

高等学校教材

机械工程材料 实验指导书

吴晶 戈晓岚 纪嘉明 编

14-33
02



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

机械工程材料实验指导书

吴 晶 戈晓岚 纪嘉明 编
邵红红 傅明喜 审



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程材料实验指导书/吴晶, 戈晓岚, 纪嘉明编.
北京: 化学工业出版社, 2005.12

高等学校教材

ISBN 7-5025-8038-7

I. 机… II. ①吴… ②戈… ③纪… III. 机械制
造材料-实验-高等学校-教学参考资料 IV. TH14-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 150228 号

高等学校教材

机械工程材料实验指导书

吴晶 戈晓岚 纪嘉明 编

邵红红 傅明喜 审

责任编辑: 程树珍 陈丽

责任校对: 吴桂萍

封面设计: 潘峰

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市兴顺印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 印张 6 $\frac{3}{4}$ 字数 160 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8038-7

定 价: 12.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

实验教学是工科高等工程教育教学体系的重要组成部分，是增加学生感性认识、培养分析实际问题能力、强化工程素质、启迪创新思维和创造能力的重要环节。在科学技术迅猛发展的当今世界，工程材料学科的新理论、新技术、新工艺、新材料和新设备及其开发应用日新月异。

编写本书的目的，是让学生掌握工程材料分析和检测的基本理论、技能；熟悉工程材料制备、处理和加工原理及工艺过程与成分、组织、性能的对应关系；培养学生的创新意识及科学研究的基本方法，全面提高学生利用所学专业知综合分析和解决问题的能力。

本书建立了基础技能素质训练、基础素质训练和综合素质训练三个实验教学平台。有大量的金相（光学和电子）组织照片，着重材料的成分、组织、性能的分析 and 对应关系。

本书在学生实践学习中和后继的毕业设计中起重要的指导作用。

本书第一部分中的一至三和第二部分由吴晶编写，第三部分的实验一由戈晓岚编写，第一部分的四至七和第三部分的实验二由纪嘉明编写。全书由邵红红、傅明喜审。

由于编写水平有限，书中不当之处，恳请同行和读者指正。

编者

2005年11月28日

目 录

第一部分 工程材料实验基础知识	1
一、显微镜的基本构造及使用	1
二、金相试样的制备	10
三、显微摄影	14
四、硬度计的使用	23
五、力学性能试验机基本结构与使用	29
六、力与变形的测量和记录仪器的使用	37
七、力学性能试验的试样	40
第二部分 工程材料基本实验	46
实验一 铁碳合金平衡图与平衡组织观察	46
实验二 碳钢的热处理操作与 C 曲线应用	51
实验三 碳钢热处理后的显微组织观察	55
实验四 常用金属材料的显微组织观察	62
实验五 非金属材料的性能测试及显微组织观察	73
第三部分 工程材料综合性、设计性实验	76
实验一 力学性能综合性实验	76
实验二 典型零件材料的选择和应用	89
附录	94
附录一 常用的化学侵蚀剂	94
附录二 压痕直径与布氏硬度对照表 (GB 231—84)	95
附录三 黑色金属硬度及强度换算值 (GB 1172—74)	98
参考文献	100

第一部分

工程材料实验基础知识

一、显微镜的基本构造及使用

(一) 光学金相显微镜的构造及使用

科学事业的迅猛发展和人们不断深入的探索自然世界，上九天揽月，下五洋捉鳖已成现实。显微镜可将人们视觉延伸到肉眼无法看到的微观世界中去。因此，显微镜成为各个领域的科学工作者不可缺少的重要工具之一。用于医学、生物学的透射照明显微镜称为生物显微镜；对观察不透明物体的反射照明显微镜一般统称为金相显微镜。现代的金相显微镜已与计算机数字信息技术相结合，成为金相组织分析最基本、最重要和应用最广泛的研究方法之一。

利用光学金相显微镜来观察金属的内部组织与缺陷，将专门制备的金属试样在金相显微镜下放大 100~1000 倍来观察，研究其组织与缺陷的方法称为金属的显微分析方法。显微分析可以研究金属组织与其成分和性能之间的关系；确定各种金属经不同加工与热处理后的显微组织；鉴别金属材料质量的优劣，如各种非金属夹杂物在组织中的数量及分布情况，以及金属晶粒度大小等。

光学金相显微镜是利用光线的反射将不透明物件放大后进行观察的。在介绍金相显微镜的构造和应用之前，应对其原理有一个了解。

1. 光学金相显微镜的基本原理

光学金相显微镜由两组透镜及一些辅助光学零件组成，对着金相试样的透镜为物镜，对着人眼的透镜称为目镜。借助于物镜与目镜的两次放大，就能使物体的像放大到很高的倍数。现代光学金相显微镜的物镜和目镜都是由复杂的透镜系统所组成，放大倍数可提高到 1600~2000 倍。其光学原理如图 1-1 所示。

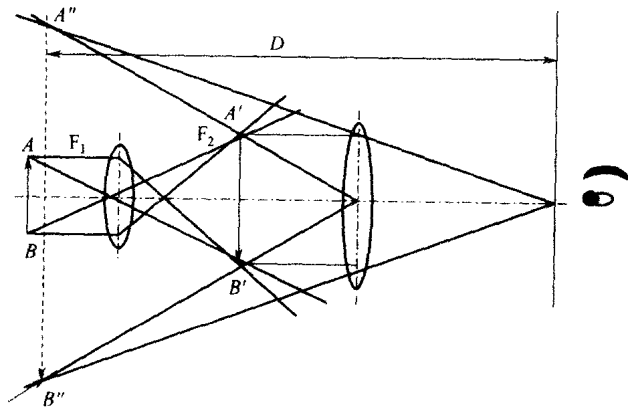


图 1-1 金相显微镜光学原理示意

当所观察的物体 AB 置于物镜焦点 F_1 外少许时，物体的反射光线穿过物镜经折射后，就得到一个放大的倒立实像 $A'B'$ ，若 AB 处于目镜的前焦距以内，再经过目镜放大后，人眼在目镜上观察时，在 250mm 的明视距离处（正常人眼看物体时，最适宜的距离大约在 250mm 左右，这时人眼可以很好的区分物体的细微部分而不易疲劳，这个距离称为“明视距离”），看到一个经再次放大的虚像 $A''B''$ 。所以，观察到的物像是经物镜和目镜两次放大的结果。

