

## 实验四 碳钢淬火、回火后的组织观察与硬度分析

### 一、实验目的

1. 了解碳钢的淬火、回火过程。
2. 观察和研究碳钢经不同淬火、回火处理后显微组织的特点，分析冷却条件、淬火温度及回火条件对其组织形态与硬度的影响，并了解淬火、回火的应用领域。

### 二、实验原理

热处理是一种很重要的热加工工艺方法，也是充分发挥金属材料性能潜力的重要手段。热处理的主要目的是改变钢的性能，其中包括使用性能及工艺性能。绝大多数重要的机械零件在制备过程中都需要经过热处理，其目的就是把工件加热到一定温度，然后根据不同的要求采取不同的保温时间、冷却速度，使金属零件中的组织结构产生预期的变化，从而使零件具有不同的机械性能。

热处理的结果是工件的组织状态改变了，性能也改变了。例如，钢件经淬火后，其组织变成马氏体，其力学性能变得更硬、更强、更耐磨了；相反地，若用退火工艺则会使钢件变得更软些。总之，热处理对钢件性能具有极大影响，工件的质量则是由正确的热处理工艺确定的。

热处理包括许多不同的过程，但基本上可把它们归纳为：把要进行热处理的工件加热到一定温度，在此温度保持一段时间，使其组织达到完全转化，然后再以某种速度进行冷却。因此，热处理包括四个因素：加热速度、最高温度、加热时间（通常将工件升温 and 保温所需时间算在一起，统称为加热时间）和冷却速度。根据热处理工艺的使用和进行方式不同，热处理一般可分为下列四种类型：退火、正火、淬火、回火（本节内容主要学习**淬火及回火**两种类型）。

#### 一) 淬火

将钢奥氏体化后以大于临界冷却速度的速度进行冷却，获得马氏体或下贝氏体组织的热处理工艺，称为淬火。钢淬火的主要目的是为了获得马氏体，提高它的硬度和强度。例如，各种高碳钢和轴承合金钢的淬火，就是为了获得马氏体组织，以提高工件的硬度和耐磨性。

- 1、淬火温度的选择：根据钢的相变点选择淬火加热温度，主要以获得细小均匀的

奥氏体为主，一般原则是：亚共析钢为 $A_3 + (30\sim 50)^\circ\text{C}$  ( $A_3$ 线是钢 $\alpha$ 固溶体转变为 $\gamma$ 固溶体之临界温度)，共析钢和过共析钢 $A_1 + (30\sim 50)^\circ\text{C}$  ( $A_1$ 为共析转变温度)，如图1所示。选择淬火温度时，还应考虑淬火工件的性能要求、原始组织状态、形状及尺寸等因素。如果淬火温度选择不当，淬火后得到的组织也不能达到要求。

