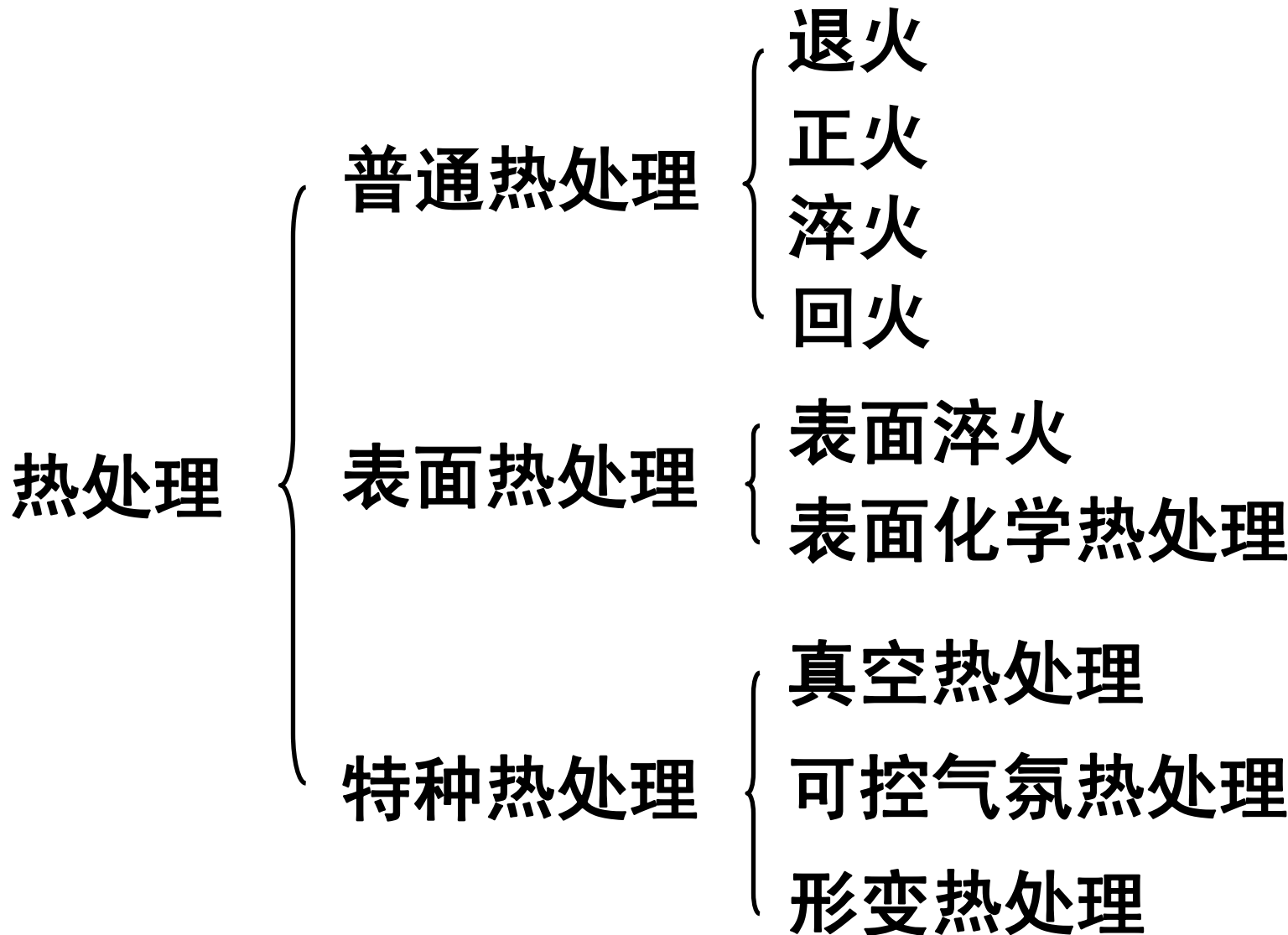


## 第三章 钢的热处理

# HEAT TREATMENT OF STEEL

- 什么是钢的热处理
  - 通过对钢件进行加热、保温、冷却，从而改变钢件性能的操作



THE END

# 第一节 钢在加热时的转变

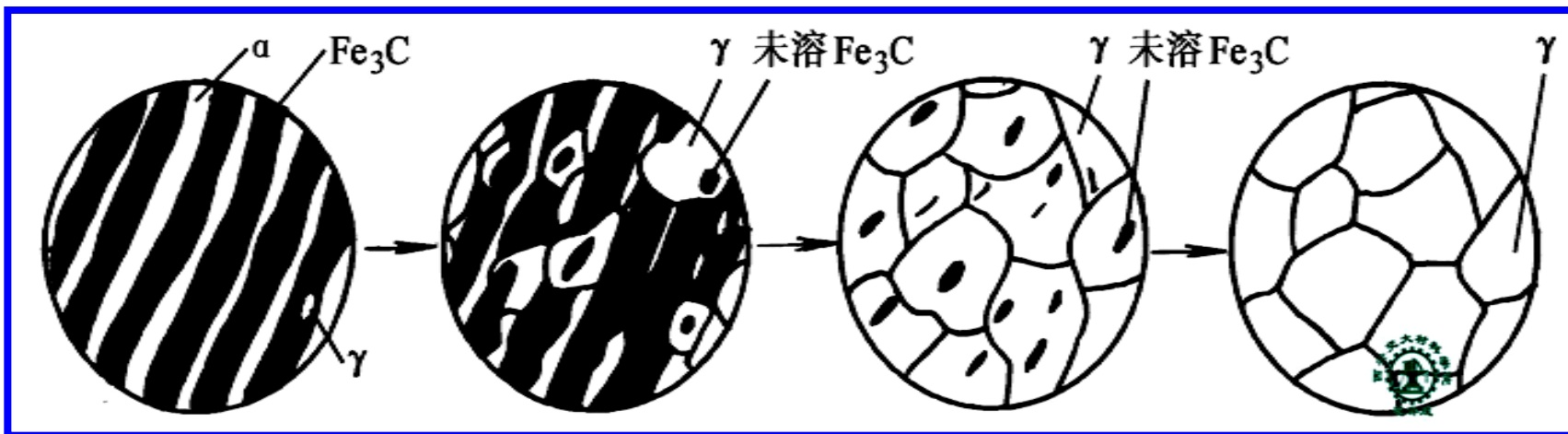
## TRANSFORMATION OF STEEL AS BEING HEATED

