

材料专业

《金属材料制备及其组织  
性能研究》  
实验讲义

材料学院实验教学中心

# 目录

第一部分 实验一 金相观察.....	4
第一章 金相显微镜的介绍.....	4
1. 金相显微镜的光学放大原理.....	4
2. 金相显微镜的主要性能.....	5
3. 金相显微镜的构造和使用.....	8
第二章 铁碳合金的介绍.....	13
1. 工业纯铁.....	14
2. 碳钢.....	15
3. 白口铸铁.....	19
4. 铸铁.....	22
第三章 实验概述.....	27
1. 实验目的.....	27
2. 实验内容.....	27
第二部分 实验二 材料的塑性变形及回复再结晶.....	29
第一章 实验目的.....	29
第二章 原理概述.....	29
第三章 金相试样的制备.....	35
第四章 实验内容.....	37
1. 绘图.....	37
2. 制样.....	38
第三部分 实验二 热处理、金相制备、力学性能测试.....	38
第一章 热处理.....	38
1. 实验目的.....	38
2. 实验原理.....	38
3. 实验方法指导.....	43
第二章 热处理后的组织观察.....	45
1. 金相组织观察分析.....	45
2. 实验内容.....	55
第三章 钢热处理后的力学性能测试.....	57
1. 硬度试验.....	57
3. 拉伸试验.....	64
3. 冲击试验.....	71
4. 弯曲试验.....	77
第四部分 实验报告.....	84
第一章 预习报告.....	84
第二章 实验一实验报告.....	84
1. 实验目的.....	84
2. 实验内容.....	84
3. 实验结果.....	84

4.论述题.....	85
第三章 实验二实验报告.....	85
1. 实验目的.....	85
2. 实验原理.....	85
3. 实验材料及设备.....	85
4. 实验内容.....	85
5. 实验结果及分析.....	85
6. 实验思考题.....	85
第四章 实验三实验报告.....	86
1. 实验目的.....	86
2. 实验仪器、实验材料.....	86
3. 实验内容.....	86
4. 实验原理.....	86
5. 实验结果.....	86
6. 结果分析.....	90
7. 思考题.....	90

金属材料的制备及其组织性能综合实验是面向材料专业的实验课，占 16 个学时，本次实验课的主要内容分为三部分，第一部分是金相观察，观察铁碳平衡合金、各种铸铁在显微镜下的组织并绘制其组织示意图；第二部分是材料的塑性变形及回复再结晶，观察工业纯铁不同变形量下及同一变形量不同退火温度的晶粒变化，并绘制组织示意图，并对冷镶后的变形样品进行金相制备；第三部分是金属材料热处理、金相制备及热处理后机械性能测试，包括硬度、拉伸、冲击、弯曲性能测试等。

## 第一部分 实验一 金相观察

### 第一章 金相显微镜的介绍

金相显微镜是进行金属显微分析的主要工具。将专门制备的金属试样放在金相显微镜下进行放大和观察，可以研究金属组织与其成分和性能之间的关系，确定各种金属经不同加工及热处理后的显微组织；鉴别金属材料质量的优劣，如各种非金属夹杂物在组织中的数量及分布情况，以及金属晶粒度大小等。因此，利用金相显微镜来观察金属的内部组织与缺陷是金属材料研究中的一种基本实验技术。

简单地讲，金相显微镜是利用光线的反射将不透明物件放大后进行观察的。在生产与科研中，经常需要利用金相显微镜对金属材料的显微组织进行检验和分析。由于金相显微镜是借助试样表面对光线的反射来呈现显微组织状态的，所以首先要将样品观察面制成光滑平面，而后通过浸蚀使其不同组织显示出微观的凹凸不平，从而在显微镜下观察到亮暗不同的显微组织特征。为了得到合格的金相显微试样，避免因出现假象而导致错误的判断，需要掌握正确的制样方法。

下面分别介绍金相显微镜的基本原理、主要性能和使用方法。

#### 1. 金相显微镜的光学放大原理

金相显微镜是依靠光学系统实现放大作用的，其基本原理如图 1-1 所示。

光学系统主要包括物镜、目镜及一些辅助光学零件。对着被观察物体 AB 的一组透镜叫物镜  $O_1$ ；对着眼睛的一组透镜叫目镜  $O_2$ 。现代显微镜物镜和目镜都是由复杂的透镜系统所组成，放大倍数可提高到 1600-2000 倍。

当被观察物体 AB 置于物镜前焦点略远处时，物体的反射光线穿过物镜经折射后，得到一个放大的倒立实像  $A' B'$ （称为中间像）。若  $A' B'$  处于目镜焦距之内，则通过目镜观察到的物像是经目镜再次放大的虚像  $A'' B''$ 。由于正常人眼观察物体时最适宜的距离是 250mm（称为明视距离），因此在显微镜设计上，应让虚像  $A'' B''$  正好落在距人眼 250mm 处，以使观察到的物体影像最清晰。

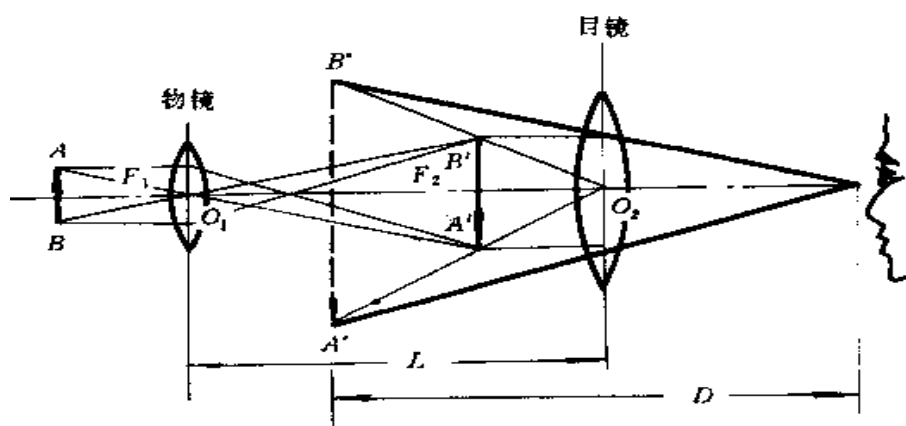


图 1-1 金相显微镜的光学放大原理示意图

## 2. 金相显微镜的主要性能

### (1) 放大倍数

显微镜的放大倍数为物镜放大倍数  $M_{物}$  和目镜放的乘积即：

$$M = M_{物} \times M_{目} = \frac{L}{f_{物}} \cdot \frac{D}{f_{目}}$$

式中， $f_{物}$ —物镜的焦距， $f_{目}$ —目镜的焦距； $L$ —显微镜的光学镜筒长度； $D$ —明视距离(250mm)。  $f_{物}$ ， $f_{目}$ 越短或  $L$  越长，则显微镜的放大倍数越高。有的小型显微镜的放大倍数需再乘一个镜筒系数，因为它的镜筒长度比一般显微镜短些。显微镜的主要放大倍数一般是通过物镜来保证。物镜的最高放大倍数可达 100 倍，目镜的放大倍数可达 25 倍。在物镜和目镜的镜筒上，均标注有放大倍数。放大倍数常用符号“×”表示，如 100×，200×等。

## (2) 鉴别率

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

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

$$d = \frac{\lambda}{2A}$$

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

## (3) 物镜的数值孔径

物镜的数值孔径表示物镜的聚光能力，如图 1-2 所示。数值孔径大的物镜聚光能力强，能吸收更多的光线，使物象更清晰。数值孔径  $A$  可由下式计算：

$$A = n \cdot \sin \phi$$

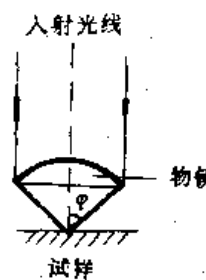


图 1-2 物镜孔径角

式中  $n$ —物镜与试样之间介质的折射率； $\phi$ —物镜孔径角的一半，即通过物镜边缘的光线与物镜轴线所成夹角。

$n$  越大或  $\phi$  越大，则  $A$  越大，物镜的鉴别率就越高。由于  $\phi$  总是小于  $90^\circ$  的，所以在空气介质 ( $n=1$ ) 中使用时， $A$  一定小于 1，这类物镜称干系物镜。若

在物镜与试样之间充满松柏油介质 ( $n=1.52$ )，则  $A$  值最高可达 1.4，这就是显微镜在高倍观察时用的油浸系物镜 (简称油镜头)。每个物镜都有一个额定  $A$  值，与放大倍数一起标到在物镜镜头上。

#### (4) 放大倍数、数值孔径、鉴别率之间的关系

显微镜的同一放大倍数可由不同倍数的物镜和目镜组合起来实现，但存在着如何合理选用物镜和目镜的问题。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：

$$d \times M = 0.15 - 0.30 \text{mm}$$

$$d = \frac{\lambda}{2A}$$

$$\text{则 } M = \frac{1}{\lambda} (0.3 \sim 0.6) A$$

在常用光线的波长范围内，上式可进一步简化为：

$$M \approx 500A - 1000A$$

所以，显微镜的放大倍数  $M$  与物镜的数值孔径之间有一定关系，其范围称有效放大倍数范围。在选用物镜时，必须使显微镜的放大倍数在该物镜数值孔径的 500 倍至 1000 倍之间。若  $M < 500A$ ，则未能充分发挥物镜的鉴别率。若  $M > 1000A$ ，则由于物镜鉴别率不足而形成“虚伪放大”，细微部分仍分辨不清。

#### (5) 透镜成像的质量

单片透镜在成像过程中，由于几何条件的限制及其它因素的影响，常使影像变得模糊不清或发生变形现象，这种缺陷称为像差。由于物镜起主要放大作用，所以显微镜成像的质量主要取决于物镜，应首先对物镜像差进行校正。普通透镜成像的主要缺陷有球面像差、色像差和像域弯曲三种。

##### ① 球面像差

如图 1-3 所示，当来自  $A$  点的单色光 (即某一特定波长的光线) 通过透镜后由于透镜表面呈球曲面，折射光线不能交于一点，从而使放大后的影像变得模糊不清。

为降低球面像差，常采用由多片透镜组成的透镜组，即：将凸透镜和凹透

镜组合在一起(称为复合透镜)。由于这两种透镜的球面像差性质相反,因此可以相互抵消。除此之外,在使用显微镜时,也可采取调节孔径光阑的方法,适当控制入射光束粗细,让极细一束光通过透镜中心部位,这样可将球面像差降至最低限度。



图 1-3 球面像差示意图

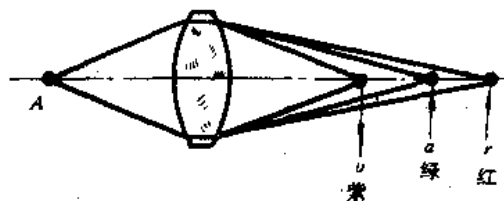


图 1-4 色像差示意图

## ② 色像差。

如图 1-4 所示,当来自 A 点的白色光通过透镜后,由于组成白色光的七种单色光的波长不同,其折射率也不同,使折射光线不能交于一点。紫光折射最强,红光折射最弱,结果使成像模糊不清。

为消除色像差,一方面可用消色差物镜和复消色差物镜进行校正。消色差物镜常与普通目镜配合,用于低倍和中倍观察;复消色差物镜与补偿目镜配合,用于高倍观察。另一方面可通过加滤色片得到单色光。常用的滤色片有蓝色、绿色和黄色等。

## ③ 象域弯曲。

垂直于光轴的平面,通过透镜所形成的像,不是平面而是凹形的弯曲像面,这种现象叫像域弯曲,如图 1-5 所示。像域弯曲是由于各种像差综合作用的结果。一般物镜或多或少地存在着像域弯曲,只有校正极佳的物镜才能达到趋近平坦的象域。

# 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,但最常见的型式有台式、立式和卧式三大类。其构造通常均由光学系统、照明系统和机械系统三大部分组成,有的显微镜还附带照像装置和暗场照明系统等。现以国产 XJB-1 型金相显微镜为例进行说明。



XJB-1 型金相显微镜的光学系统如图 1-5 所示。由灯泡 1 发出一束光线，经聚光透镜组 2 的会聚和反光镜 8 的反射，聚集在孔径光栏 9 上，然后经过聚光镜 3，再度将光线聚集在物镜的后焦面上，最后光线通过物镜，使试样表面得到充分均匀的照明。从试样反射回来的光线复经物镜组 6、辅助透镜 5、半反射镜 4、辅助透镜 11 以及棱镜 12 和棱镜 13，形成一个倒立放大实像。该物像再经场透镜 14 和目镜 15 的放大，即得到所观察试样表面的放大图像。

**照明系统** 在底座内装有一个低压 (6v-8v, 15w) 灯泡作为光源，灯泡前安装有聚光镜、反光镜和孔径光栏 15。视场光栏 14 和另一聚光镜则安在支架上。通过以上一系列透镜及物镜本身的作用，试样表面获得了充分均匀的照明。

**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。转动粗调手轮 6，可以通过内部齿轮带动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 传动内部齿轮，使其沿着滑轨缓慢移动。在右侧手轮上刻有分度格，每小格表示镜座上下微动 0.002mm。与刻度盘同侧的齿轮箱上刻有两条白线，用以指示微动升降的极限位置，微调时不可超出这一范围，否则会损坏机件。

**载物台(样品台)** 用于放置金相试样。载物台和下面托盘之间有导架。移动结构采用粘性油膜联结。用手推动，可引导载物台在水平面上作一定范围的移动，以改变试样的观察部位。

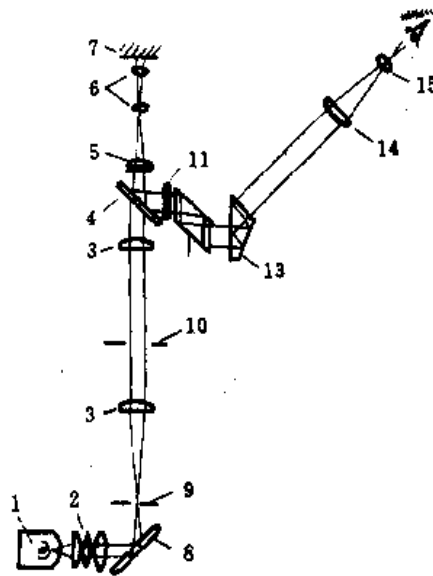


图 1-5 XJB-1 型金相显微镜的光学系统

1-灯泡；2-聚光镜组，3-聚光镜组，4-一半反射镜，5-辅助透镜，6-物镜组，7-试样，8-反光镜；9-孔径光栏；10-视场光栏，11-辅助透镜，12-棱镜，13-棱镜，14-场镜，15-目镜

XJB—1 型金相显微镜的外形结构如图 1-6 所示。各部件的功能及使用简要介绍如下：

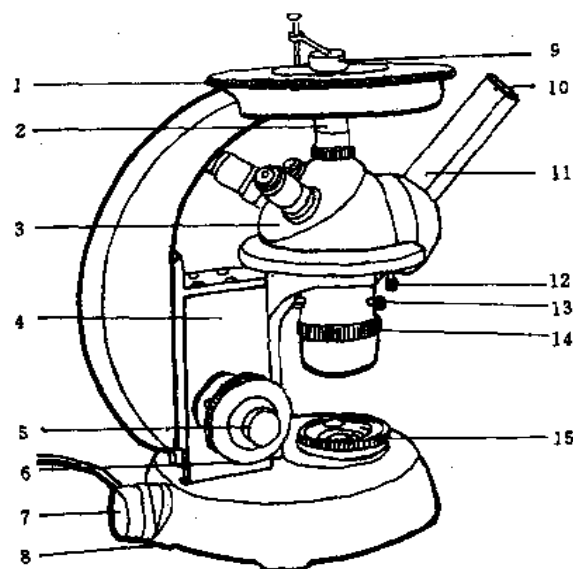


图 1-6 XJB—1 型金相显微镜外形结构图

1—载物台, 2—物镜, 3—转换器, 4—传动箱, 5—微动调焦手轮, 6—粗动调焦手轮, 7—电源。8—偏心圆, 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

**孔径光栏和视场光栏** 孔径光栏装在照明反射镜座上面, 刻有 0—5 分刻线, 它们表示孔径大小的毫米数。调整孔径光栏能控制入射光束的粗细, 以降低球面像差。视场光栏装在物镜支架下面, 可以调节视场范围, 使目镜中所见视场照亮而无阴影。在套圈上有两个调节螺钉, 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, 并定位在光轴上。

**目镜筒** 目镜筒呈 45 度倾斜安装在附有棱镜的半球形座上。目镜可转向 90 度呈水平状态以配合照相装置进行金相显微摄影。

图 1-7 所示为 4XA 型双目金相显微镜的结构图。其基本结构与 XJB—1 型金相显微镜相似, 但配有双筒目镜管, 可同时安装两个目镜。用双目观察, 从而减轻了眼睛疲乏。图 1-8 为 4XCE 型三目金相显微镜的结构图, 可以在计算机显示器上很方便地观察金相图像, 从而对金相图谱进行分析、评级等对图片进行输出、打印。

电脑型金相显微镜(4XCE)配置为: 1、金相显微镜 2、适配镜 3、摄像器(CCD) 4、A/D(图像采集) 5、计算机。

而数码相机型金相显微镜(4XCZ): 1、金相显微镜 2、适配镜 3、数码相机(NIKON)。另外, 其载物台的水平移动是靠纵向手轮和横向手轮来实现的, 定位更加准确。



图 1-7 4XA 型金相显微镜



图 1-8 4XCE 金相显微镜

## (2) 金相显微镜的使用方法及注意事项

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

### A. 金相显微镜的使用规程

- a) 将显微镜的光源插头接在低压(6—8V)变压器上，接通电源。
- b) 根据放大倍数，选用所需的物镜和目镜，分别安装在物镜座上 and 目镜筒内。旋动物镜转换器，使物镜进入光路并定位(可感觉到定位器定位)。
- c) 将试样放在样品台中心，使观察面朝下并用弹簧片压住。
- d) 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(但不得与之相碰)，然后反向转动粗调手轮，使镜筒渐渐下降以调节焦距。当视场亮度增强时，再改用微调手轮调节，直到物像最清晰为止。
- e) 适当调节孔径光阑和视场光阑以获得最佳质量的物像。
- f) 若使用油浸系物镜，可在物镜前透镜上滴一些松柏油，也可将松柏油直接滴在试样上；油镜头用后，应立即用棉花沾取二甲苯溶液擦净后用擦镜纸擦干。

### B. 注意事项

- a) 操作应细心，不能有粗暴和剧烈动作。严禁自行拆卸显微镜部件。
- b) 显微镜的镜头和试样表面不能用手直接触摸。若镜头中落入灰尘，可用镜头纸或软毛刷轻轻擦试。
- c) 显微镜的照明灯泡必须接在 6—8V 变压器上，切勿直接插入 220V 电源，以免烧毁灯泡。
- d) 旋转粗调和微调手轮时，动作要慢，碰到故障应立即报告，不能强行用力转动，以免损坏机件。

### C. 测微目镜的校正

在进行脱碳层深度检验、晶粒度评级及夹杂物定量分析等工作时，需要用测微目镜对组成物的尺寸进行测量。测微目镜是在普通目镜光阑上(即初像焦面上)装一个按 0.1mm 或 0.5mm 等分度的测微玻璃片。使用前，应用物镜测微尺对其进行校正。物镜测微尺是刻有按 0.01mm 分度的玻璃尺，尺的刻度全长 1mm，

具体校正方法如下：

将物镜测微尺作为被观察物体置于样品台上，刻度面朝物镜。用测微目镜观察，并调节其旋钮，使物镜测微尺的若干刻度  $n$  与测微目镜上若干刻度  $m$  对齐，如图 1-9 所示。由于已知物镜测微尺每小格为 0.01mm，所以测微目镜中每小格所量度的实际长度为：

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

在图 1-9 中，物镜测微尺上的 10 格 (相当于  $0.01\text{mm} \times 10 = 0.1\text{mm}$ ) 与测微目镜的 50 格对齐，所以测微目镜内每小格所量度的实际长度为：

$$\alpha = \frac{10}{50} \times 0.01 = 0.002 (\text{mm})$$

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

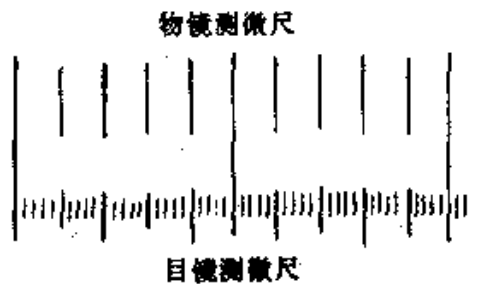


图 1-9 测微目镜刻度校正

## 第二章 铁碳合金的介绍

碳钢和铸铁是以 Fe、C 两种元素为基本组元的合金，常称为铁碳合金 (Fe-C 合金)。铁碳合金是现代工业，尤其是机械制造工业中用量最大、用途最广、最重要的工程材料。不同成分的铁碳合金从液态缓慢冷却至室温后，会结晶成不同的平衡组织，并表现不同的性能。为此，按其含碳量及组织状况可将铁碳合金系分为工业纯铁、钢、白口铸铁、灰铸铁几种类型。

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。

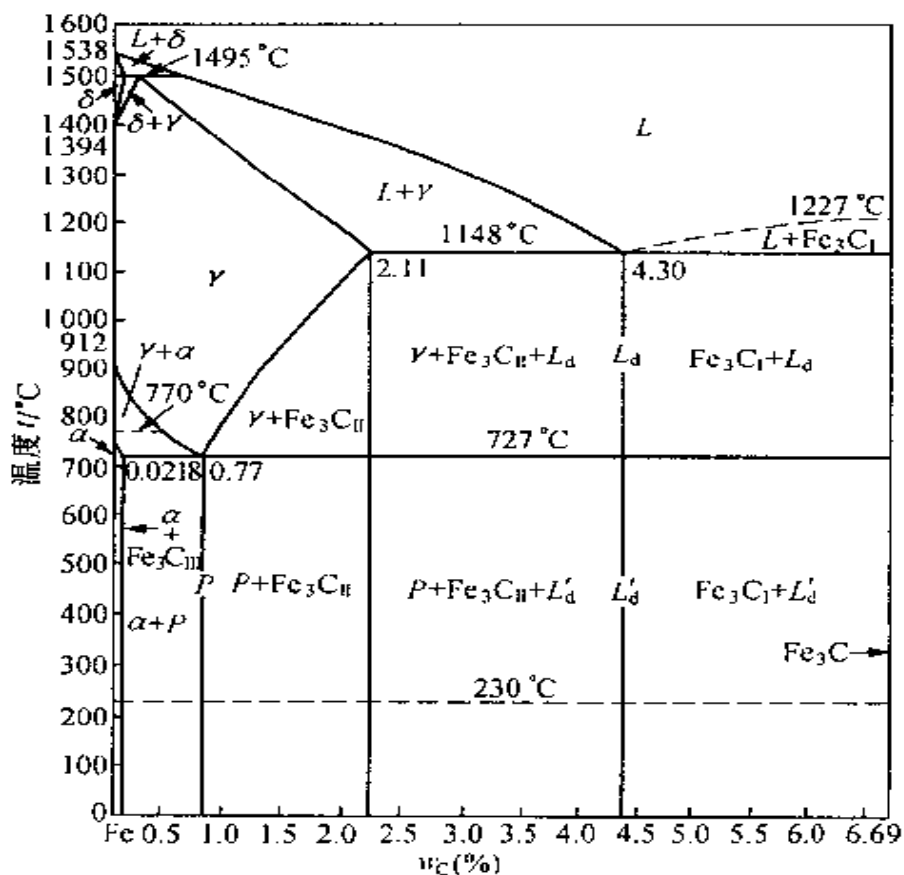


图 2-1 按组织分区的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

## 1. 工业纯铁

工业纯铁指室温的平衡组织几乎全部为铁素体的铁碳合金，其显微组织如图 2-2 所示，工业纯铁的显微组织中，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。此类合金的  $W_c < 0.02\%$ ，位于 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图 P 点成分以左的区域。工业纯铁仅适合作为某些电工材料。

