



过程设备机械设计基础

----常用材料

主讲：付 尧

电话：64252096

email: fuyao@ecust.edu.cn

学习资料及论坛: www.chenjj.org

本章内容



1

- 过程设备材料的基本要求

2

- 过程设备常用材料

3

- 钢的热处理

4

- 金属材料的腐蚀与防腐

5

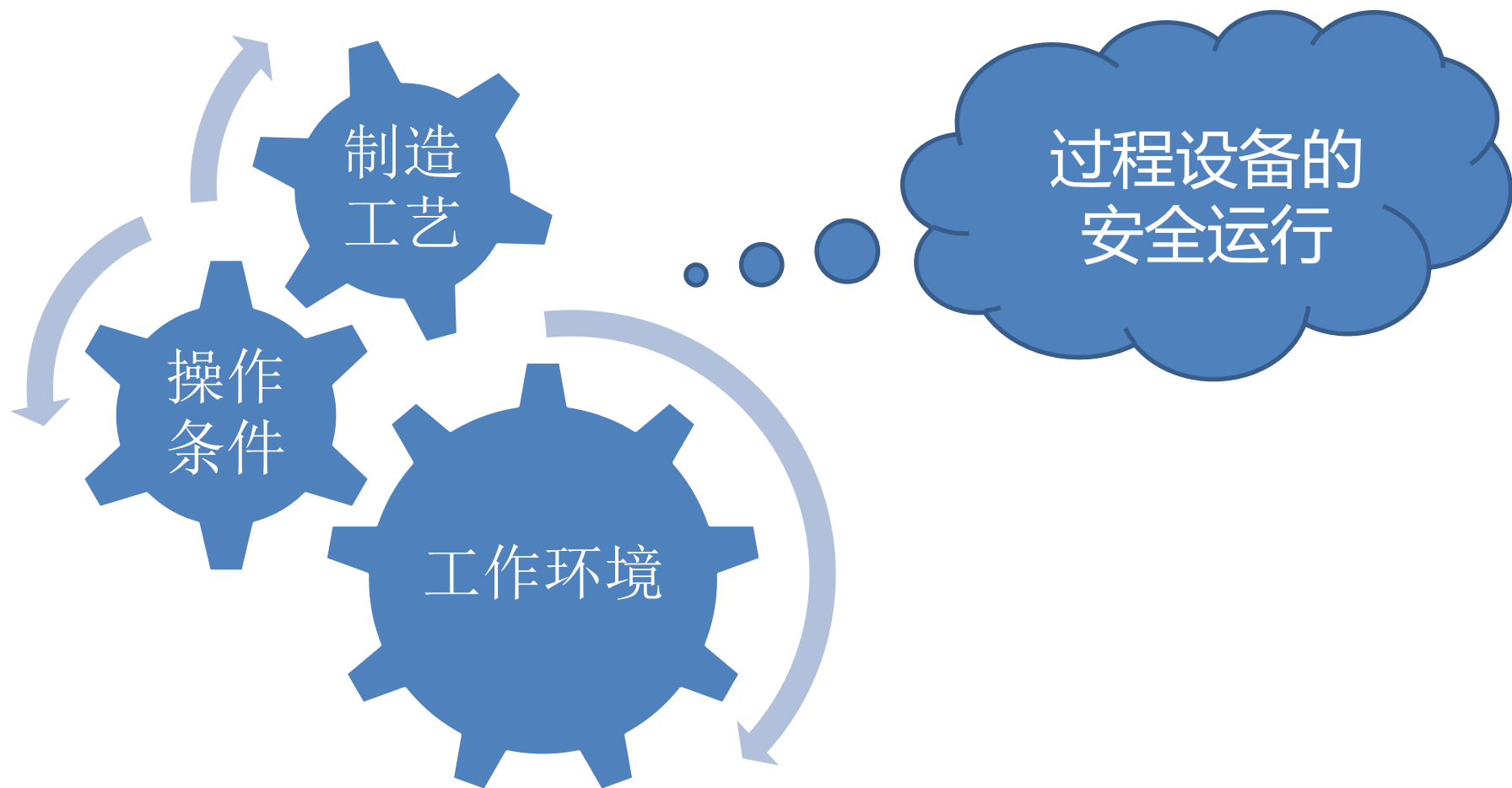
- 过程设备金属材料的选择

1. 过程设备材料的基本要求



- 过程设备是过程工业的**物质基础和保障**：
材料是任何设备功能完成的物质载体—**设备材料的重要性**
- 过程工业的复杂性，材料选用具有的特点：
复杂性、多样性、高要求

1. 过程设备材料的基本要求



1. 过程设备材料的基本要求

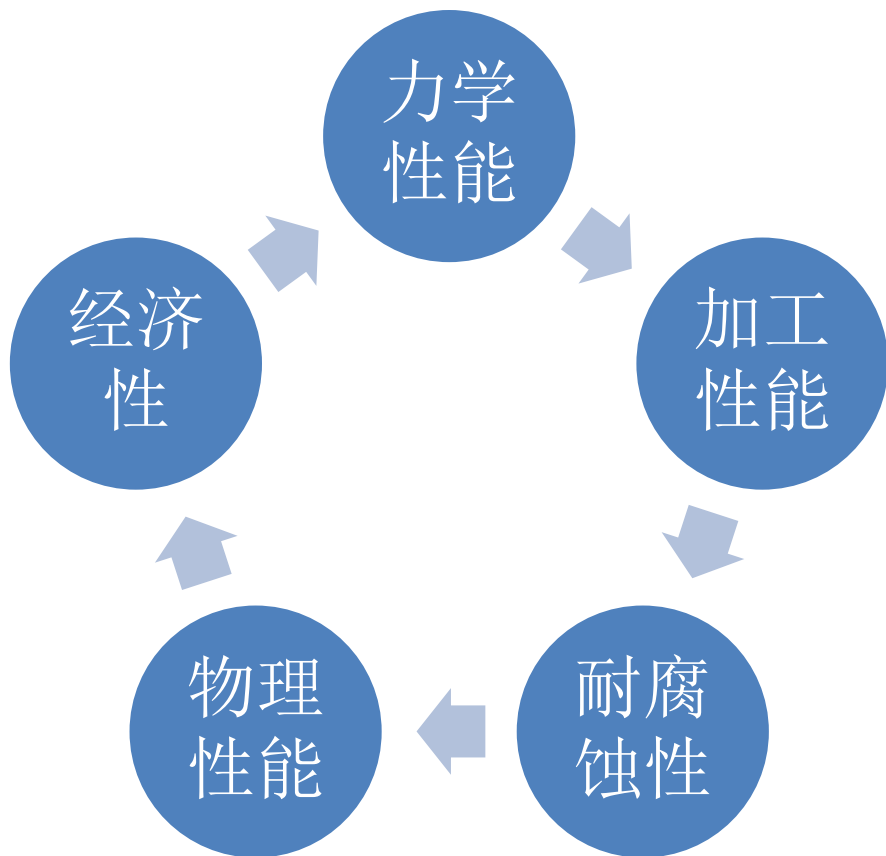


选材原则：安全、适用、经济

选材的基本要求：

1. 材质性能适用可靠，保证一定使用寿命；
2. 材料品种应符合国家资源和供应情况；
3. 经济上合算。

1. 过程设备材料的基本要求



1. 过程设备材料的基本要求

★ 力学性能要求

1. 强度

是材料抵抗塑性变形和破坏的能力

是确定材料许用应力的依据， σ_s ， σ_b

* 材料在高温和低温下的强度

1. 过程设备材料的基本要求



2. 塑性：材料在外力作用下，产生塑性变形而不破坏的能力，即材料断裂前塑性变形的能力，反应材料可塑性的指标。材料延伸率 $\delta=10\sim20\%$

3. 韧性：指材料在塑性变形直至断裂的全过程中吸收的能量，是材料强度和塑性的综合表现能力。一般用冲击韧性来评定。 $AK\text{ (J/cm}^2\text{)}$

4. 硬度：指材料抵抗外物压入的能力，有HB，HR。

1. 过程设备材料的基本要求

★ 加工性能要求

可焊性

- 少的焊接缺陷

可锻性

- 不发生热脆

可塑性

- 优良的塑性加工性能

机械加工性能

- 保证良好的切削性

可铸性好

- 铸造中收缩和偏析小

1. 过程设备材料的基本要求

★ 耐腐蚀性能

耐腐蚀性：抵抗腐蚀性介质侵蚀的能力。

腐蚀：由于环境作用引起的破坏或变质。分
化学腐蚀和电化学腐蚀。

抗氧化性：抵抗介质中的自由氧、硫及其它
杂质对钢的氧化腐蚀作用。

1. 过程设备材料的基本要求



★ 材料的物理性能

导热系数

- 设备要求传热

线膨胀系数

- 防止热应力

密度

- 决定设备的重量

熔点和导电性

- 消除静电

1. 过程设备材料的基本要求

★ 材料的经济性

- ✓ 碳素钢和普通低合金钢：满足设备耐腐蚀和力学性能的前提下优先使用。
- ✓ 因地制宜
- ✓ 同一台设备所选用的材料少而集中

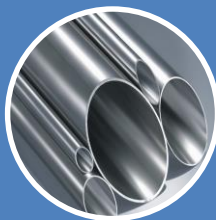
2. 过程设备常用材料特性



2. 过程设备常用材料特性



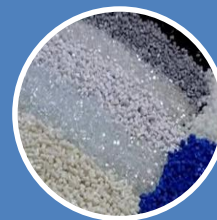
制药设备



金属材料



非金属材料



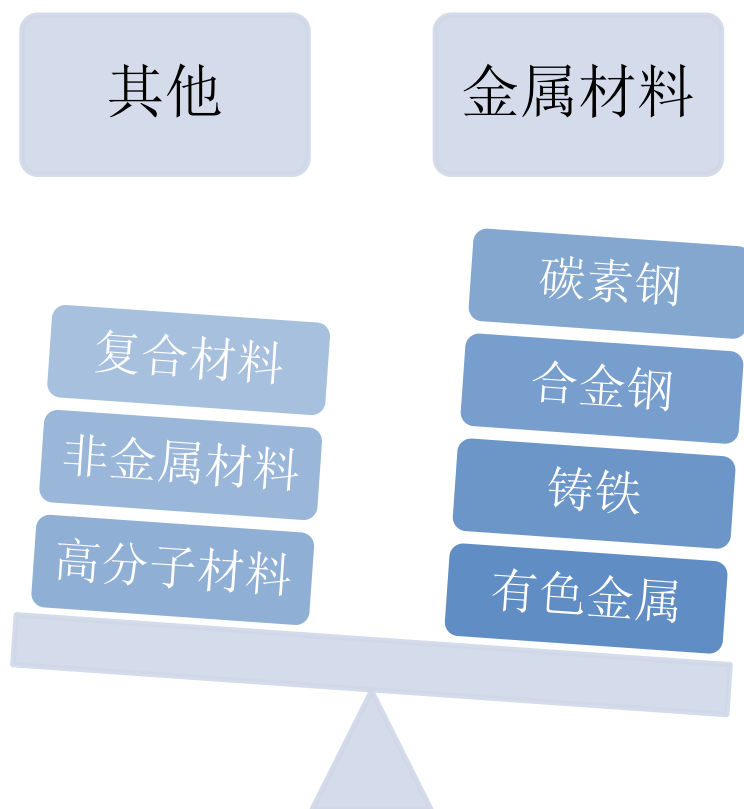
高分子材料



复合材料

按化学成分

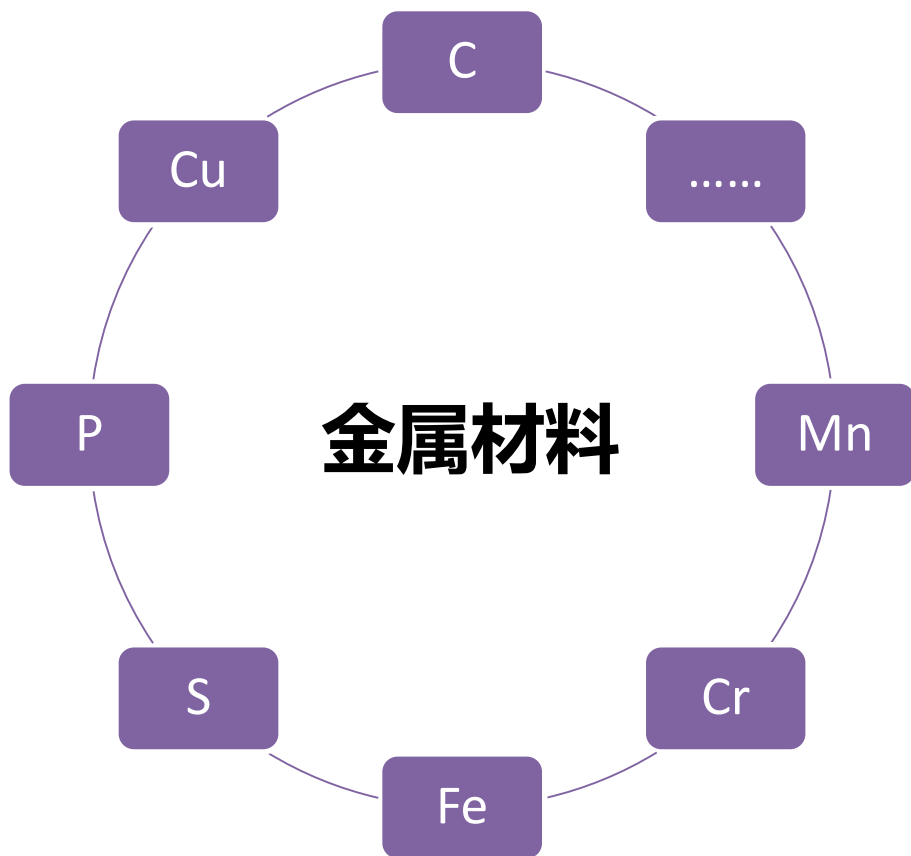
2. 过程设备常用材料特性



为什么?

金属材料的使用
占90%以上!

