

31197803

TJ05  
01  
T030

# 兵器冷冲工艺与模具设计

孙镇和 编

HK37/29



兵器工业出版社



C0079430

# 前 言

冲压工艺(包含模具设计)在兵器、航空、汽车、农机、电器、电子、仪表及日用品生产中应用十分广泛,具有极大的技术优越性和良好的经济性。在兵器中,枪械的冲压件占40%以上,各种弹药生产中的冲压工艺的比重更大。上述各行业中不论从事产品设计或工艺的技术人员都必须具备冲压工艺与模具设计的知识。

本书首先以第一章介绍的板料塑性成形原理作为本课程的基础知识,然后分别介绍了冲裁、弯曲、引伸、成形和冷挤压等工艺方法、工艺计算和模具设计。为帮助学生掌握工艺方案的制定这一难度较大的内容,第七章中列举了四个典型零件的工艺方案制定实例。为适应兵器生产特点,对变薄引伸工艺作了较详细的介绍,并编入了作者的一些理论研究成果。

由于篇幅所限,书中所列的一些数据资料仅为讲课中所必须的。在设计时如感不够,可查阅参考文献〔8〕或有关标准和手册。

参加本书编写的还有孙理(提供素材并制图)和刘莉(制图)。

太原机械学院侯义馨副教授对本书进行了仔细的审阅,提出了不少宝贵意见,特此致谢。

由于时间仓促,加之编者水平所限,难免存在缺点和错误,恳请读者批评指正。

编者

1990年8月

# 目 录

绪言	( 1 )
<b>第一章 板料塑性成形原理</b>	( 3 )
第一节 加工硬化与加工硬化曲线	( 3 )
第二节 塑性与塑性条件(屈服准则)	( 6 )
第三节 板料成形性能及其试验方法	( 9 )
第四节 冲压成形极限	( 13 )
<b>第二章 冲裁与冲裁模设计</b>	( 15 )
第一节 冲裁变形过程和冲裁力	( 15 )
第二节 提高切面质量的方法	( 17 )
第三节 冲裁模刃口尺寸的确定	( 19 )
第四节 排样	( 26 )
第五节 冲裁模结构	( 30 )
第六节 冲裁模的主要零件	( 34 )
第七节 冲裁模设计	( 46 )
第八节 其它冲裁方法	( 51 )
<b>第三章 弯曲与弯曲模设计</b>	( 60 )
第一节 弯曲的应力应变分析	( 60 )
第二节 最小弯曲半径	( 64 )
第三节 弯曲件毛坯尺寸计算	( 66 )
第四节 弯曲力	( 68 )
第五节 弯曲件的回弹	( 69 )
第六节 弯曲件的工艺性	( 72 )
第七节 弯曲模的结构	( 73 )
第八节 弯曲模工作部分尺寸的确定	( 75 )
<b>第四章 引伸与引伸模设计</b>	( 79 )
第一节 引伸变形过程分析	( 79 )
第二节 引伸过程的力学分析、引伸力	( 82 )
第三节 筒形件引伸的工艺参数与模具设计	( 88 )
第四节 其它形状零件的引伸	( 102 )
第五节 变薄引伸及其模具设计	( 110 )
第六节 引伸模具结构	( 118 )
第七节 引伸中的辅助工序	( 120 )
第八节 引伸件的工艺性	( 122 )
<b>第五章 其它成形方法与模具</b>	( 124 )

第一节	局部成形	( 124 )
第二节	翻边	( 126 )
第三节	缩口与胀形	( 131 )
第四节	旋压	( 138 )
<b>第六章</b>	<b>冷挤压与冷挤模设计</b>	( 141 )
第一节	概述	( 141 )
第二节	挤压过程中金属的流动	( 144 )
第三节	挤压力	( 146 )
第四节	冷挤模及模具设计	( 150 )
第五节	冷挤毛坯及其制备	( 159 )
第六节	冷挤工艺方案制定实例	( 165 )
<b>第七章</b>	<b>冲压工艺设计及实例</b>	( 168 )
第一节	冲压件工艺过程的制订	( 169 )
第二节	模具设计的一般程序	( 171 )
第三节	压力机的选择	( 174 )
第四节	冲压工艺过程制定实例	( 177 )
<b>参考文献</b>		( 186 )

## 绪 言

机器零件的制造方法很多，利用模具加工出机器零件是用得较多的一种方法。在压力机上通过模具对板料金属加压，使其分离或塑性变形，从而获得一定形状、尺寸和性能的机器零件，这种加工方法称为冷冲压工艺或板料冲压工艺。其模具称为冷冲模具，简称冲模。冲模设计是实现冷冲压工艺的核心。一个板料零件往往要用几副模具才能加工成形。

由于加工方法和材料不同，模具可分为板料冲压模、锻造模、压铸模、塑料成形模、玻璃成形模、橡胶成形模、粉末冶金模等等。这些模具中以冷冲模用得最广，约占模具总量的4%，其次是塑料成形模，占35%。冷冲模之所以有如此广泛的应用是因为冷冲压与其它机械加工方法相比具有以下一些优点：

- 1 可以获得其它加工方法不能或难以制造的、形状复杂的零件。还可以利用塑性变形中的加工硬化提高零件的机械性能。

- 2 由于尺寸精度主要由模具来保证，所以加工出的零件质量稳定，一致性好。

- 3 材料利用率高，属少、无切屑加工。

- 4 生产率高，操作简便，便于机械化自动化。

由于以上优点，冷冲模被广泛地用于兵器、汽车、拖拉机、飞机、电子、家用电器、仪表、日用工业等部门。例如一台联合收割机有1613个零件，其中冲压件为1023个，占63.4%。

冲压件具有重量轻、刚性好的优点，加之生产率高的特点，因此兵器工业中（尤其是弹药制造）广泛地应用冲压工艺。如枪弹制造中从零件制造到成品装配全部通过冲模完成，这样才能满足年产以亿计的高产量要求。此外，药筒、弹体、引信、火箭弹、雷管、枪械等兵器中冲压件或用冲模制造零件的工序数都是很多的。例如某冲锋枪中120个零件有56个是冲压件，占46.7%，某轻机枪的202个零件中冲压件有67个，占33.3%。

