

---

《材料科学基础 A》

实 验 指 导 书

魏范松 编写

适用专业：焊接技术与工程

江苏科技大学材料科学与工程学院

2008 年 9 月



---

# 前 言

本课程的基本内容主要包括晶体学基础、固体材料的结构和键合理论、材料的凝固与相图理论、原子和分子在固体中的运动、材料的形变与再结晶理论、热处理工艺及组织的理论。通过学习学生需要掌握材料科学的基础理论和研究方法,尤其要掌握材料的成分、工艺、组织和性能之间的关系。为了训练和培养学生进行材料的宏观和微观组织分析能力,深刻地理解和把握材料的成分和平衡组织之间的关系以及材料冷变形后回复再结晶过程中组织变化的规律,设置“光学显微镜、显微样品制备及图像采集综合实验”、“金属凝固原理与宏观组织分析综合实验”、“铁碳合金平衡组织观察”和“金属的塑性变形与再结晶”“碳钢的热处理操作、组织观察及硬度测定综合实验”、五个实验,其中三项综合性实验,二项验证性实验。

“**光学显微镜、显微样品制备及图像采集综合实验**”主要让学生了解金相显微镜的光学原理、构造和使用方法,掌握金相试样的制备和金相组织的摄制技术,了解光学金相分析方法的操作流程。

“**金属凝固原理与宏观组织分析综合实验**”主要让学生了解凝固过程及凝固条件对材料铸锭组织的影响,掌握材料宏观分析的应用及操作方法,进一步了解材料宏观缺陷的组织特征及形成条件。

“**铁碳合金平衡组织观察**”实验主要让学生识别铁碳合金在平衡状态下的显微组织,了解含碳量对铁碳合金平衡组织的影响,进一步理解合金成分、组织和性能之间的关系。

“**金属的塑性变形与再结晶**”实验主要让学生了解冷变形度对金属组织和性能的影响,了解退火温度对金属再结晶后组织和性能的影响,了解冷变形度对金属再结晶后晶粒大小的影响。

“**碳钢的热处理操作、组织观察及硬度测定综合实验**”主要让学生学会热处理工艺的操作方法,识别组织形貌,了解材料的成分、工艺、组织和性能之间的相互关系。

## 目 录

实验 1: 光学显微镜、显微样品制备及图像采集 .....	1
实验 2: 金属凝固原理与宏观组织分析 .....	16
实验 3: 铁碳合金平衡组织观察 .....	27
实验 4: 金属的塑性变形与再结晶 .....	35
实验 5: 碳钢的热处理操作、组织观察及硬度测定 .....	40

## 实验一 光学显微镜、显微样品制备及图像采集

实验学时：6

实验类型：综合

实验要求：必修

### 一、实验目的

1. 掌握金相显微镜的构造及使用, 利用显微镜进行显微组织分析;
2. 掌握金相显微试样的制备及显微图像采集和输出;
3. 掌握金相分析方法的操作流程。

### 二、实验内容

金相显微分析是研究金属组织的主要方法之一, 在生产与科研中, 为了探索金属材料的性能, 经常需要进行金相组织的检验和分析。金相显微分析就是利用显微镜的光学原理借助试样表面对光线的反射特点来进行的。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, 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, 最后将其拍摄并形成照片。本实验涉及到学生具备操作使用金相显微镜、金相样品制备、金相组织分析、显微摄影等方面的知识。通过实验训练学生材料显微分析的综合能力。

### 三、实验原理、方法和手段

#### (一) 金相显微镜的使用

#### 1. 金相显微镜的光学原理

放大镜是最简单的一种光学仪器, 它实际上就是一块集合透镜(凸透镜), 利用它可以将物体放大, 其成象光学原理, 如图 1 所示。

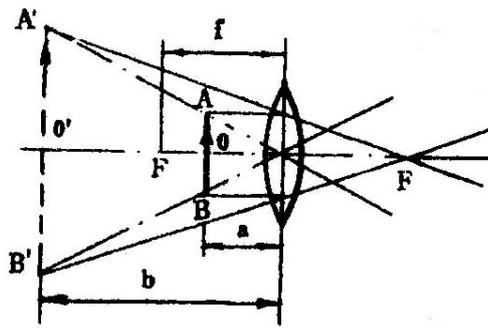


图1 放大镜的光学原理

AB—物体  $A'B'$ —物象  $f$ —焦距

当物体 AB 放在透镜与其焦点 F 之间时，则经透镜的光线就分散开来，从放大镜后面观察，可以看到一个放大了正虚象  $A'B'$ ，此象的长度与物体长度比值（即  $A'B'/AB$ ）就是放大镜的放大率（放大倍数）。由于放大镜到物体之间的距离  $a$  近似地等于透镜的焦距  $f$  ( $a \approx f$ )，而放大镜到象间的距离  $b$  近似地等于人眼的明视距离（约 250mm），故放大镜的放大倍数为：

$$N = \frac{b}{a} = \frac{250}{f}$$

由式中可知，透镜的焦距  $f$  越短，则放大镜的放大倍数越大，一般采用的放大镜其焦距在 10~100mm 范围内，放大倍数则可在 2.5—25 倍之间，若进一步提高放大倍数，将会由于透镜焦距变短使其表面曲率过分增大，而使形成的影象变得模糊不清。所以为了得到高倍放大而又清晰的影象，就得采用由多个透镜组成的显微镜。

现代显微镜中，校正透镜球面差的方法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。

色差的产生是由于组成白光的各种不同波长的光线在穿过透镜时其折射率不同。若用白色光照明时，其中紫色光线的波长最短，其折射率最大，在离透镜最近处成象；红色光线的波长最大，其折射率最小，在离透镜最远处成象。其余的有色光线(如，黄、绿、兰色)的成象，则在它们之间。因此这些光在平面上的成象就不能集中在一点，而呈现出带有彩色边缘的光环。色象差的存在也会降低透镜成象的清晰度，也应予以校正，通常采用单色光源(或加滤光片)，也可使用复

合透镜。

显微镜的放大作用主要在于物镜，物镜的好坏直接影响显微镜放大后映象的质量，所以对物镜的校正是很重要的。物镜的类型，根据对透镜球面象差和色象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。

目镜也是显微镜中的主要组成部分，是第二个透镜组。它的主要作用是将由物镜放大所得的实象再度放大，因此它的质量将最后影响到物象的质量。按照目镜的构造型式一般可分为普通目镜，补偿目镜，以及测物目镜等。普通目镜其映象未经校正，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，可以抵消这些物镜的残余色象差。

## 2. 显微镜的鉴别能力(鉴别率)

显微镜的鉴别能力就是物镜的鉴别能力。它是指物镜对于试样上最微细部分所能获得清晰映象的能力，通常用可辨别的物体上两点间的最小距离  $d$  来表示；若被分辨的距离越短，则表示显微镜的鉴别能力越高。根据光学衍射原理，试样上的某一点，通过物镜成象之后，我们看到的并非是一个真正的点象，而是具有一定尺寸的白色圆斑，并在四周围绕着许多衍射环，如图 2 所示。当试样上两个相邻的点距离极近时，经成象后由于部分重叠不能分清为两个点，好象一个大圆点，如图 3 所示；只有当试样上两点距离为  $d$  时，才能使两点分辨清楚，如图 4 所示。此  $d$  值是物镜鉴别能力的极限。

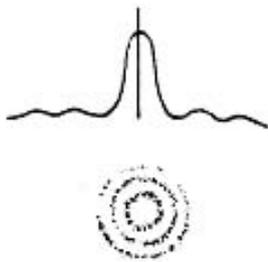


图 2

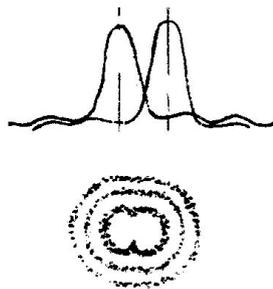


图 3

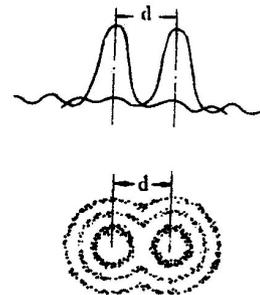


图 4

物镜在设计和使用中指定以空气为介质的称为“干系物镜”（或干物镜），加油为介质的称为“油浸系物镜”（或油物镜）。从图 5 说明油物镜具有较高的数值孔径。

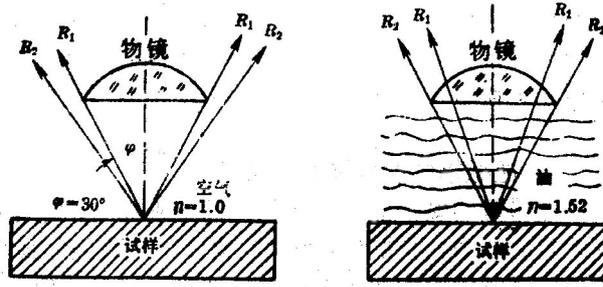


图 5 不同介质对物镜聚光能力的比较

由上可以看出物镜的数值孔径的重要性并不低于其放大倍数。如果数值孔径不足，放大倍数虽然尽量提高，也没有多大意义。因为相邻的两点若不能很好鉴别时，即使放大倍数再高(即虚伪放大)，实际上还是不能鉴别其为两点。这是因为：人眼在 250mm 处的鉴别率为 0.15~0.30mm，要使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

$$d \times M = 0.15 \sim 0.30 \text{ (mm)}$$

而 
$$d = \frac{\lambda}{2N \cdot A}$$

则 
$$M = \frac{1}{\lambda} (0.30 \sim 0.60) N \cdot A$$

若取绿光， $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ ，则有

$$M = 500 \sim 1000 N \cdot A$$

所以显微镜的放大倍数  $M$  与  $N \cdot A$  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外壳上，例如镜头上有 25/0.50 或 65× 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 ( $N \cdot A$ )。

高倍物镜通常都为油浸系，油镜头的标记有“油” (或 Oil 和 Oil) 来表示。

### 3. 金相显微镜的构造和使用：

#### (1). 金相显微镜的构造

金相显微镜的种类和型式很多，最常见的型式可分为台式、立式和卧式金相显微镜三大类。金相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，有的显微镜还附设有照像摄影装置，现以 XJB-I 型金相显微镜为例加以说明。

XJB-I 型金相显微镜构造图如图 6 所示。现分别对其各部件的功能及使用介绍如下：

**照明系统** 照明系统是仪器的主要组成部分，在底座内装有一低压(6V~8V, 15W)灯泡作为光源，灯泡由变压器降压供电，靠次级电压(6~8V)的调节来改变灯光的亮度。在灯泡前尚有聚光镜，孔径光栏 15 及反光镜等装置均安装在圆形底座上。另外，还有视场光栏 14 及另一聚光镜则安在支架上，通过以上一系列透镜作用和配合就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** 在显微镜体的两侧有粗动和微动调焦手轮，两者在同一部位。随粗调手轮 6 转动，通过内部齿轮转动，使支承载物台的弯臂作上下运动，在粗调手轮的一侧有制动装置，用以固定调焦正确后载物台的位置。微调手轮 5 传动内部一组齿轮，使沿着滑轨缓慢移动。在右侧手轮上刻有分度格表示物镜座上下微动 0.002mm。与刻度盘同侧的齿轮箱上刻有二条白线，用以指示微动升降范围，当旋到极限位置时，微动手轮就自动被限制住，此时，不能再继续旋转而应倒转回来使用。

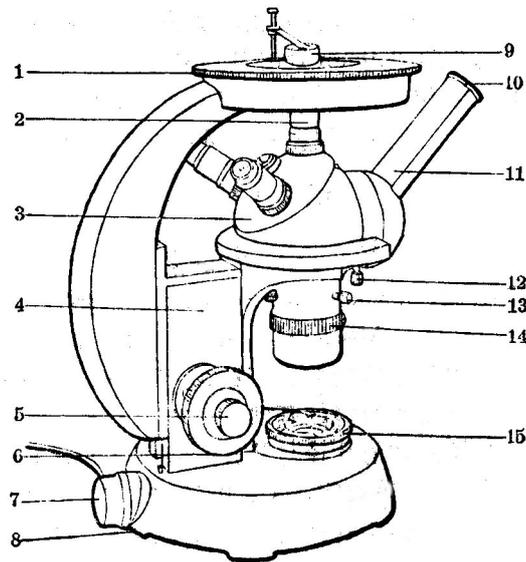


图 6 XJB-I 型金相显微镜构造图

1-载物台；2-物镜；3-转换器；4-传动箱；5-微调调焦手轮；

6-粗动调焦手轮；7-电源；8-偏心圈；9-样品；10-目镜；

11-目镜管；12-固定螺钉；13-调节螺钉；14-视场光栏；15-孔径光栏

载物台(样品台)用于放置金相样品，载物台和下面托盘之间有导架，移动结构仍采用油性膜联结，在手的推动下，可引导载物台在水平面上作一定范围的十字定向移动，以改变试样的观察部位。

孔径光栏和视场光栏 通过这两个孔径可变的光栏的调节，可以提高最后映象的质量。孔径光栏装在照明反射镜座上面，调整孔径光栏能够控制入射光束的粗细，以保证映象达到清晰的程度。视场光栏则设在物镜支架下面，其作用是控制现场范围，使目镜中所见视场照亮而无阴影。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，旋动转换器可使物镜镜头进入光路，并与不同的目镜搭配使用，即获得各种放大倍数。

目镜筒 目镜筒呈 45° 倾斜安装在附有棱镜的半球形座上，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 列出 XJB-1 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 XJB-1 型金相显微镜的放大倍数

光学系统	放大倍数	目镜		
	物镜	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×

## (2). 金相显微镜的使用方法及其注意事项

金相显微镜是一种精密的光学仪器，因此使用时要求细心和谨慎。在使用显微镜之前应熟悉其构造特点及各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。

### 金相显微镜的使用规程

- ①首先将显微镜的光源插在变压器上，通过低压(6~8V)变压器接通电源。
- 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及目镜筒内，并使转换器转至固定位置(由定位器定位)。
- ③将试样放在样品台中心，使观察面朝下并用弹簧片压住。
- ④转动粗调手轮先使镜筒上升，同时用眼观察，使物镜尽可能接近试样表面

(但不得与试样相碰)然后相反转动粗调手轮,使镜筒渐渐下降以调节焦距,当视场亮度增强时再改用细调手轮调节,直到物象调整到最清晰程度为止。

⑤适当调节孔径光栏和视场光栏,以获得最佳质量的物像。

### 使用时的注意事项

①操作应细心,不能用任何粗暴和剧烈的动作,光学系统不允许自行拆卸。

②显微镜镜头的玻璃部分和试样表面严禁手指直接接触,若镜头中落有灰尘,可用镜头纸或软毛刷轻轻擦拭。

③显微镜的灯泡(6~8V)插头,切勿直接插在220V的电源插座上,应当插在变压器上,否则灯泡立即烧坏,观察结束要及时关闭电源。

④在旋转粗调(或细调)手轮时,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,否则就会损坏机件。

### (二)、金相试样的制备方法

金相显微试样的制备过程包括如下工序:取样、镶嵌、磨制、抛光、浸蚀等。下面就各道工序加以简要说明:

