

# 材料实验技术

CAILIAO Shiyān Jishu

编者 顾永琴 康学勤 牛继南 赵宇龙

主审 王温银



中国矿业大学出版社

# 材料实验技术

编者 顾永琴 康学勤 牛继南 赵宇龙  
主审 王温银

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书根据材料科学与工程专业的实验教学要求编写,主要介绍了金相显微镜的原理和使用方法、金相试样的制备、显微数码摄影、二元合金/铁碳合金/铸铁/三元合金的金相组织、宏观组织分析、定量金相等实验。本书包含实验基本理论、实验目的、实验内容、实验报告要求、思考题等内容,尽可能系统地为学生和教师提供相应指导。

本书可作为材料科学与工程专业、机械及其他相关专业的本科实验教学用书,也可供从事与材料相关工作的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

材料实验技术/顾永琴等编. —徐州:中国矿业大学出版社, 2014.1

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2259 - 6

I. ①材… II. ①顾… III. ①材料试验—高等学校—教材 IV. ①TB302

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 023728 号

书 名 材料实验技术  
编 者 顾永琴 康学勤 牛继南 赵宇龙  
责任编辑 杨 洋  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司  
开 本 787×960 1/16 印张 11.25 字数 200 千字  
版次/印次 2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷  
定 价 18.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

# 前 言

材料科学与工程专业是实践性较强的学科,实践教学在本科教学中起着举足轻重的作用。作者结合本校教学特色,特意为材料科学与工程专业实践教学编写此书,供“材料实验技术”实验课程使用。

本书共 16 章,包括材料的金相制样技术,数码摄影技术,普通金相显微镜、偏振光显微镜、干涉显微镜、高温镜的使用,陶瓷、二元合金、三元合金、钢和铸铁的平衡组织以及钢常见的缺陷组织分析,定量金相分析,宏观组织分析,等等。每章首先介绍基础理论知识,供学生自学和复习,章后附有根据基础理论设计的实验内容部分和相关的思考题,教师可根据实际实践教学条件选做相关实验,思考题供学生们课下自主学习使用。本书可作为材料专业及相关专业的实验教材,也可供相关专业的厂矿技术人员参考。

本书由中国矿业大学顾永琴、康学勤、牛继南、赵宇龙编写。其中第 1~3、9、14~16 章由顾永琴编写,第 5~8 章由牛继南编写,第 10~13 章由康学勤编写,第 4 章由赵宇龙编写。全书由顾永琴统稿,由王温银主审。

本书编写过程中引用了大量的书籍和文献,在此向各位作者表示衷心的感谢!本书能够顺利出版,得益于中国矿业大学材料学院领导和中国矿业大学出版社的鼎力相助,在此一并表示感谢!

由于编者水平所限,书中难免有不当之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2013 年 10 月

## 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| <b>第 1 章 光学显微镜的原理、构造及使用</b> ..... | 1  |
| 1.1 光学显微镜的放大原理及放大倍数 .....         | 1  |
| 1.1.1 光学显微镜的放大原理 .....            | 1  |
| 1.1.2 光学显微镜的放大倍数 .....            | 1  |
| 1.2 金相显微镜的构造 .....                | 3  |
| 1.2.1 金相显微镜的光学系统 .....            | 3  |
| 1.2.2 金相显微镜的照明系统 .....            | 10 |
| 1.2.3 金相显微镜的机械系统 .....            | 14 |
| 1.3 金相显微镜使用方法及注意事项 .....          | 15 |
| 1.4 现代金相显微镜的进展 .....              | 16 |
| 实验一 光学显微镜应用技术 .....               | 16 |
| 思考题 .....                         | 17 |
| <b>第 2 章 金相显微试样的制备</b> .....      | 19 |
| 2.1 取样 .....                      | 19 |
| 2.1.1 取样部位及检验面的选择 .....           | 19 |
| 2.1.2 试样的截取方法 .....               | 20 |
| 2.1.3 试样尺寸 .....                  | 20 |
| 2.2 镶样或机械夹持 .....                 | 20 |
| 2.2.1 热镶 .....                    | 20 |
| 2.2.2 冷镶 .....                    | 21 |
| 2.2.3 机械夹持 .....                  | 21 |
| 2.3 磨样 .....                      | 22 |
| 2.3.1 粗磨 .....                    | 22 |
| 2.3.2 细磨 .....                    | 22 |

