



21 世纪高等学校机电类规划教材

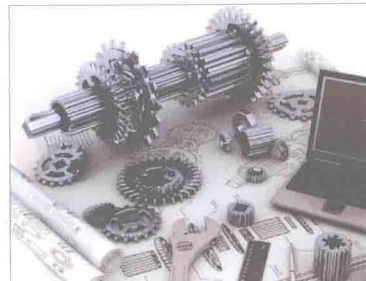
JIDIANLEI GUIHUA JIAOCAI



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 (第2版)

- ◆ 贾俐俐 主编
- ◆ 柯旭贵 副主编



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



21 世纪高等学校机电类规划教材

JIDIANLEI GUIHUA JIAOCAI



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 (第2版)

- ◆ 贾俐俐 主编
- ◆ 柯旭贵 副主编
- ◆ 高锦张 沈丽琴 康志军 编著

人民邮电出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

冲压工艺与模具设计 / 贾俐俐主编 ; 高锦张, 沈丽琴, 康志军编著. — 2版. — 北京 : 人民邮电出版社, 2016. 8

21世纪高等学校机电类规划教材
ISBN 978-7-115-42363-4

I. ①冲… II. ①贾… ②高… ③沈… ④康… III. ①冲压—生产工艺—高等学校—教材②冲模—设计—高等学校—教材 IV. ①TG38

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第142138号

内 容 提 要

本书共 8 章, 系统地介绍了冲压工艺与模具设计, 分别叙述了各类冲压工艺理论、工艺分析及计算、模具设计及设备的选用等内容。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级进模设计、其他成形工艺与模具设计、冷挤压工艺与模具设计及冲压模具设计方法与设计实例。书中对主要冲压方法, 均附有设计实例, 详细地介绍了各类模具的设计流程与设计方法, 并附有较为完整的模具总装图和模具零件图, 每章后还附有思考与练习题。

本书可作为高等学校材料成形及控制工程、模具设计与制造、机械设计制造及其自动化等专业的本科及高职高专、成人教育和助学自考的教材使用, 亦可作为从事冲压生产和科研工作的工程技术人员参考用书。

-
- ◆ 主 编 贾俐俐
 - 副 主 编 柯旭贵
 - 编 著 高锦张 沈丽琴 康志军
 - 责任编辑 张孟玮
 - 责任印制 沈 蓉 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 20.5 2016年8月第2版
字数: 504千字 2016年8月河北第1次印刷
-

定价: 52.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是根据普通本科和高职高专教育模具设计与制造专业、材料成形及控制工程专业的教学要求而编写的，可作为机械设计制造及其自动化专业的教学用书，并可供相关领域工程技术人员参考。

冲压技术在工业生产中应用很广泛，冲压模具是完成冲压工作不可缺少的工艺装备。本书在论述冲压成形理论基础及冲压工艺基础上，详细叙述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级进模设计、冷挤压工艺与模具设计及其他成形工艺与模具设计。

本书重点突出、内容精练，保证对重点内容讲精讲透，对一般内容则进行概述。在第1版的基础上补充了模具材料、冲压新技术的内容，并采用了最新的冲压模具标准。同时还增加了多工位级进冲压工艺与级进模设计、汽车覆盖件成形与模具设计的内容，以适应模具技术的新发展。通过学习本书，学习者既能熟练掌握冲压基本成形工艺与模具设计，又可对板料成形技术有全局的了解。

本书注重“即学即用”与学习方法的传授，以满足应用型人才培养需求。对主要冲压方法，在每章后面均附有一个设计实例，较为详细地介绍了各类模具的设计流程与设计方法，同时附有较为完整的模具总装图和模具零件图。每章的最后均附有思考与练习题，便于学生练习。

本书图例丰富、典型，配有大量典型结构的模具图形，对学习有很好的借鉴作用。

全书由贾俐俐任主编，柯旭贵任副主编。第1章、第3章的第5节和第6节、第4章、第6章的第1~4节由南京交通职业技术学院贾俐俐编写；第5章、第6章的第5节、第8章由南京工程学院柯旭贵编写；第7章由东南大学高锦张编写；第2章由南京交通职业技术学院沈丽琴编写；第3章第1~4节由淮阴工学院康志军编写。

本书由福建工程学院翁其金教授担任主审，南京交通职业技术学院唐妍、武艳军老师在第2版修订时提供了帮助，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中难免存在疏漏及不足之处，敬请读者批评指正。

