

金属材料学

Metal Material and Heat Treatment

主讲教师：曾燕屏

§ 2-4 钢的马氏体转变

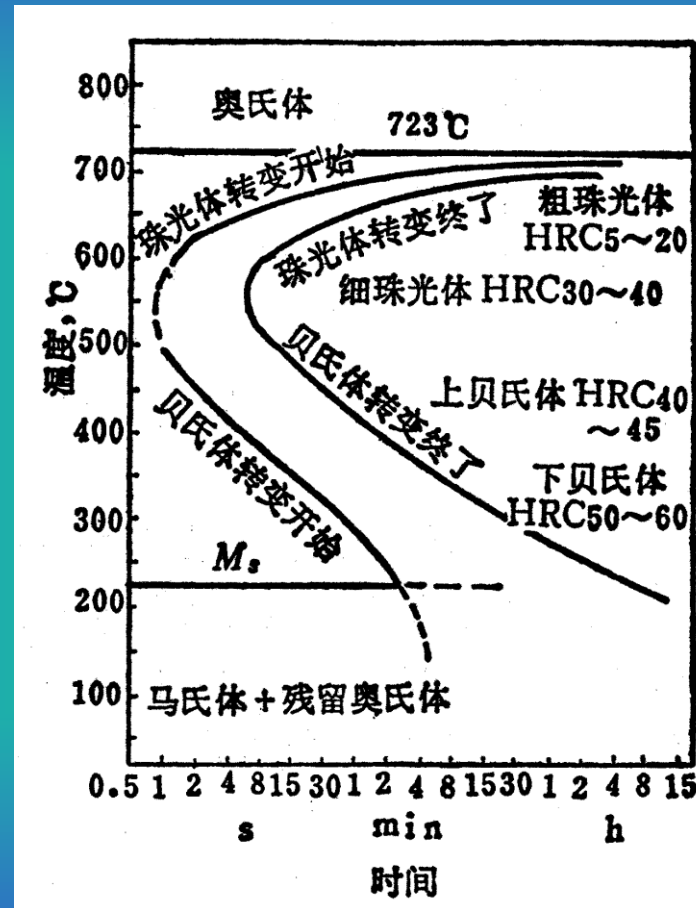
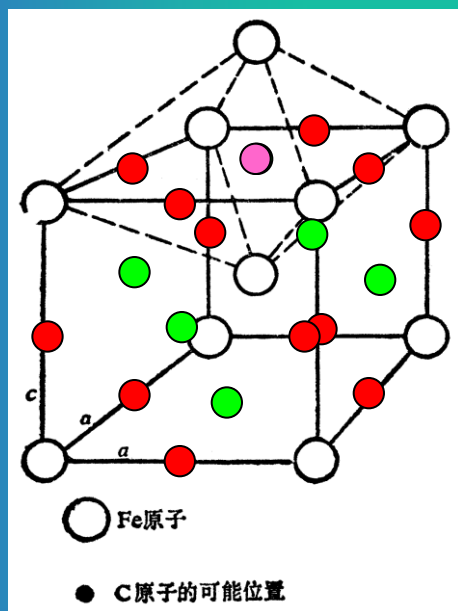


