



第四章 钢的热处理

安徽机电职业技术学院 张新建



➤ 教学目的与要求:

1. 了解热处理的基本原理。
2. 掌握常用热处理的主要工艺过程、作用与应用。





➤ 教学内容：

1. 钢的热处理的基本原理。
2. 钢的常规热处理的种类，工艺过程，作用及应用。
3. 钢的表面热处理的种类，工艺过程，作用及应用。
4. 钢的热处理工艺选用。

➤ 重点：

钢的常用热处理，作用及应用。

➤ 难点：

钢的热处理的基本原理。



第四章 钢的热处理

- 1 钢的热处理概述
- 2 钢的热处理原理
- 3 钢的普通热处理工艺
- 4 钢的表面热处理和化学热处理工艺
- 5 热处理新技术简介



第一节 钢的热处理概述

改善钢的性能

一是合金化，这是
下几章研究的内容
；

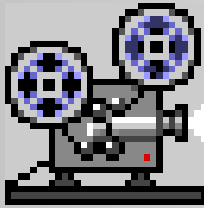
二是热处理，这是
本章要研究的内容
。





为什么要进行热处理?





弹簧热处理过程

- (1) 钢筋绕成弹簧状;
- (2) 加热钢筋至红热, 急剧冷却;
- (3) 将(2)钢筋再次加热(温度相对低)冷却。

- 为什么弹簧状钢筋加热到红热急冷后变得又硬又脆?
- 为什么再次加热和冷却后变得刚柔相济, 成为真正的弹簧?



第一节 钢的热处理概述

热处理的作用和地位录像





经铸造、锻造等热加工的工件存在残余应力，硬度偏高或偏低，组织粗大，存在成分偏析等缺陷。

危害：

- ❖ 力学性能差；
- ❖ 不利于切削加工和成型；
- ❖ 淬火易造成变形和开裂。



1、热处理的作用

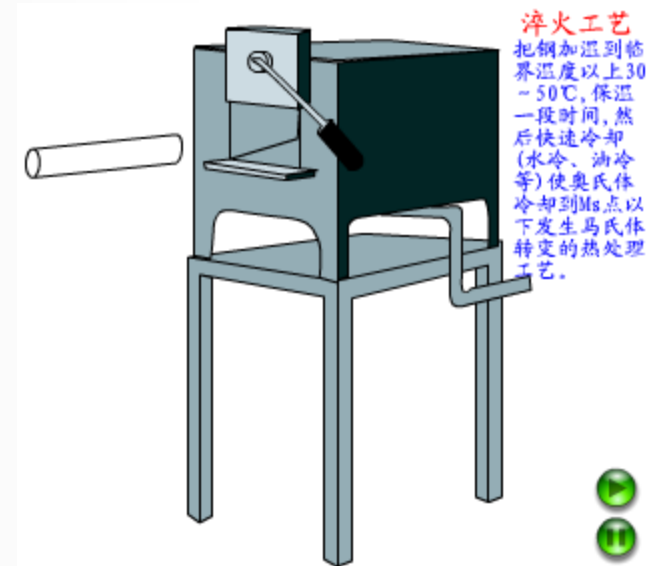
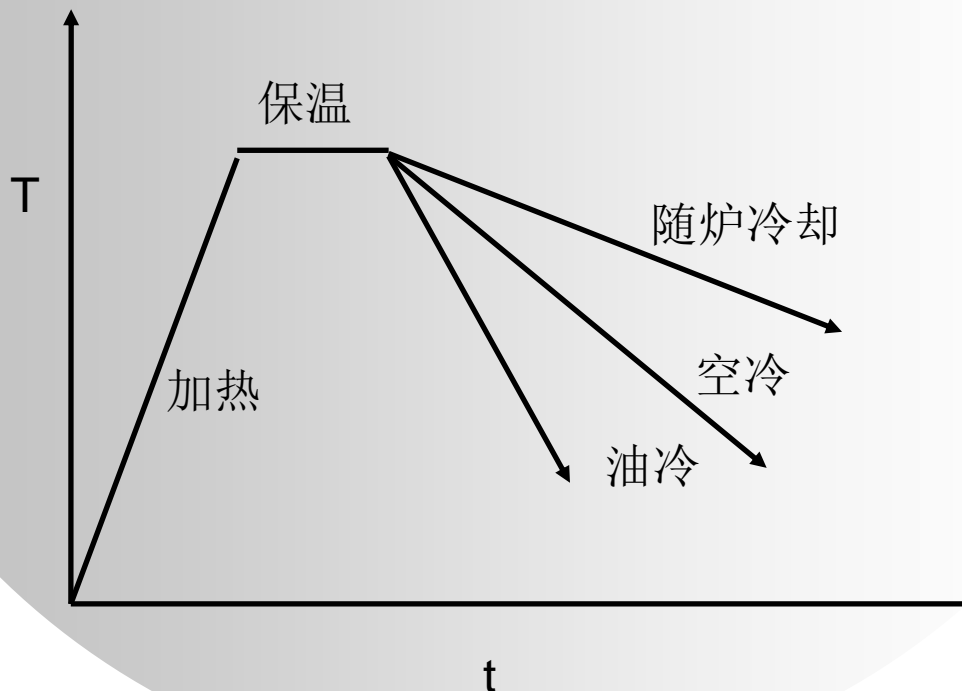
- ❖ 使材料软化，以增进其韧性及延展性→正火，退火，球状化。
- ❖ 提高材料之强度，硬度→淬火和回火。
- ❖ 稳定材料之性质，尺寸及形状，以防止进一步的变形→回火。
- ❖ 消除铸造、锻造、焊接等加工工艺过程中所造成的残余应力→低温退火。
- ❖ 将材料表面硬化，以提高其耐磨性→渗碳或渗氮。



第一节 钢的热处理概述

2、热处理的定义

热处理：通过对钢件**加热、保温和冷却**的操作方法，来改善其内部组织结构，以获得所需要性能的一种加工工艺。





第一节 钢的热处理概述

- 热处理是一种重要的加工工艺，在制造业被广泛应用。
- ❖ 在机床制造中约60-70%的零件要经过热处理。
- ❖ 在汽车、拖拉机制造业中需热处理的零件达70-80%。



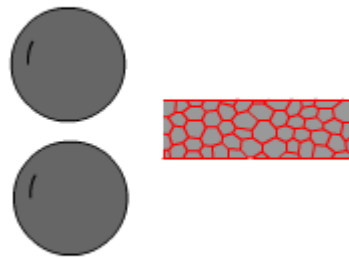
- 模具、滚动轴承100%需经过热处理。
- 总之，重要零件都需适当热处理后才能使用。



第一节 钢的热处理概述

3、热处理特点：**热处理**区别于其他加工工艺如铸造、压力加工等的特点是**只通过改变工件的组织来改变性能，而不改变其形状。**

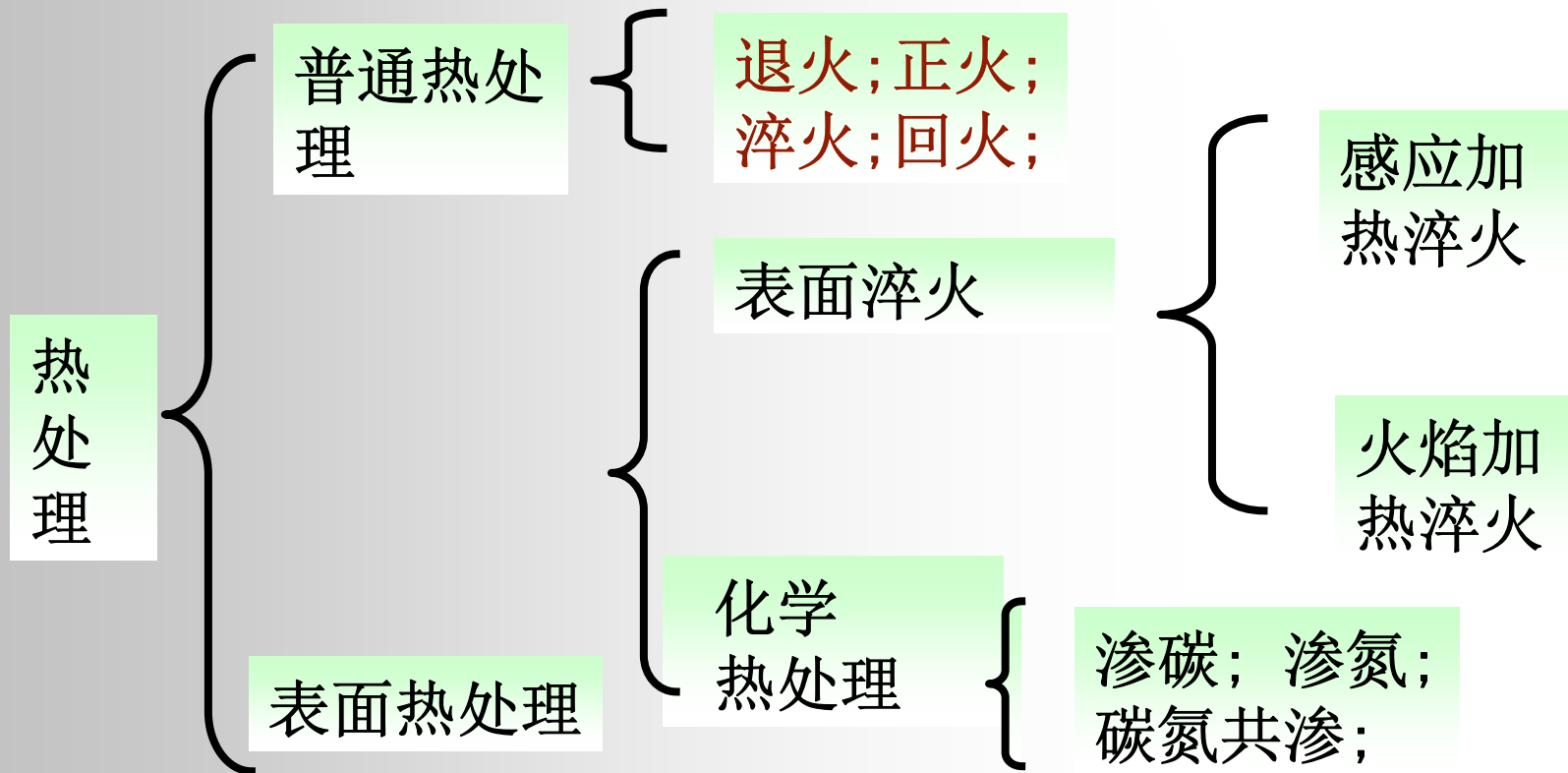
- 4、热处理适用范围：**只适用于固态下发生相变的材料，不发生固态相变的材料不能用热处理强化。**





第一节 钢的热处理概述

5、热处理的分类：



新技术：可控气氛热处理、真空.....、形变.....、电
解热.....、离子化.....、激光.....、电子束表面.....、硫
碳氮-稀土共渗等。



预备热处理与最终热处理

❖ 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。

最终热处理—赋予工件所要求的使用性能的热处理。



第二节 钢在加热和冷却时的组织转变





第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

一、钢在加热时的组织转变转变温度

(一) 钢的临界温度

1、临界温度

平衡时： A_1 、 A_3 、

A_{cm}

加热时： Ac_1 、 Ac_3 、

$Accm$

冷却时： Ar_1 、 Ar_3 、

$Arcm$

各类钢在加热和冷却时的临界温度如图3-2所示。

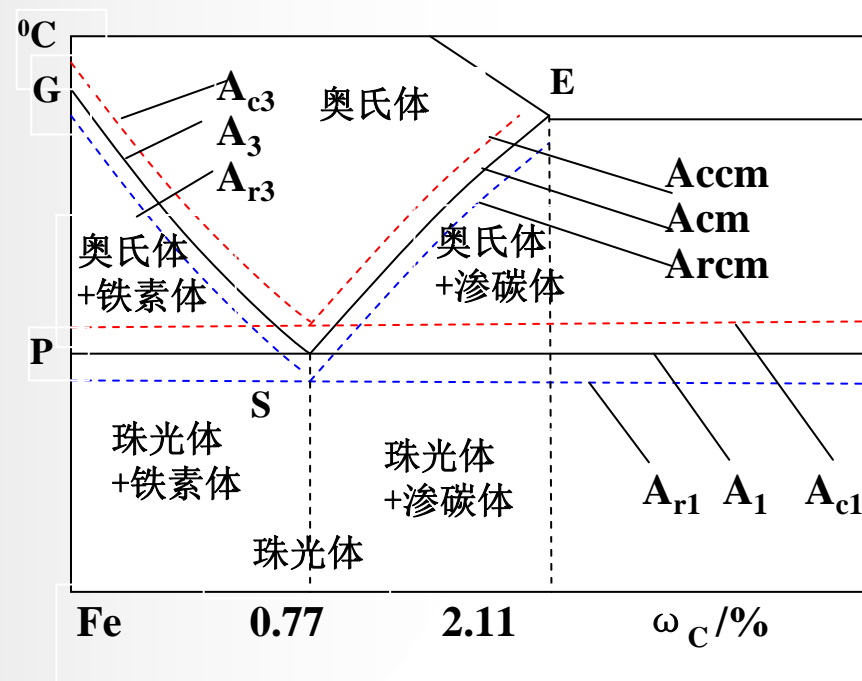


图3-2 钢在加热和冷却时的临界温度

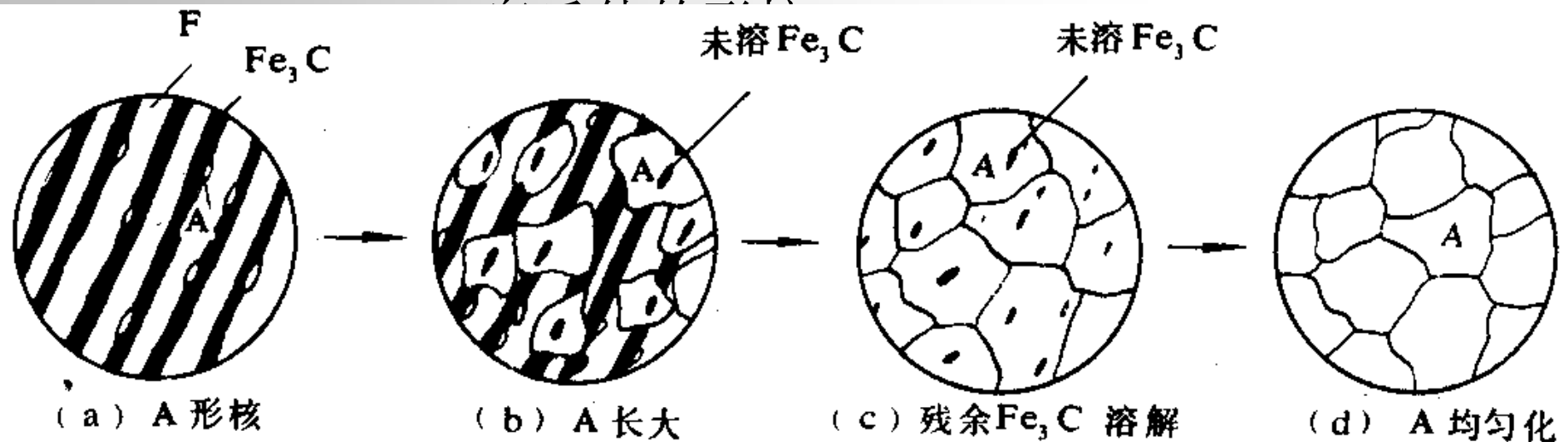
第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

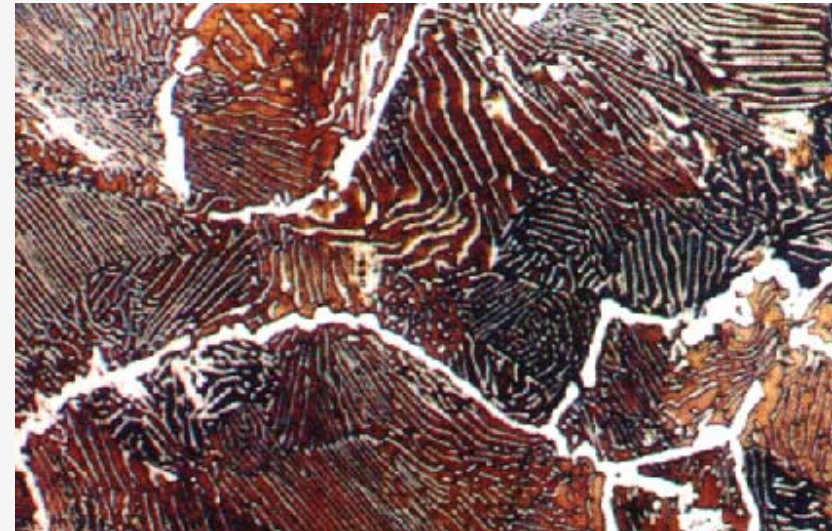
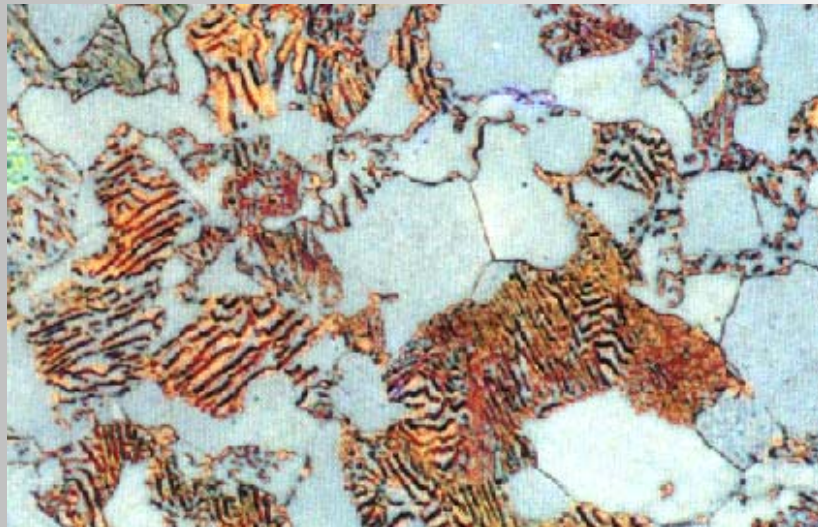
二、奥氏体的形成过程

晶体结构的改变
Fe、C原子的扩散

Ac1温度以上: $F(\text{bcc}, 0.0218) + \text{Fe}_3\text{C}(\text{复杂立方} 6.69) \rightarrow A(\text{Fcc}, 0.77)$

共析钢的奥氏体形成过程：





亚共析钢的A化: $P \rightarrow A$ 后, 先共析 F 溶解

过共析钢的A化: $P \rightarrow A$ 后, Fe_3C_{II} 溶解



第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

(三) 影响奥氏体转变的因素

奥氏体形成速度与**加热温度**、**加热速度**、**钢的成分**、**含碳量**以及**原始组织**等有关。

加热温度越高，奥氏体形成速度越快

加热速度越快，奥氏体形成速度越快

含碳量增加，利于奥氏体加速形成

合金元素显著影响奥氏体的形成速度

钴、镍等↑；
铬、钼、钒等↓；
硅、铝、锰等—。

组织（珠光体）越细，奥氏体形成速度越快



第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

(四) . 奥氏体晶粒的长大及其影响因素

1、晶粒大小的表示方法

金属组织中晶粒的大小通常用**晶粒度级别指数**来表示

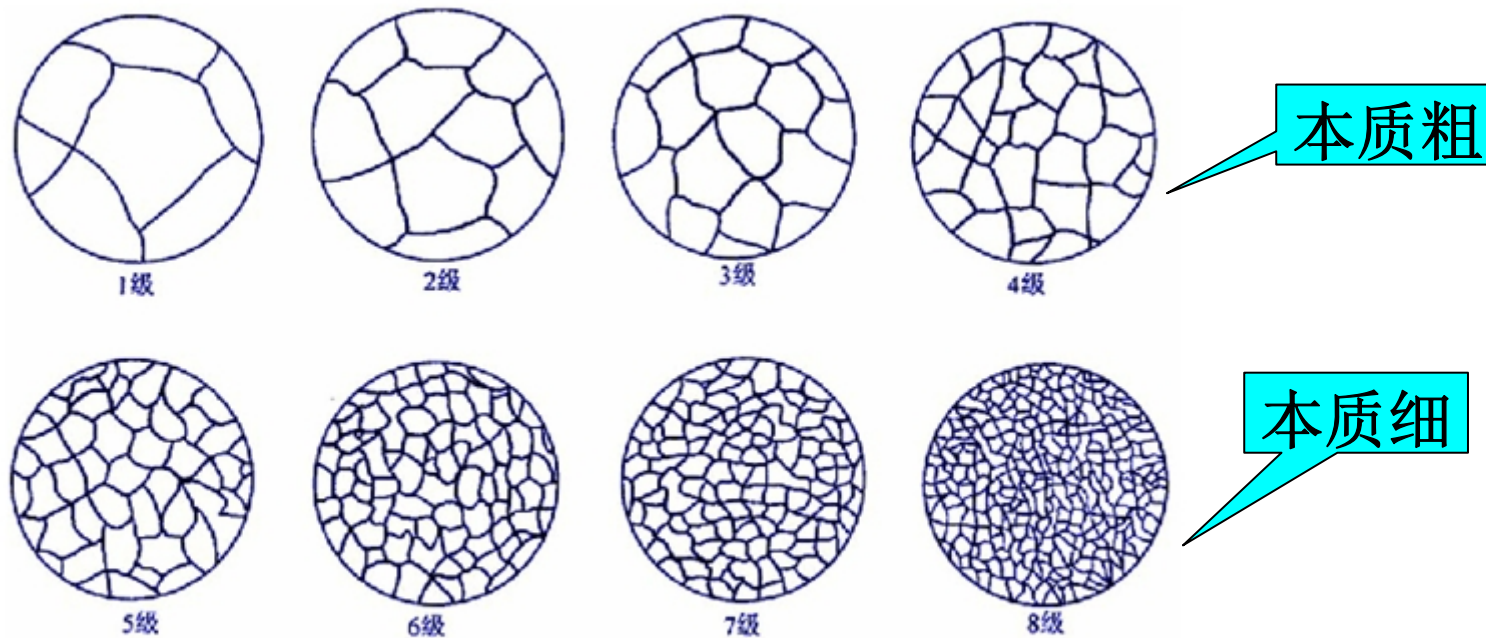
GB6394-86 《金属平均晶粒度测定法》

晶粒度的**测定方法**：比较法、面积法、截点法；

晶粒度的数值表示方法： $\left\{ \begin{array}{l} \text{晶粒度级别指数、} \\ \text{单位体积晶粒数、} \\ \text{晶粒公称直径等8种} \end{array} \right.$



第二节 钢在加热和冷却时的组织转变



标准晶粒度等级示意图



第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

2、奥氏体晶粒度的概念：

- 起始晶粒度

奥氏体形成刚结束，奥氏体晶粒边界刚刚相互接触时的晶粒大小

- 实际晶粒度

奥氏体在具体加热条件下所获得奥氏体晶粒的大小

- 本质晶粒度

特定条件下钢的奥氏体晶粒长大的倾向性，并不代表具体的晶粒大小

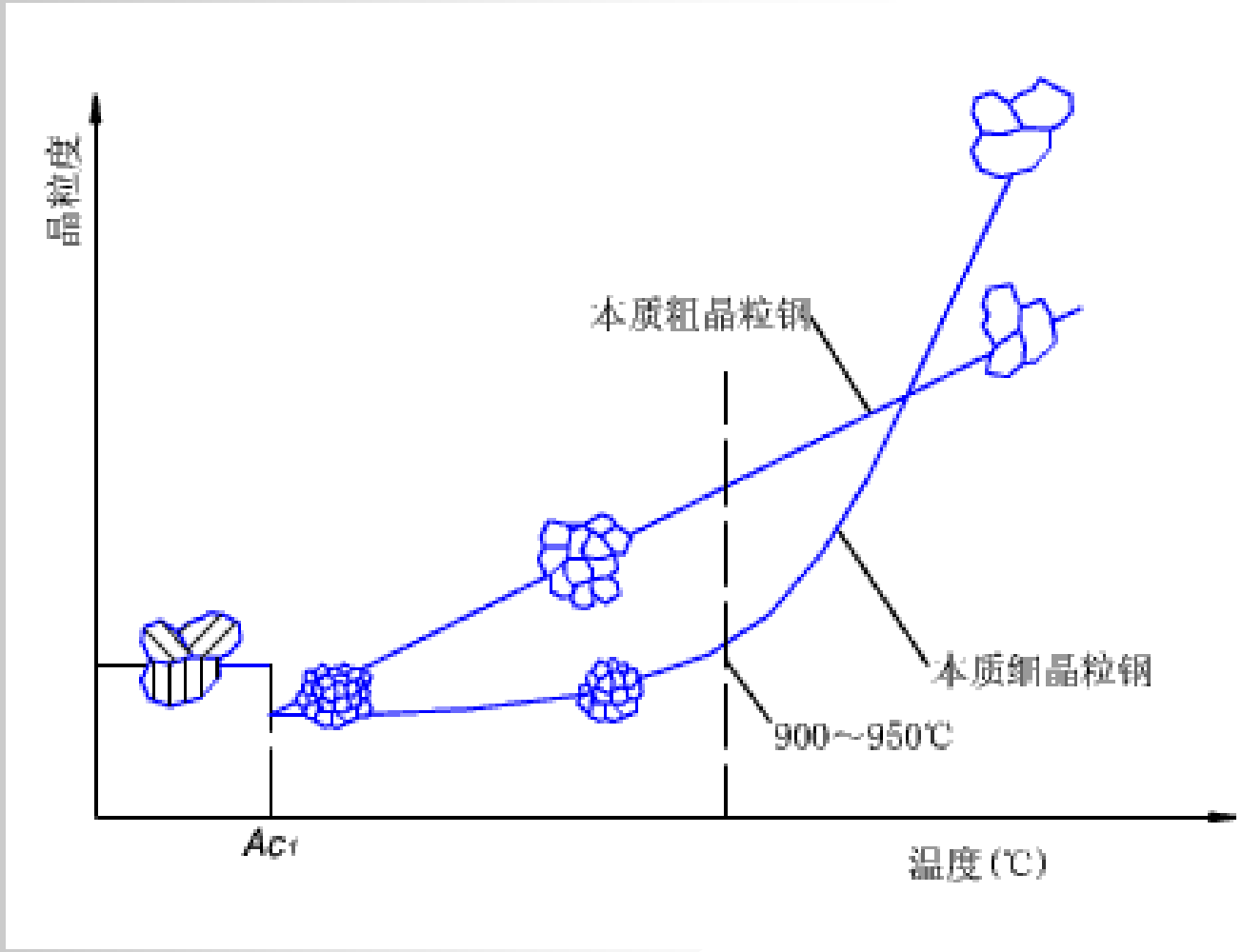
930±10℃，保温8h

本质粗晶粒钢 (Mn, Si)

本质细晶粒钢 (Al)



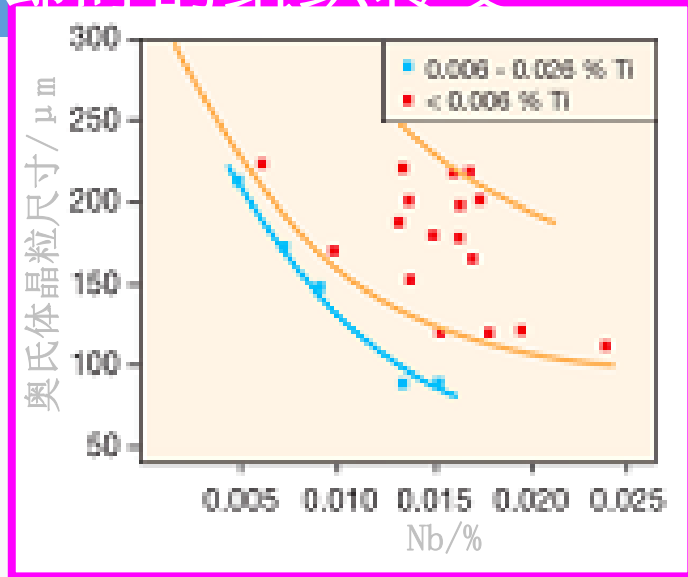
第二节 钢在加热和冷却时的组织转变



第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

3、影响奥氏体晶粒长大的因素

- ❖ (1) 加热温度↑ 奥氏体晶粒越粗大。
- ❖ (2) 保温时间↑ 奥氏体晶粒越粗大。
- ❖ (3) 加热速度↑，A化的实际温度愈高，A的形核率大于长大速率，因此获得细小的起始晶粒。
- ❖ (4) 钢的成分-合金化
 - ❖ 奥氏体中碳含量增高，晶粒长大倾向增大。未溶碳化物则阻碍晶粒长大。
 - ❖ 钢中加入钛、钒、铌、锆、铝等元素，有利于得到本质细晶粒钢，因为碳化物、氧化物和氮化物弥散分布在晶界上，能阻碍晶粒长大，锰和磷促进晶粒长大。



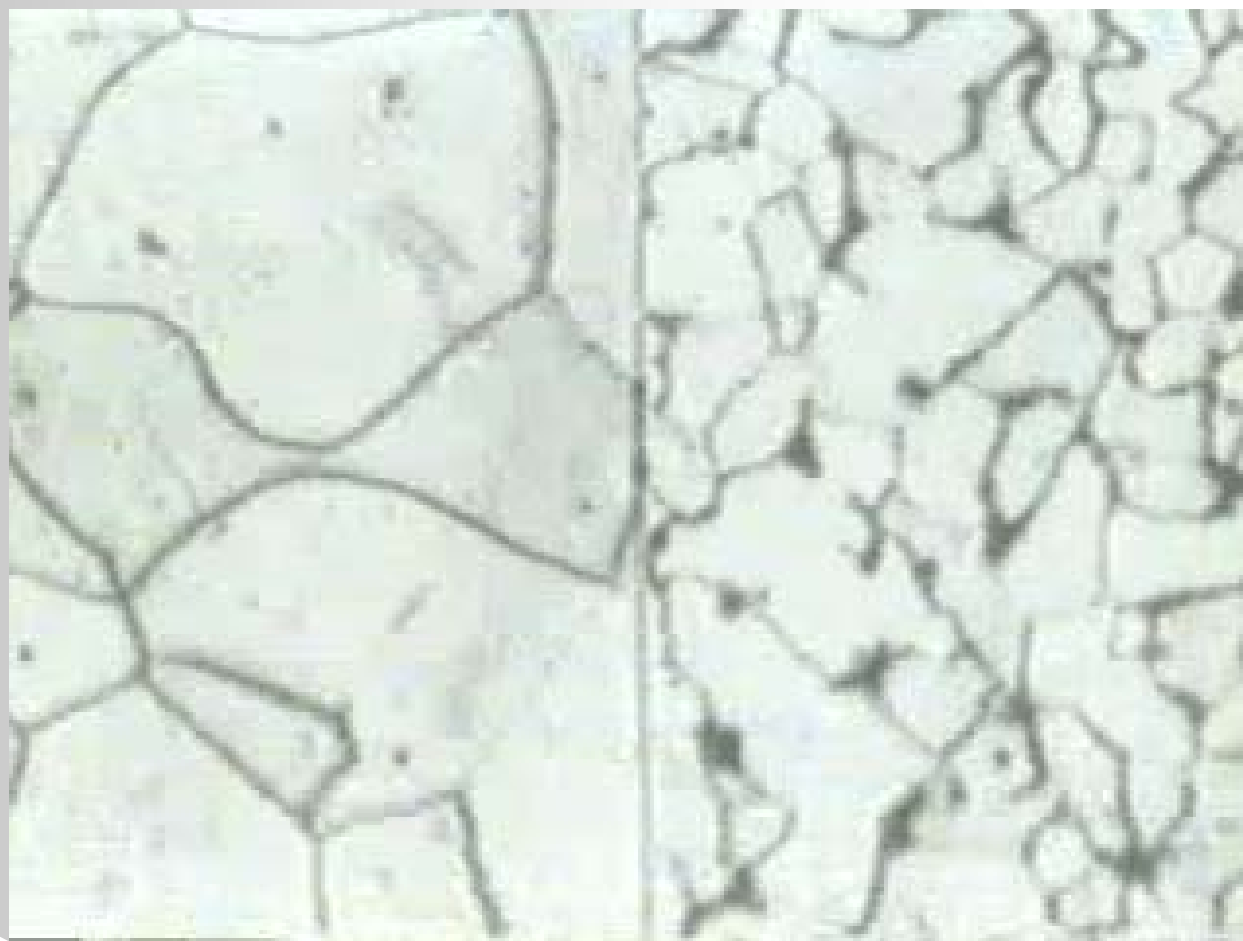
Nb、Ti对奥氏体晶粒的影响





第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

奥氏体晶粒大小与力学性能的关系录像





二、钢在冷却时的组织转变

热处理主要有两个环节：加热、冷却。*

例：T8钢

加热到780℃	{	炉冷 --- HBS170~220
		空冷 --- 25~35 HRC ;
		油中冷 --- 45~55 HRC ;
		水中急冷 --- 55~65 HRC ; .

? → C曲线可解答。



第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

二、钢在冷却时的组织转变

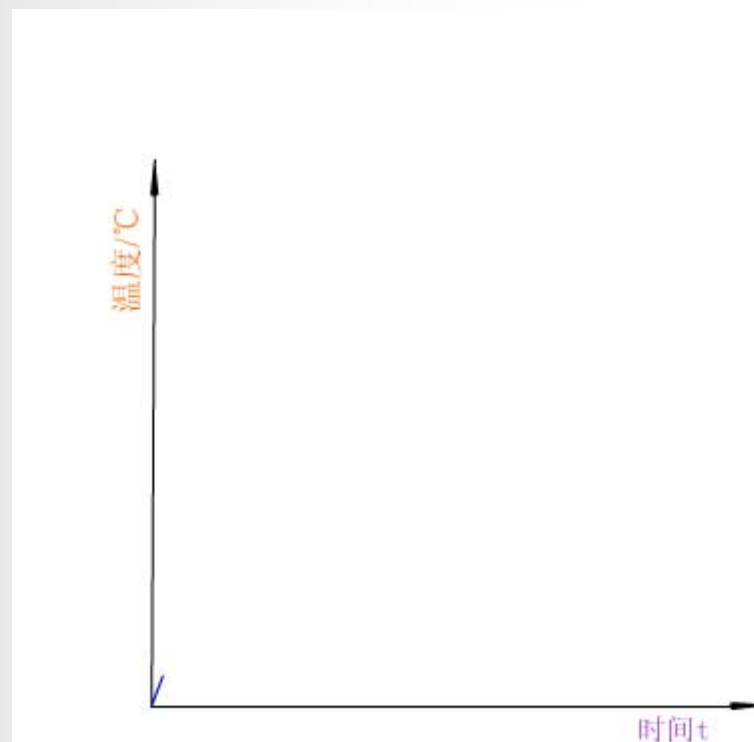
过冷奥氏体——暂时保留在 A_1 以下的奥氏体。

连续冷却转变

——使加热到奥氏体化的钢连续降温进行组织转变

等温冷却转变

——使加热到奥氏体化的钢以较快的冷却速度冷到 A_1 以下某温度保温，在等温下发生组织转变。





第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

(一)、过冷奥氏体的等温冷却转变

1、 建立共析钢过冷奥氏体等温冷却转变曲线 —— TTT曲线 (C 曲线)

