



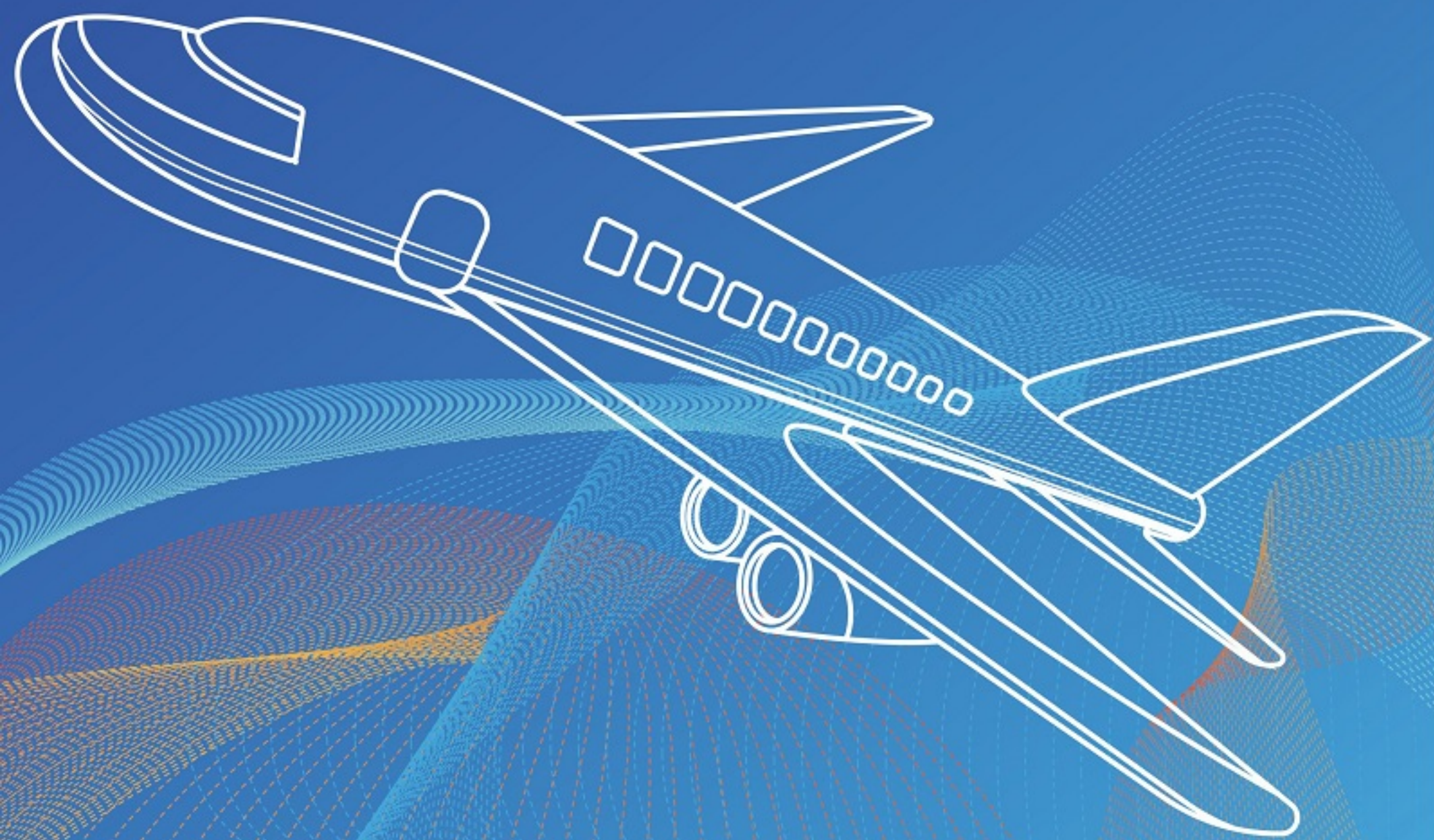
“十四五”职业教育国家规划教材



“十三五”江苏省高等学校重点教材

# 飞机钣金技术

主编 黄杰



南京大学出版社



## 图书在版编目(CIP)数据

飞机钣金技术 / 黄杰主编. — 南京: 南京大学出版社, 2020. 8

ISBN 978 - 7 - 305 - 23393 - 7

I. ①飞… II. ①黄… III. ①飞机—钣金工—工艺学  
IV. ①V261.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 097617 号

南京大学出版社

出版发行 南京大学出版社  
社 址 南京市汉口路 22 号  
出 版 人 金鑫荣

邮 编 210093

书 名 飞机钣金技术  
主 编 黄 杰  
责任编辑 吴 华

编辑热线 025 - 83596997



扫码教师可免费获取  
教学资源

照 排 南京南琳图文制作有限公司  
印 刷 南京鸿图印务有限公司  
开 本 787×1092 1/16 印张 13.5 字数 312 千  
版 次 2020 年 8 月第 1 版 2020 年 8 月第 1 次印刷  
ISBN 978 - 7 - 305 - 23393 - 7  
定 价 38.00 元

网址: <http://www.njupco.com>  
官方微博: <http://weibo.com/njupco>  
微信服务号: njuyxue  
销售咨询热线: (025) 83594756

\* 版权所有, 侵权必究

\* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购  
图书销售部门联系调换

# 前言

“飞机钣金成形技术”是航空航天制造工程的一个重要组成部分,是实现飞机结构特性的重要制造技术之一,是航空装备专业类学生的专业课程。本教材配套该课程,结合新的教学方法和教学形式,从培养应用型人才的目标出发,遵循“理论适度,培养技能,拓展思维,突出应用”的原则,以完整的实际应用项目为基础,以企业所要求的职业素养、职业能力和职业知识为内涵,把知识、技能和岗位能力融入 8 个项目,20 个教学任务之中,力求使读者通过学习,掌握钣金成形技术和操作技能。

本书主要包括金属塑性变形基础;冲裁;弯曲成形的压弯、滚弯和弯管;拉深成形;手工成形的手工弯曲、放边、收边、拔缘、拱曲、卷边、咬缝和校正;旋转成形;飞机钣金零件成形的橡皮成形、拉形和落压成形;特种成形的喷丸与高能成形和超塑性与蠕变成形。

本书由南京工业职业技术大学黄杰副教授任主编,南京航空航天大学陈明和教授任主审。南京工业职业技术大学庄亚红、成诚和蔡佳,西安航空职业技术学院石日昕,中航工业西飞公司段雪锋参加编写。

在编写本书过程中,得到了编者所在院校和部分企业的大力支持和帮助,也参考了部分国内外的文献资料,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2020 年 4 月

# 目 录

项目 1 金属塑性变形基础 .....	1
任务 变形机理 .....	1
项目 2 冲 裁 .....	10
任务 冲裁分离 .....	10
项目 3 弯曲成形 .....	25
任务 1 压 弯 .....	25
任务 2 滚 弯 .....	40
任务 3 弯 管 .....	49
项目 4 拉深成形 .....	60
任务 拉深成形 .....	60
项目 5 手工成形 .....	79
任务 1 手工弯曲 .....	79
任务 2 放 边 .....	89
任务 3 收 边 .....	95
任务 4 拔 缘 .....	102
任务 5 拱 曲 .....	108
任务 6 卷 边 .....	116
任务 7 咬 缝 .....	122
任务 8 校 正 .....	128



项目 6 旋压成形 .....	138
任务 旋压成形 .....	138
项目 7 飞机钣金零件成形 .....	149
任务 1 橡皮成形 .....	149
任务 2 拉 形 .....	161
任务 3 落压成形 .....	177
项目 8 特种成形 .....	189
任务 1 喷丸与高能成形 .....	189
任务 2 超塑性与蠕变成形 .....	200
参考文献 .....	208

南京大学出版社



## 金属塑性变形基础

### 任务 变形机理



#### 【任务描述】

1. 绘制低碳钢、铝合金的应力——应变曲线拉伸图。
2. 确定低碳钢、铝合金在拉伸时的机械性能(比例极限  $R_p$ 、下屈服强度  $R_{eL}$ 、强度极限  $R_m$ 、延伸率  $A$ 、断面收缩率  $Z$  等)。



#### 【知识准备】

##### 一、变形机理

大多数金属是在结晶状态下使用的。所谓结晶,就是原子按一定几何规律在空间周期性排列。使金属原子结合在一起的是金属键,这种键的结合特点是每个正离子处境都是等同的。因此,金属在塑性变形时,原子在变形后的新位置上能重新键合。金属键的方向性很小,这种相互的吸引力将金属原子在各个方向等地堆积起来,形成空间点阵,并使各金属原子间具有最小的间隙空间。点阵的定义是每个阵点在空间具有相同的环境。也就是说,在一个空间点阵的每个阵点上,所看到的是完全相同的景象,并且永无止境。

##### 1. 金属结构

金属的种类很多,但绝大多数(占 85%)金属的晶格类型属于下面三种。

##### (1) 体心立方晶格

体心立方晶胞是一个立方体,其晶格常数  $a=b=c$ ,  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。在体心立方晶胞中,原子位于立方体的八个顶角上和立方体的中心,如图 1.1 所示。属于这种晶格类型的金属有  $\alpha$ -铁( $\alpha$ -Fe)及铬(Cr)、钒(V)、钨(W)、钼(Mo)等。

##### (2) 面心立方晶格

其晶胞也是一个立方体,原子位于立方体的八个顶角上和立方体六个面的中心,如图 1.2 所示。属于这种晶格类型的金属有  $\gamma$ -铁( $\gamma$ -Fe)及铝(Al)、铜(Cu)、铅(Pb)、镍(Ni)等。

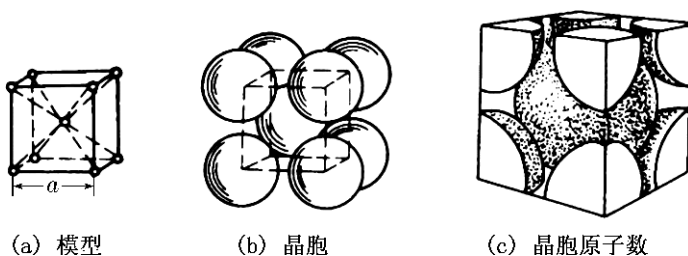


图 1.1 体心立方晶格

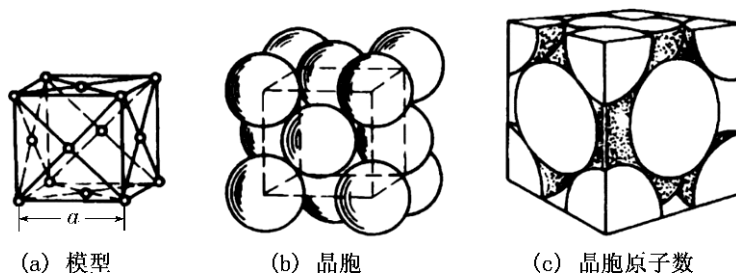


图 1.2 面心立方晶格

### (3) 密排六方晶格

其晶胞是一个正六方柱体,原子排列在柱体的每个角顶上和上、下底面的中心,另外三个原子排列在柱体内,如图 1.3 所示。属于这种晶格类型的金属有镁(Mg)、铍(Be)、镉(Cd)及锌(Zn)等。

不同元素组成的金属晶体因晶格形式及晶格常数的不同,表现出不同的物理、化学和力学性能。有些金属虽然具有相同的晶格类型,但由于原子直径的大小及晶格常数不相同,各原子所包含的电子数不同,其性能仍有很大的区别。金属的晶体结构可用 X 射线结构分析技术进行测定。

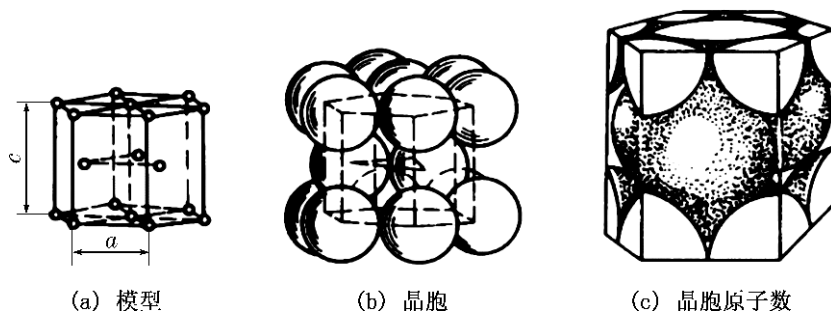


图 1.3 密排六方晶格

## 2. 金属塑性变形机理

钣金工作就是使金属材料在常温下(或加热时)变形,从而得到所需零件形状的工作。钣金工作最大的特点是使金属材料变形,而变形必然引起金属内部结构变化。要做好钣金工作,必须了解变形对结构的影响,以便有效地利用它。



在钣金成形过程中为使板料变成所需形状,就要采用各种工艺方法(如弯曲、拉深等)对板料施加一定的力,这种在加工过程中对材料施加的力称为外力。

板料在外力作用下会发生变形,其内部各质点间的相对位置将会发生变化,各质点必然相互作用阻止其变化。这种原子间相互作用阻止材料变形的力称为内力,其数值大小和外力相等。

在钣金工艺中,应力是指作用在材料单位横截面积上的内力,用 $\sigma$ 表示。

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1.1)$$

式中: $\sigma$ ——应力,Pa; $P$ ——外力,N; $A$ ——横截面积, $\text{m}^2$ 。

金属在外力的作用下发生形状的改变,这种性质叫作变形。变形一般包括弹性变形和塑性变形两个发展阶段。弹性变形是组成晶格的原子在外力作用下被迫离开原来的平衡位置,在外力消失后,原子又能恢复到原来的平衡位置。这种外力去除后能消失的变形称为弹性变形。塑性变形则是原子被迫离开原来的平衡位置后,达到一个新的平衡位置,在外力消除后,原子不能回到原来的平衡位置。这种当外力去除后不能消失而残留下来的永久变形称为塑性变形,它是冷加工所需要的。金属的塑性变形主要是通过滑移和孪动两种方式进行的。

#### (1) 滑移

金属塑性变形最基本的方式是滑移。所谓滑移,是指晶体在切应力的作用下,晶体的一部分沿一定的晶面(滑移面)上的一定方向(滑移方向)相对于另一部分发生滑动。当原子滑移到新的平衡位置时,晶体就产生了微量的塑性变形,许多晶面滑移的总和就产生了宏观的塑性变形。图 1.4 表示晶体在切应力( $\tau$ )的作用下发生滑移产生变形的过程。

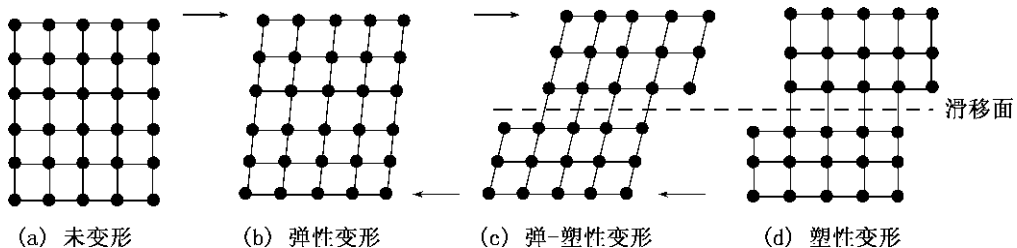


图 1.4 单晶体在切应力作用下的变形

滑移变形具有以下特点:

① 滑移在切应力作用下产生,不同金属产生滑移的最小切应力(称滑移临界切应力)大小不同。钨、钼、铁的滑移临界切应力比铜、铝的要大。

② 滑移总是沿着晶体中原子密度最大的晶面(滑移面)和其上密度最大的晶向(滑移方向)进行,这是由于密排面之间、密排方向之间的间距最大,结合力最弱。

③ 滑移时两部分晶体的相对位移是原子间距的整数倍。

④ 滑移时晶体发生转动。

⑤ 滑移是通过位错在滑移面上的运动来实现的。晶体滑移时,并不是整个滑移面上的全部原子一起移动的,因为那么多原子同时移动,需要克服的滑移阻力十分巨大,实际

上滑移是借助位错的移动来实现的,如图 1.5 所示。大量位错移出晶体表面,就产生了宏观的塑性变形。

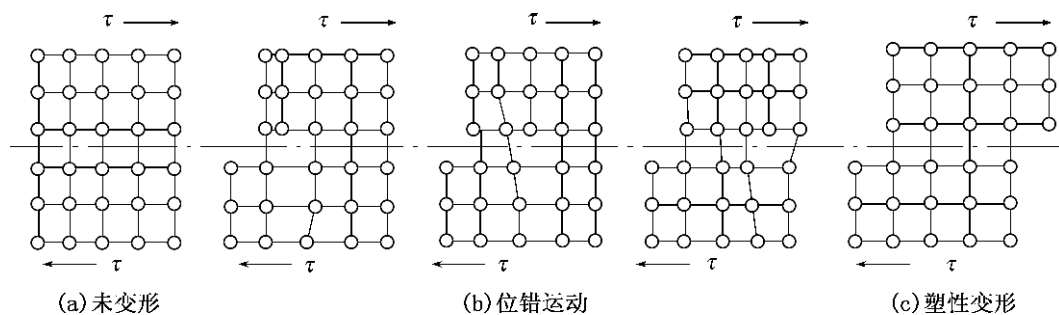


图 1.5 位错的运动

## (2) 孪动

晶体的另一种塑性变形方式是孪生,又称孪动或孪晶。它不是塑性变形的主要方式,但它却能造成破坏。孪动是金属在一定的外力作用下,晶体的一部分相对于另一部分沿着一定的晶面和方向发生转动,其结果使晶体的一部分与原晶体处于对称位置。

孪动与滑移的主要区别如下:

① 滑移过程是渐进的,而孪动过程是突然发生的。例如,金属锡在孪动过程中,能听到一种清脆的声音,称为“锡鸣”。

② 在微观方面,滑移时晶格两部分相对于滑移面的切变量是原子间距的整数倍,滑移不会引起晶格取向的变化;而孪动时切变量则是原子间距的分数倍,并且各晶面相对于孪生面的切变量和它与孪生面的距离成正比,也正是由于这个原因,孪动才会引起晶格取向的变化,如图 1.6 所示。

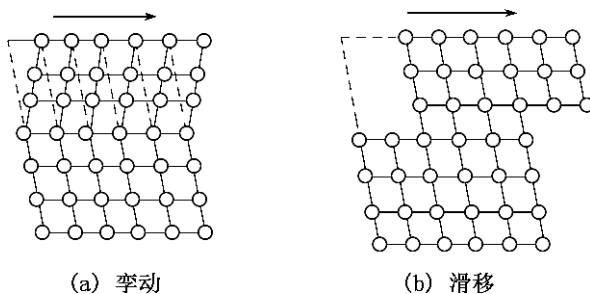


图 1.6 孪动与滑移的区别

## 二、应力—应变曲线

材料在外力作用下所呈现的有关强度和变形方面的特性,称为材料的力学性能。它是保证零件和构件正常工作应具备的主要性能,主要包括强度、塑性、硬度、冲击韧性和疲劳强度等。

材料的力学性能一般通过试验来测定。例如,强度和塑性指标是通过拉伸试验测定

的。板料的拉伸试验是确定板料力学性能的最简单、最普通的方法。根据拉伸试验所提供的力学性能指标,可以定性估计材料的压制成形性能。

以退火的低碳钢(含碳量在 0.3% 以下的碳素钢)为例,试样在拉伸试验过程中,伸长量与拉力  $P$  之间的关系曲线称为拉伸图或  $P-\Delta l$  曲线,如图 1.7 所示。为了消除试样尺寸的影响,用拉力  $P$  除以试件横截面的原始面积  $A$ ,得到名义正应力:  $\sigma = P/A$ ; 同时将伸长量  $\Delta l$  除以标距的原始长度  $l$ , 得到应变:  $\epsilon = \Delta l/l$ 。以  $\sigma$  为纵坐标,  $\epsilon$  为横坐标, 作图表示  $\sigma$  与  $\epsilon$  的关系, 称该图为应力—应变图或  $\sigma-\epsilon$  曲线(如图 1.8)。

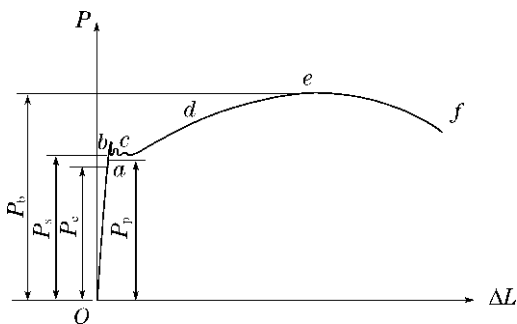


图 1.7 拉伸图( $P-\Delta l$  曲线)

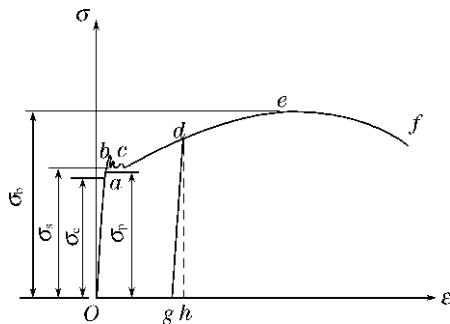


图 1.8 应力—应变图( $\sigma-\epsilon$  曲线)

根据试验结果,低碳钢的拉伸力学性能(如图 1.8)表现为 4 个不同的阶段。

#### 1. 弹性阶段 $ob$

在拉伸的初始阶段,如果解除拉力后变形可以完全消失,即变形是弹性的。实验表明,低碳钢在弹性阶段内工作应力  $\sigma$  不超过比例极限  $\sigma_p$  时,  $\sigma$  与  $\epsilon$  的关系为直线  $oa$ , 材料符合胡克定律,即  $\sigma = E\epsilon$ 。式中,  $E$  为与材料有关的比例常数,称为弹性模量。对应于  $\sigma-\epsilon$  曲线图上直线  $oa$  的斜率,它的量纲和单位与正应力相同(Pa)。它是衡量材料抵抗弹性线变形能力的重要常数,称为弹性指标。弹性变形满足胡克定律的材料称为线弹性材料。某些材料(如某些高分子材料)称为非线性弹性材料。Q235 钢的比例极限约为  $\sigma_p = 200 \text{ MPa}$ 。

当  $\sigma$  超过比例极限  $\sigma_p$  后,即从  $a$  点到  $b$  点,  $\sigma$  与  $\epsilon$  的关系不再表现为直线,但变形仍然是弹性的。弹性阶段所对应的最高应力称为弹性极限,用  $\sigma_e$  表示。弹性极限  $\sigma_e$  和比例极限  $\sigma_p$  的数值非常接近,因此,工程上并不严格区分。

#### 2. 屈服阶段 $bc$

当  $\sigma$  超过弹性极限  $\sigma_e$  后,如果解除拉力,试样的一部分变形消失(即弹性变形),而另一部分不能消失的变形称为塑性变形或残余变形。在  $\sigma-\epsilon$  曲线图上表现为一条大致水平的锯齿状线段。这种应力  $\sigma$  基本保持不变,而应变  $\epsilon$  显著增加的现象称为屈服或流动,它标志着材料暂时失去了抵抗变形的能力。屈服阶段内的最高应力和最低应力分别称为上屈服极限和下屈服极限。试验结果表明:上屈服极限受很多因素影响,一般是不稳定的;而下屈服极限则较为稳定,通常把下屈服极限称为材料的屈服极限或屈服点,用  $\sigma_s$  表示。材料的屈服使零件产生显著的塑性变形,从而影响机器的正常工作,因此,屈服极限  $\sigma_s$  是衡量材料强度的重要指标。Q235 钢的屈服极限约为  $\sigma_s = 240 \text{ MPa}$ 。



若试样表面足够光滑,屈服时可以看到试件表面上出现一系列与轴线成  $45^\circ$  的斜条纹,通常称为滑移线。它是由材料内部晶格产生滑移引起的。由斜截面应力计算公式知,在  $45^\circ$  斜截面上存在最大切应力  $\tau_{\max}$ ,  $\tau_{\max}$  超过一定极限值是造成晶格滑移的根本原因。由此可见屈服现象与最大切应力有关。

### 3. 强化阶段 $ce$

过了屈服阶段以后,试样内晶粒滑移终止,材料又恢复了抵抗变形的能力,要使它继续变形必须增加拉力,这种现象称为材料的强化。 $\sigma-\epsilon$  曲线图中,强化阶段的最高点  $e$  所对应的应力  $\sigma_b$  是材料所能承受的最大应力,称为强度极限(或抗拉强度)。它是衡量材料强度的另一重要指标。Q235 钢的强度极限约为  $\sigma_b=400\text{ MPa}$ 。

### 4. 局部变形阶段 $ef$

当应力  $\sigma$  超过强度极限后,试样在某一横截面及其附近出现急剧收缩,即产生缩颈现象。由于缩颈部分横截面面积迅速减小,致使试样继续伸长所需的拉力也相应减小,继续伸长集中在缩颈区域。在  $\sigma-\epsilon$  曲线图中,按原始横截面面积  $A$  计算的名义应力  $\sigma=P/A$  随之下降,当缩颈处的横截面收缩到某一程度时,试件被拉断。

为了比较全面地衡量材料的力学性能,除了强度指标,还需要知道材料在拉断前产生塑性变形的能力。工程上常用的塑性指标有延伸率和断面收缩率。延伸率是指标件拉断前后标距范围内塑性变形的百分率,用  $\delta$  表示,即

$$\delta = \frac{l_1 - l}{l} \times 100\% \quad (1.2)$$

式中: $l$  为试验前拉伸试样的标距长度; $l_1$  为拉伸试样断裂后两段试样拼接后的标距长度。材料的另一个塑性指标是指试件剪断后断口处最小截面面积的断面收缩率,用  $\Psi$  表示,即

$$\Psi = \frac{A_1 - A}{A} \times 100\% \quad (1.3)$$

式中: $A$  为试验前横截面面积; $A_1$  为缩颈断口处最小截面面积。

$\delta$  和  $\Psi$  愈大,说明材料的塑性愈好。工程上通常按延伸率的大小将材料分成两大类: $\delta > 5\%$  的材料称为塑性材料,如碳钢、黄铜、铝合金等; $\delta < 5\%$  的材料称为脆性材料,如灰铸铁、玻璃、陶瓷等。对于 Q235 钢,  $\delta = 5\% \sim 20\%$ ,  $\Psi = 60\%$ ,这说明其塑性性能很好。

对于塑性材料,还有一个值得注意的力学性能,即卸载定律。如图 1.9 所示,将试件加载到超过屈服极限的  $d$  点,然后逐渐卸去载荷,则在卸载过程中应力与应变将按线性关系减小,即沿着斜直线  $dg$  回到  $g$ ,斜直线  $dg$  近似地平行于  $oa$ 。这说明:在卸载过程中,应力和应变按直线规律变化,这就是卸载定律。卸载完毕后,只有如图 1.9 中线段  $gh$  所代表的那部分应变消失,而线段  $og$  所代表的那部分应变并不消失。这说明:当加载至应力达到图 1.9 中  $d$  点

