

“十二五”普通高等教育本科规划教材

JINXIANG JIANYAN JISHU SHIYAN JIAOCHENG

金相检验技术 实验教程

王志刚 徐 勇 石 磊 编著



化学工业出版社

“十二五”普通高等教育本科规划教材

金相检验技术实验教程

王志刚 徐 勇 石 磊 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要介绍了金相检验技术的基本知识，其主要内容分为三部分：第一部分为基础型实验，主要内容包括：金相试样的制备、金相显微镜的操作与金相摄影、偏光和暗场在金相检验中的应用、显微硬度法在金相分析中的应用、钢的宏观检验技术、钢铁中常见的组织、钢的晶粒度、带状组织、魏氏组织、非金属夹杂物的分析与评定等；第二部分为分析型实验，内容涉及：结构钢、碳素工具钢、合金工具钢、模具钢、高速钢、弹簧钢、轴承钢、特殊性能钢、灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、可锻铸铁以及渗层的组织分析与检验；第三部分为综合型实验，主要有：焊接件的检验、有色金属的组织观察、常见热加工缺陷组织观察与分析和扫描电镜对材料组织的分析。本书附录列举了钢铁材料常用化学侵蚀剂，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等。

本书可作为理工科大中专院校材料科学与工程专业、金属材料专业的本科生实验教材或实验教学参考书，也可供材料成型与控制工程、机械工程专业等相关专业的师生与从事金相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

金相检验技术实验教程/王志刚, 徐勇, 石磊编著. —北京:
化学工业出版社, 2014. 9

“十二五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-122-21484-3

I. ①金… II. ①王…②徐…③石… III. ①金相组织-
检验-高等学校-教材 IV. ①TG115.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 172209 号

责任编辑：杨 菁

文字编辑：徐雪华

责任校对：边 涛

装帧设计：孙远博

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：三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14 字数 350 千字 2014 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：38.00 元

版权所有 违者必究

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，对理工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。为了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《金相检验技术实验教程》。本书以培养学生全面掌握金相检验技术的基本知识和检验技能为目的，力求涵盖金属热处理、金相组织、实验设备多方面内容，简明扼要，重在实践检验环节的指导和实践检验过程的体验。

金相检验技术实验课的设立，可以让学生在实验过程中加深对所学的《金相检验技术》、《金属材料及热处理》等课程的重点、难点内容的理解，更有助于实际工作能力的提高。本书分为 23 个实验，主要介绍了实验仪器操作、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，内容多样，适应高校教材的基本要求。在实验设计及安排上，我们列出了具体的检验实例，注重讲、学、练一体化的教学模式，让学生在充满挑战性的实验过程中掌握金相检验技术的基本知识与操作技能。对于从事材料科学与工程、材料成型与控制工程、机械工程专业等相关专业的技术人员来说，也可以作为参考书籍。

本书在编写过程中受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。本书主要由王志刚、徐勇、石磊编写。孙齐磊、田彬参与了实验十到实验十九的编写工作。山东建筑大学金属材料教研室主任刘科高教授、王献忠高工对本书实验内容的安排及实验的组织结构给了很多指导意见。山东建筑大学的许斌教授认真审阅了本教材，并提出了许多宝贵的修改意见。对这些老师的热忱支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

