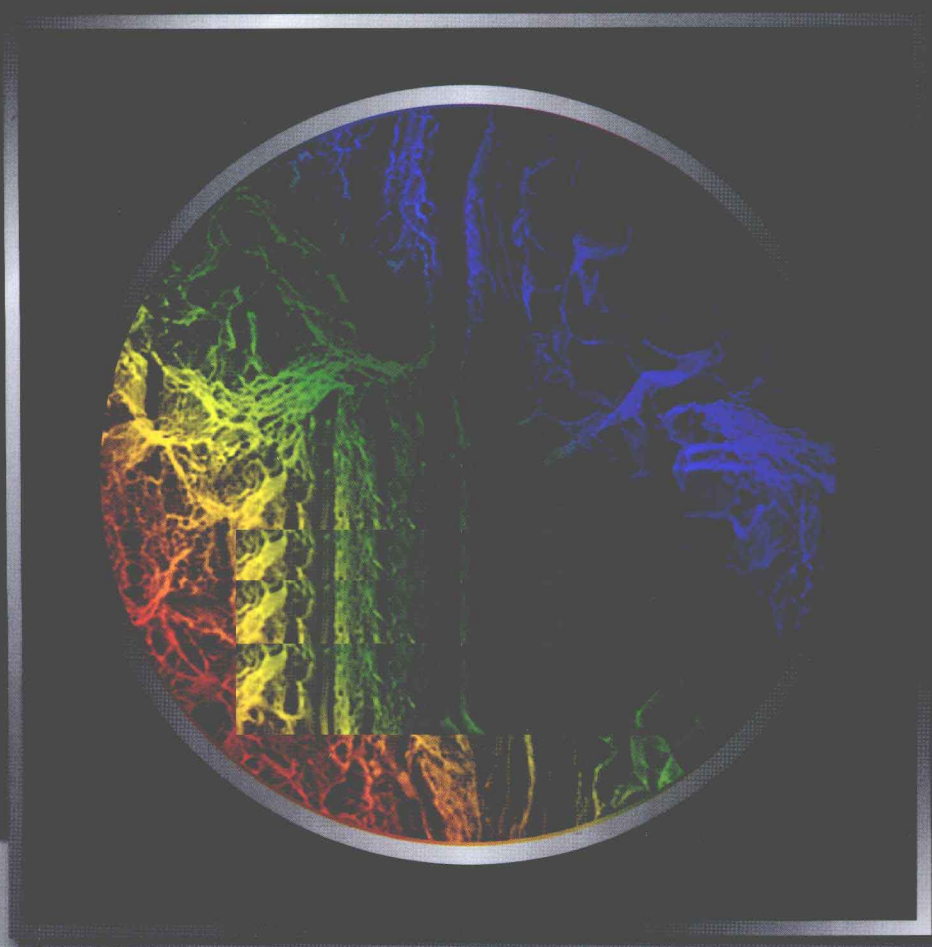


金相检验实用技术

胡义祥 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

金相检验实用技术

主 编 胡义祥
副主编 孙盛玉
参 编 何成修 黑祖昆 陈騑馥



机械工业出版社

前 言

金相检验是一门实用性很强的技术学科，在发达国家把它称之为“**Practical Metallography**”，即“实用金相学”，意在强调实用性。特别是在生产企业中，金相检验工作不仅是对原材料、加工过程的半成品及成品的质量是否合格进行评定，而且还担当失效分析的重任。因此，金相检验工作者的任务是很繁重的，不仅需要熟悉金相学及有关基础知识、各种标准，还必须学习相关学科以及新兴学科的知识，如断裂力学、断口金相学、定量金相学等知识。本书主编、副主编和参编人员为大连大型钢铁企业、机械制造企业的中心实验室以及高校金属材料专业的专家，他们数十年从事理化检验，尤其侧重金相检验方面，并在大连市理化检验协会的组织领导下，一直在该领域发挥作用。他们在钢铁材料金相检验技术、金属热加工过程的热处理缺陷分析以及机械构件失效分析等方面积累了大量的典型案例。因此，书中钢铁材料金相检验、热处理缺陷分析和失效分析等章节篇幅较大，针对性、实用性强。在大连地区金相检验人员多次培训班的实践证明，这些典型案例的分析进一步开启了金相检验人员的思路，极大地提高了他们金相检验工作的理论和实际水平；而金相检验技术延伸到扫描电镜和透射电镜及图像分析等新技术的探索，开阔了金相检验人员的新视野和新思路，为解决生产现场的实际问题，提供了新途径。

全书共分7章。第1章由大连海事大学黑祖昆教授和大连机车车辆有限公司胡义祥高级工程师编写；第2章、第3章由东北特钢集团何成修高级工程师和大连理工大学陈駉教授编写；第5章由大连重工-起重集团公司孙盛玉高级工程师和大连理工大学陈駉教授编写；第4章、第6章、第7章由大连机车车辆有限公司胡义祥高级工程师编写；全书由胡义祥高级工程师担任主编，孙盛玉高级工程师担任副主编。

