

机械工程基础实验

实验报告



姓 名:	刘侃
学 院:	机械工程学院
专 业:	机械工程
学 号:	3220103259
分 组:	组 10

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。

二、实验原理

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。以下仅涉及实验中用到的钢种：

1. 亚共析钢的显微组织

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 $400\times$ ）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 为 45 钢的显微组织。

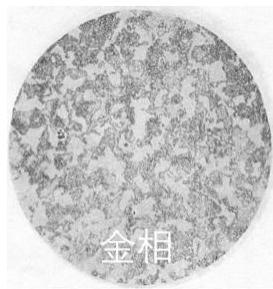


图 1 45 钢的显微组织

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。

2. 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 2 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）。

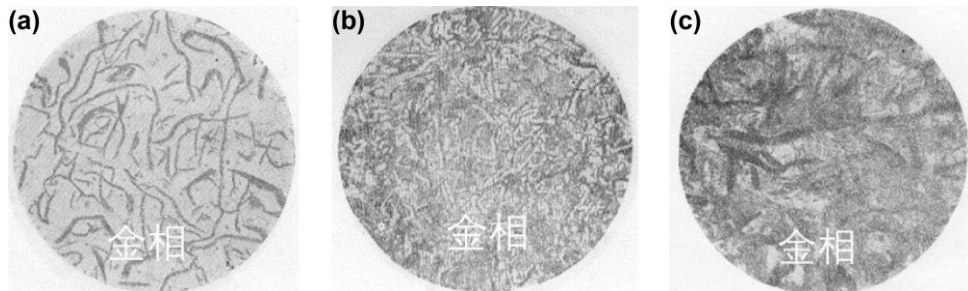


图 2 灰铸铁的显微组织；(a)铁素体基体(b)铁素体加珠光体基体(c)珠光体基体

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。

3. 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 3 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。

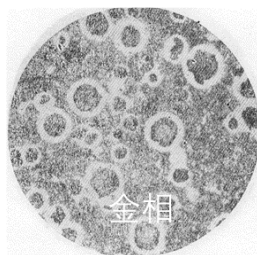


图 3 F+P 基体的球墨铸铁的显微组织

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。

三、实验内容（含设备、步骤）

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。

实验步骤：

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：

操作显微镜和金相显微分析系统，记录图片

（2）金相定量分析：

对摄像结果进行评级分析，作为实验结果数据。

（“一、实验目的，二、实验原理，三、实验内容” 合计篇幅限定 2 页以内）

四、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。

根据金相试验报告，将实验结果记录于表中

试样材料	实验次数	α 相百分含量 (珠光体)	β 相百分含量 (铁素体)	理论值(杠杆公式)	平均值(%)
20	1	24.24	75.76	α : 23.82	α : 24.77
	2	22.19	77.81	β : 76.18	β : 75.23
	3	27.88	72.12		
45	1	54.07	45.93	α : 57.23	α : 54.45
	2	57.22	42.78	β : 42.77	β : 45.55
	3	52.06	47.94		
QT		平均球化率 (%)	球化级别	球墨大小、 级别	备注
	1	0.696	5 级	1.64 7 级	
	2	0.716	4 级	1.46 8 级	
	3	0.713	4 级	1.59 7 级	
		最长 3 根石墨 平均长度/mm	石墨长度级别	石墨形态、 面积百分比 (%)	备注
HT	1	21.867	4 级 石长 18	片状 (A 型) 26.24	
	2	24.100	4 级 石长 18	片状 (A 型) 30.43	
	3	25.200	3 级 石长 38	片状 (A 型) 32.59	

