

《材料加工》课程工艺部分

# 金属塑性加工

## Metal Forming Processes

### (4)

清华大学机械工程系

# 4. 冲压工艺

4.1 冲压工艺概述

4.2 冲裁工艺

4.3 弯曲工艺

4.4 拉深工艺

4.5 成形工艺

4.6 板料成形性能及测试

4.7 冲压模具

# 4.1 冲压工艺概述

## ■ 4.1.1 特点

- 利用模具和设备进行加工，生产率高
- 操作简便，便于实现机械化和自动化
- 可以成形其他方法难以成形的复杂形状零件
- 直接制造零件，质量稳定，一般不需要机械加工，节约材料
- 一般不需加热毛坯，节约能源

# 4.1 冲压工艺概述

## ■ 4.1.2 分类

### ■ 分离工序

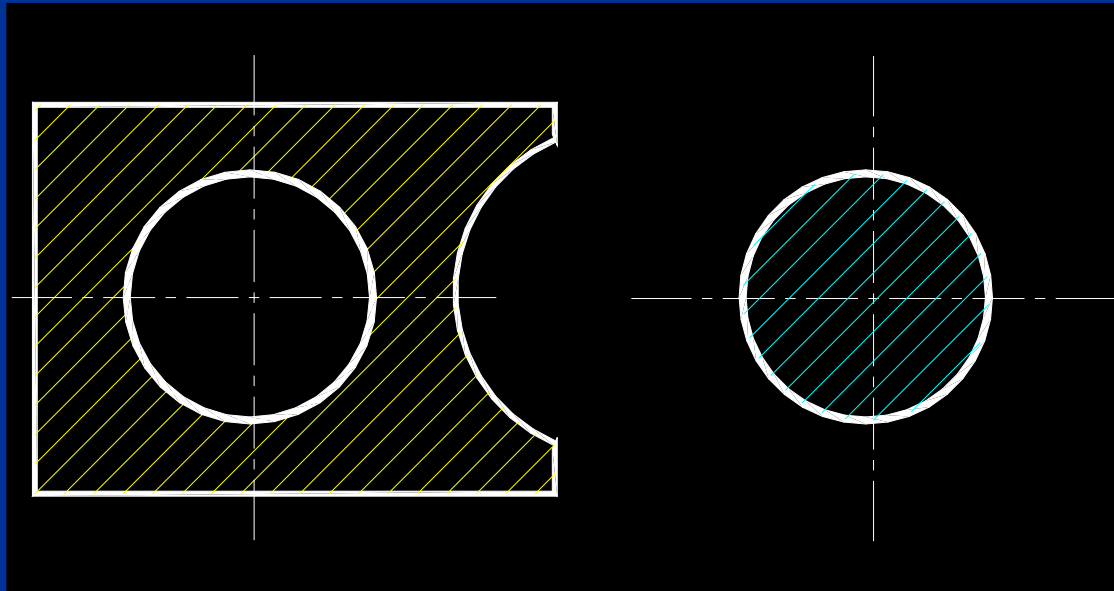
- 冲裁
- 切口
- 切边
- 剖切
- 整修

### ■ 成形工序

- 弯曲
- 卷圆
- 拉深、变薄拉深
- 翻边、胀形
- 缩口
- 旋压

# 分离工序

- 1. 冲裁(blanking)：用冲模沿封闭轮廓切除材料，使其完全分离

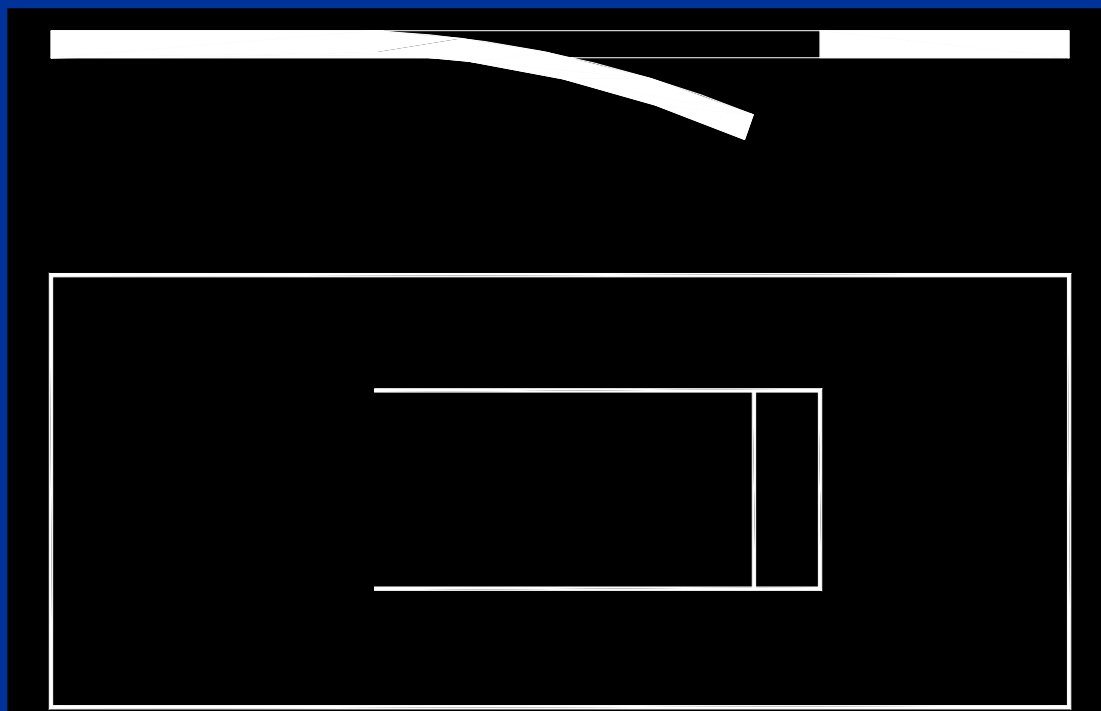


冲孔

落料

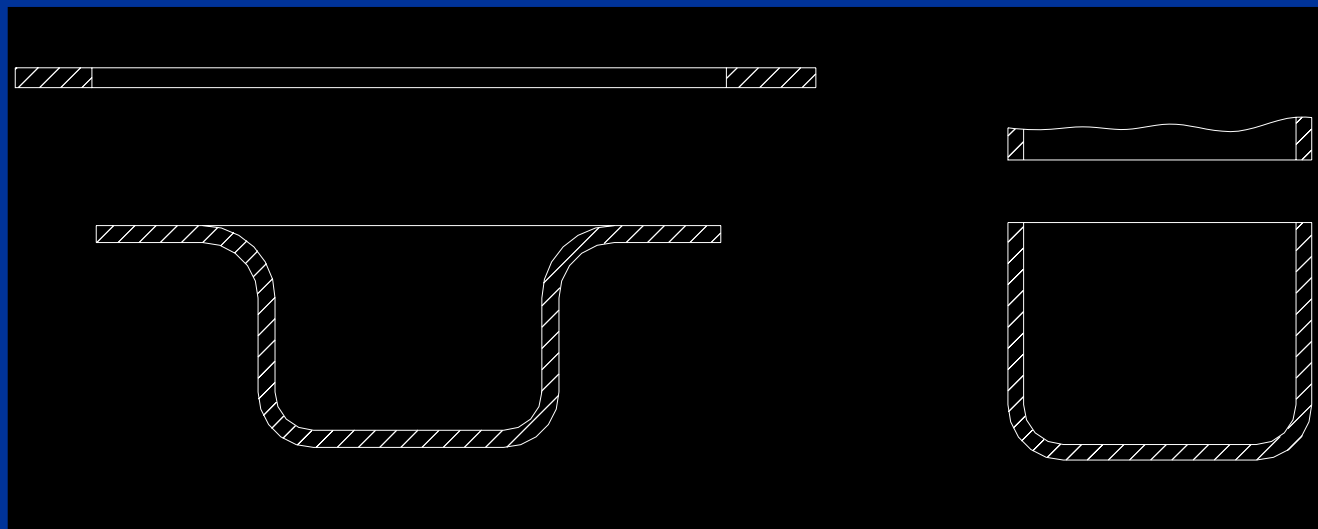
# 分离工序

- 2. 切口(notching)：用冲模冲切板料，但不完全分离



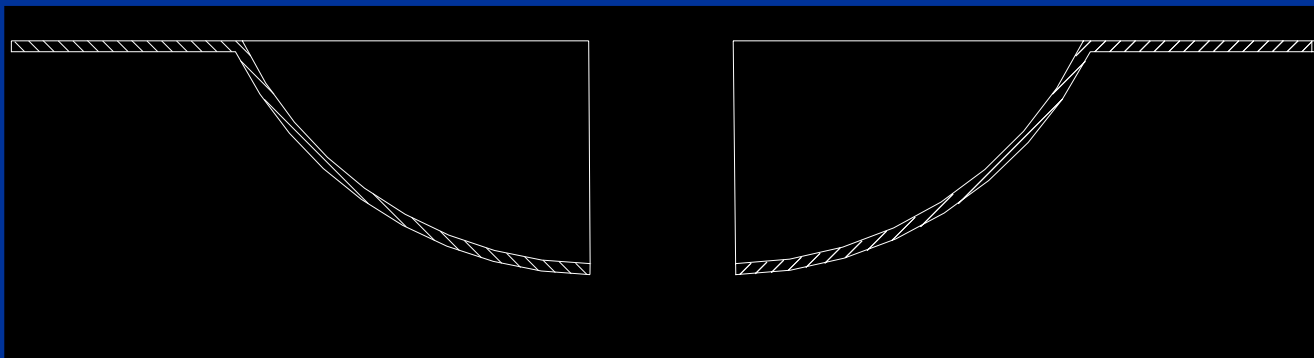
# 分离工序

- 3. 切边(trimming)：将成形零件的边缘修边整齐或切成一定形状



# 分离工序

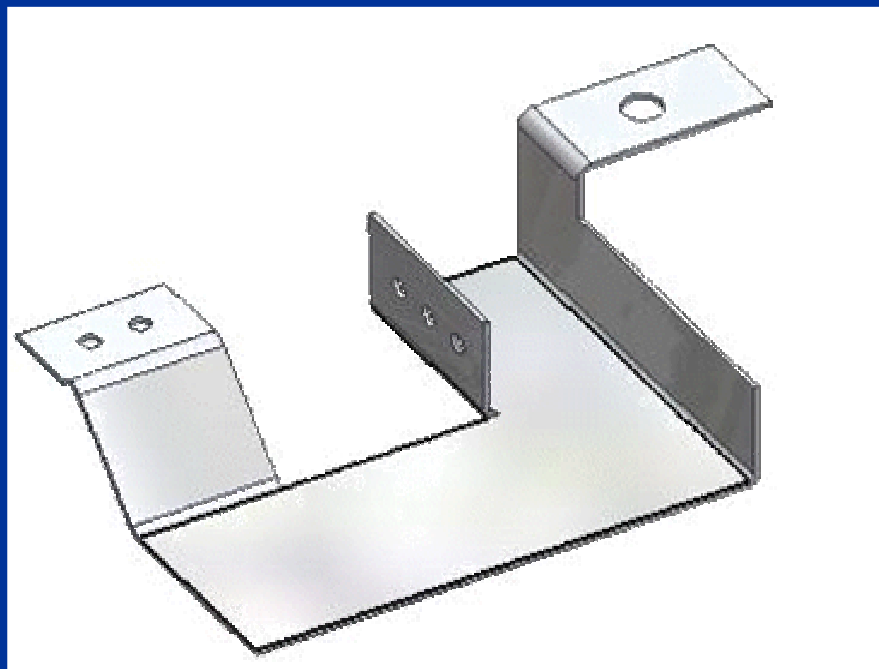
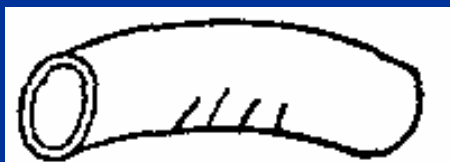
- 4. 剖切(slitting): 将冲压成形的半成品切开成为两个或数个零件





