

高等学校“十二五”规划教材

CAILIAO YANJIU FANGFA

# 材料研究方法

陈建 严文 刘春霞 主编  
王正品 主审



化学工业出版社

高等学校“十二五”规划教材

CAILIAO YANJIU FANGFA

# 材料研究方法

陈建 严文 刘春霞 主编  
王正品 主审



化学工业出版社

·北京·

本书的内容主要包括光学金相、X射线衍射、电子显微分析、无损探伤和热分析等几部分，共十七章。其中，X射线衍射和电子显微分析是全书的主体。光学金相的内容设两章，无损探伤设两章，DSC和DTA单独为一章。书中尽可能避免烦琐公式的推导，抓住本质和精华，讲清楚基本原理和常用方法。

本书既可作为金属材料工程专业本科生和研究生的教材或教学参考书，也可作为从事冶金、机械等行业相关科研人员及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/陈建, 严文, 刘春霞主编. —北京: 化学工业出版社, 2011.10

高等学校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-12315-2

I. 材… II. ①陈…②严…③刘… III. 材料科学-研究方法-高等学校-教材 IV. TB3-3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 188539 号

---

责任编辑: 杨 菁 蔡 毅

文字编辑: 糜家铃

责任校对: 宋 夏

装帧设计: 史利平

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$  字数 435 千字 2011 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 33.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

本书是材料科学与工程类专业基础课程“研究方法”的教材。编写的思路是在原有材料分析方法的基础上，扩充了无损探伤以及材料分析方法的新进展，其目的是为了让学生更能适应于以后的研究工作和实际生产。

本书的内容分为四部分。第一部分为光学金相部分，主要讲述了常规的光学金相和特殊光学金相。第二部分为 X 射线衍射部分，介绍了 X 射线衍射分析原理以及一些基本方法。第三部分为电子显微分析，主要讲述了透射电子显微分析和扫描电子显微分析，同时也对扫描电子显微分析的常见附件进行了介绍。第四部分主要讲述了无损探伤和热分析，无损探伤介绍了常见的五大探伤方法，热分析介绍了 DSC 和 DTA。

第一章由西安工业大学的刘春霞、中国石油集团石油管理工程技术研究院苗健编写；第二章、第五章、第十七章由西安工业大学刘秀兰编写；第三章、第四章、第六章~第八章、第十章、第十一章、第十二章、第十五章由西安工业大学陈建编写；第九章由刘春霞编写；第十三章由西安交通大学王力群编写；第十四章由牛津公司焦汇胜编写；第十六章由西安工业大学刘建康编写。全书由西安工业大学严文教授统稿，由陈建、严文、刘春霞担任主编，西安工业大学王正品教授担任主审。另外，本书参考并引用了一些书刊、文献和资料的有关内容，在此，编者对为本书付出辛勤劳动的人员以及援引文献的作者表示衷心的感谢！

由于编者学术水平和客观条件的限制，加之时间仓促，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者  
2011 年 6 月

# 目 录

<b>第一章 光学金相分析</b> .....	1
<b>第一节 光学透镜基础知识</b> .....	1
一、光的折射 .....	1
二、光学透镜的像差 .....	1
<b>第二节 金相显微镜的原理及结构</b> .....	3
一、金相显微镜的工作原理 .....	3
二、金相显微镜的结构 .....	4
<b>第三节 金相显微镜的性能</b> .....	6
一、显微镜的分辨率 .....	6
二、显微镜的有效放大倍数 .....	7
三、显微镜的景深(垂直分辨能力) .....	8
<b>第四节 金相试样的制备</b> .....	8
一、取样 .....	8
二、镶嵌 .....	9
三、粗磨 .....	9
四、细磨 .....	9
五、抛光 .....	10
六、浸蚀 .....	11
<b>第五节 定量金相</b> .....	12
一、定量金相的基本符号 .....	12
二、定量金相的基本原理 .....	13
三、定量金相的测试方法 .....	14
四、误差分析 .....	16
五、图像分析仪定量金相分析 .....	17
<b>习题</b> .....	17
<b>第二章 特殊光学金相技术</b> .....	18
<b>第一节 偏振光的基础知识</b> .....	18
一、偏振光和自然光 .....	18
二、偏振光的类型 .....	18
三、偏振光的产生 .....	19
<b>第二节 偏振光金相显微镜</b> .....	21
一、偏振显微镜的装置 .....	21
二、偏振显微镜的调整 .....	21
<b>第三节 偏振光金相分析原理</b> .....	22
一、偏振光在各向异性金属磨面上的反射 .....	22
二、偏振光在各向同性金属磨面上的反射 .....	23
<b>第四节 偏振光在金相分析过程中的应用</b> .....	23
一、材料显微组织的显示 .....	23
二、非金属夹杂物的鉴定 .....	25
<b>第五节 干涉显微镜</b> .....	25
一、干涉原理 .....	26
二、干涉显微镜的结构 .....	27
<b>第六节 相衬金相显微镜</b> .....	28
一、相衬分析原理 .....	28
二、相衬显微镜 .....	29
<b>习题</b> .....	29
<b>第三章 X射线运动学衍射理论</b> .....	30
<b>第一节 布拉格方程</b> .....	30
一、布拉格方程的导出 .....	31
二、布拉格方程的讨论 .....	31
<b>第二节 倒易点阵与埃瓦尔德球</b> .....	33
一、倒易点阵的概念 .....	33
二、倒易矢量及其性质 .....	34
三、布拉格定律的埃瓦尔德球图解法 .....	34
<b>第三节 单位晶胞对X射线的散射与结构因数</b> .....	35
一、结构因数公式的推导 .....	35
二、几种点阵的结构因数计算 .....	36
<b>第四节 多晶体衍射的积分强度</b> .....	37
一、洛伦兹因数 .....	37
二、多重性因数 .....	38
三、吸收因数 .....	39
四、温度因数 .....	39
五、多晶体衍射的积分强度公式 .....	40
<b>习题</b> .....	40

