



# 工程材料学实验



山东农业大学  
机械与电子工程学院

# 目 录

前 言

金相分析基础知识

材料硬度试验基础知识

实验一 金相显微镜的使用与金相样品的制备

实验二 碳钢和铸铁的平衡组织和非平衡组织的  
观察与分析

实验三 综合实验

参考文献

附录 1 数码显微镜及其使用操作规程

附录 2 常见钢铁材料的金相图谱

## 前 言

本实验指导书是配合理工类非材料专业学生学习《工程材料基础》课程的课内教学实验所编写的。目的是加强学生动手实践能力，加深理解课堂学习的知识，特别是通过开放性的学生自主综合实验，使非材料专业的工科学生也能深刻理解材料的成分-工艺-组织-性能之间的关系，为学生以后在工作研究中解决工程材料方面的相关问题打下良好科学基础，从实验的角度配合实现《工程材料基础》课程的教学目标。

从培养理工类非材料专业学生能够合理选材并正确制定零件的加工工艺路线能力的目标出发，以钢铁材料为例，围绕工程材料的成分-工艺-组织-性能之间的关系主线，本实验指导书安排了“金相显微镜的使用与金相样品的制备”（实验一）和“碳钢和铸铁的平衡组织和非平衡组织的观察与分析”（实验二）两个基本实验和一个“综合实验”（实验三）。鉴于非材料专业的同学在材料实验方面缺乏基本知识，在正式实验内容之前安排了“金相分析基础知识”和“材料硬度试验相关知识”两节预备知识。为保证安全正确地完成实验内容，指导书中还节选了部分主要设备的操作规程以及部分钢铁材料的金相图谱，供实验时特别是自主实验时参考。

由于编者的水平有限，加之时间要求的紧迫，本实验指导书有不当之处敬请批评指正。

编者

2005年7月22日

# 金相显微分析基础知识

金相分析在材料研究领域占有十分重要的地位,是研究材料内部组织的主要手段之一。金相显微分析法就是利用金相显微镜来观察为之分析而专门制备的金相样品,通过放大几十倍到上千倍来研究材料组织的方法。现代金相显微分析的主要仪器为:光学显微镜和电子显微镜两大类。这里仅介绍常用的光学金相显微镜及金相样品制备的一些基础知识。

## (一) 光学金相显微镜基础知识

### 一. 金相显微镜的构造

金相显微镜的种类和型式很多,最常见的有台式、立式和卧式三大类。金相显微镜的构造通常由光学系统、照明系统和机械系统三大部分组成,有的显微镜还附带有多种功能及摄影装置。目前,已把显微镜与计算机及相关的分析系统相连,能更方便、更快捷地进行金相分析研究工作。

#### 1.1 光学系统:

其主要构件是物镜和目镜,它们主要起放大作用。并获得清晰的图象。物镜的优劣直接影响成象的质量。而目镜是将物镜放大的象再次放大。

#### 1.2 照明系统:

主要包括光源和照明器以及其它主要附件

##### (1) 光源的种类:

包括白炽灯(钨丝灯)、卤钨灯、碳弧灯、氙灯和水银灯等。常用的是白炽灯和氙灯,一般白炽灯适应于作为中、小型显微镜上的光源使用,电压为6—12伏,功率15—30瓦。而氙灯通过瞬间脉冲高压点燃,一般正常工作电压为18伏,功率为150瓦,适用于特殊功能的观察和摄影之用。一般大型金相显微镜常同时配有两种照明光源,以适应普通观察和特殊情况的观察与摄影之用。

##### (2) 光源的照明方式:

主要有临界照明和科勒照明。散光照明和平行光照明适应于特殊情况使用。

- 1) 临界照明:光源的象聚焦在样品表面上,虽然可得到很高的亮度,但对光源本身亮度的均匀性要求很高。目前很少使用。
- 2) 科勒照明:特点是光源的一次象聚焦在孔径光栏上,视场光栏和光源一次象同时聚焦在样品表面上,提供了一个很均匀的照明场,目前广泛使用。
- 3) 散光照明:特点是照明效率低,只适应投射型钨丝灯照明。
- 4) 平行光:照明的效果较差,主要用于暗场照明,适应于各类光源。

##### (3) 光路形式

按光路设计的形式,显微镜有直立式和倒立式两种,凡样品磨面向上,物镜向下的为直立式,而样品磨面向下,物镜向上的为倒立式。

##### (4) 孔径光栏和视场光栏

孔径光栏位于光源附近,用于调节入射光束的粗细,以改变图象的质量。缩小孔径光栏可减少球差和轴外象差,加大衬度,使图象清晰,但会使物镜的分辨率降低。视场光栏位于另一个支架上,调节视场光栏的大小可改变视域的大小,视场光栏愈小,图象衬度愈佳,观察时调至与目镜视域同样大小。

##### (5) 滤色片

用于吸收白光中不需要的部分,只让一定波长的光线通过,获得优良的图象。一般有黄色、绿色和蓝色等。

### 1.3 机械系统

主要包括载物台，镜筒、调节螺丝和底座。

- (1) 载物台：用于放置金相样品。
- (2) 镜筒：用于联动物镜、目镜等部件。
- (3) 调节螺丝：有粗调和细调螺丝，用于图象的聚焦调节。
- (4) 底座：起支撑镜体的作用。

## 二. 光学显微镜的放大成像原理及参数

### 2.1 金相显微镜的成像原理

显微镜的成象放大部分主要由两组透镜组成。靠近观察物体的透镜叫物镜，而靠近眼睛的透镜叫目镜。通过物镜和目镜的两次放大，就能将物体放大到较高的倍数，见图 1，显微镜的放大光学原理图。物体 AB 置于物镜前，离其焦点略远处，物体的反射光线穿过物镜折射后，得到了一个放大的实象 A1B1，若此象处于目镜的焦距之内，通过目镜观察到的图象是目镜放大的虚象 A2B2。

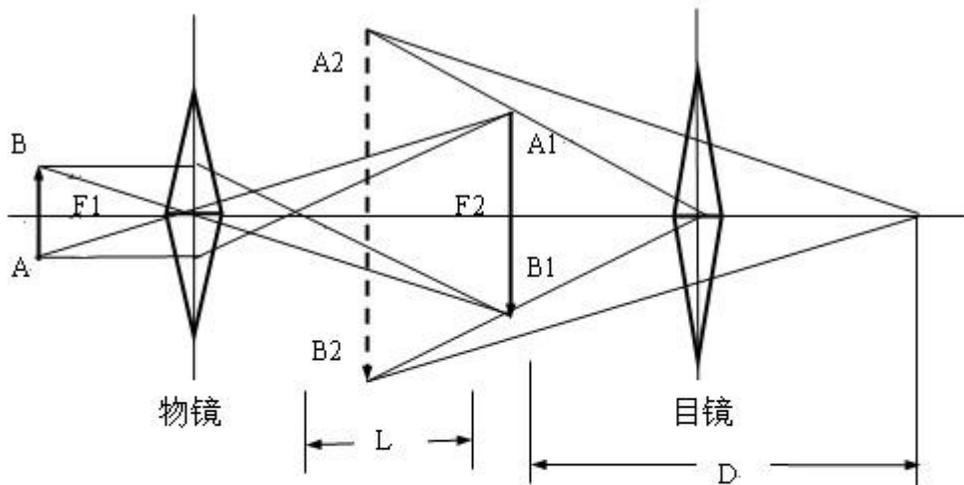


图 1 显微镜放大光学原理

AB—物体

A1B1—物镜放大图象

A2B2—目镜放大图象

F1—物镜的焦距。 F2—目镜的焦距

L—为光学镜筒长度（即物镜后焦点与目镜前焦点之间的距离）

D—明视距离（人眼的正常明视距离为 250mm）

### 2.2 显微镜的放大倍数

物镜的放大倍数  $M_{物} = A1B1/AB \approx L/F1$

目镜的放大倍数  $= A2B2/A1B1 \approx D/F2$

则显微镜的放大倍数为：

$M_{总} = M_{物} \times M_{目} = L/F1 \times D/F2 = L \times 250 / F1 \times F2$

式中：L—为光学镜筒长度（即物镜后焦点到目镜前焦点的距离）

F1—物镜的焦距。 F2—目镜的焦距

D—明视距离（人眼的正常明视距离为 250mm）

即显微镜总的放大倍数等于物镜放大倍数和目镜放大倍数的乘积。一般金相显微镜的放大倍数最高可达 1600 到 2000 倍。

由此可看出：因为 L 光学镜筒长度为定值，可见物镜的放大倍数越大，其焦距越短。在显微镜设计时，目镜的焦点位置与物镜放大所成的实象位置接近，并使目镜所成的最终倒立虚象在距眼睛 250 毫米处成象，这样使所成的图象看得很清楚。

显微镜的主要放大倍数一般通过物镜来保证，物镜的最高放大倍数可达 100 倍，目镜的最高放大倍数可达 25 倍。放大倍数分别标注在物镜和目镜各自的镜筒上。在用金相显微镜观察组织时，应根据组织的粗细情况，选择适当的放大倍数，以使组织细节部分能观察清楚为准，不要只追求过高的放大倍数，因为放大倍数与透镜的焦距有关，放大倍数越大，焦距越小，会带来许多缺陷。

### 2.3 透镜象差：

透镜象差就是透镜在成象过程中，由于本身几何光学条件的限制，图象会产生变形及模糊不清的现象。透镜象差有多种，其中对图象影响最大的是球面象差、色象差和象域弯曲三种。

显微镜成象系统的主要部件为物镜和目镜，它们都是由多片透镜按设计要求组合而成，而物镜的质量优劣对显微镜的成象质量有很大影响。虽然在显微镜的物镜、目镜及光路系统等设计制造过程中，已将象差减少到很小的范围，但依然存在。

#### (1) 球面象差：

1) 产生原因：球面象差是由于透镜的表面呈球曲面，来自一点的单色光线，通过透镜折射以后，中心和边缘的光线不能交于一点，靠近中心部分的光线折射角度小，在离透镜较远的位置聚焦，而靠近边缘处的光线偏折角度大，在离透镜较近的位置聚焦。所以形成了沿光轴分布的一系列的象，使图象模糊不清。这种象差称球面象差，见图 2 所示。

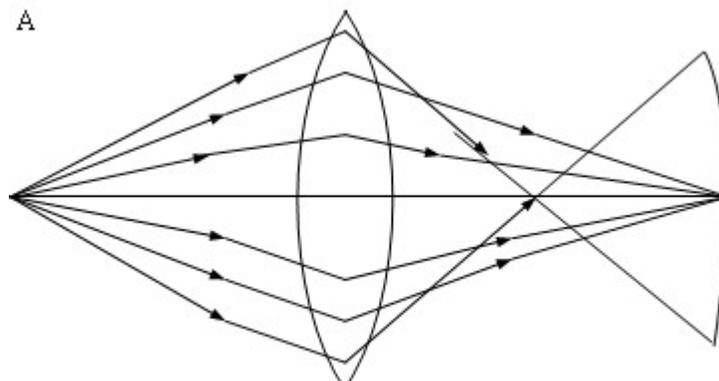


图 2 球面象差示意图

#### 2) 校正方法：

- a 采用多片透镜组成透镜组，即将凸透镜与凹透镜组合形成复合透镜，产生性质相反的球面象差来减少。
- b 通过加光栏的办法，缩小透镜的成象范围。因球面象差与光通过透镜的面积大小有关。

在金相显微镜中，球面象差可通过改变孔径光栏的大小来减小。孔径光栏越大，通过透镜边缘的光线越多，球面象差越严重。而缩小光栏，限制边缘光线的射入，可减少球面象差。但光栏太小，显微镜的分辨能力降低，也使图象模糊。因此，应将孔径光栏调节到合适的大小。

(2) 色象差:

- 1) 产生原因: 色象差的产生是由于白光是由多种不同波长的单色光组成, 当白光通过透镜时, 波长愈短的光, 其折射率愈大, 其焦点愈近。而波长越长, 折射率越小, 其焦点愈远, 这样一来使不同波长的光线, 形成的象不能在同一点聚焦, 使图象模糊所引起的象差, 即色象差。见图 3 所示。
- 2) 校正方法: 可采用单色光源或加滤色片或使用复合透镜组来减少。

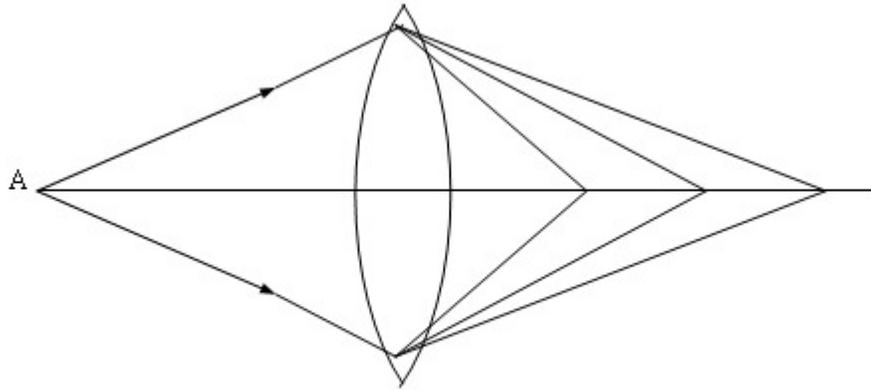


图 3 色象差示意图

(3) 象域弯曲:

- 1) 产生原因: 垂直于光轴的平面, 通过透镜所形成的象, 不是平面而是凹形的弯曲象面。称象域弯曲。见图 4 所示。

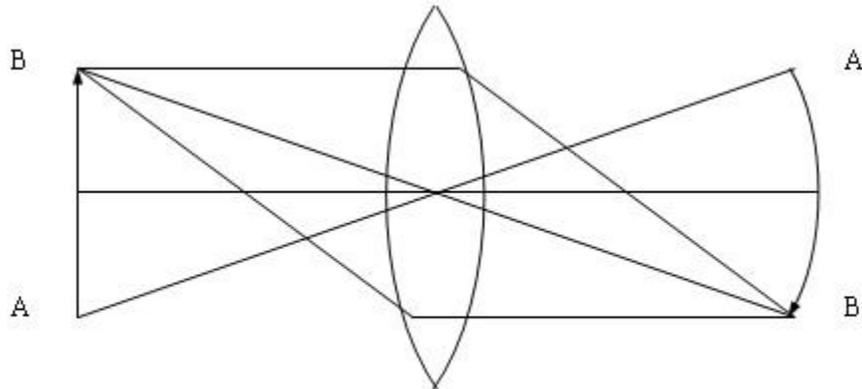


图 4 象域弯曲示意图

- 2) 校正办法: 象域弯曲的产生, 是由于各种象差综合作用的结果。一般的物镜或多或少地存在着象域弯曲, 只有校正极佳的物镜才能达到趋于平坦的象域。

2.4 物镜的数值孔径

物镜的数值孔径用 NA 表示 (即 Numerical Aperture), 表示物镜的聚光能力。数值孔径大的物镜, 聚光能力强, 即能吸收更多的光线, 使图象更加明显, 物镜的数值孔径 NA 可用公式表示为:

$$NA = n \cdot \sin \phi$$

其中：n—是物镜与样品间介质的折射率

$\phi$ —通过物镜边缘的光线与物镜轴线所成角度，即孔径半角。

可见，数值孔径的大小，与物镜与样品间介质 n 的大小有关，以及孔径角的大小有关。见图 5 所示。

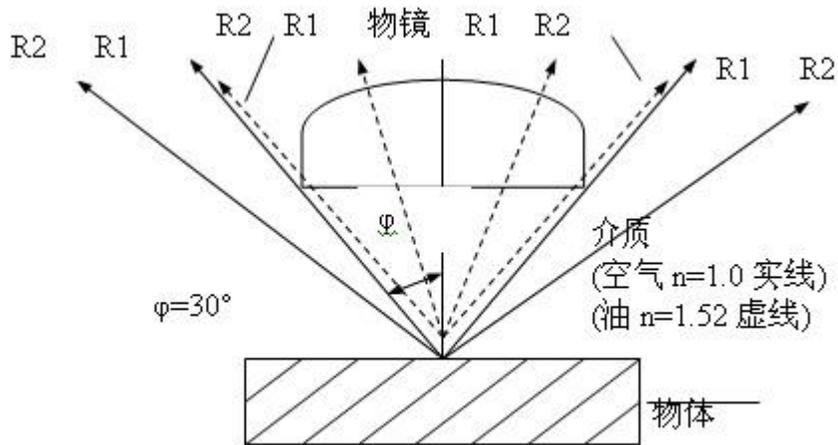


图 5 物体与物镜之间的介质对物镜数值孔径的影响

当物镜与物体之间的介质为空气时，

光线在空气中的折射率为  $n=1$ ，

若物镜的孔径半角为  $30^\circ$ ，

则数值孔径为：

$$NA=n \sin \phi =1 \times \sin 30^\circ =0.5$$

若物镜与物体之间的介质为松柏油时，

介质的折射率  $n=1.52$ ，

则其数值孔径为：

$$NA=n \sin \phi =1.52 \times \sin 30^\circ =0.76$$

物镜在设计和使用中，指定以空气为介质的称干系物镜或干物镜，以油为介质的称为油浸系物镜或油物镜。干物镜的  $n=1$ ， $\sin \phi$  值总小于 1，故数值孔径 NA 小于 1，油物镜因  $n=1.5$  以上，故数值孔径 NA 大于 1。物镜的数值孔径的大小，标志着物镜分辨率的高低，即决定了显微镜分辨率的高低。

## 2.5 显微镜的鉴别能力（分辨率）

显微镜的鉴别能力是指显微镜对样品上最细微部分能够清晰分辨而获得图象的能力。它主要取决于物镜的数值孔径 NA 之值大小，是显微镜的一个重要特性。通常用可辨别的样品上的两点间的最小距离 d 来表示，d 值越小，表示显微镜的鉴别能力越高。见图 6 所示。

