

# 工程材料的组织性能观测 与分析

机械实验教学中心

奚鹰

## 6-1 金相显微镜的使用及金相试样的制备

### 一 实验目的

1. 了解金相显微镜的光学原理及基本结构；掌握金相显微镜的操作方法。
2. 了解金相试样制备的全过程。

### 二 实验内容简介

#### 1. 金相显微镜的使用：

在科学研究和生产实践中，为了确定金属材料的性能，经常需要进行金相组织的分析。金相分析在金属材料研究领域中有非常重要的地位。分析过程中使用的显微镜有光学显微镜和电子显微镜两大类。由于4X(XJB-1)型光学显微镜使用方便、设备成本低，因而也是生产和教学中常用的金相分析仪器。本节通过对该显微镜光学原理和结构的了解，以达到实验中正确使用金相显微镜的目的。

#### 2. 金相试样的制备：

为了对金相显微组织进行鉴别和研究，需将要分析的材料制备成一定规格的试样，并经过一系列特定的制作处理过程，最后通过金相显微镜的观察分析，以确定金属材料的显微组织及分布情况。因此应学会按一定要求制备出合格的金相试样。

### 三 实验设备的原理与构造

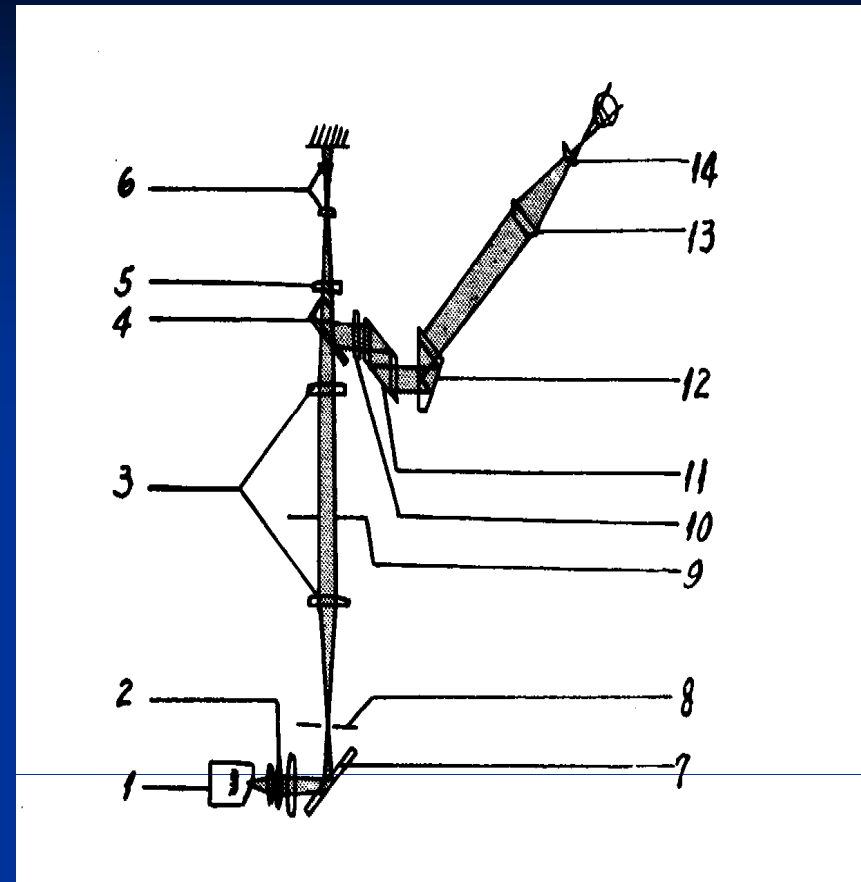
金相显微镜通常由光学系统、照明系统和机械系统三大部分组成，有的显微镜还附有摄影装置。

#### 1. 光学系统 (图6-1所示) :

灯泡1作为光源经聚光透镜组2及反光镜7聚集到孔径光栏8，再经过聚光镜组3聚集到物镜组6的后焦面，最后通过物镜平行照射到试样的表面。从试样表面反射回来的光线再经物镜组6和辅助透镜5，由半反射镜4折射，经过辅助透镜10以及棱镜11、12、形成一个倒立的放大实象，该象再经过目镜14的放大后，就形成了我们目镜视场中看到的放大映象。

#### 2. 照明系统 (图6-1所示) :

用6-8V (可调) 的15W低压灯泡1作为光源。由变压器降压供电，靠调节次级电压(6-8V) 来改变光源的亮度。聚光透镜组2、孔径光栏8及反光镜7等装置均安装在圆形的底座内，视场光栏9及另一组聚光透镜组3则安装在显微镜体内。它们组成了显微镜的照明系统，使试样表面获得充分均匀的照明。

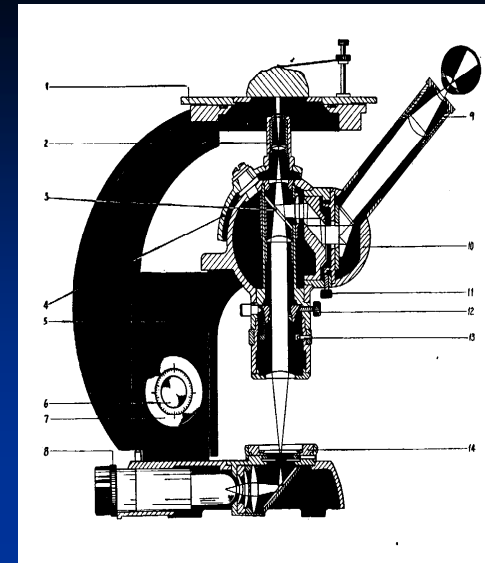


- |          |             |             |       |
|----------|-------------|-------------|-------|
| 1—灯泡     | 2—聚光透镜组 (1) | 3—聚光透镜组 (2) |       |
| 4—半反光镜   | 5—辅助透镜 (1)  | 6—物镜        | 7—反光镜 |
| 8—孔径光栏   | 9—视场光栏      | 10—辅助透镜 (2) |       |
| 11、12—棱镜 | 13—场镜       | 14—目镜       |       |

图6-1 XJB-1型金相显微镜的光学系统

### 3. 机械系统 (图6-2所示) :

- 1) 调焦装置：在显微镜的两侧同一部位上装有粗调手轮7和微调手轮6。转动粗调手轮，可使载物台1作上下移动。在粗调手轮的内侧装有锁紧旋钮（以箭头和紧字表示），用以锁定调焦准确后的载物台位置。转动微调手轮可使显微镜本体沿着传动箱5上的滑轨作微量上下移动。在左侧微调手轮上刻有50个等分格，每一格表示物镜2上下微量移动0.002毫米。在刻度盘同侧的传动箱滑轨处刻有两条以示微调升降范围的线。
- 2) 物镜转换器：物镜转换器4呈球面形，在球面上有三个可安装不同放大倍数物镜的螺纹孔，旋转转换器可使物镜镜头进入光学系统，与不同放大倍数的目镜组合使用，可获得各种不同需要的放大倍数。（见表6-1）
- 3) 目镜筒：目镜筒呈 $45^\circ$ 角倾斜地安装在附有棱镜的球形转换器上，筒上可安装不同放大倍数的目镜9。将目镜旋转 $90^\circ$ 角呈水平状态时配以照相装置可进行金相摄影。
- 4) 载物台：用以放置被测的金相试样，载物台1和下面托盘之间有导架，用手推动，可使载物台在水平面上作任意方向的移动，以选择试样的最佳观察部位。
- 5) 孔径光栏和视场光栏的调节装置：孔径光栏14安装在圆形底座上面，调节孔径光栏可控制射入光线的粗细，以调节物象的清晰程度。视场光栏设在物镜转换器下面，转动视场光栏圈13可调节视场大小范围，使目镜中的视场明亮而无阴影。在视场光栏圈的上部有三个调节螺钉12，用以调整视场光栏的中心偏移量。



1—载物台 2—物镜 3—半反光镜 4—转换器  
 5—传动箱 6—微调焦手轮 7—粗调焦手轮  
 8—偏心轮 9—目镜 10—目镜管 11—固定螺钉  
 12—调节螺钉 13—视场光栏圈 14—孔径光栏  
 图6-2 XJB-1型金相显微镜外形结构示意图

表6-1 XJB-1型金相显微镜的放大倍数

物镜	目镜	5×	10×	15×
	10×	50×	100×	150×
	40×	200×	400×	600×
	100×	500×	1000×	1500×

## 四 实验步骤及注意事项

### 1. 金相显微镜的操作步骤

- 1) 首先将显微镜灯泡插头插在低压 ( $6\sim 8V$ ) 的变压器上, 再将变压器插头插到220V的电源插座上。
- 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, 并使转换器转至定位点。
- 3) 将试样放在载物台中心。试样观察表面应朝下, 并用弹簧片压住。
- 4) 转动粗调手轮, 降低载物台; 同时用眼睛在外面直接观察, 使试样表面尽量接近物镜, 但切不可相碰以免损坏物镜。然后, 向相反方向转动粗调手轮, 逐渐升起载物台。同时注意观察目镜内的变化; 当看到视场内的亮度逐渐增强时, 说明离正确焦距不远了, 动作需放慢; 当视场内的物象基本清晰后, 即锁定锁紧旋钮, 以固定已调好的载物台位置。然后改用微调手轮进行调节, 直至物象完全清晰为止。
- 5) 适当调节孔径光栏和视场光栏, 以获得柔和的光线和清晰的物象。
- 6) 使用注意事项:
  - a. 金相显微镜是一种精密仪器, 操作时必须特别细心, 不可有任何剧烈动作。
  - b. 显微镜的镜头玻璃部分和试样的观察表面不可用手直接触摸。若有灰尘, 可用擦镜纸和软毛刷轻轻擦拭。
  - c. 显微镜的光源灯泡 ( $6\sim 8V$ ) 插头, 切记不可直接插到220V的电源上, 否则会烧坏灯泡。
  - d. 在旋转粗或微调手轮时动作要慢。如碰到某种阻碍时应立即停止操作, 报告指导教师查找原因, 切不可强行转动, 否则会损坏机件。
  - e. 观察结束后, 应及时切断电源, 给仪器加上防护罩以防沾染灰尘。

