

材料科学与工程专业实验实训

主 编 狄玉丽 郑 飞 张 浩

副主编 焦 钰 张万明 郑春梅

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

为满足应用型院校材料科学与工程专业的实验教学需求，适应时代发展的要求，培养具有扎实专业知识和较强动手能力的材料科学技术人员，编者特编写本书。

全书共两部分，第一部分为专业基础实验实训，第二部分为无机非金属材料方向实验实训，将材料科学与工程专业的基础实验课程和无机非金属等方向专业集群课程进行综合，详细讲解了合成、加工、性能测试及表征、应用的相关知识和实验，是面向材料科学与工程专业的必修课教材。为了体现应用型高校的要求和特点，本书编写时注重以下几个方面：第一，重构实验项目，针对现有实验实训开设过程中的实际情况，系统梳理课程群开设目标，根据材料科学与工程专业培养要求，对课程群所涉及知识一一对应实验项目，并将实验项目分门归类。第二，增强学生的创新科研能力，实验项目重构过程，通过系统梳理攀西特色，引导性开设探索实验项目、趣味实验项目，使学生在课程实验操作的基础上，渴望创新科研，具备创新科研的能力。第三，保障学生的实践能力和动手能力，实践是学生培养最重要的环节，通过教材指导、实验开设，使学生具备动手能力、独立思考能力、团队协作能力、理论联系实际能力、工程实践创新能力。第四，提升学生的专业技能大赛能力，通过教材指导，学生在完成大量探索实验及创新科研后，能进一步参加省级、国家级专业技能大赛，包括“材料设计大赛”“大学生创新创业大赛”“挑战杯”“全国高校大学生金相大赛”等。

本书为西昌学院立项建设教材，由西昌学院狄玉丽、郑飞、张浩担任主编，焦钰、张万明、郑春梅担任副主编。编写人员分工如下：狄玉丽编写第一章至第三章；张浩编写第四章和第五章；张万明编写第六章；焦钰编写第七章；郑飞编写第八章至第十二章；郑春梅编写第十三章。

在本书编写过程中，编者还参考和借鉴了其他院校和老师编写的相关书籍，谨在此一并表示最诚挚的谢意。我们希望本书能对材料及相关专业的实验教学工作中起到积极的作用，但由于编者能力和水平的限制，书中不当之处在所难免，恳请各位专家和读者批评指正。

编者

2023年6月于西昌学院

第一部分 专业基础实验实训

第一章 材料科学与基础实验 ·····	002
实验一 金相显微试样的制备·····	002
实验二 金相显微镜的构造和使用·····	008
实验三 铁碳合金平衡组织观察与分析·····	013
实验四 碳钢热处理后的显微组织观察·····	019
实验五 铸铁显微组织观察与分析·····	024
实验六 有色金属合金的显微组织观察·····	028
第二章 材料力学实验 ·····	033
实验一 拉伸对比实验·····	033
实验二 压缩对比实验·····	037
实验三 圆轴扭转实验·····	040
实验四 冲击实验·····	043
实验五 弯曲实验·····	047
实验六 杨氏模量的测量·····	050
实验七 自主综合设计实验·····	056
第三章 材料科学研究与分析方法实验 ·····	057
实验一 扫描电子显微镜的原理与构造·····	057
实验二 透射电子显微镜的原理与构造·····	064
实验三 原子力显微镜的原理与构造·····	069
实验四 电感耦合等离子体原子发射光谱的原理与构造·····	075
实验五 X射线衍射物相定性分析·····	078
实验六 XQM 行星式球磨机的使用·····	083
实验七 液压压片机的使用·····	087
实验八 洛氏硬度检测与分析·····	090
实验九 马弗炉的原理及使用·····	094
实验十 激光粒度分析及原理·····	098

实验十一	材料密度、孔隙率及吸水率的测定	100
实验十二	线性极化技术测量金属腐蚀速度	103
第四章	计算机在材料科学研究中的应用	106
实验一	Chemdraw 的学习与使用	106
实验二	Chem3D 的学习与使用	111
实验三	Origin 的绘图处理	115
实验四	Origin 的数据处理	120
实验五	Photoshop 的学习及使用(1)	125
实验六	Photoshop 的学习及使用(2)	128
实验七	AutoCAD 的绘图基础知识	130
实验八	AutoCAD 绘制二维图像及标注	134
实验九	AutoCAD 绘制三维图像及标注	140
第五章	物理化学实验	146
实验一	旋光度测定蔗糖水解反应速率常数	146
实验二	凝固点降低法测定摩尔质量	151
实验三	挥发性完全互溶双液系 $T-x$ 相图的绘制	157
实验四	液体饱和蒸气压的测定	163
实验五	溶液中的吸附作用和表面张力的测定——最大气泡法	168
实验六	氨基甲酸铵分解反应标准平衡常数的测定	173
实验七	恒温槽的装配和性能测试	178
实验八	黏度法测定高聚物的摩尔质量	184
实验九	化学平衡常数及分配系数的测定	188
实验十	甲基红离解平衡常数的测定	192
第六章	金工实习	198
实验一	车工实习(1)	198
实验二	车工实习(2)	201
实验三	铣工实习	205
实验四	焊接实习	212
第二部分 无机非金属材料方向实验实训		
第七章	化学成分分析	220
实验一	原样的采集、粉碎和缩分	220

实验二	水泥生料中碳酸钙滴定值测定	225
实验三	水泥熟料中氧化钙含量测定	228
实验四	水泥中三氧化硫含量测定	232
实验五	石灰中二氧化碳含量测定	237
实验六	石灰中氧化镁含量测定	239
实验七	石膏结晶水和附着水含量测定	242
实验八	玻璃配合料中碳酸钠成分分析	244
第八章	物理性能的测试与表征	246
实验一	密度、吸水率及气孔率测试	246
实验二	BET 吸附法测定粉体比表面积	251
实验三	细度、粒径和粒径分布测定	255
实验四	白度、光泽度及透光度测定	258
实验五	综合热分析	263
实验六	表面张力和接触角测定	267
实验七	水泥原料易磨性测试	271
第九章	水泥的制备及性能测试	273
实验一	硅酸盐水泥的制备	273
实验二	水泥水化热的测定	276
实验三	水泥水化速率测定	281
实验四	水泥岩相分析	285
第十章	混凝土的制备及性能测试	290
实验一	普通混凝土配合比设计及拌和实验	290
实验二	混凝土静态力学性能实验	298
实验三	混凝土受压徐变和抗压疲劳变形测定	304
第十一章	玻璃的制备及性能测试	308
实验一	玻璃配合料的制备及均匀度测定	308
实验二	玻璃熔制实验	315
实验三	玻璃化学稳定性测定	319
实验四	烧失量测定	322
第十二章	陶瓷的制备及性能测试	324
实验一	陶瓷烧成综合实验	324

实验二	线收缩率和体积收缩率的测定	331
实验三	陶瓷机械性能测定	335
实验四	干燥灵敏性系数的测定	338
实验五	陶瓷显微硬度测定	341
实验六	固相反应制备 BaTiO ₃ 粉体	345
实验七	PTC 陶瓷材料的制备	347
实验八	Al ₂ O ₃ 陶瓷材料的制备	352
实验九	溶胶-凝胶法制备 TiO ₂ 薄膜	355
第十三章	混凝土的制备及性能测试	359
实验一	石膏的成型加工	359
实验二	建筑石膏力学性能及硬度测定	361
实验三	生石灰消化速度及消石灰粉体体积安定性测定	365
参考文献		367



第一部分



PART ONE

专业基础实验实训

材料科学与基础实验主要包括 6 个实验内容, 学生通过实验可熟练掌握金相制样的方法、步骤和原理, 并通过实验能够快速分析不同含量碳钢、铸铁、重要有色金属材料的显微组织结构, 能够通过实验加强理论知识的积累。