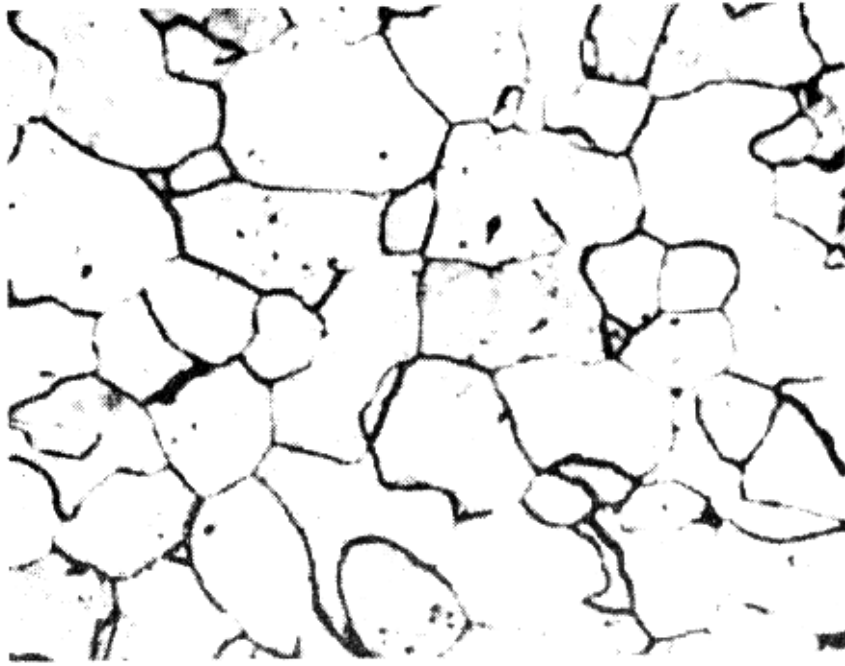


图 2-2 工业纯铁的显微组织 (300×) 浸蚀剂: 4%硝酸酒精溶液

## 2. 碳钢

碳钢是指高温固态组织可为单相奥氏体的一类铁碳合金, 其  $W_c=0.02\% \sim 2.11\%$ , 位于 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中 P 点与 E 点成分之间。此类合金具有良好的塑性, 适合锻造、轧制等压力加工。

碳钢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, 因而呈现各种不同的组织形态。

碳钢在金相显微镜下具有的几种基本组织。

(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

(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  
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。

(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。经硝酸酒精浸蚀后可观察到以下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 2-3)，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 2-4)，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。

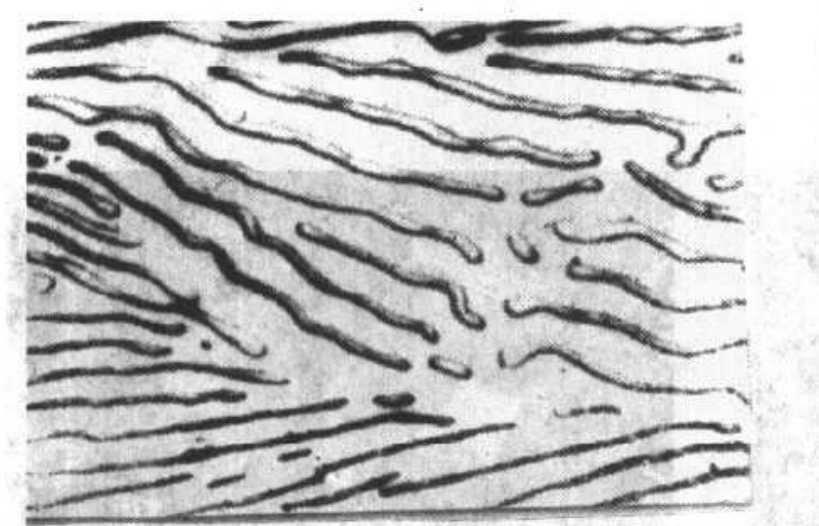


图 2-3 片状珠光体显微组织 2000× (电镀)

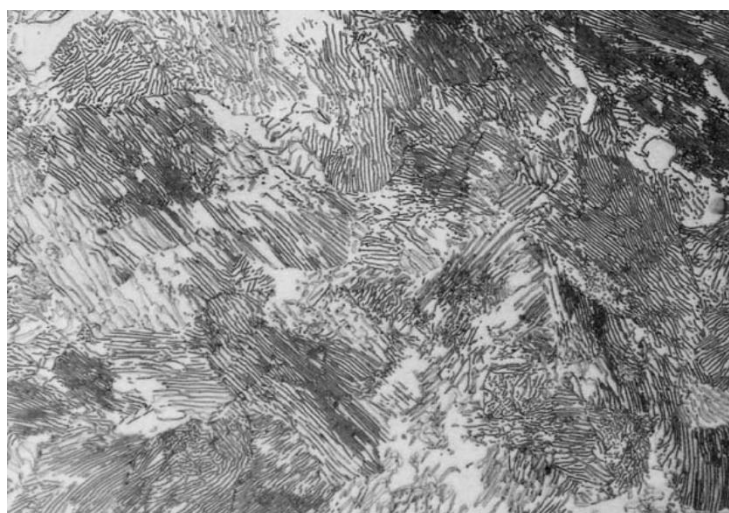


图 2-4 片状珠光体显微组织 500×,浸蚀剂: 4%硝酸酒精溶液



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 2-5。

上述各类组织组成物的机械性能见表 2-1。

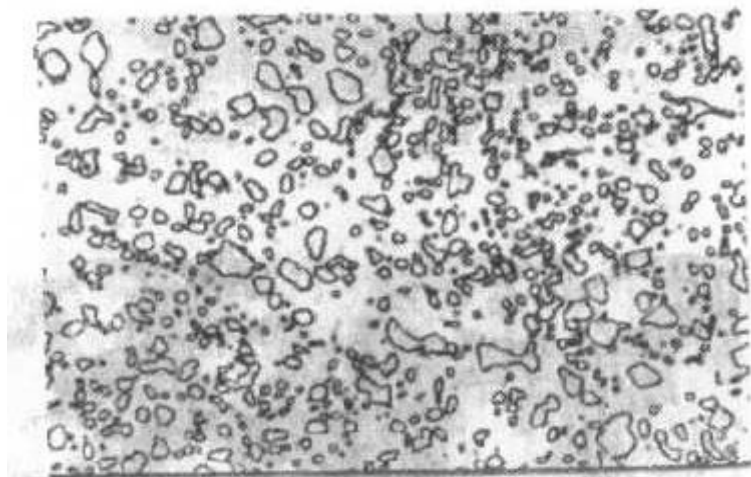


图 2-5 T12 钢球状珠光体显微组织 500×,浸蚀剂: 4%硝酸酒精溶液

表 2-1 各类组织组成物的机械性能

性能 组织物	硬 度	抗拉强度	断面收缩率	相对延伸率	冲击韧性
	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

根据室温组织的不同，碳钢可分为以下三类：

### (1) 亚共析钢

亚共析钢是指室温下的平衡组织为铁素体与珠光体的铁碳合金，其  $W_c=0.02\% \sim 0.77\%$ ，位于 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图 P 点与 S 点成分之间。

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，图 2-6 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。

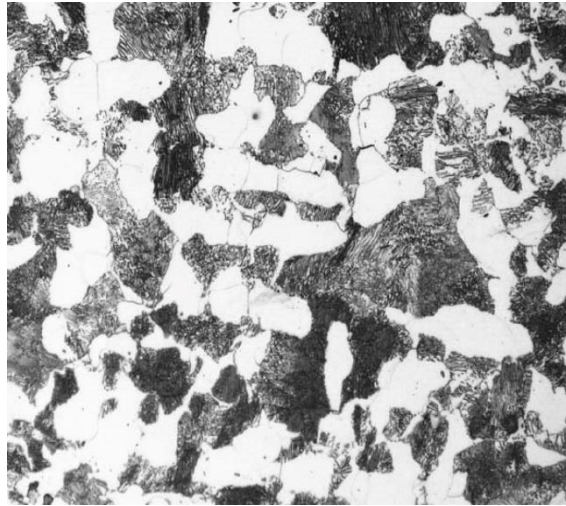


图 2-6 亚共析钢显微组织 500×,浸蚀剂: 4%硝酸酒精溶液

## (2) 共析钢

共析钢是指室温下的平衡组织仅为珠光体的铁碳合金, 其  $W_c=0.77\%$ , 即为 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图 S 点成分的合金。

其组织为珠光体, 如图 2-7 所示

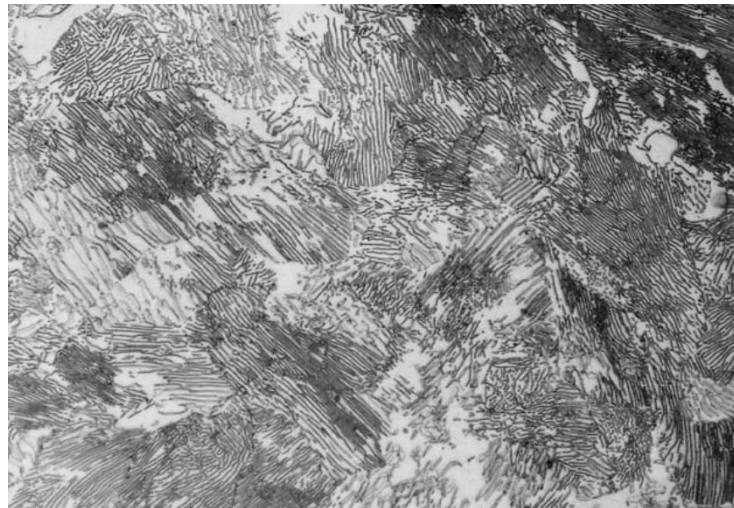


图 2-7 共析钢显微组织 300×,浸蚀剂: 4%硝酸酒精溶液

## (3) 过共析钢

过共析钢是指室温下的平衡组织为珠光体与二次渗碳体的铁碳合金, 其  $W_c=0.77\% \sim 2.11\%$ , 位于 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图 S 点与 E 点成分之间。

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 2-8 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 2-8 过共析钢体显微组织 500×,浸蚀剂: 4%硝酸酒精溶液

### 3. 白口铸铁

白口铸铁是指液态结晶时都有共晶反应且室温下的平衡组织中皆含有变态莱氏体的一类铁碳合金,因其断口白亮而得名。此类合金的  $W_c=2.11\% \sim 6.69\%$ , 位于 E 点成分以右, 熔点较低, 流动性好, 便于铸造成形; 但因其组织中总含有一定量的莱氏体, 硬度高、脆性大、故不能进行锻造、轧制等压力加工, 也不易切削加工。

变态莱氏体(L'd) 莱氏体(Ld)是由奥氏体和渗碳体组成的机械混合物。其形态为奥氏体均匀分布在渗碳体基体上。变态莱氏体(L'd)是莱氏体中的奥氏体通过共析反应转变为珠光体的莱氏体, 是由珠光体和渗碳体组成的机械混合物。其形态为珠光体均匀分布在渗碳体基体上。

L'd 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，L'd 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或细条状的珠光体。

在变态莱氏体中有共晶渗碳体、二次渗碳体和珠光体。在平衡状态时它们的相对量分别为：

$$\begin{aligned} \text{Fe}_3\text{C}_{\text{共晶}} \% &= \frac{4.3 - 2.11}{6.69 - 2.11} \times 100\% = 47.8\% \\ \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}} \% &= \frac{6.69 - 4.3}{6.69 - 2.11} \times \frac{2.11 - 0.77}{6.69 - 0.77} \times 100\% = 11.8\% \\ \text{F}\% &= \left( \frac{6.69 - 4.3}{6.69 - 2.11} - 11.8\% \right) \times \frac{6.69 - 0.77}{6.69 - 0.0218} \times 100\% = 4.53\% \\ \text{P}\% &= \frac{6.69 - 4.3}{6.69 - 2.11} - 11.8\% = 40.4\% \end{aligned}$$

式中，F%是珠光体中铁素体的含量，一般情况下不进行单独计算。

白口铸铁根据室温组织的不同分为以下三类：

### (1) 亚共晶白口铸铁

亚共晶白口铸铁是指室温下平衡组织具有变态莱氏体、珠光体与二次渗碳体的铁碳合金，其  $W_c = 2.11\% \sim 4.3\%$ ，位于 C 点成分以左。

在室温下亚共晶白口铸铁的组织为珠光体、二次渗碳体和变态莱氏体，如图 2-9 所示。用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。

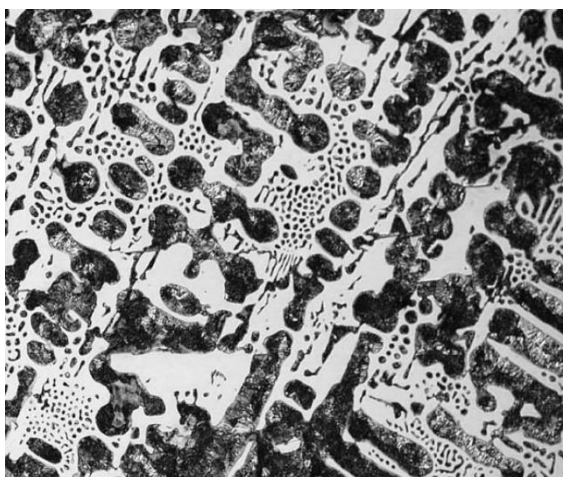


图 2-9 亚共晶白口铁 500×, 浸蚀剂: 4%硝酸酒精溶液

## (2) 共晶白口铸铁

共晶白口铸铁是指室温下平衡组织仅为变态莱氏体的铁碳合金，其  $W_c=4.3\%$ ，即为 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图 C 点成分合金。

它在室温下的组织由单一的共晶变态莱氏体组成。经浸蚀后，在显微镜下，珠光体呈暗黑色细条或斑点状，共晶渗碳体呈亮白色，如图 2-10 所示。

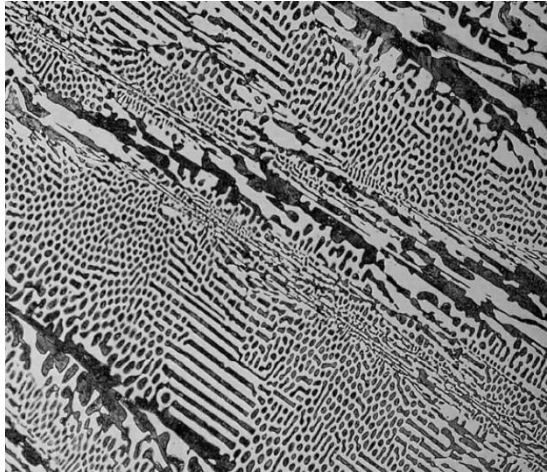


图 2-10 共晶白口铁 500×，浸蚀剂：4%硝酸酒精溶液

## (3) 过共晶白口铸铁

过共晶白口铸铁是指室温下平衡组织为变态莱氏体和一次渗碳体的铁碳合金，其  $W_c=4.3\% \sim 6.69\%$ ，位于 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图 C 点成分以后。

在室温时的组织由一次渗碳体和变态莱氏体组成。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变态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 2-11 所示。

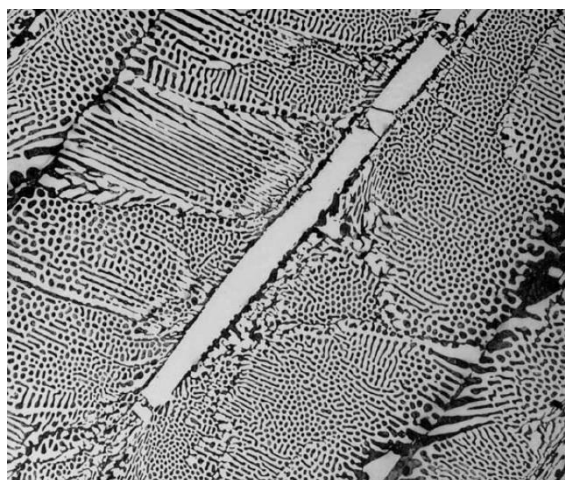


图 2-11 过共晶白口铁 500×，浸蚀剂：4%硝酸酒精溶液

## 4. 铸铁

铸铁是碳质量分数大于 2.11%、并常含有较多的硅、锰、硫、磷等元素的铁碳合金。用于制造机床的床身、床头箱、发动机的汽缸体、机器的底座等，是工程上最常用的金属材料之一。铸铁中的碳主要以石墨的形式存在。石墨不是金属，没有反光能力，所以在显微镜下与基体截然不同，未经浸蚀即可看到其呈灰黑色。由于石墨硬度很低，脆性大，在磨制的过程中很容易从基体中脱落，因此在显微镜下看到的仅是石墨存在的空洞。

灰口铸铁室温下的平衡组织具有铁素体、珠光体，或是二者皆有的基体，且基体上分布着不同形态石墨的铁碳合金，其断口呈暗灰色， $W_c > 2.11\%$ 。

根据石墨形态的不同，灰口铸铁可分为普通灰铸铁（石墨呈片状），球墨铸铁（石墨呈小球状），可锻铸铁（石墨呈团絮状），蠕墨铸铁（石墨呈蠕虫状）。

### (1) 普通灰铸铁

普通灰铸铁中石墨呈片状，由于石墨片对钢基体产生的割裂作用，破坏了钢基体的连续性、完整性，减少了钢基体的有效面积，使其抗拉强度低于钢、而塑性和韧性近于零，属于脆性材料，灰铸铁具有非常优良的铸造性能，其抗压强度与钢相近，因此普通灰铸铁广泛用于作承受压力载荷的零件和结构，如机座、机床床身、轴承等。

灰铸铁有铁素体+石墨、珠光体+石墨、(铁素体+珠光体)+石墨三种基本组织，其显微组织如下图 2-12、2-13、2-14 所示：



图 2-12 F+片状 G (100×)



图 2-13 F+P+片状 G (200×)

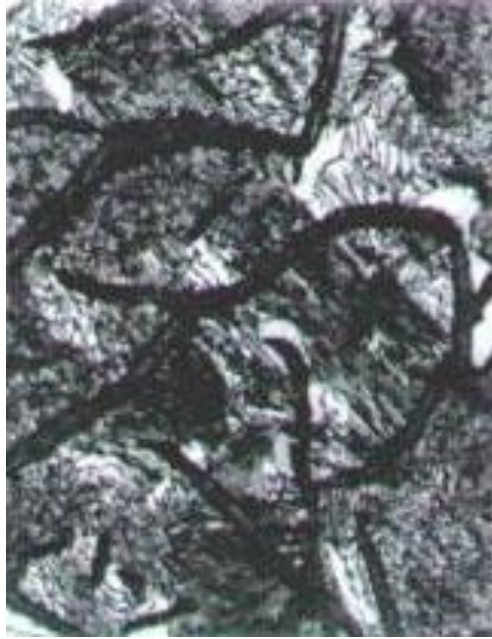


图 2-14 P+片状 G (300×)

## (2) 球墨铸铁

球墨铸铁是经过球化处理及孕育处理后而获得的一种铸铁，其基体上分布着细小的球状石墨。它是在浇注前的铁液中加入一定量的球化剂和孕育剂而获得的。球墨铸铁组织中的石墨呈球状，故对金属的割裂与损伤作用远小于片状石墨，从而具有比片墨铸铁高得多的强度、更好的塑性与韧性，在一些受力复杂、综合性能要求较高、无较大冲击力的场合下，可用球墨铸铁取代某些钢件，如汽车和拖拉机的曲轴、凸轮轴，某些机床的主轴、轧钢机的轧轴等。

球墨铸铁的显微组织也有三种类型：铁素体+球状石墨、珠光体+球状石墨、(铁素体+珠光体)+球状石墨，其显微组织如下图 2-15 所示：



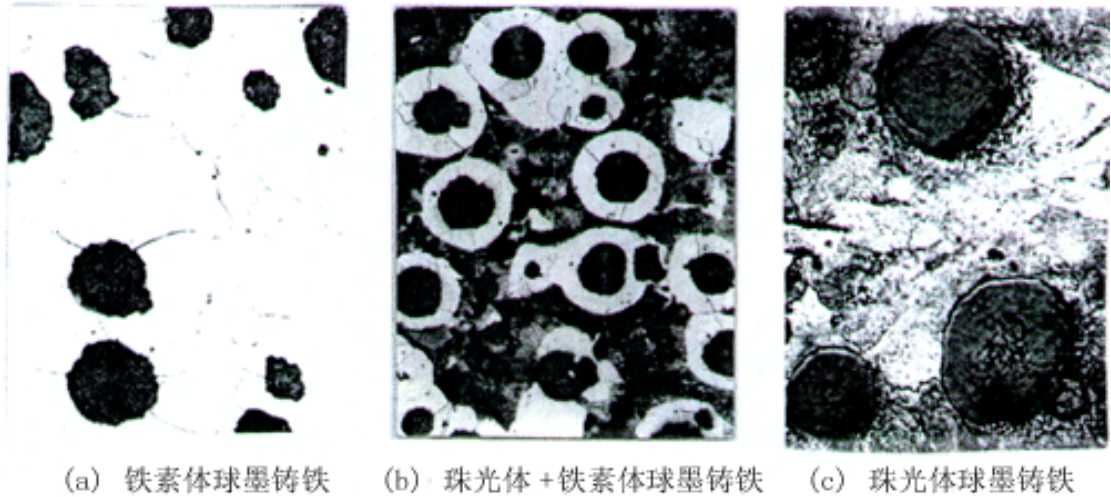


图 2-15 球墨铸铁的显微组织

### (3) 可锻铸铁

可锻铸铁是将白口铸铁经过长时间石墨化退火处理后而获得的一种铸铁，其组织中的石墨呈团絮状（由于此石墨化过程是在固态下进行的，石墨的长大速度在各方向上大致相同，故石墨呈团絮状）。

可锻铸铁中的石墨呈团絮状，减弱了对基体的割裂作用，故其强度比片墨铸铁高，其塑性、韧性比片墨铸铁好。

可锻铸铁分为黑心可锻铸铁和珠光体可锻铸铁，其显微组织分别为铁素体+团絮状石墨、珠光体+团絮状石墨，如下如 2-16、2-17 所示：

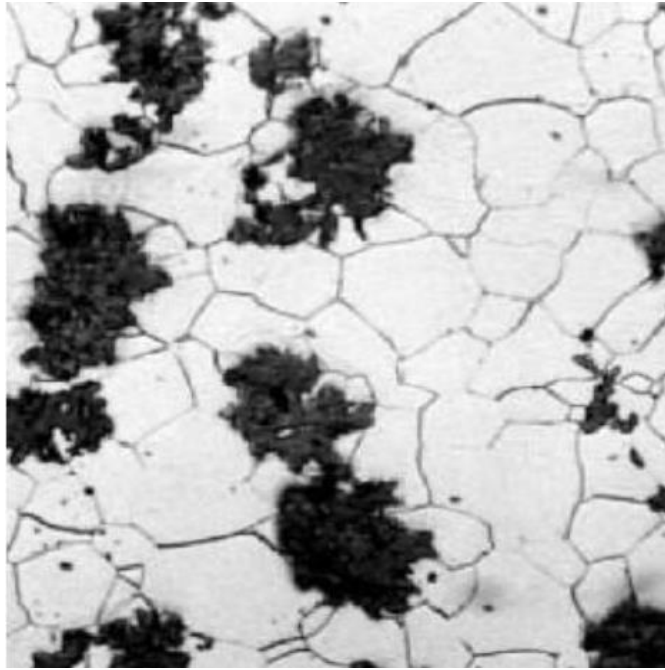


图 2-16 黑心可锻铸铁 F+团絮状 G (200×)