编者

2016年5月

目 录

| | | | |
|------------------------|----|----------------------------|-----|
| 第 1 章 冲压工艺概述 | 1 | 2.2.3 冲裁件质量控制 | 31 |
| 1.1 冲压工艺的特点 | 1 | 2.3 冲裁工艺计算 | 32 |
| 1.2 冲压工艺的分类 | 2 | 2.3.1 排样设计 | 32 |
| 1.3 塑性变形的力学基础 | 5 | 2.3.2 冲裁工艺力与压力中心 计算 | 39 |
| 1.3.1 点的应力与应变状态 | 5 | 2.4 冲裁工艺设计 | 42 |
| 1.3.2 屈服准则(塑性条件) | 6 | 2.4.1 冲裁件的工艺性分析 | 42 |
| 1.3.3 塑性变形应力与应变的关系 | 6 | 2.4.2 冲裁工艺方案的确定 | 46 |
| 1.3.4 硬化现象和硬化曲线 | 7 | 2.5 冲裁模的基本类型与构造 | 48 |
| 1.4 冲压件材料 | 9 | 2.5.1 冲裁模的分类 | 48 |
| 1.4.1 冲压材料的工艺要求 | 9 | 2.5.2 冲裁模的典型结构 | 48 |
| 1.4.2 常用冲压材料 | 11 | 2.6 冲模主要零件的设计及标准的 选用 | 57 |
| 1.5 冲压设备 | 13 | 2.6.1 工作零件的设计与标准的 选用 | 57 |
| 1.5.1 冲压设备类型 | 13 | 2.6.2 定位零件的设计与标准的 选用 | 73 |
| 1.5.2 曲柄压力机 | 14 | 2.6.3 卸料及推件零件的设计与标准 的选用 | 79 |
| 1.6 冲模常用标准 | 18 | 2.6.4 固定与紧固零件的设计与标准 的选用 | 82 |
| 1.6.1 冲模标准化意义 | 18 | 2.6.5 导向零件的设计与标准的 选用 | 86 |
| 1.6.2 常用冲模标准 | 19 | 2.6.6 冲模零件的材料选用 | 87 |
| 1.7 冲压技术发展 | 20 | 2.7 冲裁模设计举例 | 88 |
| 1.7.1 冲压技术的现状 | 20 | 2.8 精密冲裁工艺与模具设计 | 95 |
| 1.7.2 冲压技术的发展趋势 | 23 | 2.8.1 精冲工艺设计 | 95 |
| 思考与练习题 | 25 | 2.8.2 精冲模具设计 | 98 |
| 第 2 章 冲裁工艺与模具设计 | 26 | 思考与练习题 | 102 |
| 2.1 冲裁变形过程分析 | 27 | | |
| 2.1.1 冲裁变形过程 | 27 | | |
| 2.1.2 材料受力分析 | 27 | | |
| 2.2 冲裁件质量分析及控制 | 28 | | |
| 2.2.1 冲裁件断面特征与影响 因素 | 28 | | |
| 2.2.2 冲裁件精度与影响因素 | 30 | | |

