

金属材料学

Metal Material and Heat Treatment

主讲教师：曾燕屏

§ 2-6 钢的回火转变

回火是把淬火钢件加热到低于 A_1 的某一温度，保温一段时间，然后以适当方式冷却至室温的一种热处理工艺。

一、淬火钢在回火时的组织变化

1. 马氏体中碳原子的偏聚

- 100℃以下回火，马氏体中的碳原子将短距离迁移到微观缺陷处，使系统能量降低。
- 由于含碳量不同，马氏体中可能出现两种不同的偏聚过程：

(1) 在含碳量小于0.2%的马氏体中，间隙碳原子全部偏聚到高密度的位错线上，形成柯氏气团。

- 这是碳原子与位错的弹性应力场交互作用，被弹性地吸引到位错线上的结果，故称为弹性偏聚。
- 此时，马氏体为体心立方点阵，不出现正方度。
- 当马氏体的含碳量为0.2%时，弹性偏聚达饱和状态。

(2) 在含碳量大于0.2%的马氏体中，过饱和的碳原子不再偏聚到位错线附近，而是在垂直于c轴的 $(001)_{\alpha'}$ 面上偏聚，伴随有化学自由能降低，正方度c/a增大，强度、硬度提高，故称为化学偏聚。

2. 马氏体的分解与亚稳碳化物的形成

在100℃以上回火时，马氏体将发生较为明显的分解，析出碳化物，使其碳浓度降低，点阵常数 c 减小， a 增大，正方度 c/a 减小。

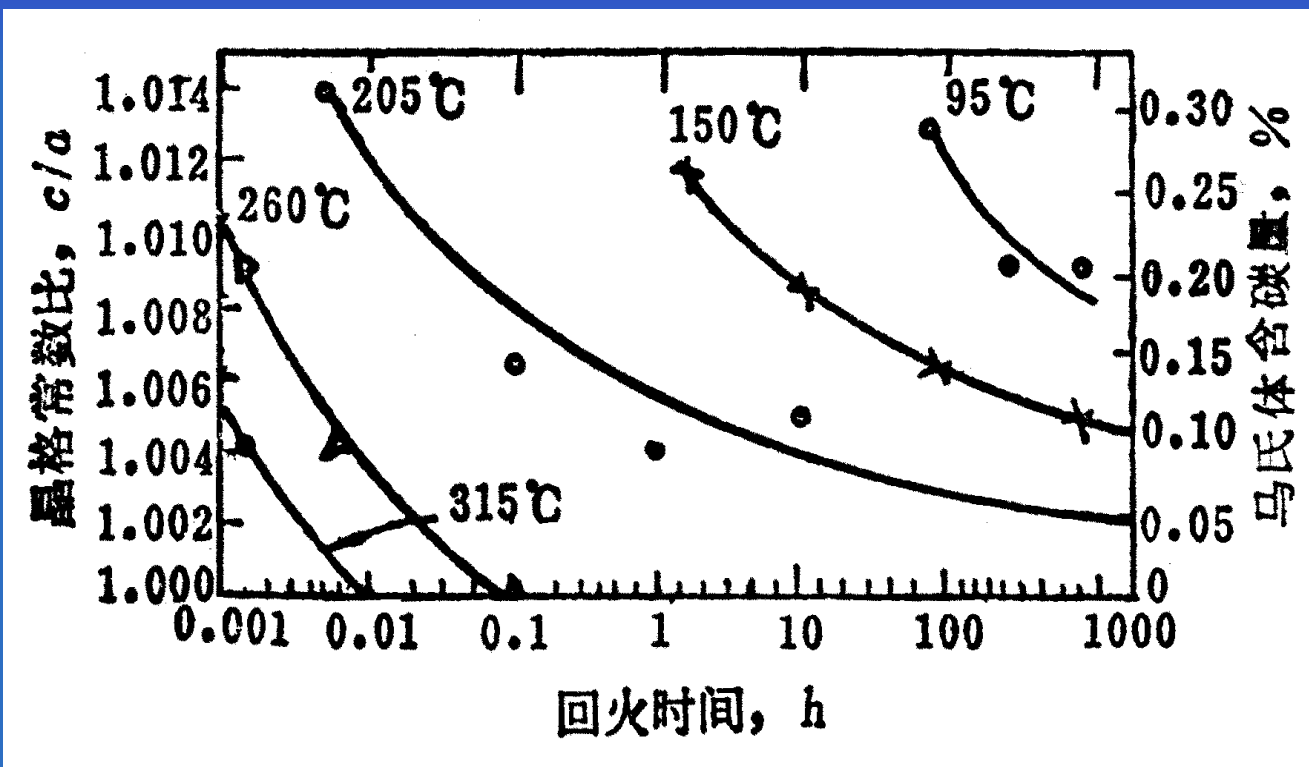


图2-56 0.96%C钢回火时马氏体的含碳量、晶格常数比(c/a)与回火温度及回火时间的关系

对于碳含量 $>0.4\%$ 的马氏体，其分解分为两个阶段：

第一阶段： $100\sim150^{\circ}\text{C}$ 第二阶段： 150°C 以上

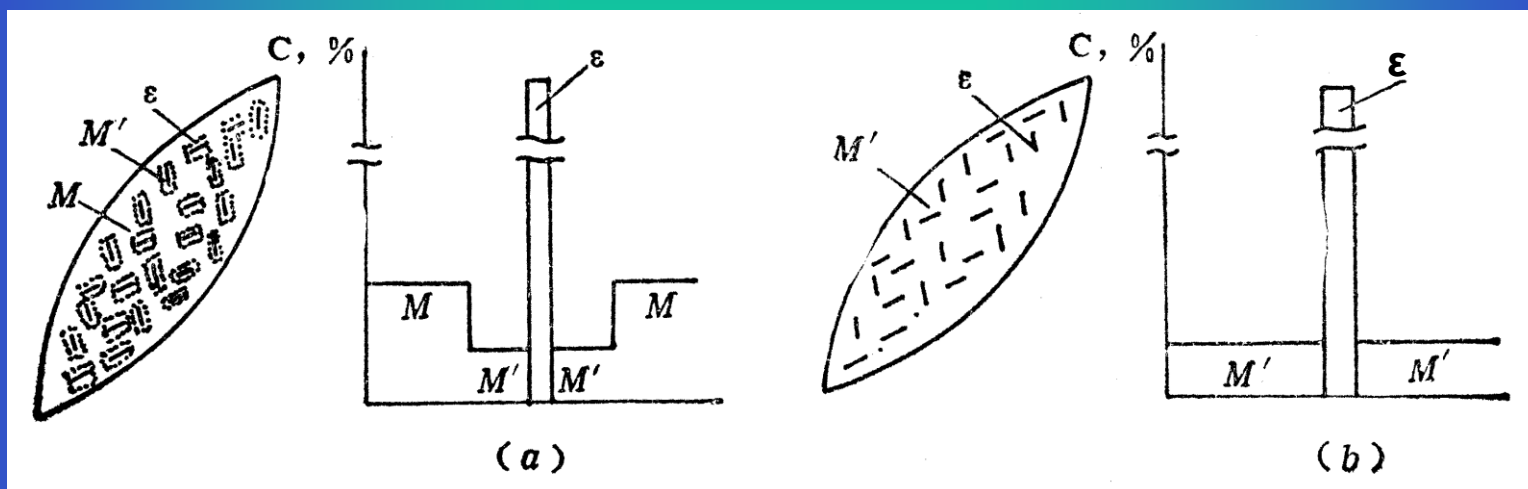


图2-57 马氏体示意图

(a) 二相式分解 (b) 连续式分解

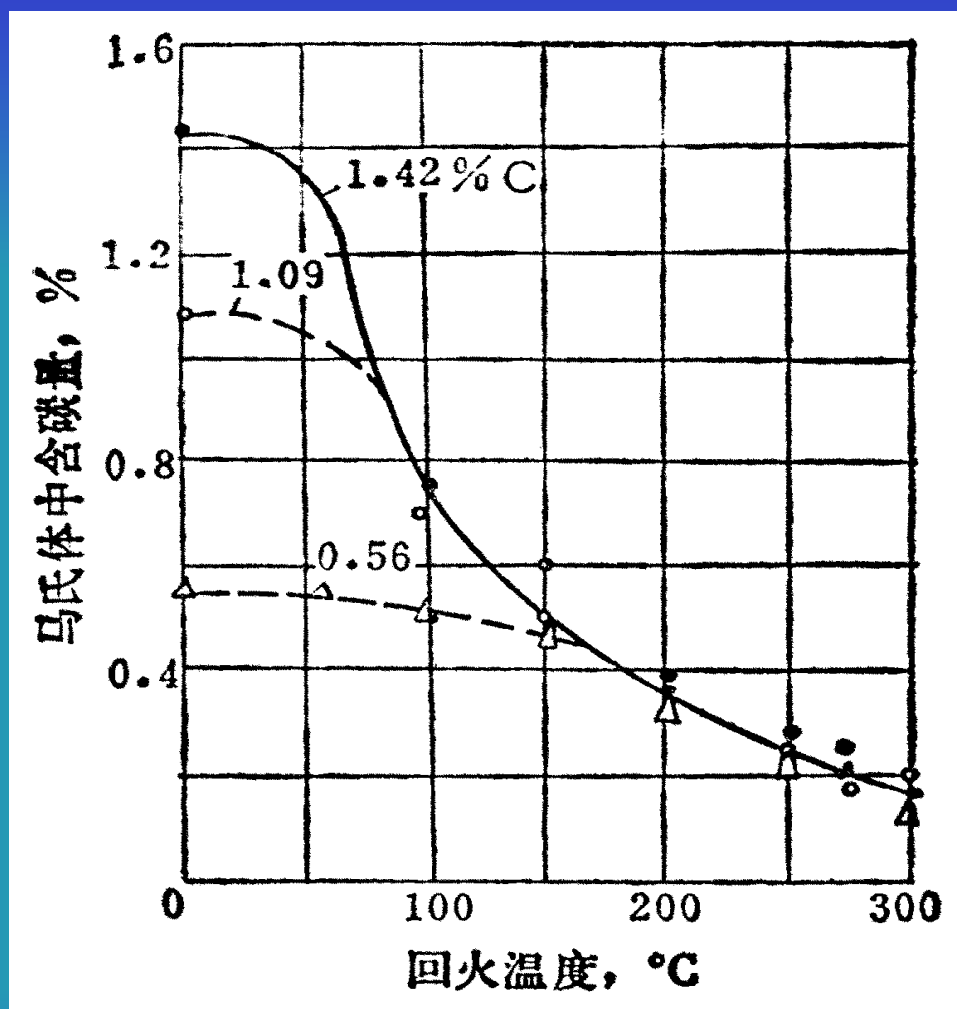


图2-58 不同含碳量的碳钢中马氏体的含碳量与回火温度的关系(回火时间1小时)

