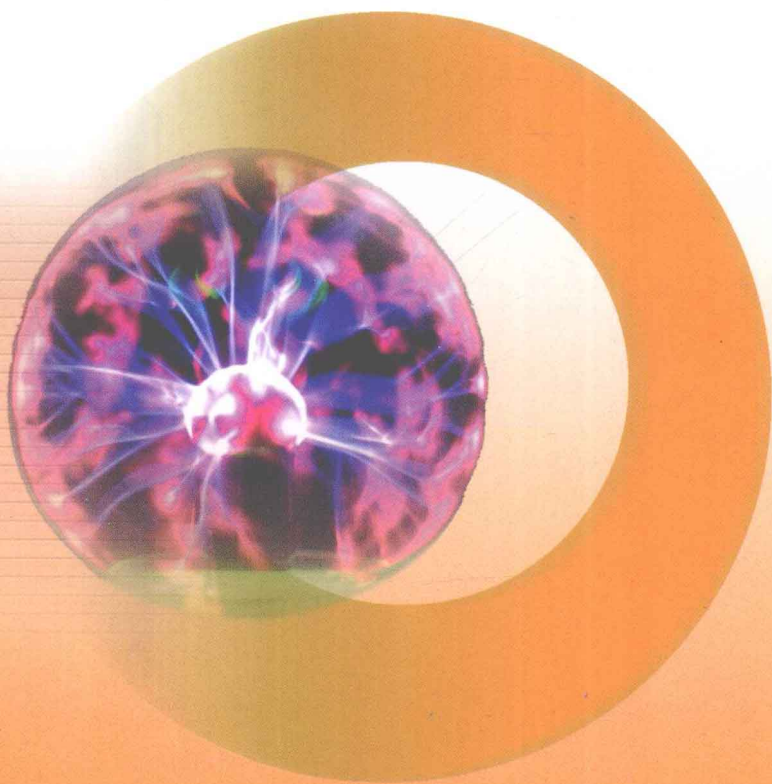




高等学校“十二五”实验实训规划教材

金属热处理 综合实验指导书

王志刚 刘科高 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



高等学校“十二五”实验实训规划教材

金属热处理综合实验指导书

王志刚 刘科高 主编

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2012

内 容 提 要

本书是高等学校“十二五”实验实训规划教材,其主要内容分为4章:第1章为金相试样的制备、显微镜的构造与操作;第2章为热处理原理和基本实验设备使用;第3章为典型材料的金相组织及常见缺陷;第4章为综合训练计划、实验报告要求及评分标准;附录列举了常用化学侵蚀剂,压痕直径与布氏硬度对照表,洛氏硬度、布氏硬度、维氏硬度与抗拉强度对照表,常用热电偶的温度-毫伏对照表等。

本书主要介绍了热处理实验的基本知识,可作为理工科大中专院校材料科学与工程专业的学生实验教材或实验教学参考书,也可供材料成形与控制工程、机械工程专业等相关专业的师生与从事相关研究的工程技术人员和管理人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属热处理综合实验指导书/王志刚,刘科高主编. —北京:冶金工业出版社,2012.4

高等学校“十二五”实验实训规划教材

ISBN 978-7-5024-5875-1

I. ①金… II. ①王… ②刘… III. ①热处理—高等学校—教学参考资料 IV. ①TG15

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第038434号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 李 梅 卢 敏 美术编辑 李 新 版式设计 葛新霞

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5875-1

三河市双峰印刷装订有限公司印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销
2012年4月第1版,2012年4月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;11.5印张;277千字;176页

25.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

随着我国高等教育的不断改革和国内机械制造业的产品结构面临的调整,对本科毕业生的专业基础知识和基本操作技能的掌握提出了更高的要求。为满足高等院校材料科学与工程及相关专业本、专科实验教学需要,我们编写了本书。本书以培养学生全面掌握热处理基本知识和技能为目的,力求涵盖金属热处理多方面内容,简明扼要,重在实践环节的指导和实践过程的体验。

“金属热处理综合实验课”的设立,可以让学生在实验过程中加深对所学的金属热处理课程内容中的重点、难点的理解,更有助于实际工作能力的提高。本实验指导书分为4章,主要介绍了热处理的基本原理与工艺设定、金相试样的制备与观察、典型材料的金相组织及常见缺陷等基本知识,结合理工科本、专科生的认知特点设计了综合实验的训练计划,学生可以在充满挑战性的实验过程中掌握金属热处理基本知识与操作技能。对于从事材料科学与工程、材料成形及控制工程、机械工程专业等相关专业的技术人员来说,也可以作为参考书。

本书在编写过程中得到了山东建筑大学材料科学与工程实验教学中心、材料科学与工程学院金属材料教研室的大力支持。本书由山东建筑大学王志刚、刘科高主编,山东建筑大学徐勇老师、田彬老师、孙齐磊老师、王献忠老师参与编写了第1、2、4章,山东建筑大学的许斌教授认真审阅了本教材,并提出了许多宝贵意见。对这些老师的热忱支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