实验一 金相显微试样的制备

金相显微分析是研究材料内部组织的重要方法之一。借助金相显微镜研究和观察金属内部显微组织结构, 首先要制备出能用于显微分析的样品——金相显微试样。制备的金相显微试样质量的好坏, 直接影响到组织观察结果。如果样品制备不符合特定的要求, 就有可能由于出现假相而产生错误的判断, 导致整个金相显微分析得不到正确的结论。因此, 学会制备金相试样是金属材料研究的基本功之一, 需熟练掌握。

一、实验目的

- (1) 熟悉金相试样的制备过程及原理。
- (2) 掌握金相试样的制备方法。

二、实验原理

一个合格的金相试样需满足以下五点:

- (1) 具有代表性, 即所选取的试样能代表所需要研究和分析的对象;
- (2) 浸蚀要适合、组织要真实;
- (3) 无划痕、无污染物;
- (4) 无变形层、平坦光滑;
- (5) 夹杂物完整。

金相显微试样的制备包括取样、夹持与镶嵌、平整与磨光、抛光和浸蚀 5 个步骤。

(一) 取 样

取样的部位应具有代表性, 所取试样能真实反映材料的组织特征。取样部位要根据金相分析的目的来取。金相试样截取部位确定后, 还需确定金相试样的磨面。磨面一般分为横截面和纵截面, 这两个截面研究的目的是不同的。

横截面主要研究：试样从中心到边缘组织分布的渐变情况，表面渗层、硬化层和镀层等表面处理的深度及其组织，表面缺陷以及非金属夹杂物在横截面上的分布情况，即类型、形态、大小、数量、分布和等级等。

纵截面主要研究：非金属夹杂物在纵截面上的分布情况、大小、数量和形状，以及金属的变形程度，如有无带状组织的存在等。

截取时应根据材料的性质和要求来决定截取的方法，常用的试样截取方法有：① 电切割，包含电火花切割和线切割，适用于较大的金属试样切割或有一定形状要求时采用。② 气切割（氧乙炔火焰），适用于较大金属试样的切割。③ 砂轮切割机切割，使用范围较广，主要用于有一定硬度的材料，如普通钢铁材料和热处理后的钢铁材料。④ 手锯或机锯，适用于低碳钢、普通铸铁和非铁金属等硬度较低的材料。⑤ 敲击，适用于硬而脆的材料，如白口铸铁、高锡青铜和球墨铸铁等。

试样一般可用手工切割、机床切割、切片切割机切割等方法截取（试样大小为 $\phi 12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 圆柱体或 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的立方体）。不论采用哪种方法，在切取过程中均不宜使试样的温度过高，以免引起金属组织的变化，影响分析结果。

（二）夹持与镶嵌

若试样尺寸过小（如薄板、丝材、金属丝、碎片、钢皮以及钟表零件等）不易握持或要求保护试样边缘（如表面处理的检测、表面缺陷的检验等），则要对试样进行夹持或镶嵌。图 1-1-1 所示为金相试样的夹持与镶嵌方法。

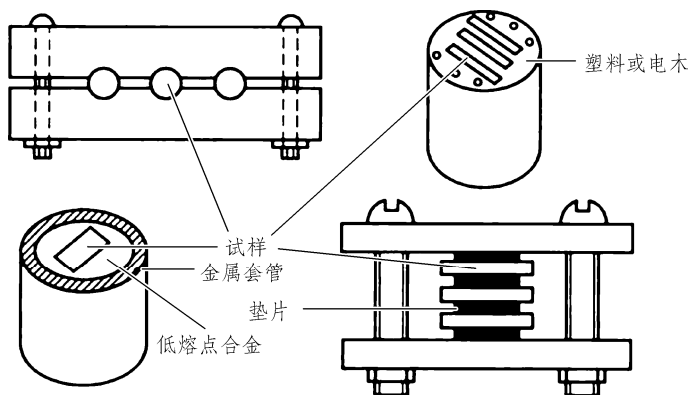


图 1-1-1 金相试样的夹持与镶嵌方法

1. 夹 持

夹持试样时要利用预先制备好的夹具装置。制作夹具的材料一般选用低碳钢、不锈钢和铜合金等。主要根据被夹试样的外形、大小及夹持保护的要求来选定机械夹具的形状。将试样进行夹持的优点是方便；缺点是磨制试样时易在缝隙中留下水与浸蚀剂，试样表面极易受到污染，造成假象。因此为保证浸蚀效果，最好将试样从夹具中取出后再浸蚀。

2. 镶 嵌

镶嵌一般用于一些体积较小、外形不规则的试样。镶嵌不仅有利于制样，而且使表面缺陷及边缘得到保护。镶嵌时必须依据下列原则：① 不允许影响试样显微组织，如机械变形及

加热。② 镶嵌介质与被镶嵌试样的硬度、耐磨性需相近，否则对保护试样边缘不利。③ 镶嵌介质与被镶嵌试样有相近的耐蚀能力，避免在浸蚀时造成试样被强烈腐蚀。

(三) 平整与磨光

1. 平整

平整又称粗磨。由于手锯或锤击所得的试样表面很粗糙，同时切割后的试样由于机械力的作用，表层存在较深的变形层，或由夹具夹持的试样，这些都需要用砂轮机进行平整，从而得到一个平整的表面。由于砂轮机的转速极快，易产生很大的热量，并且接触压力越大，产生的热量也越大，变形也越大，故操作时应手持试样，且前后用力均匀，接触压力不可过大，以防过量发热及机械变形。磨制时不断冷却试样，以保证试样组织不因受热而发生变化。另外，凡不做表层金相检验的试样必须倒角。软材料操作时要用锉刀锉平，不能在砂轮机上平整，以免产生较大的粗磨痕与大的变形层。平整完毕后，必须将手和试样清洗干净，防止粗大砂粒带入下道工序，造成较深的磨痕。

2. 磨光

磨光又称细磨，其目的是消除粗磨留下来的深而粗的磨痕和变形层，为抛光做准备。磨光通常在砂纸上进行，可分为手工磨制与机械磨制。手工磨制采用金相砂纸，机械磨制采用水砂纸。无论是金相砂纸还是水砂纸，都是由纸基、黏结剂、磨料组合而成的。手工磨制是将砂纸铺在玻璃板上，左手按住砂纸，右手捏住试样在砂纸上做单向推磨。金相砂纸由粗到细分许多种，其规格可参考表 1-1-1。

表 1-1-1 常用金相砂纸的规格

金相砂纸编号	01	02	03	04	05	06
粒度序号	M28	M20	M14	M10	M7	M5
砂粒尺寸/ μm	28~20	20~14	14~10	10~7	7~5	5~3.5

注：表中为多数厂家所用编号，目前没有统一规格。

目前，普遍使用的机械磨制设备是预磨机。电动机带动铺着水砂纸的圆盘转动，磨制时，将试样沿盘的径向来回移动，用力要均匀，边磨边用水冲。水流既起到冷却试样的作用，又可以借助离心力将脱落的砂粒、磨屑等不断地冲到转盘边缘。机械磨制的磨削速度比手工磨制快得多，但平整度不够好，表面变形层也比较严重。因此，要求较高的或材质较软的试样应该采用手工磨制。机械磨制所用水砂纸规格与手工湿磨相同，可参考表 1-1-2。