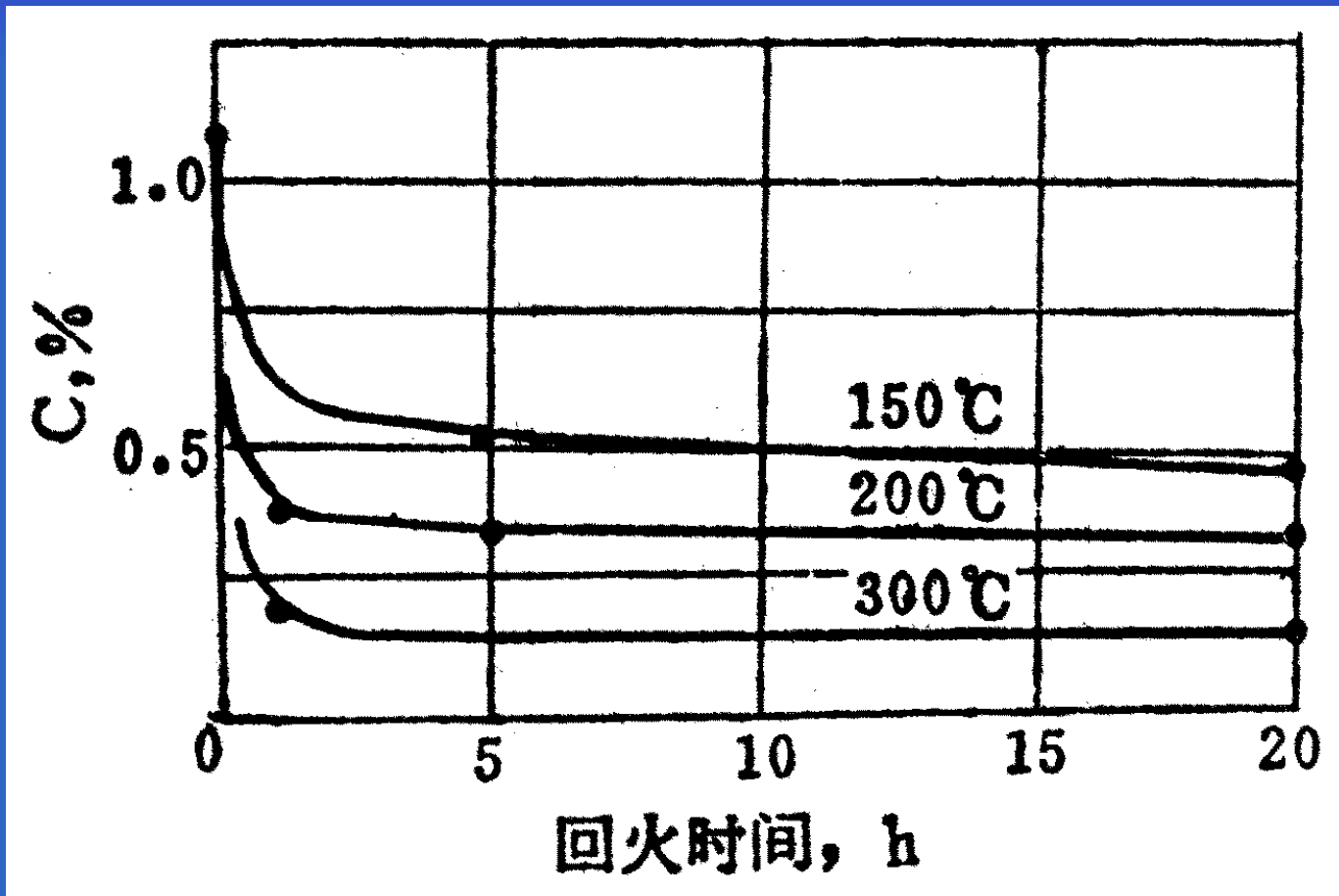


图2-59 1.09%C钢在不同温度回火时
马氏体的含碳量与回火时间的关系

- 在150~250℃回火时，片状马氏体将分解为含碳过饱和的 α 固溶体和与之共格的 ϵ 碳化物的两相组织，称为回火马氏体。
- 由于 ϵ 碳化物的弥散析出，使得回火马氏体比淬火马氏体易于腐蚀，因而回火马氏体在光学显微镜下呈暗黑色片状组织。
- 对于碳含量<0.2%的板条状马氏体，在100~200℃之间回火时，马氏体一般不析出 ϵ 碳化物，碳原子仍偏聚在位错线附近。

3. 残余奥氏体的转变

碳含量**超过0.4%**的碳钢或低合金钢，淬火后才有一定数量的残余奥氏体存在。

在200~300℃温度区间回火时，残余奥氏体将分解为过饱和 **α 固溶体**和薄片状 **ϵ 碳化物**的两相组织，一般认为是**回火马氏体**或**下贝氏体**，可用下式表示：



4. 碳化物的转变

对于碳含量 $>0.4\sim0.6\%$ 的马氏体，在 $250\sim400^{\circ}\text{C}$ 之间回火时，马氏体中的 ε 碳化物将转变为更加稳定的 χ 和 θ 碳化物。

表2-2 铁碳化合物的组成、结构与稳定性

| 铁碳化合物 | 化学式 | 结构 | 稳定性 |
|---------------|---------------------------|------|-----|
| ε | $\text{Fe}_{2.4}\text{C}$ | 六方晶系 | 亚稳定 |
| χ | Fe_5C_2 | 单斜晶系 | 亚稳定 |
| θ | Fe_3C | 斜方晶系 | 亚稳定 |

碳化物的转变也是通过形核与晶核长大方式进行的，依据新碳化物与母相的惯习面和取向关系是否与原碳化物相同，可以分为两类：

(1) “**原位**”转变：如果新碳化物与母相的惯习面和取向关系与原碳化物相同，则新碳化物可以通过原碳化物**成分的调整**和**点阵的重构**形成。

(2) “**异位**”转变：如果新碳化物与母相的惯习面和取向关系与原碳化物不同，则**原碳化物溶解**，**新碳化物**在其它部位**重新形核并长大**。

表2-3 铁碳化合物与母相的位向关系

| 铁碳化合物 | 惯习面 | 位向关系 |
|------------|--|--|
| ϵ | $\{100\}_{\alpha'}$ | $(0001)_{\epsilon} // (011)_{\alpha'}$ $(10-11)_{\epsilon} // (101)_{\alpha'}$ $[11-20]_{\epsilon} \wedge [100]_{\alpha'} = 5^{\circ}$ |
| χ | $\{112\}_{\alpha'}$ | $(100)_{\chi} // (-1-21)_{\alpha'}$ $[010]_{\chi} // [101]_{\alpha'}$ $[011]_{\chi} // [-111]_{\alpha'}$ |
| θ | $\{110\}_{\alpha'}$ $\{112\}_{\alpha'}$ | $(001)_{\theta} // (-112)_{\alpha'}$ $[010]_{\theta} // [11-1]_{\alpha'}$ $[100]_{\theta} // [1-10]_{\alpha'}$ |

