



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 冲压工艺与模具设计

贾俐俐 主 编  
柯旭贵 副主编



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 冲压工艺与模具设计

贾俐俐 主 编

柯旭贵 副主编

高锦张 杨予勇 李超 康志军 参编

翁其金 主审

人民邮电出版社  
北 京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

冲压工艺与模具设计 / 贾俐俐主编. —北京: 人民邮电出版社, 2008.9  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-115-17818-3

I. 冲… II. 贾… III. ①冲压—工艺—高等学校—教材  
②冲模—设计—高等学校—教材 IV. TG38

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 033024 号

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了冲压工艺与模具设计, 内容包括各类冲压工艺理论、工艺特点、工艺分析、工艺计算、模具设计及设备的选用。重点讲述了冲裁工艺与模具设计、弯曲工艺与模具设计、拉深工艺与模具设计、多工位级进冲压工艺与模具设计, 以及模具材料及处理与板料冲压成形新技术、新工艺。

本书可作为高等学校材料成型及控制工程、模具设计与制造、机械制造及自动化等专业的本科及高职教材, 也可供从事冲压生产和科研工作的工程技术人员参考。

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

## 冲压工艺与模具设计

- 
- ◆ 主 编 贾俐俐  
副 主 编 柯旭贵  
责任编辑 郭 晶
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
三河市海波印务有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 21.75  
字数: 532 千字 2008 年 9 月第 1 版  
印数: 1—3 000 册 2008 年 9 月河北第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-115-17818-3/TN

定价: 35.00 元

读者服务热线: (010) 67170985 印装质量热线: (010) 67129223  
反盗版热线: (010) 67171154

# 前 言

本书根据普通高等教育材料成形及控制工程专业、模具设计与制造专业的教学要求而编写，是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

冲压成形技术在工业生产中应用很广泛。冲模是完成冲压成形工作不可缺少的工艺装备。本书在论述冲压成形理论和冲压工艺的基础上，详细介绍了冲压工艺设计和冲压模具设计的基本方法。主要讲述了冲裁工艺与模具设计、弯曲工艺与模具设计、拉深工艺与模具设计、多工位级进冲压工艺与模具设计，并根据冲压技术的发展加强了多工位级进冲压工艺与模具设计的内容。特别充实了模具材料与板料冲压成形新技术、新工艺，并介绍了氮气弹簧在冲压模具中的应用这一新技术。

本教材将冲压工艺和模具设计作为同等重要的内容来组织，注重工艺理论与模具设计的紧密联系，加强了多工位级进冲压工艺与模具设计的内容，补充了冲压新技术，以适应模具技术的快速发展。本书突出重点，精炼内容，保证重点内容讲精讲透，一般内容概述，使得学习者既能熟练掌握冲压基本成形工艺与模具，对板料成形技术又有一个全面的了解。教材选用了一些实用的典型模具结构，有利于培养学习者的工程能力。

全书共分12章。第4章、第2章第11节、第3章第5节和第6节由贾俐俐编写；第5章第5节、第6章、第10章、第12章由南京工程学院柯旭贵编写；第1章、第8章、第9章由东南大学高锦张编写；第2章第1至10节、第7章由河南工业大学杨予勇编写；第3章第1至4节由淮阴工学院康志军编写；第5章1至4节、第11章由哈尔滨理工大学李超编写。本教材由贾俐俐主编，翁其金教授任主审。

由于编者水平所限，书中定有许多缺点和不当之处，敬请读者批评指正。

编 者

2008年2月

# 目 录

第 1 章 概述	1	2.3 冲裁模间隙	33
1.1 冲压工艺特点	1	2.3.1 间隙对冲裁工作的影响	33
1.2 冲压工艺分类	3	2.3.2 合理间隙值的确定	33
1.3 塑性变形的力学基础	5	2.4 凸、凹模刃口尺寸的计算	36
1.3.1 点的应力与应变状态	5	2.4.1 凸、凹模刃口尺寸计算	
1.3.2 屈服准则	6	原则	36
1.3.3 塑性变形时应力与应变	7	2.4.2 刃口尺寸计算方法	37
的关系	7	2.5 排样	42
1.3.4 金属变形时硬化现象和	7	2.5.1 排样的意义和材料利用率	42
硬化曲线	7	2.5.2 排样形式的确定	43
1.3.5 各种冲压成形方法的力	8	2.5.3 搭边和条料宽度的确定	45
学特点与分类	8	2.6 冲裁工艺力的确定	49
1.4 冲压技术发展	13	2.6.1 冲裁力的计算	49
1.5 冲压用材料	16	2.6.2 降低冲裁力的方法	49
1.5.1 冲压对材料的基本要求	16	2.6.3 卸料力及推件力的计算	51
1.5.2 材料力学性能与冲压成	17	2.7 冲裁工艺设计	52
形性能的关系	17	2.7.1 冲裁件的工艺性分析	52
1.5.3 常用冲压材料	19	2.7.2 冲裁加工的经济性分析	54
1.6 冲压设备的选用	21	2.7.3 冲裁工艺方案的确定	57
1.6.1 冲压设备类型的选择	21	2.8 冲裁模的基本类型与构造	59
1.6.2 冲压设备规格的选择	22	2.8.1 冲裁模分类	59
思考与练习	25	2.8.2 冲裁模结构分析	59
第 2 章 冲裁工艺与模具设计	26	2.9 冲模主要零件的设计及标准的	
2.1 冲裁工艺分析	26	选择	68
2.1.1 冲裁变形过程	26	2.9.1 模具零件的分类	68
2.1.2 冲裁时的变形区	27	2.9.2 冲模标准化的意义	69
2.1.3 板料受力情况	28	2.9.3 工作零件的设计与标准	
2.2 冲裁件质量及影响因素	28	的选用	70
2.2.1 冲裁件断面特征与尺寸	29	2.9.4 定位零件	78
特征	29	2.9.5 卸料及出件零件	84
2.2.2 影响冲裁件质量的因素	30	2.9.6 固定与紧固零件	87
		2.9.7 导向零件	90

