



机械工程材料及热加工工艺

安玉民，副教授

河北工业大学，机械工程学院

邮箱：anyumin@hebut.edu.cn

绪论

第1章 机械工程材料的性能

第2章 金属的晶体结构与结晶

第3章 合金的晶体结构与相图

第4章 铁碳合金相图和碳钢

第5章 钢的热处理

第6章 合金钢

第7章 铸铁

第8章 有色金属及其合金

第9章 非金属材料与新型材料

第10章 铸造成型

第11章 锻压成型

第12章 焊接与胶接成形

第13章 非金属材料成形

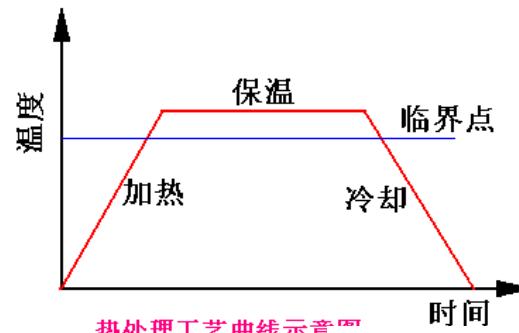
第14章 机械零件材料及毛坯的选择与质量检验

第5章 钢的热处理

1. 什么是热处理

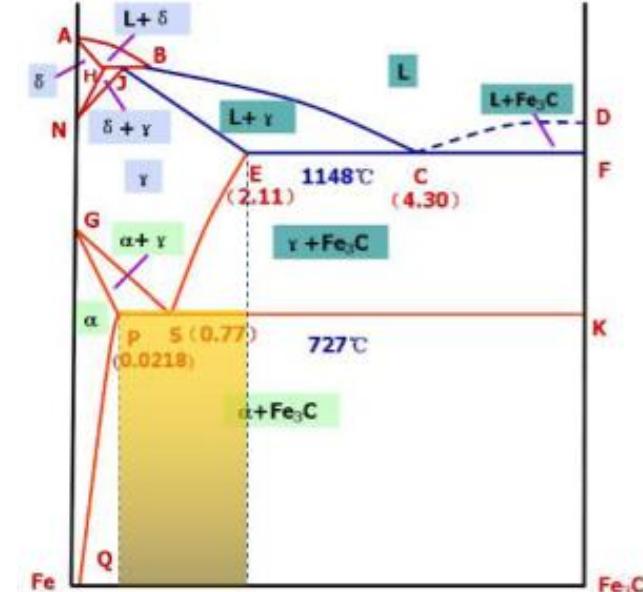
定义：将钢在固态下通过适当方法进行加热、保温、冷却的手段，以改变钢的表面或内部的化学成分及组织结构，从而获得所需性能的一种金属热加工工艺。

此处热处理指的是相图中含碳含量介于P点和E点之间的铁碳合金。



2. 热处理的目的和作用

使金属工件具有所需要的力学性能、物理性能和化学性能。提高使用性能、改善工艺性能、提高产品质量、延长使用寿命、利于冷热加工、提高经济效率。



45钢加热到840℃，在不同冷却条件下冷却后的力学性能

冷却方法	σ _b /MPa	σ _s /MPa	δ/%	φ/%	HRC
随炉冷却	519	272	32.5	49	15-18
空气冷却	657-706	333	15-18	45-50	18-24
油中冷却	882	608	18-20	48	40-50

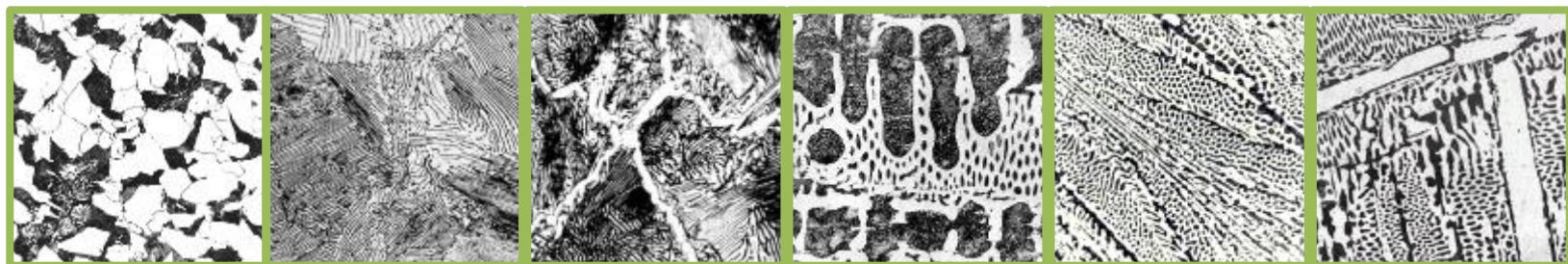
3. 热处理的发展历史

从石器时代进展到铜器时代和铁器时代的过程中，热处理的作用逐渐为人们所认识。早在公元前770至前222年，中国人在生产实践中就已发现，铜铁的性能会因温度和加压变形的影响而变化。白口铸铁的柔化处理就是制造农具的重要工艺。

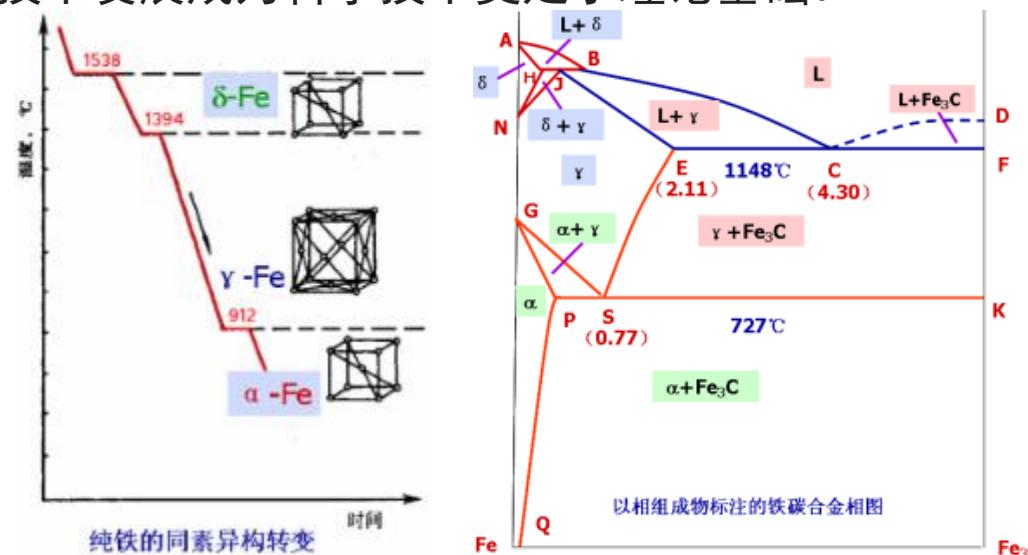
公元前六世纪，钢铁兵器逐渐被采用，为了提高钢的硬度，淬火工艺得到迅速发展，在生产实践中人们发现不同水质\油\尿等冷却介质对性能的影响，三国时蜀人蒲元曾在今陕西斜谷为诸葛亮打制3000把刀，相传是派人到成都取水淬火的。这说明中国在古代就已经注意到不同水质的冷却能力了。



前期热处理技术发展缓慢，主要是作为一种工匠技术进行保密。而到后期，在1863年，英国金相学家和地质学家展示了钢铁在显微镜下的六种不同的金相组织，证明了钢在加热和冷却时，内部会发生组织改变。

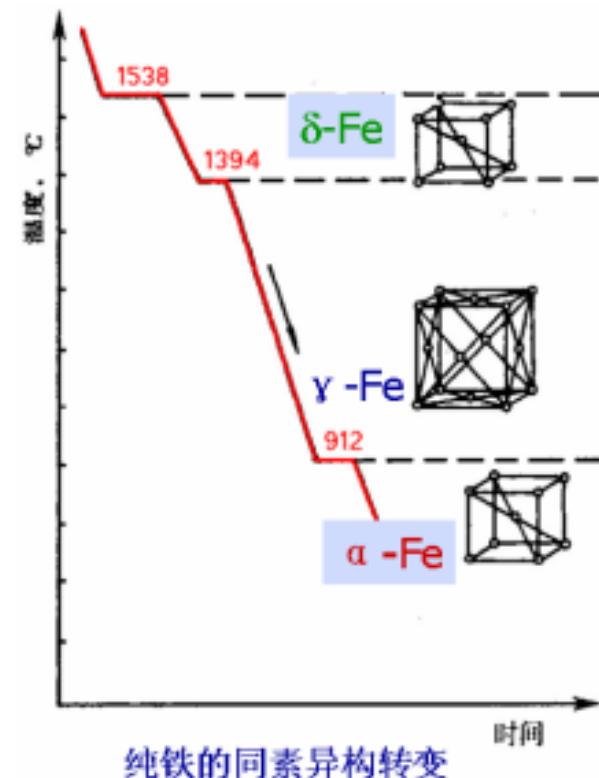


法国人奥斯蒙德确立的铁的同素异构理论，以及英国人奥斯汀最早制定的铁碳相图，为热处理从工匠技术发展成为科学技术奠定了理论基础。



4. 热处理工艺的特点及适用范围

- 1) 与其他热加工工艺如铸造、压力加工等改变材料宏观形态特征不同的是，**热处理**工艺只通过改变工件材料的**微观组织**来改变其性能，不改变其形状；而这种改变一般**肉眼观察不到**。
- 2) 热处理工艺只适用于固态下发生相变的材料，即**具有同素异构转变**的材料，如Fe、Co、Ti、Mn、Sn等。不是所有的金属都具有同素异构转变现象，如铝、铜、银等很多金属在固态下都只有一种晶体结构。而这些不发生固态相变的材料不能采用热处理工艺来进行强化处理。

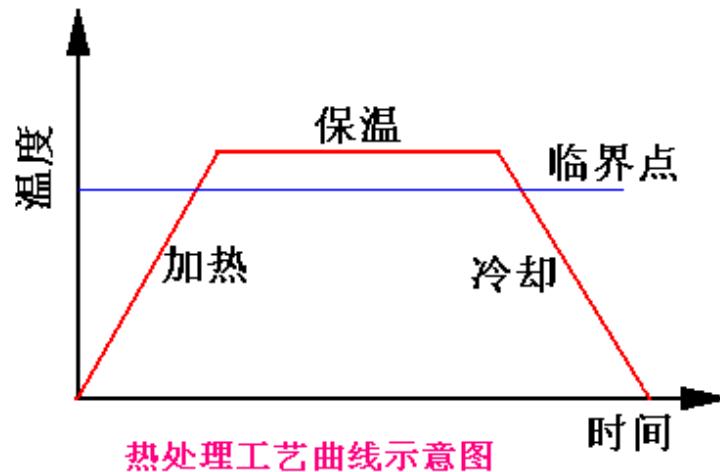


纯铁的同素异构转变

5. 热处理工艺过程

热处理工艺一般包括**加热、保温、冷却**等三个过程。这三个过程互相衔接，不可间断。在有些情况下有时也可能只有加热和冷却两个过程。

加热的目的是为了获得高温组织，而加热温度的高低随被处理的金属材料和热处理的目的不同而不同，但一般情况下都是加热到相变温度以上，以获得高温组织。



保温的目的是使工件内外温度一致，使显微组织转变完全，同时组织转变也需要一定的时间。

当采用高能密度加热和表面热处理时，加热速度极快，一般就没有保温时间，而化学热处理的保温时间往往较长。

冷却是热处理工艺过程中不可缺少的步骤。

通过改变冷却速度，控制组织中的成分和结构变化，获得相应组织和性能。

45钢加热到840℃，在不同冷却条件下冷却后的力学性能

冷却方法	σ_b /Mpa	σ_s /Mpa	$\delta/\%$	$\psi/\%$	HRC
随炉冷却	519	272	32.5	49	15~18
空气冷却	657~706	333	15~18	45~50	18~24
油中冷却	882	608	18~20	48	40~50

6. 热处理分类

(1) 根据加热和冷却及应用特点分类

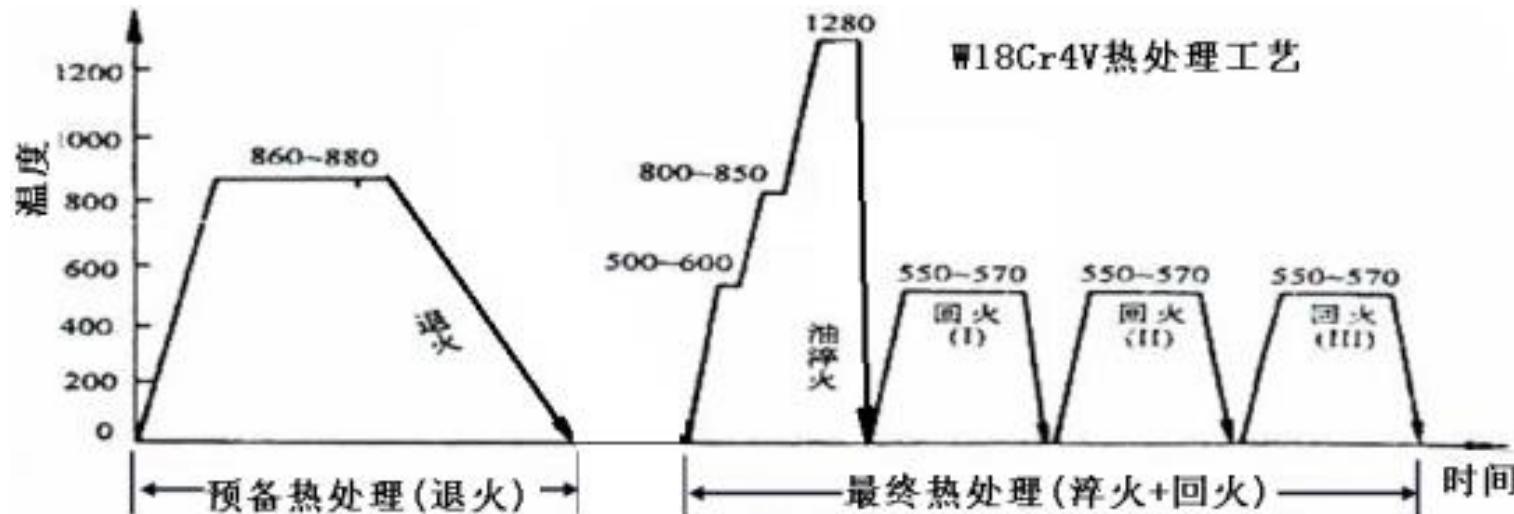
- 根据加热和冷却以及应用特点的不同，常用热处理的分类如下：
普通热处理或整体热处理、表面热处理和其他热处理。
- 其中普通热处理分为**退火、正火、淬火、回火**；又称为整体热处理中的“四把火”，随着加热温度和冷却方式的不同，“四把火”又演变出各种不同的热处理工艺；
- 表面热处理又分为**表面淬火**和**化学热处理**
表面淬火根据加热手段不同分为**感应**表面淬火、**火焰**表面淬火和**电接触**表面淬火；
化学热处理根据渗入的元素不同分为**渗碳**、**氮化**、**碳氮共渗**和**渗硼**等；
- 其他热处理工艺包含控制气氛热处理、真空热处理、形变热处理和激光热处理。
- 同一种金属采用不同的热处理工艺，可获得不同的组织，从而具有不同的性能。

(2) 根据热处理在零件加工过程中的位置和作用分类

预备热处理：清除前道工序的缺陷，改善工件的工艺性能，确保后续加工顺利进行，是零件制造过程的中间辅助工序，如**退火**或**正火**。

热
处
理

最终热处理：赋予工件所要求的使用性能的热处理或者是使零件达到规定的技术指标，如**淬火**、**回火**及相关化学热处理等。



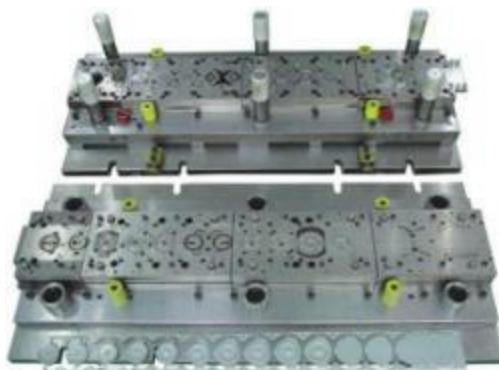


7. 热处理工艺在实际生产中的应用

热处理是一种重要的加工工艺，在制造业被广泛应用

- 汽车、拖拉机制造业中需热处理的零件达70-80%；
- 机床制造中约60-70%的零件需要经过热处理；
- 模具、滚动轴承则要100% 经过热处理；

总之，重要的零件都要经过适当的热处理才能使用。

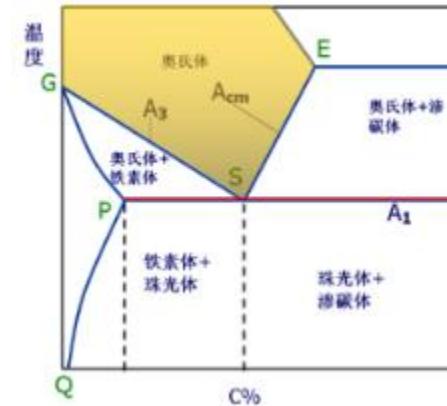


»»» 5.1 钢在加热和冷却时的组织转变

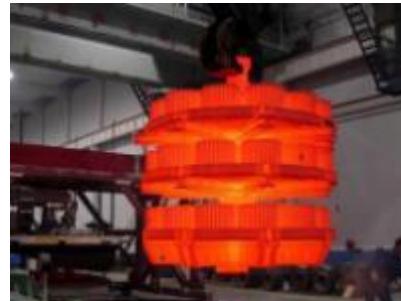


加热是热处理的第一道工序，也是重要工序之一。

加热的目的：获得均匀的奥氏体组织，即奥氏体化过程，因此一般都需加热到临界点A₁以上。



加热的手段：金属热处理加热方法很多，最早采用木炭和煤作为热源，近代应用液体和气体燃料。电的应用使加热易于控制，且无环境污染。利用这些热源可以直接对工件直接进行加热，也可以通过熔融的盐或金属，以及浮动粒子对工件进行间接加热。



金属加热时，工件暴露在空气中，常常发生氧化、脱碳（即钢铁零件表面碳含量降低），这对于热处理后零件的表面性能有很不利的影响。因而金属通常应在可控气氛或保护气氛中、熔融盐中和真空中加热，也可用涂料或包装方法进行保护加热。

加热温度

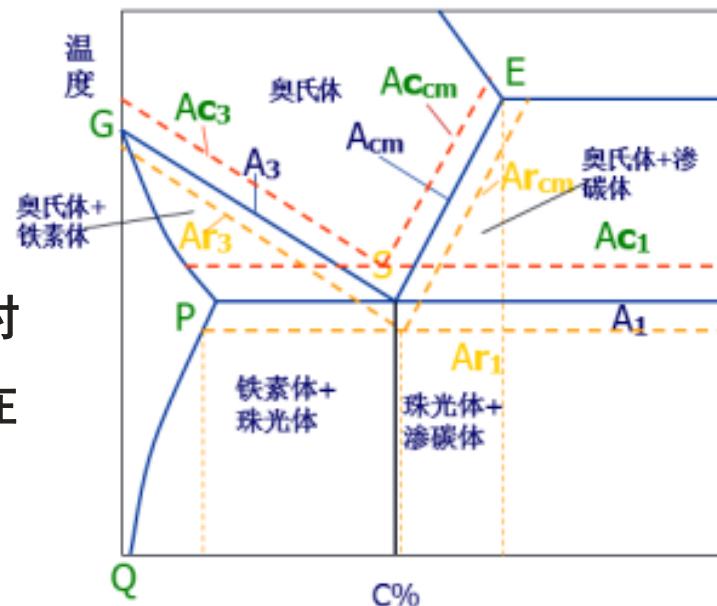
加热温度是热处理工艺的重要工艺参数之一，选择和控制加热温度，是保证热处理质量的主要问题。加热温度随被处理的金属材料和热处理的目的不同而异，但一般都是加热到相变温度以上，以获得高温组织。

»»» §5.1.1 奥氏体形成的温度范围

过热和过冷现象

在Fe-Fe₃C合金相图中，A₁线（PSK线）、A₃线（GS线）和A_{cm}线（ES线）分别代表了钢的**平衡相变温度**，即在极其缓慢的加热或冷却条件下产生相变的温度。而在实际生产中，无论是加热还是冷却都不可能达到极其缓慢的加热或冷却条件即平衡状态，因而实际相变温度和平衡相变温度有一定的差异，即加热时的过热和冷却时的过冷现象，加热时实际相变温度偏高，有一定的**过热度**，而冷却时实际相变温度偏低，有一定的**过冷度**。

为了与平衡相变温度相区别，通常将钢在加热时的实际转变温度用A_{c1}、A_{c3}、A_{ccm}表示，而钢在冷却时的实际转变温度用A_{r1}、A_{r3}、A_{rcm}表示



