

冲压工艺方法

1. 吴诗惇，李淼泉主编.冲压成形理论及技术.西北工业大学出版社第2版.2012.

2014年3月

1.概述

■ 定义

用冲模将板料进行分离或变形，获得冲压件的加工方法

板料冲压通常在室温下进行，故又称**冷冲压**。

当板料厚度超过8~10 mm 时，需采用**热冲压**。

■ 加工特点

- 可加工出复杂零件，废料较少
- 产品具有足够的精度和较低的表面粗糙度，互换性好
- 能获得质量轻、强度和刚度较高的零件
- 操作简单、便于机械自动化、生产率高，产品成本低



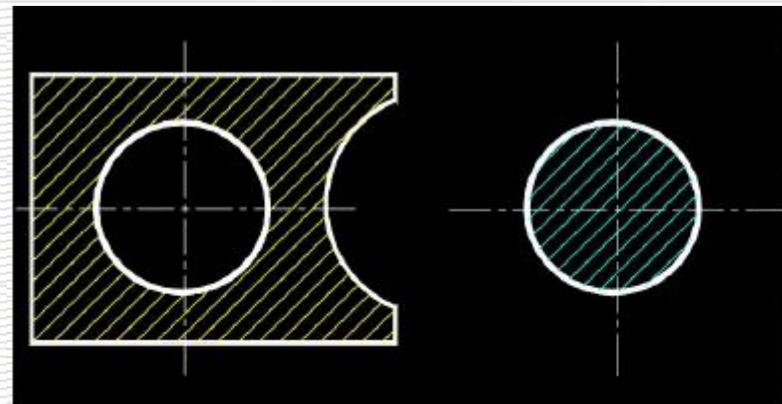
1.概述

■ 板料冲压的基本工序

● 分离工序：

使冲压件与板料沿一定的轮廓线相互分离的工序。

包括:冲裁(落料与冲孔)。



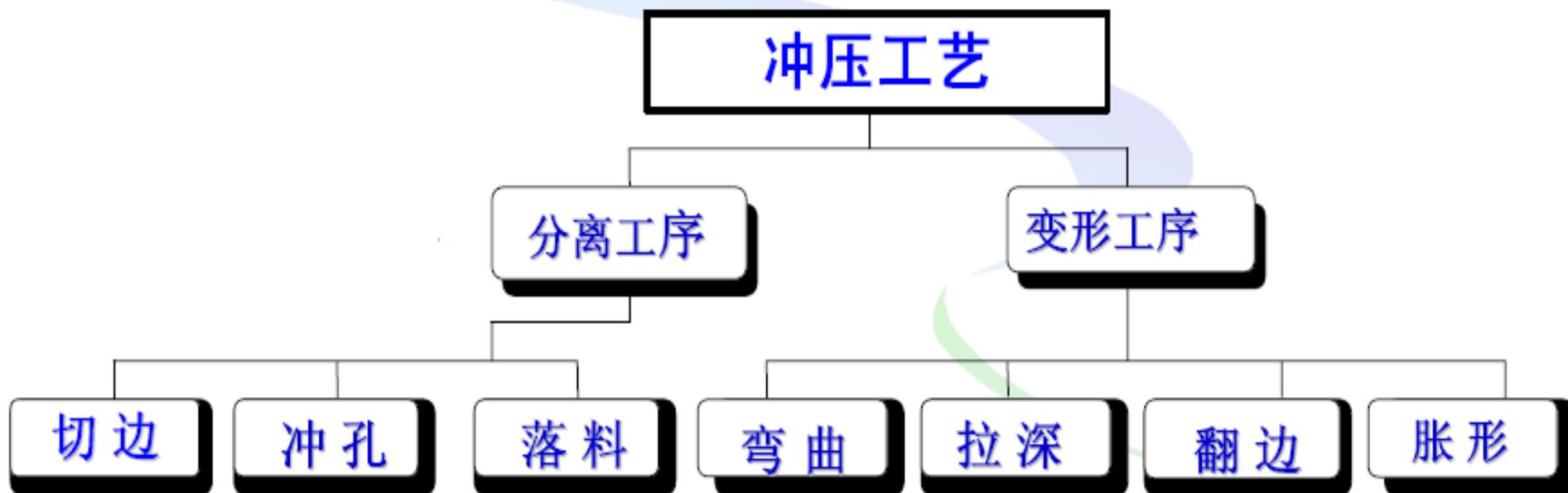
● 成形工序：

除分离工序外，使坯料塑性变形，获得所需要形状、尺寸的制件的冲压工序。

包括:弯曲、拉深和胀形。



1.概述

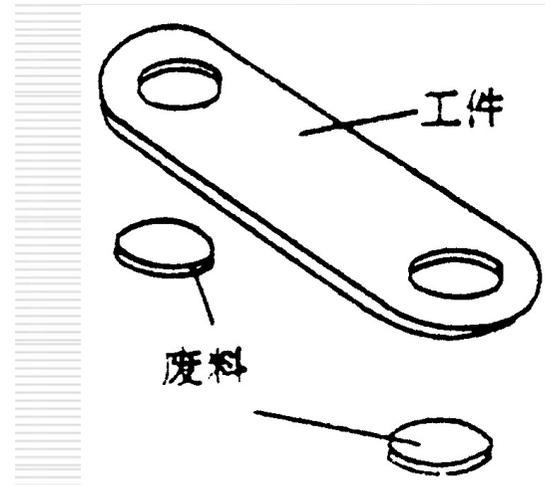
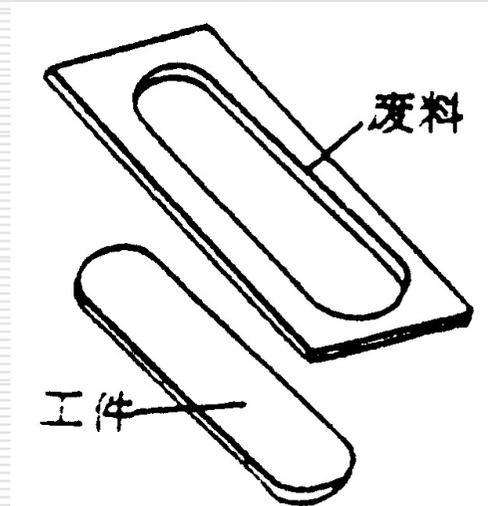
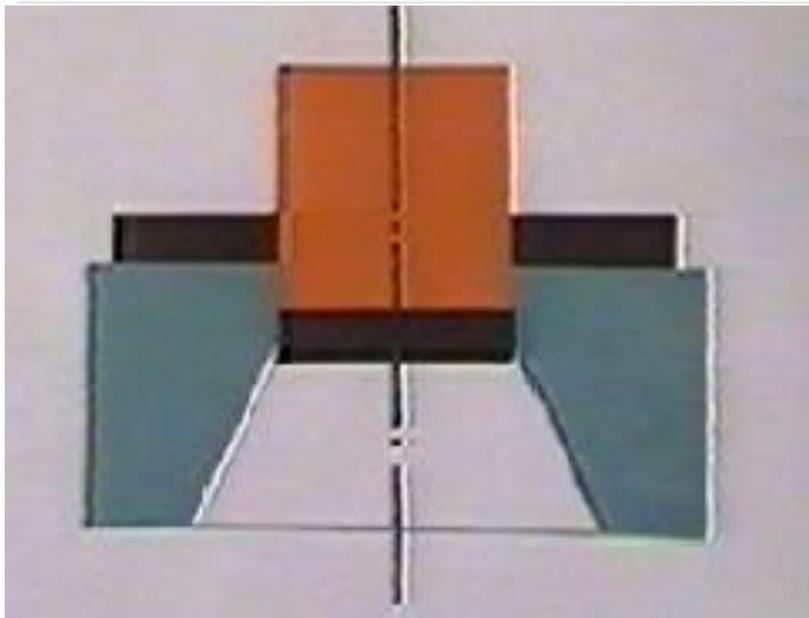


2.冲裁

使板料沿封闭轮廓线分离的工序，包括落料与冲孔。

- 落料：得到冲压件上的孔，冲下部分是工件
- 冲孔：得到片状冲压件的外形，冲下部分是废料

■切断



2.冲裁

■ 冲裁变形过程的三个阶段

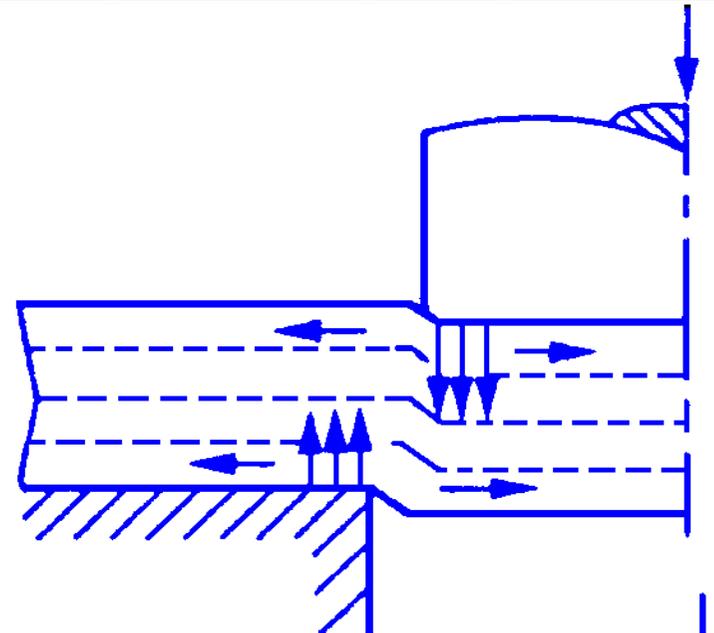
(1) 弹性变形阶段

冲头接触板料后，继续向下运动的初始阶段，使板料产生弹性压缩、拉伸与弯曲等变形。

此时，凸模下的材料略有弯曲，凹模上的材料则向上翘，间隙

↑ → 弯曲、上翘 ↑

第
一
阶
段



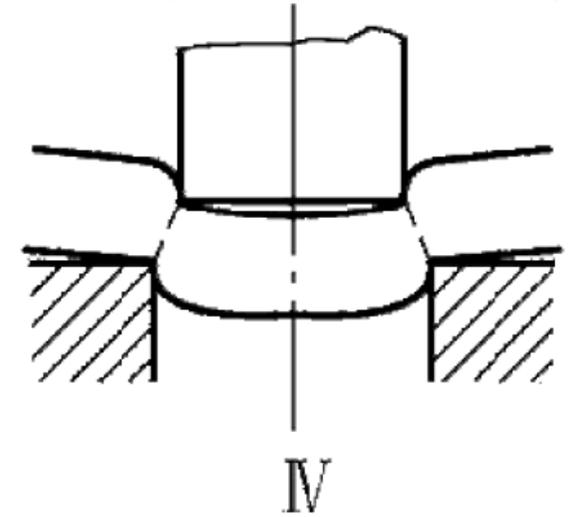
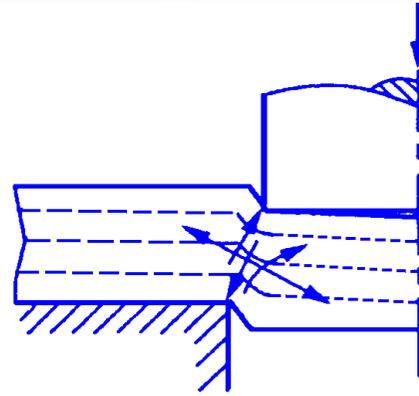
冲裁时板料的变形过程

2.冲裁

(2) 塑性变形阶段

冲头继续压入，应力值→屈服极限→塑性变形，变形达一定程度时，位于凸、凹模刃口处的材料硬化加剧——出现微裂纹；塑性变形阶段结束。

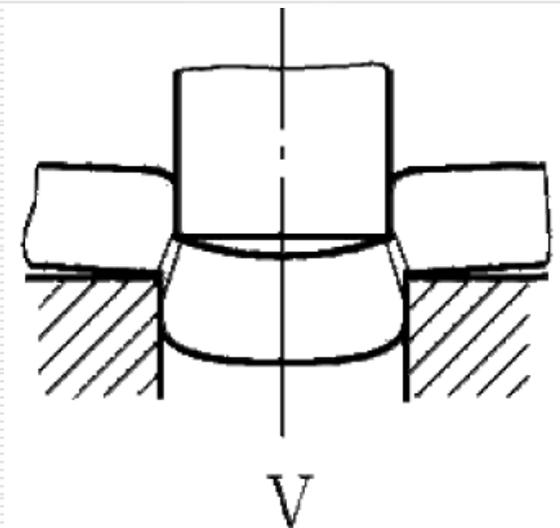
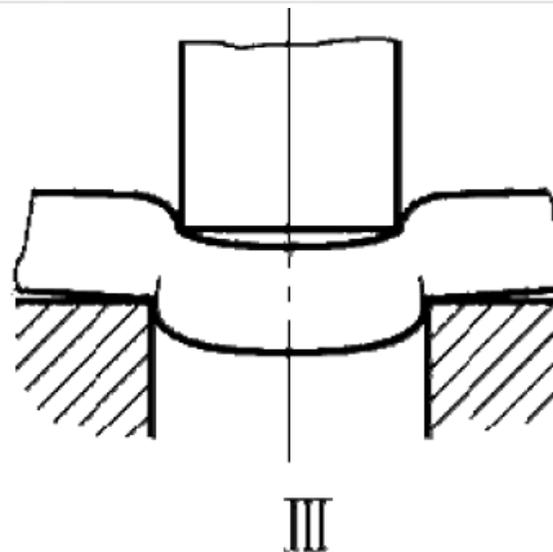
第二阶段