| | | | |
|-------------------------------|-----|-------------------------|-----|
| 第3章 弯曲工艺与模具设计 | 104 | 4.4 拉深工艺设计 | 176 |
| 3.1 弯曲变形过程分析 | 105 | 4.4.1 拉深工艺分析 | 176 |
| 3.1.1 弯曲变形过程 | 105 | 4.4.2 拉深工序安排 | 179 |
| 3.1.2 弯曲变形特点 | 106 | 4.5 拉深模具设计 | 179 |
| 3.1.3 弯曲变形区的应力应变 状态 | 107 | 4.5.1 拉深模类型及典型结构 | 179 |
| 3.2 弯曲件质量分析及控制 | 108 | 4.5.2 拉深模零件设计 | 181 |
| 3.2.1 弯裂与最小相对弯曲半径 | 108 | 4.6 拉深模设计举例 | 185 |
| 3.2.2 回弹 | 110 | 思考与练习题 | 191 |
| 3.2.3 偏移 | 115 | 第5章 多工位级进冲压工艺与级进模 设计 | 193 |
| 3.3 弯曲工艺计算 | 116 | 5.1 多工位级进模的排样设计 | 193 |
| 3.3.1 弯曲件毛坯尺寸的计算 | 116 | 5.1.1 毛坯排样 | 194 |
| 3.3.2 弯曲工艺力的计算 | 118 | 5.1.2 冲切刃口外形设计 | 195 |
| 3.4 弯曲工艺设计 | 119 | 5.1.3 工序排样 | 197 |
| 3.4.1 弯曲件工艺分析 | 119 | 5.2 多工位级进模典型结构 | 208 |
| 3.4.2 弯曲工序的安排 | 122 | 5.2.1 多工位级进冲裁模具 | 208 |
| 3.5 弯曲模具设计 | 123 | 5.2.2 冲裁弯曲多工位级进模 | 209 |
| 3.5.1 弯曲模类型与结构 | 123 | 5.2.3 冲裁拉深多工位级进模 | 212 |
| 3.5.2 弯曲模零件设计 | 134 | 5.2.4 落料复位成形多工位级 进模 | 213 |
| 3.6 弯曲模设计举例 | 138 | 5.3 多工位级进模主要零件设计 | 215 |
| 3.6.1 弯曲模的设计流程 | 138 | 5.3.1 工作零件设计 | 215 |
| 3.6.2 U形件弯曲模设计举例 | 138 | 5.3.2 定位零件设计 | 220 |
| 思考与练习题 | 144 | 5.3.3 卸料零件设计 | 222 |
| 第4章 拉深工艺与模具设计 | 145 | 5.3.4 固定零件设计 | 224 |
| 4.1 拉深变形过程分析 | 146 | 5.3.5 导向零件设计 | 224 |
| 4.1.1 拉深变形过程及特点 | 146 | 5.3.6 冲压方向转换机构设计 | 225 |
| 4.1.2 拉深过程中坯料应力和应变 状态 | 147 | 5.3.7 安全检测机构设计 | 226 |
| 4.2 拉深件质量分析及控制 | 150 | 5.4 多工位级进模的图样绘制 | 227 |
| 4.2.1 起皱 | 150 | 5.4.1 装配图的绘制要求 | 227 |
| 4.2.2 拉裂 | 151 | 5.4.2 零件图的绘制要求 | 227 |
| 4.3 拉深工艺计算 | 152 | 思考与练习题 | 230 |
| 4.3.1 直壁旋转体零件拉深工艺 计算 | 152 | 第6章 其他成形工艺与模具设计 | 231 |
| 4.3.2 非直壁旋转体零件拉深成形 特点及拉深方法 | 164 | 6.1 翻边 | 231 |
| 4.3.3 盒形件的拉深工艺计算 | 168 | 6.1.1 圆孔翻边 | 232 |
| 4.3.4 拉深工艺力计算及设备 选用 | 172 | 6.1.2 外缘翻边 | 236 |
| | | 6.1.3 非圆孔翻边 | 239 |
| | | 6.1.4 变薄翻边 | 240 |
| | | 6.2 缩口 | 240 |