»»» §5.1.2 钢在加热时的组织转变

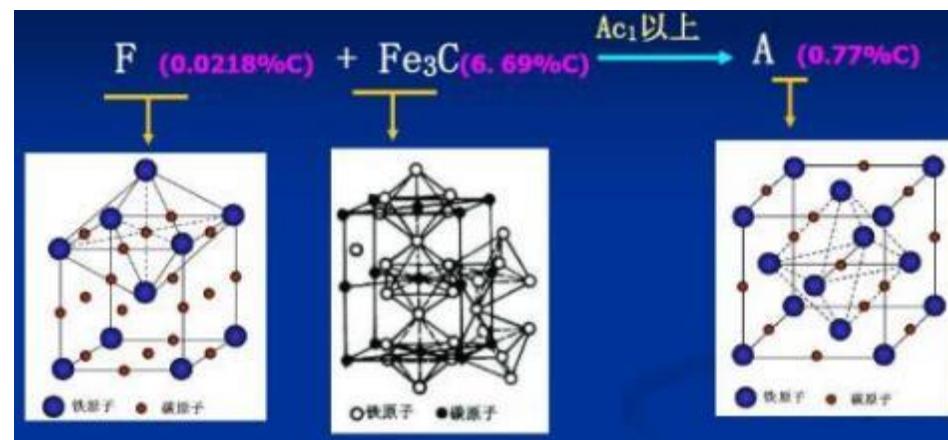
1. 奥氏体的形成过程

加热的目的是实现奥氏体化，以共析钢为例，来分析加热过程中奥氏体的形成过程。和所有相变一样，奥氏体的形成过程也符合相变的普遍规律，即奥氏体的形成是一个晶核的形成和晶核长大的过程，可以简单地用以下4个步骤来描述奥氏体化过程

(1) 奥氏体晶核的形成

由铁碳合金相图可知，共析钢的室温组织为珠光体，即铁素体和渗碳体的两相机械混合物，当加热到 Ac_1 以上时，珠光体转变为单相奥氏体。

在转变过程中，奥氏体晶核首先在铁素体和渗碳体的相界面处形成，这是因为相界上的原子排列不规则，位错及空位密度较大，容易发生晶格重组及碳原子的扩散。



(2) 奥氏体晶核的长大

奥氏体晶核形成后即开始长大，奥氏体晶核的长大是通过铁素体向奥氏体的晶格转变和渗碳体的溶解实现的。

(3) 残余渗碳体溶解

由于铁素体在化学成分和晶体结构上比渗碳体更接近奥氏体，渗碳体含碳量为6.69%，因此在转变过程中，铁素体比渗碳体先消失。

奥氏体晶核形成后即开始长大，奥氏体晶核的长大是通过铁素体向奥氏体的晶格转变和渗碳体的溶解实现的。

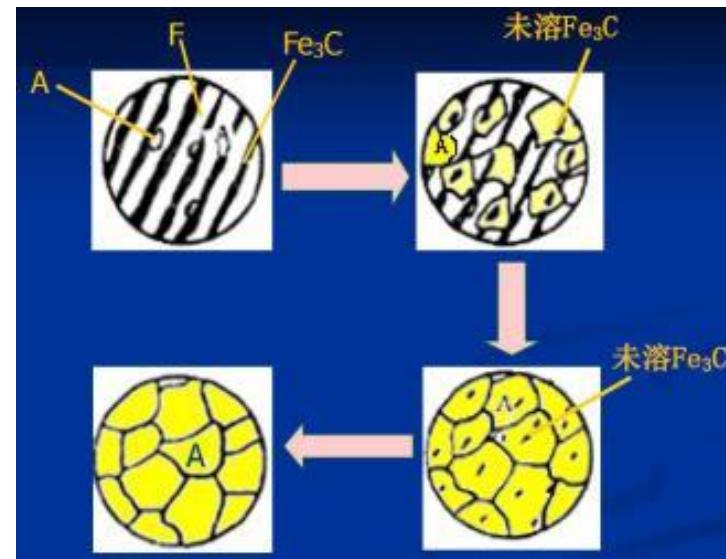
由于含碳量为6.69%的渗碳体在溶解过程中所提供的碳原子远远多于相同体积铁素体（含碳量0.0218%）转变为奥氏体（含碳量0.77%）所需要的碳量，因此在奥氏体全部形成后还会残留一定量的渗碳体，随着保温时间的延长或温度的升高，这部分残余的渗碳体通过碳原子的扩散逐渐溶入到奥氏体中。

»»» §5.1.2 钢在加热时的组织转变

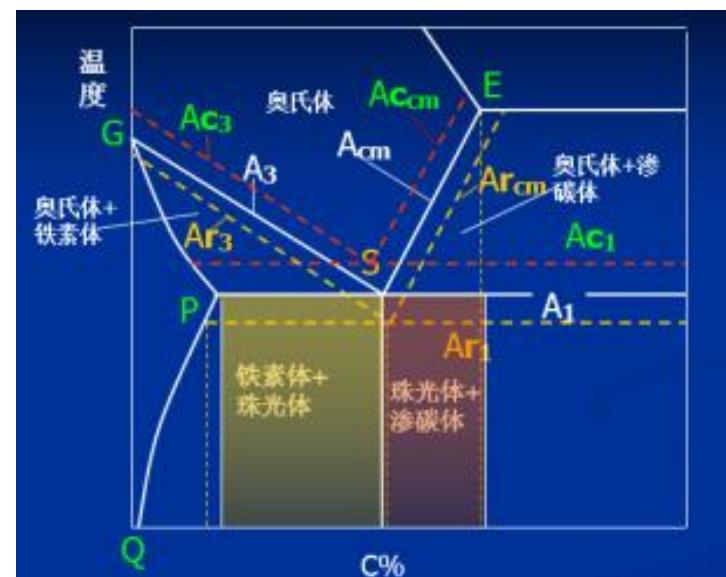
(4) 奥氏体均匀化

当渗碳体完全溶解后，则会出现原来为渗碳体的区域含碳量较高，而原来为铁素体的区域含碳量较低，而使得碳在奥氏体中的分布不均匀，需要较长时间的保温使碳原子充分扩散，从而得到成分均匀的奥氏体。

经过以上四个步骤，共析钢的奥氏体化过程完成。



以上分析的是共析钢的奥氏体化过程，亚共析钢和过共析钢的奥氏体化过程与共析钢基本相同，只是由于先共析铁素体或二次渗碳体的存在，必须相应的加热到 Ac_3 或 Ac_{cm} 以上，才能获得单一均匀的奥氏体。

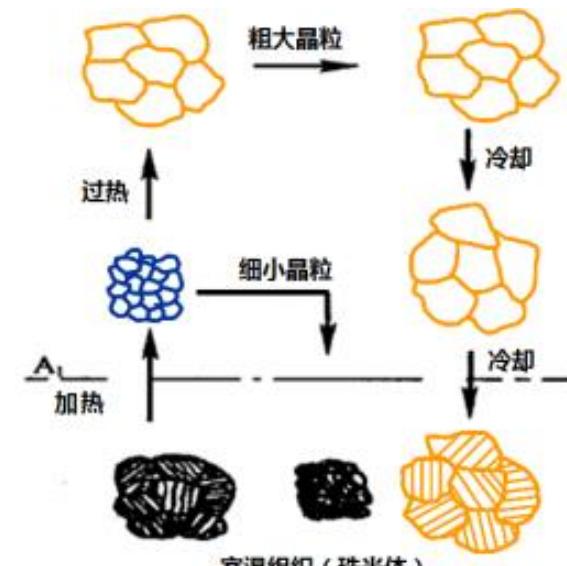


2. 奥氏体晶粒的大小及影响因素

奥氏体刚刚形成时，其晶粒一般都比较细小，若继续加热或长时间保温，则奥氏体晶粒将长大。

奥氏体晶粒的大小直接影响冷却后钢的组织和性能，加热时奥氏体晶粒越细小，则冷却后的组织也越小，其性能也越高。反之，奥氏体晶粒粗大，则冷却后的组织也粗大，性能下降。

控制晶粒大小是热处理过程中要注意的问题之一。



»»» §5.1.1 钢在加热时的组织转变

奥氏体晶粒的大小用晶粒度来衡量，由于加热时奥氏体晶粒不断长大，涉及到几个奥氏体晶粒大小的概念。

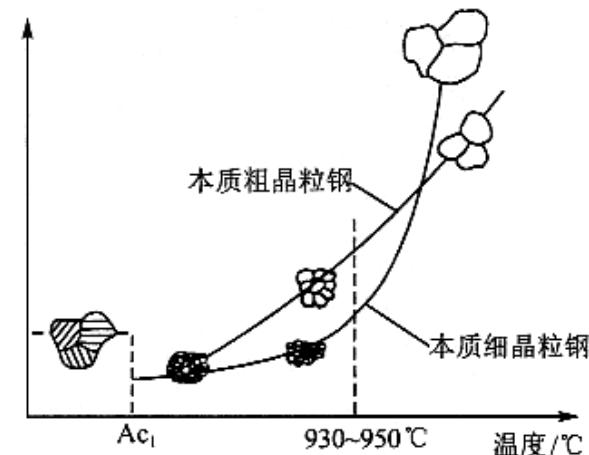
(1) 奥氏体晶粒度

起始晶粒度：奥氏体化刚刚结束时的晶粒大小，但难以测定，没有实际意义。

实际晶粒度：在某一具体加热温度下奥氏体的晶粒度，直接决定钢冷却后的组织和性能。

本质晶粒度：钢在加热时奥氏体晶粒长大的倾向。值得说明的是，**本质晶粒度**和前面的两个晶粒度概念不同，**本质晶粒度并不代表实际晶粒的大小，只描述晶粒长大的趋势。**

如图所示为加热温度对奥氏体晶粒大小影响的关系曲线，不同成分的钢在某一温度范围内加热，有些钢的晶粒随温度迅速长大，而有的不易长大。



$$n = K \left(\frac{I}{G} \right)^{1/2}$$

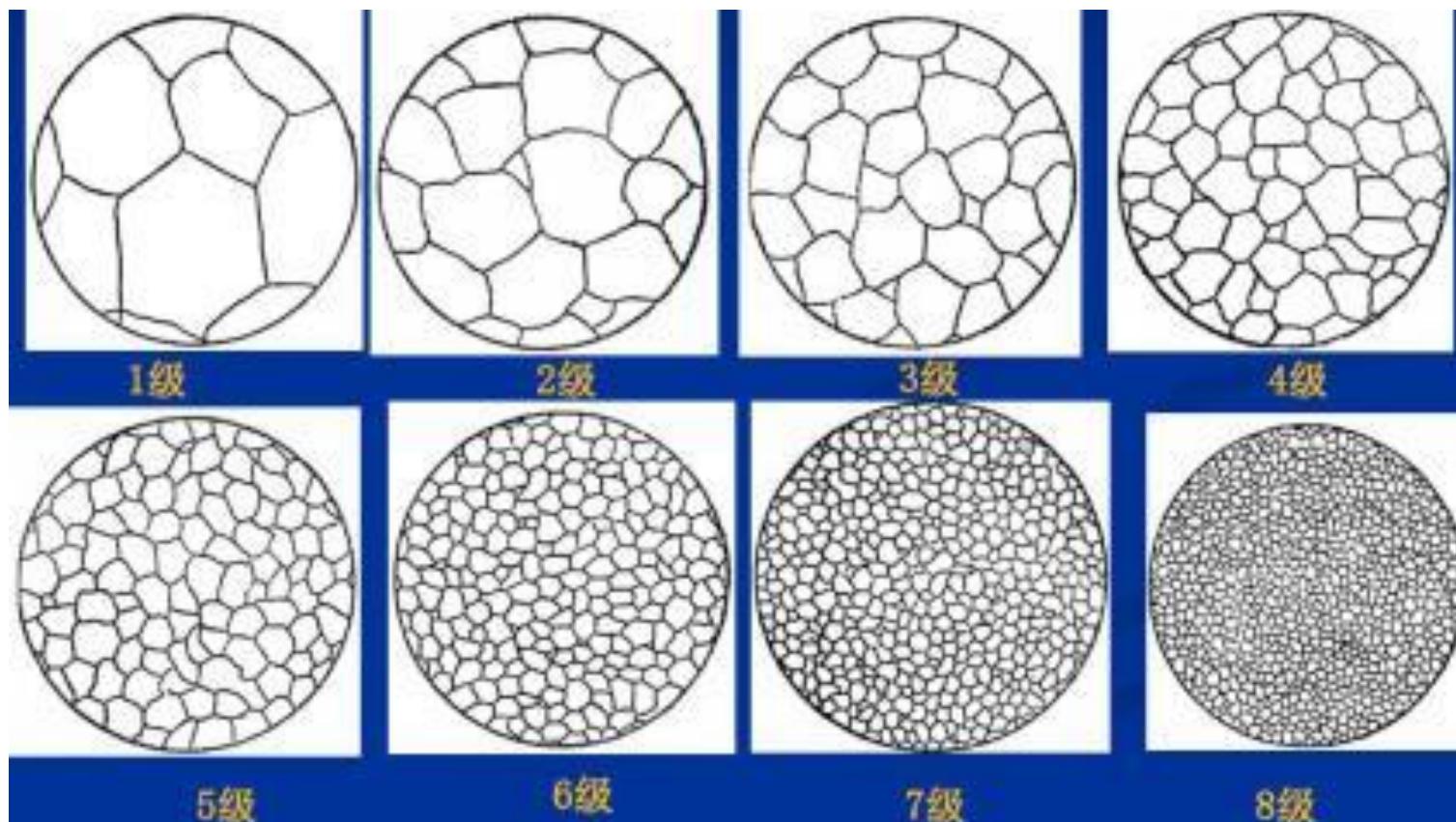
n：晶粒数目；K：系数
I：形核率；G：长大速度



»»» §5.1.1 钢在加热时的组织转变

通常将钢在规定的加热条件下加热到 $930 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ，保温3h或8h后缓冷测定的钢中奥氏体晶粒的大小作为衡量本质晶粒度的标准。

按照该方法测定，晶粒度在1-4级为本质粗晶粒钢，在5-8级为本质细晶粒钢
凡需热处理的工件，一般应采用本质细晶粒钢



(2) 影响奥氏体晶粒大小的因素

① 加热温度和保温时间

加热温度越高或保温时间越长，奥氏体晶粒长大的越快，这是由于晶粒长大与原子的扩散速度密切相关，温度越高，原子的扩散能力越强。奥氏体晶粒越粗大。而加热温度和保温时间中，加热温度对奥氏体晶粒大小的影响更明显。

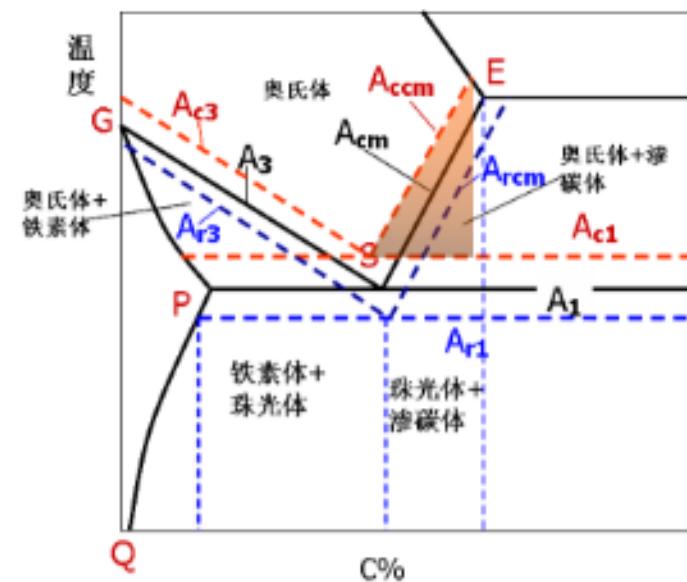
② 加热速度

加热速度越快，过热度越大，形核率越高，奥氏体起始晶粒越小，因此高温、快速、短时的加热方法可以达到细化奥氏体晶粒的目的。

»»» 5.1.1 钢在加热时的组织转变

③ 碳与合金元素

- 当含碳量在一定范围内，随含碳量增加，晶粒长大的倾向变大。但当碳以未溶渗碳体的形式存在时，将阻碍奥氏体晶界的移动，而使得晶粒的长大倾向减少；因此过共析钢在 $A_{c1} \sim A_{cmm}$ 之间加热，即不完全奥氏体化，可获得较为细小的奥氏体晶粒。
- 合金元素：除锰、硼等外，大多数合金元素都可不同程度地阻止奥氏体晶粒长大，Ti、V、Nb、W、Mo等，由于合金元素的扩散速度比碳慢的多，所以合金钢的热处理加热温度一般较高，保温时间更长，有利于合金元素的均匀化



④ 原始组织

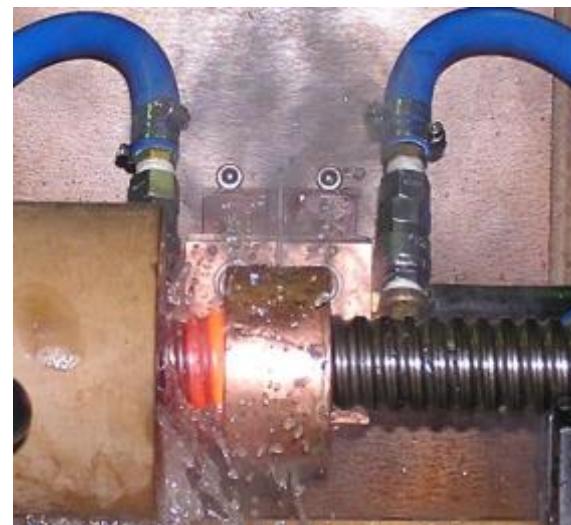
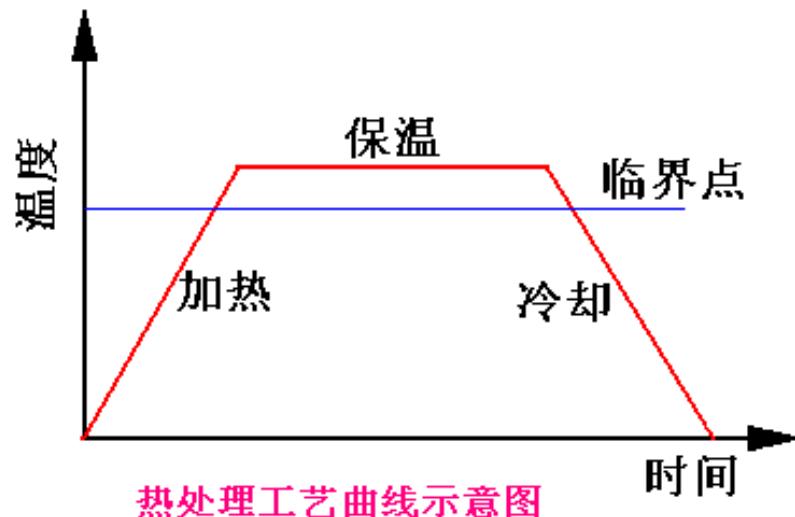
原始组织越细，相界面越多，奥氏体的形成速度越高；如：细片状P比粗片状P更容易奥氏体化。

冷却是热处理工艺过程中不可缺少的步骤

钢件经加热、保温获得晶粒细小、成分均匀的奥氏体后，随之就要进行冷却。

冷却是热处理工艺过程中不可缺少的步骤。

目的：探讨钢在冷却过程中不同过冷度下的组织转变及转变后组织的性能特点。

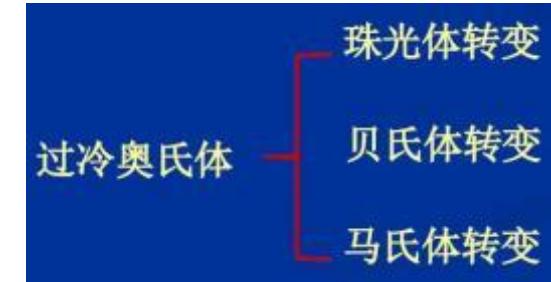


1. 过冷奥氏体的等温转变

过冷奥氏体：处于临界点A₁以下尚未发生组织转变的奥氏体

此时的过冷奥氏体并不会马上发生转变，但处于热力学不稳定状态，是一个不稳定组织，迟早会发生转变。

随过冷度不同，即转变温度不同，过冷奥氏体将发生三种类型转变。



(1) 珠光体转变 (Pearlite)

转变条件：过冷奥氏体在A₁→550°C温度范围内转变为珠光体类型的组织；

转变产物：铁素体与渗碳体片层相间的机械混合组织

珠光体是铁碳合金中最基本的五种组织之一。用字母P表示，Pearlite。因其具有珍珠般（pearl-like）的光泽得名。



分类：根据片层的厚薄不同

➤ 珠光体(P)