2. 过程设备常用材料特性



- 碳素钢
- 合金钢
- 铸铁

2. 过程设备常用材料特性

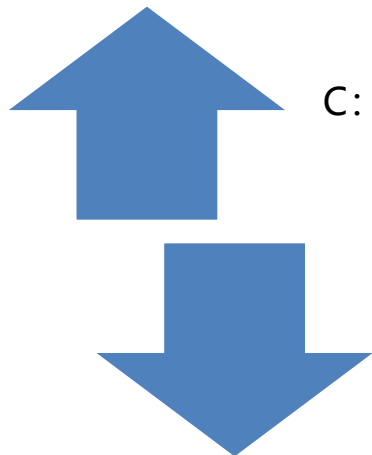
• 碳素钢

碳钢：碳含量在**0.02~2%**之间的铁碳合金；

铸铁：碳含量大于**2%**的铁合金。

由Fe、C、Mn、Si、S、P组成。

杂质的含量



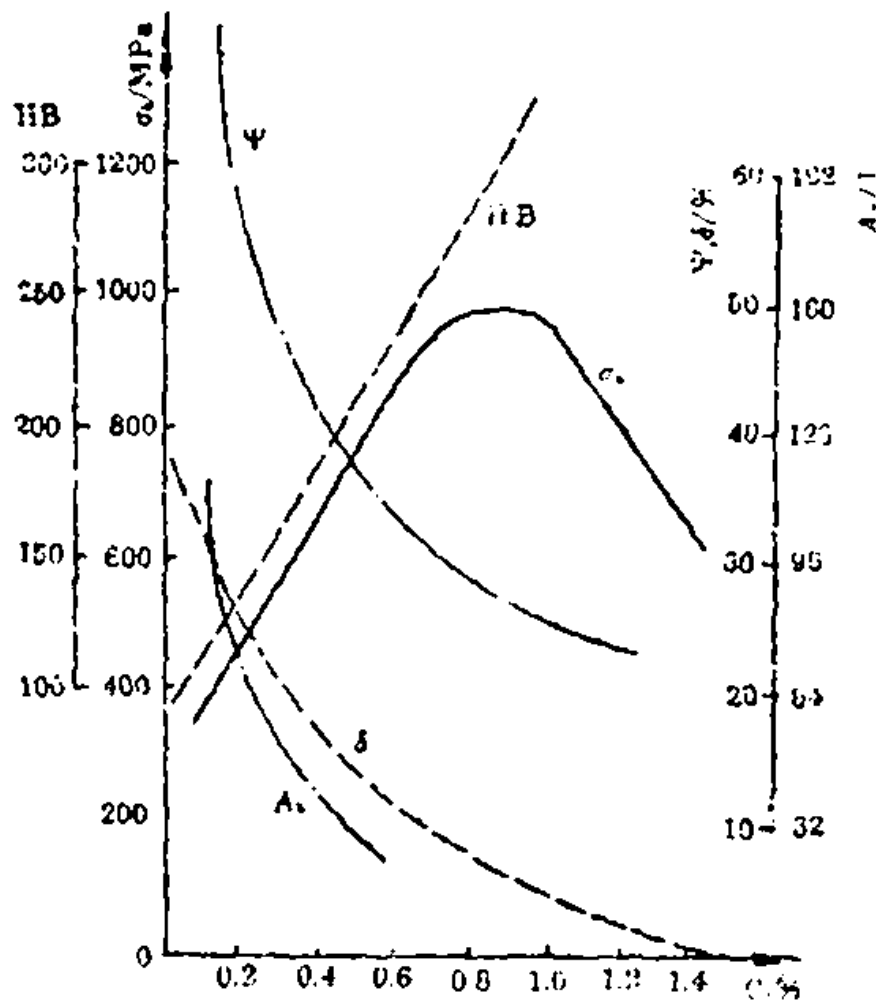
C：强度提高，韧性下降

S：FeS的形式存在，熔点低，热脆

P：塑性和冲击韧性下降，冷脆

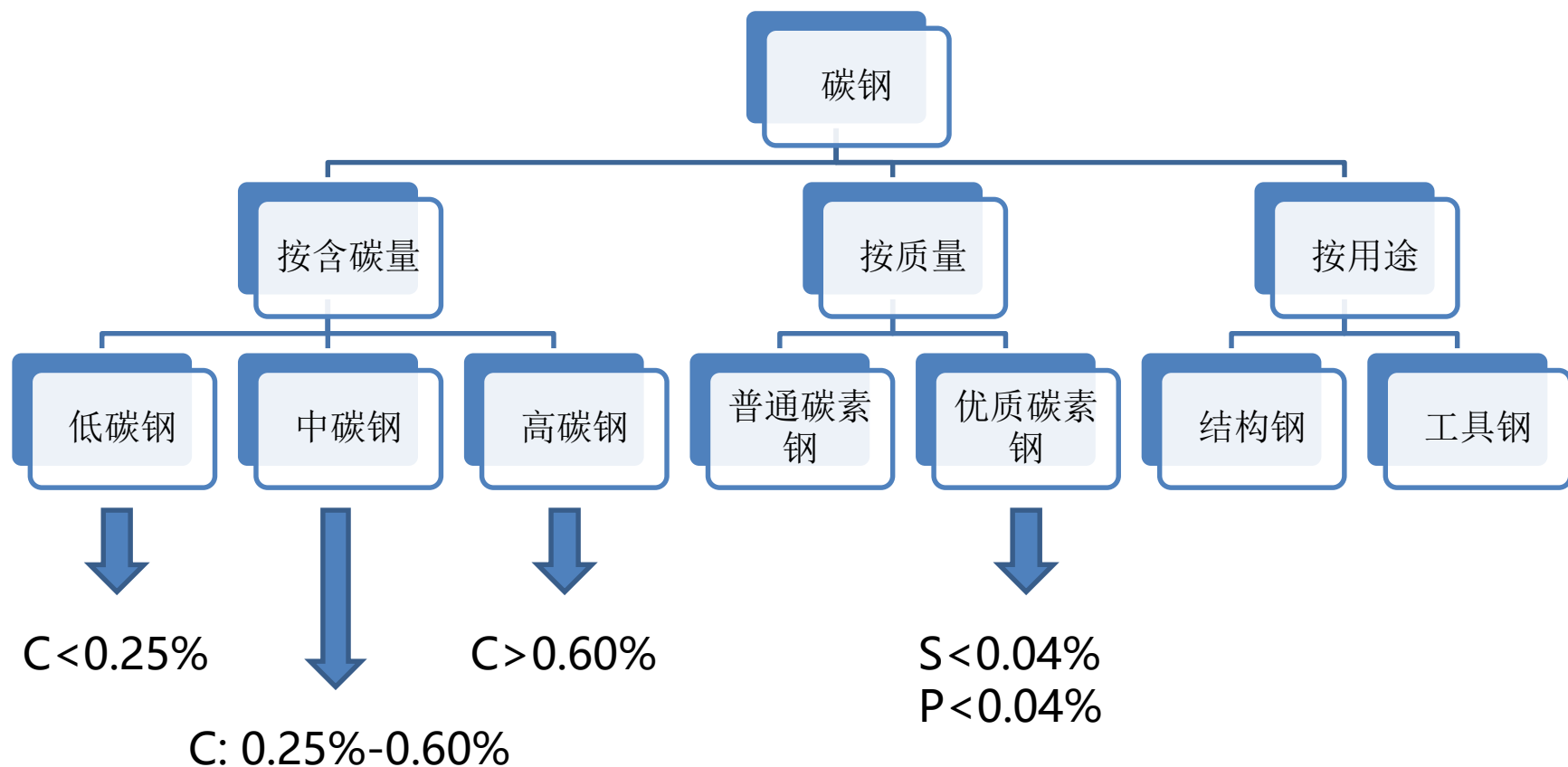
Mn， Si：有利于改善钢的力学性能

2. 过程设备常用材料特性



碳含量对材料机械性能影响

2. 过程设备常用材料特性



2. 过程设备常用材料特性



普通碳素结构钢：GB700-88

Q235—A·F—GB700-88

国标号

产品质量等级，共分A、B、C、D四级

材料屈服限的保证值，(厚度小于16mm)

F：沸腾钢，Z：镇静钢，b：半镇静钢

2. 过程设备常用材料特性

优质碳素结构钢：

除保证机械性能和化学成分外，还对磷、硫及非金属夹杂物控制较严： $C\%$ 、 $P\% < 0.04\%$ 。它的牌号以含碳量的万分之数而定。

分类

优质低碳钢： $< 0.25\%$ ，强度低，塑性好，冷冲压和焊接性能好，在石油化工设备中广泛应用。

优质中碳钢： $0.25 \sim 0.60\%$ ：强度硬度高，塑性韧性差；多用于传动设备及高压设备头盖零件。

优质高碳钢： $> 0.6\%$ ；强度硬度均较高，塑性差，常用于制造弹簧，刀具及耐磨零件。

2. 过程设备常用材料特性



锅炉和压力容器用钢有特殊性，经常采用专门用途的锅炉用钢和容器用钢。在钢号后分别以“**g**”和“**R**”来表示。

如 20g, 20R, 16MnR

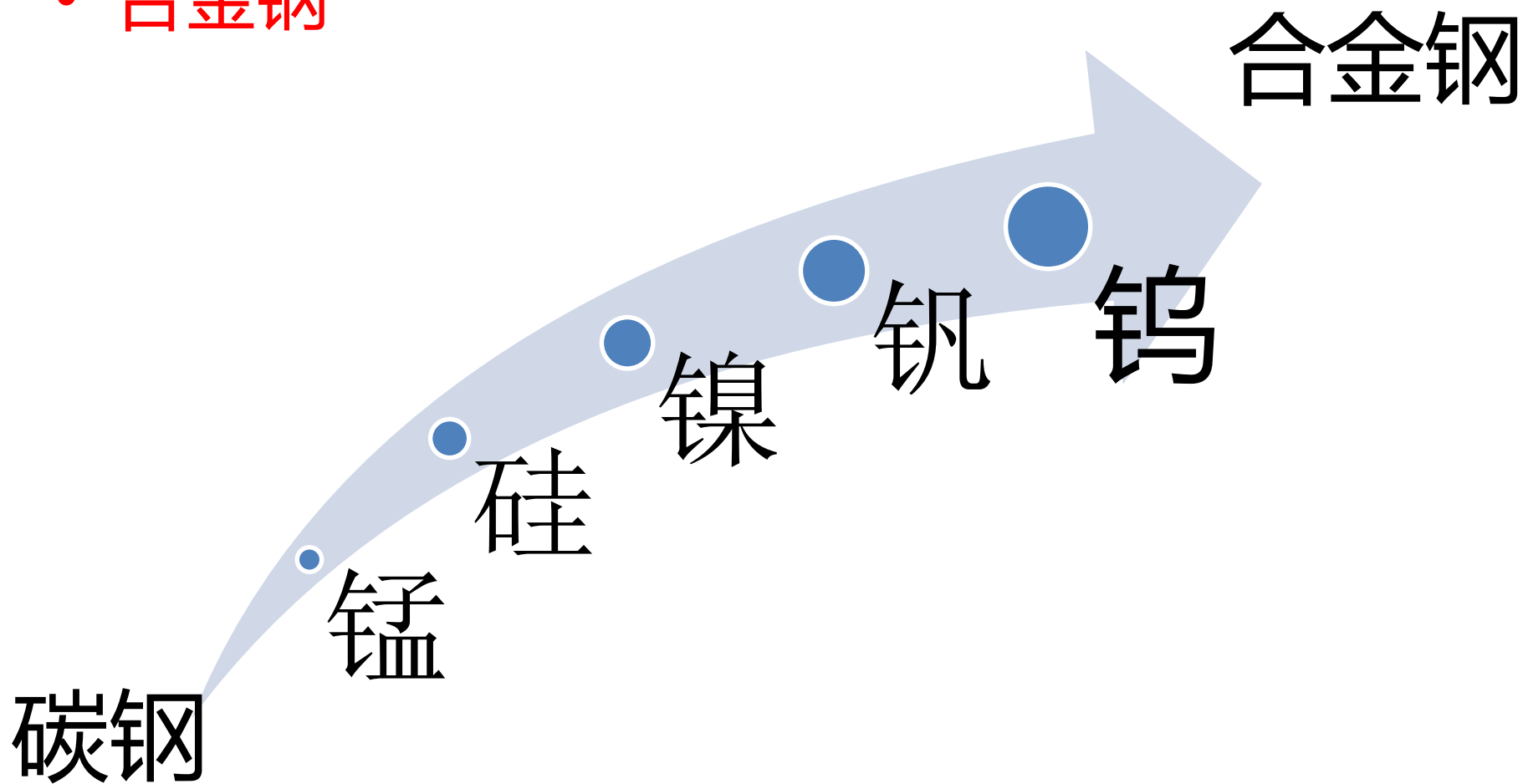
铸钢： **ZG200—400**

屈服限

强度限

2. 过程设备常用材料特性

- 合金钢



2. 过程设备常用材料特性



合金钢的分类

按合金钢的用途分：

(1)合金结构钢

主要用于制造重要的机械零部件和工程结构件的钢。包括普通低合金钢、易切削钢、渗碳钢、调质钢、弹簧钢、滚动轴承钢等。

(2)合金工具钢

主要用于制造重要工具的钢，包括刀具钢、模具钢、量具钢等。

(3)特殊性能钢

主要用于制造有特殊物理、化学、力学性能要求的钢，包括不锈钢、耐热钢、耐磨钢等。

2. 过程设备常用材料特性



合金钢的分类

6.2.1.2 按合金元素的含量分类

碳钢：

- (1)低碳钢: $\leq 0.25\%c$
- (2)中碳钢: $0.25-0.6\%c$
- (3)高碳钢: $\geq 0.6\%c$

合金钢：

- (1)低合金钢：钢中合金元素总的质量分数 $W_{Me} \leq 5\%$ 。
- (2)中合金钢：钢中合金元素总的质量分数 W_{me} ： $5\% \sim 10\%$ 。
- (3)高合金钢：钢中合金元素总的质量分数 $W_{Me} \geq 10\%$ 。

