

普通高等教育材料科学与工程专业规划教材

材料研究方法

西安交通大学 谈育煦 胡志忠 编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书包括三方面内容,分三篇叙述。第一篇为光学金相显微术,内容有常规金相分析、偏振光金相技术、干涉显微镜、相衬金相显微镜和定量金相。第二篇为X射线衍射分析,内容有X射线的特性和衍射原理、X射线的强度、多晶体分析法、物相分析、宏观应力的测定和单晶体取向的测定。第三篇为电子显微分析术,内容有透射电子显微镜、电子衍射、薄晶体的电子显微分析、扫描电子显微镜和电子探针。

本书可作为材料科学与工程专业以及机械类热加工专业的教材,也可作为从事材料工程和机械制造的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料研究方法/谈青煦,胡志忠编. —北京:机械工业出版社, 2004.5

普通高等教育材料科学与工程专业规划教材

ISBN 7-111-14337-X

I. 材... II. ①谈...②胡... III. 材料科学—研究方法 IV. TB30

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第033342号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:张祖凤 版式设计:冉晓华 责任校对:张晓蓉

封面设计:张静 责任印制:施红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004年6月第1版第1次印刷

1000mm×1400mm B5·9印张·347千字

定价:23.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

本教材定名为《材料研究方法》，它是在原金属材料专业所属三门工具课《金相研究方法》、《X射线金属学》和《金属电子显微分析》的基础上，通过调整和发展进行编写的。在内容的安排上充分考虑到了知识面的拓宽(由单纯的金属材料扩展成工程材料)和各种方法间的相互联系。编写时突出物理概念，尽量避免繁琐和不必要的数学推导，在保持课程系统性和重点的前提下，对一些次要内容作了大量的删节。

本书共分三篇：第一篇为光学金相显微术，主要讲授常规的金相分析和特种光学金相显微技术；第二篇为X射线衍射分析，主要叙述X射线晶体分析方法和宏观内应力的测定；第三篇为电子显微分析方法，主要讲授透射电子显微技术，并对扫描电镜分析作扼要的介绍。

从上述内容来看，本课程是一门以实践性环节为主的专业课，掌握了上述内容就能使学生了解到本专业范围内的一些基本实验手段，并能和从事测试工作的专业人员共同拟订实验方案和分析测试结果。

本书第一篇和第三篇由西安交通大学谈育煦编写，第二篇由西安交通大学胡志忠编写。第一篇和第三篇由西北工业大学严隽民教授审阅，第二篇由西安交通大学胡奈赛教授审阅。

由于编者水平有限，书中缺点错误在所难免，如蒙指正，不胜感谢。

编 者
2003年9月

目 录

前言

第一篇 光学金相显微术

第一章 光学透镜的成像原理	1
第一节 光的折射和衍射	1
第二节 光学透镜的像差	4
第三节 透镜的分辨率	6
思考题	7
第二章 金相显微镜	8
第一节 显微镜的工作原理	8
第二节 物镜	9
第三节 目镜	11
第四节 金相显微镜的照明系统	12
第五节 金相显微镜的整体构造图解	15
思考题	17
第三章 常规金相分析	18
第一节 取样	18
第二节 金相组织的显示	23
第三节 光学金相组织分析	25
思考题	26
第四章 偏振光金相技术	27
第一节 偏振光的基本原理	27
第二节 偏振光金相显微镜	32
第三节 偏振光金相分析原理	33
第四节 偏振光在金相分析过程中的应用	34
思考题	37
第五章 干涉显微镜	38
第一节 干涉原理	38
第二节 干涉显微镜的结构	40
第三节 应用举例	43

思考题	43
第六章 相衬金相显微镜	44
第一节 相衬分析原理	44
第二节 相衬显微镜	45
第三节 应用分析实例	48
思考题	49
第七章 定量金相	50
第一节 定量金相的基本符号	50
第二节 定量金相的基本原理	51
第三节 定量金相的测试方法	53
第四节 定量金相应用举例	56
第五节 定量金相测试时的误差	59
第六节 图像分析仪定量金相分析	60
思考题	61

