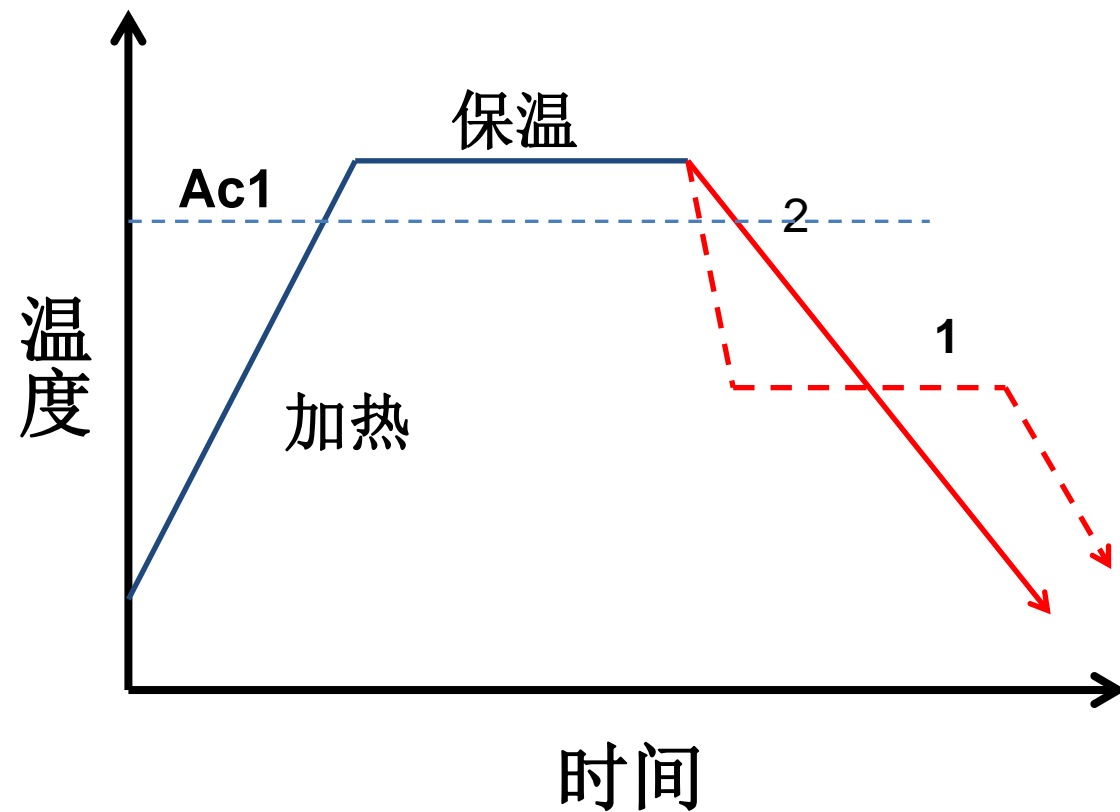


钢在冷却时的转变

材料性能不仅与加热时的状态有关，很大程度上取决于冷却时转变产物的类型和组织形态。**冷却方式和冷却速度对于奥氏体转变都有很大影响。**

钢在冷却时发生的组织转变可在某一恒定温度下进行，也可在连续冷却过程中进行。随着冷却条件的不同，奥氏体可在A₁以下不同的温度发生转变。

钢在冷却时的转变



1: 等温转变

2: 连续冷却

冷却方式：在低于奥氏体转变临界温度以下的温度控制过程

等温冷却：在奥氏体转变临界点以下时保持某温度不变

连续冷却：在奥氏体转变临界点以下时温度不断连续降低过程

5.2 热处理原理-钢在冷却时的转变

冷却
转变

过冷奥氏体的等温转变曲线

珠光体转变

马氏体转变

贝氏体转变

过冷奥氏体的连续冷却转变曲线

过冷奥氏体等温冷却转变曲线

过冷奥氏体

奥氏体冷却到临界温度 (A_1) 以下, 处于热力学不稳定状态, 经过一定孕育期后, 才会发生分解转变。在该温度下暂时存在的、处于不稳定状态的奥氏体称为过冷奥氏体。转变结束, 仍有未转变的奥氏体称为残余奥氏体。

过冷奥氏体等温转变图 (共析钢)

表示奥氏体急速冷却到临界点 A_1 以下在各不同温度下的保温过程中转变量与转变时间的关系曲线。是用来表示在不同冷却条件下过冷奥氏体转变过程的起止时间和各种类型组织转变所处的温度范围的一种图形。

过冷奥氏体等温冷却转变曲线

对于等温转变，通常采用“TTT” (Temperature-Time-Transformation)图来综合反映等温转变过程。

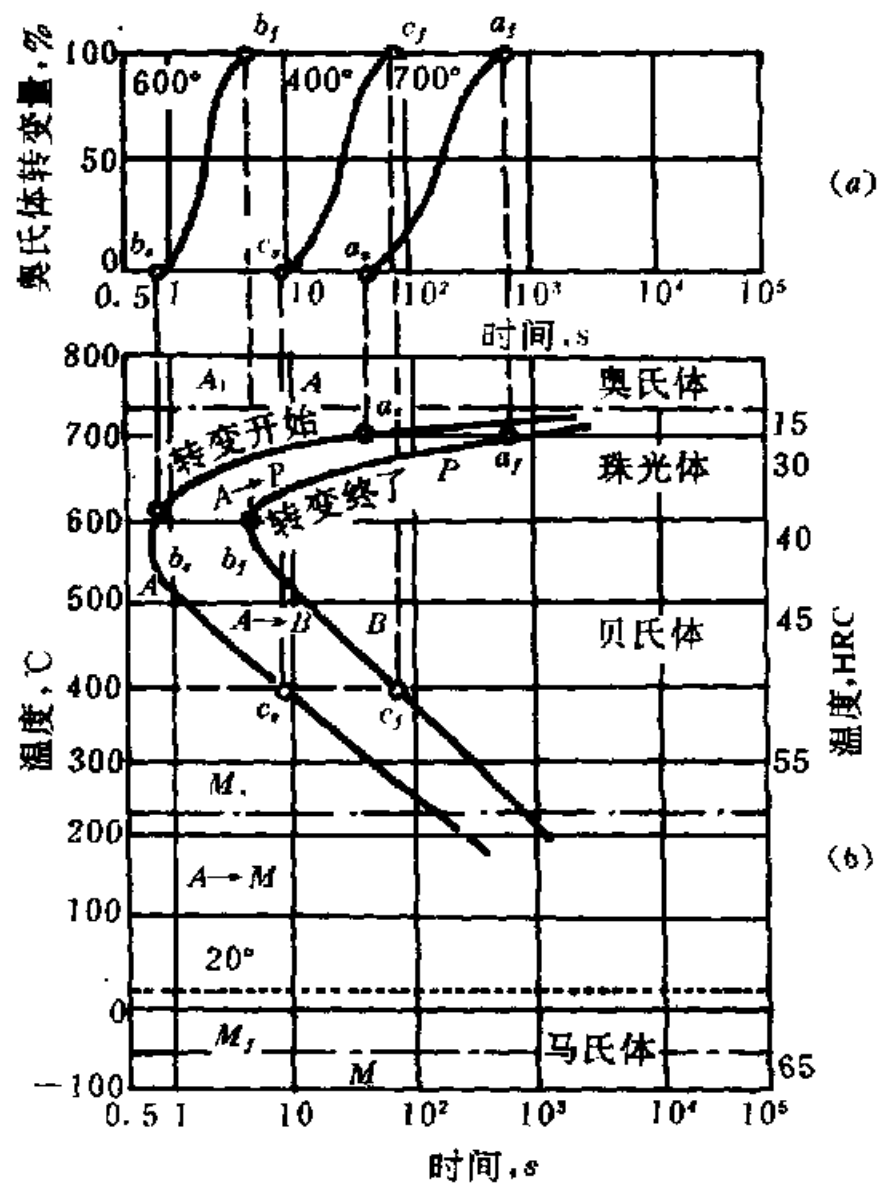
过冷奥氏体等温转变曲线的建立

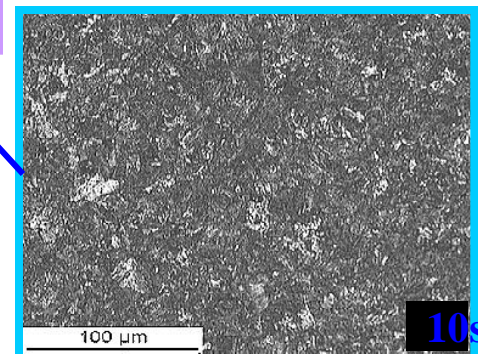
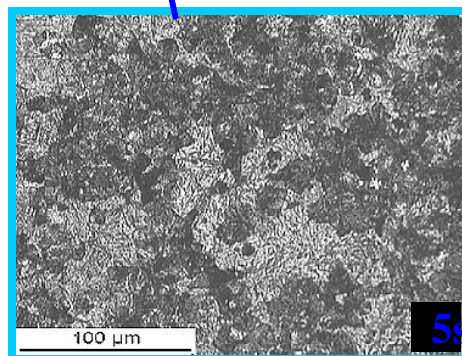
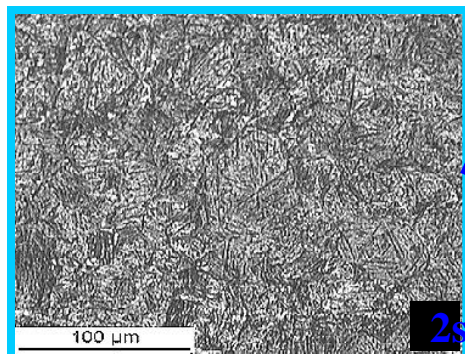
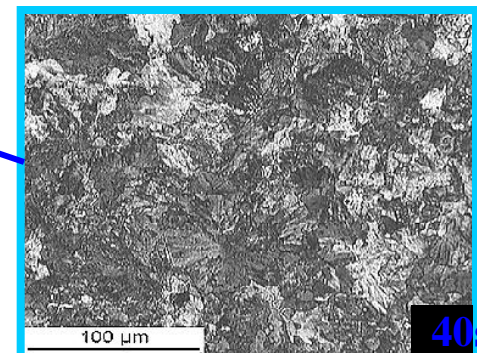
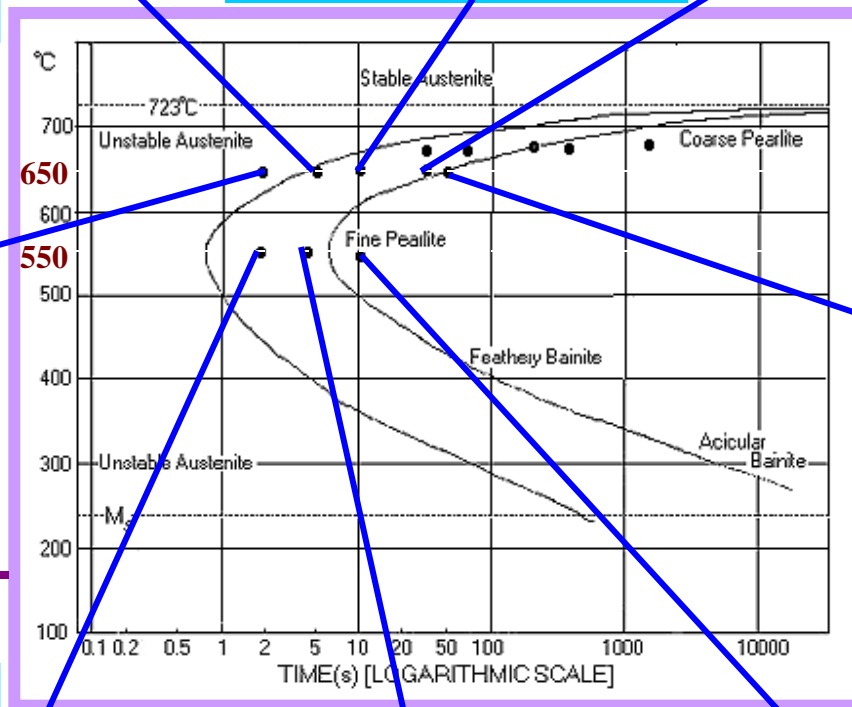
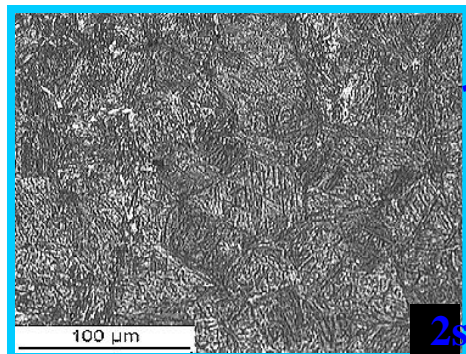
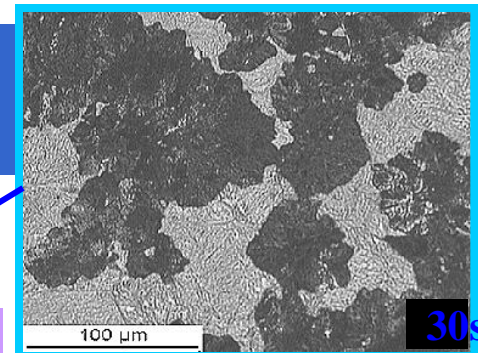
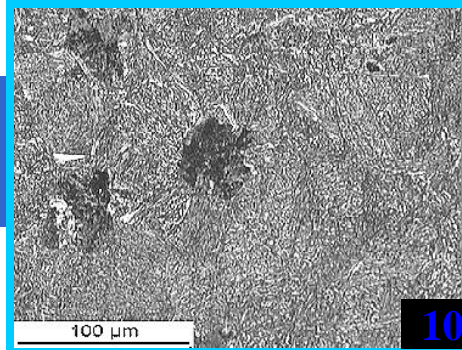
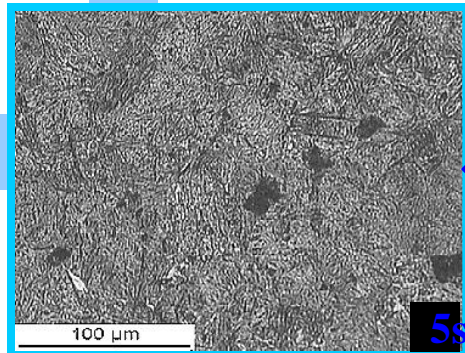
在过冷奥氏体的转变过程中不仅有组织（相变）转变和性能变化，同时伴随体积膨胀和磁性转变，因此可用金相法、硬度法、膨胀法或磁性法等来测定过冷奥氏体的等温转变过程，其中金相法是最基本的。