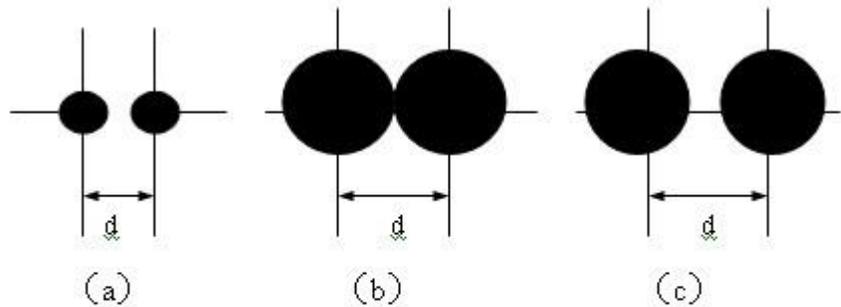


图6 显微镜分辨率高低示意图  
(a)样品上两点之间距离 (b)低分辨率 (c)高分辨率

显微镜的鉴别能力可用下式表示：

$$d = \lambda / 2NA$$

其中： $\lambda$ —入射光的波长，NA—表示物镜的数值孔径。

可见分辨率与入射光的波长成正比， $\lambda$ 越短，分辨率越高；其与数值孔径成反比，数值孔径NA越大，d值越小，表明显微镜的鉴别能力越高。

### 2.6 有效放大倍数

用显微镜能否看清组织细节，不但与物镜的分辨率有关，且与人眼的实际分辨率有关。若物镜分辨率很高，形成清晰的实象，而配用的目镜倍数过低，也使观察者难于看清，称放大不足。但若选用的目镜倍数过高，即总放大倍数越大，看得并非越清晰。实践表明，超出一定的范围，放得越大越模糊，称虚伪放大。

显微镜的有效放大倍数取决于物镜的数值孔径。有效放大倍数是指物镜分辨清晰的d距离，同样也被人眼分辨清晰所必须的放大倍数，用Mg表示：

$$Mg = d_1 / d = 2 NA / \lambda$$

其中  $d_1$ —人眼的分辨率，d—物镜的分辨率

在明视距离250mm处正常人眼的分辨率为0.15—0.30m，若取绿光 $\lambda = 5500 \times 10^{-7} \text{mm}$ 则：

$$Mg(\text{min}) = 2 \times 0.15 \times NA / 5500 \times 10^{-7} \approx 550NA$$

$$Mg(\text{max}) = 2 \times 0.30 \times NA / 5500 \times 10^{-7} \approx 1000NA$$

这说明在550NA—1000NA范围内的放大倍数均称有效放大倍数。但随着光学零件的设计完善与照明方式的不断改进，以上范围并非严格限制。有效放大倍数的范围，对物镜和目镜的正确选择十分重要。例如物镜的放大倍数是25，数值孔径为NA=0.4，即有效放大倍数应为200—400倍范围内，应选用8或16倍的目镜才合适。

## 三. 物镜与目镜的种类及标志

### 3.1 物镜的种类

物镜是成象的重要部分，而物镜的优劣取决于其本身象差的校正程度，所以物镜通常是按照象差的校正程度来分类，一般分为消色差及平面消色差物镜、复消色差及平面复消色差物镜、半复消色差物镜、消象散物镜等。因为对图象质量影响很大的象差是球面象差、色象差和象域弯曲，前二者对图象中央部分的清晰度有很大影响，而象域弯曲对图象的边缘部分有很大影响。除此之外，还有按物体与物镜间介质分类的，有介质为空气的干系物镜和介质为油的

油系物镜。按放大倍数分类的低、中、高倍物镜和特殊用途的专用显微镜上的物镜如高温反射物镜、紫外线物镜等。

按象差分类的常用的几种物镜如下：

(1) 消色差及平面消色差物镜

消色差物镜对象差的校正仅为黄、绿两个波区，使用时宜以黄绿光作为照明光源，或在入射光路中插入黄绿色滤色片，以使象差大为减少，图象更为清晰。而平面消色差物镜还对象域弯曲进行了校正，使图象平直，边缘与中心能同时清晰成像。适用于金相显微摄影。

(2) 复消色差及平面复消色差物镜

复消色差物镜色差的校正包括可见光的全部范围，但部分放大率色差仍然存在。而平面复消色差物镜还进一步作了象域弯曲的校正。

(3) 半复消色差物镜

象差校正介于消色差和复消色差物镜之间，其它光学性质与复消色差物镜接近。但价格低廉，常用来代替复消色差物镜。

### 3.2 物镜的标志

物镜的标志一般包括如下几项：

- (1) 物镜类别。国产物镜，用物镜类别的汉语拼音字头标注，如平面消色差物镜标以“PC”。西欧各国产物镜多标有物镜类别的英文名称或字头，如平面消色差物镜标以“Planachromatic 或 PI”，消色差物镜标以“Achromatic”，复消色差物镜标以“Apochromatic”。
- (2) 物镜的放大倍数和数值孔径。标在镜筒中央位置，并以斜线分开，如 10X/0.30，45X/0.63，斜线前如 10X，45X 为放大倍数，其后为物镜的数值孔径如 0.30，0.63。
- (3) 适用的机械镜筒长度。如 170，190， $\infty/0$ ，表示机械镜筒长度（即物镜座面到目镜筒顶面的距离）为 170，190，无限长。0 表示无盖波片。
- (4) 油浸物镜标有特别标注，刻以 HI,oil，国产物镜标有油或 Y。

物镜的标志如图 7 所示。

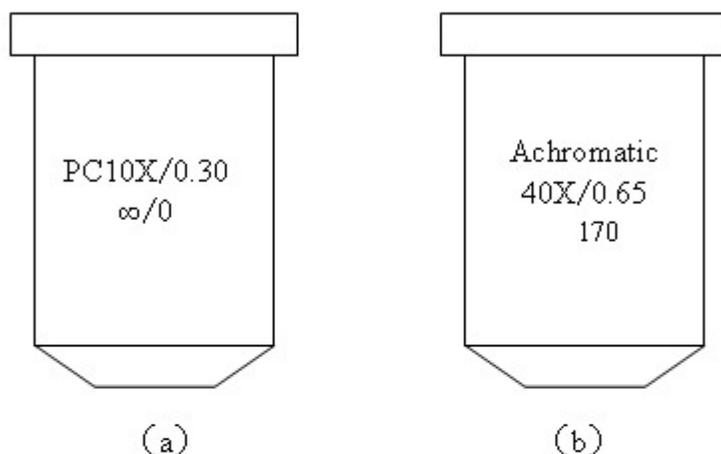


图 7 物镜的性能标志

- |           |                |
|-----------|----------------|
| (a) 国产物镜  | (b) Zeiss 公司物镜 |
| PC—平场     | Achromatic—消色差 |
| 10X—放大倍数  | 40X—放大倍数       |
| 0.30—数值孔径 | 0.65—数值孔径      |
| ∞—机械镜筒长度  | 170—机械镜筒长度     |
| 0—无盖玻片    |                |

### 3.3 目镜的类型

目镜的作用是将物镜放大的象再次放大，在观察时于明视距离处形成一个放大的虚象，而在显微摄影时，通过投影目镜在承影屏上形成一个放大的实象。

目镜按象差校正及适用范围分类如下：

- (1) 负型目镜(如福根目镜)。由两片单一的平凸透镜在中间夹一光栏组成，接近眼睛的透镜称目透镜起放大作用，另一个称场透镜，使图象亮度均匀，未对象差加以校正，只适用于与低中倍消色差物镜配合使用。
- (2) 正型目镜(如雷斯登目镜)。与上述不同的是光栏在场透镜外面，它有良好的象域弯曲校正，球面象差也较小，但色差比较严重，同倍数下比负型目镜观察视场小。
- (3) 补偿型目镜。是一种特制目镜，结构较复杂，用以补偿校正残余色差，宜与复消色差物镜配合使用，以获得清晰的图象。
- (4) 摄影目镜。专用于金相摄影，不能用于观察，球面象差及象域弯曲均有良好的校正。
- (5) 测微目镜。用于组织的测量，内装有目镜测微器，与不同放大倍数的物镜配合使用时，测微器的格值不同。

### 3.4 目镜的标志

通常一般目镜上只标有放大倍数，如 7X，10X，12.5X 等，补偿型目镜上还有一个 K 字，广视域目镜上还标有视场大小。见图 8 所示。

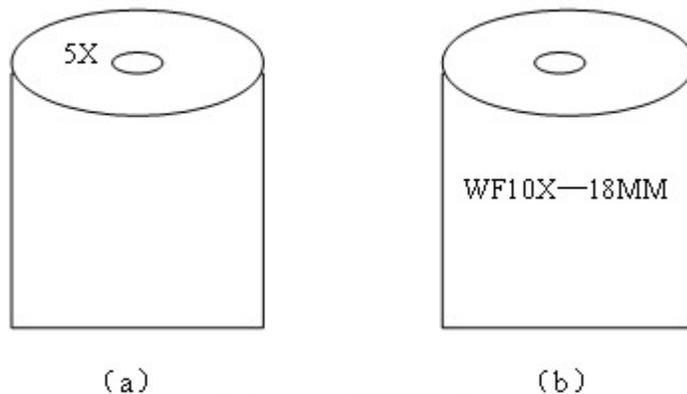


图 8 目镜的标志

(a) 普通目镜  
5X—放大倍数

(b) 广视域目镜  
WF—广视域  
10X—放大倍数  
18MM—视场大小

## (二) 金相样品的制备方法概述

在用金相显微镜来检验和分析材料的显微组织时，需将所分析的材料制备成一定尺寸的试样，并经磨制、抛光与腐蚀工序，才能进行材料的组织观察和研究工作。

金相样品的制备过程一般包括如下步骤：取样、镶嵌、粗磨、细磨、抛光和腐蚀。分别叙述如下：

### 一、取样与镶嵌

#### 1.1 取样

- (1) 选取原则。应根据研究目的选取有代表性的部位和磨面，例如，在研究铸件组织时，由于偏析现象的存在，必须从表层到中心，同时取样观察，而对于轧制及锻造材料则应同时截取横向和纵向试样，以便分析表层的缺陷和非金属夹杂物的分布情况，对于一般的热处理零件，可取任一截面。
- (2) 取样尺寸。截取的试样尺寸，通常直径为 12—15mm，高度和边长为 12—15mm 的圆柱形和方形，原则以便于手握为宜。
- (3) 截取方法。视材料性质而定，软的可用手锯或锯床切割，硬而脆的可用锤击，极硬的可用砂轮片或电脉冲切割。无论采取哪种方法，都不能使样品的温度过于升高而使组织变化。

#### 1.2 镶嵌

当试样的尺寸太小或形状不规则时，如细小的金属丝、片、小块状或要进行边缘观察时，可将其镶嵌或夹持。见图 9 所示。

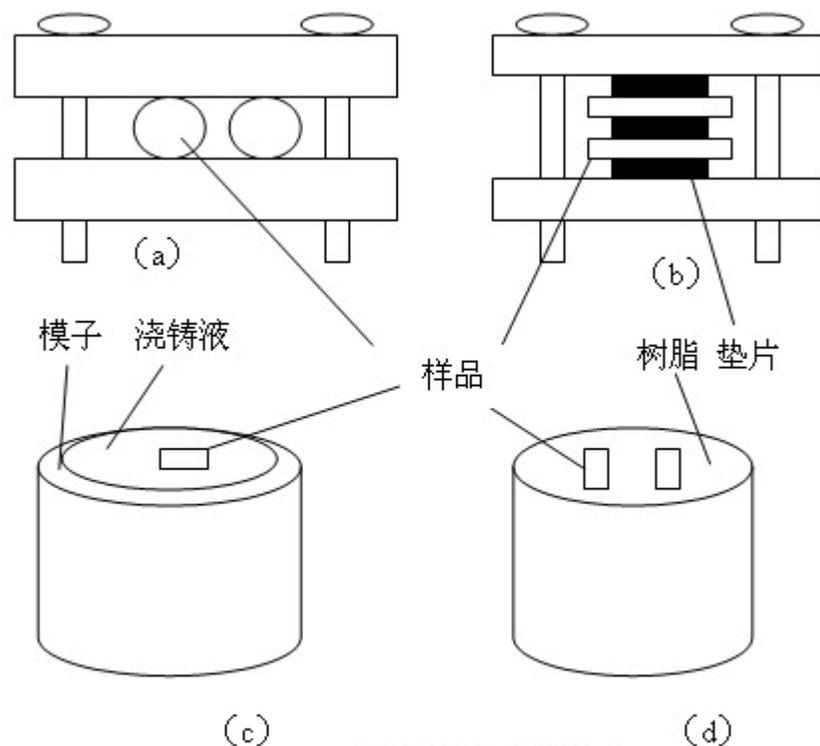


图9 金相样品的镶嵌方法  
(a)、(b) 机械夹持； (c) 冷镶嵌； (d) 热镶嵌

- (1) 热镶嵌。用热凝树脂（如胶木粉等），在镶嵌机上进行。适应于在低温及不大的压力下组织不产生变化的材料。
- (2) 冷镶嵌。用树脂加固剂（如环氧树脂和胺类固化剂等）进行，不需要设备，在模子里浇铸镶嵌。适应于不能加热及加压的材料。
- (3) 机械夹持。通常用螺丝将样品与钢板固定，样品之间可用金属垫片隔开，也适应于不能加热的材料。

## 二、磨制

### 2.1 粗磨

取好样后，为了获得一个平整的表面，同时去掉取样时有组织变化的部分，在不影响观察的前提下，可将棱角磨平，并将观察面磨平，一定要将切割时的变形层磨掉。

一般的钢铁材料常在砂轮机上磨制，压力不要过大，同时用水冷却，操作时要当心，防止手指等损伤。而较软的材料可用挫刀磨平。砂轮的选择，磨料粒度为 40、46、54、60 等号，数值越大越细，材料为白刚玉，棕刚玉、绿碳化硅、黑碳化硅等，代号分别为 GB、GZ、GC、TH、或 WA、A、TL、C，尺寸一般为外径×厚度×孔径=250×25×32，表面平整后，将样品及手用水冲洗干净。

### 2.2 细磨

目的是消除粗磨存在的磨痕，获得更为平整光滑的磨面。细磨是在一套粒度不同的金相砂纸上由粗到细依次进行磨制，砂纸号数一般为 120、280、01、03、05、或 120、280、02、04、06 号，粒度由粗到细，对于一般的材料（如碳钢样品）磨制方式为：

- (1) 手工磨制。将砂纸铺在玻璃板上，一手按住砂纸，一手拿样品在砂纸上单向推磨，用力要均匀，使整个磨面都磨到，更换砂纸时，要把手、样品、玻璃板等清理干净，并与上道磨痕方向垂直磨制，磨到前道磨痕完全消失时才能更换砂纸，见图 10 所示。也可用水砂纸进行手工湿磨，即在序号为 240、300、600、1000 的水砂纸上边冲水边磨制。
- (2) 机械磨制。在预磨机上铺上水砂纸进行磨制与手工湿磨方法相同。

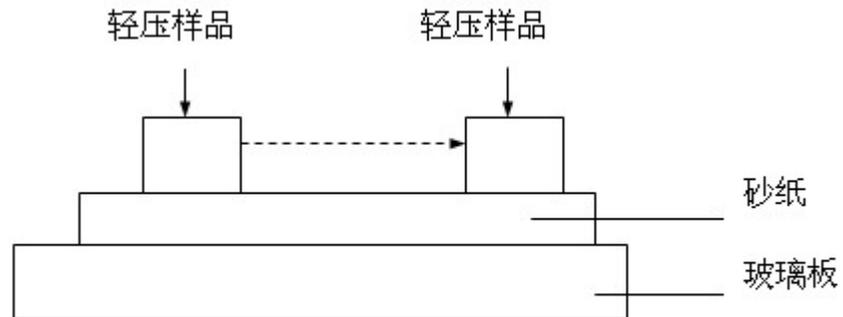


图 10 砂纸上磨制方法

### 三、抛光

目的是消除细磨留下的磨痕，获得光亮无痕的镜面。方法有机械抛光、电解抛光、化学抛光和复合抛光等，最常用的是机械抛光。

#### 3.1 机械抛光

是在专用的抛光机上进行抛光，靠极细的抛光粉和磨面间产生的相对磨削和滚压作用来消除磨痕的，分为粗抛光和细抛光两种。如图 11 所示。

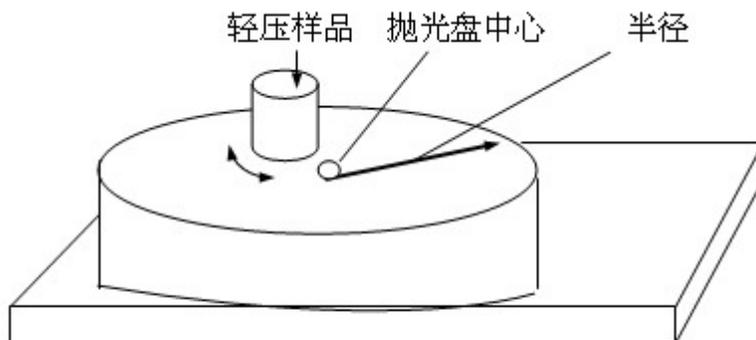


图 11 样品在抛光盘中心与边缘之间抛光

- 1) 粗抛光。粗抛光一般是在抛光盘上铺以细帆布，抛光液通常为 Cr2O3、Al2O3 等粒度为 1-5 $\mu$  的粉末制成水的悬浮液，一般一升水加入 5-10 克，手握样品在专用的抛光机上进行。边抛光边加抛光液，一般的钢铁材料粗抛光可获得光亮的表面。

- 2) 细抛光。是在抛光盘上铺以丝绒，丝绸等，用更细的  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$  粉制成水的悬浮液，与粗抛光的方法相同。样品磨面上磨痕变化见图 12 所示。

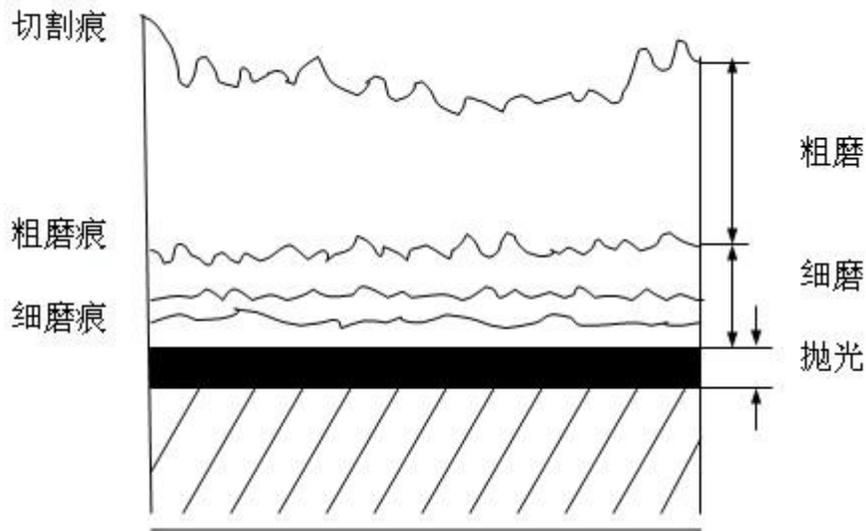


图 12 样品磨面上磨痕变化示意图

### 3.2 电解抛光

是利用阳极腐蚀法使样品表面光滑平整的方法，把磨光的样品浸入电解液中，样品作为阳极，阴极可用铝片或不锈钢片制成，接通电源，一般用直流电源，由于样品表面高低不平，在表面形成一层厚度不同的薄膜，凸起的部分膜薄，因而电阻小，电流密度大，金属溶解的速度快，而下凹的部分形成的膜厚，溶解的速度慢，使样品表面逐渐平坦，最后形成光滑表面。