五、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？

有条状、粒状、网状等，如下图



图 4 条状渗碳体



图 5 粒状渗碳体

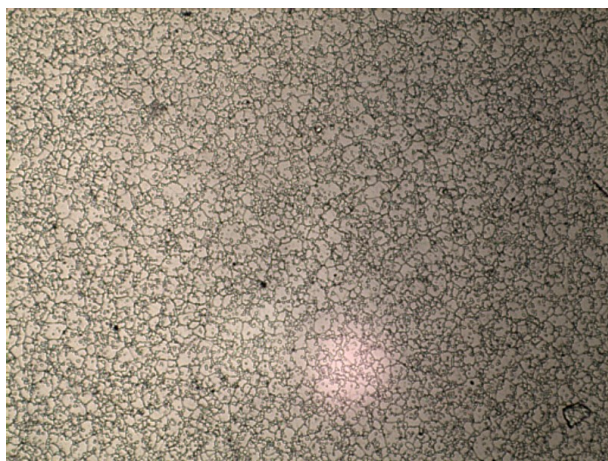


图 6 网状渗碳体

一次渗碳体是在铁—碳合金平衡结晶过程中,具有过共晶成分的合金(过共晶白口铸铁)的液相合金冷却到液相线以下时析出的渗碳体。一次渗碳体是从液相里面直接析出的,呈规则的**长条状或颗粒状**,可以提高过共晶白口铸铁的硬度,但降低强度和韧性,增加脆性。

二次渗碳体是具有共析成分(含碳量)以上的合金(过共析钢、亚共晶白口铸铁、共晶白口铸铁、过共晶白口铸铁)在缓冷到一定程度时,奥氏体中的含碳量达到饱和,继续降温就会沿奥氏体晶界析出**网状渗碳体**。硬度高、强度低,脆性大,塑性几乎为零,应该尽可能消除。

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。

对于 20 号钢，含碳量 0.2%

$$w_P = \frac{0.2 - 0.0218}{0.77 - 0.0218} = 0.2382$$

$$w_\alpha = \frac{0.77 - 0.2}{0.77 - 0.0218} = 0.7618$$

对于 45 号钢，含碳量 0.45%

$$w_P = \frac{0.45 - 0.0218}{0.77 - 0.0218} = 0.5723$$

$$w_\alpha = \frac{0.77 - 0.45}{0.77 - 0.0218} = 0.4277$$

产生误差的原因：

(1) 试样的组织组成物并非只有珠光体和铁素体，如低碳钢淬火后也可得到板条状马氏体组织，在珠光体边缘铁素体晶界上也可能有少量三次渗碳体。通过二值化来进行二分类的方法是不准确的。

(2) 计算机二值化阈值依靠主观判断，照片的对比度和亮度对金相的分类存在干扰，面积的计算存在误差。

(3) 根据 GB/T 699-2015，20 号钢的含碳量为 0.17%~0.24%，故试样含碳量并非严格确定为 20%，样品实际含碳量值会与通过 20% 的理论含碳量计算结果存在误差。

(4) 铁素体的晶粒大小分布不均匀，不同部位的相含量百分比不同，取样次数少带来误差。

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。

灰铸铁的片状石墨对基体的割裂严重，在石墨尖角处易造成应力集中，使灰铸铁的抗拉强度、塑性和韧性远低于钢，但抗压强度不低于钢。石墨具有补缩作用、易断屑、润滑性好，灰铸铁具有较好的铸造性能和切削加工性。

球墨铸铁的石墨呈球状，对基体的割裂作用不大，也没有应力集中现象，具有较高的抗拉强度和韧性，力学性能较好，其综合性能接近于钢，但铸造性能差。

可锻铸铁的石墨呈团絮状，对基体的割裂作用较小，因此它的力学性能比灰铸铁高，但塑性和韧性一般，故名为可锻，实不可锻，且铸造性能差。

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。

综合多次测量结果，本次实验测量得灰铸铁石墨长度级别为 4 级，球墨铸铁球化级别为 4 级，球墨大小级别为 7 级。

石墨呈球状，对基体的削弱作用小，无明显的尖端应力集中，基体强度利用率高。在其他条件相同时，球墨铸铁球化率越高，力学性能越好，抗拉强度、疲劳强度和屈服强度会提高，具有一定的塑性和韧性。

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、实验原理

(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 7 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）。

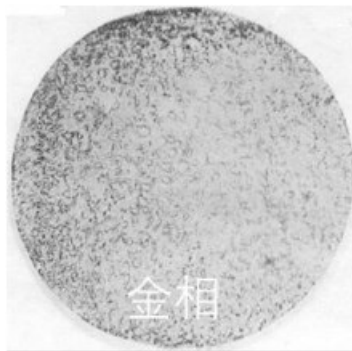


图 7 T10 钢球化退火后的显微组织

(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 9 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 8 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 8 中暗黑色部分为珠光体，而图 9 中黑色部分为索氏体。

