

《机械工程基础实验》

实 验 指 导 书

工程材料实验

铁碳合金及常用铸铁的定量金相显微分析实验

钢经热处理后不平衡组织的显微分析实验

浙江大学机械工程实验教学中心

2024 年 9 月

实验一 铁碳合金及常用铸铁的定量金相显微分析实验

一、实验辅助知识

1、金相显微分析实验基本知识

用金相显微镜（在倍率为 $100\times\sim 2000\times$ 的范围内）观察、研究和分析金属及合金内部组织的方法称为金相显微分析法。在金相显微镜下观察到的金属及合金内部形貌称为显微组织。金相显微分析是研究金属材料微观组织结构最基本的一种实验技术，也是目前生产中检验的主要方法之一。

金相显微分析可以研究金属和合金的内部组织及其与化学成分的关系；可以确定各种金属和合金经不同加工和热处理后的组织；可检验金属和合金中非金属夹杂物与缺陷的数量和分布状况以及可以测定金属和合金内部晶粒的大小。

要想观察到金属与合金真实的、清晰的显微组织，首先要把金属材料制备成符合一定要求的金相试样，其次是正确掌握金相显微镜的使用。

1. 金相试样

制备好的合格金相试样应当是：组织有代表性；无假象、要真实（如表面无变形层、制备过程中无组织变化、夹杂物与石墨等无脱落）；表面无磨痕、麻点或锈斑与水迹等。

金相试样的制备包括取样、制成光亮平整的镜面和浸蚀等几个步骤。

（1）取样

金相试样的取样应考虑截取部位、切取的方法、检验面的选择、试样大小及试样是否要装夹或镶嵌。

截取金相试样的部位必须根据检验的目的，能表征被检验材料或零件的特点。如对事故进行分析，应在零件的破损部位截取，同时也应在远离破损处截取一参数性试样，以资比较；各种材料经过的工艺过程或处理情况不同，截取试样的部位也应随着变化（如表面与中心、纵剖面与横截面）等。

截取试样时必须采取最合适的方法，尽量避免因截割不当而引起内部组织的变化。

金相试样的大小，较合适的尺寸是 $\varnothing 10\sim 15\times 12\sim 15\text{mm}$ 的圆柱体或边长为 $12\times 12\text{mm}$ 的正方体。对于形状特殊或尺寸细小的试样（如线材、薄板、切屑、锤击碎片等）可进行镶嵌或机械装夹等。图 1-1 为金相试样的镶嵌和装夹方法示意图。

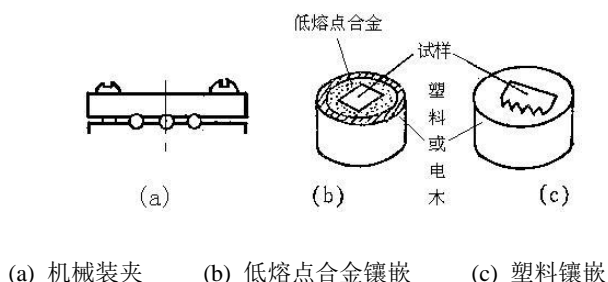


图 1-1 金相试样的镶嵌和装夹方法

（2）制成平整光亮的镜面

为了使试样的观察表面是平整光亮的镜面，可采用磨制和抛光（有机械抛光、电解抛光和化学抛光等三种方法）来获得。

光亮的镜面在金相显微镜下观察，只能看到一片白亮，也可观察材料内部的某些夹杂物。如石墨、微裂纹、孔洞等，一般看不到内部的组织形貌。

（3）浸蚀

要观察到金属和合金的组织，必须采用适当的浸蚀剂对金相试样的表面进行“浸蚀”才能使显

微组织能真实地、充分地、细致地显示出来。

常用的浸蚀方法有化学浸蚀法、电解浸蚀法和着色浸蚀法等多种。

1) 化学浸蚀法

化学浸蚀法主要是利用浸蚀剂对试样表面的化学与电化学作用来浸蚀试样表面的。这是由于各种金属材料各处的化学成分和组织不同，它们的原子排列情况和电极电位不同，故腐蚀的性能不同，造成浸蚀时各处的腐蚀速度不一样，使试样表面上呈现出微观的凹凸不平，在垂直光线的照射下，使得光的反射程度不同，因而在金相显微镜下就能观察到试样表面各处的亮暗程度不同，依此鉴别材料内部的组织。

在单相合金中，由于晶界上原子排列较不规则，具有较高的能量，所以晶界较易浸蚀，而成凹沟，对投射的光线发生漫反射。故在金相显微镜下看到黑色的晶界，如图 1-2(a)所示；同时由于各个晶粒内部原子排列的位向不同，引起腐蚀性能不一样，浸蚀后会有轻微的凹凸不平，则在金相显微镜下观察到明暗不同的晶粒，如图 1-2(b)所示。

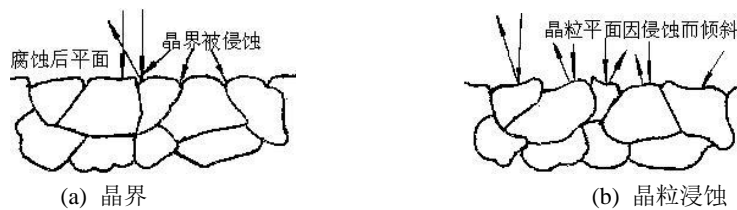


图 1-2 纯金属和单相金属浸蚀后的示意图

对于两相或两相以上的合金，由于其各组成相具有不同电极电位而引起的电化学腐蚀过程具有负（或低）电位的相被浸蚀而形成凹洼，具有正（或高）电位的相不受浸蚀。

因此在直射光线照射下，凹凸不平的试样表面产生程度不同的反射，放在金相显微镜下能区别不同的组织和组成相。如共析钢平衡状态下的珠光体组织是铁素体基体上分布着层片状的渗碳体；而铁素体具有负电位，渗碳体为正电位，因而在正常浸蚀条件下，铁素体被腐蚀而凹下，渗碳体却未腐蚀。因此在高倍金相显微镜下观察到渗碳体四周有一圈暗线，显示出两相存在，如图 1-3 所示。

常用的浸蚀剂种类很多。应按金属材料的不同和检验目的不同，选择恰当的浸蚀剂。

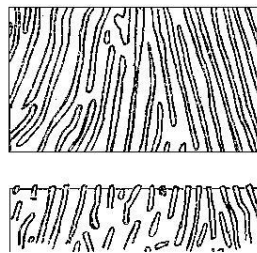


图 1-3 珠光体组织浸蚀后的示意图

常用的浸蚀剂种类很多，应按金属材料的不同和检验目的的不同，选择恰当的浸蚀剂。常用的浸蚀剂见表 1-1 所示。

浸蚀剂不同，显示组织的效果不一样。如 T12 钢退火后的组织，用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀后，渗碳体呈白色网状；用碱性苦味酸钠浸蚀后，渗碳体为棕黑色网状。

表 1-1 常用浸蚀剂

序号	浸蚀剂名称	成分	适用范围	注意事项
1	硝酸酒精溶液	硝酸 1~5ml 酒精 100ml	适用中碳钢、合金结构钢、铸铁的各种状态组织	随硝酸含量增加而浸蚀速度加快
2	苦味酸盐酸酒精溶液	苦味酸 1~5g 盐酸 5ml	适用于淬火和淬回火后钢的组织与晶粒大小	浸蚀时间较长