兵器工业中的冲压件以枪械零件最为复杂，具有以下特点：

- 1 形状复杂，不对称件多，轴对称件少，一个零件要经过多种变形工序才能完成，加上一些辅助工序，一个零件加工的工序数可多达几十道。

- 2 精度高，有些是配合尺寸，因此校正工序和冲压后的机加工是常有的。

- 3 钢号高，中碳钢冲压件较多，个别的如弹链达到T8A，并有成品淬火和表面处理等辅助工序。

冲压变形的方法很多，可以多达几十种，但归纳起来可以分为分离和成形两大类：

分离工序 是材料在凸模和凹模间被剪切而分离的方法。其主要工序有：

- 1 冲裁 是材料在冲模内沿封闭的轮廓曲线被冲切，使之分离的工序。又可分为落料和冲孔两种（图0-1a）。

- 2 切边 将成形零件边缘修切整齐。

- 3 整修 将冲裁出来的零件的切面整修垂直和光洁（图0-1b），并提高尺寸精度。

成形工序 是毛坯在冲模内产生塑性变形，从而转化为所需要的形状，并达到一定的尺寸精度的工序。它可以分为以下一些主要成形工序：

- 1 弯曲 将板料沿直线弯成各种形状(图0-1c)。
- 2 引伸 将平板毛坯冲压成带底的空心件(图0-1d)。
- 3 翻边 将预先冲好孔的板料冲压成有竖直边缘的零件(图0-1e)。
- 4 缩口 将空心件口部直径缩小(图0-1f)。
- 5 胀形 将空心件向外扩张,胀出所需的凸起或曲面(图0-1g)。
- 6 冷挤压 将厚毛坯在模具内挤压,使金属在模具的空隙中流出,形成空心或实心零件(图0-1h)。严格地分,冷挤压不属于板料冲压,它属于体积冲压。

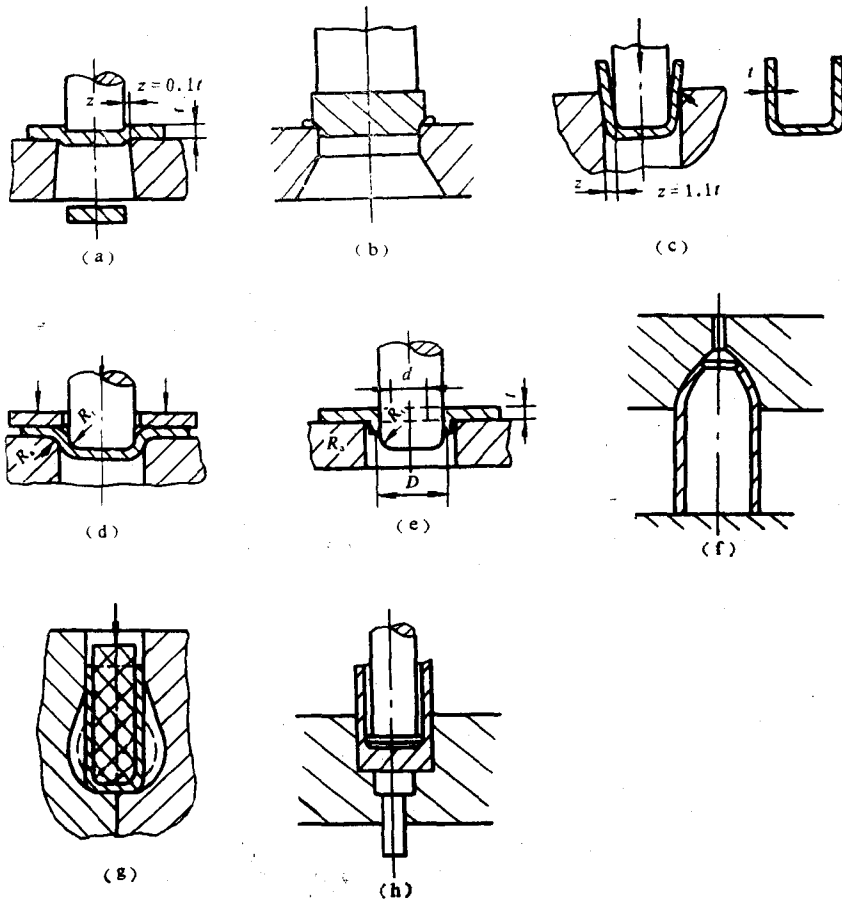


图0-1 冷冲压的主要变形工序

- |        |        |        |         |
|--------|--------|--------|---------|
| (a) 冲裁 | (b) 整修 | (c) 弯曲 | (d) 引伸  |
| (e) 翻边 | (f) 缩口 | (g) 胀形 | (h) 冷挤压 |

# 第一章 板料塑性成形原理

## 第一节 加工硬化与加工硬化曲线

### 一 加工硬化

板料冲压是一种塑性加工方法，它是利用金属的塑性，通过模具来成形（加工）板料的一种加工方法。冷塑性变形过程中随着塑性变形程度的增加，金属的变形抗力（即每一瞬间的屈服应力 $\sigma_s$ ）不断增高，强度极限 $\sigma_b$ 和硬度也相应提高，而塑性和塑性指标（延伸率 $\delta$ 、断面收缩率 $\psi$ ）不断降低，这种现象称为加工硬化。金属产生加工硬化后塑性降低，如要继续塑性变形，必须进行再结晶退火，这是加工硬化对塑性加工不利的方面。此外，变形抗力增加使冲压力增大也是其缺点之一。但是枪弹弹壳和火炮药筒制造正是利用冲压（塑性变形）后材料强度提高这一特性。因为根据产品图要求，为保证顺利抽壳，弹壳下部强度应大于750MPa，而且越高越好，而口部和肩部应软（以便封闭弹膛），为了能进行冲压，只能选用塑性好而强度低的低碳钢作原材料。这样下部部的强度就靠加工硬化来达到，而口部和肩部的强度用局部退火来达到。

