

# 热处理工艺与金相组织调控

艾云龙

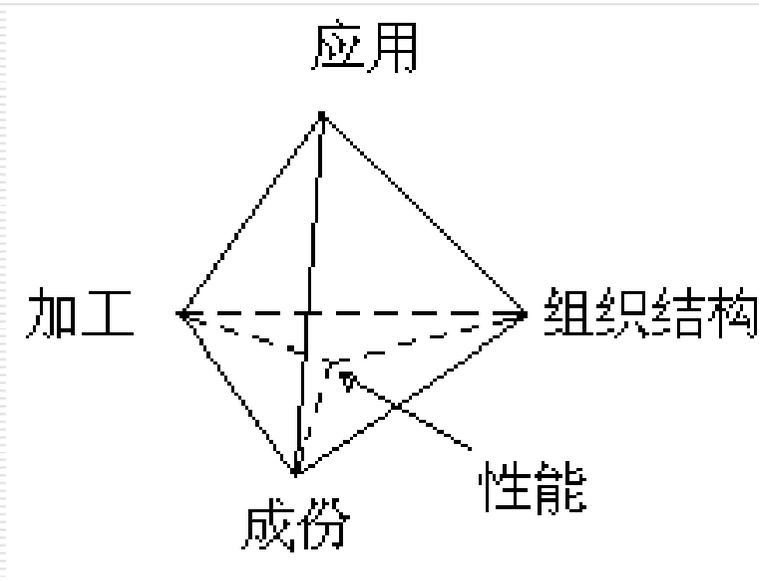
(江西省金属材料微结构调控重点实验室)



2021/3/30

## ◆ 组织结构、性能和加工合成间的联系

👉 基本要素：成份、结构，制造工艺，性能



● 应该怎样去了解材料，怎样才能获得性能满足我们使用要求的材料。

- 材料：你们最关心的是什么？
- 性能：你认为与哪些因素有关？
- 结构：有哪些检测分析技术？



## ◆ Fe-Fe<sub>3</sub>C相图

总类	分类名称	w <sub>C</sub> (%)
铁	工业纯铁 <sup>①</sup>	<0.0218
钢	亚共析钢	0.0218~0.77
	共析钢	0.77
	过共析钢	0.77~2.11
铸铁	亚共晶铸铁	2.11~4.30
	共晶铸铁	4.30
	过共晶铸铁	4.30~6.69

① 有时把工业纯铁也归于钢类。

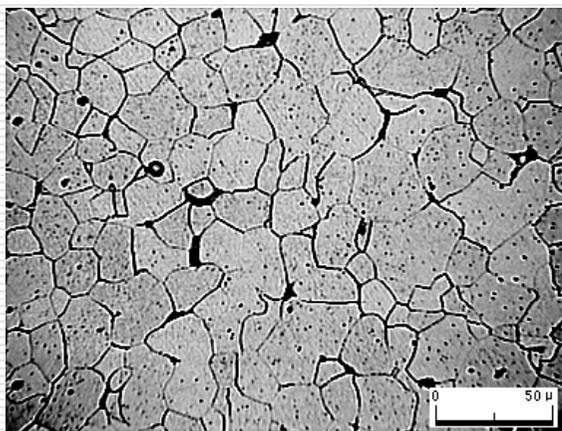
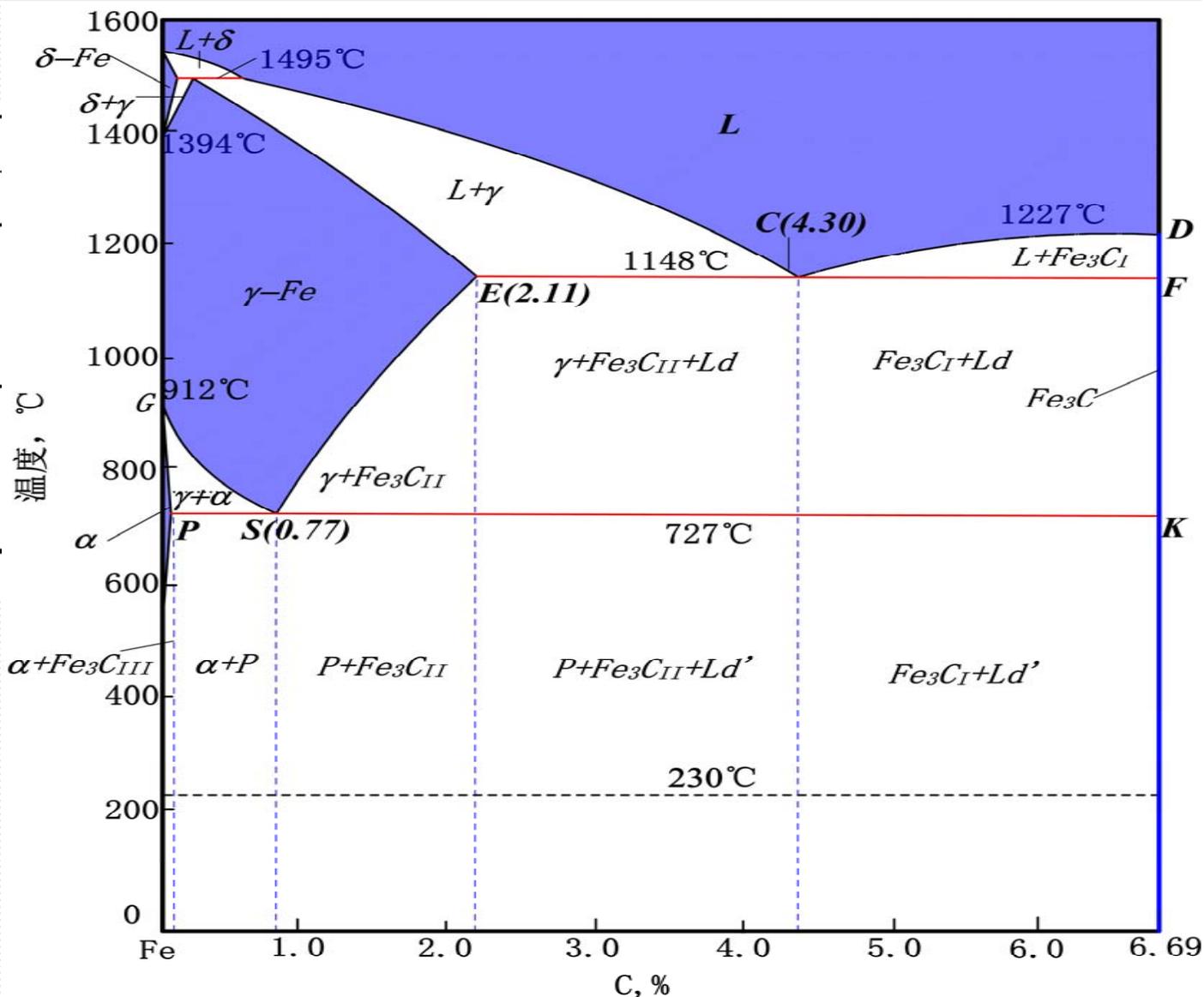


图1 工业纯铁的光学显微组织照片



# ◆ 碳钢平衡态金相组织

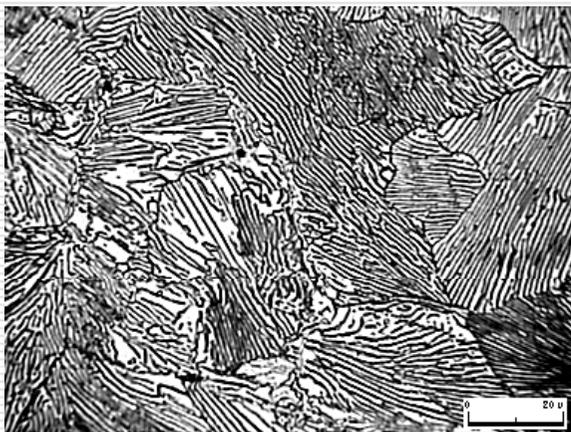


图2 珠光体的光学显微组织照片

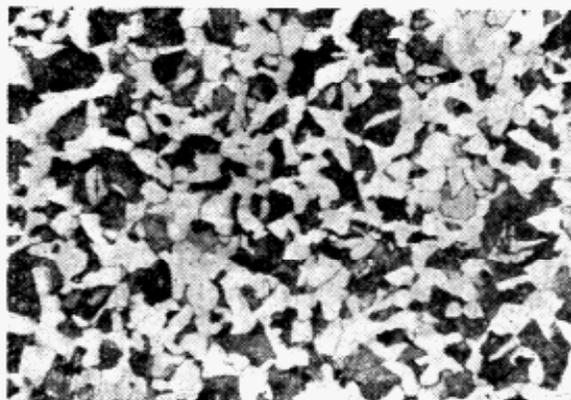


图3 亚共析钢光学显微组织照片

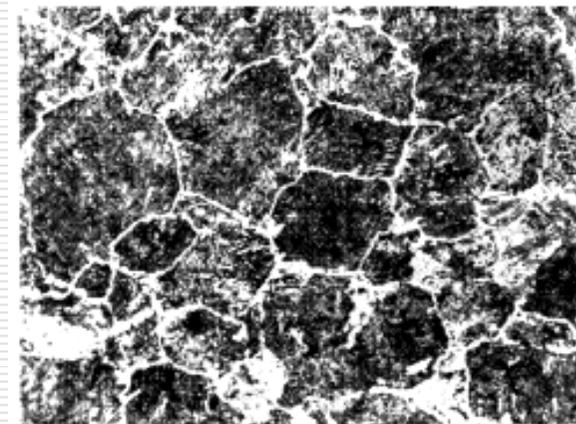


图4 过共析钢光学显微组织照片

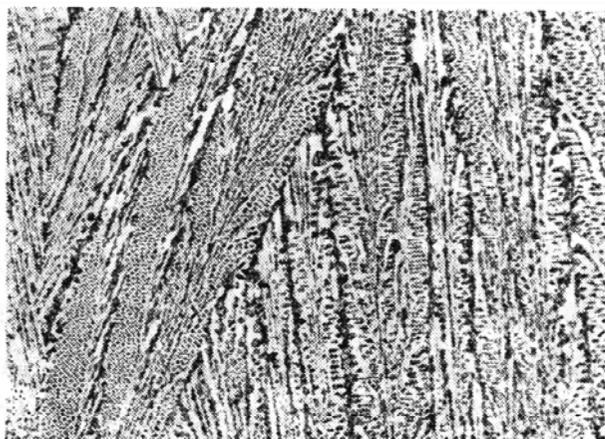


图5 共晶白口铸铁的光学显微组织照片  
(白色基体是共晶渗碳体, 黑色颗粒是共晶奥氏体转变成的珠光体)

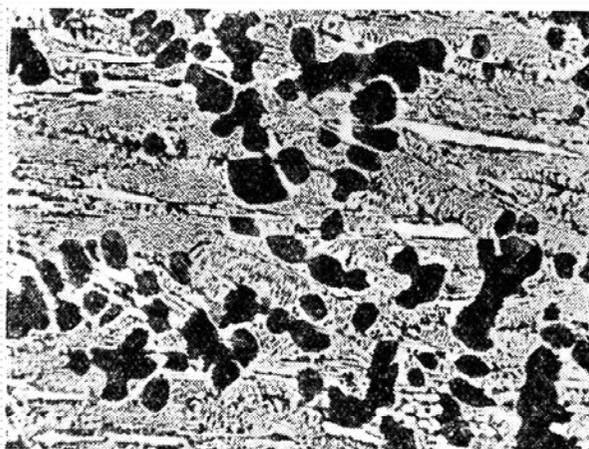


图6 亚共晶白口铸铁的光学显微组织照片  
(黑色树枝状组织为珠光体, 其余为莱氏体)

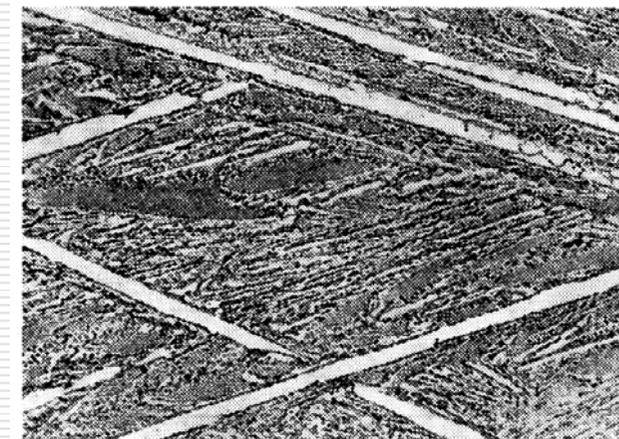
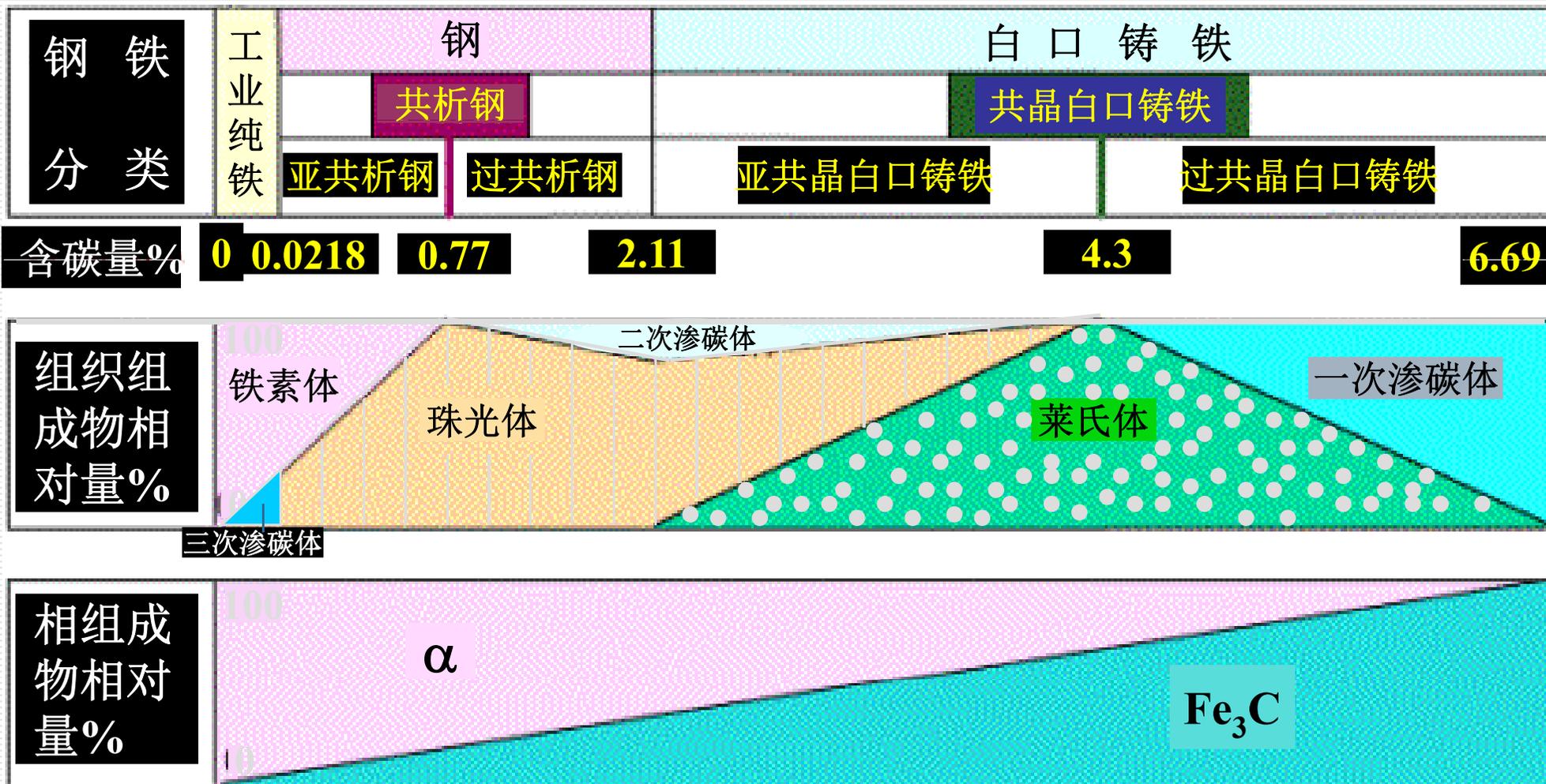


图7 过共晶白口铸铁的光学显微组织照片  
(白色条状为一次序渗碳体, 其余为莱氏体)



## ◆ 含碳量对室温平衡组织的影响



## ◆ 铁碳合金的组织与力学性能

### ➤ 对力学性能的影响

随C%提高, 强度、硬度升高, 塑韧性下降。

### ➤ 对工艺性能的影响

- 1) 适合锻造:  $C\% < 2.11\%$ , 可得到单相组织。
- 2) 适合铸造:  $C\% \sim 4.3\%$ , 流动性好。
- 3) 适合冷塑变:  $C\% < 0.25\%$ , 变形阻力小
- 4) 适合热处理:  $0.0218 - 2.11\%$ , 有固态相变。