过冷奥氏体等温转变曲线的建立

金相法测定过冷奥氏体等温转变图---C曲线（基本方法），以共析钢为例：

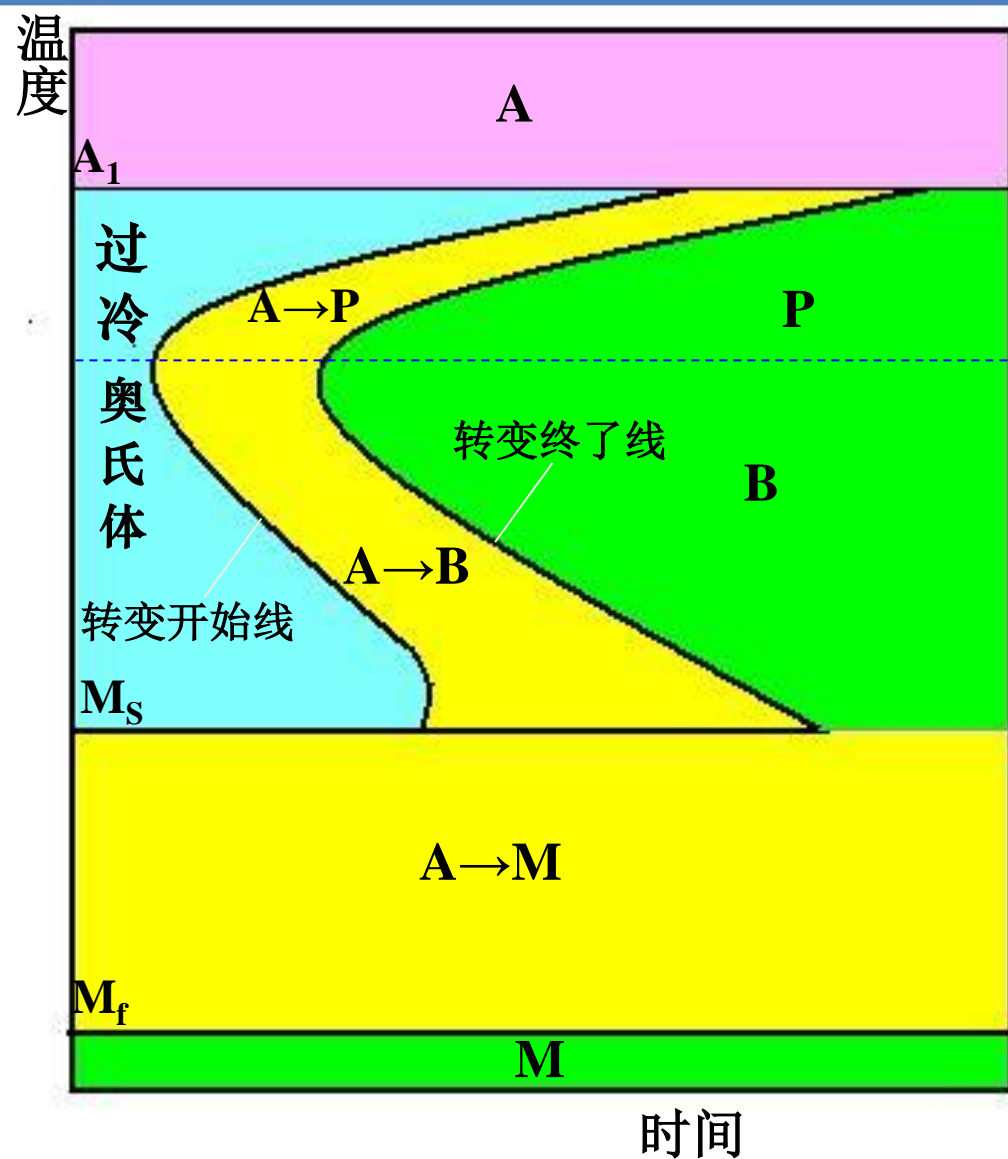
- 1、A体化的钢先快速冷却至临界点 A_{c1} 以下某温度等温冷却不同时间，再水冷至室温
- 2、室温金相观察，确定不同类型组织的含量。
- 3、分别将不同温度下开始转变和终了转变时间点连成曲线，即可





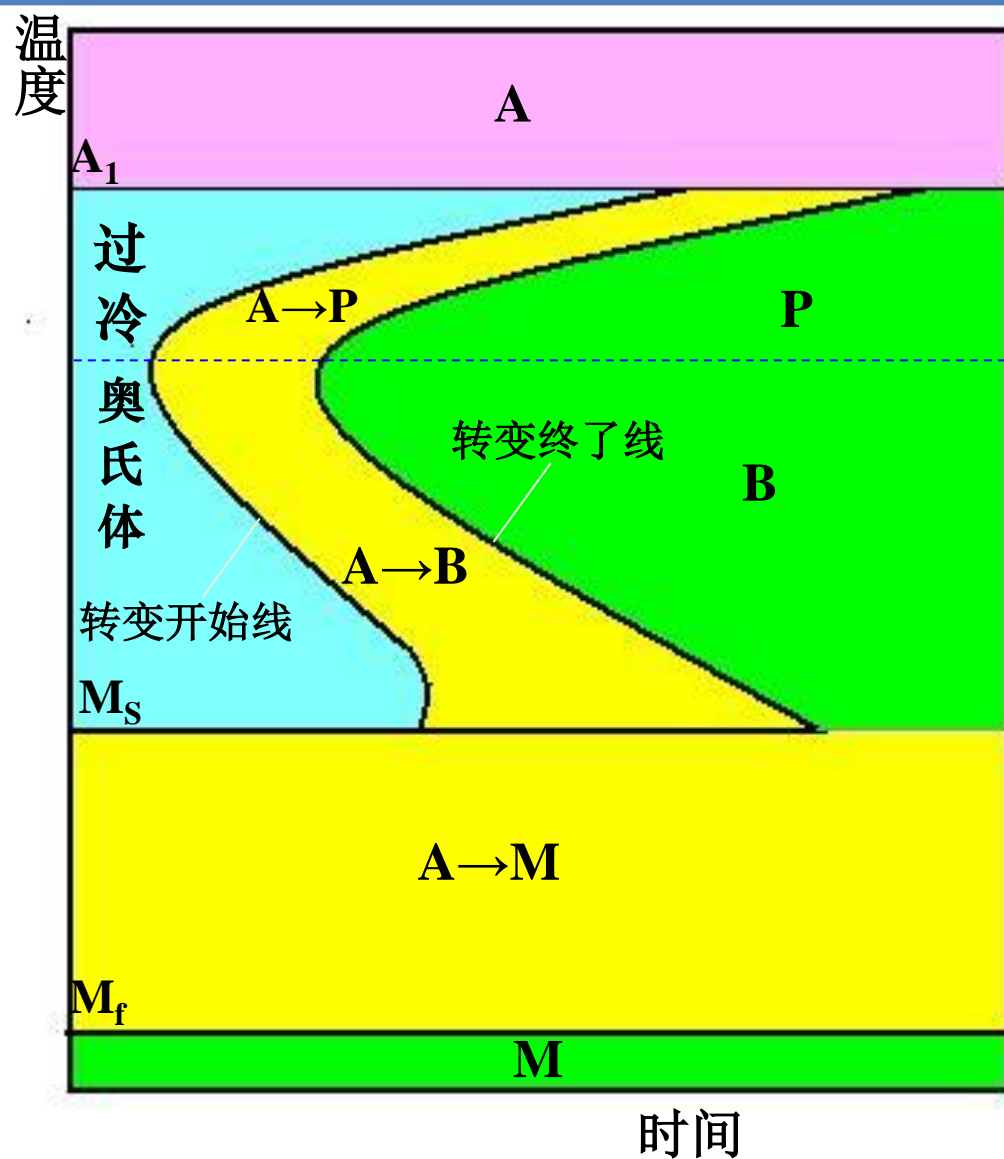
过冷奥氏体等温转变曲线的分析

- A_1 以上为奥氏体稳定区。
- A_1 - M_s 间及转变开始线以左的区域为过冷奥氏体区。
- 转变終了线以右及 M_f 以下为转变产物区。
- 两线之间及 M_s 与 M_f 之间为转变区。



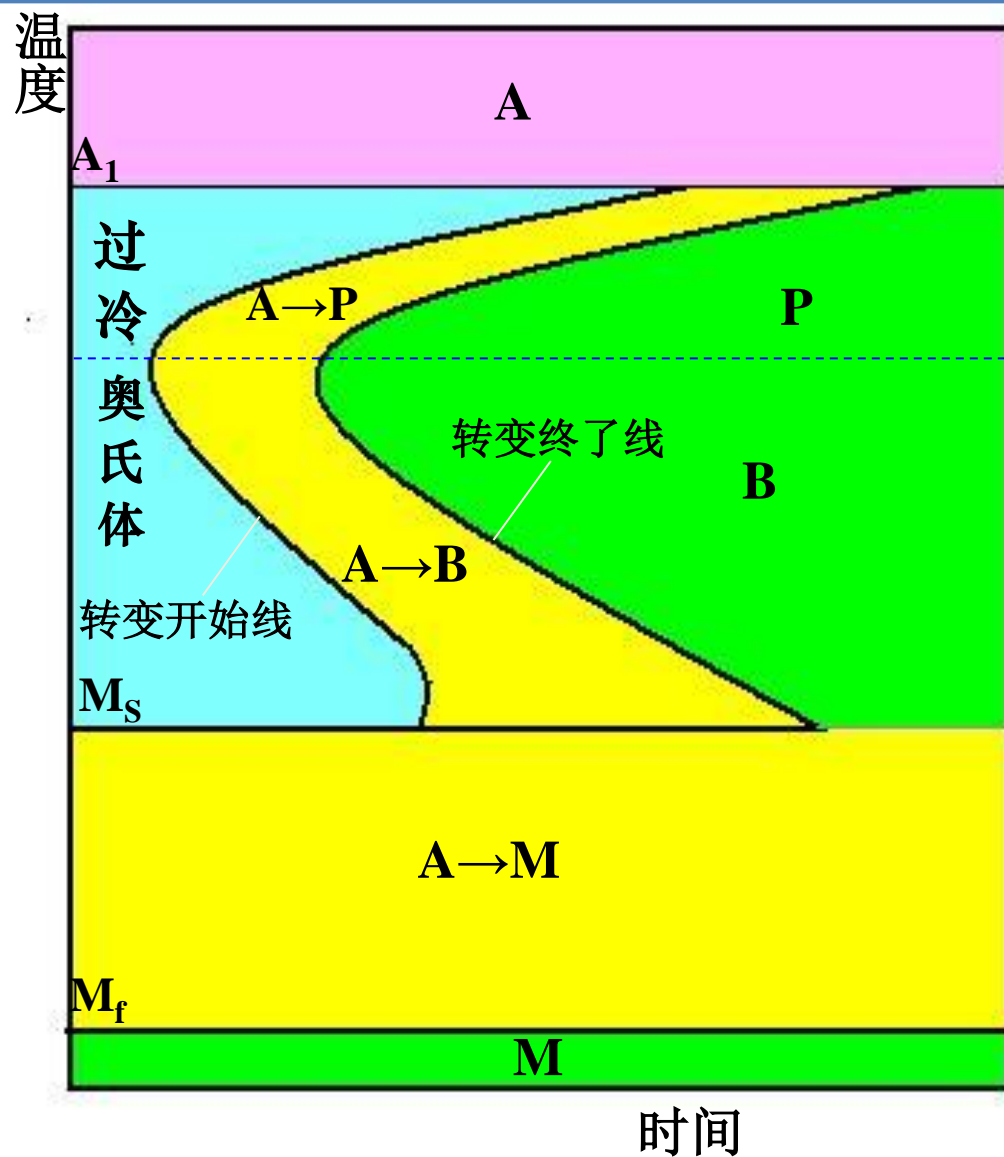
过冷奥氏体等温转变曲线的分析

- 转变开始线与纵坐标之间的距离为孕育期。
- 孕育期越小，过冷奥氏体越不稳定。
- 孕育期最小处称C曲线的“鼻尖”。
- 在鼻尖以上, 温度越高, 相变驱动力越小, 奥氏体稳定性高。在鼻尖以下, 温度越低, 扩散越困难。奥氏体稳定性越高。



过冷奥氏体等温转变曲线的分析

- A1至鼻尖处的高温转变，转变产物为珠光体，即珠光体转变。
- 鼻尖处至Ms的中温转变，转变产物为贝氏体，即贝氏体转变。
- Ms以下的低温转变，转变产物为马氏体，即马氏体转变。



过冷奥氏体转变产物的组织和性能

珠光体转变

共析碳钢加热奥氏体化后缓慢冷却，在稍低于A1温度时奥氏体将共析分解，生成共析铁素体与共析渗碳体的机械混合物，称为珠光体，珠光体相变必然要发生碳的重新分布和铁的晶格重组。珠光体转变是扩散型转变。

	$\gamma \rightarrow P (\alpha + Fe_3C)$		
结构	FCC	BCC	正交
含碳量	0.77%	0.0218%	6.69%

珠光体的组织形态和力学性能

① 珠光体的组织形态

层状珠光体



成分均匀的奥氏体的高温转变产物

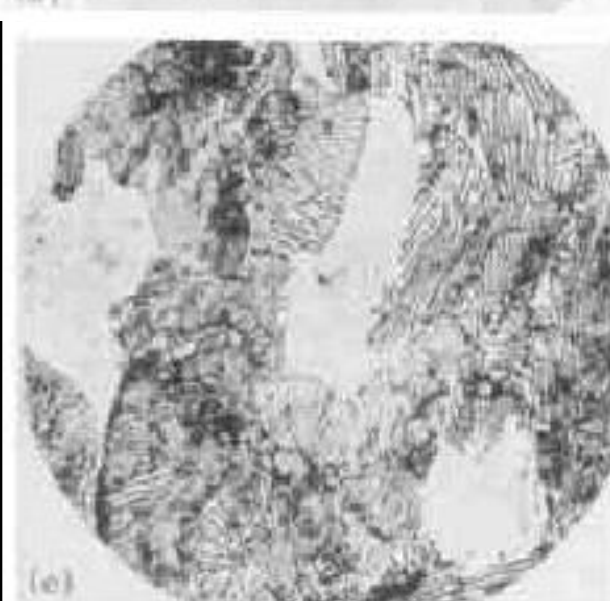
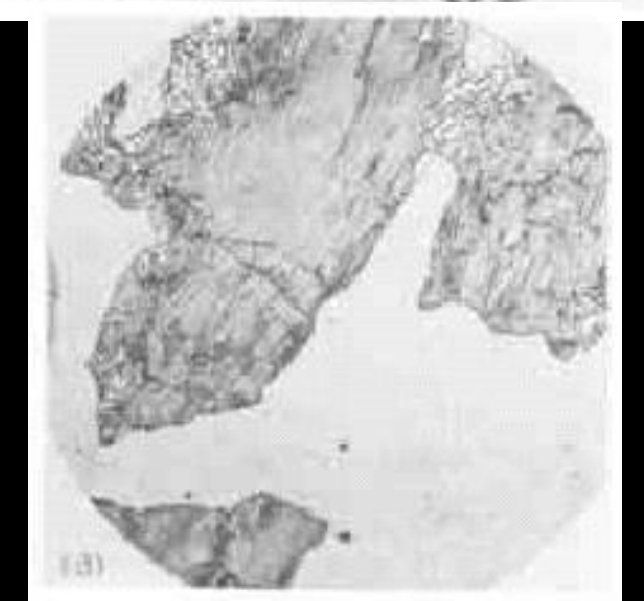
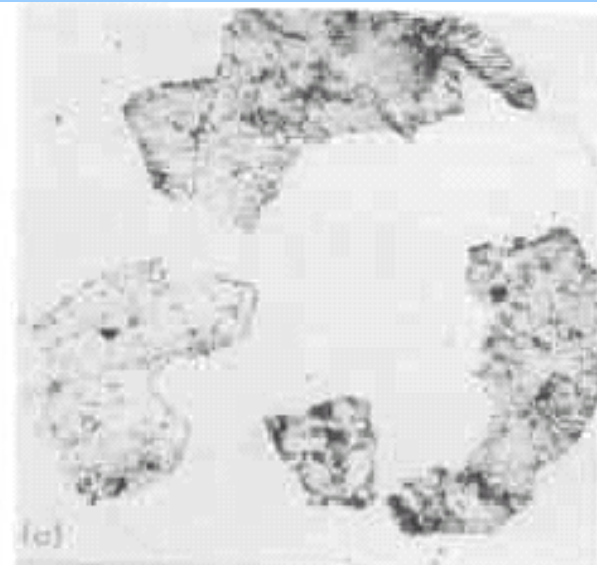
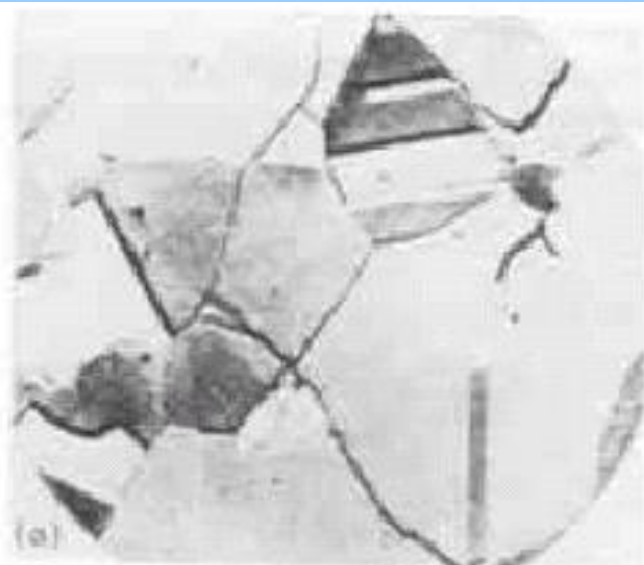