图2-30 共析碳钢的C曲线

一、马氏体的晶体结构及转变特点

1. 马氏体的晶体结构

(1) 碳原子在马氏体点阵中的位置及分布



可能位置是： α -Fe 体心立方单胞的各棱边中央和面心位置，即由铁原子组成的**扁八面体**空隙之中。

图2-31 碳原子在马氏体点阵中的可能位置示意图

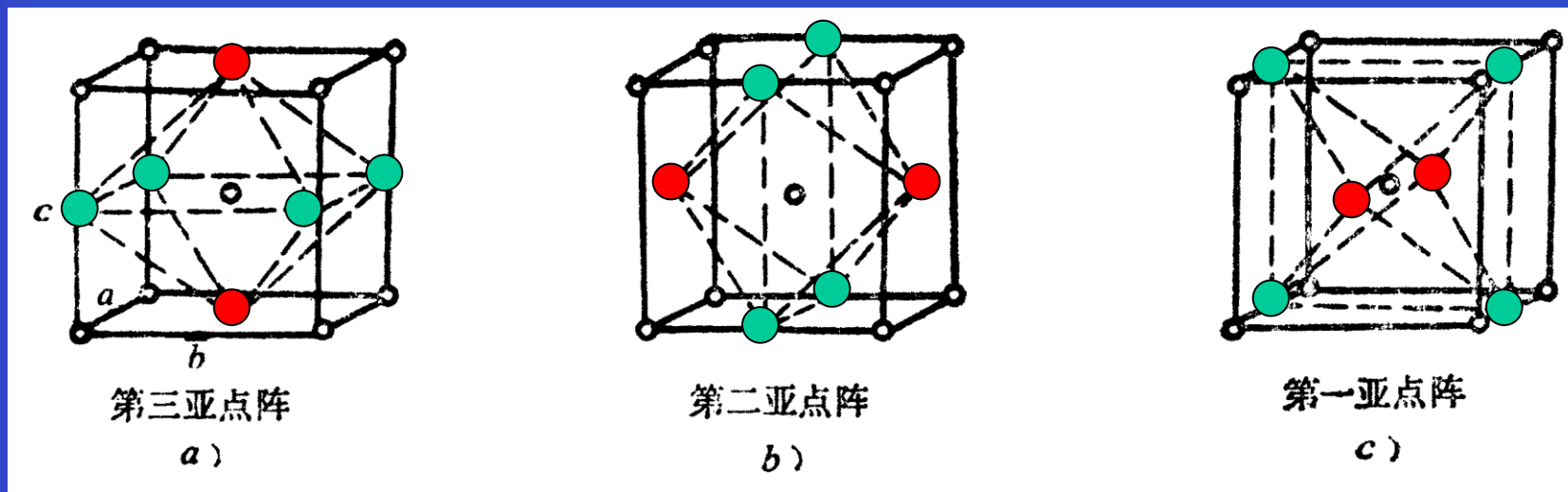


图2-32 碳原子在马氏体点阵中的可能位置构成的亚点阵

- Fe原子；• C原子可能的位置

马氏体点阵为：体心正方($w(C) > 0.2\%$)； c/a 称为马氏体的正方度。

(2) 马氏体的点阵常数和碳含量的关系

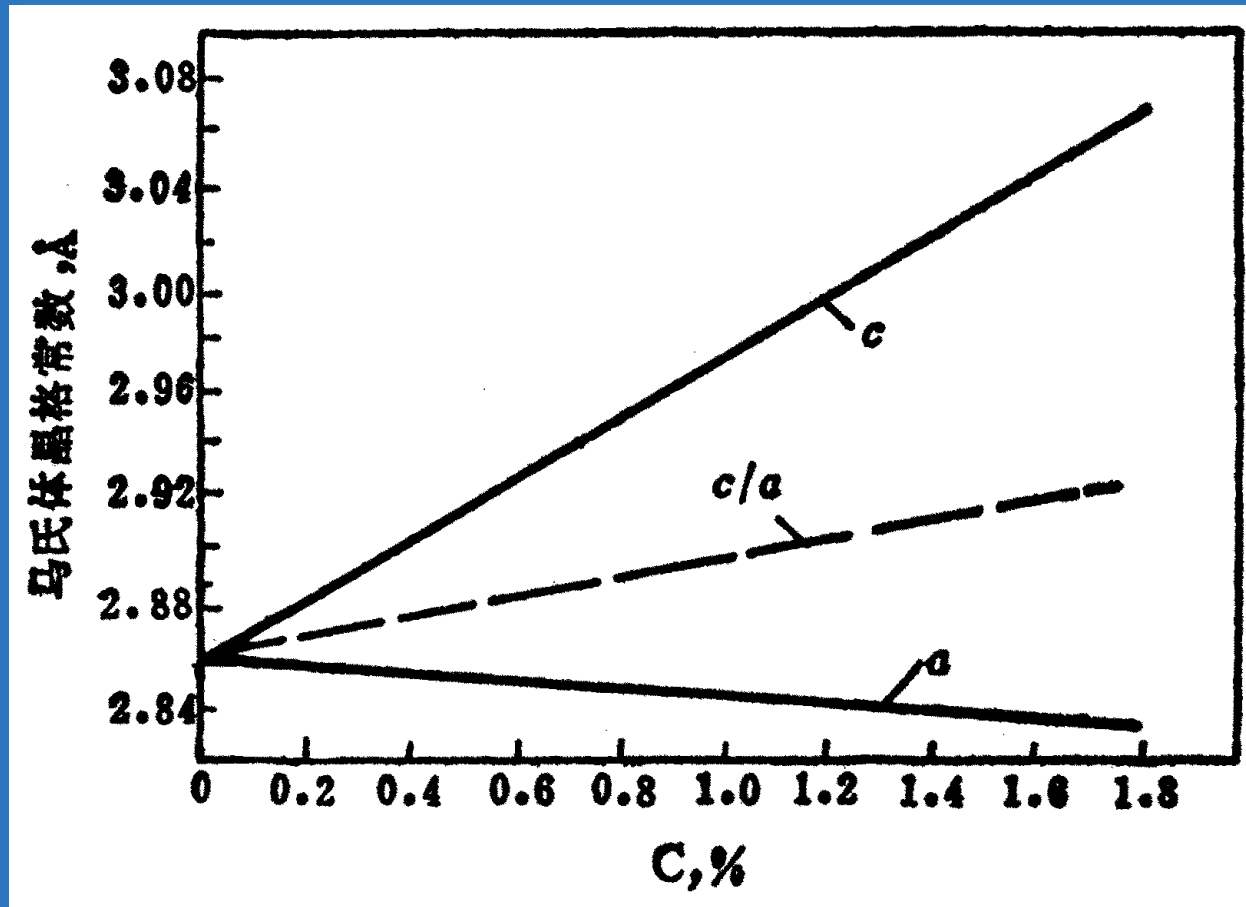


图2-33 含碳量对马氏体点阵常数的影响

2. 马氏体转变的主要特点

(1) 表面浮凸现象和切变共格性

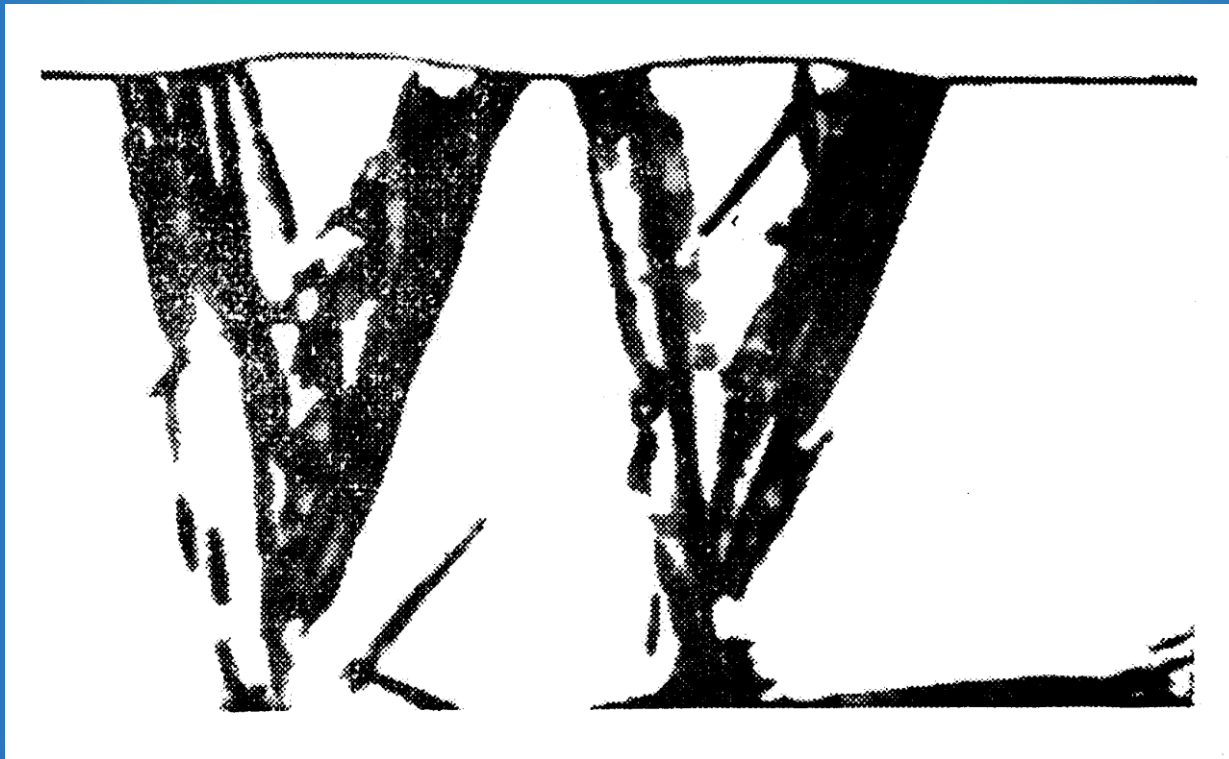


