



金属材料

核工业无损检测中心

王跃辉

一、金属材料

1. 金属材料基本概念

1. 1 材料分类

金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料四大类

金属材料通常可分为黑色金属和有色金属两大类。



一、金属材料

1. 2黑色金属

以铁元素为主要基体的金属或合金，
如各类钢材和铸铁。

1. 3有色金属

以其它金属元素作为基体的金属或合
金，如铜合金、铝合金等。

一、金属材料

1. 2 金属晶体结构

组成物质的原子在空间有序的排列，此种物质称为晶体。固态的金属和合金都是晶体。

常见的晶体结构有

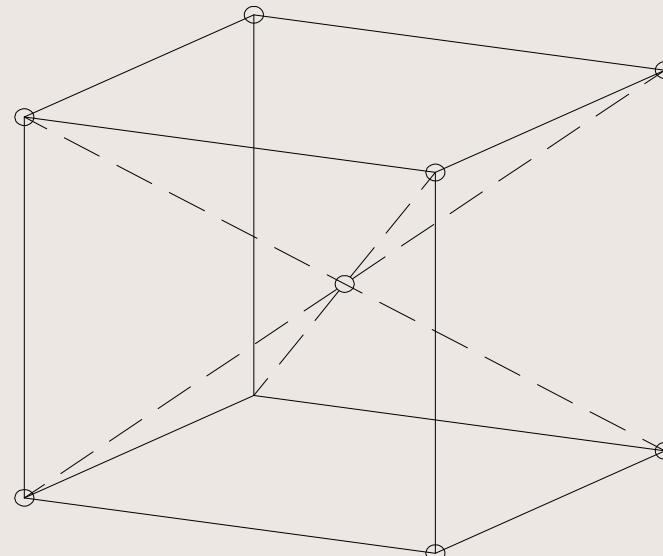
体心立方

面心立方

密排六方

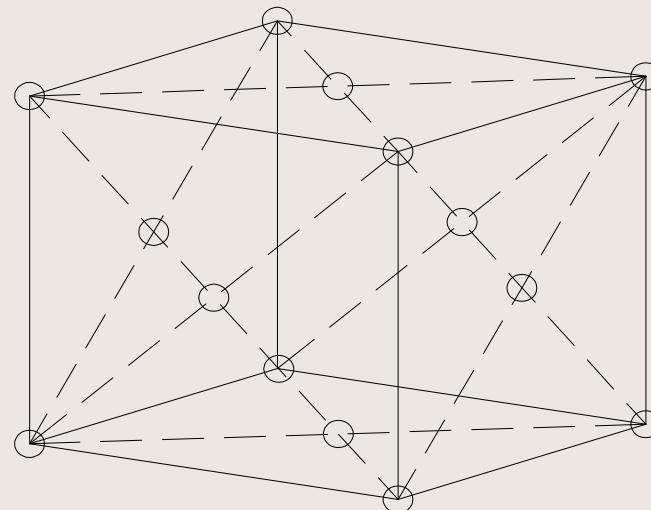
一、金属材料

体心立方



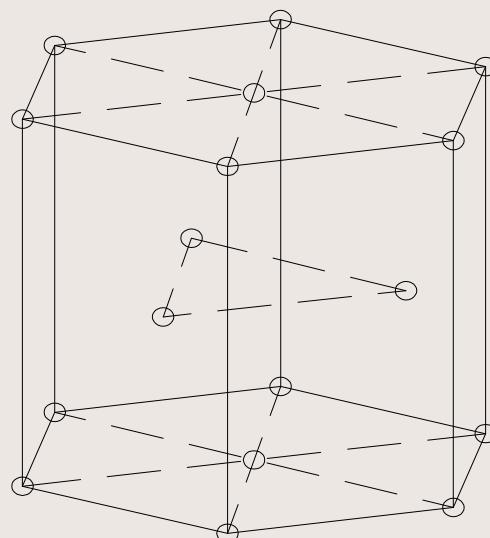
一、金属材料

面心立方



一、金属材料

密排六方



一、金属材料

- **多晶体**

金属是由许多结晶方向不同的小晶粒组成

- **晶粒**

**每个规则排列的小晶体称为一个晶粒
晶粒间的交界为晶界**

- **结晶**

金属从液态转变为固态的过程称为结晶

一、金属材料

1. 3钢的基本组织

含碳量0.02%-2%的铁碳合金称为钢

- 铁素体—F

在 α -铁的晶格中溶入少量的碳原子，形成的间隙固溶体，称铁素体。

原子排列体心立方，强度和硬度低，塑性和韧性好

一、金属材料

- 奥氏体—A

碳在 γ -铁中的固溶体称奥氏体

原子排列面心立方。它塑性好，适合
热压力加工

- 渗碳体—Cm

渗碳体是铁和碳形成的化合物 Fe_3C ，
含碳量 6.67%

硬度很高，塑性很差



一、金属材料

- 珠光体—P

F + Cm的机械混合物。P中的Cm以片状分布，称片状P

强度和硬度较高，塑性也较好

- 承压设备用钢的含碳量一般低于0.25%

一、金属材料

2. 核设备常用结构材料

2.1 低碳钢

含碳量 $\leq 0.25\%$

特性：

含碳量增加，钢的强度增加，塑性和韧性降低，焊接性能变差

一、金属材料

杂质的影响：

- 硫

硫生成硫化铁后，与铁在晶界形成低熔点共晶体，使钢在热轧时沿晶开裂，形成“热脆”，应严格限制其含量

- 磷

磷使铁素体晶格畸变，大大降低钢的塑性和韧性，形成“冷脆”

一、金属材料

- 氢

氢还会引起氢脆，产生白点

核承压设备用低碳钢的主要有：20HR、
SA106B、16Mn

主要在核电站的二、三级设备、主蒸汽
管道、二回路管道、安全壳衬里等上面使
用



一、金属材料

2.2 低合金高强度钢

钢中添加了不超过10%的合金元素
改造钢的各种性能，得到既有较高的
强度，又有较好的塑性和韧性



一、金属材料

核电站的反应堆压力容器、蒸汽发生器、稳压器、主泵壳体等。这些设备采用锻件制造，各国都用ASME规范规定的SA508 cl. 3钢或成分类似的其它牌号钢。

核承压设备的螺栓也主要用低合金高强度钢，它们的牌号有SA540、40CrNiMo、42CrMo、42CrMo钢棒材。



一、金属材料

2. 3奥氏体不锈钢

在钢中加入18%左右的铬和8%以上的镍时，可在常温下获得单相奥氏体组织，称为奥氏体不锈钢

具有优良的耐腐蚀性和焊接性

堆内构件材料、离心浇注的主管道、主管道安全端、驱动机构材料、热交换器传热管等设备中被广泛使用



一、金属材料

2. 4有色金属

有色金属也是核设备制造的重要材料

- 蒸汽发生器的U型传热管

多采用Inconel1800、Inconel1600或
Inconel1690等材料来制造，其耐应力腐蚀
性强

Inconel合金中的镍含量很高，可归类
于镍基合金。

一、金属材料

•传热管

设备冷却热交换器和凝汽器大量采用
钛管来做传热管

钛具有低的密度、高的强度和高的腐
蚀稳定性。钛合金不发生接触腐蚀和溃疡
腐蚀，特别重要的是不发生应力腐蚀

一、金属材料

3. 核燃料元件常用材料

3.1 铀及铀合金

天然存在的裂变材料只有 ^{235}U ，它是铀的一种同位素

压水堆核电站常用 UO_2 作为裂变材料

一、金属材料

3. 2 铀的氧化物和化合物

二氧化铀和铀的化合物是制造燃料元件的主要核材料之一

二氧化铀在熔点以下只有一种结晶形态，并且是各项同性

二氧化铀的热导系数很低，具有良好的耐腐蚀性能



一、金属材料

3. 3 常用包壳材料

核燃料元件的包壳是用于保护核燃料不受冷却剂的腐蚀和其它机械损伤，并防止裂变产物进入冷却回路。

制造核燃料元件包壳的材料要求对中子的吸收截面小，有一定的机械强度，抗冷却剂腐蚀以及对裂变产物的化学稳定



一、金属材料

•铝及铝合金

铝及铝合金是制造核燃料包壳的常用材料。由于它耐高温水腐蚀能力和强度的限制，多半应用于低温生产堆和试验堆中。铝镁硅系合金或铝铁镍镁合金的性能有所提高，但可焊性不好，影响了使用

