

《材料科学基础 A》 实验指导书

(金属材料工程专业)

田保红 王长生 贾淑果 编

河南科技大学
工程材料实验教学中心

2007 年 3 月

学生实验守则

1. 实验前要认真预习实验指导书和有关基础理论，并接受实验指导人员的检查。否则，不得参加实验。

2. 学生必须按时到实验室上实验课。进入实验室后应保持室内安静整洁，不准吸烟、随地吐痰和将脏物带入室内。

3. 做实验时必须严格遵守实验室的规章制度和仪器设备的操作规程，服从教师和实验技术人员的指导。

4. 爱护仪器设备、节约使用材料，未经许可不得动用与本次实验无关的仪器和其它设施，不准将室内物品带出室外。

5. 实验中要细心观察，认真记录各种数据，不得马虎从事，不得抄袭他人数据，不得擅自离开操作岗位。

6. 实验时必须注意安全，防止人身和设备事故的发生，若发生事故迅速采取有效措施，包括切断电源等，并注意保护现场，及时向指导人员报告。

7. 实验完毕后，要将使用的仪器设备、工具等整理整齐，清扫实验场地，交检实验记录，经实验指导人员同意后方可离开。

8. 凡损坏仪器设备和工具者应主动说明原因，并接受检查，填写报废单或损坏情况报告，根据具体情况进行处理。凡不遵守操作规程或擅自动用其它仪器设备造成损坏者按有关规定进行处理。

(摘自“河科大教[2007]19号文《河南科技大学实验室工作规程》”)

目 录

实验一 金相分析综合实验.....	1
实验二 典型金属晶体结构的刚球堆垛模型分析.....	25
实验三 二元系合金的显微组织分析.....	31
实验四 铁碳合金相图及平衡组织分析.....	36
实验五 三元合金显微组织分析.....	42
实验六 结晶及晶体生长形态、铸锭组织观察.....	46
实验七 金属的塑性变形与再结晶.....	51

实验一 金相分析综合实验

一、实验目的

1. 了解金相显微镜的结构与原理、金相显微数码摄影、图像处理及定金相量测量的基本原理；
2. 掌握金相显微镜的使用方法和金相试样的制备技术；
3. 掌握金相显微数码摄影、图像处理、金相显微组织的定量分析的基本方法。

二、实验内容

1. 显微镜的结构、原理与使用；
2. 金相试样的制备；
3. 金相显微数码摄影与定量金相技术。

三、实验内容概述

(一) 金相显微镜的构造与使用

一) 金相显微镜的构造

光学金相显微镜的构造一般包括放大系统、光路系统和机械系统三部分，其中放大系统是显微镜的关键部分。

1、放大系统

(1) 显微镜放大成像原理

显微镜放大基本原理如图 1-1 所示。

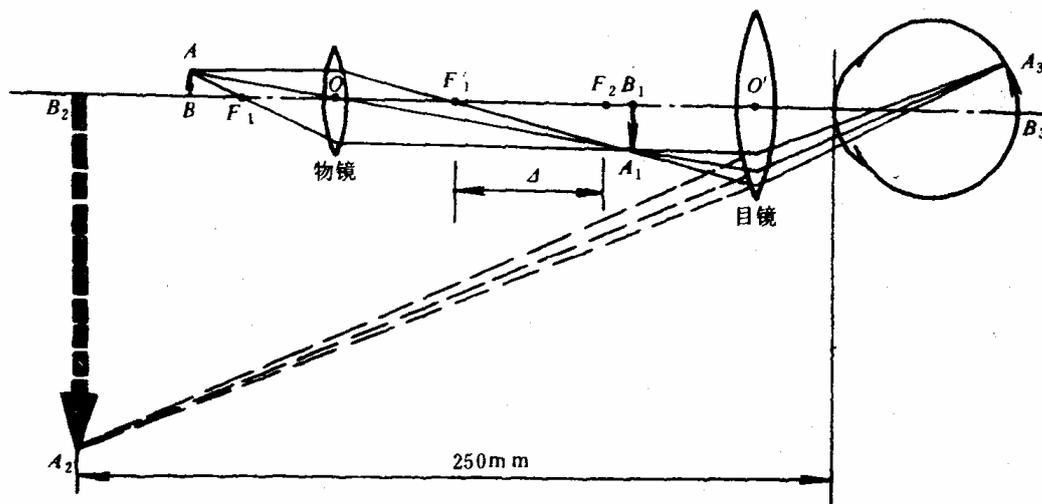


图 1-1 显微镜放大成像原理示意图

由图 1-1 可见，显微镜的放大作用由物镜和目镜共同完成。物体 AB 位于物镜的焦点 F_1 以外，经物镜放大而成为倒立的实象 A_1B_1 ，这一实象恰巧落在目镜的焦点 F_2 以内，最后由

目镜再次放大为一虚象 A_2B_2 ，人们在观察组织时所见到的象，就是经物镜、目镜两次放大，在距人眼约 150mm 明视距离处形成的虚象。

由图 1-1 可知：

$$\text{物镜的放大倍数 } M_{\text{物}} = \frac{A_1B_1}{AB} \quad (1-1)$$

$$\text{目镜的放大倍数 } M_{\text{目}} = \frac{A_2B_2}{A_1B_1} \quad (1-2)$$

$$\text{显微镜的总放大倍数 } M = M_{\text{物}} \times M_{\text{目}} = \frac{A_2B_2}{A_1B} \quad (1-3)$$

即：显微镜的总放大倍数 M 等于物镜放大倍数和目镜放大倍数的乘积。目前普通光学金相显微镜最高有效放大倍数为 1600~2000 倍，常用放大倍数有 100、450 倍和 650 倍。

另外，参照图 1-1，如果忽略 AB 与 F_1 、 A_1B_1 与 F_2 间距，依相似三角形定理可求出：

$$M_{\text{物}} = \frac{A_2B_2}{A_1B} = \frac{F_1 \cdot F_2}{F_1 O} = \frac{\Delta}{f} \quad (1-4)$$

式中， Δ 为光学镜筒长度； f 为物镜焦距。因光学镜筒长度为定值，可见，物镜放大倍数越高，物镜的焦距越短，物镜离物体越近。

(2) 透镜象差

透镜在成像过程中，由于受到本身物理条件的限制，会使映象变形和模糊不清。这种象的缺陷称为象差。在金相显微镜的物镜、目镜以及光路系统设计制造中，虽将象差尽量减少到很小的范围，但依然存在。象差有多种，其中对成像质量影响最大的是球面象差、色象差和象域弯曲三种。

1) 球面象差

由于透镜表面为球面，其中心与边缘厚度不同，因而来自同一点的单色光经过透镜折射后，靠近中心部分的光线偏折角度小，在离透镜较远的位置聚集；而靠近边缘处的光线偏折角度大，在离透镜较近的位置聚集，因而必然形成沿光轴分布的一系列的象，使成像模糊不清，这种现象称为球面象差。球面象差主要靠用凸透镜和凹透镜所级成的透镜组来减小。另外，通过加光栏的办法，缩小透镜成像范围，也可以减小球面象差的影响。

2) 色象差

色象差与光波波长有着密切关系。当白色光中不同波长的光线通过透镜时，因其折射角度不同而引起象差。波长愈短，折射率愈大，其焦点愈近；波长愈长，折射率愈小，则焦点愈远，因而不同波长的光线，不能同时在一点聚集，致使映象模糊，或在视场边缘上见到彩色电视环带，这种现象称为色象差。色象差同样可以靠透镜组来减小影响。在光路中加上滤光片，使白色光变成单色光也能有效地减小色象差。

3) 象域弯曲

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，这种现象叫象域弯曲。象域弯曲是由于各种象差综合作用的结果。一般物镜都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近平坦的象域。

(3) 物镜

显微镜观察所见到的象是经物镜和目镜两次放大后所得到的虚象，其中目镜仅起到将物镜放大的实象再放大的作用。因此，显微镜的成像质量如何，关键在物镜。物镜的种类按象差校正分类，常用物镜的种类有消色差物镜（无标志）、复消色差物镜（标志 APO）和平面

消色差物镜（标志 PL 或 Plan）。其中消色差物镜结构简单、价格低廉，象差已基本上予以校正，故普通小型金相显微镜多采用这种物镜。另外，按物体表面与物镜间的介质来划分，有介质为空气的干系物镜和介质为油的油系物镜两类。按放大倍数分，还可分为低倍、中倍和高倍。无论哪种物镜，都是由多片透镜组合而成的。

1) 物镜上的标志

按 ISO 标准规定，物镜的放大倍数和数值孔径，标在镜筒中央清晰位置，并以斜线分开。例如 45/0.63、90×/1.30 等。表示镜筒长度的字样或符号以及有无盖玻片的符号，标在放大倍数和数值孔径的下方，并用斜线分开，例如 160/—、∞/0 等。表示干系或油系的字样，可标在放大倍数和数值孔径的上方或其它合适位置。

2) 数值孔径 (N.A.)

数值孔径 (numerical aperture, 以符号 N.A.表示) 表征物镜的集光能力，其值大小取决于进入物镜的光线锥所张开的角度，即孔径角的大小。数值孔径 N.A.为：

$$N.A.=n\sin\theta \quad (1-5)$$

式中 n 为试样与物镜间介质的折射率，空气介质 $n=1$ ，松柏油介质 $n=1.515$ ； θ 为孔径角的半角。如图 1-2 所示。数值孔径 N.A.值的大小标志着物镜分辨率的高低，干系物镜因 $n=1$ 而 $\sin\theta$ 总小于 1，故 $N.A.<1$ 。油系物镜因 n 值可高达 1.5 以上，故 $N.A.>>1$ 。

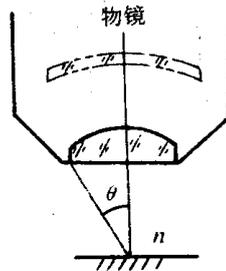


图 1-2 孔径角示意图

3) 物镜的分辨率

显微镜的分辨率主要取决于物镜。分辨率的概念与放大倍数（又称放大率）不同，可以作这样一个实验：用两个不同的物镜在同样放大倍数下观察同一个细微组织，能够得到两种不同的效果：一个可以清楚地分辨出组织中相距很近的两个点；另一个只能看到这两个点连在一起的模糊轮廓。如图 1-3 所示。显然前一个物镜的分辨率高，而后一个物镜的分辨率低。所以说，物镜的分辨率可以用物镜所能清晰分辨出的相邻两点间最小距离 d 来表示。 d 与数值孔径的关系如下：

$$d = \frac{\lambda}{2N.A.} \quad (1-6)$$

式中 λ 为入射光的波长（如绿光波长 510-570nm，蓝光波长 430-450nm，黄光波长 580-600nm）；N.A.为物镜的数值孔径(无量纲量)。

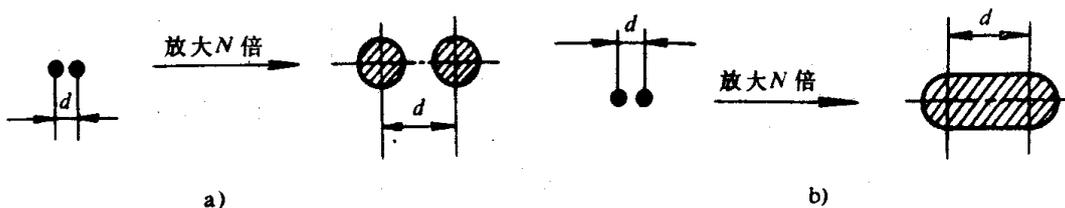


图 1-3 物镜分辨率高低示意图 (a 分辨率高, b 分辨率低)

可见，分辨率与入射光的波长成正比， λ 愈短分辨率愈高；与数值孔径成反比，物镜的数值孔径愈大分辨率愈高。

4)有效放大倍数

能否看清组织的细节，除与物镜的分辨率有关外，还与人眼实际分辨率有关。如物镜分辨率很高，形成清晰的实象，可是与之配用的目镜倍数过低，致使观察者难以看清。此时称“放大不足”，即未能充分发挥物镜的分辨率，但是，误认为选用的目镜倍数愈高，即总放大倍数愈大看得愈清晰，这也是不妥的。实践证明，超过一定界限，放得愈大映象反而是愈模糊，此时称“虚伪放大”。

物镜的数值孔径决定了显微镜的有效放大倍数。所谓有效放大倍数，是指物镜分辨清晰的距离 d ，被人眼也同样分辨清晰所必须放大的倍数，即人眼分辨率 l 与物镜分辨率 d 的比值，用 $M_{\text{观察}}$ 表示。

$$M_{\text{观察}} = \frac{l}{d} = \frac{l}{\frac{\lambda}{2N.A.}} = \frac{2l}{\lambda} N.A. \quad (1-7)$$

式中， l 为人眼的分辨率，在 250mm 处正常人眼分辨率为 0.15~0.30mm。

了解有效放大倍数范围，对考虑物镜和目镜的正确选择十分重要。例如 25 倍的物镜， $N.A.=0.4$ ，其有效放大倍数应在 500(0.4)~1000(0.4)倍，即 200~400 倍范围内。因此应选择 8 倍至 16 倍的目镜与该物镜配合使用，常用 10 倍目镜作为普通金相显微镜的标准配置。

(4)目镜

常用的目镜按其构造可分为五种：负型目镜、正型目镜、补偿目镜、摄影目镜和测微目镜。

1) 负型目镜

负型目镜以福根目镜为代表，福根目镜是由两片单一的平凸透镜并在中间加一光阑组成。接近眼睛的透镜称目透镜，起放大作用；另一透镜称场透镜，能使映象亮度均匀。中间的光阑可以遮挡无用光，提高映象清晰度。福根目镜并未对透镜象差加以校正，故只适于和低倍或中倍消色差物镜配合使用。

2) 正型目镜

正型目镜以雷斯目镜为代表。雷斯目镜也是由两片凸透镜组成，所不同的是光阑在场透镜的外面。这种目镜有良好的象域弯曲校正，球面象差也比较小，但色象差比富根目镜严重。另外，在相同放大倍数下，正型目镜的观察视场比负型目镜略小。

3) 补偿目镜

补偿目镜是一种特制的目镜，结构较上述两种都复杂。与复消色差物镜配合使用，可以补偿校正残余色差，得到全面清晰的映象，但不宜与普通消色差物镜配合使用。

4) 摄影目镜

摄影目镜专用于金相摄影，不能用于观察。由于对透镜的球面象差、象域弯曲均有良好的校正，与物镜配合，可在投影屏上形成平坦清晰的实象。凡带有摄影装置的显微镜均配有摄影目镜。

5) 测微目镜

测微目镜是为满足组织测量的需求而设制的。内装有目镜测微器，为看清目镜中标尺刻度，可借助螺旋调节装置移动目透镜的位置。

测微目镜与不同放大倍数的物镜配合使用时，测微器的格值是不同的。确定格值，需要借助物镜测微器(即 1mm 距离被等分 100 格的标尺)。

6) 目镜上的标志

普通目镜上只标有放大倍数。如 $7\times$ 、 $10\times$ 、 $12.5\times$ 等。补偿目镜上还标有一个 K 字，如 $K10\times$ 、 $K30\times$ 。

2 光路系统

小型金相显微镜，按光程设计可分为直立式和倒立式两种类型。凡试样磨面向上，物镜向下的为直立式，而试样磨面向下，物镜向上的为倒立式。如图 1-4 所示。

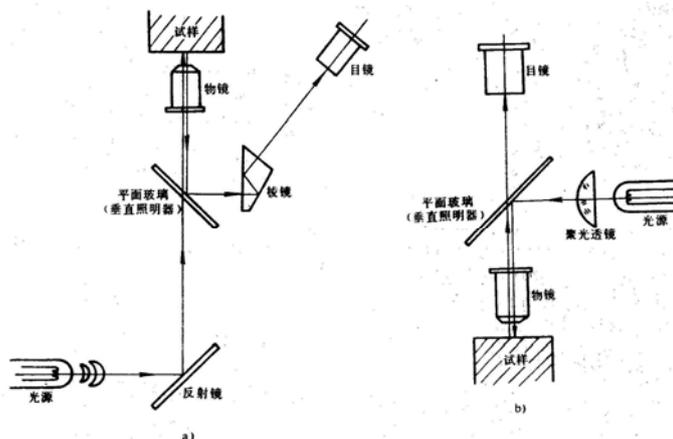


图 1-4 金相显微镜光程示意图 (a 倒立式, b 直立式)

以倒立式为例，光源发出的光，经过透镜组投射到反射镜上，反射镜将水平走向的光变成垂直走向，自下而上穿过平面玻璃（垂直照明器）到达物镜，投射到试样磨面上；反射进入物镜的光又自上而下照到平面玻璃上，反射后的光水平进入棱镜，通过折射，反射后进入目镜。

1) 光源

金相显微镜和生物显微镜不同，必须有光源装置。作为光源的有低压钨丝灯泡、氙灯、碳弧灯和卤素灯等级。目前，小型金相显微镜用得最多的是 $6\sim 8\text{V}$ 、 $15\sim 30\text{W}$ 的低压钨丝灯泡。为使发光点集中，钨丝制成小螺旋状。

2) 光源照明方式

光源照明方式取决于光路设计，一般采用临界照明和科勒照明两种。所谓临界照明方式即光源被成象于物平面上，虽然可以得到最高的亮度，但对光源本身亮度的均匀性要求很高。而科勒照明方式即光源被成象于物镜的后焦面（大体在物镜支承面位置），由物镜射出的是平行光，即可以使物平面得到充分照明，又减少了光源本身亮度不均匀的影响，因此目前应用较多。

3) 孔径光阑

孔径光阑位于靠近光源处，用来调节入射光束的粗细，以便改善映象质量。在进行金相观察和摄影时，如果孔径光阑开得过大或过小都会影响映象的质量。过大，会使球面象差增加，镜筒内反射光和炫光也增加，映象叠映了一层白光显著降低映象衬度，组织变得模糊不清。过小，进入物镜的光束太细减少了物镜的孔径角，使物镜的鉴别率降低，无法分清微细组织，同时还会产生光的干涉现象，导致映象出现浮雕和叠影而不清晰。因此孔径光阑张开的大小应根据金相组织特征和物镜放大倍数随时调整达到最佳状态。

4) 滤光片

作为金相显微镜附件，常备有黄、绿、蓝色滤光片。合理选用滤光片可以减少物镜的色差，提高映象清晰度。因为各种物镜的色差，在绿色波区均已校正过，绿色又能给人以舒适感，所以最常用的是绿色滤光片。

5) 视场光阑

视场光阑的作用与孔径光阑不同，其大小并不影响物镜的鉴别率，只改变视场的大小。

一般应将视场光阑调至全视场刚刚露出时，这样，在观察到整个视场的前提下最大限度在减少镜筒内部的反射光和炫光，以提高映象质量。

6) 映象照明方式

金相显微镜常用的映象照明方式有两种，即明场照明和暗场照明。

明场照明方式是金相分析中最常用的。光从物镜中内射出，垂直或接近垂直地投向物平面。若照到平滑区域，光线必将被反射进入物镜，形成映象中的白亮区。若照到凹凸不平区域，绝大部分光线将产生漫射而不能进入物镜，形成映象中的黑暗区。

在鉴别非金属夹杂物透明度时，往往要用暗场照明方式。光源发出的光，经过透镜变成一束平行光。又通过环形遮光板，因中心部分光线被遮挡而成为管状光束。经 45 度反射镜环反射后将沿物镜周围投射到暗场罩前缘内侧反射镜上。反射光以很大的倾斜角射向物平面，如照到平滑区域，将以很大的倾斜角反射，故难以进入物镜，形成映象中的黑暗区。只有照到凹凸不平区域的光线，反射后才有可能直入物镜，形成映象中的白亮区，因此与明场照明方式映象效果相反。

3 机械系统

机械系统主要包括载物台、粗调机构、微调机构和物镜转换器。

载物台是用来支承被观察物体的工作台，大多数显微镜的载物台都能在一定范围内平移，以改变被观察的部位。

粗调机构是在较大行程范围内，用来改变物体和物镜前透镜间轴向距离的装置，一般采用齿轮齿条传动装置。

微调机构是在一个很小的行程范围内(约 2mm)，调节物体和物镜前透镜间轴向距离的装置。一般采用微调齿轮传动装置。

物镜转换器是为了便于更换物镜而设置的。转换器上同时装几个物镜，可任意将所需物镜转至并固定在显微镜光轴上。



图 1-5 国产 4XB 倒立式金相显微镜

二) 使用显微镜时应注意的事项

- 1 操作者的手必须洗净擦干，并保持环境的清洁、干燥；
- 2 用低压钨丝灯光作光源时，接通电源必须通过变压器，切不可误接在 220V 电源上；
- 3 更换物镜，目镜时要格外小心，严防失手落地；
- 4 调节物体和物镜前透镜间轴向距离（以下简称聚焦）时，必须首先弄清粗调旋钮转向与载物台升降方向的关系，初学者应该先用粗调旋钮将物镜调至尽量靠近物体，但绝不可接触。
- 5 然后仔细观察视场内的亮度并同时用粗调旋钮缓慢将物镜向远离物体方向调节。待视

场内忽然变得明亮甚至出现映象时，换用微调旋钮调至映象最清晰为止。

6 用油系物镜时，滴油量不宜过多，用完后必须立即用二甲苯洗净，擦干；

7 待观察的试样必须完全吹干，用氢氟酸浸蚀过的试样吹干时间要长些，因氢氟酸对镜片有严重腐蚀作用。

(二) 金相试样的制备

随着科学技术的发展，研究金属材料内部组织的手段也有不断增加。然而，光学金相显微分析仍是最基本的方法。

光学金相显微分析的第一步是制备试样，将待观察的试样表面磨制成光亮无痕的镜面，然后经过浸蚀才能分析组织形态。如因制备不当，在观察上出现划痕、凹坑、水迹、变形层或浸蚀过深过浅都会影响正确的分析。因此制备出高质量的试样对组织分析是很重要的。

