

# 目录

<b>1 实验目的</b>	<b>1</b>
<b>2 实验原理</b>	<b>1</b>
2.1 热处理原理概述 . . . . .	1
2.1.1 正火 . . . . .	1
2.1.2 淬火 . . . . .	1
2.2 热处理微观组织 . . . . .	3
2.2.1 正火组织 . . . . .	3
2.2.2 淬火组织 . . . . .	3
<b>3 实验材料和仪器</b>	<b>5</b>
3.1 实验材料 . . . . .	5
3.2 实验仪器 . . . . .	5
<b>4 实验步骤</b>	<b>5</b>
4.1 淬火 . . . . .	5
4.1.1 加热温度 . . . . .	5
4.1.2 加热时间 . . . . .	6
4.1.3 具体操作 . . . . .	6
4.2 显微组织观察 . . . . .	7
4.3 测定维氏硬度 . . . . .	7
<b>5 实验结果与分析</b>	<b>7</b>
5.1 显微组织分析 . . . . .	7
5.1.1 20CrMo 钢 . . . . .	7
5.1.2 42CrMo 钢 . . . . .	10
5.1.3 T10 钢 . . . . .	12
5.2 合金元素的影响 . . . . .	14
5.3 样品硬度分析 . . . . .	14

目录	2
5.3.1 各组织的机械性能 . . . . .	14
5.3.2 各样品的维氏硬度 . . . . .	14
5.3.3 分析 . . . . .	14
<b>6 结论</b>	<b>15</b>

## 1 实验目的

- 掌握碳钢的淬火工艺及其应用。
- 研究冷却条件与钢性能的关系。
- 观察钢经热处理后的组织，熟悉碳钢经不同热处理后的显微组织及形态特征。

## 2 实验原理

### 2.1 热处理原理概述

热处理是一种很重要的金属热加工工艺方法，也是充分发挥金属材料性能潜力的重要手段，它的主要目的是改变钢的性能。所谓热处理是将钢在固态下通过加热、保温与冷却的方法改变其组织与性能的工艺。主要包括退火、正火、淬火及回火。本实验主要涉及正火与淬火工艺。

#### 2.1.1 正火

正火工艺将钢加热到  $A_{c_3}$  或  $A_{c_m}$  以上  $30\text{--}50^\circ\text{C}$ ，保温一定时间，然后在空气中冷却的工艺方法，称为正火。正火的速度比退火快，可获得较为细密的索氏体组织，因而比退火组织具有较高的强度和硬度。

#### 2.1.2 淬火

钢的淬火是将钢加热到相变温度 ( $A_{c_3}$  或  $A_{c_1}$ ) 以上，保温一定时间后，以快速冷却的一种工艺，通常淬火钢的基体是马氏体。将钢加热到  $A_{c_3}$  以上称为完全淬火，加热到  $A_{c_1}$  以上为不完全退火。

淬火冷却方法非常重要，一方面冷却速度要大于临界冷却速度，以保证全部得到马氏体组织；另一方面冷却应尽量缓慢，以减少内应力，避免变形。

和开裂。为了解决上述矛盾，可以采用不同的冷却介质和方法，使淬火工件在奥氏体最不稳定的温度范围内（650—550°C）快冷，超过临界冷却速度，而在  $M_s$ （300—100°C）点以下温度时冷却较慢，理想的冷却速度如图 1 所示。

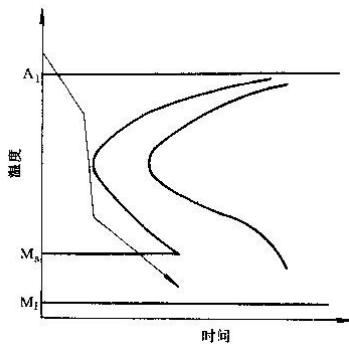


图 1: 淬火时的理想冷却曲线示意图

冷却介质一般用油、水和盐水，这三种介质的冷却能力依次增强。由于碳钢的含碳量不同、淬火加热温度不同、冷却介质不同时所得到的组织不同，因而性能也不同。本实验采用的冷却剂为水与矿物油。