一、金属材料

• 镍合金

镍的热中子吸收截面小，在一定的温度下能保持足够强度，耐腐蚀性和高温机械性能好

在动力堆中广泛使用

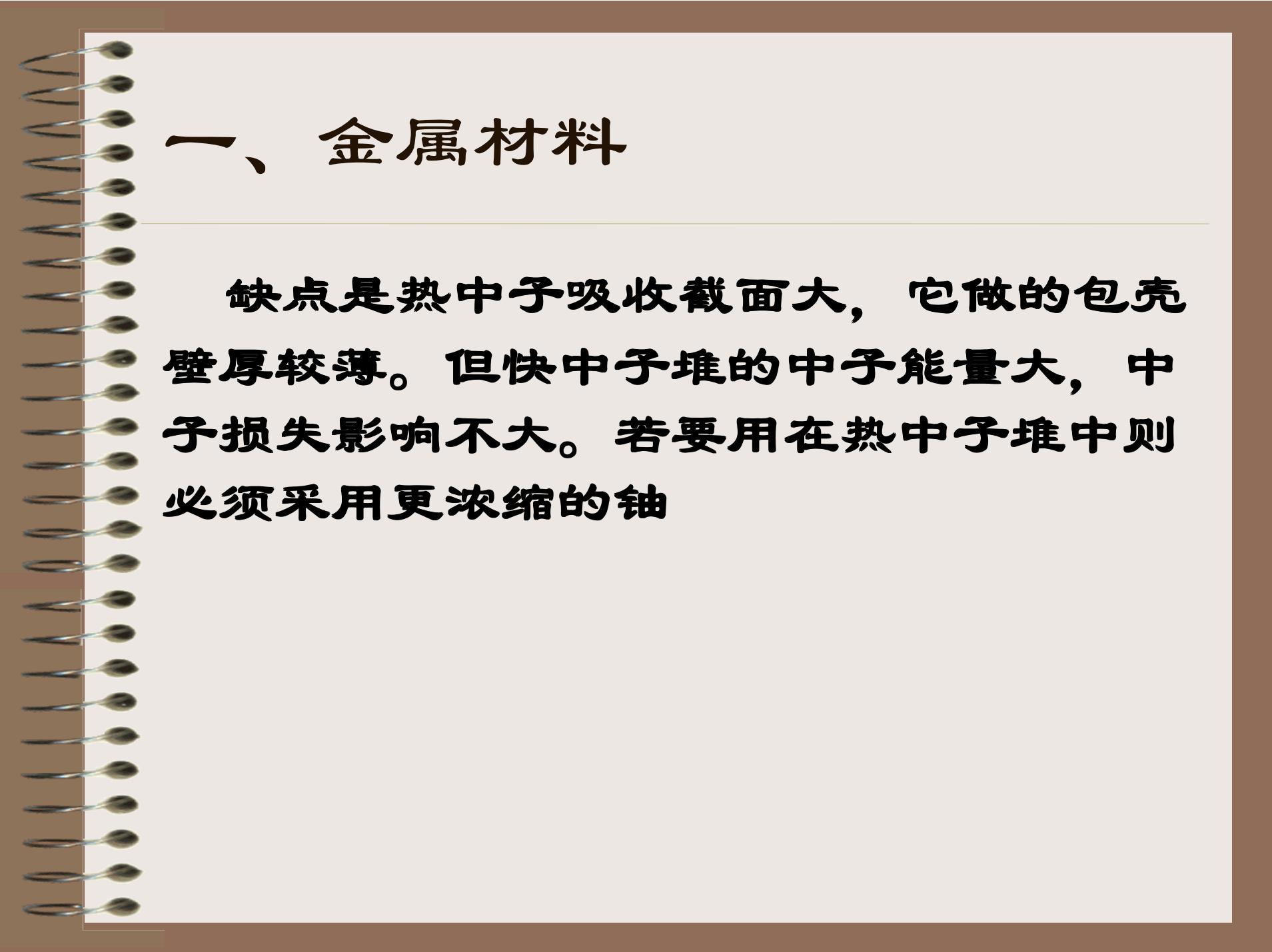
常用的镍-2、镍-4和M5

一、金属材料

• 不锈钢

奥氏体不锈钢已被广泛应用于快中子堆的燃料元件包壳上

它的优点是对水、气体和液态金属都有很好的耐腐蚀性，可焊性好，价格比锆便宜得多



一、金属材料

缺点是热中子吸收截面大，它做的包壳壁厚较薄。但快中子堆的中子能量大，中子损失影响不大。若要用在热中子堆中则必须采用更浓缩的铀



一、金属材料

4. 金属材料的性能

金属材料的力学性能主要有：

强度、塑性、硬度、韧性

• 强度

金属抵抗永久变形和断裂的能力

• 塑性

金属材料受力时，产生不可恢复的变形而不破坏的能力



一、金属材料

- **硬度**

材料抵抗其它物质侵入其表面而变形的能力或抵抗破坏的能力

- **韧性**

金属材料在外力作用下，断裂前所吸收能量的大小



一、金属材料

5. 断裂韧性和断裂力学基本概念

断裂力学是从材料中存在各种裂纹缺陷的前提下出发，从力学的角度，研究宏观缺陷与材料的强度和断裂间关系的学科

一、金属材料

- 断裂韧性

度量裂纹扩展阻力的指标

- 应力强度因子 K

$$K = Y \sigma (a)^{1/2}$$

Y - 无量纲系数, 与裂纹形状加载方式、
试样尺寸有关

σ - 外加拉应力

a - 裂纹长度

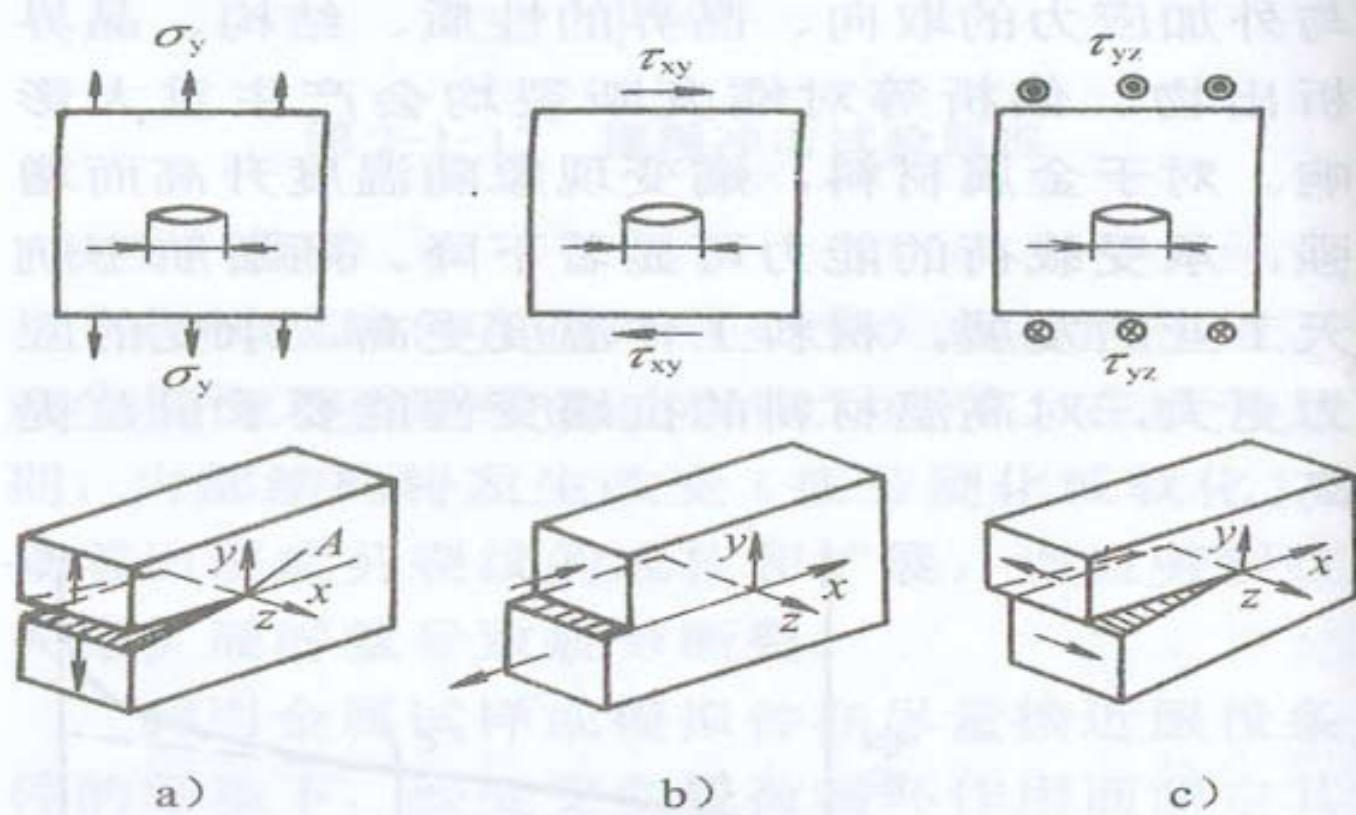


图 2-1-20 裂纹扩展的三种类型

a) 张开型, I型 b) 滑开型, II型

c) 撕裂型, III型



一、金属材料

•平面应变断裂韧性 K_C

当外加应力达到断裂应力时，应力强度因子 K 达到断裂的临界值 K_C 在 I 型裂纹的几何条件下，记为 K_{IC}

断裂韧性表征了材料抵抗裂纹扩展的能力，是材料抵抗脆性破坏的一个韧性指标。按应力强度因子建立的脆性断裂判据表达为： $K_I > K_{IC}$



一、金属材料

- K_{IC} 反映材料阻止裂纹失稳扩展的能力，
它是由材料本身的性质决定的
- K_I 是一个力学参量，与材料性质无关



一、金属材料

6. 辐射环境下的材料性能

6. 1 核性能

燃料元件芯体必须采用中子吸收截面
最低的铀合金

燃料元件包壳采用中子吸收截面很小
的锆合金等

控制棒、调节棒等采用中子吸收截面
很大的材料例如 C_d 棒制成

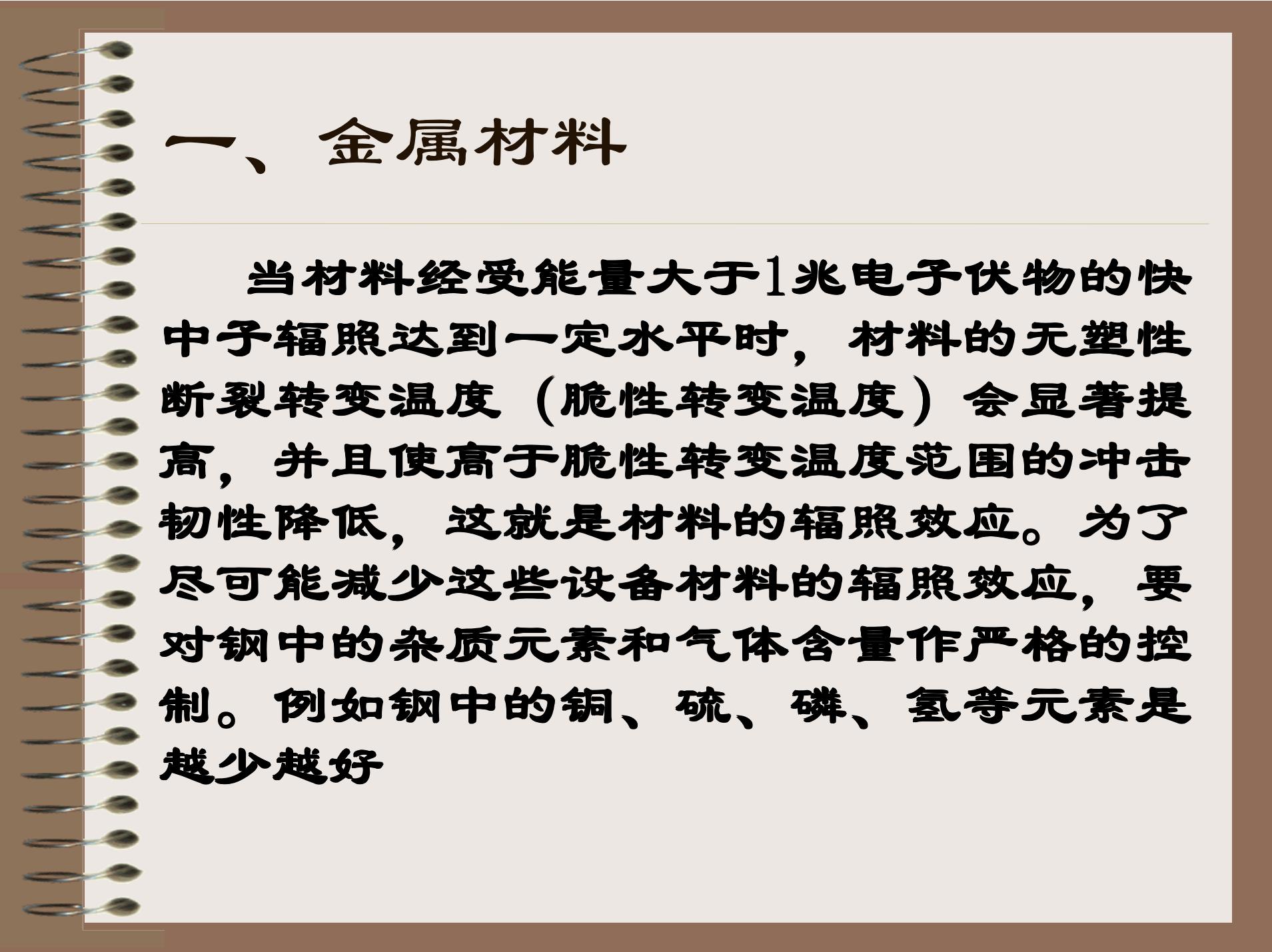


一、金属材料

6.2 辐照效应

中子对金属的辐射会引起辐射损伤，高通量的的中子辐射导致屈服强度和极限的增加，塑性和冲击韧性的降低，**无塑性转变温度的提高**

中子的通量越大，辐照的时间越长，辐照效应的影响越大



一、金属材料