粒状珠光体



调制处理或者球化退火(不是由A体直接形成)

A体通过扩散型转变为由F和Fe₃C两相组成的片层状组织，平衡状态组织平均含碳量0.77%。



② 珠光体的性能

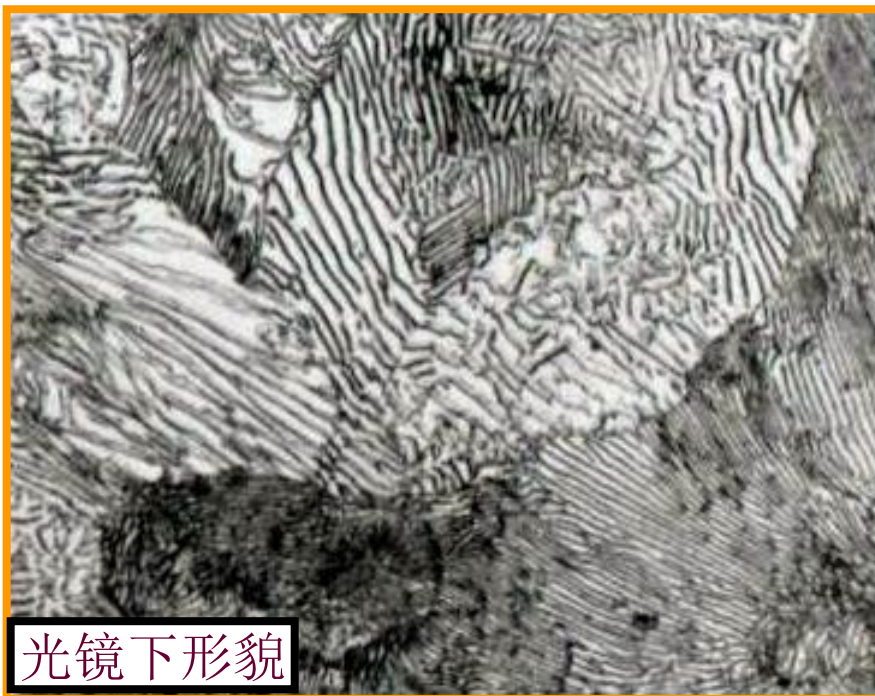
层状珠光体组织的粗细程度用珠光体的片层间距来表示。珠光体转变温度越低，过冷度越大，片层间距越小。根据片层间距不同，珠光体分为：

形成温度	片层间距 S_o	名称
A1~680 °C	0.45~0.15 μm	珠光体(P) Pearlite
680~600 °C	0.15~0.08 μm	索氏体(S) Sorbite
600~550 °C	0.08~0.03 μm	托氏体(T) Troostite

- (1) 珠光体:
- 形成温度为 $A_1-680^{\circ}\text{C}$,
片层较厚, 500倍光镜
下可辨, 用符号P表示。



三维珠光体如同放在水中的包心菜

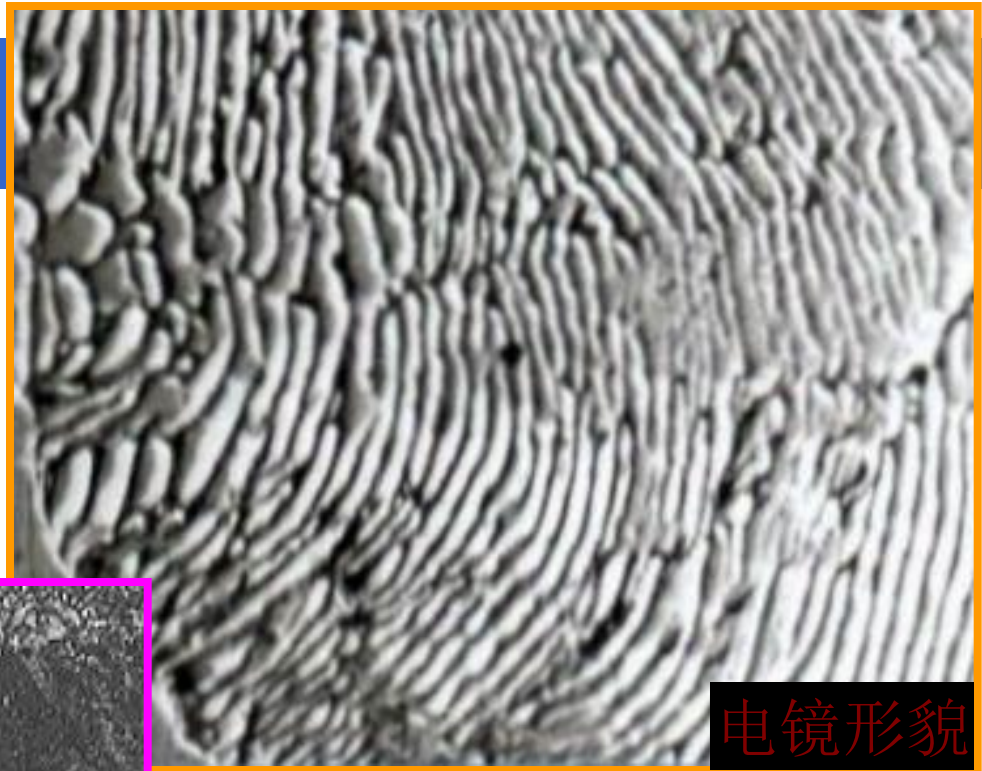


光镜下形貌



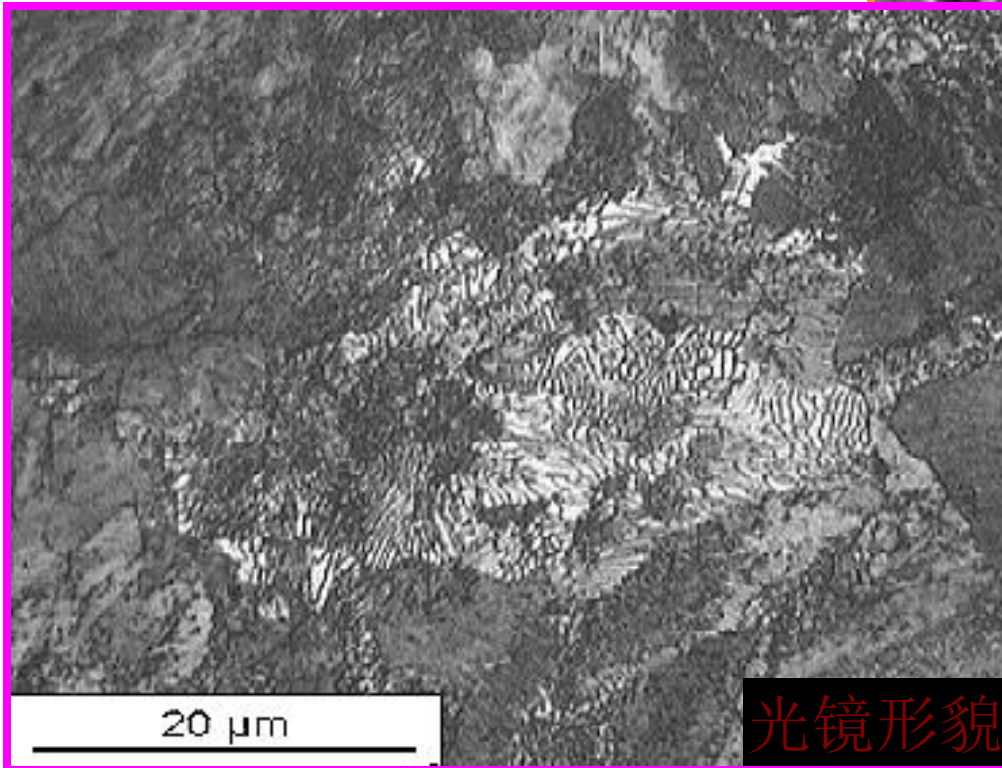
电镜下形貌

- (2) 索氏体



电镜形貌

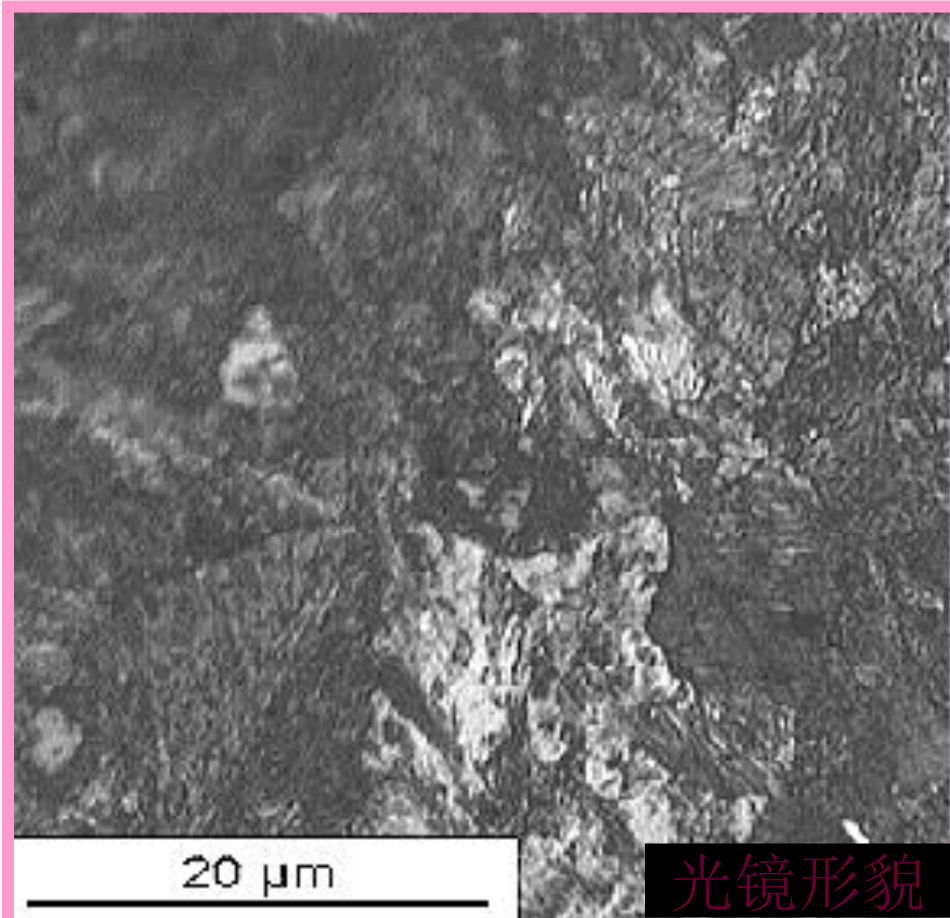
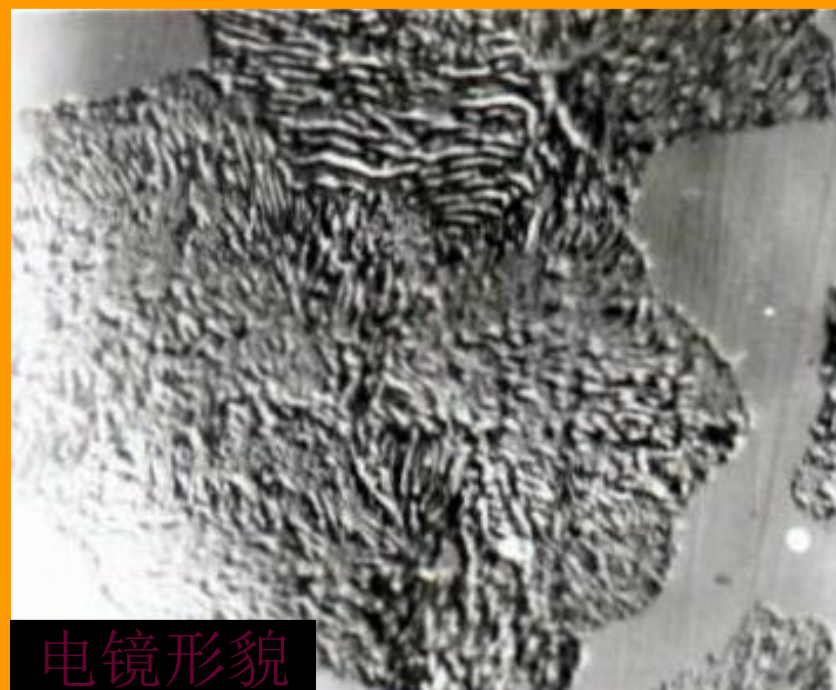
形成温度为 $680-600^{\circ}\text{C}$ ，
片层较薄， $800-1000$
倍光镜下可辨，用符
号S 表示。



光镜形貌

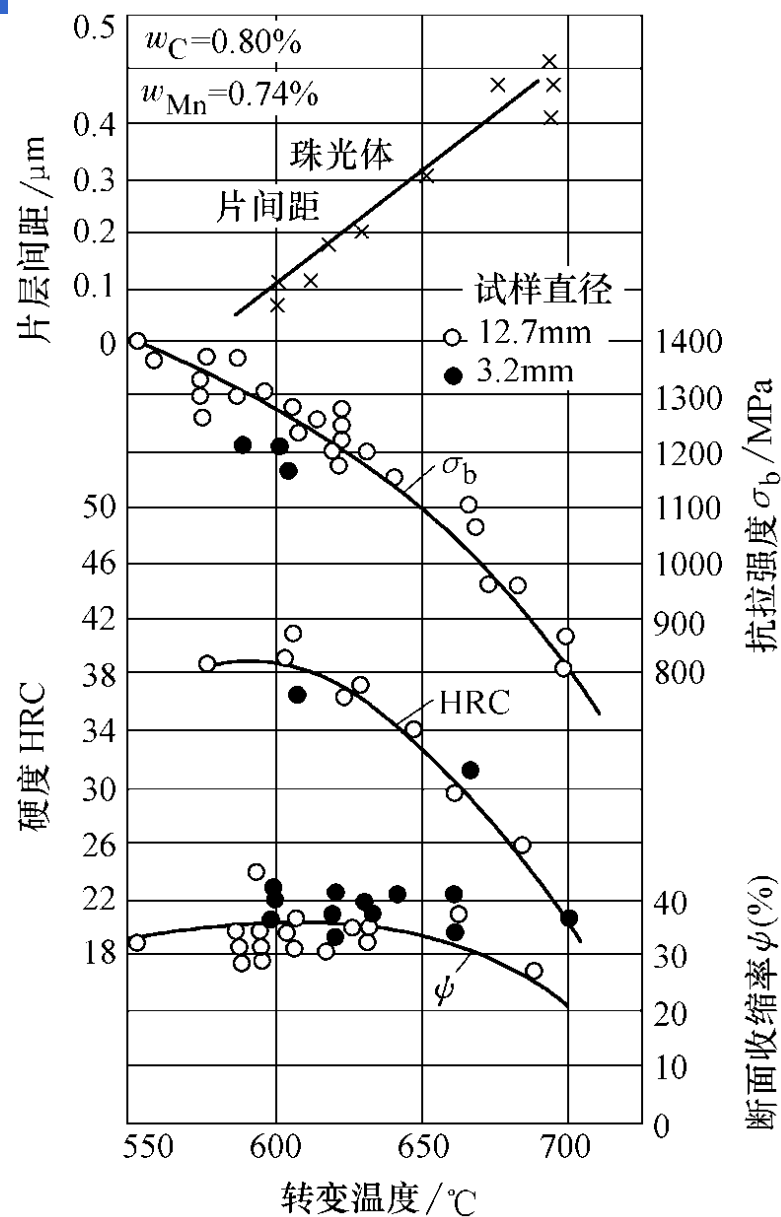
- (3) 托氏体
- 形成温度为 $600-550^{\circ}\text{C}$ ，片层极薄，电镜下可辨，用符号T 表示。