| | | | |
|-----------------------|-----|-----------------------------|-----|
| 6.2.1 缩口的变形过程 | 240 | 7.3.4 冷挤压力机的选用 | 278 |
| 6.2.2 缩口系数 | 241 | 7.4 冷挤压的工艺设计 | 279 |
| 6.2.3 缩口时管坯的尺寸计算 | 242 | 7.4.1 冷挤压件的结构工艺性分析 | 279 |
| 6.2.4 缩口力的计算 | 243 | 7.4.2 冷挤压工艺方案的制订 | 281 |
| 6.2.5 缩口模结构 | 243 | 7.4.3 不同冷锻工序的一次成形范围 | 282 |
| 6.3 旋压 | 243 | 7.5 冷挤压模具设计 | 284 |
| 6.3.1 普通旋压 | 244 | 7.5.1 典型冷挤压模具结构 | 284 |
| 6.3.2 变薄旋压 | 244 | 7.5.2 冷挤压凸模、凹模结构设计 | 286 |
| 6.4 胀形 | 246 | 7.5.3 预应力组合凹模的设计 | 287 |
| 6.4.1 胀形变形特点及成形极限 | 247 | 7.6 冷挤压设计实例 | 290 |
| 6.4.2 平板毛坯的起伏成形 | 247 | 思考与练习题 | 297 |
| 6.4.3 空心毛坯的胀形 | 250 | 第8章 冲压工艺和模具设计方法与设计实例 | 298 |
| 6.4.4 胀形模设计举例 | 252 | 8.1 冲压工艺设计的主要内容和步骤 | 298 |
| 6.5 覆盖件成形工艺与模具 | 254 | 8.1.1 冲压工艺设计前的原始资料 | 298 |
| 6.5.1 覆盖件的工艺数学模型 | 254 | 8.1.2 冲压工艺设计的一般步骤及内容 | 298 |
| 6.5.2 覆盖件拉延工艺与模具 | 258 | 8.2 冲压模具设计方法与步骤 | 302 |
| 6.5.3 覆盖件修边工艺与模具 | 261 | 8.2.1 模具类型及结构形式的确定 | 302 |
| 6.5.4 覆盖件翻边工艺与模具 | 263 | 8.2.2 模具零件的设计及标准的选用 | 303 |
| 思考与练习题 | 265 | 8.2.3 模具总装配图的内容及绘制要求 | 303 |
| 第7章 冷挤压工艺与模具设计 | 266 | 8.2.4 模具零件图绘制 | 305 |
| 7.1 冷挤压工艺分类及冷挤压金属变形特点 | 266 | 8.2.5 设计说明书的编写 | 306 |
| 7.1.1 冷挤压工艺分类 | 266 | 8.3 冲压模具材料及热处理 | 306 |
| 7.1.2 冷挤压的变形分析 | 267 | 8.4 冲压工艺与模具设计举例 | 308 |
| 7.1.3 挤压变形程度 | 269 | 思考与练习题 | 320 |
| 7.2 冷挤压原材料与毛坯的准备 | 270 | 参考文献 | 321 |
| 7.2.1 冷挤压原材料 | 270 | | |
| 7.2.2 冷挤压毛坯的形状及尺寸 | 271 | | |
| 7.2.3 冷挤压毛坯的加工方法 | 271 | | |
| 7.2.4 冷挤压毛坯的软化和表面处理 | 272 | | |
| 7.3 冷挤压力 | 273 | | |
| 7.3.1 冷挤压力-行程曲线 | 273 | | |
| 7.3.2 影响挤压力的主要因素 | 273 | | |
| 7.3.3 冷挤压力的确定 | 275 | | |

冲压是金属塑性成形的的基本方法之一，它是利用冲模在压力机上对金属（或非金属）板材、带材等施加压力使之产生塑性变形或使其分离，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。冲压应用很广，图 1.1 所示为冲压应用举例。

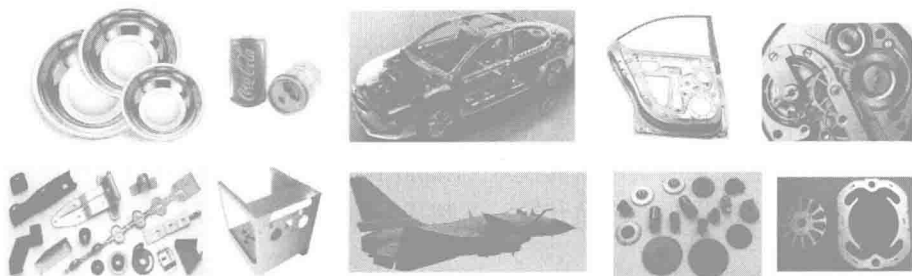


图 1.1 冲压应用举例

冲压是金属塑性变形的的基本形式之一，与锻造合称为锻压。由于通常是在常温（冷态）下进行的，所以冲压又称冷冲压，又由于它主要用于加工板料零件，所以有时也叫板料冲压。冲压加工的三要素是设备（压力机）、模具、原材料，如图 1.2 所示。