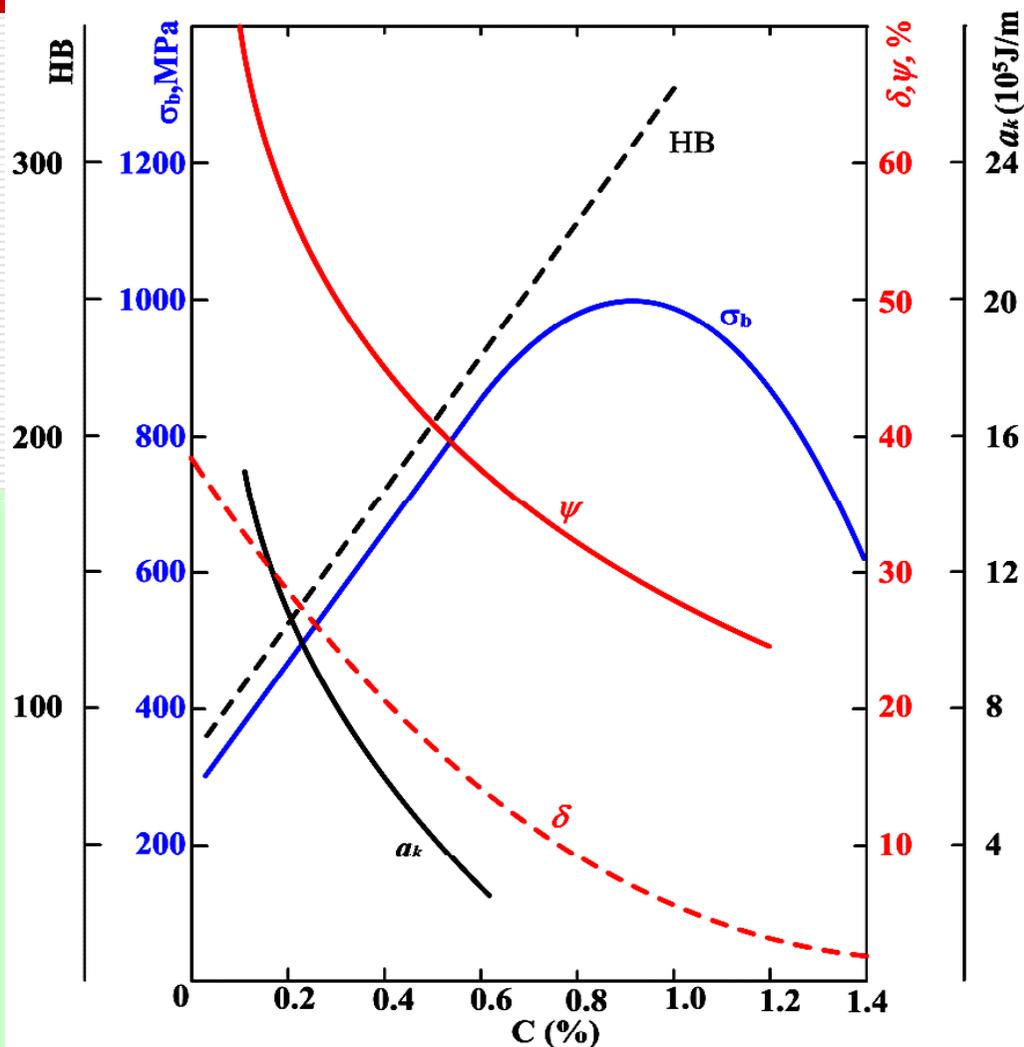


图 含碳量对平衡状态下碳钢机械性能的影响



# 热处理工艺与金相组织调控

## ◆ 石墨化过程

铸铁组织形成的基本过程就是铸铁中石墨的形成过程。

➤ 按照Fe-G相图，从液态和固态中直接析出石墨。

● 以过共晶合金的铁液为例，当它以极缓慢的速度冷却，并全部按Fe-G相图进行结晶时，则铸铁的石墨化过程可分为三个阶段：

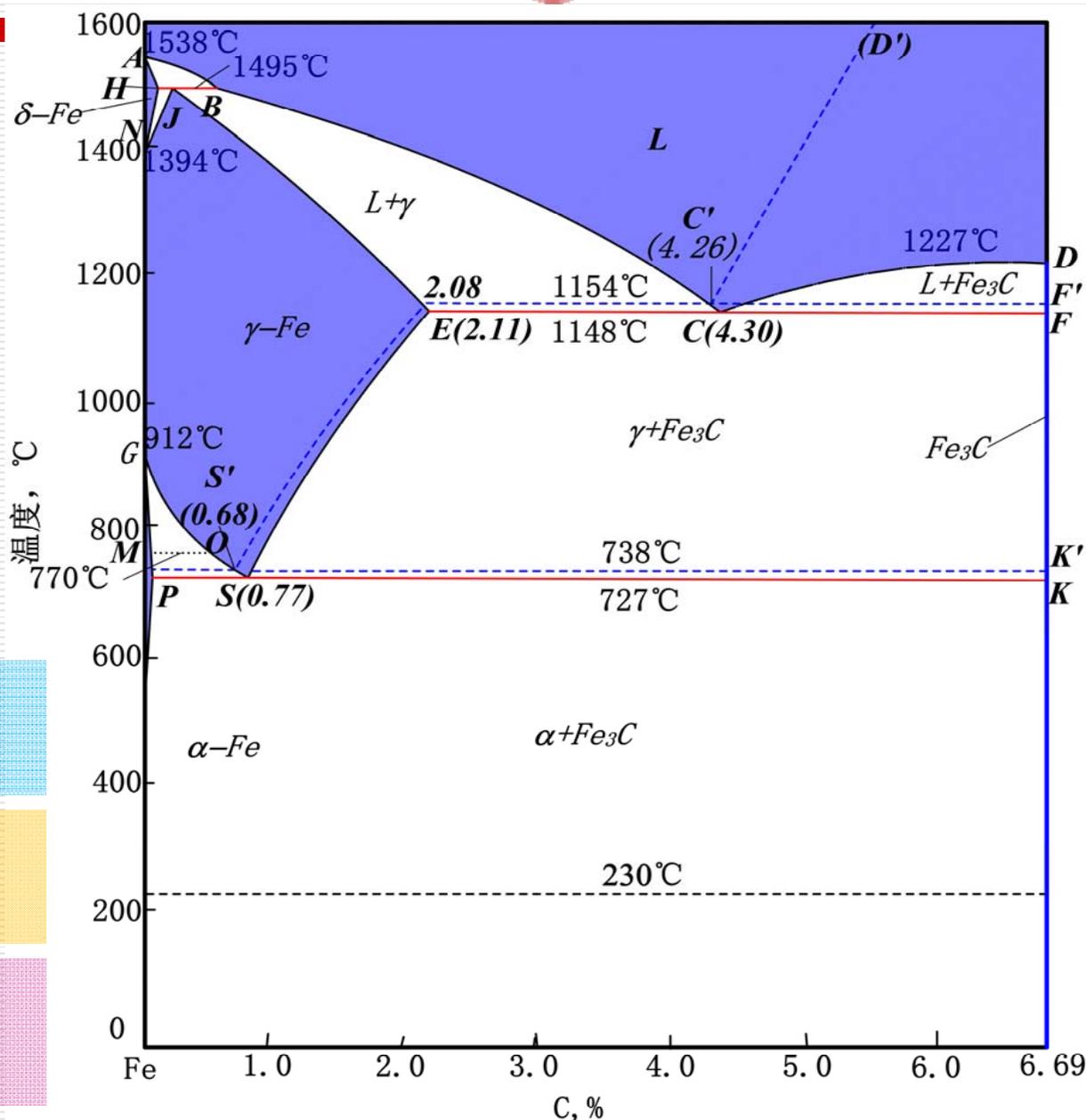
第一阶段（液相—共晶阶段）：



第二阶段（共晶—共析阶段）：



第三阶段（共析阶段）：



★ 按照Fe-Fe<sub>3</sub>C相图结晶出渗碳体，随后渗碳体在一定条件下分解出石墨。在生产中，白口铸铁经高温退火后可获得可锻铸铁，就证实了石墨也可由渗碳体分解得到。

## ◆ 铸铁中的石墨的形态

- 1) 灰铸铁的石墨是片状;
- 2) 球墨铸铁的石墨是球状;
- 3) 蠕墨铸铁的石墨是虫状;
- 4) 可锻铸铁的石墨是团状。

## ◆ 不同石墨形态的形成

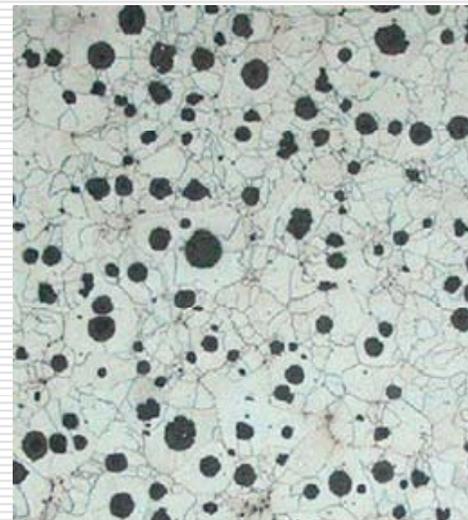
- 1) **灰铸铁**: 由铁液缓慢冷却时通过石墨化过程形成, 由片状石墨和基体组织组成;
- 2) **球墨铸铁**: 经球化和孕育处理的铁液石墨化后得到;
- 3) **蠕墨铸铁**: 在铁液中加入一定量蠕化剂进行炉前处理得到;
- 4) **可锻铸铁**: 是由一定成分白口铸铁经石墨化退火得到。

## ◆ 铸铁的应用

- 1) 灰铸铁应用于机床床身、导轨、汽缸体等。
- 2) 球墨铸铁替代部分铸钢、锻钢件, 如曲轴、连杆、轧辊、汽车后桥等;
- 3) 蠕墨铸铁强度、塑韧性优于灰铸铁, 应用于高压热交换器、汽缸盖、液压阀等;
- 4) 可锻铸铁可应用于管接头、低压阀门、汽车或拖拉机薄壳零件等。



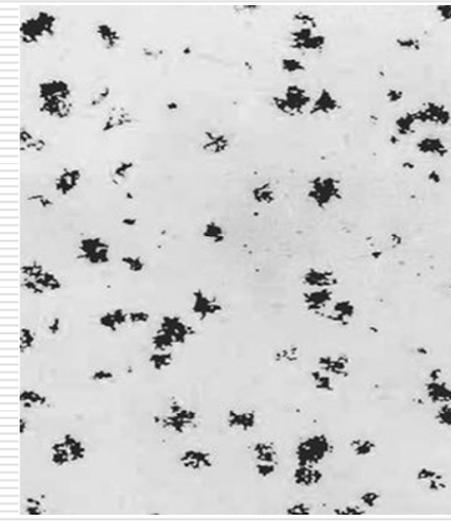
灰铸铁光学显微组织照片



球墨铸铁光学显微组织照片



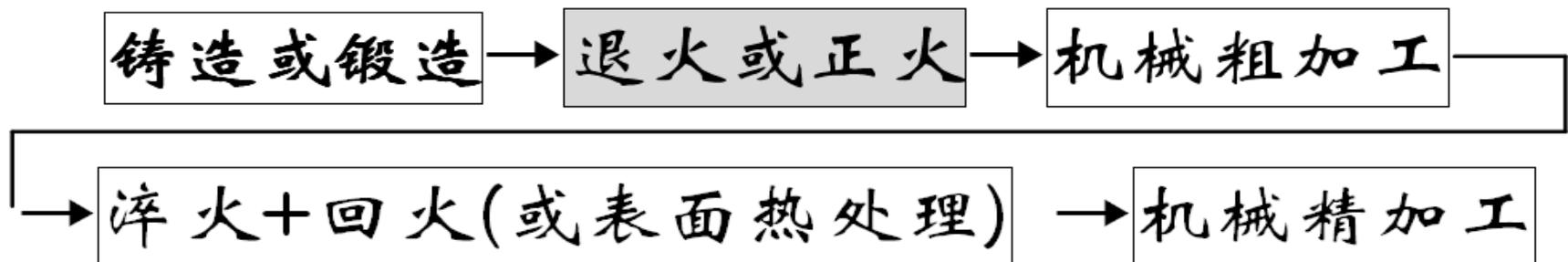
蠕墨铸铁光学显微组织照片



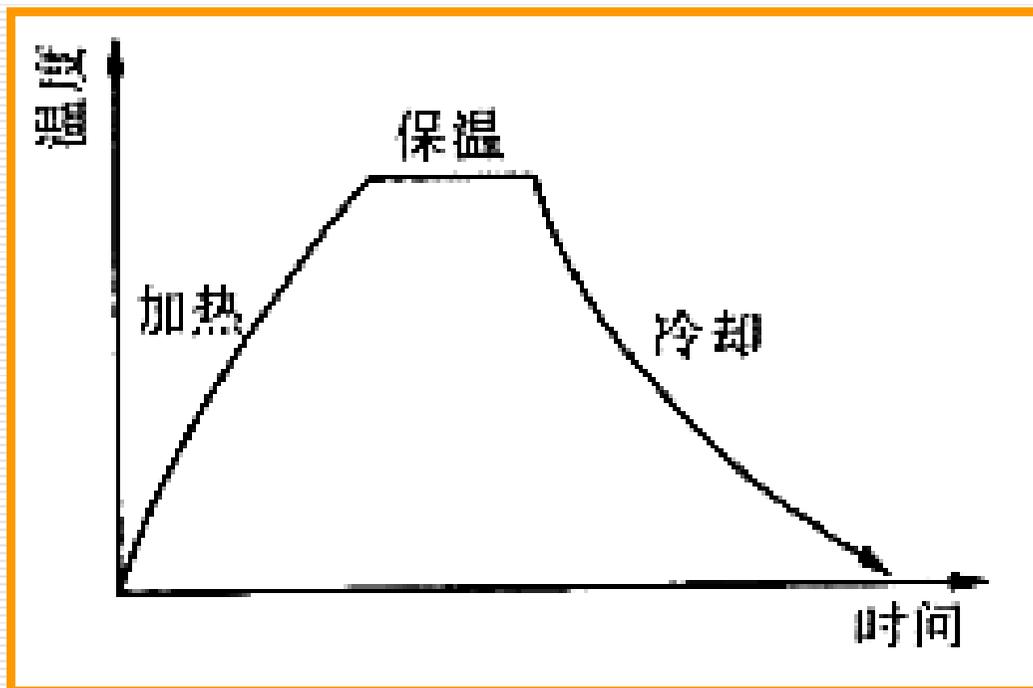
可锻铸铁光学显微组织照片



◆ 机械零件的一般加工工艺为：



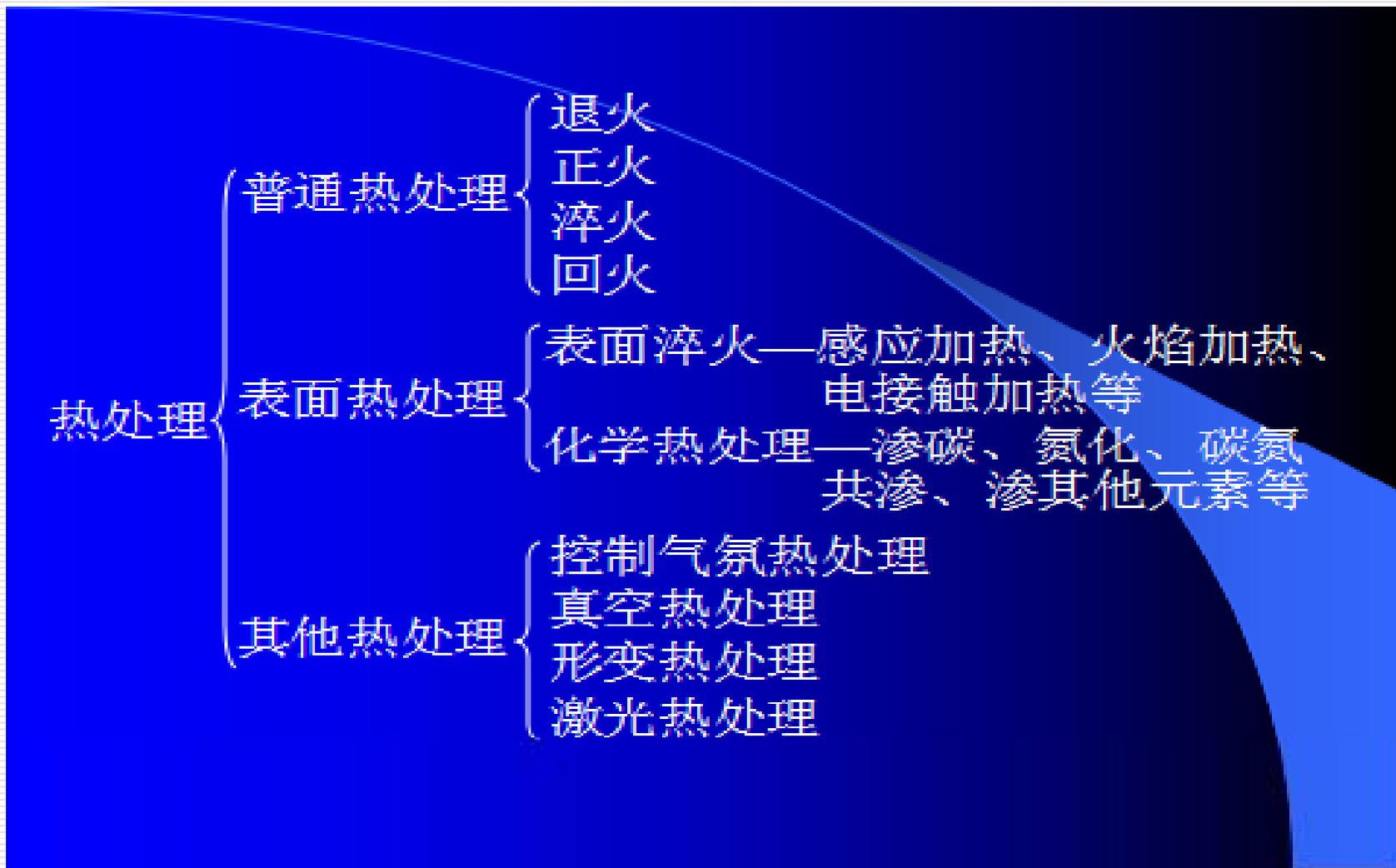
- ◆ **热处理**：是指将钢在固态下加热、保温和冷却，以改变钢的组织结构，获得所需要性能的一种工艺。