2. 金相显微镜的放大倍数

显微镜经物镜放大后的像 ($A'B'$) 的放大倍数为

$$M_{\text{物}} = \frac{L}{f_1}$$

式中 L ——微镜的镜筒长度（即物镜与目镜间的距离）；

f_1 ——物镜焦距。

显微镜目镜倍数为

$$M_{\text{目}} = \frac{D}{f_2}$$

式中 D ——明视距离；

f_2 ——目镜焦距。

很显然，显微镜的总的放大倍数应为二者放大倍数的乘积，即

$$M_{\text{总}} = M_{\text{物}} \times M_{\text{目}} = \frac{250L}{f_1 f_2}$$

显微镜中的主要放大倍数一般是通过物镜来保证，物镜的最高放大倍数可达 100 倍，目镜的放大倍数可达 25 倍。

放大倍数的符号用“ \times ”表达，例如物镜的放大倍数为 $25\times$ ，目镜的放大倍数为 $10\times$ ，则显微镜的放大倍数为 $25\times 10 = 250\times$ 。放大倍数均分别标注在物镜与目镜的镜筒上。

在使用显微镜观察物体时，应根据其组织的粗细情况，选择适当的放大倍数。以细节部分观察清晰为准，不要盲目追求过高的放大倍数。因为放大倍数与透镜的焦距有关，放大倍数越大，焦距必须越小，结果会带来许多缺陷，同时所看到的物体区域也越小。

3. 金相显微镜的鉴别率

显微镜的鉴别率是显微镜最重要的特征，它是显微镜在视场中能分辨出相邻两点间的最小距离 d 来表示。显然， d 值越小，鉴别率就越高。由于物镜使被观察物体第一次放大，故显微镜的鉴别率主要取决于物镜的鉴别率。它可由下列公式求得

$$d = \frac{\lambda}{2NA}$$

式中 d ——物镜能分辨出的物体相邻两点的最小距离；

λ ——入射光线的波长；

NA ——物镜的数值孔径，表示物体的聚光能力。

由上式可知，波长越短，数值越大，则物镜所能分辨出的物体相邻间的最小距离越小，其鉴别越高。光线的波长可通过滤色片来选择，数值孔径可由下列公式求得

$$NA = \eta \sin \varphi$$

式中 η ——物镜与物体间介质的折射率；

φ ——物镜孔径角的半角。

进入物镜的光线所张开的角度为物镜的孔径角，其半径角为 φ ，如图 1-2 所示。

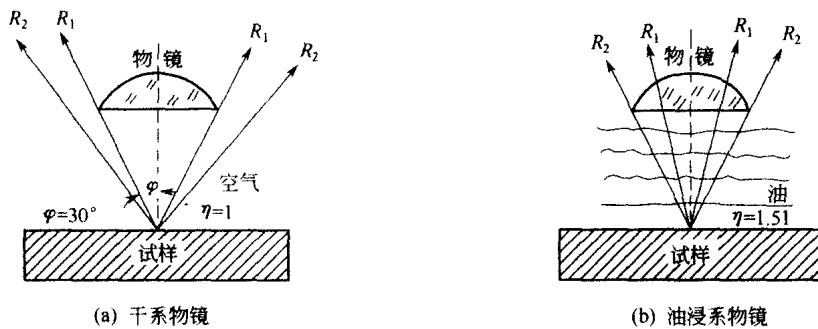


图 1-2 物镜前透镜的孔径角

由上式可知，当 φ 值越大时，则数值孔径就越大，物镜的鉴别能力也就越高。由于 φ 总是小于 90° ，而一般物镜与物体间的介质是空气，光线在空气中的折射率 $\eta=1$ ，其数值孔径总量小于 1，这类物镜被称为“干系物镜”。当物镜与物体之间充满柏油介质 ($\eta=1.51$) 时，其数值孔径最高可达 1.4 左右，这就是显微镜在高倍观察时使用的“油浸系物镜”（又称为油镜头）。

由此可见，物镜的数值孔径对鉴别率起到决定性作用的。如果数值孔径不足，此时尽量提高放大倍数也没有意义。因为相邻两点若不能很好的鉴别，即使放大倍数再高（即虚伪放大），实际上还是不能清楚区别两点。这是因为：人眼在 250mm 处的鉴别率为 0.15~0.30mm，要使命物镜可分辨的最近两点的距离 d 能为人眼所分辨，则必须将 d 放大到 0.15~0.30mm，即

$$dM=0.15\sim 0.30\text{mm}$$

因

$$d=\frac{\lambda}{2NA}$$

则

$$M=\frac{1}{\lambda}(0.3\sim 0.6)NA$$

若取 $\lambda=0.55\mu\text{m}=0.00055\text{mm}$ ，则有

$$M\approx(500\sim 1000)NA$$

所以显微镜的放大倍数 M 与 NA 之间存在一定的关系。该 M 称为有效放大倍数，是选择物镜和目镜的基础。物镜的数值孔径与其放大倍数一起刻在镜头的外壳上，例如镜头上 25/0.50 或 65 \times 的下面刻有 0.75 等数字，这个 0.50 或 0.75 即表示物镜的数值孔径 (NA)。高倍物镜通常都为油浸系，油镜头的标记有“油”（或 Oil）或外壳涂一黑圈来表示。