图 2-17 珠光体可锻铸铁 P+团絮状 G (200×)

#### (4) 蠕墨铸铁

蠕墨铸铁是经过蠕化处理和孕育处理后而获得的一种新型的铸铁。通常在铁液中加入稀土硅钙合金进行蠕化处理，然后加入少量的孕育剂以促进石墨化，使铸铁中的石墨具有介于片状和球状之间的过度形状（石墨片厚而短，两端圆钝）。

蠕墨铸铁是一种新型高强铸铁材料。它的强度接近于球墨铸铁，并且有一定的韧性、较高的耐磨性；同时又有和灰口铸铁一样的良好的铸造性能和导热性，可应用于高层建筑中高压热交换器、内燃机汽缸和缸盖、汽缸套、钢锭模、液压阀等铸件。

蠕墨铸铁的显微组织是由蠕虫状石墨和钢的基体组成。与片状石墨相比，蠕虫状石墨的长度与厚度的比值明显减小，在大多数情况下，蠕墨铸铁组织比较容易得到铁素体基体。其显微组织如图 2-18 所示：



图 2-18 蠕墨铸铁显微组织 F+蠕虫状石墨 ( $\times 100$ )

## 第三章 实验概述

### 1. 实验目的

1. 识别碳钢、白口铸铁平衡状态下的显微组织特征及其相与组织组成物的分布规律。
2. 明确化学成分与组织变化间的关系，加深对 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图的理解。
3. 熟悉各种铸铁在室温时的显微组织，观察各种铸铁中石墨的形态。进一步加深理解石墨的形态、数量、大小以及分布情况对铸铁力学性能的影响。

### 2. 实验内容

1. 在显微镜下观察和分析表 3-1、3-2 中铁碳合金的平衡组织，熟悉铁碳合

金在平衡状态时的显微组织，分析含碳量对铁碳合金显微组织的影响，理解成分、组织与性能之间的相互关系。

表 3-1 铁碳合金平衡组织

材料	状态	组织	说明
工业纯铁	退火	铁素体	黑色线条是铁素体的晶界、而亮白色基体是铁素体
20 钢	退火	铁素体+珠光体	亮白色为铁素体，暗黑色为珠光体
T8 钢	退火	珠光体	暗黑色为珠光体
T12 钢	退火	珠光体+渗碳体	珠光体呈暗黑色，二次渗碳体则呈白色网状
亚共晶白口铸铁	铸态	珠光体 + 二次渗碳体 + 变态莱氏体	黑色树枝状组织为珠光体，白色网状组织为渗透体，黑白斑点状组织为变态莱氏体
共晶白口铸铁	铸态	变态莱氏体	黑白斑点状组织为变态莱氏体
过共晶白口铸铁	铸态	变态莱氏体 + 一次渗碳体	黑白斑点状组织为变态莱氏体，白色带条状组织为一次渗碳体

3-2 铸铁的平衡组织

材料	状态	组织	说明
灰口铸铁	铸态	片状石墨	黑色片状组织为石墨，基体未腐蚀
可锻铸铁	可锻化退火	团絮状石墨	团絮状黑色组织为石墨，基体未腐蚀
球墨铸铁	退火	球状石墨+铁素体	白色晶粒为铁素体，黑色球状为石墨
球墨铸铁	低温正火	球状石墨+铁素体+珠光体	白色晶粒为铁素体，层状组织为珠光体，黑色球状为石墨

球墨铸铁	正火	球状石墨+珠光体	层状组织为珠光体，灰色球状为石墨
------	----	----------	------------------

2. 在直径为 50mm 的圆内画出所观察样品的显微组织示意图(用箭头和代表符号标明各组织组成物，并注明样品成分、浸蚀剂，放大倍数)

## 第二部分 实验二 材料的塑性变形及回复再结晶

### 第一章 实验目的

- (1) 了解冷变形对金属组织和性能的影响；
- (2) 了解加热温度对冷变形金属组织和性能的影响；
- (3) 了解变形量对再结晶后晶粒大小的影响。

### 第二章 原理概述

#### 1. 光学金相显微镜下滑移带，变形孪晶与退火孪晶的特征

当外力超过弹性极限时，金属除继续发生弹性变形外同时又开始发生塑性变形。

塑性变形的的基本方式有滑移和孪晶两种，最常见的是滑移。所谓滑移即在切应力作用下晶体的一部分沿一定的晶面和晶向相对于另一部分产生滑动。所沿晶面和晶向称为滑移面和滑移方向。

(1)滑移带 经过表面抛光的金属单晶体或晶粒粗大的多晶体试样，经拉伸（或压缩）塑性变形后放在光学显微镜下观察，在抛光的晶体表面上可见到许多互相平行的线条，称为滑移带。如图 4-1 所示。

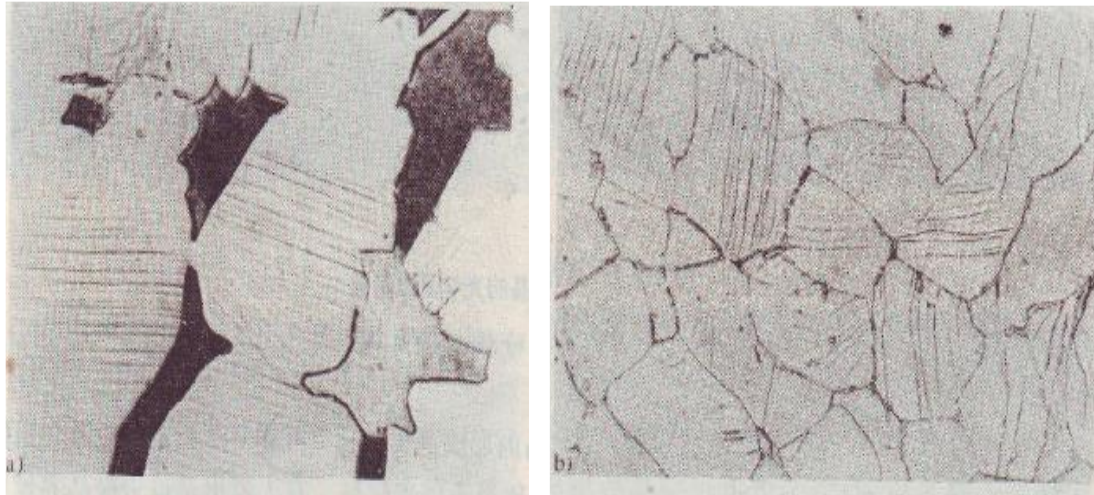


图 4-1 滑移带的光学显微形貌

a 黄铜的滑移带 600× b 纯铁的滑移带 400×

由图可见，纯铁的滑移带特征与黄铜的略有不同，往往呈波纹状，这主要是由于纯铁本身层错能较高，其扩展位错容易束集，加之体心立方晶体可进行滑移的晶面多，因而产生大量交滑移的缘故。

如果用电子显微镜作高倍观察，会发现每条滑移带（光学显微镜下的每根线条）是由许多密集在一起的滑移线群所组成。实际上，每条滑移线表示晶体表面上因滑移而产生的一个小台阶，而滑移带是小台阶垒积的大台阶。正因为晶体晶体表面有这些台阶的出现才显示出上述的微观形貌。如果将这些小台阶磨掉，即使重新抛光并浸蚀也看不出滑移带，因为滑移面两侧的晶体位向不随滑移而改变，故只能借助晶体表面出现的小台阶来观察。

（2）变形孪晶 孪生通常是晶体难以进行滑移时而发生的另一种塑性变形方式。以孪生方式变形的结果将产生孪晶组织。而面心立方晶体中一般难以见到变形孪晶，而在密排六方晶体中比较容易见到。因为密排六方晶体的滑移系少，塑性变形经常以孪生方式进行。图 4-2a 为锌的变形孪晶，其形貌特征为薄透镜状。纯铁在低温下受到冲击时容易产生变形孪晶，其形貌如图 4-2b 所示。在这种条件下萌生孪晶并长大的速度大大超过了滑移速度。

如果将变形孪晶试样重新磨制，抛光，浸蚀，是否如同滑移带那样也会消失呢？并不是这样的，实际上孪晶试样都是经过上述制备过程而得到的。这是因为孪生变形后，在孪生面的侧面的晶体位向并不相同，切变部分的晶体与未切变部分的晶体相对于孪生面呈镜面对称，如图 4-3 所示。

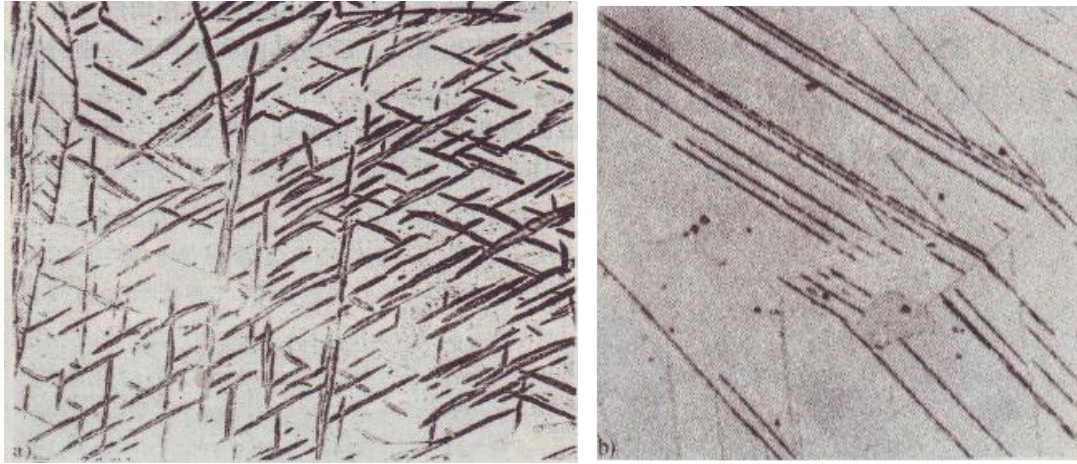


图 4-2 变形孪晶的光学显微形貌  
a 锌的孪晶 100× b 纯铁的孪晶 100×

(3) 退火孪晶 某些金属材料退火后在晶内形成退火孪晶（纯铜，单相铜合金及奥氏体不锈钢中经常出现）。关于退火孪晶的形成机理尚无完善解释，有人提出是退火时晶界推移过程中形成的，晶粒越粗大孪晶也越发展。

退火孪晶的形态和变形孪晶的形态完全不同，如图 4-4 所示。两条直线互相平行，表明它们属于共格晶界。

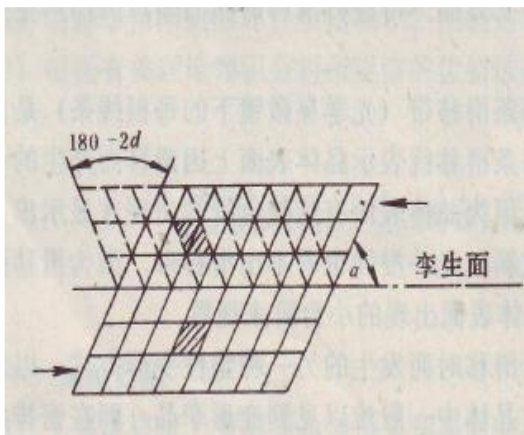


图 4-3 孪生变形

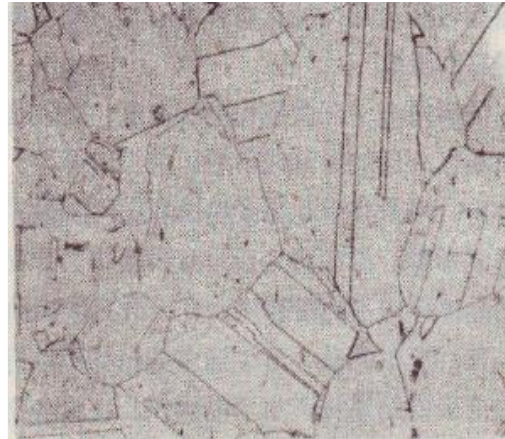


图 4-4 纯铜的退火孪晶

## 2. 冷加工对金属组织和机械性能的影响

金属材料发生冷变形后，不仅外形发生变化，内部组织也发生变化。随着变形量的增加，原来的等轴晶粒将沿受拉方向逐渐伸长，当变形量达到一定程度时，各个晶粒难以分辨呈现出一片纤维状的条纹，称为纤维组织，如图 4-5 所示。

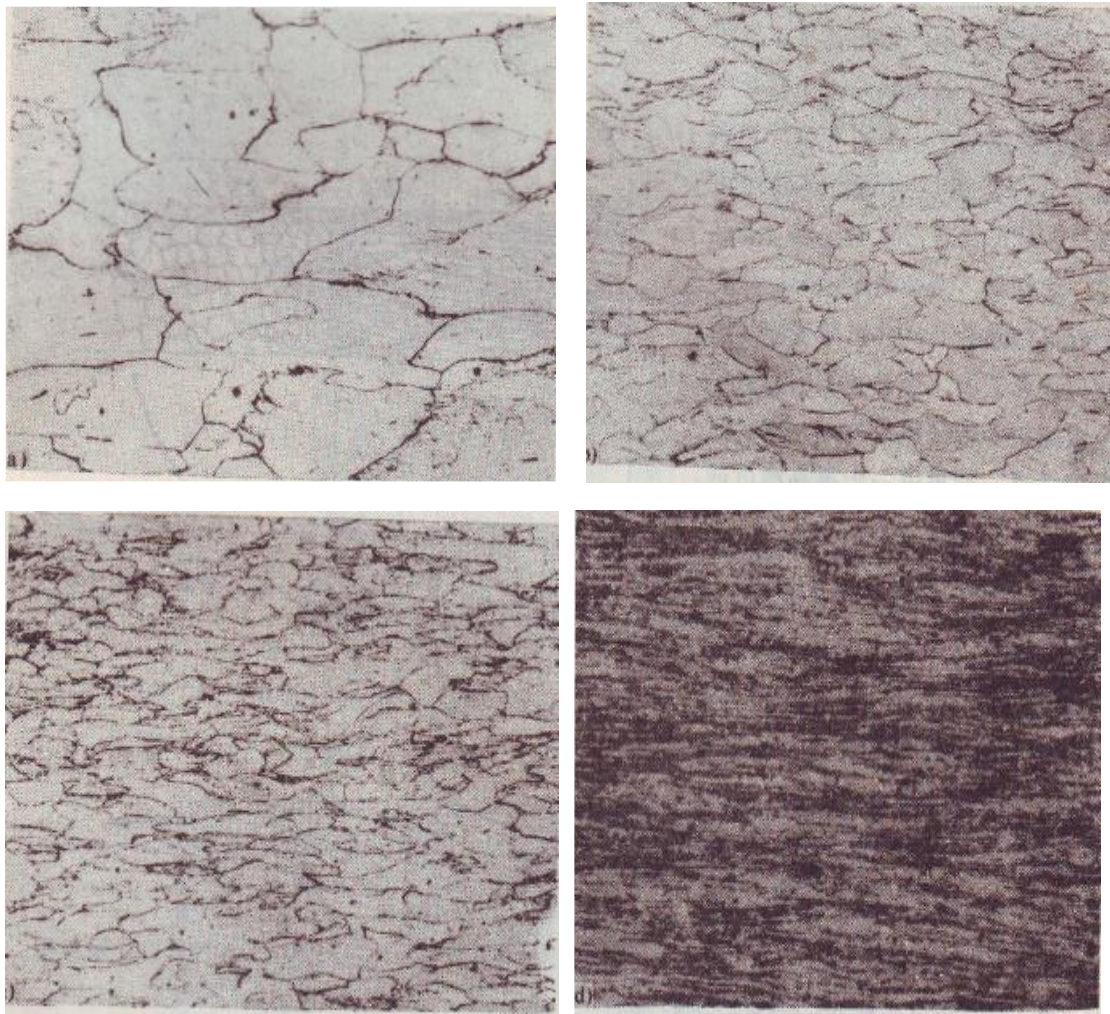


图 4-5 工业纯铁经不同程度变形后的组织 200×  
a 20%    b 40%    c 60%    d >70%

如果对冷变形金属进行薄膜透射电镜分析就会发现位错分布是不均匀的，有的地方位错密度很高并缠结在一起；有的地方位错密度很低。当变形量较大时，还会发现典型的胞状亚结构特征。高密度位错集中在胞壁上，胞内的位错密度比胞壁低得多。变形量越大，胞状亚结构的尺寸就越小。

金属得塑性变形所造成得内部组织变化必然导致某些性能得改变。大量实验证明，金属材料经冷变形后，强度，硬度显著提高，而塑性下降，即产生加工硬化。造成加工硬化的原因主要是位错密度增加并相互交截产生不易移动的位错节点；位错缠结在一起或形成胞状亚结构都对位错运动有阻碍作用。

### 3. 冷变形金属在加热时组织和性能的变化

冷变形金属在热力学上是处于一种不稳定的状态，有力求恢复到稳定状态的趋势。加热会提高原子的活动能力，促进由不稳定状态恢复到稳定状态过程的进



行。加热温度由低到高，其变化过程大致分为回复，再结晶和晶粒长大三个阶段。当然这三个阶段并非是截然分开的。如图 4-6 所示。

由图可见，当加热温度低于再结晶时，组织形态几乎不发生变化。但由于晶内缺陷（主要是点缺陷）密度减小，电阻和内应力明显下降。当温度达到再结晶温度时，在变形比较严重的区域（如晶界，形变带，夹杂物附近等）优先形成再结晶核心，并以畸变能为驱动力逐渐长大。当被拉长的晶粒完全由细小等轴晶粒代替时，再结晶过程结束。如果进一步提高温度或延长保温时间，晶粒将以界面能减少为驱动力不断合并长大，进入第三阶段。关于不同阶段材料强度及硬度的变化：回复阶段强度几乎不变。即将进入再结晶阶段时才略有下降。在再结晶阶段，强度明显下降，直到再结晶结束强度基本恢复到变形前数值。这说明，再结晶后的金属完全消除了加工硬化现象。变形量 50% 的纯铜经不同温度下退火组织如图 4-7 所示。

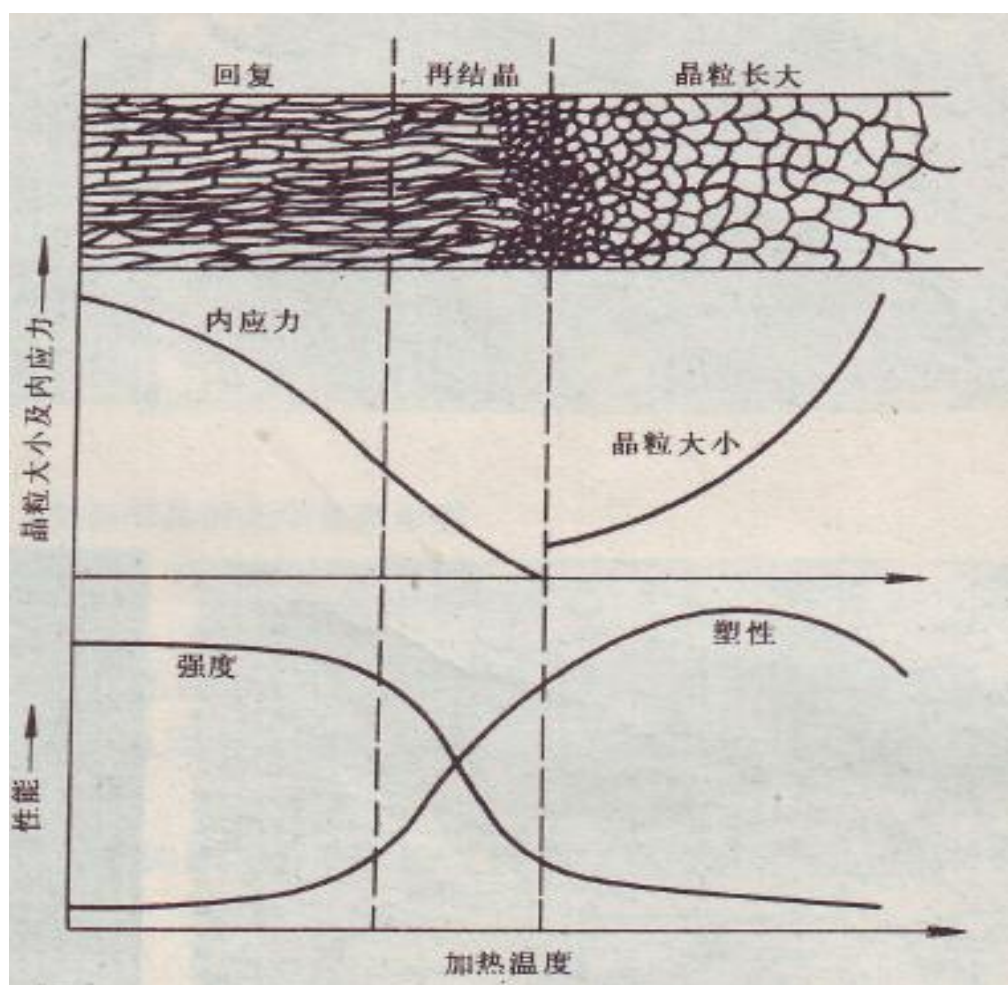


图 4-6 变形金属在加热过程中组织和性能变化示意图

#### 4，再结晶后晶粒大小与变形量的关系

再结晶后晶粒大小与再结晶加热温度，保温时间，加热速度，变形量以及变形前原始晶粒度等都有关系。为了说明晶粒大小与变形量的关系，将一组变形量各不相同的铝片放在同一温度下进行再结晶退火，结果晶粒大小相差很大。如图 4-8 所示。

当变形量很小时，由于晶内储存的畸变能不足以进行再结晶而保持变形前的状态。（图 4-8a）当达到某一变形量时，再结晶后的晶粒特别粗大（图 b）。这个变形量称为临界变形度。金属在临界变形度下，只有少数晶粒发生明显变形具备形成再结晶核心的条件，而其余绝大多数晶粒几乎未发生变形不具备形核条件。因此所形成的再结晶核心数目必然很少，由它们长大而成的晶粒（无畸变区）靠吞并周围晶粒迅速长大。其结果造成晶粒特别粗大。当变形量超过临界变形度时，随着变形量的增加，变形的均匀程度也增加，再结晶退火后的晶粒也逐渐细化，如图 4-8c, d, e 所示。