加热保温的目的：获得成分均匀、晶粒细小的奥氏体

THE END

# 一、奥氏体的形成

## 1. 共析钢奥氏体的形成过程



共析钢奥氏体的形成过程示意图

## 2. 亚共析钢和过共析钢的奥氏体形成过程

THE END

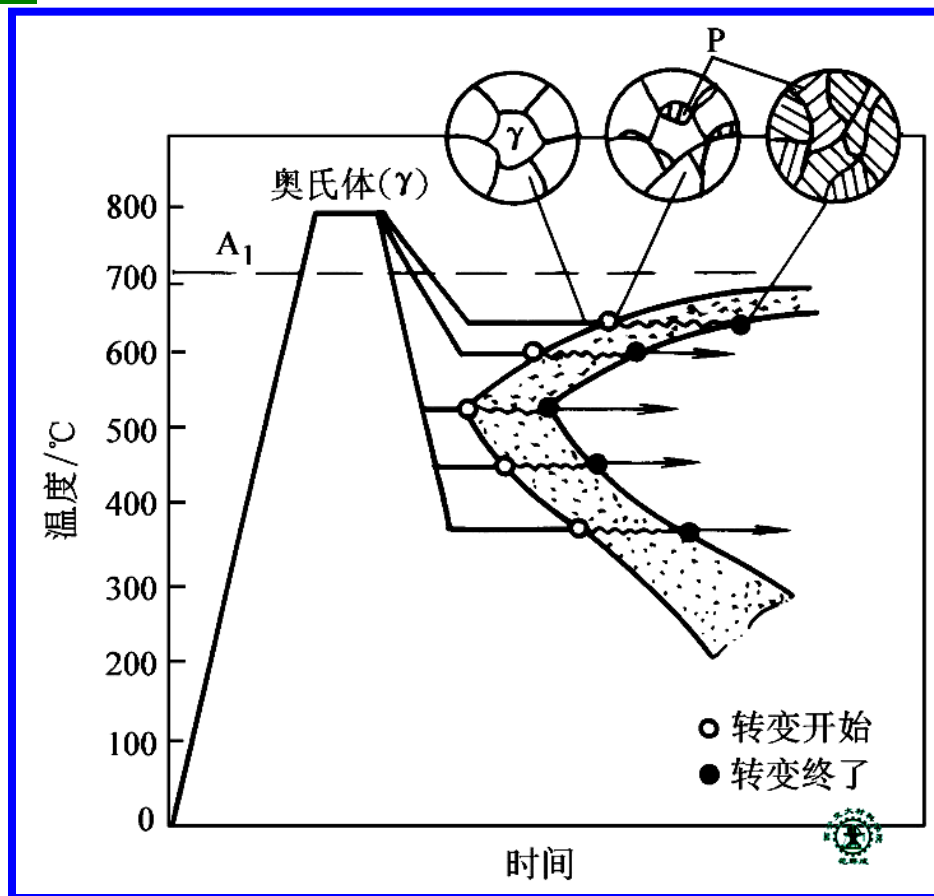
## 第二节 奥氏体转变图

# TRANSFORMATION DIAGRAM OF AUSTENITE

### 一、奥氏体等温转变图

#### 1. 奥氏体等温转变图测定原理

共析钢 C 曲线测定原理示意图



THE END

## 2. 共析钢的奥氏体等温转变图分析

$A_1 \sim 550^\circ\text{C}$

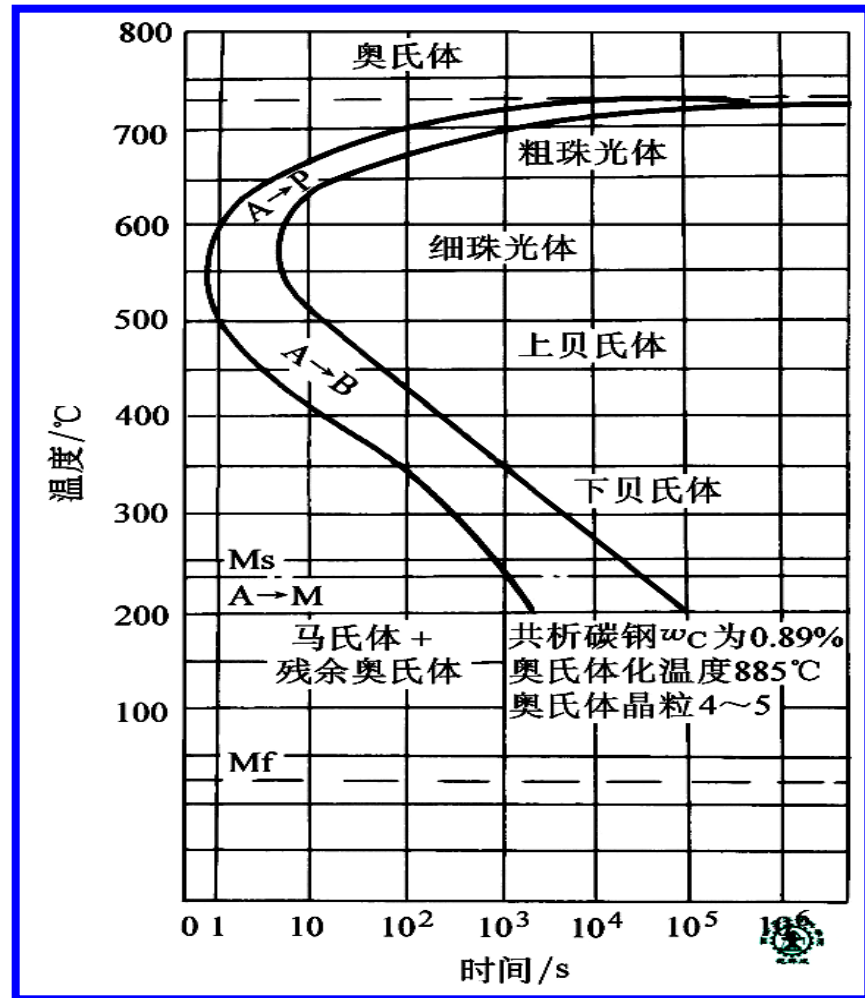
珠光体型转变

$550 \sim 230^\circ\text{C}$

贝氏体型转变

$< 230^\circ\text{C}$

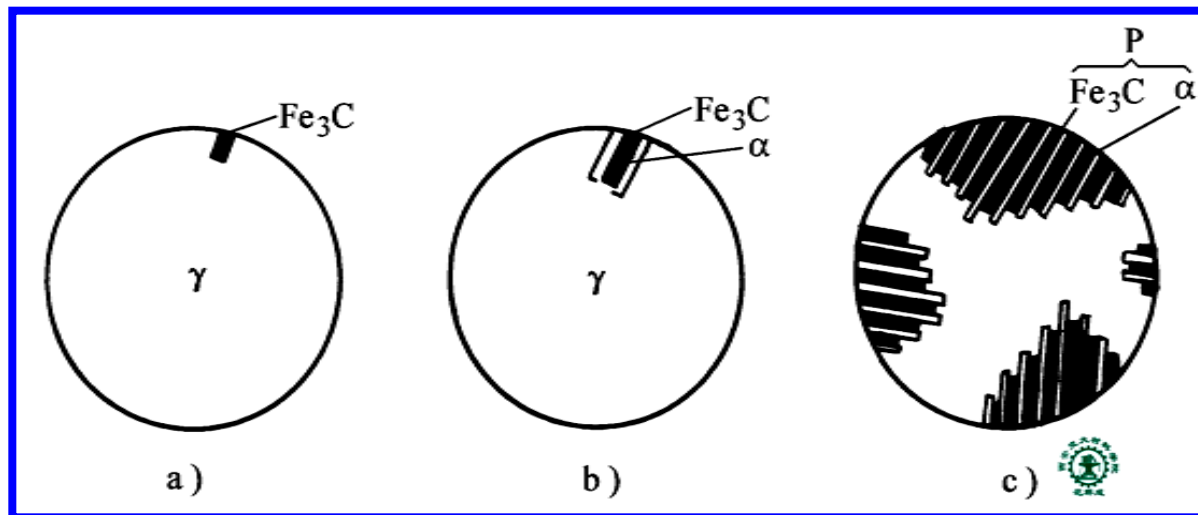
马氏体型转变



共析钢的奥氏体等温转变图

THE END

# 1) 珠光体型转变



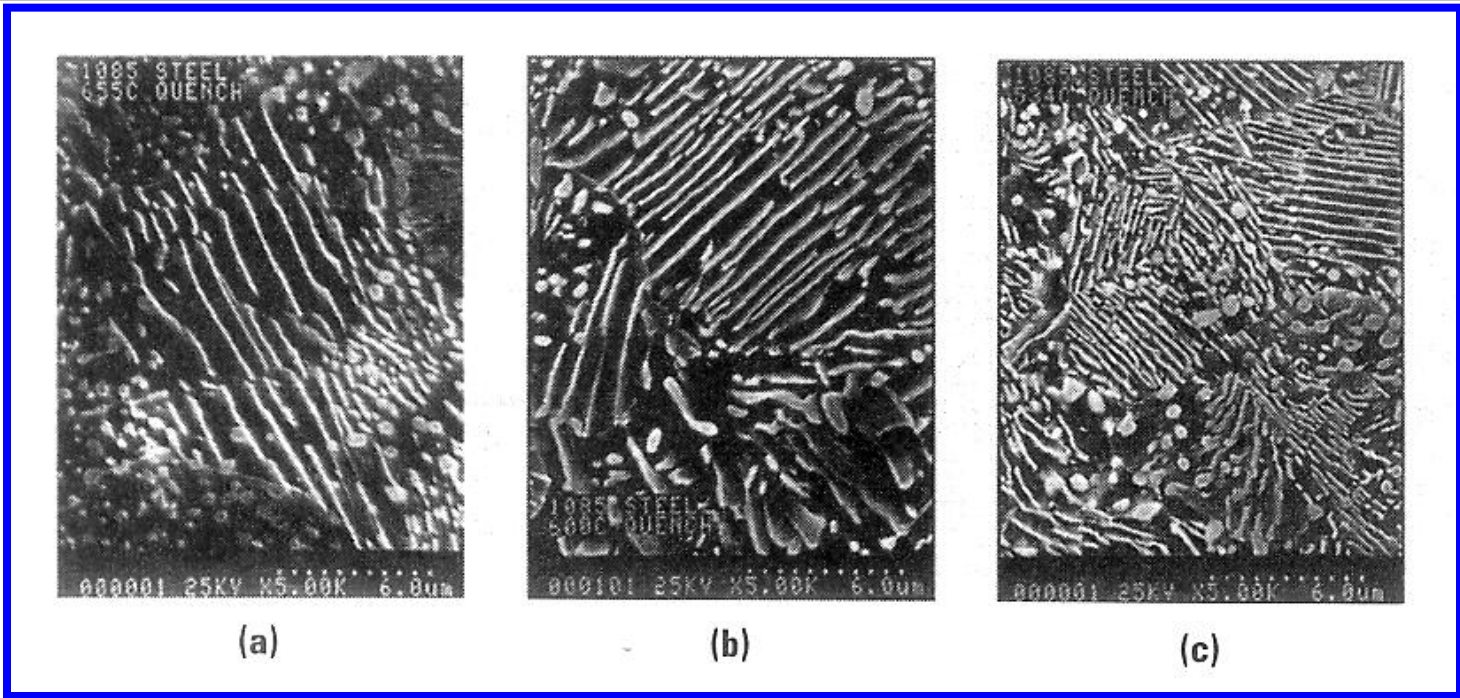
珠光体形成示意图

$A_1 \sim 650^\circ\text{C}$  珠光体(P) — 粗片状铁素体与渗碳体交替排列的混合物

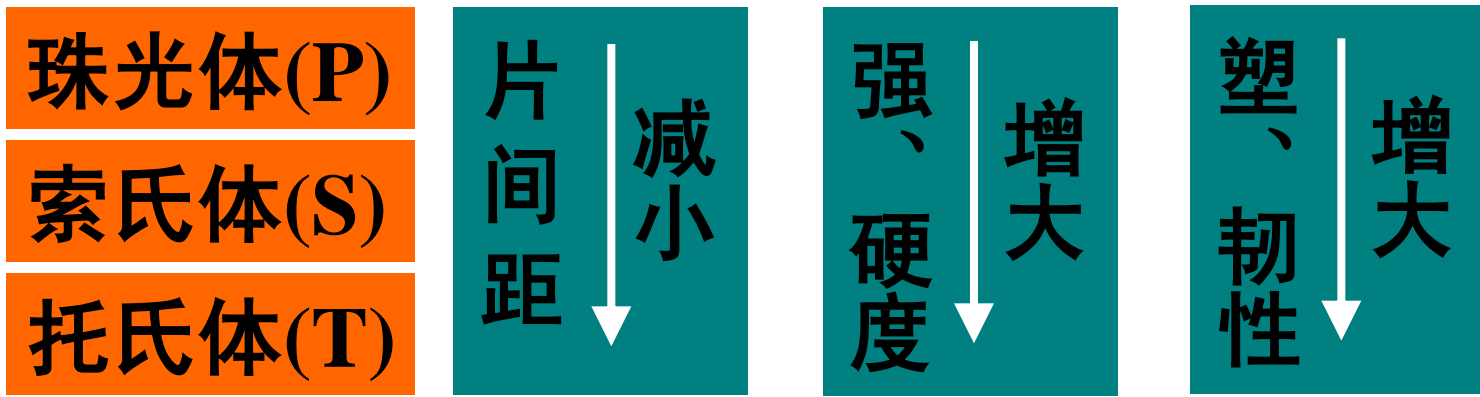
$650 \sim 600^\circ\text{C}$  索氏体(S) — 细片状铁素体与渗碳体交替排列的混合物