表 1-1-2 常用水砂纸的规格

水砂纸序号	240	300	400	500	600	800	1 000	1 200
粒度/目	160	200	280	320	400	600	800	1 000

注：表中为多数厂家所用编号，目前没有统一规格。

(四) 抛光

抛光的目的是消除试样磨面上经细磨后所留下的微细磨痕，以获得光亮的镜面。金相抛光可分为机械抛光、化学抛光和电解抛光三种。

1. 机械抛光

机械抛光是在专用的抛光机上进行。抛光机主要由电动机和抛光盘（ $\phi 200 \sim 300 \text{ mm}$ ）组成。抛光盘转速为 $300 \sim 500 \text{ r/min}$ ，其上铺以细帆布、呢绒、丝绸等。抛光时在抛光盘上不断滴注抛光液。抛光液是将 Al_2O_3 、 MgO 或 Cr_2O_3 等细粉末（粒度为 $0.3 \sim 1 \mu\text{m}$ ）溶于水中的悬浮液。抛光前要将细磨后的试样用水冲洗干净，以避免将不同粗细的砂粒带进抛光盘，影响试样制备。抛光时，手握试样务求平稳，施力均匀，压力不宜过大，并从边缘到中心不断地做径向往复移动，待试样表面磨痕全部消失且呈光亮的镜面时，抛光方可结束。非金属夹杂物试样抛光时，应将试样在抛光盘上不断地转动，这样可以随时改变磨面的抛光方向，防止非金属夹杂物磨拖产生拖洞，拖洞的产生是单向抛光的结果。

2. 化学抛光

化学抛光是依靠化学溶液对试样表面的电化学溶解，而获得抛光表面的抛光方法。化学抛光操作简单，就是将试样浸在抛光液中，或用棉花浸沾抛光液后，在试样磨面上来回擦拭。化学抛光兼有抛光和浸蚀作用，可直接显露金相组织，供显微镜观察。普通钢铁材料可采用以下抛光液配方：草酸 6 g、过氧化氢（双氧水）100 mL、蒸馏水 100 mL、氟氢酸 40 滴。

温度对化学抛光影响很大，提高温度，会加速化学抛光的速度，但抛光速度太快也不易控制抛光质量，而抛光速度太慢，生产效率会降低。所以，某种化学抛光剂对某一种钢都有一定的最佳温度，温度控制得当，能提高化学抛光的效果。

钢中含碳量对抛光时间也有影响，含碳量越高，所需抛光时间越短，含碳量越低，所需抛光时间越长。这是由于随着碳含量的增加，钢中碳化物也相应增加，单位面积内的微电池也越多，反应速度就越快。

3. 电解抛光

将试样放在有电解质的槽中作为阳极，用不锈钢或铅板作为阴极。在接通直流电源后，阳极表面产生选择性溶解，逐渐使表面凸起部分被溶解，而获得平整的表面（即被抛光）。该方法目前应用渐广，因为它速度快且表面光洁，抛光过程中不会发生塑性变形（机械抛光不可避免地发生塑性变形层，影响显微分析结果，有时要反复抛光、腐蚀才能把变形层除去）。其缺点是工艺过程不易控制。

（五）浸 蚀

光学金相显微镜是利用磨面的反射光成像的。金相试样抛光后，在金相显微镜下，由于非金属夹杂物、游离石墨、显微裂纹、表面镀层以及有些合金的各组织组成物的硬度相差较大（如复合材料中的陶瓷增强物等），或由于组织组成物本身就有独特的反射能力，所以可以利用抛光磨面直接观察并进行金相研究。而大多数组成相对光线均有强烈的反射能力，在金相显微镜下无法观察到组织。因此，要鉴别金相组织，首先应使试样磨面上各相或其边界的反射光强度和色彩有所区别。这就需要利用物理和化学的方法对抛光磨面进行专门处理，将试样中各组成相及其边界具有不同的物理、化学性质转换为磨面反射光强度和色彩的区别，使试样各组织之间呈现良好的衬度，这就是金相组织的显示。

浸蚀按金相组织显示的本质可以分为化学与物理两类。化学方法主要是浸蚀方法，包括

化学浸蚀、电化学浸蚀及氧化，这些都是利用化学试剂的溶液借助化学或电化学反应显示金属的组织。物理方法是借助金属本身的力学性能、电性能或磁性能显示出显微组织，采用光学法、干涉层法和高温浮凸法等几类。有些试样还需要两者的结合才能更好地显示组织，如借助金相显微镜上某些特殊的装置（如暗场、偏光、干涉、相衬和微差干涉衬度等光学方法），以及一定的照明方式来获得更多、更准确的显微组织信息。

化学腐蚀方法可分为浸蚀法、滴蚀法和擦蚀法，如图 1-1-2 所示。

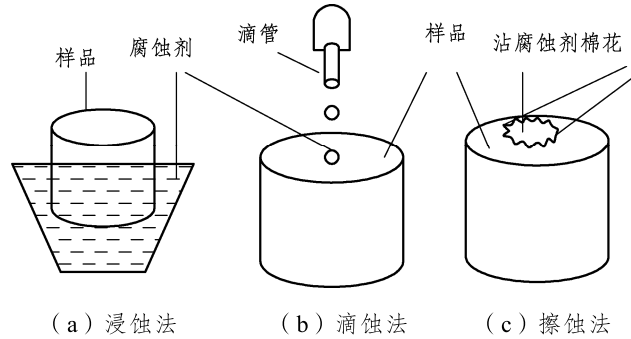


图 1-1-2 化学腐蚀方法

1. 浸蚀法

将抛光好的样品放入腐蚀剂中，视具体情况，抛光面可朝上或朝下。不断观察表面颜色的变化，当样品表面略显灰暗时，即可取出，充分冲水后冲酒精，再快速用吹风机充分吹干。

2. 滴蚀法

一手拿样品，样品表面向上，用滴管吸入腐蚀剂滴在样品表面，观察表面颜色的变化情况，当表面颜色变灰时，再过 2~3 s 即可充分冲水后冲酒精，再快速用吹风机充分吹干。

3. 擦蚀法

用沾有腐蚀剂的棉花轻轻地擦拭抛光面，同时观察表面颜色的变化，当样品表面略显灰暗时，即可取出，经充分水冲和酒精清洗后，再快速用吹风机充分吹干。

经过上述操作后，浸蚀完成，金相样品的制备即告结束，这时要将手和样品的所有表面都完全干燥后，方可进行显微镜下观察和分析金相样品的组织。

三、实验设备及材料

(一) 仪器与设备

切割机、砂轮机、预磨机、抛光机、吹风机、金相显微镜等。

(二) 耗 材

金相砂纸（或水砂纸）、玻璃板、滴瓶、玻璃皿、浸蚀剂、抛光液或研磨膏、竹夹子、脱脂棉等。

（三）化学试剂

硝酸、苦味酸（三硝基苯酚）、氢氟酸、三氯化铁、磷酸（配电解抛光液）、无水乙醇。

四、实验内容与步骤

（1）每人制备 4 个试样，其中，普通碳钢退火态（20 钢、45 钢、T12 钢）任选 1 个、铸铁（灰铸铁或球墨铸铁）任选 1 个、非铁金属（铜及铜合金或铝及铝合金）任选 1 个、钢的普通热处理试样 1 个。

（2）用砂轮机打磨碳钢、铸铁和普通热处理后的试样，获得平整的表面，并倒角。采用手工磨制、机械磨制和机械抛光对试样进行磨光和抛光。

（3）采用手工磨制法对非铁金属试样从粗到细磨光，采用电解抛光方法进行抛光。

（4）对已经抛光好的所有试样先借助金相显微镜在明场、暗场、偏光和微差干涉衬度条件下进行夹杂物、石墨形态等的分析观察。

（5）配制 4%硝酸酒精溶液（用于浸蚀钢和铸铁）、碱性苦味酸钠水溶液（用于浸蚀退火 T12 钢）、三氯化铁水溶液（用于浸蚀铜及铜合金）和 0.5%氢氟酸水溶液（用于浸蚀铝及铝合金）。将浸蚀后的试样在金相显微镜下进行分析观察表征。

