

# 机械工程基础实验

## 实验报告



姓 名:	徐屹寒
学 院:	机械工程学院
专 业:	机械工程
学 号:	3230103743
分 组:	第 3 组

浙江大学机械工程实验教学中心

2025 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. 熟悉室温下碳钢与白口铸铁平衡状态下的显微组织特征，并利用定量分析软件分析其成分与组织之间的关系。
2. 了解和鉴别常用铸铁（灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁、蠕墨铸铁）的显微组织特征；利用定量分析软件对球墨铸铁的球化率及石墨大小、灰口铸铁的石墨长度进行分析和记录。

### 二、实验原理

1. 金相显微分析基础：利用金相显微镜观察金属及合金内部组织。试样制备需经过取样、磨制抛光成镜面、浸蚀（如化学浸蚀法）等步骤，利用各相电极电位不同造成腐蚀程度差异，从而在显微镜下显示不同明暗的组织形貌。

2. 定量显微测量：通过测定组织的特征参数（如点、线、面）来建立组织与性能的定量关系。现代方法采用计算机图像分析系统（如 NK 系列），通过图像采集、数字化、分割和处理，自动测量面积分数、晶粒度、球化率等参数。

3. 铁碳合金显微组织特征：

碳钢：根据含碳量分为亚共析钢（ $F+P$ ）、共析钢（ $P$ ）和过共析钢（ $P+Fe_3C_{II}$ ）。含碳量越高，珠光体（ $P$ ）越多，铁素体（ $F$ ）越少。

白口铸铁：组织中不含石墨。分为亚共晶（ $P+Fe_3C_{II}+Ld$ ）、共晶（ $Ld$ ）和过共晶（ $Ld+Fe_3C_I$ ）。

常用铸铁：碳主要以石墨形态存在。灰铸铁为片状石墨；球墨铸铁为球状石墨；可锻铸铁为团絮状石墨；蠕墨铸铁为蠕虫状石墨。基体通常为铁素体、珠光体或二者混合。

### 三、实验内容（含设备、步骤）

1. 实验设备与材料

设备：金相电子显微镜、计算机辅助定量金相分析系统（含摄像头、图像采集卡、分析软件等）。

材料：碳钢和白口铸铁平衡组织试样、常用铸铁金相试样一套、金相图谱。

2. 实验步骤

（1）组织观察

领取试样和图谱，在显微镜下仔细观察每只金相试样的显微组织特征。

（2）金相摄像（图像采集）

1. 打开 NK 金相分析软件及电子显微镜。
2. 分别放置 20 号钢、45 号钢、灰口铸铁、球墨铸铁 试样。

3. 调节焦距至清晰，每个试样选取 3 个不同视场进行拍摄并保存图像。

### (3) 金相定量分析

利用分析软件对采集的图像进行处理。

多相含量分析（针对 20 号、45 号钢）：

1. 打开图像，点击“双阈值二值化”，进行去噪处理。
2. 单击目标测定铁素体/珠光体含量，记录 3 次评级结果。

灰铸铁分析：

1. 打开灰铸铁图像，点击“石墨分析形状及长度”。
2. 调整阈值至最佳效果，自动分析石墨长度，记录 3 次评级结果。

球墨铸铁分析：

1. 打开球铁图像，点击“球墨球化与大小级别”（手动分析）。
2. 进行二值化、修正（填充小孔、去除杂质），进行球化评级，记录 3 次评级结果。

#### 四、实验结果

抄录多相含量分析、球墨铸铁分析、灰铸铁分析的评级表格（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	$\alpha$ 相百分含量 (珠光体)	$\beta$ 相百分含量 (铁素体)	理论值 (杠杆公式)	平均值
20	1	23.98%	76.02%	23.82%	24.07%
	2	24.66%	75.34%		
	3	23.56%	76.44%		
45	1	56.21%	43.79%	57.23%	57.33%
	2	57.67%	42.33%		
	3	58.12%	41.88%		
试样材料	实验次数	平均球化率	球化级别	球墨大小、级别	备注
QT	1	0.779	4 级	1.05 8 级	
	2	0.777	4 级	1.00 8 级	
	3	0.781	4 级	1.01 8 级	
试样材料	实验次数	石墨平均长度	石墨长度级别	石墨形态、面积 (%)	备注
HT	1	9.455	5 级 石长 9	片状 A 33.75	
	2	7.860	5 级 石长 9	片状 A 21.98	
	3	7.077	5 级 石长 9	片状 A 38.56	