冷却介质	冷却速度 °C/s	
	650—550°C 区间	300—200°C 区间
水 (26°C)	500	270
矿物油	150	30

表 1: 水及矿物油的冷却能力

## 2.2 热处理微观组织

### 2.2.1 正火组织

正火的冷却速度大于退火的冷却速度，因此，在相同含碳量情况下，正火比退火的组织要细，得到的组织为：索氏体 + 铁素体（呈断续网状分布），见图 2。

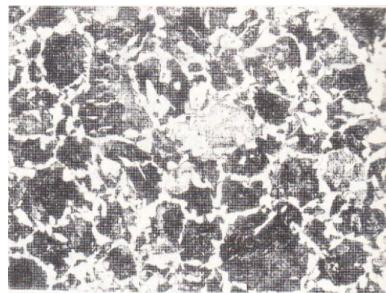


图 2: 45 钢正火组织 400×

### 2.2.2 淬火组织

**马氏体组织** 马氏体是奥氏体在冷却速度大于临界冷却速度到  $M_s$  温度得到的转变产物，有两种典型形态：板条马氏体和片状马氏体。

**板条马氏体** 板条马氏体是一种低碳马氏体，其显微组织特征是由一束束相互平行排列的板条状组织成群分布，在一个奥氏体晶粒内可能有几个不同取向的马氏体群，在一个奥氏体晶粒内可能有几个不同取向的马氏体群。图 3 为低碳钢的淬火组织。

**片状马氏体** 片状马氏体是一种高碳马氏体，其显微组织的主要特征是在光学显微镜下呈现针状或竹叶状，高碳钢经过高温淬火得到粗大的针状马氏体，其立体形貌是凸透镜状。图 4 为高碳钢的淬火组织。



图 3: 低碳钢的淬火组织



图 4: Fe-32Ni 合金的片状马氏体组织

**油冷组织** 由于油冷的冷速较水冷慢，沿奥氏体晶界首先析出屈氏体，并呈现网状分布。随后剩余奥氏体转变成为混合马氏体。图 5 为 45 钢的油冷组织。



图 5: 45 钢油冷组织 500×

### 3 实验材料和仪器

#### 3.1 实验材料

实验采用材料为高约 15mm, 直径  $\phi$  约 20mm 的圆柱形 20CrMn, 42CrMo, T10 钢样品, 其化学成分见表 2。

表 2: 20CrMn, 42CrMo, T10 钢的化学成分

	C(%)	Si(%)	Mn(%)	Cr(%)	Mo(%)
20CrMo	0.17-0.24	0.17-0.37	0.40-0.70	0.80-1.10	0.15-0.25
42CrMo	0.38-0.45	0.17-0.37	0.50-0.80	0.90-1.20	0.15-0.2
T10	0.95-1.04	0.35	0.40	0.25	0.20

#### 3.2 实验仪器

- 箱式电阻炉
- 维氏硬度计
- 金相显微镜及电子扫描显微镜
- 抛光膏及抛光机
- 浸蚀剂、酒精、玻璃器皿、竹夹子、脱脂棉、滤纸等

### 4 实验步骤

#### 4.1 淬火

##### 4.1.1 加热温度

根据表 2 提供的化学成分和图 6 综合考量, 设定加热温度为 850°C.

