

高等学校教学用书

金相实验技术

● 任怀亮 主编

JINXIANG
SHIYAN
JISHU

冶金工业出版社

高等学校教学用书

金相实验技术

北京科技大学 任怀亮 主编

冶金工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

金相实验技术/任怀亮主编. - 北京:冶金工业出版社,1986.5
(2006 重印)

高等学校教学用书

ISBN 7-5024-0466-X

I. 金… II. 任… III. ①金相组织-实验方法-高等学校
-教材②金属-性能-实验方法-高等学校-教材 IV. TG115

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 31495 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

北京燕南印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1986 年 5 月第 1 版; 2006 年 1 月第 6 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 15.5 印张; 364 千字; 238 页

35.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010) 64044283 传真:(010) 64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

《金相实验技术》是金属材料与热处理专业使用的教材之一，是专业基础实验的基本方法，也是金属材料研究和工业检验常用的方法。

金相技术作为金属材料研究和检验手段，要追溯到100多年以前。1860年索拜（Sorby）开始运用显微镜研究、检查金属内部的组织；1864年他在历史上第一次发表了金属显微组织的论文；1916年在美国材料试验学会（ASTM）的会议上，第一次确认光学显微镜是研究和检验金属材料组织的有效手段。此后随着金属材料的发展和研究的需要，光学显微镜本身，照明系统和金相试样制备方法与设备等方面都有很大的改进和发展。目前金相技术是广泛应用的材料研究和检验方法；各国材料检验标准中，金相检验是物理检验的重要项目。

编写本书时，考虑到金属学实验的需要，也考虑到专业学生结业和研究工作的需要，把一些特殊的新方法编入书中。实验用材料和设备尽量结合国内的产品加以说明。

全书共十三章。其中一、二、三、四、五章为金相显微镜的光学原理和各种显微镜；六、七、八、九章为金相试样的制备及金相显微摄影技术；十、十一、十二章为金相组织的定性和定量分析；十三章为显微硬度计的应用；为了基本实验的需要和便于认识组织，并附有常用合金的金相图谱。一、二、三、四、五、九、十一、十二、十三章由王岚编写；六、七、八、十章由任怀亮编写；书中图片由金相实验室秦文秀工程师提供；金相试样由金相实验室代纯如助理工程师制备。

全书曾邀请东北工学院、中南矿冶学院、清华大学、北京工业大学及大连工学院等校的有关老师审阅，提出了许多宝贵意见，在此特表谢意。

全书由编写者逐章共同讨论分别修改，最后由任怀亮审阅定稿。由于编者学识较浅，实践经验不足，书中谬误之处在所难免，诚恳地欢迎读者批评指正。

编 者

1985年3月

目 录

第一章 金相显微镜的光学原理	1
§1. 几何光学的基本原理	1
一、几何光学基本定律	1
二、光的全反射	2
三、光的折射、反射及全反射在光学金相显微镜中的应用	2
§2. 透镜成象原理	3
一、透镜类型	3
二、透镜成象的规律	5
三、透镜成象的象差	5
§3. 显微镜的成象	9
一、显微镜的放大原理	9
二、阿贝成象原理	11
第二章 普通光学金相显微镜	15
§1. 显微镜的光学系统	15
一、物镜	15
二、目镜	21
§2. 照明系统	22
一、光源及其装置	22
二、光源的使用方法	23
三、垂直照明器与光路行程	24
四、光路系统其他主要附件及作用	25
§3. 机械系统	28
§4. 显微镜的操作与维护	28
§5. 各类金相显微镜	29
一、台式金相显微镜	29
二、立式金相显微镜	29
三、卧式金相显微镜	29
第三章 偏振光显微镜	32
§1. 偏振光的基本知识	32
一、偏振光的获得	32
二、偏振光的干涉现象——圆偏振和椭圆偏振	33
三、偏振状态的鉴别	35
§2. 偏振光显微镜的结构特点	35
一、金相显微镜的偏光装置	35
二、偏光装置的调整	36
§3. 偏光显微镜工作原理	37