#### 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？

形态：

条状/短杆状（三次渗碳体）：在工业纯铁中，三次渗碳体沿铁素体晶界析出，呈条状或短杆状。

层片状（共析渗碳体）：在珠光体组织中，渗碳体与铁素体片层相间分布，呈层片状。

网状（二次渗碳体）：在过共析钢中，二次渗碳体沿奥氏体晶界析出，呈网状分布于珠

光体周围。

基体/连续状(共晶渗碳体): 在白口铸铁(莱氏体)中, 渗碳体作为连续的基体存在。

长条状(一次渗碳体): 在过共晶白口铸铁中, 由液态直接结晶出的一次渗碳体呈粗大的白色长条状。

颗粒状(球化渗碳体): 在球化退火后的组织中, 渗碳体呈颗粒状分布在铁素体基体上。

性能影响:

数量影响: 渗碳体数量越多, 材料的硬度越高, 脆性越大, 塑性和韧性越低。

形态影响:

1. 片状/网状: 当渗碳体呈网状分布在晶界时, 会严重割裂基体, 使钢的脆性显著增加, 极易沿晶界断裂。
2. 颗粒状: 相比于片状, 颗粒状渗碳体对基体的割裂作用最小, 因此在硬度相同的情况下, 具有更好的塑性和韧性(如球化退火后的组织)。
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。

**20 号钢(含碳量 0.20%):**

$$\text{珠光体含量 } P\% = \frac{0.20 - 0.0218}{0.77 - 0.0218} \times 100\% = 23.82\%$$

$$\text{铁素体含量 } F\% = 100\% - 23.8\% = 76.18\%$$

实验结果略低于理论值。

**45 号钢(含碳量 0.45%):**

$$\text{珠光体含量 } P\% = \frac{0.45 - 0.0218}{0.77 - 0.0218} \times 100\% = 57.23\%$$

$$\text{铁素体含量 } F\% = 100\% - 57.2\% = 42.77\%$$

实验结果略低于理论值。

误差产生的原因分析:

1. 在使用定量分析软件(如双阈值二值化)时, 阈值的选取会直接影响铁素体和珠光体的分割效果, 如果去噪或杂质去除不彻底, 会引入误差。
2. 实际钢材存在成分偏析, 取样部位不同(如表面与中心), 含碳量和组织分布可能不均匀。
3. 试样表面可能有划痕、水迹或浸蚀过度/不足, 会影响图像分析软件对颜色(灰度)的识别, 导致面积计算偏差。
3. 分析灰铸铁、球墨铸铁中石墨形状对铸铁性能的影响。

灰铸铁(片状石墨):

形状影响：石墨呈片状，相当于在钢的基体中存在许多微小裂纹。它对金属基体有严重的割裂作用，且片状石墨尖端会产生显著的应力集中。

性能结果：抗拉强度低，塑性和韧性很差，但具有良好的减振性、耐磨性和切削加工性。

石墨片越粗大、数量越多，性能越差。

球墨铸铁（球状石墨）：

形状影响：石墨呈球状，其表面积最小，对金属基体的割裂作用最小，且消除了片状石墨尖端的应力集中现象。

性能结果：强度显著提高，塑性和韧性也有较大改善，综合机械性能接近中碳钢，是性能最好的铸铁。

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。

石墨级别的大小如实验记录。

球化率对力学性能的影响：

球化率高说明石墨大部分呈圆整的球状，对基体的割裂作用小，应力集中小，材料的抗拉强度、屈服强度、延伸率（塑性）和冲击韧性均较高。

球化率低说明存在大量蠕虫状或团絮状甚至片状石墨，这些形态的石墨会像灰铸铁那样割裂基体，导致材料的力学性能（特别是强度和韧性）急剧下降。

## 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（如正火、淬火、回火等）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. 熟悉碳钢几种典型不平衡组织（如索氏体、贝氏体、马氏体等）的形态与特征。
3. 观察高速钢（如 W18Cr4V）在不同状态下的显微组织特征。

### 二、实验原理

钢经加热并快速冷却后获得的非平衡组织，需结合 C 曲线（过冷奥氏体等温转变曲线）进行分析。主要观察的组织特征如下：

1. 球化体（球化退火）：过共析钢（如 T10）经球化退火后，渗碳体呈颗粒状分布在铁素体基体上。
2. 索氏体（S）与屈氏体（T）：均为铁素体与渗碳体的机械混合物。索氏体层片较细（如 45 钢正火组织），屈氏体极细，光学显微镜下呈黑色团状。
3. 贝氏体（B）：  
上贝氏体（550~350℃形成）：羽毛状特征，由成束的铁素体条和条间断续分布的渗碳体组成。  
下贝氏体（350℃~ $M_s$ 形成）：黑色针状特征（实为含碳过饱和铁素体片内分布短杆状碳化物）。
4. 马氏体（M）：  
板条状马氏体：低碳钢（如 20 钢）淬火形成，马氏体条平行排列成束。  
针（片）状马氏体：高碳钢（如 T10）淬火形成，呈竹叶状或针状，互成 60°或 120°角，常伴有残余奥氏体。
5. 回火组织：淬火马氏体经低温回火形成回火马氏体（黑色针状），随回火温度升高可转变为回火屈氏体或回火索氏体。
6. 高速钢组织：  
铸态：含莱氏体（鱼骨状碳化物）。  
锻造退火态：索氏体基体+颗粒状碳化物。  
淬火态：隐晶马氏体+残余奥氏体+未溶碳化物。  
回火态：回火马氏体+少量残余奥氏体+弥散碳化物（二次硬化）。