金相试样制备过程一般包括：取样、粗磨、细磨、抛光和浸蚀五个步骤。

一) 取样

从需要检测的金属材料和零件上截取试样称为取样。取样的部位和磨面的选择必须根据分析要求而定。截取方法有多种，对于软材料可以用锯、车、刨等方法；对于硬材料可以用砂轮切片机或线切割机切割的方法，对于硬而脆的材料可以用锤击的方法。无论用哪种方法都应注意，尽量避免和减轻因塑性变形或受热引起的组织失真现象。试样的尺寸大小统一规定，从便于握持和磨制角度考虑，一般直径或边长为 15~20mm，高为 12~18mm 比较适宜，对那些尺寸过小，形状不规则和需要保护边缘的试样，可以采取镶嵌或机械夹持的办法，如图 1-6 所示。

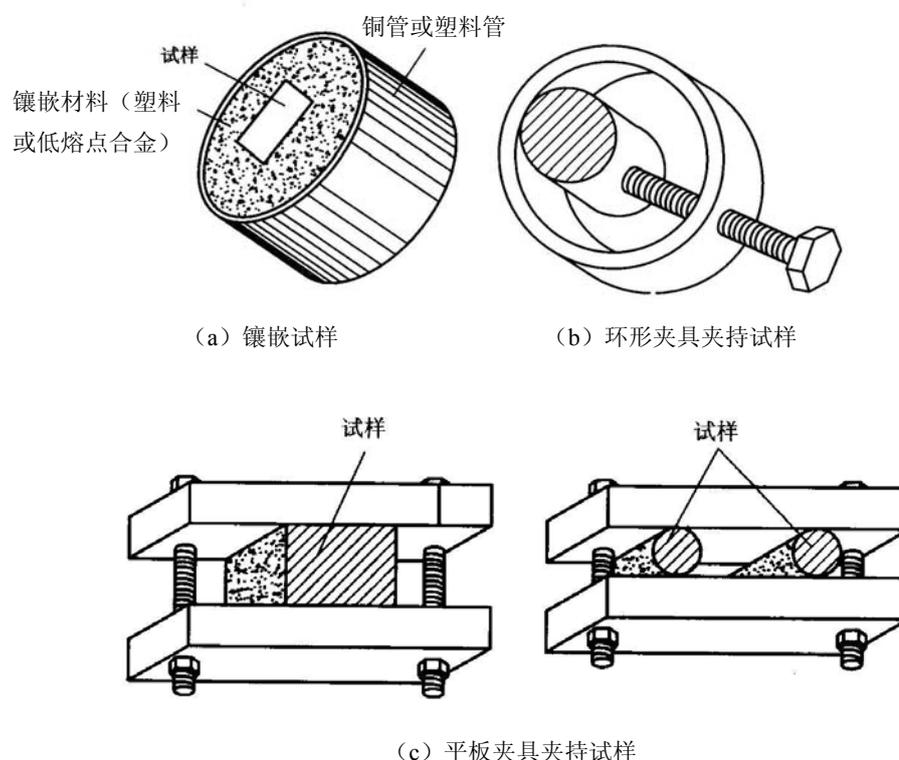


图 1-6 镶嵌及夹持试样

金相试样的镶嵌，是利用热塑塑料（如聚氯乙烯），热固性塑料（如胶木粉）以及冷凝性塑料（如环氧树脂+固化剂）作为填料进行的。前两种属于热镶填料，热镶必须在专用设

备——镶嵌机上进行。第三种属于冷镶填料，冷镶方法不需要专用设备，只将适宜尺寸（约Φ15~20mm）的钢管、塑料管、塑铝管或纸壳管放在平滑的塑料（或玻璃）板上，试样置于管内，待磨面朝下倒入填料，放置一段时间凝固硬化即可。

二) 粗磨

粗磨的目的主要有以下三点：

1) 修整

有些试样，例如用锤击法敲下来的试样，形状很不规则，必须经过粗磨，修整为规则形状的试样。

2) 磨平

无论用什么方法取样，切口往往不十分平滑，为将观察面磨平，同时去掉切割时产生的变形层，必须进行粗磨。

3) 倒角

在不影响观察目的的前提下，需将试样上的棱角磨掉，以免划破砂纸和抛光织物。

黑色金属材料的粗磨在砂轮机上进行，具体操作方法是：将试样牢牢地捏住，用砂轮的侧面磨制。在试样与砂轮接触的一瞬间，尽量使磨面与砂轮面平行，用力不可过大。由于磨削力的作用往往出现试样磨面的上半部分磨削量偏大，故需人为地进行调整，尽量加大试样下半部分的压力，以求整个磨面均匀受力。另外在磨制过程中，试样必须沿砂轮的径向往复缓慢移动，防止砂轮表面形成凹沟。必须指出的是，磨削过程会使试样表面温度骤然升高，只有不断地将试样浸水冷却，才能防止组织发生变化。

砂轮转速比较快，一般为 2850r/min，工作者不应站在砂轮的正前方，以防被飞出物击伤。操作时站在砂轮侧面，**严禁戴手套!**，以免手被卷入砂轮造成人身伤害。

关于砂轮的选择，一般是遵照磨硬材料选稍软些的，磨软材料选择稍硬些的基本原则，用于金相制样方面的砂轮大部分是：磨料粒度为 40 号、46 号、54 号、60 号（数字愈大愈细）；材料为白刚玉（代号为 GB 或 WA）、绿碳化硅（代号为 TL 或 GC）、棕刚玉（代号为 GZ 或 A）和黑碳化硅（代号为 TH 或 C）等；硬度为中软的平砂轮（代号为 ZR1 或 K），尺寸多为 250mm×25mm×32mm（外径×厚度×孔径）

有色金属，如铜、铝及其合金等，因材质很软，不可用砂轮，而要用锉刀进行粗磨，以免磨屑堵塞砂轮孔隙，且使试样产生较深的磨痕和严重的塑性变形层。

三) 细磨

粗磨后的试样，磨面上仍有较深的磨痕，为了消除这些磨痕必须进行细磨。细磨可分为手工磨和机械磨两种。

1、手工磨

手工磨是将砂纸铺在玻璃板上，左手按住砂纸，右手捏住试样在砂纸上作单向推磨。金相砂纸由粗到细分许多种，其规格可参考表 1-1。

表 1-1 常用金相砂纸的规格

砂纸序号	240	300	400	600	800	1000	1200
粒度	160	200	280	400	600	800	1000
编号	01（选一种）		02	03	04	05	06

用砂轮粗磨后的试样，要依次由 01 号磨至 05 号（或 06 号）。操作时必须注意：

(1) 加在试样上的力要均匀，使整个磨面都能磨到；

(2) 在同一张砂纸上磨痕方向要一致，并与前一道砂纸磨痕方向垂直。待前一道砂纸磨痕完全消失时才能换用下一道砂纸。

(3) 每次更换砂纸时，必须将试样、玻璃板清理干净，以防将粗砂粒带到细砂纸上。

(4) 磨制时不可用力过大, 否则一方面因磨痕过深增加下一道磨制的困难, 另一方面因表面变形严重影响组织真实性。

(5) 砂纸的砂粒变钝磨削作用明显下降时, 不宜继续使用。否则砂粒在金属表面产生的滚压会增加表面变形。

(6) 磨制铜、铝及其合金等软材料时, 用力更要轻, 可同时在砂纸上滴些煤油, 以防脱落砂粒嵌入金属表面。

砂纸磨光表面变形层消除过程如图 1-7 所示。

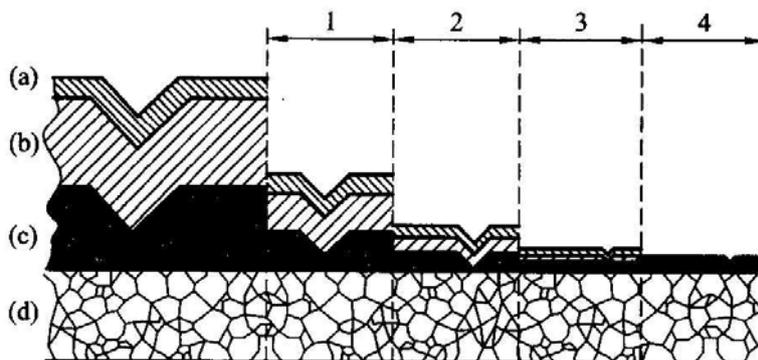


图 1-7 砂纸磨光表面变形层消除过程示意图

(a) 严重变形层 (b) 变形较大层 (c) 变形微小层 (d) 无变形原始组织

1-第一步磨光后试样表面的变形层

2-第二步磨光后试样表面的变形层

3-第三步磨光后试样表面的变形层

4-第四步磨光后试样表面的变形层

用金相水砂纸手工磨制时可加水也可以干磨。但是在干磨过程中, 脱落的砂粒和金属磨屑留在砂纸上, 随着移动的试样来回滚动, 砂粒间的相互挤压以及金属屑粘在砂纸缝隙中, 都会使砂纸磨削寿命减短, 试样表面变形层严重, 摩擦生热还可能引起组织变化。为克服干磨的弊端, 目前多采用手工湿磨的方法所用砂纸是水砂纸, 其规格可参考表 1-1。

用水砂纸手工磨制的操作方法和步骤与用金相砂纸磨制完全一样, 只是将水砂纸置于流动水下边冲边磨, 由粗到细依次更换数次, 最后磨到 1000 或 1200 号砂纸。因为水流不断地将脱落砂粒、磨屑冲掉, 使砂纸的磨削寿命较长。实践证明试样磨制的速度快、质量高, 有效地弥补了干磨的不足。

2、机械磨

目前普遍使用的机械磨设备是预磨机。电动机带动铺着水砂纸的圆盘转动, 磨制时, 将试样沿盘的径向来回移动, 用力要均匀, 边磨边用水冲。水流即起到冷却试样的作用, 又可参借助离心力将脱落砂粒、磨屑等不断冲到转盘边缘。机械磨的磨削速度比手工磨制快得多, 但平整度不够好, 表面变形层也比较严重。因此要求较高的或材质较软的试样应该采用手磨制。机械磨所用水砂纸规格与手工湿磨相同, 可参考表 1-1。

四) 抛光

抛光的目的是去除细磨后遗留在磨面上的细微磨痕, 得到光亮无痕的镜面。抛光的方法有机械抛光、电解抛光物化学抛光三种, 其中最常用的是机械抛光。

1、机械抛光

机械抛光在抛光机上进行, 将抛光织物(粗抛常用帆布, 精抛常用毛呢)用水浸湿、铺平、绷紧固定在抛光盘上。启动开关使抛光盘逆时针转动, 将适量的抛光液(氧化铝、氧化

铬或氧化铁等抛光粉加水的悬浮液)滴洒在盘上即可进行抛光,抛光时应注意:

(1) 试样沿抛光盘的径向往返缓慢移动,同时逆抛光盘转向自转,待抛光快结束时作短时定位轻抛。

(2) 在抛光过程中,要经常滴加适量的抛光液或清水,以保持抛光盘的湿度,如发现抛光盘过脏或带有粗大颗粒时,必须将其冲刷干净后再继续使用。

(3) 抛光时间应尽量缩短,不可过长,为满足这一要求可分粗抛和精抛两步进行。

(4) 抛有色金属(如铜、铝及其合金等)时,最好在抛光盘上涂少许肥皂或滴加适量的肥皂水。

机械抛光与细磨本质上都是借助磨料尖角锐利的刃部,切去试样表面隆起的部分,抛光时,抛光织物纤维带动稀疏分布的极微细的磨料颗粒产生磨削作用,将试样抛光。

目前,人造金刚石研磨膏(最常用的有W0.5、W1.0、W1.5、W2.5和W3.5五种规格的溶水性研磨膏)代替抛光液,正得到日益广泛的应用,用极少的研磨膏均匀涂在抛光织物上进行抛光,抛光速度快,质量也好。

2、电解抛光

电解抛光原理示意图如图 1-8 所示,阴极用不锈钢板制成,试样本身为阳极,二者同处于电解抛光液中,接通回路后在试样表面形成一层高电阻膜。由于试样表面高低不平,膜的厚薄也不同。试样表面凸起部分膜薄,电阻小,电流密度大,金属溶解速度快。相对而言,凹下部分溶解速度慢,这种选择性溶解结果,使试样表面逐渐平整,最后形成光滑平面。

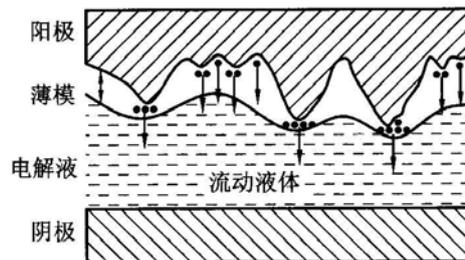


图 1-8 电解抛光原理示意图

电解抛光系电化学溶解过程,因此它消除了机械抛光难以避免的疵病,不会引起试样表面变形。与机械抛光相比即省时间又操作简便。然而电解抛光也有其局限性,因其对材料化学成分不均匀的偏析组织以及非金属夹杂物等比较敏感,会造成局部强烈浸蚀而形成斑坑。另外镶嵌在塑料内的试样,因不导电也不适用。故目前仍然以机械抛光为主。

铜合金、铝合金、奥氏体不锈钢及高锰钢等材料常用电解抛光。

3、化学抛光

化学抛光是依靠化学试剂对试样表面凹凸不平区域的选择性溶解作用将磨痕去除的一种方法。化学抛光不需要专用设备,成本低,操作方便,在抛光的同时还兼有化学浸蚀作用。省掉了抛光后的浸蚀步骤。但化学抛光的试样平整度略差些,仅适于低、中倍观察。

对于一些软金属,如锌、铅、锡、铜等。实践证明,利用化学抛光要比机械抛光和电解抛光效果好。目前,其应用范围在逐渐扩大。

化学抛光液,大多数是由酸或者混合酸(如草酸、磷酸、铬酸、醋酸、硝酸、硫酸氢氟酸等)过氧化氢及蒸馏水组成。混合酸主要起化学溶解作用,过氧化氢能增进金属表面的活化性,有助于化学抛光的进行,而蒸馏水为稀释剂。

五) 浸蚀

抛光后的试样在金相显微镜下观察,只能看到光亮的磨面,如果有划痕、水迹或扔料中的非金属夹杂物、石墨以及裂纹等也可以看出来,但是要分析金相组织还必须进行浸蚀。

浸蚀的方法有多种，最常用的是化学浸蚀法，利用浸蚀剂对试样的化学溶解和电化学浸蚀作用将组织显露出来。纯金属（或单相均匀固溶体）的浸蚀基本上为化学溶解过程。位于晶界处的原子和晶粒内部原子相比，自由能较高，稳定性较差，故易受浸蚀形成凹沟，晶粒内部被浸蚀程度较轻，大体上仍保持原抛光平面。在明场下观察，可以看到一个个晶粒被晶界（黑色网络）隔开。如浸蚀较深，还可以发现各个晶粒明暗程度不同的现象，这是因为每个晶粒原子排列的位向不同，浸蚀后，以最密排面为主的外露面与原抛光面之间倾斜程度不同的缘故。

两相合金的浸蚀与单相合金不同，它主要是一个电化学浸蚀过程。在相同的浸蚀条件下，具有较高负电位的相（微电池阳极）被迅速溶解凹陷下去；具有较高正电位的相（微电池阴极）在正常电化学作用下不被浸蚀，保持原有的光滑平面，结果产生了两相之间的高度差。多相合金的浸蚀，同样也是一个电化学溶解过程，原理与两相合金相同。

化学浸蚀的方法虽然很简单，但是只有认真对待才能制备出高质量的试样，将抛光后的试样用水冲洗同时用脱脂棉擦净磨面，然后吸水纸吸去磨面上过多的水，吹干后用显微镜检查磨面上是否有道痕、水迹等。同时证明未经过浸蚀的试样是无法分析组织的，经检查合格的试样可以放在浸蚀剂中，抛光面朝上，不断观察表面颜色的变化。这是浸蚀法。也可以用沾有浸蚀剂的棉花轻轻擦拭抛光面，观察表面颜色的变化。此为擦拭法。待试样表面被浸蚀得略显灰暗时即刻取出，用流水冲洗后在浸蚀面上滴些酒精，再用滤纸吸去过多的水和酒精，迅速用吹风机吹干，完成整个制备试样的过程。图 1-9 为浸蚀显示原理示意图。

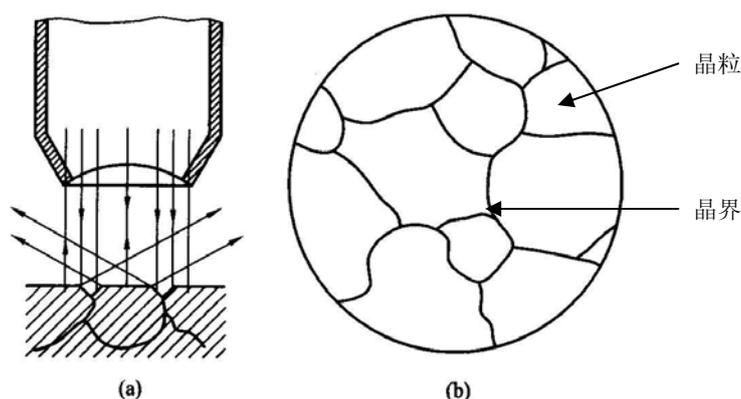


图 1-9 浸蚀显示原理示意图

(a) 晶界处光线的散射 (b) 组织显示--直射光反映为亮晶晶粒，散射光反映为晶界

关于浸蚀剂的选择可参考有关文献。钢及铸铁等黑色金属最常用的浸蚀剂为 4%硝酸酒精溶液。

浸蚀后的试样在显微镜下观察时，如发现表面变形层严重影响组织的清晰度时，可采取反复抛光、浸蚀的办法去除变形层。

(三) 金相显微数码摄影与定量金相技术

一) 金相组织摄影简介

光学金相显微镜是比较和鉴别金属组织的有效工具，若使用者具有熟练的操作技巧和丰富的实践经验，则光学显微镜往往可发挥更大的作用。通过结合应用物理冶金学的知识去识别金属材料显微组织中的有意义的特征，就可以对金属组织做出合理的说明和判断。

需要强调的是，应根据检测的目的来确定金相试样的截取部位、截取方法，确保试样磨面的磨光、抛光、显微组织显示（浸蚀）的质量。

金相摄影能具体地记载金属材料内部的各种缺陷或显微组织，是积累科学研究成果和日常工作资料的重要手段，是金相检验工作的一个组成部分。因此，每个从事金属材料科学试验及研究的工作者都应掌握金相摄影技术及暗室技术。通常情况下，金相摄影包括显微摄影、低倍摄影和实物摄影；暗室技术包括黑白及彩色底片（负片）的曝光、显影、定影、冲洗、凉干及印相、放大等工作。随着电子业的迅速发展，数码摄像技术也得到了广泛的应用。金相组织数码摄像系统组成包括光学金相显微镜系统、图像采集（摄像头）、A/D 转化系统和计算系统等。目前我校使用的金相组织数码摄像设备系统，见图 1-10 所示。成像系统是将金相显微镜视场中的组织图像通过视频摄像头（与微机 USB 接口连接）、采集卡输入计算机中；处理软件系统可对屏幕显示图像部分进行图像鉴别、图像处理、测量分析，评定级别等处理。也就是说，从图像的实时采集、显示、图像处理到检验结果的分析、报告单的编辑至彩色图文报告的打印，运用先进的计算机图像处理分析技术取代了传统的金相摄影技术及暗室技术，实现了全部信息实时化、智能化、数字化。

一般采用金相显微数码摄影技术拍照一张照片必须经过的主要程序是：取样→磨光→抛光→浸蚀→吹干→调节显微镜调焦手轮，至使显微镜视场中的图像清晰→切换光源→调节显微镜微调手轮，至使电脑屏幕上的图像清晰→按照金相显微数码摄影系统操作步骤进行操作，即可获得所需的照片。



图 1-10 金相组织数码摄像系统

二) 金相显微数码摄影系统操作步骤

1. 推进或拉出显微镜右面的光切换拉杆（白色），来进行显微镜与电脑中的图像切换。
2. 双击桌面上的“MiE”图标，进入系统主界面，如图 1-11 所示；
3. 点击图 2 中右侧的“预览”，启动“视频预览”；
4. 在显微镜上放好试样，旋动显微镜的粗调手轮，至屏幕上显示出图像。若图像呈现彩色时，点击对话框中的“高级”，再点击新打开窗口中的“默认”，随后用鼠标将“饱和度”按钮调至最左端零点，然后点击该窗口中的“隐藏”关闭此窗口，此时图像将呈现黑白色；
5. 进一步调节显微镜上的微调手轮，至屏幕上的图像清晰后，点击窗口右侧的“拍照”，随即查看屏幕右下方弹出对话框中拍照图片的存放位置，拍照结束后，点击屏幕右上方的“×”图标，关闭“MiE”窗口；

6. 双击桌面上的“我的电脑”，打开照片存放位置盘（如“C”盘），点击窗口上方标题栏的“查看”—“缩略图”，随后将鼠标箭头放在所拍照的图片上，点击右键复制该图；
7. 打开“实验报告 Word 文档”，在要求插入图片的位置处，点击右键粘贴该图；
8. 选中所粘贴图片，点击标题栏下的“视图—工具栏—图片”，在弹出的“图片”窗口中，点击“颜色—灰度”，随后分别点击“增加对比度”或“降低对比度”和“增加亮度”或“降低亮度”图标，调节图片颜色至自认为合适为止。