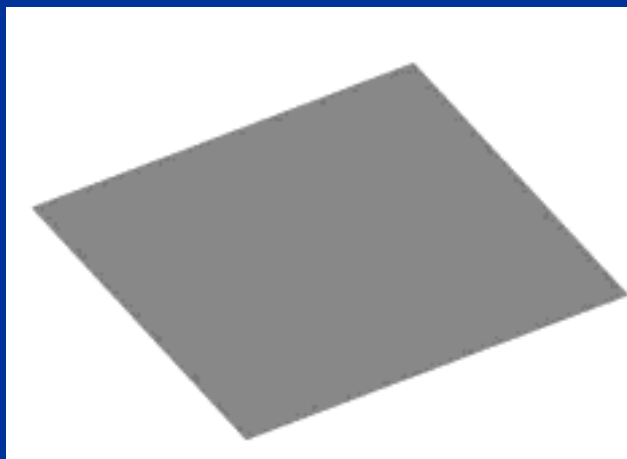
# 成形工序

- 1 弯曲(bending)：将板料或管料沿直线弯成各种形状



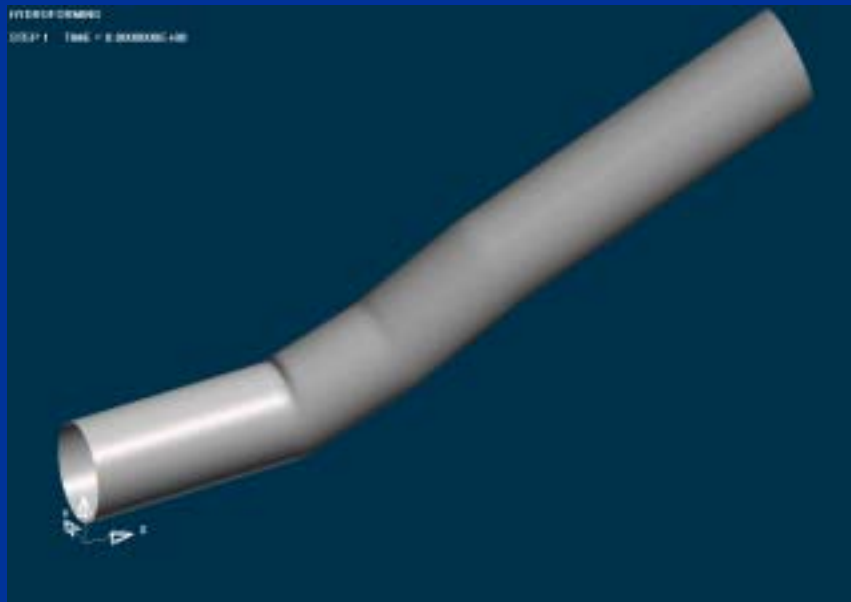
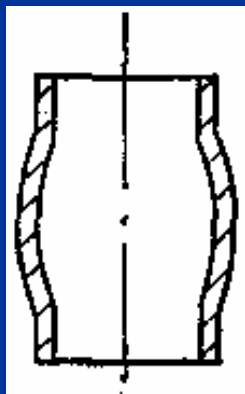
# 成形工序

- 2. 拉深(deep drawing)：把板料毛坯冲制成各种空心的零件



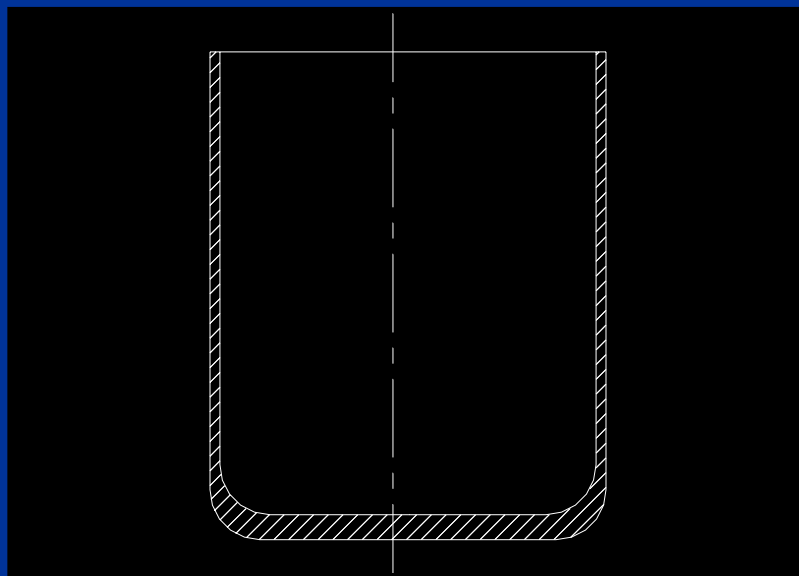
# 成形工序

- 3. 胀形(bulging)：将空心件或管状毛坯向外扩张，胀出所需的突起曲面



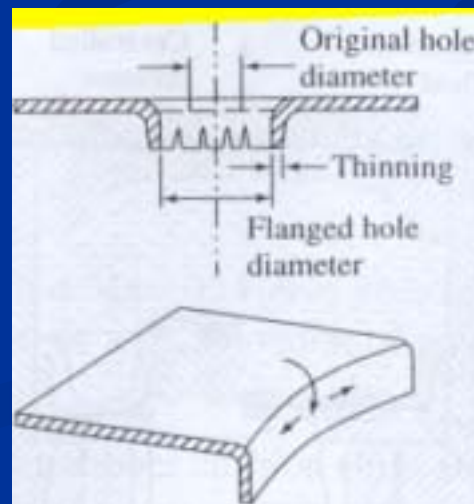
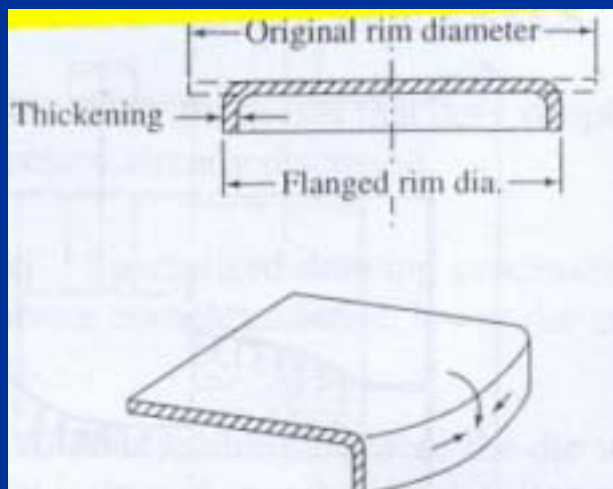
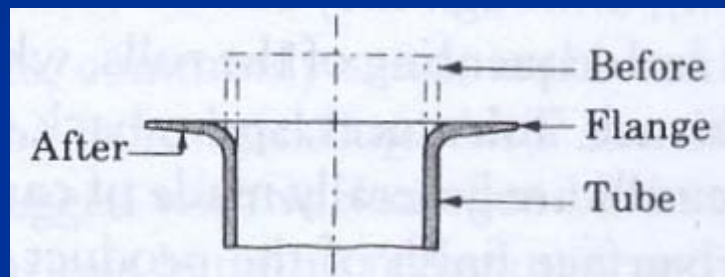
# 成形工序

- 4. 变薄拉深(ironing)：把拉深或反挤所得的空心半成品进一步加工成为侧壁厚度小于底部厚度的零件



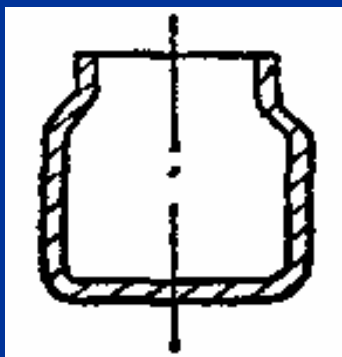
# 成形工序

- 5. 翻边(flanging):在预先冲孔的板料上冲制成竖直边缘



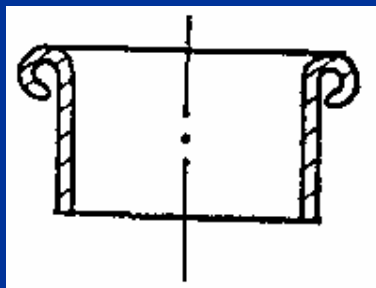
# 成形工序

- 6. 缩口或缩径（necking）：使空心件或管状毛坯的端口或中间直径缩小



# 成形工序

- 7. 旋压（spinning）：在旋转状态下用辊轮使板坯逐步成形



# 4.1 冲压工艺概述

## ■ 4.1.3 冲压变形材料的受力特点



# 塑性加工分析的全应变理论和增量理论

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_3}{\sigma_3 - \sigma_m} = \text{常数}$$

$$\frac{d\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{d\varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_m} = \frac{d\varepsilon_3}{\sigma_3 - \sigma_m} = \text{常数}$$

假如塑性变形过程中的主应力方向不变，而且应力间的比例也保持不变，全应变理论和增量理论的计算结果是一致的，所以在这种情况下完全可以应用全应变理论，此外，在单调的塑性变形过程中也可以应用全应变理论

# 平面应变（应力）问题

■ When  $\sigma_2 - \sigma_m = 0$

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_3}{\sigma_3 - \sigma_m} = \text{常数}$$

$$\varepsilon_2 = 0$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

体积不变表达式

# 三向等压（拉）状态

■ when

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_m$$

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_3}{\sigma_3 - \sigma_m} = \text{常数}$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$$