在本书编写过程中，参考了国内外专家和同行们的大量教材、著作、研究成果和文献，在此表示感谢。由于编者水平所限，书中难免存在疏漏之处，恳请同行专家和读者批评指正。

编 者

2014 年 5 月

目 录

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 第一篇 基础型实验 | 1 |
| 实验一 金相试样的制备 | 1 |
| 实验二 金相显微镜与金相摄影 | 6 |
| 实验三 钢铁材料常见组织 | 18 |
| 实验四 钢的宏观检验技术 | 34 |
| 实验五 金属平均晶粒度的测定 | 42 |
| 实验六 偏光、暗场在金相分析中的应用 | 50 |
| 实验七 钢中带状组织、魏氏组织、游离渗碳体的组织观察与检验 | 56 |
| 实验八 非金属夹杂物的分析与评定 | 60 |
| 实验九 显微硬度法在金相检验中的应用 | 66 |
| 第二篇 分析型实验 | 72 |
| 实验十 结构钢的组织观察与检验 | 72 |
| 实验十一 碳素工具钢、合金工具钢的组织观察与检验 | 83 |
| 实验十二 轴承钢的组织观察与检验 | 90 |
| 实验十三 弹簧钢的组织观察与检验 | 96 |
| 实验十四 高速钢的组织观察与检验 | 102 |
| 实验十五 模具钢的组织观察与检验 | 110 |
| 实验十六 特殊性能钢的组织观察与检验 | 118 |
| 实验十七 灰铸铁、硼铸铁的组织观察与检验 | 134 |
| 实验十八 球墨铸铁、可锻铸铁、蠕墨铸铁的组织观察与检验 | 141 |
| 实验十九 渗层的组织观察与检验 | 153 |
| 第三篇 综合型实验 | 169 |
| 实验二十 焊接件的金相检验 | 169 |
| 实验二十一 有色金属的组织观察与检验 | 185 |
| 实验二十二 常见热加工缺陷组织观察与分析 | 195 |
| 实验二十三 扫描电镜对材料组织的分析 | 202 |
| 附录 | 208 |
| 附录 1 常用化学侵蚀剂 | 208 |
| 附录 2 压痕直径与布氏硬度对照表 | 212 |
| 附录 3 洛氏硬度、布氏硬度、维氏硬度与抗拉强度对照表 | 216 |
| 参考文献 | 219 |

第一篇 基础型实验

金相检验技术是根据相关标准和规定来评价金属材料质量的一种检验方法，并可以用来判断工件的生产工艺是否完善，有助于分析工件产生缺陷的原因，是生产和科研中必不可少的一种技术。

由于金相检验经常要分析材料的金相组织，主要借助金相显微镜等分析仪器。由于光学显微镜是借助于试样表面对光线的反射来呈现显微组织状态的，所以首先要把试样观察面制成光滑平面，而后通过侵蚀使其不同组织显示出微观的凹凸不平，从而在显微镜下观察到明暗不同的显微组织特征。为了达到合格的金相试样，避免因出现假像而导致错误的判断，必须掌握正确的制样方法。

实验一 金相试样的制备

一、实验目的及要求

1. 学习掌握金相试样的制备原理与制备过程。
2. 学习掌握金相显微组织的常用显示方法。

二、实验原理

金相试样的制备应具有代表性和典型性。试样的截取方向、部位及数量应根据金属制造的方法、检验的目的、技术条件或双方协议的规定选取有代表性的部位进行切取。金相试样的制备包括：取样、镶嵌、磨制、抛光、侵蚀等工序。

1. 金相试样的选取

① 纵向取样 指沿着钢材的锻轧方向进行取样。可检验内容为：非金属夹杂物的数量、大小和形状；晶粒畸变程度；塑性变形程度；变形后的各种组织形貌；带状组织；带状碳化物；共晶碳化物等。

② 横向取样 指垂直于钢材锻轧方向进行取样。可检验内容为：材料从表层到心部的组织；显微组织状态；晶粒度级别；碳化物网；表层缺陷深度；脱碳层深度；腐蚀层深度；表面化学热处理及镀层厚度等。

③ 缺陷或失效分析取样 在缺陷或失效部位取样，注意防止缺陷或失效部位在磨制时被损伤破坏。

④ 取样大小 以便于在手中磨制为宜，通常为 $\phi 12\text{mm} \times 12\text{mm}$ 圆柱形或 $12\text{mm} \times 12\text{mm} \times 12\text{mm}$ 的正方形。

⑤ 取样方法 手锯（如灰铁，有色金属等）；砂轮切割（如高速钢，淬火钢等）；电火花切割（如钛金属等）；锤击法（对于一些硬而脆的材料）等方式。

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、塑料镶嵌或环氧树脂镶嵌。金相试样镶嵌方法如图 1-1 所示。