$600 \sim 550^\circ\text{C}$  托氏体(T) — 极细片状铁素体与渗碳体交替排列的混合物

THE END



不同等温温度形成的珠光体显微组织 (a) 655°C (b) 600°C (c) 534°C





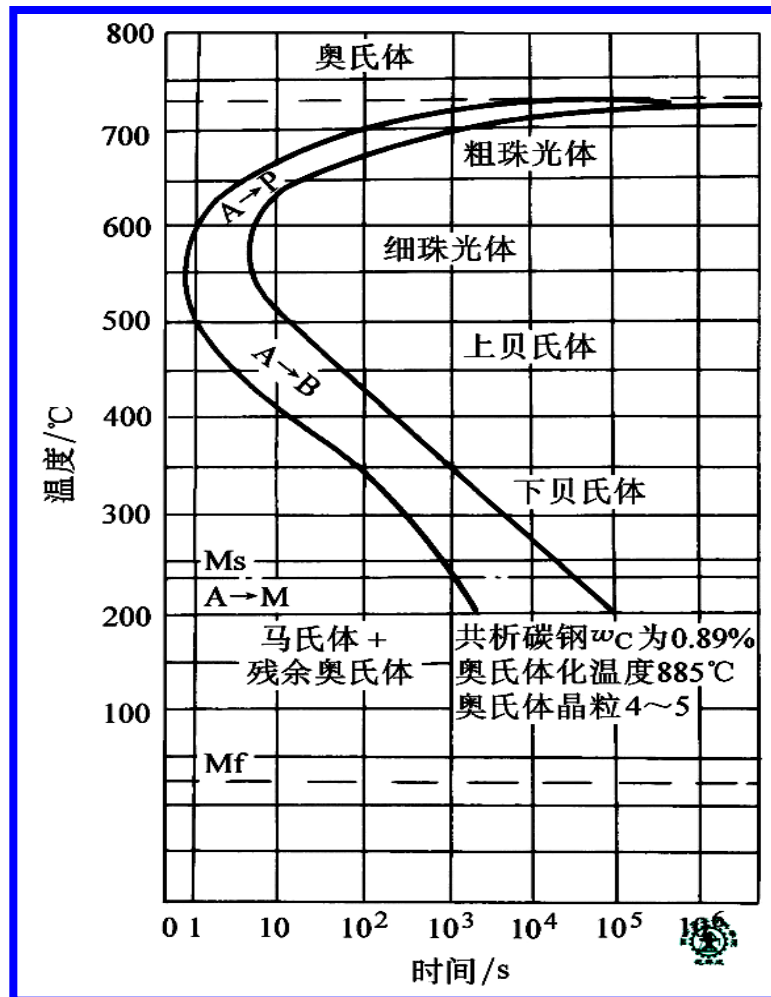
## 2) 贝氏体型转变

**贝氏体 (B)** — 过饱和铁素体与渗碳体组成的混合物

550~350°C **上贝氏体 (B<sub>上</sub>)**

350~230°C **下贝氏体 (B<sub>下</sub>)**

**上贝氏体 (B<sub>上</sub>)** — 相互平行的过饱和铁素体片与分布在片间的断续细小渗碳体组成的羽毛状混合物。脆性大性能差

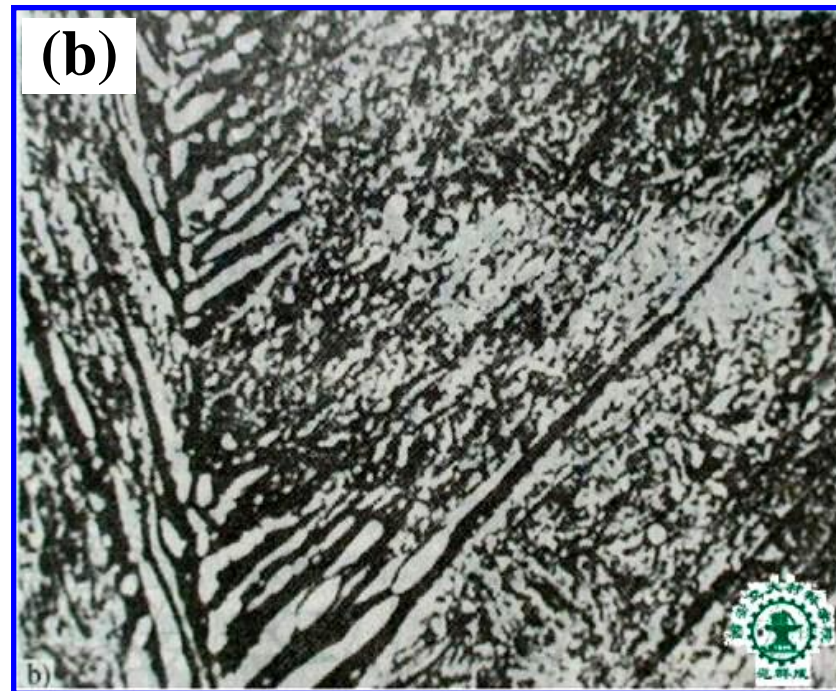
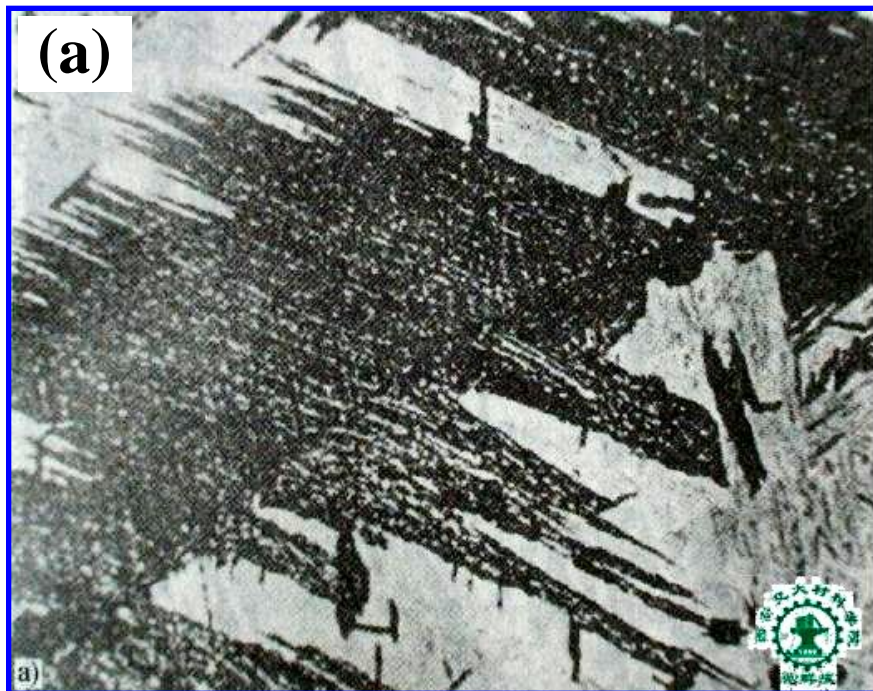


共析钢的奥氏体等温转变图

THE END



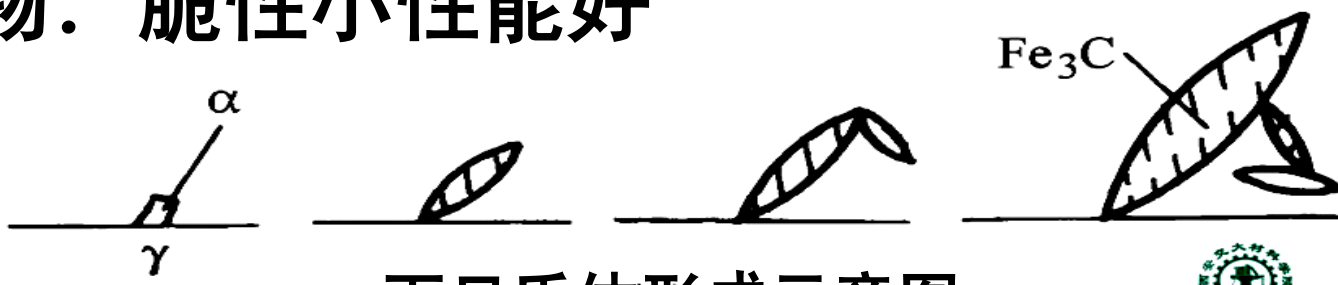
上贝氏体形成示意图



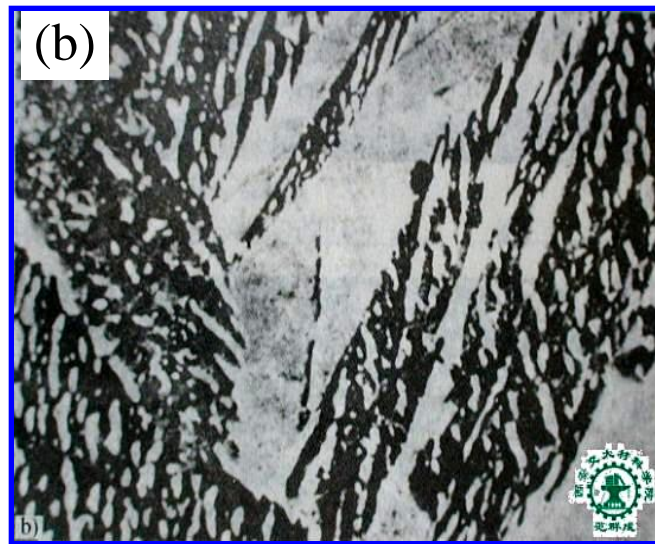
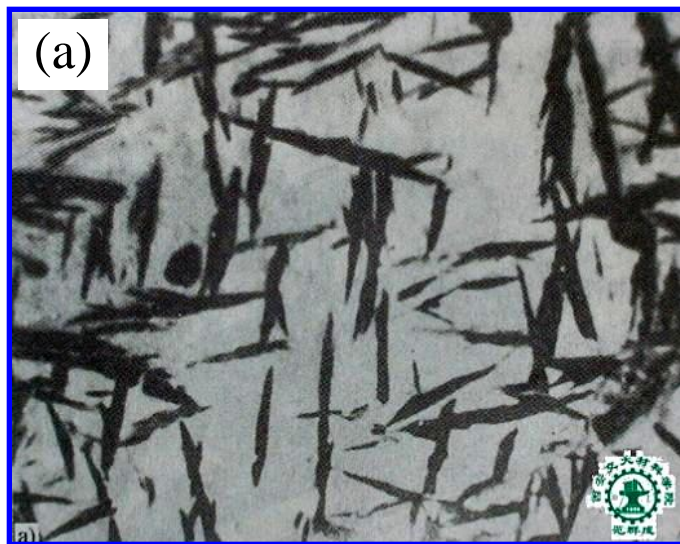
上贝氏体的显微组织 (a)光镜 (b)扫描电镜

THE END

**下贝氏体 ( $B_{\text{下}}$ )** — 针叶状的过饱和铁素体与分布在其中的极细小的渗碳体粒子组成的混合物。脆性小性能好



下贝氏体形成示意图



下贝氏体的显微组织 (a)光镜 (b)扫描电镜

THE END

### 3) 马氏体型转变

$T < 230^{\circ}\text{C}$  马氏体(M)

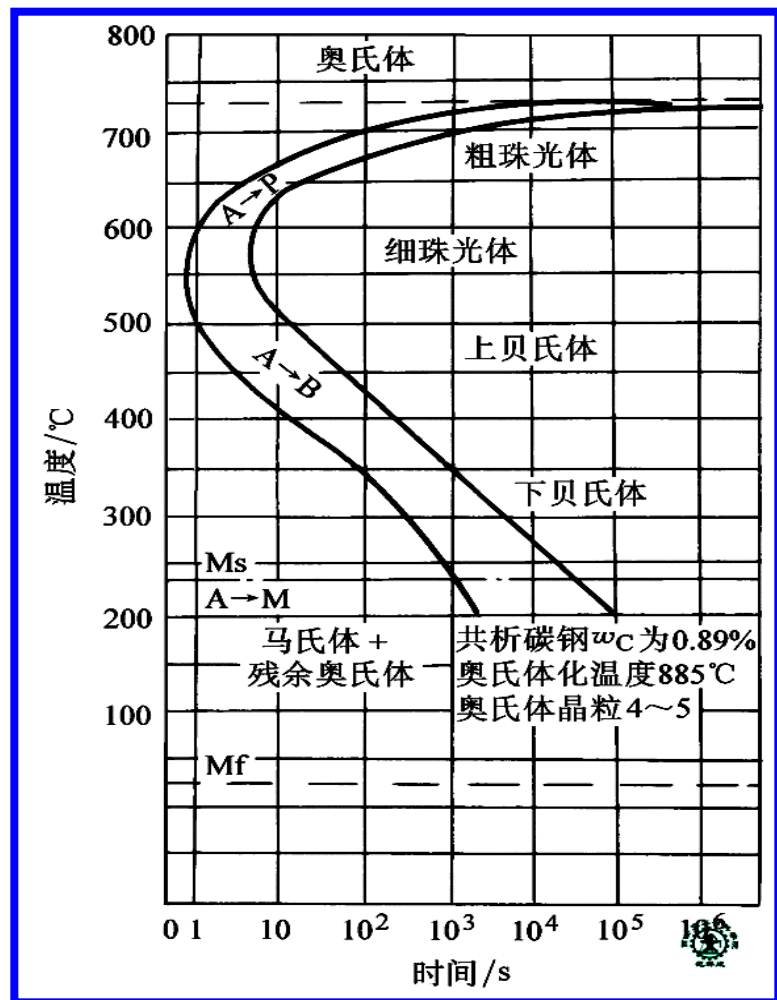
**马氏体(M)** — 碳在  
 $\alpha\text{-Fe}$ 中的过饱和固溶体