加工硬化对塑性加工有利的方面就是它使均匀的拉伸变形成为可能。如果金属没有加工硬化性能，则在伸长变形时首先在强度最弱的截面上产生塑性变形，同时该处截面积减小，承载能力减小，塑性变形继续在该截面上进行，直到断裂，金属只产生局部塑性变形。如果金属具有加工硬化性能，则在产生塑性变形的截面上强度提高，虽然截面缩小，但承载能力提高了，该处停止了变形，使变形转移到别的部位，这样试件上即可获得均匀的伸长变形。因此对于伸长变形来说，加工硬化程度高的材料均匀延伸率高，工件表面质量也高。

### 二 真实应力、真实应变的概念

在材料力学中应力 $\sigma$ 是用载荷 $P$ 与试棒初始面积 $F_0$ 的比值来表示的，即 $\sigma = P/F_0$ 。这种应力表示方法有其不合理性，因为拉伸试验中试棒的截面积在不断减小。真正的应力应该是该瞬间的载荷与该瞬间试棒的截面积之比，这个应力称为真实应力，而前者称为名义应力。在塑性加工中由于塑性变形量很大，都用真实应力表示。显然，同一载荷下材料的真实应力是大于名义应力的。

材料的真实应力就是该塑性变形量时材料的屈服应力，也可理解为材料在这个塑性变形量时的变形抗力。

在材料力学中应变 $\delta$ 是用试棒的绝对伸长量 $\Delta l$ 与试棒的初始长度 $l_0$ 之比来表示的，即 $\delta = \Delta l/l_0$ 。这种表示法在大塑性变形量时也会产生很大的误差。例如将长为 $l_0$ 的试棒拉长一倍，则其应变量为

$$\delta_1 = \frac{2l_0 - l_0}{l_0} \times 100\% = 100\%$$

如果将长为 $2l_0$ 的试棒压缩到 $l_0$ 长，则

$$\delta_2 = \frac{l_0 - 2l_0}{2l_0} \times 100\% = -50\%$$

显然用相对应变法计算应变量出现了上述矛盾的结果。其原因是材料应变是一个逐渐积累过程，一个大应变是由许多小应变累积的结果，如果把  $l_0$  拉至  $2l_0$  分为  $1.01l_0$ 、 $1.02l_0$ …… $1.99l_0$ 、 $2l_0$  许多小变形阶段，分别计算各小阶段的应变并累加起来，用这种方法分别计算上述的伸长和压缩的总变形量即不会出现上述矛盾。

设  $dl$  为每一瞬时的长度增量，则每一变形阶段应变的增量  $d\varepsilon = dl/l$ ，由  $l_0$  伸长至  $l$  的总应变  $\varepsilon$  为：

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$

这样表示的应变称为真实应变，用真实应变计算上例即不会出现矛盾。

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{2l_0}{l_0} = 0.69$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{l_0}{2l_0} = -0.69$$

将对数用级数展开：

$$\ln \frac{l}{l_0} = \left( \frac{l}{l_0} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{l}{l_0} - 1 \right)^2 + \frac{1}{3} \left( \frac{l}{l_0} - 1 \right)^3 - \dots$$

当变形量很小时， $\ln \frac{l}{l_0} \approx \frac{l-l_0}{l_0}$ ，即真实应变与相对应变相等。

此外，真实应变是可以简单相加的，而相对应变则不能。例如试棒由  $l_0$  拉至  $l_1$ （其真实应变为  $\varepsilon_{01}$ ），再由  $l_1$  拉至  $l_2$ （其真实应变为  $\varepsilon_{12}$ ），其两次变形的总量  $\varepsilon_{02}$  为：

$$\varepsilon_{01} + \varepsilon_{12} = \ln \frac{l_1}{l_0} + \ln \frac{l_2}{l_1} = \ln \frac{l_2}{l_0} = \varepsilon_0$$

### 三 加工硬化曲线

冲床吨位是根据冲压变形力来确定的，而确定冲压力时必须知道在该变形程度条件下材料的变形抗力。加工硬化曲线又称真实应力-应变曲线，就是表示材料的变形抗力随变形程度而变化的关系曲线。

真实应力与名义应力、真实应变与相对应变之间是可以互相换算的：

$$\text{真实应力 } \sigma = \frac{P}{F} = P / \frac{F_0 l_0}{l} = \frac{P}{F_0} (1 + \delta) = \sigma' (1 + \delta)$$

$$\text{真实应变 } \varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \delta)$$

式中  $\sigma'$  —— 名义应力；

$\delta$  —— 相对应变；

$l_0$  —— 变形前试棒刻度的标距；

$F, l$  —— 试棒在某一时刻的截面积、标距。



这样就可以逐点地把拉伸曲线换算成真实应力-应变曲线。但是只能换算到缩颈点，在缩颈点以后因为产生局部变形，上述换算关系中的  $F_0 l_0 \neq Fl$ 。因此逐点换算法只能得到真实应变小于  $0.2 \sim 0.3$  的加工硬化曲线，远远不能满足大变形的冲压加工要求。

利用压缩变形求加工硬化曲线，可以得到  $\varepsilon = 2$  甚至更大的应变，因为压缩变形不产生缩颈。但是试件与压板间的摩擦以及由此而引起的试件成腰鼓形，使曲线精度受影响。在冲压加工中常用幂次式和直线式两种。

### 1 幂次式

人们发现有许多金属的硬化规律接近于抛物线。对于立方晶格的退火金属，其应力-应变曲线可以相当准确地用简单的指数函数表示(1)：

$$\sigma = A\varepsilon^n \quad (1-1)$$

式中  $A$ ——与材料性能有关的系数；

$n$ ——加工硬化指数。

$A$ 和 $n$ 值是调整这根经验曲线的变化趋势的(图1-1)。对一定的材料 $A$ 和 $n$ 是一定的。为了确定 $A$ 和 $n$ 值我们进行以下推导。

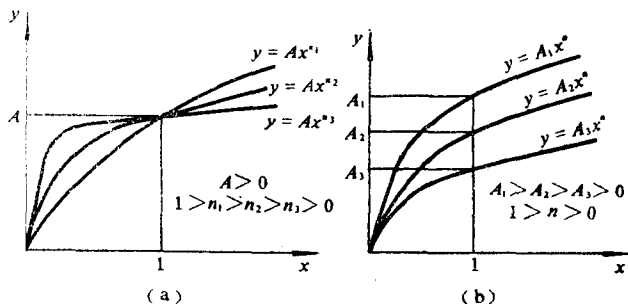


图1-1  $A$ 、 $n$ 值对幂次式曲线的影响

(a)  $A$ 相同,  $n$ 不同 (b)  $n$ 相同,  $A$ 不同

在缩颈点(坐标为  $\varepsilon_j, \sigma_j$ ) 经验的硬化曲线方程(1-1)为  $\sigma_j = A\varepsilon_j^n$  (1-2)