		酒精 100ml		
3	碱性苦味酸水溶液	苦味酸 2~5g 苛性钠 20~25g 水 100ml	钢中渗碳体呈黑色	加热至 60℃ 时浸蚀 5~30 秒
4	氯化铁盐酸水溶液	氯化铁 5g 盐 酸 5050ml 水 100ml	显示不锈钢、铜及铜合金的组织	浸蚀时间较长
5	王水溶液	盐 酸 3 分 硝 酸 1 分	显示高合金钢，不锈钢的组织	
6	氢氟酸水溶液	氢氟酸 0.5ml 水 100ml	显示铝及铝合金的组织	用棉花沾上浸蚀剂后 擦拭
7	焦亚硫酸试剂	焦亚硫酸钾 3g 氨基磺酸 1~2g 水 100ml	显示铸铁、碳钢、合金钢	使铁素体晶粒着色，碳化物呈白色
8	硒酸试剂	盐酸 2ml 硒酸 0.5ml 酒精 100ml	碳钢和工具钢	碳化物着色成红至蓝，铁素体发亮

2) 着色显示（浸蚀）法

因为合金材料内部的组织，往往是好几种组成相的混合组织，采用普通浸蚀方法难以将它们确切地区分出来，因此发展形成了着色显示法（又称彩色金相法）。着色显示法有热染定、气相沉积法、化学着色法和恒电位浸蚀法等多种。目前应用较多的是化学着色法。

化学着色显示法的基本原理是：试样在特殊的化学着色剂的作用下，主要通过试样表面材料的化学置换反应或沉积，在试样表面形成一层硫化物、氧化物等的薄膜，不同组成相形成膜的厚度不同，在金相显微镜的光线照射下，依靠薄膜干涉而增加各组成相的衬度，并使之具有不同的色彩，从而区别出各个组成相。

2. 金属材料组织的放大

制备好的金相试样，直接用肉眼是看不清材料内部的组织。正常人眼看物体时，最适宜的距离大约在 250 毫米左右，在这距离处能分辨的最小距离约 0.15~0.30mm。而金属材料内部的组织远比此值小，所以必须依靠金相显微镜，把试样放大到一定倍数，以观察金属材料的内部组织。

2、定量显微测量基本知识

材料成分、组织和性能之间定量关系的确定对于材料的研究、生产和使用具有理论指导和实际应用意义。定量金相方法是完成该任务的必要方法之一。即通过先确定材料组织的数量、大小、形状和分布，然后分析组织特征参数与成分或性能之间内在的联系，从而建立它们之间的定量关系。精确测定硬度计试验的压痕尺寸也是定量显微测量的应用之一。

常用的定量金相测量方法有：

1. 比较法

此法是将测量对象与标准图样进行比较以定出金相组织的级别，如晶粒度级别、夹杂物级别、石墨级别等，目前光学金相中的目视评级法属于比较法。比较法所用的标准图片由国家有关部门统一颁布。这种方法简单、快捷、易行，对于判断钢材一般的质量和性能趋势较为有效，在工矿企业中至今仍在沿用。由于测量者的主观因素易带来误差，精确性和再现性差；同时，所得出的金相组织级别在表明组织的量上没有确切的物理概念，所以比较法不属于定量金相，也无法建立宏观性能和微观组织的定量关系。

2. 测量法

测量法主要通过测定组织的某些特征参数并进行计算，得出我们所需的各种数据。它不直接评定金相组织的级别。测量可以通过显微镜在试样的视场中直接进行，也可以在显微照片、投影屏或工业电视的显示屏上进行。显微组织的参数很多，通常只要测量最基本、最易获得、又能够由此推导出其他数据的有关参数，如点、线、面等。常用的测量法有面积法、截线法、计点法和联合测量法。

(1) 面积法

选定视场，其总面积为 A_T ，测量出待测相面积 A_α 。则面积分数 $A_A = A_\alpha / A_T$ ；由此也可以推导出 α 相所占的体积百分比。

关于 A_α 的测量方法，可以在放大的清晰的图片上，用求积仪进行测量，也可以用称重法进行。称重法是假定照相纸的密度均匀一致，在放大的、清晰的图片上，用剪刀把待测相 α 剪下来，用天平称出重量，然后进行运算，则可求得 A_A 。这种方法是最原始的面积计量法，它只适用于相界清晰，易于分割的组织照片。这种方法比较麻烦，也不够精密。

(2) 截线法

在视场中作任意直线（测量线），它与组织中各待测相相交，把落在待测相上的线段长度（截距）相加，得到一个总长度 L_α ，而测量线的总长度是已知的。通过计算： $L_L = L_\alpha / L_T$ ，这样就可以得出线分数等数据。截线法除了用来测量截线长度外，还可以用来测量 P_L ，即在单位测量线上与测量对象界面的交点数；还可以用来测量 N_L ，即在单位测量线上和测量对象相交的数目。

(3) 计点法

用以测量参数 P_P ，以确定所测对象的数目、相对含量等。测试时，经常是用一个固定的网格来进行计点，看看被测对象落在网格交叉点上的数目。网格交叉点的数目是已知的，如36点。取多个视场就能得出点数的总和，再通过一定公式的换算，则可得到所需数据。所取视场越多，测量的点数越多，结果越接近真实值。

在实际应用中，这种网格可以装在目镜中，使其在显微镜的视场上与显微组织迭映并计数，然后移动视场，再进行计数，直到足够数量。另外也可以用带网格的透明塑料板，把它覆在显微组织照片上，数出被测相落在格点上的数目 P_P 。根据基本公式： $V_V = P_P$ ，就可以得出这一种待测相的体积分数。

(4) 联合测量法

它是将截线法和计点法结合起来应用，同时测量 P_L 和 P_P 。该法常常用来测量粒子的体积和表面积比值。

这些方法中所用模板可以放在目镜里，也可刻在透明塑料板上，盖在显微照片上进行分析。

传统的金相定量分析是用人目测，它主要包括几何测量和统计计算两方面，即用一定长度的线条或一定面积的网格，放在需测量的金相图象上，然后对截距或格点进行计数，作统计分析，从而获得定量的结果。这种人工分析法，重现性差、速度慢、效率低、劳动强度大，容易导致工作者的视力疲劳，引起测量和计算误差。另外，金相组织在微观上一般都不大均匀，因而任何一个参数都不能仅仅靠一个视场上的几个测量数据来确定，而需要用统计方法在足够多的视场上进行多次测量才能保证结果的可靠性。因此，用人工的方法进行金相定量分析测量是一件很辛苦的工作，有些甚至因工作量过大而无法进行。

以前市场上出现的半自动、全自动金相分析仪的工作效率可比人工测量提高十几到几十倍。但是，由于金相自动分析仪采用专用的图象分析硬件设备，价格十分昂贵，使得其应用受到了很大的限制。在当前计算机性能/价格比空前提高的情况下，基于图象技术的计算机辅助金相定量分析获得广泛应用。