在本书编写的过程中,参考了国内外专家和同行的教材、著作、研究成果等文献,在此表示感谢。由于编者水平所限,书中不当之处,恳请同行专家和读者批评指正。

编 者
2012年3月

目 录

1 金相试样的制备、显微镜的构造与操作	1
1.1 金相试样的制备	1
1.1.1 金相试样的取样	1
1.1.2 金相试样的镶嵌	1
1.1.3 金相试样的磨制	2
1.1.4 金相试样的抛光	3
1.1.5 金相试样的侵蚀	4
1.2 金相显微镜的构造与操作	6
1.2.1 金相显微镜的光学原理	7
1.2.2 金相显微镜的光学系统	8
1.2.3 金相显微镜的使用及注意事项	10
1.2.4 特殊光学金相分析	11
1.2.5 金相照相	18
本章思考题	19
2 热处理原理和基本实验设备使用	20
2.1 铁碳合金平衡组织的显微分析	20
2.1.1 Fe-C ($\text{Fe-Fe}_3\text{C}$) 相图	20
2.1.2 室温下基本相和组织组成物的基本特征	22
2.1.3 铁碳合金平衡组织	23
2.2 钢的热处理工艺	26
2.2.1 钢在冷却时的转变	26
2.2.2 加热温度的测量	32
2.2.3 加热温度的选择	41
2.2.4 加热时间的选择	43
2.2.5 冷却方式的选择	43
2.3 钢的热处理工艺组织的效验	45
2.3.1 布氏硬度计的使用	46
2.3.2 洛氏硬度计的使用	48
2.3.3 维氏硬度计的使用	51
本章思考题	52

3 典型材料的金相组织及常见缺陷	53
3.1 碳钢的金相组织	53
3.1.1 平衡状态的组织	53
3.1.2 热处理后的组织	53
3.1.3 常见的热处理缺陷	57
3.2 铸铁材料的热处理与检验	63
3.2.1 灰口铸铁	64
3.2.2 球墨铸铁	69
3.2.3 可锻铸铁与蠕墨铸铁	74
3.3 常用工具钢	77
3.3.1 碳素工具钢的金相检验	79
3.3.2 合金工具钢的金相检验	83
3.4 高速钢、模具钢的热处理与金相检验	85
3.4.1 高速钢的热处理与金相检验	85
3.4.2 模具钢的热处理与金相检验	90
3.5 弹簧钢的热处理与检验	95
3.5.1 弹簧钢的热处理	97
3.5.2 弹簧钢的组织检验	97
3.6 轴承钢的热处理与检验	100
3.6.1 轴承钢的热处理	100
3.6.2 轴承钢的组织检验	101
3.7 特殊性能钢的热处理与检验	105
3.7.1 耐磨钢	105
3.7.2 不锈钢	106
3.7.3 耐热钢	116
3.8 渗层的组织观察与检验	119
3.8.1 钢的渗碳层	119
3.8.2 钢的碳氮共渗层	124
3.8.3 钢的渗氮层	126
3.8.4 钢的渗硼层	129
3.9 钢的奥氏体晶粒度的显示	131
3.9.1 影响奥氏体晶粒长大的因素	131
3.9.2 显示奥氏体晶界的方法	131
3.9.3 晶粒边界腐蚀法	133
3.9.4 腐蚀机理简介	136
3.10 有色金属的组织分析	136
3.10.1 铝合金	136

3.10.2 铜合金	138
3.10.3 轴承合金	140
本章思考题	141
4 综合训练计划、实验报告要求及评分标准	143
4.1 精通铁碳相图训练	143
4.1.1 基本要求	143
4.1.2 报告内容	143
4.2 掌握碳钢的热处理原理	144
4.2.1 基本要求	144
4.2.2 报告内容	145
4.3 试样制备	149
4.3.1 基本要求	149
4.3.2 成绩评定内容	150
4.4 金相识别训练	150
4.4.1 基本要求	150
4.4.2 报告内容	151
4.5 评分标准	156
附录	161
附录1 常用化学侵蚀剂	161
附录2 压痕直径与布氏硬度对照表	166
附录3 洛氏硬度、布氏硬度、维氏硬度与抗拉强度对照表	171
附录4 常用热电偶的温度-毫伏对照表	174
参考文献	176

1 金相试样的制备、显微镜的构造与操作

本章重点：

- (1) 金相试样的制备过程。
- (2) 实验室常用化学侵蚀剂。
- (3) 金相显微镜的光学系统。
- (4) 偏振光与暗场照明在金相分析中的应用。

1.1 金相试样的制备

在科研和实验中，人们经常借助于金相显微镜对金属材料进行显微分析和检测，以控制金属材料的组织和性能。在进行显微分析前，首先必须制备金相试样，若试样制备不当，就不能看到真实的组织，也就得不到准确的结论。

