

王 曙 编 著

# 偏光显微镜 和显微摄影

地 质 出 版 社

51

06

# 偏光显微镜和显微摄影

王 曙 编著

地质出版社

## 内 容 简 介

本书内容包括两大部分，第一部分叙述透射偏光显微镜（岩石显微镜）和反射偏光显微镜（矿相显微镜）及其各种附件的原理、构造和使用方法。第二部分叙述显微摄影的原理、仪器和方法。它又分为低倍摄影和显微镜摄影两部分。在低倍摄影中，对近代科技摄影的主要仪器——单镜头反光相机及先进的TTL测光法作了详尽的叙述。同时讨论了普通摄影书中所缺少的显微摄影原理和各种计算方法。此外描述了用各种小型照相机进行显微摄影的方法及一些简易附件的自制。

本书可供岩矿鉴定人员、显微镜的使用者及从事显微摄影人员阅读。对显微镜的设计、制造和科技摄影人员也有参考价值。

### 偏光显微镜和显微摄影

王 曙 编著

\*

国家地质总局书刊编辑室编辑

地 质 出 版 社 出 版

地 质 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

\*

1978年12月北京第一版·1978年12月北京第一次印刷

印数：1-3,750册 定价：2.00元

统一书号：15038·新325

## 前 言

光学显微镜经过多年的发展，已成为精密复杂的仪器。从近年的产品看来，主要发展趋势是零件标准化，一机多用。即一台基本的显微镜架，安装各样的附件后，即可供：生物、偏光、矿相、金相、荧光、相差、干涉差、干涉、浸没差等观察测定之用。同时还有着大量特殊用途的附件。对于显微镜的使用者，必须了解显微镜及其附件的原理和构造之后，才能够熟练的应用。

在自然科学工作中，显微摄影也是必不可少的手段。因为它能迅速正确的记录被研究的物体和现象，供研究者及其它人观看。显微摄影的原理和技术不仅与显微镜有关，并且与摄影器材和技术有密切关系。

本书内容分为两大部分，第一部分包括第一至第七章，叙述透射偏光显微镜（岩石显微镜）和反射偏光显微镜（矿相显微镜）及其各种附件的原理、构造和使用方法。第二部分包括第八至第十三章，叙述显微摄影的原理、仪器和方法。它又可分为低倍摄影和显微镜摄影两部分。在低倍摄影中，对近代科技摄影的主要仪器单镜头反光相机及先进的TTL测光法作了详尽的叙述。同时讨论了普通摄影书中所缺少的显微摄影原理和计算方法。此外描述了用各种小型照相机作显微摄影的方法及一些简易附件的自制。

本书虽然主要是叙述偏光显微镜及显微摄影，但对于其它显微镜的使用者及一般科技摄影工作人员都有参考价值。

本书的写作，得到很多的支持和帮助，特在此表示感谢。由于作者水平所限，书中漏误之处在所难免，希望读者批评指正。

44061/05

# 目 录

## 第一部分 偏光显微镜

第一章 人眼的光学特点	1
第二章 透镜和棱镜	3
第一节 制作透镜和棱镜的材料	3
(一)无色光学玻璃	3
(二)萤石和石英	3
(三)透明塑料	4
第二节 透镜的种类和性能	4
第三节 透镜的象差及其校正	7
(一)球面象差	7
(二)彗星象差	9
(三)象散	10
(四)象场弯曲	11
(五)畸变	11
(六)纵向色象差	12
(七)横向色差	13
(八)应变	13
第四节 棱镜和反射镜	13
第五节 光学元件的加膜	14
(一)增透膜	15
(二)反射膜	17
(三)半透明膜	17
第六节 放大镜的原理	17
第三章 显微镜的原理和构造 (一)	19
第一节 物镜	20
(一)物镜象差及其校正	20
(二)干燥与浸没物镜	22
(三)物镜的数值孔径和分辨率	23
(四)物镜和显微镜的放大倍数	25
(五)物镜焦点深度、自由工作距离、等值焦距、加膜和亮度	30