2. 过程设备常用材料特性



合金钢的分类

按平衡状态或退火组织分类

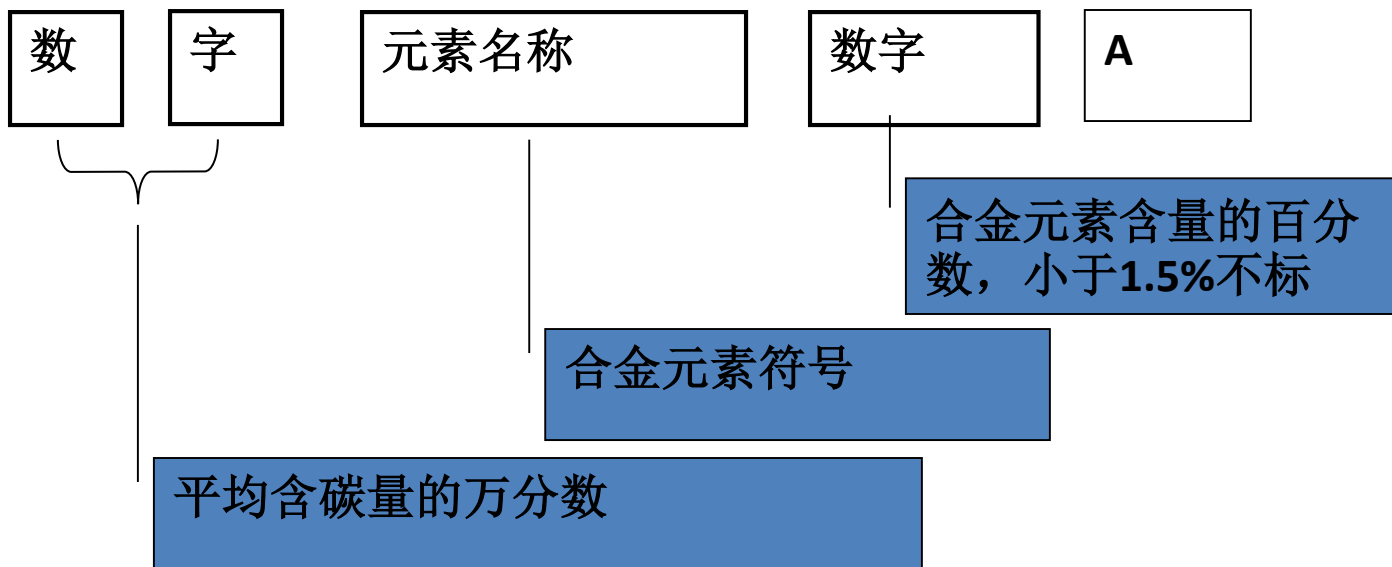
亚共析钢

共析钢

过共析钢和莱氏体钢

2. 过程设备常用材料特性

1、合金结构钢

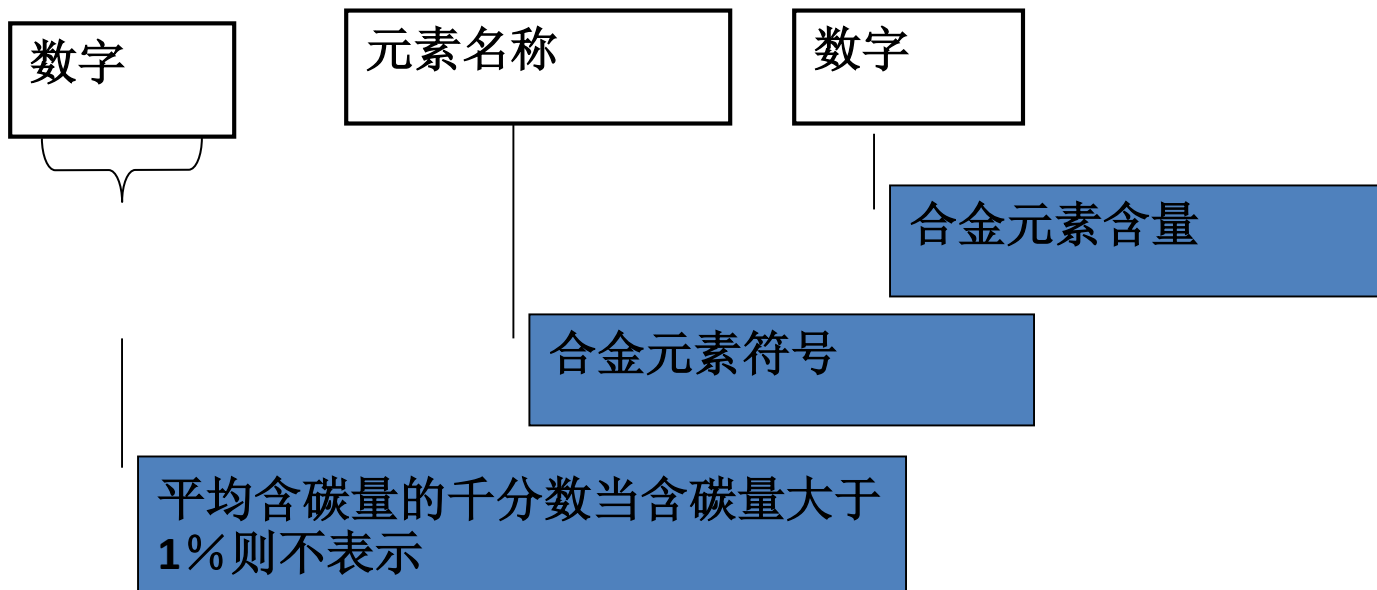


主要牌号： 16MnR， 15MnVR， 18MnMoNbR， 35CrMoA

压力容器用低合金钢：合金元素总含量小于5%

2. 过程设备常用材料特性

2、合金工具钢



如 **9SiCr**（冷冲模具用钢）

W18Cr4V(高速钢，如齿轮铣刀用钢)

2. 过程设备常用材料特性

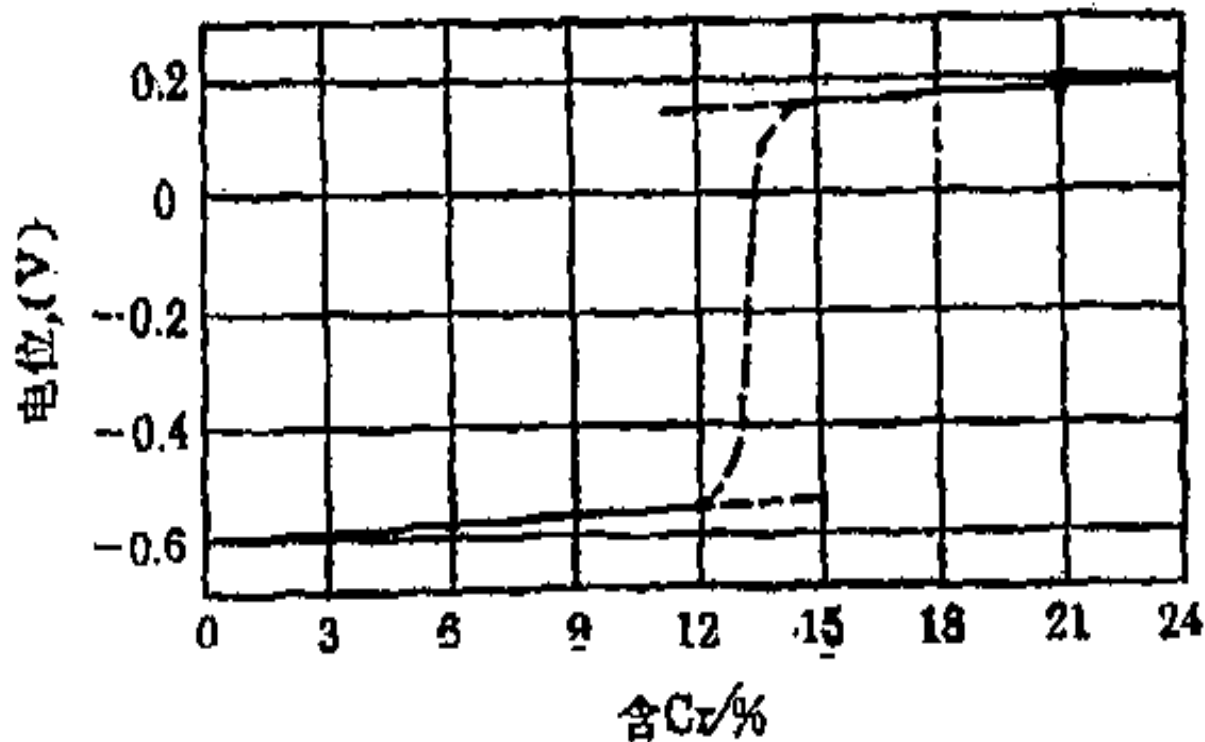
3、特殊钢

1) 不锈钢

耐大气腐蚀钢和耐化学介质腐蚀钢的总称。

- 分类 {
- 铬不锈钢: 1Cr13、0Cr13、9Cr18 ;
 - 铬镍不锈钢 (18-8): 0Cr18Ni9、00Cr18Ni9;
 - 节镍不锈钢: 1Cr18Mn8Ni5N、0Cr17Mn13Mo2N
- 00: $C\% \leq 0.03\%$; 0: $C\% \leq 0.08\%$;
1: $0.08\% \leq C\% \leq 0.12\%$

2. 过程设备常用材料特性



Cr对材料电极电位的影响

2. 过程设备常用材料特性



铬不锈钢： 1Cr13、0Cr13、9Cr18；

调质处理后有较强的强度和韧性；

弱腐蚀介质，温度低于30°C，有良好的耐蚀性；

在硫酸、盐酸、熔融碱液中耐蚀性差；

铬镍不锈钢： 典型钢号(18-8)
0Cr18Ni9、00Cr18Ni9；

一般固溶处理；

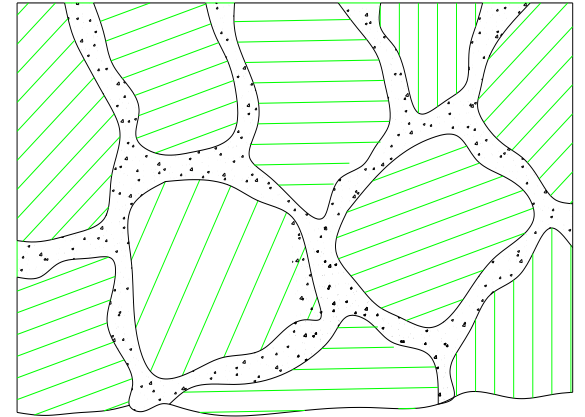
较高的强度，极好的塑性和韧性，焊接性能好；

比铬不锈钢更好的耐蚀性；还原性介质、 Cl^- 不耐蚀；

容易发生晶间腐蚀。

2. 过程设备常用材料特性

晶间腐蚀



★ 发生晶间腐蚀的原因是什么？

★ 防止发生晶间腐蚀的方法：

- 1 固溶处理；
- 2 减少钢中含碳量；
- 3 加入强亲碳元素：Ti、Nb

2. 过程设备常用材料特性



2) 高温用钢

分为： 抗氧化钢 和 热强钢

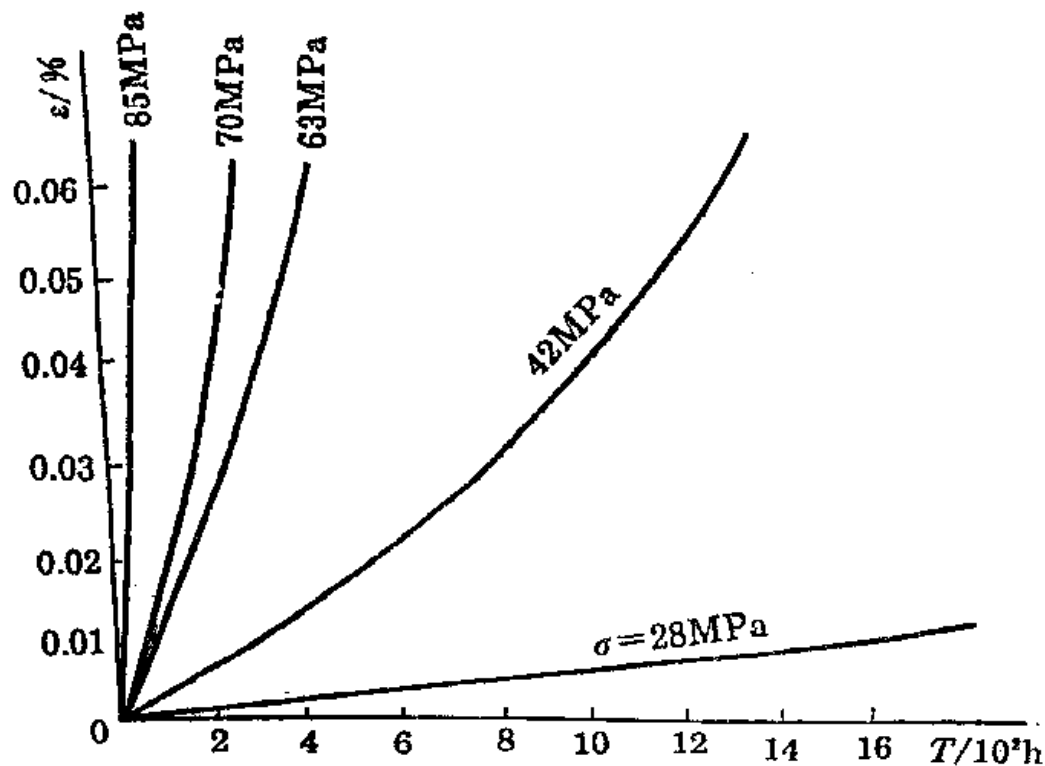
抗氧化钢：1Cr13Si3, 1Cr23Ni13

热强钢：15CrMo, 12Cr2Mo1, 1Cr5Mo,
0Cr19Ni9, 0Cr17Ni12Mo2等

3) 低温用钢

以高铬镍钢为主

2. 过程设备常用材料特性



低碳钢在538°C下的蠕变量与时间T的关系

2. 过程设备常用材料特性



- 铸铁：含碳量2.5%-4.0%

灰口铸铁：碳以自由态片状石墨存在，抗拉强度低，挤压强度高，用于制造耐压件。

HT100

可锻铸铁：石墨成团絮状，具有一定强度和塑性，用于有振动和冲击的场合

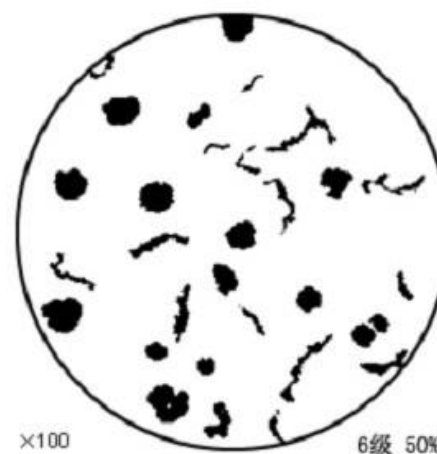
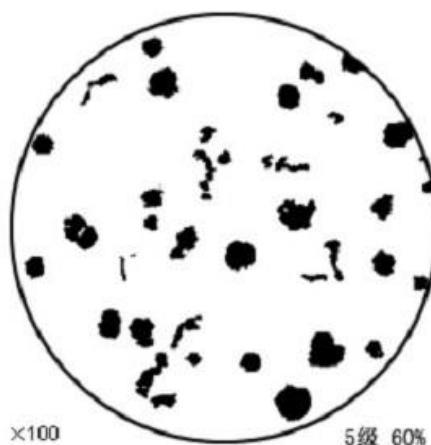
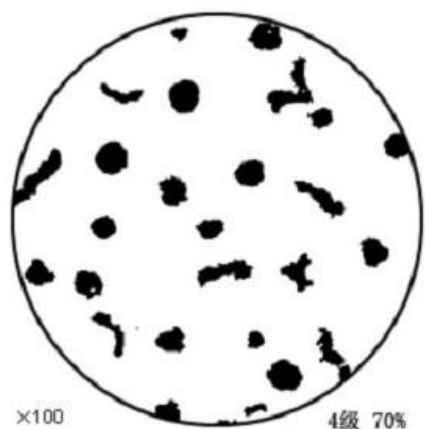
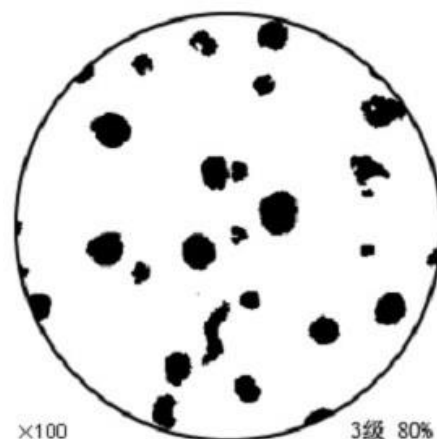
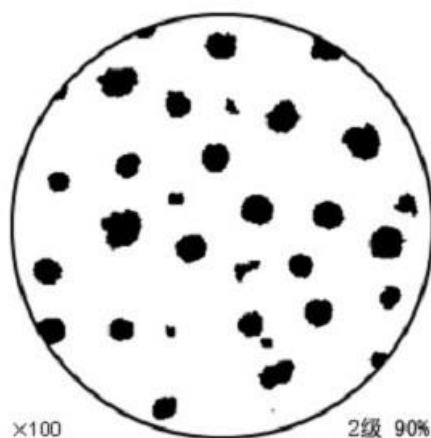
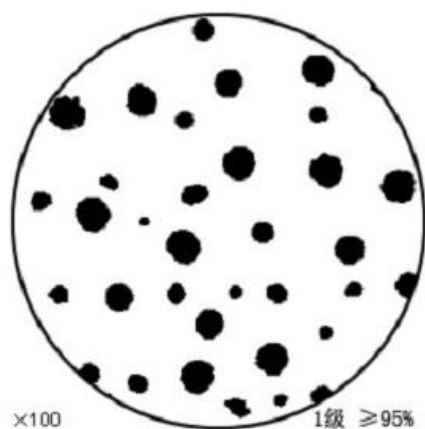
KTH300—06