热处理工艺曲线

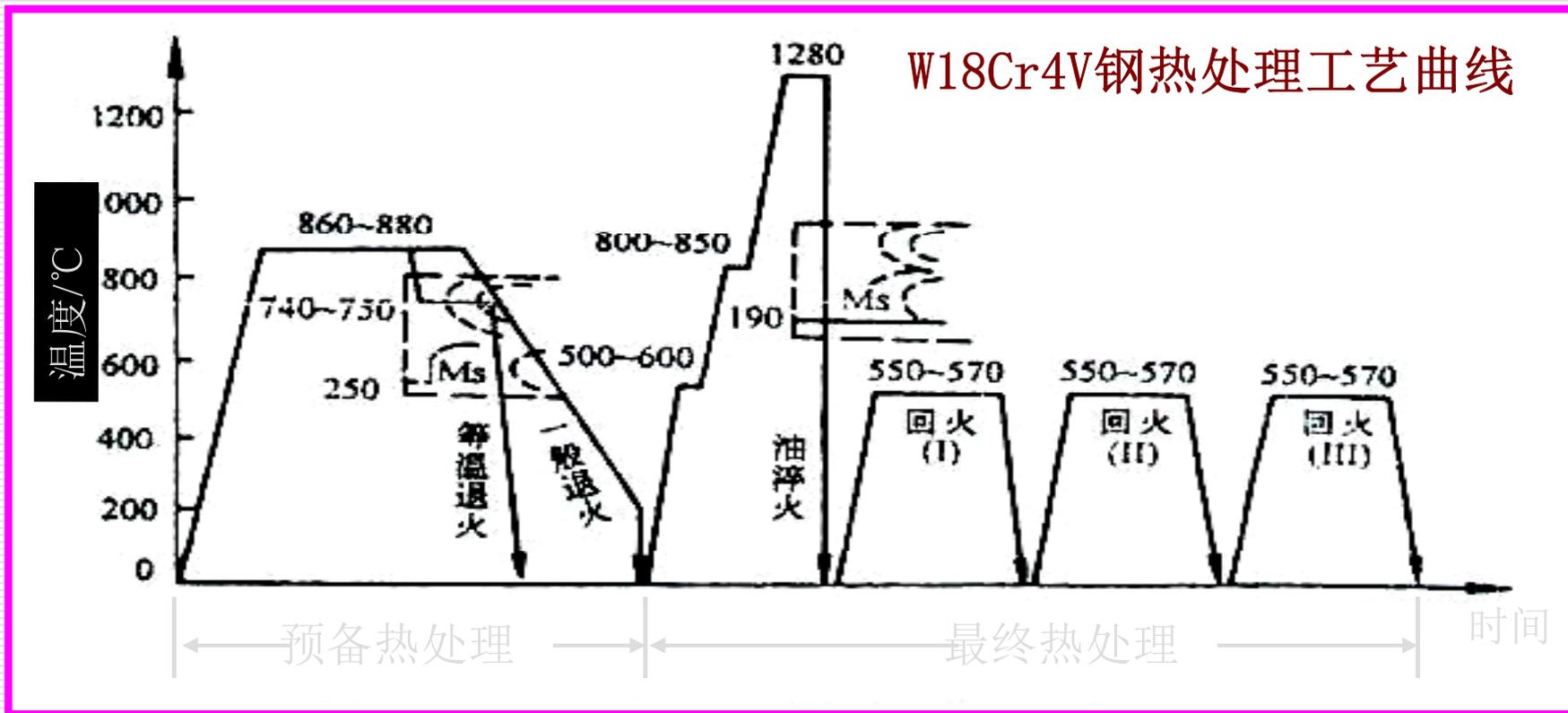


➤ 根据加热、冷却方式及钢组织性能变化特点不同，将热处理工艺分类如下：



## ● 预备热处理与最终热处理

- 1) 预备热处理—为随后的加工（冷拔、冲压、切削）或进一步热处理作准备的热处理。
- 2) 最终热处理—赋予工件所要求的使用性能的热处理。

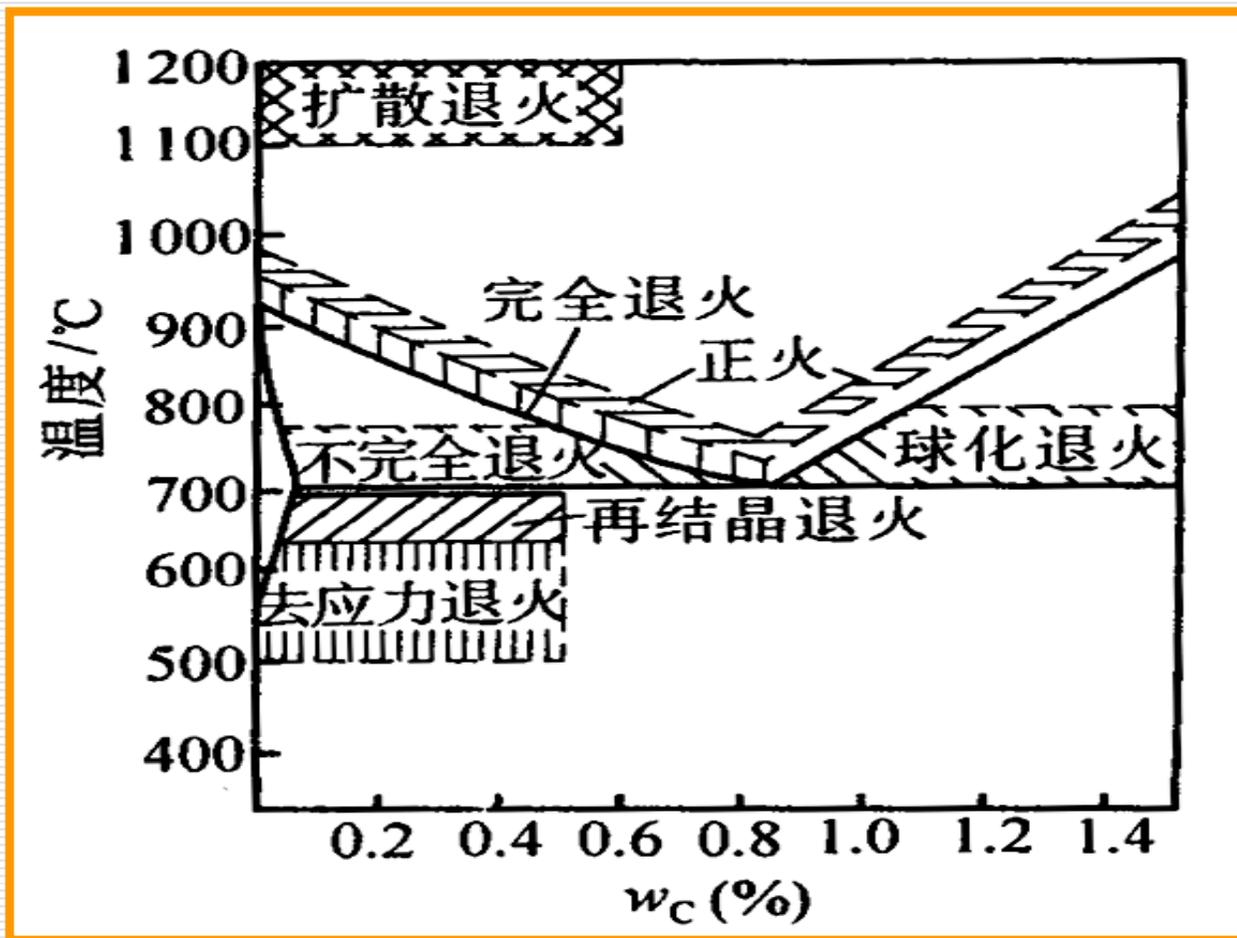


## ● 退火

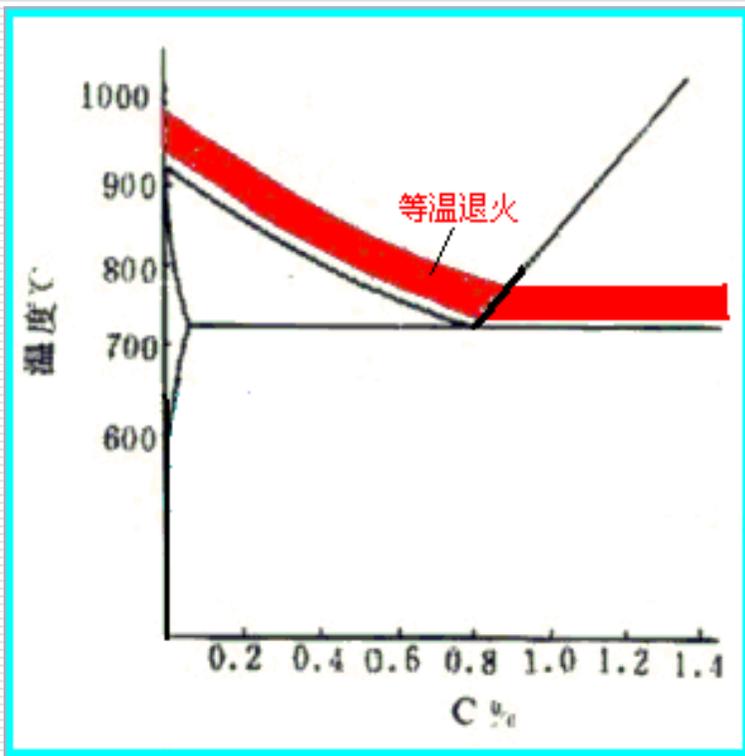
——将钢加热至适当温度保温，然后缓慢冷却（炉冷）的热处理工艺

### ➤ 退火目的

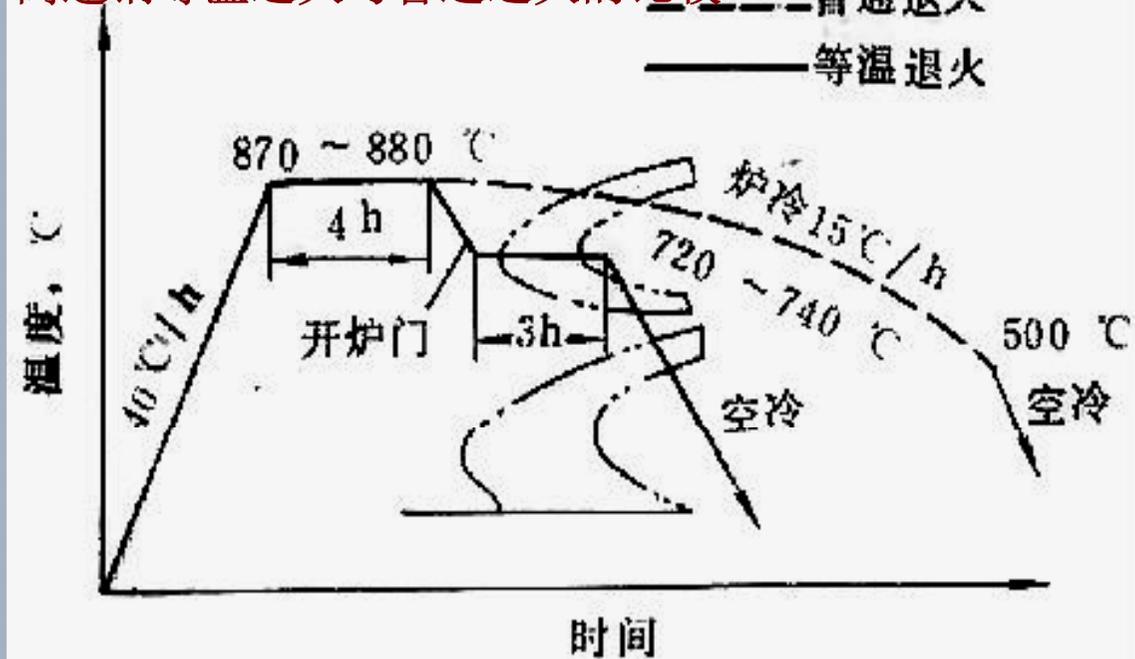
- (1)降低硬度，便于切削加工。适合加工的硬度为170-250HB。
- (2) 消除内应力，稳定尺寸，减少工件后续加工中的变形与开裂倾向。
- (3) 细化晶粒，消除组织缺陷，为最终热处理作组织准备。



## ➤ 等温退火



高速钢等温退火与普通退火的比较



**优点:** 大大缩短生产周期，提高热处理炉的使用率，更适合于孕育期长的合金钢。



## ● 正火

### ➤ 正火目的:

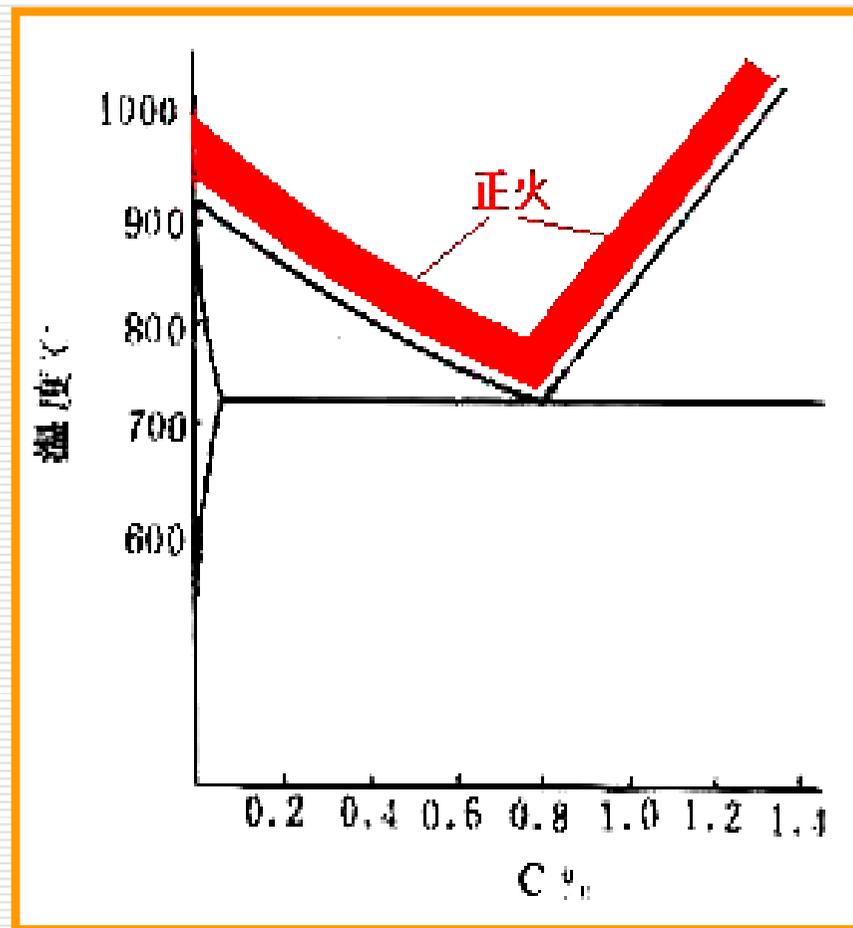
- (1) 对于低、中碳钢 ( $\leq 0.6\%C$ ), 改善切削加工性能。
- (2) 对于过共析钢, 用于消除网状二次渗碳体, 为球化退火作组织准备。

👉 **注意:** 要改善切削性能, 低碳钢用正火, 中碳钢用退火或正火, 高碳钢 ( $\geq 0.6\%C$ ) 用退火。

### ➤ 正火组织 (较细):

< 0.6% C 时, 组织为 F+S;

