

---

注：部分图片来源于上课用的课本和PPT，如果侵权请联系[fuqingchen@whut.edu.cn](mailto:fuqingchen@whut.edu.cn)，我会及时替换掉

上篇为 **工程材料导论、铸造**；下篇为 **金属压力加工、焊接、金属切削加工**

2018©Fu\_Qingchen, Markdown, Latex

# 金属压力加工基础

---

**固态金属**在外力作用下产生**塑性变形**，获得一定形状、尺寸和力学性能的零件等的生产方法

良好是塑性是金属压力加工的必要条件（要求断面收缩率大、延伸率大）

## 金属塑性变形的实质

---

金属塑性变形的实质可以用 **晶粒内部、晶粒间产生滑移和晶粒发生转动** 来解释

金属收到外力作用→内部产生应力→原子离开平衡位置→弹性变形→塑性变形

### 单晶体变形

- 滑移

近代物理学证明，实际晶体内部存在大量缺陷，其中以 **位错** 对金属塑性变形的影响最为明显。

- 孪生

### 多晶体变形

机械制造中大多数是多晶体，其中多晶体是由很多单晶体构成的，因此多晶体变形分为两类：**晶内变形、晶间变形**（滑动转动）

- 一般来说，同一成分的金属，晶粒越细，其强度、硬度越高，而且塑性和韧性也越好。

晶粒细小→晶界强化区大→变形受阻→强度硬度高→变形分散度大→每一个变形大→塑性韧性高

## 塑性变形对金属组织和性能的影响

---

金属在常温下塑性加工过后，内部组织将发生如下变化

- 晶粒向最大变形的方向延展
- 晶格与晶粒发生扭曲，产生内应力
- 晶粒间产生碎晶

宏观上表现为：硬度增加，塑性下降。这种现象被称为 **加工硬化**

单晶体内发生滑移，产生内应力，滑动阻力增大；晶粒间产生碎粒，滑动阻力增大。进一步变形会比较困难，表现为强度硬度上升，塑性下降。

加工硬化的主要原因是：**位错密度增加**

加工硬化是一种不稳定的现象，会自发的恢复。当温度升高时，原子热运动加剧，原子的排列会恢复到之前的状态，从而消除晶格扭曲，得到 **部分消除（回复现象）**

这时的温度被称为 **回复温度**，其中： $T_{回}=(0.25-0.3)T_{熔}$ 。不过此时晶体形状没有变化。

当温度继续升高，金属原子获得更多的热能，开始以某些碎晶或杂质为核心，按变形前的晶格结构结晶成新的晶粒，这一过程称为**再结晶**。此时加工硬化现象可以**完全消除**

这时的温度叫做 **再结晶温度**，其中  $T_{再}=0.4T_{熔}$ 。

再结晶退火就是这个原理

## 冷变形与热变形

- 在结晶温度**以下**发生的塑形变形是冷变形，**会产生**加工硬化现象。
- 在结晶温度**以上**发生的塑形变形是热变形，**不会**产生加工硬化现象。

加工硬化与再结晶现象同时发生，加工硬化会被再结晶消除

温度		
熔化温度	$T_{熔}$	熔化
再结晶温度	$T_{再} = 0.4 T_{熔}$	热变形，加工硬化可完全恢复（再结晶现象）
回复温度	$T_{再} = (0.25-0.3) T_{熔}$	冷变形，加工硬化部分恢复（回复现象）

## 纤维组织变化

铸锭在压力加工中产生塑性变形时，基体金属的晶粒形状和沿晶界分布的杂质形状都发生了变形，它们都将沿着 **变形方向** 被拉长，呈纤维形状。这种结构叫纤维组织。（要记）