(六)物镜的盖玻片校正 .....	31
(七)物镜种类 .....	33
(八)物镜的识别 .....	41
<b>第二节 目镜与变倍器</b> .....	<b>42</b>
(一)惠更斯目镜 .....	44
(二)兰姆斯登目镜和无畸变目镜 .....	45
(三)补偿目镜 .....	45
(四)平象目镜 .....	46
(五)霍玛尔目镜和摄影目镜 .....	47
(六)各种特殊目镜 .....	49
(七)变倍器 .....	52
<b>第三节 聚光镜</b> .....	<b>53</b>
(一)聚光镜的种类 .....	55
(二)偏光显微镜用聚光镜 .....	56
<b>第四章 显微镜的原理和构造 (二)</b> .....	<b>58</b>
<b>第一节 偏光镜和勃氏镜</b> .....	<b>58</b>
(一)冰洲石制偏光棱镜 .....	58
(二)偏光玻璃和偏振片 .....	60
(三)偏光镜的性能 .....	60
(四)显微镜的偏光镜及装置要求 .....	61
(五)勃氏镜 .....	63
<b>第二节 机械部分</b> .....	<b>64</b>
(一)镜座和镜臂 .....	64
(二)镜筒 .....	64
(三)物镜更换器 .....	68
(四)调焦设备 .....	70
(五)物台 .....	71
(六)聚光镜架 .....	72
<b>第三节 照明光源</b> .....	<b>72</b>
(一)自然光 .....	73
(二)钨丝白炽灯 .....	73
(三)卤钨灯 .....	74
(四)碳弧灯 .....	76
(五)氙弧灯 .....	77
(六)锆弧灯 .....	77
(七)汞灯 .....	79
(八)钠灯 .....	80

(九)金属卤化物灯——镝灯	80
(十)灯室	81
<b>第五章 岩石和矿相显微镜</b>	<b>84</b>
<b>第一节 岩石显微镜 (透射偏光显微镜)</b>	<b>84</b>
(一)岩石显微镜的校正	90
(二)中心亮视野照明法	91
(三)斜射光亮视野照明法	93
(四)暗视野照明法	94
<b>第二节 矿相显微镜 (反射偏光显微镜)</b>	<b>96</b>
(一)垂直照明器内的反射器	96
(二)垂直照明器构造	99
(三)矿相显微镜的校正	103
(四)矿相显微镜的使用	106
(五)亮视野照明法	107
(六)暗视野照明法	109
<b>第三节 显微镜的维护</b>	<b>112</b>
(一)使用时注意事项	112
(二)显微镜的清洁	112
(三)显微镜的存放	113
<b>第六章 偏光显微镜的附件</b>	<b>114</b>
<b>第一节 滤光器</b>	<b>114</b>
(一)有色玻璃滤光器	114
(二)干涉滤光器	116
(三)液体滤光器	118
(四)中性滤光器和吸热玻璃	122
<b>第二节 穿孔目镜</b>	<b>123</b>
<b>第三节 补色器</b>	<b>124</b>
(一)固定光程差补色器	125
(二)可变更光程差补色器	126
(三)旋转椭圆补色器	134
<b>第四节 双石英试板</b>	<b>135</b>
(一)利用非均质性的双石英试板	135
(二)利用旋光性的双石英试板	136
<b>第五节 其它附件</b>	<b>139</b>
(一)二色试板	139
(二)分光目镜	140

(三)热台 .....	141
(四)旋转针.....	141
(五)压平器和自动水平台 .....	142
(六)显微硬度计 .....	143
(七)光电显微光度计 .....	143
(八)反射率标准 .....	149
(九)反差室和阴极发光装置.....	150
(十)荧光观察用附件 .....	151
(十一)费氏台.....	152
(十二)刻号器.....	152
<b>第七章 显微镜下测量、投影和描绘设备.....</b>	<b>153</b>
<b>第一节 测量设备.....</b>	<b>153</b>
(一)机械台.....	153
(二)目镜数尺和物镜数尺 .....	154
(三)螺旋测微目镜 .....	155
(四)测角目镜 .....	156
(五)计点目镜、网格目镜和计面积目镜 .....	156
(六)积分台.....	157
(七)电动计点器 .....	159
(八)自动定量图象分析仪 .....	159
<b>第二节 投影设备.....</b>	<b>160</b>
(一)附加投影屏 .....	160
(二)投影显微镜 .....	161
<b>第三节 描绘设备.....</b>	<b>164</b>
(一)投影描绘反射镜 .....	164
(二)描绘棱镜 .....	164
(三)描绘仪.....	165

## 第二部分 显微摄影

<b>第八章 低倍摄影设备.....</b>	<b>169</b>
<b>第一节 附加镜法.....</b>	<b>169</b>
(一)附加镜原理 .....	169
(二)使用附加镜的计算问题.....	170
(三)附加镜的自制 .....	171
<b>第二节 加长象距法.....</b>	<b>172</b>