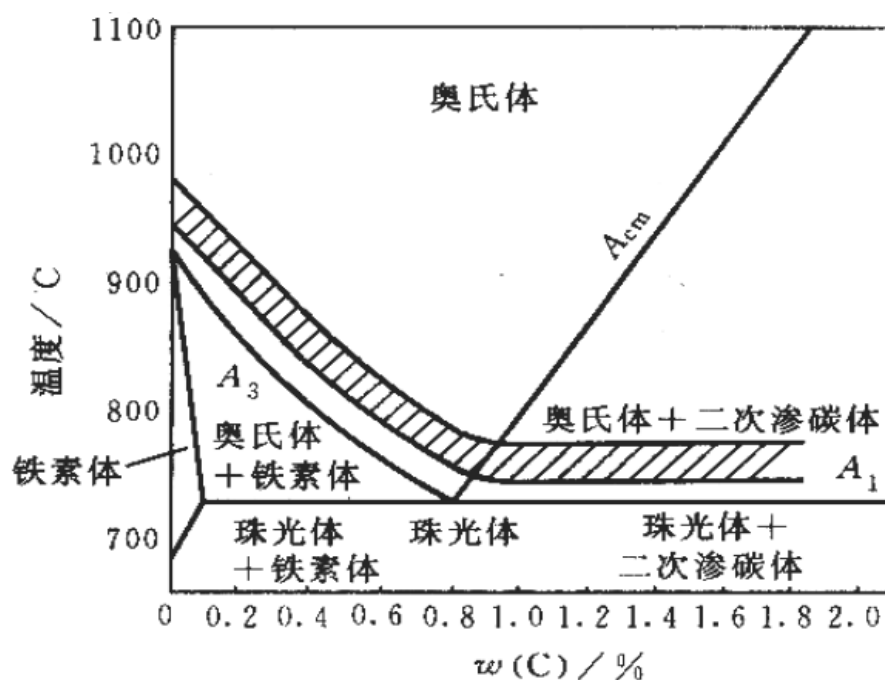


图1：淬火的加热温度范围

2、保温时间：保温的目的是使钢件热透，使奥氏体充分转变为均匀化。保温时间的长短主要根据钢的成分、加热介质和零件尺寸决定，计算公式为：

$$\tau = \alpha KD$$

式中， $\alpha$ 为加热系数； $K$ 为装炉系数； $D$ 为有效尺寸，mm

3、淬火冷却介质：钢在加热获得奥氏体后要选用适当的冷却介质进行冷却，获得马氏体组织。常用的冷却介质有油、水、盐水、碱水等，其冷却能力依次增加，但是这些冷却介质都存在不同的缺点。目前又发展了一些新型的冷却介质，克服了以前常用介质的弱点，尽量接近于理想的淬火介质。

4、淬火后的组织：亚共析钢淬火后得到马氏体组织，马氏体组织为板条状或针状，低碳钢（碳含量小于0.25%的非合金钢）淬火后的组织在光学显微镜下，其形态为一束束接近相互平行的细条状马氏体群。在一个奥氏体晶粒内可有几束不同取向的马氏体群，其中条与条之间以小角度晶界分开，束与束之间具有较大的位向差。

中碳钢（碳含量介于0.25%~0.6%之间的非合金钢）经正常淬火后将得到细针状马氏体和板条状马氏体的混合组织。由于马氏体针非常细小，在显微镜下不易分辨清晰。高碳钢（碳含量大于0.6%的非合金钢）如共析钢和过共析钢在等温淬火后可得到贝氏体组织，譬如T8钢在550~350℃及350~ $M_s$ （马氏体转变温度）内等温淬火，过冷奥氏体将分别转变为上贝氏体和下贝氏体。上贝氏体是由成束平行排列的条状铁素体和条间断分布的渗碳体组成的片层状组织；当转变量不多时，在光学显微镜下可看到成束的铁素体由奥氏体晶界向内伸展，具有羽毛特征，如图2（a）所示。下贝氏体是在片状铁素体内部沉淀有碳化物的组织；由于易受浸蚀，所以在显微镜下呈黑色针状特征，如图2（b）所示。

共析钢和过共析钢在淬火后亦得到马氏体组织，如T8钢淬火后除得到针状马氏体外，还有较多的残余奥氏体。高碳马氏体呈片状，片间互成一定角度。在一个奥氏体晶内，第一片形成的马氏体较粗大，往往贯穿整个奥氏体晶粒，将奥氏体加以分割，以后形成的马氏体针状则受其限制逐渐变小而成片状，并且有长短粗细之分，如图2（c）所示。