2.10 冲裁模结构设计.....91	4.1.3 拉深过程的力学分析... 133
2.10.1 落料模具典型结构及 尺寸关系.....91	4.1.4 拉深成形障碍及防止 措施..... 137
2.10.2 冲模压力中心的确定...91	4.2 直壁旋转体零件拉深工艺设计... 139
2.10.3 冲模的闭合高度的确定...93	4.2.1 拉深件毛坯尺寸的确定... 139
2.11 精密冲裁工艺与模具设计.....94	4.2.2 拉深系数及其影响因素... 141
2.11.1 精冲工艺设计.....94	4.2.3 无凸缘圆筒件拉深次数 和工序件尺寸的确定... 145
2.11.2 精冲模具设计.....97	4.2.4 有凸缘圆筒形件的拉深 方法及工艺计算..... 147
思考与练习.....101	4.2.5 阶梯圆筒形件的拉深... 151
<b>第3章 弯曲工艺与模具设计.....103</b>	4.3 非直壁旋转体零件拉深..... 152
3.1 弯曲变形分析.....103	4.3.1 非直壁旋转体零件拉深 特点..... 152
3.1.1 弯曲变形过程.....103	4.3.2 球面零件的拉深方法... 153
3.1.2 弯曲变形分析.....104	4.3.3 抛物面零件的拉深方法... 154
3.1.3 弯曲变形区的应力应变 状态.....106	4.3.4 锥形零件的拉深方法... 154
3.2 宽板弯曲时的主应力值和应力 中性层的位置.....107	4.4 盒形件拉深..... 155
3.3 弯曲件质量分析.....110	4.4.1 盒形件拉深的特点..... 155
3.3.1 弯裂与最小相对弯曲 半径.....110	4.4.2 盒形件拉深毛坯的形状 与尺寸的确定..... 157
3.3.2 弯曲件的回弹.....112	4.4.3 盒形件拉深变形程度... 158
3.3.3 弯曲时的偏移.....115	4.4.4 高盒形件多工序拉深方 法及工序件尺寸的确定... 159
3.4 弯曲加工的工艺性要求和工艺 计算.....116	4.5 拉深工艺设计..... 161
3.4.1 弯曲加工的工艺性要求...116	4.5.1 拉深零件的结构工艺性 分析..... 161
3.4.2 弯曲件的工序安排.....117	4.5.2 压边装置及压边力..... 162
3.4.3 弯曲力的计算.....118	4.5.3 拉深力与拉深功..... 165
3.4.4 弯曲毛坯尺寸的计算.....120	4.5.4 拉深工艺的辅助工序... 166
3.5 弯曲模具设计.....121	4.6 拉深模具设计..... 168
3.5.1 V形件弯曲模.....121	4.6.1 拉深模具分类及典型 结构..... 168
3.5.2 U形件弯曲模.....122	4.6.2 拉深模工作部分的结 构和尺寸..... 169
3.5.3 帽罩形件弯曲模(四角 弯曲模).....123	4.7 其他拉深方法..... 174
3.5.4 Z形件弯曲模.....124	4.7.1 软模拉深..... 174
3.5.5 圆形件弯曲模.....124	4.7.2 变薄拉深..... 176
3.5.6 级进弯曲模.....126	思考与练习..... 178
3.6 凸、凹模工作部分尺寸确定...126	<b>第5章 其他成形工艺及模具设计... 180</b>
思考与练习.....128	5.1 翻边..... 180
<b>第4章 拉深工艺与模具设计.....130</b>	5.1.1 圆孔翻边..... 181
4.1 拉深变形过程分析.....131	5.1.2 外缘翻边..... 185
4.1.1 拉深变形过程及特点...131	
4.1.2 拉深变形的应力和应变...132	