变形后纤维组织纤维组织使金属在性能上具有了**方向性**。纤维组织越明显，金属在纵向(平行纤维方向)上塑性和韧性提高，而在横向(垂直纤维方向)上塑性和韧性降低。

**变形程度越大，纤维组织越明显**。压力加工过程中，常用锻造比(y)来表示变形程度。

纤维组织的稳定性很高，**不能用热处理方法加以消除**，只有经过 **压力加工** 使金属变形，才能变其方向和形状。（判断题）

纤维组织的利用原则：

- 使纤维分布与零件的轮廓相符合而不被切断

局部墩粗的螺钉比切削加工的螺钉承载能力强

- 零件所受的最大拉应力与纤维方向一致，最大切应力与纤维方向垂直。

## 金属的可锻性

受到塑形变形而不开裂的能力

可锻性常用金属的 **塑性和变形抗力** 来综合衡量。塑性越好，变形抗力越小，则金属的可锻性好。反之则差。

金属的可锻性取决于**金属的本质**（内因）和**加工条件**（外因）。

### 金属的本质（内因）

### 1. 化学成分

合金元素含量越多，合金成分越复杂，其塑性越差，变形抗力越大。

### 2. 金属组织

纯金属及单一固溶体组成的合金（如奥氏体）的可锻性好；碳化物（如渗碳体）的可锻性差。

## 加工条件（外因）

### 变形温度

在一定的变形温度范围内，随着温度升高，原子动能升高，从而塑性提高，变形抗力减小，有效改善了可锻性。

但是温度过高会出现各种缺陷

名称	原因
过热	T大→晶粒大→金属力学性能下降
过烧	接近熔点→晶界氧化→塑性丧失→工件报废

因此控制温度就很重要了。于是乎就有 **始锻温度** 和 **终锻温度**

### 变形速度

- v增大 → 再结晶来不及 → 不能及时克服加工硬化 → 可锻性差
- v增大 → 热效应明显 → 塑性韧性好（一般压力加工不明显）

### 应力状态

对于本质塑性较好的金属，变形时出现拉应力是有利的。对于本质塑性较差的金属，则应尽量在三向压应力下变形，以免产生裂纹。

实践证明：三个方向的应力中，**压应力的数目越多，则金属的塑性越好**；拉应力的数目越多，则金属的塑性越差。但压应力使金属内部摩擦阻力增大，变形抗力亦随之增大，所以拉拔加工比挤压加工省力。（了解）

某种铁合金塑性较差，但又要用压力加工方法成型，此时，以选用 **挤压** 方法的成型效果最好。

## 常用的锻造方法

锻造是使加热好的金属坯料，在外力的作用下发生塑性变形，通过控制金属的流动，使其成形为所需形状、尺寸和组织的方法。

### 自由锻

只用简单的通用性工具，或在锻造设备的上、下砧间直接使坯料变形而获得所需的锻件，这种方法称为自由锻。

**自由锻是大型件唯一的锻造方法。**

自由锻工序可分为**基本工序**（使金属坯料实现主要的变形要求，达到或基本达到锻件所需形状和尺寸的工序。）、**辅助工序**和**修整工序**三大类。

基本工序主要有：

- 墩粗：是坯料高度减小、横截面积增大的锻造工序
- 拔长：使坯料横断面积减小、长度增加的锻造工序（有反复翻转和螺旋式翻转两种）
- 冲孔：在坯料上冲出通孔或盲孔的锻造工序称为冲孔
- 弯曲
- 扭转
- 切割

## 自由锻结构设计要求

- 避免窄的凹槽、圆锥面等结构
- 不允许有小的肋板、小凸台和相贯线等异形结构
- 自由锻件的横截面若有急剧变化或形状较复杂时，应设计成由几个简单件构成的几何体。

## 模锻

---

利用锻模使坯料变形而获得锻件的锻造方法称为**模锻**。

模锻分**胎模锻**和**固定模锻**两类。

### 胎模锻

胎模锻是在**自由锻设备上**使用**可移动模具**生产模锻件的一种方法。

胎模不固定在锤头或砧座上，只是在使用时才放上去，它介于自由锻和模锻之间。

### 固定模锻

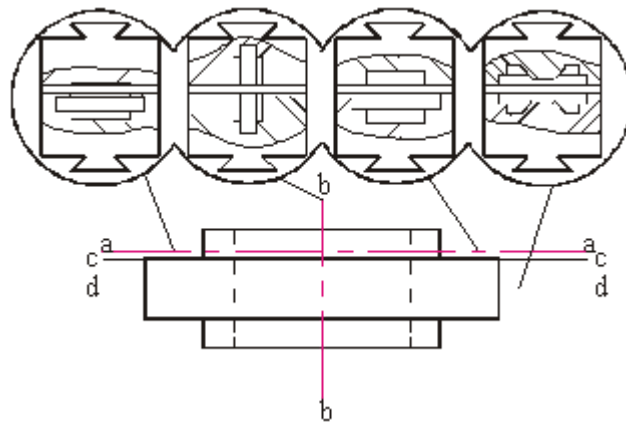
固定模锻根据所用设备不同可分为**锤上模锻**和**压力机上模锻**。

**锤上模锻**是我国当前模锻生产的基本方法。

模锻生产的工艺规程制定包括：**模锻锻件图制定**、**锻模模膛设计**、毛坯计算、工序确定、设备选择、毛坯加热、锻模及模锻件的修正工序等。

### 锻件图的制定

- 分模面
  - 保证锻件能从模膛取出（a）
  - 使模膛深度最浅（b）
  - 分模面上下模锻外形一致（c）
  - 使所需辅料最少
  - 平面



- 余料、公差和敷料

为了简化锻件形状，不予锻出添加的那部分金属称为敷料。

孔的中间留有冲孔连皮（由于模锻无法直接锻出透孔，需在该处留有较薄的金属，称为冲孔连皮）

- 模锻斜度

为了使锻件易于从模膛中取出，锻件与模膛侧壁接触部分需带一定斜度，锻件上的这一斜度称为模锻斜度

## 模锻模膛

根据模膛的功能，锻模的模膛分为**模锻模膛**和**制坯模膛**两大类。

### 模锻模膛

- 预锻模膛

使坯料变形接近锻件要求的形状和尺寸，这样在终锻模膛是，金属更容易填充模膛，从而减少模膛的磨损，延长寿命

预锻模膛的圆角和斜度要比终锻模膛要大，而且没有飞边槽

- 终锻模膛

终锻模膛的作用是使毛坯最后变形到锻件所要求的形状和尺寸，因此，它的形状应和锻件的**形状相同**，但因锻件冷却时要收缩，故终锻模膛的尺寸应比锻件**尺寸放大一个收缩量**。