一、偏振光在金属磨面上的反射	37
二、偏振光透过各向异性晶体后的反射	38
三、偏振光下透明物相的特殊光学效应	38
§4. 偏振光显微镜在金相分析中的应用	39
一、组织与晶粒的显示	39
二、多相合金的相分析	41
三、非金属夹杂物的鉴别	41
四、范性变形、择优取向及晶粒位向的测定	42
第四章 干涉显微镜	44
§1. 干涉理论概述	44
一、等厚干涉	44
二、多光束干涉	46
§2. 干涉显微镜	48
一、双光束干涉显微镜	49
二、多光束干涉显微镜	49
§3. 干涉显微镜在金相分析中的应用	52
第五章 相衬金相显微镜	54
§1. 相衬显微分析的基本原理及其在金相分析中的应用	54
一、相衬方法的基本原理	54
二、相衬显微镜的光学结构	57
三、相衬装置	59
四、相衬金相显微镜的应用	60
§2. 偏光干涉衬度装置	62
一、干涉衬度的概念	62
二、偏光干涉衬度 (DIC) 装置	62
三、偏振光干涉衬度象	63
四、操作与应用例举	65
第六章 金相试样的截取与镶嵌	66
§1. 金相试样的截取	66
一、金相试样截取部位的选择	66
二、金相试样截取的方法	66
三、金相试样磨面的磨平	67
§2. 金相试样的镶嵌	68
一、塑料镶嵌法	68
二、机械夹持法	72
第七章 金相试样的磨光与抛光	73
§1. 磨光与抛光应用的磨料	73
一、氧化铝	73
二、金刚石	74
三、碳化硅	74
四、混合刚玉	74

五、氧化镁	74
六、氧化铬	75
七、氧化铁	75
§2. 金相试样的磨光	75
一、试样磨光用砂纸	75
二、磨光操作	77
§3. 金相试样的抛光	81
一、机械抛光	81
二、电解抛光	85
三、化学抛光	90
四、显微研磨	91
五、抛光方法的评价	91
§4. 金相试样制备过程的清洁问题	92
§5. 各种金属材料金相试样的制备	92
一、有色金属材料金相试样的制备	92
二、硬质合金金相试样的制备	94
三、复合材料金相试样的制备	94
四、铸铁金相试样的制备	95
五、脆性材料金相试样的制备	95
第八章 金相试样显微组织的显示	97
§1. 概述	97
§2. 常规显示组织的方法	97
一、化学浸蚀	97
二、电解浸蚀	101
§3. 特殊显示组织的方法	101
一、阴极真空浸蚀	101
二、恒电位浸蚀	101
三、薄膜干涉显示组织	107
第九章 金相显微摄影及暗室技术	125
§1. 金相显微摄影	125
一、显微摄影的成象原理	125
二、照相显微镜	125
三、显微摄影放大倍数	129
§2. 感光材料	130
一、感光材料的种类	130
二、感光材料的基本结构	131
三、黑白片影象形成过程	132
四、感光底片的特性	132
§3. 显微摄影技术要点	132
一、底片的曝光	135
二、滤色片的使用	136
三、试样的要求	136

§4. 暗室技术	137
一、显影	137
二、定影	138
三、负片处理	139
四、印相与放大	140
§5. 彩色摄影	141
一、彩色片的成色原理	141
二、彩色底片的曝光	142
三、彩色底片的冲洗	142
四、彩色照片的印放	143
第十章 金属材料的组织分析	145
§1. 前言	145
一、什么是组织	145
二、为什么要分析研究组织	145
三、影响组织变化的条件	145
四、如何分析研究组织	146
§2. 单相多晶体等轴晶粒组织	146
§3. 金属材料的铸态组织	147
一、铸锭的宏观组织	147
二、固溶体组织	147
三、具有共晶转变的组织	148
四、具有包晶转变的组织	149
五、具有偏晶转变的组织	150
§4. 冷变形和再结晶后的组织	150
一、冷加工变形后的组织	150
二、再结晶后的组织	151
§5. 热加工变形后的组织	151
§6. 固态相变后的显微组织	152
一、碳钢退火后的组织	152
二、碳钢的魏氏组织	152
三、碳钢的马氏体组织	153
四、脱溶分解的组织	153
§7. 铸铁的组织	154
一、铸铁的类型	154
二、石墨化过程	154
三、白口铸铁的组织	154
四、灰口铸铁的组织	155
五、展性铸铁的组织	155
六、球墨铸铁的组织	155
第十一章 定量金相	156
§1. 概述	156
§2. 定量金相用的符号	157