（6）对 T12 钢退火态分别采用 4%硝酸酒精溶液（冷浸蚀）和碱性苦味酸钠水溶液（热浸蚀）进行浸蚀，分析观察浸蚀效果。

五、实验报告要求

（1）简述实验目的、实验内容、实验步骤、实验原理。

（2）简述金相显微样品的制备过程（仅叙述机械抛光及一般化学浸蚀）。

（3）简述金相试样磨光的方法与注意事项以及抛光的原理。

六、思考题

（1）为什么晶界浸蚀之后是黑色的？显微镜下观察到的黑白图像一般反映什么情况？在暗视场下晶界和晶粒内各为什么颜色？

（2）在二相组织中有一相浸蚀后观察是黑色，另一相为白色，这两相在电化学性质上有什么差别？

（3）怎样鉴别浸蚀后观察时发现的直线形的影像是组织本身的特征还是磨痕或划痕？

实验二 金相显微镜的构造和使用

光学金相显微镜是观察分析材料微观组织最常用、最重要的工具。它是基于光在均匀介质中做直线传播，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。根据材料表面上不同组织组成物的光反射特征，用金相显微镜在可见光范围内对这些组织组成物进行光学研究并定性和定量描述。金相显微镜可显示 $0.2 \sim 500 \mu\text{m}$ 尺度的微观组织特征。而扫描电子显微镜与透射电子显微镜则把观察的尺度推进到亚微米以下的层次。本实验主要讲述光学金相显微镜的工作原理、功能、使用方法及维护。

一、实验目的

- (1) 了解金相显微镜的光学原理和构造。
- (2) 操作金相显微镜，调节焦距至形成清晰图像。
- (3) 操作金相显微镜，变换物镜和目镜，以不同放大倍数观察金相试样。
- (4) 计算观察金相试样的放大倍数。

二、实验原理

(一) 金相显微镜的光学放大原理

金相显微镜是利用光线的反射原理，将不透明的物体放大后进行观察的。最简单的显微镜由两个透镜组成，将物体进行第一次放大的透镜称为物镜，将物镜所成的像再经过第二次放大的透镜称为目镜。金相显微镜的放大成像原理如图 1-2-1 所示。

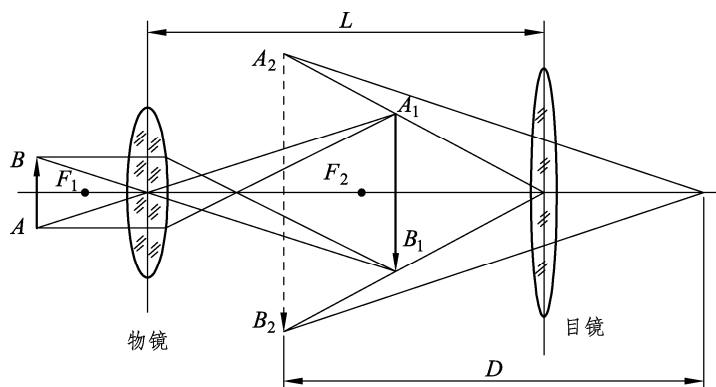


图 1-2-1 金相显微镜的放大成像原理

由放大成像原理图可见：设物镜的焦点为 F_1 ，目镜的焦点为 F_2 ， L 为光学镜筒长度（物镜与目镜的距离）， $D = 250 \text{ mm}$ 为人的明视距离。当物体 AB 位于物镜的焦点 F_1 以外，经物镜放大而成为倒立的实像 A_1B_1 ，而 A_1B_1 正好落在目镜的焦点 F_2 之内，经目镜放大后成为一个正立放大的虚像 A_2B_2 ，则两次放大倍数各为

$$M_{\text{物}}=A_1B_1/AB$$

$$M_{\text{目}}=A_2B_2/A_1B_1$$

$$M_{\text{总}}=M_{\text{物}}M_{\text{目}}=(A_1B_1/AB)(A_2B_2/A_1B_1) \quad (1-2-1)$$

即显微镜总的放大倍数等于物镜的放大倍数乘以目镜的放大倍数。目前，普通光学金相显微镜的最高有效放大倍数为 1 600 ~ 2 500 倍。

(二) 主要性能指标

1. 放大倍数

显微镜的放大倍数为物镜放大倍数 $M_{\text{物}}$ 和目镜放大倍数 $M_{\text{目}}$ 的乘积。金相显微镜的主要放大倍数一般是通过物镜来保证的，物镜的最高放大倍数可达 100 倍，目镜的放大倍数可达 25 倍。在物镜和目镜的镜筒上，均标注有放大倍数，放大倍数常用符号“×”表示，如 100×、200×等。

2. 鉴别率

金相显微镜的鉴别率是指它能清晰地分辨试样上两点间最小距离 d 的能力。 d 值越小，鉴别率越高。根据光学衍射原理，试样上的某一点通过物镜成像后，看到的并不是一个真正的点像，而是具有一定尺寸的白色圆斑，四周围绕着许多衍射环。当试样上两个相邻点的距离极近时，成像后由于部分重叠而不能分清为两个点。只有当试样上两点距离达到某一 d 值时，才能将两点分辨清楚，如图 1-2-2 所示。

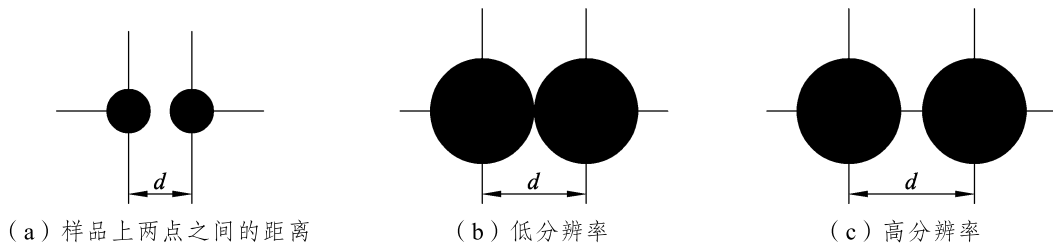


图 1-2-2 分辨率高低示意

显微镜的鉴别率取决于使用光线的波长 (λ) 和物镜的数值孔径 (NA)，而与目镜无关， d 值可由下式计算：

$$d = \frac{\lambda}{2NA} \quad (1-2-2)$$

在一般显微镜中，光源的波长可通过加滤色片来改变。例如，蓝光的波长 ($\lambda=0.44 \mu\text{m}$) 比黄绿光 ($\lambda=0.55 \mu\text{m}$) 短，所以鉴别率较黄绿光高 25%。当光源的波长一定时，可通过改变物镜的数值孔径 NA 来调节显微镜的鉴别率。

3. 数值孔径

物镜的数值孔径用 NA 表示，表示物镜的聚光能力。数值孔径大的物镜，聚光能力强，即能吸收更多的光线，使图像更加明显。物镜的数值孔径 NA 可用下式表示：

$$NA = n \cdot \sin \varphi \quad (1-2-3)$$

式中， n 为物镜与样品间介质的折射率； φ 为通过物镜边缘的光线与物镜轴线所成的角度，即孔径半角。

(三) 金相显微镜的种类

金相显微镜的种类和形式很多，但最常见的形式有台式、立式和卧式三大类。其构造通常均由光学系统、照明系统和机械系统三大部分组成，有的显微镜还附带照相装置和暗场照明系统等，如图 1-2-3 所示。

