

# 《材料科学基础》

## 实验指导书

材料科学与工程学院

实验教学中心

2011.8

# 实验 1 Pb-Sn 二元相图的测定

## 一、实验目的

- 1.学会用热分析法测定金属与合金的临界点，并根据临界点绘出二元合金相图。
- 2.了解热分析法的测量技术与热电偶测量温度的方法。

## 二、实验内容

本实验用热分析法测定铅、锡二元金属体系的相图。实验中用热电偶作测温元件，通过保温电炉来控制体系的冷却速度。

## 三、实验原理

### 1.相图及其测定

相图是多相体系处于相平衡状态时体系的某物理性质（如温度）对体系的某一自变量（如组成）作图所得的图形，图中能反映出相平衡的情况（相对数目及性质等），故称为相图。二元或多元体系的相图常以组成为自变量其物理性质则大多取温度。由于相图能反映出多相平衡体系在不同自变量条件下的相平衡情况，因此，研究多相体系的性质以及多相体系相平衡情况的变化，都要用到相图。

到目前为止，几乎所有的相图都是通过实验测定出来的。金属及合金的状态发生变化将引起其性质发生变化，例如液体金属结晶或固态相变时将会产生热效应，合金相变时其电阻、体积、磁性等物理性质亦会发生变化。金属及合金发生相变时（包括液体结晶和固态相变）引起其某种性质变化所对应的温度称为临界温度，又称临界点。因此可以通过测定金属及合金的性质来求出其临界点。把这些临界点标注在以温度为纵坐标、成分为横坐标的图上，然后把各个相同意义的临界点连接成线，就构成了完整的相图。可见，相图的建立过程就是金属与合金临界点的测定过程。

测定金属与合金临界点的方法很多，如热分析法、热膨胀法、电阻测定法、显微分析法、磁性测定法、X 射线分析法等，但其中最常用、最基本的方法是热分析法。

热分析法是通过测量、记录金属或合金在缓慢加热或冷却过程中温度随时间的变化来确定其临界点。测定时将金属自高温缓慢地冷却，在冷却过程中每隔相等时间测量、记录一次温度，由此得到温度与时间的关系曲线，称为冷却曲线。

金属或合金在缓慢冷却过程中，当没有发生相变时，温度随时间增加而均匀地降低；一旦发生了某种转变，则由于有热效应产生，冷却曲线上就会出现转折，该转折点所对应的温度就是所求的临界点。因此，测出冷却曲线就可很容易地确定相变临界点。图 1-1 就是根据测定的一组冷却曲线建立相图的实例。



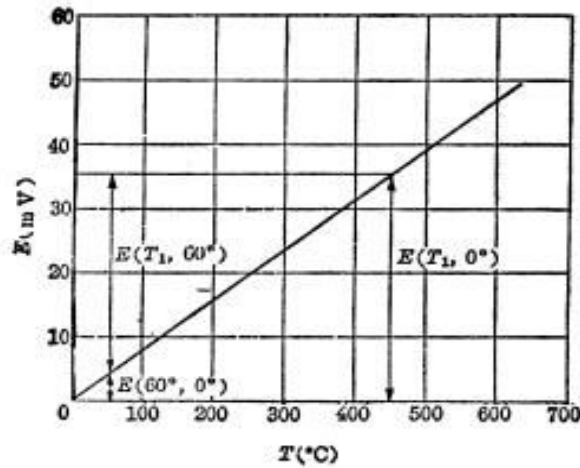


图 1-2 用图解法对冷接点温度进行修正

例如：设  $t'_0 = 60^\circ\text{C}$ ， $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ，已测知  $t_1$  温度时热电偶中所产生的热电势为  $E(t_1, 60^\circ) = 31\text{mV}$ ，求  $E(t_1, 0^\circ)$ 。此时，若应用图 1-2 所示的热电偶特性曲线，必须先求出冷接点温度  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  时的热电势数值：

$$E(t_1, 0^\circ) = E(t_1, 60^\circ) + E(60^\circ, 0^\circ)$$

由图 1-2 可查出  $E(60^\circ, 0^\circ) = 4.03\text{mV}$ 。

$$\therefore E(t_1, 0^\circ) = 31 + 4.03 = 35.03\text{mV}$$

根据图 1-2 中所示曲线， $35.03\text{mV}$  的热电势相当于热接点的温度为  $441^\circ\text{C}$ 。

热电偶有很多类型，常用的热电偶如表 1-1 所示。

表 1-1 常用的热电偶

热电偶的种类	热电偶的化学成分 (%)	热电偶导线直径(mm)	测温的上限温度 (°C)	
			短期工作	长期工作
铜 - 康铜	100%Cu 及 60%Cu+40%Ni	0.5 ~ 3	500	400
铁 - 康铜	100%Fe 及 60%Cu+40%Ni	0.5 ~ 4	800	600
镍铬 - 镍铝	89%Ni+10%Cr+1%Fe	1.0 ~ 5.0	1100	950
	95%Ni+2%Al+2%Mn+1%Si			
铂铑 - 铂	90%Pt+10%Rh 及 100%Pt	0.3 ~ 0.5	1600	1300

注：热电偶中前一种金属或合金为正极。

#### 四、实验材料及设备

##### 1. 被测样品：

铅、锡及其合金共 5 种（纯Pb；30%Sn70%Pb；62%Sn38%Pb；80%Sn20%Pb；纯Sn）。

##### 2. 实验设备：

立式加热保温坩埚炉 1 台 （炉内坩埚盛放被测样品）

镍铬-镍硅 ( $\Phi 7 \times 220$  mm) 热电偶 1 支

XMZ 101 型数显指示仪 1 个

## 五、实验方法和步骤

1. 全班同学分为 2 个大组共 10 个小组 (每组 2~3 人), 每组作出一种成分合金的冷却曲线。试验时, 各组将合金放在坩埚电炉中加热, 待合金熔化后, 将热电偶连同保护瓷套管插入金属液中, 热电偶的工作端应位于金属液中部, 不要靠近坩埚壁、坩埚底或金属液面。热电偶的自由端用补偿导线直接接到数显指示仪上 (但此时应考虑自由端的温度补偿问题, 即  $t'_0 = 20^\circ\text{C}$ )。

2. 加热升温至金属与合金熔点以上  $20^\circ\text{C}$  左右, 然后关闭电源 (坩埚炉断电后仍能升温  $30 \sim 50^\circ\text{C}$  以上)。为防止金属氧化, 应在熔化的金属液面上覆盖一层木炭粉或石墨粉。