(一)加用近摄圈法 .....	172
(二)加用皮腔法 .....	173
<b>第三节 取景对焦设备及其自制</b> .....	<b>173</b>
(一)指示棒和指示框 .....	173
(二)附加楔形镜 .....	174
(三)反光箱 .....	175
(四)台架法 .....	176
(五)专用设备 .....	179
<b>第四节 低倍摄影用镜头</b> .....	<b>180</b>
(一)低倍摄影镜头的种类 .....	181
(二)镜头的分辨率 .....	183
<b>第五节 低倍摄影的计算问题</b> .....	<b>184</b>
(一)物距、象距、镜头焦距及放大倍数的关系 .....	184
(二)低倍摄影时的景深 .....	184
(三)低倍摄影时的曝光问题 .....	187
(四)低倍摄影综合计算表 .....	188
<b>第九章 单镜头反光相机及其使用</b> .....	<b>190</b>
<b>第一节 单镜头反光相机的构造</b> .....	<b>190</b>
(一)基本原理 .....	190
(二)平视正象装置 .....	191
(三)精确准焦装置 .....	193
(四)光圈开缩的自动化 .....	194
(五)反光镜的改进 .....	195
(六)镜间快门的使用 .....	197
(七)外光法测光的自动化 .....	198
(八)电子设备的使用 .....	199
<b>第二节 TTL测光法</b> .....	<b>199</b>
(一)TTL法原理 .....	200
(二)测光范围 .....	201
(三)收缩测光与开放测光 .....	202
(四)光敏电阻位置及目镜干扰光的补偿 .....	203
(五)全自动曝光 .....	205
<b>第三节 备换镜头</b> .....	<b>206</b>
(一)变焦距镜头 .....	206
(二)反射镜头 .....	207
(三)低倍摄影(翻拍)镜头 .....	208
(四)全景镜头 .....	209

(五)P.C镜头	209
(六)可变象面镜头	210
第四节 低倍摄影附件及使用	210
第五节 连续变倍摄影机	212
<b>第十章 低倍摄影的照明方法</b>	<b>214</b>
<b>第一节 人工光源均匀照明法</b>	<b>214</b>
(一)2至4盏白炽灯照明	215
(二)方形或圆形灯架	216
(三)反光镜及极近距的照明	216
(四)磨光标本的拍摄	217
(五)金属制品及粗面物体照明法	219
(六)透明灯箱	219
(七)背景色调和阴影的消除	220
<b>第二节 人工光源非均匀照明法</b>	<b>221</b>
(一)侧面照明法	221
(二)直角照明法	221
(三)多灯照明法	221
(四)特殊照明法	222
附:遮光罩的自制法	222
<b>第十一章 显微镜摄影的原理和设备</b>	<b>224</b>
<b>第一节 显微镜摄影原理</b>	<b>224</b>
<b>第二节 显微摄影机</b>	<b>225</b>
(一)具皮腔的大型显微摄影机	226
(二)单镜头反光相机的使用	227
(三)专用的显微摄影接头	230
(四)显微摄影机系列	232
(五)摄影显微镜	238
<b>第十二章 显微摄影的拍摄</b>	<b>240</b>
<b>第一节 拍摄程序</b>	<b>240</b>
(一)准备工作	240
(二)显微镜、摄影机及光源的调整	240
(三)取景对焦及拍摄	240
<b>第二节 影响曝光的因素</b>	<b>241</b>
(一)物镜孔径与曝光关系	241
(二)物镜倍数与曝光关系	241

(三)目镜倍数及目镜至底片距离与曝光关系·····	242
<b>第三节 曝光的确定</b> ·····	<b>242</b>
(一)试摄测定·····	242
(二)用手持光电测光表测定·····	243
(三)用内装式光电测光表测定·····	245
(四)全自动曝光设备·····	245
<b>第十三章 显微摄影时反差的控制</b> ·····	<b>248</b>
<b>第一节 感光材料及其加工</b> ·····	<b>248</b>
(一)底片的感色性·····	248
(二)底片的其它性能·····	251
(三)底片的种类和规格·····	252
(四)相纸的性能和规格·····	253
(五)感光材料的冲洗·····	254
(六)底片的减薄、加厚和其它加工·····	259
<b>第二节 滤光器的选择</b> ·····	<b>261</b>
(一)单色物体·····	262
(二)双色物体·····	262
(三)多色物体·····	263
(四)偏光镜的使用·····	263
(五)低倍摄影时加用滤光器法则·····	263