5.1.3	非圆孔翻边	186	思考与练习	242
5.1.4	变薄翻边	187	<b>第7章 经济型冲压模具的设计</b>	243
5.2	缩口	188	7.1 聚氨酯橡胶模	243
5.2.1	缩口的变形过程	188	7.1.1 聚氨酯橡胶的性能	243
5.2.2	缩口系数	189	7.1.2 聚胺酯橡胶冲裁模	244
5.2.3	缩口时管坯的尺寸计算	190	7.1.3 聚氨酯橡胶成形模	246
5.2.4	缩口力的计算	191	7.2 铋-锡低熔点合金模	248
5.2.5	缩口模结构	191	7.3 锌基合金模	249
5.3	旋压	192	7.3.1 锌基合金冲模用材料	250
5.3.1	普通旋压	192	7.3.2 锌基合金冲裁模	251
5.3.2	变薄旋压	193	7.3.3 锌基合金成形模	252
5.4	胀形	194	7.4 通用冲模与组合冲模	253
5.4.1	胀形成形特点及成形 极限	195	7.4.1 逐次冲裁法和通用冲 裁模	253
5.4.2	局部胀形	196	7.4.2 组合冲模	254
5.4.3	圆柱空心毛坯的胀形	199	7.5 钢带冲模	255
5.4.4	张拉成形	201	7.5.1 切刀式钢带冲模	255
5.4.5	胀形模设计举例	204	7.5.2 常规式钢带冲模	256
5.5	覆盖件的成形	205	7.5.3 样板式钢带冲模	256
5.5.1	覆盖件的成形特点	205	思考与练习	257
5.5.2	覆盖件冲压工艺要点	205	<b>第8章 氮气弹簧在冲压模具中的 应用</b>	258
思考与练习		209	8.1 氮气弹簧的作用与发展概况	258
<b>第6章 多工位级进冲压工艺与 级进模设计</b>		210	8.2 氮气弹簧的设计原理与特性	259
6.1	概述	210	8.3 氮气弹簧的结构	262
6.2	多工位级进模的排样设计	211	8.4 氮气弹簧在冲压中的应用	264
6.2.1	工序确定与排序	213	思考与练习	267
6.2.2	载体设计	216	<b>第9章 冷挤压工艺与模具设计</b>	268
6.2.3	分段冲切设计	217	9.1 冷挤压工艺分类及变形特点	268
6.2.4	空工位设置及步距设计	219	9.1.1 冷挤压工艺分类及应用	268
6.2.5	定位形式选择与设计	219	9.1.2 冷挤压金属的变形分析	269
6.3	多工位级进模典型结构	221	9.1.3 挤压变形程度	271
6.3.1	冲孔落料多工位级进模	221	9.2 冷挤压原材料与挤压毛坯的 准备	272
6.3.2	冲裁弯曲多工位级进模	222	9.2.1 冷挤压用原材料	272
6.3.3	冲裁拉深多工位级进模	226	9.2.2 冷挤压毛坯的形状及 尺寸的确定	272
6.3.4	落料复位成形多工位 级进模	227	9.2.3 冷挤压毛坯的加工方法	273
6.4	多工位级进模主要零件设计	228	9.2.4 冷挤压毛坯的软化和 表面处理	274
6.4.1	级进冲压模具零件分类 及设计原则	228	9.3 冷挤压力的确定	275
6.4.2	模具主要零件设计	229	9.3.1 冷挤压力一行程曲线	275
6.5	安全检测装置	238		
6.6	级进模的尺寸标注	240		

9.3.2	影响挤压力的主要因素	275	11.3	粘性介质压力成形	309
9.3.3	冷挤压力的确定	276	11.4	数控增量成形	311
9.3.4	冷挤压力机的选用	279	11.4.1	数控增量成形原理及特点	311
9.4	冷挤压工艺设计	281	11.4.2	增量成形的应用	312
9.4.1	冷挤压件的结构工艺性分析	281	11.5	无模多点成形	313
9.4.2	冷挤压工艺方案的制订	282	11.5.1	无模多点成形原理及特点	313
9.4.3	不同冷锻工序的一次成形范围	283	11.5.2	无模多点成形的应用	314
9.5	冷挤压模具设计	285	11.6	液压成形	315
9.5.1	典型冷挤压模具结构	285	11.7	激光成形	317
9.5.2	冷挤压凸模、凹模设计	287	11.7.1	激光热应力成形	317
9.5.3	预应力组合凹模的设计	289	11.7.2	激光冲压成形	319
	思考与练习	291	11.8	冲压工艺及模具 CAD/CAE/CAM	320
<b>第 10 章</b>	<b>冲压工艺规程的编制</b>	<b>292</b>	11.8.1	冲压工艺及模具 CAD/CAE/CAM 概况	320
10.1	冲压工艺规程编制的主要内容和步骤	292	11.8.2	冲模 CAD 技术	322
10.1.1	制定冲压工艺规程的原始资料	292	11.8.3	冲模 CAM 技术	323
10.1.2	制定冲压工艺规程的一般步骤及内容	292	11.8.4	冲模 CAE 技术	324
10.2	冲模设计方法与步骤	296	11.8.5	冲压工艺及模具 CAD/CAE/CAM 应用软件介绍	325
10.2.1	冲模类型及结构形式的确定	296		思考与练习	326
10.2.2	冲模零件的设计及标准的选用	297	<b>第 12 章</b>	<b>冲压模具的失效形式及冲模材料的选择</b>	<b>327</b>
10.2.3	冲模总装配图的内容及绘制要求	297	12.1	冲压模具的失效形式	327
10.2.4	冲模零件图绘制	299	12.1.1	冲压模具的工作条件及失效形式	327
10.2.5	设计说明书的编写	299	12.1.2	影响冲模寿命的因素及提高冲模寿命的措施	330
10.3	冲压工艺与冲模设计举例	299	12.2	冲压模具材料的选用	332
	思考与练习	304	12.3	模具材料的热处理	334
<b>第 11 章</b>	<b>金属板材成形新技术</b>	<b>305</b>	12.4	模具材料的表面处理	335
11.1	概述	305		思考与练习	338
11.2	电磁成形	306	<b>参考文献</b>	<b>339</b>	
11.2.1	电磁成形原理及特点	306			
11.2.2	电磁成形的应用	307			



