

金属材料学

Metal Material and Heat Treatment

主讲教师：曾燕屏

第二篇 工艺篇

第三章

金属材料的热处理工艺

热处理工艺的概念

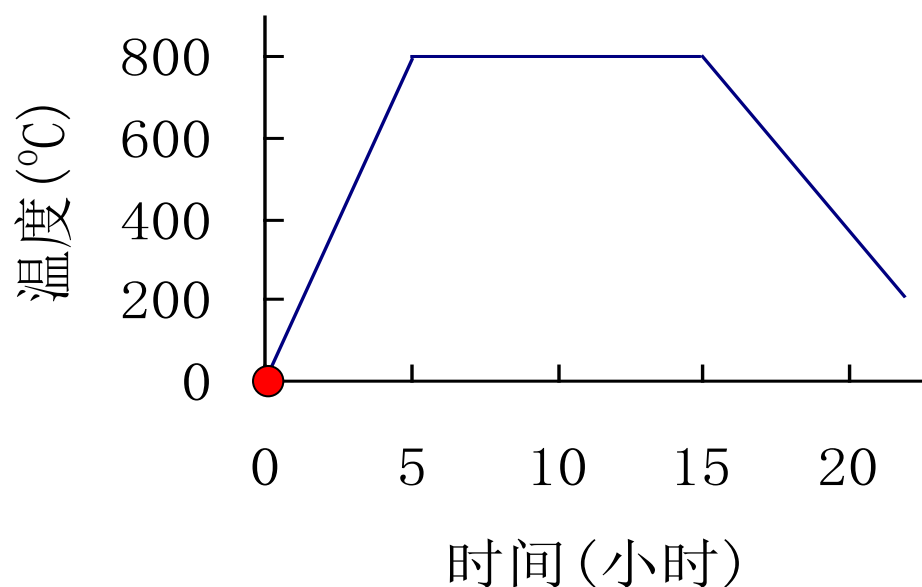


图3-1 热处理工艺

所谓**热处理工艺**，是指把材料加热到**预定的温度**，在此温度下**保持**一定时间，然后以**预定的速度**冷却下来的一种综合工艺。

§ 3-1 钢的退火与正火

一、钢的退火

将钢加热到适当温度，保温一定时间，然后缓慢冷却的热处理工艺称为退火。

退火可以达到以下目的：

- (1) 减小钢锭的成分偏析，使成分均匀化；
- (2) 消除铸、锻件中存在的魏氏组织或带状组织，细化晶粒，均匀组织，并消除内应力；
- (3) 降低硬度，提高塑性，以便于切削加工；
- (4) 改善高碳钢中碳化物的形态和分布，为淬火作好组织准备。