## 2. 金相试样的制备过程以及所需用的材料

### 1) 取样:

显微试样的选取应根据研究目的, 在材料具有代表性的部位截取。

- 检验和分析零件损坏原因时。应在损坏部位及完好部位同时取样, 以便作比较分析。
- 研究金属铸件时, 可能存在偏析现象, 必须在表面和中心同时取样。
- 对于轧制和锻造的材料, 应同时截取横向和纵向两个方向剖面的试样。
- 对于热处理后的零件, 由于金相组织比较均匀, 可随意截取。
- 试样的规格通常采用直径 $\Phi 12-15$ 毫米, 高12-15毫米的圆柱体或边长12-15毫米的方形试样。(参照图6—3)
- 软金属材料可用手锯或锯床切割, 硬而脆的材料可用锤击打下, 对极硬的材料可用砂轮片切割或电脉加工
- 注意: 无论用何种方法截取试样时, 均不可让试样温度过高, 以免引起金属组织的变化而影响分析结果。

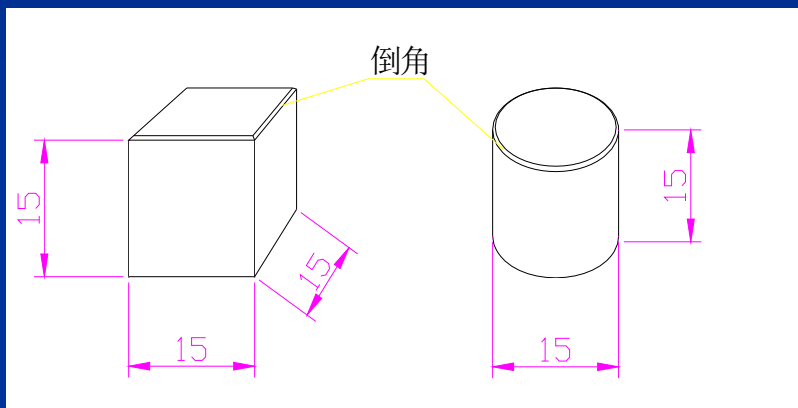


图6—3 金相试样的尺寸

### 2) 粗磨:

粗磨的目的是使试样有一个平整的表面。通常先在砂轮机上后在铁砂纸上进行。注意试样在砂轮上磨时压力不宜过大, 否则会引起试样表面产生较深的磨痕, 不利于以后细磨和抛光; 要随时用水冷却试样, 以免温度过高引起组织变化。试样边缘的棱角必须磨圆或倒角, 以免在细磨和抛光时割破砂纸和抛光布, 甚至造成试样在抛光时飞出伤人。

### 3) 细磨:

经粗磨后的试样表面仍存在较深的铁砂纸磨痕。细磨的目的就是要消除这些磨痕, 用一套金相砂纸由粗到细 (0#-06#) 依次进行磨制。细磨时将砂纸放在平整的玻璃板上, 把试样观察表面朝下, 沿着一个方向均匀用力地向前推行磨制。在回程时, 应提起试样不与砂纸接触, 以保证磨面的平整。每更换一号砂纸时, 需用脱脂棉球消除试样和玻璃板上的残留砂粒, 以免带到下一张更细的砂纸上。并且把试样的磨制方向旋转 $90^\circ$ , 即与上一道磨痕方向垂直, 再进行磨制, 直至把上道磨痕全部磨掉为止。依次类推。也可以将不同粗细规格的砂纸装在预磨机上进行磨制。



#### 4) 抛光：

细磨后的试样还需进一步抛光，以去除细磨时遗留下来的细微磨痕而得到光亮的镜面。金相试样的抛光方法一般有：机械抛光、电解抛光和化学抛光三种。

##### a. 机械抛光：

在专用的抛光机上进行。抛光机主要由电动机和抛光盘（200毫米）组成，抛光盘转速为1300-1400转/分。抛光盘上铺以细帆布、呢绒、丝绸等。抛光时在抛光盘上适量滴注抛光液（保持盘上湿润即可）。抛光液通常有Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO或Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等细粉末（粒度约为0.3-1 μm）在水中的悬浮液。机械抛光是依靠极细的抛光粉末与试样表面间产生相对磨削和滚压作用来消除磨痕的。操作时将试样磨面轻轻地压在旋转的抛光盘上，压力不可过大，并沿着中心到边缘不停地作径向往返移动。同时要保持抛光盘上有湿润的抛光液，切勿干磨。抛光结束后，试样表面应看不出任何磨痕而呈光亮的镜面。

##### b. 电解抛光

是利用阳极腐蚀法使试样表面变得平滑光亮的一种方法。操作时将试样浸入电解液中作为阳极，利用铝片和不锈钢片作为阴极。使试样与阴极之间保持20-30毫米的距离，接通直流电源。当电流密度到一定程度时，试样磨面即由于电化学反应而发生选择性溶解。从而获得平滑光亮的表面。其优点是速度快，只产生纯化学的溶解作用而无机械力的影响，因此可避免因机械力的作用引起金属表面的塑性变形，从而能更正确真实地显示金相组织。但电解抛光的工艺流程操作不易控制。

##### c. 化学抛光：

其实质与电解抛光相类似，也是一种表面溶解过程。它是将化学试剂涂在试样表面上约几秒至几分钟，依靠化学腐蚀作用使试样表面发生选择性溶解，从而获得光滑平整的表面。

#### 5) 初次观察：

经抛光后的试样在显微镜上观察时应看不到任何磨痕，否则应重做。这时因试样未经腐蚀，所以还无法看到试样的显微组织。

## 6) 浸蚀:

经抛光后的试样必须使用腐蚀剂对试样表面进行“浸蚀”，才能清楚地显示显微组织

的真实情况。钢铁材料最常用的浸蚀剂为3-4%硝酸酒精溶液或4%苦味酸酒精溶液

最常用的金相组织显示方法是化学浸蚀法。其原理是利用浸蚀剂对试样表面的化学溶解作用或电化学作用（即微电池原理）来显示组织。对于纯金属或单相合金来说，浸蚀是一个纯化学溶解过程。浸蚀后能看到暗黑色的晶粒边界。由于晶界上的原子排列比较混乱，每个晶粒原子排列方位不同，在浸蚀剂的作用下各自的溶解速度不同，故试样表面呈现出轻微的凹凸不平现象。在垂直光线的照射下，这些凹沟使射来的光线产生漫射，而呈暗色。因此在显微镜下可看到明暗不同的晶粒。

浸蚀方法：是将试样的抛光面浸入浸蚀剂中，或用脱脂棉球沾上浸蚀剂擦拭试样表面。浸蚀时间要适当，一般当试样抛光镜面发暗时即可停止浸蚀。（如浸蚀时间不足可重复浸蚀、但浸蚀时间过了需重新抛光一遍再进行浸蚀）浸蚀完毕后应立即先用清水冲洗，然后用酒精清洗，最后用吹风机吹干。这样金相试样的制备工作就完成了。即可在显微镜下进行观察和分析研究。

## 五 实验报告要求

1. 了解4X (XJB-1) 型金相显微镜的主要结构和光学原理。
2. 掌握4X (XJB-1) 型金相显微镜的操作方法及注意事项。
3. 了解金相试样制备所需用的材料。
4. 掌握金相试样的制备过程及注意事项。
5. 实验后的体会以及对此项实验的改进建议。



## 6-2 铁碳合金平衡组织观察

### 一 实验目的

1. 识别和研究铁碳合金在平衡状态下的显微组织；
2. 加深理解铁碳合金成分、组织与性能之间的相互关系。

### 二、概述

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。因其相变过程按Fe-Fe<sub>3</sub>C相图（图6—4）进行，所以，我们可以根据该相图来分析铁碳合金在平衡状态下的显微组织。

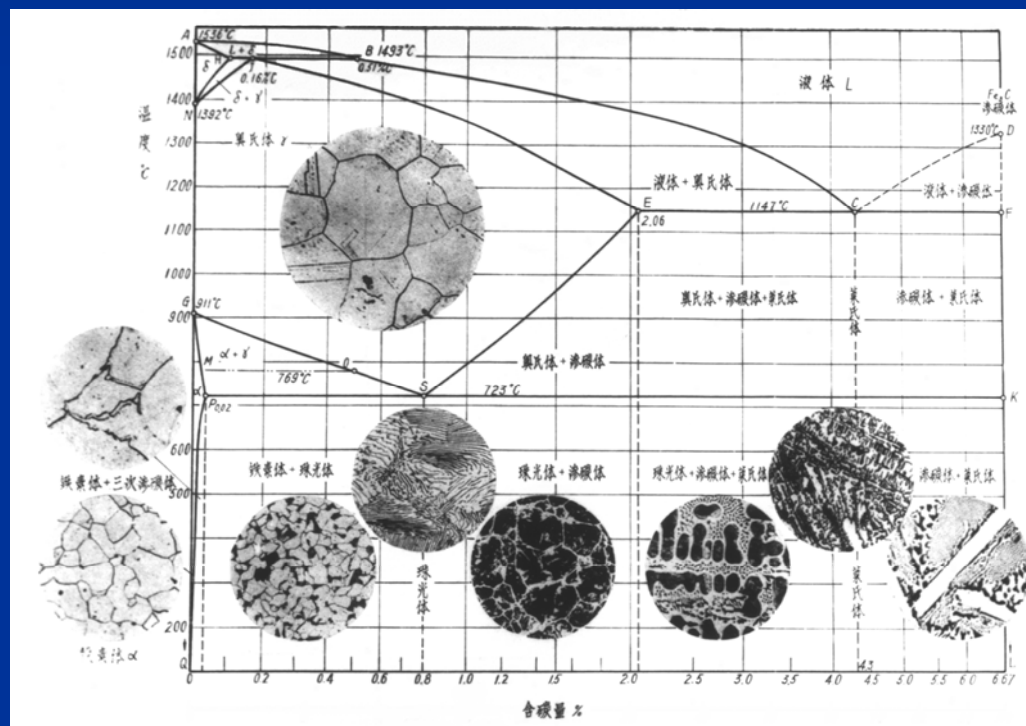


图6-4 Fe-Fe<sub>3</sub>C相图

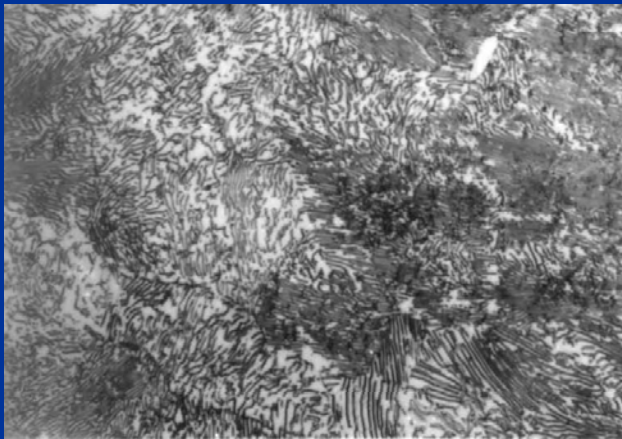
从Fe-Fe<sub>3</sub>C相图上可以看出，所有碳钢和白口铸铁的室温组织均由铁素体（F）和渗碳体（Fe<sub>3</sub>C）这两个基本相组成。但是由于含碳量不同，铁素体和渗碳体的相对数量、析出条件以及分布情况均有所不同，因而呈现各种不同的组织形态（见表6—2）。