#### 1. 取样

取样是进行金相显微分析中很重要的一个步骤,显微试样的选取应根据研究的目的,取其具有代表性的部位,例如:检验和分析失效零件的损坏原因时(废品分析)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,以便比较;在研究铸件组织时,由于偏析现象的存在,必须从表面层到中心,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。

确定好部位后就可把试样截下,试样的尺寸通常采用直径为 $\phi 12-15\text{mm}$ 、高度(或边长)为 $12-15\text{mm}$ 的圆柱体或方形试样,如图7所示。

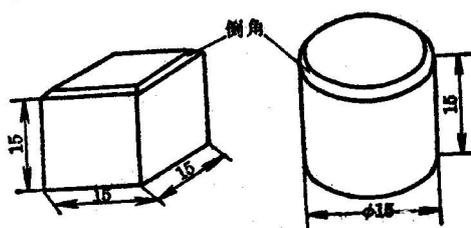


图7 金相试样的尺寸

试样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；对硬而脆的材料（如淬火钢）则可采用砂轮切片机或电脉冲加工等切割。但是不论采用哪种方法，在切取过程中均不宜使试样的温度过于升高，以免引起金属组织的变化，影响分析结果。

## 2. 镶嵌

对于尺寸过于细小的金属丝、片及管等，用手来磨制，显然很困难，需要使用试样夹或利用样品镶嵌机把试样镶嵌在低熔点合金或塑料（如胶木粉、聚乙烯聚合树脂等）中，如图 8 所示。

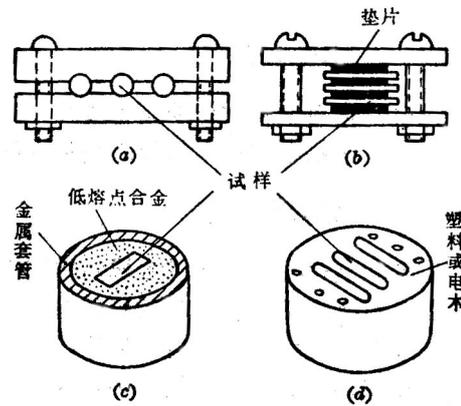


图 8 金相试样的镶嵌方法

(a)、(b)，机械镶嵌；(c)，低熔点合金镶嵌；(d)，塑料镶嵌

## 3. 磨制

试制的磨制一般分为粗磨与细磨

(1) **粗磨** 粗磨的目的是为了获得一个平整的表面，同时为了去掉截取时有组织变化的部分(如氧—乙炔割取的试样的热影响区部分)。钢铁材料试样的粗磨通常在砂轮机上进行。但在磨制时应注意：试样对砂轮的壓力不宜过大，否则会在试样表面形成很深的磨痕，从而增加了细磨和抛光的困难；要随时用水冷却试样，以免受热的影晌而起组织的变化；试样边缘的棱如没有保存的必要，可先行磨圆（倒角），以免在细磨及抛光时撕破砂纸或抛光布，甚至造成试样从抛光机上飞出伤人。当试样表面平整后，粗磨就告完成，然后将试样用水冲洗擦干。

(2) **细磨** 经粗磨的试样表面虽然平整但仍还存在有较深的磨痕，如图 9 所示。因此，细磨的目的就是消除这些磨痕，以获得一个更为平整而光滑的磨面，并为下一步抛光准备。

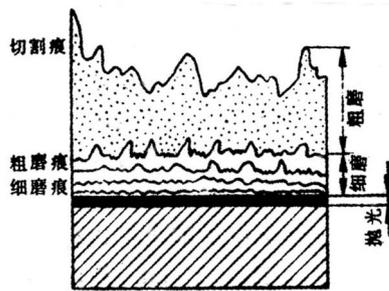


图 9 试样磨面上磨痕变化情况示意图

细磨是在一套粗细程度不同的金相砂纸上由粗到细依次序进行的。

砂纸号数:180、280、320、0、01、02、03、04、05。

究竟选那几号砂纸，磨到那号为止视钢料和要求的情况而定。对于一般碳钢样品选用从 280 至 04 号砂纸。

细磨可按图 10 所示的方式进行。将砂纸平铺在玻璃板上，一手将砂纸按住，一手将试样磨面轻压在砂纸上，并向前推移进行磨削，直到磨面上仅留有一个方向的均匀的磨痕为止。在磨面上所加的压力应力求均衡，磨面与砂纸必须完全接触，这样才能使整个磨面平均地进行磨削。为了保证磨面平整而不产生曲面，磨削应单方向进行。向前推动时进行磨削，然后将磨片提起拉回，在回程中不与砂纸接触。在更换细一级砂时，须将试样的磨削方向调转 90° 即与上一道磨痕方向垂直，直到把上一道砂纸所产生的磨痕全部消除为止。此外，在更换砂纸时还应将试样，玻璃板清理干净，以防粗砂粒带到下一道细砂纸上产生粗的深痕。

为了加快磨制速度可采用在转盘上贴有不同型号砂纸的预磨机实现机械磨光。

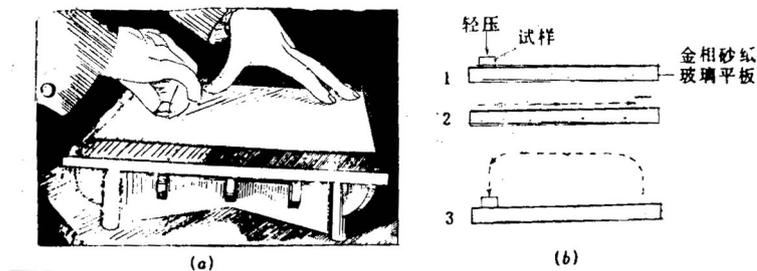


图 10 手工磨光操作

(a) 操作姿势；(b) 正确的磨光操作过程

#### 4. 抛光

细磨后的试样还需进行最后一道磨制工序——抛光，其目的是去除细磨时遗

留下来的细微磨痕，以获得光亮无疵的镜面。

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 试样的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 300~500 转 / 分钟。抛光盘上铺以细帆布、呢绒、丝绸等抛光织物。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  $0.3\sim 1\mu$ ) 在水中的悬浮液(每升水中加入  $Al_2O_3$  5~10 克)或采用由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。 $Cr_2O_3$  为绿色，具有很高的硬度，适用于淬火后的合金钢，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的。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作径向往复移动，抛光时间一般约 3~5 分钟，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，否则将会产生紊乱层而导致组织分析得出错误的结论。

抛光结束后用水冲洗试样并用棉花擦干或吹风机吹干，若只需要观察金属中的各种夹杂物或铸铁中的石墨形状时，则可将试样直接置于金相显微镜下进行观察。

(2) 电解抛光 电解抛光是靠着电化学的作用在试样表面形成一层“薄膜层”而获得光滑平整的磨面，其优点在于它只产生纯化学的溶解作用而无机械力的影响，因此可避免机械抛光时引起表面层金属的变形或流动，从而能够较正确地显示出金相组织的真实性。这种抛光法目前工厂和研究单位已在广泛应用，特别是对于有色金属及其它硬度低、塑性大的金属，效果较好，如铝合金、高锰钢、不锈钢等。但对于金属基体的非金属夹杂物、化学成分不均匀的偏析组织、用塑料镶嵌样品的试样不适于采用此法。电解抛光的简单装置如图 11 所示。

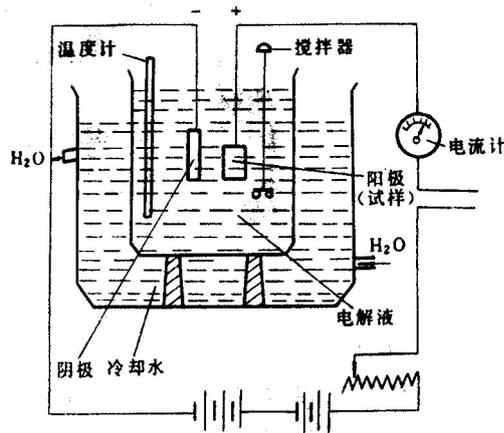


图 11 电解抛光装置示意图

电解抛光时把磨光的试样浸入电解液中，接通试样(阳极)与阴极之间的电源(通常多用直流电源)，阴极可采用铅片或不锈钢片等，并与试样抛光面保持一定的距离(约 25~300mm)。当电流密度足够时，试样磨面即产生选择性溶解，此时，靠近阳极的电解液在试样的表面上形成一层厚度不一的薄膜，由于薄膜本身具有较大电阻，并与其厚度成正比，如果试样表面高低不平，则凸出部分薄膜的厚度要比凹陷部分的薄膜厚度来得薄些，因此凸出部分电流密度最大，由此金属被迅速地溶入电解液中，凸出部分渐趋平坦，最后形成平整光滑的表面。

电解抛光的效果，在选定的电解液条件下取决于电流密度、温度及抛光时间等参数的选择是否恰当，其中电流密度尤为重要(一般电流密度为 40~50 安培每平方米)，多由试验确定，电解抛光时间可由数秒至 5~10 分钟。抛光完毕后将试样自电解液中取出，切断电源并迅速投入水中冲洗。

电解抛光用的电解液一般由三类成分组成：①酸类——具有氧化能力，是电解液的主要成份，如过氯酸、铬酸和正磷酸等。②溶媒——用于冲淡酸类，并能溶解在抛光过程中磨面所产生的薄膜中，如酒精、醋酸酐和冰醋酸等。③一定数量的水份。

电解抛光液的种类很多，较为常用的钢铁材料电解液成份为：过氯酸(70%)50 毫升、含 3%乙醚的酒精 800 毫升、水 150 毫升。电解抛光时的技术参数：电流密度 3~60(安/平方厘米)，电压 30~50 伏，使用温度 20—30℃，抛光时间 30—60 秒即可。

(3) 化学抛光 化学抛光的实质与电解抛光类似，也是一个表层溶解过程，但它纯粹是靠化学药剂对于不均匀表面所产生选择性溶解的结果而获得光亮的抛光面。

化学抛光操作简便，不需要专用抛光设备，成本低，有不产生金属表面扰乱等优点，它的缺点是抛光液易失效，夹杂物易蚀掉，抛光面平整度质量差，只能在低倍数下(低于 100 倍)作常规检验工作。化学抛光兼有化学浸蚀作用，可以立即在金相显微镜下观察。实践证明，软金属利用化学抛光要比机械抛光和电解抛光效果好。

化学抛光液可采用如下成分：草酸 2.5 克，过氧化氢 1.3 克(或改用 3%双氧水 50 毫升)，硫酸 0.01 克，蒸馏水 50~100 毫升。

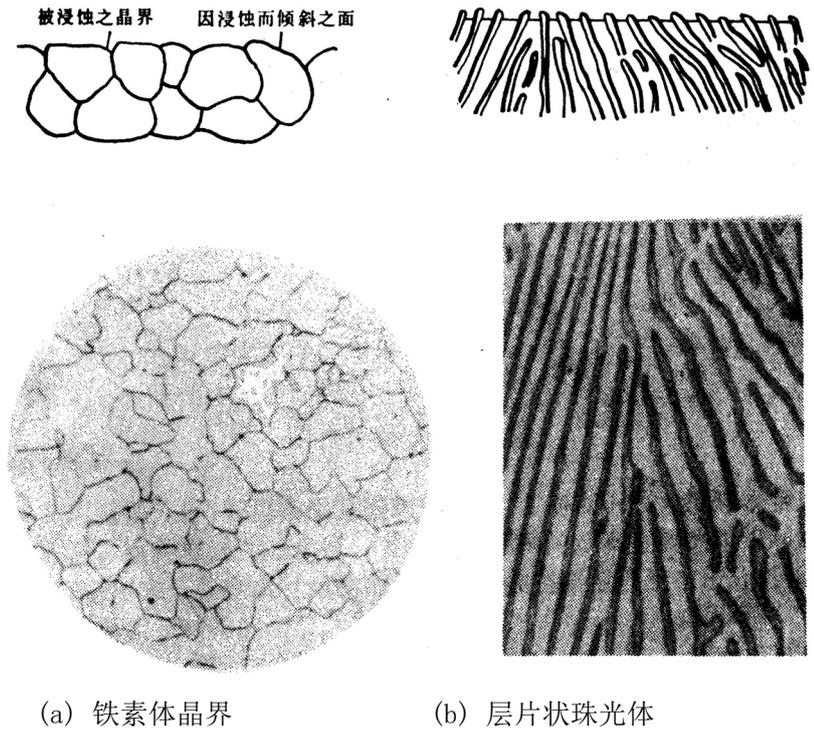
上述试剂对碳钢，普通合金钢的退火及淬火状态组织进行化学抛光具有良好效果。

## 5. 浸蚀

经抛光后的试样磨面，如果直接放在显微镜下观察时，所能看到的只是一片光亮，除某些夹杂物或石墨外，无法辨别出各种组织的组成物及其形态特征。因此，必须使用浸蚀剂对试样表面进行“浸蚀”，才能清楚地显示出显微组织。

最常用的金相组织显示方法是化学浸蚀法。化学浸蚀法的主要原理就是利用浸蚀剂对试样表面所引起的化学溶解作用或电化学作用(即微电池原理)来显示金属的组织。它们的浸蚀方式则取决于组织中组成相的性质和数量，

对于纯金属或单相合金来说浸蚀仍是一个纯化学溶解过程，由于金属及合金的晶界上原子排列混乱，并具有较高的能量，因此晶界处较为容易被浸蚀而呈现凹沟，如图 12 所示，同时由于每个晶粒中原子排列的位向不同，所以各自的溶解速度各不一样，致使被浸蚀的深浅程度也有区别，在垂直光线的照射下将显示出明暗不同的晶粒。



(a) 铁素体晶界

(b) 层片状珠光体

图 12 单相和两相组织显示图

对于两相以上的合金组织来说，则浸蚀主要是一个电化学腐蚀过程，由于各组成相的成份不同，各自具有不同的电极电位，当试样浸入具有电解液作用的浸蚀剂中，就在两相之间形成无数对“微电池”，具有负电位的一相成为阳极，被迅速地溶入浸蚀剂中，而使该相形成凹洼，具有正电位的另一相成为阴极，在正常电化学作用下不受浸蚀而保持原有的光滑表面。当光线照射到凹凸不平的试样表面时，由于各处对光线的反射程度不同，在显微镜下就能观察到各种不同的组织及组成相，如图 12 (b) 所示。

浸蚀方法通常是将试样磨面浸入浸蚀剂中，也可用棉花沾上浸蚀剂擦试样表面，浸置时间要适当，一般使试样磨面发暗时就可停止，如果浸蚀不足，可重复浸蚀，浸蚀完毕后立即用清水冲洗，然后用棉花沾上酒精擦试表面并吹干，至此，金相试样的制备工作全部结束。