T --- time

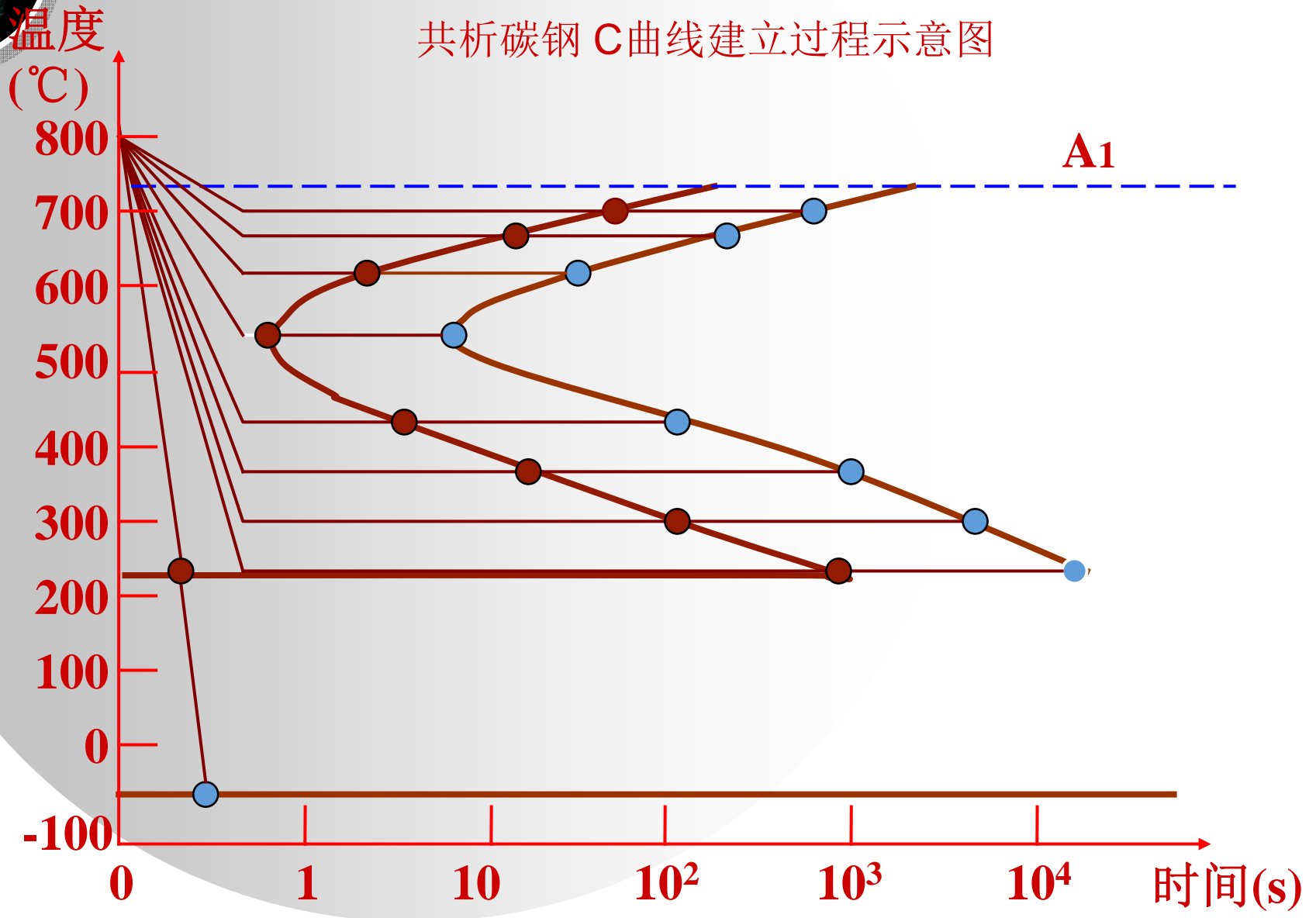
T --- temperature

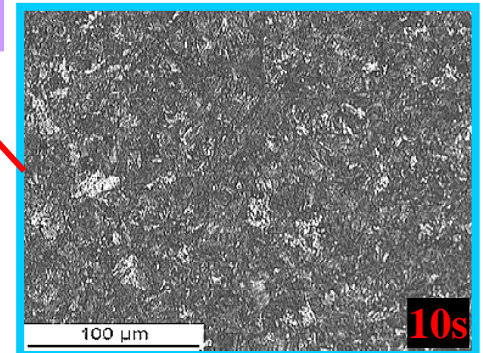
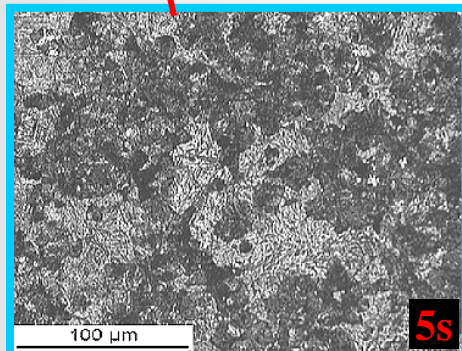
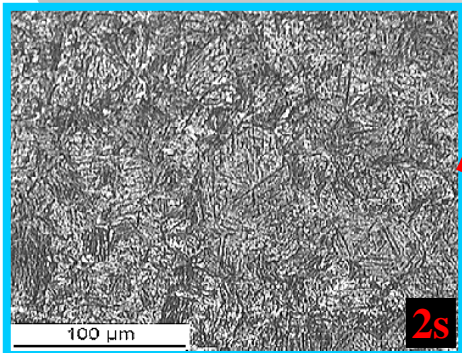
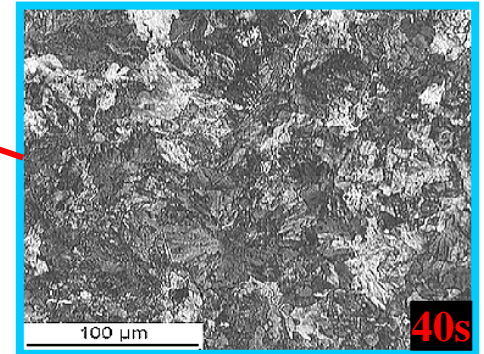
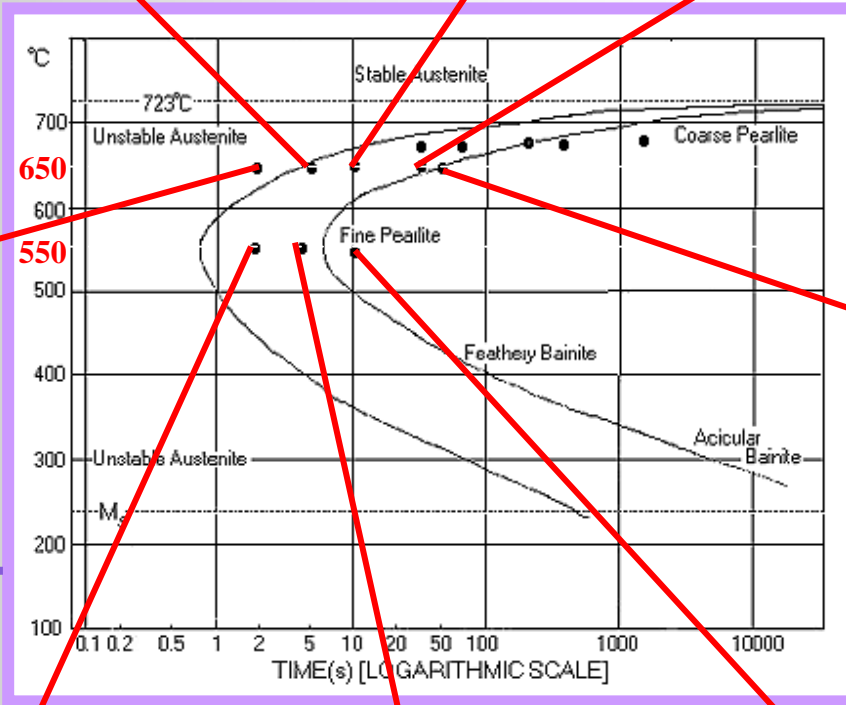
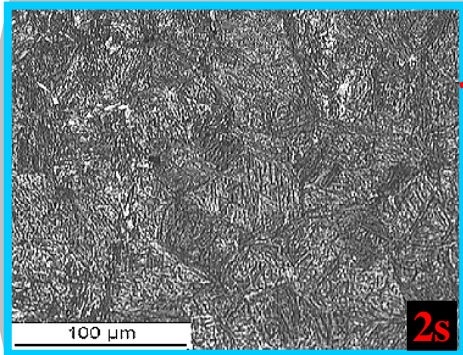
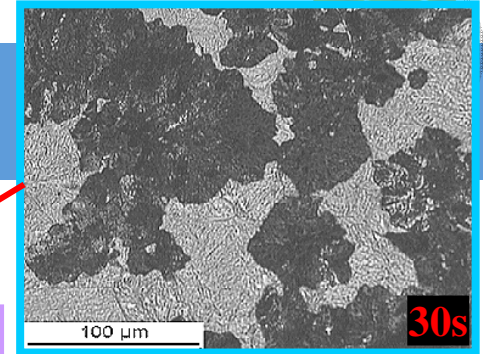
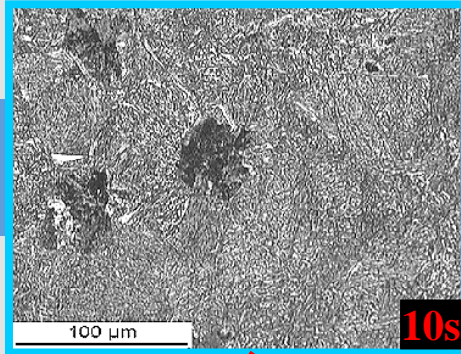
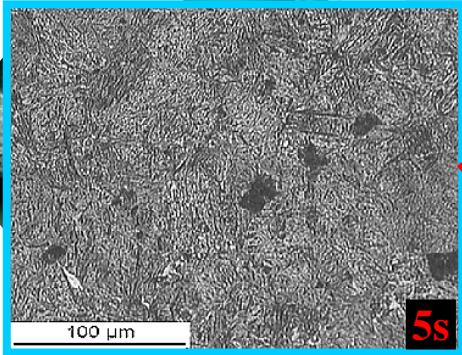
T --- transformation



第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

共析碳钢 C曲线建立过程示意图

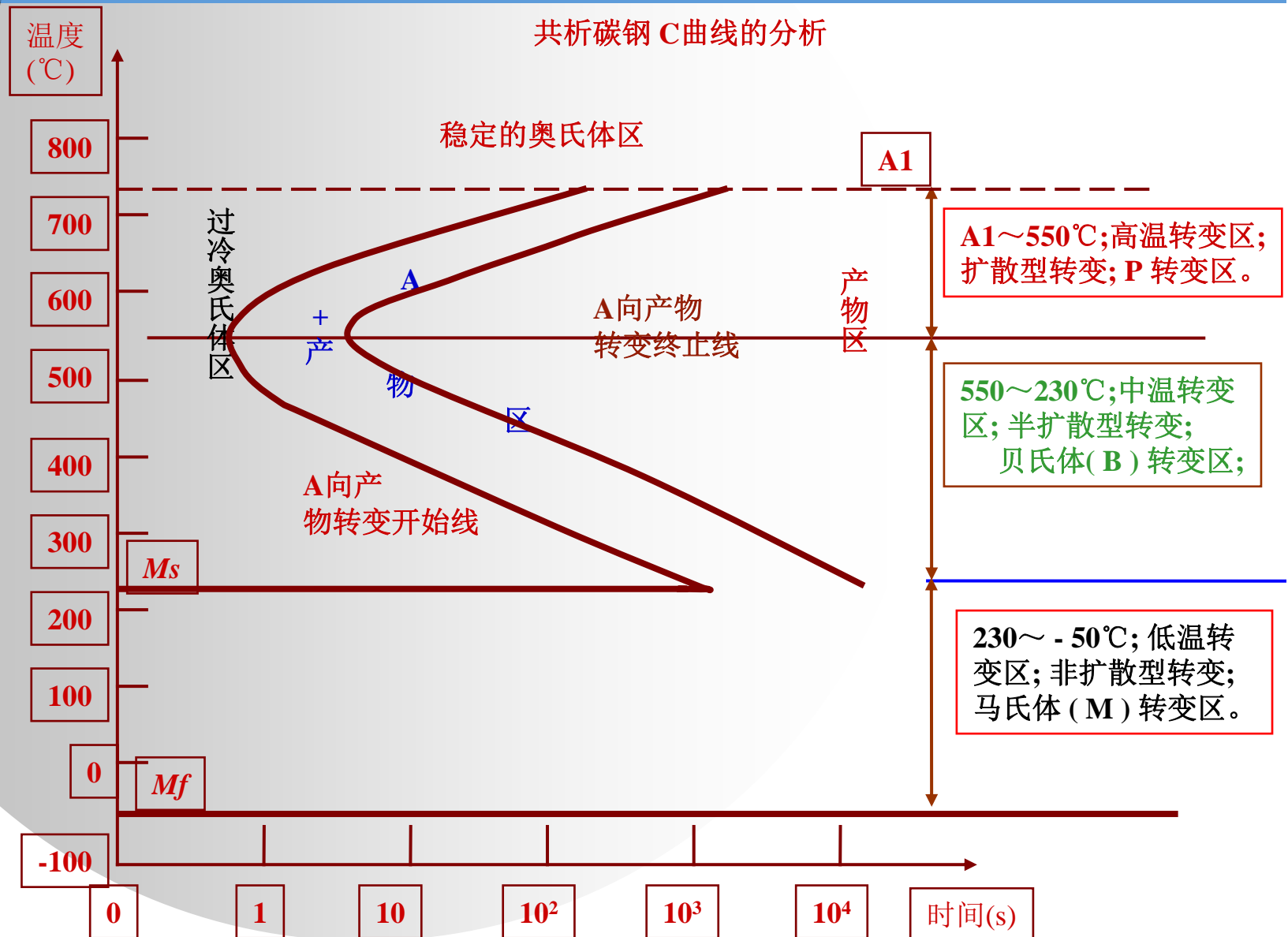


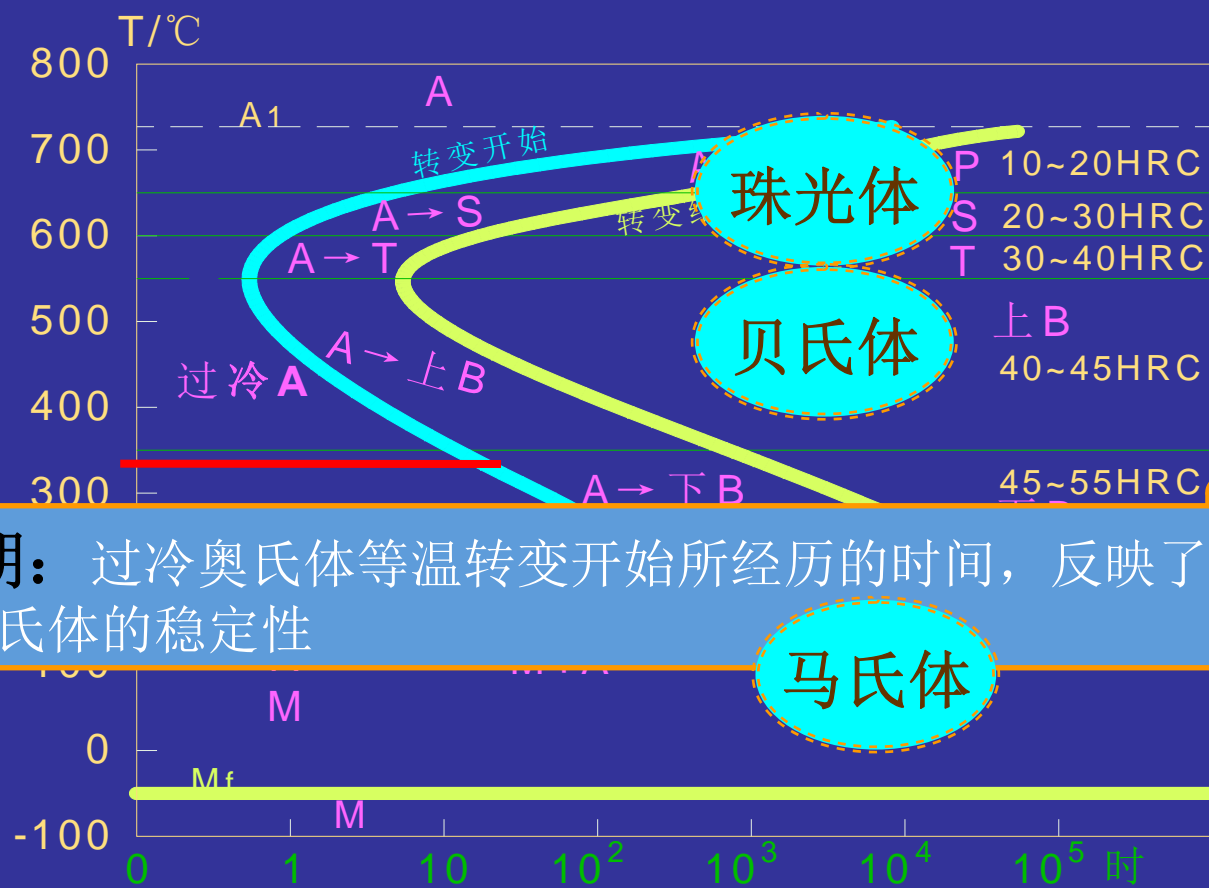


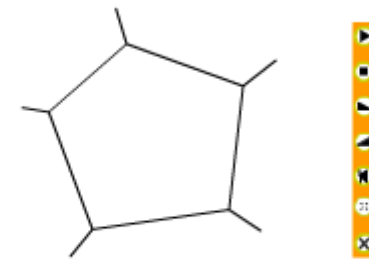


第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

共析碳钢 C 曲线的分析





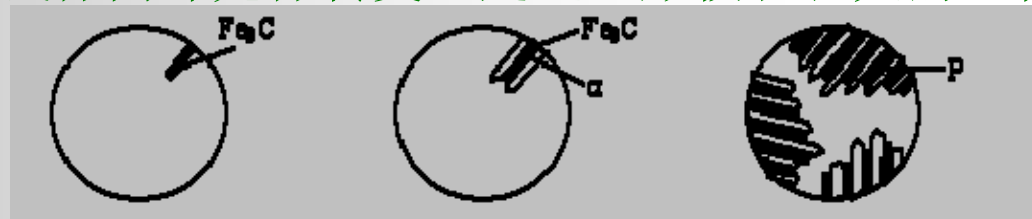


珠光体转变过程

(1) . 珠光体转变和珠光体的组织形态与性能

1) 珠光体转变特征

- 在 $A_1 \sim 550\text{ }^\circ\text{C}$ 之间，过冷奥氏体 (A) \rightarrow 珠光体 (P: F+Fe₃C)
- 过冷奥氏体向珠光体转变，是通过形核和长大的过程来完成的；

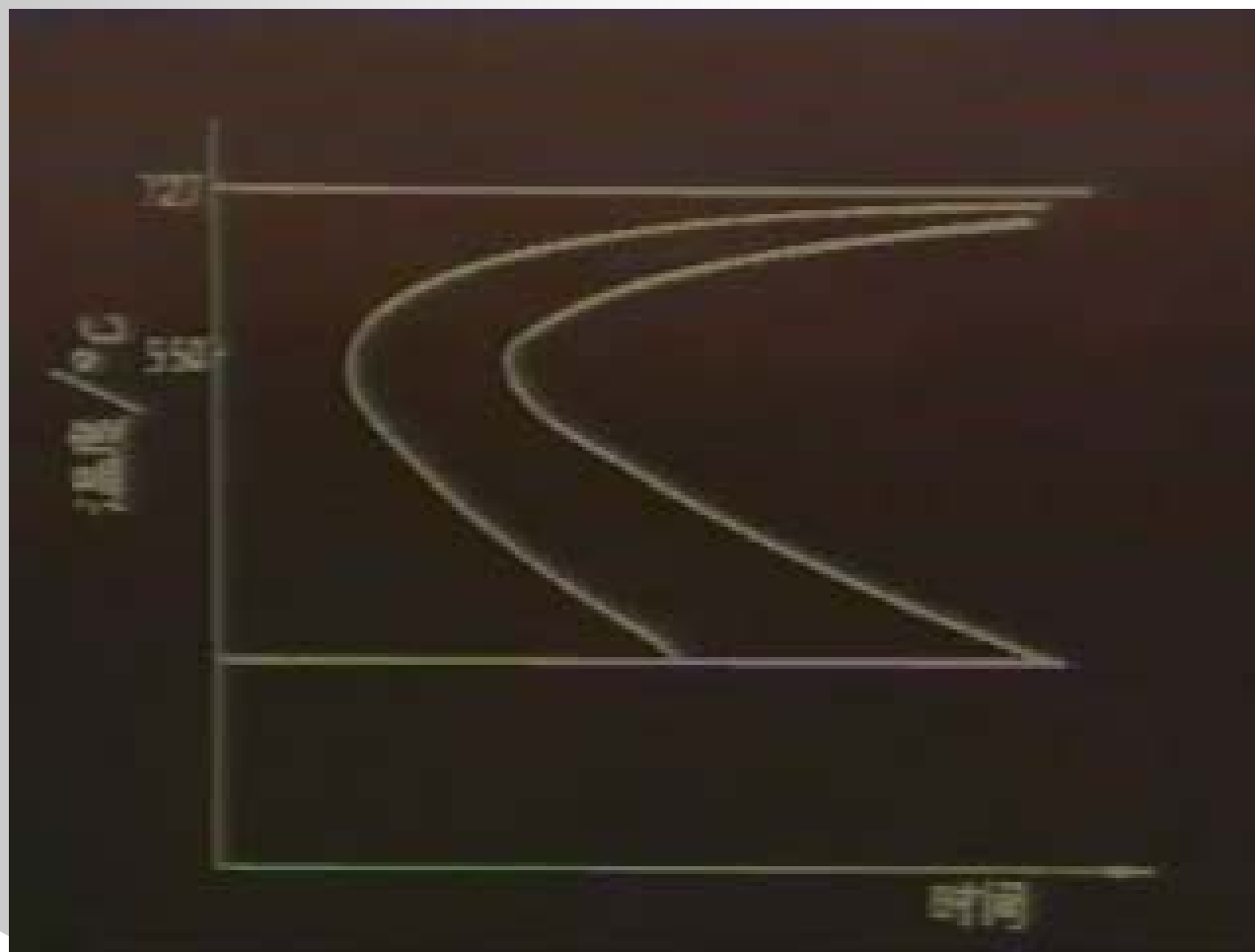


- 珠光体转变是一个**扩散型**转变 (Fe、C原子都进行扩散)；
 - Fe原子的扩散，完成 γ 相 (面心立方) 向 α 相 (体心立方) 的转变
 - C原子的扩散， γ 相 \rightarrow α 相过程中多余的C原子以Fe₃C形式析出



第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

珠光体转变过程分析录像

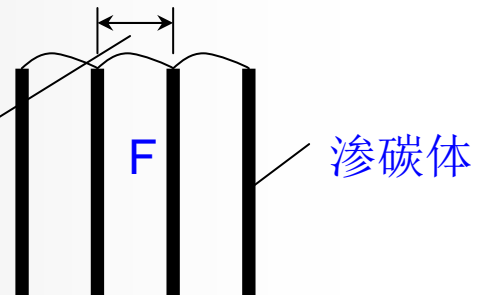




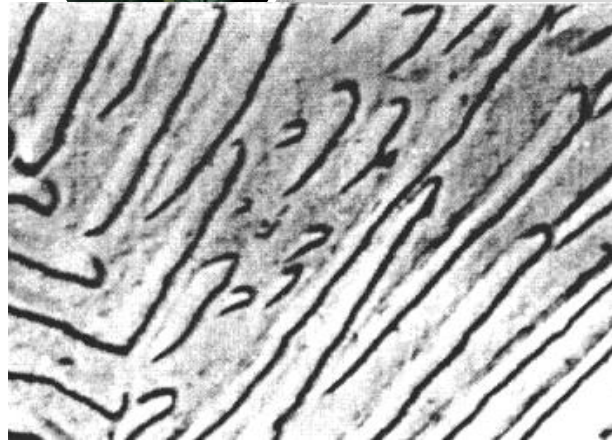
2) 珠光体的组织形态与性能

- 一般情况下，珠光体为片状铁素体和片状渗碳体相间分布的层状组织，称为片状珠光体；

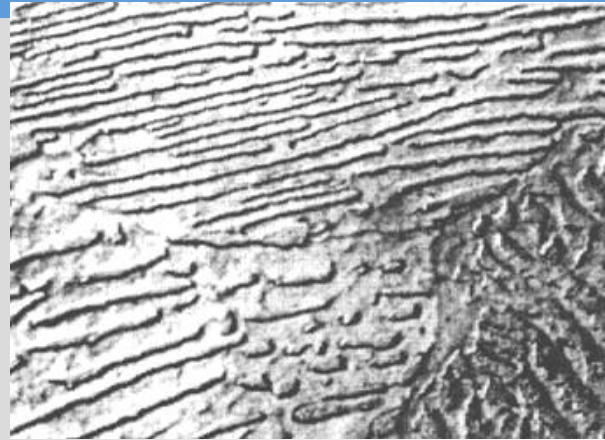
片间距：相邻两片渗碳体中心之间的距离



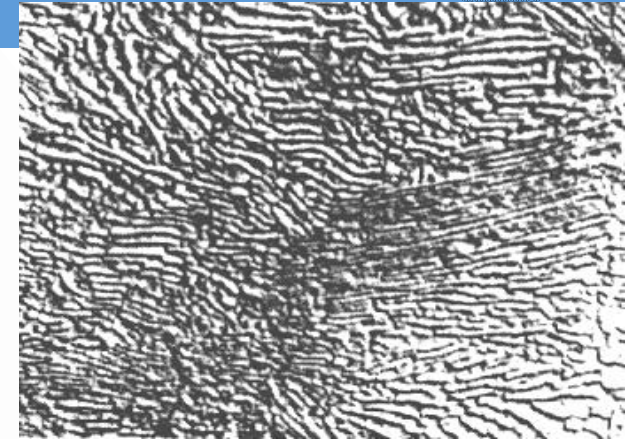
- 随着转变温度的降低，片间距减小，强硬度提高，塑韧性也有改善
- 按照片间距的大小，可将片状珠光体分为珠光体P，索氏体S和托氏体T（屈氏体），片间距 $P > S > T$ ；



珠光体 P
3800×



索氏体 S
8000×



屈氏体 T
8000×

表共析碳钢三种珠光体型组织

组织名称		符号	转变温度 /℃	相组成	转变类型	特征	HRC	σ_b /MPa
珠光体型	珠光体	P	$A_1 \sim 650$	F+Fe ₃ C	扩散型 (铁原子和碳原子都扩散)	片层间距=0.6~0.8 μm , 500×分清	10~20	1 000
	索氏体	S	650~600			片层间距=0.2~0.4 μm , 1 000×分清, 细珠光体	25~30	1 200
	托氏体	T	600~550			片层间距=0.1~0.2 μm , 2 000×分清, 极细珠光体	30~40	1 400

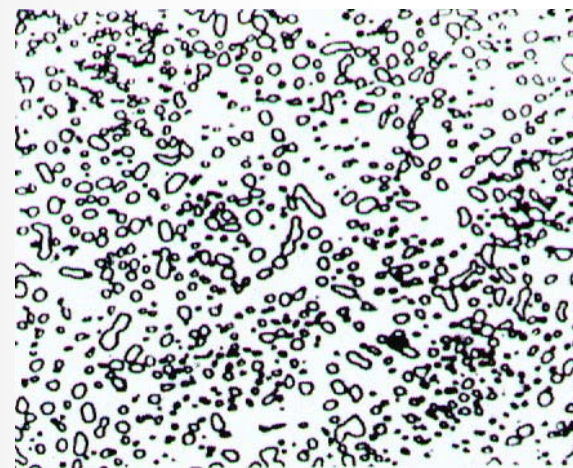


- 除片状珠光体外，还存在球状（粒状）珠光体

渗碳体呈细小的粒状或球状分布在铁素体基体上



片状珠光体



粒状珠光体

- 相同成分条件下，粒状珠光体的强硬度较低，塑韧性较好



第二节 钢在加热和冷



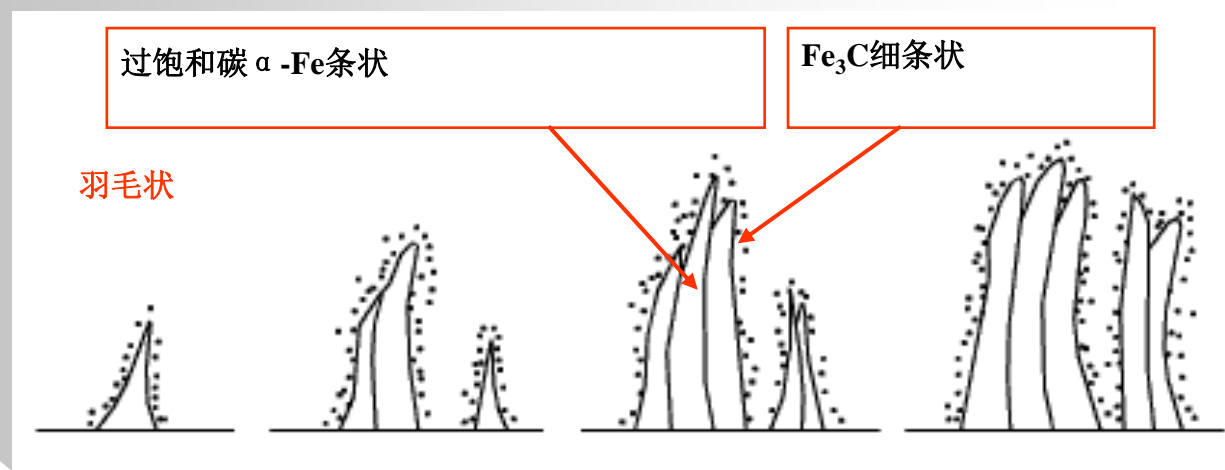
(2)、贝氏体型 (B) 转

转变温度：**550°C ~ Ms (230°C)**

产物：贝氏体

贝氏体：是渗碳体分布在碳过饱和的铁素体基体上的两相混合物。

550°C ~ 350 °C : 贝氏体呈羽毛状，称为上贝氏体，记为B上，硬度高(40~45HRC)，塑性、韧性差，不用。



B_上 = 过饱和碳 α-Fe条状 + Fe₃C细条状



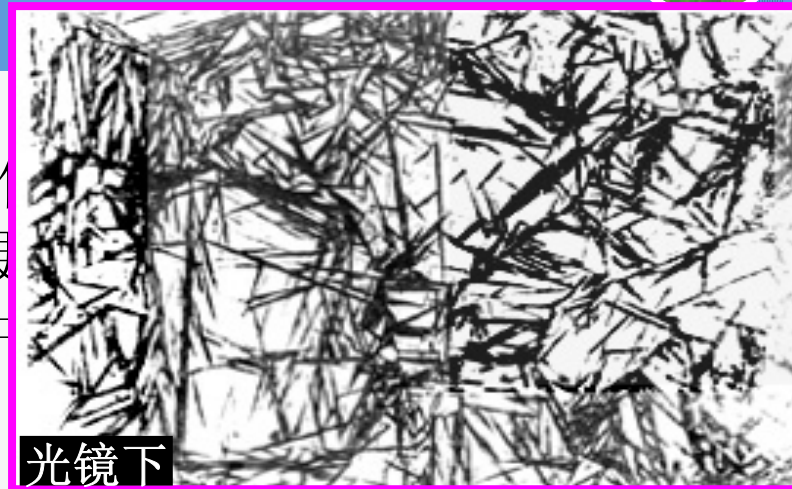
第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

上贝氏体转变录像





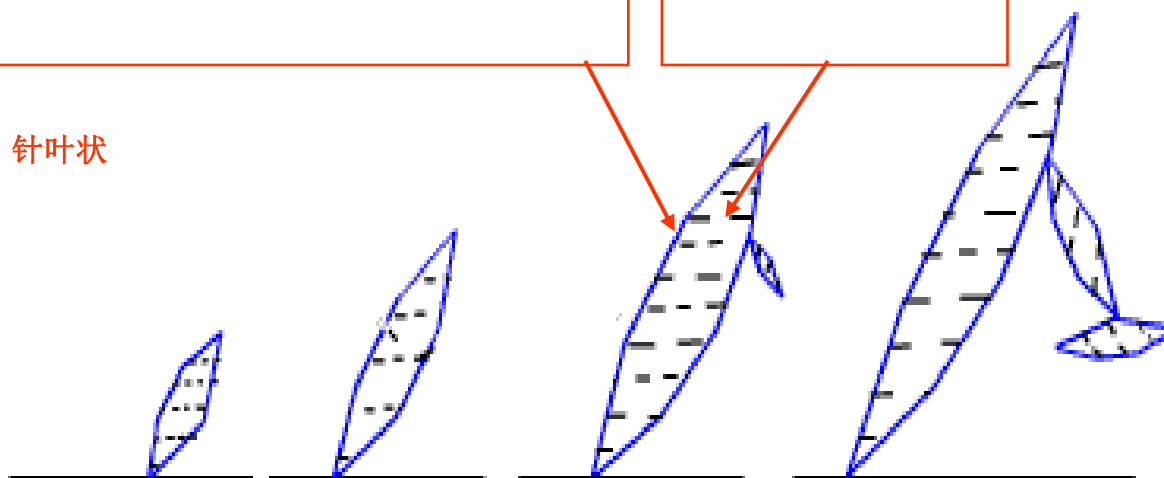
❖ $350\text{ }^{\circ}\text{C} \sim M_s (230\text{ }^{\circ}\text{C})$: 贝氏体
为下贝氏体, 记为 $B_{\text{下}}$, 高强度、硬
55HRC)、塑性韧性较好, 工业中
和中碳合金钢制造的零件中。



过饱和碳 α -Fe 针叶状

Fe_3C 细片状

针叶状



$B_{\text{下}} = \text{过饱和碳 } \alpha\text{-Fe 针叶状} + \text{Fe}_3\text{C 细片状}$



第二节 钢在加热和冷却时的组织转变



下贝氏体转变录像





第二节 钢在加热和冷却时的组织转变



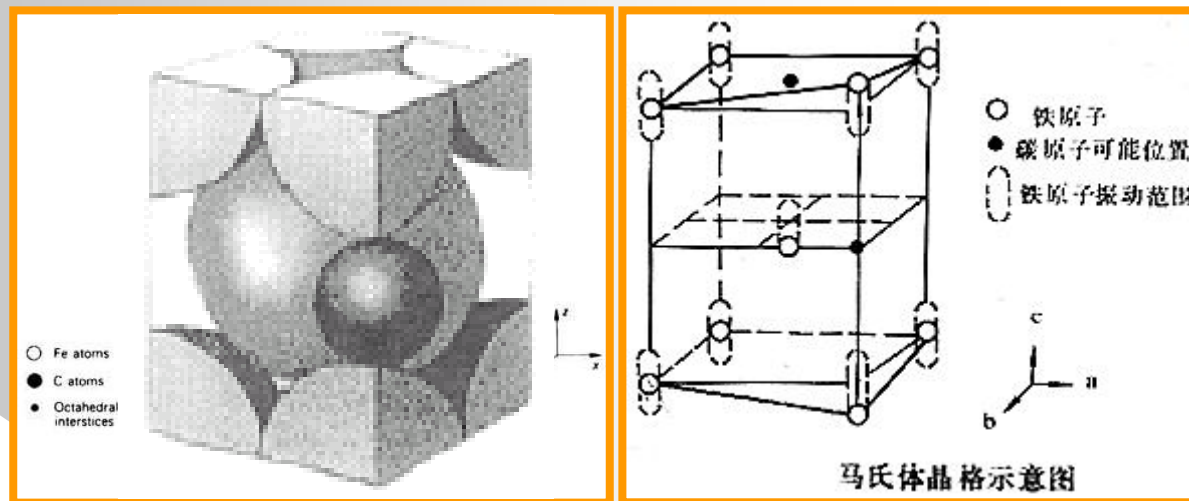
表 共析碳钢两种贝氏体型组织

组织名称		符号	转变温度 / °C	相组成	转变类型	特征	HRC
贝氏体型	上贝氏体	B _上	550 ~ 350	F _{过饱和} ⁺ Fe ₃ C	半扩散型 (铁原子不扩散, 碳原子扩散)	羽毛状: 平行密排的过饱和F板条间, 不均匀分布短杆状, 使条间容易脆性断裂, 工业上不应用	40~ 45
	下贝氏体	B _下	350 ~ 230	F _{过饱和} ⁺ ε-Fe _{2.4} C		针状: 在过饱和F针内均匀分布 (与针轴成55°~65°) 排列小薄片 ε 碳化物。具有较高的强度、硬度、塑性和韧性	45~ 55



❖ (3) 低温区转变——马氏体转变 M_s (230°C) $\sim M_f$ 。

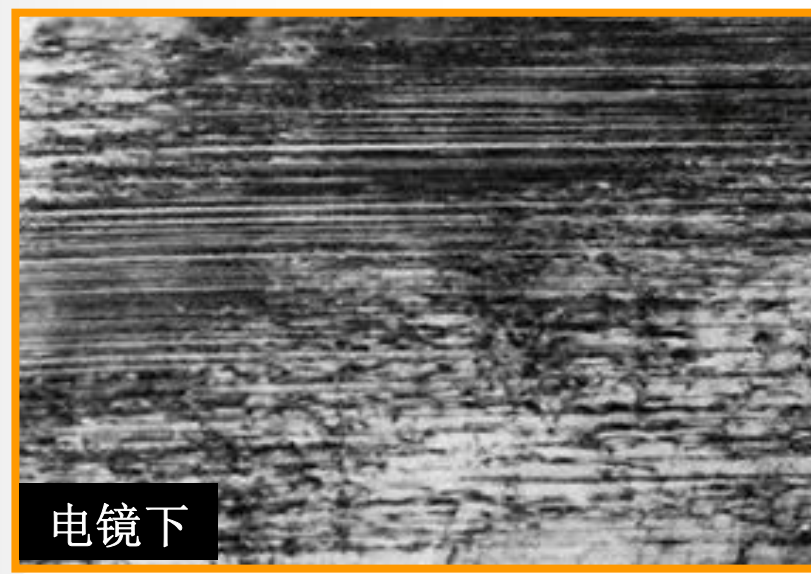
- ❖ a. A过冷 $\rightarrow M+A'$ 残余
- ❖ b. 转变产物：马氏体M，碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的过饱和固溶体
- ❖ ①马氏体结构 马氏体具有体心正方晶格 ($a=b\neq c$)
- ❖ 轴比 c/a 称马氏体的正方度。
- ❖ C% 越高，正方度越大，正方畸变越严重。
- ❖ 当 $<0.25\%C$ 时， $c/a=1$ ，此时马氏体为体心立方晶格。





❖ ②马氏体形貌

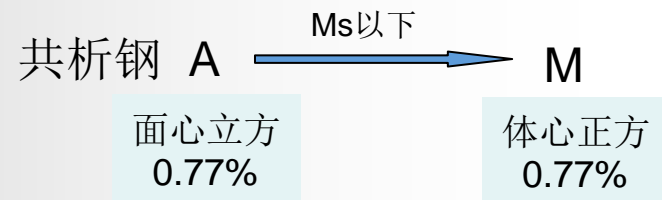
- ❖ C%小于马氏体的形态主要取决于其含碳量。
- ❖ 小于0.2%时，组织几乎全部是**板条马氏体**。强度高，塑性，韧性好。
- ❖ C%大于1.0%C时几乎全部是**针状马氏体**。硬而脆，塑、韧性差。
- ❖ C%在0.2~ 1.0%之间为**板条与针状的混合组织**。
- ❖ c. 实质：T低——C无法扩散→非扩散性晶格切变→过饱和C的铁素体。





d) 马氏体转变的特点

- ❖ ①无扩散型转变
- ❖ **Fe** 和 **C** 原子都不进行扩散，**M**是体心正方的**C**过饱和的**F**，固溶强化显著。
- ❖ ②降温形成
- ❖ 连续冷却完成。
- ❖ ③瞬时性
- ❖ **M** 的形成速度很快，温度越低，则转变量越多。
- ❖ ④转变的不完全性
- ❖ **M** 转变总要残留少量 **A**，**A**中的**C%**越多，则 M_s 、 M_f 越低，残余 **A**含量越多。残余**A**的量主要取决于 M_s 和 M_f 点的位置。
- ❖ ⑤**M**形成时体积膨胀（由体心立方晶格变成面心立方晶格）造成很大内应力。马氏体含碳量越大，体积变化也越大，所以高碳钢淬火时容易变形和开裂。





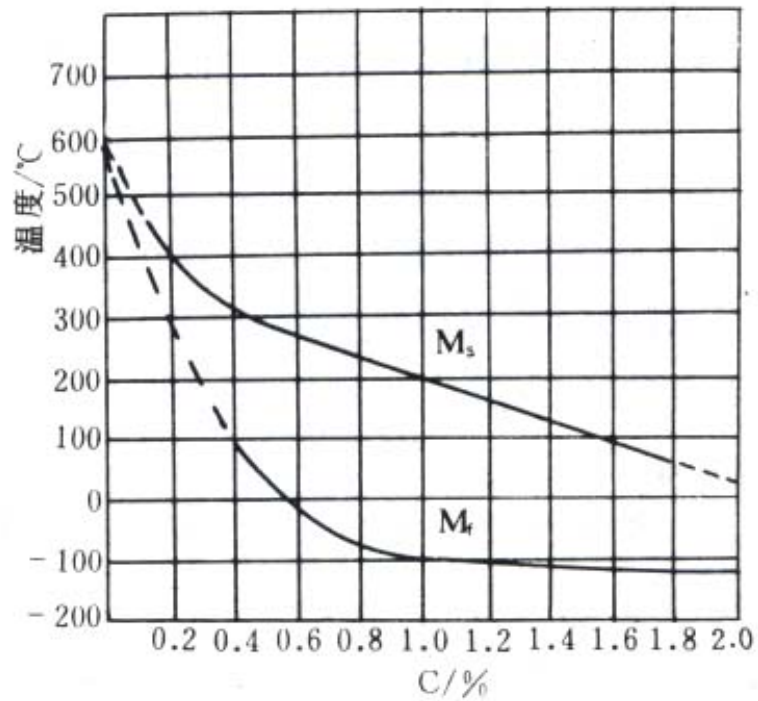
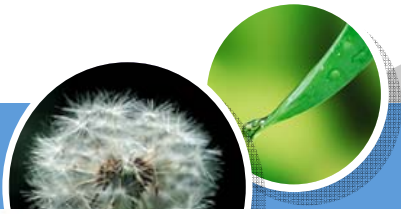
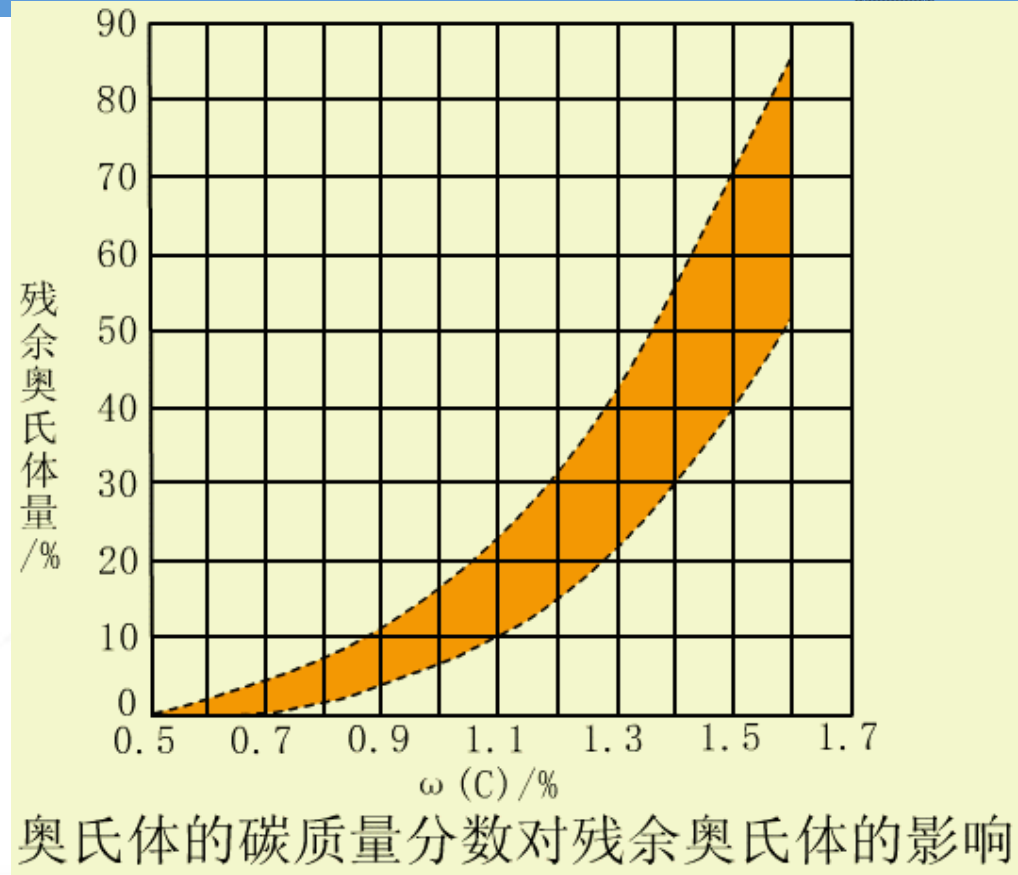


