

### CH3. 材料成形热过程.

#### 一. 基本特点.

1. 热源比较集中

2. 局部的不均匀集中加热过程, 温度梯度大, 加热速度快

3. 热源是移动的.

#### 二. 热效率.

$$\eta = \frac{Q}{Q_0}, P_0 = UI, P = \eta UI$$

电弧有效热功率 = 基本金属 + 焊接材料

焊缝 + 热影响区

#### 三. 焊接温度场. 在集中热源作用下, 点在某一瞬时的温度分布

1. 传热形式: 电弧  $\xrightarrow{\text{辐射, 对流}}$  焊件  $\xrightarrow{\text{热传导}}$  其余

2. 影响因素: 热源的性质.

焊接参数  $\uparrow$  热源区  $\uparrow$ ;  $\downarrow$  热源区  $\downarrow$ ;  $\uparrow$  热源功率

被焊金属的热物理性质.

$\lambda, C, C_p, \alpha, a, h$ ; 热扩散系数  $\uparrow$  热源区  $\downarrow$ , 应用更大  $\lambda$ .

焊件的板厚及形状:

#### 四. 焊接热循环: 某一点温度随时间的变化

加热速度  $\uparrow$  峰值温度  $\uparrow$ , 冷却时间速度  $\uparrow$

主要参数: 加热速度  $V_H$ , 峰值温度  $T_{max}$ , 高温停留时间  $t_H$   
 $\hookrightarrow$  影响相变点  $A_c, A_{cs}$        $\hookrightarrow$  影响组织、粗晶

冷却速度  $V_C$ , 冷却时间  $t_{8/5}, t_{8/3}$

一般低合金钢:  $540^\circ\text{C}$ ;淬硬倾向较大:  $300^\circ\text{C}$

五、多层焊接热循环：1. 厚度较大 2. 产生热峰值以提高接头质量。

1. 长段多层焊接热循环：焊第二层时第一层已基本冷却。

→ 可能淬硬：1. 用淬硬倾向低 2. 预热，缓冷 3. 退火（回火）焊道

2. 短段多层焊接热循环

1. 4点均在母材上停留时间短，不易长大；

1点冷却速度慢，4点应再加退火焊道。

3. 影响因素：焊件形状，截面尺寸，焊缝速度，焊接热输入，预热温度，冷却条件

六、焊接化学冶金过程。

(一) 特点：

1. 金属的保护：造气剂，造渣剂，熔渣，惰性气体，真空

2. 反应区：脱氧反应区，熔滴反应区，熔池反应区

温度分布不均匀。

(二) 气体与金属的作用。

来源	影响	抑制
N <sub>2</sub> 1. 溶解 2. 复化物	周围空气 1. 气孔的主要原因 2. 提高强度降低塑韧性 3. 时效脆化	1. 加强保护 2. 控制参数 3. 添加合金
H <sub>2</sub> 1. 溶解 2. 复化物	周围水份 1. 静态：氢脆，白点 2. 动态：气孔，冷裂纹	1. 控制材料 2. 清洁表面 3. 治金处理 4. 控制参数 5. 焊后脱氢
O <sub>2</sub> 1. 原子氧 2. 氧化亚铁	1. 强度塑韧性下降 2. 焊接性能下降 3. 气孔	1. 纯化材料 2. 控制参数 3. 脱氧

## CH4. 塑性成形理论基础

### 4.1. 金属塑性变形的物理基础.

#### 一. 冷态下的塑性变形.

1. 变形机理
  - 晶内变形
    - 滑移（应变）晶格的一部分以一定距离向相对方向移动
    - 孪生（应变）在内应力作用下晶格的一部分沿一发生切变
  - 晶间变形：晶粒间的相互滑动和转动
2. 变形特点：
  - 首先在位向有利和切应力临界的晶粒上发生
  - 连续：要求各晶粒间相互配合，多尔滑移
  - 变形不均匀性。  
· 晶粒越细：屈服点↑，塑性↑，表面积↑→“桔皮”