本实验采用的NK系列金相图象分析系统能进行图象采集、存储、图象处理、多视场测量、显示打印输出以及几十种几何参数的测量。软件可进行晶界提取，晶界重建，单相晶粒度测量（面积

法，截点法），双相晶粒度测量（截距法），非金属夹杂物测量（其中包括硫化物、氧化铝、硫酸盐、球状氧化物的区分测量），珠光体、铁素体含量测量，球墨铸铁石墨球化率测量，奥氏体钢中 α 相测量，铝合金中初晶与共晶硅分析，钛合金材料分析等。

该分析系统应用了多种图象处理技术和数学方法，主要包括三方面：

- （1）图象的数字化和编码，把图象从连续形式变换为离散形式，以进行计算机处理，并尽量节省存储空间和信息容量；
- （2）图象的增强和恢复，即改善图象质量，降低噪声；
- （3）图象的分割和描述，把图象变换成简化“图形”，以进行定量参数测量和性质描述。

在进行数字处理时，图象样本必须首先量化。金相图象的处理、分析和测量都建立在灰度信息的基础上。本系统采集的每幅图象为 512×512 像素，每个像素占用8bit空间。图象卡上的单路A/D模拟转换电路将CCD摄像头输入的视频信号按11~14MHz频率采样后，量化为256级的数字信号。0对应暗，255对应亮。从一幅图象中提取局部图象的常用方法是设置门限，将一定灰度值范围内的图象变成1，范围外的图象变为0，将图象提取出来。某一金相试样的组织在断面内的分布是随机的，但在正确制备试样的基础上，同一相金相组织往往具有相同或相近的灰度值及形状、纹理特征，并且这些特征通常会在不同的金相组织交界处发生急剧的变化。据此，可以采用特定的算法进行图象处理，提取出特征相进行二值化处理、边缘检测或者区域分割，然后针对该相进行参数测量和统计分析。

系统共分为四个部分：图象获取、图象显示和处理分析、图象存储以及最终结果输出。在现有设备的基础上，综合考虑了系统分析的效率和经济性，确定以下图1-4系统框图：

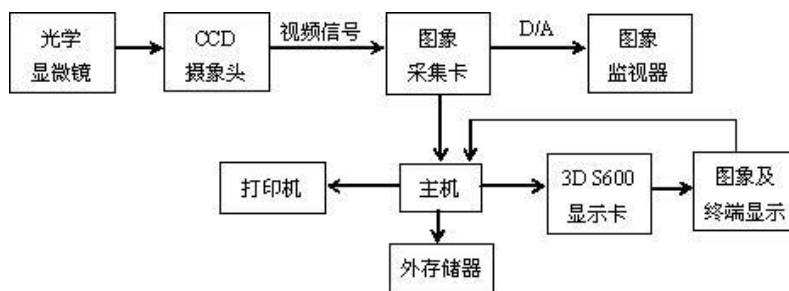


图 1-4 系统硬件组成框图

随着计算机技术的发展，工业显微镜图像处理技术日益广泛地应用在金相分析工作中。NK 系列金相图像分析系统是基于现代显微镜制造技术、理化检验中材料科学和计算机图象分析技术发展起来的现代金相分析工具。系统连接示意图如下图 1-5。



图 1-5 系统连接示意图

系统的软件依据数字图像处理技术，结合光学、电子学、数学、摄影技术、计算机技术等学科知识，采用面向对象的程序设计方法，实现对金相图像的专业分析处理，满足材料专业工作者对材料金相检验的需要。

二、实验目的

1. 熟悉室温时碳钢与白口铸铁平衡状态下的显微组织，利用定量分析软件分析其成分-组织之间的关系；
2. 了解和鉴别常用铸铁的显微组织特征，利用定量分析软件分析球墨铸铁的球化率，石墨大小，灰口铸铁的石墨长度并进行记录。

三、实验基本原理

铁碳合金是工业上常用的金属材料， $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图是分析与研究碳钢与白口铸铁的重要工具。所谓碳钢是指含碳量小于 2.11% 的铁碳合金；含碳量大于 2.11% 的铁碳合金（其中碳全部或绝大部分以渗碳体形式存在）称为白口铸铁。

碳钢与白口铸铁在室温时，其平衡状态下组织中的基本组成相均为铁素体与渗碳体。

但是由于含碳量及处理不同，它们的数量、分布及形态有很大不同，因此在金相显微镜下观察不同铁碳合金，显微组织也就有很大差异。

1. 工业纯铁的显微组织（退火态）

含碳量小于 0.02% 的铁碳合金称为工业纯铁。含碳量小于 0.006% 的工业纯铁的组织为单相铁素体；含碳量大于 0.006% 的工业纯铁的显微组织为铁素体和极少量的三次渗碳体。其显微组织如图 1-6 所示（浸蚀剂为 4% 的硝酸酒精溶液），图中白色的不规则多边形为铁素体晶粒；黑色的条纹为晶界，三次渗碳体在铁素体晶界上呈条状或短杆状（是由铁素体中析出）。工业纯铁若用冷饱和的硫代硫酸钠与焦亚硫酸钾溶液的浸蚀剂着色浸蚀，铁素体晶粒因位向不同而着成多种色彩，三次渗碳体呈白色。

2. 碳钢的显微组织（退火态）

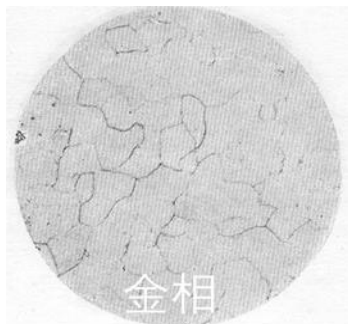
根据含碳量的不同，碳钢可分为亚共析钢、共析钢和过共析钢三类，其显微组织的特征如下：

（1）共析钢的显微组织特征

含碳量为 0.77% 的铁碳合金称为共析钢；其显微组织为片状渗碳体分布于铁素体基体上的机械混合物——珠光体；铁素体与渗碳体的重量比约为 7.3: 1，所以渗碳体片较薄。珠光体组织在 4% 硝酸酒精溶液的浸蚀下的显微组织的示意图见图 1-7 所示。在放大倍数不是很大时，渗碳体片两侧的相界已无法分辨，而呈黑色条状，如图 1-7 所示。如果放大倍数更低，或片层较细时，渗碳体和铁素体片都无法分辨，整个珠光体组织呈暗黑色，如图 1-8 中的黑色部分。

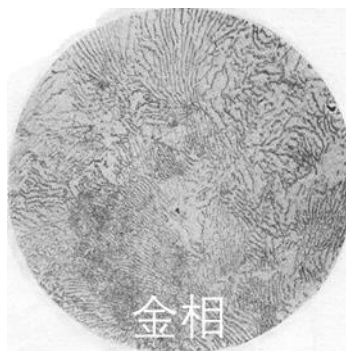
（2）亚共析钢的显微组织特征

含碳量小于 0.77% 的铁碳合金称为亚共析钢，根据 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图可知，其组织是先共析铁素体和珠光体所组成。用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀后，在放大倍数不大（小于 400×）的金相显微镜下观察，先共析铁素体呈白亮色，珠光体呈黑色。图 1-8 为 45 钢的显微组织。不同含碳量的亚共析钢的显微组织，差别在于铁素体和珠光体量不同（即白色部分和黑色部分的比例不同），随含碳量的增加，铁素体逐渐减少，珠光体不断增多。可以根据白色和黑色部分的比例，估算出钢的含碳量。