**高碳马氏体** ( $w_C > 1.0\%$ )

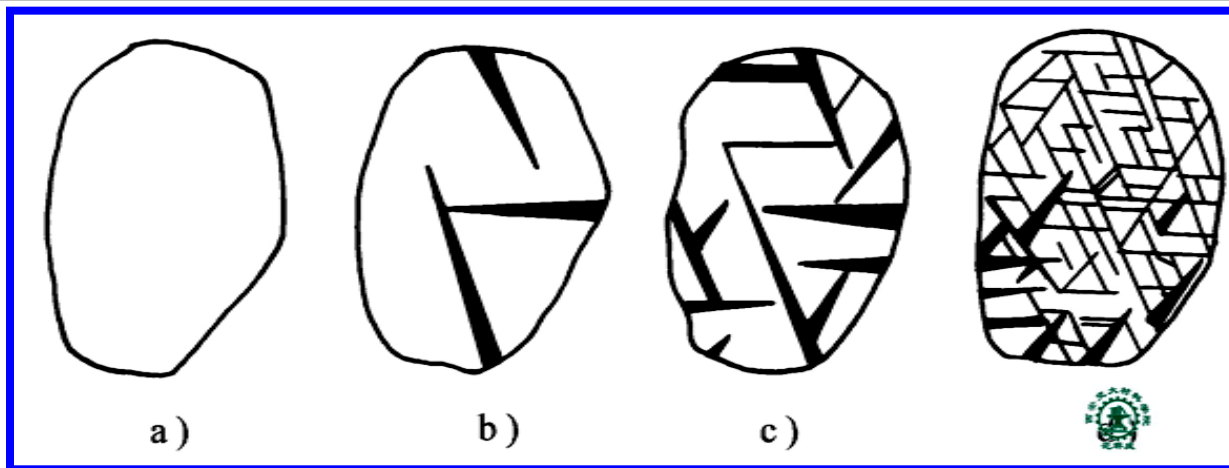
片(或针)状, 硬而脆

**低碳马氏体** ( $w_C < 0.25\%$ )

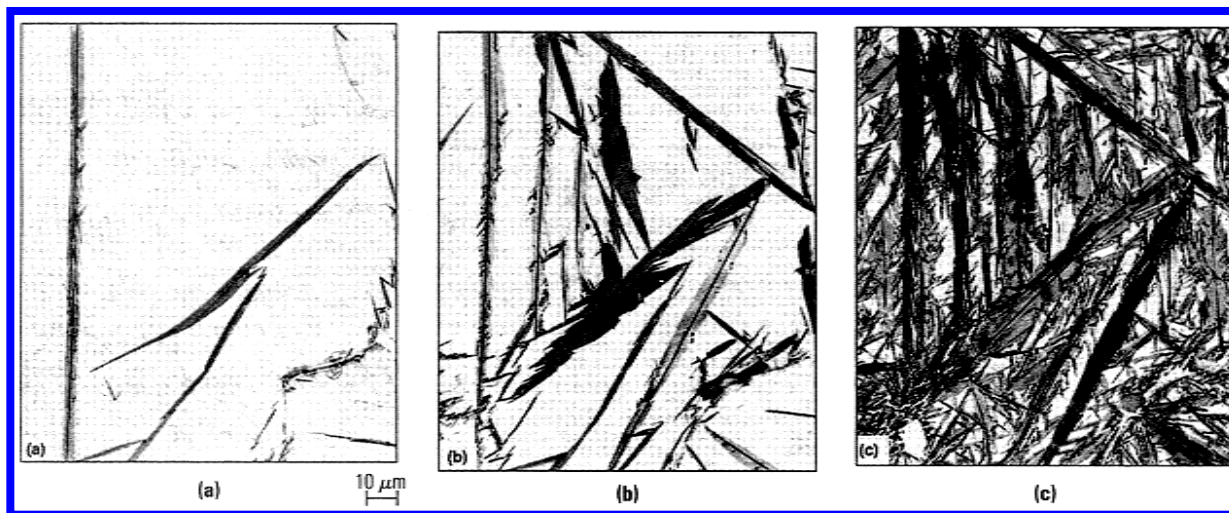
板条状, 强而韧



共析钢的奥氏体等温转变图

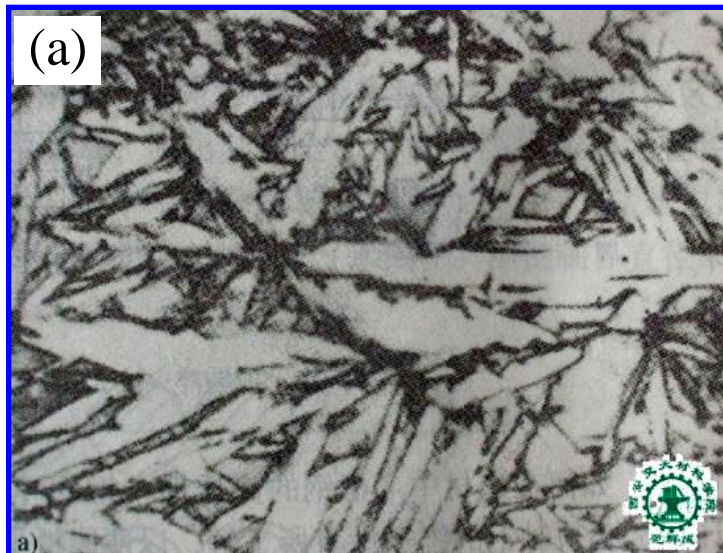


高碳马氏体形成过程示意图

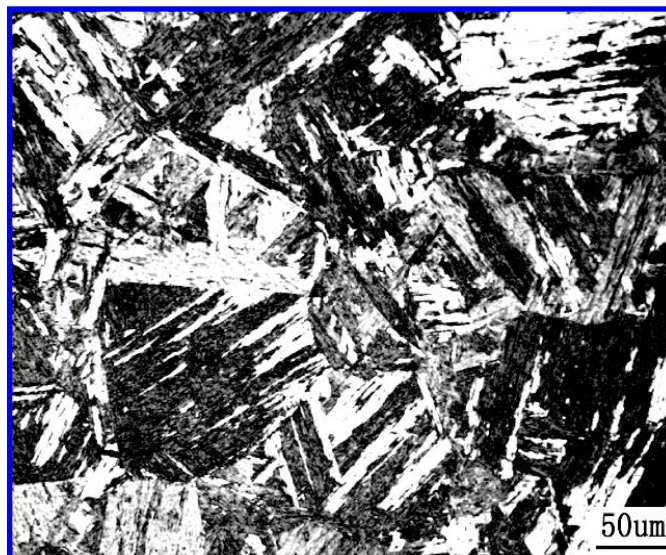


Fe-1.8 wt. % C合金冷却到下列不同温度形成高碳马氏体的过程  
(a) 24 °C (b) -60 °C (c) -100 °C

THE END



高碳马氏体的显微组织 a) 淬火态 b) 回火态

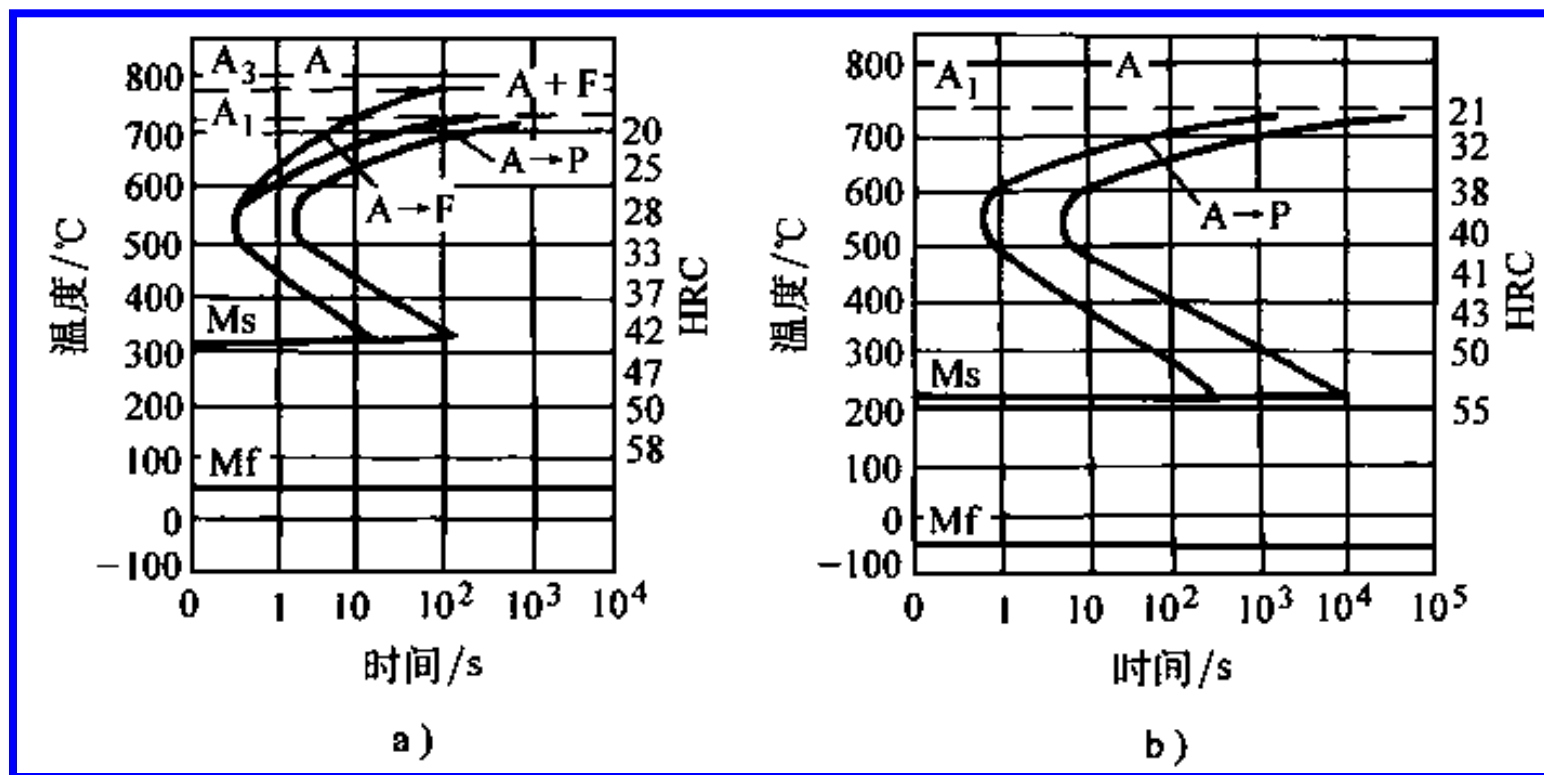


低碳马氏体的显微组织

THE END

### 3. 亚共析钢的奥氏体等温转变图

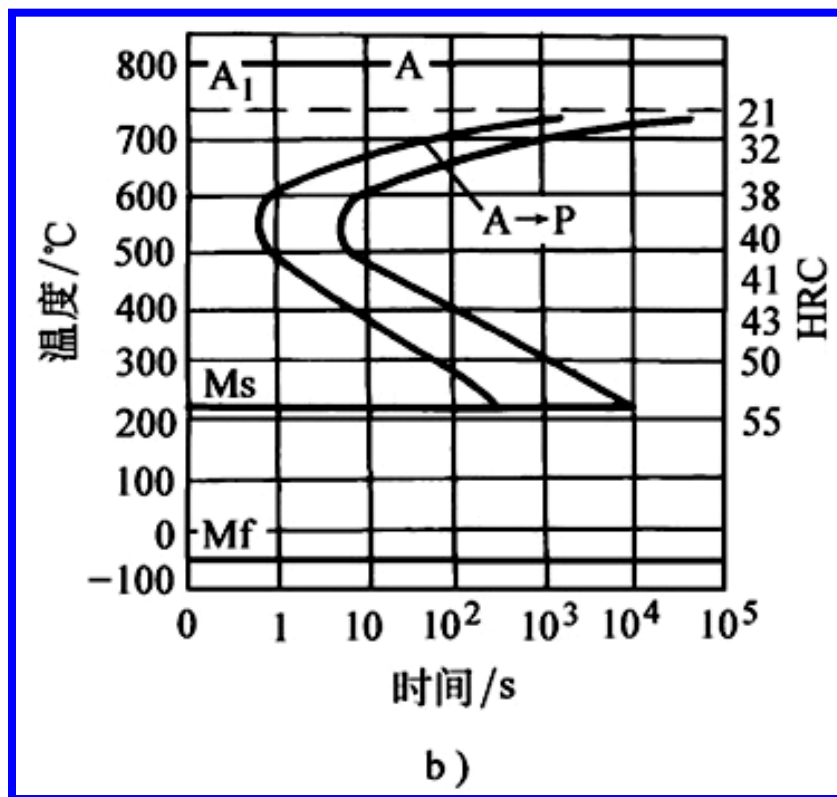
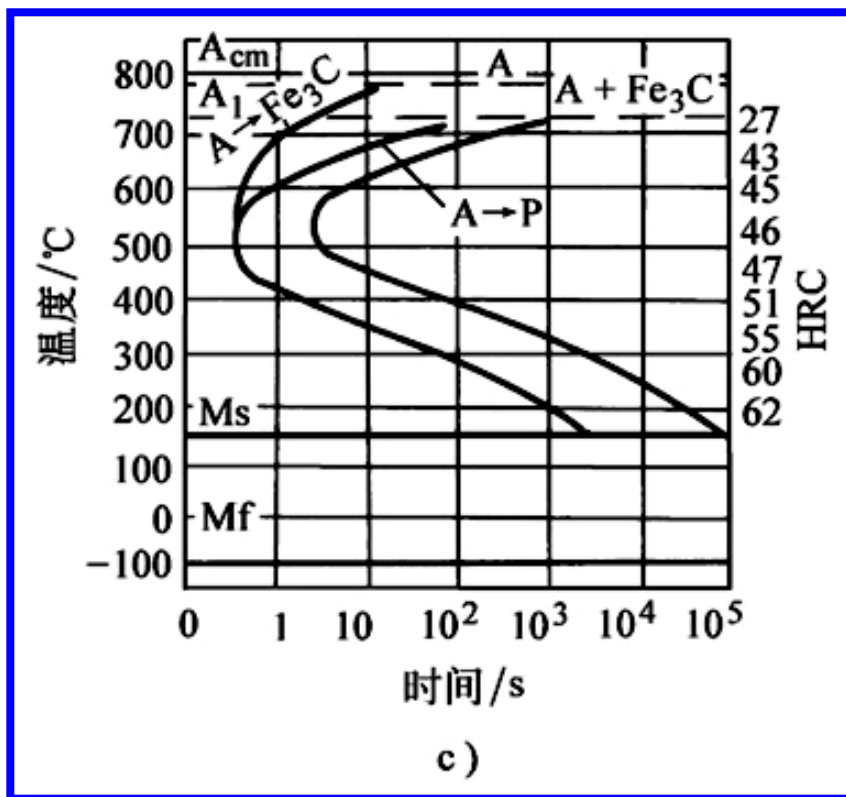
与共析钢的奥氏体等温转变图相比，亚共析钢的奥氏体等温转变图多一条  $A \rightarrow F$  转变线



