第11章 钢的特种热处理

第1节 表面热处理

第2节 真空热处理

第3节 形变热处理

第4节 钢的时效

第1节 表面热处理

钢的表面热处理：是使零件表面获得高的硬度和耐磨性，而心部仍然保持原来的优良的韧性和塑性的一类热处理方法

与化学热处理不同的是，它不改变零件表面的化学成分，而是依靠零件表层迅速加热到钢的临界点以上，并随之淬冷来达到强化表面的目的

表面热处理
- 感应加热表面热处理
- 火焰加热表面热处理
- 电接触表面热处理
- 激光热处理等

感应加热淬火6个特点

1 加热温度高，升温快

2 工件表层易得到细小的隐晶*M*

3 工件表层存在残余压应力

感应加热速度很快，因而过热度大

硬度比普通淬火提高2~3HRC，且脆性较低

疲劳强度较高

4 工件表面质量好

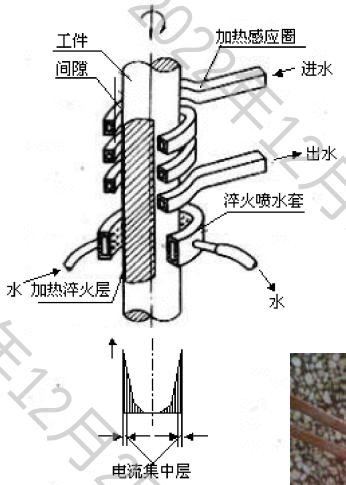
5 生产效率高，淬硬深易控制

6 易实现局部加热和连续加热

加热速度快，没有保温时间，工件不易氧化和脱碳，且由于内部未被加热，淬火变形小

便于实现机械化和自动化

1 感应加热的基本原理



感应线圈通以交流电时，在内部和周围产生频率相同的交变磁场

置于感应磁场中的工件内部将产生感应电流(电磁感应)，并由于电阻的作用被加热

2022年12月25日版本

感应电流在工件表层密度最大，心部几乎为零，这种现象称为**集肤效应**(表面效应)

电流透入工件表层的**深度**主要与**电流频率**有关：

$$\delta = 50300\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

δ 为感应电流渗入**深度** (mm)
ρ 为被加热零件电阻率(Ω·m)
μ 为被加热零件的相对导磁率
f 为电流频率(Hz)

感应加热表面淬火的分类

	电流频率	淬硬层深度	适用范围
高频	200~300kHz 200~250kHz	0.5~2.0mm	中小模数的齿轮及中小尺寸的轴类零件等
中频	2500~800Hz 8～10kHz 500～8000Hz	2~10mm	较大尺寸的轴和大中模数的齿轮等
工频	50Hz	10~15mm	较大直径零件的穿透加热，大直径零件如轧辊、火车轮等的表面淬火

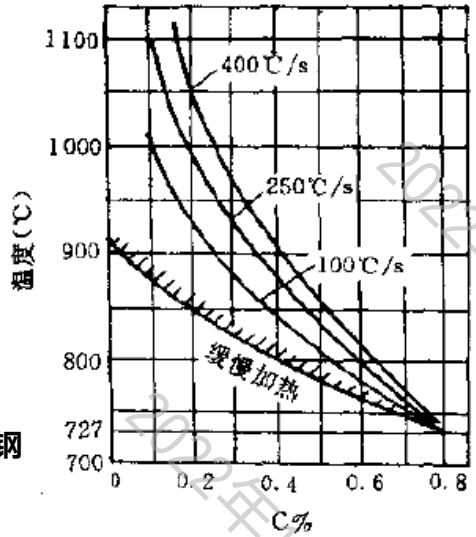
2 高频感应加热表面淬火后的组织和性能

1) 高频感应加热(快速加热)时钢的相变特点

(a) 临界温度 (A_{c1}和A_{c3})升高

转变在一个**较宽**的温度范围内进行

加热速度**越快**，**临界温度升高越**厉害

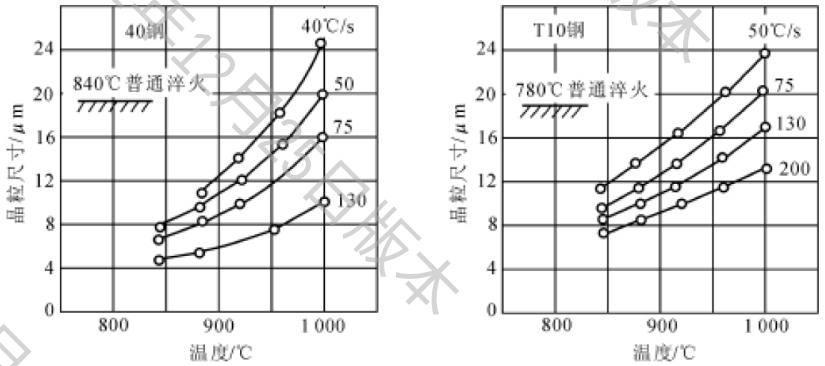


加热速度对不同碳质量分数的钢临界温度(A_{c3}) 的影响

(b) 奥氏体晶粒细小

过热度很大，形核率和长大速率都很大

加热时间短，晶粒来不及长大



在不同加热速度下加热温度对奥氏体晶粒大小的影响

淬火后 得到隐针马氏体组织
改善钢的机械性能

2022年12月25日版本

(c) 奥氏体成分不均匀，有时组织中还残存第二相

快速加热→扩散不充分→奥氏体成分(主要指碳量)不易均匀化

后果：淬火后马氏体中的碳量也是 不均匀

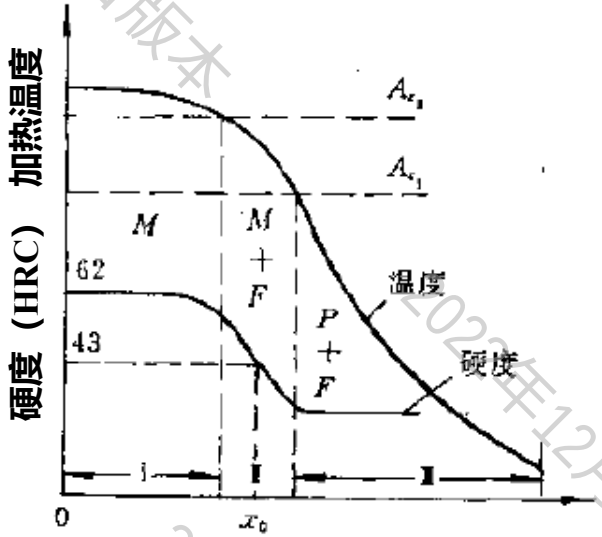
亚共析钢，在淬硬层内也可能有铁素体存在

高频感应淬火常见的缺陷之一

解决之道 在高频感应淬火之前预备热处理(获得均匀的原始组织)