图 3-18 奥氏体含碳量对马氏体转变温度的影响



奥氏体的碳质量分数对残余奥氏体的影响

Ms和Mf点随着奥氏体中的含碳量的增加而降低，残余奥氏体量随着含碳量的增加而增多。



第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

总结 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	$A_1 \sim 650$	扩散型	粗片状, F、 Fe_3C 相间分布	5-20	退火
	S	$650 \sim 600$		细片状, F、 Fe_3C 相间分布	20-30	正火
	T	$600 \sim 550$		极细片状, F、 Fe_3C 相间分布	30-40	等温处理
贝氏体	$B_{上}$	$550 \sim 350$	半扩散型	羽毛状, 短棒状 Fe_3C 分布于过饱和F条之间	40-50	等温处理
	$B_{下}$	$350 \sim M_s$		竹叶状, 细片状 Fe_3C 分布于过饱和F针上	45-55	等温淬火
马氏体	$M_{针}$	$M_s \sim M_f$	无扩散型	针状	60-65	淬火
	$M_{板条}^*$	$M_s \sim M_f$		板条状	50	淬火



总 结



共析钢等温转变组织——性能的关系

(1) 珠光体型

转变温度降低，片间距小，细晶强化→强度、硬度、塑性、韧性提高。

(2) 贝氏体

B上：强度、韧性差。

B下：硬度高，韧性好，具有优良的综合机械性能。

(3) 马氏体

硬度高， $C\% \uparrow \rightarrow HRC \uparrow$ 。

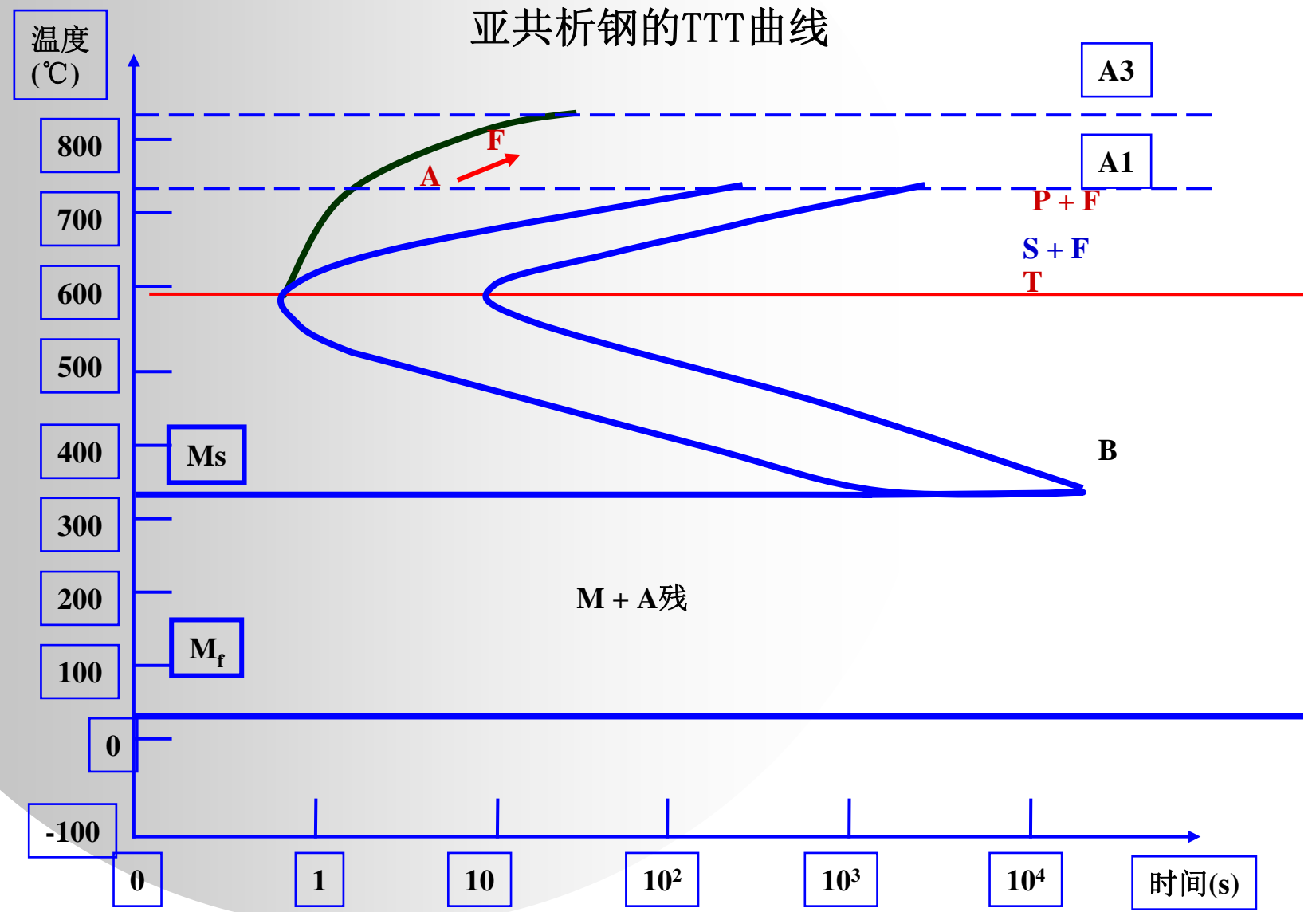
针状马氏体，硬而脆，塑、韧性差。

板条状，强度高，塑性，韧性好。



第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

亚共析钢的TTT曲线





❖ 亚共析钢的过冷奥氏体等温转变曲线与共析钢C曲线不同的是：

- ① 高温转变区过冷奥氏体将先有一部分转变为铁素体，剩余的过冷奥氏体再转变为珠光体型组织。
- ② 亚共析钢随着含碳量的增加，C曲线位置往右移。
- ③ M_s 、 M_f 线往上移。

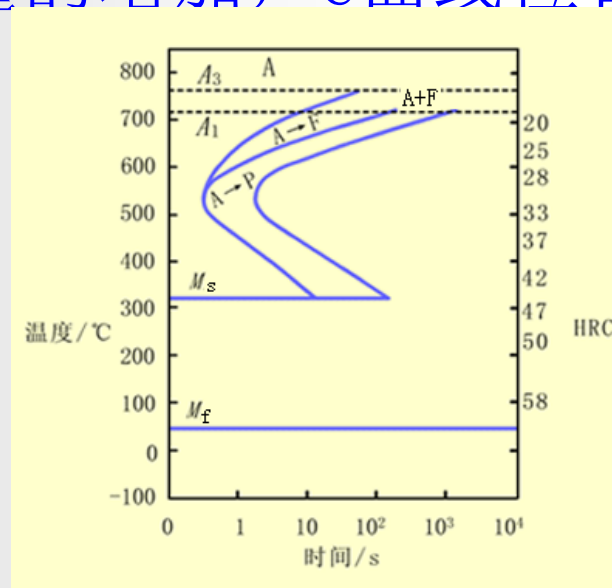
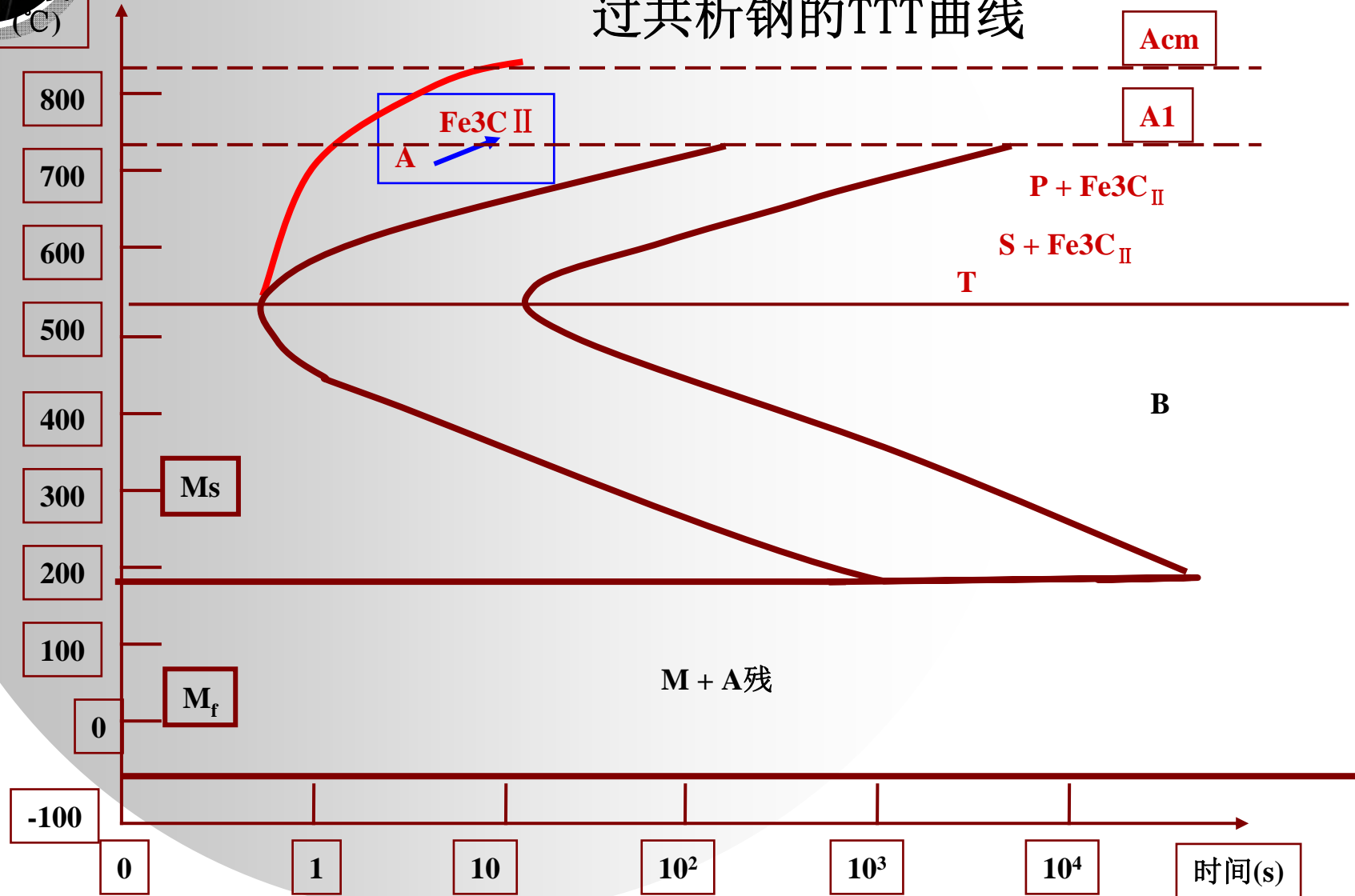


图 45钢过冷A等温转变曲线

第二节 钢在加热和冷却时的组织转变

过共析钢的TTT曲线





❖ 过共析钢过冷奥氏体的等温转变

- ❖ ①过共析钢的过冷A在高温转变区，将先析出 Fe_3C_{II} ，其余的过冷A再转变为珠光体型组织。
- ❖ ②当加热温度为 $Ac1$ 以上 $30\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 时，过共析钢随着含碳量的增加，C曲线位置向左移。
- ❖ ③ M_s 、 M_f 线往下移。

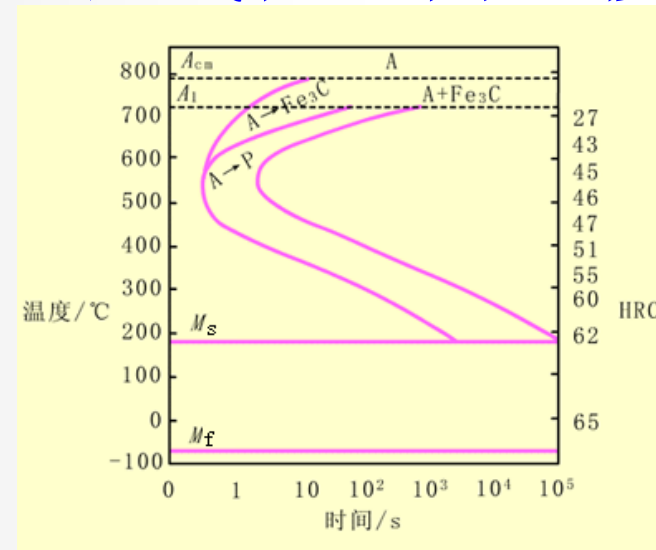


图 T10钢过冷A的等温转变曲线



第二节 钢在加热和冷却时的组织转变



3、影响 TTT 曲线形状与位置的因素

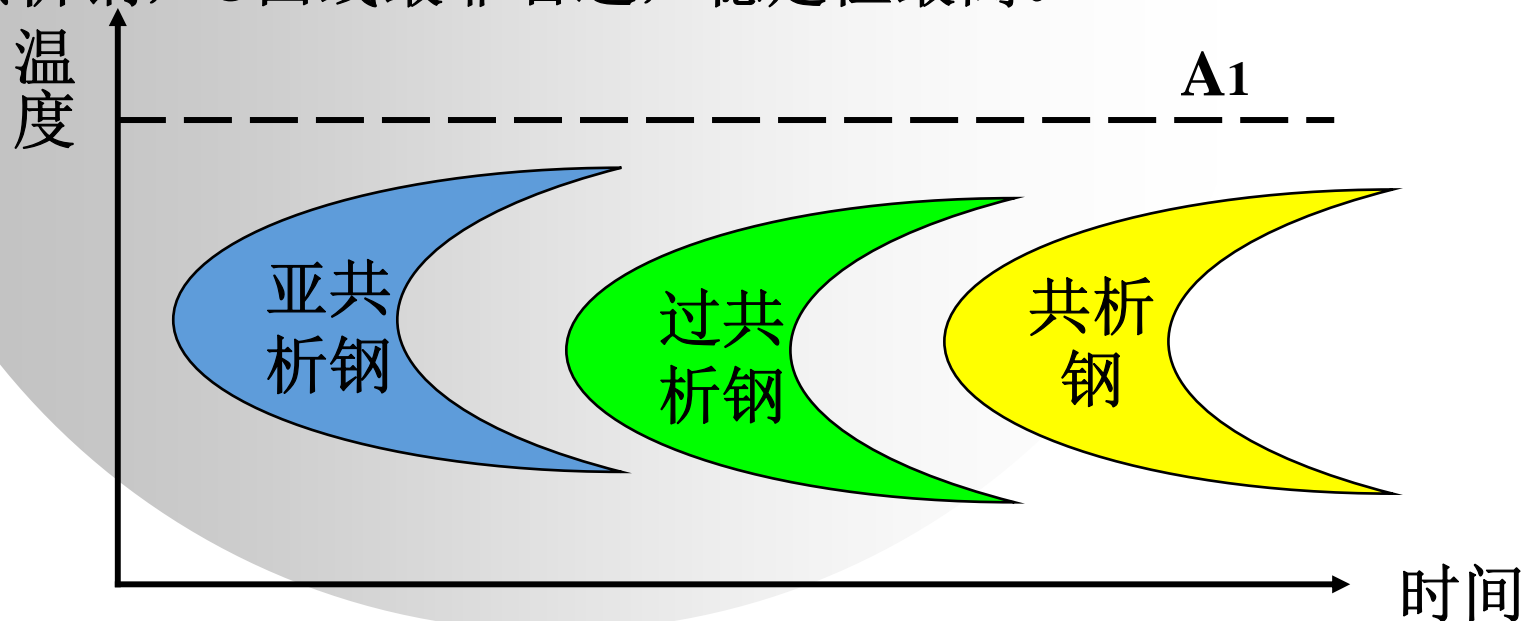
(1) 含碳量的影响:

A中C%↑ → C使奥氏体更稳定 → C曲线右移.

对亚共析钢, 钢中C%↑, A中C%↑ → C曲线右移

对过共析钢, 钢中C%↑, 未溶Fe₃C↑ → 有利于形核 → 促使奥氏体的分解 → C曲线左移

共析钢, C曲线最靠右边, 稳定性最高。





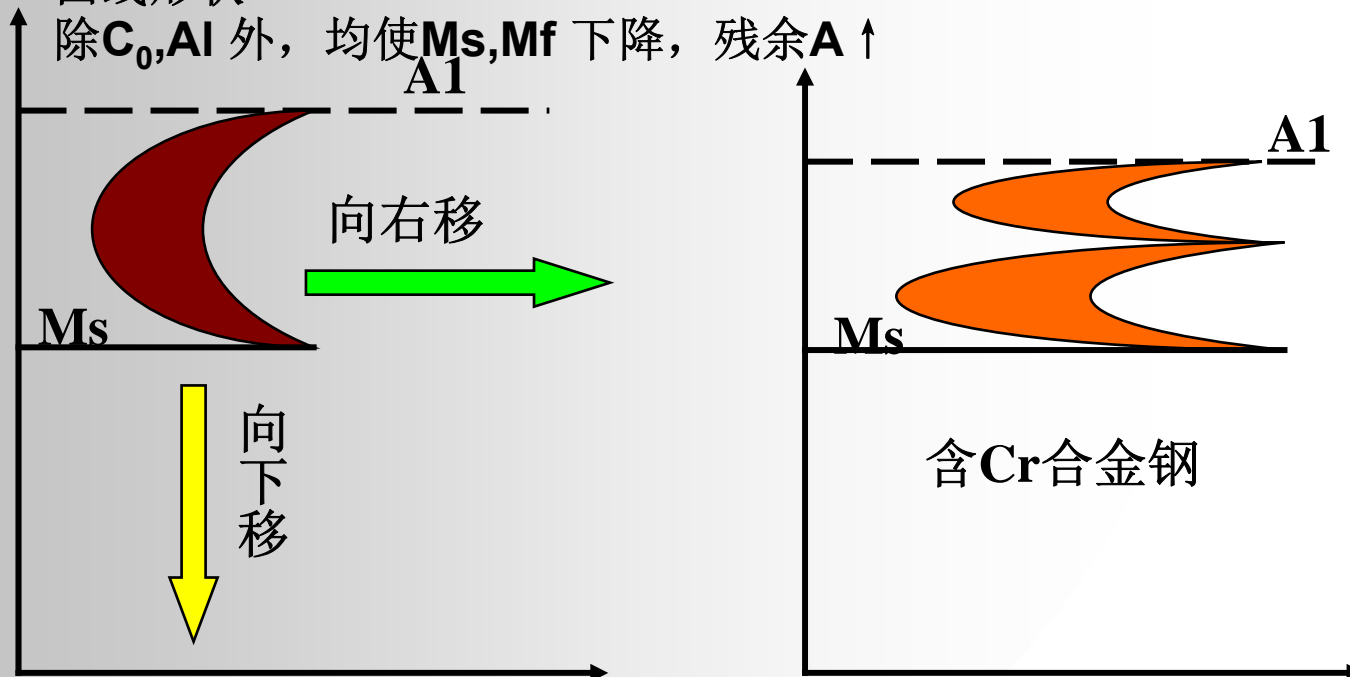
第二节 钢在加热和冷却时的组织转变



(2) 含合金元素的影响:

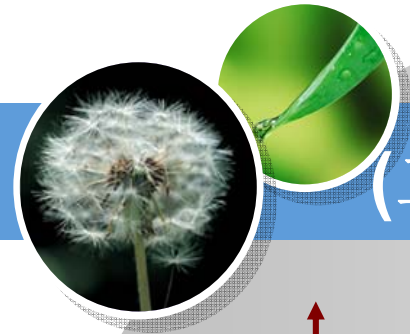
除 C_0 以外, 所有合金元素溶入A中, 增大过冷A稳定性——右移
非碳化物形成元素, Si, Ni, Cu , 只改变位置, 不改变C曲线形状
强碳化物形成元素, Cr, Mo, W, V, Nb, Ti , 不但改变位置, 而且改变C曲线形状

除 C_0, Al 外, 均使 M_s, M_f 下降, 残余A \uparrow



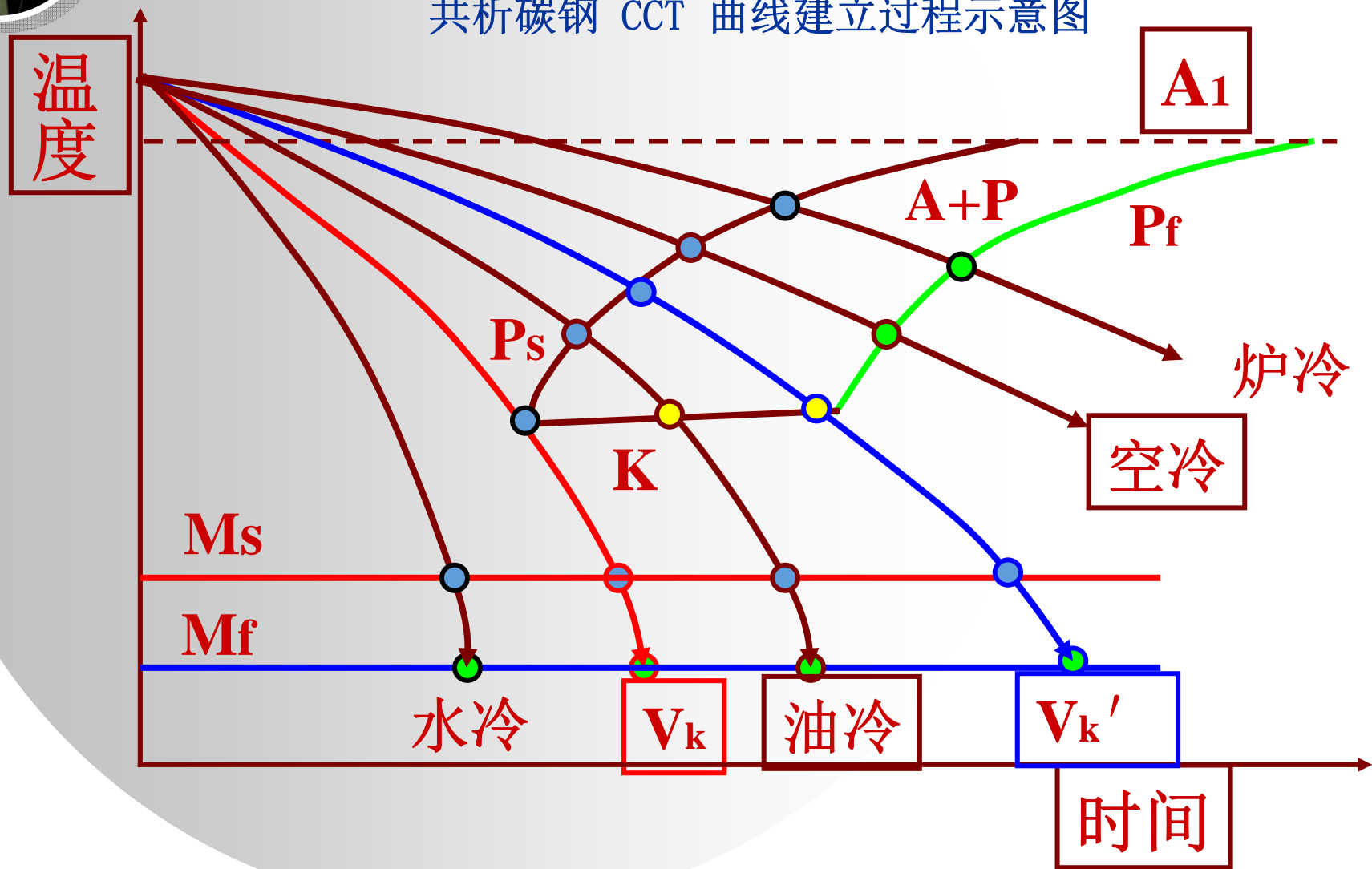
(3) 加热温度和保温时间的影响:

$T \uparrow, t \uparrow \rightarrow Fe_3C$ 溶解充分, 晶粒粗大 (晶界减小) \rightarrow A稳定 \rightarrow C曲线右移。



(二) 过冷奥氏体连续冷却转变曲线

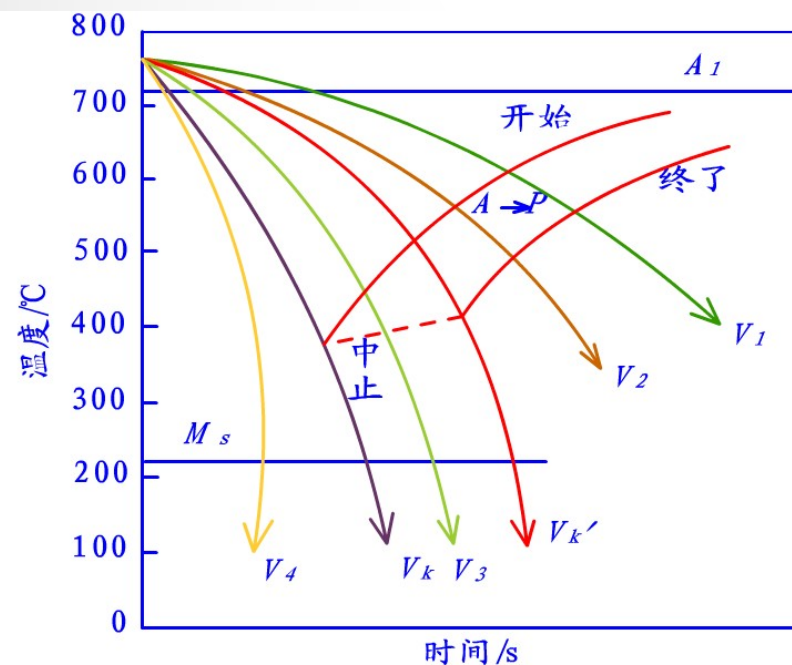
共析碳钢 CCT 曲线建立过程示意图





(二)过冷奥氏体连续冷却转变曲线

PS: A→P开始线
Pf: A→P终止线
K: 珠光体型转变终止线
Vk: 上临界冷却速度
(马氏体临界冷却速度)
→ M最小冷速
Vk': 下临界冷速→完全P
最大冷速



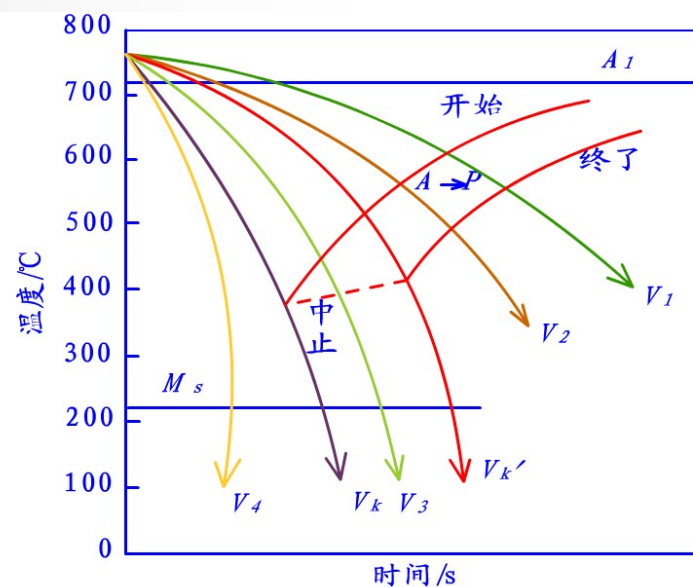
共析钢连续冷却C曲线
安徽机电职业技术学院 张新建



(二)过冷奥氏体连续冷却转变曲线

●生产上常用C曲线来分析钢在连续冷却条件下的组织。（如图）

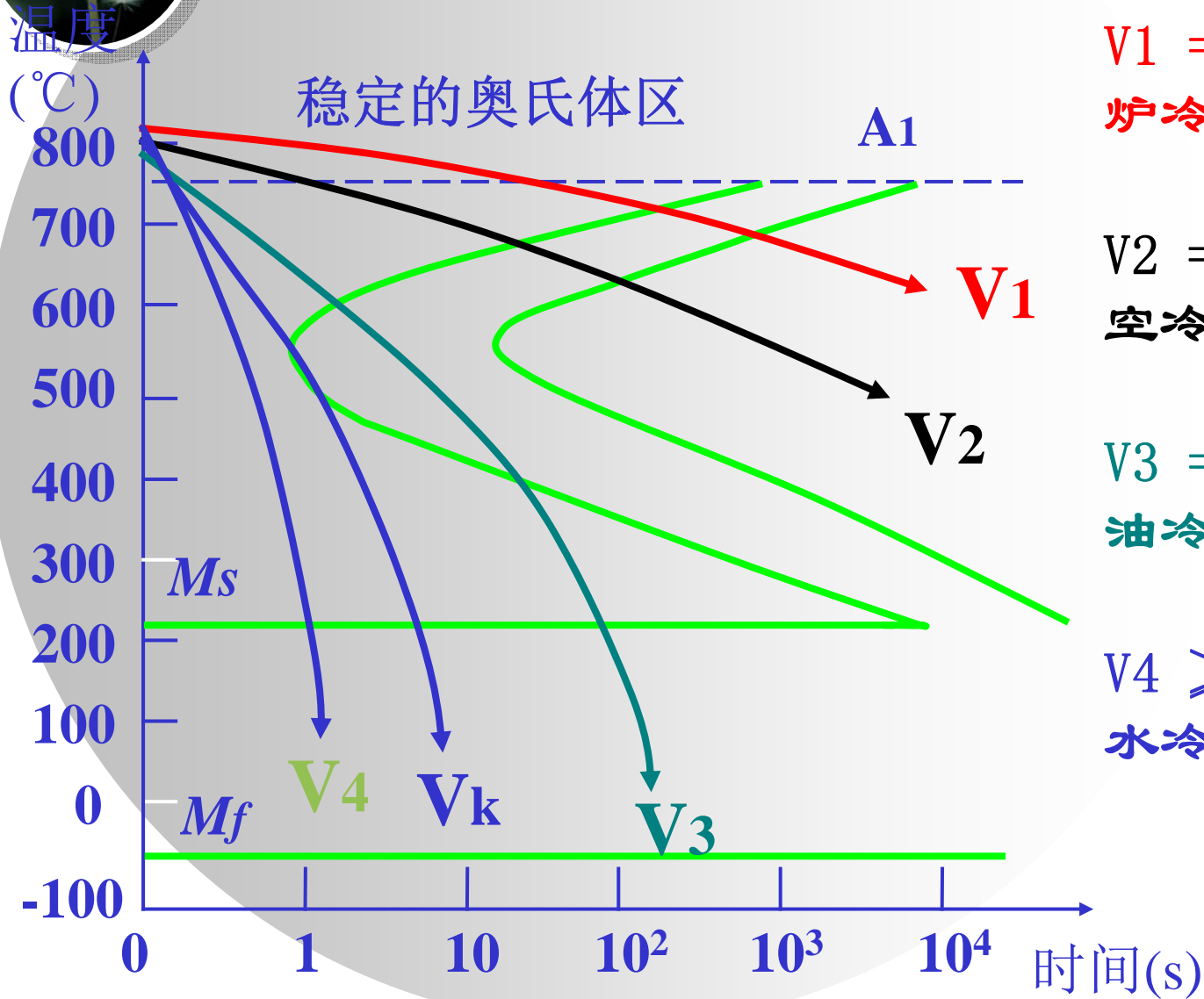
- 1) 炉冷 V_1 ——珠光体P；
- 2) 空冷 V_2 ——索氏体S；
- 3) 油冷 V_3 ——托氏体T+马氏体M+残余奥氏体 $A_{残}$ ；
- 4) 水冷 V_4 ——马氏体M+残余奥氏体 $A_{残}$ 。



共析钢连续冷却C曲线
安徽机电职业技术学院 张新建



(二) 过冷奥氏体连续冷却转变曲线



V₁ = 5.5°C/s :
炉冷 ; P

V₂ = 20°C/s :
空冷 ; S

V₃ = 33°C/s :
油冷 ; T+M+A残

V₄ ≥ 138°C/s :
水冷 ; M+A残

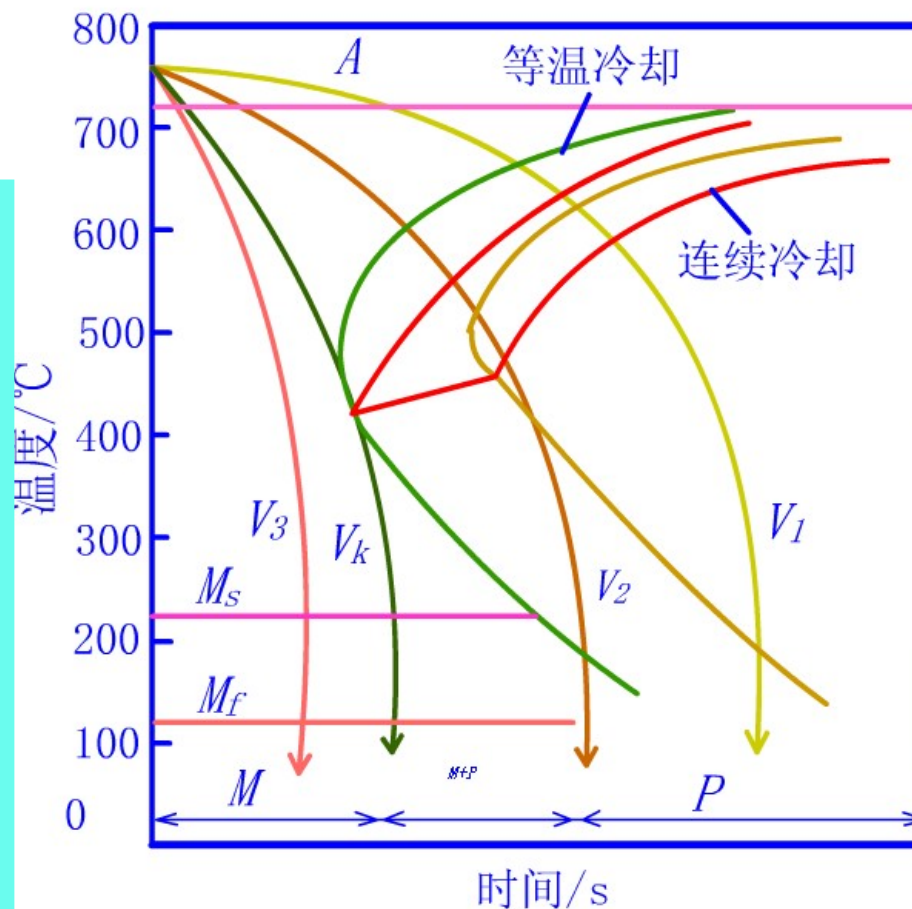


第二节 钢在加热和冷却时的组织转变



(三)、共析碳钢

- ❖ 过冷奥氏体连续转变曲线（CCT曲线）与TTT曲线的区别：
- ❖ 1、连续冷却曲线靠右一些；
- ❖ 2、连续冷却曲线只有C曲线的上半部分，而没有下半部分。也就是说而没有贝氏体转变。
- ❖ 3转变中止线，碰到它，过冷A不再发生P转变，而一直保留到MS点以下，直接变为M。



共析钢连续冷却C曲线与等温冷却C曲线的比较



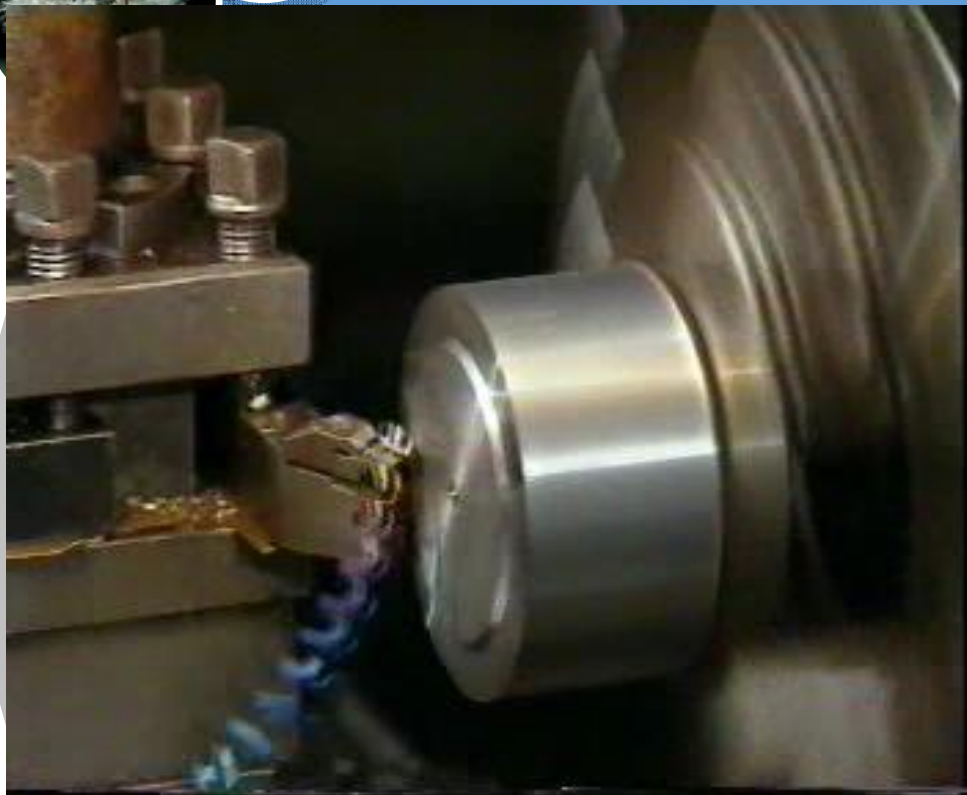
铜棒 $\text{Ø} 24 \text{ mm}$



电缆线 $\text{Ø} 0.15 \text{ mm}$



如何消除拉拔过程中的硬化现象？



切削件的硬度在170~230HB范围内，切削性能较好。

刀具具有较高的韧性时，不容易发生崩刃。

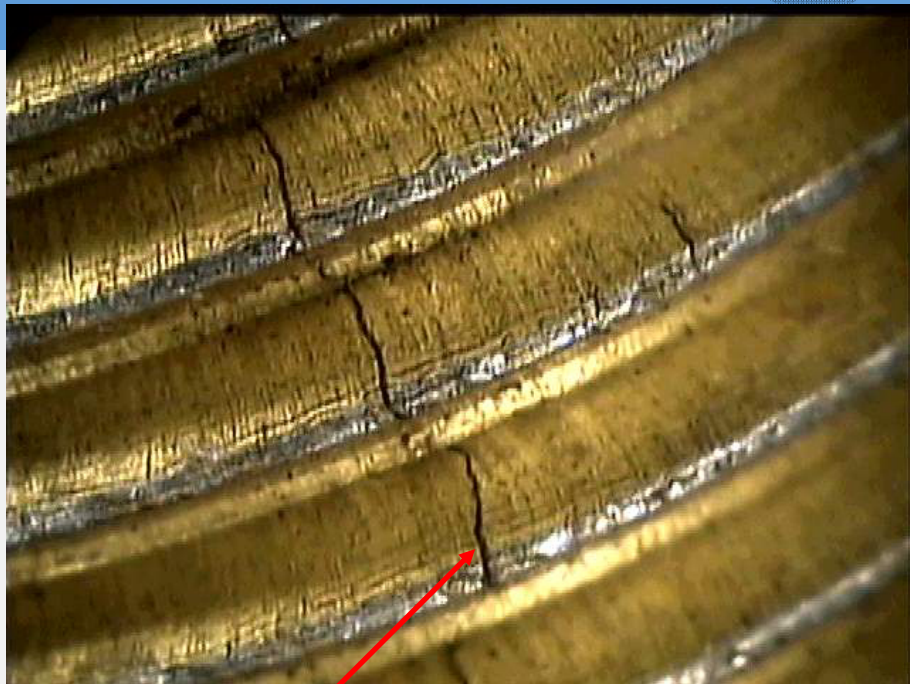


切削件的硬度如何调整？刀具如何才能具有较高的韧性？

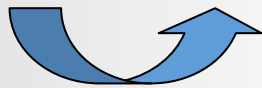


工欲善其事 必先利其器

对中国 83 式 152 毫米自行加榴炮炮弹进行保养



加工过程（铸、锻、焊、切削）产生的内应力



季裂

20世纪初，英军在印度贮存的黄铜弹壳，每当雨季就频繁发生大量裂缝，当时称之为季裂。



如何消除加工过程中产生的内应力？



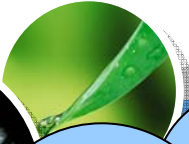
第三节 钢的普通热处理工艺



预备热处理：退火；正火；调质

最终热处理：淬火；回火；表面热处理

退火和正火是应用最为广泛的热处理工艺！！



为什么退火与正火有着非常广泛的应用?