亚共析钢等温转变图(a)与共析钢等温转变图(b)的比较

## 4. 过共析钢的奥氏体等温转变图

与共析钢的奥氏体等温转变图相比，过共析钢的奥氏体等温转变图多一条  $A \rightarrow Fe_3C$  转变线



过共析钢等温转变图(c)与共析钢等温转变图(b)的比较



## 5. 影响奥氏体等温转变图的主要因素

### 1) 碳含量的影响

形状

亚共析钢的多一条A→F线

过共析钢的多一条A→Fe<sub>3</sub>C线

位置

共析钢的最靠右

### 2) 合金元素的影响

形状

不讲

位置

除Co外，其他都使“C”曲线右

THE END

## 二、奥氏体连续冷却转变图（以共析钢为例）

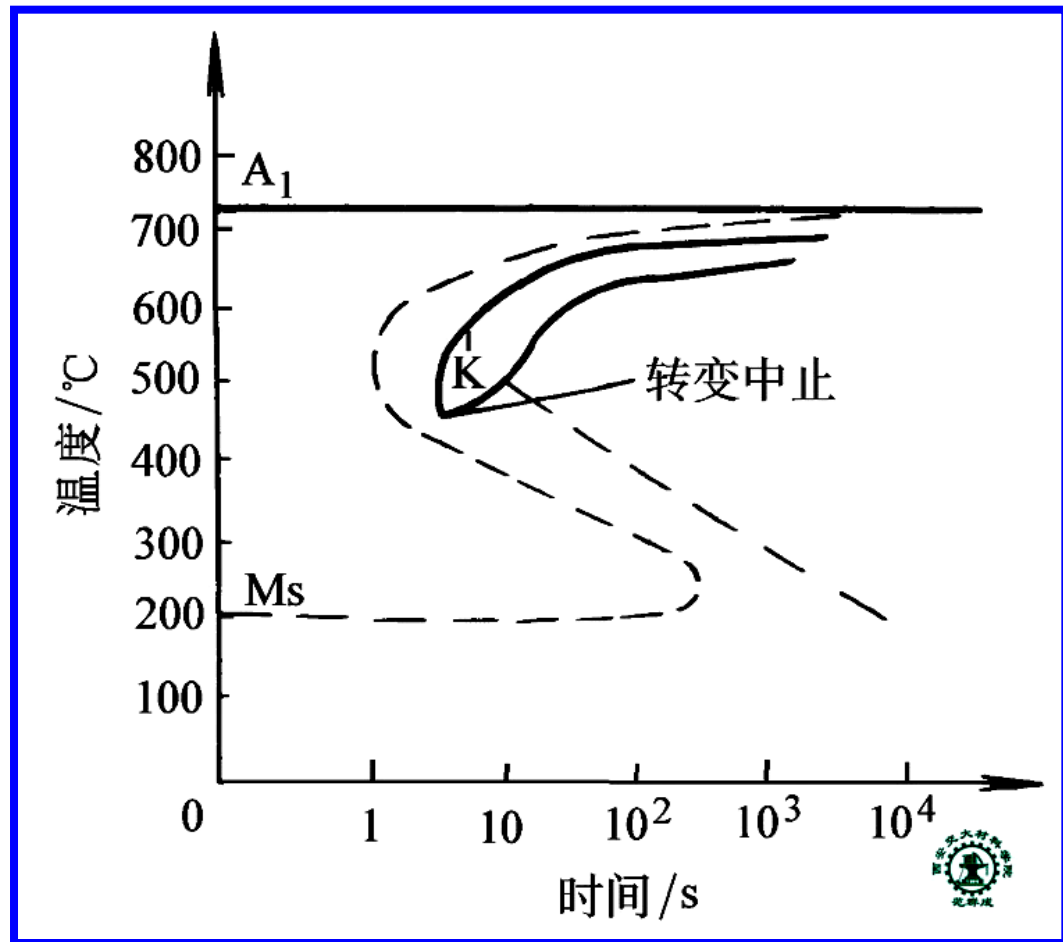
与“C”曲线相

向右下方移动

多一条珠光体转变中止线  $K'$

无贝氏体转变

共析钢奥氏体连续冷却转变图（实线）与等温转变图（虚线）的比较



THE END

### 三、用等温转变图定性判断连续冷却转变产物

$v_1$  — P

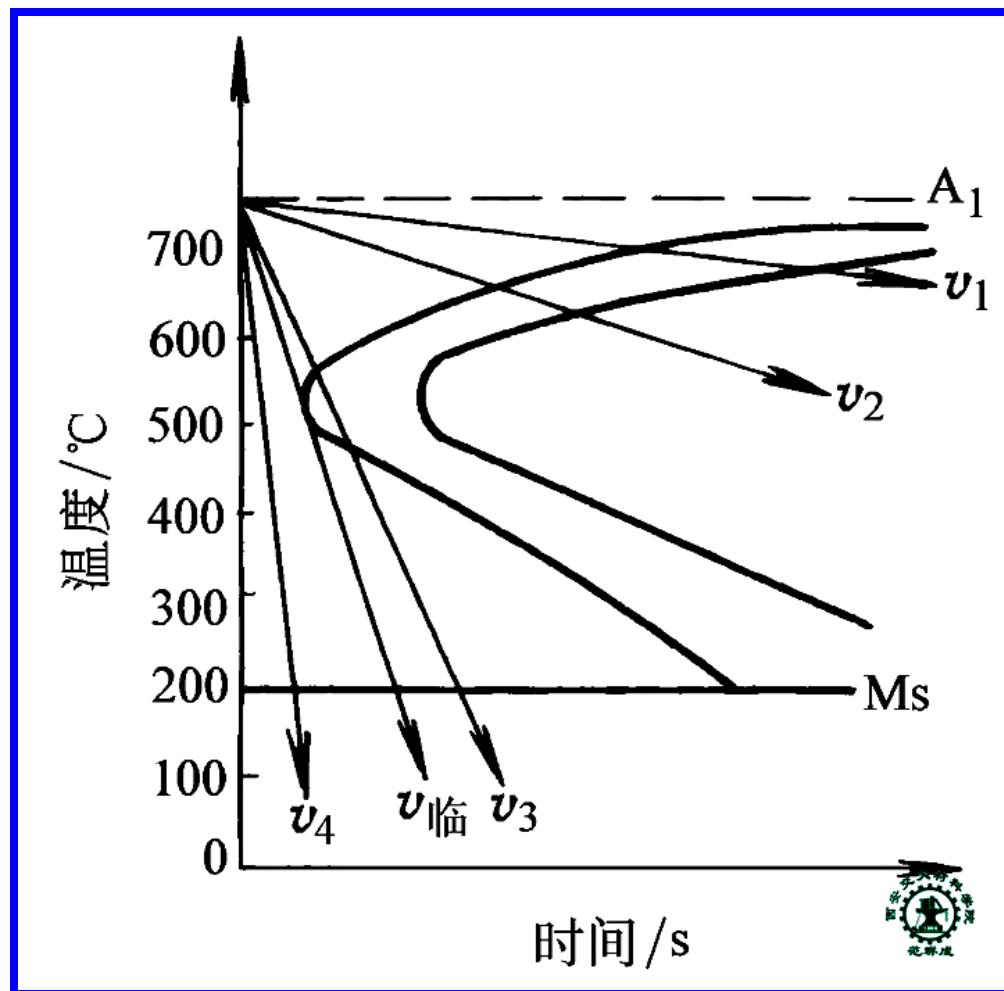
$v_2$  — S

$v_3$  — T + M + A'

$v_4$  — M + A'

$v_C$  — M + A'

共析钢奥氏体等温转变图  
在连续冷却时应用示意图



THE END

# 第三节 钢的普通热处理

## COMMON HEAT TREATMENT OF STEEL

钢的退火

钢的正火

钢的淬火

钢的回火

THE END

# 一、钢的退火

钢的退火

完全退火

球化退火

再结晶退火

去应力退火

均匀化退火

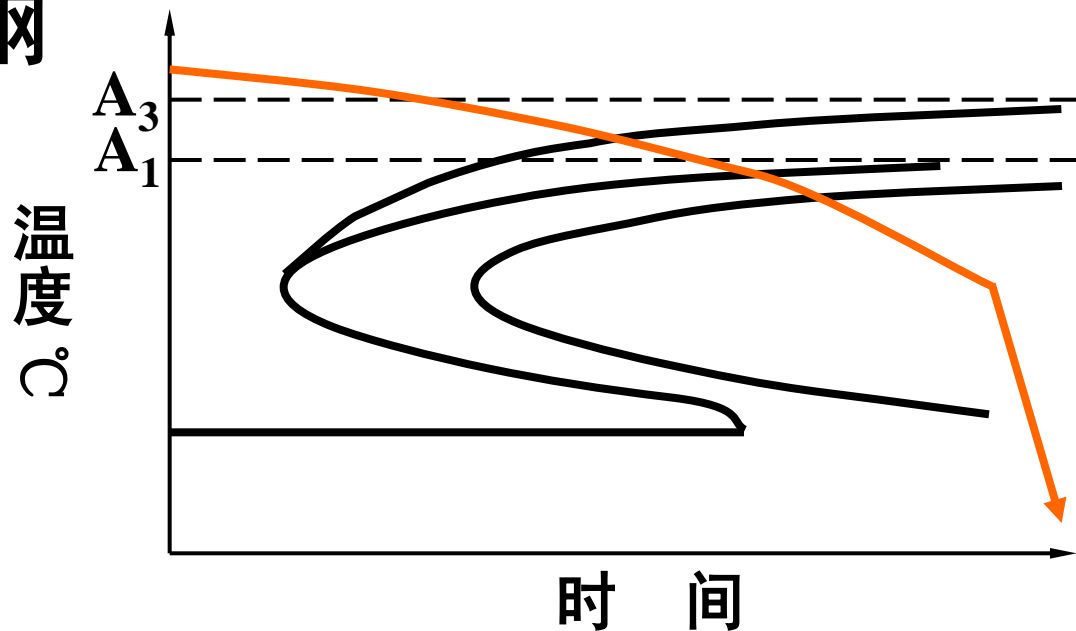
THE END

## 1. 完全退火

1) 工艺:  $A_{c3}$  以上  $30 \sim 50^\circ\text{C}$  加热保温后, 随炉冷却至  $500^\circ\text{C}$  以下出炉空冷

2) 适用于: 中碳钢

3) 组织: F + P



4) 目的: 调整硬度, 以利切削  
细化组织, 提高力学性能

40  
钢完全退火

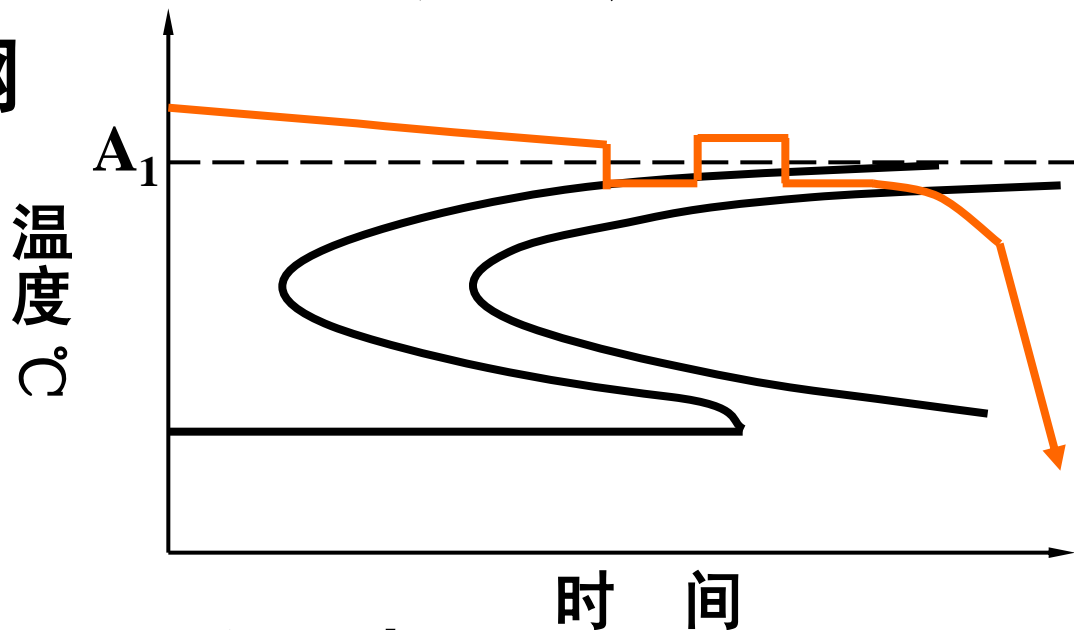


## 2. 球化退火

1) 工艺:  $A_{c1}$  以上  $30 \sim 50^\circ\text{C}$  加热保温后, 在  $A_1$  温度上下反复升温降温, 后随炉冷却至  $600^\circ\text{C}$  以下出炉空冷