$\geq 0.6\%C$  时, 组织为  $Fe_3C+S$

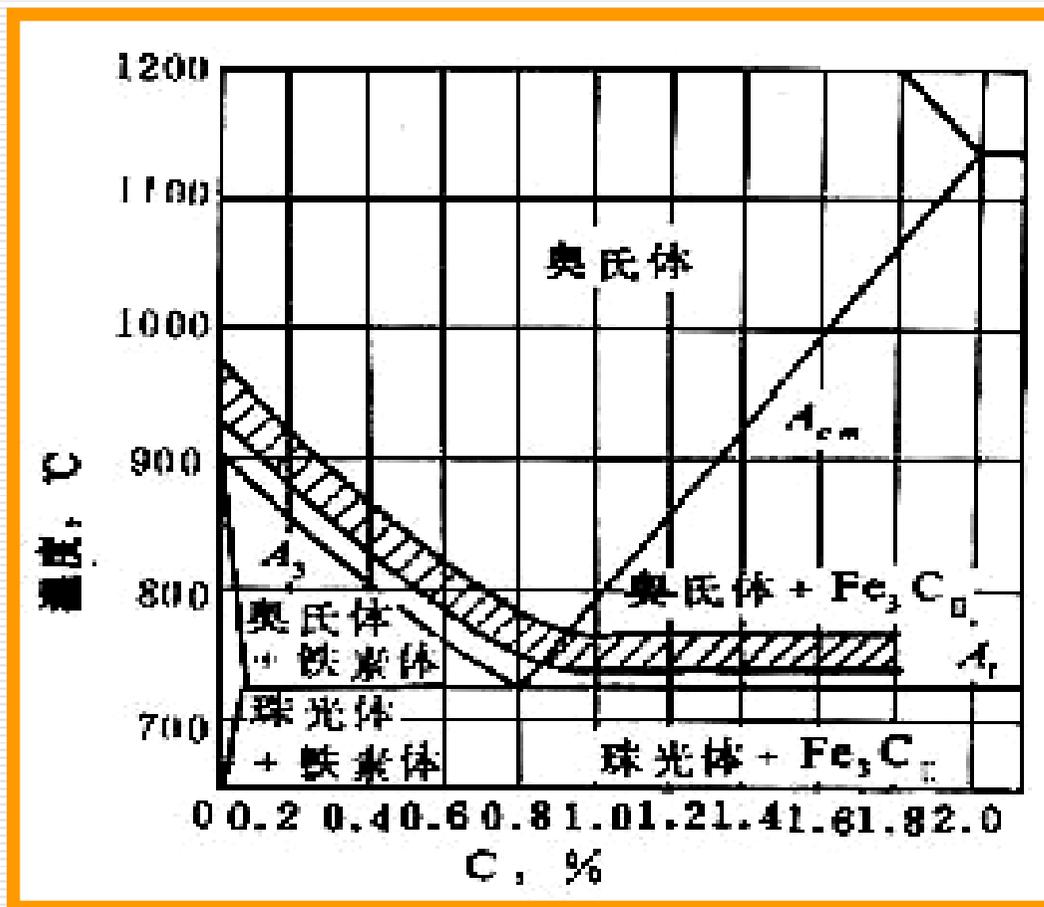


正火温度确定



## ● 钢的淬火

➤ 淬火目的：为获得马氏体或下贝氏体组织，提高钢的性能。



## ◆ 钢在加热时的转变

- 加热分两种：
  - 1) 一种是在 $A_1$ 以下加热，不发生相变；
  - 2) 另一种是在临界点以上加热，目的是获得均匀的奥氏体组织，称**奥氏体化**。

### ● 奥氏体的形成过程

- 奥氏体化也是形核和长大的过程，分为四步。

#### 现以共析钢为例说明：

- (1) **奥氏体晶核形成**：首先在 $\alpha$ 与 $Fe_3C$ 相界形核。
- (2) **奥氏体晶核长大**： $\gamma$ 晶核通过碳原子的扩散向 $\alpha$ 和 $Fe_3C$ 方向长大。
- (3) **残余 $Fe_3C$ 溶解**：铁素体的成分、结构更接近于奥氏体，因而先消失。残余的 $Fe_3C$ 随保温时间延长继续溶解直至消失。
- (4) **奥氏体成分均匀化**： $Fe_3C$ 溶解后，其所在部位碳含量仍很高，**通过长时间保温使奥氏体成分趋于均匀**。

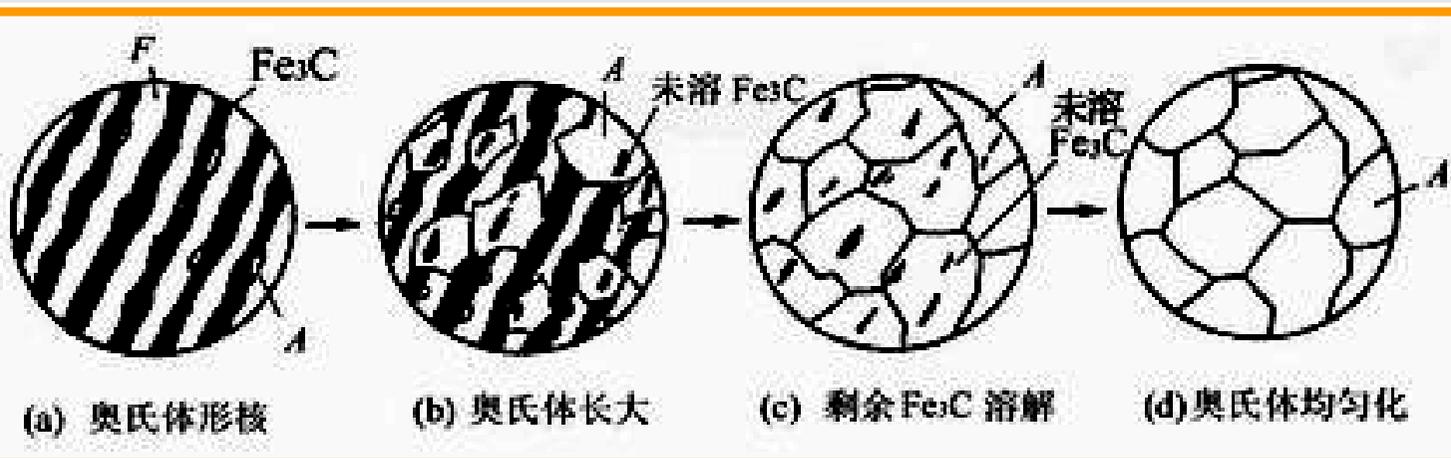
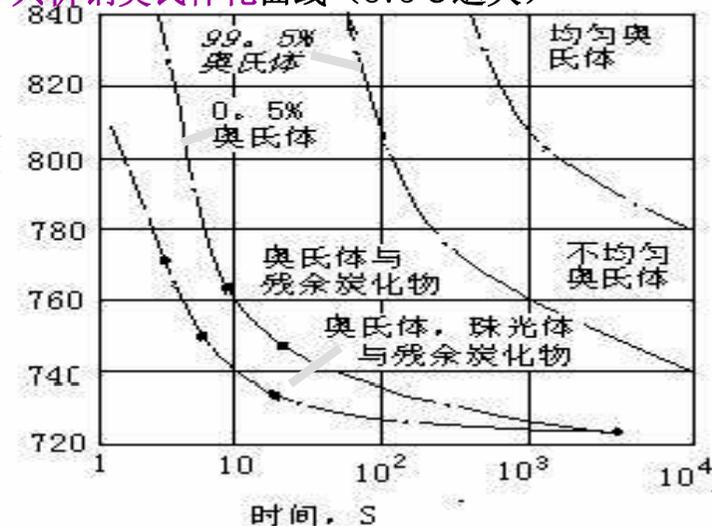


钢坯加热

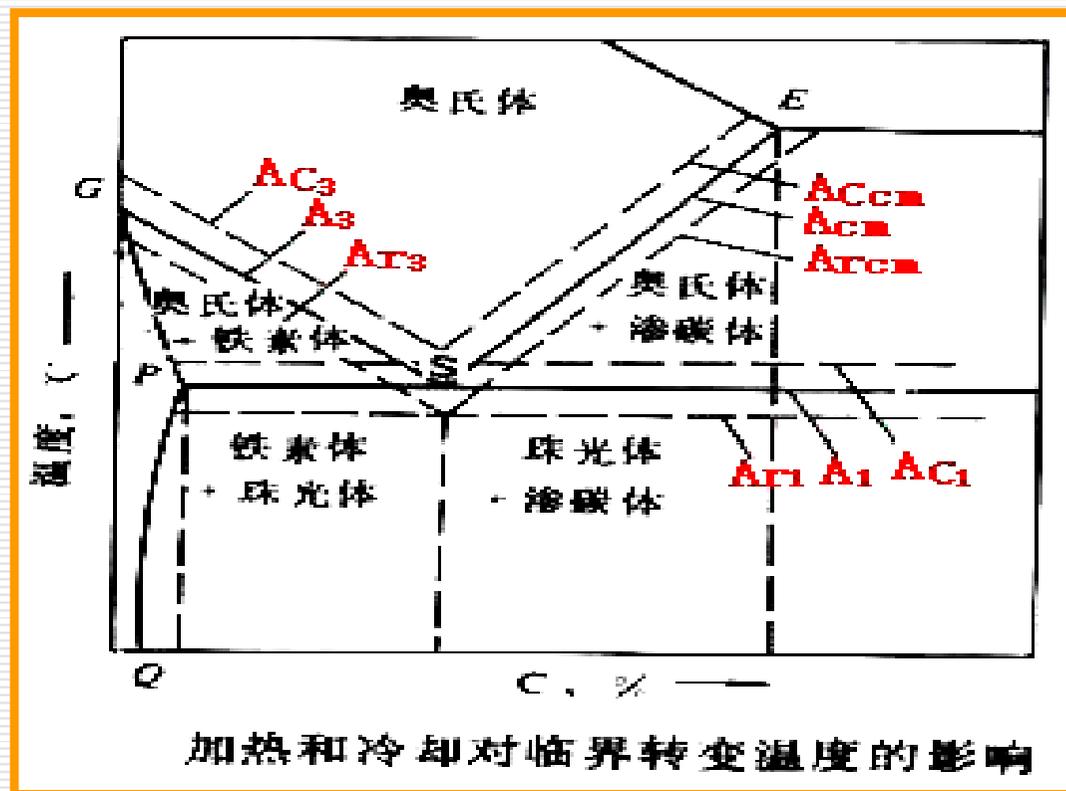


➤ 奥氏体的形成过程  
(以共析钢为例说明) :

共析钢奥氏体化曲线 (875°C退火)

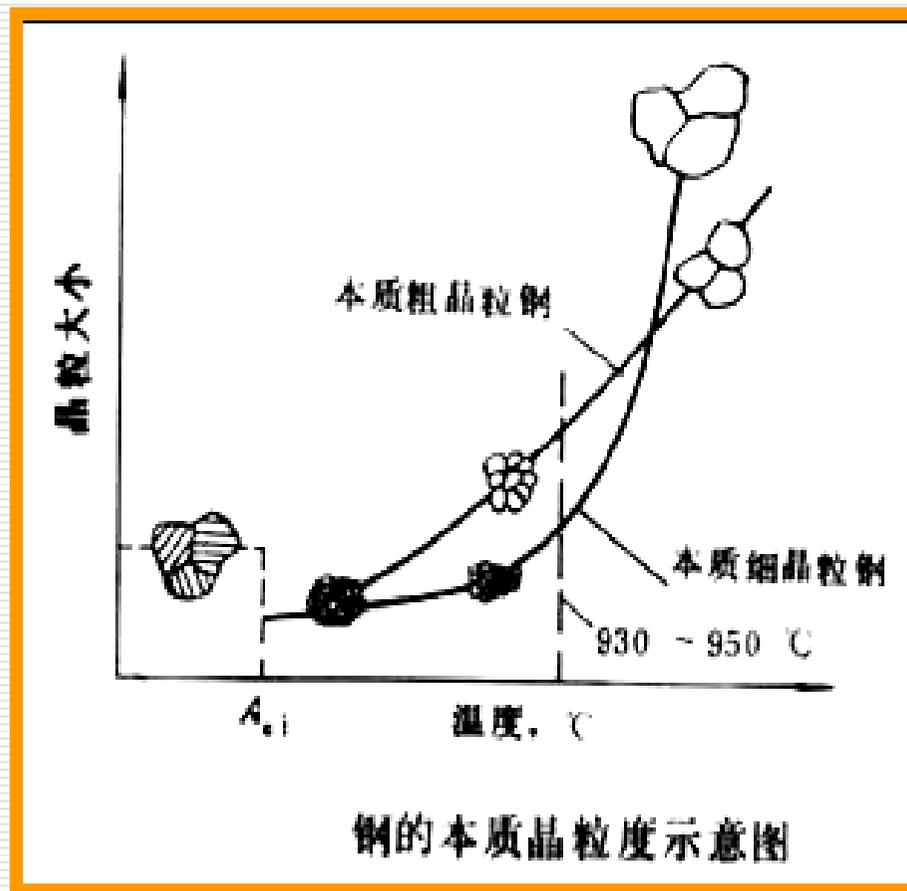


- 亚共析钢和过共析钢的奥氏体化过程与共析钢基本相同。
- 由于先共析 $\alpha$  或二次 $Fe_3C$ 的存在，要获得全部奥氏体组织，必须相应加热到 $Ac_3$ 或 $Ac_{cm}$ 以上。



## ◆ 奥氏体晶粒长大及其影响因素

- 奥氏体晶粒长大：
  - 奥氏体化刚结束时的晶粒度称 **起始晶粒度**。
  - 在给定温度下奥氏体的晶粒度称 **实际晶粒度**。
  - 加热时奥氏体晶粒的长大倾向称 **本质晶粒度**。



🌸 通常将钢加热到 $940\pm 10^{\circ}\text{C}$ 奥氏体化后，设法把奥氏体晶粒保留到室温来判断。 $\gamma$ 晶粒度为1-4级的是本质粗晶粒钢，5-8级的是本质细晶粒钢。前者晶粒长大倾向大，后者晶粒长大倾向小。



## ● 影响奥氏体晶粒长大的因素

(1) 加热温度和保温时间: 加热温度高、保温时间长,  $\gamma$  晶粒粗大。

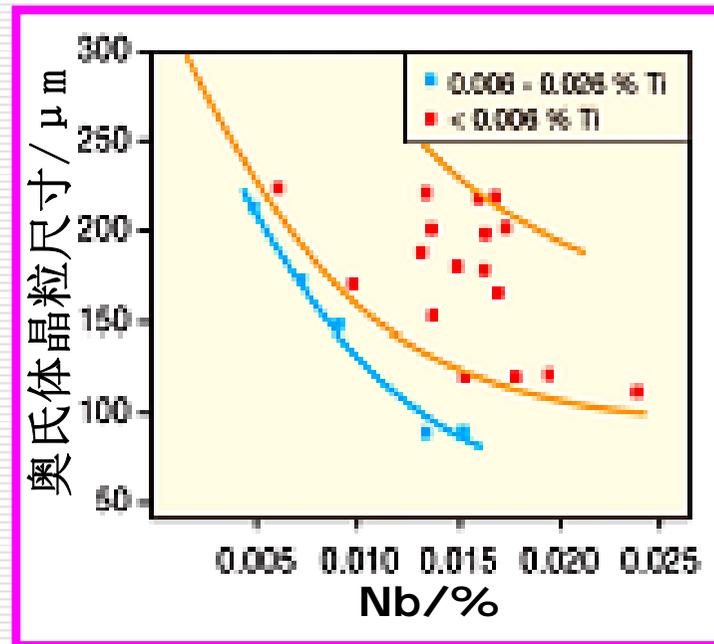
(2) 加热速度: 加热速度越快, 过热度越大, 形核率越高, 晶粒越细。

(3) 合金元素:

➤ 阻碍奥氏体晶粒长大的元素:  $Ti$ 、 $V$ 、 $Nb$ 、 $Ta$ 、 $Zr$ 、 $W$ 、 $Mo$ 、 $Cr$ 、 $Al$ 等碳化物和氮化物形成元素。