当材料经受能量大于1兆电子伏物的快中子辐照达到一定水平时，材料的无塑性断裂转变温度（脆性转变温度）会显著提高，并且使高于脆性转变温度范围的冲击韧性降低，这就是材料的辐照效应。为了尽可能减少这些设备材料的辐照效应，要对钢中的杂质元素和气体含量作严格的控制。例如钢中的铜、硫、磷、氢等元素是越少越好



一、金属材料

6. 3 活化

金属材料被腐蚀后，某些合金成分随同一回路水流入堆芯，受到中子的照射会生成放射性核素而产生放射性，这个过程叫活化，产生的放射性产物叫活化产物

堆芯材料以及和一回路水接触的材料中所含的元素成分必须是在中子流中活化较弱，而且必须有很好的耐腐蚀性



一、金属材料

6. 4抗腐蚀性

高能量和高通量的辐照，金属的电化学性能和腐蚀性能会发生下列变化：

- 辐射分解效应使分解产物 O_2 、 H_2O_2 的浓度增加，加快了一般钢材的氧化腐蚀速度。
- 辐射电化学效应使金属表面原子的能量增加，加快了电化学反应的速度，一般钢材的腐蚀速率会增快。
- 分解破坏效应使金属表面生成的保护性氧化膜产生辐射损伤，使一般钢材、不锈钢、铝合金等的腐蚀速率明显加快。

一、金属材料

7. 核用材料的基本要求

- 具有良好的室温综合性能，即较高的强度、韧性和防脆断能力
- 沿截面应有良好的性能均一性，尤其是尺寸较大、较厚截面的锻件
- 具有良好的焊接性，再热裂纹敏感度低

一、金属材料

8. 核设备材料的特殊要求

• 残留元素控制

一回路材料：铅、汞、硫、磷、锌、镉、锡、锑、铋、砷、铜、稀土元素等等

二回路材料：低熔点元素及其化合物，特别是铅、汞、砷、硫

一、金属材料

- 抗晶间腐蚀性能

- 化学成分要求

一回路中奥氏体不锈钢

钴< 0. 20% 钮 + 钨< 0. 15%

通常不允许硼的存在

为保证耐腐蚀性能

硫< 0. 020% 磷< 0. 030%

- 对中子辐照应有较高的稳定性

二、金属材料加工

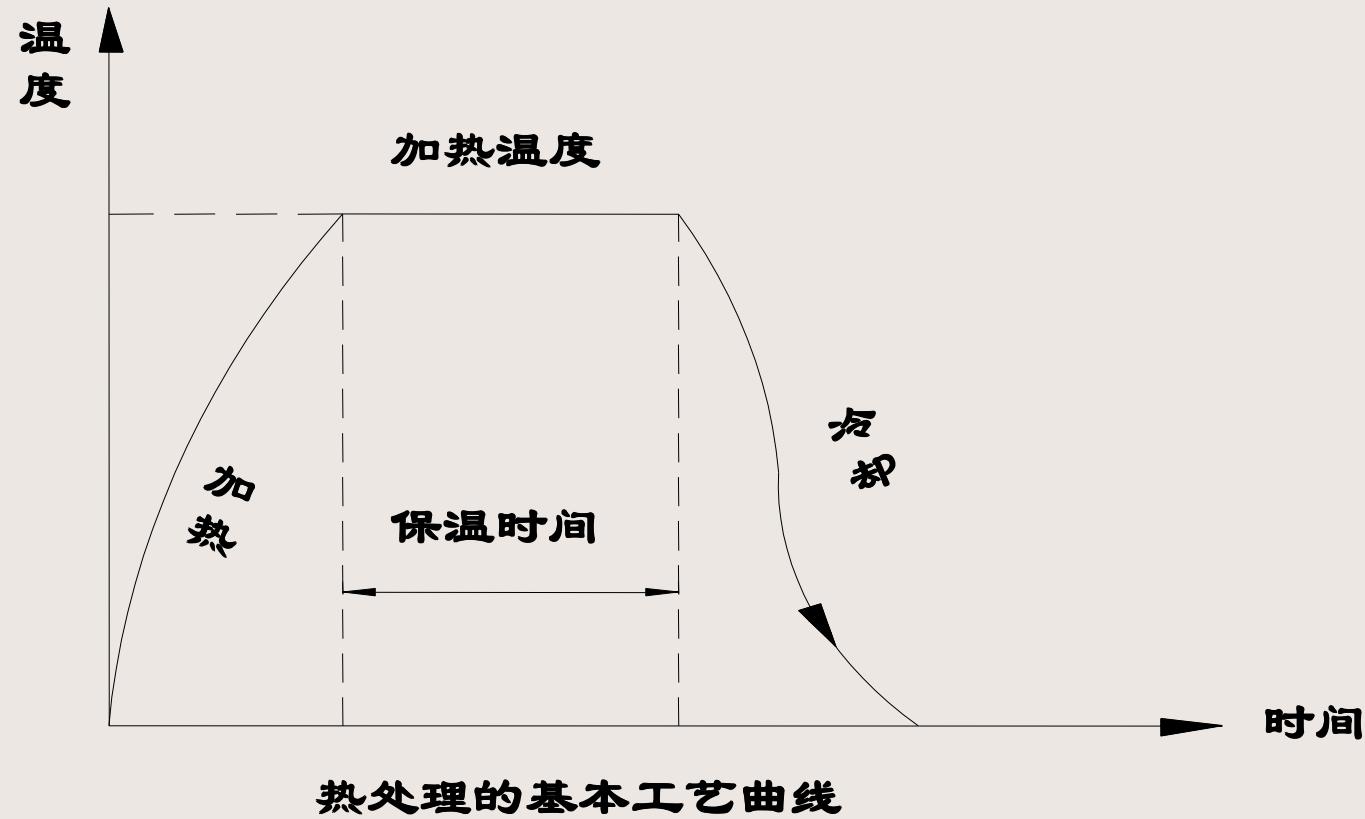
1. 金属材料热处理

1. 1 热处理的一般过程

热处理是把金属加热到预定的温度，
保温一定的时间，然后以预定的方式冷却
下来的一种热加工工艺

钢的主要热处理有：退火、正火、淬
火、回火、表面淬火、化学热处理等

二、金属材料加工





二、金属材料加工

1. 2 常用热处理工艺

• 退火

将钢加热到一定的温度，保温一定的时间后缓慢冷却，以获得接近平衡状态组织的热处理工艺，称为退火。根据工艺和目的不同，退火可分为完全退火，不完全退火，消应力退火等。

二、金属材料加工

✓ 完全退火

将工件加热到 A_{c3} 以上30-50℃，保温后在炉内缓慢冷却，得到接近平衡状态组织。其目的是细化晶粒，消除应力，降低硬度，改善加工性能

✓ 不完全退火

将工件加热到 A_{c1} 以上30-50℃，保温后缓慢冷却。其主要目的是改善加工切削性能，消除应力

二、金属材料加工

✓ 消应力退火

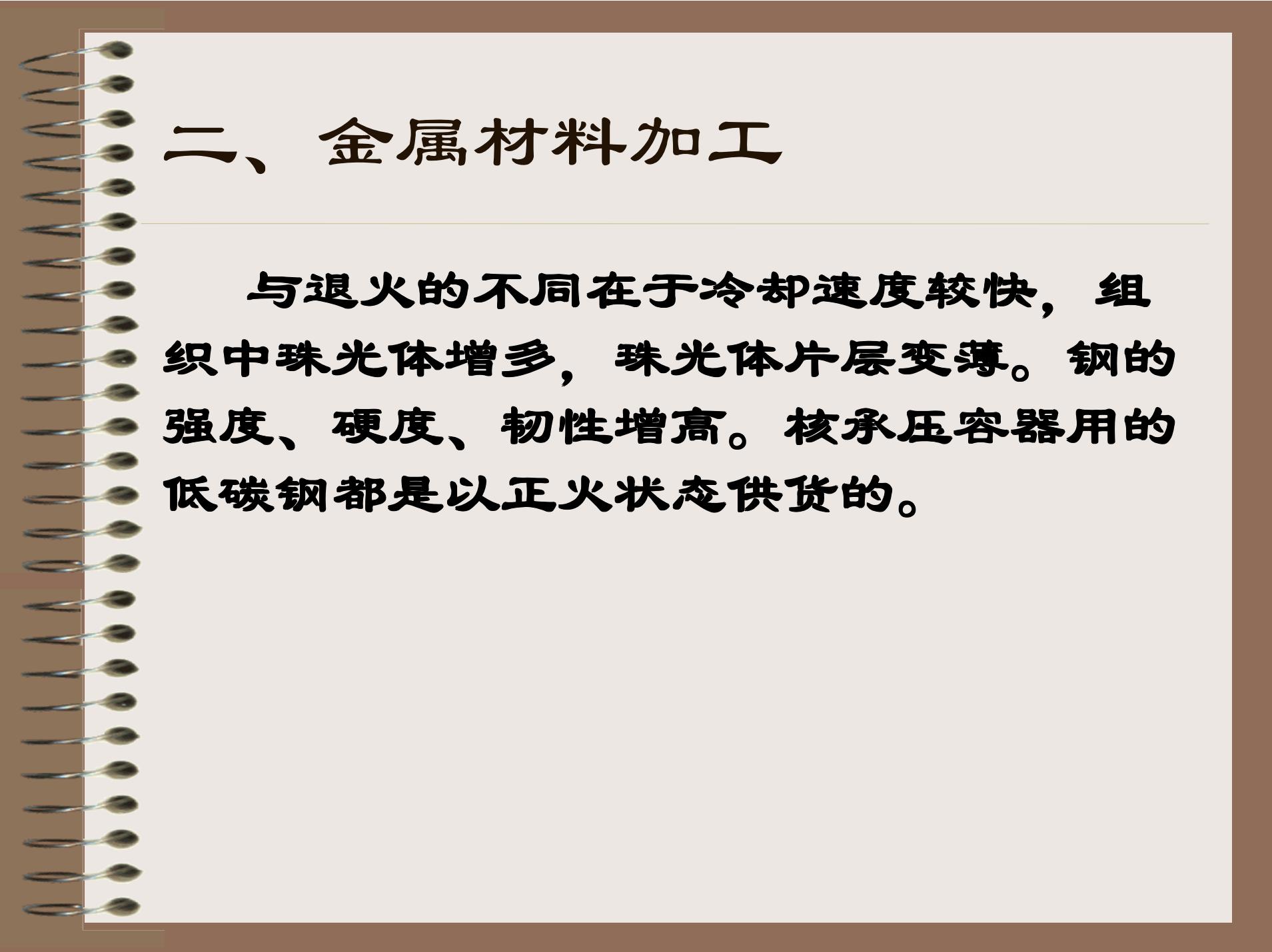
将整个工件或局部加热到 A_{c1} 以下 100–200°C，保温后缓慢冷却。其主要目的是消除焊接、冷加工、锻压等加工所产生的内应力。消应力退火不改变材料组织，通过高温时的塑性变形或蠕变来释放应力。