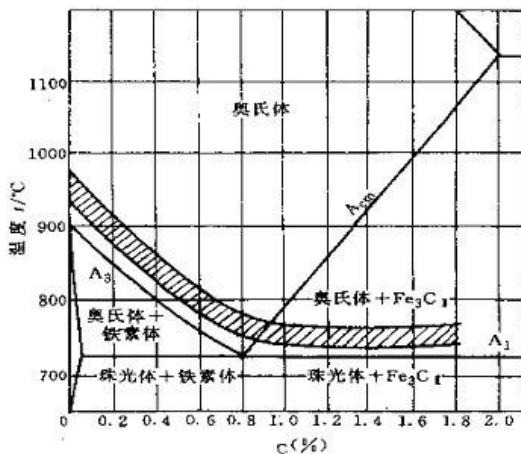


图 6: 淬火的加热温度范围

#### 4.1.2 加热时间

淬火加热保温时间按下列经验公式估算:

$$t = \alpha \cdot K \cdot H$$

式中  $t$ —保温时间 (min);

$\alpha$ —加热系数 (min/mm) (对于 800°C-900°C 箱式炉加热一般可以取 1.0-1.2);

$K$ —工件装炉方式修正系数 (一般  $K = 1 \sim 1.5$ );

$H$ —工件有效厚度 (mm) (尺寸最小部位)。

结合样品尺寸计算可得样品至少需要加热 15min。

#### 4.1.3 具体操作

把样品放入箱式电阻内恒温区的耐火砖上, 调节加热温度, 待测温仪显示为 850°C 时开始计时, 保温 15min 后, 用火钳夹出样品迅速放入水、油槽中并剧烈搅拌, 使样品能淬透。正火样品放置在防火砖上待其空冷结束。

## 4.2 显微组织观察

用一套金相砂纸在玻璃板上先粗后细逐号磨光。注意每换上一号细一些的砂纸时，将磨光方向转换  $90^\circ$ ，以便于观察原磨痕的消除情况。最后，金相样品抛光机上细抛，使样品表面达到光亮如镜的光洁度。注意手持样品应用力均匀，用力也不宜过大。

将抛光好的样品，直接在显微镜下观察，应基本上没有磨痕和磨坑，而无法观察到晶界、各类相和组织。本实验采用化学浸蚀法，将浸蚀液（4% 硝酸酒精）和纯酒精各倒入一个玻璃器皿中，用竹夹子夹脱脂棉、蘸浸蚀液在样品表面擦拭，当光亮镜面呈浅灰白色，立即用水冲洗，并用酒精擦洗后经吸水纸吸干。

制备好的样品分别用光学显微镜在 100 和 500 倍不同放大倍数下，用扫描电子显微镜在 1000 和 2000 倍下观察组织，并拍摄图片。

## 4.3 测定维氏硬度

然后，将样品放在维氏硬度计的载物台上，调整焦距，在试样上不同位置取三个点个点，三个点计入数据，若三个点硬度值相差不大说明组织较为均匀，最后对三个测量值求平均值。

# 5 实验结果与分析

## 5.1 显微组织分析

### 5.1.1 20CrMo 钢

20CrMo 钢的 CCT 曲线如图 7 所示，并根据水冷、油冷及空冷的冷却速度，在图 7 中大致画出冷却曲线：

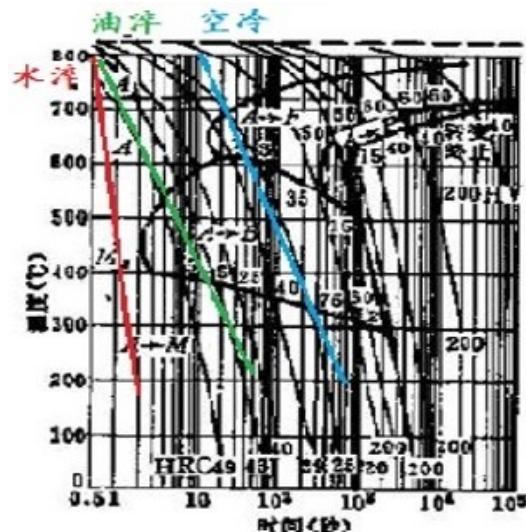


图 7: 20CrMo 钢的 CCT 曲线

**水冷** 水淬的冷却速度约为  $500^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , 由 CCT 曲线可知, 其冷却速度大于临界淬火速度, 可使奥氏体不发生珠光体相变而获得完全马氏体 (包括残余奥氏体)。

