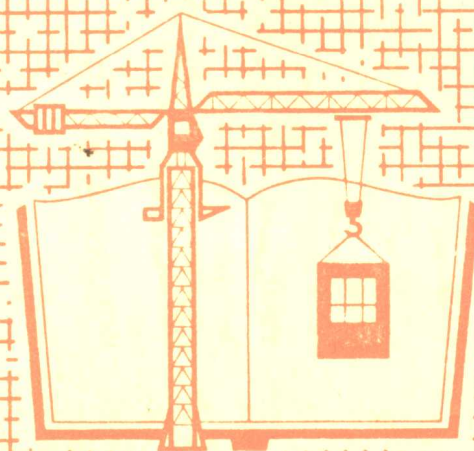


陶瓷材料研究方法

南京化工学院
清华大学 合编
华南工学院



4.0
7
高等学校试用教材

中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

陶瓷材料研究方法

南京化工学院

清华大学 合编

华南工学院

中国建筑工业出版社

本书介绍应用于陶瓷材料的结构研究方法。全书共分十二章，主要内容有：光学显微技术(偏光、反光、相衬、微差干涉、干涉、干涉相衬等)、透射及扫描电子显微镜、X射线衍射分析、荧光X射线分析及电子探针微区分析、高温物相分析、红外吸收光谱分析、表面分析(IMMA、ESCA、AES、LEED、FIM)以及陶瓷材料综合研究实测等。重点为光学显微技术、X射线衍射分析、电子显微镜及高温物相分析等部分。

本书为高等院校陶瓷专业或材料专业的教材，亦可供从事陶瓷材料研究及生产的科技人员参考。

高等学校试用教材
陶瓷材料研究方法
南京化工学院
清华大学 合编
华南工学院

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：24 1/8 字数：587 千字
1980年12月第一版 1980年12月第一次印刷
印数：1—3,310 册 定价：2.45元
统一书号：15040·3871

序

《陶瓷材料研究方法》是高等院校陶瓷专业或无机非金属材料专业的专业教材之一。

为使陶瓷材料适应科学技术发展的要求，材料工作者必须学习和掌握先进的研究方法，研究材料的元素组成与价态、物相组成及其分布特征、晶体结构及其微细变化、显微结构及缺陷，进而探讨化学组成—工艺特性—显微结构—材料性能间的内在联系及其变化规律，为材料改性和制备预见性能的新材料创造条件。因此材料的组成、结构和缺陷的研究是材料科学研究中的重要方面。为此，编者在从事教学与科研工作的基础上，参阅了国内外有关文献资料，编写了本书。书中尽量吸取国内外研究方法方面的先进成果，同时在内容和篇幅上照顾到教学的实际要求以及各院校的现状。

本书在仪器方法的介绍中，侧重于基本原理、基本操作技术、应用范围及优缺点对比。在尽量结合陶瓷材料特点的同时，亦照顾到仪器发展动向、特点及使用条件。

本书由南京化工学院、清华大学、华南工学院合编。执笔的有田雨霖（编写绪论、第一章、第二章、第三章、第四章、第九章、第十一章、第十二章）、杜学礼、蔡丽英（编写第五章）、王运辉（编写第八章、改编第五章）、林峻（编写第六章、第七章）、杨兆雄（编写第十章），田雨霖担任主编。

本书稿曾由中国科学院上海硅酸盐研究所陈显求副研究员担任主审，参加审阅的还有上海硅酸盐研究所郭常霖副研究员、上海科技大学翁臻培副教授、清华大学张孝文副教授等。审阅者提出许多宝贵意见，编者进行了修改，在此，表示衷心的感谢！

最后，全书由郭常霖副研究员进行了仔细的校阅和审定，并逐章进行了修改和补充。

由于时间紧迫，编者学识有限，谬误及差错在所难免，请读者提出宝贵意见。

编 者

一九七九年八月

绪 论

作为固体非金属材料重要分支的陶瓷材料是发展科学技术不可缺少的材料之一。耐高温、耐腐蚀、强度高、硬度大、具有多种性能的多功能陶瓷材料，已在各种工业部门以及最近二、三十年迅速发展起来的空间技术、遥感、仿生、激光、电子及能源等新技术中得到了广泛的应用。

为适应科学技术发展对材料性能提出的严苛要求，必须掌握先进的研究方法，对原料半成品、成品的宏观到微观的各个层次进行检测分析。探索成分、结构、性能及生产工艺间的关系，分析影响材料特性的各种因素，是材料改性和研制预见性能的新材料，发展现代科学技术所不可缺少的重要条件。

陶瓷材料研究方法是适应科学技术的发展而开设的一门新课程。主要内容有：光学显微技术（偏光、反光、相衬、干涉、微差干涉等）、电子显微技术（透射电镜和扫描电镜）、X射线衍射分析、X射线荧光光谱分析、电子探针、高温物相分析（差热、失重、以及高温X射线）、红外吸收光谱分析、表面分析（离子探针、光电子能谱分析、俄歇电子能谱分析、低能电子衍射及场离子显微镜等）以及陶瓷材料综合研究实例等。要求学生通过学习能理论联系实际，除掌握常规分析手段的原理及操作技能外，对于处在发展中的先进分析仪器应有一定的了解，以提高阅读文献资料的能力。