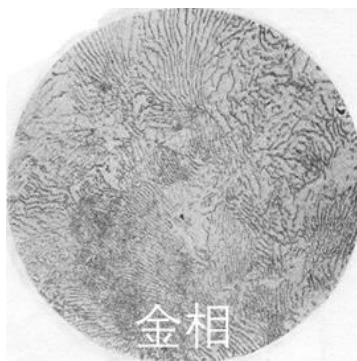


图 8 共析钢的显微组织

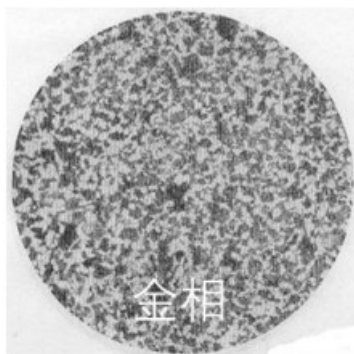


图 9 45 钢正火后的显微组织

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）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 10 为 20 钢 950℃加热水淬后，用 4%硝酸酒精溶液侵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。

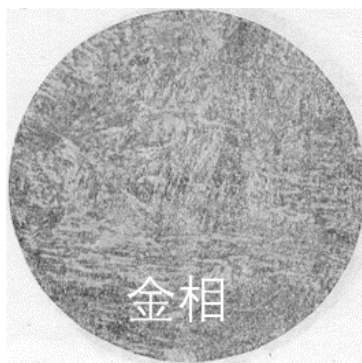


图 10 板条状马氏体组织

三、实验内容（含设备、步骤）

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

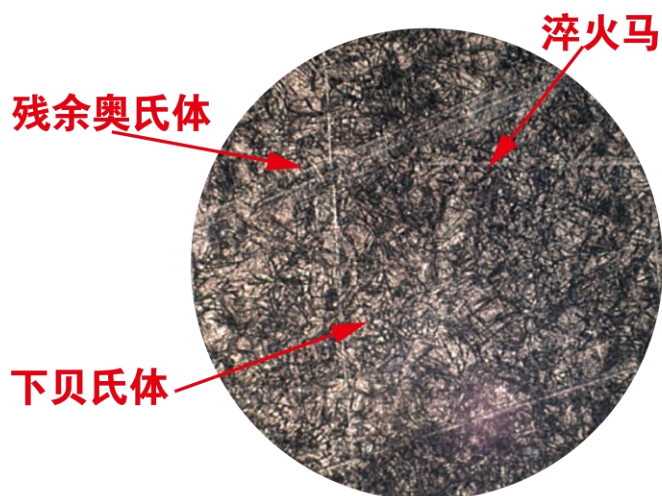
实验步骤：

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。

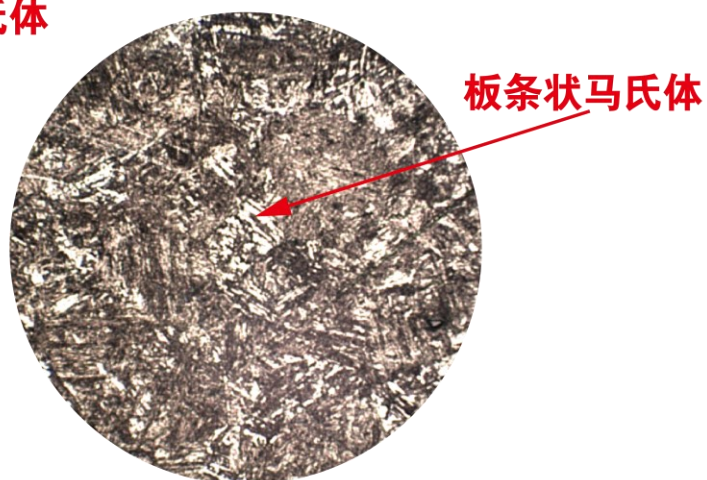
（“一、实验目的、二、实验原理、三、实验内容”合计篇幅限定 2 页以内）

四、实验结果

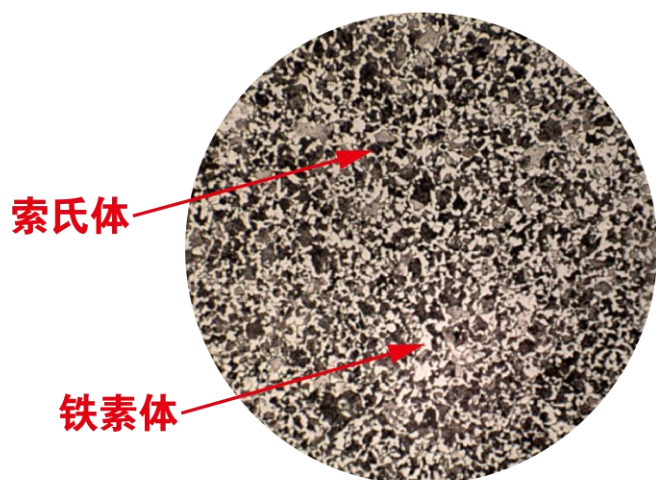
1. 观察各个试样的显微组织特征，画出下列序号为主的显微组织示意图，并用引线标注出组成物名称和观察倍率。（观察倍率均为 $\times 200$ ）