电解抛光优点是只产生纯化学的溶解作用，无机械力的影响，所以能够显示金相组织的真实性，特别适应于有色金属及其它的硬度低、塑性大的金属。如铝合金、不锈钢等，缺点是对非金属夹杂物及偏析组织、塑料镶嵌的样品等不适应。

### 3.3 化学抛光

是靠化学试剂对样品表面凹凸不平区域的选择性溶解作用消除磨痕的一种方法。化学抛光液，多数由酸或混合酸、过氧化氢、及蒸馏水组成，酸主要起化学溶解作用，过氧化氢提高金属表面的活性，蒸馏水为稀释剂。

化学抛光优点是操作简单，成本低，不需专门设备，抛光同时还兼有化学浸蚀作用。可直接观察。缺点是样品的平整度差，夹杂物易蚀掉，抛光液易失效，只适应于低、中倍观察。对于软金属如锌、铅等化学抛光比机械抛光、电解抛光效果更好。

## 四、腐蚀（浸蚀）

经过抛光的样品，在显微镜下观察时，除非金属夹杂物、石墨、裂纹及磨痕等能看到外，只能看到光亮的磨面。要看到组织必须进行腐蚀。腐蚀的方法有多种，如化学腐蚀、电解腐蚀、恒电位腐蚀等，最常用的是化学腐蚀法。下面介绍化学腐蚀显示组织的基本过程。

### 4.1 化学腐蚀法的原理

化学腐蚀的主要原理是利用浸蚀剂对样品表面引起的化学溶解作用或电化学作用（微电池作用）来显示组织。

## 4.2 化学腐蚀的方式

化学腐蚀的方式取决于组织中组成相的性质和数量。纯粹的化学溶解是很少的。一般把纯金属和均匀的单相合金的腐蚀主要看作是化学溶解过程，两相或多相合金的腐蚀，主要是电化学溶解过程。

### 1) 纯金属或单相合金的化学腐蚀

它是一个纯化学溶解过程，由于其晶界上原子排列紊乱，具有较高的能量，故易被腐蚀形成凹沟。同时由于每个晶粒排列位向不同，被腐蚀程度也不同，所以在明场下显示出明暗不同的晶粒。

### 2) 两相合金的侵蚀

它是一个电化学的腐蚀过程。由于各组成相具有不同的电极电位，样品浸入腐蚀剂中，就在两相之间形成无数对微电池。具有负电位的一相成为阳极，被迅速溶入浸蚀剂中形成低凹，具有正电位的另一相成为阴极，在正常的电化学作用下不受浸蚀而保持原有平面。当光线照到凹凸不平的样品表面上时，由于各处对光线的反射程度不同，在显微镜下就看到各种的组织 and 组成相。

### 3) 多相合金的腐蚀

一般而言，多相合金的腐蚀，同样也是一个电化学溶解的过程，其腐蚀原理与两相合金相同。但多相合金的组成相比较复杂，用一种腐蚀剂来显示多种相难于达到，只有采取选择腐蚀法等专门的方法才行。

## 4.3 化学腐蚀剂

是用于显示材料组织而配制的特定的化学试剂，多数腐蚀剂是在实际的实验中总结归纳出来的。一般腐蚀剂是由酸、碱、盐以及酒精和水配制而成，钢铁材料最常用的化学腐蚀试剂是 3—5%硝酸酒精溶液，各种材料的腐蚀剂可查阅有关手册。

## 4.4 化学腐蚀方法

一般有浸蚀法、滴蚀法和擦蚀法。见图 13 所示。

### 1) 浸蚀法：

将抛光好的样品放入腐蚀剂中，抛光面向上，或抛光面向下，浸入腐蚀剂中，不断观察表面颜色的变化，当样品表面略显灰暗时，即可取出，充分冲水冲酒精，再快速用吹风机充分吹干。

### 2) 滴蚀法：

一手拿样品，表面向上，另一手用滴管吸入腐蚀剂滴在样品表面，观察表面颜色的变化情况，当表面颜色变灰时，再过 2—3 秒即可充分冲水冲酒精，再快速用吹风机充分吹干。

### 3) 擦蚀法：

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

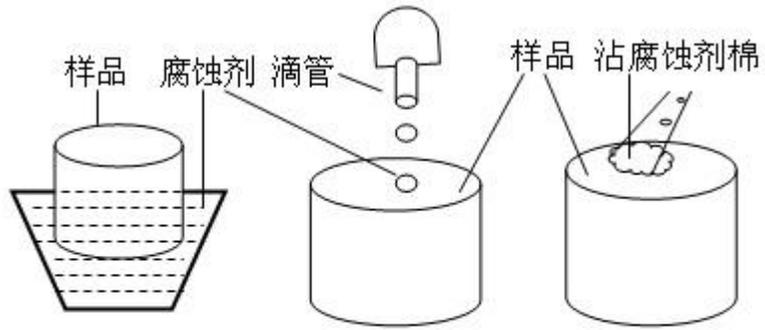


图 13 化学腐蚀方法  
(a) 浸蚀法 (b) 滴蚀法 (c) 擦蚀法

经过上述操作，腐蚀完成后，金相样品的制备即告结束。这时候要将手和样品的所有表面都完全干燥后，方可在显微镜下观察和分析金相样品的组织。

# 材料硬度试验相关知识

## 一、概述

硬度并不是金属独立的基本性能，它是指金属在表面上的不大体积内抵抗变形或者断裂的能力。究竟它表征哪一种抗力则决定于采用的试验方法，如刻划法型硬度试验则表征金属抵抗断裂的能力，而在压入法试验中，材料的硬度是指金属材料表面在接触压应力作用下抵抗塑性变形的一种能力。硬度测量能够给出材料软硬程度的数量概念。由于在材料表面以下不同深处材料所承受的应力和所发生的变形程度不同，因而硬度值可以综合地反映压痕附近局部体积内材料的弹性、微量塑变抗力、塑变强化能力以及大量形变抗力。硬度越大，表明金属抵抗塑性变形的能力越大，材料产生塑性变形就越困难。硬度是金属材料一项重要的力学性能指标。另外，硬度与其它机械性能(如强度指标及塑性指标)之间有着一定的内在联系，所以从某种意义上说硬度的大小对于机械零件或工具的使用性能及寿命具有决定性意义。

## 二、压入法硬度试验及其特点

在机械工业中广泛采用压入法来测定硬度，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。

压入法硬度试验的主要特点是：

- (1) 设备简单，操作迅速方便。
- (2) 适用范围广。压入试验时材料的应力状态最软(即最大切应力远远大于最大正应力)，因而不论是塑性材料还是脆性材料均能发生塑性变形。
- (3) 可粗略估计材料的其他力学性能。金属的硬度与强度指标之间存在如下近似关系：

$$\sigma_b = K \times HB$$

式中：——材料的抗拉强度； HB——布氏硬度值； K——系数。

退火状态的碳钢：K=0.34-0.36；合金调质钢：K=0.33-0.35；有色金属：K=0.33-0.53。

此外，硬度值对材料的耐磨性、疲劳强度等性能也有定性的参考价值，通常硬度值高，这些性能也就好。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，其原因就在于此。

(4) 硬度测定后由于仅在金属表面局部体积内产生很小压痕并不损坏零件，因而适合于成品检验。

根据压头类型和几何尺寸等条件的不同，常用的压入法可分为布氏法、洛氏法和维氏法三种。

## 三、布氏硬度试验

### 3.1 基本原理

布氏硬度试验是施加一定大小的载荷 P，将直径为 D 的钢球压入被测金属表面后保持一定时间，然后卸除载荷，根据钢球在金属表面上所压出的压痕直径查表即可得硬度值。

用钢球压头所测出的硬度值用 HBS 表示；用硬质合金球压头所测出的硬度值用 HBW 表示。目前布氏硬度计一般以钢球为压头，主要用于测定较软的金属材料的硬度。布氏硬度值的计算式如下：

$$HBS = 0.102 \times \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中：P——试验力（N）； D——压头球体直径（mm）；

d——相互垂直方向测得的压痕直径，d1、d2的平均值（mm）。

布氏硬度的优点是测定结果较准确，缺点是压痕大。

由于材料有硬有软，所测工件有厚有薄，若只采用同一种载荷和钢球直径则对硬的金属适合时，对极软的金属就不适合，甚至会发生整个钢球陷入金属中的现象；若其对厚的工件适合时，则对于薄件会出现压透的可能，所以在测定不同材料的布氏硬度值时就要求有不同的载荷 P 和钢球直径 D，以供选择使用。

### 3.2 布氏硬度试验机及其基本操作和程序

图 1 是布氏硬度试验机的基本结构，其基本操作程序如下

- (1) 将试样放在工作台上，顺时针转动手轮，使压头向试样表面直至手轮对下面螺旋产生相对运动(打滑)为止。此时试样已承受 98.07N 初载荷。
- (2) 按动加载按钮，开始加主载荷，当红色指示灯闪亮时，迅速拧紧压螺钉，使圆盘转动。达到所要求的持续时间后，转动即自行停让。
- (3) 逆时针转动手轮降下工作台，取下试样用读数显微镜测出压痕直径 d，以此查表即得 HBS 值。

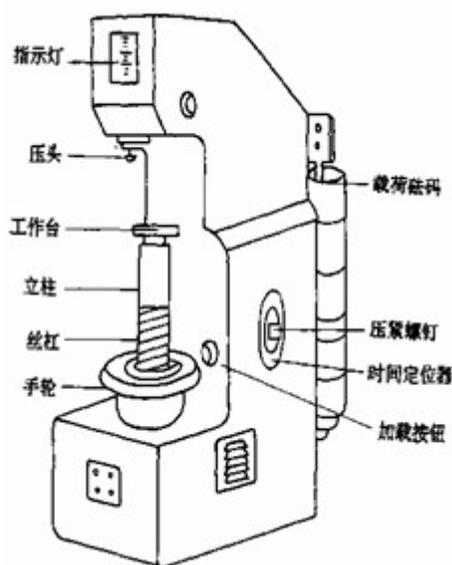


图 1 HB—3000 布氏硬度试验机

## 四、洛氏硬度试验

### 4.1 基本原理

洛氏硬度试验是采用金刚石圆锥体（锥角为 120°）或采用淬火钢球（直径为 1.588 毫米）做压头，一般较硬的金属材料（如淬火后的工件）用金刚石压头；较软的金属材料则用钢球做压头，如图 2 所示，压头压入金属表面时，分两次加载。先加 10 公斤的初载使压头与试样的表面接触良好，此时，压痕深度为 h1(附图 1-a)，然后加 140 公斤的主载荷，这时总载荷（初载荷+主载荷）为 150 公斤，而压痕的深度增加到 h2 位置（附图 1-b），然后将主载荷卸

除,此时压痕由于加载荷时所产生的弹性变形即行恢复,此时压痕深度  $h=h_2-h_1$  (附图 1-c) 作为测量硬度的依据。

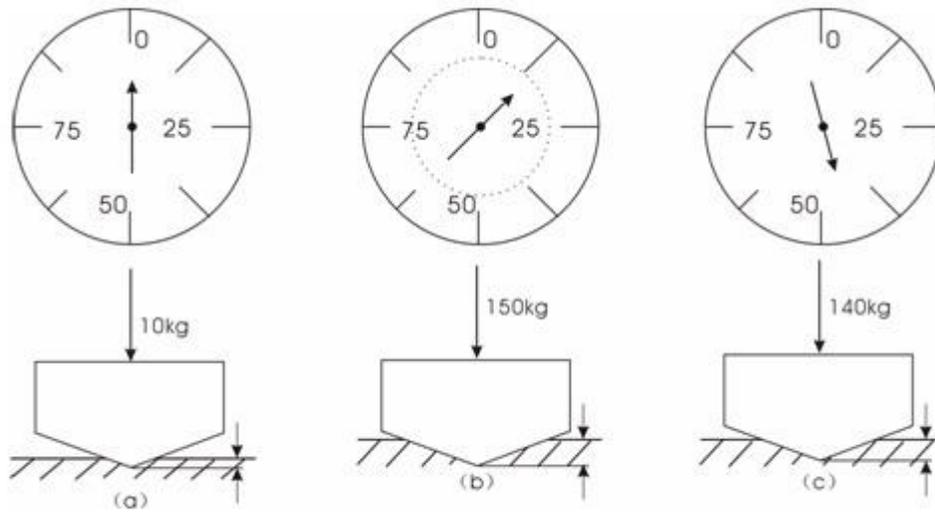


图 2 洛氏硬度试验原理

根据所用的压头和载荷的不同,洛氏硬度有几种硬度符号,常用的有 HRA、HRB、HRC 等,如表 1。

表 1 常用洛氏硬度值的符号、试验条件和应用

硬 度 符 号	压 头	总载荷 (kg)	表盘上 刻度 颜色	常用硬 度值 范 围	应用举例
HRA	金刚石园锥	60	黑色	70-85	碳化物、硬质合金、表面淬火等。
HRB	$\frac{1}{16}$ "钢球	100	红色	25-100	软钢、退火钢、铜合金等。
HRC	金刚石园锥	150	黑色	20-67	淬火钢、调质钢等。

如果直接以压痕深度大小作计量指标,则会出现硬金属的硬度值小,而软金属的硬度值反而大的现象,这和布氏硬度所标志的硬度大小的概念相反,也不合人们的习惯,因此用一个选定的常数 K 来减去所得压痕深度值作为洛氏硬度的指标,即

当以钢球为压头时,  $K=0.26$ ; 以金刚石锥体为压头时,  $K=0.2$ , 此外,在读数上又规定以压入深度 0.002 毫米作为标尺刻度的一格,这样前者的 0.26 常数相当于 130 格,后者的 0.2 常数相当于 100 倍,因此洛氏硬度值可由下式确定:

$$HRB=130-\frac{h}{0.002} \text{ (红色表盘)}$$

$$HRC=100-\frac{k}{0.002} \text{ (黑色表盘)}$$

$$0.2 \text{ 毫米} = \frac{0.2}{0.002} = 100 \text{ 格}$$

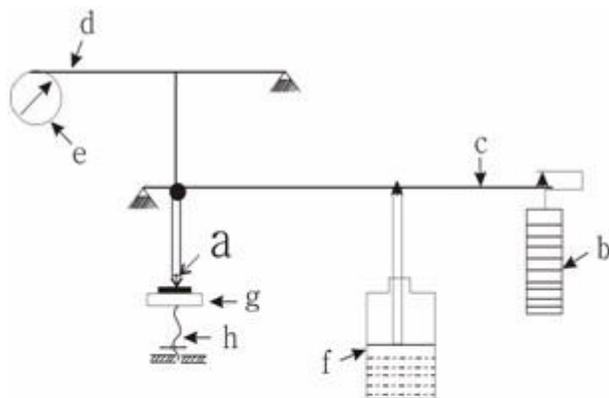
因此可知当压痕深度  $k=0.2$  毫米时 ( )  $HRB=30$ ,  $HRC=0$  这也说明为什么  $HRB$  要取  $0.26$  作为常数的原因, 因为  $HRB$  是测定较软的金属材料的, 试验时有的压痕深度可能超过  $0.2$  毫米以上, 若取  $0.2$  作为常数时, 硬度将会得负值, 为此常把常数取得大些。

洛氏硬度法克服了布氏硬度法的缺点, 它的压痕小, 可测量高硬度, 可直接读数, 操作方便, 效率高。

洛氏硬度应用范围很广, 可用于试验各种钢铁原材料, 有色金属、经淬火后高硬度工件、表面热处理工件及硬质合金等。

#### 4.3 洛氏硬度试验机结构原理

洛氏硬度计类型较多, 外形构造也各不相同, 但构造原理及主要部件相同。附图 2 为洛氏硬度计构造示意图。利用杠杆传递压力, 一方面将重锤压力加至受试样的材料上; 另一方面利用杠杆把受试材料的压痕深度传递到读数百分表上, 能直接读出硬度的数值。硬度计外形构造如附图 3 所示。



- |        |        |
|--------|--------|
| A—压头   | e—表盘   |
| B—载荷砝码 | f—缓冲装置 |
| C—主杠杆  | g—载物台  |
| D—测量杠杆 | h—升降丝杆 |



附图 2 洛氏硬度计机构造原理图

图 3 HR-150A 型洛氏硬度计

#### 4.4 试验机操作方法与洛氏试验程序

##### 1. 试验机操作方法

图 4 为试验机的结构示意图, 其操作方法如下

- ① 调整主试验力的加载荷速度：手柄（16）置于卸荷位置，手把（13）转到1471N的位置，将40-50HRC的标准硬度块放在工作台上，旋转手轮（27）使硬度块顶起主轴，加上初试验力，围内，如不符，可转动油针（14）进行调整，反复进行，直到合适为止。
- ② 试验力的选择，转动手把（13）使所选用的试验力对准红点，但必须注意变换试验力时，手柄（16）必须置于卸荷状态（即后极限位置）。
- ③ 安装压头，安装压头时应注意消除压头与主轴（1）端面的间隙。消除方法是：装上压头，并用螺钉（28）轻轻固定，然后将标准块或试件放置于工作台上，旋转手轮（27）加上初试验力，拉动手柄（15）使主试验力加于压头上，再将螺钉（28）拧紧，即可消除压头与主轴端面间的间隙。