金相试样制备过程包括：取样（镶嵌）、磨制、抛光和侵蚀。

1.1.1 金相试样的取样

取样部位的选择应根据检验的目的选择有代表性的区域。一般进行如下几方面的取样：

(1) 原材料及锻件的取样：原材料及锻件的取样主要应根据所要检验的内容进行纵向取样和横向取样。

1) 纵向取样检验的内容包括：非金属夹杂物的类型、大小、形状；金属变形后晶粒被拉长的程度；带状组织等。

2) 横向取样检验的内容包括：检验材料自表面到中心的组织变化情况；表面缺陷；夹杂物分布；金属表面渗层与覆盖层等。

(2) 事故分析取样：当零件在使用或加工过程中被损坏，应在零件损坏处取样然后在没有损坏的地方取样，以便于对比分析。

取样的方法为：取样的方法因为材料的性能不一样，有硬有软，所以取样的方法也不一样。软材料可用锯、车、铣、刨等来截取；对于硬的材料则用金相切割机或线切割机床截取，切割时要用水冷却，以免试样受热引起组织变化；对硬而脆的材料，可用锤击碎，选取合适的试样。

试样的大小以便于拿在手里磨制为宜，通常一般为 $\phi 12\text{mm} \times 15\text{mm}$ 圆柱体或 $12\text{mm} \times 12\text{mm} \times 15\text{mm}$ 正方体。取样的数量应根据工件的大小和检验的内容取 2 ~ 5 个为宜。

1.1.2 金相试样的镶嵌

截取好的试样有的过于细小或是薄片、碎片，不宜磨制或要求精确分析边缘组织的试

样就需要镶嵌成一定的形状和大小。常用的镶嵌方法有机械镶嵌、低熔点合金镶嵌、树脂镶嵌、热压镶嵌及环氧树脂冷嵌等方法，如图 1-1 所示。

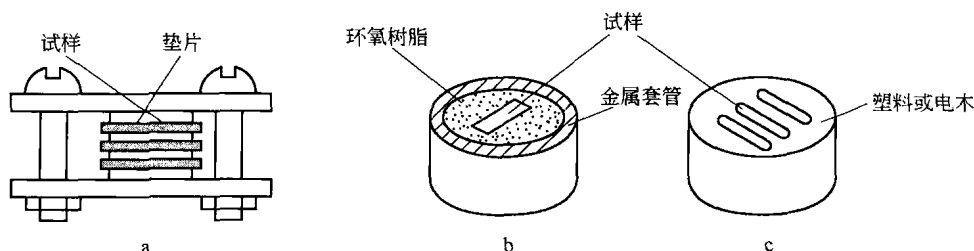


图 1-1 金相试样镶嵌方法

a—机械镶嵌法；b—环氧树脂冷嵌法；c—塑料镶嵌法

(1) 机械镶嵌法：用不同的夹具将不同外形的试样夹持。夹持时，夹具与试样之间、试样和试样之间应放上填片。填片应采用硬度相近且电位高的金属片，以免侵蚀试样时填片发生反应，影响组织显示。

(2) 低熔点合金镶嵌法：要求合金的熔点必须在 100°C 以下，低于材料的回火温度。

(3) 树脂镶嵌法：利用树脂来镶嵌细小的金相试样，可以将任何形状的试样镶嵌成一定尺寸。分为热压镶嵌法和浇注镶嵌法。

1) 热压镶嵌法：是在专用镶嵌机上进行，常用材料是电木粉。电木粉是一种酚醛树脂，不透明，有各种不同的颜色。镶嵌时在压模内加热加压，保温一定时间后取出。优点是操作简单，成形后即可脱模，不会发生变形。缺点是不适合淬火件。

对于一些不能加热和加压的试样可采用环氧树脂浇注镶嵌法。

2) 浇注镶嵌法：在室温下进行镶嵌的一种方法，常用环氧树脂及牙托粉，配方如下：

环氧树脂 6101 100g + 乙二胺（凝固剂） 8g

牙托粉 3 份 + 牙托水 1 份（重量比）

优点是不需要加热，不需要专用机械，与试样结合比较牢固，磨制时不易倒角，是一种理想的镶嵌方法。

1.1.3 金相试样的磨制

磨制目的是得到一个平整光滑的表面。磨制分粗磨和细磨。

(1) 粗磨：一般材料可用砂轮机将试样磨面磨平；软材料可用锉锉平。磨时要用水冷却，以防止试样受热而使组织发生改变。不需要检查表层组织的试样要倒角倒边。

注意事项如下：

- 1) 磨制时要用水冷却，以防止试样受热而改变组织；
- 2) 接触时压力要均匀，不宜过压（易产生砂轮破裂和温度升高使组织发生改变）；
- 3) 不适用于检验表层组织的试样，如渗氮层、渗碳层组织的检验。