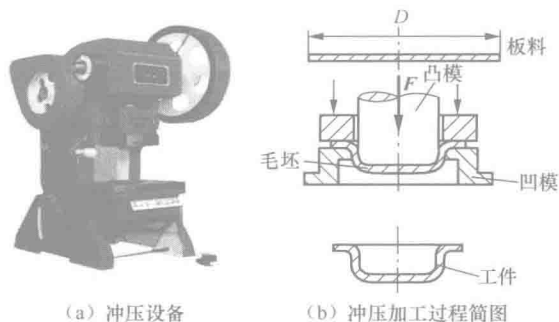


图 1.2 冲压加工三要素

1.1 冲压工艺的特点

冲压是一种先进的金属加工方法，与其他加工方法（切削）比较，在技术上、经济上有

许多优点。

(1) 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、上千次。同时, 毛坯和零件形状规则。

(2) 操作简单。在压力机简单冲压下, 能得到形状复杂的零件, 便于实现机械化和自动化, 操作简单, 对工人的技术等级要求不高。

(3) 产品精度高。冲压件的质量主要靠冲模保证, 制得的零件一般不进一步加工, 可直接用来装配, 具有互换性。

(4) 材料利用率高。普通冲压材料利用率可达 70%~85%, 有的高达 95%。

(5) 冲压属于塑性变形, 变形中金属产生加工硬化, 可得到质量轻、刚性好、强度高的零件。

(6) 批量越大, 产品的成本越低。

因此, 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、兵器等制造业中得到广泛的应用。

冲压存在的不足之处有: 对于批量较小的制件, 模具费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; 冲压工艺尤其是冲裁存在很大的噪声和振动, 劳动保护措施不到位时, 还存在安全隐患。

随着材料技术和加工制造技术的发展, 使板料加工几乎不受模具制造成本和周期的影响, 如由快速成形技术发展而来的快速模具技术 (Rapid Tooling)、低熔点合金制模技术等具有周期短、成本低等特点, 适用于新产品开发、试制及多品种小批量生产。数控增量成形可实现板料的无模成形。

钢带和钢板约占钢材的 67%, 其中大部分都是经过冲压来进行加工的。各类产品中冲压加工零件所占比例见表 1.1。

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 |


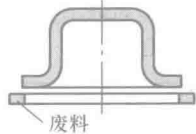
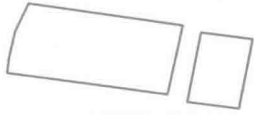
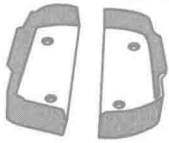
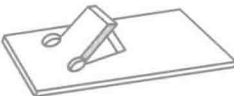
1.2 冲压工艺的分类

由于各种冲压零件形状形态各异, 所以采用的冲压加工方法种类很多。通常可按下述方法分类。

1. 按变形性质分类


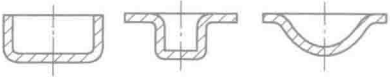

(1) 分离工序。坯料的一部分与另一部分沿一定的轮廓线发生断裂而分离, 从而形成一定形状和尺寸的零件。分离工序主要包括落料、冲孔、切边、切断、剖切等, 见表 1.2。

表 1.2 分离工序

| 工序名称 | 简图 | 特点 |
|------|---|-----------------------------------|
| 落料 |  | 沿封闭轮廓线冲切，冲下部分是零件 |
| 冲孔 |  | 沿封闭轮廓线冲切，冲下部分是废料 |
| 切边 |  | 切去成形零件多余的边缘材料，使边缘呈一定形状 |
| 切断 |  | 沿不封闭轮廓切断，使板料分离 |
| 剖切 |  | 将半成品切开成为两个或多个零件，多用于不对称零件成组冲压之后的分离 |
| 切舌 |  | 沿三边冲切，保持一边和板料相连 |

(2) 成形工序。坯料在外力作用下产生塑性变形，获得一定形状和尺寸的零件。成形工序主要包括弯曲、拉深、翻边、胀形等，见表 1.3。

表 1.3 成形工序

| 工序名称 | 简图 | 特点 |
|------|---|-----------------------|
| 弯曲 |  | 沿直线弯成一定的角度和形状 |
| 拉深 |  | 将板材毛坯拉成各种空心零件 |
| 变薄拉深 |  | 将空心毛坯加工成底部厚度大于侧壁厚度的零件 |

续表

| 工序名称 | 简 图 | 特 点 |
|-----------|---|--------------------------------|
| 翻边 |  | 沿曲线将孔边缘或外边缘翻出竖立或一定角度的直边 |
| 卷边 |  | 将板材端部卷成接近封闭的圆头 |
| 胀形 |  | 空心毛坯在双向拉应力作用下的变形 |
| 压筋 压凸包 |  | 在板材毛坯或零件的表面上压制各种筋或凸包 |
| 扩口 |  | 使空心毛坯局部径向尺寸扩大 |
| 缩口 |  | 使空心毛坯的局部径向尺寸缩小 |
| 旋压 |  | 毛坯在旋转状态下逐步成形的方法 |
| 挤压 |  | 毛坯在强力作用下, 从模具间隙中挤出, 使断面减小的成形方法 |
| 拉弯 |  | 在拉力与弯矩共同作用下实现弯曲变形 |