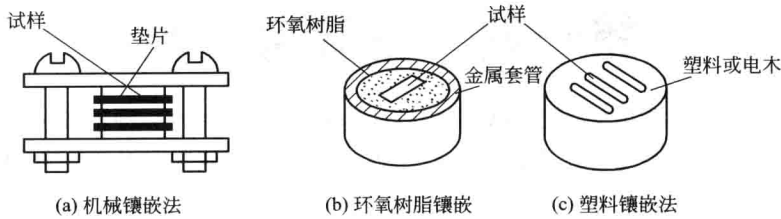


图 1-1 金相试样镶嵌方法

① 机械镶嵌 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。分为以下两种。

a. 热压镶嵌：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，成型后即可脱模，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。

b. 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（质量比）

优点：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。

3. 金相试样的磨制

分为粗磨和细磨两部分。

① 粗磨 即磨平，注意磨制时要用水冷却，以防止试样受热而改变组织；接触时压力要均匀，不宜过压（易产生砂轮破裂和温度升高组织改变）；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 即磨光，目的是除去粗磨时留下的划痕，为下一步抛光做准备。细磨可分为手工细磨和机械细磨。

注意用水冷却，避免磨面过热。注意：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。

4. 金相试样的抛光

抛光目的在于去除金相磨面上由细磨所留下的细微磨痕及表面变形层，使磨面成为无划痕的光滑镜面。抛光方法有以下几种。

① 机械抛光 主要设备是抛光机，方法同机械细磨。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，并做轻微移动。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。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生温，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。

常用的抛光微粉见表1-1。

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 $0.3\mu m$ ，外形呈多角形。 γ -氧化铝粒度为 $0.1\mu m$ ，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。

② 电解抛光 采用化学溶解作用使试样达到抛光的目的。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，对于极易加工变形的奥氏体不锈钢、高锰钢等采用电解抛光更合适。但不适用于偏析严重的金属材料、铸铁以及夹杂物的检验。电解抛光原理示意图如图1-2所示。常用的电解抛光液和规范见表1-2。

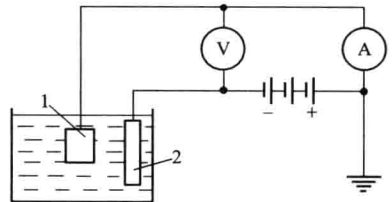


图 1-2 电解抛光原理
1—阳极(试样)；2—阴极

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 | | |

续表

| 抛光液名称 | 成分/mL | | 规范 | 用途 |
|---------|-------|-----|--------|---------|
| 磷酸-乙醇溶液 | 水 | 200 | 25~30V | 铝、镁、银合金 |
| | 乙醇 | 380 | 4~6s | |
| | 磷酸 | 400 | | |

电解抛光步骤：将试样浸入电解液中作阳极，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。

5. 金相试样的侵蚀

金相试样侵蚀的目的是显示它的微观组织。常用方法有化学侵蚀、电解侵蚀法等。

(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，晶界处就容易因侵蚀而下凹，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 1-3(a)。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 1-3(b)。

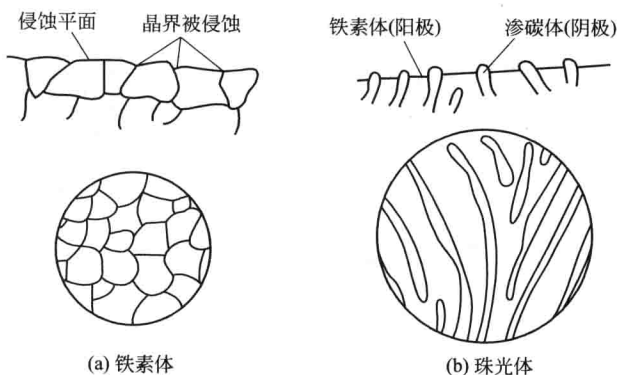


图 1-3 单相合金和双相合金侵蚀示意图

(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”现象始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。