图2-34 钢因马氏体转变而产生的表面浮凸

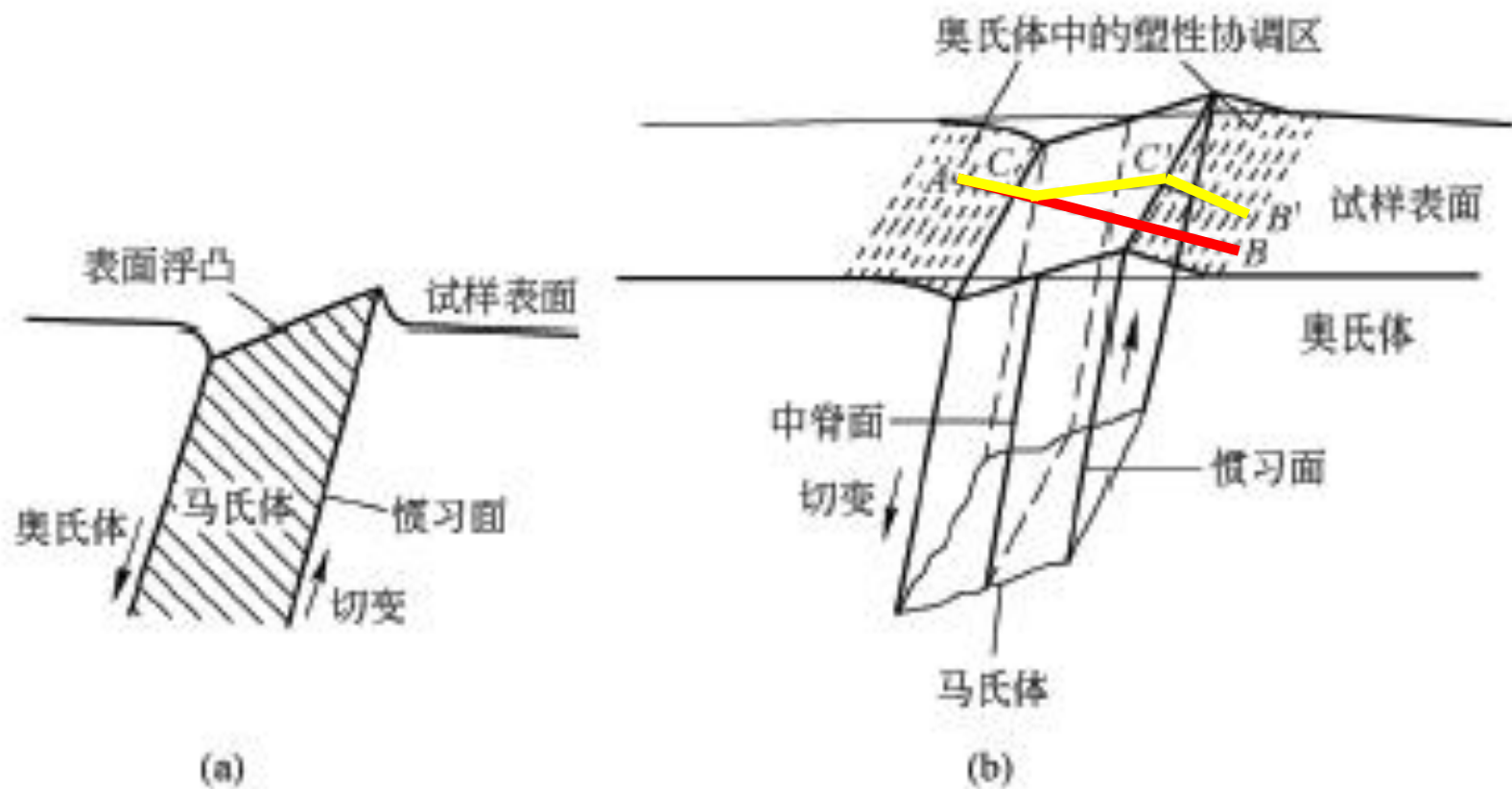


图2-35 马氏体转变时引起表面浮凸的示意图

- 马氏体是以切变方式形成的；
- 马氏体与奥氏体界面上的原子既属于马氏体，又属于奥氏体，是共有的；
- 整个相界面是互相牵制的；
- 这种界面称之为“切变共格”界面。

(2) 无扩散性

- 马氏体转变可以在相当低的温度范围内进行，并且转变速度极快。
- 这一事实足以证明，马氏体转变不可能以扩散方式进行。
- 马氏体转变属无扩散型相变。

(3) 新相与母相之间具有特定的晶体学取向关系

① K-S关系

$$\{011\}_{\alpha'} // \{111\}_{\gamma}$$
$$\langle 111 \rangle_{\alpha'} // \langle 101 \rangle_{\gamma}$$

