

项目3 弯曲工艺及弯曲模具设计

知识目标:从弯曲变形过程中了解金属的塑性变形,熟悉金属塑性变形的性质、影响因素、变形规律,初步掌握应力与应变状态对弯曲变形的影响,熟悉弯曲件质量特征,初步掌握塑性成形对冲压材料的成形性能要求及成形性能指标要求,掌握弯曲时可能出现的质量问题及控制方法;掌握弯曲件坯料尺寸及弯曲力计算方法;能分析弯曲件的工艺性和合理安排弯曲工序;掌握弯曲模典型结构及设计要点。

能力目标:具有分析材料塑性成形性能的能力,具有对弯曲件质量分析与控制的能力,具有对弯曲件工艺设计的能力,具有对弯曲件冲压工艺计算及弯曲模设计的能力。

将金属毛坯弯成具有一定角度和曲率,从而得到一定形状和尺寸零件的冲压工序称为弯曲。

弯曲是冷冲压成形工序之一,应用相当广泛,在冲压生产中占有很大的比重。图 3-1 是各种典型弯曲零件。在冲压生产中弯曲成形方法很多,使用的设备和工具也是多种多样的,其中主要有在普通冲床上成形的压弯、折弯机上的折弯、滚弯机上的滚弯和拉弯设备上的拉弯,如图 3-2 所示。同时,弯曲变形还存在于很多成形工序之中,掌握弯曲成形特点和弯曲变形规律

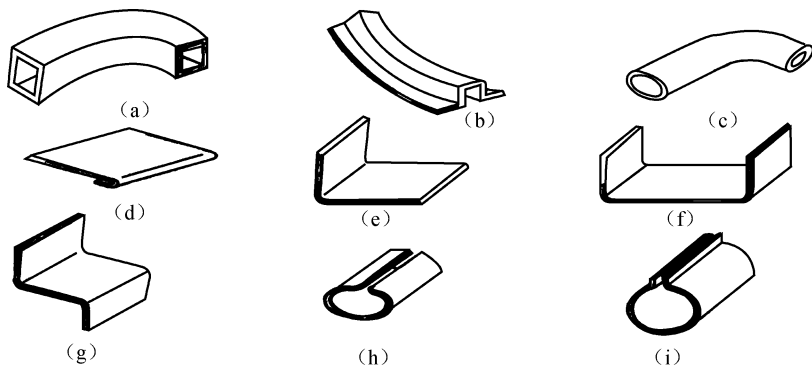


图 3-1 各种典型弯曲零件

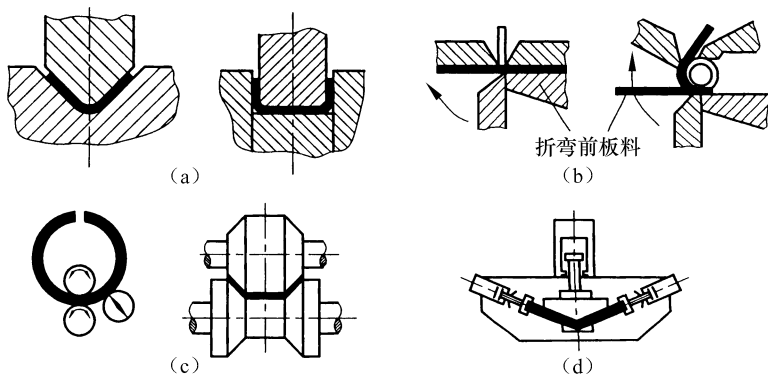


图 3-2 弯曲加工方法

(a) 模具压弯;(b) 折弯;(c) 滚弯;(d) 拉弯

有着十分重要的意义。本项目主要介绍在压力机上进行弯曲的弯曲模设计。

任务 3.1 拉板的弯曲工艺及模具设计

如图 3-3 所示弯曲件。

零件名称:拉板架

材料:20 钢 料厚 $t=2\text{ mm}$

生产纲领:中批量生产

试设计弯曲工艺及弯曲模。

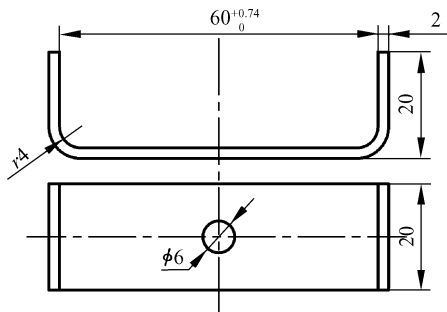


图 3-3 拉板架

3.1.1 弯曲变形分析

1. 金属的塑性变形

弯曲是冷冲压成形工序之一,而冷冲压成形属金属塑性加工,冷冲压成形的理论是建立在金属塑性变形理论的基础之上。因此,要掌握冷冲压成形的加工技术,就必须对金属的塑性变形性质、规律及材料的冲压成形性能等有充分的认识。

1) 塑性变形、塑性与变形抗力的概念

物体在外力作用下会产生变形,若外力去除以后,物体并不能完全恢复自己的原有形状和尺寸,这样的变形称为塑性变形;物体具有塑性变形的能力称为塑性;在一定的变形条件(加载状况、变形温度及速度)下,引起物体塑性变形的单位变形力称为变形抗力。变形抗力反映了物体在外力作用下抵抗塑性变形的能力。

塑性不仅与物体材料的种类有关,还与变形方式和变形条件有关。例如,在通常情况下,铅具有很好的塑性,但在三向等拉应力的作用下,却会像脆性材料一样破裂,不产生任何塑性变形。又如,极脆的大理石,若给予三向压力作用,则可能产生较大的塑性变形。这两个例子充分说明:材料的塑性并非某种物质固定不变的性质,而是与材料种类、变形方式及变形条件有关。

金属塑性的高低通常用塑性指标来衡量。塑性指标是以材料开始破坏时的变形量表示,它可借助于各种试验方法测定。

塑性和变形抗力是两个不同的概念。通常说某种材料的塑性好坏是指受力后临近破坏时的变形程度的大小,而变形抗力是从力的角度反映塑性变形的难易程度。如奥氏体不锈钢允

许的塑性变形程度大,说明它的塑性好,但其变形抗力也大,说明它需要较大的外力才能产生塑性变形。

2) 塑性变形对金属组织和性能的影响

金属受外力作用产生塑性变形后,不仅形状和尺寸发生变化,而且其内部组织和性能也将发生变化,这些变化可以归纳为以下四个方面:

(1) 形成了纤维组织 多晶体经塑性变形后,各晶粒会沿变形方向伸长。当变形程度很大时,多晶体晶粒便显著地沿变形方向被拉长,于是便形成了金属的纤维组织。形成的纤维组织会使变形抗力增加,且会产生明显的各向异性(即板平面内不同方向的性能有所差异,一般顺纤维方向的力学性能高于垂直纤维方向的力学性能)。

(2) 形成了亚组织 在金属塑性变形过程中,当变形很小时,晶粒内部位错分布相对比较均匀。随着变形程度的增加,由于位错的运动和相互作用,使位错呈不均匀分布,一些位错互相纠缠在一起,形成位错缠结。继续变形时,在纠缠处的位错愈来愈多,愈来愈密。密集的位错纠结在晶粒内围成细小的粒状组织称为胞状组织或亚组织。亚组织的形成使得位错运动更加困难,导致变形抗力的增加。

(3) 产生了内应力 由于变形过程中每个晶粒都有不同程度的变形,为了保持金属晶体的完整性,必然会在不同变形程度的晶粒之间和每个晶粒内部造成一些自相平衡的内应力,即所谓附加应力。变形终止后,附加应力遗留在金属中变成残余应力。内应力的存在,将导致金属的开裂和变形抗力的增加。

(4) 产生了加工硬化 随着变形程度的增加,金属的强度、硬度和变形抗力逐渐提高,而塑性和韧性逐渐降低,这种现象称为加工硬化现象。造成加工硬化的根本原因是变形时位错运动受阻和位错密度不断增大。

金属的加工硬化在生产中具有很大的实际意义。例如,它可作为强化金属的重要手段,特别是热处理无法强化的金属材料(如纯金属、多数铜合金和镍铬不锈钢等),只有用加工硬化的方法来强化;冶金厂生产的成品材料中有“硬”“半硬”等状态,就是经过冷轧或冷拉等方法加工硬化的。但加工硬化也有不利的一面,例如,由于塑性降低,可能给金属材料进一步成形带来困难;某些物理、化学性能的变坏,也会影响一些零件的使用。要解决这些问题,可采用一定的热处理工序。

3) 影响金属塑性的因素

前述已知,金属的塑性不是固定不变的,影响因素很多,除了金属本身的内在因素(晶格类型、化学成分和金相组织等)以外,其外部因素——变形方式(应力与应变状态)、变形条件(变形温度与变形速度)的影响也很大。从冲压工艺的角度出发,加工材料给定之后,往往着重于外部条件的研究,以便创造条件,充分发挥材料的变形潜力,尽可能的减少冲压工序次数,提高经济效益。

(1) 金属的成分和组织结构 组成金属的晶格类型,杂质的性质、数量及分布情况,晶粒大小、形状及晶界强度等不同,金属的塑性就不同。一般来说,组成金属的元素越少(如纯金属和固熔体)、晶粒愈细小、组织分布愈均匀,则金属的塑性愈好。

(2) 变形时的应力状态 因为金属的塑性变形主要依靠晶面的滑移作用,而金属变形时的破坏则是由于晶内滑移面上裂纹的扩展以及晶间变位时结合面的破坏造成的。压应力有利于封闭裂纹,阻止其继续扩展,有利于增加晶间结合力,抑制晶间变位,减小晶间破坏的倾向。

所以,金属变形时,压应力的成分愈多,金属愈不易破坏,其可塑性也就愈好。与此相反,拉应力则易于扩展材料的裂纹与缺陷,所以拉应力的成分愈大,愈不利于金属可塑性的发挥。

(3) 变形温度 变形温度对金属的塑性有重大影响。就大多数金属而言,其总的趋势是:随着温度的升高,塑性增加,变形抗力降低(金属的软化)。温度增高能使金属软化的原因是:随着温度的增加,金属组织发生了回复与再结晶;滑移所需临界剪应力降低,使滑移系数增加;产生了新的变形方式——热塑性变形(扩散塑性)等。

值得指出的是,加热软化趋势并不是绝对的。有些金属在温升过程中的某些区间,由于过剩相的析出或相变等原因,可能会使金属的塑性降低和变形抗力增加。如碳钢加热到 $200\sim 400^{\circ}\text{C}$ 之间时,因为时效作用(夹杂物以沉淀的形式在晶界滑移面上析出)使塑性降低,变形抗力增加,脆性增大,这个温度范围称为蓝脆区。而在 $800\sim 950^{\circ}\text{C}$ 范围内,又会出现热脆,使塑性降低,原因是铁与硫形成的化合物 FeS 几乎不溶于固体铁中,形成低熔点的共晶体($\text{Fe}+\text{FeS}+\text{FeO}$),如果处在晶粒边界的共晶体熔化,就会破坏晶粒间的结合。因此,选择变形温度时,碳钢应避免蓝脆区和热脆区。

在冲压工艺中,有时也采用加热冲裁或加热成型的方法来提高材料塑性和降低变形抗力,以增加变形程度和减小冲压力。有些工序(如差温拉深)中还采用局部冷却的方法,以增强变形区的变形抗力,提高坯料危险断面的强度,从而达到延缓破坏、增大变形程度的目的。

(4) 变形速度 变形速度是指单位时间内应变的变化量,但在冲压生产中不便控制和计量,故以压力机滑块的移动速度来近似反映金属的变形速度。

目前,常规冲压使用的压力机工作速度较低,对金属塑性变形的影响不大。而考虑速度因素,主要基于冲压件的尺寸和形状:对于小型件的冲压,一般可以不考虑速度因素,只需考虑设备的类型、标称压力和功率等;对于大型复杂件,由于冲压成形时坯料各部位的变形极不均匀,易于局部拉裂或起皱,为了便于控制金属的流动情况,宜采用低速成形(如采用液压机或低速压力机冲压)。另外,对于加热成形工序,为了使坯料中的危险断面能及时冷却强化,宜用低速;对于变形速度比较敏感的材料(如不锈钢、耐热合金、钛合金等),也宜低速成形,其加载速度一般控制在 0.25 m/s 以下。

(5) 尺寸因素 同一种材料,在其他条件相同的情况下,尺寸越大,塑性越差。这是因为材料尺寸越大,组织和化学成分越不一致,杂质分布越不均匀,应力分布也不均匀。例如厚板冲裁时,产生剪裂纹时凸模挤入板料的深度与板料厚度的比值(称为相对挤入深度)比薄板冲裁时小。

2. 金属塑性成形过程中的应力与应变

在冲压过程中,材料的塑性变形都是模具对材料施加的外力所引起的内力或内力直接作用的结果。一定的力的作用方式和大小都对应着一定的变形,所以为了研究和分析金属材料的变形性质和变形规律,控制变形的发展,就必须了解材料内各点的应力与应变状态以及它们之间的相互关系。

1) 应力与应变状态

(1) 点的应力状态

在外力的作用下,材料内各质点间就会产生相互作用的力,称为内力。单位面积上内力的大小称为应力。材料内某一点的应力大小与分布称为该点的应力状态。

为了分析点的应力状态,通常是通过该点周围截取一个微小的六面体(称为单元体),一般情况下,该单元体上存在大小和方向都不同的应力,设为 S_x 、 S_y 、 S_z ,如图 3-4(a)所示,其中每一个应力又可分解为平行坐标轴的三个分量,即一个正应力和两个切应力,如图 3-4(b)所示。由此可见,无论变形体的受力状态如何,为了确定物体任意点的应力状态,只需知道九个应力分量(三个正应力,六个切应力)即可。又由于所取单元体处于平衡状态,绕单元体各轴的力矩必定相等,因此其中三对切应力应互等,即

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}, \quad \tau_{zx} = \tau_{xz}$$

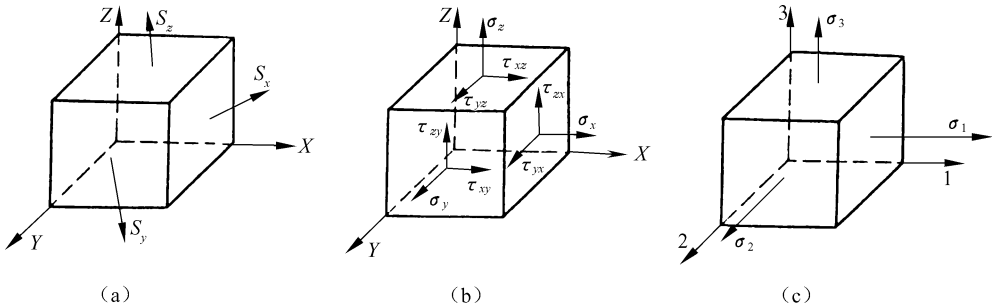


图 3-4 点的应力状态

(a), (b) 任意坐标系; (c) 主轴坐标系

于是,要充分确定变形体内任意点的应力状态,实际上只需知道六个应力分量,即三个正应力和三个切应力就够了。

必须指出,如果坐标系选取的方向不同,虽然该点的应力状态没有改变,但用来表示该点应力状态的各个应力分量就会与原来的数值不同。不过,这些属于不同坐标系的应力分量之间是可以换算的。

可以证明,对任何一种应力状态来说,总存在这样一组坐标系,使得单元体各表面上只有正应力,而没有切应力,如图 3-4(c)所示。这时的三个坐标轴称为主轴,三个坐标轴的方向称为主方向,三个正应力称为主应力,三个主应力的作用面称为主平面。主应力一般按其代数值大小依次用 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 表示,即 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$,带正号时为拉应力,带负号时为压应力。一个应力状态只有一组主应力,而主方向可通过对变形过程的分析近似确定或通过试验确定。用主应力来表示点的应力状态,可以大大简化分析、运算工作。

以主应力表示点的应力状态称为主应力状态,表示主应力个数及其符号的简图称为主应力图。可能出现的主应力图共有九种,其中四种三向主应力图(又称立体主应力图),三种双向主应力图(又称平面主应力图),两种单向主应力图(又称线性主应力图),如图 3-5 所示。

在一般情况下,点的应力状态为三向应力状态。但在大多数平板材料成形中,其厚度方向的应力往往较其他两个方向的应力小得多,因此可把厚度方向的应力忽略不计,近似看做平面应力状态。平面应力问题的分析计算比三向应力问题简单,这就为分析解决冲压成形问题提供了方便。

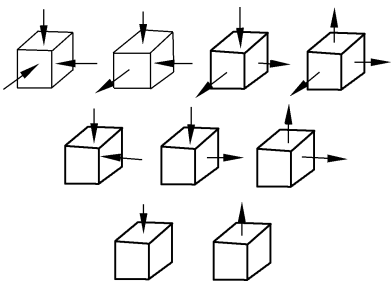


图 3-5 九种主应力图

我们把单元体上的三个主应力的平均值称为平均应力,用 σ_m 表示,则

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \tag{3-1}$$

任何一种应力状态都可以分解成两种应力状态:一种是大小均等于平均应力 σ_m 的三向等应力状态(又称球应力状态);另一种是以各向主应力与 σ_m 差值为应力值构成的偏应力状态,如图 3-6 所示。球应力状态不产生切应力,故不能改变物体的形状,只能使其体积发生微小变化;偏应力状态能产生切应力,可使物体形状发生改变,但不会引起物体体积的变化。显然,三向等压应力(亦称静水压力)状态不会产生塑性变形。

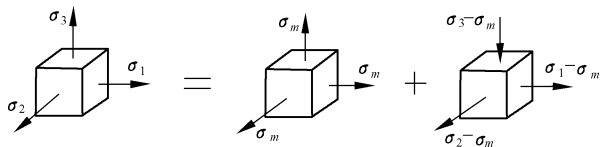


图 3-6 应力状态的分解

根据前述应力状态对金属塑性的影响情况,九种主应力图对金属塑性的影响程度可按图 3-7 所示的顺序排列,图中序号越小,金属的可塑性越好。

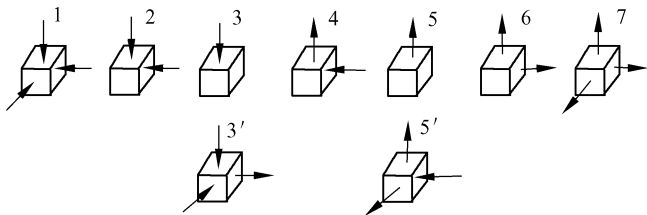


图 3-7 主应力状态对金属塑性影响的排列顺序

除了主平面上不存在切应力以外,单元体其他方向的截面上都有切应力,而且在与主平面成 45° 的截面上切应力达到最大值,称为主切应力。主切应力作用面称为主切应力面。主切应力及其作用面共有三组,如图 3-8 所示,主切应力面上的应力状态如图 3-9 所示。