(2) 细磨：目的是消除粗磨留下的划痕，为下一步的抛光做准备，细磨又分为手工细磨和机械细磨。

1) 手工细磨：选用不同粒度的金相砂纸（180 号、240 号、400 号、600 号、800 号），由粗到细进行磨制。磨时将砂纸放在玻璃板上，手持试样单方向向前推磨，切不可来回磨制，用力需均匀，不宜过重。每换一号砂纸时，试样磨面需转 90° ，与旧划痕垂直，直到旧划痕消失为止。以此类推，磨至最细砂纸。试样细磨结束后，用水将试样冲洗干净待抛。

2) 机械细磨：是在专用的机械预磨机上进行。将不同号的水砂纸剪成圆形，置于预磨机圆盘上，并不断注入水，就可进行磨光，其方法与手工细磨一样，即磨好一号砂纸后，再换另一号砂纸，试样同样转 90° ，直到 800 号为止。注意：用水冷却，避免磨面过热；因转盘转速高，磨制时压力要小；不允许使用已经破损的砂纸，否则会影响安全。

1.1.4 金相试样的抛光

抛光的目的是去除试样磨面上经细磨留下的细微划痕，使试样磨面成为光亮无痕的镜面。抛光有机械抛光、电解抛光、化学抛光。最常用的是机械抛光。

1.1.4.1 机械抛光

机械抛光在金相抛光机上进行。抛光时，试样磨面应均匀地轻压在抛光盘上。并将试样由中心至边缘移动，并做轻微晃动。在抛光过程中要以量少次数多和由中心向外扩展的原则不断加入抛光微粉乳液。常用的抛光微粉见表 1-1。常用的抛光液和规范见表 1-2。抛光应保持适当的湿度，因为太湿降低磨削力，使试样中的硬质相呈现浮雕。湿度太小，由于摩擦生热会使试样升温，使试样产生晦暗现象。其合适的抛光湿度是以提起试样后磨面上的水膜在 3 ~ 5s 内蒸发完为准。抛光压力不宜太大，时间不宜太长，否则会增加磨面的扰乱层。粗抛光可选用帆布、海军呢做抛光织物，精抛光可选用丝绒、天鹅绒、丝绸做抛光织物。抛光前期抛光液的浓度应大些，后期使用较稀的，最后用清水抛，直至试样成为光亮无痕的镜面，即停止抛光。用清水冲洗干净后即可进行侵蚀。

表 1-1 常用的抛光微粉

材 料	莫氏硬度	特 点	适 用 范 围
氧化铝 (Al_2O_3)	9	白色， α 氧化铝微粒平均尺寸 $0.3\mu\text{m}$ ，外形呈多角形。 γ 氧化铝粒度为 $0.1\mu\text{m}$ ，外形呈薄片状，压碎后更为细小	通用抛光粉。用于粗抛光和精抛光
氧化镁 (MgO)	5.5 ~ 6	白色，粒度极细而均匀，外形锐利呈八面体	适用于铝镁及其合金和钢中非金属夹杂物的抛光
氧化铬 (Cr_2O_3)	8	绿色，具有较高硬度，比氧化铝抛光能力差	适用于淬火后的合金钢、高速钢以及钛合金抛光
氧化铁 (Fe_2O_3)	6	红色，颗粒圆细无尖角，变形层厚	适用于抛光较软金属及合金
金刚石粉 (膏)	10	颗粒尖锐、锋利，磨削作用极佳，寿命长，变形层小	适用于各种材料的粗、精抛光，是理想的磨料

注：抛光时用水冷却，避免磨面过热；因转盘转速高，磨制时压力要小；不允许使用已经破损的砂纸，否则会影响安全；部分试样应打倒角。

表 1-2 常用的电解抛光液和规范

抛光液名称	成分/mL		规 范	用 途
高氯酸-乙醇水溶液	乙 醇	800	30 ~ 60V 15 ~ 60s	碳钢、合金钢
	水	140		
	高氯酸 ($w = 60\%$)	60		
高氯酸-甘油溶液	乙 醇	700	15 ~ 50V 15 ~ 60s	高合金钢、高速钢、不锈钢
	甘 油	100		
	高氯酸 ($w = 30\%$)	200		
高氯酸-乙醇溶液	乙 醇	800	35 ~ 80V 15 ~ 60s	不锈钢、耐热钢
	高氯酸 ($w = 60\%$)	200		
铬酸水溶液	水	830	1.5 ~ 9V 2 ~ 9min	不锈钢、耐热钢
	铬 酸	620		
磷酸水溶液	水	300	1.5 ~ 2V 5 ~ 15s	铜及铜合金
	磷 酸	700		
磷酸-乙醇溶液	水	200	25 ~ 30V 4 ~ 6s	铝、镁、银合金
	乙 醇	380		
	磷 酸	400		