# 第一章 人眼的光学特点

显微镜是扩大人眼观察能力的工具，因此下面对眼睛的性能作一简要叙述。

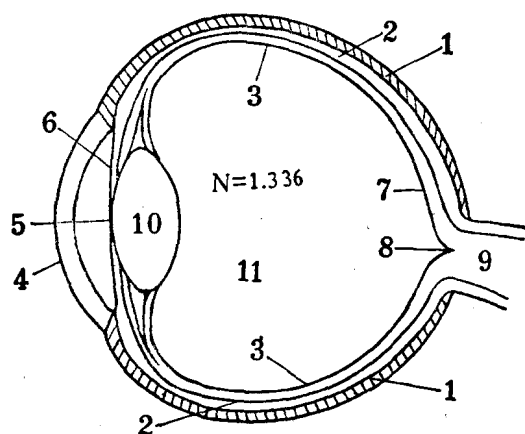


图1-1 人眼的构造

1—巩膜，2—脉络膜，3—网膜，4—角膜，5—瞳孔，6—虹膜，7—黄斑，8—盲点，9—视神经，10—水晶体，11—胶状液

人眼近于球状（图1-1），直径约25毫米，包在一层不透明的硬膜（巩膜）中。巩膜前部稍微突出的部分为角膜，它是透明的，外界光线即由此射入。角膜之后为虹膜，它中央有圆孔，即瞳孔。瞳孔直径能随外界亮度而改变，由约2毫米至8毫米。紧接虹膜为水晶体，形状象一个凸透镜，功用是使光线聚成物体的影象。水晶体后的眼睛内腔中充满折射率为1.336的胶状透明液。眼睛最后部内壁是网膜。

网膜上密布着两种感光细胞，一为锥状，一为棒状。棒状细胞对亮度的感觉特别灵敏，比锥状细胞高好几千倍，但它却不能区别颜色（即不能区别光的波长）。

锥状细胞能很好的感受颜色，但对亮度的

感受力较差。大约在照度高于1勒克斯时（相当于白天或灯光明亮处），锥状细胞起作用。而在很暗黑的地方，照度低于0.01勒克斯时，则只有棒状细胞起作用。照度介于1至0.01勒克斯之间时，两种细胞同时负担视觉责任。

在网膜上，感光细胞的分布是不均匀的。其中央正对瞳孔部分，有一小块密集着锥状细胞的区域，叫做黄斑。黄斑中心有一直径约1.25毫米的中央凹部，这里每一个锥状细胞都与一根独立的视神经分支相连。在黄斑中，则几个锥状细胞与一根视神经相连，而在黄斑之外，则是一大批锥状及棒状细胞与一根视神经相连了。由此可知，当物体的影象落到黄斑上，尤其在中央凹部时，眼睛的分辨本领最高。由于中央凹很小，所以人们看东西时要不停的转动眼球，使外界物体的影象逐一落在黄斑上。

由于黄斑中密集的是锥状细胞，不能感受暗弱光线，所以当物体照明太弱时，主要感光的是黄斑之外的棒状细胞，它们虽然感光灵敏，但由于多个细胞才共用一根视神经，因此分辨物体细节的本领大大降低，这就使人眼在照明暗弱时看东西不够清楚。

除物体亮度外，眼睛能否看清一个物体还决定于物体的视角。图1-2为视角的图解。由物体D的两端引到眼球中心O（眼的光心）的两直线相交所成的角A叫做视角。由图可看出，同样长的物体 $D_1$ 和 $D_2$ ，因与眼睛的距离不等， $D_1$ 距眼较远，所成的视角 $A_1$ 较小，故在网膜上形成的象 $D'_1$ 也较小，所以眼睛看它就不象 $D_2$ 那样清楚。

眼睛黄斑内中心凹处的锥状细胞平均直径约4微米。因此，如果物体是两个点，而它们

的距离  $D$  在黄斑上所成的象  $D'_1$  的长度如果小于 4 微米时,  $D'_1$  就会落在同一个锥状细胞上,

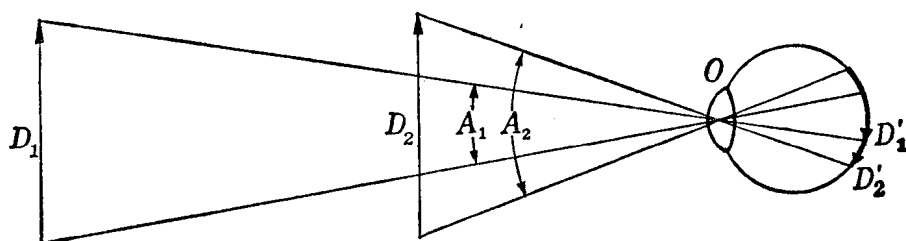


图1-2 视 角

$D_1$ 和 $D_2$ 是两个等长物体, 由于距离不同, 在网膜上成的象 $D'_1$ 和 $D'_2$ 大小不等。  
 $A_1$ 和 $A_2$ 为视角, 可以看出,  $A_2 > A_1$