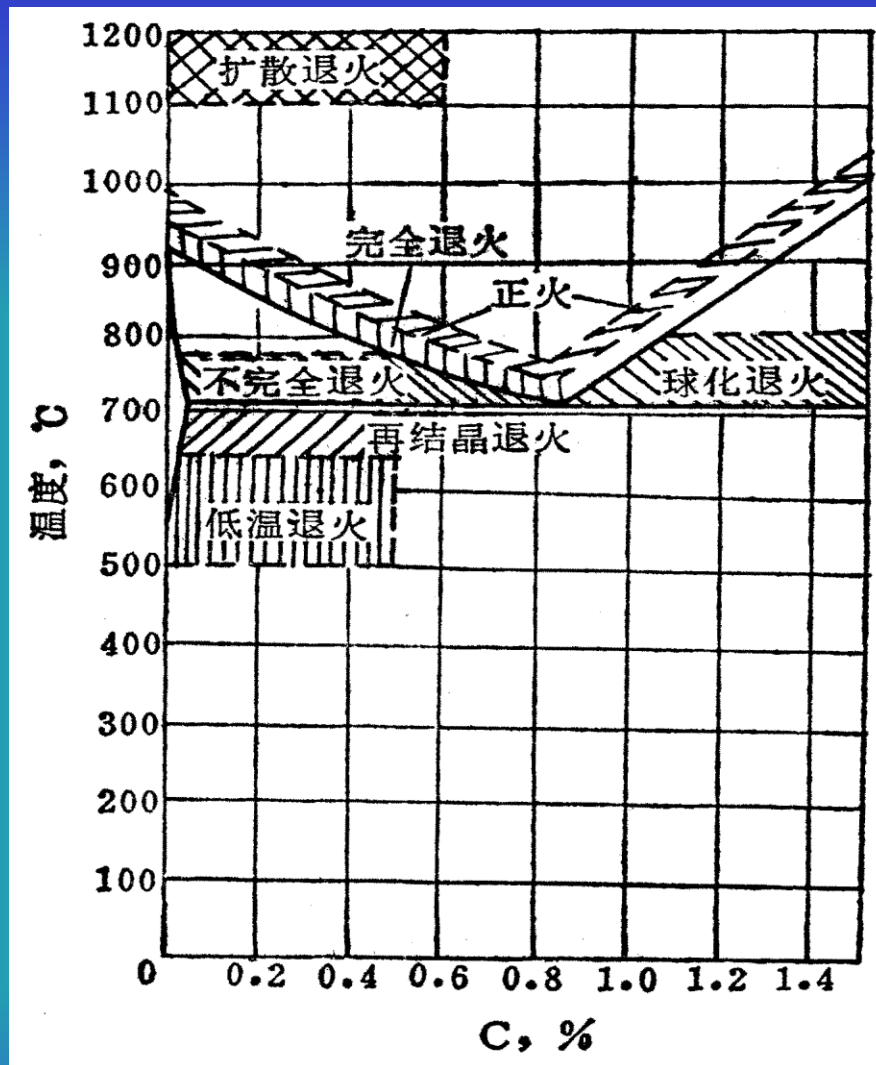


图3-2 退火与正火的加热温度范围示意图

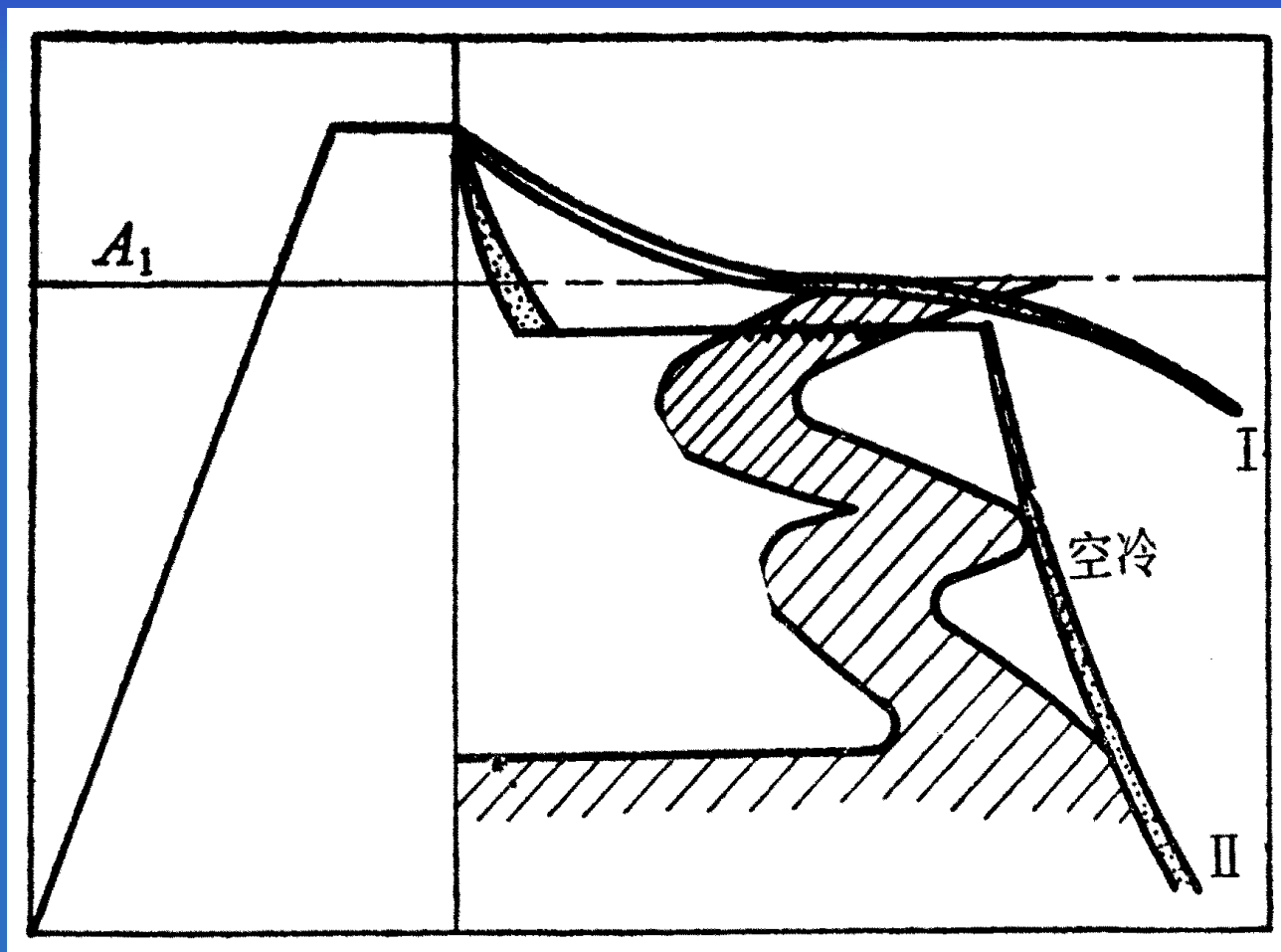


图3-3 普通退火(I)与等温退火(II)示意图

- 普通退火是将钢件加热到临界温度(A_{c1} 或 A_{c3})以上奥氏体化后连续冷却至室温。
- 等温退火是将钢件加热到临界温度(A_{c1} 或 A_{c3})以上奥氏体化后，迅速移入另一温度低于 A_{r1} 的炉中等温停留，待转变完成后，出炉空冷至室温。

1. 完全退火

将亚共析钢加热至 A_{c3} 以上 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，保温足够时间奥氏体化后，缓慢冷却，从而获得接近平衡状态的组织，这种热处理工艺称为完全退火。

完全退火的目的为：

- (1) 消除铸锻件中存在的魏氏组织或带状组织，细化晶粒和均匀组织；
- (2) 消除铸锻件中存在的内应力，降低硬度，便于切削加工；为加工后零件的淬火做好组织准备。

完全退火只适用于亚共析钢，不适用于过共析钢。



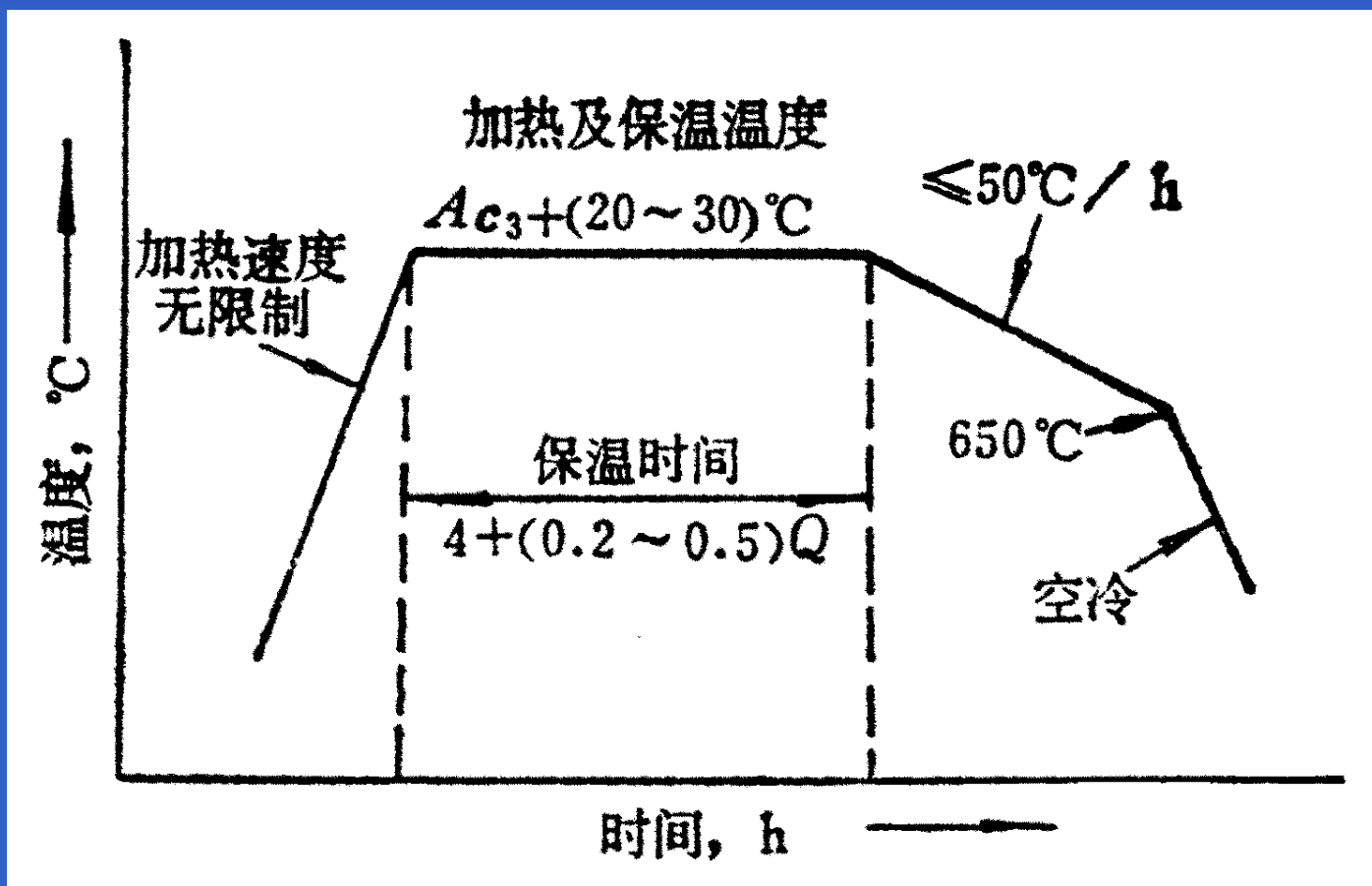


图3-4 热锻轧钢材完全退火工艺曲线

2. 不完全退火

- 将亚共析钢在 $A_{c1} \sim A_{c3}$ 之间或过共析钢在 $A_{c1} \sim A_{cm}$ 之间两相区加热，保温足够时间后缓慢冷却的热处理工艺，称为不完全退火。
- 不完全退火的目的是：细化晶粒，改善组织，消除内应力，降低硬度，以便切削加工。