二、金属材料加工

•正火

正火是将工件加热到 A_{c3} 或 A_{cm} 以上 30-50℃，保温后在空气中冷却，得到珠光体类组织的热处理工艺。

正火的目的也是细化晶粒，均匀组织，降低内应力。



二、金属材料加工

与退火的不同在于冷却速度较快，组织中珠光体增多，珠光体片层变薄。钢的强度、硬度、韧性增高。核承压容器用的低碳钢都是以正火状态供货的。

二、金属材料加工

•淬火

淬火是将钢件加热到 A_{C3} 以上 $30 - 50^{\circ}\text{C}$ ，保温后快冷，使奥氏体转变为马氏体的过程。

只有达到临界冷却速度，奥氏体才能转变为马氏体。淬火时，钢件表面冷却得快，越往心部冷却越慢。淬火时，钢件获得马氏体的深度越深，称钢的淬透性越大



二、金属材料加工

钢的含碳量和合金元素能降低淬火的临界冷却速度，从而大大提高钢的淬透性。马氏体组织硬度和强度都很高，但马氏体硬而脆，韧性很差，内应力很大，容易产生裂纹，承压容器材料和焊缝的组织中一般都不希望出现马氏体

二、金属材料加工

·回火

回火是将经过淬火的钢加热到Ac1以下的适当温度，保温后冷却，获得所需组织，消除淬火时产生的内应力，适当降低硬度和强度，提高韧性的热处理工艺。

按回火温度的不同分可为低温、中温、高温回火，以获得不同要求的硬度、强度和韧性。



二、金属材料加工

淬火后在500-650℃范围内的回火称为高温回火。淬火加高温回火的热处理又称为调质。调质后的钢材既有一定的强度，又有较高的塑性和冲击韧性，即有良好的综合机械性能。核电主设备用的低合金高强度钢都要进行调质处理。

二、金属材料加工

•表面热处理

表面热处理包括表面淬火和化学热处理：

表面淬火是应用表面快速加热随后快速冷却的方法，改变钢件表面性能的工艺。

化学热处理是在一定的温度下对钢表面渗入一些元素，以改变其表层的化学成分从而提高表层的某些特殊性能如耐磨、耐腐蚀和耐疲劳等。

二、金属材料加工

•奥氏体不锈钢的固溶处理和稳定化处理

把奥氏体不锈钢加热到1050–1100°C，保温后快速冷却，以获得单相的、均匀的奥氏体组织，这种方法称为固溶处理

含18%左右的铬和8%左右镍的奥氏体不锈钢经固溶处理后，才能在室温下得到单相的奥氏体组织，提高韧性和耐腐蚀性



二、金属材料加工

1. 3热处理缺陷

- ✓ 氧化和脱碳
- ✓ 硬度不足与软点
- ✓ 过热和过烧
- ✓ 变形与开裂

二、金属材料加工

• 氧化和脱碳

钢件加热时，表面被氧化生成氧化铁皮。同时钢表层中的碳被氧化，生成二氧化碳，即造成脱碳。氧化和脱碳使钢件表面硬度不足，降低疲劳强度。

防止的措施有：表面涂料、盐浴加热、保护气或真空加热。

二、金属材料加工

- **硬度不足与软点**

淬火时如果加热温度不够或保温时间不足或局部冷却速度不足都会造成硬度不足与软点。

二、金属材料加工

•过热和过烧

由于加热温度过高或保温时间过长而造成奥氏体晶粒粗大的缺陷叫过热。过热组织可通过重新淬火予以消除。

由于加热温度过高而造成奥氏体晶界局部熔化或氧化的现象称过烧。工件一旦过烧就只能报废。

二、金属材料加工

• 变形与开裂

淬火时产生热应力和组织应力。当淬火应力超过钢的屈服强度时，引起变形；当淬火应力超过极限强度时，会引起开裂。

防止的措施有：选用淬透性好的钢材，降低冷速；合理设计工件结构形状；淬火前退火；淬火后及时回火等。

二、金属材料加工

2. 压力加工

金属压力加工是在外力的作用下，使金属坯料产生塑性变形，从而获得一定形状、尺寸和力学性能的原材料、毛坯或零件的成型加工方法

二、金属材料加工

2.1 常用工艺方法

- ✓ 轧制
- ✓ 锻造
- ✓ 挤压
- ✓ 冷拔
- ✓ 冲压



二、金属材料加工

• 轧制

材料在旋转轧辊的压力作用下产生连续的塑性变形，获得要求的截面形状并改变其性能的加工方法称为轧制。通过合理设计的轧辊，可生产出不同截面的板材和其他型材。也可直接轧出毛坯或零件。轧制也是核燃料元件和包壳材料的基本加工方法之一。

二、金属材料加工

• 锻造

锻造是热态金属经施加外力产生塑性形变而形成产品的加工方法称为锻造

用简单的通用性工具或在锻造设备上的砧铁间直接使坯料变形而获得所需几何形状及内部质量的锻件。这种加工方法称为自由锻

利用锻模使坯料变形而获得锻件的锻造方法称为模锻

二、金属材料加工

• 挤压

挤压是坯料在压力下从模孔中挤出，
横截面变小，长度增加的加工方法

在核工业，它是铀及铀合金广泛采用
的加工方法之一

二、金属材料加工

•冷拔

冷拔是坯料在拉力下从模孔拉出，横
截面变小，长度增加的加工方法

•冲压

冲压是板材在压力下从模孔中挤出，
横截面变小，长度增加的加工方法



二、金属材料加工

2. 2 压力加工缺陷

• 压力加工后的组织与性能

金属冷塑性变形后，晶粒变形或破碎，产生内应力，金属的强度、硬度逐渐升高，塑性、韧性逐渐下降，产生了加工硬化

二、金属材料加工

• 常见压力加工缺陷

➤ 镗件常见缺陷

(1) 金属在高温下表面氧化，形成脱碳层，称氧化、脱碳。这会降低了强度和抗疲劳性

(2) 加热温度过高，晶粒显著张大，称过热。若温度再高，产生晶界熔化，称过烧



二、金属材料加工

- (3) 终锻温度太低，内部应力和相变共同作用，会导致裂纹
- (4) 锻造时应变太快、太大或坯料原有缺陷，会产生裂纹，称锻造裂纹
- (5) 内部偏析产生或外部掉入的夹杂物；
- (6) 钢中的氢和锻造过程中的应力共同作用，产生与裂纹一样危险的缺陷—白点