为什么将其安排在铸/锻造与切削加工之间呢?





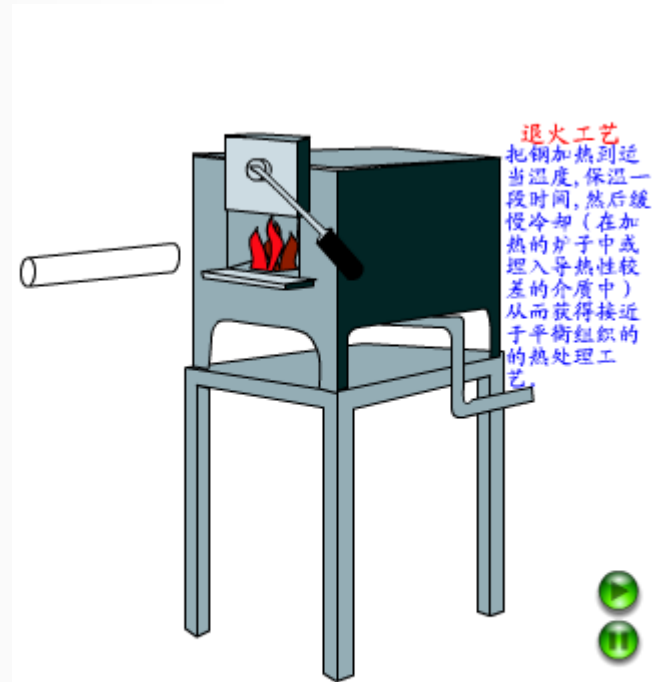
第三节 钢的普通热处理工艺

一、钢的退火

1、**退火**：将钢加热到适当温度（**临界温度以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$** ），保温一段时间，然后在**炉中缓慢地**冷却的热处理工艺。

2、**目的**——为最终热处理作好组织准备

- 1) 降低硬度，提高塑性，改善加工性能；
- 2) 细化晶粒，消除组织缺陷；
- 3) 消除内应力。





第三节 钢的普通热处理工艺

3 退火种类

- ▶ 钢的退火工艺种类很多，根据热处理目的不同，可将退火工艺分为两大类。
- ▶ 第一类退火是不以组织转变为目的的退火工艺方法。
 - 扩散（均匀化）退火、再结晶退火、去应力退火。
- ▶ **工艺特点：**通过控制加热温度和保温时间使钢由冶金及冷、热加工过程中产生的不平衡状态如成分偏析、冷变形强化、内应力等过渡到平衡状态。



➤ **第二类退火是以改变组织与性能为目的的退火工艺方法。**

● **完全退火、不完全退火、等温退火、球化退火等。**

➤ **工艺特点：**通过控制加热温度、保温时间及冷却速度等工艺参数，来改变钢中的**珠光体、铁素体、渗碳体**等组织形态及分布，**从而改变其性能**，如降低硬度、提高塑性、细化晶粒、改善机械加工性能等。



第三节 钢的普通热处理工艺

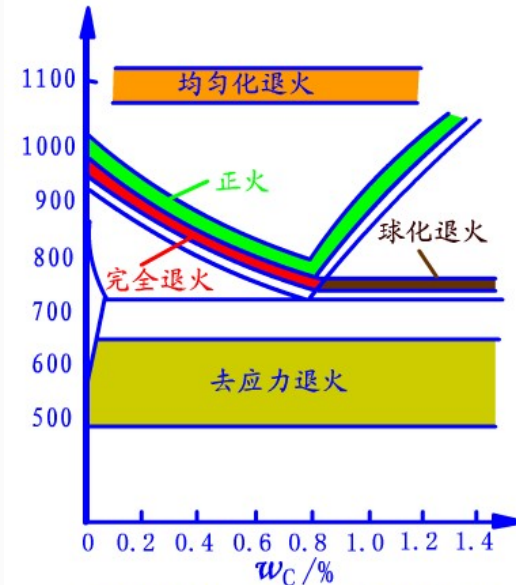
1) 完全退火

定义：将钢加热 A_{c3} 以上30-50 $^{\circ}C$ ，完全奥氏体后，保温一定时间随之缓慢冷却到600 $^{\circ}C$ 以下，出炉空冷。

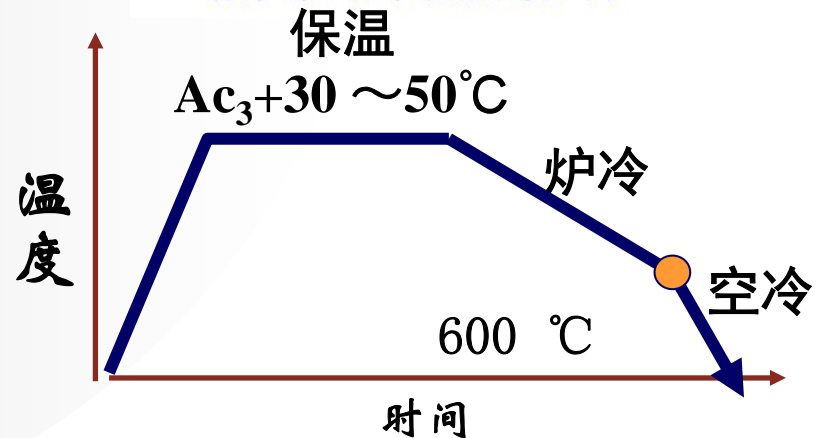
组织：细小而均匀的平衡组织（铁素体+珠光体）

- ❖ **目的：**①细化，均匀化粗大、不均匀组织
- ❖ ②接近平衡组织——调整硬度→切削性↑
- ❖ ③消除内应力

适用范围：亚共析钢。



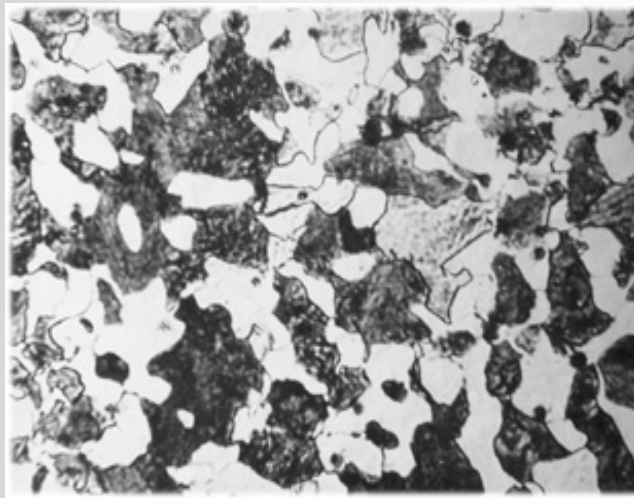
各种退火与正火加热温度范围





完全退火组织

问题：亚共析钢（共析钢）的平衡状态组织？



▶ **缺 点：**

45钢的完全退火组织（F+P） 200X

完全退火全过程所需**时间非常长**，特别是对于某些奥氏体比较稳定的合金钢，往往需要数十小时，甚至数天的时间。



- ❖ 低碳钢为什么不能用完全退火?
- ❖ 过共析钢能采用完全退火吗?



注意事项:

低碳钢和过共析钢不宜采用完全退火。 网状渗碳体
低碳钢完全退火后硬度偏低，不利于切削加工。
过共析钢加热至 A_{cm} 以上奥氏体状态缓冷退火
时，有网状二次渗碳体析出，使钢的强度、塑性和冲击韧性显著降低。



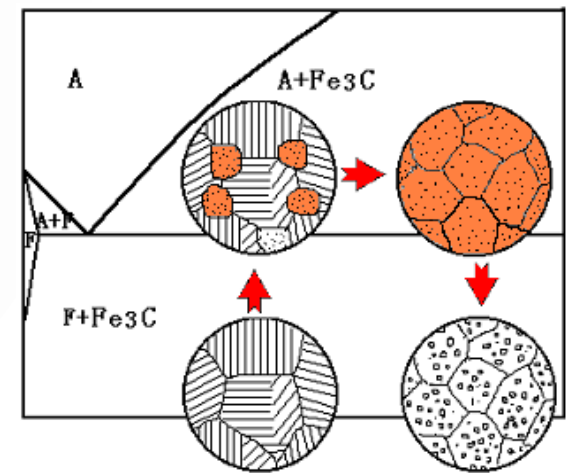
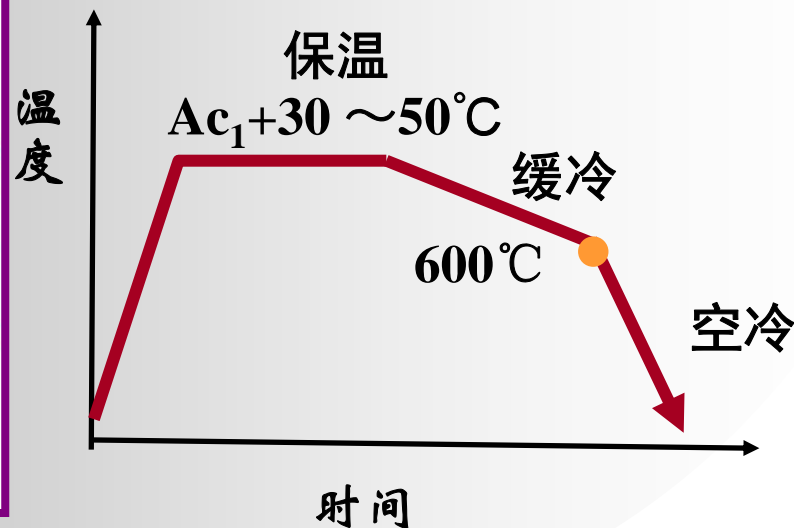
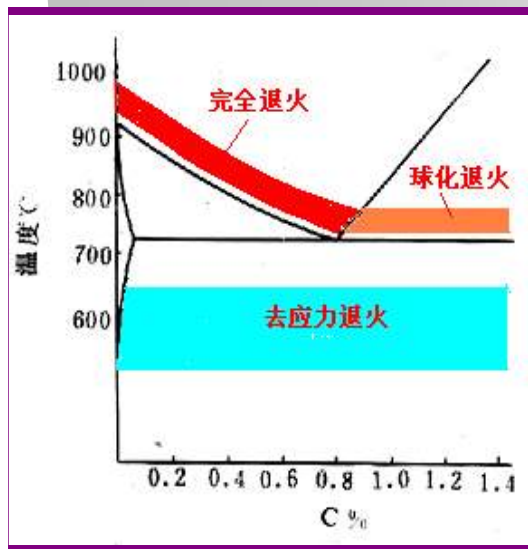
第三节 钢的普通热处理工艺

2) 球化退火

定义：将钢加热到

$A_{c1}+(30\sim 50)^{\circ}C$ ，保温后随炉缓冷至 $600^{\circ}C$ ，出炉空冷，使钢中碳化物呈球状的工艺方法。

组织：球状珠光体（渗碳体呈球形的细小颗粒弥散分布在铁素体基体中）



第三节 钢的普通热处理工艺

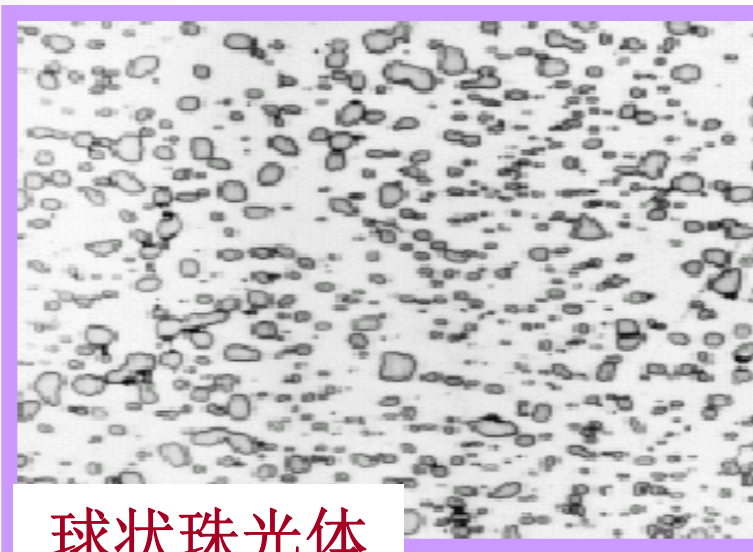


目的:

1、降低硬度、提高塑性、改善切削加工性能。如T10钢经球化退火后，硬度由255~321HBS降到≤197HBS。从而改善切削加工性能；

2、获得球状珠光体也是为淬火作组织准备，使淬火加热时奥氏体晶粒不易长大，并可减小冷却时变形和开裂的倾向。

适用范围：主要用于过共析钢、合金工具钢。



球状珠光体

● 应注意的是

对于有网状二次渗碳体的过共析钢，球化退火前应先进行正火，以消除网状。

第三节 钢的普通热处理工艺

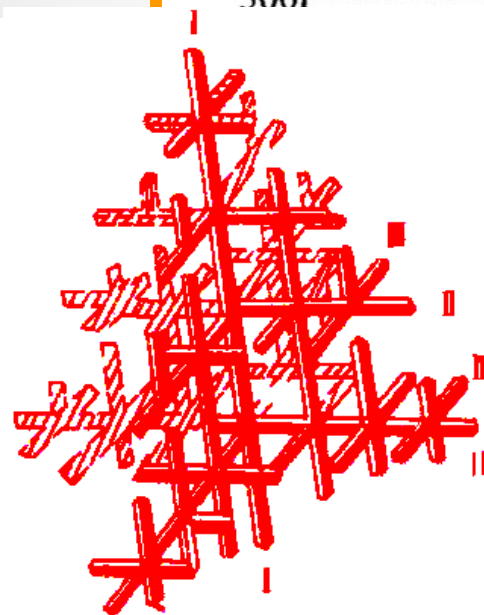
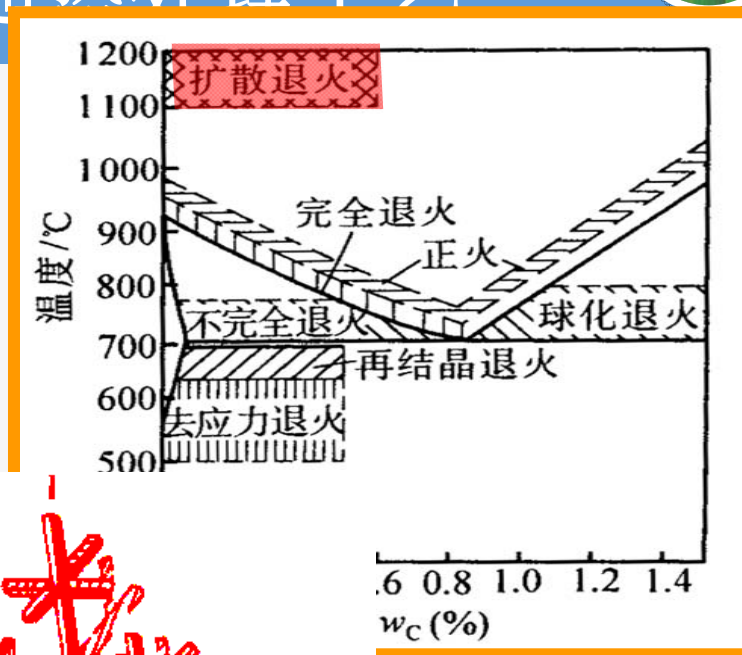
3) 扩散退火 (均匀化退火)

定义: 将钢加热到 A_{c3} 以上
150-300 °C, 保温10h~

偏析存在形式及危害

铸造化学成分不均匀、
非金属夹杂物分布不均匀、
微气泡和气孔 造成偏析。

偏析直接导致大型铸件
各处成分和组织不均匀、产
生组织应力、出现裂纹、机
械性能恶化。



1) ~200°C

0~15 h

缓冷

时间



● 应注意的是

- ❖ 工件经扩散退火后，奥氏体的晶粒十分粗大，必须进行完全退火或正火处理来细化晶粒。
- ❖ 由于扩散退火温度高、时间长，生产成本低高，一般不轻易采用。只有一些优质的合金钢和偏析较严重的合金钢铸件才使用这种工艺。

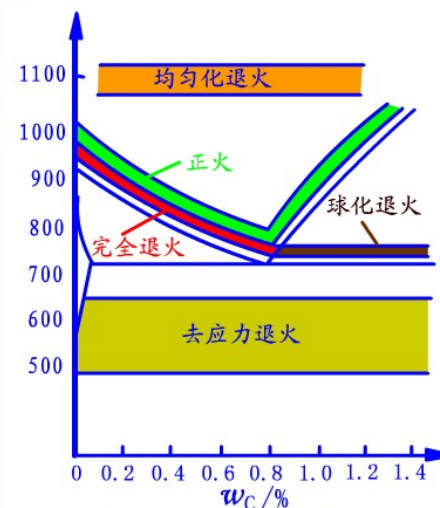
第三节 钢的普通热处理工艺

4) 去应力退火

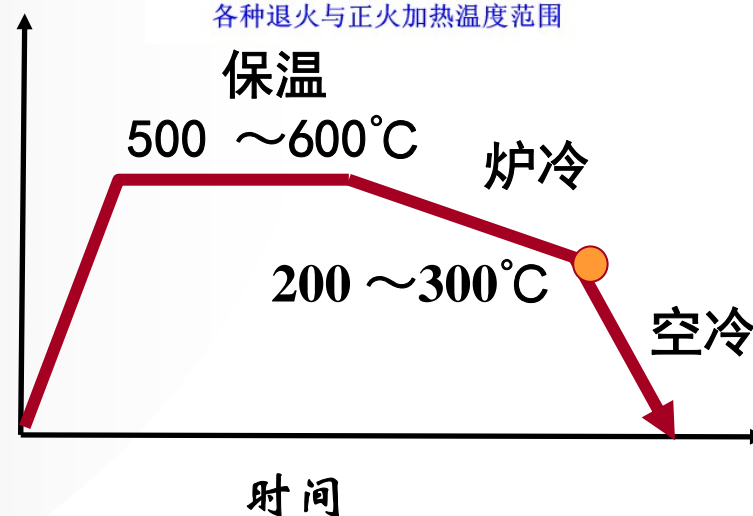
定义：将钢加热到 A_{c1} 以下（一般约为 $500\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），保温后随炉缓冷至 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷，又称低温退火。

目的：消除铸件、锻件、焊接件和机加工、冷变形等冷热加工在工件中造成的残余内应力。（没有发生组织变化）

适用范围：用于所有的钢。



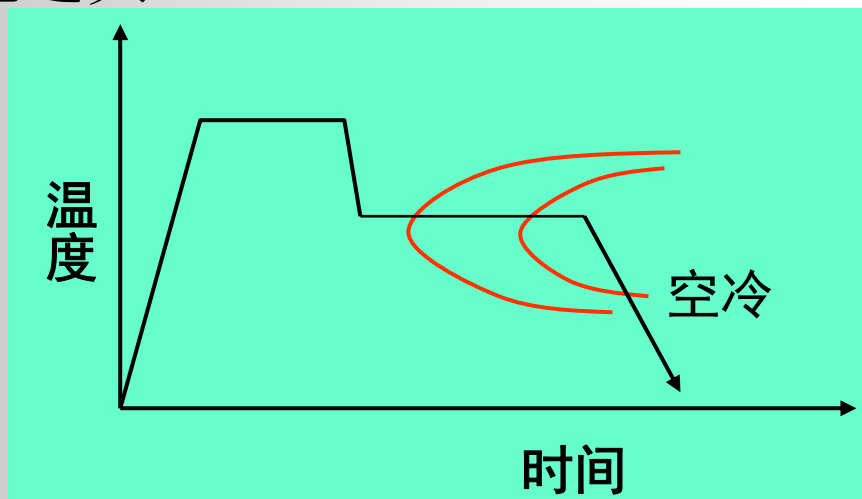
各种退火与正火加热温度范围



第三节 钢的普通热处理工艺

5) 等温退火

- ❖ 加热到高于 Ac_3 （或 Ac_1 ）温度，保持适当时间后，较快地冷却到珠光体转变温度区间的某一温度保持使奥氏体转变为**珠光体型组织**，然后在空气中冷却的退火工艺。
- ❖ 对于亚共析钢可代替完全退火，对于过共析钢可代替球化退火。

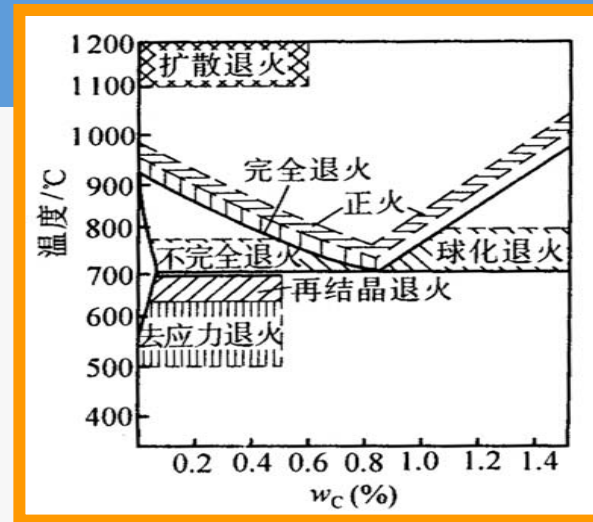


等温退火工艺图



6) 再结晶退火

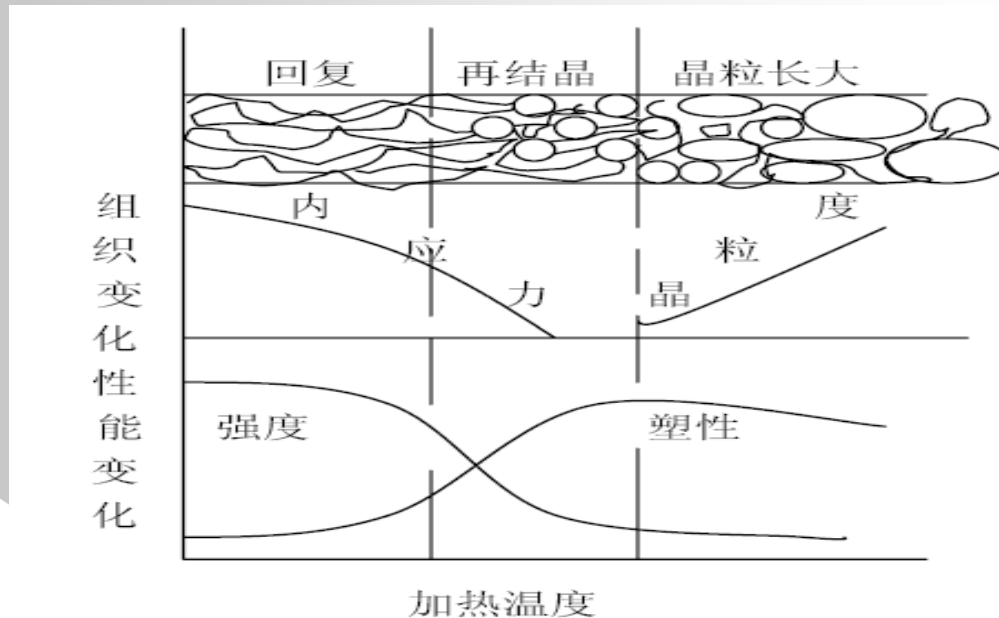
- 适用：存在加工硬化的冷变形金属
- 目的：消除加工硬化，降低硬度，改善切削加工性能；提高延展性（塑性）及压延成型性能。
- 加热温度： $T_{再}+150\sim 250^{\circ}\text{C}$ ，一般钢材再结晶退火温度 $650\sim 700^{\circ}\text{C}$ 。





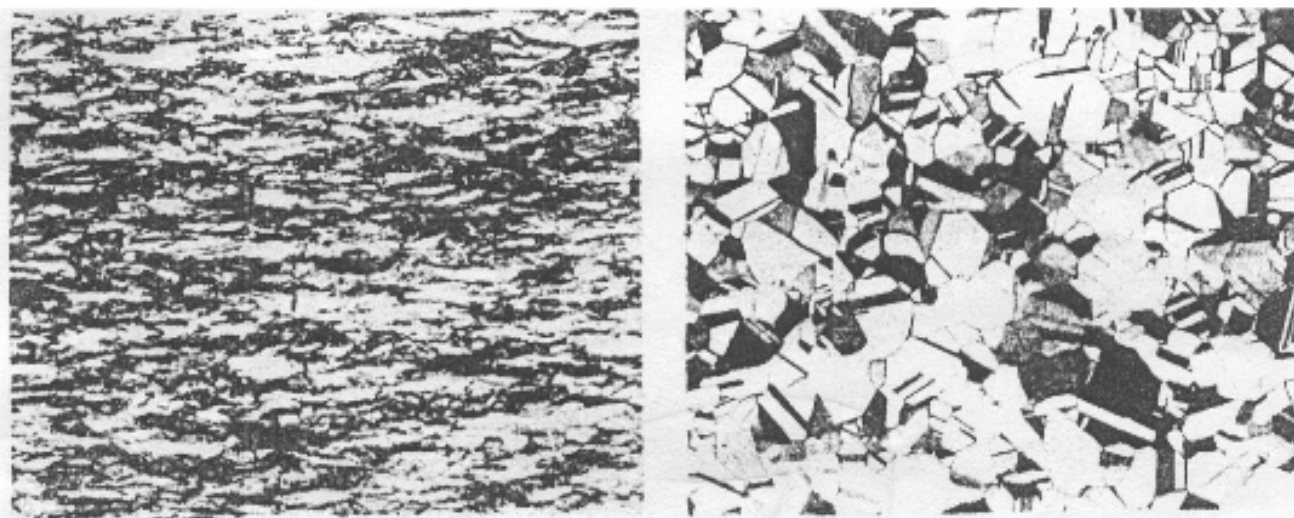
再结晶:

- ❖ 冷变形金属加热至一定温度时, 将开始形成一些位向与变形晶粒不同、内部缺陷较少的等轴小晶粒, 这些小晶粒不断向周围的变形金属中扩展长大, 直到冷变形金属组织完全消失为止的过程。随着加热温度增加, 其组织和性能的变化过程可分为回复、再结晶、及晶粒长大三个阶段。其示意图如下:





H68黄铜退火组织



6.9mm轧到1.0mm, $\varepsilon=83\%$,
轧制后晶粒拉长, 破坏, 出
现大量滑移带, 形成纤维组
织, 120x

冷轧后退火, 组织
完全恢复, 120x



名称	目的	工艺制度	组织	应用
完全退火	细化晶粒，消除铸造偏析，降低硬度，提高塑性	加热到AC3以上 30~50℃，炉冷至 600℃左右空冷	F+P	亚共析钢的铸、锻、轧件，焊接件
球化退火	降低硬度，改善切削性能，提高塑性韧性，为淬火作组织准备	加热到AC1+30~ 50℃，然后出炉空冷。	球状珠光体	共析、过共析钢及合金钢的锻件、轧件等
扩散退火	改善或消除枝晶偏析，使成分均匀化	加热到Ac3以上150- 300℃， 先缓冷，后空冷	粗大组织	合金钢铸锭及大型铸钢件或铸件
再结晶退火	消除加工硬化，提高塑性	加热到再结晶温度，再空冷	等轴晶	冷变形加工的制品
去应力退火	除残余应力，提高尺寸稳定性	加热到500~650℃ 缓冷至200℃空冷	无变化	铸、锻、焊、冷压件及机加工件



第三节 钢的普通热处理工艺



退火



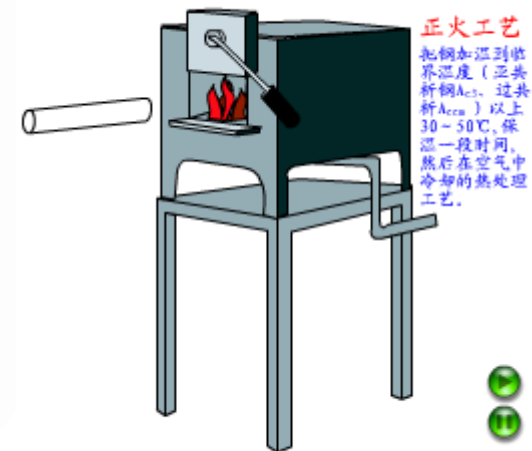
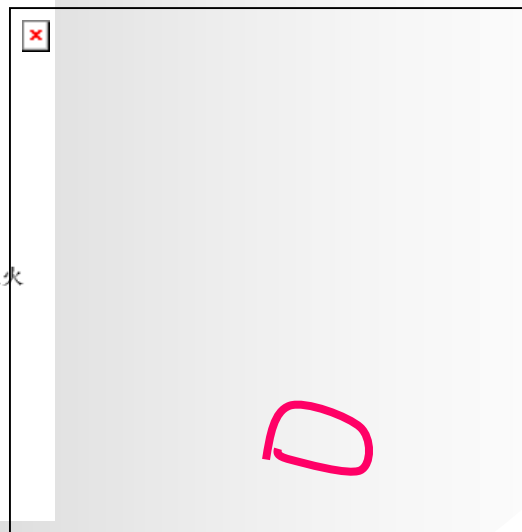
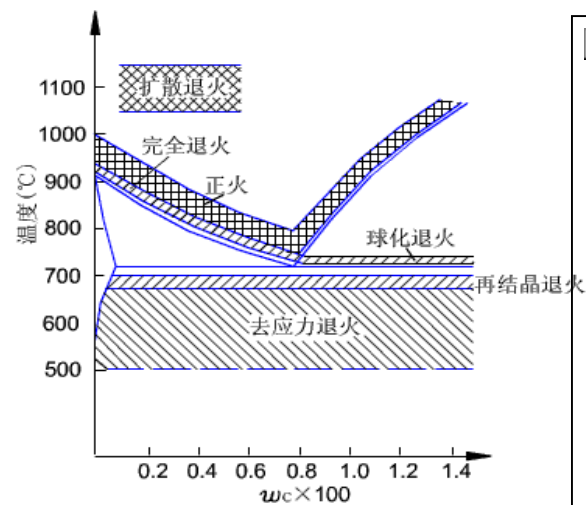


二、钢的正火

把钢零件加热到临界温度以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$,保温一定时间,然后在空气中冷却的热处理工艺。

临界温度: A_{c3} 或 $A_{c_{cm}}+30-50^{\circ}\text{C}$

组织: $S+(F\text{或}Fe_3C)$

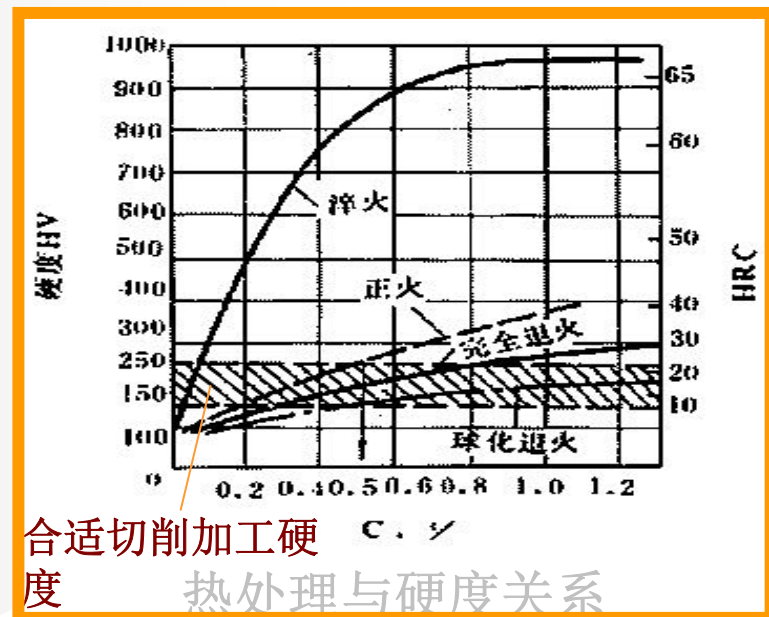




第三节 钢的普通热处理工艺

应用:

- ❖ (1) 用于普通结构零件，作为最终热处理，
- ❖ 正火可以细化晶粒，使组织组织均匀化，从而提高钢的强度、硬度和韧性。对于普通结构钢零件，机械性能要求不很高时，可以用正火作为最终热处理。
- ❖ (2) 用于低、中碳钢作为预先热处理，得合适的硬度便于切削加工。
- ❖ (3) 用于过共析钢，消除网状 Fe_3C_{II} ，有利于球化退火的进行。





正火与退火的选择

(1) 从切削加工性上考虑

一般金属的硬度在HB170~230范围内，切削性能较好。高则过硬，难加工，刀具磨损快；低则切屑不易断，刀具发热和磨损，加工后零件表面粗糙度大。

对于低、中碳结构钢以正火作为预先热处理比较合适，高碳结构钢、工具钢和中碳以上合金钢则以退火为宜。

(2) 从使用性能上考虑

如工件性能要求不太高，随后不再进行淬火和回火，那么往往用正火来提高其机械性能。

但若零件的形状比较复杂，正火的冷却速度有形成裂纹的危险，应采用退火。

(3) 从经济上考虑

正火比退火的生产周期短，耗能少，操作简便，故在可能的条件下，应优先考虑正火。



第三节 钢的普通热处理工艺



正火





第三节 钢的普通热处理工艺



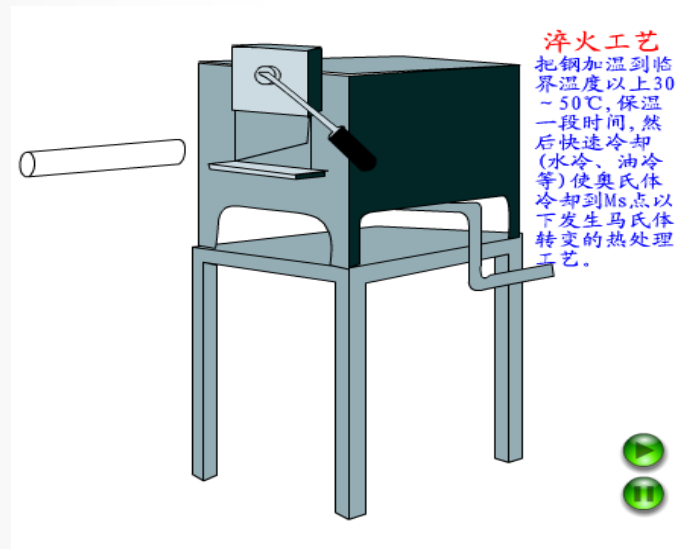
三、钢的淬火

淬火：将钢件加热到 Ac_3 或 Ac_1 以上某一温度，保温一定时间后，快速冷却的热处理工艺。

淬火目的：

- 1、提高钢的硬度及耐磨性。
- 2、获得良好的综合机械性能

（中碳钢经淬火+高温回火可获得强、韧兼备组织；各种弹簧都要求强度高、弹性好，一般用高碳钢制作，经淬火+中温回火后，弹性大大提高）。



第二节 钢的普通热处理工艺

(一)、淬火温度

1、碳钢

❖ (1) 亚共析钢:

淬火温度: $A_{c3}+30-50^{\circ}\text{C}$

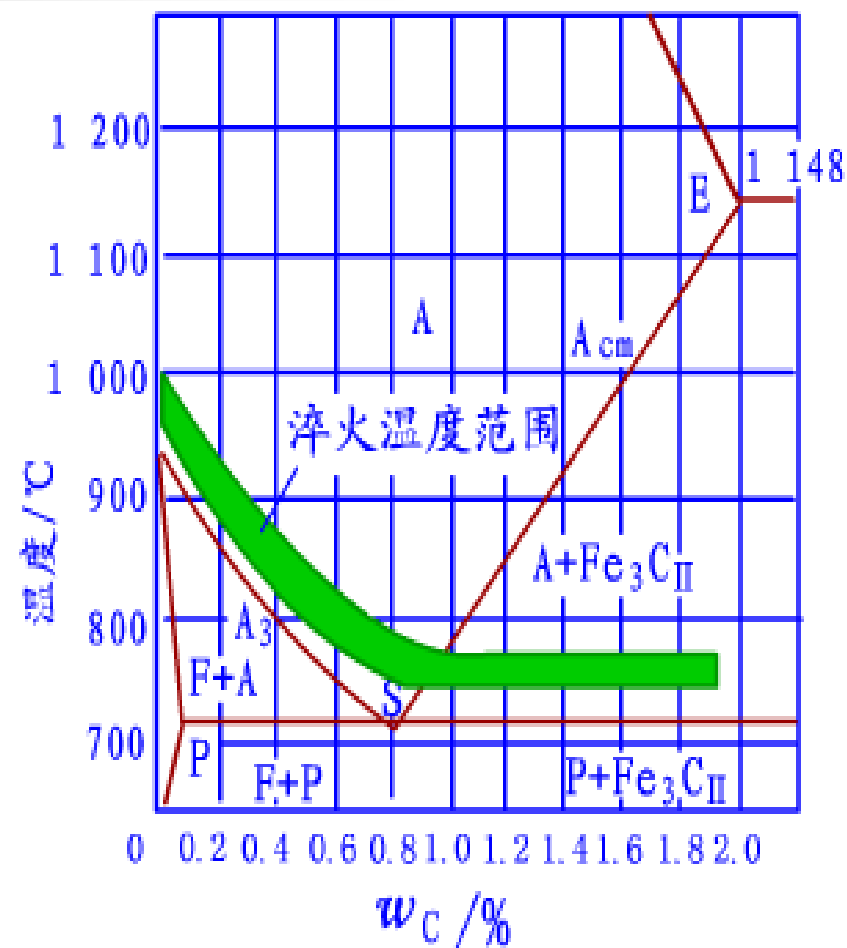
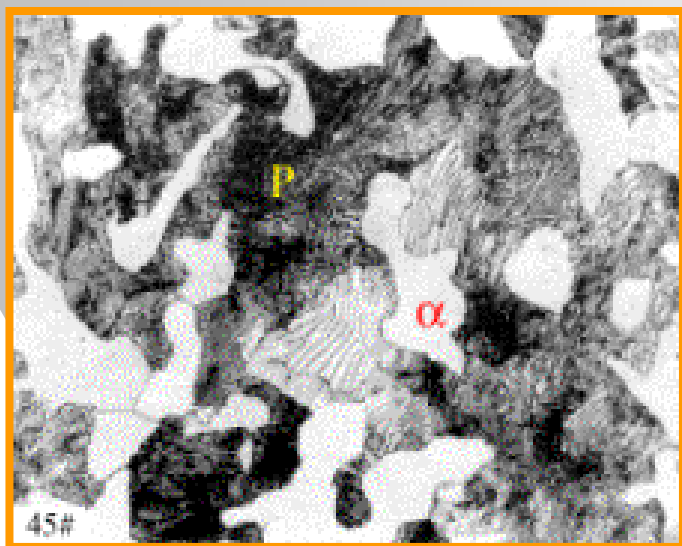


