

第 41 篇 板 料 冲 压

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会



机 械 工 业 出 版 社

TH-62

3

3.41

机械工程手册

第41篇 板料冲压

(试用本)

机械工程手册 编辑委员会
电机工程手册

B24.67



机械工业出版社

•A559954

本篇介绍冲压工艺、模具设计及冲压设备的有关资料，
对冲压变形理论，精密冲裁，复杂曲面零件的拉延，冲压
工艺过程设计等内容作了重点介绍。

机 械 工 程 手 册

第 41 篇 板 料 冲 压

(试 用 本)

第一机械工业部机械研究院机电研究所 主编
哈尔滨工业大学 第一汽车制造厂 湖北农机学院

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $6 \frac{1}{2}$ · 字数 157 千字

1978年10月北京第一版·1978年10月北京第一次印刷

印数 00,001—68,000 · 定价 0.52元

*

统一书号: 15033 · 4504

编 辑 说 明

(一) 我国自建国以来,特别是无产阶级文化大革命以来,机械工业在伟大的领袖和导师毛泽东主席的无产阶级革命路线指引下,坚持政治挂帅,以阶级斗争为纲,贯彻“**独立自主、自力更生**”的方针,取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学技术方面的经验,加强机械工业科学技术的基础建设,适应实现“四个现代化”的需要,我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》,使出版工作更好地为无产阶级政治服务,为工农兵服务,为社会主义服务。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用,也可供教学及其他有关人员参考。《手册》在内容和表达方式上,力求做到深入浅出,简明扼要,直观易懂,归类便查,以便广大机电工人使用,有利于工人阶级技术队伍的发展和壮大。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书,着重介绍各专业的理论基础,常用计算公式,数据、资料,关键问题以及发展趋向。在编写中,力求做到立足全局,勾划概貌,反映共性,突出重点。读者在综合研究和处理技术问题时,《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成,构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分,共七十九篇;《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分,共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的, 有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员, 更为广泛。许多地区的科技交流部门, 为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中, 广泛征求广大机电工人的意见, 坚持实行工人、技术人员和领导干部三结合的原则, 发挥了广大群众的智慧和力量。

(五) 为了使手册早日与读者见面, 广泛征求意见, 先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验, 试用本在内容和形式方面, 一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证, 提出批评和建议, 以便今后出版合订本时加以修订。

(六) 本书是《机械工程手册》第41篇, 由第一机械工业部机械研究院机电研究所、哈尔滨工业大学、第一汽车制造厂、湖北农机学院主编, 参加编写的有: 济南铸锻机械研究所、沈阳重型机器厂、第一机械工业部天津设计院、四川汽车厂等单位。许多单位对本书的编审工作给予大力支持和帮助, 在此一并致谢。

机械工程手册 编辑委员会编辑组
电机工程手册

目 录

编辑说明

第1章 概 述

第2章 冲压变形基础

- 1 冲压塑性变形 41-3
 - 1.1 塑性变形 41-3
 - 1.2 加工硬化 41-3
 - 1.3 塑性条件 41-3
- 2 冲压成形工艺的力学特点与分类 41-3
- 3 冲压成形中的变形趋向性及其控制 41-6
- 4 金属的流动及其控制 41-8
 - 4.1 判断金属的流动 41-8
 - 4.2 影响金属流动的因素 41-9
 - 4.3 控制金属的流动 41-9
- 5 板材的冲压性能与试验方法 41-11

第3章 冲 裁

- 1 冲裁间隙 41-13
 - 1.1 间隙的确定 41-13
 - 1.2 间隙的影响 41-13
 - 1.3 合理间隙的选择 41-15
- 2 冲裁力 41-16
 - 2.1 冲裁力计算 41-16
 - 2.2 减力的方法及其计算 41-16
 - 2.3 提高冲裁质量的几种冲压工艺 41-18

第4章 精密冲裁

- 1 精冲的材料 41-20
- 2 精冲件的工艺性 41-20
- 3 力的计算 41-22
- 4 精冲模具 41-22
 - 4.1 排样 41-23
 - 4.2 V形环尺寸 41-23
 - 4.3 间隙 41-23
 - 4.4 凸模和凹模尺寸 41-24
 - 4.5 其他结构要点 41-24

- 5 在普通压力机上精冲 41-24

第5章 弯 曲

- 1 压弯 41-26
 - 1.1 弯曲系数 41-26
 - 1.2 弯曲坯料展开尺寸计算 41-27
 - 1.3 压弯力计算 41-27
 - 1.4 提高弯曲件尺寸精度的方法 41-28
- 2 滚弯 41-31
 - 2.1 工艺特点 41-31
 - 2.2 工艺设计要点 41-32

第6章 拉 延

- 1 旋转体制件拉延 41-34
 - 1.1 坯料尺寸计算 41-34
 - 1.2 拉延次数和拉延顺序的确定 41-36
- 2 方形和矩形制件的拉延 41-39
 - 2.1 坯料形状与尺寸的确定 41-39
 - 2.2 拉延系数和拉延次数的确定 41-40
- 3 连续拉延 41-40
 - 3.1 分类及应用范围 41-40
 - 3.2 料宽和进距的计算 41-41
 - 3.3 拉延系数和拉延相对高度 41-42
- 4 拉延力计算 41-42
- 5 变薄拉延 41-43
 - 5.1 特点 41-43
 - 5.2 工艺参数确定 41-43
- 6 拉延时的润滑 41-43