- 调质处理 (原始组织)回火索氏体，这种组织不仅对高频感应淬火最为合适，而且也可使心部获得良好的综合机械性能
- 正火 对于不太重要的零件也可采用正火作为预备热处理

2) 高频感应淬火后的组织

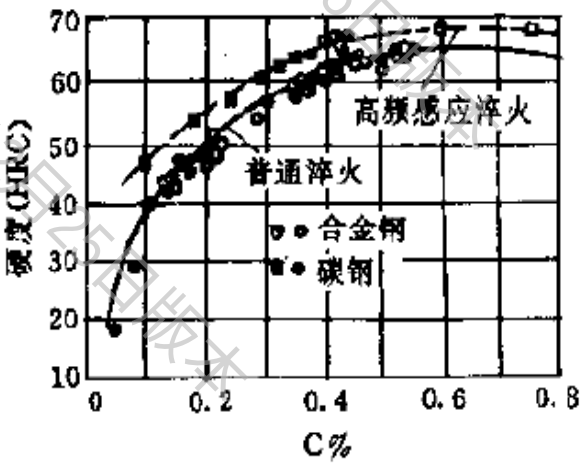


45 钢高频感应淬火后的组织和硬度(x_0为淬硬层深度)

3) 高频感应淬火后零件的机械性能

(a) 硬度

高频淬火后，表面硬度比普通淬火提高2~3HRC



原因

表层存在较大的压应力

*M*晶粒细小

较少的残*A*

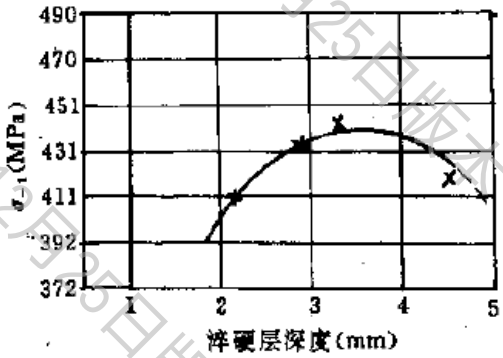
钢的碳质量分数与淬火后表面硬度的关系

(b) 疲劳强度

高频淬火可有效提高零件的疲劳强度

小零件可提高2~3倍，大零件可提高20~30%

原因：淬硬层中马氏体的比容比原始组织大，在零件表层形成很大的残余压应力所致



淬硬层过浅，张力区接近表面

淬硬层过深，使表面的压应力下降

二者都不利于疲劳强度的提高

25 钢淬硬层深度与疲劳强度σ_{-1} 的关系

2022年12月25日版本

(c) 其它机械性能

高频感应淬火后，零件的静强度如**抗弯曲强度**和**扭转强度**皆有所**提高**，且随淬硬层深度的增大而增大；塑性和韧性随淬硬层深度的增大而减少

综上所述，高频感应淬火后可以使零件获得许多优良的性能

4) 高频感应淬火后的回火

回火的目的：是减少内应力，并达到所要求的机械性能

回火的工艺：与普通淬火的回火一样

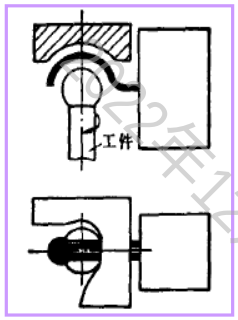
回火的方法：

炉中加热回火、

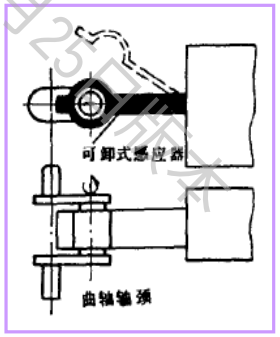
感应加热回火、

利用心部余热进行的自回火等

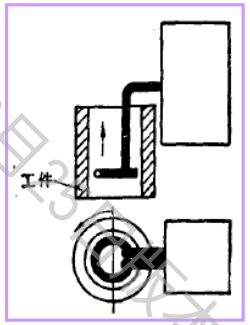
感应加热淬火的关键技术之一是**感应器的设计**在实际生产中，处理的零件是千变万化的，因此，必须有相应的感应器与之配套



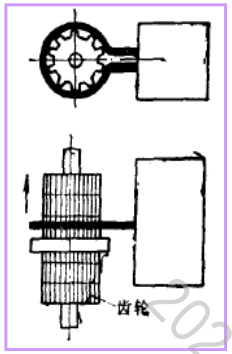
万向节球



曲轴



内孔



齿轮

2022年12月25日版本

4 感应加热适用的材料

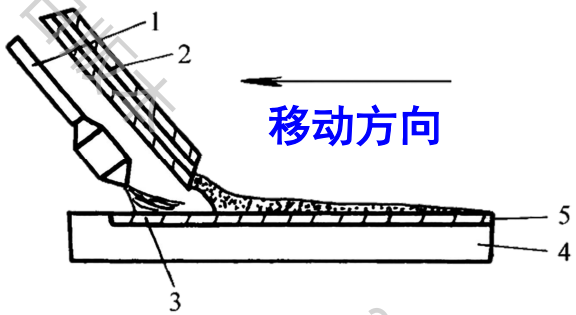
表面淬火一般适用于含碳0.4~0.5%的中碳钢和中碳低合金钢，如45、40Cr、40MnB等