探索材料的“特性”及其影响因素，是陶瓷材料研究方法的主要研究内容。陶瓷材料的特性是由组分的原子（或离子）特性、显微结构特性及宏观特性等决定的，这种关系可表示如下：

$$C_M = C_A + C_{mi} + C_{ma}$$

式中 C_M ——陶瓷材料特性；

C_A ——陶瓷组分中原子（或离子）特性；

C_{mi} ——陶瓷材料显微结构特性；

C_{ma} ——陶瓷材料宏观特性。

这种简单的表示，虽然概括了决定材料特性的因素，但是实际情况比这个简单表示式复杂得多。下面分三方面予以说明。

1、关于化学组成

化学组成是影响材料特性的最基本因素。材料特性不仅受主要化学成分的影响，而且在许多情况下还与少量杂质元素的种类、浓度和分布情况等有很大的关系。研究少量杂质元素在材料组成中的聚散特性、存在状态等，不仅涉及到探讨杂质的作用机理，而且开拓了利用少量杂质元素改善材料特性的途径。例如以钛酸钡（ BaTiO_3 ）为基的热敏电阻（PTC），就是把 CuO 、 Fe_2O_3 、 MnO 等氧化物以杂质的形式加入到瓷料中，烧结后这些氧化物在晶界处形成绝缘性的氧化物层，从而改善了 BaTiO_3 陶瓷材料的性能。 Bi_2O_3 在氧化铋半导体陶瓷中的作用也类似前述情况。高频低损耗的铁氧体是在 Ni-Zn 或 Mn-Zn 铁氧体 NiFe_2O_4 - ZnFe_2O_4 、 MnFe_2O_4 - ZnFe_2O_4 中加入少量 CaO 、 SiO_2 等杂质制成。在烧结过

程中, CaO 与 SiO_2 形成液相, 被复在铁氧体晶粒表面, 不仅起着加速扩散烧结速率的作用, 而且由于 CaO 与 SiO_2 形成晶界层, 导致了铁氧体性能的改善。杂质的作用, 尤其在光电效应、磁光效应、光色效应、压电性、热电性等方面表现得更为敏感。因此, 检测材料中杂质的种类、浓度、存在状态和分布特征, 是陶瓷材料研究中的重要内容之一。有些情况下, 杂质含量仅达几 ppm , 而且聚集在晶界或烧结体的颗粒界面上。这样, 对于检测分析来说, 不仅存在一个含量微少的问题, 而且存在一个如何确定其分布特征及存在状态的问题。也就是说, 分析方法必须考虑到微量及微区的特殊问题。常规的湿法化学分析在这里已失去作用, 必须采用先进的分析方法才能完成检测分析工作。如采用X荧光光谱分析、电子探针(EPMA)、离子探针(IMMA)、激光微探针、光电子能谱仪(ESCA)和俄歇电子能谱仪(AES)等等。利用这些方法可以得到杂质元素的种类、浓度、价态和分布特征。

2、关于晶体结构

化学成分相同, 但晶体结构不同(相组成不同)时材料性能往往不同。而晶体结构相同的材料, 由于局部点阵常数的改变, 在有些场合也是材料特性变化的重要因素。烧结体晶界附近原子排列的无序, 固体中的缺陷, 各种类型的固溶体等, 都会导致局部点阵畸变。所以测定点阵常数, 可以帮助我们了解晶体内部微小的变化; 对材料特性产生何种影响。晶体结构、点阵常数等要用X射线衍射和电子衍射等进行分析。

3、关于显微结构

陶瓷材料是由晶相、玻璃相、气孔等组成的复合体, 陶瓷材料的显微结构受到材料化学组成、晶体结构及工艺过程等因素的影响, 它与材料的特性有着密切的关系。从某种意义上说, 材料的显微结构特征对材料性能有决定性的影响。材料的显微结构主要用光学显微术和电子显微镜、扫描电镜来研究。

综上所述, 材料结构分析的内容包括下列一些方面:

- (1) 物相组成及含量;
- (2) 晶体结构及类型, 点阵常数;
- (3) 晶体结合键的类型及键力大小;
- (4) 杂质含量及分布;
- (5) 晶粒大小及其取向;
- (6) 晶粒形态及其分布特征;
- (7) 晶粒中的晶格畸变和位错等缺陷;
- (8) 晶界结构及组成, 晶界层的厚度;
- (9) 气孔、微裂纹和裂隙的数量、大小及分布;
- (10) 畴结构及其分布特征;
- (11) 表面状态及气体的吸附, 表面结构;
- (12) 材料的应力状态及应变。

陶瓷材料的性能受上述多种因素的影响, 欲使材料具有良好的性能, 必须详细地研究这些因素。

各种研究方法都有一定的应用范围及局限性, 因此在陶瓷材料的检测分析中必须根据试样条件和研究目的, 选择合适的一些方法进行综合研究, 以期了解影响材料性能的各种因素。在可能的情况下, 采取相应的措施改善材料的性能。