➤ 促进奥氏体晶粒长大的元素:  $Mn$ 、 $P$ 、 $C$ 、 $N$ 。

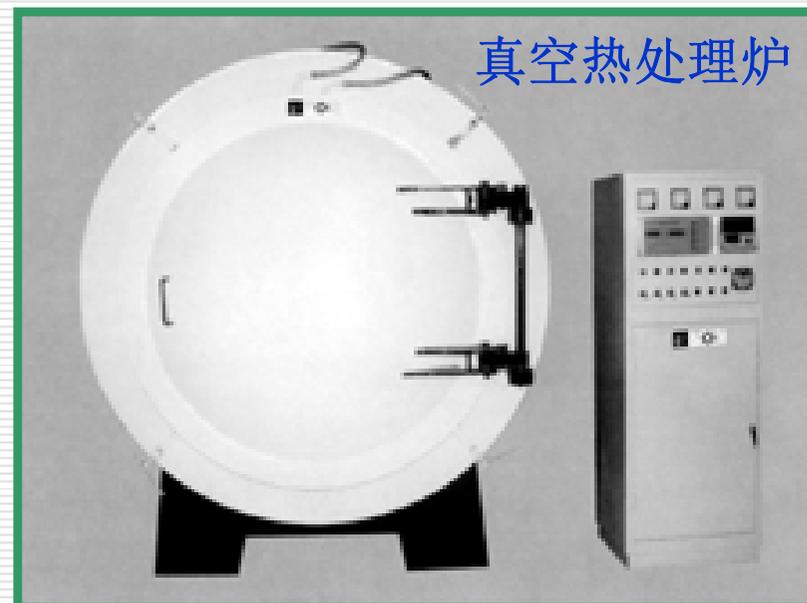
(4) 原始组织: 平衡状态的组织有利于获得细晶粒。



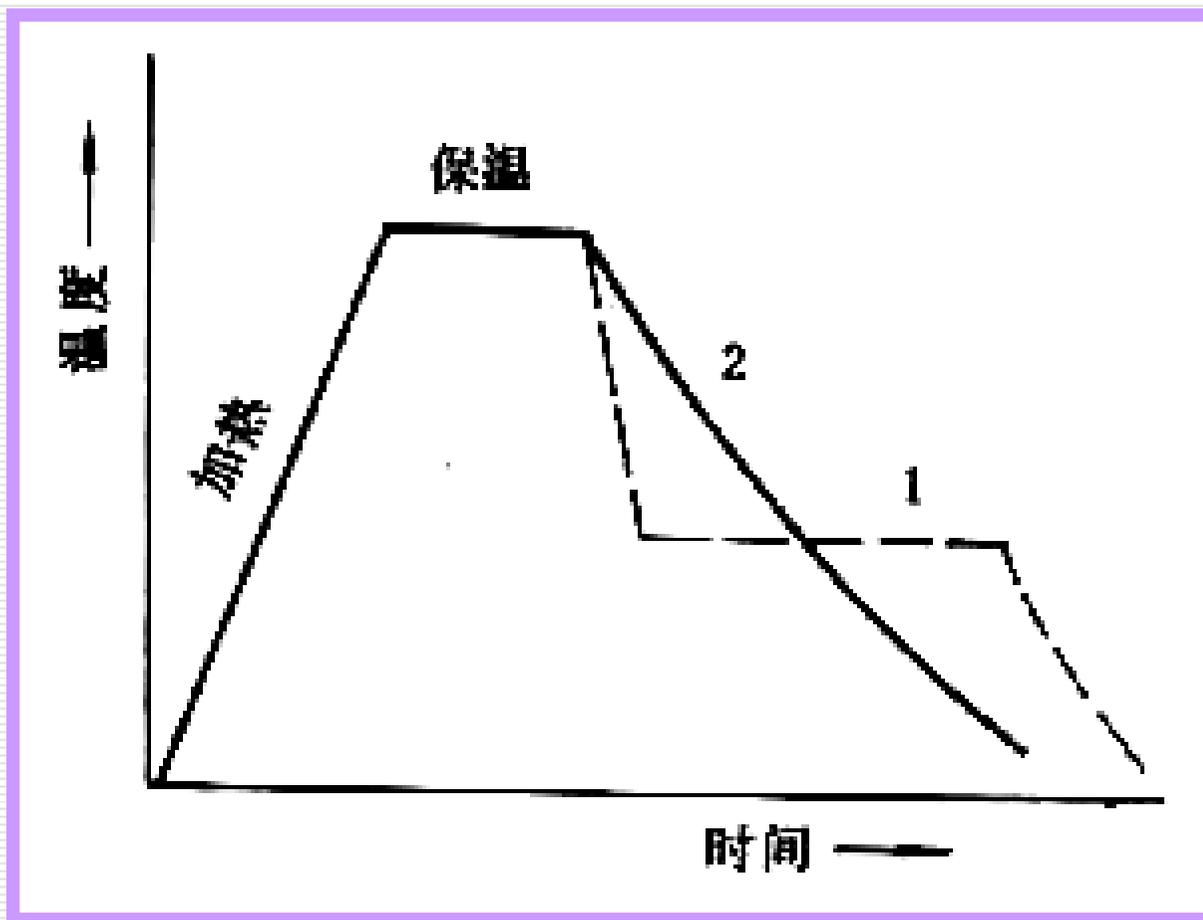
Nb、Ti对奥氏体晶粒的影响



- 奥氏体晶粒粗大，冷却后的组织也粗大，降低钢的常温力学性能，尤其是塑性。
- 钢加热时常见的缺陷：过热；氧化；脱碳。



- 过冷奥氏体的转变方式有等温转变和连续冷却转变两种。



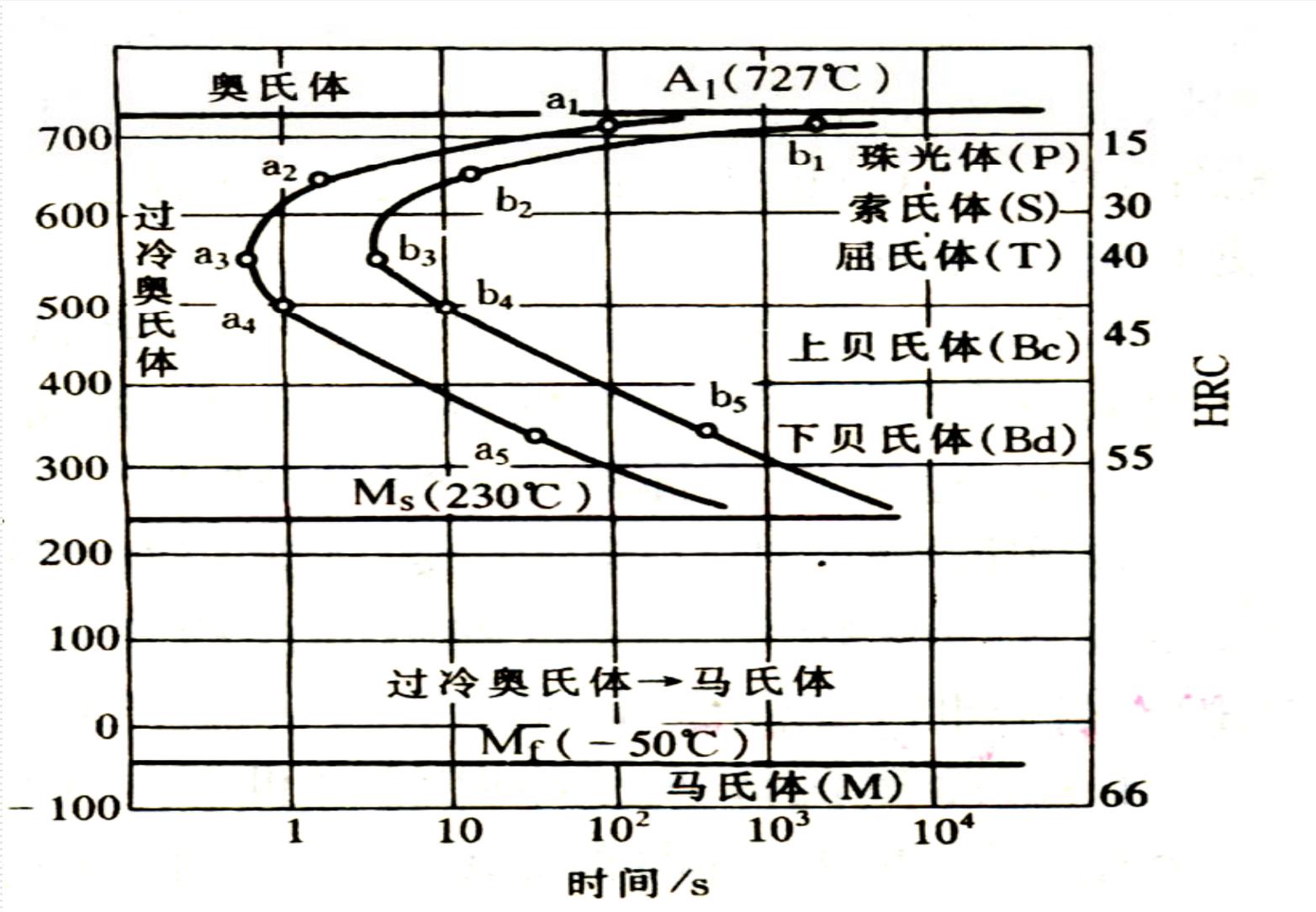
两种冷却方式示意图

1——等温冷却

2——连续冷却

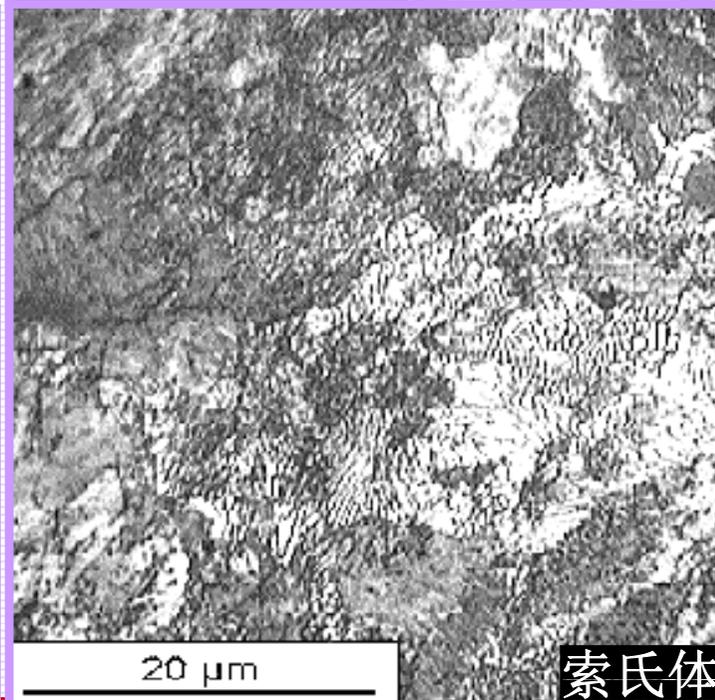
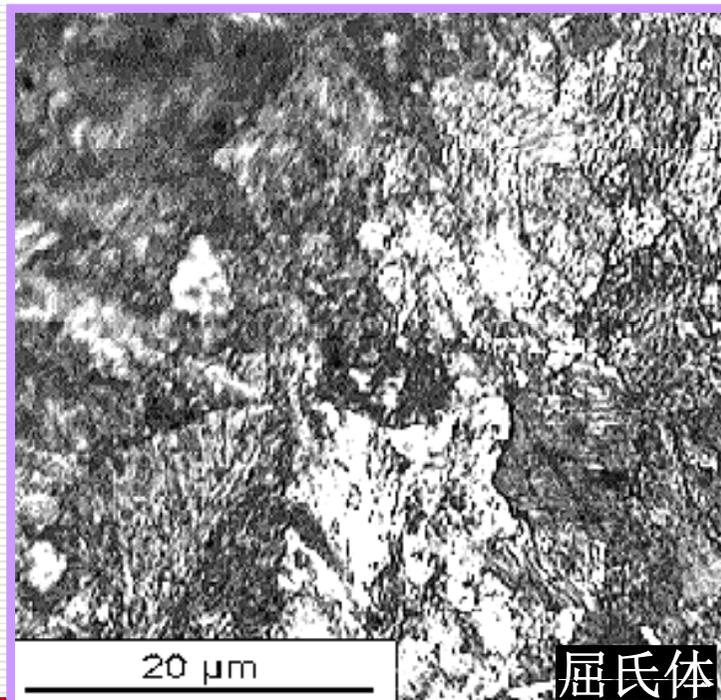
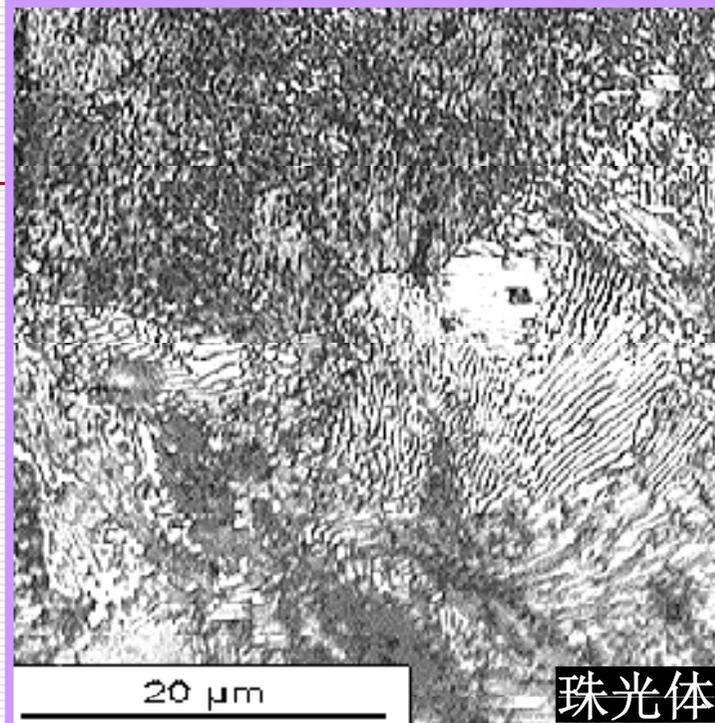


## ➤ 共析钢过冷奥氏体的等温转 (C 曲线)

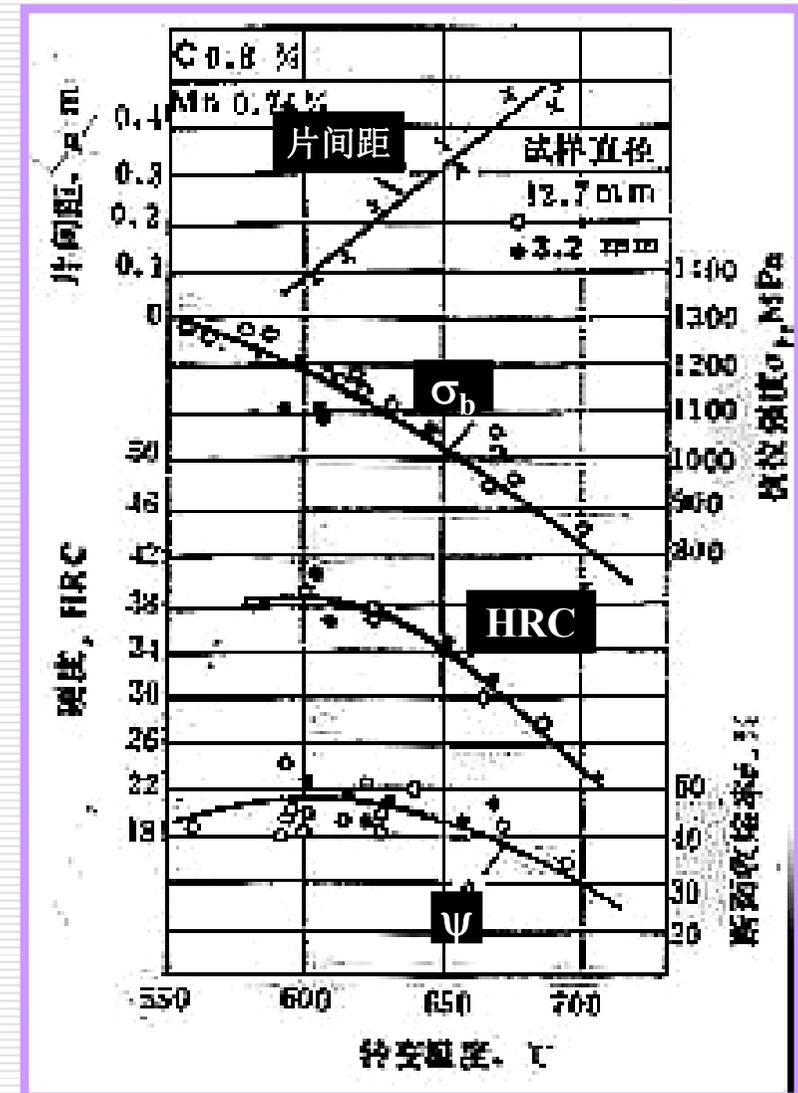
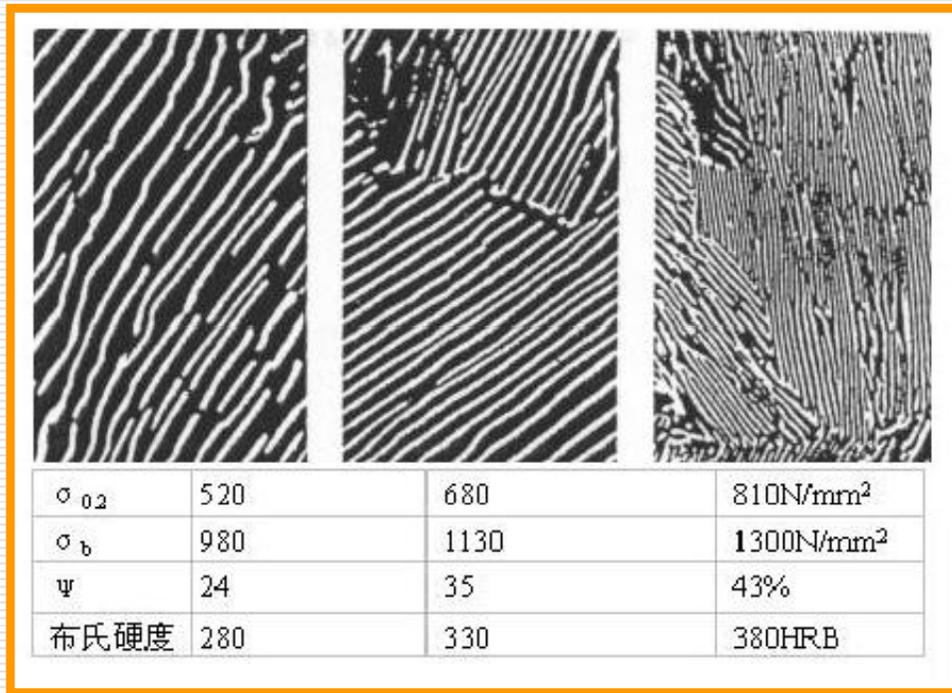