三、实验仪器及材料

1. 实验仪器

立式金相显微镜，卧式金相显微镜，砂轮机，预磨机，抛光机，电吹风。

2. 实验材料

结构钢、工具钢、特殊性能钢、铸铁、有色金属等试样，不同型号的金相砂纸，抛光液，酒精，4%硝酸酒精侵蚀剂，脱脂棉，竹夹子。

四、实验内容及步骤

1. 实验内容

- (1) 学习掌握金相试样的取样、镶嵌、磨制。
- (2) 学习掌握金相试样侵蚀剂的选取方法。
- (3) 学习掌握金相试样制备质量的检验方法。

2. 实验步骤

每位同学领取一块试样，按照上述制样过程进行操作，注意掌握每一步骤的要点。

- (1) 用砂轮打磨，获得平整磨面。
- (2) 用预磨机从粗到细磨光。
- (3) 用抛光机抛光，获得光亮镜面。
- (4) 用侵蚀剂侵蚀试样磨面，然后用金相显微镜观察所侵蚀试样的组织。
- (5) 分析所制备试样的质量。

五、实验注意事项

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. 根据试样材料和检验要求正确选择侵蚀剂，常用化学侵蚀剂见表 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 酒精 100mL | 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 |
| 2 | 苦味酸酒精溶液 | 苦味酸 2~10g 酒精 100mL | 对钢铁材料的细密组织显示较清晰 | 侵蚀时间数秒钟至数分钟 |
| 3 | 苦味酸盐酸酒精溶液 | 苦味酸 1~5g 盐酸 5mL 酒精 100mL | 显示淬火及淬火回火后钢的晶粒和组织 | 侵蚀时间较上例为快些，约数秒钟至一分钟 |
| 4 | 苛性钠苦味酸水溶液 | 苛性钠 25g 苦味酸 2g 水 100g | 钢中的渗碳体染成暗黑色 | 加热煮沸侵蚀 5~30min |
| 5 | 氯化铁盐酸水溶液 | 氯化铁 5g 盐酸 50g 水 100g | 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 |
| 6 | 王水甘油溶液 | 硝酸 10mL 盐酸 20~30mL 甘油 30mL | 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 |
| 7 | 氨水双氧水溶液 | 氨水(饱和) 50mL 3%双氧水溶液 50mL | 显示铜及铜合金组织 | 配好后，马上使用、用棉花蘸擦 |
| 8 | 氯化铜氨水溶液 | 氯化铜 8g 氨水(饱和) 100mL | 显示铜及铜合金组织 | 侵蚀 30~50s |

续表

| 序号 | 侵蚀剂名称 | 成分 | 适用范围 | 使用要点 |
|----|--------|--|-----------|------------------|
| 9 | 混合酸 | 氢氟酸(浓) 1mL 盐酸 1.5mL 硝酸 2.5mL 水 95mL | 显示硬铝组织 | 侵蚀 10~20s 或用棉花蘸擦 |
| 10 | 氢氟酸水溶液 | 氢氟酸(浓) 0.5mL 水 99.5mL | 显示一般铝合金组织 | 用棉花擦拭 |
| 11 | 苛性钠水溶液 | 苛性钠 1g 水 90mL | 显示铝及铝合金组织 | 侵蚀数秒钟 |

4. 注意掌握侵蚀时间, 根据经验, 一般磨面的光亮逐渐失去光泽而变成银灰色或灰黑色即可, 金相试样最终质量应由显微镜决定。通常高倍试样侵蚀宜浅, 低倍试样侵蚀可深一些。

5. 金相试样侵蚀适度后, 应立即用清水冲洗干净, 滴上无水乙醇吹干, 然后即可进行显微分析。

六、实验报告要求

1. 写出实验目的。
2. 简述金相组织分析原理及金相显微试样的制备过程。
3. 绘制侵蚀后试样显微组织。
4. 总结实验中存在的问题与体会。

七、思考题

1. 金相试样的取样原则是什么?
2. 金相显微试样的制备过程?
3. 如何选择侵蚀剂? 金相实验室常用化学侵蚀剂有哪些?
4. 如何制备高质量的金相显微试样?