本书获得大连市人民政府出版赞助。在本书编写过程中得到了大连机车车辆有限公司、道依茨大连柴油机厂、大连重工-起重集团公司、大连理工大学、大连海事大学、大连交通大学等单位金相室的大力支持和帮助，参考引用了国内外相关图书的有关内容，在此一并向有关单位和有关作者表示衷心感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 金相检验设备及技术延伸	1
1.1 金相显微镜	2
1.1.1 金相显微镜的基本原理	2
1.1.2 金相显微镜的构造	3
1.1.3 金相显微镜的操作	4
1.1.4 金相试样的制备	4
1.1.5 视频照相技术	7
1.2 显微硬度计	8
1.2.1 显微硬度计的工作原理	8
1.2.2 显微硬度计的使用	8
1.3 图像分析仪(定量金相)	11
1.3.1 图像分析仪的原理及功能简介	11
1.3.2 图像分析仪在金相分析中的应用	12
1.4 扫描电镜	14
1.4.1 扫描电镜的工作原理	14
1.4.2 扫描电镜的特点	15
1.4.3 扫描电镜的主要结构	16
1.4.4 扫描电镜主要指标	16
1.4.5 样品的制备	16
1.4.6 扫描电镜图像衬度观察	17
1.5 透射电子显微镜	19
1.5.1 透射电子显微镜的结构和成像原理	19
1.5.2 透射电镜图像的衬度	21
1.5.3 电子显微镜在金相学或材料学中的应用	22
1.6 金相检验技术延伸及探索	23
1.6.1 用定量金相法测定球墨铸铁中碳偏析	24
1.6.2 用图像仪演示球墨铸铁中铁素体生长动力学	26
1.6.3 用图像仪模拟结晶动力学	29
第 2 章 钢材的宏观检验技术	32
2.1 钢锭的结晶过程及缺陷的分布	32
2.2 酸浸试验	33
2.2.1 试样制备	34
2.2.2 试验方法	34
2.2.3 各种低倍缺陷的特征、评级原则、形成原因及消除方法	37
2.3 断口检验	44

2.3.1 对试样的要求	44
2.3.2 试验方法	44
2.3.3 断口组织和缺陷的分类及鉴别方法	45
2.4 塔形发纹检验	49
2.4.1 对试样的要求	49
2.4.2 试验方法	49
2.4.3 发纹的形成原因及消除方法	49
2.4.4 发纹的识别	50
2.5 硫印试验	51
2.5.1 硫在钢中的分布及影响	51
2.5.2 硫印检验方法	51
2.6 无损探伤法	52
2.6.1 磁粉探伤	52
2.6.2 超声波探伤	53
第3章 钢铁材料的金相检验	55
3.1 钢中常见的金相组织	55
3.1.1 铁素体	55
3.1.2 奥氏体	55
3.1.3 渗碳体	56
3.1.4 珠光体	56
3.1.5 莱氏体	58
3.1.6 贝氏体	59
3.1.7 马氏体	59
3.1.8 魏氏组织	61
3.2 合金元素在钢中的作用	61
3.3 金相试样的热处理	63
3.3.1 非金属夹杂物试样的热处理	63
3.3.2 网状碳化物试样的热处理	63
3.3.3 带状碳化物及带状组织试样的热处理	66
3.3.4 轴承钢碳化物液析试样的热处理	66
3.3.5 碳化物不均匀性试样的热处理	66
3.3.6 石墨碳试样的热处理	67
3.4 晶粒度的测定	67
3.4.1 金属平均晶粒度测定方法	67
3.4.2 低碳钢冷轧薄板铁素体晶粒度测定法	74
3.5 脱碳层的测定	76
3.5.1 脱碳层的测定原则	77
3.5.2 脱碳层的测定方法	79
3.5.3 脱碳层测定注意事项	80
3.6 球化组织的检验	81
3.6.1 球化退火的原理	81
3.6.2 球化组织的检验方法	82

3.6.3 球化组织检验注意事项	82
3.7 钢中非金属夹杂物的检验	83
3.7.1 钢中常见非金属夹杂物类型	83
3.7.2 钢中非金属夹杂物的检验方法	84
3.7.3 钢中非金属夹杂物检验注意事项	84
3.7.4 钢中非金属夹杂物含量的测定——标准评级图显微检验法	84
3.8 显微裂纹的检验	87
3.9 碳化物液析的检验	88
3.10 滚动轴承钢带状碳化物的检验	89
3.11 结构钢带状组织的检验	90
3.12 网状碳化物的检验	92
3.13 碳化物不均匀度的检验	93
3.13.1 碳化物不均匀度的检验方法	93
3.13.2 碳化物不均匀度检验注意事项	94
3.13.3 钢的共晶碳化物不均匀度评级法	94
3.14 钢中石墨碳的检验	95
3.15 石墨钢石墨形状的检验	96
3.16 奥氏体钢中 α 相的测定	97
3.17 钢中马氏体的金相检验	100
3.17.1 低碳马氏体钢的金相检验	100
3.17.2 中碳钢与中碳合金结构钢马氏体的金相检验	100
3.18 医用不锈钢的金相检验	101
3.19 铸铁的金相检验	102
3.19.1 白口铸铁及其金相检验	102
3.19.2 灰铸铁及其金相检验	104
3.19.3 球墨铸铁及其金相检验	108
第4章 非铁金属材料的金相检验	112
4.1 铝及铝合金的金相检验	113
4.1.1 概述	113
4.1.2 铝及铝合金的金相组织	113
4.1.3 铝合金的金相检验方法	122
4.2 铜及铜合金的金相检验	124
4.2.1 概述	124
4.2.2 铜及铜合金的金相组织	125
4.2.3 铜及铜合金的金相检验方法	132
4.3 镁合金的金相检验	133
4.3.1 概述	133
4.3.2 镁合金的金相组织	134
4.3.3 镁合金的金相检验方法	135
4.4 钛及钛合金的金相检验	136
4.4.1 概述	136
4.4.2 钛合金的金相组织	136