这些钢经预先热处理后再表面淬火，心部有较高的综合机械性能，表面也有较高的硬度和耐磨性

另外，球墨铸铁也是适合于表面淬火的材料

5 火焰加热表面淬火　火焰淬火

利用高温火焰迅速加热工件表层使其变为奥氏体，随后立即冷却，使表面淬火硬化，而心部组织基本不变，可得到0.8 ~ 6mm淬硬层。



淬火时工件运动方式不同 分为

- 固定加热淬火法
- 移动加热淬火法
- 旋转加热淬火法
- 旋转移动加热淬火法

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

高温火焰由氧化气和燃烧气混合后高速燃烧而成

热处理中的火焰淬火工艺

用乙炔-氧火焰 (最高温度达3100°C) 或煤气-氧火焰 (最高温度达2000°C)

将工件表面快速加热，随后喷液 (水或有机冷却液) 冷却的一种表面淬火方法

火焰淬火的优点是：

- 设备简单，使用方便， 成本低廉 适合单件生产
- 不受工件尺寸形状和淬火部位限制，可用于特大件的表面淬火
- 淬火表面清洁，无氧化脱 碳现象，淬火变形很小。

缺点

- 加热温度不易控制， 表面易过热
- 淬火后表面硬度不均匀

2022年12月25日版本

6 激光加热表面淬火

用高功率密度的激光束照射到工件表面，表面层快速加热到A区或T_m，靠工件自身的热传导迅速自冷 获得一定深度的淬硬层或冷凝层

激光束斑点直径20~50mm^2，工件与激光束作相对运动使光束能照射到整个工件表面

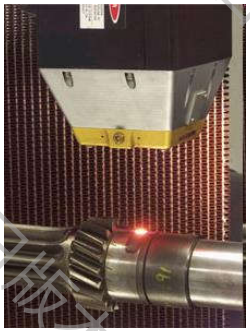
激光加热表面淬火是利用激光对钢铁表面进行加热淬火的表面强化工艺。

常用的激光器：CO_2激光器功率大 (可达几十kW)，效率高(理论值40%，一般可达10～20%)，能长时间的连续工作，所以多用在金属热处理中。

从20世纪70年代初期 开始已逐渐应用于工业生产中，例如：

(1) 1040 (40钢)钢制的轴，应用矩形 (10×17.8平方毫米) 激光光斑，扫描速度305厘米/分，可获得硬度为HRC57，厚0.3毫米的表面硬化层。

(2) 414OH (40CrMnMo) 钢制轴的轴颈激光表面淬火。轴颈Φ19毫米，使用激光的功率为10千瓦，扫描速度为1.27厘米/秒，处理后淬硬层深0.25毫米、硬度HRC55。