图 碳钢的淬火加热温度范围

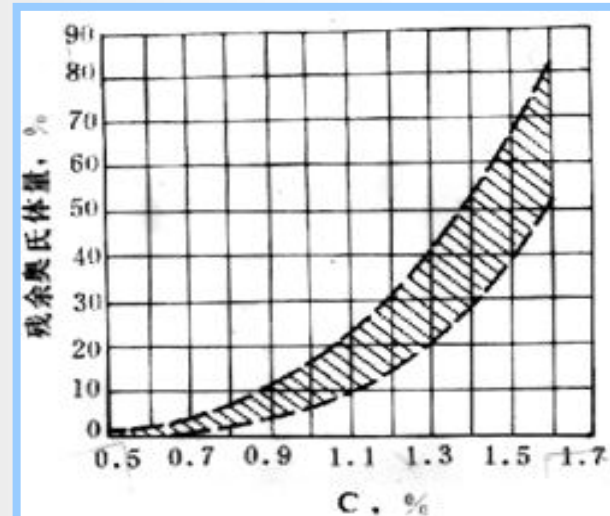


第二节 钢的普通热处理工艺

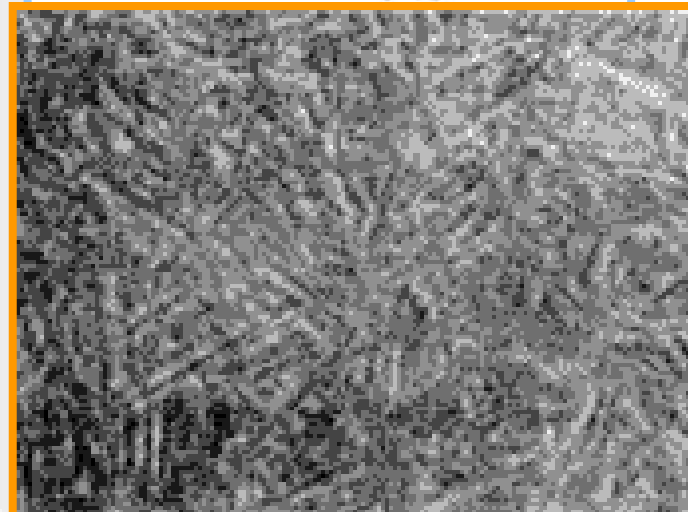
亚共析钢淬火组织:

❖ $\leq 0.5\%C$ 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



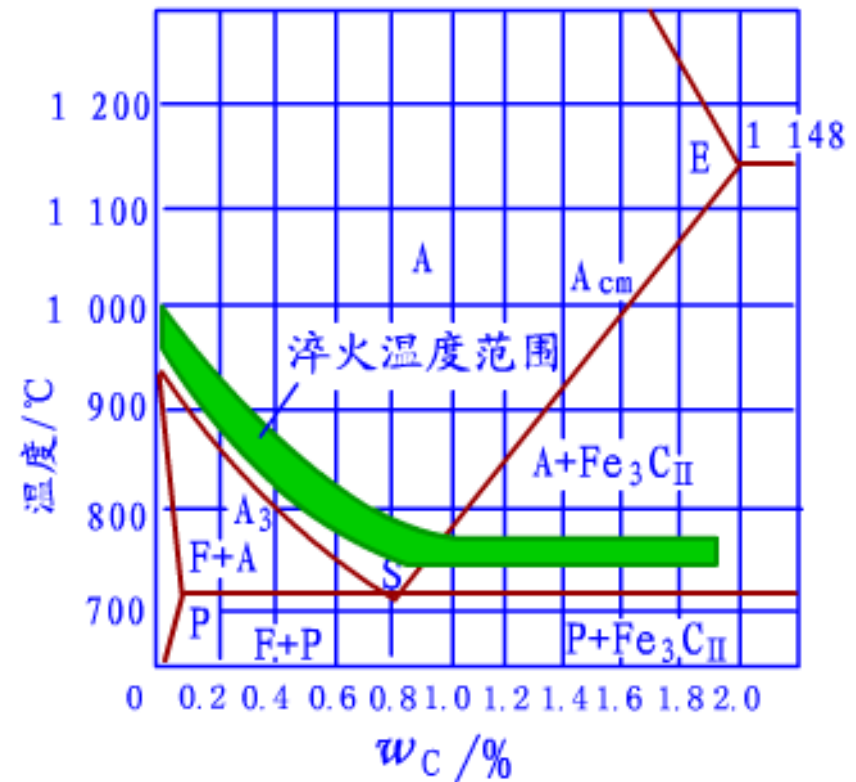
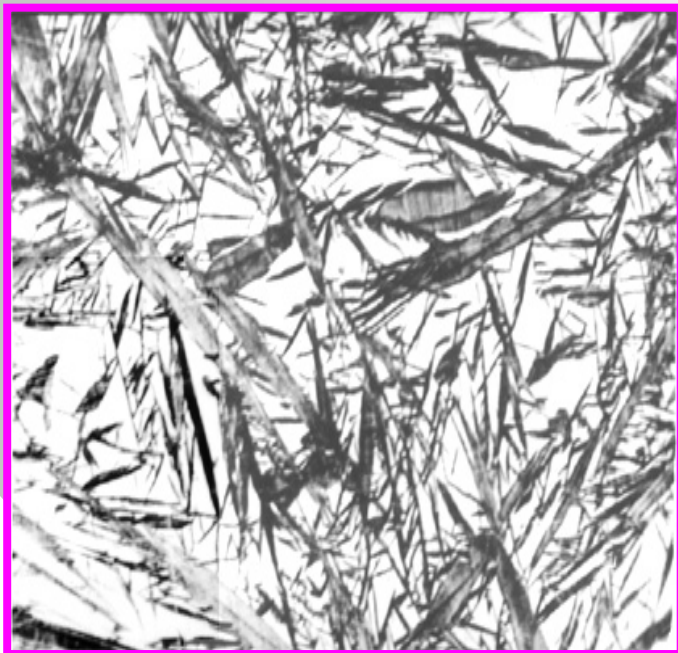
第三节 钢的普通热处理工艺



❖ (2) 共析钢

淬火温度： $A_{c1}+30-50^{\circ}\text{C}$ ；

淬火组织： $M+A'$ 。



碳钢的淬火加热温度范围

第三节 钢的普通热处理工艺

(3) 过共析钢

- ❖ **淬火温度:** $Ac_1+30-50^{\circ}C$.
- ❖ 温度高于 Ac_{cm} , 则A晶粒粗大、含碳量高, 淬火后M晶粒粗大、A'量增多, 使钢硬度、耐磨性下降, 脆性、变形开裂倾向增加。
- ❖ **淬火组织:** $M+Fe_3C_{\text{颗粒}}+A'$ 。
(预备组织为P球)



T12钢 (含1.2%C) 正常淬火组织



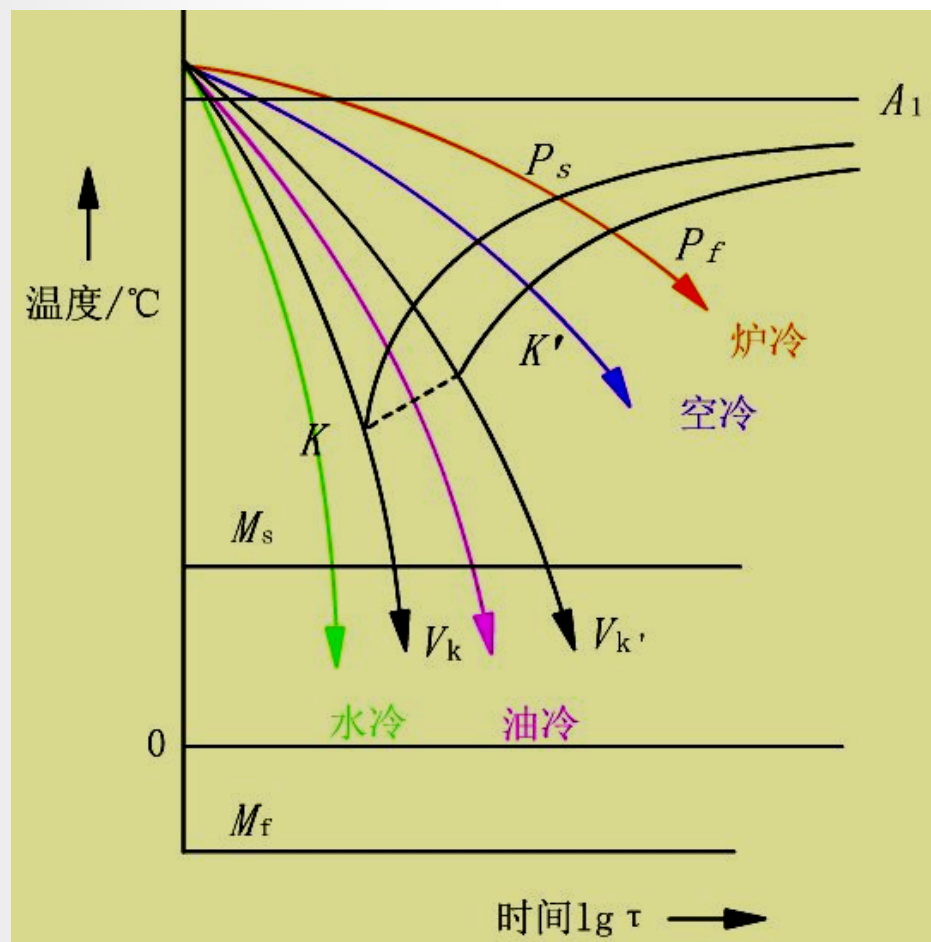
总结

钢种	淬火温度(°C)	最终组织
亚共析钢 $W_c \leq 0.5\%$	$A_{c3} + 30 \sim 50$	M
亚共析钢 $W_c > 0.5\%$	$A_{c3} + 30 \sim 50$	M + A _残
共析钢	$A_{c1} + 30 \sim 50$	M + A _残
过共析钢	$A_{c1} + 30 \sim 50$	M + Fe ₃ C + A _残



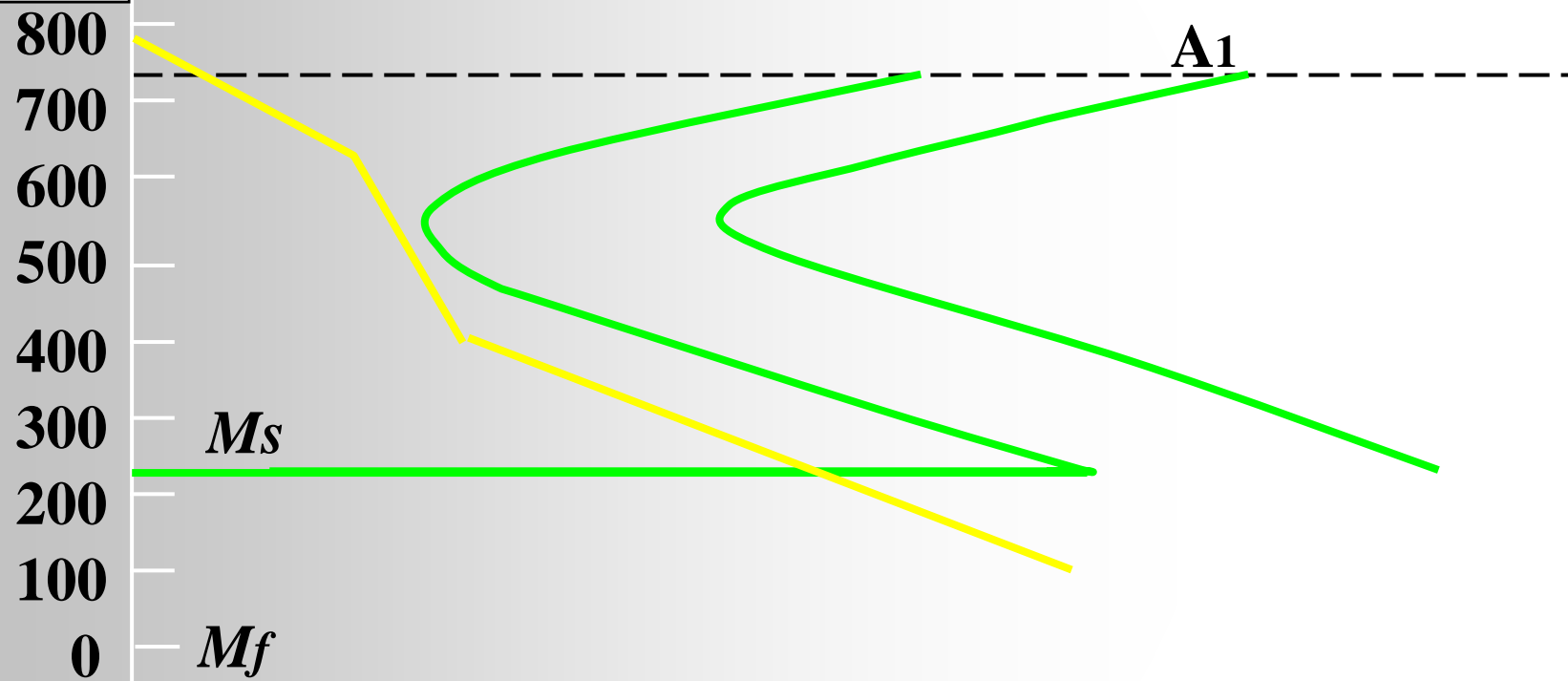
(二) 淬火冷却介质

❖ 为得到M组织，淬火冷却速度必须大于临界冷却速度 V_k 。但这必然会产生很大的内应力，往往会引起工件变形和开裂，为此人们提出了理想的淬火冷却曲线。





淬火冷却介质



在“鼻尖”温度以上，可以缓冷；在“鼻尖”温度附近则必须快冷，以躲开“鼻尖”，保证不产生非马氏体相变；而在 M_s 点附近又可以缓冷，以减轻马氏体转变时的相变应力。



到目前为止，在实际生产中还没有找到符合这一理想曲线的冷却介质。

► **现有淬火介质有：**水、含盐水溶液、油、盐浴、碱浴等。

● **水：**

冷却能力较强，中温够快，低温不够慢—用于碳钢。

● **油：**

冷却能力较低，中温不够快，低温够慢—用于合金钢。

● **盐、碱浴：**

冷却能力介于上两者之间，用于要求变形较小的合



淬火介质		水	油	盐水	碱浴	硝酸盐浴
冷速	650 ~	600°C/s 快	150°C/s 太慢	1000~ 1200°C/s快	比油快	350°C/s
	200 ~	270°C/s 太快	30°C/s 慢	300°C/s太快	比油弱	10°C/s
特点		<ul style="list-style-type: none"> ●高温冷速快，可保证工件淬硬 ●低温冷速快，工件易变形开裂 ●冷却能力对水温敏感 ●杂质使冷却能力下降 	<ul style="list-style-type: none"> ●低温冷速慢，工件不易变形、开裂 ●高温冷速慢，工件易分解，淬不硬 ●易老化、易燃 ●油温增加，冷却能力增加 (20~80°C) 	<ul style="list-style-type: none"> ●冷却能力强 ●工件表面质量好，硬度均匀 ●易变形开裂 ●易腐蚀 	<ul style="list-style-type: none"> ●既能保证工件淬硬，又能使变形开裂程度减少 ●流动性好 ●工作环境差 	
用途		碳钢	合金钢 小截面碳钢	形状简单，截面尺寸大的碳钢	小件、形状复杂、精度要求高的工件	



◆常用淬火介质

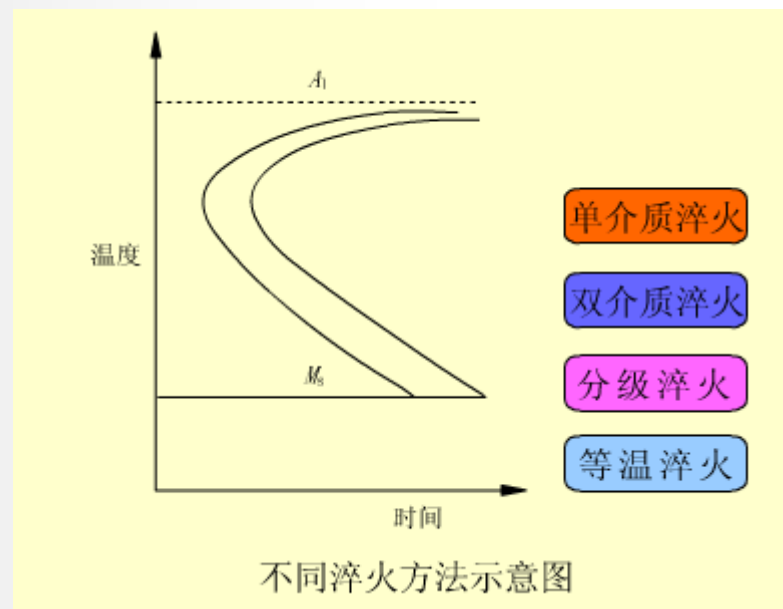


第三节 钢的普通热处理工艺

(三)、淬火方法

1.单液淬火

- 优点：工艺简单，操作方便。
- 缺点：淬火应力大，工件易变形。
- 适用：形状简单的中、低碳钢工件。





第三节 钢的普通热处理工艺

单液淬火法



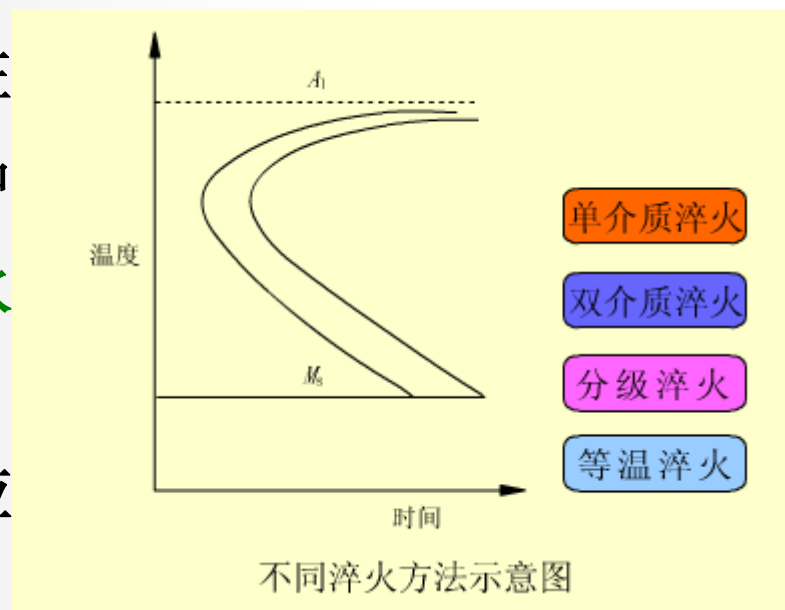


第三节 钢的普通热处理工艺



2、双液淬火法

- ❖ 工件先在一种冷却能力强的介质中冷，却躲过鼻尖后，再在另一种冷却能力较弱的介质中发生马氏体转变的方法。如**水淬油冷，油淬空冷**。
- ❖ 优点：大大减小工件的淬火应力和变形开裂倾向。
- ❖ 缺点：操作难度较高。
- ❖ 适用：适用于中等尺寸、形状复杂的高碳钢和尺寸较大的合金钢工件。





第三节 钢的普通热处理工艺

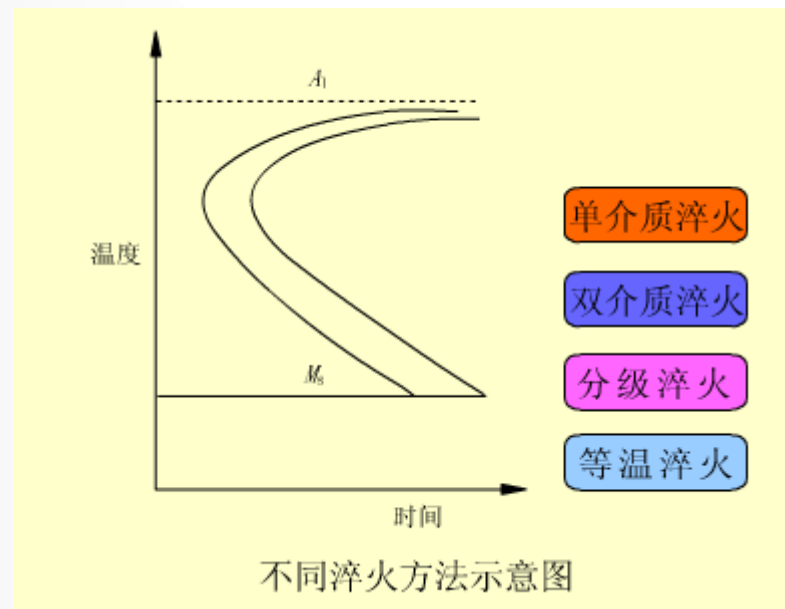
双液淬火法



第三节 钢的普通热处理工艺

3、分级淬火法

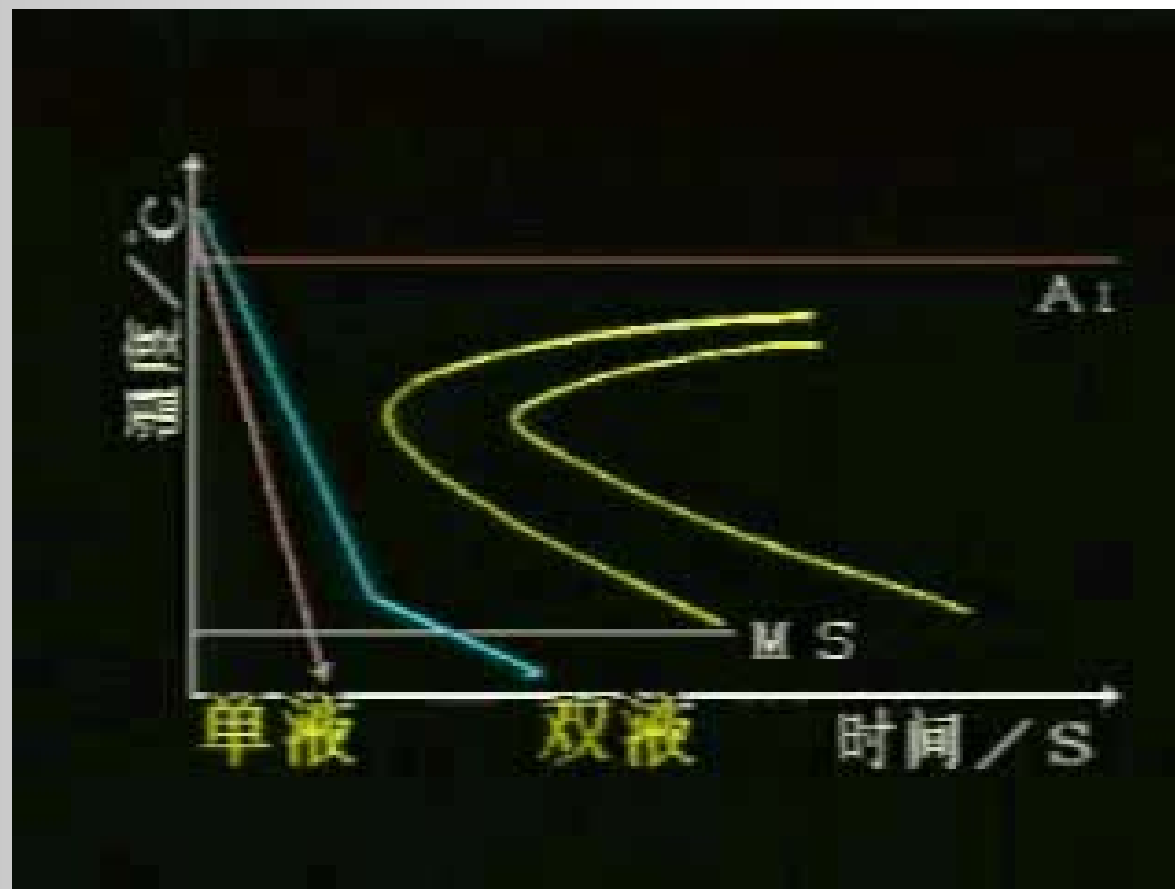
- ❖ 在 M_s 附近的盐浴或碱浴中淬火，待内外温度均匀后再取出缓冷。
- ❖ 优点：操作简单。可有效防止应力和开裂。
- ❖ 缺点：需要盐浴炉
- ❖ 适用：适用于尺寸较小（ $\phi 10\sim 12\text{mm}$ 的碳钢或 $\phi 20\sim 30\text{mm}$ 的合金钢），要求变形小、尺寸精度高的工件如刀具、模具等。





第三节 钢的普通热处理工艺

分级淬火法

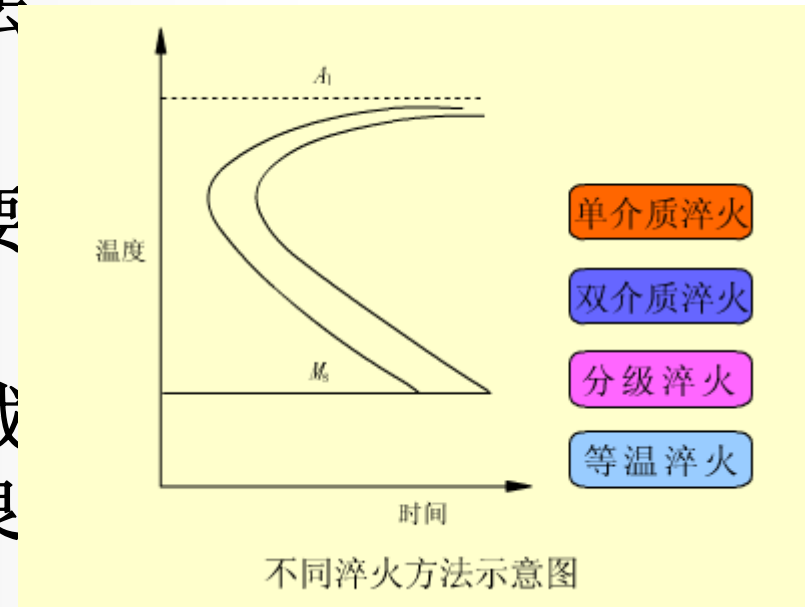




第三节 钢的普通热处理工艺

4、等温淬火法

- ❖ 将工件在稍高于 M_s 的盐浴或碱浴中保温足够长时间，从而获得下贝氏体组织的淬火方法
- ❖ 目的：得到B下
- ❖ 优缺点：同分级淬火，也需要盐浴炉。
- ❖ 适用：主要适于形状复杂、截面不大、要求精度高并具有良好的强韧性的零件。
如一些工具、模具等工件。





第三节 钢的普通热处理工艺

等温淬火法





直径为10 mm 的共析钢小试样加热 $A_c 1 + 60^\circ C$ ，用图1-6 所示的冷却曲线进行冷却，分析其所得到的组织，说明各属于什么热处理方法。

答：

a — M + A' 单液淬火

b — M + A' 分级淬火

c — T + M + A' 油冷

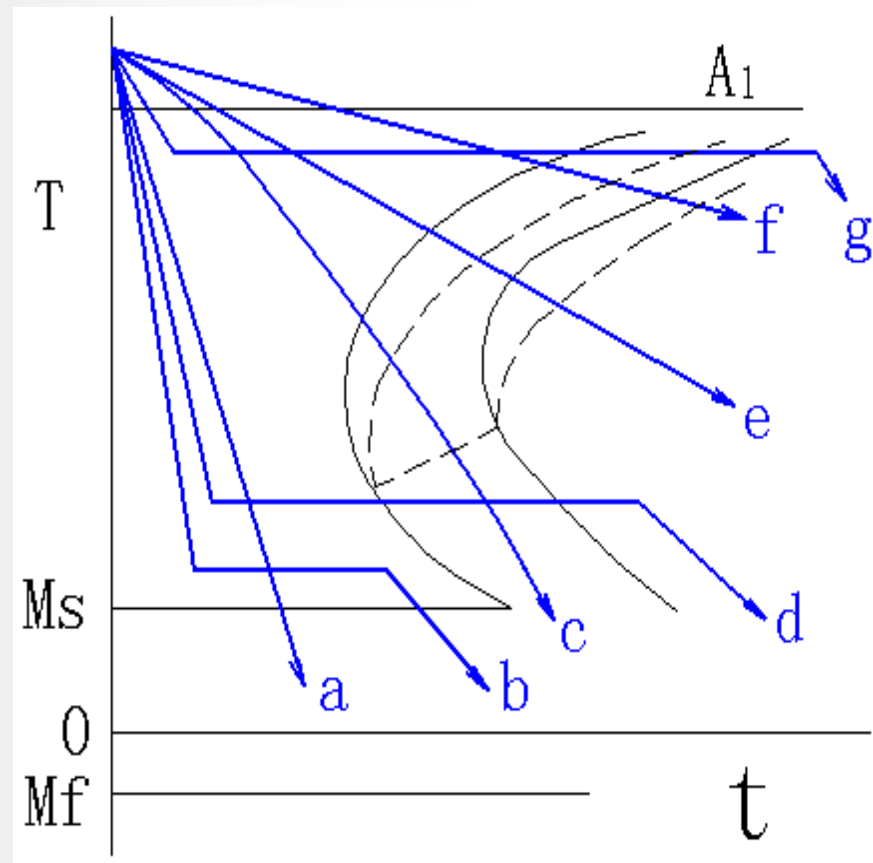
淬火

d — 下B 等温淬火

e — S 正火

f — P 完全退火

g — P 等温退火





亚共析钢 连续冷却转变

炉冷 \rightarrow **F + P**

空冷 \rightarrow **F + S**

油冷 \rightarrow **T + M**

水冷 \rightarrow **M**

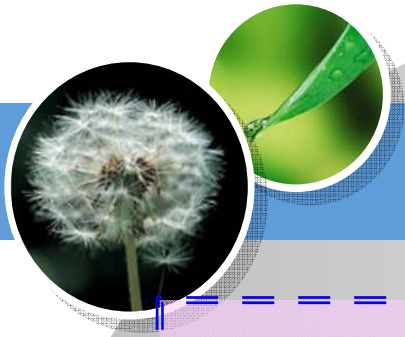
过共析钢 连续冷却转变

炉冷 \rightarrow **P + Fe₃C_{II}**

空冷 \rightarrow **S + Fe₃C_{II}**

油冷 \rightarrow **T + M + A'**

水冷 \rightarrow **M + A'**



中国在春秋晚期已掌握冶铁技术。战国时期，冶铁业已逐渐盛行，到了晚期，不仅能炼出高碳钢，并掌握了淬火技术，于是开始进入以铁兵器代替铜兵器的时代。战国晚期还出现了铁制铠甲。



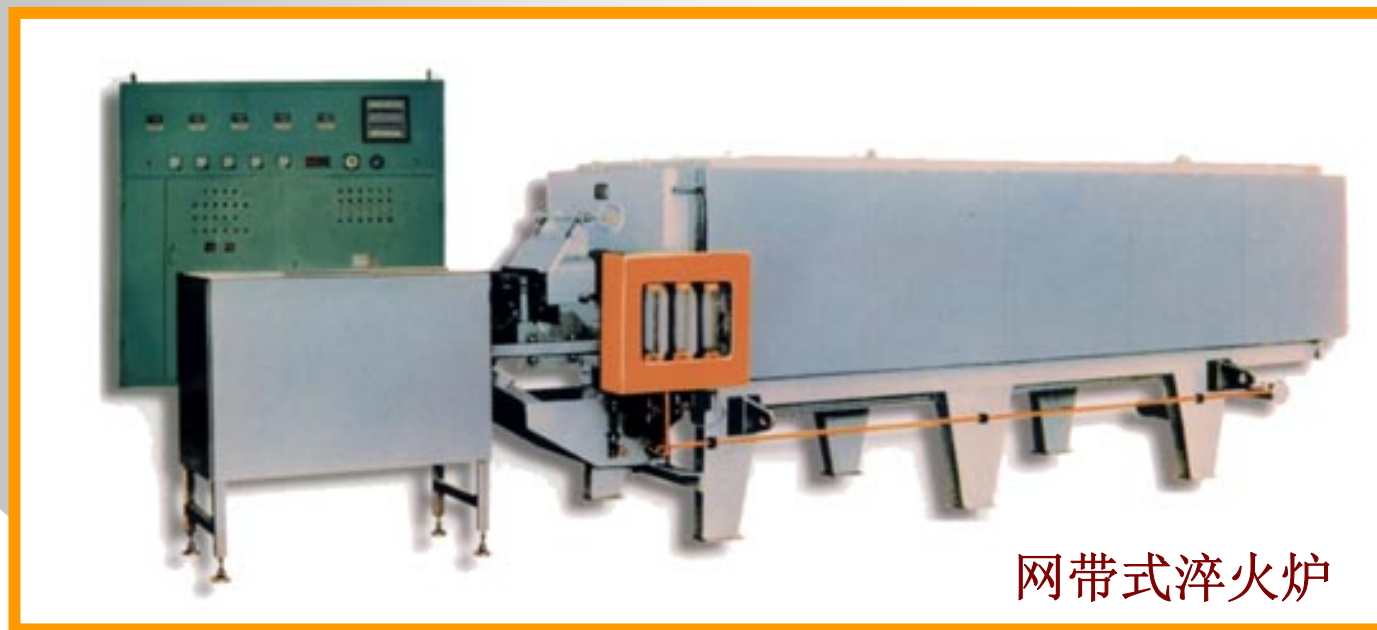


- 西汉《史记·天官书》中有“水与火合为淬”一说，正确地说出了钢铁加热、水冷的淬火热处理工艺要点。
- 《汉书·王褒传》中记载有“清水淬其锋”的制剑技术。
- 明代科学家宋应星在《天工开物》一书中对钢铁的退火、淬火、渗碳工艺作了详细的论述。

第三节 钢的普通热处理工艺

(四)、钢的淬透性

- ❖ 淬透性是钢的主要热处理性能。
- ❖ 是选材和制订热处理工艺的重要依据之一。



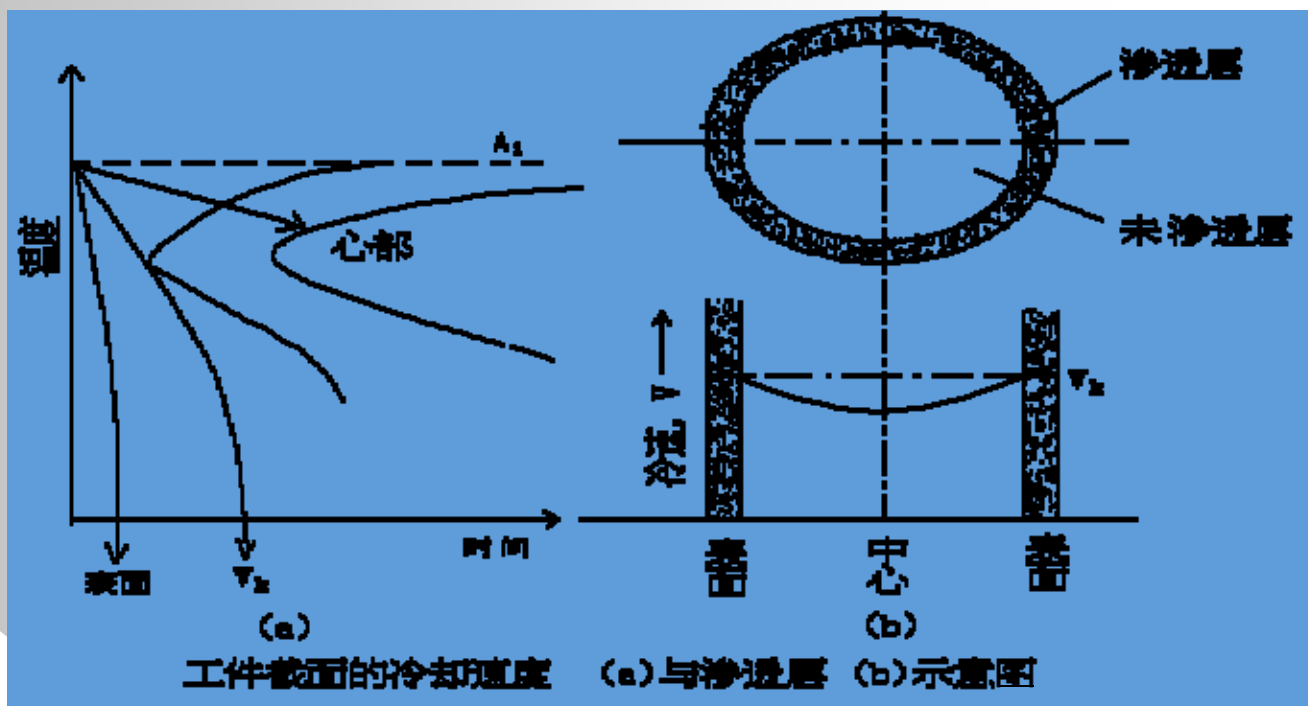
网带式淬火炉



第三节 钢的普通热处理工艺

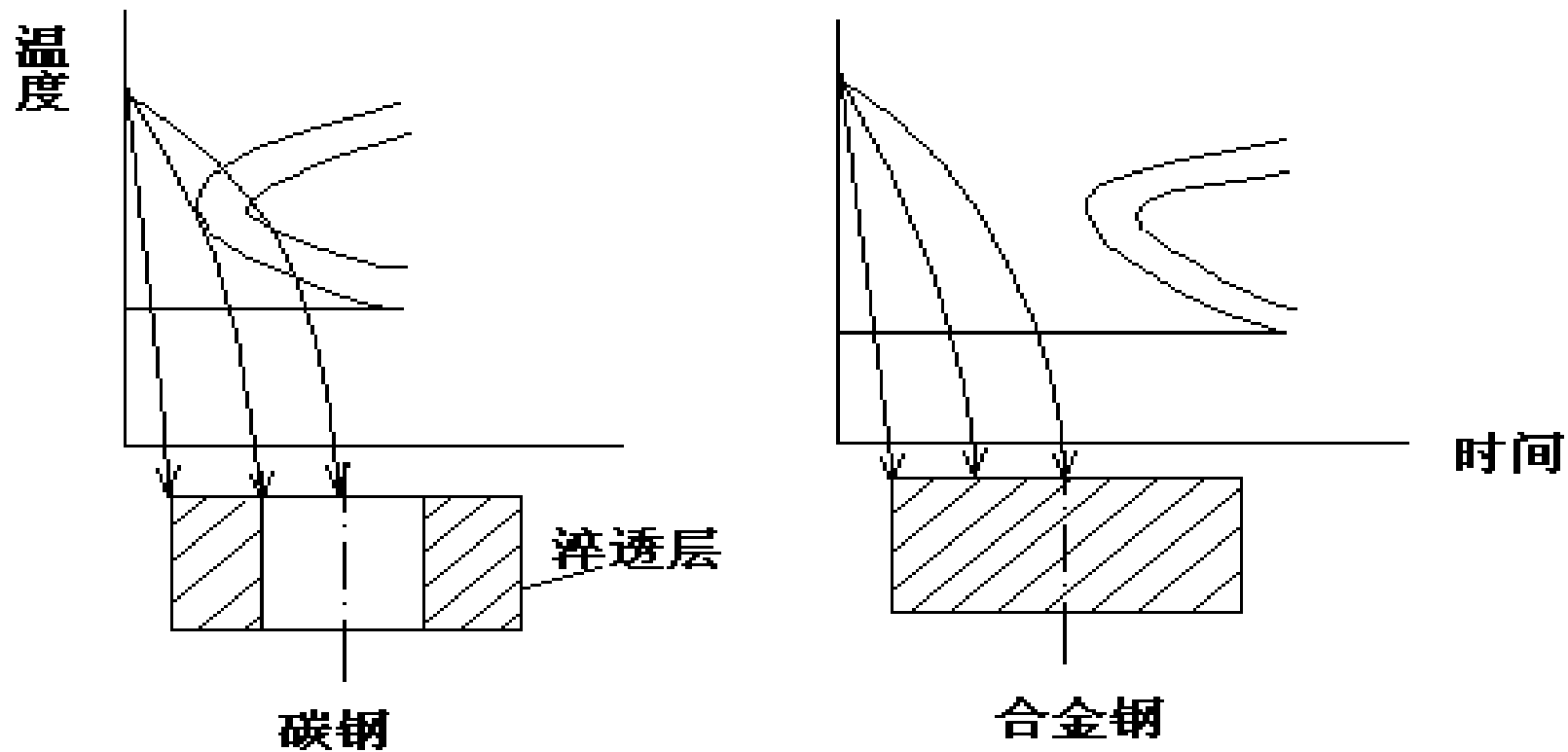
1、淬透性的概念

- ❖ 淬透性是指钢在淬火时**获得淬硬层深度的能力**。其大小是用规定条件下淬硬层深度来表示。





钢的淬透性取决于其临界冷却速度 V_k ，临界冷却速度 V_k 越小，则奥氏体越稳定，钢的淬透性越高。 V_k 取决于C曲线的位置，C曲线越靠右， V_k 越小。