1.1.4.2 电解抛光

采用化学溶解作用使试样达到抛光的目。这种方法能真实地显示材料的组织，尤其是硬度较低的金属或单相合金，以及极易加工变形的奥氏体不锈钢、高锰钢等。但不适用于偏析严重的金属材料、铸铁以及夹杂物的检验。图 1-2 为电解抛光原理示意图。

电解抛光步骤为：将试样浸入电解液中作为阳极，用铅板或不锈钢板作为阴极，试样与阴极之间的距离保持 20 ~ 30mm，接通电源，当电流密度足够大时，试样磨面即由于电化学作用而发生选择性溶解，从而获得光滑平整的表面。抛光完毕后，取出试样切断电源，将试样迅速用水冲洗吹干。

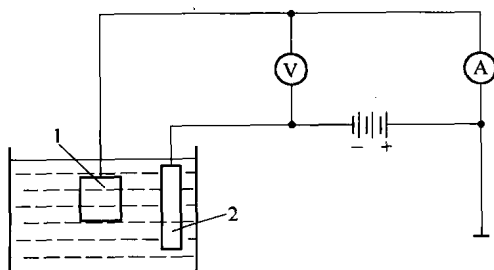


图 1-2 电解抛光原理
1—阳极（试样）；2—阴极

1.1.5 金相试样的侵蚀

抛光后的金相试样置于金相显微镜下观察，仅能看到铸铁中的石墨、非金属夹杂物，金相组织只有显示后才能看到。金相组织显示的方法有化学侵蚀法、电解侵蚀法、物理侵蚀法。常用的是化学侵蚀法。

1.1.5.1 化学侵蚀法

化学侵蚀法就是利用化学试剂对试样表面进行溶解或电化学作用来显示金属的组织。纯金属及单相合金的侵蚀是一个化学溶解过程，因为晶界原子排列较乱，不稳定，在晶界上的原子具有较高的自由能，晶界处就容易侵蚀而下凹，来自显微镜的光线在凹处就产生漫反射回不到目镜中，晶界呈现黑色，见图 1-3a。二相合金的侵蚀与纯金属截然不同，它主要是一个电化学过程。因为不同的相具有不同的电位，当试样侵蚀时，就形成许多微小的局部电池。具有较高负电位的一相为阳极，被迅速溶解，而逐渐凹洼，具有较高正电位的一相为阴极，不被侵蚀，保持原有的平面。两相形成的电位差越大，侵蚀速度越快，在光线的照射下，两个相就形成了不同的颜色，凹洼的部分呈黑色，凸出的一相发亮呈白色，见图 1-3b。

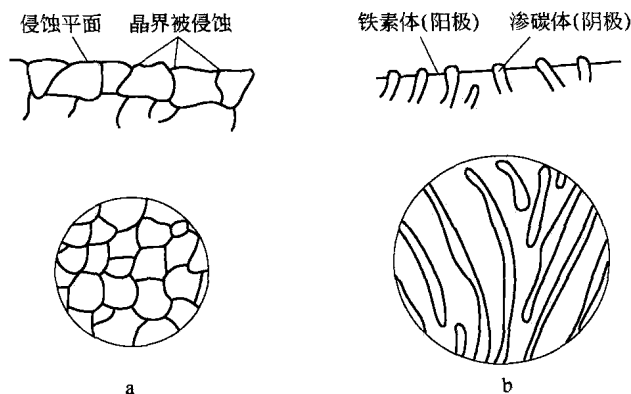


图 1-3 单相合金和双相合金侵蚀示意图

a—铁素体；b—珠光体

化学侵蚀操作注意事项为：

- (1) 试样进行化学侵蚀时应在专用的实验台上进行，对有毒的试剂应在抽风橱内进行。
- (2) 试样侵蚀前应清洗干净，磨面上不允许有任何脏物以免影响侵蚀效果。
- (3) 根据材料和检验要求正确选择侵蚀剂，见表 1-3。

表 1-3 常用化学侵蚀剂

序号	侵蚀剂名称	成 分		适用范围	使用要点
1	硝酸酒精溶液	硝 酸	1 ~ 5mL	碳钢及低合金钢的组织显示	硝酸含量按材料选择，侵蚀数秒钟
		酒 精	100mL		
2	苦味酸酒精溶液	苦味酸	2 ~ 10g	对钢铁材料的细密组织显示较清晰	侵蚀时间从数秒钟至数分钟
		酒 精	100mL		
3	苦味酸盐酸酒精溶液	苦味酸	1 ~ 5g	显示淬火及淬火回火后钢的晶粒和组织	侵蚀时间较上例快些，约数秒钟至 1min
		盐 酸	5mL		
		酒 精	100mL		