3. 影响：组织
  - 晶粒形状变化
  - 晶粒内产生亚结构
  - 晶粒位向改变

性能：加工硬化

成因：位错交互作用

#### 二. 热态下的塑性成形

1. 软化过程：
  - 热变形过程中
    - 动态回复
    - 动态再结晶
  - 热变形后高温区
    - 静态回复
    - 静态再结晶
    - 亚动态再结晶
2. 变形机理：(变形能力比冷变形强) 晶内滑移、晶界滑移、扩散蠕变
3. 影响：
  - 改善晶粒组织
  - 破碎并改善夹杂物
  - 合金内部缺陷
  - 形成纤维组织→沿流线方向力学性能疏

## 4.2 应力状态和应变状态分析

### 一、点的应力状态分析

1. 外力、内力和应力：外力： $f_i, P_i$ ，内力：各质点相互之间之力，应力：二阶张量。

2. 一高的应力状态：对称二阶张量；切应力互等。

3. 主应力和应力不变量： $\sigma^3 - J_1\sigma^2 - J_2\sigma - J_3 = 0$

4. 主切应力和最大切应力：~~最大切应力达临界值，由弹性状态进入塑性状态~~

· 主切应力平面：与某主平面垂直，与另外2个平面成 $45^\circ$ 。

$$\tau_{12} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}, \quad \tau_{13} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad \tau_{23} = \pm \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}$$

### 5. 球形张量与偏斜张量：

$\sigma_m = \frac{1}{3}\sigma_{RR}$ ：静水应力； $-\sigma_m$ ：静水反压。

· 球形张量  $\rightarrow$  引起体积变化(弹性)

形状变化  $\leftarrow$  偏斜张量。(偏量满足一定关系  $\rightarrow$  发生塑性变形)

6. 微分方程： $\sigma_{ij,j} + f_i = 0$

### 二、点的应变状态分析

2. 点的应变状态和小变形几何方程： $\epsilon = \frac{1}{2}(\epsilon_{ii} + \epsilon_{ij})$

3. 荷载：主应变、不变量、球+偏。

4. 体积不变条件： $\epsilon_{RR} = 0$

### 5. 变形力学简图：

主应力简图：9种形式：单向2种，平面3种，体4种

主应变简图：3种形式：一拉一压，二拉一压，二压一拉

4.3. 屈服准则：当应力状态满足某种关系，才进入屈服塑性变形。

一、屈雷斯加准则：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$$

二、密塞斯屈服准则：

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 = 2\sigma_s^2$$

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 2(L_{xy}^2 + L_{yz}^2 + L_{xz}^2) = 2\sigma_s^2$$

$$\text{物理意义: } \frac{1+\mu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] = \frac{1+\mu}{3E} \sigma_s^2 \\ W \quad \text{单位应屈服时的 } W$$

三、比较： $\sigma_2 = \sigma_1$  /  $\sigma_2 = \sigma_3$  时无差别；  $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$  时差别最大。

4.4. 塑性变形时的应力应变关系。

一、特点：1. 非线性，2. 不可逆 3. 与历史有关。

$$\text{二、等效应力: } \bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 2(L_{xy}^2 + L_{yz}^2 + L_{xz}^2)} \\ = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$$

$$\text{等效应变: } \bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{9} [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + \frac{2}{3} (L_{xy}^2 + L_{yz}^2 + L_{xz}^2)]} \\ = \sqrt{\frac{2}{9} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2]}$$

三、增量理论：

1.  $\sigma'_{ij}$ ：增量；  $d\lambda$ ：瞬时比例系数， $>0$

2. 增量主轴与应力主轴重合

3. 应变增量  $\alpha$  等于应力增量

2. 圣维南型流动：  $\dot{\varepsilon}_{ij} = \sigma'_{ij} \cdot \dot{\lambda}$        $\dot{\lambda} = \frac{3}{2} \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}}$ ：等效应变；速度