(三) 金相图像采集与分析

金相试样制备好以后，即可在金相显微镜下进行组织观察。组织观察结束后，常常需要将图像保存，以供日后进一步分析和使用。传统的方法是借助显微摄影的手段对所观察到的图像进行拍摄，经过底片的曝光、冲洗、印相及放大等步骤，获得所需的金相照片。随着计算机技术的发展，图像的数字化处理技术日臻完善，

将金相显微镜、数码相机（或 CCD 摄像机）和计算机及相应的图像处理和分析软件集成在一起,形成了多种金相图像分析系统。图 13 为 MIAPS 金相图像分析系统。



图 13 MIAPS 图像分析系统硬件连接示意图

该系统由金相显微镜、高分辨率 CCD 摄像头、图像采集卡、PIV 计算机和喷墨打印机等硬件构成。其系统软件具有如下主要功能：

#### （1）图像采集

具有高分辨率彩色、灰度图像采集能力，可以实时动态采集图像；可以多帧平均，去除抖动噪声，提高采集质量。

#### （2）图像显示

可以任意放大、缩小显示图像；多帧图像可进行层迭、平铺显示以及彩色图像灰度化和灰度图像伪彩色显示。

#### （3）图像增强

提供直方图均衡、对比度增强、图像运算、滤波、背景校正等多种图像增强的方法。用户可根据需要，选择不同的方法增强图像，以得到满意的图像。

#### （4）图像分割和处理

除提供标准的灰度阈值分割外，还提供强大的彩色图像分割能力。用户可对灰度、彩色图像进行自动、半自动分割识别；可对分割后的图像进行特殊处理，便于测量统计。

#### （5）参数测量及各种分析

系统能够准确识别由孤点、线段、物体等元素组成的复合特征物，提供丰富的特征物统计参数；可对直线、曲线、任意线的长度、角度、面积等几何参数进行人工测量；拥有位图分析、光密度分析等图像数值分析功能，以满足特殊的研究需要。

#### (6) 个性化的图像标注和编辑

采用独特的图像层标注层分离技术，提供丰富的标注工具。时间、日期自动标注；支持无限多个元素子层，能够方便的修改各标注元素的位置、尺寸、字体、颜色等属性；还可将标尺迭加到图像上；显示和打印时系统自动迭加图像层和标注层；系统自动记录标注过程，可重复用于同类试样的标注。

#### (7) 实用的专用测量功能

提供大量符合生产检验和科研需要的专用测量模块。如“金属平均晶粒度评级”、“第二相面积含量测量”、“非金属夹杂评级”、“颗粒度分析”、“渗碳层深度测定”。所有模块均采用 GB 或国际通用标准，提供丰富的检验报告模板，数据输出快捷方便，用户也可自行设计检验报告。

### 四、实验组织运行要求

实验原理及操作要领讲授以小班为单位集中讲授，金相试样制备、组织观察及金相显微照片摄制以学生自主训练为主，教师指导为辅。

### 五、实验条件

(1) 普通金相显微镜；(2) 砂轮机；(3) 抛光机；(4) 吹风机；(5) 试样；(6) 不同型号的砂纸；(7) 玻璃板；(8) 抛光粉悬浮液；(9) 酒精；(10) 3-4%硝酸酒精溶液；(11) 棉花；(12) 竹夹子；(12) MIAPS 图像分析系统；

### 六、实验步骤

讲解金相显微镜的基本原理、主要结构、使用方法，金相显微试样的制备步骤，设备使用方法，组织分析原理。每人完成一个样品制备，在金相显微镜下观察显微组织，试样合格后再进行显微图像采集和输出。

### 七、思考题

- 1、何谓分辨率，影响分辨率的因素有哪些？
- 2、数值孔径 NA 的含义是什么？

### 八、实验报告

简述实验目的、显微镜光学原理和金相试样的制备过程并附上所拍摄的金相照片，对影响金相图像质量的因素进行讨论并回答思考题。

## 实验二 金属凝固原理与宏观组织分析

实验学时：6

实验类型：综合

实验要求：必修

### 一、实验目的：

- (1) 观察硝酸银的枝晶形态；
- (2) 分析凝固条件对铸锭组织的影响；
- (3) 了解宏观分析的应用及操作方法；
- (4) 熟悉常见缺陷的宏观及微观组织的特征、形成原因及影响。

### 二、实验内容：

- (1) 观察硝酸银枝晶过程；
- (2) 观察六种纯铝铸锭纵断面粗视组织，分析凝固条件对金属铸锭组织的影响；
- (3) 硫印实验：观察工字钢横截面硫的分布；
- (4) 磨片分析实验：观察 20 钢焊接接头的宏观组织；
- (5) 观察热加工宏观、微观缺陷，了解缺陷特征，分析产生原因。

### 三、实验原理、方法和手段

#### (一) 盐（硝酸银）枝晶形成

盐和金属均为晶体。由液态凝固形成晶体的过程叫结晶。不论盐的结晶或金属的结晶都遵循形核和核的长大规律。形核又分为均匀形核和非均匀形核。通常情况下，由于外来杂质、容器或模壁等的影响，一般都是非均匀形核。晶核形成后通常均按树枝状方式长大形成树枝晶体即枝晶。

由于临界晶核的尺寸很小，晶核的大小不能用肉眼看到，在实验室只能见到正在长大的枝晶，通过直接观察透明盐类的结晶过程可了解树枝晶体的形成过程。

实验过程：在玻璃片上滴上一滴近饱和的硝酸银溶液，在硝酸银的水溶液中放入一小段细铜丝，铜将开始溶解，而银则沉淀出来，在生物显微镜下观察银的枝晶的生长过程。氯化银的结晶第一阶段是在液滴的最外层形成一圈细小的等轴晶体，结晶的第二阶段是形成较为粗大的柱状晶体，其成长的方向是伸向液滴的中

心，这是由于此时液滴的蒸发已比较慢，而且液滴的饱和顺序也是由外向里，最外层的细小等轴晶只有少数的位向有利于向中心生长，因此形成了比较粗大的、带有方向性的柱状晶。结晶的第三阶段是在液滴的中心部分形成不同位向的等轴枝晶。这是由于液滴的中心此时也变得较薄，蒸发也较快，同时溶液的补给也不足，因此可以看到明显的等轴晶体。

## （二）铸锭组织观察

铸锭的结晶过程和组织与盐液滴的结晶过程和组织很相似。

典型的铸锭组织可分为三个区域：靠近模壁为细等轴晶区，由细等轴晶区向铸锭中心生长的柱状晶区；铸锭中心为较粗大的等轴晶区。

改变液体金属凝固条件，如浇铸温度、铸模材料、铸模壁厚、铸模温度、铸锭大小以及是否加变质剂等，则将改变三个晶区，特别是柱状晶区和等轴晶区的相对面积及各自的晶粒大小。

采用金属模及增加其模壁厚度，可使液态金属获得较大的冷却速度，造成较大的内外温差，将有利于柱状晶区的发展。在相同的浇铸温度下，金属模比砂模可获得更大的柱状晶区。

如果铸模预热温度越高，等轴晶区就越大。

浇铸温度越高，内外温差就越大，凝固所需时间越长，使柱状晶有充分的时间和机会得到发展。同时，液态金属温度越高，非自发晶核的数目就越少，更有利柱状晶的发展。

机械震动、磁场搅拌、超声波处理等，可促进形核，减弱柱状晶的发展。

加入变质剂，促进非均匀形核，在其他条件相同的情况下有利得到细小等轴晶。

在一般铸件中都希望得到等轴细晶粒，但在个别情况下要求得到柱状晶。如涡轮叶片常采用定向凝固法有意使整个叶片由同一方向，平行排列柱状晶所构成。在纯金属中，结晶后柱状晶往往贯穿整个铸锭，这种组织叫穿晶。当浇铸温度较高、铸模的散热速度较快，已结晶的金属导热性较好时，铸锭凝固过程中，液态金属始终保持定向散热，这种情况下，柱状晶能一直长大到铸锭中心，形成穿晶。

在塑性相对较差的钢铁生产中，不希望得到柱状晶，生产上常用变质处理和物理方法控制柱状晶。

从铸锭组织结构看到，纯金属只在铸锭的表面及缩孔处，可以清楚地看到枝

晶组织，而在铸锭内，只能看到外形不规则的晶粒。在铸态合金的组织中，由于晶内偏析或结晶顺序不同，合金内部可以用显微镜看到枝晶组织(即枝晶偏析)。

### (三) 宏观分析

宏观分析又称粗视分析,即用肉眼直接观察或用 30 倍以下放大镜观察金属断口或磨面的组织和缺陷的方法。这种方法简单迅速,可在较大范围内观察金属的组织 and 缺陷,可弥补显微分析方法的不足,用来分析金属材料的冶金质量和加工质量以及初步分析构件失效的原因。但是它不能观察金属组织结构的细节。

常用的宏观分析方法有断口分析、磨片分析、贴印分析。

- 1、磨片分析:观察焊缝宏观组织及热影响区的大小,焊缝是否存在气孔、夹渣、裂缝、未焊透等焊接缺陷。
- 2、贴印分析:将试样磨平后,放入适当的化学试剂中,化学试剂与试样表面某些组织起化学反应,并用相纸记录下来。常用的贴印法有硫印、氧印、磷印等。

(1) 硫印 用来检查钢中硫的分布。将试样磨平,并用水或汽油洗净,不得留有油污、锈斑等脏物。选用反差较大的光面印相纸(曝过光的废相纸仍可使用),浸入 5%硫酸水溶液中约 5 分钟,取出垂直地晾一下,使多余的硫酸流走,然后把相纸的药面对着试样表面压紧,注意两者不能相对移动,而且必须将两面之间的气泡赶走。3—5 分钟后将相纸揭下,先用水冲洗,然后放入 10%的大苏打水溶液中定影 10~20 分钟,最后用流动的水冲洗,晾干。相纸上黑褐色斑点即表示了样品上硫的分布。

硫印的原理:钢中的硫常以  $MnS$  或  $FeS$  的形式存在,硫化物与相纸的硫酸发生反应生成硫化氢:



硫化氢又与相纸上的溴化银发生反应生成硫化银:



硫化银( $Ag_2S$ )沉淀使相纸出现黑褐色斑点。直接用重铬酸钾硫酸水溶液腐蚀样品的表面,可以看到锻件中硫的分布。

(2) 氧印 用来检查钢中氧的分布。其操作与硫印相似。将相纸放入 5%盐酸水溶液中片刻取出,试样压在相纸上 1~2 分钟,然后揭下相纸置于 2%赤血盐溶液中显影约十分钟。氧化物存在处,即在相纸上出现蓝色的斑点。

#### （四）热加工常见缺陷

(1) 缩孔 多数金属在凝固时均发生体积收缩，因此缩孔难以避免。缩孔可分为集中缩孔与分散缩孔。一般集中缩孔控制在钢锭或铸件的冒口处，然后加以切除。若缩孔较深切除不净时即成为残余缩孔或因铸型设计不当，铸锭上部而基本凝固，因心部在冷凝时未能及时得到液体金属的补充，即形成二次缩孔。

残余缩孔或二次缩孔呈中心树根状孔洞，在缩孔附近一般会出现密集的夹杂物、疏松或偏析，以此作为区别残余缩孔与各种内裂的依据。铸件中存在缩孔，显著地降低其力学性能，甚至在使用过程中发生断裂事故，有缩孔存在的钢锭，经轧制而未能良好焊合的缩孔，需完全切除，否则在继续加工中导致锻造裂纹或板材、带材的分层现象。

(2) 气泡 凝固时由液体金属中释放的气体，因浇铸条件不良如铸型生锈、涂料中存在较多水分与金属液作用产生的气体，在金属已完全凝固时很难逸出，于是有一部分就包容在处于塑性状态的金属中而形成气孔即气泡。

铸件中最常见的气泡呈圆形或椭圆形。一般由液态金属中析出的气体而形成的气泡壁具有金属光泽，表面光滑，如图 1 所示。



图 1 气泡

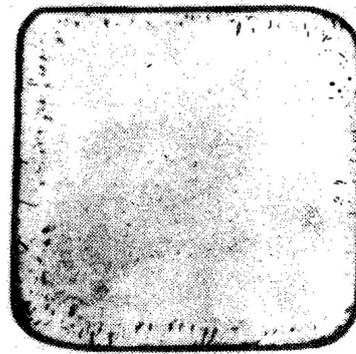


图 2 皮下气泡

在钢锭表面或附近的气泡称为皮下气泡。常由铸型生锈或涂料不当而产生，呈圆形或椭圆形光滑孔洞，热加工后呈垂直于表面的裂纹。见图 2。

气泡减少铸件的有效截面，由于缺口效应大大降低材料的强度；铸锭中的气泡通过热加工可以焊合，但压力加工中可能被氧化而不能焊合，导致细裂纹或裂缝或分层现象。

(3) 疏松 凝固时枝晶间隙因得不到液体补充，而形成的显微缩孔。

大的疏松在经切削加工后的表面上用肉眼或低倍放大镜即能观察到，而小的疏松则经酸蚀后才能发现或用显微镜进行观察。疏松集中于钢坯轴心部分称为中心疏松。

钢锭中的疏松经压力加工可得到很大改善，但严重者，因压力加工时压缩比不够等原因仍存在，如在钢锭残余缩孔、气泡因焊合不良处仍可能存在疏松。

疏松的存在影响铸锭及铸件的致密度和机加工后的表面光洁度，降低其力学性能；对用作液体容器或管道的铸件，若存在相互联接的疏松时，不能通过水压试验或在使用中发生渗漏现象而报废。

(4) 偏析 铸件或铸锭中化学成分不均匀的现象。常见有枝晶偏析、方框偏析、比重偏析。

① 枝晶偏析 固溶体合金凝固过程中，由于扩散不充分，使得同一个晶粒内后凝固的部分与先凝固的部分成分不同，愈靠近枝晶中心则富含高熔点的组元，愈靠近枝晶边缘则富含低熔点组元，因此凝固后便存在晶粒范围内的成分不均匀现象，经磨片浸蚀呈现树枝状分布。这种偏析在铸钢中尤其常见。

同理，各个树枝状晶体之间最后凝固的部分，通常为低熔点组成物和不可避免的杂质，它们与晶粒本身的成分不同，称为晶间偏析。

② 方框偏析 在钢锭的横截面上，因凝固时杂质被推向柱状晶的前沿，聚集在与中心等轴晶相遇处，酸蚀后出现腐蚀较深的方框区域。方框偏析是钢锭中的一种区域偏析。钢锭中存在区域偏析，特别是硫偏析(可富集达 300~400%)、磷偏析(可富集达 100—200%)强烈地降低钢的质量，并给以后的加工造成种种困难，导致材料的损害和机件的破坏。如硫偏析能破坏金属的连续性，在钢锻造时引起热脆，在轧制钢板时产生夹层，在承受交变载荷的零件中是引起疲劳断裂的主要原因之一。磷偏析使钢具有冷脆性，并促使钢的回火脆性。