材 料：工业纯铁
状 态：退 火
浸蚀剂：4%硝酸酒精溶液
放大倍数：200×
金相组织：铁素体

图 1-6 工业纯铁的显微组织



材 料： T8 钢
状 态： 退火
湿蚀剂： 4%硝酸酒精溶液
放大倍数：500×
金相组织：片状珠光体

图 1-7 共析钢的显微组织

(3) 过共析钢的显微组织特征

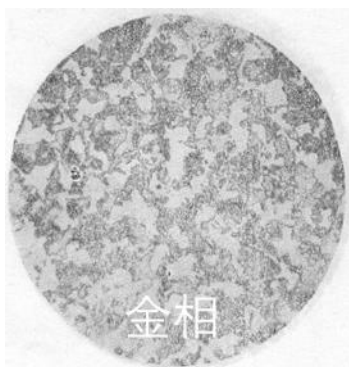
含碳量大于 0.77~2.11% 的铁碳合金称为过共析钢，这也是大多数碳素工具钢的成分。根据铁碳状态图可知，过共析钢的组织为先共析渗碳体（也称二次渗碳体）和珠光体所组成。由含碳量大于 0.77% 的奥氏体在缓冷时，从中析出的渗碳体分布于奥氏体的晶界上，以后奥氏体共析转变为珠光体。所以二次渗碳体是以网状的形式分布于珠光体周围，随含碳量增加，二次渗碳体的网络状逐渐完整并加厚。图 1-9 是含碳量为 1.2% 的碳素工具钢，用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织。图中白色的网络为二次渗碳体，暗黑色块状或层片状的部分是珠光体。如果这种组织改用煮沸的碱性苦味酸钠溶液浸蚀，则组织中的渗碳体被染成暗黑色，而铁素体仍为白亮色。

3. 白口铸铁的显微组织特征

由于这种铸铁中只含渗碳体相，不含石墨，故断口呈白亮色。

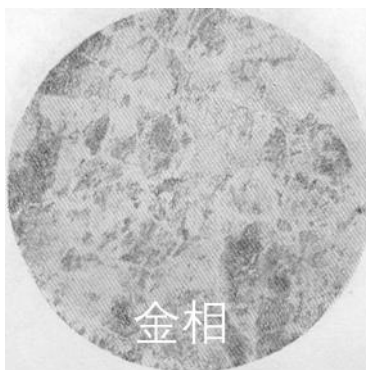
(1) 共晶白口铸铁

含碳量为 4.3% 的铁碳合金称为共晶白口铸铁。室温下其组织为珠光体和渗碳体的机械混合物——莱氏体。图 1-10 为共晶白口铸铁用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织，其中白亮的基体为渗碳体，暗黑色的细小颗粒或条状为珠光体。



材 料： 45 钢
状 态：退 火
浸蚀剂：4%硝酸酒精溶液
放大倍数：200×
金相组织：铁素体+珠光体

图 1-8 45 钢的显微组织



材 料： T12 钢
状 态：退 火
浸蚀剂：4%硝酸酒精溶液
放大倍数：200×
金相组织：珠光体+二次渗碳体

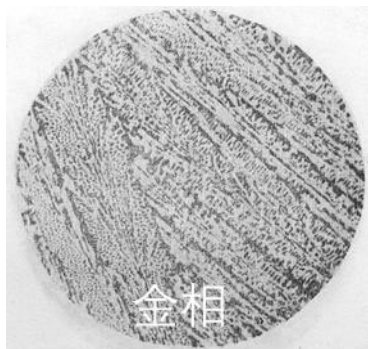
图 1-9 过共析钢的显微组织

(2) 亚共晶白口铸铁

含碳量在 2.11~4.3% 的铁碳合金称为亚共晶白口铸铁。该成分的液态合金在冷却过程中先结晶出奥氏体（呈树枝状特征）、然后发生共晶转变成莱氏体（由奥氏体和渗碳体组成）。因此结晶完成后的组织为奥氏体和渗碳体。在继续冷却过程要从奥氏体中不断析出二次渗碳体（包围在奥氏体周围成网状），然后奥氏体发生共析转变成珠光体；而莱氏体中的奥氏体也要析出二次渗碳体（它和共晶渗碳体混在一起，不易分辨），奥氏体在一定温度发生共析转变而形成珠光体，故这时莱氏体是由珠光体和渗碳体所组成。在室温下亚共晶白口铸铁的组织由珠光体和二次渗碳体与莱氏体所组成。图 1-11 为用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀后的亚共晶白口铸铁的显微组织。图中暗黑色呈树枝状分布的部分珠光体；珠光体外部呈白色网状分布的二次渗碳体；白色基体上分布着细暗黑颗粒或条状的部分为莱氏体。

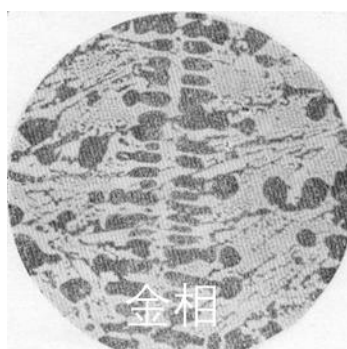
(3) 过共晶白口铸铁

含碳量在 4.30~6.69% 的铁碳合金称过共晶白口铸铁。图 1-12 用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀后过共晶白口铸铁的显微组织。图中白色长条状为一次渗碳体（由液态合金中结晶出来的），图中白色基体与暗黑颗粒的混合物为莱氏体。



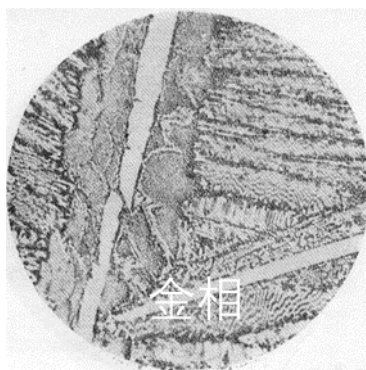
材 料：共晶白口铸铁
状 态：铸 造
浸蚀剂：4% 硝酸酒精溶液
放大倍数：200×
金相组织：莱氏体

图 1-10 共晶白口铁的显微组织



材 料：亚共晶白口铸级
状 态：铸 造
浸蚀剂：4% 硝酸酒精溶液
放大倍数：200×
金相组织：莱氏体+树枝状珠光体、二次渗碳体

图 1-11 亚共晶白口铸铁的显微组织



材 料：过共晶白口铸铁
状 态：铸 造
浸蚀剂：4% 硝酸酒精溶液
放大倍数：200×
金相组织：莱氏体+一次渗碳体

图 1-12 过共晶白口铸铁的显微组织

4. 常用铸铁的显微组织特征

这里分析的铸铁是含碳量大于 2.11% 的铁碳合金，且碳部分或大部分以游离状——石墨的形态存在。

铸铁中的碳主要是 Fe_3C 还是石墨形态存在，决定于铸铁的化学成分和冷却速度。当铸铁中含碳量较高或促进石墨化元素（如 Cu、Ni、Si 和 Al 等）较多，且冷却速度较缓慢时，碳将主要以石墨化的形态存在于合金中（其中主要是碳与硅这两个元素）；当含碳量较低，阻碍石墨化元素（如 W、Mn、S 和 Cr 等）较多时，且冷却速度较快，碳将主要以 Fe_3C 的形态存在于合金中。这里指的冷却速度是从液态合金开始结晶的温度到共析转变的温度这个范围内的冷却速度。