4. 透镜成像的质量

单片透镜在成像过程中，由于几何光学条件的限制，以及其他因素的影响，常使映像变得模糊不清或发生变形现象，这种缺陷称为像差，像差主要包括球面像差、色像差。

球面像差的产生是由于透镜的表面呈球曲形，通过透镜中心及边缘的光线折射后不能交于一点 [如图 1-3 (a) 所示]，而变成几个交点呈前后分布；来自透镜边缘的光线靠近透镜交集，而靠近透镜中心的光线则交集在较远的位置，这样得到的映像显然是不清晰的。球面像差的程度与光通过透镜的面积有关。光圈放得越大，则光线通过透镜的面积越大，球面像差就越严重；反之，缩小光圈，限制边缘光线射入，使通过透镜的光线只有中心的一部分，则可减小球面像差。但是光圈太小，也会影响成像的清晰度。

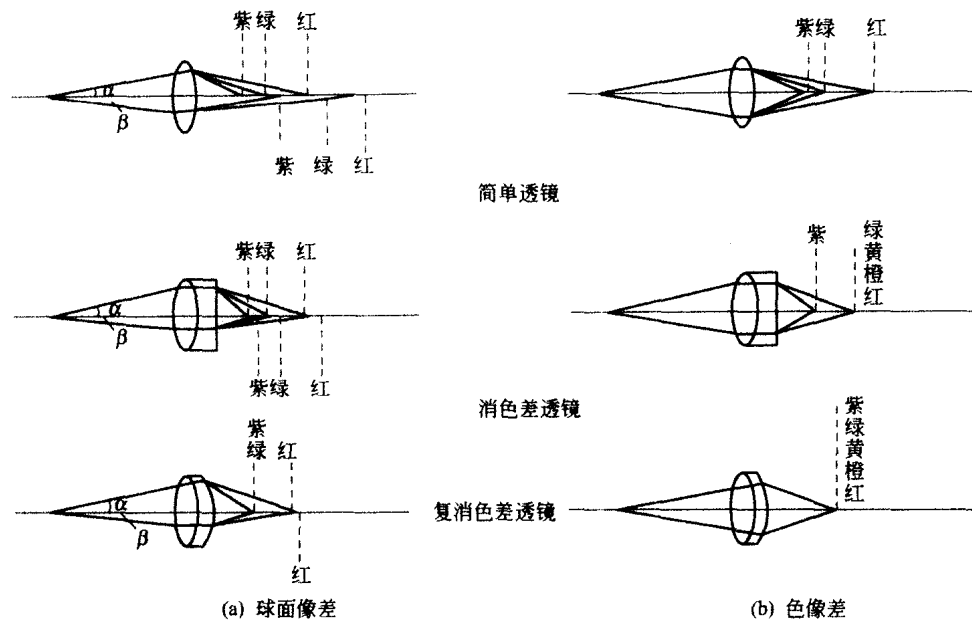


图 1-3 透镜产生像差的示意

校正透镜球面差的方法，一是采用多片透镜组成透镜组，即将凸透镜和凹透镜组合在一起（称为复合透镜），由于这两种透镜有着性质相反的球面差。因此可以相互抵消。二是在使用显微镜时也可采用调节孔径光栏，适当控制入射光光束粗细，减少透镜表面面积等方法，把球面像差降低到最低程度。

色像差的产生是由于组成的白色光线是由 7 种单色光组成，且光线的波长不同，在穿过透镜时折射率不同。使光线折射后不能交于一点。紫光折射最强，红光折射最弱，结果使成像模糊不清，此种现象称为色像差。见图 1-3 (b)。

消除色像差的方法，一是制造物镜时进行校正。根据校正的程度，物镜可分为消色差物镜和复色差物镜。消色差物镜和普通目镜配合，用于低倍和中倍观察；复色差物镜和补偿目镜配合，用于高倍观察。二是使用滤色片得到单色光。常用的滤色片有蓝色、绿色或红色。

显微镜的放大作用主要取决于物镜，物镜质量的好坏直接影响显微镜映像的质量，所以对物镜的校正是很重要的。物镜的类型，根据对透镜球面像差和色像差的校正程度不同而分为消色差物镜、复消色差物镜和半复消色差物镜等。

目镜也是显微镜的主要组成部分，它的主要作用是将由物镜放大所得的实像再度放大，因此它的质量将最后影响到物像的质量，按照目镜的构造型式，一般可分为普通目镜、补偿目镜和测微目镜等。普通目镜其映像未被校正，应与消色差物镜配合使用。补偿目镜须与复消色差物镜或半复消色差物镜配合使用，以抵消这些物镜的残余色像差。

5. 光学金相显微镜的构造

光学金相显微镜的种类很多，按其外形可分为台式、立式和卧式三大类。显微镜的构造通常由光学系统、照明系统和机械系统三大部分组成。有的显微镜带有摄影装置，现以国产 4X 型金相显微镜为例进行说明。

4X 型金相显微镜的光学系统如图 1-4 所示。由灯泡 1 发出的光线经聚光镜组 (一) 2 及反光镜 8 聚集到孔径光栏 9 上，然后经过聚光镜组 (二) 3，再度将光线聚集在物镜的后集

面上，最后通过物镜平行照射到试样 7 表面。从试样反射回来的光线复经物镜组 6 和辅助透镜 5，由半反射镜 4 转向，经过棱镜 12 及棱镜 13、场镜 14 造成一个被观察物体的倒立放大实像，该像再经过目镜 15 的放大，即可得到所观察的试样表面的放大图像。