图 4-7 变形量 50% 的纯铜在不同温度下加热时显微组织的变化 100×  
a 300°C b 500°C c 600 °C 加热时间 30min

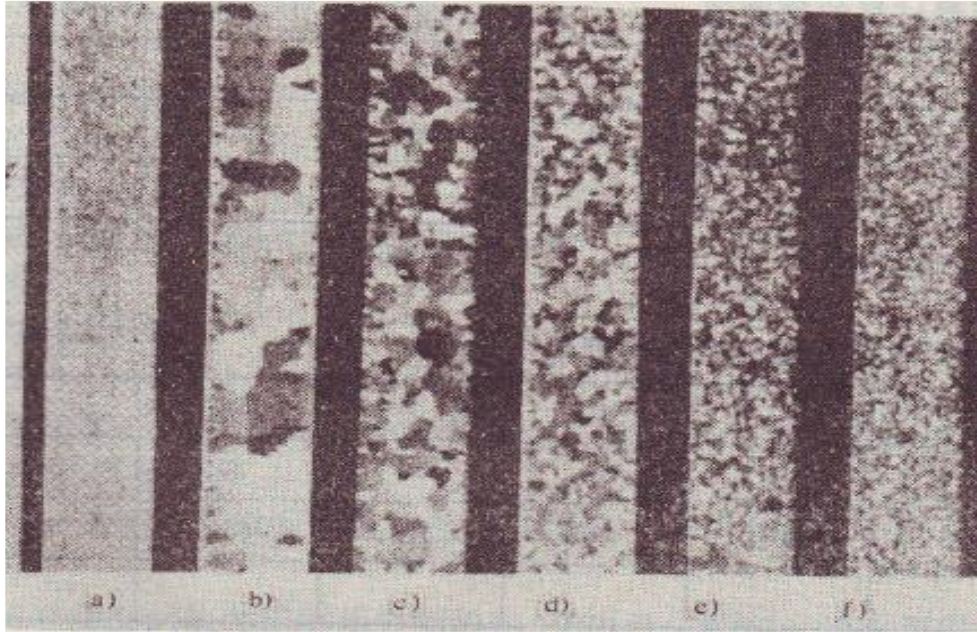
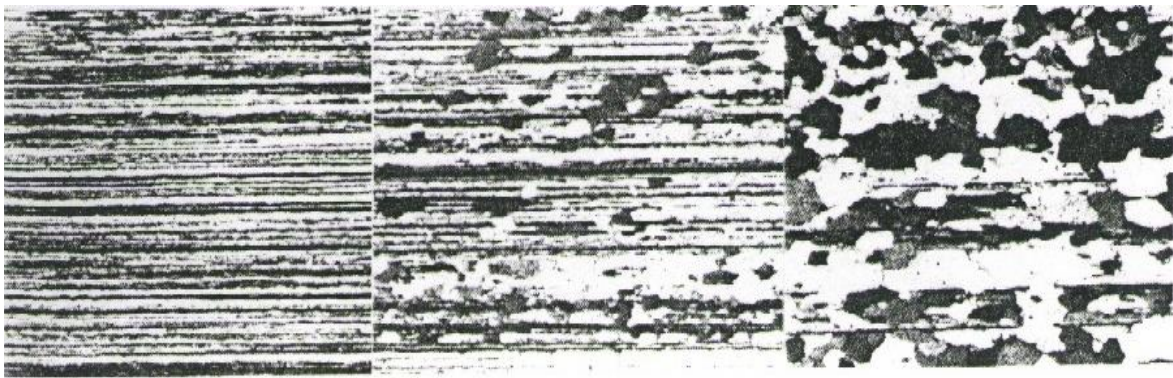


图 4-8 不同变形量对纯铝片再结晶晶粒大小的影响 (1: 1)  
a 2% b 3% c 6% d 9% e 12% f 15%



(a) (b) (c)

图 4-9 铝板材经过 85%冷加工后并加热的组织, (a) 85%冷变形 (b) 在 302°C 1h 后的组织, 可见开始再结晶 (c) 在 316°C 1h 后的组织, 有的已再结晶和未再结晶的部分

这里有必要指出, 除特殊需要外, 生产中应尽量避免在临界变形度范围内(铁约为 2~10%;铜约为 5~10%, 铝约为 2~5%; 铜及黄铜约为 5%) 加工, 以免形成粗大晶粒使性能恶化。

### 第三章 金相试样的制备

金相显微试样的制备过程包括取样、镶嵌、磨制、抛光、浸蚀等工序。

#### ① 取样

显微试样的选取应根据研究目的, 取其具有代表性的部位。试样截取方法视

材料的性质不同而异，但均应保证不使被观察面的组织发生变化。截取的试样大小以便于握持、易于磨制为准，一般为直径 (12—15)mm、高度(或边长)12—15mm 的圆柱体或正方体。

## ② 镶嵌

如果试样大小合适，便于用手握持磨制，则无需镶嵌。对于尺寸过于细小的金属丝、片、管或不规则形状物，以及有特殊要求(例如需观察表层组织)的试样，必须先将其镶嵌起来再磨制。

镶样方法很多，如低熔点合金镶嵌、电木粉或塑料镶嵌和机械夹持等，目前多用电木粉镶嵌。

## ③ 磨制

磨制是为了得到平整的磨面，为抛光做准备。一般磨制过程分为粗磨和细磨。粗磨一般在砂轮机上进行。粗磨后的试样表面仍有较深的磨痕，需进行细磨，细磨有手工磨光机械磨光两种方法。每换细一级砂纸时，应先将试样清洗干净，以免把粗砂粒带到下一级砂纸上去，再将试样的磨制方向调转 90 度，即磨制方向与上一道磨痕方向垂直，便观察上一道磨痕是否全部消除。

## ④ 抛光

抛光的目的是去除细磨后留下的细微磨痕，使磨面呈光亮镜面。抛光时需向抛光盘上不断滴注抛光液，以产生磨削和润滑作用。抛光液通常采用  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  或  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  等细抛光粉(粒度约为  $0.3-1\mu\text{m}$ )在水中的悬浮液(每升水中加入  $\text{Al}_2\text{O}_3 5-10\text{g}$ )。

## ⑤ 浸蚀

纯金属或单相金属的浸蚀是一个化学溶解过程。晶界处由于原子排列混乱，且能量较高，所以易受浸蚀而呈现凹沟。各个晶粒由于原子排列位向不同，受浸蚀程度也不同。因此，在垂直光线照射下，各部位反射进入物镜的光线不同，从而显示出晶界及明暗不同的晶粒。两相或两相以上合金的浸蚀则是一个电化学腐蚀过程。由于各组成相的成分不同，其电极电位亦不同，当表面覆盖一层具有电解液作用的浸蚀剂时，两相之间就形成了许多“微电池”。具有负电位的一相成为阳极，被迅速溶解而凹下；具有正电位的另一相为阴极，保持原来的光滑平面。试样表面的这种微观凹凸不平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 5-1 所示。



图 5-1 浸蚀作用原理图

实验方法指导：

(1) 所用设备：金相显微镜、磨抛一体机、电吹风、不同型号水砂纸、玻璃板、抛光膏、酒精、4%硝酸酒精浸蚀剂、无水乙醇、棉花、竹夹子。

(2) 实验步骤：

- ① 用砂纸由粗到细打磨，直至磨光；
- ② 用抛光机抛光，获得光亮镜面；
- ③ 用浸蚀剂浸蚀试样磨面，而后用显微镜观察组织。

## 第四章 实验内容

### 1. 绘图

1) 观察下表中所列的金属形变组织并绘制组织示意图

序号	材料	变形量	观察内容
1	工业纯铁	5%	滑移带（略带波纹状的平行线）
2	工业纯铁	20%	晶粒开始被拉长
3	工业纯铁	50%	多数晶粒被明显拉长
4	工业纯铁	70%	呈纤维状

2) 观察下表中所列的同一变形量不同温度下退火的组织并绘制组织示意图

序号	材料	变形量	退火温度 (°C)	观察内容
1	工业纯铁	50%	500	再结晶刚刚开始
2	工业纯铁	50%	600	晶粒细化
3	工业纯铁	50%	800	晶粒长的很大

## 2. 制样

对塑性变形样进行金相制备，显微镜观察其组织，打印显微组织图贴在实验报告上，标注变形量，热处理状态。

# 第三部分 实验二 热处理、金相制备、力学性能测试

## 第一章 热处理

### 1. 实验目的

- (1) 了解钢的几种热处理操作(退火、正火、淬火、回火等);
- (2) 熟悉铁碳相图和冷却曲线;

### 2. 实验原理

热处理在改善钢材性能，提高工件使用寿命方面起着重要的作用。例如汽车后桥半轴，经热处理后其使用寿命大为提高，达数年之久。这是因为经过热处理后，钢的内部组织发生了质的变化，从而引起了机械性能的改变，最后表现出使用寿命的延长。

钢的热处理是利用钢在固态范围内的加热、保温和冷却，以改变其内部组织，从而获得所需要的物理、化学、机械和工艺性能的一种操作。钢的热处理基本操作有退火、正火、淬火、回火等。

热处理操作中，加热温度、保温时间和冷却方式是最重要的三个关键工序，也称热处理三要素。正确选择这三种工艺参数，是热处理成功的基本保证。Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图（图 6—1）和 C 曲线是制定碳钢热处理工艺的重要依据。

（1）加热温度的选择 钢的退火、正火、淬火加热温度根据 Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图确定。

①退火加热温度 一般亚共析钢加热至  $A_{c3} + (20 - 30) ^\circ\text{C}$ ；共析钢和过共析钢加热至  $A_{c1} + (20 - 30) ^\circ\text{C}$ （球化退火），目的是得到球状渗碳体，降低硬度，改善高碳钢的切削性能。退火和正火加热温度范围选择见图 6—2。

②正火加热温度 一般亚共析钢加热至  $A_{c3} + (30 - 50) ^\circ\text{C}$ ；过共析钢加热至  $A_{ccm} + (30 - 50) ^\circ\text{C}$ ，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  $A_{c3} + (30 - 50) ^\circ\text{C}$ ，淬火后的组织为均匀细小的马氏体。如果加热温度不足（低于  $A_{c3}$ ），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  $A_{c1} + (30 - 50) ^\circ\text{C}$ ，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硬度和耐磨性。过高的加热温度（高于  $A_{ccm}$ ），会因得到粗大的马氏体，过多的残余 A 而导致硬度和耐磨性的下降，脆性增加。淬火加热温度范围选择见图 6—3。

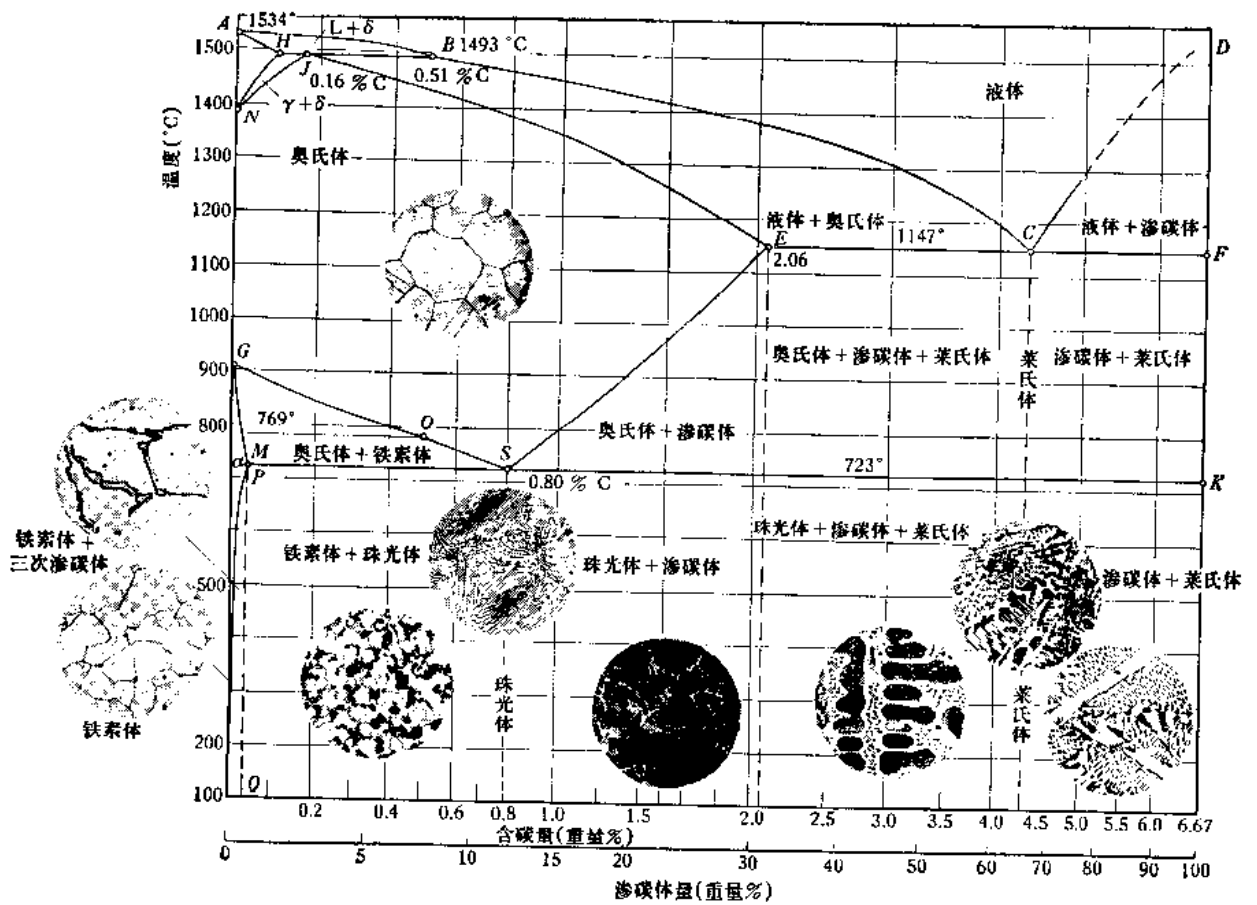


图 6-1 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

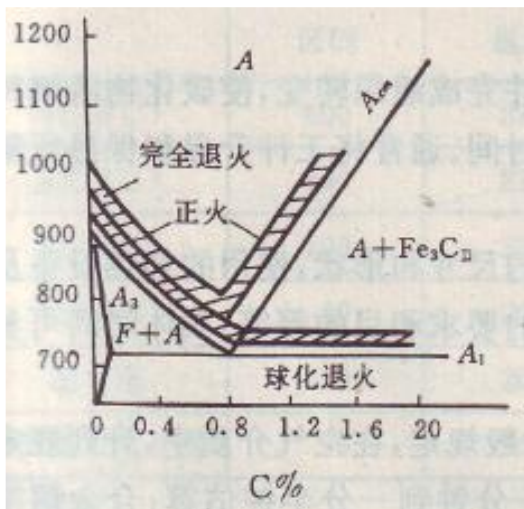


图 6-2 退火和正火的加热温度范围

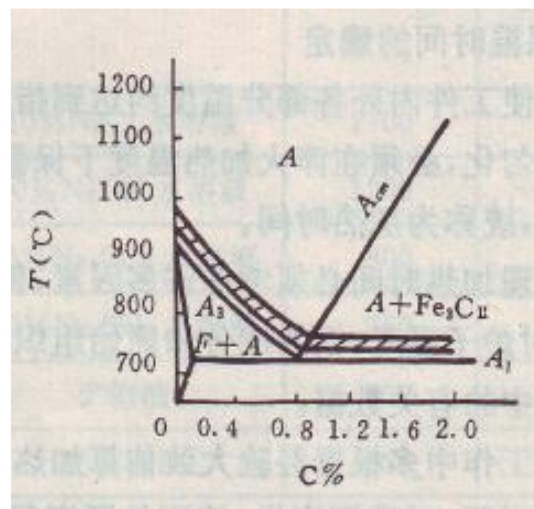


图 6-3 淬火的加热温度范围

在各种热处理手册或材料手册中，都可查到各种钢的热处理温度。各种成分碳钢的临界温度列于表 6-1 中。



表 6-1 碳钢的临界点

类别	钢号	临界点 (°C)			
		Ac1	Ac3 或 Accm	Ar1	Ar3
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
碳素工具钢	T7	730	770	700	743
	T8	730	—	700	—
	T10	730	800	700	—
	T12	730	820	700	—
	T13	730	830	700	—

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—250°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。一般用于高碳钢的切削刀具、量具、滚动轴承、渗碳件。

中温回火 在 350—500°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。主要用于含碳 0.5%—0.8% 的弹簧钢。

高温回火 在 500—650°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，用于中碳的结构钢，如柴油机连杆螺栓、汽车半轴以及机床主轴等重要零件。

(2) 保温时间的确定 为了使钢件内外各部分温度均达到指定温度，并完成组织转变，使碳化物溶解和奥氏体成分均匀化，必须在淬火加热温度下保温一定时间。通常将钢件升温 and 保温所需时间算在一起，统称为加热时间。

热处理加热时间必须考虑许多因素，例如工件的尺寸和形状，使用的加热设备及装炉量，装炉时炉子温度，钢的成分和原始组织，热处理的要求和目的等等。具体时间可参考热处理手册中的有关数据。

保温时间 (min) 的经验公式： $\tau = KD$

式中：K 为加热系数，一般  $K=1.5-2.0\text{min/mm}$ ，若装炉量大，则可延长保温时间；D 为工件有效厚度 (mm)。碳钢在电炉中加热时间的计算列于表 6—2。

表 6—2 碳钢在箱式炉中加热时间的确定

加热 温度 (°C)	工 作 形 状		
	圆 柱 形	方 形	板 形
	保 温 时 间		
	分钟/每毫米直径	分钟/每毫米厚度	分钟/每毫米厚度
700	1.5	2.2	3
800	1.0	1.5	2
900	0.8	1.2	1.6
1000	0.4	0.6	0.8

实际生产中多根据经验大致估算加热时间。一般规定，在空气介质中，升到规定温度后的保温时间，对碳钢来说，按工件厚度每毫米需一分钟到一分半钟估算；合金钢按每毫米二分钟估算。在盐浴炉中，保温时间则可缩短 1—2 倍。

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，低温回火为了稳定组织，清除内应力，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，一般为 0.5—1 小时。

(3) 冷却方法 热处理时的冷却方式要适当，才能获得所要求的组织和性能。

退火一般采用随炉冷却。正火采用空气冷却，大件可采用吹风冷却。淬火冷却方法非常重要，一方面冷却速度要大于临界冷却速度，以保证全部得到马氏体组织；另一方面冷却应尽量缓慢，以减少内应力，避免变形和开裂。为了解决上述矛盾，可以采用不同的冷却介质和方法，使淬火工件在奥氏体最不稳定的温度范围内 (650—550°C) 快冷，超过临界冷却速度，而在  $M_s$  (300—200°C) 点以下温度尽可能慢冷，以减少内应力。常用淬火方法有单液淬火、双液淬火(先水冷后

油冷)、分级淬火, 等温淬火。表 6-3 中列出了几种常用淬火介质的冷却能力。

表 6-3 常用淬火介质的冷却能力

淬火介质	冷却速度 (°C/秒)	
	650°C—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
肥皂水	30	200
矿物油	150	30
变压器油	120	25

### 3. 实验方法指导

#### 3.1、实验设备和材料

- (1) 箱式电阻炉;
- (2) 淬火水槽、油槽;
- (3) 钳子、手套、铁丝;
- (4) Ø10mm×15mm 尺寸的 45 钢试样、45 钢拉伸试样、45 钢冲击试样

#### 3.2、实验内容

表 6-4 不同热处理工艺

序号	材料	热处理工艺
1	45 钢	退火
2		正火 (860℃保温 15mins, 空冷)
3		不完全水淬 (760℃保温 15mins, 水冷)
4		水淬 (860℃保温 15mins, 水冷)
5		油淬 (860℃保温 15mins, 油冷)
6		水淬后低温回火 (860℃保温 15mins, 水冷+200℃保温 30mins, 空冷)
7		水淬后中温回火 (860℃保温 15mins, 水冷+400℃保温 30mins, 空冷)
8		水淬后高温回火 (860℃保温 15mins, 水冷+600℃保温 30mins, 空冷)

(1) 全班分成 8 个小组, 每组对应一种热处理工艺, 其中退火为随炉冷却, 时间较长故退火态的试样由实验室事先处理好直接分给学生, 每个学生三个试样, 组织形貌观察及硬度测试试样, 拉伸试样, 冲击试样。

(2) 将同一加热温度的试样放入相对应温度的炉子内加热(炉温预先由实验室升好), 保温一定时间(按 1 分钟 / 每毫米直径计算)后, 进行冷却处理(水冷、油冷、空冷)。

(3) 需要回火的试样冷却处理后分别放入不同温度的炉中进行回火, 回火保温一段时间后进行空冷。

热处理操作注意事项:

- ① 取放试样时, 炉子会自动断电, 取试样后炉门要及时关好, 并立即通电。
- ② 当试样颜色和炉膛颜色一致时, 开始计算保温时间, 注意温度控制仪表

是否正常。

③淬火冷却时，试样要用钳子夹住，将试样迅速入油或入水，并不停地移动试样，且不要露出液面。

## 第二章 热处理后的组织观察

### 1. 金相组织观察分析

碳钢经热处理后的组织，可以是平衡或接近平衡状态(如退火、正火)，也可以是不平衡组织（如淬火组织）。因此在研究热处理后的组织时，不但要参考铁碳相图，还要利用钢的 C 曲线或 CCT 曲线。

铁碳相图能说明慢冷时不同碳含量的铁碳合金的结晶过程和室温下的组织以及相对量。C 曲线或 CCT 曲线则能说明一定成分的铁碳合金在不同冷却条件下的转变过程，以及转变后能得到哪些组织。

#### 1、钢冷却时的转变

(1) 共析钢过冷奥氏体连续冷却后的显微组织 为简便起见，这里用 C 曲线来分析过冷奥氏体连续冷却后的显微组织。共析钢过冷奥氏体慢冷(炉冷)时，(见图 6—4)将全部得到珠光体，冷却速度增大(空冷)时，得到片层细的索氏体，冷却速度又增大(油冷)时，得到片层更细的屈氏体和部分马氏体，而冷却速度再增大(水冷)时，奥氏体一下被过冷到马氏体转变开始点( $M_s$ )以下，转变成马氏体。由于共析钢的马氏体转变终点在室温下( $-50^{\circ}\text{C}$ )，所以在生成马氏体的同时保留有部分残余奥氏体。与 C 曲线鼻尖相切的冷却速度  $V_k$  称为淬火的临界冷却速度。

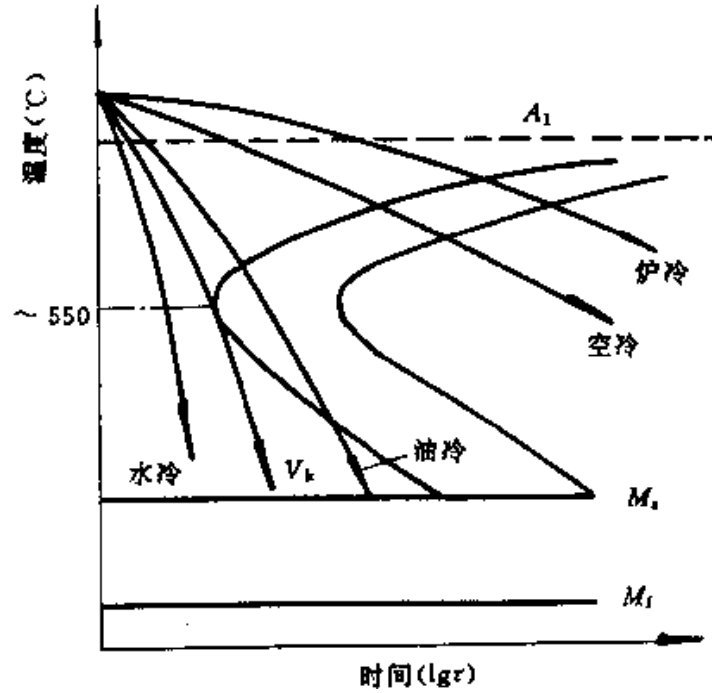


图 6-4 共析钢的 C 曲线

由上图可以看出，按照不同的冷却条件，过冷奥氏体将在不同的温度范围发生不同类型的转变。通过金相显微镜观察，可以看出过冷奥氏体各种转变产物的组织形态各不相同。共析碳钢过冷奥氏体在不同温度转变的组织特征及性能如表 6—5 所示。

表 6—5 共析碳钢(T8)过冷奥氏体在不同温度转变的组织及性能

转变类型	组织名称	形成温度范围(°C)	金相显微组织特征	硬度(HRC)
珠光体型相变	珠光体(P)	>650	在 400~500 倍金相显微镜下可观察到铁素体和渗碳体的片层状组织	~ 20(HB180~200)
	索氏体(S)	600~650	在 800~1000 倍以上的显微镜下才能分清片层状, 在低倍下片层模糊不清	25~35
	屈氏体(T)	550~600	用光学显微镜观察时呈黑色团状织, 只有在电子显微镜(5000~15000×)下才能看出片层组织	35~40
贝氏体型相变	上贝氏体(B <sub>上</sub> )	350~550	在金相显微镜下呈暗灰色的羽毛状特征	40~48
	下贝氏体(B <sub>下</sub> )	230~350	在金相显微镜下呈黑色针叶状特征	48~58
马氏体型相变	马氏体(M)	<230	在正常淬火温度下呈细针状马氏体(隐晶马氏体), 过热淬火时则呈粗大片状马氏体	62~65