2. 影响淬透性的因素 —— V_K , C曲线

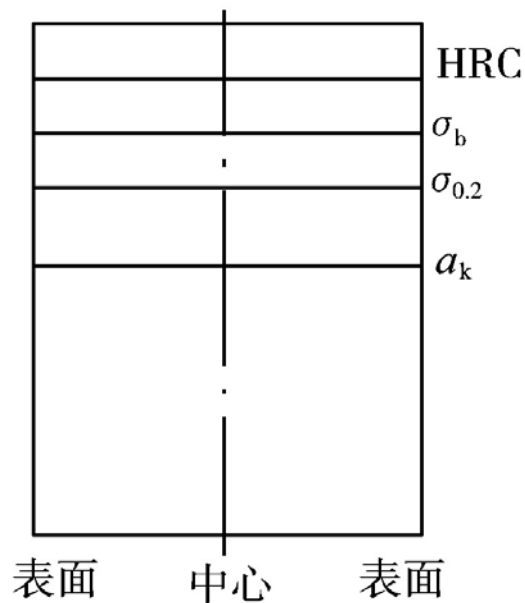
影响C曲线的因素

C%	亚共析钢 C% \uparrow \rightarrow 淬透性 \uparrow , 过共析钢 C% \uparrow \rightarrow 淬透性 \downarrow
奥氏体化温度	T \uparrow t \uparrow \rightarrow 淬透性 \uparrow
合金元素	除Co%以外, C曲线右移, \uparrow 淬透性
未溶第二相	\downarrow 淬透性

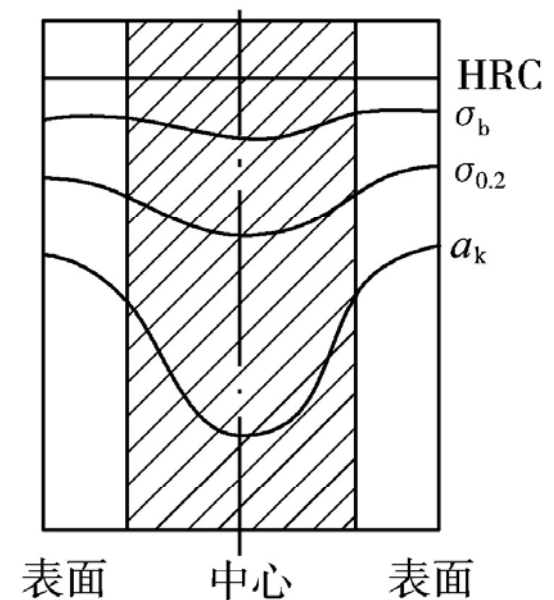


第三节 钢的普通热处理工艺

淬透性不同的钢材淬火后沿截面的组织和力学性能差别很大。



(a)高淬透性钢



(b)低淬透性钢



第三节 钢的普通热处理工艺



3. 淬透性的应用

- ❖ 完全淬透的工件，整个截面上的性能均匀一致，如未淬透，截面各处的性能不均匀。淬透性小，淬硬层就浅，其承载能力就弱，所以，选材和制定热处理工艺要注意钢材的淬透性，有以下几种情况：
- ❖ （1）大截面、动载荷及交变载荷下工作的重要零件，选淬透性好的钢材。如：锻锤、大电机轴、连杆螺栓、拉杆等；
- ❖ （2）承受弯曲、扭转应力的零件，受力在表层，心部不要求高硬度，选淬透性一般的钢材；
- ❖ （3）形状复杂或对变形要求严格的零件，为减小变形，防止开裂，选选淬透性较好的钢材，以便选冷却能力较弱的淬火介质或双介质淬火。



第三节 钢的普通热处理工艺



(五)、钢的淬硬性

- **淬硬性**：是指钢在理想条件下淬火成马氏体后所能达到的最高硬度。
- **影响钢的淬硬性的因素**主要取决于钢含碳量。

低碳钢淬火的最高硬度值低，淬硬性差；
高碳钢淬火的最高硬度值高，淬硬性好。



第三节 钢的普通热处理工艺

淬透性与淬硬性？

淬透性是钢淬火时获得M的能力！
取决于 V_K （上临界冷却速度）

淬硬性是钢淬火获得M的硬度！
取决于M中C%

淬透性与具体工件的淬透深度？

淬透性是钢的一种属性，在相同的奥氏体化温度下淬火时，其淬透性是不变的！

具体工件的淬透深度是指在实际生产条件下得到半马氏体区至工件表面的距离，是不确定的，受淬透性、工件尺寸、冷却介质等的影响。



第三节 钢的普通热处理工艺

淬硬性与淬透性之间的关系：

钢 种	淬硬性	淬透性
碳素结构钢 (20)	低	小
碳素工具钢(T10A)	高	小
低碳合金结构钢 (18Cr2Ni4WA)	低	大
高碳高合金工具钢 (Cr12MoV)	高	大



(六)、淬火缺陷与防止措施

1、氧化与脱碳

- ❖ **氧化**，是指铁的氧化，即在工件表面形成一层松脆的氧化铁皮。氧化不仅造成金属的损耗，还影响工件的承载能力和表面质量等。
- ❖ **脱碳**，是指气体介质和钢表面的碳起作用而逸出，使材料表面含碳量降低。脱碳会降低工件表层的强度、硬度和疲劳强度，对于弹簧、轴承和各种工具、模具等，脱碳是严重的缺陷。
- ❖ 为了防止氧化和脱碳，对重要受力零件和精密零件，通常应在盐浴炉内加热。



第三节 钢的普通热处理工艺

2、过热和过烧

- ❖ 钢在淬火加热时，由于加热温度过高或高温下停留时间过长而发生奥氏体晶粒显著粗化的现象，称为过热。加热温度达到固相线附近，使晶界氧化并部分熔化的现象称为过烧。
- ❖ 工件过热后，晶粒粗大，不仅降低钢的力学性能（尤其是韧性），也容易引起变形和开裂。过热可以用正火处理予以纠正，而过烧后的工件只能报废。
- ❖ 为了防止工件的过热和过烧，必须严格控制加热温度和保温时间。



第三节 钢的普通热处理工艺



3、变形与开裂

- ❖ 淬火内应力是造成工件变形和开裂的原因。对于变形量小的工件可采取某些措施予以纠正，而变形量太大或开裂的工件只能报废。
- ❖ 为了防止变形和开裂的产生，可采用不同的淬火方法（如分级淬火或等温淬火等）或在设计上采取一些措施（如结构对称、截面均匀、避免尖角等）。

4、硬度不足

- ❖ 由于加热温度过低、保温时间不足、冷却速度过低或表面脱碳等原因造成的。一般情况下，
- ❖ 可采用重新淬火消除，但淬火前要进行一次退火或正火处理。



淬火钢一般不能直接使用，必须进行回火。

- 淬火后得到的是性能很脆的马氏体组织，并存在内应力，零件容易变形和开裂。
- 淬火马氏体和残余奥氏体都是不稳定的组织在零件工作过程中会发生分解，导致尺寸的变化。这对于精密零件是不允许的。
- 为了获得要求的强度、硬度、塑性与韧性，以满足零件的使用要求。

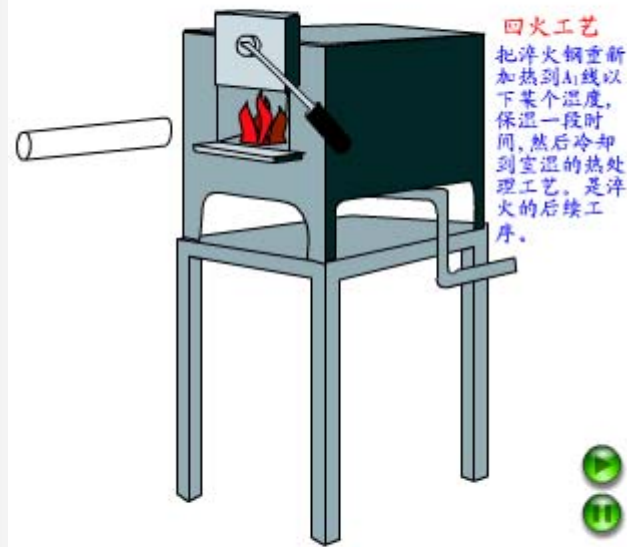


第三节 钢的普通热处理工艺

四、钢的回火

一、定义：将淬火后钢件再加热到 A_{c1} 以下的某一温度，保温一定时间后，然后冷却到室温的热处理工艺。

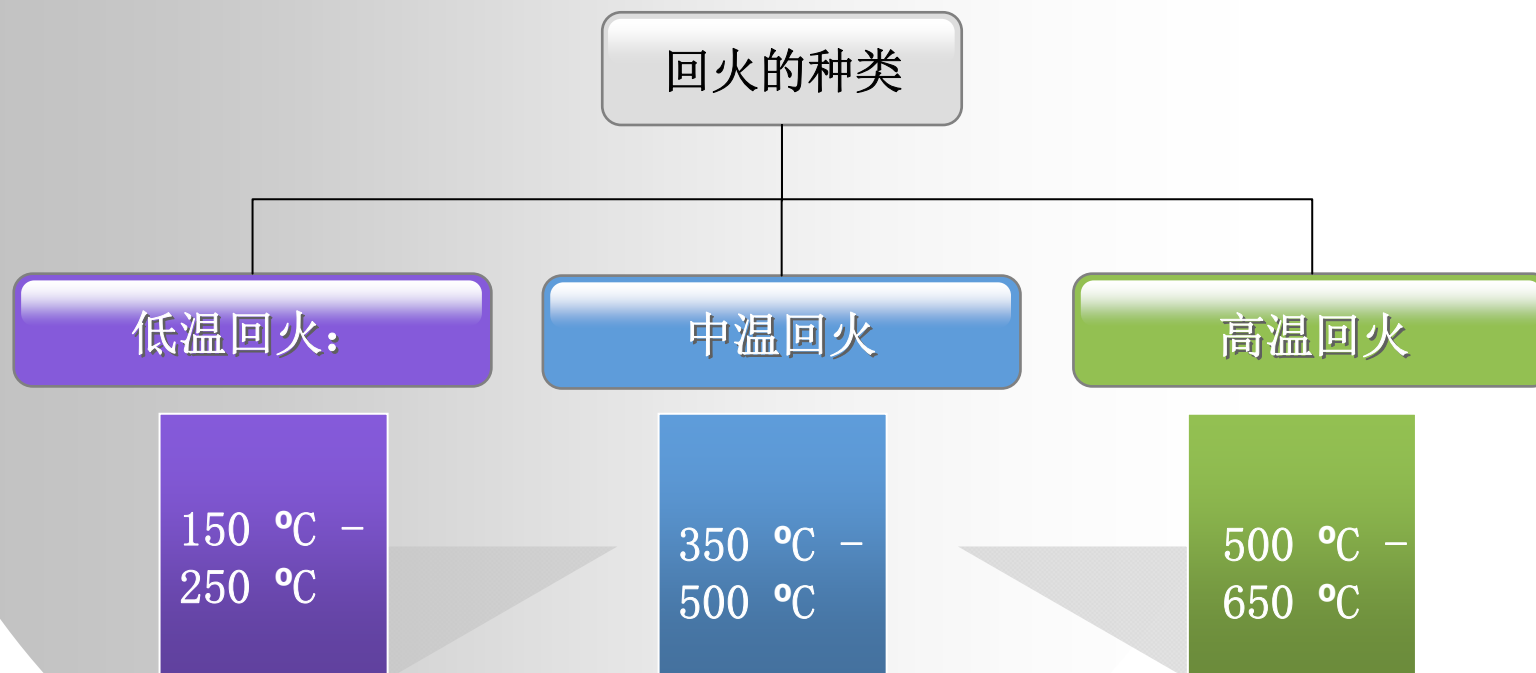
二、目的：
消除淬火应力，降低脆性；
稳定工件尺寸；
调整淬火零件的力学性能。



第三节 钢的普通热处理工艺

三、回火的种类

按回火温度的不同，回火可分以下三种：





三、淬火钢回火时组织与性能的变化

四阶段

第一阶段 $T \leq 200^\circ\text{C}$
M分解

第二阶段 $T \in (200, 300^\circ\text{C})$
残余A转变

第三阶段 $T \in (300, 400^\circ\text{C})$
碳化物析出

第四阶段 $T > 400^\circ\text{C}$
 Fe_3C 的聚集体长大与F的再结晶



第一阶段：马氏体的分解 $T \leq 200^\circ\text{C}$

C有一定的扩散能力，马氏体中过饱和的碳以亚稳定的 ε -碳化物($\text{Fe}_{2.4}\text{C}$ ，正交晶格)形式析出，弥散分布、极细、粒状，马氏体的过饱和度减小。

- **组织：回火马氏体组织 ($M_{\text{回}}$) Tempered Martensite**

低度过饱和 α 固溶体+高度弥散 ε 相的混合物。

- 晶格畸变程度下降，淬火内应力减少
- 回火马氏体基本保留了淬火马氏体的力学性能



第二阶段：残余奥氏体的转变 (200~300℃)

C的扩散能力增强，碳化物的析出 \Rightarrow M分解使得体积 \downarrow \Rightarrow 残A受到的压力 \downarrow ， $A_{残} \Rightarrow B_{下}$ 。M的碳质量分数降为 $w_c=0.15\% \sim 0.20\%$ ，

- 组织仍主要是回火马氏体
- 淬火应力进一步降低
- 钢的硬度降低并不显著，屈服强度略有上升。



第三阶段：碳化物析出 (300~400 °C)

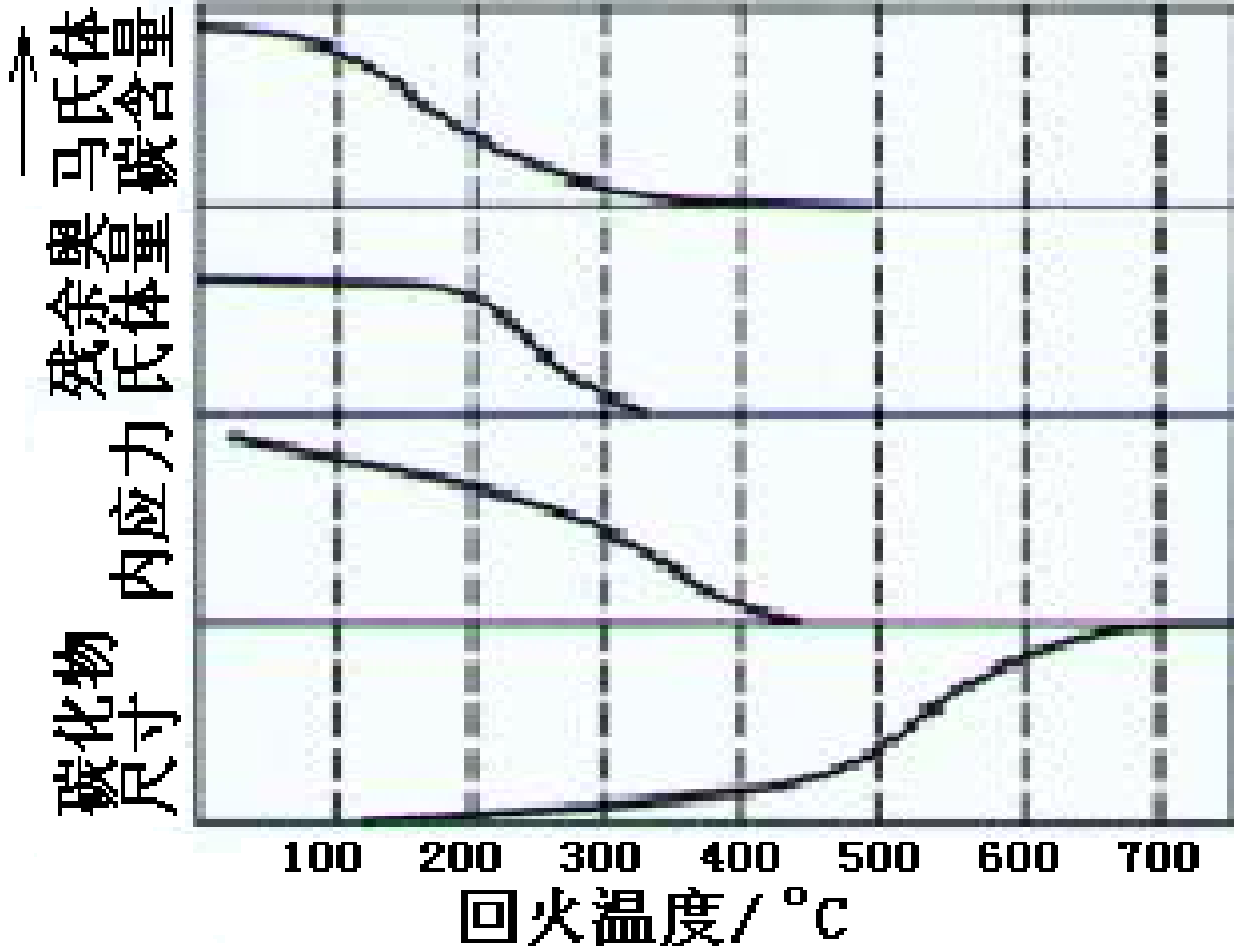
碳的扩散能力继续增加：

- ❖ C 从过饱和的 α -Fe中析出 \Rightarrow 铁素体 \Rightarrow M 消失
- ❖ 不稳定的 ε -(Fe_{2.4}C) \Rightarrow Fe₃C;
- 铁素体基体内分布着极细小的渗碳体 (粒状颗粒)
- 组织为：回火屈氏体组织 (T_回) Tempered Troostite
针状铁 F + 细颗粒状的Fe₃C的混合物。
- 淬火时晶格畸变所造成的内应力大大消除。
- 钢的硬度、强度降低，塑性、韧性上升



第四阶段：渗碳体的聚集长大和铁素体再结晶 $T \geq 400^\circ\text{C}$

- ❖ 回火温度高于 400°C 时，渗碳体球将逐渐聚集长大，形成较大的粒状渗碳体，回火温度越高，球粒愈粗大；
- ❖ 当回火温度上升到 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ ，铁素体逐渐发生再结晶，使针状铁素体转变为多边形铁素体；
- 组织为：回火索氏体组织 ($S_{\text{回}}$) Tempered Sorbite
等轴状的F + 球状 Fe_3C 的混合物。
- 钢的强度、硬度进一步下降，塑性、韧性进一步上升

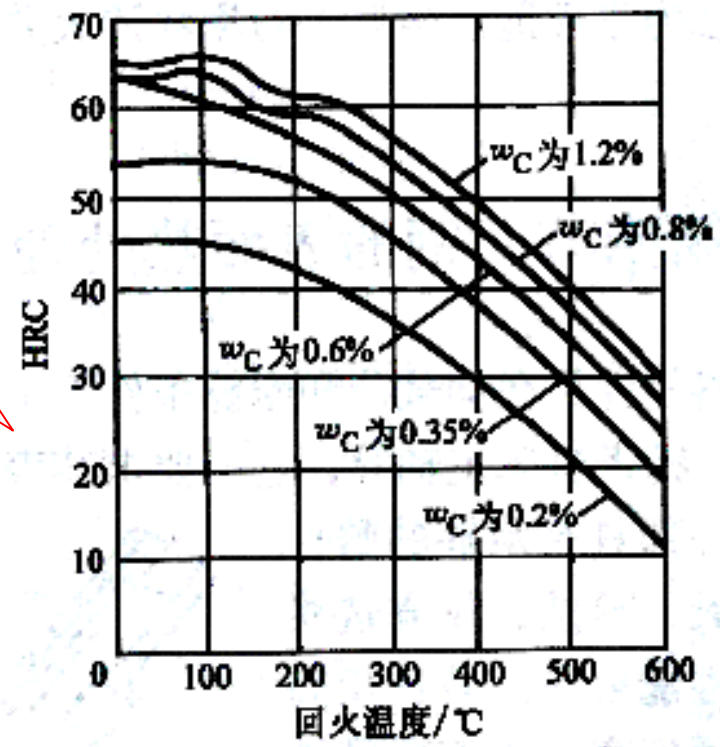




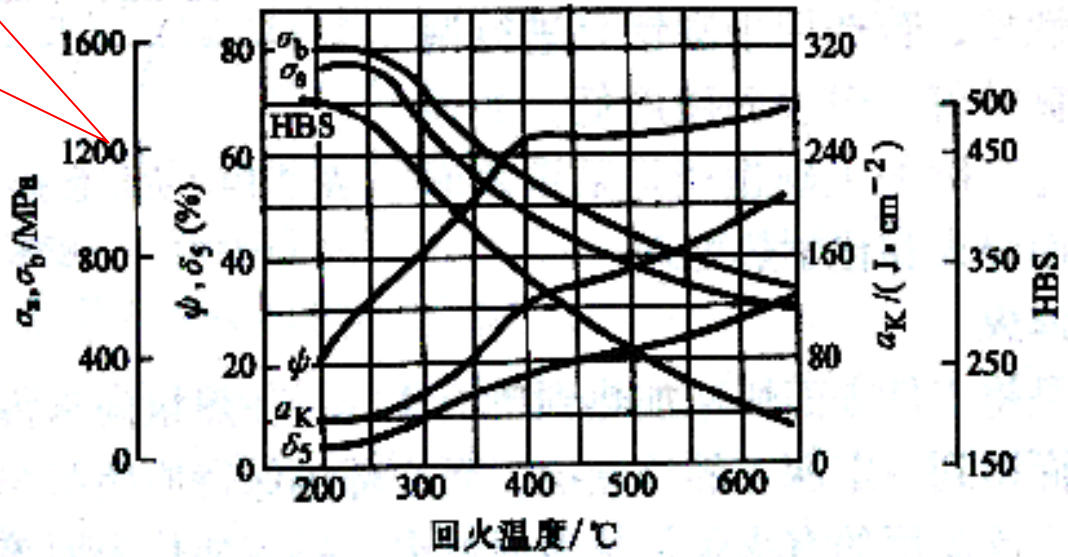
不同含碳量钢的硬度随回火温度升高而降低

35钢力学性能与回火温度的关系

随回火温度提高，淬火钢性能总的变化规律是：**强度、硬度下降，塑性、韧性上升**

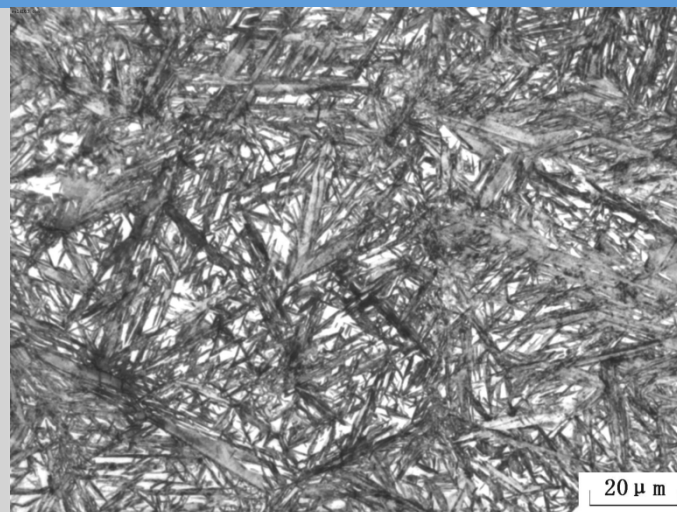


a)

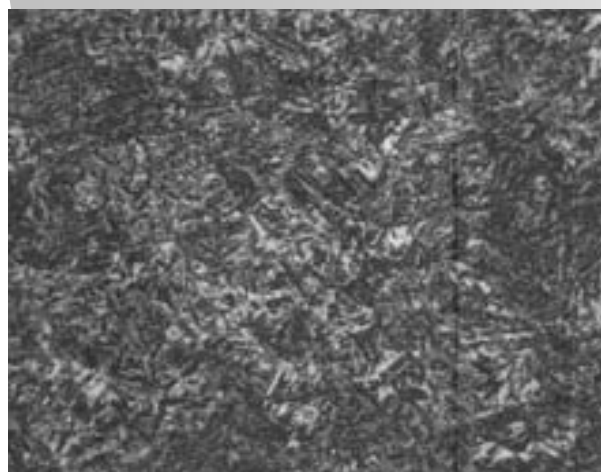


b)

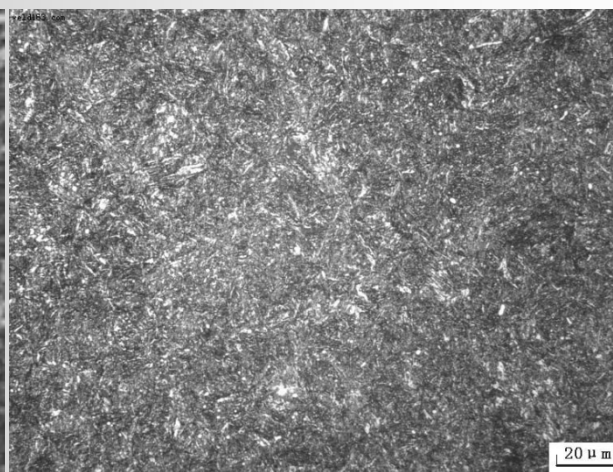
回火后钢的组织



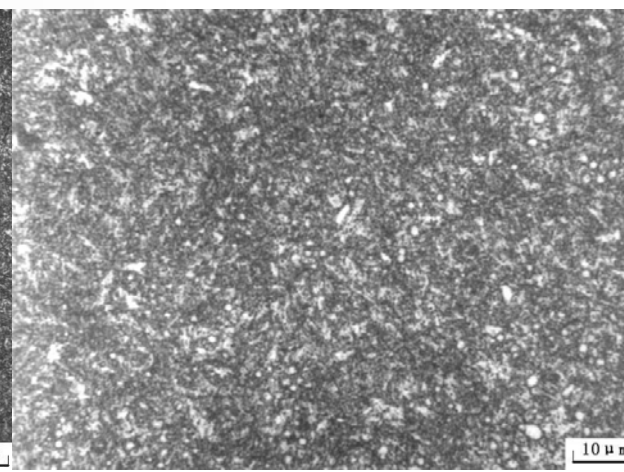
马氏体



回火马氏体



回火屈氏体



回火索氏体

四、回火的种类

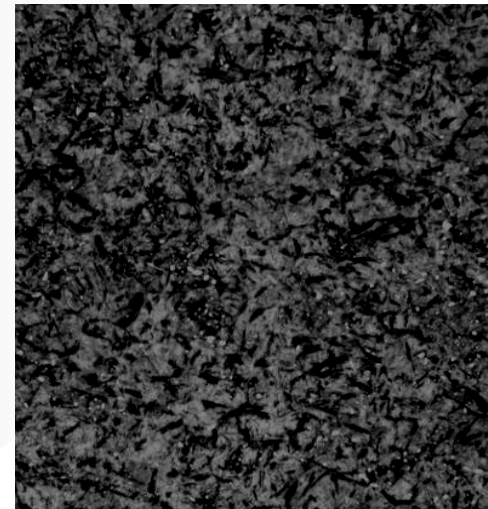
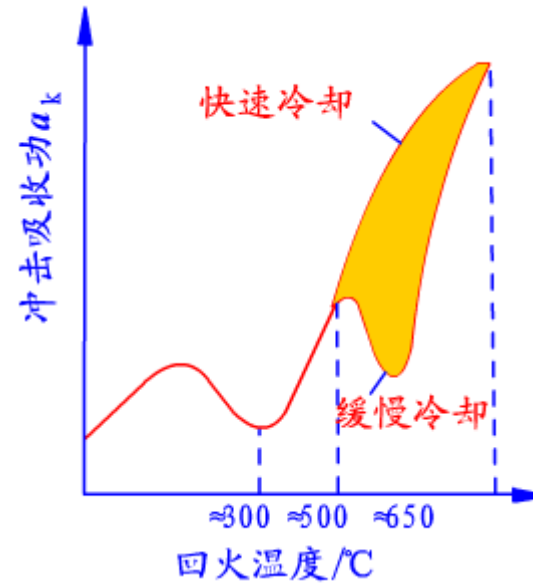
1、低温回火（150-250）°C

组织： $M_{回}$ (过饱和 α 固溶体 + ϵ 碳化物)

目的： 保持淬火钢的高硬度和高耐磨性，降低淬火力，减少钢的脆性。硬度为58-64HRC。

应用： 适用于高碳钢和合金钢制作的各类刀具、模具、滚动轴承、渗碳及表面淬火的零件。

- 如T12钢锉刀采用
- 760°C水淬+200°C回火。



回火M

第三节 钢的普通热处理工艺

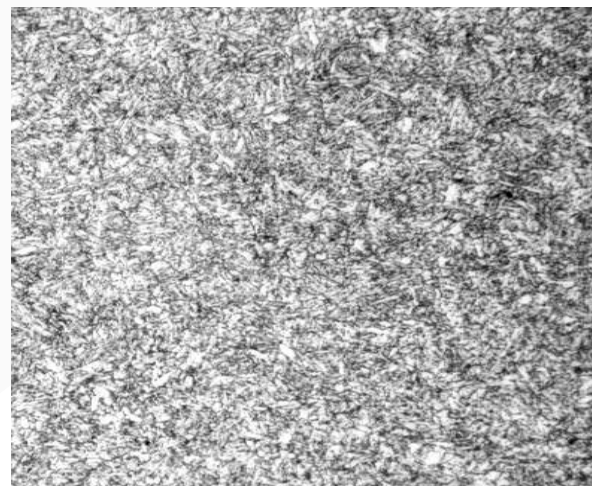
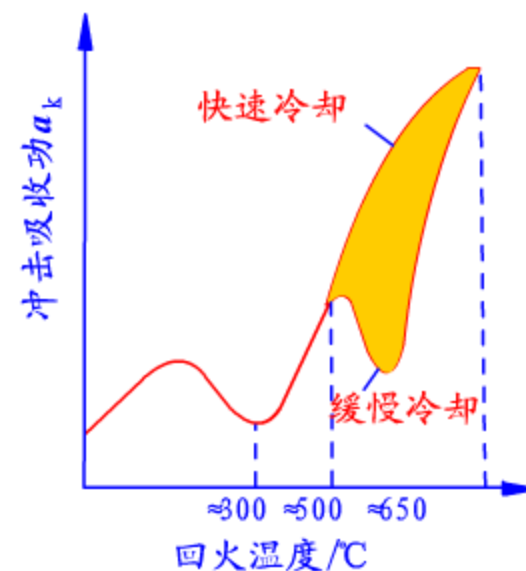
2、中温回火（350-500）℃

组织：T回（F_{针状} + Fe₃C_{细颗粒状}）。

目的：获得高的弹性极限、屈服点和较好的韧性。又称弹性处理。硬度为35-50HRC。

应用：弹性零件及热锻模具等。

- 如65钢弹簧采用
- 840℃油淬+480℃回火。



回火T

第三节 钢的普通热处理工艺

3、高温回火（500-650）°C

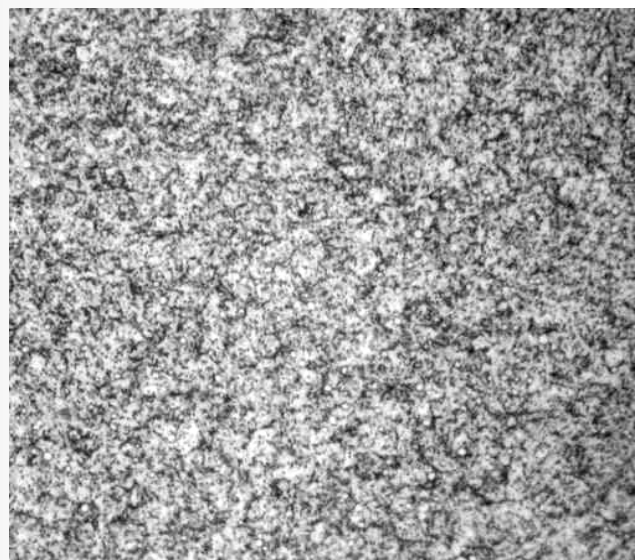
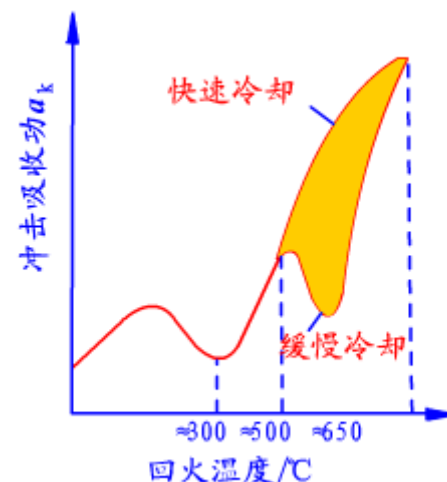
组织： S_回 (F_{等轴状} + Fe₃C_{球状})