表6—2 各种铁碳合金在室温下的显微组织

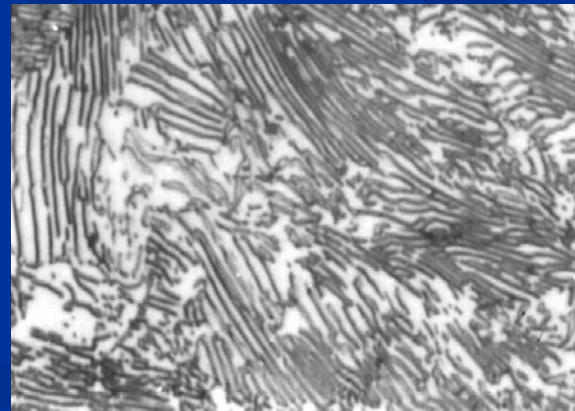
类 型		含碳量 (%)	显 微 组 织	浸 蚀 剂
工业纯铁		<0.02	铁 素 体	4%硝酸酒精溶液
碳 钢	亚共析钢	0.02~0.8	铁素体+珠光体	4%硝酸酒精溶液
	共析钢	0.8	珠 光 体	4%硝酸酒精溶液
	过共析钢	0.8~2.06	珠光体+二次渗碳体	4%硝酸酒精溶液； 苦味酸钠溶液
白口铸铁	亚共晶白口铁	2.06~4.3	珠光体+二次渗碳体+莱氏体	4%硝酸酒精溶液
	共晶白口铁	4.3	莱 氏 体	4%硝酸酒精溶液
	过共晶白口铁	4.3~6.67	莱氏体+一次渗碳体	4%硝酸酒精溶液

通过浸蚀剂显露后，可以在金相显微镜下观察到碳钢和白口铸铁的几种基本组织。

- 1) 铁素体 (F) 它是碳在  $\alpha$ -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的等轴晶粒。在亚共析钢中，铁素体呈块状分布 (图6—7)；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。
- 2) 渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 它是铁与碳形成的一种化合物，其含碳量为 6.67%。经 3—4% 硝酸酒精溶液浸蚀后，渗碳体呈亮白色。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。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的不同，渗碳体呈现不同的形态：一次渗碳体 (初生相) 是直接由液体中析出的，故在白口铸铁中呈粗大的条片状 (图6—11)；二次渗碳体 (次生相) 是从奥氏体中析出的，往往呈网络状沿奥氏体晶界分布 (图6—8)。
- 3) 珠光体 (P) 它是铁素体和渗碳体的机械混合物，在一般退火处理情况下是由铁素体和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 (如图6—5所示)。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细条渗碳体；当放大倍数较低时，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，它实际上就是渗碳体。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。



(a) 500×



(b) 1500×

图6-5 不同放大倍数下的珠光体显微组织

高碳工具钢（过共析钢）经球化退火处理后还可获得球状珠光体（图6—23）。上述各类组织组成物的机械性能见表6—3。

表6—3 各类组织组成物的机械性能

性能	硬度	抗拉强度	断面收缩率	相对延伸率	冲击韧性
组成物	HB	$\sigma_b$ (MN/m <sup>2</sup> )	$\psi$ (%)	$\delta$ (%)	$A_k$ (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 ( $Ld'$ ) 莱氏体在室温时是由珠光体、二次渗碳体和共晶渗碳体所组成的机械混合物。它是含碳量为4.3%的液态铁碳合金在1147℃共晶反应时形成的由奥氏体和渗碳体组成的共晶体，其中奥氏体在继续冷却时析出二次渗碳体，并在723℃以下分解为珠光体。因此，莱氏体的显微组织特征（如图6—10）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。二次渗碳体和共晶渗碳体连在一起，从形态上难以区分。

根据组织特征及含碳量的不同，铁碳合金分为工业纯铁、钢和铸铁三大类。

## 1. 工业纯铁

含碳量小于 0.02% 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组成。

图6-6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，而亮白色基底则是铁素体的不规则等轴晶粒。有时，在部分晶界处可以看到不连续的薄片状三次渗碳体。



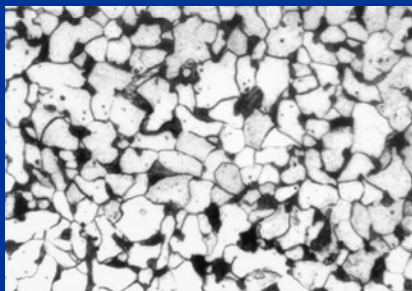
图6-6 工业纯铁的显微组织 (200×)

## 2. 钢

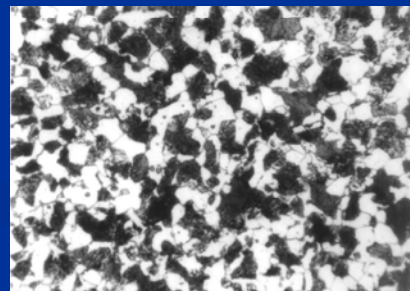
### 1) 亚共析钢

亚共析钢的含碳量在0.02%—0.8%范围内，其组织由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。图6—7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。两者的相对量可由杠杆定律求得。例如：含碳量为0.45%的钢（45钢），其珠光体的相对量为  $P(\%) = 0.45 \div 0.8 \times 100\% = 56\%$ ，铁素体的相对量为  $F(\%) = (0.8 - 0.45) \div 0.8 \times 100\% = 44\%$ 。

另外，也可通过直接在显微镜下观察珠光体和铁素体各自所占面积的百分数，近似地计算出钢的含碳量。例如：在显微镜下观察到有50%的面积为珠光体，50%的面积为铁素体，则此钢的含碳量  $C\% = 50\% \times 0.8 \div 100 = 0.4\%$ （室温下铁素体含碳量极微，约为0.0008%，可忽略不计），即相当于40钢



(a) 20钢 (200×)



(b) 45钢 (200×)

图6-7 亚共析钢显微组织

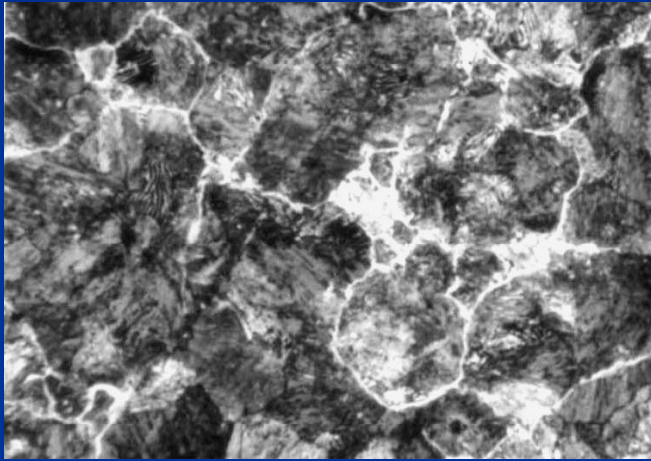


## 2) 共析钢

含碳量为0.8%的碳钢，称为共析钢，由单一的珠光体组成，其显微组织如图6—5所示

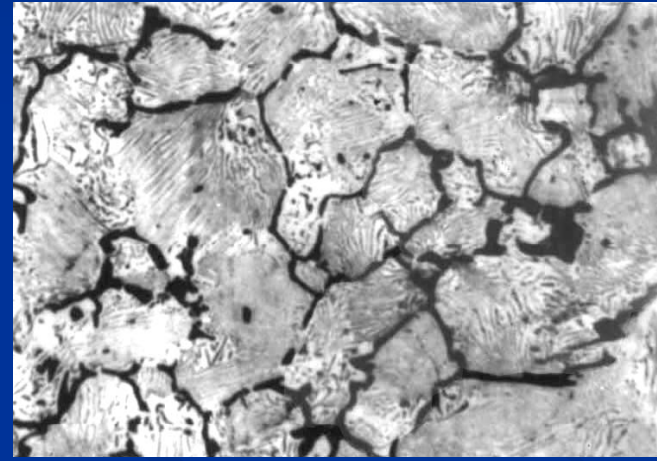
## 3) 过共析钢

含碳量超过0.8%的碳钢，称为过共析钢，它在室温下的组织由珠光体和二次渗碳体组成。钢中含碳量越多，二次渗碳体数量就越多。图6—8 (a) 为含碳量1.2%的过共析钢的显微组织。组织形态为层片相间的珠光体和二次渗碳体，经硝酸酒精溶液浸蚀后珠光体呈暗黑色，而二次渗碳体则呈白色网状。若采用苦味酸钠溶液浸蚀，网状二次渗碳体就被染成黑色，而珠光体为白色，如图6—8 (b) 所示。



(a) 400×

浸蚀剂：4%硝酸酒精溶液



(b) 400×

浸蚀剂：碱性苦味酸钠溶液

图6—8 过共析钢(T12)显微组织

### 3. 铸铁

#### 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，如图6—9所示。经硝酸酒精溶液浸蚀后，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) 共晶白口铸铁

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6—10所示。

#### 3) 过共晶白口铸铁

含碳量大于4.3%的白口铸铁称为过共晶白口铸铁。其室温下的组织由一次渗碳体和莱氏体组成，经硝酸酒精溶液浸蚀后，在显微镜下可观察到暗色斑点状的莱氏体基底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6—11所示。

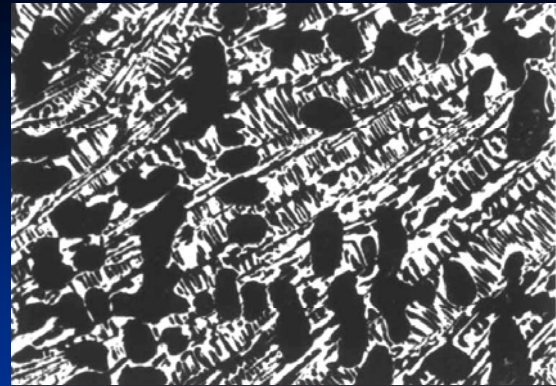


图6—9 亚共晶白口铸铁显微组织 (200×)