表2-4 回火时含碳量不同的马氏体中
碳化物的转变情况

| 含碳量 | 碳化物转变情况 |
|--------------------------------|---|
| $C\% < 0.2\%$ | $\alpha' \longrightarrow \theta\text{-Fe}_3\text{C}$ |
| $0.2\% < C\% < 0.4 \sim 0.6\%$ | $\alpha' \longrightarrow \varepsilon\text{-Fe}_{2.4}\text{C} \longrightarrow \theta\text{-Fe}_3\text{C}$ |
| $C\% > 0.4 \sim 0.6\%$ | $\alpha' \longrightarrow \varepsilon\text{-Fe}_{2.4}\text{C} \longrightarrow \chi\text{-Fe}_5\text{C}_2 \longrightarrow \theta\text{-Fe}_3\text{C}$ |

5. 碳化物的聚集长大与 α 相的回复、再结晶

- 回火温度高于400℃后，渗碳体明显聚集、长大并球化。
- 无论是初始片状渗碳体的球化还是粒状渗碳体的长大，均按小颗粒溶解，大颗粒长大的机理进行。

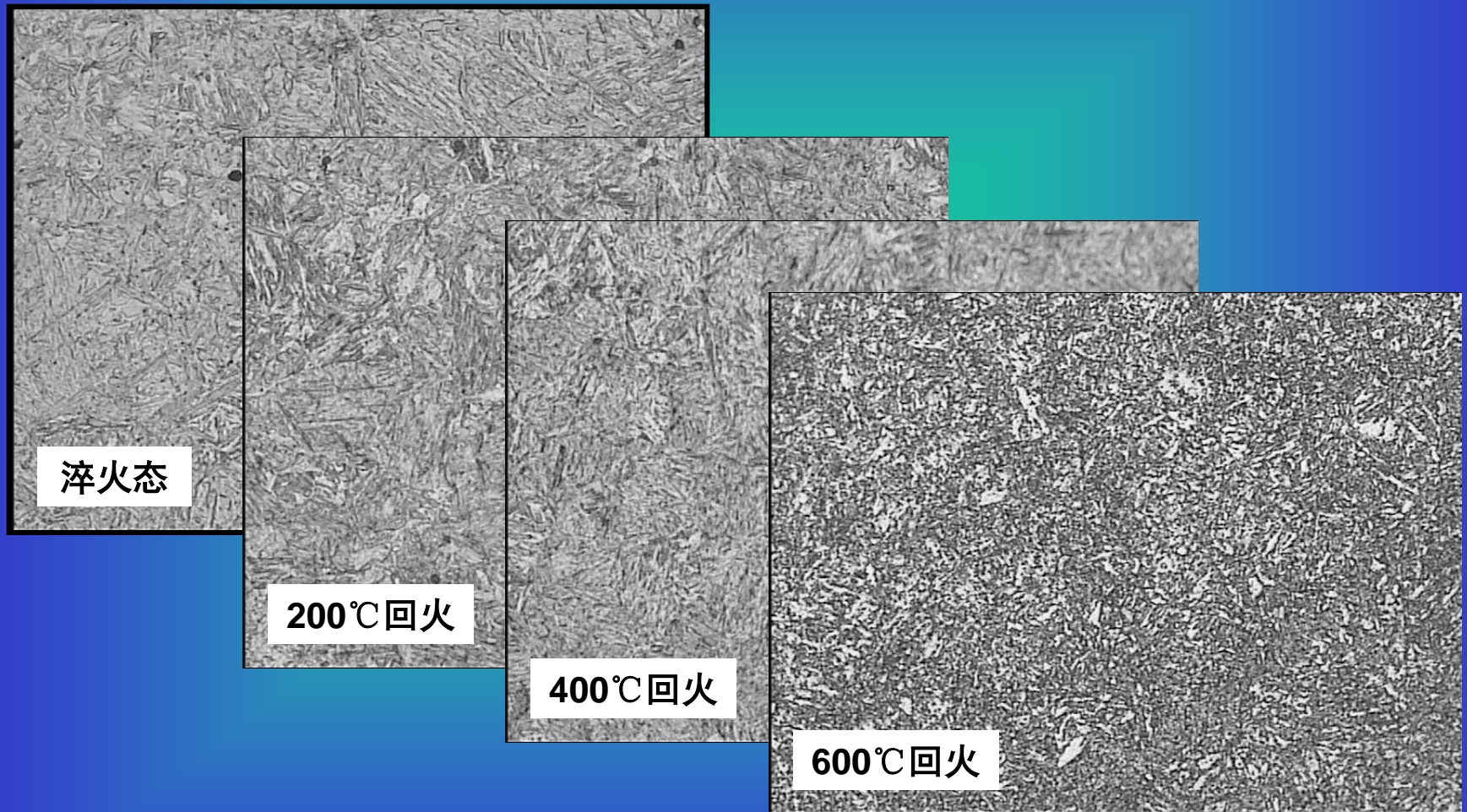
- 低碳板条马氏体在400℃以上回火时， α 相将发生回复。
- 在回复过程中， α 相中的位错密度逐渐降低，剩下的位错重新排列成二维位错网络，并将 α 相分割成许多亚晶粒。
- 随着回火温度的升高，亚晶粒逐渐长大，当回火温度高于500℃后， α 相将发生再结晶。
- 在再结晶过程中，等轴状铁素体逐步取代了板条状的 α 相。

- 在250~400℃之间回火时，片状马氏体中的孪晶亚结构就已逐渐消失，但同时出现了位错胞和位错线。
- 回火温度高于400℃后， α 相也将发生回复和再结晶。
- 但由于钢中碳含量较高，沉淀的碳化物数量较多，碳化物颗粒的钉扎作用，将阻碍 α 相的回复，尤其是再结晶的进行，故片状马氏体的回复与再结晶过程要比板条马氏体更缓慢些。