因此我们会把它看成是一个点而无法分开。当黄斑上两个点的影象为 4 微米时, 视角约为 30 秒, 这个角度就是视角的极限。一般要能清晰的分辨两个点, 视角须在 1 分以上。高 1 米的物体距眼睛 3400 米时, 视角为 1 分, 距眼 6800 米时, 视角为极限 30 秒。由此可知, 如有两个距离为  $D$  的点, 我们要想分辨时, 它们离眼的距离不能远于  $3400 D$  至  $6800 D$ 。

人眼观察距离不同的物体时, 须要调整焦距。调焦是利用肌肉的收缩改变眼球内水晶体 (相当于凸透镜) 的曲率来达到。这种调节是有限度的。人眼调焦时能清楚看到的最远处叫远点, 最近处叫近点。远点和近点随人的年龄而变。一般五十岁以下的人, 远点在无限远, 即平行光线可以聚焦在网膜上, 近点约 10 至 50 厘米, 随年龄增加而近点距离变大。物体距眼如果小于近点, 眼睛由于过度紧张聚焦而非常难受, 并且无法准焦。所以企图使物体尽量靠近眼睛, 以便获得大视角的方法是行不通的。

有缺陷的眼睛, 其远点不是无限远而是某个近距离, 近点则变成几厘米, 这就是近视眼。远点是无限远, 近点却超过 20 厘米的眼睛, 都是远视眼。一般年龄超过 40 岁的人, 多少有些远视 (俗称花眼)。有近视和远视的人, 观察显微镜时可取下眼镜, 当然其准焦位置与视力正常的人不同。近视者准焦时将缩小物镜与标本之间距离, 远视者则增大这个距离。此外有些人眼睛有明显的象散差, 俗称散光。散光严重的人必须戴着眼镜观察显微镜。要使物体在网膜上所成的象尽可能的大 (这样就看得更清楚些), 同时眼睛长时间注视这个物体也不疲劳, 眼与物之间必须有一个适当的距离, 这个距离叫做“明视距离”, 正常眼睛的明视距离约为 25 厘米。

为了能看清极其微小的物体, 只有尽量设法增大视角, 但这又受眼睛调焦的限制。因此, 就只有借助于光学仪器了, 放大镜和显微镜就是为此目的而设计的仪器。

在观察显微镜时, 眼睛的训练和适应也非常重要。经常观察, 眼睛适应了的人, 能看出一些缺乏经验的眼睛看不到的细节。即使是熟练的观察者, 如果长时间不看显微镜, 再次观察时会因眼睛的适应性减退而视力不象以前那样敏锐, 但在观察几天之后, 视力即会恢复。用单筒观察时, 一定要同时张开双眼, 不可紧闭不观察的那只眼睛, 因为这样不仅容易使眼睛疲劳, 同时对视力有损害。双眼睁开还便于在观察同时作记录及描绘。为了使眼睛轮流休息, 应该练习左右眼都能观察, 尤其左眼观察常为一般人忽视, 其实用左眼观察对记录和描绘比右眼方便。

## 第二章 透镜和棱镜

透镜和棱镜是显微镜光学系统中最基本的元件，下面将分别叙述之。最后讨论放大镜的原理。

### 第一节 制作透镜和棱镜的材料

透镜和棱镜一般用各种均质的透明物质制成。在特殊需要时，例如制作偏光棱镜，也使用非均质透明物质。下面分述各种透明材料。

#### (一) 无色光学玻璃

无色光学玻璃的基本原料为氧化硅、硼酸盐、硝酸盐，氧化钾、钠、钡、铅、镧及某些稀土元素等。概略地说，根据成分中氧化铅的含量光学玻璃可分为两大类：凡含氧化铅（PbO）低于3%者称冕牌玻璃，高于3%称为火石玻璃。加上“钡”字者表示玻璃中含有不少于3%的氧化钡，例如钡冕玻璃。加“重”或“轻”字者表示含某种成分的多少，如重火石玻璃表示含氧化铅甚多。近些年来，又制出了光学性质较特殊的镧玻璃和稀土玻璃，使光学仪器的质量大有改进。

光学玻璃最重要的特性是它的折射率 $N$ 和平均色散系数 $V$ 。通常采用下列谱线的波长来测定玻璃的折射率（表2-1）。

表2-1

谱线颜色	红 外		红		黄		绿	浅 蓝		蓝	紫	紫外
谱线符号	—	—	A'	C	D	d	e	F	g	G'	h	—
谱线波长 (单位Å)	9508	8630	7665	6563	5893	5876	5461	4861	4358	4341	4047	3650
发射谱线 的元素	—	—	钾	氢	钠	氢	汞	氢	汞	氢	汞	汞