特 点

- **质量高**

  激光加热时，因其过程极短，无需考虑大气介质的影响

  表层组织超细化

  硬度高（比常规淬火高HRC6~10）

  脆性极小

  工件变形小
  工艺过程短，加热区域小，因而工件的变形也小

2022年12月25日版本

- 自冷淬火，不需回火

加热层很薄，是自激冷淬火，无需特殊的冷却设备

- 易于实现自动化

通过调节光斑尺寸，扫描速度和激光功率等参数，控制工件表面温度和透热层深度，以获得合格的产品

- 设备昂贵，成本高

第2节 真空热处理

1 真空的基本知识

真空就是指压力比正常压力小(即负压)的任何气态空间

将热处理的加热和冷却过程置于真空中进行，称为真空热处理

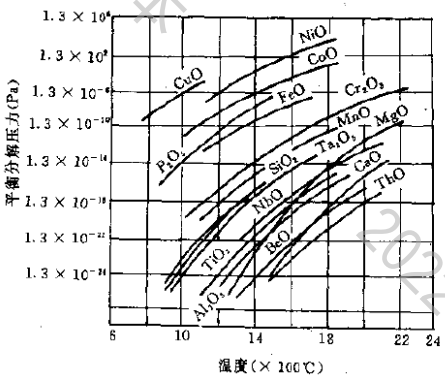
2 真空热处理的特异效果和伴生现象

1) 表面保护作用

可有效防止氧化和脱碳

2) 表面净化作用

当真空中的氧分压小于氧化物的分解压力时，不但可以防止氧化，还可以使金属表面的氧化物发生分解去除而获得光亮的表面



各种氧化物的平衡分解压力

实际真空处理时，尽管炉内氧分压远远高于分解压力，但仍然可以获得**光亮的表面**

3) 脱脂作用

当工件表面只存在轻度油污时，可以允许真空热处理前免于进行专门的脱脂处理

4) 脱气作用

在真空中，随气体分压的降低，气体在金属中的溶解度将减小，即真空度越高，脱气效果越好

5) 真空加热油淬引起钢件渗碳

在高温真空加热时，对钢件表面的净化作用使得它处于活性状态，当赤热的工件与淬火油接触后，在油蒸气的包围下便发生渗碳过程

2022年12月25日版本

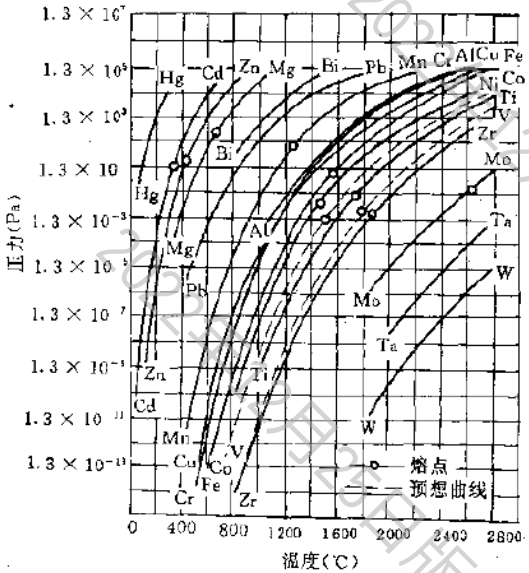
6) 元素的蒸发现象

真空加热，钢或合金中某些蒸气压高的合金元素从表面蒸发而脱去

影响性能并引起工件之间的粘连

对于钢，真空加热时最易蒸发的元素是Cr和Mn

实践证明，在漏气率小于133.3×10^{-3} L·Pa/s、真空度为1.333~13.33Pa的炉内加热，一般钢件都不会发生明显的氧化、脱碳和合金元素蒸发



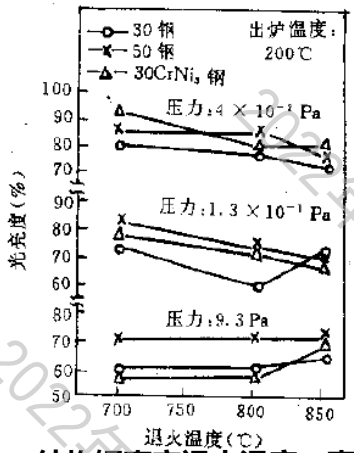
金属的蒸气压力与温度的关系

3 真空热处理的应用

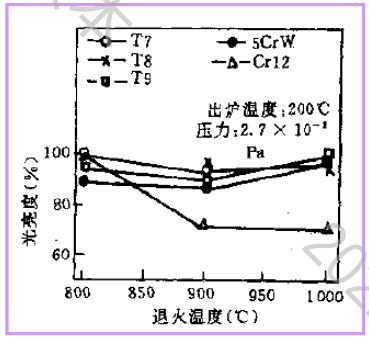
1) 钢的真空退火

其主要：处理后工件表面达到一定的光亮度

光亮度与真空度、退火温度和出炉温度有关



结构钢真空退火温度、真空与光亮度的关系



真空度越高，处理后工件的光亮度越高

出炉温度越高，光亮度越低一般应控制在200℃以下

2) 钢的真空淬火及回火

真空淬火最常用的冷却介质是真空淬火油

(a) 真空淬火油

真空淬火油应具备的特性：

- 蒸发量要小，不易引起炉内污染
- 蒸气压要低，不影响真空效果
- 真空冷却性能好，并在较大温度范围内不受影响
- 光亮性和热稳定性要好

(b) 真空淬火的光亮度和变形

真空度高→光亮度好

→降低淬火油的冷却性能

为了兼顾光亮度和淬火油的冷却性能，通常采用在低气压下加热，在临淬火前通入高纯度的惰性气体或氮气以提高压力，随后进行淬火

真空淬火的变形一般要比普通淬火小，这与真空加热速度缓慢所引起的热应力小有关

(c) 真空回火

由于在600℃以下加热缓慢，真空回火最好先进行排气和升温，而后立即通入惰性气体，以进行强制对流传热，最后再冷却

2022年12月25日版本

3) 钢的真空渗碳

(a) 真空渗碳的特点

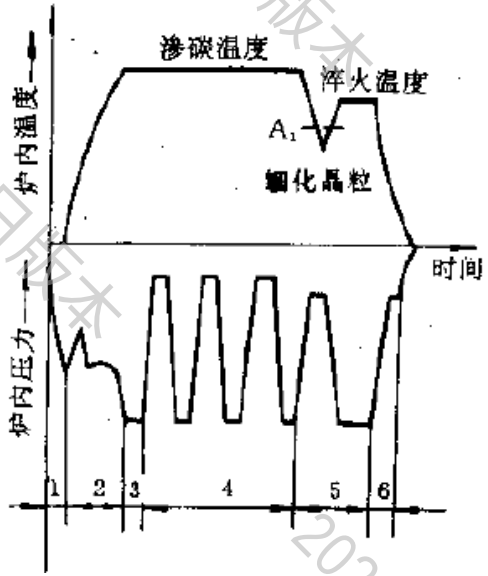
渗碳时间显著缩短： 由于渗碳温度由普通渗碳时的920~930℃提高到1030~1050℃，加之真空加热时的表面净化作用使表面处于活化状态，故大大加速了渗碳过程；

渗碳质量好： 渗碳层均匀，渗层中碳浓度梯度平缓，表面光洁，渗层深度易于精确控制，无反常组织和晶间氧化产生；

作业条件好： 基本上无污染，也无热辐射

缺点：设备投资大、成本高、周期式生产的产量低

(b) 真空渗碳的工艺



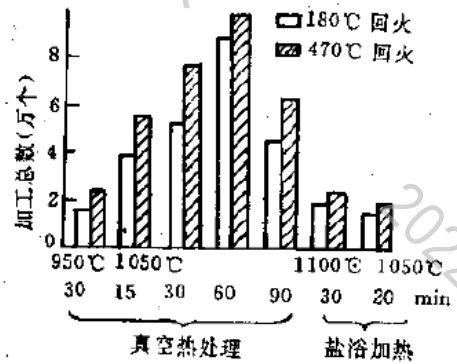
真空渗碳的工艺曲线
1抽真空; 2升温脱气; 3均热; 4渗碳及扩散; 5淬火加热(细化晶粒); 6淬火冷却

渗碳完毕后，通入氮气冷却到550~660℃，然后移入淬火室加热并淬火

4) 真空热处理后钢的性能

由于真空热处理具有防止氧化、脱碳，并可脱气等良好作用，因而对钢件的机械性能带来有益的影响

主要表现在使强度有所提高，特别是使疲劳寿命和耐磨性等与钢件表面状态有关的性能得到提高



Cr12MoV 钢冷冲模具的寿命试验结果

5) 真空热处理时应注意的问题

- 由于真空加热依靠辐射传热，考虑到辐射传热的直射特点，工件在炉内的放置应尽量避免有“背阴”部分，以防止加热不均；
- 在真空辐射加热升温过程中，工件的温度总是滞后于炉温，故应视工件的大小适当增加保温时间；
- 注意防止真空加热时合金元素的蒸发和真空油淬时工件表层的渗碳

2022年12月25日版本

第3节 形变热处理

形变热处理：是将压力加工与热处理相结合，对金属材料进行形变强化和相变强化的一种综合强化工艺

形变热处理不仅可以获得由单一强化方法难以达到的良好的强韧化效果，而且还可以大大简化工艺流程，从而带来较大的经济效益

Ausforming also known as Low and High temperature thermomechanical treatments is a method used to increase the hardness and toughness of an alloy by simultaneously tempering, rapid cooling, deforming and quenching to change its shape and refine the microstructure.