4X 型金相显微镜的外形结构如图 1-5 所示。现分析各部件的功能与作用。

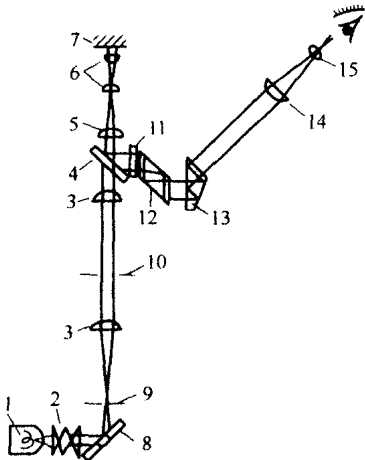


图 1-4 4X 型金相显微镜的光学系统

- 1—灯泡；2—聚光镜组（一）；3—聚光镜组（二）；
4—半反射镜；5—辅助透镜；6—物镜组；7—试样；
8—反光镜；9—孔径光栏；10—视场光栏；
11—辅助透镜（二）；12、13—棱镜；
14—场镜；15—目镜

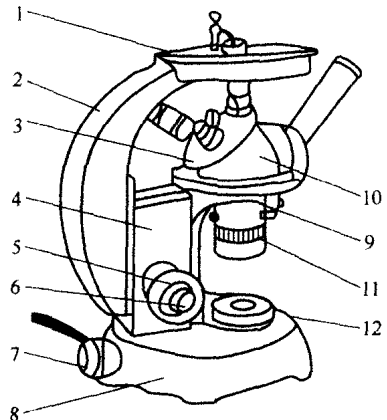


图 1-5 4X 型金相显微镜的外形结构

- 1—载物台；2—镜臂；3—物镜转换器；4—微动座；
5—粗动调焦手轮；6—微动调焦手轮；
7—照明装置；8—底座；9—平台托架；
10—碗头组；11—视场光栏；
12—孔径光栏

照明系统：在底座内部装有一低压（6V、15V、20V）灯泡作为光源，由变压器降压供电，靠调节次级电压（6~8V）来改变灯光亮度，聚光镜、孔径光栏 12 及反光镜等装置均安装在圆形底座上，视场光栏 11 及另一聚光镜则安装在支架上，它组成显微镜的照明系统，使试样表面获得充分、均匀的照明。

显微镜调焦装置：在显微镜的两侧有粗动和微动调焦旋钮，两者在同一部位。随着粗动调焦手轮 5 转动，通过内部齿轮传动，使支撑载物台的弯臂做上下运动。在粗动调焦旋钮的一侧有制动装置，用以固定调焦正确后载物台的位置。微动调焦手轮 6 转动内部一组齿轮，使其沿着滑轨缓慢移动。在右侧旋钮上刻有分度格，每一格表示物镜座上下微动 0.002mm。与刻度同侧的齿轮箱上刻有两条白线，用以指示微动升降的极限范围，微调时不能超出这一范围，否则将会损坏机件。

载物台（样品台）：用于放置金相试样。载物台和下面托盘之间有导架，在手的推动下，可使载物台在水平面上作一定范围的移动，以改变试样的观察部位。

孔径光栏和视场光栏：在目镜的镜筒中抽出目镜，可直接用肉眼观察到物镜的孔径光栏（圆形透光孔），旋转孔径光栏的滚花圈，使光栏缩小，直至目视能观察到多边形的可变孔径光栏，使可变孔径光栏小于物镜的孔径光栏，如图 1-6。

图 1-6 (a) 为不正确的调节，可变孔径光栏太小，影响仪器的分辨率；图 1-6 (b) 为正确的调节，可变孔径光直径约为物镜孔径光直径的 3/4 左右。此时，较好且仪器的分辨能力较高；图 1-6 (c) 为不正确的调节，可变孔径光栏过大，使成像的对比度急剧下降，仪器

的实际分辨能力也随之迅速下降。

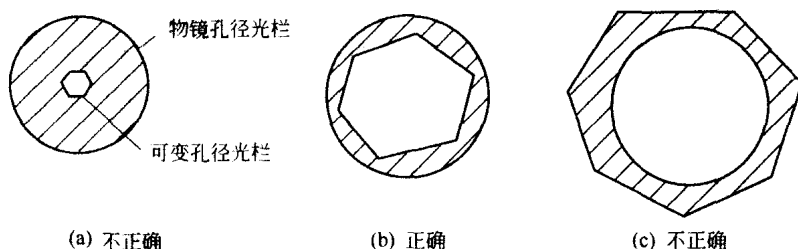


图 1-6 孔径光栏演示

视场光栏的作用是控制视场范围，使目镜中视场明亮而无阴影。在刻有直纹的套圈上还有两个调节螺钉，用来调整光栏中心。

物镜转换器：转换器呈球面形，上面有三个螺孔。可安装不同放大倍数的物镜，旋动转换器可使各物镜镜头进入光路，与不同的目镜搭配使用，可获得各种放大倍数。

目镜筒：目镜筒呈 45° 倾斜安装在有棱镜的半球形的座上，还可将目镜转向 90° 呈水平状态以配合照相装置进行金相摄影。

表 1-1 列出了 4X 型金相显微镜的物镜和目镜不同配合情况下的放大倍数。

表 1-1 4X 型金相显微镜的物镜和目镜不同配合情况下的放大倍数

光学系统	目镜 物镜 放大倍数	5×	10×	15×
干燥系统	8×	40×	80×	120×
干燥系统	45×	225×	450×	675×
油浸系统	100×	500×	1000×	1500×