<b>第四章 X射线衍射方法</b> .....	41		
第一节 劳埃法 .....	41	四、立方结构物质的德拜相分析 .....	46
一、劳埃相机 .....	41	第三节 X射线衍射仪 .....	48
二、劳埃图像的形成原理 .....	42	一、测角仪部分 .....	48
第二节 德拜谢乐法 .....	43	二、光学布置 .....	49
一、衍射图的形成原理 .....	43	三、探测与记录系统 .....	50
二、德拜相机 .....	44	四、探测器扫描方式及参数 .....	53
三、德拜相的误差及修正 .....	45	习题 .....	55
<b>第五章 物相分析及点阵参数精确测定</b> .....	56		
第一节 定性分析 .....	56	一、误差的来源 .....	67
一、基本原理 .....	56	二、图解外推法 .....	68
二、粉末衍射卡片 (PDF) .....	56	三、最小二乘方法 .....	69
三、索引 .....	58	四、标准样校正法 .....	70
四、定性分析过程 .....	60	第四节 非晶态物质及其晶化过程的 X 射	
第二节 定量分析 .....	62	线衍射分析 .....	70
一、定量分析原理 .....	62	一、非晶态物质结构的主要特征 .....	71
二、外标法 .....	63	二、非晶态结构的径向分布函数 .....	71
三、内标法 .....	64	三、非晶态物质的晶化 .....	72
四、基体冲洗法 ( $K$ 值法) .....	65	习题 .....	74
第三节 点阵常数的精确测定 .....	67		
<b>第六章 宏观应力的测定</b> .....	76		
第一节 X射线宏观应力测定的基本原理 .....	77	三、侧倾法 .....	82
一、弹性应力和应变的关系 .....	77	第三节 X射线宏观应力测定中的一些	
二、X射线应力测定计算公式的		问题 .....	83
推导 .....	78	一、定峰法 .....	83
三、X射线应力测定的方位角选择 .....	80	二、应力常数 $K$ 的确定 .....	84
第二节 宏观应力测试方法 .....	80	三、影响宏观应力测量精度的因素 .....	85
一、固定 $\psi$ 法 .....	80	习题 .....	86
二、固定 $\psi_0$ 法 .....	81		
<b>第七章 织构的测定</b> .....	87		
第一节 晶体取向和织构的定义 .....	87	第三节 极图测试方法 .....	93
一、晶体取向以及表示方法 .....	87	第四节 反极图测试方法 .....	96
二、织构的概念及类型 .....	89	第五节 取向分布函数 .....	99
第二节 极射投影及极图 .....	90	一、取向分布函数的概念 .....	99
一、极射投影 .....	90	二、取向分布函数计算中的级数展开 .....	99
二、极图的绘制及织构组分的判断 .....	90	习题 .....	103
三、反极图 .....	92		
<b>第八章 电子光学及透射电子显微镜的构造</b> .....	104		
第一节 成像原理及分辨率 .....	104	二、分辨率 .....	104
一、凸透镜成像 .....	104	三、电磁透镜 .....	106

