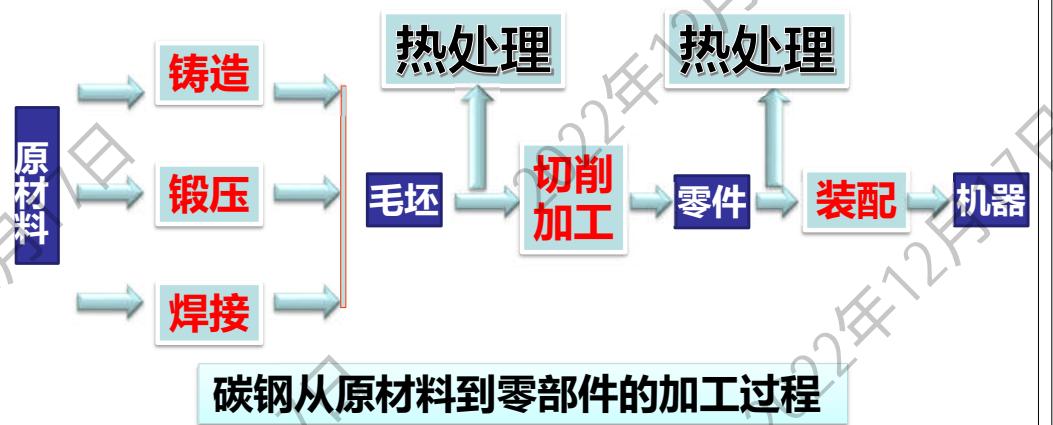
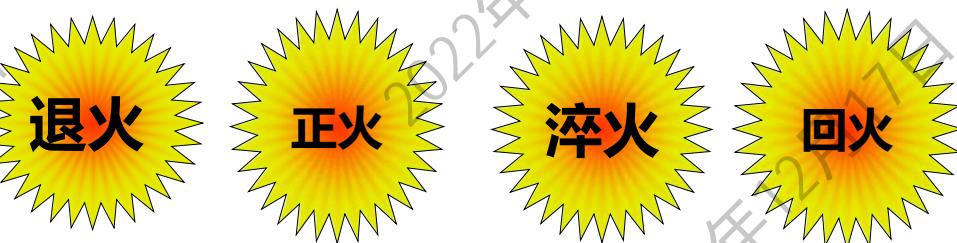


第10章 普通热处理工艺



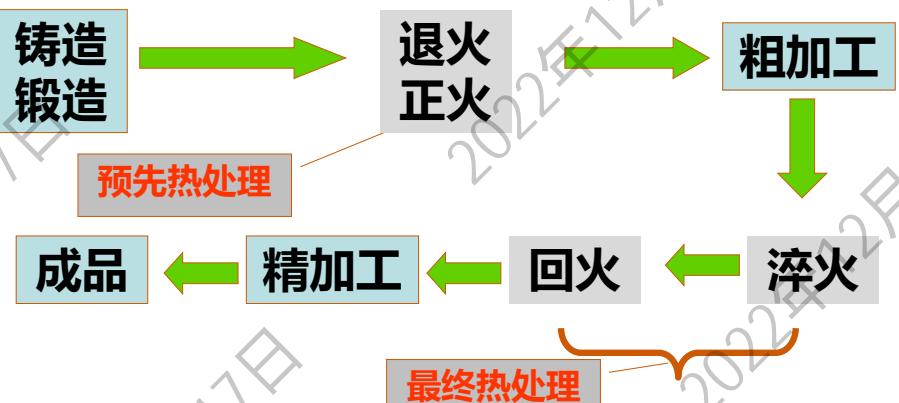
普通热处理是零件制造过程中非常重要的不可缺少的工序



一般零部件制造工艺中路线



重要零部件制造工艺中路线



第1节 钢的退火

将钢件加热到适当温度，保温一定时间，然后缓冷（炉冷、坑冷、灰冷）以得到平衡状态的组织的热处理工艺称**退火**

凡铁鎋纯钢为之。……久用乖平，入火退去健性，再用鑿划。
明·宋应星《天工开物》卷一。

中国古人已认识到把钢件重新加热后缓冷退火，可降低其硬度，以便于加工。

一种热处理工艺。发明于战国前。战国广泛使用，沿用至今。
依操作方法和技术目的之不同，中国古代主要有四种：

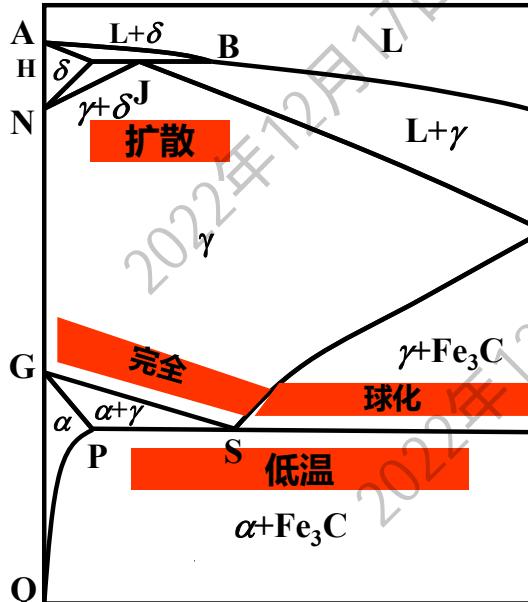
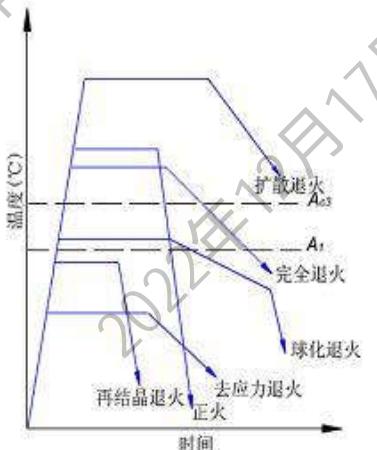
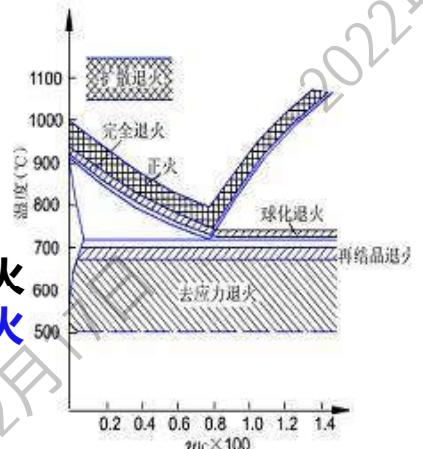
- (1) 再结晶退火，如战国刻纹铜器
- (2) 铸铁可锻化退火。流行于春秋至隋唐
- (3) 消除应力退火。如宋应星《天工开物》所云针坯之慢火炒熬
- (4) 组织均匀化退火，如《天工开物》所说黄铜退火处理

中国古代退火技术的主要成就是较早发明和使用铸铁可锻化退火，对含锌稍高的黄铜进行组织均匀化退火。

- 中国历史大辞典·下卷

应用最广 花样最多

**完全退火
等温退火
球化退火
扩散退火
去应力退火
再结晶退火**



退火温度

1 完全退火

**主要用于亚共析钢和合金钢的铸、锻、及热轧型材
也可以用于焊件**

完全? 使组织**完全奥氏体化** 后缓慢冷却

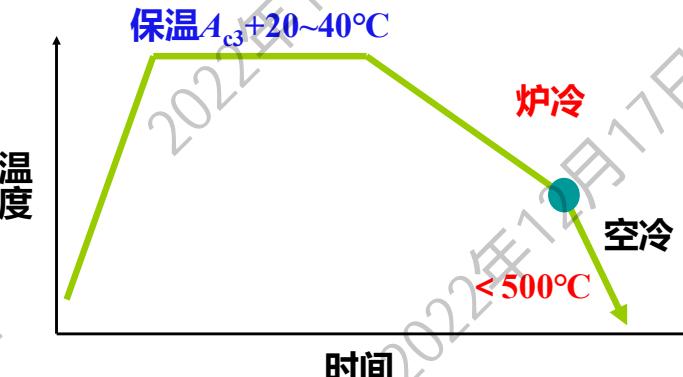
加热保温 $A_{c3}+20^{\circ}C \sim 40^{\circ}C$