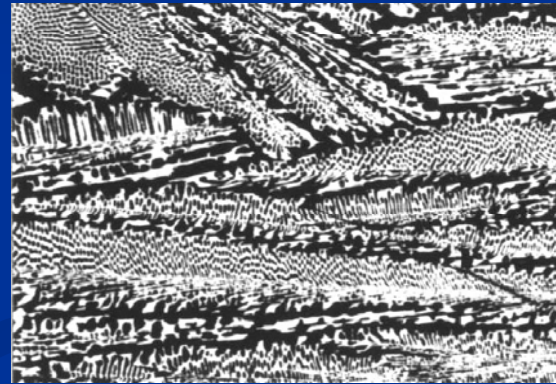


图6—10 共晶白口铸铁显微组织 (200×)

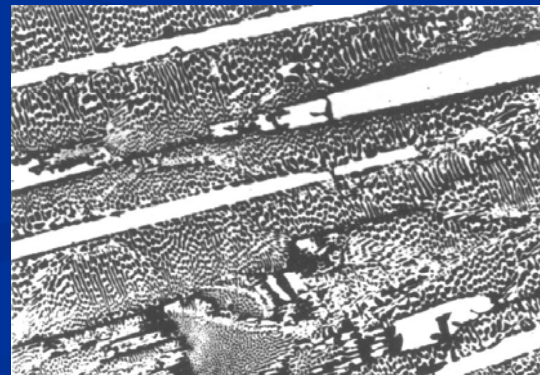


图6—11 过共晶白口铸铁显微组织 (200×)

### 三 实验设备及材料

1. 金相显微镜；
2. 金相图谱；
3. 各种铁碳合金的显微样品（见表6-4）。

表6-4 碳钢和白口铸铁的显微样品

编号	材 料	热处理	组 织 名 称 及 特 征	放大倍数
1	工业纯铁	退 火	铁素体（呈等轴晶粒）和微量三次渗碳体（薄片状）	100~400
2	20钢	退 火	铁素体（呈块状）和少量的珠光体	100~400
3	45钢	退 火	铁素体（呈块状）和相当数量的珠光体	100~400
4	T8钢	退 火	铁素体（宽条状）和渗碳体（细条状）相间交替排列	100~400
5	T12钢	退 火	珠光体（暗色基底）和细网络状二次渗碳体	100~400
6	亚共晶 白口铁	铸 态	珠光体（呈黑色枝晶状）、莱氏体（斑点状）和二次渗碳体（在枝晶周围）	100~400
7	共晶 白口铁	铸 态	莱氏体，即珠光体（黑色细条及斑点状）和渗碳体（亮白色）	100~400
8	过共晶 白口铁	铸 态	莱氏体（暗色斑点）和一次渗碳体（粗大条片状）	100~400

注： 以上样品浸蚀剂均为4%硝酸酒精溶液

## 四 实验步骤及注意事项

1. 在显微镜下观察和分析表6—4所列铁碳合金的平衡组织，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。
2. 绘出其中三种显微组织示意图。画图时，应抓住组织形态的典型特征，不要将磨痕或杂质画在图上。
3. 根据显微组织近似确定亚共析钢的含碳量：

$$C\% = (P \times 0.8 \div 100) + (F \times 0.0008 \div 100)$$

式中：P和F分别为珠光体和铁素体所占面积（%）。

## 五 实验报告要求

1. 明确本次实验目的；
2. 画出所观察的亚共析钢、共析钢和过共析钢显微组织示意图，说明材料名称，并将组成物名称用指引线注明；
3. 根据显微组织估算其中亚共析钢的含碳量；
4. 分析含碳量对铁碳合金组织和性能的影响。

## 6-3 碳钢的热处理实验

### 一 实验目的

1. 了解碳钢的基本热处理（退火、正火、淬火及回火）工艺方法；
2. 了解加热温度、冷却条件与钢性能的关系；
3. 分析淬火及回火温度对钢性能的影响。

### 二 概述

钢的热处理就是通过加热、保温和冷却三个步骤来改变其内部组织，从而获得所需性能的一种加工工艺。根据加热、保温和冷却方式的不同，钢的热处理基本工艺方法可分为退火、正火、淬火及回火等。

#### 1. 钢的退火和正火

钢的退火通常是把钢加热到临界温度 $A_{c1}$ 或 $A_{c3}$ 以上，保温一段时间，然后随炉缓慢冷却至室温，以获得接近平衡状态组织的一种热处理工艺（见图6—12）。

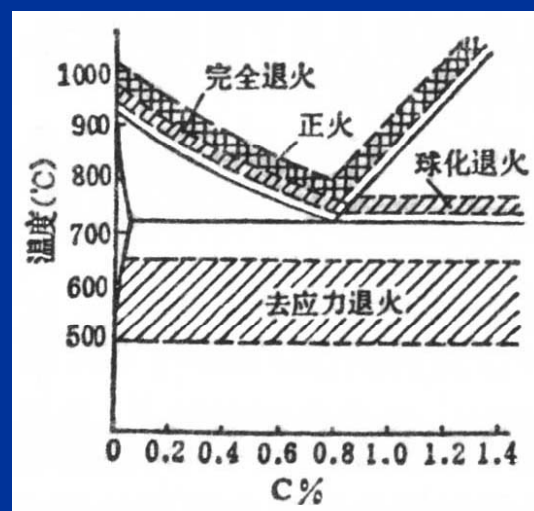


图6—12 退火和正火加热温度范围



正火是把钢加热到临界温度  $A_{c3}$  或  $A_{ccm}$  以上  $+30\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，保持一定时间后，在空气中冷却得到珠光体类型组织的热处理工艺。由于正火的冷却速度大于退火，使组织中珠光体量增多，且片层较细密。对低碳钢来说，正火后可提高硬度、改善切削加工性能，对高碳钢则正火可消除网状渗碳体，为下一步球化退火及淬火作准备。不同含碳量的碳钢在退火及正火状态下的强度和硬度值见表6-5。

表6-5 碳钢在退火及正火状态下的机械性能

性能	热处理状态	含碳量 (%)		
		$\leq 0.1$	0.2~0.3	0.4~0.6
硬度	退火	$\sim 120$	150~160	180~230
(HB)	正火	130~140	160~180	220~250
强度 $\sigma_b$	退火	300~330	420~500	560~670
(MN/m <sup>2</sup> )	正火	340~360	480~550	660~760

## 2. 钢的淬火

淬火是把钢加热到临界温度 $A_{c1}$ 或 $A_{c3}$ 以上，保温一段时间，然后放入冷却介质中快速冷却（ $V_{冷} > V_{临}$ ），以获得马氏体组织的热处理工艺。

为了正确地进行钢的淬火，必须考虑下列三个重要因素：淬火加热温度、保温时间和冷却速度。

### 1) 淬火温度的选择

淬火加热温度主要取决于钢的含碳量，可根据F—Fe<sub>3</sub>C相图来确定，如图6—13所示。

对亚共析钢，其加热温度为 $A_{c3}+30\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，在此温度下钢的组织完全为奥氏体，淬火后转变为马氏体。若加热温度低于 $A_{c3}$ ，则钢的组织由铁素体和奥氏体组成，淬火后组织中除马氏体外，尚有部分铁素体，造成强度和硬度的降低。若加热温度过高，则引起奥氏体晶粒的粗大，使淬火钢的性能变坏。

对过共析钢，其加热温度为 $A_{c1}+30\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，在此温度下能获得比较细小的奥氏体晶粒，且保留有部分渗碳体，淬火后可得到细小的马氏体和粒状渗碳体。后者的存在可以提高钢的硬度和耐磨性。若加热温度过高（如高于 $A_{cm}$ ），淬火后则会形成粗大的马氏体和过多的残余奥氏体，从而导致硬度和耐磨性能的下降。

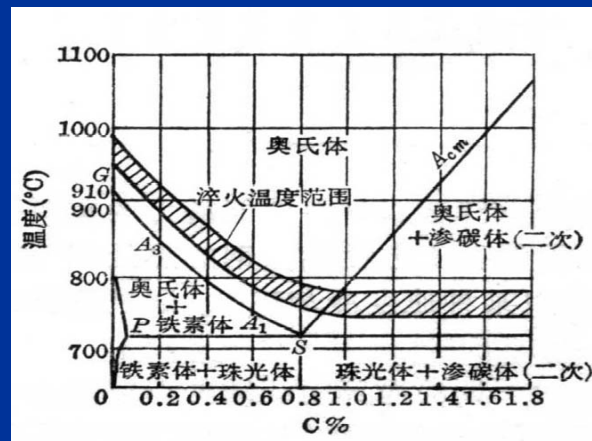


图6—13 碳钢淬火加热温度范围

不同成分碳钢的临界温度列于表6—6中。

表6—6 各种碳钢的临界温度 (近似值)

类别	钢号	临界温度 (°C)			
		$A_{c1}$	$A_{c3}$ 或 $A_{ccm}$	$A_{r1}$	$A_{r3}$
碳素结构钢	20	735	855	680	835
	30	732	813	677	835
	40	724	790	680	796
	45	724	780	682	760
	50	725	760	690	750
	60	727	766	695	721
碳	T7	730	770	700	743
素	T8	730	—	700	—
工	T10	730	800	700	—
具	T12	730	820	700	—
钢	T13	730	830	700	—

## 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。对于碳钢件，放进预先已加热至规定淬火温度的炉内加热，如果是火焰炉、电炉，所需加热及保温时间大约为1分钟/毫米直径，如果是盐浴炉则缩短1-2倍。合金钢加热时间要增加25-40 %。

## 3) 冷却速度的影响

冷却是淬火的关键工序，它直接影响到钢淬火后的组织和性能。因此，冷却时应使冷却速度大于临界冷却速度，以保证获得马氏体组织。但是，冷却速度也不能太大，以减少内应力，防止变形和开裂。通常是根据C曲线图（图6—14），使淬火工件在过冷奥氏体最不稳定的温度范围（650-550℃）进行快冷，以超过临界冷却速度，而在 $M_s$ 点（300-200℃）以下尽可能慢冷，以减少内应力。

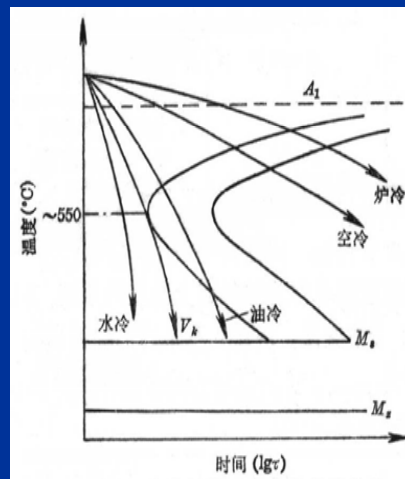


图6—14 在共析钢C曲线上估计连续冷却速度的影响

为了保证淬火质量，应选用适当的冷却介质和淬火方法。常用淬火介质的特性见表6-7

表6-7 常用淬火介质的冷却能力

冷却介质	在下列温度范围内的冷却速度 (°C/秒)	
	650~550°C	300~200°C
18°C的水	600	270
26°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%Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 水溶液 (18°C)	800	270
蒸馏水	250	200
肥皂水	30	200
菜籽油 (50°C)	200	35
矿物机器油 (50°C)	150	30
变压器油 (50°C)	120	25



