

高等学校材料科学与工程类专业“十二五”规划教材

JINSHU CAILIAOXUE SHIYAN

金属材料学实验

主 编 张皖菊 李殿凯



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

014017793

TG14-33
06

高等学校材料科学与工程类专业“十二五”规划教材

金属材料学实验

主 编 张皖菊 李殿凯

副主编 丁晓丽 庞 刚
杨 磊 张义伟



TG14-33
06

合肥工业大学出版社



北航

C1704716

内容提要

本书为高等院校金属材料工程专业实验课程的教材。本书对金属学、钢的热处理、金属材料学、金属力学性能、金属物理性能、X射线衍射和电子显微分析等专业课的课程实验进行了归纳和整合,在介绍基本实验技能、金相组织分析、产品质量检验、热处理工艺制定及仪器仪表的构造和使用等实验内容的基础上,还增加了一些综合性、设计性、高科技设备演示性的实验项目,特别是介绍了美国的大型热/力模拟设备(Gleebl-3500)以及最新的图像分析仪的工作原理、设备构造和使用方法。

本书根据最新的国家标准进行编写。书中内容丰富翔实,并配有众多的图表、金相照片等。另外,本书还提供与之配套的多媒体教学课件,方便教学。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料学实验/张皖菊,李殿凯主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2013.8

ISBN 978-7-5650-1443-7

I. ①金… II. ①张…②李… III. ①金属材料—实验—高等学校—教材
IV. ①TG14-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 182475 号

金属材料学实验

张皖菊 李殿凯 主编

责任编辑 汤礼广

出版 合肥工业大学出版社
地址 合肥市屯溪路 193 号
邮编 230009
电话 理工编辑部:0551-62903087
市场营销部:0551-62903163
网址 www.hfutpress.com.cn
E-mail hfutpress@163.com

版次 2013 年 8 月第 1 版
印次 2013 年 8 月第 1 次印刷
开本 787 毫米×1092 毫米 1/16
印张 16
字数 355 千字
印刷 合肥星光印务有限责任公司
发行 全国新华书店

ISBN 978-7-5650-1443-7

定价: 34.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

前 言

本书是金属材料工程专业实验课程（独立设课）的教材。本书对金属学、钢的热处理、金属材料学、金属力学性能、金属物理性能、X射线衍射和电子显微分析等专业课的实验进行了认真归纳和整合，较为系统地介绍了本专业的基本实验原理和实验方法。本书除了介绍基本实验技能、金相组织分析、产品质量检验、热处理工艺制定及仪器仪表的构造和使用等实验内容外，还增加了一些综合性、设计性、高科技设备演示性实验项目，特别是介绍了美国的大型热/力模拟设备（Gleebl-3500）以及最新的图像分析仪的工作原理、设备构造和使用方法。编写本书的目的就是让学生加强专业基本实验技能训练，巩固专业课程所学知识，加强对材料成分、工艺组织、结构性能之间规律的掌握，了解材料科学研究的方法和程序，培养综合运用知识进行分析问题和解决问题的能力。

本书根据最新的国家标准进行编写，内容丰富翔实，图文并茂，并配有众多的图表、金相照片等。与本书配套的多媒体教学课件，色彩鲜明、生动活泼、实践性强，深受学生欢迎。本书中所有用来观察的金相样品，除了标准样品外，均大量来源于各研究所和工厂的实样（实样还在不断补充中），尽量做到理论与实际生产紧密结合，其中绝大部分的金相照片是作者亲自拍摄的。在第一部分实验教学内容中，还设计了一个较多学时的大型综合性、设计性实验（实验二十二）。这个实验要求学生在老师的精心指导下，根据所学知识查阅有关资料文献，分组独立完成拟定实验项目、设计实验内容、制订实验方案，完成实验操作、数据整理、分析结果等，并要求撰写出准论文形式的实验报告。这对于调动学生的学习积极性以及让学生勇于实践、敢于开拓创新、全面提高其专业基本技能和综合素质均有较大的帮助。