只有弹性变形，没有塑性变形

# 单向拉伸状态

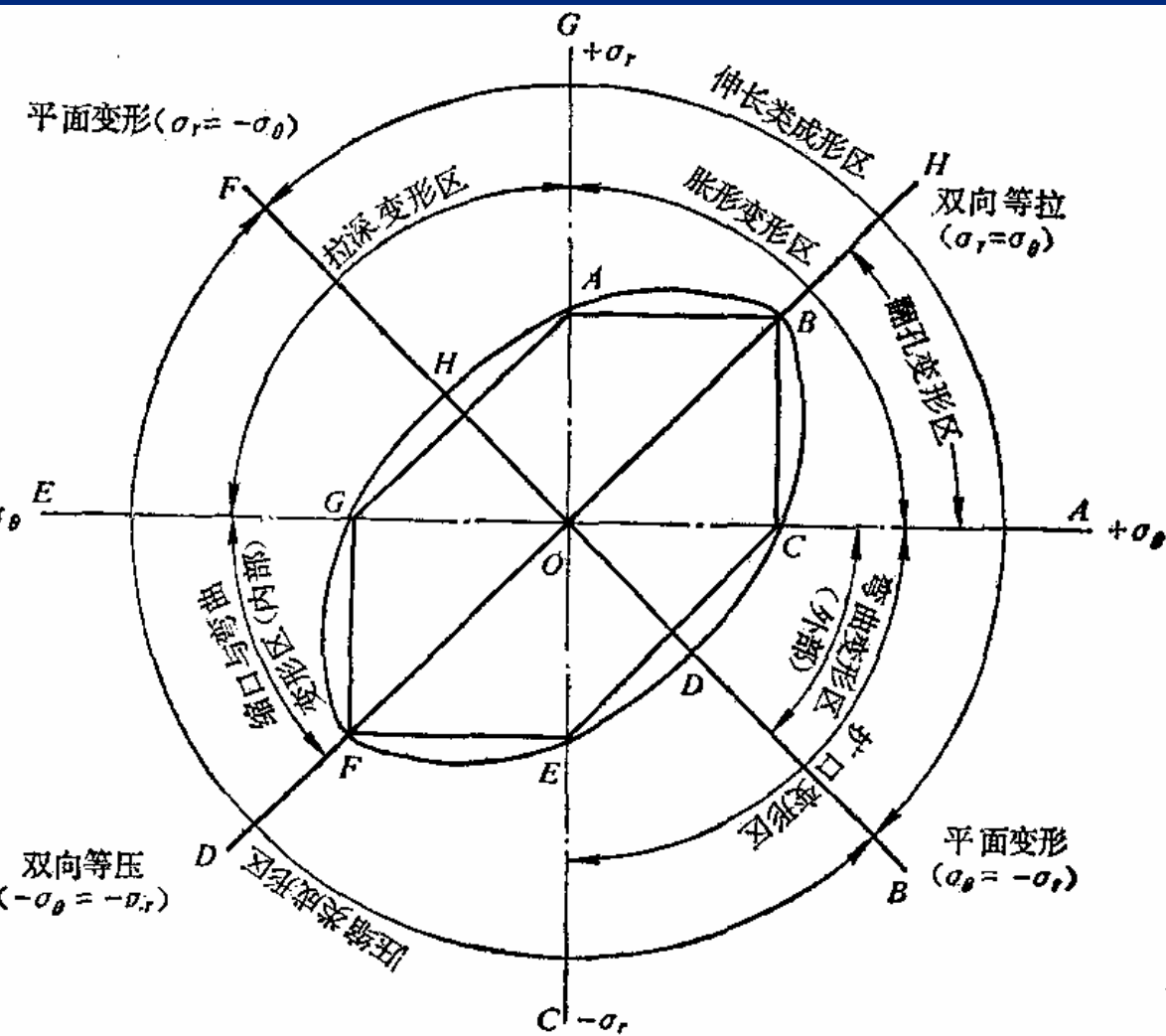
- 当  $\sigma_1 > 0$  而且  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  时

$$\sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_1$$

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_3}{\sigma_3 - \sigma_m} = \text{常数}$$