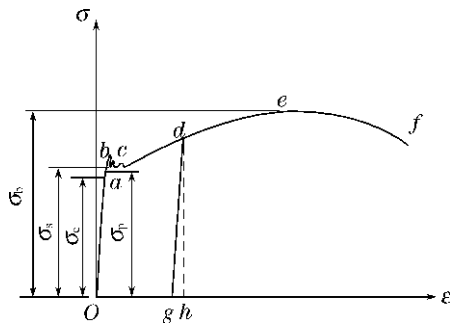


图 1.9 韧性材料的加载卸载再加载曲线

对应的值时,相应的应变包括了弹性应变  $\epsilon_e$  和塑性应变  $\epsilon_p$  两部分。

卸载后,如果在短期内再次加载,则应力和应变大致沿卸载时斜直线  $gd$  上升,到  $d$  点后又沿曲线  $def$  变化。这时,当应力达到原来的流动极限时不再发生流动。可见再次加载时,直到  $d$  点以前材料的变形都是弹性的,经过  $d$  点以后才开始出现塑性变形。倘若卸载后经过一段时间再加载,则应力应变曲线会在超过卸载应力一定值后才变为曲线。工程实践中就是利用这种加载卸载再加载的方式将塑性材料(如低碳钢)进行预张拉以提高材料的比例极限。但是,经过这种处理的钢材,比例极限虽然提高了,塑性变形和延伸率却有所降低。材料在室温下经受塑性变形后比例极限提高而塑性降低的现象称为冷作硬化。冷作硬化现象经退火后又可以消除。



## 【任务实施】

### 一、实验设备

电子万能试验机一台;

钢直尺一把;

游标卡尺一把;

低碳钢和铝合金试验件,试样符合 GB/T 228.1—2010 规定,结构如图 1.10 所示。

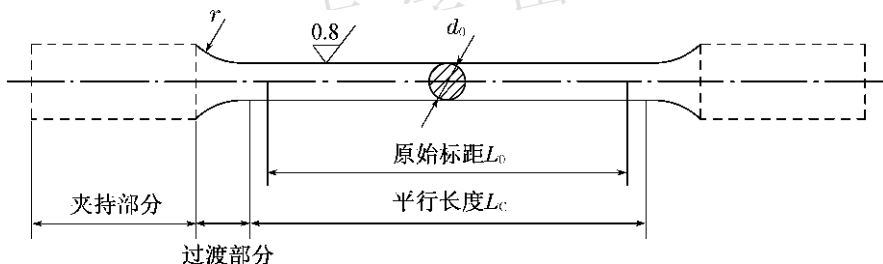


图 1.10 标准试样

### 二、操作步骤

#### 1. 电子万能试验机操作

第一步 量尺寸。用游标卡尺在标距内的两端及中部三个位置上沿两个相互垂直的方向测量直径,以其平均值计算各横截面面积,再取三者中的最小值为试件的初始截面面积。

第二步 打开计算机电源,选择试验模式。

第三步 安装试件。使用手控盒或程序移动横梁夹持试样,将试件安装至合适位置,按箭头指示方向手动夹紧试件上下夹头。

第四步 安装引伸计。夹持好试件后请安装引伸计,安装后取下小插销。

第五步 各通道清零,点击开始按钮,开始加载,画曲线。

第六步 观察曲线和实验现象,若曲线开始下降,试件出现颈缩现象至最后拉断。当出现“试样破断,本实验是否有效”对话框,点击“是”保存,结束本实验。

第七步 打印出拉伸图,抄下数据。

第八步 卸下试件,测量断后标距及断中处的最小直径。

## 2. 实验数据处理

### (1) 强度指标

比例强度:  $\sigma_p = P/A_0 = 4P/(\pi d_0^2)$  (1.4)

下屈服强度:  $\sigma_s = P_s/A_0$  (1.5)

条件屈服强度:  $\sigma_{0.2} = P_{0.2}/A_0$  (1.6)

抗拉强度:  $\sigma_b = P_b/A_0$  (1.7)

断裂强度:  $\sigma_f = P_f/A_0$  (1.8)

### (2) 塑性指标

断后伸长率:  $\delta = (L_u - L_0)/L_0 \times 100\%$  (1.9)

断面收缩率:

$$\Psi = (A_0 - A_u)/A_0 \times 100\% = \left( \frac{1}{4} \pi d_0^2 - \frac{1}{4} \pi d_u^2 \right) / \left( \frac{1}{4} \pi d_0^2 \right) \times 100\% \quad (1.10)$$

弹性模量:  $E$

#### 注意事项

- ① 试件夹紧后,切忌使用启动下夹头的行程开关。
- ② 加载、卸载必须缓慢进行,实验过程中不得触动摆锤。
- ③ 实验过程中,如听到异常声音或发生故障,应立即停机。

## 三、结束工作

第一步 清点工具和设备,摆放规范整齐,外表完好。

第二步 清扫工作现场,保持工位文明整洁,符合安全文明生产。

第三步 填写试验数据表 1.1 和表 1.2,并分析低碳钢、铝合金的应力—应变曲线拉伸图。

表 1.1 低碳钢拉伸试验数据表

初始截面积 $A_0$ (mm <sup>2</sup> )	初始标距 $L_0$ (mm)	断后伸长率 $\delta$ (%)	比例伸张力 $P$ (kN)	下屈服力 $P_s$ (kN)	最大力 $P_b$ (kN)	断裂力 $P_f$ (kN)
断后截面积 $A_u$ (mm <sup>2</sup> )	断后标距 $L_u$ (mm)	断面收缩率 $\Psi$ (%)	比例强度 $\sigma_p$ (MPa)	下屈服强度 $\sigma_s$ (MPa)	抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)	断裂强度 $\sigma_f$ (MPa)



表 1.2 铝合金拉伸试验数据表

初始截面积 $A_0(\text{mm}^2)$	初始标距 $L_0(\text{mm})$	断后伸长率 $\delta(\%)$	比例伸长力 $P(\text{kN})$	条件屈服力 $P_{0.2}(\text{kN})$	最大力 $P_b(\text{kN})$
断后截面积 $A_u(\text{mm}^2)$	断后标距 $L_u(\text{mm})$	断面收缩率 $\Psi(\%)$	比例强度 $\sigma_p(\text{MPa})$	条件屈服强度 $\sigma_{0.2}(\text{MPa})$	抗拉强度 $\sigma_b(\text{MPa})$



【任务评价】

根据表 1.3 评分表,可对任务进行评价和总结。

表 1.3 放边评分表

金属材料拉伸试验操作评分			总分				
序号	考核项目	配分 $T$	评分标准			检测结果	得分
			$\leq T$	$>T, \leq 2T$	$>2T$		
1	比例强度 $\sigma_p$	20	20	5	0		
2	条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$	15	15	5	0		
3	断面收缩率 $\Psi$	15	15	0	0		
4	工具和设备使用规范性	30	发现一处扣 2 分				
5	技术安全和文明生产	20	违反规定扣 5~10 分				



【思考与练习】

1. 测定材料的力学性能为什么要使用标准试件?
2. 提高金属材料的屈服强度有哪些方法?
3. 为什么材料的塑性要以延伸率和断面收缩率这两个指标来衡量? 它们在工程上有什么实际意义?



## 冲 裁

### 任务 冲裁分离



#### 【任务描述】

1. 冲裁零件的形状和尺寸如图 2.1 所示,确定冲裁工艺方案,设计冲裁模具。

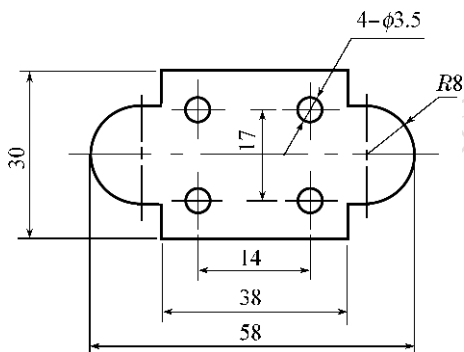


图 2.1 零件图

#### 2. 技术要求

- (1) 生产批量:大批量。
- (2) 材料:08F 钢板,厚度  $t=2\text{ mm}$ 。
- (3) 尺寸精度:零件图上所有尺寸均未标注公差,属自由尺寸。
- (4) 零件平整,表面无划痕、压伤、裂纹等。



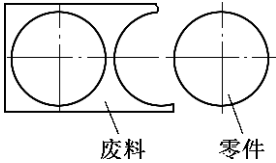
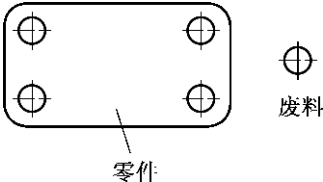
#### 【知识准备】

### 一、冲裁的基本原理

冲裁是利用冲裁模来完成板料分离的一种冲压加工方法。冲裁可以得到平板零件,也可为弯曲、拉深、成形等工序准备毛坯。冲裁工艺包括冲孔、落料、切断、切口、切边、剖切、冲槽、冲缺、修整等内容。

一般来说,冲裁工艺主要是指落料和冲孔工序。如果冲裁时,沿封闭曲线以内被分离的板料是零件时,称为落料。反之,封闭曲线以外的板料作为零件时,称为冲孔,见表 2.1 所示。

表 2.1 冲裁工序及应用

工序	简图	特征及应用
落料		用冲模从材料上沿封闭轮廓曲线分离出工件的工序。冲下部分是零件。用于制造各种形状的平板零件。
冲孔		用冲模从工件上沿封闭轮廓分离出的废料,获得所需要的带孔零件的工序。冲下部分是废料。用于制造各种形状的平板零件。

冲裁过程如图 2.2 所示。凸模 1 与凹模 2 具有与工件轮廓一致的刃口。凸、凹模之间存在一定的间隙,当外力(如压力机滑块运动)将凸模推下时,便将放在凸、凹模之间的板料冲裁成需要的工件。

冲裁过程是在瞬间完成的,在模具刃口尖锐,凸、凹模间隙正常时,这个过程大致可以分为三个阶段,图 2.3 所示为板料冲裁变形的全过程。

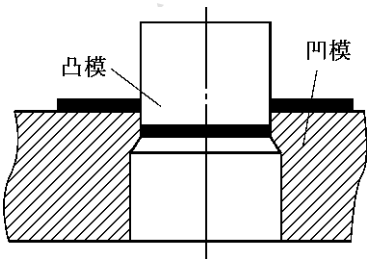


图 2.2 冲裁过程示意图

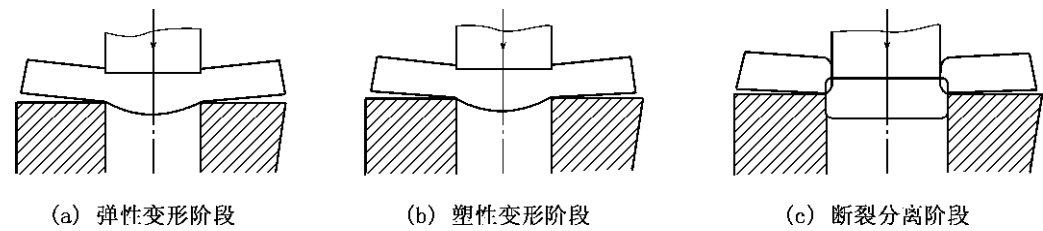


图 2.3 板料冲裁变形过程

1. 弹性变形阶段

当凸模开始接触板料并下压时,在凸、凹模压力作用下,板料表面受到压缩产生弹性变形,板料略有压入凹模洞口现象。由于凸、凹模间隙的存在,在冲裁力作用下产生弯矩,使板料同时受到弯曲和拉伸作用,凸模下的材料略有弯曲,凹模上的材料则向上翘起。间隙越大,弯曲和上翘现象越明显。而材料的弯曲和上翘又使凸、凹模端面与材料的接触面逐渐移向刃口的附近。此时,凸、凹模刃口周围材料应力集中现象严重。位于刃口端面的材料出现压痕,而位于刃口侧面的材料则形成圆角。由于开始时压力不大,材料的内应力



还未达到屈服点,仍在弹性范围内,若撤去压力,板料可回复原状。

### 2. 塑性变形阶段

凸模继续下压,材料内应力达到屈服点,板料在与凸、凹模刃口接触处产生塑性剪切变形,凸模切入板料,板料下部被挤入凹模洞内。板料剪切面边缘的网角小于弯曲和拉伸作用的加大而形成明显塌角,剪切面显现明显的滑移变形,形成一段光亮且与板面垂直的剪切断面。凸模继续下压,光亮剪切带加宽,而冲裁间隙造成的弯矩使材料产生弯曲应力。当弯曲应力达到材料抗弯强度时便发生弯曲塑性变形,使冲裁件平面边缘出现“穹弯”现象。随着塑性剪切变形的发展,分离变形应力随之增加,终至凸、凹模刃口侧面材料内应力超过抗剪强度,便出现微裂纹。由于微裂纹产生的位置是在离刃尖不远的侧面,裂纹产生后也就留下了毛刺。

### 3. 断裂分离阶段

凸模继续下行,刃口侧面附近产生的微裂纹不断扩大并向内延伸发展,至上、下两裂纹相遇重合,板料便完全分离,粗糙的断裂带同时也留在冲裁件断面上。此后凸模再下压,已分离的材料便从凹模型腔中推出,而已形成的毛刺同时被拉长并留在冲裁件上。

## 二、冲裁设备

冲裁零件的机床主要是机械压力机,俗称冲床。常用的冲床包括曲轴冲床和偏心冲床两种,两种具有相同的工作原理,区别主要在主轴,前者主轴是曲轴,后者主轴是偏心轴。

曲轴冲床的基本结构如图 2.4 所示,工作原理如图 2.5 所示。冲床的床身与工作台是一体的,床身上有与工作台面垂直的导轨,滑块可沿导轨做上、下运动。上、下冲裁模分别装在滑块和工作台面上。

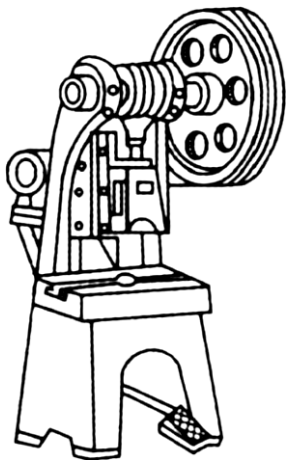


图 2.4 曲轴冲床结构

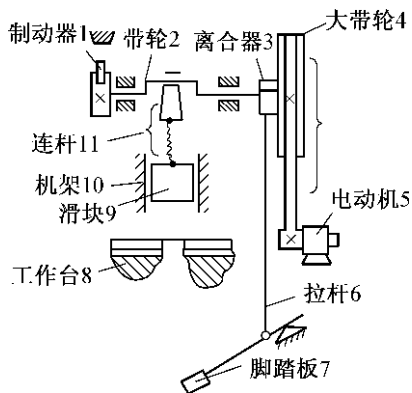


图 2.5 曲轴冲床工作原理

### 三、冲裁间隙、冲裁力

#### 1. 冲裁间隙

冲裁模的凸模尺寸总要比凹模小,其间存在一定的间隙。设凸模刃口部分尺寸为  $d$ ,凹模刃口部分尺寸为  $D$ (如图 2.6),则冲裁模具间隙  $Z$ (双边)可用下式表示:

$$Z = D - d \quad (2.1)$$

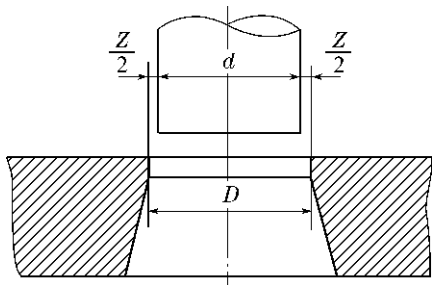


图 2.6 冲裁间隙示意图

冲裁模具间隙是一个重要的工艺参数。合理的间隙除了能保证工件良好的断面质量和较高的尺寸精度外,还能降低冲裁力,延长模具的使用寿命。

合理的间隙值,是一个尺寸范围。间隙尺寸范围的上限称为最大合理间隙  $Z_{\max}$ ,下限为最小合理间隙  $Z_{\min}$ 。凸模与凹模在工作过程中必然会有磨损,使间隙逐渐增大。因此,制造新模具时,应采用合理间隙最小值。但对尺寸精度要求不高的零件,为减少模具的磨损,可采用大一些的间隙。

对于飞机工厂的常用金属板料,冲裁模的合理单面间隙  $Z/2$  是板料厚度的  $2\% \sim 5\%$ 。板料薄而材料软时,间隙占板料厚度的百分比应小。

在模具使用过程中,间隙随着凸、凹模的磨损而逐渐扩大,因此,新制的模具应取间隙最小值。

(1) 落料(冲裁外形)时,凹模的尺寸取为零件的最小极限尺寸。决定落料尺寸的是凹模,间隙由减小凸模的尺寸得到,即  $d = D - Z$ 。

(2) 冲孔时,凸模的尺寸取为孔的最大极限尺寸。决定冲孔尺寸的是凸模,间隙由增加凹模的尺寸得到,即  $D = d + Z$ 。

#### 2. 冲裁力

冲裁力是指冲裁时,材料对凸模的最大抵抗力,它是用冲压设备检验冲模强度的依据。

冲裁力的计算公式(在平刃冲模上冲裁时所需的冲裁力)

$$P = KLt\tau \quad (2.2)$$

其中,  $P$ ——冲裁力(N);

$L$ ——冲裁零件的周长(mm);

$t$ ——冲裁零件的厚度(mm);

$\tau$ ——材料的抗剪强度(MPa);

$K$ ——系数,考虑间隙和刃口磨钝的影响,一般取值 1~1.3。

冲裁时,工件或废料从凸模上卸下来的力为卸料力,从凹模内将工件或废料顺着冲裁的方向推出的力为推件力,逆冲裁方向顶出的力叫顶件力。通常多为经验公式计算:

$$P_{卸}=K_{卸} P, P_{顶}=K_{顶} P, P_{推}=nK_{推} P \quad (2.3 \sim 2.5)$$

式中: $P$ ——冲裁力,N;

$n$ ——同时卡在模里的工件(或废料)的件数;

$K_{卸}, K_{顶}, K_{推}$ ——均为系数,一般在 0.3~0.8 之间,可查表得到。

这些力在选择冲裁设备时是否考虑进去,要根据不同的模具结构区别对待。因此,总冲裁力可能是:

$$P_{总}=P+P_{推} \quad (2.6)$$

$$\text{或} \quad P_{总}=P+P_{顶} \quad (2.7)$$

$$\text{或} \quad P_{总}=P+P_{推}+P_{卸} \quad (2.8)$$

$$\text{或} \quad P_{总}=P+P_{顶}+P_{卸} \quad (2.9)$$

#### 四、冲裁模具

冲裁加工的零件多种多样,冲裁模具的类型也很多,常用的模具是在冲床每一次冲程中只完成一道冲裁工序的简单冲裁模。简单冲裁模的组成包括:凸模和凹模、定位装置、卸料装置、导向装置和装卡、固定装置等,如图 2.7 所示。

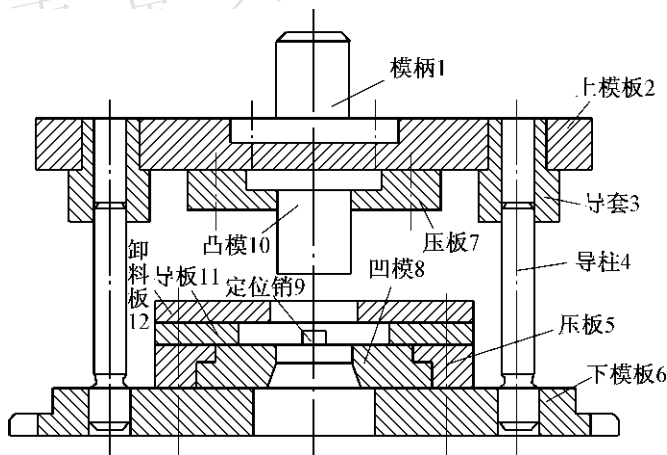


图 2.7 简单冲裁模组成

**凸模和凹模:**这是直接对材料产生剪切作用的零件,是冲裁模具的核心部分。由图 2.7 中凸模 10 和凹模 8 组成,凸模 10 固定在上模板 2 上,凹模 8 固定在下模板 6 上。

**定位装置:**其作用是保证冲裁件在模具中的准确位置。由图 2.7 中导板 11 和定位销 9 组成,固定在下模架上,控制条料的送进方向和送进量。

**卸料装置(包括出料零件):**其作用是使板料或冲裁下的零件与模具脱离。图 2.7 中刚性卸料板 12,当冲裁结束凸模 10 向上运动时,连带在凸模上的条料被刚性卸料板挡住

落下。此外,凹模上向下扩张的锥孔,有助于冲裁下的材料从模具中脱出。

导向装置:其作用是保证模具的上、下两部分具有正确的相对位置。图 2.7 中导套 3 和导柱 4 即此模具的导向装置。工作时,装在导模板上的导套在导柱上滑动,使凸模与凹模得以正确配合。

装卡、固定装量:其作用是保证模具与机床、模具与零件间连接的稳定、可靠。图 2.7 中的上模板 2、下模板 6、模柄 1、压板 5 和用板 7 及图中未画出的螺柱、螺钉等,都属装卡、固定零件。靠这些零件将模具各部分组合装配,并固定在冲床上。冲裁模具还可根据不同冲裁件的加工要求,增加其他装置。例如为防止冲裁件起皱和提高冲裁断面质量而设置压料圈等。

## 五、冲裁工艺

### 1. 搭边值的确定

为保证冲裁质量和寿命,冲裁时材料在凸模工作刃口外侧应留有足够的宽度,即所谓搭边。搭边值一般可根据冲裁件的板厚  $t$  按如下关系选取:

圆形零件  $a \geq 0.7t$ ;

方形零件  $a \geq 0.8t$ 。

### 2. 合理排样

冲裁加工时的合理排样,是降低生产成本的有效途径。合理排样,是在保证必要搭边值的前提下,尽量减少废料,如图 2.8 所示。

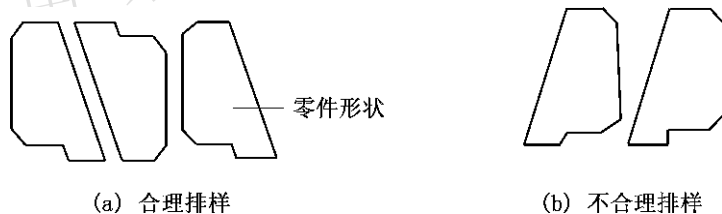


图 2.8 排样

各种冲裁件的具体排样方法,应根据冲裁件形状、尺寸和材料规格,灵活考虑。

### 3. 可能冲裁的最小尺寸

零件冲裁加工部分尺寸越小,则所需的冲裁力也越小,但尺寸过小,将造成凸模单位面积上的压力过大,使其强度不足。零件冲裁加工部分的最小尺寸,与零件的形状、板厚及材料的力学性能有关。采用一般冲模,在软钢材料上所能冲出的最小尺寸为:

圆形零件最小直径  $= t$  (板厚)

方形零件最小边长  $= 0.9t$

矩形零件最小短边  $= 0.8t$

### 4. 使用冲床应注意的事项

(1) 使用前,对冲床的各部分要进行检查,并加注润滑油。

(2) 安装模具时,要使模具压力中心与冲床压力中心相吻合,且要保证凸、凹模间隙均匀。

(3) 启动开关后,空车试转 3~5 次,检查操纵装置及运转状态是否正常。冲裁时,精神要集中,不能随意踩踏板,要防止手伸向模具间或头部接触滑块,以免发生事故或造成废品。

(4) 不能冲裁过硬或经淬火的材料,而且冲床绝不允许超载工作。

(5) 停止冲裁后,需切断电源或上保险开关。冲裁出的零件及边角料应及时运走,保持冲床周围无工作障碍物。

(6) 长时间冲裁,要注意检查模具有无松动,间隙是否均匀。



## 【任务实施】

### 一、冲裁件工艺分析

#### 1. 材料

08F 钢板是优质碳素结构钢,具有良好的可冲压性能。

#### 2. 工件结构形状

冲裁件内、外形应尽量避免有尖锐清角,为提高模具寿命,建议将所有  $90^\circ$  清角改为 R1 的圆角。

#### 3. 尺寸精度

零件图上所有尺寸均未标注公差,属自由尺寸,可按 IT14 级确定工件尺寸的公差。经查公差表,各尺寸公差为:  $58_{-0.74}^0$ 、 $38_{-0.62}^0$ 、 $30_{-0.52}^0$ 、 $16_{-0.43}^0$ 、 $14 \pm 0.27$ 、 $17 \pm 0.27$ 、 $\phi 3.5_{+0.3}^0$ 。

结论:可以冲裁。

### 二、确定工艺方案及模具结构形式

经分析,工件尺寸精度要求不高,形状不大,但工件产量较大,根据材料较厚(2 mm)的特点,为保证孔位精度,冲模有较高的生产率,通过比较,决定实行工序集中的工艺方案,采取利用导正钉进行定位、刚性卸料装置、自然漏料方式的级进冲裁模结构形式。

### 三、模具设计计算

#### 1. 排样计算条料宽度及确定步距

首先确定搭边值。根据零件形状,两工件间按矩形取搭边值  $b=2$ ,侧边按圆形取搭边值  $a=2$ 。

级进模进料步距为 32 mm。

条料宽度按相应的公式计算:

$$B=(D+2a)-\Delta \quad \text{查表} \quad \Delta=0.6 \quad (2.10)$$

$$B=(58+2 \times 2)_{-0.6}=62_{-0.6}$$

画出排样图,如图 2.9 所示。

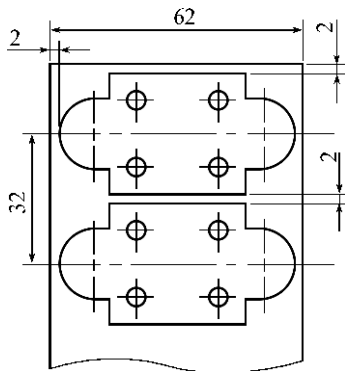


图 2.9 排样图

## 2. 计算总冲压力

由于冲模采用刚性卸料装置和自然漏料方式,故总的冲压力为:

$$P_0=P+P_t \quad (2.11)$$

$$P=P_1+P_2 \quad (2.12)$$

而式中: $P_1$ ——落料时的冲裁力; $P_2$ ——冲孔时的冲裁力。

按冲裁力计算公式计算落料时的冲裁力:

$$\begin{aligned} P_1 &= KLt\tau \quad \text{查} \tau=300 \text{ MPa} \\ &= 1.3[2 \times (58-16) + 2 \times (30-16) + 16\pi] \times 2 \times 300 / 1000 (\text{kN}) \\ &\approx 126.55 (\text{kN}) \end{aligned} \quad (2.13)$$

按冲裁力计算公式计算冲孔时的冲裁力:

$$\begin{aligned} P_2 &= 1.3 \times 4\pi \times 3.5 \times 2 \times 300 / 1000 (\text{kN}) \\ &\approx 34.3 (\text{kN}) \end{aligned} \quad (2.14)$$

计算推料力  $P_t$ :

$$\begin{aligned} P_t &= nK_t P \quad \text{取} n=3, \text{查表} K_t=0.055 \\ P_t &= 3 \times 0.055 \times (126+34) \\ &\approx 26.5 (\text{kN}) \end{aligned} \quad (2.15)$$

计算总冲压力  $P_0$ :

$$\begin{aligned} P_0 &= P_1 + P_2 + P_t \\ &= 126.55 + 34.5 + 26.5 \\ &= 187.5 (\text{kN}) \end{aligned} \quad (2.16)$$