二、金属材料加工

➤ 轧制

由于只在一个方向进行压力加工，缺陷在长度方向的连续性将增大。除了裂纹、夹杂物和偏析外还存在分层和折叠等缺陷。

➤ 挤压

工艺产生缺陷的主要类型有疏松、裂纹、折叠和一些线性缺陷。

二、金属材料加工

3. 焊接

3. 1 焊接概念和焊接性能

通过加热或加压，或两者并用，并且用或不用填充材料，使工件达到结合的一种加工工艺方法

按工艺特点可将焊接分为熔焊、压焊和钎焊

二、金属材料加工

3.2 常用的焊接方法有：

- ✓ 手工电弧焊
- ✓ 埋弧自动焊
- ✓ 电渣焊
- ✓ 气体保护焊
- ✓ 等离子弧焊

二、金属材料加工

3.3 焊接接头形式和坡口

焊接接头主要形式有：

- ✓ 对接接头
- ✓ 角接接头
- ✓ 搭接接头
- ✓ T型接头

二、金属材料加工

3.4 焊接接头组成和组织

焊接接头包括：

- ✓ 焊缝
- ✓ 熔合区
- ✓ 热影响区



二、金属材料加工

3.5 焊接缺陷

主要缺陷有：外观缺陷、裂纹、气孔、夹渣、未熔合和未焊透、其它缺陷等六类

二、金属材料加工

• 外观缺陷

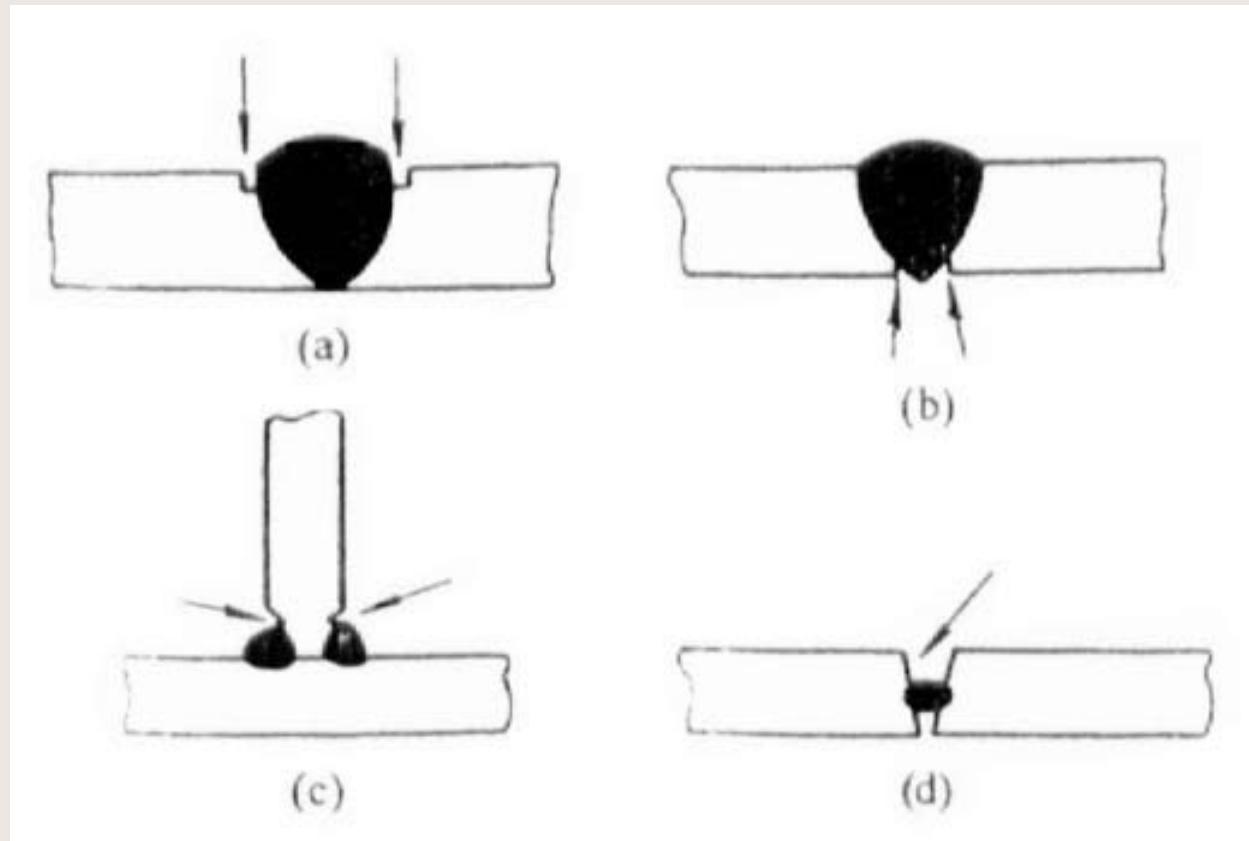
a. 咬边

咬边是指沿着焊趾，在母材部分形成的凹陷或沟槽

它是由于电弧将焊缝边缘的母材熔化后没有得到熔敷金属的充分补充而留下的缺口

咬边又分连续咬边和局部咬边两种

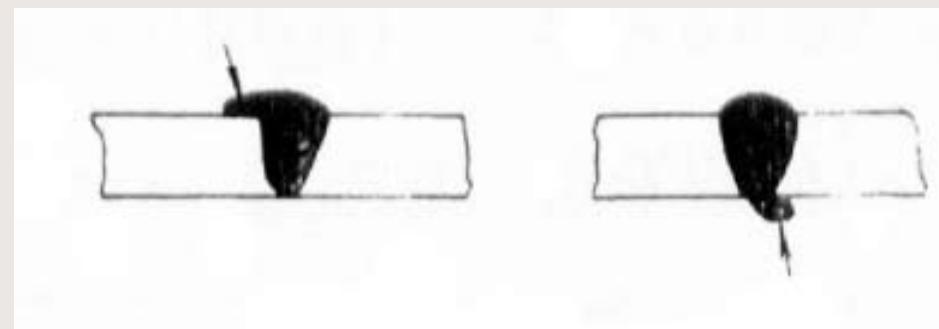
二、金属材料加工



二、金属材料加工

b. 焊瘤

焊缝中的液态金属流到加热不足未熔化的母材上或焊缝根部溢出，冷却后形成的未与母材熔合的金属瘤



二、金属材料加工

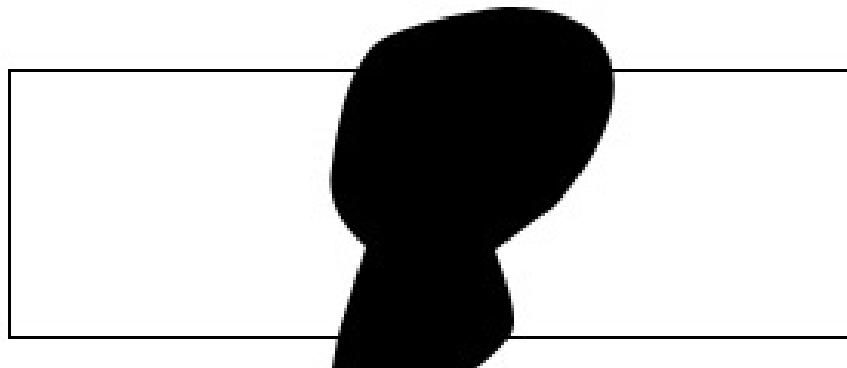
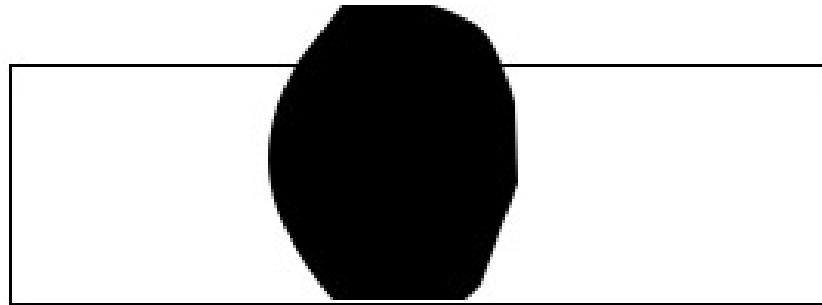
c. 成形不良