$$\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2 = -2\varepsilon_3$$

# 冲压工艺应力分区图



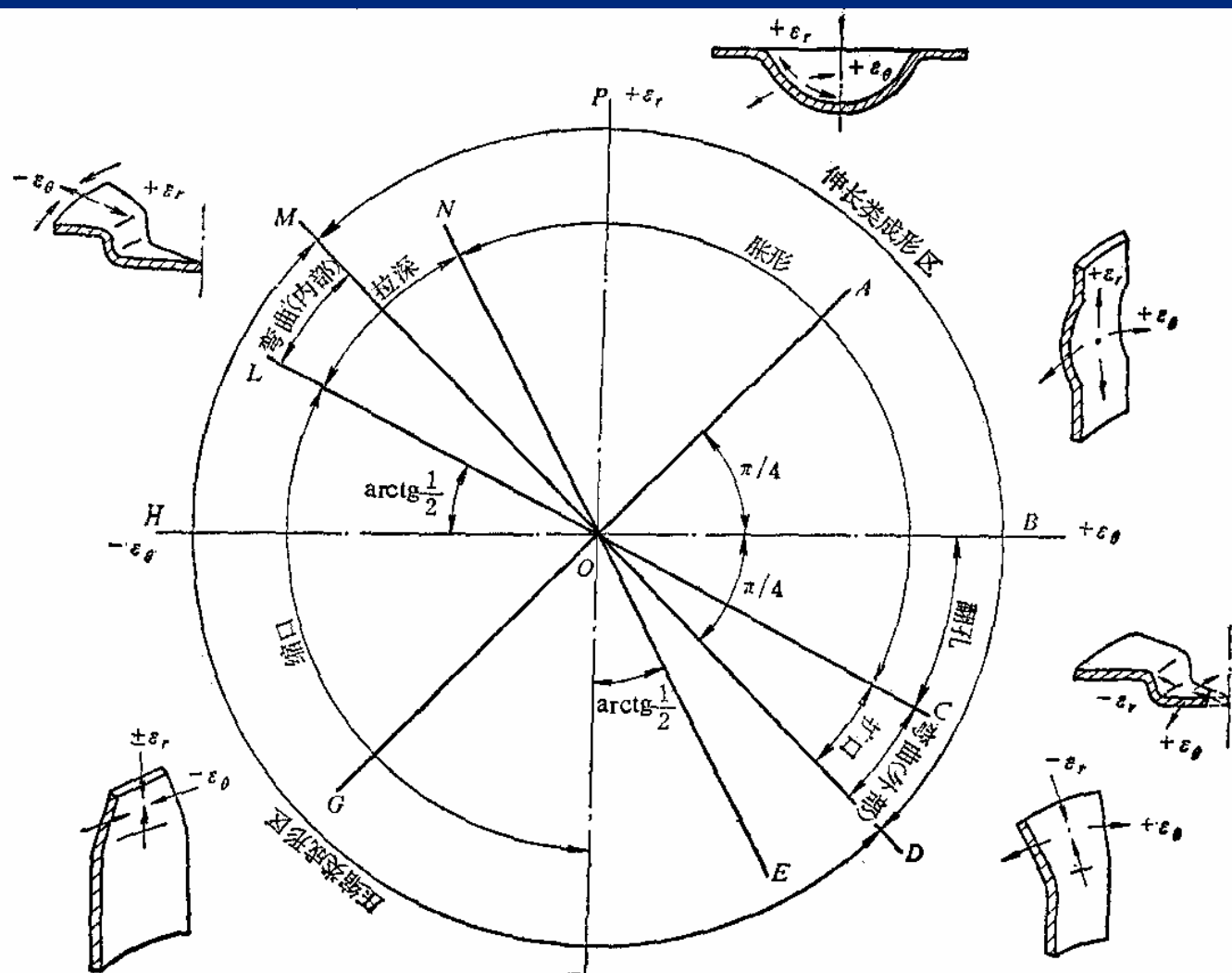
1. 冲压毛坯变形区受到两向拉应力的作用

2. 冲压毛坯变形区受两向压应力的作用

3. 冲压毛坯变形区受异号应力作用，而且拉应力的绝对值大于压应力的绝对值

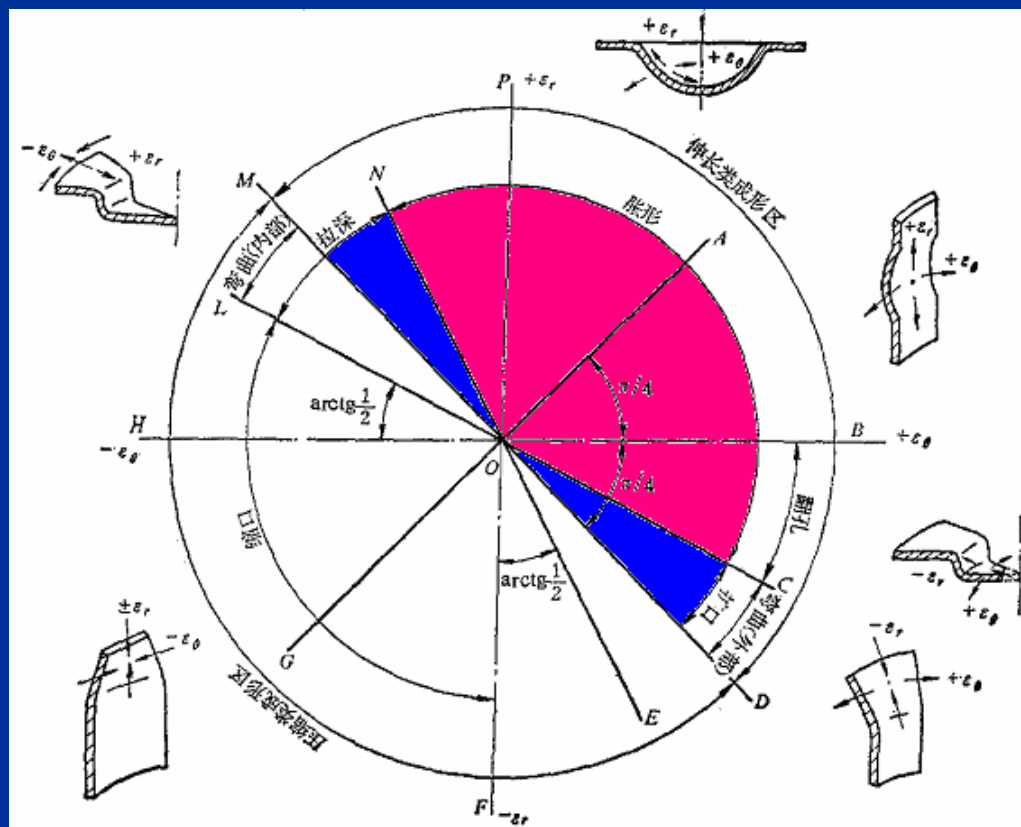
4. 冲压毛坯变形区受异号应力的作用，而且压应力的绝对值大于拉应力的绝对值。

# 冲压工艺应变分区图



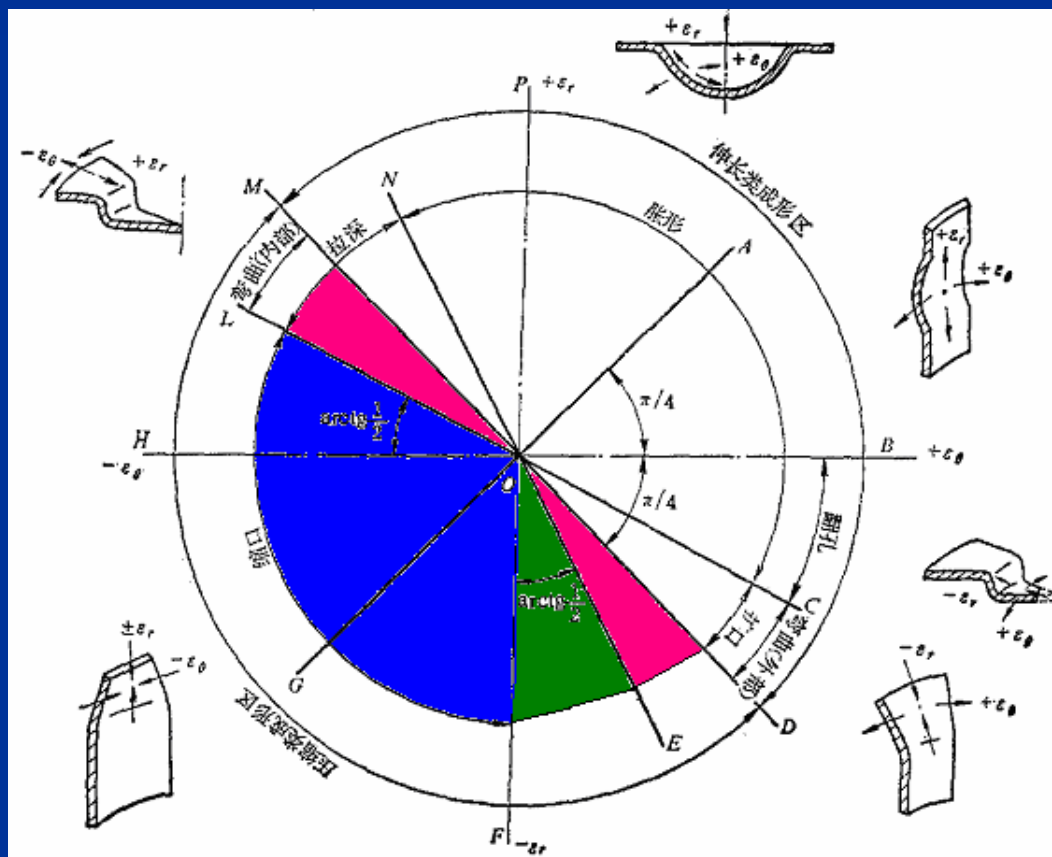
# 伸长类变形

伸长类变形包括冲压变形图中的MON、NOA、AOB、BOC、及COD等五个区（拉应力的绝对值最大）



# 压缩类变形

压缩类变形包括冲压变形图中的MOL、HOG、GOE及EOD等五个区（**压应力的绝对值最大**）

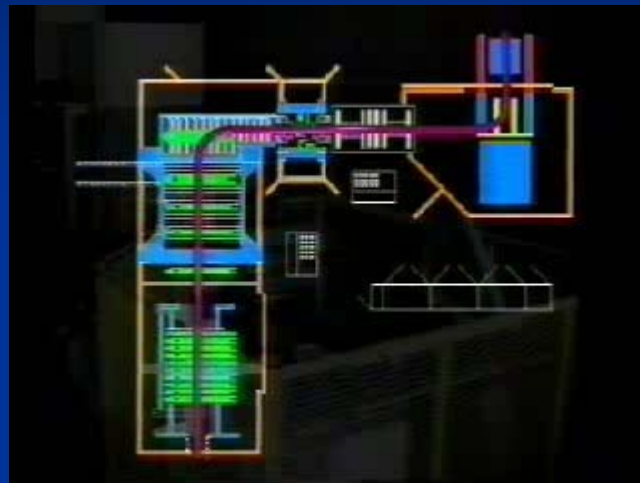




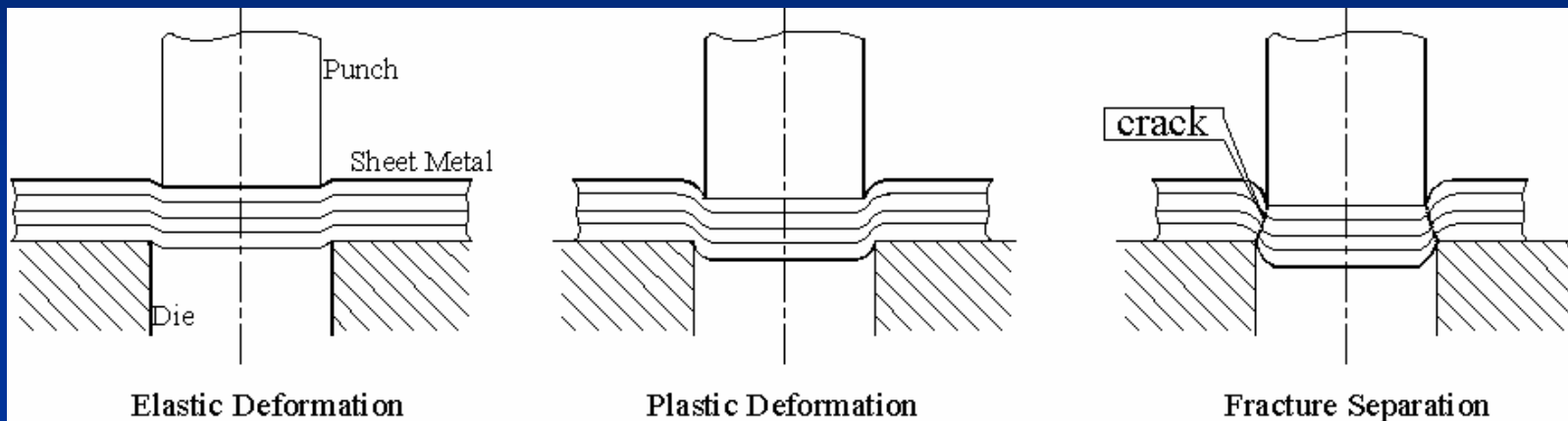
# 伸长类和压缩类成形的缺陷

项 目	伸长类成形	压缩类成形
变形区质量问题的表现形式	变形区因受拉过度而破坏	变形区受压引起的失稳起皱
成形极限的含义	主要受板料塑性的限制，与板厚的关系不大	一般不受板料塑性的影响，板厚的影响较大
变形区厚度变化	变薄	变厚
提高成形极限的方法	一般不用多次成形方法，只能用提高板料塑性和使变均化等方法	常用多次成形的方法

## 3.2 冲裁工艺



# 冲裁过程

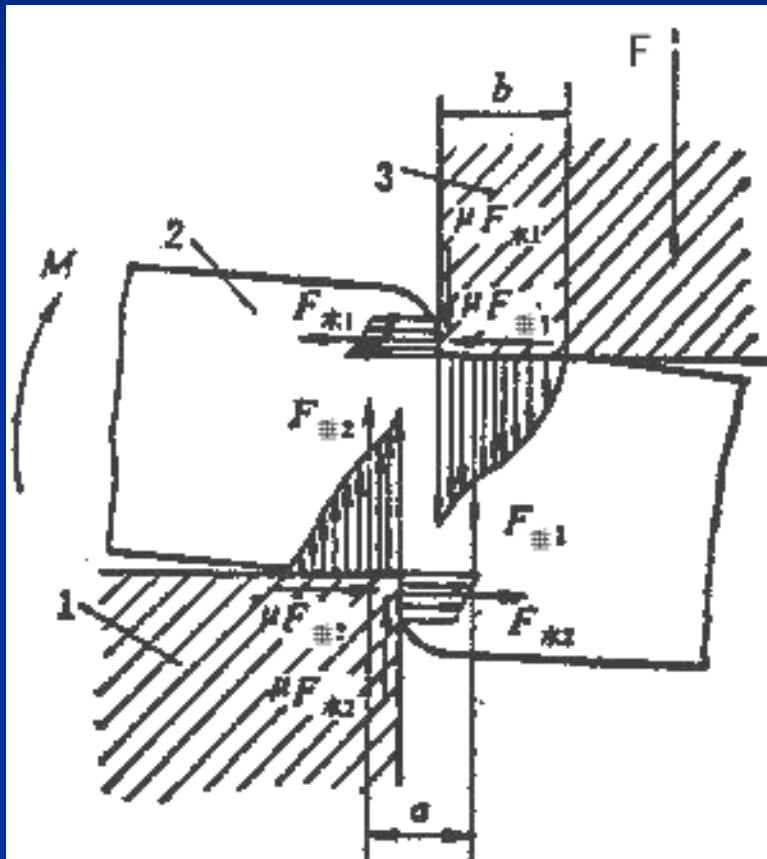


当凸模下降接触板料，板料即受到凸、凹模压力而产生弹性变形，由于力矩 $M$ 的存在，使板料产生弯曲，即从模具表面上挠起

随着凸模下压，模具刃口压入材料，内应力状态满足塑性条件时，产生塑性变形，变形集中在刃口附近区域。由此可知，塑性变形从刃口开始，随着切刃的深入，变形区向板料的深度方向发展、扩大，直到在板料的整个厚度方向上产生塑性变形

当切刃附近材料各层中达到极限应变与应力值时，便产生微裂，裂纹产生后，沿最大剪应变速度方向发展，直至上、下裂纹会合，板料就完全分离

# 剪切区力态分析



$F_{\perp 1}$ 、 $F_{\perp 2}$  ——凸、凹模对板料的垂直作用力;