# 第 1 章 概 述

## 1.1 冲压工艺特点

冲压是利用冲模在压力机上对金属（或非金属）板料施加压力使其产生分离或塑料变形，从而得到一定形状，并且满足一定使用要求的零件的加工方法。由于通常是在常温（冷态）下进行的，所以又称为冷冲压。又由于它主要用于加工板料零件，所以有时也叫板料冲压。

日常生活中人们使用的很多用具是用冲压方法制造的，比如搪瓷面盆，它是用一块圆形金属板料，在压力机上利用模具对板料加压力而冲出来的，如图 1.1.1 所示，利用凸模和凹模对直径为  $D$  的圆板料加一压力，就冲出人们需要的面盆。

### 1. 冲压加工的三要素

- (1) 冲床 供给变形所需的力。
- (2) 模具 冲压所用的工具是各种形式的冲模，冲模对材料塑性变形加以约束，并直接使材料变成所需的零件。
- (3) 原材料 所用的原材料多为金属和非金属的板料。

### 2. 冲压生产特点

冲压是一种先进的板料加工方法，与其他加工方法（切削）比较，在技术上、经济上有如下优点。

- (1) 它是无屑加工，被加工的金属在再结晶温度以下产生塑性变形，不产生切屑，变形中金属产生加工硬化。
- (2) 在压力机简单冲压下，能得到形状复杂的零件，而这些零件用其他的方法是可能或者很难得到的。
- (3) 制得的零件一般不进一步加工，可直接用来装配，而且有一定精度，具有互换性。
- (4) 在耗料不大的情况下，能得到强度高、足够刚性而重量轻的零件，由于加工过程中不损坏原材料的表面质量，制得的零件外表光滑美观。

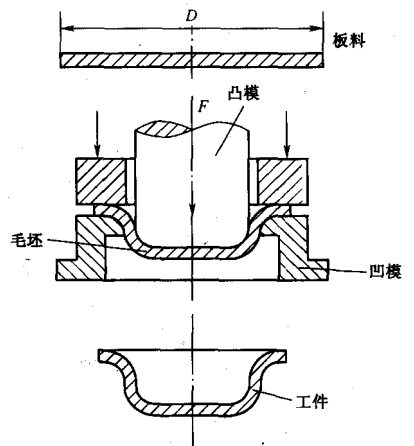


图 1.1.1 冲压过程简图

(5) 生产率高，冲床冲一次一般可得一个零件，而冲床一分钟的行程少则几十次，多则几百次、千次以上。同时，毛坯和零件形状规则，便于实现机械化和自动化生产。

(6) 冲压零件的质量主要靠冲模保证，所以操作简单，便于组织生产。

(7) 在大量生产的条件下，产品的成本低。

冲压工艺存在的不足之处有：对于批量较小的制件，模具费用使用使得成本明显增高，所以一般要有经济批量，同时，模具需要一个生产准备周期；冲压生产会产生噪声和振动，劳动保护措施不到位时，还存在安全隐患；冲压件的精度取决于模具精度，如零件的精度要求过高，用冷冲压生产就难以达到。

总体上看，冲压是一种制件质量较好、生产效率高、成本低，其他加工方法无法替代的加工工艺，在机械、车辆、电机、电器、仪器仪表、农机、轻工、日用品、航空航天、电子、通信、船舶、铁道、兵器等制造业中获得了十分广泛的应用，表 1.1 所示为部分产品中冲压加工零件所占比例。图 1.1.2 所示为轿车车身部分冲压件，有些机器设备往往以冲压件占的比例多少作为评价结构是否先进的指标之一。

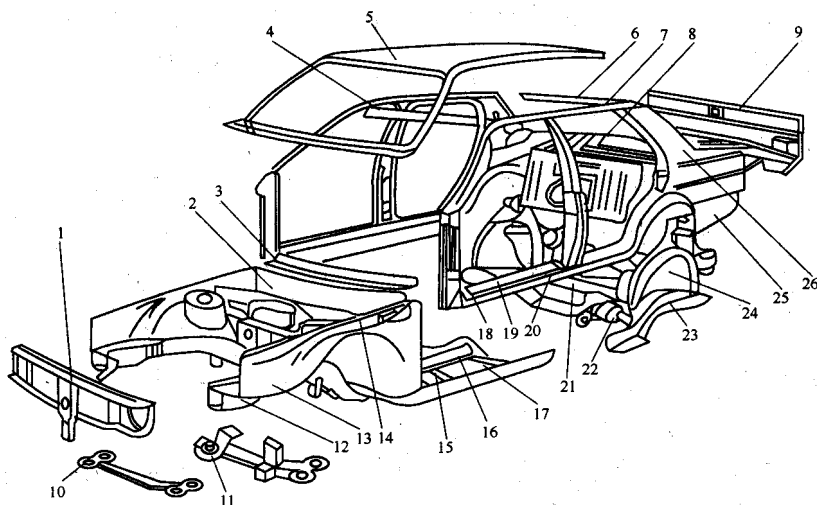


图 1.1.2 轿车车身部分冲压件

- 1—散热器框架 2—前围板 3—前风窗下横梁 4—前风窗上横梁 5—顶盖 6—后风窗上横梁 7—上边梁  
8—后风窗下横梁 9—后围板 10—前横梁 11—副车架 12—前纵梁 13—挡泥板 14—挡泥板加强撑  
15—前座椅横梁 16—地板通道 17—前地板 18—前立柱 19—门槛 20—中立柱 21—后地板  
22—地板后横梁 23—后纵梁 24—后轮罩 25—后翼子板 26—后立柱