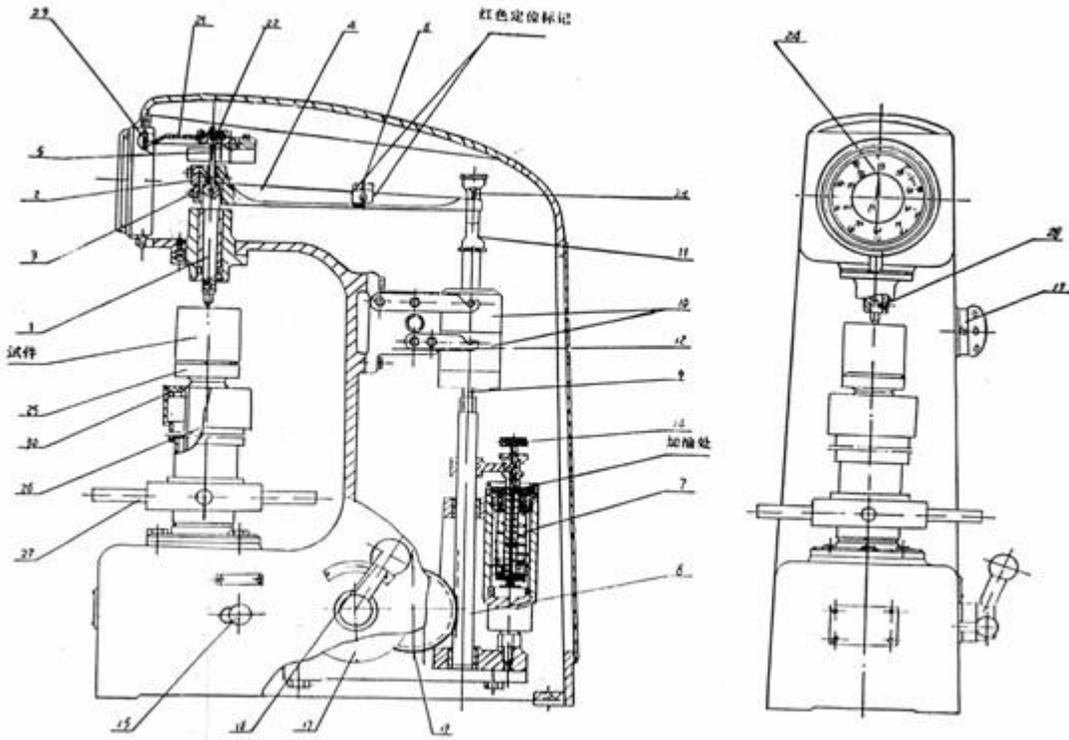


图4 洛氏试验机结构示意图

## 2. 洛氏硬度试验程序：

①将丝杠（26）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（26）上。

②将试件支撑面擦干净，放置于工作台上，旋转手轮（27）使工作台缓慢上升，并顶起压头，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±5个刻度，若超过5个刻度，此点应作废，重新试验。）

③旋转指示器（24）外壳，使刻度盘上的C、B之间长刻线与大指针对正（顺时针或逆时针旋转均可）。

④拉动加载手柄（15），施加主试验力，这时指示器的大指针按逆时针方向转动。

⑤当指示器指针的转动显著停顿下来后，即可将卸荷手柄（16）推回，卸除主试验力。注意主试验力的施加与卸除，均需缓慢进行。

⑥从指示器上相应的标尺读数；采用金钢石压头试验时，按表盘外圈的黑字读取，采用钢球压头试验时，按表盘内圈的红字读取。

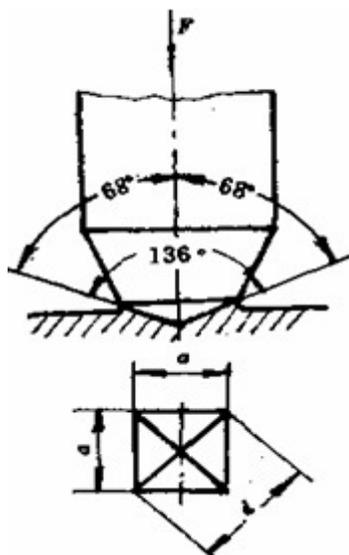
⑦转动手轮使试件下降，再移动试件，按以上②-⑥过程进行新的试验。

注意事项：丝杠保护套（30）是为了保护丝杠（26）不受灰尘侵袭而制设的。硬度计不使用时或试件高度小于 100 毫米时，将其套在丝杠外面。当试件高度大于 100 毫米时，必须将其拿掉，以免将工作台顶起，使试验无效。

## 五、其他硬度试验简介

### 1、 维氏硬度

测定的基本原理和布氏硬度相同，区别在于压头采用锥面夹角为 136° 的金钢石棱锥体，压痕是四方锥形(图 4)。



维氏硬度用 Hv 表示，Hv 的计算式为：

$$HV = 0.102 \times 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

式中：F—载荷（N）； d—压痕对角线长度（mm）

维氏硬度试验的优点是：1) 它既不存在布氏那种负荷和压头直径 D 的规定条件的约束问题，也不存在洛氏那种硬度值无法统一的问题。2) 它和洛氏一样可以试验任何软硬的材料，并且比洛氏能更好地测试极薄件(或薄层)。3) 由于测定的是压痕宽度，相对误差比洛氏实验小，数据精确。唯一缺点是硬度值需通过测量对角线后才能计算(或查表)出来，效率较低，但现在已有带计算机图形数据处理的维氏硬度试验机，这点已不成问题。

### 2、 显微硬度

显微硬度是用来测量尺寸很小或很薄零件的硬度，或者是用来测量各种显微组织的硬度。显微硬度测量所用的压头有两种：一种是维氏压头，和宏观的维氏硬度压头一样，只是在金钢石四方锥的制造上和测量上要更加严格；另一种是努氏压头(knoop indenter)，它是一菱形的金钢锥体，其形貌如图 5 所示。

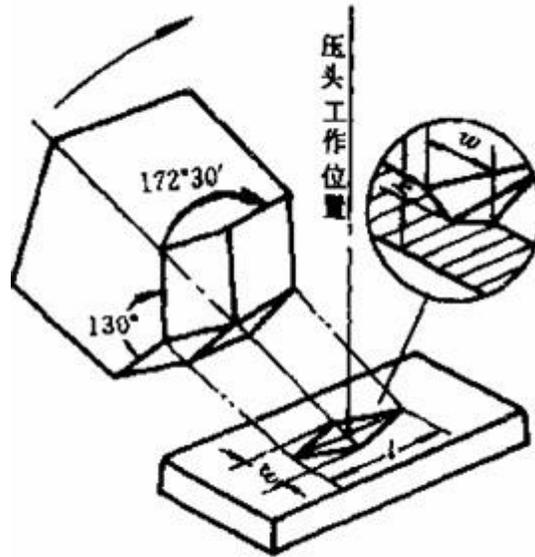


图 5 努氏硬度试验压头与压痕示意图

显微硬度测量所用的载荷很小，大致在 100gf — 500gf 范围内。维氏显微硬度测量和计算方法和维氏硬度一样。而努氏显微硬度按下式计算：

$$H_K = \frac{P}{A} = \frac{P}{Cl^2}$$

其中，A 是投影面积而不是压痕表面积，l 是长对角线的长度以 um 计，c 是制造厂家提供的常数。

### 3、 莫氏硬度

莫氏硬度试验属于划痕硬度试验。莫斯(Моск)将十种矿物作为标准矿物，按其硬度高低进行排列，将硬度分为十级。用较硬的标准矿物刻划较软的标准矿物时，在较软的标准矿物上可以看到明显的擦划条纹。在这些标准矿物中，滑石最软，金刚石最硬。由软到硬这十种标准矿物排列的次序是：滑石、岩盐(或石膏)、方解石、宝石、磷灰石、长石、石英、黄玉、刚玉、金刚石。

用这种硬度试验方法，是这样来测定硬度的：从用最软的标准矿物开始，依次地在所测试样上擦划，找到第一个出现明显擦划条纹的标准矿物，则所得试样硬度在这个标准矿物和上一个较软的标准矿物硬度之间。很显然，用这种方法所测得的硬度，只是一种粗略的硬度比较。这种硬度试验方法目前仍广泛应用于建树部门对施釉和不施釉的陶瓷顶砖的硬度测定中。

# 实验一 金相显微镜的使用与金相样品的制备

## 一. 实验目的

1. 初步学会金相样品制备的基本方法。
2. 分析样品制备过程中产生的缺陷及防止措施。
3. 熟悉金相显微镜的基本原理及使用方法。
4. 初步认识金相显微镜下的组织特征。

## 二. 金相显微镜的构造与使用

以 XJP—3A 型金相显微镜为例进行说明。

### 2.1 XJP—3A 型金相显微镜的光学系统的工作原理

图 1—1 为 XJP—3A 型金相显微镜光学系统图。

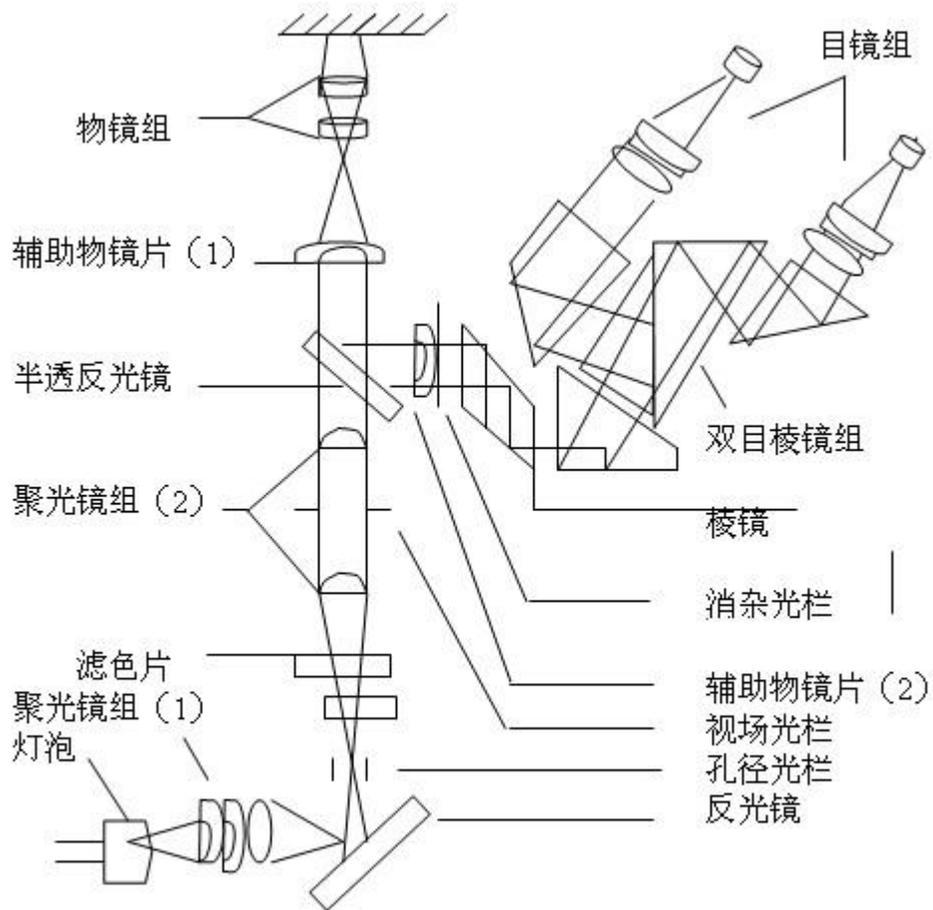


图 1—1 XJP—3A 型金相显微镜光学系统图

由灯泡发出一束光线，经过聚光镜组（1）及反光镜，被会聚在孔径光栏上，然后经过聚光镜组（2），将光线会聚在物镜后焦面上。最后光线通过物镜，用平行光照明样品，使其表面得到充分均匀的照明。从物体表面散射出来的成像光线，复经物镜、辅助物镜片（1）、半透反光镜、辅助物镜片（2）、棱镜与双目棱镜组，造成一个物体的放大实象。目镜将此象再次放大。显微镜里观察到的就是通过物镜和目镜两次放大所得图象。

## 2.2 XJP—3A 型金相显微镜结构

图 1—2 为 XJP—3A 型金相显微镜的结构。

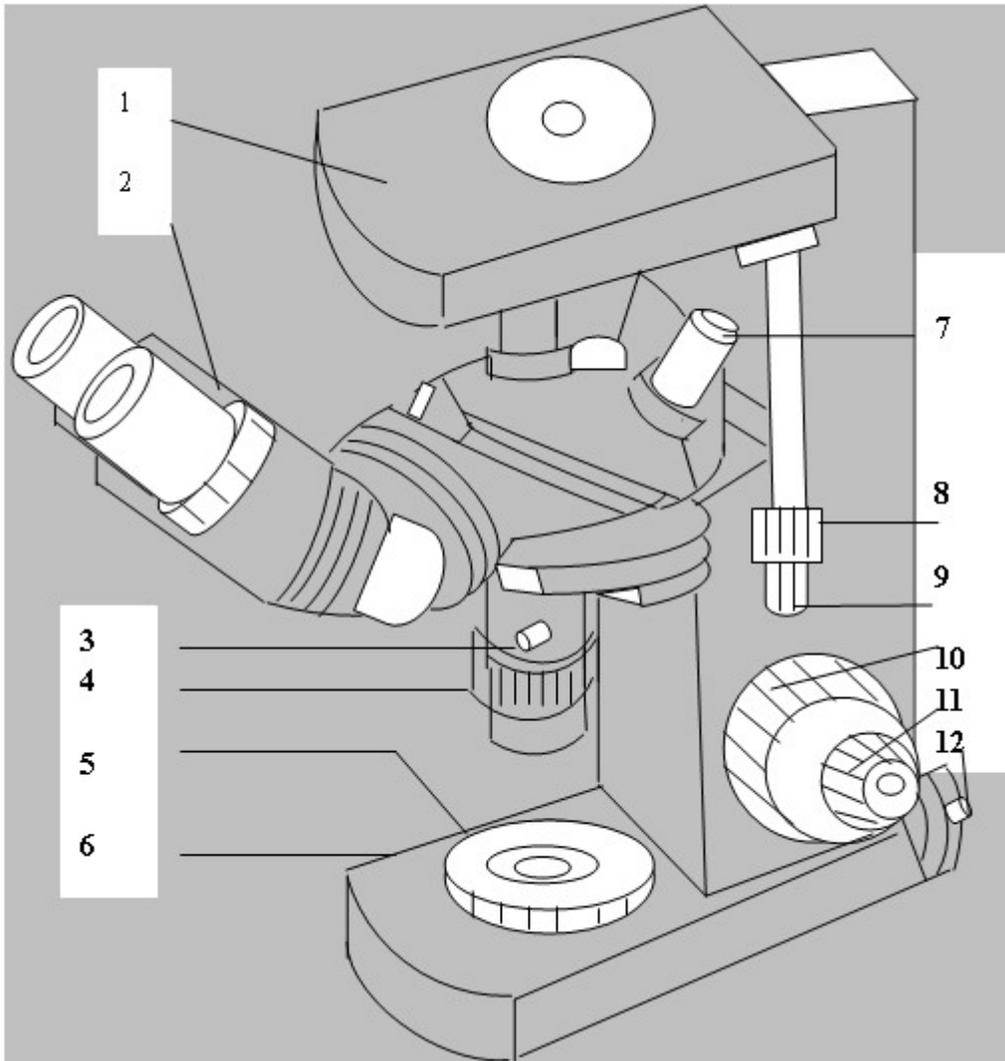


图 1—2 XJP—3A 型金相显微镜的结构

- |          |          |         |
|----------|----------|---------|
| 1—载物台    | 2—双目镜    | 3—调节螺钉  |
| 4—视场光栏圈  | 5—孔径光栏圈  | 6—底座    |
| 7—物镜     | 8—纵动手轮   | 9—横动手轮  |
| 10—粗调焦手轮 | 11—微调焦手轮 | 12—偏心螺钉 |

### 1) 照明系统:

在底座内装有一低压卤钨灯泡，由变压器提供 6 伏的使用电压，灯泡前有聚光镜，孔径光栏及反光镜等安装在底座上，视场光栏及另一聚光镜安装在支架上，通过一系列透镜作用及配合组成了照明系统。目的是样品表面能得到充

分均匀的照明，使部分光线被反射而进入物镜成象。并经物镜及目镜的放大而形成最终观察的图象。

#### 2) 调焦装置:

在显微镜两侧有粗调焦和微调焦手轮，转动粗调手轮，可使载物弯臂上下运动，其中一侧有制动装置，而微动手轮使弯臂很缓慢的移动，右微动手轮上刻有分度，每小格值为 0.002 毫米，在右粗动手轮左侧，装有松紧调节手轮，在左粗动手轮右侧，装有粗动调焦单向限位手柄，当顺时针转动锁紧后，载物台不再下降，但反向转动粗动调焦手轮，载物台仍可迅速上升，当图象调好后，更换物镜时，聚焦很方便。

#### 3) 物镜转换器:

位于载物台下方，可更换不同倍数的物镜，与目镜配合，可获得所需的放大倍数。

#### 4) 载物台:

位于显微镜的最上部，用于放置金相样品，纵向手轮和横向手轮可使载物台在水平面上作一定范围内的十字定向移动。

### 2.3 XJP—3A 型金相显微镜操作规程

(1) 将显微镜的光源与 6 伏的变压器接通，把变压器与 220 伏电源接通，并打开开关。

(2) 根据放大倍数选择适当的物镜和目镜，用物镜转换器将其转到固定位置，需调整两目镜的中心距，以使与观察者的瞳孔距相适应，同时转动目镜调节圈，是其示值与瞳孔距一致。