淬火钢在回火过程中的组织变化为：

- 在150~250℃之间回火时，片状马氏体将分解为含碳过饱和的 α 固溶体和薄片状 ϵ 碳化物的两相组织，称为回火马氏体；
- 在350~500℃之间回火时，碳钢与低合金钢将得到板条状或片状铁素体与细颗粒渗碳体组成的混合物，称为回火屈氏体；
- 在500℃~ A_1 之间回火时，碳钢与低合金钢将得到颗粒状渗碳体分布于等轴状铁素体基体上的组织，称为回火索氏体。

40钢回火转变光学金相组织实例



二、钢的回火脆性

1. 淬火钢回火时力学性能的变化

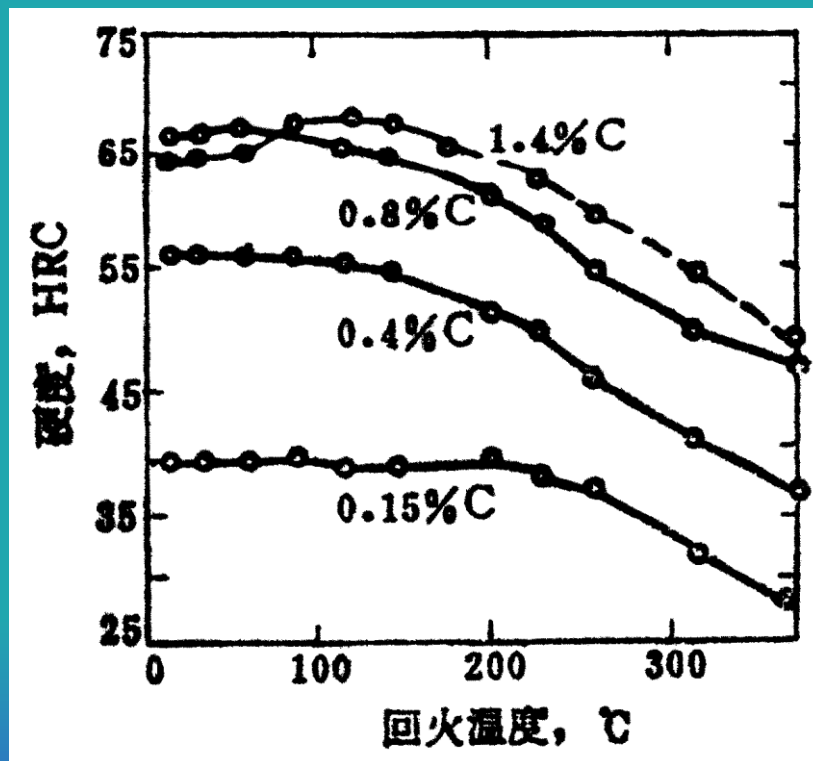


图2-60 淬火钢回火后硬度与回火温度的关系

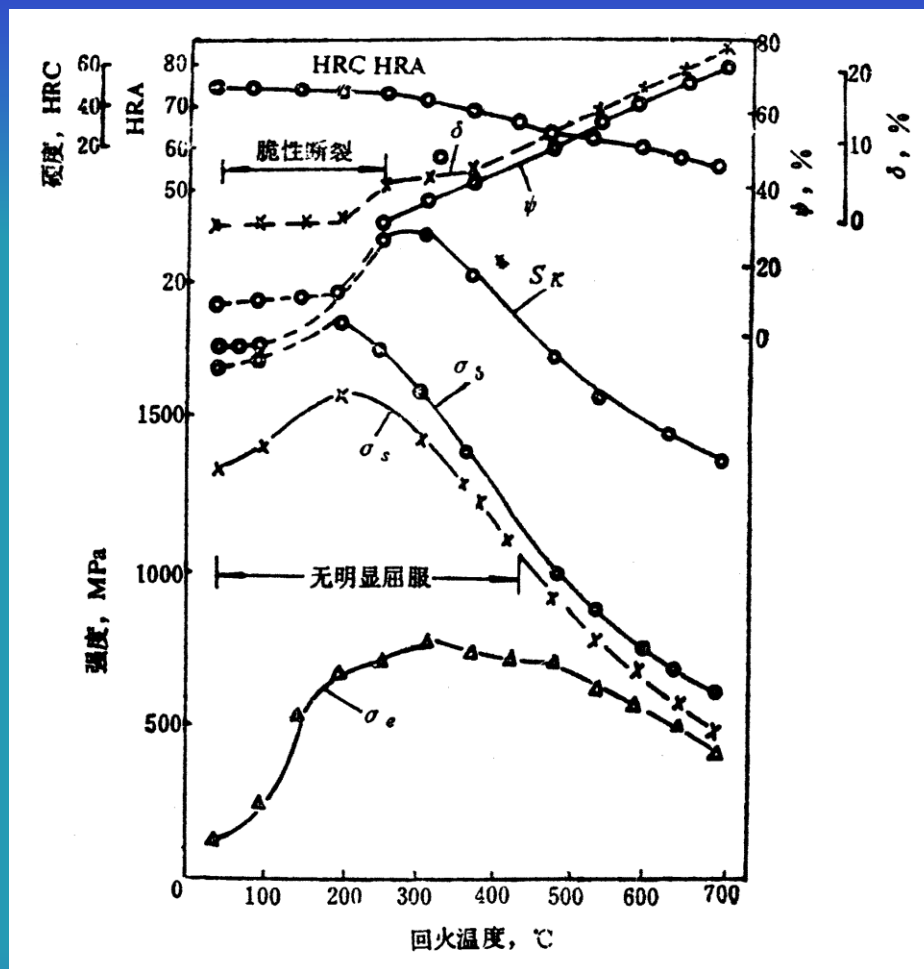
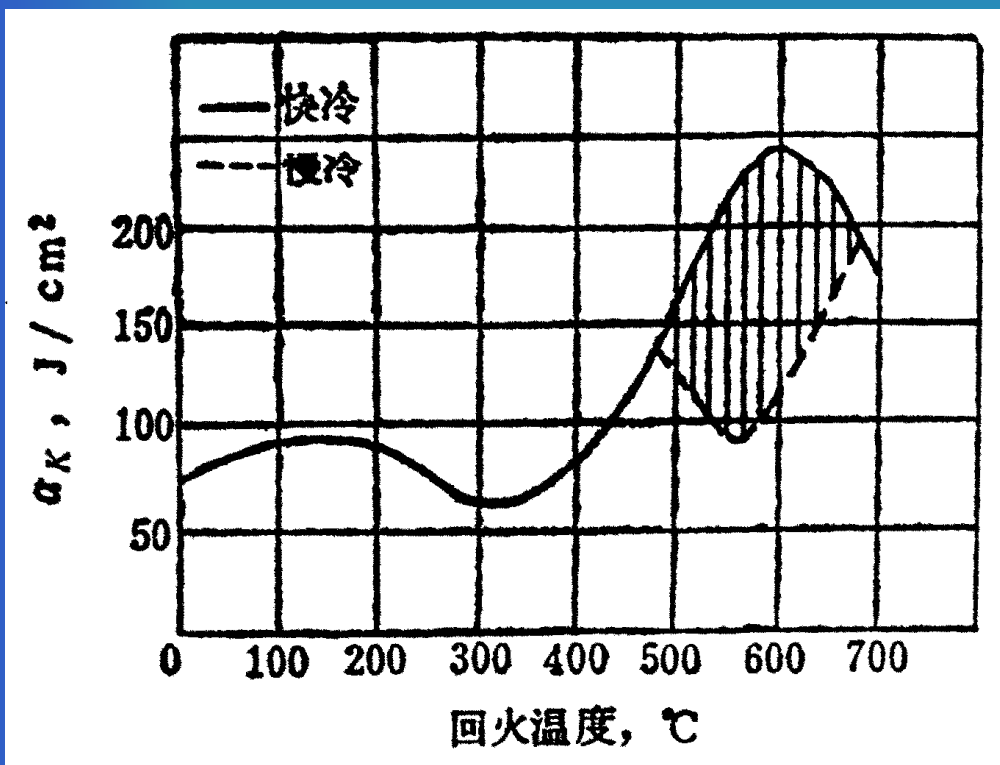