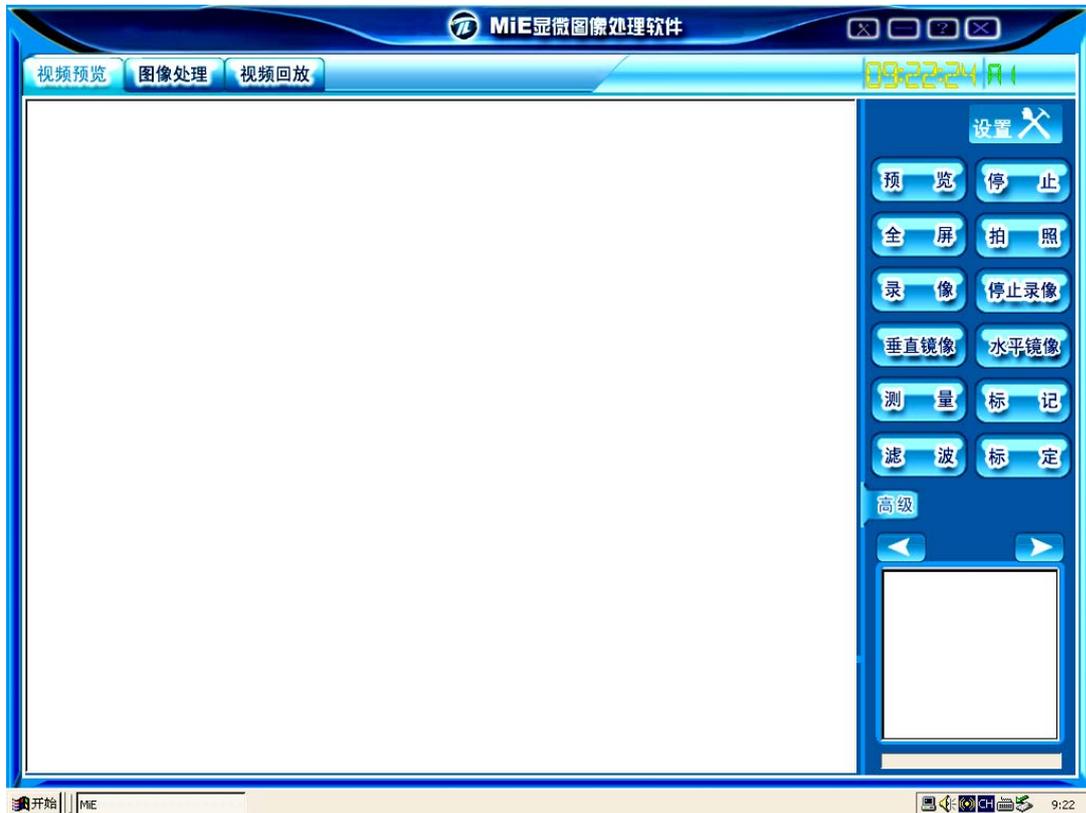


图 1-11 当前窗口—视频预览

三) 作业提交

1. 首先关闭所有打开的窗口，即退回到原始桌面；
2. 用右键点击桌面右下方的“小电脑”图标；
3. 点击弹出窗口中的“作业提交”；
4. 点击弹出窗口中的“添加文件”图标（最左边图标）；
5. 点击弹出窗口中的“查找范围”右边的“▼”；
6. 在下拉菜单中选择“桌面”；
7. 选择对话框中的此次“实验报告 Word 文档”并“打开”；
8. 点击“作业提交”对话框中的“提交文件”图标（第四个图标）；
9. 在弹出窗口“学生姓名”一栏中，填写上自己的“班级、姓名”，随后点击“提交”；
10. 确认自己的作业已提交后，关闭“作业提交”窗口；
11. 查看投影大屏幕中是否出现你所提交的“Word 文档”，若有，即为提交成功。若无，则说明在你进行文件提交前，没有完全关闭所有打开的窗口，需重新按上述步骤进行操作。

四) 定量金相简介

金属材料的显微组织特征与力学性能存在着密切的关系：如晶粒尺寸减小，屈服强度增

加；位错密度增加，流变应力增加；单相合金晶界面积增加，硬度提高。对这些显微组织进行定性的分析，虽可说明金属材料的某些性能特征，但要较精确地描述组织和性能之间的关系，找出其规律性，就需要利用定量金相的方法来测量、计算组织中相应组成相的特征参数，建立组织参数、状态、性能间更为本质的、定量的关系。利用定量金相法也能达到合理设计合金、预报、控制、评定材料质量及从事理论研究等目的。

定量金相的基础是体视学。由于金属不透明，不能直接观察三维空间的组织图像，故只能在二维截面上得到显微组织的有关几何参数，然后运用数理统计的方法推断三维空间的几何参数，即用二维组织图像来解释三维组织图像，这门学科称为“体视学”。

五) 定量金相用的符号

定量金相所用的测量很多，为了工作方便，规定用统一的符号。以 P 、 L 、 A 、 S 、 V 、 N 等分别表示点、线、面（平面）积、曲面积、体积和个数。测量结果常用被测量对象的量与测试用的量的比值来描述，以带下标的符号表示。例 $N_A = \frac{\text{测量对象个数}}{\text{测量用的面积}}$ ，表示单位测量面积

上测量对象的个数； P_L 表示单位测量线长度上和测量对象的交点数； S_V 表示单位测量体积中测量对象的面积。其它符号可如此类推。

常用的基本符号及定义见表 1-2。

表 1-2 常用的基本符号及定义

符号	量纲	定义
P	--	点的数目。
P_p	L^0	测量对象落在总测试点上的点分数。
P_L	L^{-1}	单位测量用线长度上的点数（相截的点）。
P_A	L^{-2}	单位测量用面积上的点数。
P_V	L^{-3}	单位测量用体积上的点数。
L	L	线的长度。
L_L	L^0	线的百分数。在单位长度测量用的线上测量对象占的长度。
L_A	L^{-1}	单位测量用面积上的线长度。
L_V	L^{-2}	单位测量用体积上的线长度。
A	L^2	测量对象或测量用的平面积。
S	L^2	内界面积（平面或曲面）
A_A	L^0	面积百分数。在单位测量用面积上测量对象占的面积。
S_V	L^{-1}	单位测量体积中含有的表面积。
V	L^3	测量对象或测量用的体积。
V_V	L^0	体积百分数。在单位测量用体积中测量对象占的体积。
N	--	测量对象的数目。
N_L	L^{-1}	每单位测量用线长度上遇到测量对象的数目。
N_A	L^{-2}	每单位测量用面积上遇到测量对象的数目。
N_V	L^{-3}	每单位测量用体积中包含测量对象的数目。
\bar{L}	L	平均截线长度，等于 L_L/N_L 。
\bar{A}	L^2	平均截面积，等于 A_A/N_A 。
\bar{S}	L^2	平均内界面积，等于 S_V/N_V 。
\bar{V}	L^3	测量对象的平均体积，等于 V_V/N_V 。

六) 定量测量基本原理

定量金相中常用的量列于表 1-3 中, 其中括号内的量可以直接测量的, 如 P_p , P_L , L_L , P_A 等; 方框内的量是不能直接测量的, 如 V_V , S_V , L_V , P_V 等, 可借助体视学基本公式找出它们与可直接测量的关系, 从而计算出来。故又称为间接测量量。

定量金相中常用的几个基本公式列述如下:

$$V_V = A_A = L_L = P_P \quad (1-8)$$

$$S_V = \frac{4}{\pi} L_A = 2P_L \quad (L_A = \frac{\pi}{2} P_L) \quad (1-9)$$

$$L_V = 2P_A \quad (1-10)$$

$$P_V = \frac{1}{2} L_V \cdot S_V = 2P_A \cdot P_L \quad (1-11)$$

表 1-3 中的箭头表示从一个量可以推算另一个量的关系。以上公式的导出除了要求测试时的随机性之外, 没有其它附加条件, 因此应用时不受组织形状、尺寸大小及分布的限制, 公式本身不会给计算带来误差。但是, 测量次数的多少却直接影响测量的可靠性, 因此, 公式的应用必须以无限、大量测量为条件。由公式可见, 金相组织的定量测量就是建立在这些最简单、最基本量的基础上, 通过二维截面上可直接测量的组织参数的测量, 得到我们所需的三维组织参量。

表 1-3 测量和计算量的关系

量纲	L^0	L^{-1}	L^{-2}	L^{-3}
点	(P_p)	(P_L)	(P_A)	P_V
线	(L_L)	L_A	L_V	
面	(\hat{A}_A)	S_V		
体	V_V			

七) 定量测量的基本方法

为保证测量精度, 取样要真实反应材料客观情况, 组织均匀时可任意取一个样, 但实际上材料组织是不均匀的, 此时则要增加试样数目, 一般最少要取五个样, 即在材料两端、中点和中点到两端的一半处截取样。在试样制备时, 被测试样的端面应磨平、抛平, 浸蚀后能反应组织的细节。测量视场的选择, 每个试样上一般不应少于五个, 且应选在能真正反应材料实际情况的部位。

最常用的测量方法为计点法和截线法。这两种方法也是最基本的方法。

1. 网格计点法 (P_p 的测量)

特制一套具有不同网线间距的网格, 典型的网格如图 1-12a 所示。网格可以插在显微镜的目镜光阑处, 也可用带网格的透明塑料板覆盖在显微组织照片上, 如图 1-12b 所示。在试样或照片上选择一定的部位, 数出格点落在被测相 (如 α 相) 内的点数 P_α , 若测试网格的格

点总数为 P_T ，则可求得 $P_p = \frac{P_\alpha}{P_T}$ 。

测试网格的选择，应使平均落在任何第二相面积内的格点不大于 1，同时网线间距应接近第二相间距。对于落在网格边界上的点以二分之一计算。为了操作方便，适用不同的显微组织和放大倍数，可使用格点为 3×3 、 4×4 、 5×5 或 10×10 的网格。

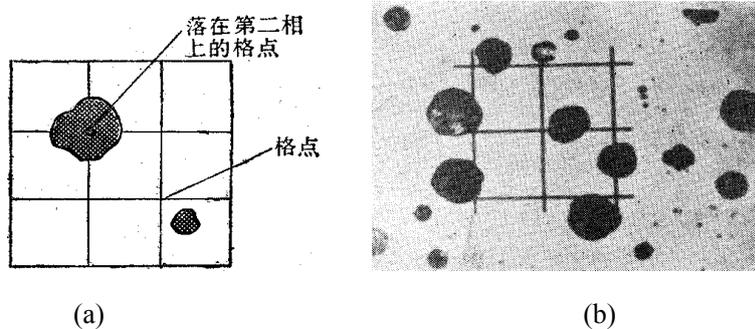


图 1-12 P_p 的测量

(a) 测量 P_p 用的网格 (b) 计点网格的应用

例如，测定球墨铸铁中球状石墨的体积分数 V_V 。用一个 3×3 网格覆盖在组织图片上，如图 3b 所示。图中有两个石墨球与测试格点相切，因每个交点只能按 $1/2$ 计算，即 $P_\alpha = 1/2 + 1/2 = 1$ ，测试网格格点总数 $P_T = 9$ ，因此， $P_p = \frac{P_\alpha}{P_T} = 1/9$ 。因为 $V_V = P_p$ ，故 $V_V = 1/9$ ，即石墨所占的体积分数为 $1/9$ 。

2. 截线法

(1) 求单位长度测试线上的交点数 P_L 或物体数 N_L

其测试线可选用平行线或一组同心圆(半径分别为 1.65, 2.65, 3.65cm, 圆周总长为 50cm)组成，如图 1-13 所示。对随机分布的组织可使用单线或图 1-13a 中的一组平行线来测量；如果被测量的组织是有方向性的，通常需要相对于有方向性组织的方向轴转动一定的角度来测量，图 1-13a 中的放射线可帮助我们确定所需的角度的；如果测量对象的方向性程度高，为减少误差，可采用图 1-13b 的圆周线进行测量。测量时，将测试线组(或圆)重叠在适当放大倍数的显微组织上，测量试验线与被测组织形成的交点数 P 。已知平行线或圆周线总长度 L_T ，然后由计算式 $P_L = \frac{P}{L_T}$ 可求得 P_L 值。

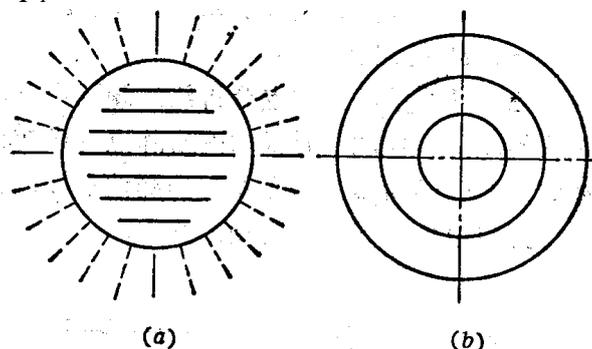


图 1-13 测量 P_L 用的测试线

同样，可测单位测试线截获得物体颗粒数 N ，测量方法与测 P_L 相似，只是以截到的颗粒数来代替交点数，并允许外形不规则的颗粒可被测试线截获一次以上。对于充满空间的单相晶粒 $P_L = N_L$ ，在图 1-14a 中，测试线 L 所截获的晶粒间交界点数 P_L 和获的晶粒数 N_L 都为 8。

当被测物体为第二相粒子时, $P_L=2N_L$, 在图 1-14b 中, 测试线 L 截获相界的交点数 $P_L=8$, 而截获第二相 (α 相) 的颗粒数 $N_L=4$ 。

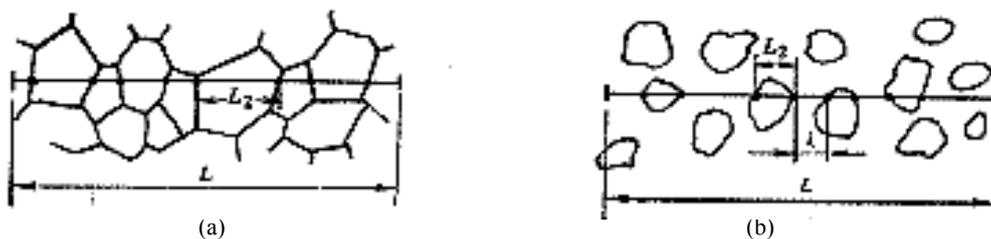


图 1-14 截线法求 P_L 和 N_L

(a) 单向晶粒 (充满空间) (b) α 相粒子分布在基体上

(2) 求测试面积上的交点数 P_A 或物体数 N_A

P_A 代表每单位面积中的交点数, 在图 1-15 中, 把测试面积中的三个晶粒的交点作为被测点来计算, 得 $P=57$, 若已知测试圆面积为 0.5mm^2 , 则 $P_A = \frac{57}{0.5} = 114\text{mm}^{-2}$ 。同样, N_A 表示每单位面积中物体颗粒数, 在图 1-15 中, 被包围的晶粒数 $n=30.5$ (其中被圆周截获的晶粒, 每个以 $1/2$ 计算), 则 $N_A = \frac{30.5}{0.5} = 61\text{mm}^{-2}$ 。

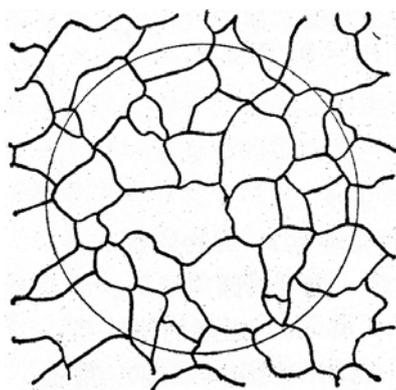


图 1-15 求测试面积上的 P_A 和 N_A

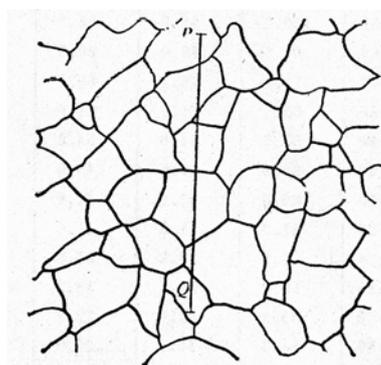


图 1-16 截线法求晶粒度

八) 显微组织特征参数测量举例

1. 晶粒大小测量

在实际工作中, 晶粒大小的概念一般采用晶粒直径大小或晶粒度大小的数值来表示。采用晶粒直径表示晶粒大小时, 因为直径的概念只有对球体才有明确的意义, 而对于形状不规则的晶粒, 其含义就不确切。因此, 一般可用平均截线长度来表示晶粒直径。平均截线长度是指在截面上任意测试直线穿过每个晶粒长度的平均值。在二维平面上截获的平均截线长度记为 L_2 , 三维空间的平均截线长度记为 L_3 , 当测量的晶粒数目具有足够统计意义时, 二者是相等的。

对于单向晶粒, 平均截线长度为:

$$L_2 = \frac{1}{N_L} = \frac{1}{P_L} \quad (1-12)$$

式中: N_L ——单位长度测试线上截到的晶粒数;

P_L ——单位长度测试线和晶界的交点数。

如果在显微组织照片上进行测量时, 则

$$L_2 = \frac{L_T}{PM} \quad (1-13)$$

式中： L_T ——任意作的测试线长度；
 P ——测试线与晶界总交点数；
 M ——显微组织放大倍数。

在用晶粒度表示晶粒大小时，晶粒度值的测定，通常采用与标准进行比较的方法来评定，这种比较法只能粗略估计晶粒大小。根据 GB/T 6394-2002 《金属平均晶粒度测定法》的规定，将晶粒度等级分为 8 级。这种标准晶粒度图，实质上是按单位面积内平均晶粒数 n (N_A) 来分级的，级别的定义为：

$$n = 2^{g+3}$$

或
$$g = \frac{\lg n}{\lg 2} - 3 \quad (1-14)$$

式中： n ——每平方毫米面积中的晶粒数；
 g ——晶粒度级别。

由此可见，单位面积内晶粒数目越多，每个晶粒的平均面积越小，晶粒度级别便越大。因此，只要测出每平方毫米面积内的晶粒数 n ，代入 (1-14) 式中，即可较精确地求出晶粒度级别。比较简便的测试方法为截线法和由 P_L 求晶粒度法。

(1) 截线法

在显微组织图像上，作一条长度为 L 的线段 PQ，如图 1-14 所示。由这条直线截到的晶粒数为 N_2 ，假定晶粒平均直径的平方值相当于晶粒的平均面积，则

$$n = \frac{N_2^2 M^2}{L^2} \quad (1-15)$$

例如，图 1-16 中 L 为 50mm，把没有完全被线段截割的晶粒按 1/2 计算，得 N_2 为 6 个，若显微组织放大倍数为 100 倍，则

$$n = \frac{6^2 \times 100^2}{50^2} = 144 \text{mm}^{-2}$$

代入式 (1-14)

$$g = \frac{\lg 144}{\lg 2} - 3 = 4.2 \text{ (级)}$$

应用截线法时，所作的线段应尽可能多地截割晶粒，并采用多条线段测试为好。

(2) 由 P_L 求晶粒度法

如前所述，单相合金晶粒大小可用抛光平面上测出的平均截线长度 L_2 表示。对于许多无序的平面测得的 L_2 平均值就等于三维参数 L_3 ，就是晶粒的平均长度。故根据式 (1-12) 和式 (1-13) 可求得

$$L_3 = L_2 = \frac{1}{P_L} = \frac{L_T}{PM}$$

L_T 通常采用已知长度为 10、20、50cm 的圆周形测试网格。测量时应根据组织的特点选择合适的测试圆和放大倍数，并使测试圆每次截获的交点数足够多。通常根据截点数，可直接查表得 L_2 值 (见表 1-4)，然后将求得的 L_3 值代入式 (1-16) 中，就可求得晶粒度：

$$g = -10.0 - 6.64 \lg L_3 \quad (1-16)$$

对于等轴晶粒，求得的晶粒度级别数和标准的比较，偏差不超过 0.3 级。

例如，用 50cm 的测试圆，在放大 400 倍的显微组织上截 4 次，得总的交点数 $P=113$ ，则：

$$L_3 = \frac{4 \times 50}{113 \times 400} = 4.4 \times 10^{-3} \text{ (cm)}$$

$$g = -10.0 - 6.64 \lg(4.4 \times 10^{-3}) = 5.6 \text{ (级)}$$

2. 线长度及界面面积测量

测量单位面积内特征物的线长度，主要是指测量金相磨片（或图片）上的晶界线长度，孪晶与基体间的总界面长度及片状石墨的平均长度。测量单位体积内特征物界面面积，通常指单相或多相合金中的晶粒表面积，第二相脱溶物的表面积等。这些量的测定，只要选择适当的测试网格，运用体视学公式，就能方便的测算出这些特征物的参数。

对于单相组织，若单位截面积内晶界线长度为 L_A ，可用式（1-17）求得：

$$L_A = \frac{\pi}{2} P_L = \frac{\pi}{2} N_L \quad (1-17)$$

表 1-4 用 50cm 圆网格在确定放大倍数下测得的晶粒大小（平均截线长度）值 单位：μm

放大100倍										
截点数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	100.0	98.0	96.2	94.3	92.6	90.9	89.3	87.7	86.2	84.7
60	83.3	82.0	80.6	79.4	78.1	76.9	75.8	74.6	73.5	72.5
70	71.4	70.4	69.4	68.5	67.6	66.7	65.8	64.9	64.1	63.3
80	62.5	61.7	61.0	60.2	59.5	58.8	58.1	57.5	56.8	56.2
90	55.6	54.9	54.3	53.8	53.2	52.6	52.1	51.5	51.0	50.5
100	50.0	49.5	49.0	48.5	48.1	47.6	47.2	46.7	46.3	45.9
110	45.5	45.0	44.6	44.2	43.9	43.5	43.1	42.7	42.4	42.0
120	41.7	41.3	41.0	40.7	40.3	40.0	39.7	39.4	39.1	38.8
130	38.5	38.2	37.9	37.6	37.3	37.0	36.8	36.5	36.2	36.0
140	35.7	35.5	35.2	35.0	34.7	34.5	34.2	34.0	33.8	33.6
150	33.3	33.1	32.9	32.7	32.5	32.3	32.1	31.8	31.6	31.4
160	31.3	31.1	30.9	30.7	30.5	30.3	30.1	29.9	29.8	29.6
170	29.4	29.2	29.1	28.9	28.7	28.6	28.4	28.2	28.1	27.9