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, 如冲孔、落料等。
- (2) 弯曲。将材料弯成一定角度或形状的冲压工序, 如压弯、卷边等。
- (3) 拉深。将平板毛坯拉成空心件, 或将空心件的尺寸做进一步改变的冲压工序。
- (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, 如翻边、缩口等。

3. 按工序组合形式分类

(1) 单工序冲压: 在压力机的一次行程中, 只能完成一道冲压工序。如图 1.3 (a) 所示的工件, 需要采用落料和冲孔两道基本工序来完成。若采用单工序冲压, 需要在落料、冲孔两副模具上分别完成, 如图 1.3 (b) 所示, 完成图示的工件冲压需要两副模具。

(2) 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冲压工序的单工位冲压方法, 如图 1.3 (c) 所示。此时只需一副模具, 只有一个工位。

(3) 级进冲压: 在压力机的一次行程中, 在一副模具上, 沿送料方向上连续排列的多个工位上同时完成多道冲压工序的冲压方法。如图 1.3 (d) 所示, 此时只需一副模具, 有两个工位, 在第 1 工位上完成冲孔, 在第 2 工位上完成落料。多个工位中心之间的距离叫步距, 压力机每一行程条料送进一个步距, 除最初几次冲程外, 以后每次冲程都可以完成一个零件。

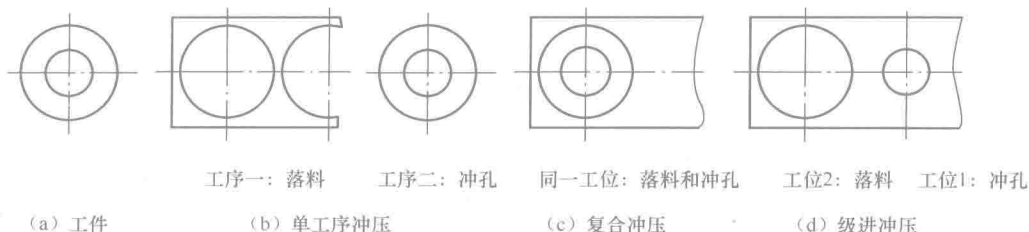


图 1.3 工序组合举例

零件批量不大、形状简单、精度要求不高、尺寸较大时, 常采用单工序。零件批量较大、尺寸较小、精度要求高时, 多采用组合工序, 即复合冲压或级进冲压。在同一副模具内包括级进冲压和复合冲压的组合工序时称级进-复合冲压工序。在生产中也常用冲压方法使零件产生局部的塑性变形来进行装配, 此工序称为冲压装配工序, 如铆接、弯接、塑压焊接等。

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 1.4 (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 1.4 (b) 所示。这 3 个坐标轴就称为应力主轴, 3 个坐标轴的方向称主方向, 作用面称为主平面, 其上的正应力即主应力。

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 σ_r 与其他两个互相垂直方向的主应力 (如径向应力 σ_r 与切向应力 σ_θ) 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时, 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, σ_r 、 σ_t 为零。

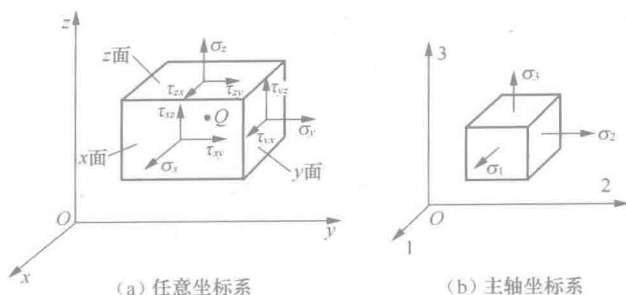


图 1.4 点的应力状态

与主平面成 45° 截面上的切应力达到极值时, 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 ε_1 、 ε_2 和 ε_3 , 而没有切应变分量。塑性变形时, 物体主要发生形状的改变, 体积变化很小, 可忽略不计, 即

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (1.1)$$

此即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。根据体积不变定律可知: 塑性变形时只可能有三向应变状态和平面应变状态, 而不可能有单向应变状态。在平面应变状态时 (若 $\varepsilon_2=0$), 另外两个应变的绝对值必然相等, 而符号相反。