实验二 金相显微镜与金相摄影

利用显微镜检验金属材料内部组织和缺陷是金属材料研究中的一种基本实验技术, 也是学生必须掌握的金相显微分析手段。光学显微镜是用于金属显微分析的主要工具, 它是利用光线的反射将不透明物件放大后进行观察的。将按一定程序制备好的金属试样放在光学显微镜下进行放大和观察, 可以研究金属组织与成分和性能之间的关系, 确定各种金属经不同加工工序及热处理后的显微组织; 鉴别金属材料质量的优劣, 如金属晶粒度大小, 以及各种非金属夹杂物在组织中的数量及分布情况等。

一、实验目的及要求

1. 掌握金相显微镜的成像原理和立式、卧式金相显微镜的构造。
2. 掌握金相显微镜实际操作方法。
3. 掌握金相摄影操作步骤与使用方法

二、实验原理

1. 金相显微镜

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。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) 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。金相显微镜也是运用了光学的反射和折射定律。它一般由两组透镜(物镜与目镜)组成,并借助物镜、目镜两次放大,使得物体得到极高的放大倍数。

① 显微镜的放大倍数 由图 2-1 可知,按照几何光学定律,物镜 Ob 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 OK 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:

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

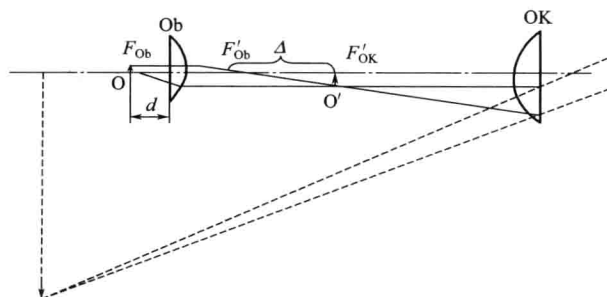


图 2-1 显微镜的光学成像图解

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。

② 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: $d = \frac{\lambda}{NA}$

其中, d 为显微镜可以区分的两点间的距离; λ 为光的波长; NA 为数值孔径。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。

③ 数值孔径 通常以 NA 表示,表征物镜的集光能力。

$$\text{数值孔径 } NA = \eta \times \sin\psi$$

其中, η 为介质的折射率; ψ 为孔径角的一半。介质的折射率越大,则物镜的数值孔径越大,即分辨率越高。

(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。如图 2-2 是国产江南 XJG-05 型金相显微镜的光路图。

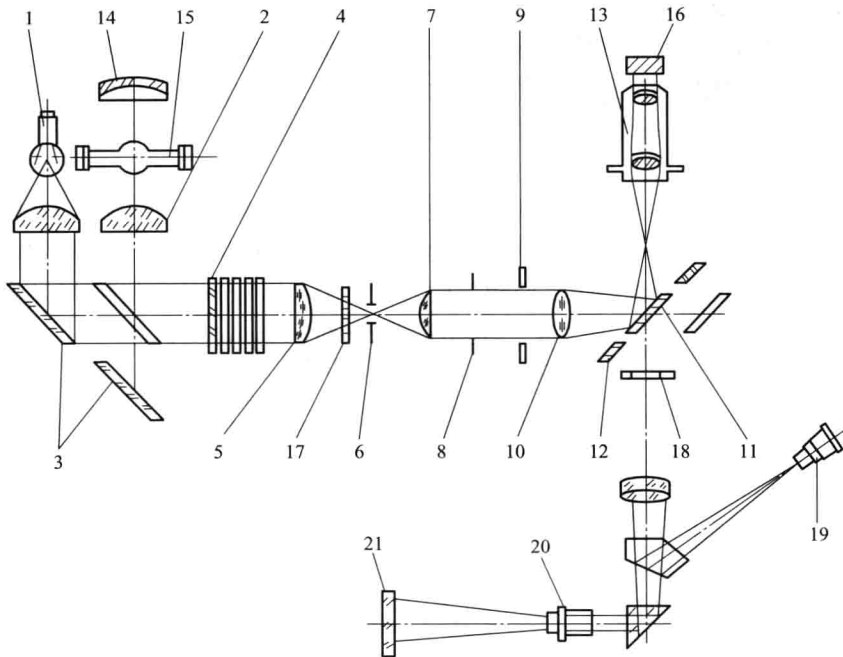


图 2-2 国产江南 XJG-05 型金相显微镜的光路图

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 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。