③ 比重偏析 产生在凝固的早期，由于组成相之间比重相差悬殊，轻者上浮，重者下沉，从而导致上下成分不均匀的现象。例如 Pb—Sb (15%) 合金，在结晶过程中，先共晶的 Sb 相比重较小，而共晶(Pb+Sb)的比重较大，因而 Sb 晶体上浮，而(Pb+Sb)共晶下沉，结果合金的组织极不均匀，导致零件报废。铸铁中的石墨漂浮也是一种比重偏析。

增大铸件的冷却速度，使组成相来不及上浮下沉；加入第三种合金元素，使

其形成高熔点的比重不同的固溶体或化合物，在结晶初期形成树枝状骨架晶体，阻止相的沉浮，均能有效地防止比重偏析。

(5) 魏氏组织 是铸钢中常见的一种缺陷组织，如图 3 所示。亚共析钢铸造后，在高温下形成的奥氏体晶粒往往比较粗大，并以一定速度冷却时，铁素体与奥氏体以一定的共格关系析出，铁素体由晶界向晶内呈针状长大，使材料冲击韧性下降，进行退火或正火可消除。

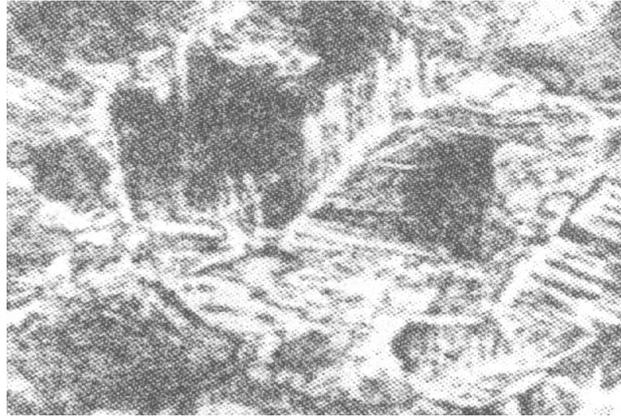


图 3 魏氏组织

(6) 非金属夹杂物 是指不具有金属性质的化合物，如氧化物( $Al_2O_3 \cdot FeO$  等)、硫化物( $MnS$ 、 $FeS$  等)、硅酸盐( $nFeO \cdot mSiO_2$  或  $nAl_2O_3 \cdot mSiO_2$  等)及氮化物( $TiN$ 、 $AlN$ )等。

在钢中它们常伴随冶炼脱氧过程中的物理化学反应而出现或因冶炼浇铸过程中的炉渣及耐火材料落入钢液中而形成。

非金属夹杂物在钢中一般为数很少，但对性能的影响不可忽视。特别对钢的疲劳性能、冲击韧性和塑性影响很大。因为夹杂物的存在破坏了基体金属的连续性，造成应力集中，常常成为疲劳裂纹的发源地，导致零件早期失效；当夹杂物呈尖角沿晶界呈网状分布或聚集在一起时，使材料的韧性和塑性(断面收缩率)明显下降；钢在铸造、轧制、锻造过程中常因硫化物过多而引起裂纹；零件中大量夹杂物存在导致淬火开裂。因此，为了提高金属材料的质量，必须识别和控制钢中非金属夹杂物。夹杂物的评级可根据冶标(YB25—77)进行。

非金属夹杂物的危害程度取决于它们的性质、形状、大小和分布情况。鉴别金属中非金属夹杂物，广泛采用金相法。

首先需制备优良的金相试样，要求夹杂物不脱落，外形完整，试样经磨制抛光后，一般不浸蚀，随即依次采用明场、暗场和偏光三种照明方式检查其形状、

分布、色彩等以辨别其类型。在明场下，根据夹杂物本身的反光能力所呈现的不同颜色、形状、分布来鉴别它们的类型：

氧化物的特点是性脆易断，热轧后常沿加工方向呈链状分布。其中以铁的氧化最多，明场下呈灰色。

硫化物主要以 MnS 形式存在于钢中，锰量较少时也可以 FeS 或 FeS • MnS 复杂硫化物出现。高温时 MnS 具有塑性，轧制后常沿加工方向呈条状分布。硫化物对光有中等反射能力，明场下呈浅灰色。

硅酸盐夹杂物有易变形与不易变形两类，前者在压力加工后呈条线状，后者呈链状或球。

TiN、VN 等一类氮化物，形状比较规则，多数呈方形或三角形，在明场下为淡黄色或金黄色。AlN 一般很小，在高倍的光镜或电镜下才可分辨。当明场下无法准确地区别夹杂物的类型时，应采用暗场下观察，可避免金属表面反射光的混淆作用，从而显示透明夹杂物固有的色彩：如 MnO 在暗场呈绿宝石色，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 呈淡黄色，TiN 不透明，在暗场下看不见，只边界上镶有亮线轮廓。

当明、暗场下都难以确定某夹杂物时，可利用夹杂物的各向异性和各向同性在偏振光下的特征来鉴别。

将试样置于正交偏振光下，使显微镜的载物台转动 360° 时，各向异性的夹杂物，如 AlN，就会交替出现亮度最强及亮度最弱的交替变化，产生四次消光、四次发亮现象，各向同性的夹杂物则保持不变。透明的各向同性的球状夹杂物如氧化硅、硅酸盐，在正交偏正光下观察时，呈现出一种特有的“黑十字”和“同心环”特征。

## 2. 锻造缺陷

(1) 流线分布不良 流线是枝晶偏析和非金属夹杂物在加工过程中沿加工方向延伸的结果。由于流线的存在，使钢的性能出现方向性，流线的横向塑性、韧性远比纵向为低。因此零件在热加工时力求流线沿零件轮廓分布、使其与零件工作时所受的最大拉应力的方向平行，而与外加剪切应力或冲击力的方向垂直。锻压切削而成的吊钩，流线分布不正确，容易折断，而锻造成流线分布正确的吊钩，强度高，不易折断。

(2) 带状组织 如图 4 所示。亚共析钢终锻温度过低，低于 A<sub>3</sub> 至 A<sub>1</sub> 之间

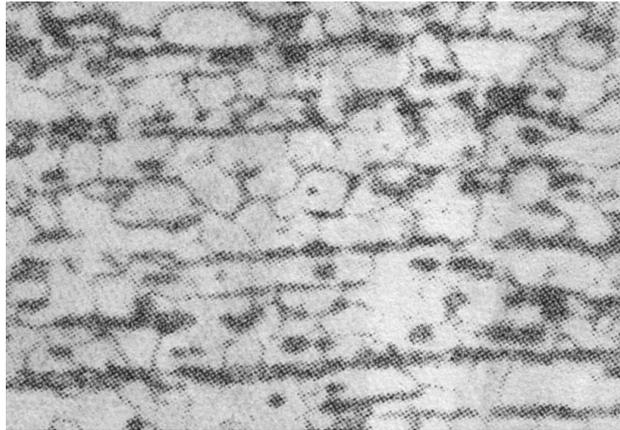


图 4 带状组织

时，正处在奥氏体分解的情况下，使奥氏体按金属加工流动方向析出铁素体，而尚未分解的奥氏体也被带状分布的铁素体分割呈带状，当继续冷到  $A_1$  以下时，则奥氏体分解的珠光体必然保持原奥氏体带状。此外，钢中非金属夹杂物的存在可促使带状组织的形成。因夹杂物被加工时按金属变形流动方向延伸排列，当温度降至  $A_3$  以下时，它们可成为铁素体的结晶核心，所以铁素体围绕夹杂物呈带状分布，然后奥氏体分解的珠光体也必然存在于带状铁素体之间。

具有带状组织缺陷的钢材，其性能有显著的方向性。热加工引起的带状组织，可通过完全退火消除。

(3) 白点 白点是铬镍和铬镍钼合金钢锻坯中常见的一种缺陷，其他成分钢材则较少产生。因其在钢材的纵断面上呈圆形或椭圆形银亮色的斑点，所以叫做白点。在横断面上观察白点时，则呈直的、弯曲的细小裂纹，所以又叫发裂。白点裂纹的长度一般在十分之几毫米到 10 毫米。区别白点和其他裂纹的最有效办法是查看钢材的纵向断口。产生原因主要是因冶炼和浇铸过程中，氢进入钢液而引起的。氢可固溶于奥氏体和铁素体中，其溶解度随温度的降低而减小。钢在热锻后冷却时，氢由于溶解度减小而以原子态析出。当钢锻件截面较大，冷却较快时，原子氢来不及扩散至钢的表面而留在钢内并聚集到疏松、晶粒边界和夹杂物附近，转变成为分子氢而产生巨大的内应力并与钢发生组织转变时产生的局部内应力相结合，致使钢材内部产生细裂纹。具有白点的钢材，断面收缩率和冲击韧性显著下降，有时接近零，因此具有白点的钢材一般不能使用。

(4) 过热 因加热温度超过正常锻造温度。一般显微组织表现为：晶粒粗大、铁素体沿晶界析出较粗和出现魏氏组织。使钢的冲击韧性和塑性显著下降。例如

45 钢锻制的曲轴，在锻造后机加工时断裂，其断口为萘状。显微组织为珠光体+铁素体沿粗大晶界分布，并出现魏氏组织和在铁素体晶界上有少量硫化物夹杂。

过热的本质：钢在高温加热过程中，硫化物等夹杂物逐渐向奥氏体中溶解，而在随后的冷却过程中，钢中的硫化物夹杂以细小的球状粒子重新在原奥氏体晶界上析出，奥氏体化的温度越高，时间越长，奥氏体晶粒长大的趋势越大，MnS 粒子越多。晶界的结合力将大为减弱，易导致脆断。

(5) 过烧 过烧是在过热基础上进一步恶化的结果，它和过热的区别在于过烧钢的粗大晶界已被脆性的硫化物等夹杂的质点和金属熔化的空洞所分隔开，即奥氏体晶界开始熔化。所以，锻件过烧会使金属内部和表面造成裂纹或龟裂。过烧严重的锻件、进行敲击时无金属响声。在进行锻打时，会使金属碎裂成豆渣状，锻件表面可看到极为严重的氧化皮。

过热可通过重结晶正火或退火消除，而过烧一般无法挽救。

(6) 停锻温度过低 高合金钢在 900℃ 以下还继续锻打，钢内发生相变，使钢的热塑性显著下降，而金属内部的相变应力不断增加，此时锻打变形时产生的应力超过材料强度，即发生开裂。高合金钢锻坯因停锻温度过低，冷却速度太快，使锻件沿切应力最大的对角线处开裂。

### 3. 热处理缺陷

热处理缺陷以淬火后的缺陷最重要，主要包括淬火裂纹、过热、过烧、淬火软点、硬度不足等。重要零件热处理淬火时，往往因淬火开裂而报废，全功尽弃，为此，这里着重介绍淬火裂纹的特征和形成。

(1) 淬火裂纹 淬火裂纹是淬火冷却时形成的拉应力超过材料微裂纹扩展所需的临界应力时形成的宏观裂纹。

淬火裂纹的特征：

①多数情况裂纹由表面向心部扩展，宏观形态较平直。

②从宏观和微观看，裂纹两侧均无氧化、脱碳现象(淬火后在氧化气氛中进行过高温回火除外)，由于淬火裂纹是产生在马氏体转变之后，所以裂纹两侧无氧化脱碳现象。显微组织与其他部位毫无区别。

③在显微镜下看，淬火产生的裂纹，大多沿原奥氏体晶界和马氏体晶体所产生，裂纹由粗变细，尾部细尖。

特征②是区别淬火裂纹与非淬火裂纹的重要依据。

淬火裂纹产生的原因可从两方面来考虑，一是造成较大拉应力因素：二是材质有何缺陷，以致强度和韧性降低。

增大淬火内应力因素：

①零件设计不合理，如有尖角、截面突变，或销孔、键槽等均易引起应力集中。工件厚薄悬殊，有尖角，裂纹开始於尖角处，由于应力集中引起淬火裂纹。

②冷却太强烈，如淬油的淬了水；不该冷透的冷透了等等。

③淬火时入水方式不当，以至冷却不均应力不均。

④淬火后未能及时回火等等。

以上原因引起的淬火裂纹，显微组织无异常变化。

材料缺陷引起淬裂的原因：

①淬火温度偏高，产生过热，奥氏体晶粒粗大，淬火后形成粗大的马氏体，容易开裂，特别是高碳马氏体，常伴有微裂纹，危险更大。这种裂纹的特征是沿原奥氏体晶界扩展。

②钢材中存在着网状碳化物等脆性相，在淬火时易沿脆性碳化物网络开裂。

③钢材存在严重偏析，淬火后组织不均匀，内应力较大，不均匀，容易开裂。

④零件表面脱碳，淬火时表层体积膨胀小，受到两向拉应力，容易形成龟裂。

(2)脱碳 钢件在氧化介质(如  $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $H_2O$  等)中进行长时间加热保温，使其表面层中碳含量全部或部分损失的现象叫脱碳。脱碳是工具、弹簧、轴承等重要钢件的主要缺陷之一，它使其表面硬度、耐磨性、强度、疲劳强度都显著降低。一般脱碳层在技术条件许可的情况下可从工件上去掉，如果不能，只有报废。

#### 4、焊接过程形成的缺陷

焊接与其他热加工工艺相比，是最容易出现缺陷的一种工艺。在焊接过程中，由于材质和焊接工艺不当等因素，焊接接头会产生各种缺陷，主要有：裂缝、气孔、夹渣、未焊透等。

### 四、实验组织运行要求

分组集中进行，每组十五人左右，由指导老师首先讲解有关实验原理和实验方法，然后学生分头实验。要求学生做课前预习并做实验记录，实验结束后撰写实验报告。

### 五、实验条件

(1)硝酸银、相纸、砂纸、硫酸、硝酸、定影液、小烧杯、玻璃片、容器等；

- (2) 金相显微镜、生物显微镜;
- (3) 宏观缺陷样品一套、显微缺陷样品一套;
- (4) 焊接接头、不同状态下的铝锭试样一套。

## 六、实验步骤

- (1) 观察硝酸银的结晶, 并画出结晶组织示意图;
- (2) 选画 4 种纵断面粗视组织示意图, 注明浇注条件;
- (3) 比较铸锭的柱状晶区和粗等轴晶区的相对面积和晶粒的大小, 分析原因, 说明模壁材料、模子预热温度、浇铸温度、变质处理对铸锭组织(包括出现铸锭缺陷的情况)的影响;
- (4) 简述硫印步骤, 贴上所作硫印相纸, 进行分析;
- (5) 观察焊接接头宏观组织, 画出组织示意图; 观察陈列宏观缺陷试样的特征, 分析形成的主要原因及产生的影响;
- (6) 观察热加工显微缺陷, 分析其特征, 画下组织示意图;
- (7) 提问与讨论相结合, 弄清热加工过程中常见缺陷, 形成原因, 对材料质量的影响、消除办法。

## 七、思考题

- 1. 如何识别锻造裂纹和淬火裂纹?
- 2. 冷却速度大小对铸锭组织有何影响?