指焊缝的外观几何尺寸不符合要求

有焊缝余高超高、表面不光滑、焊缝过宽、焊缝向母材过渡不圆滑等



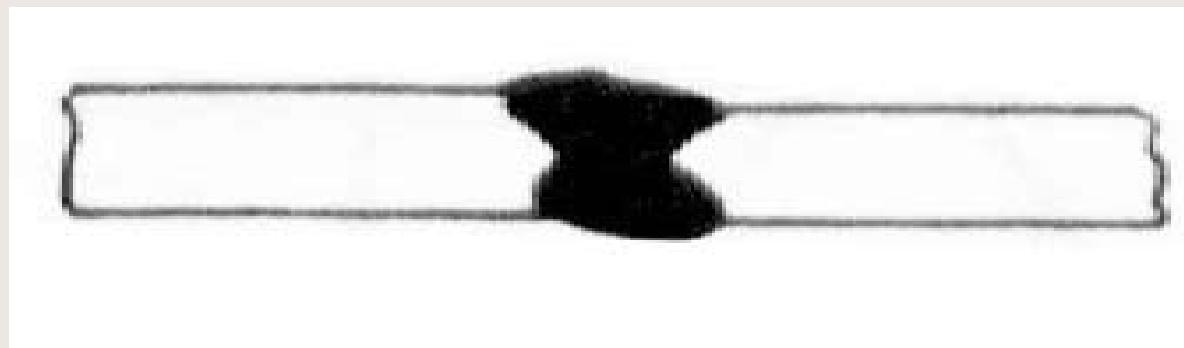
二、金属材料加工



二、金属材料加工

d. 错边

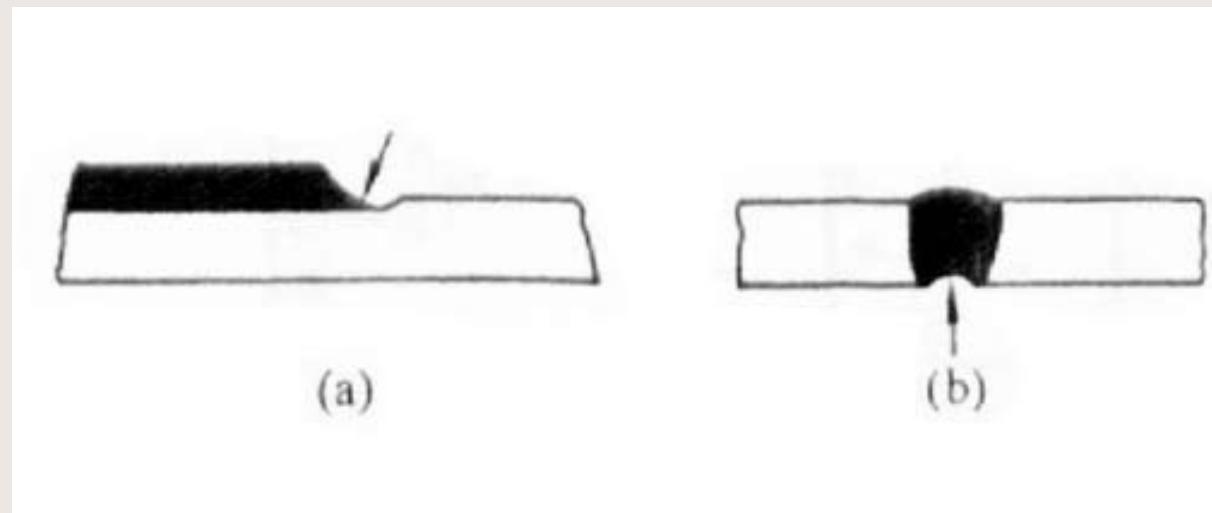
错边是指两个工件在厚度方向上错开一定的位置



二、金属材料加工

e. 凹坑

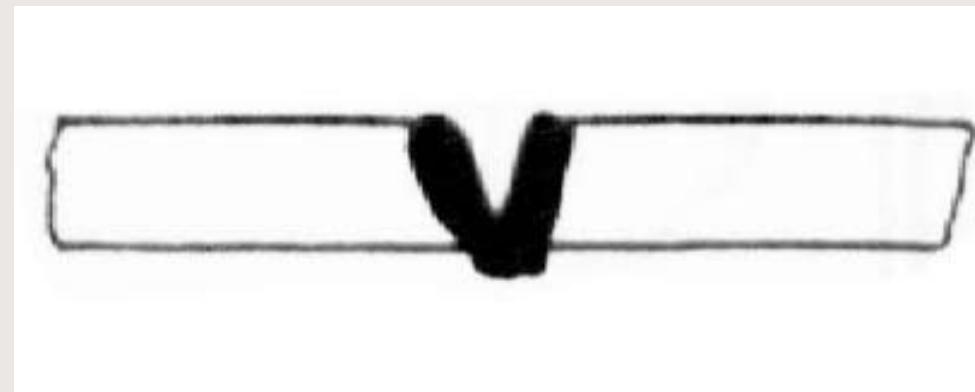
凹坑是指焊缝表面或背面局部低于母材的部分



二、金属材料加工

f. 烧穿

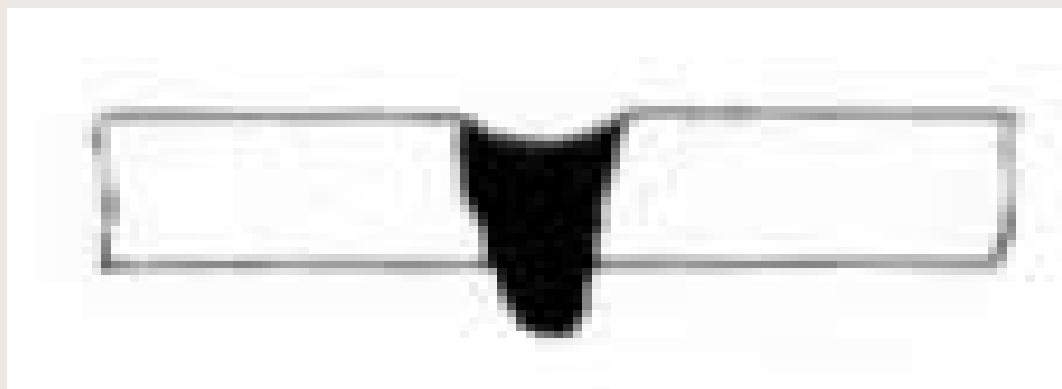
烧穿是指焊接过程中，熔深超过工件厚度，熔化金属自焊缝背面流出，形成穿孔性缺陷



二、金属材料加工

g. 塌陷

单面焊时由于输入热量过大，熔化金属过多而使液态金属向焊缝背面塌落，形成后焊缝背面突起，正面下塌



二、金属材料加工

•裂纹

焊缝中原子结合遭到破坏，形成新的界面而产生的缝隙称为裂纹

按外观形貌和产生部位可分为纵向裂纹、横向裂纹、弧坑裂纹

按产生的温度范围，裂纹可分为热裂纹、冷裂纹和再热裂纹

二、金属材料加工

a. 纵向裂纹

基本上平行于焊缝轴线的裂纹，它可能位于焊缝、熔合线、热影响区、母材等部位

b. 横向裂纹

基本上垂直于焊缝轴线的裂纹，它可能位于焊缝、热影响区、母材等部位



二、金属材料加工

c. 辐射裂纹

具有公共点的呈辐射状的裂纹，可能出现在焊缝、热影响区、母材等部位，有时也将此类缺陷称作星形裂纹

d. 弧坑裂纹

在焊缝末端弧坑中的裂纹，可以为纵向、横向、星形状

二、金属材料加工

e. 裂纹群

一群不连续的裂纹，它可能位于焊缝、热影响区、母材等部位。

f. 枝状裂纹

起源于一条公共裂纹而又相互连接的一组裂纹，不同于不连续的裂纹和辐射裂纹，它们可能位于焊缝、热影响区、母材等部位。

二、金属材料加工

热裂纹是凝固致固相线附近的高温区形成的裂纹

形成热裂纹的条件之一是合金成分和杂质（主要是C、S、P）在凝固时形成低熔点的共晶组织

二、金属材料加工

冷裂纹是在接近室温的范围内形成的裂
纹

是在热影响区或焊缝金属内生成淬硬组
织（马氏体）后，在氢和焊接内应力的共
同作用下形成的

二、金属材料加工

再热裂纹是工件焊接后，再次加热到一定温度时形成的裂纹

它是高温蠕变和碳化物沉淀强化使晶界应力高度集中所致

它一般发生在低合金结构钢和奥氏体不锈钢中

二、金属材料加工

•气孔

在焊接过程中，熔池中吸收和析出的气体在凝固时未能逸出，残留在焊缝金属内形成孔洞，称为气孔

气孔是常见缺陷，出现部位可以是焊缝表面，也可是内部或根部。有时以单个出现，有时以成堆的形式密集在局部区域，其形状有球形、虫形等

二、金属材料加工

• 夹渣

夹渣是残留在焊道之间或焊道与坡口侧壁之间的熔渣

夹渣有多种形状，可能是单个的颗粒状夹渣，也可能是呈条状或线状的连续夹渣。

夹渣会减少承载面积，影响力学性能