6. 金相显微镜的使用方法及注意事项

金相显微镜是一种精密的光学仪器，必须细心谨慎使用，初次操作显微镜之前，应首先熟悉其构造特点及主要部件的相互位置和作用，然后按照显微镜的使用规程进行操作。

使用 4X 型金相显微镜时，应按下列步骤进行。

i. 根据放大倍数选用所需物镜和目镜。分别安装在物镜座和目镜筒内，并使转换器转至固定位置（由定位器定位）。

ii. 转动载物台，使物镜位于载物台中心孔的中央，然后把金相试样的观察面朝下倒置在载物台上。

iii. 将显微镜的光源插头在变压器上，通过低压（6~8V）变压器接通电源。

iv. 转动粗调旋钮先使载物台下降，使物镜尽可能接近试样表面（但不得与试样相碰），然后向相反方向转动粗调旋钮，使载物台慢慢上升以调节焦距，当视场亮度增强时，再改变微调旋钮进行调节，直到物像调整到最清晰程度为止。

v. 适当调节孔径光栏和视场光栏，以获得最佳质量的物像。

vi. 如果使用金相油浸物镜，则可在物镜的前透镜上滴一点松柏油，也可以将松柏油直接滴在试样上。油镜头用过后应立即用棉花蘸取二甲苯溶液擦干净，再用镜头纸擦干。

在使用金相显微镜时，一般应注意以下事项。

i. 金相试样要干净，不得残留有酒精和侵蚀剂，以免腐蚀显微镜的镜头，更不能用手指接触镜头，若镜头落有灰尘时，可用镜头纸擦拭。

ii. 照明灯泡 (6~8V) 插头, 切勿直接插入在 220V 的电源插座上, 否则灯泡会立即烧坏, 观察结束后, 要及时关闭电源。

iii. 操作时必须特别细心, 不得有粗暴和剧烈的动作, 光学系统不允许自行拆卸。

iv. 在更换物镜或调焦时, 要谨防物镜受碰撞而损坏。

v. 在旋钮粗调 (或微调) 旋钮时, 动作要慢, 碰到某种阻碍时应立即报告, 弄清原因, 不得用力强行转动, 否则会损坏机件。

(二) 电子显微镜

显微镜的分辨本领是指成像物体 (试样) 上能分辨出来的两点之间的最小距离。光学显微镜的分辨本领为

$$d = \frac{\lambda}{2NA}$$

式中 λ ——照明光源的波长。

上式表明: 光学显微镜的分辨本领取决于照明光源的波长。在可见光波长范围, 光学显微镜分辨本领的极限为 200nm。由此可知, 要提高显微镜的分辨本领, 关键是既要有波长短, 又能聚焦成像的照明光源, 这样只有采用短波长的光源。1924 年德布罗意 (De Brolie) 发现电子波的波长比可见光短十万倍。又过了两年, 布施 (Du scb) 指出轴对称非均匀磁场能使电子波聚焦。为一种新的显微镜——电子显微镜的诞生奠定了理论基础。1933 年鲁斯卡 (Ruska) 等设计并制造了世界上第一台透射电子显微镜。

电子显微镜可分为透射式、扫描式、反射式和发射式四种。下面主要介绍扫描电子显微镜的原理和使用范围。

1. 透射电子显微镜

(1) 透射电子显微镜的成像原理

透射电子显微镜是一种具有高分辨率、高放大倍数的电子光学仪器, 被广泛应用于材料科学等研究领域。透射电镜以波长极短的电子束作为光源, 电子束经由聚光镜系统的电磁透镜将其聚焦成一束近似平行的光线穿透样品。再经成像系统的电磁透镜成像和放大, 然后电子束投射到镜筒最下方的荧光屏上而形成所观察的图像。透射电子显微镜的加速电压为 80~3000kV; 分辨率中的点分辨率为 0.2~0.35nm, 线分辨率为 0.1~0.2nm; 最高放大倍数达 (30~100) 万倍。在材料科学研究领域, 透射电子显微镜主要可用于材料微区的组织形貌观察、晶体缺陷分析和晶体结构测定。

(2) 透射电子显微镜的结构

透射电子显微镜由电子光学系统、真空系统和电子系统三部分组成。电子光学系统通常称镜筒, 是透射电子显微镜的核心, 它的光路原理与透射光学显微镜十分相似, 如图 1-7 所示。它分为三部分, 即照明系统、成像系统和观察记录系统。

① 照明系统 由电子枪、聚光镜和相应的平移对中、倾斜调节装置组成。电子枪是透射电子显微镜的电子源, 其作用是提

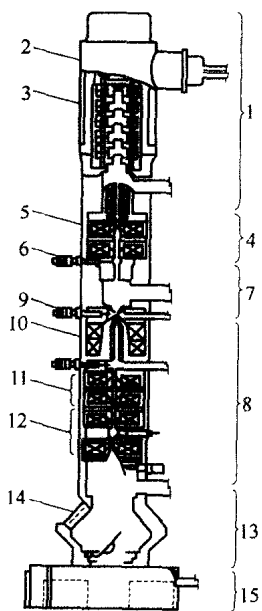


图 1-7 透射电子显微镜结构

- 1—电子枪; 2—灯丝; 3—加速管;
4—照明透镜系统; 5—聚光镜;
6—聚光镜光栏; 7—样品室;
8—成像透镜系统; 9—物镜光栏;
10—物镜; 11—中间镜;
12—投影镜; 13—观察室;
14—观察窗; 15—照相室

供一束亮度高、照明孔径角小、平行度好、束流稳定的照明光源，聚光镜用电子枪射出的电子束来会聚在样品的表面上。

② 成像系统 主要是由物镜、中间镜和投影镜组成。

物镜是用来形成第一幅高分辨率电子显微图像或电子衍射花样的透镜。透射电子显微镜分辨本领的高低主要取决于物镜。必须尽可能获得物镜的高分辨本领，降低像差。通常采用强激磁、短焦距的物镜，并在物镜的后焦面上安放一个物镜光阑。物镜光阑不仅具有减小球差、像散和色差的作用，而且可以提高图像的衬度。像差小，分辨高。在用电子显微镜进行图像分析时，物镜和样品之间的距离总是固定不变的（即物距不变）。因此改变物镜放大倍数进行成像时，主要是改变物镜的焦距和像距来满足成像条件。