§3. 定量测量基本原理	158
§4. 定量测量的基本方法	159
一、 P_P 的测量	159
二、 P_L 的测量	160
三、 P_A 的测量	160
四、 N_L 的测量	160
五、 N_A 的测量	161
六、 L_L 的测量	161
七、 A_A 的测量	161
§5. 测量误差	162
一、用点分析法测量 V_V 的误差	162
二、用线分析法测量 V_V 的误差	162
三、用面分析法测量 V_V 的误差	162
四、其它测量量的误差估计	163
§6. 描述组织的特征参数与定量	163
一、晶粒大小	163
二、分散分布的第二相粒子	164
三、片层状组织	166
四、界面曲率	167
五、有向组织参数	168
§7. 定量金相应用例举	168
一、钢中夹杂物纯净度的测量	168
二、测量晶粒平均长大速度 G	169
三、测量新相的形核率 N	169
§8. 自动图象分析仪应用简介	169
一、仪器的基本组成	169
二、仪器测量基本原理	170
第十二章 钢中非金属夹杂物的金相分析	172
§1. 钢中非金属夹杂物的分类	172
一、夹杂物的来源	172
二、夹杂物的分类	173
§2. 钢中非金属夹杂物的鉴定方法	173
§3. 非金属夹杂物的金相鉴定	174
一、非金属夹杂物在显微镜下的主要性征	174
二、金相法鉴定夹杂物(定性)的程序	176
三、非金属夹杂物的定量测定	177
第十三章 显微硬度在金相研究中的应用	179
§1. 显微硬度测试原理	179
一、压头类型	179
二、显微硬度值	180
三、显微硬度测试要点	180
四、显微硬度值的比较标准	181

§2. 常用显微硬度计	182
一、台式显微硬度计	182
二、哈纳门型显微硬度计	183
§3. 显微硬度在金相研究中的应用	184
一、金属材料、合金相的研究	184
二、金属表面层性能的研究	184
三、晶粒内部不均匀性的研究	184
四、极细薄金属制成品硬度的测量	184
五、其他方面的应用	184
附录	185
附录一 抛光试剂	185
表A 常用电解抛光溶液及规范	185
表B 常用化学抛光试剂	185
表C 化学—机械抛光液	186
附录二 浸蚀试剂	188
表A 常用化学浸蚀试剂	188
表B 常用电解浸蚀试剂及规范	189
表C _I 化学染色浸蚀试剂	190
表C _{II} 各种合金的化学染色及特征	191
附录三 基本实验所用相图	193
附录四 基本实验用金相图谱	197
A 金属及合金的铸造组织	197
B 金属的冷变形组织	201
C 冷变形金属的再结晶组织	204
D 碳钢的组织	208
E 铸铁的组织	213
F 钢中非金属夹杂物	218
附录五	221
表A 在暗场及偏振光下系统鉴定夹杂物程序表	221
表B 钢中夹杂物的性质及金相特征	222
表C 化学浸蚀与金相法配合鉴定夹杂物的程序表	230
附录六 显微硬度	231
表A 合金中各组成相的显微硬度值HM	231
表B 硬质合金及其他化合物的显微硬度值HM	233
表C 某些纯金属的显微硬度值HM	234
表D 压痕显微硬度值换算表	235
主要参考文献	238

第一章 金相显微镜的光学原理

金相显微镜是用于观察金属内部组织结构的重要光学仪器。所有光学仪器都是基于光线在均匀的介质中作直线的传播，并在两种不同介质的分界面上发生折射或反射等现象构成的。研究这些现象的理论称为几何光学。随着几何光学及物理光学的发展，金相显微镜已日臻完善。为了能正确地使用各种现代的金相显微镜，本章将介绍与普通光学显微镜有关的几何光学基本原理。

§ 1. 几何光学的基本原理

一、几何光学基本定律

几何光学的理论基础，就是由实际观察和直接实验得到的几个基本定律：光的直线传播定律；光的独立传播定律及光的反射和折射定律。在所研究的对象中，若其几何的尺寸远远大于所用光波的波长（如对有一定大小的透镜或面镜研究由它们成象的物距和象距等），则由几何光学可以获得与实际基本相符的结果。

几何光学基本定律的要点表述如下：

（1）光的直线传播定律：在均匀介质中，光沿直线传播。即在均匀介质中，光线为一直线。

（2）光的独立传播定律：自不同方向或由不同物体发出的光线的相交，对每一光线的独立传播不发生影响。

（3）光的反射和折射定律：当光线由一介质进入另一介质时，光线在两个介质的分界面上被分为反射光线和折射光线。对于这两条光线的行进方向，可分别由反射定律和折射定律来表述。