3. 球化退火

- 球化退火是一种将钢中碳化物由片状变为粒状的热处理工艺，主要用于过共析钢，是一种不完全退火。
- 球化退火的目的是：消除钢中的片状珠光体，代之以粒状珠光体。
- 球化退火的加热温度范围一般为： $A_{c1}+20\sim 30^{\circ}\text{C}$

二、钢的正火

- 正火是将钢加热奥氏体化后在空气中冷却的热处理工艺。
- 对于亚共析碳钢，正火加热温度一般采用 A_{c3} 以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。
- 对于过共析碳钢，正火加热温度一般采用 A_{cm} 以上 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。

- 对于含有强碳化物形成元素钒、钛、铌等的合金钢，在不引起奥氏体晶粒粗化的条件下，应尽可能采用高的加热温度，以加速合金碳化物的溶解和奥氏体成分的均匀化。
- 根据过冷奥氏体的稳定性和工件的截面尺寸，正火后可获得不同的组织，如粗细不同的珠光体、贝氏体、马氏体或它们的混合组织。

正火的目的：

- (1) 对于截面较大的钢材、锻件、铸件，用正火来细化晶粒，均匀组织(如消除魏氏组织或带状组织)，为淬火做好组织准备，此时正火相当于退火的效果。
- (2) 低碳钢退火后硬度太低，切削加工中易粘刀，光洁度差。改用正火，可提高硬度，改善其切削加工性。
- (3) 可以作为某些中碳钢或中碳低合金钢工件的最终热处理，以代替调质处理，具有一定的综合力学性能。
- (4) 用于过共析钢，可消除网状二次碳化物，为球化退火做好组织上的准备。

§ 3-2 钢的淬火与回火

一、钢的淬火

将钢加热奥氏体化后以适当方式冷却获得**马氏体**或**贝氏体**组织的热处理工艺称为**淬火**。

淬火的主要目的是：把奥氏体化后的工件**淬成马氏体**，以便在适当温度回火后，获得所需要的力学性能。

1. 淬火工艺参数的选择

(1) 加热温度

- 亚共析碳钢的淬火加热温度为：
 $A_{c3}+30\sim 50^{\circ}\text{C}$
- 共析及过共析碳钢的淬火加热温度为：
 $A_{c1}+30\sim 50^{\circ}\text{C}$

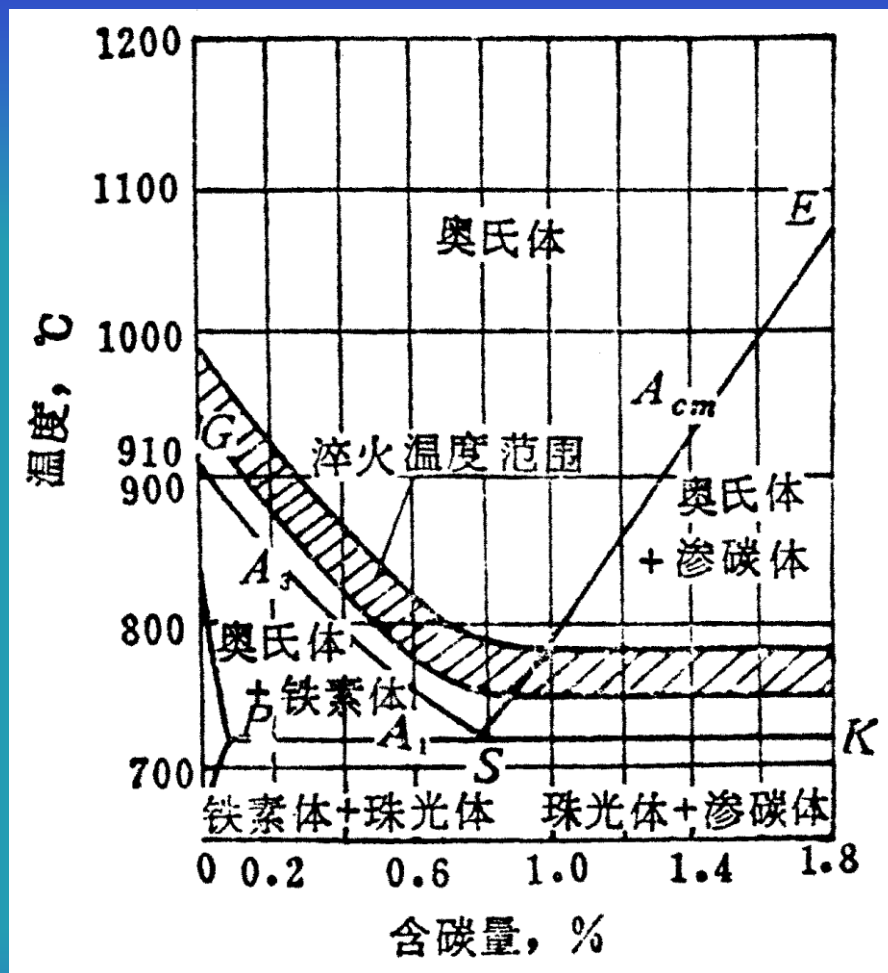


图3-5 碳钢的淬火加热温度范围

(2) 保温时间

- 保温时间是指工件装炉后，炉温回升到淬火加热温度后所需保持的时间。
- 保温的目的是：
 - ① 使工件透热，即工件整个截面都达到规定的淬火加热温度；
 - ② 完成加热时的转变过程，获得所需成分的细晶粒奥氏体。