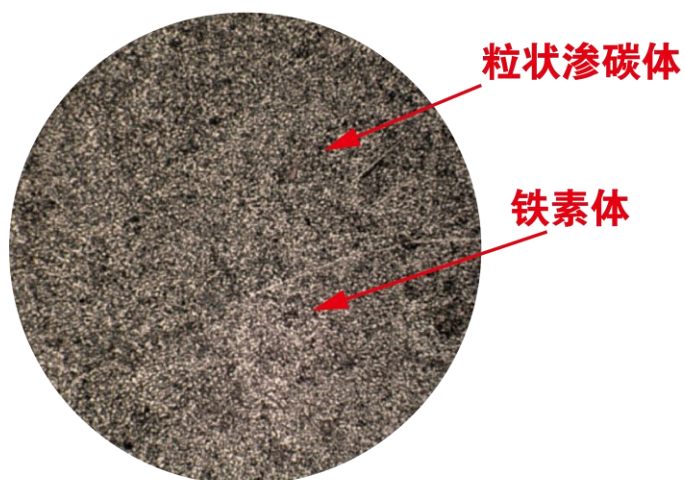
XD14



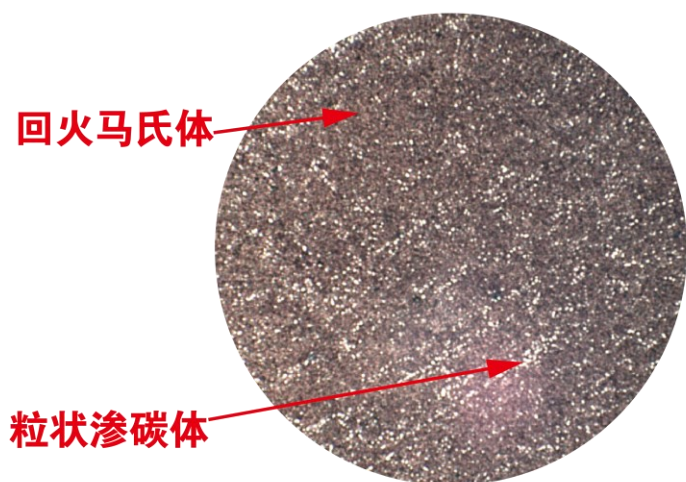
XD15



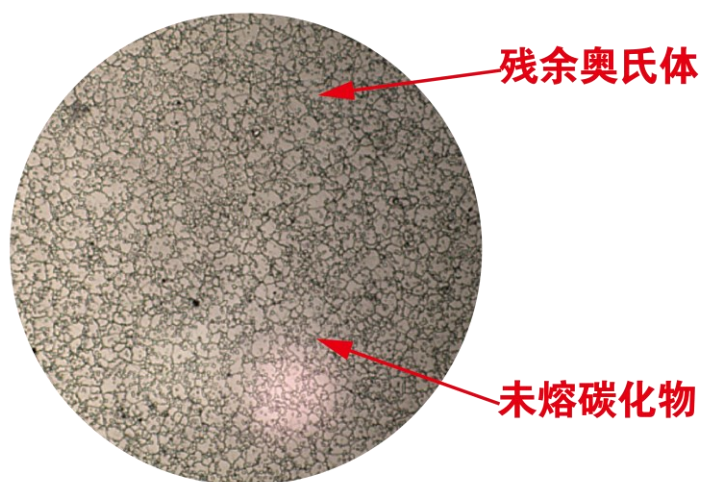
XD17



XD25



XD26



XD33

2. 观察金相组织，在表中写出以下材料热处理后的组织组成物

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		球化组织(粒状渗碳体+铁素体)
XD17	II-03	45	正火		铁素体+索氏体
XD13	II-08	T8	400℃等温水淬	4%	上贝氏体+板条状马氏体+残余奥氏体
XD14	II-09	T8	300℃等温水淬		下贝氏体+板条状马氏体+残余奥氏体
XD15	II-02	20	淬火	硝酸	板条状马氏体
	II-12	T12	高温淬火	酸	淬火针状马氏体+残余奥氏体
XD27	II-13	T12	高温淬火+低温回火	酒精	回火马氏体+残余奥氏体
XD26	II-11	T12	淬火+低温回火	精液	回火马氏体+少量残余奥氏体+渗碳体
XD39	II-14	20	渗碳后缓冷		表层: 珠光体+网状渗碳体; 中间: 珠光体; 里层: 珠光体+铁素体
XD31	III-04	W18 Cr4V	铸态		屈氏体+马氏体+莱氏体
XD32	III-05	W18 Cr4V	锻造+退火		索氏体+碳化物
XD33	III-06	W18 Cr4V	淬火		隐晶马氏体+残余奥氏体+碳化物
XD34	III-07	W18 Cr4V	淬火+三次 560℃回火		回火马氏体+碳化物+少量残余奥氏体