二、金属材料加工

•未熔合

未熔合是指焊缝金属与母材金属，或焊缝金属之间未熔化结合在一起的缺陷

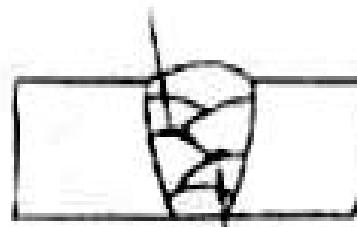
按其所在位置未熔合可分为坡口未熔合、层间未熔合和根部未熔合三种

未熔合属面缺陷，易造成应力集中，危害性很大，焊缝中一般不允许存在

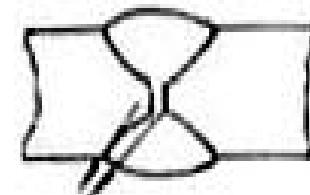
二、金属材料加工



(a) 坡口未熔合



(b) 层间未熔合



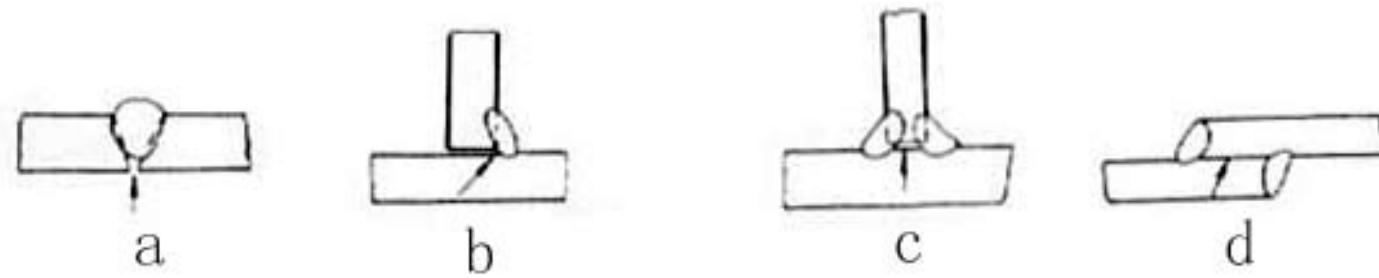
(c) 根部未熔合

二、金属材料加工

•未焊透

未焊透是指母材金属未熔化，焊接金属没有进入接头根部的缺陷

未焊透使承载面积减小，并造成应力集中，在单面焊中严格限制



二、金属材料加工

4. 铸造

4. 1 铸造特点和方法

将熔融金属浇入铸型，凝固后获得一定形状和一定性能铸件的方法称为铸造

铸造具有：成形方便、成本低廉、适应性强、铸件的力学性能较差、质量不够稳定等特点

二、金属材料加工

铸造方法有：砂型铸造、熔模铸造、
金属型铸造、压力铸造、离心铸造

4.2 铸造缺陷

铸件中常见的缺陷有：几何尺寸不符合
要求；铸造缺陷：粘砂、夹砂、裂纹（冷、
热裂纹）、缩孔、疏松、气孔、冷隔等

二、金属材料加工

•缩孔和缩松

铸件凝固时，熔液供给不足，在某些部位出现孔洞，大而集中的孔洞称为缩孔，细小而分散的孔洞称为缩松

缩孔和缩松产生的基本原因是合金的液态收缩和凝固收缩远大于固态收缩



二、金属材料加工

- 铸件的热裂

热裂是在铸件凝固末期时由热应力作用而形成的

- 铸件的冷裂与变形

铸件在凝固冷却时，相变使各部分体积变化不一致，产生了残余铸造应力。当铸件的铸造应力超过屈服强度时，铸件就会发生变形；当铸造应力超过极限强度时，铸件就会发生冷裂

二、金属材料加工

•气孔和非金属夹杂物

铸件凝固时，当中的气体未来得及逸出，形成气孔。气孔是铸件中最常见的一种缺陷。

铸件中常会混入的氧化物、硫化物、氮化物、硅酸盐等非金属夹杂物，即有内部生成的，也有外部掉入的。

二、金属材料加工

•冷隔

冷隔是在同一铸件中一次浇铸或两次浇铸时由于温度偏低，金属液体没有充分熔和在一起，其边界形成带有氧化层的隔层



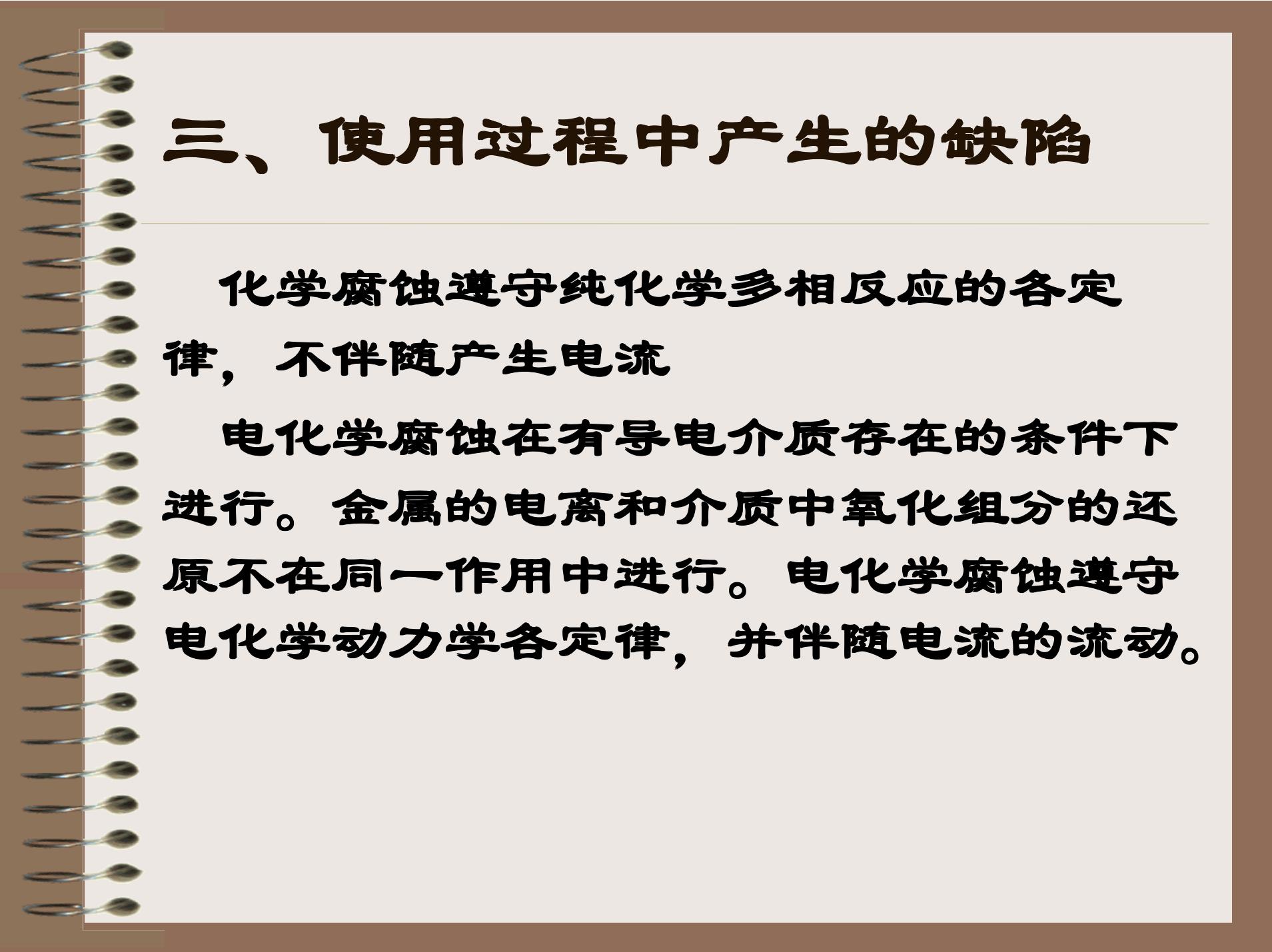
三、使用过程中产生的缺陷

1. 腐蚀和应力腐蚀

金属材料与周围环境发生化学作用而引起的变质和破坏

它会显著降低金属材料的力学性能，破坏构件的几何形状、增加转动件间的磨损、缩短设备使用寿命

腐蚀分为两种类型：化学腐蚀和电化学腐蚀



三、使用过程中产生的缺陷

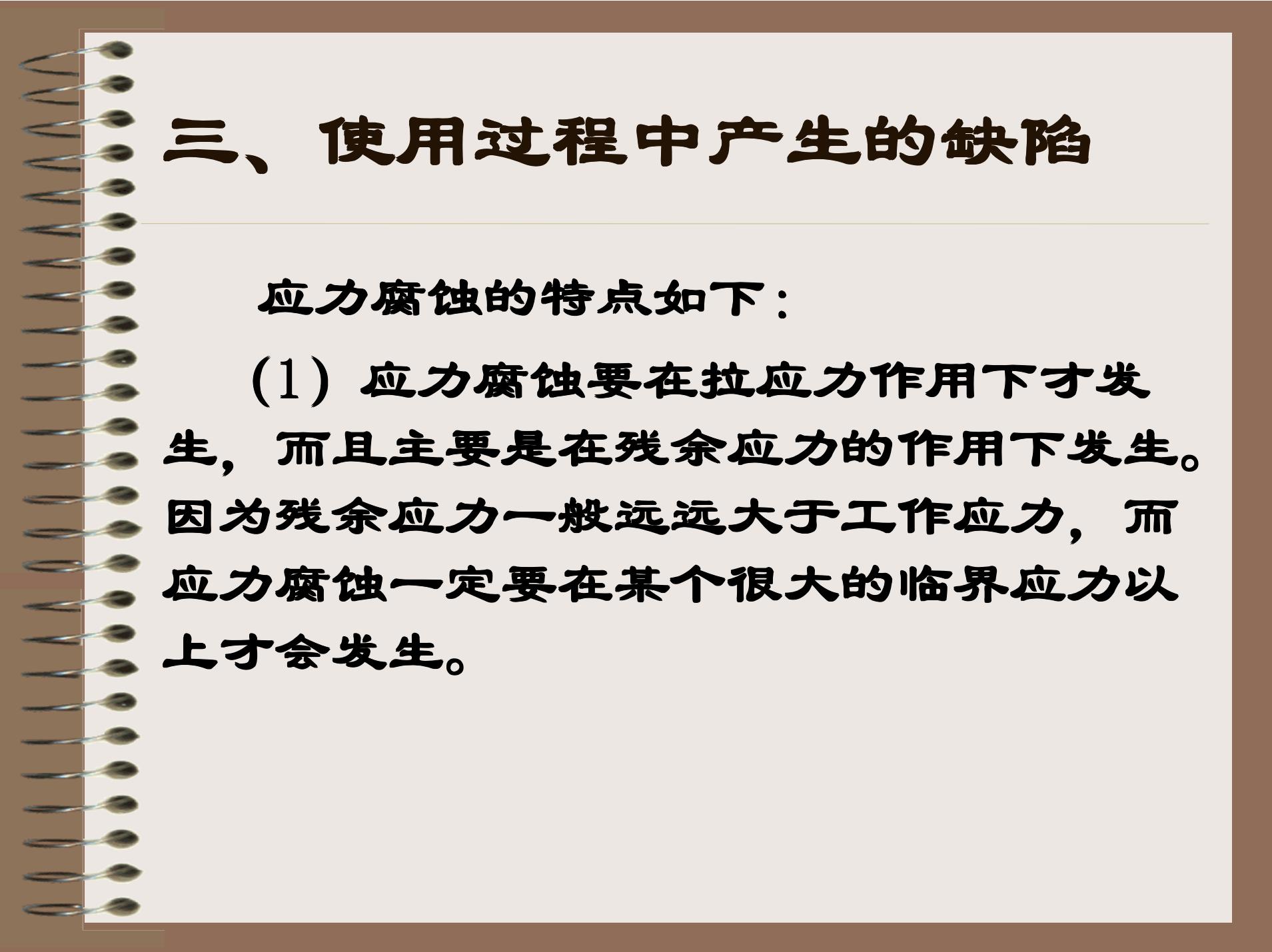
化学腐蚀遵守纯化学多相反应的各定律，不伴随产生电流

电化学腐蚀在有导电介质存在的条件下进行。金属的电离和介质中氧化组分的还原不在同一作用中进行。电化学腐蚀遵守电化学动力学各定律，并伴随电流的流动。