冷却 缓慢冷却 (冷速 $<30^{\circ}C/h$; 随炉或者埋在砂中或石灰中冷却) 到 $500^{\circ}C$ 以下, 在空气中冷却

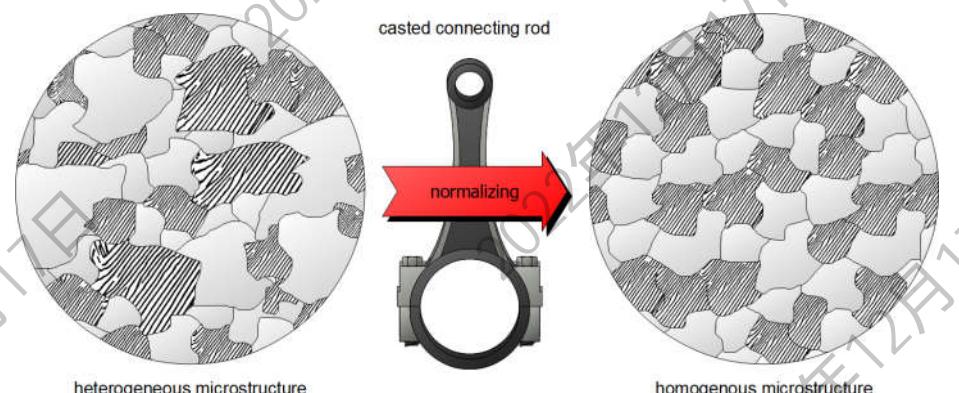
目的 (a) 细化晶粒, 消除应力和组织缺陷
(b) 硬度降低, 塑性提高, 为机加工及后续热处理(淬火)作组织准备

组织: 平衡态组织 P 或 $P+F$

完全退火工艺曲线



局限性: 周期长,
特别对于某些**A**比
较稳定的合金钢,
需要十几个小时甚
至几天



不完全退火？有

将钢加热到 $A_{c1} \sim A_{c3}$ (亚共析钢) 或 $A_{c1} \sim A_{cm}$ (过共析钢) 经保温后
缓慢冷却以获得近于平衡组织的热处理工艺

亚共析钢的不完全退火温度一般为 $740 \sim 780^{\circ}\text{C}$

亚共析钢只有经过正确热加工，不需改善组织时，采用不完全退火才是适宜的

优点是加热温度低，操作条件好

球化退火是不完全退火的一种

球化退火(大多数)适用于共析钢和过共析钢。虽然**亚共析钢**也有特殊情况下球化的，但因为球化后硬度太低，不利于加工一般不采用

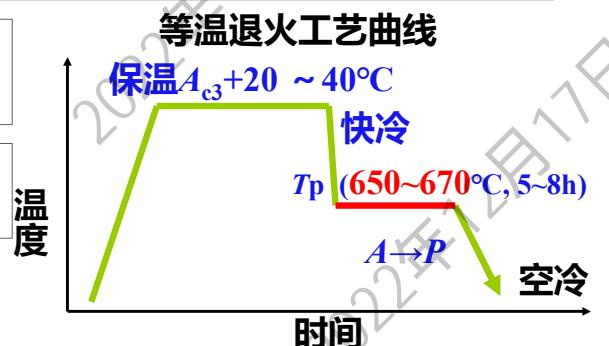
2 等温退火

将钢加热到高于 A_{c3} (或 A_{c1})的温度，保温适当时间后，较快冷却到珠光体 (+F) 区的某一温度，等温保持，使 $A \Rightarrow P (+F)$ ，之后空冷至室温，得到平衡状态的组织的热处理工艺

适用于 A 较稳定的钢：高碳钢 ($w_c > 0.6\%$)、合金工具钢、高合金钢(合金元素的总量 $> 10\%$)

优势：缩短退火时间
获得组织更均匀

不适用于大截面钢件和大批量炉料，难等温

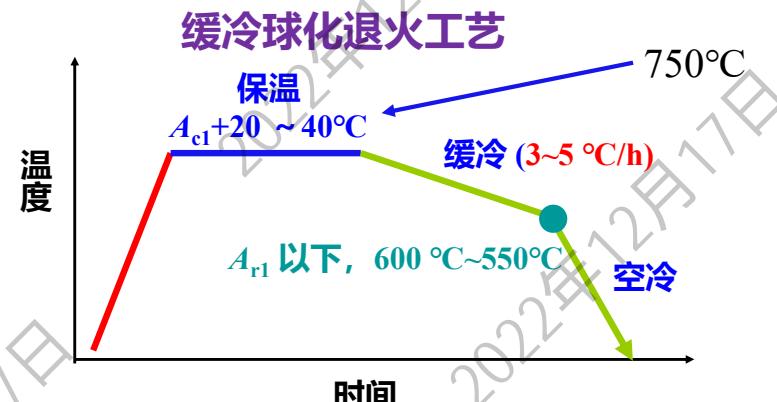


3 球化退火

soft annealing

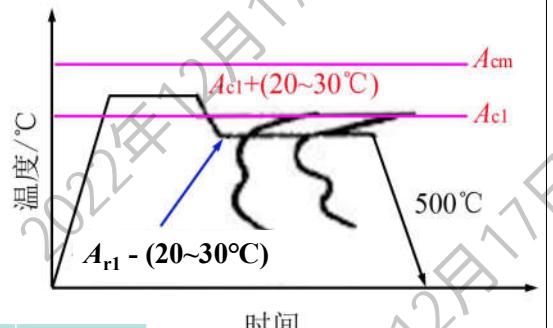
1) 工艺：

加热至 A_{c1} 以上 $20 \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，保温时间一般 $2 \sim 4\text{h}$ ，冷却方式：
炉冷，或在 A_{r1} 以下 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 等温，使碳化物趋于球化，
降低硬度，改善切削加工性能，并为淬火作组织准备



2) 适用于: (多数)共析与过共析成分的碳钢 或 合金钢

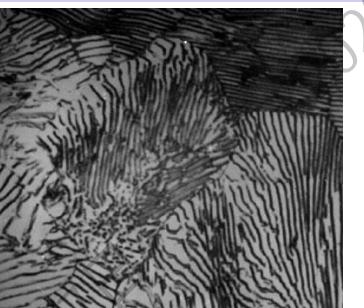
等温球化退火工艺



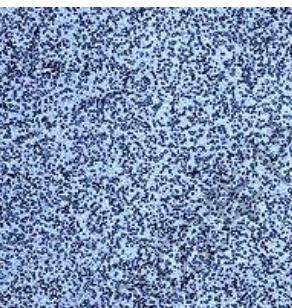
牌号	温度/°C	时间/h	硬度/HB
40Cr	690	8	174
40CrMo	677	9	179
40CrNiMo	649	12	197
T8	650~680	6~4	≤187
T12	680~700	6~4	≤207
Cr12MoV	730~750	6~4	207~255

3) 组织: $P_球$ 长时间保温, 钢中 Fe_3C 趋于球化

片层状渗碳体 网状二次渗碳体



球状珠光体组织



4) 目的:
调整硬度, 硬度更低, 塑/韧性更好 利于切削
减少(后续)淬火变形和开裂

Figure:
Micrograph of
a soft annealed
steel (C45)

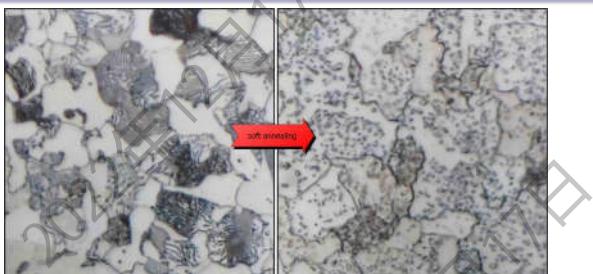
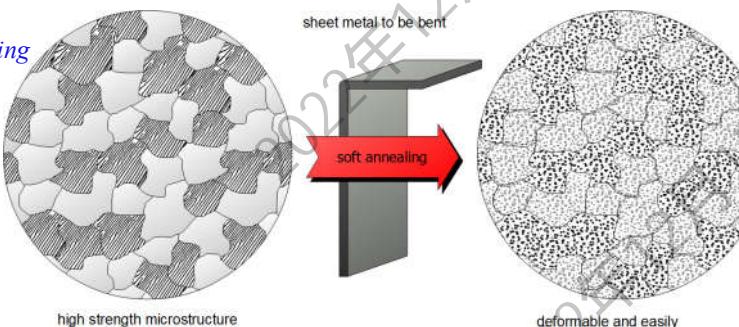


Figure: Soft annealing



4 扩散退火

把钢加热到固相线以下100~200°C, 一般为1100~1200°C,
合金钢一般为1200~1300°C → 并保温缓冷

目的: 消除钢中的枝晶偏析。也叫均匀化退火
dendritic segregation

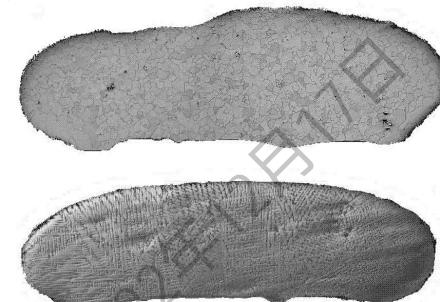
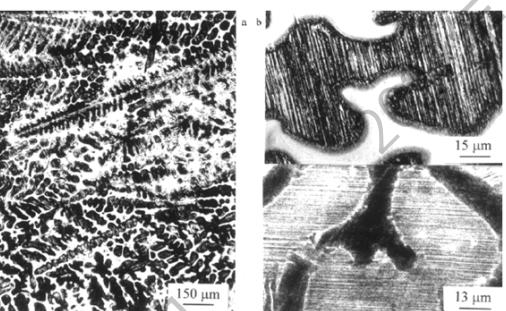


Figure 1. Optical microstructures of the as-cast 120A alloy (a) and (b) and SEM under atomic number contrast (c).