(2) 亚共析钢过冷奥氏体连续冷却后的显微组织 亚共析钢的 C 曲线与共析钢的相比, 上部多了一条铁素体析出线。见图 6—5 所示。

当奥氏体缓慢冷却(如炉冷)时,(见图 6—5 中的 V<sub>1</sub>)转变产物接近平衡状态显微组织, 为珠光体和铁素体, 随冷却速度的增大(如空冷或风冷), 例如由 V<sub>1</sub>→V<sub>2</sub>→V<sub>3</sub>时, 奥氏体的过冷度越大, 析出的铁素体越少, 而共析组织(珠光体)的量增加, 碳的含量减少, 共析组织变得更细。这时的共析组织实际上为伪共析组织。析出的少量铁素体多分布在晶粒的边界上, 因此, 由 V<sub>1</sub>→V<sub>2</sub>→V<sub>3</sub>时, 显微组织的变化是:

铁素体+珠光体→铁素体+索氏体→铁素体+屈氏体。

当冷却速度再增大，为  $V_4$  时（油冷），析出的铁素体极少，最后主要得到屈氏体和马氏体及少量贝氏体。当冷却速度超过临界冷却速度  $V_k$  后，奥氏体全部转变为马氏体。碳含量大于 0.5% 的钢中，马氏体间还有少量残余奥氏体。

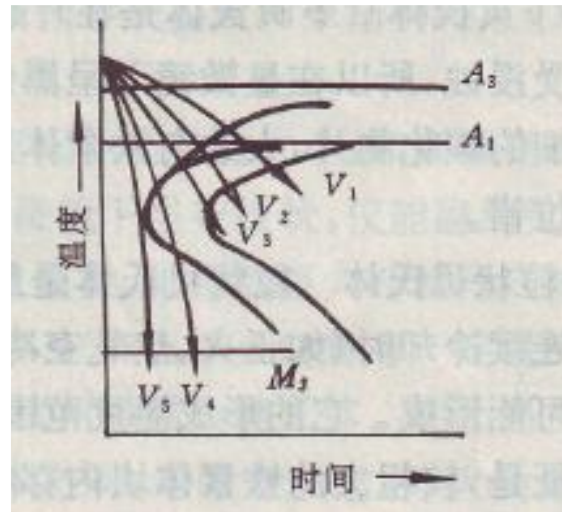


图 6-5 亚共析钢的 C 曲线

(3) 过共析钢的 C 曲线与亚共析钢的相似，不同之处是亚共析钢先析出的是铁素体，而过共析钢先析出的是渗碳体。所以随着冷却速度的增加，钢的组织变化将是：渗碳体+珠光体→渗碳体+索氏体→渗碳体+屈氏体→屈氏体+马氏体+残余奥氏体→马氏体+残余奥氏体。

## 2、钢冷却时所得的各种组织的形态

(1) 索氏体(S)是铁素体与渗碳体的机械混合物。其片层比珠光体更细密，在显微镜的高倍(700×以上)放大下才能分辨。

(2) 屈氏体(T)是铁素体与片状渗碳体的机械混合物。片层比索氏体更细，在一般光学显微镜下无法分辨，只能看到如墨菊状的黑色组织。当其少量析出时，沿晶界分布呈黑色网状包围马氏体。当析出量较多时，呈大块黑色晶团状。只有在电子显微镜下才能分辨其中的片层。

(3) 贝氏体(B)是奥氏体中温转变的产物，也是铁素体与渗碳体的两相混合物，但其金相形态与珠光体类组织不同，且因钢的成分和形成温度不同而有差别。其组织形态主要有三种：

①上贝氏体 上贝氏体是由成束平行排列的条状铁素体和条间断分布的细条状渗碳体所组成。当转变量不多时，在光学显微镜下可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。在电镜下观察可看到铁素体以几度到十几度的小位向差相互平行，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。

②下贝氏体 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。在电镜下观察可以看到，它是以针片状铁素体为基体，其中分布着很细的碳化物片，这些碳化物片大致与铁素体片的长轴呈 55—65 度的角度。下贝氏体中的铁素体亚结构是位错。

③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。它的形成温度范围大致在上贝氏体相变温度区的上部。粒状贝氏体的金相特征是，较粗大的铁素体块内存在一些孤立的小岛，形态多样，呈粒状或条状，很不规则。低倍观察时，其形态类似魏氏组织，但其取向不如魏氏组织明显。铁素体包围的小岛，原先是富碳的奥氏体区，其随后的转变可以有三种情况：(a) 分解为铁素体和碳化物，在电镜下可见到比较密集的多向分布的粒状、杆状或小块状碳化物；(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，主要分为两大类，即板条状马氏体和片状马氏体。

①板条马氏体 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以小角度晶界分开，束与束之间具有较大的位向差。板条状马氏体的立体形态为细长的板条状，其横截面近似椭圆形。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，故在金相试验时，易被腐蚀而呈现较深的颜色。在电子显微镜下，马氏体群是由许多平行的板条所组成，且发现板条马氏体的亚结构是高密度的位错。含碳低的奥氏体形成的马氏体呈板条状，故板条状马氏体又称为低碳马氏体，因形成温度高，又称高温马氏体。因亚结构为位错，又称为位错马氏体。

②片状马氏体 在光学显微镜下，片状马氏体呈针状或竹叶状，片间有一定

角度，其立体形态为双凸透镜状。因形成温度较低，没有自回火现象，故组织不易被浸蚀，所以颜色较浅，在显微镜下呈白亮色。用透射电镜观察，其亚结构为孪晶。根据形成温度和亚结构特点，又称低温马氏体，或孪晶马氏体。

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，淬火后可得到细针状马氏体，在光学显微镜下呈布纹状，仅能隐约见其针状，故又称为隐晶马氏体。如淬火温度较高，奥氏体晶粒粗大，则得到粗针状马氏体。

(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成为马氏体，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，残余奥氏体与马氏体很难区分，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。

### 3、钢淬火回火后的组织

钢经淬火后所得到的马氏体和残余奥氏体均为不稳定的组织，它们具有向稳定的铁素体和渗碳体两相混合组织转变的倾向。在室温下，由于原子活动能力较弱，转变难以进行，但加热（回火）可提高原子的活动能力，有可能促进这个转变过程。

淬火钢经不同温度回火后，所得的组织通常分为三类：

(1) 回火马氏体 淬火钢在  $150-250^{\circ}\text{C}$  之间进行低温回火时，马氏体内的过饱和碳原子脱溶，沉淀析出与母相保持共格关系的  $\epsilon$  碳化物，这种组织称为回火马氏体。与此同时，残余奥氏体也开始转变为回火马氏体。在显微镜下回火马氏体仍保持针(片)状形态。因极细小的  $\epsilon$  碳化物的析出，使回火马氏体易受浸蚀，颜色比淬火马氏体深，呈黑色针(片)状组织。回火马氏体具有高的强度和硬度，而韧性和塑性较淬火马氏体有明显改善。

(2) 回火屈氏体 淬火钢在  $350-500^{\circ}\text{C}$  间进行中温回火，所得组织是铁素体与粒状渗碳体组成的极细密的混合物，称为回火屈氏体。组织特征是，铁素体基本保持原来针(片)状马氏体的形态，而在基体上分布着极细颗粒的渗碳体，在光学显微镜下分辨不清，呈黑点。但在电子显微镜下可观察到渗碳体颗粒及原针(片)状马氏体的位向。回火屈氏体具有较高的强度，最佳的弹性，较好的韧性。

(3) 回火索氏体 淬火钢在 500—650℃ 高温回火时所得的组织为回火索氏体。它是由等轴晶铁素体和粒状渗碳体组成的混合物。在光学显微镜下可观察到渗碳体小颗粒，均匀分布在铁素体中。在电子显微镜下观察回火索氏体中的铁素体，经再结晶针状特征已消失呈等轴细晶，渗碳体颗粒聚集长大。

但是，某些合金钢经调质处理后，铁素体仍保持针状形态，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。

回火索氏体组织具有强度、塑性和韧性均较好的综合机械性能。

下面列出钢热处理后的显微组织图：



图 6-6 45 钢正火组织珠光体及铁素体

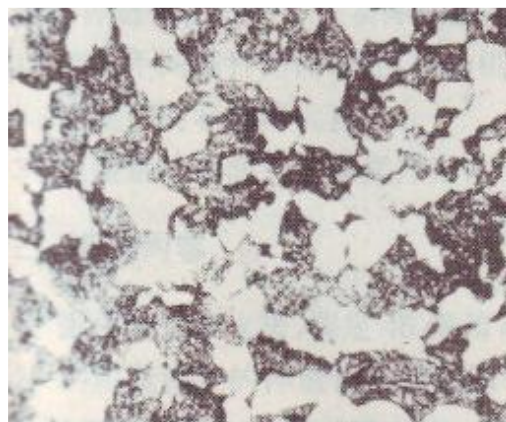


图 6-7 45 钢 750℃ 淬火组织 M+F



图 6-8 铁素体和粒状渗碳体  
(球化处理, 400×)



图 6-9 马氏体及残余奥氏体  
(加热到 1200℃ 后水淬, 400×)

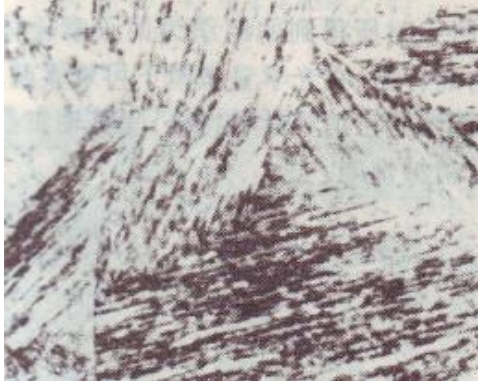


图 6-10 板条状马氏体组织



图 6-11 片状马氏体组织



图 6-12 粗马氏体

(加热到 890°C 后水淬, 400×)



图 6-13 马氏体

(加热到 830°C 后水淬, 400×)

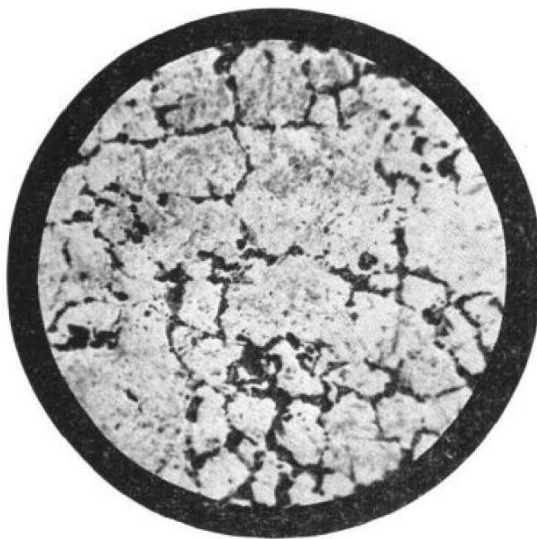


图 6-14 马氏体及屈氏体

(加热到 1200°C 后油淬, 400×)



图 6-15 回火马氏体

(淬火成马氏体后 200°C 回火, 400×)

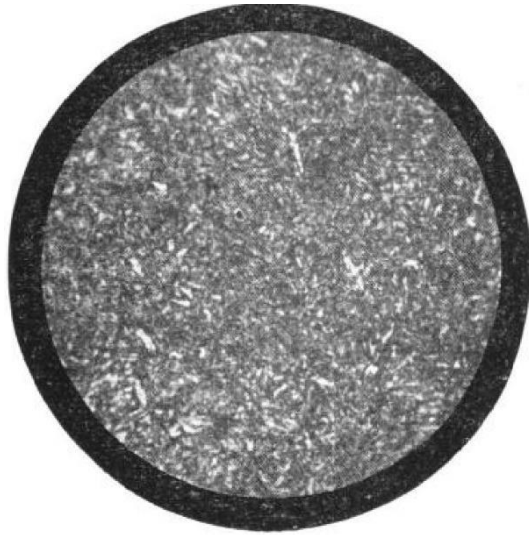


图 6-16 回火屈氏体  
(淬火成马氏体后 350℃回火, 400×)

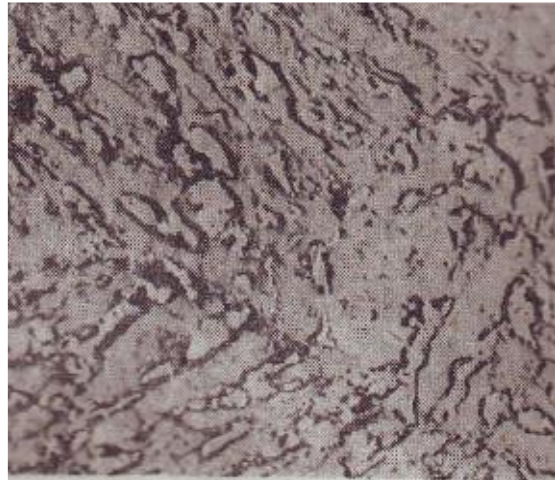


图 6-17 回火屈氏体电镜图像  
(7000×)



图 6-18 回火索氏体  
(淬火成马氏体后在 620℃, 400×)

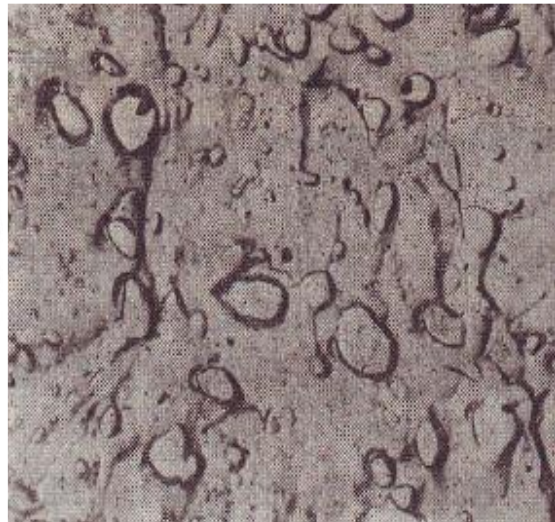


图 6-19 回火索氏体电镜图像  
(7000×)

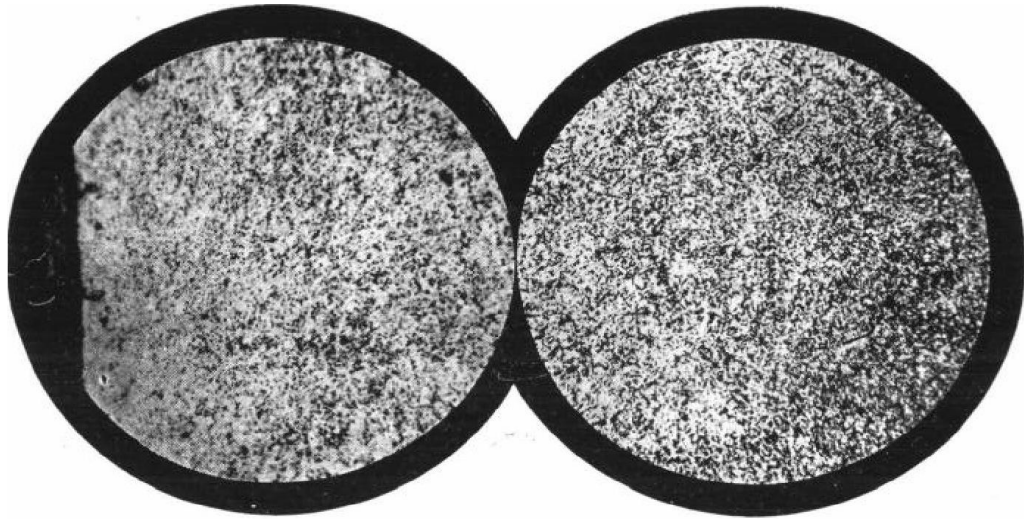


图 6-20 表层为马氏体（高频感应加热淬火）



图 6-21 表层为自由的渗碳体及珠光体、中心为铁素体及珠光体

（在 940°C 气体渗碳 7 小时）

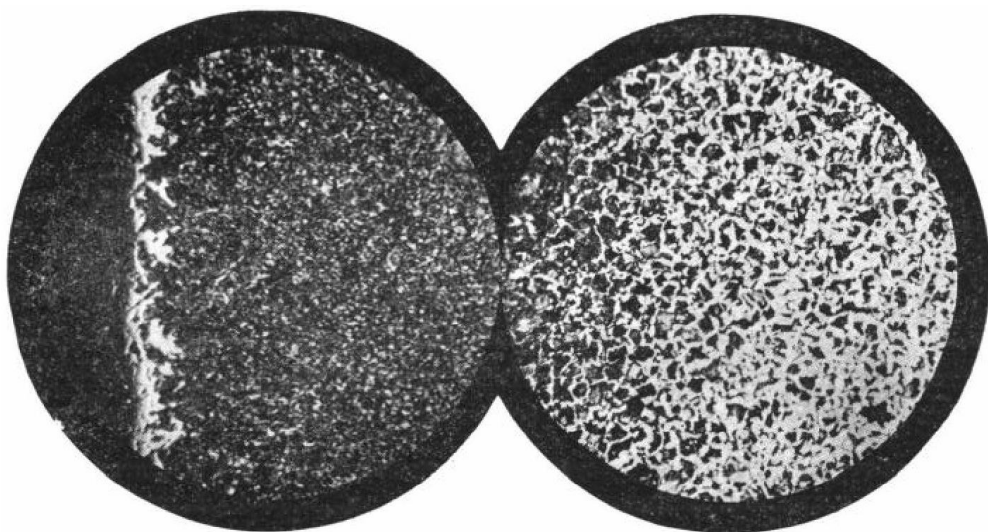


图 6-22 表层为氧化层，向内为含氮珠光体及渗碳体，中心为珠光体及铁素体

（高温气体氧化）

## 2. 实验内容

### 1、实验设备及材料

- (1) 金相显微镜；
- (2) 热处理试样
- (3) 磨抛一体机
- (4) 砂纸、抛光膏、玻璃板、抛光布

### 2、实验步骤

- (1) 按照实验二中第三章所述的方法，把典型零件制作成金相试样；
- (2) 根据零件试样的成分、热处理工艺、对照 Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图和 C 曲线分析可能出现的组织；
- (3) 正确选择放大倍数，组织粗的可选用低倍，组织细的可选用高倍。先全面观察，后重点深入，先用低倍，后用高倍；
- (4) 用手机摄下各组织示意图，并注明材料、处理工艺、放大倍数、组织名称、浸蚀剂等。

本实验所研究的 45 钢热处理工艺、浸蚀剂、显微组织列于表 6—6 中。

表 6—6 45 钢经不同热处理后的显微组织

序号	钢号	热处理工艺	浸蚀剂	显微组织
1	45	退火	4%硝酸酒精	铁素体+珠光体
2		正火		铁素体+索氏体
3		不完全水淬		马氏体+铁素体
4		水淬		混合马氏体+少量残余奥氏体
5		油淬		马氏体+屈氏体
6		水淬+低温回火		回火马氏体
7		水淬+中温回火		回火屈氏体
8		水淬+高温回火		回火索氏体

### 3、注意事项

- (1) 对照老师给出的标准显微组织图像，观察时采用对比的方式进行分析

研究，弄清楚各显微图像的特征形貌：

（2）对各类不同热处理工艺的组织，观察时也可采用对比方式进行分析研究，例如正常淬火与不正常淬火，水淬与油淬，淬火马氏体和回火马氏体等。

（3）对各种不同的温度回火后的组织，可采用高倍放大进行观察，必要时参考有关金相图谱。



## 第三章 钢热处理后的力学性能测试

### 1. 硬度试验

硬度是金属材料力学性能指标中最常用的指标之一，表征金属材料在局部体积内抵抗变形或断裂的能力。金属材料的硬度虽然没有确切的物理意义，但是它不仅与材料的静强度、疲劳强度存在近似的经验关系，还与其冷成形性、切削性、焊接性等工艺性能间也存在某些关系。因此硬度值对于控制材料冷加工工艺质量也有一定的参考意义。对于玻陶瓷等脆性材料，硬度还于材料的断裂韧性存在一定的经验关系。此外，表面硬度和显微硬度试验反映了金属表面及局部范围内的力学行为，因此可以用于检验材料表面或鉴别微区组织。

硬度测试方法很多，使用最广泛的是压入法，压入法就是把一个很硬的压头以一定的压力压入试样的表面，使金属产生压痕，然后根据压痕的大小来确定硬度值。压痕越大，则材料越软；反之，则材料越硬。根据压头类型和几何尺寸条件的不同，常用硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度。

#### 一、布氏硬度试验

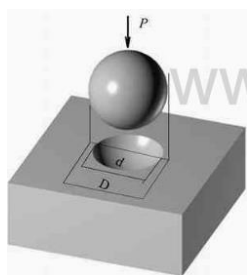


图 7-1 布氏硬度示意图

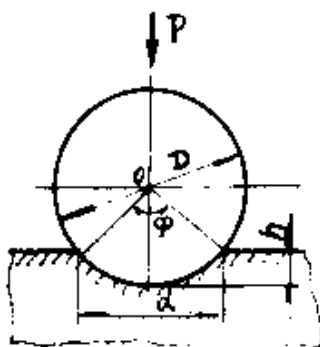


图 7-2 HB-3000E 布氏硬度计

将具有一定直径的钢球或者硬质合金球，以相应的试验力压入试样表面，经规定保持  $t$  间后，除去试验力，测量试样表面的压痕直径。如图 7-2 所示。

计算公式为  $HB=P/F$ (公斤/毫米<sup>2</sup>)或写成以下形式：

$$HB = 2P / \left[ \pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \right]$$

$$= \frac{P}{D^2} \left[ \frac{2}{\pi \left( 1 - \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \right)} \right]$$

式中 P: 负荷 (千克); F: 压痕球面面积 ( $F=\pi Dh$ ); h: 压痕球面深度; d: 压痕直径 (毫米); D: 钢球直径 (毫米);  $\psi$ : 压入角。

国家标准 GB231—84 中规定, 布氏硬度实验用的球体直径有 10、5、2.5、2 和 1mm 五种。根据金属材料的种类及布氏硬度范围, 按照表 7-1 选定 P/D<sup>2</sup> 值。

当压头为淬火钢球时, 其符号为 HBS (适用于布氏硬度值在 450 以下的材料), 当压头为硬度合金球时, 其符号为 HBW (适用于布氏硬度值为 450~650 的材料)。符号 HBS 或 HBW 之前为硬度值, 符号后面的数值依次表示球体直径、载荷大小及载荷保持时间, 用以表示试验条件 (保持时间 10~15S 的, 可不标注)。例如, 当用 10mm 淬火钢球在 9.81KN (1000kgf) 载荷作用下保持 30S 测得的布氏硬度为 120 时, 可写成 120HBS10/1000/30。

表 7-1 布氏硬度试验钢球直径与负荷选择表

材料	硬度范围	试样厚度	负荷 P 与钢球 D 之比	钢球直径 D (mm)	负荷 P (Kgf)	保荷时间 (S)
黑色金属	140-650	>6	P/D <sup>2</sup> =30	10	3000	15
		6-3		5	750	
		<3		2.5	187.5	
黑色金属	<140	>6	P/D <sup>2</sup> =10	10	1000	15
		6-3		5	250	
有色金属及合金 (铜黄铜及其它)	31.8-140	>6	P/D <sup>2</sup> =10	10	1000	30
		6-3		5	250	
		<3		2.5	62.5	
有色金属及合金 (铝轴承合金)	8-35	>6	P/D <sup>2</sup> =2.5	10	250	60
		6-3		5	62.5	
		<3		2.5	15.6	