表 1.1 各类产品中冲压加工零件所占比例

产品	汽车	仪器仪表	电子	电机电器	家用电器	自行车、手表
比例/%	60~70	60~70	>85	70~80	≤90	>80

工业发达国家（如美国、日本等）模具工业的产值已超过机床工业，从这些国家钢材品种的构成可看出冷冲压的发展趋势，如表 1.2 所示，其中钢带和钢板占全部品种的 67%，说明冲压加工方法已成为现代工业生产的重要手段和发展方向。

表 1.2 工业发达国家钢材品种构成

钢材品种	钢带	钢板	棒材	型材	线材	管材	其他
比例/%	50	17	13	9	7	2	2

## 1.2 冲压工艺分类

由于各种冲压零件的形状、尺寸、公差要求和批量等的不同，所以生产中所采用的冲压工序种类繁多，通常可按下述方法分类。

### 1. 按变形性质分类

(1) 分离工序 被加工材料在外力作用下产生变形，当变形区所受的剪切应力达到了材料的抗剪强度，材料便产生剪裂而分离，从而形成一定形状和尺寸的零件。分离工序包括剪裁—冲孔、落料、切口等。

(2) 成形工序 被加工材料在外力作用下，变形区所受到的等效力达到材料的屈服应力，材料产生塑性变形，得到一定形状和尺寸的零件。成形工序包括弯曲、拉深、成形等。

常用的各种冲压加工方法，如表 1.3 和表 1.4 所示。

表 1.3 分离工序

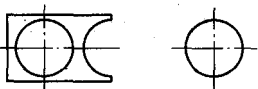

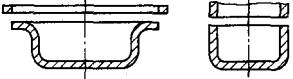

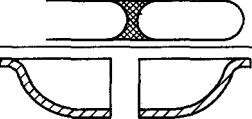

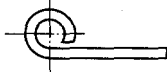

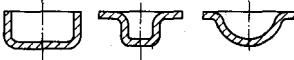
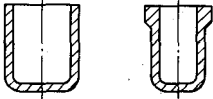



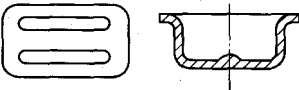

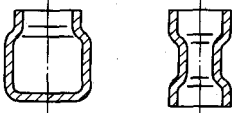
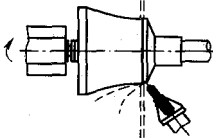
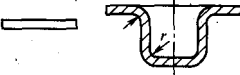
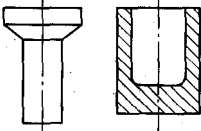
工序名称	简图	特点及应用范围
落料		用冲模沿封闭轮廓线冲切，冲下部分是零件
冲孔		用冲模沿封闭轮廓线冲切，冲下部分是废料
切边		将成形零件的边缘修切整齐或切成一定形状
切断		用剪刀或冲模沿不封闭线切断
剖切		将冲压加工成的半成品切开成为两个或多个零件

表 1.4 成形工序

工序名称	简图	特点及应用范围
弯曲		将板材沿直线弯成各种形状

续表

工序名称	简图	特点及应用范围
卷圆		将板材端部卷成接近封闭的圆头，用于加工类似铰链的零件
扭曲		将冲裁后的半成品扭转一定角度
拉深		将板材或空心毛坯拉成各种空心零件
变薄拉深		将拉深加工后的空心半成品进一步加工成底部厚度大于侧壁厚度的零件
翻边		将制件的孔边缘或外边缘沿曲线翻出竖立的直边
拉弯		在拉力与弯矩共同作用下实现弯曲变形
胀形		在双向拉应力作用下的变形，可成形各种空间曲面形状的零件
起伏		在板材毛坯或零件的表面上用局部成形的方法制成各种形状的突起与凹陷
扩口		在空心毛坯或管状毛坯的某个部位上使其径向尺寸扩大的变形方法
缩口		在空心毛坯或管状毛坯的某个部位上使其径向尺寸缩小的变形方法
旋压		毛坯在旋转状态下用辊轮使之逐步成形的方法
校形		为了提高已成形零件的尺寸精度或获得小的圆角半径而采用的成形方法
挤压		毛坯在强大的压力作用下，从模具间隙中挤出，产生断面减小的成形方法

## 2. 按基本变形方式分类

(1) 冲裁 使材料沿封闭或不封闭的轮廓剪裂而分离的冲压工序为冲裁, 如冲孔、落料、切口等。

(2) 弯曲 将材料弯成一定角度或形状的冲压工序称为弯曲, 如压弯、卷边、扭曲等。

(3) 拉深 将平板毛坯拉成空心件, 或将空心件的尺寸作进一步拉深的冲压工序, 称为拉深, 有不变薄拉深和变薄拉深。

(4) 成形 使材料产生局部变形, 以改变零件或毛坯形状的冲压工序称为成形, 如翻边、缩口等。

## 3. 按工序组合形式分类

(1) 简单工序 当零件批量不大、形状简单、精度要求不高、尺寸较大时, 在工艺上常采用工序分散的方案, 即在一副模具内只完成零件的一个工序, 此工序称为简单工序。