该点处曲线斜率为  $\frac{d\sigma_j}{d\varepsilon_j} = Ane_j^{n-1}$  (1-3)

现用理论方法推导实际的硬化曲线在缩颈点的斜率。

拉力  $P$  等于真实应力  $\sigma$  与试件截面积  $F$  的乘积，即  $P = \sigma F$

$$dP = \sigma dF + F d\sigma$$

根据体积不变有  $F_0 l_0 = Fl$

$$dF = - \frac{F_0 l_0 dl}{l^2}$$

$$dP = \sigma dF + F d\sigma = - \frac{\sigma F_0 l_0 dl}{l^2} + \frac{F_0 l_0 d\sigma}{l}$$

出现缩颈时  $P = P_{max}$ ,  $dP = 0$ ;  $\sigma = \sigma_j$ ,  $d\sigma = d\sigma_j$ ;  $l = l_j$ ,  $dl = dl_j$ ; 于是

$$\frac{\sigma_j F_0 l_0 dl_j}{l_j^2} = \frac{F_0 l_0 d\sigma_j}{l_j}$$

$dl_j/l_j = d\varepsilon_j$ , 所以上式为  $\sigma_j d\varepsilon_j = d\sigma_j$ , 得到实际的加工硬化曲线在缩颈点的斜率为

$$\frac{d\sigma_j}{d\varepsilon_j} = \sigma_j \quad (1-4)$$

使(1-3)与(1-4)相等并与(1-1)联解，得

$$n = \varepsilon_j \quad (1-5)$$

$$A = \frac{\sigma_j}{\varepsilon_j^n} \quad (1-6)$$

可见要求某材料的加工硬化曲线只要对该材料作一次拉伸试验，测得其缩颈点的真实应力和应变  $\sigma_j$  和  $\epsilon_j$ ，代入 (1-5)、(1-6) 求得  $n$  和  $A$  值即可。幂次式加工硬化曲线虽为经验式，但实践证明其精确度是很高的。表1-1为常用材料的  $A$  和  $n$  值。图1-2为各种材料的加工硬化曲线。

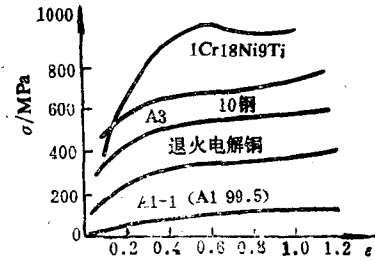


图1-2 各种材料的加工硬化曲线

表1-1 常用材料的  $A$  和  $n$  值

材 料	$A$ (MPa)	$n$
S20A 钢	780	0.23
S15A 钢	680	0.24~0.28
10F	547	0.23
H60 黄铜	990	0.46
H65 黄铜	760~800	0.39~0.44
铜	420~460	0.27~0.34
铝	160~210	0.25~0.27

## 2. 直线式

在近似计算中一般采用缩颈点的切线方程作为应力应变关系的数学关系 (图 1-3)，即

$$\sigma = \sigma_0 + D\epsilon$$

式中  $\sigma_0$ ——近似屈服极限，是切线的纵截距；

$D$ ——切线的斜率，称为强化模数， $D = \sigma_j$ 。

当  $\epsilon = \epsilon_j$  时  $\sigma = \sigma_j$ ，故  $\sigma_0 = \sigma_j(1 - \epsilon_j)$ ，得

$$\sigma = \sigma_j(1 - \epsilon_j + \epsilon) \quad (1-7)$$

严格地说，直线式只有在缩颈点是准确的，其余各点均高于实际值。

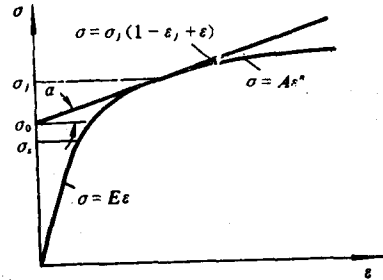


图1-3 直线式加工硬化曲线

## 第二节 塑性与塑性条件（屈服准则）

### 一 塑性的概念

材料的塑性是塑性加工的依据。冲压工艺人员总希望被冲压的材料有良好的塑性。

塑性是指固体材料在外力作用下发生永久变形而不破坏其完整性的能力。人们常把金属的塑性与柔软性的概念相混，错认为软的物质塑性一定好，或塑性好的物质一定是柔软的。柔软性只是物质的变形抗力的标志，它与金属塑性没有直接的联系。例如奥氏体不锈钢在室温下有很大的塑性，但其变形抗力却很大（即柔软性差）。

塑性还不能理解为物质天然固有的属性，因为外界条件（如温度、应力状态）对于塑性的影响比物质本身性质所起的影响要大得多。金属的超塑性就是很好的说明：在低的变形速度、一定的温度范围下对超细晶粒的某些金属进行拉伸，可得到几倍、甚至几十倍的均匀延伸率。对塑性应该理解为反映了内部性质和外部变形条件的物体状态。

### 二 影响塑性的因素

影响金属塑性的因素有两个方面，一是金属本身方面，有晶格类型、化学成份和金相组织；二是外部条件方面，有变形温度、变形速度和应力状态。这里主要阐述应力状态对塑性

的影响。

金属在塑性变形时承受着各个方向上的压应力和拉应力。为了研究变形金属各部位的应力状态，在变形体中取了一个微小的单元六面体，在六面体上画出所受应力的数量和方向，这种图称为应力状态图。如果六面体上只有正应力而无切应力则此应力状态图称为主应力图。这样，主应力图共有九种。