放大400倍										
截点数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	25.00	24.51	24.04	23.58	23.15	22.73	22.32	21.93	21.55	21.19
60	20.83	20.49	20.16	19.84	19.53	19.23	18.94	18.66	18.38	18.12
70	17.86	17.61	17.36	17.12	16.89	16.67	16.45	16.23	16.03	15.82
80	15.62	15.43	15.24	15.06	14.88	14.71	14.53	14.37	14.20	14.04
90	13.89	13.74	13.59	13.44	13.30	13.16	13.02	12.89	12.76	12.63
100	12.50	12.38	12.25	12.14	12.02	11.90	11.79	11.68	11.57	11.47
110	11.36	11.26	11.16	11.06	10.96	10.87	10.78	10.68	10.59	10.50
120	10.42	10.33	10.25	10.16	10.08	10.00	9.92	9.84	9.77	9.69
130	9.62	9.54	9.47	9.40	9.33	9.26	9.19	9.12	9.06	8.99
140	8.93	8.87	8.80	8.74	8.68	8.62	8.56	8.50	8.45	8.39
150	8.33	8.28	8.22	8.17	8.12	8.06	8.01	7.96	7.91	7.86
160	7.81	7.76	7.72	7.67	7.62	7.58	7.53	7.49	7.44	7.40
170	7.35	7.31	7.27	7.23	7.18	7.14	7.10	7.06	7.02	6.98

注：摘自《体视学和定量金相学》[美] G. E. 彼里西阿 S. M. 浦迪著

若单位体积内晶界面积为 S_V ，则可用式（1-18）求得：

$$S_V = 2P_L = 2N_L \quad (1-18)$$

对于分布在基体上的第二相（α相）粒子组织，可用式（1-19）或（1-20）求得第二相粒子在

截面上的线长度及单位体积中的界面面积:

$$(L_A)_\alpha = \frac{\pi}{2} P_L = \pi N_L \quad (1-19)$$

$$(S_V)_\alpha = 2P_L = 4N_L \quad (1-20)$$

例如, 求图 1-17 中片状石墨平均长度 L_C 及周长 L_S 。

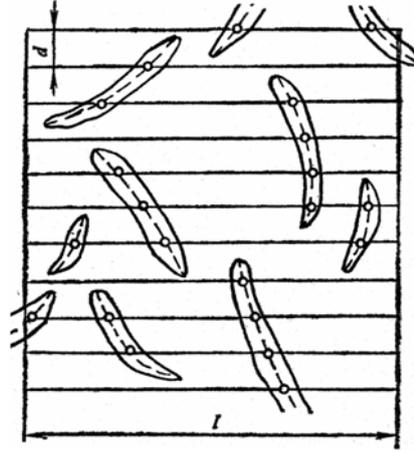


图 1-7 片状石墨平均长度 L_C 及周长 L_S 的测定

首先采用图示的平行线组作测试线。设整个测试面积内有 n 条测试线, 每条测试线长度为 l , 平行的测试线间距为 d 。在测试面积内测得的石墨片数为 N , 则石墨片的平均长度为:

$$L_C = \frac{L_A}{N_A}$$

根据式 (1-17)

$$L_A = \frac{\pi}{2} P_L = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{P}{L_T} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{P}{nl}$$

而

$$N_A = \frac{N}{nld}$$

所以

$$L_C = \frac{L_A}{N_A} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{P}{nl} \cdot \frac{nld}{N} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{Pd}{N}$$

考虑到图片经放大 M 倍, 故

$$L_C = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{Pd}{NM}$$

如果图 1-17 中 $d=5\text{mm}$, 在测量面积内石墨片的总数 $N=10$, 交点数 $P=21$ (以石墨片中线与测试线交点为准), 放大 250 倍, 则

$$L_C = \frac{3.14 \times 21 \times 5}{2 \times 10 \times 250} = 0.066 \quad (\text{mm})$$

在计算单位测试面积内石墨片周长时, 平行的测试线与石墨片的交点数 P 应是测试线与石墨片边界的交点数。在图 8 中测得 $P=41$, 故石墨片周长为

$$L_S = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{Pd}{NM} = \frac{3.14 \times 41 \times 5}{2 \times 10 \times 250} = 0.129 \quad (\text{mm})$$

3. 多相合金中各组成相相对量的测定

在实际金相检测工作中, 常需测定多相合金组织中各组成相 (或组织) 所占的相对量。例如, 测定钢中铁素体和珠光体的相对量, 钢中残余奥氏体量, 铸铁中的石墨量等。

测定组织相对量的原理是依据体视学的基本计算式, 即 $V_V = A_A = L_L = P_P$ 。只要测出待测相

的 L_L 或 P_P ，即可求得该相所占的体积百分数 V_V 。

常用的测量方法亦为截线法和计点法。

(1) 截线法 (测量 L_L 法)

在显微组织照片上作任意直线，它被组织中各个相截成若干线段，把落在被测相上的线段相加，得总长度 L_a ，然后除以测试线总长度 L_T ，即得被测相体积百分数： $V_V=L_L=L_a/L_T$ 。

线段长度可用刻度尺在显微组织照片上测量，也可直接在显微镜的毛玻璃上测量。由于测量的是组织相对量，所以对所用刻度尺的比例和组织的放大倍数，对测定的结果不受影响。为提高测量的精度，应考虑测量的截线数量，使用的截线总数越多，测量误差越小。

(2) 计点法 (P_P) 测量法

在显微镜的目镜镜筒上装上附有十字线的目镜，每次将显微镜载物台移动相同的距离，观察通过十字线交点的第二相，把交点落在第二相的次数加起来 (P_a)，除以观察总次数 (P_T)，即得第二相的体积百分数。

更方便的计点法是应用有网格的计点格子，插入显微镜目镜中或用带网格的透明塑料板覆盖在显微组织照片上进行测量。

九) 定量图像分析仪在金相定量测试中的应用简介

利用人工进行显微组织定量测试，是一项繁重的工作，且长时间地、精力高度集中地观察组织和测量各种参数，易导致工作者的视力疲劳，引起测量和计算误差，测试效率低。因此，各种定量图像分析仪和配置在金相显微镜或电子显微镜上的附件相继研制并使用。

应用图像分析仪定量研究材料的显微组织结构是近二十年来发展起来的新方法。图像分析仪代替人工自动测量具有准确度高、重现性好、速度快等特点。目前已在材料科学、生物学、固体物理、环境保护、地质矿产等领域获得了广泛的应用。

1. 仪器的基本组成及工作原理

(1) 系统组成 由金相显微镜系统 1、图像采集 (摄像头) 2、和计算系统 3 组成 (图 1-18)。



图 1-18 图像采集系统组成

(2) 系统基本工作原理 成像系统是将金相显微镜视场中的组织图像通过视频摄像头 (与

微机 USB 接口连接)、采集卡输入计算机中;软件系统可对屏幕显示图像部分进行图像鉴别、图像处理、测量分析,评定级别等处理。也就是说,从图像的实时采集、显示、图像处理到检验结果的分析、报告单的编辑至彩色图文报告的打印,运用先进的计算机图像处理分析技术取代了传统的照相机拍摄、人工显微镜目测计数法,实现了全部信息实时化、智能化、数字化。

(3)测量的基本原理 可用图 1-19 说明,和网格法原理一样,只不过它的网格更密,因此,比网格法人工测量更为准确。按照这一原理,图 1-19 中的组织 1、2 在定量时均可计入,而 3、4 则不能计入。

需要测量的物相必须选择出来,这就叫鉴别。鉴别的基础是灰度(即图像的黑白对比度)。因此,只有灰度上能区分的相方能进行定量测量。具体地讲,当扫描束从一个组成相移到另一个组成相时,由于灰度不同,导致脉冲变化(见图 1-20),把一定长度上的脉冲数之和(图 11a)和脉冲持续时间(图 1-20b)记录下来。这样,就和用直线截过组织的测量一样得到我们需要的可测量量 L_L , N_L , P_L 等。然后计算机系统处理,给出测量结果。

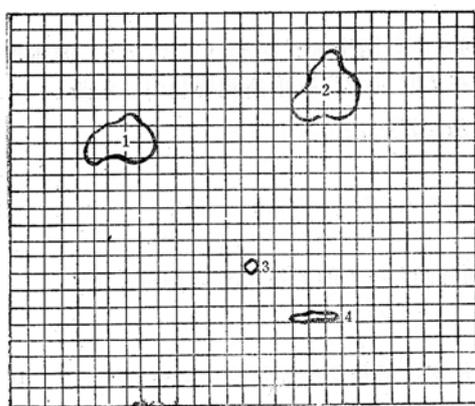


图 1-19 图像定量测量原理

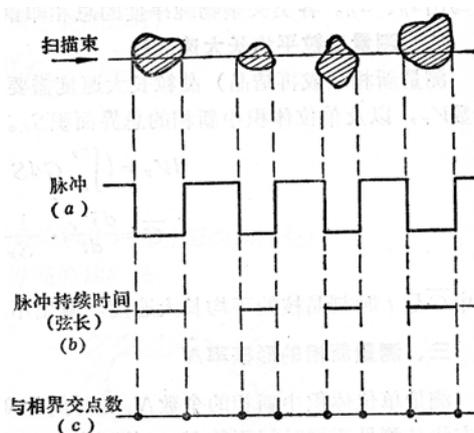


图 1-20 图像仪定量过程示意图

十) 定量金相测量步骤

以下测量步骤是建立在学习并掌握了“金相显微数码摄影操作步骤”基础上的,测量时需预先对选定的组织图像进行拍照并保存。

1. 当“MiE”软件处于“视频预览”时,点击“设置”,会弹出如下对话框(图 1-21),在“物镜倍数&测量”栏内选择当前显微镜所使用的物镜倍数(可选倍数有 10 倍、20 倍、40 倍三种),“测量单位”默认为微米,点击“确定”。(注:“视频预览”中的“测量”仅能对所采集的图像进行实时测量,并不能保存测量结果)

2. 当“MiE”软件处于“图象处理”时,点击“打开”,选择并打开所需测量长度的图片,点击“测量”并选择“直线”,然后在图上用鼠标左键点测量的起点,按住左键不放并移动鼠标,系统会实时绘制从起点至当前鼠标位置的一条直线,移动鼠标至测量的终点,松开鼠标左键,测量结束。此时在直线下方会显示测量的长度(见图 1-22)。

3. 点击“标记融合”,再点击“保存”,此时会出现保存图像文件的对话框,更改文件名后保存即可。

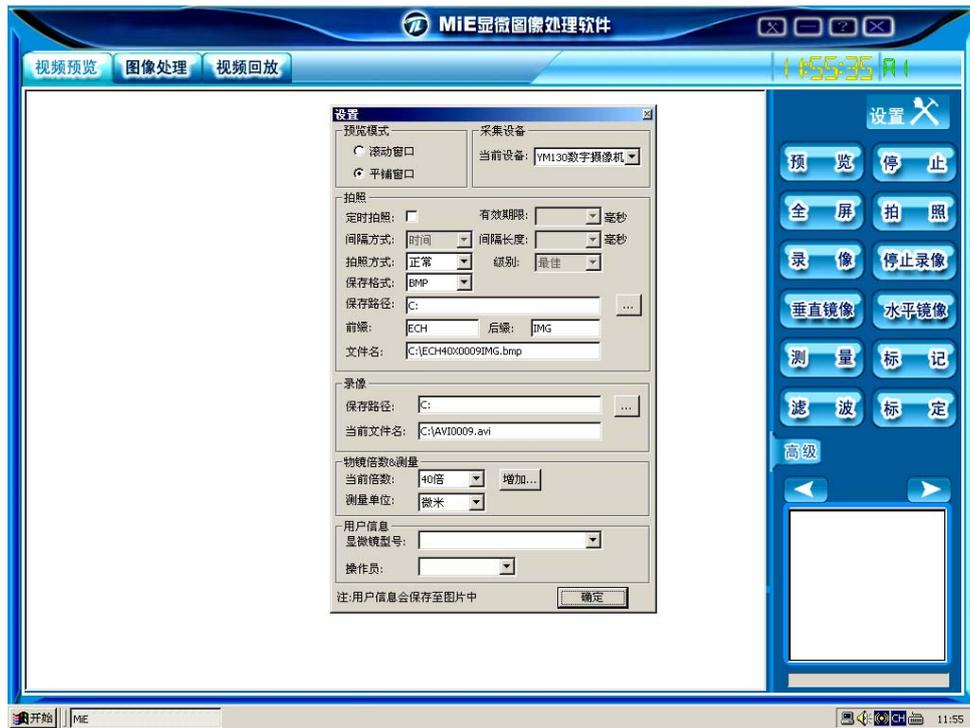


图 1-21 物镜倍数设置



图 1-22 测量长度

四、实验步骤

1. 利用挂图、教具及现场的设备仪器讲解金相显微镜、磨光、抛光、金相显微数码摄影、

图像处理、定量金相分析等设备仪器的原理、构造、使用与维护；

2. 在具体了解上述设备仪器功能的基础上，反复练习，直到熟练掌握；如：反复改变显微镜的孔径光阑、视场光阑的大小，加或不加滤光片，观察同一视场映象的清晰程度；金相显微数码摄影的质量；利用计算机系统软件进行定量金相测量的步骤与方法等。

3. 领取待磨试样，用砂轮机粗磨，用金相砂纸细磨，进行机械抛光；浸蚀前观察对抛光后洗净，吹干的试样进行浸蚀前的检查；将抛光合格的试样置于浸蚀剂中浸蚀；对浸蚀后的试样进行在金相显微镜上进行观察，联系化学浸蚀原理对组织形态进行分析。如浸蚀程度过浅，可重新浸蚀；若过深，待重新抛光后才能浸蚀；若变形层严重，反复抛光—浸蚀 1~2 次后再观察组织清晰度的变化。

4. 借助计算机中的定量金相分析系统软件，并按要求对组织进行实地测量，将其结果首先保存于电脑中，然后试验报告要求进行。

五、实验报告要求

采用个人制备好的金相样品，利用数字网络显微互动实验室的设备，独立完成金相显微数码摄影、图像处理、金相显微组织的定量分析。并将实验结果与分析填写在“电子实验报告（Word 文档）中”（实验报告格式模板见附录），随后按“作业提交”的操作步骤进行操作，即可将“电子实验报告（Word 文档）”提交于教师主机内。

实验二 典型金属晶体结构的刚球堆垛模型分析

一、实验目的

- 1) 熟悉面心立方、体心立方和密排六方晶体结构中常用晶面、晶向的几何位置、原子排列和密度;
- 2) 熟悉三种晶体结构中的四面体间隙和八面体间隙的位置和分布;
- 3) 熟悉面心立方和密排六方晶体结构中, 最密排面的堆垛顺序;
- 4) 进一步练习晶面和晶向指数的确定方法。

二、原理概述

1、晶体

原子、分子或它们的集团, 按一定规则呈周期性重复排列, 即构成晶体。自然界中近 80 种金属元素, 其中大多数属于面心立方、体心立方和密排六方三种典型晶体结构。其结构特点如图 2-1 所示。

2、晶面

同处于一个平面中的原子构成晶面。任一晶面指数表示晶体中近乎平行的所有晶面。不同指数的晶面空间方位、原子排列方式和原子面密度不同。立方晶体结构中常用晶面的方位和原子排列如图 2-2 所示。

3、晶向

晶体中任一原子列均构成一晶向。任一晶向指数代表晶体中相互平行并同向的所有原子列。不同指数的晶向有不同的空间方位和原子间距。面心立方和体心立方晶体的最密排晶向如图 2-3 所示。

4、面心立方和密排六方晶体结构最密排面的堆垛顺序

面心立方和密排六方晶体结构均为等径原子最密排结构, 二者致密度均为 0.74, 配位数均为 12, 它们的区别在于最密排面的堆垛顺序不同。面心立方晶体的最密排面 $\{111\}$ 按 ABCABC……顺序堆垛, 而密排六方晶体的最密排面 $\{0001\}$ 按 ABABAB……顺序堆垛。A、B、C 均表示堆垛时原子所占据的相应位置, 如图 2-4 所示。

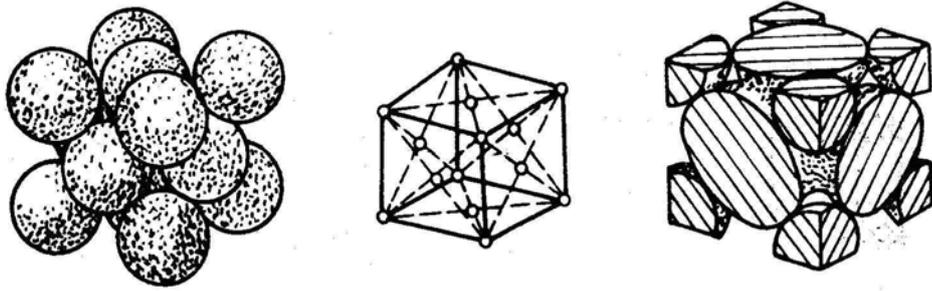
5、晶体中间隙的意义、位置、大小和数量

从原子排列刚球模型可见, 除最近邻原子外, 球间都有空隙, 就是这些空隙构成了晶体中的间隙 (又称空腔)。尺寸较大的间隙, 因具备溶入其它小原子的可能而被人们所重视。按周围原子的分布可将间隙分为两种, 即四面体间隙和八面体间隙。其位置如图 2-5 至图 2-7 所示。间隙的大小和数量如表 2-1 所示。

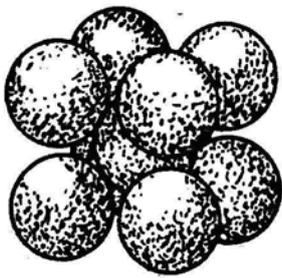
表 2-1 间隙的大小和数量

晶体结构	间隙	大小	数量/每个晶胞
面心立方	八面体间隙	$r_B=0.414r_A$	4
	四面体间隙	$r_B=0.225r_A$	8
体心立方	八面体间隙	$r_B=0.155r_A$	6
	四面体间隙	$r_B=0.291r_A$	12
密排六方	八面体间隙	$r_B=0.414r_A$	6
	四面体间隙	$r_B=0.225r_A$	12

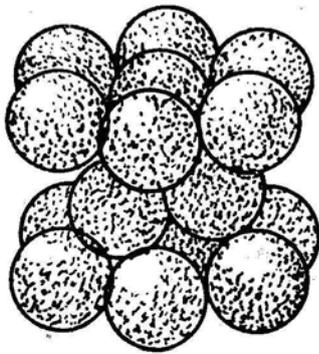
注: r_B 为间隙半径, r_A 为原子半径。



a)



b)



c)

图 2-1 三种典型晶体结构

a) 面心立方 b) 体心立方 c) 密排六方

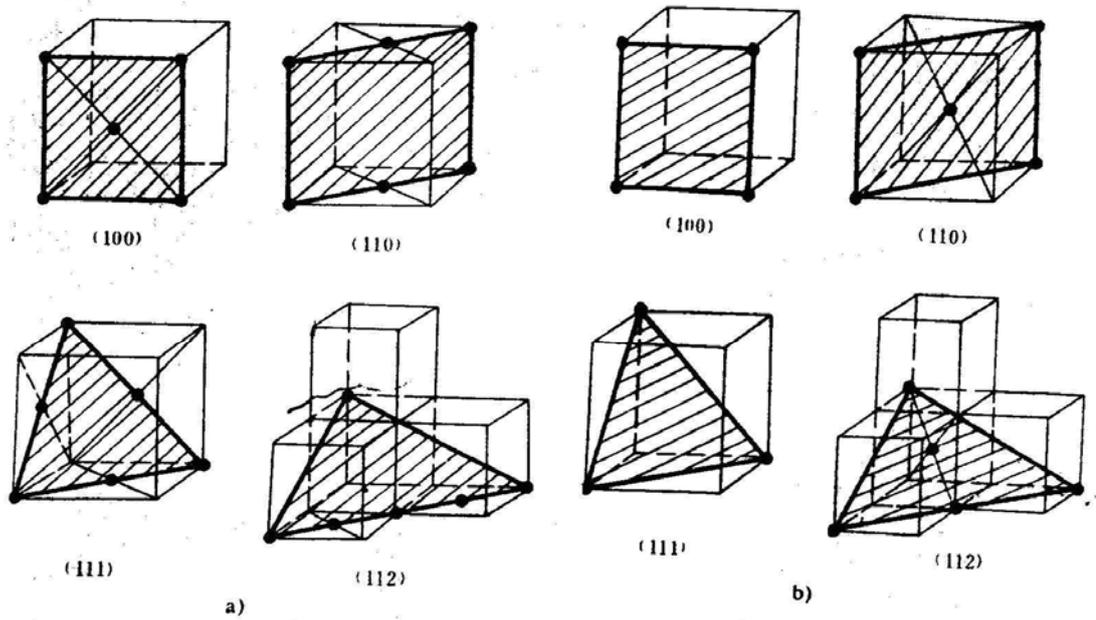


图 2-2 立方晶体结构中常用晶面的方位和原子排列
a) 面心立方 b) 体心立方

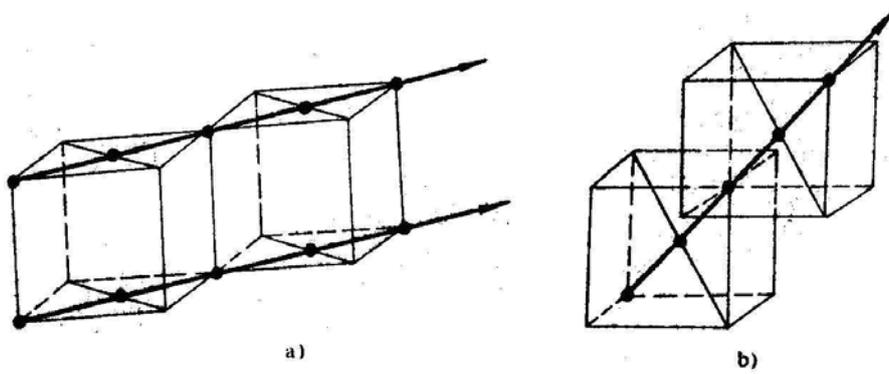


图 2-3 立方晶体结构中的最密排晶向
a) 面心立方 b) 体心立方

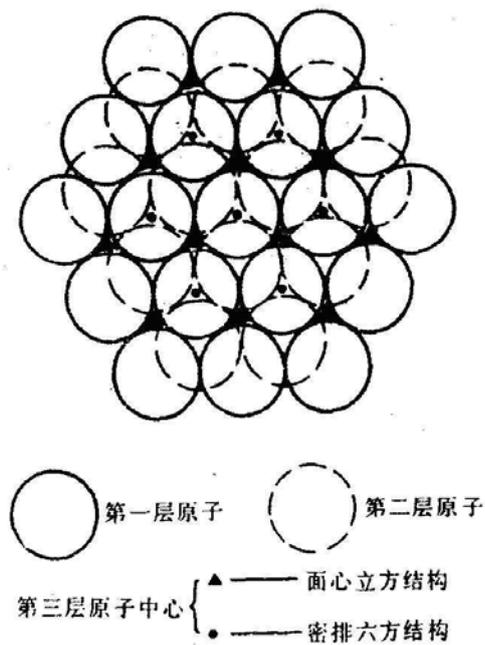


图 2-4 面心立方和密排六方
结构中原子堆积的方式

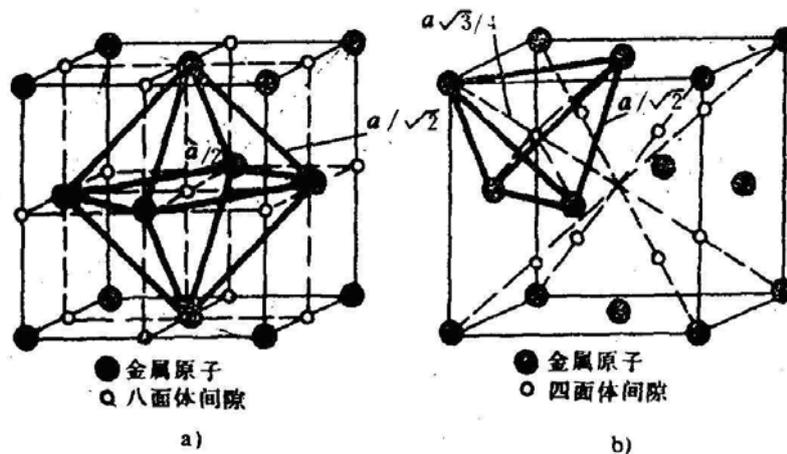


图 2-5 面心立方晶体结构的间隙
a) 八面体间隙 b) 四面体间隙

6、晶面上原子面密度的计算

晶面上原子排列的紧密程度可以用 η 表示。即

$$\eta = S / S_0$$

式中， S 为晶面上所有原子所占面积之和、 S_0 为晶面的总面积，

三、实验内容

- 1) 把钢球或乒乓球作为球形刚性金属原子，堆积出面心立方和体心立方晶体的 (100)、(110)、(111) 和 (112) 晶面。
- 2) 在已堆出的上述晶面上，至少确定三个不同方位原子列的晶向指数。
- 3) 按最密排面堆积的顺序堆积出面心立方和密排六方晶体结构。