(3) 把样品放在载物台上，使观察面向下。转动粗调手轮，使载物台下降，在看到物体的象时，再转动微调焦手轮，直到图象清晰。

(4) 纵向手轮和横向手轮可是使载物台在水平面上作一定范围内的十字定向移动。用于选择视域。但移动范围较小，要一边观察，一边转动。

(5) 转动孔径光栏至合适位置，得到亮而均匀的照明。

(6) 转动视场光栏使图象与目镜视场大小相等，以获得最佳质量的图象。

### 2.4 注意事项

(1) 在用显微镜进行观察前必须将手洗净擦干，并保持室内环境的清洁，操作时必须特别仔细，严禁任何剧烈的动作。

(2) 显微镜的低压灯泡，切勿直接插入 220 伏的电源上，应通过变压器与电源接通。

(3) 显微镜的玻璃部分及样品观察面严禁手指直接接触。

(4) 在转动粗调手轮时，动作一定要慢，若遇到阻碍时，应立即停止操作，报告指导教师，千万不能用力强行转动，否则仪器损坏。

(5) 要观察用的金相样品必须完全干燥。

(6) 选择视域时，要缓慢转动手轮，边观察边进行。勿超出范围。

### 2.5 XJB—1 型、4X 型、MG 型显微镜的介绍

#### 1、XJB—1 型、4X 型显微镜:

与 XJP—3A 型显微镜的主体结构基本相同，使用方法略有差别。XJB—1 型、4X 型显微镜，目镜镜筒是单筒。载物台采用粘性油膜与托盘联结，载物台与托盘之间有四方导架，样品被观察面与载物台表面重合，所以样品的移动是靠载物台与托盘之间的滑动完成。粗调焦手轮上未装限位手柄。

#### 2、MG 型显微镜:

它的光源、光栏等部分装在与显微镜主体垂直的部分，称垂直照明器，变压器在显微镜体内，插头可直接插在 220 伏的电源上，但面板上的旋转钮的转

动一定要当心，千万不要转到红线以右，以免损坏仪器。除此以外，粗调焦手轮上也未装限位手柄。其它操作方法与 XJP—3A 型相同。

### 三、金相样品制备的基本方法

金相样品的制备过程一般包括取样、镶嵌、粗磨、细磨、抛光和腐蚀步骤。虽然随着科学的不断发展，样品制备的设备越来越先进，自动化的程度越来越高，有预磨机、自动抛光机等，但目前在我国手工制备金相样品的方法，由于有许多优点仍在广泛使用。

#### 3.1 金相样品制备的要点

- 1) 取样时，按检验目的确定其截取部位和检验面，尺寸要适合手拿磨制，若无法做到，可进行镶嵌。并要严防过热与变形，引起组织改变。
- 2) 对尺寸太小，或形状不规则和要检验边缘的样品，可进行镶嵌或机械夹持。根据材料的特点选择热镶嵌或冷镶嵌与机械夹持。
- 3) 粗磨时，主要要磨平检验面，去掉切割时的变形及过热部分。同时，要防止又产生过热。并注意安全。
- 4) 细磨时，要用力大小合适均匀，且使样品整个磨面全部与砂纸接触，单方向磨制距离要尽量长，更换砂纸时，不要将砂粒带入下道工序。
- 5) 抛光时，要将手与整个样品清洗干净，在抛光盘边缘和中心之间进行抛光。用力要均匀适中，少量多次地加入抛光液。并注意安全。
- 6) 腐蚀前，样品抛光面要干净干燥，腐蚀操作过程衔接要迅速。
- 7) 腐蚀后，要将整个样品与手完全冲洗干净，并充分干燥后，才能在显微镜下进行观察与分析工作。

#### 3.2 金相样品制备方法

见表 1—2。

表 1—2 金相样品的制备方法

序号	步骤	方法	注意事项
1	取样	在要检测的材料或零件上截取样品，取样部位和磨面根据分析要求而定，截取方法视材料硬度选择，有车、刨、砂轮切割机，线切割机及锤击法等，尺寸以适宜手握为宜。	无论用哪种方法取样，都要尽量避免和减少因塑性变形和受热所引起的组织变化现象。截取时可加水等冷却。
2	镶嵌	若由于零件尺寸及形状的限制，使取样后的尺寸太小、不规则，或需要检验边缘的样品，应将分析面整平后进行镶嵌。有热镶嵌和冷镶嵌及机械夹持法。应根据材料的性能选择。	热镶嵌要在专用设备上进行，只适应于加热对组织不影响的材料。若有影响，要选择冷镶嵌或机械夹持。
3	粗磨	用砂轮机或挫刀等磨平检验面，若不需要观察边缘时可将边缘倒角。粗磨的同时去掉了切割时产生的变形层。	若有渗层等表面处理时，不要倒角，且要磨掉约 1.5mm，如渗碳。
4	细磨	按金相砂纸号顺序：120、280、01、03、05 或 120、280、02、04、06 将砂纸平铺在玻璃板上，一手拿样品，一手按住砂纸磨制，更换砂纸时，磨痕方向应与上道磨痕方向垂直，磨到前道磨痕消失为止，砂纸磨制完毕，将手和样品冲洗干净。	每道砂纸磨制时，用力要均匀，一定要磨平检验面，转动样品表面，观察表面的反光变化确定，更换砂纸时，勿将砂粒带入下道工序。

5	粗抛光	用绿粉 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) 水溶液作为抛光液在帆布上进行抛光, 将抛光液少量多次地加入到抛光盘上进行抛光。	初次制样时, 适宜在抛光盘约半径一半处抛光, 感到阻力大时, 就该加抛光液了。 <b>注意安全, 以免样品飞出伤人。</b>
6	细抛光	用红粉 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 水溶液作为抛光液在绒布上抛光, 将抛光液少量多次地加入到抛光盘上进行抛光。	同上。
7	腐蚀	抛光好的金相样品表面光亮无痕, 若表面干净干燥, 可直接腐蚀, 若有水分可用酒精冲洗吹干后腐蚀。将抛光面浸入选定的腐蚀剂中(钢铁材料最常用的腐蚀剂是 3—5% 的硝酸酒精), 或将腐蚀剂滴入抛光面, 当颜色变成浅灰色时, 再过 2—3 秒, 用水冲洗, 再用酒精冲洗, 并充分干燥。	这步动作之间的衔接一定要迅速, 以防氧化污染, 腐蚀完毕, 必须将手与样品彻底吹干, 一定要完全充分干燥, 方可在显微镜下观察分析。否则显微镜镜头损坏。

### 3.3 金属材料常用腐蚀剂及腐蚀方法

#### 1、金属材料常用腐蚀剂

见表 1—1, 其它材料的腐蚀剂可查阅有关手册

**表 1—1 金属材料常用腐蚀剂**

序号	腐蚀剂名称	成分 ml (g)	腐蚀条件	适应范围
1	硝酸酒精溶液	硝酸 1—5 酒精 100	室温腐蚀数秒	碳钢及低合金钢, 能清晰的显示铁素体晶界
2	苦味酸酒精溶液	苦味酸 4 酒精 100	室温腐蚀数秒	碳钢及低合金钢, 能清晰的显示珠光体和碳化物
3	苦味酸钠溶液	苦味酸 2—5 苛性钠 20—25 蒸馏水 100	加热到 60°C 腐蚀 5 到 30 分钟	渗碳体呈暗黑色, 铁素体不着色
4	混合酸酒精溶液	盐酸 10 硝酸 3 酒精 100	腐蚀 2—10 分钟	高速钢淬火及淬火回火后晶粒大小
5	王水溶液	盐酸 3 硝酸 1	腐蚀数秒	各类高合金钢及不锈钢组织
6	氯化铁、盐酸水溶液	三氯化铁 5 盐酸 10 水 100	腐蚀 1—2 分钟	黄铜及青铜的组织显示
7	氢氟酸水溶液	氢氟酸 0.5 水 100	腐蚀数秒	铝及铝合金的组织显示

#### 2、样品腐蚀 (即浸蚀) 的方法

金相样品腐蚀的方法有多种, 最常用的是化学腐蚀法, 化学腐蚀法是利用腐蚀剂对样品的化学溶解和电化学腐蚀作用将组织显示出来。其腐蚀方式取决于组织中组成相的数量和性质。

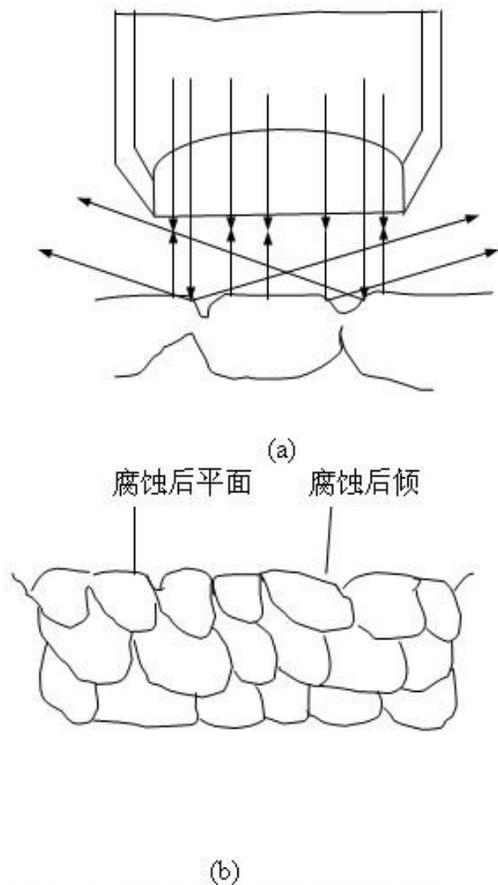


图 1—3 单相均匀固溶体浸蚀示意图  
(a) 浸蚀效果 (b) 铁素体之晶界组织观察

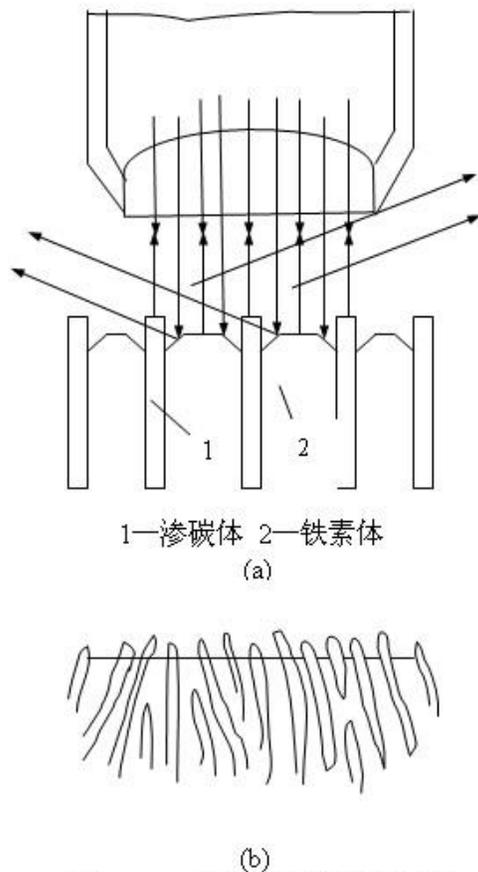


图 1—4 两相组织浸蚀示意图  
(a) 浸蚀效果 (b) 层片状珠光体组织

### 1) 纯金属或单相均匀的固溶体的化学腐蚀方式

见图 1—3 所示。其腐蚀主要为纯化学溶解的过程。例如工业纯铁退火后的组织为铁素体和极少量的三次渗碳体，可近似看作是单相的铁素体固溶体，由于铁素体晶界上的原子排列紊乱，并有较高的能量，因此晶界处容易被腐蚀而显现凹沟，同时由于每个晶粒中原子排列的位向不同，所以各自溶解的速度各不一样，使腐蚀后的深浅程度也有差别。在显微镜明场下，即垂直光线的照射下将显示出亮暗不同的晶粒。

### 2) 两相或两相以上合金的化学腐蚀方式

对两相或两相以上的合金组织，腐蚀主要为电化学腐蚀过程。例如共析碳钢退火后层状珠光体组织的腐蚀过程，层状珠光体是铁素体与渗碳体相间隔的层状组织。在腐蚀过程中，因铁素体具有较高的负电位而被溶解，渗碳体具有较高的正电位而被保护，在两相交界处铁素体一侧因被严重腐蚀而形成凹沟。因而在显微镜下可以看到渗碳体周围有一圈黑，显示出两相的存在，见图 1—4 所示。

### 3.4 金相样品常见的制备过程缺陷

- 1) 划痕：在显微镜视野内，呈现黑白的直道或玩虚道痕，穿过一个或若干晶粒，粗大的、直的道痕是磨制过程留下的痕迹，抛光未除去。而弯曲道痕是抛光过程中产生的，只要用力轻，均可消除。
- 2) 水迹于污染：在显微组织图像上出现串状水珠或局部彩色区域，是酒精未将水彻底冲干净所致。
- 3) 变形扰乱层：显微组织图像上出现不真实的模糊现象，是磨抛过程用力过大引起。
- 4) 麻坑：显微组织图像上出现许多黑点状特征，是抛光液太浓太多所致。
- 5) 腐蚀过深：显微组织图像失去部分真实的组织细节。
- 6) 拖尾：显微组织图像上出现方向性拉长现象，是样品沿某一方向抛光所致。

#### 四、实验设备

多媒体设备一套、金相显微镜数台、抛光机、吹风器、样品、不同号数的砂纸、玻璃板，抛光粉悬浮液、4%的硝酸酒精溶液、酒精、棉花等。

#### 五、实验内容

1. 阅读实验指导书上的有关部分及认真听取教师对实验内容等的介绍。
2. 观看金相样品制备及显微镜使用的录像。
3. 每位同学领取一块样品，一套金相砂纸，一块玻璃板。按上述金相样品的制备方法进行操作。操作中必须注意每一步骤中的要点及注意事项。
4. 将制好的样品放在显微镜上观察，注意显微镜的正确使用，并分析样品制备的质量好坏，初步认识显微镜下的组织特征。

#### 六. 实验报告要求

1. 简述金相显微镜的基本原理和主要结构。
2. 叙述金相显微镜的使用方法要点及其注意事项。
3. 简述金相样品的制备步骤。
4. 结合实验原始记录，分析自己在实际制样中出现的问题,并提出改进措施。
5. 对本次实验的意见和建议。

### 实验原始记录

学生姓名	班级	实验日期
显微镜型号	物镜放大倍数	目镜放大倍数
样品材料	浸蚀剂	自制样品组织描述
制样过程简记	异常现象纪录	

指导教师签名： \_\_\_\_\_

## 实验二 碳钢和铸铁的平衡组织和非平衡组织的观察与分析

### 一. 实验目的

1. 观察和分析碳钢和白口铸铁在平衡状态下的显微组织。
2. 分析含碳量对铁碳合金的平衡组织的影响，加深理解成分、组织和性能之间的相互关系。
3. 熟悉灰口铸铁中的石墨形态和基体组织的特征，了解浇铸及处理条件对铸铁组织和性能的影响，并分析石墨形态对铸铁性能的影响。
4. 识别淬火组织特征，并分析其性能特点，掌握平衡组织和非平衡组织的形成条件和组织性能特点。

### 二. 实验概述

铁碳合金的显微组织是研究钢铁材料的基础。所谓铁碳合金平衡状态的组织是指在极为缓慢的冷却条件下，比如退火状态所得到的组织，其相变过程按 Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图进行，此相图是研究组织，制定热加工工艺的重要依据。其室温平衡组织均由铁素体 F 和渗碳体 Fe<sub>3</sub>C 两个相接不同数量、大小、形态和分布所组成。高温下还有奥氏体 A，固溶体相  $\delta$ 。用金相显微镜分析铁碳合金的组织时，需了解相图中各个相的本质及其形成过程，明确相图中各线的意义，三条水平线上的反应产物的本质及形态，并能作出不同合金的冷却曲线，从而得知其凝固过程中组织的变化及最后的室温组织。初步体会材料科学研究中的成分-工艺和组织之间的关系精髓。

在上述的铁碳合金中，碳除了少数固溶于铁素体和奥氏体外，其余的均以渗碳体 Fe<sub>3</sub>C 方式存在，即按 Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图进行结晶。除此之外，碳还可以以另一种形式存在，即游离状态的石墨，用 G 表示，所以，铁碳合金的结晶过程存在两个相图，即上述的 Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图和 Fe—C 相图。这两个相图常画在一起，就称为铁碳双重相图。

在实际生产中，由于化学成分、冷却速度等的不同，常得到三种不同的铸铁，即灰口铸铁、白口铸铁和麻口铸铁。

灰口铸铁是第一阶段和第二阶段石墨化过程充分进行而得到的铸铁，其中碳全部或大部分以石墨形式存在，断口为灰暗色而得名。在工业生产上广泛应用。

白口铸铁是第一阶段和第二阶段石墨全部被抑制，完全按照 Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图进行结晶而得到的铸铁，其中碳几乎全部以 Fe<sub>3</sub>C 形式存在，断口呈白色而得名，这类铸铁组织中因存在大量莱氏体，即硬又脆，不易加工，在工业上很少应用。

麻口铸铁是第一阶段石墨化过程部分进行而得到的铸铁，其中碳一部分以 Fe<sub>3</sub>C 形式存在，另一部分以石墨形式存在，组织介于灰口铸铁和白口铸铁之间，断口上黑白相间成麻点而得名。因组织中含有不同程度的莱氏体，性硬而脆，在工业上也很少应用。

铁碳合金经过缓慢冷却后，所获得的显微组织，基本上与铁碳相图上的各种平衡组织相同，但碳钢的不平衡状态，即在快速冷却时的显微组织应由过冷奥氏体等温转变曲线图，即 C 曲线来确定。

#### 2.1 碳钢和铸铁的平衡组织

根据 Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图中含碳量的不同，铁碳合金的室温显微组织可分为工业纯铁、钢和白口铸铁三类。按组织标注的 Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图见图 2—1。