沿模膛四周有飞边槽

飞边槽的作用：①增加金属从模膛流出的阻力，使金属充满模膛②容纳多余的金属

### 制坯模膛

对于形状复杂的锻件，为了使毛坯形状基本符合锻件形状，以便使金属能合理分布和很好地充满模膛，就必须预先在制坯模膛内制坯。

- 拔长模膛
- 滚压模膛
- 弯曲模膛
- 切断模膛

## 模锻工序的确定

- 长轴：常选用拔长、滚压、弯曲、预锻和终锻等工序
- 短轴（齿轮）：常选用墩粗、预锻和终锻等工序

## 修整工序

- 切边和冲孔
- 矫正

## 模锻将结构工艺性

由于模锻件在锻模模膛中的成型条件比自由锻更加优越，因此模锻件形状比自由锻复杂

设计时应该遵循：

- 必须保证锻件从模膛取出
- 模锻件形状应该简单（最小截面与最大截面之比如果小于0.5，那么锻件不易锻出）
- 模锻件尺寸精度高，表面粗糙度低。因此只有与其他机件配合才需要进行机械加工，零件上与锤击方向平行的应该设计出斜度，非加工表面形成的角应该为圆角
- 避免深孔、多孔结构
- 采用组合工艺

## 板料冲压

使板料经分离或成型而制件的工艺称为冲压

板料厚度 < 4mm 时的金属板在常温下进行冲压，因此称为 **冷冲压**。只有当板料厚度超过 8-10mm 才采用 **热冲压**

优点：

- 便于自动化生产，生产率高
- 节省原材料，节省能源
- 产品重量轻，强度高，刚性好
- 产品尺寸稳定，互换性好，可加工形状复杂的零件

## 板料冲压基本工序

板料冲压的基本工序可以分为 **分离工序** 和 **变形工序** 两大类

### 分离工序

落料和冲孔统称**冲裁**

落料是为了制取工件的外形，故冲下的部分为工件，带孔的为废料。

冲孔则相反，是要制取工件的内孔，故冲下的部分为废料，带孔的部分为工件。

### 冲裁变形和分离过程

记过程

此过程分为**弹性变形**、**塑性变形**、**断裂分离**三个阶段

### 冲裁件断面质量及其影响因素

冲裁面由 **圆角带 (a)**、**光亮带 (b)**、**断裂带 (c)** 和**毛刺 (d)** 组成

- 圆角带a：冲裁过程中刃口附近材料被牵连拉入变形

- 光亮带b：入口切入金属板料后，板料与模具侧面挤压而形成的光亮而垂直的断面
- 断裂带c：刃口处微裂纹扩展形成
- 毛刺d：刃口附近侧面材料出现微裂纹

提高冲裁件质量，就是要增大光亮带高度，缩小圆角带和毛刺的高度，并较少从裁剪翘曲

### 凹凸模间隙

凹凸模的间隙不仅严重影响冲裁件的断面质量，也影响模具寿命、卸料力、推件力和冲裁件的尺寸精度

类型	效果
间隙过小	光亮面宽度增加，毛刺与圆角宽度减小，工件质量高，但是刀具寿命会减小，然后也会出现二次光带
间隙合适	光面占板厚的1/2-1/3，切断面的毛刺圆角和斜度均比较小，完全满足使用要求
间隙过大	断面光面减小，圆角与斜度增大，容易形成后而大的拉长毛刺，而且难以去除

### 凹凸模刃口尺寸的确定

确定原则如下：

- 落料时，落料件的尺寸是由 **凹模刃口** 尺寸决定的，因此，应该以**落料凹模**为设计基准，考虑到凹模磨损后会 使落料件尺寸增大，为提高刀具寿命，凹模刃口基本尺寸应该是落料件的**最小极限尺寸**。凸模尺寸 = 凹模尺寸 - 最小间隙值。
- 冲孔时，冲孔件的尺寸是由 **凸模刃口** 尺寸所确定的，因此应该以 **冲孔凸模** 为基准。考虑到凸模磨损会变小，因此，凸模刃口是冲孔件的 **最大极限尺寸**。凹模尺寸 = 凸模尺寸 + 最小间隙值

### 冲裁力计算

冲裁时材料对凸模的最大抗力称为冲裁力。

其大小与**材质、料厚及冲裁件周边长度**有关。

### 修整

修整是利用修整模沿冲裁件外缘或内孔刮削一薄层金属，以切掉普通冲裁时在冲裁件断面上存留的剪裂带和毛刺，从而提高冲裁件的尺寸精度和降低表面粗糙度。

### 切断

切断是指用剪刀或冲模将板料沿不封闭轮廓进行分离的工序。

## 变形工序

- 弯曲：将板料在弯矩作用下完成具有一定曲率和角度的制件的成型方法
 

弯曲时还应尽可能使**弯曲线与坯料纤维方向垂直**。若弯曲线与纤维方向一致，则容易产生破裂。

**回弹现象**：由于材料的弹性形变的恢复，坯料会稍微弹回一点（凹凸模小一回转角）

工程中常用最小相对弯曲半径（ $r_{\min}/\delta$ ， $\delta$ 为工件厚度）来限制弯曲变形的程度

- 拉深：变形区一拉一压的作用下，是平板成为**开口的中心件**而厚度不变的加工方法。

当拉深系数  $m = d/D$ ；一般来说，有  $0.5 \leq m \leq 0.8$ 。

当筒形件直径d与坯料直径D相差较大时，不能一次拉深至产品尺寸，而应进行多次拉深，并在中间穿插进行**再结晶退火处理**，以消除前几次拉深变形所产生的**加工硬化现象**。