(3) 断裂分离阶段

冲头继续压入，已形成的上、下微裂纹扩大——向内扩展，上、下裂纹相遇重合时，材料被剪断分离。

裂纹的起点是在刃口侧面距刃尖很近的板料处，裂纹先从凹模一侧开始，然后才在凸模刃口侧面产生。



2.冲裁

■ 受力分析

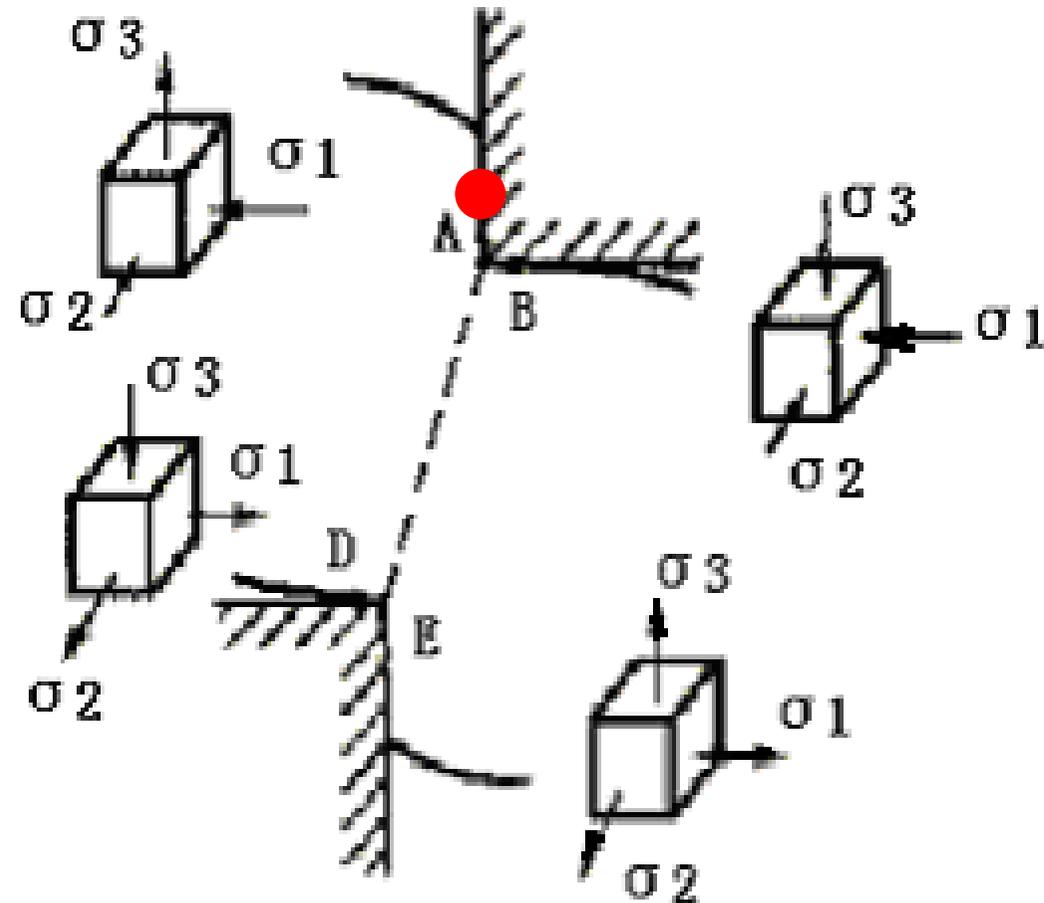
A点:

σ_1 —板料内层弯曲与凸模侧压力引起
径向压应力;

σ_2 —板料内层切向弯曲引起的压应力
与侧压力在切向引起的拉应力所
合成的压应力;

σ_3 —凸模下压引起的轴向拉应力。

——A点处于三向应力状态，平均
应力为拉应力。



2.冲裁

■ 受力分析

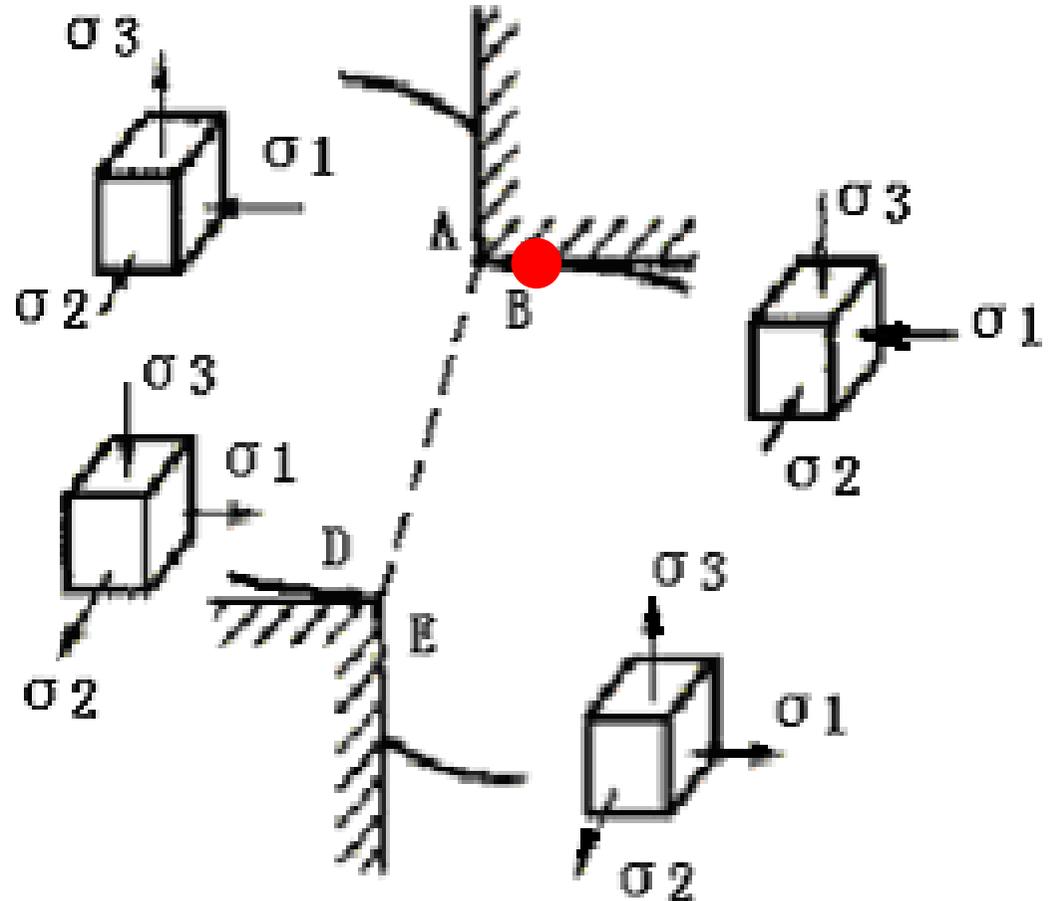
B点:

σ_1 —板料内层弯曲引起的径向压应力;

σ_2 —板料内层切向弯曲引起的压应力;

σ_3 —凸模下压引起的轴向压应力

——B点处于三向压应力状态，平均应力为压应力。



2.冲裁

■ 受力分析

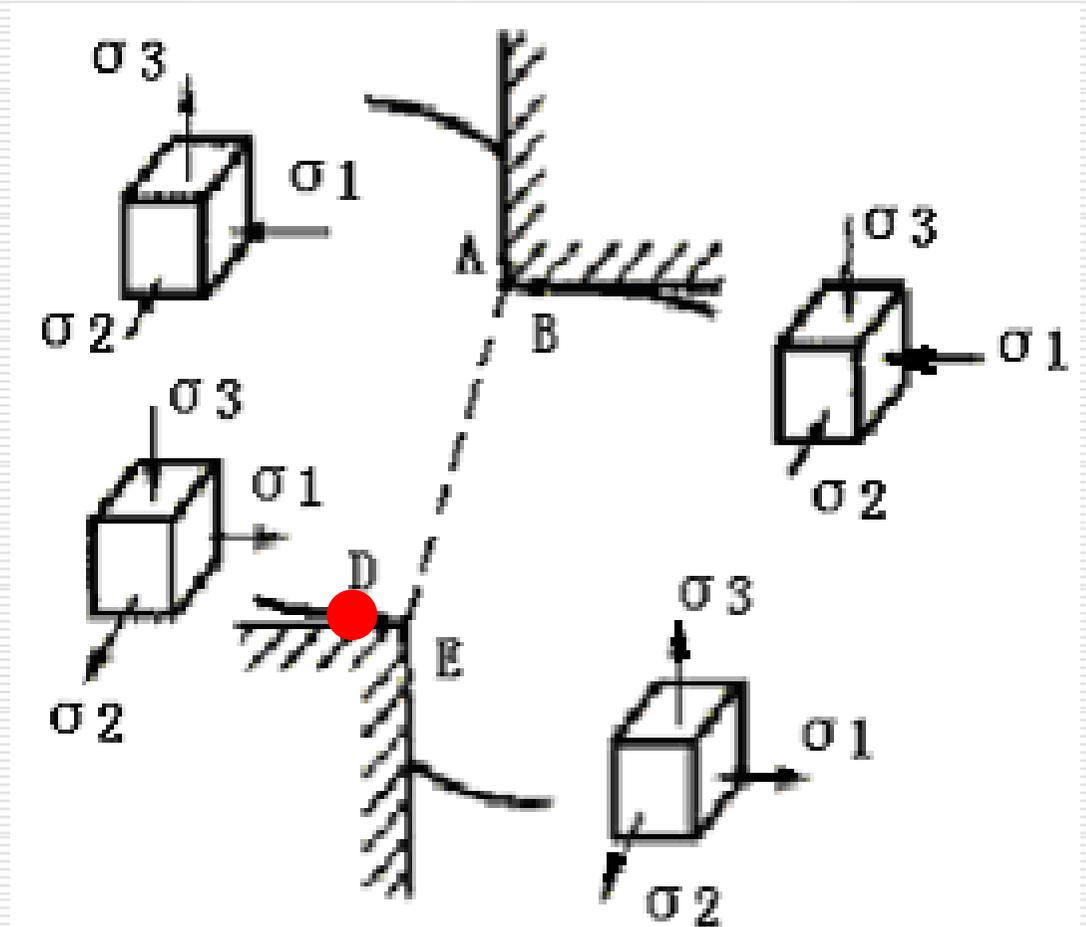
D点:

σ_1 —板料外层弯曲引起的径向拉应力；（较小）

σ_2 —板料外层切向弯曲引起的拉应力；（较小）

σ_3 —凹模端面挤压板料引起的轴向压应力。（较大）

——D点处于三向应力状态，平均应力为压应力。



2.冲裁

■ 受力分析

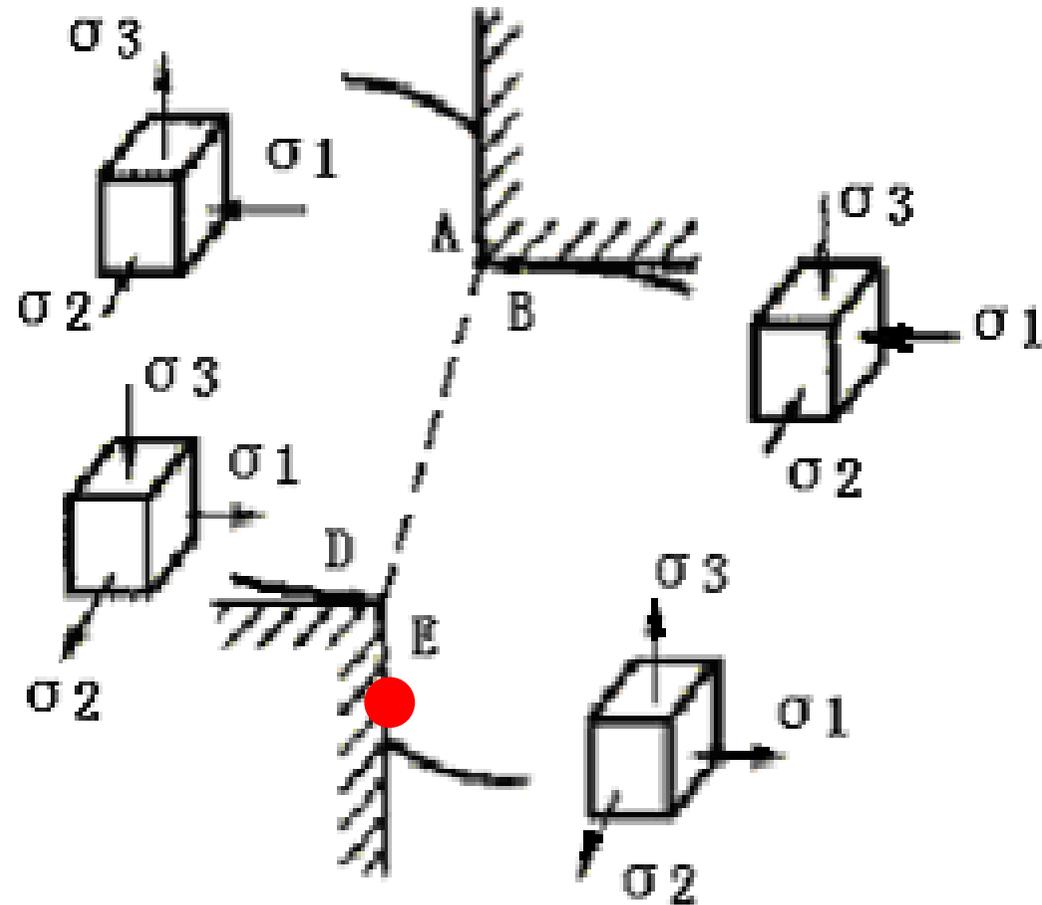
E点:

σ_1 —板料外层弯曲在径向引起的拉应力与凹模侧压力在径向引起的压应力的合成，可能是拉应力或压应力，取决于间隙大小；（趋向于拉）

σ_2 —板料外层弯曲在切向引起的拉应力与凹模侧压力在切向引起的压应力的合成，可能是拉应力或压应力，取决于间隙大小；（趋向于拉）

σ_3 —凸模下压引起的轴向拉应力（凹模侧面的摩擦力）。

—— E点为三向应力，平均应力为拉应力。



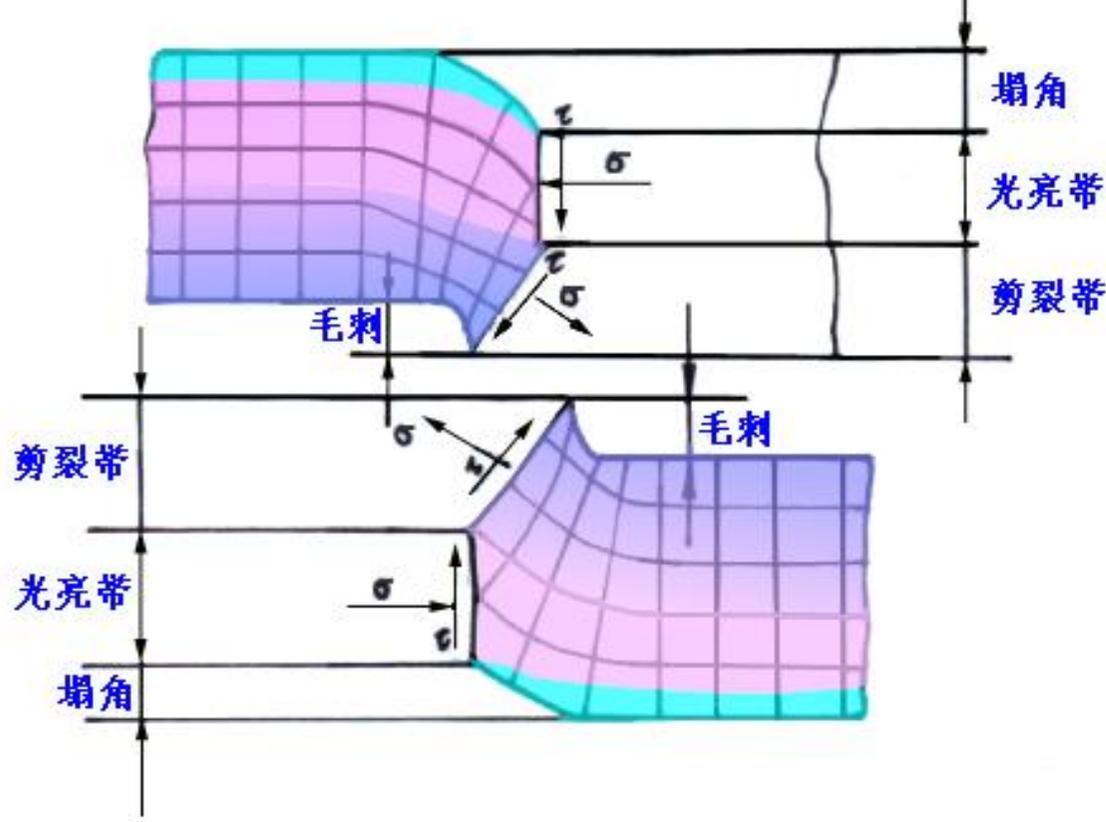
2.冲裁

■ 冲裁件切断面上的区域特征

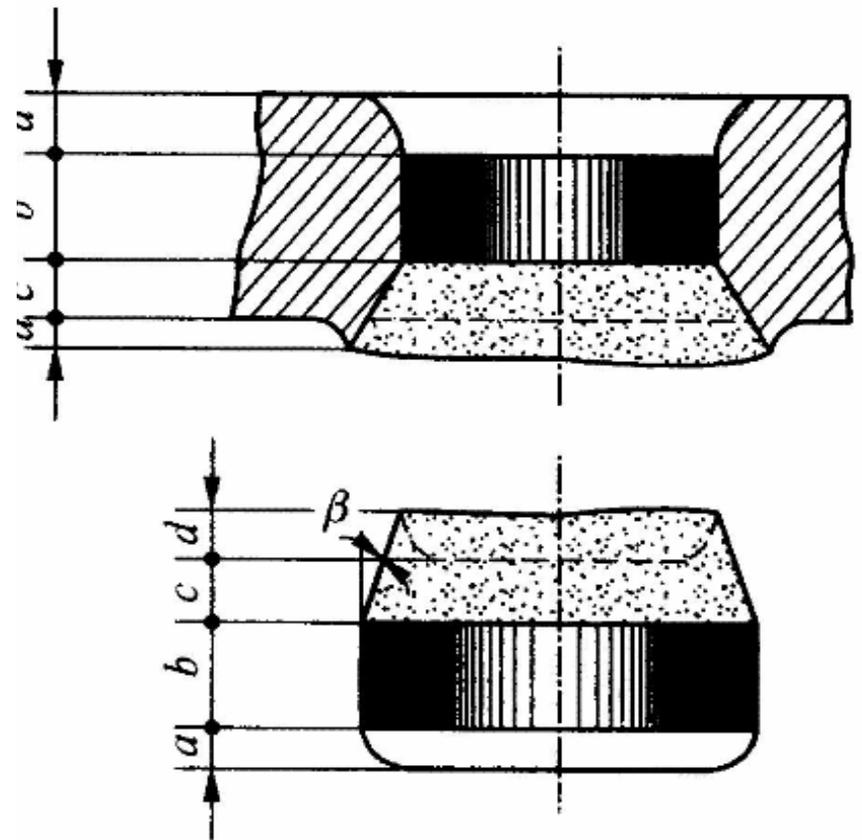
冲裁件的断面有三个特征区，即圆角带、光亮带和断裂带

[冲裁变形过程.swf](#)

① 塌角（圆角）带：刃口附近材料被弯曲和拉伸的结果。

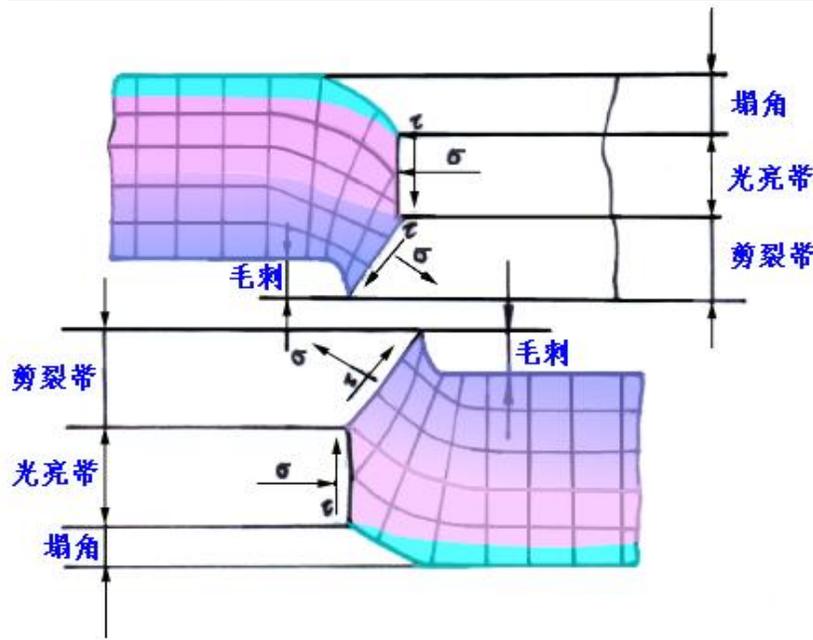


冲裁区应力与应变情况

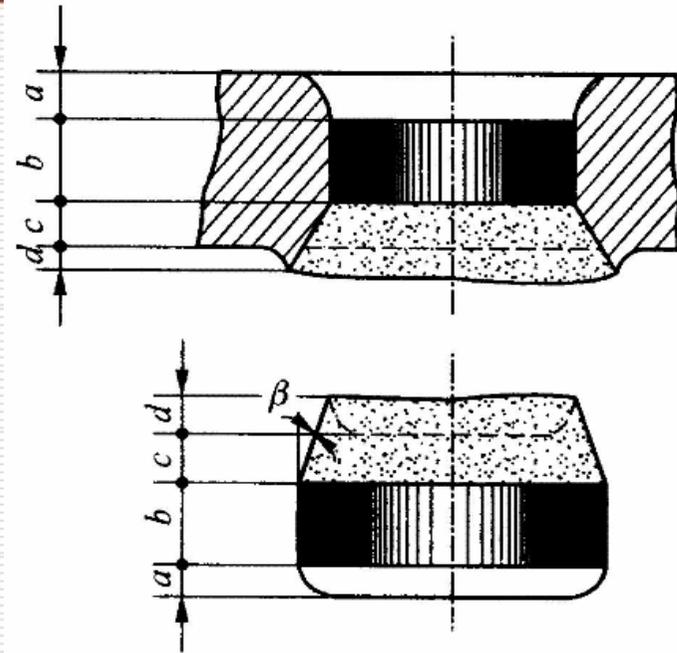


冲裁件正常的断面特征

2.冲裁



冲裁区应力与应变情况



冲裁件正常的断面特征

- ② **光亮带**：塑性变形过程中凸模（或凹模）挤压切入材料，使其受到剪切和挤压应力的作用而形成。表面光滑，断面质量最好。
- ③ **剪裂（断裂）带**：由于刃口处的微裂纹在拉应力作用下不断扩展断裂而形成。表面粗糙，略带斜度。
- ④ **毛刺**：微裂纹出现时产生，冲头继续下行时被拉长。

2.冲裁

■ 冲裁凸凹模间隙对断面的影响

冲裁间隙是指冲裁凸模与凹模之间工作部分的尺寸之差，如图所示，即：

$$Z = R_{\square} - R_{\triangle}$$

冲裁间隙不仅对冲裁件的质量起决定性的作用，而且直接影响模具的使用寿命。

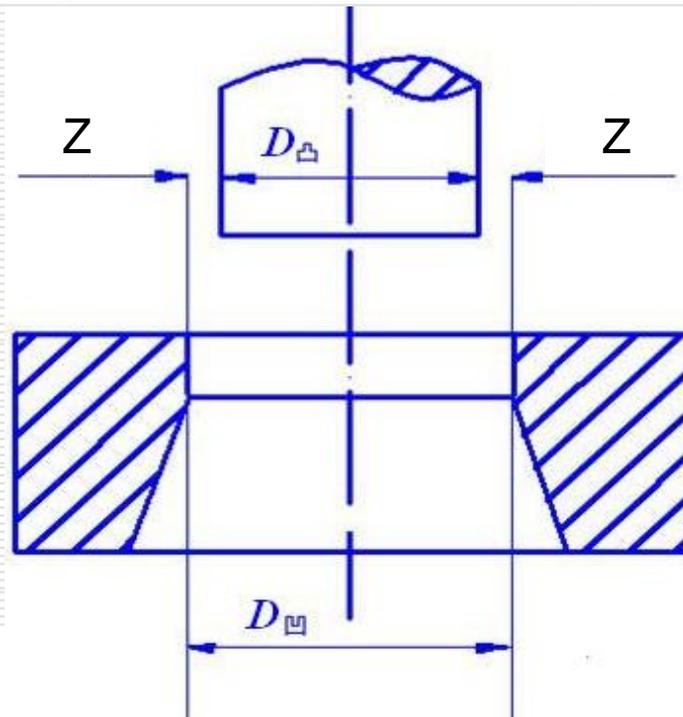


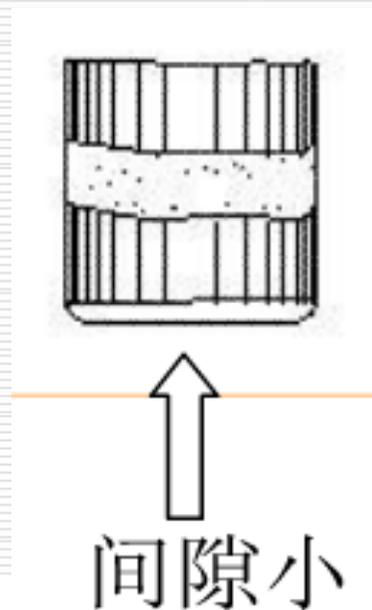
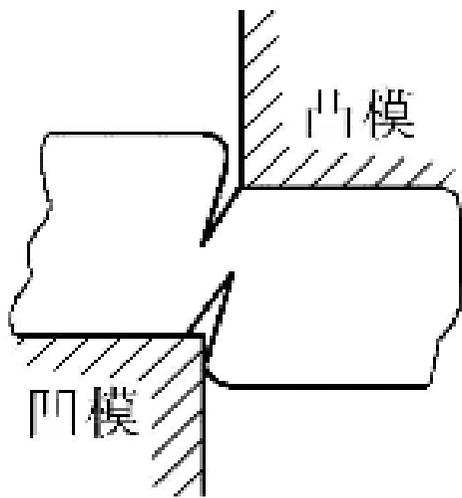
图 冲裁间隙