主应力图中压应力个数越多、数值越大则塑性越好。因此九种主应力图对塑性影响的顺序如图1-4所示。

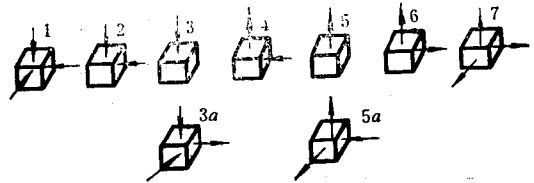


图1-4 主应力图对塑性影响的顺序

大理石在几千大气压的侧压作用下进行压缩（图1-5）可以获得78%的变形程度，进行拉伸可以得到25%的延伸率，并出现缩颈。对填满混凝土的钢管进行压缩，直到钢管失稳，

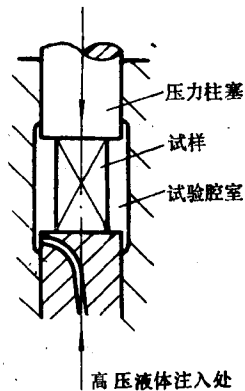


图1-5 大理石压缩试验仪的工作部分

去除钢管外壳，发现混凝土没有开裂，且形状变成与失稳钢管内形一样，说明钢管对混凝土的侧压力作用下处于三向压应力状态的混凝土产生了塑性变形。

拉丝变形的最大断面缩减率为20~30%，而挤压变形的断面缩减率可达90%以上。因为后者是三向压应力状态而前者的变形区为二向压缩一向拉伸的应力状态。

物体上受到各向同性的压应力叫做静水压，就像物体在液体中各方向都受到同样大小的压应力一样。静水压不仅通过液体作用在物体上，也可通过固体作用在物体上。在静水压作用下的金属，其塑性将提高。静水压越大，塑性提高越多。这种现象称为静水压效应。挤压变形方式可以使塑性低的材料产生较大的变形，就是因为材料产生了静水压效应。静水压效应对塑性加工很有利，应尽量利用它。

主应力图对变形抗力也有影响。同号主应力图（主应力图上应力方向全部相同的）会使变形抗力增加，异号主应力图将降低变形抗力。所以挤压变形虽能产生静水压效应，但因是同号主应力图（三向压缩应力），所以变形力较大。

### 三 塑性条件（屈服准则）

塑性条件是指金属进入塑性状态的应力条件。在单向拉伸时当金属的应力达到屈服极限时即可认为该金属进入了塑性状态，即开始了塑性变形。但塑性加工中金属常处于两向或三向应力状态，其三个主应力的符号又是任意的（有拉有压），数值上也是任意大小。这种情况下如何来确定金属是否已进入塑性状态呢？

密席斯提出了屈服准则。变形金属上所受的三个主应力的组合满足以下关系时材料即开始屈服，进入塑性状态。

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_s \quad (1-8)$$

式中  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ ——三个主应力，拉应力取正，压应力取负，且规定  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ；

$\sigma_s$ ——材料在单向拉伸时的屈服极限。

式(1-8)与材料力学第四强度理论的形式完全一样，只是材料力学中希望这个等效应

力小于 $\sigma_s$ ，使构件安全，而在塑性加工中希望它达到 $\sigma_s$ ，以便进行塑性变形。

式(1-8)较繁，我们对其进行简化：

(1) 当 $\sigma_2 = \sigma_1$ 时，即中间主应力等于最大主应力时，式(1-8)简化为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$$

(2) 当 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时，即中间主应力等于最小主应力时，式(1-8)简化为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$$

(3) 当 $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 时，即中间主应力等于最大主应力与最小主应力的平均值时，式(1-8)变为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 1.15\sigma_s$$

综合上述三式可得到式(1-8)的简化形式：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta\sigma_s \quad (1-9)$$

式中  $\beta$ ——中间主应力 $\sigma_2$ 对 $\sigma_s$ 影响的系数， $\beta=1\sim 1.15$ ，平面应变状态下 $\beta$ 值最大。

从简化的塑性方程式(1-9)可以看出：

(1) 材料产生塑性变形主要取决于最大主应力与最小主应力之差，中间主应力对塑性变形的影响不大(不超过15% $\sigma_s$ )。

(2) 同号主应力图的变形抗力大，而异号主应力图的变形抗力小，因为异号主应力图时式(1-9)变为 $|\sigma_1| + |\sigma_3| = \beta\sigma_s$ ，即只要两个主应力之和等于 $\beta\sigma_s$ 时即可开始塑性变形。

(3) 静水压对变形抗力无影响，因为静水压作用在变形体上时 $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 都增加一个静水压应力， $\sigma_1 - \sigma_3$ 值不变。

塑性方程在以后的求解塑性变形应力中是很有用的。在板料冲压时厚度方向所受的应力与其余两个主应力相比往往可以忽略不计。即板料冲压是在平面应力状态下进行的。这时只有两个未知数 $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 。求解这两个主应力只需两个方程即可。一般方法是在变形区取一微分体建立力的平衡方程再与塑性方程联解。

〔例一〕 对一个经过良好润滑的边长为80mm的金属立方体上施加4000kN的压力时该材料产生屈服。如果在其余两对侧面分别加1000kN和2000kN的约束力，问需要施加多大的载荷才能使该材料屈服。

解 单向压缩时材料的屈服应力为 $4000/6400=625\text{N/mm}^2$ 。其余两侧的应力分别为 $-312\text{N/mm}^2$ 和 $-156\text{N/mm}^2$ (压应力取负)。根据密席斯屈服准则的式(1-8)知使材料屈服的压应力为 $844\text{N/mm}^2$ ，其载荷为5400kN。可见三向同号应力状态下，材料的变形抗力增大。

〔例二〕 将一宽500mm、厚5mm的铜板用250kN的后拉力轧制，在不计摩擦的情况下应施加多大的单位轧制力才能使铜板变形(已测得该材料单向拉伸时的 $\sigma_s=340\text{N/mm}^2$ )。