## 3. 确定压力中心

根据图 2.10 分析,因为工件图形对称,故落料时  $P_1$  的压力中心在  $O_1$  上,冲孔时  $P_2$  的压力中心在  $O_2$  上。

设冲模压力中心离  $O_1$  点的距离为  $X$ , 根据力矩平衡原理得:

$$P_1 X = (32 - X) P_2 \tag{2.17}$$

由此算得  $X = 7 \text{ mm}$

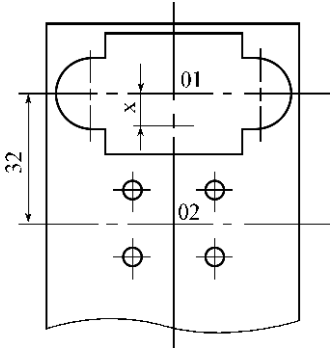


图 2.10 压力中心

4. 冲模刃口尺寸及公差计算

刃口尺寸计算方法及演算过程不再赘述, 仅将计算结果列于表 2.2 中。

在冲模刃尺寸计算时需要注意: 在计算工件外形落料时, 应以凹模为基准, 凸模尺寸按相应的凹模实际尺寸配制, 保证双面间隙为  $0.25 \sim 0.36 \text{ mm}$ 。为了保证  $R8$  与尺寸为 16 的轮廓线相切,  $R8$  的凹模尺寸取 16 的凹模尺寸的一半, 公差也取一半。

在计算冲孔模刃口尺寸时, 应以凸模为基准, 凹模尺寸按凸模实际尺寸配制, 保证双面间隙为  $0.25 \sim 0.36 \text{ mm}$ 。

表 2.2 冲模刃口尺寸

冲裁性质	工件尺寸	计算公式	凹模尺寸标注法	凸模尺寸标注法
落料	$58_{-0.74}^0$	凹模计算 $D_d = (D_{\max} - x\Delta)_0^{+\delta_d}$ $\delta_d = 0.25\Delta$	$57.6_0^{+0.18}$	凸模尺寸按凹模实际尺寸配置, 保证双边间隙 $0.25 \sim 0.36 \text{ mm}$
	$38_{-0.62}^0$		$37.7_0^{+0.16}$	
	$30_{-0.52}^0$		$29.7_0^{+0.13}$	
	$16_{-0.43}^0$		$16.8_0^{+0.11}$	
	$R8$		$R7.9_0^{+0.06}$	
冲孔	$\varphi 3.5_{-0.08}^{+0.3}$	凸模计算 $d_p = (d_{\min} + x\Delta)_0^{-\delta_p}$ $\delta_p = 0.25\Delta$	凹模尺寸按凸模刃口实际尺寸配置, 保证双边间隙 $0.25 \sim 0.36 \text{ mm}$	$3.65_{-0.08}$

中心距尺寸:  $L_{14} = 14 \pm 0.44/8 = 14 \pm 0.055$

$L_{17} = 17 \pm 0.44/8 = 17 \pm 0.055$

注: 在计算模具中心距尺寸时, 制造偏差值取工件公差的  $1/8$



## 5. 确定各主要零件结构尺寸

## (1) 凹模外形尺寸的确定

凸模厚度  $H$  的确定:

$$H = \sqrt[3]{0.1P} \quad P \text{ 取总压力} = 187.5(\text{kN}) = 187\,500 \text{ N}$$

$$H = \sqrt[3]{0.1 \times 187\,500} \approx 26 \text{ mm} \quad (2.18)$$

取凹模厚度  $H = 25 \text{ mm}$ 。

根据设计资料确定凹模长度  $L$  和宽度  $B$

凹模长度  $L$  的确定:  $L = b + 2c$  ( $c$  根据设计资料取 34)

$$= 58 + 2 \times 34 = 126 \text{ mm} \quad (2.19)$$

凹模宽度  $B$  的确定:  $B = \text{步距} + \text{工件宽} + 2c$  (取: 步距 = 32; 工件宽 = 30;  $c = 34$ )

$$B = 32 + 30 + 2 \times 34 = 130 \text{ mm} \quad (2.20)$$

凹模板尺寸为:  $L \times B \times H = 126 \times 130 \times 25$  (2.21)

(2) 凸模长度  $L_1$  的确定

凸模长度计算为:

$$L_1 = h_1 + h_2 + h_3 + Y \quad (2.22)$$

其中: 导料板厚  $h_1 = 8$ ; 卸料板厚  $h_2 = 12$ ; 凸模固定板厚  $h_3 = 18$ ; 凸模修磨量  $Y = 18$ , 则

$$L_1 = 8 + 12 + 18 + 18 = 56 \text{ mm} \quad (2.23)$$

选用冲床的公称压力, 应大于计算出的总压力  $P_0 = 187.5(\text{kN})$ ; 最大闭合高度应大于冲模闭合高度 + 5 mm; 工作台台面尺寸应能满足模具的正确安装。按上述要求, 结合工厂实际, 可选用 J23 - 250 开式双柱可倾压力机, 并需在工作台面上配备垫块, 垫块实际尺寸可配制。

## (3) 设计并绘制总图、选取标准件

按已确定的模具形式及参数, 从冷冲模标准中选取标准模架。

绘制模具总装图。如图 2.11 所示, 单排冲孔落料连续模。

按模具标准, 选取所需的标准件, 查清标准件代号及标记, 写在总图明细表内, 见表 2.3 所示, 并将各零件标出统一代号。

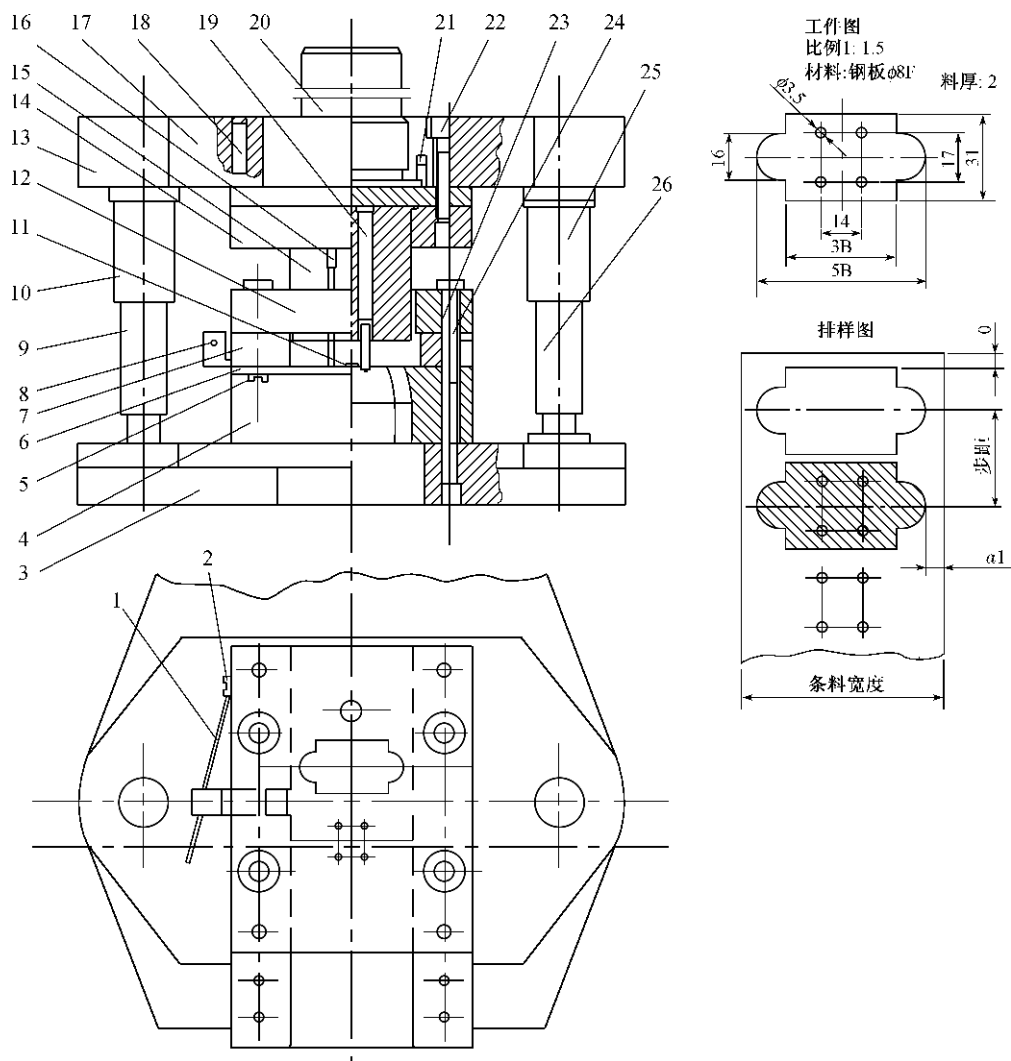


图 2.11 单排冲孔落料连续模

1—簧片;2—螺钉;3—下模座;4—凹模;5—螺钉;6—承导料;7—导料板;8—始用挡料销;9、26—导柱;10、25—导套;11—挡料钉;12—卸料板;13—上模座;14—凸模固定板;15—落料凸模;16—冲孔凸模;17—垫板;18—定位销;19—导正销;20—模柄;21—防转销;22—内六角螺钉;23—圆柱销;24—内六角螺钉。

表 2.3 零件明细表

序号	名 称	数量	材 料	热处理	标准件代号	备注	页次
1	簧片	1	65Mn				
2	螺钉	1	45	HRC40~45			
3	下模座	1	1	HT200			
4	凹模	1	T10A	HRC58~62			
5	螺钉	4	45	HRC40~45			
6	承导料	1	45				
7	导料板	2	45	HRC40~45			
8	始用挡料销	1	45				
9	导柱	2	20	渗碳 HRC56~60			
10	导套	2	20	渗碳 HRC58~62			
11	挡料钉	1	45				
12	卸料板	1	Q235(A3)				
13	上模座	1	HT200				
14	凸模固定板	1	45				
15	落料凸模	1	T8A	HRC56~60			
16	冲孔凸模	1	T8A	HRC56~60			
17	垫板	1	45	HRC40~45			
18	定位销	1	45	HRC40~45			
19	导正销	1	45	HRC40~45			
20	模柄	1	Q235(A5)				
21	防转销	1	45	HRC40~45			
22	内六角螺钉 M12×70	10	45	HRC40~45			
23	圆柱销 12n6×100	6	45	HRC40~45			
24	内六角螺钉 M12×70	1	45	HRC40~45			

#### 四、绘制非标准零件图

凸凹模、凹模、凸模固定板和卸料板四个零件图样,如图 2.12 至图 2.15 所示。

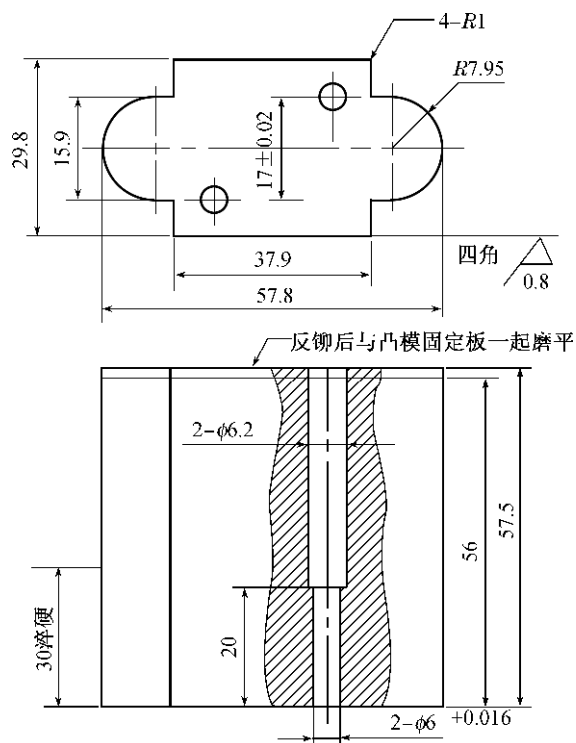


图 2.12 凸凹模

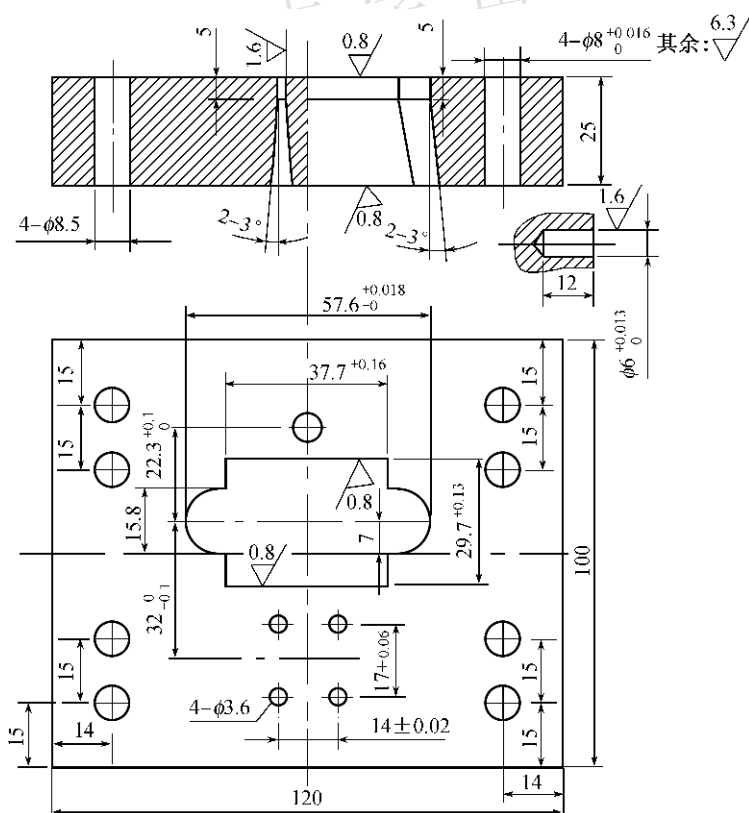


图 2.13 落料凹模

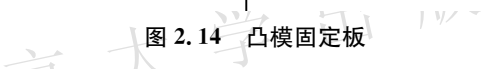


图 2.14 口楔回走板





## 【任务评价】

根据表 2.4 评分表,可对任务进行评价和总结。

表 2.4 冲裁评分表

冲裁技能操作评分			总分			检测结果	得分
序号	考核项目	配分 $T$	评分标准				
			$\leq T$	$>T, \leq 2T$	$>2T$		
1	$\phi 3.5_0^{+0.3}$	20	20	5	0		
2	$14 \pm 0.27$	15	15	5	0		
3	$17 \pm 0.27$	15	15	5	0		
4	平面度 $\leq 0.5$	15	15	0	0		
5	表面质量:无裂纹、夹伤、划伤、锤痕等	15	发现一处扣 3 分				
6	技术安全和文明生产	20	违反规定扣 5~10 分				



## 【思考与练习】

1. 简述冲裁原理。
2. 冲裁模间隙如何选择?
3. 降低冲裁力的方法有哪些?
4. 试分析图 2.16 所示零件的冲裁加工过程。

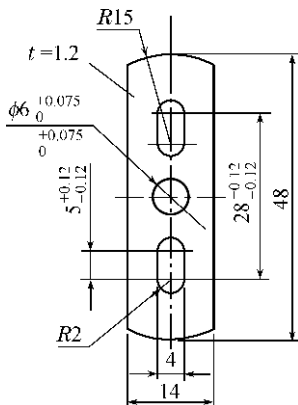


图 2.16 冲裁零件图(材料:钢 45)



## 弯曲成形

### 任务 1 压 弯



#### 【任务描述】

如图 3.1 所示,某型材零件牌号为 NTA44186(相当于 2024-0,  $\delta$  为 1.6 mm),用压弯成形的方式制作。

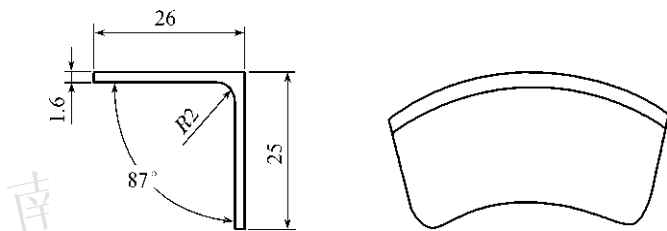


图 3.1 压弯零件



#### 【知识准备】

#### 一、弯曲成形概述

把平板毛坯、型材、管材等弯成一定的曲率、角度,从而形成一定形状的零件,这样的加工方法称为弯曲成形。目前飞机制造中常采用压弯、滚弯和拉弯等弯曲成形方法。

#### 二、压弯

##### 1. 概述

在板料上加压产生弯矩,使其弯曲成形的加工方法称为压弯。压弯成形时,材料的弯曲变形可以有自由弯形、接触弯形和校正弯形三种方式。如图 3.2 所示,在 V 形模上进行三种方式弯形的情况。如图 3.2(a)所示,材料变形时,仅与凸、凹模在三条线接触,弯形圆角半径  $r_1$  是自然形成的,这种弯形方式为自由弯形;如图 3.2(b)所示,材料弯形到直边与凹模表面平行,而且在长度  $ab$  上相互靠紧时,停止弯形,弯形件的角度等于模具的



角度,而弯形圆角半径  $r_2$  仍是自然形成的,这种弯形方式为接触弯形;如图 3.2(c)所示,将材料弯形到与凸、凹模完全靠紧,弯形圆角半径  $r_3$  等于模具圆角半径  $r_{凸}$ ,这种弯形方式为校正弯形。自由弯形、接触弯形和校正弯形三种方式,是在材料弯形时的塑性变形阶段依次发生的。

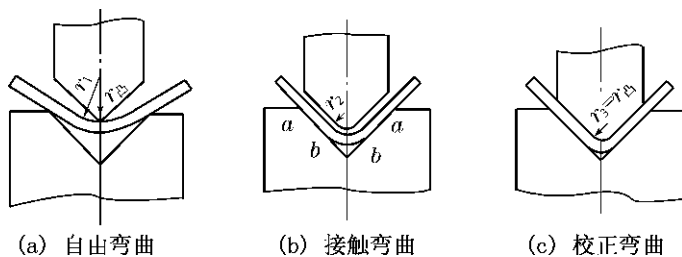


图 3.2 材料压弯时的三种变形方式

## 2. 特点

压弯时材料产生外拉内压,中间有一层不受拉也不受压,称为中性层,弯曲变形受最小弯曲半径的限制和回弹影响。弯曲件的圆角半径不宜过大和过小。过大时因受回弹的影响,弯曲件的精度不易保证;弯曲半径过小时易产生裂纹。

## 3. 压弯力的计算

选用压弯机床时,需进行弯曲力的计算。弯曲作用力与下列因素有关:

- (1) 金属的力学性能。金属的强度越高,所需的弯曲力越大。
- (2) 坯料的厚度和宽度。坯料越厚越宽,所需的弯曲力越大。
- (3) 弯曲时变形程度。变形程度越大,所需的弯曲力越大。
- (4) 其他因素。如弯曲时有无压料装置,模具的间隙等对弯曲力的大小都有影响。

弯曲力的计算公式:

$$F = k B t \sigma_b \quad (3.1)$$

式中:  $F$ ——一个弯角弯曲作用力, N;

$B$ ——毛料宽度, mm;

$\sigma_b$ ——抗拉强度极限, MPa;

$t$ ——毛料厚度, mm;

$k$ ——系数,取决于弯曲半径  $R$  与毛料厚度  $t$  之比,见表 3.1 所示。

表 3.1 系数  $k$  值确定

$\frac{R}{t}$	0.1	0.25	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
系数 $k$	0.55	0.48	0.4	0.3	0.2	0.10	0.06

## 三、弯曲时的回弹

弯曲时塑性变形与弹性变形同时存在,当外载荷去除后,弹性变形即消失,因而使工

件尺寸与模具尺寸不一致,这种现象称为回弹。回弹一般以角度的变化来表示,当用大圆角半径弯曲时,除需求出回弹角外,还应求出弯曲半径的变化。

#### 1. 影响回弹的主要因素

(1) 材料的力学性能。材料的屈服极限越高,弹性模数越小,加工硬化越激烈,则回弹越大。

(2) 相对弯曲半径 $\frac{R}{t}$ 。相对弯曲半径 $\frac{R}{t}$ 越大,材料回弹越小,反之,则回弹越大。

(3) 弯曲角 $\alpha$ 。在弯曲半径一定时,弯曲角 $\alpha$ 越大,表示变形区的长度越大,回弹也越大。

(4) 其他因素。零件的形状、模具的结构、弯曲方式及弯曲力的大小、摩擦等,对弯曲件的回弹也有一定的影响。

#### 2. 减小回弹的主要措施

(1) 根据计算或经验数据对弯曲模工作部分的形状做必要的修正。

(2) 利用弯曲坯料不同部位回弹方向不同的规律,适当调整各种影响因素(模具的圆角半径、间隙、开口宽度、校正力、压料力等),使相反方向的回弹相互抵消。

(3) 利用聚氨酯橡胶的软凹模代替金属的刚性凹模进行弯曲。

(4) 改变模具结构,如带摆动块、局部突起等。

### 四、压弯模

在用机床设备进行压弯时,往往需要配合弯曲模进行压弯成形。弯曲模的结构形式,根据弯形件的形状、精度要求及生产批量等进行选择,最简单而且常用的是无导向装置(利用压床导向)的单工序压弯模。这种压弯模可以整体铸造后加工制成,如图 3.3(a)(b)所示,也可以利用型钢焊制,如图 3.3(c)(d)所示,或由若干零件组合、装配而成。

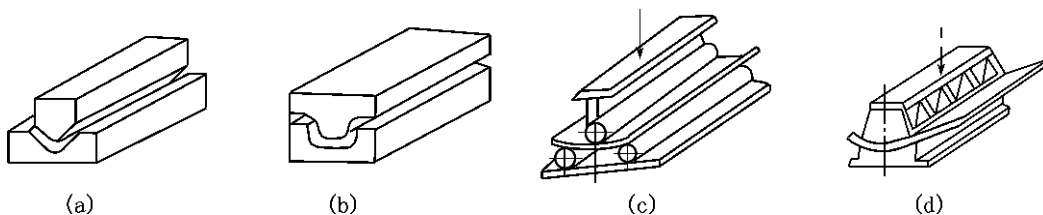


图 3.3 压弯模结构形式

压弯模具工作部分的结构形状如图 3.4 所示。凸模的圆角半径 $r_{\text{凸}}$ 和角度,根据弯形件的内圆角半径,用回弹值修正后确定。凹模非工作圆角半径 $r'_{\text{凹}}$ ,应取小于弯形件相应部分的外圆角半径( $r_{\text{凸}}+t$ )。其他尺寸见表 3.2 所示。

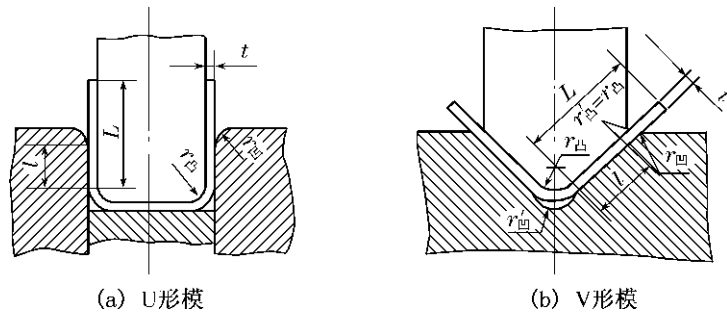


图 3.4 压弯模工作部分结构

表 3.2 弯曲件工作部分尺寸及系数/mm

L	板厚 t											
	0.5			0.5~2			2~4			4~7		
	l	r <sub>凹</sub>	c	l	r <sub>凹</sub>	c	l	r <sub>凹</sub>	c	l	r <sub>凹</sub>	c
10	6	3	0.1	10	3	0.1	10	4	0.08			
20	8	3	0.1	12	4	0.1	15	5	0.08	20	8	0.06
35	12	4	0.15	15	5	0.1	20	6	0.08	25	8	0.06
50	15	5	0.2	20	6	0.15	25	8	0.1	30	10	0.08
75	20	6	0.2	25	8	0.15	30	10	0.1	35	12	0.1
100				30	10	0.15	35	12	0.1	40	15	0.1
150				35	12	0.2	40	15	0.15	50	20	0.1
200				45	15	0.2	50	20	0.15	65	25	0.15

U 形件弯形时,凸模与凹模间的间隙值可按下式确定:

$$Z=t_{\max}+ct \tag{3.2}$$

式中: $t_{\max}$ ——材料最大厚度,mm;

$c$ ——系数,按表 3.2 选取;

$t$ ——材料名义厚度,mm。

V 形件弯曲时,凸凹模间的间隙值,是靠调整压床闭合高度来控制的,不需要在制造模具时确定。

### 五、压弯的方式

#### 1. 折弯机弯曲

折弯机主要用来弯曲简单的直线零件,按加工方法来分,折弯机有普通折弯机和数控折弯机两种。

(1) 普通折弯机。普通折弯机按传动方式分为机动折弯机和手动折弯机两种。手动折弯机如图 3.5 所示。

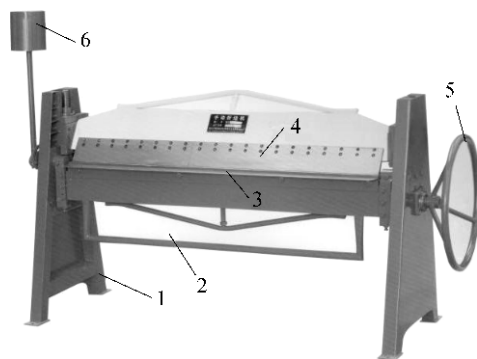


图 3.5 手动折弯机

1—支柱；2—折板；3—下台面；4—上台面；5—手柄传动机构；6—平衡配重。

折弯机的工作部分是固定在台面和折板上的镶条，其安装情况如图 3.6 所示。上台面和折板的镶条一般是成套的，具有不同的角度和弯曲半径，可根据需要选用。

折弯机的操作过程如下：

- ① 将选好的镶条装在台面和折板上，如果所弯制零件的弯曲半径比现有镶条稍大时，可加特种垫板，如图 3.7 所示，这样工作时，垫板要垫在坯料的下边。
- ② 下降上台面，翻起折板至  $90^{\circ}$  角，调整折板与台面间的间隙，以适应材料厚度和弯曲半径，为避免弯折时擦伤毛料，间隙应稍大些。
- ③ 退回折板，升起台面，放入的坯料靠紧后挡板。若弯折较窄的零件或不用挡板时，毛料的弯折线应对准台面镶条的外缘线。
- ④ 下降上台面，压住坯料。
- ⑤ 翻转折板，弯折至要求角度。为得到尺寸准确的零件，应注意回弹，必须很好地控制弯折角度。
- ⑥ 退回折板，升起上台面，取下零件。