(3) 淬火介质及冷却方法

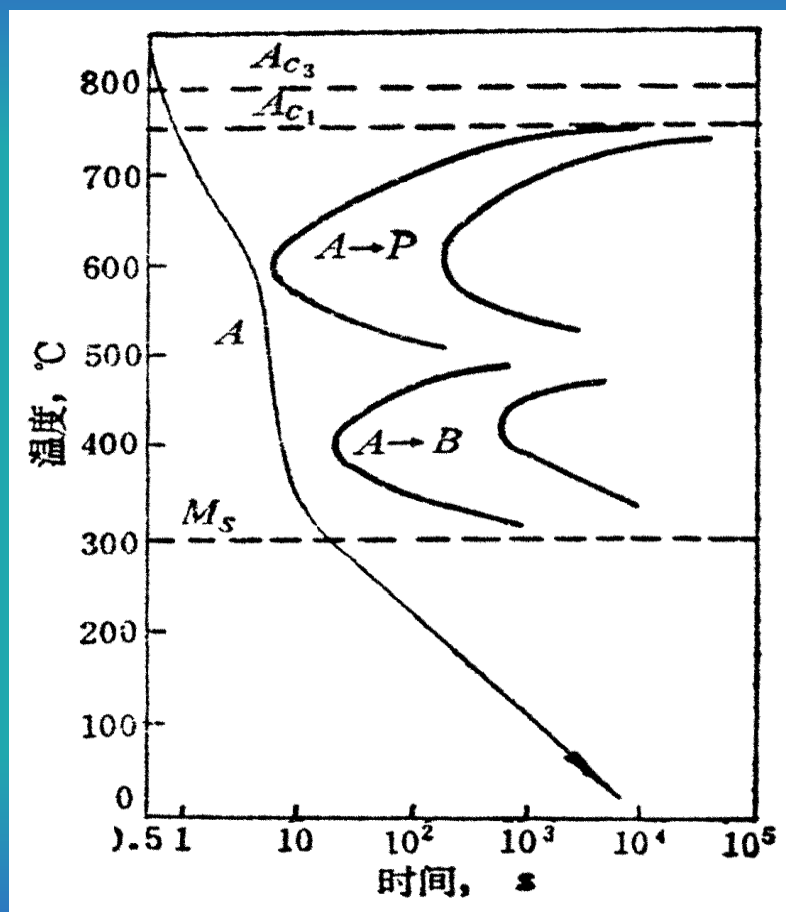


图3-6 钢的理想淬火冷却曲线

表3-1 常用淬火介质的冷却速度

淬火介质	冷却速度(°C/s)	
	在650~550°C区间	在300~200°C区间
水(18°C)	600	270
水(26°C)	500	270
水(50°C)	100	270
水(74°C)	30	200
10%苛性钠水溶液(18°C)	1200	300
10%氯化钠水溶液(18°C)	1100	300
矿质机油	100	20
油水乳状液	70	200

常用的淬火冷却方法有四种：

- ① **单液淬火**：将奥氏体化后的工件迅速投入到**一种**淬火冷却介质中，冷却到适当温度后取出空冷，这种淬火冷却方式称为单液淬火。
- ② **双液淬火**：将奥氏体化后的工件迅速投入**水**中急冷，防止工件发生珠光体和贝氏体转变，待工件表面温度**接近** M_s 点时，立即从水中取出，投入**油**中冷却，在油冷过程中发生马氏体转变，这种淬火冷却方式称为双液淬火。

③ 分级淬火：将奥氏体化后的工件迅速投入温度略高于或略低于 M_s 点的盐浴或碱浴中保持适当时间，在工件整体达到介质温度后取出空冷以获得马氏体，这种淬火冷却方式称为分级淬火。