4.4.3 钛合金的金相检验方法	139
4.5 硬质合金的金相检验	139
4.5.1 概述	139
4.5.2 硬质合金的金相组织	139
4.5.3 硬质合金的金相检验方法	142
4.6 粉末冶金制品的金相检验	142
4.6.1 概述	142
4.6.2 粉末冶金制品的金相组织	143
4.6.3 粉末冶金制品的金相检验方法	145
4.7 轴承合金的金相检验	146
4.7.1 概述	146
4.7.2 轴承合金的金相组织	147
4.7.3 轴承合金的金相检验方法	150
第5章 金属热加工过程的缺陷分析	151
5.1 铸造缺陷	151
5.1.1 气孔	151
5.1.2 疏松	152
5.1.3 缩孔	153
5.1.4 夹杂	154
5.1.5 偏析	155
5.1.6 金相组织缺陷	155
5.2 锻造缺陷	155
5.2.1 原材料缺陷造成的锻件缺陷	155
5.2.2 落料不当造成的锻件缺陷	156
5.2.3 锻造工艺不当造成的缺陷	156
5.3 热处理缺陷	157
5.3.1 热处理裂纹	157
5.3.2 热处理变形	204
5.4 焊接接头缺陷	207
5.4.1 裂纹	207
5.4.2 孔穴	209
5.4.3 固体夹杂	210
5.4.4 未熔合和未焊透	210
5.4.5 形状缺陷	211
5.4.6 其他缺陷	212
第6章 失效分析基础	213
6.1 失效分析的思路及方法	213
6.1.1 失效分析的思路	213
6.1.2 失效分析的方法	213
6.2 机械构件失效的主要形式及其分析	215
6.2.1 断裂特征及其分析	215
6.2.2 表面损伤失效	233

第 7 章 失效分析案例	240
7.1 由“痕迹”分析追查失效原因	240
7.1.1 2942kW (4000 马力) 柴油机主轴瓦剥落碎粒分析	240
7.1.2 汽车发动机三元催化器网眼堵塞残留物分析	241
7.1.3 汽车柴油机滤清器网上残留物分析	244
7.1.4 推力瓦发热预报分析	248
7.2 材料缺陷引起的失效	253
7.2.1 转子滤脆断分析	253
7.2.2 活塞销断裂分析	254
7.2.3 弹簧座原材料裂纹分析	255
7.2.4 车钩焊补引起裂纹	257
7.3 热加工工艺不当引起的失效	259
7.3.1 38CrMoAl 齿轮掉渣	259
7.3.2 叉车方向联轴器断裂分析	260
7.3.3 发电机转子爪断裂分析	262
7.3.4 齿轮两端齿根未淬硬引起断裂	262
7.4 刀痕及零件设计结构不合理造成应力集中引起的失效	263
7.4.1 连杆螺栓螺纹根部刀痕引起的断裂	263
7.4.2 结构设计不当造成连杆盖断裂	266
7.4.3 结构设计不当造成齿轮断裂	269
7.4.4 气缸套冷加工失误引起断裂	272
7.5 装配及运用中过载造成的失效	274
7.5.1 高速钢刀过载二次淬火开裂	274
7.5.2 连杆螺栓装配过程中过载断裂	275
7.5.3 叉车扭锁销切断分析	278
7.5.4 橡塑机齿轮轴失效分析	280
7.6 磨损及环境引起的失效	286
7.6.1 从动齿轮剥落及下凹失效分析	286
7.6.2 凸轮轴磨裂	289
7.6.3 铝活塞应力腐蚀开裂	290
7.6.4 柴油机高压油管应力腐蚀	291
7.6.5 弹簧垫氢脆断裂	293
7.6.6 油泵油嘴氢脆断裂	294
7.7 2942kW (4000 马力) 内燃机车球墨铸铁曲轴综合失效分析及质量改进	295
7.7.1 抱轴引起的失效	296
7.7.2 水锤引起的断裂	297
7.7.3 球化不良引起的失效	298
7.7.4 疲劳断裂及质量改进	301
参考文献	306

第 1 章 金相检验设备及技术延伸

金相分析是研究材料内部组织结构的主要方法之一，特别是在金属材料研究领域中有很重要的地位。金相显微镜是进行显微分析的主要工具，利用金相显微镜在专门制备的试样上观察材料的组织和缺陷的方法，称为金相显微分析。显微分析可以观察、研究材料中存在的相的形貌、晶粒大小，以及这些相和非金属夹杂物（氧化物、硫化物等）在组织中的数量和分布情况等问题，根据材料的组织结构与其化学成分之间的关系，可以确定各类材料经不同加工工艺处理后的显微组织，并以此判别材料的性能及质量的优劣等。金相学的诞生已经有一个多世纪了，作为现代金相的重要组成部分及研究方法之一，光学显微镜在金属材料的宏观和微观检验中发挥着重要的作用，尤其以其直观、便捷等特点在金相组织鉴别和缺陷分析中得到了广泛应用，并已成为一门成熟的学科。随着科学技术的发展，金相学也在不断充实新的内容和扩大它的领域。首先，观察手段的改进使金相学起了明显的变化。随着光学显微技术的发展，从显微镜光学系统的设计到观察方式都有了很大的进步，进一步提高了观察的效果和效率。特别是近年来数码影像系统的发展，使影像数字化，并为定量金相分析提供了条件。目前，它的主要发展趋势是定量金相学，也就是把光学显微镜配上电子计算机，对显微组织的一些特征进行定量的分析。同时，针对材料研究的多样化要求，显微镜各种功能的模块化设计为扩展显微镜的功能提供了一个好的平台，如电动台、加热台等，从而可以非常方便地搭载，为多视场金属夹杂物的评定以及对高温或低温条件下组织转变的研究提供了便利。金相分析作为常规检验手段之一，为了提高工作效率，也促使显微镜的自动化程度大幅度的提高，例如自动聚焦、物镜电动转化、观察方式电动转换，甚至显微镜完全由计算机操控都可实现，为材料科学研究和产品质量控制提供了有利的工具。