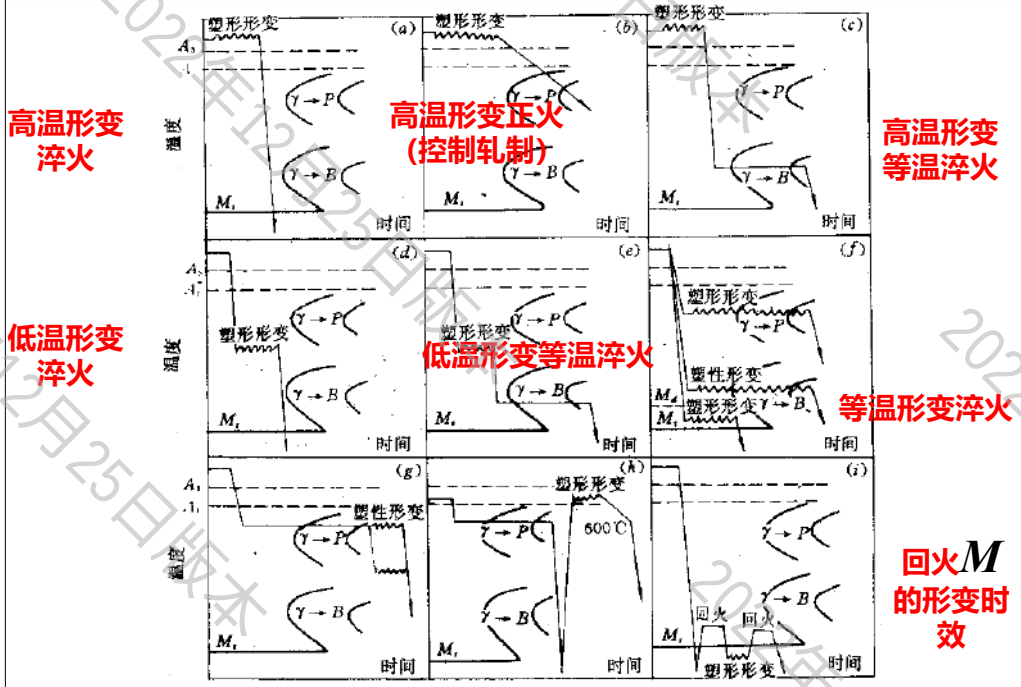
This treatment is an important part in the processing of steel.

1 形变热处理的分类与应用

按顺序 (相变前、中、后形变)

按温度 (高温、低温形变)

按相变 (珠光体、贝氏体、马氏体和时效等)



形变热处理分类示意图

2 形变热处理强韧化的机理

钢经过形变热处理后，能够获得良好的强、韧性，是由其显微组织和亚结构的特点所决定的

形变热处理强韧化的机理大致可以归纳为：显微组织细化、位错密度和亚结构的变化以及碳化物的弥散强化作用

1) 显微组织细化

对于获得*M*组织的形变热处理：不论是高温形变淬火或低温形变淬火，均能使*M*显著细化

形变为*M*相变提供更多的形核率并阻止*M*片的长大

低温形变的细化效果要好于高温形变

2022年12月25日版本

对于获得*P*组织的形变热处理：形变等温处理或等温形变处理，均能得到极为细密的*P*，特别是后者，使*P*中碳化物球化，并将*F*基体分割为许多等轴的亚晶粒

对于获得*B*组织的形变热处理：形变为*B*相变提供更多的形核率并阻止*F*相的共格长大，最终使*B*组织显著细化

对于获得*M*、*P*、*B*组织的形变热处理，显微组织细化对强度的影响顺序如下：

*P*细化 > *B*细化 > *M*细化

2) 位错密度和亚结构的变化

对获得*M*组织的形变热处理：形变时在*A*中产生的大量位错被随后形成的*M*继承，因而使形变热处理*M*的位错密度比普通淬火*M*要高得多；形变淬火后的*M*中还存在比普通淬火*M*更多、更细微、由高密度位错构成的胞状亚结构它们无疑对强度贡献显著

对获得*P*组织的形变热处理：由于*P*转变的扩散性，位错对它基本上不存在任何强化作用

对于获得*B*组织的形变热处理：位错密度对它的影响介于*M*和*P*之间

3) 碳化物的弥散强化作用

形变时产生的高密度位错为碳化物的形核提供了大量的有利部位，又加速了碳化物形成元素的置换扩散，同时在压力下还使碳在*A*中的溶解度显著下降，而碳化物在位错上的沉淀会对位错产生强烈的钉扎作用，导致在进一步形变时位错的迅速增殖，从而又为碳化物提供更多的沉淀部位，如此往复不已，最后便在*A*中析出大量细小的碳化物

由于碳化物的析出是在*A*形变过程中发生的，与*A*转变为何种组织无关，因而碳化物对形变热处理得到的*M*、*P*、*B*都具有相同的弥散强化效果

3 影响形变热处理强韧化效果的工艺因素

形变热处理的强韧化效果与采用何种形变热处理方法密切相关

奥氏体在高温下形变时将因位错密度的增加而引起加工硬化，同时又因为形变过程中的动态回复和动态多边化而引起软化这两种强化和软化的作用决定着形变热处理的最终的强韧化效果