续表 1-3

序号	侵蚀剂名称	成 分		适用范围	使用要点
4	苛性钠苦味酸水溶液	苛性钠	25g	钢中的渗碳体染成暗黑色	加热煮沸侵蚀 5 ~ 30min
		苦味酸	2g		
		水	100g		
5	氯化铁盐酸水溶液	氯化铁	5g	显示不锈钢、奥氏体高镍钢、铜及铜合金组织	侵蚀至显现组织
		盐 酸	50g		
		水	100g		
6	王水甘油溶液	硝 酸	10mL	显示奥氏体镍铬合金等组织	先用盐酸与甘油充分混合, 然后加入硝酸, 试样侵蚀前先用热水预热
		盐 酸	20 ~ 30mL		
		甘 油	30mL		
7	氨水双氧水溶液	氨水 (饱和)	50mL	显示铜及铜合金组织	配好后, 马上使用, 用棉花蘸擦
		3% 双氧水溶液	50mL		
8	氯化铜氨水溶液	氯化铜	8g	显示铜及铜合金组织	侵蚀 30 ~ 50s
		氨水 (饱和)	100mL		
9	混合酸	氢氟酸 (浓)	1mL	显示硬铝组织	侵蚀 10 ~ 20s 或用棉花蘸擦
		盐 酸	1.5mL		
		硝 酸	2.5mL		
		水	95mL		
10	氢氟酸水溶液	氢氟酸 (浓)	0.5mL	显示一般铝合金组织	用棉花擦拭
		水	99.5mL		
11	苛性钠水溶液	苛性钠	1g	显示铝及铝合金组织	侵蚀数秒钟
		水	90mL		

(4) 注意掌握侵蚀时间, 一般是磨面由光亮逐渐失去光泽而变成银灰色或灰黑色。主要根据经验确定。通常高倍观察时侵蚀宜浅, 低倍观察可深些。

试样侵蚀适度后, 应立即用清水冲洗干净, 滴上乙醇再吹干, 即可进行显微分析。

1.1.5.2 电解侵蚀法

原理基本与电解抛光相似, 在电解抛光开始时试样产生“侵蚀”现象就是电解侵蚀的工作范围。此方法对于某些具有极高化学稳定性的合金, 如不锈钢、耐热钢、热电偶材料等, 仍极难清晰地显示出它们的组织。

1.2 金相显微镜的构造与操作

金相显微镜是用于观察金属内部组织结构的重要光学仪器。在显微镜问世以后, 人们才具备了对金属材料进行深入研究的条件。随着科技的发展和新技术的应用, 现代的金相显微镜已发展到相当完善和先进的程度, 已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。

1.2.1 金相显微镜的光学原理

所有的光学仪器都是基于光线在均匀介质中作直线的传播，并在两种不同介质的分界面上发生折射或反射等现象构成的。显微镜也是运用了光学的反射和折射定律。它一般由两块透镜（物镜与目镜）组成，并借助物镜、目镜两次放大，从而得到极高的放大倍数。

1.2.1.1 显微镜的放大倍数

由图 1-4 可知，按照几何光学定律，物镜 O_b 将位于焦点 F_{ob} 左上方的物体 O 放大成为一个倒立的实像 O' 。当用目镜 O_k 观察时，目镜重新又将 O' 放大成倒立的虚像，即在目镜中看到的像。经物镜放大后的像（ O' ）的放大倍数 M_{ob} 为：

$$M_{ob} = \frac{\Delta}{F_{ob}} = \frac{\text{光学镜筒长(约 160mm)}}{\text{物镜焦距}}$$

经目镜将 O' 再次放大的放大倍数 M_{ok} 按照下面的公式计算：

$$M_{ok} = \frac{250}{F_{ok}} = \frac{\text{明视距离}}{\text{目镜焦距}}$$

得到显微镜的总放大倍数 M 为：

$$M = M_{ok} \times M_{ob} = \frac{\Delta}{F_{ob}} \times \frac{250}{F_{ok}}$$

放大倍数与物镜和目镜的焦距乘积成反比。

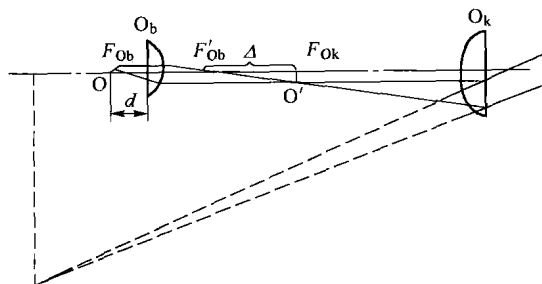


图 1-4 显微镜的光学成像图解

1.2.1.2 显微镜的分辨率

显微镜的分辨率是指显微镜对于要观察的物体上彼此相近的两点产生清晰像的能力，可表示为：

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

式中 d ——显微镜可以区分的两点间的距离；

λ ——光的波长；

A ——数值孔径。

从公式可以看出，物镜的数值孔径越大，入射光波波长越短，则显微镜的分辨率就越高。

1.2.1.3 数值孔径

通常以 $N \times A$ 表示，表征物镜的集光能力。

数值孔径

$$N \times A = \eta \times \sin \psi$$

式中 η ——介质的折射率；

ψ ——孔径角的一半。

介质的折射率越大，则物镜的数值孔径越大，即分辨率越高。

1.2.2 金相显微镜的光学系统

金相显微镜的光学系统一般包括物镜、目镜、光阑、照明系统、滤色片等几部分。金相显微镜一般采用平行光照明系统，即灯丝像先会聚在孔径光阑上，再成像于物镜后焦面上，经物镜射出一束平行光线投射在试样表面。其特点是照明均匀，并且便于在各种照明方式中变换。图 1-5 是国产江南 XJG-05 型金相显微镜的光路图。