② 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），它具有“过正”的特性（过度的校正色差），以补偿物镜的残余色差，它还能补偿（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。

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能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 2-3。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 2-4 是在暗场下的条带状组织，其细节更加明显；图 2-5 是低温超导体导线在明场和暗场的形貌。

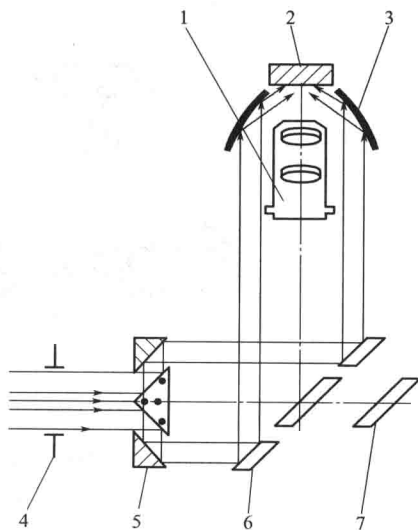


图 2-3 暗场照明光路图

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

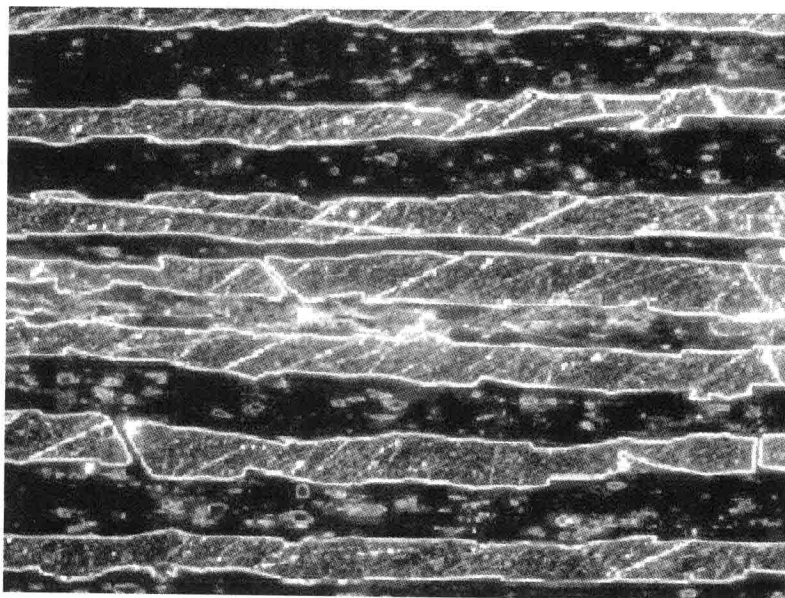


图 2-4 暗场下的条带状组织 (500×)

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

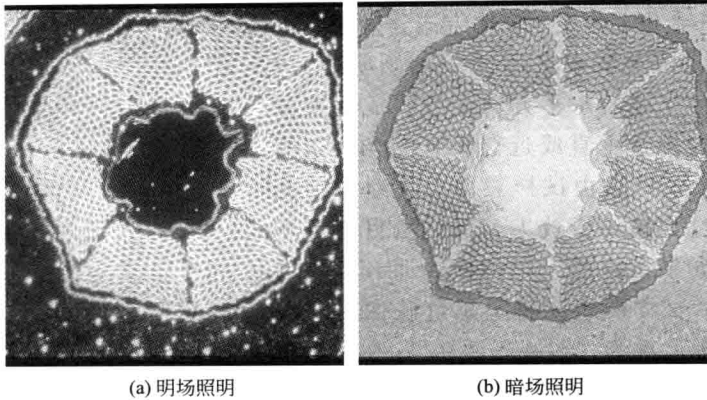


图 2-5 低温超导体导线 (500×)

衬度。视域光阑能改变观察区域的大小，还能减少镜头内部的反射与弦光；视域光阑越小，图像的衬度越好。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。