第7章 复杂曲面零件拉延

- 1 特点 41-44
- 2 复杂曲面零件拉延中的几个问题 41-44
 - 2.1 拉延方向 41-44
 - 2.2 压边面(压料面) 41-45
 - 2.3 变形阻力 41-45
 - 2.4 拉延筋 41-46

2.5 工艺切口与工艺孔	41-48
2.6 后续工序的要求	41-48
3 确定拉延件形状	41-49

第8章 成形

1 缩口及外凸曲线翻边	41-50
1.1 缩口	41-50
1.2 外凸曲线翻边	41-51
2 翻孔	41-51
2.1 变形程度	41-51
2.2 坯料预留孔径的计算	41-51
2.3 翻孔力	41-51
3 起伏	41-52
3.1 主要工艺参数 h 、 R 、 r 的确定	41-52
3.2 起伏力	41-52
4 胀形	41-52
4.1 胀形方法	41-53
4.2 变形程度	41-53
4.3 胀形力	41-53
5 液压、橡皮及软模成形	41-53
6 旋压	41-55
6.1 不变薄旋压	41-56
6.2 变薄旋压	41-56
7 校平	41-56
8 压印	41-57
9 高速成形	41-57
9.1 爆炸成形	41-58
9.2 电水成形和电爆成形	41-58
9.3 电磁成形	41-59

第9章 冲压工艺过程设计

1 冲压件工艺性	41-60
1.1 冲裁件结构工艺性	41-60
1.2 弯曲件结构工艺性	41-60
1.3 各种空心零件结构工艺性	41-60
2 冲压工艺过程设计应考虑的问题	41-61
2.1 弱区条件	41-61
2.2 精度要求	41-63
2.3 操作要求	41-63

2.4 工艺稳定性	41-63
2.5 模具结构	41-64
3 排样	41-64
3.1 条料上的排样	41-64
3.2 板料上的排样	41-65

第10章 冲模设计

1 冲模结构	41-66
1.1 冲模分类	41-66
1.2 冲模基本结构的组成	41-66
1.3 冲模结构的比较及选择	41-68
1.4 冲模结构与压力机的关系	41-69
2 冲模工作零件的设计	41-69
2.1 凸模与凹模的基本结构型式	41-69
2.2 组合式和镶块式凸、凹模分块原则	41-70
2.3 冲裁凸模与凹模尺寸	41-70
2.4 压弯凸模与凹模尺寸	41-71
2.5 拉延凸模与凹模尺寸	41-71
3 冲模定位部分的设计	41-72
3.1 设计原则	41-72
3.2 定位的基本型式	41-72
4 冲模零件的材料及热处理	41-73
5 冲模零件的配合和精度	41-73
5.1 配合	41-73
5.2 精度	41-74

第11章 冲压设备

1 剪板机	41-74
2 剪切冲型机	41-76
3 开式压力机	41-76
4 闭式压力机	41-78
5 闭式拉延压力机	41-80
6 多工位自动压力机	41-81
7 冲模回转头压力机	41-83
8 高速压力机	41-83
9 精密冲裁压力机	41-84
10 冲压液压机	41-85
10.1 C型单臂式液压机	41-85
10.2 单动冲压液压机	41-87

10.3 双动冲压液压机	41-88
--------------------	-------

第12章 冲压安全技术

1 安全区操作的措施	41-90
1.1 设置模具防护罩	41-90
1.2 扩大模具的安全操作空间	41-91
1.3 用进、退料机构代替手工操作	41-91
1.4 使用手工具	41-93
2 压力机的安全起动装置	41-93
2.1 门栅-杠杆安全起动装置	41-93

2.2 防打连车装置	41-93
2.3 光电安全装置	41-93
2.4 手推式安全装置	41-93
2.5 电容式保护装置	41-94
2.6 气幕保护装置	41-94
2.7 双手及多手起动装置	41-94
3 排除危险装置	41-94
3.1 摆杆护手装置	41-94
3.2 转板护手装置	41-95

第1章 概 述

冲压是通过模具对板料施加外力，使之产生塑性变形或分离，从而获得一定尺寸、形状和性能的零件的加工方法。冲压加工的应用范围很广，不仅可冲压金属板材，而且也可冲压非金属材料；不仅能制造很小的仪表零件，而且也能制造如汽车大梁等大型零件；不仅能制造一般精度和形状的零件，而且也能制造精密和复杂形状的零件。

冲压件在形状和尺寸精度方面互换性较好，可以满足一般的装配和使用要求，并且经过塑性变形，金属的内部组织得到改善，机械强度有所提高，具有重量轻、刚度好、精度高和外表光滑美观的特点。

冲压是一种高生产率的加工方法。大型冲压件（如汽车覆盖件）的生产率可达每分钟几件，高速冲压的小件则可达千件。由于所用坯料是板材或卷料，一般又是冷态加工，较易实现机械化与自动化。

冲压生产的材料利用率较高，一般可达70~85%。

冲压生产的工艺和设备正在不断地发展，特别是精密冲压、多工位自动冲压以及液压成形、高速成形、超塑性冲压等各种冲压工艺的迅速发展，把冲压的技术水平提高到了一个新的高度。由于新型模具材料的采用和钢结合金、硬质合金模具的推广、模具的各种表面处理技术的发展，冲压设备与模具结构的改善及其精度的提高，显著地提高了模具的寿命。采用低熔点合金模具后，对中小批量的拉延件的生产起了很好的推动作用。

采用冲压与焊接、胶接等复合工艺，使零件结构更趋合理，加工更为方便，是制造复杂形状的结构件的主要方法。

冲压工艺理论正在不断发展。为了提高冲压件成品率和质量，充分采用极限变形，必须加强冲压基本变形规律、各种冲压工艺的变形理论、极限变形程度、不均匀变形与残余应力、板材冲压性能与硬化等方面的基础研究工作，制定出先进合理的工艺参数。要深入研究冲裁与精密冲裁两种不同的变