④ 等温淬火：将奥氏体化后的工件快冷到贝氏体转变温度区间等温保持，使奥氏体转变为贝氏体，这种淬火冷却方式称为等温淬火。



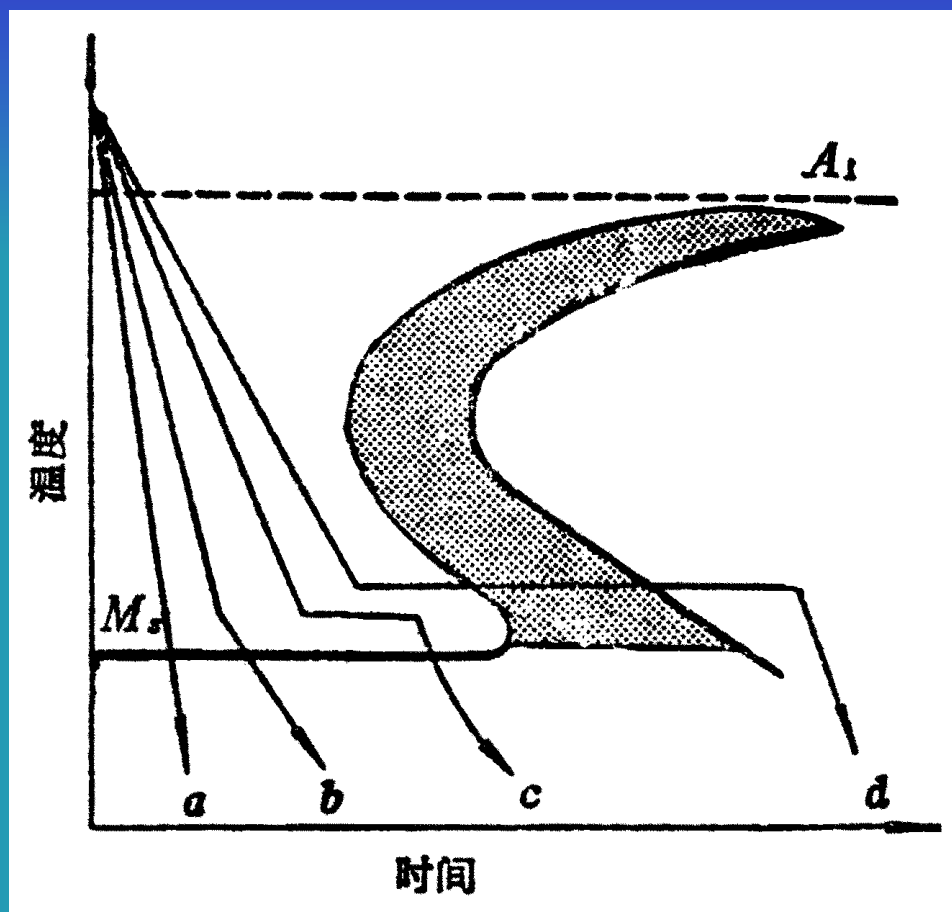


图3-7 各种淬火方法的冷却曲线示意图

- (a) 单液淬火 (b) 双液淬火
(c) 分级淬火 (d) 等温淬火

2. 钢的淬透性

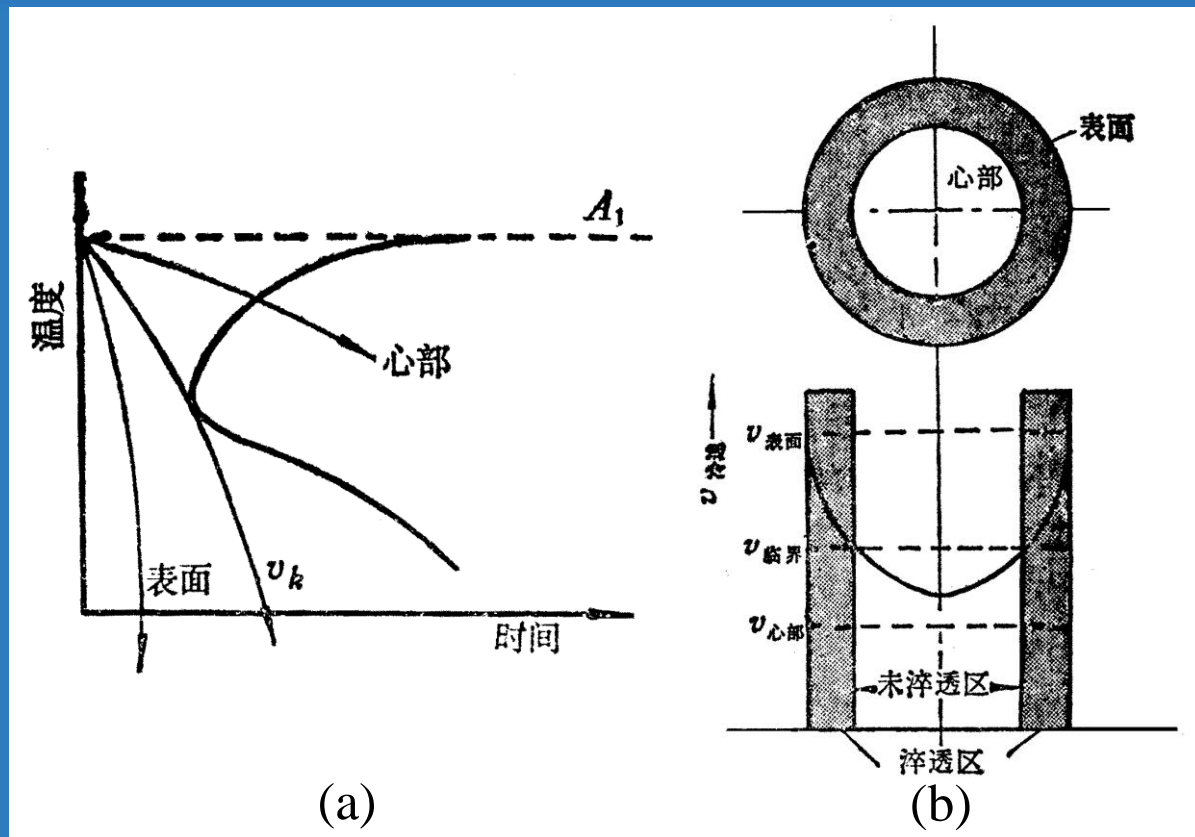


图3-8 工件截面上各点的冷却速度(a)与未淬透区(b)示意图

- 淬透层深度为：表面至半马氏体区(即由50%马氏体和50%非马氏体组成)的距离。

- 钢的淬透性：是指以在规定条件下钢试样淬透层深度和硬度分布来表征的材料特征，它主要取决于钢的临界淬火冷速的大小。



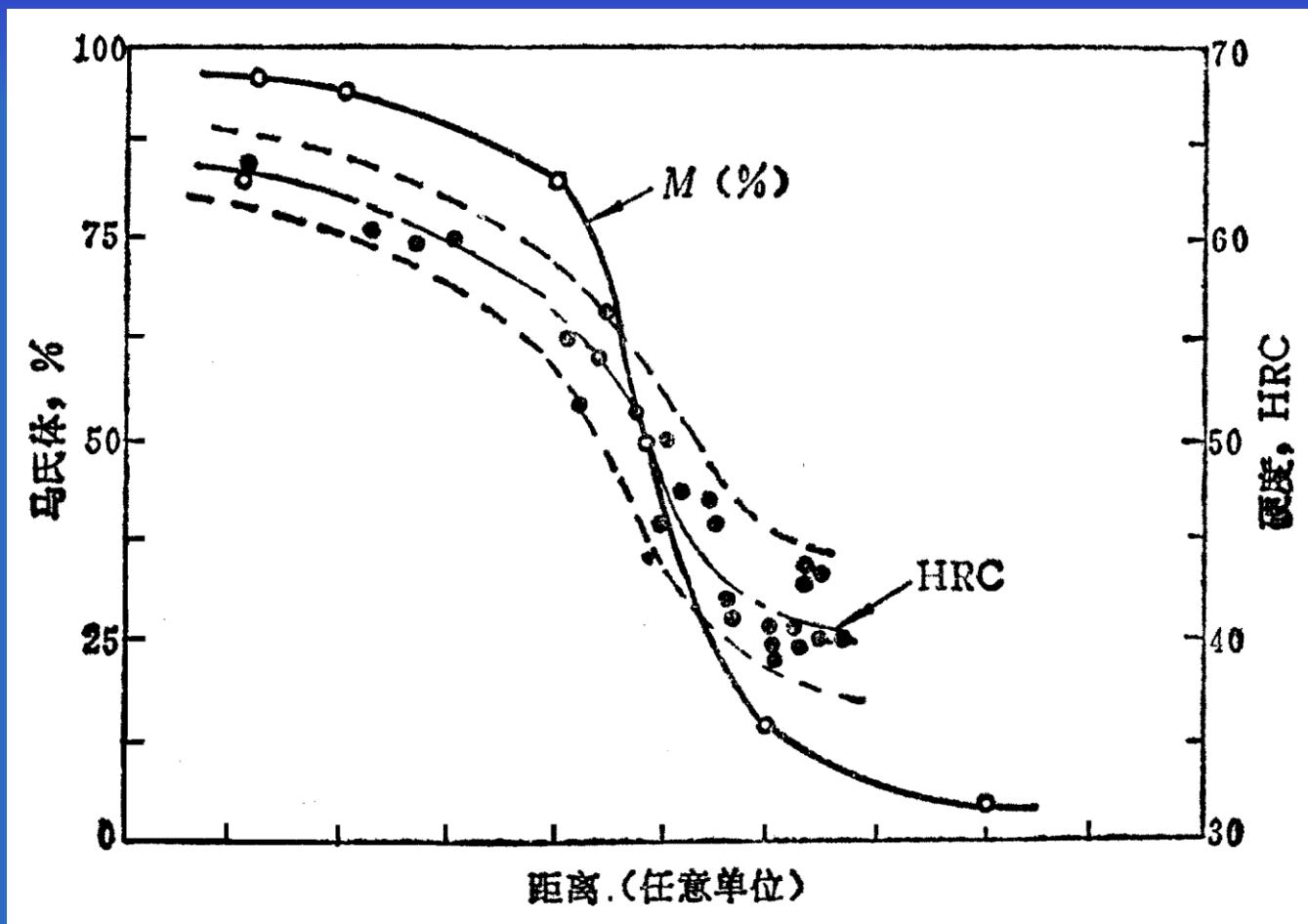


图3-9 淬透-未淬透区过渡部分的马氏体量与硬度变化

淬透性的测定方法

① 断口评级法

- 按国标GB227-63规定，试样尺寸为 $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 100\text{mm}$ ，中间开一个V型缺口；或 $\Phi 22\text{mm} \times 100\text{mm}$ ，中间开环形缺口，缺口深均为3~5mm。

- 将试样分别加热至760、800和840℃淬火，从缺口处打断试样，观察其断口形貌，对照相应的评级标准图来评定淬透性等级。
- 标准中规定了0~5六个级别，0级淬透性最小，5级淬透性最大。
- 此方法主要适用于碳素工具钢，低合金工具钢也可参照使用。

② 顶端淬火法 (GB225-63)