球墨铸铁：石墨成球状，强度、塑性、韧性好
可替代铸钢

QT500—5

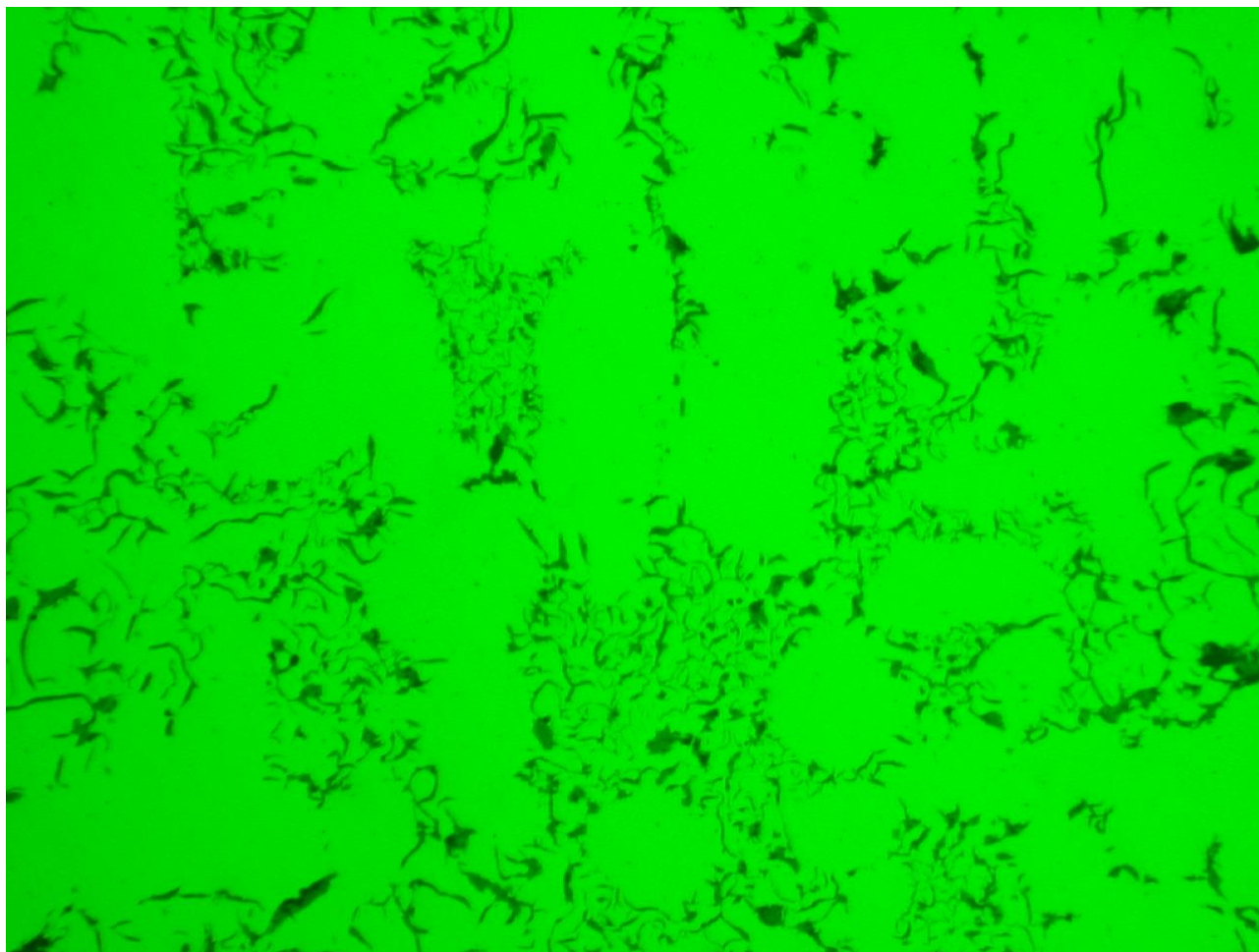
2. 过程设备常用材料特性

球墨铸铁的金相组织



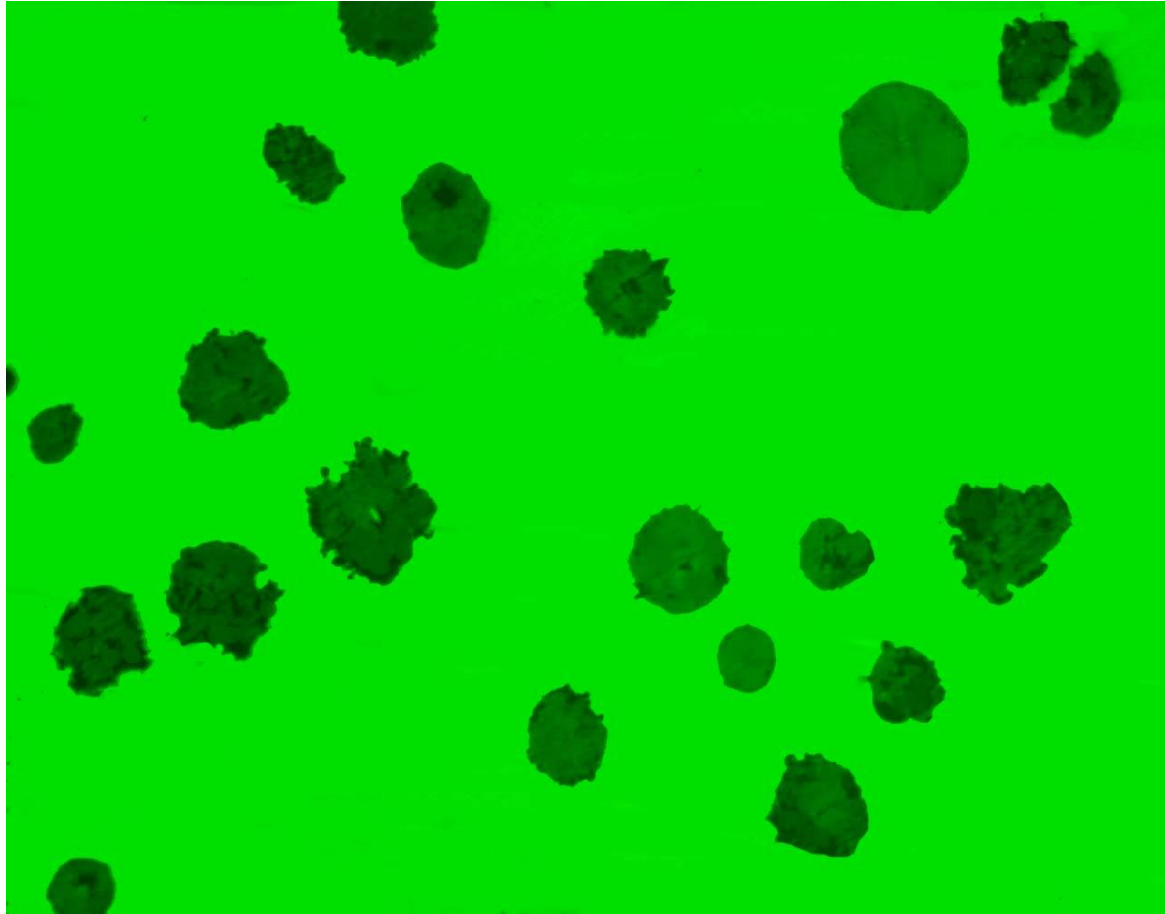
石墨形态：球状石墨、团状、团絮状、蠕虫状、片状

2. 过程设备常用材料特性



球化效果差，石墨形态为片状和蠕虫状

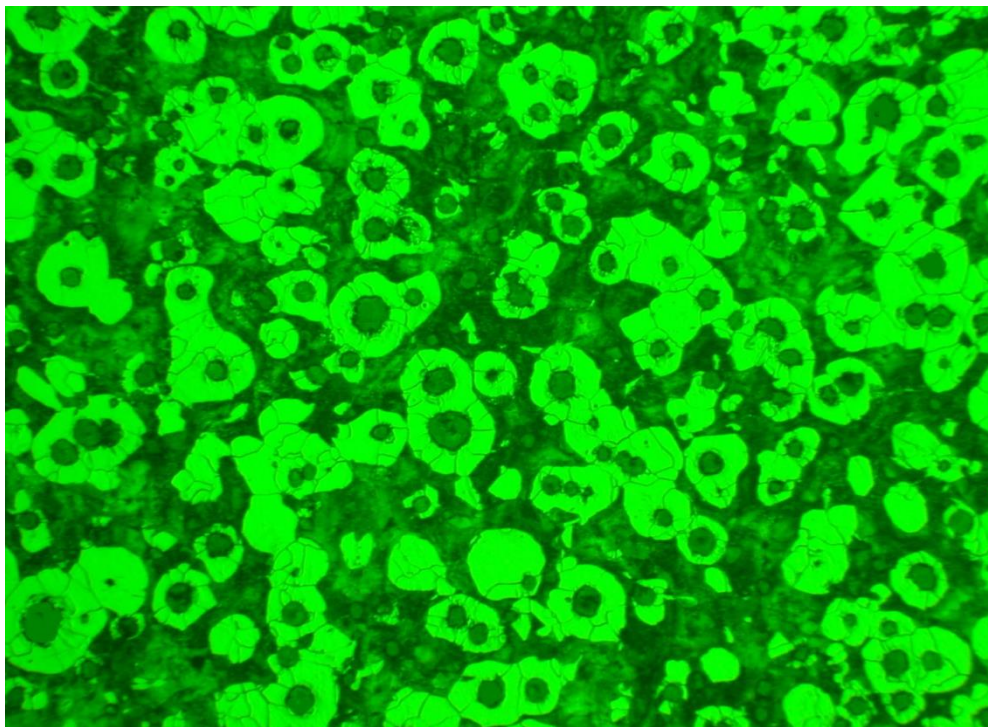
2. 过程设备常用材料特性



石墨形态：球状石墨、团状、团絮状、蠕虫状、片状
石墨大小：1~7级

2. 过程设备常用材料特性

球墨铸铁的金相组织



球墨铸铁基体组织：铁素体+珠光体，
珠光体含量≈65%

2. 过程设备常用材料特性



- 珠光体为基体的球墨铸铁强度高
- 铁素体为基体的球墨铸铁塑性韧性好
- 珠光体+铁素体为基体的球墨铸铁力学性能介于二者之间。

2. 过程设备常用材料特性

四) 有色金属及合金

铜及铜合金 { 紫铜：T1，T2，T3

黄铜：H80，H68，H62

铝及铝合金 { 铝：L1,L2,.....L6

硬铝：Al-Cu-Mg的合金,LY1L-1L-2

防锈铝：Al-Mg的合金，LF21

铸铝：Al-Si的合金，ZL107

镍及镍合金 { 作耐磨件：蒙乃尔合金

作腐蚀件：Inconel合金和海氏合金

铅及铅合金：铅锑合金，PbSb4,

2. 过程设备常用材料特性

五) 非金属材料

无机材料

化工陶瓷：化学稳定性好

玻璃：表面光洁、耐腐蚀（搪玻璃设备）

水泥：价廉

天然耐酸材料：花岗石、石墨、石棉等

有机材料