形机理，研究和发展在普通冲裁条件下也能获得较高质量的半精冲工艺。

冲压的基本工序可分为分离与成形两大类（见表41·1-1、41·1-2）。

表41·1-1 分离工序分类

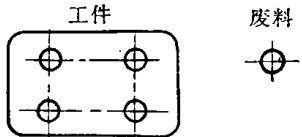
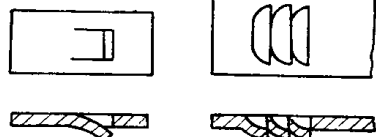
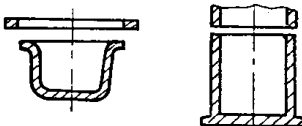
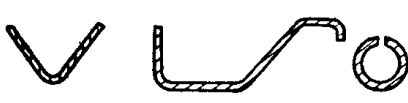
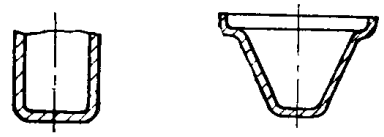
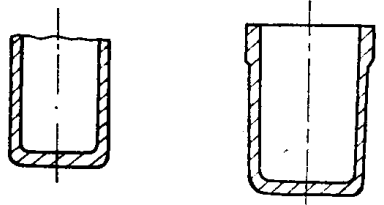
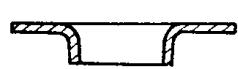
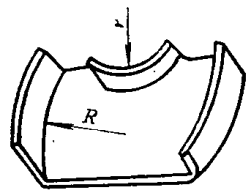
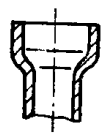
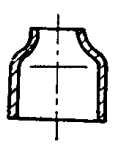
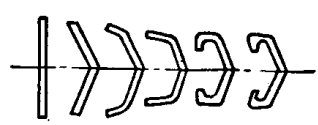
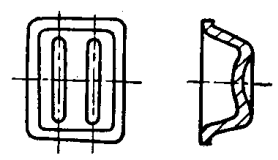
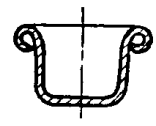
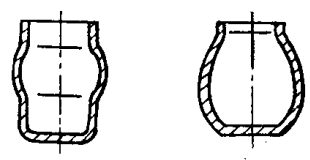
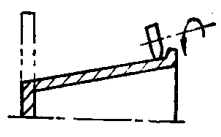
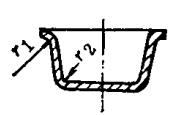
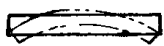
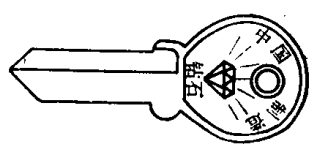
工序名称	简 图	特 点 及 常用范围
切断		用剪刀或冲模切断板材，切断线不封闭
落料		用冲模沿封闭线冲切板材，冲下来的部分为制件
冲孔		用冲模沿封闭线冲切板材，冲下来的部分为废料
切口		在坯料上沿不封闭线冲出缺口，切口部分发生弯曲，如通风板
切边		将制件的边缘部分切掉
剖切		把半成品切开成两个或几个制件，常用于成双冲压

表41-1-2 成形工序分类

工序名称	简图	特点及常用范围
弯曲		把板料弯成一定的形状
卷圆		把板料端部卷圆, 如合页
扭曲		把制件扭转成一定角度
拉伸		把平板形坯料制成空心制件, 壁厚基本不变
变薄拉伸		把空心制件拉伸成侧壁比底部为薄的制件
翻孔		把制件上有孔的边缘翻出竖立边缘
翻边		把制件的外缘翻起圆弧或曲线状的竖立边缘
扩口		把空心制件的口部扩大, 常用于管子
缩口		把空心制件的口部缩小

(续)

滚弯		通过一系列轧辊把平板卷料滚弯成复杂形状
起伏		在制件上压出筋条, 花纹或文字, 在起伏处的整个厚度上都有变形
卷边		把空心件的边缘卷成一定形状
胀形		使制件的一部分凸起, 呈凸肚形
旋压		把平板形坯料用小滚轮旋压出一定形状 (分变薄与不变薄两种)
整形		把形状不太准确的制件校正成形, 如获得小的 r 等
校平		校正制件的平直度
压印		在制件上压出文字或花纹, 只在制件厚度的一个平面上有变形

第2章 冲压变形基础

1 冲压塑性变形

1.1 塑性变形

从金属的应力-应变图(图41·2-1)可见,屈服点(应力 σ_s)是从弹性变形过渡到塑性变形的转折点。产生细颈时(应力 σ_{x1}),是从均匀塑性变形过渡到不均匀塑性变形的转折点。断裂时(应力 σ_d)是从塑性变形过渡到破坏的转折点,此时变形达到极限应变 ε_{max} 。

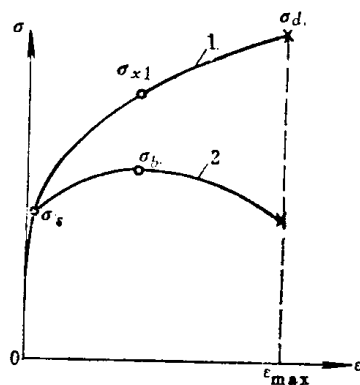


图41·2-1 金属的应力-应变图

1—真实应力曲线 2—假象应力曲线

利用塑性变形($\sigma_s \sim \sigma_d$ 阶段)将金属板料冲压成形的工序称为成形工序(或称变形工序),利用剪切破坏获得零件的冲压工序称为分离工序。