3. 当合金开始冷却时, 若用人工测温, 则需每隔 1 分钟记录 1 次数显指示仪的读数, 在临界点附近, 也可以每隔 0.5 分钟作一次记录。

4. 根据所得数据, 以温度-时间为坐标系做出冷却曲线, 根据冷却曲线确定临界点; 以每组为单位依据各小组所测得的临界点, 建立 Pb-Sn 二元合金相图。

## 六、实验报告要求

1. 每组将所选定的合金在冷却过程中温度随时间的变化数据记录于表 1-2 中。

表 1-2 单组份合金在冷却过程中温度随时间的变化记录

读次	温度 $^\circ\text{C}$	读次	温度 $^\circ\text{C}$	读次	温度 $^\circ\text{C}$	读次	温度 $^\circ\text{C}$	读次	温度 $^\circ\text{C}$

2. 根据表 1-2 记录的数据, 用方格纸绘出所测合金的冷却曲线, 并注明合金成分, 确定发生转折和停顿时的临界点, 将其温度值填入表 1-3 中。

表 1-3 临界点的温度值

样 品	Pb	30%Sn70%Pb	62%Sn38%Pb	80%Sn20%Pb	Sn
开始析晶( $^\circ\text{C}$ )					
全部凝固( $^\circ\text{C}$ )					

3. 根据各种成分合金的临界点, 按比例绘出 Pb-Sn 二元合金相图。

4. 对实验结果进行分析和总结。

## 七、思考题

1. 样品在冷却过程中会出现过冷现象, 其原因是什么?

2. 为什么样品在冷却过程中又会出现温度回升现象?

## 实验 2 金相试样的制备

### 一、实验目的

1. 学会金相试样的制备方法。
2. 熟悉常用化学浸蚀试剂及其使用方法。

### 二、实验内容

按照金相试样的制备方法，每人制备出碳钢金相试样一块，用金相显微镜观察自己制备的试样，要求试样在显微镜下观察应没有磨痕、组织清晰。

### 三、实验原理

要对金属材料的显微组织进行观察，首先就必须制备金相试样。一般金相试样的制备过程包括取样、镶嵌、磨制、抛光、浸蚀等步骤。

#### 1. 取样

取样时应根据零件的特点及检验目的分别选取具有代表性的部位。例如，分析机械零件失效原因时应在破坏最严重处和远离破裂处分别切取，从而有利于观察显微组织的变化，分析失效的原因。研究铸件组织时，由于组织的不均匀性，应从表层到中心同时切取几个试样，分析各个部位显微组织的差异，了解结晶组织的变化。研究退火处理的机械零件时，由于其内部组织比较均匀，可切取任意截面试样进行分析。

切取试样时，应小心操作，不得因加工过热而改变其组织。取样的常用方法有：锯、车、刨、气割、砂轮切割和线切割等。试样的大小视具体情况而定，以便于握持、易于磨制为准。通常方形试样的边长为 12~15 mm，圆柱形试样尺寸为  $\phi(12\sim 15\text{ mm})\times 15\text{ mm}$ ，如图 2-1 所示。

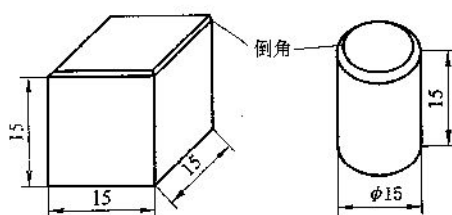


图 2-1 金相试样的尺寸

#### 2. 镶嵌

对于细小和形状特殊的试样(如丝、带、片等)，不便于磨制和抛光时，须将其镶嵌在塑料及低熔点的合金中或用专用夹具夹持，以便进行磨制和抛光操作。

镶样多采用热压镶样法和机械镶样法。热压镶样法是将试样放在电木粉或塑料粒中加热至 110~150℃左右，在镶样机中热压完成。机械镶样法的优点是使用专门的夹具夹持试样以克服热压对试样组织产生的影响。

#### 3. 磨制

磨制试样是为了得到平整的磨面，为抛光做准备。磨制分为粗磨和细磨。

①粗磨：用锉刀、砂轮或粗砂纸将试样表面磨平、修整成平整合适的形状，不做表面层金相检验的试样应倒角，以免抛光时撕裂抛光布。注意磨制时应不断用冷却液进行冷却以免试样表面过分发热而引起内部组织变化。

②细磨：试样的细磨一般在由粗到细的金相砂纸上进行，细磨的目的是为了消除粗磨过程中产生较粗、较深的磨痕，为抛光作好准备。手工操作时应注意，将砂纸平铺在玻璃板上，一手将砂纸按住，一手将试样轻压在砂纸上，向一个方向推进，如图 2-2 所示。细磨时，从粗砂纸到细砂纸依次进行(金相砂纸标号依次为 W50、W28、W14、W10、W5 号五级)；每更换一次砂纸，试样须转 90 度与前次磨制方向垂直并保持一个方向磨至旧磨痕完全消失，新磨痕均匀一致时为止；每次磨制后更换新砂纸前，试样必须用清水冲洗，以免上一道工序的粗沙砾带到细砂纸上而形成深的划痕。磨削时不可用力过重，否则容易产生过深的划痕。

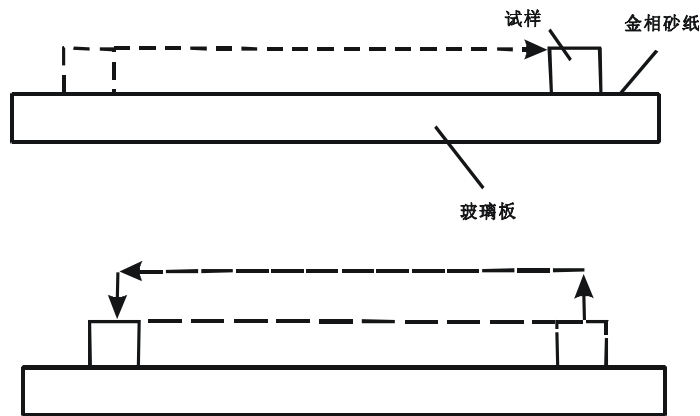


图 2-2 金相试样磨制示意图

#### 4. 抛光

细磨后的试样用水冲洗后就可进行抛光。抛光的目的是去除试样磨面上经细磨所产生的均匀而细微的划痕，使检验面呈光亮的镜面。

机械抛光在金相试样抛光机上进行，抛光机的电动机带动抛光盘高速旋转。抛光时要握紧试样，将被磨面轻压在旋转的抛光盘上，用力要轻，并使试样沿着抛光盘半径方向上来回移动，要不断地在抛光盘上加抛光液(抛光液是微粒磨料加水而成的悬浮液)，抛光时间不宜太长，到划痕完全消失为止。抛光后的试样表面用水冲洗干净，浸以酒精备用。