反射定律：入射光线 AB （图1-1），分界面 B 点的法线 NB 和反射光线 BC ，三者在同一平面内，并且反射光线与法线间的夹角 γ （反射角）等于入射光线与法线间的夹角 i （入射角）。

折射定律：入射光线 AB ，分界面 B 点的法线 NB 和折射光线 BD ，三者在同一平面内，并且入射角 i 的正弦与折射角 i' （折射光线和法线间的夹角）的正弦之比，是一个取决于两介质光学性质及光的波长的常数。这个定律可写成：

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{n'}{n}$$

其中常数 n 和 n' 分别为第一介质和第二介质的绝对折射率。它们的定义是：

$$n = \frac{c}{v_1} \quad n' = \frac{c}{v_2}$$

式中 c 为光在真空中的传播速度, v_1 和 v_2 分别为光在第一介质和第二介质中的传播速度。

二、光的全反射

当光线射到两种媒介的界面上时, 反射和折射现象是同时产生的。反射光和折射光的强弱随入射角而异。如图1-2所示, 在实发光点 S 所处介质的折射率大于分界面另一侧介质的折射率 ($n > n'$) 时, 折射角 i' 总大于入射角 i ; 当 $i' = 90^\circ$, 相应的人射角 i_c 是给定情况下的最大入射角, 入射角超过 i_c 的光线, 都不能进入分界面的另一侧, 而按照反射定律返回原介质。这种完全返回原介质的反射称为全反射, 或全内反射。最大入射角 i_c 称为临界角, 临界角 i_c 的数值取决于相邻两介质折射率的比值:

$$i_c = \sin^{-1} \frac{n}{n'}$$

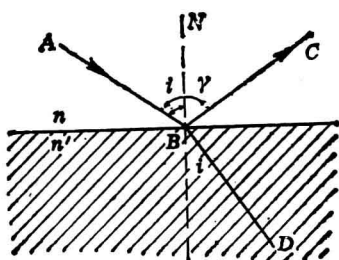


图 1-1 光的反射与折射

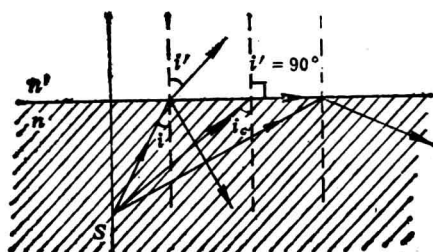


图 1-2 光的全反射

三、光的折射、反射及全反射在光学金相显微镜中的应用

在光学仪器中, 为了工作方便常常需要改变光束的方向和行程, 利用折射、反射及全反射原理设计的各类光学元件, 能够圆满地完成这一任务。其在光学显微镜中的应用例举如下:

(1) 金相显微镜中光源集光镜的曲面反射、光线转向的平面反射镜及球面反射镜都是利用光的反射定律而设计的光学元件。

如平面反射镜可以借助抛光金属表面, 镀银的玻璃镜面及平面玻璃等来完成。镀银镜面反射常用于改变光线方向, 但使用日久因表面氧化或剥蚀而减弱反射能力; 平面玻璃反射镜用作垂直照明器, 因光线损失较多, 一般别无它用。

反射定律与可见光线的波长无关, 故根据反射所设计的物镜没有色象差等缺陷。

(2) 借助光在棱镜中的全反射来改变光的进行方向, 这在许多方面都较平面反射镜优越。首先, 因为全反射时光能够完全反射回原介质, 而采用镀介质膜的平面镜反射时, 在反射表面上将有一定的光能被吸收; 其次, 在研磨工艺和装校技术上棱镜具有容易制成多种多样组合的反射面和满足高精度要求的特点, 故在近代金相显微镜中除以半透半反的平面镜作垂直照明器外, 均以全反射棱镜来改变光线行程。常用的反射镜如图 1-3 所示,

(a) (b) 可使光线转向 90° , 在显微镜中用作改变光路; (c) 用于斜管目镜筒中使光线转向; (d) 用于双筒目镜反射; (e) 用于照相机或瞄准镜的调焦光路中, 使光路改变 90° , 象的左右与物的左右互换。