(2) 组合工序 当零件批量较大、尺寸较小、精度要求较高时, 在工艺上多采用工序集中的方案, 即将两种或两种以上的简单工序集中在一副模具内完成, 称为组合工序。根据工序组合的方法, 又可分为以下3类。

① 复合冲压: 在压力机的一次行程中, 在一副模具的同一位置上同时完成两种或两种以上的简单工序的冲压方法。

② 级进冲压: 在压力机的一次行程中, 在一副模具的不同位置上同时完成两种或两种以上的简单工序的冲压方法。级进冲压所完成的冲压工序依次分布在条料送进的方向上, 压力机每一行程条料送进一个步距, 同时冲压相应的工序。除最初几次冲程外, 以后每次冲程都可以完成一个零件。

③ 级进—复合冲压: 在一副模具内包括级进和复合冲压的组合工序。

级进冲压和级进—复合冲压是高效率的组合工序, 可使复杂零件在一副模具内冲压成形。在大批量生产中广泛采用。

此外, 在生产中也常用冷冲压方法使零件产生局部的塑性变形来进行装配, 此工序称为冷冲压装配工序, 如铆接、弯接、冷塑压焊接等。

# C 1.3 塑性变形的力学基础

金属塑性成形时, 外力通过模具或其他工具作用在坯料上, 使其内部产生应力, 并且发生塑性变形。由于外力的作用状况、坯料的尺寸与模具的形状千差万别, 从而引起材料内各点的应力与应变也各不相同。因此需要研究变形体内各点的应力状态、应变状态以及产生塑性变形时各应力之间的关系与应力应变之间的关系。

## 1.3.1 点的应力与应变状态

在变形物体上任意点取一个微量六面单元体, 该单元体上的应力状态可取其相互垂直表面上的应力来表示, 沿坐标方向可将这些应力分解为9个应力分量, 其中包括3个正应力和

6个切应力，如图 1.3.1 (a) 所示。相互垂直平面上的切应力互等， $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ， $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ ， $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ 。改变坐标方位，这 6 个应力分量的大小也跟着改变。对任何一种应力状态，总是存在这样一组坐标系，使得单元体各表面上只有正应力而无切应力，如图 1.3.1 (b) 所示。这 3 个坐标轴就称为应力主轴，3 个坐标轴的方向称为应力主方向，作用面称为应力主平面，其上的正应力即为主应力。

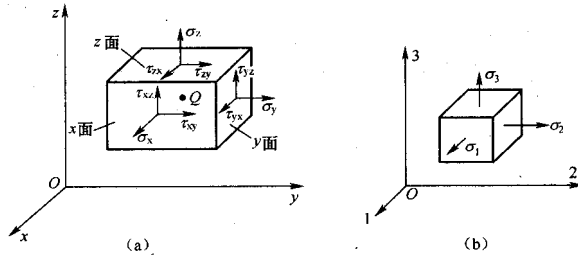


图 1.3.1 点的应力状态  
(a) 任意坐标系 (b) 主轴坐标系

3 个主方向上都有应力存在称为三向应力状态，如宽板弯曲变形。但大多数板料成形工艺，沿料厚方向的应力  $\sigma_t$  与其他两个互相垂直方向的主应力（如径向应力  $\sigma_r$  与切向应力  $\sigma_\theta$ ）相比较，往往很小，可以忽略不计，如拉深、翻孔和胀形变形等，这种应力状态称为平面应力状态。3 个主应力中只有一个有值，称为单向应力状态，如板料的内孔边缘和外形边缘处常常是自由表面， $\sigma_r$ 、 $\sigma_t$  为零。

与应力主平面成  $45^\circ$  截面上的切应力达到极值，称为主切应力。当  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  时，最大切应力为  $\tau_{max} = \pm(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ ，最大切应力与材料的塑性变形关系很大。

应变也具有与应力相同的表现形式。单元体上的应变也有正应变与切应变，当采用主轴坐标时，单元体 6 个面上只有 3 个主应变分量  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  和  $\epsilon_3$ ，而没有切应变分量。塑性变形时物体主要是发生形状的改变，体积变化很小，可忽略不计，即

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \tag{1.1}$$

式 (1.1) 为塑性变形体积不变定律。它反映了 3 个主应变值之间的相互关系。

### 1.3.2 屈服准则

当物体受单向应力作用时，只要其主应力达到材料的屈服极限，该点就进入塑性状态。而对于复杂的三向应力状态，就不能仅根据某一个应力分量来判断该点是否达到塑性状态，而要同时考虑其他应力分量的作用。只有当各个应力分量之间符合一定的关系时，该点才开始屈服，这种关系就称为屈服准则。

工程上经常采用屈服准则通式来判别变形状态：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_s \tag{1.2}$$

式中  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 、 $\sigma_s$ ——最大主应力、最小主应力和坯料的屈服应力；