# 热处理工艺与金相组织调控

- 珠光体转变
- 珠光体的组织形态及性能
- ☞ 根据片层厚薄不同, 又细分为珠光体、索氏体和屈氏体。



- ☞ 珠光体、索氏体、屈氏体三种组织无本质区别，只是形态上的粗细之分，因此其界限也是相对的。
- 片间距越小，钢的强度、硬度越高，而塑性和韧性略有改善。

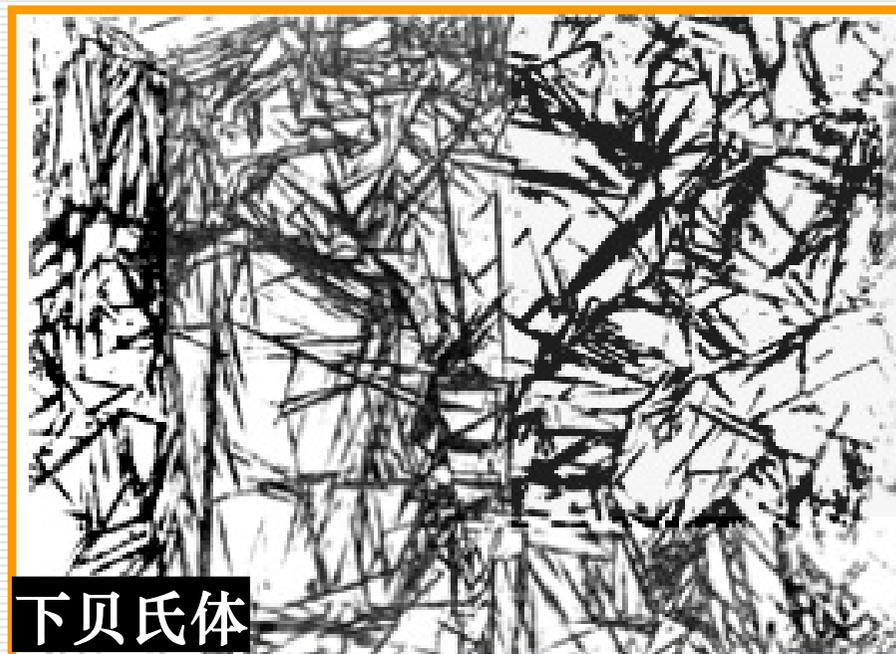
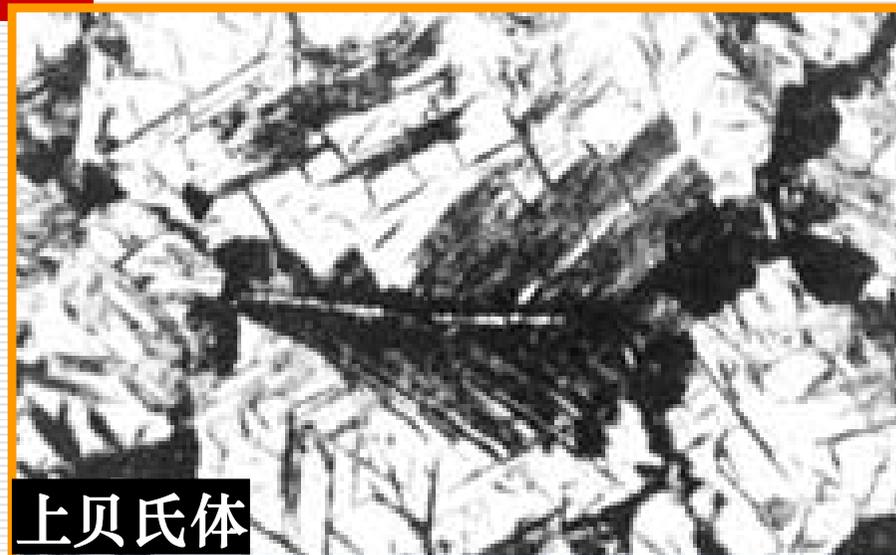


## ● 贝氏体转变

➤ 贝氏体的组织形态及性能

👉 过冷奥氏体在 $550^{\circ}\text{C} - 230^{\circ}\text{C}$  ( $M_s$ ) 间将转变为贝氏体类型组织，贝氏体用符号B表示。

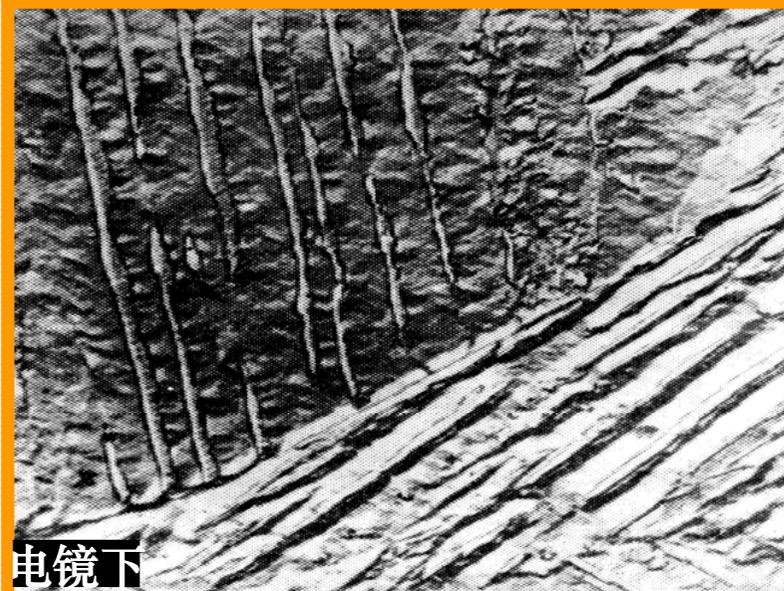
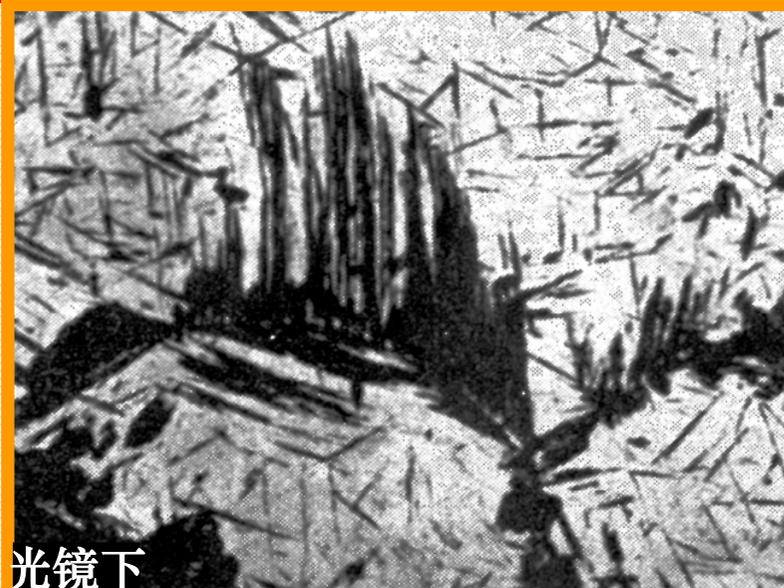
👉 根据其组织形态不同，贝氏体又分为上贝氏体( $B_{\text{上}}$ )和下贝氏体( $B_{\text{下}}$ )。



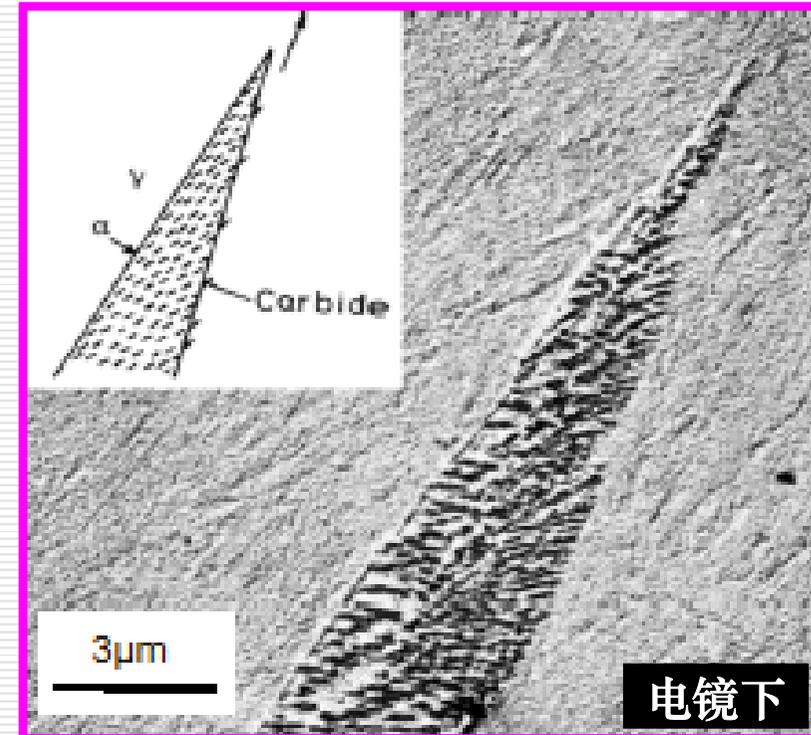
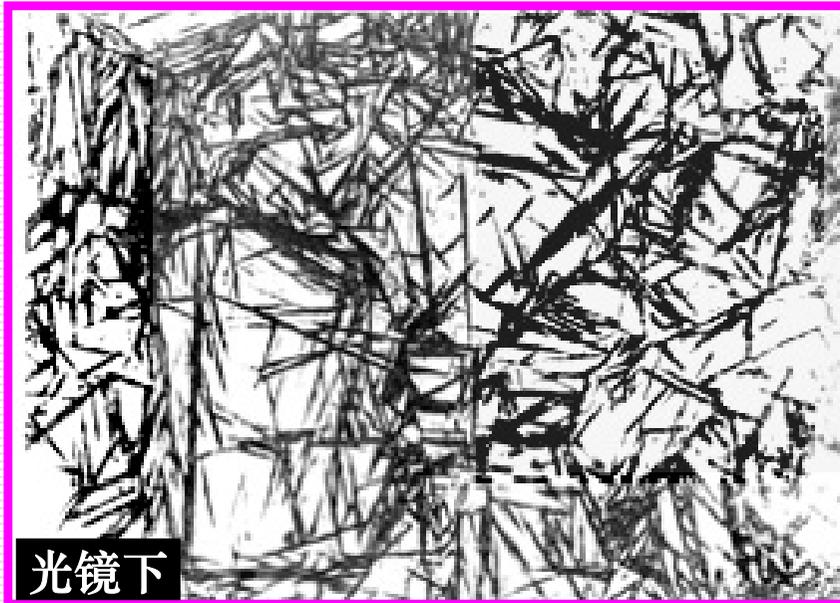
- 上贝氏体
- ☞ 形成温度为550-350℃。
- ☞ 在光镜下呈羽毛状。
- ☞ 在电镜下为不连续棒状的渗碳体分布于自奥氏体晶界向晶内平行生长的铁素体条之间。

## ★ 上贝与魏氏组织区别是：

上贝铁素体大都是紧靠排列，条间为渗碳体。而魏氏组织为单片铁素体（针），间距较大，铁素体之间是珠光体组织。



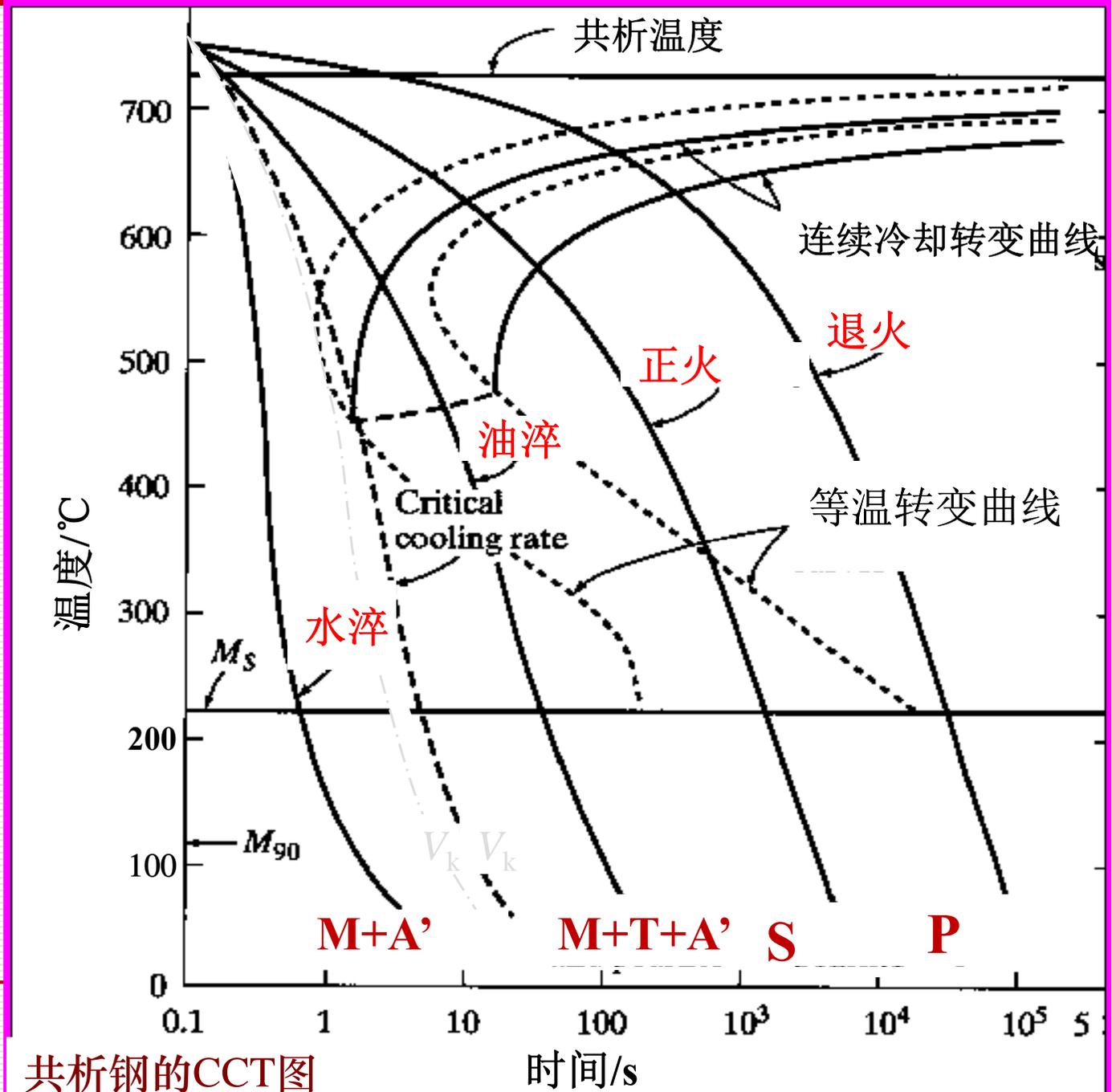
- 下贝氏体
- 形成温度为 $350^{\circ}\text{C}-M_s$ 。在光镜下呈竹叶状。
- 在电镜下为细片状碳化物分布于铁素体针内，并与铁素体针长轴方向呈 $55-60^{\circ}$ 角。



- 上贝氏体强度与塑性都较低，无实用价值。
- 下贝氏体除了强度、硬度较高外，塑性、韧性也较好，即具有良好的综合力学性能，是生产上常用的强化组织之一。



## 共析钢过冷奥氏体连续冷却转变



共析钢的CCT图

时间/s



- 马氏体转变
  - 当奥氏体过冷到 $M_s$ 以下将转变为马氏体类型组织。
  - 马氏体转变是强化钢的重要途径之一。
  - 碳在 $\alpha$ -Fe中的过饱和固溶体称马氏体，用M表示。



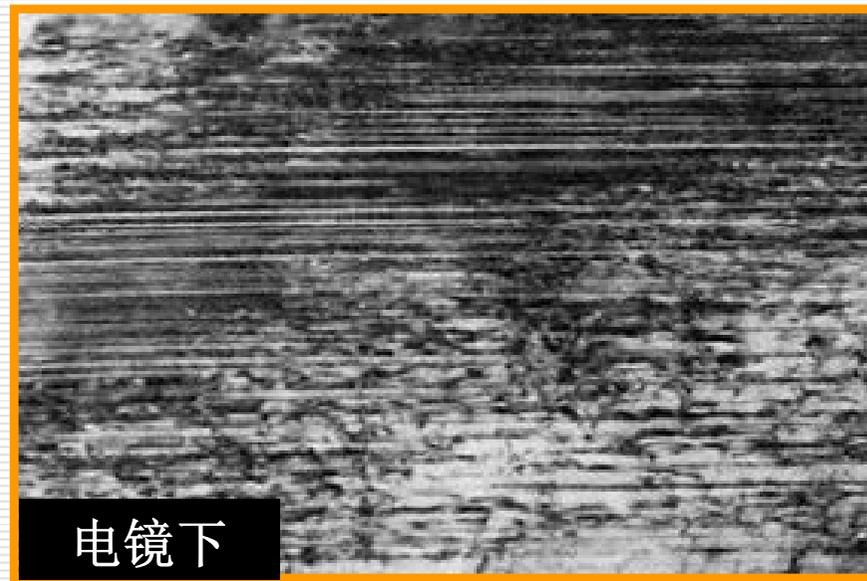
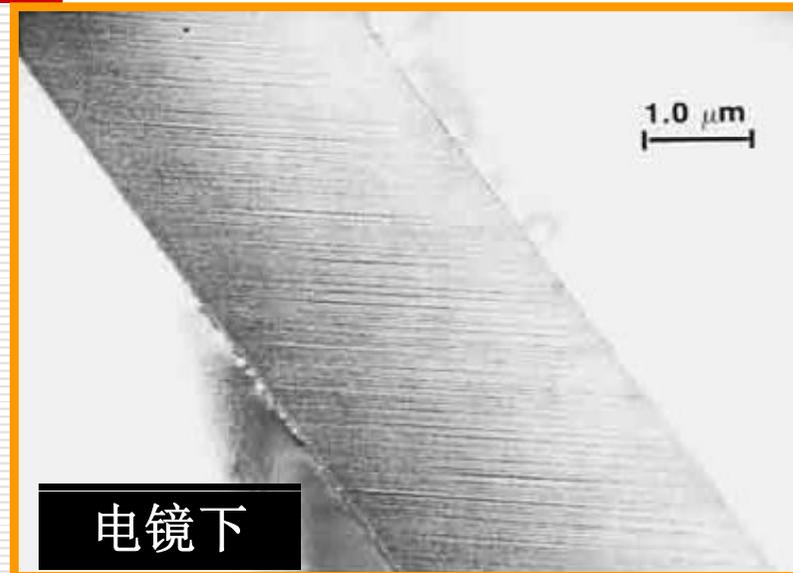
马氏体组织