图2-61 中碳钢(0.41%C, 0.72%Mn)的力学性能与回火温度的关系

2. 钢的回火脆性



回火脆性：随着回火温度升高，钢的冲击韧性反而降低的现象。

图2-62 含0.3%C, 1.47%Cr, 3.4%Ni钢的冲击韧性与回火温度的关系

(1) 低温回火脆性

- 在250~400℃范围内回火时出现的脆性，称为低温回火脆性。
- 几乎所有淬成马氏体的钢，在300℃左右回火后都将或轻或重地出现这种脆性。
- 如果将已产生这种脆性的工件，在更高温度回火，其脆性将消失；若再将这个工件在300℃左右回火，其脆性不再出现，故这类回火脆性又称为“不可逆回火脆性”。

- 不可逆回火脆性与回火后的冷却速度无关。

- 低温回火脆性产生的主要原因是 ϵ 碳化物转变成的 χ 及 θ 碳化物沿马氏体板条或片的界面呈薄膜状析出。韧性的残余奥氏体分解成回火马氏体或下贝氏体也促进此类脆性。

(2) 高温回火脆性

- 在450~650℃范围内回火时出现的脆性，称为高温回火脆性。
- 如果将已产生这种脆性的工件，重新加热到650℃以上保温，然后快冷，其脆性可以消失；若再次将这个工件加热到650℃以上慢冷，其脆性又将出现，故这类回火脆性又称为“可逆回火脆性”。

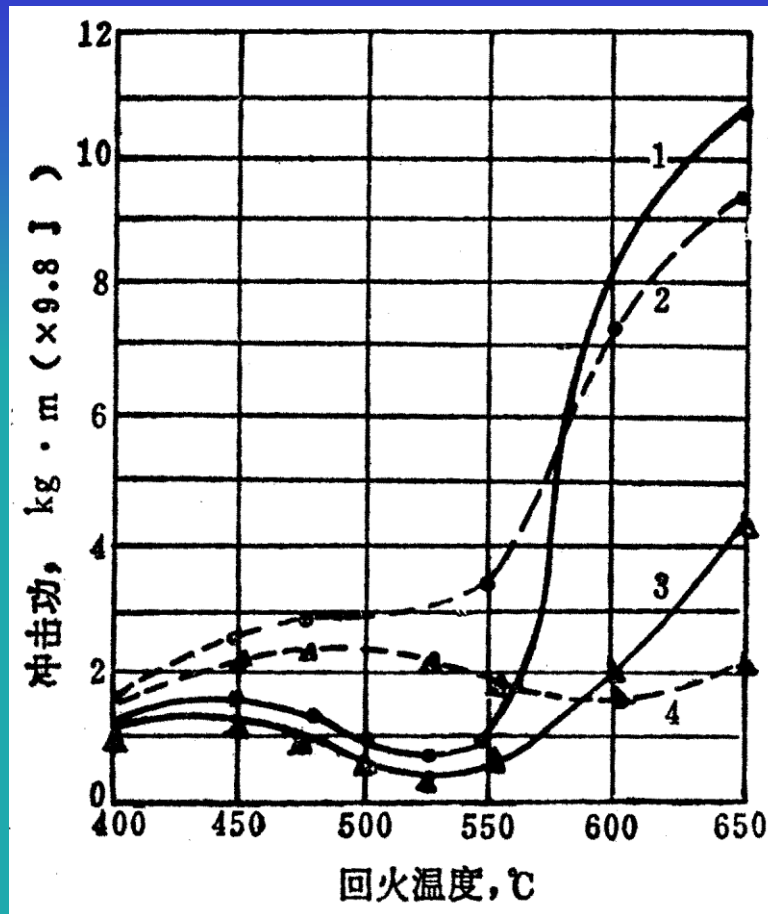


图2-63 0.35%C, 0.52%Mn, 3.44%Ni, 1.05%Cr
钢的冲击韧性与回火温度的关系

1-回火10小时后水冷 2-回火30分钟后水冷
3-回火10小时后炉冷 4-回火30分钟后炉冷

- 高温回火脆性主要是由锑、磷、锡、砷等微量杂质元素在原奥氏体晶界偏聚所引起。
- 合金钢中铬、锰、镍等元素，不但促进上述微量杂质元素的偏聚，本身也产生晶界偏聚，故增加脆化倾向。