不论采用何种方法切取的试样经粗磨、细磨、抛光后加工影响面(损伤层)逐渐消除，得到平整光滑的磨面，其磨痕变化如图 2-3 所示。

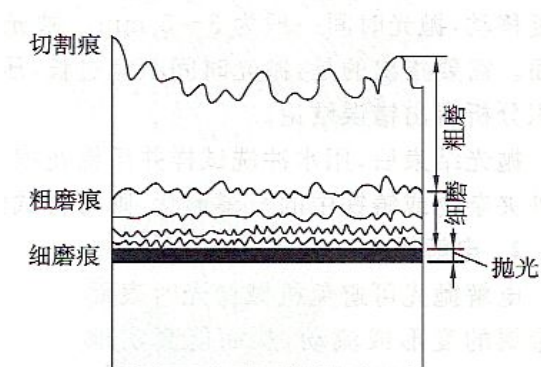


图 2-3 试样表面磨痕变化示意图

抛光好的磨面如镜面，在低倍显微镜下观察应没有明显的刻痕和蚀坑，这时就可以进行浸蚀。

### 5. 浸蚀

抛光后的试样在金相显微镜下观察，只能看到光亮的表面及某些非金属夹杂物。要想观察金属的显微组织，则必须用浸蚀剂浸蚀试样表面。最常用的浸蚀方法是化学浸蚀法，常用化学浸蚀剂如表 2-1 所示。浸蚀时可用棉花蘸上浸蚀剂在磨面上轻轻擦试，或将磨面完全浸入浸蚀剂中。浸蚀时间一般由浸蚀剂浓度及金属材料本身而定。若选 45 钢试样，则浸蚀剂选用 4% 的硝酸酒精溶液，浸蚀的时间约为 8~15s（浸蚀时间与浸蚀剂浓度有很大关系）。若浸蚀不足可继续浸蚀；但浸蚀过度则需重新抛光。

对于不同的材料，可选用不同的浸蚀剂，其选用可查相关手册。

表 2-1 常用化学浸蚀试剂

浸蚀试剂名称	成分	浸蚀条件	适用范围
1. 硝酸酒精溶液	HNO <sub>3</sub> (1.42/ml) 2~5ml 乙醇 100 ml	浸蚀几秒~1min	浸蚀铸铁、碳钢及低合金钢组织
2. 苦味酸酒精溶液	苦味酸 5g 乙醇 100ml	同上	同上
3. 碱性苦味酸溶液	NaOH 25g 苦味酸 5g H <sub>2</sub> O 100g	加热到 100℃ 使用，浸蚀 5~25min	显示钢中的碳化物，碳化物被污成黑色
4. 混合酸甘油溶液	HNO <sub>3</sub> (1.42/ml) 10ml HCl (1.19/ml) 20~30ml 甘油 30~20ml	用时稍加热	显示高速钢、高锰钢、镍铬合金等组织
5. 氯化铁盐酸水溶液	FeCl <sub>3</sub> 5g HCl (1.19/ml) 50ml H <sub>2</sub> O 100ml	浸蚀 1~2min	显示奥氏体镍钢及不锈钢组织
6. 硫酸铜盐酸水溶液	CuSO <sub>4</sub> 4g HCL (1.19g/ml) 50g H <sub>2</sub> O 20ml	用时稍加热	显示不锈钢组织



7. 氯化铁盐酸水溶液	FeCl <sub>3</sub> 5g HCl (1.19/ml) 50ml H <sub>2</sub> O 100ml	揩试法浸蚀	铜、黄铜、青铜、磷青铜
8. 氢氟酸盐水溶液	HF 10ml HCl 15ml H <sub>2</sub> O 90ml	浸蚀 1~2s	铝及铝合金
9. 草酸溶液	草酸 2g H <sub>2</sub> O 98ml	揩试法浸蚀 1~2s	显示铸造及形变后镁合金组织

对于纯金属或单相合金而言，浸蚀仍是一个纯化学溶解过程。由于晶界处缺陷和杂质较多，原子排列混乱且具有较高的自由能，易被浸蚀而呈凹陷；同时每个晶粒中原子排列的位向不同，各自的溶解速度也各不相同，致使被浸蚀的深浅程度也有区别。因此在显微镜下观察时，反射光线变化较大：晶界处的反射光线发生散射没有进入显微镜物镜而呈黑色；晶粒未被浸蚀，反射光线垂直进入显微镜物镜故呈白亮色。所以，在显微镜下观察到黑色的晶界和白色（各晶粒之间略有差异）的晶粒，如图 2-4 所示。

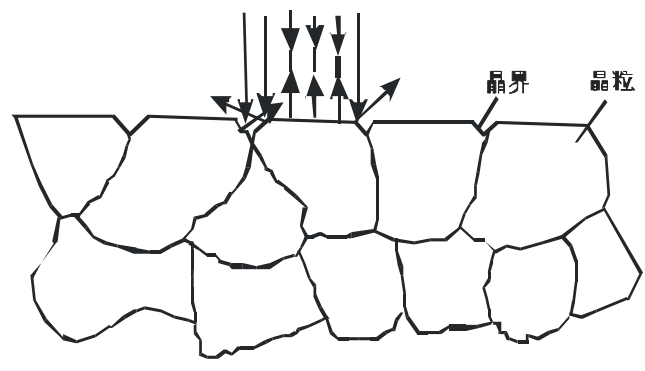


图 2-4 纯金属的化学浸蚀

对于两相以上的合金组织，浸蚀主要是一个电化学腐蚀过程。由于各组成相的成分不同，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时，就在两相之间形成无数对“微电池”：具有负电位的组成相成为阳极，它被迅速腐蚀而呈凹洼；具有正电位的另一组成相成为阴极，在正常的电化学作用下不受浸蚀而保持原有的光滑表面。当入射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，在金相显微镜下就能观察到各种不同的组成相。如图 2-5 所示。

试样经过浸蚀后，立即用清水冲洗，然后用酒精棉球擦拭并吹干，至此金相试样的制备工作全部结束，即可在显微镜下进行组织观察和分析研究。

正电位阴极碳化物 负电位阳极铁素体



图 2-5 两相以上合金的电化学腐蚀

#### 四、实验材料及设备

1. 4XB 型金相显微镜、P-1 型抛光机、吹风机等。
2. 金相砂纸一套、抛光剂、4%的硝酸酒精溶液、无水酒精、镊子、脱脂棉等。
3. 45 碳钢原材料试样若干。