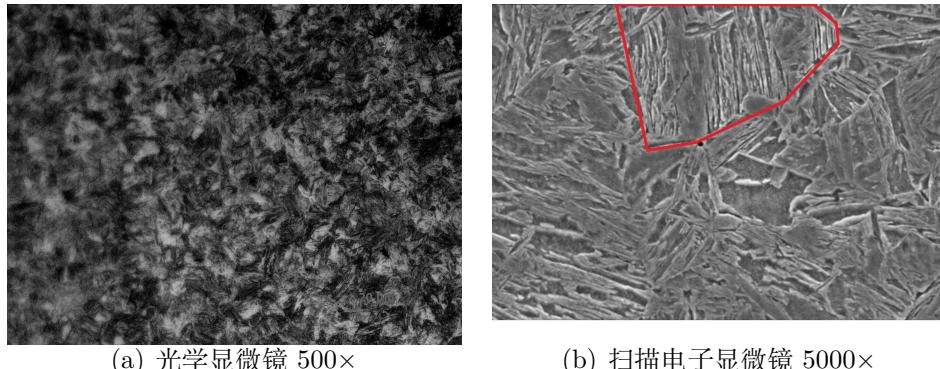


图 8: 20CrMo 钢水冷金相照片

**板条状马氏体** 板条状马氏体是低碳钢中形成的一种典型的马氏体组织, 因其显微组织是由许多成群的板条组成, 故称为板条状马氏体。因为这

种马氏体的亚结构主要为位错，通常也称为位错型马氏体。其马氏体晶粒呈一定角度相交，在图 8 中可以较清晰的看出。

**同位向束 板条** 板条状马氏体由板条群所组成，一个原始奥氏体晶粒内可有几个板条群。板条群由若干尺寸大致相同的板条在空间位向大致平行排列所组成，一个板条群又可分成几个平行的区域，称为同位向束。每个同位向束由若干个平行板条所组成，每个板条为一个马氏体单晶体，金相呈现为黑白交替的块，在图 8 电镜照片框中可以很清晰清晰的看出平行板条和其黑白交替，马氏体板条多被连续的残余奥氏体薄膜所隔开。

**表面浮突** 由于马氏体形成是以切变方式进行的，且一边相对凸起，一边相对凹陷，使表面出现浮突现象，且在板条状马氏体中，浮突呈现帐篷型。

**油冷** 水淬的冷却速度约为  $150^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，由 CCT 曲线可知，其冷却速度小于临界淬火速度，可使奥氏体不发生珠光体相变而获得完全马氏体（包括残余奥氏体）。