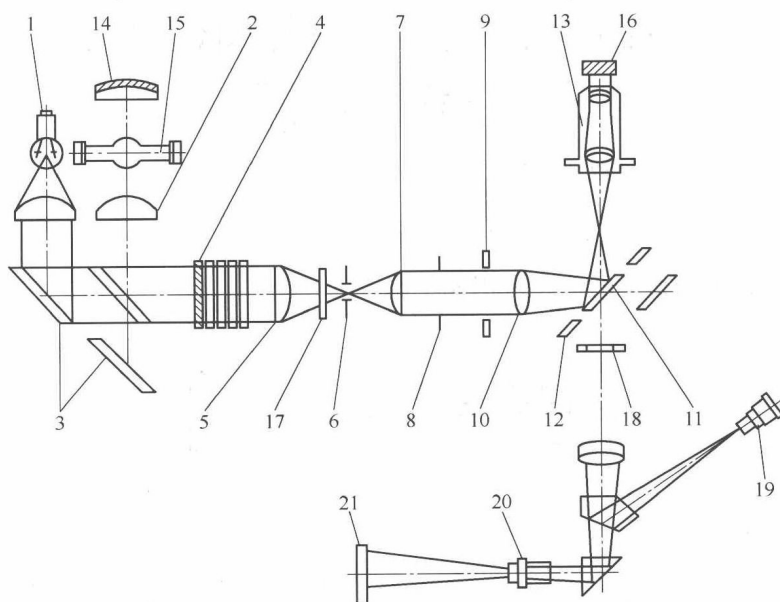


图 1-5 江南 XJG-05 型金相显微镜的光路图

- 1—白炽灯；2、5—聚光镜；3—反射镜；4—滤光片；6—孔径光阑；7—第一透镜；
8—视场光阑；9—明-暗滑板；10—第二透镜；11、12—平面半镀铝反射镜；
13—物镜；14—光源反射镜；15—氙灯；16—试样；17—起偏振镜；
18—检偏振镜；19—目镜；20—摄影目镜；21—毛玻璃

1.2.2.1 物镜

物镜是显微镜最主要的部件，它是由许多种类的玻璃制成的不同形状的透镜组所构成的。位于物镜最前端的平凸透镜称为前透镜，其用途是放大。在它以下的其他透镜均是校正透镜，用以校正前透镜所引起的各种光学缺陷（如色差、像差、像弯曲等）。

按照所接触的介质可分为干系（介质是空气）、湿系或油浸系（介质是高折射率的液体）；按照其光学性能又可分为消色差、平面消色差、复消色差、平面复消色差、半消色

差物镜和显微硬度物镜、相称物镜、球面及非球面反射物镜等。

1.2.2.2 目镜

目镜主要用来对物镜已放大的图像进行再次放大，可分为普通目镜、校正目镜和投影目镜。

普通目镜是由两块平凸透镜组成的。在两个透镜中间、目透镜的前交叉点处安置一个光圈。其目的是为了限制显微镜的视场，即限制边缘的光线。

校正目镜（或称补偿目镜），具有色“过正”的特性（过度地校正色差），以补偿物镜的残余色差，还能补偿（校正）由物镜引起的光学缺陷。该目镜只与复消色差和半复消色差物镜配合使用。

投影目镜专门供照相时使用，用来消除物镜造成的曲面像。

1.2.2.3 照明系统

金相显微镜中主要有两种照明物体的方法，即 45° 平面玻璃反射和棱镜全反射。这两种方法都是为了使光线进行垂直转向，并投射在物体上。这种作用的结构称为“垂直照明器”。在金相工作中的照明方式分为明场和暗场照明两种。

明场照明是金相分析中常用的一种照明方式。垂直照明器将来自光源的水平方向光线转成垂直方向的光线，再由物镜将垂直或近似垂直的光线，照射到金相试样平面，然后由试样表面上反射来的光线，又垂直地通过物镜给予放大，最后由目镜再予以第二次放大。如果试样是一个镜面，那么最后的映像是明亮一片，试样的组织将呈黑色映像衬映在明亮的视域内，因此称为“明视场照明”。在后面章节中出现的金像图片大部分是以这种照明方式取得的。