白口铸铁中由于较多的渗碳体，性能是硬而脆，在工业上应用较少。工业上主要应用含有一定数量石墨的铸铁，它不仅有一定的强度，而且切削加工性能好、耐磨性好，并具有优良的减振性。根据石墨的形态不同，含石墨的铸铁可分为灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁和蠕状石墨铸铁等多种。

(1) 灰铸铁

石墨以片状形态存在的铸铁称为灰铸铁。其基体组织有三种：铁素体、珠光体加铁素体、珠光体。图 1-13 为用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织（仅仅为观察石墨形态，可抛光后直接观察，不需进行腐蚀）。石墨一般不被腐蚀且较疏松（与金属基体相比），故在金相显微镜下观察为暗黑色的片状。由图可看出，铁素体基体的灰铸铁组织，相当于工业纯铁的组织中分布着片状石墨；珠光体基体灰铸铁的组织相当于含碳量为 0.77% 共析钢组织中分布着片状石墨；珠光体加铁素体基体的灰铸铁是最常用的灰铸铁，白色的铁素体大多出现在片状石墨周围。

石墨片愈粗大、数量愈多、愈直、两头愈尖，则灰铸铁的性能就愈差。石墨的大小和数量，与碳、硅含量有关。碳、硅含量愈高，则石墨愈粗大；且数量多。通过孕育处理可使石墨片变得细小，这种铸铁称为孕育铸铁或高强度铸铁。片状石墨一般是由液态合金中直接析出；有时也可通过石墨化退火获得。

基体组织的种类，一般可通过调整化学成分和冷却速度来获得。珠光体基体的灰铸铁由液态合金直接浇注获得比较困难，一般通过正火处理来达到。

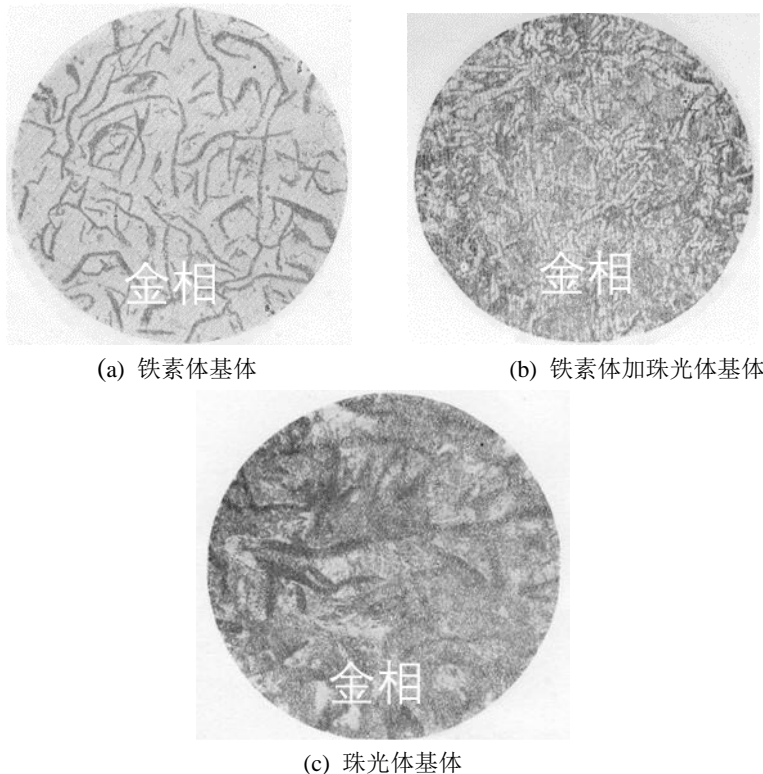


图 1-13 灰铸铁的显微组织

（2）球墨铸铁

石墨呈球状形态存在的铸铁称为球墨铸铁。球墨铸铁的基体也有三种：铁素体、铁素体加珠光体、珠光体。图 1-14 为铁素体和珠光体基体的球墨铸铁，用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织。图中暗黑色的球即为球状石墨；球状石墨周围的白色部分为铁素体；其余灰黑色部分为珠光体。

由于石墨呈球状，它对金属基体的割裂作用较小，不仅使铸铁的强度提高，而且塑性和韧性也有较大改善，其综合机械性能可接近于中碳钢的水平，是诸种铸铁中性能最好者，所以球墨铸铁是一种优质铸铁。但要获得球状石墨较困难，要用专门装备进行处理。它是在浇注前，在一定成分的液态合金中加入一定量的球化剂（常用镁或稀土镁合金）和墨化剂（常用硅铁），使石墨结晶成球状。

球墨铸铁与钢一样，可进行多种热处理，进一步改善和提高性能，故应用广泛，已经代替部分碳钢来制造较重要的零件。

球墨铸铁的牌号用“QT”后面加两组数字来表示。前一组三位数表示抗拉强度（单位 MN/m^2 ）；后一组二位数表示延伸率。

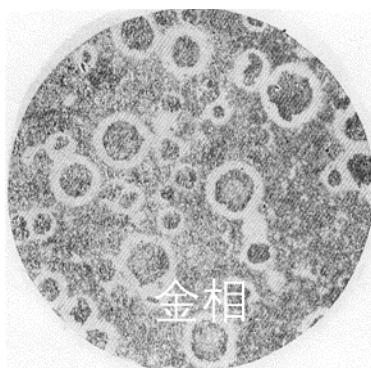


图 1-14 F+P 基体的球墨铸铁的显微组织

（3）可锻铸铁

石墨呈团絮状的铸铁称为可锻铸铁。其基体组织有铁素体与珠光体两种。图 1-15 为铁素体基体的可锻铸铁经 4% 硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织。图中暗黑色的团絮状即为石墨；白色部分为铁素体。目前我国主要使用的可锻铸铁基体是铁素体。

可锻铸铁中团絮状石墨获得方法与前两种铸铁不同。它是将一定成分的液态合金先浇注成白口铸铁，再经过可锻化石墨退火处理，使渗碳体分解而形成团絮状石墨。用控制石墨化的程度，来获得铁素体或珠光体基体。