#### 五、实验方法和步骤

1. 每人领取碳钢试样一个，用粗砂纸打磨试样，应将车削痕迹完全消除，以获得平整磨面。
2. 使用金相砂纸按照先粗后细的顺序进行磨制，注意更换砂纸时用水冲洗和旋转试样90度。
3. 在抛光机上进行抛光，获得光亮镜面。
4. 用浸蚀剂浸蚀试样磨面，应控制浸蚀时间，用显微镜观察组织显现效果。
5. 绘制显微组织示意图。

#### 六、实验报告要求

1. 明确实验目的。
2. 简述金相试样的制备过程。
3. 绘制试样浸蚀后的显微组织图。
4. 总结实验中存在的问题并提出解决办法。

#### 七、思考题

1. 金相试样如何显露？
2. 简述试样制备的要点与体会。

## 实验3 金相显微镜的使用及铁碳合金的平衡组织观察

### 一、实验目的

1. 了解金相显微镜的基本构造及成像原理，并学会其使用方法。
2. 了解铁碳合金在平衡状态下的显微组织。

### 二、实验内容

了解金相显微镜的构造及成像原理，学会其使用。用金相显微镜观察表 3-1 中的金相试样的显微组织，画出对应的组织示意图，标明材料名称、热处理状态、放大倍数、浸蚀剂等实验条件。

### 三、实验原理

#### 1. 金相显微镜的成像原理、构造及使用

用来观察和研究金属材料显微组织的光学显微镜称为金相显微镜。金相显微镜是利用反射光来观察不透明的金属物体。金相显微镜的种类很多，通常可分为台式、立式和卧式三大类。下面以 4X 系列台式金相显微镜为例来了解其成像原理、构造及使用方法。

##### (1) 金相显微镜的成像原理

金相显微镜属于光学显微镜的范畴，它的成像完全遵循光学成像的基本原理。它是由两级特定的透镜及一些辅助光学零件所组成，靠近被观察物体的透镜叫做物镜而靠近眼睛的透镜叫做目镜。借助于物镜与目镜的两次放大，就能将物体放大到很高的倍数（大约 1600~2000 倍），其成像原理如图 3-1 所示。

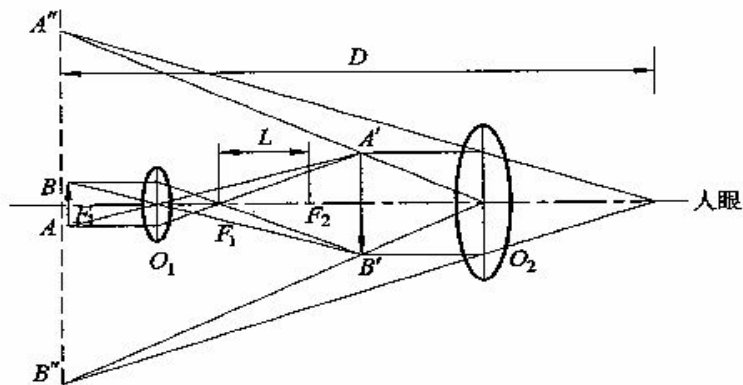


图3-1 金相显微镜成像原理图

物体 AB 放在物镜的焦点附近（在焦点以外），由物体反射的光线穿过物镜经折射后得到一个放大的倒立实像 A'B'，目镜再将实像 A'B' 放大成正立虚像 A''B''。虚像 A''B'' 就是我们在金相显微镜下所观察到的经过二次放大的物像。

在设计显微镜时，让物镜放大后形成的实像 A'B' 位于目镜的焦距  $f$  之内，并使最后的

虚像A'B'在距眼睛 250mm 处，这时观察者看得最清晰。

## (2) 金相显微镜的构造

金相显微镜主要由照明系统、光学系统和机械系统三部分组成。4X 型金相显微镜的外形结构如图 3-2 所示。

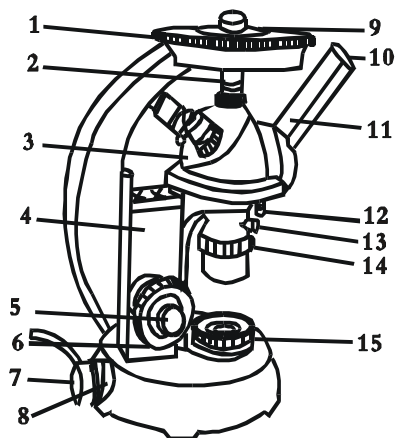


图3-2 4X型金相显微镜外形图

- 1-载物台 2-物镜 3-物镜转换器
- 4-传动箱 5-微调手轮 6-粗调手轮
- 7-光源 8-偏心圈 9-试样 10-目镜
- 11-目镜筒 12-固定螺钉 13-调节螺钉
- 14-视场光栏 15-孔径光栏

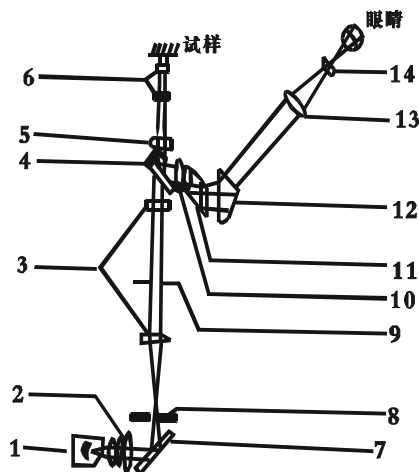


图3-3 4X型金相显微镜光学系统

- 1-灯泡 2-聚光镜组 (1) 3-聚光镜组 (2)
- 4-半反射镜 5-辅助透镜 (1) 6-物镜组
- 7-反光镜 8-孔径光栏 9-视场光栏
- 10-辅助透镜 (2) 11-棱镜 12-棱镜
- 13-场镜 14-接目镜

### ① 光学系统

如图 3-3 所示，由灯泡 1 发出一束光线，经过聚光镜组 2 及反光镜 7 被会聚在孔径光栏 8 上，随后经过聚光镜 3，再度将光线会聚在物镜 6 的后焦面，最后光线通过物镜，用平行光照明试样，使其表面得到充分均匀的照明。从物体反射回来的光线复经物镜 6、辅助透镜 5、半反射镜 4、辅助透镜 10、以及棱镜 11 与棱镜 12 形成一个放大的倒立实像，该像被场镜 13 和接目镜 14 所组成的目镜放大，最后进入观察者的眼睛。