中间镜是一个弱激磁的长焦距变倍透镜，可在0~20倍范围调节。当放大倍数大于1时用来进一步放大物镜像；当放大倍数小于1时，用来缩小物镜像。在电镜操作过程中，主要是利用中间镜的可变倍率来控制电镜的总放大倍数。如果物镜的放大倍数 $M=100$ ，投影镜的放大倍数 $M=100$ ，则中间镜放大倍数 $M=20$ 时，总放大倍数 $M=100 \times 20 \times 100 = 200000$ 倍。若 $M=1$ ，则总放大倍数为10000倍。如果 $M=1/10$ ，则放大倍数仅为1000倍。如果把中间镜的物平面和物镜的像平面重合，则在荧光屏上得到一幅放大像，这就是电子显微镜中的成像操作。

投影镜作用是把经中间镜放大（或缩小）的像（或电子衍射花样）进一步放大，并投影到荧光屏上，它和物镜一样，是一个短焦距的强磁透镜。投影镜的激磁电流是固定的。因为成像电子束进入投影镜时孔径角很小，因此它的景深和焦长都非常大。即使改变中间镜的放大倍数，使显微镜的总放大倍数有很大的变化，也不会影响图像的清晰度。

③ 观察和记录系统 包括荧光屏和照相机构。在荧光屏下面放置一个可以自动换片的照相暗盒。因为人眼不能直接看到电子射线，所以必须利用电子在荧光屏上激发出可见光成像来进行观察。若需要记录图像，可移开荧光屏，使置于荧光屏下的照相底片曝光成像，再经冲洗，即可得到一幅所需的照片，以便永久保存。若和电子计算机连接，通过模数转换器将图像进行数字化处理并将图形数据输入到计算机中，然后用图像处理和数字化分析软件对采集到的图像进行分析，图像处理主要进行数据计算、绘制图表等；数字化分析主要根据计算数据进行统计、分析并输出金属材料的组织参数与性能对照表。最后可用电子计算机的输出系统输出图片。

为保证电镜正常工作，要求电子光学系统应处于真空状态下。电镜的真空度一般应保持在 $10 \sim 5 \text{ Pa}$ ，这需要机械泵和油扩散泵两级串联才能得到保证。目前的透射电镜增加一个离子泵以提高真空度，真空度可高达 $133.322 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ 或更高。如果电镜的真空度达不到要求会出现以下问题：

- i. 电子与空气分子碰撞改变运动轨迹，影响成像质量；
- ii. 栅极与阳极间空气分子电离，导致极间放电；
- iii. 阴极炽热的灯丝迅速氧化烧损、缩短使用寿命甚至无法正常工作；
- iv. 试样易于氧化污染，产生假象。

电子显微镜的电子系统主要有高压发生器及电子枪灯丝加热电源、稳压电路和安全自控电路及计算机控制电路部分组成。

(3) 透射电子显微镜的样品制备

由于试样对电子束的强烈散射作用，使电子束的穿透能力比较低。用于透射电子显微镜

的分析样品非常薄，一般在 5~500nm 之间。要制成这样薄的样品，必须通过一些特殊的方法，目前主要常用的样品制备方法如下。

- ① 间接样品 一级复型、二级复型和萃取复型。
- ② 半间接样品 萃取复型。
- ③ 直接样品 金属薄膜。

2. 扫描电子显微镜

(1) 扫描电子显微镜的成像原理

扫描电子显微镜的成像原理和透射电子显微镜完全不同。它不用电磁透镜放大成像，而是以类似电视摄影成像的方式，利用细聚焦电子束在样品表面扫描时激发出来的各种物理信号（如二次电子、俄歇电子、背射电子、吸收电子、标识 X 射线及透射电子等），这些信号经检测器接收、放大并转换成调制成像的。最后在荧光屏上显示反映样品表面各种特征的图像。新式扫描电子显微镜的二次电子像的分辨率已达到 3~4nm，放大倍数可从数倍原位放大到 20 万倍左右，且在一定范围内（几十倍到几十万倍）可以实现连续调整。扫描电镜所需的加速电压比透射电镜要低得多，一般约在 1~30kV，最常用的加速电压约在 20kV 左右。

由于扫描电子显微镜的景深远比光学显微镜大，图像立体感强，放大倍数范围大、连续可调、分辨率高、样品室空间大且样品制备简单等特点，可以用它进行显微断口分析。用扫描电子显微镜观察断口时，样品不必复制，可直接进行观察，这给分析带来极大的方便。因此，目前显微断口的分析工作大都是用扫描电子显微镜来完成的。由于电子枪的效率不断提高，使扫描电子显微镜的样品室附近的空间增大，可以装入更多的探测器。因此，目前的扫描电子显微镜不只是分析形貌像，它可以和其他分析仪器相组合，使人们能在同一台仪器上进行形貌、微区成分和晶体结构等多种微观组织结构信息的同位分析。

(2) 扫描电子显微镜的结构

扫描电子显微镜的基本结构可分为三大部分，即电子光学系统、信号收集处理和图像显示及记录系统、真空系统（图 1-8）。

① 电子光学系统 包括电子枪、电磁透镜、扫描线圈和样品室。

扫描电子显微镜中的电子枪与透射电子显微镜的电子枪相似，只是加速电压比透射电子显微镜低。

扫描电子显微镜中各电磁透镜都不作成像透镜用，而是作聚光镜用，它们的功能是把电子枪的束斑（虚光源）逐级聚焦缩小，这样必须用几个透镜来完成。扫描电子显微镜一般都有三个聚光镜，前两个聚光镜是强磁透镜，把电子束光斑缩小；第三个透镜是弱磁透镜，具有较长的焦距，这个透镜称为物镜，目的在于使样品室和透镜之间留有一定的空间，以便装入各种信号探测器。扫描电子显微镜中照射到样品上的电子束直径越小，就相当于成像单元的尺寸越小，相应的分辨率就越高。