第二篇 X 射线衍射分析

第八章 X 射线的物理特性	63
第一节 X 射线的产生及其性质	63
第二节 X 射线谱	64
第三节 X 射线与物质的相互作用	68
第四节 X 射线的衰减规律	71
思考题	74
第九章 X 射线的衍射原理	75
第一节 倒易点阵简介	75
第二节 布拉格定律	78
第三节 厄瓦尔德图解及其应用	81
思考题	86
第十章 X 射线的衍射强度	88
第一节 电子和原子对衍射强度的影响	88
第二节 单胞对衍射强度的影响	90
第三节 角因数	94
第四节 多晶体衍射的总强度	96
思考题	99
第十一章 多晶体分析法	100
第一节 粉末法	100

第二节	X 射线衍射仪	105
第三节	其他分析方法	110
思考题	.....	112
第十二章	多晶体的物相分析	113
第一节	定性分析	113
第二节	定量分析	118
第三节	点阵参数的精确测定	121
思考题	.....	125
第十三章	残余应力的测定	127
第一节	内应力的分类和检测	127
第二节	残余应力的测定原理	130
第三节	残余应力的测定方法	133
思考题	.....	141
第十四章	晶体投影和单晶体取向测定	142
第一节	晶体投影	142
第二节	劳埃法	150
第三节	单晶体取向的测定	154
思考题	.....	160

第三篇 电子显微分析术

第十五章	透射电子显微镜	162
第一节	透射电子显微镜的结构	162
第二节	电子显微镜中的电子光学问题	163
第三节	透射电子显微镜的光路系统	172
第四节	主要部件的结构及其工作原理	176
思考题	.....	180
第十六章	电子衍射	181
第一节	概述	181
第二节	电子束的布拉格衍射	181
第三节	g 矢量(衍射晶面矢量)	184
第四节	电子衍射的基本公式和产生衍射的充要条件	185
第五节	零层倒易面	187
第六节	标准电子衍射花样	188
第七节	偏离矢量	189
第八节	电子显微镜中的电子衍射	192

第九节 单晶体电子衍射花样的标定	194
第十节 多晶体的电子衍射花样	198
第十一节 菊池线	200
思考题	204
第十七章 薄晶体的电子显微分析	205
第一节 薄晶体样品(薄膜)的制备	205
第二节 衍射衬度原理	207
第三节 衍衬运动学简介	209
第四节 晶体缺陷分析	217
思考题	224
第十八章 扫描电子显微镜和电子探针	225
第一节 扫描电子显微镜	225
第二节 电子探针	242
思考题	250
附录 A 抛光试剂和浸蚀试剂	251
附录 B X射线分析时常用的一些常数和系数	254
附录 C 常见晶体的标准电子衍射花样	258
附录 D 电子衍射花样标定时用的数据表	264
参考文献	278

第一篇 光学金相显微术

光学金相显微分析是指利用金相显微镜来对金属和合金的组织进行观察和分析。它是广义金相分析的一个重要组成部分。由于后者的含义中并未规定使用的分析工具，因此它还包括了用肉眼进行的宏观分析以及用电子显微镜等手段进行的分辨率更高的观察分析。光学金相分析开始于19世纪60年代，100余年的科学实践使它已从一般的明场观察发展成材料科学领域中一项完整的基本技术，在0.2mm至0.2 μ m尺度范围的观察分析中具有不可替代的作用。在本篇中将介绍七个部分的内容，即：光学透镜的成像原理，金相显微镜，常规金相分析，偏振光金相技术，干涉显微镜，相衬金相显微镜和定量金相。

第一章 光学透镜的成像原理

第一节 光的折射和衍射

一、光的折射

光在介质中是沿直线传播的。在不同介质中光的传播速度不同。当光从一种介质传播到另一种介质中去时，在两介质的界面上光的传播方向会发生突然的变化，这种现象就是光的折射，如图1-1。