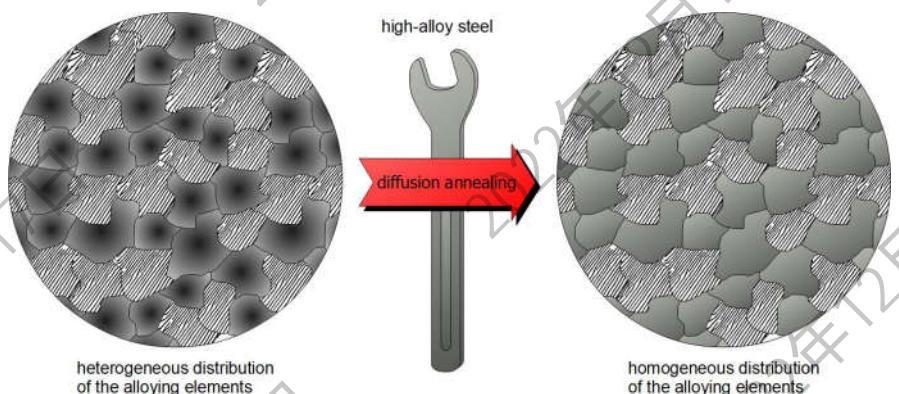
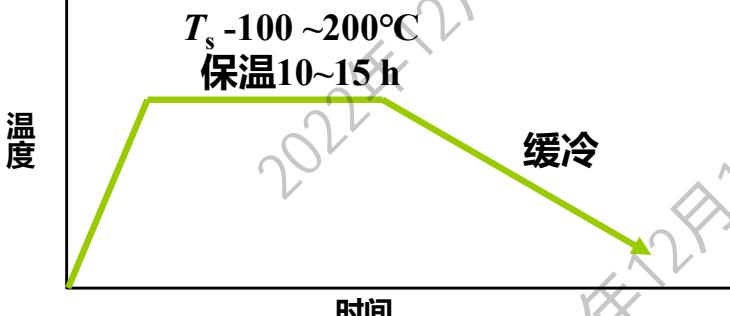


Figure: Diffusion annealing of a high-alloy steel

应用: 一些优质合金钢及偏析较严重的合金钢铸件及钢锭**扩散退火工艺曲线**

由于扩散退火需要在高温下长时间加热，因此奥氏体晶粒十分粗大，需要再进行一次正常的完全退火或正火，以细化晶粒、消除过热缺陷。高温扩散退火生产周期长，消耗能量大，工件氧化，脱碳严重，成本很高。只是一些优质合金钢及偏析较严重的合金钢铸件及钢锭才使用这种工艺。对于一般尺寸不大的铸件或碳钢铸件，因偏析程度减轻，可采用完全退火来细化晶粒，消除铸造应力。

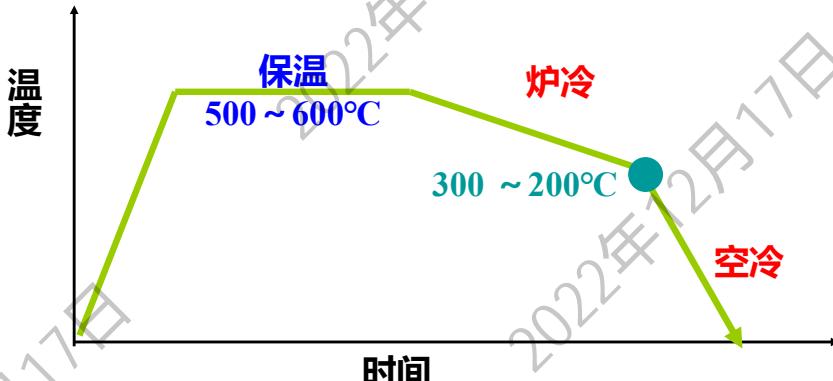
Diffusion annealing of semiconductors

In the semiconductor industry, silicon wafers are annealed, so that dopant atoms, usually boron, phosphorus or arsenic, can diffuse into substitutional positions in the crystal lattice, resulting in drastic changes in the electrical properties of the semiconducting material.

5去应力退火

1) 工艺：把钢件(缓慢)加热到 A_{c1} 以下，一般(碳钢和低合金钢) 550~650°C，随炉冷却至300~200°C出炉

又称低温退火或高温回火

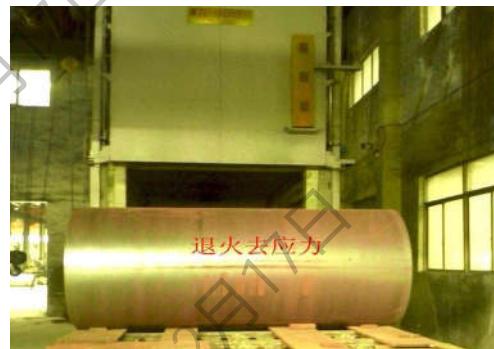
去应力退火工艺曲线

2) 应用对象

铸件、锻件、焊接件、冷冲压件、冷拔件

3) 目的

**消除残余应力，防止零件变形或开裂
保证精度**



6 再结晶退火

recrystallization annealing

把冷变形后的金属加热到再结晶温度以上保持适当的时间，使变形晶粒重新转变为均匀等轴晶粒，同时消除加工硬化和残余内应力的热处理工艺

再结晶现象的产生

- 必须一定量的冷塑性变形，
- 必须加热到一定温度以上。发生再结晶现象的最低温度称为最低再结晶温度

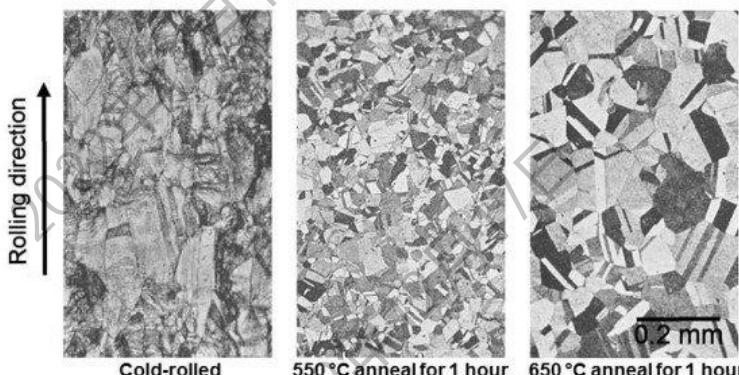
(当钢处于临界冷变形度6%-10%，采用正火或完全退火，避免粗大晶粒)

加热温度：

针对经过冷塑性变形的低碳钢在 A_{c1} 以下，再结晶温度以上 $150\sim250^{\circ}\text{C}$ （低碳钢的再结晶温度为 $450\sim500^{\circ}\text{C}$ ，因此再结晶温度一般为 $600\sim700^{\circ}\text{C}$ ）加热保温缓冷的热处理

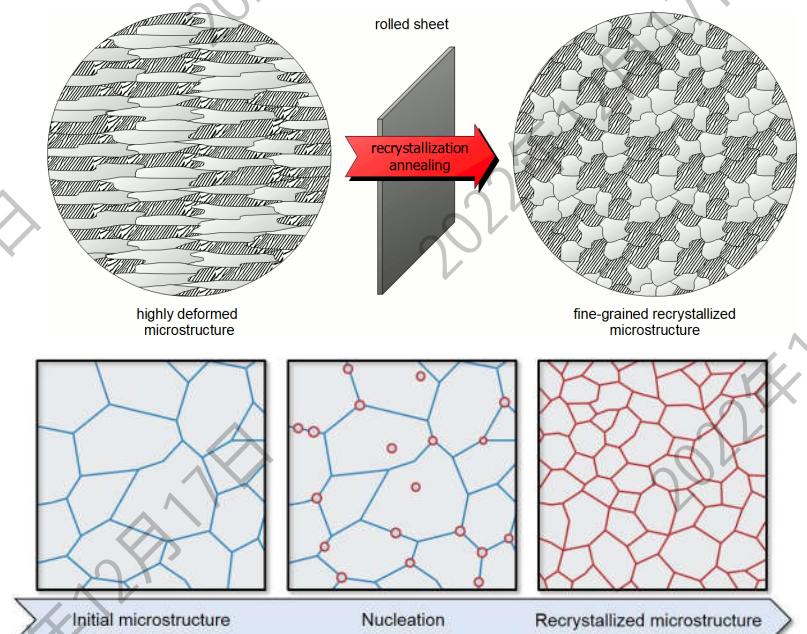
目的：消除加工硬化，恢复塑性

用途：冷轧低碳钢和钢带 18-8和ZGMn13 奥氏体冷轧



The cold-rolled sample had a yield strength of 80 ksi (550 MPa). The sample that was annealed at 1022 °F (550 °C) for 1 hour had yield strength of 11 ksi (75 MPa). Many small grains are present in this sample. The sample that was annealed at 1202 °F (650 °C) for 1 hour had yield strength of 9 ksi (60 MPa). Fewer, larger grains were present in this sample compared to the center sample.