1.3.2 屈服准则 (塑性条件)

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, 这种关系就称为塑性条件, 或称屈服准则。

工程上经常采用屈服准则通式来判别变形状态:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_s \quad (1.2)$$

式中, σ_1 、 σ_3 、 σ_s 分别为最大、最小主应力、坯料的屈服应力。 β 为应力状态系数, 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, β 可取近似平均值 1.1。

1.3.3 塑性变形应力与应变的关系

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 1.5 所示为材料单向拉伸时应力应变曲线。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, $d\lambda = \frac{3 d\bar{\varepsilon}}{2 \sigma_s}$, 上式可以表达为

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

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 $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ 。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，且变形量为拉伸变形的 $\frac{1}{2}$ ，翻孔变形材料边缘属此类变形。

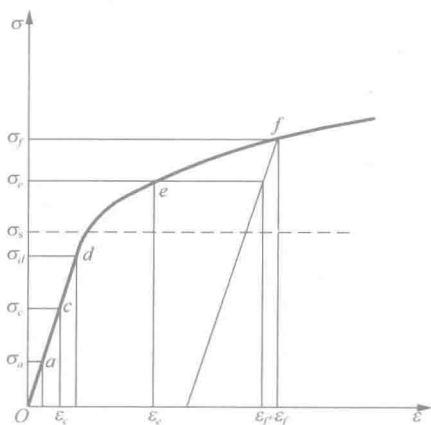


图 1.5 单向拉伸时的应力应变曲线

1.3.4 硬化现象和硬化曲线

金属材料在常温下塑性变形的重要特点之一是加工硬化，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 σ_s 与抗拉强度 σ_b ）随变形程度的增加而增加；塑性指标（伸长率 δ 与断面收缩率 ψ ）随变形程度的增加而降低。加工硬化既有不利的方面——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，在进行变形应力分析和确定各种工艺参数时，应考虑加工硬化的影响。

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 1.6 所示为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:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1.5)$$

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 K 、 n 值列入表 1.4 中。

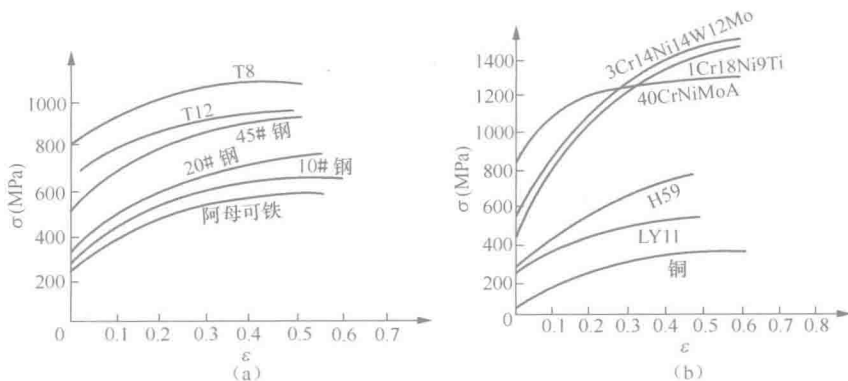


图 1.6 几种常用冲压板材的硬化曲线

表 1.4 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#钢 | 0.215 | 583.84 | Q235 | 0.236 | 630.27 |
| 20#钢 | 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 |