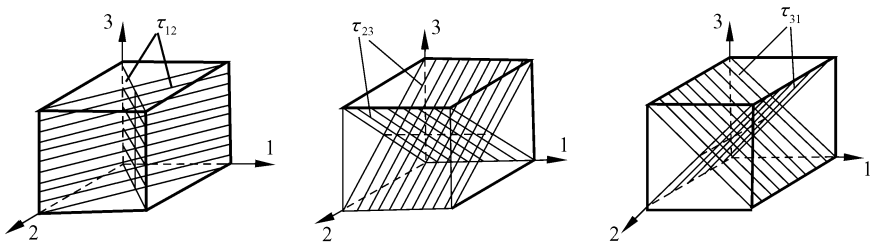


图 3-8 主切应力及主切应力面

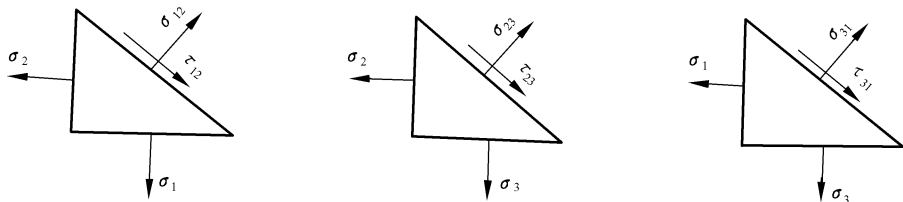


图 3-9 主切应力面上的应力状态

经过分析推导,主切应力面上的主切应力及正应力值分别为:

$$\tau_{12} = \pm (\sigma_1 - \sigma_2)/2, \quad \tau_{23} = \pm (\sigma_2 - \sigma_3)/2, \quad \tau_{31} = \pm (\sigma_3 - \sigma_1)/2 \quad (3-2)$$

$$\sigma_{12} = (\sigma_1 + \sigma_2)/2, \quad \sigma_{23} = (\sigma_2 + \sigma_3)/2, \quad \sigma_{31} = (\sigma_3 + \sigma_1)/2 \quad (3-3)$$

其中,绝对值最大的主切应力称为该点的最大切应力,用 τ_{\max} 表示,若 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, 则

$$\tau_{\max} = \pm (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad (3-4)$$

最大切应力与金属的塑性变形有着十分密切的关系。

(2) 点的应变状态

变形体内存在应力必伴随有应变,点的应变状态也是通过单元体的变形来表示的。与点的应力状态一样,当采用主轴坐标系时,单元体就只有三个主应变分量 ϵ_1 、 ϵ_2 和 ϵ_3 , 而没有切应变分量,如图 3-10 所示。一种应变状态只有一组主应变。

与应力状态一样,任何一种主应变状态也可分解成以平均主应变 ϵ_m [$\epsilon_m = (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)/3$] 为应变值的三向等应变状态和以各向主应变与 ϵ_m 的差值为应变值构成的偏应变状态,如图 3-11 所示。其中三向等应变状态使单元体体积发生微小的变化,偏应变状态使单元体形状发生变化。

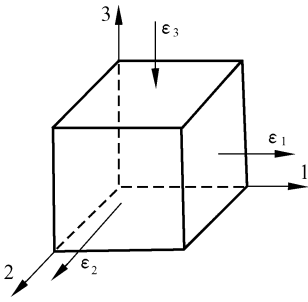


图 3-10 点的应变状态

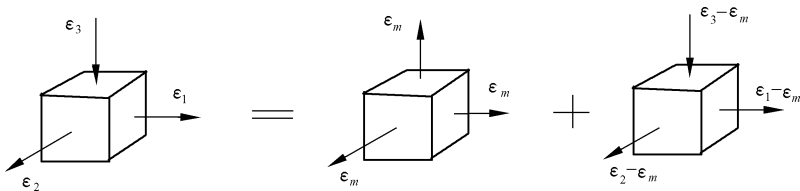


图 3-11 应变状态的分解

应变的大小可以通过物体变形前后尺寸的变化量来表示。如图 3-12 所示,设变形前的尺寸为 l_0 、 b_0 和 t_0 , 变形后的尺寸为 l 、 b 和 t , 则三个方向的主应变可分别用相对应变(亦称条件应变)和实际应变(亦称对数应变)表示如下:

相对应变:

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \\ \delta_2 &= \frac{b-b_0}{b_0} = \frac{\Delta b}{b_0} \\ \delta_3 &= \frac{t-t_0}{t_0} = \frac{\Delta t}{t_0} \end{aligned} \right\} \quad (3-5)$$

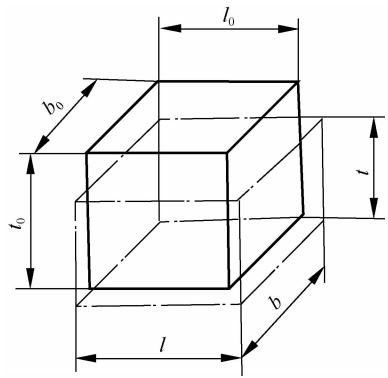


图 3-12 变形前后尺寸的变化

实际应变:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \\ \epsilon_2 &= \int_{b_0}^b \frac{db}{b} = \ln \frac{b}{b_0} \\ \epsilon_3 &= \int_{t_0}^t \frac{dt}{t} = \ln \frac{t}{t_0} \end{aligned} \right\} \quad (3-6)$$

其中,相对应变只考虑了物体变形前后尺寸的变化量,而实际应变考虑了物体的变形是一个逐渐积累的过程,它反映了物体变形的实际情况。 δ 或 ϵ 为正时表示伸长变形,为负时表示压缩变形。

实际应变与相对应变之间的关系为:

$$\epsilon = \ln(1 + \delta) \quad (3-7)$$

可见,只有当变形程度很小时, δ 才近似等于 ϵ ,变形程度越大, δ 或 ϵ 的差值也越大。一般把变形程度在 10% 以下的变形情况称为小变形问题,10% 以上为大变形问题。板料冲压成形一般属于大变形问题。

金属材料在塑性变形时,体积变化很小,可以忽略不计,则有 $l_0 b_0 t_0 = lbt$,即

$$\frac{lt}{l_0 b_0 t_0} = 1$$

等式两边取对数,可得

$$\ln \frac{l}{l_0} + \ln \frac{b}{b_0} + \ln \frac{t}{t_0} = 0$$

即

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \quad (3-8)$$

这就是塑性变形时的体积不变定律,它反映了三个主应变之间的数值关系。

根据体积不变定律,可以得出如下结论:

- ① 塑性变形时,物体只有形状和尺寸发生变化,而体积保持不变。
- ② 不论应变状态如何,其中必有一个主应变的符号与其他两个主应变的符号相反,这个主应变的绝对值最大,称为最大主应变。
- ③ 当已知两个主应变数值时,便可算出第三个主应变。
- ④ 任何一种物体的塑性变形方式只有三种,与此相应的主应变状态图也只有三种,如图 3-13 所示。

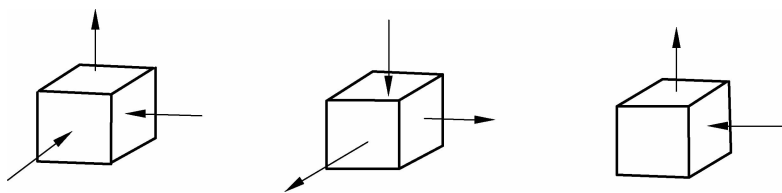


图 3-13 三种主应变图

2) 塑性条件(屈服条件)

决定受力物体内质点由弹性状态向塑性状态过渡的条件,称为塑性条件或屈服条件。金属由弹性变形过渡到塑性变形,主要取决于在一定变形条件(变形温度与变形速度)下金属的物理力学性质和所处的应力状态。一般来说,在材料性质和变形条件一定的情况下,塑性条件主要决定于物体的应力状态。

当物体内某点处于单向应力状态时,只要该向应力 σ_1 达到材料的屈服点 σ_s ,该点就开始屈服,由弹性状态进入塑性状态,即此时的塑性条件是 $\sigma_1 \geq \sigma_s$ 。但是对复杂应力状态,就不能仅仅根据一个应力分量来判断该点是否已经屈服,而要同时考虑其他应力分量的作用。只有当各个应力分量之间符合一定关系时,该点才开始屈服。

法国工程师屈雷斯加(H. Tresca)通过对金属挤压的研究,于1864年提出:在一定的变形条件下,当材料中的最大切应力达到某一定值时,材料就开始屈服。并通过单向拉压等简单的试验,该定值就是材料屈服点应力值 σ_s 的一半,即 $\sigma_s/2$ 。设 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$,则屈雷斯加屈服条件可表达为:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_s}{2}$$

或 $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$ (3-9)

屈雷斯加屈服条件又称最大切应力理论。该条件公式简单,在事先知道主应力大小的情况下使用很方便。但该条件显然忽略了中间主应力 σ_2 的影响,实际上在一般三向应力状态下, σ_2 对于材料的屈服也是有影响的。

德国力学家密席斯(Von Mises)于1913年在对屈雷斯加条件加以修正的基础上提出:在一定的变形条件下,无论变形物体所处的应力状态如何,只要其三个主应力的组合满足一定条件,材料便开始屈服。该条件为:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 \quad (3-10)$$

密席斯屈服条件又称常量形变能量理论。因密席斯条件考虑了中间主应力 σ_2 的影响,实践证明,对于大多数金属材料(特别是韧性材料)来说,应用密席斯屈服条件更符合实际情况。

密席斯屈服条件虽然在数学表达方法上比较完善,但在方程中同时包含了全部应力分量,实际运算比较繁琐。为了使用上的方便,可将密席斯屈服条件改写成如下简单形式:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta\sigma_s \quad (3-11)$$

式中, β 为反映中间主应力 σ_2 影响的系数,其范围为1~1.155,具体取值见表3-1。

表 3-1 β 值

中间应力	β	应力状态	应用举例
$\sigma_2 = \sigma_1$ 或 $\sigma_2 = \sigma_3$	1.0	单向应力叠加三向等应力	软凸模胀形、外缘翻边
$\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$	1.155	平面应变状态	宽板弯曲
σ_1 不属于上面两种情况	≈ 1.1	其他应力状态(如平面应力状态等)	缩口、拉深

由表3-1可知,在单向应力叠加三向等应力状态下, $\beta=1$,密席斯屈服条件与屈雷斯加屈服条件是一致的;在平面应变状态下,两个屈服条件相差最大,为15.5%。

3) 塑性变形时应力与应变的关系

物体弹性变形时,其变形可以恢复,变形过程是可逆的,与物体的加载过程无关,应力和应变之间的关系可以通过广义虎克定律来表示。但物体进入塑性变形以后,其应力与应变的关系就不同了。在单向受拉或受压时,应力与应变关系可用硬化曲线来表示,然而在受到双向或三向应力作用时,变形区的应力与应变关系相当复杂。经研究,当采用简单加载(加载过程中只加载不卸载,且应力分量之间按一定比例递增)时,塑性变形的每一瞬间,主应力与主应变之间存在下列关系:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\epsilon_2 - \epsilon_3} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\epsilon_3 - \epsilon_1} = C \quad (3-12)$$

式中, C 为非负数的比例常数。在一定的条件下, C 只与材料性质及变形程度有关,而与物体所处的应力状态无关,故 C 值可用单向拉伸试验求出。

式(3-12)也可表示为:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_m}{\epsilon_1} = \frac{\sigma_2 - \sigma_m}{\epsilon_2} = \frac{\sigma_3 - \sigma_m}{\epsilon_3} = C \quad (3-13)$$

上述物理方程又称为塑性变形时的全量理论,它是在简单加载条件下获得的,通常用于研究小变形问题。但对于冲压成形中非简单加载的大变形问题,只要变形过程中是加载,主轴方向变化不大,主轴次序基本不变,实践表明,应用全量理论也不会引起太大的误差。

全量理论是冲压成形中各种工艺参数计算的基础,而且利用全量理论还可以对有些变形过程中坯料的变形和应力的性质作出定性的分析和判断,例如:

(1) 由式(3-13)可知,判断某方向的主应变是伸长还是缩短,并不是看该方向是受拉应力还是受压应力,而是要看该方向应力值与平均应力 σ_m 的差值。差值为正时是拉应变,为负时是压应变。

(2) 若 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_m$, 由式(3-13)可知, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 0$, 这说明在三向等拉或等压的球应力状态下,坯料不产生任何塑性变形(但有微小的体积弹性变化)。

(3) 由式(3-12)可知,三个主应力分量和三个主应变分量代数数值的大小、次序互相对应,即若 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, 则有 $\epsilon_1 \geq \epsilon_2 \geq \epsilon_3$ 。

(4) 当坯料单向受拉时,即 $\sigma_1 > 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 时,因为 $\sigma_1 - \sigma_m = \sigma_1 - \sigma_1/3 > 0$, 由式(3-13)可知 $\epsilon_1 > 0, \epsilon_2 = \epsilon_3 = -\epsilon_1/2$ 。这说明在单向受拉时,拉应力作用方向为伸长变形,另外两个方向则为等量的压缩变形,且伸长变形为每一个压缩变形的2倍。如翻孔时,坯料孔边缘的变形就属于这种情况。同样,当坯料单向受压时,压应力作用方向上为压缩变形,另外两方向为等量的伸长变形,且压缩变形为每一个伸长变形的2倍。如缩口、拉深时,坯料边缘的变形即属于此种情况。

(5) 坯料受双向等拉的平面应力作用,即 $\sigma_1 = \sigma_2 > 0, \sigma_3 = 0$ 时,由式(3-13)可知, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = -\epsilon_3/2$ 。这说明当坯料受双向等拉的平面应力作用时,在两个拉应力作用的方向为等量的伸长变形,而在另一个没有主应力作用的方向为压缩变形,其值为每个伸长变形的2倍。平板坯料胀形时的中心部位就属于这种情况。

(6) 由式(3-13)可知,当 $\sigma_2 - \sigma_m = 0$ 时,必有 $\epsilon_2 = 0$, 根据体积不变定律,则有 $\epsilon_1 = -\epsilon_3$ 。这说明在主应力等于平均应力的方向上不产生塑性变形,而另外两个方向上的塑性变形数值相等、方向相反。这种变形称为平面变形,且平面变形时必有 $\sigma_2 = \sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, 即 $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 。如宽板弯曲时,板料宽度方向变形为0,该方向上的主应力即为其余两个方向主应力之和的一半。

(7) 当坯料三向受拉,且 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ 时,在最大拉应力 σ_1 方向上的变形一定是伸长变形,在最小拉应力 σ_3 方向上的变形一定是压缩变形。同样,当坯料三向受压,且 $0 > \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 时,在最小压应力 σ_3 (绝对值最大)方向上的变形一定是压缩变形,而在最大压应力 σ_1 (绝对值最小)方向上的变形一定是伸长变形。

3. 弯曲变形过程

在认识了塑性变形的基本知识以后,现在我们来观察和了解弯曲变形过程。

图3-14所示为板料在V形模内的弯曲变形过程。弯曲开始后,首先经过弹性弯曲,然后进入塑性弯曲。随着板料在凸模作用下,产生弹性变形,如图3-14(a);随着凸模下压,板料与

凹模工作表面逐渐靠紧,弯曲半径由 R_0 变为 R_1 ,弯曲力臂则由 l_0 变为 l_1 ,如图 3-14(b);凸模继续下压,板料弯曲区逐渐减小,直到与凸模三点接触,此时曲率半径已由 R_1 变为 R_2 ,弯曲力臂也由 l_1 变为 l_2 ,如图 3-14(c);此后,板料直边部分则向与以前相反的方向变形,直至圆角、直边与模具全部贴合,得到所需要的弯曲件。如图 3-14(d),此为弯曲过程的塑性变形阶段。以上整个过程均为自由弯曲。而在行程终了时,凸、凹模对板料进行镦压,致使冲床和模具产生弹性变形,弯曲力瞬间急剧增加,使制件形状获得校正,这就是校正弯曲。

由 V 形件的弯曲过程可以看出,弯曲成形的过程是从弹性弯曲到塑性弯曲的过程,弯曲成形的效果表现为弯曲变形区弯曲半径和角度的变化。

4. 弯曲变形特点

为了分析弯曲变形特点,可采用网格法,如图 3-15 所示。通过观察板料弯曲变形后位于弯曲件侧壁的坐标网格的变化情况,可以看出以下几点。

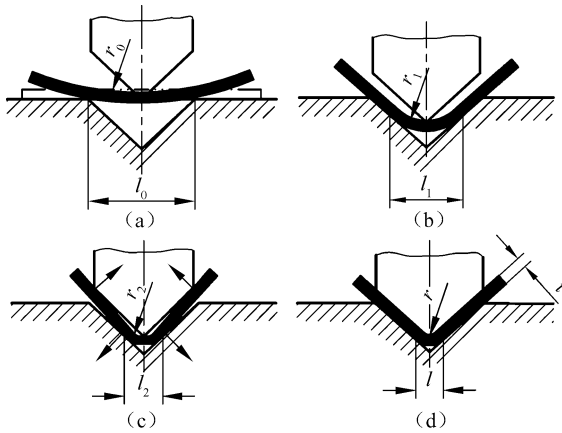


图 3-14 弯曲变形过程

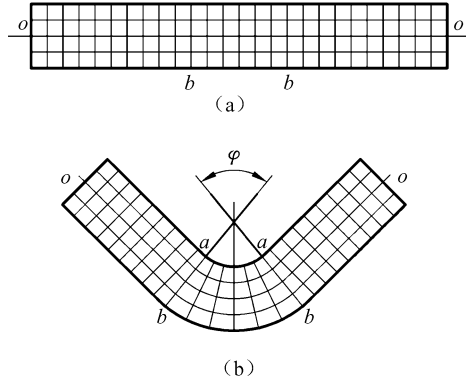


图 3-15 弯曲变形分析

(1) 只有在弯曲中心角 φ 的范围内,网格才发生显著的变化,而在板料平直部分,网格仍保持原来状态。这表明弯曲变形区域主要是在制件的圆角部分。

(2) 在变形区内,板料的外层纵向纤维(靠近凹模一边)受拉而伸长(\widehat{bb} 弧 $>$ \overline{bb}),内层纵向纤维(靠近凸模一边)受压而缩短(\widehat{aa} $<$ \overline{aa})。由内外表面至板料中心,其伸长和缩短的程度逐渐变小,其间有一层金属的长度不变,这层金属称为变形中性层。

(3) 在弯曲变形区内板料厚度略有变薄。

(4) 从弯曲件变形区域的横断面看,变形有两种情况:

① 对于窄板($B < 3t$, B 为板料宽度, t 为板件厚度),弯曲内侧材料受到切向压缩后,便向宽度方向流动,使板宽增大;而在弯曲区外侧的材料受到切向拉延后,则宽度变窄,结果使断面略呈扇形。

② 对于宽板($B > 3t$),由于弯曲时宽度方向变形阻力大,材料不易流动,因此弯曲后在宽度方向无明显变化,断面基本保持矩形。

5. 弯曲变形时的应力与应变

如前所述,板料相对宽度 B/t 直接影响板料沿宽度方向的应变,进而影响其应力,因此随着

B/t , 的不同, 具有不同的应力-应变状态。窄板和宽板塑性弯曲时的应力-应变状态, 如图 3-16 所示。

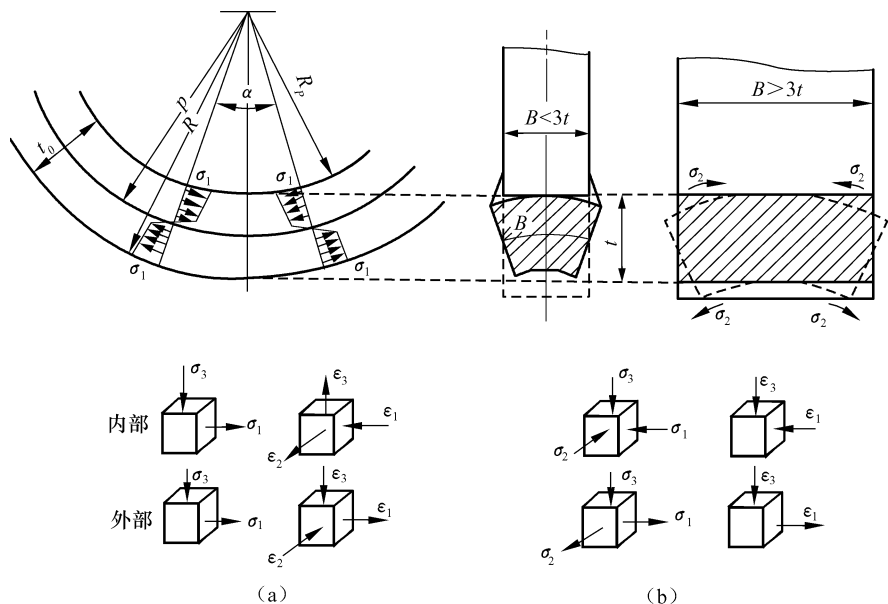


图 3-16 弯曲变形时的应力与应变

(a) 窄料($B < 3t$); (b) 宽料($B > 3t$)