解 铜板受到轧辊给予的厚度方向的压应力 $\sigma_3$ 、长度方向的拉应力 $\sigma_1$ 和宽度方向的压应力 $\sigma_2$ 。 $\sigma_1=250000/(500\times 5)=100\text{N/mm}^2$ ， $\sigma_3$ 为所求之轧制单位压力， $\sigma_2$ 较为难求。为此可以用简化的塑性方程式(1-9)来求解。由于轧制板材很宽，金属在宽度方向的扩展量可以忽略，因此为平面变形， $\beta=1.15$ 。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 1.15\sigma_s, \quad \sigma_3 = -(1.15\sigma_s - \sigma_1) = -291\text{N/mm}^2$$

可见异号主应力图可以降低变形抗力。

### 第三节 板料成形性能及其试验方法

板料的冲压成形性能是指板料对各种冲压方法的适应能力。要测定板料的成形性能是很困难的，因为板料的成形方式是多种多样的，每一种变形方式的应力状态、变形特点等情况均不相同，很难用一个指标来表示其成形性能的好坏。目前一般是通过对板料的拉伸试验中测得的一些机械性能数据来定性地预测该材料的成形性能，也可用模拟某一成形变形的方法来测定其对该工艺的成形性能。

冲压变形方式尽管很多，但根据变形区的应力应变状态可以分为以伸长变形为主的变形方式（如内孔翻边、胀形等）和以压缩变形为主的变形方式（如缩口、引伸等）两大类。进行这样的分类后就便于今后讨论一些材料性能对成形性能的影响。

#### 一 板料机械性能与成形性能的关系

作为材料验收时的常规拉伸试验，一般是测定材料的屈服极限 $\sigma_s$ 、强度极限 $\sigma_b$ 、总延伸率 $\delta$ 和断面收缩率 $\psi$ 。为了判断材料的成形性能，这些机械性能指标是不够的，拉伸试验中还可以进行以下一些测试，这些测试对分析材料的成形性能极为有用，现分述如下：

##### 1 屈强比 $\sigma_s/\sigma_b$

屈强比是材料的屈服极限与强度极限之比，希望成形材料的屈强比越小越好，因为无论是伸长类变形还是压缩类变形，小的屈强比对成形都是有利的。其原因将在有关成形章节中解释。

##### 2 均匀延伸率 $\epsilon_j$

拉伸试验时在产生缩颈前材料各点的延伸率是相同的，在产生缩颈前材料的伸长率称为均匀延伸率。如果用对数变形表示，即为以前所说的 $\epsilon_j$ 。板料的成形都是在均匀变形范围内进行的，因此均匀延伸率直接影响伸长类变形的成形性能，它是衡量伸长类变形性能的一个重要指标。

拉伸试验中测出的总延伸率包括均匀延伸率和局部（缩颈点）延伸率两部分，后者对冲压成形无实用意义，因此用总延伸率 $\delta$ 来衡量塑性变形能力是不够严密的。我们应该提倡测定均匀延伸率。

##### 3 加工硬化指数 $n$

在用幂函数表示的加工硬化曲线式 $\sigma = Ae^n$ 中 $n$ 即称为加工硬化指数，它是表示材料硬化程度的指标。 $n$ 值大的材料，在同样的塑性变形增量时真实应力（变形抗力）增加得大。 $n$ 值大的材料变形均匀、表面质量好（厚度均匀）、对表面划伤的敏感度小，拉伸时不易产生裂纹，所以 $n$ 值大的材料成形性能好。为了说明 $n$ 值在变形过程中起的作用，我们进行以下推导：

某一瞬间试棒的拉力 $P$ 等于试棒该时的实际面积 $F$ 与当时的变形抗力 $\sigma$ 的乘积，即

$$P = F\sigma$$

微分后得

$$dP = Fd\sigma + \sigma dF$$

相除得

$$\frac{dP}{P} = \frac{d\sigma}{\sigma} + \frac{dF}{F}$$

式中  $dP/P$ ——试件承载能力的变化率；

$d\sigma/\sigma$ ——由于加工硬化引起的变形抗力的增长率，为正值；

$dF/F$ ——由于拉长引起的试棒截面积的缩减率，为负值。

塑性变形开始时变形是在强度(承载能力)最低的截面上开始产生微小的缩颈( $dF/F$ )，对 $n$ 大的材料只要很小的 $dF/F$ 值即可产生较大的 $d\sigma/\sigma$ 值，使该截面的 $dP/P$ 为正，缩颈不扩展，变形转移到其它截面上进行。如果材料的 $n$ 值较小，则小缩颈处必须产生较大的 $dF/F$ 值才能使 $dP/P$ 为正值，将变形转移出去。这样的试件，表面粗糙、厚度不均是不可避免的。

微小缩颈在试件上不断地转移，在宏观上就表现为均匀伸长。由幂函数的硬化曲线看出，随着变形程度的增加，硬化效应在逐渐减弱，因此变形量到达一定值后即会出现 $\left|\frac{d\sigma}{\sigma}\right| = \left|\frac{dF}{F}\right|$ ，即强化效应与断面缩减效应相互抵消， $dP/P=0$ 。继而出现了缩颈，变形不能转移出去，直至拉断。

前已推得 $n=e_n$ ，因此在伸长类变形中 $n$ 对成形性能的影响也就是缩颈点真实应变 $\epsilon_i$ 对成形性能的影响。

#### 4 厚向异性指数 $r$

板状试件在拉伸变形时宽度方向和厚度方向同时缩小，但由于板料在宽向和厚向的机械性能不一致，其缩小的变形量是不同的，我们把拉伸试验时材料宽度方向的应变 $\epsilon_b$ 与厚度方向的应变 $\epsilon_t$ 之比定义为厚向异性指数 $r$ ，即

$$r = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_t} = \ln \frac{b}{b_0} / \ln \frac{t}{t_0} \quad (1-10)$$

式中  $b_0$ 、 $b$ 、 $t_0$ 、 $t$ ——变形前后试件的宽度与厚度。

不同的伸长率时 $r$ 值是不同的，一般规定在伸长20%时测定 $r$ 值。

板料成形时一般都希望在平面方向上(即试件的宽度方向)变形而不希望厚度方向上发生过大的变形。 $r$ 值越大，表示板料越不易在厚度方向上发展变形，即在压缩变形时宽向易变形(抗起皱能力强)，在伸长变形时不易产生厚向变薄(不易产生缩颈或拉裂)。