$\beta$ ——应力状态系数，其值在 1.0~1.155 范围内。单向应力状态及轴对称应力状态（双向等拉、双向等压）时，取  $\beta=1.0$ ；平面变形状态时，取  $\beta=1.155$ 。在应力分量未知情况下， $\beta$ 可取近似平均值 1.1。

### 1.3.3 塑性变形时应力与应变的关系

物体在弹性变形阶段，应力与应变之间的关系是线性的，与加载历史无关。而塑性变形时应力应变关系则是非线性的、不可逆的，应力应变不能简单叠加，图 1.3.2 所示为材料单向拉伸应力应变曲线。塑性应力与应变增量之间的关系式，即增量理论，其表达式如下：

$$d\varepsilon_{ij} = \sigma'_{ij} d\lambda \quad (1.3)$$

其中， $d\lambda = \frac{3 d\bar{\varepsilon}}{2 \sigma_s}$ ，式 (1.3) 可以表达为

$$\frac{d\varepsilon_1}{\sigma_1} = \frac{d\varepsilon_2}{\sigma_2} = \frac{d\varepsilon_3}{\sigma_3} = \frac{d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = d\lambda \quad (1.4a)$$

如果在加载过程中，所有的应力分量均按同一比例增加，这种状况称为简单加载，在简单加载情况下，应力应变关系得到简化，得出全量理论公式，其表达式为

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1} = \frac{\varepsilon_2}{\sigma_2} = \frac{\varepsilon_3}{\sigma_3} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \lambda \quad (1.4b)$$

其中， $\lambda = \frac{3 \bar{\varepsilon}}{2 \sigma_s}$ 。

下面举两个简单的利用全量理论分析应力应变关系的例子。

(1)  $\varepsilon_2 = 0$  时，称平面应变，由式 (1.4b) 可得出

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \text{ 宽板弯曲属于这种情况。}$$

(2)  $\sigma_1 > 0$ ，且  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  时，材料受单向拉应力，

由式 (1.4b) 可得  $\varepsilon_1 > 0$ ， $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \frac{1}{2} \varepsilon_1$ ，即单向拉伸

时拉应力作用方向为伸长变形，其余两方向上的应变为压缩变形，且为拉伸变形之半，翻孔变形材料边缘属此类变形。

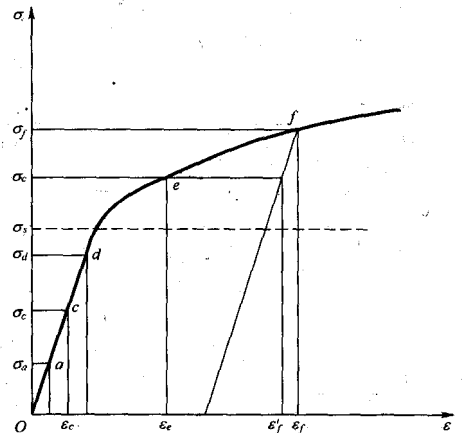


图 1.3.2 单向拉伸时的应力应变曲线

### 1.3.4 金属变形时硬化现象和硬化曲线

大部分冲压生产是在常温下进行的，材料在变形中会产生加工硬化，其结果是引起材料力学性能的变化，表现为材料的强度指标（屈服强度  $\sigma_s$  与抗拉强度  $\sigma_b$ ）随变形程度的增加而增加；塑性指标（伸长率  $\delta$  与断面收缩率  $\psi$ ）随之降低。加工硬化既有不利的方面，会使进一步变形变得困难；又有有利的方面，板料硬化能够减小过大的局部变形，使变形趋于均匀，增大成形极限，同时也提高了材料的强度。因此，在进行变形毛坯内各部分的应力分析和各种工艺参数的

确定时，必须考虑到加工硬化所产生的影响。

冷变形时材料的变形抗力随变形程度的变化情况可用硬化曲线表示。一般可用单向拉伸或压缩试验方法得到材料的硬化曲线。图 1.3.3 所示为几种常用冲压板材的硬化曲线。

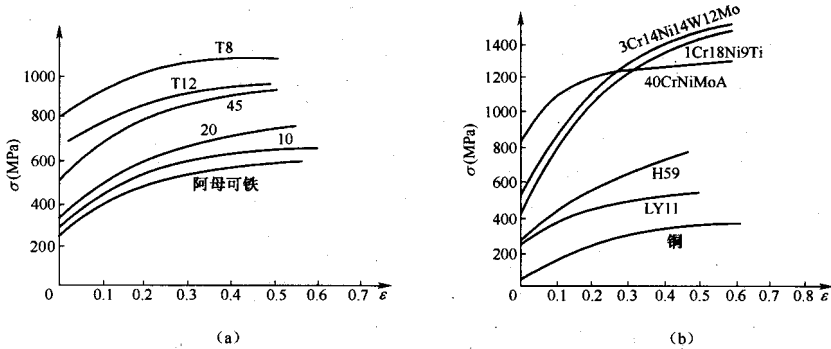


图 1.3.3 几种常用冲压板材的硬化曲线

为了使用方便，可将硬化曲线用数学函数式来表示。常用的数学函数的幂次式如下：

$$\sigma = K\varepsilon^n \tag{1.5}$$

式中  $K$ 、 $n$  均为材料常数， $n$  称为材料的硬化指数，是表明材料冷变形硬化性能的重要参数，部分冲压板材的  $n$  值和  $K$  值如表 1.5 所示。