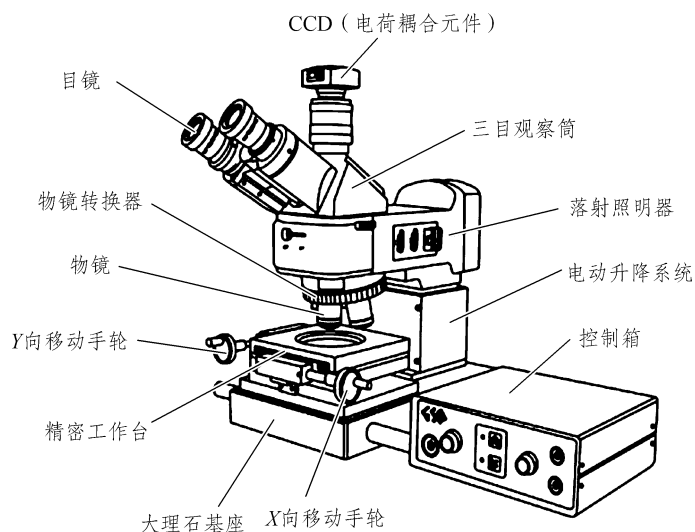


图 1-2-3 金相显微镜外形结构

(四) 金相显微镜的观察方法

目前，金相显微镜的主要照明方式有明场、暗场、偏光和微差干涉相衬。

1. 明场照明

明场照明是金相显微镜最普通的照明方式与观察方法，显微组织观察首先要进行明场观察。

2. 暗场照明

暗场照明是显微镜的另一种照明方式。采用暗场照明时，因物像的亮度较低，此时应将视场光阑开到最大。暗场照明比明场照明分辨率要高、衬度更好，极细的磨痕在暗场照明下也极易鉴别，也可用来观察非常小的粒子（超显微技术）。暗场照明还能正确地鉴定透明非金属夹杂的色彩，这也是鉴定非金属夹杂物的有效方法。

3. 偏光照明

偏光照明就是在显微镜的光路中安装了偏振装置，使光在照射试样前产生平面偏振光的照明方式。偏光照明在金相研究中主要有以下应用：

(1) 各向异性材料组织的显示。金属材料按其光学性能不同可分为各向同性与各向异性

两类。各向同性金属一般对偏光不灵敏，而各向异性金属对偏光极为灵敏，因而，偏光照明在显示各向异性材料的组织显示中得到应用。

(2) 多相合金的相分析。如果在各向同性晶体中有各向异性的相存在，假如两相合金中一相为各向同性，另一相为各向异性，在正交偏光下，具有各向异性的相在暗的基体中很容易由偏振光来鉴别。同样，对两个光学性能不同的各向异性晶体或浸蚀程度不同的各向异性晶体，也可由偏振光加以区分。

4. 微差干涉相衬

微差干涉相衬又称为偏光干涉衬度，是利用光束分割双石英棱镜的显微方法。它可观察试样表面更细微的凹凸，同时由于试样表面所产生的附加光程差，使影像具有立体感，并随干涉光束的光程差的变化对不同的组织进行着色，大大提高了组织衬度。

三、实验设备及材料

(一) 仪器与设备

金相显微镜、测微目镜与标定尺。

(二) 耗材与试样

制备好的工业纯铁、纯铜、球墨铸铁、多相合金、含有夹杂物的金相试样等。

四、实验内容与步骤

金相显微镜是一种精密光学仪器，在使用时要求细心和谨慎，严格按照使用规程进行操作：

(1) 将显微镜的光源插头接在低压(6~8V)变压器上，接通电源。

(2) 根据放大倍数，选用所需的物镜和目镜，分别安装在物镜座上 and 目镜筒内，旋动物镜转换器，使物镜进入光路并定位(可感觉到定位器定位)。

(3) 将试样放在样品台上中心位置，使观察面朝下并用弹簧片压住。

(4) 转动粗调手轮使镜筒上升，同时用眼观察，使物镜尽可能接近试样表面(但不得与之相碰)，然后反向转动粗调手轮，使镜筒渐渐下降以调节焦距。当视场亮度增强时，再改用微调手轮调节，直到物像最清晰为止。

(5) 适当调节孔径光阑和视场光阑，以获得最佳质量的物像。

(6) 如果使用油浸系物镜，可在物镜的前透镜上滴些松柏油，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净，再用擦镜纸擦干。

五、实验报告要求

(1) 写出实验目的及实验设备。

(2) 简述金相显微镜的放大成像原理。

(3) 光学金相显微镜主要由哪几部分组成？各部分又由哪几个零件组成？

- (4) 光学金相显微镜的主要技术有哪些?
- (5) 显微镜在使用和维护中, 应该注意哪些事项?
- (6) 对观察到的金相显微组织进行分析讨论, 并绘制所制样品的金相显微组织特征图。
- (7) 简述本次实验的体会与建议。

六、思考题

- (1) 绘制显微镜的光路简图, 并简述其工作原理。
- (2) 在金相显微镜下能否观察到工件的外形轮廓全貌, 为什么?
- (3) 使用金相显微镜观察试样应注意什么?

实验三 铁碳合金平衡组织观察与分析

铁碳合金的显微组织是研究和分析钢铁材料性能的基础。所谓平衡状态的显微组织，是指合金在极为缓慢的冷却条件下（如退火状态，即接近平衡状态）所得到的组织。铁碳合金在室温下的平衡组织是由铁素体（Fe）和渗碳体（ Fe_3C ）两相按不同数量、大小、形态和分布所组成的。本实验通过铁碳合金相图来进一步熟悉金相显微镜的构造与使用方法，了解铁碳合金在平衡状态下的相及组织组成物的形态和分布特征。

一、实验目的

- （1）观察碳钢和铸铁试样在平衡状态下的显微组织。
- （2）了解碳含量对铁碳合金显微组织的影响，从而理解成分、组织和性能之间的关系。
- （3）学习用金相法确定钢的碳含量。

二、实验原理

铁碳合金相图是研究碳钢和白口铸铁的重要工具，是分析钢铁在平衡状态或接近平衡状态下显微组织的基础。通常将碳含量小于 2.11% 的合金称为碳钢，含碳量大于 2.11% 的合金称为白口铸铁。钢铁室温组织均由铁素体和渗碳体这两个基本相组成。不同含碳量的合金，在组织上所呈现的差异由这两个基本相的相对量、形态及分布不同所致。铁碳合金中渗碳体的相对量、析出条件及分布情况，对合金的性能影响极大。图 1-3-1 为按组织分区的铁碳合金相图。

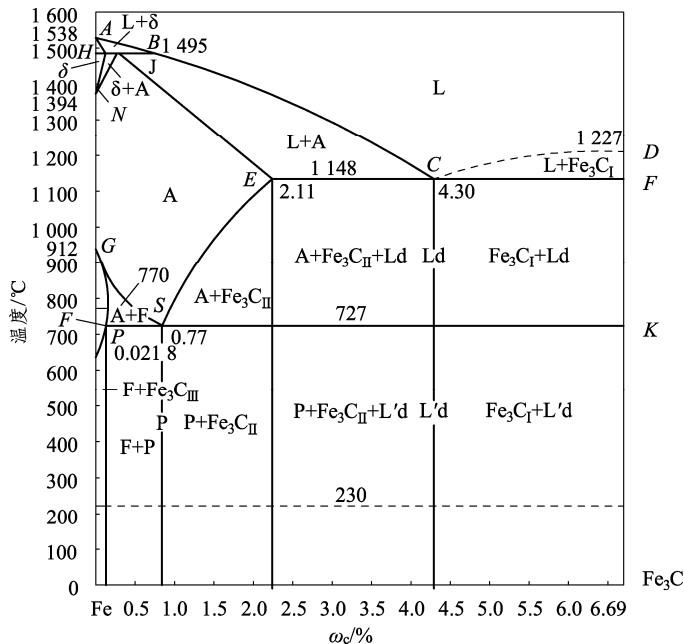


图 1-3-1 以组织组成物标注的 Fe-Fe₃C 合金相图

从 Fe-Fe₃C 相图中可以看出，所有碳钢和白口铸铁的室温组织均由铁素体（F）和渗碳体（Fe₃C）这两个基本相所组成。但是由于含碳量不同，铁素体和渗碳体的相对数量、析出条件以及分布情况均有所不同，因而呈现出各种不同的组织形态。