轧制后的钢板在顺轧向和垂直轧向的机械性能是不会相同的，即试件在各个方向上的 $r$ 值是不同的。统一规定以几个方向上测得的 $r$ 值的平均值 $\bar{r}$ 作为标准。

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4}$$

式中  $r_0$ 、 $r_{90}$ 、 $r_{45}$ ——板料沿与轧制方向成 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $45^\circ$ 取样测得的 $r$ 值。

#### 5 板平面各向异性指数 $\Delta r$

轧制后板料在各个方向上的机械性能是不相同的，为了表示其在各个方向上的性能差异程度，将各方向测得的 $r$ 值按以下式子计算，并用 $\Delta r$ 表示， $\Delta r$ 称为板平面各向异性指数。

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2}$$

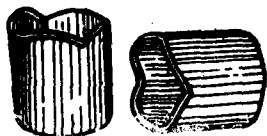


图1-6 引伸件的突耳

$\Delta r$ 值大的钢板引伸后工件口部不齐，形成“突耳”(图1-6)。

降低了零件的质量和材料利用率，增加了引伸的切口工序。

## 二 用模拟试验法鉴定板料成形性能

上述的材料基本性能试验结果可以初步估计该材料的成形性能，但由于变形特点毕竟与

真实冲压过程有很大差别，它不能准确地（定量的）反映每一种特定工艺方法中的冲压成形性能。为了更准确地鉴定这些性能，采用模拟的方法，即突出某一成形方法的主要特点加以模拟，使应力应变状态基本上与实际冲压过程相同。现介绍几种主要方法。

### 1 弯曲试验

将窄板条试件夹在特制的虎钳或弯曲试验仪上使其左右反复弯曲，向左弯 $90^\circ$ 再复原作为弯曲一次，向右弯 $90^\circ$ 再复原为第二次，一直弯曲到出现裂纹、层片或脱片现象时计算其弯曲次数。它在一定程度上可以表示该板料的弯曲成形性能。

### 2 杯突试验（压深穴试验）

将 $70 \times 70\text{mm}$ 的板料试件压紧在凹模与压边圈之间，使之无法流动，用 $20\text{mm}$ 的球形凸模把板料压入凹模（图1-7），形成圆穴，直到圆穴出现裂纹为止，测量压入的深度可以鉴定材料胀形变形性能。

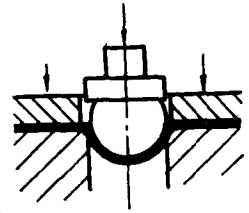


图1-7 杯突试验原理

### 3 引伸-胀形成形性能试验（福井试验）

利用球形凸模把直径为 $d_0$ 的毛坯压入一个锥角为 $60^\circ$ 的锥形凹模内，使板料成为球底的锥形件（图1-8），直到产生破裂为止。计算 $(d_0 - D_0)/d_0$ 值，此值称锥杯值(CCV值)。此值综合地反映了同时引伸和胀形的能力，CCV值越大则板料成形性能越好。

### 4 多工序综合试验

冲压件形状常是很复杂的，有时需经过几种变形工序才能成形，因此必须采用能综合反映其成形性能的模拟方法。本试验综合反映了弯曲、翻边、胀形、引伸等工序的变形特点。在 $90 \times 90\text{mm}$ 的方形毛坯中间加工一个 $d_0 = 12\text{mm}$ 的圆孔作为试件。用直径 $D = 40\text{mm}$ 的凸模把试件压入凹模内（图1-9），当孔边开始拉裂时测出凸模压入深度 $h$ 、孔的最大直径 $d_{max}$ 、最小直径 $d_{min}$ ，用参数 $g$ 作为判断材料成形性能的指标， $g$ 越大则综合成形性能越好。

$$g = \frac{h(d_{max} + d_{min})^2}{4d_0(d_{max} - d_{min})}$$

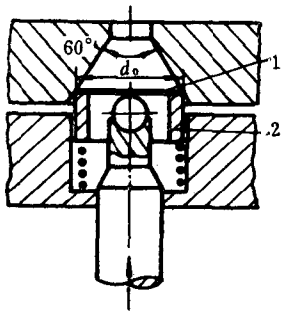


图1-8 球底锥形件引伸试验

1—试件； 2—试件定位器

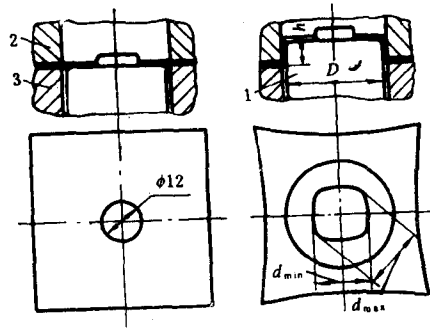


图1-9 多工序综合试验原理图

1—凸模； 2—凹模； 3—压料板

### 5 成形极限图

单向拉伸变形的极限值是均匀延伸率，但两向拉伸变形由于两向应变量的数值是不同的，因此成形极限很难确定，一向伸长一向压缩变形方式的极限变形更难计算，这两类变形在冲压中是常见的，为此用试验方法建立其成形极限曲线图作为复杂形状冲压件工艺设计和冲模设计的参考是很有意义的。具体方法如下：

将被测定的材料截成 $155 \times 155\text{mm}$ 的方试件，其表面上印上直径为 $2.54\text{mm}$ 的小圆网格线。然后将试件夹在凹模和压边圈之间，用 $\phi 50.8$ 的半球凸模压向毛坯(如杯突试验一样)，直到出现裂纹为止。取出试件，在离裂纹最近处测量某一椭圆的长、短轴尺寸，计算其长、短轴应变，因该测量点是变形极限点，故测得的应变量即可认为是此应变状态下的临界点。

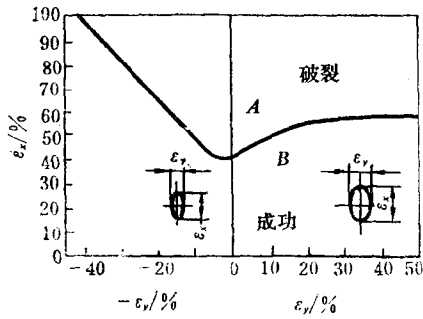


图1-16 成形极限图

缩小试件尺寸、改变润滑条件进行试验，可以得到许多不同应变状态下的临界点。取得足够数据后将这些点以椭圆长轴应变 $\epsilon_x$ 为纵座标、以椭圆短轴应变 $\epsilon_y$ 为横座标绘制成形极限曲线图(图1-10)。短轴应变以伸长应变取正，压缩应变取负。