4) 借助模型, 找出三种晶体结构中两种间隙的位置。

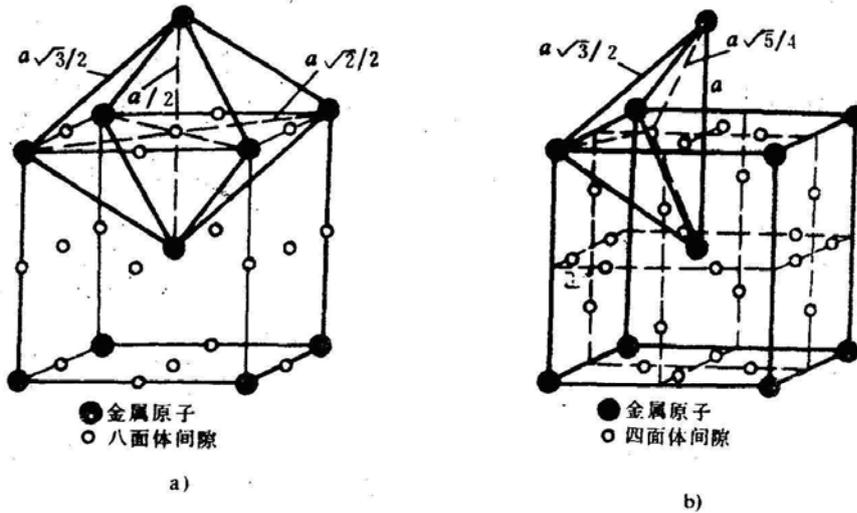


图2-6 体心立方晶体结构的间隙

a) 八面体间隙 b) 四面体间隙

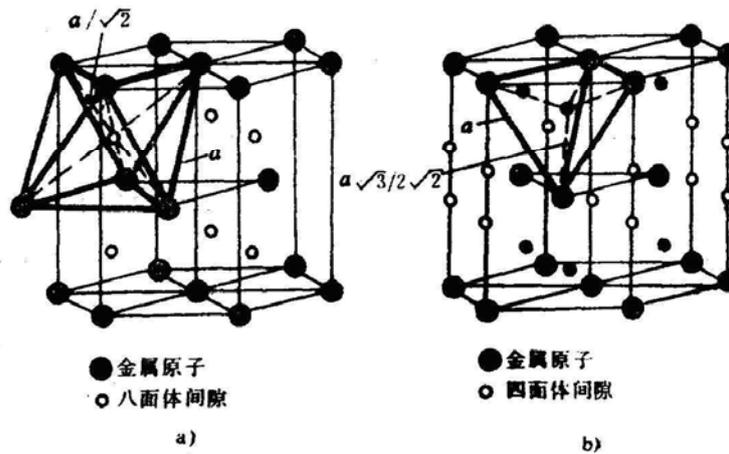


图 2-7 密排六方晶体结构的间隙

a) 八面体间隙 b) 四面体间隙

四、材料及设备

- 1) 有机玻璃盒或玻璃盒、涂有凡士林油的钢球或乒乓球、医用镊子, 每人一套。
- 2) 晶体结构模型。

五、实验步骤

- 1) 用镊子将球一个一个放入盒内, 堆垛出面心立方和体心立方晶体的(100)、(110)、(111)和(112)晶面;
- 2) 逐个分析上述所堆晶面上原子的分布特征, 如实画出原子分布;
- 3) 在上述平面图上, 至少标出三个不同方位的晶向指数;
- 4) 参照图 4-4, 用球堆垛出密排六方和面心立方晶体结构;

5) 借助晶体结构模型和 4) 分析间隙位置。

六、实验报告要求

- 1) 实验目的;
- 2) 画出面心立方和体心立方晶体结构的 (110) 、 $(\bar{1}10)$ 、 (111) 和 (112) 晶面的原子分布图;
- 3) 上述每个图中至少标出三个不同方位的晶向;
- 4) 求出上述各晶面的原子面密度;
- 5) 指出三种晶体结构的最密排晶面和最密排晶向。

实验三 二元系合金的显微组织分析

一、实验目的

- 1) 掌握根据相图分析合金凝固组织的方法。
- 2) 熟悉典型共晶系合金的显微组织特征。
- 3) 了解初晶及共晶形态。
- 4) 分析二元合金的不平衡凝固组织，掌握其组织特征及某与平衡组织的差别

二、原理概述

研究合金的显微组织时，常根据该合金系的相图，分析其凝固过程，从而得知合金缓慢冷却后应具有的显微组织。显微组织是指各组成物的本质、形态、大小、数量和分布特征。特征不同，即使组成物的本质相同，合金的性能也不一样。

具有共晶反应的二元合金系有：Pb-Sb、Pb-Sn、Al-Si、Al-Cu、Cu-O、Zn-Mg 等。根据合金在相图中的位置，可分为端部固溶体、共晶、亚共晶和过共晶合金来研究其显微组织特征。

1、端部固溶体合金

端部固溶体合金位于相图两端。如 Pb-Sn 相图中含锡的质量分数小于 19% 的合金，见图 3-1；Pb-Sb 相图中含锑的质量分数小于 3.5% 的合金，见图 3-2。这类合金慢冷凝固终了得到单相固溶体 α ，继续冷却到固溶度曲线以下，将析出二次相 β_{II} ，一般合金中的二次相常呈粒状或小条状分布在 α 固溶体的晶界和晶内。图 3-3 为含锡 10% 的 Pb-Sn 合金的显微组织，其中暗色的基体为铅基固溶体 α ，亮色颗粒为二次相 β ，记为 β_{II} ， β 是以锡为基体的固溶体。

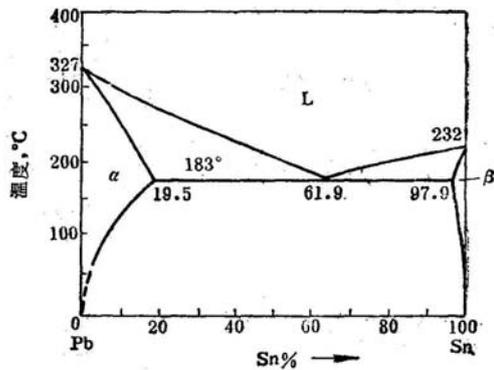


图 3-1 Pb-Sn 相图

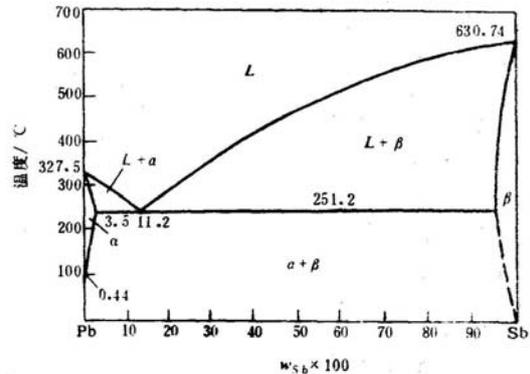


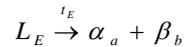
图 3-2 Pb-Sb 相图



图 3-3 Pb-10%Sn 合金的显微组织

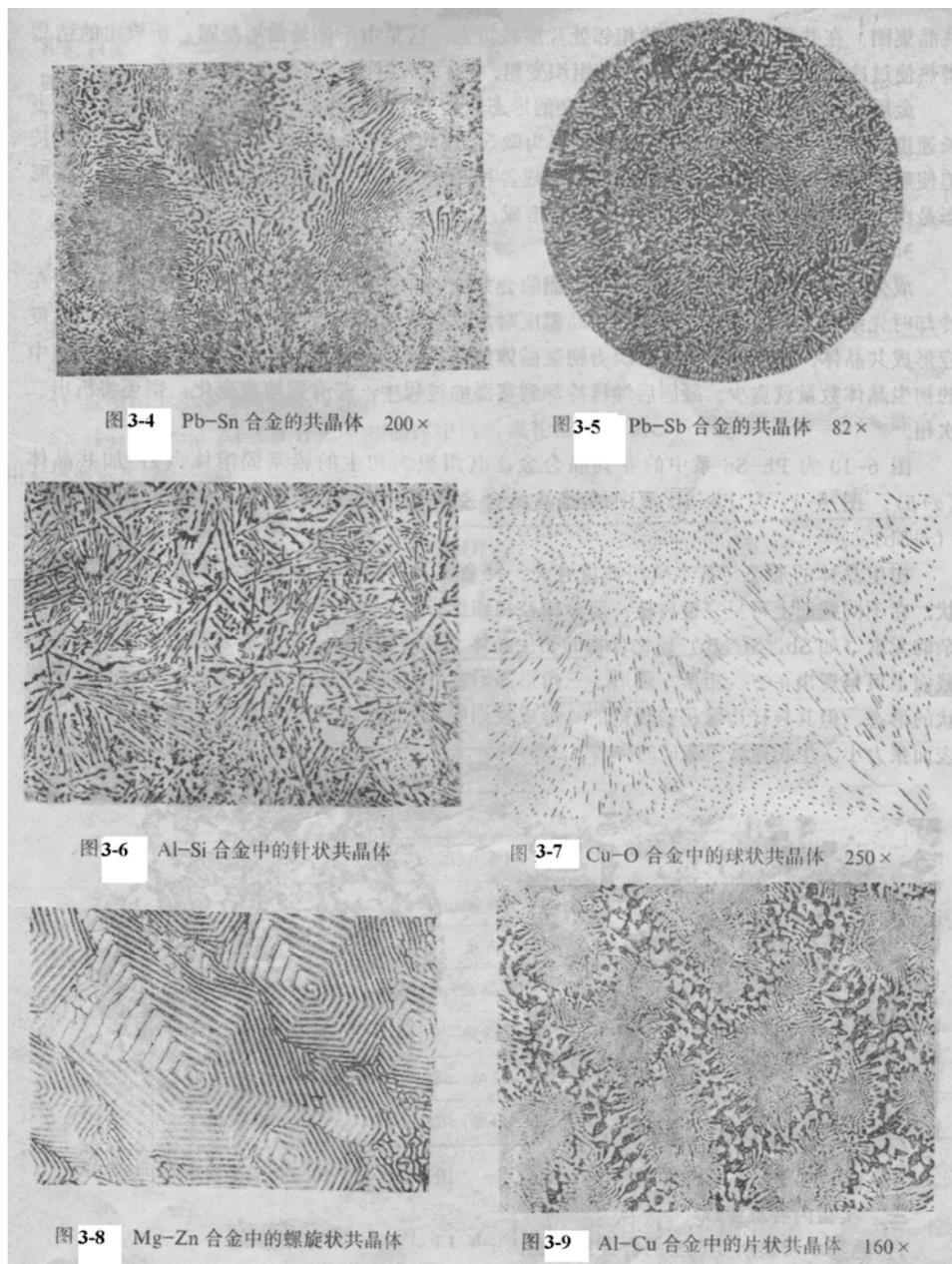
2、共晶合金

位于二元相图中共晶点成分的合金液体 L_E 冷至共晶温度 t_E 时，发生共晶反应，



凝固终了得共晶体组织。共晶体是由两种一定成分的固相 ($\alpha_a + \beta_b$) 组成，两相的本质和成分可由相图上得知。如 Pb-Sn 合金的共晶体中两个相的本质分别为以铅和锡为基的固溶体 α 和 β ，在共晶温度时， α 和 β 中锡的质量分数分别为 19% 和 97.5% (见图 3-1)。而在 Pb-Sb 合金中，由于铅在锑中的固溶度很小， β 相的成分接近纯锑，故其共晶体由 $\alpha + \text{Sb}$ 所组成。这两个合金系的共晶体组织见图 3-4 和图 3-5。

不同合金系的共晶体的形态各异，如 Pb-Sn 共晶为片状，Pb-Sb 共晶为树枝状，此外还有针状，棒状 (条或纤维状)，球状及螺旋状等不同形态的共晶体组织，见图 3-6 至图 3-9。



共晶体的形态，主要取决于其组成相的本质和相对数量。金属-金属型共晶组织凝固时，两相的液-固界面均为微观粗糙型，凝固后常形成规则共晶体，如片状、棒状等。由一个共晶晶核长成的，具有相同位向的区域称为一个共晶领域，几个领域可组成一个共晶集团。在共晶领域或集团的相邻处片层较粗大，这是由于该处最后凝固，所放出的结晶潜热使过冷度减小，生核率降低，故组织变粗。

金属-非金属型共晶组织常具有复杂的形态。由于金属相的液-固界面多为微观粗糙型，生长速度较快。而非金属相的液-固界面多为微观光滑型，生长速度较慢，金属相的超前生长迫使后生长的非金属相产生分枝，因而形成各种复杂的形态。还有种观点认为复杂的共晶形态是由于非金属相生长时强烈的各向异性造成。

3、亚共晶和过共晶合金

成分位于共晶线上共晶点左侧和右侧的合金分别称为亚共晶和过共晶合金。这些合金在冷却时先结晶出初生晶体，当冷到共晶温度时，剩余液相的成分变化达到共晶点，发生共晶反应形成共晶体，故其凝固后的组织为初生晶体+共晶体。合金成分距共晶点愈近时，组织中的初生晶体数量就愈少。凝固后继续冷却到室温的过程中，若有固溶度变化还将析出二次相。

图 3-10 为 Pb-Sn 系中的亚共晶合金，其组织为初生的铅基固溶体 (α) 加共晶体 ($\alpha+\beta$)。图 3-11 为 Pb-Sb 系中的过共晶合金，其组织为初生晶体(Sb)加共晶体($\alpha+Sb$)。

初生晶体的形态与其本质和数量有关。纯金属及其固溶体的初晶组织形态一般呈树枝状，在不同截面上可呈完整树枝、部分树枝和卵形排列。对一些金属性较差、晶体结构较复杂的元素（如 Sb、Si、Bi）或化合物的初生晶体，数量较少时，常具有规则的外形，在不同截面上可呈现出正方、矩形、菱形、三角形等形状，如果这些相的量较多时，也可具有树枝状的形态，但其枝杆边缘仍是规则的。形成规则的几何外形的原因，是由于这类初生晶体的表面张力小，生长速度慢造成的。

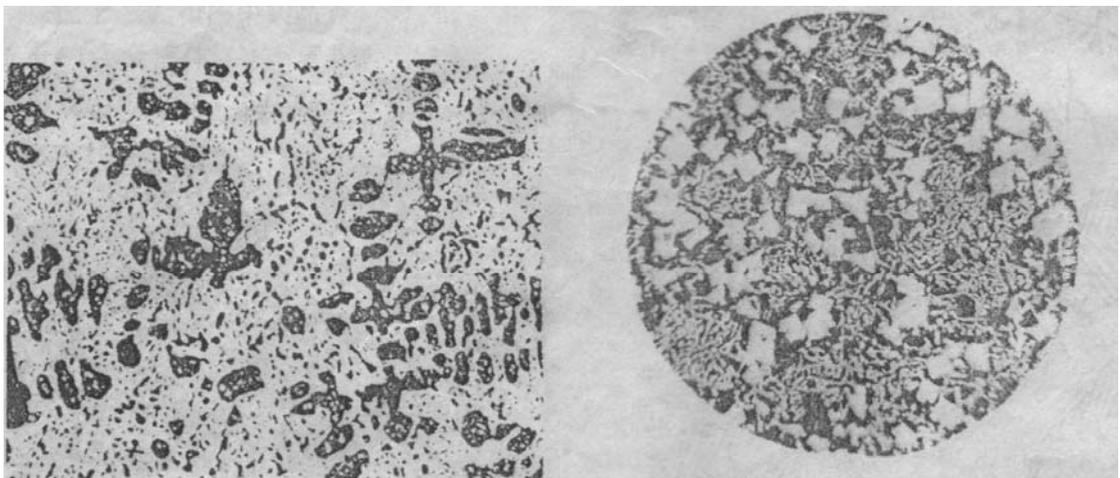


图 3-10 Pb-50%Sn 合金的显微组织 图 3-11 Pb-20%Sb 合金的显微组织

4、固溶体合金的不平衡组织

固溶体合金在慢冷凝固终了后，可得到成分均匀的固溶体晶粒，不显示树枝状。快冷时，固相成分来不及扩散均匀，在凝固过程中各温度的固相平均成分将偏离原平衡相图上固相线的位置，见图 3-12。在合金完全凝固后，先结晶出的枝干（包括一次轴和二次轴）含高熔点的组元多，后结晶的枝间含低熔点组元多；由于二者抗蚀性不同，浸蚀后呈现出树枝状组织特征，形成枝晶偏析，导致合金的强度和塑性下降，使铸锭开坯时易裂。为提高塑性，改善热加工性能，需对快冷后的合金进行扩散退火（均

匀化) 处理, 即将合金加热到低于固相线温度, 保温较长时间, 然后缓冷, 从而消除或减轻偏析, 得到接近平衡的组织。图 3-13 为铜-镍合金的铸造及扩散退火后的组织。

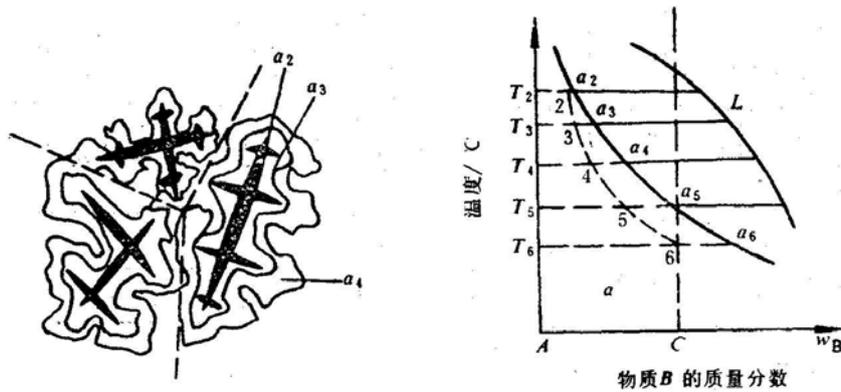


图 3-12 固溶体合金不平衡凝固时固相成分的变化

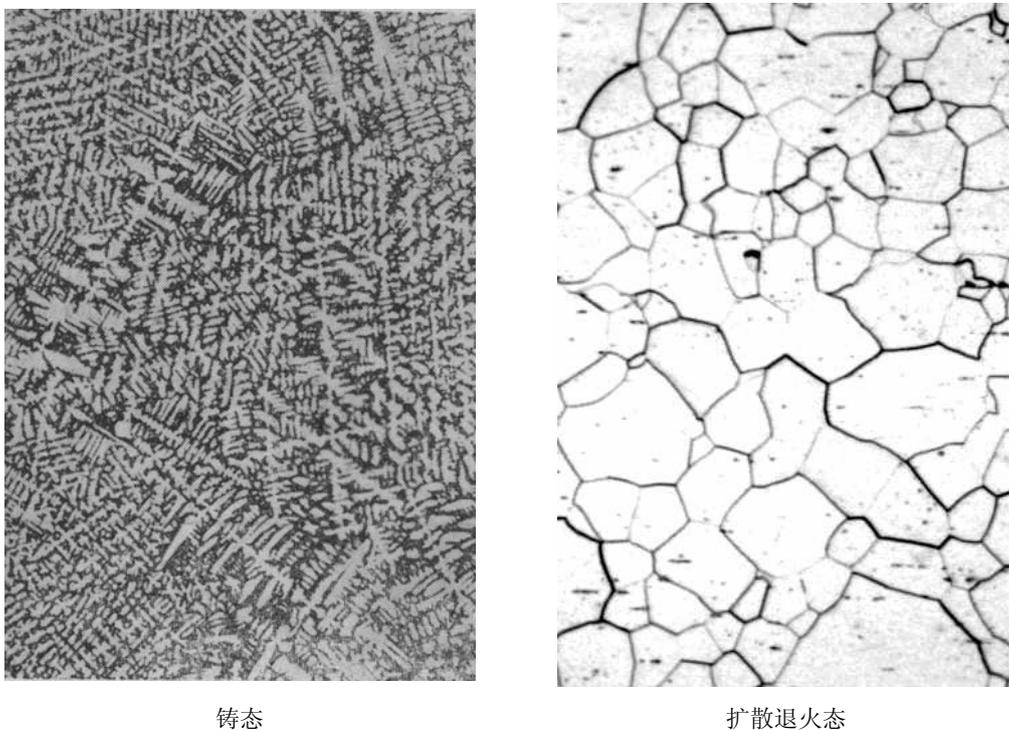


图 3-13 铜-镍合金的铸造及扩散退火后的组织

三、实验内容及步骤

- 1) 熟悉本实验所要观察的合金系相图。
- 2) 分析不同成分合金的平衡凝固过程及冷至室温应具有的组织。
- 3) 观察合金的组织特征, 绘出示意图, 注明各组成物。分析组织与成分的变化规律。
- 4) 分析固溶体合金枝晶偏析形成原因。