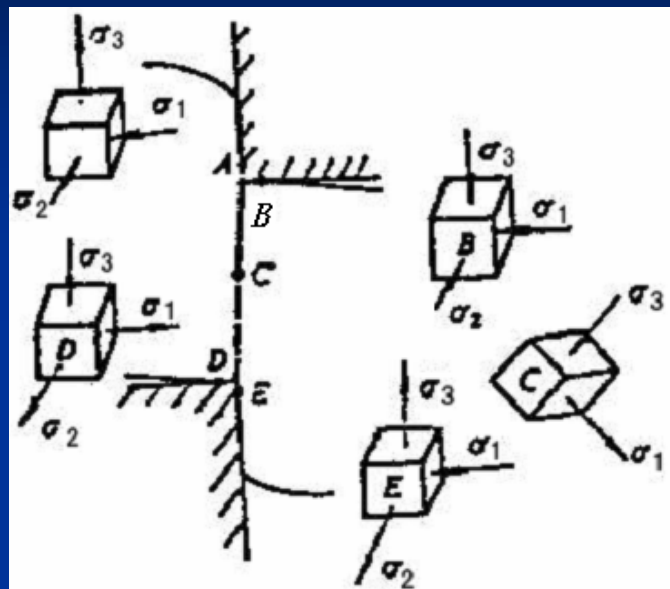
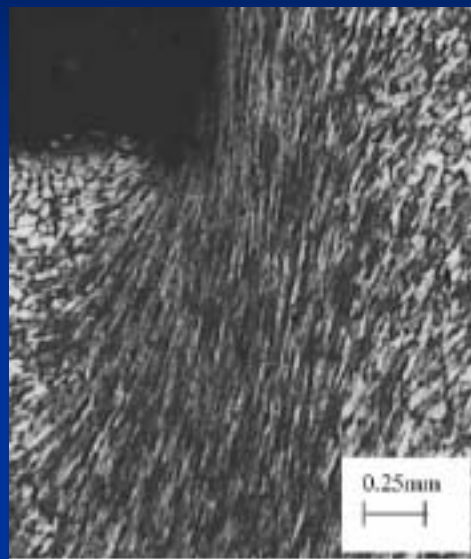
$F_{\parallel 1}$ 、 $F_{\parallel 2}$  ——凸、凹模对板料的侧压力;

$\mu F_{\perp 1}$ 、 $\mu F_{\perp 2}$ 、——模端面与板料间的摩擦力, 其方向与间隙大小有关, 但一般系指向模具刃口;

$\mu F_{\parallel 1}$ 、 $\mu F_{\parallel 2}$ 、——凸、凹模侧面与板料间的摩擦力

冲裁时作用于材料上的力

# 剪切区力态分析



A 点——凸模下压引起轴向拉应力  $\sigma_3$ , 板料弯曲与凸模侧压力引起径向压应力  $\sigma_1$ , 而切向应力  $\sigma_2$  为板料弯曲引起的压应力与侧压力引起的拉应力的合成应力。

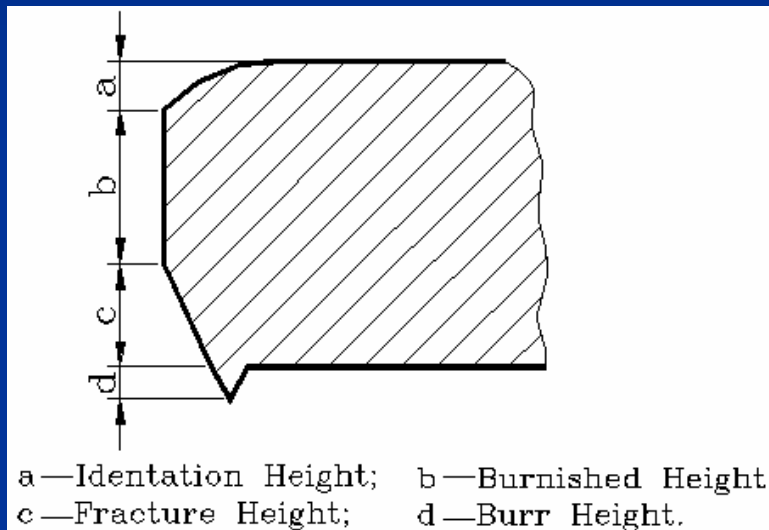
B 点——凸模下压及板料弯曲引起的三向压缩应力。

C 点——沿纤维方向为拉应  $\sigma_1$ , 垂直于纤维方向为压应力  $\sigma_3$ 。

D 点——凹模挤压板料产生轴向压应力  $\sigma_3$ , 板料弯曲引起径向拉应力  $\sigma_1$  和切向拉应力  $\sigma_2$ 。

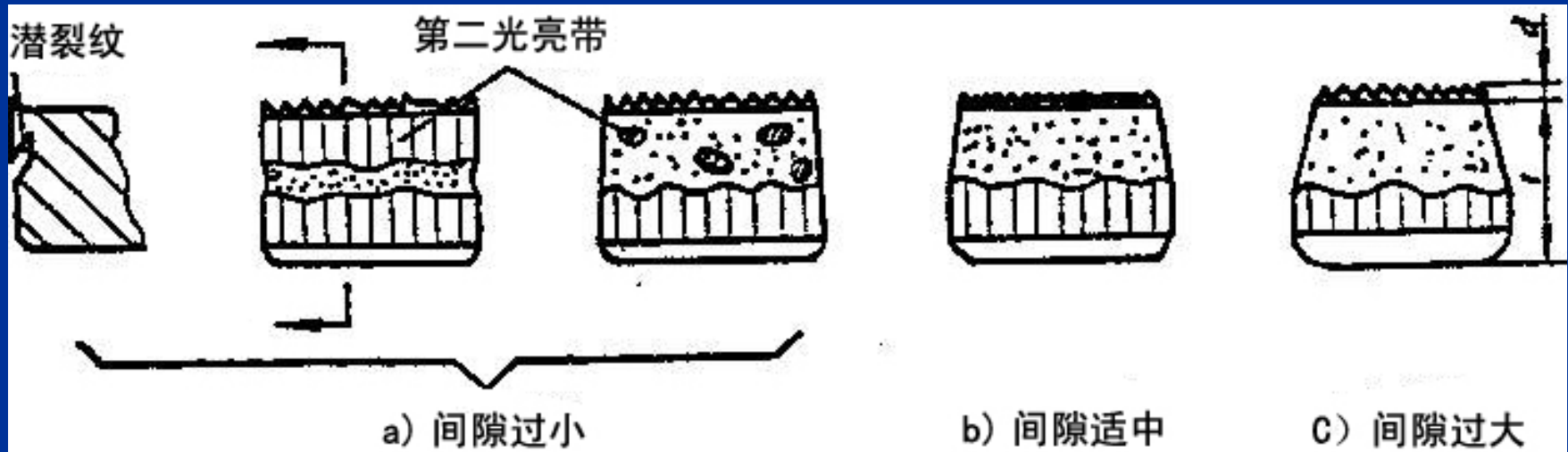
E 点——凸模下压力引起轴向拉应力  $\sigma_3$ , 由板料弯曲引起的拉应力与凹模侧压力引起的压应力合成产生应力  $\sigma_1$  与  $\sigma_2$ , 该合成应力可能是拉应力, 也可能是压应力, 与间隙大小有关。

# 冲裁断面

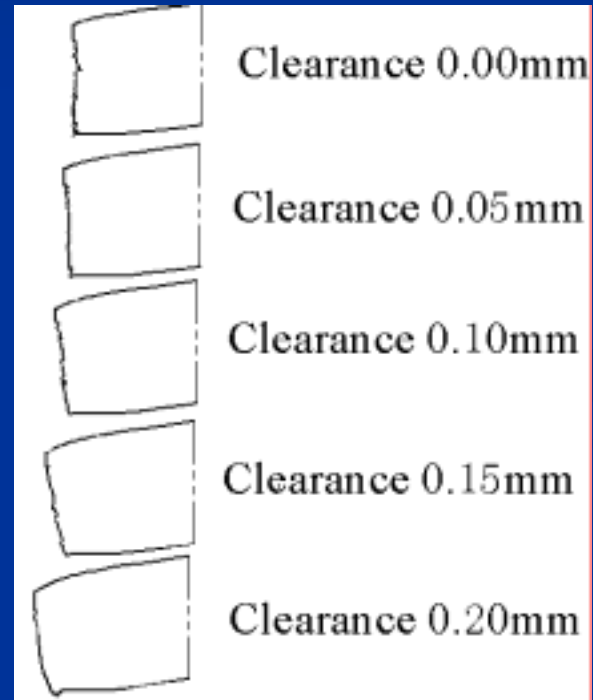
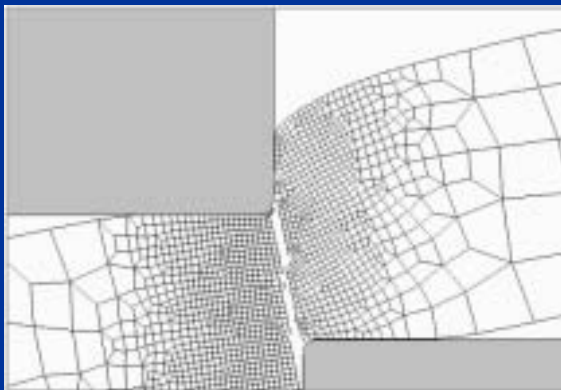
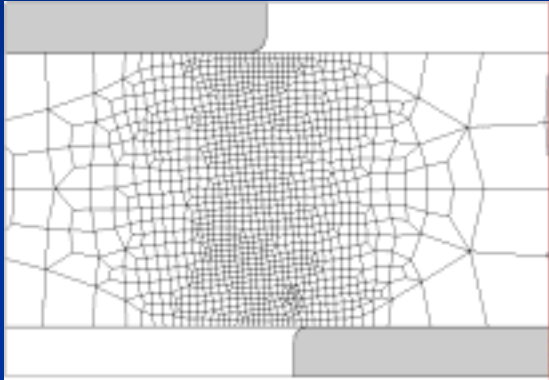