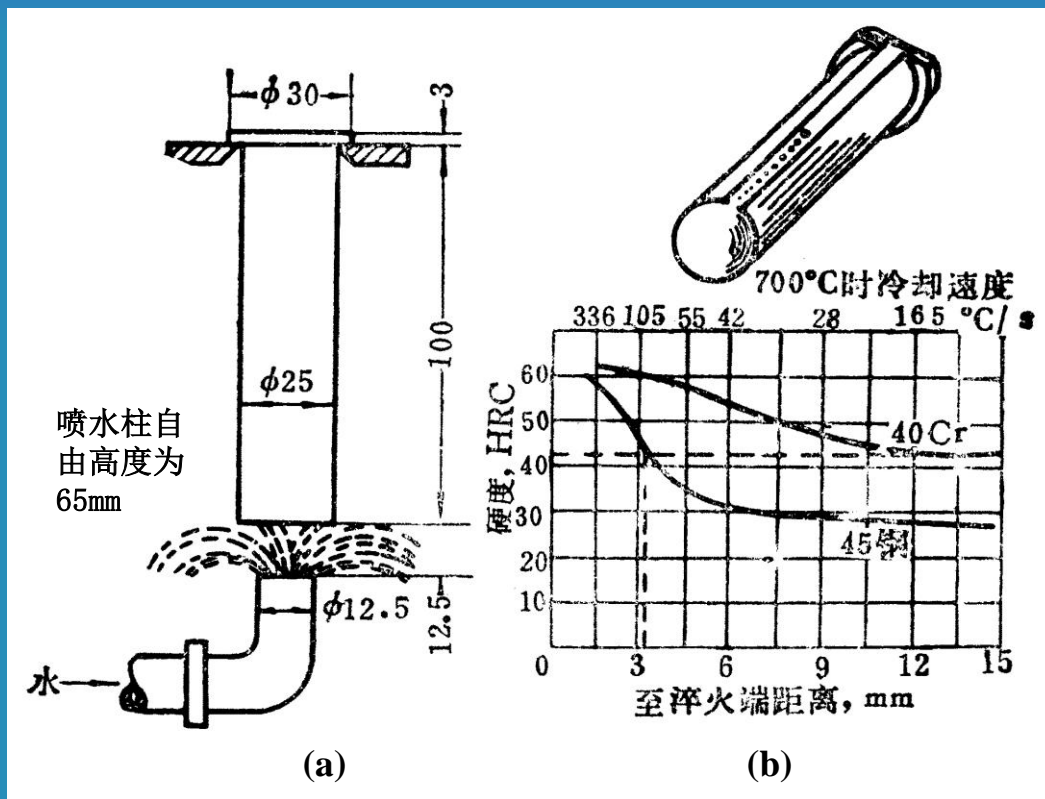


图3-10 顶端淬火法示意图
(a) 淬火装置；(b) 淬透性曲线

钢的淬透性应表示为 $J \frac{HRC}{d}$ ，d为至水冷端距离；HRC为该处的硬度值。

临界淬透直径：是指在某种淬火介质中，圆柱形试样**中心**刚好为**50%马氏体**组织时的**最大直径**。

顶端淬火法适用于碳素结构钢和合金结构钢。



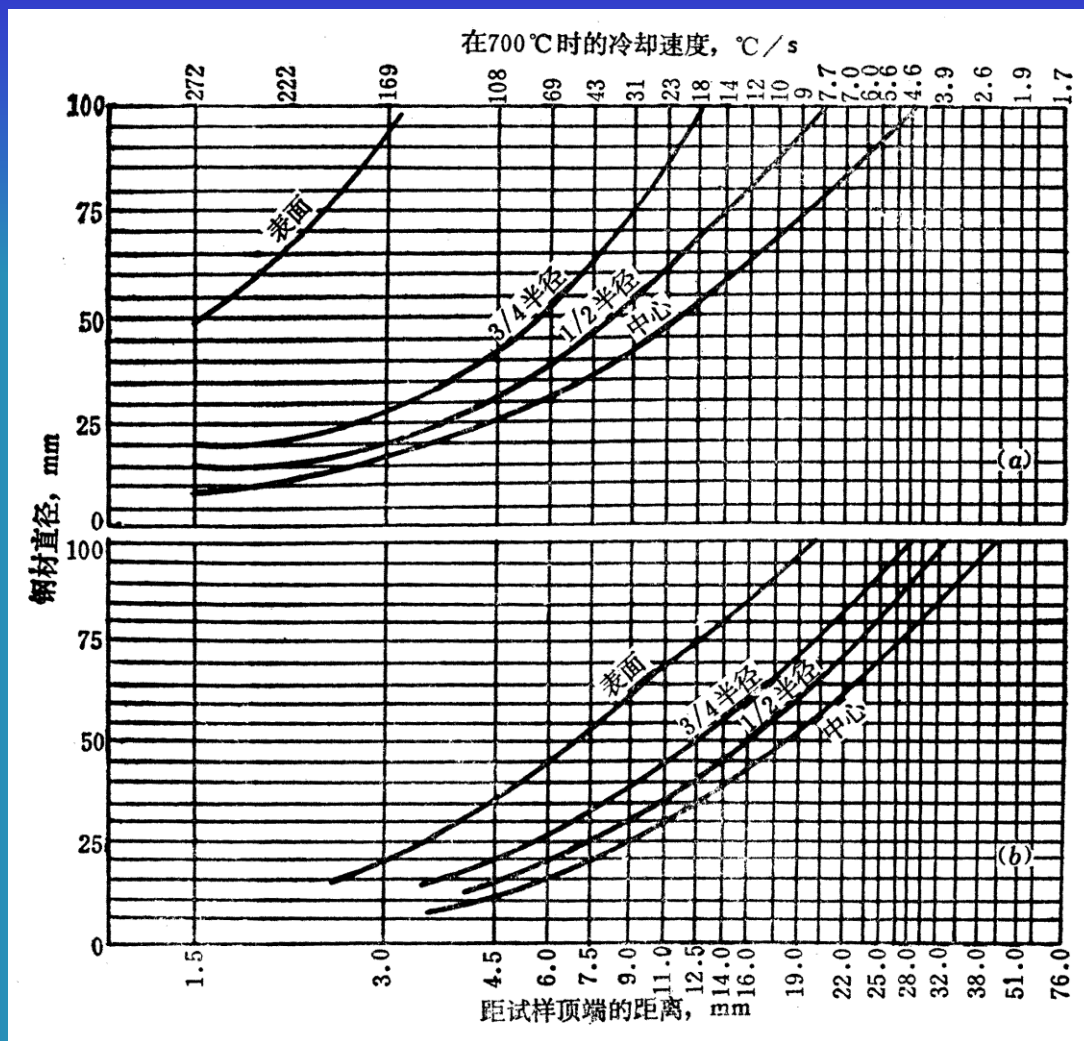


图3-11 不同直径棒材横截面上各点与顶端淬火试样轴向各点的冷却速度对照图
(a) 淬入缓动水中；(b) 淬入缓动油中

二、钢的回火

回火是将**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。

回火的主要目的：

- (1) **获得**所需组织以改善性能；
- (2) **稳定**组织与尺寸；
- (3) **消除**内应力。

按回火温度的不同，可将回火分为以下三类：

1. 低温回火

- 在 $150\sim 250^{\circ}\text{C}$ 之间进行，回火后组织为回火马氏体。
- 目的是在保持高强度、高硬度的前提下，降低钢的淬火内应力，减小其脆性。
- 主要用来处理刀具、量具、冷作模具、滚动轴承和渗碳件等。

2. 中温回火

- 在350~500℃之间进行，回火后组织为回火屈氏体。
- 中温回火后的钢具有最高的弹性极限和足够的韧性。
- 主要用来处理各种弹簧，也可用于处理要求高强度的工件，如刀杆、轴套等。

3. 高温回火

- 在500~650℃之间进行，回火后组织为回火索氏体。
- 淬火加高温回火的热处理工艺称为调质处理。
- 调质处理后工件既具有较高的强度，又具有良好的塑性和韧性，即具有高的综合力学性能。
- 调质处理广泛用于要求高强度并受冲击或交变负荷的重要工件，如连杆、轴等。