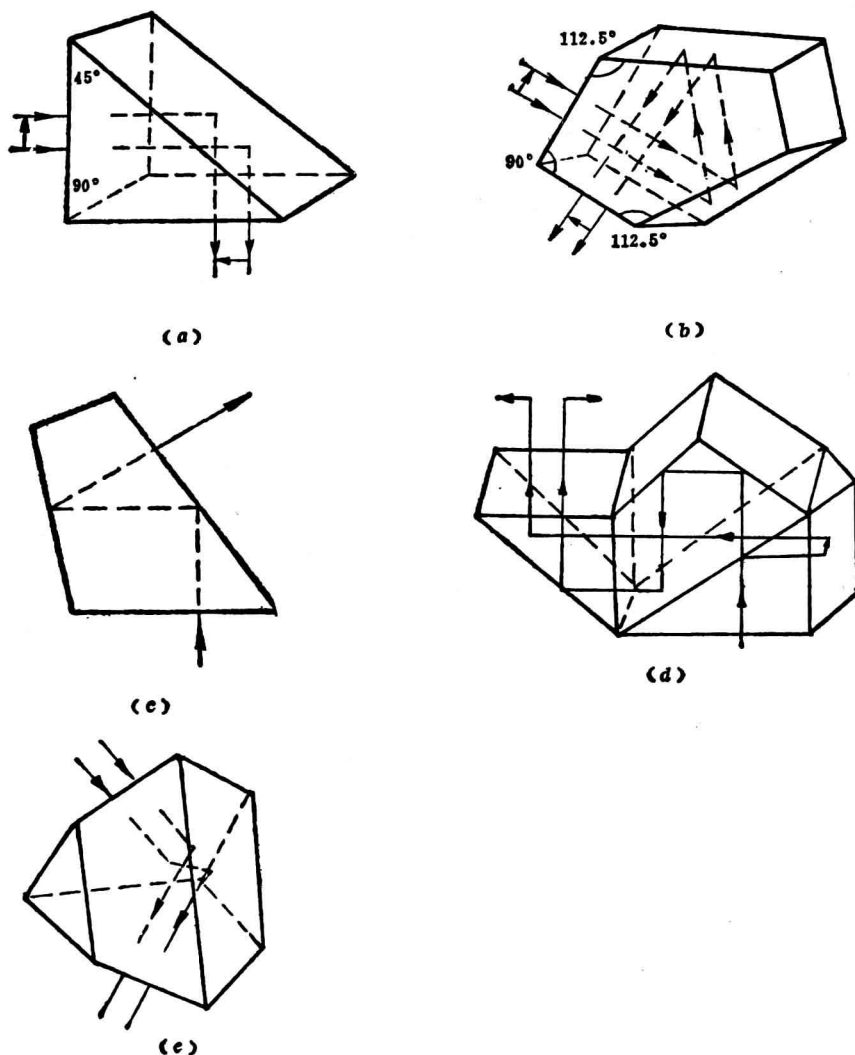


图 1-3 常用的反射棱镜

§ 2. 透镜成像原理

一、透镜类型

由两个共轴折射曲面构成的光学系统称为透镜。透镜是光学仪器中的基本元件之一，主要用于造象、聚光或造成平行光源等。

透镜的型式很多，可归纳成正透镜与负透镜两类。

1. 正透镜

凡是透镜中心厚度大于透镜边缘者，统称为正透镜，起聚焦作用。如图1-4(a)(b)(c)均为正透镜。

当平行光线射到透镜表面时，光线经透镜将产生折射，由于光线射至透镜上各点的角度不同，所以在每点产生的折射角不等。通过透镜折射后各点的光线将会聚于一点 F ，称

F 为正透镜的焦点。这一现象就是透镜的聚焦。由实验得知正透镜有如下性质。

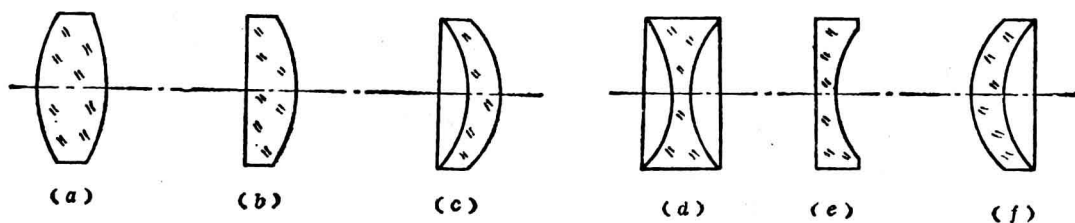


图 1-4 透镜的类型

(a) 平行光线经过正透镜后会聚于焦点。反之，在焦点处置一点光源，经正透镜后将折射为平行光 (图1-5 (a))；

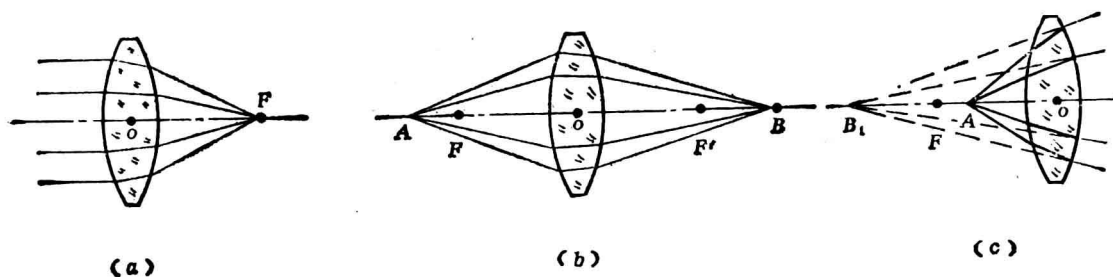


图 1-5 正透镜的折射与聚焦

(b) 点光源置于焦点 F 外的某一点 A 处，经正透镜后光线将会聚于另一侧焦点 F' 外某一对应点 B 处， B 即为点光源 A 经过正透镜后形成的实象 (图1-5 (b))；