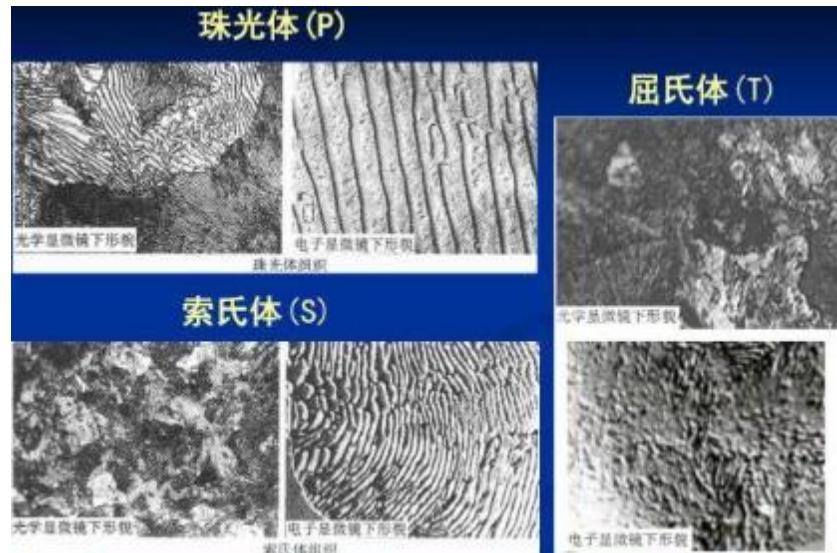
形成温度**A₁~650°C**；片层较厚，在光学显微镜下能明显分辨出铁素体和渗碳体层片状组织形态的珠光体，其片间距约为150~450nm

➤ 索氏体(S)

形成温度为**650~600°C**；片层较薄，约为80~150nm，其片层在光学显微镜下难以分辨，只有在高倍的光学显微镜下(放大800~1500倍时)才能分辨出铁素体和渗碳体的片层形态。

➤ 托(屈)氏体(T)

形成温度为**600~550°C**；片层极薄，约为30~80nm，在光学显微镜下根本无法分辨其层片状特征，只有在电子显微镜下才能区分。



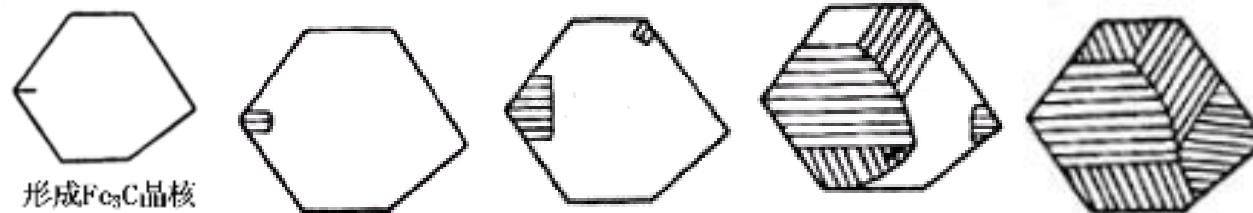
组织名称	表示符号	形成温度 /°C	硬度 (HRC)	能分辨其层片的放大倍数
珠光体	P	A ₁ ~650	5~25	< 500 ×
索氏体	S	650~600	25~35	> 1000 ×
屈氏体	T	600~550	35~40	> 2000 ×

奥氏体化温度、转变前奥氏体晶粒大小，只影响珠光体团的大小，对片层间距无影响。

»»» §5.1.3 钢在冷却时的组织转变

从珠光体(P)、索氏体(S)到屈氏体(T)，**温度越低，层片间距越小，强度、硬度越高**，它们只是层片粗细和性能差异，并无本质区别。

和加热时奥氏体化过程一样，冷却时珠光体的转变过程也是一个固态下形核和长大的过程。



- ① 由于晶界处原子排列不规则，空位、位错等缺陷较多，原子排列容易发生重组，**渗碳体首先在奥氏体晶界上形核**
- ② 渗碳体形核后即开始长大，在长大过程中，使得其两侧的奥氏体的含碳量下降，促进了铁素体的形核，两者相间形核并长大，形成多个铁素体与 Fe_3C 的层片状组织
- ③ 与此同时，在晶界的其他部分也同时开始形核和长大，形成多个不同位相的珠光体
- ④ 这些珠光体晶粒长大并连成一片
- ⑤ 最后全部形成珠光体，过冷奥氏体完成向珠光体的转变过程

由于在奥氏体转变为珠光体的过程中，**温度高，铁、碳原子得到充分扩散**，因此称为**扩散型转变**。

(2) 贝氏体 (B) 转变

转变条件：过冷奥氏体在 $550^{\circ}\text{C} \sim \text{Ms}$ 温度范围内，对共析钢而言，Ms温度为 230°C

转变产物： Fe_3C 与含碳过饱和铁素体的两相机械混合物，用字母B来表示。1930年达文波特 (E.S.Davenport) 和贝茵 (E.C.Bain) 首次观察到钢经中温等温转变后相变产物的金相组织形态，后人为了纪念贝茵的功绩，将这种组织定名为“贝氏体” (Bainite)。



➤ 上贝氏体 ($B_{\text{上}}$)

形态：呈羽毛状

不连续棒状的渗碳体分布于奥氏体晶界向晶内生长的平行的铁素体条之间。

上贝氏体中铁素体片较宽，碳化物较粗，且分布不均匀，它的脆性较大，强度较低，基本上无实用价值。



➤ 下贝氏体 (B_下)

形态：呈竹叶状

细片状碳化物分布于铁素体针上

下贝氏体性能特点

- 下贝氏体中碳化物细小，分布均匀
- 除有较高的强度和硬度外，还有良好的塑性和韧性，是生产上常用组织
- 获得下贝氏体组织是强化钢材的途径之一。



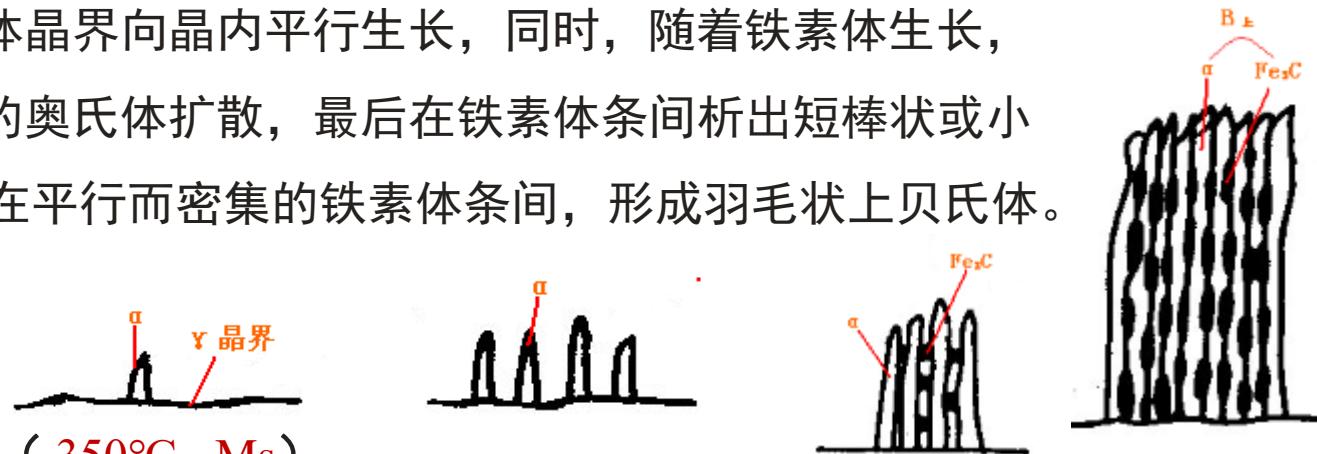
在硬度相同的情况下：**下贝氏体组织的耐磨性明显优于马氏体**，可以达到马氏体的1~3倍，因此在钢铁材料中基体组织获得下贝氏体是人们追求的目标。

»»» §5.1.3 钢在冷却时的组织转变



1) 上贝氏体形成过程

当转变温度较高时（ $550\sim350^{\circ}\text{C}$ ）时，在奥氏体的低碳区优先形成铁素体晶核，然后从奥氏体晶界向晶内平行生长，同时，随着铁素体生长，多余的碳原子向周围的奥氏体扩散，最后在铁素体条间析出短棒状或小片状 Fe_3C ，断续分布在平行而密集的铁素体条间，形成羽毛状上贝氏体。



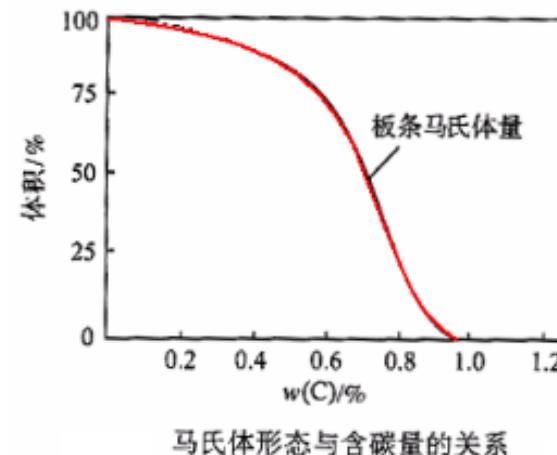
2) 下贝氏体形成过程 ($350^{\circ}\text{C} \sim \text{Ms}$)

铁素体晶核首先在奥氏体晶界处生成，然后沿一定晶面呈针叶状生长，由于下贝氏体的转变温度较低，多余的碳原子不能长距离扩散，而只能在铁素体内沿一定晶面以极细小的碳化物沉淀析出，形成竹叶状的下贝氏体。由于在奥氏体转变为贝氏体的过程中，只有碳原子扩散，铁原子不扩散，因此称为半扩散型转变。



(3) 马氏体 (M) 转变

- **转变条件：**温度区间低于Ms点
- 过冷奥氏体在该温度下不能在恒温下转变，而是以极大的过冷度连续冷却；
- **转变产物：**碳在 α -Fe 中的过饱和间隙固溶体，用符号M表示；
- 马氏体 (Martensite) 19世纪90年代最先由德国冶金学家阿道夫·马滕斯 (Adolf Martens, 1850-1914) 于一种硬矿物中发现。1895年法国人奥斯蒙 (F.Osmond) 为纪念德国冶金学家马滕斯 (A.Martens)，把这种组织命名为马氏体 (Martensite)
- **分类：**常见的马氏体有两种类型，取决于奥氏体中的含碳量，当含碳量**大于1.0%**时得到**针状马氏体**；当含碳量**小于0.2%**时得到**板条马氏体量**； **$0.2\% < C\% < 1.0\%$** 时，得到两种的**混合组织**。



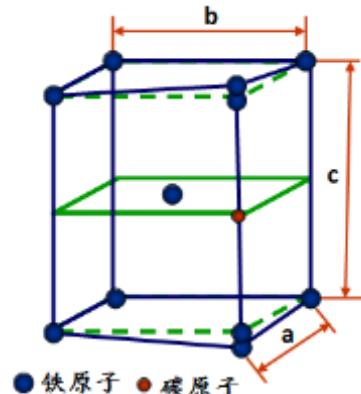


»»» §5.1.3 钢在冷却时的组织转变

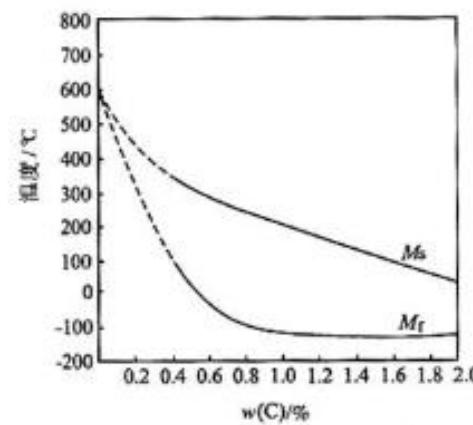
马氏体转变的特点

- 1) 马氏体的晶体结构：马氏体是一种**碳在 α 铁中的过饱和间隙固溶体**，其晶体结构为体心正方，晶格常数 $c/a > 1$ 称为马氏体的正方度，含碳量越高，正方度越大。
- 2) 无扩散性：由于转变温度低，铁、碳原子都不发生扩散，因而马氏体中的含碳量与奥氏体的含碳量相同；
- 3) 降温形成：只要温度达到 M_s 以下即发生马氏体转变。温度下降，转变量增加，冷却中断，转变即停止，到 M_f 温度转变结束。

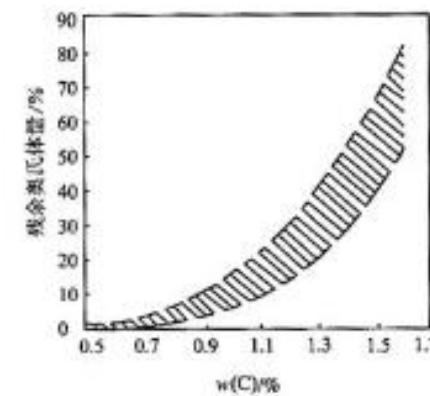
- M_s 为马氏体转变**开始的温度**、 M_f 为马氏体转变**终了温度**
- M_s 、 M_f 的高低取决于奥氏体中的含碳量，**含碳量越高，转变温度越低，与冷却速度无关。**



马氏体体心正方晶格示意图



含碳量对马氏体转变温度的影响



含碳量对残余奥氏体的影响

»»» §5.1.3 钢在冷却时的组织转变

- 4) 高速长大：马氏体形成速度极快，瞬间形核，瞬间长大。转变时体积产生膨胀，在钢的内部形成很大的内应力，所以淬火后的钢需要及时回火，防止应力开裂。
- 5) 转变速度快：马氏体形成速度极快，瞬间形核，瞬间长大，一般不需要孕育期
- 6) 转变不完全：即使冷却到 M_f 点温度，也不可能获得100%的马氏体，这些未发生转变而残留下来的奥氏体，称为残余奥氏体（ A' ），马氏体转变后的残余奥氏体量随含碳量的增加而增加；
- 7) 体积膨胀：马氏体是体心正方结构，奥氏体是面心立方结构。马氏体的密度低于奥氏体，所以转变后体积会膨胀。在钢的内部形成很大的内应力，所以淬火后的钢需要及时回火，防止应力开裂。

»»» §5.1.3 钢在冷却时的组织转变

马氏体形态及性能

(1) 板条马氏体（位错马氏体）

在透射电镜下观察，板条内的亚结构主要是**高密度的位错**，因此又称为位错马氏体。

板条马氏体主要出现在淬火后的**低碳钢或低合金钢**，故也称为**低碳马氏体**；

特点：含碳量低，有大量位错；

形态：细长板条状组织，片与片之间互相平行，

这些平行的束条在形成过程中不易相互撞击而产生显微裂纹；

性能：板条马氏体具有良好的塑性和韧性，较高的强度，力学性能良好；

(2) 针状马氏体（孪晶马氏体）

主要出现于淬火后的**高碳钢和低合金钢**中，也称为**高碳马氏体**。

形态：竹叶或针片状组织，针片大小不一，针叶或片与片之间互成 60° 或 120° 交角。

因此在形成过程中，片与片之间容易相互碰撞而产生大量显微裂纹，产生内应力，使得针状马氏体相比板条马氏体而言，具有较大的脆性；

特点：含碳量高，有严重的晶格畸变； **性能：**硬度、强度高，但塑性和韧性差；

»»» §5.1.3 钢在冷却时的组织转变

总之：两种马氏体都是热处理强化所需求的最重要组织；

总的来说马氏体的性能：**高硬度**

如图所示为含碳量与马氏体性能之间的关系曲线，从中可以看出，含碳量越高，硬度越高，当含碳质量分数达到0.6%时，淬火钢硬度接近最大值，含碳质量分数进一步增加，虽然马氏体的硬度会有所提高，但由于残余奥氏体数量增加，反而使钢的硬度有所下降。

合金元素对钢的硬度关系不大，但可以提高其强度。

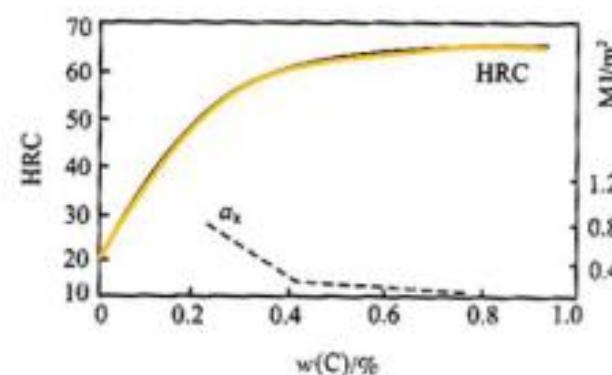
由此可以看出，在马氏体形成过程中，含碳量对Ms和Mf温度、残余奥氏体量、马氏体的形态、马氏体的性能（硬度）都有决定性的影响作用。



板条马氏体(400×)



针状马氏体(400×)



马氏体的硬度、韧性与含碳量的关系

»»» §5.1.3 钢在冷却时的组织转变

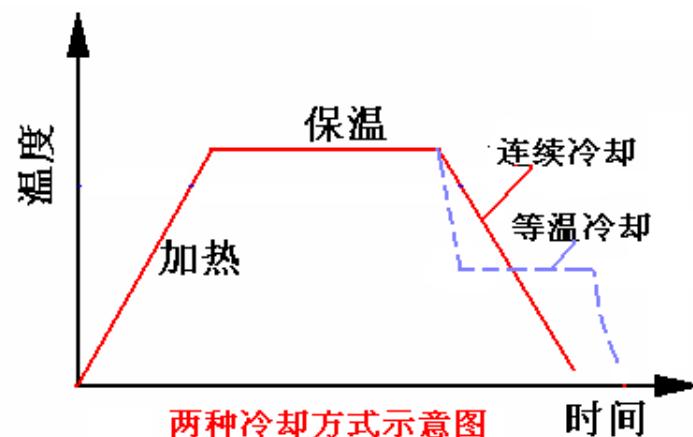
钢的等温冷却曲线

冷却过程是热处理的关键工序，同一种钢加热到奥氏体状态后，采取的冷却速度或冷却方式不同，所得到的组织和性能也是不一样的。

在热处理中通常有两种冷却方式：**等温冷却和连续冷却**

等温冷却：将钢迅速冷却至临界点以下的某一温度，使奥氏体在该温度下转变

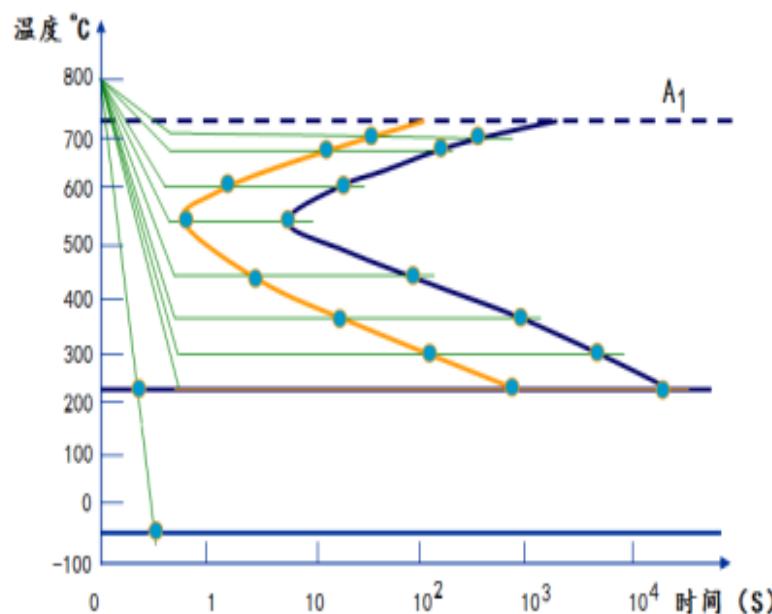
连续冷却：将钢以某种速度不停顿地冷却，使奥氏体在连续降温过程中转变



»»» §5.1.3 钢在冷却时的组织转变

过冷奥氏体转变图：描述在这两种冷却方式下过冷奥氏体的转变量与转变时间之间的关系曲线图，反映了过冷奥氏体的冷却状态与组织结构之间的关系，是研究钢在冷却时组织转变的理论基础，也是选择热处理冷却工艺的重要依据。

过冷奥氏体的等温转变曲线：指表示奥氏体急速冷却到临界点A₁以下，在各种不同温度下的保温过程中转变量与转变时间之间关系的曲线。



过冷奥氏体等温转变曲线的建立是由于过冷奥氏体在转变过程中不仅有组织转变和性能变化，而且有体积膨胀和磁性转变，因此可以采用热分析法、热膨胀法、磁性法、金相硬度法等来测定过冷奥氏体等温转变曲线。也就是C曲线可以说是实验测得的结果。



»»» 5.1.3 钢在冷却时的组织转变

在图中C曲线上半部所占温度范围内的转变为珠光体转变，C曲线下半部所占温度范围内的转变为贝氏体转变，横线下温度的转变则为马氏体转变。

以共析钢为例，对C曲线进行分析：

➤ 图中的线：共有5条线

最上面一条水平虚线表示**钢的临界点A1线 (727°C)**，即奥氏体与珠光体的平衡温度。下方的一条水平线**Ms (230°C)** 为马氏转变开始温度，Ms以下还有一条**水平线Mf (-50°C)** 为马氏体转变终了温度。A1与Ms线之间有两条C形曲线，左侧一条为**过冷奥氏体转变开始线**，右侧一条为**过冷奥氏体转变终了线**。