在 Fe-Fe₃C 相图中，*ABCD* 为液相线，*AHJECF* 为固相线。相图中各特征点的温度、成分及其含义如表 1-3-1 所示。

表 1-3-1 铁碳相图中各特征点的说明

点的符号	温度/°C	含碳量/%	说 明
<i>A</i>	1 538	0	纯铁熔点
<i>B</i>	1 495	0.53	包晶反应时液态金属的成分点
<i>C</i>	1 148	4.3	共晶点 $L_C \rightarrow A_E + Fe_3C$ ，共晶产物称莱氏体
<i>D</i>	1 227	6.69	渗碳体的熔点
<i>E</i>	1 148	2.11	碳在 γ -Fe 中的最大溶解度
<i>F</i>	1 148	6.69	共晶反应渗碳体的成分点
<i>G</i>	912	0	α -Fe、 γ -Fe 同素异构转变点
<i>H</i>	1 495	0.09	碳在 δ -Fe 中的最大溶解度
<i>J</i>	1 495	0.17	包晶点 $L_B + \delta_H \rightarrow A_J$
<i>K</i>	727	6.69	共析反应时渗碳体成分点
<i>N</i>	1 394	0	γ -Fe、 δ -Fe 同素异构转变点
<i>P</i>	727	0.021 8	碳在 α -Fe 中的最大溶解度
<i>S</i>	727	0.77	共析点 $A_S \rightarrow F_P + Fe_3C$ ，共析产物，称珠光体
<i>Q</i>	室温	0.000 8	室温下碳在 F 体中的溶解度

（一）铁碳合金中的几种基本组织

1. 铁素体（Fe）

铁素体是碳溶于 α -Fe 中的间隙固溶体，在金相显微镜观察为白色晶粒（见图 1-3-2），亚共析钢中的铁素体呈块状分布。随着钢中含碳量的增加，铁素体数量减少，其形状也由多边形块状逐渐变成在珠光体边界呈断续网状分布。

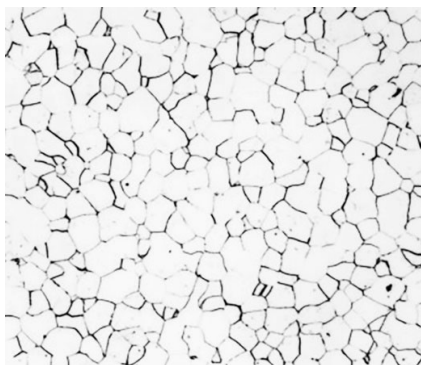


图 1-3-2 铁素体的微形貌

2. 渗碳体 (Fe_3C)

渗碳体是铁和碳形成的化合物，其碳的质量分数为 6.69%，抗浸蚀能力较强，经 3%~5% 硝酸酒精溶液浸蚀后呈亮白色，若用苦味酸钠溶液浸蚀，则呈现暗黑色。由此可在组织中区分铁素体和渗碳体。图 1-3-3 呈现的是片状渗碳体。

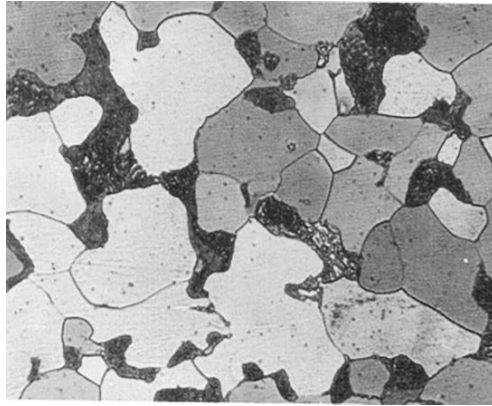


图 1-3-3 片状渗碳体微组织

3. 珠光体

珠光体是铁素体和渗碳体的机械混合物，在一般退火处理下，是由铁素体和渗碳体相互混合交替排列形成的层片状组织。经 4% 硝酸酒精溶液浸蚀后，在高倍放大时能清楚地看到珠光体中平行相间的宽条铁素体和条状渗碳体；当放大倍数较低时，所观察到的珠光体中的渗碳体呈一条黑线。当组织较细而放大倍数较低时，珠光体的片层就不能分辨，而呈黑色。图 1-3-4 显示了多个珠光体。

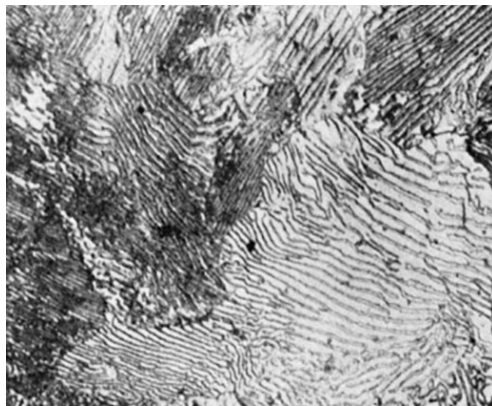


图 1-3-4 珠光体显微组织

4. 莱氏体

莱氏体在室温时是珠光体和渗碳体的机械混合物。渗碳体包括共晶渗碳体和二次渗碳体，两种渗碳体相连在一起，没有边界线，无法分辨开。莱氏体经 3%~5% 硝酸酒精溶液浸蚀后，其组织特征是在白亮色渗碳体基体上分布着许多黑色点（块）状或条状珠光体，如图 1-3-5 所示。

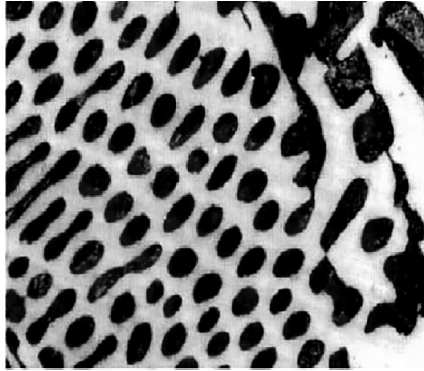


图 1-3-5 莱氏体显微组织

(二) 铁碳合金室温下的显微组织特征

1. 工业纯铁

含碳量小于 0.021 8%的铁碳合金通常称为工业纯铁。它为两相组织，即由铁素体和少量三次渗碳体所组成。图 1-3-6 所示为工业纯铁的显微组织，其中黑色线条是铁素体的晶界，亮白色基底则是铁素体的不规则等轴晶粒。某些晶界处可以看到不连续的薄片状三次渗碳体。

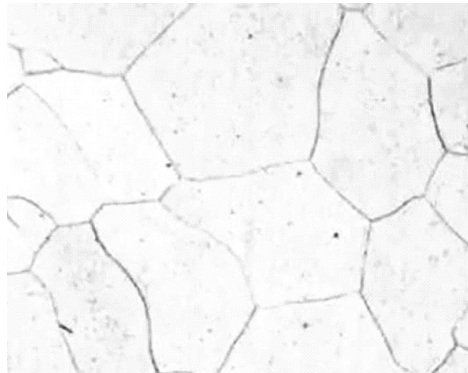


图 1-3-6 工业纯铁微组织

2. 碳 钢

1) 亚共析钢

亚共析钢的含碳量为 0.021 8%~0.77%，其组织由铁素体和珠光体所组成。随着钢中含碳量的增加，铁素体的数量逐渐减少，而珠光体的数量则相应地增多。图 1-3-7 为亚共析钢 45 钢的显微组织，其中亮白色为铁素体，暗黑色为珠光体。