目 录

绪论

第一章 光学显微镜概况 1

第一节 概述 1

第二节 光学显微镜的工作能力 10

第二章 偏光显微镜 17

第一节 晶体光学的基础理论 17

第二节 偏光显微镜下材料的定性分析 28

第三节 透光材料折光率的测定方法 66

第四节 偏光显微镜下材料的定量分析 76

第五节 偏光显微镜下材料的系统研究 83

第三章 反光显微镜 90

第一节 反光显微镜的构造 90

第二节 反光显微镜下观察试样的制备 93

第三节 反光显微镜下材料的研究 99

第四章 特殊显微技术 114

第一节 暗场照明法 114

第二节 相衬显微镜 117

第三节 干涉显微术 122

第五章 电子显微镜 135

第一节 透射式电子显微镜 135

第二节 扫描电子显微镜(SEM) 146

第六章 X射线物理基础 159

第一节 X射线的基础知识 159

第二节 X射线发生装置 171

第三节 X射线的检测及安全防护 174

第七章 X射线衍射分析 177

第一节 X射线的衍射 177

第二节 布拉格方程式 178

第三节 X射线的衍射强度 181

第四节 晶体对X射线衍射的基本方法 190

第五节 粉末法(德拜法)及其原理 192

第六节 聚焦法 207

第七节 衍射仪法 210

第八节 X射线物相定量分析 215

第九节 定性相分析及X射线粉末衍射卡片(JCPDS卡片)的应用 219

第十节 晶粒度的测定 225

第八章 荧光X射线分析及电子探针微区X射线分析 230

第一节 荧光X射线分析 230

第二节 电子探针微区X射线分析 241

第九章 高温物相分析 250

第一节 概述 250

第二节 差热分析 250

第三节 失重分析 285

第四节 综合热分析 288

第五节 高温X射线分析 291

第十章 红外光谱分析 298

第一节 红外光谱的基本概念 298

第二节 红外分光光度计的构造及试样制备 300

第三节 影响红外吸收光谱的因素及谱线解释 304

第四节 红外分析在陶瓷领域中的应用 307

第十一章 表面分析仪器 308

第一节 概述 308

第二节 离子探针微区分析(IMMA) 310

第三节 光电子能谱分析(ESCA) 319

第四节 俄歇电子能谱分析(AES) 324

第五节 低能电子衍射(LEED) 326

第六节 场离子显微镜 328

第十二章 陶瓷材料综合研究实例 333

第一节 普瓷的研究 333

第二节 特瓷的研究 348

附表 360

X射线衍射分析常用表 360

参考书目 379

第一章 光学显微镜概况

第一节 概 述

一、光学显微镜的发展概况

追溯光学显微镜的历史，距今已有四百余年了。在漫长的历史岁月中，光学显微镜为人类探索自然的奥秘，为科学技术的发展作出了卓越的贡献。

世界上第一架光学放大器诞生于1590年，由双凸双凹透镜组成，放大率不超过10倍。该放大器是由住在荷兰的工匠詹森父子创制的。1609年意大利学者伽里略发明了望远镜，翌年使用类似仪器于微小物体的观察。1625年法伯尔把这种观察微小物体的仪器定名为显微镜，从此，显微镜这个名字便与科学技术的发展紧密地联系起来了。

显微镜的出现使科学研究增加了先进的工具，因此对科学技术的发展起过巨大的促进作用。在改良和完善显微镜的工作中，各国科学家相继做出了贡献。十七世纪中叶，英国的胡克创制了放大率为40~140倍的显微镜，他用这架显微镜进行了许多研究工作，在他著的《显微图志》一书中有关于木栓组织细胞的论述。同一时期，许多学者如吕文虎克、马尔皮基等人，也利用显微镜进行了生物学和微生物学方面的研究。荷兰的惠更斯于1695年设计并制造了惠更斯目镜。十八世纪中叶英国的道兰德发明了消色差透镜。十九世纪中叶，德国学者阿贝用无色透明的萤石和光学玻璃制成复消色差透镜和聚光镜。英、法、意、等国的科学家发明了反光镜和物镜校正环等。经过这些改进后，不仅提高了显微镜的工作能力，扩大了应用范围，而且从外观上也接近于目前使用的显微镜。

尼科耳于1828年发明了偏光棱镜。1830年他第一个试制成功适合于显微镜观察的矿物岩石薄片，开创了用偏光显微镜研究天然矿物、岩石的历史。

阿贝教授曾对显微镜的改良工作有过卓越的贡献。他在1870年发表了有关放大理论的重要论文，确立了光波波长与显微镜分辨能力（或解象能力）间的关系，奠定了近代光学显微镜的理论基础。1872年他又发明了透镜的油浸法，并于1882年制造了多种优质光学玻璃。十九世纪末，阿贝与卡尔·蔡司(Carl Zeiss)合作，在德国耶拿(Jena)市开设了大型光学工厂，进行有计划的显微镜改良工作。结果在一百多年前，就使光学显微镜的性能几乎达到理论解象能力，放大率亦提高到2000倍左右。

1891年俄国学者费德洛夫，发明了费德洛夫台，可使矿物、岩石薄片在费氏台上围绕几个旋转轴转动，这样在一个矿物颗粒上借助于转动，可以得到任一方向的切面，弥补了偏光显微镜只能使试样在一个平面内转动的缺陷，扩大了偏光显微镜的功能及应用范围。

1903年澳大利亚学者喜格蒙提利用暗场照明法与显微镜联合，观察到极微小的颗粒。他在用显微镜研究微小颗粒运动的基础上，证实胶体完全存在，开创了胶体化学的领域。暗场显微镜在较好的条件下，可以检测出粒径为40埃(Å)左右的微粒。这种尺度的微粒叫亚微子(Submicron)。这种检测亚微子的技术叫做超显微术(Ultramicroscopy)。在电子显微镜出现前，这是唯一能观测到最小微粒的方法。为此，1925年R·喜格蒙提得到诺贝

尔化学奖。为进一步提高显微镜的分辨率，德国的戈勒于1904年发明了紫外线显微镜（分辨率为0.12微米），吉蒙和西登多夫于1903年发明了超显微镜（分辨率为0.004微米）。

1934年荷兰的契尼克提出了相衬（位相差）显微镜理论。至此，在成像理论上完全被忽视的光的位相差理论得到了应用。这一理论表明光波通过物质时产生的位相差，直接可变换为光的强度差。三百多年来一直利用光波振幅成象，而今使光波的另一特性——位相得到了应用。这不仅对于显微镜世界，而且对于视觉世界也是一个很大的提高。契尼克由于发明了相衬显微镜，于1953年得到诺贝尔物理学奖。相衬显微镜诞生至今已四十多年了，基于新的成像理论的相衬显微术与干涉显微术已成为现代光学显微术中能够帮助研究者洞察研究物体光学特性精细状况的先进工具，因此得到了普遍的重视，并取得了惊人的进展。

现在，光学显微术已被广泛的应用于生物学、医学、药理学、病理学、金属学、矿物学、岩石学、晶体学、化学、农艺学以及陶瓷、水泥、玻璃、耐火材料、矿渣、磨料和高分子材料研究等各种学科领域中，而且在许多近代分析和测量仪器中常配有光学显微镜。所以，光学显微镜已遍及于国民经济的各部门，并且在这些领域的使用中，又会受到实践的启发而创制出许多新型的光学显微镜及其附件。