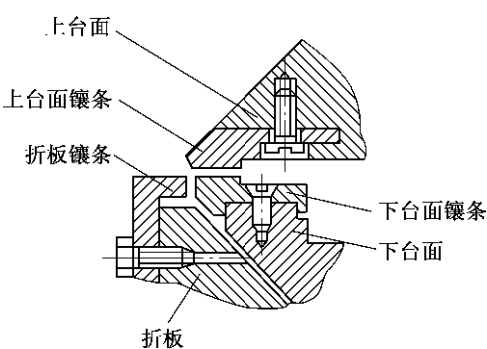


图 3.6 折弯机上镶条的安装情况

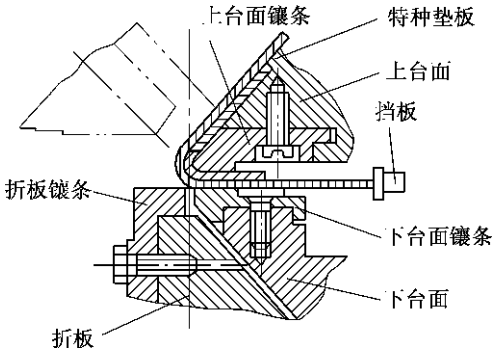


图 3.7 镶条的使用情况

(2) 数控折弯机。使用数控折弯机可比普通折弯机节约 20%~70% 的加工成本，经济效果十分显著。比较先进的数控系统一般都具有以下主要功能：彩色图形显示，并能预先显示每一折弯工序的折弯过程；自动绘制折弯零件的毛料展开图；确定最优折弯顺序；

选择模具;判断折弯过程中零件与模具是否发生干涉;自动编程。

数控折弯机如图 3.8 所示,数控折弯机的安全操作规程如下:



图 3.8 数控折弯机

① 严格遵守机床工安全操作规程,按规定穿戴好劳动防护用品。

② 启动前须认真检查电机、开关、线路和接地是否正常和牢固,检查设备各操纵部位、按钮是否在正确位置。

③ 检查上下模的重合度和坚固性;检查各定位装置是否符合被加工的要求。

④ 在上滑板和各定位轴均未在原点的状态时,运行回原点程序。

⑤ 设备启动后空运转 1~2 分钟,上滑板满行程运动 2~3 次,如发现有不正常声音或有故障时应立即停车,将故障排除,一切正常后方可工作。

⑥ 工作时应由一人统一指挥,使操作人员与送料压制人员密切配合,确保配合人员均在安全位置方准发出折弯信号。

⑦ 板料折弯时必须压实,以防在折弯时板料翘起伤人。

⑧ 调板料压模时必须切断电源,停止运转后进行。

⑨ 在改变可变下模的开口时,不允许有任何料与下模接触。

⑩ 机床工作时,机床后部不允许站人。

⑪ 严禁单独在一端处压折板料。

⑫ 运转时发现工件或模具不正,应停车校正,严禁运转中用手校正以防伤手。

⑬ 禁止折超厚的铁板或淬过火的钢板、高级合金钢、方钢和超过板料折弯机性能的板料,以免损坏机床。

⑭ 经常检查上、下模具的重合度,压力表的指示是否符合规定。

⑮ 发生异常立即停机,检查原因并及时排除。

⑯ 关机前,要在两侧油缸下方的下模上放置木块将上滑板下降到木块上。

⑰ 先退出控制系统程序,后切断电源。

## 2. 闸压床弯曲

飞机框肋上的缘条和长桁都是用型材弯曲而成的。一般采用挤压型材,当缺乏适合的挤压型材或在轻型结构中,也可用板弯型材。型材的显著特点是窄而长,断面形状有 V 形、U 形、几形和 Z 形等,除 V 形断面外,都包含两个或更多弯角。板弯型材须经多次压弯才能制成,因坯料很长,普通冲床不能适应压弯成形需要,而必须使用专用的闸压床,因而闸压床主要用来将金属条料或板料弯曲成各种型材,最适合加工窄而长的直线零件。闸压床可弯成的各种零件断面如图 3.9 所示。

闸压属于自由弯曲。将板料放在开有 V 形槽的凹模上,由 V 形凸模压向坯料,如图 3.10 所示。随着凸模下降,坯料弯成一定的角度,并形成一定的弯曲半径。弯角大小取决于凸模进入凹模的深度,准确地调节凸模的行程,便可弯出不同的弯角。自由弯曲的回

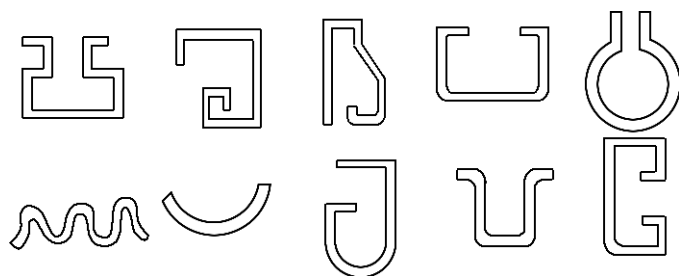


图 3.9 用闸压床弯曲的各种零件断面

弹很大, 闸压弯曲时, 可通过“过弯”来加以修正, 先将角度弯小一些, 卸载后经过回弹, 获得所需弯角。“过弯”量须经过试压确定。

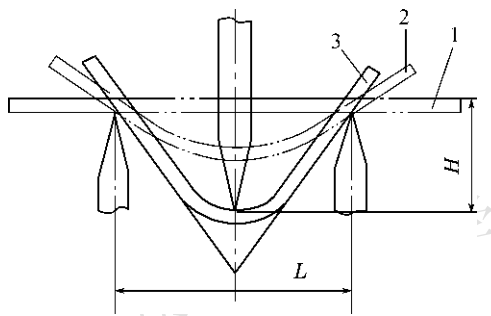


图 3.10 闸压成形

1—弯曲前; 2—弯曲后; 3—卸载后。

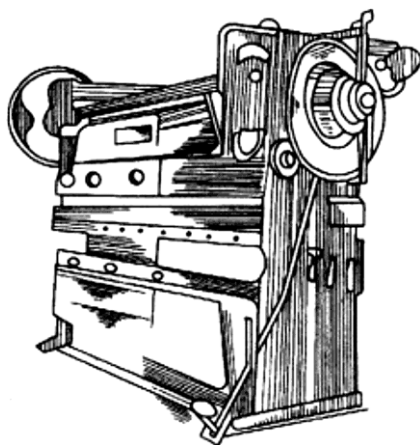


图 3.11 闸压床

闸压床的种类很多, 但主要有两大类, 即机械双曲轴式和液压式。闸压床如图 3.11 所示, 工作台一般由整块钢板制成埋入地下, 以保证在最大工作压力下变形量小。当工作时拖板上、下运动好像闸门一样起落, 故称闸压床。其传动原理如图 3.12 所示。

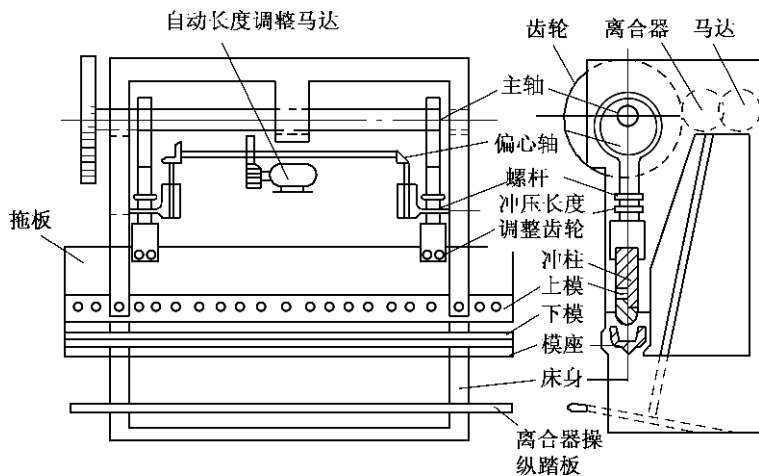


图 3.12 闸压床传动原理

当主轴转动时,拖板上、下运动。在拖板的下端固定有上模座,上模座上钻有若干孔眼,用以安装上模。上模的上下位置可用螺杆加以调整,螺杆用一个小电动机带动,同时装有自动断电开关,使上模的上、下运动不超过所允许的限度。闸压床有一个很坚固的床身,台面上有安装下模的槽子,闸压床由脚踏板开动,动力部分是电动机,在电动机与主轴之间装有离合器,每踏一次踏板,上模上、下运动一次。为便于工作时坯料定位,在工作台后边装有挡料机构,结构如图 3.13 所示。根据需要,滑块 2 沿支架 5 可前后移动,挡料 1 还可微调。

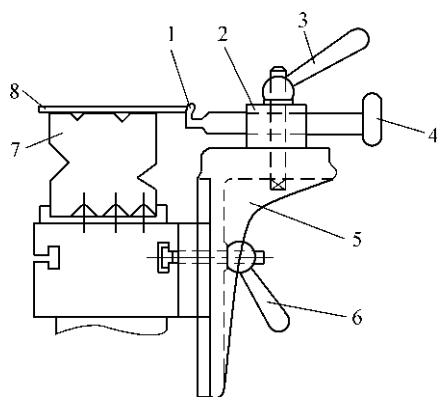


图 3.13 闸压床的挡料机构

1—挡料板;2—滑块;3,6—固紧笔柄;  
4—微调螺母;5—支架;7—下模;8—坯料。

闸压床上用的弯曲模具可分为通用模具和专用模具两类,通常采用通用弯曲模。图 3.14 所示为通用闸压模的截面形状。上模一般是 V 形,有直臂式和曲臂式两种,如图 3.14(b)、(c)所示,下端的圆角半径是做成几种固定尺寸组成一套,圆角较小的上模夹角制成  $15^\circ$ 。下模一般是在四个面上分别加工出适应机床闸制零件的几种固定槽口,如图 3.14(a)所示。槽口的形状一般是 V 形,也有 U 形,都能闸制钝角和锐角。下模的长度一般与工作台面相比相等或稍长一些,也有较短的。闸压模上下模的高度根据机床闭合高度确定,在使用闸压模时其弯曲角度大于  $18^\circ$ 。

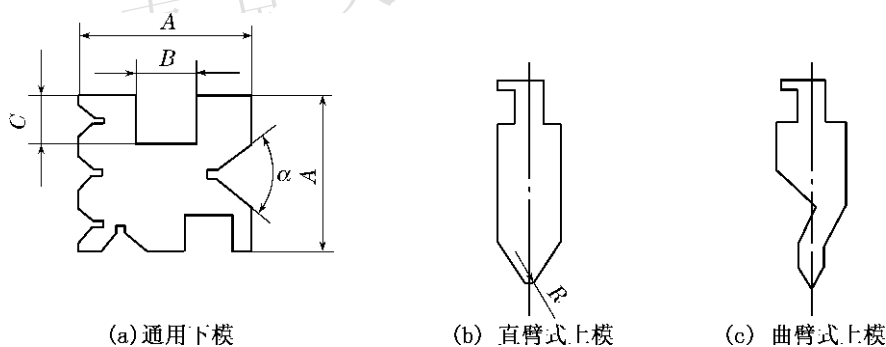


图 3.14 通用闸压模

在闸压床上选用通用闸压模弯制零件时,下模槽口的宽度不应小于零件的弯曲半径与材料厚度之和的 2 倍,再加上 2 mm 的间隙,即

$$B > 2(t + R) + 2 \quad (3.3)$$

式中:  $B$ ——下模口宽度,单位为 mm;

$t$ ——零件的材料厚度,单位为 mm;

$R$ ——零件的弯曲半径,单位为 mm。

这样,在闸制时坯料不会因受阻产生压痕或刮伤现象,同时为减少弯曲力,对硬的材料应选用较宽的槽口;对软的材料,大的槽口会使直边弯成弧形,应选用较小的槽口。

对于上模的选择也需根据零件的形状和尺寸的要求。上模工作端的圆角半径应略小



于零件的弯曲半径;一般采用直臂式上模,而当直臂式上模挡碍时应换成曲臂式上模。

液压式闸压床与一般闸压床的不同点是液压传动代替了曲轴传动,由于液压系统能在整个行程中对板料施加全力,过载时自动保护,易于实现自动控制,因此,液压式闸压床是现代最常用的闸压床。闸压床操作过程如下。

(1) 开车前检查各部分工作是否正常,发现问题及时修理,特别要仔细检查脚踏板(离合器)是否灵活好用,如发现连续冲击绝不允许使用。

(2) 将拖板下降至最低位置,调整拖板的最低点到工作台面的垂直距离即闭合高度,闭合高度比模具总高度高 30~50 mm。

(3) 升起拖板,安装上模和下模。一般是先把下模放在工作台上,然后下降拖板再装上模。在安装上模时,要保持两端平行,从拖板固定槽的一端,一边活动一边往里推至拖板中间位置,使机床受力均衡,并用螺钉紧固,如图 3.15 所示。

(4) 开动拖板的调整机构,使上模进入下模槽口,并移动下模,使上模的中心线对正下模槽口的中心线,将下模固定,如图 3.16 所示。

(5) 升起拖板,按弯曲尺寸调整挡料板,如图 3.13 所示。

(6) 按要求调整弯曲角度。弯曲角度只需调整上模进入下模的深度,就很容易达到要求。一般先用废料调试,调好后再正式进行弯曲工作。

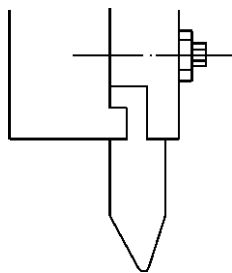


图 3.15 固定上模

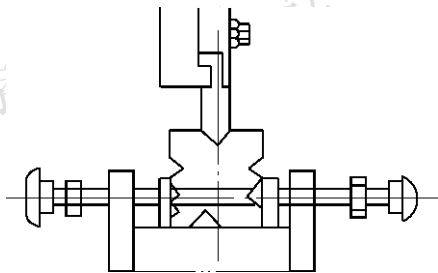


图 3.16 固定下模

### 3. 冲压弯曲

冲压弯曲是用弯曲模在冲床上进行弯曲工作。飞机上冲压弯曲的零件很多,如连接角片、卡箍及各种支架等。弯曲件种类繁多,为了适应不同的弯曲成形需要,弯曲模的形式也是多种多样的。下面介绍一些常见且比较典型的弯曲模结构。

(1) V 形件弯曲模。图 3.17(a)所示为简单的 V 形件弯曲模,其特点是结构简单、通用性好,但弯曲时坯料容易偏移,影响工件精度。

图 3.17(b)~(d)所示分别为带有定位尖、顶杆、V 形顶板的模具结构,可以防止坯料滑动,提高工件精度。

(2) U 形件弯曲模。根据弯曲件的要求,常用的 U 形件弯曲模是如图 3.18 所示的几种常用结构形式。图 3.18(a)所示为无底凹模,用于底部不要求平整的制件。图 3.18(b)所示结构用于底部要求平整的弯曲件。图 3.18(c)所示结构用于料厚公差较大而外侧尺寸要求较高的弯曲件,其凸模为活动结构,可随料厚自动调整凸模横向尺寸。

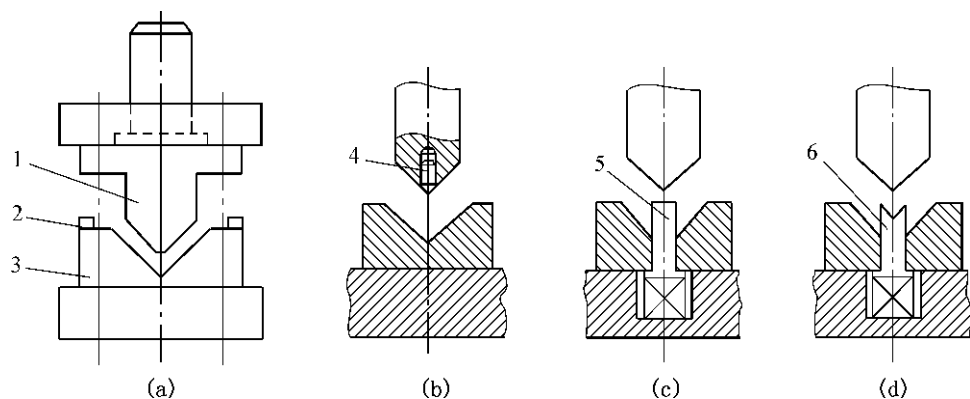


图 3.17 V 形件弯曲模的一般结构形式

1—凸模;2—定位板;3—凹模;4—定位尖;5—顶杆;6—V 形顶板。

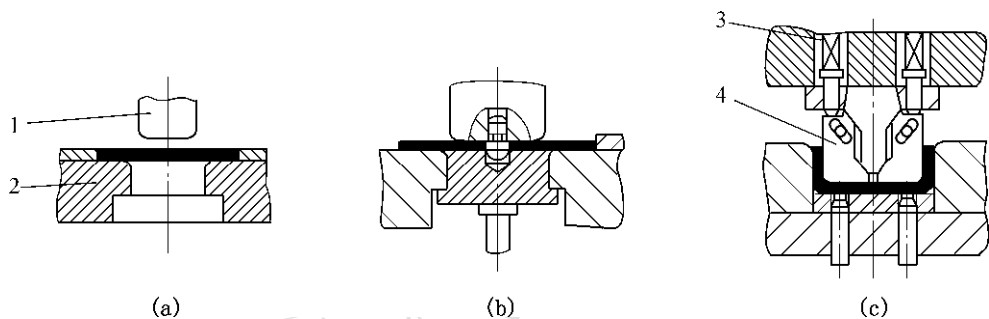


图 3.18 U 形件弯曲模

1—凸模;2—凹模;3—弹簧;4—凸模活动镶块。

(3) Z 形件弯曲模。Z 形件一次性弯曲即可成形,图 3.19 为 Z 形件弯曲模。如图 3.19(a)所示,该模具无压料装置,坯料在压弯过程中容易产生偏移,因此,只适合于要求

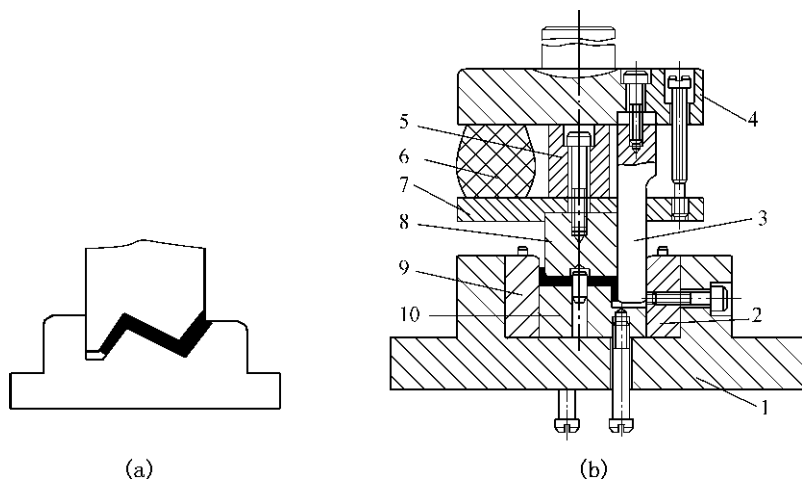


图 3.19 Z 形件弯曲模

1—下模座;2—反侧压块;3—凸模;4—上模座;5—压块;6—橡皮;7—凸模托板;  
8—活动凸模;9—凹模;10—顶块。

不高的零件。图 3.19(b)所示的模具为活动式 Z 形件弯曲模。在冲压前,压块 5 在橡胶 6 的作用下与凸模托板 7 端面齐平,这时压块 5 与上模座分离。同时顶块 10 在顶料装置的作用下处于与下模座持平的初始位置,坯料由定位销定位。弯曲时,上模座下压,活动凸模 8 与顶块 10 将坯料夹紧,由于橡胶的弹力大于顶块 10 上顶料装置的弹力,坯料随活动凸模 8 与顶块 10 下行,先完成左端弯曲。当顶块 10 向下运动到与下模座 1 相接触时,橡胶 6 开始压缩,活动凸模 8 静止,使凸模 3 相对于压块 5 产生向下的相对运动,从而完成坯料右端的弯曲。当压块 5 与上模座 4 相接触时,制件得到校正。

#### 4. 自动弯曲机上的弯曲成形

对于薄带料、线材需经多次弯曲成形的小零件,批量又很大时,如果采用一般的模具在通用压力机上加工很不方便,有的甚至很困难。而采用多滑块自动弯曲机配上相应的简单模具,可以完成各种复杂零件的弯曲成形,整个生产过程除了上料和装模、调整需人工进行外,其余均由机床进行连续自动化生产,因而生产效率很高。此外,由于自动弯曲机具有较高的送料精度(可达 $\pm 0.05\text{ mm}$ ),因此,加工零件的一致性很好。在自动弯曲机上工作时,料宽常常等于零件展开宽度。送料进距常常等于零件的展开长度。排样一般不留搭边,无废料,材料的利用率高,因而是一种十分先进的加工方法。

#### 5. 液压机

液压机是利用液体作为介质传递动力,根据所用的介质不同,分为油压机和水压机两种。液压机的结构形式,有柱式和悬臂式。图 3.20 为典型的柱式水压机。水压机的下面是一个坚固的不动横梁 1,通过四根导向钢柱 2 与上横梁 5 连接固定。工作缸 6 和提升缸 7 形成一体装在横梁 5 上。工作缸中的活塞 4 和提升缸的活塞 9,分别由于可动横梁 3 和上横板 10 相连,而可动横梁 3 又通过两个拉杆 8 与上横板 10 连接,并沿导向钢柱 2 上下滑动。

悬臂式水压机典型结构如图 3.21 所示。由床身 1 和底座 4 等组成。床身上有工作缸 8 和活塞 7,活塞 7 的下部是压力头 6,用于装夹和固定上模。床身的侧面装有压力表 2 和操纵器 3。底座上有一个工作台 5,用以安装下模和放置零件。床身 1 上还装有悬臂吊杆 9,便于吊运工件。

使用液压机时,要注意液体介质的清洁,并需要定期更换。工作中有长时间间歇时需停泵,以免液体介质发热及出气泡,并能节省电能。导向钢柱不得磕破划伤,并应经常注油润滑。发现泄漏时,应及时修理。

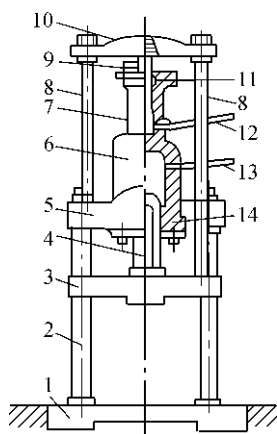


图 3.20 柱式水压机

1—不动横梁；2—导向钢柱；3—可动横梁；4, 9—活塞；5—上横梁；6, 14—工作缸；7—提升缸；8—拉杆；10—上横板；11—密封圈；12, 13—管路。

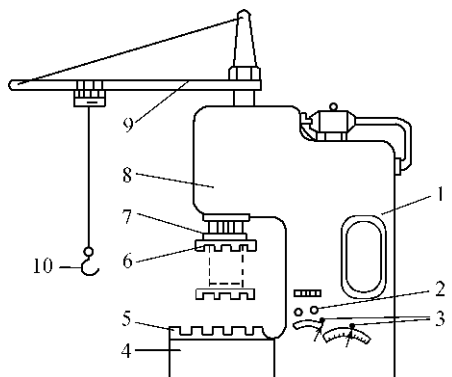


图 3.21 悬臂式水压机

1—床身；2—压力表；3—操纵器；4—底座；5—工作台；6—压力头；7—活塞；8—工作缸；9—悬臂吊杆；10—吊钩。

## 六、型材压弯成形技术

### 1. 工艺要求

型材零件的弯曲适用于一些外形尺寸和曲率半径都较小的零件,或者是外形尺寸虽然较大,但只是局部弯曲的零件。还有一类是大截面异形型材的弯曲成形,也是借用液压机来完成的,一般情况下都使用专用模具。通常型材弯曲半径比较大,故可按中性层通过型材断面重心来计算坯料长度。压弯时材料外侧受拉应力,内侧受压应力,使型材断面发生畸变,如图 3.22 所示。弯曲变形受弯曲半径的限制和回弹的影响。

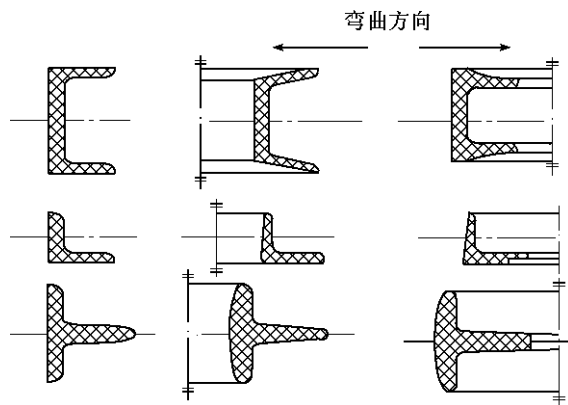


图 3.22 型材弯曲时的断面变形

## 2. 成形方法及特点

### (1) 成形方法

① 多次成形法。对有些曲率较大的零件,一套模具很难保证零件的加工完成。有时需要一套或几套过渡模具进行初步成形,然后再在最终的模具上成形。

② 曲率平缓型材的弯曲成形。液压机除了可借助专用模具压制下陷和弯曲成形外,对一些截面尺寸较大但曲率较为平缓的零件,可采用将带有型面的支撑块或垫块放置在机床台面上进行“三点式”或“四点式”,压制成形,如图 3.23 所示。支撑块间的距离根据零件弯曲的曲率大小自行确定。在压制过程中不断对照检验工装,反复压制直到符合要求为止。

③ 复杂零件的弯曲成形。在压制某些复杂零件过程中,压力一般是先轻后重,对难以变形部位还需要进行适当的手工预成形,如图 3.24 所示。其基本过程为:手工预成形→机床压制→手工修正和校形→再次机床压制。如此反复进行,直至达到要求(越复杂的零件,交替进行成形的次数应该越多。在其成形过程中,可视具体情况安排中间退火工序,消除冷作硬化,便于继续进行弯曲成形)。

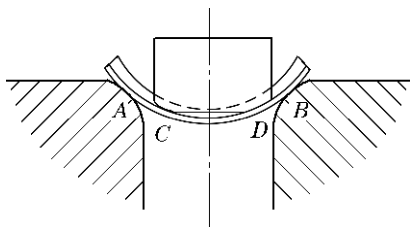


图 3.23 “四点式”压弯成形

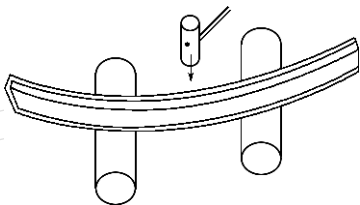


图 3.24 手工预成形

### (2) 成形工艺特点

① 对角形型材之类不对称零件,为防止零件断面畸变和扭转应尽量靠背压弯,并用夹具夹紧,如图 3.25 所示。

② 坯料与上模之间要垫 0.8~1.2 mm 的铝板,如图 3.26 所示,防止将零件表面压伤。

③ 压弯次数根据零件具体情况确定,一般是先轻后重,对难变形处还需必要的手工成形。图 3.27 所示 S 形零件,放边的弯曲度需手工预成形,然后压弯收边弯曲度并对放边弯曲度校形。