2.冲裁

■ 冲裁凸凹模间隙对断面的影响

(1) 间隙过小

间隙过小——上、下裂纹向外错开→中间材料被二次剪切→第二个光亮带，且材料与凸、凹模之间的摩擦力增加→冲裁力、卸料力、推件力↑，凹凸模磨损加剧→模具寿命↓



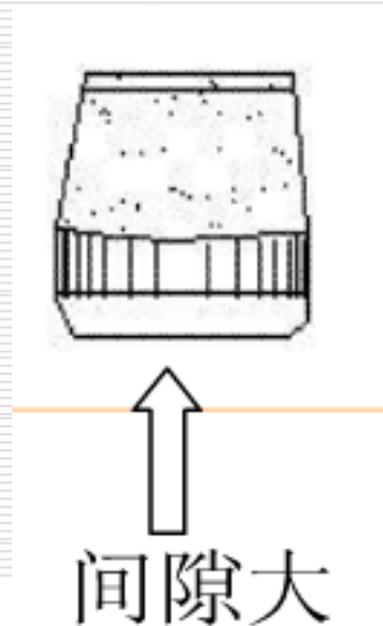
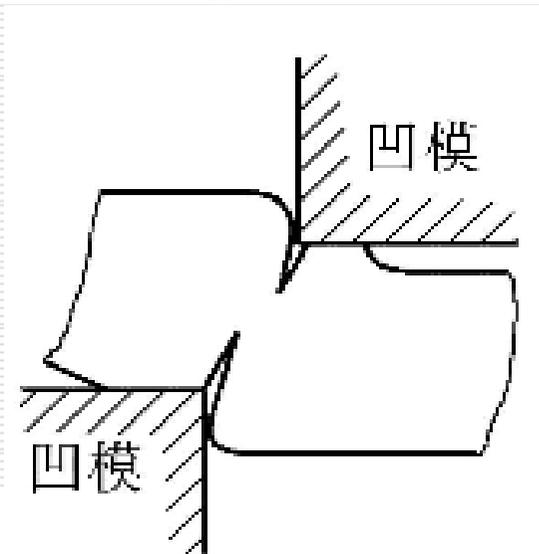
2.冲裁

■ 冲裁凸凹模间隙对断面的影响

(2) 间隙过大

间隙过大→拉伸变形增加，上、下裂纹向内错开，光亮带减小，圆角带与锥度增大→厚大的拉长毛刺，冲裁的翘曲现象严重。

对于批量较大而公差又无特殊要求的冲裁件——采用“大间隙”冲裁，提高模具寿命。

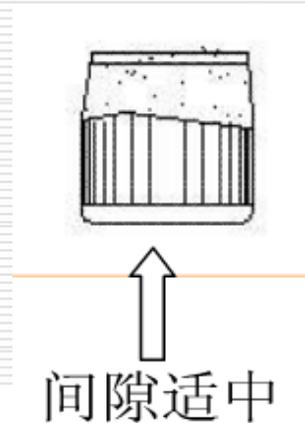
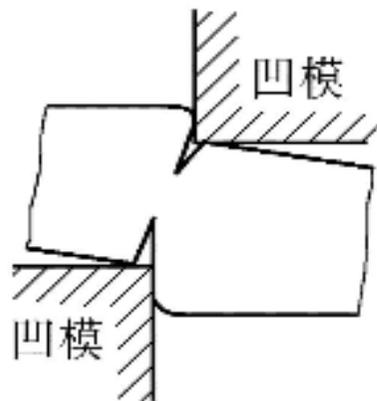


2.冲裁

■ 冲裁凸凹模间隙对断面的影响

(3) 间隙合适

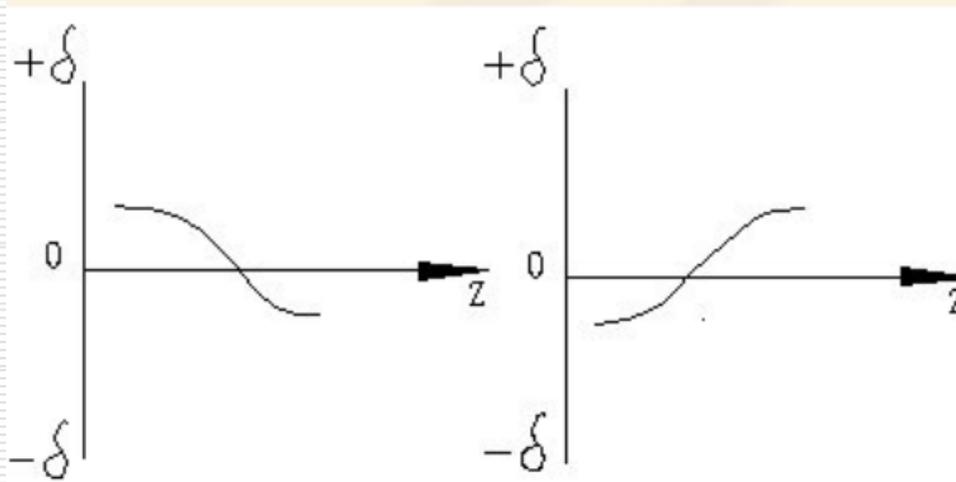
- 间隙合适—上、下裂纹重合一线，冲裁力、卸料力、推件力适中，模具寿命足够，零件尺寸几乎与模具一样。
- 较小的间隙有利于提高冲裁件的质量。
- 较大的间隙则有利于提高模具的寿命。
- 间隙合理模具有足够长的寿命，零件的尺寸几乎与模具一致。



2.冲裁

■ 冲裁凸凹模间隙对尺寸精度的影响

- 间隙大：材料所受拉伸力 \uparrow →冲裁后，弹性恢复→落料尺寸 $<$ 凹模尺寸，冲孔孔径 $>$ 凸模直径
- 间隙小：材料受凹凸模挤压力→冲裁后，弹性恢复→落料尺寸 \uparrow ，冲孔孔径 \downarrow
- 间隙合适：落料尺寸由凹模决定；冲孔尺寸由凸模决定



2.冲裁

■冲裁凸凹模间隙

合理的间隙——经验公式

$$z=Ct$$

t—板料厚度(mm)

C—与材料厚度、性能有关的系数。

0.06~0.10 (t≤3mm, 低碳钢、铜合金、铝合金)

0.08~0.12 (t≤3mm, 高碳钢)

2.冲裁

■凸凹模刃口尺寸的确定

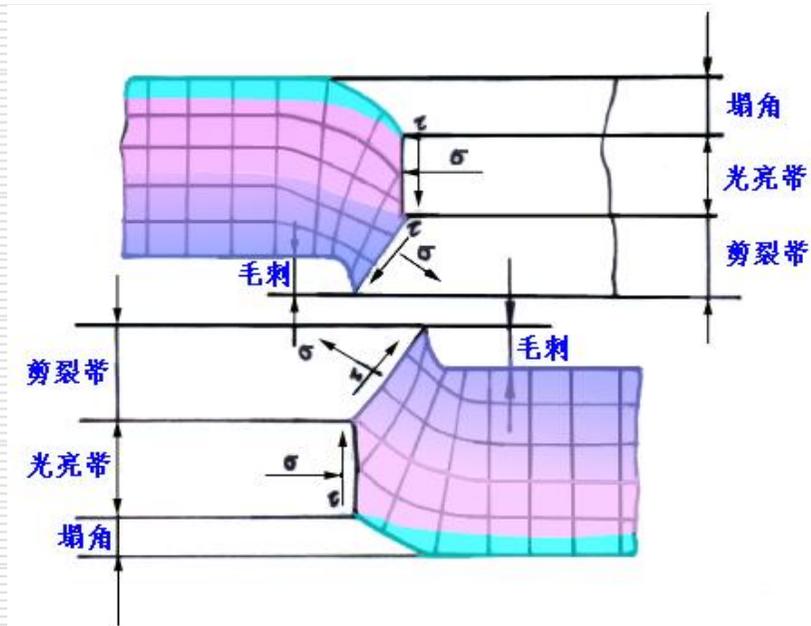
凸模和凹模刃口的尺寸取决于冲裁件尺寸和冲模间隙，因此必须正确确定冲模刃口尺寸。

➤设计落料模时：先按落料件确定凹模刃口尺寸。

取凹模作设计基准件，然后根据间隙确定凸模尺寸，即用**缩小凸模刃口尺寸**来保证间隙值。

➤设计冲孔模时：先按冲孔件确定凸模刃口尺寸。

取凸模作设计基准件，然后根据间隙确定凹模尺寸，即用**扩大凹模刃口尺寸**来保证间隙值。



冲裁区应力与应变情况

2.冲裁

■ 凸凹模刃口尺寸的确定

● 冲模在工作过程中的磨损：

落料件尺寸会随凹模刃口的磨损而增大；

冲孔件尺寸则随凸模的磨损而减小。

为了保证零件的尺寸要求，并提高模具的使用寿命：

- 落料时，凹模刃口的公称尺寸应取工件尺寸公差范围内的最小尺寸；
- 冲孔时，凸模刃口的公称尺寸应取工件尺寸公差范围内的最大尺寸。

2.冲裁

■ 冲裁力的计算

冲裁时材料对模具的最大抗力称为冲裁力。

冲裁力是选择压力机的主要依据，也是设计模具所必须的依据。

冲裁力大小与板料的材质、厚度及冲裁件周边的长度有关。

- 普通平刃口冲裁模冲裁力的计算方法如下：

$$P=KLt\tau$$

式中 P —冲裁力，N；

L —冲裁件周长，mm；

t —板料厚度，mm；

K —安全系数，通常取1.3。

τ —材料的抗剪强度，MPa；查手册或 $\tau = 0.8\sigma_b$

2.冲裁

■ 冲裁件的排样

排样：是指落料件在条料，带料或板料上合理布置的方法。排样合理则废料最少，材料利用率最大。

● 落料件的排样有三种类型：

• **无搭边排样：**用落料件的一个边作为另一个落料件的边。图d

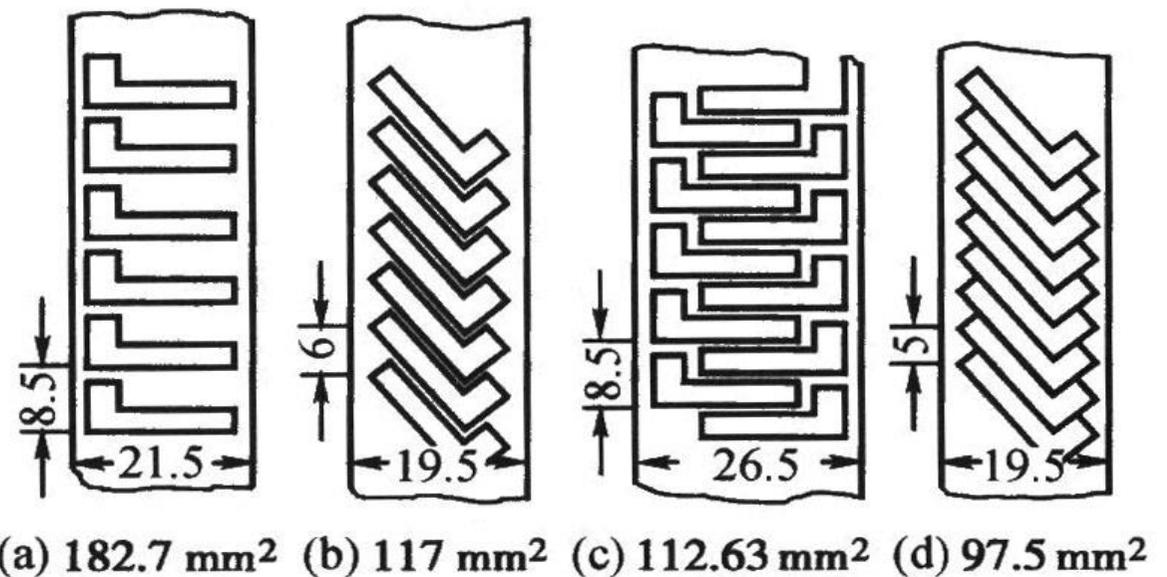
- 材料利用率很高；
- 尺寸不够准确；
- 品质要求不高

• **有搭边：**

- 冲裁件质量
- 模具寿命高，利用率低

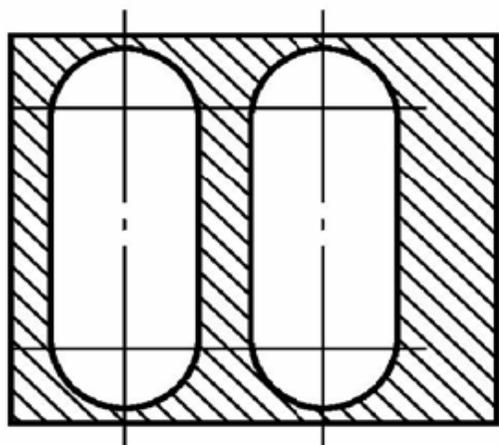
• **少搭边**

- 部分轮廓
- 精度低
- 利用率较高



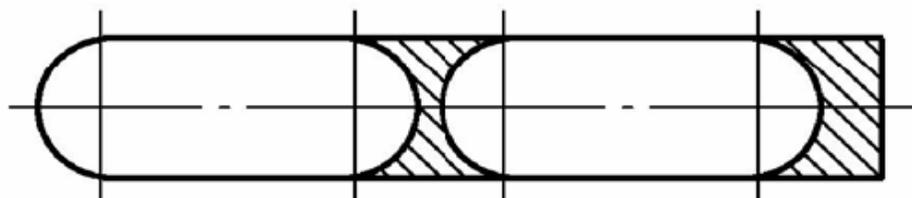
同一落料件的四种排样方式

2.冲裁



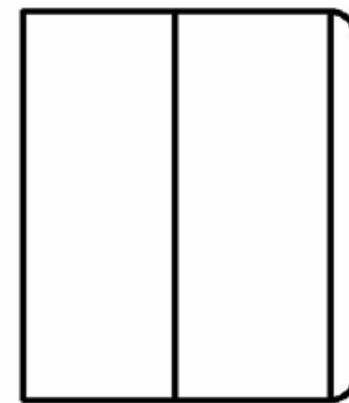
a)