托氏体在光学显微镜下很难区分其片层结构



- 珠光体、索氏体、托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，相界面增多，塑性变形抗拉越大，强度、硬度越高。渗碳体片越薄，越容易随铁素体一起变形而不断裂，塑性和韧性越好。



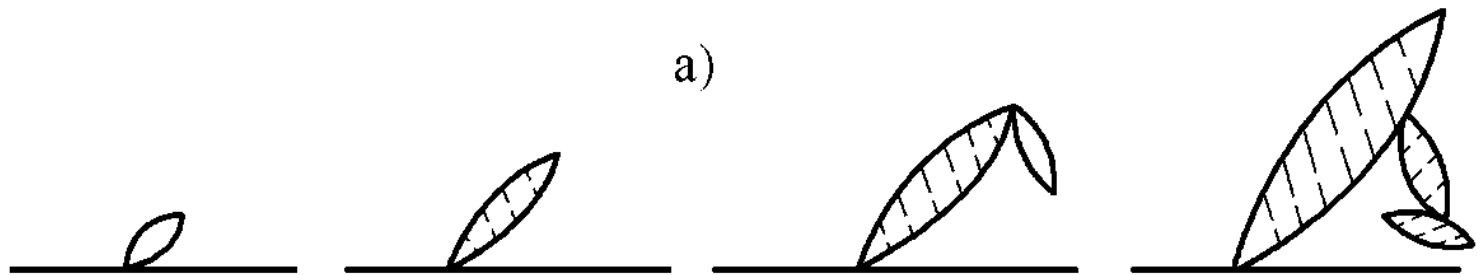
过冷奥氏体转变产物的组织和性能

贝氏体转变

- ◆ 由切变转变形成的铁素体和扩散转变形成的渗碳体的混合物
- ◆ 贝氏体的形态和形成机制均与珠光体不同，转变过程兼有M转变和P转变的特点。
- ◆ B中的铁素体是无扩散转变形成，而渗碳体则为扩散转变形成
- ◆ 两种不同的形态，转变方式不同：上贝氏体和下贝氏体



a)



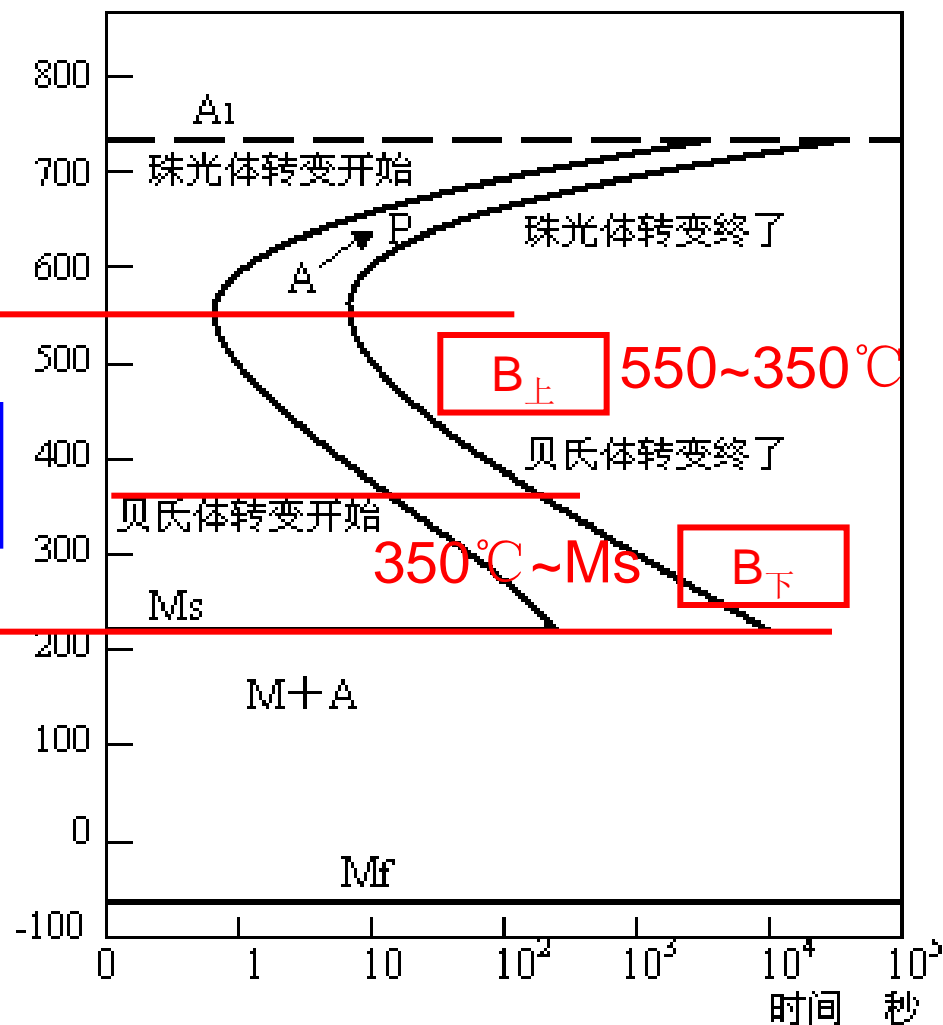
b)

贝氏体的组织形态和力学性能

贝氏体转变温度范围

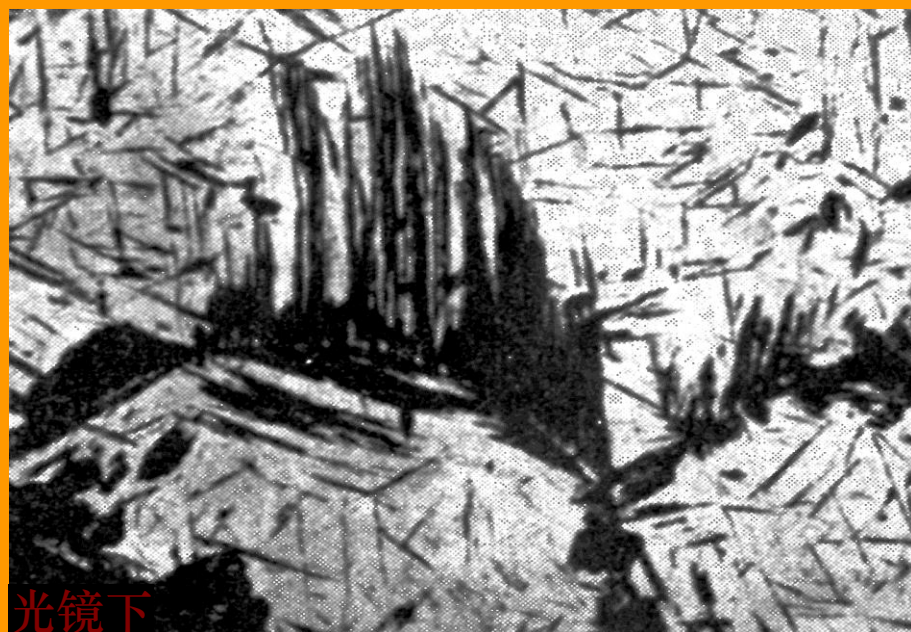
是介于珠光体和马氏体转变之间，故又称为中温转变。

贝氏体转变
温度范围



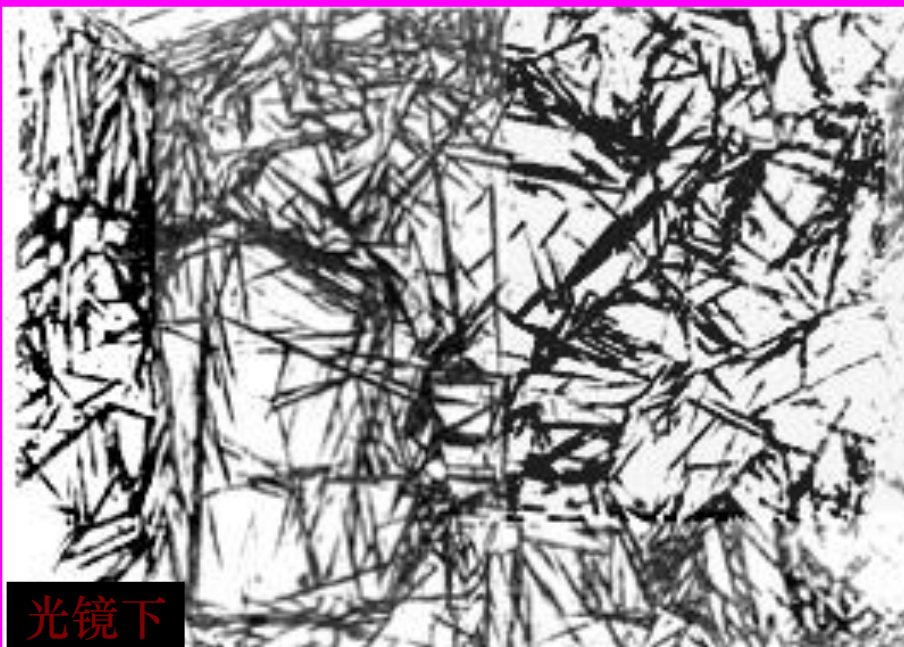
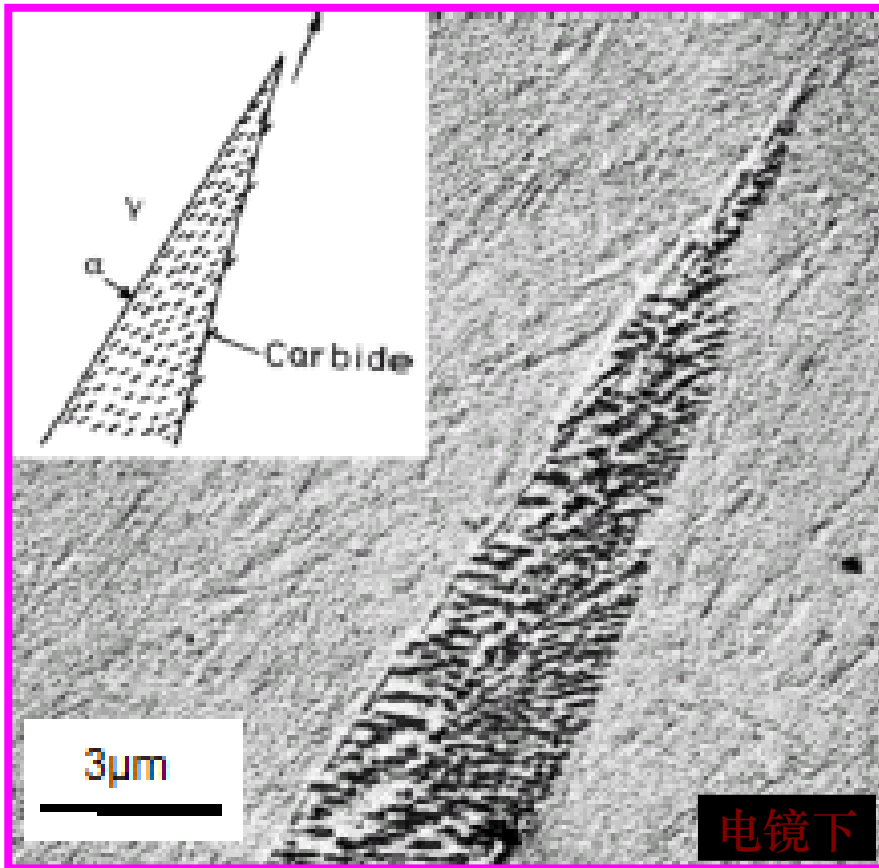
温度较低，铁原子仅做很小位移，不发生扩散（切变转变）₁

- (1) 上贝氏体
- 形成温度为 $550-350^{\circ}\text{C}$ 。
- 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
- 很脆没有利用价值。



下贝氏体

- 形成温度为 $350^{\circ}\text{C}-\text{Ms}$ 。
- 在光镜下呈针片状。



- ◆ 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。
- ◆ 强度高、韧性好

贝氏体的组织形态和力学性能

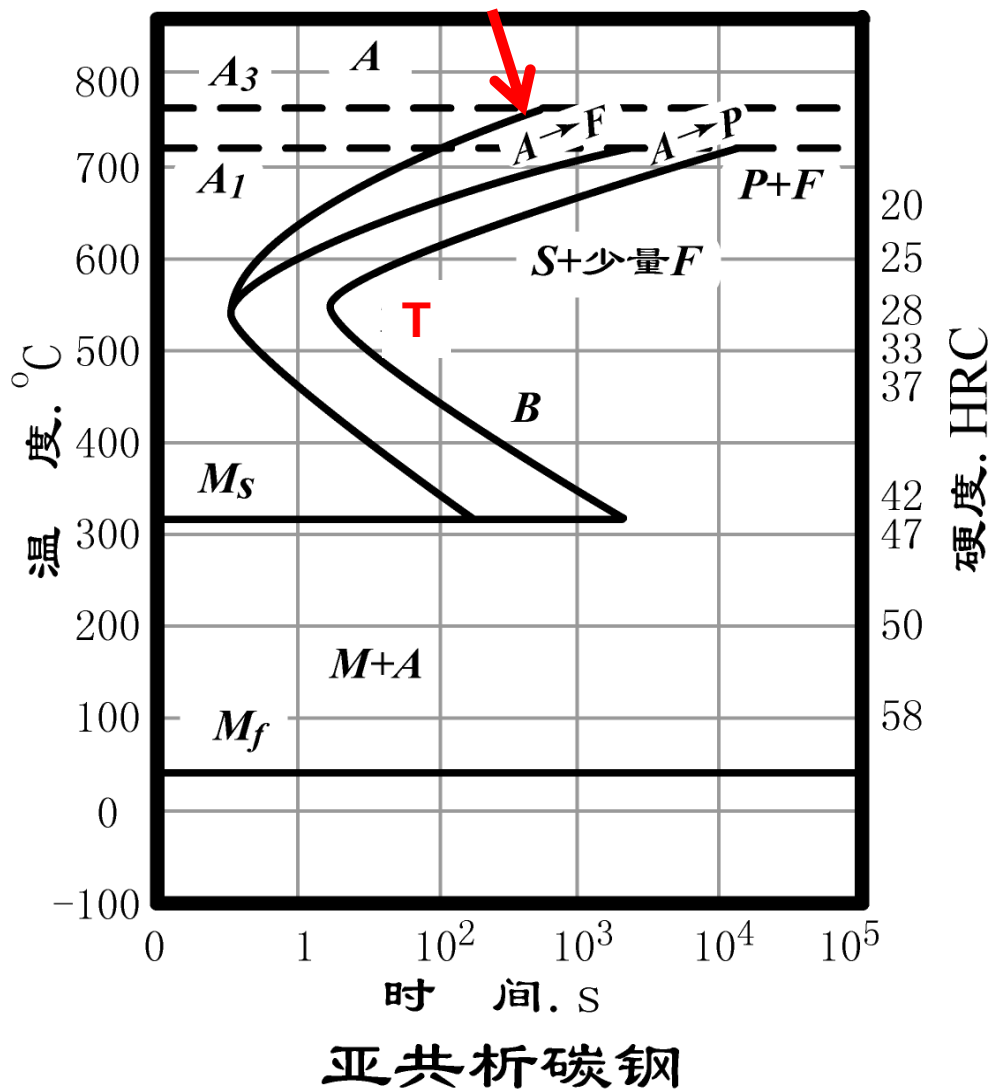
- 上贝氏体强度与塑性都较低，无实用价值。在实际应用中往往希望得到B下，而不希望出现B上。
- 下贝氏体除了强度、硬度较高外，塑性、韧性也较好，即具有良好的综合力学性能，是生产上常用的强化组织之一。