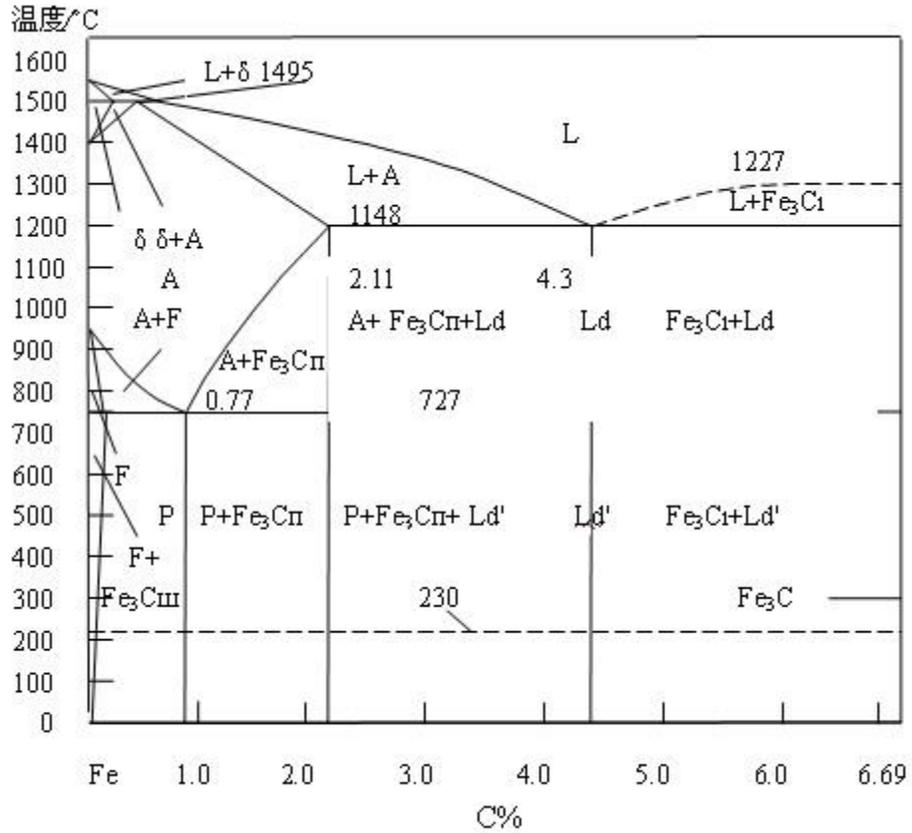


图 2—1 Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图

### 1、工业纯铁

含碳量小于 0.0218% 的铁碳合金，室温显微组织为铁素体和少量三次渗碳体，铁素体硬度在 80HB 左右，而渗碳体硬度高达 800HB，工业纯铁中的渗碳体量很少，故塑性、韧性好，而硬度、强度低，不能用作受力零件。

### 2、碳钢

含碳量在 (0.0218—2.11)% 之间的铁碳合金，高温下为单相的奥氏体组织，塑性好，适应于锻造和轧制，广泛应用于工业上，根据含碳量和室温组织，可将其分为三类：亚共析钢、共析钢和过共析钢。

- 1) 亚共析钢。0.0218—0.77)% 之间的铁碳合金，室温组织为铁素体和珠光体，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的增加，显微组织中铁素体呈白色，珠光体呈暗黑色或层片状。
- 2) 共析钢。0.77%，其显微组织由单一的珠光体组成，即铁素体和渗碳体的混合物，在光学显微镜下观察时，可看到层片状的特征，即渗碳体呈细黑线状和少量白色细条状分布在铁素体基体上，若放大倍数低，珠光体组织细密或腐蚀过深时，珠光体片层难于分辨，而呈现暗黑色区域
- 3) 过共析钢。0.77—2.11)% 之间，室温组织为珠光体和网状二次渗碳体，含碳量越高，渗碳体网愈多、愈完整。当含碳量小于 1.2% 时，二次渗碳体呈不连续网状，强度、硬度增加，塑性、韧性降低，当含碳量大于或等于 1.2% 时，二次渗碳体呈连续网状，使强度、塑性、韧性显著降低，过共析钢含碳量一般不超

过（1.3—1.4）%，二次渗碳体网用硝酸酒精溶液腐蚀呈白色，若用苦味酸钠溶液热腐蚀后，呈暗黑色。

### 3、白口铸铁

含碳量在（2.11—6.69）%之间，室温下碳几乎全部以渗碳体形式存在，故硬度高，但脆性大，工业上应用很少。按含碳量和室温组织将其分为三类。

- 1) 亚共晶白口铸铁。含碳量在（2.11—4.3）%之间，室温组织为珠光体、二次渗碳体和变态莱氏体  $Ld'$  组成。用硝酸酒精溶液腐蚀后，在显微镜下呈现枝晶状的珠光体和斑点状的莱氏体，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。含碳量为 4.3%，室温组织由单一的莱氏体组成，经腐蚀后，在显微镜下，变态莱氏体呈豹皮状，由珠光体，二次渗碳体及共晶渗碳体组成，珠光体呈暗黑色的细条状及斑点状，二次渗碳体常与共晶渗碳体连成一片，不易分辨。呈亮白色。
- 3) 过共晶白口铸铁。是含碳量大于 4.3% 的白口铸铁，在室温下的组织由一次渗碳体和莱氏体组成，经硝酸酒精溶液腐蚀后，显示出斑点状的莱氏体基体上分布着亮白色粗大的片状的一次渗碳体。

### 4、灰口铸铁

铁碳双重相图如图 2—2 所示，由铁碳双重相图可知，铸铁凝固时碳可以以两种形式存在，即以渗碳体的形式  $Fe_3C$  和石墨  $G$  的形式存在。碳大部分以渗碳体  $Fe_3C$  形式存在的，因其断口呈白色。而称白口铸铁，如前所述，白口铸铁硬而脆，很少用做零件。而碳大部分以石墨形式存在的，因其断口呈灰色，而称灰口铸铁。

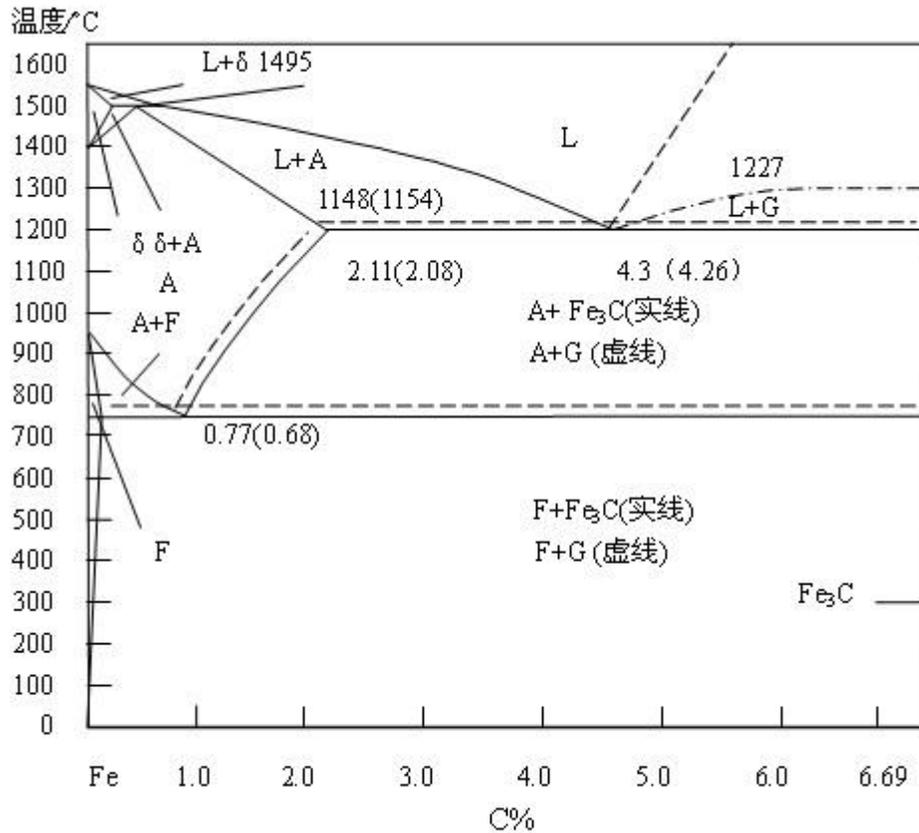


图 2—2 Fe—C 双重相图

工业生产中常采用调整铸铁成分，加入石墨化形成元素如 C、Si、P、Al、Cu 及球化剂，或进行石墨化退火等措施，生产各种灰口铸铁零件。虽然灰口铸铁的强度、塑性和韧性比钢差，但具有优于钢的减震性，耐磨性、铸造性和可切削性，且生产工艺和熔化设备简单，因而在工业上得到普遍应用。

灰口铸铁的显微组织可简单的看成是钢基体和石墨夹杂物共同构成。按石墨形态可将灰口铸铁分为灰铸铁、球墨铸铁和可锻铸铁三种。按基体的不同又可分为三类，即铁素体、珠光体、铁素体+珠光体。灰口铸铁具有优良的铸造性能、切削加工性能、耐磨性和减磨性，在工业上得到广泛的应用。

### 2.2 碳钢和铸铁的热处理组织

由碳钢的过冷奥氏体转变曲线知，不同的冷却条件，过冷奥氏体将发生不同类型的转变，转变产物的组织形态各不相同。共析碳钢的 C 曲线见图 2—3 所示。

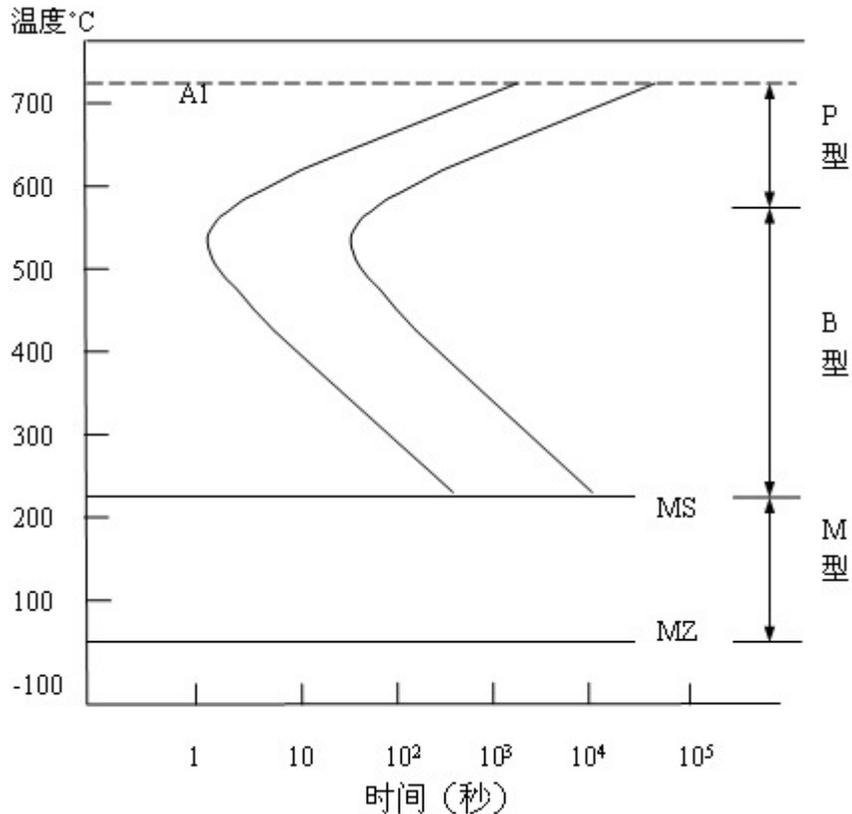


图 2—3 共析碳钢 C 曲线

#### (1) 退火组织

碳钢经退火后获得前述的平衡组织，共析钢和过共析钢经球化退火后，获得由铁素体和球状渗碳体组成的球状珠光体组织。

#### (2) 正火组织

碳钢经正火后的组织比退火细，相同成分的亚共析钢，正火后珠光体含量比退火后的多。

#### (3) 淬火组织

经淬火或等温淬火后获得不平衡组织。碳钢淬火后的组织为马氏体和残余奥氏体，低碳钢淬火后组织为板条马氏体和少量的残余奥氏体，随含碳量的增加，残余奥氏体量增多，淬火马氏体是碳在  $\alpha$ -Fe 中的过饱和固溶体，其形态取决于马氏体中的含碳量，低碳马氏体呈板条状，强而韧，高碳马氏体呈针叶状，硬而脆，而中碳钢淬火后得到板条马氏体和针叶状马氏体的混合组织。

#### (4) 等温淬火组织

碳钢等温淬火后获得贝氏体组织，在贝氏体转变温度范围内，等温温度较高时，获得上贝氏体，呈羽毛状，它由过饱和的铁素体片和分布片间的断续细小的碳化物组成的混合物，塑性、韧性较差，应用较少。而等温温度较低时，获得下贝氏体，呈黑色的针叶状，它是由过饱和的铁素体和其上分布的细小的渗碳体粒子组成的混合物，下贝氏体强而韧，等温淬火的温度视钢的成分而定。

### 三. 实验仪器及材料

1. 拟观察金相样品见表 2—1
2. 几种基本组织的概念与特征见表 2—2
3. XJB—1 型、4X 型、XJP—3A 型和 MG 型金相显微镜数台
4. 多媒体设备一套
5. 金相组织照片两套

**表 2—1 碳钢和铸铁的平衡组织与非平衡组织样品**

序号	材料名称	处理状态	腐蚀剂	放大倍数	显微组织
1	工业纯铁	退火	40%硝酸酒精	400X	F+Fe <sub>3</sub> C <sub>III</sub>
2	20 钢	退火	40%硝酸酒精	400X	F+P
3	40 钢	退火	4%硝酸酒精	400X	F+ P
4	60 钢	退火	4%硝酸酒精	400X	F+P
5	T8	退火	4%硝酸酒精	400X	P
6	T12	退火	4%硝酸酒精	400X	P+Fe <sub>3</sub> C <sub>II</sub>
7	T12	退火	苦味酸钠溶液	400X	P+Fe <sub>3</sub> C <sub>II</sub> (Fe <sub>3</sub> C 呈黑色)
8	T12	球化退火	4%硝酸酒精	400X	P 球 (F+ Fe <sub>3</sub> C 球)
9	亚共晶白口 铸铁	铸态	4%硝酸酒精	400X	P+Fe <sub>3</sub> C <sub>II</sub> +L <sub>d</sub>
10	共晶白口铸 铁	铸态	4%硝酸酒精	400X	L <sub>d</sub>
11	过共晶白口 铸铁	铸态	4%硝酸酒精	400X	Fe <sub>3</sub> C <sub>I</sub> +L <sub>d</sub>

12	灰铸铁	铸态	40%硝酸酒精	400X	F+P+G 片
13	球墨铸铁	铸态	4%硝酸酒精	400X	F+P+G 球
14	可锻铸铁	石墨化退火	4%硝酸酒精	400X	F +G 团
15	15 钢	淬火	4%硝酸酒精	400X	M 板
16	球墨铸铁	淬火	4%硝酸酒精	400X	M 片+A'+G
17	40Cr	460C° 等温淬火	4%硝酸酒精	400X	B 上+M+A'
18	T8	280C° 等温淬火	4%硝酸酒精	400X	B 下+M+A'

表 2—2 几种基本组织的概念及金相显微镜下的特征

组织名称	基本概念	腐蚀剂	显微镜下的特征
铁素体	碳在 $\alpha$ -Fe 中的固溶体	4%硝酸酒精	亮白色及浅色的多边形晶粒
渗碳体	铁与碳形成的一种化合物	4%硝酸酒精	呈亮白色或细黑线状, 有多种形态, 如条状、网状和球状
珠光体	铁素体和渗碳体的机械混合物	4%硝酸酒精	呈球状分布和层片状
片状珠光体	铁素体和渗碳体交替排列形成的层片状	4%硝酸酒精	随放大倍数不同而呈白色宽条铁素体和细条渗碳体, 或细黑线状或暗黑色
球状珠光体	球状的渗碳体分布在铁素体的基体上	4%硝酸酒精	白色渗碳体颗粒分布在亮白色的铁素体基体上, 边界呈暗黑色
莱氏体 (Ld')	是珠光体、二次渗碳体、共晶渗碳体组成的机械混合物、	4%硝酸酒精	亮白色渗碳体基体上分布着暗黑色斑点状及细条状的珠光体
马氏体 (M)	碳在 $\alpha$ -Fe 中的过饱和固溶体	4%硝酸酒精	主要呈针状或板条状

板条马氏体	含碳量低的奥氏体形成的马氏体	4%硝酸酒精	黑色或浅色不同位向的一束束平行的细长条状
片状马氏体	含碳量高的奥氏体形成的马氏体	4%硝酸酒精	浅色针状或竹叶状
残余奥氏体 (A')	淬火未能转变成马氏体而保留到室温的奥氏体	4%硝酸酒精	分布在马氏体之间的白亮色
贝氏体 (B)	铁素体和渗碳体的两相混合物	4%硝酸酒精	黑色羽毛状及针叶状
上贝氏体	平行排列的条状铁素体和条间断续分布的渗碳体组成	4%硝酸酒精	黑色成束的铁素体条, 即羽毛状特征
下贝氏体	过饱和的针状铁素体内沉淀有碳化物	4%硝酸酒精	黑色的针叶状

#### 四. 实验内容

1. 实验前应复习课本中有关部分, 认真阅读实验指导书。
2. 熟悉金相样品的制备方法与显微镜的原理和使用。
3. 认真聆听指导教师对实验内容、注意事项等的讲解。
4. 用光学显微镜观察和分析表 2—1 中各金相样品的显微组织。
5. 观察过程中, 学会分析相、组织组成物及分析不同碳量的铁碳合金的凝固过程、室温组织及形貌特点。

#### 五. 实验报告要求

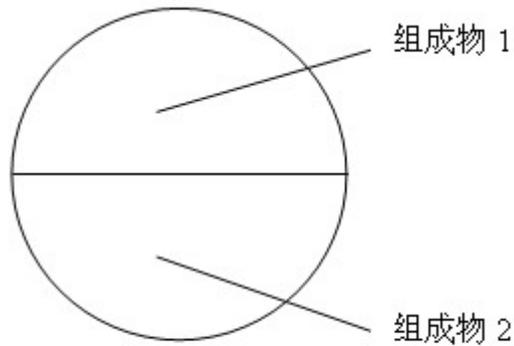
##### 5.1 画组织示意图

(1) 画出下列试样的组织示意图

- 1) 工业纯铁
- 2) 亚共析钢 20 钢、40 钢、60 钢中任选一个
- 3) 过共析钢 T12 退火、球化退火中任选一个
- 4) 白口铸铁: 亚共晶、过共晶中任选一个
- 5) 灰口铸铁: 灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁中任选一个
- 6) 淬火马氏体: 低碳和高碳马氏体任选一个
- 7) 贝氏体: 40Cr 上贝氏体、T8 下贝氏体任选一个

(2) 画图方法要求如下

- 1) 应画岩石记录表中的 30—50 直径的圆内, 注明: 材料名称、含碳量、腐蚀剂和放大倍数。并将组织组成物用细线引出标明。如下图:



材料名称	处理状态
放大倍数	腐蚀剂
金相组织	

2) 先在实验原始记录表上按要求画出，和正式报告一起交上。

### 5.2 回答以下问题

- (1) 分析所画组织的形成原因。并近似确定一种亚共析钢的含碳量。
- (2) 根据实验结果，结合所学知识，分析碳钢和铸铁成分、组织和性能之间的关系。
- (3) 分析碳钢（任选一种成分）或白口铸铁（任选一种成分）凝固过程。
- (4) 总结碳钢、铸铁和淬火组织中各种组织组成物的本质和形态特征。