本书共分为四部分：金属材料学基础实验（共22个实验）；金属力学性能实验（共5个实验）；金属物理性能实验（共3个实验）；电子显微分析实验（共6个实验）。

“金属材料学基础实验”的主要内容有：金相基本技能实验、热处理工艺制定与操作及组织观察与分析实验、综合性实验。其中实验四、实验十八、实验十九由丁晓丽编写；实验九、实验十三、实验十六由庞刚编写；实验十一、实验十二、实验二十由杨磊编写；实验二十一由张义伟编写；其余由张皖菊编写。

“金属力学性能实验”主要内容有：拉伸、冲击、硬度、断裂韧性等，在此基础上还设了一个综合性实验。这部分内容由张皖菊编写。

“金属物理性能实验”主要内容有：用双臂电桥测金属的电阻、用悬丝耦合共振法测金属的弹性模量和内耗等。这部分内容由丁晓丽编写。

“电子显微分析实验”主要内容有：X射线衍射分析和透射电镜与扫描电镜电子背反射衍射等的构造、原理及分析方法等。这部分内容由李殿凯编写。

本书由张皖菊、李殿凯担任主编，全书由张皖菊统稿。

在安徽工业大学材料科学与工程学院实验中心工作 30 余年、现已退休的吴慧英老师也为本书的编写工作做出了重要贡献，在此对她表示衷心的感谢。

在教学过程中，若需要与之配套的教学课件，请通过电子邮箱 zwju@ahut.edu.cn 与作者进行联系。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

作者

目 录

第一部分 金属材料学基础实验

实验一 金相显微镜的构造与使用	(3)
实验二 金相样品的制备及组织观察与摄影	(15)
附录 1 常用浸蚀剂	(22)
实验三 定量金相及奥氏体晶粒测定	(25)
附录 2 GB6394—2002 金属平均晶粒度评级图	(35)
实验四 碳钢的热处理及性能测定	(39)
实验五 二元合金显微组织观察与分析	(43)
实验六 金属凝固组织观察与分析	(48)
实验七 铁碳合金平衡组织观察与分析	(52)
实验八 金属冷塑性变形与再结晶	(58)
实验九 碳钢热处理后显微组织观察与分析	(67)
实验十 钢的淬透性曲线测定	(73)
实验十一 Gleeble—3500 热/力模拟试验机简介	(77)
实验十二 物理热模拟试验测淬火介质冷却曲线	(81)
实验十三 钢材质量的高倍检验	(84)
附录 3 钢铁材料高倍检验标准	(91)
实验十四 钢材质量的低倍检验	(110)
附录 4 钢铁材料低倍检验标准	(113)
附录 5 宏观分析浸蚀剂	(124)
实验十五 合金钢的显微组织观察与分析	(126)
实验十六 钢中非金属夹杂物的金相鉴定	(130)

附录 6 夹杂物的鉴别程序(参考图)	(136)
实验十七 铸铁显微组织观察与分析	(137)
实验十八 化学热处理后渗层组织观察及渗层深度测定	(143)
实验十九 高速钢热处理后显微组织分析及性能测定	(152)
实验二十 物理热模拟试验测钢的连续冷却转变(CCT)曲线	(157)
实验二十一 图像分析仪的工作原理及应用	(160)
实验二十二 金属材料及热处理综合实验	(164)
附录 7 综合实验项目(参考)	(166)

第二部分 金属力学性能实验

实验一 金属的拉伸实验	(175)
附录 8 试样断裂长度 L_k 的测定——消除断口位置对伸长率测定的影响	(179)
实验二 金属的硬度实验	(180)
附录 9 GB/T231.1—2009 压痕直径与布氏硬度对照表	(189)
实验三 金属冲击韧性实验	(192)
实验四 钢材成分、热处理工艺对钢的力学性能的影响	(195)
实验五 金属材料平面应变断裂韧性 K_{Ic} 的测试	(197)
附录 10 条件临界载荷 P_Q 的研究	(201)
附录 11 三点弯曲试验的 $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 值	(202)

第三部分 金属物理性能实验

实验一 用双臂电桥研究含碳量及热处理对钢的电阻的影响	(207)
实验二 悬丝耦合共振法测定金属材料的杨氏模量	(212)
实验三 用共振法测金属的内耗	(215)