表中波长5893Å的折射率 $N_D$ 或5876Å的 $N_d$ 是玻璃的最主要折射率。因为这两个波长接近于人眼感受最灵敏的范围。光学玻璃的平均色散系数以下式表示

$$V = (N_D - 1) / (N_F - N_C)$$

$N_F$ 为玻璃对F谱线的折射率； $N_C$ 为对C线折射率。在知道 $N$ 和 $V$ 值之后，就可以选择不同的玻璃制成透镜以消除各种象差。

#### (二) 萤石和石英

无色透明的萤石是珍贵的光学材料。它的折射率特别低（ $N_D = 1.43385$ ； $N_C = 1.43251$ ； $N_F = 1.43705$ ），可与光学玻璃配合制成高质量的复消色差和半复消色差物镜。此外，萤石

能透过波长短达1330 Å的紫外线，因此可用以制造紫外显微镜的物镜、紫外分光棱镜等。

用萤石制成的透镜，很难避免应变，因此近年来生产的新型偏光显微镜很少使用具有萤石透镜的复消色差和半复消色差物镜。由于合乎光学要求的天然萤石很少，而且颗粒一般很小，近年来已生产较大的人造萤石晶体。

石英的无色透明晶体（即水晶）具有双折射和旋光性，又有很高的硬度和稳定性，并因无解理易于加工，因此广泛用以制造偏光显微镜的各种补色器及准确测定消光位的各种试板等。

熔融后的石英玻璃是均质的，并能透过波长短达1852 Å的紫外线。因此可用以制作紫外显微镜和萤光显微镜的物镜、聚光镜及载玻片等。又因石英玻璃能耐1000℃以上的高温而不变形，因此偏光显微镜用的高温热台，它的盖玻片也采用厚1.5毫米左右的石英玻璃。

### (三) 透明塑料

塑料也可用以制作光学元件，优点是质轻不会破碎，加工便利。但它有一系列严重缺点，如受热后变形，体积易于变化，硬度低容易划伤，磨制时因摩擦高热而膨胀，磨毕又因冷缩变形失去精确性，因此它只能制作低级光学仪器如放大镜等。显微镜中未见使用。

## 第二节 透镜的种类和性能

透镜用各种光学性质均匀的玻璃或其它透明物质制成，它的两个表面为球面，或一个平面一个球面（图2-1）。从理论上说，用非球面比球面更好，但要磨制非球面在加工技术上非常困难，因此目前主要还是采用球面的透镜。根据要求，透镜表面与理想的几何球面误差不能大于可见光的波长，即不能大于0.5微米左右，这就使光学透镜的磨制成为一项非常精密的技术。根据透镜球

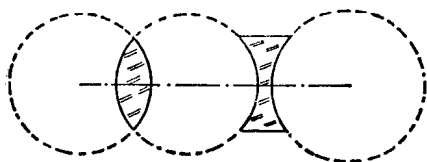


图2-1 透镜的表面是球面，穿过中心的水平直线为光轴

面性质的不同，可以分成两大类：

面性质的不同，可以分成两大类：

(1) 正透镜 又称凸透镜，分为双凸、平凸及凸月三种（图2-2），它们的共同特点是透镜中心比边缘要厚一些。

(2) 负透镜 又称凹透镜，分为双凹、平凹及凹月三种，其共同特点是透镜中心比边缘薄（图2-2）。

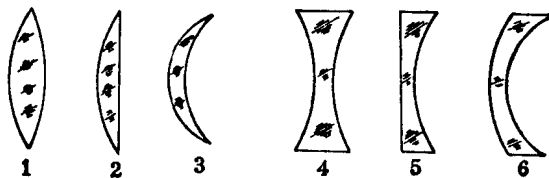


图2-2 各种透镜

1—双凸； 2—平凸； 3—凸月； 4—双凹；  
5—平凹； 6—凹月

穿过透镜中心，连接透镜两个球面的曲率中心的直线，叫做透镜的光轴（图2-1）。光轴是非常重要的，例如组成物镜的多片透镜，安装时它们的光轴必须严格在同一条直线上。透镜的光学中心叫光心，它一定在光轴上。光经过光心时不发生折射。光心位置决定于透镜形状。对称的双凸或双凹透镜光心在两球面顶点之间；不对称的双凸或双凹透镜光心在透镜内靠曲率大的球面一边；平凸及平凹透镜光心在球面顶点上，凸月及凹月透镜光心在透镜之外。