1.2 加工硬化

金属经过塑性变形后强度指标(如 σ_s , HB)增加,塑性指标(如 δ , ψ)降低的现象称为加工硬化,其数学表达式为 $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} > 0$ 。当 $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$ 时称为理想塑性状态,此时无加工硬化,例如热塑性变形。

真实应力曲线的经验公式为

$$\sigma = c\varepsilon^n$$

式中 c ——塑性系数(或称强度系数,当 $n=0$ 时, $\sigma=c$)

n ——硬化指数(或称硬化系数)

材料的加工硬化特性,可以用硬化指数 n 来衡量。 n 大表示硬化强度高,冲压时硬化显著,对后续变形工序不利,但是变形均匀性好,变形后零件壁厚均匀,刚性大,精度高,在同样应力状态下所能给出的极限变形程度也高。常用材料的 n 和 c 见表41·2-1。

表 41·2-1

材 料	n	c kgf/mm ²
低碳钢	0.19~0.22	71~75
60/40黄铜	0.46	99
65/35黄铜	0.39~0.44	76~82
磷青铜	0.22	110
磷青铜(低温退火)	0.52	89
银	0.31	47
紫铜	0.27~0.34	42~46
硬铝	0.12~0.13	32~38
铝	0.25~0.27	16~21
不锈钢	0.5	

注:本表适用于室温,低速塑性加工,材料为退火状态。

1.3 塑性条件

物体进入并保持塑性状态的条件称为塑性条件,它反映了塑性变形时应力之间的关系。塑性条件与应力状态无关。在冲压中常用简化的能量条件,即

$$\sigma_1 - \sigma_3 = m\sigma_{zs}$$

式中 σ_1 、 σ_3 ——制件中最大主应力与最小主应力,均用代数值,即 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$

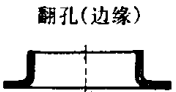
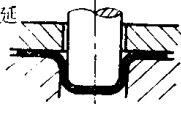
σ_{zs} ——制件的真实应力,即考虑了加工硬化后的材料变形抗力

m ——考虑中间主应力 σ_2 的系数,其数值见表41·2-2

2 冲压成形工艺的力学特点与分类

用塑性力学的分析方法,可以确切描绘冲压加工中坯料变形区的应力、应变分布情况。但在生产实践中这种方法的运用受到很大限制。

表41-2-2 系数 m 的数值

中间主应力情况举例		m
$\sigma_2 = \sigma_1$ 或 $\sigma_2 = \sigma_3$	 	1.0
$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ (平均应力)		1.155
σ_2 不属上面两种情况时	 	≈ 1.1

通过建立冲压变形区坯料的主应力图和主应变图的方法,可对坯料的受力情况和变形特点作概括的定性分析,在一定程度上满足了冲压工艺设计及零件质量分析的要求。

建立主应力图和主应变图的要点如下:

(1) 首先,根据模具对坯料的作用,确定变形区内主导的强制变形的性质。然后根据应力与应变关系进一步确定这个方向上的主应力的方向:当主导的强制变形为伸长变形时,这个方向上的主应力一定是拉应力,而且是最大主应力;当主导的强制变形为压缩变形时,这个方向上的主应力一定是压应力,而且是最小主应力。例如:在翻孔与扩口时,主导的强制变形为切向的伸长变形 ϵ_1 ,故在切向上的主应力是拉应力,而且是最大主应力 σ_1 。又如在缩口时,主导的强制变形为切向的压缩变形 ϵ_3 ,故在切向上的主应力必定是压应力,而且是最小主应力 σ_3 。

(2) 其他两个方向上的主应力可按下面几个条件确定:

1) 根据模具和坯料间力的相互关系或平衡条件确定其他主应力的存在和方向——如翻孔时的径向拉应力 σ_2 ,弯曲时厚度方向上的压应力等。

2) 当坯料的某一个变形趋势受到其形状的阻碍时,就会产生附加的应力。例如:在宽板弯曲时,本来在宽度方向上没有外力引起的主应力,但是,由于外层金属与内层金属分别在拉应力 σ_1 和压应力 σ_3 的作用下产生了长度方向上的伸长和压

缩变形,从而引起外层与内层在宽度方向的压缩和伸长变形。这种不同的变形引起坯料在宽度方向上产生弯曲变形的趋势。在宽板弯曲时,这种横向弯曲受到板材形状的限制很难实现,于是产生了宽度方向上外层受拉、内层受压的附加应力。

3) 主应力图和主应变图都不包含数量的概念,不能根据主应力图确定主应变图。但是,对于变形区的受力情况比较简单的某些成形过程(如单向受拉,单向受压,双向等拉,平面变形等),可以利用坯料的连续条件和应力与应变关系推断出相应的主应变图。例如圆柱形坯料的校形、翻孔与扩口时坯料孔口的边缘部位都是单向受拉,这时主导的强制变形是切向伸长,而由坯料的连续性所决定的其他两个方向上的随从变形一定是压缩变形;又如平板坯料的胀形时,其中心部位受双向等拉的作用,因此,其厚度方向上是压缩变形,而其余两个方向上的变形是相等的伸长变形;又如宽板弯曲属于平面变形,三个变形中有一个为零,其余两个方向上的变形相等,方向相反。