Animation: Recrystallization annealing of a rolled sheet



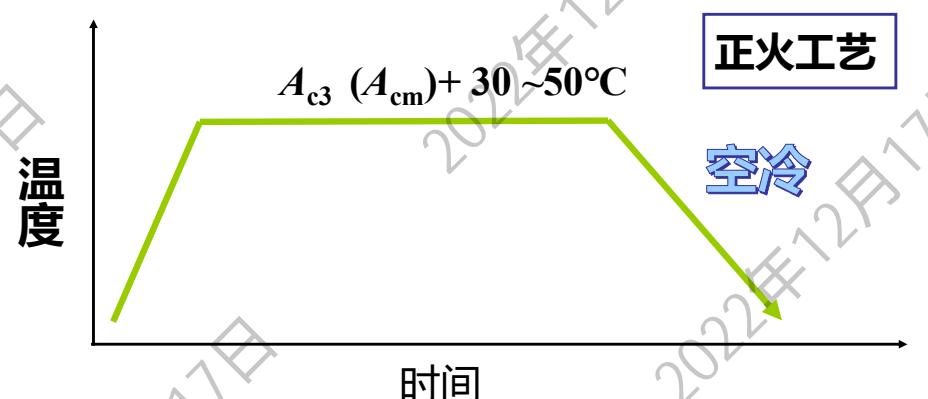
Annealing, in metallurgy and materials science, is a heat treatment that alters the physical and sometimes chemical properties of a material to increase its ductility and to make it more workable. It involves heating a material to above its glass transition temperature, maintaining a suitable temperature, and then cooling. Annealing can induce ductility, soften material, relieve internal stresses, refine the structure by making it homogeneous, and improve cold working properties.

In the cases of copper, steel, silver, and brass, this process is performed by heating the material (generally until glowing) for a while and then slowly letting it cool to room temperature in still air. Copper, silver and brass can be cooled slowly in air, or quickly by quenching in water, unlike ferrous metals, such as steel, which must be cooled slowly to anneal. In this fashion, the metal is softened and prepared for further work—such as shaping, stamping, or forming.

第2节 钢的正火

正火是将亚共析钢加热到 A_{c3} 以上30~50°C，过共析钢加热到 A_{cm} 以上30~50°C保温，然后在静止或者流动的空气中冷却的热处理。

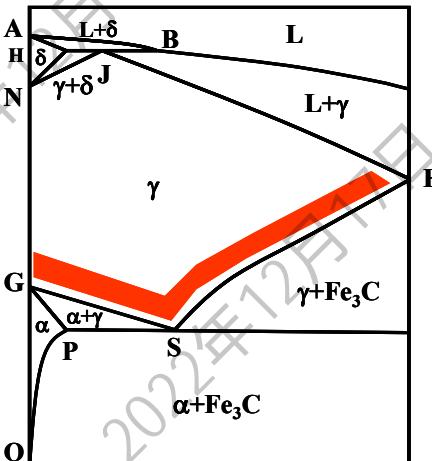
由于冷却速度略高，最后组织中可以获得较细的珠光体或者索氏体，非共析钢正火后的铁素体和二次渗碳体数量也比退火状态略有减少，同时过共析钢析出的二次渗碳体也不易形成连续网状组织



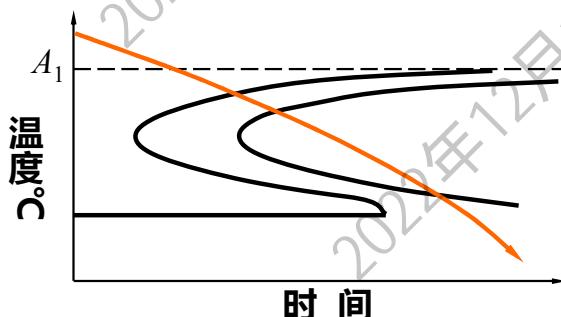
工艺

亚共析钢: A_{c3} 以上30~50°C加热、空冷
共析钢: A_{c1} 以上30~50°C加热、空冷
过共析钢: A_{cm} 以上30~50°C加热、空冷

A_{c3} 、 A_{cm} + 30~50°C
保温后空冷



2 组织



亚共析钢: $F + S$ (索氏体)

共析钢: S

过共析钢: $S + Fe_3C_{II}$

3 目的

低碳钢(含碳量低于0.4%):
细化晶粒, 使组织均匀, 调整(提高)硬度, 以利切削

过共析钢(工具钢):
消除网状 Fe_3C_{II} 以利球化 (正火后应再进行一次不完全退火)

抑制或消除过共析钢的网状渗碳体

对性能不高的低碳钢与中碳钢零件: 做为最终热处理
细化晶粒 提高其强度和韧性

退火与正火的选择

(1) 改善切削性能

低碳钢: 硬度低, 粘刀, **正火**

高碳钢: 硬度高, 难切削, **退火**

中碳钢: **退火、正火**

(2) 经济性

正火周期短, 耗能少, 操作简便, 尽量以**正火代替退火**

(3) 使用性能

普通结构件, 以正火作为最终热处理, 以细化晶粒, 提高力学性能

形状复杂的结构件, 采用退火作为最终热处理, 以消除应力防止裂纹

正火温度为什么要高于淬火温度?

应当从两者冷却过程组织转变原理和工艺实施目的作个比对:

1) 正火冷却时材料内部发生扩散型转变, 在一定过冷度条件下原奥氏体基体上形成新晶核生长为新晶粒, 过冷度越大形核数目多得到新晶粒越细。高的加热温度**利于后来取得大的过冷度**, 由于有形成新晶核的机会加热时可不计较温度高奥氏体晶粒长大问题;

然而淬火冷却得到马氏体是由原奥氏体晶粒切变而来, 奥氏体晶粒决定最终组织的粗细程度, 为防止奥氏体晶粒过分长大淬火加热温度不宜过高, 而正火温度可以高些。

2) 正火重要目的之一是**消除材料中组织、成分不均匀现象**, 由于成分不均匀部分区域奥氏体转变温度偏移, 亚共析钢存在难溶铁素体, 过共析钢存在难溶渗碳体或碳化物, 这些都需要高于淬火温度加热才能使之改善, 因此正火温度就必须高些。

第3节 钢的淬火 Quenching

1 淬火简介

淬火: 将钢加热到临界温度以上, 保温后快速冷却获得马氏体(或下贝氏体)的热处理工艺

Quenching (不止于此)

(广义的)淬火: 将合金加热和冷却获得**亚稳组织**的热处理都称为淬火

有**同形异构**转变或**固溶度变化**的合金都可以淬火

只有**固溶度变化**的合金淬火也称为**固溶处理**水韧处理

目的: 获得M(或B_下, 或固溶处理), 使钢(合金或有色金属)具有**高强度、硬度和高耐磨性**

淬火是强化(**钢材**)的重要方法

1) 淬火加热温度

碳钢

亚共析钢

(完全奥氏体化) $A_{c3} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}$

(不完全奥氏体化) $A_{c1} \sim A_{c3}$

亚温淬火

淬火后组织: **马氏体+铁素体**

优点: 提高塑韧性

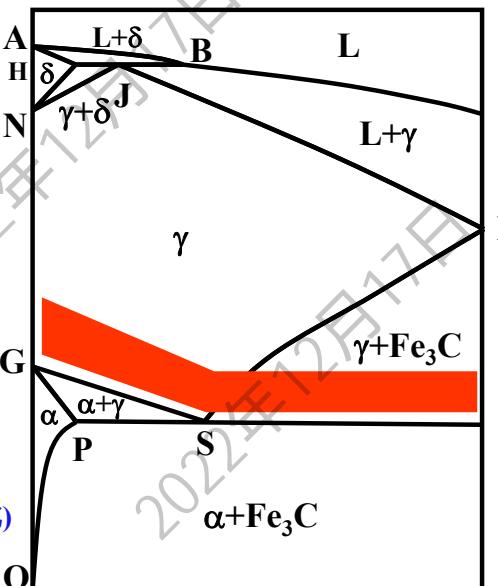
过共析钢

$A_{c1} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ (不可完全奥氏体化)