2) 共析钢的组织

含碳量为 0.77%的铁碳合金称为共析钢。其组织为共析转变得到的珠光体，即片状铁素体和渗碳体的机械混合物。铁素体厚，渗碳体薄。通过金相显微观察可知，珠光体团之间没有明显的晶界。

3) 过共析钢的组织

含碳量为 0.77%~2.11%的铁碳合金称为过共析钢，其组织为先共析渗碳体和珠光体。先

共析渗碳体由奥氏体中沿晶界析出，故呈网状分布在随后发生共析转变形成的珠光体周围。其室温组织为网状二次渗碳体和珠光体。组织形态为层片相间的珠光体和细小的亮白色的网络状渗碳体。

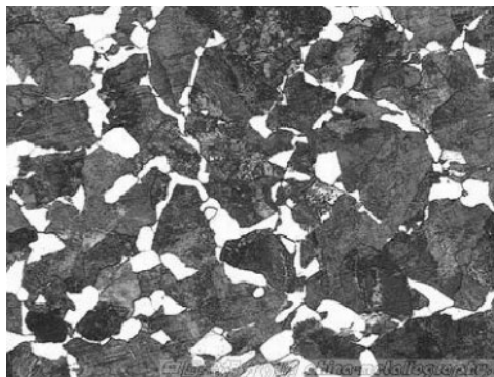


图 1-3-7 亚共析钢 45 钢显微组织

3. 铸铁的组织

1) 亚共晶白口铸铁

含碳量为 2.11%~4.3% 的白口铸铁称为亚共晶白口铸铁。在室温下亚共晶白口铸铁的组织由珠光体、二次渗碳体和莱氏体组成。用硝酸酒精溶液浸蚀后在显微镜下观察，斑点状莱氏体为基体，黑色枝晶组织为珠光体。

2) 共晶白口铸铁

共晶白口铸铁的含碳量为 4.3%，室温组织由单一的共晶莱氏体所组成，亮白色的基体是渗碳体，暗黑色的斑点和细条是珠光体。

3) 过共晶白口铸铁

含碳量 4.3%~6.69% 的白口铸铁在室温下的组织由一次渗碳体和莱氏体所组成。在显微镜下可观察到在暗色斑点状的莱氏体的基底上分布着亮白色粗大条片状的一次渗碳体。

三、实验设备及材料

(一) 仪器与设备

金相显微镜。

(二) 试样与耗材

碳钢（亚共析钢、共析钢、过共析钢）试样，白口铸铁（亚共晶白口铸铁、共晶白口铸铁、过共晶白口铸铁）试样。

四、实验内容与步骤

(1) 按观察要求，选择物镜和目镜，并将其安装在显微镜上。

(2) 用手慢旋显微粗调手轮，视场由暗到亮，调至看到组织，然后再旋转微调焦手轮，直到图像清晰。应注意先用低的放大倍数进行全面观察，找出典型组织，然后再用高倍数放大对这些区域进行详细观察。

(3) 绘出所观察样品的显微组织示意图，注明合金成分、状态、放大倍数及组织组成物的名称，说明其特征和形成过程。

五、实验报告

- (1) 写明实验目的、实验原理和实验步骤。
- (2) 将观察到的金相组织图片附上并分析其组织成分。
- (3) 完成思考题内容并附在实验报告最后。

六、思考题

- (1) 归纳和总结铁碳相图中，随着碳含量增加，铁素体和渗碳体含量的变化规律。
- (2) 冷却速度对组织形貌和相对量有无影响？并举例说明。
- (3) 说明铁比钢硬的原因。

实验四 碳钢热处理后的显微组织观察

钢的组织决定了钢的性能，在化学成分相同的条件下，改变钢的组织的主要手段是通过热处理工艺来控制钢的加热温度和冷却过程，从而得到所希望的组织 and 性能。钢在热处理条件下所得到的组织与钢的平衡组织有很大差别。

一、实验目的

- (1) 观察和分析碳钢经不同热处理后的显微组织特征。
- (2) 加深理解不同热处理工艺对碳钢组织和性能的影响。

二、实验原理

钢在热处理条件下所得到的组织与钢的平衡组织有很大差别，钢加热到临界点 (A_{c1}) 以上即发生奥氏体转变，奥氏体在非常缓慢冷却时才能形成平衡状态的珠光体或珠光体+铁素体 (或渗碳体)，但大部分热处理工艺，如退火、正火、淬火 (回火或时效例外) 都是将钢加热到奥氏体状态，然后以各种不同的冷却速度或冷却方式冷却到室温。退火、正火、淬火的冷却速度不同，会使钢得到不同的组织，其力学性能或物理性能也不同。

(一) 钢的退火组织

完全退火热处理工艺主要适用于亚共析钢 (如 40 钢和 45 钢)，经完全退火后钢的组织接近于平衡状态的组织。45 钢的退火组织如图 1-4-1 所示，为铁素体加珠光体，白色有晶界的颗粒状为铁素体，黑色或层片状的为珠光体。

过共析钢一般采用球化退火热处理工艺，T12 钢经球化退火后的组织如图 1-4-2 所示，组织中的二次渗碳体和珠光体中的渗碳体都呈球状或粒状 (图中为均匀分布的细小粒状组织)。

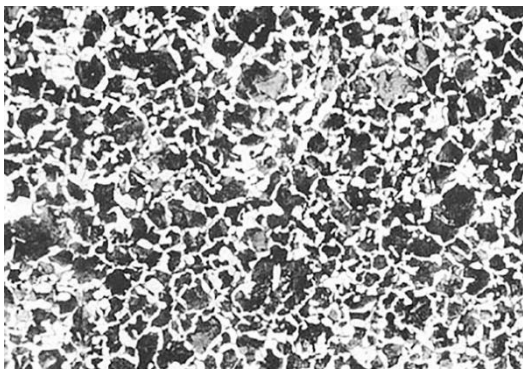


图 1-4-1 45 钢的退火组织

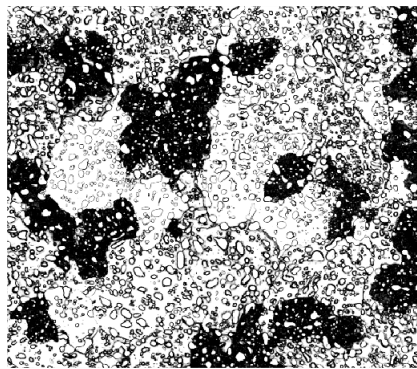


图 1-4-2 T12 钢球化退火组织

（二）钢的正火组织

由于正火的冷却速度大于退火的冷却速度，因此，在相同碳含量的情况下，正火后得到的金相组织一般要比退火后的组织细，珠光体的相对含量也比退火组织中的相对要多。

（三）钢的淬火组织

不同成分的钢在不同的加热、保温和冷却条件下会得到不同的淬火组织，典型的淬火组织有如下几种。

1. 贝氏体组织

贝氏体是在等温淬火条件下得到的淬火组织，根据转变温度的不同，贝氏体分为两种类型：在 $500 \sim 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的转变产物为上贝氏体；在 $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 M_s 点之间的转变产物为下贝氏体。上贝氏体是由成簇的平行排列的板条状铁素体和沿其边界分布的细条状渗碳体所组成，在光学显微镜下难以分辨上贝氏体中的两相，其形态就像羽毛，所以又称之为羽毛状贝氏体，如图 1-4-3 所示。

下贝氏体是铁素体呈针片状并互成一定角度，在铁素体的针片上分布着碳化物短针，这些碳化物短针的取向与铁素体片的长轴成 $55^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 角，在光学显微镜下，下贝氏体呈黑色针片状组织，如图 1-4-4 所示。