拉深缺陷：

- 拉裂（拉应力超过强度极限）
- 折皱（凸缘和凸模圆角部位变形最大，凸缘部分在圆周切线方向受压应力，压应力过大时，会发生折皱，坯料厚度愈小，拉深深度H愈大，愈容易产生折皱）

可以使用有压板拉深来避免这个现象

防止措施

- 凸凹模圆角半径应该合适
- 凸凹模间隙应合适
- 合理控制拉深系数 m
- 起伏
- 翻边
- 胀形

## 冲压件结构设计要求

---

### 对冲裁件要求

1. 对冲裁剪力求结构简单、对称，尽可能使用圆形矩形等规则形状，应避免窄而长的形状
2. 避免尖角，以圆弧过渡，以避免应力集中
3. 冲裁件尺寸应考虑到厚度

### 对弯曲件要求

1. 弯曲件应尽量对称，弯曲半径不能小于材料允许的最小弯曲半径，并考虑材料纤维方向
2. 弯曲边过短不易成型
3. 弯曲件带孔时，为了避免孔的变形，孔的边缘距弯曲中心应该有一段距离

### 对拉深件要求

1. 拉深件的结构应该简单、对称、且不宜太高
2. 拉深件的圆角半径有要求
3. 拉深件的壁厚变薄量一般要求不超过拉伸工艺壁厚变化的规律

## 冲压模具

---

一般可分为**简单模**、**连续模**和**复合模**三类。

### 简单模

在压力机的一次行程中，只完成一道冲压工序的模具，称为简单模。



## 连续模

压力机的一次行程中，在模具的不同部位上同时完成数道冲 压工序的模具，称为连续模。

## 复合模

利用压力机的一次行程，在模具的同一位置完成两道或两道以上工序的模具，称为复合模

# 焊接工艺基础

焊接是一种永久性连接金属材料的工艺方法，焊接过程的实质是利用加热或加压等手段，借助金属原子的结合与扩散作用，是金属材料牢固的连接起来。

焊接的方法可以分为3类：**熔焊、压焊、钎焊**

名称	定义	细分
熔焊	将焊接接头加热至熔化状态，不加压力的焊接方法	手工电弧焊、埋弧焊、氩弧焊 CO2焊、电渣焊、等离子弧焊
压力焊	焊接过程中必须对工件施加压力，已完成焊接的方法	电阻焊（点焊、缝焊）等
钎焊	采用比母材熔点低的金属材料做钎焊，将焊件和钎料加热到高于钎料熔点，低于母材熔点的温度，利用液体钎料润湿母材	硬钎焊、软钎焊

## 电弧焊工艺基础

### 焊接电弧

焊接电弧是在具有一定电压的电极和工件之间的气体介质中长时间放电现象，即在局部气体介质中有大量电子流过的导电现象

接法	解释	适用范围
正接	焊件接正极，焊条接负极	厚板、酸性焊条
反接	焊件接负极，焊条接正极	薄板、碱性焊条

### 熔化焊冶金特点

- 熔化焊的本质是金属在焊接条件下的再次熔炼，是金属熔化结晶的过程
- 熔池存在时间少，温度高，冶金过程不充分，氧化严重，热影响区大
- 冷却速度快，结晶后易产生粗大的柱状晶

### 电弧焊冶金特点

- 电弧和熔池温度高于一般冶炼温度，是金属强烈蒸发，导致金属**烧损**或形成**有害杂质**

- 熔池体积小，导致化学成分不均匀，容易产生**气孔或夹杂**等缺陷
- 熔池不断更新，有害物质不断进入形成**氧化物、气孔、杂质**等缺陷

## 熔化焊三要素

- **热源**：热量要集中，温度要高，以保证金属快速熔化，减小热影响区
- **熔池的保护**：渣保护、气保护、渣气保护
  - 形成熔融的液态焊剂薄膜，使熔池与空气隔绝，大大减少含气量，提高韧性
  - 延长熔池时间，加强冶金反应，有利于气孔夹渣的析出

如焊条的药皮及二氧化碳加药芯是渣气联合保护

- **填充金属**：保证焊缝填满及给焊缝带入有益的合金元素，并达到力学性能和其它性能的要求，主要有焊芯和焊丝

## 焊条

### 焊条的型号

- “E”代表焊条
- 前两位数字表示熔敷金属抗拉强度的最小值，单位为Mpa
- 第三位数字表示焊条的焊接位置
- 第三位和第四位数字组合时表示焊接电流种类及药皮类型

类型	焊接工艺性	焊件性能	使用注意
酸性焊条	好，适用于各种电源，操作性好，电弧稳定，成本低	焊缝强度低，渗合金作用弱	不宜用于承受重载和高强度要求的重要结构件
碱性焊条	差，一般要求采用直流电源，操作性差，电弧不稳定，成本高	焊缝强度高，渗合金作用强	只适合焊接重要结构件，易产生有毒物质，注意通风

### 选用原则

- **等强度原则**
- 考虑**焊接件的结构形状、钢板厚度、载荷性质和抗裂能力**
- **低碳钢与低合金钢结构钢**焊接，按**强度较小**的定
- 铸钢一般用碱性焊条