淬火前已经球化退火处理

淬火后: M+(未溶)粒状碳化物

利于提高耐磨性



2) 淬火时间

$$\tau = \alpha k D$$

τ 保温时间 min

α 保温时间系数 min/mm

k 修正系数

D 工件有效厚度 mm

3) 加热介质

- | | | |
|---|----|--|
| { | 气体 | 空气 |
| | 液体 | 盐浴 |
| | 固体 | 固态粒子 (fluidized bed 流态床炉)
国际公认 有前途的工艺之一 |

确定加热温度考虑的其他因素

(1) 工件尺寸和形状

小工件低 大工件高 形状复杂 低

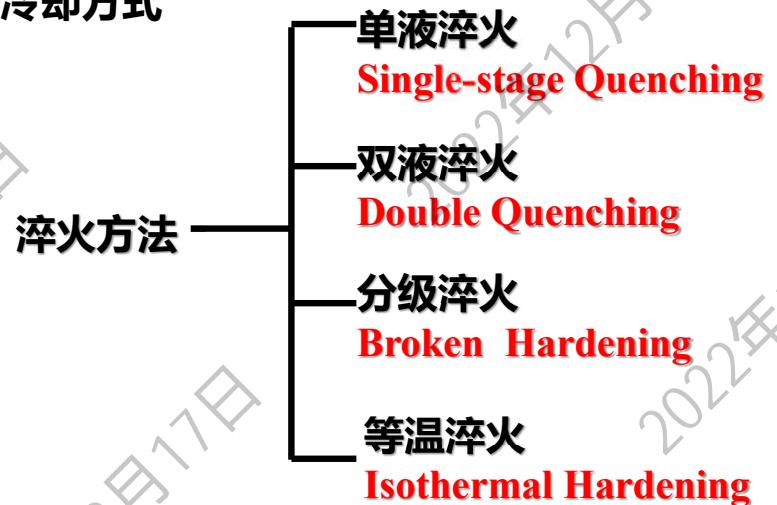
(2) 淬火介质和淬火方法

冷却介质强 低温, 等温或分级淬火 高温

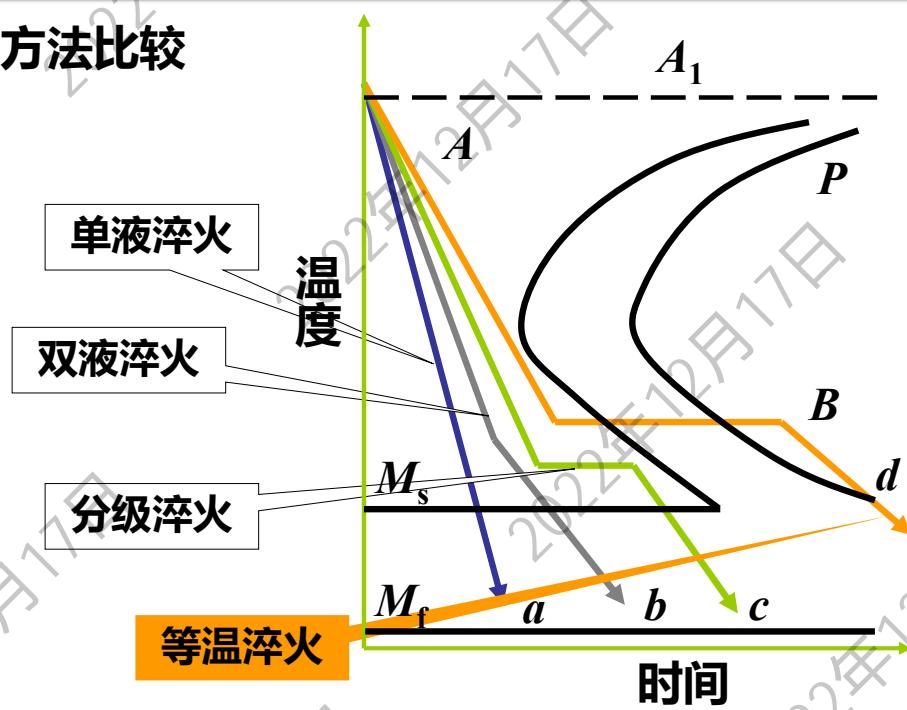
(3) 奥氏体晶粒长大倾向

2 淬火方法

按冷却方式



淬火方法比较



1) 单介质淬火 (单液淬火法)

将钢件奥氏体化后，在单一淬火介质中冷却到室温的处理，称为单介质淬火

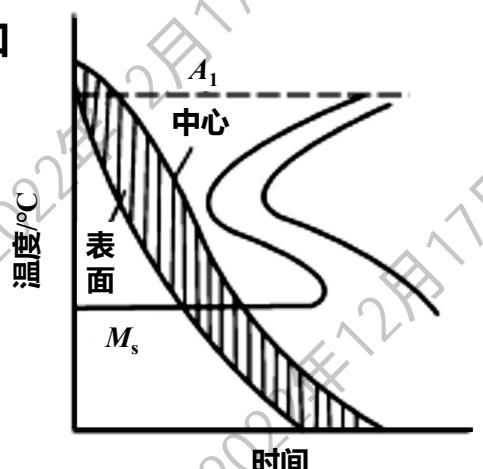
优点：

操作简单，易实现机械化和自动化

缺点：

综合冷却特性不理想，容易产生硬度不足和开裂等淬火缺陷

只适用于小尺寸且形状简单的工件，大件易产生较大的变形和开裂



2) 双介质淬火 (双液淬火)

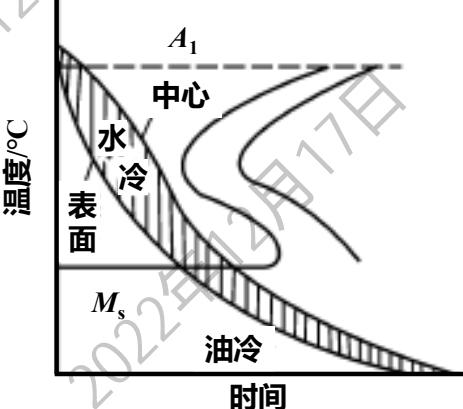
先快冷：将A状态的工件在冷却能力强的淬火介质(水)中冷却至接近 M_s 点温度时

再慢冷，立即转入冷却能力较弱的淬火介质(油)中冷却，直至完成 M 转变

适用于形状复杂和截面不均匀工件的淬火

优点：内应力小，变形及开裂小

缺点：操作困难，不易掌握



3) 分级淬火

将A状态的工件首先淬入略高于钢的 M_s 点的盐浴或碱浴炉中保温

当工件内外温度均匀后，再从（盐浴或碱浴）炉中取出空冷至室温，完成M转变

优势：由于工件内外温度均匀并在缓慢冷却条件下完成M转变，不仅减少了淬火热应力，而且显著降低了组织应力，有效地减少了工件淬火变形和开裂
同时还克服了双介质淬火出水入油时间难以控制的缺点