频率 ν 的单色光在相同介质中传播时其频率是固定不变的。若此单色光的波长为 λ ，则它在具有折射率 n 的介质中传播时速度为 $v = \lambda\nu$ 。因在真空中光的折射率 $n_0 = 1$ ，相应的传播速度为 c ，故光在一般介质中的传播速度应为 $v = c/n$ ， n 在数值上均大于1。

实验证明光在折射时服从以下规律：入射束、折射束和折射界面法线三者位于一平面内；入射角 θ 、折射角 γ 与两种介质的折射率 n_1 和 n_2 之间满足下式关系：

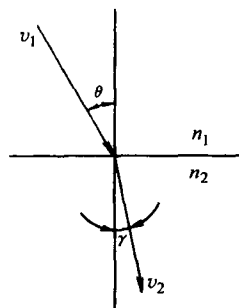


图1-1 光的折射现象

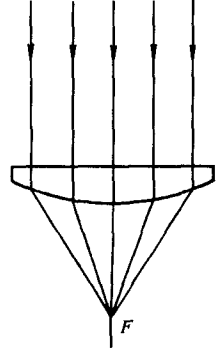
$$\frac{\sin\theta}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (1-1)$$

因为 $v_1 = \nu\lambda_1$, $v_2 = \nu\lambda_2$, 故

$$\frac{\sin\theta}{\sin\gamma} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (1-2)$$

式中, v_1 、 v_2 , λ_1 、 λ_2 分别为光在第一和第二介质中的速度和波长; n_{21} 是相对折射率。如果 $n_2 > n_1$, 则 n_{21} 大于 1 或 $\lambda_1 > \lambda_2$, 这表明光在第一介质中的传播速度大于第二介质中的传播速度, 此时折射光更靠近界面法线即折射角 γ 小于入射角 θ ; 反之则折射角大于入射角。

利用光的折射特性可使平行的光束射入旋转对称凸透镜时发生聚焦作用, 因此光的折射是光学透镜成像的基础, 如图 1-2。



凸透镜是光学显微镜放大成像的主要部件, 凸透镜成像时服从下面的关系式:

$$\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} = \frac{1}{f} \quad (1-3) \quad \text{图 1-2 平行光的聚焦}$$

图 1-3 中示出了式(1-3)中各参数的意义, 其中 L_1 和 L_2 分别为物距和像距, F 为焦点, 它至透镜中心的距离 f 为焦距。

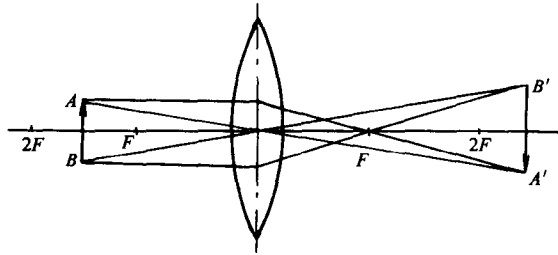


图 1-3 凸透镜的成像

图中物体置于 1~2 倍焦距之间, 根据几何光学的原理, 当 $1 < L_1/f < 2$ 时形成倒立的放大实像。由几何作图的结果可知, 当 $L_1/f > 2$ 时, 形成倒立缩小实像; 当 $L_1/f < 1$ 时, 形成正立虚像。

透镜的放大倍数等于像和物长度的比值, 或像距和物距的比值, 即

$$M = \frac{A'B'}{AB} = \frac{L_2}{L_1} \quad (1-4)$$

玻璃制成的光学透镜, 其焦距 f 已经固定不变, 若要满足成像条件则必须改变透镜与物和像之间的相对位置以获得与式(1-3)相匹配的 L_1 和 L_2 值。

二、光的衍射

光具有波动性，光波之间会相互干涉即产生所谓衍射现象。由于衍射效应的存在，物点通过透镜成像时成像点并不是一个理想的点(几何点)而是一个有一定尺寸的光斑。光斑中间的亮度最大，四周被亮度逐渐减弱的明暗相间的衍射环所包围，这个光斑即所谓埃利(Airy)斑。通常埃利斑是以第一暗环处的半径来衡量其尺寸的。