如某零件在成形中产生破裂，则可在毛坯的相应部位印上小圆，成形后在破裂点附近测得应变量为 $A$ 点，根据成形极限图即可知应该减小长轴方向的应变，增大短轴方向的应变，使 $A$ 点移至成功区内(如 $B$ 点)。增大应变就是在模具设计中增大该方向金属流动的阻力，如减小圆角半径、增加突梗等。

### 三 常用材料的成形性能

表1-2列出了常用材料的成形性能指标，根据前面所介绍的各指标的意义，可以对该材料的成形性能有个较全面的了解。表中 $\sigma_{0.2}/E$ 是材料在屈服极限时的弹性变形量，它近似地反映了工件从冲模中脱出后的弹性变形大小。

表1-2 常用材料的成形性能指标

材料牌号	$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_b}$	$\phi_{10}$ (%)	$\psi$ (%)	$n = \epsilon_i$	$A$ (MPa)	$r$	$\frac{\sigma_{0.2}}{E} (10^{-3})$
10F	0.75	45	76	0.23	547	1.30	1.06
20	0.6	28	45	0.18	637	0.60	1.12
F18 <sup>①</sup>	0.66	41	56	0.28	644	1.04	1.12
1Cr18Ni9Ti	0.55	45	65	0.34	1340	0.89	1.79
LF21M	0.59	30	80	0.21	177	0.44	0.88
T2	0.79	43	61	0.27	411	1.09	1.58
H62	0.5	50	58	0.38	672	1.00	1.46

① 覆铜钢，含碳 $0.11 \sim 0.19\%$ 的深引伸钢的两表面覆上一层H90铜，单面铜层厚为钢板厚度的 $3.4 \sim 4\%$ 。

低碳钢(如10F)具有良好的塑性成形性能，因此应用较广，但低碳钢冲压时表面出现滑移线和出现应变时效现象是应该注意的。低碳钢拉伸时产生明显的屈服点伸长(达 $1 \sim 3\%$ )，见图1-11BC段，材料延伸到C点后才开始产生加工硬化和均匀变形，直到E点出现缩颈。BC段的材料应力不增大，因此表面出现局部凹纹，影响表面质量。如果拉伸到D点后卸载，停留一段时间再拉伸，发现弹性极限不再是D点

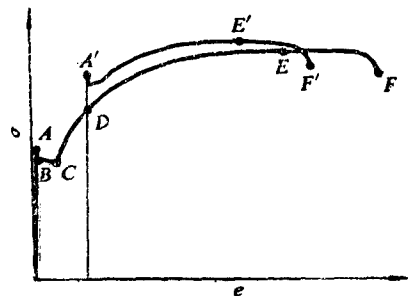


图1-11 低碳钢的应变时效



而是升高到 $A'$ ，并又出现屈服平台，强度极限也提高到 $E'$ ，且均匀延伸率减小，这说明材料产生了应变时效。应变时效降低了材料的成形性能。为了清除滑移线缺陷，可在冲压前将板料用多轴辊滚校一次，即事先给予一定的塑性变形，使冲压件从C点以后开始变形。但滚校后不能搁置太久，否则仍会产生滑移线。铝脱氧镇静钢不会产生时效。

## 第四节 冲压成形极限

### 一 冲压成形时毛坯各区的划分

板料冲压就是利用模具对板料施压使之变形的加工方法。但在模具内的毛坯并非每处都变形，可以把毛坯划分为变形区和不变形区。不变形区可以是已经过变形的已变形区或是尚未进入变形区的待变形区，也可能是在冲压过程中都不变形的不变形区，不变形区起传递变形力作用时称为传力区。例如引伸变形区是在压边圈和凹模间的这部分金属A（图1-12a）。变形完的金属流入凸模与凹模间隙处B，因此B为已变形区。变形力作用在工件底部，通过B传递到变形区，因此B又称为传力区。一些冲压工序毛坯区域的划分见表1-3。

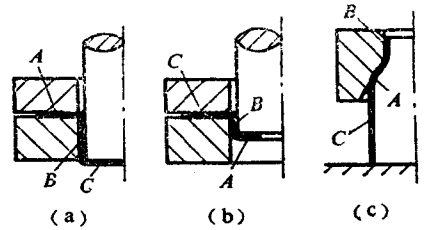


图1-12 冲压变形时毛坯各区的划分  
(a)引伸 (b)翻孔 (c)缩口

表1-3 冲压变形时毛坯各区的划分

成形方法	变形区	不变形区		
		已变形区	待变形区	传力区
引伸	A	B	无	B
翻边	A	B	无	B
缩口	A	B	C	C

### 二 冲压成形极限

所谓冲压成形极限是指在冲压成形过程中材料的最大变形限度。这个变形限度取决于材料性能、变形方式、变形区的应力应变状态等。超过这个限度，材料即产生破坏。冲压变形分为伸长和压缩两大类，它们冲压失效（破坏）的形式也各异。

伸长类变形的破坏一般是因为变形程度过大（超过材料允许的拉伸变形程度），材料在变形区过度变薄，产生缩颈（失稳）而断裂，如胀形，翻边、扩口等。

压缩类变形时材料由于受压应力而失稳起皱，造成变形区的破坏，但这时材料的塑性没有丧失，即起皱并不表示材料已没有塑性变形能力了，可以采取防皱措施以继续提高压缩变形程度，如引伸时加压边圈、缩口时口内加芯棒。尽管变形程度可以不断提高，但它受到传力区的承载能力的限制，当变形区的变形力超过了传力区的承载能力时传力区破坏。所以压缩类变形的最大变形限度是受传力区承载能力的限制，压缩类冲压变形的破坏（失效）不在变形区而是在传力区。例如引伸是在传力区B发生破裂，缩口是在传力区C产生压屈（起皱）或塑性墩粗。