2) 适用于: 高碳钢

3) 组织:  $P_{\text{球}}$



4) 目的: 调整硬度, 以利切削



## 二、钢的正火

### 1. 工艺

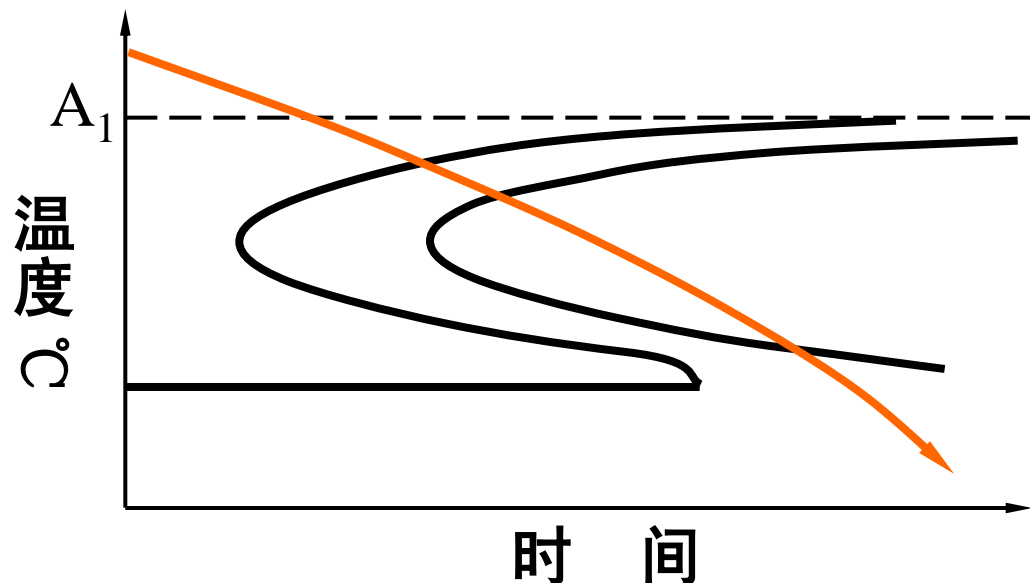
亚共析钢： $A_{c3}$ 以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 加热、空冷  
 共析钢： $A_{c1}$ 以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 加热、空冷  
 过共析钢： $A_{cm}$ 以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 加热、空冷

### 3. 组织

亚共析钢： $F+S$

共析钢： $S$

过共析钢： $S+Fe_3C_{II}$



### 2. 目的

低碳钢：调整硬度，以利切削

过共析钢：消除网状 $Fe_3C_{II}$ ，以利球化

中碳钢制一般零件：做为最终热处理

THE END

40  
钢  
正  
火



## 三、钢的淬火

1. 目的 获得马氏体, 以提高硬度

2. 工艺

加热后快冷 (大于临界冷却速度)

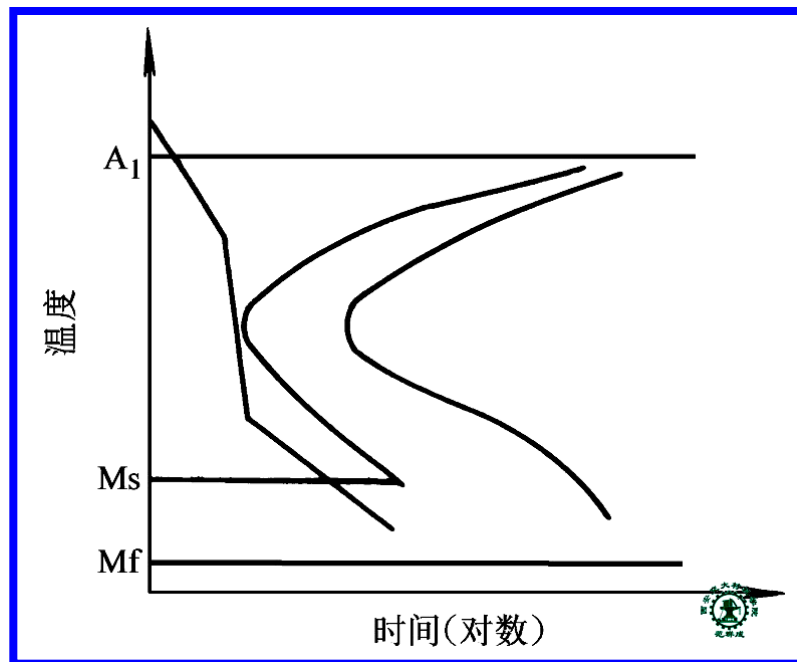
亚共析钢:  $A_{c3}$  以上  $30 \sim 50^\circ\text{C}$

共析、过共析钢:  $A_{c1}$  以上  $30 \sim 50^\circ\text{C}$

3. 淬火介质

1) 理想的冷却速度

钢的理想淬火冷却速度



THE END

## 2) 常用淬火介质

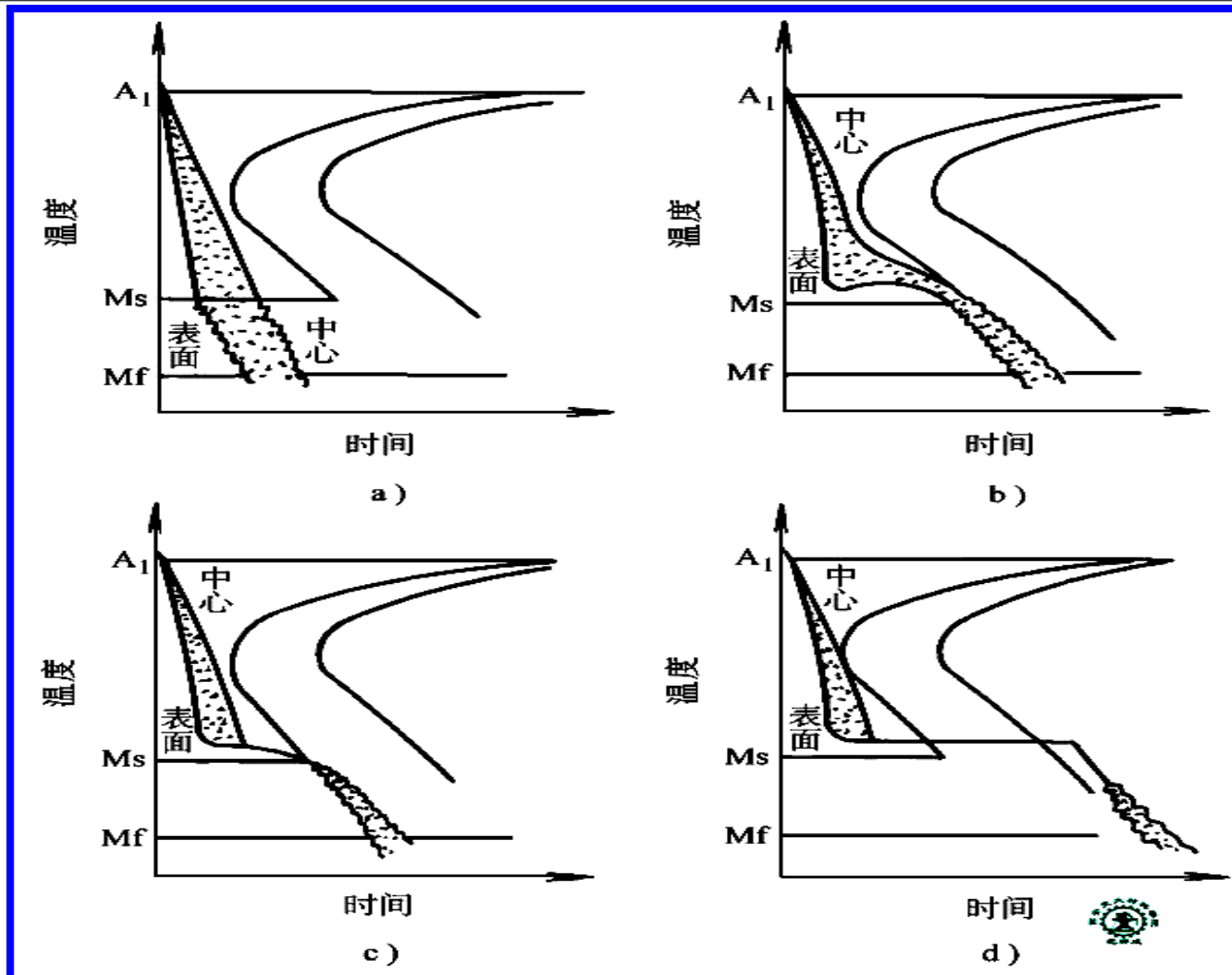
### “神刀蒲元”的故

**水：** 淬冷能力强，但工件表面有软点，易变形开裂

**盐水：** 淬冷能力更强，工件表面光洁、无软点，但更易变形开裂

**油：** 淬冷能力弱，但工件不易变形开裂

## 4. 常用淬火方法



### 常用淬火方法示意图

(a) 单液淬火法 (b) 双液淬火法 (c) 分级淬火法 (d) 等温淬火法

40  
钢  
淬  
火

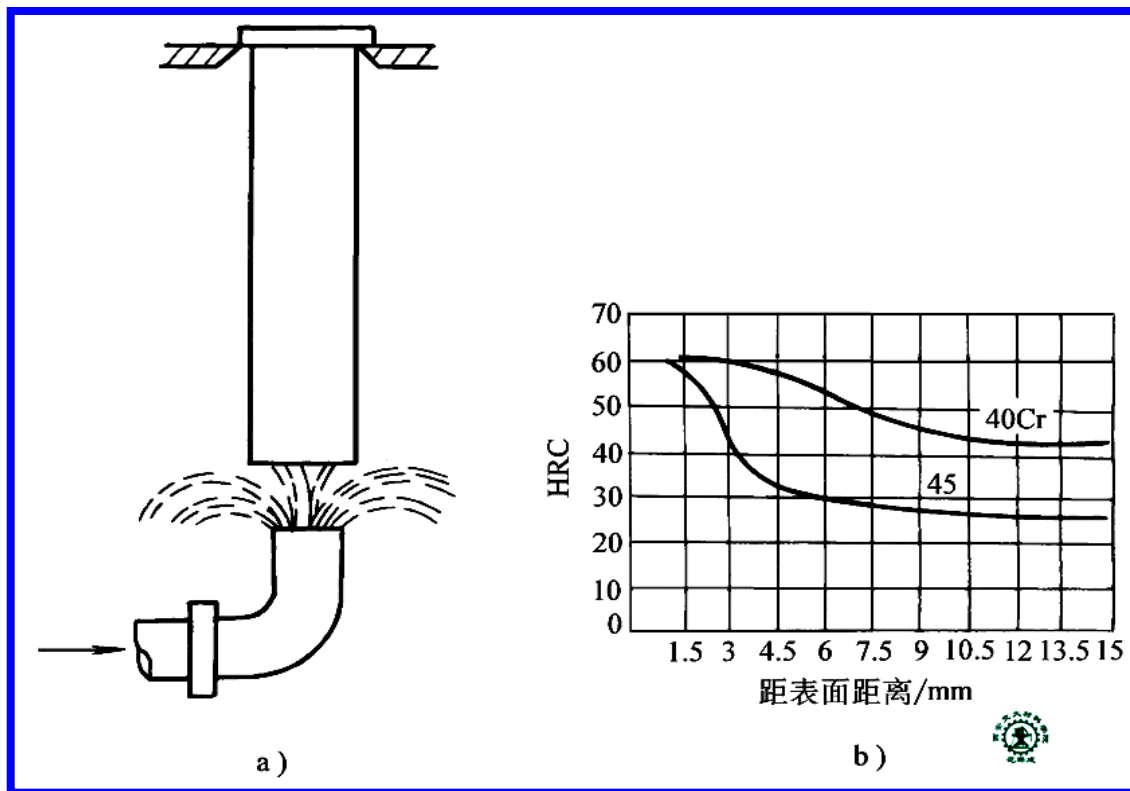


## 4. 钢的淬透性

1) **钢的淬透性**— 钢在淬火时获得**淬硬层**深度大小的能力

**淬硬层**— 工件表面至半马氏体层之间的区域

(a) 顶端淬火法  
(b) 淬透性曲线



THE END

## 2) 影响淬透性的主要因素

钢的  $w_C$  %

共析钢的最高

合金元素:

除Co外, 其他都提高淬透性

**淬硬性**—正常淬火条件下, 以超过临界冷却速度冷却所形成的马氏体达到的硬度高低. 主要取决于钢的含碳量.

## 3) 如何在选材中考虑钢的淬透性

横截面受力均匀的零件:

淬透性要高

横截面受力不均匀的零件:

淬透性不必高

避免脆性断裂的零件:

淬透性不能高

THE END



## 四、钢的回火

### 1. 工艺

将淬过火的钢在 $A_1$ 以下温度加热保温后空冷

### 2. 目的

消除内应力，降低脆性

降低硬度，提高塑性

稳定组织，稳定尺寸

### 3. 回火的种类、组织、性能及应用

种 类	低温回火	中温回火	高温回火
温 度	150~250℃	350~500℃	500~650℃
组 织	$M_{\text{回}} + A_{\text{残}}$	$T_{\text{回}}$	$S_{\text{回}}$
性 能	高硬度 高耐磨 HRC58~64	高 $\sigma_s$ 、高 $\sigma_e$ 一定韧性 HRC35~45	适当的强、硬度 足够的塑、韧性 HRC25~35
应 用	工具、滚动轴承	弹 簧	重要零件

回火马氏体  $M_{\text{回}}$

过饱和 $\alpha$ 固溶体 +  $\varepsilon$  碳化物

回火托氏体  $T_{\text{回}}$

F + 极细粒状  $Fe_3C$

回火索氏体  $S_{\text{回}}$

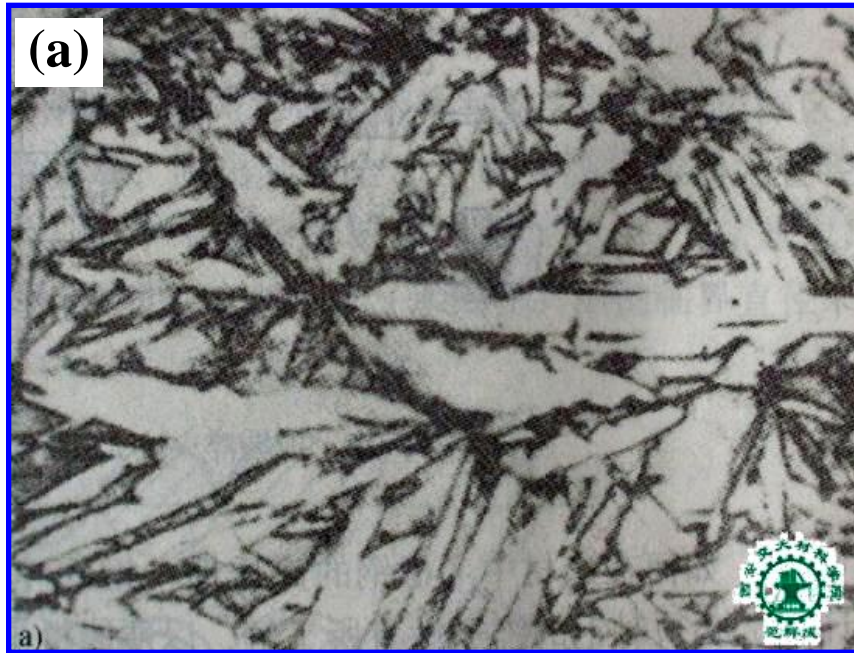
F + 细粒状  $Fe_3C$

注意：相同硬度下

$\left\{ \begin{array}{l} M_{\text{回}} \text{ 比 } M \\ T_{\text{回}} \text{ 比 } T \\ S_{\text{回}} \text{ 比 } S \end{array} \right\}$

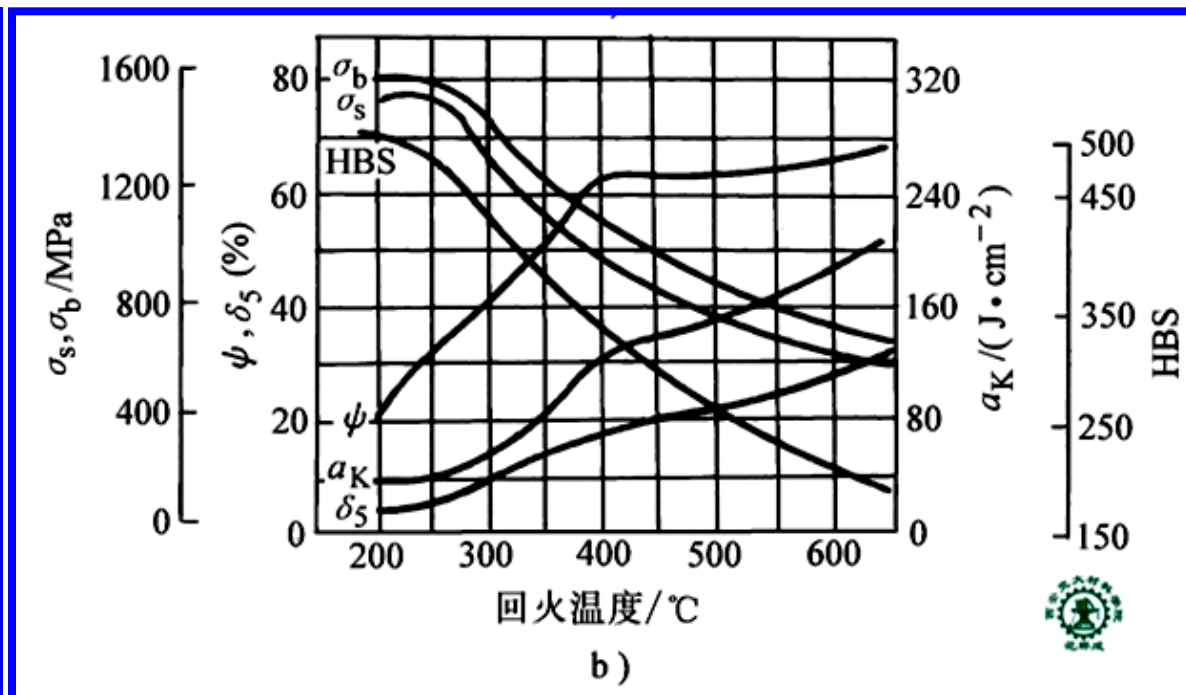
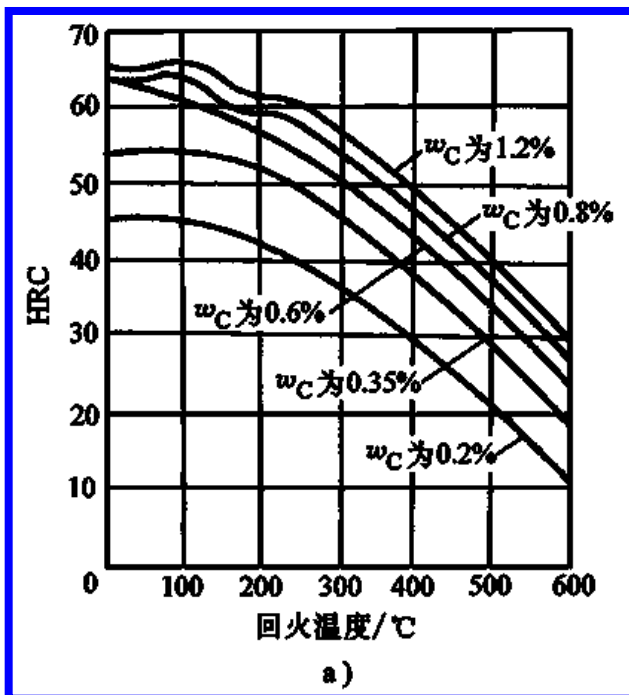
有更高强度，  
更好塑、韧性