影响形变热处理强韧化效果的因素主要有：

形变温度、形变量、形变后停留的时间等

2022年12月25日版本

1) 形变温度

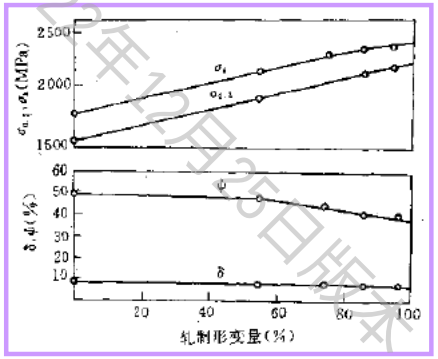
一般地，当形变量一定时，形变温度愈低，强化效果愈好，但塑性和韧性却有所下降

这是由于形变温度越高，越有利于回复、多边化甚至再结晶过程的发生和进行

2) 形变量

低温形变淬火时，形变量越大，强化效果越显著，但塑性有所下降

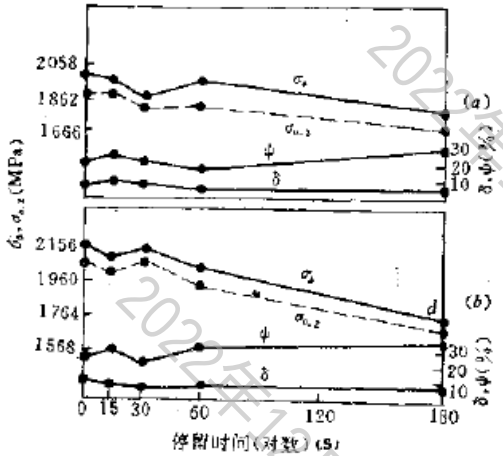
为获得满意的强化效果，通常要求大于60～70%



3) 形变后淬火前的停留时间

低温形变淬火时，随着在略高于形变温度下停留时间延长，塑性将不断增高而强度略为下降

高温形变淬火时，情况比较复杂，性能与停留时间不是单调变化的停留时间的选取非常重要



停留时间对高温形变淬火60Si2V 钢性能的影响(400°C回火1h)
(a)形变量20% ; (b) 形变量50%

第4节 钢的时效

现象

(1) 低碳钢板材经热加工或冷形变后在室温下放置一定时间, 其机械性能会发生变化

(2) 马氏体时效钢淬火后, 加热 (~480°C) 保温, 在室温 机械性能会发生变化

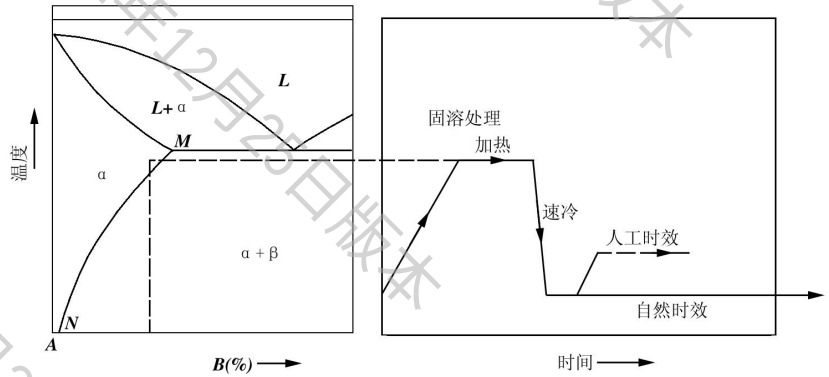
(3) 固溶处理的铝合金在室温放置一段时间，机械性能会发生变化

性能变化规律： 即强度、硬度升高,
而塑性、韧性下降

时效：金属材料的性能随时间而改变的现象

1 时效过程的一般原理

固溶处理 钢(或合金) 经加热后形成单相固溶体快冷 (也称淬火)



固溶处理与时效处理的工艺过程(示意图)

固溶处理后→固溶体中的溶质元素将处于过饱和状态

这是时效处理的前提条件 之一

2022年12月25日版本

从热力学角度分析

固溶处理后→溶质元素处于过饱和状态→非平衡状态

自然时效 人工时效

室温或某高温下 (有些)溶质原子仍具有 扩散能力

→扩散多少就是靠时间熬，快慢靠扩散系数

→随时间的延续，过饱和固溶体中的溶质元素将发生脱溶或析出→成分、结构/组织发生变化

→使钢或者合金的性能发生变化

时效：金属材料的性能随时间而改变的现象

时效发生的必备条件

(1) 溶质元素在固溶体中应具有一定的固溶度，并随温度的下降而减少

(2) 经高温固溶处理后，溶质元素处于过饱和状态

(3) 在较低温度下溶质原子仍具有一定的扩散能力

时效过程的本质 由非平衡态向平衡态转化的过程

经历几个过渡阶段

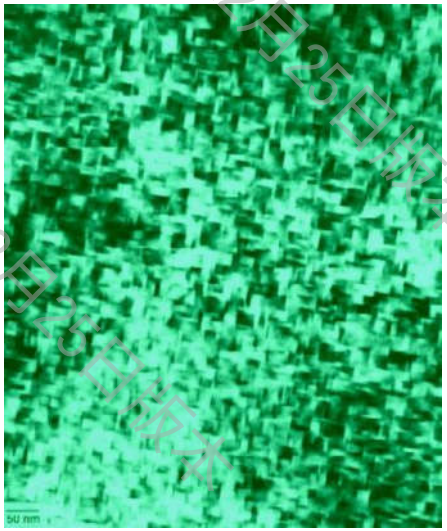
首先在过饱和固溶体中形成介稳的偏聚状态，如溶质原子偏聚区(*G-P*区)、柯氏气团

然后形成介稳的过渡相；最后形成稳定的平衡相

G-P区 Guinier-Preston zone discovered in 1938

André Guinier (法)+ George Dawson Preston (英)

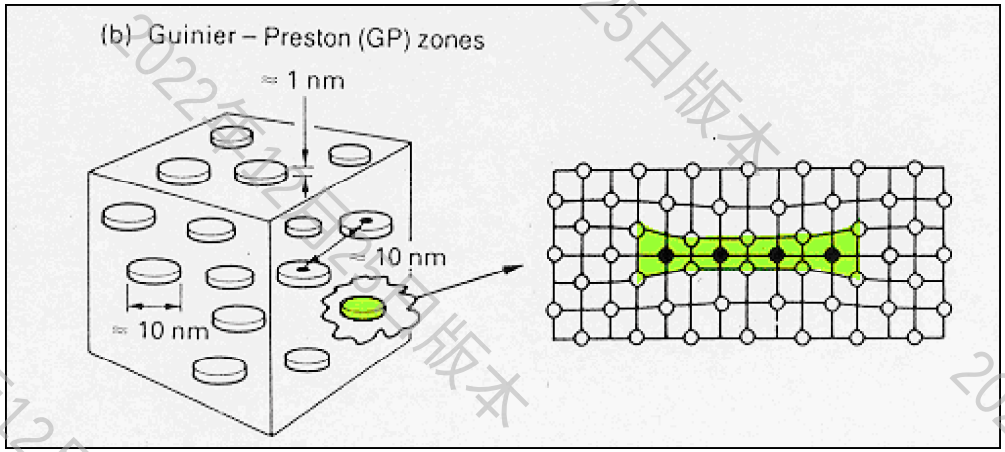
6000 and 7000 series alloys铝合金经常会用到时效强化



The TEM photograph shows an array of Guinier Preston zones (GP Zones) in an aluminum-copper alloy.

The scale at the bottom of the picture indicates that these copper precipitates are about 40 nm in diameter.