过冷奥氏体转变产物的组织和性能

马氏体转变-M

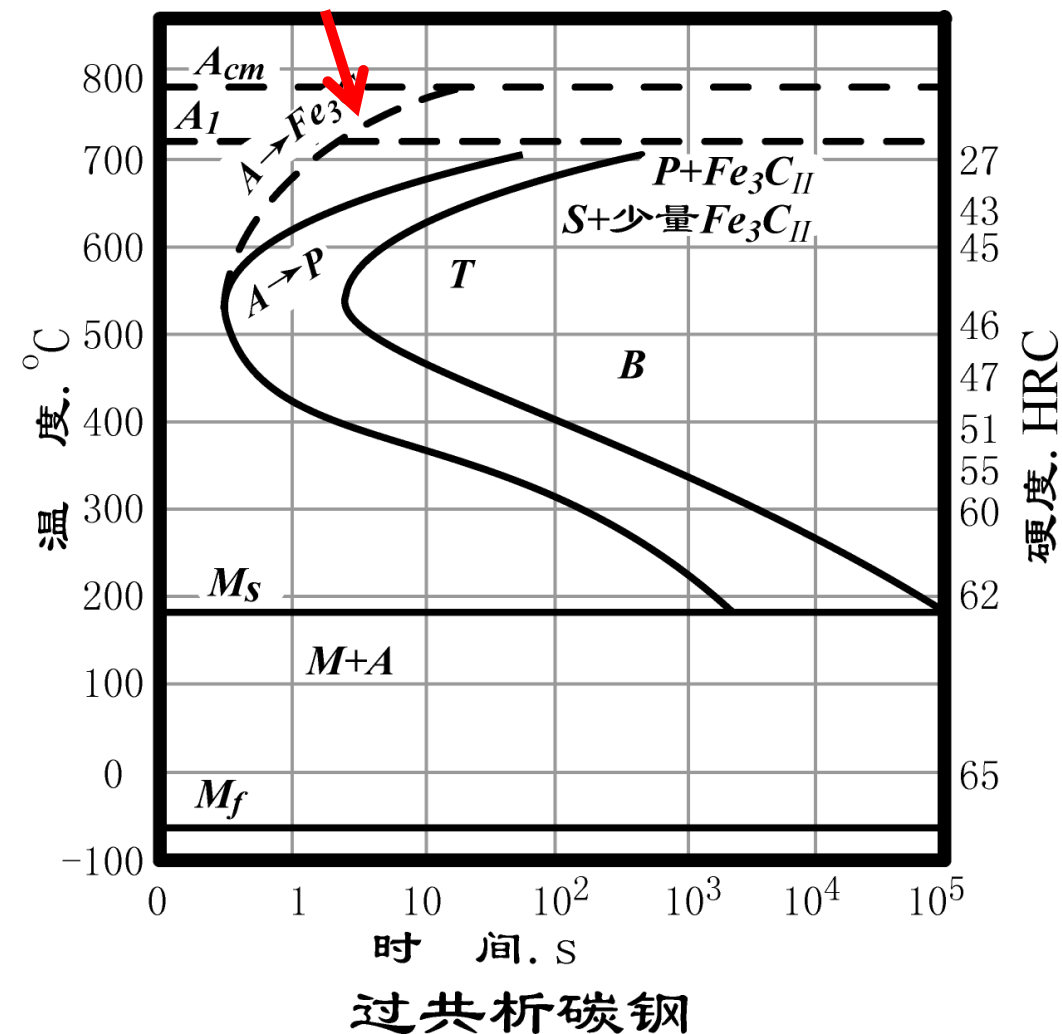
过冷奥氏体在 M_s 温度以下将发生马氏体转变。在极快的连续冷却过程中形成，没有孕育期，因此，在连续冷却相变之后讨论。

亚共析钢和过共析钢的等温转变



- 亚共析钢有一条先共析铁素体线，最后得到的组织为铁素体和珠光体。
- 随着过冷度增大，先共析铁素体量降低，到一定程度就不会析出先共析铁素体，而直接转为T组织
- 这种托氏体组织为**伪共析体**。

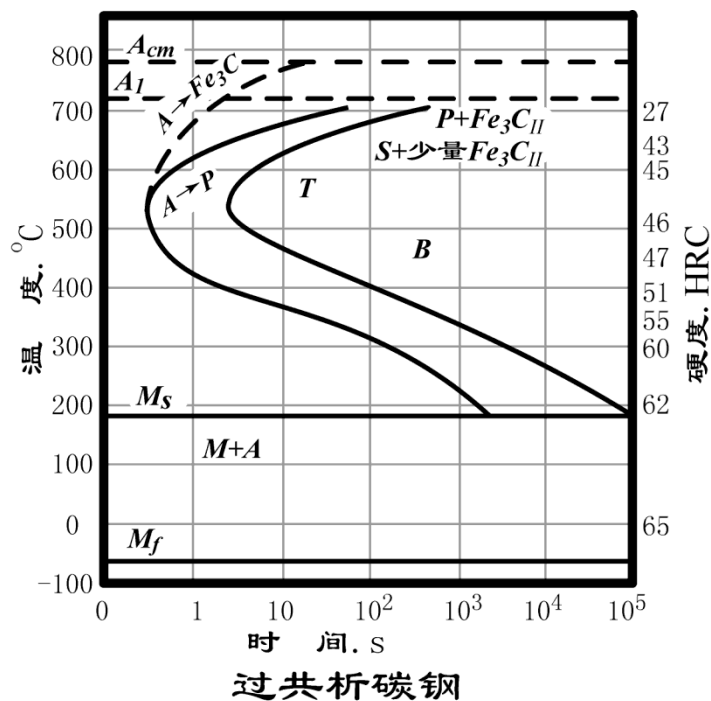
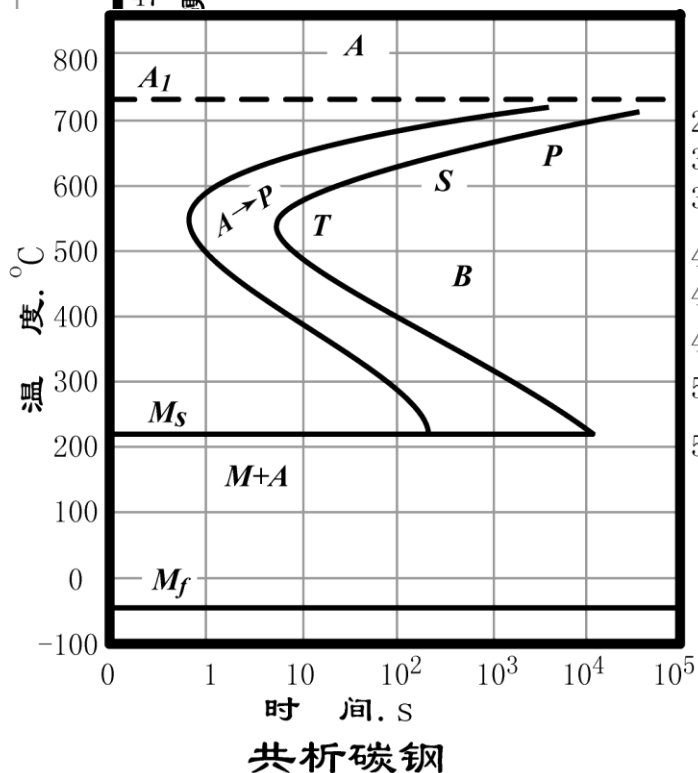
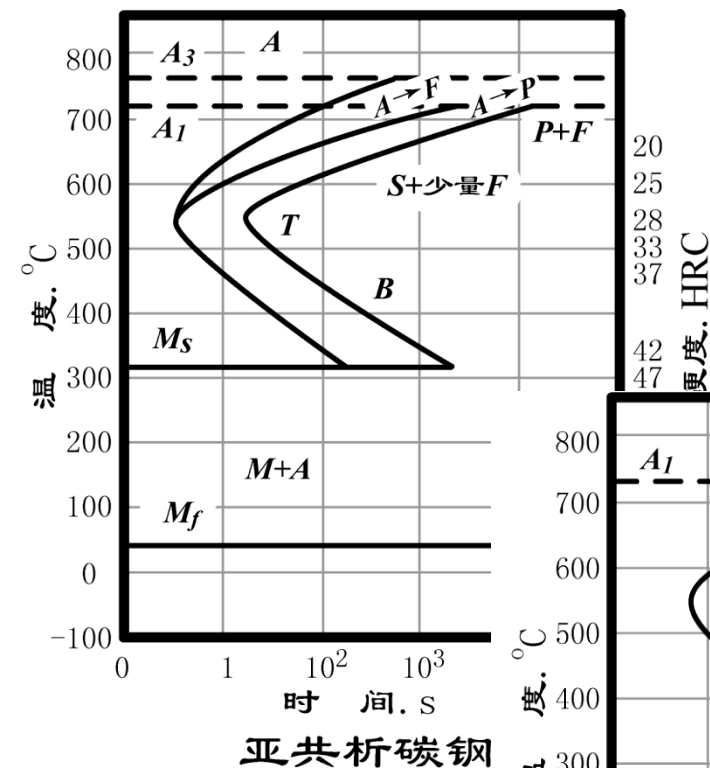
亚共析钢和过共析钢的等温转变



- 过共析钢有一条先共析渗碳体线，最后得到的组织为先共析渗碳体和珠光体。
- 随等温温度降低，先共析渗碳体量降低。
- 到一定程度，将不析出先共析渗碳体。
- 这种托氏体组织含碳量发生变化，性能也将发生变化。

亚共析钢和过共析钢的等温转变

亚共析钢，随碳含量增加，C曲线出现右移，过共析钢C曲线随碳含量增加而左移。共析钢C曲线鼻尖处最远，即奥氏体稳定性最好。

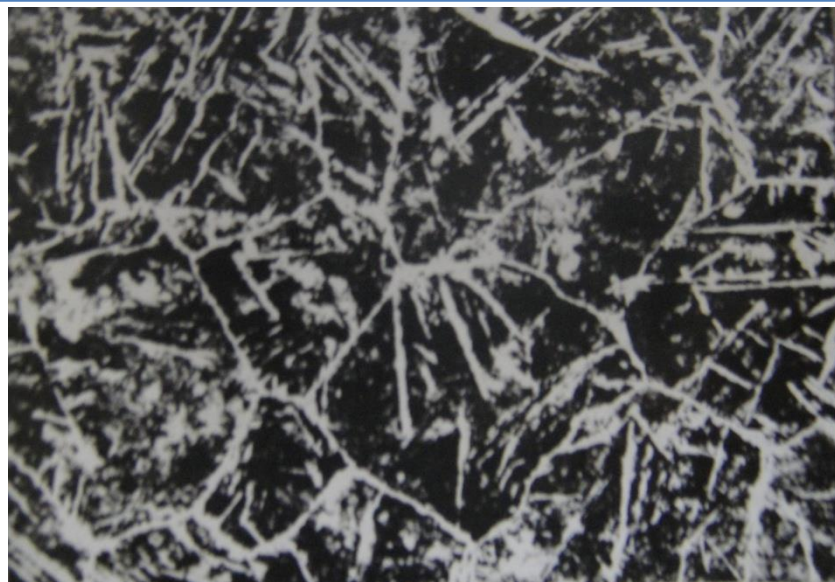


亚共析钢和过共析钢的等温转变

- 先共析铁素体一般呈块状或网状
- 先共析渗碳体呈网状析出。
- 若原奥氏体晶粒特别粗大，碳含量远离共析成分的钢（ $<0.6\%$ 或 $>1.2\%$ ），在一定的冷却条件下会以一定位向在奥氏体内部析出，形成魏氏组织。