图 1-4a 示出了物体上两个点光源(物点)成像时形成的埃利斑。图中 S_1 和 S_2 是成像点， S'_1 和 S'_2 是埃利斑。图的下方示意地描出了斑的形状及其亮度(即强度

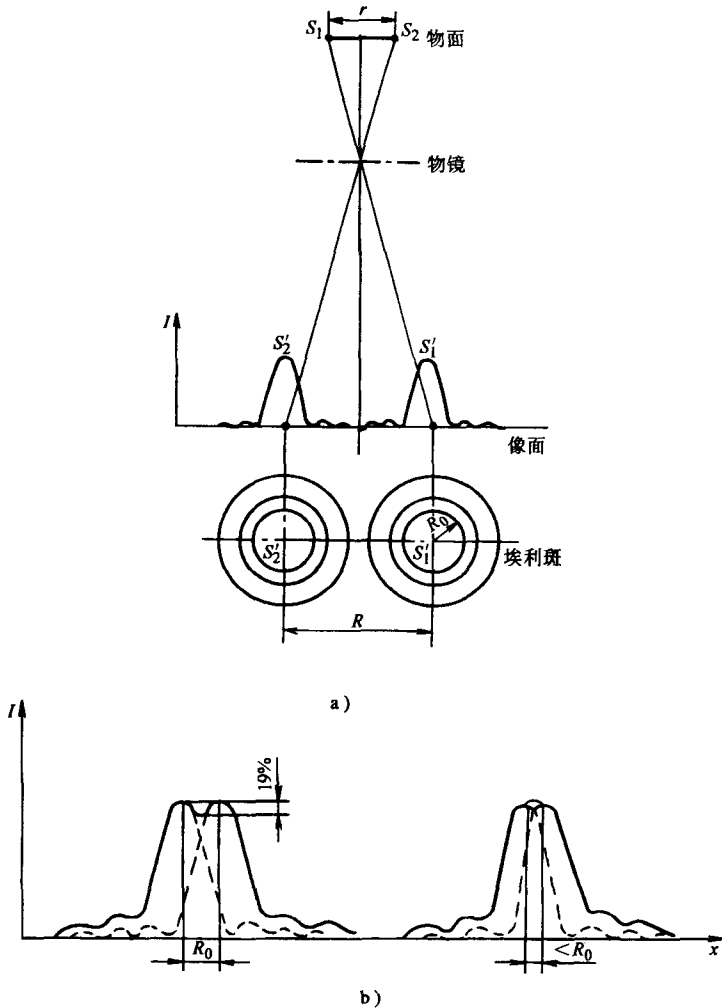


图 1-4 两个物点通过透镜后形成的埃利斑
a) 埃利斑的形成 b) 两埃利斑间的强度合成

I)分布, R_0 为第一暗环半径。现在讨论下面三种情况(见图 1-4b): 当两个物点 S_1 和 S_2 之间距离 r 比较大时, 相应的埃利斑彼此分开, 其间距为 R , 此时可认为两个物点的像可以清楚地被物镜分辨出来; 若两个物点之间距离相互靠近, 埃利斑也随之接近, 当它们之间的间距 $R = R_0$ 时, 两个埃利斑部分重叠。若仔细分析强度分布曲线, 可发现两个强度峰和低谷之间的相对强度差值约为 19% 左右。由于 19% 的强度(亮度)差刚能被人眼所觉察(对大多数人来说), 因此瑞利(Rayleigh)以此为基础提出了分辨两个埃利斑的标准: 当两个埃利斑之间的间距等于第一暗环半径 R_0 时, 两斑之间存在的亮度差是人眼刚能分辨的极限值, 因此 $R \geq R_0$ 是能够分辨相邻两个成像点的判据; 若两个埃利斑之间的距离 $R < R_0$ 时, 则合成强度曲线间的强度差小于 19% 或只有一个强度峰出现, 此时, 两个成像点不可分辨。