暗场照明时入射光束绕过物镜，以极大的角度斜射到试样表面，散射光（漫射光）进入物镜成像。这样的光束是靠暗场折光反射镜和环形反射镜获得，其光路图见图 1-6。暗场照明提高了显微镜的实际分辨能力和衬度；可以鉴别钢中的夹杂物和固有色彩；暗场照明可以粗略地估算夹杂物的类型及所含元素的种类，故对非金属夹杂物可以做定性分析。

图 1-7 是在暗场下的条带状组织，其细节更加明显；图 1-8 是金属中非金属夹杂物

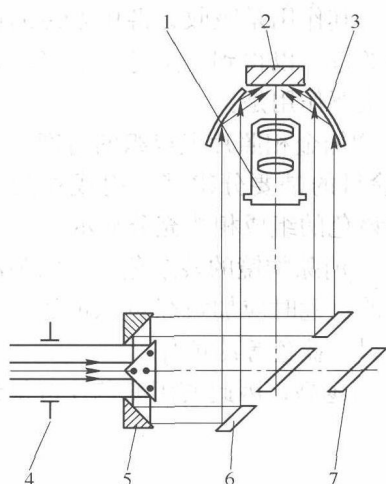


图 1-6 暗场照明光路图

1—物镜；2—试样；3—抛物型反射镜；4—光源；
5—棱镜；6，7—平面半镀铝反射镜

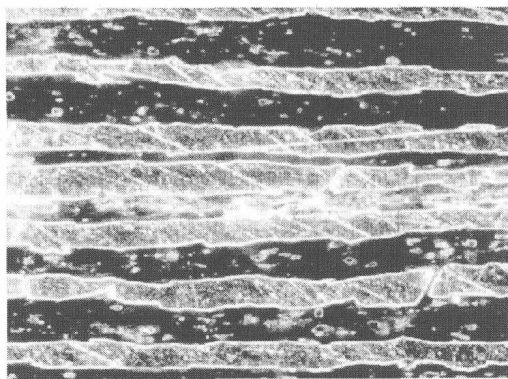


图 1-7 暗场下的条带状组织（500×）

照片(500×)在明场和暗场中的形态。

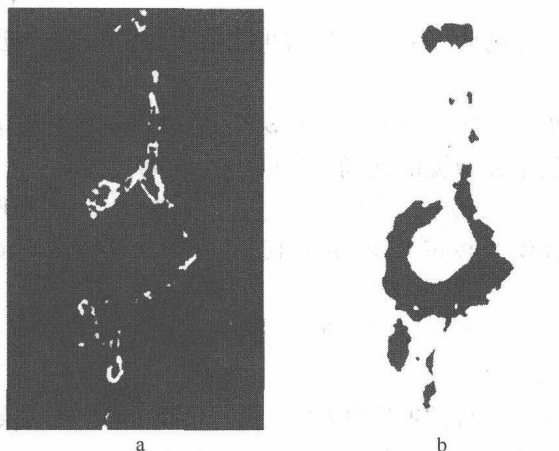


图 1-8 金属中非金属夹杂物照片(500×)

a—暗场照明；b—明场照明

1.2.2.4 光阑

光阑的存在是为了提高映像质量。主要有孔径光阑和视域光阑两种。孔径光阑可以调节入射光线的粗细。孔径光阑过小降低物镜的分辨能力，孔径光阑过大又影响图像衬度。视域光阑处在孔径光阑之后，能改变观察视域的大小；视域光阑还能减少镜筒内部的反射与弦光，提高映像衬度。孔径光阑和视域光阑都是为了改进映像的质量，而设置于光学系统中的，应根据映像的分辨能力和衬度的要求妥为调节，充分发挥其作用。切勿仅用以调节映像的明暗，而失去应有效应。

1.2.2.5 滤色片

滤色片是金相显微镜摄影时的一个重要辅助工具。其作用是吸收光源中发出的白光中波长较长不符合需要的光线，而只让所需波长的光线通过，以得到一定色彩的光线，从而明显地表达出各种组织组成物的金相图片。滤色片的主要作用是：

(1) 对彩色图像进行黑白摄影时，使用滤色片可增加金相照片上组织的衬度，或提高某种带有色彩组织的细微部分的分辨能力。如果检验目的是要分辨某一组成相的细微部分，则可选用与所需鉴别的相同样色彩的滤色片，使该色的组成相能充分显示。

(2) 校正残余色差。滤色片常与消色差物镜配合，消除物镜的残余色差。因为消色差物镜仅于黄绿光区域校正比较完善，所以在用消色差物镜时应加黄绿色滤色片。复消色差物镜对波长的校正都极佳，故可不用滤色片或用黄绿、蓝色等滤色片。

(3) 提高分辨率。光源波长越短，物镜的分辨能力越高，因此使用滤色片可得到较短波长的单色光，提高分辨率。

1.2.3 金相显微镜的使用及注意事项

金相显微镜属于精密的光学仪器，因此在使用时必须细心谨慎，使用前应当熟悉金相显微镜的原理和结构，使用过程中严格按照有关操作规程进行操作。