- 马氏体的形态分**板条和针状**两类。
- ☞ 板条马氏体
  - ★ 立体形态为细长的扁棒
  - ★ 在光镜下板条马氏体为一束束的细条组织。
  - ★ 每束内条与条之间尺寸大致相同并呈平行排列，一个奥氏体晶粒内可形成几个取向不同的马氏体束。
  - ★ 在电镜下，板条内的亚结构主要是高密度的位错， $\rho=10^{12}/\text{cm}^2$ ，又称**位错马氏体**。

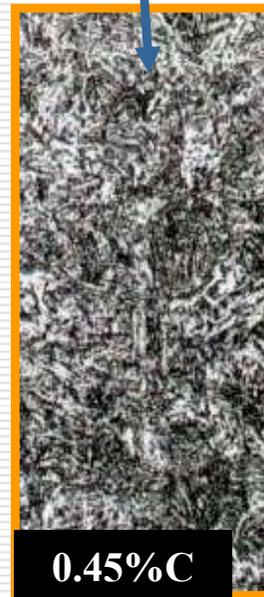
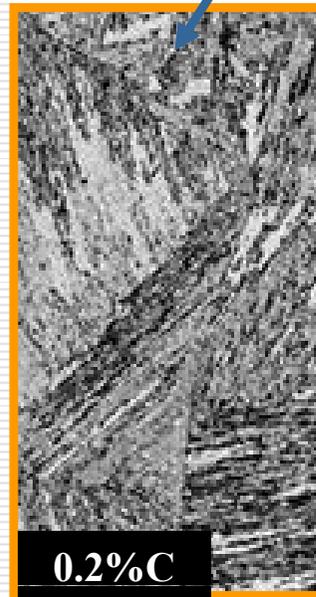
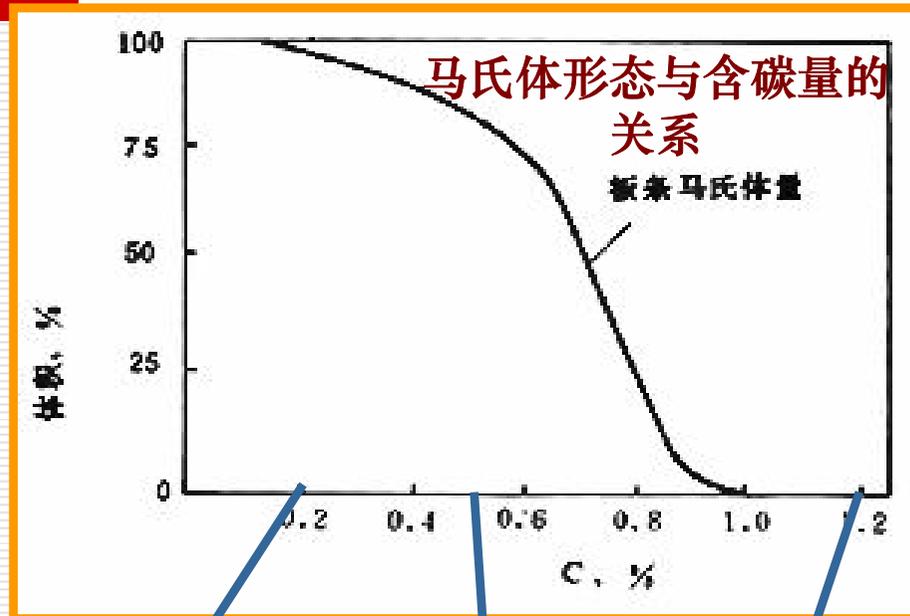


- ☞ 针状马氏体（片状针状马氏体）
- ★ 立体形态为双凸透镜形的片状。显微组织为针状。
- ★ 在电镜下，亚结构主要是孪晶，又称孪晶马氏体。



## ➤ 马氏体的形态与含碳量

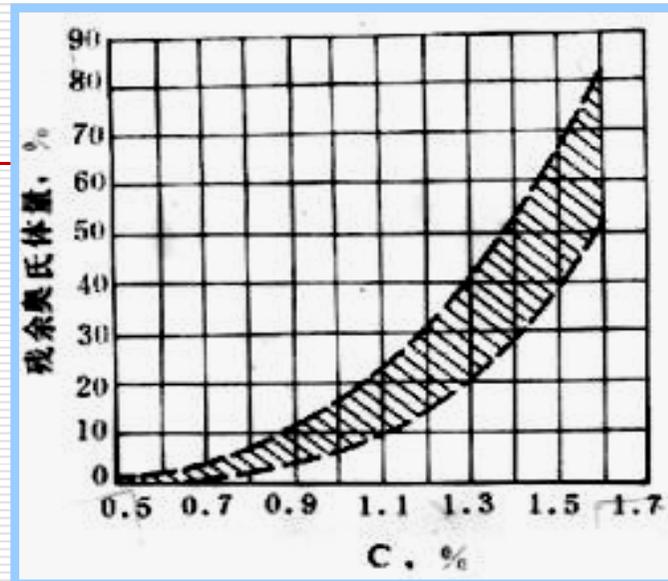
- ① C%小于0.2%时，组织几乎全部是板条马氏体。
- ② C%大于1.0%时几乎全部是针状马氏体。
- ③ C%在0.2-1.0%之间为板条与针状的混合组织。



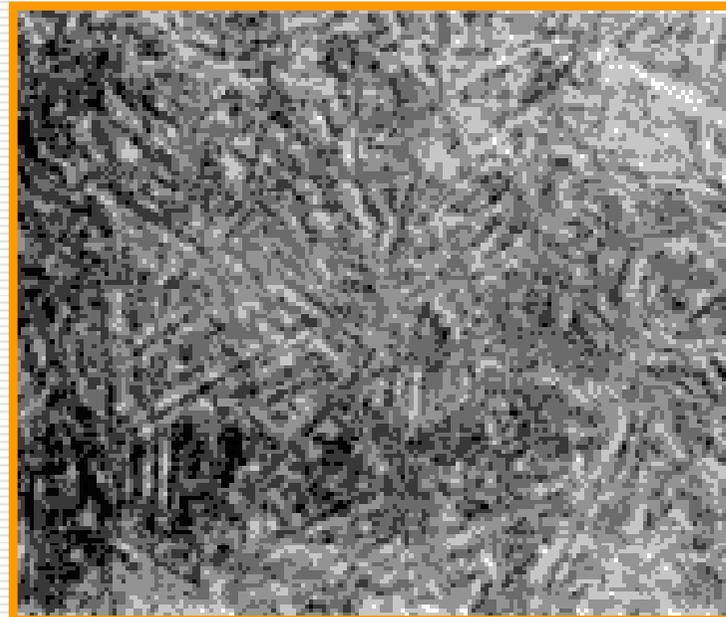
# 热处理工艺与金相组织调控

## ➤ 亚共析钢淬火组织:

- ≤0.5%C时为M
- >0.5%C时为M+A'



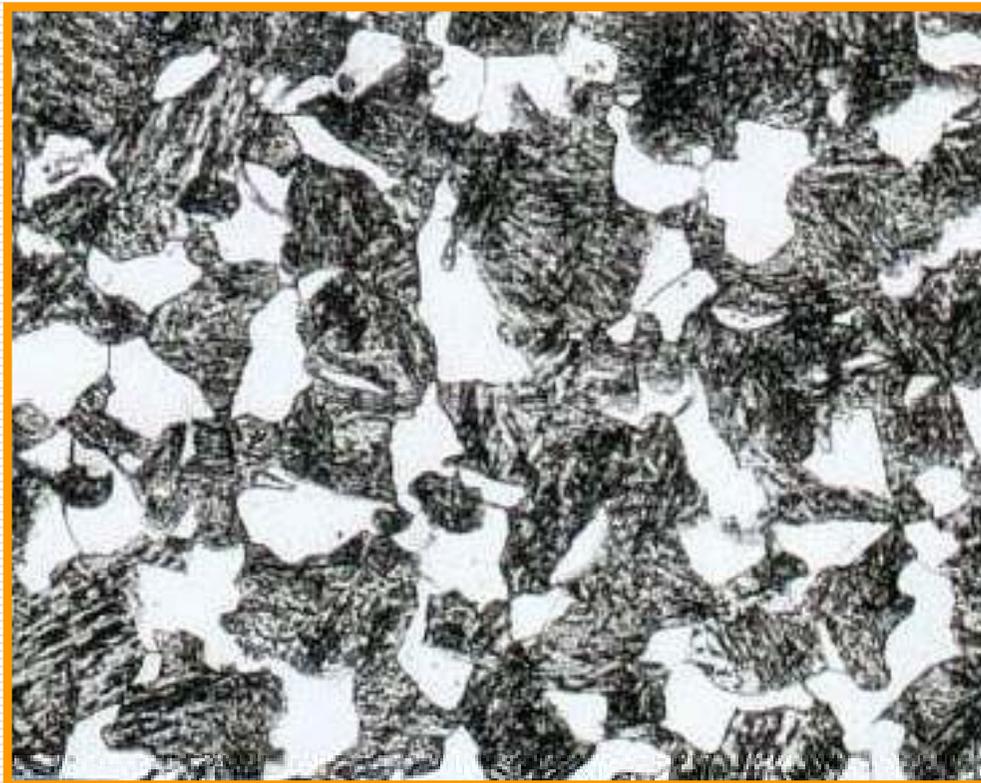
45钢(含0.45%C)正常淬火组织



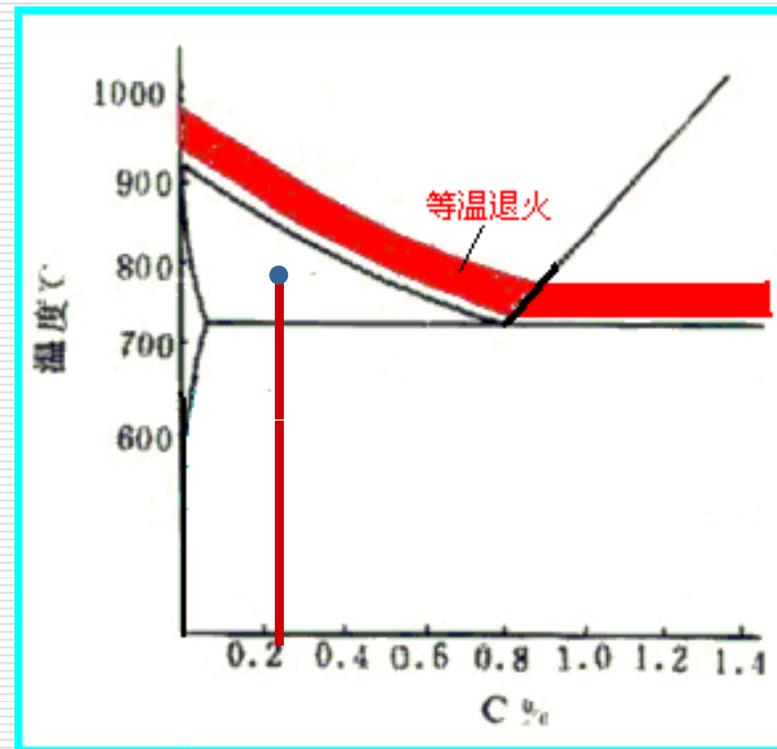
65MnV钢(0.65%C) 淬火组织



➤ **亚温淬火:**在 $Ac_1 \sim Ac_3$ 之间的加热淬火。



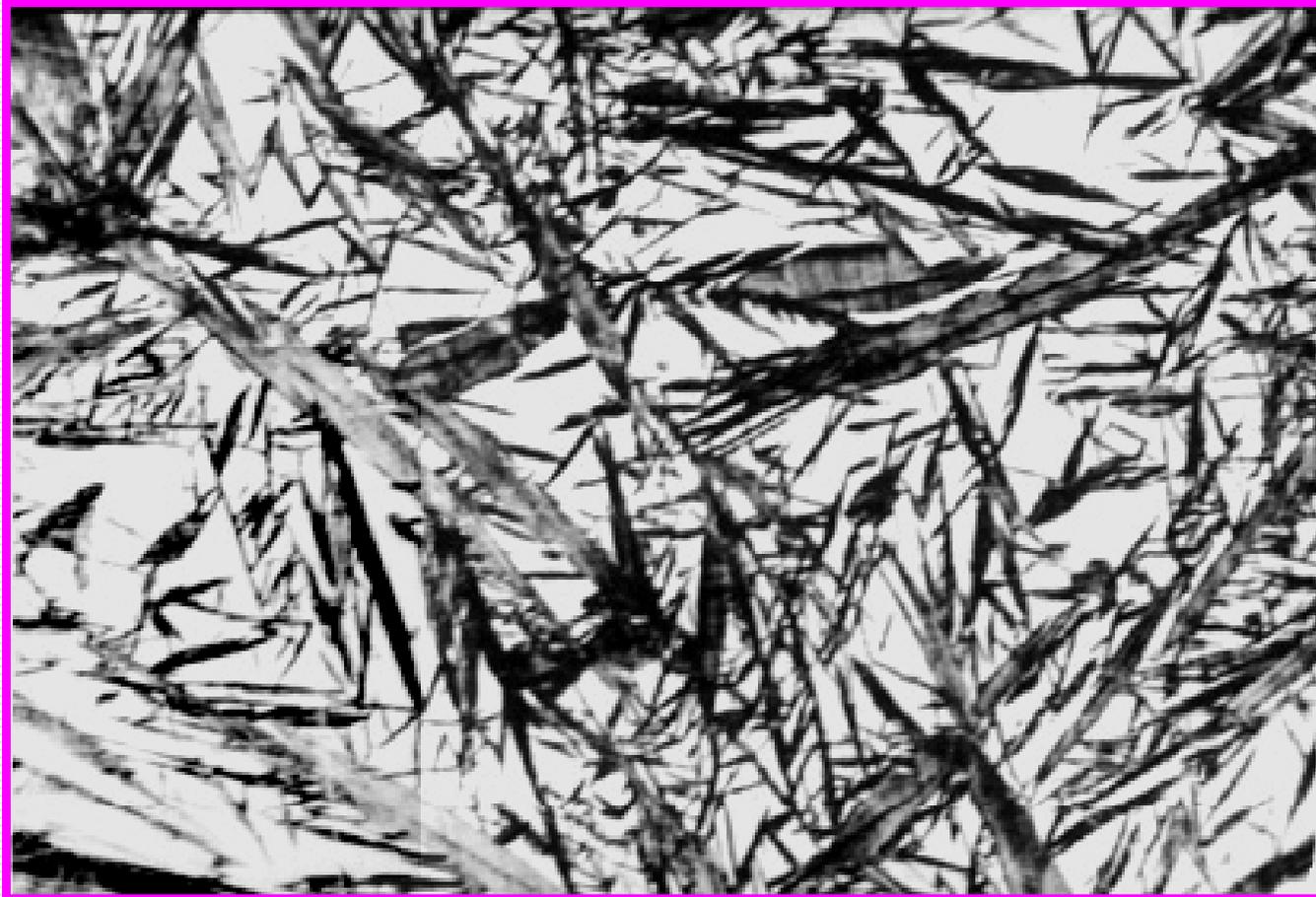
35钢（含0.35%C）亚温淬火组织



➡ 亚温淬火组织为F+M，强硬度低，但塑韧性好。



- 共析钢淬火组织： $M+A'$ 。



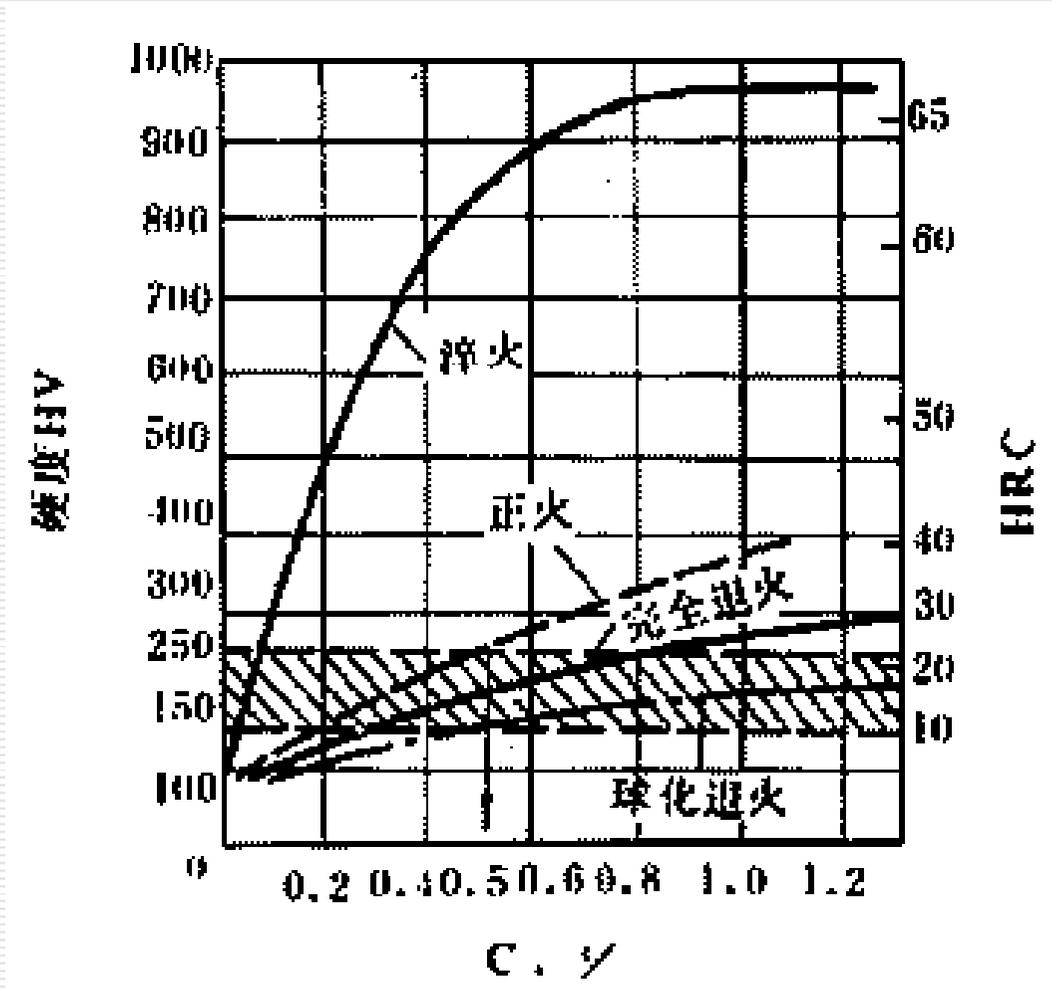
➤ 过共析钢淬火组织： $M + Fe_3C_{\text{颗粒}} + A'$ 。（预备组织为 $P_{\text{球}}$ ）