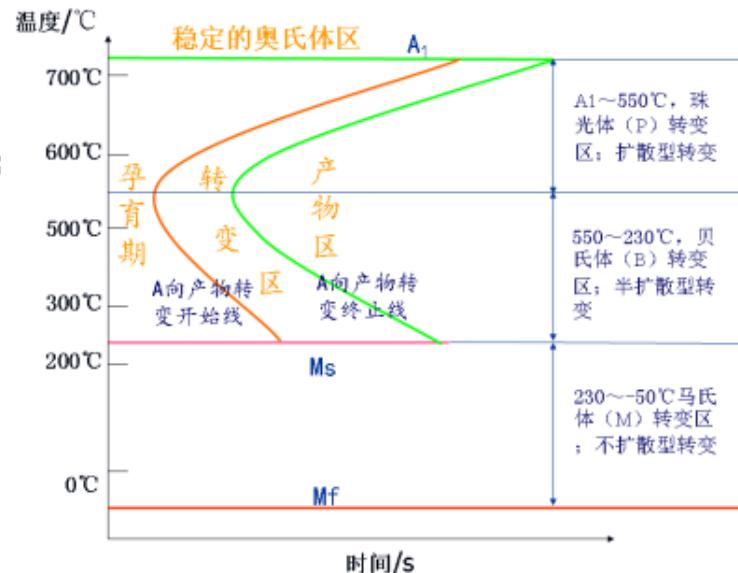
➤ 图中的区

奥氏体稳定区：A1线以上，奥氏体稳定，不会发生转变；

过冷奥氏体不稳定区：A1线以下、Ms线以上、转变开始线以左和纵坐标之间所包围的区域；

转变过渡区：转变开始线和转变终了线及Ms和Mf之间；该区为过冷奥氏体与部分转变产物的混合组织所构成。

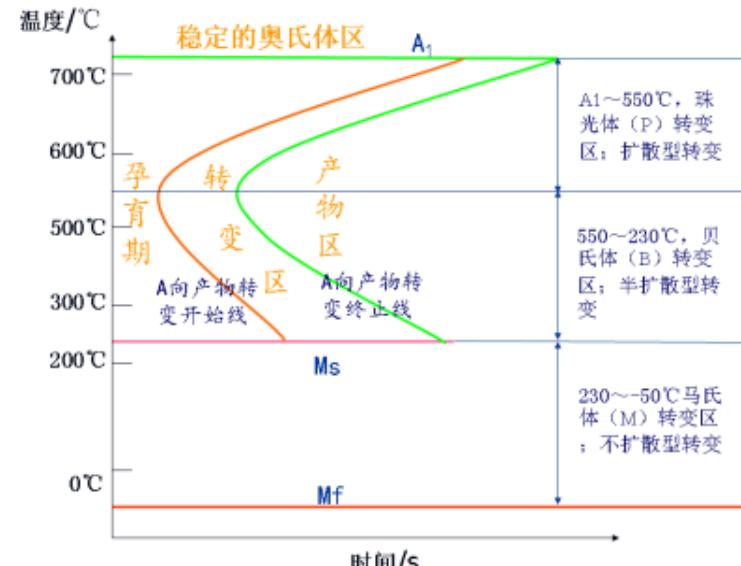
过冷奥氏体转变产物区：转变终了线以右或M_f线以下；



»»» §5.1.3 钢在冷却时的组织转变

孕育期

- 转变开始线与纵坐标之间的水平距离称为在该温度下的**孕育期**，也就是过冷奥氏体发生转变前所经历的等待时间，通常把**孕育期最短处**称为C曲线的**鼻尖**。
- 转变开始线与纵坐标之间的**水平距离越小**则意味着**孕育期越短**，孕育期的长短表示过冷奥氏体稳定性的高低，孕育期越短说明过冷奥氏体稳定性越小。
- C曲线鼻尖处**孕育期最短，转变速度最快**。对共析钢而言，鼻尖处的温度约为550°C，温度在高于该温度或低于该温度时孕育期都变长。这是由于过冷奥氏体转变速度同时受原子扩散速度和转变自由能差两个因素所制约，其中原子扩散速度与温度成正比，而转变自由能差与过冷度成正比，孕育期是这两个因素的综合作用结果。**在鼻尖以上，过冷度越小，转变自由能差小；在鼻尖以下，温度越低，原子扩散困难，两者都使奥氏体稳定性增加，孕育期增长。**
- 值得注意的是：**一旦过冷奥氏体全部转变为C曲线图中相应温度区域的组织，则该组织将稳定地保持至室温而不再发生改变。**
- 影响C曲线在等温冷却转变图中左右位置的因素有很多，奥氏体稳定性越大，则孕育期越长，意味着C曲线在图中的位置越靠右，因此凡是影响奥氏体稳定性的因素都将对C曲线的位置产生影响。



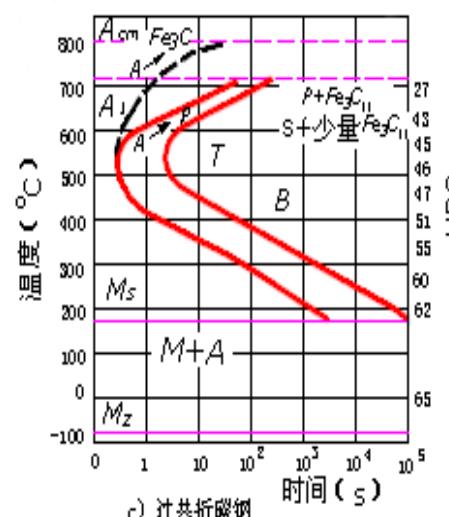
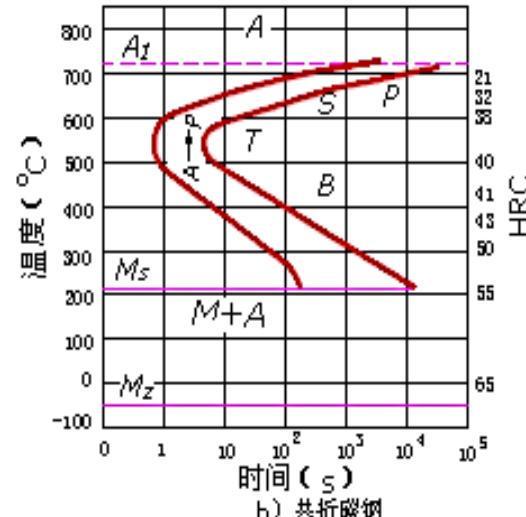
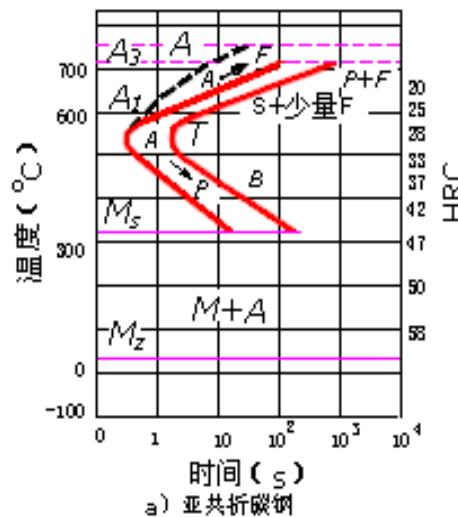
影响C曲线的因素

(1) 含碳量的影响:

亚共析钢C曲线右移: 随碳的质量分数增加, **亚共析钢的C曲线右移**;

过共析钢C曲线左移: 随碳质量分数增加, **过共析钢, 加热到Ac₁以上使C曲线左移**;

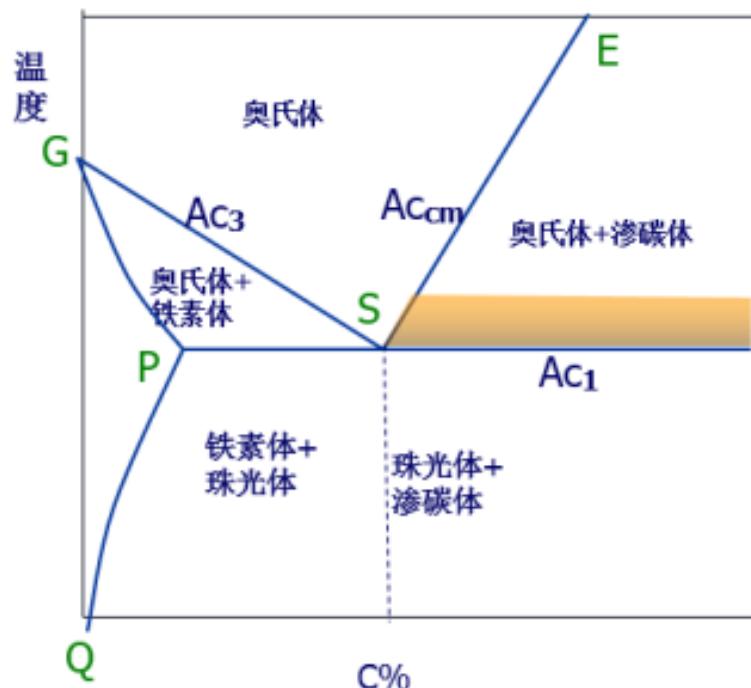
加热到Ac_{cm}以上, 使C曲线右移。



(2) 合金元素的影响:

除Co以外, 凡溶入奥氏体的合金元素都使奥氏体稳定性增加, **C曲线右移**;

除Co和Al以外, 所有合金元素都使Ms与Mf点下降。



(3) 加热温度和保温时间

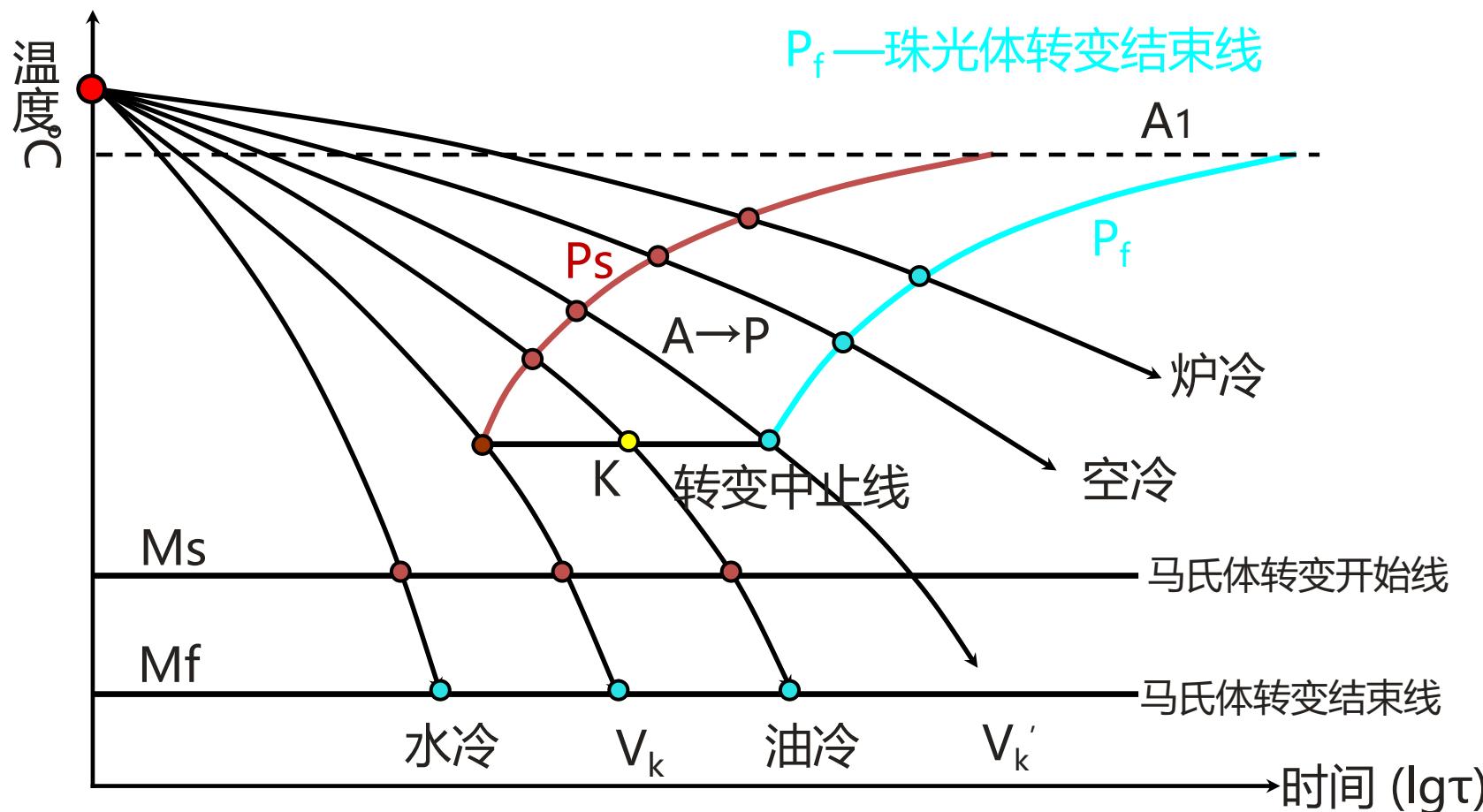
提高奥氏体化温度和延长保温时间使奥氏体成分均匀、晶粒粗大、未溶碳化物减少，所有这些都使得过冷奥氏体稳定性增加从而使得C曲线右移。

»»» §5.1.3 钢在冷却时的组织转变

过冷奥氏体连续冷却转变图

Ps — 珠光体转变开始线

P_f — 珠光体转变结束线



(1) $V < V_k'$, A → P全部

(2) $V_k' < V < V_k$, A → P部分, 剩余A → M

(3) $V > V_k$, A → M全部

V_k' — 不发生 M 转变的最大冷速

V_k — 全部转变成 M 的最小冷速



§5.2 钢的退火与正火

一般机械零件的加工工艺路线

铸、锻的毛坯经过预备热处理，然后进行车削、铣削等机械加工，最后进行最终热处理，完成机械零件的加工。

本节中退火和正火主要用做钢的预备热处理，消除和改善前一道工序所造成的某些组织缺陷及内应力，为随后的切削加工及热处理做好组织和性能上的准备，只有当工件性能如强度、硬度要求不高时才作为最终热处理。

»»» §5.2.1 钢的退火

退火：将钢加热至适当温度、保温，然后缓慢冷却（通常为随炉冷却），从而获得接近平衡状态组织的热处理工艺。

1. 退火的目的

- ①**调整硬度**以便进行切削加工，工件太硬切不动，太软则切削过程中不易断屑，通常情况下适合于一般切削加工的硬度通常为 $170\sim250HB$
- ②**消除残余内应力**，以防止钢件在后续加工或热处理中产生变形或开裂。工件在铸造、锻造、焊接等毛坯成形工艺或切削加工中都会在工件表面和内部产生残余内应力，这些残余内应力会在工件的后续加工中重新分布而使得工件产生变形或开裂
- ③**细化晶粒**，改善组织，提高力学性能，为最终热处理作组织准备





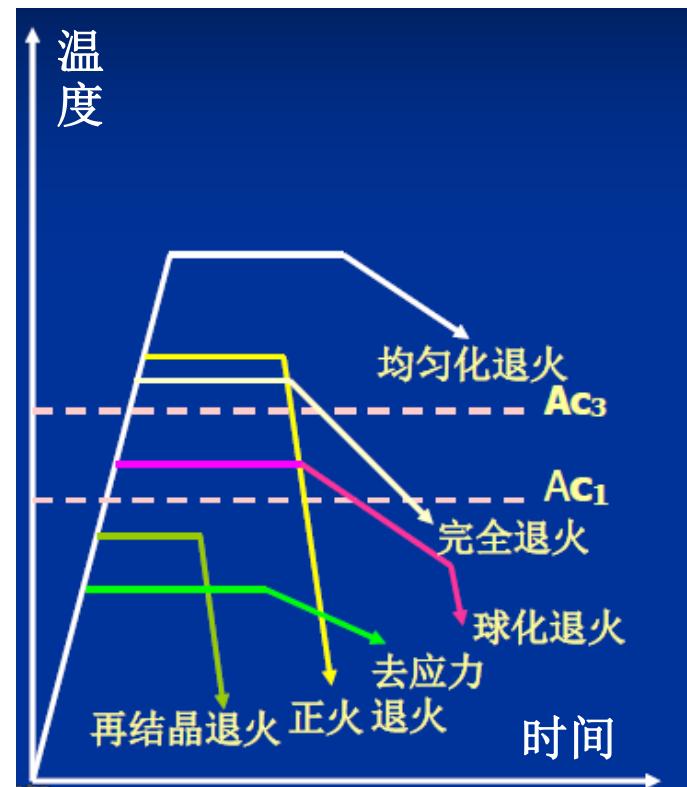
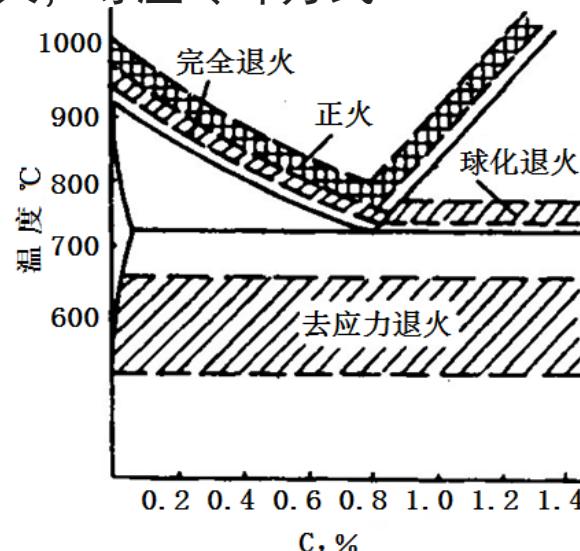
2. 退火工艺的分类

(1) 根据加热的温度不同

- 临界温度 (Ac_1 、 Ac_3) 以上的退火，包括完全退火、不完全退火、球化退火和扩散退火等
- 临界温度以下的退火，如再结晶退火、去应力退火等

(2) 根据冷却方式的不同

- 连续退火，连续冷却方式
- 等温退火，等温冷却方式

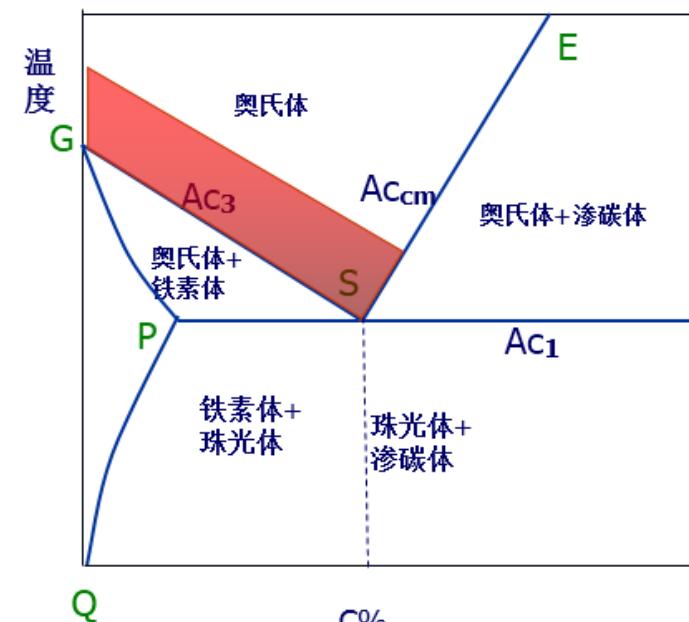


»»» §5.2.1 钢的退火

3. 常见的退火工艺

(1) 完全退火

- 定义：将工件缓慢加热到 Ac_3 以上30~50℃之间，保温后缓冷的退火工艺，又称为普通退火或重结晶退火。之所以称为“完全”是指钢的组织能通过重新形核、长大得以全部奥氏体化转变，这种退火方法，相当普遍地应用于钢。
- 适用范围：主要用于 亚共析碳钢 和 中碳合金结构钢 的铸、锻、焊坯件以及热轧型材的预备热处理，以消除组织缺陷（如魏氏组织、带状组织等），使组织变细和变均匀，以提高钢件的塑性和韧性。同时降低硬度以便于切削加工，并消除内应力。
- 局限性：完全退火采用炉中缓冷的冷却方式，**工艺周期长**，占用设备时间长，为提高设备利用率，常用等温退火代之。