A. 试件要求及注意事项:

- a) 试样应制成光滑平面, 使压痕边缘足够清晰, 保证压痕测量的准确性, 试样表面应无氧化层油污及表面缺陷等, 制备试样时, 不应使试样表面因受热或加工硬化而改变其硬度。

- b) 应保证试验面与支承面的平行性，以及试验面的水平，保证负荷垂直作用于试样表面。
- c) 试样厚度不小于压痕深度的 10 倍，如有关技术条件另有规定时，则其厚度不小于压痕深度的 8 倍，试验后，试样边缘及背面呈现变形痕迹时，则试验无效。应选用较小的钢球及相应的负荷重新试验。
- d) 压痕中心与试样边缘的距离不应小于压痕直径的 2.5 倍，两相邻压痕中心的距离不小于压痕直径的 4 倍，对于软金属，这个距离还应适当加大。
- e) 试验后压痕直径的大小应在  $0.24D < d < 0.6D$ ，如不符合上述条件时，试验结果认为无效，此时应选择相应的试验力重新试验。
- f) 试验时，必须保证压头轴线与试样或试件的试验平面垂直，试验过程中试验加卸应平稳、无冲击无震动。
- g) 压痕直径应从两个相互垂直方向测量，并取其算术平均值，压痕两直径之差应不超过较小直径的 2%。

本实验所用的 HB-3000E 布氏硬度计及其结构分别如图 7-2 和 7-3 所示。

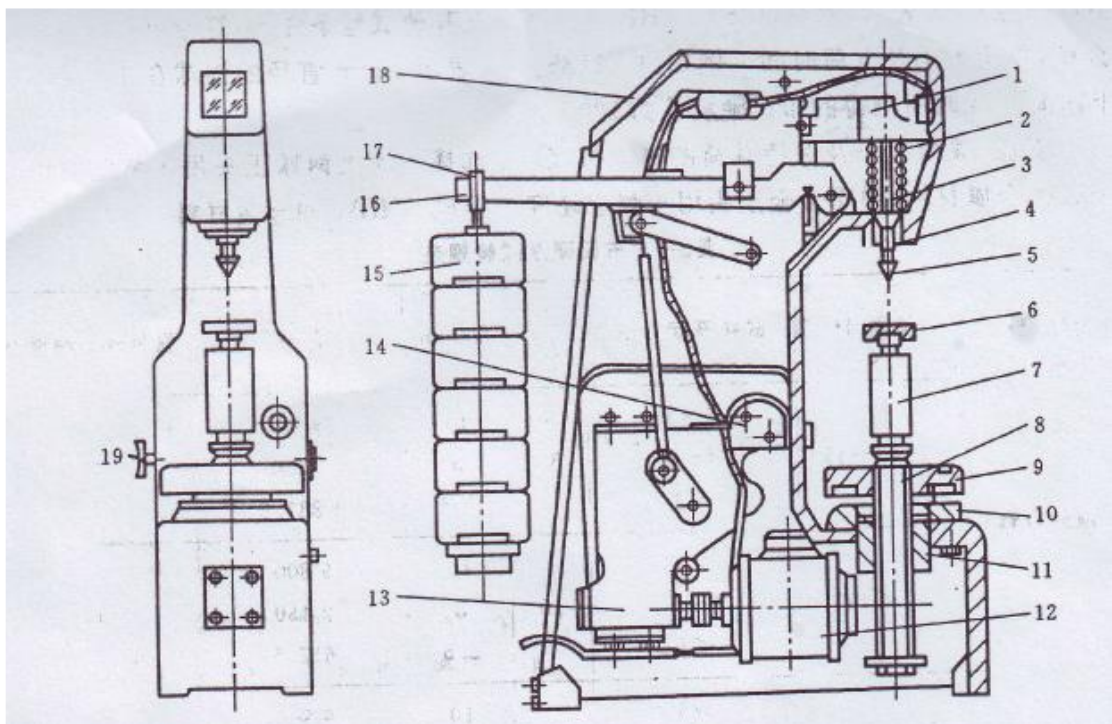


图7-3 杠杆式布氏硬度计结构

1-小杠杆 2-弹簧; 3-压轴;4-主轴衬套;5-压头;6-可更换工作台;7-工作台立柱 8-螺杆;9-升降手轮;10-螺母;11-套筒;12-电动机;13-减速器;14-换向器;15-砝码;16-大杠杆;17-吊环;18-机

体;19 电源开关。

## B. 布氏硬度计的操作方法:

### 1) 安装压头与工作台。

按规定选择压头，将试样平稳地放在工作台上。

### 2) 选择负荷

按表3-1选择试验力。选用的负荷为187.5kgf时，将砝码吊架挂在大杠杆尾部刀刃上即可，若加上62.5kgf的砝码，就形成了250kgf的负荷，再加上500kgf的砝码，便形成了750kgf的负荷……依此类推。

### 3) 选择负荷时间

首先打开电源开关，接通电源，此时电源指示灯亮，按表3-1选择好试验力的保荷时间，按动试验力保荷时间按钮（12秒、30秒、60秒）进行选择。

### 4) 正式开始试验

以上准备工作就绪后，首先转动手轮，使工作台缓慢上升，试样与压头接触直至手轮发出“咔塔”一声表示试样安装到位。

打开电源，接通电源，此时电源指示灯燃亮。然后启动按钮开关，选好试验力荷时间。

选择档位完毕，10秒钟后，本设备自动确认，也可按动“START”键强制确认，试验开始运行。

### 5) 检验并确定试验结果

实验结束后，转动手轮，取下试样，用显微测距仪及软件测量表面的压痕直径，将测得结果查表确定试样硬度值，填入附表 1 中。

## 二、洛氏硬度试验

洛氏硬度试验原理如图 7-4 所示，是用顶面角为 120°的金刚石圆锥体或直径为 1.588 毫米的钢球做压头，根据压痕深度来表示其硬度的高低的一种硬度实验，实验时先后两次加负荷，初负荷  $P_0=98.07N$  (10kgf)，总负荷 P 见表 7-5 规定：

表 7-3 常用 HRC、HRB、HRA 试验规范

刻度符号	压头种类	总试验力 N(kgf)	洛氏刻度允许范围
HRB	φ1.588mm 钢球	980.7(100)	20~100
HRC	120°金刚石圆锥	1471(150)	20~70
HRA	120°金刚石圆锥	588.4(60)	20~88

在预载荷  $P_0$  与主载荷  $P_1$  的作用下，压头压入试件，总载荷为  $P=P_0+P_1$ ，总载荷作用终了后即卸除主载荷  $P_1$ ，保留预载荷下的压入深度  $h$ ， $h$  与预载荷作用下的压入深度  $h_0$  之差就可以表示洛氏硬度，公式如下：

$$HRA = 100 - \frac{h - h_0}{0.002} ;$$

$$HRC = 100 - \frac{h - h_0}{0.002} ;$$

$$HRB = 130 - \frac{h - h_0}{0.002} ;$$

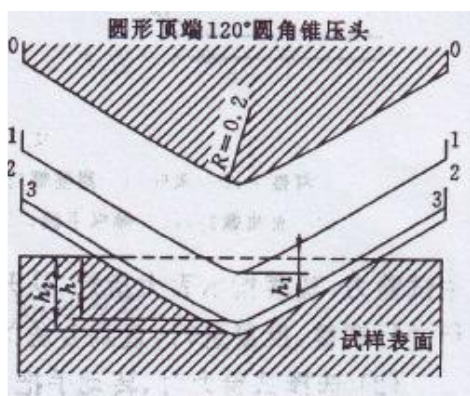


图 7-4 洛氏硬度试验原理图 (R/mm)



图 7-5 HR-150A 硬度计

i. 试件要求及注意事项：

- 1) 试件要求光洁；
- 2) 了解试件的材料及硬度范围，按表 7-5 选择合适的硬度标度；
- 3) 安装和卸下金刚石时要小心，防止丢落。试件接触金刚石时要缓慢，以免损坏或脆断金刚石。

ii. 洛氏硬度计的操作方法：

本实验所用的是图 7-5 所示 HR-150A 型洛氏硬度计，它也是利用杠杆加荷的，如图 7-6 所示，

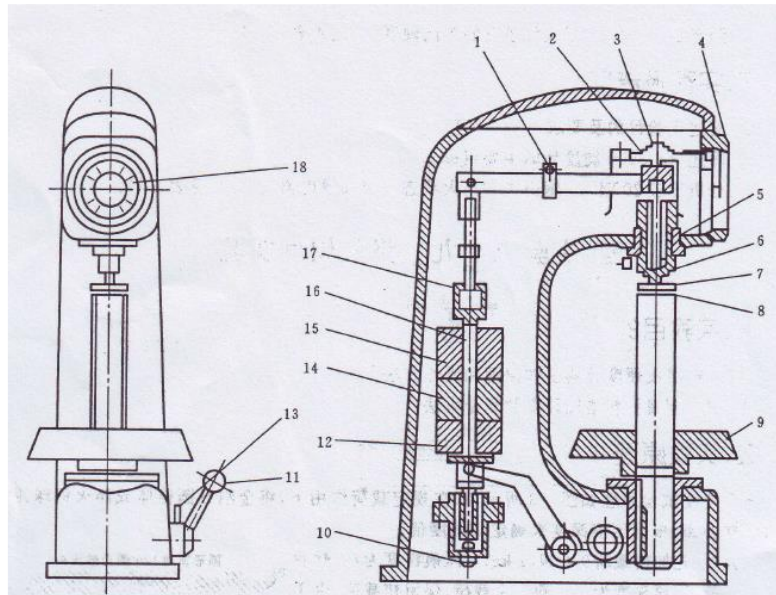


图 7-6 HR-150A 型洛氏硬度计

1-调整块;2-顶杆;3-调整螺钉;4-调整盘;5-按钮;6-紧固螺母;7-试样;8-工作台;9-手轮;10-放油螺钉;11-操纵手柄;12-砝码座;13-油杆;14/15-砝码;16-杆;17-吊套;18-指示器

操作步骤如下:

- 1) 调整主试验力的加荷速度, 将手柄置于卸荷位置, 手把转到 **1471N** 的位置, 再将 **35~55HRC** 的标准硬块放在工作台上, 旋转手轮使硬度块顶起主轴, 加上初试验力, 拉动手柄加主试力, 观察指示表大指针, 从开始转动到停止的时间应在 **4~8s** 范围内; 如不符, 可转动油针进行调整, 反复进行, 直到合适为止。
- 2) 选择试验力时, 转动手把使所选用的试验力对准红点。必须注意的是, 变换试验力时, 手柄必须置于卸荷状态(即后极限位置)。
- 3) 将丝杠顶面及被选用的工作台上、下端面擦干净, 将工作台置于丝杠上。
- 4) 将试件放置于工作台上, 旋转手轮使工作台缓慢上升, 并顶起压头, 直到小指针指着红点, 大指针旋转三圈垂直向上为止(允许相差 $\pm 5$ 个刻度; 若超过5个刻度, 此点应作废, 重新试验)。
- 5) 旋转提示器外壳, 使 **C、B** 之间长刻线与大指针对正(顺时针或逆时针旋转)。
- 6) 拉动加荷手柄, 施加主试验力, 这时指示器的大指针按逆时针方向转动。
- 7) 当指示器指针的转动显著停顿下来后, 即可将卸荷手柄推回, 卸除主试验力。
- 8) 从指示器上读取相应的标尺读数。采用金刚石压头试验时, 按表盘外圈的黑字读取。

9) 转动手轮使试件下降，再移动试件，按以上步骤进行新的试验，并将有关数据记入附表 2 中。

附表 1 45 钢退火和正火状态下的布氏硬度值

钢号	热处理工艺	布氏硬度测试参数			
		钢球直径 $D(mm)$ : _____ 载荷 $P\ kgf$ : _____ $P/D^2$ : _____ 保荷时间 $s$ : _____			
		第 1 点 硬度 HB	第 2 点 硬度 HB	第 3 点 硬度 HB	平均硬度 HB
45	退火				
45	正火 (860℃ 保温 15min, 空冷)				

附表 2 45 钢淬火和回火状态下的洛氏硬度

材料	热处理工艺	洛氏硬度测试参数			
		压头类型: _____ 总压力 $N\ (Kgf)$ : _____			
		第 1 点 HRC	第 2 点 HRC	第 3 点 HRC	HRC 平均值
45 钢	不完全水淬 (760℃ 保温 15min, 水冷)				
	水淬 (860℃ 保温 15min, 水冷)				
	油淬 (860℃ 保温 15min, 油冷)				
	水淬后低温回火 (860℃ 保温 15min, 水冷) + (200℃ 保温 30min, 空冷)				
	水淬后中温回火 (860℃ 保温 15min, 水冷) + (400℃ 保温 30min, 空冷)				
	水淬后高温回火 (860℃ 保温 15min, 水冷) + (600℃ 保温 30min, 空冷)				

### 3. 拉伸试验

#### 1) 试验目的

① 测定 45 钢的各种热处理工艺试样的上屈服强度  $R_{eH}$ 、下屈服强度  $R_{eL}$ 、抗拉强度  $R_m$ 、断面收缩率  $Z$  和断后伸长率  $A$ 。

② 观察并分析材料在拉伸过程中的各种现象，并结合断口分析不同工艺试样强度、塑性变化的原因。

③ 学习电子万能试验机的使用方法。

#### 2) 试验设备

① 电子万能试验机

② 电子引伸计

③ 游标卡尺

#### 3) 试样

最常见的拉伸试样是圆形截面和矩形截面试样。它们均由夹持、过渡和平行三部分组成。(见图 8-1) 夹持部分的形状应适合于试验机夹头的夹持。过渡部分的圆弧应与平行部分光滑地联接。圆弧  $r$  不能太小(如直径  $\geq 4\text{mm}$  的棒材使用的圆形截面试样, 应  $r \geq 0.75d_0$ ; 厚度  $\geq 3\text{mm}$  的板材使用的矩形截面试样, 应  $r \geq 12\text{mm}$ )。平行部分中测量伸长用的  $K$  度称为标距。受力前的标距称为原始标距, 记作  $L_0$ , 通常在其两端划细线标志。平行部分长度记作  $L_c$ , 对于直径  $\geq 4\text{mm}$  的棒材使用的圆形截面试样, 应  $L_c \geq L_0 + d_0/2$ ; 对厚度  $\geq 3\text{mm}$  的板材使用的矩形截面试样, 应  $L_c \geq L_0 + 1.5\sqrt{S_0}$ 。

若按试样标距  $L_0$  和横截面面积  $S_0$  间关系分, 有比例试样和非比例试样两种。比例试样系按公式  $L_0 = K\sqrt{S_0}$  计算而得到的试样, 式中系数  $k$  通常为 5.65 或 11.3。前者称为短试样, 后者称为长试样。对圆形试样来说, 原始标距分别等于  $5d_0$  和  $10d_0$ 。一般应采用短试样, 长试样仅系过渡性质。非比例试样的  $L_0$  和  $S_0$  无上述



关系。

国标 GB / T228-2002 中，对试样形状、尺寸“公差和表面粗糙度均有明确规定。本次实验采用  $d_0=10\text{mm}$  的圆形截面短试样。

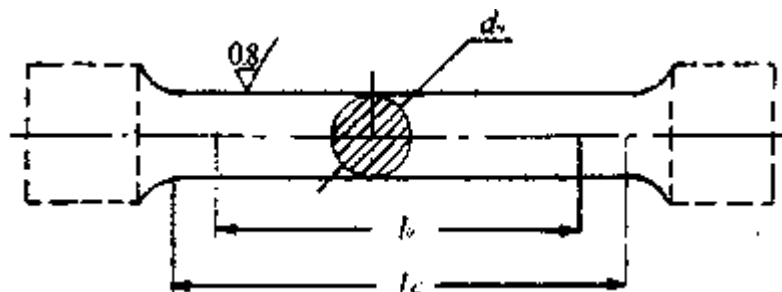


图 8-1 圆形标准试样

#### 4) 试验原理

##### 45 钢拉伸（采用图解法）

用电子万能试验机自动测试系统可直接测得  $R_{eH}$ 、 $R_{eL}$  和  $R_m$ ，并不须绘制拉伸图。但为了让同学直观地理解这几个性能指标的定义，也为了让同学学会使用电子引伸计的方法，我们采用图解法。

把试样安装到试验机上，并将电子引伸计安装到试样上后，开动试验机就能自动绘制出  $F-\Delta L$  曲线（图 8-2），从这曲线可以看出低碳钢拉伸过程中的四个阶段，并求出  $R_{eH}$ 、 $R_{eL}$  和  $R_m$ 。

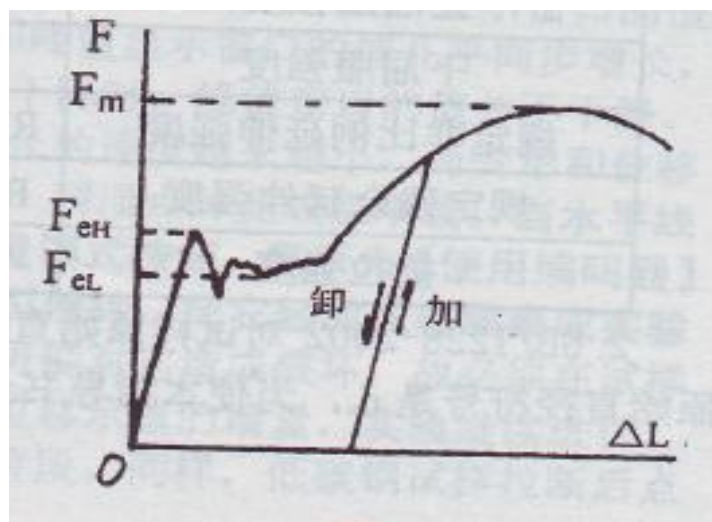


图 8-2 45 钢的拉伸曲线

应注意：上屈服强度  $R_{eH}$  是试样发生屈服而力首次下降前的最高应力。

下屈服强度  $R_{eL}$  是在屈服期间不计初始瞬时效应（载荷第一次急剧下降）时的最低应力。

抗拉强度  $R_m$  是试样在屈服阶段之后所能抵抗的最大力对应的应力。对于无明显屈服（连续屈服）的材料为试验期间的最大力对应的应力。

在强化阶段任时刻卸载、再加载，可以看到加工硬化现象。

在  $F_m$  以前，变形是均匀的。从  $F_m$  开始，产生局部伸长和颈缩，由于“颈子”截面减小，使载荷随之下降，最后断裂。断口呈杯锥形。

测量断后标距  $L_u$ ，和断后颈缩处最小直径  $d_u$ ，按下面公式计算断后伸长率  $A$  和断面收缩率  $Z$ ：

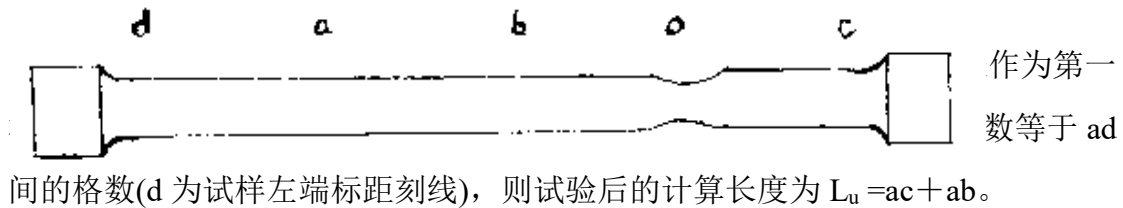
$$A = (L_u - L_0) / L_0 \times 100\%$$

式中  $A$  是用短试样测得的伸长率， $L_0$  应该用名义尺寸 50mm。

注意：拉断后将两段试样在断裂处对齐，使其轴线在一条直线上并尽量挤紧后测量标距部分的长度  $L_u$ 。

测量  $L_u$  通常有两种情况：

- (1) 若试样在原标距长度的中央 1/3 范围内断裂时，可直接测出  $L_u$ 。
- (2) 若试样断裂处不在标距长度的中央 1/3 范围内，要用位移法换算。具体方法通过下例说明：



断面收缩率  $Z$ ：

$$Z = (S_0 - S_u) / S_0 \times 100\%$$

式中  $S_0$  和  $S_u$  分别是原始横截面积和断后最小横截面积

说明：

- ① 这里采用了新国标 GB/T228-2002 规定的符号，为便于同学学习，现将新

老标准性能名称符号对照列表如下：

② GB/T228 -2002对试样径规定的符号是d，但国标对压缩试样和扭转试样规定的原始直径符号是 $d_0$ 。

表8-1 新旧国标对照表

新标准		旧标准	
性能名称	符号	性能名称	符号
断面收缩率	Z	断面收缩率	$\Psi$
断后伸长率	A	断后伸长率	$\delta_5$
	$A_{11.3}$		$\delta_{10}$
	$A_{x1mm}$		$\delta_{x1mm}$
屈服强度	/	屈服点	$\sigma_s$
上屈服强度	$R_{eH}$	上屈服点	$\sigma_{su}$
下屈服强度	$R_{eL}$	下屈服点	$\sigma_{sL}$
规定非比例延伸强度	$R_p$ 如 $R_{p0.2}$	规定非比例伸长应力	$\sigma_p$ 如 $\sigma_{p0.2}$
规定残余延伸强度	$R_r$ 如 $R_{r0.2}$	规定残余伸长应力	$\sigma_r$ 如 $\sigma_{r0.2}$
抗拉强度	$R_m$	抗拉强度	$\sigma_b$

## 5) 试验步骤

① **开机** 开启控制电脑，点击桌面上的快捷方式图标【newtest】，进入控制程序“主窗口”后，按【enter】，进入控制程序“试验窗口”。给“WEW”系列万能试验机测控箱油泵上电。

② **测量试样直径** 在试样标距两端和中间三个截面上测量直径，每个截面在相互垂直方向各测量一次，取其平均值。用二个平均值中最小者计算横截面面积，数据列表记录。试样直径为10mm左右，如偏差超过0.2mm，请检查原因或向老师询问。测量时系统在预热。

③ **装夹试样** 点击屏幕右下角的下行控制钮，让工作台带上夹头一起向下移动到最低点，此时油缸活塞处于最下端。上下夹头均为斜楔夹块，试样的夹持部位应夹于v型槽中央。先拿试样比较一下上下夹头间的距离是否合适，如需要调整，可按立柱上的上升或下降按钮，让下夹头改变位置，待上下夹头的间距合适后，再按【停止】按钮。

将上下夹头控制手柄向其中间转动，则两夹头打开，将试样的夹持部位放入v型槽中央，慢慢松开控制手柄，同时，另一同学注意上下移动试样，使其被

两夹头夹住的长度无太大区别。反向转动控制手柄，**注意稍用力夹紧试样。**

注意45钢实验试样上下夹持部位均须留出5~10 mm，以便安装引伸计。引伸计是精密测量仪器，安装时要注意用力不可太大。引伸计有一特制的垫片，把它插入标距杆的一端，轻压引伸计的两臂，则其两刀口间的距离正好为50mm。然后，将引伸计轻轻压在试样平行部分中部，用弹性元件，如橡皮筋或弹簧绕过试样紧套在每个刀口的两个刀耳上，注意不要绕过标距杆。这样引伸计就卡红试样上了。取下垫片；用手轻拨标距杆，它应不受干涉。

④ **实验参量设置** 本机力的量程和变形的量程自动设置，只须选择变形测量模式。它的切换按钮为【使用引伸计】和【使用编码器】。使用编码器即是用作工作台的位移作为变形数据，用于铸铁拉伸实验。使用引伸计用于做45钢拉伸实验、

⑤ **测试** 变形测量模式选好后，只要点击【启动】（机器提示保存文件的地方皆保存，注意记录文件名和目录），本机程序会自动调零，开始拉伸实验。注意实验中不可点击【停止】或按主机上的【急停】按钮，除非实验还在比例阶段或发生重大事故。45钢实验在进行比例阶段后停止将会使试样报废。