按照这样的位向关系，
马氏体在母相中可以有
24个不同的取向。

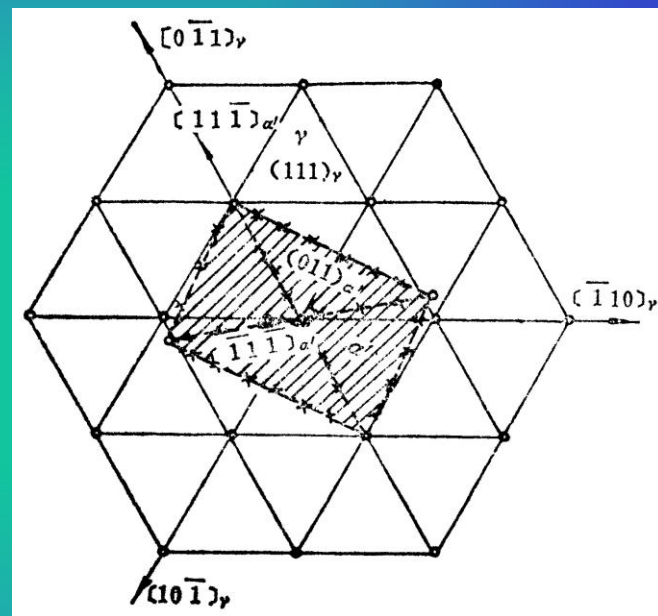


图2-36 K-S位向关系示意图

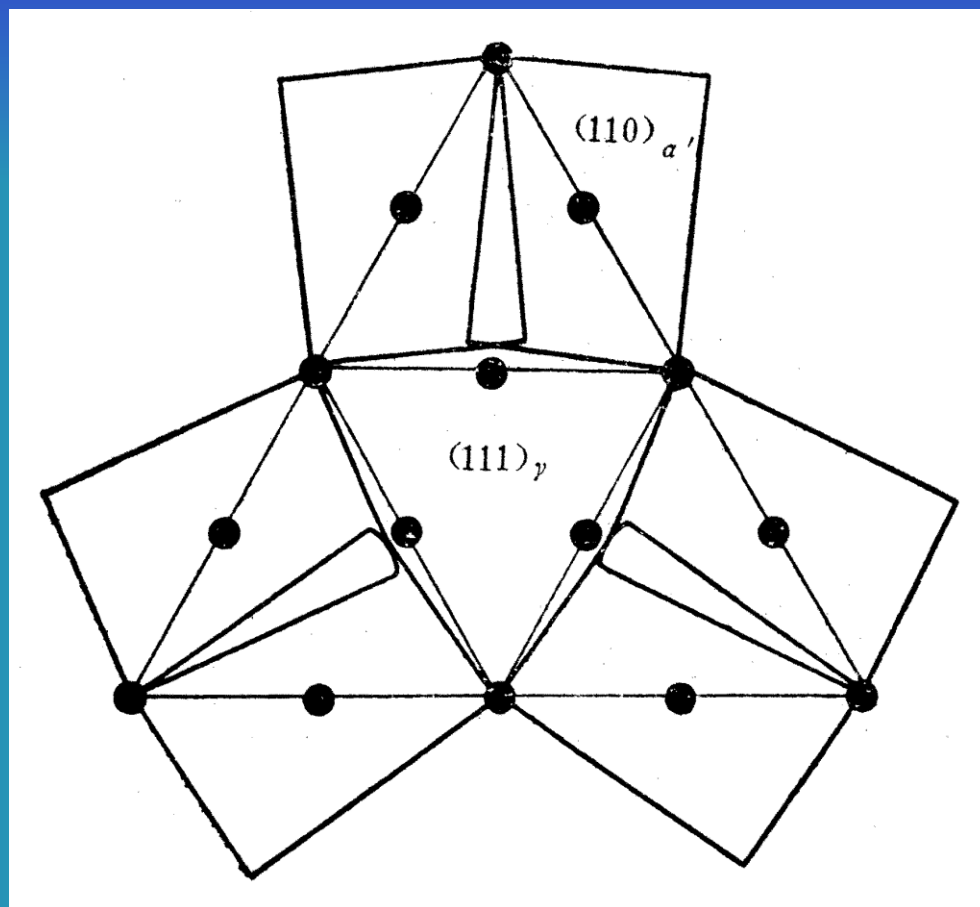


图2-37 钢中马氏体在 $(111)_{\gamma}$ 面上形成时可能的取向

② 西山关系

$$(011)_{\alpha'} // (111)_{\gamma}$$

$$[01\bar{1}]_{\alpha'} // [1\bar{2}1]_{\gamma}$$

按照西山关系，在每个 $\{111\}_{\gamma}$ 面上，马氏体只可能有三种不同的取向，所以总共只有12种可能的马氏体取向。

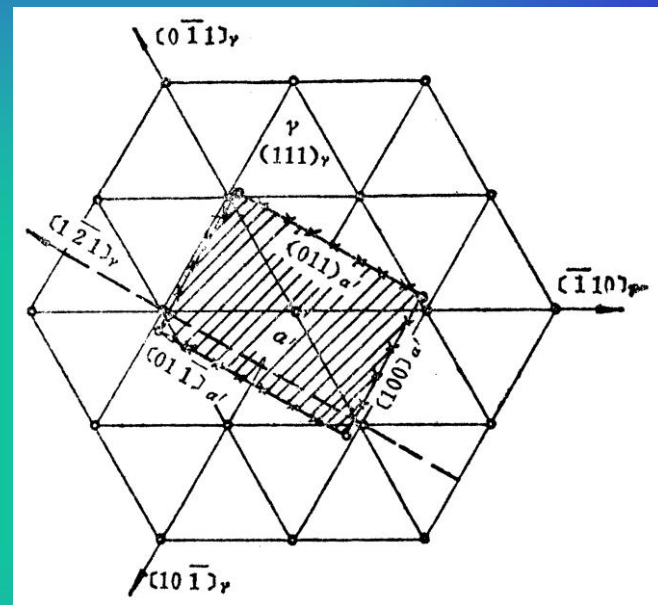


图2-38 西山关系示意图

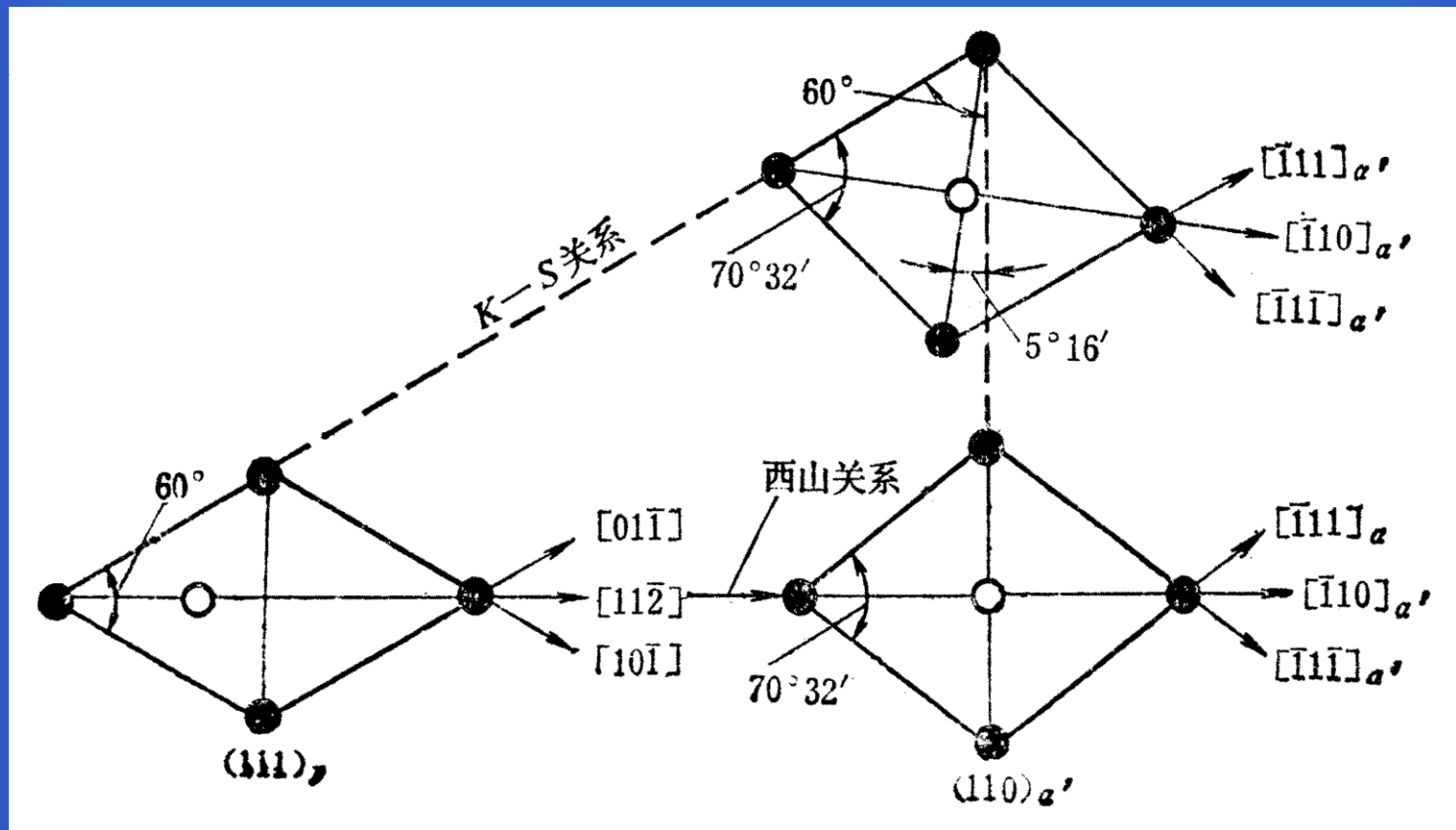


图2-39 西山关系和K-S关系的比较

(4) 惯习现象

- 马氏体转变时，新相总是在母相的某个晶面族上形成，这种晶面称为惯习面。
- 在相变过程中从宏观上看，惯习面是不发生转动和不畸变的平面，用它在母相中的晶面指数来表示。

● 钢中马氏体的惯习面随碳含量及形成温度不同而异，常见的有以下几种：

- 碳含量小于0.2%时，为近 $\{111\}_\gamma$ 或 $\{557\}_\gamma$ ；
- 碳含量在0.2%~0.6%之间时，为 $\{557\}_\gamma$ 或 $\{225\}_\gamma$ ；
- 碳含量在0.6%~1.0%之间时，为 $\{225\}_\gamma$ ；
- 碳含量在1.0%~1.4%之间时，为 $\{225\}_\gamma$ 或 $\{259\}_\gamma$ ；
- 碳含量高于1.4%后，为 $\{259\}_\gamma$ 。

随马氏体形成温度下降，惯习面有向高指数变化的趋势。

(5) 马氏体转变的可逆性

- 在某些铁合金中，奥氏体冷却转变为马氏体，重新加热时，已形成的马氏体又可以逆马氏体转变为奥氏体，这就是马氏体转变的可逆性。
- 一般将马氏体直接向奥氏体转变称为逆转变。
- 逆转变开始点用 A_s 表示，逆转变终了点用 A_f 表示。
- 通常 A_s 温度比 M_s 温度高。

二、马氏体的组织形态及性能特点

1. 马氏体的组织形态

(1) 板条状马氏体

- 板条状马氏体是低、中碳钢等铁系合金中形成的一种典型马氏体组织。



图2-40 板条状马氏体 ×500

(15钢：1350℃奥氏体化，15℃盐水淬火)