魏氏组织：是在[奥氏体晶粒](#)较粗大，冷却速度适宜时，钢中的先共析相以针片状形态与片状珠光体混合存在的复相组织

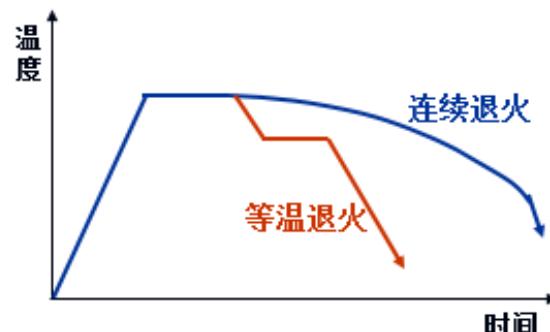
»»» §5.2.1 钢的退火

(2) 等温退火

将亚共析钢加热到 Ac_3 以上30~50°C之间，将共析钢、过共析钢加热 Ac_1 以上30~50°C之间，保温适当时间后停止加热并开启炉门，使工件快冷到 Ar_1 以下的某一温度，并在此温度下**保温**，直到奥氏体全部转变为**片层状珠光体**（亚共析钢还有先共析铁素体；过共析钢还有先共析渗碳体）为止，最后以任意速度冷却下来（通常是出炉在空气中冷却）的退火工艺。

等温退火目的与完全退火相同，等温退火可缩短工件在炉内的停留时间，并能得到更均匀的组织和硬度。

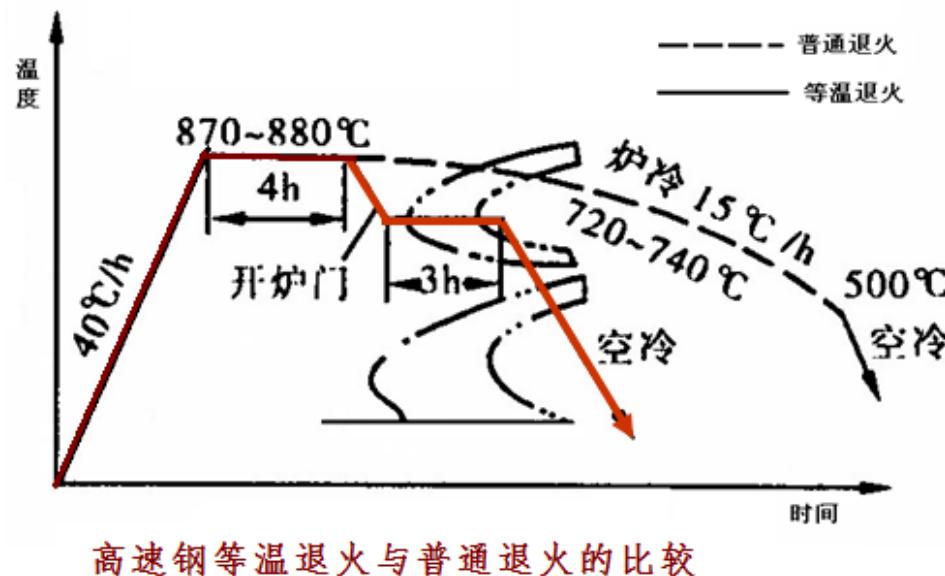
等温温度不可过低或过高，过低则退火后硬度偏高；过高则等温保持时间需要延长。



»»» §5.2.1 钢的退火

(2) 等温退火

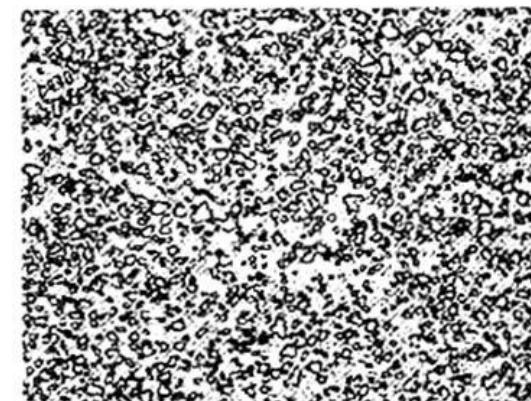
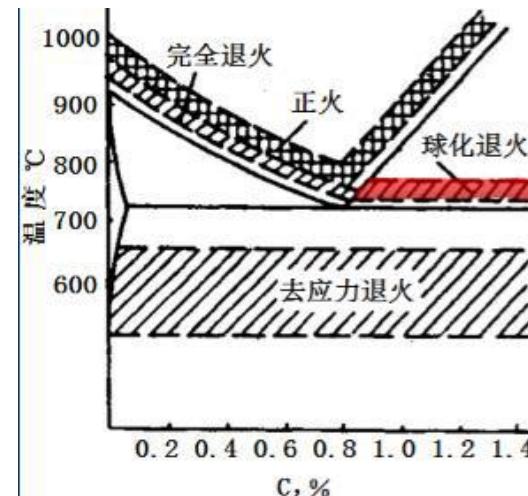
应用：等温退火主要用于高碳钢和孕育期长的合金钢，这些钢的过冷奥氏体在珠光体型相变温度区间转变相当缓慢，若采用完全退火方法，往往需要数十小时，很不经济。



»»» §5.2.1 钢的退火

(3) 球化退火

- 定义：将共析钢或过共析钢加热到 A_{C1} 以上10~20°C之间，以使较多未溶碳化物粒子在长时间保温过程中自发球化，保温一定时间后缓慢冷却到600°C以下，再出炉空冷，使珠光体中的渗碳体球状化的退火工艺。
- 球化退火所得到的组织：在铁素体基体上弥散分布着颗粒状渗碳体的组织，将这种组织称为球状珠光体。
- 球化退火的目的
 - 1) 使渗碳体球化，降低硬度，改善切削加工性能；
 - 2) 为后续的淬火作组织准备。
- 适用范围：球化退火主要用于改善共析钢、过共析钢和某些合金工具钢、轴承钢等的切削工艺性能。
- ◆ 注：若球化退火前钢中有严重的网状碳化物的存在，则在球化退火前应先进行正火，来消除网状渗碳体，然后再进行球化退火。否则将影响球化效果

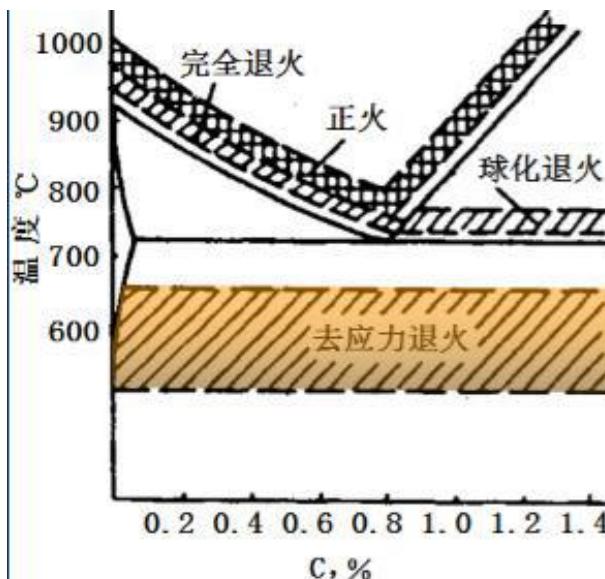


球状珠光体(400×)

»»» §5.2.1 钢的退火

(4) 去应力退火

- 定义：将工件随炉缓慢加热至 $500\sim600^{\circ}\text{C}$ ，经一段时间保温后随炉缓冷至 $300\sim200^{\circ}\text{C}$ 以下出炉，但工件并无组织转变的热处理工艺。
- 目的：主要适用于毛坯件及经过切削加工的零件，目的是为了消除毛坯和零件中的残余应力，稳定工件尺寸及形状，减少零件在切削加工和使用过程中的形变和裂纹倾向。
- 应该指出的是去除应力退火并不能将内应力完全去除，而只是部分去除，从而消除它的有害作用。



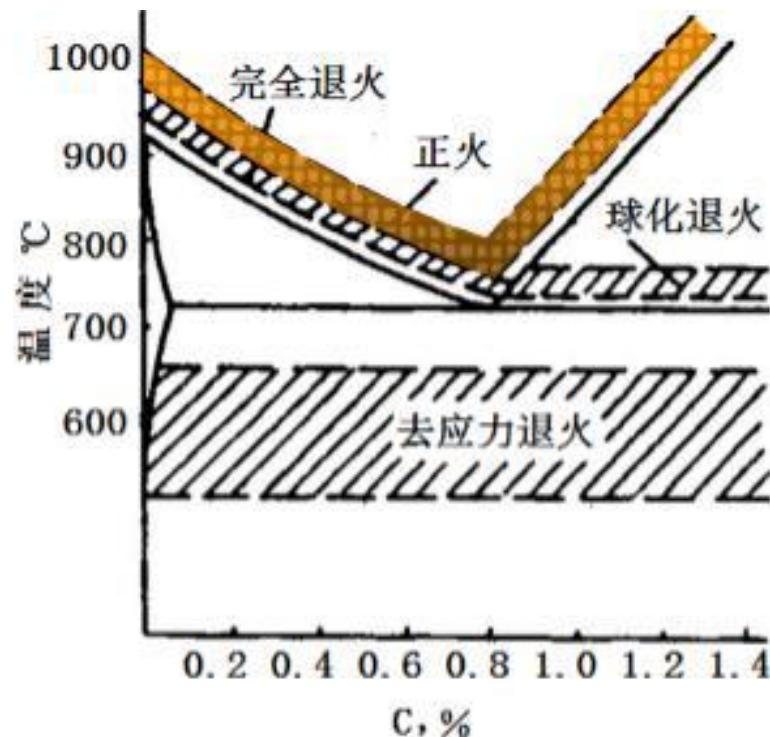
»»» §5.2.1 钢的退火

(5) 扩散退火（又称为均匀化退火）

- 定义：将钢加热到合金的固相线温度以下的**某一较高温度**，长时间保温（10~15h），然后缓慢冷却的热处理工艺。
- 应用于钢及非铁合金（如锡青铜、硅青铜、白铜等）的铸锭或铸件的一种退火方法。
- 目的：均匀化退火是使合金中的元素发生固态扩散，来减少钢锭、铸钢件或铸坯在凝固过程中产生的**化学成分偏析和晶粒尺度内的组织不均匀性**（晶内偏析或称枝晶偏析）。
- 均匀化退火温度所以如此之高，是为了**加快合金元素扩散**，尽可能缩短保温时间。合金钢的均匀化退火温度远高于Ac₃，通常是1050~1200°C。

正火，又称常化，Normalizing

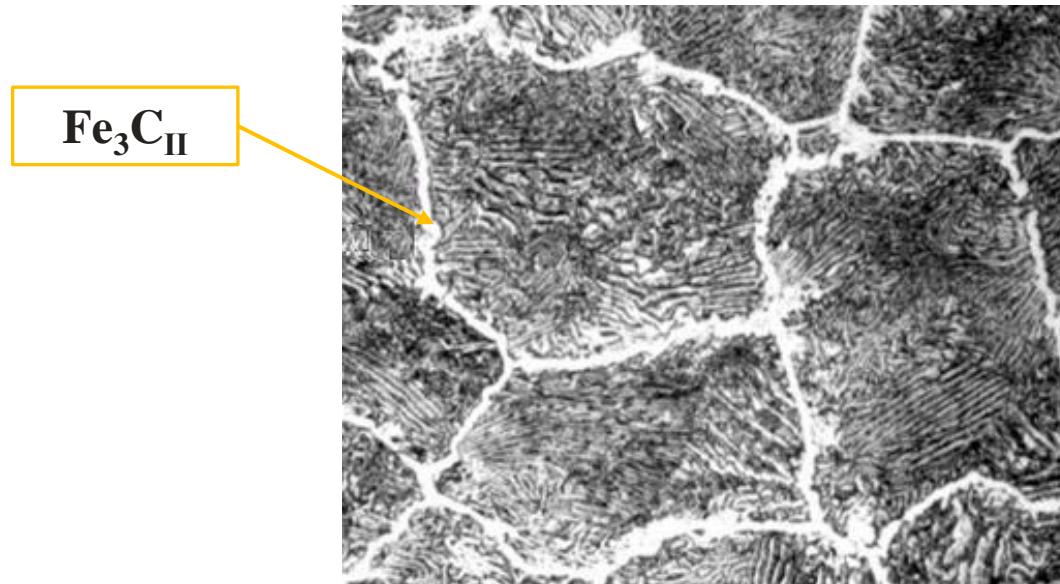
将亚共析钢加热到 Ac_3 以上30~50°C之间，过共析钢加热到 Acc_m 以上30~50°C之间，保温后空冷的热处理工艺。



»»» §5.2.2 钢的正火

1. 正火的目的

- 作为低、中碳结构钢的预备热处理，能适当提高硬度，改善切削加工性能
- 消除过共析钢中的网状二次渗碳体，为球化退火作组织准备
- 正火可细化晶粒，使组织均匀化，消除内应力，在一定程度上又提高强韧性及硬度的效果，可以作为普通结构零件的最终热处理工艺。



»»» §5.2.2 钢的正火

2. 正火后的组织：

正火后的组织：亚共析钢为F+S，共析钢为S，过共析钢为S+二次渗碳体，且为不连续。

值得注意的是：有些**临界冷却速度很小**的钢，在空气中冷却就可以使奥氏体转变为马氏体，这种处理不属于正火性质，而称为**空冷淬火**。与此相反，一些用临界冷却速度较大的钢制作的**大截面工件**，即使在**水中淬火也不能得到马氏体**，淬火的效果接近正火。

»»» §5.2.2 钢的正火

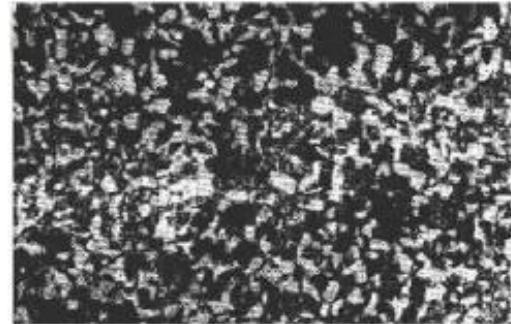
3. 正火与退火的主要区别

(1) 冷却速度

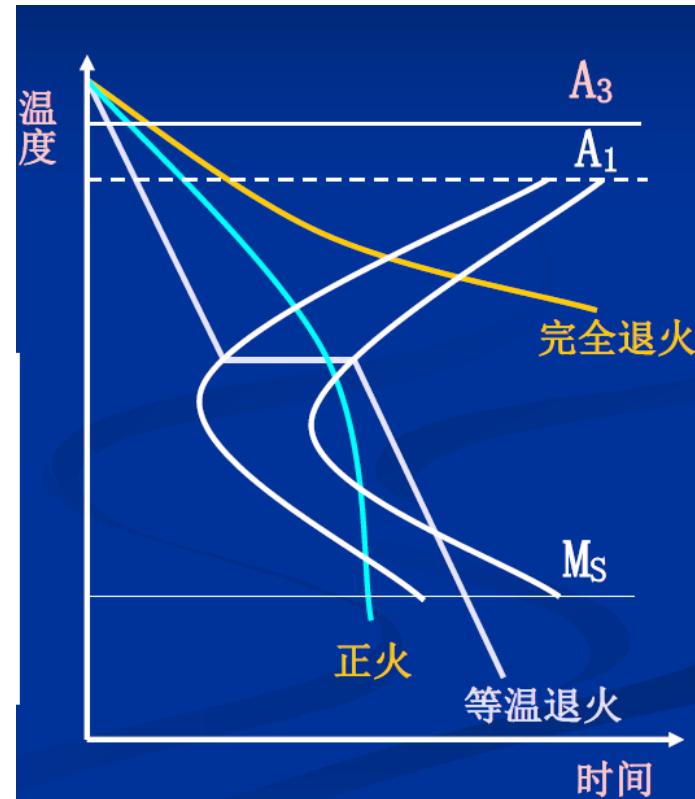
和退火相比，正火冷却速度较大，因此得到的珠光体组织更细，强度和硬度也较高。



45钢的退火组织



45钢的正火组织



(2) 目的

- 对于低、中碳的亚共析钢而言，正火和退火的目的相同，都是为了改善切削加工性；
- 而过共析钢球化退火前进行一次正火，可消除网状二次渗碳体，以保证球化退火时渗碳体全部球粒化。

»»» §5.2.3 钢的退火与正火的选择

- 正火时不必像退火那样使工件随炉冷却，占用炉子时间短，**生产周期短，成本低**，在能满足要求的情况下，应**尽量选用正火**，以降低生产成本。
- 钢件的**硬度为170–280 HBS**时，切削加工性能较好。
低碳钢、低碳合金钢应选**正火**作为**预备热处理**，中碳钢也可选用**正火**；
 $\omega(C) > 0.5\%$ 的碳钢、中碳以上的合金钢应选用**退火**作为**预备热处理**。
- 一般**合金钢坯料常采用退火**。若用正火，由于冷却速度较快，使其正火后硬度较高，不利于切削加工。
- 形状复杂的零件或大型铸件，正火有可能因内应力大而引起开裂，则应选用**退火**。



§5.3 钢的淬火和回火

»»» §5.3.1 钢的淬火

淬火，在金属材料加工、金属热处理等学术领域和行业内均读（zhàn huǒ）“蘸火”是淬火工艺的行业术语，起源于工艺处理的方法，因为淬火就是把加热到一定程度的热工件蘸一下介质，以达到要求，过去工匠们形象的称谓淬火为蘸火。



淬火：将钢加热到临界点温度以上，保以一段时间，使之**全部或部分**奥氏体化后，以**大于 V_k** 的速度冷却至**Ms点以下**（在Ms点附近温度等温），使奥氏体转变为马氏体（M）或下贝氏体（B下）组织的热处理工艺。

淬火工艺是强化钢的重要手段，对力学性能高的工件，**淬火+后续的回火**往往作为**最终热处理**。

一、淬火加热

淬火加热温度即钢奥氏体化温度，是淬火的主要工艺参数之一。

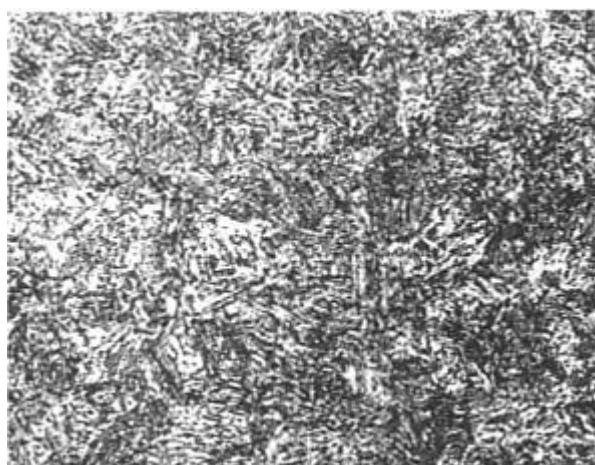
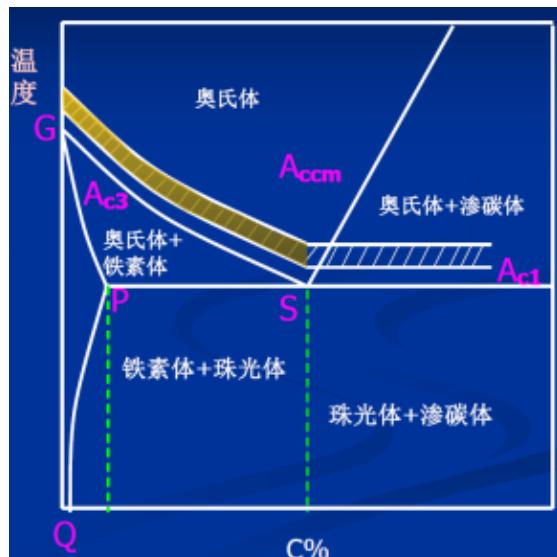
选择淬火温度的原则