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，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，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。滤色片的主要作用如下。

a. 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同同样色彩的滤色片，使该色的组成相能充分显示。

b. 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，所以在使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。

c. 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，提高分辨力。

(3) 新型金相显微镜简介

① 偏振光显微镜 利用自然光线射入光学各向异性晶体会发生分解为两束折射光线的现象，即双折射现象，来分析组织与晶粒、多相合金的相以及非金属夹杂物的鉴别、晶粒位向的测定等，如图 2-6 所示。

② 干涉显微镜 利用光的干涉原理来提高显微镜的垂直鉴别能力，能够显示试样表面的微小起伏，可用于表面光洁度测量、形变滑移带和切变型相变浮凸的观测以及裂纹的扩展等方面的研究。图 2-7 中干涉像中能够清晰显示马氏体的浮凸效果。

③ 相衬显微镜 利用特殊相板的作用，使不同位相的反射光发生干涉或叠加，借以鉴别金相组织。试样高度差在十埃到几百埃范围内都能清楚鉴别。可用于增加映像的衬度、获得清晰组织图像；显示显微偏析；用于滑移带、位错、表面浮凸的观察等。如图 2-8 能够看到纯铜表面产生塑性变形后出现的滑移台阶。

(4) 测微目镜的校正

在进行脱碳层深度检验、晶粒度评级及夹杂物定量分析等工作时，需要用测微目镜对组

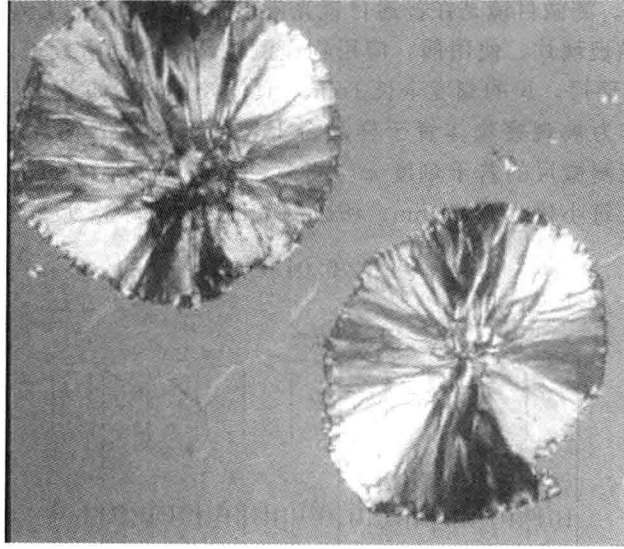
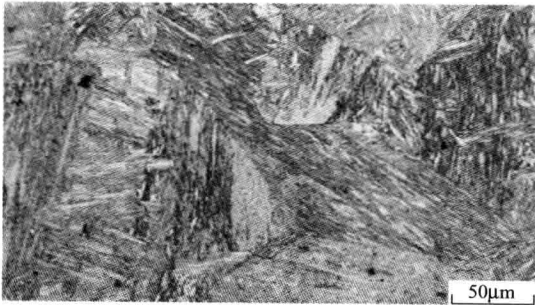
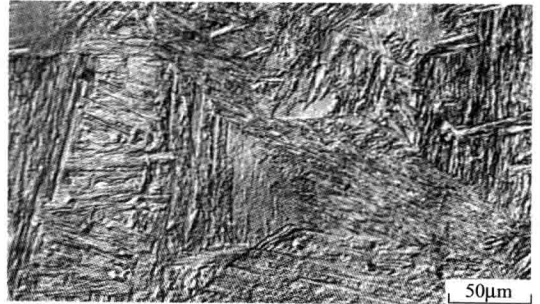


图 2-6 球铁在偏振光显微镜下的金相组织 (100×)