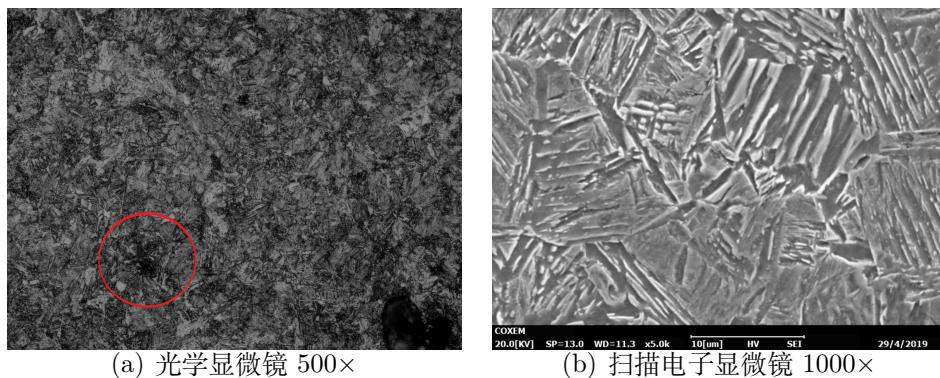


图 9: 20CrMo 钢油冷金相照片

**上贝式体** 在贝氏体相变区较高范围内形成的贝氏体称为上贝氏体，在光镜下观察时呈羽毛状、条状或针状，如图 9 中所示。

**板条马氏体** 在油冷的样品中，仍然存在特征显著的板条马氏体。

**空冷** 空冷的冷速较为缓慢，这里采取了  $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$  的冷却速度，从 CCT 曲线上看，有可能析出铁素体和珠光体。

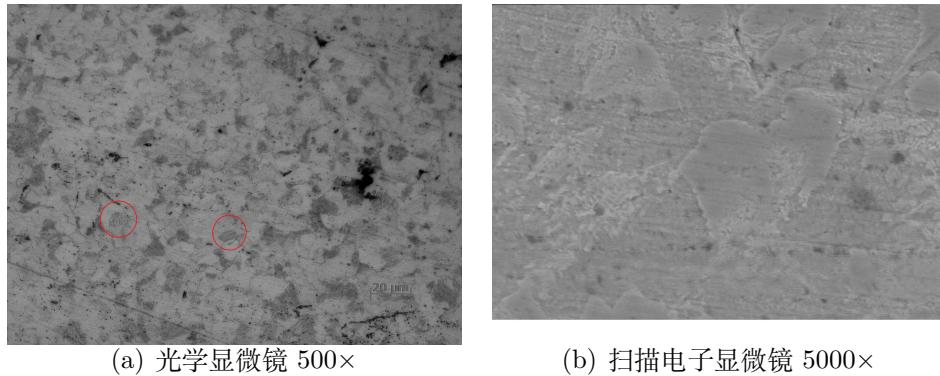


图 10: 20CrMo 钢空冷金相照片

**片状珠光体与铁素体** 由光镜的金相图片可以明显看出析出的铁素体晶粒，在光镜下呈现较亮的区域。同时，如图 10 中框中所示，较暗的片状珠光体，如果放大可隐约观察到铁素体和渗碳体交替的片层结构，由于缺少测量手段，无法进一步识别是珠光体、索式体或屈式体，但这三者仅在粗细上呈现差异，在本质上并无差别。

### 5.1.2 42CrMo 钢

42CrMo 钢的 CCT 曲线如图 11 所示，并根据水冷、油冷及空冷的冷却速度，在图 11 中大致画出冷却曲线：

**水冷** 从 CCT 曲线上可以看出，水冷的速度超过了 42CrMo 钢的临界淬火温度。

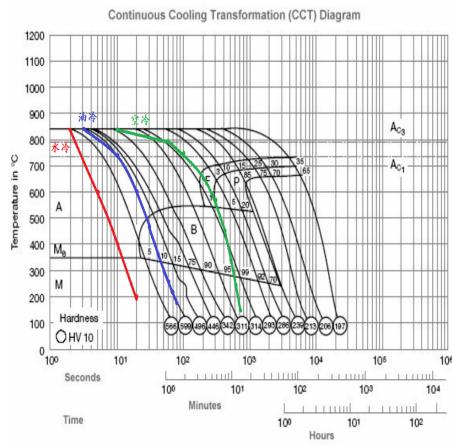
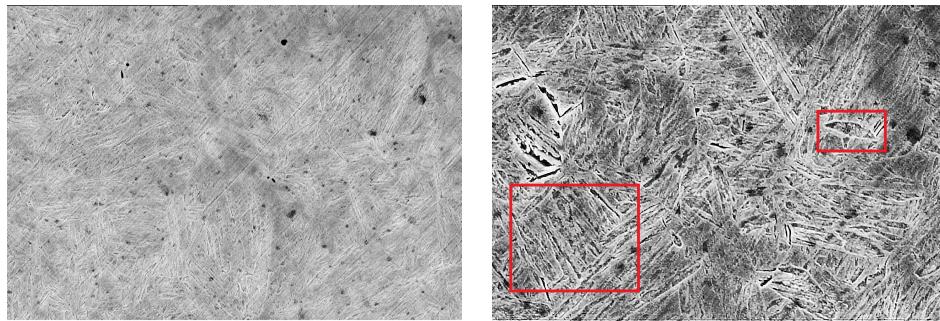