光学系统的核心部件是目镜和物镜。其任务是完成金相组织的放大，获得清晰的图像。

目镜：目镜是用来观察由物镜所成物像的放大镜。

物镜：物镜起着放大和清晰成像的作用。物镜质量的好坏直接影响显微镜的成像质量。物镜的主要性能指标包括放大倍数、数值孔径、鉴别率和景深等。

物镜的放大倍数是指物镜在线长度上放大实物倍数的能力。物镜上刻有如 40X / O. 65 等符号，其中 40X 表示物镜的放大倍数，0.65 表示物镜的数值孔径。

显微镜的放大倍数：目镜放大倍数 X 物镜放大倍数。

物镜的数值孔径表征物镜的聚光能力，它是影响物镜鉴别率的重要因素之一，通常以

“N.A”表示。

物镜的鉴别率是指物镜具有将试样上两个物点清晰分辨的最大能力，以能清晰分辨两个物点的最小距离  $d$  来表示， $d$  愈小，表示物镜的鉴别率愈高，如图 3-4 所示。景深是反映物镜对于高低不平的物体能清晰成像的能力，又称垂直鉴别率。



图 3-4 物镜清晰成像作用

## ② 照明系统

照明系统主要由位于显微镜底部的光源、聚光镜组、反光镜、孔径光栏及视场光栏组成。通过上一系列的透镜及物镜本身的作用，使试样表面获得充分均匀的照明。

孔径光栏：孔径光栏的作用是控制入射光束的粗细。孔径光栏对成像质量有重要影响，缩小孔径光栏可以减小像差，加大景深，成像清晰，但使物镜鉴别率降低；反之，扩大孔径光栏可以提高鉴别率，但成像质量降低。因此，孔径光栏的调整要适当，以观察成像最清晰时为宜。

视场光栏：视场光栏的作用是调节所观察视场的大小，它不影响物镜的鉴别率。视场光栏调节愈小，像的衬度愈佳。故为了增加衬度可将视场光栏尽量缩小，如观察金相组织时调至与目镜视场同样大小；在金相摄影时，调节至画面尺寸为佳。

## ③ 机械系统

机械系统(如图 3-2 所示)包括载物台、粗、微动调焦装置、物镜转换器、底座等。

载物台：试样 9 磨面向下放置在载物台 1 上，可用手轻推载物台在水平面任意方向微微移动，以便选择观察试样的适当部位。

粗、微动调焦装置：用来调节物镜 2 与试样 9 的相对位置，以得到最清晰的图像。旋转粗动手轮 6 能使载物台迅速上升或下降，旋转微动手轮 5 能使载物台缓慢升降，进行精确调焦。

物镜转换器：物镜转换器 3 可安装三个不同放大倍数的物镜，与目镜配合可获得不同的放大倍数。

底座：支撑整个镜体。

### (3) 金相显微镜的使用

金相显微镜属于精密光学仪器，必须精心操作、使用。

2 使用前要预习实验指导书，了解显微镜的构造，操作要细心。遇有故障时不得擅自处理，应立即报告指导老师。

② 制备好的试样要保持清洁、干燥，无残留浸蚀液，以免浸蚀镜头。

③ 切勿用手触摸镜头、镜片，如发现镜头上有污垢时，应用棉球或毛刷轻轻擦去。

④ 观察完毕后应及时关闭电源。

## 2. 铁碳合金的平衡组织

铁碳合金的平衡组织是指其在极为缓慢的冷却条件下（如退火）所得到的组织。其基本组织有铁素体(F)、渗碳体( $\text{Fe}_3\text{C}$ )、珠光体(P)和莱氏体(Ld')。

### (1) 铁碳合金的基本组织特征

#### ① 铁素体(F)

铁素体是碳溶解在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的间隙固溶体。它的溶碳量随着温度的改变而变化，其最大的溶碳量为0.0218%。经4%硝酸酒精溶液浸蚀后，在金相显微镜下观察呈白色多边形晶粒，黑色网格是晶粒边界(即晶界)。浸蚀后的晶粒呈现明暗不同的颜色，这是由于各晶粒的位向不同，显示出晶粒具有不同的耐腐蚀性。亚共析钢中，随着含碳量的增加，珠光体含量增加而铁素体量减小，当铁素体量多时，它呈块状分布，当含碳量接近共析成分时，铁素体在珠光体边界上呈网状分布。

铁素体硬度较低，一般为80~120 HB，强度也较低，但塑性和韧性好。

#### ② 渗碳体( $\text{Fe}_3\text{C}$ )

渗碳体是一种铁碳化合物，含碳量为6.69%，在铁碳合金中，当碳含量超过其溶解度时，多余的碳就以 $\text{Fe}_3\text{C}$ 的形式出现。渗碳体的抗腐蚀能力较强，经4%的硝酸酒精溶液浸蚀后仍呈白亮色。白口铁中的一次渗碳体是直接由液体中析出，呈粗大条状分布在莱氏体基体中；二次渗碳体由奥氏体中析出，由于量少而沿着奥氏体晶界分布，随后奥氏体变成珠光体，因此室温下二次渗碳体呈网状分布在珠光体的边界上。

渗碳体硬度很高，可达800 HB，它是一种硬脆相，所以强度、塑性都很差。故单纯的渗碳体或以它为基体的合金没有使用价值，只有在铁素体基体上分布适量的渗碳体才具有使用价值（很重要）。

#### ③ 珠光体(P)

珠光体是铁素体和渗碳体的两相混合物。是由高温奥氏体(A)冷却到727℃时发生共析反应所得到的铁素体和渗碳体交替形成的层片状组织。经4%的硝酸酒精溶液浸蚀后，在低倍数下观察，铁素体和渗碳体无法分辨，呈现黑色块状，在中高倍数下观察，片层状珠光体中铁素体呈黑色条纹状，而渗碳体呈白亮色。这是因为低倍观察时显微镜分辨率低，高倍时显微镜分辨率高的缘故。

片状珠光体的硬度为190~230HB，随着片层间距的变小而硬度升高。

#### ④ 莱氏体(Ld')

莱氏体是一种两相共晶组织。莱氏体(Ld')在727℃以上是奥氏体和渗碳体共晶的机械混合物（称为高温莱氏体Ld）；在723℃时，奥氏体发生共析反应形成珠光体。所以室温下观察到的莱氏体组织是珠光体和渗碳体的机械混合物。经4%的硝酸酒精浸蚀后，莱氏体(Ld')的组织特征是白亮色的渗碳体基体上分布着黑色点状或条状珠光体。

Ld'的硬度很高，可达700HB，性脆。它一般存在于含碳量大于2.11%的白口铁中，在某些高碳合金钢的铸造组织中也会出现。



## (2) 铁碳合金在室温下的显微组织

铁碳合金包括工业纯铁、钢和铁三大类。其中钢根据组织可分为亚共析钢、共析钢、过共析钢三类；铁根据组织可分为亚共晶白口铁、共晶白口铁和过共晶白口铁三大类。铁碳合金在室温下的显微组织如表 3-1 所示。金相显微组织如图 3-5~图 3-12 所示。