第二节 电磁透镜的像差 .....	108	一、照明系统 .....	111
一、像差 .....	108	二、成像系统 .....	115
二、像差对分辨率的影响 .....	109	三、观察记录系统 .....	117
第三节 景深和焦长 .....	110	四、光阑 .....	118
一、景深 .....	110	五、样品台 .....	119
二、焦长 .....	111	习题 .....	119
第四节 透射电镜的结构 .....	111		
<b>第九章 透射电子显微镜样品的制备方法</b> .....	121		
第一节 复型样品制备 .....	121	三、高分子块体薄膜样品的制备 .....	126
一、一级复型 .....	121	第三节 其他制样方法 .....	127
二、二级复型 .....	121	一、粉末样品的制备 .....	127
三、萃取复型 .....	122	二、截面样品的制备 .....	127
第二节 薄膜样品的制备 .....	122	三、聚焦离子束方法 .....	128
一、金属薄膜样品的制备 .....	123	四、真空蒸涂方法 .....	129
二、无机非金属块体薄膜样品的制备 .....	125	习题 .....	129
<b>第十章 电子衍射</b> .....	130		
第一节 电子衍射与 X 射线衍射的比较 .....	130	第四节 单晶体电子衍射花样的标定 .....	138
第二节 电子衍射原理 .....	131	一、已知晶体结构时衍射花样的标定 .....	138
一、布拉格定律与埃瓦尔德球图解法 .....	131	二、未知晶体结构时衍射花样的标定 .....	140
二、晶带轴定律和零层倒易面 .....	131	三、标准花样对照法 .....	140
三、干涉函数与倒易点阵扩展 .....	133	第五节 复杂电子衍射花样 .....	140
四、电子衍射基本公式 .....	135	一、高阶劳厄区斑点 .....	140
第三节 电子显微镜中的电子衍射 .....	136	二、超点阵斑点 .....	141
一、有效相机常数 .....	136	三、孪晶斑点 .....	142
二、选区电子衍射 .....	137	四、菊池线分析 .....	143
三、磁转角 .....	138	习题 .....	146
<b>第十一章 高分辨电子显微术</b> .....	147		
第一节 高分辨像的成像原理 .....	147	第二节 弱相位体高分辨像的直接解释 .....	152
一、高分辨电子显微像的成像过程 .....	147	一、晶格条纹像和一维结构像 .....	154
二、透射函数 .....	148	二、二维结构像 .....	155
三、衬度传递函数 .....	150	第三节 高分辨像显示位错特征的方法 .....	156
四、谢尔策欠焦 .....	150	习题 .....	159
五、色差和会聚角对像分辨率的影响 .....	152		
<b>第十二章 晶体薄膜衍射成像分析</b> .....	160		
第一节 电子显微镜图像的衬度 .....	160	一、基本假设 .....	164
一、质厚衬度 .....	160	二、完整晶体的衍射强度 .....	165
二、相位衬度 .....	161	三、完整晶体衍射运动学理论对等厚条纹	
三、衍射衬度 .....	161	和等倾条纹的解释 .....	166
第二节 消光距离 .....	163	第四节 晶体缺陷分析 .....	169
第三节 衍射运动学 .....	164	一、非理想晶体的衍射衬度 .....	169

二、位错 .....	169	第五节 衍衬运动学理论的局限性 .....	174
三、层错 .....	172	习题 .....	174
四、第二相粒子 .....	173		
<b>第十三章 扫描电子显微镜 .....</b>	<b>176</b>		
第一节 电子束与固体样品作用时产生的 信号 .....	176	第三节 扫描电子显微镜的性能与特征 .....	182
一、二次电子 .....	176	一、分辨率 .....	182
二、背散射电子 .....	177	二、放大倍数 .....	183
三、吸收电子 .....	178	三、景深 .....	184
四、透射电子 .....	178	四、样品制备 .....	184
五、特征 X 射线 .....	179	第四节 表面形貌衬度成像原理及应用 .....	185
六、俄歇电子 .....	179	一、二次电子成像原理 .....	185
第二节 扫描电镜的构造和工作原理 .....	179	二、二次电子形貌衬度的应用 .....	187
一、电子光学系统 .....	179	第五节 原子序数衬度原理及其应用 .....	187
二、信号收集处理和图像显示记录系统 .....	180	一、背散射电子形貌衬度特点 .....	187
三、真空系统和电子系统 .....	182	二、背散射电子原子序数衬度原理 .....	187
		习题 .....	188
<b>第十四章 波谱、能谱以及电子背散射衍射 .....</b>	<b>189</b>		
第一节 波谱仪 .....	189	特点 .....	196
一、波谱仪分析原理 .....	189	一、点分析 .....	196
二、波谱仪的工作原理与结构 .....	190	二、线分析 .....	196
三、波谱仪定性和定量分析 .....	192	三、面分析 (X 射线像) .....	196
第二节 能谱仪 .....	192	第四节 电子背散射衍射简介 .....	198
一、能谱仪的结构 .....	193	一、EBSD 系统的硬件组成 .....	198
二、能谱仪定性分析 .....	195	二、EBSD 花样的标定 .....	200
三、能谱仪定量分析 .....	195	三、EBSD 的应用 .....	202
第三节 波谱仪/能谱仪的分析方法及 特点 .....	196	习题 .....	203
<b>第十五章 超声波检测 .....</b>	<b>204</b>		
第一节 超声波检测基本原理 .....	205	一、接触法与液浸法 .....	212
一、超声场及介质的声参量简介 .....	205	二、纵波脉冲反射法 .....	213
二、超声波的分类 .....	205	三、横波探伤法 .....	213
三、超声波的速度 .....	206	四、表面波探伤法 .....	214
四、超声波在介质中的传播特性 .....	207	五、兰姆波探伤法 .....	214
五、超声场的特征 .....	209	六、穿透法检测 .....	214
第二节 超声波换能器 .....	210	习题 .....	214
第三节 超声波检测方法 .....	212		
<b>第十六章 其他常见无损探测方法 .....</b>	<b>215</b>		
第一节 射线检测 .....	215	四、中子照相 .....	219
一、射线检测的基本原理 .....	215	第二节 液体渗透检测 .....	219
二、射线检测的方法 .....	215	一、液体渗透探伤原理 .....	219
三、常见的缺陷影像特征及判断 .....	217	二、液体渗透探伤法的分类和检测方法 .....	220