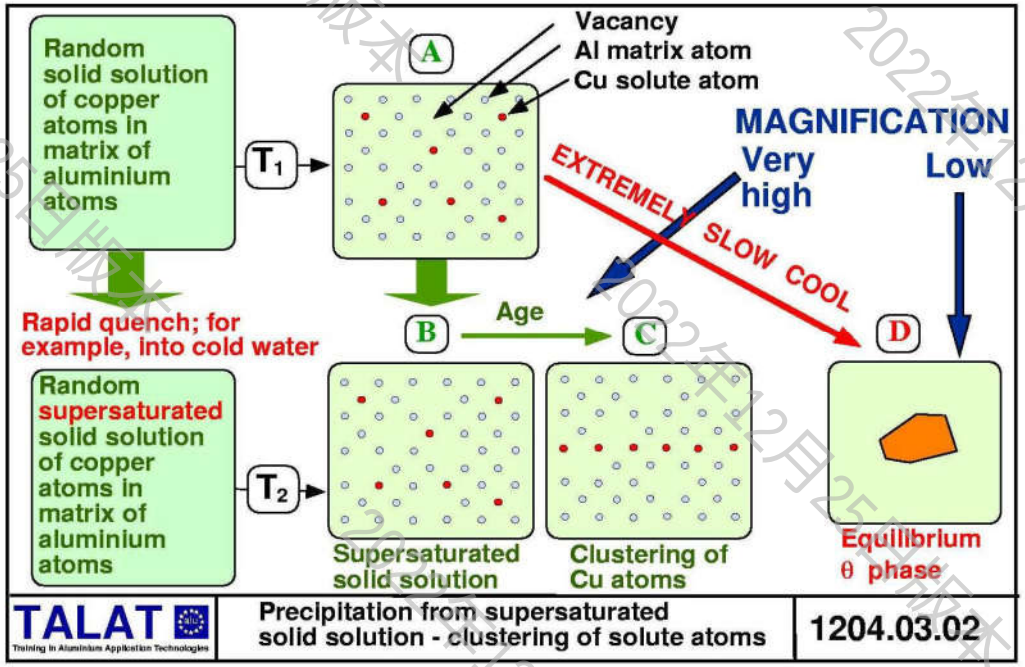
https://www.princeton.edu/~maelabs/mae324/10/10mae_40a.htm



Disc shaped Guinier-Preston zones that are coherent with the aluminum matrix nucleate and grow (b) by diffusion controlled processes.

The large lattice strain associated with these zones will restrict dislocation motion in the alloy lattice.

2022年12月25日版本



http://core.materials.ac.uk/repository/eaa/talat/1204.pdf

在整个时效过程中，其析出的顺序一般总是：

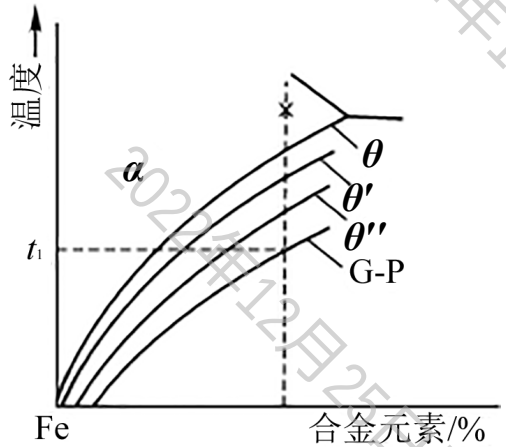
G-P区→介稳过渡相(θ''、θ') →平衡相(θ)

且时效温度越高，时效过程的阶段数越少

G-P区、过渡相和平衡相是不同阶段的产物

有各自的固溶度曲线

根据析出物的介稳程度，将其固溶度曲线依次排列在亚平衡相图上，与平衡相图叠加就得到图



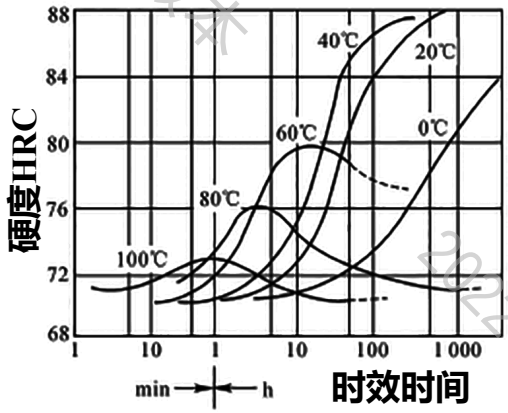
各种析出物的固溶度曲线

2 时效的影响因素

1) 时效温度和时效时间

时效温度是影响时效过程的重要因素，它对时效机理、动力学、显微组织、亚结构和性能等产生显著影响

时效时间也对时效过程产生影响，但只占次要地位



低碳钢(0.06%°C) 的时效硬化曲线

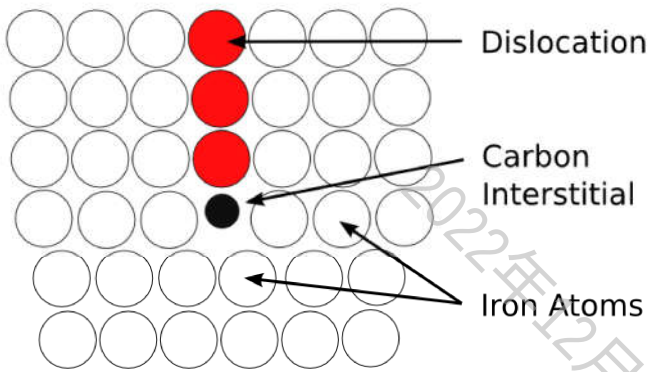
淬火钢中所含碳、氮等间隙原子在室温下都具有一定的扩散能力，所以它们极容易在位错等缺陷附近偏聚，形成柯氏气团