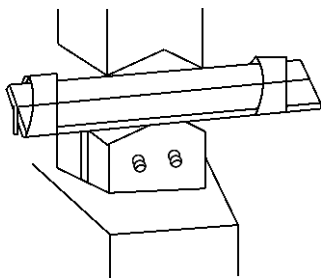


图 3.25 L 形型材靠背压弯

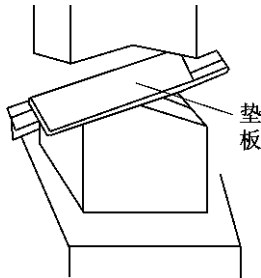


图 3.26 坯料上垫铝板

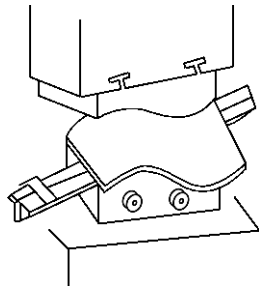


图 3.27 S 形零件的压弯

④ 模具安放要对中防止偏载,模具或垫铁与台面或滑块接触面不能太小,防止接触应力过大损坏机床。

⑤ 对于带有空腔的零件,其内部需放置填充物,主要在弯曲部位填充,填充物通常为铝条和锡条。

⑥ 对有直边型材零件的压弯,模具应有顶块,否则直边上表面产生塌陷,如图 3.28 所示。

⑦ 对零件上有两个以上的折弯,应按样板分次划线,依次压出,以防压偏造成废品,如图 3.29 所示。

⑧ 成形变薄量。当型材弯曲半径  $R$  小于或等于被拉伸缘条宽度  $\alpha$  的 6 倍时,如图 3.30 所示,在弯曲区允许:

I. 材料的变薄量为材料公称厚度的 30%。

II. 缘条宽度  $\alpha$  的减少量为 10%。

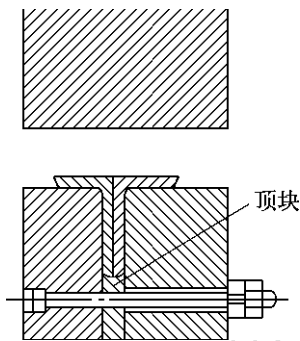


图 3.28 压模中的顶块

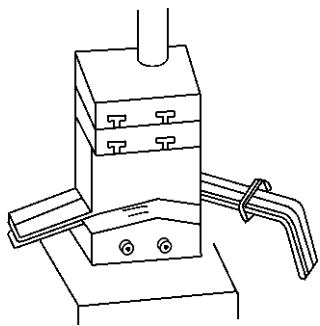


图 3.29 多折弯零件的压弯

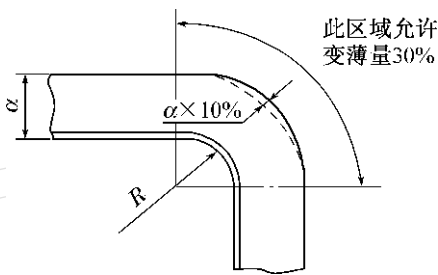


图 3.30 弯曲时允许变薄量



## 【任务实施】

### 一、工艺分析

#### 1. 成形方式

零件成形所要求的相对弯曲半径( $R/a=1.6$ )较小,所以该零件选用压弯方式成形。

#### 2. 成形模具

该零件用一套弯曲模。

#### 3. 该零件成形的典型工艺流程

第一步 检查材料状态;

第二步 热处理,将 20240-0 热处理至 2024-T42 状态;

第三步 压弯;

第四步 取出零件检查;

第五步 修正和校形;

- 第六步 铣切零件外形；
- 第七步 修正和校形；
- 第八步 人工时效；
- 第九步 表面处理；
- 第十步 交检。

二、压弯成形装备

生产上使用的液压机通常为 63t、100t 以及 160t 三种单柱校正压装液压机。其主要技术参数见表 3.3 所示。

表 3.3 三种单柱校正压装液压机技术参数

参 数 \ 型 号	63 t 单柱校正压装 液压机	100 t 单柱校正压装 液压机	160 t 单柱校正压装 液压机
公称压力/kN	63×9.8	100×9.8	160×9.8
柱塞最大行程/mm	350	350	500
压头至工作台面最大距离/mm	700	660	1 000
工作台面尺寸	1 500×1 500	1 200×600	800×630
柱塞下行速度/(mm/s)	12	12	20
柱塞工作速度/(mm/s)	2.3	3.6	5
柱塞回程速度/(mm/s)	60	60	80

三、压弯基本操作过程

- 第一步 接到零件加工任务后,在液压成形前要进行三对照(工艺文件、工装模具、零件材料)。
- 第二步 按工艺文件、图样,检查零件坯料规格、状态是否相符。
- 第三步 借出工艺文件所规定的模具。模具表面无锈蚀,光滑完好。
- 第四步 按照工装下陷和弯曲的要求,在零件坯料上用铅笔划出下陷和弯曲成形的位置及标记。
- 第五步 检查机床各部位运转是否正常,尤其操纵手柄是否灵活,发现故障要及时通知机床维护人员进行排故。
- 第六步 将专用成形模具放在通用模座中,并将其放置在机床台面的中间(即液压机柱头正下方),切记防止偏载。
- 第七步 放入零件坯料,与模具的下模成形部分相吻合后,再放入上模并拧动模座上的螺杆,必须夹紧成形模具。
- 第八步 启动机床,压力柱头慢速下行。
- 第九步 根据零件曲率半径的大小、材料厚度调整工作压力。调压时上、下模应合模并在加载情况下进行,同时依据第一件试压的情况修正压力值。

第十步 操纵手柄,使柱头上升并停在原始位置。

第十一步 取出被压坯料,按工装检查下陷和弯曲成形质量。如不符合,划出不符之处,再次重复压制,直到与工装符合为止。



### 【任务评价】

根据表 3.4 评分表,可对任务进行评价和总结。

表 3.4 压弯评分表

压弯技能操作评分			总分				
序号	考核项目	配分 $T$	评分标准			检测结果	得分
			$\leq T$	$>T, \leq 2T$	$>2T$		
1	$25 \pm 0.5 \text{ mm}$	15	20	5	0		
2	$R2 \pm 0.5 \text{ mm}$	15	10	5	0		
3	$87^{\circ} \pm 30'$	15	15	5	0		
4	平面度 $\leq 0.5 \text{ mm}$	15	15	0	0		
5	表面质量:无表面压伤, 直边上表面塌肩等	20	发现一处扣 2 分				
6	技术安全和文明生产	20	违反规定扣 5~10 分				



### 【思考与练习】

1. 什么是机械弯曲? 飞机制造中常用机械弯曲的方法有哪些?
2. 什么叫压弯? 常用的压弯设备有哪几种?

## 任务 2 滚 弯



### 【任务描述】

如图 3.31 所示,按图样尺寸用柱面滚弯加工的方法制作工件。

1. 用卡形样板测量圆度,间隙最大值应小于 1 mm。
2. 不得出现歪扭现象。

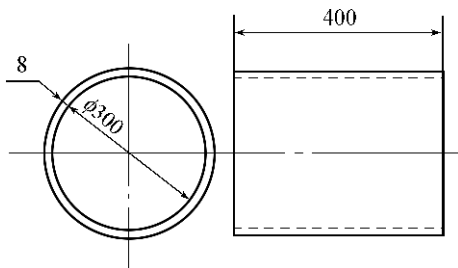


图 3.31 滚弯零件





## 【知识准备】

### 一、滚弯的概述

通过旋转的滚轴,使坯料弯曲的方法叫滚弯,如图 3.32 所示。滚弯的实质是连续不断的弯曲,滚弯适用于板材,如飞机上单曲面蒙皮,以及型材和管材的弯曲。

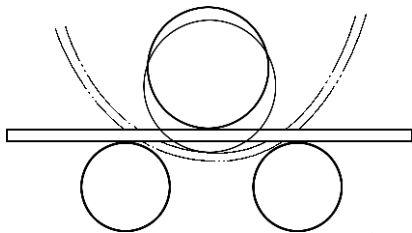


图 3.32 滚弯过程

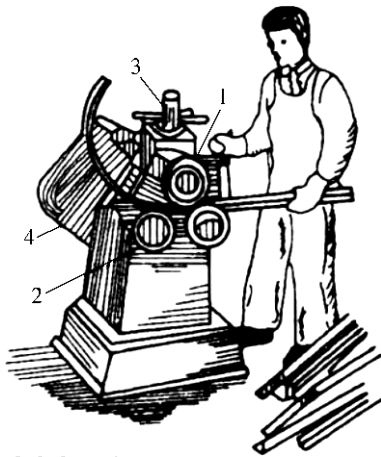


图 3.33 三轴滚弯机

1—上滚轮;2—下滚轮;3—手轮;4—导轮。

### 二、滚弯设备

滚弯机的类型有三轴滚弯机、四轴滚弯机和多轴滚弯机。三轴滚弯机,如图 3.33 所示,可分为对称式和不对称式两类。对称式三轴滚弯机的特点是中间的上轴辊位于两个侧下辊的中心线上,如图 3.34(a)所示,结构简单、应用普遍。其主要缺点是弯曲件两端有较长的一段长度,位于弯曲变形区以外,在滚弯后称为直边。因此,为使板料全部弯曲,要采用特殊的工艺措施。

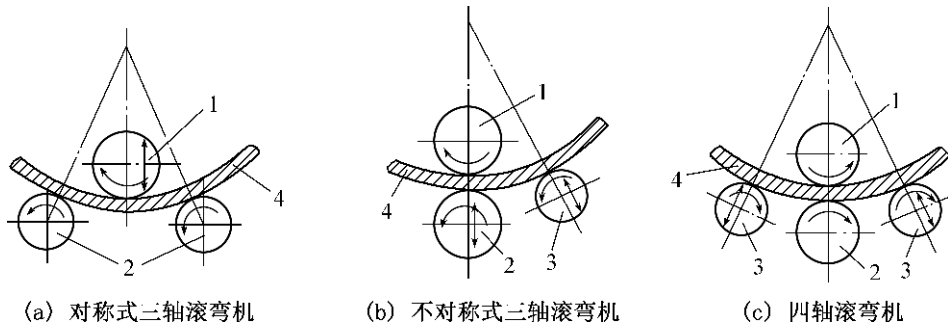


图 3.34 滚弯机轴辊分布和运动方向

1—上轴辊;2、3—下辊;4—板料。

不对称式三轴滚弯机,其轴辊的布置是不对称的,上轴辊位于两下辊之上,而向一侧偏移,如图 3.34(b)所示。这样,就使板料的一端边缘也能得到弯曲,剩余直边的长度极短。如在滚制完板料一端后,将板料从滚弯机上取出调头,再放入进行弯曲,就可使板料全部得到弯曲。这种滚弯机的缺点是由于支点距离不相等,滚弯时轴辊受力很大,易产生弯曲,影响滚弯精度,而且弯曲过程中的板料调头也增加了操作程序。

四轴滚弯机相当于在对称式三轴滚弯机的基础上,又增加了一个中间下辊,如图 3.34(c)所示。这样既能使板料全部弯曲,又避免了板料在不对称三轴滚弯机上,需进行调头滚弯的麻烦。它的主要缺点是结构复杂、造价高,因此,应用不太普遍。

### 三、滚弯基本原理

板料滚弯时,坯料在滚轴作用力和摩擦力的连续加载下,通过轴辊产生塑性弯曲变形。如图 3.35 所示,坯料经滚弯后所要求得到的曲率半径  $R$  是由滚弯时的曲率半径  $R_0$  经过卸载回弹后而获得的。因  $R_0$  与三轴辊的相对位置有关, $R$  也就取决于三个轴辊的相对位置和坯料的力学性能及厚度。滚弯时曲率半径  $R_0$  与轴辊之间的关系,可表示为

$$\left(\frac{d_2}{2} + t + R_0\right)^2 = a^2 + \left(H + R_0 - \frac{d_1}{2}\right)^2 \quad (3.4)$$

式中: $t$ ——材料厚度;

$R_0$ ——滚弯时零件的曲率半径;

$d_1, d_2$ ——分别为上、下轴辊的半径;

$a$ ——两下轴辊之间的半间距;

$H$ ——上、下轴辊之间的相对距离。

两个轴辊之间的半间距  $a$  和上、下轴辊之间的相对距离  $H$  均为可调变量。为了滚弯后获得要求的曲率半径  $R$ ,需要调整  $a$  或  $H$ ,但调节  $H$  要比改变  $a$  值更为方便。 $H$  值可按下式求得

$$H = \frac{d_1}{2} - R_0 + \left[ \left( R_0 + \frac{d_2}{2} + t \right)^2 - a^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

由于板料的回弹量事先难以计算确定,因此,上述关系式不能准确地计算出所需的  $H$  值来,仅供初卷参考。实际生产中,大都采取试测的方法,即凭经验大体调整好上轴辊的位置后,逐渐试卷直到合乎要求的曲度为止。

### 四、滚弯的特点

(1) 通用性好。板材滚弯时,由于钣金件多是较薄的金属板材或型材,均在常温下通过塑性变形滚弯成形,滚弯时不须加热,且一般不用在滚弯机上附加工艺装配。型材滚弯时,只须附加适于不同剖面形状、尺寸的滚轮。

(2) 零件的回弹可通过调整滚轮(滚轴)位置的方法加以补偿。

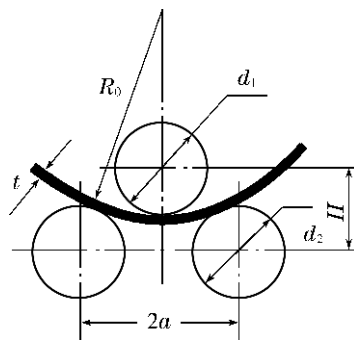


图 3.35 板材滚弯示意图

(3) 滚弯机床结构简单,使用和维护方便。

(4) 滚弯成形效率较低,且精度不高。

## 五、板材滚弯成形

### 1. 等曲率滚弯成形

等曲度零件即圆筒形零件,是滚弯成形中最简单的一种。在滚制工件前,应先检查滚弯机上、下轴辊是否平行,如不平行,则要进行调整。当采用对称式三轴滚弯机滚弯时,通常采用以下两种措施消除工件的直边段。

(1) 板料两端预弯。板料两端预弯时,可利用模具在压力机上进行,如图 3.36 所示。当板料较薄时,也可以手工预弯,或者用一块已经完成适当曲率的垫板,在三轴滚弯机上对板料预弯,如图 3.37 所示,垫板厚度应大于工件板厚的两倍。

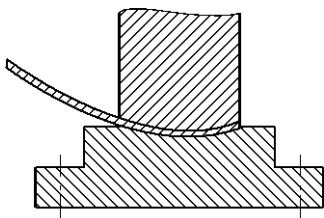


图 3.36 在压力机上预弯板料端部

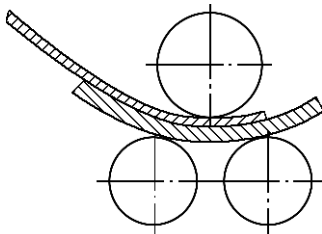


图 3.37 在滚弯机上预弯板料端部

(2) 板料两端留余量。下料时,在板料两端留稍大于直边长度的余量,待滚弯后再割去,但割下的余量如不能使用,则会造成材料的浪费。

(3) 为使滚弯件不出现歪扭现象,板料放入滚床后,要找正位置。在三轴滚弯机上可利用挡板或轴辊上的定位槽找正,还可以用目测或直角尺找正。在四轴滚弯机上找正时,可调节侧辊,使板边紧靠侧辊对准。

(4) 调节轴辊间的距离,以控制滚弯件的曲率。由于弯曲回弹等因素的影响,往往不能一次调节,滚压就可使坯料获得指定的曲率。通常是先凭经验初步调节好轴辊间的距离,然后滚压一段并用样板测量。根据测量结果,对轴辊间的距离做进一步调整,再滚压、测量,如此数次,直至工件曲率符合要求为止。

(5) 较大的工件滚弯时,为避免其自重引起的附加变形,应将板料分为三个区域,先滚压两侧区,再滚压中间区。

(6) 滚压前,应将轴辊和板料表面清理干净,还要将板料上气割留下的残渣和焊接留下的疤痕铲去、磨平,以免碰伤工件和轴辊。

### 2. 变曲率滚弯成形

在滚弯过程中,三根轴辊保持相互平行,并随时改变上轴辊的上下位置,就可弯卷出变曲率零件。上轴辊随时改变的量,虽有指示器表示,但也难控制。因此,有的滚弯机上装有靠模装置,在滚弯过程中,上轴辊依靠模上下移动。采用靠模时,只要靠模做得准确,就能卷制出合乎要求的曲度。但因靠模制造的误差和传动机构的误差,尽管这些误差可

以通过调整机构进行修正,却很难消除。尤其是在生产批量较小时,调整靠模时间过长,不合算;另外,在滚弯同一批零件时,由于毛料厚度及材料硬度上的差异,使滚弯的曲度大小不一,较厚或较软的毛料,滚弯的曲度就大些,反之就小些,毛料厚度越大,这种现象越突出。因此,有的工厂不采用靠模滚弯。

不采用靠模滚弯变曲率零件,一般采用的方法是把零件近似地看作由几个不同半径  $R$  组成的,按半径  $R$  分段、分次滚弯,即曲率由小往大逐次卷成,如图 3.38 所示。滚弯时,首先以  $R_1$  调整上轴辊的位置,毛料从  $a$  端滚弯到  $f$  端,使  $ef$  段曲度符合要求;然后以  $R_2$  调整上轴辊,从  $a$  端滚弯到  $e$  处,使  $de$  段的曲率符合要求。当上轴辊接近  $e$  点时,缓慢适量地上升,使曲度圆滑过渡,以防  $R_1$  和  $R_2$  间出现棱角。依次从  $a$  到  $d$ 、从  $a$  到  $c$ 、从  $a$  到  $b$  来完成全部滚弯工序 I, II, III, IV 和 V。批量生产时,为提高效率,全批零件的工序 I 都完成后,再进行工序 II。在各个工序中,最好每个零件都进行检查,检查时采用样板或模胎。

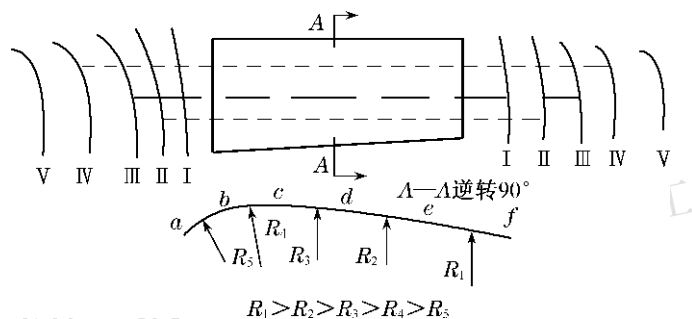


图 3.38 不用靠模滚弯变曲率零件示意图

### 3. 锥台形滚弯成形

从理论上讲,在滚弯过程中两根下轴辊保持平行,上轴辊倾斜不上下移动(或两根下轴辊成一定角度,上轴辊水平不上下移动),可滚弯制出等曲率的锥形零件。上轴辊在滚弯过程中如连续做上下移动,则可制成变曲率的锥形零件。实际上,还必须使坯料两端在轴辊间送给的速度不同,才能滚弯出符合要求的等曲率或变曲率的锥形零件。因为这种零件,如图 3.39 所示的两端的曲率不同,展开长度也不同,因此,在滚弯时,要求两端有不同的滚弯速度。曲率大的  $B$  端速度应慢些,曲度小的  $A$  端速度应快些。在滚弯时板料同时承受三根轴辊的滚压,轴辊一般是圆柱形,所以根本不可能同时得到几种不同的速度,从而易出现弯曲线与坯料等百分比线不重合而产生的扭曲变形。为解决这一问题可采用分段滚弯,即将坯料分段送进机床,具体步骤是先按样板在坯料的内表面的两边划出百分比线,如图 3.40 所示,然后将上轴辊对正百分比线,如图中  $a-a'$ ,使轴辊在等百分比线的前后两个区间内滚动;再由手工调整坯料,使上轴辊对正  $b-b'$ ,重复上述操作,逐段滚弯,直至最后获得所需零件。

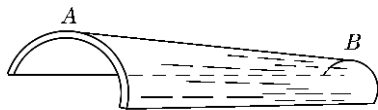


图 3.39 典型锥形零件

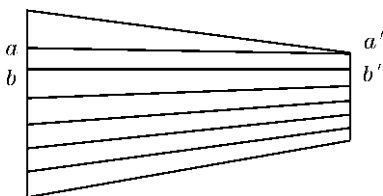


图 3.40 坯料等百分比线

## 六、型材滚弯成形

### 1. 概述

型材滚弯成形工艺常用于飞机机身结构框的制造过程。型材四轴滚弯机(简称“四轴辊”)是型材滚弯成形的专用设备。型材从四个同步旋转的辊轮间通过,在辊轮作用力和摩擦力的作用下,向前推进并产生弯曲变形,如图 3.41 所示。四轴型材滚弯成形适合于大曲率半径、截面形状简单的型材零件成形,最适合等曲率、对称截面型材的成形。

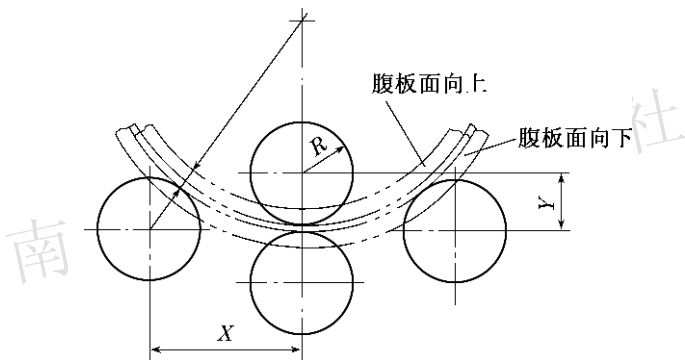


图 3.41 型材滚弯

### 2. 型材滚弯成形工艺要点及对策

(1) 型材绕纵轴扭转,产生歪扭畸变。对于非对称截面型材而言,由于型材截面承受弯曲合力的作用点偏离型材零件形心垂面,从而导致零件扭曲。改变这种情况的对策如下。

- ① 在型材滚弯机上增加侧挡装置,使型材受控在一个平面内弯曲。
- ② 若有可能,采用组合滚弯成形,将非对称截面成对组合为对称截面。

(2) 型材形状及角度畸变。滚弯过程中,型材各部位受力不均和板料各向异性导致这种畸变。改变这种情况的对策如下。

- ① 提高机床刚性及辊轮质量。
- ② 限制型材缘板变形。

### 3. 型材滚弯工艺装备

辊轮是与零件直接接触的成形工装,而型材四轴滚弯机需要四套辊轮,两套弯曲辊轮、两套导向辊轮。对于不同的型材零件截面,要选择不同的成套辊轮。一般来说,L形、T形、Π形等截面可选用通用辊轮,其他异型截面则选用专用辊轮。

(1) 辊轮的结构形式。辊轮一般为拼合结构,由内侧轮片、外侧轮片和垫板按不同的型材截面形状组合而成,如图 3.42 所示。

(2) 辊轮与零件的间隙。型材内边缘与辊轮之间的合理间隙值选取范围为  $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 。

(3) 辊轮直径的选择。

① 适当加大上导轮、下导轮直径,使型材与导轮之间有较强的接触面积,以改善型材在导轮间的支撑状态。

② 尽量减小弯曲轮和导向轮之间的中心距,缩短型材悬空段长度。

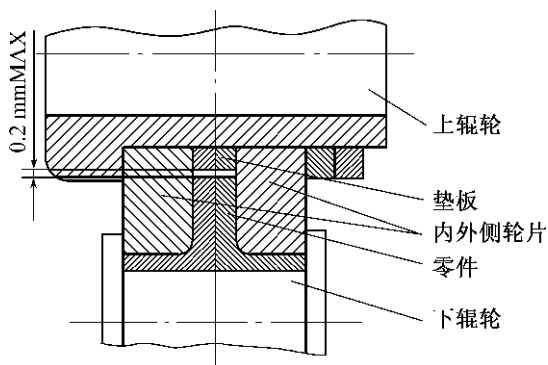


图 3.42 组合式辊轮



## 【任务实施】

### 一、准备工作

#### 1. 材料准备

材料规格:  $\delta 8 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 1\,200 \text{ mm}$ ; 材料牌号: LY12M; 数量: 1 件。

#### 2. 工艺装备

本任务的工艺装备见表 3.5 所示。

表 3.5 滚弯工具和设备

序号	名 称	规格型号	数量	序号	名 称	规格型号	数量
1	大锤		1	8	钢板尺	1 000 mm	1
2	压弧锤		1	9	直角尺		1
3	槽头模胎		1	10	手动剪床		1
4	划线平板		1	11	对称式三轴滚弯机		1
5	划针		1	12	圆弧厚衬板		1
6	内圆卡形样板		1	13	焊机		1
7	铅笔	2B	1				

## 二、柱面滚弯的工艺分析

(1) 柱面的几何特征是表面素线相互平行,因此,在滚制柱面工件时,要求滚弯机的上、下轴辊应平行,不能带有斜度,否则会使滚出的工件带有锥度。

(2) 用对称式三辊滚弯机滚弯,要在滚弯前采取板料两端预弯或预留余量的方法,消除板料两端的直边段。

(3) 为了不使滚弯工件出现歪扭现象,板料放入滚弯机后,要注意找正位置。找正的方法主要有利用挡板或轴辊上的定位槽找正,也可以用目测或  $90^\circ$  角尺找正。

(4) 较大工件滚弯时,为了避免其自重引起附加变形,应将板料分为三个区域,先滚压两端,再滚压中间。必要时还要由吊车予以配合。

## 三、滚弯的步骤及方法

第一步 根据图样要求,计算出板料长并在坯料上划线,用剪板机下料。

第二步 小圆筒一般整筒滚制,大圆筒则要分两半滚制。本工件分两半滚制。

第三步 检查滚弯机的上下轴辊是否平行,若不平行,应将其调整平行。

第四步 用手工的方法预弯板料两端,预弯长度应略大于两下辊中心距的一半,一般为  $180 \sim 200$  mm。在预弯过程中,要用卡形样板进行检查,直至达到图样要求的曲率为止,如图 3.43 所示。

第五步 工件放入滚弯机后,利用滚弯机轴辊上的定位槽进行找正。方法是将下辊的定位槽转到最上端位置,使放入滚弯机的板料边缘与定位槽平行,如图 3.44 所示。

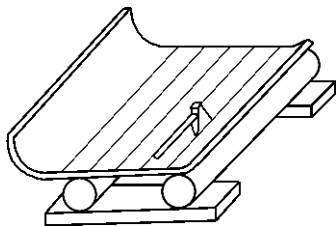


图 3.43 手工预弯工件两端

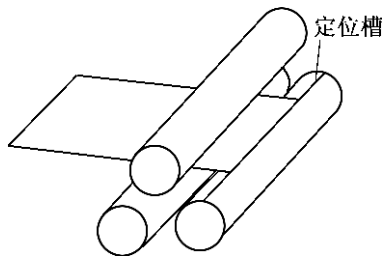


图 3.44 工件找正

第六步 滚弯过程中,由于回弹的影响,往往不能一次滚压至工件要求的曲率。一般要凭经验初步调节上辊压下量,然后再滚压,并用样板测量。根据测量结果,对上辊压下量进一步调节,再滚压、测量,直至达到要求为止。

第七步 滚压中若出现歪扭现象要及时调整,其方法是采用手工矫正,如图 3.45 所示。在矫正过程中,应根据工件的歪扭方向和程度,确定锤击位置,施加相应的锤击力量,避免因矫正失当而引起工件反向歪扭或曲率过大。