第三节 磁粉检测 .....	222	一、涡流探伤的特点 .....	229
一、磁粉检测的基本原理 .....	223	二、涡流检测的原理 .....	230
二、磁粉检测方法 .....	223	习题 .....	231
第四节 涡流检测 .....	228		
<b>第十七章 热分析</b> .....	<b>233</b>		
第一节 差热分析 .....	233	第三节 热分析在金属合金研究中的应用 .....	243
一、差热曲线的形成及差热分析的一般特点 .....	233	一、相图的测绘 .....	243
二、差热曲线提供的信息 .....	235	二、熔点的确定 .....	244
三、影响 DTA 曲线的因素 .....	236	三、测定钢的过冷奥氏体转变曲线 .....	245
四、实验数据的处理 .....	241	四、研究合金的有序-无序转变 .....	246
第二节 差示扫描量热法 .....	241	五、研究淬火钢的回火 .....	246
一、差示扫描量热法的特点 .....	241	六、非晶态合金晶化过程的研究 .....	247
二、差示扫描量热法的影响因素和数据处理 .....	243	七、居里点的测定 .....	249
		习题 .....	249
<b>附录</b> .....	<b>250</b>		
附录 A 物理常数 .....	250	附录 D 原子散射因子 $f$ .....	255
附录 B 常见晶体的标准电子衍射花样 .....	250	附录 E 特征 X 射线的波长和能量表 .....	256
附录 C 质量吸收系数 $\mu/\rho$ .....	254	附录 F 立方和六方晶体可能出现的反射 .....	258
<b>参考文献</b> .....	<b>259</b>		

# 第一章 光学金相分析

光学金相分析是利用金相显微镜，根据有关标准、规定来评定和鉴别金属材料内部组织和质量的一种常规检验方法。光学金相分析开始于19世纪60年代，经过100多年的发展，它的应用已不仅仅局限于明场像的观察，而且可以进行定量金相、偏光金相以及干涉、相衬等的分析，在 $0.2\sim 200\mu\text{m}$ 尺度范围材料的组织分析中具有不可替代的作用，是生产和科研中必不可少的一种分析检验手段。

## 第一节 光学透镜基础知识

### 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改变，这种现象就是光的折射，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。

凸透镜是光学显微镜放大成像的主要部件，凸透镜成像时（见图1-1）服从下面的关系式：

$$\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} = \frac{1}{f} \quad (1-1)$$

式中， $L_1$  和  $L_2$  分别为物距和像距；焦点  $F$  至透镜中心的距离  $f$  为焦距。

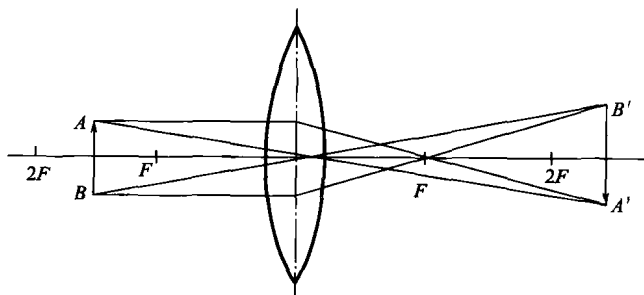


图 1-1 凸透镜的成像原理示意

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：

$$M = \frac{A'B'}{AB} = \frac{L_2}{L_1} \quad (1-2)$$

对于一个给定的光学透镜，其焦距是个定值，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(1-1)相匹配的  $L_1$  和  $L_2$  值。

### 二、光学透镜的像差

光具有波动性，光波之间会相互干涉即产生所谓的衍射现象。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，另外，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。本节主要介绍三种主要的像差，即球差、像场弯曲和色差。

### (1) 球差

在透镜成像时，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  $\alpha$  不同，进入透镜后，折射倾向不同，使得各光线并不聚焦在同一个点上，而是沿着  $z$  轴形成前后不同的一系列交点群，如图 1-2 所示。孔径半角大的人射光线离开主轴的距离较远，称为远轴光线，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 1-2 中的像平面沿着  $z$  轴左右移动，就可以得到一个最小的散焦圆斑。最小散焦圆斑的半径可用  $R_s$  表示。如果把最小散焦圆斑折算到物平面（物体或样品）上去，则可得：

$$r_s = \frac{R_s}{M} \quad (1-3)$$

$r_s$  的值表示球差的大小。显然  $r_s$  变小，透镜的分辨率就有可能提高。光学玻璃凸透镜的球差可通过配以相同材料的凹面镜组成透镜组而加以部分校正。

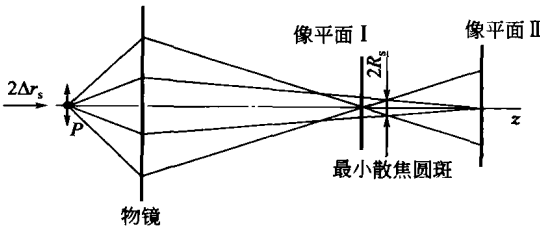


图 1-2 球差

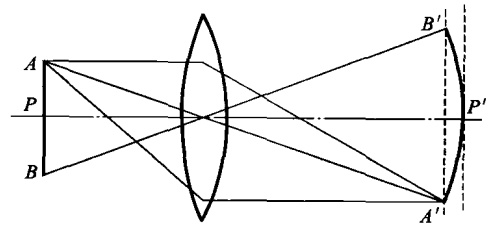


图 1-3 像场弯曲

### (2) 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经过透镜折射后，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 1-3 示出了位于光轴上的物点  $P$  的像点位于  $P'$  处，而远轴物点  $A$ 、 $B$  的像点分别位于  $A'$  和  $B'$  处，图像呈一曲面，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。