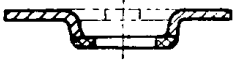
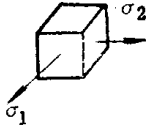
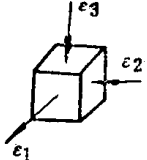
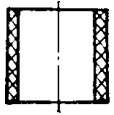
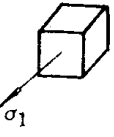
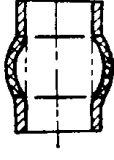
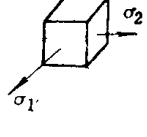
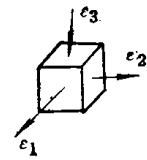
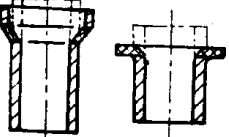
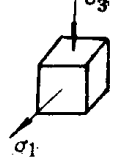
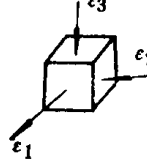
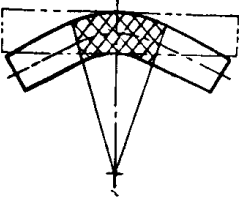
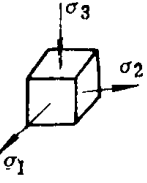
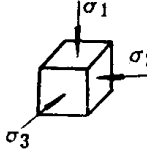
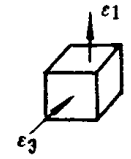
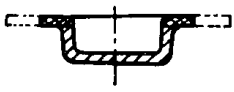
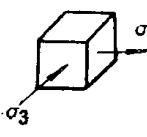
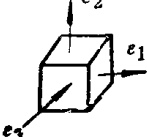
4) 对于变形区的受力情况比较复杂的成形过程,必须以变形区内各主应力的数值及其分布情况的分析计算作为确定应变性质的依据。例如,在拉伸时,变形区——法兰边在厚度方向上的应变可能是正,也可能是负;其正负只有在计算出切向应力 σ_3 和径向应力 σ_1 的具体数值后,才能对这个应变的性质作出确切的判断。计算结果表明,当拉伸系数大于0.61时,在整个法兰边的厚度方向上

都是增厚的正应变；而当拉延系数小于0.61时，在法兰边的外圈是增厚的正应变，而内圈是变薄的负应变，分界圆的直径是坯料直径的0.61倍。在分界圆附近有一个宽度不大的环形部分，其应变是变

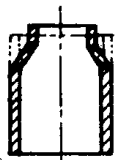
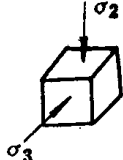
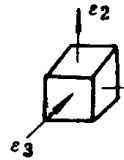
化的，由拉延开始时的正应变转变为后期的负应变。

几种常用冲压成形工艺的主应力图与主应变图列于表41·2-3。

表41·2-3 各种冲压成形方法的坯料变形区及其主应力和主应变图

成形方法		成形方法简图①	主应力图	主应变图	备 注
伸长类成形	孔的翻边				1为切向 2为径向 3为厚度方向
	圆柱形制件的均匀胀形或校形、拉弯				
	圆柱形制件的局部胀形				1、2、3方向 同上项
	平板坯料的局部胀形，曲面形状拉深件的中间部分或起伏成形				
	扩口				1为切向 2为轴向 3为厚度方向
弯曲类成形	弯 外层				1为长度方向 2为宽度方向 3为厚度方向
	弯 内层				3为长度方向 2为宽度方向 1为厚度方向
	拉 延				3为切向 1为径向 2为厚度方向 当拉延系数小时，内边缘 ϵ_2 为负

(续)

成形方法	成形方法简图①	主应力图	主应变图	备 注
压缩类成形 缩 口				3 为切向 2 为轴向 1 为厚度方向

①交叉的断面线表示毛坯的变形区。

按照主应力图与主应变图的特点可以把冲压成形方法分为两类。第一类为伸长类成形工艺，特点是：与最大拉应力相对应的主导的强制变形是正应变，其极限变形参数如翻孔系数、扩口系数、胀形系数、最小弯曲半径等都主要决定于板料的塑性，并且可以直接或间接地用塑性指标（延伸率和断面收缩率）表示。这类工艺要求板料具有较高的塑性变形稳定性，即有较大的均匀延伸率和较大的硬化指数，而板料的相对厚度对成形的难易程度没有直接的影响。第二类为压缩类成形工艺，特点是与最小压应力相对应的主导的强制变形是负应变，其极限变形参数如拉延系数、缩口系数等基本上与板材的塑性指标无关，也不可能用延伸率等去衡量，而主要受到变形区的失稳、起皱和传力区强度的限制，所以板材的相对厚度是衡量这类工艺的难易程度的主要因素。压缩类成形工艺要求板料具有较低的屈服点 σ_s 以及较高的强度极限 σ_b 和弹性模数 E 。

3 冲压成形中的变形趋向性及其控制

研究各种冲压成形工艺的变形趋向性及其控制是为了确定工艺参数、制订工艺过程、设计冲模、分析和解决冲压过程中出现的质量问题。

冲压过程中，可以把坯料划分成变形区和传力区。冲压变形力通过坯料的传力区而施加于变形区，使其产生塑性变形。在成形过程中，变形区和传力区的范围和尺寸不断地变化，而且它们也互相转化。图 41·2-2 a 所示缩口过程开始时，随着凹模的下降，变形区 B 不断扩大，传力区 A 不断减小，金属由传力区转移到变形区去。当缩口发展到图 41·2-2 b 所示的阶段时，变形区的尺寸不再发生变化，从传力区进入变形区的金属体积和从变形区转移出去的相等——稳定变形过程。这时，传力区 A