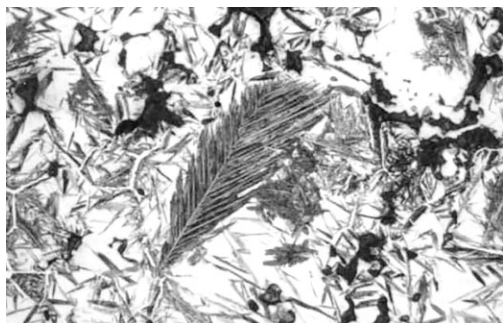


图 1-4-3 上贝氏体显微组织

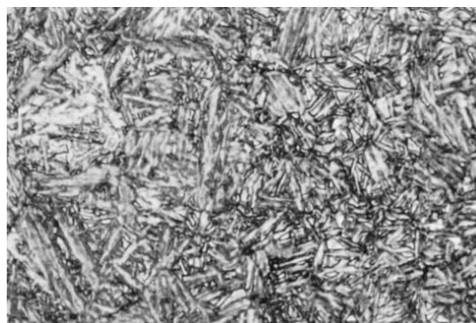


图 1-4-4 下贝氏体显微组织

2. 马氏体组织

马氏体是将奥氏体快速冷却（冷却速度大于临界冷却速度 v_c ）到 M_s 点以下温度得到的转变产物。常见的马氏体组织主要有两种典型形态：板条状马氏体和片状马氏体。板条状马氏体是一种低碳马氏体（ $\omega_c < 0.2\%$ ），显微组织的主要特征是由许多平行排列的板条状组织成排地群集在一起，称为马氏体群或马氏体“领域”。在每个奥氏体晶粒中，可以有好几个不同取向的马氏体群。板条状马氏体的显微组织如图 1-4-5 所示。

片状马氏体是一种高碳马氏体（ $\omega_c > 0.6\%$ ），显微组织的主要特征是互成一定角度的针状或竹叶状组织，如果金相磨面恰好与马氏体片平行相切，还可以看到片状形态。片（针）状马氏体的显微组织如图 1-4-6 所示。



图 1-4-5 板条状马氏体显微组织

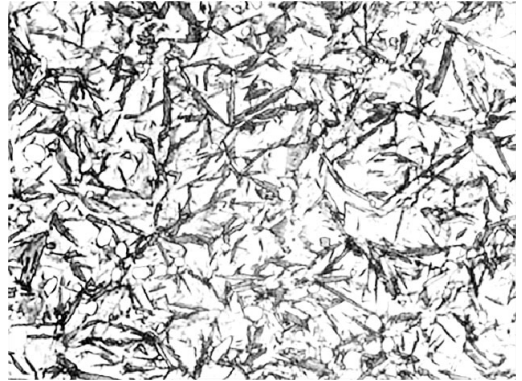


图 1-4-6 片（针）状马氏体显微组织

3. 钢淬火后的回火组织

马氏体是过饱和固溶体，是一种亚稳组织，因此，在实际工程中，淬火钢都需要经过回火后才能使用。淬火钢的回火是在 A_1 温度以下重新加热，使淬火组织逐渐向稳定状态转变，转变为铁素体与渗碳体的混合物。淬火钢在不同温度下回火，将得到不同的回火组织，典型的回火组织有如下三种：

1) 回火马氏体

淬火马氏体经低温回火（ $150 \sim 250\text{ }^\circ\text{C}$ ）后，马氏体内的过饱和碳原子会以高度弥散并与母相保持着共格关系的 ϵ 碳化物形式析出，这种组织称为回火马氏体。回火马氏体仍保持马氏体的针片状特征，但受浸蚀的程度比马氏体深，故呈暗黑色，如图 1-4-7 所示。

2) 回火屈氏体

淬火马氏体经中温回火（ $300 \sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ ）后，形成在铁素体基体上弥散分布着细小渗碳体颗粒的组织，这种组织称为回火屈氏体。回火屈氏体中的铁素体仍然保持原来马氏体的针片状形态特征，其中的渗碳体由于颗粒很小，在光学显微镜下无法分辨，如图 1-4-8 所示。

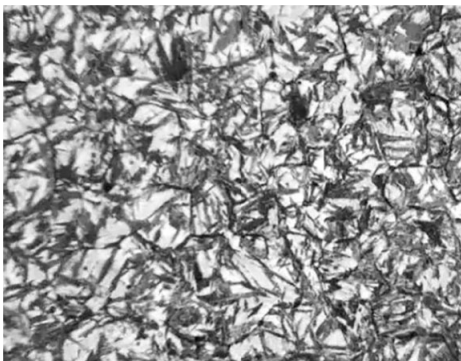


图 1-4-7 回火马氏体显微组织

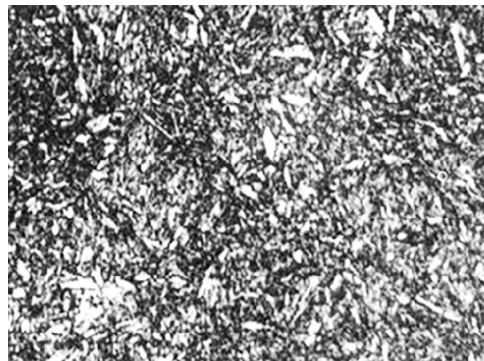


图 1-4-8 回火屈氏体显微组织

3) 回火索氏体

淬火马氏体经高温回火（ $500 \sim 650\text{ }^\circ\text{C}$ ）后，铁素体已经失去了原来马氏体的针片状形态而成等轴状，渗碳体颗粒也发生了聚集长大，形成粗粒状的渗碳体，分布在铁素体基体上，这种组织称为回火索氏体，如图 1-4-9 所示。



图 1-4-9 回火索氏体显微组织

三、实验设备及材料

(一) 仪器与设备

金相显微镜。

(二) 其他材料

常用碳钢的不同热处理金相试样、金相图谱等。

四、实验内容与步骤

(1) 观察分析表 1-4-1 中所列出的显微组织，并根据 Fe-Fe₃C 相图和等温转变图来分析不同热处理条件下各种组织的形成原因。

表 1-4-1 碳钢不同热处理后的显微试样

编号	材料	热处理工艺	显微组织特征	浸蚀剂
1	20 钢	920 °C 加热水冷	板条马氏体	4%硝酸酒精溶液
2	45 钢	860 °C 退火	铁素体+珠光体	
3		860 °C 正火	索氏体+铁素体	
4		860 °C 油冷	屈氏体+混合马氏体	
5		860 °C 水冷	混合马氏体	
6		860 °C 水冷 600 °C 回火	回火索氏体	
7		750 °C 水冷	未熔铁素体+混合马氏体	
8		1 100 °C 水冷	粗大马氏体	
9		T12 钢	780 °C 球化退火	
10	780 °C 水冷 200 °C 回火		未熔渗碳体+针状马氏体	
11	1 100 °C 水冷 200 °C 回火		粗大针状马氏体+残留奥氏体	
12	T8 钢	350 °C 等温淬火	上贝氏体	
13		280 °C 等温淬火	下贝氏体	

(2) 通过相同成分采用不同的热处理工艺所得到的组织和不同成分采用类似热处理工艺所得到的组织进行纵横比较。

(3) 绘制所观察到的典型热处理显微组织。

五、实验报告要求

(1) 简述实验目的和实验原理。

(2) 画出所观察试样的典型显微组织示意图。

(3) 运用铁碳相图及相应钢种的 C 曲线，根据具体的热处理工艺分析所得组织及其特征。

六、思考题

(1) 分析 45 钢 750 °C 加热水冷与 860 °C 加热油冷淬火组织的区别。若 45 钢淬火后硬度不足，如何根据组织来分析其原因是淬火加热温度不足还是冷却速度不够？

(2) 分析 T12 钢 780 °C 加热水冷 200 °C 回火与 T12 钢 1 100 °C 加热水冷 200 °C 回火的组织与性能的区别。说明过共析钢淬火温度如何选择。