphi = 1 \times \sin 30^\circ = 0.5$$

若物镜与物体之间的介质为松柏油时，介质的折射率  $n=1.52$ ，则其数值孔径为

$$NA = n \cdot \sin\varphi = 1.52 \times \sin 30^\circ = 0.76$$

物镜在设计和使用中，指定以空气为介质的称干系物镜或干物镜，以油为介质的称为油浸系物镜或油物镜。干物镜的  $n=1$ ， $\sin\varphi$  值总小于 1，故数值孔径  $NA$  小于 1；油物镜因  $n=1.5$  以上，故数值孔径  $NA$  可大于 1。物镜的数值孔径的大小，标志着物镜分辨率的高低，即决定了显微镜分辨率的高低。

## 5. 显微镜的鉴别能力(分辨率)

显微镜的鉴别能力是指显微镜对样品上最细微部分能够清晰分辨而获得图像的能力，如图 6 所示。它主要取决于物镜的数值孔径  $NA$  值大小，是显微镜的一个重要特性。通常用可辨别的样品上的两点间的最小距离  $d$  来表示， $d$  值越小，表示显微镜的鉴别能力越高。

显微镜的鉴别能力可用下式表示：

$$d = \lambda / 2NA$$

式中： $\lambda$ ——入射光的波长；

$NA$ ——物镜的数值孔径。

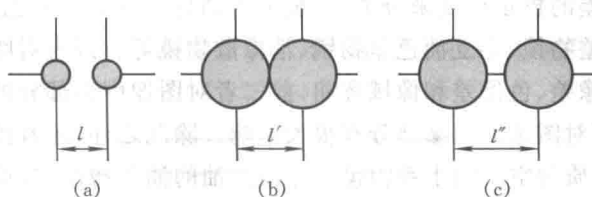


图 6 显微镜分辨率高低示意图

(a) 样品上两点之间距离; (b) 低分辨率; (c) 高分辨率

可见分辨率与入射光的波长成正比,  $\lambda$  越短,  $d$  值越小, 分辨率越高; 其与数值孔径成反比, 数值孔径  $NA$  越大,  $d$  值越小, 表明显微镜的鉴别能力越高。

## 6. 有效放大倍数

用显微镜能否看清组织细节, 不但与物镜的分辨率有关, 且与人眼的实际分辨率有关。若物镜分辨率很高, 形成清晰的实像, 而配用的目镜倍数过低, 也使观察者难于看清, 这称之为放大不足。但若选用的目镜倍数过高, 即总放大倍数越大, 也并非看得越清晰。实践表明, 超出一定的范围, 放得越大越模糊, 这称之为虚伪放大。显微镜的有效放大倍数取决于物镜的数值孔径。有效放大倍数是指物镜分辨清晰的  $d$  距离, 同样也被人眼分辨清晰所必须的放大倍数, 用  $M_g$  表示:

$$M_g = d_1 / d = 2 d_1 \cdot NA / \lambda$$

式中:  $d_1$ ——人眼的分辨率;

$d$ ——物镜的分辨率。

在明视距离 250 mm 处正常人眼的分辨率为 0.15 mm~0.30 mm, 若取绿光  $\lambda = 5\,500 \times 10^{-7}$  mm, 则:

$$M_{g,\min} = (2 \times 0.15 \times NA) / (5\,500 \times 10^{-7}) \approx 550 NA$$

$$M_{g,\max} = (2 \times 0.30 \times NA) / (5\,500 \times 10^{-7}) \approx 1\,000 NA$$

这说明在 550NA~1 000NA 范围内的放大倍数均称有效放大倍数。但随着光学零件的设计完善与照明方式的不断改进, 以上范围并非严格限制。有效放大倍数的范围, 对物镜和目镜的正确选择十分重要。例如物镜的放大倍数是 25, 数值孔径为  $NA = 0.4$ , 即有效放大倍数应为 200~400 倍范围内, 应选用 8 倍或 16 倍的目镜才合适。

### 1.1.3 物镜与目镜的种类及标志

#### 1. 物镜的种类

物镜是成像的重要部分, 而物镜的优劣取决于其本身像差的校正程度, 所以物



镜通常是按照像差的校正程度来分类,一般分为消色差及平面消色差物镜、复消色差及平面复消色差物镜、半复消色差物镜、消像散物镜等。因为对图像质量影响很大的像差是球面像差、色像差和像域弯曲,前二者对图像中央部分的清晰度有很大影响,而像域弯曲对图像的边缘部分有很大影响。除此之外,还有按物体与物镜间介质分类的,有介质为空气的干系物镜和介质为油的油系物镜;按放大倍数分类的低、中、高倍物镜和特殊用途的专用显微镜上的物镜如高温反射物镜、紫外线物镜等。

按像差分类的常用的几种物镜如下。

### (1) 消色差及平面消色差物镜

消色差物镜对像差的校正仅为黄、绿两个波区,使用时宜以黄绿光作为照明光源,或在入射光路中插入黄绿色滤色片,以使像差大为减少,图像更为清晰。而平面消色差物镜还对像域弯曲进行了校正,使图像平直,边缘与中心能同时清晰成像,适用于金相显微摄影。

### (2) 复消色差及平面复消色差物镜

复消色差物镜色差的校正包括可见光的全部范围,但部分放大率色差仍然存在。而平面复消色差物镜还进一步做了像域弯曲的校正。

### (3) 半复消色差物镜

像差校正介于消色差和复消色差物镜之间,其它光学性质与复消色差物镜接近。但价格低廉,常用来代替复消色差物镜。

## 2. 物镜的标志

物镜的标志一般包括如下几项:

### (1) 物镜类别

国产物镜,用物镜类别的汉语拼音字头标注,如平面消色差物镜标以“PC”(平场)。西欧各国物镜多标有物镜类别的英文名称或字头,如平面消色差物镜标以“Planachromatic 或 Pl”,消色差物镜标以“Achromatic”,复消色差物镜标以“A-pochromatic”。

### (2) 物镜的放大倍数和数值孔径

物镜的放大倍数和数值孔径标在镜筒中央位置,并以斜线分开,如“ $10\times/0.30$ ”,“ $45\times/0.63$ ”,斜线前如“ $10\times$ ”,“ $45\times$ ”为放大倍数,其后为物镜的数值孔径如“ $0.30$ ”,“ $0.63$ ”。

### (3) 适用的机械镜筒长度

如“170”,“190”,“ $\infty/0$ ”,表示机械镜筒长度(即物镜座面到目镜筒顶面的距离)为170,190,无限长。“0”表示无盖波片。