## 焊接接头组织与性能

由于各点与焊缝中心位置距离不同，所受温度不同，相当于对焊接接头区域进行了一次不同规范的热处理，因此会有不同的结构与性能

整个焊接接头由**焊缝区、熔合区、热影响区**构成。

### 焊缝区

在焊接接头横截面上的金属。焊缝的结晶从熔池底壁开始向中心成长。由**铁素体和少量珠光体**所组成。因结晶是从熔池底部的半熔化区开始逐次进行的，低熔点的硫磷杂质和氧化铁等易偏析物集中在焊缝中心区，将影响焊缝的力学性能。

## 熔合区

加热温度在固液两相区之间，有明显的化学不均匀性。**组织为少量的铸态组织和粗大的过热组织**。塑性差，强度低，脆性大，易产生焊缝裂纹和脆性断裂、**决定了焊接接头的性能**。

## 热影响区

热影响区可分为**过热区、正火区和部分相变区**等。

过热区——加热温度在 $Ac_3$  以上 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ 至固相线温度区间。由于该区域内奥氏体晶粒急剧长大，形成过热组织，故塑性及韧性降低。也是一个薄弱环节。

焊接热影响区的大小和组织性能变化的程度，决定于**焊接方法、焊接参数、接头形式和焊接后冷却速度**等因素。

在保证焊接质量的条件下，增加**焊接速度或减少焊接电流**都能减小焊接热影响区。

## 焊缝应力与变形

---

### 应力的产生

本质就是被焊结构件有不均匀的加热和冷却

当焊缝及相邻区金属处于加热阶段时都会膨胀，但受到焊件冷金属的阻碍，不能自由伸长而受压，**形成压应力**，该压应力使处于塑性状态的金属产生压缩变形。

随后再冷却到室温时，其收缩又受到周边冷金属的阻碍，不能缩到自由收缩所达到的位置，因而**产生残余拉应力（焊接应力）**

### 变形的基本形式

- 收缩变形：工件整体的变小，包括焊缝的纵向和横向收缩
- 角变形：焊缝截面上下不对称，焊缝收缩横向不均匀
- 弯曲变形：发生在焊缝在结构上不对称的情况下，纵向收缩不对称，导致工件向一侧弯曲
- 波浪边形：发生在焊接薄板时
- 扭曲变形：发生多对焊缝和长焊缝结构

### 防止措施（重点）

等MOOC答案

## 常见的焊接方法

---

名称	特点	适用范围
手工电弧焊	有结构简单、应用灵活方便、可焊各种金属等优点	
埋弧焊	加工效率高；节约能源和材料；焊缝质量高；劳动条件好；使用位置，厚度受限制；对坡口加工要求高	长直焊缝和环焊缝
氩弧焊	焊缝小，能量集中；熔池保护好；可以全位置焊接；贵	易氧化的Fe合金等
CO2焊	成本低；生产效率高；合金元素烧损严重；易飞溅	黑色金属
电渣焊	生产效率高；焊后要进行热处理；焊接质量好；热影响区宽	厚板
压力焊	速度快；变形小；效率高；耗电；对接头形式有要求	-

## 手工电弧焊

焊芯与工件的熔化金属形成**焊缝金属**，焊条药皮产生的气体和熔渣**保护熔池、稳定电弧、渗入合金**  
有**结构简单、应用灵活方便、可焊各种金属**等优点

## 埋弧焊

课堂上展开讲解了

埋弧焊是一种电弧在焊剂层下燃烧并进行焊接的电弧焊

在焊接**长直焊缝和环焊缝**中与有明显的优点

## 优点

- 焊接生产率高
- 节省焊接材料、电能
- 焊缝质量好（隔绝空气效果好，焊剂层保护效果好）
- 劳动条件好

## 缺点

- 焊接使用位置受限制
- 焊接厚度受限制
- 对坡口加工要求精度高，装配要求高

## 氩弧焊

可以分为**熔化氩弧焊和钨极氩弧焊**

**特点**

- 氩弧焊电弧直径小，能量集中，电弧稳定
- 气体保护效果好，可以实现自动全位置焊接

- 适用于各种金属的焊接，可以实现单面焊双面成型
- 氩气贵

## CO2焊

---

全位置焊接

### 防飞溅措施

- 直流反接
- 用含Si、Mn、Ti、Al 焊丝
- 采用药芯焊丝

### 不足

- CO2氧化性强，焊缝金属烧损严重
- 只适用于黑色金属的焊接（低碳钢、低碳合金钢）

## 电渣焊

---

- 最适合焊接厚大金属，可一次焊成，成本低
- 焊接材料和电能消耗少，焊接成本低（不需要预热）
- 焊缝液态金属停留时间长，焊缝质量好
- 热影响区宽，结晶晶粒粗大，焊后必须进行热处理（焊接能量大，加热冷却速度慢，高温停留时间长）

## 常用金属材料的焊接

---

### 金属焊接性

---

用来评价金属焊接加工的难易程度。其内容包括两个方面：金属在焊接是对缺陷的敏感性（**工艺焊接性**）；焊接接头在使用过程中的可靠性，包括力学性能、耐热耐腐蚀等（**使用焊接性**）