3. 普朗特-洛埃斯方程：  $d\varepsilon_{ij} = d\lambda \sigma'_{ij} + \frac{1}{2\lambda} d\sigma'_{ij} + \frac{1-\mu}{E} d\sigma_m \delta_{ij}$

四、全量理论：  
简单加载条件下：  $\dot{\varepsilon}'_{ij} = \lambda \sigma'_{ij}$        $\lambda = \frac{3}{2} \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}}$       刚塑性：  $\dot{\varepsilon}'_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}$

#### 4.5. 应力状态对塑性和变形抗力的影响.

##### 一. 对塑性的影响:

球量产生作用; 等压型最好:  
 1. 阻止晶间变形  
 2. 利于损伤的愈合  
 3. 抑制缺陷的发展  
 4. 消除不均匀形的附加拉应力, 防止裂纹.

##### 二. 对变形抗力的影响: “达到屈服(塑性)程度的难易程度”

等号主应力圆: 减少变形抗力, 但降低塑性.

三. 等压: 提高塑性, 但增加变形抗力.

#### 4.6. 真实应力-应变曲线

##### 一. 用拉伸试验绘制应力-应变曲线

$$\text{应力: } \sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{未颈缩}) \quad \sigma = \frac{F}{A(1 + \frac{\delta}{\delta_p})} \quad (\text{颈缩, 形状演化})$$

$$\text{应变: } \delta = \frac{l - l_0}{l_0} \quad \gamma = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \quad \varepsilon = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0}$$

→ 未颈缩:  $A_0l_0 = A_1l_1$ ; 颈缩:  $A_0l_0 \neq A_1l_1$ . → 对数应变, 反称真实应变.

##### 二. 近似数学表达式:

$$\sigma = B\varepsilon^n, \quad B = \frac{S_b}{\varepsilon_b^m}, \quad n = \varepsilon_b$$

##### 三. 影响:

1. 变形温度: ↑,  $\sigma \downarrow$ , 加工硬化速率 ↓

↑展

2. 变形速率: ↑  $\sigma \uparrow$ , 且  $\Delta S$  与温度有关,  $t \uparrow, \Delta S \uparrow$

#### 4.7. 主应力法

1. 化为平面问题 / 轴对称问题

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2L}{h} = 0 \rightarrow \text{近似平衡方程}$$

2. 假设飞应力与某坐标轴无关

3. 飞应力为主应力: 近似平衡方程:  $(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = \frac{4}{3}\tau_s^2$ ;  $(\sigma_x - \sigma_y) = \pm \frac{2}{\sqrt{3}}\tau_s$

## CH6. 塑性成形技术

板料成形：冲压  
分离：冲裁

成形：弯曲、拉深、胀形、翻边

体积成形：锻造、轧制、挤压、拉拔

### §6.1. 板料成形方法及其模具

冲裁：· 弹性变形、塑性变形、断裂分离

· 主要变形区：以凸、凹模刃口为连线为中心的纺锤形区域

· 断面特征：圆角带、光亮带、断裂带、毛刺、光亮带↑ 质量↑

· 工艺参数：凸凹模间隙：C 为材料厚度的 5%~10%

弯曲：· 弹性弯曲、塑性弯曲、塑性弯曲

· 主要变形区：曲率发生变化的圆角部分

· 变形特征：外层减薄大于内层增厚，板料变薄、总长度增加

· 工艺参数：相对弯曲半径  $\frac{r}{t}$  长  $\frac{l}{t} \text{ min}$ ，开裂，若过大，回弹严重。

拉深：· 弯曲、张形、拉深的变形过程

· 变形区：底壁、承力区；壁部、转力区、已变形；法兰：主要变形区

· 工艺参数：拉深系数  $\frac{d}{D} = m$ ； $R = \frac{D}{m}$ 。 $m < m_{\text{min}}$  时，多次拉深。