4) 等温淬火

将A化后的工件淬入 M_s 点以上某温度盐浴中等温保持足够时间，使之转变为B_下组织，而后于空冷却的淬火方法

B_下的强度硬度较高而韧性良好
等温淬火可显著提高钢的综合机械性能

减少了工件与淬火介质的温差→减少了淬火热应力；
B的比容比M小，而且工件内外温度一致，淬火组织应力小

→等温淬火可显著减小工件的变形和开裂

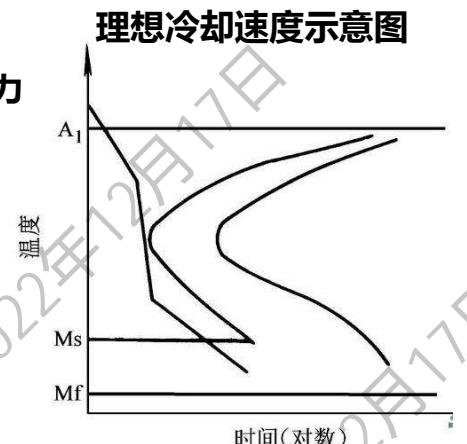
3 淬火介质

理想冷却速度

高温 $T > 650^{\circ}\text{C}$, 慢冷，可以减少热应力

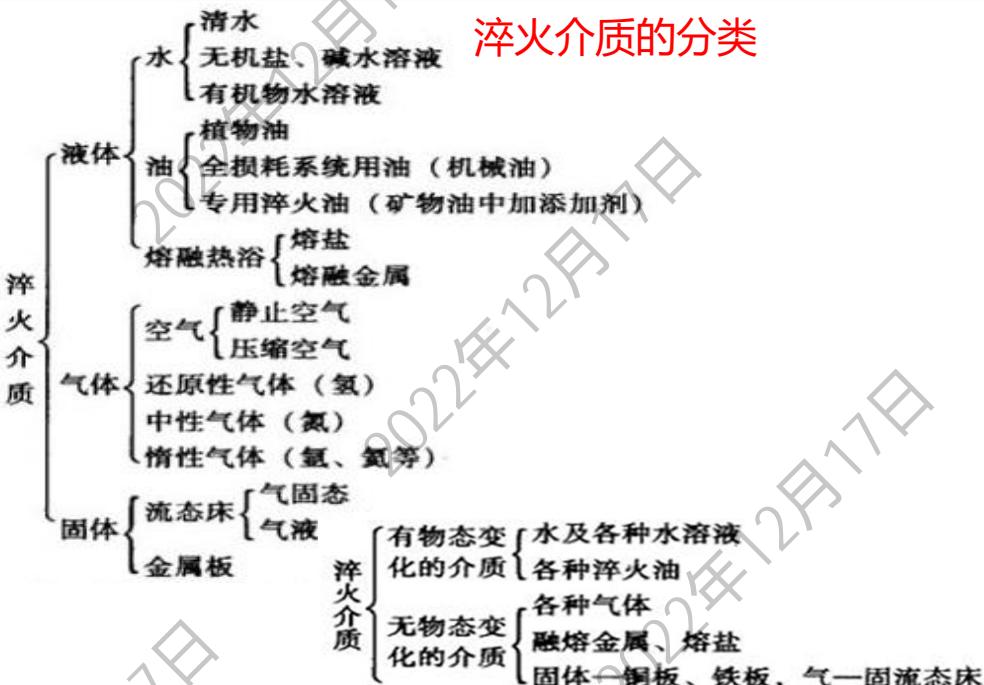
中温 $650^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$, 快冷，避开C曲线的鼻尖，保证全部获得M

低温 400°C 以下，特别是 $300 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 发生M转变时要求慢冷，↓M转变时的组织应力



到目前为止，在实际生产中还没有找到符合这一理想曲线的冷却介质

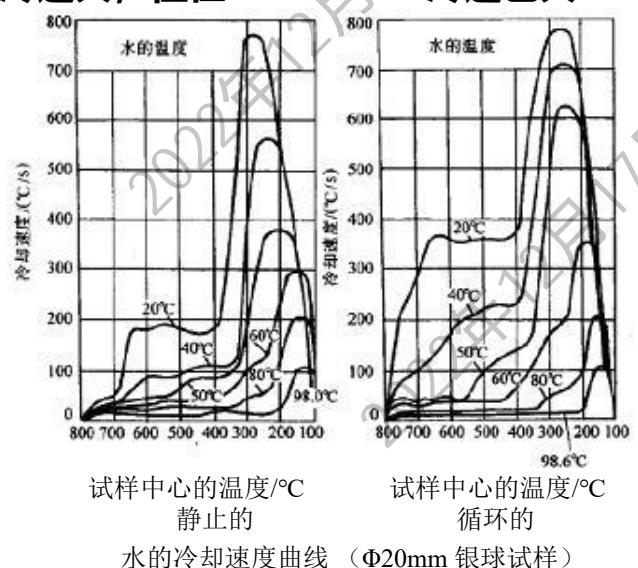
淬火介质的分类



1) 水--最普通的淬火介质

特点：在650~500°C冷速大，但在320~200°C冷速也大

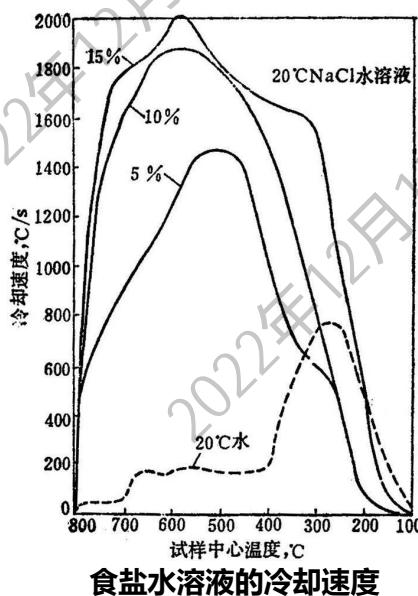
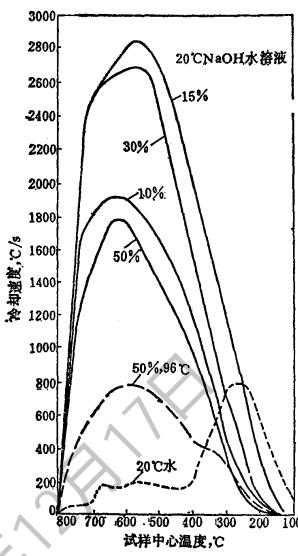
水的冷却能力受温度影响很大



45

2) 盐水溶液--冷却能力强

淬火后表面硬度高、性能均匀、表面光滑



46

3) 油--冷却较慢

在650~500°C冷速小，但在320~200°C冷速也小

常用的淬火冷却介质

名称	最大冷却速度时		平均冷却速度/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1})$	
	所在温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却速度/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1})$	$650\sim 550\ ^{\circ}\text{C}$	$300\sim 200\ ^{\circ}\text{C}$
20°C静止水	340	775	135	450
40°C静止水	285	545	110	410
60°C静止水	220	275	80	185
10%NaCl 溶液	580	2000	1900	1000
10%NaOH 溶液	560	2830	2750	775
20°C10号机油	430	230	60	65
80°C10号机油	430	230	70	55
20°C3号锭子油	500	120	100	50

47

48

神刀蒲元

刘备造刀5000把 上刻“七十二炼”

地点：成都

为诸葛亮制刀3000把 地点：斜谷

淬火处理是关键

当刀到“白亮”的程度时需要进行淬火处理

淬火介质，不用汉江水，专取蜀江水

“汉水纯弱，不任淬；而蜀江水比较爽烈，适合淬刀。”

蒲元用刃一试，当即说道

“此水中已掺杂了涪水，不能用。”

蒲元当即用刀在水中划了两划，然后说道

“水中掺进了8升清水，还敢说没有。”



新型淬火工艺

1、高压气冷淬火法

工件在强惰性气流中快速均匀冷却，可防止表面氧化，避免开裂，减少畸变，保证达到所要求的硬度，主要用于工模具钢的淬火。这项技术最近进展较快，应用范围也有很大扩展。

2、强烈淬火法

采用高压喷射淬火介质，使其强烈地喷射在工件表面上，通过控制喷射淬火介质的压力、流量和配比，调整其冷却能力，促进均匀冷却，能获得表面硬度均匀且畸变小的优质工件。这种淬火方法对提高合金钢产品的寿命效果显著。

3、水空气混合剂冷却法

通过调节水和空气的压力以及雾化喷嘴到工件表面之间的距离，可以改变水空气混合剂的冷却能力，并使冷却均匀。生产实践表明，运用该法对形状复杂的碳钢或合金钢零件进行表面感应加热淬火，可有效防止淬火裂纹的产生。

4、沸腾水淬火法

采用100 °C的沸腾水冷却，可获得较好的硬化效果，用于钢的淬火或正火。目前这项技术已成功运用于对球墨铸铁的淬火。

5、热油淬火法

采用热的淬火油，使工件在进一步冷却之前的温度等于或接近 M_s 点的温度，以便把温度差减至最小，能有效地防止淬火工件的畸变和开裂。将小尺寸的合金工具钢制冷冲模在160 ~ 200°C的热油中淬火，可以有效减少畸变并避免开裂。

热处理淬火新方式：气淬法

气淬法，原先只应用于高淬透性钢，但近10年来，也开始应用到中、低淬透性钢的淬火中。采用高压气体或者高流速气体淬火扩大了气淬应用领域，同时减少了变形。为了达到工件变形最小的目的，应当采取可调整局部淬冷速率并能模拟工件形状的一些淬火方法。气淬和喷雾淬火可能满足这些要求。因此，气淬法正在引起人们的重视。

气体作为淬火介质，在通常条件下其热传导系数比油和水基介质都小，但是它能够根据工件形状和材料的特殊要求调整淬火过程，并且可通过提高气体流速和压力使其热传导系数达到油或水基介质的水平。通常认为气淬会增加成本，因而限制了其普及应用。但是，从总体成本核算来评价气淬工艺，虽然气体淬火本身的成本较高，但可以通过降低清洗费用、提高气淬过程重现性，以及减少后续加工的磨削和减少淬硬层深度等优越性来得到补偿。