如果时效温度较高，还将以碳化物、氮化物的形式从固溶体中析出

上述过程均引起较大的强化效果

2022年12月25日版本

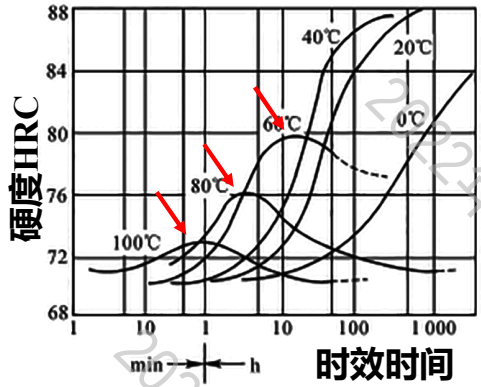
柯氏气团



A carbon atom below a dislocation in iron, forming a Cottrell atmosphere

https://en.wikipedia.org/wiki/Cottrell_atmosphere

随着时效温度的升高或时间的延续，时效过程将继续发展，使碳化物、氮化物相发生聚集长大，从而导致强化效果弱化



低碳钢(0.06%°C) 的时效硬化曲线

一般钢材在时效后，在强度、硬度提高的同时，总是引起塑性、韧性的下降，这是时效的不利方面

2) 碳(含碳量的影响)

在*F*中，固溶的C量越多，时效强化的效果越显著

- 在C含量为0.025%时可获得最大的时效强化效果
- 以后随着C含量的增大，时效强化效果反而下降
- 当C含量达到0.6%时 基本上不产生时效现象

因为C含量增高，*F*量减少，而时效只在*F*中发生，因而时效效果越来越小

3) 氮及合金元素

N的作用与C类似，当钢中含Al时，将与N结合生成AlN，轧后冷速快时将引起时效强化；

当冷速较慢或者重新加热退火，则AlN将充分析出，从而使*F*中N的过饱和度降低而大大降低对时效的敏感性

除铝外，当钢中含有碳化物、氮化物形成元素时，如轧后缓冷，将同样由于碳化物、氮化物的析出而降低对时效的敏感性

合金元素 还影响碳、氮在铁素体中的溶解度和扩散速度，从而影响碳和氮的时效效果

2022年12月25日版本

4) 固溶处理后、时效前的冷变形

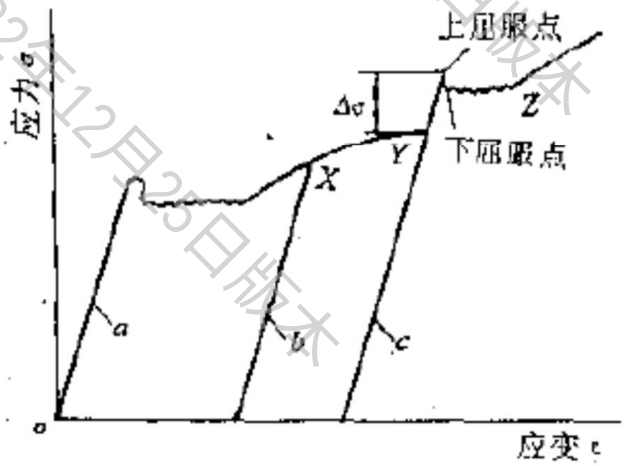
冷变形会使钢中的位错密度增大，更易于形成柯氏气团，同时形变还能加速扩散，因而冷变形不仅加速时效过程，还可使时效后的硬度升高

3 低碳钢的形变时效

低碳钢从高温状态缓冷得到平衡组织，经过冷形变后，在室温或者较高温度下，性能也会随时间延续发生变化，这种现象称为**形变时效**

效果：与时效类似，即**强度与硬度增高而塑性和韧性降低**

机理：冷变形使*F*中位错密度增大，从而使*F*中的C、N原子更容易**扩散**至位错附近而形成**柯氏气团**，使**强度**和**硬度**升高

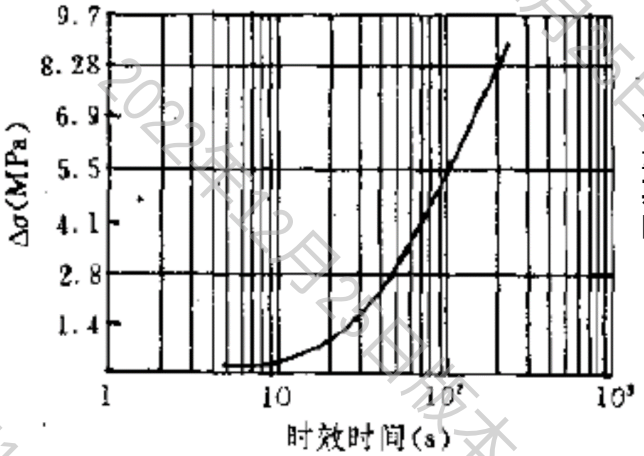


低碳钢形变时效特性的应力应变曲线

a 原材料拉伸时开始出现的屈服现象

b 在X 点卸载后，又立即加载不出现屈服现象

c 在Y 点卸载后时效，再加载又出现屈服现象



含碳、氮量为0.114%（重量）的铁在形变后时效(初期)时间与屈服点应力增量间的关系

低碳钢经冷变形后立即进行拉伸试验，不会出现明显的屈服现象，但经过时效后却具有明显的屈服现象

即存在明显的上下屈服点；

并且随时效时间的延续，屈服点应力的增量Δσ增大

2022年12月25日版本

生产中的屈服现象有时是有害的，可采取以下措施克服：

① 在冷冲压前对钢板进行小形变量的轧制，随后立即进行冲压

② 如果不能及时冲压，可将钢板储存在0°C以下，以抑制或减缓时效过程

形变时效是形变、时效温度和时效时间三者综合作用的结果

通常将先形变而后时效的过程称为**静态形变时效**，如果形变是在较高温度下进行，则时效可在形变过程中同时发生，这种时效称为**动态形变时效**

4 马氏体时效钢的时效

是指一类**超低碳**(≤0.03%)**高镍**(18~25%)、并加有某些能够引起**时效强化**的合金元素的高合金超高强度钢

含有大量的奥氏体稳定化元素镍→**淬透性极好**

→**空冷**至M_s(约200°C)即可获得M；

低碳+合金元素→完全的板条状 M 组织

马氏体时效钢的热滞性较大，其A_s点**马氏体转变为奥氏体的临界转变温度**高于500°C，因此，正火后在**500°C以下**进行时效处理

马氏体中**位错密度**较**高**，易于形成柯氏气团，以此为核心从马氏体基体中**析出**大量部分共格的、弥散的**金属间化合物**，从而使钢获得显著的强化效果

2022年12月25日版本