a— 塌角   b—光亮带   c—剪裂带   d—毛刺

# 冲裁间隙对断面质量的影响



# 冲裁间隙对断面质量的影响

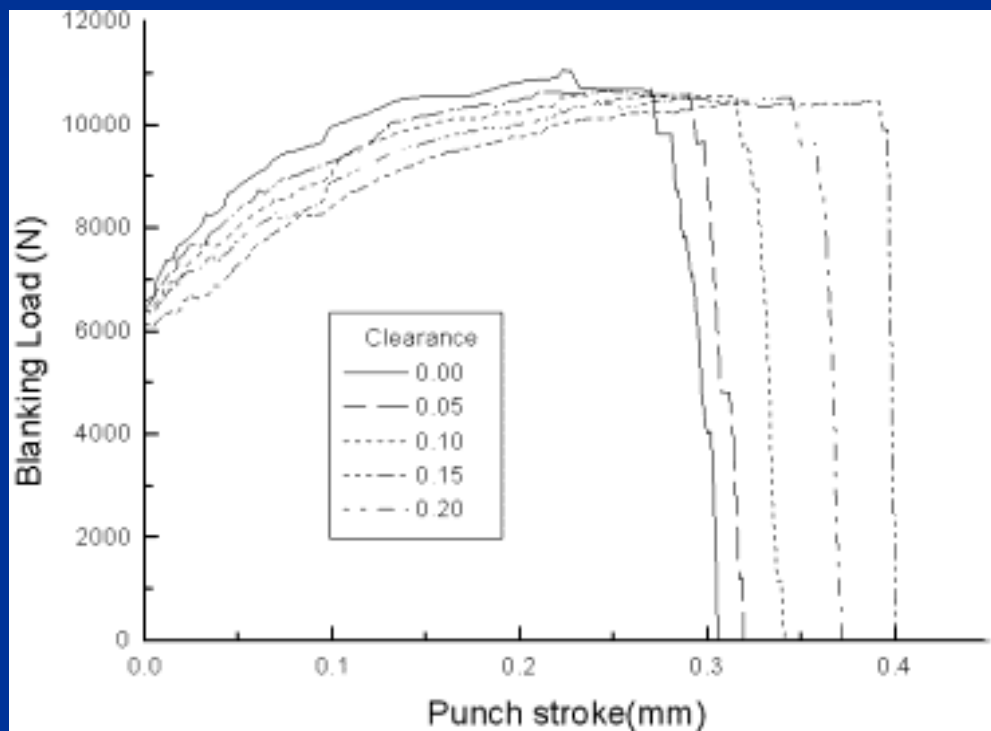




# 冲裁间隙对载荷的影响

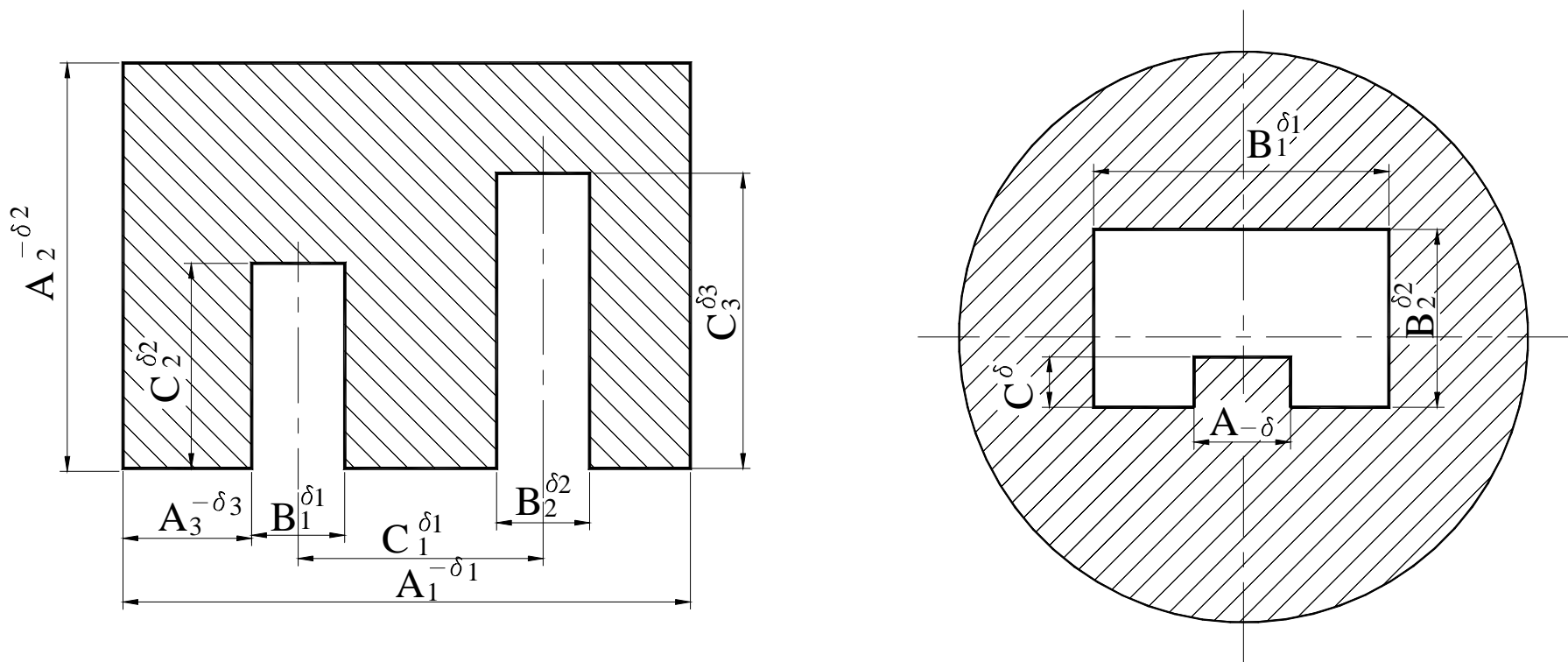
间隙对裁力的大小及变化有一定影响。

随着间隙 $Z$ 的减小，弯矩减小，材料所受拉应力减小，而静水压应力增大，故材料不易产生撕裂，使冲裁力有所增加，且产生最大冲裁力时，凸模切入材料的深度增加，因而小间隙冲裁所消耗的功比合理间隙时大得多



# 考虑模具的磨损

冲孔以凸模为基准，落料以凹模为基准

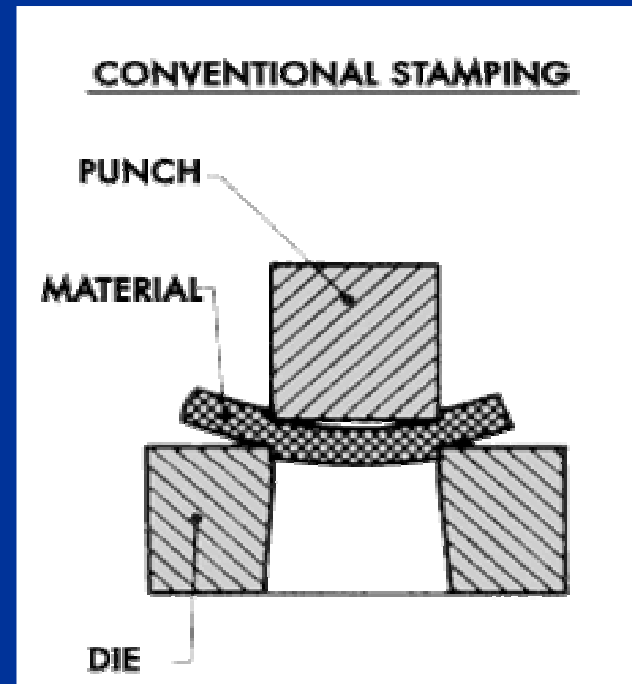
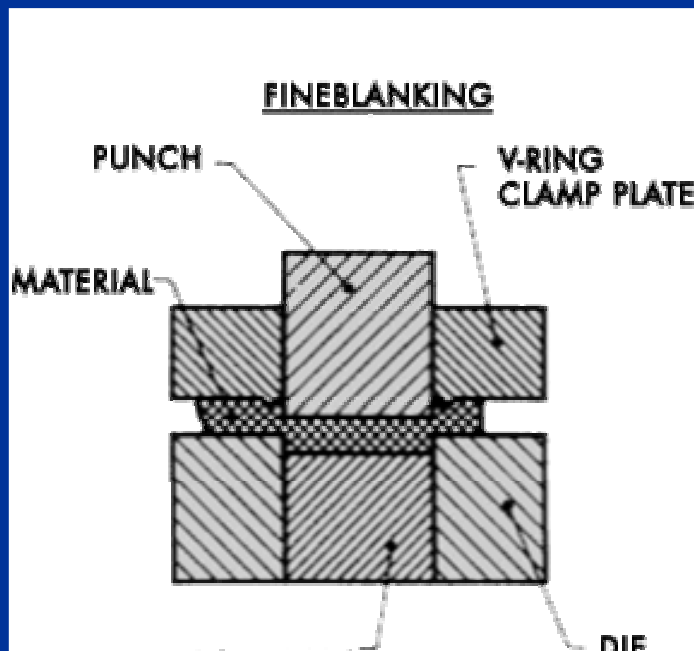


凹模磨损情况可分成三类：第一类是凹模磨损后增大尺寸；第二类是凹模磨损后变小尺寸；第三类是当凹模磨损后没有增减的尺寸

# 精密冲裁 ( Fine Blanking )

## 四种方法及措施

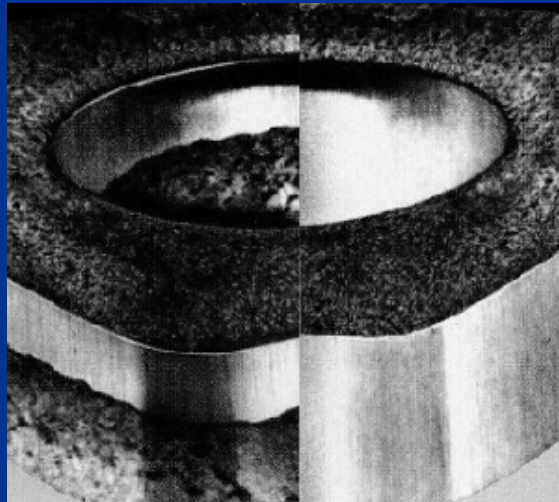
- 1) 齿圈压板
- 2) 凹模圆角减小
- 3) 凸凹模间隙减小，负间隙
- 4) 顶板（上下模冲裁）