### 3. 钢的回火

钢件，特别是高碳钢件经淬火得到马氏体组织时，其材质硬而脆，并且工件内部存在很大的内应力，如果直接进行磨削加工，往往会出现龟裂；一些精密的零件在使用过程中将会引起尺寸变化而失去精度，甚至开裂。因此，钢件淬火后必须进行回火处理。不同的回火工艺可使钢件获得不同的组织和性能。表6-8为45钢淬火后经不同温度回火的组织及性能。

表6—8 45钢经淬火及不同温度回火后的组织和性能

类型	回火温度(°C)	回火后的组织	回火后硬度(HRC)	性能特点
低温回火	150~250	回火马氏体+残余奥氏体+碳化物	60~57	高硬度，内应力减小
中温回火	350~500	回火屈氏体	35~45	硬度适中，弹性高
高温回火	500~650	回火索氏体	20~33	具有良好塑性、韧性和一定强度相配合的综合性能

对碳钢来说，回火工艺的选择主要是考虑回火温度和保温时间两个因素。

回火温度取决于所要求的组织和性能。各种钢材的回火温度与硬度之间的关系曲线可从有关手册中查阅。表6—9是几种常用碳钢（45、T8、T10和T12钢）不同温度回火后的硬度值。

表6—9 常用碳钢不同温度回火后的硬度值

回火温度（℃）	45钢	T8钢	T10钢	T12钢
150~200	60~54	64~60	64~62	65~62
200~300	54~50	60~55	62~56	62~57
300~400	50~40	55~45	56~47	57~49
400~500	40~33	45~35	47~38	49~38
500~600	33~24	35~27	38~27	38~28

回火保温时间与工件材料及尺寸、工艺条件等因素有关，通常为1-3小时。由于实验所用的试样较小，故回火保温时间可为20—30分钟，回火后在空气中冷却。

### 三 实验设备及材料

1. 箱式电炉及控温仪表；
2. 冷却剂：水，油（使用温度约20℃）；
3. 试样：20钢，45钢，T12钢；
4. 洛氏硬度计。

### 四 实验步骤及注意事项

1. 淬火、正火部分：
  - 1) 用三种钢（20钢，45钢，T12钢）分组进行不同加热温度和冷却方式的热处理（见表6-10）。
  - 2) 加热前先测定试样处理前的硬度。
  - 3) 确定试样的保温时间。
  - 4) 将试样放入炉内加热。
  - 5) 淬火或正火后，用砂纸磨去试样表面的氧化层，并测出硬度值。

表6—10 淬火实验

组别	淬火加热温度	冷却方式	20钢		45钢		T12钢	
			处理前硬度	处理后硬度	处理前硬度	处理后硬度	处理前硬度	处理后硬度
1	860℃	水冷						
2	860℃	油冷						
3	860℃	空冷						
4	750℃	水冷						

注：1-4组每种钢号各一块

## 2. 回火部分：

- 1) 将已正常淬火并测定了硬度的45钢分组进行不同温度的回火（见表6—11）。
- 2) 保温时间为20—30分钟，然后取出空冷。
- 3) 用砂纸磨去试样表面的氧化层，并测出硬度值。

## 3. 注意事项

- 1) 本实验所用加热炉均为电炉，所以放入、取出试样时，必须先切断电源；
- 2) 放、取试样用的夹钳或金属钩，进入炉内时不得沾有油或水；
- 3) 开启炉门时要平行移动，将内侧灼热一面朝里，防止灼伤。
- 4) 试样取出淬火时，动作要迅速，浸入淬火液后应不停地搅动，以免影响淬火质量。

表6—11 回火实验

组 别	回火温度	回火前HRC	回火后HRC
1	200℃		
2	400℃		
3	600℃		

## 五 实验报告要求

1. 明确碳钢热处理实验的目的；
2. 将各小组实验数据填入汇总表；
3. 分析加热温度与冷却速度对钢性能的影响；
4. 绘制出45钢回火温度与硬度的关系曲线；
5. 若实验数据出现错误，则分析其产生的原因。

## 6-4 金属材料的硬度试验

### 一 实验目的

1. 了解硬度测定的基本原理及应用范围；
2. 了解布氏、洛氏硬度试验机的主要结构及操作方法。

### 二 实验内容简介

#### 1. 硬度测试的原理

硬度测试的方法有很多，在科研和机械工业中广泛采用的是压入法，压入法又可分为布氏硬度（HBS）、洛氏硬度（HR）以及维氏硬度（HV）等。

压入法是用淬硬的钢球或金刚石锥体压入金属材料的表层，然后根据压痕的面积或深度来衡量其硬度值，所以金属材料的硬度表示在接触应力作用下抵抗塑性变形的能力。

#### 2. 硬度测试的应用

硬度测试在教学科研与生产实践中广泛应用。在机械零件设计图纸上对机械性能的技术要求，往往只标注硬度值。其原因主要是：

- 1) 硬度测定设备简单，操作迅速方便。
- 2) 硬度值与其他机械性能指标（如抗拉强度、疲劳强度、耐磨性等）有一定关系。通常硬度值越高，这些性能也就越好。
- 3) 硬度测定后仅在金属表面留下很小压痕，并不会损坏零件，因而也适合于成品检验。

### 三 实验设备的构造与操作步骤

#### 1. HB-3000型布氏硬度试验机

##### 1) 布氏硬度测试的基本原理

布氏硬度试验是将直径为 $D$ 的钢球，加以一定大小的检测力 $F$ ，压入被测金属表面（如图6-15所示），保持一定时间后去除检测力的一种操作。根据钢球在金属表面压出的压痕面积 $A_{凹}$ 求出平均应力值，以此作为硬度值的计量指标，单位为 $9.807\text{N}/\text{mm}^2$ 。

其计算公式如下：

$$HBS = \frac{F}{A_{凹}}$$

式中： HBS —— 布氏硬度值（钢球压头）  
F —— 检测力（N）  
 $A_{凹}$  —— 压痕面积（ $\text{mm}^2$ ）  
D —— 钢球直径（mm）  
h —— 压痕深度（mm）  
d —— 压痕直径（mm）

上式中，当检测力 $F$ 和钢球直径 $D$ 确定以后，只有压痕直径 $d$ 是变量，测出压痕直径 $d$ ，就可直接查表得出HBS值。

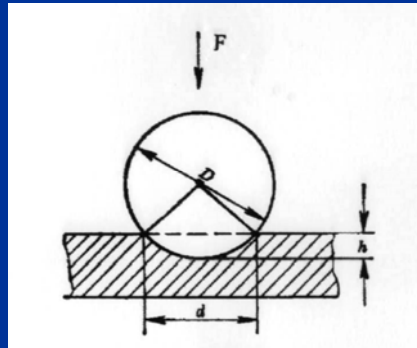


图6—15 布氏硬度试验原理图



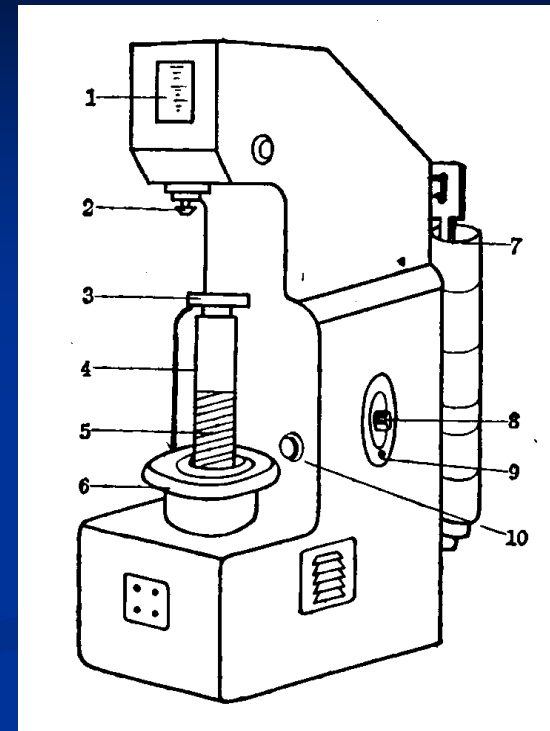
## 2) 布氏硬度试验机的结构、操作步骤及注意事项

### ① 结构 (如图6-16所示)

- a. 机体：HB-3000布氏硬度试验机的机体由铸铁铸造而成，在机体前面安装有丝杆座，其上面装有手轮6，旋转手轮可上下移动丝杆5、立柱4和工作台3。所有传动和控制部分都安装在机体内。
- b. 传动部分：由电动机通过变速箱带动曲柄连杆机构，杠杆机构，经压头2自动将载荷加到试样上。图6-16 HB-3000布氏硬度机外形结构图
- c. 控制部分：由加载按钮10启动电机，经时间定位器9与限位开关的作用，来控制电动机的旋转方向，以达到自动加载，保持一定时间后再自动卸载，电动机停止运转等一系列动作一次连续完成。

### ② 操作步骤

- a. 根据表6-12选定合适的压头钢球直径，把压头擦拭干净装入主轴套内，同时确定检测力，加上相应的砝码。
- b. 根据被测件形状安装合适的工作台。
- c. 根据表12-1，确定持续时间 $T$ ，然后将压紧螺钉8松开，把时间定位器上的红点转到与持续时间相符的位置上。
- d. 接通电源，指示灯亮，表示通电正常。
- e. 将被测试样放在工作台上，顺时针转动手轮6，使压头逐渐对试样进行加压直至手轮与下面螺母产生打滑现象为止。
- f. 按下加载按钮10，启动电动机，即开始施加检测力。由于压紧螺钉8已经拧松，盘形时间定位器9并不转动，当红色指示灯1闪亮时，迅速拧紧压紧螺钉8；带动圆盘一起回转并自动反转直至停止。（加载、持续时间、卸载一次完成）
- h. 逆时针转动手轮6降下工作台，取下试样用读数显微镜测量出压痕直径 $d$ ，即可查表得HBS值。