### (3) 色差

色差有两种类型，即轴向色差和垂轴色差。图 1-4 是造成轴向色差的示意。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。如果把像平面沿着主轴左右移动，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：

$$r_c = \frac{R_c}{M} \quad (1-4)$$

同样，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 1-5 是形成垂轴色差的示意。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，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，此即为垂轴色差。

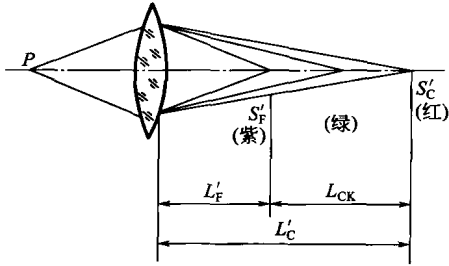


图 1-4 轴向色差

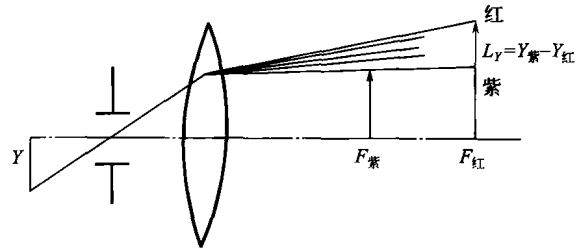


图 1-5 垂轴色差

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，而后边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。

## 第二节 金相显微镜的原理及结构

### 一、金相显微镜的工作原理

金相显微镜是利用可见光作为照明源，通过玻璃透镜对试样进行放大成像的。成像时来自照明系统的光束经金相试样表面反射后，经过物镜和目镜等一套光学放大系统使试样表面的显微组织放大，并在目镜筒内成像，以供观察或拍照。

金相显微镜的工作原理如图 1-6 所示。图中  $L_1$  表示物镜， $L_2$  表示目镜。根据几何光学原理，位于  $L_1$  焦点  $F_1$  之外的物体  $AB$  被放大成倒立的实像  $A'B'$ ， $A'B'$  处于  $L_2$  焦点  $F_2$

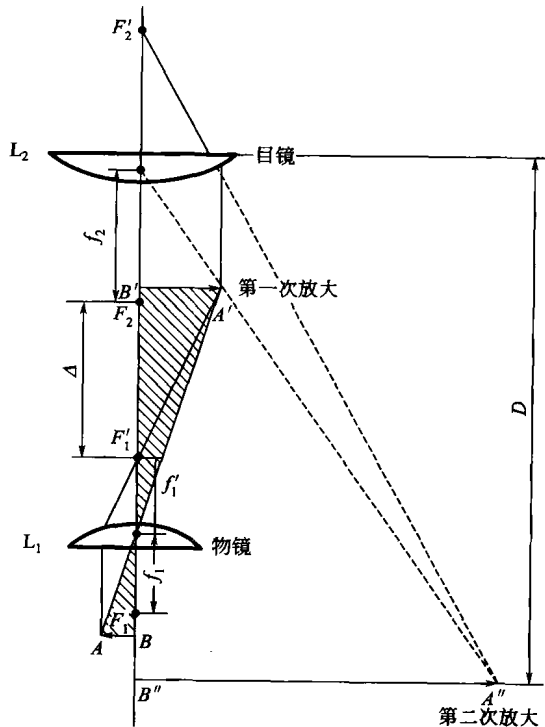


图 1-6 金相显微镜放大成像原理示意

之内，在明视距离（约 250mm）处得到一个仍然倒立的虚像 A”B”。A”B” 是经 L<sub>1</sub> 与 L<sub>2</sub> 两次放大后所得到的像，在显微镜视场中所观察到的图像就是 A”B”。

L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 之间距离称为光学镜筒长度，根据光路的几何关系，不难求出物镜 AB 被放大到 A”B” 时的放大倍数近似为：

$$M = \frac{\Delta}{f_1} \cdot \frac{250}{f_2} = M_{\text{物}} M_{\text{目}} \quad (1-5)$$

式中， $f_1$  和  $f_2$  分别为物镜和目镜的焦距； $M_{\text{物}}$  和  $M_{\text{目}}$  则是它们的放大倍数，显微镜在制造过程中其光学镜筒长度  $\Delta$  并不一定对应理论长度，此时显微镜的放大倍数应予以修正，即：

$$M = KM_{\text{物}} M_{\text{目}} \quad (1-6)$$

式中， $K$  为修正系数。一台显微镜通常配有几个物镜和目镜，上面分别刻有  $\times 15$ 、 $\times 20$ 、 $\times 30$  等数字，这些数字表示各镜头的放大倍数。修正系数  $K$  一般为 0.63，以  $\times 0.63$  表示，刻在镜筒的侧面，当  $K=1$  时，一般不标明。