耐酸酚醛塑料

聚氯乙烯塑料

聚乙烯

聚四氟乙烯

玻璃钢

3.钢的热处理

晶体：原子(离子或分子)在三维空间有规则的周期性重复排列的物体。

非晶体：原子(离子或分子)在空间无规则排列的物体。

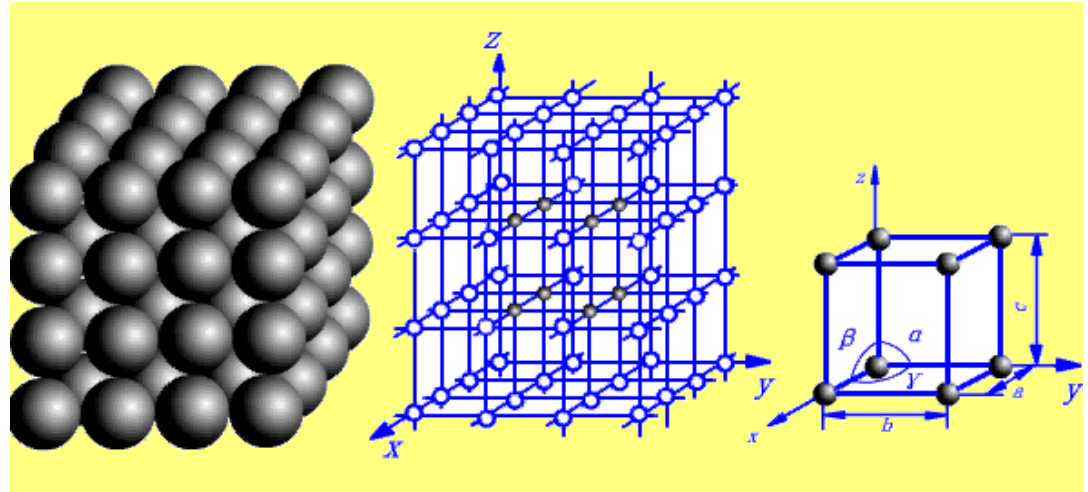


3.钢的热处理

晶体结构：

晶体中原子(离子或分子)规则排列的方式。

晶格：通过金属原子的中心划出许多空间直线，这些直线将形成空间格架。这种假想的格架称为晶格。



(a)晶体

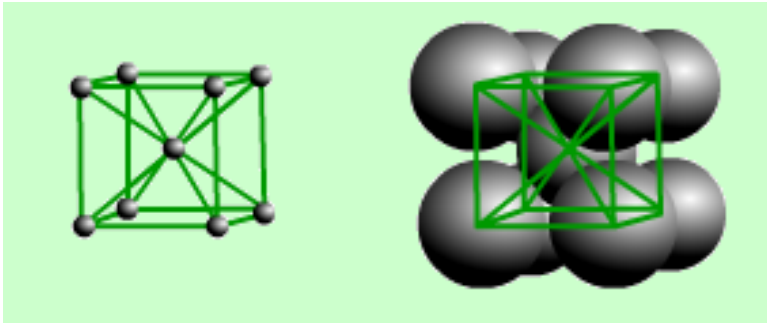
(b)晶格

(c)晶胞

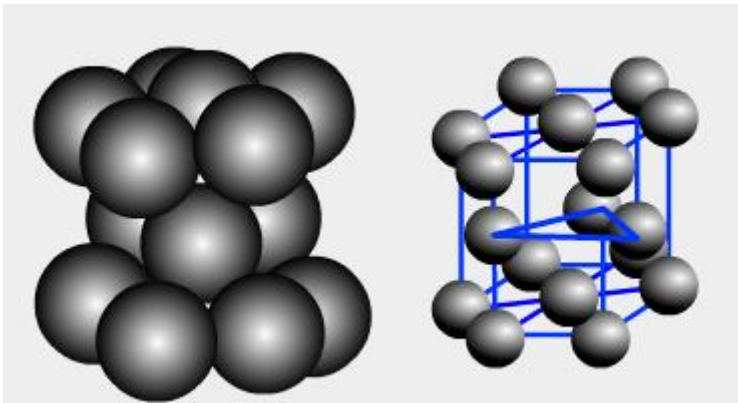
晶胞：能反映晶格特征的最小组成单元。

3.钢的热处理

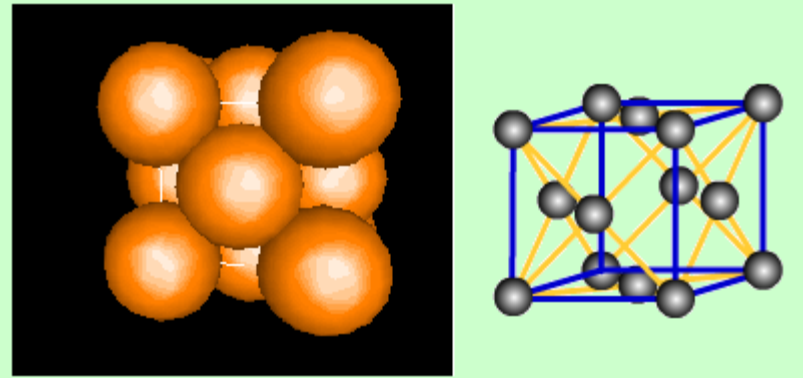
★ 三种常见金属晶体的结构



体心立方：如Cr、Fe



密排六方：如Zn、Cr



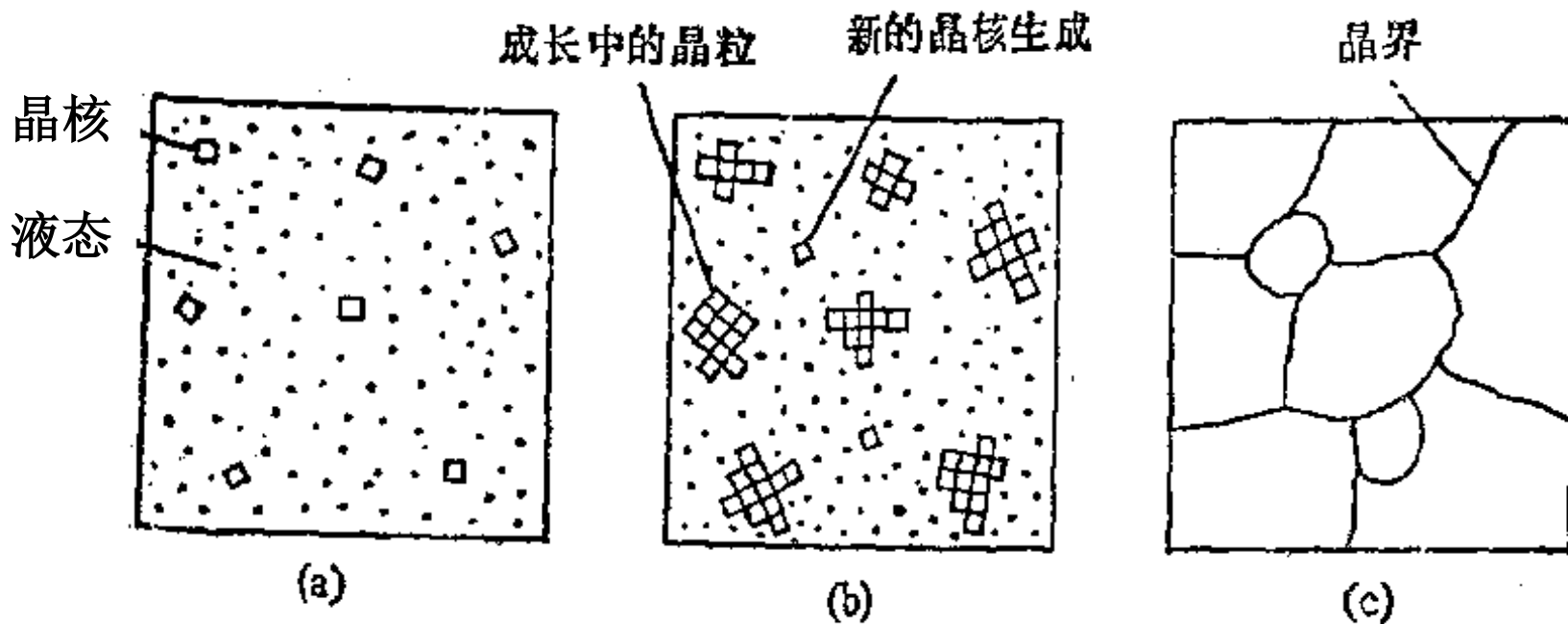
面心立方：如Cu、Ni、Fe

3.钢的热处理

表 常用金属的晶体结构

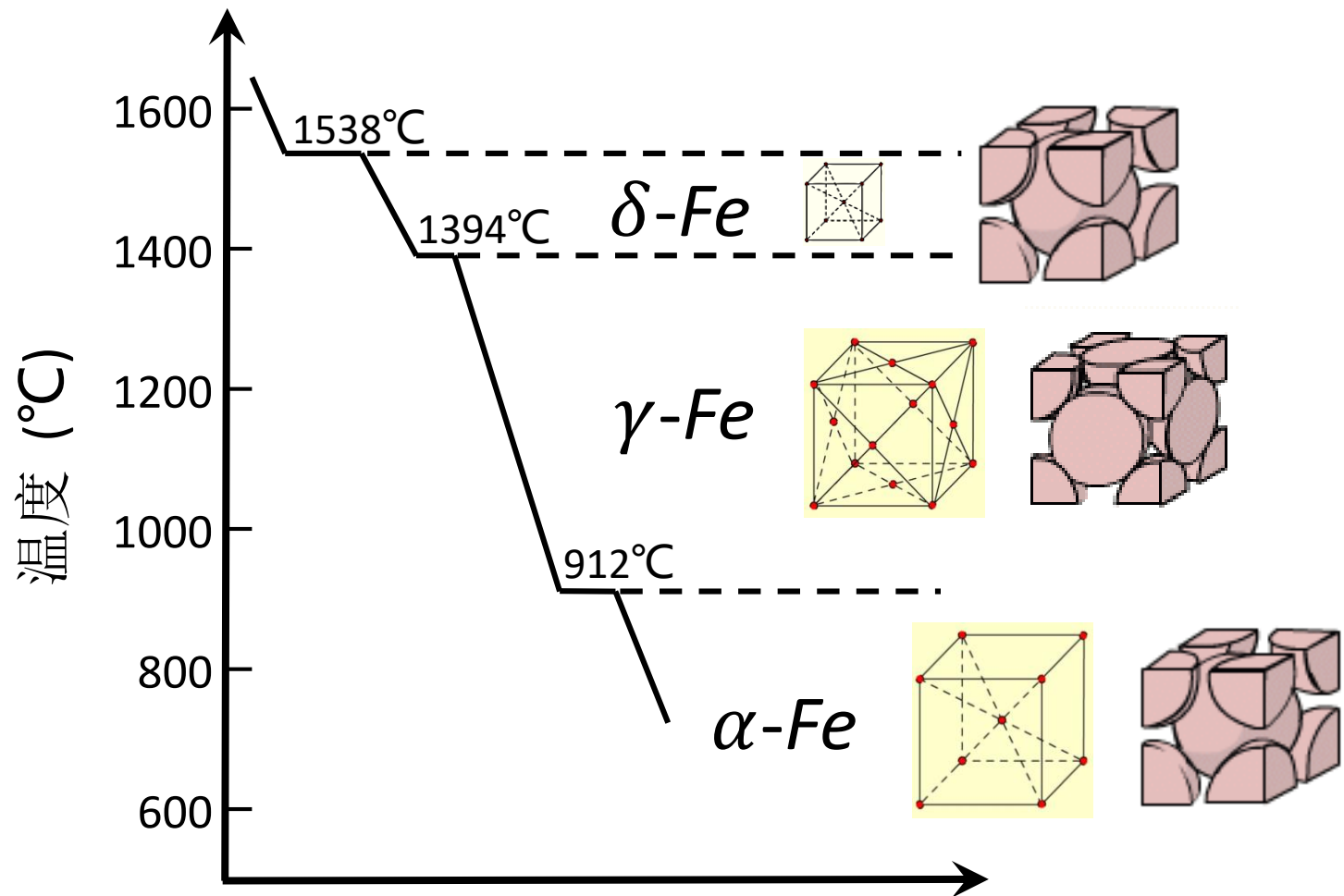
	Be	Mg	Al	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Ag	W	Pt	Au	Pb
B. C. C.				✓	✓	✓	✓	✓					✓		✓			
F. C. C.			✓				✓	✓	✓	✓	✓			✓		✓	✓	✓
H. C. P.	✓	✓		✓		✓			✓			✓						