### 三、实验内容（含设备、步骤）

#### 1. 实验设备与试样

设备：金相电子显微镜、计算机辅助分析系统。

资料：金相图谱。

试样：碳钢和白口铸铁平衡组织及热处理后金相试样一套。

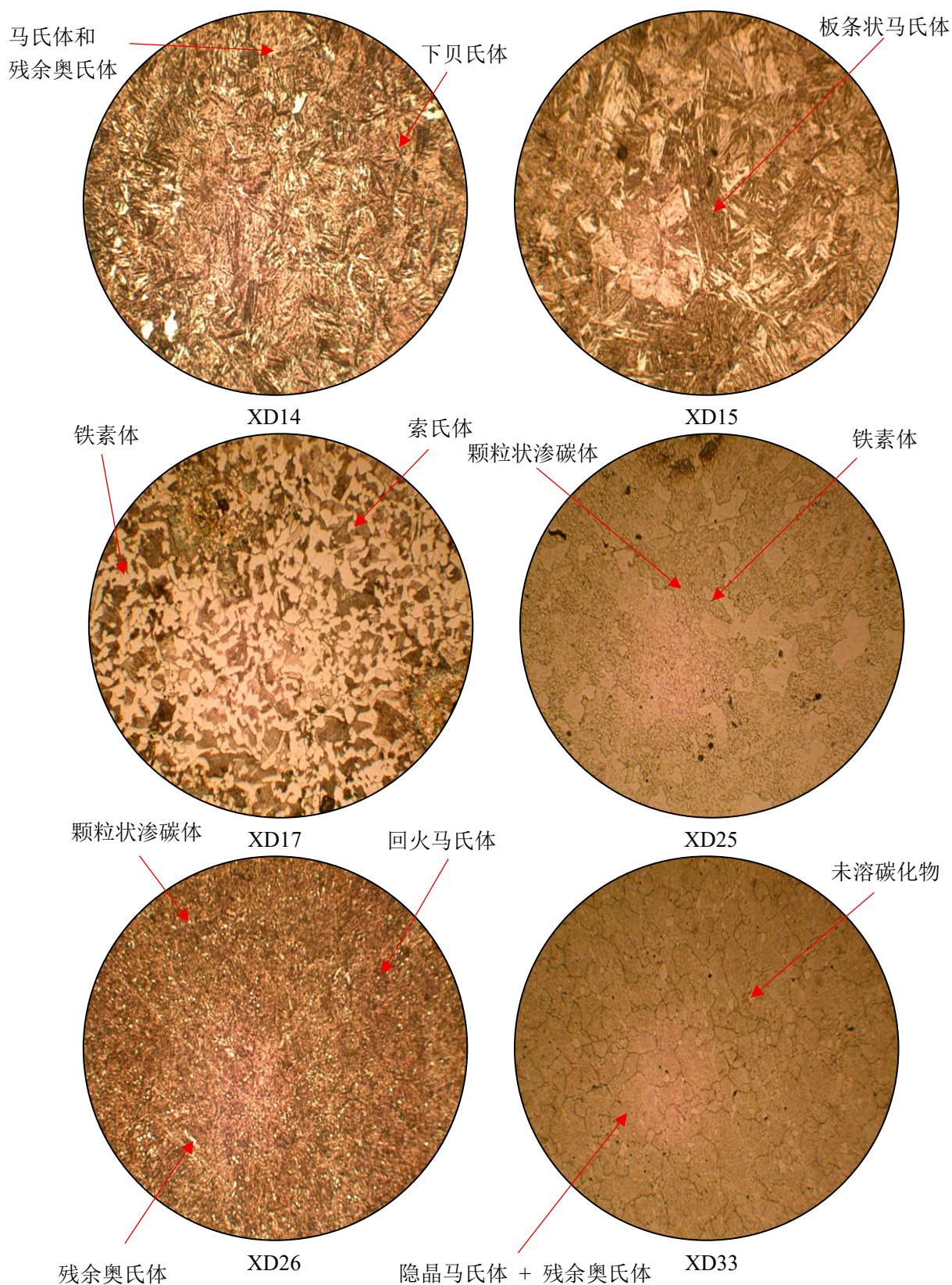
## 2. 实验步骤

1. 领取包含不同热处理状态的碳钢及高速钢金相试样。
2. 在金相显微镜下仔细观察各个试样（如 T10 球化退火、45 钢正火、T8 等温淬火、20 钢/T12 钢淬火及回火、20 钢渗碳、高速钢各阶段组织）的显微组织特征。
3. 在电脑中截取指定序号（如 XD14, XD15 等）的显微组织图。画出显微组织示意图，并用引线标注出铁素体、渗碳体、马氏体、残余奥氏体等组成物的名称。
4. 填写实验结果表，记录材料、热处理工艺、浸蚀剂及观察到的显微组织组成物。