一般来说，显微镜设计的最高放大倍数可达 1600~2000 倍。但受到物镜分辨能力的限制，实际上大多采用 1000 倍左右。

## 二、金相显微镜的结构

普通金相显微镜主要由光学系统、照明系统、机械系统等组成。其中光学系统是金相显微镜的核心部分，显微镜的成像依赖于此，物镜和目镜是金相显微镜的主要光学部件。

### （一）光学系统

光学系统主要由物镜、目镜及一些辅助的光学部件构成。

#### （1）物镜

物镜是显微镜最重要的光学元件，显微镜的分辨能力及成像质量主要取决于物镜的性能。物镜的种类很多，一般按相差校正程度分为消色差物镜、复消色差物镜以及半复消色差物镜。为了改善质量，还设计了平场物镜。

在设计和制造物镜时，为了提高成像质量，应力求将像差减低到最小程度。为了消除色差，显微镜的物镜采用多片凹凸透镜组合而成。这种组合的凹凸透镜在一定程度上也可以来校正球差（当然也可以采用适当缩小透镜成像范围来减少球差）。至于场曲和像散的校正，常常采用多种光学玻璃制成复合透镜加以改进。前面提到的平场物镜就是为了校正场曲和像散而专门设计的镜头。

物镜的主要性能大多刻在物镜镜筒的金属外壳上，可根据使用说明书加以识别。

#### （2）目镜

目镜的作用是将物镜放大的实像再次放大。某些目镜除放大作用外，还能将物镜成像过程中的残余像差予以校正。目镜的种类很多，常用的有惠更斯目镜、雷斯登目镜、补偿目镜、摄影目镜和测微目镜等。

惠更斯目镜由两块同种玻璃制成的平凸透镜所组成。其焦点位于两透镜之间，不能单独作放大镜使用，故又称为负型目镜。惠更斯目镜结构简单，价格便宜，适合与低、中倍消色差物镜配合使用。小型台式金相显微镜多用这种目镜。

雷斯登目镜由两片等焦距的平凸透镜组成，凸面相对，两透镜的间距等于焦距的  $2/3$ 。这种目镜可单独作为放大镜来观察物体，故又称为正型目镜。雷斯登目镜对场曲和畸变校正较好，球差也小，但对色差的校正较差。

补偿目镜是一种特制的目镜，结构较上述两种都复杂。与复消色差物镜配合使用，可以补偿校正残余色差，但不宜与普通消色差物镜配合使用。

摄影目镜是专为摄影或近距投射而设计的，由多片透镜组成，不能用于观察。摄影目镜对透镜的球面像差、像场弯曲均有良好的校正，与物镜配合，可在投影屏上形成平坦、清晰的实像。

测微目镜主要用于对某些组织，如晶粒大小、石墨片长度、表面脱碳或渗碳层的厚度、显微硬度的压痕等进行定量测定。它的结构主要为在目镜中装有目镜测微器，可借助螺旋调节装置移动目透镜的位置，使目镜刻度清晰。

## (二) 照明系统

照明系统由光源、透镜、滤色片、毛玻璃、孔径光阑及垂直照明器组成，为被测试样表面提供照明源。

普通金相显微镜的光源一般采用6V的白炽灯，它所发射的可见光经过透镜后变成平行光束，再经滤色片变成不刺眼的其他颜色的光线（一般为黄绿色）。

在金相显微镜的光学系统中，均配置有孔径光阑和视场光阑。孔径光阑位于光源聚光镜之后，调节光阑孔的大小可改变成像光束的孔径。孔径光阑控制了实际进入光学系统的光通量，也就是控制了一个物点达到对应像点的光线亮度，缩小孔径光阑，可以使图像清晰，提高景深，提高像的衬度。但缩小小孔径光阑，会使孔径角减小，降低物镜的分辨能力。孔径光阑开得过大，会使球面像差增加，镜筒内反射光和炫光也增加，使图像衬度变差。因此，要发挥物镜的分辨能力，又能兼顾景深获得良好衬度，应将孔径光阑调节到使入射光束刚好充满或略小于物镜孔径为宜。视场光阑主要是限制成像的范围，一般调节到稍大于目镜的视场即可，视场光阑的大小对显微镜的分辨能力没有影响，但适当缩小可减小镜筒内的杂散光、增加图像的衬度。有时为了观察某一范围的显微组织，可以将视场光阑缩小至这个区域，可获得良好效果。正确使用这两个光阑，才能获得高质量的图像。

垂直照明器有平板玻璃式和棱镜式两种。可以使光路的方向按需要改变 $90^\circ$ 。棱镜式对光源的利用率较高，但使显微镜的鉴别能力降低，只在低倍放大（100倍以下）时应用，一般用平板玻璃式。

滤色片的作用是吸收光源发出的白色光中波长不合需要的光线，而只让一定波长的光线通过。使用滤色片的目的在于增加黑白金相照片上组织的衬度，有助于鉴别色彩组织的微细部分，校正残余色差和提高分辨能力。

## (三) 机械系统及其他装置

金相显微镜的机械系统主要包括载物台、焦距调节系统及物镜转换器。

载物台是用来支撑被观察的物体，大多数显微镜的载物台都能在一定范围内平移，以改变被观察的视域。

焦距调节机构分为粗调机构和微调机构，是用来改变物体和物镜前透镜间轴向距离的装置。

物镜转换器是为了便于更换物镜而设置的。转换器上同时装有几个物镜，可以根据观察需要将合适的物镜转至显微镜光轴上。

显微镜的辅助装置主要有暗视场观察附件及照明附件。照明光线通过物镜直射在试样表面的照明关系称为明视场照明，而暗视场照明则是附加一些附件，使照明光线不通过物镜而斜射至试样表面，如图1-7所示。