五、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？

45 钢淬火后的显微组织为马氏体及残余奥氏体，其中马氏体为浅灰色的板条状或针状，残余奥氏体为白色部分。由于奥氏体硬度比片状马氏体硬度低，可以将显微组织的马氏体比例与正常淬火的显微组织比例对比，若马氏体比例明显偏低，则硬度会不足。

硬度偏低的原因可能是 45 钢加热温度偏低出现块状铁素体，或保温时间不足出现条状铁素体组织。组织中奥氏体的碳和合金元素含量不够，甚至组织中还残存着未转变的珠光体或未溶铁素体，45 钢淬火后没有完全转变成马氏体，导致硬度达不到要求。

热处理	组织	性能
完全退火	珠光体和铁素体	硬度降低，塑性、韧性明显提高
正火	珠光体和铁素体（珠光体组织更细，强度和硬度更高）	强度、韧性、硬度和切削性能提高
淬火	马氏体（板条+针状）和残余奥氏体	硬度高，塑性、韧性差
调质处理	回火索氏体	具有良好的综合力学性能

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。

XD26 试样为 T12 钢 760℃加热水冷+180℃回火，得到的组织为回火马氏体和渗碳体；XD27 试样为 T10 钢 1000℃加热水冷+180℃回火，得到的组织为回火马氏体和残余奥氏体

XD26:T12 钢经 760℃加热，温度在 A_{ccm} 以下， A_{c1} 以上，珠光体不完全转换成奥氏体，渗碳体不会全部溶入奥氏体，部分最终以粒状渗碳体存在，这样得到的奥氏体晶粒更为细小，最终钢的耐磨性可明显提高，硬度也较高。

XD27:T12 钢经 1000℃加热，温度超过了 T12 钢的 A_{ccm} ，使其完全奥氏体化，导致渗碳体消失，奥氏体晶粒粗化，淬火后得到粗大针状马氏体，残余奥氏体量增多，硬度和耐磨性降低，脆性增大。