1) 窄板

弯曲时, 在切线方向上的应力应变最大, 其弯曲处内侧应力为压应力 $-\sigma_1$ 、应变为压应变 $-\epsilon_1$, 外侧应力为拉应力 $+\sigma_1$, 应变为拉应变 $+\epsilon_1$; 在宽度方向上, 弯曲处内侧应变为拉应变 $+\epsilon_1$, 外侧应变为压应变 $-\epsilon_2$ 。由于材料在宽度方向上能自由变形, 所以弯曲处内、外侧的应力都接近于零($\sigma_2 \approx 0$); 在厚度方向上, 由于表层材料对里层材料产生挤压, 因此, 弯曲处内、外侧的应力均为压应力 $-\sigma_3$, 其应变根据体积不变的原则, 即有:

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$$

如果知道一个最大主应变, 则另外两个主应变的符号必然与最大主应变相反, 或者其中一个主应变为零。

在图 3-16(a)中, 弯曲内侧的切向压缩应变是最大主应变 $-\epsilon_1$, 则厚度方向的应变为拉应变 $+\epsilon_3$ 。同理, 弯曲外侧的切向拉伸应变是最大主应变 $+\epsilon_1$, 而厚度方向的应变则为压应变 $-\epsilon_3$ 。

2) 宽板

宽板弯曲时, 在切向和厚度方向的应力应变与窄板相同, 只有在宽度方向上, 由于宽度大, 沿宽度方向变形困难, 因而宽度基本不变, 弯曲处内、外侧的应变均为零($\epsilon_2 = 0$), 在弯曲处内侧拉伸受阻, 应力为压应力 $-\sigma_2$, 在外侧压缩受阻, 应力为拉应力 $+\sigma_2$, 如图 3-16(b)。

综上所述, 窄板在弯曲时为平面(两向)应力状态和立体(三向)应变状态, 宽板则为立体应力状态和平面应变状态。

3.1.2 弯曲件的质量问题及控制

弯曲是一种成形工序, 同所有的冷冲压成形工序一样, 在成形过程中容易产生各种质量问

题,弯曲最常见的质量问题是弯裂、回弹、偏移、翘曲与剖面畸变。这些质量问题与弯曲件材料的冲压成形性能存在很大的关系。

1. 材料的冲压成形性能

材料对各种冲压成形方法的适应能力称为材料的冲压成形性能。材料的冲压成形性能好,就是指其便于冲压成形,单个冲压工序的极限变形程度和总的极限变形程度大,生产率高,容易得到高质量的冲压件,且模具损耗低,不易出废品等。由此可见,冲压成形性能是一个综合性的概念,它涉及的因素很多,但就其主要内容来看,有两个方面:一是成形极限,二是成形质量。

1) 成形极限

成形极限是指材料在冲压成形过程中能达到的最大变形程度。对于不同的冲压工序,成形极限是采用不同的极限变形系数来表示的,如弯曲时为最小相对弯曲半径,拉深时为极限拉深系数,翻孔时为极限翻孔系数等。由于冲压用材料主要是板料,冲压成形大多都是在板厚方向上的应力值近似为零的平面应力状态下进行的,因此不难分析:在变形坯料的内部,凡是受到过大拉应力作用的区域,就会使坯料局部严重变薄甚至拉裂;凡是受到过大压应力作用的区域,若压应力超过了临界应力就会使坯料丧失稳定而起皱。因此,为了提高成形极限,从材料方面看,必须提高材料的抗拉和抗压的能力;从冲压工艺参数的角度来看,必须严格限制坯料的极限变形系数。

当作用于坯料变形区的拉应力为绝对值最大的应力时,在这个方向上的变形一定是伸长变形,故称这种冲压变形为伸长类变形,如胀形、扩口、圆孔翻孔等;当作用于坯料变形区的压应力的绝对值最大时,在这个方向上的变形一定是压缩变形,故称这种冲压变形为压缩类变形,如拉深、缩口等。在伸长类变形中,变形区的拉应力占主导地位,坯料厚度变薄,表面积增大,有产生破裂的可能性;在压缩类变形中,变形区的压应力占主导地位,坯料厚度增厚,表面积减小,有产生失稳起皱的可能性。由于这两类变形的变形性质和出现的问题完全不同,因而影响成形极限的因素和提高极限变形参数的方法就不同。伸长类变形的极限变形参数主要决定于材料的塑性,压缩类变形的极限变形参数一般受传力区承载能力的限制,有时则受变形区或传力区失稳起皱的限制。所以提高伸长类变形的极限变形参数的方法有:提高材料塑性;减少变形的不均匀性;消除变形区的局部硬化或其他引起应力集中而可能导致破坏的各种因素,如去毛刺或坯料退火处理等。提高压缩类变形的极限变形系数的方法有:提高传力区的承载能力,降低变形区的变形抗力或摩擦阻力;采取压料等措施防止变形区失稳起皱等。

2) 成形质量

成形质量是指材料经冲压成形以后所得到的冲压件能够达到的质量指标,包括尺寸精度、厚度变化、表面质量及物理力学性能等。影响冲压件质量的因素很多,不同冲压工序的情况又各不相同,这里只对一些共性问题作简要说明。

材料在塑性变形的同时总伴随着弹性变形,当冲压结束载荷卸除以后,由于材料的弹性回复,造成冲压件的形状与尺寸偏离模具工作部分的形状与尺寸,从而影响了冲压件的尺寸和形状精度。因此,为了提高冲压件的尺寸精度,必须掌握回弹规律,控制回弹量。

材料经过冲压成形以后,一般厚度都会发生变化,有的变厚,有的减薄。厚度变薄后直接影响冲压件的强度和使用,因此对强度有要求时,往往要限制其最大变薄量。

材料经过塑性变形以后,除产生加工硬化现象外,还由于变形不均匀,材料内部将产生残余应力,从而引起冲压件尺寸和形状的变化,严重时还会引起冲压件的自行开裂。消除硬化及残余应力的方法是冲压后及时安排热处理退火工序。

原材料的表面状态、晶粒大小、冲压时材料的黏模情况及模具对材料表面的擦伤等,都将影响冲压件表面质量。如原材料表面存在凹坑、裂纹、分层及锈斑或氧化皮等附着物时,将直接在冲压件表面上形成相应缺陷;晶粒粗大的钢板拉深时会在拉深件表面产生所谓的“橘子皮”;易于黏模的材料会擦伤冲压件并降低模具寿命。此外,模具间隙不均匀、模具表面粗糙等也会擦伤冲压件表面。

2. 板料的冲压成形性能指标

板料的冲压成形性能是通过试验来确定的。板料冲压成形性能的试验方法很多,但概括起来可分为直接试验和间接试验两类。在直接试验中,板料的应力状态和变形情况与实际冲压时基本相同,试验所得结果比较准确。而在间接试验中,板料的受力情况和变形特点都与实际冲压时有一定的差别,所得结果只能在分析的基础上间接地反映板料的冲压成形性能。

间接试验有拉伸试验、剪切试验、硬度试验和金相试验等。其中拉伸试验简单易行,不需专用板料试验设备,而且所得的结果能从不同角度反映板料的冲压性能,所以它是一种很重要的试验方法。

通过拉伸试验,可以测得板料的强度、刚度、塑性、各向异性等力学性能指标。根据这些性能指标,即可定性估计板料的冲压成形性能,现简述如下:

(1) 强度指标(屈服点 σ_s 、抗拉强度 σ_b 或缩颈点应力 σ_j) 强度指标对冲压成形性能的影响通常用屈服点与抗拉强度的比值 σ_s/σ_b (称为屈强比)来表示。一般屈强比愈小,则 σ_s 与 σ_b 之间的差值愈大,表示材料允许的塑性变形区间愈大,成形过程的稳定性愈好,破裂的危险性就愈小,因而有利于提高极限变形程度,减小工序次数。因此, σ_s/σ_b 愈小,材料的冲压成形性能愈好。

(2) 刚度指标(弹性模量 E 、硬化指数 n) 弹性模量 E 愈大或屈服点与弹性模量的比值 σ_s/E (称为屈弹比)愈小,在成形过程中抗压失稳的能力愈强,卸载后的回弹量小,有利于提高冲压件的质量。硬化指数 n 可根据拉伸试验结果求得。 n 值大的材料,硬化效应就大,这对于伸长类变形来说是有利的。因为 n 值愈大,在变形过程中材料局部变形程度的增加会使该处变形抗力增大,这样就可以补偿该处因截面积减小而引起的承载能力的减弱,制止了局部集中变形的进一步发展,具有扩展变形区、使变形均匀化和增大极限变形程度的作用。

(3) 塑性指标(均匀伸长率 δ_j 或细颈点应变 ϵ_j 、断后伸长率 δ 或断裂收缩率 ψ) 均匀伸长率 δ_j 是在拉伸试验中开始产生局部集中变形(即刚出现缩颈时)的伸长率(即相对应变),它表示板料产生均匀变形或稳定变形的能力。一般情况下,冲压成形都在板料的均匀变形范围内进行,故 δ_j 对冲压性能有较为直接的意义。断后伸长率 δ 是在拉伸试验中试样拉断时的伸长率。通常 δ_j 和 δ 愈大,材料允许的塑性变形程度也愈大。

(4) 各向异性指标(板厚方向性系数 r 、板平面方向性系数 Δr) 板厚方向系数 r 是指板料试样拉伸时,宽度方向与厚度方向的应变之比,即

$$r = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_t} = \frac{\ln(b/b_0)}{\ln(t/t_0)} \quad (3-14)$$

式中, b_0 、 b 、 t_0 、 t 分别为变形前后试件的宽度与厚度, 一般取伸长率为 20% 时试样测量的结果。

r 值的大小反映了在相同受力条件下板料平面方向与厚度方向的变形性能差异, r 值越大, 说明板平面方向上越容易变形, 而厚度方向上越难变形, 这对拉深成形是有利的。如在复杂形状的曲面零件拉深成形时, 若 r 值大, 板料中部在拉应力作用下, 厚度方向变形较困难, 则变薄量小, 而在板平面与拉应力相垂直的方向上的压缩变形比较容易, 则板料中部起皱的趋向性降低, 因而有利于拉深的顺利进行和冲压件质量的提高; 同样, 在用 r 值大的板料进行筒形件拉深时, 凸缘切向压缩变形容易且不易起皱, 筒壁变薄量小且不易拉裂, 因而可增大拉深极限变形程度。

由于板料经轧制后晶粒沿轧制方向被拉长, 杂质和偏析物也会定向分布, 形成纤维组织, 使得平行于纤维方向和垂直于纤维方向材料的力学性能不同, 因此在板平面上存在各向异性, 其程度一般用板厚方向性系数在几个特殊方向上的平均差值 Δr (称为板平面方向性系数) 来表示, 即

$$\Delta r = (r_0 + r_{90} - 2r_{45})/2 \quad (3-15)$$

式中, r_0 、 r_{90} 、 r_{45} 分别为板料的纵向(轧制方向)、横向及 45° 方向上的板厚方向性系数。

Δr 值越大, 则方向性越明显, 对冲压成形性能的影响也越大。例如弯曲, 当弯曲件的折弯线与板料纤维方向垂直时, 允许的极限变形程度就大, 而当折弯线平行于纤维方向时, 允许的极限变形程度就小, 且方向性越明显, 减小量就越大。又如筒形件拉深时, 由于板平面方向性使拉深件出现口部不齐的“突耳”现象, 方向性越明显, 突耳的高度越大。由此可见, 生产中应尽量设法降低板料的 Δr 值。

由于存在板平面方向性, 实际应用中板厚方向性系数一般也采用加权平均值 \bar{r} 来表示, 即

$$\bar{r} = (r_0 + r_{90} + 2r_{45})/4 \quad (3-16)$$

式中, r_0 、 r_{90} 、 r_{45} 的含义与式(3-15)相同。

3. 弯曲件的问题及控制

1) 弯裂及其控制

弯曲时板料的外侧受拉伸, 当外侧的拉伸应力超过材料的抗拉强度以后, 在板料的外侧将产生裂纹, 此种现象称为弯裂。实践证明, 板料是否会产生弯裂, 在材料性质一定的情况下, 主要与弯曲半径 r 与板料厚度 t 的比值 r/t (称为相对弯曲半径) 有关, r/t 越小, 其变形程度就越大, 越容易产生裂纹。

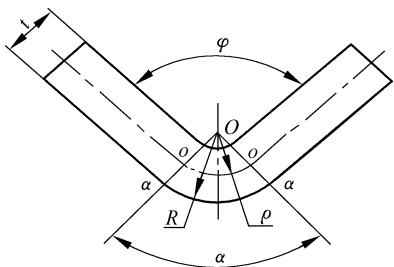


图 3-17 弯曲变形

(1) 最小相对弯曲半径

如图 3-17 所示, 设中性层半径为 ρ , 弯曲中心角为 α , 则最外层金属(半径为 R)的伸长率 $\delta_{\text{外}}$ 为

$$\delta_{\text{外}} = \frac{\widehat{aa} - \widehat{oo}}{\widehat{oo}} = \frac{(R - \rho)\alpha}{\rho\alpha} = \frac{R - \rho}{\rho}$$

设中性层位置在半径为 $\rho = r + t/2$ 处, 且弯曲后厚度保持不变, 则 $R = r + t$, 故有:

$$\delta_{\text{外}} = \frac{(r + t) - (r + t/2)}{r + t/2} = \frac{t/2}{r + t/2} = \frac{1}{2r/t + 1} \quad (3-17)$$

如将 $\delta_{\text{外}}$ 以材料断后伸长率 δ 代入,则 r/t 转化为 r_{min}/t ,且有

$$r_{\text{min}}/t = \frac{1-\delta}{2\delta} \quad (3-18)$$

从式(3-17)及式(3-18)可以看出,相对弯曲半径 r/t 越小,外层材料的伸长率就越大,即板料切向变形程度越大,因此,生产中常用 r/t 来表示板料的弯曲变形程度。当外层材料的伸长率达到材料断后伸长率后,就会导致弯裂,故称 r_{min}/t 为板料不产生弯裂时的最小相对弯曲半径。

影响最小相对弯曲半径的因素很多,主要有以下几种。

① 材料的塑性及热处理状态 材料的塑性越好,其断后伸长率 δ 越大,由式(3-18)可以看出 r_{min}/t 就越小。经退火处理后的坯料塑性较好, r_{min}/t 小些。经冷作硬化的坯料塑性降低, r_{min}/t 就大些。

② 板料的表面和侧面质量 板料的表面及侧面(剪切断面)的质量差时,容易造成应力集中并降低塑性变形的稳定性,使材料过早地破坏。对于冲裁或剪裁的坯料,若未经退火,由于切断面存在冷变形硬化层,也会使材料塑性降低。在这些情况下,均应选用较大的相对弯曲半径。

③ 弯曲方向 板料经轧制以后产生纤维组织,使板料性能呈现明显的方向性。一般顺着纤维方向的力学性能较好,不易拉裂。因此,当弯曲线与纤维方向垂直时[如图 3-18(a)], r_{min}/t 可取较小值;当弯曲线与纤维方向平行时[如图 3-18(b)], r_{min}/t 则应取较大值。当弯曲件有两个互相垂直的弯曲线时,排样时应使两个弯曲线与板料的纤维方向成 45° 夹角,如图 3-18(c)所示。

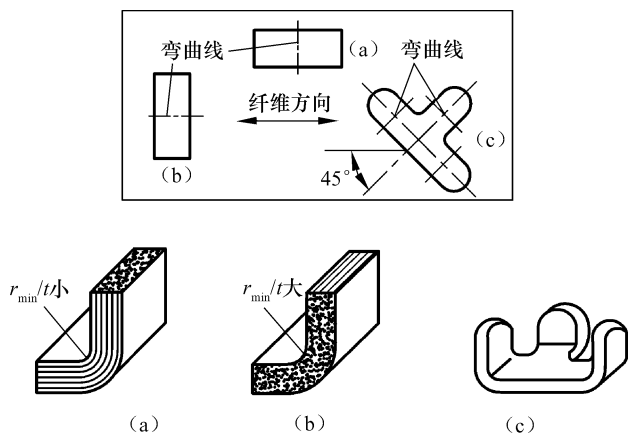


图 3-18 板料纤维方向对最小相对弯曲半径的影响

④ 弯曲中心角 α 理论上弯曲变形区外表面的变形程度只与 r_{min}/t 有关,而与弯曲中心角无关,但实际上由于接近圆角的直边部分也产生一定的变形,这就相当于扩大了弯曲变形区的范围,分散了集中在圆角部分的弯曲应变,从而可以减缓弯曲时弯裂的危险。弯曲中心角愈小,减缓作用愈明显,因而 r_{min}/t 可以越小。

由于上述各种因素对 r_{min}/t 的综合影响十分复杂,所以 r_{min}/t 的数值一般用试验方法确定。各种金属材料在不同状态下的最小相对弯曲半径的数值参见表 3-2。

表 3-2 最小相对弯曲半径 r_{\min}/t

材 料	退火状态		冷作硬化状态	
	弯曲线方向			
	垂直纤维方向	平行纤维方向	垂直纤维方向	平行纤维方向
08、10、Q195、Q215	0.1	0.4	0.4	0.8
15、20、Q235	0.1	0.5	0.5	1.0
25、30、Q255	0.2	0.6	0.6	1.2
35、40、Q275	0.3	0.8	0.8	1.5
45、50	0.5	1.0	1.0	1.7
55、60	0.7	1.3	1.3	2.0
铝	0.1	0.35	0.5	1.0
纯铜	0.1	0.35	1.0	2.0
软黄铜	0.1	0.35	0.35	0.8
半硬黄铜	0.1	0.35	0.5	1.2
紫铜	0.1	0.35	1.0	2.0
磷铜	—	—	1.0	3.0
1Cr18Ni9Ti	1.0	2.0	3.0	4.0

注: 1. 当弯曲线与纤维方向不垂直也不平行时, 可取垂直和平行方向两者的中间值。
2. 冲裁或剪裁后的板料若未作退火处理, 则应作为硬化的金属选用。
3. 弯曲时应使板料有毛刺的一边处于弯角的内侧。

(2) 控制弯裂的措施

为了控制或防止弯裂, 一般情况下应采用大于最小相对弯曲半径的数值。当零件的相对弯曲半径小于表 3-2 所列数值时, 可采取以下措施。

① 经冷变形硬化的材料, 可采用热处理的方法恢复其塑性。对于剪切断面的硬化层, 还可以采取先去除然后再进行弯曲的方法。

② 去除坯料剪切面的毛刺, 采用整修、挤光、滚光等方法降低剪切面的表面粗糙度值。

③ 弯曲时将切断面上的毛面一侧处于弯曲受压的内缘(即朝向弯曲凸模)。

④ 对于低塑性材料或厚料, 可采用加热弯曲。

⑤ 采取两次弯曲的工艺方法, 即第一次弯曲采用较大的相对弯曲半径, 中间退火后再按零件要求的相对弯曲半径进行弯曲。这样就使变形区域扩大, 每次弯曲的变形程度减小, 从而减小了外层材料的伸长率。