#### 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。（除 XD25 为 20x10，其他试样观察倍率均为 20x40）



## 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	4%	铁素体 + 颗粒状渗碳体 (或球状珠光体)
XD17	Ⅱ-03	45	正火		铁素体 + 索氏体
XD13	Ⅱ-08	T8	400℃等温水淬		上贝氏体 (铁素体条 + 条间渗碳体)
XD14	Ⅱ-09	T8	300℃等温水淬		下贝氏体 + 马氏体 + 残余奥氏体
XD15	Ⅱ-02	20	淬火	硝	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	回火马氏体 + 残余奥氏 体
XD26	Ⅱ-11	T12	淬火+低温回火	精	回火马氏体 + 颗粒状渗 碳体 + 残余奥氏体
					表层:珠光体 + 网状渗碳 体;
XD39	Ⅱ-14	20	渗碳后缓冷	溶	过渡区: 珠光体;
					心部: 铁素体 + 珠光体
XD31	Ⅲ-04	W18 Cr4V	铸态	液	莱氏体 (屈氏体 + 骨骼 状碳化物)
XD32	Ⅲ-05	W18 Cr4V	锻造+退火		索氏体 + 颗粒状碳化物
XD33	Ⅲ-06	W18 Cr4V	淬火		隐晶马氏体 + 残余奥氏 体 + 未溶碳化物
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

- 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？

### （1）45 钢不同热处理后的组织及性能分析

热处理工艺	显微组织	性能特点
完全退火	铁素体 (F) + 珠光体 (P)	硬度低，塑性和韧性好，消除内应力，便于切削加工。
正火	铁素体 (F) + 索氏体 (S)	强度和硬度比退火态高，综合机械性能较好。
淬火	马氏体 (M)	硬度最高，强度高，但脆性大，塑性和韧性很低，内应力大。
调质 (淬火+高温回火)	回火索氏体	具有良好的强度、塑性和韧性的配合

### （2）45 钢淬火后硬度偏低的原因

#### 1. 加热不足：

显微特征：如果在淬火组织（马氏体基体）中观察到白色的块状或网状铁素体。

原因：加热温度过低（低于  $A_{c_3}$  线），导致奥氏体化不完全，部分铁素体未溶入奥氏体中，淬火后保留下来。铁素体硬度极低，导致整体硬度下降。

#### 2. 冷却速度不够：

显微特征：如果在组织中观察到黑色的团块状屈氏体 (T)。

原因：冷却速度小于临界冷却速度，导致过冷奥氏体在高温区发生了非马氏体转变，形成了硬度较低的屈氏体组织。

- 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。

#### （1）显微组织对比

XD26：回火马氏体 + 颗粒状渗碳体 + 少量残余奥氏体。

XD27：粗大的针状回火马氏体 + 大量残余奥氏体。

#### （2）产生原因分析

XD26：加热温度适当（约  $760^{\circ}\text{C}$ ），即  $A_{c_1}$  以上， $A_{c_{cm}}$  以下。此时奥氏体晶粒细小，且保留了部分未溶的二次渗碳体颗粒。淬火后获得细小的马氏体，且因碳化物未完全溶解，奥氏体中碳含量适中，残余奥氏体量较少。

XD27：加热温度过高（如  $1000^{\circ}\text{C}$ ），超过了  $A_{c_{cm}}$  线。高温导致奥氏体晶粒急剧长大，淬火后形成粗大的针状马氏体。二次渗碳体全部溶入奥氏体，导致奥氏

体中碳含量极高，降低了  $M_s$  和  $M_f$  点，致使淬火后残余奥氏体量显著增加。

(3) 性能差别

XD26: 具有高硬度、高耐磨性，且由于晶粒细小，韧性较好。

XD27:

1. 脆性大: 粗大的针状马氏体容易导致微裂纹，显著增加脆性。
2. 耐磨性降低: 硬度极高的粒状渗碳体消失，且软的残余奥氏体增多，降低了耐磨性。
3. 硬度可能偏低: 虽然马氏体含碳量高硬度高，但大量残余奥氏体的存在可能会导致整体硬度下降。