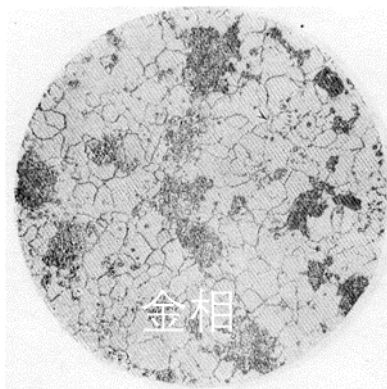


图 1-15 铁素体基体可锻铸铁的显微组织

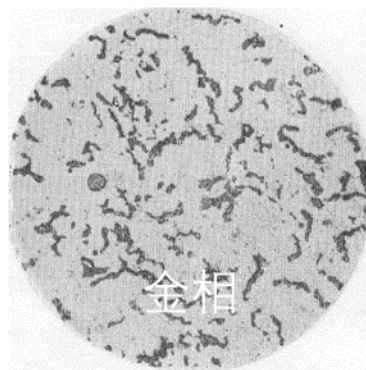


图 1-16 铁素体基体的蠕墨铸铁

可锻铸铁的牌号是 KTH（F 基体）或 KTZ（P 基体）后面加两组数字来表示。前面一组三位数表示抗拉强度（单位 MN/m^2 ）；后面一组两位数为延伸率。

4. 蠕虫状石墨铸铁（简称蠕墨铸铁）

这种铸铁的石墨形态是介于片状和球状之间，呈蠕虫状分布。图 1-16 为铁素体基体的蠕墨铸铁，用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织。由图中可见，蠕虫状石墨看起来像片状，但其片短而厚，且端部较圆，一般常常有少量球状石墨存在。

蠕虫状石墨是在一定成分的液态合金中，在浇注前加入一定量的稀土硅铁，使石墨结晶成蠕虫状。

蠕墨铸铁的强度比灰铸铁高，铸造性能比球墨铸铁好，铸造工艺简单方便，其成品率又高。所以蠕墨铸铁正在引起各方面的重视。

四、实验装置与试样

1. 金相电子显微镜；
2. 碳钢和白口铸铁平衡组织、常用铸铁金相试样一套；
3. 金相图谱；
4. 计算机辅助定量金相分析系统。

五、实验步骤

1. 每人领取碳钢和白口铸铁平衡组织、常用铸铁金相试样一套和金相图谱一本；
2. 仔细观察每只金相试样的显微组织特征(重点针对思考题)；
3. 熟悉 NK 计算机辅助定量金相显微分析系统的基本使用方法，利用该系统观察和测量金相试样，测出材料（20、45 号钢）的 α 相百分含量，球墨铸铁的球化率，石墨大小，灰口铸铁的石墨长度并进行记录。定量分析步骤如下：

（1）金相摄像：

- a. 打开桌面 NK 金相分析 2020 软件。
- b. 打开电子显微镜，在载物台上放置金相试样，每组拍摄 5 个试样：20 号钢、45 号钢、灰口铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁。
- c. 点击操作系统图标中“DS”图标，调节显微镜焦距至最清晰位置。
- d. 保存图片(在桌面建立一个以学号为文件名的文件夹，将拍摄的图像存入)。
- e. 移动载物台，一个试样需取三个不同视场拍摄并保存图标 1，2，3

（2）金相定量分析：

- a. 打开桌面 2020 金相图样系统分析软件
- b. 分别选择多相含量分析、球墨铸铁分析、灰铸铁分析、蠕墨铸铁分析软件进行相应分析实验
- c. 含量分析：
 - 打开 20 号钢或 45 号钢图像 1
 - 点击“双阈值二值化”——进行去噪（自动去除杂质）——单击目标——得到测量结果
 - 同样操作 20 号钢或 45 号钢图像 2、3
 - 将三次评级表格抄录下来，作为实验结果数据
- d. 灰口铸铁分析：
 - 打开灰铁图像 1
 - 点击“石墨分析形状及长度”自动分析（若当前图片中的石墨目标已被自动识别，请单击“确定”按钮，否则请调整上下阈值得到一个最佳效果后再按“确定”按钮）
 - 同样操作灰铁图像 2、3
 - 将三次评级表格抄录下来，作为实验结果数据

e. 球墨铸铁 球化率分析

- 打开球铁图像 1
- 点击“球墨球化与大小级别”（手动分析）—二值化—修正（填充小孔 与自动去除杂质）—球化评级
- 同样操作球铁图像 2、3。
- 将三次评级表格抄录下来，作为实验结果数据

f. 蠕墨铸铁 蠕化率分析

- 打开蠕铁图像 1
- 点击“石墨蠕化率评级”（自动分析）—二值化（若当前图片中的石墨目标已被自动识别，请单击“确定”按钮，否则请调整上下阈值得到一个最佳效果后再按“确定”按钮。）—评级
- 同样操作蠕铁图像 2、3。
- 将三次评级表格抄录下来，作为实验结果数据

六、实验结果

抄录多相含量分析、球墨铸铁分析、灰铸铁分析、蠕墨铸铁的评级表格（每种试样各三次），并依此得出最后评级结果。

七、思考题

1. 在所观察的铁碳合金的组织中，渗碳体有几种形态（可用组织图样表示）？对材料的性能有什么影响？
2. 利用铁碳合金平衡状态图的杠杆定律计算 20、45 号钢的组织组成物百分含量，与实验结果对照；分析误差产生的原因。
3. 分析灰铸铁、球墨铸铁和可锻铸铁中石墨形状对铸铁性能的影响。
4. 根据测量的结果判别石墨级别的大小，分析球化率对材料的力学性能的影响。

实验二 钢经热处理后不平衡组织的显微分析实验

一、实验目的

1. 观察碳钢经不同热处理后的显微组织，深入理解热处理工艺对钢组织与性能的影响。
2. 熟悉碳钢的几种典型不平衡组织的形态与特征。
3. 观察高速钢的显微组织的特征。

二、实验基本原理

碳钢经退火与正火后的显微组织基本上与铁碳状态图上的组织相符合，碳钢经加热后，继之以较快速度冷却后的显微组织；不仅要用铁碳状态图来分析，更重要的是根据 C 曲线（钢的过冷奥氏体等温转变曲线）分析。

1. 碳钢热处理后基本组织的金相特征

（1）碳钢退火的组织

碳钢经退火后的组织是接近平衡状态下的组织，这在实验四已观察过。但过共析钢经球化退火后获得球化体组织（F+颗粒状 Fe_3C ），即二次渗碳体和珠光体中的渗碳体都将呈颗粒状。图 2-1 为 T10 钢经球化退火后，用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织。图中白色基体为铁素体；白色的颗粒为渗碳体，渗碳体外面黑色的线为铁素体和渗碳体的相界线（被浸蚀呈黑色）。

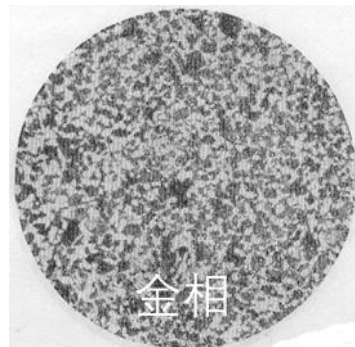
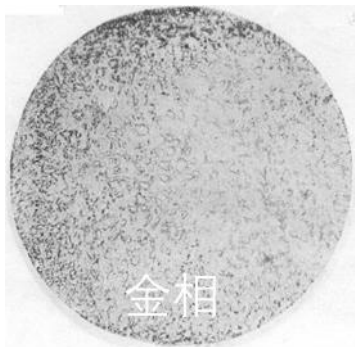