⑥ 对于较厚板料的弯曲, 如果结构允许, 可采取先在弯角内侧开出工艺槽后再进行弯曲的工艺, 如图 3-19(a)、(b)所示。对于薄料, 可以在弯角处压出工艺凸肩, 如图 3-19(c)所示。

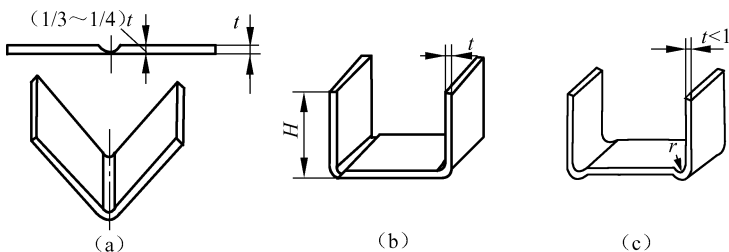


图 3-19 在弯角内侧开出工艺槽或压出

2) 回弹及其控制

在外载荷作用下,材料产生塑性变形的同时,伴随着弹性变形。当外载荷去掉后,弹性变形恢复,致使弯曲件的形状和尺寸都发生变化,这种现象称为回弹,如图 3-20 所示。通常回弹是指制件弯曲角和半径与模具相应的几何参数不一致的现象。大于模具相应几何参数的叫正回弹,小于模具相应几何参数的叫负回弹。在所有冲压工序中,回弹是一个普遍现象,但在弯曲工序中,回弹是影响弯曲件质量的主要因素。

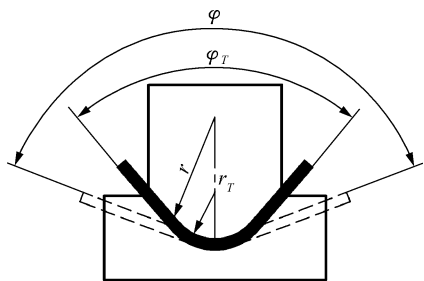


图 3-20 弯曲回弹

(1) 影响回弹的因素

① 材料的机械性能 回弹的大小与材料的屈服强度 σ_s 成正比,与弹性模数 E 成反比,即 σ_s/E 越大,则回弹越大。在材料性能不稳定时,回弹值也不稳定。

② 工件的相对弯曲半径 r/t 表示弯曲带内材料的变形程度,当其他条件相同时,回弹角随 r/t ,值的增大而增大。因此,可按 r/t 值来确定回弹角的大小,见表 3-3。

表 3-3 单角自由弯曲 90°时的平均回弹角

材 料	r/t	材料厚度 t/mm		
		<0.8	$0.8\sim 2$	>2
软钢 $\sigma_b=350\text{ MPa}$	<1	4°	2°	0°
黄铜 $\sigma_b=350\text{ MPa}$	$1\sim 5$	5°	3°	1°
铝和锌	>5	6°	4°	2°
中硬钢 $\sigma_b=400\sim 500\text{ MPa}$	<1	5°	2°	0°
硬黄铜 $\sigma_b=350\sim 400\text{ MPa}$	$1\sim 5$	6°	3°	1°
硬黄铜	>5	8°	5°	3°
硬钢 $\sigma_b=350\text{ MPa}$	<1	7°	4°	2°
	$1\sim 5$	9°	5°	3°
	>5	12°	7°	6°
硬铝 LF12	<2	2°	3°	$4^\circ 30'$
	$2\sim 5$	4°	6°	$8^\circ 30'$
	>5	$6^\circ 30'$	10°	14°

③ 弯曲件的形状 一般弯曲 U 形件时比 V 形件的回弹角小。

④ 模具间隙 在弯曲 U 形件时,凸、凹模之间的间隙对回弹有直接影响。间隙减小,由于模具对板料产生挤薄作用,可使回弹减小。反之,间隙越大,回弹越大。

⑤ 校正程度 在弯曲终了时进行校正,可增加圆角处的塑性变形程度,从而可减少回弹。校正程度决定于校正力的大小。而校正力的大小是靠调整冲床滑块位置来实现的。校正程度越大,则回弹角越小。

(2) 回弹值的确定

如上所述,影响回弹的因素很多,而且各因素又互相影响,用理论计算非常复杂,且不准确。故在实际生产中,往往是根据经验来初定回弹角的大小,然后在试模时进行修正。

① 当 $r/t < 5$ 时,弯曲半径的变化不大,故只考虑角度的回弹,当弯曲角度不为 90° 时,回弹角应做如下修正:

$$\Delta\alpha_x = \frac{\alpha}{90} \Delta\alpha_{90} \tag{3-19}$$

式中 $\Delta\alpha_x$ ——弯曲角为 x 的回弹角；
 $\Delta\alpha_{90}$ ——弯曲角为 90° 的回弹角；
 α ——制件的弯曲角。

② 当 $r/t > 10$ 时,由于弯曲半径较大,回弹量较大,故弯曲圆角半径及弯曲角均有较大变化。有关资料表明,如图 3-20 所示,凸模的圆角半径及角度可按下式计算:

$$r_T = \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{3\sigma_s}{Et}} \quad (3-20)$$

$$\alpha_T = \alpha \frac{r}{r_T} \quad (3-21)$$

式中 r_T ——凸模圆角半径(mm);
 r ——弯曲件圆角半径(mm);
 α_T ——凸模圆弧中心角(度);
 α ——弯曲件弯曲中心角(度);
 σ_s ——材料屈服强度(MPa);
 E ——材料弹性模数(MPa);
 t ——材料厚度(mm)。

③ 校正弯曲时的回弹值 校正弯曲时也不需考虑弯曲半径的回弹,只考虑弯曲角的回弹值。弯曲角的回弹值可按表 3-4 中的经验公式计算。

表 3-4 校正弯曲时的回弹值 $\Delta\alpha$

材 料	弯曲角			
	30°	60°	90°	120°
08、10、Q195	$\Delta\alpha=0.75r/t-0.39$	$\Delta\alpha=0.58r/t-0.80$	$\Delta\alpha=0.43r/t-0.61$	$\Delta\alpha=0.36r/t-1.26$
15、20、Q235	$\Delta\alpha=0.69r/t-0.23$	$\Delta\alpha=0.64r/t-0.65$	$\Delta\alpha=0.434r/t-0.36$	$\Delta\alpha=0.37r/t-0.58$
25、30、Q255	$\Delta\alpha=1.59r/t-1.03$	$\Delta\alpha=0.95r/t-0.94$	$\Delta\alpha=0.78r/t-0.79$	$\Delta\alpha=0.46r/t-1.36$
35、Q275	$\Delta\alpha=1.51r/t-1.48$	$\Delta\alpha=0.84r/t-0.76$	$\Delta\alpha=0.79r/t-1.62$	$\Delta\alpha=0.51r/t-1.71$

(3) 控制回弹的措施

在实际生产中,由于材料的力学性能和厚度的变动等,要完全消除弯曲件的回弹是不可能的,但可以采取一些措施来控制或减小回弹所引起的误差,以提高弯曲件的精度。控制弯曲件回弹的措施有如下几种。

① 改进弯曲件的设计

尽量避免选用过大的相对弯曲半径 r/t 。如有可能,在弯曲变形区压出加强筋或成形边翼,以提高弯曲件的刚度,抑制回弹,如图 3-21 所示。

采用 σ_s/E 小、力学性能稳定和板料厚度波动小的材料。如用软钢来代替硬铝、铜合金等,不仅回弹小,而且成本低,易于弯曲。

② 采取合适的弯曲工艺

用校正弯曲代替自由弯曲。

对经冷作硬化后的材料在弯曲前进行退火处理,弯曲后再用热处理方法恢复材料性能。对回弹较大的材料,必要时可采用加热弯曲。

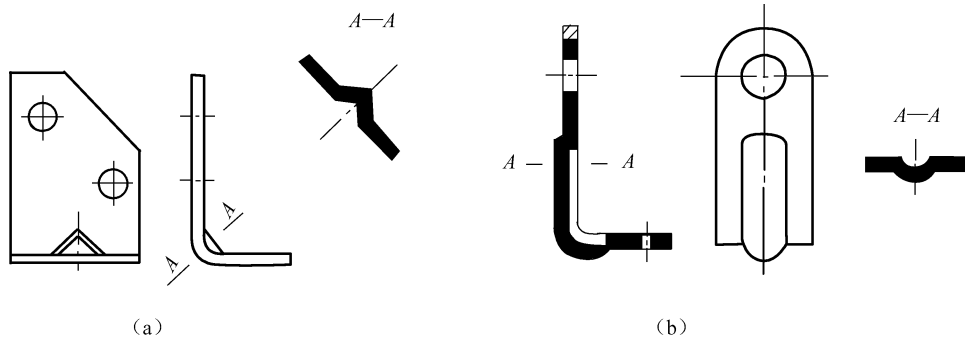


图 3-21 加强筋减小回弹

采用拉弯工艺方法。拉弯工艺如图 3-22 所示，在弯曲过程中对板料施加一定的拉力，使弯曲件变形区的整个断面都处于同向拉应力，卸载后变形区的内、外区回弹方向一致，从而可以大大减小弯曲件的回弹。这种方法对于弯曲 r/t 很大的弯曲件特别有利。

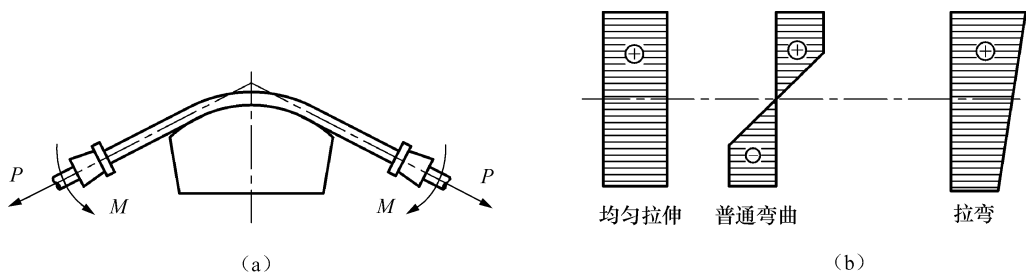


图 3-22 拉弯工艺

(a) 拉弯工艺方法；(b) 拉弯时断面内应力分布情况

③ 合理设计弯曲模结构

在凸模上减去回弹角[如图 3-23(a)、图 3-23(b)]，使弯曲件弯曲后其回弹得到补偿。对 U 形件，还可将凸、凹模底部设计成弧形[如图 3-23(c)]，弯曲后利用底部向上的回弹来补偿两直边向外的回弹。

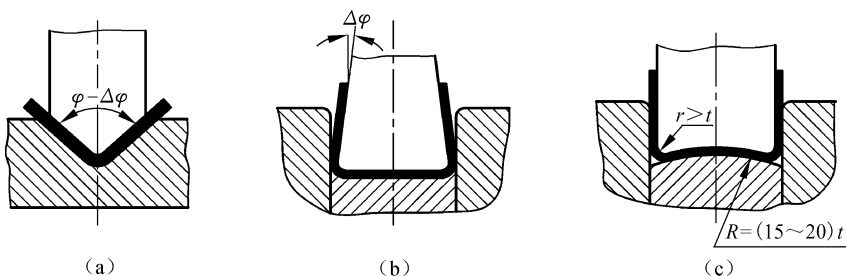


图 3-23 补偿回弹

当弯曲件材料厚度大于 0.8 mm，且塑性较好时，可将凸模设计成图 3-24 所示的局部突起形状，使凸模作用力集中在弯曲变形区，以加大变形区的变形程度，从而减小回弹。

对于一般较软的材料[如 Q215、Q235、10、20、H62(M)等]，可增加压力[如图 3-25(a)]或减小凸、凹模之间的间隙[如图 3-25(b)]，以增加拉应变，减小回弹。

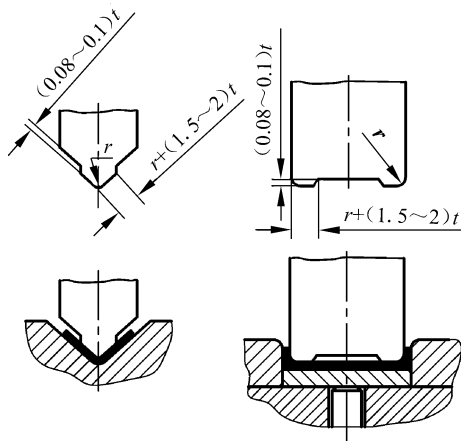


图 3-24 凸模作用力集中减小回弹

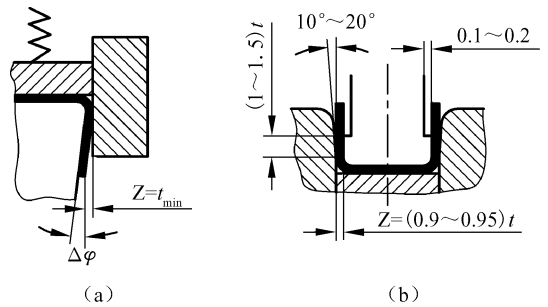


图 3-25 增大拉应变减小回弹

在弯曲件直边的端部加压,使弯曲变形区的内、外区都处于压应力状态而减小回弹,并能得到较精确的弯边高度,如图 3-26 所示。

采用橡胶或聚氨酯代替刚性凹模进行软凹模弯曲,可以使坯料紧贴凸模,同时使坯料产生拉伸变形,获得类似拉弯的效果,能显著减小回弹,如图 3-27 所示。

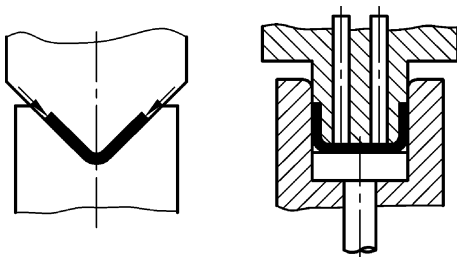


图 3-26 在弯曲件端部加压减小回弹

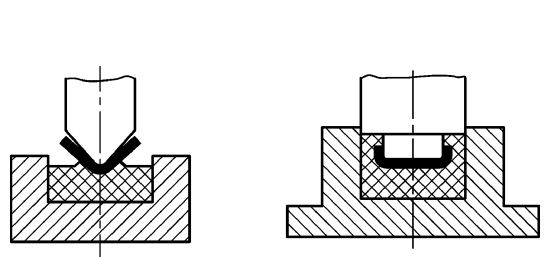


图 3-27 采用软凹模弯曲减小回弹

3) 偏移及其控制

在弯曲过程中,坯料沿凹模边缘滑动时要受到摩擦阻力的作用,当坯料各边所受到的摩擦力不等时,坯料会沿其长度方向产生滑移,从而使弯曲后的零件两直边长度不符合图样要求,这种现象称为偏移,如图 3-28 所示。

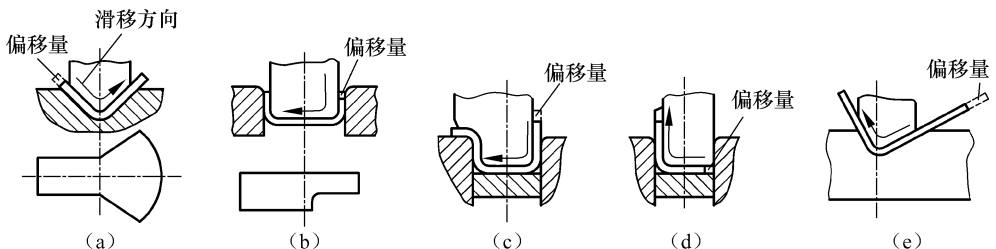


图 3-28 弯曲时的偏移现象

(1) 产生偏移的原因

① 弯曲件坯料形状不对称 如图 3-28(a)、图 3-28(b)所示,由于弯曲件坯料形状不对称,

弯曲时坯料的两边与凹模接触的宽度不相等,使坯料沿宽度大的一边偏移。

② 弯曲件两边折弯的个数不相等 如图 3-28(c)、图 3-28(d)所示,由于两边折弯的个数不相等,折弯个数多的一边摩擦力大,因此坯料会向折弯个数多的一边偏移。

③ 弯曲凸、凹模结构不对称 如图 3-28(e)所示,在 V 形件弯曲中,如果凸、凹模两边与对称线的夹角不相等,角度大的一边坯料所受凸、凹模的压力大,因而摩擦力也大,所以坯料会向角度大的一边偏移。

此外,坯料定位不稳定、压料不牢、凸模与凹模的圆角不对称、间隙不对称和润滑情况不一致时,也会导致弯曲时产生偏移现象。

(2) 控制偏移的措施

① 采用压料装置,使坯料在压紧状态下逐渐弯曲成形,从而防止坯料的滑动,而且还可得到平整的弯曲件,如图 3-29 所示。

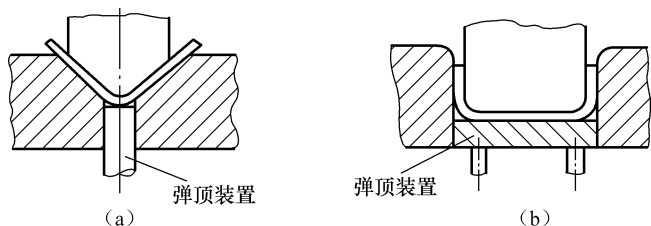


图 3-29 控制偏移的措施

② 利用毛坯上的孔或弯曲前冲出工艺孔,用定位销插入孔中定位,使坯料无法移动,如图 3-30(a)、图 3-30(b)所示。

③ 根据偏移量大小,调节定位元件的位置来补偿偏移,如图 3-30(c)所示。

④ 对于不对称的零件,先成对地弯曲,弯曲后再切断,如图 3-30(d)所示。

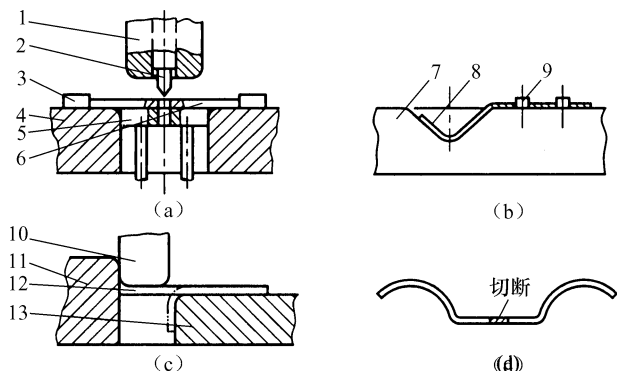


图 3-30 控制偏移的措施

1、10—凸模;2—导正销;3—定位板;4、7、13—凹模;5—顶板;6、12—坯料;8—弯曲件;9—定位销;11—定位板

⑤ 尽量采用对称的凸、凹结构,使凹模两边的圆角半径相等,凸、凹模间隙调整对称。

4) 翘曲与剖面畸变

对于细而长的板料弯曲件,弯曲后一般会沿纵向产生翘曲变形,如图 3-31 所示。这是因为沿板料宽度方向(折弯线方向)零件的刚度小,塑性弯曲后,外区(a 区)宽度方向的压应变 $-\epsilon_s$ 和

内区(b 区)宽度方向的拉应变 $+\epsilon_\phi$ 得以实现,结果使折弯线凹曲,造成零件的纵向翘曲。当板弯件短而粗时,因为零件纵向的刚度大,宽度方向的应变被抑制,弯曲后翘曲则不明显。翘曲现象一般可通过采用校正弯曲的方法进行控制。