在扩大显微镜的应用范围方面，值得指出的是1941~1942年荷兰人鲍尔斯设计并制造的结构比较简单、用于显微镜上的反一折物镜。这种物镜的创制，使光学显微镜的使用范围从可见光波长范围扩展到紫外和红外光波长范围。由于反一折物镜不使用透镜曲面折射，而是利用透镜曲面反射，从而消除了物镜的象差及色差点，解决了焦点合一的问题。使用反一折物镜能从可见光到紫外、红外光广阔的波长范围内进行检测分析及观察摄影。可以预料，反一折物镜在一定情况下会得到更普遍的应用。

此外，随着科学技术的发展，具有特殊性能及特殊要求的显微镜部件的设计和制造也有了较大的进展，已成为显微镜发展中的重要内容。

光学显微镜在近四百年的发展，其成果概括起来主要有三方面：

1. 提高显微镜的分辨能力；
2. 提高显微镜成象的衬度；
3. 显微镜附件的多样化。

在上述三方面中，尤以第三方面发展的最为迅速。对一个试样尽可能取得多种信息的要求，使显微镜向着具备多种附件，能测定各种物理常数的方向发展。由于电子技术惊人的进展，应用电子技术于光学显微镜以提高显微镜的工作效率及扩大应用范围，已成为显微镜发展中的一个重要方向。电视机，电子计算机等近代仪器与光学显微镜组合，显著提高了显微镜的检测、计算功能，进一步扩大了显微镜的应用范围。在集成电路(IC)等的生产管理上、用于血球自动记数和粒度分布测定上的飞点显微镜等都是电子技术与显微镜组合应用的实例。

我国解放后，光学显微镜发展十分迅速，不仅能生产普及型的光学显微镜（如生物显微镜、中级偏光显微镜、金相显微镜等），而且能生产精密的或具有特殊功能、综合应用的显微镜（如SXN-01型研究用生物显微镜、大型卧式金相显微镜、XJW-1型万能金相显微镜、干涉显微镜、荧光显微镜、全息显微镜、图象分析仪等）。

二、显微镜的光学系统

显微镜主要由光学和机械两大系统组成。光学部份主要包括：物镜、目镜、照明装置等。因此显微镜的性能与物镜、目镜的质量有密切关系。

(一) 物镜

显微镜的性能及分解能力主要决定于物镜，其结构较复杂，一般由1~5组复式透镜组成，每个透镜组约有一至数块透镜。因单透镜存在多种妨碍成象清晰度的象差，而用折射率不同、色散不同的凸凹透镜经光学计算后加以组合能消除大部分象差，使成象清晰。

单透镜的各种象差中，最有害的是球面象差和纵向色差。球面象差的产生是因透镜表面是球面，光线通过透镜中轴和透镜边缘不能聚焦于一点，而聚焦成两点甚至三点（图1-1），所以不能形成清晰的物象。

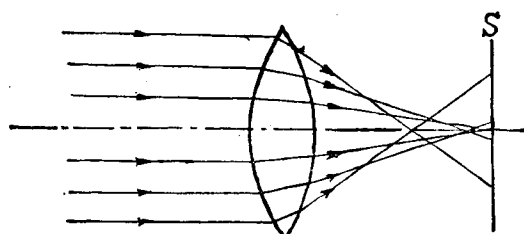


图 1-1 透镜球面象差的成因
S—投影屏

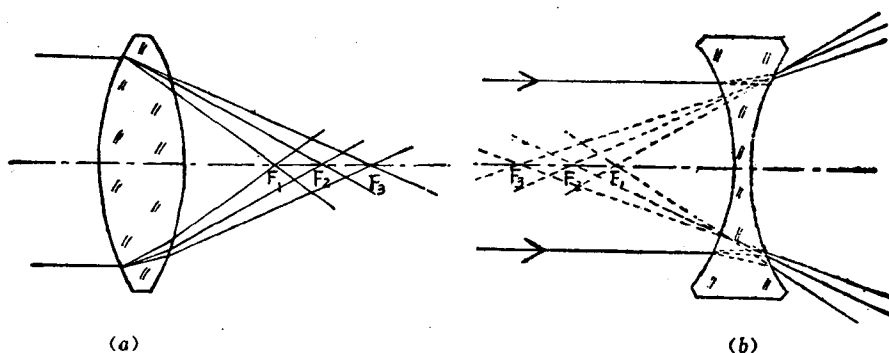


图 1-2 纵向色差的成因
a—凸透镜；b—凹透镜； F_1 、 F_2 、 F_3 分别为蓝、黄、红光的三个焦点（使用白光照明）

纵向色差是因透镜玻璃对波长不同的色光折射率不同。因此，用白光照明时，一束白光经过单透镜后，不是聚焦于一点，而是聚焦成红、黄、蓝三点（图1-2）。结果使一个物体形成红、黄、蓝三个焦距不同的物象，造成物象镶有不清晰的红、蓝色边。所以必须采用透镜组合，消除色差，才能得到清晰的物象。

1. 物镜的种类

根据象差的校正程度，物镜分为如下四种：

(1) 消色差物镜 (Achromatic Objective)

显微镜中最常用的就是消色差物镜，它的色差校正是使可见光中两个极端波长红光C和蓝光F线聚焦于一点，而黄光D线则聚焦于另一点。因此，这种物镜还残留有少量的色差，用C线焦点与D线焦点间的距离表示，这种色差叫做副光谱。