透镜的主要作用是可以改变光线的进行方向（折射），因而造成物体的象。根据物体与透镜的距离不同，所形成的象可以小于、等于或大于原物体。对于聚光的正透镜，来自远处的平行光波在通过透镜时（图2-3），由于透镜中部比边缘厚，因此光波在通过中段时速度慢于边缘部分。故光波通过透镜后，其中段部分比边缘部分要滞后一些，使光波面成为球形，所有光波面全部聚集在一点上，这即是透镜右面的焦点，又称第二焦点。如放一屏幕（毛玻璃或白纸）于此处，即可以见到物体的象，这是一个实象。图2-3之b用光线代替光波面情况。

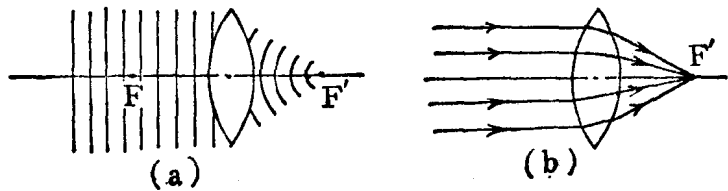


图2-3 正透镜的折射

a—光波通过正透镜的情况；b—用光线代替光波面情况。  
F'为透镜的第二焦点，也是无限远物体的象的位置

中段部分比边缘部分要滞后一些，使光波面成为球形，所有光波面全部聚集在一点上，这即是透镜右面的焦点，又称第二焦点。如放一屏幕（毛玻璃或白纸）于此处，即可以见到物体的象，这是一个实象。图2-3之b用光线代替光波面情况。

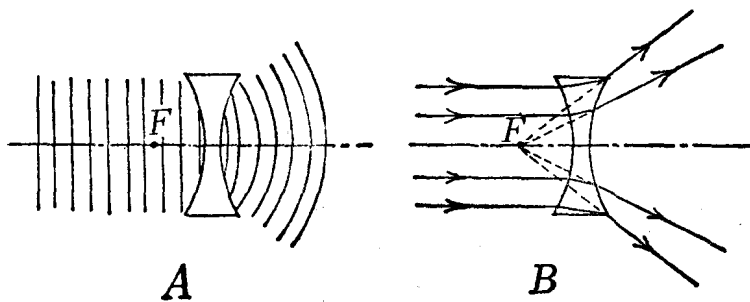


图2-4 负透镜的折射

A—光波通过负透镜时情况；B—用光线代替光波面情况。  
F—虚象的位置，即凹透镜负焦点位置

对于散光的负透镜，当平行光波通过时（图2-4 A），由于透镜中段较边缘薄，因此光波通过中段时的速度较边缘快，故通过透镜后光波面也成球形，但边缘部分要滞后一些。故它造成的象看来在透镜左边，不过实际上那里没有物体的象，所以这个象不能映在屏幕上，它叫做虚象。图2-4 B 是用光线代替光波面的情况。

凡是负透镜所成的象都是虚象，而正透镜所生成的象则不一定，随物距（物体与透镜间距离）而变，经常是实象，物距太小时也会生成虚象，这在后面将详细叙述。

由图2-3b可知，平行光通过正透镜后，会在透镜右边聚焦，聚焦的位置就是透镜的焦点，由焦点至透镜光心距离为焦距。设有一点状光源，它发出的光线经过透镜后，聚焦在一个点上，此点即光源的象（图2-5），根据折射定律，可求得物距  $b$

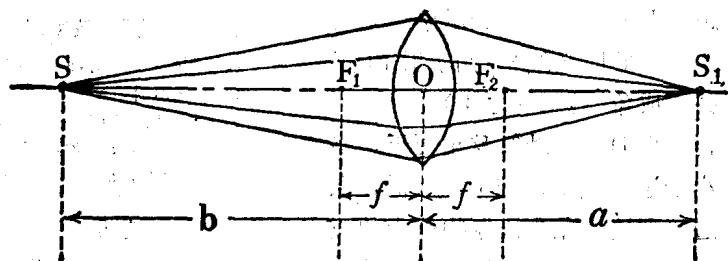


图2-5 透镜成象状况

S—点光源；S<sub>1</sub>—点光源的象；F<sub>1</sub>和F<sub>2</sub>—透镜的前、后焦点；f—焦距；b—物距；a—象距；O—光心

（点光源与透镜距离），象距  $a$ （物的象与透镜的距离）和透镜焦距  $f$  三者关系如下：

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



上式中 $a$ 、 $b$ 和 $f$ 三个数值的正负决定于它与光线进行方向的关系。习惯上规定光线方向自左至右，以透镜中心为原点，三个数值的位置在原点之右时为正号，反之在原点之左为负号。因此，正透镜的焦距都是正号，而负透镜焦距都是负号。