- 对于碳钢，板条状马氏体通常在碳含量 $\leq 0.2\%$ 时单独存在，碳含量在 $0.2\% \sim 1.0\%$ 之间时与片状马氏体共存。

- 板条状马氏体与母相奥氏体的晶体学取向关系是K-S关系，惯习面为 $\{111\}_{\gamma}$ 。

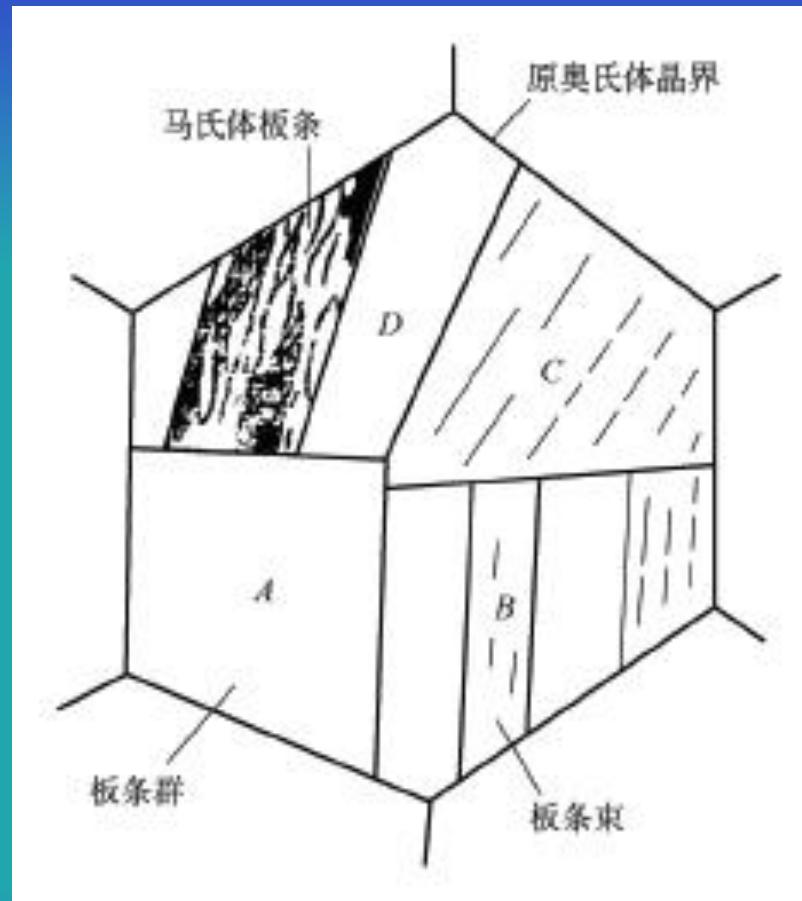


图2-41 板条状马氏体显微组织的晶体学特征示意图

目前认为板条状马氏体的立体形态有两种：

(a) 横截面为椭圆形，呈扁条状， $a \gg b > c$ ，一般a比b大10倍以上。

(b) 横截面为矩形，呈薄板状， $a > b \gg c$ 。

板条状马氏体的亚结构主要是：
高密度缠结的位错，位错密度一般为 $0.3 \sim 0.9 \times 10^{12} \text{cm/cm}^3$ 。

(2) 片状马氏体

- 片状马氏体是中、高碳钢，高镍的铁镍合金等铁系合金中出现的另一种典型马氏体组织。

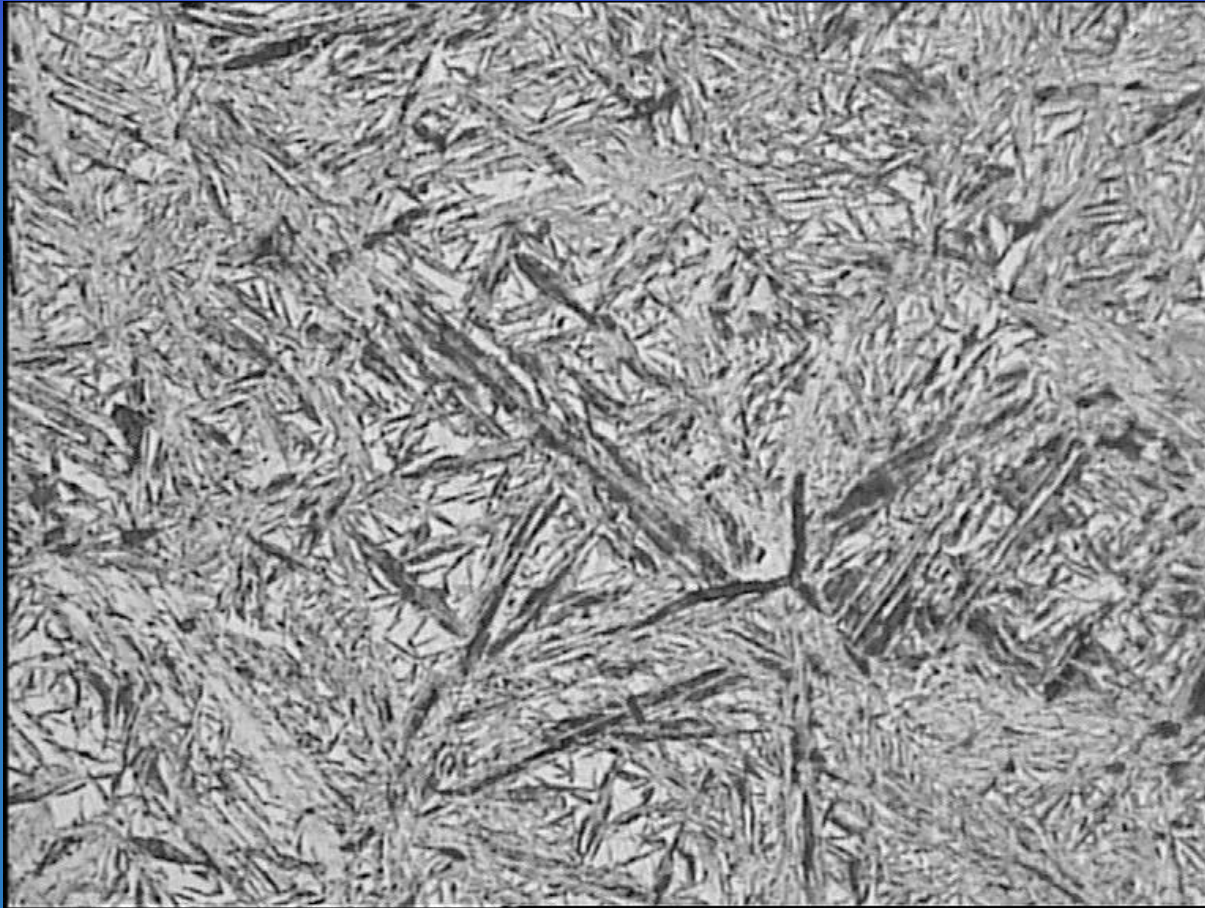


图2-42 片状马氏体 $\times 280$

(T12钢: 930℃奥氏体化, 水淬)