根据衍射理论并结合阿贝(Abbe)成像原理, 已导出了物点通过透镜后产生埃利斑半径 R_0 的计算公式:

$$R_0 = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha} M \quad (1-5)$$

式中, n 为透镜靠近物体一边的介质折射率, λ 为照明光的波长, α 为透镜的孔径半角, M 为放大倍数。 $n \sin \alpha$ 称为数值孔径, 习惯上用符号 N.A 表示(Numerical Aperture 的缩写)。

R_0 位于像平面上, 它是由物体上的一个几何点通过透镜成像后演化成的圆斑半径, 若把 R_0 除以放大倍数 M 就可把这个尺度折算到成像的物体上去, 即

$$r_0 = \frac{R_0}{M} = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha} \quad (1-6)$$

因此 r_0 就是透镜能够分辨物体(样品)上相邻两个物点间的最小距离, 我们称它为衍射效应规定的透镜的分辨率。

从式(1-6)可以看出照明光波长愈短, 介质的折射率和透镜的孔径半角愈大, 则 r_0 数值愈小, 相应的分辨率就愈高。从技术方面来看, 玻璃透镜的孔径半角可以做得很大, 最大者可达 $\alpha = 75^\circ$; 若物方的介质为松柏油则折射率 n 可达 1.5 左右, 此时计算出的数值孔径 N.A 约为 1.25 ~ 1.35。由此, 式(1-6)可以写成:

$$r_0 \approx \frac{1}{2} \lambda \quad (1-7)$$

式(1-7)说明了由衍射效应规定的分辨率可以用照明光波长的一半大小来估算。可见光的波长范围为 390 ~ 760nm, 若用可见光中波长最短的紫光照明, 则分辨率可达 200nm 左右。

第二节 光学透镜的像差

衍射效应会使一个物点的像在像平面上扩大成一个半径为 R_0 的光斑, 除此

之外, 由于透镜成像时受到物理条件的限制也会使成像物点扩展成圆斑, 这就是所谓像差。按像差产生的原因可把它们分成两类: 第一类是单色光成像时的像差, 称为单色像差, 如球差、像场弯曲和像散等; 第二类是多色光成像时由于介质折射率随光的波长不同而引起的像差, 叫做色差。本节中我们主要介绍三种主要的像差, 即球差、像场弯曲和色差。

一、球差

球差产生的原因如图 1-5 所示。位于透镜主轴 z 上的一个物点 P 发出的单色光, 由于入射的孔径半角 α 不同, 进入透镜后, 因折射倾向不同, 各光线并不聚焦在同一个点上, 而沿着 z 轴形成前后不同的一系列交点群。孔径半角大的人射光线离开主轴 z 距离较远, 称为远轴

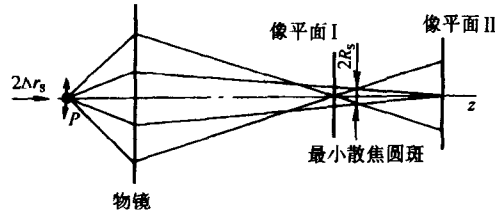


图 1-5 球差

光线, 它们的折射倾向大; 孔径半角小的人射光线则离主轴较近, 称为近轴光线, 它们的折射倾向小。因此, 若把图 1-5 中的像平面顺着 z 轴左右移动, 就可以得到一个最小的散焦圆斑。最小散焦斑的半径可用 R_s 表示。如果把最小散焦斑折算到物平面(物体或样品)上去, 则可得:

$$r_s = \frac{R_s}{M} \quad (1-8)$$

r_s 的物理意义和衍射规定的分辨率 r_0 相似, 我们用 r_s 的大小来衡量球差的大小。显然, r_s 变小, 透镜的分辨率就有可能提高。光学玻璃制成的凸透镜引起的球差可配以相同材料的凹面镜, 组成透镜组加以部分校正。

二、像场弯曲

在透镜物平面上, 物体 AB 上每一点发出的单色光束通过透镜折射后, 每一个物点均能得到一个像点。由于近轴光线和远轴光线的折射程度不同, 因此, 整个像平面不可能是一个平面。