三、合金元素对淬火钢回火时转变的影响

- 碳化物形成元素对马氏体的分解有明显的阻碍作用。其中以强碳化物形成元素钒的作用最显著，钨、钼次之，铬又次之。
- 硅和铝较强烈地阻碍和推迟 $\epsilon\text{-Fe}_{2.4}\text{C}$ 的溶解与渗碳体的析出。
- 通常可以利用加钒和硅来提高马氏体的分解温度，增强马氏体抗回火的能力。

- 碳化物形成元素V、W、Mo、Cr等阻碍合金渗碳体的聚集长大。
- 此外，在含强碳化物形成元素较多的钢中，马氏体高温回火时将析出特殊碳化物。
- 特殊碳化物的析出有两种途径：

(1) 由碳化物形成元素在渗碳体中富集，当其浓度超过合金渗碳体的溶解度时，合金渗碳体在**原位转变成**特殊碳化物。

铬钢特殊碳化物的析出就属于这一类型。

高铬钢回火时碳化物转变的顺序为：

回火马氏体 $\rightarrow (\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C} \rightarrow \text{Cr}_7\text{C}_3 \rightarrow \text{Cr}_{23}\text{C}_6$

(2) 直接从 α 相析出特殊碳化物，同时伴随有渗碳体的溶解。

含强碳化物形成元素V、Ti、Nb的钢特殊碳化物的析出属于这一种类型。

- 在合金钢中伴随着这类特殊碳化物的析出，钢的硬度和强度会升高，这种现象称为二次硬化。

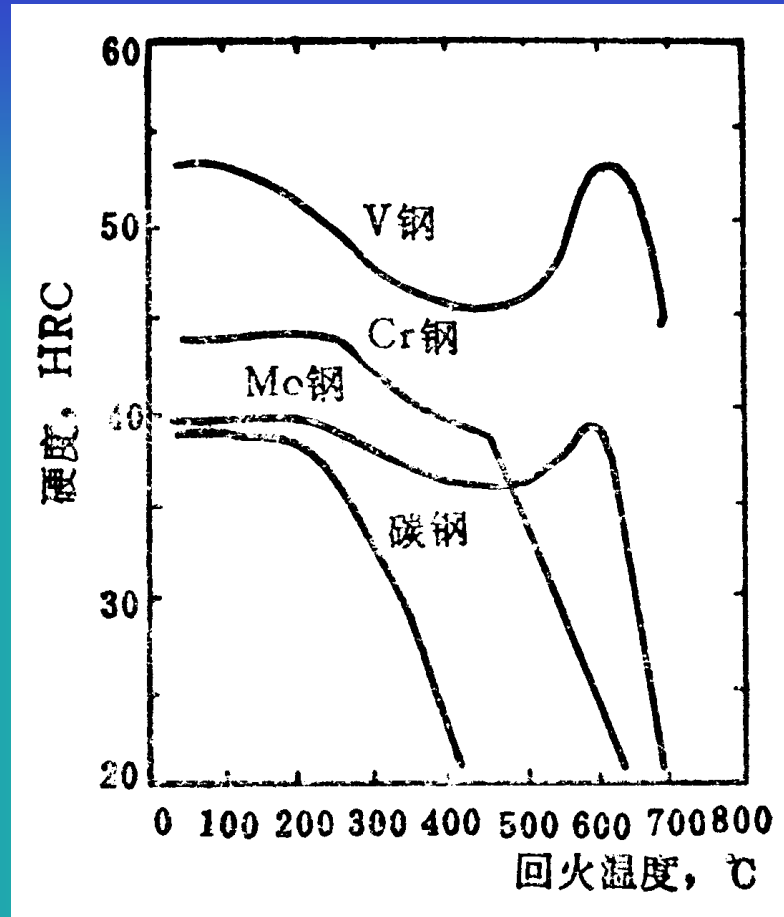


图2-64 钒钢(0.32%C, 1.36%V)、