由上式可看出，当物距 $b$ 不同时，象距 $a$ 也随之改变，而象的大小也会变化，下面以正透镜为例分析之（图2-6）。

物体在无限远处，此时 $b = -\infty$ ， $a = f$ 。说明无限远物体生成的象在正透镜右面的焦点上，象距 $a$ 等于焦距 $f$ ，象是比原物体小得多的倒立实象（图2-6之1）。

物体向透镜逐渐移近，象则由焦点逐渐远离透镜，象也渐变大。至物距等于二倍焦距，即 $\frac{1}{a} = \frac{1}{-2f}$

$= \frac{1}{f}$ ， $a = 2f$ 。表示象与透镜距离也是 $2f$ ，与物距相等。此时物体与象分别对称的在透镜两边，大小相等，但象是倒立的实象（图2-6之2）。

物体继续向透镜移近，当物距小于 $2f$ 但大于 $f$ ，象距 $a$ 大于 $2f$ ，象比原物体大，并且是倒立实象（图2-6之3）。

物体继续再移近，至物距等于透镜焦距，即 $b = -f$ 时，表示象距无限远，实际上此时光线平行的射向远处，并不成象（图2-6之4）。

物体再向透镜继续移至更近，当物距小于透镜焦距，即 $b < -f$ 时，象即在透镜左边，象为比原物体大的正立虚象（图2-6之5）。

用上述方法，也可以计算负透镜的象距，只是负透镜的焦距之前加一个负号。物体经过负透镜生成的象，永远是正立且较原物体小的虚象。

在上述的透镜造象计算中，假定透镜本身是极薄的，其厚度比 $a$ 、 $b$ 、 $f$ 的数值要小得多，故可忽略不计。但在透镜厚度相当大时则必须考虑。对于极薄透镜， $a$ 、 $b$ 和 $f$ 值都以透镜光心为原点起算。而在厚透镜中，则须以两个主点为原点起算。主点是透镜光轴上的两个点，在这两点上物体和象的大小相同，方位也相同。通过主点垂直于光轴的平面叫主平面。

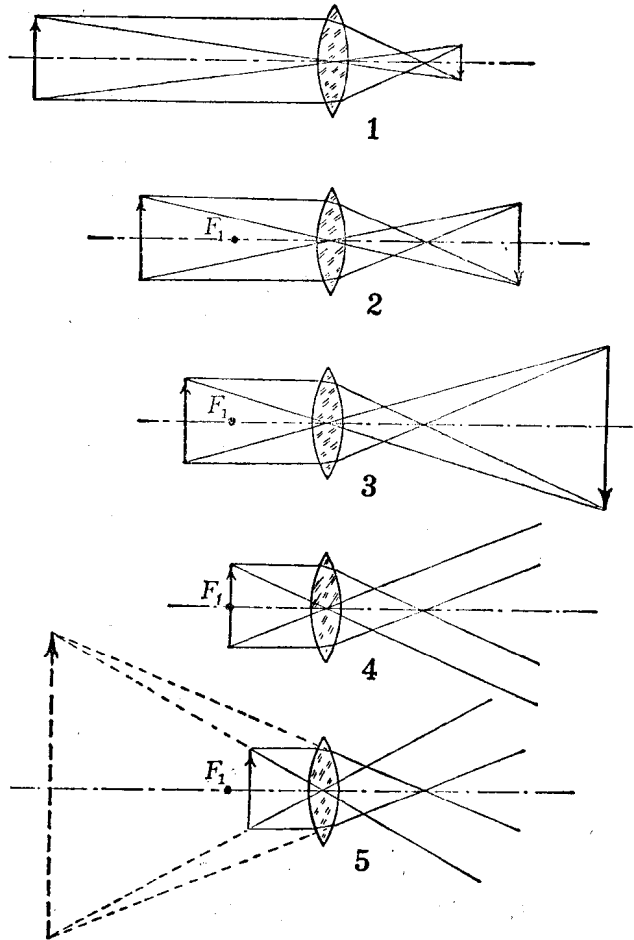


图2-6 物距 $b$ 改变时，象距 $a$ 及象的大小的变化

1. 物距 $b = -\infty$ 时， $a = f$ ，象比原物体小得多；
2.  $b = -2f$ 时， $a = 2f$ ，象与物体大小相等；
3.  $-2f > b > -f$ 时， $a > 2f$ ，象比物体大；
4.  $b = -f$ 时， $a = \infty$ ，实际上下成象；
5.  $b < -f$ 时， $a$ 为负值，象生在透镜左边，为放大虚象