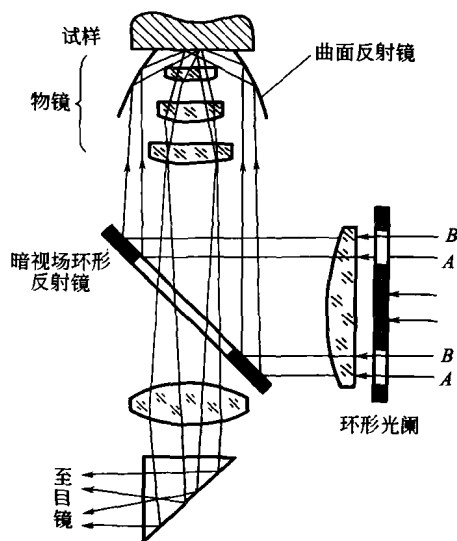


图 1-7 暗视场照明光路图

若试样表面是光洁的，在明视场中则可以观察到白亮的试样表面，而在暗视场中反射光线不能进入物镜，所以只能看到漆黑一片，只有在试样表面凹凸不平处或存在透明夹杂物时才会有光线反射进物镜。一般情况下，暗视场照明所得的黑底图像的明亮部分恰为明视场照明所得白底图像的黑色部分。暗视场能正确鉴定非金属夹杂物的固有色彩，鉴别率也高于明视场。

一般显微镜的暗视场照明附件有环形光阑和曲面反射镜。环形光阑的作用是使照明的光线呈环形而不通过物镜，曲面反射镜可使照明光线以一定的角度投射到试样表面上。

### 第三节 金相显微镜的性能

#### 一、显微镜的分辨率

分辨率是指显微镜所能分辨的两点之间的最小距离。

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来的结构细节才能被目镜进一步清晰放大。

透镜成像时，由于衍射效应的存在，一个物点通过透镜所成的像点并不是一个理想的点，而是一个有一定大小的光斑。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即埃利（Airy）斑所包围。通常埃利斑的大小是以第一暗环的半径来衡量的。图 1-8 是物体上两个点光源（物点）成像时形成的埃利斑的示意。其中  $S_1$  和  $S_2$  是成像物点， $S'_1$  和  $S'_2$  是相应的埃利斑。图中还示意地给出了埃利斑的形状及其亮度（即强度  $I$ ）的分布，其中  $R_0$  为第一暗环半径。现在讨论下面三种情况：当两个物点  $S_1$  和  $S_2$  之间的距离比较大时，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；若两个物点之间的距离相互靠近，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，可发现此时两个强度峰和低谷之间的相对强度差值约为 19%。由于 19% 的强度（亮度）差刚能被人眼所觉察，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，两个成像点便不可分辨。

根据衍射理论并结合阿贝（Abbe）成像原理，可导出埃利斑半径  $R_0$  的计算公式：

$$R_0 = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha} M \quad (1-7)$$

式中， $n$  为透镜靠近物体一边介质的折射率； $\lambda$  为照明源的波长； $\alpha$  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，就可把这个尺度折算到成像的物体上去，即：

$$r_0 = \frac{R_0}{M} = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha} \quad (1-8)$$

式中， $r_0$  为由衍射效应所决定的透镜的分辨率。

从式(1-8)可以看出照明光源波长愈短，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

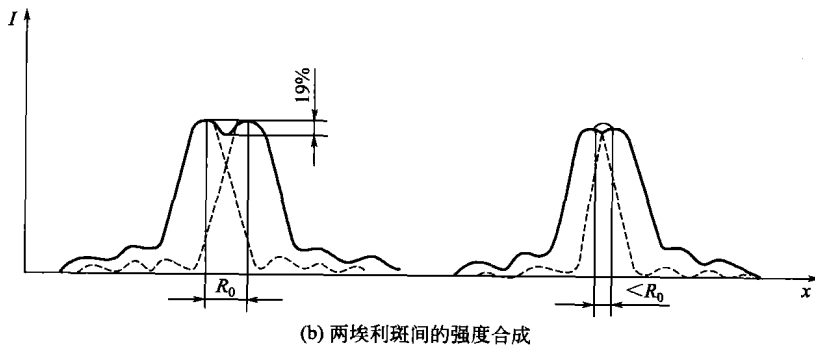
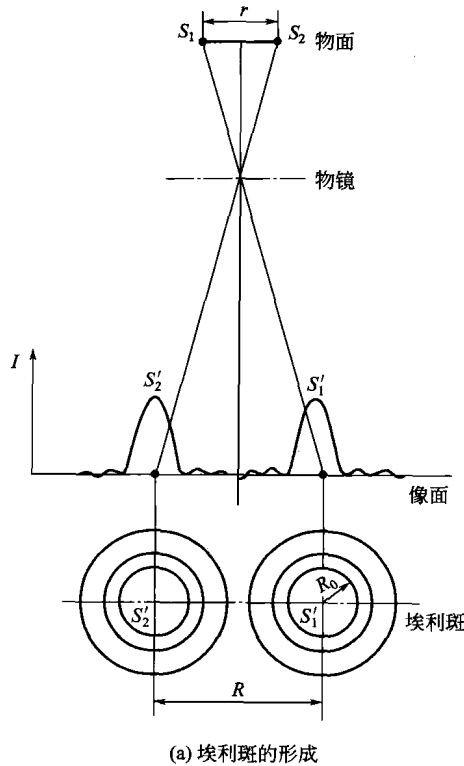