## 八、实验报告

- 1. 简述实验目的、实验内容;
- 2. 画出硝酸银晶体结晶过程及焊缝宏观示意图、附上硫印照片;
- 3. 选画 3 种铝铸锭纵断面粗视组织示意图, 注明浇铸条件, 分析浇铸条件对铸锭组织的影响;
- 4. 画出缺陷组织示意图, 指出缺陷的主要特征、形成原因及防止办法。

## 实验三 铁碳合金平衡组织观察

实验学时：2

实验类型：验证

实验要求：必修

### 一、实验目的

- (1) 识别和研究铁碳合金(碳钢和白口铸铁)在平衡状态下的显微组织。
- (2) 分析含碳量对铁碳合金显微组织的影响，理解成分、组织与性能之间相互关系。

### 二、实验内容

- (1) 在显微镜下观察和分析铁碳合金显微样品的平衡组织，识别钢和铸铁组织形态的特征。
- (2) 根据 Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图分析各合金的形成过程，建立成分，组织之间相互关系的概念。
- (3) 绘出所观察的显微组织示意图。
- (4) 根据显微组织近似确定亚共析钢的含碳量。

### 三、实验原理、方法和手段

铁碳合金的显微组织是研究钢铁材料性能的基础。铁碳合金平衡状态的组织是指合金在极为缓慢的冷却条件下(如退火状态)所得到的组织，其相变过程均按 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图进行，所以我们可以根据该相图来分析铁碳合金的平衡组织。

如图 1 所示，含碳量小于 2.11%的合金为碳钢，含碳量大于 2.11%的合金为白口铸铁。所有碳钢和白口铸铁在室温下的组织均由铁素体(F)和渗碳体(Fe<sub>3</sub>C)这两个基本相所组成。只是因含碳量不同，铁素体和渗碳体的相对数量、析出条件以及分布情况各有所不同，因而呈各种不同的组织形态。

碳钢和白口铸铁在金相显微镜下具有下面几种基本组织：

(1) 铁素体(F) 是碳在  $\alpha$ -Fe 中的固溶体。铁素体为体心立方晶格。具有磁性及良好的塑性，硬度较低。用 3~4%硝酸酒精溶液浸蚀后，在显微镜下呈现明亮色的多边形晶粒：亚共析钢中，铁素体呈块状分布；当含碳量接近于共析成分时，铁素体则呈断续的网状分布于珠光体周围。

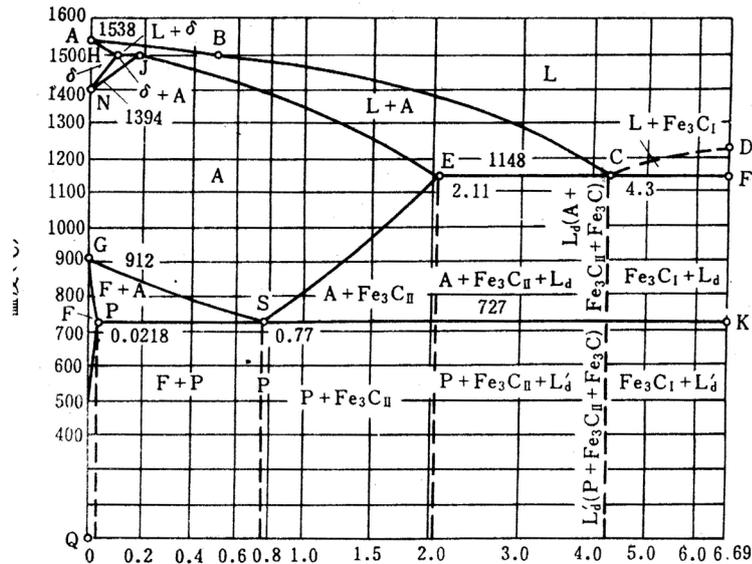


图1 按组织分区的Fe-Fe<sub>3</sub>C相图

(2) 渗碳体(Fe<sub>3</sub>C) 是铁与碳形成的一种化合物，其含碳量为 6.69%。当用 3—4%硝酸酒精溶液浸蚀后，渗碳体呈亮白色（如图 2 网状 Fe<sub>3</sub>C 呈白亮色），若用 苦味酸钠溶液浸蚀，则渗碳体呈黑色而铁素体仍为白色(如图 3 网状 Fe<sub>3</sub>C 呈黑色)。由此可区别铁素体与渗碳体。此外，按铁碳合金成分和形成条件不同，渗碳体呈现不同的形态：一次渗碳体(初生相)直接由液体中析出，在白口铸铁中呈粗大的条片状；二次渗碳体(次生相)从奥氏体中析出，呈网络状沿奥氏体晶界分布；经球化退火，渗碳体呈颗粒状。



图 2 网状 Fe<sub>3</sub>C 呈白亮色

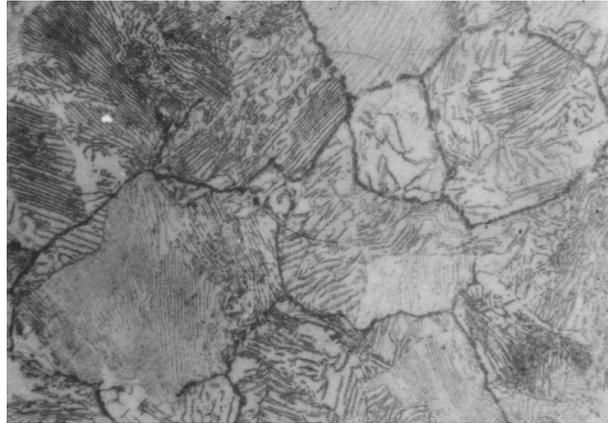


图 3 网状 Fe<sub>3</sub>C 呈黑色

(3) 珠光体(P) 是铁素体和渗碳体的机械混合物，其组织是共析转变的产物。由杠杆定律可以求得铁素体与渗碳体的含量比为 8: 1。因此，铁素体厚，渗碳体薄。硝酸酒精浸蚀后可观察到两种不同的组织形态：

① 片状珠光体 它是由铁素体与渗碳体交替排列形成的层片状组织，经硝酸酒精溶液浸蚀后，在不同放大倍数的显微镜下，可以看到具有不同特征的层片状组织。在高倍放大时（图 4），能清楚地看到珠光体中平行相间的宽条铁素体和细条渗碳体。当放大倍数较低时（图 5），由于显微镜的鉴别能力小于渗碳体片厚度，这时就只能看到一条黑线，它实际上就表示渗碳体。当组织较细而放大倍数更低时，珠光体片层就不能分辨，而呈黑色。

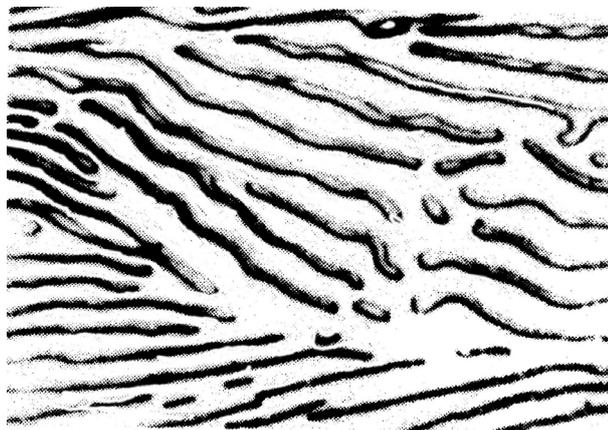


图 4 片状珠光体显微组织 2000×(电镜)

② 球状珠光体 球状珠光体组织的特征是在亮白色的铁素体基体上，均匀分布着白色的渗碳体颗粒，其边界呈暗黑色，如图 3-6 照片。



图 5 片状珠光体显微组织 500×

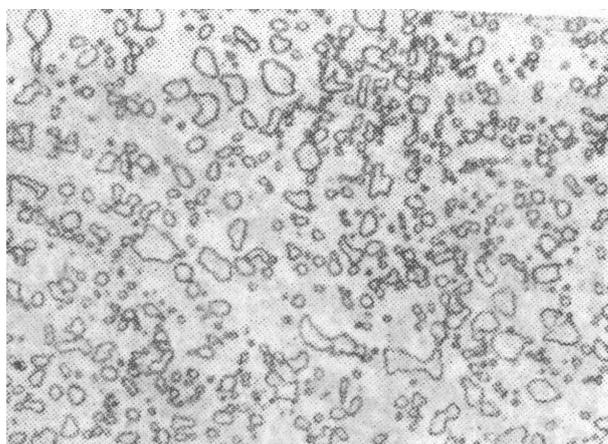


图 6 粒状珠光体组织

上述各类组织组成物的机械性能见表 1。

表 1 各类组织组成物的机械性能

性能 组成物	硬 度 HB	抗拉强度 $\sigma_b$ (MN / m <sup>2</sup> )	断面收缩率 $\psi$ (%)	相对延伸率 $\delta$ (%)	冲击韧性 $A_k$ (J)
铁素体	60~90	120~230	60~75	40~50	160
渗碳体	750~820	30~35	—	—	≈0
片状珠光体	190~230	860~900	10~15	9~12	24~32
球状珠光体	160~190	650~750	18~25	18~25	32~27

(4) 莱氏体(Ld') 室温时是珠光体、二次渗碳体和共晶渗碳体所组成的机械混合物。它是由含碳量为 4.3%的液态共晶白口铸铁在 1148℃ 共晶反应所形成的共晶体(奥氏体和共晶渗碳体)其中奥氏体在继续冷却时析出二次渗碳体, 在 727℃ 以下分解为珠光体。因此, 莱氏体的显微组织特征是在亮白色的渗碳体基底上相间

地分布着暗黑色斑点及细条状的珠光体。

含碳量 $<0.0218\%$ 的铁碳合金通常称为工业纯铁，它为两相组织，即由铁素体和三次渗碳体组成。照片 7 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、而亮白色基体是铁素体的不规则等轴晶粒。在晶界上存在少量三次渗碳体，呈现出白色的不连续的网状，由于量少，有时看不出。

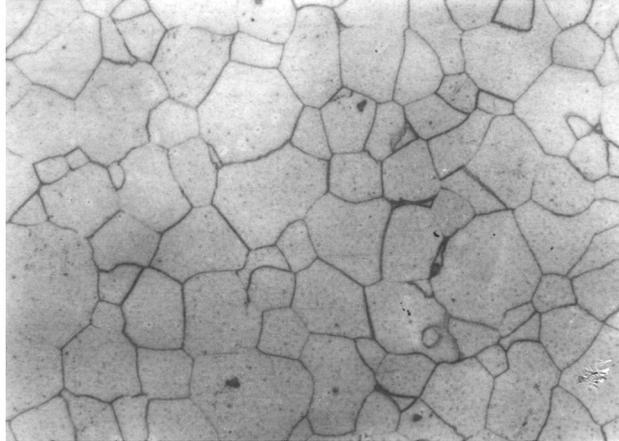


图 7 工业纯铁的显微组织

## 2. 碳钢

(1) 共析钢 含碳量为  $0.77\%$  的铁碳合金。其显微组织由单一的珠光体组成。

(2) 亚共析钢 含碳量在  $0.0218\sim 0.77\%$  范围内的铁碳合金。其组织由先共析铁素体和珠光体所组成，随着含碳量的增加，铁素体的数量逐渐减少，而珠光体的数量则相应地增多，照片 3-8、3-9 为亚共析钢的显微组织，其中亮白色为铁素体，暗黑色为珠光体。

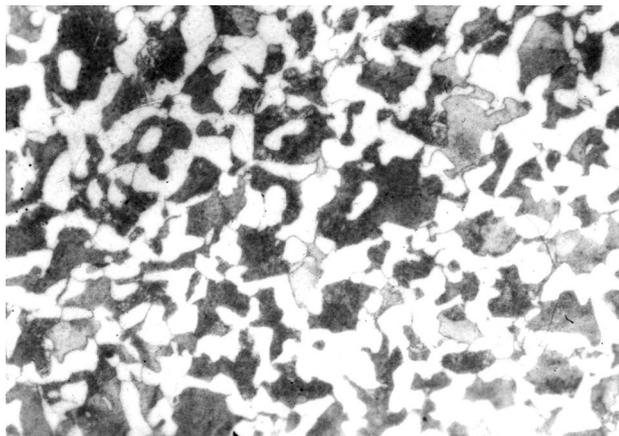


图 8 45 钢退火组织

(3) 过共析钢 含碳量在  $0.77\%$  与  $2.11\%$  之间的铁碳合金。其组织由珠光体和先共析渗碳体(即二次渗碳体)组成。钢中含碳量越多，二次渗碳体数量就越多。

图为含碳量 1.2%的过共析钢的显微组织。组织中存在片状珠光体和网络状二次渗碳体，经浸蚀后珠光体呈暗黑色，而二次渗碳体则呈白色网状。

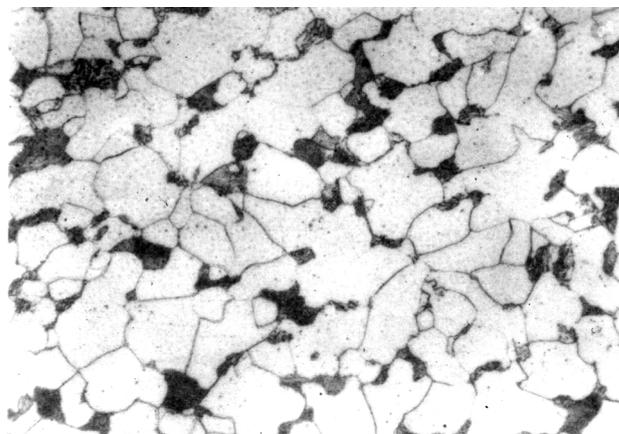


图 9 20 钢退火组织

若要根据显微组织来区分过共析钢的网状二次渗碳体和亚共析钢的网状铁素体，可采用煮沸的苦味酸钠溶液来浸蚀，这样二次渗碳体就被染色呈黑色网状，而铁素体和珠光体仍保留白色晶粒（如图 2 和图 3）。

### 3. 白口铸铁

含碳量大于 2.11%的铁碳合金叫白口铸铁。其中碳以渗碳体的形式存在，断口呈白亮色而得此名。

#### (1) 亚共晶白口铸铁

含碳量小于 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为珠光体、二次渗碳体和莱氏体，如照片 10 所示。用硝酸酒精溶液