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| 2.4 抛光               | 25        |
| 2.4.1 机械抛光           | 25        |
| 2.4.2 电解抛光           | 28        |
| 2.4.3 化学抛光           | 29        |
| 2.5 金相试样的腐蚀          | 30        |
| 2.5.1 化学腐蚀           | 30        |
| 2.5.2 电解腐蚀           | 33        |
| 2.5.3 干涉层法           | 33        |
| 2.6 金相试样制样缺陷         | 36        |
| 实验二 金相显微试样的制备        | 38        |
| 思考题                  | 39        |
| <b>第3章 光学显微摄影技术</b>  | <b>40</b> |
| 3.1 显微摄影             | 40        |
| 3.2 数码显微摄影           | 41        |
| 3.2.1 数码显微摄影成像原理     | 41        |
| 3.2.2 数码显微摄影步骤       | 42        |
| 3.2.3 数码相机与传统相机      | 42        |
| 实验三 光学显微摄影技术         | 44        |
| 思考题                  | 44        |
| <b>第4章 陶瓷材料的显微组织</b> | <b>46</b> |
| 4.1 普通陶瓷原材料          | 46        |
| 4.2 陶瓷材料的显微结构        | 47        |
| 4.2.1 晶相             | 47        |
| 4.2.2 玻璃相            | 48        |
| 4.2.3 气相             | 49        |
| 4.3 典型陶瓷材料的显微组织      | 50        |
| 4.3.1 普通陶瓷           | 50        |
| 4.3.2 氧化铝陶瓷          | 50        |
| 4.3.3 磁性陶瓷           | 51        |
| 4.3.4 压电陶瓷           | 51        |

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| 实验四 陶瓷材料的显微组织分析 .....            | 52        |
| 思考题 .....                        | 53        |
| <b>第 5 章 二元合金显微组织分析 .....</b>    | <b>54</b> |
| 5.1 匀晶系相图及其合金显微组织 .....          | 54        |
| 5.1.1 平衡转变 .....                 | 54        |
| 5.1.2 非平衡转变 .....                | 55        |
| 5.2 共晶系相图及其合金显微组织 .....          | 56        |
| 5.2.1 平衡转变 .....                 | 57        |
| 5.2.2 非平衡转变 .....                | 60        |
| 5.3 包晶系相图及其合金显微组织 .....          | 62        |
| 5.3.1 平衡转变 .....                 | 62        |
| 5.3.2 非平衡转变 .....                | 63        |
| 实验五 二元合金组织分析 .....               | 65        |
| 思考题 .....                        | 65        |
| <b>第 6 章 铁碳合金的平衡组织 .....</b>     | <b>67</b> |
| 6.1 工业纯铁 .....                   | 68        |
| 6.2 碳钢 .....                     | 68        |
| 6.2.1 共析钢 .....                  | 68        |
| 6.2.2 亚共析钢 .....                 | 69        |
| 6.2.3 过共析钢 .....                 | 70        |
| 6.3 白口铸铁 .....                   | 71        |
| 6.3.1 共晶白口铸铁 .....               | 71        |
| 6.3.2 亚共晶白口铸铁 .....              | 71        |
| 6.3.3 过共晶白口铸铁 .....              | 72        |
| 实验六 铁碳合金的平衡组织分析 .....            | 72        |
| 思考题 .....                        | 73        |
| <b>第 7 章 灰口及其他铸铁显微组织分析 .....</b> | <b>74</b> |
| 7.1 共晶反应合金 .....                 | 74        |
| 7.2 亚共晶反应合金 .....                | 75        |