第四部分 电子显微分析实验

实验一 立方晶系粉末相线条的指数标定和点阵类型与点阵参数的确定	(221)
实验二 利用 X 射线衍射仪定性相分析	(225)
实验三 透射电镜样品的制备及典型组织观察	(233)
实验四 电子衍射分析	(237)
实验五 扫描电镜结构、原理及微区成分分析	(240)
实验六 电子背反射衍射 (EBSD) 及其应用	(243)
参考文献	(247)

第一部分

金属材料学基础实验

实验一 金相显微镜的构造与使用

【实验目的】

- (1) 了解金相显微镜的构造。
- (2) 掌握金相显微镜的使用方法。

【实验说明】

1. 金相显微镜的构造

光学金相显微镜的构造一般包括放大系统、光路系统和机械系统三部分,其中放大系统是显微镜的关键部分。

(1) 放大系统

1) 显微镜的放大成像原理

显微镜的基本放大原理如图 1-1 所示。其放大作用主要由焦距很短的物镜和焦距较长的目镜来完成。为了减少像差,显微镜的目镜和物镜都是由透镜组构成的复杂的光学系统,其中物镜的构造尤为复杂。为了便于说明,图中的物镜和目镜都简化为单透镜。物体 AB 位于物镜的前焦点外但很靠近焦点的位置上,经过物镜形成一个倒立的放大实像 $A'B'$,这个像位于目镜的物方焦距内但很靠近焦点的位置上,作为目镜的物体。目镜将物镜放大的实像再放大成虚像 $A''B''$,位于观察者的明视距离(距人眼 250 毫米)处,供眼睛观察,在视网膜上最终得到实像 $A'''B'''$ 。

由图 1-1 可知:

物镜的放大倍数

$$M_{\text{物}} = \frac{A'B'}{AB}$$

目镜的放大倍数

$$M_{\text{目}} = \frac{A''B''}{A'B'}$$

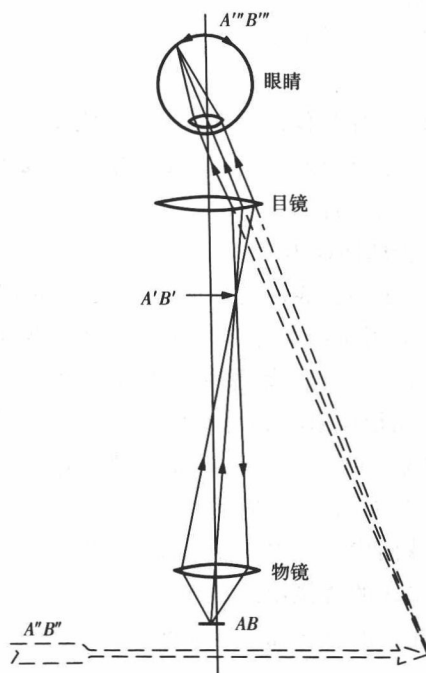


图 1-1 显微镜的成像原理图

将两式相乘：

$$M_{\text{物}} \times M_{\text{目}} = \frac{A'B'}{AB} \times \frac{A''B''}{A'B'} = \frac{A''B''}{AB} = M$$

说明显微镜的总放大倍数 M 等于物镜的放大倍数和目镜的放大倍数的乘积。目前普通光学金相显微镜最高有效放大倍数为 1600~2000 倍。

另外,根据几何光学原理得物镜的放大倍数:

$$M_{\text{物}} = \frac{\Delta}{f_{\text{物}}}$$

式中: Δ ——光学镜筒长度;

$f_{\text{物}}$ ——物镜焦距。

因光学镜筒长度为定值,所以物镜放大倍数越高,物镜的焦距就越短,物镜离物体也就越近。

2) 透镜像差

透镜在成像过程中,由于受到本身物理条件的限制,会使映像变形和模糊不清,这种像的缺陷称为像差。在金相显微镜的物镜、目镜以及光路系统设计制造中,虽然将像差尽量减小,但依然存在。像差有多种,其中对成像质量影响最大的是球面像差、色像差和像域弯曲三种。

① 球面像差

由于透镜表面为球面,其中心与边缘厚度不同,因而来自一点的单色光经过透镜折射后,靠近中心部分的光线偏折角度小,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,在离透镜较近位置聚焦,因而形成沿光轴分布的一系列的像,使成像模糊不清,这种现象称球面像差,如图 1-2 所示。