提高气淬时冷却能力可以有不同的方法：增加气淬压力；增加气体流速；选择不同气体类型（如氮气、氦气、氢气）；优化流动状态，增加气流搅拌等。

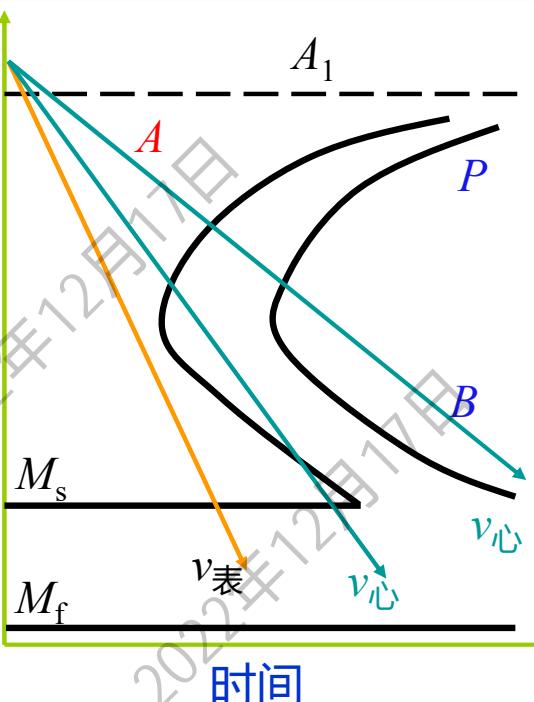
通过合理设计能提高冷却的均匀性，最终使残留应力降至最小。

4 钢的淬透性

Harding capacity

淬火时表层直接与淬火介质接触，冷速快；心部通过表层散热，冷速慢

钢件表层得到M；而心部只能获得部分M，甚至完全得不到M



(1) 淬透性

淬透性是表征钢件淬火时形成M的能力
或者:表征钢件淬火时所能得到的淬硬层的深度

(2) 淬硬层深度

由钢件表面向里到半M组织(50% M)的区域称为淬硬层，其深度称淬硬层深度

(3) 淬硬性

在正常淬火情况下，以超过临界冷却速度的冷速冷却，得到的M组织所能达到的最高硬度值

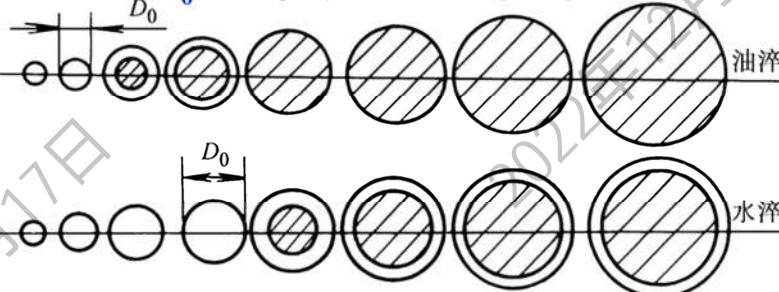
影响因素：含碳量，碳含量越高，钢的淬硬性越高

(4) 淬透性的测试方法

临界直径法

将同一种钢不同直径的圆棒试样加热至单相A区，然后在同一淬火介质中冷却，测出其能全部淬硬成M的最大直径D₀即为临界直径。

D₀越大，表示钢的淬透性越好

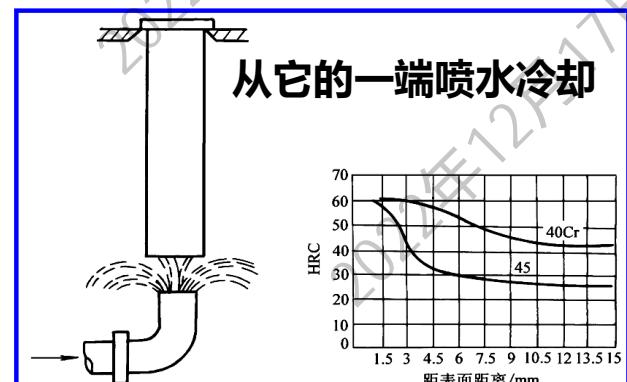


不同截面的钢淬火时淬硬层深度的变化

顶端淬火法

国内普遍采用的淬透性试验方法；

将标准试样加热至单相A区后放在支架上



从端面起依次测定硬度

硬度随距顶端距离的变化曲线
- 淬透性曲线

(5) 影响淬透性的主要因素

钢的含碳量：共析钢的最高

合金元素：除Co外，其他都提高淬透性

第5章 钢的过冷奥氏体转变图

第1节 过冷奥氏体和冷却方式

第2节 过冷奥氏体等温转变图

第3节 合金元素对等温转变图的影响

第4节 工艺因素对C曲线的影响

第5节 过冷奥氏体连续冷却转变图

第6节 奥氏体转变图的应用

(6) 如何在选材中考虑钢的淬透性

横截面受力均匀的零件: 淬透性要高

大截面 动载荷: 螺栓 拉杆 锻模

横截面受力不均匀的零件: 淬透性不必高

心部力学性能对零件使用寿命无明显影响 (承受弯曲和扭转的轴类)

淬硬层深度为工件半径(厚度) $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{4}$ 即可

避免脆性断裂的零件: 淬透性不能高

焊接工件 冷镦凸模 齿轮齿面

减少变形开裂 防止脆断 断齿等

讨论

淬硬性跟淬透性具体的区别是?

淬透性跟有效淬硬深度什么关系?

在淬火冷却过程中, 水淬比油淬有效淬硬深度大, 但是冷却速度不是决定钢的淬透性大小的因素, 这个怎么感觉自相矛盾?

5 淬火缺陷及其预防措施

(1) 加热---氧化和脱碳

氧化: 钢在氧化性介质(氧, 水蒸气等)中加热时, Fe 和 合金元素原子会被氧化

氧化 { 表面氧化(560°C) Fe_2O_3 (最外层) Fe_3O_4 (中层) FeO (内层) 1:10:100
内氧化(800°C) 氧化沿奥氏体晶界向内扩散 (几微米厚)

脱碳: 钢在脱碳性介质(氧, CO_2 , H_2 等)中加热时, 钢表层固溶碳,发生反应, 变成气体逸出, 钢表层碳含量降低

产生的后果: 工件表面硬度不足, 并降低零件的疲劳强度,同时增大淬火冷却时零件的开裂可能性

减少和防止氧化和脱碳的主要措施

- 在空气炉中加热时可用保护涂料将零件加以保护
 H_3BO_3 涂料 NaF 涂料 SiO_2 涂料 Al_2O_3 涂料
- 零件在熔融的盐浴中加热时, 氧化和脱碳程度有明显减轻
当然也要对盐浴 脱氧
- 要求更高时可用保护气氛炉或真空炉来加热零件
特种热处理, 可控气氛炉加热
- 采用高温短时间快速加热

相关文献

- [1] 李雅琪, 古一, 孟熙, 朱涵睿, 孙沛. 防脱碳涂料对30CrMnSiA热处理保护的研究[J]. 材料保护, 2019, 52(03):72-76.
- [2] 杨军, 尹文华. 热处理保护涂料性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2018, 47(04): 26-28.
- [3] 邢旭腾. 钢坯表面防氧化涂料及其耐高温性能的研究[D]. 华北理工大学, 2015.
- [4] 曾坤, 张炼. 钢铁高温防氧化脱碳涂料的研究[J]. 材料保护, 2008(06):72-74+8.
- [5] 曾坤. 钢铁高温抗氧化涂料的研究[D]. 机械科学研究院, 2007.
- [6] 李虹燕, 白力静, 梁戈, 李均明. 防氧化脱碳涂料对钢铁材料热处理的保护研究[J]. 电镀与涂饰, 2005(12):33-36.
- [7] 王崇庆, 王恩泽, 余大兵. 钢铁热处理保护涂料研究[J]. 热加工工艺, 2004(02):43-44.
- [8] 张兴奎. 我国热处理保护涂料的发展与应用现状[J]. 国外金属热处理, 2003(04):1-4.