图 1-6 示出了近轴光线物点 P 的像点位于 P' 处, 远轴光线物点 A 、 B 的像点分别位于 A' 和 B' 处, 图像成一曲面, 这就是所谓像场弯曲。视域愈大场曲愈严重, 造成图像上各点清晰度不一。为了获得在大视场内平坦清晰的图像, 常采用组合透镜来校正场曲。

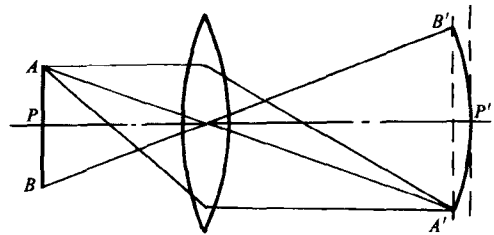


图 1-6 像场弯曲

三、色差

色差有两种类型，即轴向色差和垂轴色差。

图 1-7 是造成轴向色差的示意图。从物点 P 发出的多色光束经透镜后，波长最短的紫光折射倾向最大，红光的折射倾向最小，因此各种颜色的光便聚焦在主轴 z 的不同位置上，因此物点 P 在像平面上得到的不是一个像点，而是各色群像的汇集。如果把像平面顺着主轴左右移动，可以得到一个尺寸最小的散焦斑，其半径用 R_c 表示。若把散焦斑半径 R_c 折算到物平面上，则

$$r_c = \frac{R_c}{M} \quad (1-9)$$

同样的道理，可以用 r_c 来表示轴向色差的大小， r_c 变小，透镜的分辨率有可能提高。

图 1-8 是形成垂轴色差的示意图。根据折射原理，紫光和红光形成物像的高度不同，红光高而紫光低。因此由于垂轴色差的形成，在像平面上往往会得到一个不同色调镶边的图像，影响物像的清晰度。

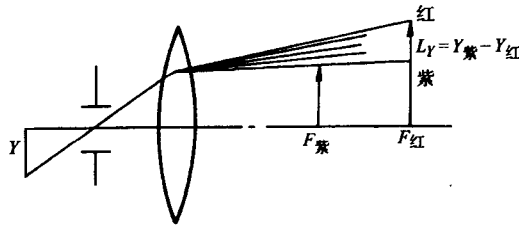


图 1-8 垂轴色差

上面介绍了单片透镜成像时存在的主要缺陷。在实际的使用过程中，显微镜中的透镜(物镜或目镜)均是由一组透镜组成。位于最前沿的凸透镜担负着放大的作用，而后继的透镜组都是为了消除各种像差而安置的。这些透镜就是所谓校正透镜。