剖面畸变是指弯曲后坯料断面发生变形的现象。窄板弯曲时的剖面畸变如图 3-16(a)所示。弯曲管材和型材时,由于径向压应力 ϵ_r 的作用,也会产生如图 3-32 所示的剖面畸变现象。另外,在薄壁管的弯曲中,还会出现内侧面因受宽向压应力 ϵ_θ 的作用而失稳起皱的现象,因此弯曲时管中应加填料或芯棒。

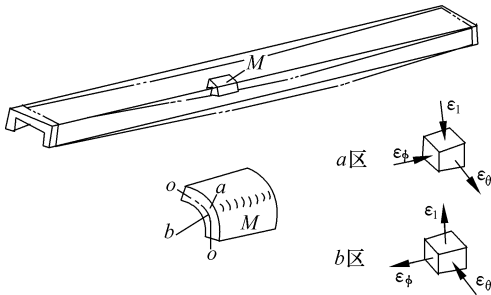


图 3-31 弯曲后翘曲变形

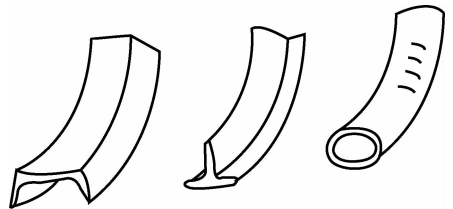


图 3-32 管材和型材的剖面畸变

3.1.3 弯曲件的工艺性

弯曲件的工艺性是指弯曲件的结构形状、尺寸、精度、材料及技术要求等是否符合弯曲加工的工艺要求。具有良好工艺性的弯曲件,能简化弯曲工艺过程及模具结构,提高弯曲件的质量。

1. 弯曲件的材料

弯曲件的材料,要求具有足够的塑性,屈弹比 σ_s/E 和屈强比 σ_s/σ_b 小。足够的塑性和较小的屈强比能保证弯曲时不开裂,较小的屈弹比能使弯曲件的形状和尺寸准确。最适宜于弯曲的材料有软钢、黄铜和铝等。脆性较大的材料,如磷青铜、铍青铜、弹簧钢等,要求弯曲时有较大的相对弯曲半径 r/t ,否则容易发生裂纹。

对于非金属材料,只有塑性较大的纸板、有机玻璃才能进行弯曲,而且在弯曲前坯料要进行预热,相对弯曲半径也应较大,一般要求 $r/t > 3 \sim 5$ 。

2. 弯曲件的形状尺寸及其精度

1) 弯曲件的结构与尺寸

(1) 弯曲件的形状

弯曲件的形状应尽可能对称,弯曲半径左右一致,以防止弯曲变形时坯料受力不均匀而产生偏移。

有些虽然形状对称,但变形区附近有缺口的弯曲件,若在坯料上先将缺口冲出,弯曲时会出现叉口现象,严重时难以成形,这时应在缺口处留连接带,弯曲后再将连接带切除,如图 3-33(a)、图 3-33(b)所示。

为了保证坯料在弯曲模内准确定位,或防止在弯曲过程中坯料的偏移,最好能在坯料上预先增添定位工艺孔,如图 3-33(b)、图 3-33(c)所示。

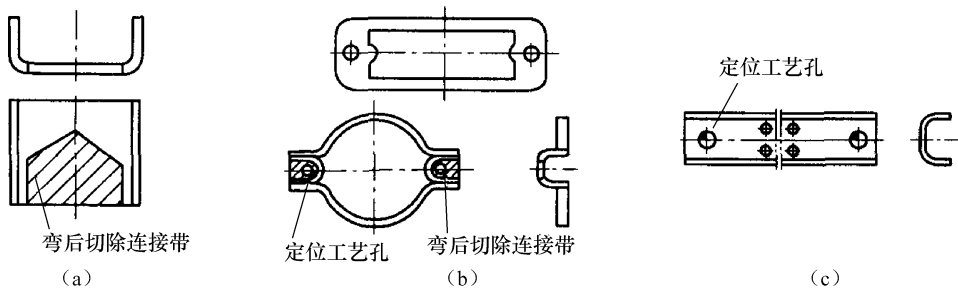


图 3-33 增添连接带和定位工艺孔的弯曲件

(2) 弯曲件的相对弯曲半径

弯曲件的相对弯曲半径 r/t 应大于最小相对弯曲半径(见表 3-2),但也不宜过大。因为相对弯曲半径过大时,受到回弹的影响,弯曲件的精度不易保证。

(3) 弯曲件的弯边高度

弯曲件的弯边高度不宜过小,其值应为 $h > r + 2t$,如图 3-34(a)所示。当 h 较小时,弯边在模具上支持的长度过小,不容易形成足够的弯矩,很难得到形状准确的零件。当零件要求 $h < r + 2t$ 时,则需预先在圆角内侧压槽,或增加弯边高度,弯曲后再切除,如图 3-34(b)所示。如果所弯直边带有斜角,则在斜边高度小于 $r + 2t$ 的区段不可能弯曲到要求的角度,而且此处也容易开裂[如图 3-34(c)],因此必须改变零件的形状,加高弯边尺寸,如图 3-34(d)所示。

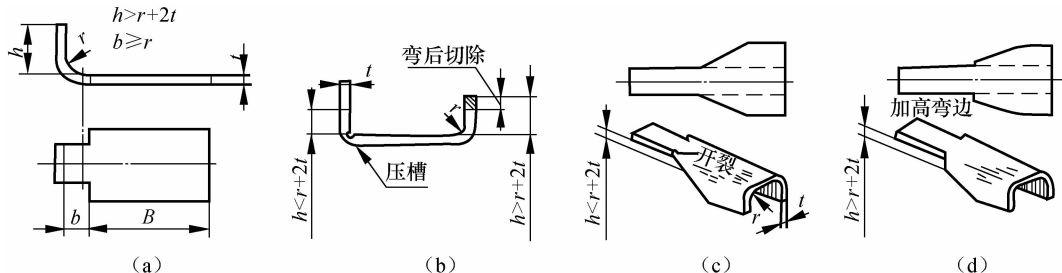


图 3-34 弯曲件的弯边高度

(4) 避免弯边根部开裂

在局部弯曲坯料上的某一段边缘时,为避免弯边根部撕裂,应减小不弯部分的长度 B ,使其退出弯曲线之外,即 $b \geq r$ [如图 3-34(a)]如果条件 $b \geq r$ 不能满足,可在弯曲部分和不弯部分之间切槽[如图 3-35(a)],或在弯曲前冲出工艺孔[如图 3-35(b)]。

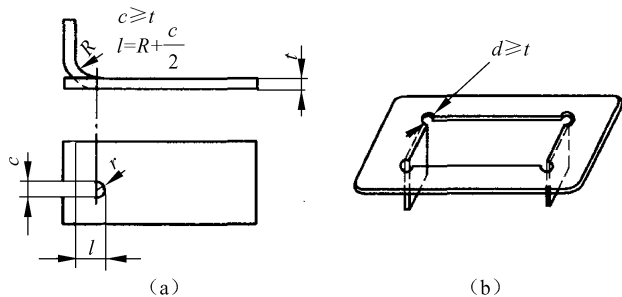


图 3-35 避免弯边根部开裂的措施

(5) 弯曲件的孔边距离

带孔的板料弯曲时,如果孔位于弯曲变形区内,则弯曲时孔的形状会发生变形,因此必须使孔位于变形区之外,如图 3-36 所示。一般孔边到弯曲半径 r 中心的距离要满足以下关系。

当 $t < 2 \text{ mm}$ 时, $L \geq t$ 。

当 $t \geq 2 \text{ mm}$ 时, $L \geq 2t$ 。

如果上述关系不能满足,在结构许可的情况下,可在靠变形区一侧预先冲出凸缘形缺口或月牙形槽[如图 3-37(a)、图 3-37(b)],也可在弯曲线上冲出工艺孔[如图 3-37(c)],以改变变形范围,利用工艺变形来保证所需孔不产生变形。

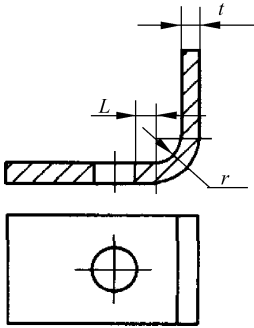


图 3-36 弯曲件的孔边距离

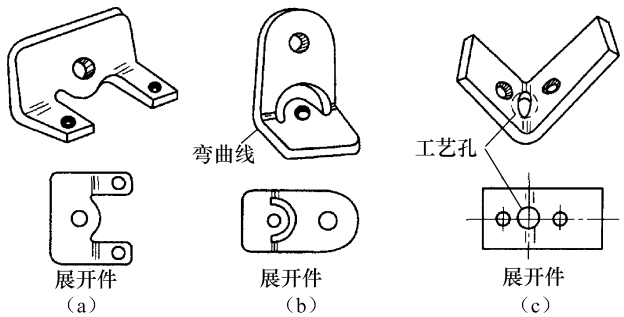


图 3-37 防止弯曲时孔变形的措施

(6) 弯曲件的尺寸标注

弯曲件尺寸标注不同,会影响冲压工序的安排。例如,图 3-38 所示是弯曲件孔的位置尺寸的三种标注方法,其中采用图 3-38(a)所示的标注方法时,孔的位置精度不受坯料展开长度和回弹的影响,可先冲孔落料(复合工序),然后再弯曲成形,工艺和模具设计较简单;图 3-38(b)、图 3-38(c)所示的标注法,受弯曲回弹的影响,冲孔只能安排在弯曲之后进行,增加了工序,还会造成许多不便。

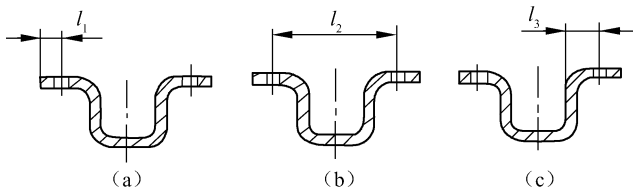


图 3-38 弯曲件的尺寸标注

2) 弯曲件的精度

弯曲件的精度受坯料定位、偏移、回弹、翘曲等因素的影响,弯曲的工序数目越多,精度也越低。对弯曲件的精度要求应合理,一般弯曲件长度的尺寸公差等级在 IT13 级以下,角度公差大于 $15'$ 。弯曲件长度未注公差的极限偏差见表 3-5;弯曲件角度的自由公差见表 3-6。

表 3-5 弯曲件未注公差的长度尺寸的极限偏差

mm

长度尺寸 l/mm	3~6	>6~18	>18~50	>50~120	>120~260	>260~500
材料厚度 t/mm	≤ 2	± 0.3	± 0.4	± 0.6	± 0.8	± 1.0
	$>2\sim 4$	± 0.4	± 0.6	± 0.8	± 1.2	± 1.5
	>4		± 0.8	± 1.0	± 1.5	± 2.0

表 3-6 弯曲件角度的自由公差值

L/mm	~6	>6~10	>10~18	>18~30	>30~50
$\Delta\beta$	$\pm 3^\circ$	$\pm 2^\circ 30'$	$\pm 2^\circ$	$\pm 1^\circ 30'$	$\pm 1^\circ 15'$
L/mm	>50~80	>80~120	>120~180	>180~260	>260~360
$\Delta\beta$	$\pm 1^\circ$	$\pm 50'$	$\pm 40'$	$\pm 30'$	$\pm 25'$

3) 拉板弯曲件的工艺性分析(图 3-3)

拉板弯曲件的材料为 20 钢,查附表 1 可知,屈弹比 $\sigma_s/E=245/206\ 000=1.2\times 10^{-3}$ 和屈服比 $\sigma_s/\sigma_b=245/400=0.6$,延伸率为 25% 小,其弯曲成形性能良好。

零件为 U 形件,结构简单对称,内形尺寸 $60^{+0.74}$ 精度为 IT14,是必须保证的尺寸,其余尺寸为自由尺寸,尺寸精度满足弯曲精度要求。相对圆角半径 $r/t=4/2=2>r_{\min}/t=0.5$,满足弯曲变形程度的要求。

结论:拉板适宜弯曲成形。

3.1.4 弯曲件毛坯尺寸的确定

为了确定弯曲前坯料的形状与大小,需要计算弯曲件的展开尺寸。弯曲件展开尺寸的计算基础是应变中性层在弯曲前后长度保持不变。

1. 弯曲中性层位置的确定

根据中性层的定义,弯曲件的坯料长度应等于弯曲件中性层的展开长度。由于在塑性弯曲时,中性层的位置要发生位移,所以,计算中性层展开长度,首先应确定中性层位置。中性层位置以曲率半径表示(如图 3-39),常用下面经验公式确定

$$\rho = r + \chi t \quad (3-22)$$

式中 r ——弯曲件的内弯曲半径;

t ——材料厚度;

χ ——中性层位移系数,见表 3-7。

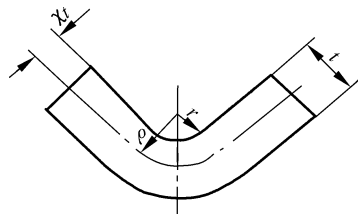


图 3-39 中性层位置

表 3-7 中性层位移系数 χ

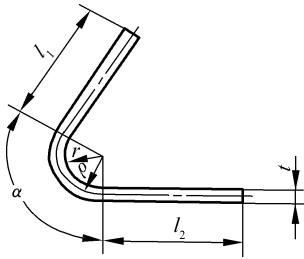
r/t	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1	1.2
χ	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.28	0.3	0.32	0.33
r/t	1.3	1.5	2	2.5	3	4	5	6	7	≥ 8
χ	0.34	0.36	0.38	0.39	0.4	0.42	0.44	0.46	0.48	0.5

2. 弯曲件坯料尺寸的确定

弯曲件的展开长度等于各直边部分长度与各圆弧部分长度之和。直边部分的长度是不变的,而圆弧部分的长度则需考虑材料的变形和中性层的位移。

1) $r/t > 0.5$ 的弯曲件

$r/t > 0.5$ 的弯曲件由于变薄不严重,按中性层展开的原理,坯料总长度应等于弯曲件直线部分和圆弧部分长度之和(如图 3-40),即

图 3-40 $r/t > 0.5$ 的弯曲

列经验公式计算。

$$L_z = l_1 + l_2 + \frac{\pi\alpha}{180}\rho = l_1 + l_2 + \frac{\pi\alpha}{180}(r + \chi t) \quad (3-23)$$

式中 L_z ——坯料展开总长度, mm;

α ——弯曲中心角, ($^\circ$)。

2) $r/t < 0.5$ 的弯曲件

对于 $r/t < 0.5$ 的弯曲件, 由于弯曲变形时不仅零件的圆角变形区产生严重变薄, 而且与其相邻的直边部分也产生变薄, 故应按变形前后体积不变条件来确定坯料长度。通常可采用表 3-8 所列经验公式计算。

表 3-8 $r/t < 0.5$ 的弯曲件坯料长度计算公式

简图	计算公式	简图	计算公式
	$L_z = l_1 + l_2 + 0.4t$		$L_z = l_1 + l_2 + l_3 + 0.6t$ (一次同时弯曲两个角)
	$L_z = l_1 + l_2 + 0.43t$		$L_z = l_1 + 2l_2 + 2l_3 + t$ (一次同时弯曲四个角) $L_z = l_1 + 2l_2 + 2l_3 + 1.2t$ (分为两次弯曲四个角)

3) 铰链式弯曲件

对于 $r = (0.6 \sim 3.5)t$ 的铰链件(如图 3-41), 通常采用推圆的方法[如图 3-59(b)]成形, 在卷圆过程中板料有所增厚, 中性层发生外移, 故其坯料长度

L_z 可按式近似计算:

$$L_z = l + 1.5\pi(r + \chi_1 t) + r \approx l + 5.7r + 4.7\chi_1 t \quad (3-24)$$

式中 l ——直线段长度;

r ——铰链内半径;

χ_1 ——中性层位移系数, 查表 3-9。

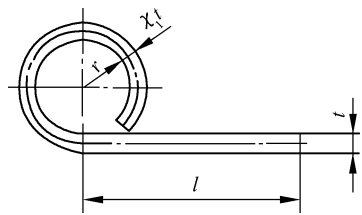


图 3-41 铰链式弯曲件

表 3-9 卷圆时中性层位移系数 χ_1 值

r/t	$>0.5 \sim 0.6$	$>0.6 \sim 0.8$	$>0.8 \sim 1$	$>1 \sim 1.2$	$>1.2 \sim 1.5$	$>1.5 \sim 1.8$	$>1.8 \sim 2$	$>2 \sim 2.2$	>2.2
χ_1	0.76	0.73	0.7	0.67	0.64	0.61	0.58	0.54	0.5

需要指出, 上述坯料长度计算公式只能用于形状比较简单、尺寸精度要求不高的弯曲件。对于形状比较复杂或精度要求高的弯曲件, 在利用上述公式初步计算坯料长度后, 还需反复试弯, 不断修正, 才能最后确定坯料的形状及尺寸。这是因为很多因素没有考虑, 可能产生较大的误差, 故在生产中宜先制造弯曲模, 后制造坯料的落料模。

3. 拉板毛坯尺寸的确定(图 3-3)

由于 $r/t = 2$, 故可按中性层确定其展开长度。

中性层位置:根据 $r/t=2$,查表 3-7, $\chi=0.38$;

中性层曲率半径: $\rho=r+\chi t=4+0.38\times 2=4.76$ (mm)

圆弧部分长度: $l_{\text{弯}1}=\pi\times 90/180(4+0.38\times 2)=7.47$ (mm)

垂直的直线: $l_{\text{直}1}=20-4-2=14$ (mm)

底部直线: $l_{\text{直}2}=60-2\times 4=52$ (mm)

故毛坯展开长度为:

$$L_z = 2(l_{\text{直}1} + l_{\text{弯}1}) + l_{\text{直}2} = 2 \times (14 + 7.47) + 52 = 94.94(\text{mm})$$

经过计算展开长度初步确定为 95 mm,精确的长度只有试模后再进行修正。

3.1.5 弯曲力的计算

弯曲力是设计弯曲模和选择压力机的重要依据之一。弯曲力不仅与弯曲变形过程有关,还与坯料尺寸、材料性能、零件形状、弯曲方式、模具结构等多种因素有关,因此用理论公式来计算弯曲力不但计算复杂,而且精确度不高。实际生产中常用经验公式来进行概略计算。

1. 自由弯曲时的弯曲力

V 形件弯曲力

$$F_{\text{自}} = \frac{0.6KBt^2\sigma_b}{r+t} \quad (3-25)$$

U 形件弯曲力

$$F_{\text{自}} = \frac{0.7KBt^2\sigma_b}{r+t} \quad (3-26)$$

式中 $F_{\text{自}}$ ——自由弯曲在冲压行程结束时的弯曲力,N;

B ——弯曲件的宽度,mm;

r ——弯曲件的内弯曲半径,mm;

t ——弯曲件材料厚度,mm;

σ_b ——材料的抗拉强度,MPa;

K ——安全系数,一般取 $K=1.3$ 。

2. 校正弯曲时的弯曲力

校正弯曲时的弯曲力比自由弯曲力大得多,一般按下式计算:

$$F_{\text{校}} = Ap \quad (3-27)$$

式中 $F_{\text{校}}$ ——校正弯曲力,N;

A ——校正部分在垂直于凸模运动方向上的投影面积, mm^2 ;

p ——单位面积校正力,MPa,其值见表 3-10。

表 3-10 单位面积校正力 p

MPa

材 料	料厚/mm	
	~3	3~10
铝	30~40	50~60
黄铜	60~80	60~100
10~20 钢	80~100	100~120
25~35 钢	100~120	120~150