# 普通冲裁与精密冲裁的断面质量比较

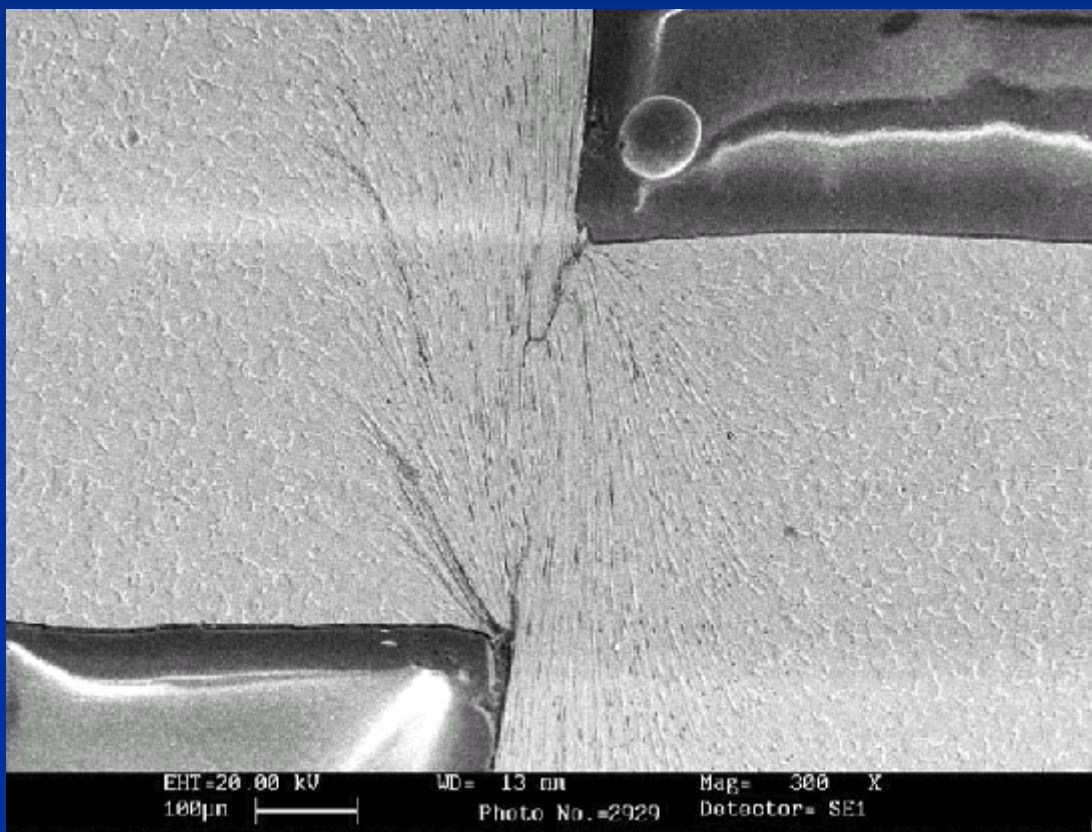


30% smooth edge part



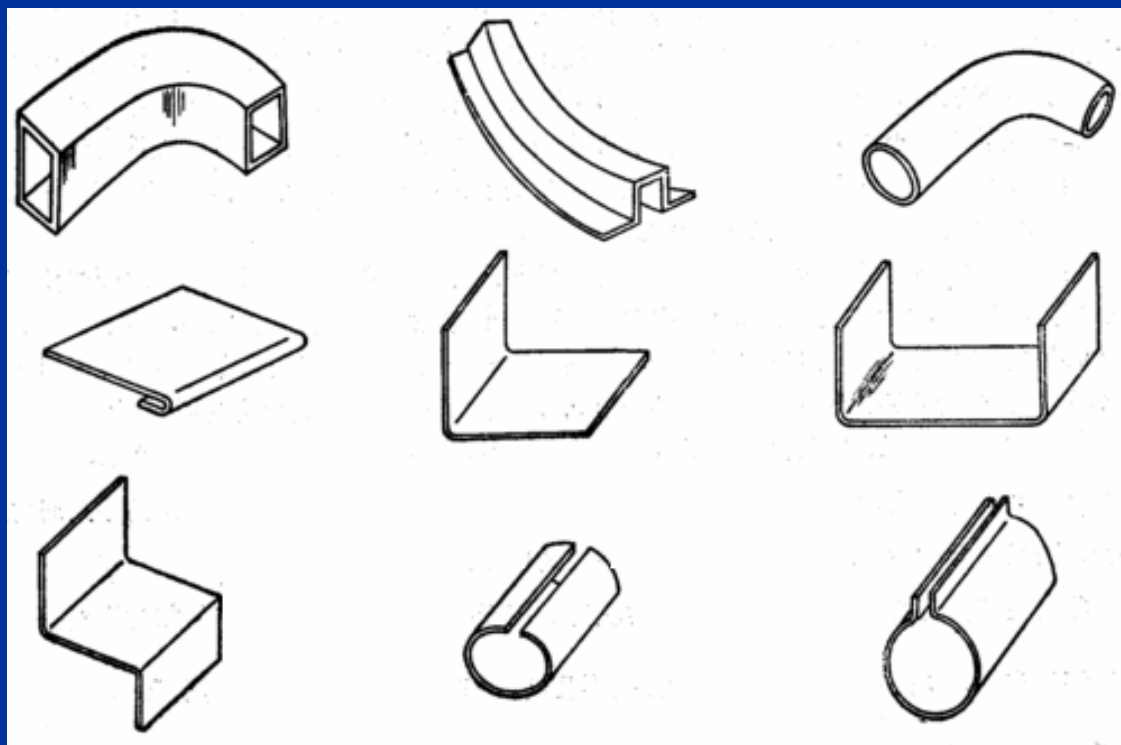
75-100% smooth edge part

# 精冲件断裂过程



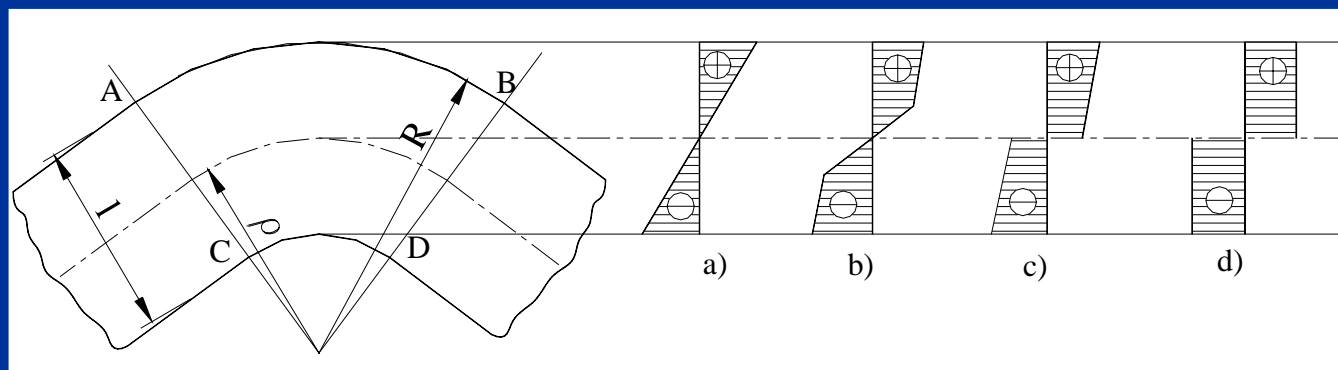
## 3.3 弯曲工艺

把**平板毛坯**、**型材**和**管材**等弯成一定的曲率、一定的角度形成一定形状零件的冲压工序称为弯曲。



# 3.3.1 板材弯曲的力学分析

- 分为三个阶段: 弹性弯曲, 弹塑性弯曲以及纯塑性弯曲
- 应力中性层: 曲率半径  $\rho_{\sigma}$
- 应变中性层: 曲率半径  $\rho_{\varepsilon}$



a——弹性弯曲 b——弹——塑性弯曲 c——纯塑性弯曲 d——无硬化纯塑性弯曲

# 基本规律

根据塑性变形体积不变条件 $\varepsilon_\theta + \varepsilon_\rho + \varepsilon_b = 0$ 可知，板料径向应变 $\varepsilon_\rho$ 和宽度方向应变 $\varepsilon_b$ 的符号一定与最大的切向应变 $\varepsilon_\theta$ 符号相反，所以：

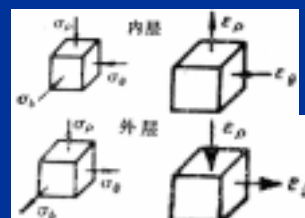
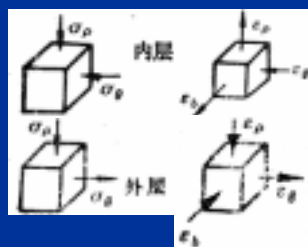
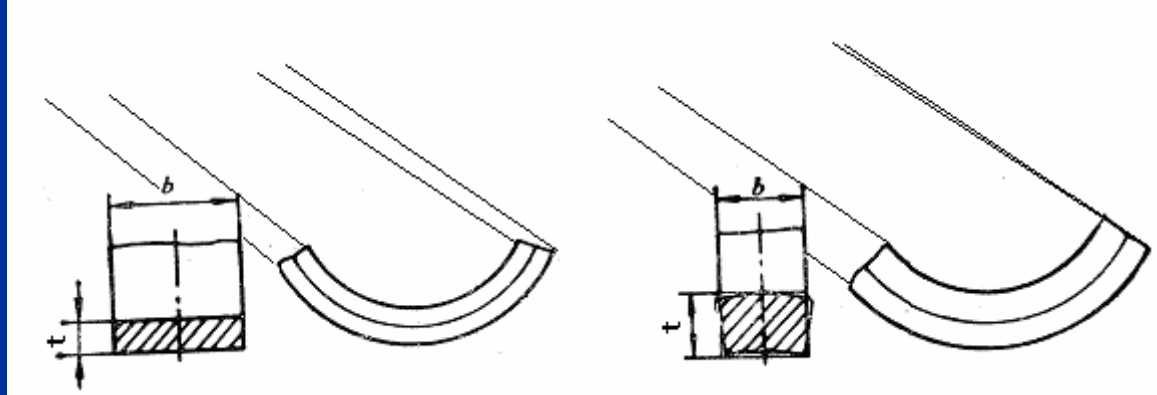
在宽度方向上，外层应变 $\varepsilon_b$ 为负；内层应变 $\varepsilon_b$ 为正；

在径向：外层应变 $\varepsilon_\rho$ 为负，内层应变 $\varepsilon_\rho$ 为正；

应变中性层：板料弯曲时，外层纤维受拉，内层纤维受压，在拉伸与压缩之间存在着一个既不伸长，也不压缩的纤维层。

应力中性层：毛坯截面上的应力，在外层的拉应力过渡到内层压应力时，发生突然变化的或应力不连续的纤维层。





		窄板 ( $b/t < 3$ ) plate	宽板 ( $b/t > 3$ ) sheet
宽向	应力	材料可以自由变形, 所以内、外层应力接近于 0;	纤维相互制约, 材料不能自由变形, 外层纤维的收缩受阻, 产生拉应力, 内层纤维的伸长受阻, 产生压应力。
	应变	外层应变为负; 内层应变为正;	材料流动比较困难, 弯曲后板宽基本不变, 应变接近于 0
切向	应力	外层纤维受拉, 切向应力为正; 内层纤维受压, 切向应力为负;	
	应变	外层应变为正; 内层应变为负;	
径向	应力	由于弯曲时板料纤维之间相互压缩, 内外层应力均为负值;	
	应变	外层应变为负; 内层应变为正;	
总结		应变状态是立体的; 应力状态是平面的	应力状态是立体的; 应变状态是平面的

# 宽板变形近似分析（单向拉伸）

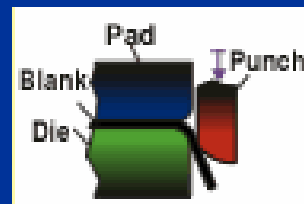
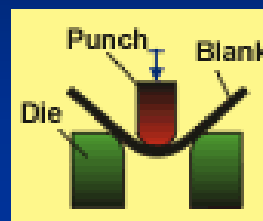
- 见板书

# 宽板变形近似分析（平面应变）

- 见板书

## 3.3.2 板材弯曲方法

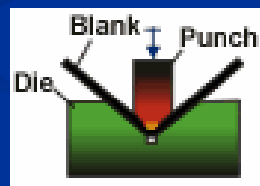
- 单角弯曲 板料放置在固定不动的凹模上，凸模自上而下运动，使板料产生V型弯曲。弯曲角度由凹模的开口和凸模的行程决定
- 直线翻边 板料放置在固定不动的工作台上，并用垫块压紧，冲头自上而下运动，使板料产生直线的翻边。弯曲角度由冲头的行程决定