光学显微镜虽然有简单方便的优点，但是它的分辨率不高。由于光波波长的限制，金相显微镜的放大倍数为几十倍到 2000 倍，极限分辨率为 250nm 左右，一般仅能观察金相组织中几十微米尺度的细节。而且，也不能给出有关相的晶体结构、取向、缺陷和成分的信息。若要观察材料的更精细结构，如嵌镶块等，则要用放大倍数可达几万到几十万倍的透射电子显微镜或扫描电子显微镜及 X 光射线能谱技术等。为了获得更高的分辨率以观察更细微的内部结构，20 世纪 30 年代初研制成功了透射式电子显微镜。经过半个世纪的发展，它的分辨率已接近或达到分辨单个原子的水平。这些电子光学仪器不但有极高的分辨率，并且能进行微区电子衍射分析，给出有关的晶体结构数据，而且能确定有关相之间的取向关系和内部缺陷。后来，为了观察凹凸不平的大块试样（断口），扫描电子显微镜又应运而生，配上 X 射线谱仪及电子能量谱仪后，还能进行小到几纳米范围的化学成分分析。总之，电子显微镜（包括透射电镜和扫描电镜）使我们对金属的显微组织结构的研究深入到原子的层

次,是光学显微分析的重要补充,已经成为现代金相学研究必不可少的重要手段。本章拟就金相分析常用的光学和电子分析仪器的基本原理和应用作些简单的介绍,供读者参考。

1.1 金相显微镜

1.1.1 金相显微镜的基本原理

金相显微镜的基本原理如图 1-1 所示。它包括两个透镜:物镜和目镜。对着被观察物体的透镜,称为物镜;对着人眼的透镜,称为目镜。被观察物体 AB 放在物镜前比焦点 F_1 略远一点的地方。物镜会使物体 AB 在目镜的焦点 F_2 处形成放大的倒立实像 A_1B_1 ,目镜再把 A_1B_1 放大成倒立的虚像 $A_1'B_1'$,若它正在人眼明视距离处,即距离人眼 250mm 处,人眼即可通过目镜看到这个虚像 $A_1'B_1'$ 。

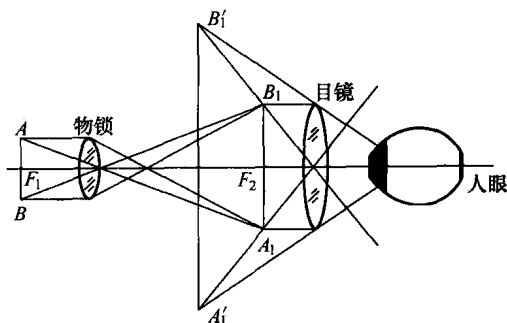


图 1-1 显微镜成像的光学简图

显微镜的主要性能如下:

1. 显微镜的放大倍数

显微镜的放大倍数等于物镜和目镜单独放大倍数的乘积,即物镜放大倍数 $M_{\text{物}} = A_1B_1/AB$;目镜放大倍数 $M_{\text{目}} = A_1'B_1'/A_1B_1$;显微镜放大倍数 $M = A_1'B_1'/AB = M_{\text{物}} \times M_{\text{目}}$ 。物镜和目镜的放大倍数分别刻在各自镜筒上,例如:10×、20×、45×分别表示放大 10 倍、20 倍、45 倍。

2. 显微镜的分辨率

显微镜的分辨率是指显微镜能清晰地分辨试样上两点间最小距离 d 的能力。 d 值越小,分辨率就越高。分辨率是显微镜的一个最重要的性能,它决定于物镜数值孔径 A 和所用的光线波长 λ ,可用下式确定:

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

式中 λ ——入射光线的波长;

A ——物镜的数值孔径。

λ 越小, A 越大,则 d 越小。光线的波长可通过滤色片来选择。蓝光的波长 ($\lambda = 0.44\mu\text{m}$) 比黄光、绿光的波长大 25%。当光线波长一定时,可改变物镜数值孔径来调节显微镜的分辨率。

3. 物镜数值孔径

物镜数值孔径表示物镜的集光能力,其大小为:

$$A = n \sin \alpha$$

式中 n ——物镜与试样之间介质的折射率;

α ——物镜孔径角的一半,如图1-2所示。

n 越大或 α 角越大,则 A 越大。由于 α 总是小于 90° ,当介质为空气时($n=1$), A 一定小于1;当介质为松柏油时($n=1.5$), A 值最高可达1.4。物镜上都刻有 A 值,如0.25、0.65等。

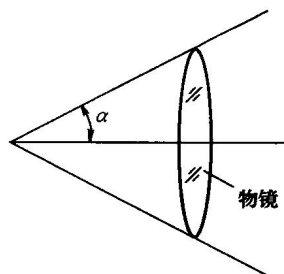


图1-2 物镜的孔径角

1.1.2 金相显微镜的构造

金相显微镜的种类和类型很多,但最常见的形式有台式、立式和卧式三大类。金相显微镜通常由光学系统、照明系统及机械系统三大部分组成。有的显微镜还附带有摄影装置。现以常用的立式金相显微镜为例进行说明。立式金相显微镜的结构如图1-3所示。由光源发出一束光线,经聚光镜组及反光镜汇聚在孔径光栏上,然后经过聚光镜,再度将光线聚集在物镜的后焦面上,最后经过物镜,使试样表面得到充分均匀的照明。从试样反射回来的光线又经物镜、辅助透镜、半反射镜及棱镜造成一个物体的倒立放大实像。该像再经场透镜和目透镜组成的目镜放大,即可得到所观察的试样表面的放大图像。