§ 3-3 钢的表面淬火

为改变工件表面的组织和性能，仅对其表面进行热处理的工艺。

一、感应加热基本原理

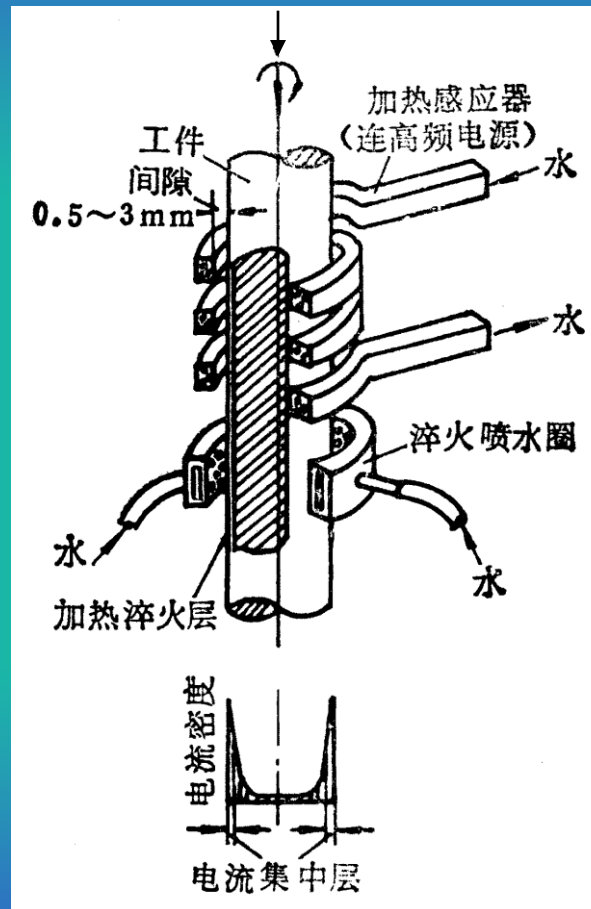


图3-12 感应加热表面淬火示意图

- 将工件放在通有交变电流的感应圈内，感应圈周围的交变磁场会使工件产生感应电流，这个电流在工件内自成回路，称为**涡流**。

- 工件上产生的感应电流在工件截面上的分布是不均匀的，在工件表面电流密度最大，心部几乎没有电流通过，这种现象称为**集肤效应**。

电流透入工件表面层的深度为：

$$\delta = \frac{20}{\sqrt{f}} \quad (\text{冷态 } 20^{\circ}\text{C})$$

$$\delta = \frac{500}{\sqrt{f}} \quad (\text{热态 } 800^{\circ}\text{C})$$

式中 δ —电流透入深度(mm)；

f —电流频率(Hz)。

工件表面在感应电流作用下，很快被加热到淬火温度，而后又被急速冷却，这一过程就是**感应加热表面淬火**处理。

二、感应加热表面淬火的特点

1. 感应加热是靠工件表面层感应电流直接加热，因而加热效率高，速度快(可达 $1000^{\circ}\text{C}/\text{秒}$)，无保温过程。
2. 这使钢的临界点 A_{C1} 、 A_{C3} 有不同程度提高，故加热温度高于一般淬火，为 A_{C3} 以上 $80\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。

3. 能获得细晶粒奥氏体，淬火后得隐晶马氏体，工件表面**硬度高**(比普通淬火高2~3HRC)，**氧化、脱碳少**。
4. 感应加热表面淬火后，淬硬的表面层中存在很大的残余压应力，能有效地**提高**工件的**疲劳强度**。由于不是整体加热，淬火冷却时，工件的**变形小**。
5. 感应加热表面淬火**生产效率高**，便于实现**机械化、自动化**。

三、感应加热表面淬火设备及应用

根据电流频率的不同，感应加热表面淬火可分为以下三类：

(1) 高频感应加热淬火

采用电子管式高频设备，工作频率通常为200~250kHz，可获得1~2mm厚的硬化层，一般用于处理中小模数齿轮和小轴。

(2) 中频感应加热淬火

生产上采用机械式中频发电机组或可控硅变频器，可提供频率为1000、2500或8000Hz的电流，能获得3~5mm厚的硬化层。主要用于大模数齿轮、较大尺寸的轴、钢轨轨端及轨面全长淬火。

(3) 工频感应加热淬火

工频感应加热是采用工业上常用的50Hz工频电流，因而只需降压变压器。能获得10~15mm厚的硬化层，主要用于深层和穿透加热，如大工件的表面淬火、锻件的穿透加热等。

生产上还采用双频感应加热淬火工艺，它是用工频预热，再用中频作淬火加热，从而加深硬化层，并提高淬火质量。此种工艺已应用于钢轨全长淬火，冷轧辊表面淬火等。

感应加热表面淬火一般用于中碳钢或中碳合金结构钢，如40、45、40Cr、35CrMo等，这些钢在感应加热表面淬火前需预先正火或调质处理。

感应加热表面淬火也可用于高碳工具钢和球墨铸铁等。

根据钢淬裂倾向的不同，感应加热表面淬火可采用水、乳化液、0.05~0.10%聚乙烯醇水溶液作为喷射淬火介质。

§ 3-4 钢的化学热处理

钢的化学热处理是将工件置于适当的活性介质中加热、保温，使一种或几种元素渗入它的表层，以改变其化学成分、组织和性能的热处理。

与表面淬火相比，化学热处理的主要优点是：

- ① 表面强化效果极为显著；
- ② 可获得某些特殊性能，如抗蚀性、抗高温氧化以及极高的耐磨性。

化学热处理的种类很多，都以渗入钢中的元素命名，如渗碳、氮化、碳氮共渗、渗硼、渗铝等。

一、渗碳

- 为提高工件表层的含碳量并在其中形成一定的碳含量梯度，将工件在渗碳介质中加热、保温，使碳原子渗入的化学热处理工艺称为渗碳。
- 由于渗碳工件心部要求具有较高的韧性，因此渗碳用钢是含碳量为0.15~0.25%的低碳钢或低碳合金钢，如20、20Cr、20CrMnTi、20CrMnMo等。

- 根据渗碳介质状态的不同，渗碳工艺有气体渗碳、固体渗碳和液体渗碳三种。其中应用最广泛的是气体渗碳。

- 分解是指渗碳介质在一定温度下产生化学反应，析出所需活性碳原子的过程。如



- 吸收是指活性碳原子首先被工件表面所吸附，而后通过溶解或结合成化合物的形式进入金属表面层的过程，可用下式表示：



- 扩散是指被工件表面吸收的活性碳原子向工件内部迁移的过程。扩散的结果便得到一定厚度的富碳扩散层，即渗碳层。
- 低碳钢渗碳缓冷后，表层是珠光体和网状渗碳体的过共析组织，往里依次为共析组织，亚共析组织过渡区及原始组织。通常把由表面至过渡区的一半处作为渗碳层深度。