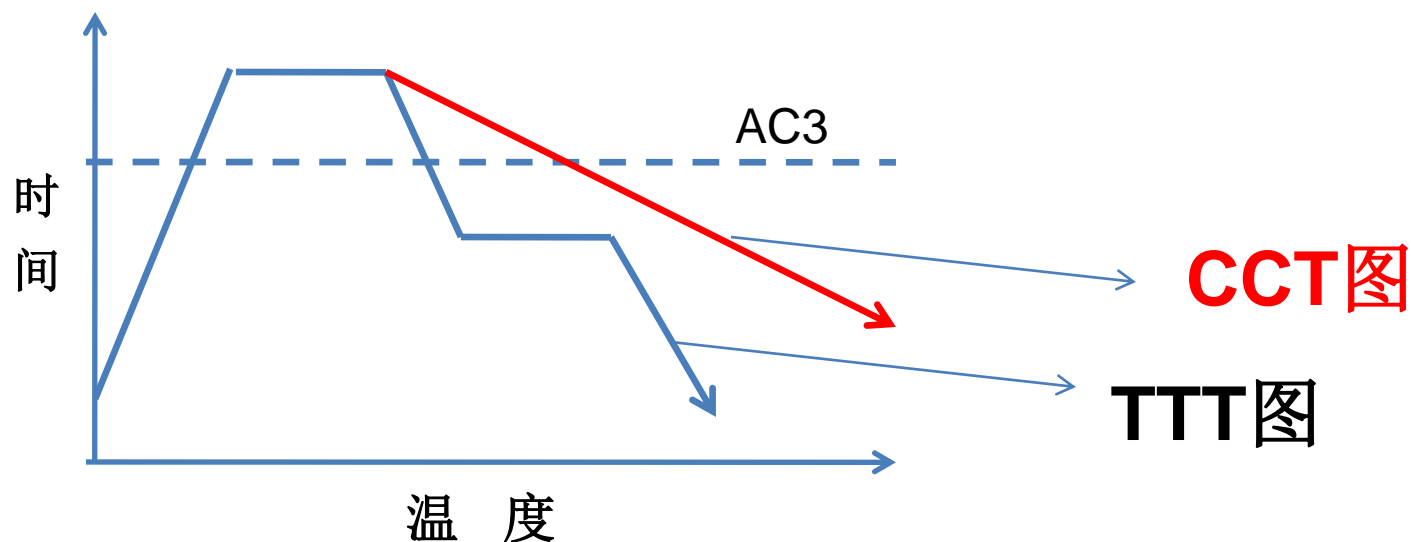


共亚析碳钢的魏氏组织（200x）



过共析碳钢的魏氏组织（400x）

过冷奥氏体的连续冷却转变曲线



中华人民共和国黑色冶金行业标准

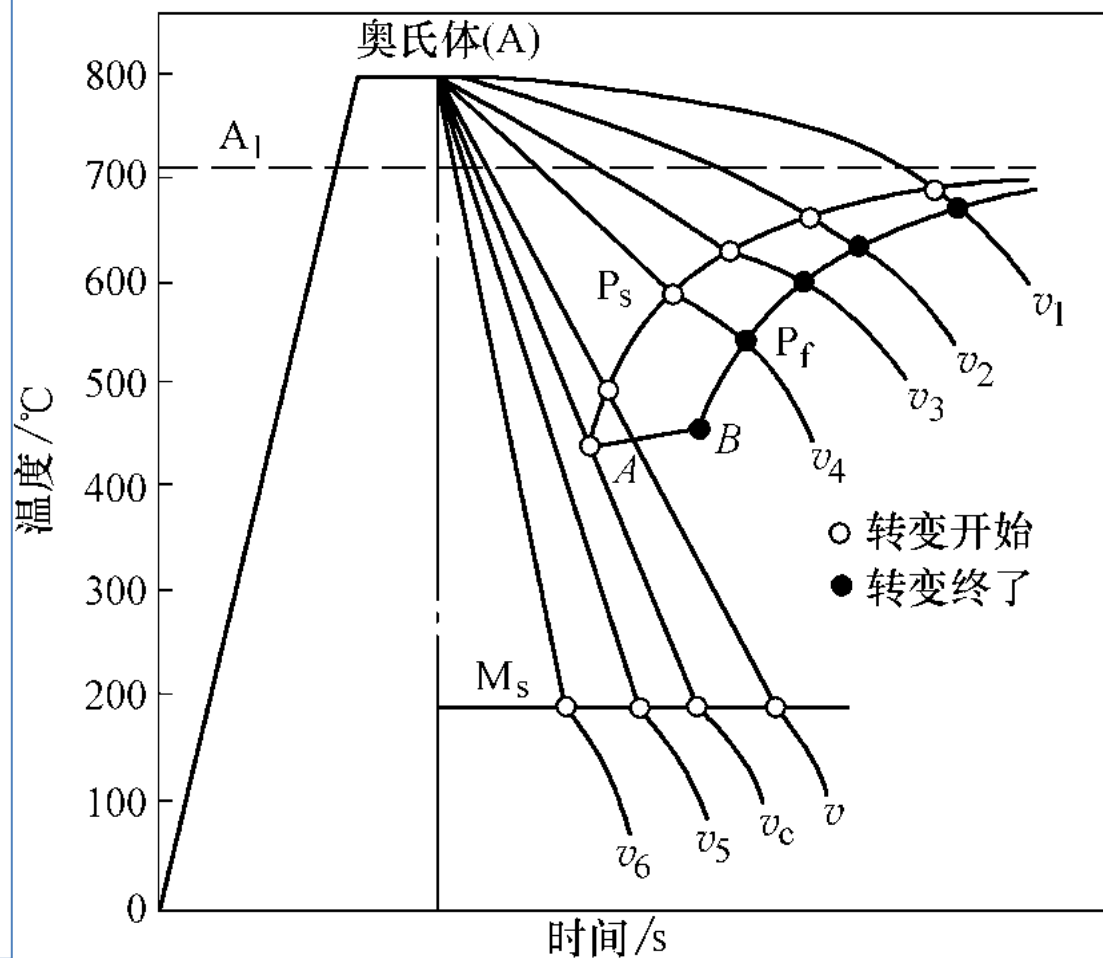
钢的连续冷却转变曲线图的测定
方法（膨胀法）

YB/T 5128—93

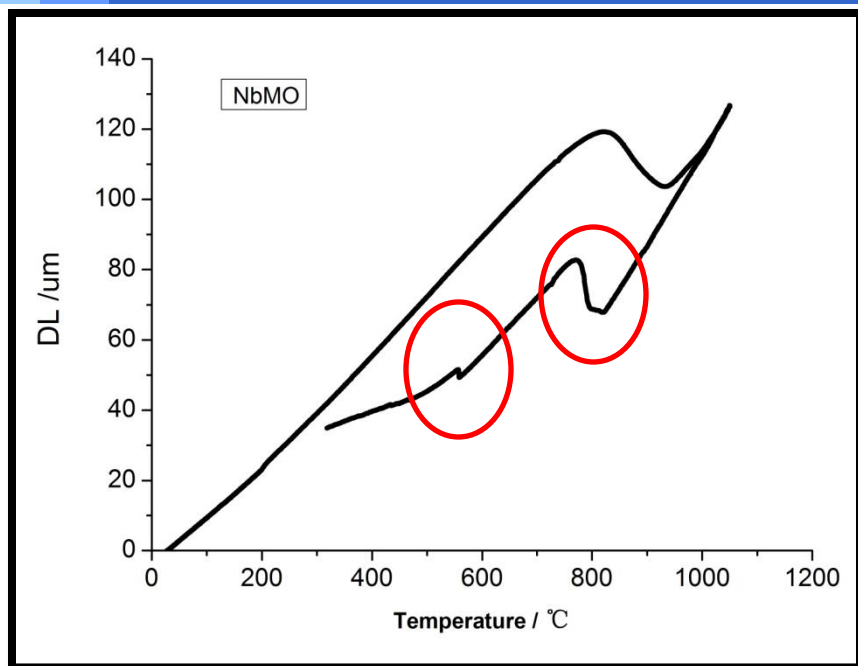
Steel—Determination of continuous cooling
transformation diagram—Dilatometric method

过冷奥氏体的连续冷却转变曲线

将若干共析碳钢小试样在规定的温度奥氏体化后，以不同的速度连续冷却（10种冷速以上），同时测出各种冷速下连续冷却时的转变开始点和终了点。将这些点画在温度-时间坐标系中，并将转变开始点与终了点各自分别连在一起，绘成连续冷却转变图

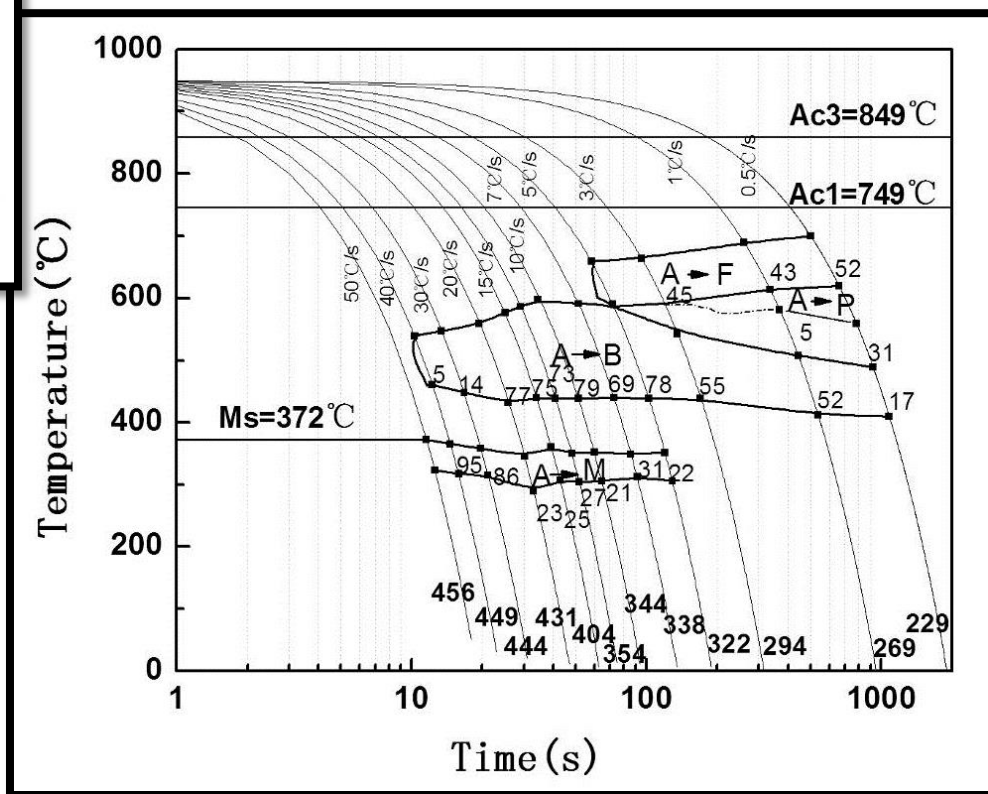


■ 典型事例

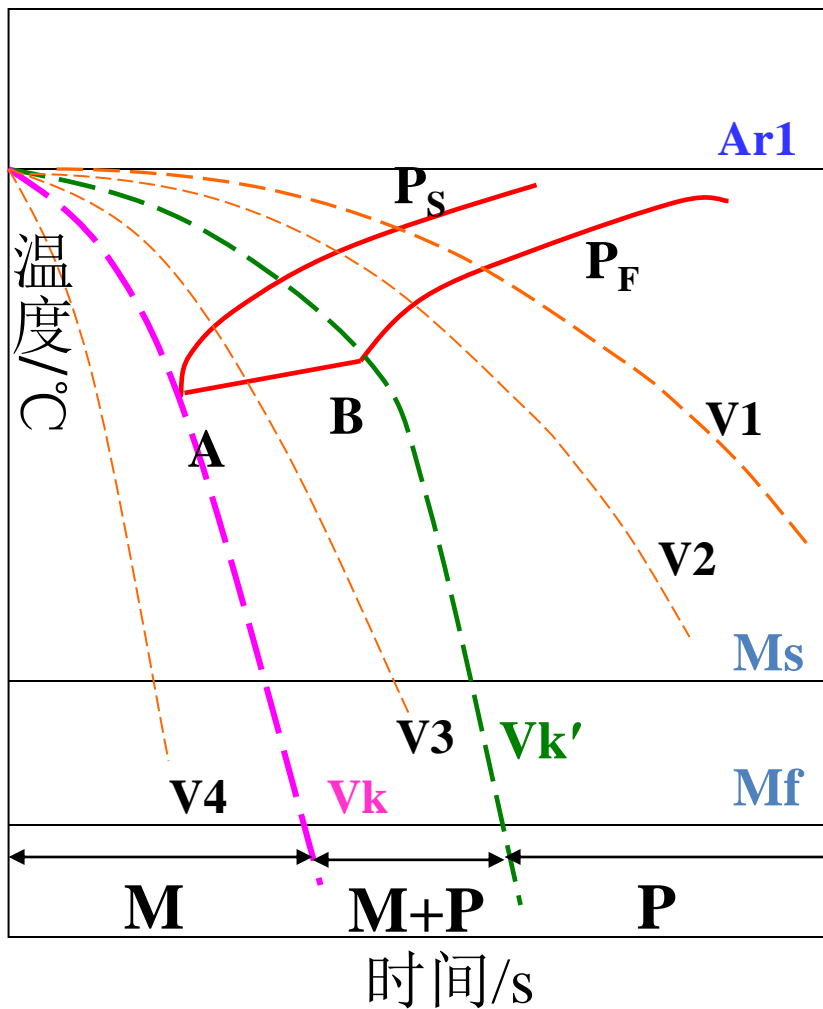


某冷速下的热膨胀曲线

DP1180的热膨胀曲线



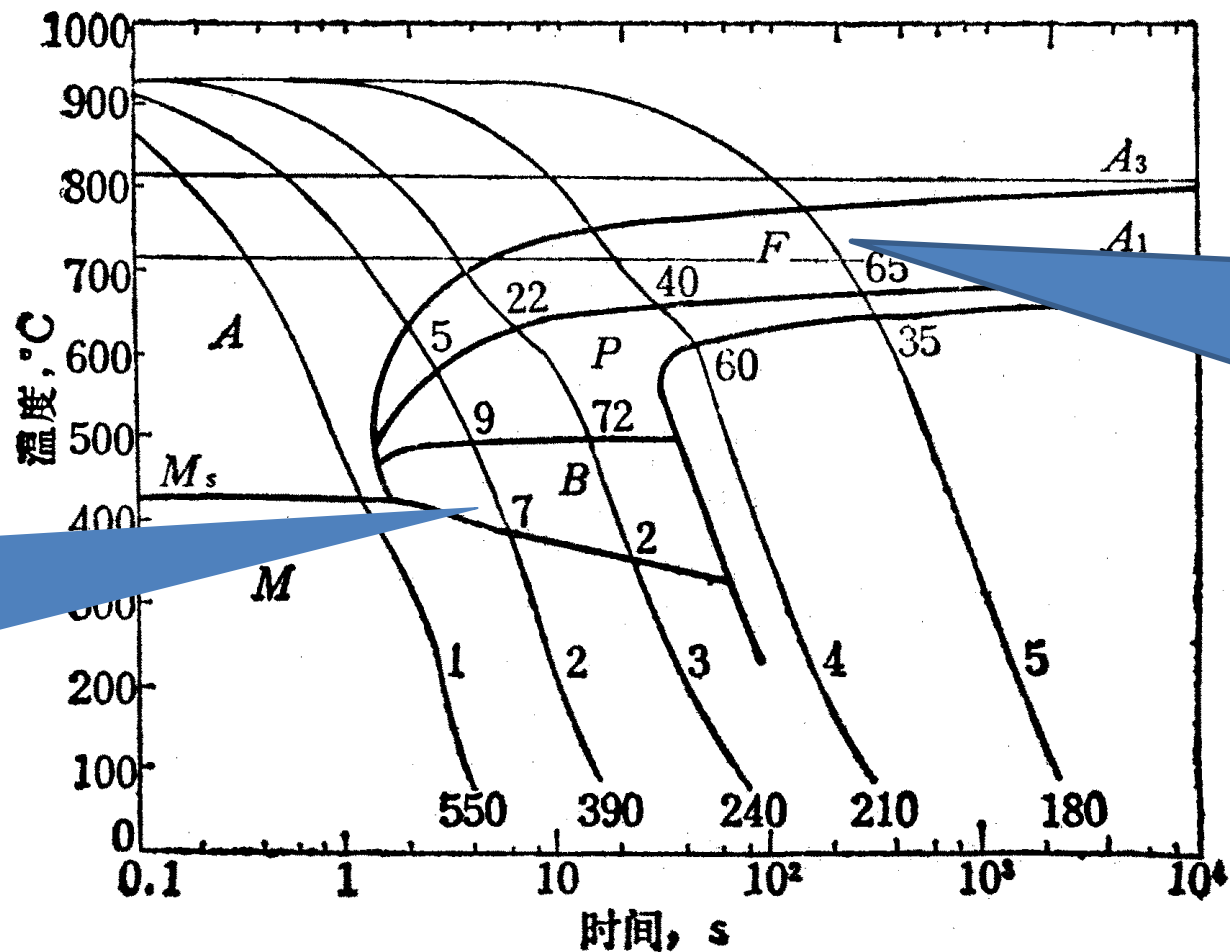
过冷奥氏体连续冷却转变图的分析



共析碳钢 CCT 曲线

- ◆ 无贝氏体转变区
- ◆ **Ps** 珠光体开始，**Pf** 珠光体结束，**AB** 珠光体终了线
- ◆ 当 $V < V_{k'}$ ，完全生成珠光体
- ◆ 当 $V_{k'} < V < V_k$ ，生成珠光体加马氏体
- ◆ 当 $V > V_k$ ，完全生成马氏体
- ◆ 转变在一个温度区间进行，因此存在成分不均匀现象
- ◆ 冷速越大，转变温度区间向低温转移，并加宽