这种金相显微镜各部件的功能及使用方式简单介绍如下。

1. 照明系统

在底座内装有低压(6~8V)灯泡作为光源,由变压器(最大输出15V)降压供电,靠调节次级电压(6~8V)来改变灯光的亮度。聚光镜、反光镜及孔径光栏等均装在圆形底座上,视场光栏及另一聚光镜安在支架上,它们组成显微镜的照明系统,使试样表面获得充分、均匀的照明。

2. 调焦装置

在传动箱的两侧有粗调和微调焦距手轮,转动粗调焦距手轮可使支承载物台的弯臂作上下移动。微调焦距手轮转动时,使弯臂上下缓慢移动。

3. 载物台

载物台用于放置金相试样,它与下面托盘之间的导架移动结构采用粘性油膜联结,在手的推动下,可使载物台作水平移动,以改变试样被观察的部位。

4. 孔径光栏和视场光栏

孔径光栏装在照明反射镜底座上面,刻有0~5分刻线,表示孔径的大小(mm),视场光栏装在物镜支架下面,可以旋转滚花套圈来调节视场光栏大小。在套圈上方有两个滚花螺钉,用来调节视场光栏中心,通过调节孔径和视场光栏的大小,可以提高映像的质量。

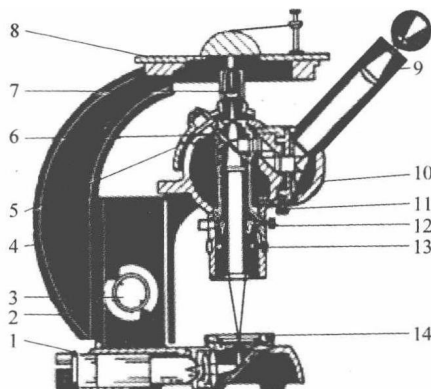


图1-3 立式金相显微镜的结构

- 1—低压灯泡 2—微调焦手轮 3—粗调焦手轮
- 4—传动箱 5—物镜转换器 6—三个物镜螺孔
- 7—物镜 8—载物台 9—目镜 10—目镜管
- 11—固定螺钉 12—调节螺钉
- 13—视场光栏 14—孔径光栏

5. 物镜转换器和物镜

物镜转换器呈球面形，上面有三个螺孔；物镜通过螺纹连接安装在转换器上，旋转转换器可使物镜镜头进入光路，并与不同的目镜匹配成各种放大倍数。

6. 目镜管和目镜

目镜镜筒安装在附有棱镜的半球形座上，倾斜 45°角。

1.1.3 金相显微镜的操作

金相显微镜是贵重的精密光学仪器，在使用中必须十分爱护，遵守操作规程。其操作规程如下：

- 1) 选用适当载物台，将制备好的试样放在载物台上。
- 2) 按观察需要，选择合适倍数的物镜和目镜，并将物镜和目镜分别装在物镜转换器及目镜管上，转动粗调焦手轮，升高载物台，使物镜接近试样表面。
- 3) 将照明灯泡的导线插头插到 5V 或 6V 电源变压器上，并把变压器与电源相接，打开开关，使灯泡发亮。
- 4) 转动粗调焦手轮，使载物台下降，待看到组织后，再转动微调焦手轮直至图像清晰为止。
- 5) 缩小视场光栏，使其中心与目镜视场中心大致重合，然后打开视场光栏，使其边缘的像恰好消失于目镜视场之外。
- 6) 根据所观察试样范围的要求，调整孔径光栏的大小。
- 7) 观察或照相。

1.1.4 金相试样的制备

金相试样的制备过程一般包括取样、磨制、抛光、浸蚀等几个步骤，制备好的试样应能观察到真实组织，无磨痕、麻点和水迹，并使金属组织中的夹杂物、石墨等不脱落；否则，将会严重影响显微分析的正确性。

1. 取样

显微试样的选取应根据研究目的，取其具有代表性的部位，例如，在检验和分析失效零件的损坏原因时，除了在损坏部位取样外，还需要在距损坏部位较远处截取试样，以便对二者进行比较。在研究金属铸件组织时，由于存在偏析现象，必须从表层到中心同时取样进行观察；对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；对于一般热处理后的零件，由于金相组织比较均匀，试样的截取可在任一截面进行。截取方法视材料的性质不同而异，软的金属可用手锯或锯床切割，硬而脆的材料（白口铸铁）则可用锤子击打，对极硬的材料（如淬火钢）则可采用砂轮片切割或电脉冲加工。但不论用哪种方法取样，都应避免试样因受热或变形而引起金属组织变化。为防止受热，必要时应随时用水冷却试样。试样尺寸一般不要过大，应便于握持和容易磨制。其尺寸常采用直径为 12 ~ 15mm 的圆柱体或边长 12 ~ 15mm 的方形试样。对形状特殊或尺寸细小不易握持的试样，或为了试样不发生倒角，可采用图 1-4 所示的机械夹装法或

镶嵌法。

镶嵌法是将试样镶嵌在镶嵌材料中，使用的镶嵌材料有热固性塑料（如胶木粉）及热塑性材料（聚乙烯、聚合树脂）等。此外，还可将试样放在金属圈内，然后注入低熔点物质，如硫黄、低熔点合金等。

2. 磨制

试样的磨制一般分为粗磨和细磨两道工序。

(1) 粗磨 粗磨的目的是为了获得一个平整的表面。试样截取后，将试样的磨面在砂轮上或用锉刀磨成平面，同时把尖角磨圆。在砂轮上磨制时，应握紧试样，压力不宜过大，并随时用水冷却，以防试样受热引起金属组织变化。经粗磨后，试样表面虽较平整，但仍存在较深的磨痕。