T12钢（含1.2%C）正常淬火组织



## ◆ 热处理与硬度关系



热处理与硬度关系

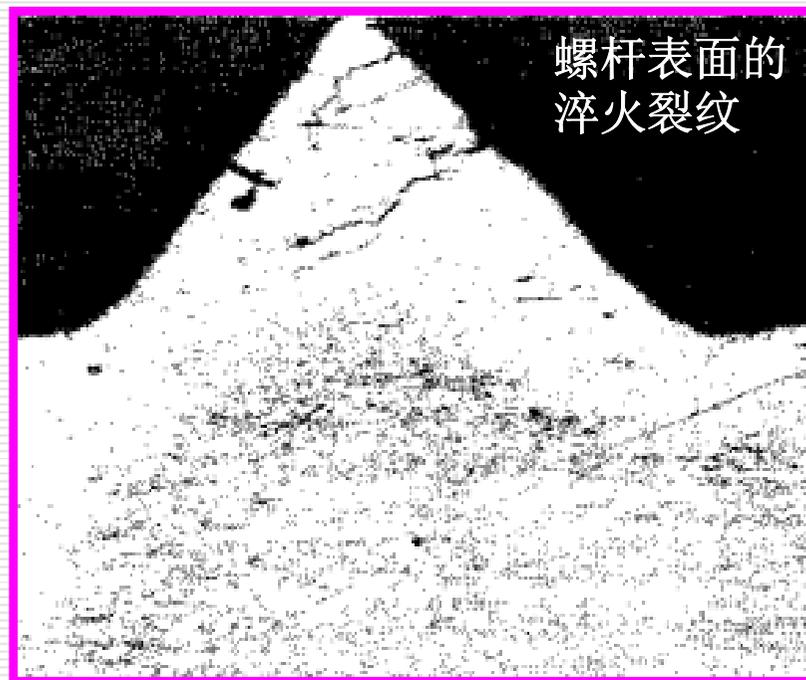


## ◆ 钢的回火

——指将淬火钢加热到 $A_1$ 以下的某温度保温后冷却的工艺。

### ● 回火的目的

- (1) 降低脆性，减少或消除淬火内应力。防止变形或开裂。
- (2) 稳定组织，稳定尺寸和形状，保证零件使用精度和性能。
- (3) 获得所需要的力学性能。淬火钢一般硬度高，脆性大，回火可调整硬度、韧性。
- (4) 对于某些高淬透性的钢，空冷即可淬火，如采用回火软化既能降低硬度，又能缩短软化周期。



## ● 钢在回火时的组织转变

淬火钢回火时的转变特征

### ➤ 淬火组织

(非平衡态, 不稳定 M和A')  $\rightarrow$   $\alpha$  + 碳化物 (平衡态) 扩散  
型转变

➤ 实质: 淬火M分解, 碳化物析出、聚集长大的过程。

回火阶段	组织转变阶段名称	回火温度范围/℃	回火时组织、结构的变化	
			板条马氏体	针片状马氏体
预备	碳原子的偏聚与聚集	< 100℃	碳原子偏聚在位错线附近	碳原子沿一定晶面而聚集
一	马氏体分解	(100 ~ 250)℃ 一直持续到350℃	碳原子仍偏聚在位错附近	正方度(c/a)下降, 马氏体过饱和度下降, 由马氏体中共格析出极细小片状 $\epsilon$ (Fe <sub>2.4</sub> C)碳化物
二	残余奥氏体分解	(200 ~ 300)℃		残余奥氏体分解为回火马氏体
三	碳化物类型的变化	(250 ~ 400)℃	碳原子全部脱溶, 析出细粒状渗碳体, $\alpha$ 相仍保持条状特征	过饱和碳自 $\alpha$ 相内继续析出, 同时 $\epsilon$ 碳化物转变为细粒状渗碳体
四	碳化物聚集长大与 $\alpha$ 相回复、再结晶	> 400℃	$Fe_3C$ 细粒 $\rightarrow$ 聚集长大 $\alpha$ 条状 $\xrightarrow{\text{回复}}$ $\alpha$ 回复 $\xrightarrow{\text{再结晶}}$ 多边化	



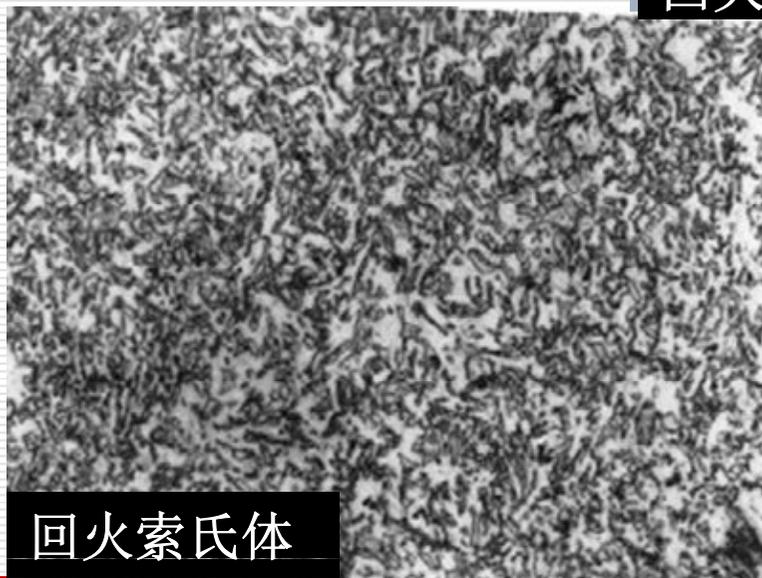
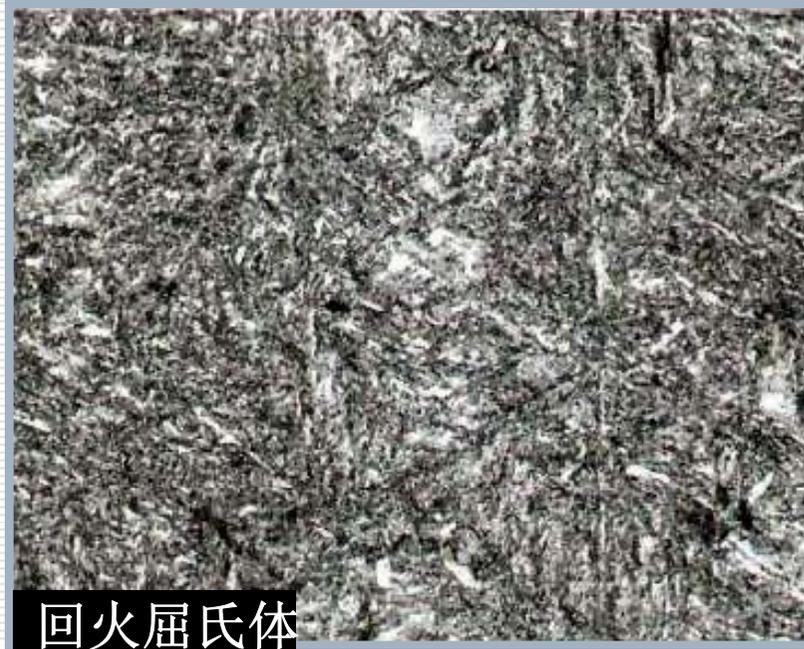
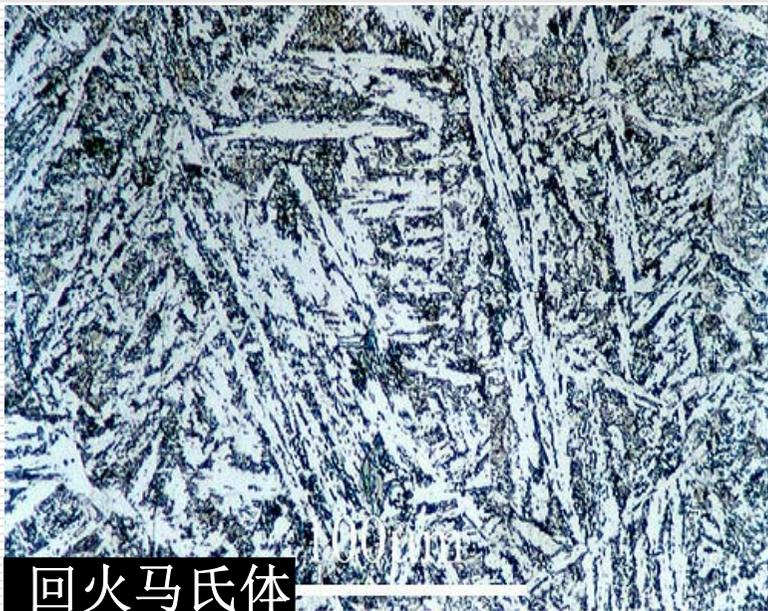
## ➤ 回火种类及应用

	低温回火	中温回火	高温回火（调质）
回火温度	150-250℃	350-500℃	500-650℃
回火组织	$M_{\text{回}}$	$T_{\text{回}}$	$S_{\text{回}}$
回火目的	在保留高硬度、高耐磨性的同时，降低内应力。	提高 $\sigma_e$ 及 $\sigma_s$ ，同时使工件具有一定韧性。	获得良好的综合力学性能，即在保持较高的强度同时，具有良好的塑性和韧性。
应用	适用于各种高碳钢、渗碳件及表面淬火件。	弹性元件及热锻模	广泛用于各种结构件如轴、齿轮等热处理。也可作为要求较高精密件、量具等预备热处理。

★ **尺寸稳定处理**（时效处理）：某些量具等精密零件，为保持淬火后的高硬度和尺寸稳定性，100~150℃长时间（10~50h）加热



# 热处理工艺与金相组织调控



## ➤ 马氏体和回火马氏体的区别：

- 1) **马氏体**在金相显微镜里是**亮白**的，而**回火马氏体**是灰**黑色**的；
- 2) **回火马氏体**是由马氏体**低温**回火后的**产物**，在低温回火时，马氏体中过饱和的碳**脱溶**，形成**碳化物**，但是整体还是**保持原马氏体位向**。由于碳化物的析出相和不均匀的分布，使得这种组织易于腐蚀，故回火马氏体的金相组织呈不均匀的灰黑色。

## ➤ 索氏体和回火索氏体的区别：

- 1) **索氏体**是由**过冷奥氏体**等温转变而来，一般称为等温**正火**，实质属于**片状珠光体**，一般称之为细珠光体；
- 2) **回火索氏体**是由**马氏体高温**回火转变而来，实质属于**粒状珠光体**，即为等轴铁素体基体上弥散的**细颗粒状渗碳体**。

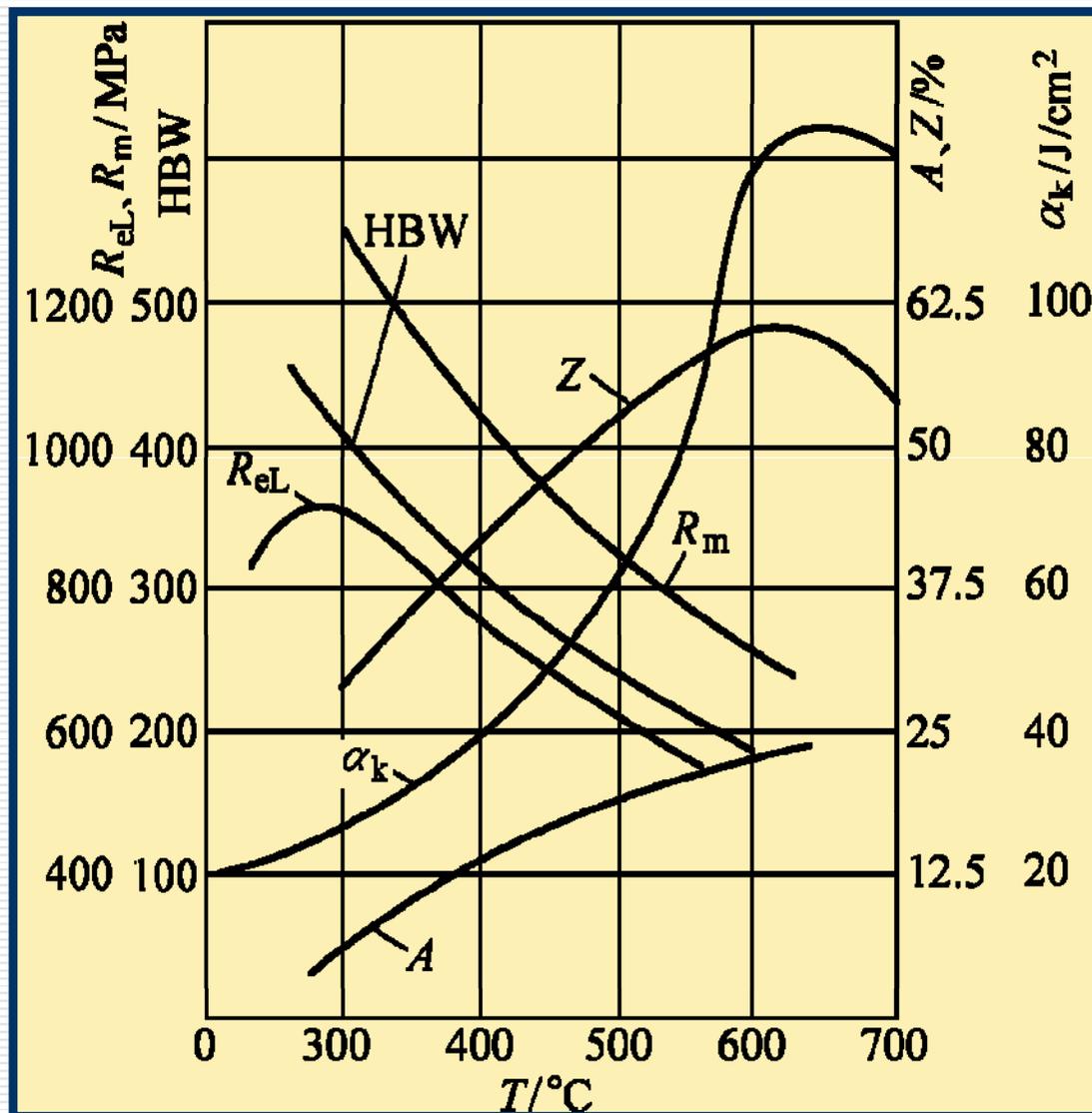
## ➤ 屈氏体和回火屈氏体的区别：

- 1) **屈氏体**为片间距为0.1微米的珠光体组织，也就是平常所称的**极细致珠光体**。
- 2) **回火屈氏体**(现在称为**托氏体**)淬火马氏体**中温回火**后组织，其金相特征是**马氏体**仍然基本上保持着**条状或片状形态**，**碳化物呈条状或颗粒状**。



## ➤ 回火时的性能变化

★ 随回火温度提高，钢的强度、硬度下降，塑性、韧性提高。





敬请批评指正  
谢 谢！

2021/3/30