目的： 获得良好的综合力学性能。硬度为HRC25-35。

应用： 各种重要结构零件如螺栓、齿轮及轴承。

淬火 + 高温回火 = 调质处理

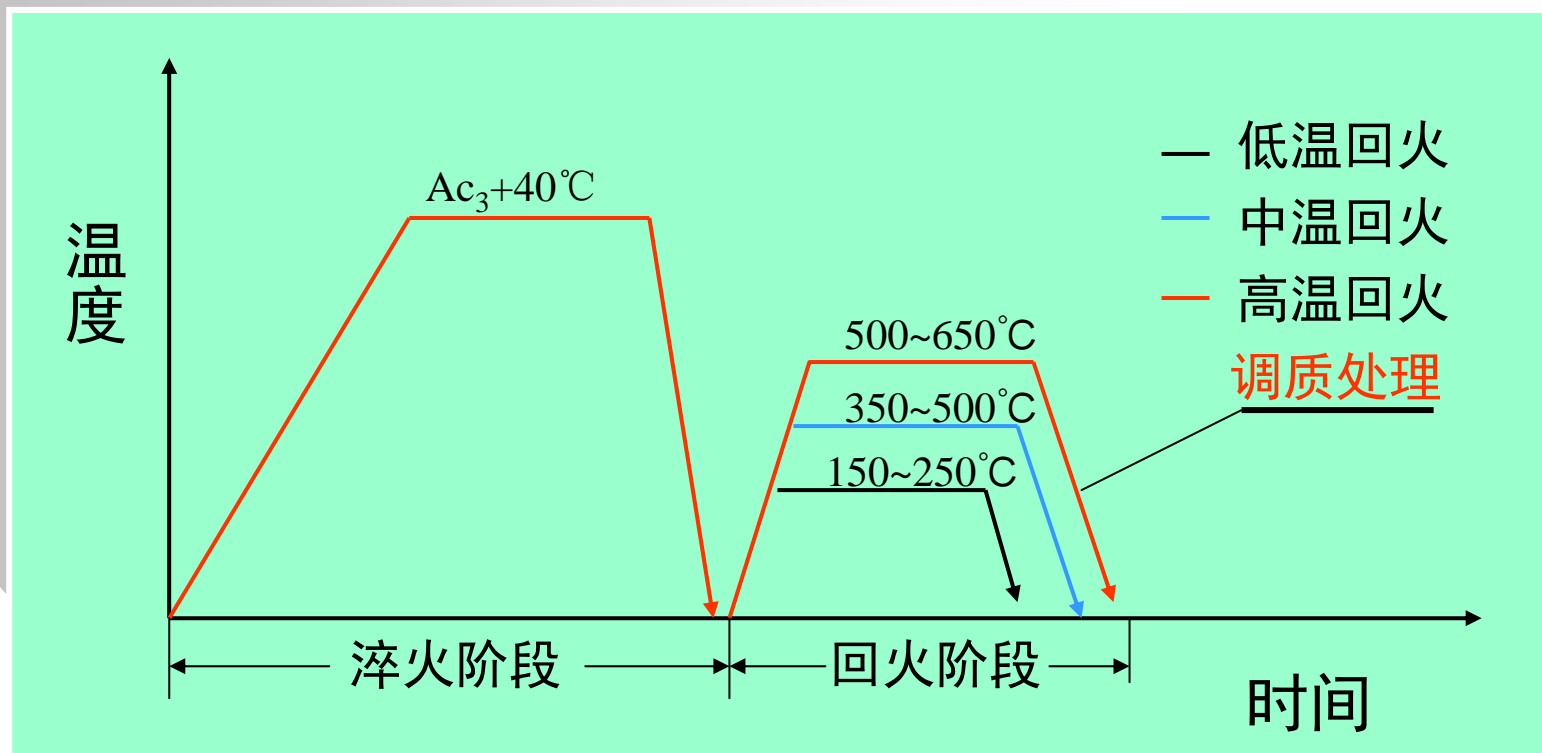
- 如45钢小轴采用
- 830°C水淬+600°C回火。



回火S



淬火加回火工艺曲线图



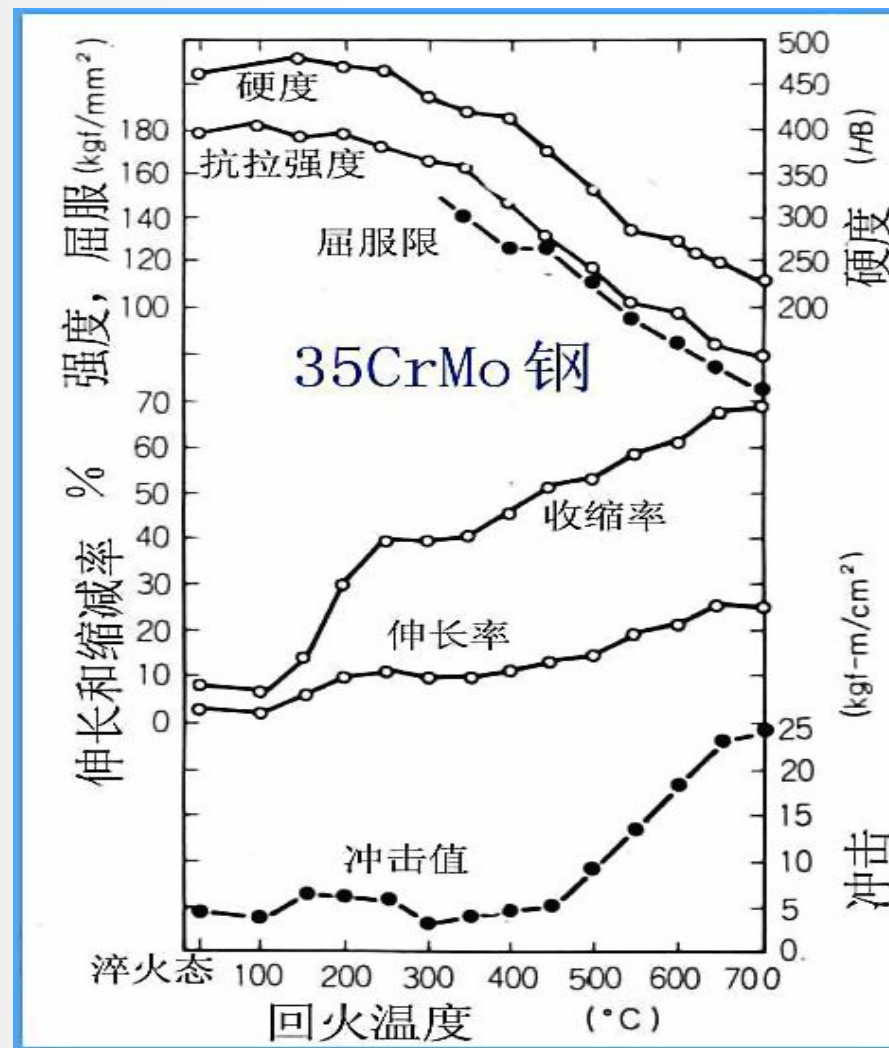


第三节 钢的普通热处理工艺

(五)、回火脆性

淬火钢的韧性并不总是随温度升高而提高。

在某些温度范围内回火时，会出现冲击韧性下降的现象，称回火脆性。



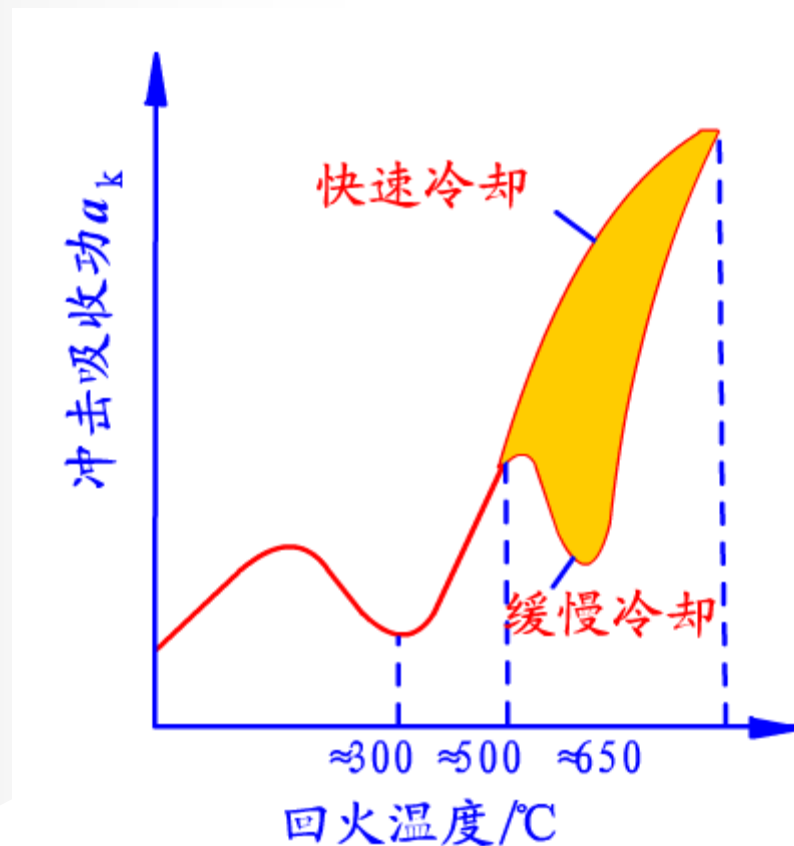


第三节 钢的普通热处理工艺



1、第一类回火脆性

- ❖ 又称不可逆回火脆性。是指淬火钢在250-350℃回火时出现的脆性。
- 这种回火脆性是不可逆的，只要在此温度范围内回火就会出现脆性，目前尚无有效消除办法。
- 回火时应避开这一温度范围。

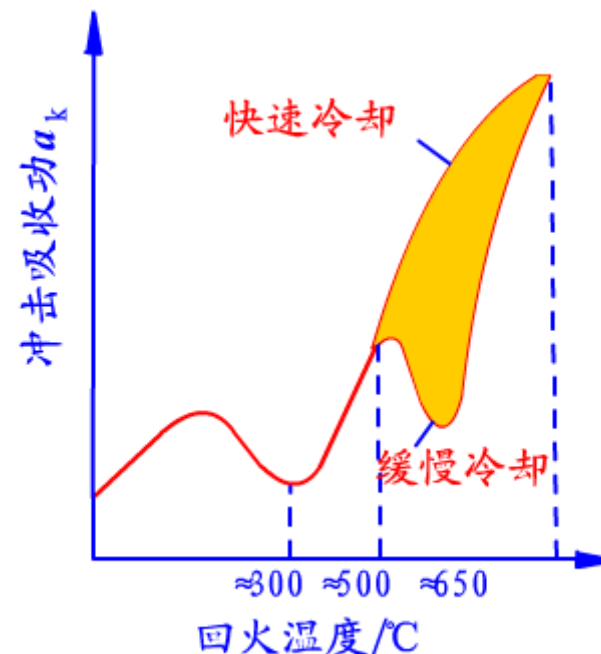




第三节 钢的普通热处理工艺

2、第二类回火脆性

- ❖ 又称可逆回火脆性。是指淬火钢在500–650℃范围内回火后缓冷时出现的脆性。
- ❖ 回火后快冷不出现，是可逆的。
- ❖ 防止办法：
 - ❖ (1) 回火后快冷。
 - ❖ (2) 加入合金元素W（约1%）、Mo（约0.5%）。该法更适用于大截面的零部件





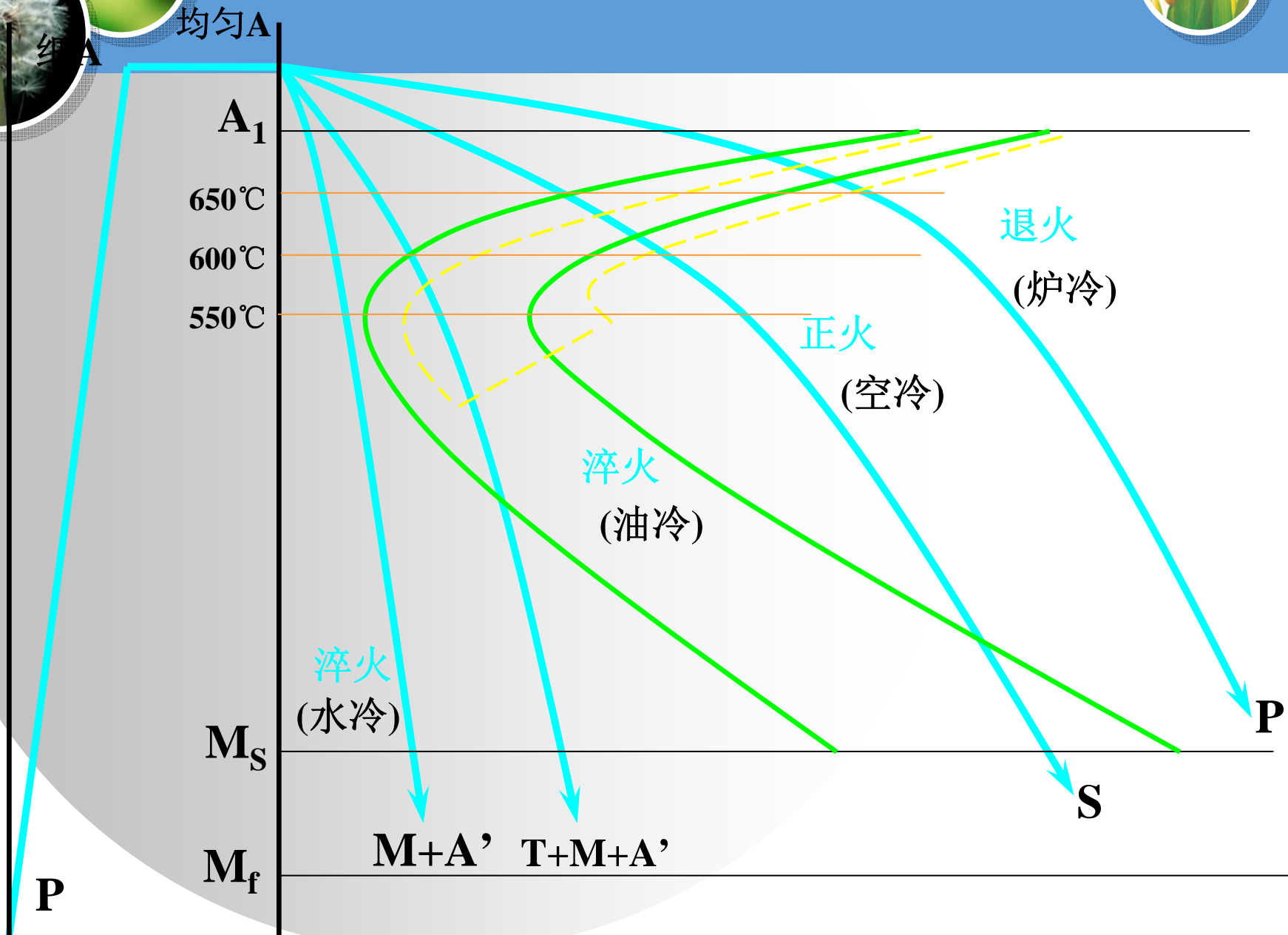
第三节 钢的普通热处理工艺

钢的回火





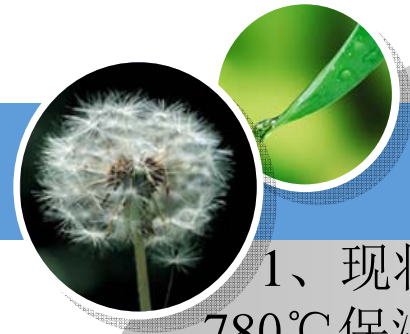
	低温回火	中温回火	高温回火
回火温度	150-250℃	350-500℃	500-650℃
回火组织	$M_{回}$	$T_{回}$	$S_{回}$
回火目的	保留高硬度、高耐磨性，降低应力。	提高 σ_e 、 σ_s ，同时具有一定韧性。	获得良好的综合力学性能，即在保持较高的强度同时兼具良好的塑性和韧性。
应用	各种高碳钢、渗碳件及表面淬火件。	弹簧热处理	各种结构件如轴、齿轮等。也可作为要求较高精密件、量具等预备热处理。



复 习

共析钢过冷奥氏体转变产物

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	$A_1 \sim 650$	扩散型	粗片状, F、 Fe_3C 相间分布	5-20	退火
	S	650~600		细片状, F、 Fe_3C 相间分布	20-30	正火
	T	600~550		极细片状, F、 Fe_3C 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_3C 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_3C 分布于过饱和F针上	50-60	等温淬火
马氏体	$M_{针}$	$M_s \sim M_f$	无扩散型	针状	60-65	淬火
	$M_{板条}^*$	$M_s \sim M_f$		板条状	50	淬火



1、现将3块碳质量分数均为0.77%的碳钢试样加热到780℃保温后，分别以不同方式冷却至室温，如图所示，请回答下列问题：

- a点组织为_____
- b点组织为_____
- c点组织为_____
- d点组织为_____

(2)：按曲线2和曲线3冷却后得到的组织_____，其中曲线_____的淬火应力大。

(3)：曲线_____为双介质淬火。(1) a: 索氏体+过冷奥氏体

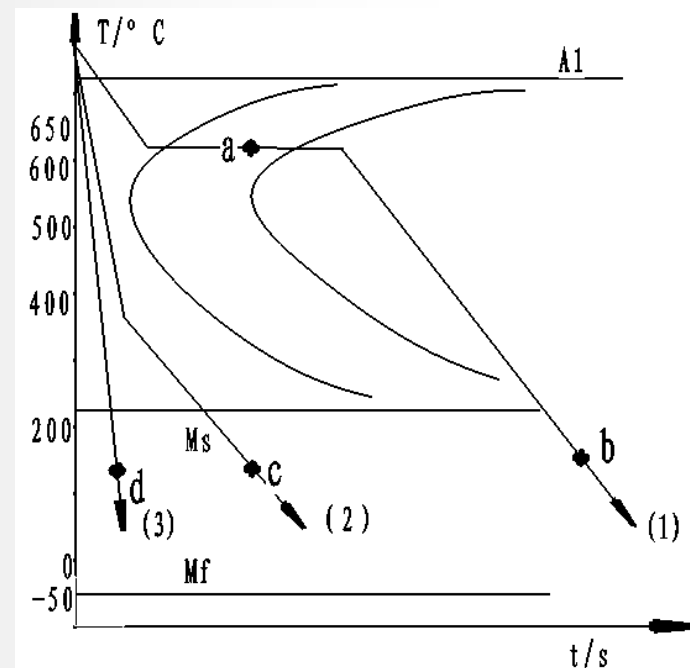
b: 索氏体

❖ c: 马氏体+残余奥氏体

❖ d: 马氏体+残余奥氏体

❖ (2)：相同 3

❖ (3)：2



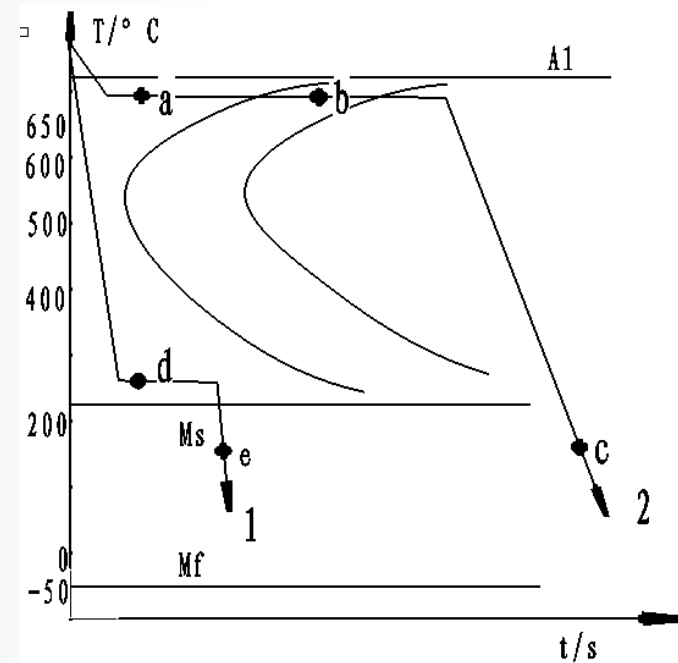


2、将两块T8钢试样加热到770℃保温，然后以不同方式1、2冷却。冷却曲线为图示，指出a、b、c、e、f点处组织名称及淬火工艺曲线。

a: _____
 b: _____
 c: _____
 d: _____
 e: _____

曲线1与2，为淬火工艺的是曲线

_____.



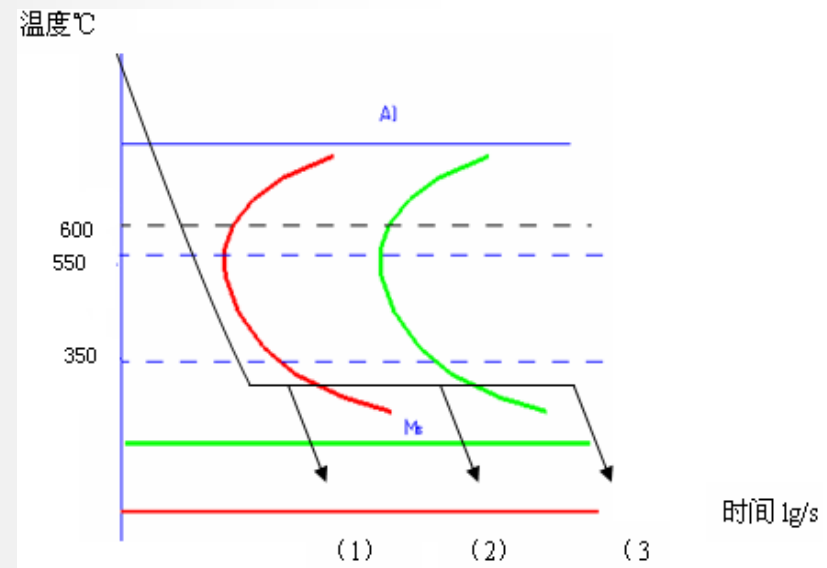
- ❖ a: 过冷奥氏体 b: 过冷奥氏体+珠光体
- ❖ c: 珠光体 d: 马氏体 e: 马氏体+残余奥氏体
- ❖ 曲线1



3、T8钢C曲线为图示，试说明该钢经奥氏体化后，在300℃经不同时间等温后按图示（1）（2）（3）线冷却到室温所得到的组织。

- (1) _____
(2) _____
(3) _____

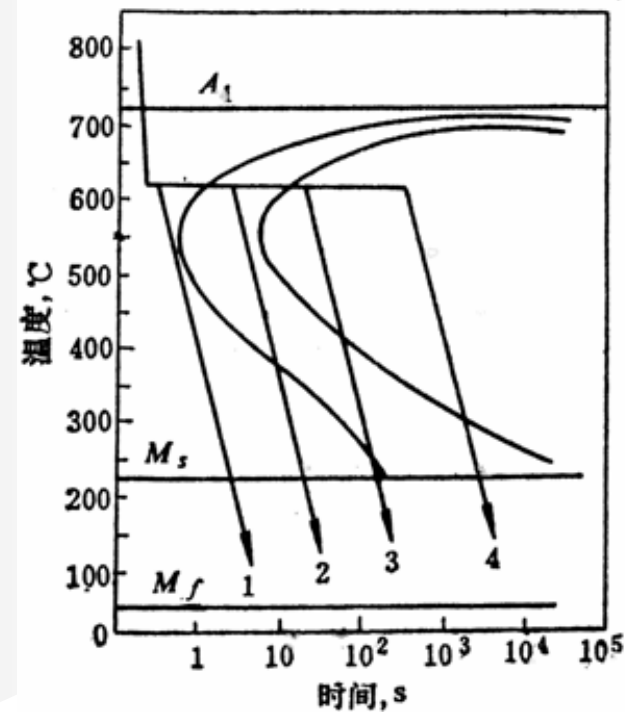
- ❖ (1) M+A残
- ❖ (2) B下+M+A残
- ❖ (3) B下





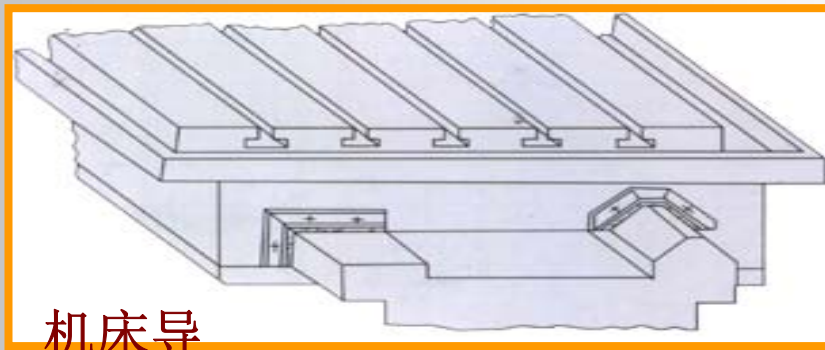
❖ 4、T8钢的C曲线如图所示，若该钢在620℃进行等温转变，并经不同时间保温后，按照图示的1、2、3、4线的冷却速度冷却至室温，试问各获得什么组织？

- ❖ 1: M+A残
- ❖ 2: M+A残+S
- ❖ 3: S
- ❖ 4: S



第四节 钢的表面热处理和化学热处理

工艺的核心：使零件具有
“**表硬里韧**”的力学性能。



机床导
轨



表面淬火齿
轮

表面：硬度高，
耐磨

心部：硬度
低，韧性高



对轴、齿轮、凸轮的机械性能要求

表面：硬，耐磨，耐疲劳

M

心部：塑，韧，耐冲击

F, P

解决思路：

选材 → 低淬透性材料

只改变表层组织

表面淬火

同时改变表层组织、成分

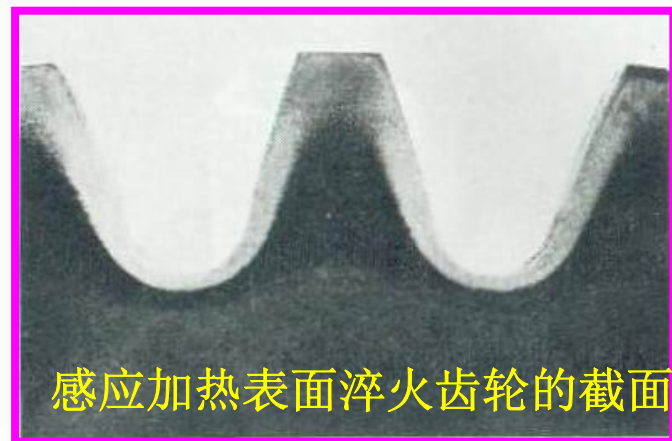
化学热处理

表面热处理

第四节 钢的表面热处理和化学热处理

一、表面淬火

- ❖ 1、**定义**：是一种不改变钢表层化学成分，但改变表层组织，且心部组织不发变化的热处理工艺。
- ❖ 2、**工艺特征**：通过快速加热至淬火温度，使钢的表层奥氏体化，然后急冷以大于 v_k 的速度冷却，使表层形成马氏体组织，而心部仍保持不变。



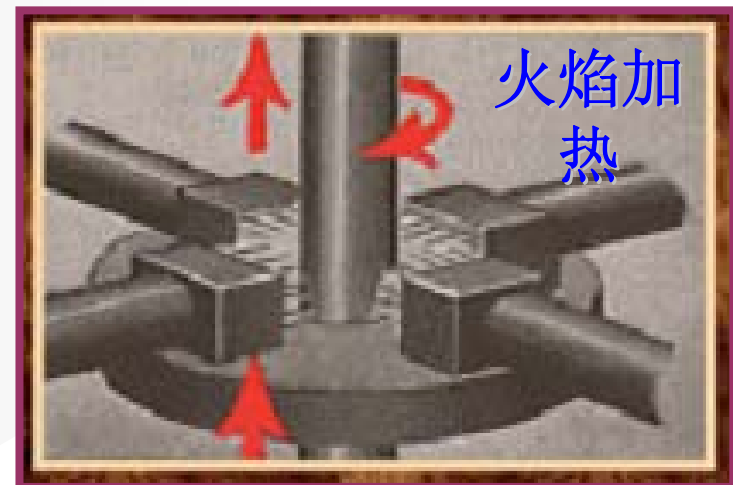
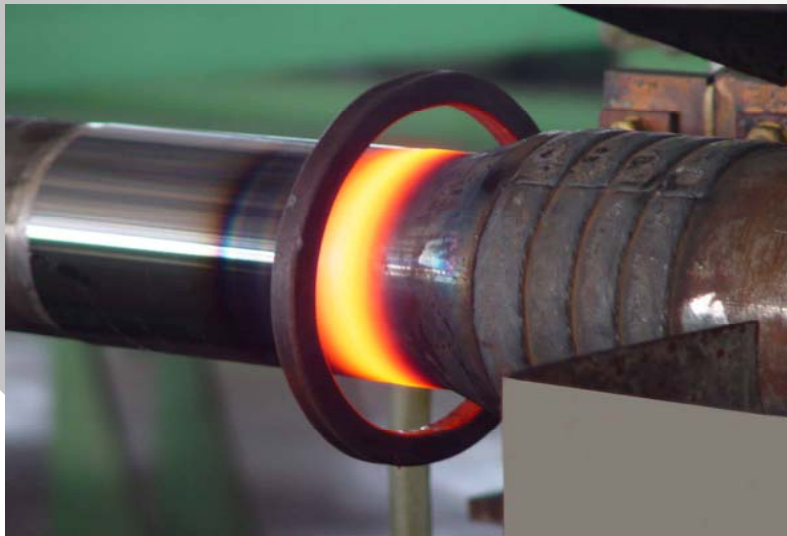
第四节 钢的表面热处理和化学热处理

❖ 3、表面淬火应用：

选用中碳或中碳低合金钢。40、45、40Cr、40MnB等。

❖ 4、表面淬火加工的方法：

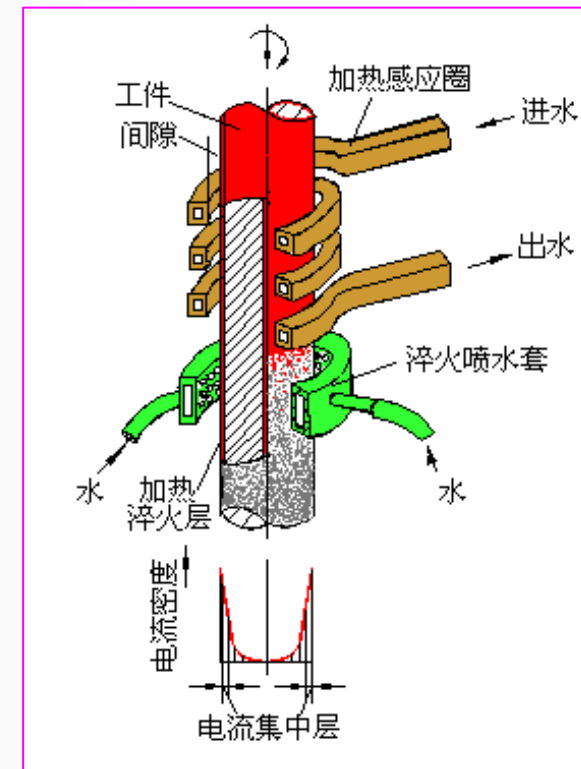
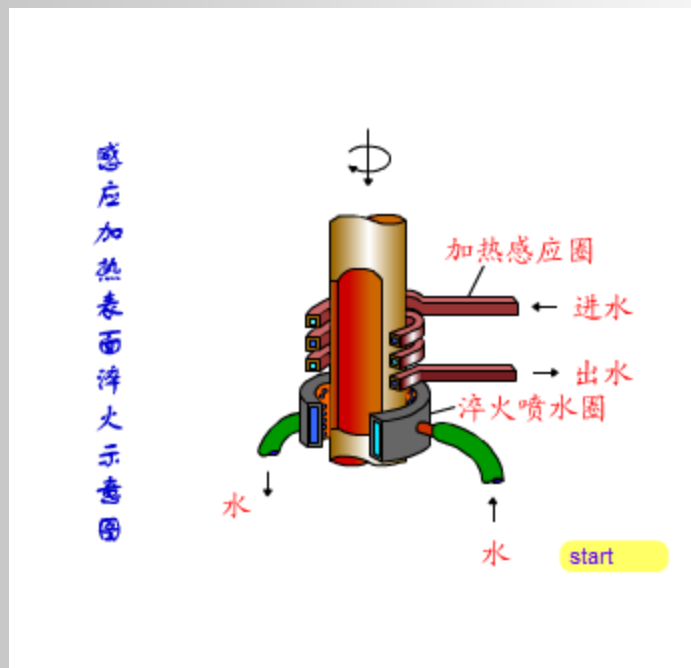
感应加热、火焰加热、电接触加热法等。





第四节 钢的表面热处理和化学热处理

(一) 感应加热表面淬火



- ❖ 1. 原理
- ❖ 交变磁场→感应电流→工件电阻→加热，集肤效应→表面加热



第四节 钢的表面热处理和化学热处理



2、感应加热表面淬火的分类

1) 高频感应加热表面淬火:

常用频率为200~300kHz, 淬硬层深度一般为0.5~2mm;

主要用于要求淬硬层较浅的中小型钢件(如小模数齿轮、中小型轴等)的表面淬火。

2) 中频感应加热表面淬火:

常用频率为2.5~8kHz, 淬硬层深度一般为2~10mm;

它主要用于淬硬层要求较深的钢件(如直径较大的轴类和中等模数的齿轮、大模数齿轮单齿等)的表面淬火。

3) 工频感应加热表面淬火

常用频率为50Hz, 淬硬层深度可达10~15mm;

它主要用于要求深淬硬层的大直径钢件(如轧辊、火车车轮等)的表面淬火。



3、感应加热表面淬火的特点

- a. 加热速度快 几秒~几十秒;
- b. 加热时实际晶粒组小，淬火得到极细马氏体，硬度↑，脆性↓；
- c. 残余压应力→提高寿命；
- d. 不易氧化、脱碳、变形小；
- e. 工艺易控制，设备成本高.

4、感应加热表面淬火用钢

- 中碳钢、低合金中碳钢，40，45，40Cr

5、感应淬火零件的一般工艺路线：

锻造 → 正火或退火 → 机加工 → 调质 → 半精加工 → 感应淬火
→ 低温回火 → 磨削加工



第四节 钢的表面热处理和化学热处理

感应淬火的基本原理、分类及应用

1、感应加热 基本





第四节 钢的表面热处理和化学热处理



齿轮感应淬火的操作





第四节 钢的表面热处理和化学热处理



齿轮高频淬火的过程

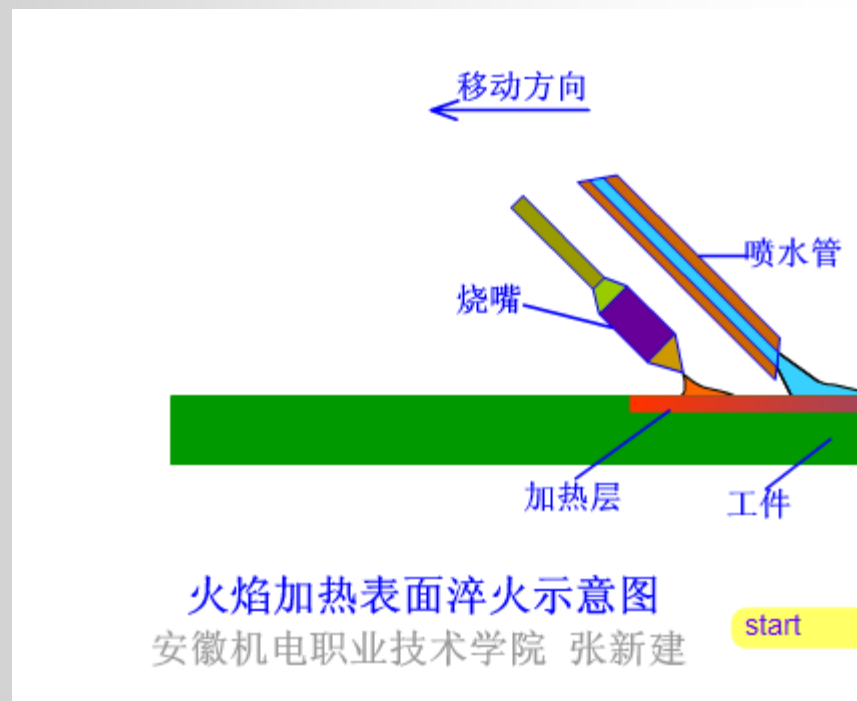




第四节 钢的表面热处理和化学热处理

(二) 火焰加热表面淬火

1、火焰加热表面淬火的基本方法





第四节 钢的表面热处理和化学热处理



2、火焰加热表面淬火的特点：

- *设备简单，操作方便，成本低。
- *淬火质量不稳定。
- *适于单件、小批量及大型零件的生产。



第四节 钢的表面热处理和化学热处理

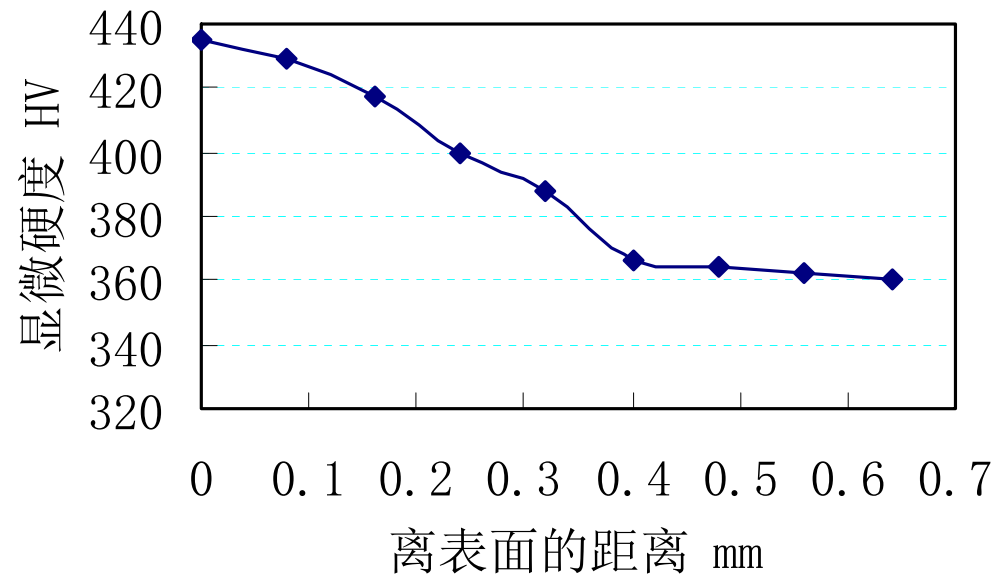
火焰加热表面淬火



第四节 钢的表面热处理和化学热处理

二、化学热处理

1、**定义：**将零件置于一定的化学介质中，通过加热、保温，使介质中一种或几种元素原子渗入工件表层，以改变钢表层的化学成分和组织的热处理工艺。



20MnSi 930°C 渗碳10h后硬度



二、化学热处理

2、 化学热处理的基本过程：

- ❖ **分解**：化学介质在高温下释放出待渗的**活性原子**。



- ❖ **吸收**：活性原子被零件表面**吸收和溶解**。

- ❖ **扩散**：活性原子由零件表面向内部扩散，形成一定的**扩散层**。



第四节 钢的表面热处理和化学热处理

3、 化学热处理进行的条件：

- 1) 渗入元素的原子必须是活性原子，而且具有较大的扩散能力。
- 2) 零件本身具有吸收渗入原子的能力，即对渗入原子有一定的溶解度或能与之化合，形成化合物。

4、 化学热处理的种类：

- 渗碳、渗氮、碳氮共渗可提高钢的**表面硬度、耐磨性**及疲劳强度；
- 渗B、渗Cr可提高**表面耐磨性和耐腐蚀性**；
- 渗Al、渗Si可提高**耐热抗氧化性**；
- 渗S可提高**减摩性**。



第四节 钢的表面热处理和化学热处理



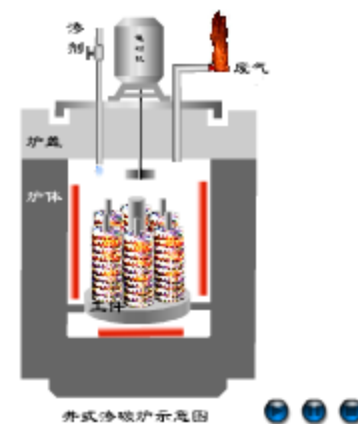
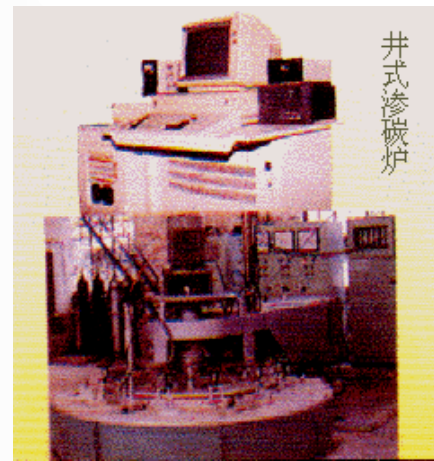
(一) 钢的渗碳

- 1、定义：向钢的**表面渗入碳原子**的过程。
- 2、目的：获得具有**表硬里韧性能**的零件。
- 3、用钢：**低碳钢和低碳合金钢**。
- 4、方法：**固体、气体、液体渗碳**。

第四节 钢的表面热处理和化学热处理

(1) 气体渗碳法

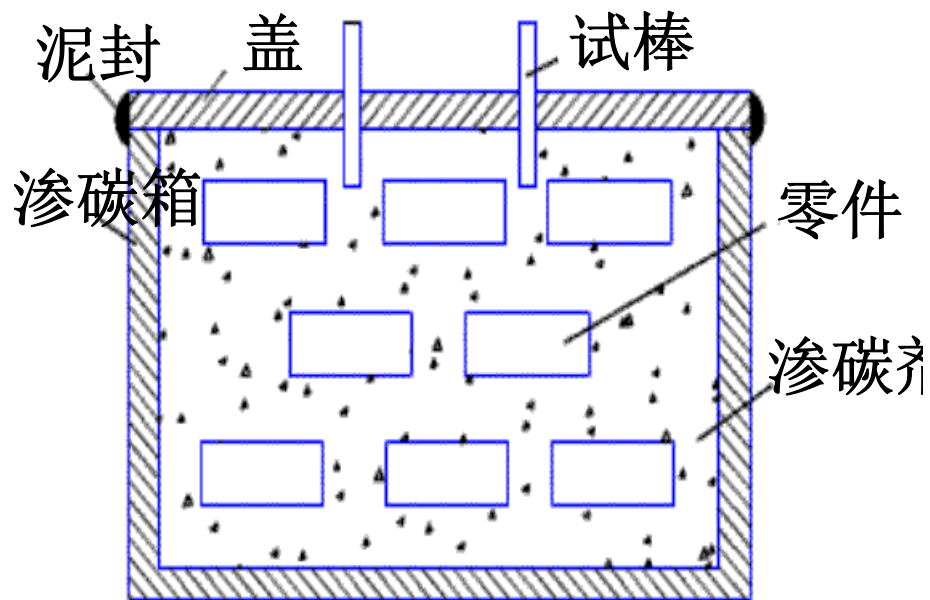
- ❖ 将工件放入密封炉内，在高温渗碳气氛中渗碳。
- ❖ 渗剂为气体（煤气、液化气等）或有机液体（煤油、甲醇等）。
- ❖ 优点：质量好，效率高；缺点：渗层成分与深度不易控制。



第四节 钢的表面热处理和化学热处理

(2) 固体渗碳法

- ❖ 将工件埋入渗剂中，装箱密封后在高温下加热渗碳。
- ❖ 固体渗碳剂是木炭和10%—20%碳酸盐混合物。碳酸盐的成分以碳酸钡为主，另加少量碳酸钠、碳酸钙。其中，木炭提供渗碳过程所需要的活性碳原子，碳酸盐则起着催化作用，促进产生更多的活性碳原子渗入工件表面。
- ❖ 优点：操作简单；
- ❖ 缺点：渗速慢，劳动条件差。