表 3-1 铁碳合金在室温下的平衡组织

名称	含碳量 (%)	热处理状态	显微镜组织	浸蚀剂
工业纯铁	<0.02	退火	F	4%硝酸酒精溶液
亚共析钢	0.02~0.77	退火	F+P	4%硝酸酒精溶液
共析钢	0.77	退火	P	4%硝酸酒精溶液
过共析钢	0.77~2.11	退火	P+二次 Fe <sub>3</sub> C	4%硝酸酒精溶液
亚共晶白口铁	2.11~4.3	铸态	P+ Ld' +二次 Fe <sub>3</sub> C	4%硝酸酒精溶液
共晶白口铁	4.3	铸态	Ld'	4%硝酸酒精溶液
过共晶白口铁	4.3~6.69	铸态	Ld' +一次 Fe <sub>3</sub> C	4%硝酸酒精溶液

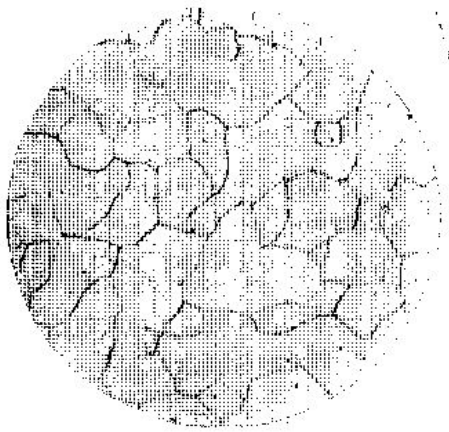


图 3-5 工业纯铁 (200×)

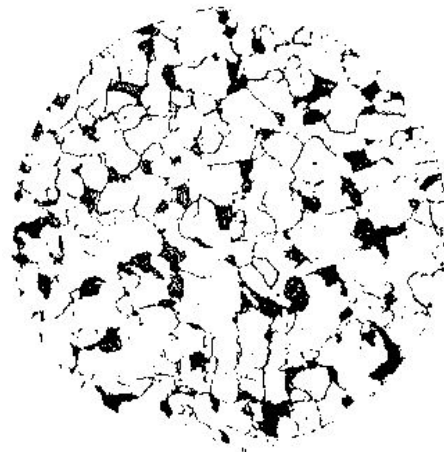


图 3-6 20 钢 (200×)

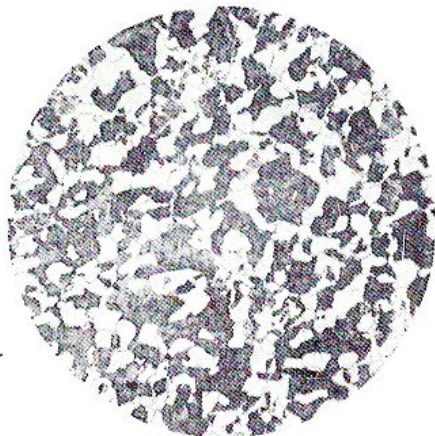


图 3-7 45 钢 (200×)

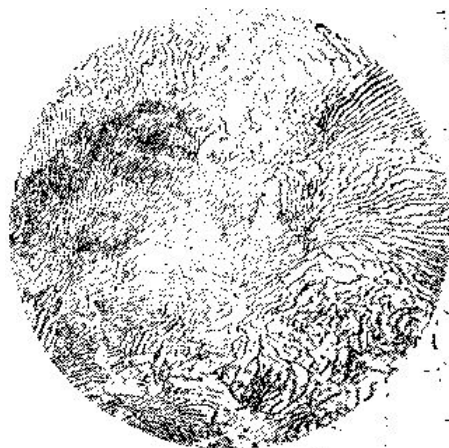


图 3-8 T8 钢 (400×)

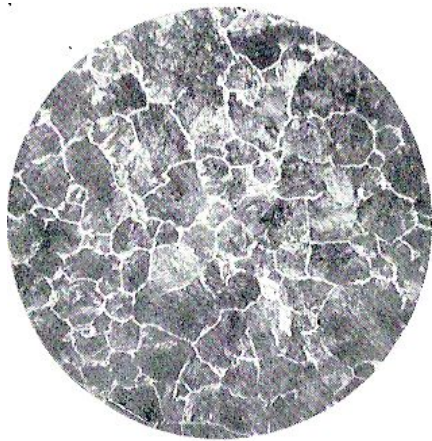


图 3-9 T12 钢 (100×)

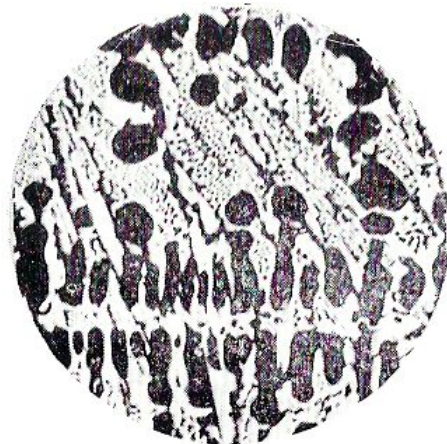


图 3-10 亚共晶白口铸铁 (200×)

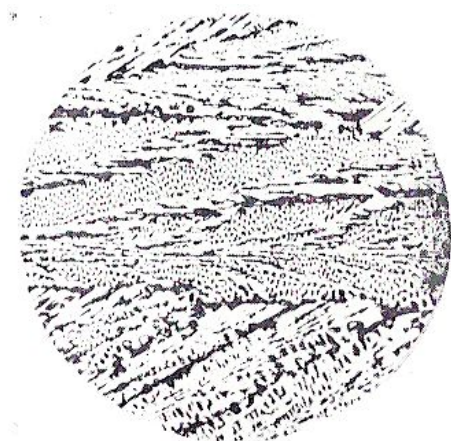


图 3-11 共晶白口铸铁 (200×)

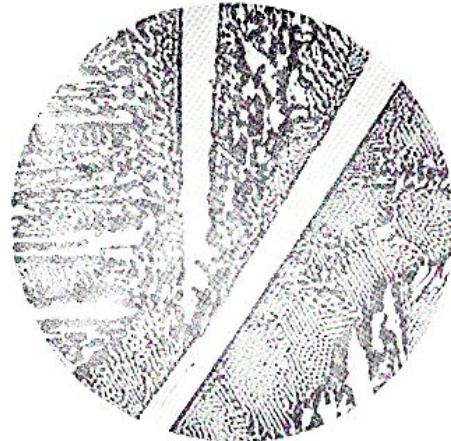


图 3-12 过共晶白口铸铁 (160×)