胀形：· 变形过程：弯曲、局部张形、内于加压使贴膜而脉增加、张形向外扩展

· 主要变形区：不断扩大的

翻边：弯曲、打孔、翻边

· 工艺参数： $K_f = \frac{d_0}{D}$ 。 $K_f < K_{f\text{min}}$ ：破裂

## 二. 典型模具结构.

1. 工作零件 定位零件. 压料卸料出料零件. 引向零件. 固紧回零件  
工艺结构零件 辅助结构零件

2. 种类: 简单模. 复合模. 级进模

### 3.6.2. 体积成形技术及其模具.

一. 铸造: [自由锻]

[模锻]  $\left\{ \begin{array}{l} \text{锤上模锻} \\ \text{压力机上模锻} \end{array} \right.$  [开式模锻]  
[闭式模锻]

· 自由锻:

锻粗: 1. 工程变形. 2. 大变形. 3. 小变形. 拔长: 1.  $L < 0.5h$ . 质量下降. 锻不透  
2.  $H_0/D_0 > 3$ : 稳定. 2~3 双鼓  
 $0.5 < 2$ : 匀匀  $\rightarrow$  变形  
3. 相对压下量:  $\varepsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_0} \times 100\%$  2.  $L > a$ : 延宽及流动  
 $L < a$ : 轴向伸长量大  
3.  $\Delta h$ : 利于缺陷愈合. 但太大会变坏  
4. 锻造比:  $K = \frac{A_0}{A_1}$

· 模锻:

1. 工步: 制坯:  $\xrightarrow{\text{饼类零件: 锻粗}} \xrightarrow{\text{模锻: }} \xrightarrow{\text{切断: }}$   
[饼类零件: 锻粗]  
[模锻: 预锻. 精锻]  
[轴类零件: 成形. 压扁]  
分离毛边/夹钳部位切头

2. 锤上模锻: 1) 锻挤  $\rightarrow$  填充  $\rightarrow$  打靠  
2) 飞边槽: 避免阻力. 控制流动  
保证尺寸精度及  
3) 后期成形力急剧增加  
沿高处流动变形↑  
对靠挤入方式有利  
对靠挤入方式成形零件  
应多模膛模锻逐步成形  
沿水平↑. 上部易充不满  
静压力: 适用于底型粗. 精度高

二. 挤压:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{热} \\ \text{温} \\ \text{冷} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{已} \\ \text{反} \\ \text{复合} \end{array} \right\}$

1. 变形: I: 弹性变形区

II: 塑性变形区: 主要变形区, II存在较大应力, 变形不易.

III: 死区, 变形与高度及孔隙有关

IV: 已变形区, 与凹模出口有摩擦

2. 流动: 1) 高, f 小: 变形集中在孔口, 死区小

2) 高, f 大: 除死区外的塑性变形

3) 高, f 大, 挤压比大: 第三种金属流动, 花瓣状流线

3. 工艺参数:  $\varepsilon = -\frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\%$  挤压比:  $R = \frac{A_0}{A}$

$\varepsilon, R \uparrow$ , 模具损坏  $\uparrow$ ; 一次加工允许的变形程度: 许可变形程度

2.

药

## CH7. 焊接成形技术

### §7.1 焊接本质及方法分类

一. 本质：通过化学物理方法，使两个分离的固态物体产生分子间结合力而连接成一体  
为什么不能自动连接：1. 表面有粗糙度 2. 氧化膜、杂质

### 二. 焊接方法分类：

熔焊：使被连接两物体表面局部加热熔化成液体，然后冷却成一体  
气焊、铝热焊、弧焊、激光焊、电子束焊

压焊：利用摩擦、扩散、加压等物理作用使两零件在固态条件下实现连接  
(固相焊接) 1. 压焊、摩擦焊、电阻焊。

钎焊：利用熔点低于被连接材料作钎料的媒剂润湿在两零件表面形成湿润。  
火焰钎焊、炉中钎焊、感应钎焊

§7.2. 弧焊：  
1. 碳化钛电弧焊：焊条、埋弧、惰性气体保护焊  
2. 非碳化钛电弧焊：钨极氩弧焊、等离子焊等

### 一. 焊条电弧焊：

1. 原理及特点：手工操作焊条，利用焊条与焊件间的电弧熔化焊条  
· 简便灵活、适应性强 → 可以仰焊  
· 技术要求高，劳动条件差，生产率低 → 短、不规则，小批量