钼钢(0.11%C, 2.14%Mo)、铬钢
(0.19%C, 2.91%Cr)的回火二次硬化

● 与特殊碳化物析出的同时，还发生 α 相的回复和再结晶。

✓ 合金元素中，V、W、Mo、Cr、Co等显著提高 α 相的回复、再结晶温度；

✓ Mn、Si稍提高 α 相的回复、再结晶温度；

✓ Ni对 α 相的回复、再结晶温度没有影响。

四、回火产物与奥氏体直接分解产物的性能比较

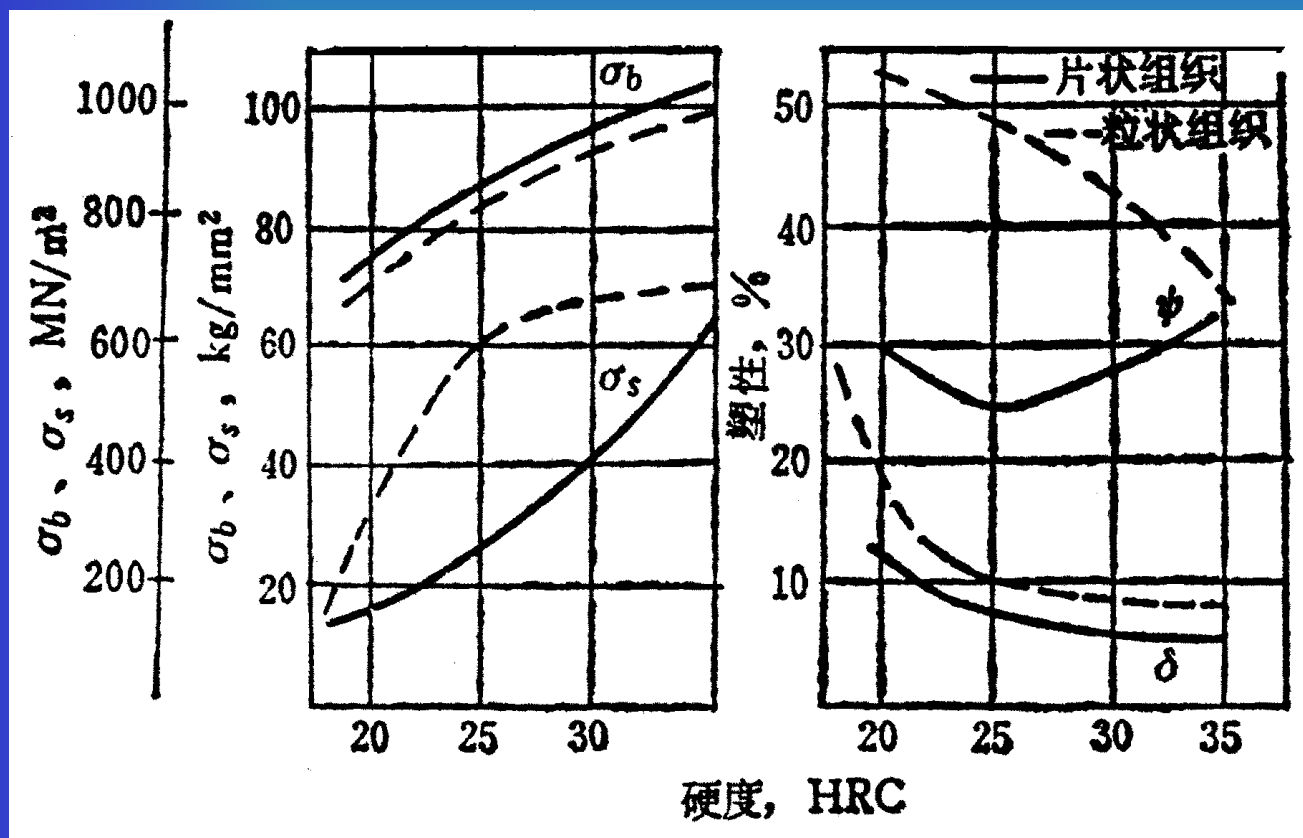
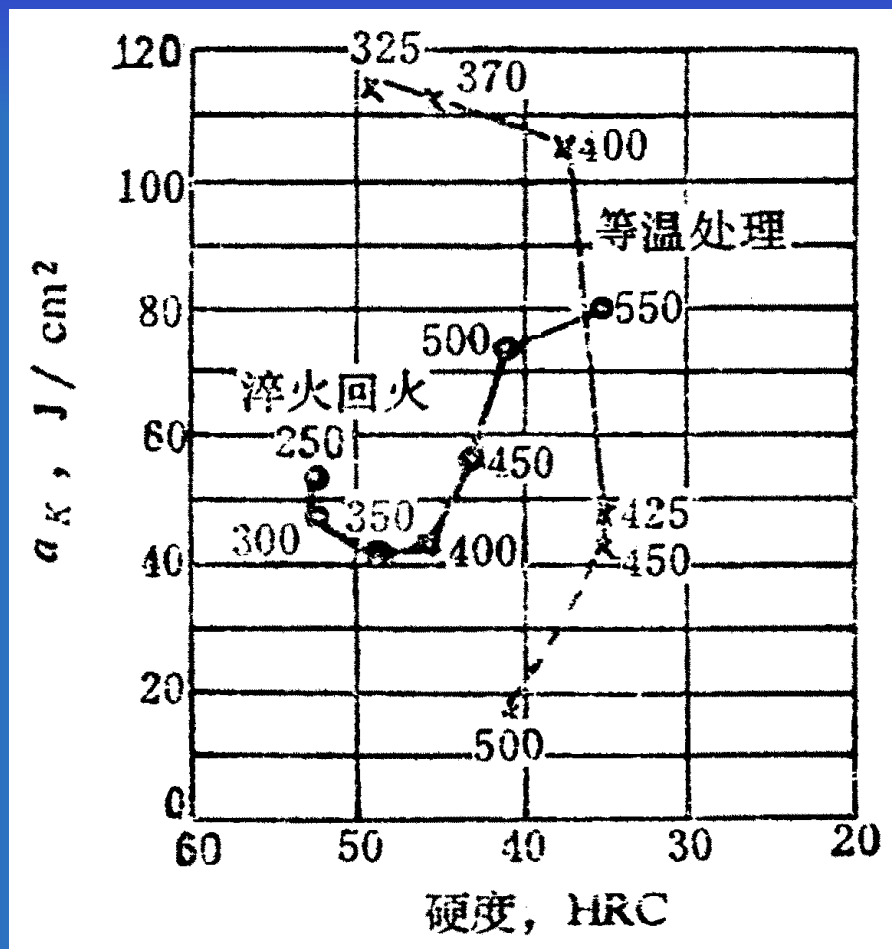


图2-65 0.84%C的碳钢片状与粒状组织的力学性能对比

回火索氏体(粒状组织)
的性能明显优于索氏体
(片状组织)



下贝氏体的性能明显优于淬火回火产物。

图2-66 30CrMnSi钢等温处理和淬火回火后的冲击韧性

思考题

1. 默绘出Fe-Fe₃C相图。据此图描述共析钢、亚共析钢和过共析钢从单相奥氏体区随炉冷却至室温时可能发生的基本相变过程。
2. 逐一解释如下钢铁材料专业术语：
(1) A_1 ；(2) A_3 ；(3) A_{cm} ；
(4) A_{C1} ；(5) A_{C3} ；(6) A_{r1} ；(7) A_{r3}

3. 简述奥氏体形成过程。
4. 默绘出过冷奥氏体恒温转变动力学曲线和连续冷却转变曲线，并比较两者的区别。
5. 比较珠光体、贝氏体和马氏体转变的异同点，说明其产物的组成相和组织形态。
6. 简述淬火钢在回火过程中的组织转变。