绘制组织示意图时, 应先全面观察整个视场, 分清并掌握各组成物特征; 概括示出其形态、相对数量、大小及分布特点。

四、材料及设备

- 1) 选定合金的金相试样 1 套。
- 2) 金相显微镜和数码显微互动图像分析系统 36 台套。
- 3) 所观察的合金显微组织电子照片 1 套，配置在相应的显微镜旁。

五、报告重点要求

- 1) 画出各合金的显微组织示意图，并加以注解（标明各部分组织名称）。
- 2) 结合相图分析不同成分合金结晶组织的形成过程。
- 3) 总结共晶系合金成分不同时组织的变化规律。
- 4) 联系所观察的合金说明组织组成物与相组成物（即组成相）的不同及两者的关系。
- 5) 说明初生晶体与共晶体可具有那些形态？并加以解释。
- 6) 结合合金相图分析固溶体合金不平衡组织形成原因及其组织特征，说明如何消除其枝晶偏析。

实验四 铁碳合金相图及平衡组织分析

一、实验目的

- 1) 熟练运用铁碳合金相图，提高分析铁碳合金平衡凝固过程及组织变化的能力。
- 2) 掌握碳钢和白口铸铁的显微组织特征。

二、原理概述

铁碳合金相图是研究碳钢组织、确定其热加工工艺的重要依据。按组织标注的铁碳相图见图 4-1，铁碳合金在室温的平衡组织均由铁素体（Ferrite，简称 F）及渗碳体（ Fe_3C ，又称 Cementite，）两相接不同数量、大小、形态和分布所组成。高温下还有奥氏体（A）及高温铁素体 δ 固溶体相。

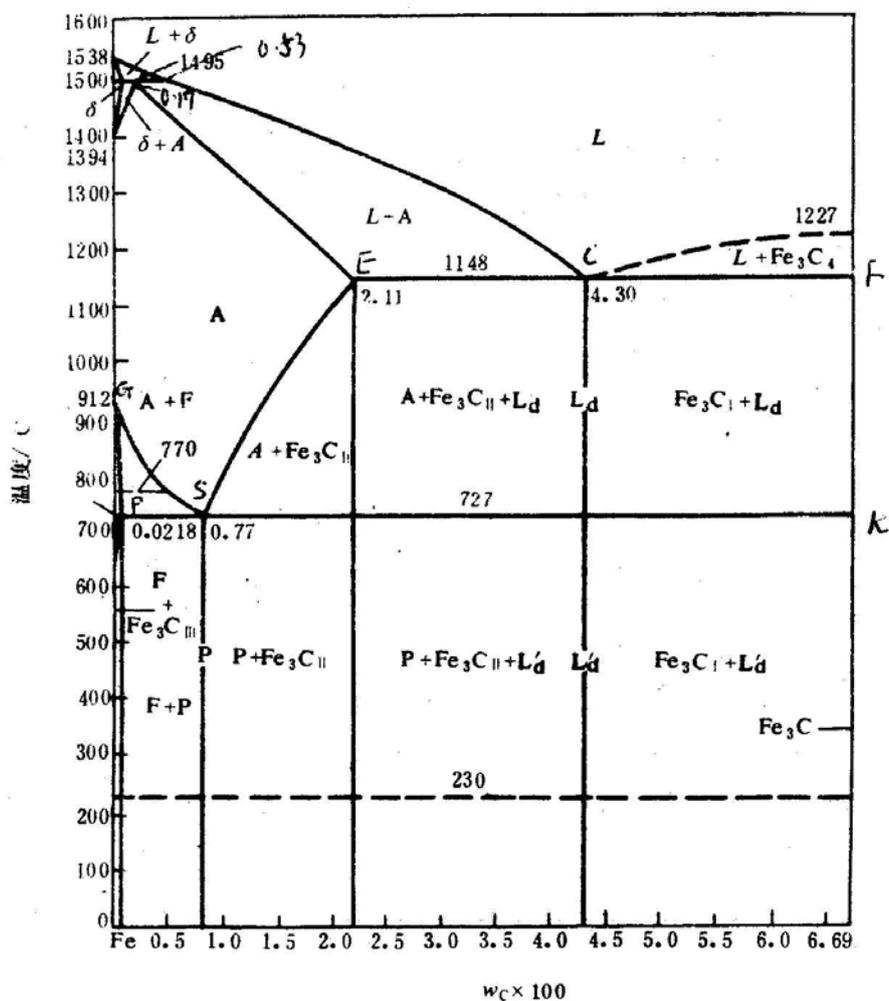


图 4-1 铁碳相图

利用图 4-1 分析铁碳合金的组织时，需了解相图中各相的本质及其形成过程，明确图中各线的意义，三条水平线上的反应及反应产物的本质和形态，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。

根据含碳量的不同，铁碳合金可分为工业纯铁、钢及白口铸铁三大类。现分别说

明其组织形成过程及特征。

1、工业纯铁

碳的质量分数小于 0.0218% 的铁碳合金称为工业纯铁，其光学显微组织见图 4-2。当其冷到碳在 α -Fe 中的固溶度线 PQ 以下时，将沿铁素体晶界析出少量三次渗碳体，铁素体的硬度在 80HBS 左右，而渗碳体的硬度高达 800HBS，因工业纯铁中的渗碳体量很少、故硬度、强度不高而塑性、韧性较好。

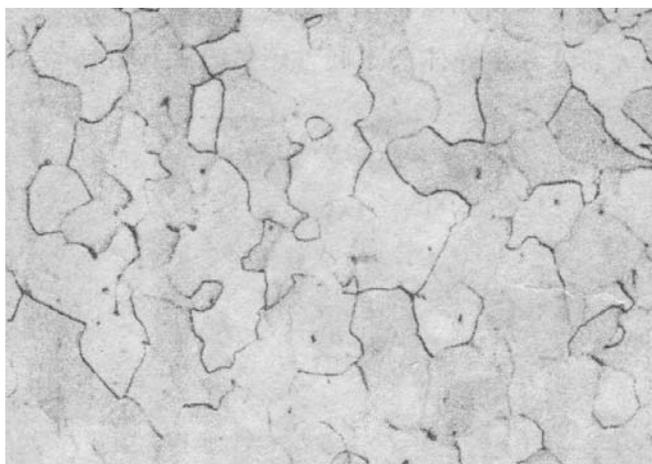
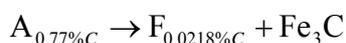


图 4-2 工业纯铁的光学显微组织 100×

2、钢

碳的质量分数 w_C 在 0.0218~2.11% 之间的铁碳合金称为碳素钢、碳钢。根据合金在相图中的位置可分为亚共析钢、共析钢和过共析钢。

共析钢 $w_C=0.77\%$ ，在 727°C 以上的组织为奥氏体，冷至 727°C 时发生共析反应：



将铁素体与渗碳体的混合物称珠光体 P。室温下珠光体中渗碳体的质量分数约为 12%。慢冷所得珠光体呈片状。在普通光学显微镜下观察时、只能看到 F 片成条条细黑线、分布在铁素体上，见图 4-3。位向相同的一组铁素体加渗碳体片层称为一个共析领域。当放大倍数低，珠光体组织细密或浸蚀过深时，珠光体中的片层难以分辨，呈一片暗色区域。采用电子显微镜高倍放大能看出 Fe_3C 薄层的厚度，见图 4-4，图中窄条为 Fe_3C ，宽条为 F 基体，两者有明显的分界线。

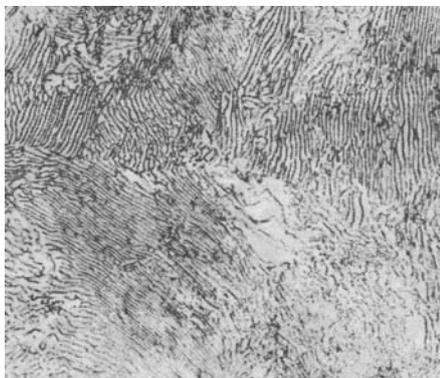


图 4-3 光学显微镜下的珠光体组织 400×

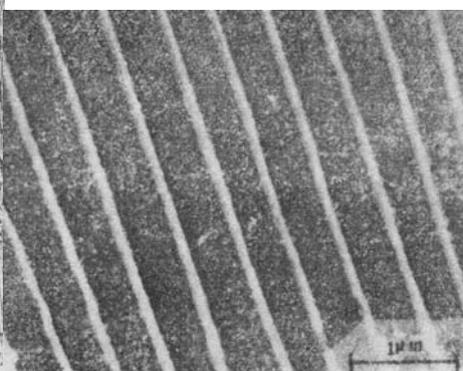


图 4-4 珠光体的电镜组织

亚共析钢成分为 $0.0218\% < w_C < 0.77\%$ ，组织为铁素体 F 加珠光体 P。在显微镜下铁素体呈亮色，珠光体为暗色。铁素体的形态随合金所含碳量即铁素体量的多少而变，如 $w_C = 0.2\%$ 时，其组织为等轴铁素体基体与少量主观体分布在铁素体晶界上或三叉晶界上呈不规则岛状。当含碳量增加，组织中珠光体的量增多，至 $w_C = 0.4\%$ ，珠光体与铁素体的量各占一半； $w_C > 0.5\%$ 珠光体成为钢的基体，铁素体呈连续或断续的网络状围绕着珠光体分布。这是由于先共析铁素体是沿原奥氏体边界优先析出，至一定量后，剩余奥氏体才转变为珠光体。不同含碳量的亚共析钢的显微组织见图 4-5。

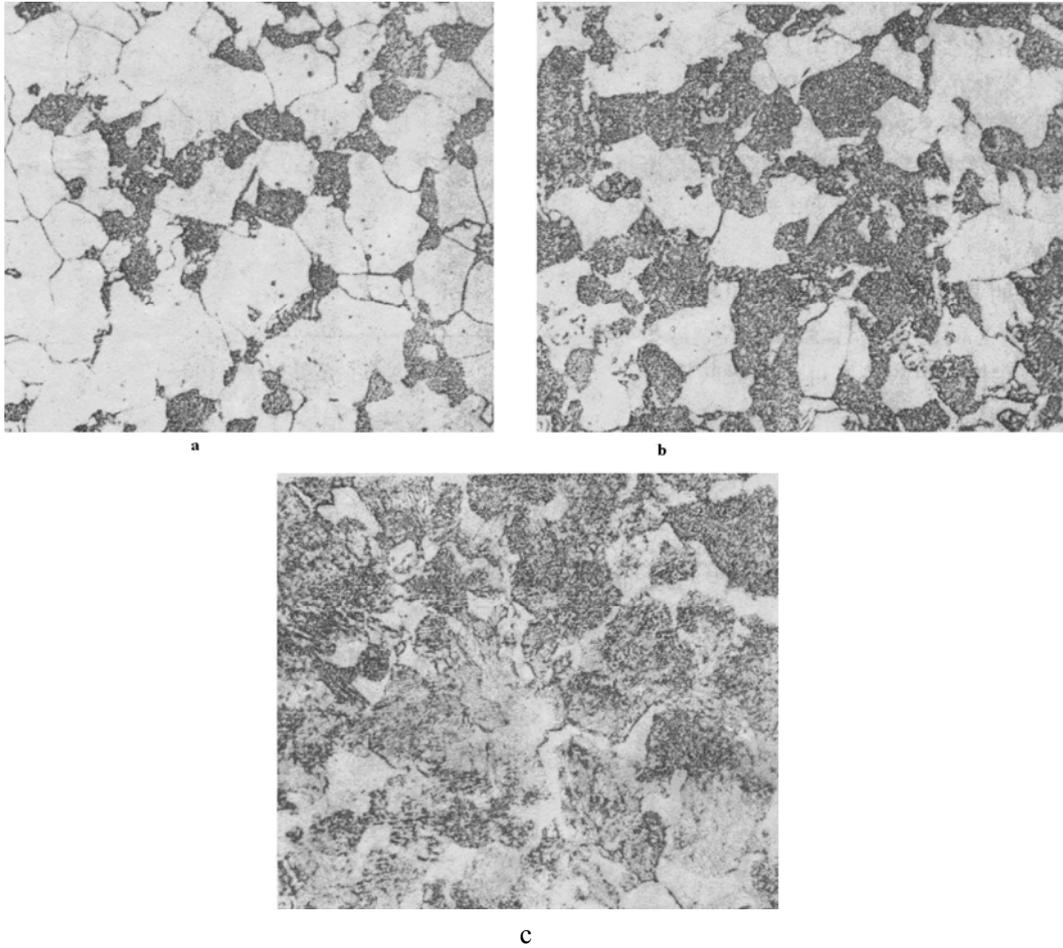


图 4-5 亚共析钢的显微组织 500× (a-20 钢, b-40 钢, c-60 钢)

过共析钢成分为 $0.77\% < w_C < 2.11\%$ ，但实用钢的含碳量只到 1.3%，因碳量再高，二次渗碳体量增多，使钢的性能变脆。过共析钢的组织由珠光体及二次渗碳体所组成，二次渗碳体呈网状。碳量愈高，渗碳体网愈多、愈完整。与先共析铁素体网很容易区别，若经硝酸酒精溶液浸蚀后，两者虽均为亮色，但二次渗碳体网要细得多；若用碱性苦味酸钠溶液热浸蚀后，渗碳体变成暗色，铁素体仍为亮色。经不同方法浸蚀后的 T12 钢组织见图 4-6a、b。

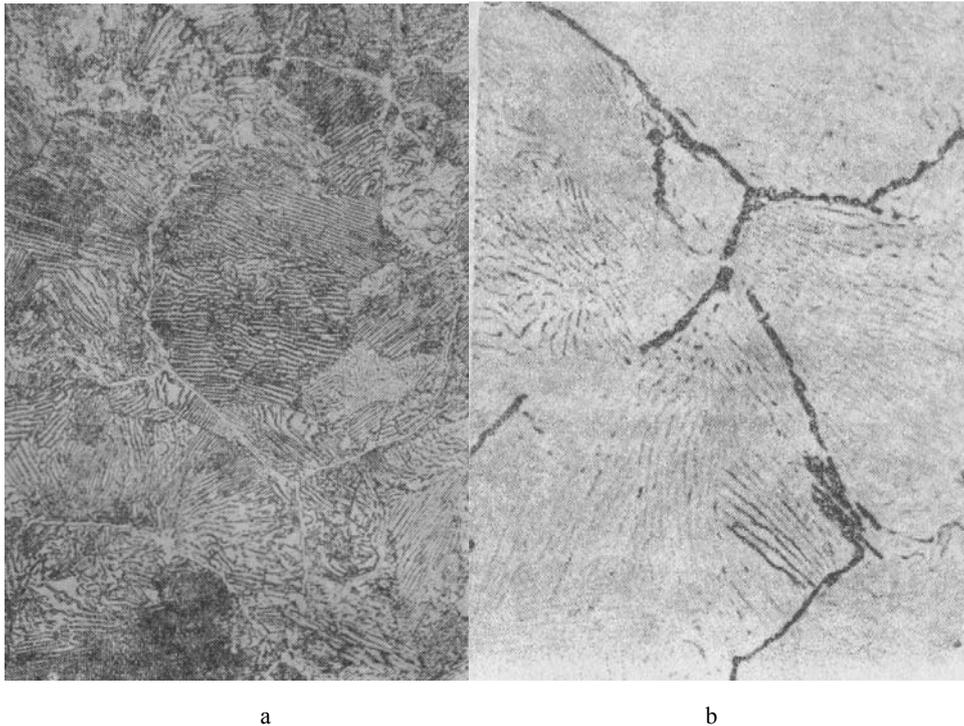


图 4-6 不同方法浸蚀后的 T12 钢组织 (a-4%硝酸酒精溶液浸蚀、b-碱性苦味酸钠溶液热浸蚀。)

3、白口铸铁

共晶白口铁 ($w_C=4.3\%$) 合金由液态冷却到 1148°C ，全部发生共晶反应



所得产物称莱氏体 (Ld)，呈豹皮状，其中奥氏体呈短棒或、条状分布在渗碳体基体上。在以后继续冷却的过程中，只有奥氏体原地发生转变，先析出二次渗碳体，后在 727°C 形成珠光体。沿奥氏体边界析出的二次渗碳体，常与共晶渗碳体连成一片不易分辨。室温共晶体是由奥氏体转变来的二次渗碳体、珠光体及原共晶渗碳体所组成。称为变态莱氏体 (Ld')。所谓变态的实质是指共晶内部组成物 (合金相) 改变，并非形貌改观，在显微镜下观察变态莱氏体仍呈豹皮状。见图 4-7a。

亚共晶白口铁 ($w_C=2.11\% \sim 4.3\%$) 合金凝固时先析出初生奥氏体，呈树枝状，剩余液体在 1148°C 发生共晶反应得到莱氏体。继续冷却时初生奥氏体及共晶体中的奥氏体各在原地发生相同的转变，即先析出二次渗碳体，后形成珠光体，室温组织是由初生奥氏体转变所得二次渗碳体加珠光体 ($Fe_3C_{II} + P$) 及变态莱氏体 Ld' 所组成；见图 4-7b。

过共晶白口铁 ($w_C=4.3\% \sim 6.69\%$) 的组织为粗大片状的一次渗碳体加变态莱氏体 ($Fe_3C_I + Ld'$)，见图 4-7c。

三、实验内容及步骤

1. 讨论 Fe-Fe₃C 相图

- 1) 分析各相及组织组成物的本质。
 - 2) 分析不同含碳量的铁碳合金的凝固过程，室温组织及其形貌特征。
 - 3) 总结铁碳合金的组织，性能与含碳量的关系。
- 2、观察、分析并画出工业纯铁，不同碳钢及白口铸铁的组织示意图。

四、材料及设备

- 1) 表 4-1 所列的金相试样 2 套，并附电子金相照片。
- 2) 金相显微镜和数码显微互动图像分析系统 36 台套。

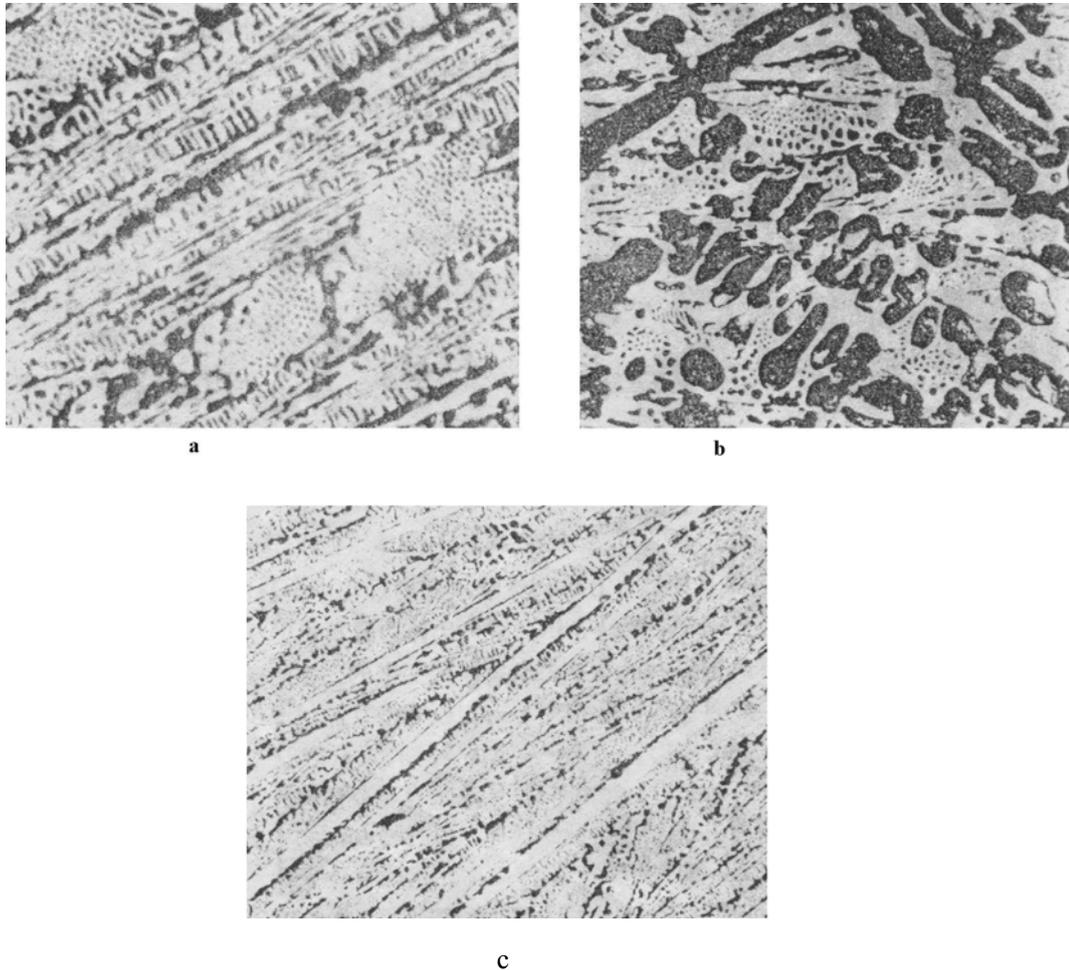


图 4-7 白口铸铁的显微组织 (a-共晶, b-亚共晶, c 过共晶) 400×

表 4-1 本实验所观察的合金

序号	类别	合金牌号	碳含量 $w_C/\%$	浸蚀剂	显微组织
1	工业纯铁		0.01	4%硝酸酒精溶液	F+Fe ₃ C _{III}
2		20	0.2	4%硝酸酒精溶液	F+P
3	亚共析钢	40	0.4	4%硝酸酒精溶液	F+P
4		60	0.6	4%硝酸酒精溶液	F+P
5	共析钢	T8	0.8	4%硝酸酒精溶液	P
6	过共析钢	T12	1.2	4%硝酸酒精溶液	P+ Fe ₃ C _{II}
		T12	1.2	碱性苦味酸钠溶液	P+ Fe ₃ C _{II}
7	亚共晶白口铸铁		3.0	4%硝酸酒精溶液	Ld'+P+ Fe ₃ C _{II}
8	共晶白口铸铁		4.3	4%硝酸酒精溶液	Ld'
9	过共晶白口铸铁		5.0	4%硝酸酒精溶液	Ld'+ Fe ₃ C _I