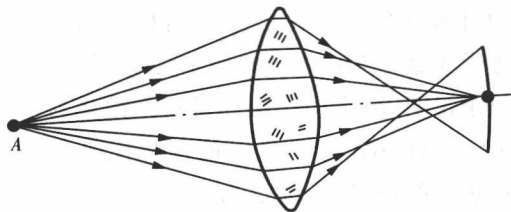


图 1-2 球面像差示意图

球面像差主要靠凸透镜和凹透镜所组成的透镜组来减小。另外,通过加光栏的办法缩小透镜成像范围,也可以减小球面像差的影响。

② 色像差

色像差与光波波长有密切关系。当白色光中不同波长的光线通过透镜时,因其折射角不同而引起像差。波长越短,折射率越大其焦点越近;波长越长,折射率越小,则焦点越远。因而,不同波长的光线不能在一点聚焦,否则会使映像模糊,或在视场边缘上见到彩色环带,这种现象称为色像差,如图 1-3 所示。

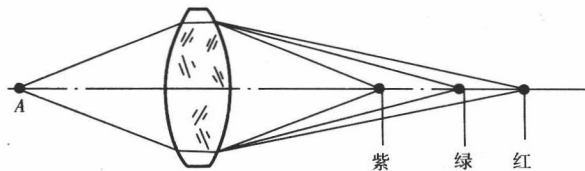


图 1-3 色像差示意图

色像差可以靠透镜组来减

小影响,在光路中加滤色片,使白色光变成单色光,也能有效地减小色像差。

③ 像域弯曲

垂直于光轴的平面,通过透镜所成的像不是平面,而是凹形的弯曲像面,这种现象叫做像域弯曲,如图 1-4 所示。

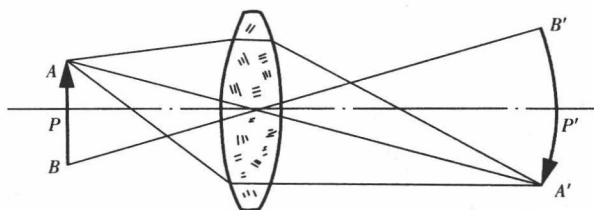


图 1-4 像域弯曲示意图

像域弯曲是由于各种像差综合作用的结果,一般物镜都或多或少的存在,只有校正极佳的物镜才能获得趋近平坦的像域。

3) 物镜

显微镜观察到的像是经物镜和目镜两次放大后所得虚像,其中目镜仅起到将物镜放大的实像再次放大的作用。因此,显微镜成像的质量关键在于物镜。

① 物镜的种类

按像差校正分类,常用物镜的种类如表 1-1 所示。其中消色差物镜结构简单、价格低廉、像差基本上予以校正,故普通小型金相显微镜多采用这种物镜。

表 1-1 几种常用物镜

物镜名称	标 志	对象域中心的校正		对视场边缘的校正
		色像差	球面像差	
消色差物镜	无标志	红绿两波区	黄绿两波区	未校正
复消色差物镜	APO	可见光全波区	绿紫两波区	未校正
平场消色差物镜	PL 或 Llan	红绿两波区	黄绿两波区	已校正

按物体表面与物镜间的介质分类,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,可以分为低倍、中倍和高倍物镜。无论哪种物镜都是由多片透镜组合而成的。

② 物镜上的标志

按国际标准规定,物镜的放大倍数和数值孔径标在镜筒中央清晰位置,并以斜线分开,例如 $45\times/0.63$ 、 $90\times/1.30$ 等;表示镜筒长度的字样或者符号以及有无盖玻片标在放大倍数和数值孔径的下方,并以斜线分开,例如 $160/-$ 、 $\infty/0$ 等;表示干系或者油系的字样,标在放大倍数和数值孔径的上方或其他合适的地方。

③ 镜筒长度

光学镜筒长度 Δ 是指物镜后焦点与目镜前焦点的距离。因为该值与显微镜的放大

倍数直接相关,因此在设计时已经确定。为确保该值准确,物镜、目镜的焦距以及机械镜筒长度都有严格的公差范围。

根据物镜像距的不同,又将显微镜分为两种:一种为物镜像距 150mm、机械镜筒长 160mm 的显微镜,如图 1-5 所示;另一种为物镜像距无穷远、镜筒内装有透镜的显微镜,如图 1-6 所示。