表 1.5 部分板材的  $n$  值和  $K$  值

材 料	$n$	$K$ (MPa)	材 料	$n$	$K$ (MPa)
08F	0.185	708.76	H62	0.513	773.38
08Al (ZF)	0.252	553.47	H68	0.435	759.12
08Al (HF)	0.247	521.27	QSn6.5-0.1	0.492	864.49
10	0.215	583.84	Q235	0.236	630.27
20	0.166	709.06	SPCC (日本)	0.212	569.76
LF2	0.164	165.64	SPCD (日本)	0.249	497.63
LY12M	0.192	366.29	1Cr18Ni9Ti	0.347	1093.61
T2	0.455	538.37	L4M	0.286	112.43

### 1.3.5 各种冲压成形方法的力学特点与分类

正确的板料冲压成形工艺的分类方法，应该能够明确地反映出每一种类型成形工艺的共性，并在此基础上提供可能用共同的观点和方法分析、研究和解决每一类成形工艺中的各种实际问题的条件。在各种冲压成形工艺中毛坯变形区的应力状态和变形特点是制订工艺过程、设计模具和确定极限变形参数的主要依据，所以只有能够充分地反映出变形毛坯的受力与变形特点的分类方法，才可能真正具有实用的意义。

#### 1. 变形毛坯的分区

在冲压成形时，可以把变形毛坯分成变形区和不变形区。不变形区可能是已变形区或是尚未参与变形的待变形区，也可能是在全部冲压过程中都不参与变形的不变形区。当不变形



区受力的作用时,叫做传力区。图 1.3.4 中列出拉深、翻边、缩口时毛坯的变形区与不变形区的分布情况。

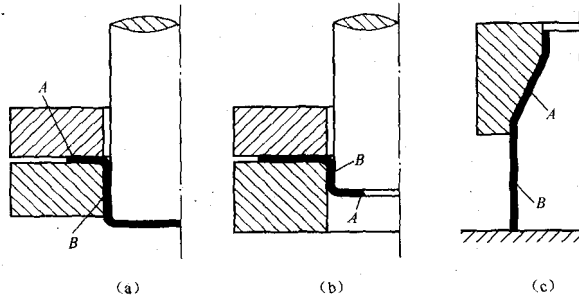


图 1.3.4 冲压变形毛坯各区划分举例  
A—变形区 B—传力区  
(a)拉深 (b)翻边 (c)缩口

## 2. 变形区的应力与应变特点

从本质上看各种冲压成形过程就是毛坯变形区在力的作用下产生变形的过程,所以毛坯变形区的受力情况和变形特点是决定各种冲压变形性质的主要依据。大多数冲压变形都是平面应力状态。一般在板料表面上不受力或受数值不大的力,所以可以认为在板厚方向上的应力数值为零。使毛坯变形区产生塑性变形均是在板料平面内相互垂直的两个主应力。除弯曲变形外,大多数情况下都可认为这两个主应力在厚度方向上的数值是不变的。因此,可以把冲压变形方式按毛坯变形区的受力情况和变形特点从变形力学理论的角度归纳为以下 4 种情况,并分别研究它们的变形特点。

(1) 冲压毛坯两向受拉应力的作用,可以分为以下两种情况:

$$\sigma_r > \sigma_\theta > 0, \sigma_t = 0$$

$$\sigma_\theta > \sigma_r > 0, \sigma_t = 0$$

相对应的变形是平板毛坯的局部胀形、内孔翻边、空心毛坯胀形等(见图 1.3.5 I 象限)。

这时由应力应变关系的全量理论可知,最大拉应力方向上的变形一定是伸长变形,应力为零的方向(一般为料厚方向)上的变形一定是压缩变形。因此,可以判断在两向拉应力作用下的变形,会产生材料变薄。在两个拉应力相等(双向等拉应力状态)时,  $\epsilon_\theta = \epsilon_r > 0$ ,  $\epsilon_t = -2\epsilon_\theta = -2\epsilon_r > 0$ , 厚向上的压缩变形是伸长变形的两倍,平板材料胀形时的中心部位就属于这种变形状况。

(2) 冲压毛坯受两向压应力的作用,可以分为下面两种情况:

$$\sigma_r < \sigma_\theta < 0, \sigma_t = 0$$

$$\sigma_\theta < \sigma_r < 0, \sigma_t = 0$$

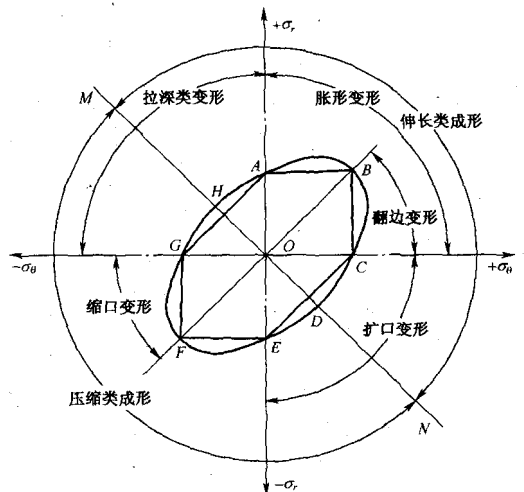


图 1.3.5 冲压应力图