第八步 滚弯件成形质量的检查

(1) 用卡形样板沿圆筒内表面上、下边沿检查整个工件的曲率,若有不合格处,应及时修整。

(2) 检查半圆筒两直边是否平行(即共面),方法如图 3.46 所示。若两直边都与平台

贴合,说明两边平行;若不能与平台贴合,说明工件存在歪扭现象,要按图 3.45 所示的方法矫正。

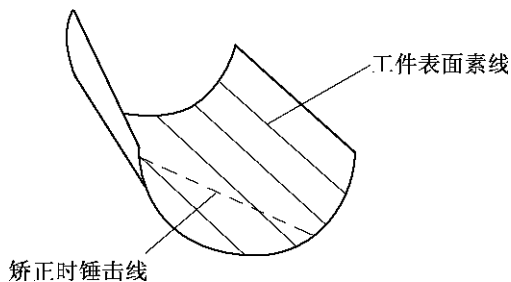


图 3.45 滚弯件歪扭的矫正

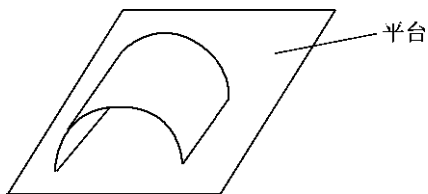


图 3.46 圆筒两边平行度检验

第九步 装焊及矫正。两半筒滚制合格后,便可进行装配焊接,如图 3.47 所示。焊接后要对工件进行检验及必要的矫正。

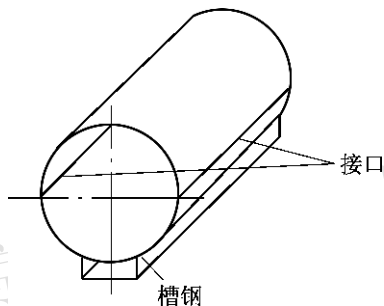


图 3.47 圆筒装配



### 【任务评价】

根据表 3.6 评分表,可对任务进行评价和总结。

表 3.6 滚弯评分表

滚弯技能操作评分			总分				
序号	考核项目	配分 $T$	评分标准			检测结果	得分
			$\leq T$	$> T, \leq 2T$	$> 2T$		
1	$\phi 300 \pm 0.5$	20	20	10	0		
	$400 \pm 0.5$	10	20	10	0		
2	工件的曲率,间隙最大值 小于 1 mm	30	发现一处不符扣 5 分				
3	表面质量:无表面压伤、 无裂纹、锤痕等	20	发现一处扣 5 分				
4	技术安全和文明生产	20	违反规定扣 5~10 分				





### 【思考与练习】

1. 什么叫滚弯？常用的滚弯设备有哪几种？
2. 简述滚弯基本原理和特点。

## 任务 3 弯 管



### 【任务描述】

如图 3.48 所示,按图样尺寸进行弯管。

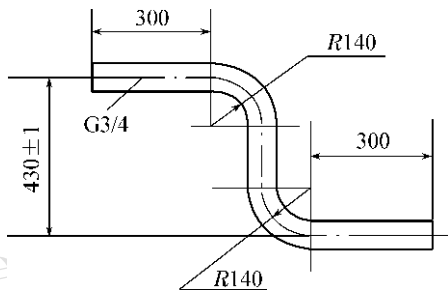


图 3.48 弯管零件

技术要求:

1. 管的上下两直段平行度公差为 2 mm。
2. 管子弯形后应无明显压扁。



### 【知识准备】

在现代飞机上有很多管子零件。它们的外形有直管、比较规则的平面弯曲件以及又弯又扭的空间弯曲件。后者在液压、燃料和冷气系统导管中是常见的。这些管件的主要制造工序有切割、管端成形(如扩口、缩口、波纹等)和弯曲。

弯管是通过手工或机械的方法,将金属管材进行弯曲,以得到符合要求的工件,一般是按管坯的直径和壁厚的不同情况,选择不同的加工工艺。小直径薄壁管在设备能力允许的条件下一般用冷弯,大直径管材一般用热弯。

#### 一、管子弯曲受力分析

管材弯曲与板材弯曲相比,虽然从变形性质等方面看非常相似,但由于管材空心横断面的形状特点,弯曲加工时不仅容易引起横断面形状发生变化,而且也会使壁厚发生变

化。因此,在弯曲加工方法、需要解决的工艺难点、产品的缺陷形式和防止措施、弯曲用模具及设备等方面,两者之间存在很大差别。如图 3.49 所示,在纯弯曲的情况下,外径为  $D$ ,壁厚为  $S$  的管子受外力矩  $M$  的作用而弯曲时,弯曲变形区的外侧材料受到切向拉伸应力的作用而伸长,从而使外侧管壁减薄;内侧材料则受到切向压应力的作用而缩短,从而使内侧管壁增厚。

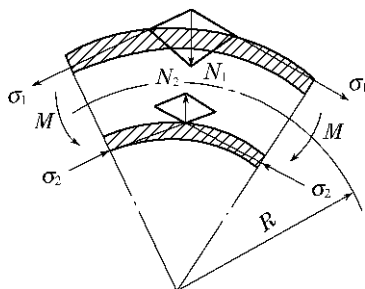


图 3.49 管子弯曲受力分析

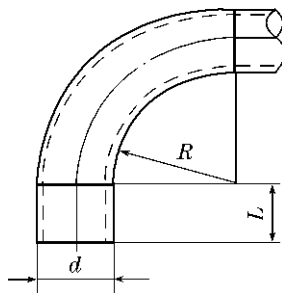


图 3.50 管子最小弯曲半径

由于位于弯曲变形区最外侧和最内侧的材料所受的切向应力最大,故其管壁的厚度变化也最大。因此,外侧管壁会过量减薄。当变形程度过大时,最外侧管壁会产生裂纹,最内侧管壁会出现失稳而起皱。同时,由于弯曲内、外侧管壁上切向应力在法向的合力(外侧切向拉应力的合力  $N_1$  向下,内侧切向压应力的合力  $N_2$  向上)的作用,使弯曲变形区的圆管横截面在法向受压而产生畸变,即法向直径减小,横向直径增大,从而成为近似椭圆形,如图 3.52 所示。变形程度越大,则畸变现象越严重。另外,由于从拉应力过渡到压应力的弹性阶段的存在,卸载时外层纤维因弹性恢复而缩短,内层纤维因弹性恢复而伸长,结果使工件弯曲的曲率和角度发生显著变化,与模具的形状和设计要求的形状不一致,造成弯曲回弹现象,降低了弯曲件的工艺精度。

管壁失稳起皱和圆截面的畸变等现象,需要在工艺上采用预防措施,以增加管壁抵抗失稳的能力,增加剖面抵抗畸变的刚度。常见的方法是弯曲之前在管内加填充物,或在弯曲时用辅助装置支撑管子的内、外壁。一般而言,管径在 10~12 mm 以上,无论何种材料的管子,弯曲时最好都要填充。填充物的选用,应根据管子的相对厚度、相对弯曲半径大小、椭圆度与波纹度的容差范围、材料种类等因素来确定。

## 二、管子的最小弯曲半径

### 1. 最小弯曲半径

管子弯曲时,由于管材性质和管子直径、壁厚等条件的限制,显然不能任意弯曲,而必须在一定的弯曲范围内进行弯曲加工。否则会造成管子的破裂、椭圆度过大、起皱等一系列现象,导致弯曲管子报废。管子在弯曲时,必须在最小弯曲半径以内弯曲,如图 3.50 所示。

### 2. 常见管材的最小弯曲半径

常见管材的最小弯曲半径见表 3.7 所示。

表 3.7 常见管材的最小弯曲半径

管子	弯曲工序		管子外径 $d$	最小弯曲半径			
钢管	热弯		任意值	$3d$			
	冷弯	焊接钢管	任意值	$6d$			
		无缝钢管	5~20 (含 20)	壁厚 $\leq 2\text{ mm}$	$4d$	壁厚 $> 2\text{ mm}$	$3d$
			$>20\sim 35$ (含 35)		$5d$		$3d$
			$>35\sim 60$ (含 60)				$4d$
			$>60\sim 140$ (含 140)				$5d$
	冷弯		$\leq 18$	$2d$			
		$> 18$	$3d$				

三、弯管的椭圆度和减薄量

1. 弯管的椭圆度

管材在自由弯曲时,其横剖面会产生很大的变形,而且外侧管壁会减薄,内侧管壁相应增厚,如图 3.51 所示。

管材弯曲后的变形取决于相对弯曲半径  $R_x$  和相对壁厚  $\delta_x$ 。相对弯曲半径  $R_x$  是指管子中性层的弯曲半径  $R$  和管子外径  $D$  的比值,即  $R_x=R/D$ 。相对壁厚是指管子的壁厚  $\delta$  与管子外径  $D$  的比值,即  $\delta_x=\delta/D$ 。相对弯曲半径和相对壁厚的值越小,则弯曲变形越大,甚至造成外侧管壁破裂和内侧管壁起皱。

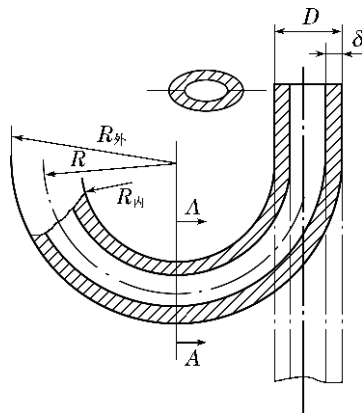


图 3.51 弯管的截面变化

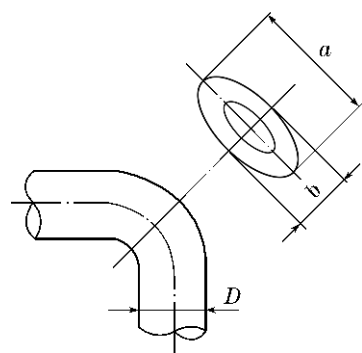


图 3.52 弯管的椭圆度

管材弯曲后的椭圆度不应过大,如图 3.52 所示,否则会造成超差而不符合工件技术要求。管子弯曲后椭圆度  $E$  的计算公式为

$$E=(a-b)/D\times 100\% \quad (3.6)$$

## 2. 弯管减薄量的计算

管子弯曲后壁厚由于受拉,一般都有一定的减薄现象,其减薄率的计算公式为

$$C=[(\delta-\delta_1)/\delta]\times 100\% \quad (3.7)$$

式中: $\delta$ ——弯曲前管坯的壁厚;

$\delta_1$ ——弯曲后管子的壁厚。

# 四、常用弯管方法

## 1. 手工弯管

手工弯管是利用简单的弯管装置,对管坯进行弯曲加工。根据弯管时是否加热,可分为冷弯和热弯两种工艺。

一般管材外径  $D\leq 25\text{ mm}$  时,由于弯曲力矩较小,通常采用冷弯;而管径较大时,多采用热弯。手工弯管不需专用的弯管设备,制造成本低,调节使用方便,但劳动强度较大,效率低,适合小批量或单件生产。

### (1) 手工弯管的原理和装置

手工弯管装置如图 3.53 所示,主要由平台、定模、滚轮和杠杆组成。定模固定在平台上,具有与管坯外径相适应的半圆形凹槽。弯曲前,先将管坯的一端置于定模凹槽中,并用压板压紧。然后扳动杠杆,则固定在杠杆上的滚轮(具有与管子外径相适应的半圆形凹槽)便压紧管子,迫使管子绕定模弯曲变形。当达到管件所要求的弯曲角度时即停止弯曲,从而完成绕弯过程。管件的弯曲半径不同,定模的直径则相应不同。

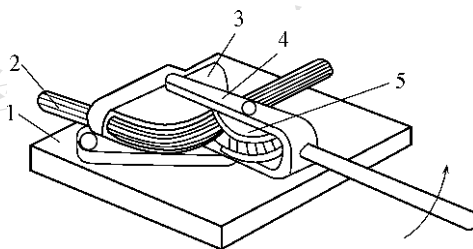


图 3.53 手工弯管装置

1—平台;2—管子;3—定模;4—杠杆;5—滚轮。

### (2) 手工装砂热弯

对于直径较大的管子,手工弯曲时所需力矩过大,必须在折弯处局部加热。加热弯管时,其主要工序有灌砂、划线、加热和弯曲。

① 灌砂。为防止管件断面畸变,通常需在管坯内装入填充物。对于直径较大的管子,一般使用砂子。灌砂前用锥形木塞将管子的一端塞住,并在木塞上开有出气孔,以使管内空气受热膨胀时自由泄出,灌砂后管子的另一端也用木塞塞住。管径较小时也可将管端压扁封口,弯曲后必须经过切割端头和清洗等工序。装砂时,管子两端应留出 20~30 mm 的余量。装入管中的砂子应该清洁干燥,使用前必须经过水冲洗、干燥和过筛。因为砂子中含有杂质和水分,加热时杂质的分解物将沾污管壁,同时水分变成气体时体积膨胀,使压力增大,甚至将端头木塞顶出。砂子的颗粒度一般在 2 mm 以下。若砂子颗粒度过大,就不容易填充紧密,管子弯曲时易使断面畸变;若砂子颗粒度过小,填充过于紧密,弯曲时不易变形,甚至使管件破裂。

② 划线。划线的目的是确定管子加热的长度及位置。加热区域的大小与弯曲角度、弯曲半径的大小有关。首先按图样尺寸定出弯曲部分中点位置,并由此向管子两边量出弯曲的长度,然后再加上管子的直径,这样便确定了管子的加热长度。生产实践表明,按该方法确定的加热长度较为合理。

③ 加热。管子经灌砂、划线后,便可进行加热。加热可用木炭、焦炭、煤气等作燃料或用喷灯、氧乙炔焰加热。普通的煤因含有大量的硫,会渗入钢中,造成管子质量下降,所以不宜作燃料。加热时,应尽量减少加热的持续时间,避免过烧现象。钢管的加热温度约 $600^{\circ}\text{C}\sim 800^{\circ}\text{C}$ ,即钢管呈现樱红色时即可弯曲。加热铝合金管子时,可在弯曲处外缘涂以皂液,当皂液受热变成深褐色时,说明温度已达到 $350^{\circ}\text{C}\sim 450^{\circ}\text{C}$ ,即可进行弯曲。管子的弯曲应尽可能在加热后一次完成,若增加加热次数,不仅会使钢管质量变坏,而且增加了氧化层的厚度,导致管壁减薄。

④ 弯曲。若管子的直径较小时,可采用如图3.54所示的半圆形凹槽模具,用杠杆进行弯曲。当管子的直径比较大时,要将管子放在平台上,利用电动绞车等进行弯管。导管加热弯曲,在弯曲部位易产生不圆度和内侧壁起皱,主要与装砂不紧密有关。

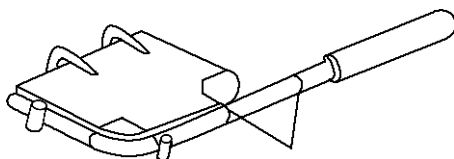


图 3.54 小管子手工弯曲过程

## 2. 机械弯曲

机械弯管是利用弯管设备和弯管模进行弯管,可以对管材进行各种形式的弯曲。

(1) 绕弯。绕弯可分为有芯弯管和无芯弯管两种。

① 有芯弯管。在弯管机上进行管坯绕弯,如图3.55所示。弯管模胎4固定在机床主轴上,由电动机经过蜗轮蜗杆传动,做顺时针方向旋转,管子6由夹块3夹紧在弯管模上,在管子和弯管模胎相切的切点附近装有压块1,内侧垫有防皱块5,管子内部塞有芯棒2,当弯管模胎转动时,管子即绕弯管模胎逐渐弯曲成形。防皱块结构图如图3.56所示。

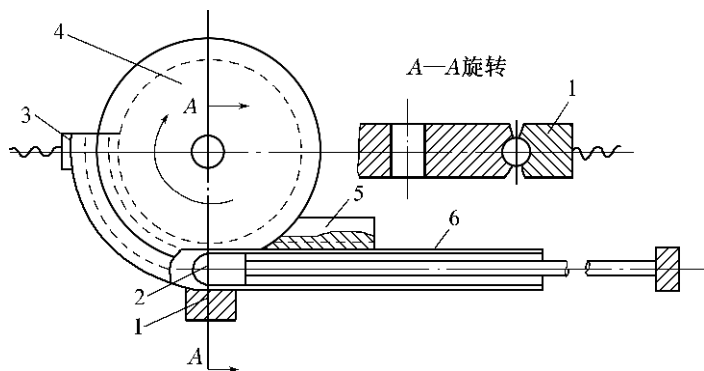


图 3.55 管子绕弯工作原理图

1—压块;2—芯棒;3—夹块;4—弯管模胎;5—防皱块;6—管子。

有芯弯管的工模件主要包括芯棒、防皱块和模胎。

I. 芯棒。芯棒的作用是从管材内部支撑管壁,预防管材截面畸变和管壁起皱。常用的芯棒有以下几种形式:柱形芯棒、成形芯棒和链节球状芯棒等,如图 3.57 所示。

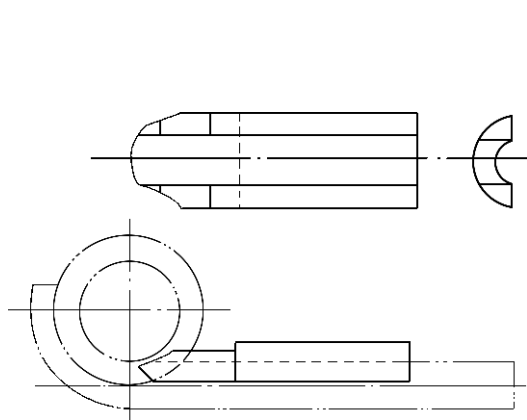


图 3.56 防皱块

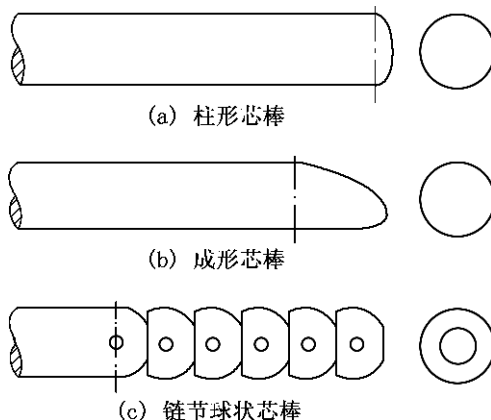


图 3.57 各种芯棒的形式

II. 防皱块。靠近切点又未进入弯曲变形区的管坯材料,其外表没有得到弯曲模胎型槽的支撑,即使采用了芯棒,弯曲时仍有可能在此处起皱,故应加装防皱块。

III. 弯曲模胎。有芯弯管的另一重要零件,其半径取决于弯管的弯曲半径。由于冷弯时弯管将产生一定的回弹,所以在设计时弯曲模胎的半径应比需要的弯管半径略小,一般可按下列数据确定。

当  $R/D=3\sim 4$  时,有

合金钢管的模胎半径  $=0.94R$

碳素钢管的模胎半径  $=(0.96\sim 0.98)R$

当  $R/D$  较大时,取小值,反之取大值,最终靠试模时调整修正。

② 无芯弯管。无芯弯管是在弯管机上利用反变形法控制管截面的变形,使管坯沿弯曲模胎绕弯的工艺方法。无芯弯管机比有芯弯管机结构简单,省去了芯棒,应用更为广泛。

采用反变形法进行无芯弯管,即在管坯进入弯曲变形区之前,预先给予一定量的反变形,而使管坯弯曲外侧向外突出,如图 3.59 所示,在弯曲后,由于不同方向的变形互相抵消,使管坯截面基本保持圆形,以满足截面处的椭圆度要求。

无芯弯管的工作原理如图 3.58 所示。管坯置于弯曲模胎与反变形滚轮之间,并用夹块压紧在弯曲模胎上。导向轮的凹槽为半圆形,引导管坯进入弯曲模胎。反变形轮的凹槽为双圆弧结构,它将管坯压紧产生反变形,如图 3.58(a)中 A-A 剖视所示。当弯曲模胎旋转时,管坯便绕弯曲模胎逐渐弯曲成形。由于弯曲前管坯截面产生了预定的反向变形,因此,弯曲恢复后截面基本保持圆形,如图 3.58(b)中 B-B 剖视所示。图 3.58(a)所示为采用反变形轮的弯管情形,图 3.58(b)所示为采用反变形滑槽的弯管情形,其工作原理相同。

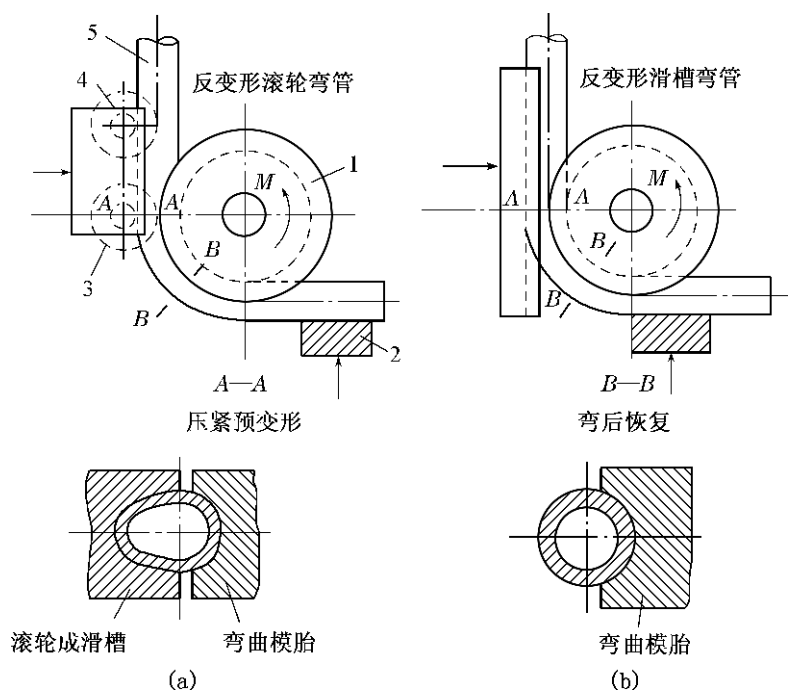


图 3.58 无芯弯管工作原理

1—弯曲模胎;2—夹块;3—反变形滚轮;4—导向轮;5—管坯。

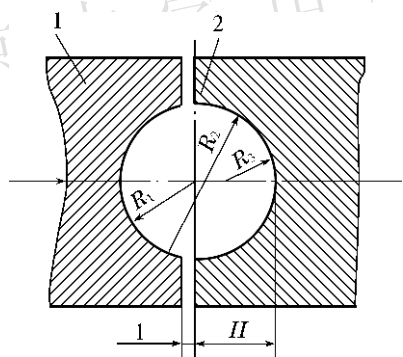


图 3.59 反变形槽的断面形状

1—模胎;2—滚轮或滑轮。

在理想情况下,只要反变形型槽的形状和尺寸适当,可使弯管截面的椭圆度极小甚至为零。反变形槽的断面形状如图 3.59 所示,反变形槽的尺寸与相对弯曲半径  $R/D$  有关,具体见表 3.8 所示。

表 3.8 反变形槽的尺寸

相对弯曲半径 $R/D$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$H$
1.5~2	0.5D	0.95D	0.37D	0.56D
>2~3.5	0.5D	1.0D	0.4D	0.545D
≥3.5	0.5D		0.5D	0.5D

一般来说,当相对弯曲半径为 1.5 时,均采用无芯弯管法,只有对直径较大、壁厚较薄的管坯才采用有芯弯管法。

(2) 滚弯。整圆或螺旋圆形的弯管在滚弯机上滚弯比其他弯管法更为方便。可使用三轴滚弯机,或多轴滚弯机,如图 3.60 所示。管子弯曲时管内要有填充物防止圆管截面畸变。

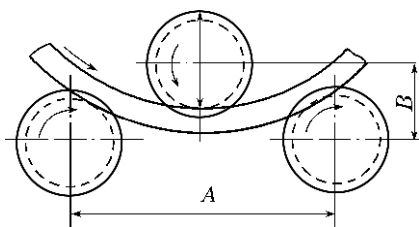


图 3.60 三轴滚弯机滚弯管子

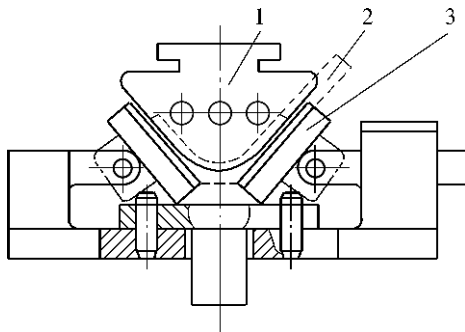


图 3.61 V 形管件冲模压弯

1—凸模;2—管坯;3—凹模。

(3) 冲模压弯。此法生产率高,模具调节简单。对外径为 10 mm 以上的薄壁管在弯曲前要填填充物,防止管壁起皱和管截面畸变。此法也有些缺点,如管子与凸凹模开始接触处,剖面会有一些畸变;在模具上修回弹量比较困难。V 形管件冲模压弯如图 3.61 所示。

(4) 拉弯。在管子内充液压或填充料的情况下,对管子进行拉弯,使管子内、外侧壁均处于受拉应力状态,卸载后回弹量极少,又不会起皱,提高了弯管的准确度。

(5) 热弯。铝及铝合金、碳钢及合金钢等管子除了可采用上述冷弯方法之外,还可采用热弯成形,以获得比冷弯更小的相对弯曲半径。不锈钢导管因会产生晶界腐蚀,不允许热弯。加热方式可采用焊枪加热、自阻加热,如图 3.62 所示。电焊机对管子的自阻加热,管子通过低电压大电流,依靠管子自身的内阻加热。

(6) 推弯。推弯主要用于弯制弯头。根据推弯工艺特点,又可分为冷推弯管和芯棒式热推弯管两类。

冷推弯管装置如图 3.63 所示,主要由压柱 1、导向套 2 和弯曲型模 4 组成。弯曲型模由对中的两块拼成,以方便其型腔加工。弯管时,把管子 3 放在导向套中定位后,压柱下行,对管子端口施加轴向推力,强迫管子进入弯曲型腔,从而产生弯曲。

芯棒式热推弯管工作原理如图 3.64 所示,管子 7 套在芯杆 5 上,由管子支承辊 8 支承。推板 6 位于管子末端,对管子施加轴向推力  $F$ 。加热炉 2 的热源 3 对管子进行加热。这样,管子在推力作用下,边加热边向前移动,最后从芯棒 4 末端推出,形成管弯头 1。