获得均匀细小的奥氏体组织，以便淬火后获得细小马氏体

(1) 亚共析钢的淬火温度

淬火温度为 A_{c3} 以上 $30\sim50^{\circ}\text{C}$

高温下钢的状态处在单相奥氏体（A）区内，故称为完全淬火



45钢的正常淬火组织

亚共析钢的淬火组织

含碳量 $\leq 0.5\%$ ，马氏体

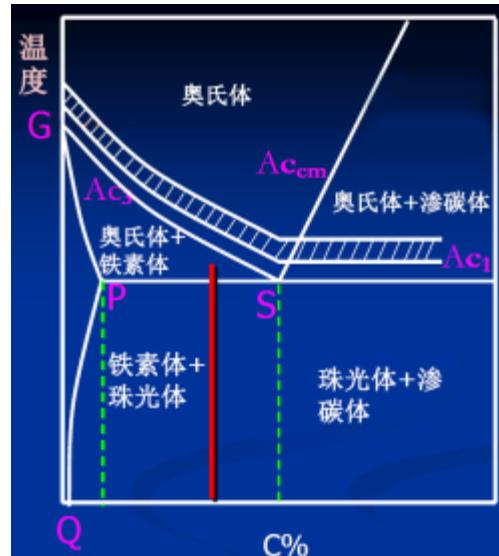
含碳量 $>0.5\%$ ，马氏体+少量残

余奥氏体

»»» §5.3.1 钢的淬火



35钢的亚温淬火组织



若亚共析钢在 $Ac_1 \sim Ac_3$ 之间加热，则高温下部分先共析铁素体未完全转变成奥氏体，淬火后组织中会出现铁素体，淬火后组织为**F+M**。

由于铁素体的存在，使得硬度有所降低，但塑性、韧性提高，工业生产中将这种方法称为**亚温淬火**。

(2) 共析钢的淬火温度

淬火温度均为 $Ac_1 + 30 \sim 50^\circ C$

共析钢淬火后的组织，**马氏体+少量残余奥氏体**

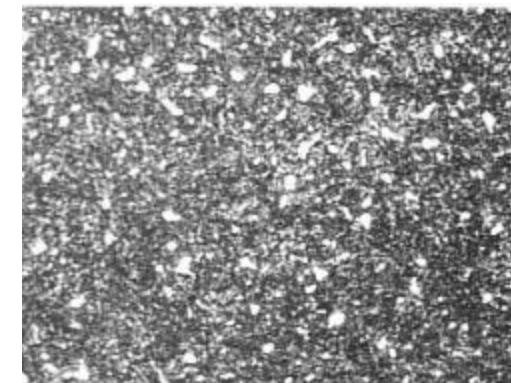
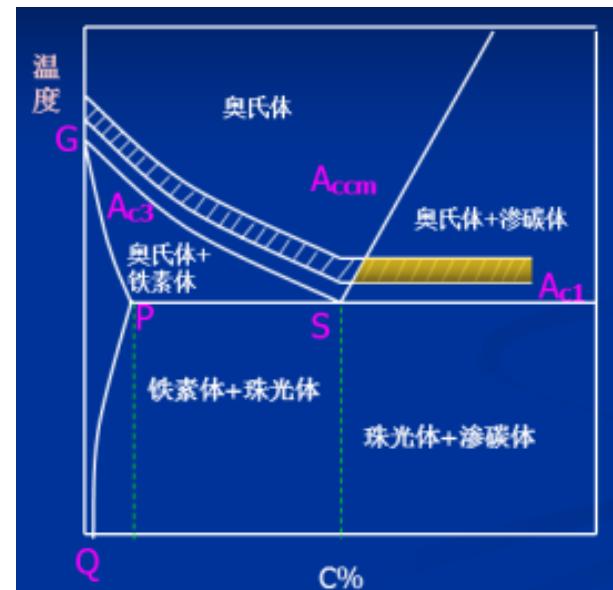
»»» §5.3.1 钢的淬火

(3) 过共析钢的淬火

淬火温度均为 $Ac_1+30\sim50^{\circ}\text{C}$ ：处于奥氏体与渗碳体双相区，因而过共析钢的正常淬火仍属不完全淬火。

过共析钢淬火后的组织为细马氏体+颗粒状渗碳体+少量残余奥氏体，颗粒状渗碳体是因为过共析钢淬火前经过球化退火处理，弥散分布的颗粒状渗碳体对钢的硬度和耐磨性有利。

若过共析钢加热到 $Accm$ 以上，先共析渗碳体溶解过多，甚至完全溶解，则会导致奥氏体中含碳量提高，而使得奥氏体晶粒粗大，从而导致淬火后的马氏体也粗大，使钢件淬火内应力增加，微裂纹增多，零件的变形和开裂倾向增加；由于奥氏体碳浓度高， M_s 下降，导致残留奥氏体量增加，使工件的硬度和耐磨性降低。



T12钢的淬火组织 (400₉₉X)

»»» §5.3.1 钢的淬火

(4) 合金钢的淬火

大多数合金元素（Mn、P除外）都有阻碍奥氏体晶粒长大的作用，因此合金钢的淬火温度可以在**临界点以上50~100°C之间**，比相应的碳钢加热温度略高。

对合金钢而言淬火温度的提高有利于合金元素在奥氏体中的充分溶解和均匀化，以获得较好的淬火效果

实际生产中，加热温度的选择要根据具体情况加以调整。

二、淬火保温

对整体淬火而言，保温的目的是使工件内部温度均匀趋于一致。

对各类淬火，其保温时间最终取决于在要求淬火的区域获得良好的淬火加热组织。

淬火保温时间由设备加热方式、零件尺寸、钢的成分、装炉量和设备功率等多种因素确定。

加热与保温是影响淬火质量的重要环节，奥氏体化获得的组织状态直接影响淬火后的性能。一般钢件奥氏体晶粒控制在5~8级。

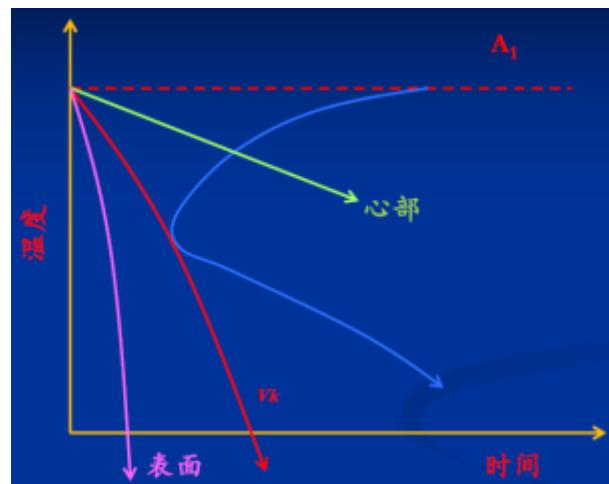
»»» §5.3.1 钢的淬火

三、淬火冷却

冷却阶段是淬火工艺过程的关键环节，不仅使零件获得合理的组织，达到所需要的性能，而且要保持零件的尺寸和形状精度。

淬火的目的和实质是获得马氏体（包括下贝氏体）组织，则冷却速度必须大于钢的临界冷却速度；

工件在冷却过程中，通常表面的冷却速度大，而心部的冷却速度小，如果这种差异足够大，则可能造成大于临界冷却速度表面部分转变成马氏体，而小于临界冷却速度的心部不能转变成马氏体的情况。



因此为保证工件整个截面上都转变为马氏体，则需要选用**冷却能力足够强**的淬火介质，以保证工件心部有足够高的冷却速度。

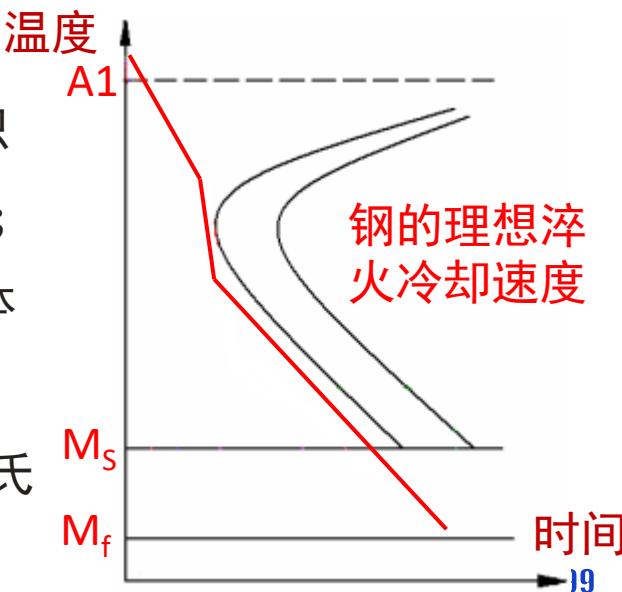
»»» §5.3.1 钢的淬火

但是冷却速度大，工件内部由于热胀冷缩不均匀将造成内应力，即热应力；同时由于奥氏体比马氏体的密度大（奥氏体为面心立方结构，而马氏体为过饱和的体心四方结构），因此奥氏体向马氏体转变过程中由于体积变化而产生的内应力即为相变应力。工件冷却过程中热应力和相变应力共同作用，可能导致工件出现变形或开裂，对于那些复杂形状的工件来说尤其严重。因而要考虑上述两种矛盾因素，合理选择淬火介质和冷却方式。

淬火冷却介质是控制钢件冷却速度，保证淬火质量的重要媒介物质。

1. 理想淬火介质的冷却速度

- 在 650°C 以上保证过冷奥氏体不转变为珠光体型组织的前提下，应尽量减慢冷却速度以减少热应力作用；
- 在C曲线“鼻尖”处应尽快冷却，以保证过冷奥氏体不在此处转变；
- 避开“鼻尖”后，又应缓慢冷却。因为此后发生马氏体转变时将产生较大的相变应力。



»»» §5.3.1 钢的淬火

2. 常用的淬火冷却介质

(1) 水

优点	<ul style="list-style-type: none"> 1) 经济的且冷却能力较强的淬火介质 2) 对环境没有污染
缺点	<ul style="list-style-type: none"> 1) 在C曲线鼻尖部位 (650~500°C) 范围内冷却能力不够强 2) 在马氏体转变区 (300~200°C) 范围内冷却能力不够缓慢

适用范围：最常用的淬火介质，多用于**形状简单或截面尺寸较小**的碳钢件的淬火冷却

(2) 油

特点	<ul style="list-style-type: none"> 1) 低温区的冷却速度比水小得多 2) 高温区的冷却速度也很小
----	--

适用范围：各类矿物油（机油、柴油等）多用于**形状复杂**的中、**小合金钢件**的淬火冷却（这是因为除Co外，凡溶入奥氏体的合金元素都使C曲线右移，使得孕育期变长）

(3) 盐水、碱水（在水中加入10~15%的NaCl或NaOH等物质的水溶液）

特点	<ul style="list-style-type: none"> 1) 明显提高水在高温区400~600°C的冷却能力 2) 但在300~200°C范围内的冷却能力仍较强
----	---

适用范围：主要用于**形状简单，硬度要求高**而均匀且**变形要求不高**的碳钢件的淬火冷却。

»»» §5.3.1 钢的淬火

3. 淬火工艺

根据冷却方法不同，常见的淬火工艺分为单介质淬火、双介质淬火、马氏体分级淬火和贝氏体等温淬火等4类。

(1) 单介质淬火，如冷却曲线1所示

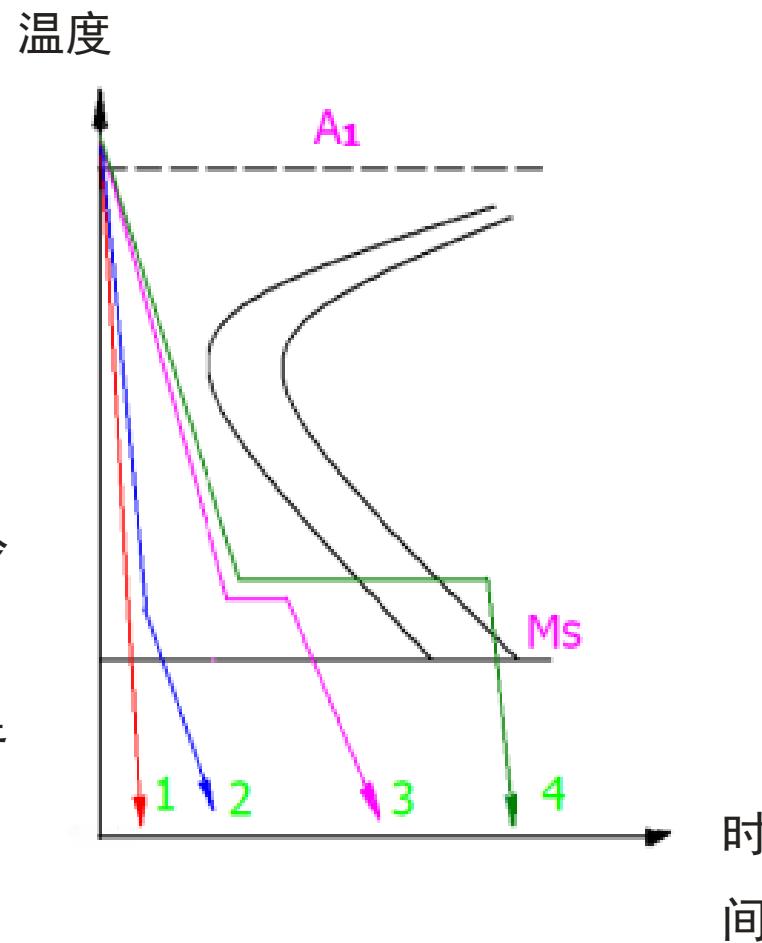
将奥氏体化后的工件迅速投入到一种淬火介质中冷却至室温的淬火方法。

优点：操作简单，易实现机械化，应用较广泛

缺点：

1) 水中淬火变形开裂倾向大，这是由于水的冷却能力强，工件在冷却过程中热应力大

2) 油中淬火时大碳钢件不容易淬硬（硬度不足或不均匀），这是因为油的冷却能力相对较弱，大件冷却过程中，心部的冷速不够，不能获得完全的马氏体组织



»»» §5.3.1 钢的淬火

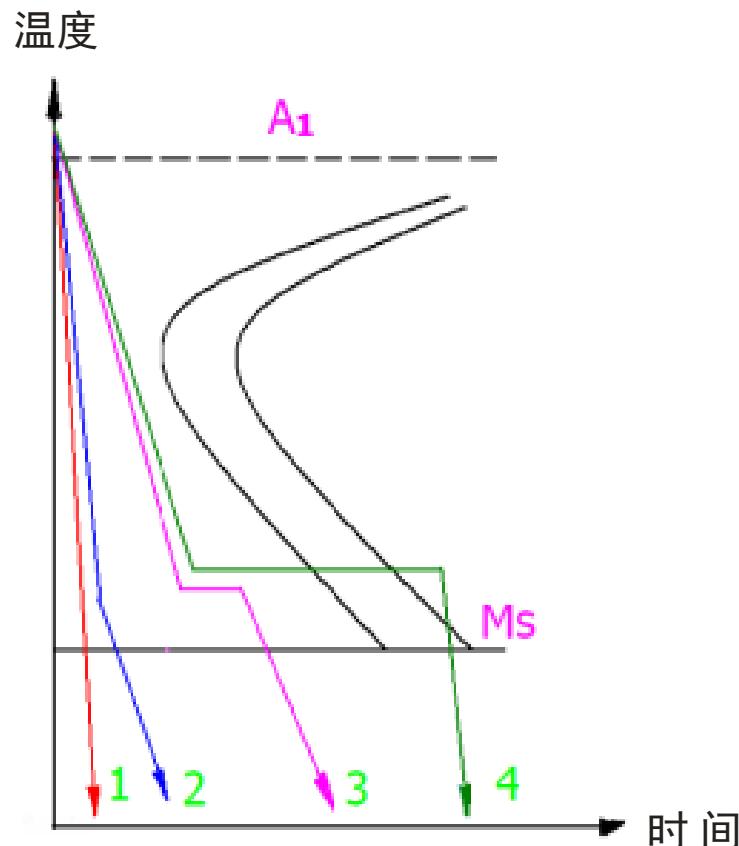
(2) 双介质淬火, 如冷却曲线2所示

将工件先在一种冷却能力较强的介质中冷却到300°C左右, **避免珠光体转变**, 然后转入另一种冷却能力较弱的介质中发生**马氏体转变**的方法常用的双介质淬火为**水淬油冷或油粹空冷**。

优点: 获得了较理想的冷却条件, 既保证工件得到马氏体组织, 又可降低了马氏体转变区的冷却速度, **减少淬火热应力**, 从而减少了变形和开裂的可能性。

缺点: 操作复杂, 在第一种介质中的**停留时间不易掌握**, 转换过早容易淬不硬, 转换过迟又容易淬裂, 需要有实践经验;

适用范围: 主要用于**形状复杂的高碳钢工件及大型合金钢工件**。



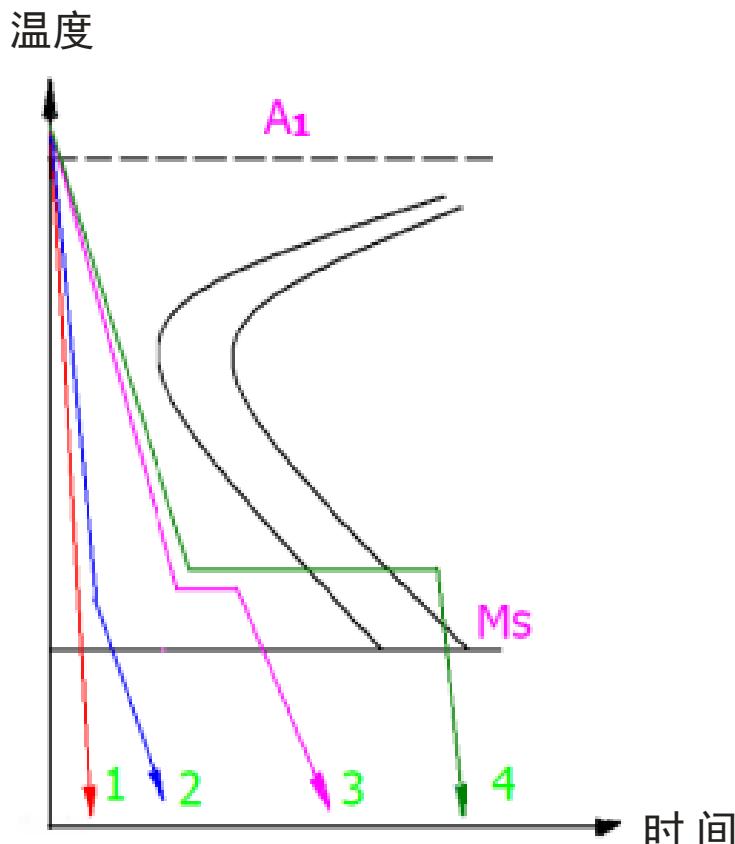
»»» §5.3.1 钢的淬火

(3) 分级淬火法 如冷却曲线3所示

指将奥氏体化的工件淬入到稍高于Ms点温度的盐浴或碱浴中**保温2~5min**，待工件表、心部温度接近盐浴温度时**拿出来空冷**的淬火方法

优点：分级淬火工艺使工件内外温度较为均匀，从而很好地消除淬火工件表、心部的温差问题，可以大大减小淬火应力，有效地减少工件变形开裂倾向

适用范围：适于**形状复杂、厚薄不均**的工件淬火，但因其冷却能力有限，仅用于**尺寸较小**的工件。



»»» §5.3.1 钢的淬火

(4) 等温淬火法 如冷却曲线4所示

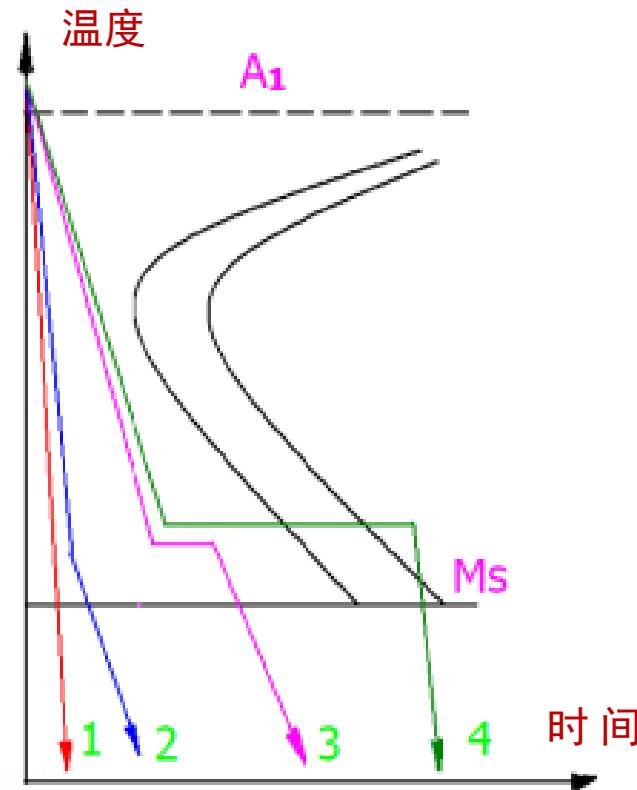
将加热工件在高于Ms温度的盐浴或碱浴中冷却并等温停留较长时间(30~60min)，直到贝氏体转变结束，取出空冷淬火方法。

优点

- 1) 等温淬火得到的组织为下贝氏体，强度高、塑性和韧性好，工件具有良好的综合力学性能；
- 2) 淬火应力小，变形小。这是因为下贝氏体转变没有相变应力，同时长时间的保温，使得工件表面和心部温度一致，减少了热应力的影响；