2. 焊条：焊芯 + 药皮

药皮作用  
保护 → 电极、填充金属。

冶金  
良好工艺性

酸性焊条

碱性焊条 → 直流反接

富镍、富镁 Al

熔渣粘度高  
钛型 可向下立焊

钛钙型

钛铁矿型

氧化铁型

E xx 15

$\sigma_b$  (MPa)

## 二. 理弧焊

1. 原理及特点：焊丝与焊件间的电弧在焊剂下

· 生产率高、质量好、劳动条件好

· 只适用于平焊、设备复杂。

2. 高效理弧焊：窄间隙理弧焊；低合金钢厚壁容器。

3. 焊接材料：焊丝：钩芯 焊剂：保护和冶金作用

## 三. 钨极氩弧焊（非熔化极氩弧焊、TIG焊）

1. 原理及特点：在Ar保护下，利用钨极与母材间的电弧熔化填充焊丝

· 保护好；明弧无渣，熔池可见良好 · 热源与焊丝分别控制

· 熔池浅，生产率低； · 成本高 · 对工件表面质量要求高。

### 2. 电流：

直流： 直流正接 直流反接 直流脉冲

发热量小，电极不易坏 阴极烧化 较底热输入，薄板构件

交流： 正弦 矩形

负清氈角极 乙：深熔池 平稳；不耐热；负小弓大

## 四. 熔化极气体保护焊：

1. 原理及特点：同前述；喷嘴喷保护气

· 所有金属 · 电流密度大，熔深大 · 直流反接

MIG：电弧短，性能好  
射滴+短路  
MAG：短路+喷射+脉冲

2. 过渡： 自由 滴状 轴向 Ar } 重力

非轴向 CO<sub>2</sub>

喷射 液滴 射流 强大电磁力

} 电磁吸力、张力

短路  
混合

### §7.3 压焊及钎焊

一、电阻焊：焊件组合后施加压力，利用电阻热加热至熔化/塑性阶段。

点焊、缝焊、凸焊、对焊。

二、摩擦焊：利用摩擦产生的热使工件热塑性，顶锻加压。

旋转～，搅拌～；轨道～

### 三、钎焊

①软～：钎料熔点 $<450^{\circ}\text{C}$ : 电子元件 → 硬:  $>450^{\circ}\text{C}$ : 铜管连接

§7.4. 常用金属材料焊接。

### 一、金属焊接性和试验方法。

1. 金属焊接性：[工艺焊接性  
使用焊接性]

2. 影响因素：材料、工艺、结构、使用条件。

#### 3. 试验方法。

(1) 间接评估：① 碳当量  $C_{eq}$  间接评估法： $C_{eq}(\text{III}) > 0.5\%$  易发脆裂 ↑

② 冷裂纹敏感系数： $P_c$ ： $P_c \uparrow$  越易冷裂 ↑

#### (2) 直接试验方法：

① 斜Y形坡口焊接裂纹试验：小铁研试裂纹试验

表面裂纹率、断面裂纹率

② 插销试验：临界断裂应力  $\sigma_{cr.}$  → 评估热影响区冷裂纹敏感性

## 二、结构钢的焊接

- 中碳钢：预热，控制焊接温度（层间）
- 冷裂纹：正确选用预热温度
- 消除粗晶区脆化：正确选用预热温度和回火温度及
- 防止再热裂纹：避免在 600°C 回火

## CH 8. 增材制造