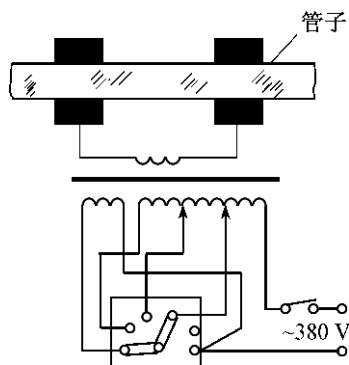


图 3.62 自阻加热示意图



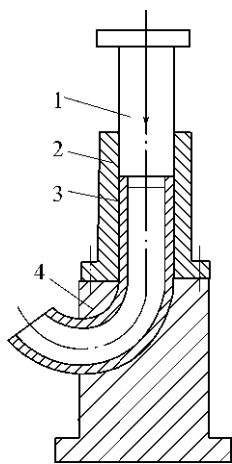


图 3.63 冷推弯管装置

1—压柱；2—导向套；  
3—管子；4—弯曲型模。

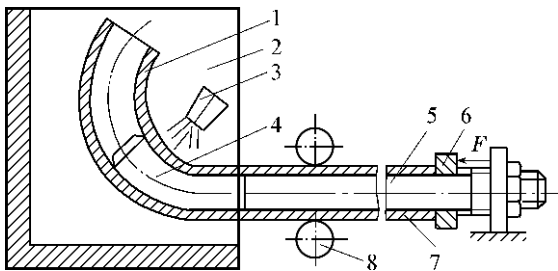


图 3.64 热推弯管工作原理

1—弯头；2—加热炉；3—热源；4—芯棒；  
5—芯杆；6—推板；7—管子；8—支承辊。



【任务实施】

一、准备工作

1. 材料准备

材料规格：G3/4，1 500 mm；材料牌号：LY12M；数量：1 件。

2. 工艺装备

本任务的工艺装备见表 3.9 所示。

表 3.9 弯管工具和设备

序号	名 称	规格型号	数量	序号	名 称	规格型号	数量
1	方头砧铁		1	10	钢板尺	300 mm	1
2	扳弯器(套管)		1	11	直角尺		1
3	装砂漏斗		1	12	游标卡尺	150 mm	1
4	定位销			13	工作钳台		1
5	大锤		1	14	划针		1
6	手锤		1	15	铅笔	2B	1
7	弯管胎模			16	焦炭炉		1
8	羊角卡		1	17	焦炭		
9	加热用具						

## 二、操作步骤

第一步 将砂子冲洗、干燥和筛选。

第二步 装砂。为了使砂子在管内填充紧密,用漏斗装砂的同时,要不断地敲击管子。装满砂子的管子两端须用金属盖封住,本零件管子较细,也可用木塞塞紧。为了便于管内空气在受热膨胀时能自由泄出,可在盖板上钻一排气孔。

第三步 划线。划线的目的在于确定管子的加热位置和长度。划线时,按图样尺寸定出弯曲部位中点位置,并由此向管子两端量出弯曲长度,再加上管子直径,这样确定加热长度比较合适。

第四步 加热。管子经装砂、划线后,便可利用焦炭炉进行分段加热。加热温度为  $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,加热速度应缓慢、均匀。当管子加热至规定温度时,应短时间保温,使管内的砂子也达到相同温度,这样可使管子在弯形时不致冷却过快。

管子每一弧段的弯形,最好一次加热完成。增加加热次数,将使材料力学性能变坏,增加管子氧化层的厚度,导致管壁变薄。

第五步 弯形。将加热好的管子放置于弯曲模胎上,使管子的弯曲点与模胎上的对应点对正、固定。然后,利用扳弯器将管子顺着模胎的弧面扳弯,使管子与模胎逐步贴严。

第六步 质量检查。管子弯好后,须按图样要求进行质量检查,并对不合格处进行修整。

第七步 清理。取下金属塞,倒出管内砂子,将管子清理干净。清理管内砂子时,不可用力敲击或撞击管子,以免引起变形。

## 三、结束工作

第一步 清点工具和量具,摆放规范整齐,外表完好。

第二步 清扫工作现场,保持工位文明整洁,符合安全文明生产的要求。

第三步 填写工作评价单。



### 【任务评价】

根据表 3.10 评分表,可对任务进行评价和总结。

表 3.10 弯管评分表

放边技能操作评分			总分				
序号	考核项目	配分 $T$	评分标准			检测结果	得分
			$\leq T$	$> T, \leq 2T$	$> 2T$		
1	300(2 处)	$10 \times 2$	10	0	0		
2	$R140$ (2 处)	$10 \times 2$	15	0	0		
3	$430 \pm 1$	10	10	5	0		

(续表)

放边技能操作评分			总分				
序号	考核项目	配分 $T$	评分标准			检测结果	得分
			$\leq T$	$>T, \leq 2T$	$>2T$		
4	管的上下两直段平行度公差为 2 mm	10	10	0	0		
5	表面质量:无裂纹、夹伤、划伤、锤痕,无明显压扁等	20	发现一处扣 2 分				
6	技术安全和文明生产	20	违反规定扣 5~10 分				



## 【思考与练习】

1. 简述管件绕弯成形的基本原理。
2. 芯棒的作用是什么以及有哪几种类型?
3. 手工装砂热弯主要有哪些工序?

南京大学出版社



## 拉深成形

### 任务 拉深成形



#### 【任务描述】

如图 4.1 所示圆筒形零件,按图样尺寸加工无凸缘圆筒形拉深件,材料为 08 钢,板料厚度  $\delta=1\text{ mm}$ ,大批量生产。

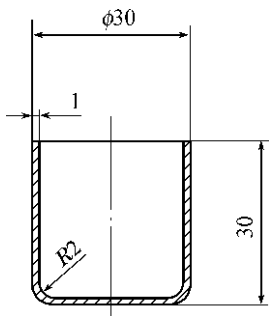


图 4.1 拉深件



#### 【知识准备】

拉深成形是利用模具使一定形状的平板毛坯变为开口空心零件的冲压工艺方法。拉深成形也称压延成形或拉延成形。用拉深成形可以制成筒形、阶梯形、锥形、半球形、盒形和其他不规则形状的立体空心零件。拉深加工的对象广泛,材料品种繁多。在日常用品、电器零件、机械零件、飞机结构和汽车零件的成形中,有着广泛的应用。图 4.2 是典型拉深零件外形示意图。

拉深有多种形式。按照零件的外形,拉深可划分为筒形件、锥形件、半球形件、阶梯形件、盒形件和复杂形状零件拉深。按照工序数,拉深可划分为单次和多次拉深。按照材料变形情况,拉深可划分为正拉深、反拉深、变薄拉深和特殊拉深等。在各种拉深成形工艺中,圆筒形件拉深是最基本的拉深方法。

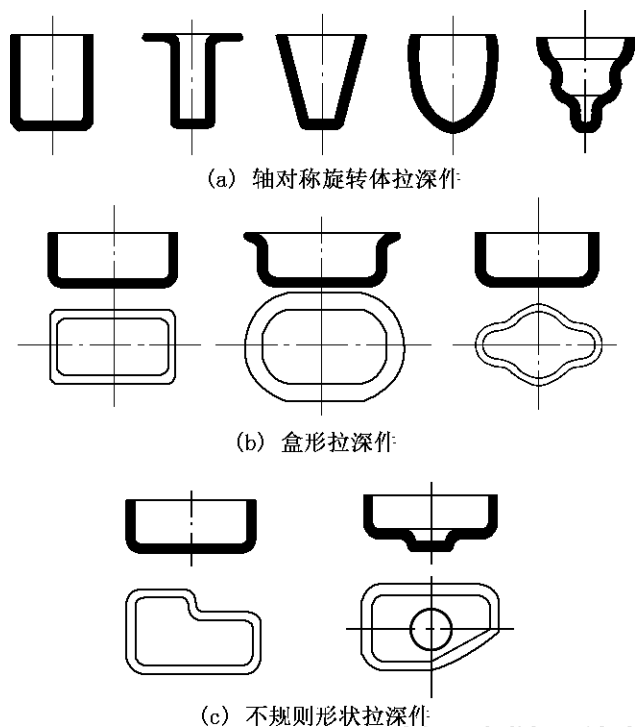


图 4.2 典型拉深零件示意图

### 一、拉深成形过程及特点

现以圆筒形拉深件为例,说明板料的拉深成形过程。如图 4.3 所示,拉深模的工作部分具有一定的圆角,并且凸、凹模间隙稍大于板料的厚度。拉深成形时,板料置于凹模上,当凸模向下运动时,迫使板料压入凹模孔,形成空心的筒形件。

拉深过程中,板料毛坯的中间直径为  $d$  的部分变为零件的底部,基本不发生变形。而外部环形部分的金属,将沿圆周方向发生很大的压缩塑性变形,并迫使多余的金属沿毛坯的径向产生流动,形成拉深件的侧壁。如图 4.4 所示,如果把坯料的环形部分划分为若干狭条和扇形,把扇形部分切除,余下的狭条部分沿直径  $d$  的圆周弯曲后即为圆筒的侧壁。扇形部分的金属是多余的,此部分金属在拉深过程中,沿半径方向产生了流动,从而增加了零件的高度。因此,筒壁高度  $h$  总是大于  $\frac{1}{2}(D-d)$ 。

拉深中毛坯金属的周向压缩变形受到限制,引起很大的切向压应力,使毛坯变形区因为失稳而出现起皱现象,如图 4.5 所示。毛坯严重起皱后,由于不能通过凸、凹模之间的间隙而被拉断,造成废品。即使轻微起皱的毛坯,能勉强地通过,也会在零件的侧壁上留下起皱的痕迹,影响拉深件质量。防止起皱的有效办法是采用压边圈,如图 4.3 所示。

拉深中毛坯金属的周向压缩和径向流动,还将导致拉深件厚度发生变化,如图 4.6 所示。由图中可见,凸模圆角处板料厚度减薄最为严重,是发生拉裂的危险区。合理选择凸、凹模间隙和工作圆角半径,可使板料厚度减薄现象得以改善。

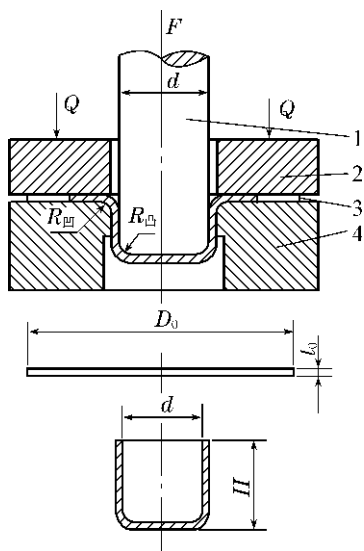


图 4.3 拉深过程

1—凸模;2—压边圈;3—板料毛坯;4—凹模。

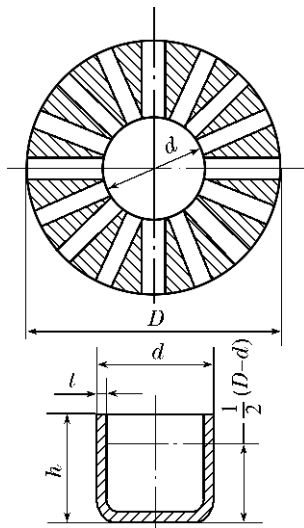


图 4.4 拉深时金属的流动

此外,拉深中的大塑性变形还可能引起材料的加工硬化,使进一步拉深更加困难。因此,拉深中应根据材料的塑性,合理选定每次拉深材料的变形程度。变形较大的拉深件,应采用多次拉深的方法,并采取中间退火的措施,以消除材料的加工硬化,完成拉深工作。

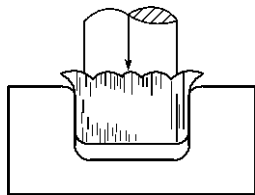


图 4.5 毛坯起皱

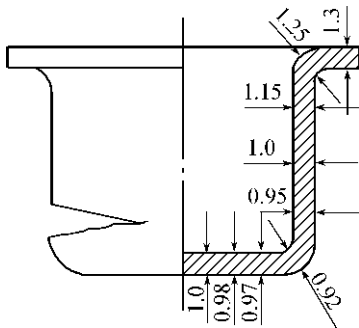


图 4.6 拉深件厚度的变化情况

## 二、工艺参数

### 1. 坯料尺寸

旋转体零件是采用圆形坯料,其直径按面积相等的原则计算(不考虑板料的厚度变化)。计算坯料尺寸时,先将零件划分为若干便于计算的简单几何体,分别求出其面积后相加,得总面积  $\sum A$ ,则坯料直径

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \sum A} \text{ (mm)}$$

图 4.7 所示为圆筒形拉深件坯料尺寸计算图。由图示得

$$\frac{\pi}{4}D^2 = A_1 + A_2 + A_3 = \sum A_i$$

故

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \sum A_i} \tag{4.1}$$

$$A_1 = \pi d(H-r)$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4}[2\pi r(d-2r)+8r^2]$$

$$A_3 = \frac{\pi}{4}(d-2r)^2$$

把以上各部分的面积相加后代入式(4.1),整理可得  
坯料直径为

$$D = \sqrt{(d-2r)^2 + 4d(H-r) + 2\pi r(d-2r) + 8r^2}$$
$$= \sqrt{d^2 + 4dH - 1.72dr - 0.56r^2} \tag{4.2}$$

式中: $D$ ——坯料直径;

$d, H, r$ ——拉深件直径、高度、圆角半径。

由于板料的各向异性和模具间隙不均等因素的影响,拉深后零件的边缘不整齐,甚至出现耳子,需在拉深后进行修边。圆筒件的修边余量  $\Delta h$ 。见表 4.1 所示,当拉深次数多或板料方向性较大时,取表中较大值。当零件的  $\frac{h}{d}$  值很小时,也可不进行修边。常用旋转体坯料直径计算公式,见表 4.2 所示。

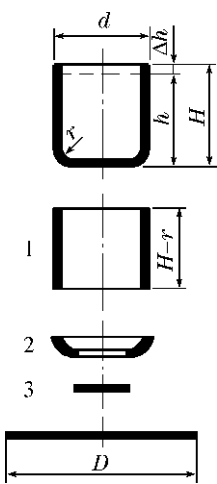


图 4.7 圆筒形拉深件坯料尺寸计算图

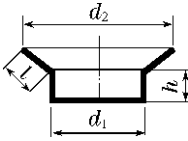
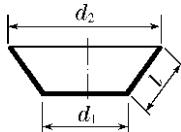
表 4.1 圆筒体拉深的修边余量  $\Delta h$

零件高度/mm	修边余量 $\Delta h$ /mm	零件高度/mm	修边余量 $\Delta h$ /mm
10~50	1~4	100~200	3~10
50~100	2~6	200~300	5~12

表 4.2 常用旋转体拉深件坯料直径的计算公式 (mm)

序号	零件形状	坯料直径 $D$
1		$D = \sqrt{d^2 + 4dh}$
2		$D = \sqrt{d_2^2 + 3d_1h}$
3		$D = \sqrt{d_2^2 + 4(d_1h_1 + d_2h_2)}$

(续表)

序号	零件形状	坯料直径 D
4		$D=\sqrt{d_1^2+4d_1h_1+2l(d_1+d_2)}$
5		$D=\sqrt{d_1^2+2l(d_1+d_2)}$

注:对于厚度小于 1 mm 的拉深件,可不按工件材料厚度中心层尺寸计算,而根据工件外壁尺寸计算。

2. 拉深系数和次数

(1) 拉深系数的确定

圆筒件的拉深系数为

$$m=\frac{d}{D} \tag{4.3}$$

式中: $D$ ——拉深前坯料直径;

$d$ ——拉深后零件直径。

拉深系数反映了坯料外边缘在拉深后切向压缩变形的大小。因此,它表示了拉深的变形程度,其值的倒数为拉深比  $K$ ,即  $K=\frac{1}{m}=\frac{D}{d}$ 。圆筒件第  $n$  次拉深系数为  $m_n=\frac{d_n}{d_{n-1}}$  ( $n=1,2,\cdots$ )。

制定拉深工艺时,为了减少拉深次数,可采用小的拉深系数(大的拉深比),但根据前面的变形分析可知,拉深系数过小,将会在危险断面产生破裂。因此,要保证拉深顺利进行,每次拉深系数应大于极限拉深系数。拉深系数  $m$  与板料成形性能、坯料相对厚度  $\frac{t}{D}$ 、凸凹模间隙及其圆角半径等有关,见表 4.3 所示。

表 4.3 圆筒件极限拉深系数

坯料的相对厚度 $t/D \times 100$	0.08~0.15	0.15~0.30	0.30~0.60	0.60~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0
拉深系数						
$m_1$	0.63	0.60	0.58	0.55	0.53	0.50
$m_2$	0.82	0.80	0.79	0.78	0.76	0.75
$m_3$	0.84	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78
$m_4$	0.86	0.85	0.83	0.82	0.81	0.80
$m_5$	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.82

表中数值是由实验得出, $m_1, m_2, \cdots$  分别表示第一、第二……次拉深工序的极限拉深系数



工艺设计时,按表 4.3 决定极限拉深系数后,就可根据圆筒件和平板坯料尺寸,从第一次拉深开始依次向后推算,便能得出所需拉深次数和各中间工序尺寸,如图 4.8 所示。当零件要求较高时,为了防止坯料在凸模圆角处过分变薄,一般采用比极限拉深系数稍大的值。

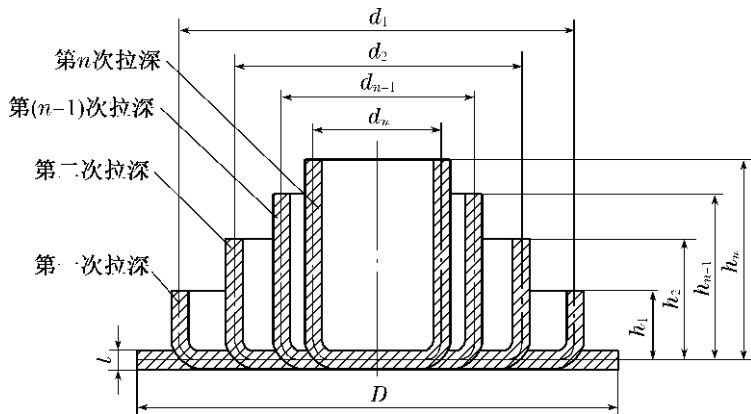


图 4.8 拉深工序示意图

## (2) 拉深次数的确定

拉深次数的确定可以用推算法。根据已知条件,由表 4.3 查得各次的极限拉深系数,然后依次计算出各次拉深直径,即  $d_1 = m_1 D, d_2 = m_2 d_1, \dots, d_n = m_n d_{n-1}$ ,直到  $d_n \leq d$ ,即当计算所得直径  $d_n$  小于或等于零件直径  $d$  时,计算的次数即为拉深次数。

## 3. 各次拉深工序件尺寸的确定

(1) 工序件直径的确定 拉深次数确定后,由表 4.3 查得各次拉深的极限拉深系数,并加以调整(一般是增大),调整的原则是:

① 保证  $m_1 m_2 \dots m_n = \frac{d}{D}$ 。

② 使  $m_1 < m_2 < \dots < m_n$ 。

其中, $d$  为工件直径; $D$  为坯料直径。

最后按调整后的拉深系数计算各次工序件直径,即

$$d_1 = m_1 D; d_2 = m_2 d_1; \dots; d_n = m_n d_{n-1}$$

(2) 工序件圆角半径的确定 圆角半径的确定方法见拉深模工作部分的结构和尺寸部分。

(3) 工序件高度的计算 各次工序件高度的计算公式为:

$$\begin{aligned} h_1 &= 0.25 \left( \frac{D^2}{d_1} - d_1 \right) + 0.43 \frac{r_1}{d_1} (d_1 + 0.32r_1) \\ h_2 &= 0.25 \left( \frac{D^2}{d_2} - d_2 \right) + 0.43 \frac{r_2}{d_2} (d_2 + 0.32r_2) \\ &\vdots \\ h_n &= 0.25 \left( \frac{D^2}{d_n} - d_n \right) + 0.43 \frac{r_n}{d_n} (d_n + 0.32r_n) \end{aligned} \quad (4.4)$$

式中: $h_1, h_2, \dots, h_n$ ——各次工序件高度;

$d_1, d_2, \dots, d_n$ ——各次工序件直径；

$r_1, r_2, \dots, r_n$ ——各次工序件底部圆角半径；

$D$ ——坯料直径。

#### 4. 压边力和拉深力、拉深功

拉深中,为防止材料起皱而采用压边圈,压边力必须适中。压边力太小起不到防皱作用,压边力太大又易引起材料拉裂,是否采用压边圈可以从表 4.4 中做出判断。

表 4.4 采用或不采用压边圈的条件

拉深方法	第一次拉深		以后各次拉深	
	$t/D_0 \times 100$	$m_1$	$t/d_{n-1} \times 100$	$m_n$
用压边圈	$<1.5$	$<0.6$	$<1$	$<0.8$
可用可不用	$1.5 \sim 2.0$	$0.6$	$1 \sim 1.5$	$0.8$
不用压边圈	$>2.0$	$>0.6$	$>1.5$	$>0.8$

对于筒形第一次拉深的压边力

$$Q = \frac{\pi}{4} [D^2 - (d_1 + 2r_d)^2] q$$

当  $d_1/t$  的值很大时

$$Q = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_1^2) q$$

对于筒形件以后各次拉深的压边力

$$Q = \frac{\pi}{4} [d_n^2 - (d_n + 2r_d)^2] q \quad (4.5)$$

上三式中: $Q$ ——压边力(N)

$q$ ——单位压边力(MPa),见表 4.5 所示;

$D$ ——坯料直径(mm);

$r_d$ ——凹模圆角半径(mm);

$d_1, \dots, d_n$ ——各次拉深件的直径(mm)。

表 4.5 圆筒形件拉深时防皱单位压边力  $q$  值

材料	单位压边力 $q$ /MPa	材料	单位压边力 $q$ /MPa
铝	$0.8 \sim 1.2$	深拉深用钢:厚度 $<0.5$ mm	$2.0 \sim 2.5$
铜	$1.2 \sim 1.8$	厚度 $>0.5$ mm	$2.5 \sim 3.0$
黄铜	$1.5 \sim 2.0$	不锈钢	$3.0 \sim 4.5$

拉深力常用以下经验公式计算:

第一次拉深时,拉深力  $F_1$

$$F_1 = \pi d_1 t \sigma_b K_1 \quad (4.6)$$

第二次及第  $n$  次拉深时,拉深力  $F_n$

$$F_n = \pi d_n t \sigma_b K_2 \quad (4.7)$$

式中： $t$ ——料厚(mm)；  
 $d_1, d_n$ ——第 1 次、第  $n$  次拉深半成品直径(mm)；  
 $\sigma_b$ ——抗拉强度(MPa)；  
 $K_1, K_2$ ——修正系数，见表 4.6 所示。

表 4.6 修正系数  $K_1, K_2$  和  $\lambda_1, \lambda_2$  值

拉深系数 $m_1$	0.55	0.57	0.60	0.62	0.65	0.67	0.70	0.72	0.75	0.77	0.80	—	—	—
$K_1$	1.00	0.93	0.86	0.79	0.72	0.66	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	—	—	—
$\lambda_1$	0.80	—	0.77	—	0.74	—	0.70	—	0.67	—	0.64	—	—	—
拉深系数 $m_2$							0.70	0.72	0.75	0.77	0.80	0.85	0.90	0.95
$K_2$							1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.70	0.60	0.5
$\lambda_2$							0.80	—	0.90	—	0.75	—	0.70	—

带压边圈拉深时，总的拉深力应包括压边力在内。

单次行程所需拉深功可按下式计算：

第一次拉深时，拉深功  $A_1$

$$A_1 = \frac{\lambda_1 F_{1\max} h_1}{1\,000} (\text{N} \cdot \text{m})$$

以后各次拉深时，拉深功  $A_n$

$$A_n = \frac{\lambda_2 F_{n\max} h_n}{1\,000} \tag{4.8}$$

式中： $F_{1\max}, F_{n\max}$ ——第一次和以后各次拉深的最大拉深力(N)；

$\lambda_1, \lambda_2$ ——系数见表 4.6；

$h_1, h_n$ ——第一次和以后各次的拉深高度(mm)。

拉深所需压力机的电动机功率为  $P$

$$P = \frac{A \xi n}{60 \times 75 \times \eta_1 \eta_2 \times 1.36 \times 10} (\text{kW}) \tag{4.9}$$

式中： $A$ ——拉深功(N·m)；

$\xi$ ——不平衡系数，取  $\xi = 1.2 \sim 1.4$ ；

$\eta_1$ ——压力机效率，取  $\eta_1 = 0.6 \sim 0.8$ ；

$\eta_2$ ——电机效率，取  $\eta_2 = 0.9 \sim 0.95$ ；

$n$ ——压力机每分钟行程次数。

### 三、压力机的选择

对于压力机形式的选择，中、小型拉深零件选用偏心压力机或曲轴压力机，大型拉深零件选用双动压力机。对于压力机吨位的选择，薄板零件(板厚在 3 mm 以下)由于所需的拉深力不大，因此无须进行计算，在实际生产中，只要压力机的行程和台面大小能够满

足要求,就可以进行拉深。但是,对于厚料、大尺寸的零件,往往需要计算拉深力和压边力,依次来确定压力机的吨位,一般选择的吨位尽量大些。

压力机的工作行程是指滑块单方向所经的路程。对于压力机行程的选择,压力机的行程至少大于拉深件高度的两倍。曲轴压力机的行程不变,等于曲轴半径的两倍。偏心压力机的行程可调节。

另外,根据工作类别及零件的性质,压力机还应备有特殊装置,例如缓冲器、顶出装置、送料装置等。

## 四、拉深模

### 1. 拉深模的分类

拉深模按不同分类方法可分为多种类型,见表 4.7 所示。

表 4.7 拉深模的类型

序号	分类方法	模具名称
1	按拉深次序分类	首次拉深模 以后各次拉深模
2	按使用机床分类	单动压力机使用的普通拉深模 双动压力机使用的双动拉深模
3	按压边装置分类	无压边装置的拉深模 带压边装置的拉深模
4	按一套模具完成的工序数分类	简单拉深模 连续拉深模 复合拉深模

### 2. 拉深模的结构

#### (1) 无压边装置的首次拉深模

如图 4.9 所示,为典型的无压边装置的首次拉深模。模具由凸模、凹模及定位板等零件组成。工作时,毛料放在定位板内,凸模下降时,将毛料压入凹模产生塑性变形而成形。凸模上开有一个  $\phi 3\text{ mm}$  的通气孔,以使制品不至于紧贴在凸模上而造成卸料困难。结构中带有卸件器,当拉深工作行程结束,凸模回程时,卸件器下平面作用于拉深件口部,把零件卸下。这种拉深模具结构简单,适用于拉深板料厚度较大而深度不大的拉深件。

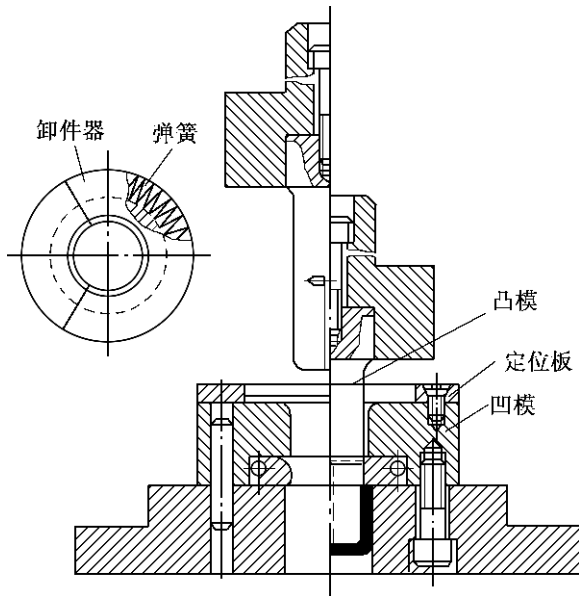


图 4.9 无压边装置的首次拉深模

### (2) 带压边装置的首次拉深模

如图 4.10 所示,为典型的带压边装置的首次拉深模。拉深模的压料装置在上模,由于弹性元件高度受到模具闭合高度的限制,因而这种结构形式的拉深模适用于拉深深度不大的零件。