图 2-1 T10 钢球化退火后的显微组织—球化体 图 2-2 45 钢正火后的显微组织

（2）索氏体（S）与屈氏体（T）的显微组织

索氏体和屈氏体均为铁素体与片状渗碳体的机械混合物。索氏体的层片比珠光体细密，故要放大 700 倍以上才能分辨层片组织。一般金相显微镜的放大倍数下分辨不清，只能观察到黑色形态。图 2-2 为 45 钢经正火处理后，用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织（F+S）。该组织与图 1-7 相比较，其晶粒较细（因冷速较大）；其中白色的不规则多边形均为铁素体；图 1-7 中暗黑色部分为珠光体，而图 2-2 中黑色部分为索氏体。

屈氏体的层片比索氏体更细密，在一般的金相显微镜下也无法分辨，只有在电子显微镜下才能分辨其中的层片。

（3）贝氏体（B）的组织形态

贝氏体是钢在 $550^{\circ}\text{C} \sim \text{M}_\text{S}$ 温度范围内等温冷却的转变产物。贝氏体是微过饱和铁素体和渗碳体的两相混合物。根据等温温度和组织形态不同，贝氏体主要有上贝氏体和下贝氏体两种。

1) 上贝氏体

上贝氏体是钢在 $550 \sim 350^{\circ}\text{C}$ 温度范围内过冷奥氏体的等温转变的产物。它是由平行排列的条状铁素体和条间断续分布的渗碳体所组成。当转变量不多时，在金相显微镜下为成束或片状的铁素体条，具有羽毛状特征。图 2-3 为 T8 钢 860°C 加热和保温后，在 400°C 等温（过冷奥氏体转变，但尚

未转变结束)并水淬,经 4%硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织。图中成束或片状的为铁素体条;淡灰白基体为马氏体和残余奥氏体。



图 2-3 上贝氏体显微组织

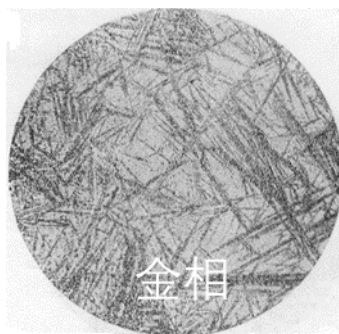


图 2-4 下贝氏体显微组织

2) 下贝氏体,

下贝氏体是钢在 $350^{\circ}\text{C} \sim \text{MS}$ 温度范围过冷奥氏体等温转变的产物,它是在微饱和铁素体片内弥散分布着短杆状渗碳体的两相混合物。图 2-4 为 T8 钢经 860°C 加热、 300°C 等温(过冷奥氏体已发生转变,尚未转变结束)后水淬,经 4%硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织。图中黑色的针为下贝氏体(实际是弥散碳化物与铁素体相界面被浸蚀之故)。淡灰白色部分为马氏体和残余奥氏体。

(4) 淬火马氏体的组织形貌

淬火马氏体的形态,根据马氏体中含碳量的不同有板条状马氏体和针(或片)状马氏体两种。

图 2-5 为 20 钢 950°C 加热水淬后,用 4%硝酸酒精溶液浸蚀后的板条状马氏体的显微组织。由图看出,其组织形态是尺寸较小的马氏体条平行排列成马氏体束,各马氏体面之间的位向差较大。每束马氏体的平面形状象板状;故称板条状马氏体。

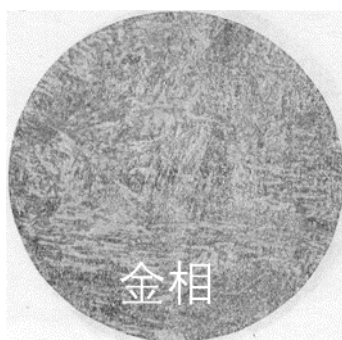


图 2-5 板条状马氏体组织

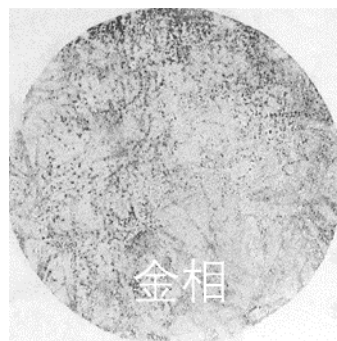


图 2-6 针状马氏体组织

图 2-6 为 T10 钢 1000°C 加热水淬后,用 4%硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织。图中呈浅灰色的竹叶状为针状淬火马氏体,白色部分为残余奥氏体。T10 钢用 1000°C 加热,温度偏高(使二次渗碳体也溶入奥氏体),奥氏体晶粒粗化,这样淬火后获得的针状马氏体片也较粗,便于在金相显微镜下观察其形貌,另外也使钢淬火后残余奥氏体数量增多,容易分清淬火马氏体。实际生产中,T10 钢的加热温度为 760°C 左右,淬火后马氏体较细小且数量较多,残余奥氏体数量也很少。这样的情况下,用金相显微镜就较难观察清楚针状马氏体的形态。

(5) 回火组织

钢的淬火组织主要是淬火马氏体(常有少量残余奥氏体,过共析钢还有颗粒状渗碳体)。其中淬火马氏体和残余奥氏体为不稳定组织,随回火加热温度的升高,原子的活动能力增大,促使这些组织发生转变。根据加热温度不同,分别可获得回火马氏体、回火屈氏体和回火索氏体。

淬火马氏体是含碳微过饱和的 α 固溶体和与其保持着共格关系的 ϵ 碳化物所组成。图 2-7 为 T10 钢 1000°C 加热水淬,并经 180°C 保温 1 小时回火,用 4%硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织。图中暗黑色的针状为回火马氏体,白色部分为残余奥氏体。图 2-8 为 T10 钢 760°C 加热水淬,并经 180°C 保

温 1 小时回火，用 4%硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织。图中白色的小颗粒为渗碳体，暗色部分为回火马氏体（因为此时淬火加热温度低，淬火后马氏体针较细小而且多，故回火后就分辨不清每个回火马氏体黑色的针，从而成为图中黑色的一片）和少量残余奥氏体。这种组织形貌是大多数过共析碳钢和合金工具钢在使用状态（要求高硬度）下的组织形貌。

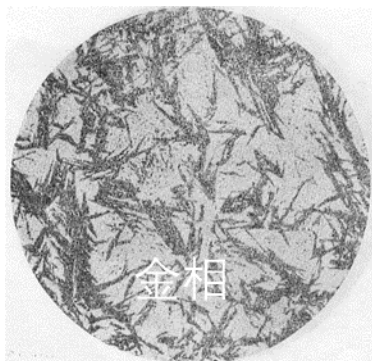


图 2-7 T10 钢 1000°C水淬和 180°C回火后的显微组织

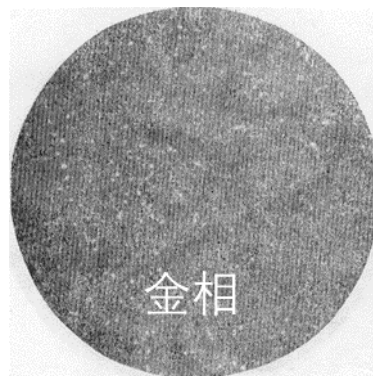


图 2-8 T10 钢 760°C水淬和 180°C回火后的显微组织

2. 高速钢的显微组织

高速钢是应用广泛的一种高合金工具钢，其典型的钢种为 W18Cr4V，化学成分约为：0.7~0.8% C、3.8~4.4% Cr、17.5~19%W、1.0~1.4%V。