第四节 钢的表面热处理和化学热处理

(3) 真空渗碳法

- 将工件放入真空渗碳炉中，抽真空后通入渗碳气体加热渗碳。
- 优点：表面质量好，渗碳速度快。



真空渗碳炉



第四节 钢的表面热处理和化学热处理

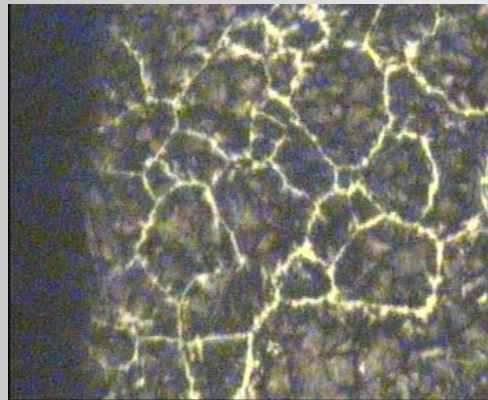
5、工艺:

加热温度为 $900\sim 950^{\circ}\text{C}$;

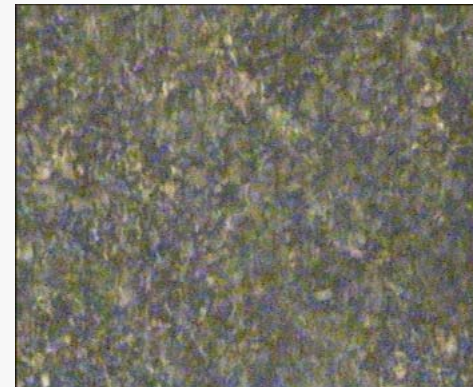
渗碳时间一般为 $3\sim 9$ 小时;

6、渗碳后的组织:

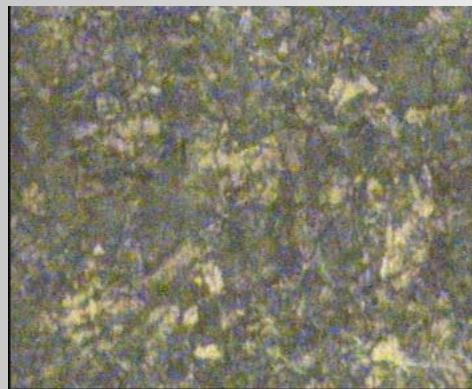




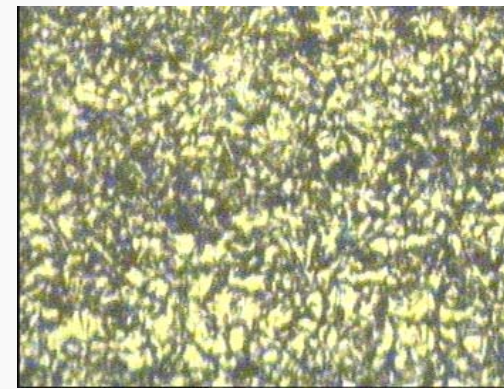
过共析区



共析区



亚共析区



心部



第四节 钢的表面热处理和化学热处理



7、渗碳后的热处理工艺

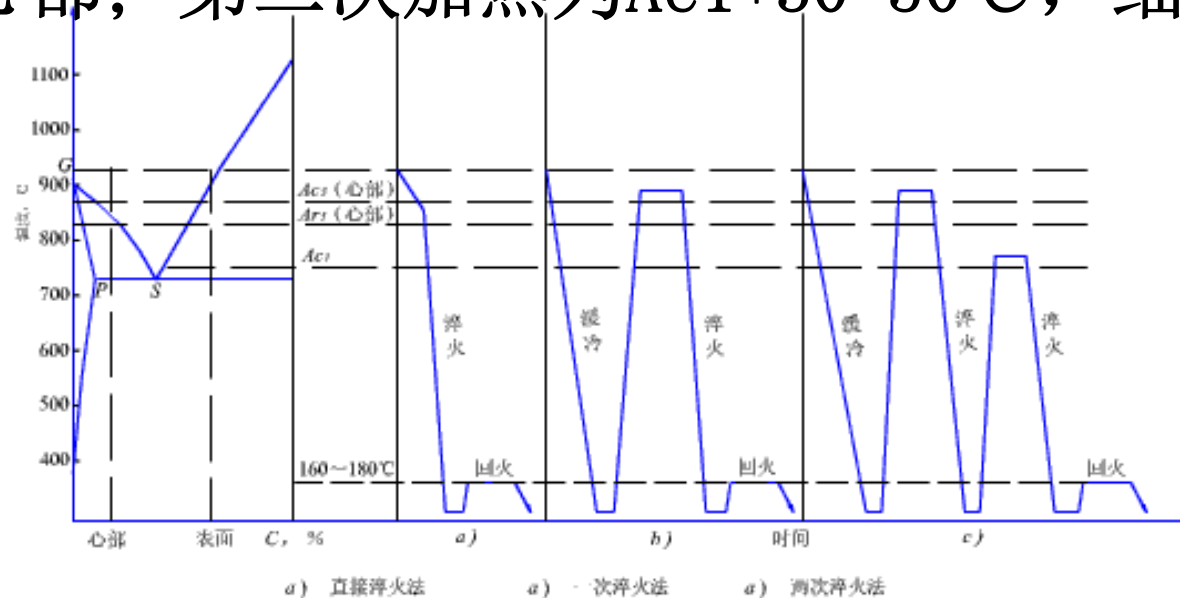
❖ (1) 预冷淬火法:

渗碳后预冷到略高于 A_{r1} 温度直接淬火。

❖ (2) 一次淬火法: 即渗碳缓冷后重新加热淬火。

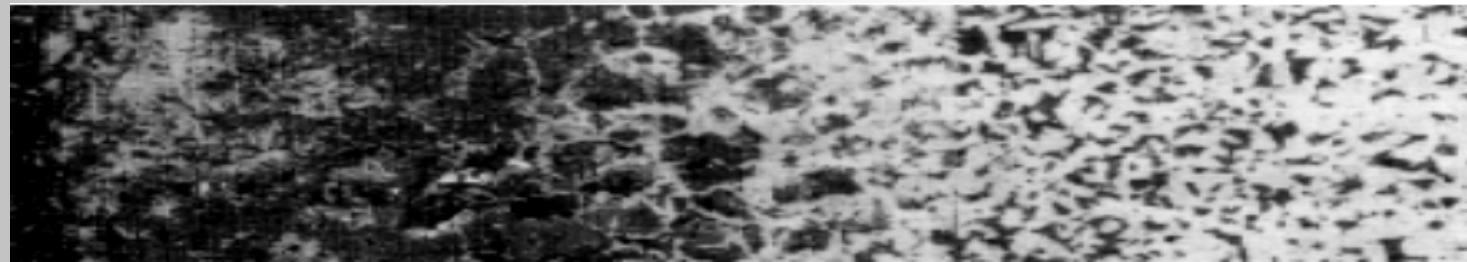
❖ (3) 二次淬火法:

即渗碳缓冷后第一次加热为心部 $A_{c3}+30-50^{\circ}\text{C}$ ，细化心部；第二次加热为 $A_{c1}+30-50^{\circ}\text{C}$ ，细化表层。



第四节 钢的表面热处理和化学热处理

8、 热处理后的组织

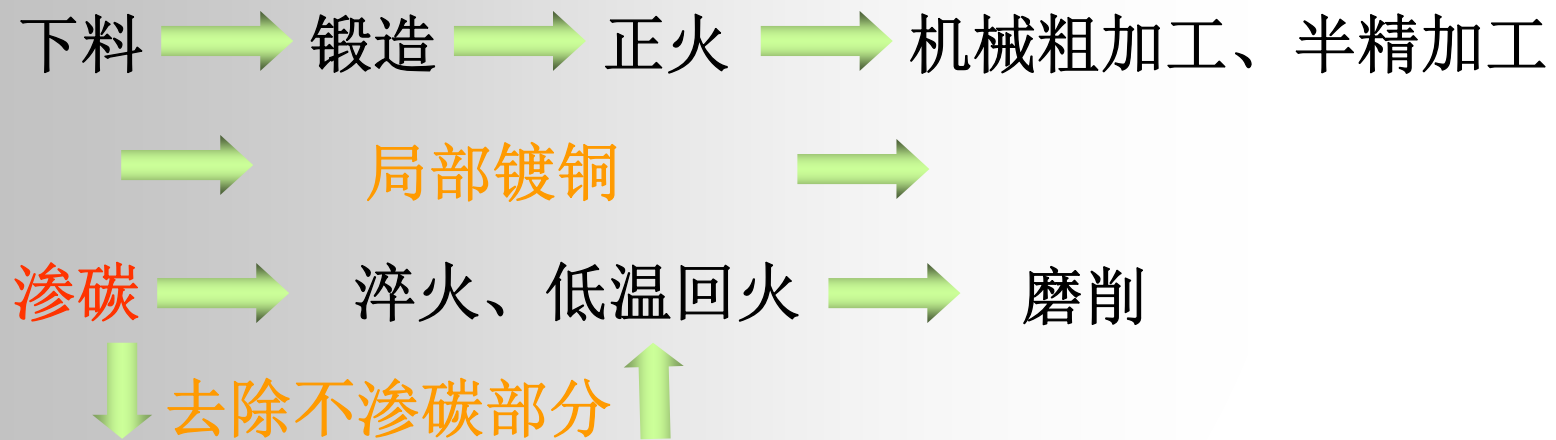


钢种	表层组织	心部组织
低碳钢	$M_{\text{回}} + Fe_3C + A_{\text{残}}$	F+P

9、常用的钢种：15、20、20Cr、20Mn2、20CrMnTi、18Cr2Ni4WA等。



10、渗碳的工序位置





第四节 钢的表面热处理和化学热处理



气体渗碳炉的构造





第四节 钢的表面热处理和化学热处理

化学热处理的基本过程





第四节 钢的表面热处理和化学热处理



渗碳操作



第四节 钢的表面热处理和化学热处理

二、钢的渗氮

1、定义:向钢的**表面渗入氮原子**的过程
 $2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + 2[\text{N}]$

2、目的:获得具有**表硬里韧及抗蚀性能**的零件。

3、用钢: **中碳合金钢**。

4、方法:**气体渗氮**。





第四节 钢的表面热处理和化学热处理



- 5、工艺：**加热温度** 500~600℃；
保温时间 0.3~0.5mm/20~50h。
- 6、热处理特点：**渗氮前需调质处理；**
渗氮后不需热处理。
- 7、渗氮处理后的组织
表层：Fe₄N、Fe₂N、AlN、CrN、
MoN、TiN、VN。
心部：S回。
- 8、常用的钢种：35 CrMo、18CrNiW、
38 CrMoAlA（氮化王牌钢）等。



第四节 钢的表面热处理和化学热处理

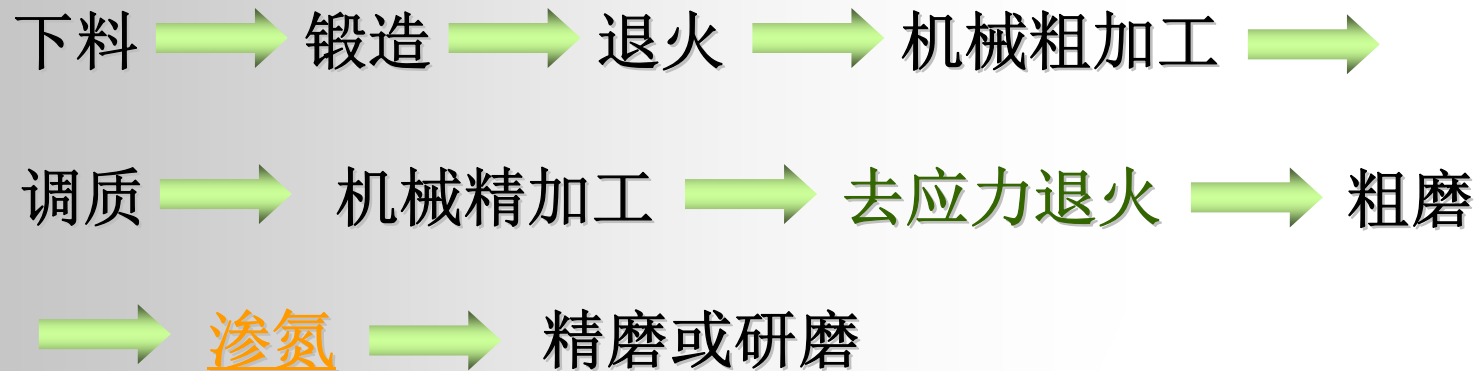


渗碳与渗氮的工艺特点

名称	处理温度 ($^{\circ}\text{C}$)	处理时间 (h)	处理后是否需要热处理
渗碳	900~950	3~9	需要
渗氮	500~600	20~50	不需要



9、渗氮的工序位置



不需渗氮部位镀锡或镀镍保护，渗氮后磨去。



第四节 钢的表面热处理和化学热处理



钢的渗氮处理





第四节 钢的表面热处理和化学热处理

(三) 钢的碳氮共渗——氰化处理

1) 定义: 向钢的**表面同时渗入碳和氮原子**的过程。

2) 目的: 获得具有**表硬里韧**性能的零件。

3) 方法:

}	固体碳氮共渗	}	高温
	气体碳氮共渗		中温
	液体碳氮共渗		低温



第四节 钢的表面热处理和化学热处理

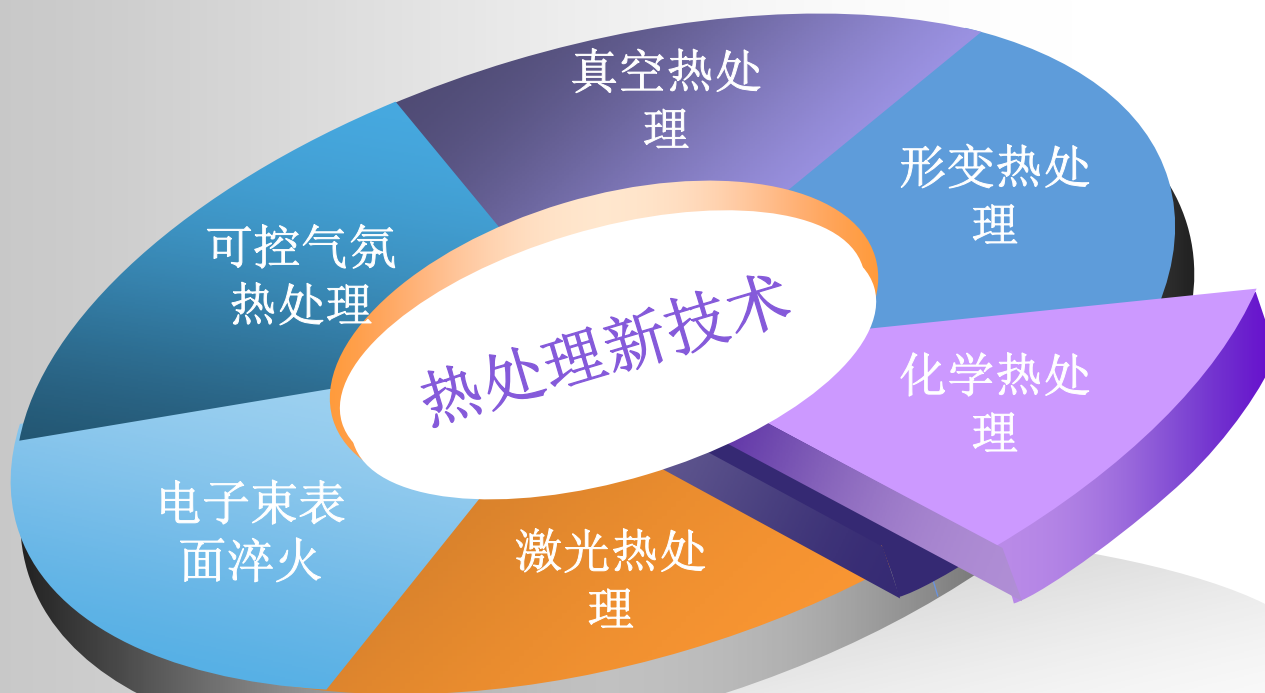


4) 工艺:

名称	低温气体碳氮共渗	中温气体碳氮共渗
温度(°C)	500~600	800~860
时间(h)	1~6	1~8
作用	以渗氮为主	以渗碳为主
渗层	0.1~0.4mm	0.5~0.8mm
热处理	不需要	淬火+低温回火
性能	HRC54~63	HRC53~60
材料	合金工具钢	合金结构钢



第五节 热处理新技术简介





第五节 热处理新技术简介



一、可控气氛热处理

在炉气成分可控的热处理炉内进行的热处理称为可控气氛热处理。在热处理时实现无氧化加热是减少金属氧化损耗，保证制件表面质量的必备条件。

正确控制热处理炉内的炉气成分，可为某种热处理过程提供元素的来源，金属零件和炉气通过界面反应，其表面可以获得或失去某种元素。也可以对加热过程的工件提供保护。

如可使零件不被氧化，不脱碳或不增碳，保证零件表面耐磨性和抗疲劳性。从而也可以减少零件热处理后的机加工余量及表面的清理工作。缩短生产周期，节能、省时，提高经济效益。可控气氛热处理已成为最成熟的，在大批量生产条件下应用最普遍的热处理技术之一。



第五节

热处理新技术简介



二、真空热处理

真空热处理是在 $0.0133\text{Pa}\sim 1.33\text{Pa}$ 真空度的真空介质中对工件进行热处理的工艺。真空热处理具有无氧化、无脱碳、无元素贫化的特点，可以实现光亮热处理，可以使零件脱脂、脱气，避免表面污染和氢脆；同时可以实现控制加热和冷却，减少热处理变形。提高材料性能；还具有便于自动化、柔性化和清洁热处理等优点。近年已被广泛采用，并获得迅速发展。

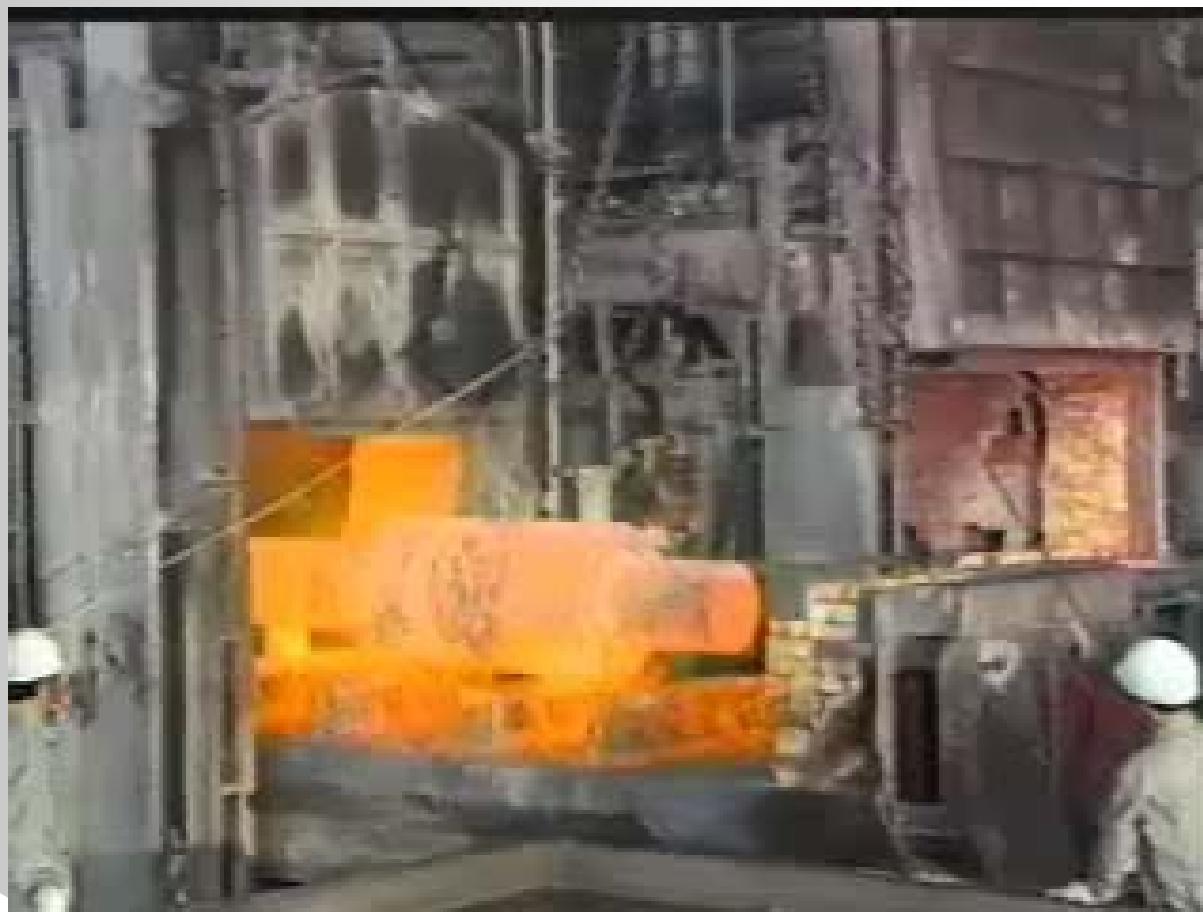
几乎全部热处理工艺均可以进行真空热处理，如退火、淬火、回火、渗碳、氮化、渗金属等。而且淬火介质也由最初仅能气淬，发展到现在的油淬、水淬、硝酸盐淬火等。



第五节 热处理新技术简介



保护气氛热处理





第五节 热处理新技术简介



三、离子渗扩热处理

离子渗扩热处理是利用阴极(工件)和阳极间的辉光放电产生的等离子体轰击工件,使工件表层的成分、组织及性能发生变化的热处理工艺。离子渗碳的硬度、疲劳强度、耐磨性等力学性能比传统渗碳方法都高,而且渗碳速度快,特别是对狭小缝隙和小孔能进行均匀的渗碳,渗碳层表面碳浓度和渗层深度容易控制,工件不易产生氧化;表面洁净,耗电省和无污染。根据同样的原理,离子轰击热处理还可以进行离子碳氮共渗、离子硫氮共渗、离子渗金属等,所以在国内外具有很大的发展前途。



缝纫机用氮化件



经氮化的机车曲轴



第五节

热处理新技术简介



离子氮化





第五节

热处理新技术简介



四、形变热处理

形变热处理是**将形变强化与相变强化综合起来的一种复合强韧化**处理方法。从广义上来说，凡是**将零件的成形工序与组织改善有效结合起来的工艺都叫形变热处理**。

形变热处理的强化机理是：奥氏体形变使位错密度升高，由于动态回复形成稳定的亚结构，淬火后获得细小的马氏体，**板条马氏体数量增加，板条内位错密度升高**，使马氏体强化。此外，**奥氏体形变后位错密度增加，为碳氮化物弥散析出**提供了条件，获得弥散强化效果。弥散析出的碳氮化物阻止奥氏体长大，转变后的马氏体板条更加细化，产生细晶强化。马氏体板条的细化及其数量的增加，碳氮化物的弥散析出，都能使钢在强化的同时得到韧化。



第五节 热处理新技术简介



形变热处理





第六节 热处理工艺的应用

一、热处理的技术条件的标注

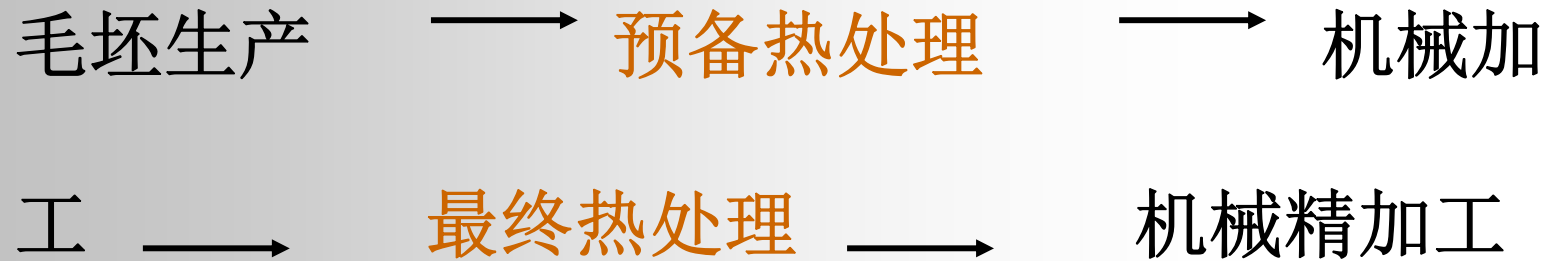
设计者根据零件的性能要求，在图纸上标明材料的牌号，并相应的热处理条件，作为热处理操作及检验的依据，一般来讲，在图纸上用**硬度**作为热处理条件。如调质220HBS~250HBS，淬火、回58HRC~62HRC。

- 渗碳零件还标注渗碳层深度，淬火、回火后的硬度和渗碳部位等。
- 表面淬火应标注淬硬部位。



第六节 热处理工艺的应用

二、热处理工序位置的确定



预备热处理：退火；正火；调质

最终热处理：淬火；回火；表面热处理



1、退火、正火工序位置

——在毛坯生产（铸造，锻造，焊接）之后，便于毛坯切削加工。 其加工工艺路线如下：

毛坯生产（铸造，锻造，焊接）→退火（或正火）
→切削加工

2、调质工序位置

主要提高综合力学性能；粗加工之后，半精加工或精加工之前。

下料→锻造→正火（退火）→粗加工→调质→精加工。



3、淬火工序位置



(1) 整体淬火件加工工艺路线如下：

下料→锻造→正火（或退火）→粗加工（半精加工）
→**淬火+中温（或低温）回火**→磨削加工。

(2) 表面淬火件加工工艺路线如下：

下料→锻造→正火（或退火）→粗加工→调质→半
精加工→**表面淬火+低温回火**→磨削加工。



4、渗碳工序——目的大大提高表面硬度、耐磨性，特别是受冲击件。

渗碳件加工路线一般为：

下料→锻造→正火→粗加工、半精加工→渗碳→
淬火、低温回火→磨削



三、典型零件的热处理分析

1、轴类零件

1、工作条件及工作要求：

- (1) 承受载荷传递动力——**综合力学性能好。**
- (2) 交变弯曲应力，扭转应力——**疲劳强度高。**
- (3) 冲击、震动（有时过载）——**足够的韧性。**
- (4) 高速旋转、较大摩擦——**较高硬度、耐磨性，刚度好。**



第六节 热处理工艺的应用

三、典型零件的热处理分析

该轴选用45钢的锻件毛坯，热处理技术条件如下：

整体调质后硬度为220~250HBS；

内锥孔和外锥体硬度为45 ~ 48HRC；

花键齿廓部分硬度为48 ~ 53HRC。

生产过程中，主轴的加工工艺路线为：

备料→锻造→正火→机械粗加工→调质→机械半精加工→锥孔及外锥体的局部淬火、回火→粗磨（外圆、锥孔、外锥体）→铣花键、花键淬火、回火→精磨（外圆、锥孔、外锥体）

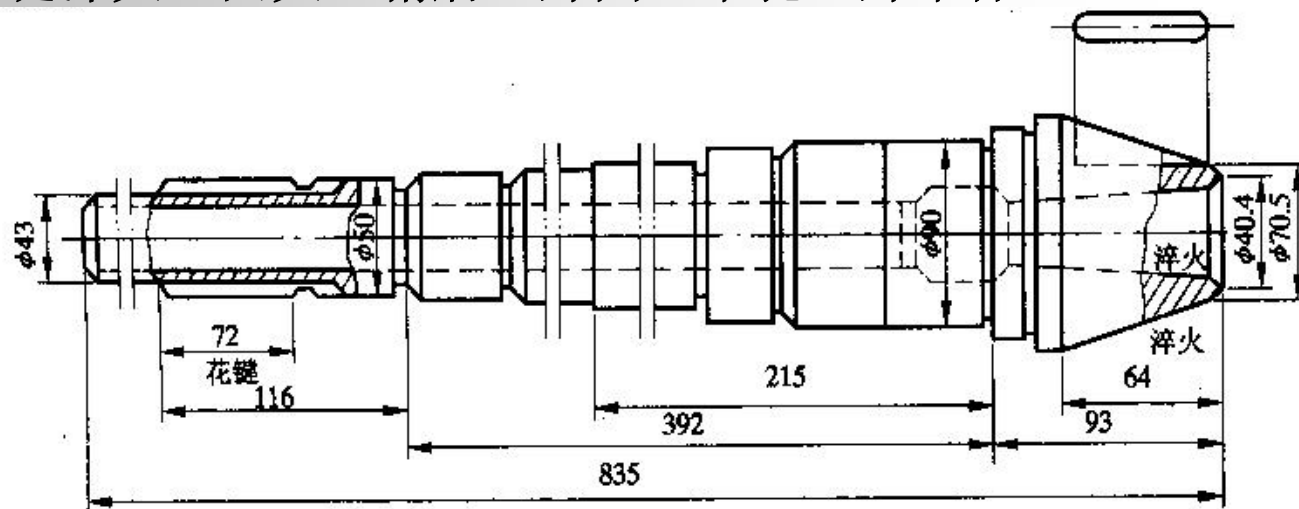


图 6-27 车床主轴



第六节 热处理工艺的应用

2、齿轮

该齿轮选用20CrMnTi的锻件毛坯，热处理技术条件如下：

齿面渗碳层深度：0.8~1.3mm

齿面硬度为58~62HRC

心部硬度为33~48HRC

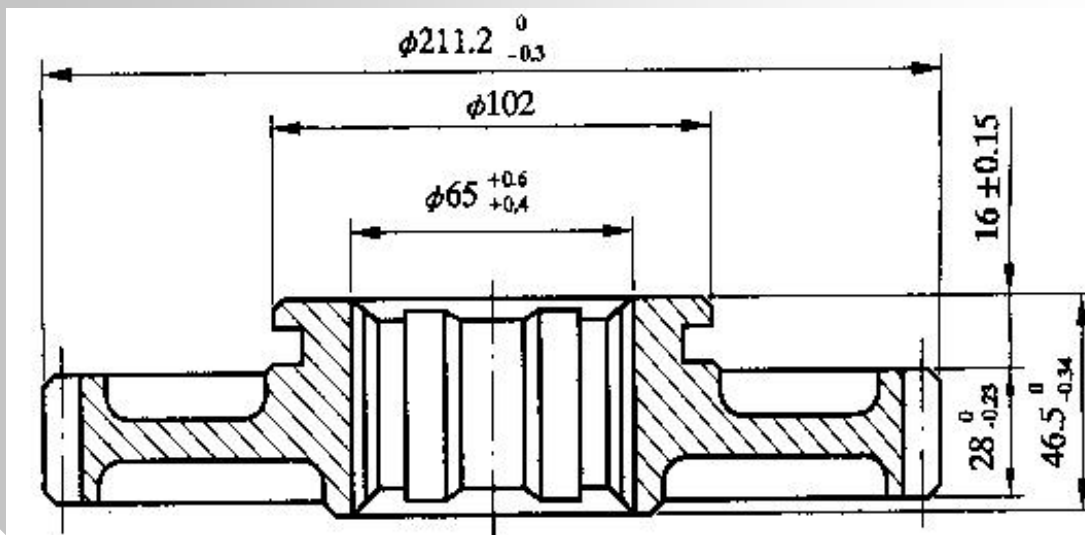


图 6-28 汽车变速齿轮简图



选用材料：20Cr

工艺路线：

下料 → 锻造 → 正火 → 机械加工 →

渗碳、淬

→ 磨削

低温回火是为了消除淬火应力，减少齿轮脆性，也是获得回火马氏体的必要工序。

组织。

正火是为了得到均匀和细化晶粒组织；消除锻造内应力；获得良好的切削加工性，并为最终热处理

组织：表层 → $M_{\text{回火}}$ + 碳化物 + Ar (少量)

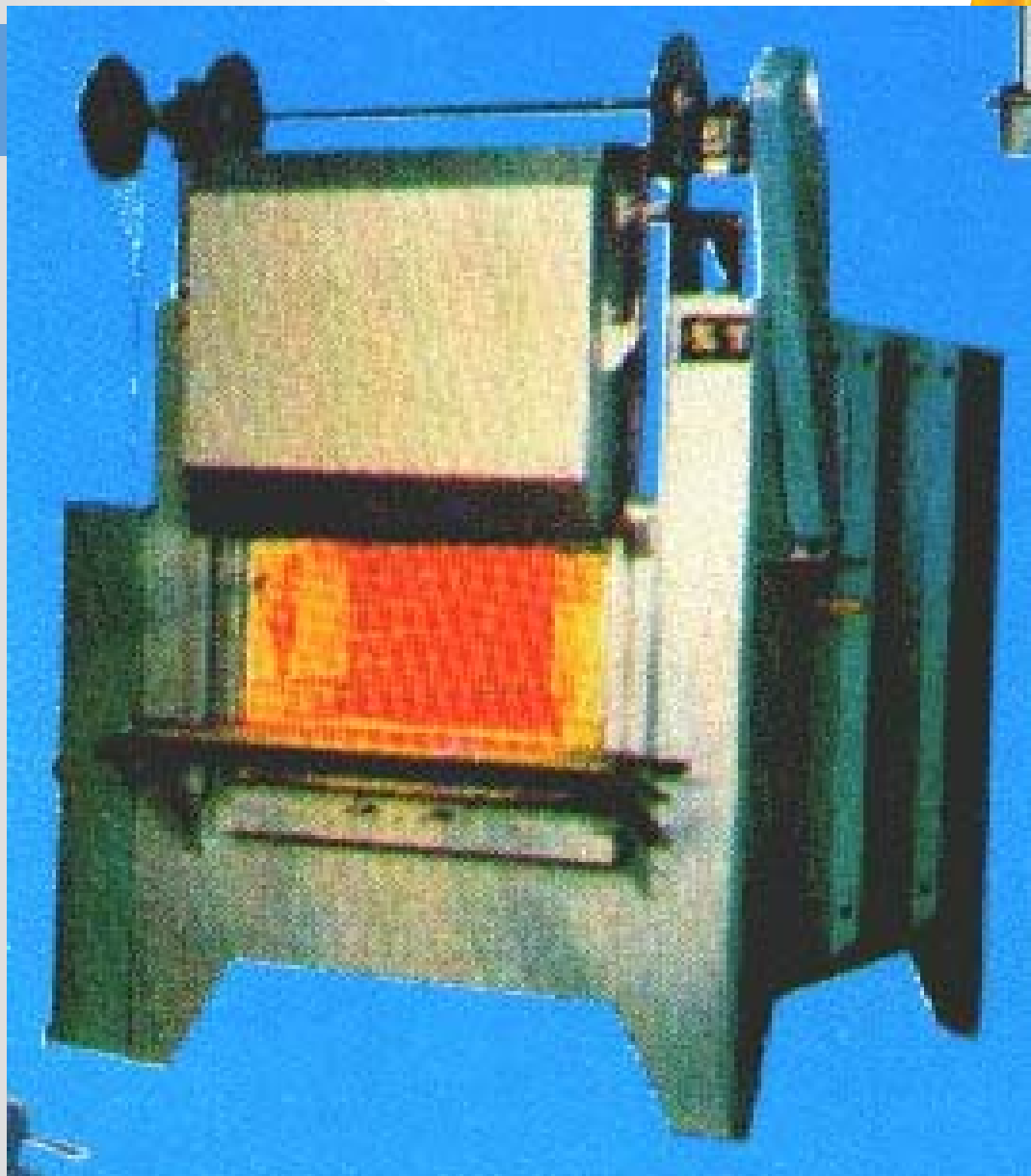
心部 → $M_{\text{回火}}$

上一页

下一页

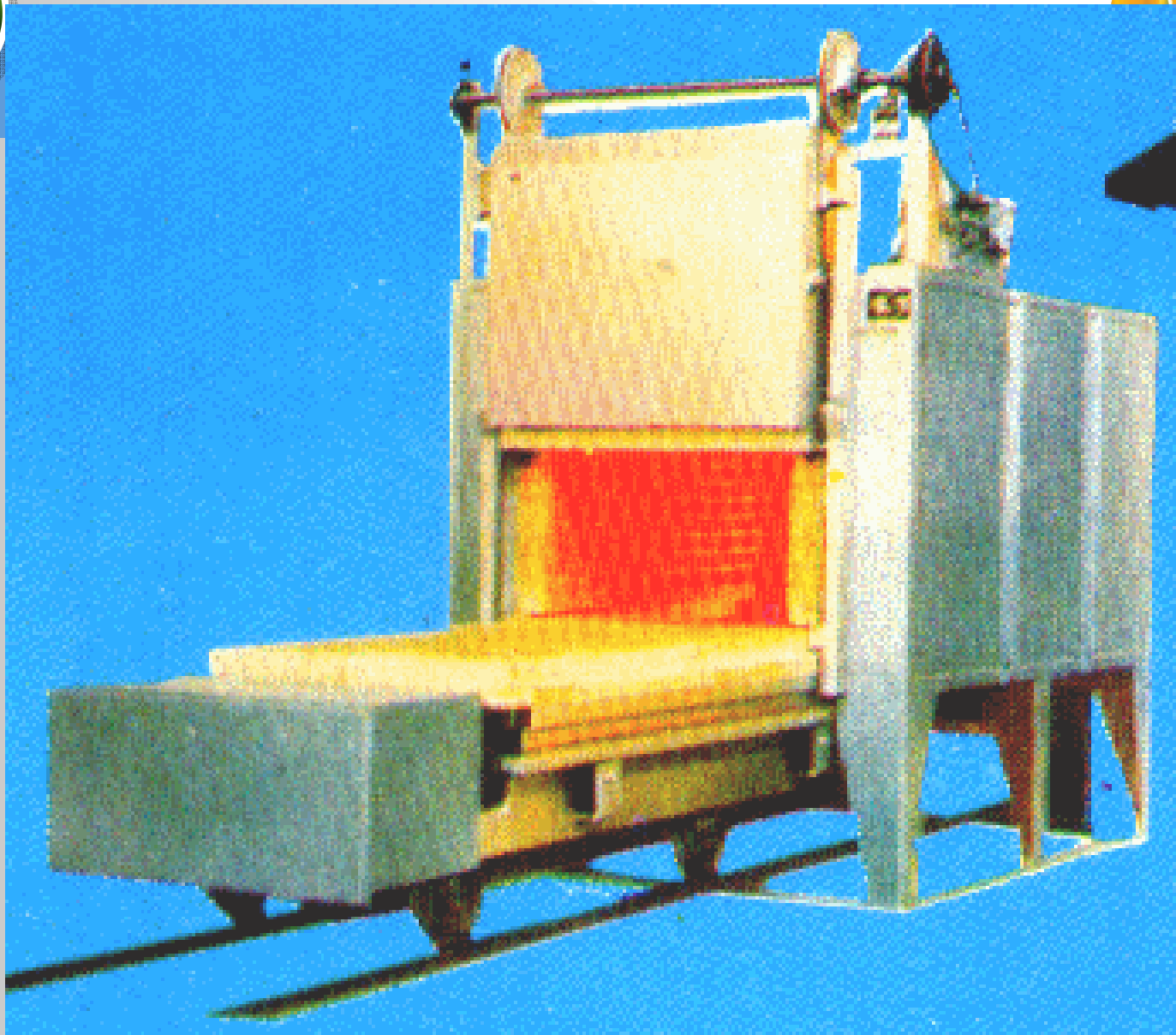
设备

箱式电阻炉



设备

台车式电阻炉



设备

连续式热处理炉