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| 7.3 过共晶反应合金         | 77        |
| 7.4 其他铸铁            | 78        |
| 7.4.1 球墨铸铁          | 79        |
| 7.4.2 蠕虫状石墨         | 79        |
| 7.4.3 可锻铸铁          | 80        |
| 实验七 灰口及其他铸铁显微组织分析   | 80        |
| 思考题                 | 81        |
| <b>第8章 三元合金组织分析</b> | <b>82</b> |
| 8.1 典型合金的结晶过程       | 82        |
| 8.1.1 I成分合金的凝固过程    | 83        |
| 8.1.2 II成分合金的凝固过程   | 84        |
| 8.1.3 III成分合金的凝固过程  | 85        |
| 8.1.4 IV成分合金的凝固过程   | 85        |
| 实验八 三元合金组织分析        | 86        |
| 思考题                 | 88        |
| <b>第9章 显微组织定量分析</b> | <b>89</b> |
| 9.1 定量金相学           | 89        |
| 9.2 基本符号和基本方程       | 89        |
| 9.2.1 基本符号          | 89        |
| 9.2.2 基本方程          | 90        |
| 9.3 定量分析的基本方法       | 91        |
| 9.3.1 计点法           | 91        |
| 9.3.2 线分析法          | 92        |
| 9.3.3 面积分析法         | 93        |
| 9.3.4 联合测量法         | 93        |
| 9.4 定量分析在材料研究中的应用   | 93        |
| 9.4.1 晶粒大小的测量       | 93        |
| 9.4.2 第二相颗粒的几何尺寸测定  | 98        |
| 9.4.3 误差分析          | 100       |
| 9.5 图像分析技术          | 103       |



|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 实验九 显微组织定量分析                   | 103        |
| 思考题                            | 104        |
| <b>第 10 章 碳素钢中常见缺陷显微组织分析</b>   | <b>105</b> |
| 10.1 偏析                        | 105        |
| 10.2 带状组织                      | 105        |
| 10.3 魏氏组织                      | 106        |
| 10.4 表层脱碳                      | 107        |
| 10.5 钢的过热与过烧                   | 108        |
| 10.6 钢中非金属夹杂物                  | 108        |
| 实验十 碳素钢中常见缺陷显微组织观察             | 110        |
| 思考题                            | 110        |
| <b>第 11 章 宏观分析与火花鉴别</b>        | <b>111</b> |
| 11.1 宏观分析                      | 111        |
| 11.1.1 断口分析                    | 111        |
| 11.1.2 磨片分析                    | 115        |
| 11.1.3 贴印法                     | 115        |
| 11.2 火花鉴别                      | 118        |
| 11.2.1 火花类型                    | 118        |
| 11.2.2 碳钢的火花                   | 118        |
| 11.2.3 几种常见合金的火花               | 119        |
| 11.3 钢铁的听音鉴别                   | 121        |
| 11.4 磁性鉴别                      | 121        |
| 11.5 点试鉴别                      | 121        |
| 实验十一 宏观组织及其他组织分析一              | 121        |
| 思考题                            | 122        |
| <b>第 12 章 纯金属铸锭组织分析与结晶过程观察</b> | <b>123</b> |
| 12.1 结晶过程                      | 123        |
| 12.2 纯金属铸锭组织                   | 124        |
| 实验十二 宏观组织及其他组织分析二              | 128        |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 思考题                                | 128 |
| <b>第 13 章 金属的塑性变形及回复与再结晶</b>       | 130 |
| 13.1 金属和合金的塑性变形                    | 130 |
| 13.1.1 拉伸应力—应变曲线                   | 130 |
| 13.1.2 塑性变形对材料性能的影响                | 131 |
| 13.2 回复与再结晶                        | 132 |
| 13.2.1 回复                          | 132 |
| 13.2.2 回复退火的应用                     | 133 |
| 13.2.3 再结晶                         | 133 |
| 13.2.4 再结晶温度                       | 134 |
| 13.2.5 再结晶的主要影响因素                  | 134 |
| 13.2.6 再结晶晶粒大小的控制                  | 135 |
| 13.3 晶粒长大                          | 136 |
| 实验十三 金属的塑性变形及回复与再结晶                | 137 |
| 思考题                                | 138 |
| <b>第 14 章 偏振光显微镜的原理及其在材料研究中的应用</b> | 139 |
| 14.1 偏振光的基础知识                      | 139 |
| 14.1.1 自然光和偏振光                     | 139 |
| 14.1.2 直线偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光            | 139 |
| 14.1.3 起偏振镜和检偏振镜                   | 141 |
| 14.2 偏振光的反射原理                      | 143 |
| 14.3 偏振光装置的调整及使用                   | 145 |
| 14.3.1 起偏振镜位置的调整                   | 145 |
| 14.3.2 检偏振镜位置的调整                   | 145 |
| 14.3.3 载物台中心位置的调整                  | 146 |
| 14.4 偏光干涉衬度显微镜                     | 146 |
| 14.4.1 偏光干涉衬度装置                    | 146 |
| 14.4.2 偏振光干涉衬度像                    | 148 |
| 14.4.3 偏光干涉衬度装置在金相分析方面的应用          | 148 |
| 14.5 偏光显微镜在材料领域的应用                 | 149 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 14.5.1 材料显微组织的显示           | 149        |
| 14.5.2 非金属夹杂物的鉴定           | 151        |
| 实验十四 偏振光显微镜应用技术            | 154        |
| 思考题                        | 154        |
| <b>第 15 章 干涉显微镜的原理及其应用</b> | <b>155</b> |
| 15.1 光的干涉原理                | 155        |
| 15.1.1 劈尖干涉                | 155        |
| 15.1.2 牛顿环                 | 156        |
| 15.2 干涉显微镜                 | 157        |
| 15.2.1 双光束干涉显微镜(6JA 干涉显微镜) | 157        |
| 15.2.2 多光束干涉显微镜            | 157        |
| 15.3 干涉显微镜的应用              | 159        |
| 15.3.1 表面光洁度的测定            | 159        |
| 15.3.2 相变浮凸的研究             | 159        |
| 15.3.3 材料塑性变形的研究           | 160        |
| 实验十五 干涉显微镜应用技术             | 160        |
| 思考题                        | 161        |
| <b>第 16 章 高温及低温金相技术</b>    | <b>162</b> |
| 16.1 高温金相技术                | 162        |
| 16.1.1 高温真空下金属和合金组织的显示     | 162        |
| 16.1.2 高温金相显微镜装置           | 163        |
| 16.2 高温金相在金属材料研究中的应用       | 164        |
| 16.2.1 应用方面                | 164        |
| 16.2.2 高温金相在研究钢铁相变时的局限性    | 164        |
| 16.3 低温金相研究                | 164        |
| 思考题                        | 165        |
| <b>参考文献</b>                | <b>166</b> |