（1）高速钢的铸态组织

虽然这种钢的含碳量只有 0.7~0.8%，但由于含有大量的合金元素，使铁碳状态图中 E 点显著左移，致使高速钢的铸造组织中有莱氏体出现，且空冷就能硬化。图 2-9 为高速钢铸态，用 4%硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织。图中白色呈骨骼状的为碳化物；莱氏体是由骨骼状碳化物和屈氏体或马氏体所组成；图中黑色部分为屈氏体。

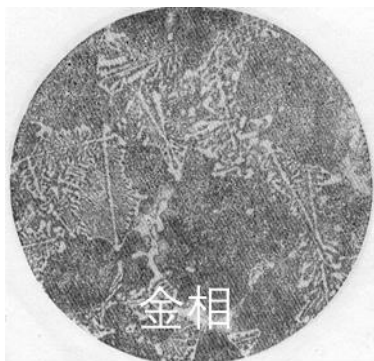


图 2-9 高速钢的铸造组织

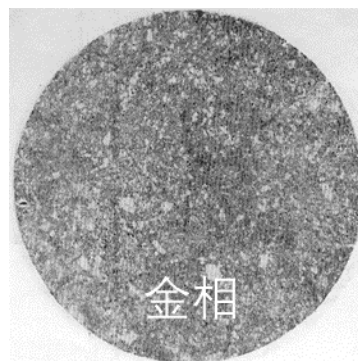


图 2-10 高速钢锻造、退火后组织

（2）高速钢锻造退火组织

上面的铸造组织中粗大而呈骨骼状的碳化物，不能用热处理方法消除，只能用锻造来粉碎。图 2-10 为经锻造和退火后，用 4%硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织。图中白色的颗粒为碳化物，暗黑色基体为索氏体。

（3）高速钢的淬火组织

高速钢经 1270~1280°C加热（保证奥氏体充分合金化）在油或空气中冷却淬火，用 4%硝酸酒精溶液浸蚀后，其显微组织如图 2-11 所示。图中白色的不规则多边形为隐晶马氏体和残余奥氏体；白色的小颗粒为未溶碳化物。

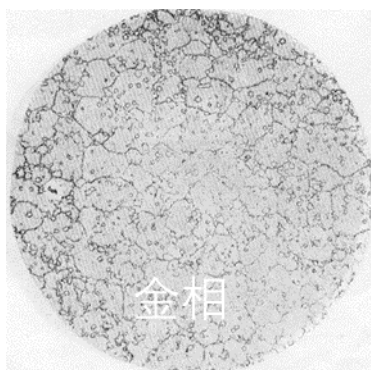


图 2-11 高速钢的淬火组织

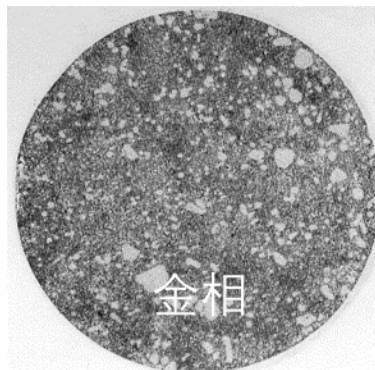


图 2-12 高速钢的回火组织

(4) 高速钢的回火组织

图 2-12 为经淬火的高速钢，在 560℃保温 1 小时的三次回火，用 4%硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织。图中白色的颗粒为碳化物；黑色基体为回火马氏体和少量（2~5%）的残余奥氏体。为了使高速钢产生二次硬化和消除淬火后约 25%的残余奥氏体，必须把经淬火的高速钢在 560℃（因为含合金元素的淬火马氏体与残余奥氏体较稳定，必须在较高温度下回火。）进行三次回火才能实现。

3. 低碳钢渗碳缓冷后的组织

有些零件（如某种齿轮）要求表面有高的硬度与耐磨性，而心部有良好的韧性。则必须用低碳钢或低碳合金钢经渗碳处理，提高表面的含碳量，然后通过淬火和低温回火，使零件表面有高的硬度，而心部由于含碳量低保持良好的韧性。

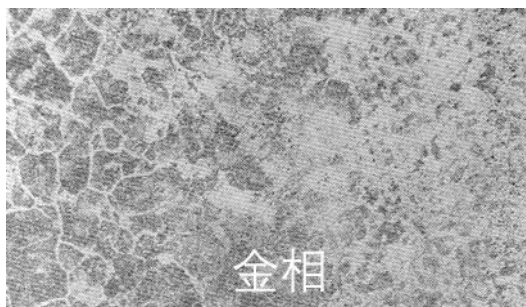


图 2-13 20 钢渗碳缓冷后的显微组织

图 2-13 为 20 钢经渗碳处理缓冷后，用 4%硝酸酒精溶液浸蚀后的显微组织。左边为渗碳的表层，由图看出，它是过共析钢平衡状态的组织（珠光体和二次网状渗碳体）；向里为共析钢组织（珠光体）；继续向里为亚共析钢组织（珠光体和铁素体）；愈向里铁素体量不断增多，珠光体量减少，直到 20 钢的平衡组织（其中珠光体约为 1/4）。

三、实验装置与试样

1. 金相电子显微镜；
2. 金相图谱；
3. 金相试样一套

四、实验步骤

1. 领取金相试样一套；
2. 在金相电子显微镜下仔细观察各个试样的显微组织特征；
3. 在电脑中截取序号为 XD14、XD15、XD17、XD25、XD26、XD33 的显微组织示意图，并用引线标注出组成物名称。

五、实验结果

1. 观察各个试样的显微组织特征，画出金相试样的显微组织示意图，并用引线标注出组成物名称和观察倍率。

2. 观察金相组织，在表中填写以下材料热处理后的显微组织组成物。

序 号	图谱对 照号	试样材料	热 处 理 工 艺	浸蚀 剂	显 微 组 织
XD25	Ⅱ-10	T10	球化退火	4 %	
XD17	Ⅱ-03	45	正火		
XD13	Ⅱ-08	T8	400℃等温水淬		
XD14	Ⅱ-09	T8	300℃等温水淬		
XD15	Ⅱ-02	20	淬火	硝 酸 酒 精 液	
	Ⅱ-12	T12	高温淬火		
XD27	Ⅱ-13	T12	高温淬火+低温回火		
XD26	Ⅱ-11	T12	淬火+低温回火		
XD39	Ⅱ-14	20	渗碳后缓冷		
XD31	Ⅲ-04	W18 Cr4V	铸态		
XD32	Ⅲ-05	W18 Cr4V	锻造+退火		
XD33	Ⅲ-06	W18 Cr4V	淬火		
XD34	Ⅲ-07	W18 Cr4V	淬火+三次 560℃回火		

六、思考题

1. 分析 45 钢分别进行完全退火、正火、淬火与调质处理后的组织及性能。根据实验结果，若发现 45 钢淬火后硬度偏低（与正常淬火后，45 钢应有的硬度相比），如何根据显微组织来判别其硬度偏低的原因？
2. 比较表中序号 XD26、XD27 试样 T12 的显微组织，分析产生的原因及性能上的差别。