1—指示灯 2—压头 3—工作台 4—立柱  
5—丝杠 6—手轮 7—载荷砝码 8—压紧螺钉  
9—时间定位器 10—加载按钮

图6-16 HB-3000布氏硬度机外形结构图

表6—12 布氏硬度试验规范

材料	硬度范围 (HBS)	试样厚度 (mm)	F/D <sup>2</sup>	钢球直径 (mm)	检测力F kgf (N)	载荷保持 时间 (秒)
黑色金属		3 -- 6		10	3000(29.42kN)	
	140 -- 450	2 -- 4	30	5	750(7.355kN)	10
		< 2		2.5	187.5(1.839kN)	
	<140	> 6		10	1000(9.807kN)	
		3 -- 6	10	5	250(2.452kN)	10
		< 3		2.5	62.5(612.9N)	
铜合金与 镁合金		> 6		10	1000(9.807kN)	
	36 -- 130	3 -- 6	10	5	250(2.452kN)	30
		< 3		2.5	62.5(612.9N)	
铝合金与 轴承合金		> 6		10	250(2.452kN)	
	8 --35	3 -- 6	2.5	5	62.5(612.9N)	60
		< 3		2.5	15.6(153.2N)	

③ 注意事项

- a. 为保证精确测量压痕直径d，试样表面必须平整光洁，才能使压痕直径边缘清晰
- b. 两相邻压痕直径边缘间的距离应不小于钢球直径D。
- c. 用读数显微镜测量压痕直径d时，应在相互垂直的两个方向进行，取其平均值
- d. 为了表明试验条件，可在HBS值后标注D/F/T，如HBS 10/3000/10，即表示此硬度值是在D = 10mm，F = 3000kgf，T = 10秒的条件下得到的。

## 2. HR-150型洛氏硬度试验机

### 1) 洛氏硬度测试的基本原理 (如图6-17所示)

洛氏硬度同布氏硬度一样也属压入法, 但它是根据压痕的深度来确定其硬度值的。洛氏硬度试验所用压头有两种: 一种是 $120^\circ$ 顶角的金刚石圆锥体, 另一种是直径为 $(1/16)''$  (1.588mm) 或 $(1/8)''$  (3.175mm) 的淬火钢球, 根据金属材料软硬程度, 可选用不同的压头和载荷配合使用。具体选择可参考表6-13来确定。

表 6-13 洛氏硬度的试验规范

符号	压头	负荷 (kgf)	硬度值有效范围	使用范围
HRA	$120^\circ$ 金刚石圆锥	60	>70	适用测量硬质合金, 表面淬火层, 渗碳层。
HRB	$1/16''$ 钢球	100	25-100 (60-230 HBS)	适用测量有色金属, 退火及正火钢
HRC	$120^\circ$ 金刚石圆锥	150	20-67 (230-700 HBS)	适用测量调质钢, 淬火钢

洛氏测定时, 需要先后两次施加检测力 (初始检测力和主检测力)。初始检测力的目的是使压头与测试件表面接触良好。图6-17中的0-0为未加检测力时的压头位置; 1-1为初始检测力10kgf后的位置, 深度为 $h_1$ ; 2-2为加上主检测力 $F$ 后的位置, 深度为 $h_2$ , 包括由加载所引起的弹性变形和塑性变形, 卸除主检测力之后, 由于弹性变形恢复而稍有提高到3-3的位置, 实际压入深度为 $h_3$ 。洛氏硬度实际是以主检测力所引起的残余压入深度 ( $h = h_3 - h_1$ ) 来表示。

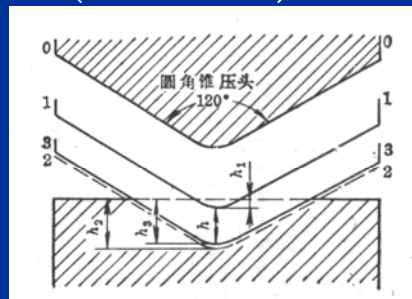


图6-17 洛氏硬度试验原理图

但这样直接以压入深度的大小来表示硬度值，将会出现金属硬的值小，而软的值大，这与布氏硬度值大小所标志的概念相矛盾。为了与习惯上数值越大，硬度越高的概念相一致，采用一常数 (K) 减去 (h) 的差值表示硬度值。为简便起见又规定每压入0.002mm深度作为一个硬度值单位（即指示盘上的一小格）。

洛氏硬度值的计算公式如下：

$$HR = K - \frac{h}{0.002}$$

式中：HR —— 洛氏硬度值；

$h_3$  —— 施加主检测力后，再卸除主检测力保留初始检测力时压头压入的深度 (mm)；

$h_1$  —— 初始检测力作用下，压头压入的深度 (mm)；

K —— 常数，当采用金刚石锥体压头时为100，当采用钢球压头时为130。

实际上，洛氏硬度计指示器上的刻度值已按上式进行换算，测定时可在刻度盘上直接读出材料的硬度值。

## 2) 洛氏硬度试验机的结构, 操作步骤以及注意事项

### ① 结构 (图6-18所示)

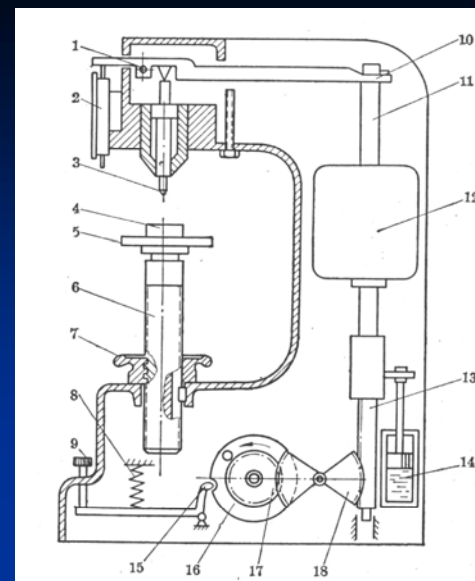
- 机体: 试验机有坚固的铸铁机体, 在机体前面安装有丝杆座, 其上面装有手轮7, 旋转时可上下移动丝杆6、试验台5。
- 加载部分: 由加载杠杆10及纵杆11等组成, 通过杠杆系统将载荷加至压头3上, 再压入试样4, 借助扇形齿轮18的传动可完成卸去载荷的作用。
- 指示表盘 (如图6-19所示): 通过指示器2可读出各种不同的硬度值

### ② 操作步骤及注意事项

- 根据试样材料预计硬度值按表6-13确定, 选择相应压头装上并调整相应载荷位置。
- 将试样被测表面用砂纸磨平并擦拭干净, 然后放在试验台5的中心。顺时针转动手轮7, 使试样缓慢与压头接触, 直至指示器2表盘内小指针转到3 (即红色刻线) 为止。此时即已加了初始载荷 (10kgf)。然后转动表盘外圈使大指针调整至0点 (HRA、HRC为0、HRB零点为30)
- 按下按钮或拉动加载手柄, 使主载荷加于压头3上, 当表盘大指针反向旋转若干格并停止后, 持续3-5秒, 再推回卸荷手柄 (即顺时针带动转盘16), 通过小齿轮17使扇齿轮18卸去主载荷。同时大指针退回若干格, 此时指针所指的刻度即为洛氏硬度值, HRA、HRC读外圈刻度数值, HRB读内圈刻度数值 (各种硬度值可查表进行换算)。
- 逆时针旋转手轮7, 降下试样台, 取下试样, 测试完毕。由于同一试样硬度不可能完全一致, 希望在不同部位进行不少于三点的测定, 然后取平均值作为测定值。

### ③ 注意事项

- 试样表面应平整光洁, 不得有氧化皮或油污以及明显的加工痕迹。
- 根据测试金属材料的硬度高低, 按表 (6-13) 确定合适的压头和主载荷
- 试样厚度应不小于压入深度的10倍。
- 两相邻压痕及边缘间的距离均不小于3mm。
- 加载时的作用力方向, 必须垂直于试样表面。



1—支点 2—指示器 3—压头 4—试样 5—试样台 6—螺杆 7—手轮 8—弹簧 9—按钮 10—杠杆 11—纵杆 12—重锤 13—齿杆 14—油压缓冲器 15—插销 16—转盘 17—小齿轮 18—扇形齿轮

图6-18 HR-150型洛氏硬度机结构图

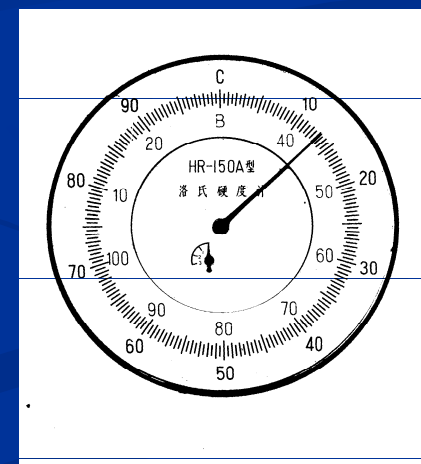


图6-19 洛氏硬度指示盘



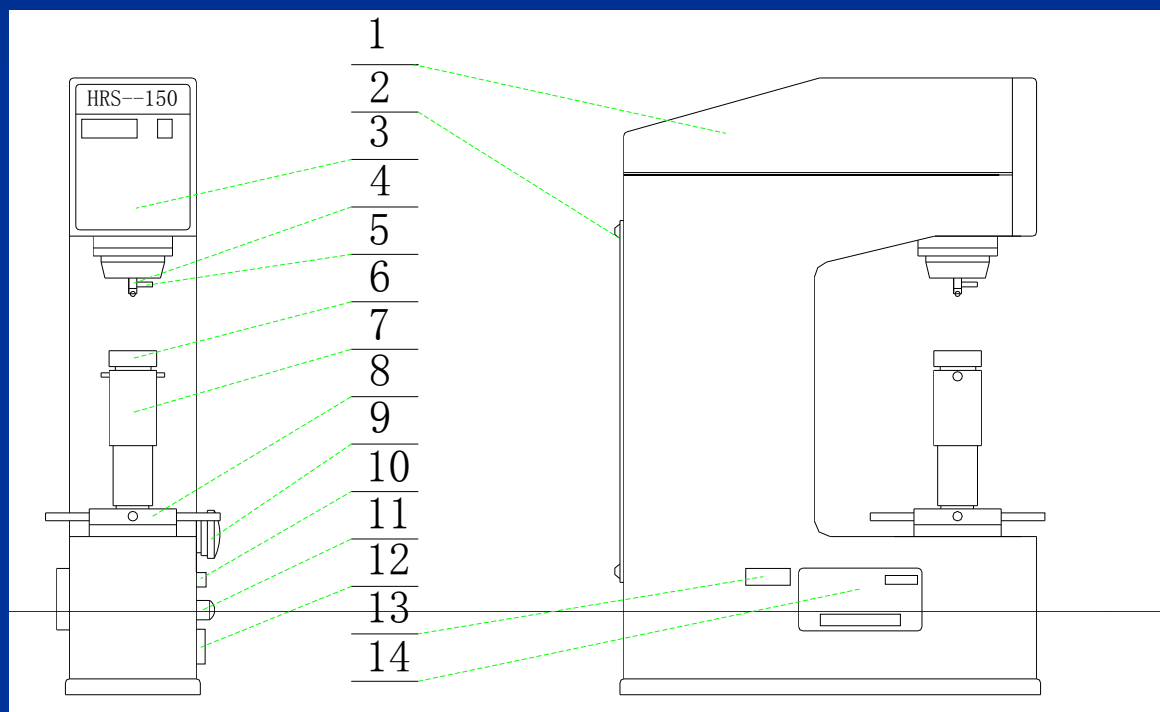
### 3. HRS—150型数显洛氏硬度计

1) 试验的基本原理 (同HR-150型洛氏硬度计)