3.钢的热处理



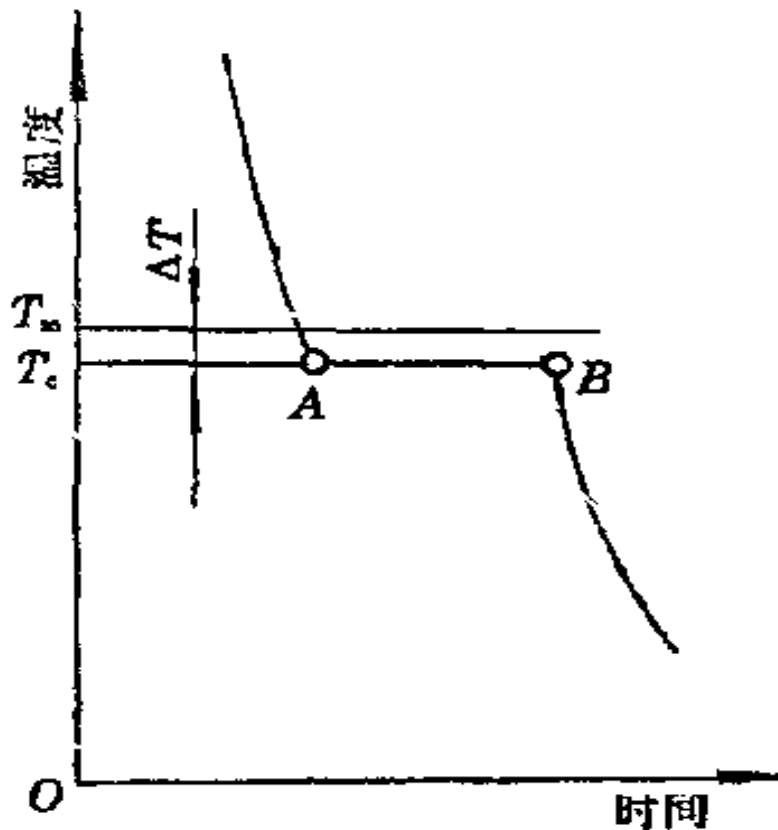
• 金属结晶过程

纯铁晶体结构



3.钢的热处理

★ 金属的结晶过程

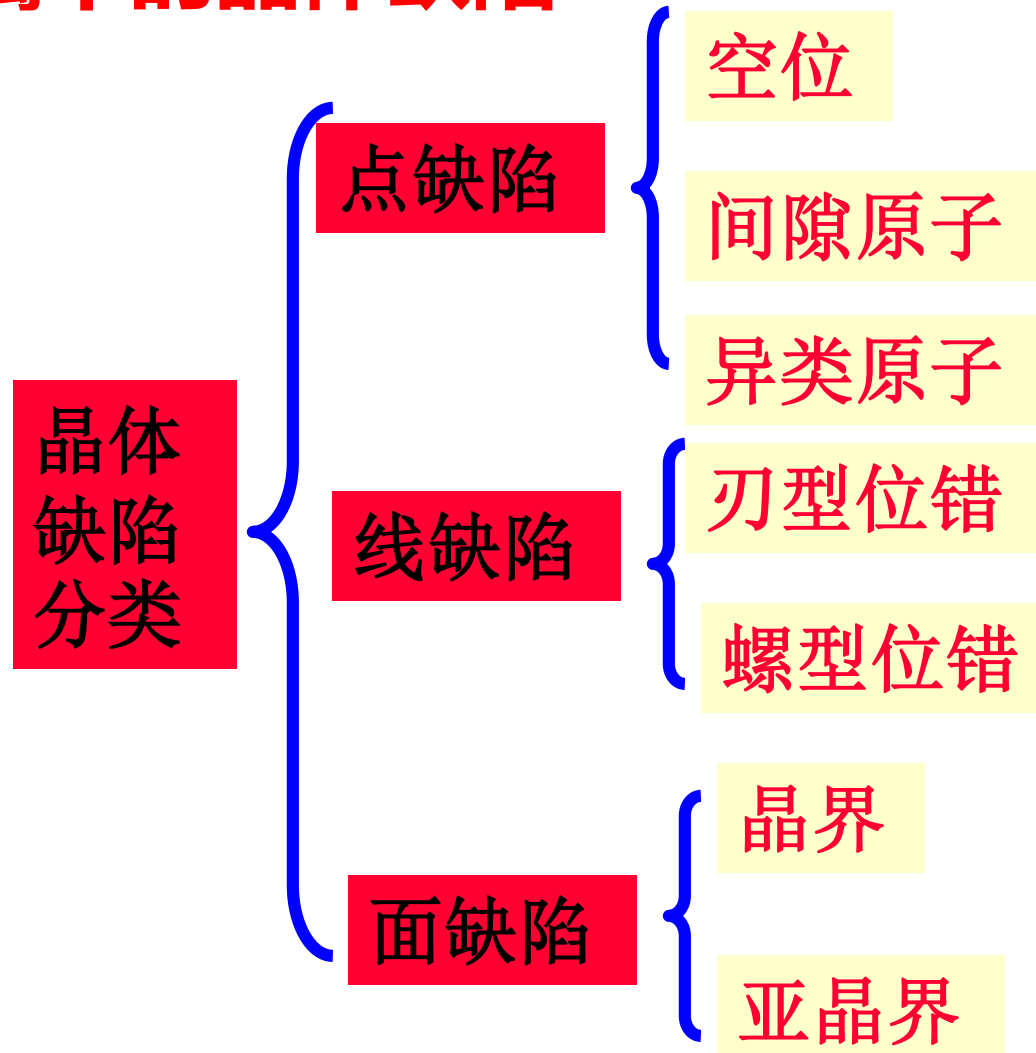


各向异性：在晶体中，不同晶面和晶向上原子排列的方式和密度不同，它们之间的结合力的大小也不相同，因而金属晶体不同方向上的性能不同。这种性质叫做晶体的各向异性。

3.钢的热处理

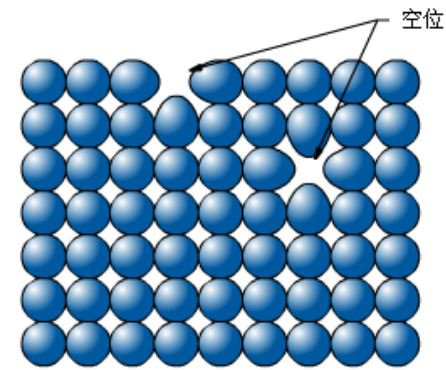


实际金属中的晶体缺陷

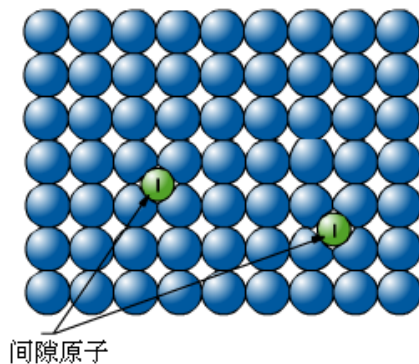


3.钢的热处理

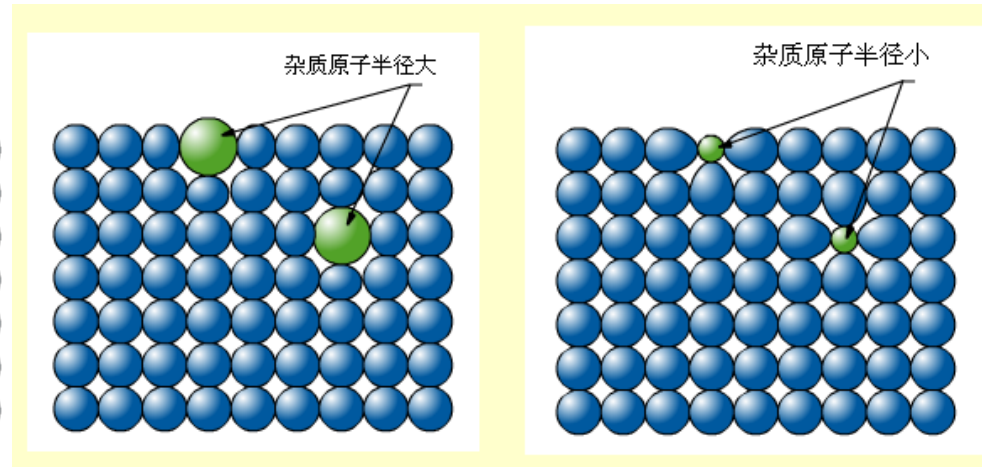
(1)点缺陷:指在三维尺度上都很小的,不超过几个原子直径的缺陷。



空位



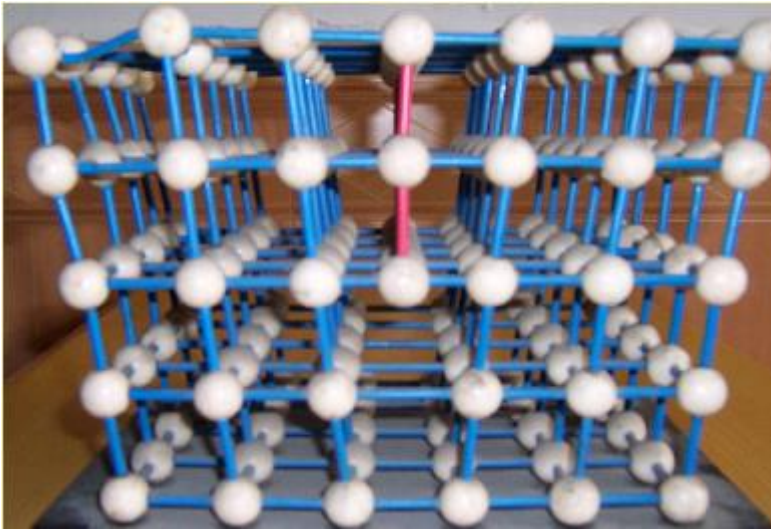
间隙原子



杂质原子

3.钢的热处理

(2)线缺陷:指二维尺度很小而第三维尺度很大的缺陷。位错(dislocation)

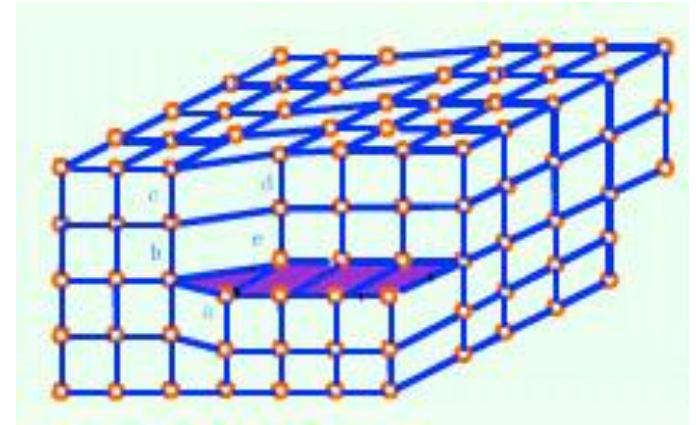


刃型位错(edge dislocation)

在金属晶体中，由于某种原因，晶体的一部分相对于另一部分出现一个多余的半原子面。这个多余的半原子面犹如切入晶体的刀片，刀片的刃口线即为位错线。这种线缺陷称为刃型位错。

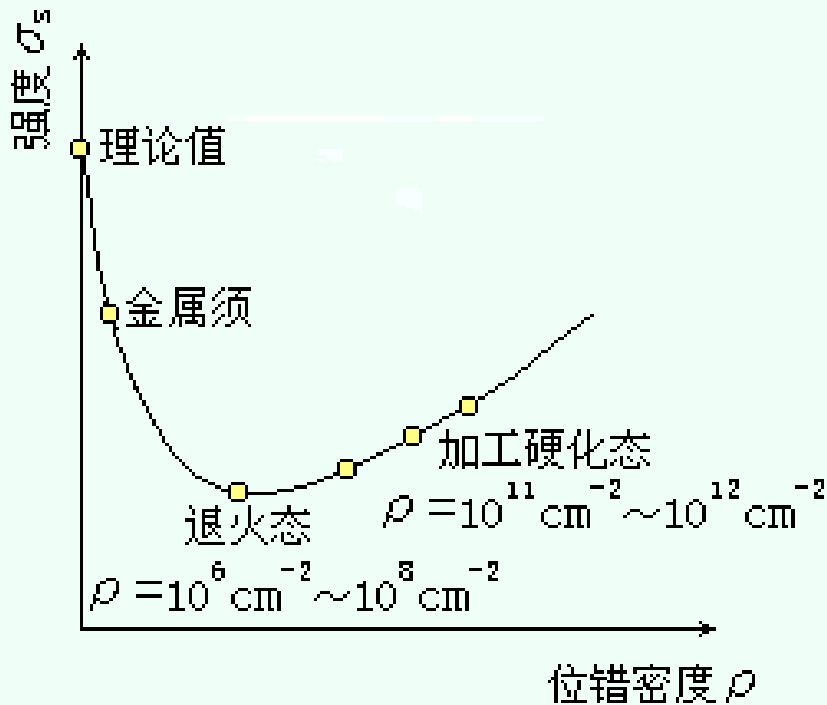
3.钢的热处理

晶体右边的上部原子相对于下部的原子向后错动一个原子间距，即右边上部相对于下部晶面发生错动。若将错动区的原子用线连接起来，则具有螺旋型特征。这种线缺陷称为螺型位错。



螺型位错
(screw dislocations)

3.钢的热处理

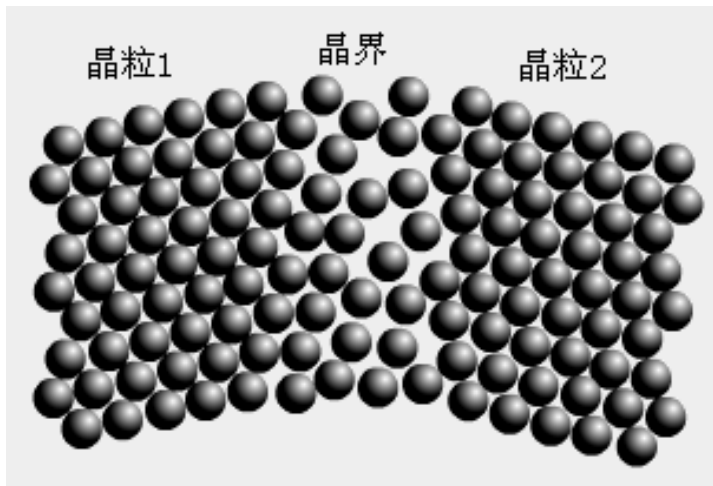


位错的存在极大地影响金属的机械性能。当金属为理想晶体或仅含有极少位错时，金属的屈服强度 σ_s 很高，但含有一定量的错位时，强度降低。当进行形变加工时，位错密度增加， σ_s 将会增高。