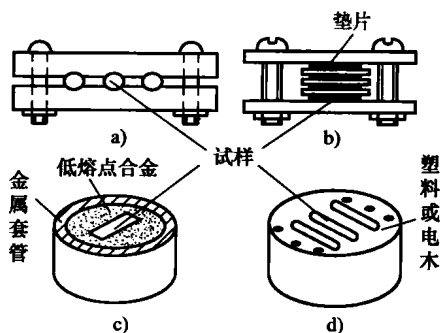


图 1-4 金相试样的固定方法

a、b) 机械夹装法 c、d) 镶嵌法

(2) 细磨 细磨的目的就是为了消除粗磨磨痕，以得到平整而光滑的磨面，为进一步的抛光做好准备。将粗磨好的试样用水冲洗并擦干后，随即依次在由粗到细的各号金相砂纸上把磨面磨光。常用的砂纸号数有 01、02、03、04 四种，前者磨粒较粗，后者较细。磨制时砂纸应平铺于厚玻璃板上，左手按住砂纸，右手握住试样，使磨面朝下并与砂纸接触，在轻微压力作用下向前推行磨制，用力要均匀，务求平稳；否则，会使磨痕过深，而且造成磨面的变形。试样退回时不能与砂纸接触，以保证磨面平整而不产生弧度。这样“单向单程”地反复进行，直至磨面上旧的磨痕被去掉，新的磨痕均匀一致时为止。在调换下一号更细砂纸时，应将试样上磨屑和砂粒清除干净，并将试样转动 90°，即与上一道磨痕方向垂直。为了加快磨制速度，除手工磨制外，还可以将不同型号的砂纸贴在带有旋转圆盘的预磨机上，实现机械磨制。

(3) 抛光 抛光的目的是：去除细磨后磨面上遗留下来的细微磨痕和变形层，以获得光滑的镜面。常用的抛光方法有机械抛光、电解抛光和化学抛光三种，其中以机械抛光应用最广。

1) 机械抛光：一般在专用的抛光机上进行。抛光机主要由电动机和抛光圆盘（一般为 $\phi 200 \sim \phi 300 \text{mm}$ ）组成，抛光盘转速为 $200 \sim 600 \text{r/min}$ 。抛光盘上铺以细帆布、呢绒、丝绸等。抛光时在抛光盘上不断滴注抛光液。抛光液通常采用 Al_2O_3 、 MgO 或 Cr_2O_3 等细粉末（粒度约为 $0.3 \sim 1 \mu\text{m}$ ）在水中的悬浮液。机械抛光就是靠极细的抛光粉对磨面的机械作用来消除磨痕而使其成为光滑的镜面。

2) 抛光织物：对于抛光织物的选用，钢试样一般用细帆布和丝绒；对灰铸铁试样，为防止石墨脱落或曳尾，可用没有绒毛的织物；铝、镁、铜等非金属材料可用细丝绒。对于磨料的选用，一般来说，钢、铸铁可用氧化铝、氧化铬及金刚石研磨膏，非金属材料可用细粒度的氧化镁。在实际使用中，应根据织物的性能及被抛光试样的特点，灵活选用。

3) 抛光操作：将试样磨面均匀地压在旋转的抛光盘上，并沿盘的边缘到中心不断

作径向往复运动；同时，试样自身略加转动，以便试样各部分抛光程度一致及避免曳尾现象的出现。抛光过程中抛光液的滴注量的确定以试样离开抛光盘后试样表面的水膜在数秒钟可自行挥发为宜。抛光时间一般为3~5min。抛光后的试样，其磨面应光亮无痕，且石墨或夹杂物等不应抛掉或有曳尾现象。抛光后的试样应该用清水冲洗干净，并用酒精冲去残留水滴，再用吹风机吹干。

试样磨面上磨痕变化情况如图1-5所示。

(4) 浸蚀 抛光后的试样磨面是一光滑镜面，若直接放在显微镜下观察，只能看到一片亮光，除某些非金属夹杂物、石墨、孔洞、裂纹外，无法辨别出各种相组成物及其形态特征。必须经过适当的浸蚀，才能使显微组织正确地显示出来。目前，最常用的浸蚀方法是化学浸蚀法。

1) 化学浸蚀：将抛光好的试样磨面在化学浸蚀剂（常用酸、碱、盐的酒精或水溶液）中浸蚀或擦拭一定时间，由于金属材料中各相的化学成分和组织结构不同，故具有不同的电

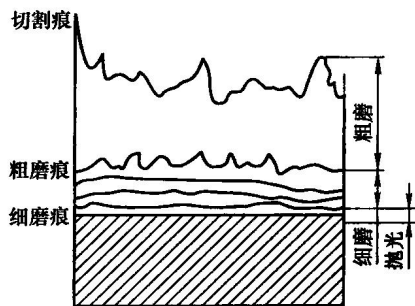


图1-5 试样磨面上磨痕变化情况示意图

极电位，在浸蚀剂中就构成了许多微电池，电极电位低的相为阳极而被溶解，电极电位高的相为阴极而保持不变。故在浸蚀后就形成了凹凸不平的表面，在显微镜下，由于光线在各处的反射情况不同，就能观察到金属的组织特征。纯金属及单相合金浸蚀时，由于晶界原子排列较乱，缺陷及杂质较多，具有较高的能量，故晶界易被浸蚀而呈凹沟。在显微镜下观察时，使光线在晶界处被漫反射而不能进入物镜，因此显示出一条条黑色的晶界，如图1-6a所示。对于两相合金，由于电极电位不同，负电位的一相被腐蚀形成凹沟，当光线照射到凹凸不平的试样表面时，就能看到不同的组成相，如图1-6b所示。