不断减小，已变形区 C 不断增大，而变形区 B 的尺寸及其内应力的数值与分布规律都不变。

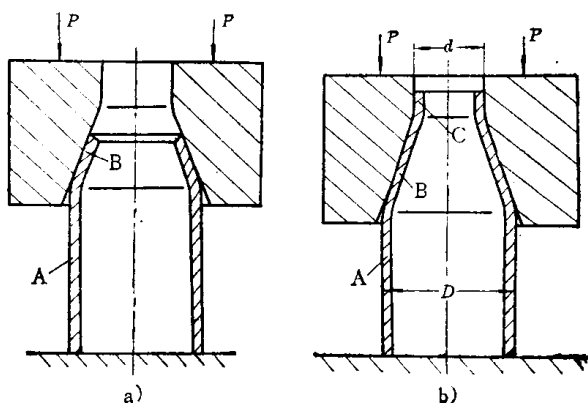


图 41·2-2 缩口加工中制件各区的划分
A—传力区 B—变形区 C—已变形区

变形区和传力区之间的分界面上的内力，其性质与大小完全相同。在同一内力的作用下，在这两个区内，产生的变形的的方式不同，金属的相互尺寸关系也不同，所以必定有一个区所需的变形力较小，因而首先进入塑性状态，产生塑性变形。这个区是相对的弱区。为使冲压过程顺利进行，必须保证制件上应该变形的部分——变形区成为弱区，以便把塑性变形局限于变形区，并排除传力区产生塑性变形的可能。“变形区应为弱区”具有重要的实用意义。某些冲压工艺的极限变形参数（拉延系数、缩口系数等）的确定，复杂形状零件的冲压工艺过程的设计等等，都把它作为分析和计算的依据。

如图 41·2-2 所示的缩口，在 A 与 B 两个交界面上的应力为 σ ，传力区产生塑性变形的的方式是镦粗，其变形所需要的压应力为 σ_s 。不产生镦粗变形的条件是：

$$\sigma < \sigma_s$$

变形区产生塑性变形的的方式为切向收缩的缩

口，它所需要的压应力是 σ_{sk} ，产生缩口变形的条件是：

$$\sigma \geq \sigma_{sk}$$

所以，缩口时，传力区不产生塑性变形的条件是：

$$\sigma_{sk} < \sigma_s$$

因为 σ_{sk} 的数值决定于缩口系数 $\frac{d}{D}$ ，所以上式就成为确定极限缩口系数的依据。

在设计工艺过程、选定工艺方案、确定工序和半成品尺寸时，也必须遵循弱区先变形，变形区应为弱区的条件。如图 41·2-3 所示零件，当 $D - d$ 较大， h 较小时，可用带孔的环形坯料翻孔；但是，当 $D - d$ 较小， h 较大时，翻孔就不能保证坯料外环是强区和翻孔部分是弱区的条件，外径必然收缩，使翻孔成为不可能。这时，必须改为拉延后切底和切外缘；或将环形坯料的外径加大，在翻孔成形后再冲切外圆（虚线所示）。

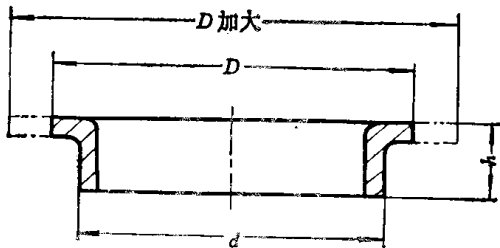


图 41·2-3

当变形区或传力区有两种以上的变形方式时，则首先发生的是需变形力最小的变形方式。因此，在工艺过程设计和模具设计时，除要保证变形区为弱区外，还要保证其所需的变形方式要求最小的变形力。例如，在缩口时（图 41·2-2），变形区可能

产生的塑性变形是切向收缩的缩口变形或在切向压应力作用下的失稳起皱；传力区可能产生的塑性变形是墩粗和纵向失稳。在这四种变形趋向中，必须使缩口变形所需的变形力最小，制件才能正常缩口。又如在冲裁时，在冲压力的作用下，板料具有产生剪切和弯曲变形两种趋向。当冲裁间隙小到一定程度，建立起对弯曲变形不利而对剪切有利的条件，便可以在产生很小的弯曲变形的情况下实现剪切，提高了零件的尺寸精度。

在冲压过程中，变形区和传力区在一定条件下可以互相转化，改变某些条件就可以实现对变形趋向性的控制。其控制措施如下：

a. 合理确定坯料和半成品尺寸 图 41·2-4 a 所示的坯料，由于尺寸 D_0 、 d_0 与 d_t 的相对关系不同，具有三种可能的变形趋向（拉延、翻孔与胀形），形成三种形状完全不同的零件。

当 D_0/d_t 与 d_0/d_t 都较小时，宽度为 $D_0 - d_t$ 的外环部分是弱区，得到坯料外径收缩的拉延变形

表 41·2-4 环形板坯的变形趋向

尺寸关系	成形方式 (变形趋向)	备 注
$\frac{D_0}{d_t} < 1.5 \sim 2; \frac{d_0}{d_t} < 0.15$	拉 延	
$\frac{D_0}{d_t} > 2.5; \frac{d_0}{d_t} > 0.2 \sim 0.3$	翻 孔	要得到图 41·2-4 c 所示的零件， $\frac{d_0}{d_t}$ 的数值也必须加大，否则内孔会开裂
$\frac{D_0}{d_t} > 2.5; \frac{d_0}{d_t} < 0.15$	胀 形	当 $\frac{d_0}{d_t} = 0$ 时，是完全的胀形