3. 顶件力或压件力

若弯曲模设有顶件装置或压件装置,其顶件力(F_D)或压件力(F_Y)可近似取自由弯曲力的30%~80%。即

$$F_D = F_Y = (0.3 \sim 0.8)F_{\text{自}} \quad (3-28)$$

4. 压力机标称压力的确定

对于有压料的自由弯曲,压力机公称压力应为

$$F_{\text{压机}} \geq (F_{\text{自}} + F_Y) \quad (3-29)$$

对于校正弯曲,由于校正弯曲力是发生在接近压力机下止点的位置,且校正弯曲力比压料力或推件力大得多,故 F_Y 值可忽略不计,压力机公称压力可取:

$$F_{\text{压机}} \geq F_{\text{校}} \quad (3-30)$$

4. 拉板弯曲件弯曲力及压力机标称压力的选择

该弯曲模采用校正弯曲,其力的计算如下:

查附表 1, $\sigma_b = 450 \text{ MPa}$; 查表 3-10, $p = 100 \text{ MPa}$ 。

(1) 校正弯曲力 $F_{\text{校}} = Ap = 60 \times 20 \times 100 = 120 (\text{kN})$

(2) 压力机标称压力 $F_{\text{压机}} \geq F_{\text{校}} = 120 \text{ kN}$

故可初选 JB23-25 开式双柱可倾压力机,在模具结构确定后再校核其他参数。

3.1.6 单工序弯曲模典型结构

由于弯曲件的种类很多,形状繁简不一,因此弯曲模的结构类型也是多种多样的。常见的弯曲模结构类型有:单工序弯曲模、级进弯曲模、复合弯曲模和通用弯曲模等。简单的弯曲模工作时只有一个垂直运动,复杂的弯曲模除垂直运动外,还有一个或多个水平动作。因此,弯曲模设计难以做到标准化,通常参照冲裁模的一般设计要求和办法,并针对弯曲变形特点进行设计。设计时应考虑以下要点。

- (1) 坯料的定位要准确、可靠,尽可能采用坯料的孔定位,防止坯料在变形过程中发生偏移。
- (2) 模具结构不应妨碍坯料在弯曲过程中应有的转动和移动,避免弯曲过程中坯料产生过度变薄和断面发生畸变。
- (3) 模具结构应能保证弯曲时上、下模之间水平方向的错移力得到平衡。
- (4) 为了减小回弹,弯曲行程结束时应使弯曲件的变形部位在模具中得到校正。
- (5) 坯料的安放和弯曲件的取出要方便、迅速、生产率高、操作安全。
- (6) 弯曲回弹量较大的材料时,模具结构上必须考虑凸、凹模加工及试模时便于修正的可能性。

1. V 形件弯曲模

图 3-42 所示为 V 形件弯曲模的基本结构。凸模 3 装在标准槽形模柄 1 上,并用两个销钉 2 固定。凹模 5 通过螺钉和销钉直接固定在下模座上。顶杆 6 和弹簧 7 组成的顶件装置,工作行程起压料作用,可防止坯料偏移,回程时又可将弯曲件从凹模内顶出。弯曲时,坯料由定位板 4 定位,在凸、凹模作用下,一次便可将平板坯料弯曲成 V 形件。

图 3-43 所示为 V 形件折板式弯曲模,两块活动凹模 4 由铰链 8 连接,铰链的心轴 2 可沿支架 7 的长槽作上下滑动,定位板 9 固定在活动凹模上。弯曲前,顶杆 3 将心轴顶到最高位置,使两块活动凹模成一平面,平板坯料放在定位板上定位。工作时,在凸模 1 作用下,两块凹模将绕铰链心轴转动,而铰链心轴沿支架槽下滑,从而使坯料随活动凹模一起折弯成形。当凸模回程时,活动凹模借助顶杆 3 的作用复位并顶出弯曲件。在弯曲过程中,由于坯料始终与活动凹模和定位板接触,即使坯料形状不对称也不会产生相对滑动和偏移,因此弯曲件的精度和表面质量都较高。图中铰链心轴中心至凹模面的距离 s 影响凹模成 V 形时底部开口宽度 b 的大小, b 过大时弯边接触凹模的面积减小,将失去折板凹模的优越性。为了使全部直边都能与凹模接触,一般 s 值不能大于弯曲件的外弯曲半径,即 $s \leq r_0 + t_0$ 这种弯曲模特别适用于有精确孔位的小零件、坯料不易放平稳的带窄条的零件以及没有足够压料面的零件。

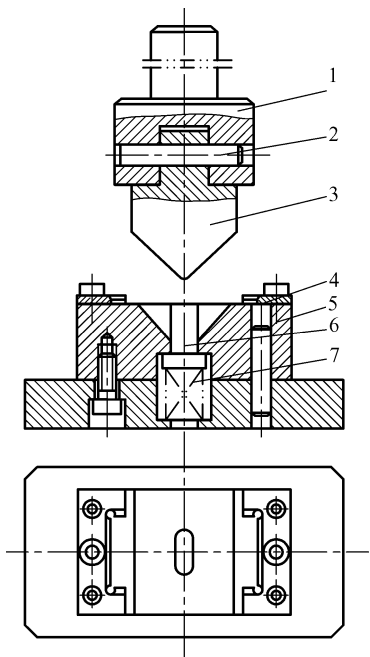


图 3-42 V 形件弯曲模

- 1—槽形模柄;2—销钉;3—凸模;
4—定位板;5—凹模;6—顶杆;7—弹簧

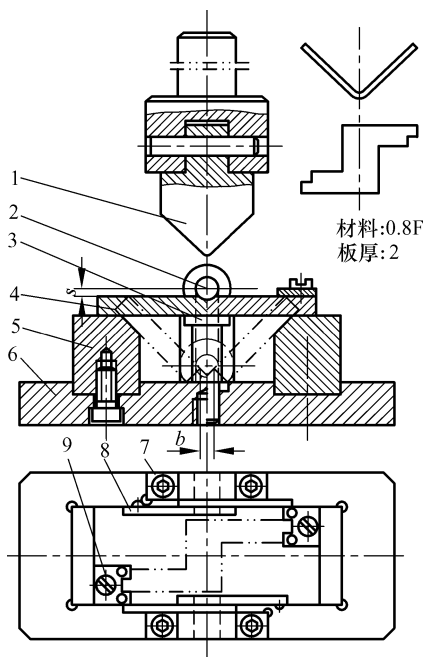


图 3-43 V 形件折板式弯曲模

- 1—凸模;2—心轴;3—顶杆;4—活动凹模;
5—支撑板;6—下模座;7—支架;8—铰链;9—定位板

2. U 形件弯曲模

图 3-44 所示为上出件 U 形弯曲模,坯料用定位板 4 和定位销 2 定位,凸模 1 下压时将坯料及顶板 3 同时压下,待坯料在凹模 5 内成形后,凸模回升,弯曲后的零件就在弹顶器(图中未画出)的作用下,通过顶杆和顶板顶出,完成弯曲工作。该模具的主要特点是在凹模内设置了顶件装置,弯曲时顶板能始终压紧坯料,因此弯曲件底部平整。同时顶板上还装有定位销 2,可利用坯料上的孔(或工艺孔)定位,即使 U 形件两直边高度不同,也能保证弯边高度尺寸。因有定位销定位,定位板可不作精确定位。如果要进行校正弯曲,顶板可接触下模座作为凹模底来用。

图 3-45 所示为弯曲角小于 90° 的闭角 U 形件弯曲模,在凹模 4 内安装有一对可转动的凹

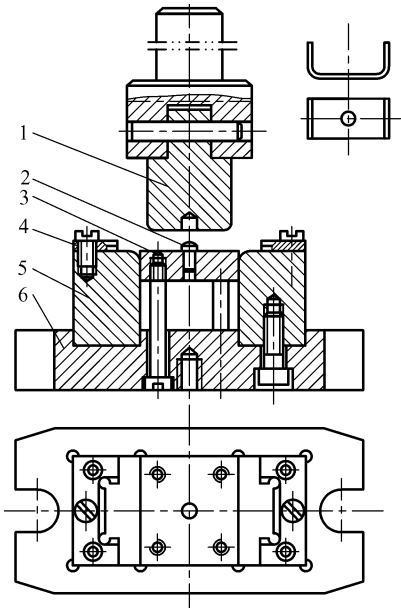


图 3-44 上出件 U 形弯曲模图

1—凸模;2—定位销;3—顶板;
4—定位板;5—凹模;6—下模座

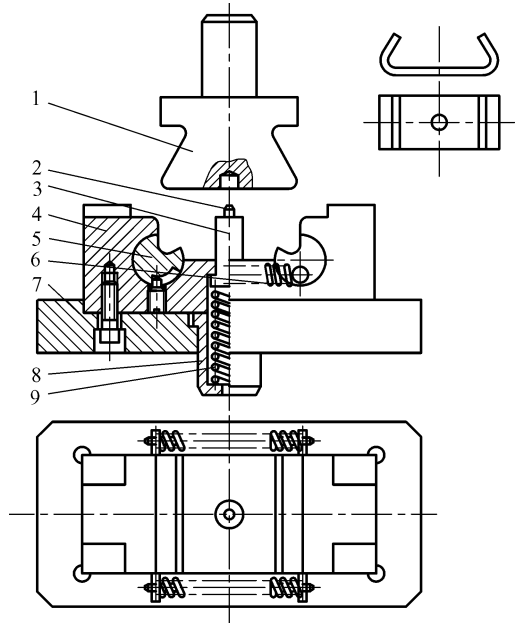


图 3-45 闭角 U 形件弯曲模

1—凸模;2—定位销;3—顶杆;4—凹模;
5—凹模镶件;6—拉簧;7—下模座;8—弹簧座;9—弹簧

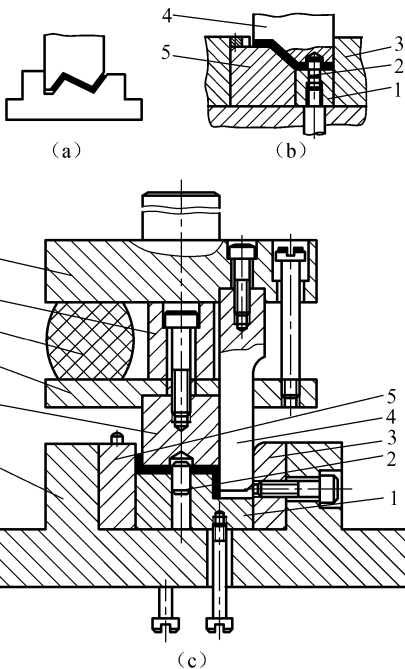


图 3-46 Z 形件弯曲模

1—顶板;2—定位销;3—反侧压块;
4—凸模;5—凹模;6—上模座;
7—侧楔;8—橡皮;10—活动凸模;
11—下模座

模镶件 5,其缺口与弯曲件外形相适应。凹模镶件受拉簧 6 和止动销的作用,非工作状态下总是处于图示位置。模具工作时,坯料在凹模 4 和定位销 2 上定位,随着凸模的下压,坯料先在凹模 4 内弯曲成夹角为 90° 的 U 形过渡件,当工件底部接触到凹模镶件后,凹模镶件就会转动而使工件最后成形。凸模回程时,带动凹模镶件反转,并在拉簧作用下保持复位状态。同时,顶杆 3 配合凸模一起将弯曲件顶出凹模,最后将弯曲件由垂直于图面方向从凸模上取下。

3. Z 形件弯曲模

Z 形件一次弯曲即可成形。图 3-46(a)所示的 Z 形件弯曲模结构简单,但由于没有压料装置,弯曲时坯料容易滑动,只适用于精度要求不高的零件。

图 3-46(b)的 Z 形件弯曲模设置了顶板 1 和定位销 2,能有效防止坯料的偏移。反侧压块 3 的作用是平衡上、下模之间水平方向的错移力,同时也为顶板导向,防止其窜动。

图 3-46(c)所示的 Z 形件弯曲模,弯曲前活动凸模 10 在橡皮 8 的作用下与凸模 4 端面平齐。弯曲时

活动凸模与顶板 1 将坯料压紧,并由于橡皮的弹力较大,推动顶板下移使坯料左端弯曲。当顶板接触下模座 11 后,橡皮 8 压缩,则凸模 4 相对于活动凸模 10 下移将坯料右端弯曲成形。当压块 7 与上模座 6 相碰时,整个弯曲件得到校正。

4. 拉板弯曲模结构

拉板弯曲模结构如图 3-44 所示。

3.1.7 弯曲模工作部分尺寸的确定

弯曲模工作零件的设计主要是确定凸、凹模工作部分的圆角半径、凹模深度、凸、凹模间隙、横向尺寸及公差等,凸、凹模安装部分的结构设计与冲裁凸、凹模基本相同。弯曲凸、凹模工作部分的结构及尺寸如图 3-47 所示。

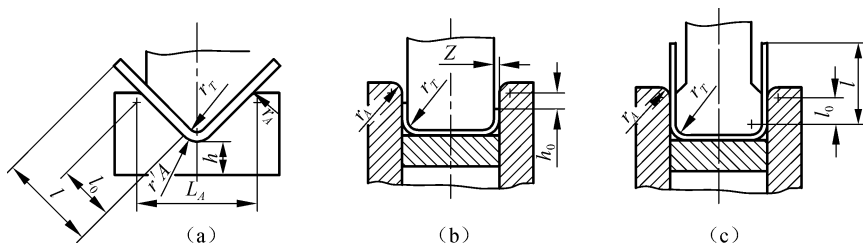


图 3-47 弯曲凸、凹模工作部分的结构及尺寸

1. 凸模圆角半径 r_T

当弯曲件的相对弯曲半径 $r/t < 5 \sim 8$ 、且不小于 r_{\min}/t (见表 3-2) 时,凸模的圆角半径取等于弯曲件的圆角半径,即 $r_T = r$ 。若 $r/t < r_{\min}/t$,则应取 $r_T \geq r_{\min}$,将弯曲件先弯成较大的圆角半径,然后采用整形工序进行整形,使其满足弯曲件圆角半径的要求。

当弯曲件的相对弯曲半径 $r/t \geq 10$ 时,由于弯曲件圆角半径的回弹较大,凸模的圆角半径应根据回弹值作相应的修正,其值按公式 3-20 和 3-21 确定。

2. 凹模圆角半径 r_A

凹模圆角半径的大小对弯曲变形力、模具寿命、弯曲件质量等均有影响。 r_A 过小时,坯料拉入凹模的滑动阻力增大,易使弯曲件表面擦伤或出现压痕,并增大弯曲变形力和影响模具寿命; r_A 过大时,又会影响坯料定位的准确性。生产中,凹模圆角半径 r_A 通常根据材料厚度选取。

$$t \leq 2 \text{ mm 时, } r_A = (3 \sim 6)t$$

$$t = 2 \sim 4 \text{ mm 时, } r_A = (2 \sim 3)t$$

$$t > 4 \text{ mm 时, } r_A = 2t.$$

另外,凹模两边的圆角半径应一致,否则在弯曲时坯料会发生偏移。

V 形弯曲凹模的底部可开设退刀槽或取圆角半径 $r_A = (0.6 \sim 0.8)(r_T + t)$ 。

3. 凹模深度 l_0

凹模深度过小,则坯料两端未受压部分太多,弯曲件回弹大且不平直,影响其质量;凹模深

度若过大,则浪费模具钢材,且需压力机有较大的工作行程。

V形件弯曲模:凹模深度 l_0 及底部最小厚度 h 值可查表3-11。但应保证凹模开口宽度 L_A 之值不能大于弯曲坯料展开长度的0.8倍。

表 3-11 凹模深度 l_0 及底部最小厚度 h 值

mm

弯曲件边长 l /mm	材料厚度 t /mm					
	≤ 2		2~4		4	
	h	l_0	h	l_0	h	l_0
10~25	20	10~15	22	15	—	—
25~50	22	15~20	27	25	32	30
50~75	27	20~25	32	30	37	35
75~100	32	25~30	37	35	42	40
100~150	37	30~35	42	40	47	50

U形件弯曲模:对于弯边高度不大或要求两边平直的U形件,则凹模深度应大于弯曲件的高度,如图3-47(b)所示,其中 h_0 值见表3-12;对于弯边高度较大,而平直度要求不高的U形件,可采用图3-47(c)所示的凹模形式,凹模深度 l_0 值见表3-13。

表 3-12 弯曲U形件凹模 h_0 值

mm

材料厚度 t /mm	≤ 1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~10
h_0	3	4	5	6	8	10	15	20	25

表 3-13 弯曲U形件凹模深度 l_0 值

mm

弯曲件边长 l /mm	材料厚度 t /mm				
	< 1	1~2	2~4	4~6	6~10
< 50	15	20	25	30	35
50~75	20	25	30	35	40
75~100	25	30	35	40	40
100~150	30	35	40	50	50
150~200	40	45	55	65	65

4. 凸、凹模间隙

弯曲V形件时,凸、凹模间隙是由调整压力机的闭合高度来控制的,模具设计时可以不考虑。对于U形类弯曲件,设计模具时应当确定合适的间隙值。间隙过小,会使弯曲件直边料厚减薄或出现划痕,同时还会降低凹模寿命,增大弯曲力;间隙过大,则回弹增大,从而降低了弯曲件精度。生产中,U形件弯曲模的凸、凹模单边间隙一般可按如下公式确定。

弯曲有色金属时:

$$Z = t_{\min} + ct \quad (3-31)$$

弯曲黑色金属时:

$$Z = t_{\max} + ct \quad (3-32)$$

式中 Z ——弯曲凸、凹模的单边间隙;

t ——弯曲件的材料厚度(基本尺寸);

t_{\min} 、 t_{\max} ——弯曲件材料的最小厚度和最大厚度;

c ——间隙系数,可查表 3-14。

表 3-14 U 形件弯曲模凸、凹模的间隙系数 c 值

弯曲件高度 H/mm	弯曲件宽度 $B \leq 2H$				弯曲件宽度 $B > 2H$				
	材料厚度 t/mm								
	< 0.5	$0.6 \sim 2$	$2.1 \sim 4$	$4.1 \sim 5$	< 0.5	$0.6 \sim 2$	$2.1 \sim 4$	$4.1 \sim 7.5$	$7.6 \sim 12$
10	0.05	0.05	0.04	—	0.1	0.1	0.08	—	—
20	0.05	0.05	0.04	0.03	0.1	0.1	0.08	0.06	0.06
35	0.07	0.05	0.04	0.03	0.15	0.1	0.08	0.06	0.06
50	0.1	0.07	0.05	0.04	0.2	0.15	0.1	0.06	0.06
70	0.1	0.07	0.05	0.05	0.2	0.15	0.1	0.1	0.08
100	—	0.07	0.05	0.05	—	0.15	0.1	0.1	0.08
150	—	0.1	0.07	0.05	—	0.2	0.15	0.1	0.1
200	—	0.1	0.07	0.07	—	0.2	0.15	0.15	0.1

5. U 形件弯曲凸、凹模横向尺寸及公差

确定 U 形件弯曲凸、凹模横向尺寸及公差的原则是:弯曲件标注外形尺寸时如图 3-48(a),应以凹模为基准件,间隙取在凸模上;弯曲件标注内形尺寸时如图 3-48(b),应以凸模为基准件,间隙取在凹模上;基准凸、凹模的尺寸及公差则应根据弯曲件的尺寸、公差、回弹情况以及模具磨损规律等因素确定。