### 评定方法

- 实验法
- 碳当量法

**将合金元素的含量对焊接性能的影响程度转化为C的含量，其总和为碳当量**

$$W_{CE} = (W_C + \frac{W_{Mn}}{6} + \frac{W_V + W_{Cr} + W_{Mo}}{5} + \frac{W_{Ni} + W_{Cu}}{15}) \times 100\%$$

当  $W_{CE} \leq 0.4\%$  时，焊接性能优良（但是对板厚较大或在低温下应考虑预热）

当  $0.4\% \leq W_{CE} \leq 0.6\%$  时，焊接性能较差。应考虑预热、缓冷、焊后热处理等工艺措施

当  $0.6\% \leq W_{CE}$  时，焊接性能差，需要更高的温度和更严格的工艺措施防止焊接应力

金属材料	焊条电弧焊	埋弧焊	氩弧焊	CO2焊	电渣焊	气焊	点焊	钎焊
铸铁	A	C	B	B	B	A	D	C
铸钢	A	A	A	A	A	A	D	B
低碳钢	A	A	A	A	A	A	A	A
高碳钢	A	B	B	B	B	A	B	C
低合金钢	A	A	A	A	A	B	A	A

## 碳钢的焊接

### 低碳钢

焊接性能最好，一般不需要采取特殊的工艺措施。

- 在零度以下的低温环境中需要预热
- 在焊厚板时要焊后热处理（去应力退火）

### 中碳钢

- 焊缝容易产生热裂纹
- 热影响区容易产生淬硬组织和冷裂纹

需要采取以下措施：

- 焊前必须预热**（使焊接时工件各部分的温差减小，以减小焊接应力，同时减慢热影响区的冷却速度，避免产生淬硬组织）
- 开坡口分层焊

### 高碳钢

焊接特点与中碳钢基本相似，进行焊接时，应采用更高的预热温度、更严格的工艺措施。

### 低合金钢

- 热影响区有淬硬倾向（合金元素越多，倾向越明显）
- 焊接接头有裂纹倾向

Q345(16Mn)与低碳钢差不多；Q420(15MnVN)焊前要高于150℃预热，焊后要热处理，要用抗裂性好的焊条

## 铸铁的补焊

铸铁含碳量高，组织不均匀塑形低，**焊接性能差**，不应用铸铁设计和制造焊接结构件

### 焊接特点

- 熔合区易产生白口组织
- 易产生裂纹
- 易产生气孔

- 流动性好，因此只能用于平焊

根据铸铁的焊接特点，易采用**气焊和焊条电弧焊**

## 焊接方法

### 热焊法

是焊前将工件整体或局部预热到 $600 \sim 700^{\circ}\text{C}$ ，焊补后缓慢冷却。

热焊法能防止工件产生白口组织和裂纹，焊补质量较好，焊后可进行机械加工。

但**热焊法成本较高，生产率低，焊工劳动条件差，尽量少用**。一般用于焊补形状复杂焊后需要加工的重要铸件，如床头箱、汽缸体等。

### 冷焊法

补焊前工件不预热或只进行 $400^{\circ}\text{C}$ 以下的低温预热。

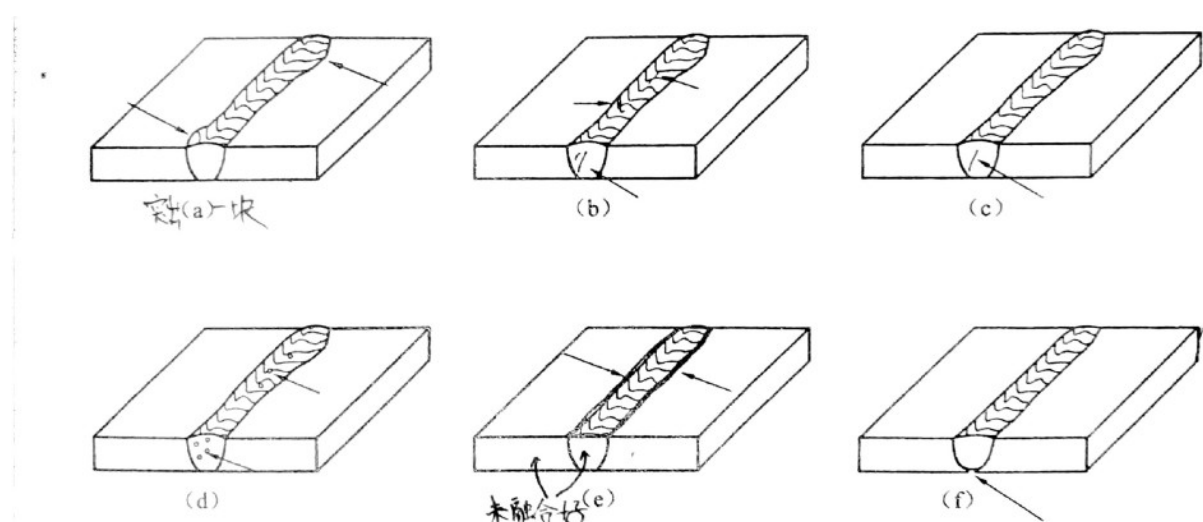
主要依靠焊条来调整焊缝化学成分，以防止或减少白口组织和避免裂缝。

**冷焊法方便灵活生产率高、成本低、劳动条件好，应用广泛**。但焊接处切削加工性能较差。生产中多用于焊补要求不高的铸件以及怕高温预热引起变形的工件。

## 防止白口组织

- 减缓冷却速度
- 增加有利于石墨化元素的含量
- 用异质材料焊接

## 焊接缺陷与检验



序号	缺陷	原因
a	焊瘤	焊条熔化速度过快，电弧过长，电流过大，焊速过慢，运条不当
b	裂纹	焊接结构不合理，焊缝冷却速度过快，含有 C、S、P 等元素
c	夹渣	未搅拌熔池，焊件不洁，电流过小，分层焊时未除焊渣
d	气孔	焊件不洁、焊条潮湿、电弧过长、电流过大，焊件含 C 高
e	咬边	电流过大，运条不当，电弧过长、焊接角度不对
f	未焊透	电流过大、焊速过快、运条不当

外观检验

- 着色检验
- 荧光检验
- 磁粉检验