像差的校正是一个非常复杂的问题，也是一门专门的学问，不在本书介绍之列。

第三节 透镜的分辨率

显微镜的分辨率是由物镜的分辨率来决定的，因为只有被物镜分辨出的结构

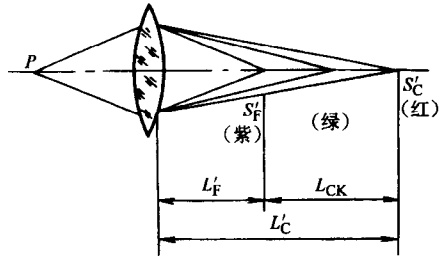


图 1-7 轴向色差

细节才能被目镜进一步清晰放大，因此，一个模糊的组织虽经目镜放大其图像仍然是不能分辨的。如前所述，由于光学透镜成像时存在着像差和衍射效应，使成像的物点不能成为理想的像点，而扩展成各种散焦斑。如果散焦斑的尺寸接近于理想像点(几何点)的大小，则透镜的分辨率可接近无穷大。事实上光学透镜的缺陷只能部分得到校正而不能完全消除，因此透镜的分辨率应该受控于各种缺陷形成的散焦斑的大小。一旦透镜成像，各种最小散焦斑都是客观地重叠存在于像平面上，因此透镜的分辨率将受到这些散焦斑中尺寸最大斑点的影响。例如： R_0 、 R_s 、 R_c 分别代表由衍射、球差和色差在像平面上形成的最小散焦斑的半径，其中以 R_0 的数值为最大。此时透镜的分辨率应是 $r_0 = \frac{R_0}{M}$ ，可通过增加孔径半角 α 和介质折射率或改用较短波长的光源来减小 R_0 的数值，使分辨率提高。当 R_0 的数值降低到比球差(或色差)的散焦斑半径 R_s 小时，继续采取同样的方法就不能再使分辨率提高，因为此时透镜的分辨率将由 $r_s = \frac{R_s}{M}$ 来决定，只有继续采取减小 R_s 的方法才能使透镜的分辨率进一步提高。

思 考 题

1. 光的折射和玻璃透镜聚焦之间有何关系？
2. 说明瑞利公式的物理意义及其具体应用。
3. 各种像差是怎样造成的？它对透镜的成像有什么影响？
4. 透镜分辨率的物理意义。

第二章 金相显微镜

第一节 显微镜的工作原理

光学显微镜具有二级放大的功能。物体上的结构细节经物镜一次放大后再由目镜作第二次放大，其放大的原理如图 2-1 所示。图中箭头 AB 表示待放大的物体，它置于物镜的一至二倍焦距之间(f_1 为物镜前焦距)。经物镜放大后的一次像 $A'B'$ 是一个倒立实像。在显微镜中，一次像 $A'B'$ 都应着落在目镜的一倍焦距(f_2)之内，它再经目镜放大则成为一个正立的虚像 $A''B''$ 。据此显微镜的总放大倍数应是物镜和目镜放大倍数的乘积。

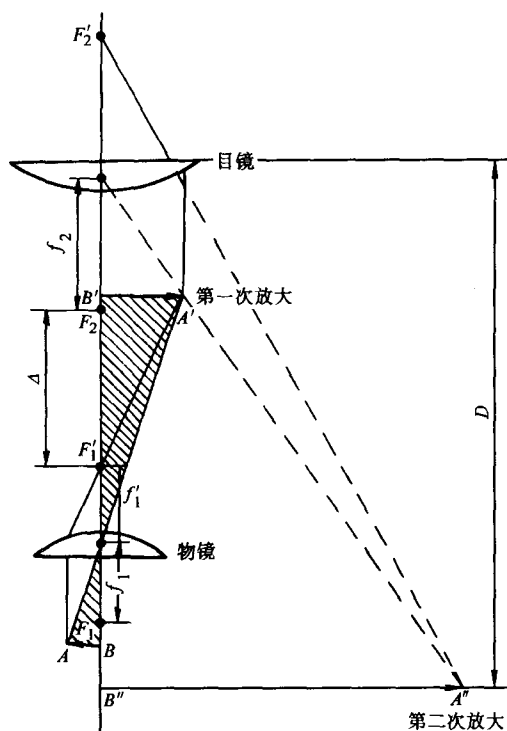


图 2-1 金相显微镜的放大原理示意图

由图 2-1 中的比例关系可看出物镜的放大倍数应是：

$$M_{\text{物}} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{s + f'_1}{f_1} \quad (2-1)$$

式中， f_1 、 f'_1 为物镜的前、后焦距， s 为显微镜的光学镜筒长度。分子一项中 $s \gg f'_1$ ，故可略去 f'_1 ，所以

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

同样，根据几何关系，目镜的放大倍数可用下式计算：

$$M_{\text{目}} = \frac{A''B''}{A'B'} \approx \frac{D}{f_2} \quad (2-3)$$

式中， f_2 为目镜的前焦距， D 为人眼的明视距离， $D = 250\text{mm}$ 。所以显微镜的总放大倍数应按下式计算：

$$M = M_{\text{物}} M_{\text{目}} = \frac{s}{f_1} \cdot \frac{D}{f_2} \quad (2-4)$$