有搭边排样



b)

少搭边排样



c)

无搭边排样

3. 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，以切掉冲裁件上的剪裂带和毛刺，从而提高冲裁件的尺寸精度 (IT6~IT7)，降低表面粗糙度值 (Ra0.8~1.6 μ m)。

修整冲裁件的外形称外缘修整，修整冲裁件的内孔称内孔修整。

修整的机理：
与冲裁完全不同，
而与切削加工相似。

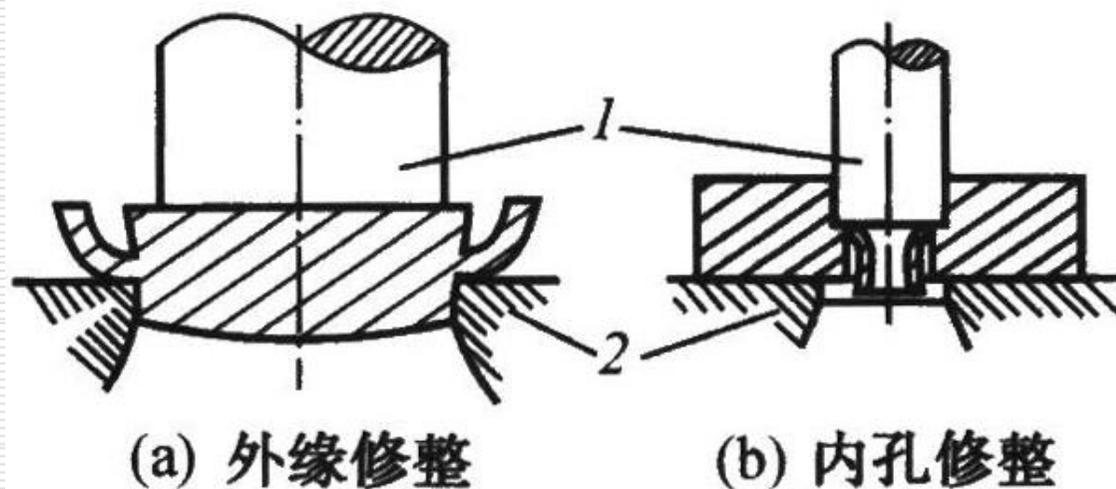


图 3-42 修整工序简图

1—凸模；2—凹模

3. 修整

■ 修整量

大间隙冲裁件：单边修整量一般为板料厚度的10%；

小间隙冲裁件：单边修整量在板料厚度的8%以下。

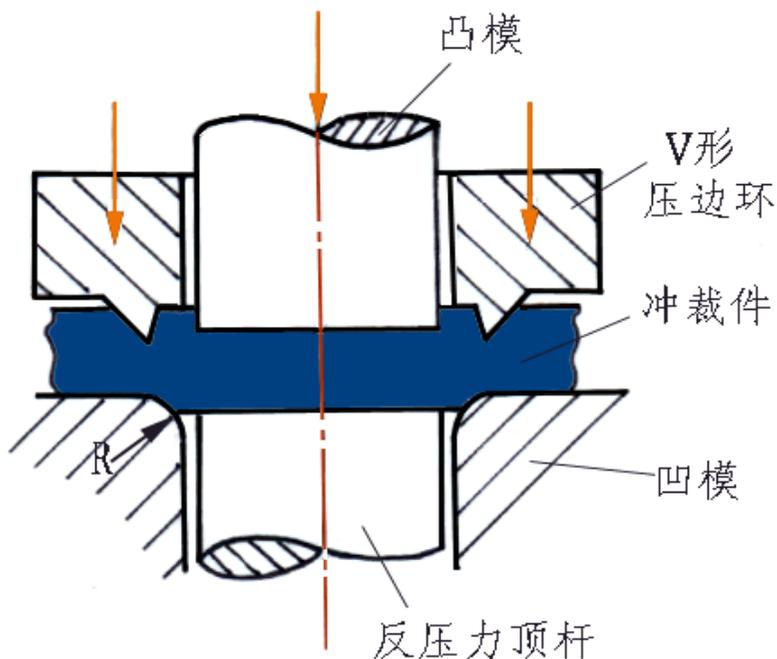
当冲裁件的修整总量大于一次修整量时，或板料厚度大于3 mm时，均需多次修整。

4.精密冲裁

■ 定义

是指通过一次冲压行程即可获得低表面粗糙度和高精度的冲裁零件的工艺方法。

精密冲裁是利用小间隙的凸、凹模获得纯剪切塑性变形，避免出现撕裂现象的原理，从而获得既不带锥度又表面光洁的冲裁件。

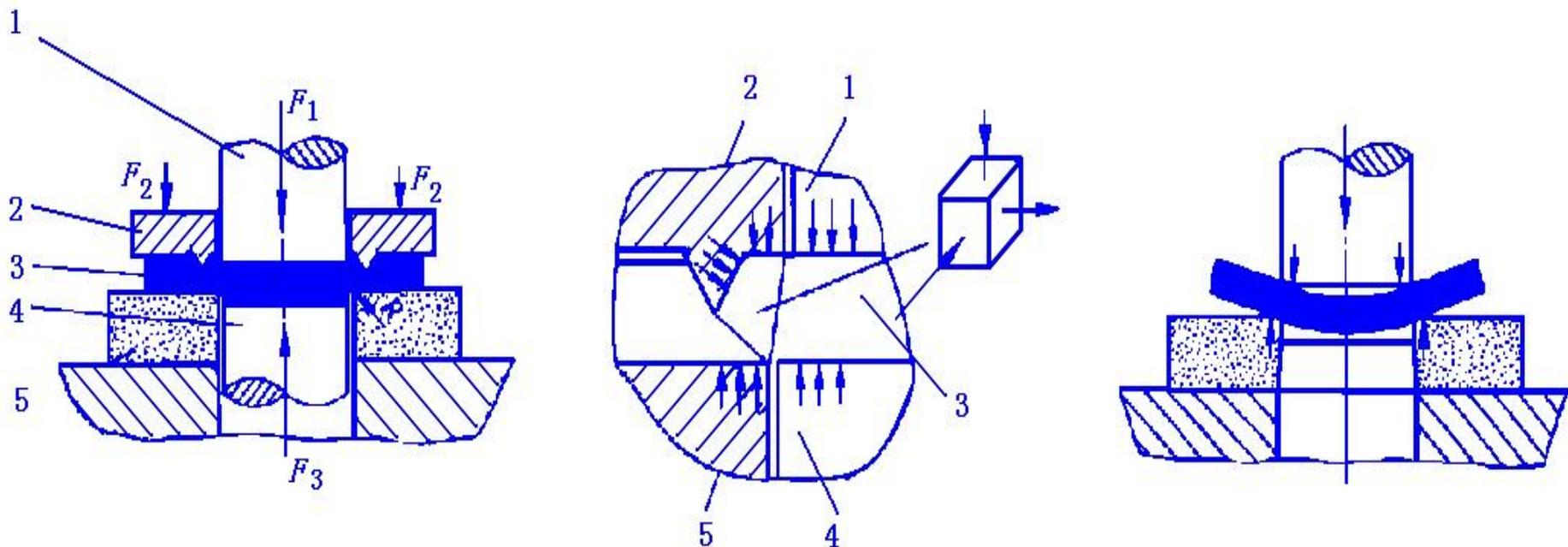


- ① 一般冲裁：精度为IT10~IT11， R_a ：12.5~3.2；
- ② 精密冲裁：IT8~IT9， R_a ：3.2~0.20。

4.精密冲裁

■ 精冲的工作原理：

精冲时，齿圈压板2将板料3压紧在凹模5表面，V形齿压入材料，使坯料径向受到压缩，当凸模下压时，板料处于凸模1的下压力、齿圈压板2的压边力及顶板4的反压力的共同作用下，此外由于凸、凹模的间隙很小，坯料处于强烈的三向压应力状态，提高了材料的塑性，抑制了剪切过程中裂纹的产生，使冲裁过程以接近于纯剪切的变形方式进行。



(a) 带齿圈压板精冲法

(b) 精冲时坯料变形区受力情况

(c) 普通冲裁的法

1—凸模；2—齿圈压板；3—板料；4—顶板；5—凹模

4.精密冲裁

■ 特点:

- 材料分离形式：纯塑性剪切变形。
- 断面质量：全是光亮带。
- 间隙及刀口形式：精冲凸、凹模**间隙**要比普通冲模**小**的多；
- 凸、凹模的**刃口**也不一定做成很锋利，而有时须做成**圆弧**及圆角形式。
- 精冲的工件**极限尺寸较小**，可冲裁宽度或孔径小于料厚的0.5~0.7mm 的工件。
- 对原**材料**要求须有**良好的塑性**。
- 使用模具设备比普通冲裁**复杂**，使用自动及精冲**专用设备**；或在普通冲床上使用精冲模。
- **成本低**。对同一精度冲裁件精冲提高了效率(普通冲裁需加整修工序)、节约工时、降低成本。

■ 应用:

- 目前广泛用于一些精密的电子仪器、仪表、钟表及照相机零件的生产。

变形工序

1.概述

指材料在不破裂的条件下产生塑性变形，从而获得一定形状、尺寸和精度要求的零件。

基本工序：弯曲、拉深、胀形、翻边等。

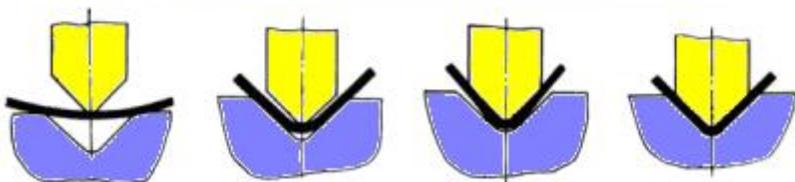
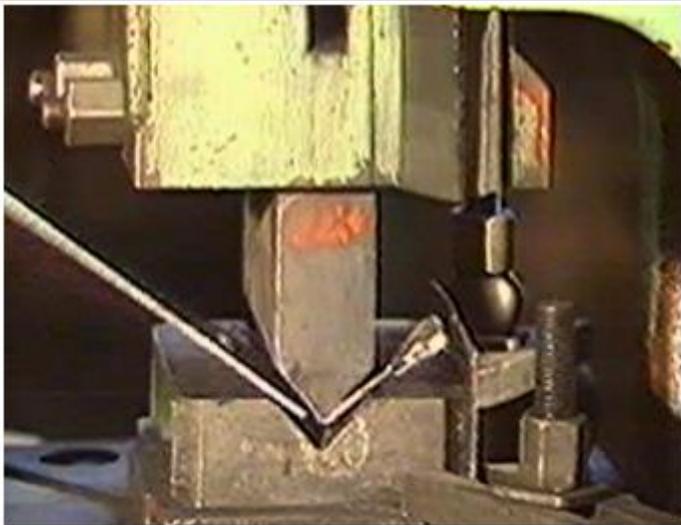