图 11: 42CrMo 钢的 CCT 曲线



(a) 扫描电子显微镜 1000×

(b) 扫描电子显微镜 5000×

图 12: 42CrMo 钢水冷金相照片

**混合马氏体** 不同于 20CrMo 钢, 42CrMo 钢经过水淬后得到了板条马氏体和片状马氏体的混合组织, 在 12 中可以看到具有典型板条马氏体的区域, 也能看到片状马氏体。

**下贝氏体** 在贝氏体相变区较低温度范围内形成的贝氏体称为下贝氏体, 典型的下贝氏体组织在光镜下呈暗黑色针状或片状, 而且各个片之间都有一定的交角, 如图 13 中可以很明显的看到暗黑色针状组织。

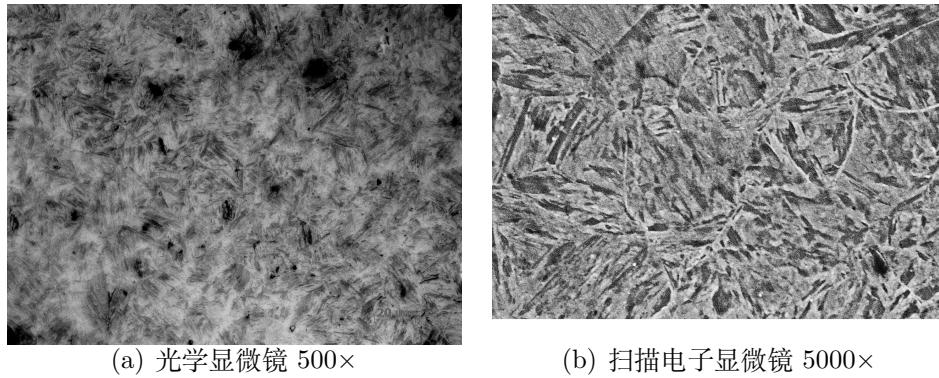


图 13: 42CrMo 钢油冷金相照片

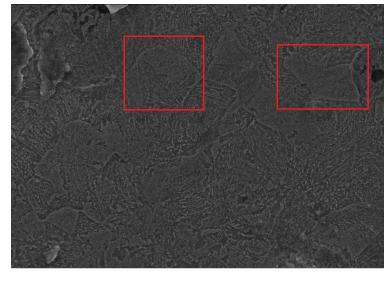


图 14: 42CrMo 钢空冷金相照片

**空冷**

**珠光体与铁素体** 与 20CrMn 钢类似，由于空冷的冷却速度较慢，铁原子可以充分扩散，如 14 所示，可先析出等轴块的铁素体。由于光镜的照片缺失，无法准确分辨是否存在珠光体。

### 5.1.3 T10 钢

**水冷**

**裂纹** 在淬火的初期，需要保持较高的冷速超过临界淬火温度，后期需要控制降低内部应力。但实验中水冷速度较快，同时 T10 钢的含碳量较

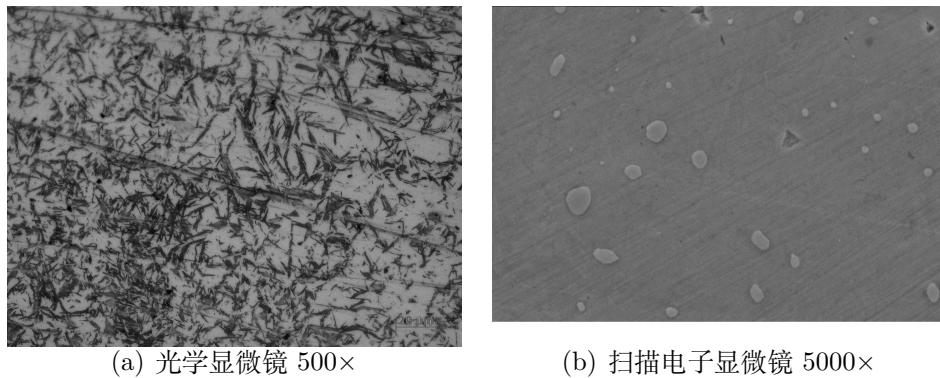


图 15: T10 钢水冷金相照片

高，后形成的马氏体片不断撞击先形成的马氏体，由于马氏体形成速度极快，相互撞击，同时还与奥氏体晶界撞击，产生相当大的应力场，在内部将聚集较大的应力，宏观上即可看到一条贯穿样品的裂纹。



图 16: T10 钢的淬裂图

**片状马氏体及渗碳体** 片状马氏体是铁基合金中的一种典型的马氏体组织，常见于淬火高、中碳钢中，在图 15 的光镜下可以非常清楚的看出针状和竹叶状的马氏体组织。另外其中还存在点状的渗碳体组织，在电镜照片中可以清晰的看出。

## 5.2 合金元素的影响

除 Co、Al 外，其它合金元素含量的上升，C 曲线将右移；虽然本次实验只有 20CrMo 和 42CrMo 两种合金元素相同的钢，但后者合金元素 Cr、Mn 的上升，C 曲线将右移，在基本相同的冷却条件（油冷）下，分别能够获得上贝氏体和下贝氏体，可以认为能够印证此理论。