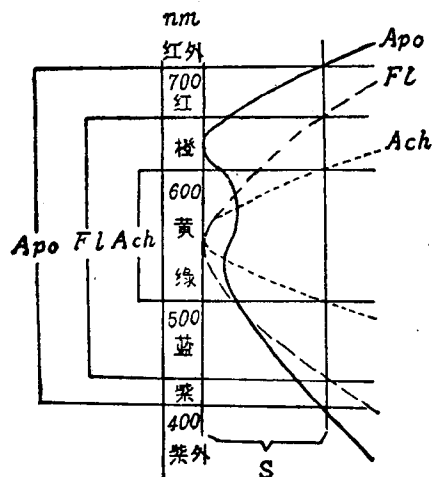


图 1-3 物镜的色差校正曲线
点线 *Ach* 代表消色差物镜；虚线 *FL* 代表萤石物镜；实线 *Apo* 代表复消色差物镜
S—清晰范围

色差校正曲线(图1-3)表示 *Ach* 消色差物镜最佳的清晰范围为波长5100埃的绿光和波长6300埃的红光之间,即人眼最灵敏的光谱范围。在此范围内,色差及球面象差的校正最为完善,此范围之外,消色差物镜的成象质量变坏。显微照相时,消色差物镜配以黄绿滤光片,可得到最清晰的照片。而使用深红或深蓝滤光片则不能得到清晰的照片。消色差物镜残留的副光谱,对于低、中倍物镜的影响可以忽略,只对高倍物镜的影响较大。消色差物镜最大的优点是容易做到无应变,适合于透射偏光及反射偏光下的定量测定工作。但是,进行高倍精细观察及显微照相时,最好使用复消色差或萤石物镜。

(2) 复消色差物镜 (*Apochromatic objective*)

该种物镜基本上能把所有色光聚焦于一点,因此消除了副光谱。同时校正了红、蓝色光的球象差。这种物镜质量优异,适于任何倍率的观察及摄影。从图1-3 *Apo* 曲线可以看出,复消色差物镜最佳的清晰范围的波长是4000~7200埃,包括了全部可见光谱,能适合于任何色光波下的观察及摄影。

复消色差物镜虽然完全校正了纵向色差,但不能同时校正横向色差,所以使用复消色差物镜,用白光照明时,蓝光产生的物象比红光大。为消除此缺点,阿贝设计了一种补偿目镜,其红光物象比蓝光物象大,与复消色差物镜配合使用能刚好抵消横向色差。然而经过这种校正后,象场弯曲现象比消色差物镜严重。平面物体经过复消色差物镜后,形成的物象不是一个平面,而是类似于球面的弯曲面。在显微镜中呈现的现象是视场中心和边缘不能同时准焦。象场弯曲对于观察和摄影都有不便。目视观察时要改变焦距才能看清视场中心与边缘,或将边缘移至中心观察。摄影时,照片中心清晰而边缘较模糊。象场的弯曲在显微照相时可利用某些特殊目镜加以校正。复消色差物镜框上常刻有“*Apochromatic*”或“*Apo*”等字,以资识别。

(3) 萤石物镜 (*Fluorite objective*)

萤石物镜是由无色萤石和光学玻璃制成,其色差校正介于消色差与复消色差物镜之间,仅残留有极少量的副光谱未得到校正。从图1-3 萤石物镜的色差校正曲线可以看出,其最佳清晰范围在波长4300~6300埃之间, *FL* 曲线包括了绝大部分可见光波长,所以萤石物镜的质量优于消色差物镜,适于高倍观察及摄影。萤石物镜框上常刻有“*FL*”或“*Fluorite*”等字。萤石物镜主要与平象目镜或补偿目镜配合使用。

(4) 平象物镜 (*Plane objective*)

上述三种物镜均有象场弯曲,倍数愈高愈严重,并以复消色差物镜为最严重。象场弯曲给目视观察及显微摄影造成很多不便。因此1938年制出平象消色差物镜,1952年又制出平象复消色差物镜。这些物镜造成的影象基本上是平的,象场弯曲小,不会发生视野中心与边缘不能同时准焦的现象。所以对目视观察及显微摄影都极为方便。所有的平象物镜都

与制造厂特制的平象目镜或补偿目镜配合使用。平象物镜的金属外壳上常刻有“Plane-chromate”（平象消色差），“Planeapochromate”（平象复消色差），“PL”或“NPL”，“Plane”（平象）等字样。

2. 物镜的孔径角及数值孔径

物镜的孔径角（Angular aperture）是指从物镜光轴上的物体焦点进入物镜前透镜的光线所形成的最大角度（图1-4），即物镜光轴上的物体焦点与物镜前透镜的有效直径所形成的角度。

物镜的数值孔径（Numerical aperture）是指物镜和被检物体之间的介质折射率（ n ）与物镜孔径角（ u ）一半的正弦之积。用下式表示：

$$N \cdot A = n \cdot \sin \frac{u}{2} \quad (1-1)$$

式中 $N \cdot A$ ——物镜的数值孔径；

n ——物镜与被检物体间的介质折射率；

$\frac{u}{2}$ ——物镜孔径角之半。

数值孔径通常简写为 $n \cdot A$ ， $N \cdot A$ ， $Apert$ ， num 等。并刻在物镜金属外壳上或聚光镜上，是判断物镜或聚光镜性能的重要数据。通常数值孔径愈大，工作能力愈强。数值孔径与显微镜的工作能力的关系为：与分辨率成正比；与焦点深度成反比；数值孔径的平方与镜象亮度成正比。欲使物镜发挥与其数值孔径相适应的能力，必须配以数值孔径相适应的聚光镜，否则物镜性能就会受到聚光镜的影响。

3. 干燥系物镜及浸没系物镜

根据使用条件的不同把物镜分为两大系统：

即干燥系物镜和浸没系物镜。

（1）干燥系物镜

所谓干燥系物镜是指物镜与所观察的物体之间的介质是空气。根据公式（1-1）知，

$\sin \frac{u}{2}$ 的值小于 1，而空气的折射率为 1，所以干燥系物镜的数值孔径也小于 1，一般为 0.05~0.95。放大倍数亦较低。

（2）浸没系物镜

所谓浸没系物镜是指物镜与被检测物体之间的介质是液体，镜检时即把物镜浸没在液体介质中。根据浸没液体的种类又分为水浸系及油浸系两类。浸没物镜的金属外壳前端常有一黑圈，并刻有“Oil”、“imm”、“HI”及“ПМИ”等字样。常用介质有香柏油（ $n = 1.515$ ）、蒸馏水（ $n = 1.33$ ）等，特殊的有甘油（ $n = 1.473$ ）、 α -溴萘（ $n = 1.66$ ）等等。