2.弯曲

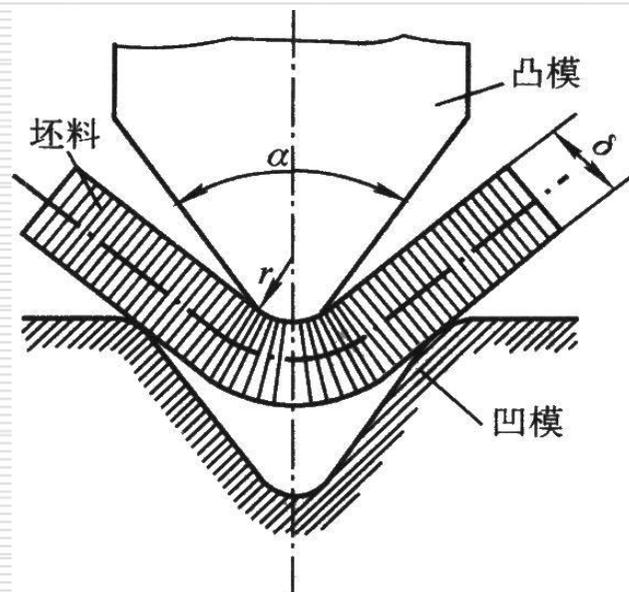
弯曲是将金属材料弯成一定的角度、曲率和形状工件的冲压工艺方法。

弯曲所用的材料有板料、棒料、管材和型材。

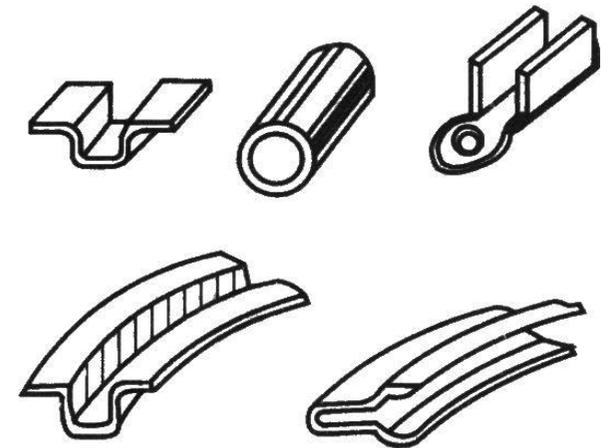
弯曲可以在压力机上使用弯曲模压弯，也可在弯板机、弯管机、滚弯机和拉弯机上进行。



弯曲过程



(a) 弯曲过程



(b) 弯曲产品

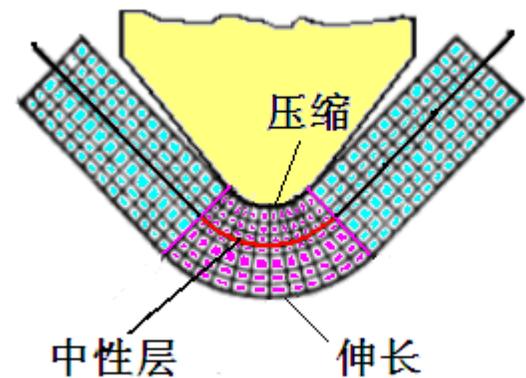
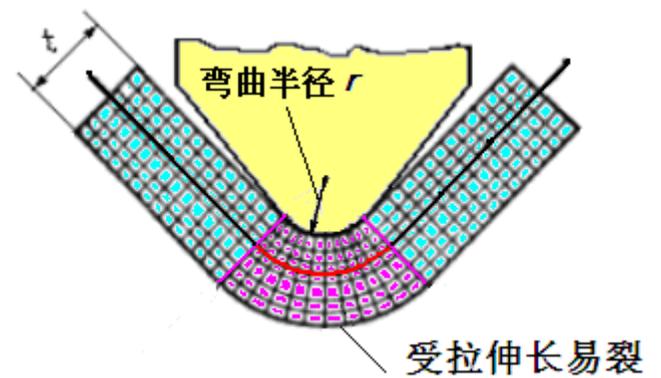
图 3-49 弯曲过程中金属变形简图

2.弯曲

■弯曲时受力分析

●变形区：

- 外层：受切向拉力作用，发生伸长变形。为最危险部位。
- 内层：受切向压力作用，发生压缩变形
- 中性层：切向应力或切向应变为零，位于板料中心部位



2.弯曲

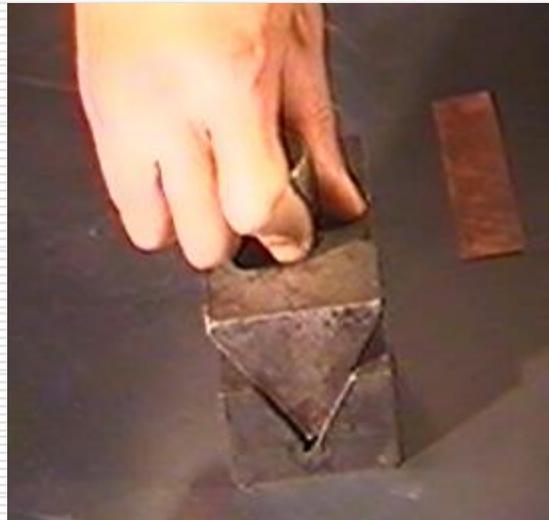
■ 为避免造成板料的破裂:

- 最小弯曲半径 (r/t) : 表示弯曲变形程度
- 坯料越厚, 弯曲半径越小, 其变形程度越大。
- 最小弯曲半径 $r_{\min}/t \geq (0.25 \sim 1.0)$ 。
- 材料塑性好, 相对弯曲半径可小些。

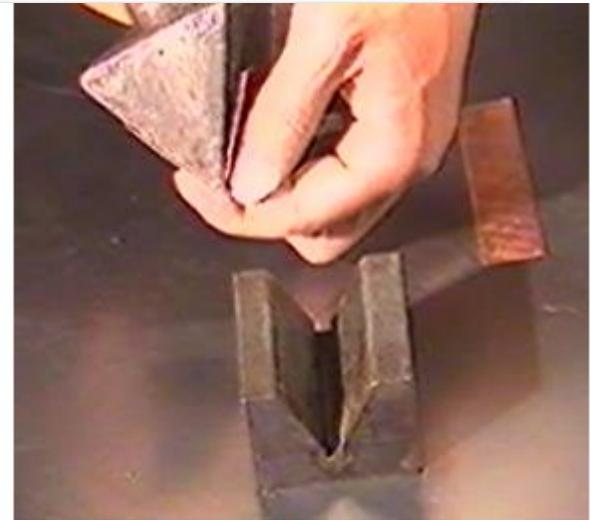
2.弯曲

■回弹

由于材料的弹性恢复，会使弯曲件的角度和弯曲半径较凸模大，这种现象称为回弹。弯曲工艺中回弹很难克服，所以在设计弯曲模时，应使模具的弯曲角 α 减小一个回弹量 $\Delta\alpha$