# 第1章 光学显微镜的原理、构造及使用

显微分析方法是金属材料科学的一个很重要的研究方法,它可以观察和研究金属,这是用宏观分析方法无法实现的,故光学显微镜已经成为显微分析的主要工具。根据光学成像原理不同,把光学显微镜分为生物显微镜和金相显微镜,其光学特性前者为透光原理,主要用来观察透明的对象,后者为反光原理,利用反射光来观察不透明的对象。

## 1.1 光学显微镜的放大原理及放大倍数

### 1.1.1 光学显微镜的放大原理

众所周知,利用放大镜(透镜)可将物体的像放大,但单个透镜的放大倍数是有限的。显微镜由两组透镜组成,对着试样的一组透镜叫做物镜,而靠近眼睛的一组透镜叫做目镜。物镜和目镜都是由透镜组构成的复杂的光学系统。

光学显微镜通过物镜和目镜的两次放大而得到倍数较高的放大物像。一般光学显微镜的放大倍数为数十倍至1 000倍。图1-1为光学显微镜的放大原理简图。物体AB置于物镜前焦点 $F_1$ 外少许,物体AB经物镜放大得到一个倒立、放大的实像 $A'B'$ 。在设计显微镜时,使这个实像 $A'B'$ 刚好落在目镜的前焦点 $F_2$ 以内,再经目镜将实像 $A'B'$ 放大成正立虚像 $A''B''$ ,其位置正好在人眼的明视距离处,即距人眼250 mm处。人眼通过显微镜目镜中看到的就是这个虚像 $A''B''$ 。