#### 四、实验材料及设备

1. 4X型金相显微镜。
2. 标准金相试样若干。

#### 五、实验方法和步骤

金相显微镜的操作步骤如下：

1. 根据放大倍数选择物镜和目镜。
2. 将试样放在载物台 1 上，磨面对准物镜。
3. 打开电源。
4. 旋转粗动调焦手轮 6 进行调焦，当呈现出模糊的影像时，再转动微动调焦手轮 5，直至所观察的物像清晰为止。
5. 按需要调节孔径光阑和视场光阑的大小。
6. 观察显微组织时，可移动(不能转动)载物台 1，对试样的各部位进行观察。



7. 观察完毕后，应关毕电源，取下试样。

## 六、实验报告要求

1. 明确实验目的
2. 简述金相试样制备的原理及意义
3. 图示说明金相显微镜的成像原理
4. 分析铁碳合金中含碳量与组织间的关系
5. 根据表3-1，画出对应的组织示意图，标明材料名称、热处理状态、放大倍数、浸蚀剂等实验条件。

## 七、思考题

1. 金相显微镜主要由几部分构成?其成像原理如何?
2. 铁碳合金中含碳量如何对其组织与性能产生影响? ?

## 实验4 钢的整体热处理及其非平衡组织观察

### 一、实验目的

1. 了解碳钢整体热处理的原理及操作方法。
2. 熟悉碳钢整体热处理后的组织与性能。
3. 分析加热温度、冷却速度及回火温度对热处理材料组织与硬度的影响。

### 二、实验内容

在了解碳钢整体热处理的原理及操作方法的基础上，对45钢试样进行淬火和回火处理并通过用洛氏硬度计对淬火前、后和回火后的试样硬度进行测定来了解热处理对材料性能的影响；使用金相显微镜观察几种典型材料的非平衡组织。

### 三、实验原理

#### 1. 钢的整体热处理的概念

碳钢的热处理是指将碳钢在固态下进行加热、保温和冷却，以改变其组织和性能的一种工艺。如果对碳钢进行穿透加热的热处理工艺被称之为钢的整体热处理；仅对碳钢的某一部分或几个部位进行热处理的工艺被称之为局部热处理。通过热处理能显著提高材料的力学性能及零件的使用寿命，因此热处理在机械制造业中占有十分重要的地位。

热处理工艺过程分为加热、保温和冷却三个阶段，工艺曲线如图4-1所示。

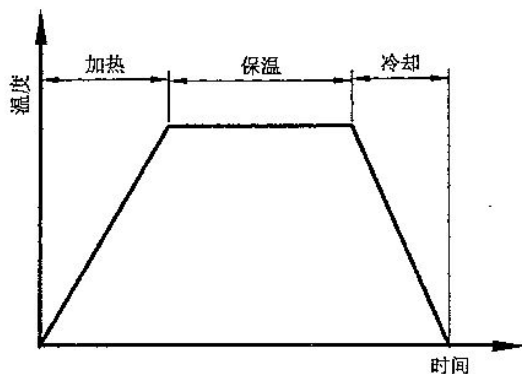


图4-1 热处理工艺曲线

**加热：**多数碳钢零件进行热处理时，都需要加热到相变点以上，以获得全部或部分均匀的奥氏体组织。

**保温：**保温的目的是为了使零件内外都达到所要求的温度，充分完成组织转变。

**冷却：**冷却介质是影响碳钢最终所获得组织与性能的重要工艺因数，主要根据零件所要求的组织和性能来确定。同一种碳钢，在不同的介质中冷却时，由于冷却速度不同，过冷奥氏体处在不同温度下发生转变，得到不同的组织产物，具有不同的性能。

## 2. 过冷奥氏体连续冷却转变曲线

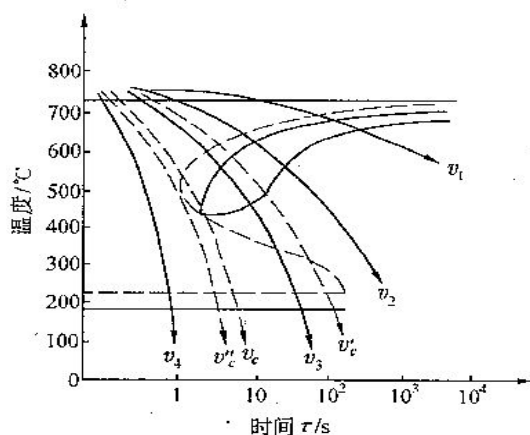


图 4-2 共析钢连续冷却转变曲线

实际生产中，普遍采用的冷却方式是连续冷却，图4-2 是通过实验测定的共析钢连续冷却转变曲线。从图中可以看出： $v_c$ 是得到全部马氏体组织（含少量残余奥氏体）的最小冷却速度，称为“临界冷却速度”，又称“上临界冷速”； $v'_c$ 为奥氏体在连续冷却过程中全部获得珠光体的最大冷速，也称“下临界冷却速度”。如果实际冷却速度小于 $v'_c$ 时只发生珠光体转变，大于 $v_c$ 时只发生马氏体转变，介于二者之间时先发生珠光体转变，后发生马氏体转变。共析碳钢连续冷却时没有贝氏体形成（无贝氏体转变区）。因此，掌握过冷奥氏体在连续冷却过程中的组织转变规律对制定热处理工艺具有很大的实际意义。

## 3. 几种常用的热处理方法

碳钢的整体热处理一般分为淬火、回火、退火、正火四种，俗称“四把火”。同一种材料，采用不同的热处理方法，最终所获得的组织和性能均不同。

### (1) 碳钢的淬火

淬火是将钢加热到临界点  $Ac_1$  或  $Ac_3$  以上  $30^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ ，经过适当的保温后，在冷却介质中快速冷却，以得到马氏体组织的一种热处理工艺。淬火可显著提高碳钢的强度和硬度，以适应零件的使用要求。而加热温度、保温时间和冷却速度是影响淬火质量的重要工艺参数。