加压弯曲时

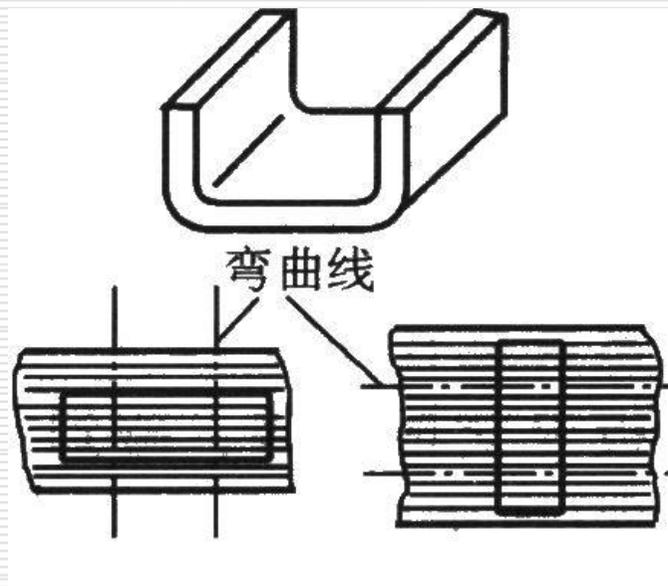


弯曲卸压后

2.弯曲

■ 弯曲时还应尽可能使弯曲线与板料纤维垂直。

若弯曲线与纤维方向一致，则容易产生破裂。此时应增大弯曲半径。



弯曲时的纤维方向

3.拉深

将一定形状的平板毛坯通过拉深模冲压成各种形状的开口空心件；或以开口空心件为毛坯通过拉深，进一步使空心件改变形状和尺寸的冷冲压加工方法。

可生产筒形、阶梯型、锥形、球形、方盒形及其他不规则形状的薄壁零件。

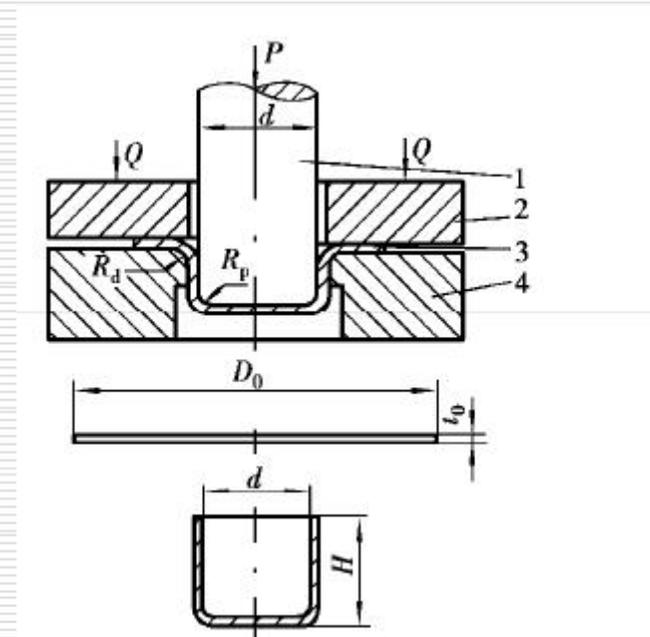
因此，拉深工艺在汽车、拖拉机、电器、仪表工业中得到广泛的应用。



3.拉深

■拉深的特点

- 其凸模和凹模有一定的圆角
- 其间隙一般稍大于板料厚度
- 拉深件的底部一般不变形
- 底部厚度基本不变
- 直壁厚度有所减小。

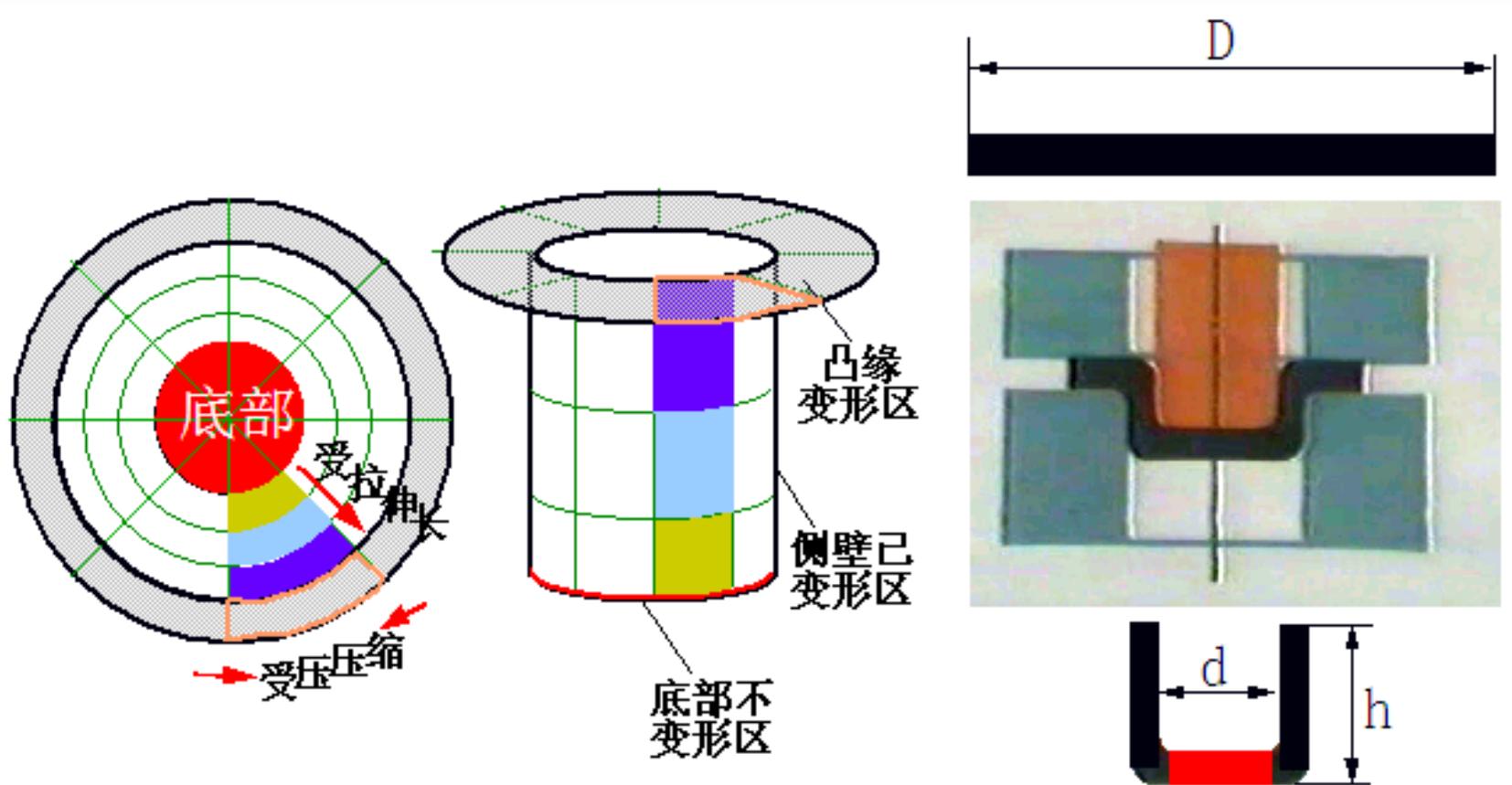


拉深过程示意图

1—凸模 2—压边圈 3—坯料 4—凹模

3.拉深

■拉深受力状态



3.拉深

■ 变形过程

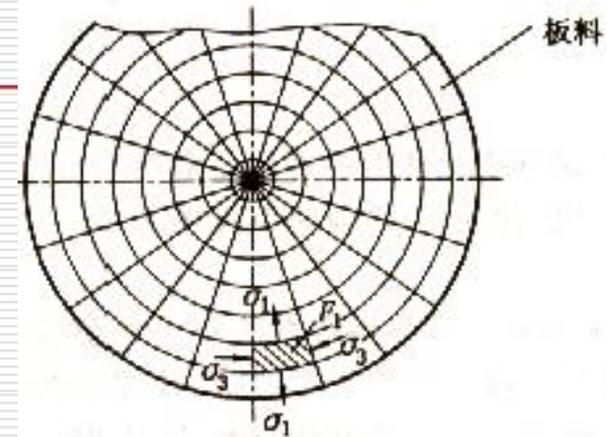
- 凸模底部金属不变形
- 底部以外环形部分变形后形成侧壁

■ 应力分布

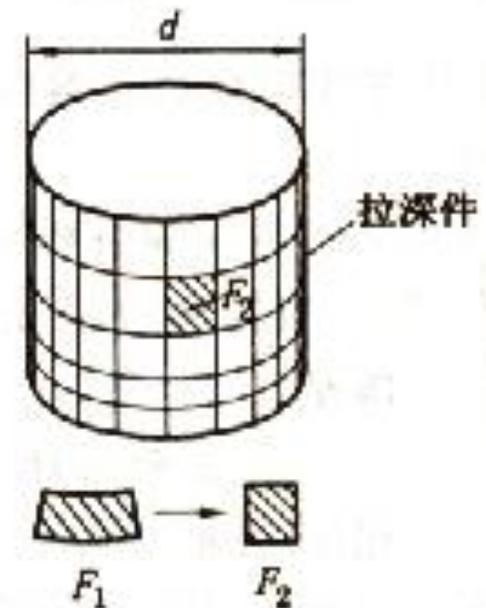
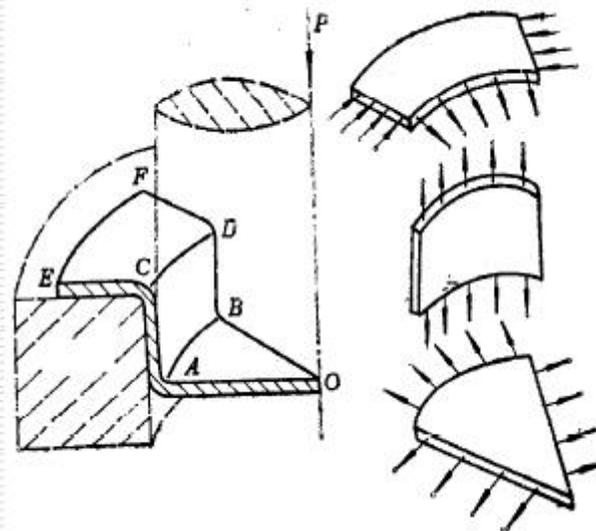
- 底部：径向和切向拉应力
- 侧壁：单向轴向拉应力

■ 壁厚变化

- 侧壁上部壁厚最大
- 靠近底部圆角附近壁厚最小，最易破裂



(c) 拉深前板料的网格



(d) 拉深件的网格变化

3.拉深

拉深件的主要质量问题

主要缺陷:

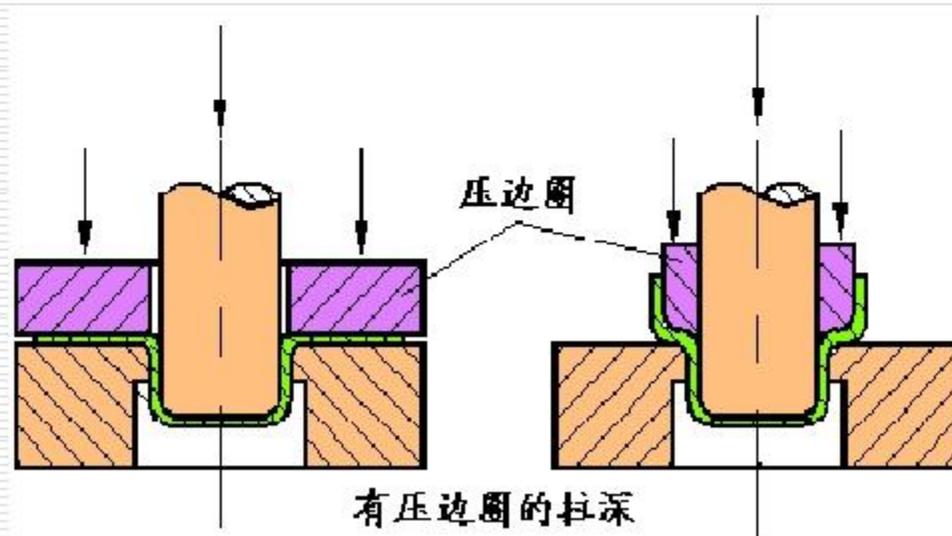
- 起皱: 凸缘区, 切向压应力最大
- 拉裂: 筒形件底部圆角附近。该区加工硬化程度最小, 且壁厚减薄最严重。



3.拉深

拉深件的主要质量问题—防止措施

- ✓ 限制拉深系数 $m=d/D$
- ✓ 凹模工作部位设计为圆角
- ✓ 采用压边圈
- ✓ 采用润滑

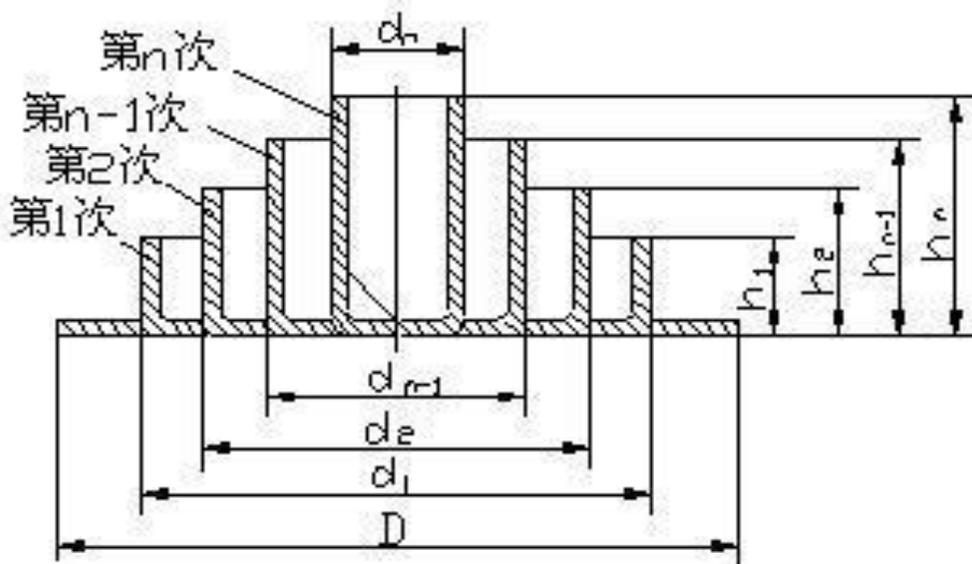


3.拉深

拉深件的主要质量问题—防止措施

- 限制拉深系数 $m=d/D$:
d—拉深后的工件直径, mm;
D—拉深前坯料直径, mm。

极限拉伸系数: 保证危险面不被拉裂的拉深系数的最小值



多次拉深时圆筒直径的变化

如果拉深系数过小, 不能一次拉深成形时, 则可采用多次拉深工艺。

第一次拉深系数 $m_1 = d_1/D$

第二次拉深系数 $m_2 = d_2/d_1$

第n次拉深系数 $m_n = d_n/d_{n-1}$

总的拉深系数

$$m = m_1 \times m_2 \times \dots \times m_n$$

3.拉深

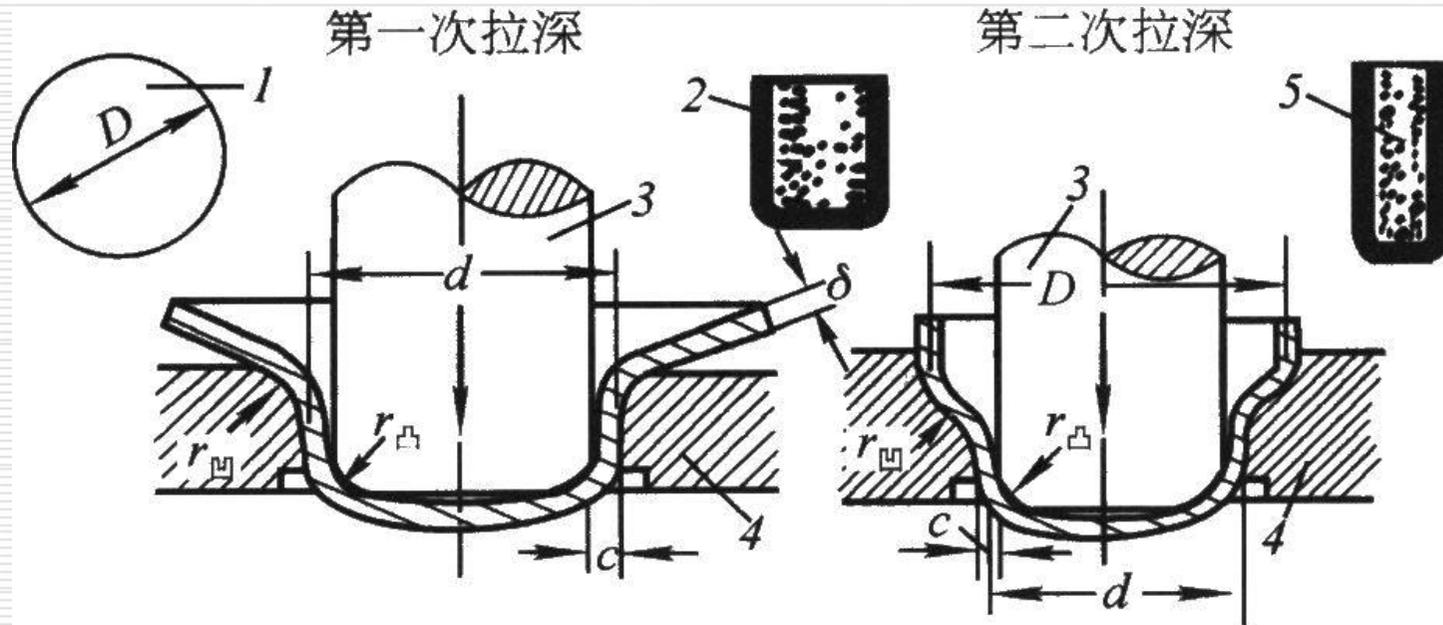


图 3-43 拉深工序

1—坯料；2—第一次拉深成品，即第二次拉深的坯料；
3—凸模；4—凹模；5—成品

3.拉深

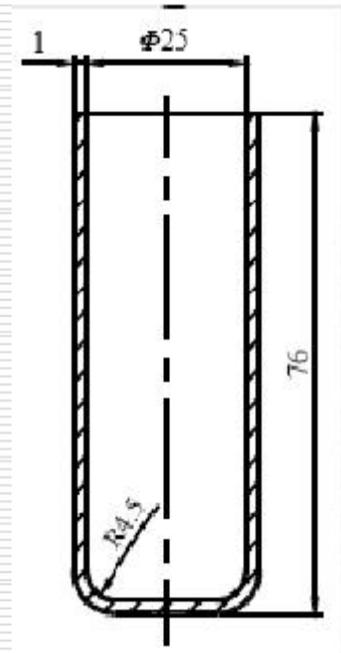
■实例

某厂需用低碳钢拉深如图所示的薄壁筒形件，请估算拉深次数，并给出必要的计算过程。该零件为圆筒形拉深件，材料为低碳钢，板料初始厚度为1mm。

- 板料尺寸按拉深前后表面积不变的原则进行计算。

方法：

- 1.把拉深件划分成若干容易计算的部分，分别计算出其表面积。
- 2.增加修边余量——各向异性
- 3.各表面积之和即得所需板料的总表面积，再求出板料直径。



3.拉深

■ 实例

某厂需用低碳钢拉深如图所示的薄壁筒形件，请估算拉深次数，并给出必要的计算过程。

✓ 该零件为圆筒形拉深件，材料为低碳钢，板料初始厚度为1mm，

$$D = \sqrt{d^2 + 4dh} - 1.72dr - 0.56r^2$$

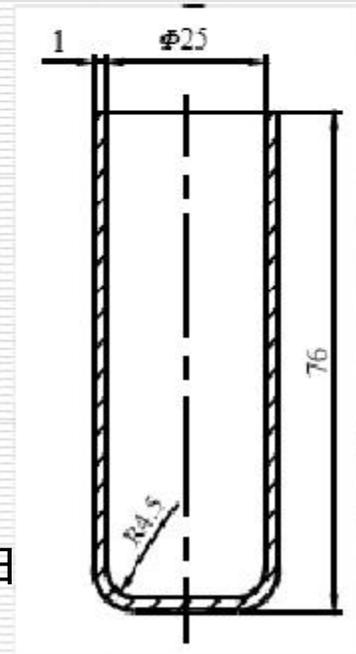
✓ 根据表面积相等，初始板料直径 D_0 为90mm，

✓ 毛坯相对厚度 t/D_0 为1.11，

✓ 由图示得出总拉深系数为 $m=d/D_0=25/90=0.28$

✓ 查表2-10得， $m_{1k}=0.53$ ， $m_{2k}=0.76$ ， $m_{3k}=0.79$ ， $m_{4k}=0.81$

✓ 前4次总拉深次数 $m_4=0.53*0.76*0.79*0.81=0.26$ ，由于 $m_4 < m=0.28$ ，所以该件至少经过4次拉深，才能顺利加工。