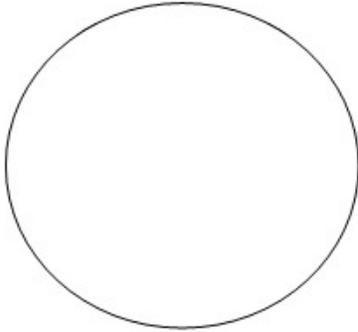
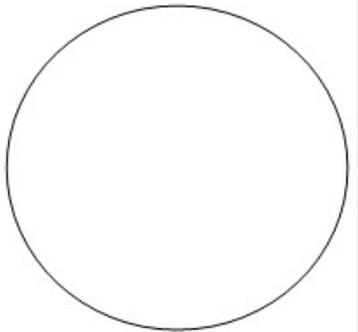
注：以上问题可按具体情况选做。

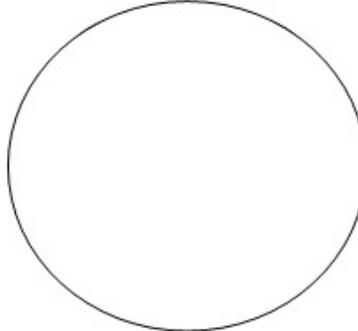
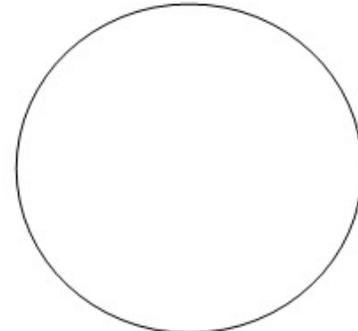
### 5.3 对本次试验的感想与建议

碳钢和铸铁的平衡组织和非平衡组织的观察与分析

# 原始记录

班级：                      实验日期：    年    月    日                      指导教师签名：

材料名称				材料名称			
组织示意图				组织示意图			
金相组织		热处理 状态		金相组织		热处理 状态	
放大倍数		浸蚀剂		放大倍数		浸蚀剂	

材料名称				材料名称			
组织示意图				组织示意图			
金相组织		热处理 状态		金相组织		热处理 状态	
放大倍数		浸蚀剂		放大倍数		浸蚀剂	

# 实验三 综合实验

## 一、实验目的

1. 了解碳钢热处理工艺操作。
2. 学会使用洛氏硬度计测量材料的硬度性能值。
3. 利用数码显微镜获取金相组织图像，掌握热处理后钢的金相组织分析。
4. 探讨淬火温度、淬火冷却速度、回火温度对 40 和 T12 钢的组织 and 性能（硬度）的影响。
5. 巩固课堂教学所学相关知识，体会材料的成分-工艺-组织-性能之间关系。

## 二、实验内容

1. 进行 40 和 T12 钢试样退火、正火、淬火、回火热处理，工艺规范见表 3—1。
2. 用洛氏硬度计测定试样热处理试样前后的硬度。
3. 制备表 1 所列样品的金相试样，观察并获取其显微组织图像。
4. 对照金相图谱，分析探讨本次试验可能得到的典型组织：片状珠光体、片状马氏体、板条状马氏体、回火马氏体、回火托氏体、回火索氏体等的金相特征。

## 三、实验概述

### 3.1 热处理工艺参数的确定

Fe—Fe<sub>3</sub>C 状态图和 C—曲线是制定碳钢热处理工艺的重要依据。热处理工艺参数主要包括加热温度，保温时间和冷却速度。

#### 1、加热温度的确定

淬火加热温度决定于钢的临界点，亚共析钢，适宜的淬火温度为 Ac<sub>3</sub> 以上 30~50℃，淬火后的组织为均匀而细小的马氏体。如果加热温度不足 (<Ac<sub>3</sub>)，淬火组织中仍保留一部分原始组织的铁素体，会造成淬火硬度不足。

过共析钢，适宜的淬火温度为 Ac<sub>1</sub> 以上 30~50℃，淬火后的组织为马氏体十二次渗碳体（分布在马氏体基体内成颗粒状）。二次渗碳体的颗粒存在，会明显增高钢的耐磨性。而且加热温度较 Ac<sub>m</sub> 低，这样可以保证马氏体针叶较细，从而减低脆性。

回火温度，均在 Ac<sub>1</sub> 以下，其具体温度根据最终要求的性能（通常根据硬度要求）而定。

#### 2、加热温度与保温时间的确定

加热、保温的目的是为了使零件内外达到所要求的加热温度，完成应有的组织转变。加热、保温时间主要决定于零件的尺寸、形状、钢的成分、原始组织状态、加热介质、零件的装炉方式和装炉量以及加热温度等。本试验用圆形薄片试样，在马福电炉中加热，加热温度在 800~900℃ 之间，按直径每毫米保温一分钟计算。

回火加热保温时间，应与回火温度结合起来考虑，一般来说，低温回火时，由于所得组织并不是稳定的，内应力消除也不充分，为了使组织和内应力稳定，从而使零件在使用过程中性能与尺寸稳定，所以回火时间要长一些，不少于 1.5~2 小时。高温回火时间不宜过长，过长会使钢过分软化，有的钢种甚至造成严重的回火脆性，一般在 0.5~1 小时。本试验淬火后的试样分别不同温度回火（见表 6—2），保温时间均在 1 小时内。

#### 3、冷却介质与方法

冷却介质是影响钢最终获得组织与性能的重要工艺参数，同一种碳钢，在不同冷却介质中冷却时，由于冷却速度不同，奥氏体在不同温度下发生转变，

并得到不同的转变产物。淬火介质主要根据所要求的组织和性能来确定。常用的介质有水、盐水、油、空气等。

对碳钢而言，工件退火常采用随炉缓慢冷却，正火为空气中冷却，淬火为在水、盐水或油中冷却，回火为工件在炉中保温后取出在空气中冷却。

### 3.2 基本组织的金相特征

碳钢经退火后可得到（近）平衡组织，淬火后则得到各种不平衡组织，实验二中已介绍。普通热处理除退火、淬火外还有正火和回火。这样，在研究热处理后的组织时，还要熟悉以下基本组织的金相特征（相应图谱见附录 2）。

- 1、索氏体：是铁素体与片状渗碳体的机械混合物。片层分布比珠光体细密，在高倍（700×左右）显微镜下才能分辨出片层状。
- 2、托氏体：也是铁素体与片状渗碳体的机械混合物。片层分布比索氏体更细密，在一般光学显微镜下无法分辨，只能看到黑色组织如墨菊状。当其少量析出时，沿晶界分布呈黑色网状包围马氏体；当析出量较多时，则成大块黑色晶粒状。只有在电子显微镜下才能分辨其中的片层状。层片愈细，则塑性变形的抗力愈大，强度及硬度愈高，另一方面，塑性及韧性则有所下降。
- 3、回火马氏体：片状马氏体经低温回火（150~250℃）后，得到回火马氏体。它仍具有针状特征，由于有极小的碳化物析出使回火马氏体极易浸蚀，所以在光学显微镜下，颜色比淬火马氏体深。
- 4、回火托氏体：淬火钢在中温回火（350~500℃）后，得到回火屈氏体组织。其金相特征是：原来条状或片状马氏体的形态仍基本保持，第二相析出在其上。回火屈氏体中的渗碳体颗粒很细小，以至在光学显微镜下难以分辨，用电镜观察时发现渗碳体已明显长大。
- 5、回火索氏体：淬火钢在高温回火（500~650℃）回火后得到回火索氏体组织。它的金相特征是：铁素体基体上分布着颗粒状渗碳体。碳钢调质后回火索氏体中的铁素体已成等轴状，一般已没有针状形态。

必须指出：回火屈氏体、回火索氏体是淬火马氏体回火时的产物，它的渗碳体是颗粒状的，且均匀的分布在 $\alpha$ 相基体上；而屈氏体、索氏体是奥氏体过冷时直接转变形成，它的渗碳体是呈片层状。回火组织较淬火组织在相同硬度下具有较高的塑性及韧性。

### 3.3 金相组织的数码图像

金相组织照片可提供材料内在质量的大量信息及数据，金相分析是材料科研、开发及生产中的重要分析手段。

传统金相显微组织照片都要经过胶片感光、冲洗、印制、烘干等过程才能获得，操作繁琐，制作周期长，并且需要一定的仪器、场地及大量耗材，所得仅为一张纸质照片，不便长期保存、相互交流。利用数字技术对传统光学金相显微镜进行改造和完善，添加既经济又实用，并且操作简便，省时省力，可在很短时间内能直接打印出一份质量上乘的金相照片和试验报告，并能使大量资料储存、查询、上网、及管理实现自动化、信息化。

XJP-6A 金相显微镜数字图像采集系统是在 XJP-6A 光学显微镜基础上，添加光学适配镜，通过 CCD 图像采集和数字化处理，提供计算机数码图像。整个系统构成如下（见下图）：

XJP-6A 光学显微镜 → 光学适配镜 → CCD 图像采集 → 图像数字化处理 → USB 口传输 → 计算机处理 → 显示器 → 打印输出



图 1 XJP-6A 金相显微镜数字图像采集系统

高像素图像数字采集系统影像总像素达 500 万，有效面积达  $90 \times 70$  mm 并与显微镜同倍，借助于计算机中强大功能的 Photoshop 软件以及高分辨率专用 Photo 打印机，影像真实、精细，可提供高品质的金相显微组织照片。

本综合实验为指导性综合试验，以下介绍其实验材料、设备、实验步骤。对于完全开放型的综合试验，不受以下内容限制，在材料选取、设备准备、实验内容设计等方面，可由同学结合所学知识，围绕材料的成分-工艺-组织-性能关系研究分析，参考本指导书的内容自行安排，取得实验指导教师准许后，个人或小组独立完成。

#### 四、实验方法

本综合实验为指导性综合试验，以下介绍其实验材料、设备、实验步骤。对于完全开放型的综合试验，不受以下内容限制，在材料选取、设备准备、实验内容设计等方面，可由同学结合所学知识，围绕材料的成分-工艺-组织-性能关系研究分析，参考本指导书的内容自行安排，取得实验指导教师准许后，个人或小组独立完成。

##### 4.1 实验材料及设备

- ① 40、T12 钢试样，尺寸分别为  $\phi 10 \times 15$  mm、 $\phi 10 \times 12$  mm。
- ② 砂纸、玻璃板、抛光机等金相制样设备，按表 6—2 已制备好金相试样一套。
- ③ 马福电炉。
- ④ 洛氏硬度计。

- ⑤ 淬火水槽、油槽各一只。
- ⑥ 铁丝、钳子。
- ⑦ 金相显微镜及数码金相显微镜。

#### 4.2 实验步骤

实验前应仔细阅读实验指导书（包括洛氏硬度计的原理、构造及操作），明确实验目的、内容、任务。

2、实验以组为单位进行，每组 12 人，每人完成表 3-1 列内容之一。

表 3-1 综合实验方案

材料	编号	热处理工艺			硬度 HRC		最终组织
		加热温度 ℃	冷却方法	回火温度 ℃	处理前	处理后	
40	1	860	空冷				
	2	860	油冷				
	3	860	水冷				
	4	860	水冷	150			
	5	860	水冷	400			
	6	860	水冷	600			
	7	760	水冷				
T12	8	1200	空冷				
	9	1200	水冷				
	10	780	水冷				
	11	780	水冷	200			
	12	780	油冷				

#### 3、实验流程：

- ① 按组每人领取已编好号码的试样一块，绑好细铁丝环；
- ② 全组人员由实验老师讲解洛氏硬度计的使用，观看硬度测定示范，并按顺序各人测定试样处理前硬度。
- ③ 按表 3-1 中规定条件进行热处理处理。各试样处理所需的加热炉已预先由实验老师开好，注意各人选用合适的加热保温温度。首先观看一次实验老师进行的操作演示。断电打开炉门，将试样放入炉膛内加热。试样应尽量靠近炉中测温热电偶端点附近，以保证热电偶测出的温度尽量接近试样温度。当试样加热到温时，开始计算保温时间，保温到所需时间后，断电开炉门，立即用钩子取出试样，出炉正火或淬火。淬火槽应尽量靠近炉门，操作要迅速，试样应完全浸入介质中，并搅动试样，否则有可能淬不硬。特别安全提示：热处理过程中，放置和取出试样时，首先应切断电源，打开炉门操作时注意安全，不要被高温炉和试样烫伤，试样冷却过程中，在到达室温温度以前，不要用裸手触摸。
- ④ 试样经处理后，必须用纱布磨去氧化皮，擦净，然后在洛氏硬度计上测硬度值。

- ⑤ 进行回火操作的同学，将正常淬火的试样，测定淬火后的硬度值，再按表3-1中所指定的温度回火，保温一小时，回火后再测硬度值。
  - ⑥ 每位同学把自己测出的硬度数据填入原始记录表格中，记下本次试验的全部数据。
  - ⑦ 制备试样，分析组织。各人制备并观察所处理样品的金相显微组织，在原始记录表中画下组织特征示意图。组织观察在普通显微镜上进行，并和附录中相应图谱对照分析，在具有数据采集功能的数码显微镜上采集图像，保存成电子文档并打印输出在相片打印纸上。
- 4、小组讨论。根据实验结果，结合课堂所学知识，围绕材料的成分-工艺-组织-性能关系，进行分析讨论。

#### **五、实验报告要求**

以组为单位，撰写实验报告，要求：

1. 每位同学写一份自己所做实验的小报告，附原始记录。
2. 全组同学结果共享，结合课堂所学相关知识讨论后，共同撰写一份总报告，并对实验提出意见和建议。
3. 将总报告和个人小报告汇总成一册上交，其中一份为纸质打印报告，一份为电子版报告。

# 综 合 实 验

## 原始记录

班级：                      实验日期：      年    月    日                      指导教师签名：

试样 编号		材料名称		样品硬度 (HRC)	处理前	淬火后	回 火 后
热处理 工艺	加热温度		冷却方法 (打钩)			回火温度	
	℃	空冷	油冷	水冷	℃		
最终 组织 照片							
显微镜型号				金相组织 描述			
硬度计型号				放大倍数		浸蚀剂	

### 参考文献

- [1] 沈莲, 机械工程材料, 机械工业出版社, 北京, 2003年。
- [2] 石德柯, 材料科学基础, 机械工业出版社, 北京, 2003年。
- [3] 何明、赵文英, 金属学原理实验, 机械工业出版社, 北京, 1988年。
- [4] 林昭淑, 金属学及热处理实验与课堂讨论, 湖南科学技术出版社, 长沙, 1992年。
- [5] 史美堂, 柏斯森, 金属材料及热处理习题集与实验指导书, 上海科学技术出版社, 1983年。
- [6] 陆文周, 工程材料及机械制造基础实验指导书, 东南大学出版社, 1997年。
- [7] 温其诚, 硬度计量, 中国计量出版社, 1991年。

## 附录 1、XJP-6A 金相显微镜数字图像采集系统操作规程

### XJP-6A 金相显微镜数字图像采集系统操作规程

金相试样在普通显微镜上确定可用后方可放置在 XJP-6A 金相显微镜数字图像采集系统的显微镜上，

按下述操作进行数码图像获取。

学生姓名：

#### 一、图像采集

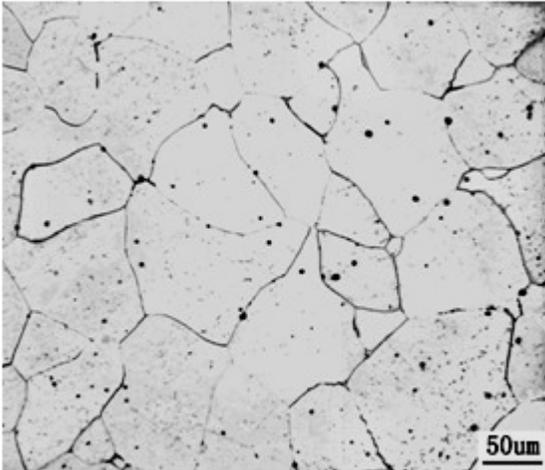
- 1、 开通采集仪及显示器；
- 2、 拉出显微镜右拉杆；
- 3、 按大鼠标正中小键持续 2 秒，采集仪工作；
- 4、 按小右键两次；
- 5、 按左侧前键放大图像至最大；
- 6、 按左侧后键按钮，采集仪拍摄图像

#### 二、图像处理

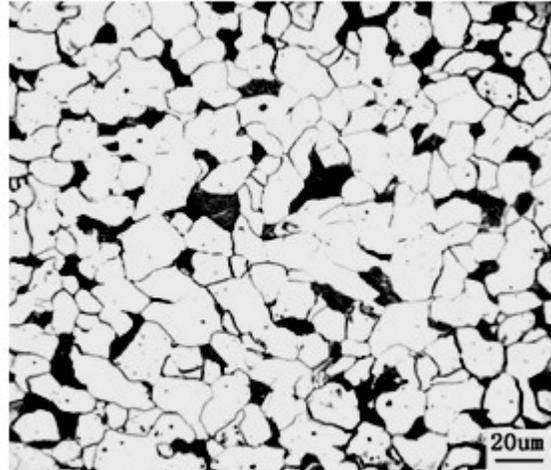
- 1、 打开 PHOTOSHOP 软件；
- 2、 按左侧白方按钮，拍摄图片导入计算机；
- 3、 点击 取消 / 文件 / 打开 / ；
- 4、 点击 文件栏 / 打开 / 可移动磁盘 / 取出拍摄图片；
- 5、 点击 图像栏 / 模式 / 灰度；
- 6、 点击 图像栏 / 图像大小 / 改宽度为 9；
- 7、 点击 图像栏 / 调整/亮度对比度；
- 8、 点击 文件栏 / 存储为 / 进入指定磁盘 / 保存 / 好；
- 9、 点击 文件栏 / 打印选项 / 去掉居中 / 显示定界框 / 调整图像  
打印位置；
- 10、 点击 打印命令；
- 11、 点击 设置命令；
- 12、 点击 属性命令；
- 13、 选择纸张类型点击确定命令；
- 14、 点击 继续 / 仅限黑墨；
- 15、 点击 好；
- 16、 点击 好，至打印结束