亚共析碳钢的连续冷却转变曲线

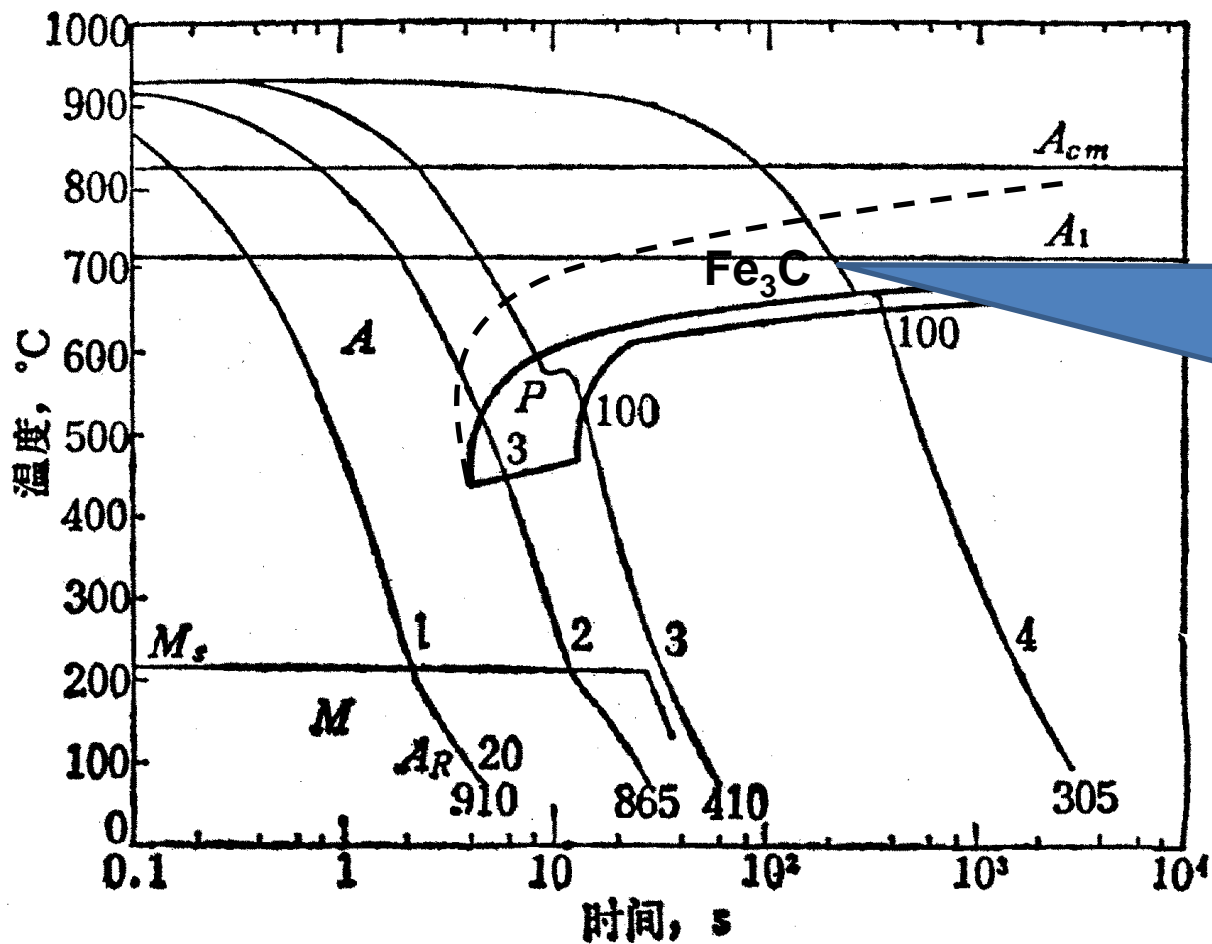


贝氏体区

先共析铁素体区

0.30%C钢连续冷却转变曲线
奥氏体化温度：930°C；时间：30min

过共析碳钢的连续冷却转变曲线



二次渗碳体

0.90%C钢连续冷却转变曲线
奥氏体化温度：930℃；时间：30min

过冷奥氏体等温转变曲线在连续冷却中应用

过冷奥氏体等温转变曲线定性地、近似地来分析奥氏体在连续冷却中的转变。

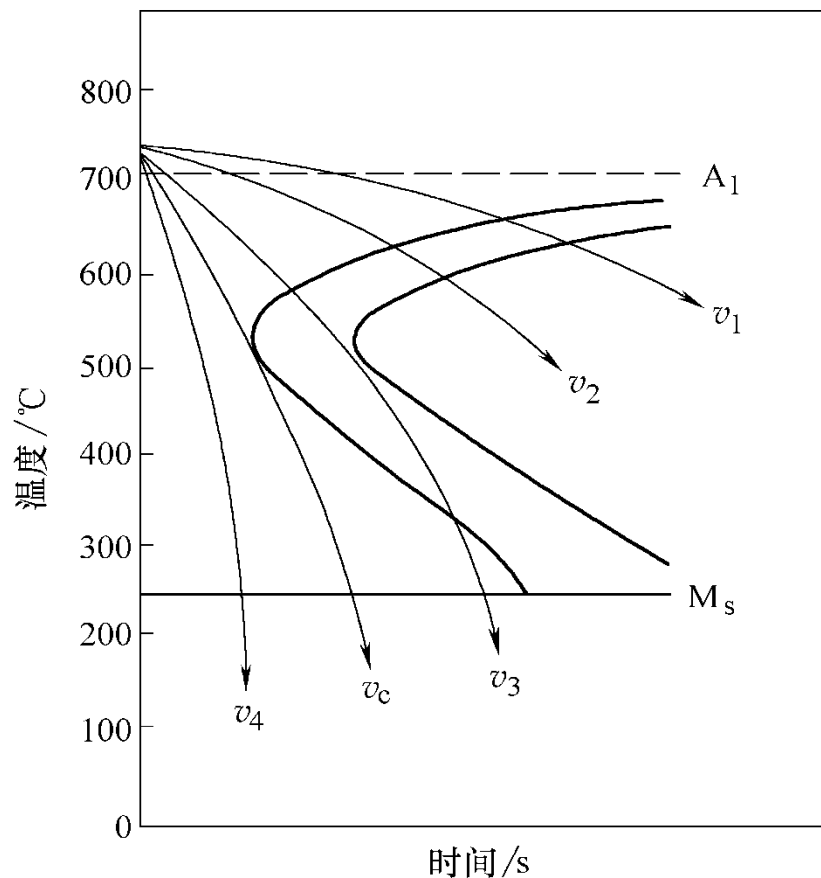
v_1 炉冷—珠光体

v_2 空冷—索氏体

v_3 油冷—托氏体+马氏体+残余奥氏体

v_4 水冷—马氏体

V_c —临界冷却速度



过冷奥氏体转变产物的组织和性能

马氏体转变

当奥氏体的冷却速度大于该钢的马氏体临界冷却速度，并过冷到 M_s 以下时，就开始发生马氏体转变。马氏体转变是强化钢的重要途径之一。

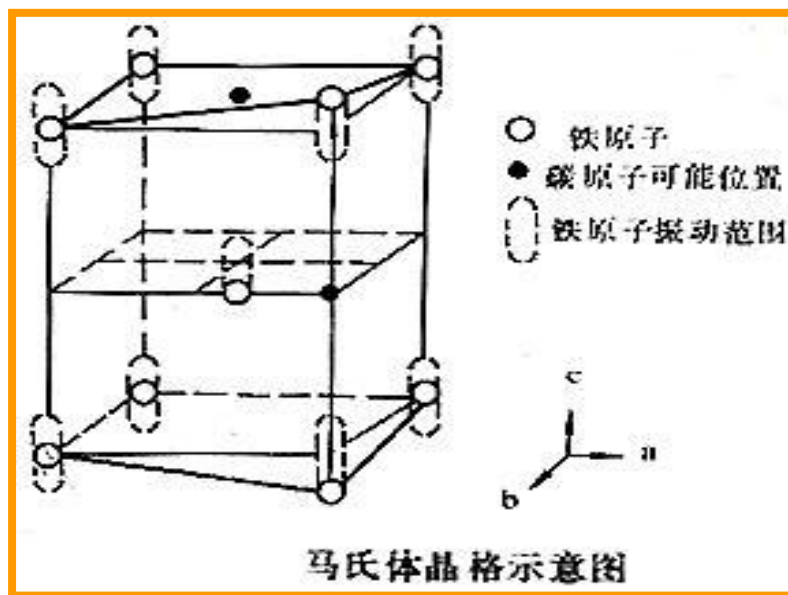
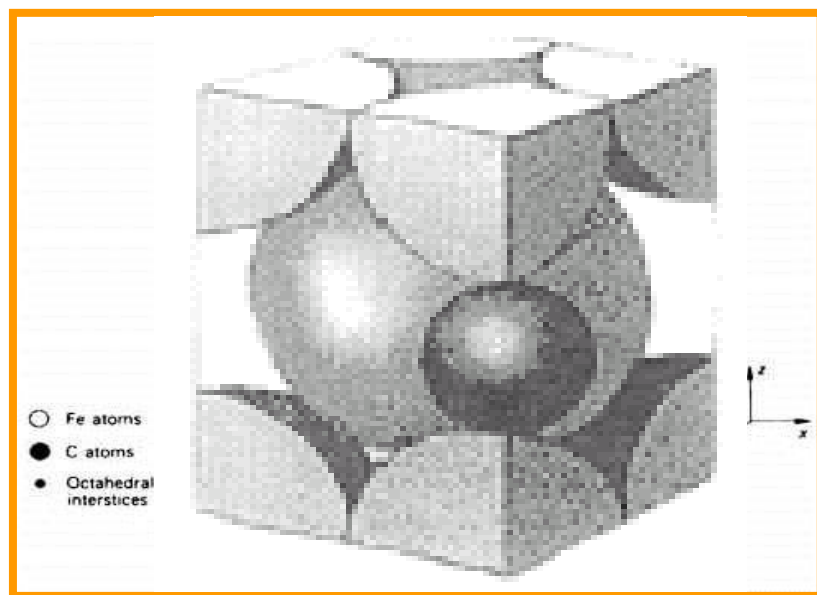
- 定义：

碳在 α -Fe中的过饱和固溶体称马氏体，用M表示。奥氏体中的碳全部保留到马氏体中。



马氏体的晶体结构：

- 马氏体具有体心正方晶格 ($a=b \neq c$)
- 轴比 c/a 称马氏体的正方度。
- C% 越高，正方度越大，正方畸变越严重。
- 当 $<0.25\%C$ 时， $c/a=1$ ，此时马氏体为体心立方晶格。



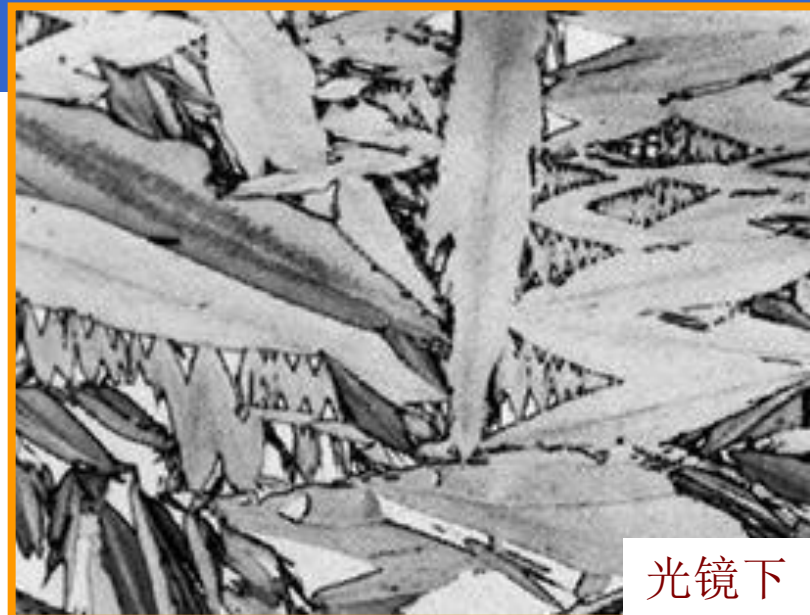
板条马氏体

- 立体形态为细长的扁棒状
- 在光镜下板条马氏体为一束束的细条组织。
- 在电镜下，板条内的亚结构主要是高密度的位错(位错马氏体)

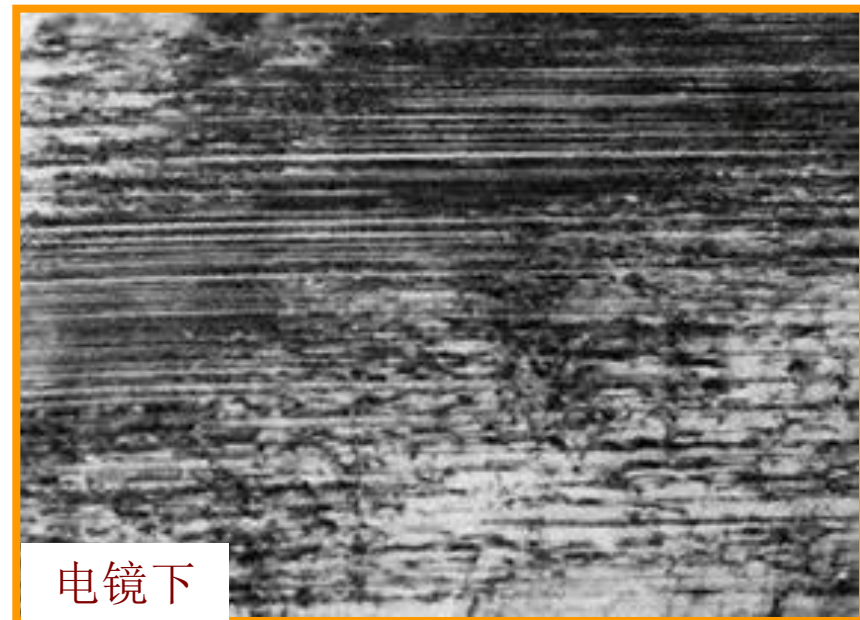


片状马氏体

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



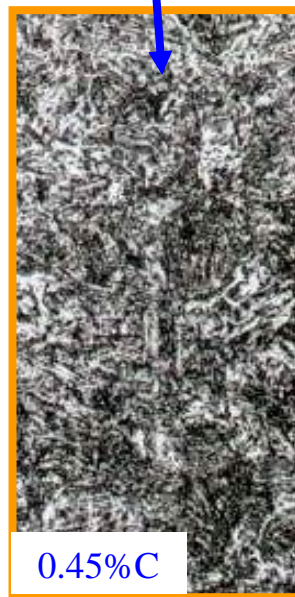
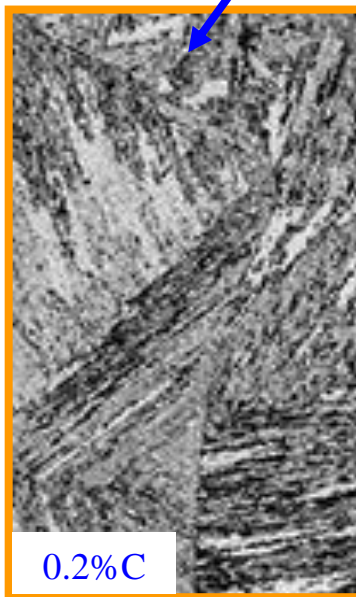
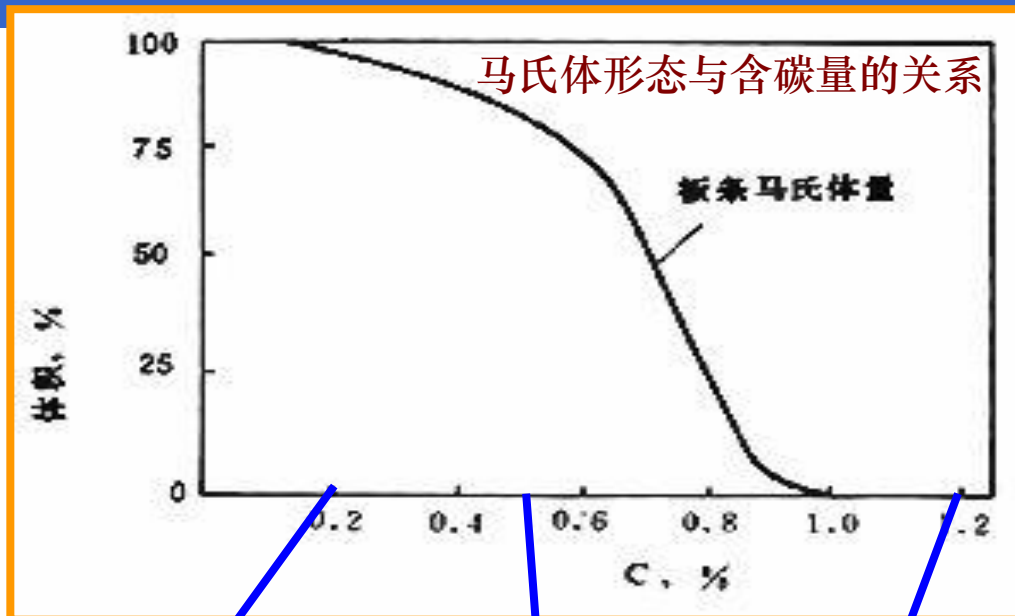
光镜下