2) 硬度计的结构、操作步骤及注意事项

① 结构 (图6—20所示)

HRS—150型数显洛氏硬度计在前述硬度计上作了较大的改进, 以新颖的外观、直观的数字显示、性能稳定和微机控制等集机电于一体的高新技术设备, 可进行多种洛氏硬度测试。并可把硬度测试结果打印输出。连接RS—232C串行通讯, 可扩展使用功能。



- 1—上盖 2—后盖 3—面板 4—压头 5—压头紧固螺钉  
6—试验台 7—保护罩 8—手轮 9—变荷手轮 10—开关  
11—保险丝 12—电源插座 13—RS-232C插座 14—面板式打印机

图6—20 HRS—150型数显洛氏硬度计结构图

## 面板功能操作介绍 (图6—21)

数显示屏 I 为硬度值显示 (HR)。

显示预选硬度测试的时间和次数等。

数显示屏 II 为硬度标尺显示，

共显示9种标尺，依次分别为：

HR (C、F、B、G、H、E、K、A、D)。

(+) 为递增键，每按一次加1

(-) 为递减键，每按一次减1

(SC) 为标尺键，洛氏硬度的9种标尺任意选用，

由数显示屏 II 显示。例如：选择A标尺，对应的588指示灯亮，一般C标尺为常用标尺，开机后自动显示。

(NO) 测试次数选择键，按此键数显示屏 I 显示为3，表示硬度测试预选为3点，若要增减请按 (+) (-) 键。次数预选不超过20次，选择结束后，再按本键复零。每次测试的第一点打印机不记录。

(LD) 为保持时间选择键，按此键数显示屏 I 显示为10，表示总试验力的保持时间预选为10秒，若要变动请按 (+) (-) 键。时间选择最多为30秒，选择结束后，再按本键复零。测试数据的平均值键。由数显示屏 I 显示。

(0) 为清零键。复位键。消除输入的全部数据。

(R) 为复位键。消除输入的全部数据。灯亮，表示测试工作已经完成，可以进行打印记录。

(OVER) 为操作完成后，指示灯亮，表示测试工作已经完成，可以进行打印记录。

(PR) 为打印输出键，只有当工作完成指示灯亮，此键才起作用可进行打印输出。

( $\bar{H}$ ) 为平均值键。由数显示屏 I 显示所有测量数据的平均值。

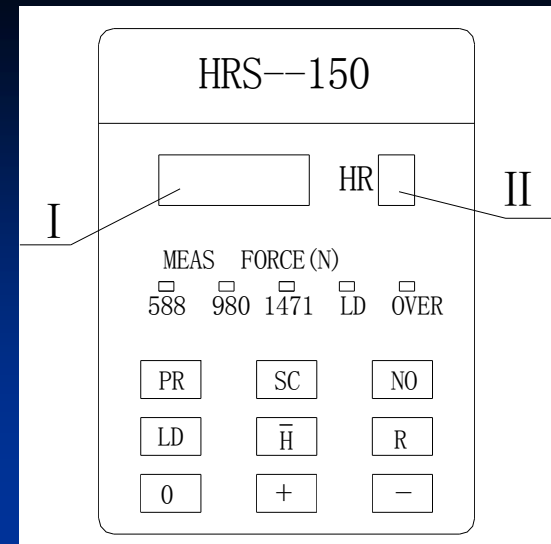


图6—21 面板图

② 操作步骤 (参照图6—20)。举例测试HRC值：

- a. 将试件放在试验台上。
- b. 接通电源12，启动开关10，面板3指示灯亮。
- c. 按 (SC) 键，选择C标尺 (C标尺开机时自动显示)，对应的总试验力1471灯亮。顺时针转动变荷手轮，确定总试验力1471N。
- d. 按 (LD) 键，选择总试验力的保持时间5秒，再按 (LD) 确定。
- e. 按 (NO) 键，选择操作次数为3次，再按 (NO) 键确定。
- f. 参照表6—14，选择压头形式并核实总试验力。安装压头并紧固压头紧固螺钉，同时调整变荷手轮校对总试验力。

表6—14 洛氏硬度试验标尺、压头、试验力及应用范围

标尺	压头	初试验力 (N)	总试验力(N)	应用范围
A	金刚石压头 圆锥角120° 顶端球面半径 0.2(mm)	1471.0	588.4	硬质合金、碳化物、表面淬火钢、硬化薄钢板
D			980.7	表面淬火钢、薄钢板
C			1471.0	淬火钢、调质钢、冷硬铸铁
F	球压头 φ1.5875(mm) (1/16" )		588.4	铸铁、铝、镁合金、退火铜合金、轴承合金、薄软钢板等
B			铸铁、铝合金、可锻铸铁、退火钢、铜合金	
G			磷青铜、铍青铜、可锻铸铁	
H	球压头 φ3.175(mm) (1/8" )		588.4	铝、锌、铅等
E			轴承合金、锡、硬塑料等软材料	
K				

- g. 顺时针转动手轮8，试验台6上升，使试件慢慢无冲击地与压头4接触，接触后显示屏 I 开始记数，数字超过500以后操作速度放慢，当数字达到600时硬度计发出蜂鸣声，表示初试验力（98.07N）已经到位，这时升降螺杆与手轮8之间自动反馈锁合。人工操作停止。电机自动施加主试验力，保持一定时间后（预先设定），电机再次转动，自动卸除主试验力，保留初试验力，蜂鸣器声响，数字显示屏 I 显示的数值即为被测试件的硬度值。（如手轮动速度过快，显示屏显示的数值超过600后，则蜂鸣器长鸣，提示操作失误，应下降试验台，改换测点重新进行测试。）
- h. 反方向旋转手轮，使试验台下降，更换测试点，重复上述操作，每次试件测试不得少于4点（因第一点不记录）。
- i. 当选择的测试次数操作完成后，（ OVER ）指示灯亮，下降试台。按平均值键  $\bar{H}$  数字显示屏 I 显示的数据即为硬度测试的平均值。
- j. 按（PR）键，测试数据即进行打印。内容举例如图6—22。
- k. 操作完毕

R	0.5	← 3点中最大值和最小值之差
HMIN	30.4	← 3点中的最小硬度值
HMAX	30.9	← 3点中的最大硬度值
AV	30.6	← 3点硬度算术平均值
N	3	← 测定次数（实际操作N+1）
AMOUNT		
03	30.9HRC	← 3点硬度测试示值
02	30.6HRC	
01	30.4HRC	

图6—22 打印数据示例

### ③ 注意事项

- a. 硬度计电源接通后，开机预热几分钟。不经常使用的硬度计，开机后在标准块上要进行多次硬度测试，稳定后才能进行零件测定。
- b. 在硬度测试过程中，严禁转动变荷手轮。
- c. 在转动手轮预加试验力时，特别注意当数字显示超过500后速度不可过快。
- d. 其余注意事项与普通洛氏硬度计相同。

### 四 实验报告要求

1. 简单叙述布氏和洛氏硬度试验的基本原理。
2. 简单叙述布氏和洛氏硬度测试的操作规程和注意事项。
3. 结合热处理实验，学会根据不同材料试样，查表选择不同的试验仪器和技术参数（如：布、洛、维氏试验机和主试验力 $F$ 、压头形式和规格、持续时间 $T$ 等技术数据）。
4. 实验后的体会和对今后实验的改进建议。



## 6-5 碳钢热处理后的显微组织观察

### 一 实验目的

1. 观察和研究碳钢经不同热处理工艺的显微组织特点；
2. 了解热处理工艺对钢组织和性能的影响。

### 二 概述

碳钢经缓冷后的显微组织基本上与Fe-Fe<sub>3</sub>C相图显示的平衡组织相符合，但在快冷条件（不平衡状态）下，其显微组织则由C曲线来确定。按照不同的冷却条件，过冷奥氏体在不同的温度范围内发生不同类型的转变。

#### 1. 钢的退火和正火组织

亚共析钢一般采用完全退火工艺，经退火后可得到接近于平衡状态的组织。

过共析成分的碳素工具钢（如T10、T12等）则常采用球化退火工艺。经球化退火后，其组织中的二次渗碳体和珠光体中的渗碳体都变成颗粒状，如图6—23所示。

由于正火的冷却速度稍大于退火的冷却速度，所以钢经正火后的组织通常比退火的细，其珠光体的相对含量也比退火组织中的多。图6—24是45钢经正火后的显微组织。

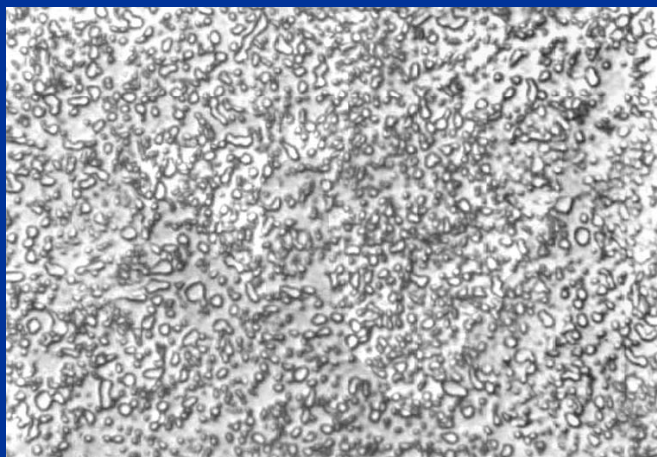


图6—23 T12钢经球化退火后的显微组织（400×）

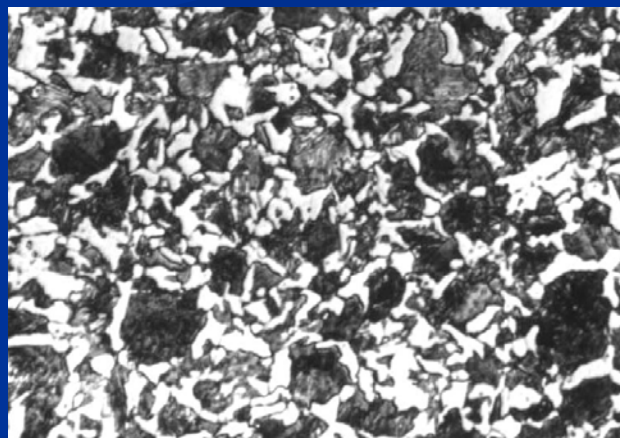


图6—24 45钢经正火后的显微组织（400×）

## 2. 钢的淬火组织

- 1) 45钢加热到正常淬火温度 ( $860^{\circ}\text{C}$ )，然后在水中冷却，将得到细针状马氏体，如图6-25所示。若将淬火温度提高到 $1000^{\circ}\text{C}$ ，则为过热淬火。由于奥氏体晶粒已粗化，故淬火后将得到粗大针状的马氏体组织，如图6—26所示。