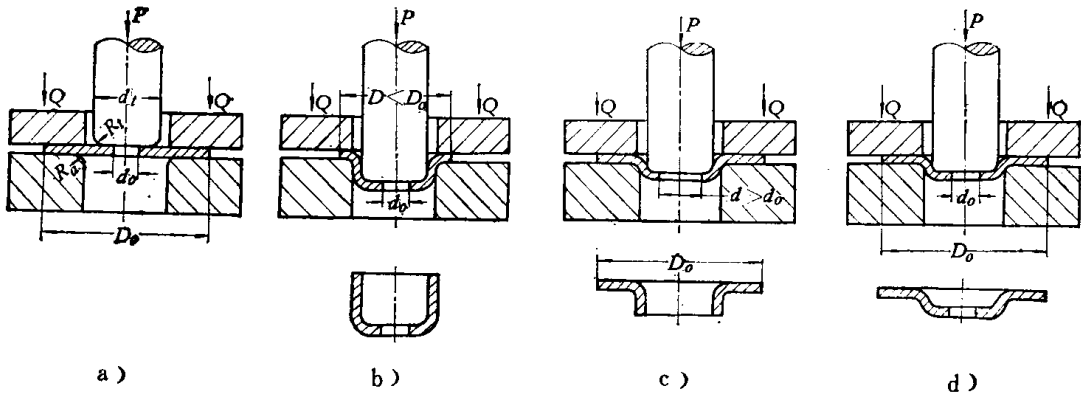


图 41·2-4 环形板坯的变形趋向

a—变形前的坯料与模具 b—拉延 c—翻孔 d—胀形

(图 41·2-4 b)。当 D_0/d_i 与 d_0/d_i 都比较大时, 宽度为 $d_i - d_0$ 的内环部分成为弱区, 于是得到坯料内孔扩大的翻孔变形 (图 41·2-4 c)。当 D_0/d_i 很大, 而 d_0/d_i 很小或等于零时, 外环的拉伸变形与坯料中间部分的翻孔变形的变形阻力都增大了, 中间部分的胀形成为变形阻力最小的变形方式, 于是坯料中间部分变薄而胀形如图 41·2-4 d。以上情况及具体数据见表 41·2-4。

实例: 钢球活座套的冲压加工过程 (图 41·2-5), 包括冲裁、拉伸、冲孔、翻孔四道工序。在第二道拉伸工序中, 坯料的外环是弱区, 发生塑性变形, 并使其外径由 $\phi 59$ 减到 $\phi 52$ 。但是在冲出 $\phi 24$ 内孔之后, 中间部分由强区变为弱区, 原来是弱区的外环转变成成为相对的强区, 这就使变形区由外部转移到中间部分, 从而保证了第四道工序——内孔扩大的翻孔变形的进行。

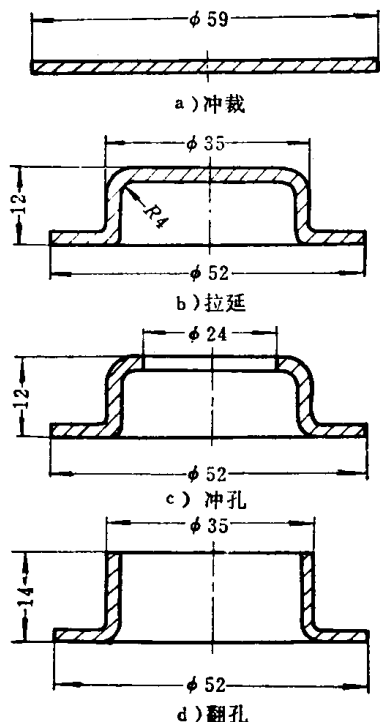


图 41·2-5 钢球活座套的冲压工艺过程

b. 改变模具工作部分的几何形状和尺寸 例如增大凸模的圆角半径 R_i , 减小凹模的圆角半径 R_0 (图 41·2-4 a), 可以使拉伸变形的阻力增大, 并使翻孔的阻力减小, 有利于翻孔变形的实现。

c. 改变坯料与模具的接触表面之间的摩擦阻力 例如使图 41·2-4 中的压边圈和凹模面与坯料的摩擦阻力减小 (减小压边力 Q , 改善润滑), 有利

于拉伸变形而有利于翻孔和胀形。

d. 采用局部加热或局部深冷, 降低变形区的变形抗力或提高传力区的强度 例如在拉伸和缩口时对变形区局部加热, 在不锈钢制件的拉伸时对传力区局部深冷, 对镁合金、钛合金等在屈服比 σ_s/σ_b 较小的温度区间进行拉伸等方法, 都能加大一次成形的极限变形程度。

4 金属的流动及其控制

制件根据变形趋向性而成形的过程, 也可把它看作是金属的流动及其控制的过程。

4.1 判断金属的流动

研究金属的流动可按三个主轴方向分别分析其应变。最直接的方法是实验法。在制件上画网格、小圆或同心圆等, 观察并测量其在冲压过程中的实际应变。对于复杂变形的制件, 常用画小圆的办法 (图 41·2-6), 小圆的各种格式见图 41·2-7。小圆直径为 $1.5 \sim 20 \text{ mm}$ 。刻制方法有直接刻划, 感光复制和电解腐蚀等。直接刻划要划伤板料, 容易在刻划处过早破裂, 刻划精度也较低, 但制作容易。感光复制会由于冲压时摩擦使图形看不清楚。电解腐蚀的精度较高, 应力集中少, 但制作需要专用设备。