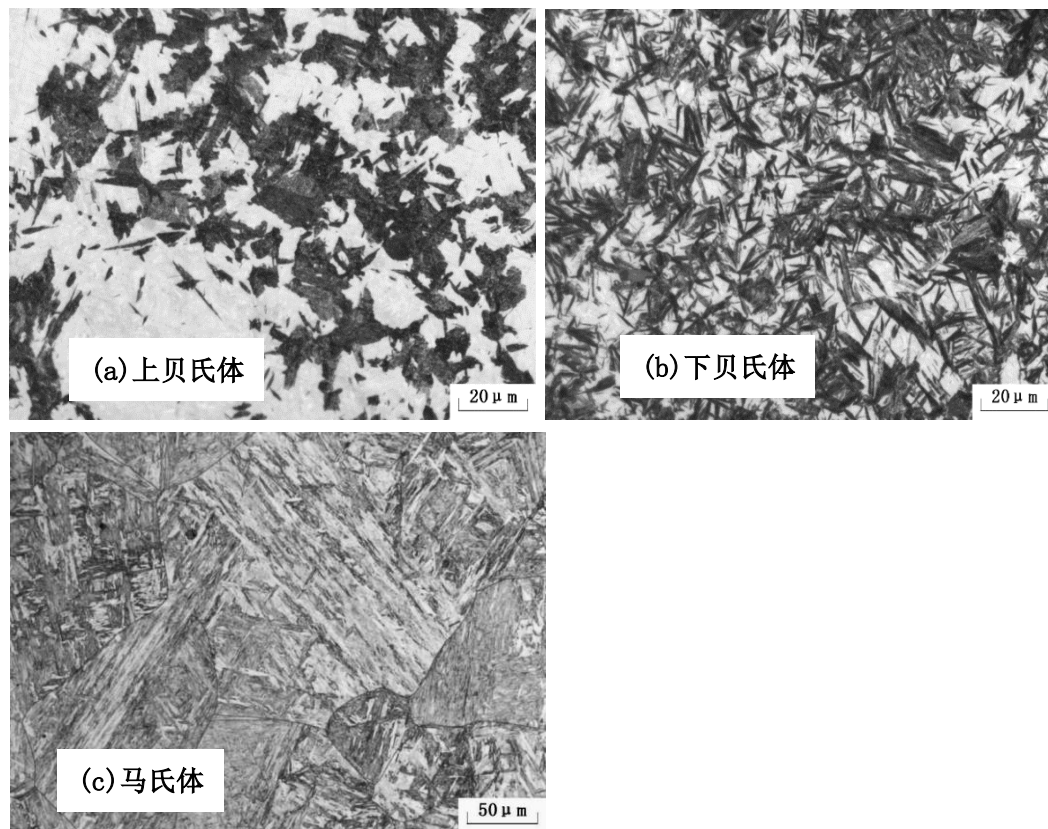


图2：T8钢的淬火组织

## 二) 回火

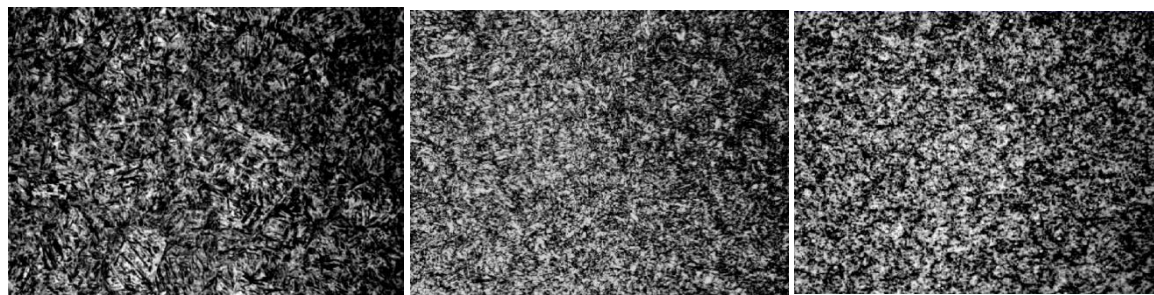
回火是将经过淬火的试样加热到临界点 $A_1$ 以下的适当温度，保持一定时间后，采用适当的冷却方式进行冷却，以获得所需的组织和性能的热处理工艺。回火过程中将引起马氏体和残余奥氏体的分解。回火主要是消除内应力，获得所要求的力学性能以提高尺寸和稳定性等。根据回火温度的不同，回火可分为低温回火(150~250℃)、中温回火(350~500℃)和高温回火(500~650℃)三种。并且淬火钢经不同温度回火后所得到的组织也不相同，低温回火得到回火马氏体，中温回火得到回火屈氏体，高温回火得到回火索氏体。具体组织形态如下：

(1) 回火马氏体：经低温回火后，从淬火马氏体内脱溶沉淀析出高度弥散的与母相保持着共格联系的碳化物质点的组织。回火马氏体仍保持针状特征，但容易受浸蚀，颜色要比淬火马氏体深些，呈暗黑色的针状组织。并且回火马氏体具有高的强度和硬度，同时韧性和塑性也较淬火马氏体有明显改善。如45钢经淬火+低温回火后的组织如图2 (a) 所示。

(2) 回火屈氏体：经中温回火后，在铁素体基体上弥散分布着微小粒状的渗碳体组织。回火屈氏体中的铁素体仍然保持原来针状马氏体的形态，渗碳体则呈细小的颗粒状，在光学显微镜下不易分辨清楚，故呈暗黑色。这种组织具有较好的强度和硬度，尤其具有非常高的弹性性能。如45钢经淬火+中温回火后的组织如图2 (b) 所示。

(3) 回火索氏体：经高温回火后，由颗粒状渗碳体和多边形的铁素体组成的组织。回火索氏体具有强度、韧性和塑性较好的综合机械性能。45钢经淬火+高温回火后的组织如图2 (c) 所示。