(2) 淬火变形、开裂

产生原因: 热应力、组织应力、比容差

内应力超过材料的规定非比例伸长应力 $\sigma_{p0.2}$ 时 \rightarrow 零件变形

内应力超过材料的断裂强度时 \rightarrow 零件开裂

瞬间(in-situ)应力 影响因素复杂 难以测量

残余内应力 可以测量 \rightarrow 间接分析(瞬间)内应力

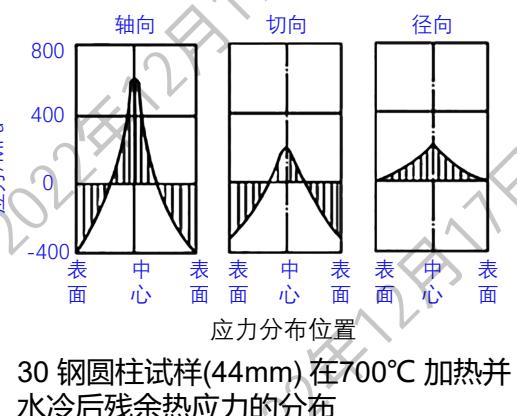
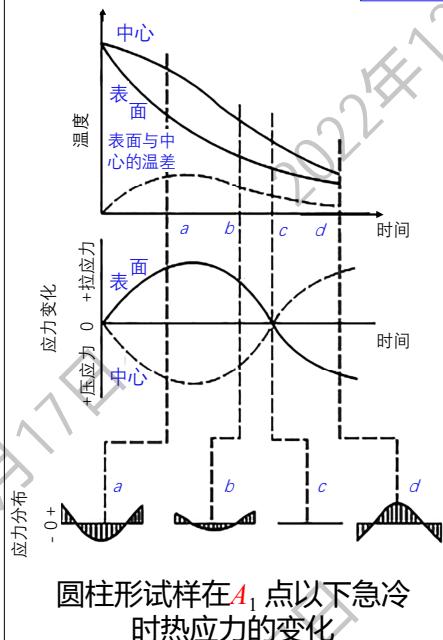
- **热应力**

由于零件表层和心部(广义的讲, 不同部位)冷缩(降温过程)
不同时性(同一零件, 温度有高有低)而造成的内应力

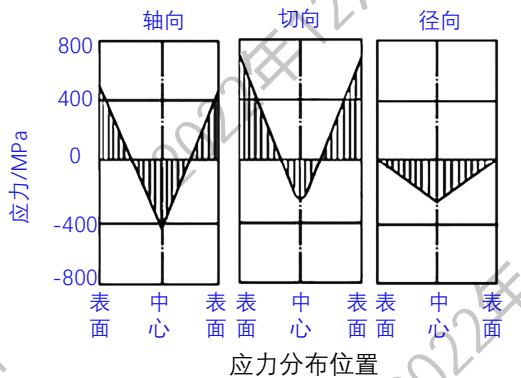
- **组织应力**

由于零件表层和心部(广义的讲, 不同部位)发生马氏体转变(降温过程)
不同时性(同一零件, 转变有先有后)而造成的内应力

热应力分布示意图



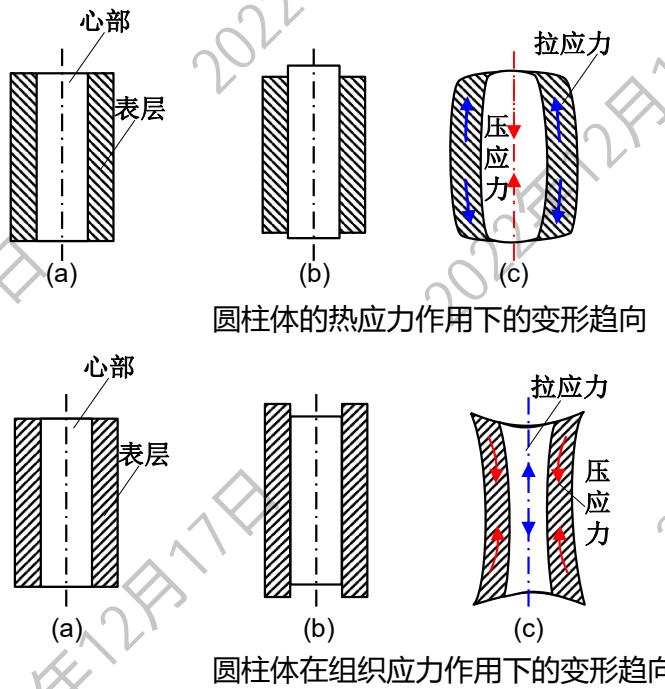
组织应力分布示意图



Fe-16Ni 合金圆柱试样(50 mm)自900°C缓冷至330°C, 再在冰水中急冷至室温时残余组织应力的分布

钢件在淬火过程中, 在组织转变发生前 只有热应力产生
到 M_s 点以下 热应力与组织应力 共存 (组织应力为主)

综合作用 有时因两者的方向相反而起着抵消或削弱
有时又因两者的方向相同而起着加强作用



防止措施:

- 1 正确选择材料和合理设计工件形状
- 2 正确锻造和预热处理
- 3 采用合适的热处理工艺

- 尽量做到均匀加热及正确加热
- 正确选择冷却方法和冷却介质的基本原则
- 正确选择淬火工件浸入淬火介质的方式和运行方向的基本原则

(3) 硬度不足

- 加热温度过低，保温时间不足
- 表面脱碳引起表面硬度不足
- 冷却速度不够，在金相组织上可以看到黑色屈氏体沿晶界分布
- 钢材淬透性不够，截面大处淬不硬

(4) 硬度不均匀

工件淬火后有软点

- 工件表面有氧化皮及污垢等
- 淬火介质中有杂质
- 工件在淬火介质中冷却时，冷却介质的搅动不够，没有及时赶走工件的凹槽及大截面处形成的气泡而产生软点
- ...

第4节 钢的回火 Tempering

将淬火后的钢重新加热到 A_{c1} 以下某一温度，保温一定时间，然后冷却到室温

Temper 调和 温柔的（温度不高）

保温时间不长（几小时内）

冷却不复杂 空冷(大部分) 油冷/水冷 (避免第二类回火脆性)

设备要求不高

回火的目的(第9章进过)

- 消除淬火应力，降低钢的脆性
- 稳定工件尺寸(淬火 M 和残余 A 是非稳定组织，如果发生转变，则零件的尺寸会发生变化)
- 获得工件所要求的组织性能
- 回火是热处理工序中最后一道工序

回火的关键

(根据对工件性能的要求) 选择正确的回火温度

回火的分类和应用

生产中根据回火温度，将回火分成三类

(1) 低温回火 (150~250°C)

回火组织：回火马氏体

目的：能够保持钢淬火后的高硬度和高耐磨性的同时，降低材料的(淬火)内应力，愈合微裂纹，提高工作韧性，

用途：

中、高碳的各种工具、模具 (200°C)
量具(冷处理，或200~225°C较长时间回火)
滚动轴承 (160°C)

低合金超高强度钢 合金元素提高回火抗力 回火温度可到 250~300°C

(2) 中温回火 (350 ~500°C)

回火组织：回火屈氏体

回火温度200~400°C 钢的弹性极限 最高

目的：产生高的弹性极限和屈服强度，并具有一定的韧性

用途：弹簧和热作模具的热处理

碳素弹簧钢 (65钢) 回火温度下限 380°C

合金弹簧钢 (55Si2Mn) 回火温度上限 480°C

(3) 高温回火 (500~650°C)

回火组织：回火索氏体

目的：为了获得综合机械性能都比较好的回火工艺，其强度、塑性和韧性都较好

用途：重要的机器结构件

受交变载荷的零件
涡轮轴 汽车曲轴 机床主轴

某些精密工件，如量具、模具的预先热处理等

淬火 + 高温回火 \Rightarrow 调质处理

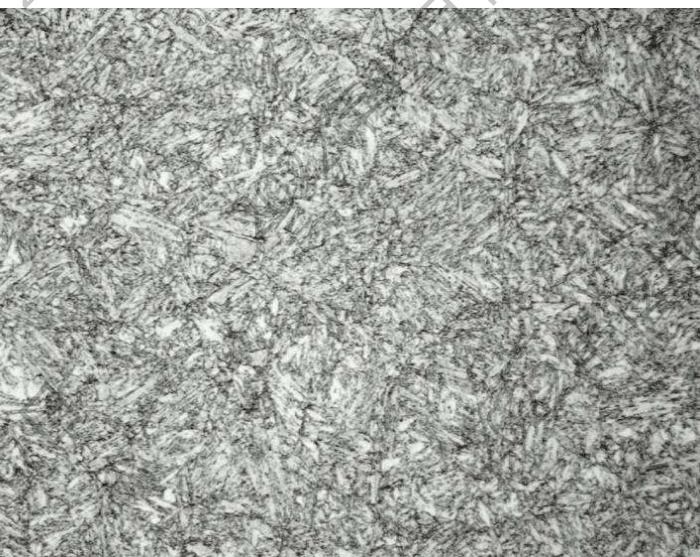
45钢经调质和正火后的性能比较

热处理状态	σ_b , MN/m ²	δ , %	A_k , J/cm ²	HB	组织
正火	700~800	15~20	50~80	163~220	细珠光体+铁素体
调质	750~850	20~25	80~120	210~250	回火索氏体

回火索氏体(调质处理的优势)

塑性和韧性

合金钢高温回火后金相照片



74

淬火钢回火时的组织变化

回火组织	形成温度	组织特征	性能特征
回火马氏体	150~250°C	极细的 ϵ 碳化物分布在马氏体基体上	强度、硬度高，耐磨性好 硬度一般为HRC58~64
回火屈氏体	350~500°C	细粒状渗碳体分布在针状铁素体基体上	弹性极限、屈服极限高，具有一定的韧性 硬度一般为HRC35~45
回火索氏体	500~650°C	粒状渗碳体分布在多边形铁素体基体上	综合机械性能好，强度、塑性和韧性好 硬度一般为HRC25~35