- 对于碳钢，片状马氏体只在碳含量 $>1.0\%$ 时才单独存在，碳含量在 $0.2\sim 1.0\%$ 之间时与板条状马氏体共存。

- 片状马氏体与母相奥氏体的晶体学位向关系是K-S关系或西山关系，惯习面为 $\{225\}_{\gamma}$ 或 $\{259\}_{\gamma}$ 。

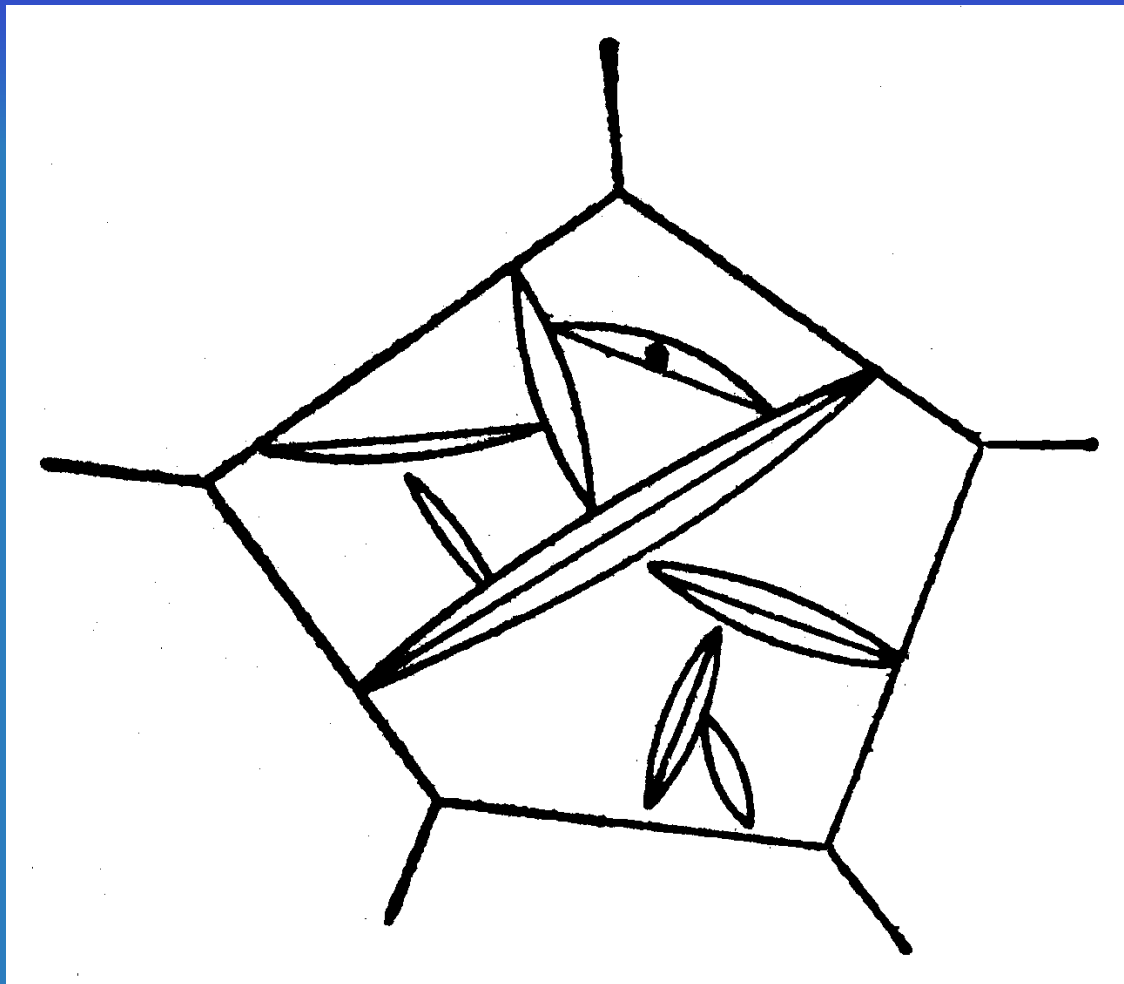


图2-43 片状马氏体显微组织示意图



图2-44 具有中脊的片状马氏体

(0.5C-24Ni钢：惯析面为 $\{259\}_{\gamma}$ ， $\times 6000$)

- 在一个马氏体片中间常有一条明显的筋，称为中脊。它的厚度一般约为 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ ，是 $\{112\}_{\alpha'}$ 型孪晶。

- 片状马氏体的亚结构主要是：平行的细小孪晶。

2. 马氏体的性能特点

(1) 马氏体的硬度和强度

- 钢中马氏体最主要的特性就是高硬度和高强度。

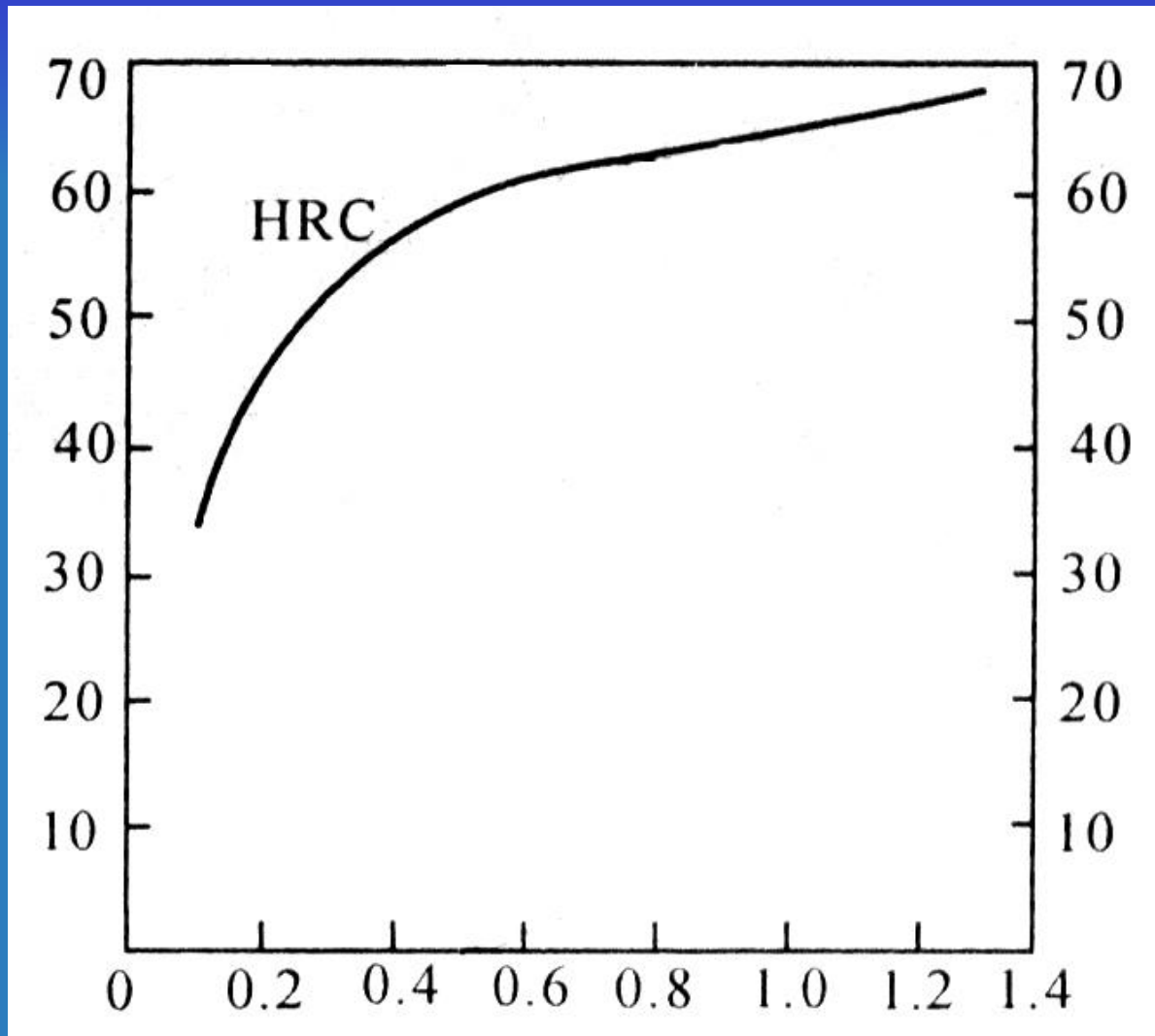


图2-45 马氏体的硬度与碳含量的关系

马氏体具有高强度和高硬度的原因如下：

- ① **固溶**强化：过饱和碳原子间隙式固溶于马氏体中引起强烈的正方畸变，形成以碳原子为中心的应力场，这种应力场与位错交互作用使马氏体显著强化。
- ② **亚结构**强化：马氏体相变的切变特性造成晶体内产生大量的微观缺陷(位错和孪晶等)，这些缺陷交互作用，使马氏体得到强化。
- ③ **时效**强化：马氏体形成过程中发生自回火，使钢中碳原子沿晶格缺陷偏聚或碳化物弥散析出，从而使马氏体得到强化。