使用浸没系物镜时，首先用低倍干燥系物镜将欲观察之目标找好，换上浸没系物镜，

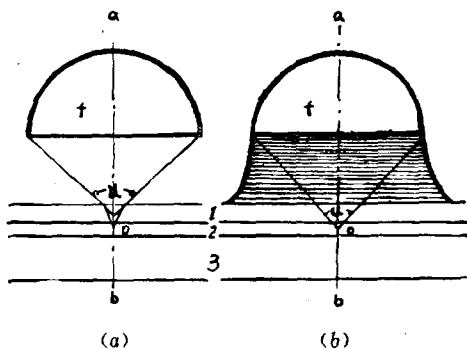


图 1-4 物镜的孔径角

(a) 一物镜与盖玻片间的介质为空气层；

(b) 一物镜与盖玻片间介质为香柏油

1—盖玻片；2—加拿大树胶层；3—载玻片

并滴一滴浸液于观察目标上，调好焦距即可观测。观测后换下物镜用擦镜纸浸少量二甲苯擦拭物镜及试片至清洁为止。

(二) 目镜

目镜一般是由上面的目透镜和下面的会聚透镜所组成。有些目镜则由三块透镜组成。靠近会聚透镜的金属光阑叫做视场光阑，物象即成象在该光阑平面上，光阑边缘就是视野界限。此外，于目镜光阑位置可以装设目镜十字丝；目镜显微尺；指示针；面积网格等，构成特殊用途的目镜。

1. 目镜的类型

根据目镜的结构把目镜分为下列类型：

(1) 惠更斯目镜

该种目镜是由两个单凸透镜组成，凸面向下，一般均与消色差物镜配合使用。惠更斯目镜的结构如图1-5所示。

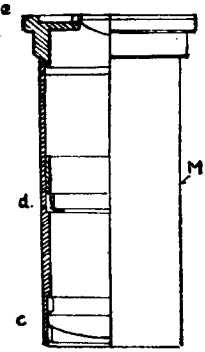


图 1-5 惠更斯目镜

e—目透镜；c—会聚透镜；d—视场光阑；M—金属外壳

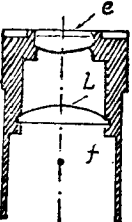


图 1-6 雷姆斯登目镜

e—目透镜；L—会聚透镜；f—目镜焦点

目镜的放大倍率取决于目透镜的曲率半径及目镜筒长。放大倍率与目透镜的直径及筒长成正比。常见的目镜放大倍率为 $5\times$ 、 $8\times$ 、 $10\times$ 、 $15\times$ 、 $20\times$ 等。最常用的是 $5\times$ 及 $10\times$ 的目镜。

(2) 雷姆斯登目镜

该种目镜也是由两个平凸透镜组成，凸面相对，目透镜与会聚透镜大小相近，焦距亦相同。雷姆斯登目镜的结构如图1-6所示。从目镜结构可知，射向目透镜的光线是发散的，因此要求目透镜与会聚透镜大小相近才能接受来自会聚透镜的光线。该目镜不能全部消除横向色差。将目透镜用两片透镜粘合而成以消除残存色差的改良目镜叫开尔纳目镜。

雷姆斯登目镜的优点是各种象差都比惠更斯目镜小（横向色差除外），球象差是惠更斯目镜的 $1/5$ ，纵向色差为 $1/2$ ，畸变也小于 $1/2$ 。该目镜的成象平面位于会聚透镜之下，十字丝平面与物镜的成象平面一致。因此，整个目镜所起的作用相当于一个放大镜的作用。而惠更斯目镜不能直接使物体放大。所以又称雷姆斯登目镜为正目镜，惠更斯目镜叫负目镜。

(3) 补偿目镜

补偿目镜是专门与复消色差物镜配合使用的目镜，其结构根据放大率的高低有显著的差别。复消色差物镜产生的蓝象比红象大，造成物体影象出现彩色边缘。而补偿目镜设计

时就使其红象比蓝象大，故能消除复消色差物镜的横向色差。

补偿目镜结构如图1-7所示。其目透镜和会聚透镜是由几个透镜粘合而成。焦平面可能在两组透镜之内或之外。低、中倍的消色差物镜用补偿目镜则会使影象产生不清晰的彩色边。补偿目镜的缺点是象场弯曲严重，而且弯曲方向与复消色差相同，因此更增加了象场弯曲度。

补偿目镜倍数由 $5\times$ 至 $30\times$ ，与同倍数的惠更斯目镜比较，它的出射光瞳距目透镜较远，目视观察较适宜。补偿目镜外壳上常刻有字母“K”，“Komp”，“Compens”及“КОМП”等字。

(4) 无畸变目镜

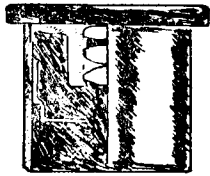


图 1-7 高倍补偿目镜

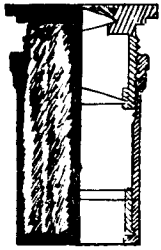


图 1-8 无畸变目镜

无畸变目镜就是消色差的雷姆斯登目镜，即开尔纳目镜（图1-8所示）。该目镜利用目透镜和会聚透镜的对称性消除畸变，因此适用于高倍观察及显微测量。

畸变现象是物体上的一条直线经透镜放大后失真变形成一条曲线的现象。图1-9示出正、负畸变现象。随着目镜倍数的增加，畸变现象愈趋严重，因此妨碍高倍观察、摄影及镜下测量。