淬火加热温度的确定：亚共析钢的淬火加热温度一般在  $Ac_3$  以上  $30^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ ，经过适当的保温后得到均匀细小的奥氏体组织，淬火后得到均匀细小的马氏体组织。若加热温度在  $Ac_1 \sim Ac_3$  之间，此时亚共析钢的组织为铁素体和奥氏体，淬火后的组织为铁素体和马氏体。由于铁素体的存在，显著降低了钢淬火后的硬度和强度。若加热温度过高，奥氏体晶粒粗化，淬火后得到粗大马氏体，使钢的韧性变差，同时也增加了淬火应力，使零件变形和开裂倾向增大；共析钢和过共析钢的的淬火加热温度一般在  $Ac_1$  以上  $30^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ ，经过适当的保温后得到奥氏体或奥氏体与渗碳体，淬火后得到的马氏体或马氏体与少量渗碳体，由于渗碳体的存在，提高了淬火钢的硬度和耐磨性。若加热温度选在  $Ac_{cm}$  以上，渗碳

体全部溶解于奥氏体中，淬火后得到粗大马氏体和残余奥氏体，使钢的硬度、耐磨性变差。若加热温度过低，得到非马氏体组织，淬火就失去意义。表 4-1 列出了部分常用碳钢的临界温度，供同学们实验时查阅。

表 4-1 常用碳钢的临界温度

钢号	临界温度/°C	
	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub> 或 Ac <sub>cm</sub>
15	735	
20	732	863
40	724	813
45	724	790
50	725	780
65	727	760
T7	730	752
T8	730	-770
T10	730	800
T12	730	820

保温时间的确定：加热、保温的目的是为了使零件表面和心部均达到所要求的加热温度，完成组织转变。保温时间主要取决于零件的大小、形状、加热介质以及热处理炉的装炉量等。本次实验选用圆柱形试样，淬火保温时间按直径每毫米保温 1 分钟计算。

淬火介质：冷却是淬火的关键工序，同一种碳钢，在不同的冷却介质中冷却时，由于冷却速度不同，最终得到的组织不同。常用的冷却介质有水、盐水和油，本次实验采用盐水冷却。

## (2) 淬火钢的回火

回火是将淬火后的碳钢加热到 Ac<sub>1</sub> 以下某一温度，保温一定时间后，随炉冷却或空冷至室温的一种热处理工艺。

由于工件淬火后存在很大的内应力，易使工件发生变形甚至开裂，而且淬火后工件中的马氏体和残余奥氏体都是不稳定的组织，在室温下会发生分解，从而引起工件变形。因此，一般工件淬火后都要进行回火处理以消除内应力，提高韧性，获得稳定的组织和性能。

回火的加热温度在 Ac<sub>1</sub> 以下，在回火的加热、保温过程中淬火马氏体和残余奥氏体都要发生分解和分解产物的聚集长大及再结晶。随着回火温度的升高，得到的回火组织依次为回火马氏体、回火屈氏体、回火索氏体。淬火钢的强度、硬度依次降低，韧性、塑性将逐渐升高，内应力也逐渐趋于消除。根据回火温度的不同，回火分为低温回火、中温回火、高温回火三种，其组织与性能特点如表 4-2 所示。

表 4-2 不同回火温度的组织与性能

类型	温度 / °C	回火组织	HRC	性能特点	主要应用
低温回火	150~250	回火马氏体	62~65	高硬度、内应力和脆性降低	高碳工具钢
中温回火	350~500	回火屈氏体	35~45	硬度适中，具有高弹性	弹簧
高温回火	500~650	回火索氏体	20~33	有良好的综合性能	重要的结构件：如轴、齿轮等

### (3) 碳钢的退火与正火

退火是将碳钢加热到临界点  $A_{c1}$  或  $A_{c3}$  以上  $30^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，经过适当的保温后，缓慢随炉冷却至室温的一种热处理工艺。由于冷却是缓慢进行，所以碳钢的退火组织接近平衡状态的组织，基本符合铁碳合金状态图的组织。退火可以降低工件的硬度，以利于切削加工。

正火是把碳钢加热到临界点  $A_{c1}$  或  $A_{cm}$  以上  $30^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，经过适当的保温后，在空气中冷却至室温的一种热处理工艺。亚共析钢的正火组织为索氏体（细珠光体）和铁素体，共析钢的正火组织为索氏体，过共析钢的正火组织为索氏体和颗粒状渗碳体。正火可以细化晶粒，调整硬度，改善材料的切削加工性能。

由于正火比退火的冷却速度快，因此同一种材料的正火组织要比退火组织细小，硬度、强度也高。

碳钢的退火、正火的保温时间，可按工件每毫米厚度  $1.2 \sim 1.5$  分钟估算。

## 四、实验材料及设备

1. 箱式电阻炉、洛氏硬度计、金相显微镜。
2. 淬火钳、淬火介质（盐水）及水箱等。
3. 45钢试样，几种典型材料的标准试样。

## 五、实验方法和步骤

1. 学生 3 人一组，每组领取三块 45 钢试样，测定试样的硬度值（HRC）。确定 45 钢的淬火加热温度、保温时间、冷却介质等工艺参数。

2. 将试样放入热处理炉中加热。当温度控制器的保温指示（红灯）第一次闪亮时开始计算保温时间。

3. 保温时间一到，迅速取出试样放进盐水中进行淬火处理。

4. 将试样表面的氧化皮用砂纸磨去，测定试样淬火后的硬度值（HRC）。

5. 每组三块试样分别放入  $180^{\circ}\text{C}$ 、 $400^{\circ}\text{C}$ 、 $600^{\circ}\text{C}$  的热处理炉中回火。回火时间到后，试样可在空气中冷却。

6. 测定回火后试样的硬度值（HRC），按表 4-3 作好记录。

表 4-3 热处理实验数据记录

材料	热处理工艺			洛氏硬度 (HRC)	
	淬火加热温度 /°C	淬火介质	回火温度/°C	淬火后	回火后
45			180		
			400		
			600		

7. 利用金相显微镜观察、分析表 4-4 中几种典型材料经过热处理后的显微组织（非平衡组织）。

表 4-4 几种典型材料热处理后的组织

材料	热处理工艺	浸蚀剂	组 织
45	淬火	4%硝酸酒精溶液	
45	调质	4%硝酸酒精溶液	
T10	球化退火	4%硝酸酒精溶液	
T12	淬火	4%硝酸酒精溶液	
20	淬火	4%硝酸酒精溶液	
20	渗碳	4%硝酸酒精溶液	

## 六、实验报告要求

1. 简述金属材料热处理的原理及在工业生产中的应用。
2. 列出实验数据表，说明45钢试样淬火后和回火后的组织变化。
3. 绘制45钢试样淬火后的硬度随回火温度而变化的曲线。
4. 分析加热温度、冷却速度及回火温度对热处理材料组织与硬度的影响。
5. 列表说明几种典型材料热处理后的组织。

## 七、思考题

1. 热处理工艺在工业生产中的意义与作用。
2. 分析在热处理工艺中加热温度、冷却速度等工艺参数对碳钢组织和性能的影响。