(c) 若将点光源置于焦点 F 内某一点 A 处，则经过透镜后在另一侧不能会聚。其折射光的延长线交于光源同侧 F 点以外的相应点 B_1 处。 B_1 即为 A 的虚像 (图1-5 (c))。图

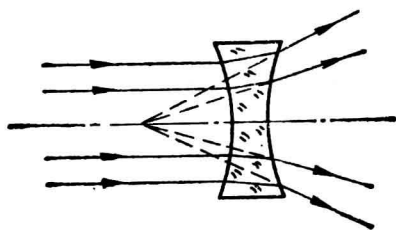


图 1-6 负透镜的折射

中透镜中心处 O 点具有任何方向光线经过该点都不产生折射，仍沿直线传播的特点，称为透镜的光学中心，由焦点 F 到光学中心 O 点的距离称为焦距，以 f 表示。

2. 负透镜

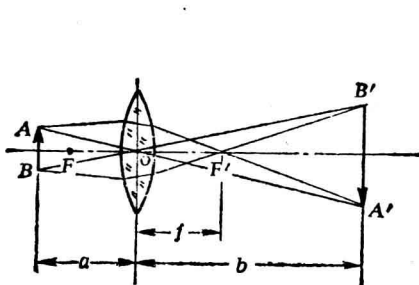
凡透镜中心较边缘薄的透镜均为负透镜。负透镜起发散作用。图1-4 (d) (e) (f) 均为负透镜。平行光入射于负透镜，因折射而被发散，所以负透镜造成的象必然为虚像。如图1-6所示，经过负透镜的出射光线必然是发散的，或平行的，绝无聚焦的可能。

二、透镜成像的规律

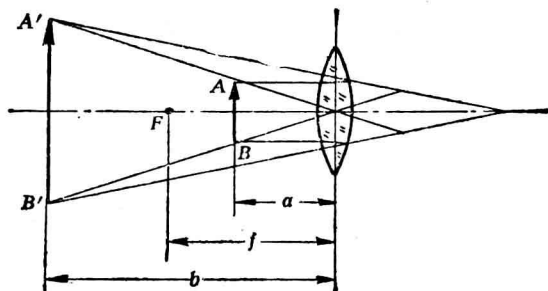
物象是从物体各发光点发出的所有光线经过透镜折射后分别会聚于各点而联成的。因而只要作出各发光点发出的任意两条光线在折射后的交点，即可得到相应象点而联成的物象。

依照透镜的性质，可用作图法求得物象。图1-7为正透镜成像示意图。

(1) 物体 AB 置于透镜的1倍焦距到2倍焦距 (F 到 $2F$) 之间，光线通过透镜后，于透镜另一侧， $2F'$ 距离以外得到一个倒立、放大的实象 $A'B'$ 。