## 附录 2、部分材料的金相图谱

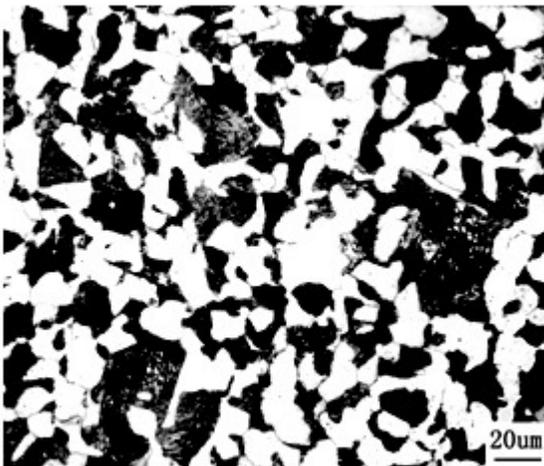
### 一、实验 2 部分相关材料的金相图谱



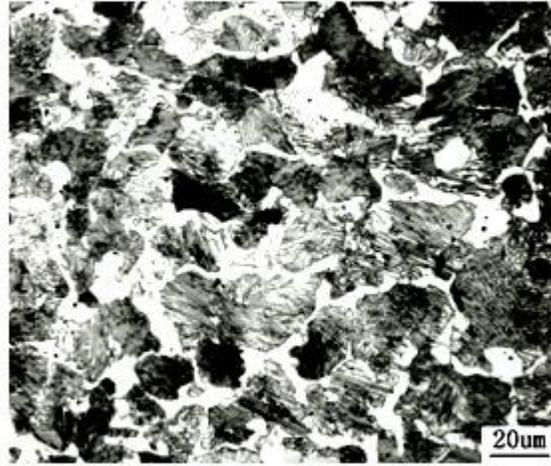
工业纯铁 退火 40%硝酸酒精  $F+Fe_3C_{III}$



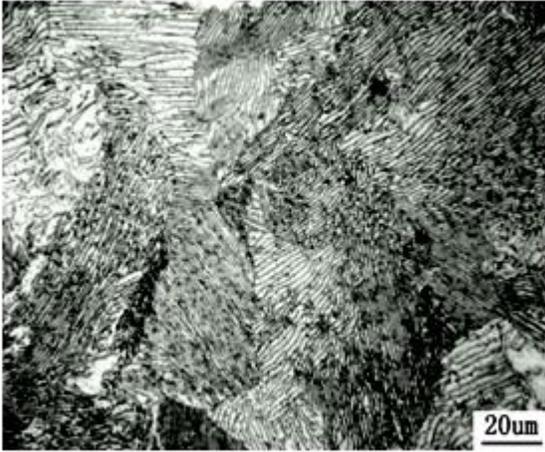
20 钢 退火 40%硝酸酒精 F+P



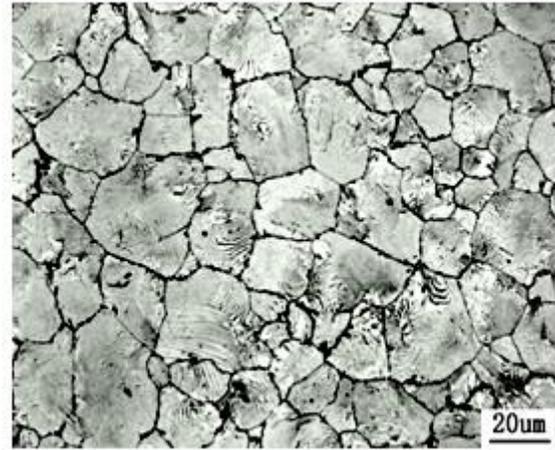
40 钢 退火 40%硝酸酒精 F+P



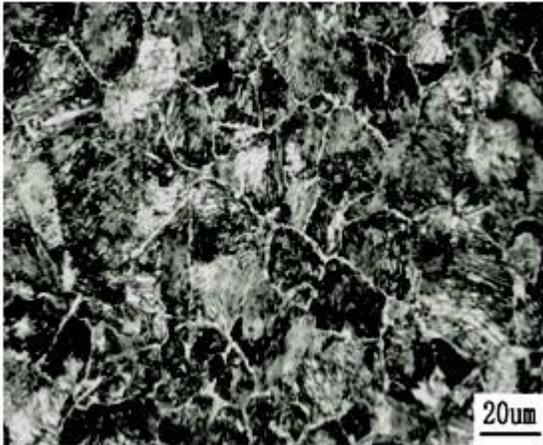
60 钢 退火 40%硝酸酒精 F+P



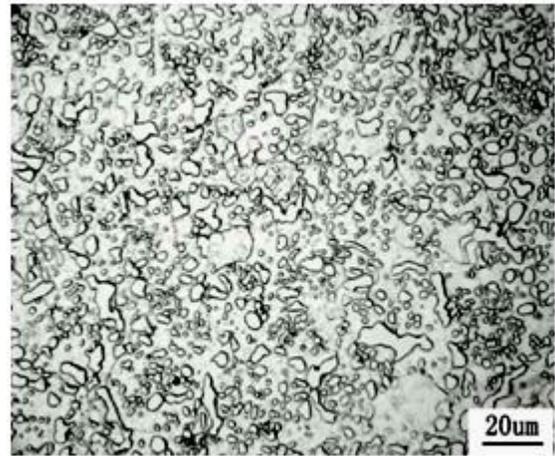
T8 钢 退火 4%硝酸酒精 P



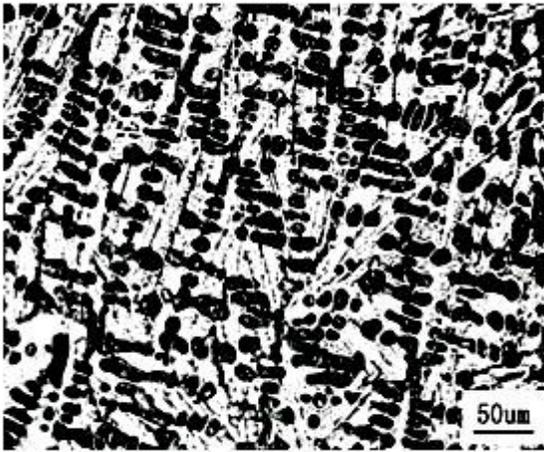
T12 退火 苦味酸钠溶液 P+Fe<sub>3</sub>C<sub>II</sub> (Fe<sub>3</sub>C 呈黑色)



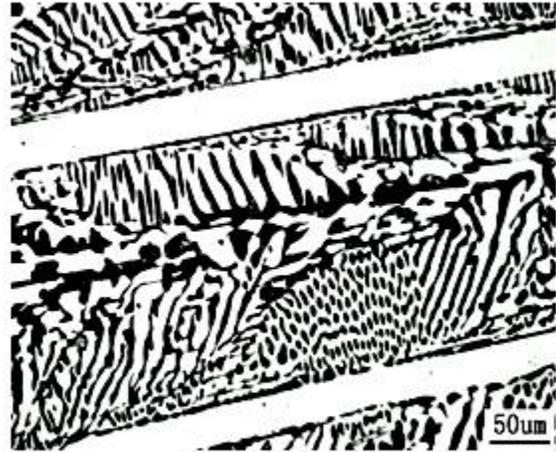
T12 退火 4%硝酸酒精 P+Fe<sub>3</sub>C<sub>II</sub>



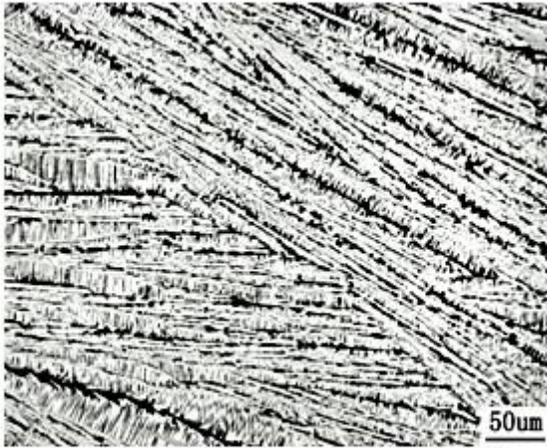
T12 球化退火 4%硝酸酒精 P 球 (F+ Fe<sub>3</sub>C)



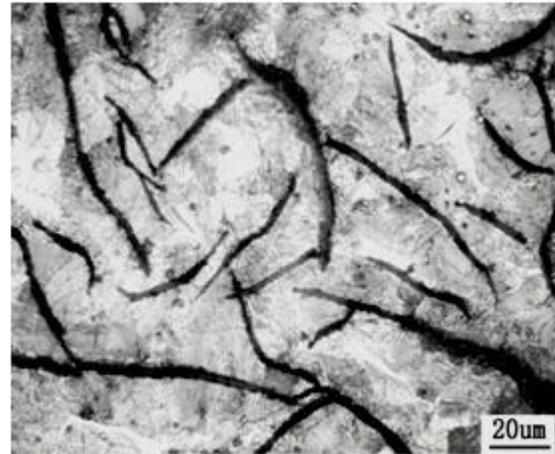
亚共晶白口铸铁 铸态  
4%硝酸酒精  $P+Fe_3C_{II}+Ld'$



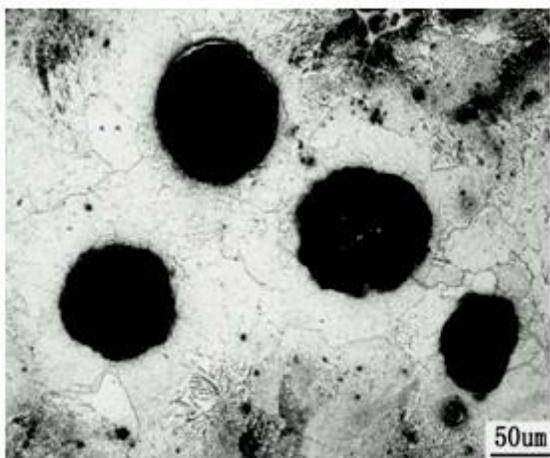
过共晶白口铸铁铸态  
4%硝酸酒精  $Fe_3C_I+Ld'$



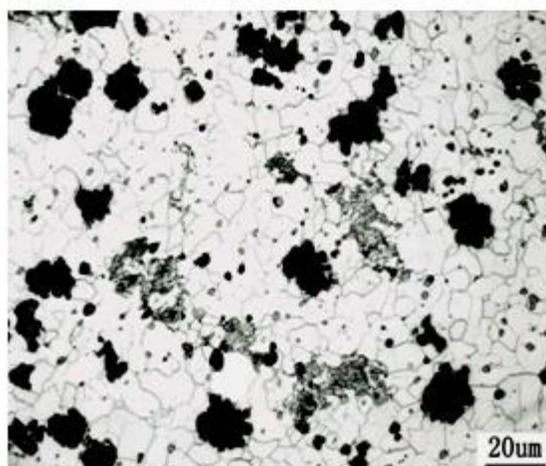
共晶白口铸铁 铸态 4%硝酸酒精  $Ld'$



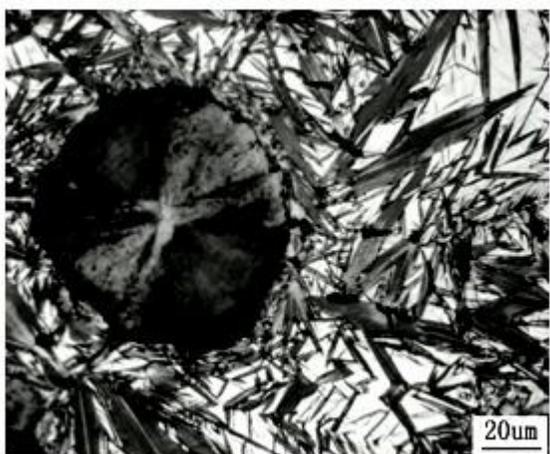
灰铸铁 铸态 40%硝酸酒精  $P+G$  片



球墨铸铁 铸态 4%硝酸酒精 F+P+G 球



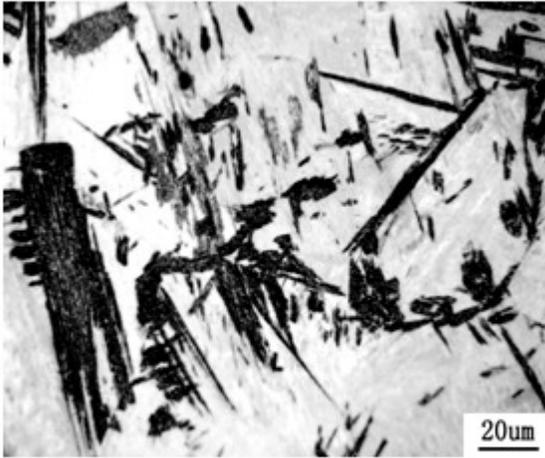
可锻铸铁 石墨化退火 4%硝酸酒精 F+P+G 团



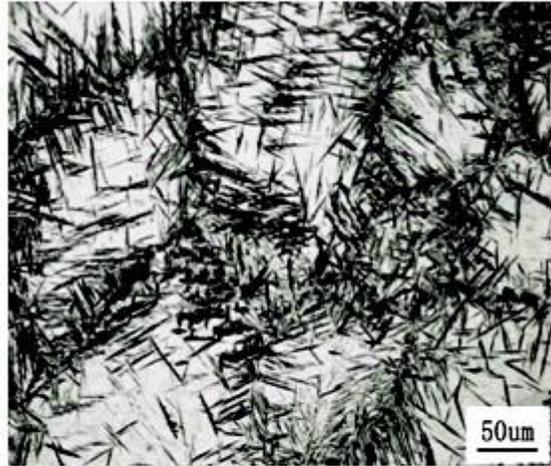
球墨铸铁 淬火 4%硝酸酒精 M+A+G 球



15 钢 淬火 4%硝酸酒精 低 M



40Cr 460 等温淬火 4%硝酸酒精  
B 上+M+A'



T8 280 等温淬火 4%硝酸酒精  
B 下+M+A'

## 二、 实验 3 部分相关材料的金相图谱



40 钢 860°C 水淬

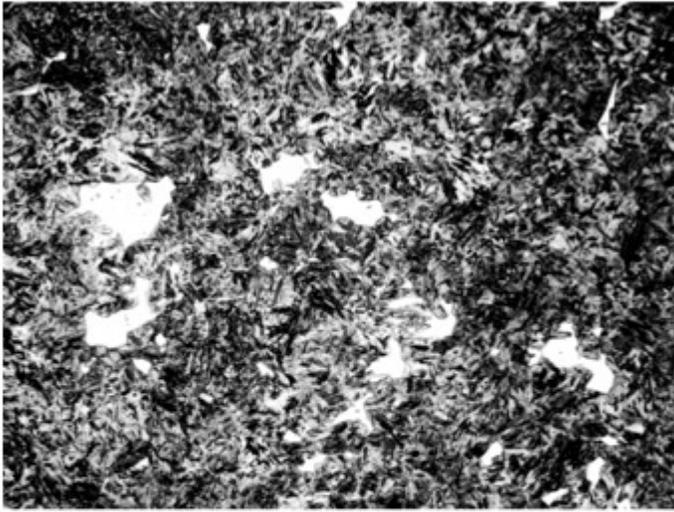
材料、 40 钢

工艺： 860°C 水淬

组织： 板条马氏体与片状马氏体的混合组织

腐蚀剂： 4% 硝酸酒精

放大倍数： ×500



40 钢 760°C 水淬

材料、40 钢

工艺：760°C 水淬

组织：M+F 珠（白色）

腐蚀剂：4% 硝酸酒精

放大倍数：×500



40 钢 860°C 水淬 150°C 回火

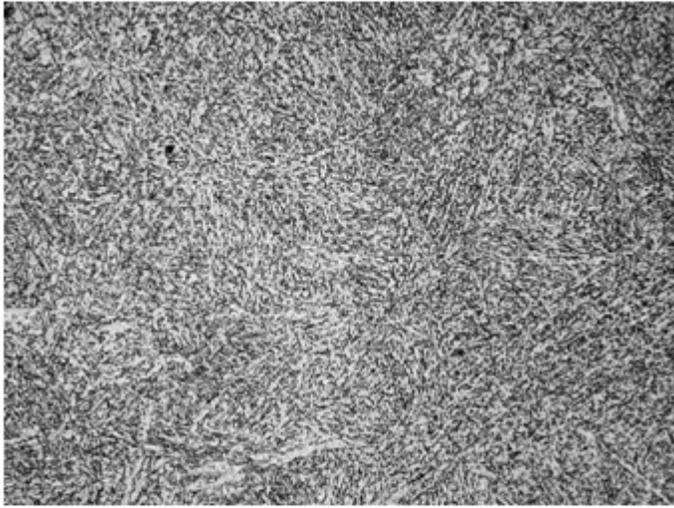
材料、40 钢

工艺：860°C 淬水+150°C 回火

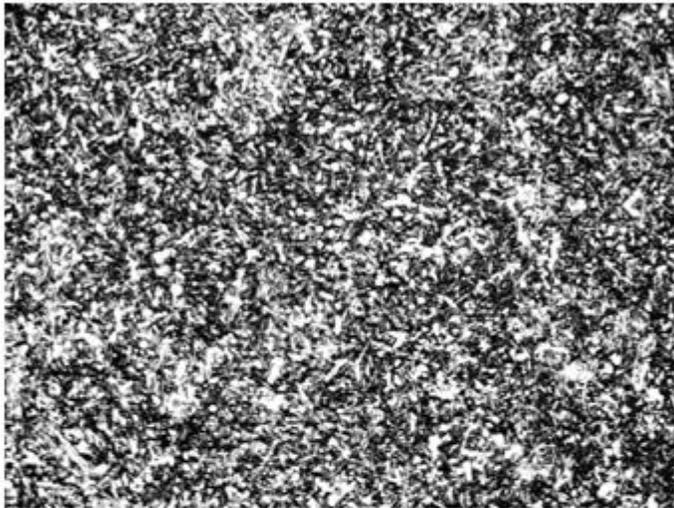
组织：回火马氏体

腐蚀剂：4% 硝酸酒精

放大倍数：×500



材料、 40 钢  
工艺： 860℃淬盐水+400℃回火  
组织： 回火托氏体  
腐蚀剂： 4%硝酸酒精  
放大倍数： ×500



T12 780℃水淬

材料、 T12 钢  
工艺： 780℃水淬  
组织： M 残余+K  
腐蚀剂： 4%硝酸酒精  
放大倍数： ×500