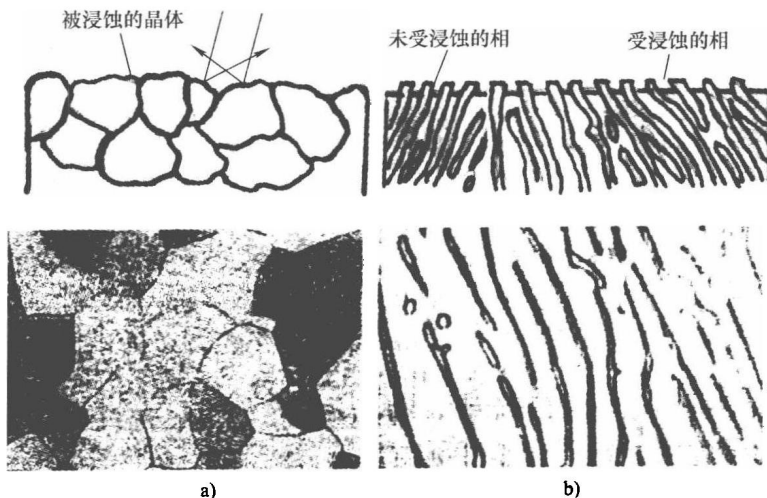


图1-6 单相和两相组织的化学浸蚀效果图

a) 铁素体晶界 b) 层片状珠光体

应当指出,金属中同一相中各个晶粒的成分虽然相同,但由于其原子排列位向不同,也会使磨面上各晶粒的浸蚀程度不一致,在垂直光线照射下,各个晶粒就呈现出明暗不一的颜色。

化学浸蚀剂的种类很多,应按金属材料的种类和浸蚀的目的,选择恰当的浸蚀剂。

2) 浸蚀操作:浸蚀时,应将试样磨面向上浸入一盛有浸蚀剂的容器内,并不断地轻微晃动(或用棉花沾上浸蚀剂擦拭磨面),待浸蚀适度后取出试样,迅速用水冲洗,接着用酒精冲洗,最后用吹风机吹干,其表面需严格保持清洁。浸蚀时间要适当,一般试样磨面发暗时就可停止,其时间取决于金属的性质、浸蚀剂的浓度以及显微镜下观察时的放大倍数。总之,浸蚀时间以在显微镜下能清晰地显示出组织的细节为准。若浸蚀不足,可再重复进行浸蚀,但一旦浸蚀过度,试样则需重新抛光,甚至还需在最后一号砂纸上进行磨光。

1.1.5 视频照相技术

普通金相显微镜拍摄金相图片时操作非常繁杂,耗材又多,成本较高。现在应用视频照相技术提高金相检验分析的准确性和速度,取消了传统的暗室底片冲洗、照片印制等程序,并能够使大量的数据照片存储,随时可打印成照片与报告,使获得每份金相照片与报告的时间仅为几分钟,完成了从金相照片的获取、存储、查询、打印输出到统一报告、建立档案、管理的全过程自动化。这样,取消了大量繁杂的暗室工作,又节约了大量材料,并且使照片、报告的保存、查询、传输和管理实现了微机数字化,可以说是金相技术的一次革命。

现在的光学显微镜大都配备视频相机及相应的软件。视频照相技术,泛指将一系列静态图像以电信号加以捕捉、记录、传送与重现的各种技术,其基本原理是:闪烁体将电子信号转变成光子信号,电荷耦合器件图像传感器 CCD (Charge Coupled Device) 再将光信号转变为电荷积聚于 CCD 芯片中。它用一种高感光度的半导体材料制成,能把光线转变成电荷,通过模数转换器芯片,用一定脉冲电压将积聚的电荷读出,以像素为单位转换成数字信号,数字信号经过压缩以后由相机内部的闪速存储器或内置硬盘卡保存,因而可以轻而易举地把数据传输给计算机,并借助于计算机的处理手段,根据需要来修改图像。CCD 是由许多感光单位组成,通常以百万像素为单位。当 CCD 表面受到光线照射时,每个感光单位会将电荷反映到组件上,所有的感光单位所产生的信号加在一起,就构成了一幅完整的画面。同时,当 CCD 芯片工作时采用“peltier”效应进行冷却,这样高灵敏度相机能够在非常大的动态范围内产生低噪声图像。

CCD 和传统底片相比,更接近于人眼对视觉的工作方式,只不过人眼的视网膜是由负责光强度感应的杆细胞和色彩感应的锥细胞分工合作组成视觉感应。CCD 经过长达 35 年的发展,大致的形状和运作方式都已经定型,其组成主要是由一个类似马赛克的网格、聚光镜片以及垫于最底下的电子线路矩阵所组成。因此,视频照相所用的相机也称 CCD 相机。

视频金相显微镜主要由金相显微镜、CCD 摄像头、采集卡、计算机及电源组成,用相关的软件进行参数设置和数据采集,形成图像;也可以投影到大屏幕上,进行多人

观察与分析。其优点是方便、快捷、一目了然；方便多人观察分析，可进行金相分析多媒体教学；由于采用数字化图像存储方式，便于网络传输。

视频显微分析仪的操作如下：

- 1) 打开显微镜和计算机的电源及计算机中相关软件。
- 2) 将试样放在显微镜的载物台上适当的位置。
- 3) 调节显微镜至看到清晰的图像，并将其转换到显示器的屏幕上，再调清图像。
- 4) 选择适当的放大倍数，调节试样位置，进行观察、分析。
- 5) 找到满意的图像并拍照。
- 6) 键入欲存图像的文件名。
- 7) 保存图像到预定文件夹。
- 8) 重复上述操作进行所有试样的观察、分析及存储。
- 9) 进行试样观察、分析、测量和标注等图像处理工作。
- 10) 退出软件，关闭视频显微分析仪，关闭电源。