## 5.3 样品硬度分析

### 5.3.1 各组织的机械性能

**铁素体** 铁素体含碳量极低，韧性，塑性很好，而强度硬度较低。

**渗碳体** 渗碳体是铁和碳形成的金属化合物，硬度很高，韧性、塑性几乎为零，脆性很大。

**贝氏体** 贝氏体的强度与贝氏体中铁素体的晶粒大小符合 Hall-Petch 公式，即铁素体晶粒（或亚晶粒）愈细小，贝氏体的强度就愈高，而且韧性有时还有所提高。贝氏体中渗碳体数量愈多，则硬度和强度就愈高，韧性和塑性就愈低。

**马氏体** 钢中马氏体最重要的特性就是高硬度和高强度，合金元素影响不大，其硬度随碳含量增加而升高，在 0.6% 处达到极值。

可以看出对硬度起贡献作用的主要是马氏体和渗碳体。

### 5.3.2 各样品的维氏硬度

### 5.3.3 分析

如表 3 所示：

材料	冷却方式	硬度值 (HV)
CrMo20	水冷	401.6
CrMo20	油冷	346.3
CrMo20	空冷	191.2
CrMo42	水冷	740.4
CrMo42	油冷	569.6
CrMo42	空冷	344.2
T10	水淬	902.1

表 3: 不同冷却条件下的硬度值

1. 随着含碳量的增加，马氏体的硬度增加，虽然在 0.6% 处达到极值，但 T10 钢中的渗碳体做了贡献，使硬度提高。
2. 随着冷却速度的增快，析出马氏体的百分比增加，样品的硬度增大。

## 6 结论

根据所做实验可以做出以下结论：

1. 淬火冷却条件可以影响金属的组织和性能。根据不同材料的 CCT 曲线，在不同的冷却条件下，将得到结构与机械性能迥然不同的组织。相对而言，冷却速度越快，马氏体转变越充分，得到的组织的硬度越大，反之可能会进行贝氏体、珠光体转变，导致硬度降低，但塑性增强。
2. 碳元素含量可以影响样品的组织和性能。碳元素能够起到固溶强化的作用，马氏体的硬度在 0.6% 以下时，将随着碳元素的增加而变大，但由于不同马氏体的相互碰撞形成的微观裂纹，碳元素的增加将增加材料淬裂的可能性。
3. 合金元素含量将通过影响 CCT 曲线的方式影响最终的结构和性能。