适用范围：等温淬火用于中碳以上的钢，目的是为了获得下贝氏体，以提高强度、硬度、韧性和耐磨性。低碳钢一般不采用等温淬火。

在生产中常用于形状复杂、变形要求很小的工具和零件，如模具、刀具、齿轮等尺寸较小的零件。



»»» §5.3.1 钢的淬火

深冷处理

将淬火工件继续冷却到室温以下温度(-70~ -80°C)保持一段时间，使其中的**残余奥氏体**继续转变为**马氏体**的工艺

目的：降低钢中残余奥氏体量，以**提高**钢的**硬度**和**耐磨性**及工件的尺寸稳定性

适用范围：主要用于淬火后残余奥氏体量较多的**合金钢或精密件**，如：刃量具钢等

其他淬火方式

局部淬火：仅对工件需要硬化的局部进行的淬火。

风冷淬火：以强迫流动的空气或压缩空气作为冷却介质的淬火冷却。

加压淬火：工件加热奥氏体化后再特定夹具夹持下进行的淬火冷却，其目的在于减少淬火冷却畸变。

喷液淬火：用喷射液流作为冷却介质的淬火冷却。

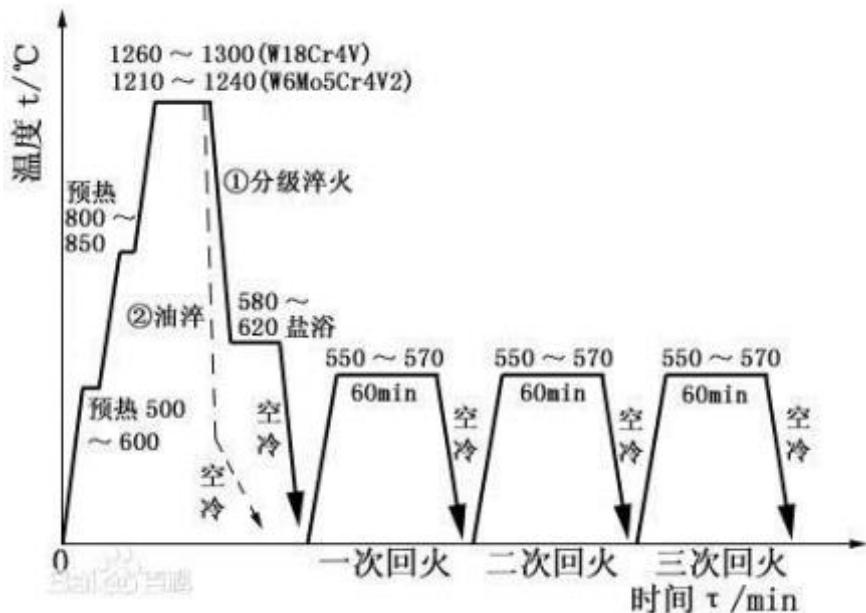
喷雾冷却：工件在水和空气混合喷射的雾中进行的淬火冷却。

»»» §5.3.2 钢的回火

淬火是钢铁材料强化的基本手段之一。

淬火工艺在现代机械制造工业中得到广泛的应用。机械中的重要零件，尤其在汽车、飞机、火箭中应用的钢件几乎都经过淬火处理。

除了等温淬火钢通常在淬火状态下使用外，**大多数钢都不能在淬火状态下使用**。因为淬火过程中产生的**马氏体脆性很大**，加之淬火后钢件内部有较大的**淬火内应力**，因而不宜直接使用，必须**进行回火**。



回火：将经过淬火的工件重新加热到低于临界温度**Ac1以下**的适当温度，**保温**一段时间后以一定的速率冷却，以**增加材料韧性**的一种热处理工艺。回火是决定钢在使用状态下组织和性能的一道关键工序。

一、回火的性质

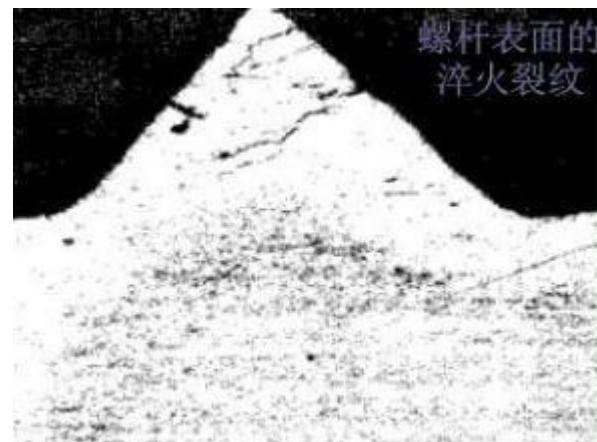
- 钢件淬火后不能直接使用，必须**及时回火**，
 - 调整工件的硬度、强度、塑性和韧性，达到使用性能要求，淬火钢一般硬度高，脆性大，通过**回火可调整硬度和韧性**
 - 消除或减少工件淬火时产生的**残余内应力**，防止变形或开裂
 - 稳定组织与尺寸，保证精度尺寸和形状的变化
-
- ◆ 钢件淬火后的组织为**淬火马氏体**和**残余奥氏体**，均为亚稳态组织，都有向稳定组织过渡的趋势，即自发的向铁素体和渗碳体转变的趋势，而使得工件的尺寸和形状发生改变；
 - ◆ 回火可使淬火马氏体和残余奥氏体转变为较**稳定的组织**，以保证工件在使用过程中不发生尺寸和**形状的变化**。



»»» §5.3.2 钢的回火

此处要强调的几点：

- 未经淬火的钢，回火是没有意义的，因此**回火是作为最终热处理与淬火并用的**；
- 为**避免**淬火件在放置过程中发生**变形或开裂**，钢件经淬火后**应及时回火**；
- 回火不足可再适当追补一次，但若回火过度则将**前功尽弃**，必须重新淬火；
- 回火不是硬化方法，而是刚好相反。
- 回火钢是将经热处理硬化的钢通过回火时的再加热来**释放应力、软化和提高塑性**。
- 回火引起的结构变化和性能改变**取决于钢重新加热的温度**。温度越高，效果越大，所以温度的选择通常**取决于牺牲硬度和强度换取塑性和韧性的程度**。



»»» §5.3.2 钢的回火

二、淬火钢回火时的组织和性能的变化

回火过程包括马氏体分解；残留奥氏体分解；马氏体分解完成及渗碳体的形成；渗碳体的聚集长大和固溶体的回复与再结晶等四个阶段。

第一阶段（室温~250°C）：马氏体开始分解

马氏体中的过饱和碳原子析出，形成细小的 ε 碳化物($\text{Fe}\chi\text{C}$)，这种极细的 ε 碳化物与低饱和度的 α 固溶体构成的组织称为回火马氏体。

第二阶段（230~280°C）：残余奥氏体的分解

淬火马氏体转变为回火马氏体后，其体积缩小，降低了对残余奥氏体的压力，转变为过饱和固溶体与碳化物，亦称为回火马氏体。

第三阶段（260~360°C）：马氏体分解完成及渗碳体的形成

碳原子析出使过饱和的固溶体转变为铁素体；回火马氏体中的 $\text{Fe}\chi\text{C}$ 转变成稳定粒状渗碳体。此阶段回火后组织为铁素体与细小粒状渗碳体的混合物，称为回火托氏体。

第四阶段（400°C以上）：渗碳体的聚集长大和固溶体的回复与再结晶

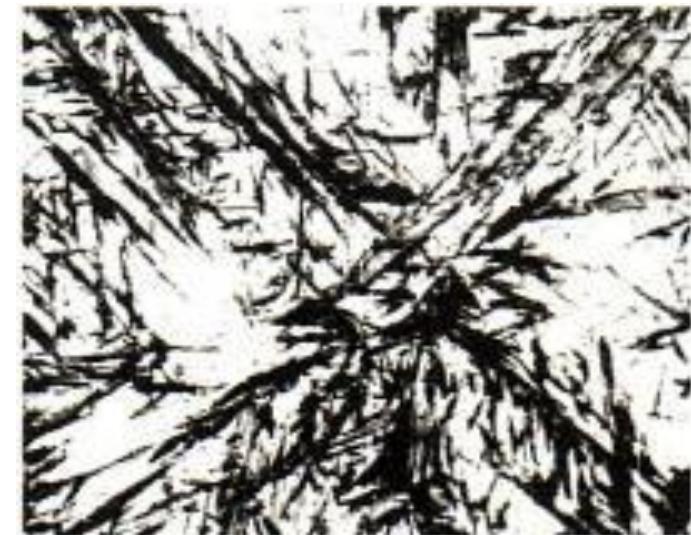
铁素体发生再结晶，由针片状逐渐转变成等轴晶粒，淬火内应力完全消除。钢组织为等轴铁素体基体和均匀分布的粒状等渗碳体的混合物，称为回火索氏体。

三、回火的种类

根据回火的温度范围分为低温回火、中温回火和高温回火

(1) 低温回火

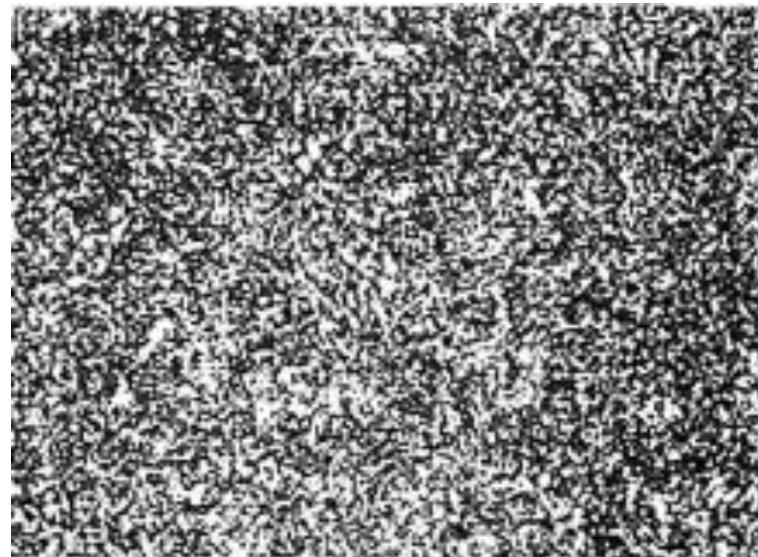
- 回火温度：150～250°C；
- 低温回火组织：**M回**，极细的 ε 碳化物与低饱和度的 α 固溶体，光学显微镜下，M回为黑色，残余奥氏体为白色；
- 目的：保持淬火工件高的**硬度**（一般为58～64HRC）和耐磨性，**降低淬火残留应力和脆性**；
- 应用范围：低温回火主要应用于各类**高碳钢**的工具、刃具、量具、模具、滚动轴承、渗碳及表面淬火的零件等。



»»» §5.3.2 钢的回火

(2) 中温回火

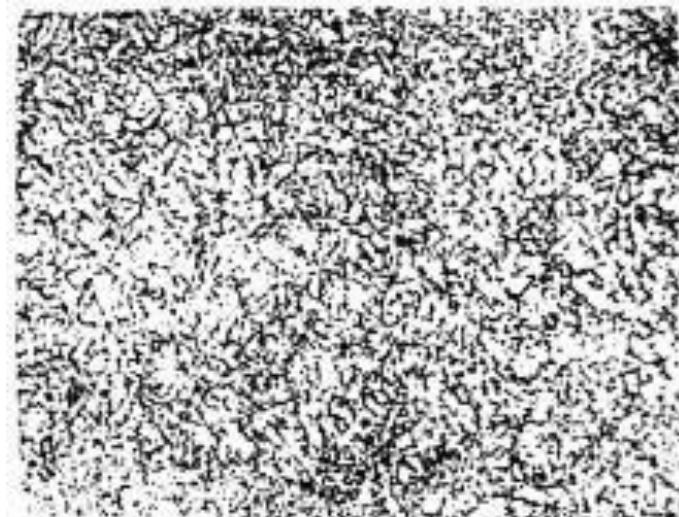
- 中温回火温度: $350\sim500^{\circ}\text{C}$;
- 中温回火组织: T回, 在保持马氏体形态的铁素体基体上分布着细粒状渗碳体的组织;
- 中温回火目的: 得到高的弹性极限和屈服强度及一定的韧性, 内应力消除大半, 硬度为 $35\sim45\text{HRC}$;
- 应用范围: 主要用于弹簧、发条、锻模、冲击工具等的热处理。



»»» §5.3.2 钢的回火

(3) 高温回火

- 高温回火温度: $500\sim650^{\circ}\text{C}$;
- 高温回火后的组织: S回, 在多边形铁素体基体上分布着颗粒状 Fe_3C 的组织;
- 高温回火的目的: 得到强度、塑性和韧性都较好的综合力学性能。内应力完全消除, 硬度为 $25\sim35\text{HRC}$ 。由于S回具有良好的综合力学性能, 通常把淬火+高温回火称为调质处理, 简称调质;
- 应用范围: 调质处理主要用于各种重要结构零件的最终热处理, 如受交变载荷且抗疲劳性要求高的连杆、轴类、齿轮等, 也常用于表面淬火件、氮化件、精密刀具、量具和模具的预备热处理;
- 上述回火工艺的温度范围划分是针对碳钢和低合金钢, 对合金元素含量较高的中、高合金钢并不适用。



回火索氏体(500×)

»»» §5.3.2 钢的回火

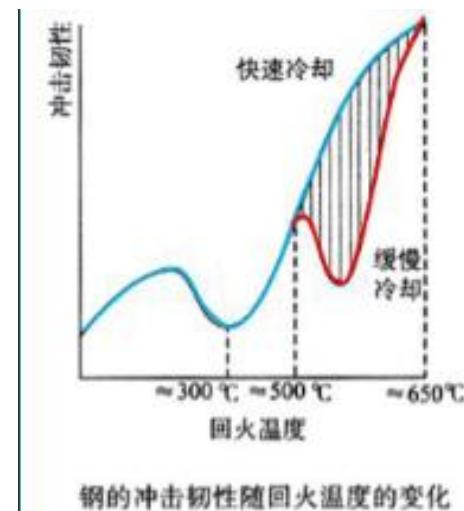
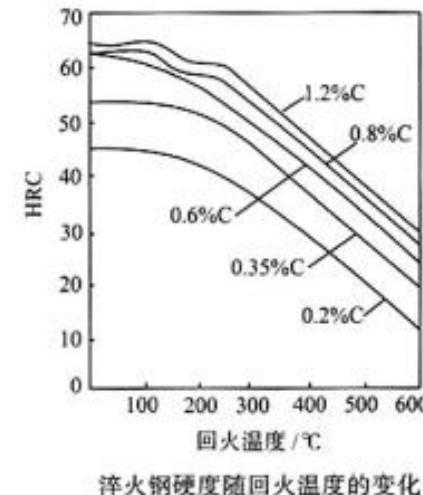
四、回火脆性

淬火钢的冲击韧性随回火温度的变化规律如图所示。从图中可以看出，随着回火温度的提高，钢的硬度呈下降趋势而韧性总体呈上升趋势，但在 $250\sim400^{\circ}\text{C}$ 之间以及 $450\sim650^{\circ}\text{C}$ 两个区间出现了两个极小值，这种现象称为钢的回火脆性。前者称为低温回火脆性，后者称为高温回火脆性。

(1) 低温回火脆性

淬火钢在 $250\sim400^{\circ}\text{C}$ 回火时出现的脆性，由于已经发生的脆化不能用重新加热的方法消除，因此又称为不可逆回火脆性。其产生的主要原因是在此温度区回火时，马氏体分解，在晶界上析出渗碳体，降低晶界断裂强度，破坏了基体的连续性。几乎所有的钢都有这类回火脆性，目前尚无有效办法完全消除这类回火脆性。

因此一般淬火钢都不在 $250\sim350^{\circ}\text{C}$ 范围内进行回火。



»»» §5.3.2 钢的回火

(2) 高温回火脆性

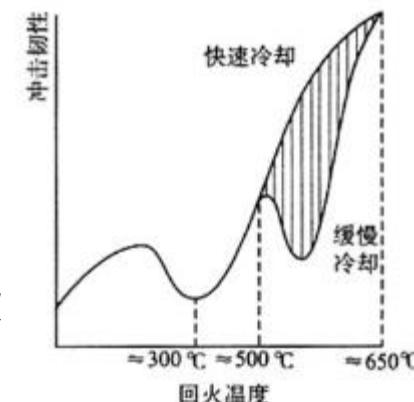
淬火钢在 $450\sim650^{\circ}\text{C}$ 范围内回火后缓冷出现的脆性，如果重新加热到 600°C 以上温度后快速冷却，可以恢复韧性，因此又称为可逆回火脆性。

这类回火脆性主要发生在含Cr、Ni、Si、Mn等合金元素的结构钢中

这类回火脆性的特点是：回火后快冷（油冷）不产生脆性，而慢冷（空冷）则会产生脆性。当这些钢必须高温回火时，它们通常加热到 600°C 以上并快速冷却。当然，从这个温度快冷不会产生硬化，因为没有进行奥氏体化。

为了获得良好的综合力学性能，合金结构钢往往在三个不同温度范围回火：

- 超高强度钢约在 $200\sim300^{\circ}\text{C}$ ；
- 弹簧钢在 460°C 附近；
- 调质钢在 $550\sim650^{\circ}\text{C}$ 回火；
- 碳素及合金工具钢要求具有高硬度和高强度，回火温度一般不超过 200°C 。
- 合金结构钢、模具钢和高速钢等都在 $500\sim650^{\circ}\text{C}$ 范围内回火。



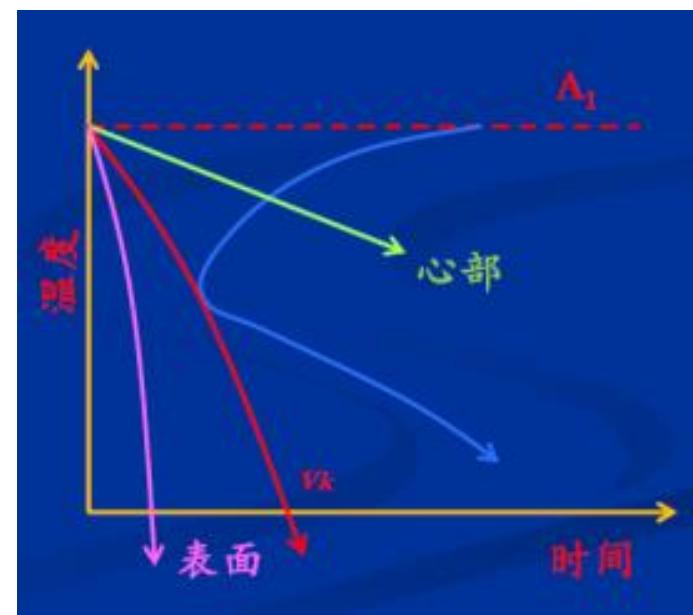
钢的冲击韧性随回火温度的变化

§5.4 钢的淬透性和淬硬性

»»» §5.4 钢的淬透性和淬硬性

1. 淬透性 (Hardenability)

- 淬透性是指在规定条件下，钢在淬火时获得淬硬层（马氏体层）的深度的能力，是钢种本身固有的属性；
- 钢件能否淬透与钢的淬火临界冷却速度 (v_k) 有关；
- 衡量指标：用标准试样在一定条件下淬火时所能达到的有效淬硬层深度来表示；
- 淬硬层深度：指钢件表面至内部马氏体组织占50%处的距离；
- 淬硬层深度越大，淬透性越高；
- 淬硬层深度达到心部，工件被淬透；

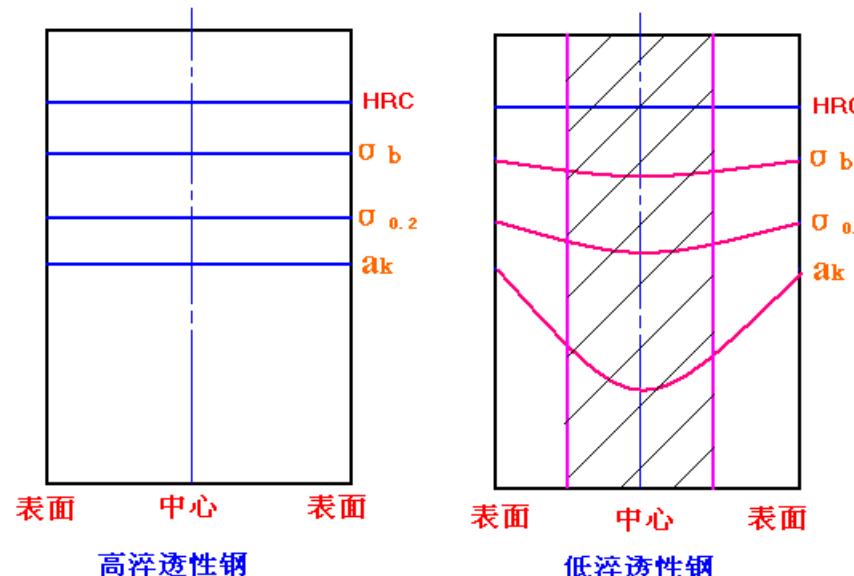


»»» §5.4 钢的淬透性和淬硬性

(1) 淬透性对钢力学性的影响

淬透性对钢的力学性能影响很大

- 如果工件淬透了，表面的性能均匀一致，能充分发挥钢材的力学性能潜力；
- 如果未淬透，则表面的性能便存在差异，尤其在高温回火后，心部的韧性将比表层低。



在相同奥氏体化条件下，同种钢的淬透性是相同的

淬硬层深度，水淬 > 油淬；小件 > 大件

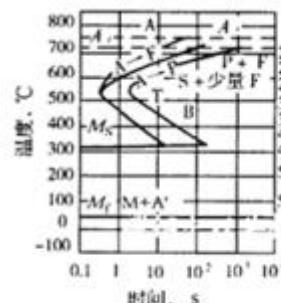
»»» 5.4 钢的淬透性和淬硬性

(2) 影响淬透性的因素

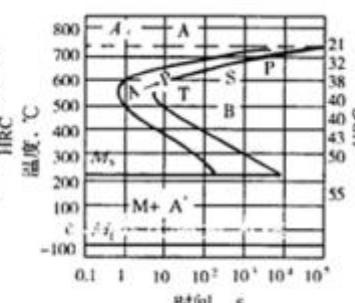
淬透性是钢的本质属性，与钢材外部条件（如形状、尺寸、表面积及冷却介质等）无关，但却与其临界冷却速度密切相关，临界冷却速度越小，钢的淬透性越高。凡是影响临界冷却速度（或者说影响C曲线位置）的因素（如化学成分、淬火温度和保温时间）均影响淬透性。