图 金属的强度与位错密度的关系

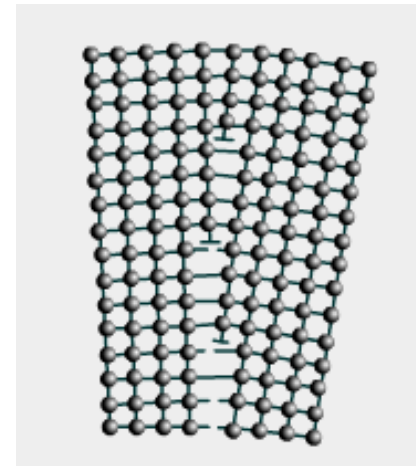
3.钢的热处理

(3)面缺陷:指二维尺度很大而第三维尺度很小的缺陷。



晶界

晶界：晶粒与晶粒之间的接触界面叫做晶界。



亚晶界

亚晶界：亚晶粒之间的边界界面叫做亚晶界。

晶界和亚晶界均可提高金属的强度。晶界越多，晶粒越细，金属的塑性变形能力越大，塑性越好。

3.钢的热处理



★ 合金的晶体结构

合金：一种元素同另一种或几种其他元素，通过熔化或其他方法结合在一起所形成的具有金属特性的物质。

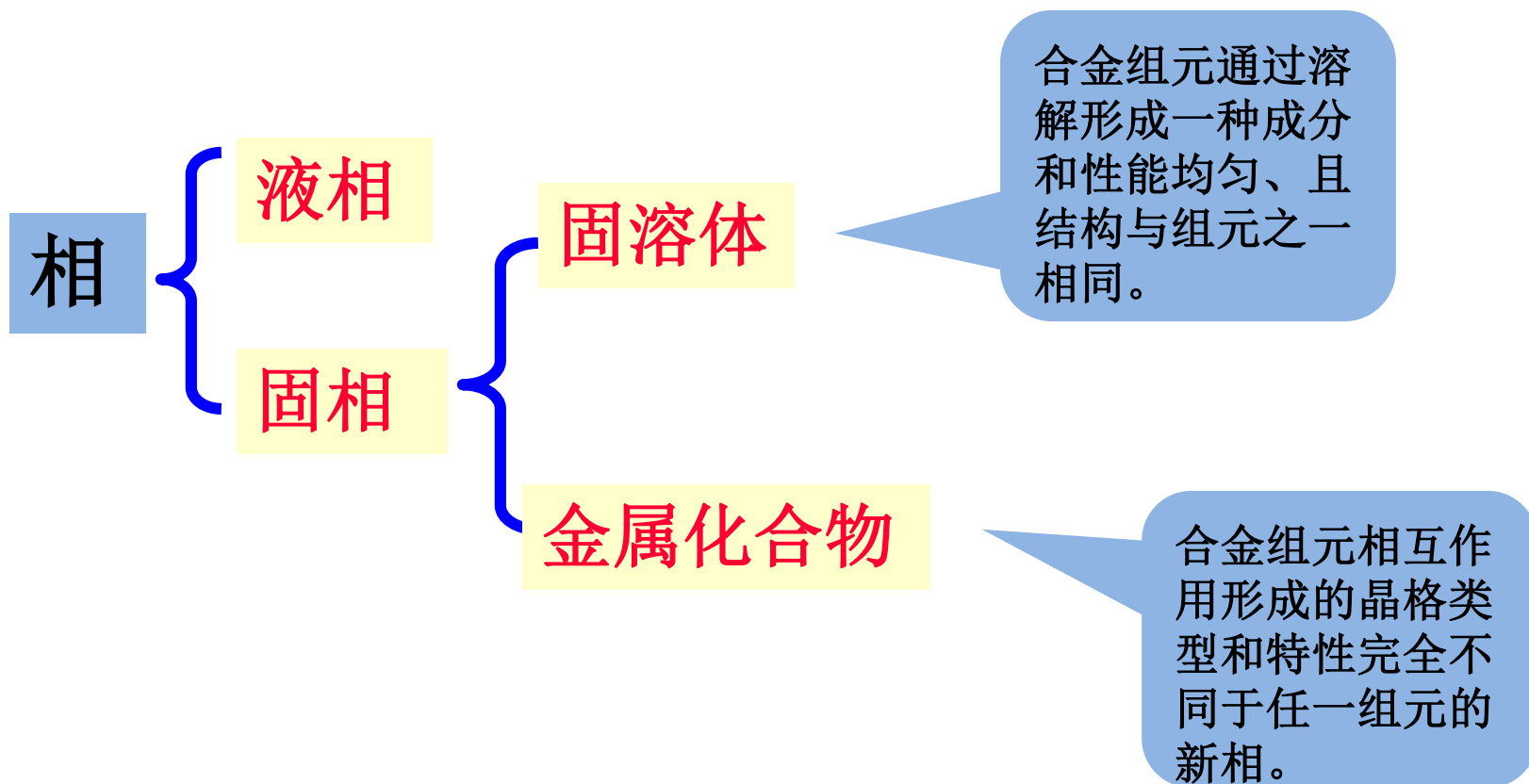
组元：组成合金独立的最基本的单元。

由两个组元组成的合金称为二元合金。

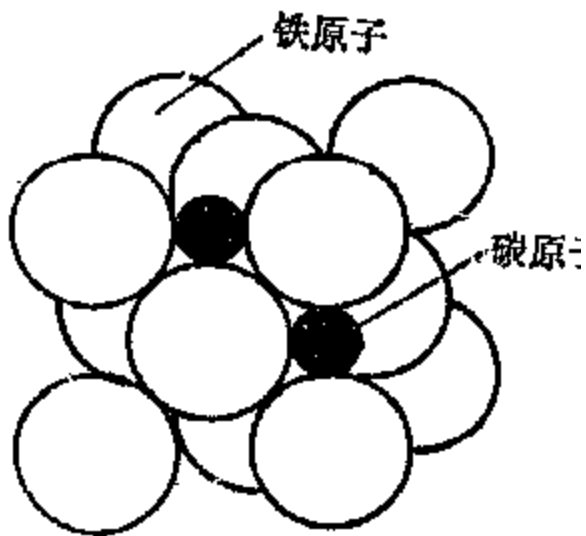
如：铁碳合金、铜镍合金

3.钢的热处理

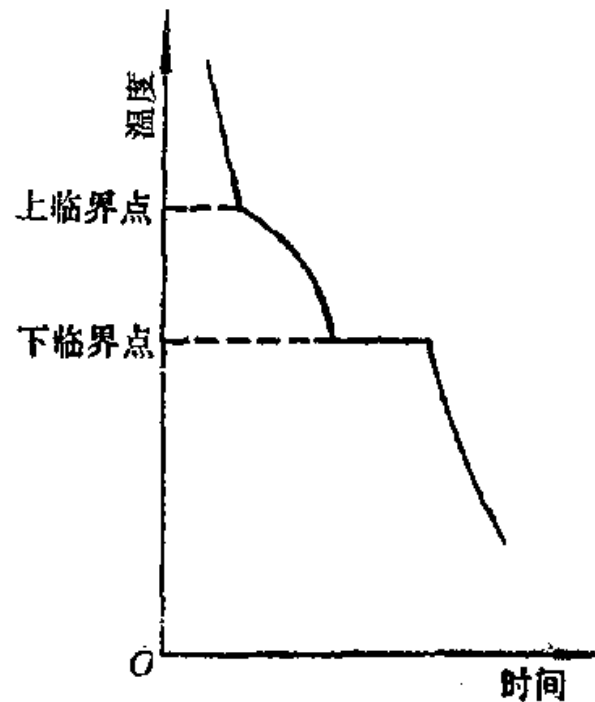
相：凡化学成分相同、晶体结构相同并有界面与其他部分分开的均匀成分叫相。



3.钢的热处理



碳在铁中形成**固溶体**



钢的冷却曲线

化合物：**渗碳体** Fe_3C

3.钢的热处理



➤ 固溶体

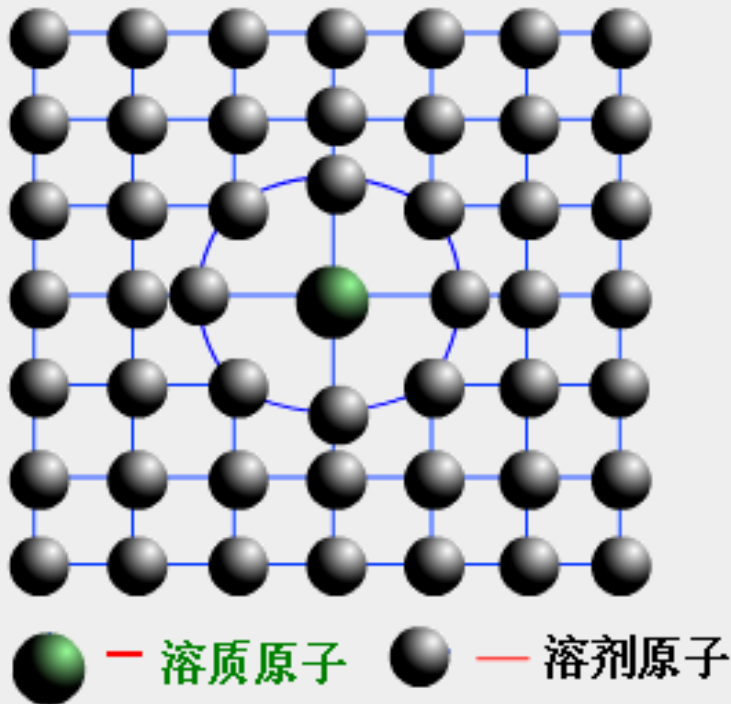
与固溶体晶格相同的组元为溶剂，一般在合金中含量较多，另一组元为溶质，含量较少。

固溶体用 α 、 β 、 γ 等符号表示，A、B组元组成的固溶体用A(B),其中A为溶剂，B为溶质。

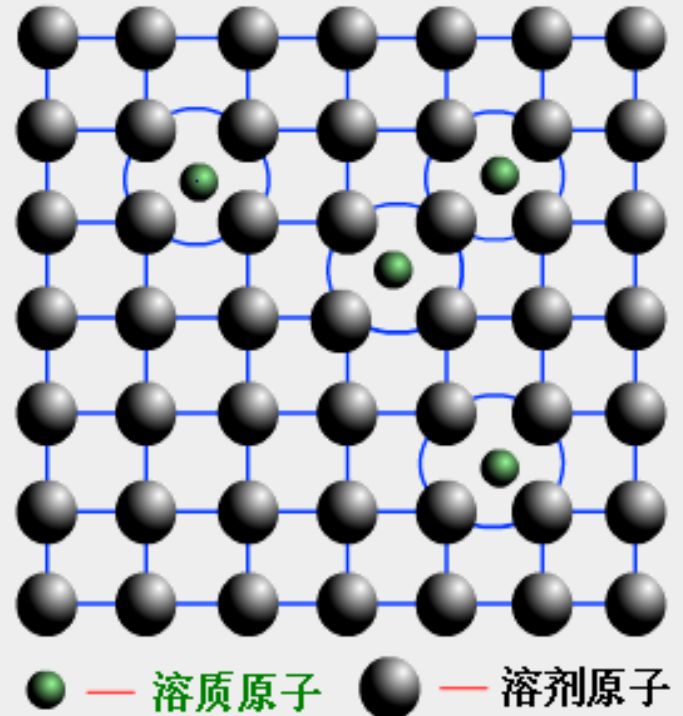
3.钢的热处理

固溶体的分类

按溶质原子在溶剂晶格中的位置，固溶体可分为：
置换固溶体和间隙固溶体



置换固溶体示意图



间隙固溶体示意图

3.钢的热处理



固溶体的性质

什么是固溶强化?造成固溶强化的原因是什么?

①固溶强化就是通过形成固溶体使金属强度和硬度提高的现象。

②造成固溶强化的原因是固溶体随着溶质原子的溶入而晶格发生畸变,晶格畸变增大位错运动的阻力,使金属的滑移变形变得更加困难,从而提高合金的强度和硬度。

3.钢的热处理



铁素体：碳溶解在 α 铁中形成的固溶体

奥氏体：碳溶解在 γ 铁中形成的固溶体

渗碳体：碳与铁形成化合物， Fe_3C

珠光体：铁素体与渗碳体的机械混合物

马氏体：碳在 α 铁中的过饱和固溶体

3.钢的热处理

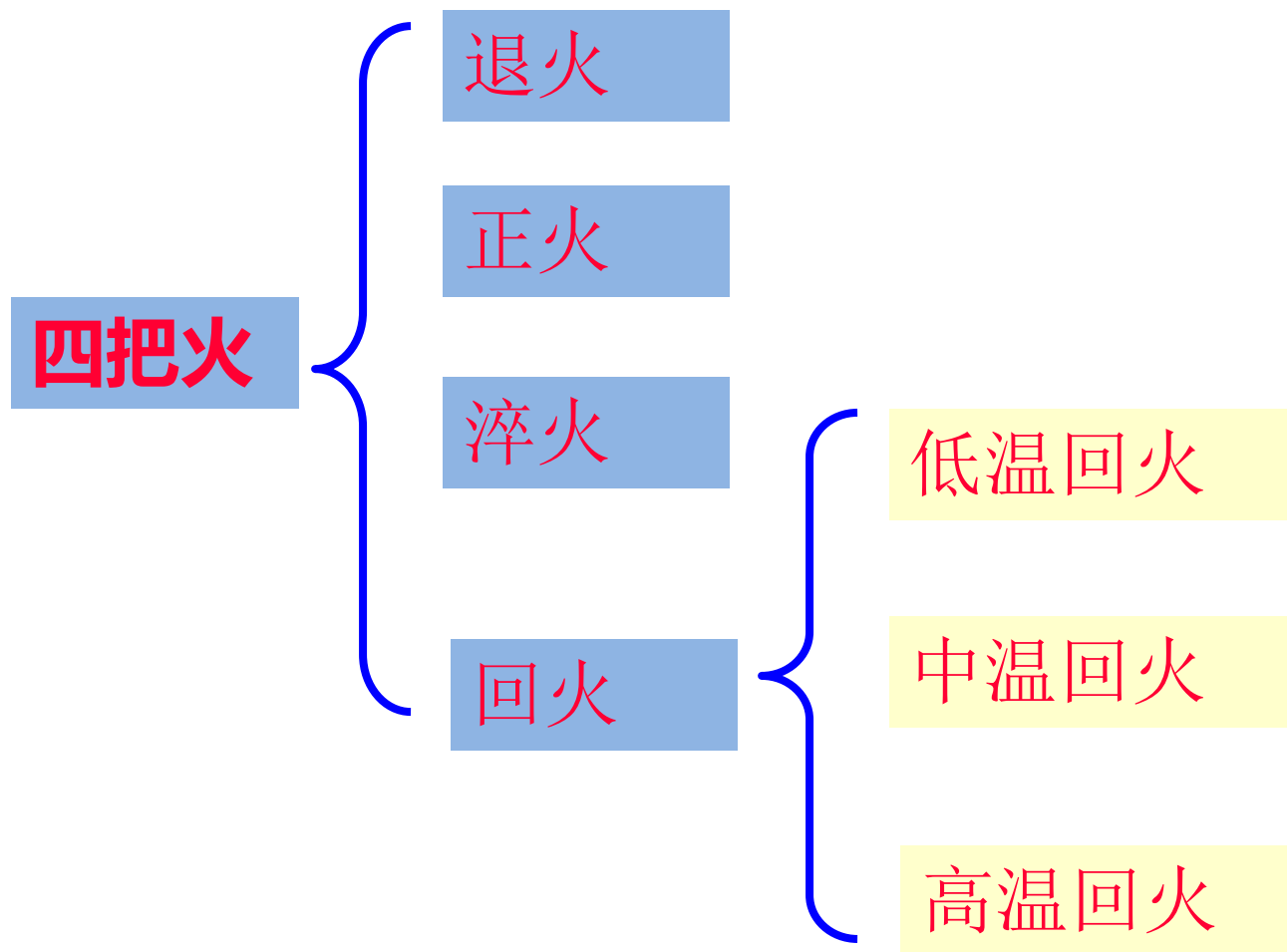


★ 什么是钢的热处理？

钢的热处理是将钢材通过适当的加热、保温和冷却过程，使钢材的内部组织按一定的规律变化，以获得预期的机械性能。

3.钢的热处理

- 钢的普通热处理



3.钢的热处理

1.退火(anneal)

将组织偏离平衡状态的钢加热到适当温度，保温一定时间，然后缓慢冷却（一般为随炉冷却），以获得接近平衡状态组织的热处理工艺叫做退火。

退火

扩散退火(diffusing annealing)

完全退火(full annealing)

球化退火(spheroidizing annealing)

去应力退火(relif annealing)

等温退火(isothermal annealing)

3.钢的热处理



- **方法**：把钢材加热到一定温度，保温一段时间后，随炉缓慢冷却的过程。
- **目的**：达到平衡状态。强度、硬度降低，塑性、韧性提高；消除组织缺陷、消除内应力。
- **应用**：消除铸件、焊件、锻件、热轧件、冷拉件等的内应力，冷作硬化

3.钢的热处理



2.正火(normalize)

- **方法：**把钢件加热到临界点以上，经适当保温后，从炉中取出在空气中冷却。
- **目的：**细化珠光体晶粒、减少钢件内应力、均匀组织。可作为最终热处理。
- **应用：**广。如锻造的法兰与换热器的管板的最终热处理。

3.钢的热处理



3.淬火(quench)