实现基本的弯曲成形步骤

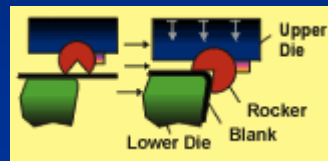
## 3.3.2 板材弯曲方法

- 双凹模弯曲 这种弯曲方法主要是为了减小回弹而设计的，相当于在直线翻边冲头上有加了一个台阶，行程两次直线翻边，增加其变形程度。
- 校正弯曲（coin, bottoming bending）这种弯曲方法主要是为了校正其他弯曲方法形成的回弹而设计的，在冲头的尖角处加一台阶，在V凹模的尖角处相应的开一槽，使板料在冲头和凹模尖角形成局部塑性成形，增加其变形程度。



## 3.3.2 板材弯曲方法

- 旋转变曲 使用一旋转凹模，在工作中，凹模即作为夹持工具，有作为成形工具，即可以成形大于90度的弯曲角，来补偿引回弹引起的弯曲角减小，还可以降低弯曲力。

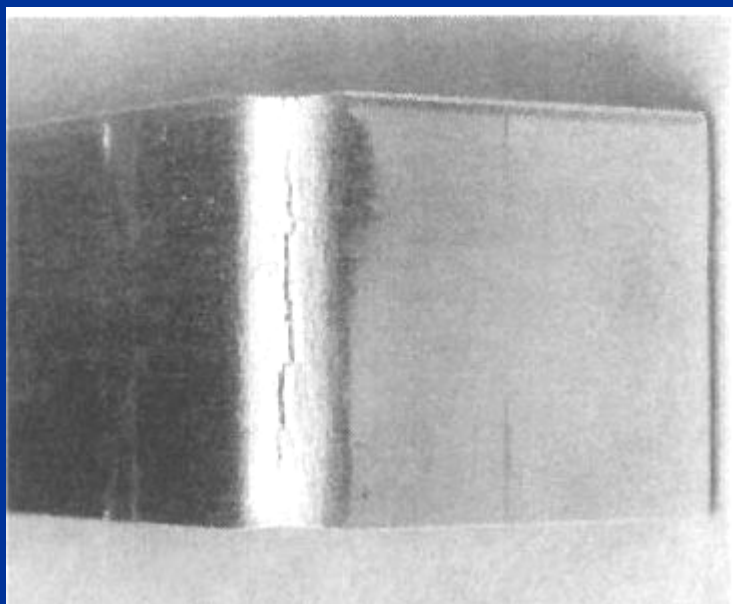


## 3.3.2 弯曲变形中出现的缺陷和解决办法

### 弯曲断裂

- 1) 选择合理的相对弯曲半径 $R/t$
- 2) 选择合适的方向（与板料的纤维方向有关）

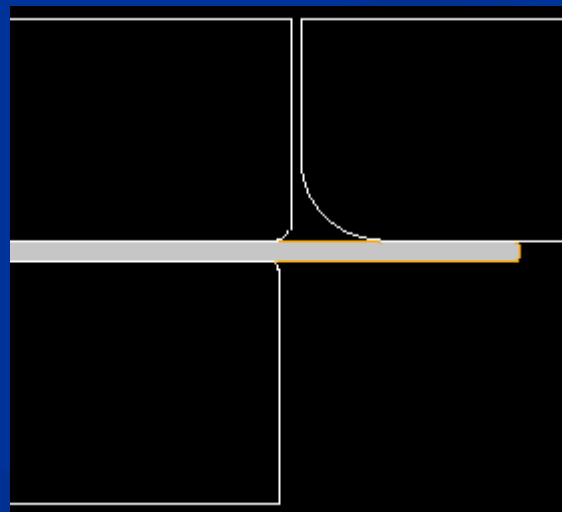
$$\varepsilon_{\max} = \ln(1 + e_{\max}) = \ln\left(1 + \frac{1}{2R/t + 1}\right)$$



# 3.3.3 弯曲变形中出现的缺陷和解决办法

## II 弯曲回弹

- 1) 改进弯曲件局部结构，选用合适的材料
- 2) 用补偿法修正模具
- 3) 校正法





卸载前后的应变

$$\varepsilon_{be} = \frac{(\rho_i + t/2)\alpha_i - \rho_i\alpha_i}{\rho_i\alpha_i} = \frac{t}{2R_i}$$

$$\varepsilon_{re} = \frac{(\rho_f + t/2)\alpha_f - \rho_f\alpha_f}{\rho_f\alpha_f} = \frac{t}{2R_f}$$

卸载过程中产生的弹性应变值

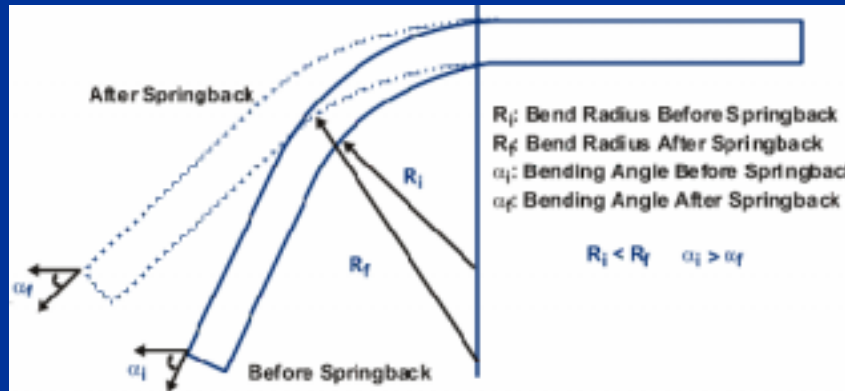
$$\varepsilon_{sp} = \frac{Mt}{2EI}$$

根据回弹定义

$$\varepsilon_{sp} = \varepsilon_{re} - \varepsilon_{be}$$

所以

$$\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_f} = \frac{M}{EI}$$



弯曲前后的应变中性层长度不变

$$\rho_i\alpha_i = \rho_f\alpha_f$$

回弹角

$$\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_f = \rho_i\alpha_i\left(\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_f}\right) = \frac{M\rho_i}{EI}\alpha_i = \frac{M\rho_f}{EI}\alpha_f$$

回弹系数

$$K_s = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{(2R_i/T) + 1}{(2R_f/T) + 1}$$

$\rho_i, \rho_f, \alpha_i, \alpha_f, R_i, R_f$  分别表示回弹前后的中性层曲率半径、弯曲角及弯曲内径值

T 板料厚度, E 弹性模量, M, 弯矩, I, 弯曲界面模量

## 3.3.4 管材弯曲工艺

应用范围：

金属结构

工程机械

动力机械

锅炉、石油化工：气体、液体的输送

轻工、管道工程

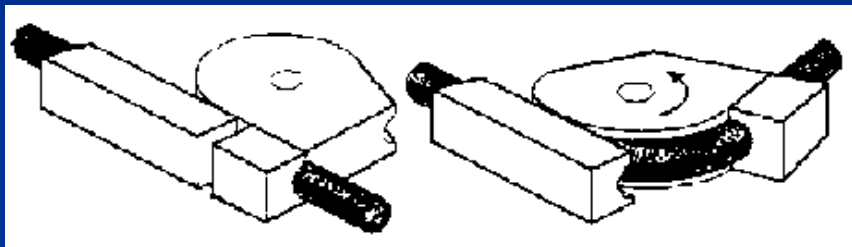
航空航天

常用材料：钢、铜、铝、其他合金

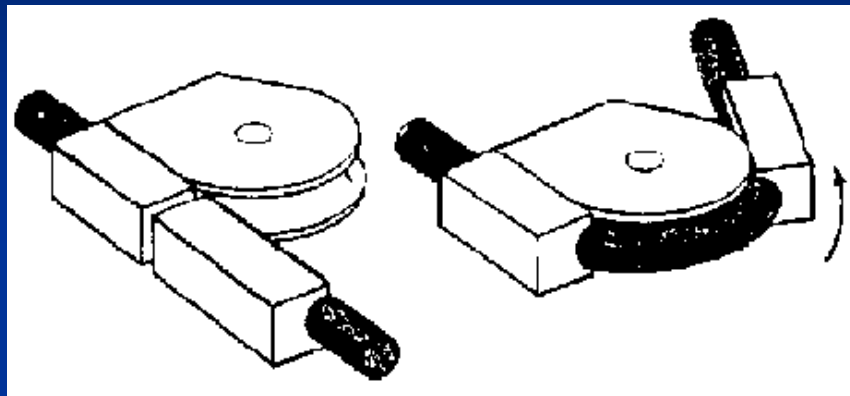
## ■ 弯曲分类：

- 按弯曲方式
  - 绕弯
  - 推弯
  - 压弯
  - 滚弯
  - 拉弯
- 按弯曲温度
  - 冷弯
  - 热弯
- 按有无填充物
  - 有芯弯管
  - 无心弯管

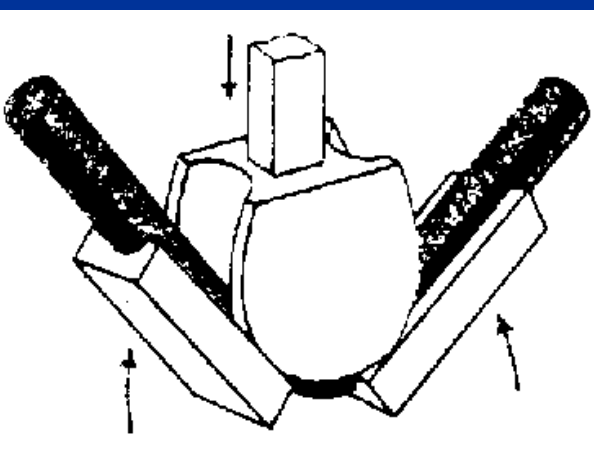
# 弯管的各种工艺



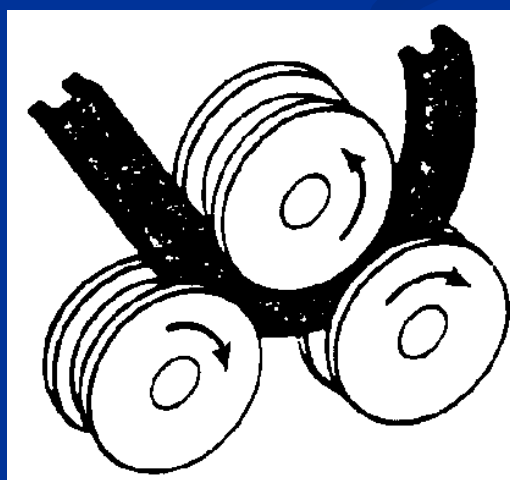
绕弯



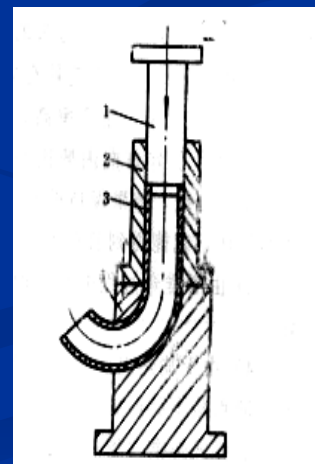
拉弯



压弯



滚弯



推弯