五、实验报告要求

- 1、列表说明铁碳相图中各个相的本质、晶体结构、碳含量、形成条件和形态等不同点。
- 2、画出所观察合金的显微组织示意图并加以注解。
- 3、分析 20 钢及亚共晶白口铁的平衡结晶过程。
- 4、总结碳含量变化对亚共析钢组织和性能的影响变化规律。
- 5、总结碳钢和白口铸铁中各种组织组成物的本质和形态特征。
- 6、如何用金相法来鉴别 F 和 Fe_3C 。
- 7、说明为什么用 P 的相对面积估算钢的碳含量只能用于亚共析钢？

实验五 三元合金显微组织分析

一、实验目的

学习利用三元相图分析不同合金平衡凝固过程，并掌握其显微组织特征。

二、原理概述

三元相图是研究三元合金成分，组织和性能之间关系的理论依据。利用三元相图的投影图可分析合金的凝固过程，并得知合金应具有显微组织。

本实验以 Pb-Sn-Bi 三元相图为例，分析不同成分合金的凝固过程及显微组织特征。

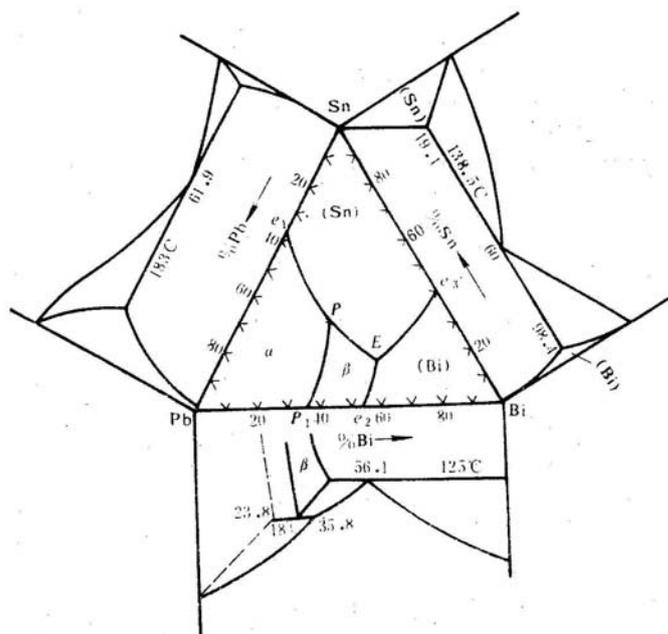


图 5-1 Pb-Sn-Bi 三元相图液相面的投影图

图 5-1 为 Pb-Sn-Bi 三元相图液相面的投影图，相应的二元相图也在图上展开。图 5-1 中，有 4 种初生晶体的液相面，其在浓度三角形上的投影列于表 5-1。

表 5-1 初生晶体液相面的投影范围

初生晶体	液相面投影
α (Pb 基固溶体)	$e_1P_1P_2Pe_1$
β (BiPb ₃ 基固溶体)	$P_1e_2EPP_1$
Bi (固溶度忽略不计)	$Bi e_3Ee_2Bi$
Sn (固溶度忽略不计)	Sne_1PEe_3Sn

Pb-Sn-Bi 三元系合金凝固时所具有的反应类型见表 8-2。

四相平衡共晶反应面为整个合金系固相面的一部分，若不计各相的固溶度使问题简化，则 Pb-Sn-Bi 三元相图固相面的投影见图 5-2 中的细实线。图中另一部分主要的固相面应为四相平衡包共晶反应后，由三个固相组成的三角形面。

表 5-2 三相和四相平衡反应

反应类型	液相成分变化线或点	反应式
三相平衡共晶反应	e_1P	$L \rightarrow Sn + \alpha$
	PE	$L \rightarrow \beta + Sn$
	e_2E	$L \rightarrow \beta + Bi$
	e_3E	$L \rightarrow Bi + Sn$
三相平衡包晶反应	P_1P	$L + \alpha \rightarrow \beta$
四相平衡包共晶反应	P	$L + \alpha \rightarrow \beta + Sn$
四相平衡共晶反应	E	$L \rightarrow Bi + Sn + \beta$

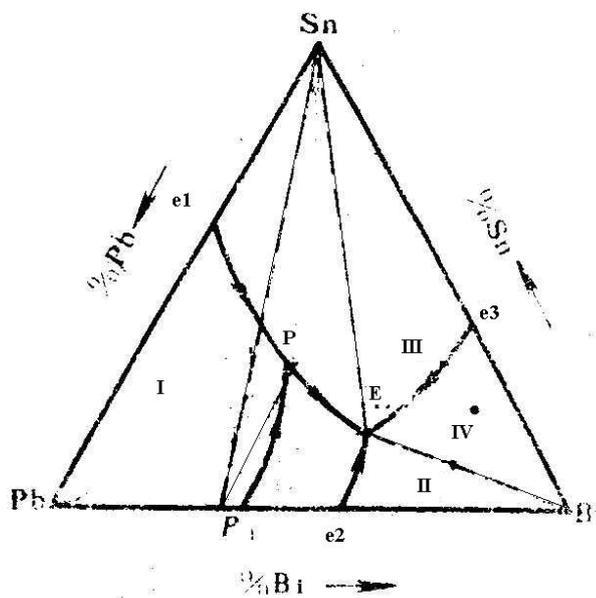


图 5-2 Pb-Sn-Bi 三元系相图投影图示意图

现举例说明如何利用投影图分析合金的凝固过程和组织:

合金 I:

如合金 I 的成分恰为 E 点, 则合金液体冷却到 96°C 时, 直接发生四相平衡共晶反应, 并以此结晶终了, 所得组织为 $(Bi + Sn + \beta)$ 三相共晶体, 见图 5-3a。由于凝固温度低, 此三相共晶体组织细密。经 5% 醋酸水溶液浸蚀后, 在高倍 (500 倍) 放大时, 可看出其中 Bi 呈亮色, β 相为黑色, Sn 显褐色。若放大倍数低, 或浸蚀太深则 Sn 和 β 相将难以区分。

合金 II:

合金 II 位于初生晶体 Bi 的液相面内并落在 BiE 线上, 故凝固时首先结晶出初生晶体 Bi, 随着温度的降低不断结晶出 Bi 晶体的同时, 液相成分将沿 Bi II 线的延长线变化。因合金成分点落在四相平衡共晶反应面范围内, 故液相成分将变至 E 点。结晶过程将以四相平衡共晶反应告终, 所得组织为初生 Bi 加三相共晶体 $(Bi + Sn + \beta)$ 。初生晶体 Bi 具有规则的外形。见图 5-3b。

合金 III:

成分点位于 e_3E 线上的合金 III。一开始就结晶出两相共晶体 $(Bi + Sn)$, 随着温度的降低, 液相成分沿 $\sim F$ 线变化, 并不断结晶出 $(Bi + Sn)$ 共晶体, 因合金成分点也

位于四相平衡共晶反应面上，故也以此反应结束其结晶过程。所得组织为两相共晶体（Bi+Sn）加三相共晶体（Bi+Sn+β），见图 5-3c。由于两相共晶体的形成温度范围较高，故其组织较三相共晶体粗大。由图 5-3c 中可以看出，两相共晶体（Bi+Sn）呈小片层状，它是以亮色的 Bi 为基体，其上分布着暗色的不规则的小条状 Sn。

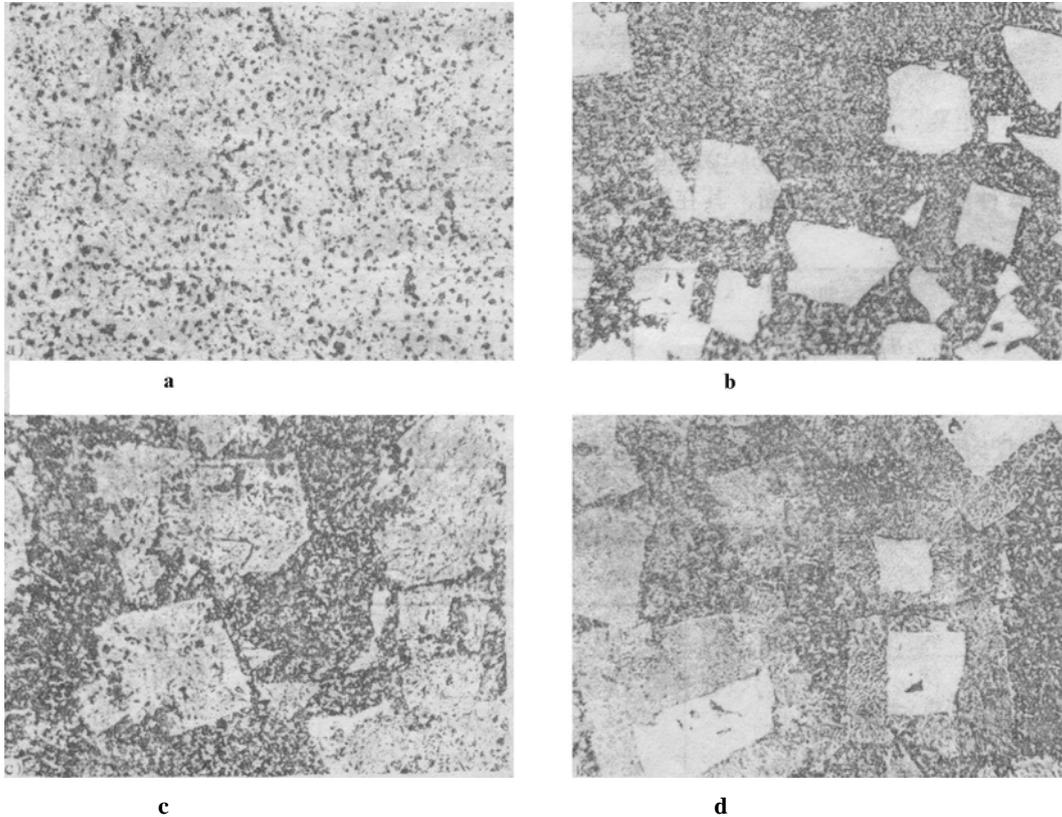


图 5-3 Pb-Sn-Bi 三元的显微组织

- a) 32%Pb, 17%Sn, 51%Bi, (Bi+Sn+β) 100×
 b) 25%Pb, 15%Sn, 60%Bi, Bi+ (Bi+Sn+β), 40×
 c) 10%Pb, 32%Sn, 58%Bi Bi+Sn, (Bi+Sn) + (Bi+Sn+β), 40×
 d) 7%Pb, 28%Sn, 67%Bi, Bi+ (Bi+Sn) + (Bi+Sn+β), 40×

合金IV:

合金IV位于初生晶体 Bi 的液相面内，首先结晶出 Bi 晶体，忽略 Bi 的固溶度，则液相成分将沿 Bi 点与合金成分点IV的连线的延长线变化，当此延长线与 e_3E 相交。则结晶出 (Bi+Sn) 两相共晶体。若 Bi 点与合金成分点连线的延长线与 e_2E 相交，则降温时将结晶出 (β+Bi) 两相共晶体。因此能得到哪种两相共晶体，决定于合金成分点的具体位置。最后若要确定此合金组织中是否有三相共晶体，只需视此合金成分点是否落入四相平衡共晶反应面上。合金IV凝固后的组织为初生晶体 Bi 加两相共晶体 (Bi+Sn) 和三相共晶体 (Bi+Sn+β)、其显微组织特征如图 5-3d 所示。

三、实验内容及步骤

- 1) 根据 Pb-Sn-Bi 三元相图的投影图，独立思考，分析所给合金的凝固过程及应具有显微组织。
- 2) 仔细观察分析所给合金的显微组织特征，画出示意图、并加以注解。

- 3) 利用大张组织照片或投影仪讨论总结所观察合金的凝固过程和组织。

四、材料及设备

- 1) 选定实验用的合金用试样 2 套和电子图片 1 套供组织分析用。
- 2) 金相显微镜和数码显微互动图像分析系统 36 台套。

五、报告重点要求

- 1) 绘出所观察合金的冷却曲线，分析其组织形成过程。
- 2) 画出各合金的显微组织示意图，注意示出其组织组成物的相对量和特征。

实验六 结晶及晶体生长形态、铸锭组织观察

一、实验目的

- 1) 认识结晶的基本过程。
- 2) 了解晶体生长形态及不同结晶条件对晶粒大小的影响。
- 3) 认识浇铸条件对铸锭宏观组织的影响。

二、原理概述

(一) 结晶的基本过程

结晶是由形核和核长大两个基本过程所组成。认识并掌握其规律，从而控制结晶过程，是很重要的。观察一些盐类的结晶，能给人深刻的印象，有助于了解金属的结晶过程。

将适量的质量分数为 25~30% 的氯化铵水溶液倒入培养皿中，由于溶液降温和水蒸发不断结晶出氯化铵。连续拍摄此结晶过程的照片(见图 6-1)。图 6-2 为 H_2O-NH_4Cl 的二元相图。由图 6-1 可知，在第一批晶核形成随之长大的同时，又出现许多新的晶核并长大。因此整个液体的结晶就是不断形成晶核和晶核不断长大的过程。由各晶核长成的不同晶粒未相互接触前都能自由生长，清楚地显示出各自的外形；一旦相遇，则互相妨碍生长，直至液相消失，各晶粒完全接触，在晶粒之间形成分界线即晶界。

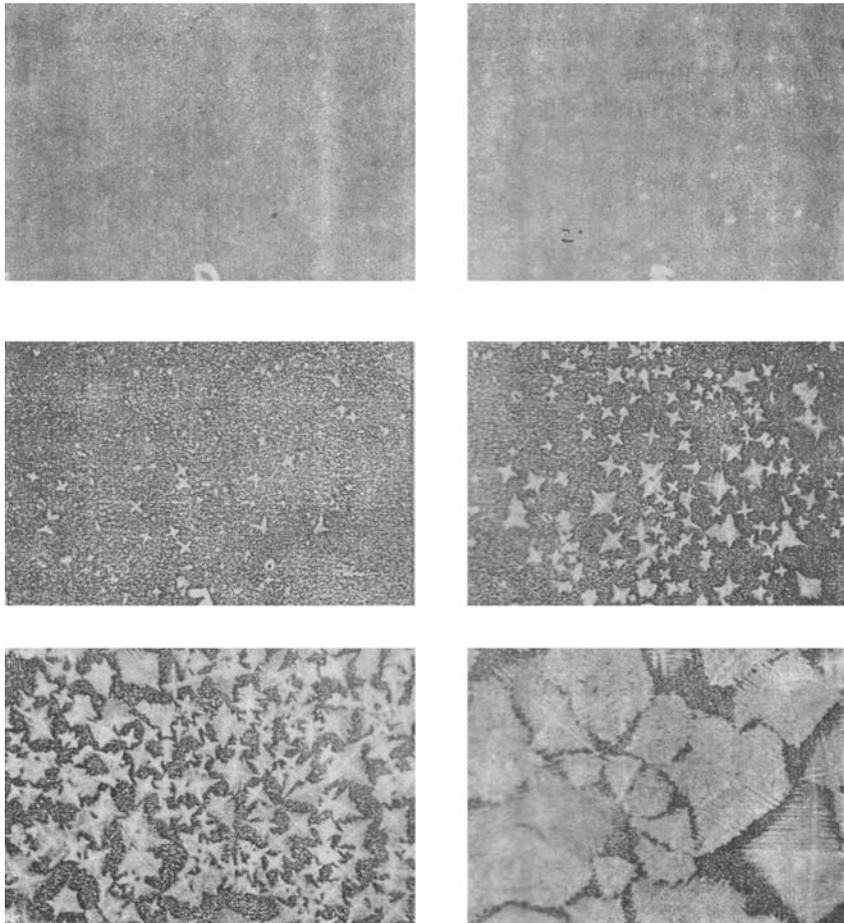


图 6-1 氯化铵水溶液的结晶过程图 (1)



图 6-1 氯化铵水溶液的结晶过程图 (2)

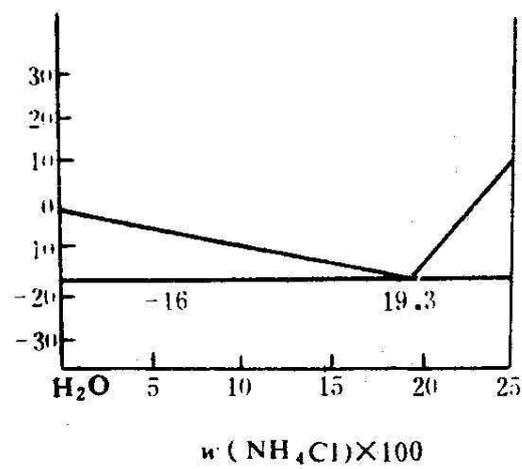


图 6-2 $\text{H}_2\text{O}-\text{NH}_4\text{Cl}$ 的二元相图

另外，硝酸银水溶液与细铜丝发生还原反应，可以观察到反应产物黑色银颗粒在细铜丝以松枝状形态结晶。

(二) 晶体生长形态

1、成分过冷

固溶体合金结晶时，在液-固界面前沿的液相中有溶质聚集，引起界面前沿液相熔点的变化。在液相的实际温度分布低于该熔点变化曲线的区域内形成过冷。这种由于液相成分变化与实际温度分布共同决定的过冷，称为成分过冷。根据理论计算，形成成分过冷区的条件是：

$$\frac{G}{R} < \frac{mC_0}{D} \left(\frac{1-k_0}{k_0} \right)$$

式中，G 为液相中自液-固界面开始的温度梯度；R 为凝固速度；m 表示相图上液相线的斜率；C₀ 为合金的原始成分；D 为液相中溶质的扩散系数；k₀ 为平衡分配系数，合金的成分、液相中的温度梯度和凝固速度是影响成分过冷的主要因素。高纯物质在正的温度梯度下结晶时为平面状生长；在负的温度梯度下呈树枝状生长。固溶体合金或纯金属含微量杂质时，即使在正的温度梯度下也会因有成分过冷而呈树枝状或胞状生长，晶体的生长形态与成分过冷区的大小有密切的关系，当成分过冷区较窄时形成胞状晶；当成分过冷区足够大时形成树枝晶。

2. 树枝晶

观察氯化铵的结晶过程，可清楚地看到树枝晶生长时各次轴的形成和长大，最后每个枝晶形成一个晶粒。根据各晶粒主轴的指向不一致，可知它们有不同的位向。

氯化铵水溶液在培养皿中结晶时，只能显示出树枝晶的平面生长形态。若能将适量的溶液倒入小烧杯中观察其结晶过程，则可见到树枝晶生长的立体形貌，特别是那些从溶液表面向下生长的枝晶，犹如一颗颗倒立的塔松，不过要注意的是一旦枝晶长得过大，则将落入烧杯底部，难以再看清楚。

若将溶液倒入试管中观察其结晶过程，则可根据先结晶的小晶体的漂移方向、看出管内液体的对流情况。

结晶时的冷却速度增大，可得细晶粒组织。如将盛有氯化氨水溶液的培养皿放在冰块上冷却与放在空气中冷却相比较，则前者结晶所需时间短，晶粒更细；若向溶液中加入能起非自发核心作用的物质，亦可增加核心数，使晶粒细化。

3、胞状晶

合金凝固时常出现成分过冷、当液-固界面前沿的成分过冷区较窄时，固相表面上偶然的凸起，不可能向更远的液相中延伸，因此界面不能伸展呈树枝状，而只能形成一些突起的曲面，称为胞状界面。用倾倒法可显示这种晶体以胞状生长的界面形态。例如将 Sn-0.05%Pb 合金加热熔化，升温至 550℃，浇入预热到 100℃的金属模中，待其凝固短时间（约 3s）后，将剩余液体倒掉，选取较平整的一小块液-固界面，在显微镜下观察，即可看出胞状界面（见图 6-3a）。若沿铸锭纵向剖开，经磨制抛光，用 4%硝酸酒精溶液浸蚀后可观察到胞状晶体的纵向形态（见图 6-3b）。

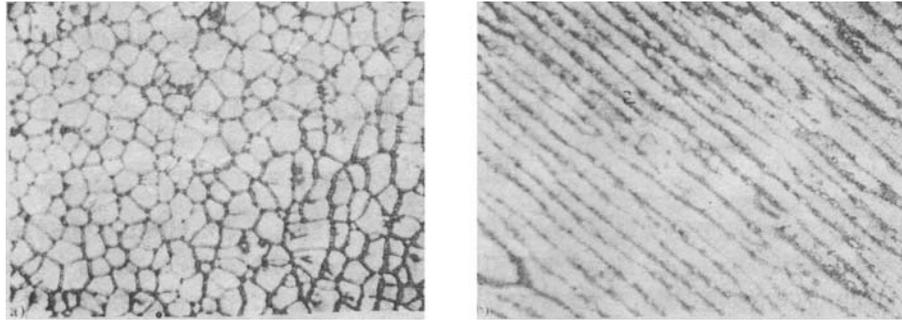


图 6-3 Sn-0.05%Pb 合金的胞状组织 (a—横向 b—纵向)