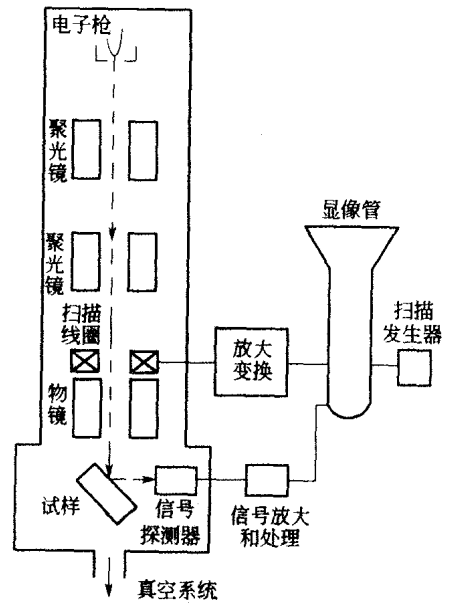


图 1-8 扫描电子显微镜结构原理方框图

扫描线圈的作用是使电子束偏转，并在样品表面作有规则的扫动，电子束在样品上的扫描动作和显像管上的扫描动作保持严格同步，因为它们是受同一扫描发生器控制的。在电子束偏转的同时还带有一个逐行扫描动作，电子束在上下偏转线圈的作用下，在样品表面扫描出方形区域，相应地在样品上也画出一帧比例图像。样品上各点受到电子束轰击时发出的信号可由信号探测器接收，并通过显示系统在显像管荧光屏上按强度描绘出来。

样品室内除放置样品外，还安置信号探测器。各种不同信号的收集和相应检测器的安放位置将直接影响信号的接收，从而影响分析精度。

样品台本身是一个复杂而精密的组件。它应既能夹持一定尺寸的样品，又要能使样品作平移、倾斜和转动等运动，以便于对样品上每一特定位置进行各种分析。它还可以带有多种附件，可使样品在样品台上加热、冷却和进行力学性能试验（如拉伸和疲劳）。

② 信号收集处理和图像显示及记录系统 二次电子、背散射电子和透射电子的信号都可采用闪烁计数器来进行检测。信号电子进入闪烁体后即引起电离，当离子和自由电子复合后就产生可见光。可见光信号通过光导管送入光电倍增器，光信号放大，即又转化成电流信号输出，电流信号经视频放大器放大后就成为调制信号。如前所述，由于镜筒中的电子束和显像管中电子束是同步扫描的，而荧光屏上每一点的亮度是根据样品上被激发出来的信号强度来调制的，因此样品上各点的状态各不相同，所以接收到的信号也不相同，于是就可以在显像管上看到一幅反映试样各点状态的扫描电子显微图像。

③ 真空系统 为保证扫描电子显微镜电子光学系统的正常工作，对镜筒内的真空度有一定的要求。一般情况下，如果真空系统能提供 $1.33 \times 10^{-2} \sim 1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ ($10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ mmHg}$) 的真空度时，就可防止样品的污染。如果真空度不足，除样品被严重污染外，还会出现灯丝寿命下降，极间放电等问题。

(3) 扫描电子显微镜的样品制备

扫描电镜的优点之一是样品制备简单，对于新鲜的金属断口样品不需要做任何处理，可以直接进行观察。但在有些情况下需对样品进行必要的处理。

i. 样品表面附着有灰尘和油污，可用有机溶剂（乙醇或丙酮）在超声波清洗器中清洗。

ii. 样品表面锈蚀或严重氧化，采用化学清洗或电解的方法处理。清洗时可能会失去一些表面形貌特征的细节，操作过程中应该注意。

iii. 对于不导电的样品，观察前需在表面喷镀一层导电金属或碳，镀膜厚度控制在 $5 \sim 10 \text{ nm}$ 为宜。

二、金相试样的制备

为了对金相显微组织进行鉴别和研究，需要将所分析的金属材料制备成一定尺寸的试样，并经磨制抛光与腐蚀等工序，最后通过金相显微镜来观察与分析金属的显微组织状态及其分布情况。

金相样品制备的质量，直接影响到组织分析的结果。如果样品制备不符合特定的要求，就有可能由于出现假象而得出错误的判断，使整个分析得不到正确的结论。因此，为了得到合乎要求的金相试样，需要经过一系列严格操作的制备过程。

(一) 取样

取样是进行金相显微分析中很重要的一步，要根据被检验和分析金属材料或零件的特点、加工工艺、失效形式及不同的研究目的进行选择，取其具有代表性的部位。

1. 取样部位及检验面的选择

取样部位及检验面的选择应具有最好或较好的代表性。例如：在检验和分析失效零件损坏原因时，除了在损坏部位取样外，还需要在距破坏处较远的部位截取试样，以便分析比较；在研究金属铸件组织时，由于偏析现象的存在，必须从表面到中心，同时取样进行观察；对于轧制和锻造材料则应同时截取横向（垂直于轧制方向）及纵向（平行于轧制方向）的金相试样，以便于分析比较表层缺陷及非金属夹杂物的分布情况；对于一般经热处理后的零件，由于金相组织比较均匀，试样截取可在任一截面进行；对于焊接结构，通常应在焊接接头处截取包含熔合区及过热区的试样。

2. 取样的方法

截取试样时首先要保证检验部位的金相组织不发生变化。试样的截取方法视材料的性质不同而异，软材料可用手锯或锯床等方法截取，硬材料可用带冷却水的砂轮切割机或线切割机机床截取，硬而脆的材料（如白口铁）可用锤击取样。

3. 试样的尺寸

试样的大小视具体情况而定，一般以便于握持，易于磨制为准。通常方形试样边长为12~15mm，圆形试样为 $\phi 12 \times 15$ （图1-9）。对尺寸过小，形状不规则的试样如薄片、细丝、细管等不易握持磨制的则要求进行镶样。

4. 镶嵌

镶样多采用热压镶样法和机械镶样法（图1-10）。热压镶样法是将试样放在电木粉或塑料粒中加热到110~156℃，在镶样机上进行热压形成。由于热压镶嵌需要一定的温度和压力，不适合于低温发生组织转变（如淬火马氏体）的材料和较易产生塑性变形的低熔点金属材料。