**45钢拉伸实验时**，请注意观察图形和数据显示窗口。在比例阶段，变形显示窗口的值很小，大大小于位移显示窗口的值，试验力和峰值显示窗口的值几乎同步增长。在屈服阶段，变形显示窗口的值开始较快增加，而试验力下降时，峰值窗口的值并不下降。到了强化阶段，试验力和峰值显示同步增长，只不过增长的速度越来越小，而变形和位移的增量的差别也会逐渐变小，同样，曲线的斜率逐渐变小，到顶点时变成水平线1，当水平线的长度大约为绘图区网格单格宽度的 1 / 3时，点击变形测量模式按钮，显示为【使用编码器】后，此时要迅速拨下安装引伸计的弹性件，同时用手托住引伸计，把它轻放在电脑桌或实验机平台上。这是因为引伸计是精密测量仪器，试样断裂时可能对它造成破坏，故必须在试样断裂前取下。点击变形测量模式按钮后应变形的增量取为位移示值的增量，实验继续进行。而后，试验力开始小于峰值窗口的值，实验进入局部变形阶段。同样，45钢试样断后点击【停止】，保存实验文件，并纪录【峰值】。

⑥ **打印**

只需打印 45 钢拉伸实验曲线。点击【窗口】中的【分析窗口】，即进入分析窗口。点击【文件】中的【打印报告】 / 【打印选择】 / 【打印设置】，选择坐标为“实验力”和“变形”，并给出各坐标的最大值（最好为整数），使曲线充分占据图形区空间而又不溢出，以增加步骤 10 中的测量精度。点击【确定】后，页面又回到“分析窗口”。键入实验名称、实验者班级姓名。点击【打印报告】中的【打印】，就可通过网络打印机打印出所需图纸。如已退出，可在“分析窗口”中进入【文件】，【打开件】，读出保存的文件。

⑦ 取出拉断的试样。

注意保护 45 钢的断口。如还有实验，请转至步骤③。

⑧ 测量断后标距  $L_u$  和断后颈缩处最小直径  $d_u$ 。

本步骤只针对 45 钢拉伸实验，须将 45 钢试样两段的断口紧密对接好后再测量。测量颈缩处最小直径  $d_u$  时，在最小处互相垂直的两个方向测量直径。注意应用卡尺测量面前端较窄的部位，以免由于弧线的影响而测量不到实际的最小值。

⑨ 关机。

应先关油泵电源和测控箱电源，在退出本程序后，再关计算机。

## 6) 试验结果处理

将原始记录按附表 3 和表 4 作初步处理，再计算各性能指标，并对拉伸断口进行分析。

附表3 45钢拉伸试样尺寸

材料	热处理工艺	原始长度 / mm	原始平均直径 $d$ / mm			原始截面积 $A$ / mm <sup>2</sup>		断后长度 / mm	断裂处最小直径 $d_u$ / mm			断裂处 最小截面积 $A_u$ / mm <sup>2</sup>
			上	中	下	最小	平均		$d_{u1}$	$d_{u2}$	平均	
45 钢	退火											
	正火											
	不完全水淬											
	水淬											
	油淬											
	水淬+低温回火											
	水淬+中温回火											
	水淬+高温回火											

附表4 不同热处理工艺的45钢强度及塑性指标

材料	热处理工艺	下屈服强度 $\sigma_s$ / MPa	抗拉强度 $\sigma_b$ / MPa	断后伸长率 $\delta$ / %	断面收缩率 $\psi$ / %
45 钢	退火				
	正火				
	不完全水淬				
	水淬				
	油淬				
	水淬+低温回火				
	水淬+中温回火				
	水淬+高温回火				

### 3. 冲击试验

#### 1) 试验目的

- ① 熟悉和了解一次摆锤冲击试验机的结构和使用方法；
- ② 弄清 U 型冲击试件与冲击试验机和 V 型冲击试样与冲击试验机的差别和适用情况；
- ③ 掌握用系列冲击方法测定冷脆转化温度；
- ④ 了解影响冲击数据的主要因素；
- ⑤ 根据冲击试样的材料、热处理状态、材质及取样部位等来分析冲击弯曲试验所得的各个数据。

#### 2) 试验原理

冲击试验是把要试验的材料制成规定形状和尺寸的试样，在冲击试验机上一次冲断，根据冲断试样所消耗的功或试样断口形貌特点，经过整理，得到规定定义的冲击性能指标，例如冲击韧度和冲击吸收功。冲击试验所得的性能指标没有明确物理概念，所得的性能数值也不能用于对所测性能做定量评价或设计计算。但冲击试验简单方便，是最容易获得材料动态性能的试验方法。迄今已积累了大量的冲击试验数据和评价这些数据的经验，并且冲击试验对材料使用中至关重要的脆性倾向问题和材料冶金质量、内部缺陷情况极为敏感，是检查材料脆性倾向和冶金质量的非常方便的办法。因此，这种试验方法在产品质量检验、产品设计和研究工作中仍然得到了广泛应用。近 20 年来，断裂力学和断裂金属学飞速发展，表明冲击试验得到的冲击韧度与断裂韧度有比较密切的关系，可用简单的冲击试验值来估计断裂韧度，或直接用冲击试验的方法来测量材料动态断裂韧度，并且设计了带有冲击示波装置和电子计算机的冲击试验机，用以显示和记录冲击变形过程中弹性变形、塑性变形、裂纹萌生和裂纹扩展诸阶段的能量分配，对于测定断裂性能和研究断裂过程具有重要意义。

##### ① 冲击试验原理

测量冲击韧度最普遍的方法是一次摆锤弯曲冲击试验。按 GB / T 229—1994

规定，将材料制成带缺口的标准试样，放在材料试验机的机座上，让一重量为  $G$  的摆锤自高度  $H$  自由下摆，摆锤冲断试样后又升至高度  $h$ ，如图 9-1 所示。摆锤冲断试样所失去的能量即为试样在被冲断过程中吸收的功，称为冲击吸收功，用  $A_k$  表示，单位为  $J$ 。用断口处单位面积上所消耗的冲击吸收功大小来衡量材料的冲击韧度，即

$$\alpha_k = A_k / F = G(H - h) / F$$

式中： $\alpha_k$  为冲击韧度 ( $J / cm^2$ )； $F$  为试样缺口处的横截面积 ( $cm^2$ )； $A_k$  为冲击吸收功 ( $J$ )； $G$  为摆锤重力 ( $kg$ )； $H$  为摆锤初始高度 ( $m$ )； $h$  为摆锤冲断试样后上升的高度 ( $m$ )。

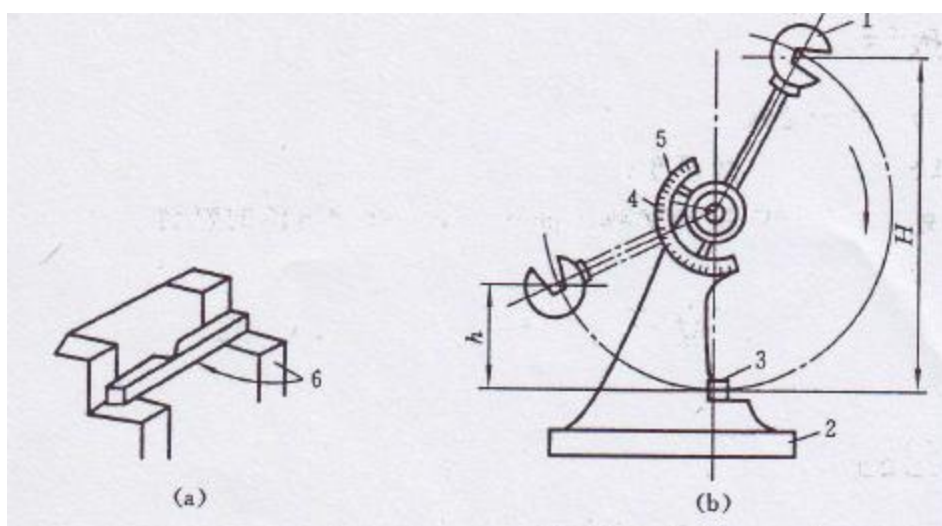


图 9-1 摆锤式冲击试验原理图

1-摆锤；2-机架；3-试样；4-表盘；5-指针；6-支座

## ② 冲击试样的类型和要求

冲击试样类型较多，常用的试样尺寸为  $10mm \times 10mm \times 55mm$ ，缺口为 V 形和 U 形两种。缺口处断面尺寸为  $8mm \times 10mm$ 。当无法切取上述试样时，可采用缺口规格相对应的  $7.5mm \times 10mm \times 55mm$  和  $5mm \times 10mm \times 55mm$  小尺寸试样。其中  $5mm \times 10mm \times 55mm$  试样常用于簿形板树检验。

图 9-2 为我国 U 形和 V 形缺口冲击试样的尺寸和公差范围。

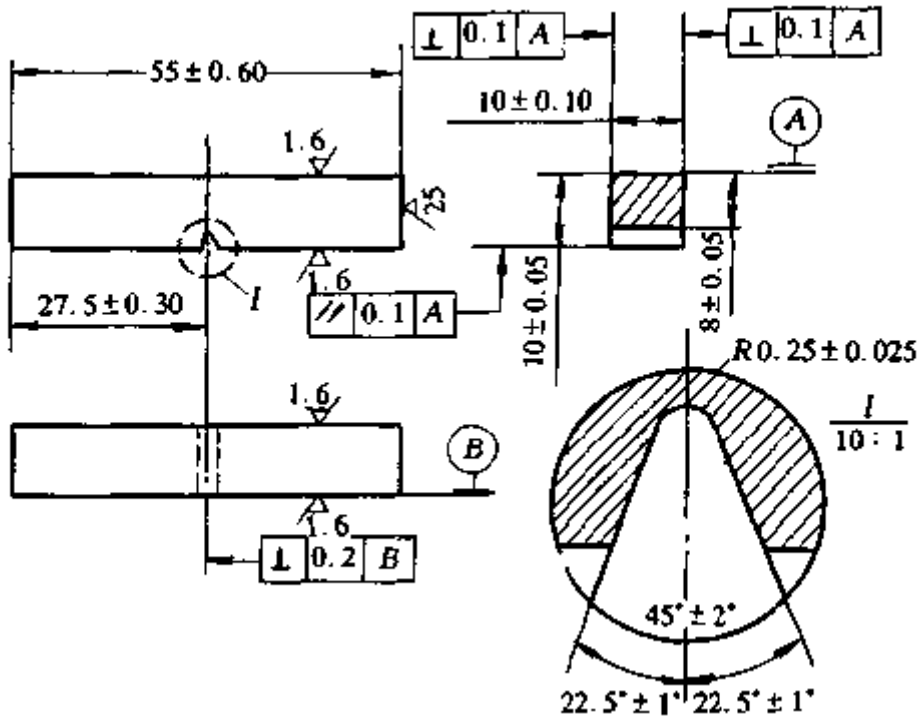
一次摆锤冲击弯曲试样目前常用的有两种：一是 U 型试样如图 9-2a；一是 V 型试样如图 9-2b，为了保证试样的几何形状和尺寸要求的四个平面最后要在平面磨床上磨加工，然后在安装成型的砂轮开出缺口，对硬度不高的材料刨或钻缺



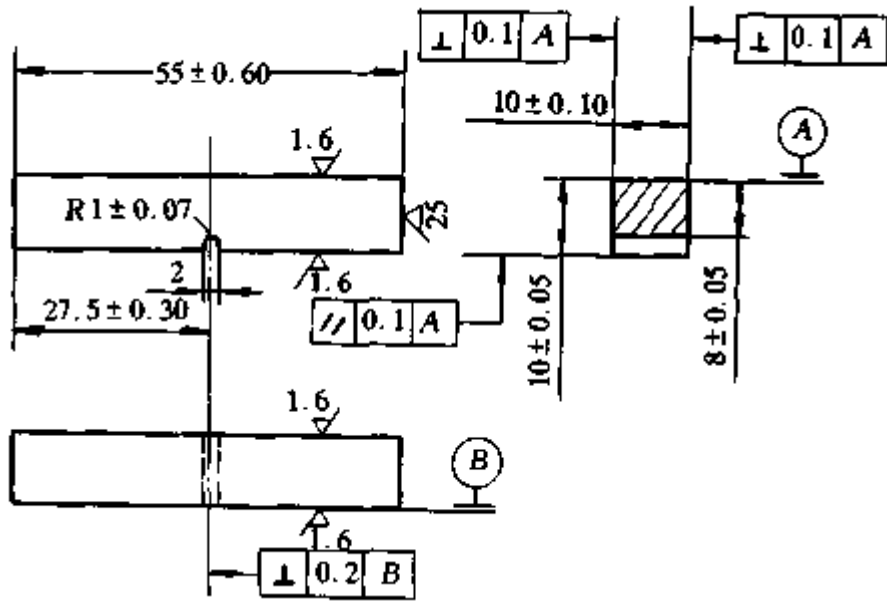
口也可，最后保证横截面四周应为  $90^\circ \pm 0.5^\circ$ ，缺口轴线与试样纵轴角应为  $90^\circ \pm 2^\circ$ 。

若有下列情况的试样不可作试验：

- A、试样的缺口内有横向加工痕迹；
- B、试样上有淬火或其它裂痕；
- C、棱边上有毛刺；
- D、外形及尺寸公差符合要求。



a



b

图 9-2

a 标准 U 型缺口冲击试样, b 标准 V 型缺口冲击试样

### ③ 一次摆锤的几种冲击试验

#### 1)、金属常温冲击韧性试验

金属常温冲击韧性试验法根据国家标准 GB/T229-1994, GB/T12778-1991 进行, 所用试样规定以梅氏试样作为冲击韧性试验的标准试样, 若用其它非标准试样冲击值不能相互核算, 试验机最大能量一般不应大于 294.3J(30kg·m), 若用其它能量级的试验机可在冲击韧性符号  $a_k$  后, 附名, 例如, 用 147J(15kg·m) 试验时, 冲击韧性应表示为  $a_k / 15$

冲击韧性  $a_k$  的计算:

$$a_k = \frac{A_k}{F} \quad (\text{J/cm}^2, \text{kg}\cdot\text{m/cm}^2)$$

$A_k$  —— 击断试样所消耗的冲击功 J、kg·m

$F$  —— 试验前试样缺口处的横断面积:  $\text{cm}^2$

$a_k$  —— 要精确到 1  $\text{J/cm}^2$

#### 2)、金属低温冲击韧性试验:

金属低温冲击韧性试验法根据 GB/T229-1994 规定进行所用试样和试验机完全同于常温冲击, 只是在低于室温的任一温度下(常用  $0\sim 100^\circ\text{C}$ ), 将试样放大装有低温介质的容器内保温, 试样在规定试验温度下保温时间不少于 15 分钟, 在将不同试验温度的所有试样放在同一箱内冷却时, 第一

个试验温度的保温时间仍不少于 15 分钟，下一个试验温度的变化不大于 10°C，允许下一个试验温度到温后，保温时间可以缩短 10 分钟，如温度变化不大于 5°C 则可为 5 分钟。

冷却液或控制试样的温度低于规定试验温度，其过冷度的大小取决于空温与规定试验温度之差，如室温为 20°C±5°C 时，试样取出保温箱随即正确的要放在试验机，到摆锤打击试样时的总时间在 5 秒钟之内，此时一般采用的过冷度为：试验温度在 0~ -60°C 时 3~4°C，试验温度低于 -60°C 时 4—6°C。

### 3)、用系列冲击方法测定冷脆转化温度

为了表明材料低温脆性倾向大小，确定韧性到脆性的转变温度，一种办法是测定材料低温韧性转化温度即“冷脆转化温度”，常用的冷脆转化温度表示方法有两种：一是用 U 形缺口的梅氏冲击试样，在规定的支座尺寸及刀口尺寸的冲击试验机上进行不同温度的冲击试验，测出各温度下的冲击值  $a_k$  与  $0.4a_{kmax}$  的温度定为冷脆转化温度  $T_k$ °C，另一种是用 V 形缺口的夏培冲击试样在其规定的支座尺寸及刀口尺寸的冲击试验机上进行不同温度的冲击试验，然后测量试样断口上纤维状韧性断口面积与结晶状脆性断口面积的比，具体方法是测量出 A 和 B 的尺寸准确到 0.5 毫米或 0.02 英寸(图 6)。按测量所用的单位查表或计算出剪切区和解理区的面积比，面积比为 50% 时的相当温度称为“断口形貌转化温度”用符号 FATT 表示。

剪切断面百分比测定的其它几种方法：(1)根据规定所示的断口形态卡片来比较断口形态；(2)放大断口表面并与一预先标准的覆盖卡片对比，或用面积仪测剪切断面百分比；(3)以合适的放大倍数照相并用面积仪测量剪切断面面积。

### 3) 试验方法与步骤

- ① 检查试样的尺寸及光洁度，注意缺口处的加工质量；
- ② 检查试验机；

(1)将摆锤抬起空冲 1~2 次，看指针是否指零，可用调节指针松紧螺钉及拨动指针机构的原始位置，直到指针指零为止，而且不打滑。

(2)检查刹车机构是否良好。

(3)查看两支座间的距离是否是 40mm 并是否对称。

③ 装好保护网，此时常温试验就可以做，若要求做冷脆转化温度则应；

④ 根据要求的试验温度在保温箱内调节好温度，室温至-60℃常用干冰的酒精混合控制温度，温度调好后放入试样保温。注意选好过冷度；

⑤ 迅速将试样取出按规定将试样放好尽快打断试样，取出样品到打断的总时间一般不超过 5 秒；

⑥ 读出指针读数并记录；

⑦ 指针复原，刹车使摆锤停止摆动；

⑧ 切记!!!

(1)安放试样，释放摆锤要一个人操作，严禁二人同时操作。

(2)室内所有人员注意力要集中，要远离摆锤摆动平面。

(3)加好防护网，防止试样飞出损伤人及其它设备。

(4)刹车时用力不要太大，防止猛然停车，这样容易损坏试验机。

(5)低温介质可用于冰，液氢禁用液氧，如用液氢时，须严格注意安全，注意勿近烟火油污棉丝，尽量减少摩擦，维护好电气开关触点防止打火。

#### 4) 试验数据整理

附表 5 45 钢冲击实验数据

材 料	热处理 状态	试样缺口处 原始横截面积 $F$ ( $\text{cm}^2$ )	冲击功 $A_K$ ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )	冲击韧性 $a_K = A_K / F$ ( $\text{N} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ )
45 钢	退火			
	正火			
	不完全水淬			
	水淬			
	油淬			
	水淬后低温回火			
	水淬后中温回火			
	水淬后高温回火			

## 4. 弯曲试验

### 1) 金属弯曲力学性能试验的特点

在工程和建筑上，很多构件和零部件是在弯曲载荷作用下工作的，如桥式起重横梁、火车的轮轴、电缆桥架等，需要对这些零件或构件的材料进行弯曲性能评定，因此弯曲力学性能试验也是生产中常用的一种金属性能试验方法。

金属弯曲力学性能试验按 YB/T 5349—2006 《金属弯曲力学性能试验方法》进行，是指采用三点弯曲或四点弯曲方式对圆形或矩形横截面试样施加弯曲力，一般直至断裂，测定其弯曲力学性能指标。金属弯曲试验有以下特点：

1) 弯曲试验试样形状简单、操作方便，同时不受试样偏斜的影响。由于塑性材料在试验时很难弯曲断裂，故金属弯曲力学性能试验可以稳定地测定脆性和低塑性材料的抗弯强度，同时用挠度表示塑性，能明显地显示脆性或低塑性材料的塑性，所以这种试验很适合于测定铸铁、铸造合金、工具钢及硬质合金等脆性与低塑性材料的力学性能和工艺性能。图 10-1 为热处理工艺对几种合金工具钢弯曲力学性能影响的试验结果，据此可确定最佳淬火温度范围。

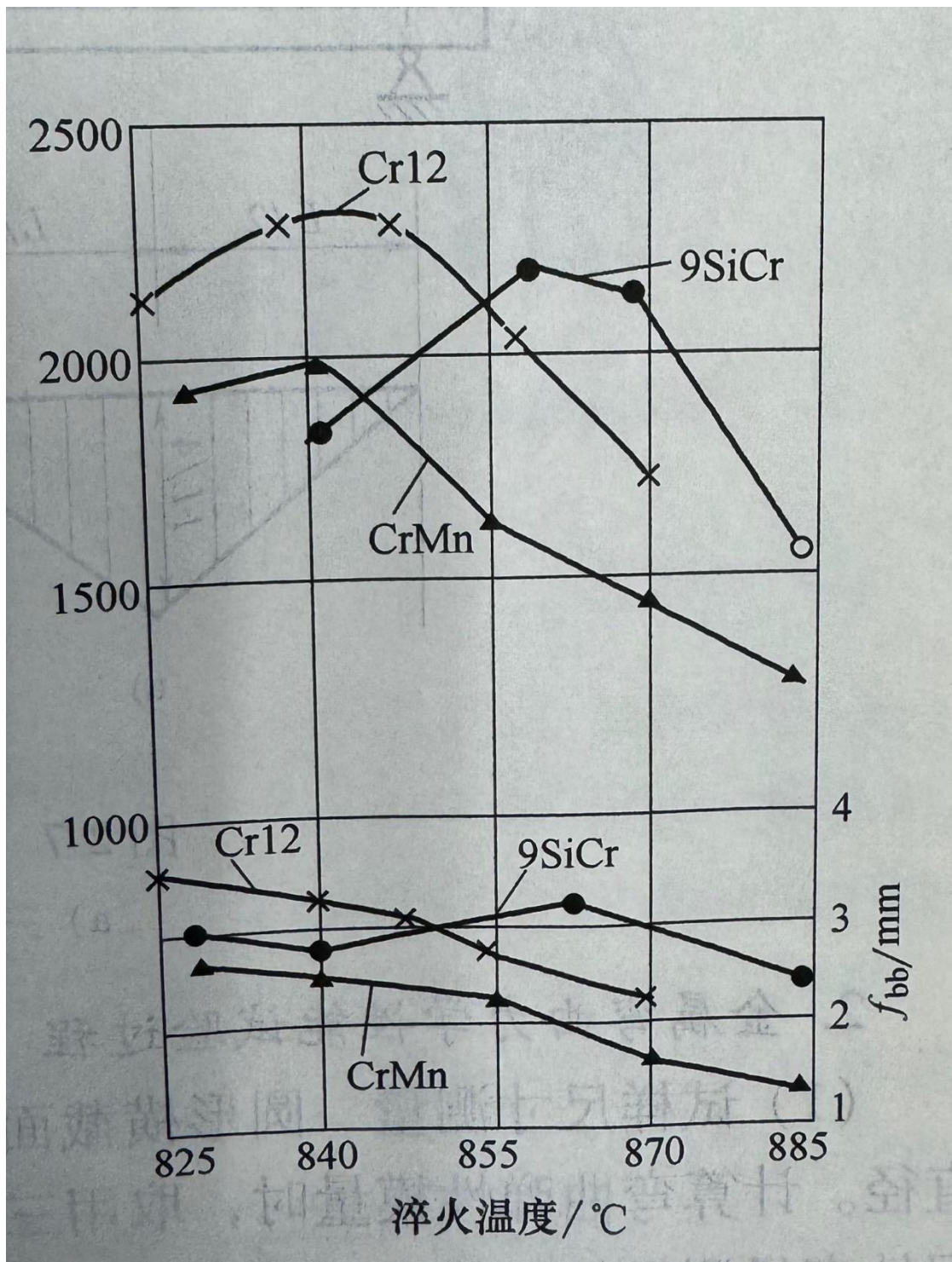


图 10-1 几种合金工具钢的淬火温度对抗弯强度及挠度的影响（150℃回火）

- 2) 弯曲试验不能使塑性很好的材料破坏，不能测定其断裂弯曲强度，但可以比较一定弯曲条件下不同材料的塑性，如进行弯曲工艺性能试验。
- 3) 弯曲试验时，试样断面上的应力分布也是不均匀的，表面应力应变最大，而心部最小，可以较灵敏地反映材料表面缺陷情况，因此，常用来检查材料的表