图 1-8 两个物点通过透镜后形成的埃利斑示意

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(1-8) 可以写成：

$$r_0 = \frac{1}{2}\lambda \tag{1-9}$$

式(1-9) 说明了由衍射效应所决定的分辨率，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 380~780nm，若用可见光中波长最短的紫光照明，则光学显微镜的分辨率可达 200nm 左右。

### 二、显微镜的有效放大倍数

显微镜的有效放大倍数是指在保证物镜分辨率充分利用时所对应的显微镜的放大倍数。有效放大倍数  $M_{\text{有效}}$  可以用下式计算：

$$M_{\text{有效}} = \frac{r_e}{r_M} \tag{1-10}$$



式中,  $r_e$  是人眼的分辨率, 人眼在明视距离 (250mm) 处的分辨能力统计位于 0.15~0.30mm 之间;  $r_M$  是物镜的分辨率, 亦即是光学显微镜的分辨率, 高质量显微镜的分辨率大致可达到  $r_M = 200\text{nm}$ , 即  $0.2\mu\text{m}$ 。如果我们把  $r_e$  大致定为 0.2mm, 则显微镜的有效放大倍数  $M_{\text{有效}} = 1000$  倍。

上述分析表明, 若显微镜的物镜放大倍数为 100 倍, 分辨率  $r_M = 0.2\mu\text{m}$ , 此时如选用 10 倍目镜, 其总放大倍数正好等于有效放大倍数的 1000 倍。如果我们选择小于 10 倍的目镜, 则因总放大倍数减小而使原本能看清的结构细节不能被人们分辨出来, 故没有充分发挥物镜  $0.2\mu\text{m}$  的分辨率; 如果选用的目镜放大倍数超过 10 倍, 虽然总的放大倍数增大了, 但物镜的分辨率并未改变, 此时, 小于  $0.2\mu\text{m}$  的细节仍然不能被分辨, 它们只能被虚假地放大。因此显微镜中物镜和目镜放大倍数的合理配合是以有效放大倍数的概念作为根据的。

在实际的操作过程中, 可根据物镜的数值孔径 N. A 来确定有效放大倍数的大小, 其根据如下。

因  $M_{\text{有效}} = \frac{r_e}{r_M}$ , 式中  $r_M$  以衍射效应所决定的分辨率  $r_0 = \frac{0.61\lambda}{n\sin\alpha}$  为代表, 而  $n\sin\alpha = \text{N. A}$ , 则:

$$M_{\text{有效}} = \frac{(0.15 \sim 0.3)\text{N. A}}{0.61\lambda} \quad (1-11)$$

在常规金相分析时大都采用黄绿光, 其平均波长  $\lambda = 550\text{nm}$ , 代入上式得  $M_{\text{有效}} = (447 \sim 894)\text{N. A}$ 。由于这种计算是十分粗略的, 为了便于记忆可把计算结果圆整为:

$$M_{\text{有效}} \approx (500 \sim 1000)\text{N. A} \quad (1-12)$$

例如, 物镜的参数为  $40 \times 0.65\text{N. A}$ , 根据式(1-12) 计算, 有效放大倍数为 325~650 倍之间, 而目镜的放大倍数  $M_{\text{目}}$  应位于  $325/40 \sim 650/40$  之间, 即 8~16 倍。

### 三、显微镜的景深 (垂直分辨能力)

垂直分辨能力是指物镜对于高低不平的物体能清晰成像的能力。金相试样经浸蚀后表面呈现凸凹不平, 要使各种组织均能清晰地呈现在视场之中, 则需要物镜有一定的垂直分辨能力, 即所谓显微镜的景深  $d_L$ 。景深一般是以物体同时清晰成像时最高点到最低点之间的距离。根据理论推导, 景深为:

$$d_L = \frac{n}{7\text{N. A}M} + \frac{\lambda}{2(\text{N. A})^2} \quad (1-13)$$

式中, 前项为人眼调节状态不变时显微镜的景深, 后项为人眼调节能力附加的景深值。可见显微镜的放大倍数或数值孔径越大, 则景深越小。在实际操作中, 不要过分选择数值孔径小的物镜或过分地缩小孔径光阑来提高景深。因为这会降低物镜的分辨能力。另外, 当使用高倍干系物镜或油浸物镜显示金相组织时, 由于景深小, 应浸蚀得浅些才能获得清晰的图像。

## 第四节 金相试样的制备

金相试样制备过程一般包括取样、镶嵌、粗磨、细磨、抛光和浸蚀等几个步骤。

### 一、取样

取样最常用的方法是进行机械切割。机械切割的设备和工具有砂轮切割机、电火花切割