3.拉深

■ 拉深件的主要质量问题—防止措施

● 合理设计拉深凸凹模的圆角半径

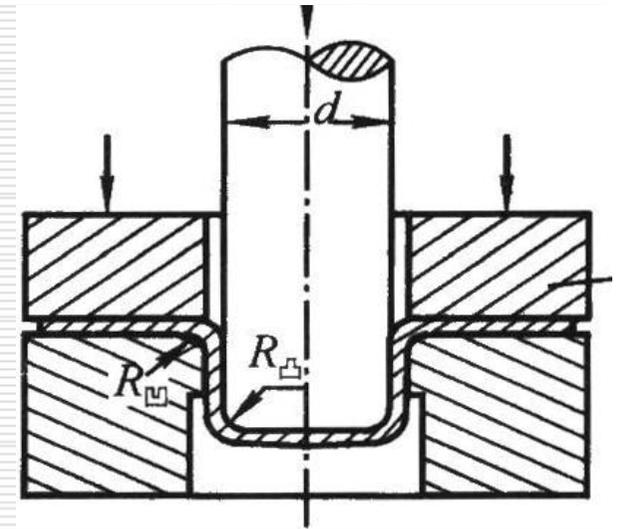
- 凸凹模的圆角半径为 r ，板料材质为钢，厚度为 t ，则：
- $R_{凹} = (5\sim 10)t$,
- $R_{凸} = (0.7\sim 1)R_{凹}$
- 若两个圆角半径过小，则容易拉裂。

● 合理设计凸凹模的间隙

- 一般取凸凹模的单边间隙为：
- $z = (1.0\sim 1.2)t_{max}$ ，比冲裁模间隙大。
- 间隙过小，模具与拉深件间的摩擦力增大，容易拉裂工件，擦伤工件表面，缩短模具寿命。
- 间隙过大，又容易使拉深起皱，影响拉深件的精度。

● 注意润滑

- 在凹模与坯料的接触面上涂敷润滑剂，以利坯料向内滑动，减少摩擦，降低拉深件壁部的拉应力，减少模具磨损，防止拉裂。



3.拉深

■拉深件的主要质量问题—防止措施

- 采用压边圈

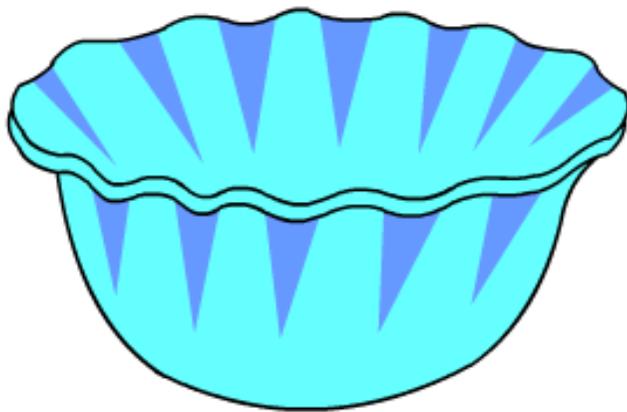


图8-10 起皱的拉深件

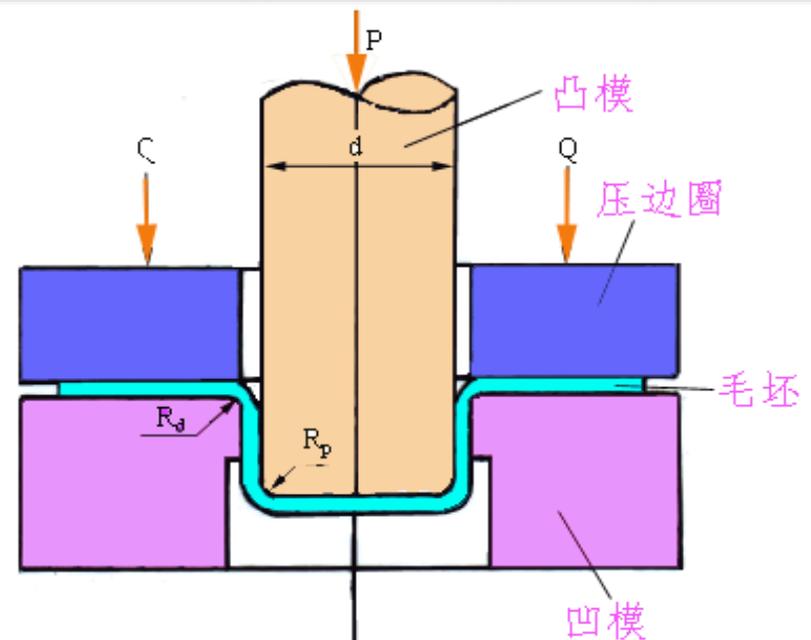


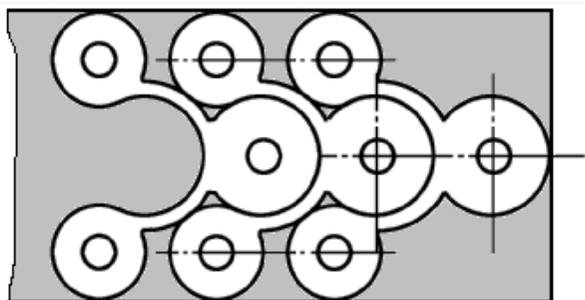
图8-11 有压边圈的拉深

冲压件结构工艺性

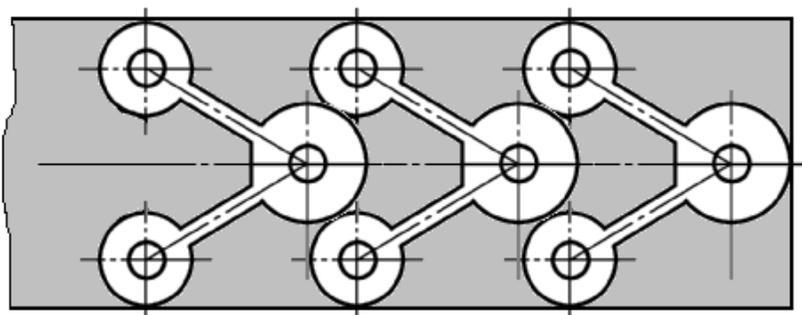
冲压件结构工艺性

■ 冲裁件

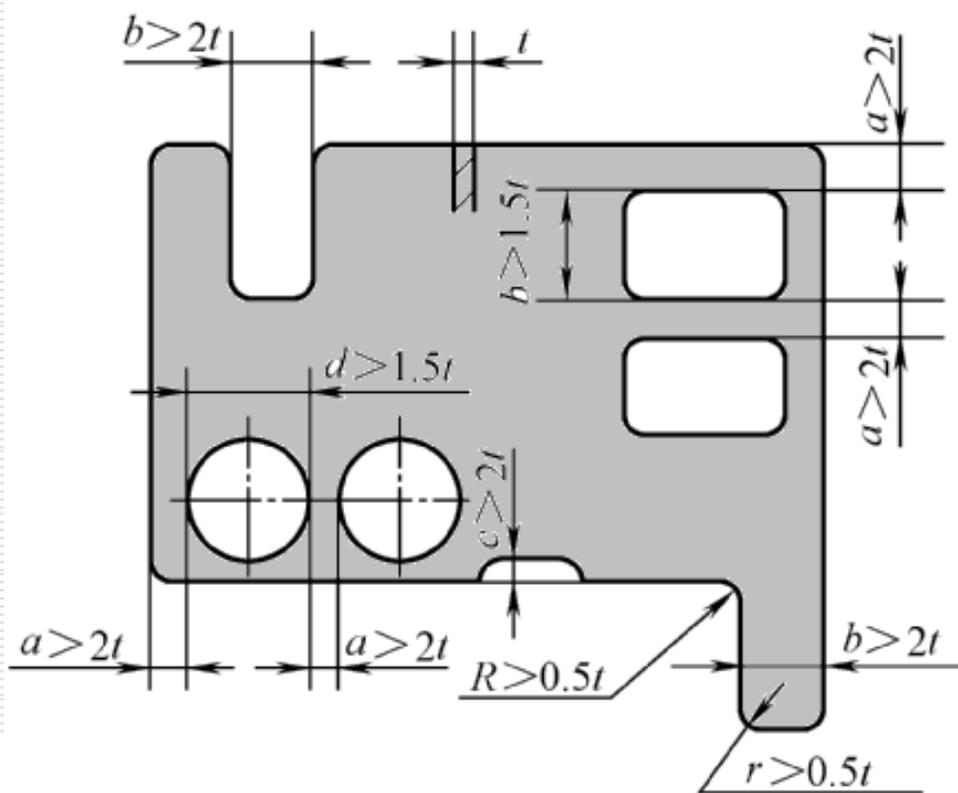
- 形状简单对称，提高材料利用率
- 转角圆角过渡 $R \geq 0.25t$ (t 为板厚)
- 机构尺寸限制



材料利用率高



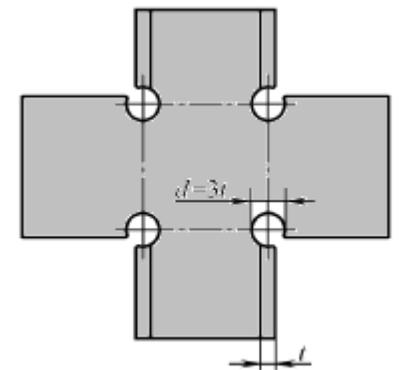
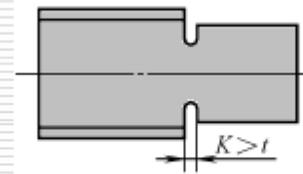
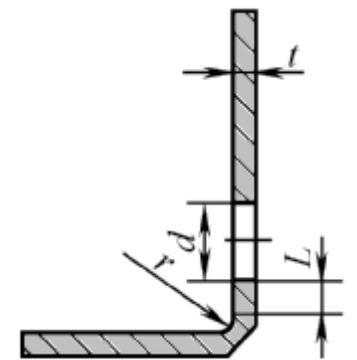
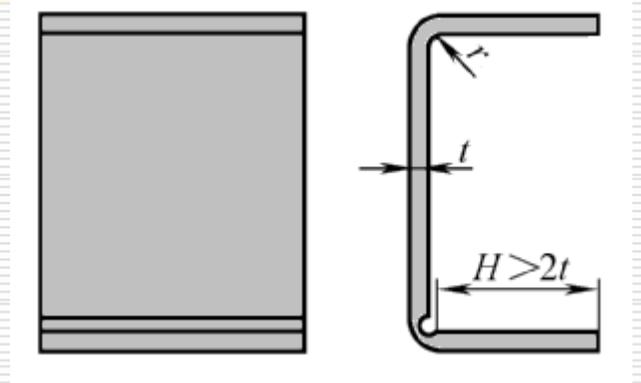
材料利用率低



冲压件结构工艺性

■ 弯曲件

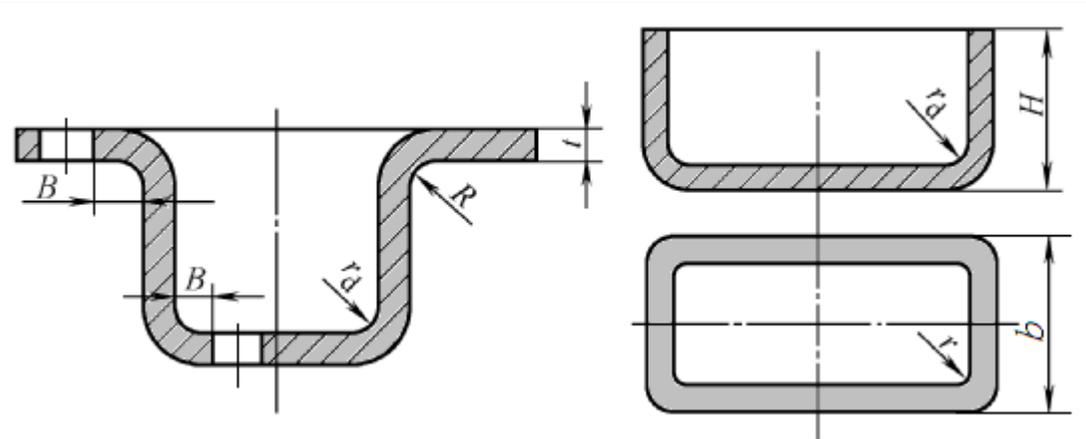
- 弯曲半径 $\geq r_{\min}$ 或减薄弯曲区厚度
- 对称，防偏移
- 直边 $H > 2t$
- 已冲孔工件， $L \geq (1 \sim 2)t$
- 沿材料纤维方向弯曲
- 多向弯曲，应冲工艺孔或切槽



冲压件结构工艺性

■ 拉深件

- 简单对称
- 避免过大深径比
- 底部-侧壁圆角 $r_d \geq 2t$
- 凸缘-侧壁圆角 $R > r_d$
- 方形件 $r \geq 3t$
- 凸缘或底部上孔-侧壁距离 $B \geq r_d + 0.5t$ 或 $B \geq R + 0.5t$
- 凸缘不宜过大或过小——无法压边



作业

■ 2-17

■ 2-18

■ 2-20

■ 2-23

The End