(5) 超平目镜

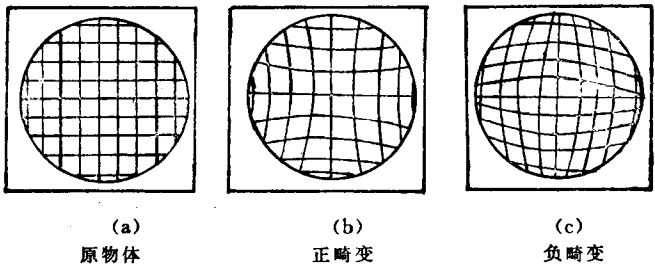


图 1-9 畸变现象

超平目镜在构造上类似于惠更斯目镜，但却在目透镜之上加装一校正目透镜，而且目透镜是由双凸透镜构成（图1-10），使目镜成象几乎完整的位于同一平面中。因此象的各部分具有相同的清晰度。该目镜常与高倍物镜配合使用。显微摄影时使用超平目镜象的清晰度较高。

除上述各种目镜外，还有一些特殊用途的目镜、如测微目镜、指示目镜、网格目镜、绘图目镜、分光目镜、搜索目镜、测角目镜、比较目镜、投影目镜、示教目镜等等，这里不一一介绍了。

(三) 照明装置

所谓照明装置是指把光源射来的光线变成适合于观察的状态送至被检物体的装置。照明装置通常由反光镜、光阑、聚光镜等三部分组成（见图1-11）。

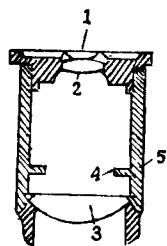


图 1-10 超平目镜

1—校正目透镜；2—目透镜；3—会聚透镜；
4—金属光阑；5—金属外壳

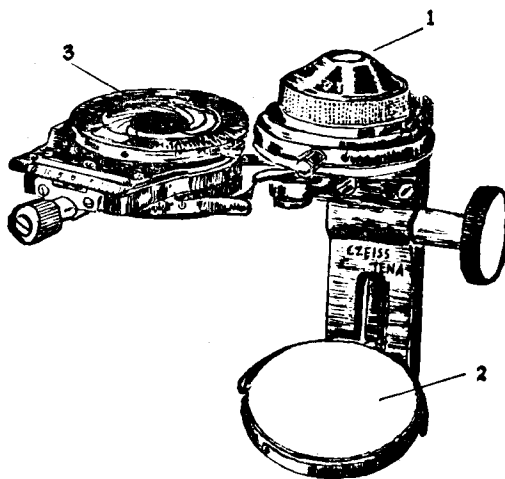


图 1-11 照明装置

1—聚光镜；2—反光镜；3—虹彩光阑

1. 反光镜。是由一块一面平，一面凹的双面镜制成，位于镜座上，并可在弧弓中转动。也可以拔出反光镜，代之以安装反射棱镜，光源通过反射棱镜，直接射入聚光镜。

2. 光阑。是用以改变光束大小的装置。由反光镜射来的光束过大时，影响物象的清晰度，调整光阑大小，可以改变入射光束的大小，以保证物象的清晰度。

虹彩光阑是目前显微镜中较先进的光阑，操作简便，因此中级以上的显微镜和许多人工光源都设有这种装置。它由嵌在金属圆框中的十几片半月形薄金属片组成，在中心部分形成圆孔，孔的大小用金属框外侧的把手调整。通常金属框边缘刻有分度，看把手位置就能知道孔的大小（见图1-11）。

3. 聚光镜。是用以弥补光量不足及适当改变从光源射来的光线性质的装置。聚光镜由1-3块或更多的透镜组成，表现为凸透镜的性质。上透镜上面是平面，光线汇集在上透镜的1.25毫米上方。优质的聚光镜有消球差透镜（Aplanat）和消色差透镜（Achromat）两种。通常称为消色差的聚光镜便是高级的，对球差及色差都有校正。由两块以上的透镜组成的聚光镜，卸掉一块或两块上的透镜就会使聚光镜的数值孔径变小。聚光镜亦附中心调节装置，通常做精密检测时都使用这种聚光镜（如偏光检测等）。

特殊用途的聚光镜有：透过紫外线的石英聚光镜；用于暗场（视野）照明的各种暗场（视野）聚光镜；用于相衬观察的由各种特殊环状光阑组成的转盘式聚光镜等。

从显微镜的构造来看，由光源射出照明光线，通过物镜和目镜才能造成物体的放大象。因此，优质物镜必须配以优质的聚光镜才能充分发挥显微镜的能力。即使用复消色差物镜时，也必须配以消光差聚光镜，才能消除色差的干扰而得到清晰的物象。聚光镜的数值孔径有0.8；1.2；1.3；1.4等等。物镜的分辨率受聚光镜数值孔径的影响。因此，检测时，聚光镜的数值孔径应与物镜的数值孔径相匹配，才能充分发挥物镜的性能。例如，数

值孔径为1.3的物镜，如配以数值孔径为1.2的聚光镜，则只能发挥数值孔径为1.2的能力。如配以数值孔径为1.4的聚光镜，才能充分发挥物镜的能力。通常聚光镜上端常刻有表征其性能的符号：如 *Aplanat*（消球差），*Achromat*（消色差），*N·A*（数值孔径）1.4等。

三、显微镜的光路特征

为全面而合理的使用显微镜，因此有必要了解显微镜的光路特征及被检物体的象在显微镜中的形成过程。

用显微镜观察物体时，能得到物体放大的象，其光路简示于图1-12中。被检测的微小物体置于显微镜载物台上，由反光镜从下面把它照亮。因物体 AB 位于物镜 O_1 的焦距之外，两倍焦距之内的位置上，所以在 O_1 的另一侧形成一个倒立的放大的物体实象 A_1B_1 。而 A_1B_1 恰落于目镜 O_2 的焦距之内。根据透镜成像原理，又在 A_1B_1 的同侧形成一个物体放大的虚象 A_2B_2 。我们通过目镜看到的物体是经过两次放大后的原物体倒立的虚像。可见用显微镜观察物体时比直接用肉眼观察物体的视角大得多，因此可以看到肉眼看不到的微小物体。