(2) 马氏体的塑性与韧性

- 马氏体的塑性与韧性主要决定于它的亚结构。
- 位错马氏体既具有高的强度和硬度，又具有良好的塑性与韧性；
- 孪晶马氏体虽具有高的强度和硬度，但其塑性与韧性却很低。

三、马氏体转变的动力学特点

1. 马氏体的变温形成

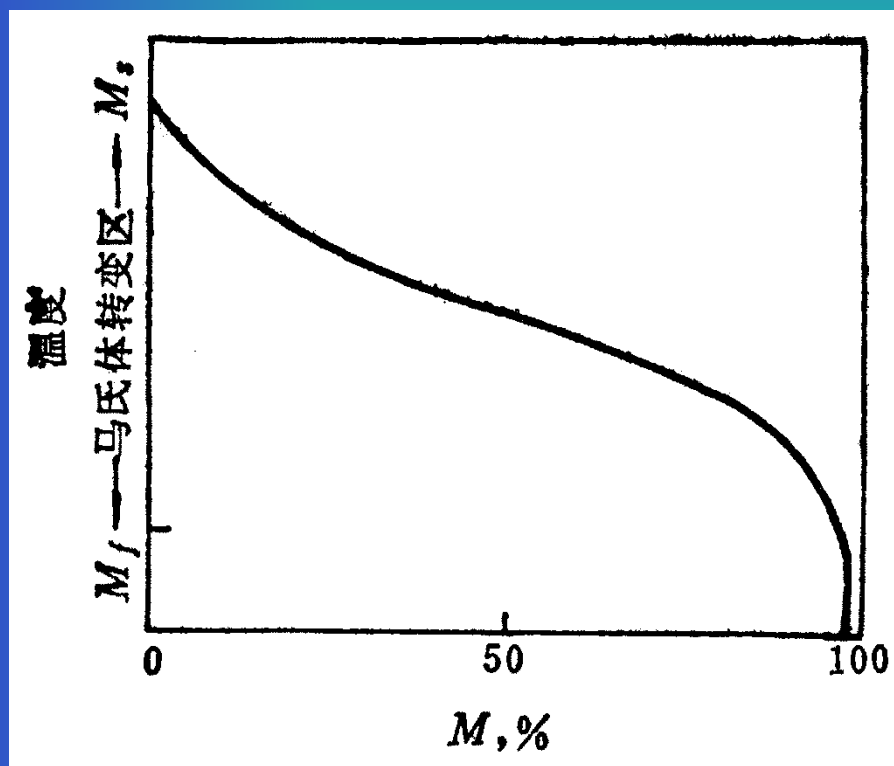


图2-46 连续冷却时马氏体转变动力学曲线

马氏体变温形成的动力学特点为：

- 降温形成
- 瞬时成核
- 瞬时长大
- 转变速度极快

2. 马氏体的等温形成

对于某些 M_s 点在 0°C 以下的 Fe-Ni-Mn、Fe-Ni-Cr 和 Fe-Mn-C 合金，其马氏体转变可完全在等温过程中进行。

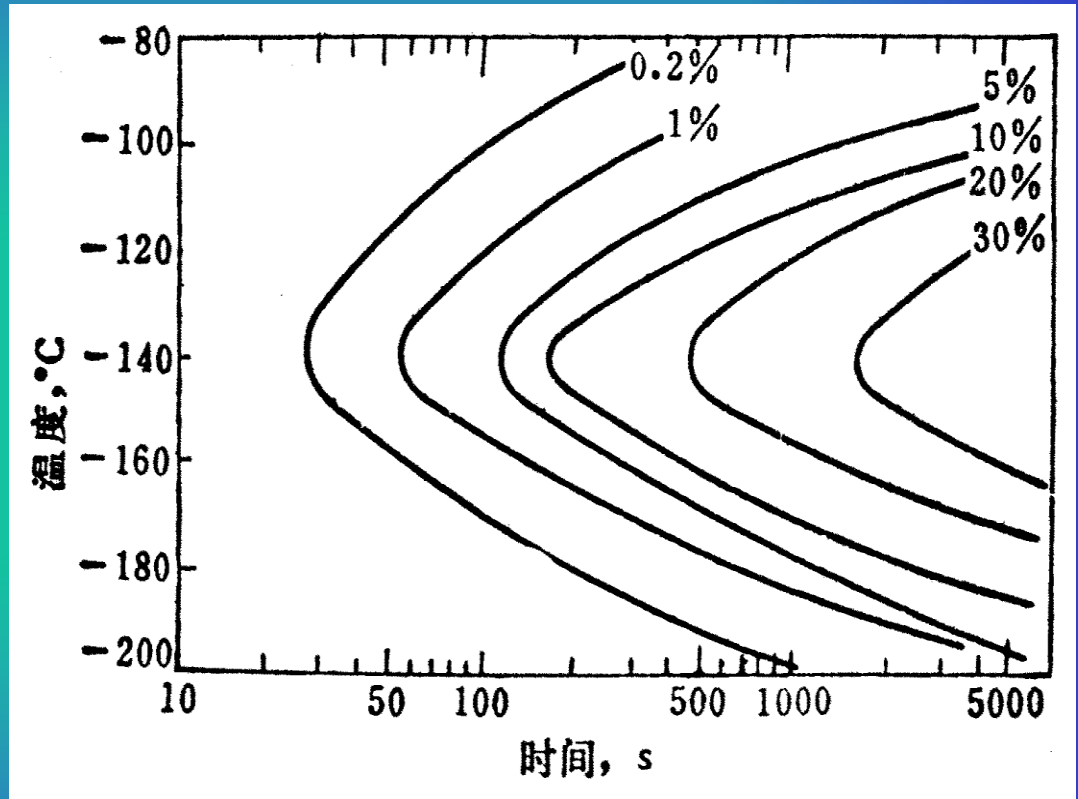


图2-47 Fe-Ni-Mn合金马氏体等温转变动力学曲线

四、马氏体转变的热力学条件

1. 马氏体转变的驱动力

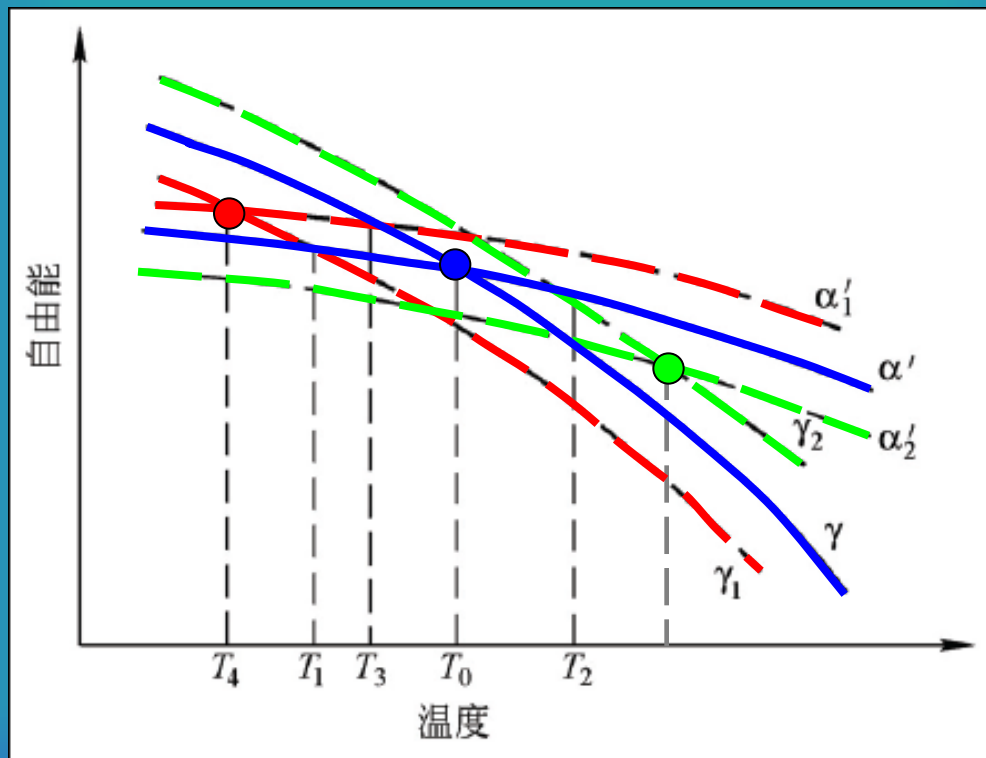


图2-48 马氏体与奥氏体的化学自由能随温度变化的示意图

马氏体转变的热力学特点是：相变需要很大的驱动力。其原因如下：

- (1) 因形成新的界面而消耗界面能；
- (2) 因产生宏观均匀切变而消耗塑性应变能；
- (3) 因新相比容增大和维持切变共格而消耗弹性应变能；
- (4) 因产生微观不均匀切变，在马氏体中形成高密度位错和细小孪晶(以能量的形式储存于马氏体中)而做功等。

2. M_s 点的物理意义

- M_s 点的物理意义：奥氏体和马氏体两相自由能之差达到相变所需的**最小**化学驱动力值时的**温度**。

3. 碳与合金元素对 M_s 点的影响

- 碳与合金元素对 M_s 点的影响主要决定于它们对**马氏体-奥氏体**两相平衡温度 T_0 的影响和对**奥氏体**的**固溶强化**作用。

- 碳既剧烈降低 T_0 温度又显著增高奥氏体的屈服强度，故碳剧烈降低 M_s 点；
- Mn、Ni、Cr也既降低 T_0 温度，又稍增高奥氏体的屈服强度，故它们也降低 M_s 点；