三、使用过程中产生的缺陷

金属在应力和腐蚀介质的共同作用下发生开裂称为应力腐蚀

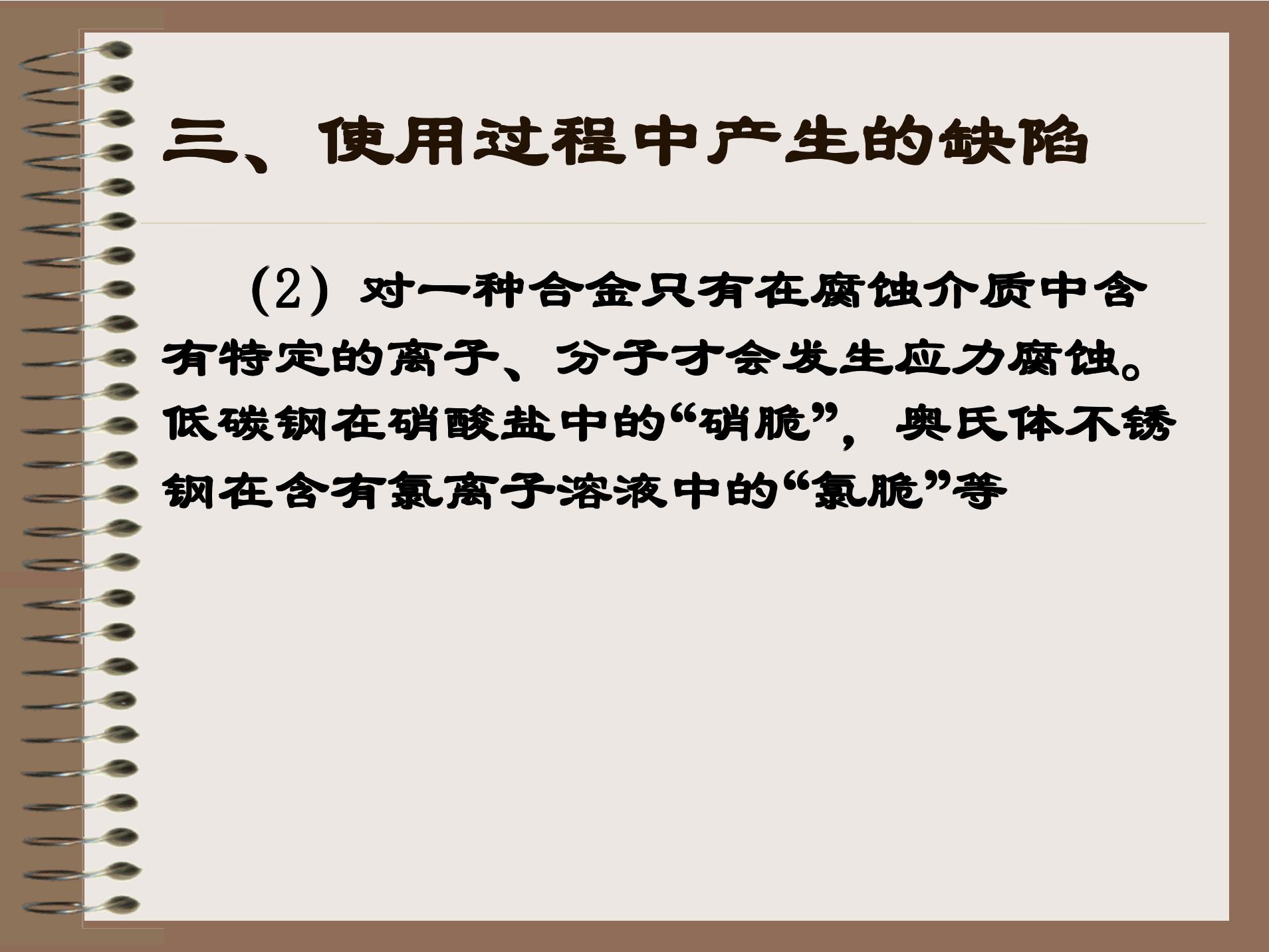
应力腐蚀是一种极为隐蔽的局部腐蚀，常常造成严重破坏



三、使用过程中产生的缺陷

应力腐蚀的特点如下：

(1) 应力腐蚀要在拉应力作用下才发生，而且主要是在残余应力的作用下发生。因为残余应力一般远远大于工作应力，而应力腐蚀一定要在某个很大的临界应力以上才会发生。



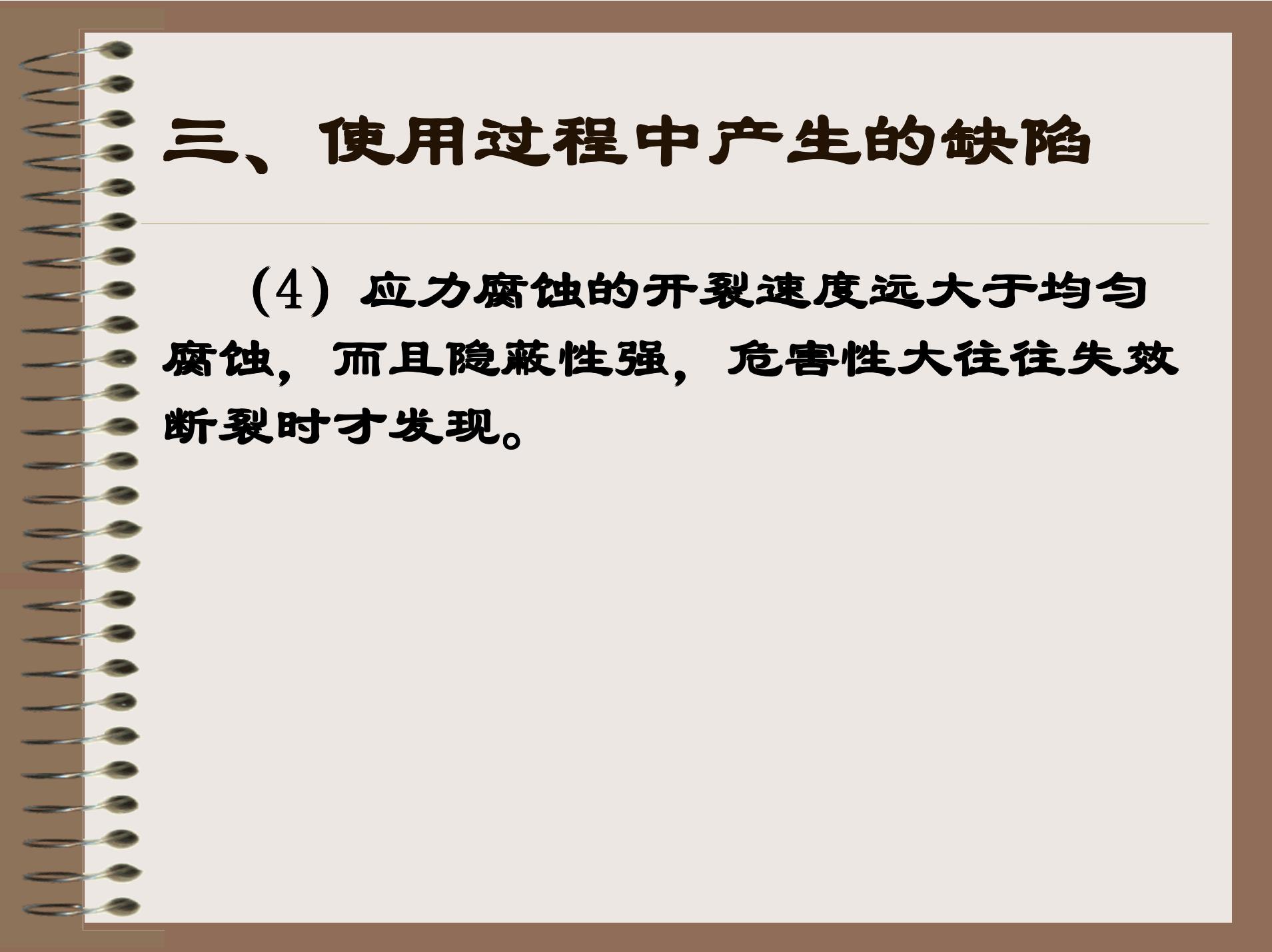
三、使用过程中产生的缺陷

(2) 对一种合金只有在腐蚀介质中含有特定的离子、分子才会发生应力腐蚀。低碳钢在硝酸盐中的“硝脆”，奥氏体不锈钢在含有氯离子溶液中的“氯脆”等



三、使用过程中产生的缺陷

(3) 介质中的腐蚀剂在浓度很低时就会发生应力腐蚀。如核电站高温水中仅有几个ppm的氯离子便可使奥氏体不锈钢发生应力腐蚀。有时介质的整体浓度很低，但局部会产生浓缩作用。如在正常循环和热交换受到破坏的蒸发器中，裂缝和间隙等处可能发生氯化物的浓缩。



三、使用过程中产生的缺陷

(4) 应力腐蚀的开裂速度远大于均匀腐蚀，而且隐蔽性强，危害性大往往失效断裂时才发现。



三、使用过程中产生的缺陷

2. 冲蚀、气蚀和流动加速腐蚀

由于固体、液体或者气体向固体表面不断进行动态撞击导致表面被磨去的现象称为冲蚀

例如：气轮机的叶片被凝结的水滴撞击；冷凝器的管段受到蒸气的冲蚀；弯管处所受的水流的冲蚀

三、使用过程中产生的缺陷

由于流动液体中的气泡撞击破裂形成的振动波而引起固体表面局部被磨去的现象称为气蚀

这也是一种常见的磨损现象，如一些泵和阀门的气蚀



三、使用过程中产生的缺陷

流动加速腐蚀是腐蚀性的介质流体，在局部形成湍流，大大加快了氧化膜的溶解和化学、电化学反应的速度，使局部腐蚀迅速加快的现象

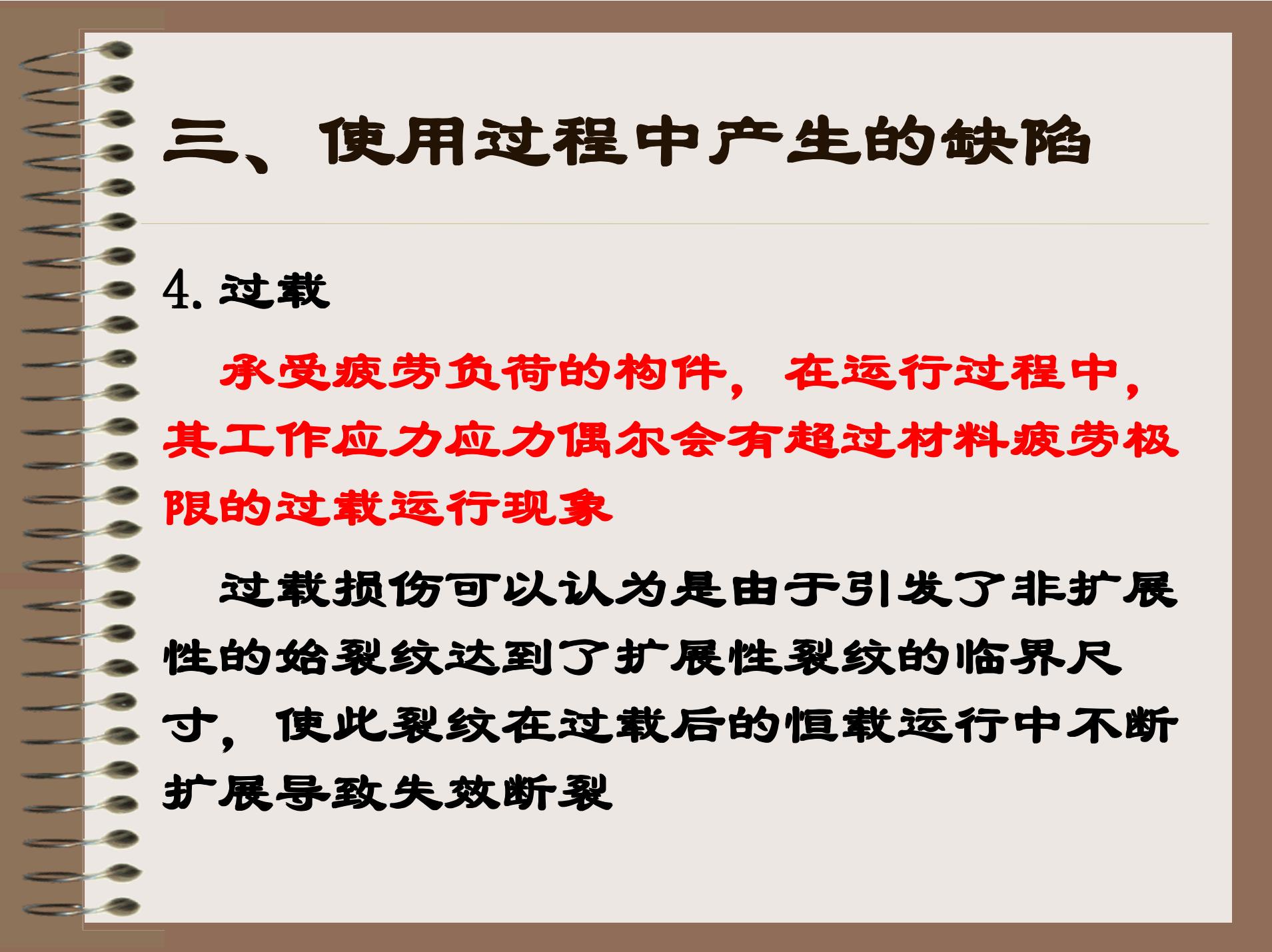


三、使用过程中产生的缺陷

3. 疲劳

构件在交变载荷的长时间作用下发生失效的现象称为疲劳

构件的疲劳破坏一般分为裂纹萌生、疲劳扩展、瞬时断裂等几个阶段。构件承受交变载荷的每一循环之后，金属局部就积累一定数量的微观缺陷。累计到一定程度就会萌生疲劳裂纹。裂纹随着交变载荷慢慢扩展，最后破坏。



三、使用过程中产生的缺陷

4. 过载

承受疲劳负荷的构件，在运行过程中，其工作应力偶尔会有超过材料疲劳极限的过载运行现象

过载损伤可以认为是由于引发了非扩展性的始裂纹达到了扩展性裂纹的临界尺寸，使此裂纹在过载后的恒载运行中不断扩展导致失效断裂



三、使用过程中产生的缺陷

5. 脆性断裂

按断裂前金属在宏观上能贡献的延性或韧性的大小来分。凡是延性或韧性很小的叫脆性断裂，反之则叫延性或韧性断裂

按断裂过程在金属内部所经历的途径可分为穿晶断裂和沿晶断裂

穿晶断裂在宏观上可表现为脆性断裂

三、使用过程中产生的缺陷

6. 磨损

磨损有多种形式如高温磨损、磨差磨损、
疲劳磨损、粘着磨损