(三) 过冷度

金属结晶时需要过冷，以提供相变的驱动力。因此金属实际开始结晶的温度低于其熔点，两者之差称为过冷度。同种金属结晶时的过冷度随冷却速度的增加而增大。过冷度愈大，所得晶粒愈细小；如将锡熔化后，分别在炉内与空气中冷却结晶，记录冷却时温度随时间的变化值，绘制冷却曲线，即可得知空冷时的过冷度比炉冷时的大。

(四) 铸锭宏观组织

金属材料性能的优劣、首先取决于能否获得优质的铸锭，故对铸锭组织要进行控制和检验。铸锭的宏观组织一般包括三个晶区，即由于激冷形成的表层细晶区，迎着散热方向生长的柱状晶区，和均匀散热形成的位向各异的中心等轴晶区。浇铸条件不同时各区的尺寸及晶粒粗细均不一样，见图 6-4。如加大冷速和散热的方向性，有利于柱状晶区的发展；减慢冷速，增加散热的均匀性，有利于扩大等轴晶区，各区有着不同的性能特点：如柱状晶区纯度高，平行柱晶纵向的性能优于垂直方向的性能，柱状晶交界处为脆弱面，热加工时易开裂；等轴晶区性能无方向性，当杂质、疏松少时，结晶致密，宜于压力加工。故除了对塑性很好的材料允许柱状晶区较宽外，一般均要限制柱状区的宽度不超过规定值。

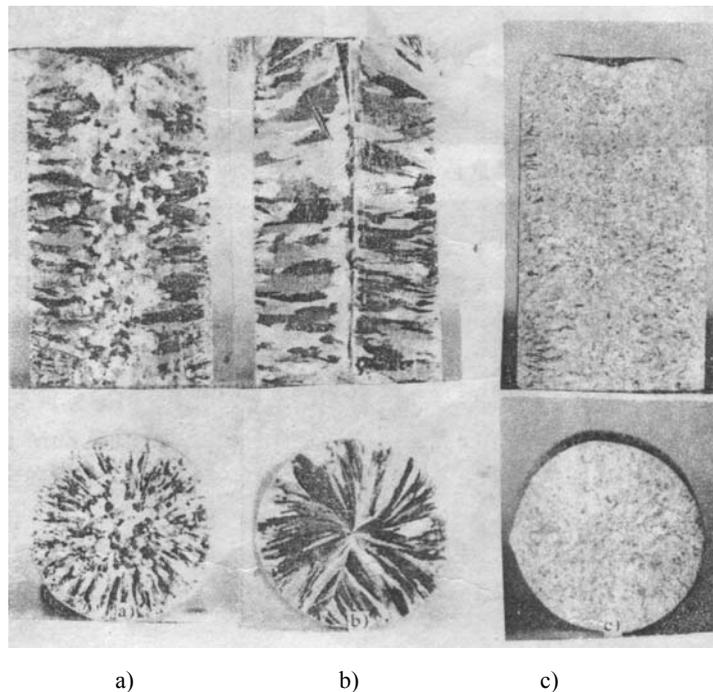


图 6-4 不同浇铸条件下铝锭的宏观组织

a) 680℃ 浇铸， 3mm 厚铁模 b) 800℃ 浇铸， 10mm 厚铁模 c) 680℃ 浇铸， 10mm 厚铁模加硅铁粉

三、实验内容

- 1、观察质量分数为 25~30% NH_4Cl 水溶液在培养皿中空冷的结晶过程及晶体生长形态。
- 2、观察硝酸银水溶液与细铜丝发生还原反应产物结晶过程及晶体生长形态。
- 3、观察不同浇铸条件对铝铸锭宏观组织的影响。

四、材料及设备

- 1) 配制好的质量分数为 25~30% 的氯化氨水溶液和饱和硝酸银水溶液。
- 2) 培养皿、滴管和细铜丝若干。
- 3) 不同浇铸条件下的铝铸锭若干。
- 4) 偏光显微镜 1 台。

五、实验步骤

- (一) 观察并描绘质量分数为 25~30% 的氯化铵水溶液的结晶过程和晶体生长形态。
 - 1) 将适量的氯化铵水溶液倒入培养皿中，注意勿摇动培养皿，置于显微镜下调好焦距，观察首批小晶体的出现。
 - 2) 观察小晶体长大并又出现新的小晶体的情况。
 - 3) 注意各晶体长大的形态，即树枝晶的形成，各次轴的长大。
 - 4) 长大的晶体相遇后在其交界处形成晶界，注意观察各晶粒位向的不同。
- (二) 观察并描绘饱和硝酸银水溶液与铜丝反应产物的结晶过程和晶体生长形态。
 - 1) 将适量的硝酸银水溶液倒入培养皿中，注意勿摇动培养皿，置于显微镜下调好焦距观察首批小晶体在铜丝表面的出现。
 - 2) 观察小晶体长大并又出现新的小晶体的情况。
 - 3) 注意各晶体长大的形态，即树枝晶的形成、各次轴的长大。
- (三) 观察不同浇铸条件下的铝铸锭横截面宏观组织

六、实验报告要求

- 1) 画出氯化氨水溶液在空气中冷却的结晶过程示意图，并加以说明。
- 2) 画出描绘饱和硝酸银水溶液与铜丝反应产物的结晶过程示意图。
- 3) 分析说明浇铸条件对铝铸锭宏观组织的影响。

实验七 金属的塑性变形与再结晶

一、实验目的

- 1) 了解滑移带、变形孪晶与退火孪晶的金相形貌；
- 2) 了解冷变形对金属组织和性能的影响；
- 3) 了解加热温度对冷变形金属组织和性能的影响；
- 4) 了解变形量对再结晶后晶粒大小的影响。

二、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、孪生两种，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 7-1 所示。

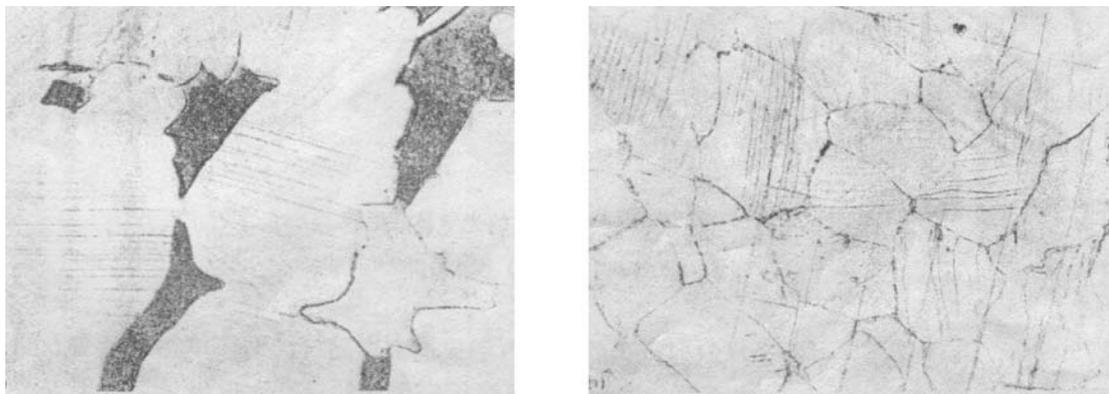


图 7-1 滑移带的光学显微形貌

(a) 黄铜的滑移带

(b) 纯铁的滑移带

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，故只能借助晶的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。在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 7-2a 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也容易产生变形孪晶，其形貌如图 7-2b 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，在孪生面两侧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 9-3 所示。

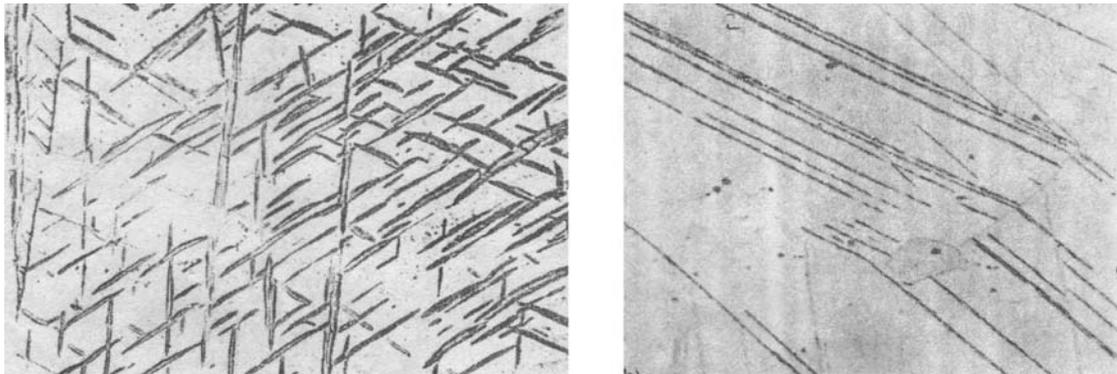


图 7-2 变形孪晶的光学显微形貌

(a) 锌的孪晶

(b) 纯铁的孪晶

(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完全不同，如图 7-4 所示。两条直线互相平行，表明它们属于共格晶界。

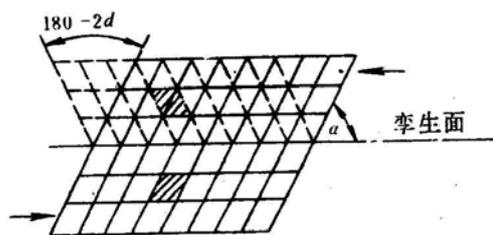


图 7-3 孪生变形示意图



图 7-4 纯铜的退火孪晶

2、冷加工对金属组织和力学性能的影响

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。当变形量大到一定程度时，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 7-5 所示。

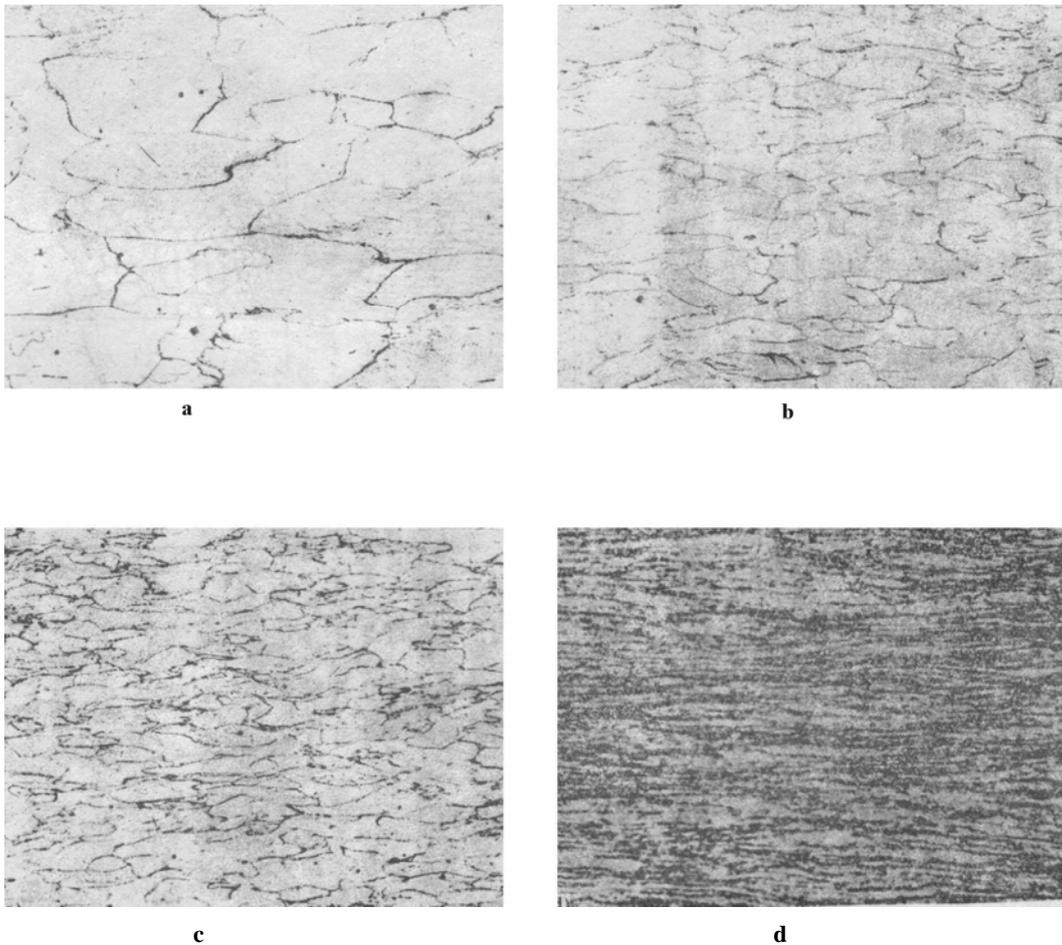


图 7-5 工业纯铁经不同程度变形后的组织
a) 20% b) 40% c) 60% d) 70%

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绕在一起；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，胞状亚结构的尺寸越细小。

金属的塑性变形所造成的内部组织变化必然导致某些性能的改变。大量实践证明，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；位错缠绕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，其变化过程人为分为回复、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 7-6 所示。

由图可见，当加热温度低于再结晶温度时，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。当被拉长的变形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的组织如图 7-7 所示。

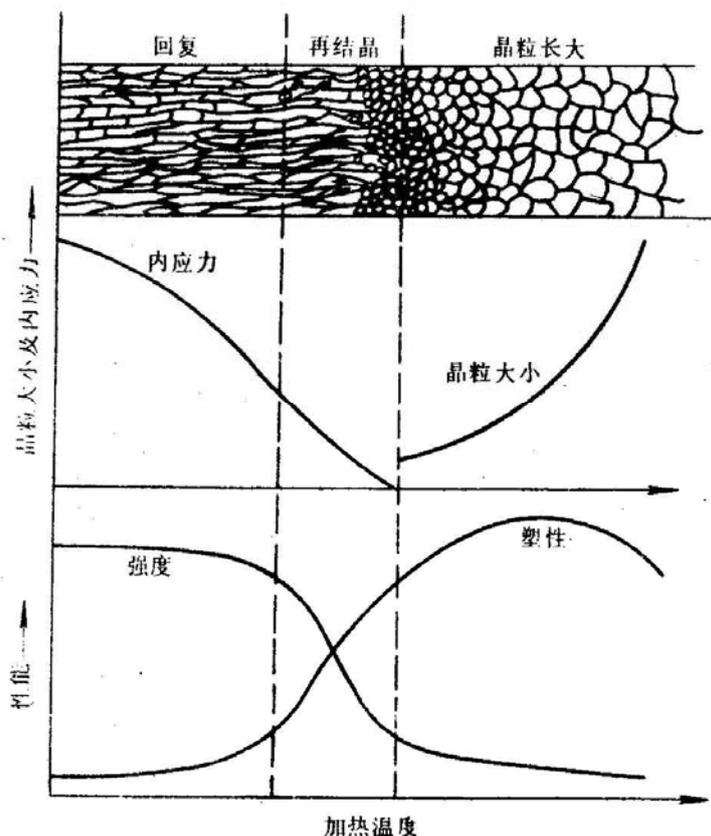


图 7-6 变形金属在加热过程中组织和性能变化示意图

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 7-8 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状态（图 9-8a）。当达到某一变形量时，再结晶后的晶粒特别粗大（图 7-8b）。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 7-8c、d、e 所示。

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%；钢约为 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。

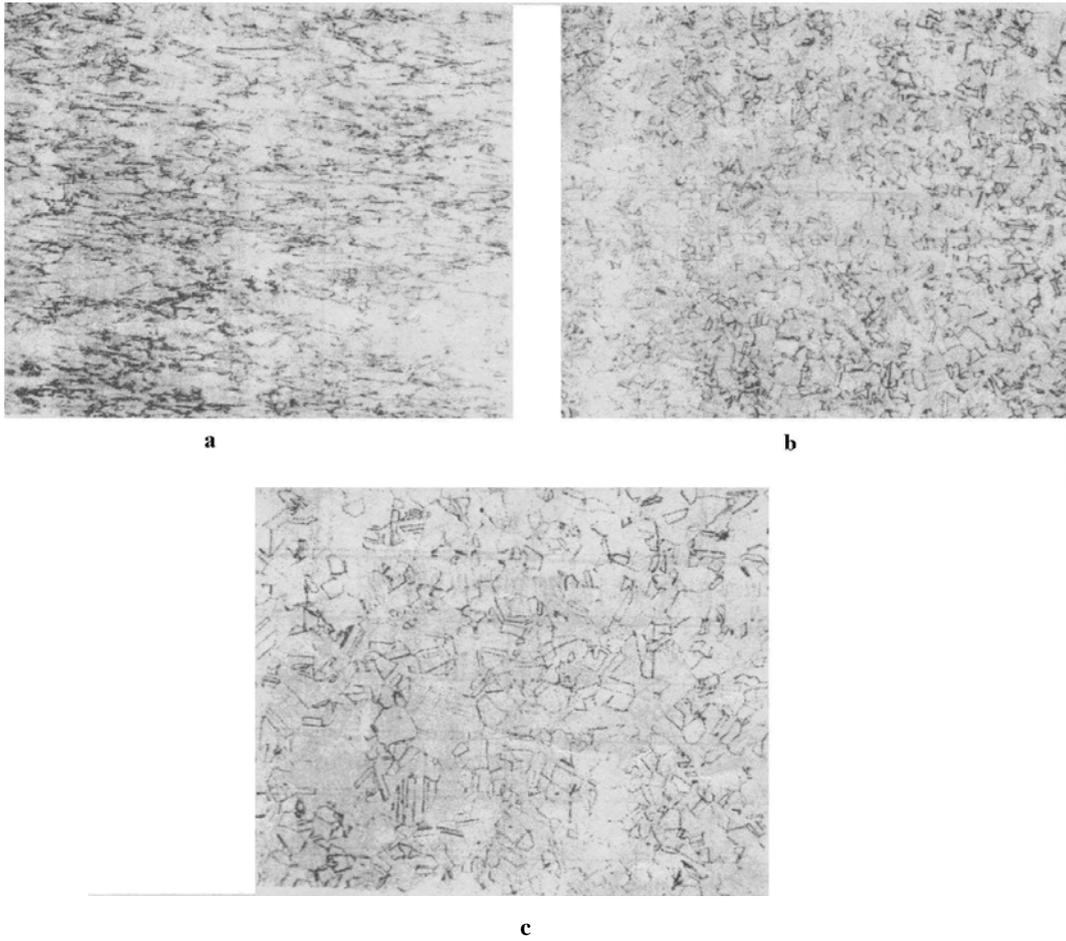


图 7-7 变形量 50% 的纯铜经不同温度退火的显微组织变化
a) 300°C b) 500°C c) 600°C, 加热时间: 30min

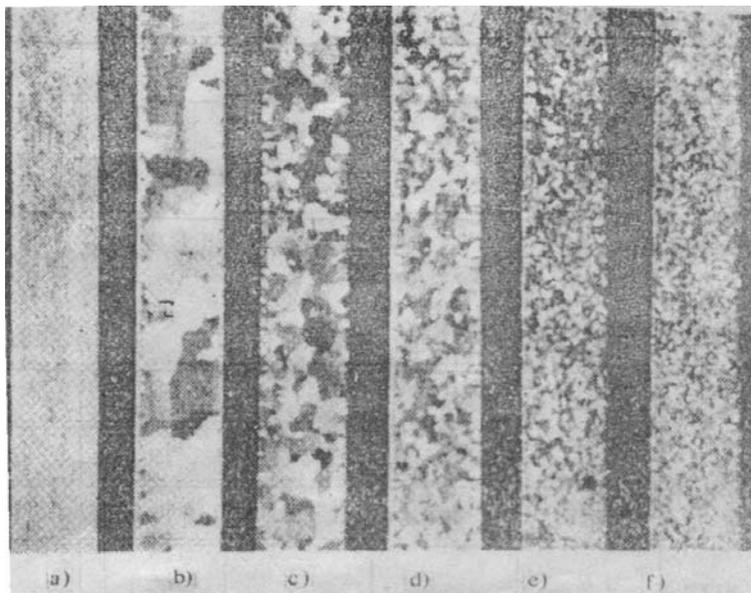


图 7-8 不同变形量对纯铝片再结晶晶粒大小的影响
a) 2% b) 3% c) 6% d) 9% e) 12% f) 15%

三、实验内容及步骤

- 1、观察不同金属和不同变形方式、不同变形量的形变组织
- 2、铝片拉伸、退火，浸蚀并观察晶粒大小

将退火状态的长约 150mm，宽约 20mm，厚约 0.5~0.8mm 的铝片，在小型拉伸机上拉伸，使其变形量分别为 2%、3%、6%、9%、12%。然后在 550℃加热炉内保温 40 分钟，出炉空冷至室温后浸蚀，当表面显出清晰的晶粒时立即取出用水冲洗并吹干。观察并分析变形量对其退火组织晶粒大小的影响。

四、材料及设备

1. 材料
 - 1) 不同变形量的工业纯铁（或低碳钢）金相试样一套；
 - 2) 同一变形量不同温度下退火的金相试样一套；
 - 3) 观察滑移带、变形孪晶和退火孪晶的试样一套；
 - 4) 退火状态的长约 150mm，宽约 20mm，厚约 0.5~0.8mm 的纯铝片 40 片/班。
- 5) 铝片浸蚀剂

配方	HCl/%	HNO ₃ /%	HF/%	H ₂ O/%
1	60	30	5	5
2	45	15	15	25
3	50	50		

以上三种浸蚀剂，可从中任选一种。

2. 设备
 - 1) 金相显微镜和数码显微互动图像分析系统 36 台套。
 - 2) 小型拉伸机 1 台；
 - 3) 加热炉（装有热电偶和控温仪表）1 台套；
 - 4) 吹风机 3 个

五、实验报告要求

- 1) 实验目的
- 2) 绘制滑移带、变形孪晶、退火孪晶以及不同变形量的工业纯铁（或纯铜、低碳钢）组织图，并说明其形态特征。
- 3) 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。
- 4) 根据实验结果绘出“铝片的晶粒大小-变形量”关系曲线示意图，并找出临界变形度。