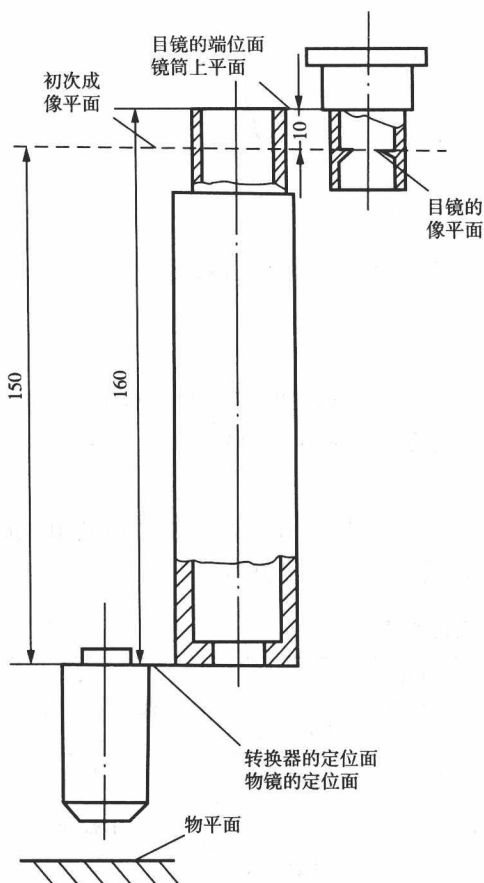


图 1-5 筒长 160mm 的显微镜

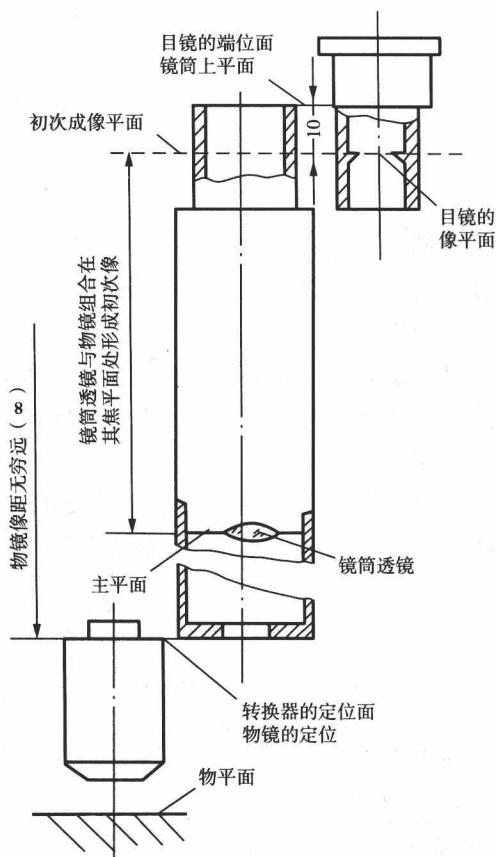


图 1-6 物镜像距无穷远的显微镜

④ 盖玻片

盖玻片是置于被测物体与物镜之间的无色透明玻璃薄片,按国际标准规定,盖玻片分为矩形和圆形两种。物镜上标有 160/— 说明盖玻片用不用均可,标有 160/0 说明不用盖玻片。金相显微镜一般不用盖玻片,用盖玻片的一般指生物显微镜。

⑤ 数值孔径(numerical aperture,以符号 $N \cdot A$ 表示)

表征物镜的聚光能力,其值大小取决于进入物镜的光线锥所张开的角度,即孔径角的大小。

$$N \cdot A = n \sin \theta$$

式中 n 为试样与物镜间介质的折射率,空气介质 $n=1$,松柏油介质 $n=1.515$ 。 θ 为孔径

角的半角,如图 1-7 所示。数值孔径 $N \cdot A$ 值的大小标志着物镜分辨率的高低。干系物镜 $n=1$, $\sin\theta$ 总小于 1, 因此 $N \cdot A < 1$; 油系物镜 n 值可大于 1.5, 所以 $N \cdot A > 1$ 。