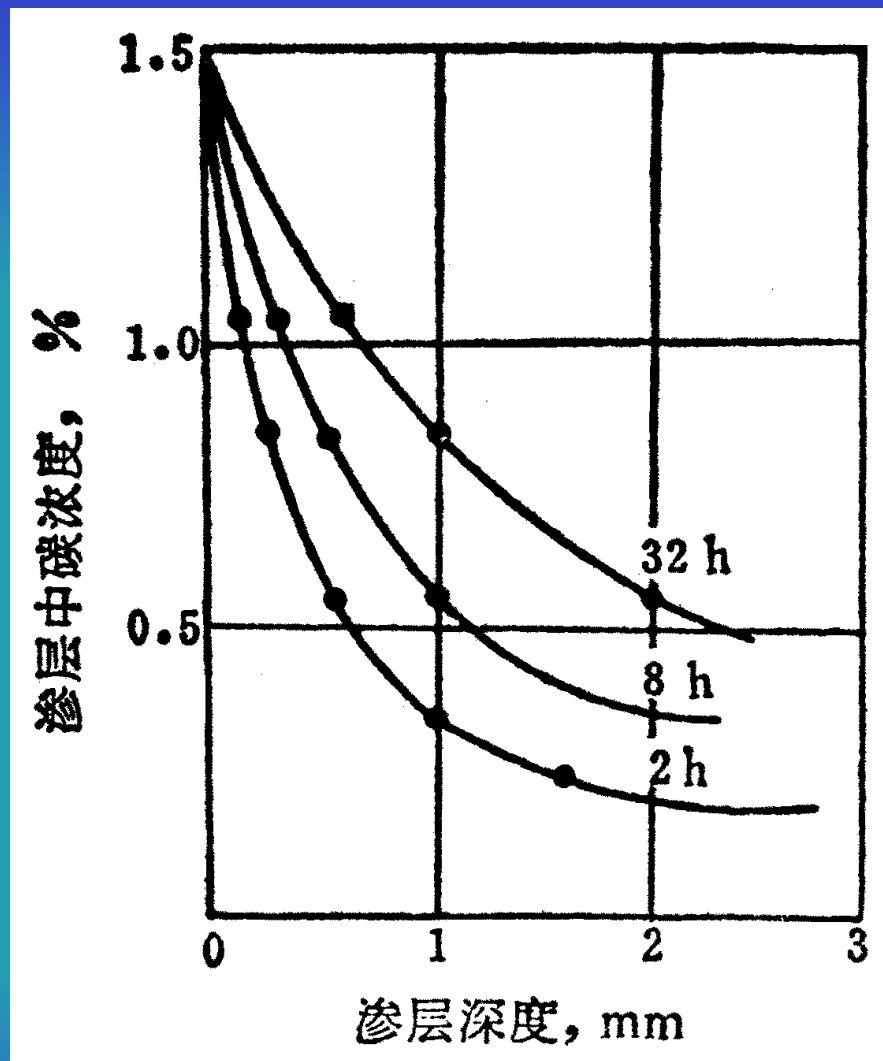


图3-13 渗碳层的碳浓度分布

- 对于一般零件，渗碳层表面的含碳量最好控制在0.85~1.05%之间，渗碳层的深度控制在0.5~2.0mm之间。
- 工件经渗碳后必须进行淬火和低温回火处理，使工件表面获得高硬度和高耐磨性，而心部具有一定的强度和较高的韧性。
- 对于本质细晶粒钢，可以渗碳后预冷直接淬火，然后低温回火。

- 渗碳件经淬火、低温回火后，表层组织应由细片状回火马氏体、细粒状碳化物和少量残余奥氏体组成，硬度为HRC58~62。

- 心部组织随钢种而异：低碳钢由铁素体和珠光体组成；低碳合金钢如20CrMnTi由低碳回火马氏体和少量铁素体组成，其硬度在HRC35~45之间，具有较高的强度和足够高的韧性。

二、氮化

- 在一定温度下于一定介质中使氮原子渗入工件表层的化学热处理工艺称为氮化（或渗氮）。
- 为了保证氮化后工件表面具有高硬度和高耐磨性，心部获得强而韧的组织，氮化用钢应采用能形成稳定合金氮化物的合金钢，最常用的是38CrMoAlA钢。

- 与渗碳相比，氮化后工件的性能具有以下特点：

(1) 表面硬度可达HV950~1200（相当于HRC65~72），工件具有更好的耐磨性；

(2) 氮化层内形成更大的残余压应力，工件具有更高的疲劳强度和较低的缺口敏感性；

(3) 氮化表面形成致密的氮化物连续薄膜，工件具有**高的抗腐蚀性**；

(4) 氮化处理温度低，工件**变形小**。

- 氮化处理被广泛用于**精密零件**(如高精度的传动齿轴和轴)、要求**高疲劳强度**的零件和**抗热、抗蚀及耐磨**零件。

- 氮化处理**温度低，时间长**。由于氮化后不再对工件进行热处理，故**氮化前**必须对其进行**调质处理**。

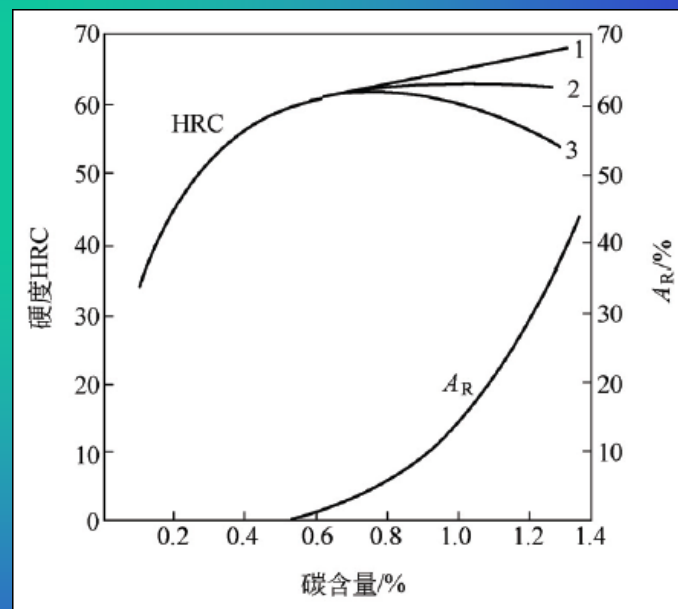
思考题

1. 试分析下图中曲线变化的原因。淬火处理工艺如下：

① 亚共析钢：加热到 A_{C3} 以上充分奥氏体化后，急冷淬火；

② 过共析钢：

1. 马氏体的硬度与其中含碳量的关系。
2. 加热到 $A_{C1} \sim A_{cm}$ 之间充分奥氏体化后，急冷淬火；
3. 加热到 A_{cm} 以上充分奥氏体化后，急冷淬火；



淬火后硬度与钢中含碳量的关系

2. 将退火态45钢小试样若干块，分别在900、850、800、750、700、650、600、550、500℃的加热炉中充分加热后水冷至室温，然后测量各试样的硬度，请示意画出试样硬度(Y)轴与加热温度(X轴)的关系图，并说明图中曲线各部分所对应的组织和温度范围；若改用T8钢制成的试样进行相同的试验，请示意画出试验结果，并进行简要分析(提示：在工业上T8钢被认为是共析钢)。

3. 退火态45号钢(0.45%C)经过何种热处理工艺可得到下列两种组织状态：(1)屈氏体网+下贝氏体；(2) 在铁素体基体上分布着粒状渗碳体。请在C曲线上画出每种工艺曲线，并作简要分析。

4. 若要使钢表面有近似工具钢一样的硬度，而心部具有很好的韧性，需选择何种钢及怎样的热处理方法？