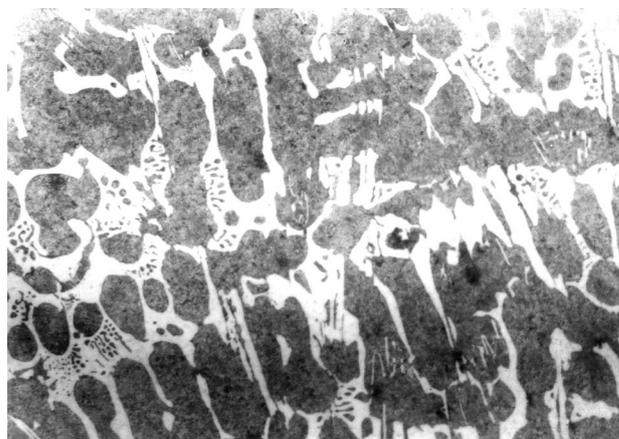


图 10 亚共晶白口铁

浸蚀后，在显微镜下呈现黑色枝晶状的珠光体和斑点状莱氏体，其中二次渗碳体

与共晶渗碳体混在一起，不易分辨。

### (2) 共晶白口铁

共晶白口铸铁的含碳量为 4.3%，它在室温下的组织由单一的共晶莱氏体组成。经浸蚀后，在显微镜下，珠光体呈暗黑色细条及斑点状，共晶渗碳体呈亮白色，如图 11 照片所示。

### (3) 过共晶白口铸铁

含碳量 $>4.3\%$ 的白口铸铁称为过共晶白口铸铁，在室温时的组织由一次渗碳体和莱氏体组成。用硝酸酒精溶液浸蚀后，在显微镜下可观察到在暗色斑点状的莱氏体基体上分布着亮白色的粗大条片状的一次渗碳体，其显微组织如图 3-12 照片所示。

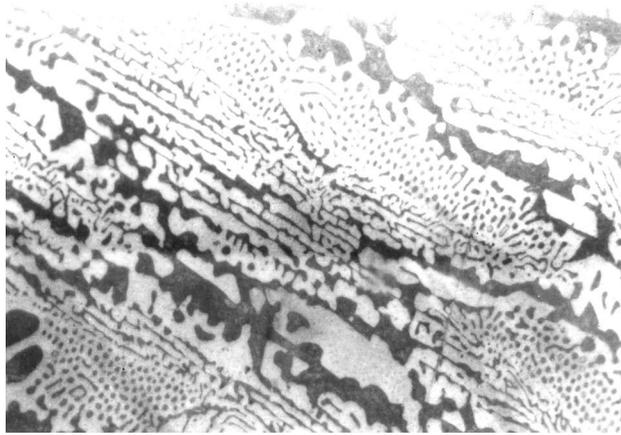


图 11 共晶白口铁

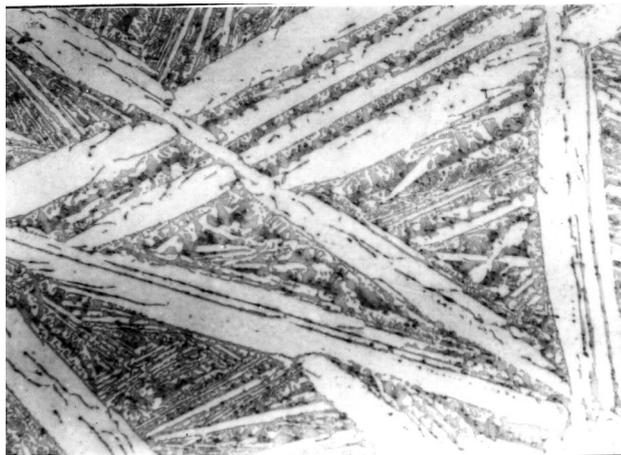


图 12 过共晶白口铁

## 四、实验组织运行要求

根据本实验的特点、要求和具体条件，采用“采用集中授课形式”。

## 五、实验条件

### 1. 实验设备

金相显微镜；腐蚀液

### 2. 实验用材料

各种成分的铁碳合金的显微样品

## 六、实验步骤

(1) 实验前学生应复习讲课中的有关内容和阅读实验指导书，为实验做好理论方面的准备。

(2) 在显微镜下观察和分析铁碳合金显微样品的平衡组织，识别钢和铸铁组织形态的特征；根据 Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图分析各合金的形成过程，建立成分，组织之间相互关系的概念。

(3) 绘出所观察的显微组织示意图，画时应抓住组织形态的典型特征，并在图中表示出来。

(4) 根据显微组织近似确定亚共析钢的含碳量：

$$C\% = \frac{P \times 0.8}{100} + \frac{F \times 0.0008}{100}$$

式中：P 和 F 分别为珠光体和铁素体所占面积(%)。

## 七、思考题

1. 总结含碳量对铁碳合金的组织 and 性能的影响？

## 八、实验报告

(1) 简述实验目的、实验原理。

(2) 画出所观察显微组织示意图，并注明材料名称、含碳量、浸蚀剂和放大倍数，显微组织画在直径为 30~50mm 的圆内，并将组成物名称以箭头引出标明。

## 实验四 金属的塑性变形与再结晶

实验学时：2

实验类型：验证

实验要求：必修

### 一、实验目的

1. 了解金属冷变形后变形度对硬度和显微组织的影响；
2. 了解变形度对金属再结晶后晶粒大小的影响；
3. 了解铜合金冷变形孪晶的组织形态。

### 二、实验内容

1. 测量工业纯铁的硬度与变形度的关系。
2. 研究变形度对工业纯铝片再结晶后晶粒大小的影响，并观察组织。
3. 观察铜合金冷变形孪晶的显微组织特征，分析它的形成。

### 三、实验原理、方法和手段

#### 1. 滑移线与变形孪晶

金属受力超过弹性极限后，将产生塑性变形，其基本方式为滑移和孪晶两种。

所谓滑移是晶体在切应力作用下借助于金属薄层沿滑移面相对移动(实质为位错沿滑移面运动)的结果。滑移后在滑移面两侧的晶体位向保持不变。把抛光的纯铝试样拉伸，其表面会有变形台阶出现，一组细小的台阶在显微镜下只能观察到一条黑线，即称为滑移带。变形后的显微组织由许多滑移带(平行的黑线)组成。

在显微镜下能清楚地看到多晶体变形的特点：各晶粒内滑移带的方向不同(因晶粒方位各不相同)，各晶粒之间形变程度不均匀，有的晶粒内滑移带多(即变形量大)，有的晶粒内滑移带少(即变形量小)，在同一晶粒内，晶粒中心与晶粒边界变形量也不相同，晶粒中心滑移带密，边界滑移带稀；并可发现在一些变形量大的晶粒内，滑移沿几个系统进行，经常看见双滑移现象(在面心立方晶格情况下很容易发现)，即两组平行的黑线在晶粒内部交错起来，将晶粒分成许多小块。

金属的另一种变形的方式为孪晶。不易产生滑移的金属，如六方晶系的镉、镁、铍、锌等，或某些金属当其滑移发生困难的时候，在切应力的作用下将发生另一形式的变形，即晶体的一部分以一定的晶面(孪晶面或双晶面)为对称面，与

晶体的另一部分发生对称移动，这种变形方式称为孪生或双晶。孪生的结果是孪晶面两侧晶体的位向发生变化，呈镜面对称。所以产生孪晶变形后，由于对光的反射能力不同，在显微镜下能看到较宽的变形痕迹—孪晶带或双晶带。在密排六方结构的锌中，由于其滑移系少，则易以孪晶方式变形，在显微镜下看到变形孪晶呈发亮的竹叶状特征。对体心立方结构的 $\alpha$ -Fe，在常温时变形以滑移方式进行，而在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下受冲击载荷时，则以孪晶方式变形，而面心立方结构大多是以滑移方式变形的。

## 2. 变形程度对金属组织和性能影响

金属经冷变形后，不但外形发生变化，而且晶粒内部也发生明显变化。随变形度增大，晶粒逐渐沿受力方向伸长，当变形程度很大时，晶粒内部被许多滑移带分割成细小的小块，晶界与滑移带分辨不清，呈纤维组织。

由于变形的结果，滑移带附近晶粒破碎，产生较严重的晶格歪扭，造成临界切应力提高，使继续变形发生困难，即所谓加工硬化现象。随变形程度的增加，金属的硬度、强度、矫顽力、电阻增加，而塑性和韧性下降。

## 3. 变形后金属在加热时组织和性能的变化

加工硬化后的金属，由于晶粒破碎，晶格歪扭、位错密度、空位和间隙原子等缺陷的增加，使其内能增加，金属处于不稳定状态，有力求恢复到稳定状态的趋势，加热则为之创造了条件，促进这一过程的进行。

变形后的金属在较低温度加热时，金属内部的应力部分消除，歪曲的晶格恢复正常，但显微组织没有变化，原来拉长的晶粒仍然是伸长的。这个过程是靠原子在一个晶粒范围内的移动来实现的，称为回复。这时金属可部分地恢复机械性能，而物理性能，如导电性，几乎全部恢复。

变形后金属加热到再结晶温度以上时，发生再结晶过程，显微组织发生显著变化。再结晶使金属中被拉长的晶粒消失，生成新的无内应力的等轴晶粒，机械性能完全恢复。如变形60%的黄铜经 $270^{\circ}\text{C}$ 再结晶退火后，其组织是由许多细小的等轴晶粒及原来纤维状组织组成，温度继续升高，纤维状组织全部消失为等轴晶粒，此后温度再升高，就发生积聚再结晶，温度愈高，晶粒愈大。

在 $\alpha$ -黄铜组织内，经再结晶退火后能看到明显的退火孪晶，是与基体颜色不同、边很直的小块。退火孪晶的产生是再结晶过程中，面心立方结构的新晶粒界面在推移过程中发生层错现象所致。

对于立方晶系的金属，当变形度达到 70~80%以上时，最低(开始)的再结晶温度与熔点有如下关系：

$$T_{\text{再}} = 0.4T_{\text{熔化}} \text{ (绝对温度计)}$$

金属中有杂质存在时，最低的再结晶温度显著变化。在大多数情况下，杂质均使再结晶温度升高。

为消除加工硬化现象，通常退火温度要比最低再结晶温度高出 100~200℃

变形金属经过再结晶后的晶粒度，不仅会影响其强度和塑性，而且还会显著影响动载下的冲击韧性值。

再结晶后晶粒的大小，不仅与再结晶退火的温度有关，而且与再结晶退火前的变形度有关。在同一再结晶退火温度下，晶粒度的大小与预先变形程度的关系，如图 1 所示。

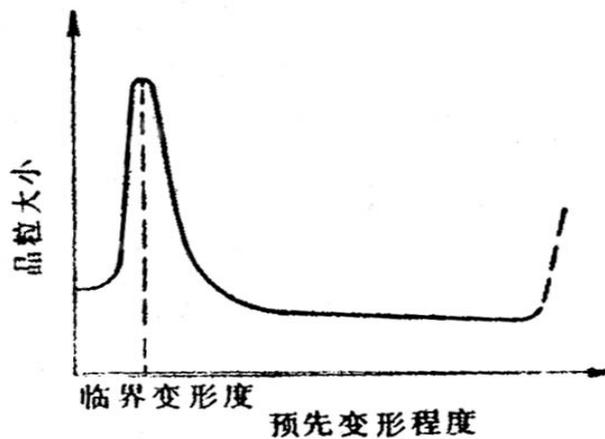


图 1 变形程度与再结晶后晶粒大小的关系

当变形度很小时，由于晶格歪扭程度很小，不足以引起再结晶，故晶粒大小不变。当变形度在 2~10%范围内时，金属中变形极不均匀，再结晶时形核数量很少，再结晶后晶粒度很不均匀，晶粒极易相互并吞长大，这样的变形度称“临界变形度”，即金属能进行再结晶的最小变形度。大于临界变形度后，随着变形度的增加，变形愈均匀，再结晶时的形核率便愈大，再结晶后的晶粒便愈细，在进行冷塑性变形时，应尽量避免在临界变形度下变形，而采用较大的变形度，以获得较细小晶粒，临界变形度因金属的本性及纯度而异，铁为 7~15%，铝为 2~4%。

#### 四、实验组织运行要求

根据本实验的特点、要求和具体条件，采用“采用集中授课形式”。

#### 五、实验条件

1. 实验设备

- (1) 洛氏硬度计(载荷 980N 即 100Kgf, 用 HRB)
- (2) 金相显微镜。

2. 实验用材料

- (1) 不同变形度的工业纯铁试样若干。
- (2) 退火状态的具有均匀细小等轴晶粒的工业纯铝片 5~6 套, 每套 6 片。
- (3) 不同变形度的工业纯铁金相试样一套及铜合金冷变形孪晶试样。

六、实验步骤

1. 测量工业纯铁的硬度与变形度的关系。

取四种不同变形度的冷轧试样, 用卡尺测量其厚度, 其中厚度最大的一块是未经变形的样,  $h_0=10\text{mm}$ , 用公式计算其变形度:

$$f\% = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100\%$$

式中  $f\%$  为变形度,  $h_0$  为试样的原始厚度(mm),  $h_1$  为试样变形后的厚度(mm)。测量变形试样的硬度, 每个试样至少测三点, 取平均值, 再将试验结果记入表 1。

表 1

试样号	试样厚度 (mm)	变形度 (%)	硬度 (HRB)	备注

根据表中数据, 以变形度为横坐标, 硬度为纵坐标, 作出硬度与变形度关系曲线。

2. 研究变形度对工业纯铝片再结晶后晶粒大小的影响, 并观察组织。

① 六人一小组, 每组均为不同变形程度的纯铝片, 见表 2。

观察试样上晶粒的分布情况, 数出每个试样上单位面积(1cm<sup>2</sup>)内的晶粒数 Z, 并记入表 3 中。

表 2

试样编号	1	2	3	4	5	6
要求变形度%	1	3	6	9	12	15
变形后的计算长度 mm	101	103	106	109	112	115

表 3

铝片再结晶退火温度℃	保温时间(分钟)	测得数据	变 形 程 度 %					
			1	3	6	9	12	15
550	30	1cm <sup>2</sup> 内的晶粒数 Z						
		晶粒大小 $\frac{1}{Z}$						

3. 观察工业纯铁经不同变形后显微组织及铜合金经冷变形后的显微组织特征。

在金相显微镜下观察各试样的显微组织特征, 每个试样在 30mm 圆内画出显微组织形态。

### 七、思考题

① 滑移带与孪晶有何区别?