(a) 明场像



(b) 干涉像

图 2-7 低碳马氏体钢中的板条马氏体

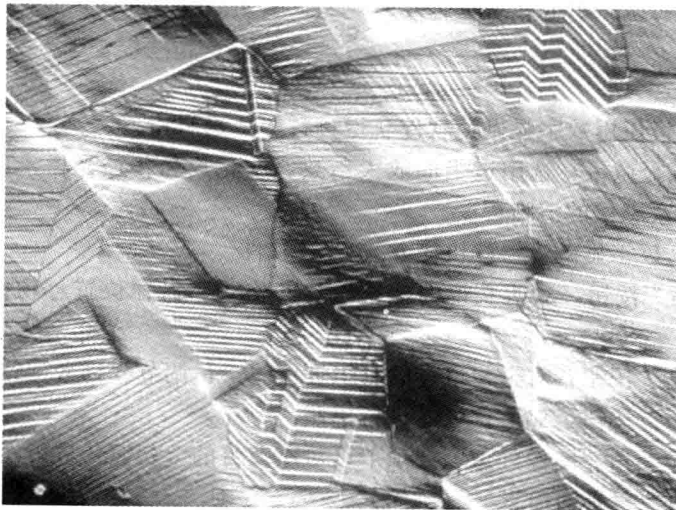


图 2-8 纯铜的滑移痕迹 (500×)

成物的尺寸进行测量。测微目镜是在普通目镜光阑上（即初像焦面上）装一个按 0.1mm 或 0.5mm 等分度的测微玻璃片。使用前，应用物镜测微尺对其进行校正。物镜测微尺只是刻有按 0.01mm 分度的玻璃尺，尺的刻度全长 1mm，具体校正方法如下。

将物镜测微尺作为被观察物体置于样品台上，刻度面朝物镜。用测微目镜观察，并调节其旋钮，使物镜测微尺的若干刻度 n 与测微目镜上若干刻度 m 对齐，如图 2-9 所示。由于已知物镜测微尺每小格为 0.01mm，所以测微目镜中每小格所量度的实际长度为：

$$a = \frac{n}{m} \times 0.01 \text{ (mm)}$$

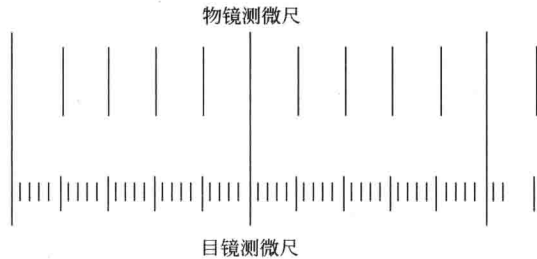


图 2-9 测微目镜刻度校正

在图 2-9 中，物镜测微尺上的 10 格（相当于 $0.01\text{mm} \times 10 = 0.1\text{mm}$ ）与测微目镜的 50 格对齐，所以测微目镜内每小格所量度的实际长度为：

$$a = \frac{n}{m} \times 0.01 \text{ (mm)}$$

若用测微目镜测量的组织组成物长度为 N 格，则它的实际长度为 $N \times a$ (mm)。应当注意：校正后进行实际测量时，必须仍用校正时的物镜；若改用别的物镜，又需重新校正。

2. 金相摄影

金相摄影是在数字显微互动系统及金相显微镜上进行的。

(1) 试样制备要求

根据检验内容及相关标准要求制备金相试样。要照相的金相试样需要特别精制、要求在被照视区无划痕，显微组织清晰，层次分明，无金属变形层或假相，石墨及夹杂物不得被磨掉或有曳尾现象。

(2) 照相

通过金相显微镜使用数字显微镜软件获得材料的金相照片。

① 要正确调试显微镜，选用适当的放大倍数、滤光片和孔径光栏，可用专附的放大镜在照像毛玻璃上观察影像的清晰程度。

② 运行桌面上数字显微镜软件快捷方式 MiE 软件。

③ 点击“设置”按钮，对所获得的金相照片的格式、保存位置、物镜放大倍数及测定单位等进行设置。

④ 点击“预览”按钮，对金相试样的组织进行观察，调节载物台旋钮选择合适的视场。

⑤ 点击“拍照”按钮，对所选区域进行拍照。

⑥ 点击屏幕左上角“图像处理”选项卡，对所获得的金相照片进行图片处理。

3. 影响金相照片质量的因素

影响金相照片质量的因素有原材料本身缺陷、样品制备缺陷和拍摄技巧。