⑥ 物镜的分辨率

显微镜的分辨率主要取决于物镜,分辨率的概念与放大倍数不同。可以做这样一个实验:用两个不同的物镜在同样放大倍数下观察同一细微组织能得到两种不同的效果,一个可以清楚的分辨出组织中相距很近的两个点,另一个只能看到这两个点连在一起的模糊轮廓,如图 1-8 所示。显然前一个物镜的分辨率高,而后一个物镜的分辨率低。所以说物镜的分辨率可以用物镜所能清晰分辨出相邻两点间最小距离 d 来表示。 d 与数值孔径的关系如下:

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

式中: λ —— 入射光的波长;

$N \cdot A$ —— 物镜数值孔径。

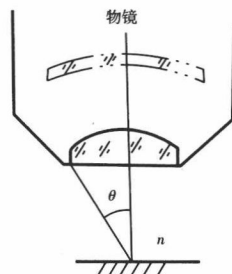


图 1-7 孔径角

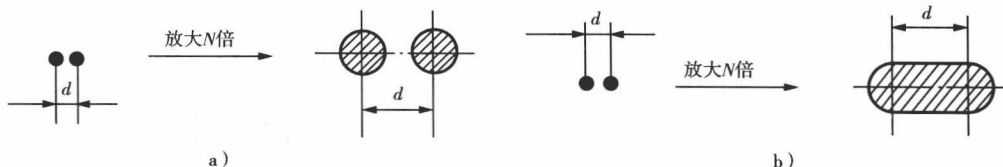


图 1-8 物镜分辨率高低示意图

a) 分辨率高; b) 分辨率低

可见,分辨率与入射光的波长成正比, λ 愈短,分辨率愈高;与数值孔径成反比,物镜的数值孔径愈大,分辨率愈高。

⑦ 有效放大倍数

能否看清组织的细节,除与物镜的分辨率有关外,还与人的眼睛实际分辨率有关。如物镜分辨率很高,形成清晰的实像,可是与之配用的目镜倍数过低,致使观察者难以看清,此时称“放大不足”,即未能充分发挥物镜的分辨率。但是误认为选用的目镜倍数愈高,即总放大倍数愈大看的愈清楚,这也是不妥当的。实践证明超过一定界限后,放大的映像愈大反而愈模糊,此时称“虚伪放大”。

物镜的数值孔径决定了显微镜的有效放大倍数。所谓有效放大倍数是指物镜分辨清楚的距离(d),被人的眼睛同样能分辨清晰所必须放大的倍数,用 $M_{\text{有效}}$ 表示。

$$M_{\text{有效}} = \frac{l}{d} = \frac{l}{\frac{\lambda}{2N \cdot A}} = \frac{2l}{\lambda} N \cdot A$$

式中 l 为人眼的分辨率,在 250mm 处,正常人眼的分辨率为 0.15~0.30mm。

若取 $\lambda = 5500 \times 10^{-7} \text{ mm}$ (绿光波长) 代入上式, 则

$$M_{\text{有效}(\min)} = \frac{2 \times 0.15}{5500 \times 10^{-7}} N \cdot A \approx 550 N \cdot A$$

$$M_{\text{有效}(\max)} = \frac{2 \times 0.30}{5500 \times 10^{-7}} N \cdot A \approx 1000 N \cdot A$$

结果说明, 在 $500 \sim 1000 N \cdot A$ 范围内的放大倍数, 均为有效放大倍数; 小于 $500 N \cdot A$ 时, 由于受目镜放大倍数不足的限制, 未能充分发挥物镜的分辨率; 大于 $1000 N \cdot A$ 时, 可能会出现虚伪放大现象。然而, 随着科学技术的发展, 光学零件设计制造日趋完善精良, 照明方式不断改进, 有些显微镜的有效放大倍数最大可达 $2200 N \cdot A$, 说明上述有效放大倍数的范围并非是严格的界限。

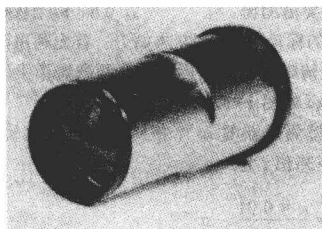
了解有效放大倍数范围对正确选择物镜和目镜的配合十分重要, 例如 25 倍的物镜 $N \cdot A = 0.40$, 其有效放大倍数应该在 $500 \times 0.40 \sim 1000 \times 0.40$ 倍, 即 $200 \sim 400$ 倍范围内。因此, 应选择 8~16 倍的目镜与该物镜配合使用。