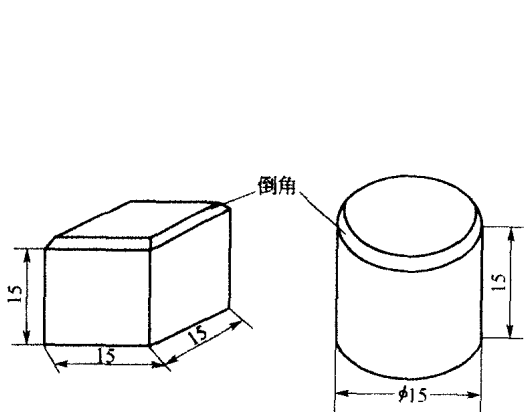


图 1-9 金相试样的尺寸

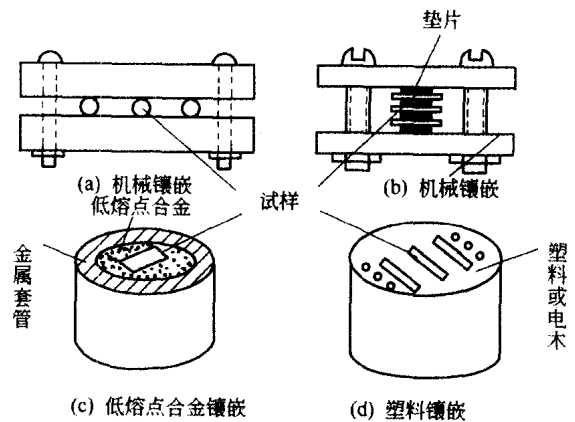


图 1-10 金相试样的镶嵌方法

机械镶样法即设计专门的夹具夹持试样，以避免热压镶嵌的不足。

(二) 磨样

试样磨制分为粗磨和细磨。磨制方法有手工磨样和机械磨样。

1. 手工磨样

粗磨一般在砂轮机上进行，手工磨样时用砂轮侧面，以保证试样磨平，并不断用水冷却，避免温度升高造成试样内部组织发生变化。试样边缘的棱角若无保留必要，可进行倒角，以免在细磨及抛光时撕破抛光布，甚至造成试样从抛光机上飞出伤人。

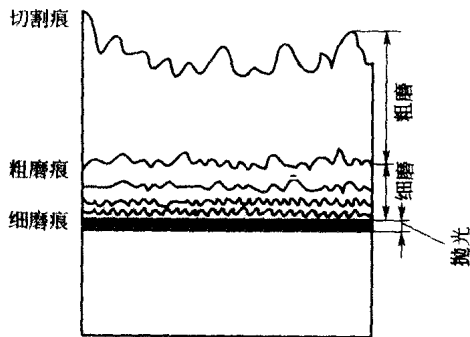


图 1-11 试样磨面上磨痕变化示意

细磨，经粗磨后试样表面虽较平整，但仍存在有较深的磨痕（如图 1-11 所示）。细磨的目的就是为了消除这些磨痕，以得到平整面光滑的磨面，为下一步的抛光做好准备。

细磨时用手握持试样，并使磨面朝下，均匀用力向前推行。在回程时，应提起试样不与砂纸接触，以保证磨面平整而不产生弧度。金相砂纸按粗细分为 180 目、280 目、320 目、400 (01) 目、500 (02) 目、600 (03) 目、800 (04) 目。并不是所有的试样都需要从粗到细磨一遍，砂纸的选择可视钢料的软硬情况而定。对于一般碳钢样品选用从 180~800 目砂纸。每更换一号砂纸时，应先将试样清洗干净，以免把粗砂粒带到下一级砂纸上去，再将试样的磨制方向调转 90°，即磨制方向与上一道磨痕方向垂直，以便观察上一道磨痕是否全部消除。

2. 机械磨样

为了加快磨制速度，除手工磨制外，还以将不同型号的水砂纸贴在带有旋转圆盘的预磨机上，实现机械磨制。水砂纸按粗细有 180 目、200 目、300 目、400 目、500 目、600 目、700 目、800 目、900 目等。用水砂纸盘磨样时，应不断加水冷却。同样，每换一道砂纸时，要用水冲洗干净，也要调换 90° 方向。

(三) 抛光

细磨后的试样还需要进行最后一道磨制工序——抛光，其目的是去除细磨时遗留下来的细磨痕，以获得光亮无痕的镜面。

试样的抛光一般可分为：机械抛光、电解抛光和化学抛光。

1. 机械抛光

机械抛光是在专用抛光机上进行的。抛光机的主要结构是由电动机和水平抛光盘组成，转速 300~500r/min。抛光盘上辅助以细帆布、呢绒、丝绒等抛光织物。抛光时在抛光盘上不断滴注抛光液，抛光通常采用 Al_2O_3 、 MgO 或 Cr_2O_3 等细粉末（粒度约 0.3~1 μm ）在水中的悬浮液（每升水中加入 Al_2O_3 5~10g）或采用极细钻石粉制成的膏状抛光剂等。 Al_2O_3 又称刚玉，白色透明，用于粗抛和精抛。 MgO 白色，适用于铝、镁及其合金等软性材料的最后精抛。 Cr_2O_3 具有很高的硬度，适合于淬火后的合金钢，高速钢以及钛合金的抛光。

机械抛光就是靠极细的抛光粉与磨面间产生的相对磨削和滚压作用来消除磨痕。操作时将试样磨面均匀地压在旋转的抛光盘上（可先轻后重）并沿盘的边缘到中心不断做径向往复移动，抛光时间一般约 3~5min，最后抛光后，试样表面应看不出任何磨痕而呈光亮的镜面。需要指出的是抛光时间不宜过长，压力也不可过大，否则将会产生扰乱层而导致组织分析得出错误的结论。