- V、Ti、Mo、W、Si、Co、Al等虽不同程度地增加奥氏体的屈服强度，但却提高 T_0 温度。
- 若强化奥氏体的作用大，则使 M_s 点降低，如V、Ti、Mo、W；

- 若提高 T_0 的作用大，则使 M_s 点升高，如Co、Al；
- 若这两种作用大致相当，则对 M_s 点影响不大，如Si。
- 就碳与合金元素对 M_s 点的影响而言，除钴、铝能提高 M_s 点以外，所有常用合金元素，只要溶于奥氏体，都不同程度地降低 M_s 点。

- 其中碳的作用最强烈，锰、铬、钒的作用次之，镍、钼、钨的作用再次之，硅和硼则基本不影响 M_s 点。
- 凡降低 M_s 点的合金元素均降低 M_f 点，只不过对 M_f 点的影响较弱而已，尤其是在碳含量不高时更是如此。
- 钢中加入合金元素都增大形成孪晶马氏体的倾向，使室温下的残余奥氏体量增多。

五、马氏体转变模型简介

1. 马氏体转变的晶体学经典模型

(1) Bain畸变模型

(2) K-S切变模型

(3) G-T切变模型

2. 马氏体转变的位错理论

3. 马氏体转变的唯象理论

六、奥氏体的稳定化

使奥氏体转变为马氏体的能力减弱(表现为 M_s 点降低及马氏体量减少)的一切现象，均可称为奥氏体的稳定化。

按其机理(或本质)的不同，可将其分为三大类：

- (1) 因化学成分变化而引起奥氏体的稳定化，称为**化学**稳定化；
- (2) 由于塑性变形而引起的奥氏体稳定化，称为**机械**稳定化；
- (3) 因淬火冷却过程中冷却缓慢或中途停留而引起的奥氏体稳定化，称为**热**稳定化。

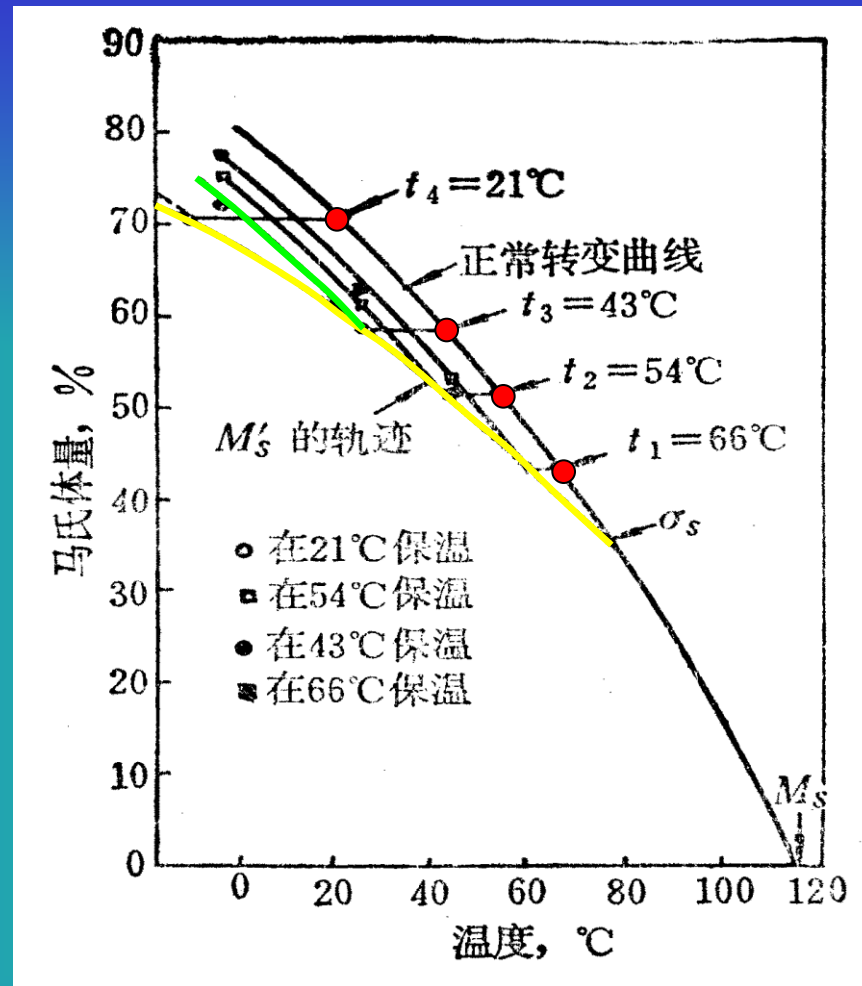


图2-49 高碳铬钢中奥氏体的热稳定化

(1.1C-1.5Cr钢; 奥氏体化温度为 1040°C)

思考题

1. 简述马氏体的晶体结构与转变特点。
2. 概述板条马氏体和片状马氏体的组织形态、亚结构与力学性能有何不同。
3. 简述 M_s 点的物理意义及影响 M_s 点的主要因素。
4. 试分析产生奥氏体稳定化的条件及奥氏体稳定化对马氏体转变的影响。