将钢件加热到相变温度以上，保温一定时间，然后快速冷却以获得马氏体组织的热处理工艺。

- **方法**：把钢材加热到一定温度，保温一段时间后，快速冷却的过程。
- **目的**：得到马氏体组织、提高表面硬度、提高强度和耐磨性。硬而脆。

3.钢的热处理



③淬火冷却介质

常用水和油。

淬火用水的温度控制在 30°C 以下。
水一般用于碳钢。

油一般用于合金钢。

为了减少零件淬火时的变形，可用盐浴作淬火介质。

3.钢的热处理

④淬火方法

淬火方法

单介质淬火

双介质淬火

分级淬火

等温淬火

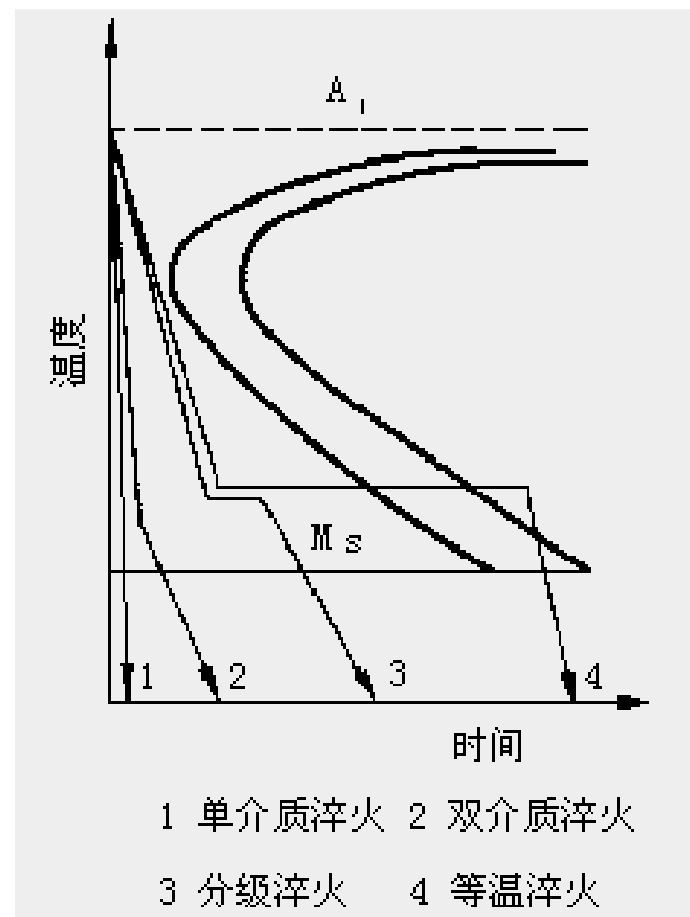


图 不同淬火方法示意图

3.钢的热处理



4. 回火(temper)

钢件淬火后，为了消除内应力并获得所要求的组织和性能，将其加热到一定温度，保温一定时间，然后冷却到室温的热处理工艺叫做回火。

- **目的**：降低或消除钢件的内应力，并可通过控制回火温度，获得不同的机械性能。
- **调质处理**：淬火后高温回火的热处理。
提高综合机械性能。用于重载零件。

3.钢的热处理



马氏体的分解

($> 100^{\circ}\text{C}$)

残余奥氏体的转变

($200\sim 300^{\circ}\text{C}$)

碳化物的转变

($250\sim 450^{\circ}\text{C}$)

渗碳体的聚集长大和铁素体再结晶 ($> 450^{\circ}\text{C}$)

3.钢的热处理



回火的工艺

回火
温度

低温回火(low tempering): $150^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$

中温回火(middle tempering): $350^{\circ}\text{C} \sim 450^{\circ}\text{C}$

高温回火(high tempering): $450^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$

回火时间：一般为 1 ~ 3 小时。

回火冷却：一般空冷。

3.钢的热处理

低温回火：150°C~250°C

组织：回火马氏体= ϵ 碳化物($\text{Fe}_{2.4}\text{C}$) + 过饱和的 α 固溶体

性能：

高碳回火马氏体：强度、硬度高、塑性、韧性差。

低碳回火马氏体：高的强度与韧性，硬度、耐磨性也较好。

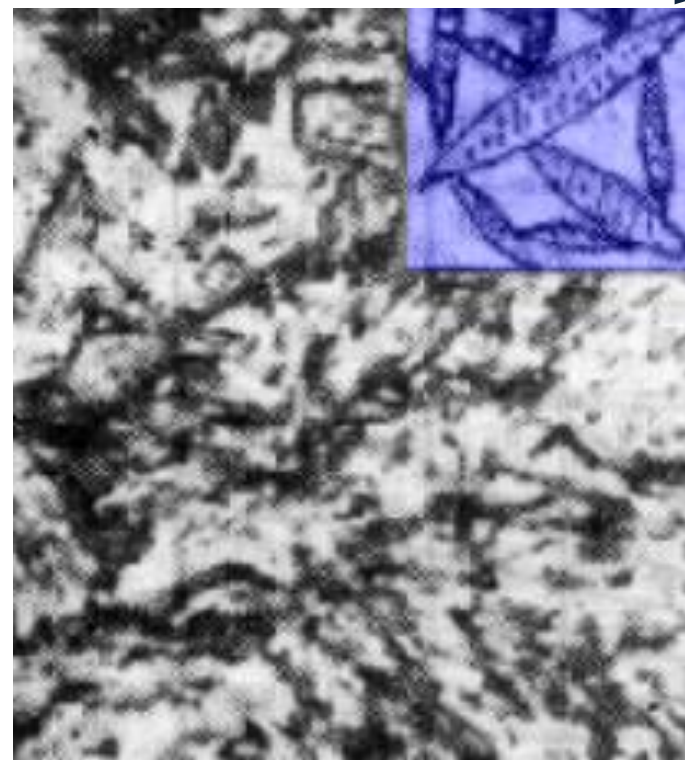


图 回火马氏体（回火M）

目的：降低淬火应力，提高工件的韧性，保证淬火后的高硬度(58HRC~64HRC)和高耐磨性。

应用：主要用于高碳工具钢等

3.钢的热处理

中温回火：350°C~450°C

组织：回火屈氏体=铁素体与大量弥散分布的细粒状渗碳体的混合物。

性能：屈服强度与弹性极限高。
，同时也有一定的韧性，硬度一般为35HRC~45HRC。

应用：主要用于处理各类弹簧

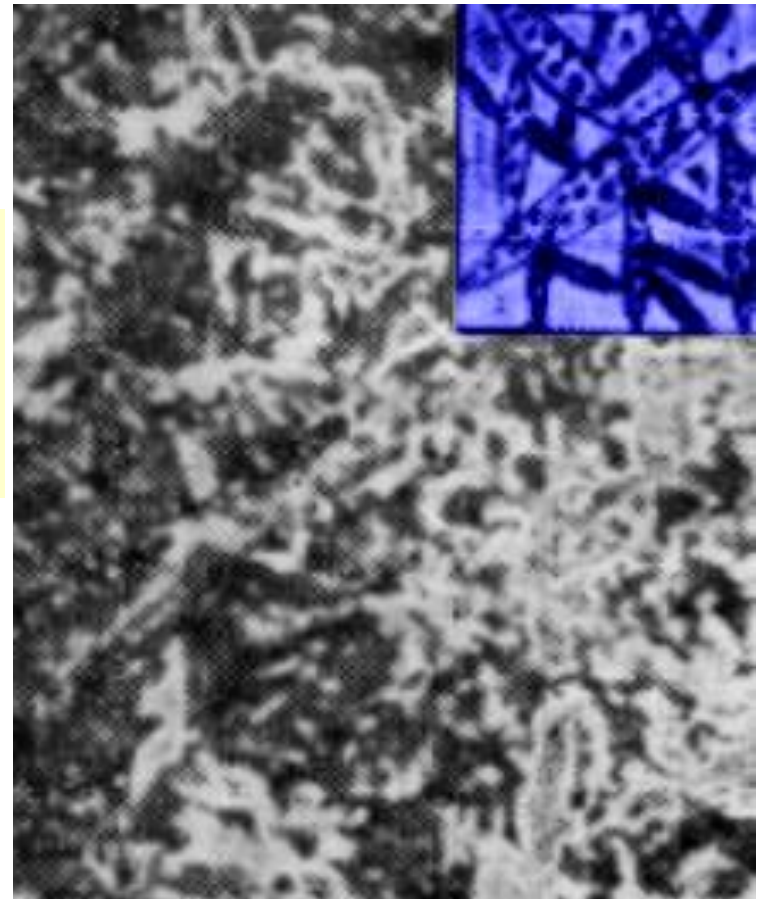


图 回火屈氏体（回火T）

3.钢的热处理

高温回火：450℃~650℃

调质处理：淬火+高温回火

组织：回火索氏体=细粒状渗碳体和铁素体基体的混合物。

性能：综合机械性能好。
即强度、塑性和韧性都比较好，硬度一般为25HRC~35HRC。

应用：主要用于轴、连杆、齿轮等



图 回火索氏体（回火S）

3.钢的热处理

回火温度与性能的关系:

随着回火温度的升高，碳钢的硬度、强度降低，塑性提高。

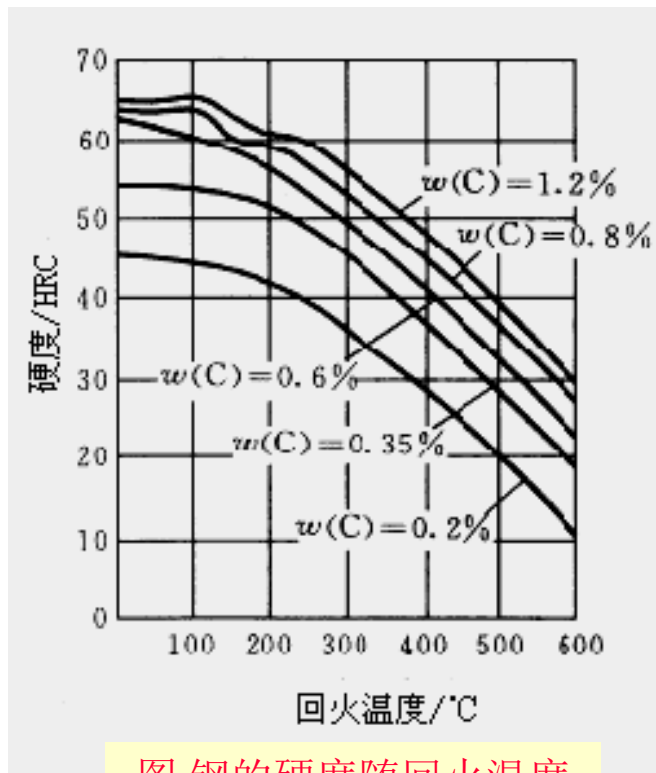


图 钢的硬度随回火温度的变化

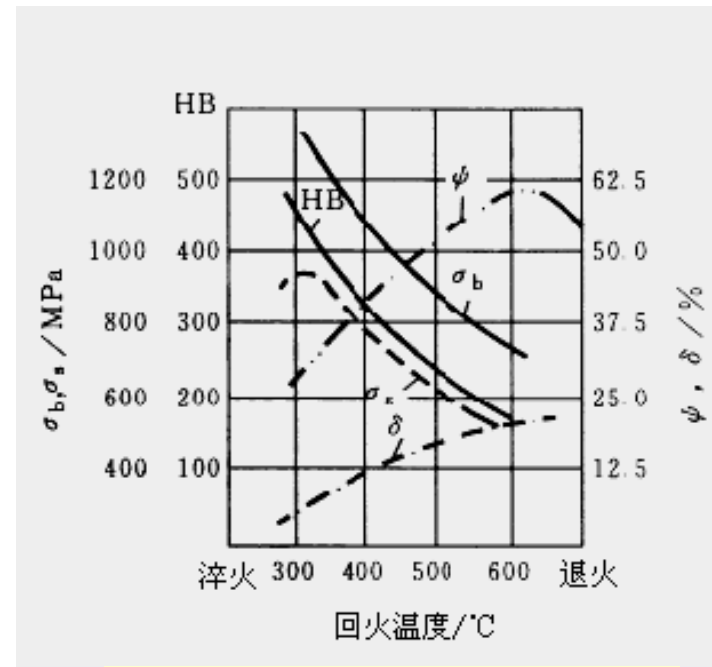
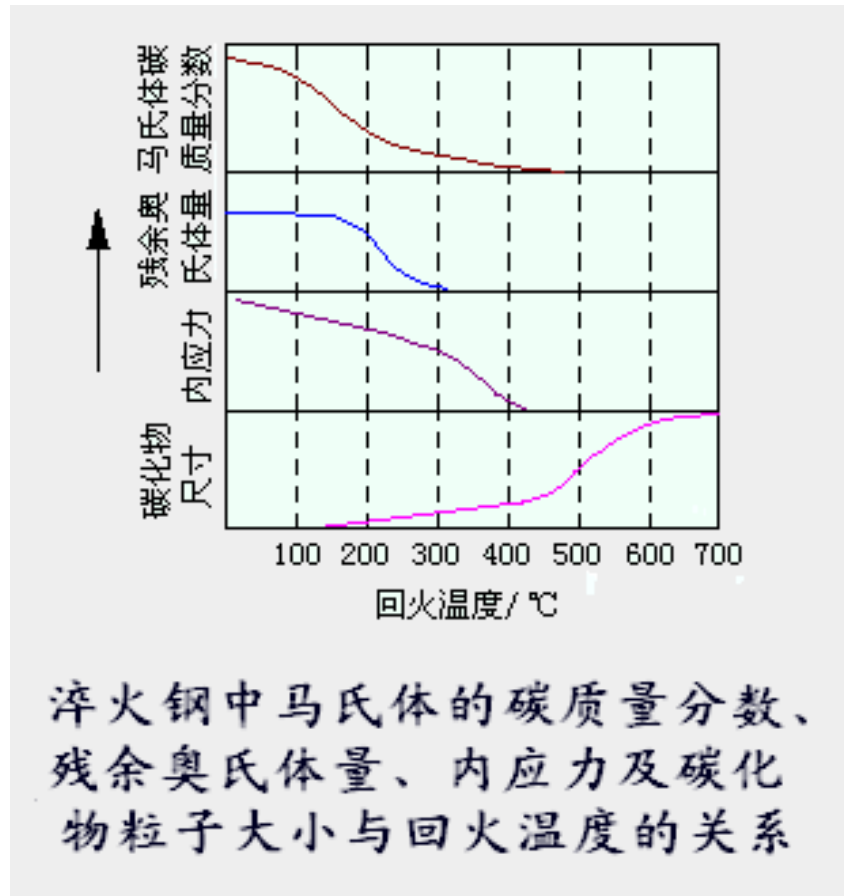


图 40钢机械性能与回火温度的关系

3.钢的热处理



回火脆性：在 $250^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ 和 $450^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$ 两个温度区间回火后，钢的冲击韧性明显下降。

3.钢的热处理



化学热处理

- **方法**：将钢件放在一定的介质中加热和保温，使介质中的活性原子渗入工件表面，改变表面化学成分以获得预期的组织和性能的一种热处理过程。
- 根据渗入元素的不同，可分为**渗碳**、**渗氮**等。

3.钢的热处理

★ 叶片材料有哪些要求？

在工作条件下必须承受较大的离心力和弯应力：材料必须具有的基本的**强度**和**韧性**，还须具有**耐蚀性**、**抗氧化性**、足够的**疲劳强度**，良好的**刚度**、减振性能等等；

高压级的动叶片工作于高温蒸汽介质中，还应考虑蠕变强度、持久极限等高温性能；

低压级动叶片尤其是末级叶片，由于工作在湿蒸汽区，叶片更长，离心力更大，故需考虑材料具有更高的强度，抗水滴冲蚀和应力腐蚀等问题。

思考题



- 7-7
- 7-8



THANK YOU!