无损探伤

- 声发射探伤
- 超声波探伤
- 激光全息探伤

有色合金的焊接

使用氩弧焊、气焊、钎焊

焊接结构设计

焊接方法选择

- 小批量钢结构件
  - 板厚 < 3mm，焊缝较短：**CO2焊**
  - 板厚 3-10mm，焊缝较短，强度较低：**手工电弧焊**
  - 板厚 >10mm，焊缝为长直焊缝或环焊缝：**埋弧焊**
- 大批量钢结构件
  - 板厚 <3mm，无密封要求：**点焊**；有密封要求：**缝焊**
  - 板厚 3-10mm，长直焊缝或环焊缝：**CO2自动焊**
  - 板厚 >10mm，长直焊缝或环焊缝：**埋弧焊**
- 不锈钢、铝合金、铜合金
  - 板厚 <3mm，**钨极氩弧焊**
  - 板厚 3-10mm，长直焊缝或环焊缝：**熔化极电弧焊**

焊接结构件的选择

- 在满足性能的前提下，尽量选择焊接性能好的材料



碳含量小的低合金钢比较好

- 异种材料的焊接，特别需要注意焊接性能，尽量选择化学成分、物理性质相似的材料
- 减少焊缝数量，简化焊接工艺，增加焊件的强度与刚度
- 合理焊接结构件供应时的尺寸等

## 焊接件接头工艺的选择

### 接头形式的选择

焊接接头的基本形式有：对接、角接、搭接、T形接

- 对接：受力均匀，应力集中较小，易保证焊缝质量，静载和疲劳强度比较高；对下料尺寸精度要求较高
- 搭接：两工件不在同一平面，受力复杂，容易产生附加弯矩；对下料尺寸精度要求不高，不需要坡口
- 角接和T形接：受力复杂，和搭接一样容易产生缺陷

接口形式与焊接方法的关系比较大。例如，手工电弧焊和埋弧焊可以用对接、角接、搭接、T形接；电渣焊可以用对接、角接、T形接；点焊和缝焊只能搭接；钎焊常用搭接

### 坡口的选择

- 采用对接接头时，当厚度  $< 6\text{mm}$  时，常常使用 I 形坡口（对接处留适当间隙）
- V 形坡口 和 U 形坡口，可以单向焊接，焊接性较好，但是角变形大，消耗焊条多
- 双 V 形坡口 和 双 U 形坡口，需要两面施焊，受热均匀，变形小，消耗焊条少，不过结构受限制

### 焊缝的合理布置

- 尽可能使焊缝分散布置  
焊缝过于密集会使金属过热，使接头组织粗大
- 尽可能使焊缝对称分布  
焊缝对称布置可减小焊接变形
- 使焊缝避开应力集中处
- 使焊缝避开机械加工表面
- 使焊缝处于便于操作的地方

## 金属切削加工

### 切削三要素

切削速度、进给量、切削深度

不考

### 刀具材料

#### 对刀具材料的基本要求

- 高的硬度和耐磨性
- 高的耐热性和化学稳定性
- 足够的强度和韧性
- 良好的工艺性
- 经济性

## 常用刀具材料

- 高速钢

耐热性、硬度、耐磨性低于硬质合金；强度韧性工艺性优于硬质合金；价格比硬质合金便宜

只能用于 **中速切削**
- 硬质合金

以高熔点、高硬度的金属化合物做基体，以 Co 为黏合剂，用粉末冶金制成

有两大类：WC 与 Co 组成的 钨钴类（TG类，塑性好）；WC、Ti、Co 组成的（YT类，硬度高）

塑性好的刀具适合切削脆性材料（且塑性好的材料容易磨损）；硬度高的刀具适合切削塑性材料（切塑性差的材料容易受到脆性冲击，崩刃）
- 陶瓷材料

硬度高，耐磨性好，耐热性好，怕脆性冲击，容易崩刃

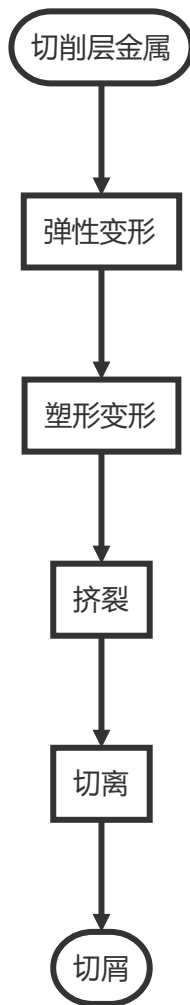
## 刀具的几何参数

名称	定义
前刀面	刀具上切削流过表面
主后刀面	刀具上与工件被切削面相对应的表面
副后刀面	刀具上与工件已加工表面相对应的表面
基面 $p_r$	过切削刃上某点，垂直于该点主运动方向的面
切削平面 $p_s$	过切削刃上某点，与切削刃相切并垂直于 $p_r$ 的面
正交平面 $p_o$	过切削刃上某点，同时垂直于 $p_r$ 和 $p_s$ 的面