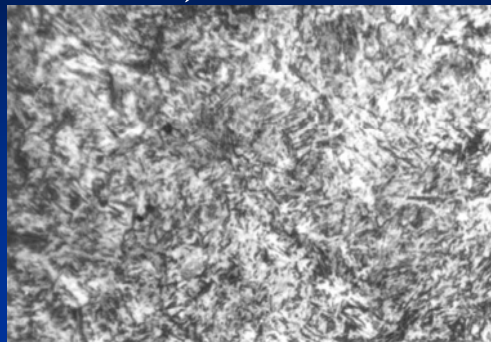


图6—25 45钢经 $860^{\circ}\text{C}$ 正常淬火后的显微组织 (400×)

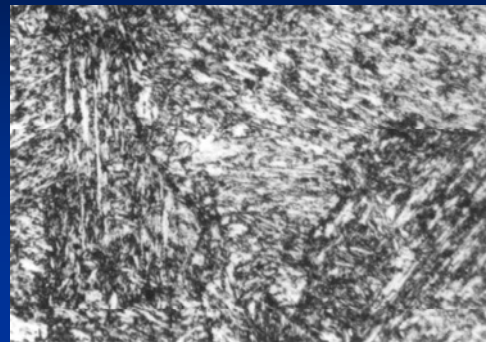


图6—26 45钢经 $1000^{\circ}\text{C}$ 过热淬火后的显微组织 (400×)

若将45钢加热到 $760^{\circ}\text{C}$ ，然后在水中冷却，则为不完全淬火。由于在此温度，部分铁素体尚未溶入奥氏体中，淬火后将得到马氏体和铁素体组织。从金相显微镜中观察到的是在暗色针状马氏体基底上分布着白色块状铁素体，如图6—27所示。

如果将45钢加热到 $860^{\circ}\text{C}$ ，然后在油中冷却，则由于冷却速度小于临界冷却速度，得到的组织将是马氏体和部分屈氏体（或混有少量贝氏体），如图6—28所示。

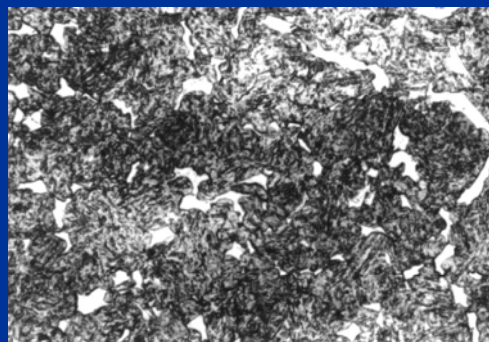


图6—27 45钢经 $760^{\circ}\text{C}$ 不完全淬火后的显微组织 (400×)

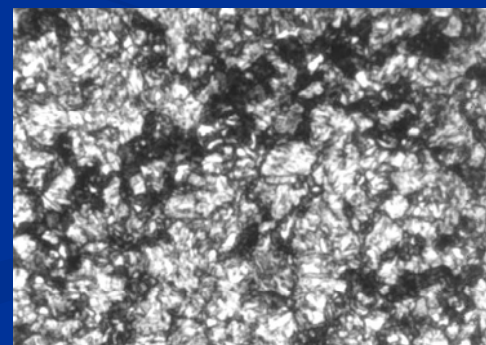


图6—28 45钢经 $860^{\circ}\text{C}$ 油淬后的显微组织 (400×)

2) T12钢在正常淬火温度 (800℃) 淬火后, 其显微组织如图6—29所示。除了细小的马氏体外, 尚有部分未溶入奥氏体中的渗碳体 (呈亮白色颗粒)。

若将T12钢在较高温度淬火, 则显微组织中出现粗大的马氏体, 而且还有一定数量的残余奥氏体 (呈亮白色) 存在于马氏体针之间, 如图6—30所示。

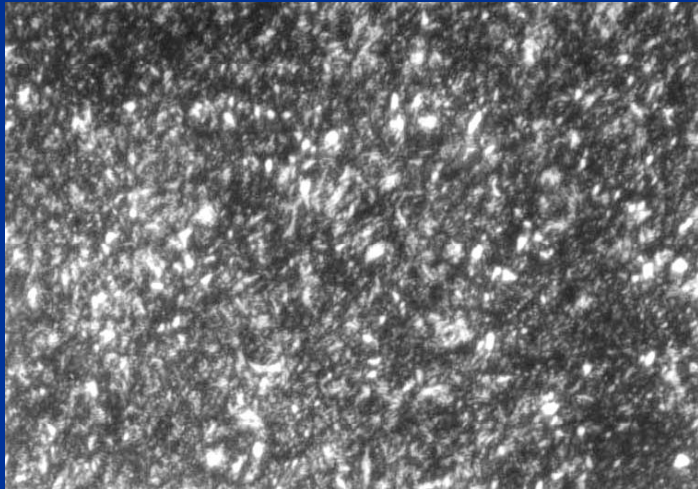


图6—29 T12钢经800℃正常淬火后的显微组织 (400×)

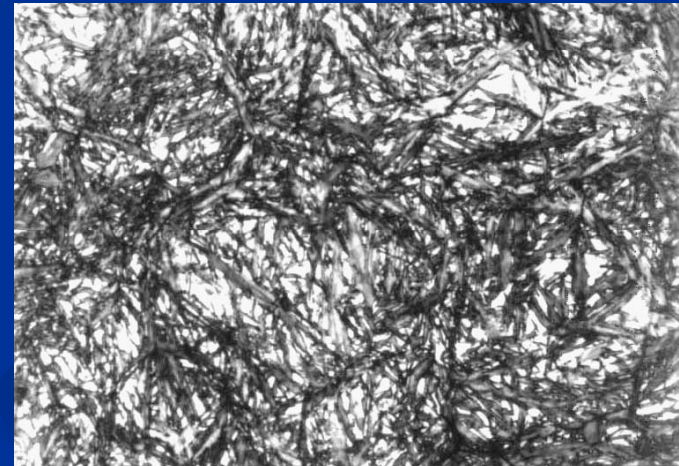


图6—30 T12钢经1000℃过热淬火后的显微组织 (400×)



### 3. 淬火后的回火组织

钢淬火后的组织为马氏体和残余奥氏体，是不稳定组织，有自发分解和转变为铁素体和渗碳体的趋势，回火加热可以促进其分解和转变。根据回火加热温度的不同，得到的回火组织也不一样。

#### 1) 回火马氏体

它是淬火钢经低温回火（150-250℃）时获得的组织。回火马氏体仍具针片状特征，但经浸蚀后，显示颜色比淬火马氏体深（见图6-31）；在电子显微镜下观察时，可见到其上分布有细小的 $\epsilon$ 碳化物。回火马氏体仍保持较高的硬度。

#### 2) 回火屈氏体

它是淬火钢经中温回火（350-500℃）后的产物，其组织为极细的颗粒状渗碳体和仍基本保持原来针片状马氏体形态的铁素体，在光学显微镜下不易分辨清楚，仅观察到暗黑的组织，如图6-32所示。在电子显微镜下观察时，可见到渗碳体质点，并可看出回火屈氏体仍保持着针片状马氏体的位向。

#### 3) 回火索氏体

淬火钢经高温回火（500-650℃）后得到的组织称为回火索氏体，其组织为铁素体基体中均匀分布着细粒状渗碳体，渗碳体的外形已较清晰，马氏体片的痕迹已消失。在电子显微镜下，可看出回火索氏体中的铁素体已不呈针片状而呈等轴状，如图6-33所



图6—31 45钢经淬火及200℃回火后的显微组织（400×）



图6—32 45钢经淬火及400℃回火后的显微组织（400×）



图6—33 45钢经淬火及600℃回火后的显微组织（400×）

表6—15 45钢和T12钢经不同热处理后的显微组织

### 三 实验设备及材料

1. 金相显微镜；
2. 金相图谱及放大的金相照片；
3. 经不同热处理的显微样品。

### 四 实验步骤及注意事项

1. 依次在指定的金相显微镜下观察整套样品。观察时注意正常淬火与不正常淬火、水淬与油淬、淬火马氏体与回火马氏体等组织的区别。
2. 画出观察到的45钢不完全淬火与正常淬火后的显微组织特征，说明材料名称，并将组成物名称用指引线注明；
3. 参照表6—15，分析45钢及T12钢的热处理工艺、显微组织等。

### 五 实验报告要求

1. 明确本次实验目的；
2. 画出几种典型的显微组织图；
3. 分析样品3与4、4与5的异同处，并说明其原因。

编号	热处理工艺	显微组织特征	放大倍数
	45钢		
1	退火：860℃炉冷	珠光体+铁素体（呈亮白色块状）	400×
2	正火：860℃空冷	细珠光体+铁素体（块状）	400×
3	淬火：760℃水冷	针状马氏体+部分铁素体（白色块状）	400×
4	860℃水冷	细针马氏体+残余奥氏体（亮白色）	400×
5	860℃油冷	细针马氏体+屈氏体（暗黑色块状）	400×
6	1000℃水冷	粗针状马氏体+残余奥氏体（亮白色）	400×
7	860℃水淬和200℃回火	细针状回火马氏体（针呈暗黑色）	400×
8	860℃水淬和400℃回火	针状铁素体+不规则粒状渗碳体	400×
9	860℃水淬和600℃回火	等轴状铁素体+粒状渗碳体	400×
	T12钢		
10	退火：760℃球化	铁素体+球状渗碳体（细粒状）	400×
11	淬火：780℃水冷	细针马氏体+粒状渗碳体（亮白色）	400×
12	1000℃水冷	粗片马氏体+残余奥氏体（亮白色）	400×