(a)



(b)

图 1-7 正透镜成像示意图

(a) 实像；(b) 虚像

(2) 物体 AB 置于透镜焦距以内，入射光通过透镜折射后不相交，其延长线交于 $A'B'$ 点。即于透镜的同侧， $2F$ 距离以外得到一个放大的、正立的虚象 $A'B'$ 。

设图中物体离开透镜中心的距离 (物距) 为 a ，物象离开透镜中心的距离 (象距) 为 b ，透镜焦距为 f 。其成像位置应遵从透镜公式：

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

使用该式应按以下约定：①物距 a 始终取正值；②对正透镜 f 取正值。负透镜 f 取负值；③物象为倒立实象， b 取正值；物象为正立虚象， b 取负值。

象的长度与物体长度之比就是象的放大率，以 M 表示： $M = \frac{A'B'}{AB}$ 。由几何关系可知：

$$M = \frac{A'B'}{AB} = \frac{b}{a}$$

三、透镜成像的象差

上述透镜成像规律都是依近轴光线得出的结论。所谓近轴光线系指与光轴夹角很小的光线。而由于物理条件的限制，实际光学系统的成像与近轴光线成像不同，两者存在着偏离，我们把这种相对于近轴成像的偏离称为象差。

按象差产生的原因可分两类：一类是单色光成像时的象差，称为单色象差。如球差、彗差、象散、象场弯曲和畸变均属单色象差；另一类是多色光成像时，由于介质折射率随光的波长不同而引起的象差，称为色差。色差中又分位置色差和放大率色差两种。

各种象差的存在从不同方面影响显微镜的成像质量，在设计中可尽量使之减小，但不

可能完全消除。因此，使用者应了解各种象差的成因，以便使用中使其减至最小程度。

1. 球面差

由光轴上某一物点发出的单色光束，经单片透镜后并不会聚于一点，而是分成许多个交点前后分布，从而使光轴上的象点被一个弥散光斑所代替，我们称光学系统对该物点的成象有球面差。

图1-8表示由光轴上物点 S 发出的单色光束，经透镜后孔径角 u 不同的光线交于光轴的不同位置。孔径角近于零的近轴光线与光轴交于 S' 点，而非近轴的光线交光轴于 $\bar{S}'$ 点，我们就以这两点的间距表征光学系统对给定物点 S 的球差。球差 $LA = S' - \bar{S}'$ 。