THE END



高碳马氏体的显微组织 a) 淬火态 b) 回火态

THE END



## 钢的力学性能随回火温度的变化

a) 不同含碳量的硬度变化    b) 35钢的各种力学性能变化

THE END

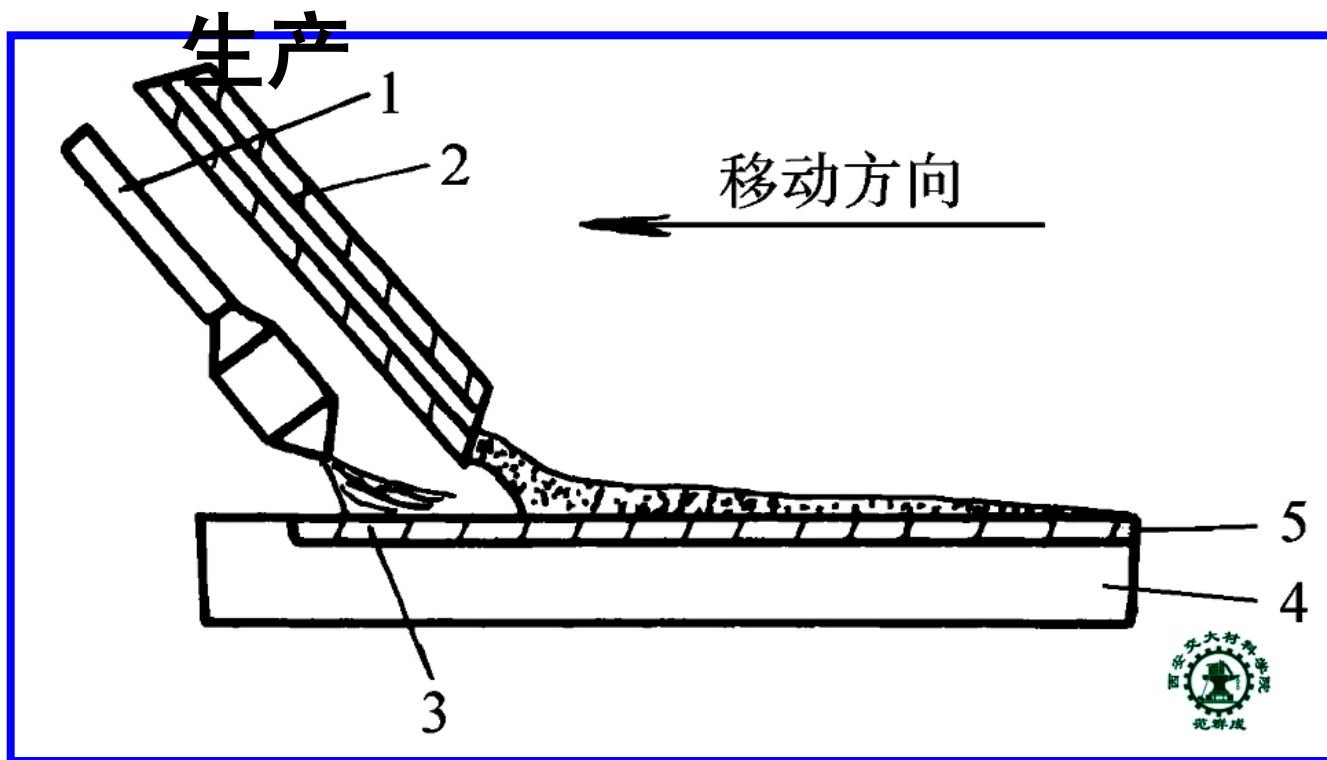
40  
钢  
高  
温  
回  
火





## 4. 火焰加热表面淬火

特点：设备简单，质量不易保证，适合单件



火焰加热表面淬火示意图

1—烧嘴 2—喷水管 3—加热层 4—工件 5—淬硬层



## 5. 感应加热表面淬火

### 1) 基本原理

感应电流的集肤效应

### 2) 感应电流频率

高频 100~500KHz 深度小

中频 500~10000Hz

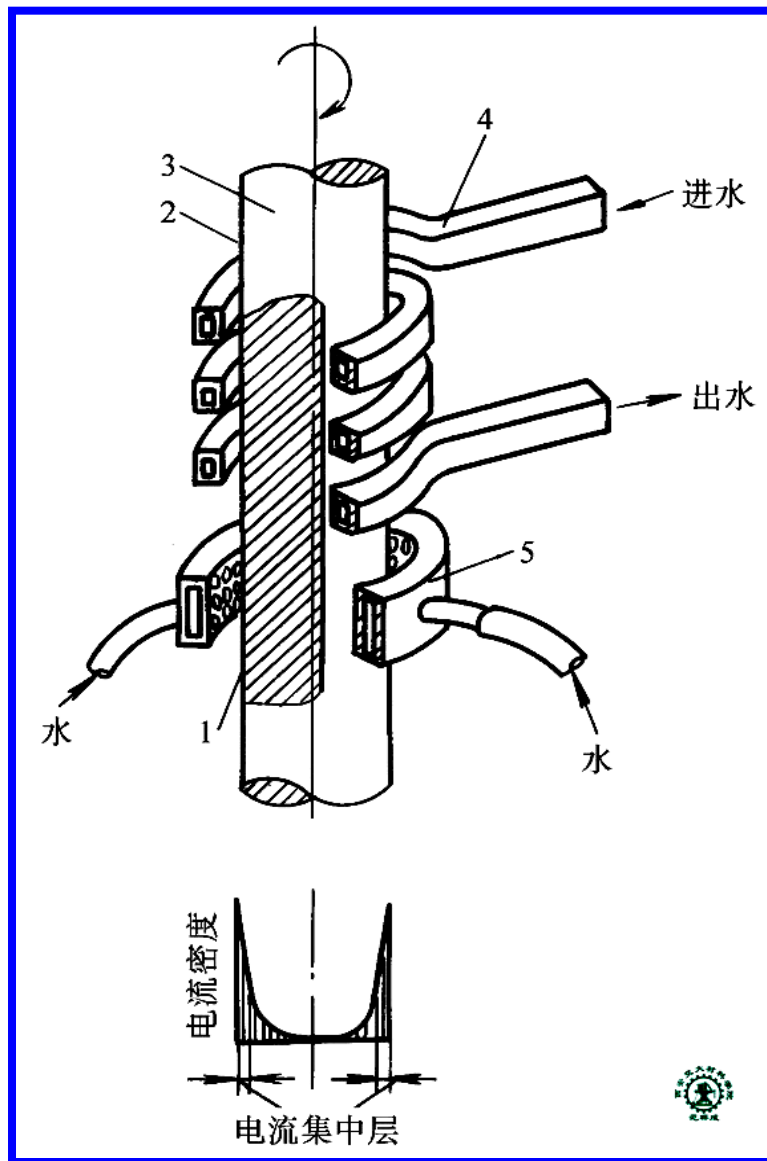
低频 50Hz 深度大

感应加热表面淬火示意图

1—加热淬火层 2—间隙

3—工件 4—加热感应圈

5—淬火喷水套



### 3) 预先热处理

(1) 目的：使工件心部具有高的综合力学性能

(2) 方法 { 一般零件：正火处理  
重要零件：调质处理 (淬火 + 高温回火)

4) 后续热处理：低温回火

5) 最终组织 { 表层：中碳  $M_{回} + A_{残}$   
心部： $S_{回}$  或  $P + F$

6) 特点：设备复杂，质量高，适合批量生产

7) **应用举例**：中碳钢制齿轮制造工艺路线

下料 → 锻造 → 退火 → 粗加工 → 调质 → 精加工  
→ 感应淬火 → 低温回火 → 精磨 → 成品

THE END

感应加热表面淬火  
齿轮的淬硬层分布



激光表面淬火的汽缸套



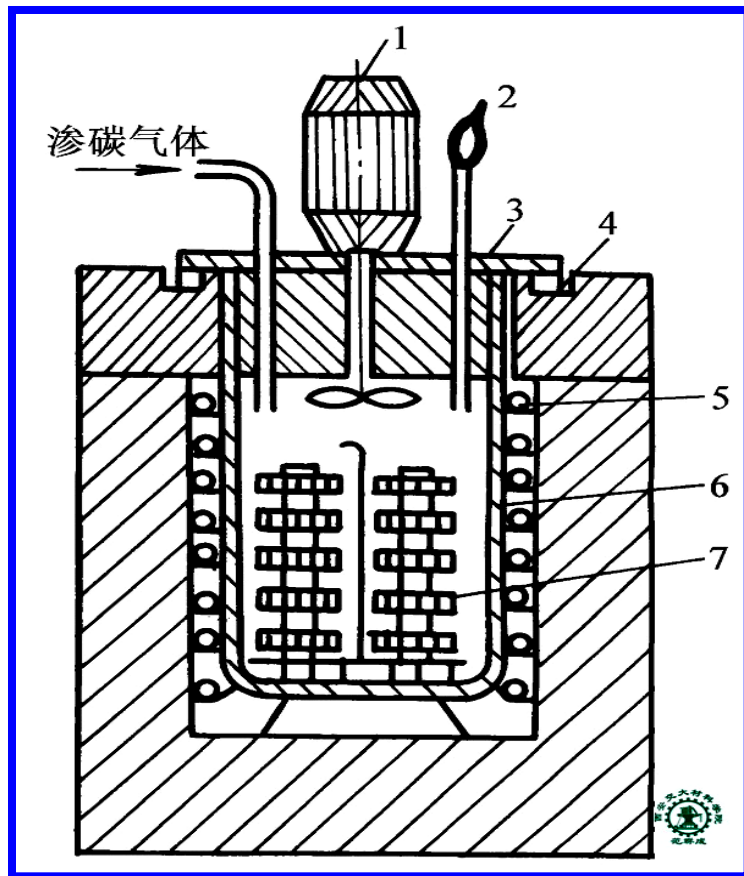
## 二、表面化学热处理

1. 目的 改变工件表层化学成分、组织，从而改善工件性能

2. 常用方法 渗碳, 渗氮

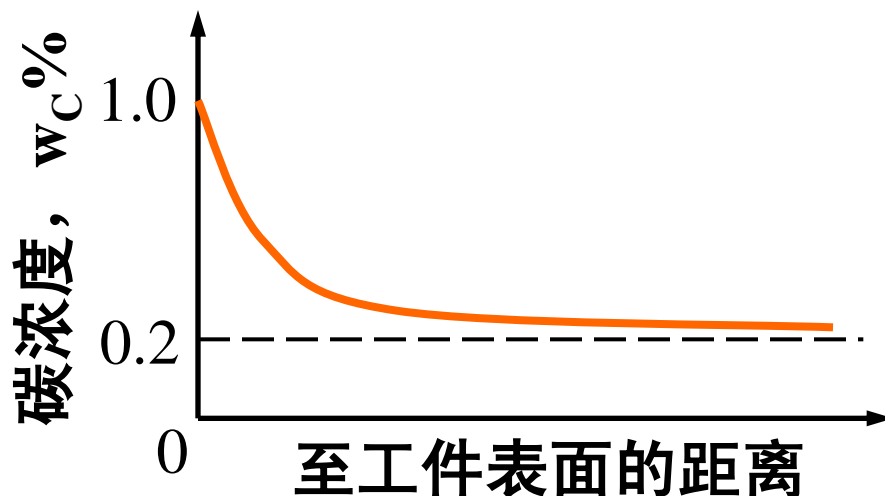
### 3. 钢的气体渗碳

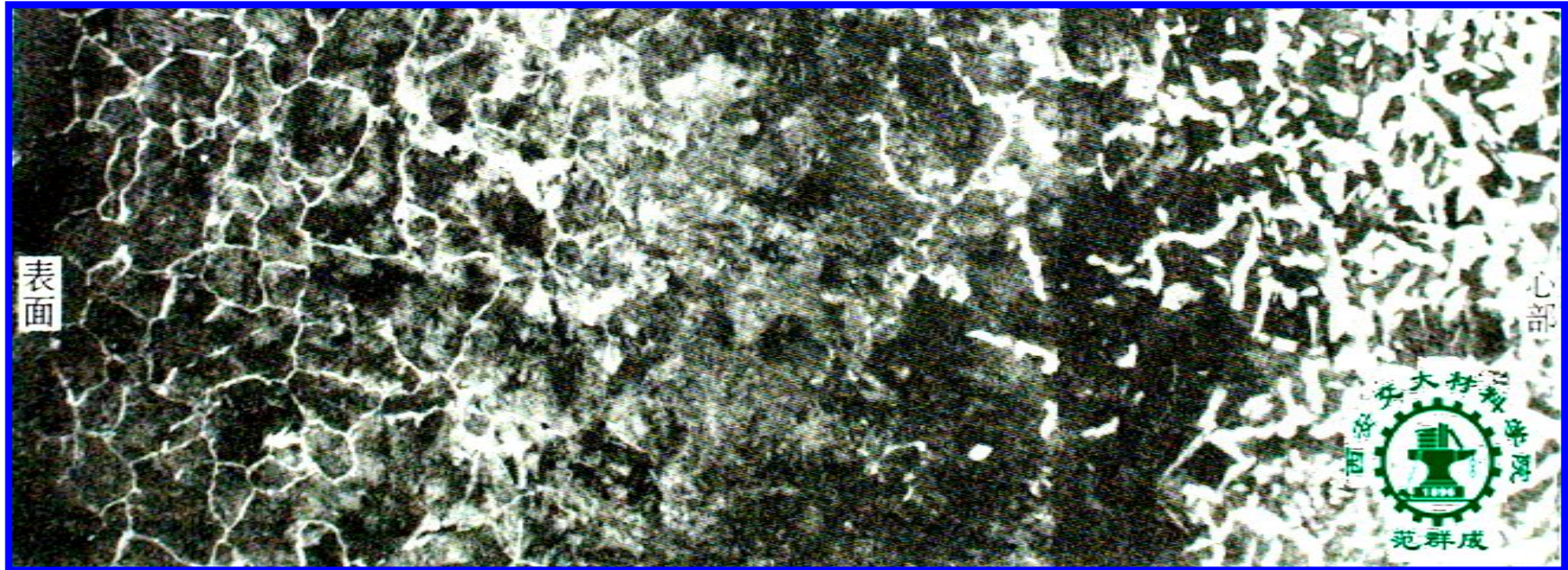
- 1) 装置：气体渗碳炉
- 2) 渗碳用钢：低碳钢
- 3) 渗碳基本原理：  
碳原子在钢件表面  
吸附、扩散



气体渗碳法示意图

- 4) 渗碳剂：煤油，或甲醇+丙酮， ...
- 5) 渗碳温度： $\sim 930^{\circ}\text{C}$
- 6) 渗碳时间：一般为数小时 $\sim$ 十几小时
- 7) 渗碳后的碳浓度分布





低碳钢渗碳后缓冷的组织

THE END

## 8) 一般工艺路线

如：用低碳钢制造汽车变速齿轮

下料→锻造→正火→机加工→渗碳→淬火  
→低温回火→精磨→喷丸→成品

## 9) 最终组织

表层：高碳  $M_{\text{回}}$  + 粒状碳化物 +  $A_{\text{残}}$

心部：P+F (未淬透), 低碳  $M_{\text{回}}$  (淬透)  
+F



渗碳齿轮