4) 目镜

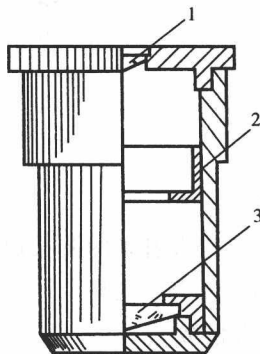
常用的目镜按其构造可分为 5 种。

① 负型目镜

负型目镜以福根目镜为代表, 如图 1-9 所示。



a)



b)

图 1-9 负型目镜

a) 实体; b) 剖面图

1—目透镜; 2—光阑; 3—场透镜

福根目镜是由两片单一的平凸透镜并在中间加一光阑组成。接近眼睛的透镜称为目透镜, 起放大作用; 另一透镜称场透镜, 能使映像亮度均匀。中间的光阑可以遮挡无用光, 提高映像清晰度。福根目镜并未对透镜像差加以校正, 故只适于同低倍或中倍消色差物镜配合使用。

② 正型目镜

正型目镜以雷斯登目镜为代表, 如图 1-10 所示。

雷斯登目镜也是由两片凸透镜组成, 所不同的是光阑在场透镜的外面。这种目镜有

良好的像域弯曲校正,球面像差也比较小,但色像差比福根目镜严重。另外,在相同放大倍数下,正型目镜的观察视场比负型目镜略小。

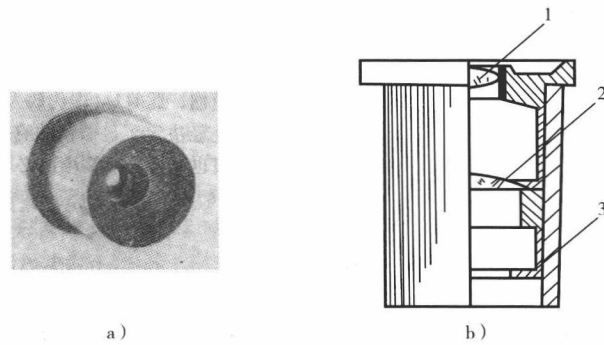


图 1-10 正型目镜

a) 实体; b) 剖面图

1—目透镜; 2—场透镜; 3—光阑

③ 补偿目镜

补偿目镜是一种特制的目镜,结构较上述两种复杂。与复消色差物镜配合使用,可以补偿校正残余色差,得到全面清晰的映象,但不宜与普通消色差物镜配合使用。

④ 摄影目镜

摄影目镜专用于金相摄影,不能用于观察。由于对透镜的球面像差、像域弯曲均有良好的校正,因此与物镜配合可在投影屏上形成平坦、清晰的实像。凡带有摄影装置的显微镜均配有摄影目镜。

⑤ 测微目镜

测微目镜是为了满足组织测量的需求而设置的,内装有目镜测微器,为看清目镜中标尺刻度,可借助螺旋调节装置移动目透镜的位置。如图 1-11 所示。

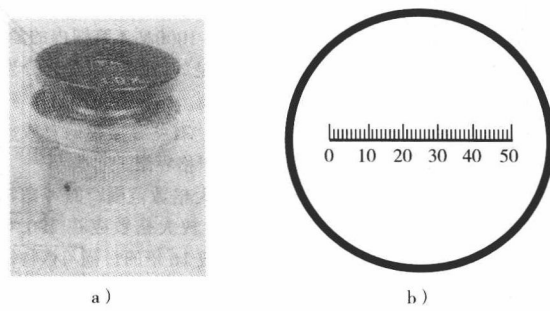


图 1-11 测微目镜

a) 实体; b) 目镜测微器

测微目镜与不同放大倍数的物镜配合使用,测微器的格值是不同的。标定格值需要借助物镜测微尺(即 1mm 距离被等分成 100 格的标尺)。标定方法如下:首先利用测微目镜上的螺旋装置将视场中目镜测微器的刻度调至最清楚,然后将物镜测微尺作为试样成像是于视场中,这样视场中可同时看到两个标尺。如图 1-12 所示。