1) 化学成分

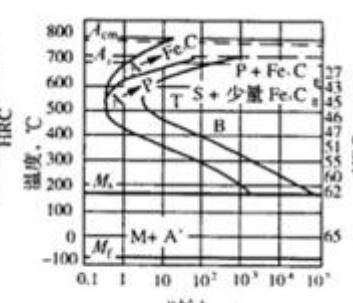
- **含碳量：**在亚共析钢、共析钢、过共析钢中，**共析钢**的临界冷却速度最小，**淬透性**在碳钢中**最高**；**亚共析钢**随**含碳量的增加**淬透性**增高**；**过共析钢**在正常淬火加热温度范围内随**含碳量的增加**其淬透性**降低**。
- **合金元素：**除Co外的**合金元素**均使C曲线向右移，临界速度减小，淬透性增加。



亚共析钢



共析钢



过共析钢

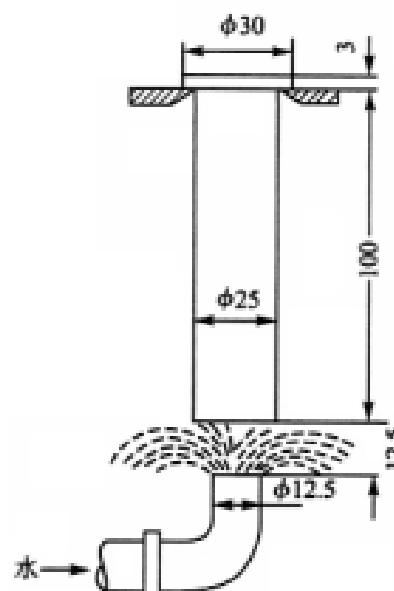


2) 淬火温度和保温时间

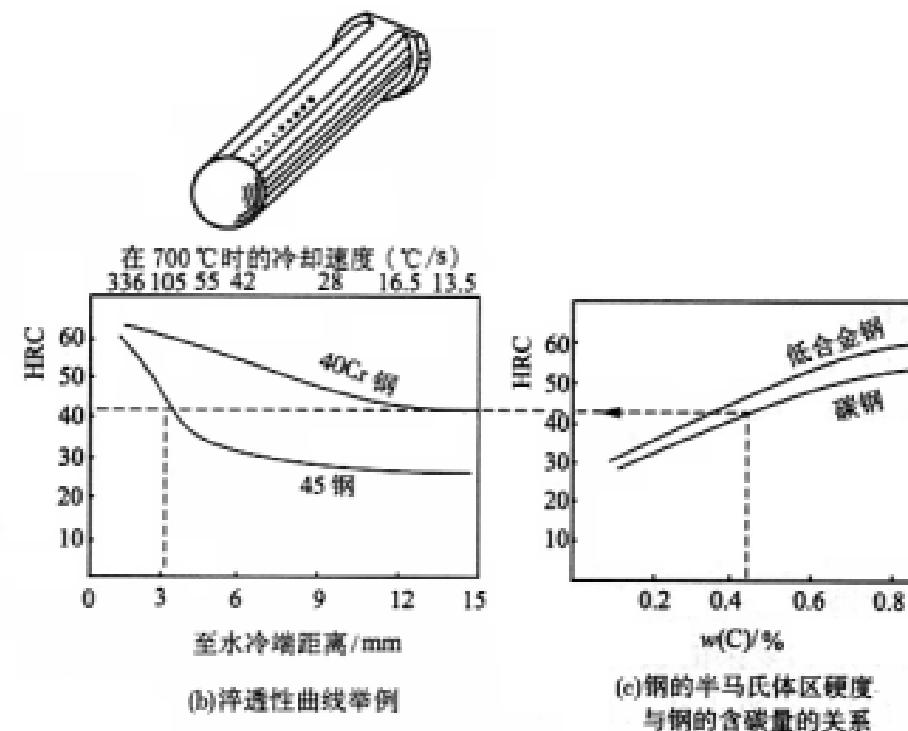
加热温度的升高和保温时间的延长都能适当地提高钢的淬透性，但采取这种方法，会引起晶粒粗大，故一般不采用。

(3) 淬透性的测定

末端淬火法（端淬法）



(a) 喷水



(4) 淬透性的应用

1) 估算淬硬层的深度

零件设计时可利用已知的淬透性曲线来估算零件的有效淬硬层深度

2) 根据淬硬层深度选择材料

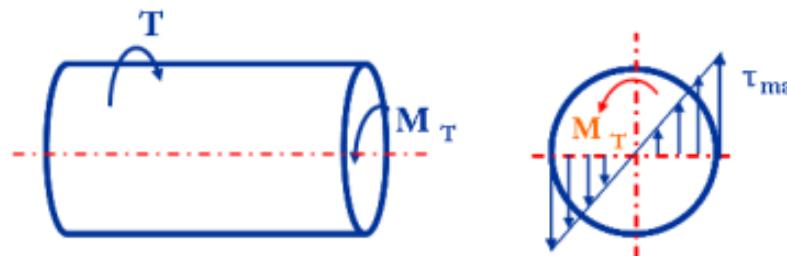
有效淬硬层深度对工件力学性能影响很大

当工件淬透后，经回火可得到沿整个截面分布一致的组织，其力学性能分布也均匀一致；

当未淬透时，工件心部的力学性能低于表面淬透层的性能。

当工件应力沿截面均匀分布 \Rightarrow 截面上的力学性能均匀一致 \Rightarrow 选用淬透性较高的钢

承受弯曲或扭转载荷的零件（轴类） \Rightarrow 表面应力最大，心部很小 \Rightarrow 选用淬透性较差的钢



2. 淬硬性

在正常淬火情况下获得马氏体组织所能达到的**最高硬度**；

影响因素：主要取决于马氏体中的**含碳量**，而与合金元素关系不大；

含碳量越高⇒淬硬性也高

注：淬透性高的钢，其淬硬性不一定高；反之亦然

低碳合金钢的淬透性相当好，但它的淬硬性却不高

高碳工具钢的淬透性较差，但其淬硬性高。

通常以中碳合金钢40Cr和45钢作为例子进行比较，前者含合金元素Cr而淬透性高于后者；但其含碳量低于后者，而使得淬硬性略低。

在相同奥氏体化条件下，同种钢的淬透性是相同的

淬硬层深度 [水淬 > 油淬
小件 > 大件]



§5.5 钢的表面热处理

一、表面热处理

通过对钢件表面的加热、冷却而改变表层力学性能的金属热处理工艺。

- **特点：**不改变零件心部的组织和性能,获得表硬里韧，即**表面具有高的强度、硬度、耐磨性和疲劳极限，心部具有足够的塑性和韧性**的力学性能。
- **应用范围：**广泛用于既要求**表层具有高的耐磨性、抗疲劳强度和较大的冲击载荷**，又要求**整体具有良好的塑性和韧性的零件**，如**曲轴、凸轮轴、传动齿轮等**承受弯曲、扭转、摩擦或冲击载荷的零件。
- **分类：**表面热处理分为**表面淬火**和**化学热处理**两大类



»»» §5.5 钢的表面热处理

1. 表面淬火

通过不同的热源对工件进行快速加热，将钢件表层迅速加热到奥氏体化温度（此时工件心部温度处于临界点以下）后急冷使表层形成马氏体组织而心部组织仍保持不变的热处理工艺

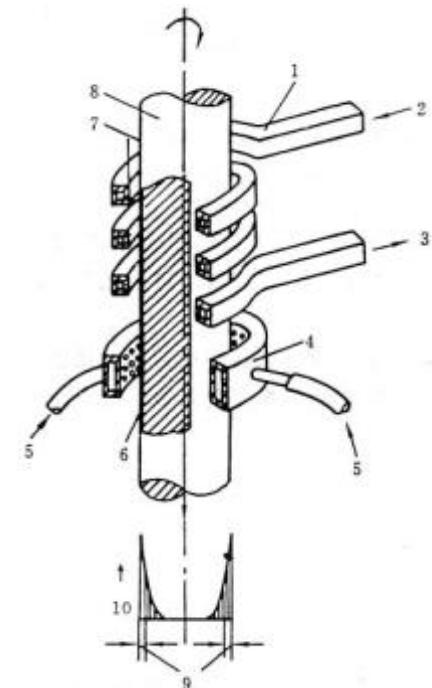
特点：只改变组织性能而不改变钢的化学成分

分类：只加热工件表层，要求所用热源具有较高的能量密度。根据加热方法不同，表面淬火可分为感应加热（高频、中频、工频）表面淬火、火焰加热表面淬火、电接触加热表面淬火、电解液加热表面淬火、激光加热表面淬火、电子束表面淬火等。

工业上应用最多的为**感应加热**和**火焰加热**表面淬火。

表面淬火用钢

适用于中碳钢或中碳低合金钢，如：40、45钢、40Cr、40MnB及60Ti等**低淬透性钢**含碳量过高，尽管淬火后的表面硬度、耐磨性提高，但硬化层的脆性增大，心部的塑性和韧性较低；含碳量过低，则表面的强化效果不显著，影响钢的表面硬度和耐磨性基体组织相当于**中碳钢**的普通灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁等原则上也可进行表面淬火，提高耐磨性，但以球墨铸铁工艺性为最好。



2. 表面淬火后的回火及组织

淬火后的回火：低温回火，回火温度不高于200°C

回火目的：降低内应力，保留表面淬火后的高硬度和高耐磨性。

淬硬层深度：一般可取半径的1/10，特小件取1/5，大件取小于1/10

预备热处理：不重要的零件表面淬火前可用正火处理，较重要的零件要先调质处理以得到回火索氏体组织

回火后的组织：表面组织为回火马氏体，心部组织为回火索氏体

回火后的硬度：表面硬度可取55~58HRC，心部组织可取40~55HRC

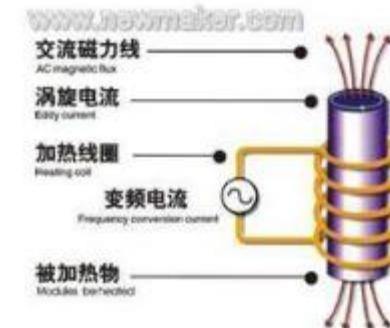
»»» §5.5 钢的表面热处理

3. 表面淬火常用的加热方法

表面淬火采用的快速加热方法有多种，如电感应，火焰，电接触，激光等，目前应用最广的是电感应加热法。

(1) 感应加热表面淬火

感应加热淬火是采用电磁感应方法使零件表面迅速加热，然后迅速喷水冷却的一种热处理操作方法。



感应加热淬火的特点

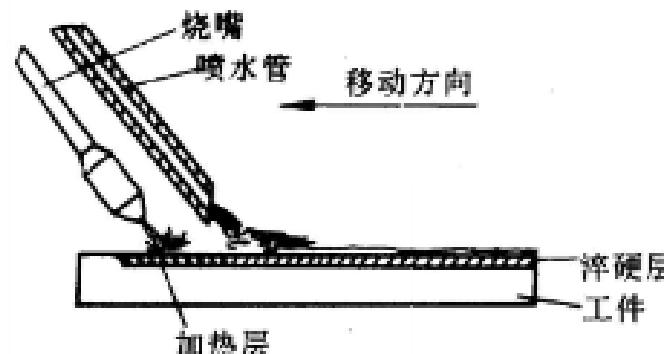
1. 加热速度快其加热速度极快，通常只有几秒钟，工件不易脱碳，变形小；
2. 获得的马氏体组织极细，硬度高、脆性小、疲劳强度好；
3. 加热层深度易控制，可实现自动化批量生产；
4. 不足之处是设备较贵，形状复杂零件的处理比较困难。

感应加热表面淬火分类

分类	频 率	淬硬层深度	适用范围
高频淬火	200~300kHz	0.5~2.0	中小零件
中频淬火	2500~8000Hz	2.0~10	直径较大的轴、齿轮和其他件
工频淬火	50Hz	10~15	大型零件如轧辊等

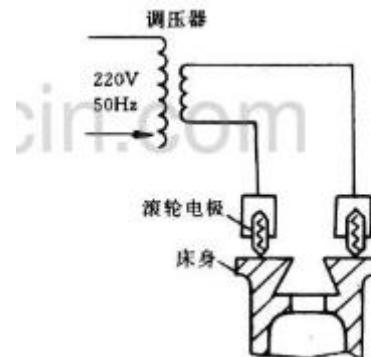
(2) 火焰加热表面淬火

淬硬层一般为2~6mm，过深的淬硬层会使工件表面组织过热，易产生淬火裂纹。火焰淬火方法简便，操作简单，不需特殊设备。适于单件或小批量生产的大型零件和需要局部淬火的工具或零件。



(3) 电接触加热表面淬火

采用低电压、大电流，通过压紧在工件表面的滚轮与工件形成回路，靠接触电阻热实现快速加热，滚轮移去后即进行自激冷淬火。



(4) 激光加热表面淬火

激光淬火的功率密度高，冷却速度快，不需要水或油等冷却介质，是清洁、快速的淬火工艺。与其他淬火工艺相比，激光淬火淬硬层均匀，硬度高（一般比感应淬火高1-3HRC），工件变形小，加热层深度和加热轨迹容易控制，易于实现自动化，而且激光淬火前后工件的变形几乎可以忽略，因此特别适合高精度要求的零件表面处理。



二、化学热处理

将钢件置于一定的化学介质中加热、保温，使介质中一种或几种元素的原子渗入工件表层，以改变钢件表层化学成分和组织且又能有更高强韧性的热处理工艺。

1. 特点：

- (1) 既改变组织性能又改变化学成分；
- (2) 通过改变表面成分，使工件表层组织与性能皆发生变化；
- (3) 有效地提高钢件表面硬度、耐磨性及抗疲劳性能，其工序地位均属于最终热处理。

2. 化学热处理的基本过程

- (1) 化学渗剂分解为活性原子的分解过程；
- (2) 活性原子被钢件表面吸收和溶解；
- (3) 活性原子不断向内部扩散，形成一定的扩散层。在一定的保温温度下，通过控制保温时间来控制扩散层的深度。

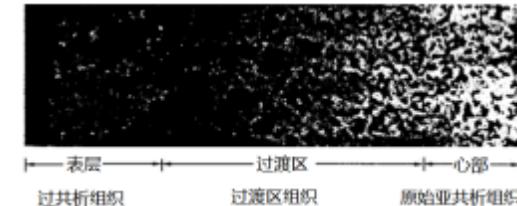
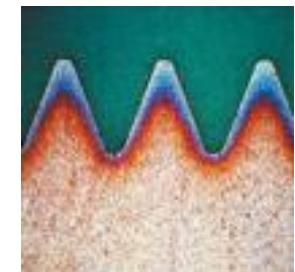
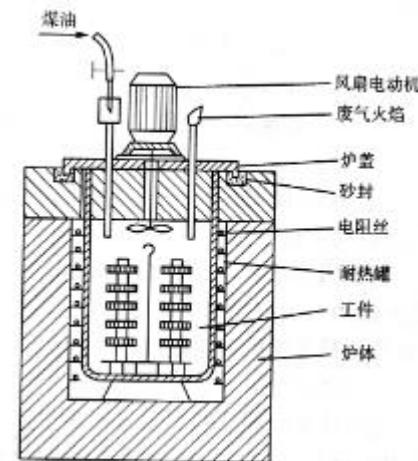
注：上述三个过程同时发生并相互制约。加热温度越高，整个过程越快，渗层越深。但过高会使奥氏体晶粒粗化，使钢的性能变差。

3. 化学热处理的种类

化学热处理的方法繁多，多以渗入元素或形成的化合物来命名。目前生产上应用最广泛的化学热处理工艺是**渗碳、渗氮、碳氮共渗等**

(1) 渗碳：将低碳钢放入高碳介质中，在900-950°C加热保温，使**活性碳原子渗入钢的表面**以获得**高碳表层**的化学热处理工艺。

- **渗碳的目的：**提高工件**表面的硬度、耐磨性和疲劳强度**，同时保持心部的良好韧性
- **渗碳用钢：**渗碳钢含**碳量**一般为**0.1%~0.3%**，常用的渗碳钢有20、20Cr、20CrMnTi、12CrNi3、20MnVB等
- **渗碳方法：**根据所用渗碳介质的工作状态分为**气体渗碳、液体渗碳和固体渗碳**。常用的是**气体渗碳法**
- **渗碳层的成分、组织和厚度：**低碳钢工件渗碳后，其**表面含碳量可达过共析钢的成分**，由表向里碳浓度逐渐降低，直至钢的原始含碳量。



»»» §5.5 钢的表面热处理

一般规定，从表面到过渡层一半处的厚度为渗碳层的厚度

渗碳层表面的含碳量以0.85%-1.05%为最好

- ◆ 含碳量过低，表面耐磨性差，疲劳抗力小；
- ◆ 含碳量过高，渗层变脆，易剥落

渗碳层的厚度应根据工件的工作条件及具体尺寸来确定

- ✓ 渗层太薄，引起表层疲劳剥落；
- ✓ 渗层太厚，耐冲击载荷的能力降低。

渗碳层厚度一般由零件尺寸及工作条件而定，对不同零件，可参考以下值：

- 轴类件： $(0.1-0.2)R$ (R 为轴半径)；
- 齿轮： $(0.1-0.3)m$ (m 为模数)；
- 薄片件： $(0.2-0.3)t$ (t 为工件厚度)

注：在图纸上应注明不要求渗碳的部位以防渗碳淬硬，或多留加工余量，最后再去除多余的渗层。

»»» §5.5 钢的表面热处理

钢件必须经过**渗碳、淬火加低温回火**的最终热处理才能有效发挥渗碳层的强化作用。低碳钢渗碳、淬火加低温回火后，表层组织为高碳回火马氏体+粒状碳化物+少量残余奥氏体，硬度为58-62HRC，心部组织则取决于渗碳件的尺寸和淬透性，一般低碳钢为珠光体+铁素体。

一般渗碳件的加工工艺路线



(2) 氮化

氮化是指在A1以下温度，一般为520-600°C使活性氮原子渗入工件表面，以形成高氮硬化层的化学热处理工艺

气体氮化：应用最广的是气体氮化法，气体氮化是利用氨气加热时分解出的活性氮原子被钢吸收后在其表面形成氮化层，同时向心部扩散。

分解反应： $2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + 2[\text{N}]$

氮化用钢：通常是含Al、Cr、Mo、Ti、V等合金元素的钢，最常用的氮化钢是38CrMoAl

氮化工艺的特点

- 1) 氮化件表面硬度高(1000-2000HV)，耐磨性好，还具有高的热硬性；
- 2) 氮化件疲劳强度高；氮化后表层体积增大，产生压应力；
- 3) 氮化件变形小；氮化温度低，而且氮化后不再进行热处理
- 4) 氮化件耐蚀性好；氮化后表层形成一层致密的化学稳定性高的 ϵ 相
- 5) 氮化的缺点是工艺复杂，成本高，氮化层薄。

»»» §5.5 钢的表面热处理

在渗氮零件的整个制造过程中，渗氮往往是最后一道工序，至多再进行精磨或研磨。

渗氮零件的工艺流程一般为：

锻造→正火（退火）→粗加工→调质→精加工→去应力→精磨→**渗氮**→精磨→装配。

氮化工艺的应用

主要应用于耐磨性及精度均要求很高的零件，或要求耐热、耐磨及耐蚀的零件

(3) 氮化

使工件表面同时渗入碳和氮的化学热处理工艺，也称做**碳氮共渗**

氮化用钢：主要是渗碳钢，但也可用中碳钢和中碳合金钢

优点 1) 氮化件淬火后得到含氮马氏体，硬度较高，耐磨性比渗碳更好

2) 氮化层比渗碳层有更高的压应力，耐疲劳性能和耐蚀性更为优越

3) 处理温度低，速度快，生产效率高，变形小

氮化的应用

目前只用于形状较复杂、要求变形小，受力不特别大的小型耐磨件。例如缝纫机、纺织机零件及轻载齿轮等。

表面热处理与化学热处理的比较

处理方法	表面淬火	渗碳	渗氮	氰化
处理过程	表面加热淬火+低温回火	渗碳+淬火+低温回火	调质+氮化	氰化+淬火+低温回火
生产周期	几秒-几分钟	3-9h	30-50h	1-2h
硬化深度 (mm)	0.5-7	0.5-2	0.3-0.5	0.2-0.5
最高硬度	55-61	58-63	65-70	58-63
耐磨性	较好	良好	最好	良好
疲劳强度	良好	较好	最好	良好
热处理后变形	小	较大	最小	较小



感谢同学们的聆听！



河北工业大学
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

勤慎公忠