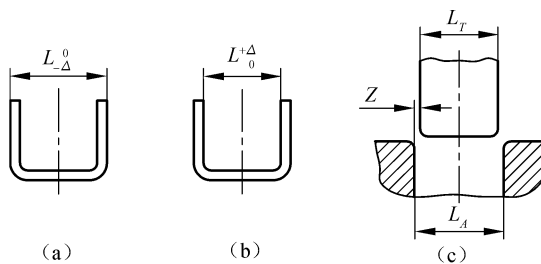


图 3-48 标注外形与内形的弯曲件及模具尺寸

(1) 弯曲件标注外形尺寸时[如图 3-48(a)]

$$L_A = (L_{\max} - 0.75\Delta)^{+\delta_A}_0 \quad (3-33)$$

$$L_T = (L_A - 2Z)^0_{-\delta_T} \quad (3-34)$$

(2) 弯曲件标注内形尺寸时[如图 3-48(b)]

$$L_T = (L_{\min} + 0.75\Delta)^0_{-\delta_T} \quad (3-35)$$

$$L_A = (L_T + 2Z)^{+\delta_A}_0 \quad (3-36)$$

式中 L_A 、 L_T ——弯曲凸、凹模横向尺寸;

L_{\max} 、 L_{\min} ——弯曲件的横向最大、最小极限尺寸;

Δ ——弯曲件横向的尺寸公差;

δ_T, δ_A ——弯曲凸、凹模的制造公差,可采用 IT9~IT7 级精度,一般取凸模的精度比凹模精度高一级,但要保证 $\delta_T/2 + \delta_A/2 + t_{\max}$ 的值在最大允许间隙范围以内;
 Z ——凸、凹模单边间隙。

当弯曲件的精度要求较高时,其凸、凹模可以采用配作法加工。

6. 拉板弯曲模工作零件的设计

(1) 凸模圆角半径 r_T 当 $r/t < 5 \sim 8$ 时,取 $r_T = 4 \text{ mm}$

(2) 凹模圆角半径 r_A r_A 根据材料厚度选取:

$$r_A = 3t = 3 \times 2 = 6(\text{mm})$$

(3) 凹模深度 h_0

U 形件弯曲模:对于弯边高度不大或要求两边平直的 U 形件,则凹模深度应大于弯曲件的高度,查表 4-11 得 $h_0 = 4 \text{ mm}$ 。

(4) 凸、凹模间隙

查表 4-13 得 $c = 0.05$,查附表 2 取厚度公差为 0.15,则:

$$Z = t_{\max} + ct = 2.15 + 0.05 \times 2 = 2.25(\text{mm})$$

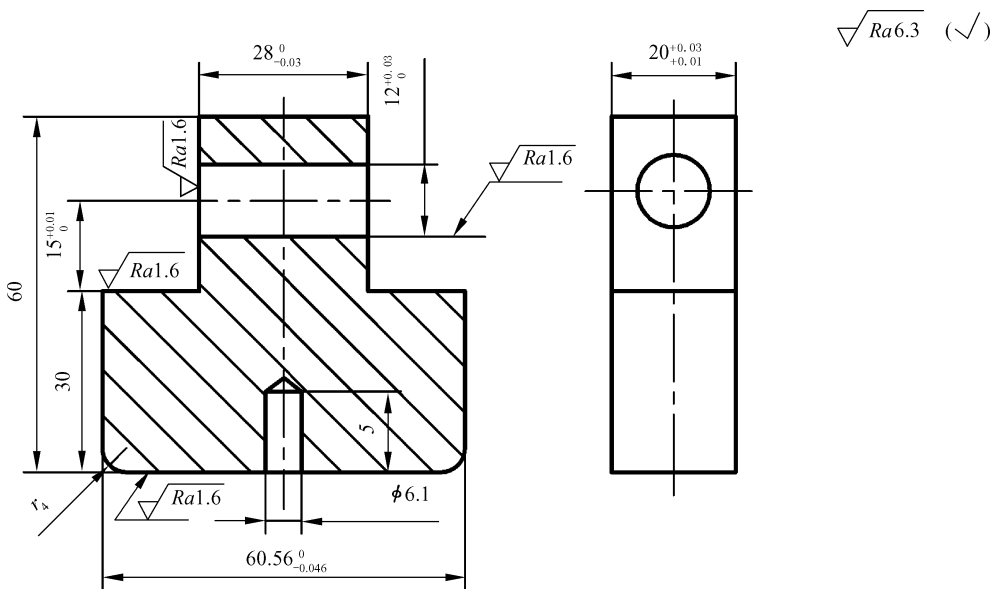
(5) U 形件弯曲凸、凹模横向尺寸及公差

弯曲件标注内形尺寸 $60^{+0.74}_0$,故应先确定凸模刃口尺寸。凸模的制造精度按 IT8,凹模的制造精度按 IT9。

弯曲凸模横向尺寸 $L_T = (L_{\min} + 0.75\Delta)_{-\delta_T} = (60 + 0.75 \times 0.74)_{-0.046} = 60.56_{-0.046}^0 (\text{mm})$

弯曲凹模横向尺寸 $L_A = (L_T + 2Z)_{+\delta_A} = (60.56 + 2 \times 2.25)_{+0.074} = 65.06_{+0.074}^0 (\text{mm})$

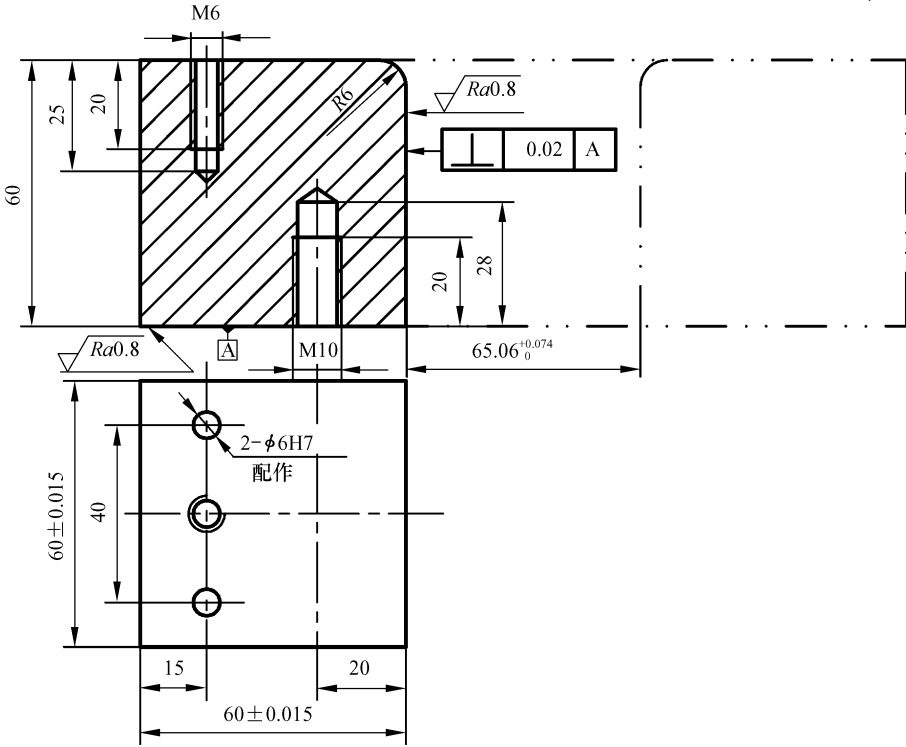
(6) 绘制凸模和凹模零件图,如图 3-49、图 3-50 所示。



材料T10A
 热处理56~60HRC

图 3-49 凸模

$\sqrt{Ra1.6}$ (✓)



材料T10A

热处理56~60HRC

装配后应保证凹模间的横向尺寸 $65.06^{+0.074}_0$

图 3-50 凹模

任务 3-2 托架的弯曲

如图 3-51 所示弯曲件。

零件名称:托架

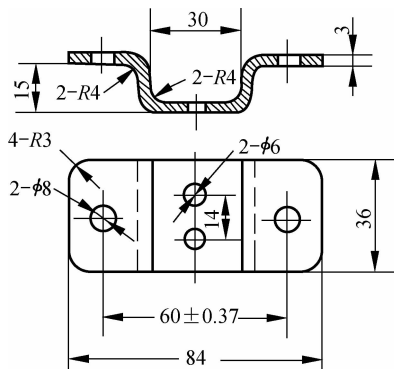


图 3-51 托架

材料:08 钢 料厚 $t=3 \text{ mm}$

生产纲领:中批量生产

要求:表面无划痕 孔不允许严重变形
试进行冲压工艺设计。

3.2.1 多工序弯曲件的工序安排

弯曲件的工序安排是在工艺分析和计算后进行的一项工艺设计工作。安排弯曲件的工序时应根据零件的形状、尺寸、精度等级、生产批量以及材料的性能等因素进行考虑。弯曲工序安排合理,则可以简化模具结构,提高零件质量和劳动生产率。

1. 弯曲件工序安排的原则

(1) 对于形状简单的弯曲件,如 V 形件、U 形件、Z 形件等,可以一次弯曲成形。而对于形状复杂的弯曲件,一般要多次弯曲才能成形。

(2) 对于批量大而尺寸小的弯曲件,为使操作方便、定位准确和提高生产率,应尽可能采用级进模或复合模弯曲成形。

(3) 需要多次弯曲时,一般应先弯两端,后弯中间部分,前次弯曲应考虑后次弯曲有可靠的定位,后次弯曲不能影响前次已弯成的形状。

(4) 对于非对称弯曲件,为避免弯曲时坯料偏移,应尽可能采用成对弯曲后再切成两件的工艺。

2. 典型弯曲件的工序安排

图 3-52 至图 3-54 所示分别为多次弯曲成形的实例,可供制定零件弯曲工艺过程时参考。



图 3-52 一次弯曲成形实例

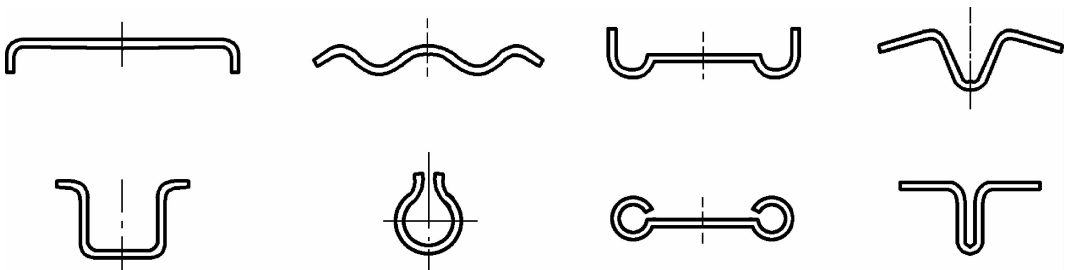


图 3-53 二次弯曲成形实例

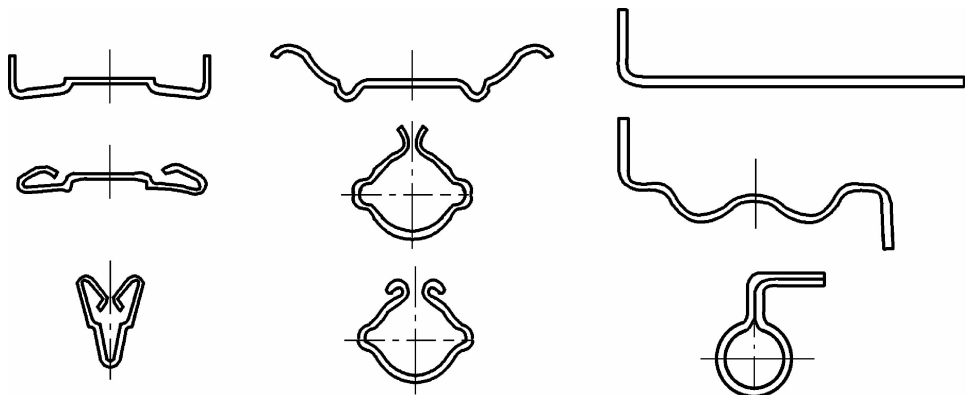


图 3-54 三次弯曲成形实例

3.2.2 多次弯曲成形件的典型模具结构

1. 圆形件弯曲模

一般圆形件尽量采用标准规格的管材切断成形，只有当标准管材的尺寸规格或材质不能满足要求时，才采用板料弯曲成形。用模具弯曲圆形件通常限于中小型件，大直径圆形件可采用滚弯成形。

(1) 小圆形件，一般先弯成 U 形，再将 U 形弯成圆形。图 3-55(a)所示为用二套简单模弯圆的方法。由于工件小，分两次弯曲操作不便，可将二道工序合并，如图 3-55(b)、图 3-55(c)所

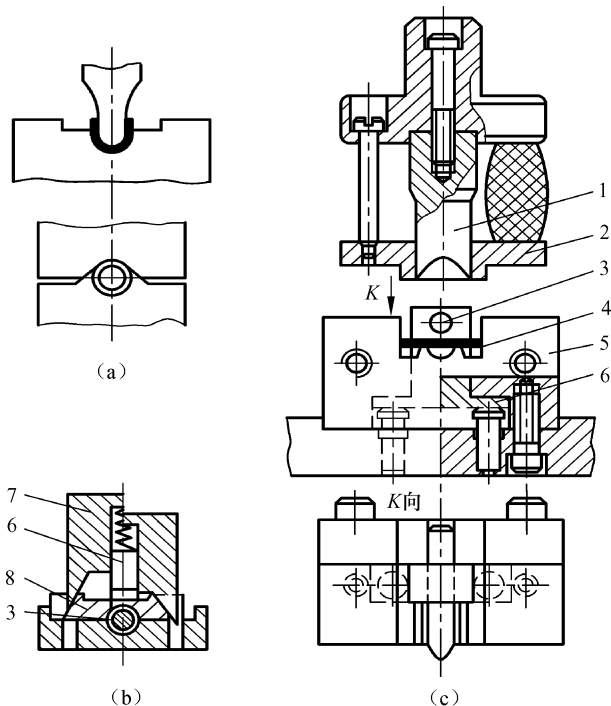


图 3-55 小圆弯曲模

1—凸模；2—压板；3—芯棒；4—坯料；5—凹模；6—滑块；7—侧楔；8—活动凹模

示。其中图 3-55(b) 为有侧楔的一次弯圆模, 上模下行时, 芯棒 3 先将坯料弯成 U 形, 随着上模继续下行, 侧楔 7 便推动活动凹模 8 将 U 形弯成圆形; 图 3-55(c) 是另一种一次弯圆模, 上模下行时, 压板 2 将滑块 6 往下压, 滑块带动芯棒 3 先将坯料弯成 U 形, 然后凸模 1 再将 U 形弯成圆形。如果工件精度要求高, 可旋转工件连冲几次, 以获得较好的圆度。弯曲后工件由垂直于图面方向从芯棒上取下。

(2) 对于直径 $d \geq 20 \text{ mm}$ 的大圆形件, 根据圆形件的精度和料厚等要求不同, 可以采用一次成形、二次成形和三次成形方法。

图 3-56 所示是用三道工序弯曲大圆的方法, 这种方法生产率低, 适用于料厚较大的工件。

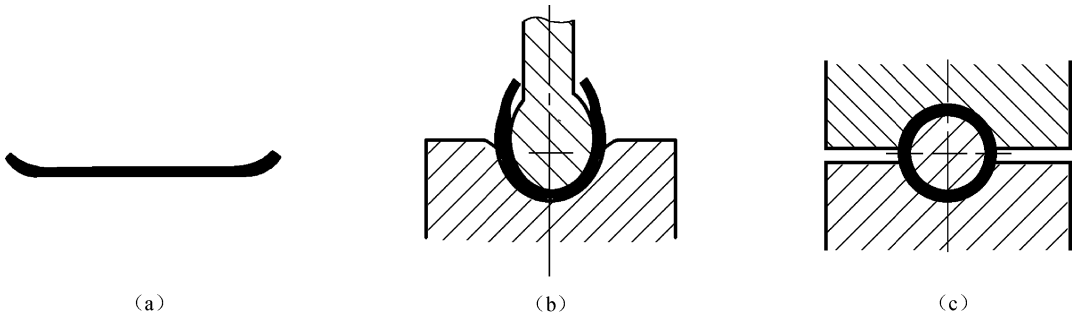


图 3-56 大圆三次弯曲模

图 3-57 是用二道工序弯曲大圆, 先预弯成三个 120° 的波浪形[如图 3-57(a)], 再弯成圆形, 工件顺凸模轴线方向取下[如图 3-57(b)]。

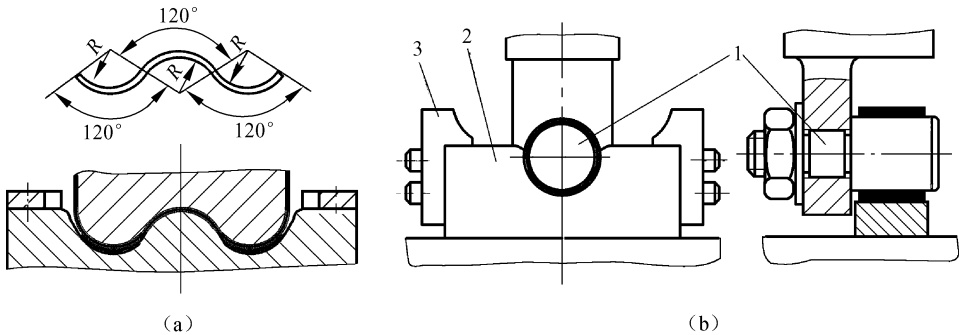


图 3-57 大圆二次弯曲模

1—芯轴(凸模); 2—凹模; 3—定位板

图 3-58 所示是大圆一次成形模具, 这种模具生产率较高, 但由于回弹, 在工件接缝处留有缝隙和少量直边, 工件精度差, 模具结构也较复杂。

2. 铰链件弯曲模

标准的铰链或合页都是采用专用设备生产的, 生产率很高, 价格便宜, 只有当选不到合适标准铰链件时才用模具弯曲。

图 3-59 所示为铰链件两次弯曲模。图 3-59(a) 为第一道工序的预弯模。

图 3-59(b) 是采用推圆法将铰链链件推弯成形。这种模具结构较简单。

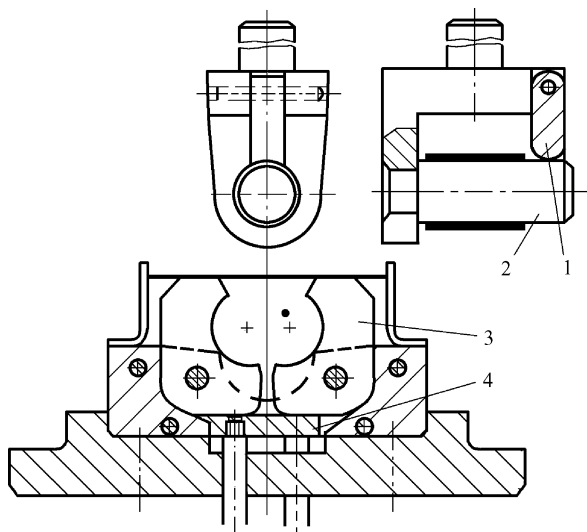


图 3-58 大圆一次弯曲模

1—支撑;2—芯轴(凸模);3—活动凹模;4—顶板

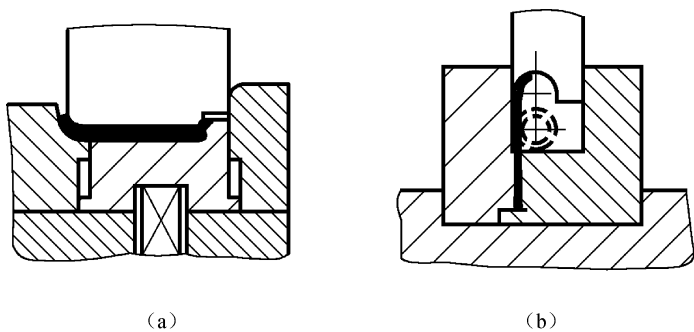


图 3-59 铰链件两次弯曲模

图 3-60 所示为铰链件一次弯曲模,模具中有压料装置,坯料先由凸模 3 压紧,继而通过斜楔 1 和滑动式凹模 2 将坯料推弯成形。该模具操作方便,零件质量也较好。