### 1.1.2 光学显微镜的放大倍数

物体AB经物镜第一次放大后的倍数为:

$$M_{\text{物}} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{L + f'_1}{f_1} \quad (1-1)$$

式中  $f_1, f'_1$  ——物镜前焦距与后焦距;

$L$  ——显微镜的光学镜筒长度。

由于物镜的焦距 $f'_1$ 与光学镜筒长度 $L$ 相比较很短,所以式(1-1)近似

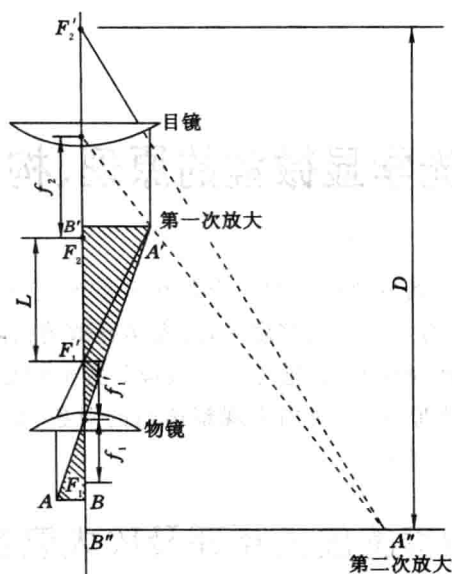


图 1-1 显微镜的放大原理图

写成：

$$M_{\text{物}} \approx \frac{L}{f_1} \quad (1-2)$$

像  $A'B'$  经目镜第二次放大后的倍数为：

$$M_{\text{目}} = \frac{A''B''}{A'B'} \approx \frac{D}{f_2} \quad (1-3)$$

式中  $f_2$  —— 目镜的前焦距；

$D$  —— 人眼的明视距离 (250 mm)。

显微镜的总放大倍数为物镜与目镜放大倍数的乘积，即：

$$M = M_{\text{物}} M_{\text{目}} = \frac{250L}{f_1 f_2} \quad (1-4)$$

显微镜的放大倍数主要是通过物镜和目镜来保证的，目前物镜的最高放大倍数可达 100 倍，目镜的放大倍数可达 20 倍。放大倍数通常用符号“ $\times$ ”表示，例如物镜的放大倍数为  $40\times$ ，目镜的放大倍数为  $10\times$ ，则显微镜的放大倍数为  $400\times$ 。放大倍数均分别标注在物镜与目镜外壳上。

光学镜筒长度在实际应用中很不方便，通常使用机械镜筒长度，即物镜的支承面与目镜支承面之间的距离。显微镜的机械镜筒长度分为有限和任意两种。各国有限机械镜筒长度标准不同，一般在 160~190 mm 之间，我国规定为 160

mm。物镜外壳上通常标有 160/0 或 160/- 等,斜线前数字表示机械镜筒长度,斜线后的“0”或“-”表示金相显微镜不用盖玻璃片。对于透射显微镜,此处的数字表示盖玻璃片的厚度。任意机械镜筒长度用  $\infty/0$  或  $\infty/-$  表示,这种物镜可以在任何镜筒长度下使用,不会影响成像质量。

## 1.2 金相显微镜的构造

金相显微镜的构造通常由光学系统、照明系统、机械系统三大部分组成。

### 1.2.1 金相显微镜的光学系统

光学系统的核心部件是物镜和目镜,其主要作用是完成金相组织的放大,获得清晰的图像。

#### 1.2.1.1 物镜

显微镜的成像质量在很大程度上取决于物镜的质量,因此物镜是显微镜最重要的部件。显微镜质量好坏的标准可用一些性能指标来描述,显微镜主要性能指标包括数值孔径、分辨率、放大倍数、景深(垂直鉴别率)、工作距离与视场范围、消除像差的能力。

##### (1) 数值孔径

物镜的数值孔径表示物镜收集光线的能力。物镜对试样上各点的反射光收集得越多,成像质量就越好。数值孔径常以  $N.A.$  来表示,计算公式如下:

$$N.A. = n \sin \varphi \quad (1-5)$$

式中  $n$ ——物镜与试样之间介质的折射率;