面质量；比较利鉴别渗碳层和表面淬火层等表面热处理后工件的质量和性能。

## 2) 金属弯曲力学性能试验的原理及过程

### 1) 金属弯曲力学性能试验原理

金属弯曲力学性能试验所用圆形截面试样的直径 5~45mm，矩形截面试样的  $h \times b$  为 5 mm×7.5 mm（或 5 mm×5 mm）至 30 mm×40 mm（或 30 mm×30 mm）。试样的跨距  $L$  不小于直径或高度的 16 倍，要求试样有一定的加工精度，但铸铁弯曲试样表面可不加工。试样切取的方向和部位应按有关标准或 GB/T 2975—1998 规定执行。切取样坯和机加工试样的方法不应改变材料的弯曲力学性能。进行对比试验时，试样横截面形状、尺寸和跨距应相同。

进行弯曲试验时，将圆形或矩形及方形试样放置在一定跨距  $L$  的支座上，进行三点弯曲或四点弯曲试验，通过记录弯曲力  $F$  和试样挠度  $f$  之间的关系，求出断裂时的抗弯强度和最大挠度，以表示材料的强度和塑性，如图 10-2 所示。

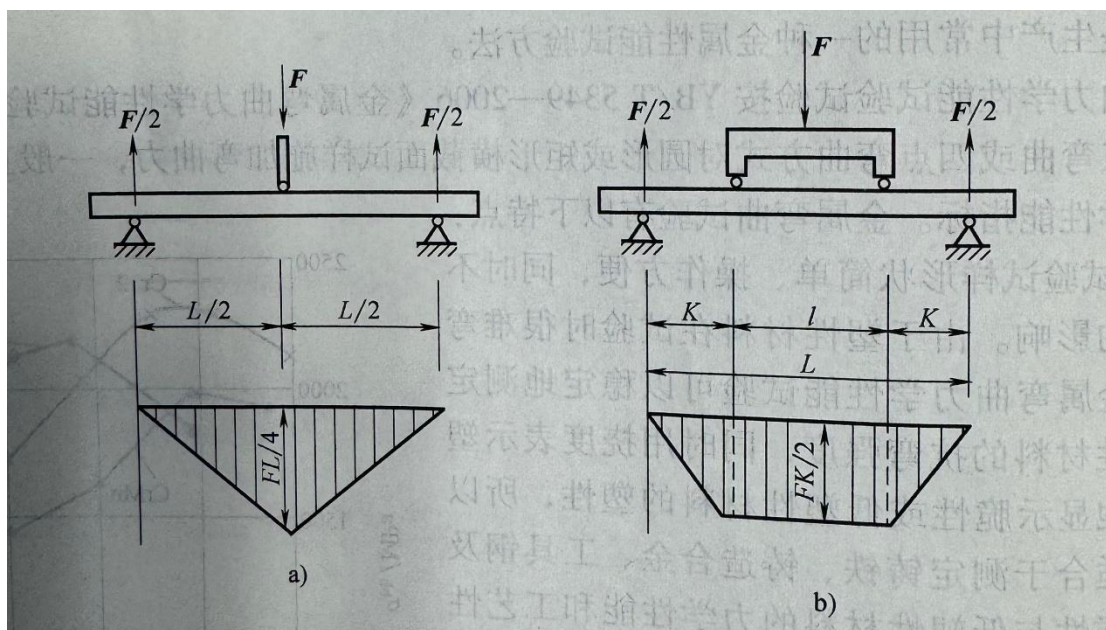


图 10-2 金属弯曲试验加载方式示意图

a) 三点弯曲加载    b) 四点弯曲加载

对于圆形、矩形横截面试样，一般每个试验点需试验 3 个试样；对于薄板试样，每个试验点至少试验 6 个试样，试验时，拱面向上和向下各试验 3 个试样。

用四点弯曲的加载方式，一般可以得到比较准确的结果，同时也能较好地反

映金属的内部缺陷影响，因为弯矩均匀分布在试样工作长度上，试样破断是发生在该段体积内某些组织缺陷较集中的地方；而用三点弯曲加载，则总是在集中载荷  $F$  的试样中点处破坏，在其他部位的缺陷不易显示出来。尽管如此，由于三点弯曲试验方法比较简单，在工厂实验室中常被采用。

## 2) 金属弯曲力学性能试验过程

### ① 试样尺寸测量

圆形横截面试样应在跨距两端和中间处两个相互垂直的方向测量其直径。计算弯曲弹性模量时，取用三处直径测量值的算术平均值；计算弯曲应力时，取用中间处直径测量值的算术平均值。

矩形横截面试样应在跨距的两端和中间处分别测量其高度和宽度。计算弯曲弹性模量时，取用三处高度测量值的算术平均值和三处宽度测量值的算术平均值。计算弯曲应力时，取用中间处测量的高度和宽度。对于薄板试样，高度测量值超过其平均值 2% 的试样不应用于试验。

### ② 试验设备

各类万能试验机和压力试验机均可用于金属弯曲力学性能试验。试验机精确度为一级或优于一级。试验机应能在规定的速度范围内控制试验速度，加卸力应平稳、无振动、无冲击。

试验机应有三点弯曲和四点弯曲试验装置。施力时弯曲试验装置不应发生相对移动和转动。

试验机应配备记录弯曲力-挠度曲线的装置。试验机应定期按 JJG139、JJG157 或 JJG475 检定规程进行校验。

### ② 弯曲试验装置

三点弯曲和四点弯曲试验装置和薄板试样用三点弯曲和四点弯曲试验装置如图 10-3 和图 10-4 所示。试验装置中的支承滚柱直径（或支承刀的刀刃半径）和施力滚柱直径（或施力刀的刀刃半径）根据试样尺寸按 YB/T 5349—2006 选用。

试验时，滚柱应能绕其轴线转动，但不应发生相对位移。两支承滚柱（或支承刀）间和施力滚柱（或施力刀）间的距离应分别可调节，并带有指示距离的标记，跨距应精确到士 0.5%。滚柱的硬度应不低于试样的硬度，其表面粗糙度  $R_a$



值应不大于 0.8 $\mu$ m。

应根据所测弯曲力学性能指标按 YB/T5349—2006 选用相应精确度的挠度计。挠度计座定期参照 GB/T 12100-2002《单轴试验用引伸计的标定》的规定进行标定，标定时挠度计工作状态应尽可能与试验工作状态相同。

试验时应在弯曲试验装世周围装设安全防护装置，以防试验时试样断裂碎片飞出，伤害试验人员或损坏设备。

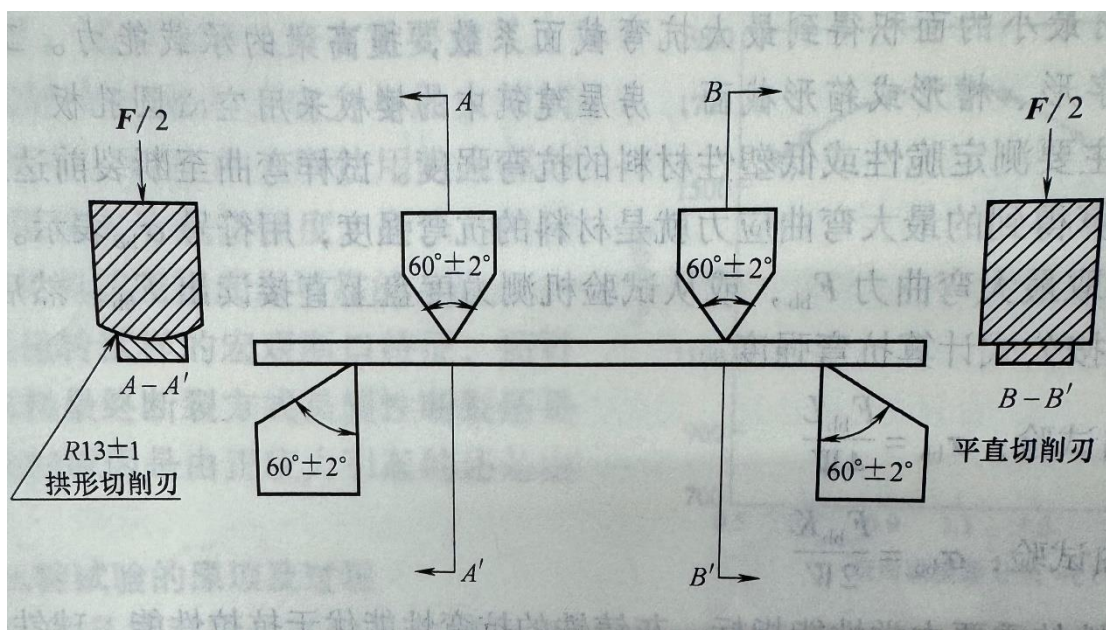


图 10-3 薄板四点弯曲试验示意图

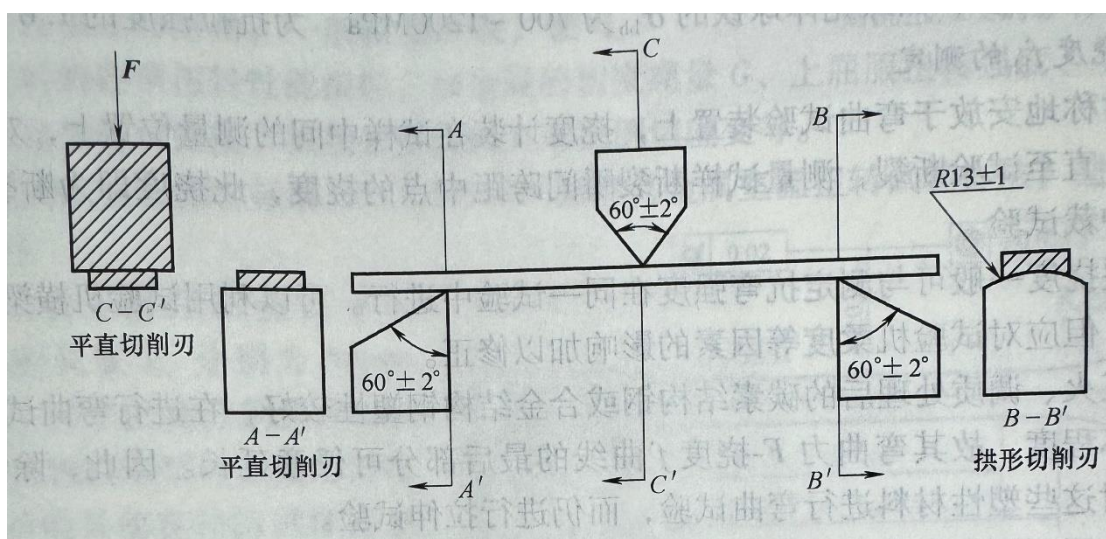


图 10-4 薄板三点弯曲试验示意图

### 3) 金属弯曲力学性能的确定

金属弯曲力学性能试验应在室温 10~35℃ 下进行。试验时，弯曲应力速率应控制在 3~30MPa/s 范围内某个尽量恒定的值。通过弯曲试验得到的弯曲载荷和试样弯曲挠度的关系曲线称为弯曲图，图 10-5 为铸铁弯曲图。并可根据弯矩  $M$  值，应用材料力学公式求出弯曲强度和挠度。

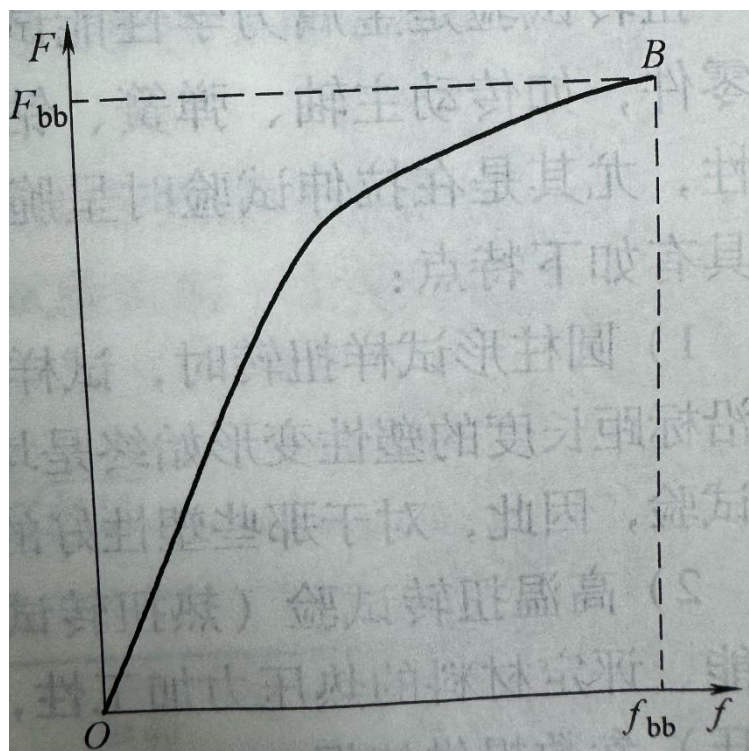


图 10-5 铸铁的弯曲图

#### 1) 抗弯强度 $\sigma_{bb}$

试样在弹性范围内弯曲时，受拉侧表面的最大弯曲应力，按下式计算：

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W}$$

式中： $M$ —最大弯矩，对三点弯曲  $M = FLs/4$ ；对四点弯曲  $M = FK/2$ 。

$W$ —为抗弯截面系数，对于直径为  $d$  的圆形试样， $W = \pi d^3/32$ ；对于宽度为  $b$ ，高为  $h$  的矩形试样， $W = bh^2/6$ 。

抗弯截面系数是衡量截面抗弯能力的一个几何量， $W$  越大， $\sigma_{\max}$  越小，截面的抗弯能力越强。抗弯截面系数不仅与截面的尺寸有关，还与截面的形状有关，梁的合理截面形状是指用最小的面积得到最大抗弯截面系数，提高梁的

承载能力。工程中的吊车梁、桥梁常采用工字形、槽形或箱形截面，房屋建筑中的楼板采用空心圆孔板，道理就在于此。

弯曲试验主要测定脆性或低塑性材料的抗弯强度。试样弯曲至断裂前达到的、按弹性弯曲应力公式计算得到的最大弯曲应力就是材料的抗弯强度，用符号  $\sigma_{bb}$  表示。从图 2-10 所示的曲线 B 点读取最大弯曲力  $F_{bb}$ ，或从试验机测力度盘上直接读出  $F_{bb}$ ，然后计算断裂前的最大弯矩，再按公式计算抗弯强度。

三点弯曲试验：

$$\sigma_{bb} = \frac{F_{bb}L}{4W}$$

四点弯曲试验：

$$\sigma_{bb} = \frac{F_{bb}K}{2W}$$

$\sigma_{bb}$  是铸铁的重要力学性能指标。灰铸铁的抗弯性能优于抗拉性能，球铁和可锻铸铁的  $\sigma_{bb}$  比灰铸铁的大得多，如珠光体球铁的  $\sigma_{bb}$  为 700~1200MPa，为抗拉强度的 1.6~1.9 倍。

## 2) 断裂挠度 $f_{bb}$ 的测定

将试样对称地安放于弯曲试验装置上，挠度计装在试样中间的测量位置上，对试样连续施加弯曲力，直至试验断裂，测量试样断裂瞬间跨距中点的挠度，此挠度即为断裂挠度  $f_{bb}$ 。此方法用于仲裁试验。

测定断裂挠度一般可与测定抗弯强度在同一试验中进行。可以利用试验机横梁位移来测定断裂挠度，但应对试验机柔度等因素的影响加以修正。

退火、正火、调质处理后的碳素结构钢或合金结构钢塑性较好，在进行弯曲试验时，一般达不到破坏程度，故其弯曲力  $F$ -挠度  $f$  曲线的最后部分可任意延长。因此，除特殊情况外，一般不对这些塑性材料进行弯曲试验，而仍进行拉伸试验。

弯曲试验还可测定弯曲弹性模量  $E_b$  和断裂能量  $U$  等力学性能指标。

# 第四部分 实验报告

## 第一章 预习报告

实验一预习报告：

1. 金相光学显微镜的成像原理。
2. 简述工业纯铁、亚共析钢、共析钢、过共析钢的平衡结晶过程。
3. 简述共晶白口铁、亚共晶白口铁、过共晶白口铁的平衡结晶过程。

实验二预习报告：

1. 塑性变形的物理本质及基本方式。
2. 冷变形金属在加热过程中各阶段组织与性能的变化。
3. 金相试样制备的流程。

实验三预习报告：

1. 简述 4 种基本热处理工艺方法（退火、正火、淬火、回火）及钢热处理后的显微组织。
2. 布氏和洛氏硬度测定的基本原理和应用范围。
3. 简述静拉伸实验中屈服极限  $\sigma_s$ 、强度极限  $\sigma_b$ 、延伸率  $\delta$  及断面收缩率  $\psi$  的测定原理。
4. 简述一次摆锤冲击试验原理并解释名词冲击载荷、冲击韧性、冲击吸收能量。
5. 简述金属弯曲试验的原理及其特点、应用。

## 第二章 实验一实验报告

### 1.实验目的

### 2.实验内容

### 3.实验结果

画出所观察到的纯铁及碳钢（4 种），铸铁（8 种）的组织示意图（各画在

一个 $\phi 50\text{mm}$ 的圆内), 在对应位置处标明组成物名称, 在圆的下方标注材料名称, 热处理状态和浸蚀剂。

## 4. 论述题

- 4.1. 试分析不同铸铁中石墨形态对性能的影响。
- 4.2. 简述你在实验时首次观察的一种试样的材料性质, 并阐述其贴近日常生活的一项应用。

## 第三章 实验二实验报告

### 1. 实验目的

### 2. 实验原理

### 3. 实验材料及设备

### 4. 实验内容

### 5. 实验结果及分析

打印自己金相制备后的试样组织图, 贴在此部分, 并标注变形量, 有退火处理的样品需标注退火温度。

绘制以下条件的 7 个标样组织图: 不同变形量 (5%, 20%、50%和 70%) 的工业纯铁, 以及同一变形量 (50%) 对应不同温度 (500°C, 600°C和 800°C) 退火组织的工业纯铁, 并说明变形量和退火温度对其组织形态特征的影响。

根据同一变形量不同温度退火组织的观察, 对再结晶形核场所, 影响再结晶温度的因素进行分析。

### 6. 实验思考题

- 6.1. 金属材料在冷塑性变形后为什么强度和硬度会升高?

6.2. 金属具有的再结晶现象在实际生产中有何意义？

## 第四章 实验三实验报告

### 1. 实验目的

### 2. 实验仪器、实验材料

### 3. 实验内容

- ① 热处理
- ② 组织观察
- ③ 硬度
- ④ 拉伸
- ⑤ 冲击
- ⑥ 弯曲

### 4. 实验原理

（简单叙述热处理原理、硬度测试原理、拉伸试验原理、冲击试验原理、弯曲试验原理）

### 5. 实验结果

**注意：由于实验分为 8 小组，每组同学对应一组数据，整个数据表格的完成需要用到其余小组的数据，故每个同学需在自己的数据旁签上姓名**

#### ① 附表 1 的填写

照片打印，每个同学将自己对应的 45 钢热处理工艺后的显微组织图打印，裁剪成 50\*50mm，粘贴在表格下方

组织示意图，在  $\Phi 50\text{mm}$  的圆内画出组织示意图，图下方标注材料名称，热处理状态，放大倍数和浸蚀剂，并简明描述组织特征。

附表 1 45 钢热处理后的组织

序号	钢号	热处理工艺	浸蚀剂	显微组织
1	45	退火	4%硝酸酒精	
2		正火		
3		不完全水淬		
4		水淬		
5		油淬		
6		水淬+低温回火		
7		水淬+中温回火		
8		水淬+高温回火		

## ② 硬度数据

附表 2 45 钢退火和正火状态下的布氏硬度值

钢号	热处理工艺	布氏硬度测试参数						平均硬度 HB
		钢球直径 $D(\text{mm})$ : _____ 载荷 $P \text{ kgf}$ : _____ $P/D^2$ : _____ 保荷时间 $s$ : _____						
		第 1 点		第 2 点		第 3 点		
压痕 直径 $d_1(\text{mm})$	硬度 H B	压痕 直径 $d_2(\text{mm})$	硬度 H B	压痕 直径 $d_3(\text{mm})$	硬度 H B			
45	退火							
45	正火							

附表3 45钢淬火和回火状态下的洛氏硬度

材料	热处理工艺	洛氏硬度测试参数			
		压头类型:			
		总压力N (Kgf) :			
		第1点 HRC	第2点 HRC	第3点 HRC	HRC 平均值
45 钢	不完全水淬				
	水淬				
	油淬				
	水淬+低温回火				
	水淬+中温回火				
	水淬+高温回火				

③ 拉伸数据 (打印拉伸断口照片, 并对断口形貌进行初步分析)

附表4 45钢拉伸试样尺寸

材料	热处理工艺	原始长度 / mm	原始平均直径 $d/mm$			原始截面积 $A/mm^2$		断后 长度 / mm	断裂处最小直径 $d_u/mm$			断裂处 最小截 面积 $A_u/mm^2$
			上	中	下	最小	平均		$d_{u1}$	$d_{u2}$	平均	
45 钢	退火											
	正火											
	不完全 水淬											
	水淬											
	油淬											
	水淬+ 低温回火											
	水淬+ 中温回火											
	水淬+ 高温回火											



附表5 不同热处理工艺 45 钢拉伸测试数据

材料	热处理工艺	下屈服强度 $\sigma_s / \text{MPa}$	抗拉强度 $\sigma_b / \text{MPa}$	断后伸长率 $\delta / \%$	断面收缩率 $\psi / \%$
45 钢	退火				
	正火				
	不完全水淬				
	水淬				
	油淬				
	水淬+低温回火				
	水淬+中温回火				
	水淬+高温回火				

## ⑥ 冲击数据

附表6 不同热处理工艺 45 钢冲击试验数据

材 料	热处理 状态	试样缺口处 原始横截面积 $F (\text{cm}^2)$	冲击功 $A_K (\text{N} \cdot \text{m})$	冲击韧性 $a_K = A_K / F (\text{N} \cdot \text{m} / \text{cm}^2)$
45 钢	退火			
	正火			
	不完全水淬			
	水淬			
	油淬			
	水淬后低温回火			
	水淬后中温回火			
	水淬后高温回火			

## ⑦ 弯曲数据

附表 7 不同热处理工艺的 45 钢弯曲试验数据

材 料	热处理状态	最大弯曲应力 $F_{bb}$	最大弯曲应力对应挠度 $f_{bb}$	抗弯强度 $\sigma_{bb}$
45 钢	退火			
	正火			
	不完全水淬			
	水淬			
	油淬			
	水淬后低温回火			
	水淬后中温回火			
	水淬后高温回火			

## 6. 结果分析

根据实验结果，分析不同的热处理工艺对 45 钢的金相组织及力学性能的影响。

## 7. 思考题

现有某工厂生产某种实心轮时，原本计划采用 45 钢材，经过调质处理及表面淬火后再进行低温回火，使零件表面硬度达到 50HRC 以上，并且心部具有较好的韧性，先由于订单量太大而库存跟不上，45 钢已用完，而 15 号钢还有大量存货，试说明以下几个问题

- (1) 采用 45 钢时各个热处理工序的作用。
- (2) 能否直接改用 15 钢而不改变原有热处理工艺？为什么？
- (3) 如果只能采用 15 钢，能否通过改进热处理工艺使得零件的性能达到要求？如何改进？说明理由。