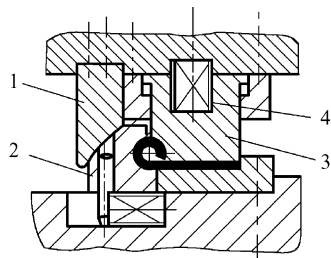


图 3-60 铰链件两次弯曲模
1—斜楔;2—凹模;3—凸模;4—弹簧

3. 级进模

对于批量大、尺寸小的弯曲件,为了提高生产率和安全性,保证零件质量,可以采用级进弯曲模进行多工位的冲裁、弯曲、切断等工艺成形。

图 3-61、图 3-62 所示为同时进行冲孔、切断和弯曲的级进模排样及级进模结构。条料以

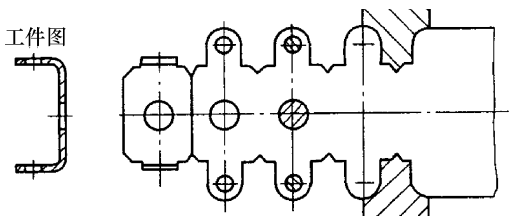


图 3-61 冲孔、切断和弯曲的级进排样

导料板导向并从刚性卸料板下面送至挡块右侧定位。上模下行时,条料被凸凹模切断并随即将所切断的坯料压弯成形,与此同时冲孔凸模在条料上冲出孔。上模回程时卸料板卸下条料,顶件销则在弹簧的作用下推出工件,获得侧壁带孔的 U 形弯曲件。

4. 复合模

对于尺寸不大的弯曲件,还可以采用复合模,即在压力机一次行程内,在模具同一位置上完成落料、弯曲、冲孔等几种不同的工序。

图 3-63(a)、图 3-63(b)是切断、弯曲复合模结构简图。图 3-63(c)是落料、弯曲、冲孔复合模,模具结构紧凑,工件精度高,但凸凹模修磨困难。

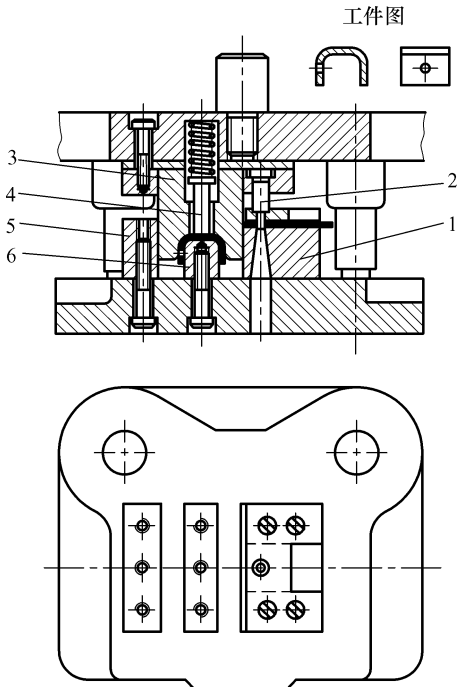


图 3-62 级进弯曲模

- 1—冲孔凹模;2—冲孔凸模;3—凸凹模;
4—顶件销;5—挡块;6—弯曲凸模

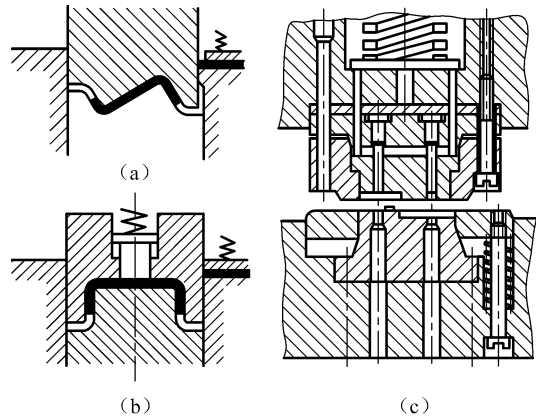


图 3-63 复合弯曲模

5. 通用弯曲模

对于小批量生产或试制生产的弯曲件,因为生产量少、品种多、尺寸经常改变,采用专用的弯曲模时成本高、周期长,采用手工加工时劳动强度大、精度不易保证,所以生产中常采用通用弯曲模。

采用通用弯曲模不仅可以成形一般的 V 形件、U 形件、Z 形件,还可成形精度要求不高的复杂形状件,图 3-64 所示是经过多次 V 形弯曲成形复杂零件的实例。

图 3-65 所示是折弯机上使用的通用弯曲模。凹模的四面分别制出适应于弯曲不同形状或尺寸零件的几种槽口[如图 3-65(a)],凸模有直臂式和曲臂式两种,工作部分的圆角半径也作成几种不同尺寸,以便按工件需要更换[如图 3-65(b)、(c)]。

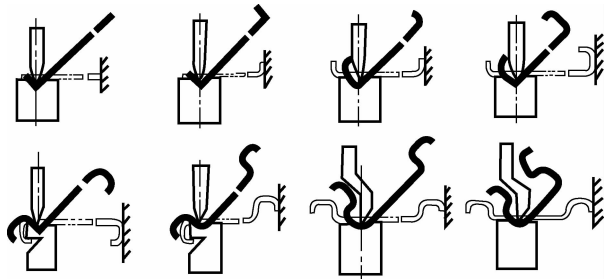


图 3-64 多次 V 形弯曲成形复杂零件的实例

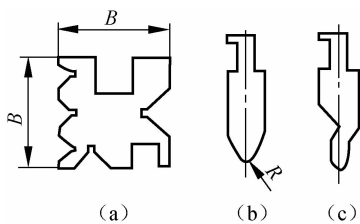


图 3-65 折弯机用的弯曲模的端面形状

3.2.3 托架弯曲工艺设计过程

1. 零件的工艺性综合分析

该零件是一个简单的支承托架。通过孔 $\phi 6\text{ mm}$ 、 $\phi 8\text{ mm}$ 分别与心轴和机身相连。

零件工作时受力不大,对强度、刚度和精度要求不高,零件形状简单对称,中批量生产,由冲裁和弯曲即可成形。冲压难点在于四角弯曲回弹较大,制件变形较大,但通过模具措施可以控制。

冲压工艺性分析见表 3-15 所示内容。

表 3-15 冲压工艺性分析表

工艺性质	冲压件工艺项目	工艺性允许值	工艺性评价
冲裁工艺性			
1. 形状	落料外形 36×102		符合工艺性
	冲孔圆孔 $\phi 6, \phi 8$		
2. 落料圆角	R3	≥ 0.75	符合工艺性
3. 孔径	2 个 $\phi 6, \phi 8$	≥ 4.5	符合工艺性
4. 孔边距	最小孔边距 8	≥ 3	符合工艺性
弯曲工艺性			
1. 形状	U 形件, 四角弯曲, 对称		符合工艺性
2. 弯曲半径	R4	≥ 1.2	符合工艺性
3. 弯曲高度	弯曲外角 20	≥ 6	符合工艺性
	弯曲内角 8	≥ 6	
4. 孔边距	距 $\phi 6$ 的孔边 8	≥ 6	$\phi 8$ 的孔边距为 4, 距弯曲区较近, 易使孔变形, 故先弯曲后冲孔
	距 $\phi 8$ 的孔边 4	≥ 6	
5. 精度	其他 IT14		符合工艺性
	2- $\phi 8$ 孔距 60 ± 0.37 为 IT9	允许尺寸公差 60 ± 1.2	为保证孔距 60 ± 0.37 , 应弯曲后冲 2- $\phi 8$ 孔
6. 材料	08 钢	常用材料范围	冲压工艺性好

2. 冲压工艺方案的分析 and 确定

从零件的结构形状可知,零件所需的冲压基本工序为落料、冲孔、弯曲。根据零件特点和工艺要求,可能有的冲压工艺方案有:

方案一: 冲 2- $\phi 6\text{ mm}$ 孔和落料复合 \rightarrow 弯曲两外角 \rightarrow 弯曲两内角 \rightarrow 冲 2- $\phi 8\text{ mm}$ 孔。如图 3-66 所示。采用此方法弯曲,须保证弯曲件高度 $H \geq (12 \sim 15)t$, 才能使凹模有足够的强度。

方案二: 冲 2- $\phi 6\text{ mm}$ 孔和落料复合 \rightarrow 一次弯曲四角 \rightarrow 冲 2- $\phi 8\text{ mm}$ 孔。如图 3-67 所示。

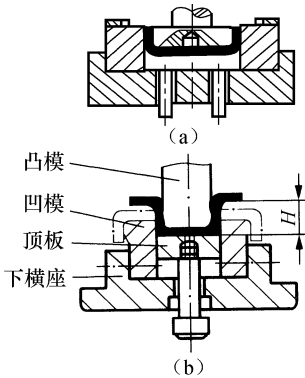


图 3-66 方案一

(a) 弯两外角; (b) 弯两内角

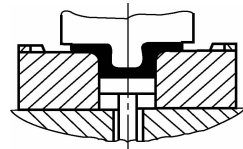


图 3-67 方案二

方案三: 冲 $2-\phi 6$ mm 孔和落料复合 \rightarrow 弯曲两外角预弯内角 $45^\circ \rightarrow$ 弯曲两内角 \rightarrow 冲 $2-\phi 8$ mm 孔。如图 3-68 所示。

方案四: 冲 $2-\phi 6$ mm 孔和落料复合 \rightarrow 两次弯曲四角(复合模) \rightarrow 冲 $2-\phi 8$ mm 孔。如图 3-69 所示。这种结构需要凹模下腔空间较大, 以方便工件侧边的转动。

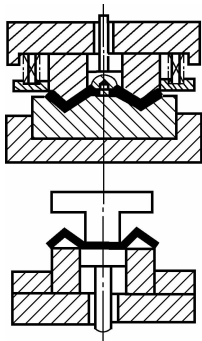


图 3-68 方案三

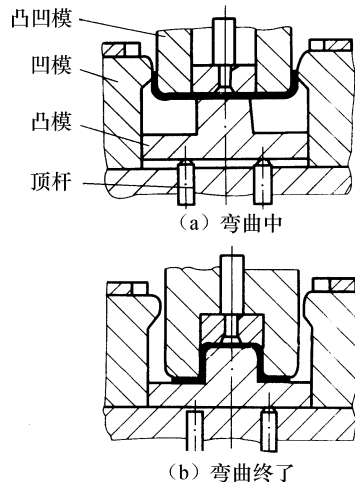


图 3-69 方案四

方案五: 冲 $2-\phi 6$ mm、 $2-\phi 8$ mm 孔和落料复合 \rightarrow 两次弯曲四角(复合模)。

方案六: 工序合并, 采用带料级进冲压。

方案性能比较见表 3-16, 考虑零件精度不高, 批量不大, 回弹对其影响不大, 可以采用校形和整形复合控制回弹。故选定方案四。

表 3-16 冲压工艺方案比较表

项目	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
模具结构	简单	简单	较复杂	较复杂	结构复杂	结构复杂
模具寿命		弯曲摩擦大, 寿命低	寿命长			
冲压件质量	有回弹, 可以控制, 形状尺寸精度较差	四角同时弯曲, 回弹大不易控制, 划痕严重	预压内角回弹小, 形状尺寸精度较好。表面质量好	有回弹, 可以控制	有回弹, 可以控制	有回弹, 可以控制, 表面质量较好
模具数量	4 套	3 套	4 套	3 套	2 套	1 套
生产效率	低	较高	低	较高	高	最高

3. 工艺计算

1) 坯料尺寸计算

如图 3-70 所示,坯料展开尺寸分段计算可得:

坯料总尺寸 $L=2L_1+2L_2+L_3+4L_4=2\times 20+2\times$

$$4+22+4\times 8=102(\text{mm})$$

2) 排样和裁板方案

坯料形状为矩形,采用单排最适宜。

取搭边 $a=2.8\text{ mm}, a_1=2.4\text{ mm},$

侧条料宽度 $B=102+2\times 2.8=107.6(\text{mm})$

步距 $s=36+2.4=38.4(\text{mm})$

板料选用规格为 $3\text{ mm}\times 900\text{ mm}\times 2\text{ }000\text{ mm}.$

采用纵裁法:

$$\text{每板条料数 } n_1 = \frac{900}{107.6} = 8(\text{条}), \text{余 } 39.2\text{ mm}$$

$$\text{每条制件数 } n_2 = \frac{900-2.8}{38.4} = 52(\text{件})$$

$$39.2\times 2\text{ }000\text{ 余料利用件数 } n_3 = \frac{2\text{ }000}{107.6} = 18(\text{件}), \text{余 } 63.2\text{ mm}.$$

$$\text{每板制件数 } n = n_1 \times n_2 + n_3 = 8 \times 52 + 18 = 434(\text{件})$$

$$\text{材料利用率 } \eta = \frac{434 \times (36 \times 102 - 2\pi \times 6^2 - 2\pi \times 8^2)}{900 \times 2000} = 88.54\%$$

采用横裁法:

$$\text{每板条料数 } n_1 = \frac{2\text{ }000}{107.6} = 18(\text{条}), \text{余 } 63.2\text{ mm}$$

$$\text{每条制件数 } n_2 = \frac{900-2.8}{38.4} = 23(\text{件}), \text{余 } 14\text{ mm}$$

$$63.2 \times 900\text{ 余料利用件数 } n_3 = \frac{900}{107.6} = 422(\text{件})$$

$$\text{材料利用率 } \eta = \frac{422 \times (36 \times 102 - 2\pi \times 6^2 - 2\pi \times 8^2)}{900 \times 2\text{ }000} = 86.09\%$$

由此可见,纵排材料利用率高,但横排时弯曲线与纤维方向垂直,弯曲性能好,08 钢塑性好,为提高效率,降低成本,选用纵向单排。

3) 冲压力计算

(1) 工序 1(落料冲孔复合工序)

$$\text{冲裁力 } F = 1.3L_t\tau = 1.3(2 \times 36 + 2 \times 102 + 2 \times 6\pi) \times 3 \times 260 = 318\text{ }071(\text{N})$$

$$\text{卸料力 } F_x = K_x \times F = 0.05 \times 318\text{ }071 = 15\text{ }903(\text{N})$$

$$\text{推件力 } F_T = nK_T \times F = 3 \times 0.055 \times 318\text{ }071 = 52\text{ }490(\text{N})$$

$$\text{冲压力 } F_{\text{总}} = (F + F_x + F_T) = (300\text{ }995 + 12\text{ }039 + 40\text{ }634) = 386\text{ }465(\text{N})$$

通过计算分析,选用 400 kN 的冲床。

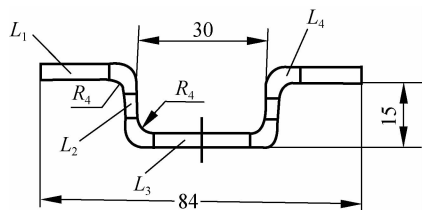


图 3-70 坯料展开尺寸计算

(2) 弯曲工序

由于二次弯曲,按 U 形件弯曲计算。

$$\text{自由弯曲力 } F_{\text{自}} = \frac{0.7Kbt^2}{r+t} \sigma_b = \frac{0.7 \times 1.3 \times 36 \times 3^2 \times 338}{4+3} = 14\,236(\text{N})$$

$$\text{校正弯曲力 } F_{\text{校}} = Ap = (84 \times 36) \times 80 = 241\,920(\text{N})$$

4. 填写托架冲压工艺卡如表 3-17

表 3-17 托架冲压工艺卡

(厂名)	冲压工艺卡		产品型号	零件名称	玻璃升降外壳	共 页	
			产品名称	零件型号		第 页	
材料牌号及规格		材料技术要求		坯料尺寸	每个坯料可制零件数	毛坯重量	辅助材料
08 钢 3±0.11×900 ×2 000				条料 3×108 ×2 000	52 件		
工序号	工序名称	工序内容	加工简图		设备	工艺装备	工时
0	下料	剪板 108×2 000					
1	冲孔落料	冲 2-φ6 孔和落料复合			400 kN	落料冲孔复合模	
2	弯曲校正	先弯外后弯内并校正			400 kN	二次弯曲模	
3	冲孔	冲 2-φ8 孔			100 kN	冲孔模	
4	检验	按零件图样检验					
					绘制 (日期)	审核 (日期)	会签 (日期)

做 一 做

3-1 弯曲变形有哪些特点? 宽板与窄板弯曲时为什么得到的截面形状不同?

3-2 弯曲的变形程度用什么来表示？弯曲时的极限变形程度受到哪些因素的影响？

3-3 为什么说弯曲时的回弹是弯曲工艺不能忽视的问题？试述减小弯曲件回弹的常用措施。

3-4 什么是弯曲时的偏移？产生偏移的原因有哪些？如何减小和克服偏移？

3-5 弯曲模的结构有哪些特点？

3-6 试分析图 3-71(a)、(b)所示零件的弯曲工艺性，并对弯曲工艺性不合理之处提出解决措施。零件材料为 20 钢，未注弯曲内表面圆角半径为 2 mm。

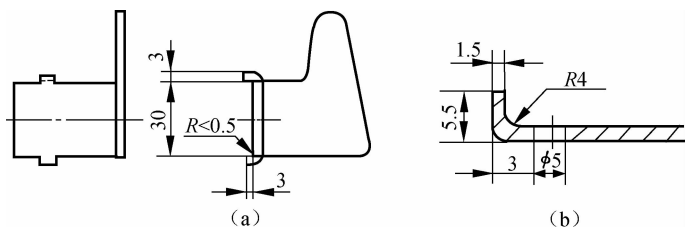


图 3-71

3-7 计算图 3-72 所示零件的展开长度。该零件需在模具内弯成什么形状和尺寸，出模后才能得到图示形状和尺寸？

3-8 弯曲如图 3-73, 图 3-74 所示零件，材料为 35 钢，已退火，厚度 $t=4\text{ mm}$ 。完成以下工作内容：

- (1) 分析弯曲件的工艺性；
- (2) 计算弯曲件的展开长度和弯曲力（采用校正弯曲）；
- (3) 绘制弯曲模结构草图；
- (4) 确定弯曲凸、凹模工作部位尺寸，绘制凸、凹模零件图。

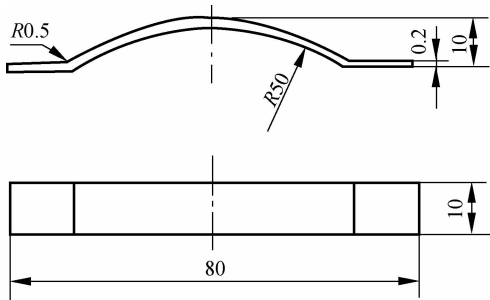


图 3-72

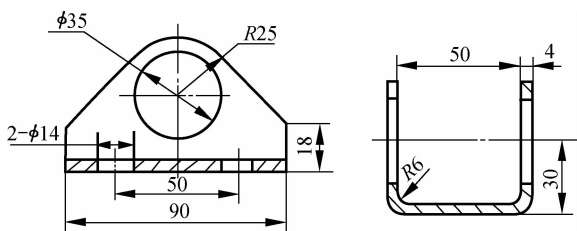


图 3-73

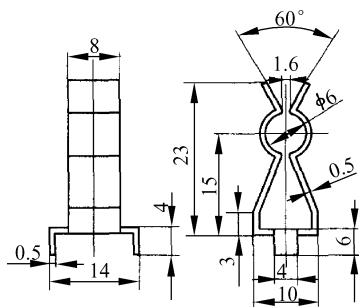


图 3-74 保持架