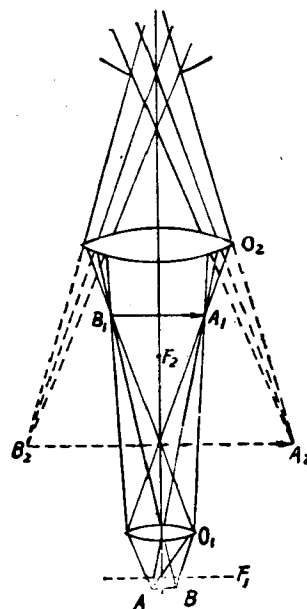


图 1-12 显微镜光路图

图1-13是图1-12的简化图。 H_1 和 H_2 是物镜 O_1 的主平面， H_3 和 H_4 是目镜 O_2 的主平面。 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 ，分别是物镜和目镜的前后两焦点，它们的焦距分别为 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 。 F_2 和 F_3 之间的距离为 Δ ，即物镜的后焦平面与目镜的前焦平面间的距离，这个距离又称为光学镜筒长度。光学镜筒长度随物、目镜的焦距而改变，通常与显微镜的机械筒长（镜筒末端至上端间的距离）比较相近。图1-13中， H 和 H' 是整个显微镜系统的主平面， F 是其前焦点（或第一焦点）， F' 是后焦点（或第二焦点）。整个系统的第二焦距 f' 由下式决定：

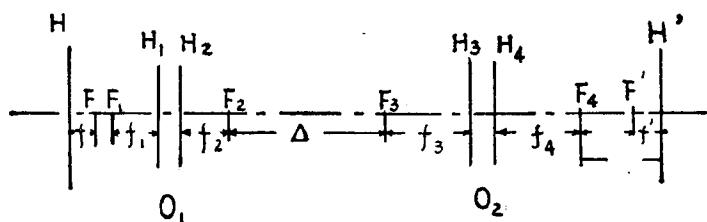


图 1-13 光路简化图

$$f' = -\frac{f_2 \cdot f_4}{\Delta} \quad (1-2)$$

因为 $\Delta > 0$ ，所以 $f' < 0$ 。

整个系统的第一焦距由下式决定：

$$f = \frac{f_1 f_3}{\Delta} = \frac{f_2 f_4}{\Delta} \quad (1-3)$$

因此, $f > 0$, 第一焦点 F 在显微镜第一主平面的右侧。

从图1-12, 图1-13中可知, 显微镜的光学系统中物镜的结构比较复杂, 是一种短焦距的光学系统, 置于被观察的物体之上, 稍高于物镜主焦距的位置上。由光源发出的光束, 经反光镜向上反射, 通过照明系统——聚光镜及虹彩光阑, 把点光源成象在欲检测的透明物体平面上。虹彩光阑对入射光束的孔径起着限制作用, 调节它可以改变入射光束的孔径, 所以又称它为孔径光阑。它在显微镜的光学系统中起着入射光瞳的作用。在图1-14中, 物体 AB 位于载物台上, 物镜把 AB 成象在目镜的第一焦平面上。装在显微镜筒中的目镜、会聚透镜低于物镜所产生的物体实象, 并将产生此象的光束综合, 使象下移至视场光阑

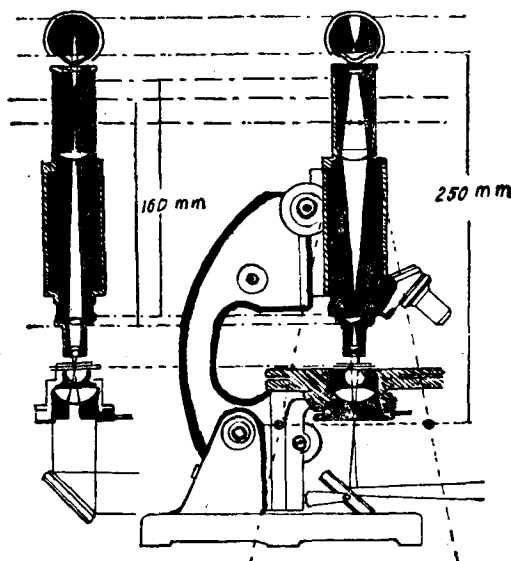


图 1-14 显微镜结构光路示意图

上, 并略有缩小。随着象的缩小, 象的边缘部分出现于视域中。因此会聚透镜的作用是使显微镜的视域扩大。显微镜的目透镜则有如放大镜的作用。目镜的视场光阑在结构上恰位于目透镜的焦距之内, 因此经目透镜的作用, 最后形成一个放大物体的虚像。目镜的视场光阑就是显微镜的出射光瞳。从眼睛的视网膜到物体虚象间的距离叫做明视距离, 这个距离通常等于250毫米。

第二节 光学显微镜的工作能力

决定光学显微镜工作能力的主要因素是: 分辨能力、清晰度、总放大率、焦点深度、镜象亮度、视野宽度、工作距离等。这些因素都受一定条件的限制, 相互制约, 互为影响。因此, 欲提高某项指标, 就有可能使其它指标降低。所以, 实际上只能使显微镜的工作能力满足一定的条件, 而不能满足所有的条件。

一、显微镜的分辨能力

所谓显微镜的分辨能力, 就是指物镜分辨被检物体上细微结构的能力, 或叫分辨率、解象能力。物镜不能分辨的细微结构, 在物镜的成象中就不能反映出来。而目镜的作用仅