明视距离 D 是一个常数，光学镜筒长度是设计显微镜时已确定的参数，因此可根据不同的物镜和目镜匹配来获得需要的放大倍数。

第二节 物 镜

一、物镜的种类

显微镜的物镜并不是单片透镜而是由多片透镜构成的透镜组。物镜可按其镜片组合的程度分成几个等级，常用的物镜主要有列四种：

1. 消色差物镜(Achromat)

这是金相显微镜中构造最简单的物镜，适用于低、中倍的放大。这种透镜能校正红、绿波长区的色差(见图 2-2a、b)，同时对黄、绿波长区的球差进行了校正，但像场弯曲仍然存在。由于对紫光的色差以及红、紫光的球差没有校正，因此使用时应配以黄绿滤色片只让黄绿光通过。虽说消色差物镜的构造简单，但透镜的总片数仍可多至 6~7 片。

2. 复消色差物镜(Apochromat)

这种物镜对色差的校正比较理想，可见光的全部波段范围都得到了校正(见图 2-2c)。同

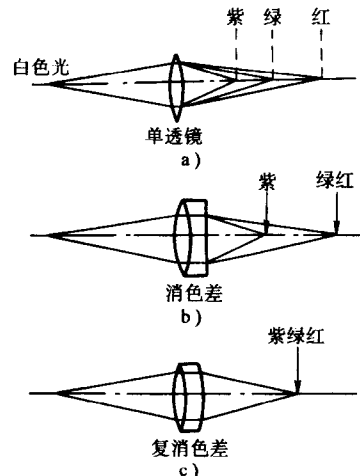


图 2-2 不同物镜对色差的校正示意图

- a) 单透镜色差未校正 b) 消色差物镜
c) 复消色差物镜

时对紫光和绿光范围的球差亦得到了校正，但是像场弯曲仍未改变。这种物镜可进行高倍放大，并可配用任何色调的滤色片。

3. 平面消色差物镜(Planachromat)

色差和球差的校正情况和消色差物镜相同，增加了对像场弯曲的校正。

4. 平面复消色差物镜(Planapochromat)

色差和球差的校正和复消色差物镜相同，同时增加了对像场弯曲的校正。平面复消色差物镜最适用于高倍观察和照相，但是它的构造复杂，有时透镜片的总数可多达十余片。

二、物镜的识别

物镜的主要参数大多标在物镜的镜筒上，如图 2-3 所示。金相显微镜的物镜一般都有五种标志，介绍如下：

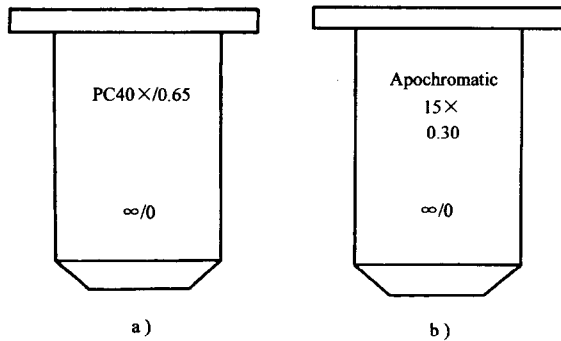


图 2-3 标在镜筒上的物镜主要参数

a) 国产物镜 b) 进口物镜

1. 物镜类型

国产消色差物镜一般不标符号，复消色差和平面消色差物镜则分别标以 FC 和 PC 符号；国外生产的物镜则分别用英文名称标出，如平面消色差为 Planachromatic，消色差为 Achromatic，复消色差为 Apochromatic 等。

2. 放大倍数

以 $15\times$ 、 $20\times$ 、 $32\times$ 、 $40\times$ 、 $63\times$ 等分别表示 15 倍、20 倍、32 倍、40 倍和 63 倍。

3. 数值孔径

用数值直接标在镜筒上，例如 0.65 表示 $N.A = 0.65$ 。

4. 机械镜筒长度

指从物镜的座面到目镜顶面的距离，在镜筒上分别以毫米数刻出，如 160mm、170mm、190mm 和 $\infty/0$ 。 $\infty/0$ 表示这种物镜可以在任何镜筒长度情况下