1.2 显微硬度计

硬度是材料力学性能重要指标之一，而硬度试验是判断材料或产品零件质量的一种手段。所谓硬度，就是材料在一定条件下抵抗另一本身不发生残余变形物体压入的能力。抵抗能力越大，则硬度越高；反之，则硬度越低。在力学性能试验中，测量硬度是一种最容易、最经济、最迅速的方法，也是生产过程中检查产品质量的措施之一。由于金属等材料硬度与其他力学性能有相互对应的关系，因此，大多数金属材料可通过硬度近似地推算出其他力学性能，如强度、疲劳、蠕变、磨损和内损等。所以，硬度计被广为应用。

1.2.1 显微硬度计的工作原理

显微硬度计是常用测量显微组织硬度的设备。其工作原理是通过显微硬度计的测量显微镜的调焦机构将光线聚焦到样品表面，通过加载机构，正确选择负荷、加载速度，进行全自动加载、卸载试验力，并正确控制试验力保持时间，通过显微硬度计显微镜的光学放大，测量在一定试验力下金刚石角锥体压头压入被测物表面后所留压痕的对角线长度，来求出被测物的硬度值。

1.2.2 显微硬度计的使用

由于显微硬度试验往往是对很小的试样（如针尖），或试样上很小的特定部位（如某一金相组织）进行硬度测定，而这些情况难以用人眼来进行观察和判定，而且显微硬度试验后所得的压痕非常小，人眼难以寻找，更不用说进行压痕对角线长度的测量。所以必须用显微镜才能进行工作。正确使用显微硬度计，除了正确选择负荷、加载速度、保持时间外，测量显微镜使用的正确与否也是十分重要的。

1. 负荷的选择

为确切得到被测对象的真实硬度，必须选择恰当的负荷。选择负荷时应考虑以下几个原则：

1) 在测定薄片或表面层硬度时，要根据压头压入深度和试件或表面层厚度选择负荷。因为一般试件或表面层厚度是知道的，而被测部位硬度或硬度范围也应是可知道的，基于压头压入试样时挤压应力在深度上涉及范围接近于压入深度的10倍，为避免底层硬度的影响，压头压入深度应小于试件或表面层的1/10。

2) 对试样横截面测定硬度时，应根据压痕对角线长度和剖面宽度选择负荷。基于压头压入试样时产生的挤压应力区域最大可从压痕中心扩展到4倍对角线的距离，为避免相邻区域不同硬度或空间对被测部位硬度影响，所以压痕中心离开边缘的距离应不小于压痕对角线长度的2.5倍，即压痕对角线长度为试件或表面层剖面宽度的1/5。

3) 当测定晶粒、相、类金属夹杂物等时，应遵守以上两个原则来选择负荷，压头压入深度不大于其厚度的1/10，压痕的对角线长度应不大于其宽度的1/5。

4) 测定试件（零件、表面层、材料）平均硬度时，在试件表面尺寸及厚度允许的前提下，尽量选择大负荷，以免试件材料组织硬度不均匀影响试件硬度测定的正确性。

5) 为保证测量精确度，在情况允许时，应选择大负荷，一般应使压痕对角线长度大于 $20\mu\text{m}$ 。

6) 考虑到试件表面冷加工时产生的挤压应力对硬化层的影响，在选择负荷时应在条件许可的情况下选择大的负荷。

2. 显微硬度计测量显微镜的正确使用

(1) 像平面的寻找方法

1) 光点找像法：对针尖状试样，应采用“光点找像法”。一般显微硬度计测量显微镜物方视场只有 $0.25\sim0.35\text{mm}$ ，在此视场范围外的区域，在测量显微镜目镜视场内，眼睛是看不到的。而针尖状试样顶尖往往小于 0.1mm ，所以在安装调节试样时，很难把此顶尖调节在视场内；如果此顶尖在视场周围而不在视场内，则在升降工作台进行调节时不小心就会把物镜镜片碰坏，即使不碰坏物镜，找像也很困难，为解决这个问题，提出“光点找像法”。开启测量显微镜的照明灯，这时在物镜下面工作台上就有一个圆光斑，把针尖试样垂直于工作台安装在此光斑的中心，升高工作台，使此针尖的顶尖离开物镜约 1mm ，这时眼睛观察顶尖部位，调节工作台上的两个测微丝杆，使物镜下照明光点在前后左右对称分布在此顶尖上（这一步骤必须仔细），随后缓慢调节升降机构，这时在目镜视场中即会看到一个光亮点，这就是此顶尖上的反射光点，再进一步调节升降即可找到此针尖的像。

2) 边缘找像法：表面粗糙度值很低的试样（如显微硬度块）应采用边缘找像法。显微硬度试验中，试样表面光洁度一般都是很高的，往往是镜面，表面上没有明显形貌特征，而显微硬度计中所有高倍测量显微镜的景深都是非常小的，只有 $1\sim2\mu\text{m}$ ，所以在调焦找像平面时，对于缺乏经验的操作者是很困难的，甚至会碰坏物镜。有的操作者借用表面残留痕迹来找像平面，但往往无残留痕迹，建议采用边缘找像法，即按上述同样方法使用照明光点（ $0.5\sim1\text{mm}$ ）的中心对准试样表面轮廓边缘，则在目镜视场内看