显然，球差的大小与孔径角 u 或光线在光学系统上的高度 y 有关，即 LA 是 u 或 y 的函数。

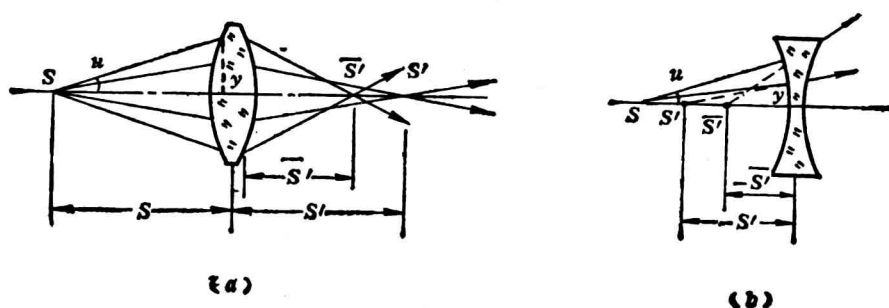


图 1-8 球差

图1-8(a)为正透镜球差示意图， $LA > 0$ 。

图1-8(b)为负透镜球差示意图， $LA < 0$ 。

同样地高于光轴的任何点经透镜后也不聚焦一点，这将使物体放大后的映像变得模糊不清。

由正、负单透镜球差的性质可知：如将正透镜和负透镜适当地组合起来，即可得到消球差的光学系统。图1-9(a)(b)所示的双透镜组和胶合双透镜即可达到球差校正的目的。

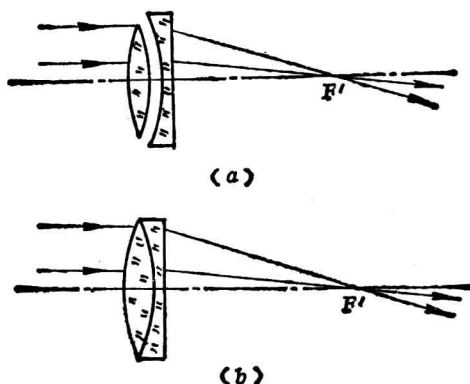


图 1-9 球差的校正

2. 象散和象场弯曲

由轴外一点发出的入射光线与光轴所成倾角较大时,即使是窄光束,出射光线也不可能很好地交于一点,而在空间不同地方相交于两条相互垂直的焦线,分别称为子午焦线和弧矢焦线。两条焦线之间的距离称为象散。图1-10表示一个正单透镜对非近轴的P点成像时产生象散的情形。光学系统象散的大小,用弧矢焦线S与子午焦线T在系统光轴QQ'上的投影ST表示,称ST为象散差。

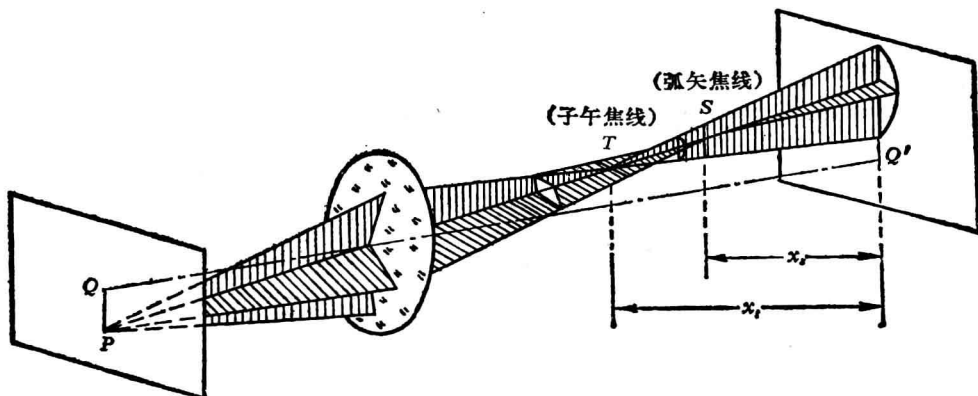


图 1-10 P点成像时产生的象散

上的投影ST表示,称ST为象散差。

$$ST = x_t - x_s$$

P点与系统光轴的夹角(即视场角)愈大,则象散差愈大。P点于T至S间不同位置的象顺次为直线→椭圆→圆→椭圆→直线。此间有一个最小圆斑称为明晰圆,可以认为这里是P点成像最清晰的地方,是放置照相底片或屏幕的最佳位置。

对于垂直系统光轴的物平面,明晰圆的轨迹一般是个曲面,见图1-11, Σ_M 、 Σ_S 、 Σ_C 分别代表子午焦线,弧矢焦线和明晰圆的轨迹,它们均是相切于高斯面中心点的曲面(高斯面即为近轴光线所决定的象面),其偏离高斯平面的距离就是象场弯曲。

象场弯曲取决于系统中透镜的焦距与其折射率之间的关系。有显著象场弯曲的光学系统,使投射在屏幕上的映象无法同时清晰,这给实用(如照相)带来许多不便。因此,用于照相的物镜要求良好的校正象场弯曲。采用组合系统,并且适当地选配透镜的焦距及其折射率可改善或消除象场弯曲;对于单透镜,可以通过在透镜前适当位置放一光阑校正:改变光阑位置可以改变象散,从而找到使 Σ_C 为一平面的位置(如图1-12),此时,虽未消除象散,但象场弯曲却得以消除。

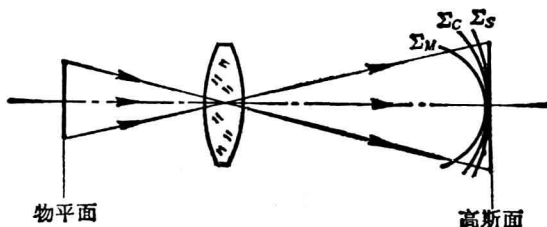


图 1-11 象场弯曲

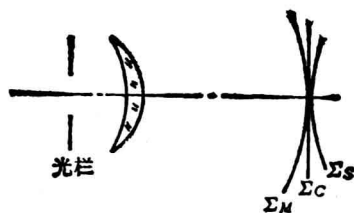


图 1-12 调整光阑位置消除象场弯曲