回火所得到的回火索氏体和回火屈氏体与由过冷奥氏体直接分解出来的索氏体和屈氏体在显微组织上是不同的，前者中的渗碳体呈粒状而后者则为片状。



(a) 淬火+低温回火

(b) 淬火+中温回火

(c) 淬火+高温回火

图2：45钢淬火后不同回火处理后的显微组织

### 注意事项:

- 1) 本实验加热为高温马弗炉，在放、取试样时一定要注意安全。
- 2) 往炉中放、取试样必须使用夹钳，夹钳必须擦干，不得沾有油和水。
- 3) 淬火时，试样要用钳子夹住，动作要既稳又快，并不断在水或油中搅动，以免由于冷却不够均匀而影响热处理质量。
- 4) 淬火或回火后的试样均要用砂纸打磨掉表面黑色氧化皮后再测定硬度值。

### 三、实验仪器、用具等

箱式电阻加热炉，洛氏硬度计，砂纸，抛光机，金相显微镜。热处理试样：**45钢**。  
冷却介质水和油及淬火水桶，长柄铁钳等。

### 四、实验内容、步骤及要求

- 1、每4人一组，领取**45钢**（4个），每组共同完成一套实验（对应下表中相应的热处理工艺方法）。

表：试样的热处理工艺

试样号码	钢号	热处理工艺	浸蚀剂	建议放大倍数
1	45	淬火，油冷	4%硝酸酒精	200~500
2	45	淬火，水冷	4%硝酸酒精	200~500
3	45	淬火+中温回火	4%硝酸酒精	200~500
4	45	淬火+高温回火	4%硝酸酒精	200~500

- 2、制定热处理工艺参数，加热温度和淬火冷却方式按照表中给定的实施（各小组可在合理范围内适当调整加热温度），淬火加热保温时间根据给定试样的尺寸，依据公式计算求得（20-30分钟），回火保温时间均采用1小时且均采用空冷方式。

① 45钢淬火工艺：加热温度为 $860 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ，根据试样有效尺寸计算保温时间，保温后用长柄铁钳夹出放入淬火油中冷却。

② 45钢淬火工艺：加热温度为 $860 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ，根据试样有效尺寸计算保温时间，保温后用长柄铁钳夹出放入水中进行冷却。

③ 45钢淬火+中温回火工艺：淬火方式为加热温度为 $860 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ，根据试样有效尺寸计算保温时间，保温后出炉进行水淬。随后放入炉中加热至 $400^{\circ}\text{C}$ ，保温1

个小时后出炉空冷。

④ 45钢淬火+高温回火工艺：加热温度为 $860 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ，根据试样有效尺寸计算保温时间，保温后出炉进行水淬。随后放入炉中加热到 $600^{\circ}\text{C}$ ，保温1个小时后出炉空冷。

3、利用硬度计对所有热处理后的试样进行硬度测试，每个试样至少三个试验点，再取一个平均值。进行回火的试样需进行两次硬度测试，即淬火后回火前、回火后两次，测试结果记录于下表中。（硬度测试须在金相磨制观察前完成）

不同热处理试样的硬度值

材料及热处理状态	测得硬度数据（HRC）	
45钢经 $860^{\circ}\text{C}$ 加热、油淬		
45钢经 $860^{\circ}\text{C}$ 加热、水淬		
45钢经 $860^{\circ}\text{C}$ 加热、水淬、 $400^{\circ}\text{C}$ 回火		
45钢经 $860^{\circ}\text{C}$ 加热、水淬、 $600^{\circ}\text{C}$ 回火		

4、根据拟定的热处理工艺对试样进行相应的热处理，然后利用金相砂纸对热处理后的试样进行磨制、抛光，并用4%的硝酸酒精进行腐蚀制得金相试样。利用金相显微镜对其进行显微组织观察，分析热处理工艺对其组织的影响。

5、实验结束后，汇总各小组实验数据，根据实验数据分析冷却方法及回火温度对碳钢性能（硬度）的影响，画出回火温度同硬度的关系曲线，并阐明硬度变化的原因。

五、实验思考与讨论

1、45钢淬火后硬度不足，如何用金相分析来断定是淬火加热温度不足还是冷却速度不够？

## 附件1：洛氏硬度计参数

试验时应按下表选用压头和总试验力。

刻 度 符 号	压 头	总试验力 N(kgf)	标注硬度 符 号	允许测量 范 围
B	φ1.588 毫米钢球	980.7(100)	HRB	20—100
C	120° 金钢石	1471(150)	HRC	20—70
A	120° 金钢石	588.4(60)	HRA	20—88

A 标尺:用于测定硬度超过 70HRC 的金属(如碳化钨、硬质合金等),也可测定硬的薄板材料以及表面层淬硬的材料。

C 标尺:用于测定经过热处理的钢制品硬度。

B 标尺:用于测定较软的或中等硬度的金属以及未经淬硬的钢制品。