名称	定义	影响
主偏角 $\kappa_r$	在 $p_r$ 投影面内，主切削刃与进给运动方向夹角	①影响刀具寿命（角越小寿命越长）②影响切削分力大小（角越小，径向分力越大，容易出现变形和振动）
副偏角 $\kappa'_r$	在 $p_r$ 投影面内，副切削刃与进给运动反方向夹角	影响已加工表面粗糙度（角越小，粗糙度越小）（过小会使已加工表面与刀具接触摩擦，产生振动和噪音）
前角 $\gamma_o$	在 $p_o$ 投影面内，前刀面与基面夹角	①影响切屑的变形程度（角大，减小切屑变形，使切削其轻快，降低切削温度，减小磨损）②影响刀刃强度（角大，强度低，散热面积小）（精加工、韧性好材料，增大前角）
后角 $\alpha_o$	在 $p_o$ 投影面内，后刀面与基面夹角	①增大后角，减少摩擦，工件质量高②刀具强度低，散热体积减小，刀具寿命减小
刃倾角 $\lambda_s$	在 $p_s$ 投影面内，主切削刃与基面投影（下凹为正）	①影响刀具强度（正的容易损坏，为了保护已加工表面，精加工去0值或正值；负的增强刀头，但可能引起震动，用于粗加工）②影响切削流出方向（正：流向待加工表面；0：沿着与主切削刃垂直的方向；负：流向已加工表面）

# 金属切削过程

## 切削的形成过程



## 切屑的种类

- 带状切屑

用大前角的刀具、较高的切削速度和较小的进给量切削**塑性材料**时，容易得到带状切屑。

切削力平稳，加工面光洁，但是为了保护已加工表面需要进行断屑处理

- 节状切屑

用较低的切削速度、较大的进给量切削粗加工**中等硬度**的材料时得到的。工件表面比较粗糙。

- 崩碎切屑

在切削**脆性材料**时，产生的。刀尖容易磨损，振动，影响表面质量。

加大前角、提高切削速度、减小进给量 可以将节状切屑转化为带状切屑，使加工表面光滑

## 积屑瘤

### 产生原因

当切屑沿着刀具的前刀面流出时，在一定的温度和压力作用下，与前刀面接触的切屑底层受到很大的切削阻力，导致这一层的流出速度减慢，逐渐形成了滞留层。当前刀面对滞留层的摩擦阻力超过金属材料内部结合力时，就会有一部分金属粘附在切削刃附近，形成**积屑瘤**

### 对加工影响

- 起到了保护切削刀的作用，同时相当于增大了  $\gamma_o$ ，是切削轻快。**粗加工** 希望出现积屑瘤
- 积屑瘤不断的形成与脱落，影响了尺寸精度，使表面粗糙。**精加工** 不希望出现

### 控制措施

- **塑形**越大，越容易产生积屑瘤
- **中温中速**切削加工，最容易产生积屑瘤

低速摩擦阻力小，不易产生积屑瘤；高速温高，摩擦阻力也小，不易产生

改变切削速度是控制积屑瘤最有效的方法，此外加入切削液、增大前角可以抑制积屑瘤的形成

### 切削温度

切削摩擦产生的热量分为了3块

名称	效果
传入切屑	对加工有利
传入刀具	加速刀具磨损
传入工件	产生形状尺寸误差

其主要影响因素为：

- 切削速度
- 工件强度

此外，导热性好的金属材料，可以降低切削温度

### 刀具的磨损与耐用度

- 磨损分为三个阶段：初期磨损阶段、正常磨损阶段、急剧磨损阶段
- 耐用度是刃磨后的刀具自切削开始到磨损量达到磨钝标准所经历的切削时间

## 常见金属切削方法

## 零件的结构工艺性

- 尽量采用标准化参数
- 要便于装夹
  - 设置工艺凸台
  - 设置凸缘或装夹孔
- 要便与加工
  - 刀具不与工件干涉
  - 留出退到空间
  - 尽量采用标准刀具加工

- 孔轴线与端面垂直
    - 配合表面尽量避免箱体外表面
    - 增加工艺孔
    - 增加加强肋
    - 适当的采用零件的组合
  - 要便于提高生产效率
    - 加工面应该等高
    - 同类结构要素要统一
    - 减少装夹次数
    - 键槽应该在同一侧
    - 要减少加工面积
  - 要便于测量
  - 要便于装配
    - 在配合要求的地方应该有倒角
    - 圆柱销与盲孔配合要有出气孔
    - 要留出扳手空间
    - 同一方向应该只有一对配合表面
  - 要便于拆卸
-