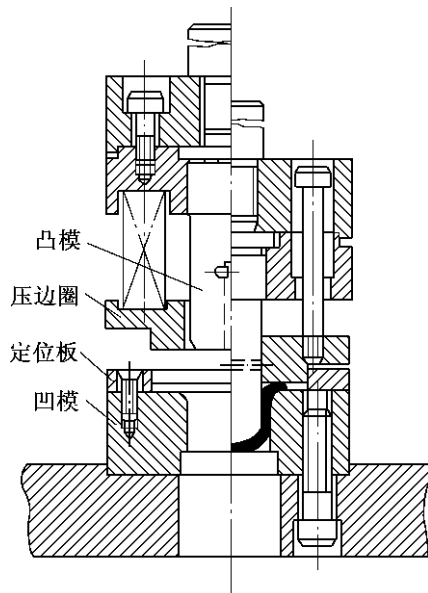


图 4.10 带压边装置的首次拉深模

### (3) 二次及二次以后拉深模

二次及二次以后拉深模的典型结构如图 4.11 和图 4.12 所示。该模具的凸模、凹模及定位圈可以更换,以拉深一定尺寸范围的不同拉深件。

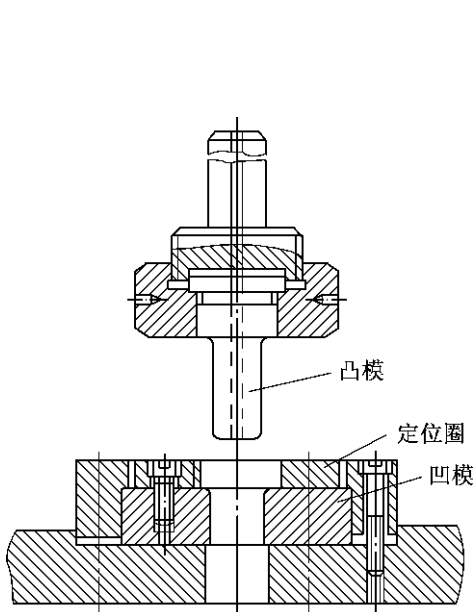


图 4.11 无压边装置的再次拉深模

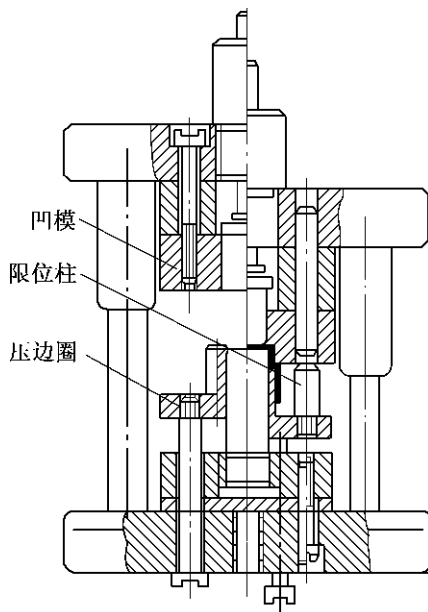


图 4.12 带压边装置的再次拉深模

#### (4) 复合拉深模

所谓复合拉深模,就是在一套模具中不仅完成拉深工作而且又能完成下料、冲孔或切边等多项工作。这种模具适合于成批或大量生产,劳动生产率高,但是模具结构复杂,造价高。如图 4.13 所示为落料拉深复合模,这种模具一般设计成先落料后拉深,为此,拉深凸模应低于落料凹模一个板料厚度。压边圈既起压料作用,又起顶件作用。由于有顶件作用,上模回程时,冲件可能留在拉深凹模内,所以一般设置推件装置。

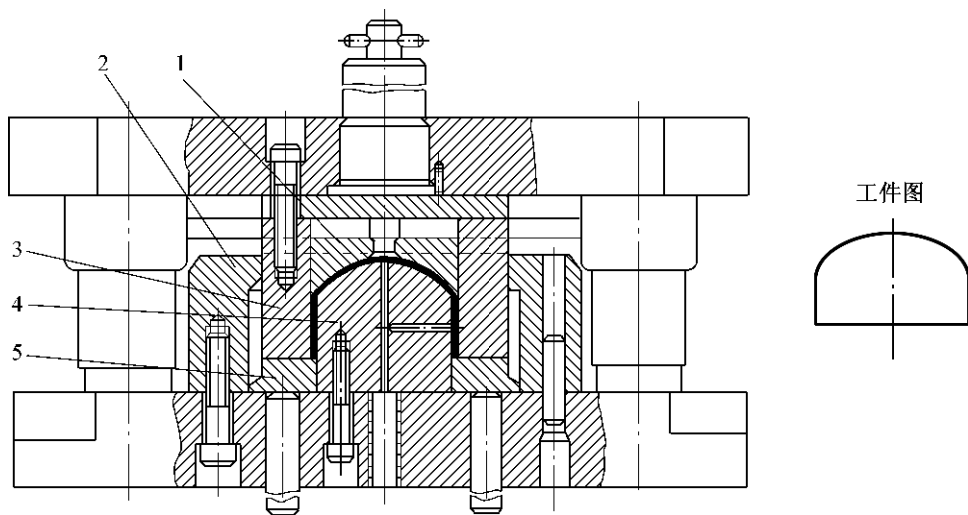


图 4.13 落料拉深复合模

1—推件块;2—落料凹模;3—落料凸模兼拉深凹模;4—拉深凸模;5—压边圈兼顶板。

#### (5) 双动压力机用拉深模

① 双动压力机用首次拉深模 如图 4.14 所示,为双动拉深压力机用首次拉深模,下模由凹模,定位双动压力机用定位板、凹模固定板和下模座组成。上模的压边圈和上模座固定在外滑块上,凸模通过凸模固定杆固定在内滑块上。该模具可用于拉深带凸缘或不带凸缘的拉深件。

② 双动压力机用以后各次拉深模 图 4.15 所示为双动拉深压力机用以后各次拉深模。该模具与首次拉深模的不同之处是所用坯料是拉深后的工序件,定位板较厚,拉深后的零件利用一对卸件板从凸模上卸下来。该模具适用于拉深不带凸缘的拉深件。

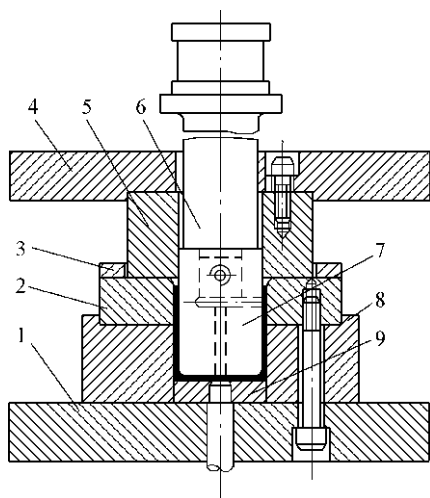


图 4.14 双动拉深压力机用首次拉深模

1—下模座;2—凹模;3—定位板;4—上模座;  
5—压边圈;6—凸模固定杆;7—凸模;  
8—凹模固定板;9—顶板。

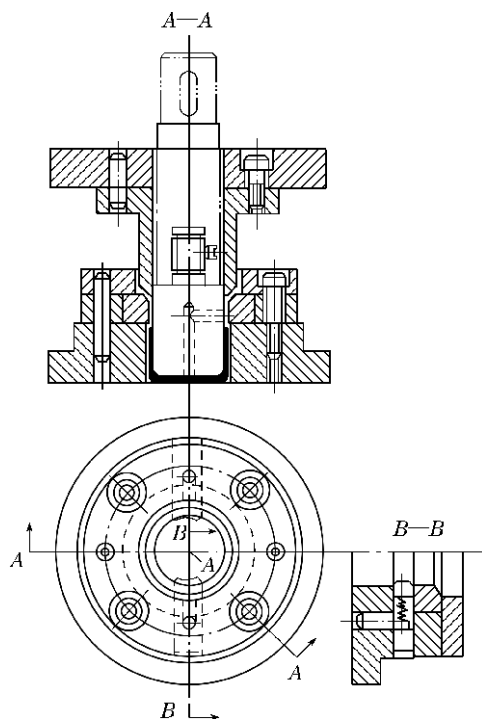


图 4.15 双动拉深压力机用以后各次拉深模

### 3. 拉深模工作部分的结构和尺寸

#### (1) 凸、凹模的圆角半径

① 凹模圆角半径的确定 首次(包括只有一次)拉深凹模圆角半径可按下式计算,即

$$r_{A1} = \sqrt{(D-d)t} \text{ 或 } r_{A1} = c_1 c_2 t \quad (4.10)$$

式中:  $r_{A1}$ ——凹模圆角半径;

$D$ ——坯料直径;

$d$ ——凹模内径;

$t$ ——坯料厚度;

$c_1$ ——考虑材料力学性能的系数,对于软钢、硬铝,  $c_1=1$ ,对于纯铜、铝,  $c_1=0.8$ ;

$c_2$ ——考虑坯料厚度与拉深系数的关系,见表 4.8 所示。

以后各次拉深凹模圆角半径应逐渐减小,一般按下式确定,即

$$r_{Ai} = (0.6 \sim 0.8) r_{Ai-1} \quad (i=2, 3, \dots, n) \quad (4.11)$$

以上计算所得凹模圆角半径一般应符合  $r_A \geq 2t$  的要求。

② 凸模圆角半径的确定 首次拉深可取

$$r_{T1} = (0.7 \sim 1.0) r_{A1} \quad (4.12)$$

最后一次拉深凸模圆角半径  $r_T$  即等于零件圆角半径  $r$ 。但零件圆角半径如果小于

拉深工艺性要求时,则凸模圆角半径应按工艺性的要求确定(即  $r_T \geq r$ ),然后通过整形工序得到零件要求的圆角半径。

中间各拉深工序凸模圆角半径可按下式确定,即

$$r_{T_{i-1}} = \frac{d_{i-1} - d_i - 2t}{2} \quad (i=3, 4, \dots, n) \quad (4.13)$$

式中:  $d_{i-1}, d_i$ ——各工序件的外径。

表 4.8 拉深凹模圆角半径系数  $c_2$

材料厚度 $t/\text{mm}$	拉深件直径 $d/\text{mm}$	拉深系数 $m_1$		
		0.48~0.55	$\geq 0.55 \sim 0.6$	$\geq 0.6$
0.5	$\leq 50$	7~9.5	7.5	5~6
	$> 50 \sim 200$	8.5~10	7~8.5	6~7.5
	$> 200$	9~10	8~10	7~9
$> 0.5 \sim 1.5$	$\leq 50$	6~8	5~6.5	4~5.5
	$> 50 \sim 200$	7~9	6~7.5	5~6.5
	$> 200$	8~10	7~9	6~8
$> 1.5 \sim 3$	$\leq 50$	5~6.5	4.5~5.5	4~5
	$> 50 \sim 200$	6~7.5	5~6.5	4.5~5.5
	$> 200$	7~8.5	6~7.5	5~6.5

## (2) 拉深模间隙

拉深模凸、凹模之间的间隙对拉深力、零件质量、模具寿命等都有影响。间隙小,拉深力大,模具磨损大,但冲件回弹小,精度高。间隙过小,会使零件严重变薄甚至拉裂。间隙过大,坯料容易起皱,冲件锥度大,精度差。因此,应根据板料厚度及公差、拉深过程板料的增厚情况、拉深次数、零件的形状及精度要求等,正确确定拉深模间隙。

### ① 无压边圈的拉深模 拉深模单边间隙为

$$Z = (1 \sim 1.1)t_{\max} \quad (4.14)$$

式中:  $Z$ ——拉深模单边间隙;

$t_{\max}$ ——板料厚度的上极限尺寸。

对于系数  $1 \sim 1.1$ ,小值用于末次拉深或精密零件的拉深,大值用于首次和中间各次拉深或精度要求不高零件的拉深。

### ② 有压边圈的拉深模 拉深模间隙可按表 4.9 确定。



表 4.9 有压边圈拉深时的单边间隙值

总拉深次数	拉深工序	单边间隙 $Z$	总拉深次数	拉深工序	单边间隙 $Z$
1	一次拉深	$(1\sim1.1)t$	4	第一、二次拉深	$1.2t$
2	第一次拉深	$1.1t$		第三次拉深	$1.1t$
	第二次拉深	$(1\sim1.05)t$		第四次拉深	$(1\sim1.05)t$
3	第一次拉深	$1.2t$	5	第一、二、三次拉深	$1.2t$
	第二次拉深	$1.1t$		第四次拉深	$1.1t$
	第三次拉深	$(1\sim1.05)t$		第五次拉深	$(1\sim1.05)t$

注:1.  $t$  为厚度,取材料偏差的中间值(mm)。  
2. 当拉深精密工件时,对最末一次拉深单边间隙取  $Z=t$ 。

对于精度要求高的零件,为了减小拉深后的回弹,常采用负间隙拉深模。其单边间隙值为

$$Z=(0.9\sim0.95)t \tag{4.15}$$

五、特殊拉深方法与变薄拉深方法

1. 特殊拉深

用橡皮(以聚氨酯橡皮为代表)、液体或气体的压力(代替刚性凸模或凹模),使坯料在刚性凹模或凸模中成型的方法。

(1) 橡皮拉深。采用橡皮凸模拉深时,由于坯料定位困难,零件底部变薄严重,故较少采用,较多的是采用橡皮凹模拉深。

橡皮拉深模结构如图 4.16 所示,橡皮装在上模的橡皮容框内,凸模是刚性的并且可以更换。橡皮拉深常在液压机上进行。这种方法因容框中的橡皮紧贴坯料表面而施压,从而有利于坯料变形,使允许的拉深系数减少,增大了零件一次成形的可能性。又由于模具结构简单,成本低廉,因而在生产批量不大的情况下得到了广泛应用。

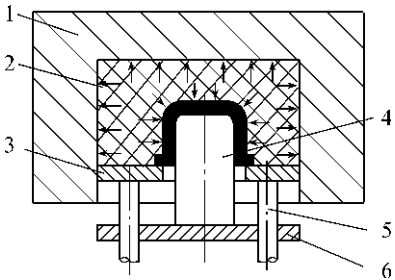


图 4.16 橡皮拉深模

1—容框;2—橡皮;3—压边圈;4—凸模;5—顶杆;6—凸模座。

(2) 液压拉深。液压拉深也叫充液成形。液压拉深是一种直接利用液体,如水或油的压力而使坯料成形的拉深方法。液压拉深与橡皮拉深相比具有许多优点:橡皮囊寿命长、拉深深度大,能够达到更大的单位压力。根据变形特点和应用范围的不同,液压拉深

原则上分为以下两类。

① 液体充当拉深凸模。如图 4.17 所示为液压凸模拉深示意图,凹模仍采用普通凹模。压制零件的操作过程为将毛料置于凹模 1 的型腔上,它们之间用橡皮 8 密封,将凸模体 5 通过螺钉 3 和压板 2 与凹模 1 紧固,将液体注入凸模体与毛料构成的容腔,再将活塞杆 7 及端盖 6 用螺钉 9 紧固于凸模体 5 上。通过手动或机动将活塞杆向下推,活塞杆端部的活塞压缩液体而产生压力,液体压力将平板毛料压制变形而紧贴在凹模型腔上,得到所需的零件。这种液压凸模拉深主要用于拉深锥形件、半球形件和抛物线性件等。其优点是作用在毛料上的压力比较均匀,不存在像普通拉深模那样的压力集中现象。其缺点是在拉深过程中定位比较困难,零件容易拉偏。另外,由于轴向拉深变形厉害,零件底部变薄比较严重。

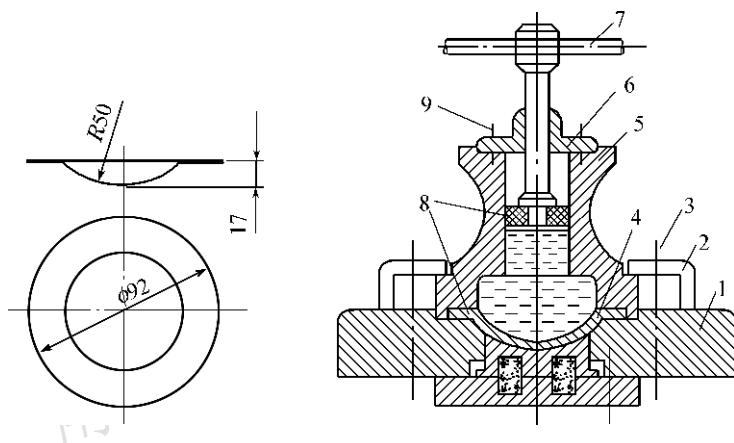


图 4.17 液压凸模拉深

1—凹模;2—压板;3、9—螺钉;4—零件;5—凸模体;6—端盖;7—活塞杆;8—橡皮。

② 液体充当拉深凹模。如图 4.18 所示为液压凹模拉深示意图,凸模仍为普通凸模。这类凹模结构,由于很高的液体压力把毛料紧紧压在凸模上,零件底部不易变薄,因而毛料定位比较容易。同时,与橡皮拉深一样,由于液体压力通过橡皮囊也压到毛料凸缘上,造成有利于拉深的应力应变状态,因此,这种方法可以降低拉深系数。

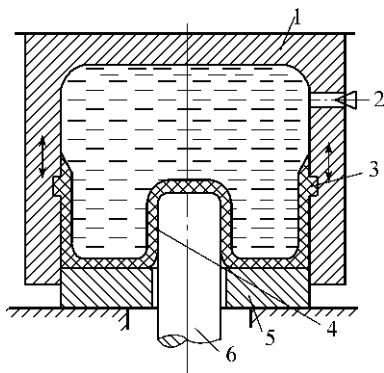


图 4.18 液压凹模拉深

1—高压容器;2—调压阀;3—橡皮囊;4—零件;5—压边圈;6—凸模。

## 2. 温差拉深

(1) 局部加热拉深。利用分别装在压边圈和凹模上的电热元件对主要变形区凸缘区进行局部加热,如图 4.19 所示,以此提高其塑性,降低变形抗力;同时对凹模口与凸模内部通入冷水散热,以限制零件筒壁拉力传递区强度的降低程度,因而可获得较大的变形程度,适用于低塑性材料,如镁合金、钛合金和形状复杂零件的拉深成形。该方法的缺点是模具结构复杂,制造成本高。

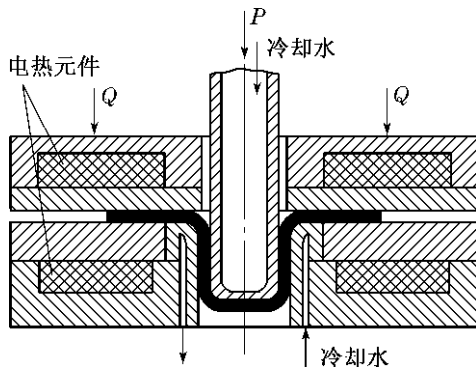


图 4.19 局部加热拉深

(2) 深冷拉深。用液氮( $-195^{\circ}\text{C}$ )或液态空气( $-183^{\circ}\text{C}$ )通入凸模,将零件传力区冷却到 $-170^{\circ}\text{C}\sim 160^{\circ}\text{C}$ 而被强化,可大大降低拉深系数。

### 3. 脉动拉深

凸模并非连续工作,而是以脉动方式将板料拉入凹模。每个脉动行程长  $h=(0.1\sim 0.2)f$ ,  $f$  为压边圈在每个工作循环中的上抬间隙,  $f=0.05(1-m)d/m$ 。每个行程都允许产生小的皱折,再用大的压边力将其压平,因此,可比普通拉深的拉深系数减少。如对盒形件一次脉动拉深可取代 3~4 次普通拉深。缺点是压边力大,需要脉动行程的专用设备。

#### 4. 变薄拉深

对于子弹壳、高压容器等侧壁厚与底厚不等而高度很高的零件,可用变薄拉深方法加工。其成形特点是使板料的直壁部分通过比板料厚度略小的凸凹模单边间隙受压变薄,使侧壁增高,零件侧壁厚度均匀,表面光滑,晶粒细密,强度提高。此外,因为变形区较小,所以拉深力减少,不致出现前述普通拉深(不变薄拉深)易出现的起皱现象,可省去压边圈,但所得零件的残余应力较大,需要回火。变薄拉深一般采用普通拉深所得的筒形件作为毛料。



### 【任务实施】

## 一、准备工作

## 1. 结构分析

- (1) 该零件为无凸缘圆筒形件,结构简单、对称。
- (2) 底部圆角半径  $r=2\text{ mm}>t$ ,满足拉深工艺的要求。

## 2. 精度分析

- (1) 该零件所有尺寸都未标注尺寸公差,属于未注公差尺寸,因此,该零件的精度要

求不高。

(2) 没有厚度变化的要求。

### 3. 材料分析

08 钢具有良好的冲压性能,易于拉深成形。

综上所述,该零件适合拉深成形。

## 二、工艺方案确定

为了确定零件的工艺方案,先应计算拉深次数及有关工序尺寸。板料厚度  $t=1\text{ mm}$ ,故按中线尺寸计算。

### 1. 计算坯料直径 $D$

根据零件尺寸查表 4.1 得修边余量  $\Delta h=2.5\text{ mm}$ 。

由式(4.2)计算坯料直径

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

由零件图可得  $d=29\text{ mm}$ ,  $r=2.5\text{ mm}$ ,  $H=29.5\text{ mm}+2.5\text{ mm}=32\text{ mm}$ , 则  $D\approx 66.5\text{ mm}$ 。

### 2. 判断能否一次拉深成形

$$\frac{t}{D}=\frac{1}{66.5}\approx 1.5\%$$

查表 4.4 可知,该零件首次拉深需要用压边圈,采用压边圈后,首次拉深的拉深系数较小,可以减少拉深次数。

该零件的拉深系数为

$$m=\frac{d}{D}=\frac{29}{66.5}=0.44$$

根据  $\frac{t}{D}=1.5\%$ , 查表 4.3 得  $m_1=0.5$ ,  $m_2=0.75$ ,  $m_3=0.78$ ,  $m_4=0.80$  等。因  $m<m_1$ , 故该零件不能一次拉深成形,需要多次拉深。

### 3. 确定首次拉深工序件尺寸

调整好以后各次拉深系数如下:  $m_1=0.53$ ,  $m_2=0.82$ 。

各工序件直径为

$$d_1=m_1D=0.53\times 66.5\text{ mm}=35.2\text{ mm}$$

$$d_2=m_2d_1=0.82\times 35.4\text{ mm}=28.9\text{ mm}, \text{取 } d_2=29\text{ mm}$$

根据式(4.9)、式(4.10)和式(4.11),各次工序件底部圆角半径取值为

$$r_1=5\text{ mm}, r_2=2.5\text{ mm}$$

按式(4.4),可得各次拉深高度为

$$\begin{aligned} h_1 &= 0.25\left(\frac{D^2}{d_1}-d_1\right)+0.43\frac{r_1}{d_1}(d_1+0.32r_1) \\ &= \left[0.25\left(\frac{66.5^2}{35.2}-35.2\right)+0.43\times\frac{5}{35.2}(35.2+0.32\times 5)\right]\text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &=24.9\text{ mm} \\ h_2 &=0.25\left(\frac{D^2}{d_2}-d_2\right)+0.43\frac{r_2}{d_2}(d_2+0.32r_2) \\ &=\left[0.25\left(\frac{66.5^2}{29}-29\right)+0.43\times\frac{2.5}{29}(29+0.32\times2.5)\right]\text{mm} \\ &=32.0\text{ mm} \end{aligned}$$

4. 工艺方案

根据上述计算结果,此零件需要落料(圆形坯料)、两次拉深和切边(达到零件要求的直径  $\phi 30\text{ mm}$ )共三道冲压工序。因此,生产该零件的工艺方案:落料与首次拉深复合模(或者落料→首次拉深)→第二次拉深→切边。

5. 工艺装备

本任务的工艺装备见表 4.10 所示。

表 4.10 拉深工具和设备

序号	名 称	规格型号	数量	序号	名 称	规格型号	数量
1	方头砧铁		1	8	弯剪刀	10"	1
2	中平锉	10"	1	9	钢板尺	300 mm	1
3	细平锉	10"	1	10	直角尺		1
4	木锤	圆柱形	1	11	游标卡尺	150 mm	1
5	划线平板	300×260	1	12	工作钳台		1
6	划针		1	13	拉深模具		1 套
7	铅笔	2B	1	14	压力机	JA11-250	1

三、操作步骤

第一步 调节压力机和拉深模。

① 将凸、凹模扣放在一起,吊放至压力机工作台,注意使模具的压力中心与压力机滑块中心对正。

② 操纵压力机,慢慢降下滑块,使滑块下平面与模具的上模板贴合,要求贴合严密,然后固定好凸模。

③ 以定好的凸模为基准,调整凸、凹模之间的间隙:取三根(或三根以上)与坯料等厚的板条,间距均匀地摆放在凹模口边缘处,操纵压力机使凸模下落,压下板条挤入凹模,由于凹模未固定,随之确定了凹模的位置和凸、凹模之间的间隙。

④ 操纵压力机使凸模起落几个行程,使凹模处于合适位置后,再将其固定。

⑤ 升起凸模,撤去板条,对模具的工作表面进行清理,按工艺要求,涂上适当的润滑剂。

⑥ 检查压边圈、卸料装置是否完好。

第二步 根据图样要求,做出样板。

第三步 将坯料置于凹模上,在圆形凹模的外缘上进行找正,压紧压边圈,开动压力机进行拉深。

第四步 拉深完成后,迅速升起凸模,利用卸料销将工件自动卸下,落在凹模底部,然后取出。与上述步骤类似,进行第二次拉深。

第五步 清理模具:清除氧化皮,检查压边圈、卸料装置等,对模具工作部位进行润滑。工作结束后,操纵压力机,将凸模落入凹模,顺序卸下凸模和凹模,进行清理。

#### 四、结束工作

第一步 清点工具和量具,摆放规范整齐,外表完好。

第二步 清扫工作现场,保持工位文明整洁,符合安全文明生产。

第三步 填写工作评价单。



#### 【任务评价】

根据表 4.11 评分表,可对任务进行评价和总结。

表 4.11 拉深成形评分表

拉深成形技能操作评分			总分				
序号	考核项目	配分 $T$	评分标准			检测结果	得分
			$\leq T$	$>T, \leq 2T$	$>2T$		
1	$\phi 30$	20	20	5	0		
2	$90^{\circ}$	10	10	5	0		
3	30	15	15	0	0		
4	$R2$	15	15	0	0		
5	表面质量:无裂纹、夹伤、划伤、锤痕等	20	发现一处扣 2 分				
6	技术安全和文明生产	20	违反规定扣 5~10 分				



#### 【思考与练习】

1. 什么叫拉深成形?拉深成形可以成形哪些零件?
2. 简述拉深过程材料起皱和破裂的原因。
2. 简述筒形件拉深过程。
3. 筒形件的拉深次数含义是什么?有何意义?
4. 常见的特殊拉深有哪些?