### 八、实验报告

(1) 根据实验记录表 1 绘制并分析硬度与变形度的关系曲线。

(2) 根据实验记录表 3 绘制出晶粒大小与预先变形度的关系曲线, 并说明金属在同一退火温度及同一保温时间条件下, 不同的预先变形度对再结晶后组织与性能的影响。试从绘制的曲线上找出该种材料的临界变形度。

(3), 画出金相显微镜下观察到的试样显微组织形态特征。

## 实验五 碳钢的热处理操作、组织观察及硬度测定

实验学时：4

实验类型：综合

实验要求：必修

### 一、实验目的

1. 了解碳钢的热处理工艺操作；
2. 研究碳钢加热温度、冷却速度、回火温度对钢性能的影响；
3. 观察热处理后的显微组织变化；
4. 了解硬度计的原理、初步掌握洛氏硬度计的使用。

### 二、实验内容

1. 按表 1 中的热处理工艺进行操作，并对热处理后的各样品进行硬度测定，将硬度值填入表 1 中。

表 1 各种热处理工艺

加热温度℃ 45 钢    T12	冷却 方式	20 钢		45 钢		T12 钢	
		学号	硬度	学号	硬度	学号	硬度
920	水冷						
780	水冷						
860    780	灰冷						
860    780	空冷						
860    780	油冷						
860	水冷						
45 钢回火工艺							
学 号							
回火温度℃	200	300	400	500	600		
回火前硬度							
回火后硬度							

注：保温时间可按 1 分钟/每毫米直径计算；回火保温时间均为 30 分钟，然后取出空冷。

2. 观察下列表 2 热处理后的金相试样，并画出组织示意图。

表 2 热处理后的金相试样

编号	钢号	处理状态	显微组织	腐蚀剂
1	20	920℃水淬	板条 M	4%硝酸酒精
2	45	退火	F + P	4%硝酸酒精
3	45	正火	F + P	4%硝酸酒精
4	45	860℃油淬	M + B <sub>上</sub> + T + F <sub>少</sub>	4%硝酸酒精
5	45	860℃水淬	M	4%硝酸酒精
6	45	780℃水淬	M + F	4%硝酸酒精
7	T12	1000 水淬+180℃回火	竹叶状 M + Ar	4%硝酸酒精
8	T12	780℃水淬	隐晶 M+颗粒状 Fe <sub>3</sub> C+Ar	4%硝酸酒精
9	T12	780℃水淬+180℃回火	回火 M + 颗粒状 Fe <sub>3</sub> C	4%硝酸酒精
10	T12	760℃球化退火	球状 P	4%硝酸酒精
11	45	860℃水淬低温回火	回火 M	4%硝酸酒精
12	45	860℃水淬中温回火	回火 T	4%硝酸酒精
13	45	860℃水淬高温回火	回火 S	4%硝酸酒精

### 三、实验原理、方法和手段

#### (一) 钢的热处理工艺:

钢的热处理基本工艺有退火、正火、淬火和回火。进行热处理时，加热是第一道工序，目的是为了得到奥氏体，因为钢的最终组织珠光体、贝氏体和马氏体都是由奥氏体转变来的。二是保温、目的使奥氏体均匀化。三是冷却，是改变组织和性能的重要因素。因此，正确选择三个基本因素是热处理成功的基本保证。

##### 1. 加热温度的选择

(1) 退火加热温度：根据 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图确定。对亚共析钢，其加热温度为：共析钢和过共析钢加热至 A<sub>cl</sub>+ (20~30) °C (球化退火)，目的是得到球状渗碳体，降低硬度，改善切削性能。

(2) 正火加热温度：一般亚共析钢加热至 A<sub>c3</sub>+ (30~50) °C；过共析钢加热至 A<sub>c1</sub>+ (30~50) °C，即加热到奥氏体单相区。

(3) 淬火加热温度：一般亚共析钢加热至 A<sub>c3</sub>+ (30~50) °C，淬火后的组织为均匀细小的马氏体。如果加热温度不足 (如低于 A<sub>c3</sub>)，则淬火组织中将出现铁素体，造成淬火后硬度不足；共析钢和过共析钢加热至 A<sub>cl</sub>+ (30~50) °C，淬火后的组织为隐晶马氏体与粒状二次渗碳体。未溶的粒状二次渗碳体可以提高钢的

耐磨性。的粒状二次渗碳体可提高钢的硬度和耐磨性。过高的加热温度(高于  $A_{cm}$ )，会因得到粗大的马氏体，过多的残余奥氏体而导致硬度和耐磨性下降，脆性增加。

(4) 回火温度：钢淬火后都要回火，回火温度决定于最终所要求的组织和性能（工厂中常常是根据硬度的要求）。按加热温度不同，回火可分为三类：

低温回火：在  $150\sim 250^{\circ}\text{C}$  回火，所得组织为回火马氏体，硬度约为 HRC57-60，其目的是降低淬火应力，减少钢的脆性并保持钢的高硬度。一般用于切削工具、量具、滚动轴承以及渗碳和氰化件。

中温回火：在  $350\sim 500^{\circ}\text{C}$  回火，所得组织为回火屈氏体，硬度约为 HRC40-48，其目的是获得高的弹性极限，同时有高的韧性。因为它主要用于各种弹簧及热锻模。

高温回火：在  $500\sim 650^{\circ}\text{C}$  回火，所得组织为回火索氏体，硬度约为 HRC25-35，其目的是获得既有一定强度、硬度、又有良好的冲击韧性的综合机械性能，常把淬火后经高温回火的处理称为调质处理，因此一般用于各种重要零件，如柴油机连杆螺栓、汽车半轴以及机床主轴等。

## 2. 保温时间的确定

为了使钢件内外各部分温度均匀一致，并完成组织转变，使碳化物溶解和奥氏体成分均匀化，就必须在淬火加热温度下保温一定时间，通常将钢件升温和保温所需的时间计算在一起，统称为加热时间。

在具体生产条件下，工件加热时间与钢的成分、原始组织、工件几何形状和尺寸，加热介质、炉温、装炉方式等许多因素有关。

对于本实验中的碳钢，保温时间为：工件的有效加热厚度 $\times 1$  分钟/毫米。如果是火焰炉、电炉所需加热及大约直径，如果是盐浴炉则缩短 1-2 倍。合金钢加热时间要增加 25-40%。

回火时的加热、保温时间，应与回火温度结合起来考虑。一般来说，低温回火时，由于组织不稳定，内应力消除不充分，为了稳定组织、消除内应力，使零件在使用过程中性能与尺寸稳定，回火时间要长一些，一般不少于 1.5-2 小时。高温回火时间不宜过长，过长会使钢过分软化，对有的钢种甚至造成严重的回火脆性，所以一般为 0.5-1 小时。

## 3. 冷却速度的影响

冷却是淬火的关键工序，一方面冷却速度要大于临界冷却速度，以保证得到马氏体，另一方面又希望冷却速度不要太大，以减小内应力，避免变形和开裂，为此，根据 c 曲线考虑，淬火工件必须在过于奥氏体最不稳定的温度范围（ $650\sim 550^{\circ}\text{C}$ ）进行快冷，以超过临界冷却速度，而在  $M_s$  ( $300\sim 200^{\circ}\text{C}$ ) 点以下，尽可能慢冷以减小内应力。为了保证淬火质量，应适当选用适当的淬火介质和淬火方法，见表 3 常用淬火介质的冷却能力

表 3 常用淬火介质的冷却能力

淬 火 介 质	冷 却 速 度 °C/秒	
	650~ 550°C	300~200°C
18°C的水	600	270
20°C的水	500	270
50°C的水	100	270
74°C的水	30	200
10%NaCl 水溶液 18°C	1100	300
10%NaOH 水溶液 18°C	1200	300
10%NaCO <sub>3</sub> 水溶液 18°C	800	270
肥皂水	30	200
矿物油	150	30
变压器油	120	25

## (二) 钢热处理后的基本特征:

共析钢连续冷却曲线如图 1 所示。

炉冷得到 100%珠光体，空冷得到细片状珠光体或称索氏体。油冷得到少量屈氏体和马氏体。水冷得到马氏体和少量残余奥氏体。随着成分和热处理条件不同，钢热处理后的组织各不相同，基本组织特征如下：

(1) 索氏体 (s) 是铁素体与片状渗碳体的机械混合物，其层片分布比珠光体更细密，在显微镜的高倍 (700 左右) 放大下才能分辨出片层状，它比珠光体具有更高的强度和硬度。

(2) 屈氏体 (T) 也是铁素体与片状渗碳体的机械混合物，片层分布比索氏体更细密，在一般光学显微镜下无法分辨，只能看到黑色组织如墨菊状，当其少

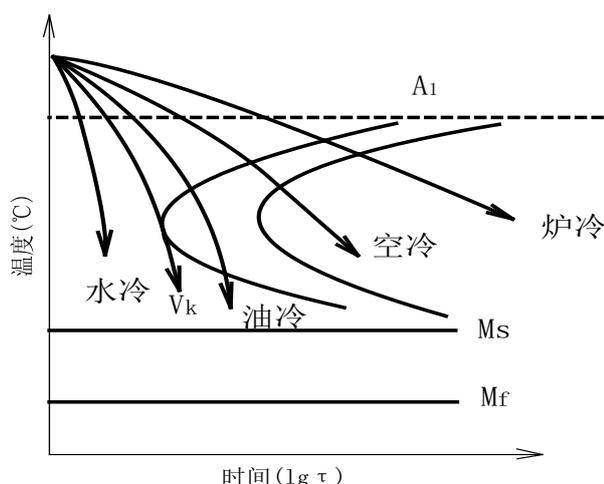


图 1 共析钢连续冷却曲线

量析出时，沿晶界分布呈黑色网状包围马氏体，当析出量较多时则呈大块黑色晶

粒状。只有在电子显微镜下才能分辨出其中的片层状。

(3) 贝氏体 (B) 贝氏体也是铁素体与渗碳体的两相混合，但其金相形态与珠光体不同，因钢的成分和形成温度不同，其组织形态主要有三种：

上贝氏体 是由成束平行排列的条状铁素体和条间断断续续地分布着细条状渗碳体所组成。当转换量不多时，在光学显微镜下可以观察到成束的铁素体条向奥氏体晶界内伸展，具有羽毛状特征，如图 2 所示。在电子显微镜下可看到铁素体以几度到十几度的小位向差相互平行着，渗碳体沿条的长轴方向排列成行。上贝氏体中铁素体的亚结构是位错。

下贝氏体 是在具有一定过饱和的针状铁素体的内部沉淀有碳化物的组织，由于下贝氏体易受浸蚀，所以在显微镜下观察呈黑色针状。

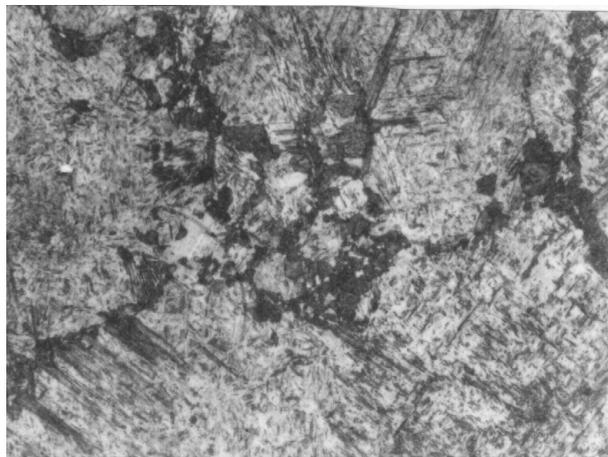


图 2 上贝氏体显微组织（羽毛状）

在电镜下观察可以看到，它是以片状铁素体为基，其中分布着很细的  $s$  碳化物片，这些碳化物片大致与铁素体片的长轴呈  $55-65^\circ$  的角度。下贝氏体中的铁素体亚结构是位错。

粒状贝氏体 粒状贝氏体是最近十几年才被确定的组织。在低中碳合金钢中，特别是在连续冷却时（如正火、热轧空冷或焊接热影响区）往往会出现这种组织，在等温冷却时也可能形成。其特征是较粗大的铁素体块内有一些孤立的小岛状组织，原先富碳的奥氏体区在其随后的转变可以有三种情况 (a) 分解为铁素体和碳化物，(b) 发生马氏体转变，(c) 仍然保持为富碳的奥氏体。

(4) 马氏体 (M) 是碳在  $\alpha$ -Fe 中的过饱和固溶体，马氏体的组织形态是多种多样的，归纳起来分为两大类，即板条状马氏体和片状马氏体。

板条状马氏体 在光学显微镜下，板条马氏体的形态呈现一束束相互平行的细长条状马氏体群，在一个奥氏体晶粒内可有几束不同取向的马氏体群。每束内的条与条之间的小角度晶界分开，束与束之间具有较大的相位差，如图 3 所示，由于条状马氏体形成温度较高，在形成过程中常有碳化物析出，即产生自回火现

象，故在金相实验时，易被腐蚀而呈现较深的颜色。在透射电镜下观察可以看到马氏体群是由许多平行的板条所组成，且发现板条马氏体晶内亚结构是高密度的位错，因此条状马氏体又称为位错马氏体，因含碳低的奥氏体形成的马氏体呈板条状，故板条马氏体又称低碳马氏体。



图 3 条状马氏体显微组织

**片状马氏体** 在光学显微镜下，片状马氏体呈现针状或竹叶状，其立体形态为双透镜状，因此成温度较低没有自回火现象故其显微组织不易被浸蚀，所以颜色较浅，在显微镜下呈白亮色。透射电镜观察片状马氏体晶体内部为孪晶亚结构，故片状马氏体又称孪晶马氏体，因含较高的奥氏体形成的马氏体呈片状，故片状马氏体又可称高碳马氏体。

马氏体的粗细取决于原奥氏体晶粒的大小，即取决于淬火加热温度如高碳钢在正常温度下淬火加热，淬火后可得到细小针状的马氏体，在光学显微镜下，仅能隐约见其针状，故又称为陷晶马氏体。如淬火温度较高，奥氏体晶粒粗大，则得到粗大针状如图 4 所示。

(5) 残余奥氏体 (Ar) 当奥氏体中含碳量 $>0.5\%$ 时，淬火时总有一定量的奥氏体不能转变为马氏体，而保留到室温，这部分奥氏体就是残余奥氏体，它不易受硝酸酒精腐蚀剂的浸蚀，在显微镜下呈白亮色，分布在马氏体之间，无固定形态，淬火后未经回火，Ar 与马氏体很难区分，都呈白亮色，只有马氏体回火后才能分辨出马氏体间的残余奥氏体。

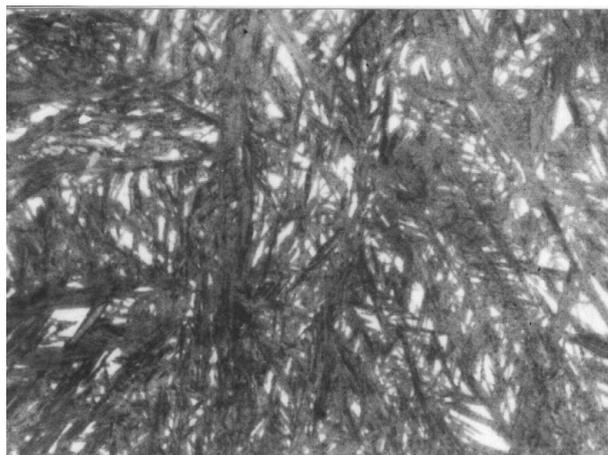


图4 粗大竹叶状马氏体+Ar

(6) 回火马氏体 (Mr) 高碳马氏体经低温回火后, 马氏体分解, 析出了与母相共格的极细小弥散的碳化物。这种组织称为回火马氏体。由于极小的碳化物析出使回火马氏体易受浸蚀, 所以在光学显微镜下观察回火马氏体仍保持针状马氏体形态, 只是颜色比淬火马氏体深, 但极细小的碳化物分辨不清。在电子显微镜下则可观察到细小的碳化物。