电镜下

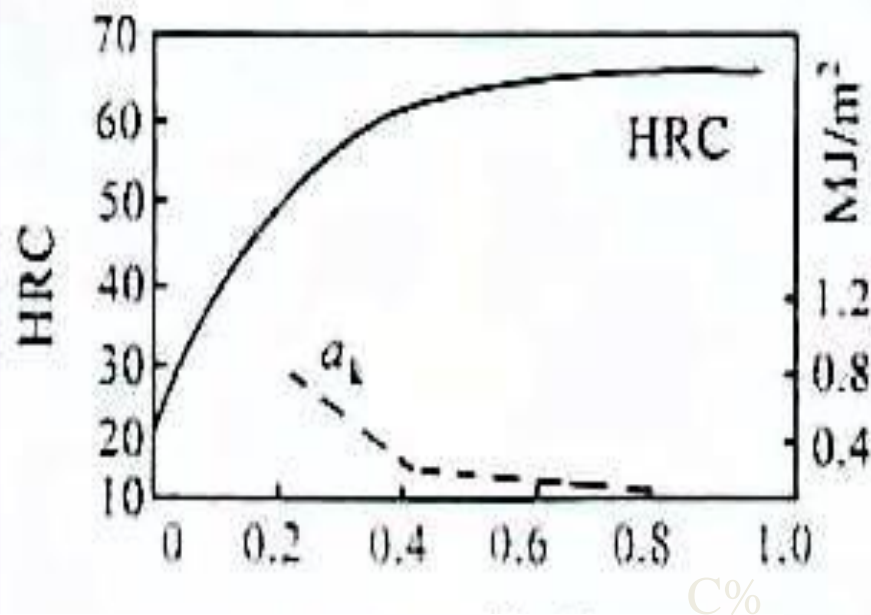
马氏体的形态主要取决于其含碳量

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



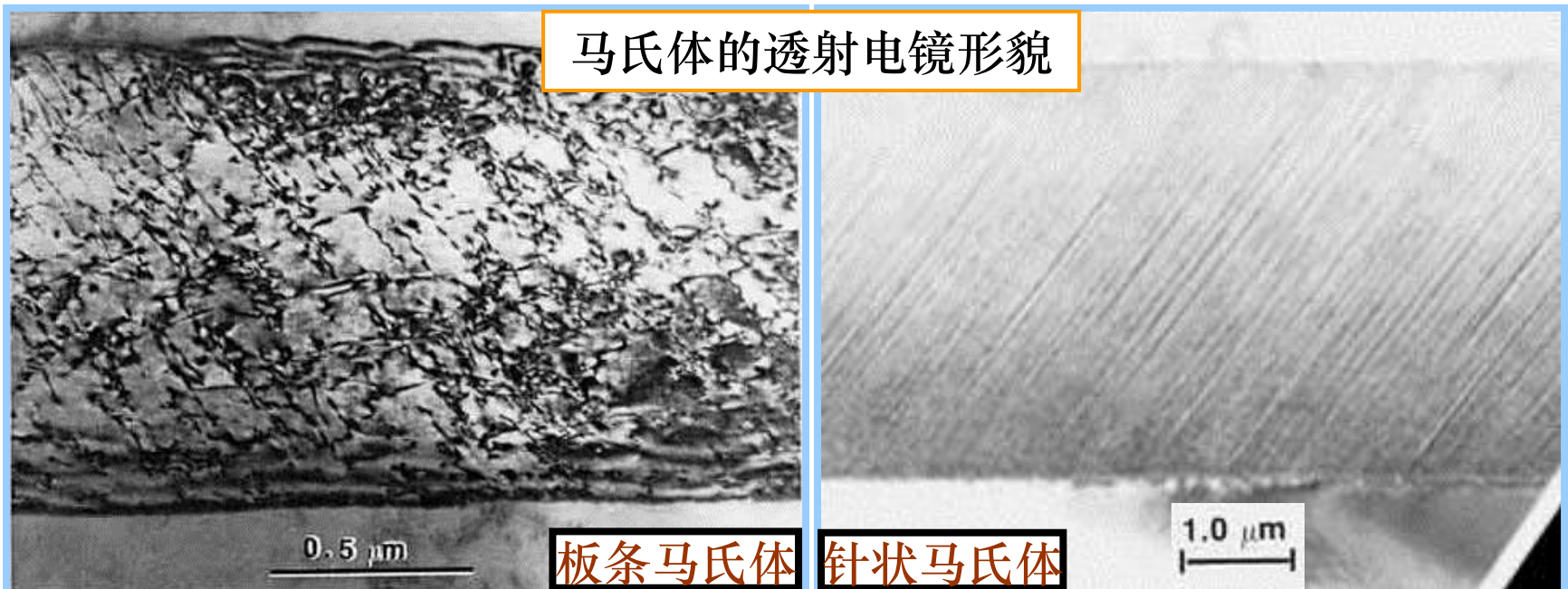
马氏体的性能

- 高硬度是马氏体性能的主要特点。
- 马氏体的硬度主要取决于其含碳量。
- 含碳量增加，其硬度增加，大于0.6%时，其硬度趋于平缓。



马氏体硬度、韧性与含碳量的关系

- 马氏体强化的主要原因是过饱和碳引起的固溶强化。
此外，马氏体转变产生的组织细化也有强化作用。
- 马氏体的塑性和韧性主要取决于其亚结构的形式。针状马氏体脆性大，板条马氏体具有较好的塑性和韧性。



马氏体转变的特点

马氏体转变也是形核和长大的过程。其主要特点是：

(1)无扩散型相变

大的过冷度下进行，只有晶格的改组， $\gamma\text{-Fe}$ 转为 $\alpha\text{-Fe}$ ，铁和碳原子都不扩散，因而马氏体的含碳量与奥氏体的含碳量相同。



马氏体转变的特点

马氏体转变也是形核和长大的过程。其主要特点是：

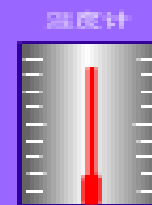
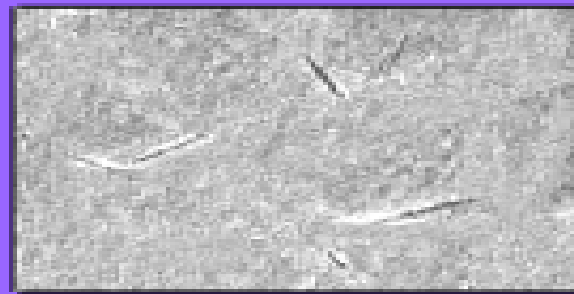
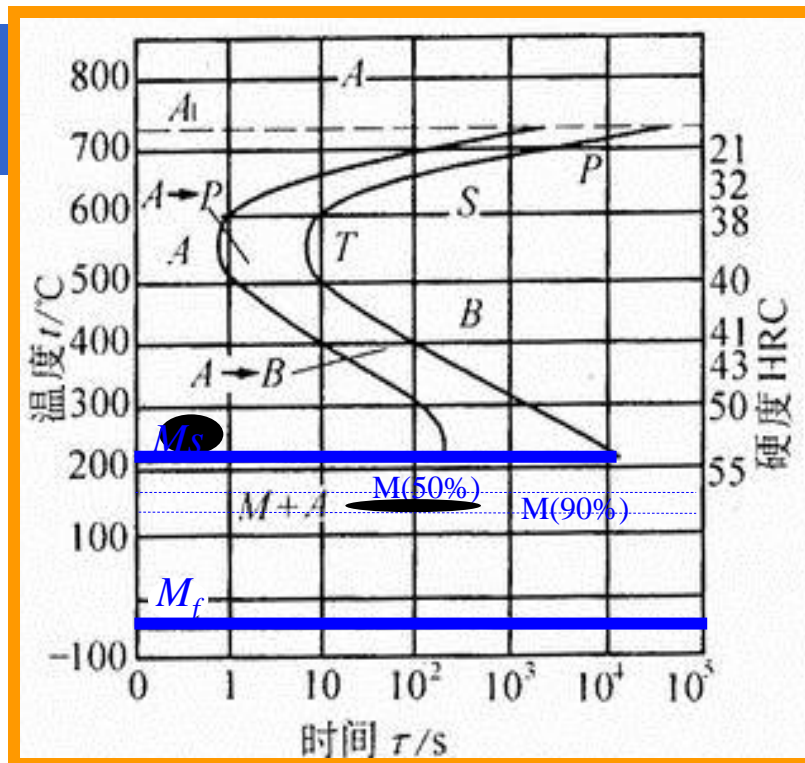
(2) 转变速度极快

无孕育期，马氏体形成速度极快，瞬间形核，瞬间长大。



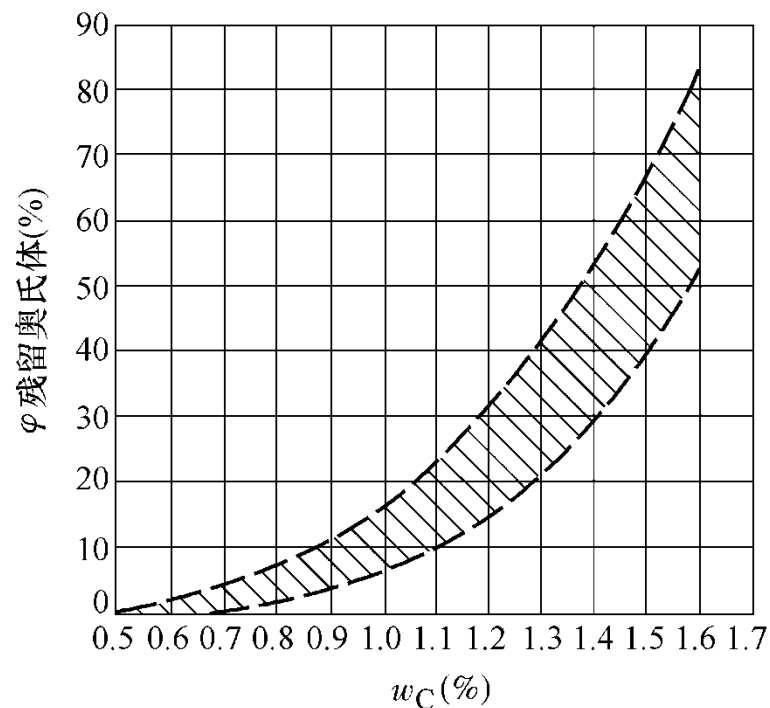
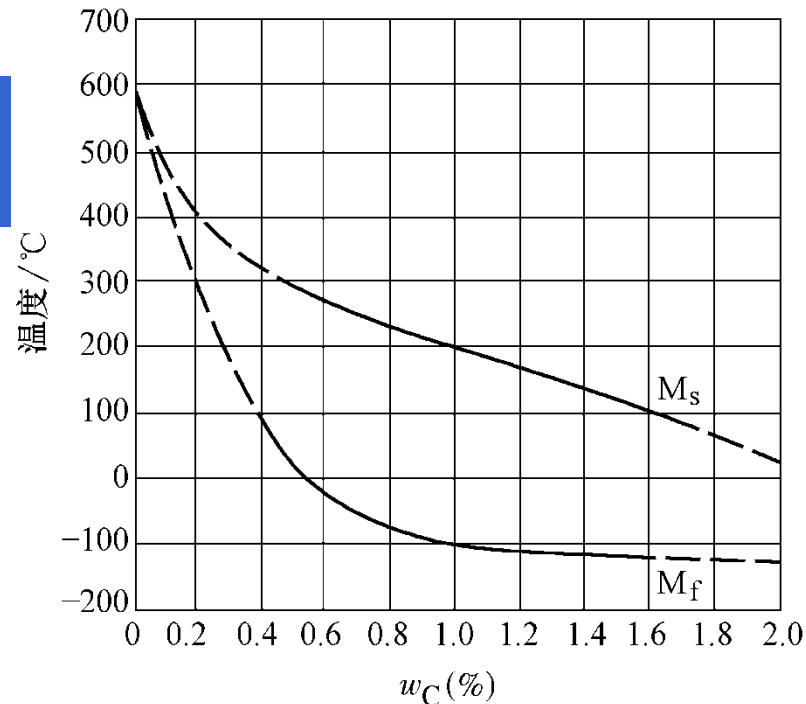
(3) 一定范围内形成

- 马氏体转变开始的温度 M_s
马氏体转变终了温度 M_f
- 只要温度达到 M_s 以下即发生马氏体转变。
- 在 M_s 以下，随温度下降，转变量增加，冷却中断，转变停止，继续降温，马氏体继续形成。



(4) 不完全性

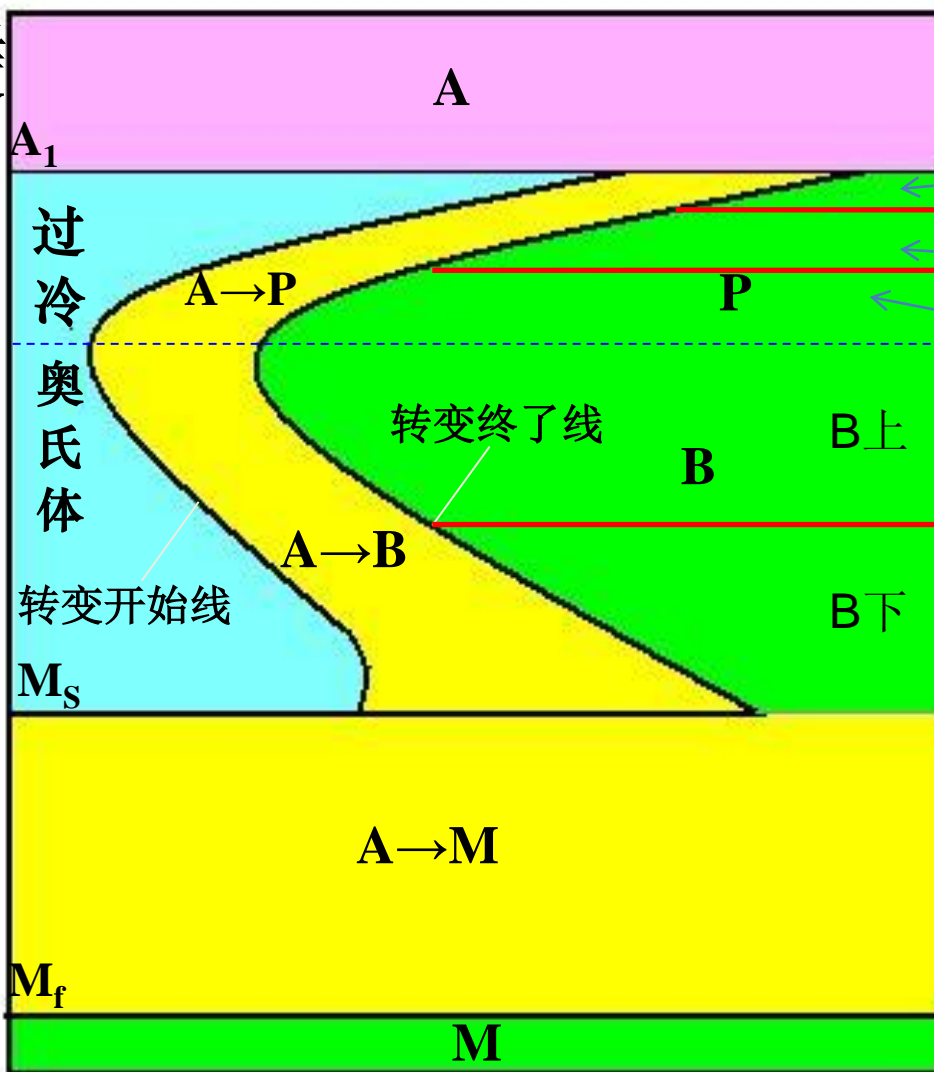
- 含碳量越高， M_s 、 M_f 越低
- 碳含量 $< 0.5\%$ ， M_f 低于室温，淬火到室温，必然有一定的残余奥氏体 A'
- 含碳量越高，残余奥氏体越多。
- A' 降低硬度和耐磨性，长期使用时发生转变，影响工件尺寸精度
- 将淬火工件放入冷却介质中，消除 A' —— 深冷处理



过冷奥氏体转变产物（共析钢）

转变类型	转变产物	形成温度, °C	转变机制	显微组织特征	HRC	获得工艺
珠光体	P	A ₁ ~650	扩散型	粗片状, F、Fe ₃ C相间分布	5-20	退火
	S	650~600		细片状, F、Fe ₃ C相间分布	20-30	正火
	T	600~550		极细片状, F、Fe ₃ C相间分布	30-40	等温处理
贝氏体	B _上	550~350	半扩散型	羽毛状, 短棒状Fe ₃ C分布于过饱和F条之间	40-50	等温处理
	B _下	350~M _S		竹叶状, 细片状Fe ₃ C分布于过饱和F针上	50-60	等温淬火
马氏体	M _针	M _S ~M _f	无扩散型	针状	60-65	淬火
	M _{板条} *	M _S ~M _f		板条状	50	淬火

温度



A₁

过冷奥氏体

转变开始线

M_s

M_f

A→P

A→B

A→M

转变终了线

A

P

B

B_上

B_下

M

P

S

T

时间