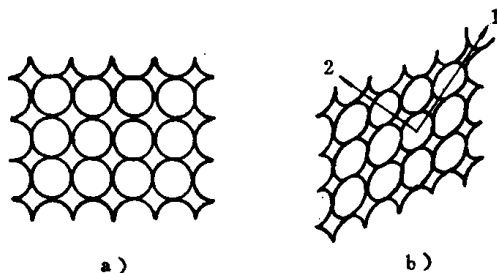


图 41·2-6

a—变形前 b—变形后 1 与 2 为主应变方向

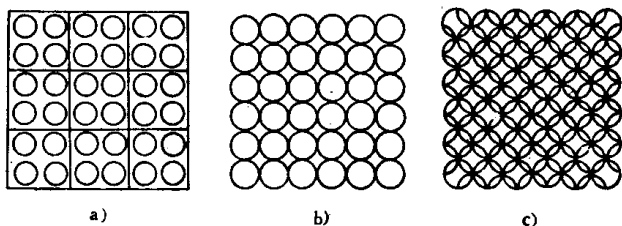


图 41·2-7 小圆制作格式

a—小圆与直线间隔 b—小圆相切 c—小圆相交与相切

4.2 影响金属流动的因素

金属的流动决定于材料本身的特性和应力状态。应力状态有两个方面：一是应力方向；二是应力数值。前者由冲压工序的性质所决定，后者与工艺参数有关。

冲压成形工序中影响金属流动最主要的因素有凸模与凹模工作部分的圆角半径、摩擦和间隙。

4.3 控制金属的流动

冲压各成形工序在生产中出现的质量问题有以下几种基本类型：破裂、起皱、划伤以及形状与尺寸精度不好等。

冲压件的厚度变薄与破裂属于同一性质的问题，变薄的极限就是破裂。冲压件厚度变厚、起波浪形以及起皱也属于同一性质的问题，严重时就形成皱褶。划伤是由金属流动时其表面与模具间的摩擦所引起。形状与尺寸精度问题除与冲压件工艺性、模具精度等有关外，还与金属的流动有关。

控制金属流动的基本原则是开流还是限流。开流，就是在需要金属流动的地方减小阻力，让其顺利流动。当某处需要金属流入而又不能流入时，就会产生变薄，甚至导致断流而破裂。限流，就是在不需要金属流动的地方加大阻力，限制其流动。当某处不需要金属流入，而又任其流入时，金属就会多余、就会发生波浪形甚至起皱。

控制金属流动时应注意以下几点：

1) 控制金属流动主要是控制变形区内金属的流动，因此，首先要搞清什么地方是变形区。冲压各工序的变形区参见表 41.2-3。

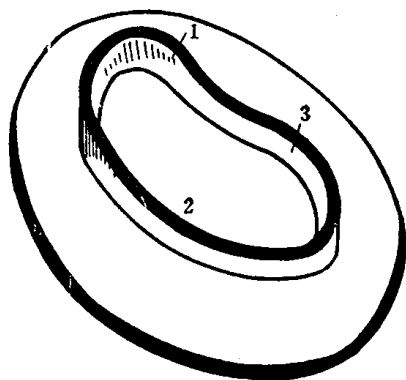


图 41.2-8

2) 分析变形性质，判断金属流动的方向。要搞清该处的变形是伸长（或变薄）还是缩短（或变厚），例如图 41.2-8 为制件翻孔，圆弧 1-2-3 段属翻孔性质，受拉应力，口部变薄，破坏形式为裂口；而圆弧 1-3 段属拉延性质，受压应力，口部变厚，废品形式为起皱。

3) 根据变形情况采取相应的控制措施。主要控制措施有：改变凸模与凹模工作部分的圆角半径；改变摩擦和改变间隙等。

加大圆角半径，减小摩擦，加大间隙均能起到开流作用；反之，则起限流作用。这些措施可单独采用，也可综合采用。例如对具有一定深度的矩形件拉延时，若直边与四角的间隙取一样数值，则当间隙小时，四角易拉破，当间隙大时，直壁部分易起皱。因此，矩形件的拉延应采取直边限流、四角开流的措施，使四角的间隙比直边的间隙大（图 41.2-9）。

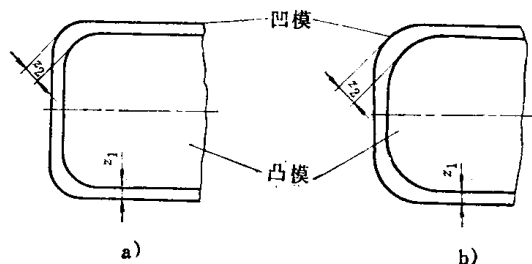


图 41.2-9

a—减小凹模圆角半径 b—加大凸模圆角半径
 $z_2 > z_1$

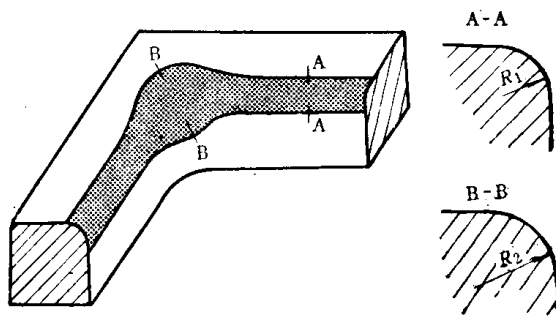


图 41.2-10 矩形件拉延凹模的圆角半径

不调整间隙，而调整圆角半径，即使凹模四角处的圆角半径大于其直边处的圆角半径（见图 41.2-10）也能起到直边限流，四角开流的作用。

改变摩擦可以采用以下几种方法：