(7) 低碳条状马氏体 低温回火以后, 马氏体只发生碳原子的偏聚, 尚未析出碳化物, 在光学和电子显微镜下观察, 低碳回火马氏体仍然保持条状形态。中碳钢淬火以后得到条状马氏体和片状马氏体的混合组织, 回火后其中片状马氏体易受浸蚀, 颜色变深。

(8) 回火屈氏体 淬火钢进行中温回火以后, 得到回火屈氏体。它的金相组织特征是: 在铁素体基体上弥散分布着微小的粒状渗碳体, 铁素体, 铁素体仍然基本保持原来的条状或片状马氏体的形态, 渗碳体颗粒很细小, 在光学显微镜下不易分辨清楚, 故呈暗黑色。用电子显微镜可以肯到这些渗碳体的质点, 而且回火屈氏体仍然保持针状马氏体的位向。

(9) 回火索氏体 淬火钢高温回火得到回火索氏体, 金相组织特征是已经聚集长大了的渗碳体颗粒均匀分布在再结晶的铁素体基体上。但是某些合金钢经调质处理后, 铁素体仍然保持针状形态, 因合金元素对于铁素体的再结晶有阻碍作用, 须更高的温度才能完成再结晶

#### 四、实验组织运行要求

根据本实验的特点要求及具体条件, 采用集中运行模式组织教学

#### 五、实验设备和材料

- (1) 箱式电阻炉和控温仪表;
- (2) 金相显微镜;

- (3) 洛氏硬度计;
- (4) 淬火水桶、油桶、火钳、砂纸等, 20 钢、45 钢、T12 钢试样若干, 尺寸分别为 12x 12mm、13x14mm; 15x14mm
- (5) 金相试样一套;
- (6) 金相图谱一套。

## 六、实验步骤

1. 领取试样进行热处理工艺实验, 炉冷试样由灰冷来代替。
2. 同一加热温度的 20 钢、45 钢和 T12 钢试样放入 920℃、860℃、780℃、炉子内加热, 保温后分别进行水冷、油冷、空冷和灰冷操作。
3. 将水冷试样中取出 5 块 45 钢试样分别放入 200℃ 300℃ 400℃ 500℃ 600℃ 的炉中进行回火、回火保温时间为 30 分钟。
4. 洛氏硬度测试
5. 观察金相组织, 画示意图

## 七、思考题

1. 试分析 T12 钢 780℃ 水淬 200℃ 回火与 T12 钢 1100℃ 水淬 200℃ 回火的组织区别, 性能区别, 说明过共析钢淬火温度如何选择?
2. 分析 45 钢 760℃ 水淬与 45 钢 860℃ 油淬组织区别。若 45 钢淬火后硬度不足, 如何根据组织分析原因是淬火加热温度不足还是冷却速度不够?

## 八、实验报告

1. 实验目的。
2. 根据实验测试数据及观察到的显微组织综合分析
  - a. 加热温度与冷却速度对钢性能的影响;
  - b. 不同回火温度对材料组织和性能的影响, 绘制 45 钢回火温度与硬度的关系曲线,
  - c. 观察热处理后的金相组织, 并画出组织示意图

## 九、其它说明

- (1) 实验前仔细阅读实验指导书。
- (2) 热处理操作及注意事项

装取试样时炉子要断电, 装取试样后炉门要及时关好, 并立即通电。

试样加热时, 尽量靠近热电偶测出的温度接近试样温度。

实验中注意计算保温时间; 保温时要注意温度控制仪表是否正常, 以免跑温或升温太慢, 发现问题应报告老师检查。

淬火冷却时, 将试样迅速入油或入水。并不停地移动试样, 且不要拿出液面。

热处理后测定硬度, 并填写在表 2 中。

测硬度前要将试样的氧化皮磨掉。

(3) 观察显微试样的基本步骤:

根据试样的成分、热处理工艺,对照相图和 C 曲线分析可能出现的组织。

正确选择放大倍数,组织粗的可选低倍,组织细的可选高倍。先用低倍。低倍观察视场,组织特征较明显,观察较全面,然后对其中有代表性的区域用高倍观察,高倍观察范围较局限,但能看到局部组织的细节。

显微镜观察时要根据观察重点深入的原则,选择其中有代表性的区域进行重点观察。

根据组织的形成特点和组织的特征画出组织示意图,注明材料、热处理工艺、放大倍数、腐蚀剂、组织名称等。

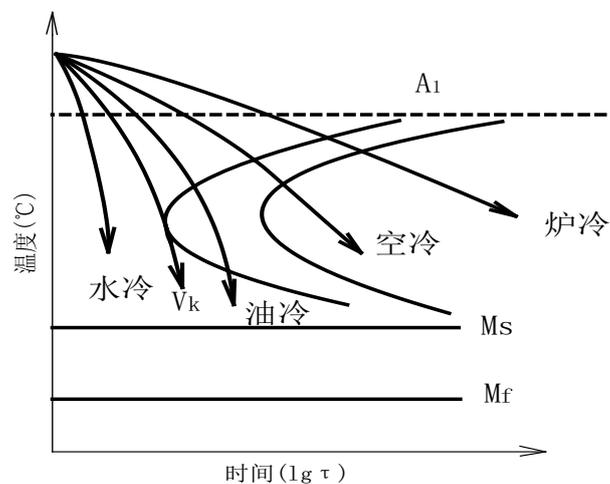


图1 共析钢连续冷却曲线

量析出时，沿晶界分布呈黑色网状包围马氏体，当析出量较多时则呈大块黑色晶粒状。只有在电子显微镜下才能分辨出其中的片层状。

(3) 贝氏体 (B) 贝氏体也是铁素体与渗碳体的两相混合，但其金相形态与珠光体不同，因钢的成分和形成温度不同，其组织形态主要有三种：

**上贝氏体** 是由成束平行排列的条状铁素体和条间断断续续地分布着细条状渗碳体所组成。当转换量不多时，在光学显微镜下可以观察到成束的铁素体条向奥氏体晶界内伸展，具有羽毛状特征，如图2所示。在电子显微镜下可看到铁素体以几度到十几度的小位向差相互平行着，渗碳体沿条的长轴方向排列成行。上贝氏体中铁素体的亚结构是位错。

**下贝氏体** 是在具有一定过饱和的针状铁素体的内部沉淀有碳化物的组织，由于下贝氏体易受浸蚀，所以在显微镜下观察呈黑色针状。

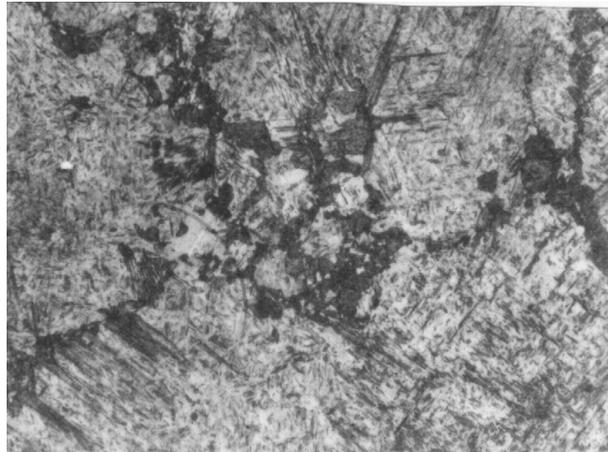


图2 上贝氏体显微组织（羽毛状）

在电镜下观察可以看到，它是以片状铁素体为基，其中分布着很细的  $s$  碳化物片，这些碳化物片大致与铁素体片的长轴呈  $55-65^\circ$  的角度。下贝氏体中的铁素体亚结构是位错。

**粒状贝氏体** 粒状贝氏体是最近十几年才被确定的组织。在低中碳合金钢中，特别是在连续冷却时（如正火、热轧空冷或焊接热影响区）往往会出现这种组织，在等温冷却时也可能形成。其特征是较粗大的铁素体块内有一些孤立的小岛状组织，原先富碳的奥氏体区在其随后的转变可以有三种情况 (a) 分解为铁素体和碳化物，(b) 发生马氏体转变，(c) 仍然保持为富碳的奥氏体。

(4) 马氏体 (M) 是碳在  $\alpha$ -Fe 中的过饱和固溶体，马氏体的组织形态是多种多样的，归纳起来分为两大类，即板条状马氏体和片状马氏体。

**板条状马氏体** 在光学显微镜下，板条马氏体的形态呈现一束束相互平行的细长条状马氏体群，在一个奥氏体晶粒内可有几束不同取向的马氏体群。每束

内的条与条之间的小角度晶界分开，束与束之间具有较大的相位差，如图 3 所示，由于条状马氏体形成温度较高，在形成过程中常有碳化物析出，即产生自回火现象，故在金相实验时，易被腐蚀而呈现较深的颜色。在透射电镜下观察可以看到马氏体群是由许多平行的板条所组成，且发现板条马氏体晶内亚结构是高密度的位错，因此条状马氏体又称为位错马氏体，因含碳低的奥氏体形成的马氏体呈板条状，故板条马氏体又称低碳马氏体。



图 3 条状马氏体显微组织

**片状马氏体** 在光学显微镜下，片状马氏体呈现针状或竹叶状，其立体形态为双透镜状，因此成温度较低没有自回火现象故其显微组织不易被浸蚀，所以颜色较浅，在显微镜下呈白亮色。透射电镜观察片状马氏体晶体内部为孪晶亚结构，故片状马氏体又称孪晶马氏体，因含较高的奥氏体形成的马氏体呈片状，故片状马氏体又可称高碳马氏体。

马氏体的粗细取决于原奥氏体晶粒的大小，即取决于淬火加热温度如高碳钢在正常温度下淬火加热，淬火后可得到细小针状的马氏体，在光学显微镜下，仅能隐约见其针状，故又称为陷晶马氏体。如淬火温度较高，奥氏体晶粒粗大，则得到粗大针状如图 4 所示。

(5) 残余奥氏体 (Ar) 当奥氏体中含碳量 $>0.5\%$ 时，淬火时总有一定量的奥氏体不能转变为马氏体，而保留到室温，这部分奥氏体就是残余奥氏体，它不易受硝酸酒精腐蚀剂的浸蚀，在显微镜下呈白亮色，分布在马氏体之间，无固定形态，淬火后未经回火，Ar 与马氏体很难区分，都呈白亮色，只有马氏体回火后才能分辨出马氏体间的残余奥氏体。



图4 粗大竹叶状马氏体+Ar

(6) 回火马氏体 (Mr) 高碳马氏体经低温回火后, 马氏体分解, 析出了与母相共格的极细小弥散的碳化物。这种组织称为回火马氏体。由于极小的碳化物析出使回火马氏体易受浸蚀, 所以在光学显微镜下观察回火马氏体仍保持针状马氏体形态, 只是颜色比淬火马氏体深, 但极细小的碳化物分辨不清。在电子显微镜下则可观察到细小的碳化物。

(7) 低碳条状马氏体 低温回火以后, 马氏体只发生碳原子的偏聚, 尚未析出碳化物, 在光学和电子显微镜下观察, 低碳回火马氏体仍然保持条状形态。中碳钢淬火以后得到条状马氏体和片状马氏体的混合组织, 回火后其中片状马氏体易受浸蚀, 颜色变深。

(8) 回火屈氏体 淬火钢进行中温回火以后, 得到回火屈氏体。它的金相组织特征是: 在铁素体基体上弥散分布着微小的粒状渗碳体, 铁素体, 铁素体仍然基本保持原来的条状或片状马氏体的形态, 渗碳体颗粒很细小, 在光学显微镜下不易分辨清楚, 故呈暗黑色。用电子显微镜可以肯到这些渗碳体的质点, 而且回火屈氏体仍然保持针状马氏体的位向。

(9) 回火索氏体 淬火钢高温回火得到回火索氏体, 金相组织特征是已经聚集长大了的渗碳体颗粒均匀分布在再结晶的铁素体基体上。

但是某些合金钢经调质处理后, 铁素体仍然保持针状形态, 因合金元素对于铁素体的再结晶有阻碍作用, 须更高的温度才能完成再结晶

#### 四、实验组织运行要求

根据本实验的特点要求及具体条件, 采用集中运行模式组织教学

#### 五、实验设备和材料

- (7) 箱式电阻炉和控温仪表;
- (8) 金相显微镜;
- (9) 洛氏硬度计;
- (10) 淬火水桶、油桶、火钳、砂纸等, 20 钢、45 钢、T12 钢试样若干,

尺寸分别为 12x 12mm、13x14mm；15x14mm

- (11) 金相试样一套；
- (12) 金相图谱一套。

## 六、实验步骤

- 1、领取试样进行热处理工艺实验，炉冷试样由灰冷来代替。
2. 同一加热温度的 20 钢、45 钢和 T12 钢试样放入 920℃、860℃、780℃、炉子内加热，保温后分别进行水冷、油冷、空冷和灰冷操作。
3. 将水冷试样中取出 5 块 45 钢试样分别放入 200℃ 300℃ 400℃ 500℃ 600℃ 的炉中进行回火、回火保温时间为 30 分钟。
4. 洛氏硬度测试

观察金相组织,画示意图

## 七、思考题

1. 试分析 T12 钢 780℃ 水淬 200℃ 回火与 T12 钢 1100℃ 水淬 200℃ 回火的组织区别,性能区别,说明过共析钢淬火温度如何选择?
2. 分析 45 钢 760℃ 水淬与 45 钢 860℃ 油淬组织区别。若 45 钢淬火后硬度不足, 如何根据组织分析原因是淬火加热温度不足还是冷却速度不够?

## 八、实验报告

1. 实验目的。
2. 根据实验测试数据及观察到的显微组织综合分析
  - a、加热温度与冷却速度对钢性能的影响；
  - b. 不同回火温度对材料性能的影响,绘制 45 钢回火温度与硬度的关系曲线,
  - c. 观察热处理后的金相组织, 并画出组织示意图

## 九、其它说明

- (1) 实验前仔细阅读实验指导书。
- (2) 热处理操作及注意事项

装取试样时炉子要断电,装取试样后炉门要及时关好,并立即通电。

试样加热时,尽量靠近热电偶测出的温度接近试样温度。

实验中注意计算保温时间;保温时要注意温度控制仪表是否正常,以免跑温或升温太慢,发现问题应报告老师检查。

淬火冷却时,将试样迅速入油或入水。并不停地移动试样,且不要拿出液面。

热处理后测定硬度,并填写在表 2 中。

测硬度前要将试样的氧化皮磨掉。

- (3) 观察显微试样的基本步骤:

根据试样的成分、热处理工艺，对照相图和 C 曲线分析可能出现的组织。

正确选择放大倍数，组织粗的可选低倍，组织细的可选高倍。先用低倍。低倍观察视场，组织特征较明显，观察较全面，然后对其中有代表性的区域用高倍观察，高倍观察范围较局限，但能看到局部组织的细节。

显微镜观察时要根据观察重点深入的原则，选择其中有代表性的区域进行重点观察。

根据组织的形成特点和组织的特征画出组织示意图，注明材料、热处理工艺、放大倍数、腐蚀剂、组织名称等。