$\varphi$ ——物镜孔径角的一半。

孔径角又称“镜口角”,是物镜光轴上的物体点与物镜前透镜的有效直径所形成的角度,如图 1-2 所示。孔径角与物镜的有效直径成正比,与焦点的距离成反比。根据式(1-5)可知, $\varphi$  角越大, $N.A.$  越大,表明物镜前透镜收集光线的能力就越大。

对于干系物镜(物镜与试样之间的介质为空气),由于  $n=1$ ,因而物镜的数值孔径不能大于 1;对于油浸物镜(物镜与试样之间的介质为油),通过折射率大( $n>1$ )的油介质进入物镜的光线增加,因此,当孔径角与干系物镜孔径角相同时,油浸物镜收集光线的能力大为提高。例如使用介质为  $n=1.515$  的松柏油时,数值孔径值最大可达 1.4。

油浸物镜在物镜镜体上刻有 Oil 等字样,同时有环绕镜体的彩色圈标志。物镜的数值孔径一般都标在物镜的镜体上。

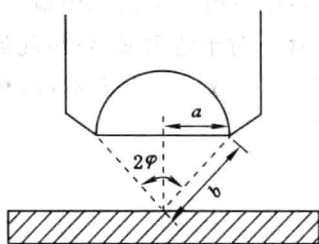


图 1-2 干系物镜的孔径角和数值孔径

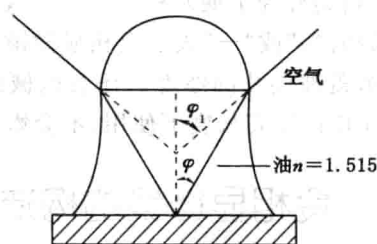


图 1-3 油浸物镜的孔径角和数值孔径  
(孔径角为  $2\varphi$  的油浸物镜收集光线的能力  
相当于孔径角为  $2\varphi_1$  的干系物镜)

## (2) 分辨率

显微镜的分辨率是指能清晰地分辨试样上两点间的最小距离  $d$ 。分辨率决定了显微镜分辨试样上细节的程度,  $d$  值越小, 表明物镜的分辨率越高。因为目镜只能放大物镜已分辨的细节, 物镜未能分辨的细节, 决不会通过目镜放大而变得可分辨, 因此显微镜的分辨率主要取决于物镜的分辨率。物镜分辨率的表达式如下:

$$d = \frac{\lambda}{2N.A.} \quad (1-6)$$

式中  $\lambda$ ——入射光的波长;

$N.A.$ ——物镜的数值孔径。

由式(1-6)可知, 对于一定波长的入射光, 物镜的分辨率完全取决于物镜的数值孔径; 数值孔径越大, 分辨率就越高, 反之越低; 对于特定的数值孔径, 选用  $\lambda$  小的人射光可以提高分辨率。

## (3) 放大倍数

为了充分利用物镜的分辨率, 使操作者看清已被物镜分辨出的组织细节, 显微镜必须有适当的放大倍数。在使用显微镜时, 应选择合适的放大倍数。以细节部分观察清晰为准, 盲目追求高放大倍数, 会带来许多缺陷。物镜的数值孔径决定了显微镜的有效放大倍数。有效放大倍数指人眼能够分辨的线距离  $d'$  与物镜的分辨率  $d$  间的比值, 即不使人眼看到假象的放大倍数, 如下式:

$$M = \frac{d'}{d} \quad (1-7)$$

将式(1-6)代入式(1-7)得:

$$d' = d \times M = \frac{\lambda}{2N.A.} \times M \quad (1-8)$$

当照明条件良好时,人眼在明视距离处的分辨距离  $d'$  一般在  $0.15 \sim 0.30$  mm 之间。假设用光线的波长为  $0.55 \mu\text{m}$  (黄绿光) 照明,则可得到  $M$  的近似表达式如下:

$$500N.A. < M < 1000N.A. \quad (1-9)$$

当显微镜的放大率小于式(1-9)的下限时  $500N.A.$  时,人眼看不清物镜已分辨的组织细节;放大率大于式(1-9)的上限  $1000N.A.$  时,人眼并不能看到更多的细节,物体的像反而不如放大率较低时清晰,这种放大称为“虚放大”或“无效放大”。

图 1-4 显示的是放大率及照明光线波长相同的条件下,采用不同数值孔径的物镜观察珠光体组织的分辨情况对比。图 1-4(a)采用数值孔径为  $0.25$  的物镜,  $600$  倍已超过其有效放大率的上限,所看到的组织模糊不清;图 1-4(b)采用数值孔径为  $0.95$  的物镜,  $600$  倍正好处在有效放大倍数的范围内,因此成像质量较好,可分辨珠光体的层片。



图 1-4 物镜的数值孔径对同一组织分辨情况的对比

(a)  $N.A. = 0.25$  ( $600\times$ ); (b)  $N.A. = 0.95$  ( $600\times$ )

#### (4) 景深

景深又称为垂直分辨率,显微镜的景深是指对高低不平的物体能够清晰成像的能力。当显微镜准确聚焦于某一物面时,如果位于其前面及后面的物面仍然能被观察者看清楚,则该最远两平面之间的距离就是景深。物镜的景深主要取决于物镜的数值孔径。在照相时,物镜的景深  $d_L$  与数值孔径  $N.A.$  之间的关系如下:

$$d_L = \lambda [n^2 - (N.A.)^2]^{1/2} / (N.A.)^2 \quad (1-10)$$

从式(1-10)可以看出,物镜的数值孔径越大,其景深越小。在物镜的数值孔径特别大的情况下,显微镜可以有很好的分辨率,但景深很小。

用眼睛观察时,景深比照相时大,通常用下式表示:



$$d'_L = d_L + (250/M^2) \quad (1-11)$$

式中  $d'_L, d_L$  ——用眼睛观察和照相时的景深；

$M$  ——放大率。

在实际应用时,要根据成像需要选择数值孔径合适的物镜。表 1-1 给出了不同物镜的景深。例如用高倍显微镜观察时,由于景深小,只有在金相试样表面高低差别很小时,才能清晰成像,因此高倍观察所用的试样需要腐蚀浅一些。

表 1-1 不同物镜的标准景深

| 物镜             | 目镜  | 景深/mm |         |
|----------------|-----|-------|---------|
|                |     | 照相    | 目视      |
| 10×, 0.25 N.A. | 10× | 0.008 | 0.033 5 |
| 43×, 0.65 N.A. | 10× | 0.001 | 0.002 3 |
| 97×, 1.30 N.A. | 10× | 0.002 | 0.000 5 |

#### (5) 工作距离与视场范围

物镜的工作距离是指显微镜准确聚焦后,试样表面与物镜的前端之间的距离。物镜的放大率越高,工作距离越短。所以选用高倍物镜观察时,调焦距需要格外细心,一般先使物镜无限靠近试样但不接触,然后使物镜缓慢离开试样,直至看到显微组织。

视场范围是指显微镜中所观察到的试样表面区域的大小。视场范围与物镜的放大率成反比。普通物镜初次放大实像的直径一般为 18 mm,放大率为 10×、40×、100×的物镜,其视场的直径分别为 1.8 mm、0.45 mm、0.18 mm。平视场物镜初次放大实像直径可达 28 mm,视场范围大大增加。

#### (6) 透镜的像差及物镜的基本类型

由于物理条件的限制,单片普通透镜所成的像往往模糊不清或发生畸变,在实际成像中出现的所有缺陷和偏差都称为像差。像差一般分为两大类:一类是单色光成像时的像差,简称为单色像差,包括球面像差、彗形像差、像散和像域弯曲;另一类是多色光成像时的像差,称为色像差,这是由于介质对不同波长的光的折射率不同而引起的。对显微成像影响最大的有三种像差,即球面像差、色像差和像域弯曲。下面分别介绍这三种像差。

① 球面像差——来自光轴某点的单色光通过透镜时,由于通过光轴附近的光线的折射角小,而通过透镜边缘的光线的折射角大,因而会形成前后分布的许多聚焦点而成一弥散的光斑。这种现象称为球面像差,如图 1-5 所示。

为了降低球面像差,可采用组合透镜作为物镜进行校正。此外还可以适当