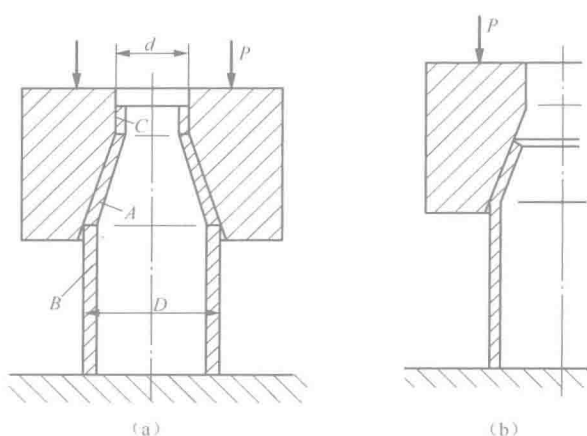


图 1.7 变形趋向性对冲压工艺的影响
A—变形区 B—传力区 C—已变形区

冲压变形的趋向性: 冲压毛坯的多个部位都有变形的可能时, 变形在阻力最小的部位进行, 即“弱区必先变形”。

下面以缩口为例加以分析(见图 1.7)。缩口时坯料可分为 3 个区域。在外力作用下, A 、 B 两区都有可能发生变形, A 区可能会发生缩口塑性变形; B 区可能会发生墩粗变形, 这两个区域总有一个需要比较小的塑性变形力, 并首先进入塑性状态, 产生塑性变形。因此, 可以认为这个区域是个相对的弱区。为了保证冲压过程的顺利进行, 必须保证应该变形的部分——变形区成为弱区, 以便在把塑性变形局限于

变形区的同时,排除传力区产生任何不必要的塑性变形的可能。

“弱区必先变形,变形区应为弱区”的结论,在冲压生产中具有很重要的实用意义,例如,有些冲压工艺的极限变形参数(拉深系数、缩口系数等)的确定,复杂形状零件的冲压工艺过程设计等,都是以这个道理作为分析和计算的依据。

下面仍以缩口为例来说明这个道理。在图 1.7 所示的缩口过程中,变形区 A 和传力区 B 的交界面上作用有数值相等的压应力 σ ,传力区 B 产生塑性变形的方式是墩粗,其变形所需要的压应力为 σ_s ,所以传力区不致产生墩粗变形的条件是

$$\sigma < \sigma_s \quad (1.6)$$

变形区 A 产生的塑性变形方式为切向收缩的缩口,所需要的轴向压应力为 σ_k ,所以变形区产生缩口变形的条件是

$$\sigma \geq \sigma_k \quad (1.7)$$

由式(1.6)与式(1.7)可以得出在保证传力区不致产生塑性变形的条件下能够进行缩口的条件是

$$\sigma_k < \sigma_s \quad (1.8)$$

因为 σ_k 的数值决定于缩口系数 d/D ,所以式(1.8)就成为确定极限缩口系数的依据。极限拉深系数的确定方法,也与此相类似。

此外,在设计工艺过程、选定工艺方案、确定工序和工序间尺寸时,也必须遵循“弱区必先变形,变形区应为弱区”的道理。

1.4 冲压件材料

冲压材料是冲压加工三要素之一,材料选择合理与否,直接影响到冲压产品的性能、质量、成本,还会影响到冲压工艺过程及后续加工,因此合理选材十分重要。

冲压所用材料,需要满足两方面要求,即产品的性能要求和冲压工艺及冲压后的加工要求,如切削加工、电镀、焊接等。对冲压材料的基本要求如下。

(1) 满足使用性能要求。冲压件应具有一定的强度、刚度、冲击韧性等力学性能要求。此外,有的冲压件还有一些物理、化学等方面的特殊要求,如电磁性、耐腐蚀性、传热性和耐热性等。

(2) 满足冲压工艺要求。冲压加工属于塑性变形,要求材料具有良好的塑性,较低的变形抗力等。

1.4.1 冲压材料的工艺要求

冲压材料的工艺要求主要体现在材料的冲压成形性能、化学成分及组织、厚度及公差、表面质量等方面。

1. 冲压成形性能

材料对冲压成形工艺的适应能力称为板料的冲压成形性能。材料的冲压成形性能好,是指其便于冲压加工,能用较少的工序、较简单的模具、较长的模具寿命得到高质量的冲压件。

影响冲压成形性能的因素很多。主要体现为抗破裂性、贴模性和定形性等方面。

(1) 抗破裂性, 是指金属板料在冲压成形过程中抵抗破裂的能力, 反映的是各种冲压成形工艺可达到的最大变形程度, 即成形极限。

各种成形工艺都有其成形极限指标。GB15825.1—2008 规定了薄板冲压的胀形性能、拉深性能、扩孔(内孔翻边)性能、弯曲性能和复合成形性能指标。

(2) 贴模性, 是指板料在冲压过程中取得与模具形状保持一致的能力。成形过程中发生的起皱、塌陷等缺陷, 均会降低零件的贴模性。影响贴膜性的因素很多, 如板料屈服极限、厚向异性指数、工件形状、模具结构等。

(3) 定形性, 是指零件脱模后保持其在模内既得形状的能力。影响定形性的主要因素是回弹, 它主要受材料的屈服极限、硬化指数、弹性模量、工件形状、模具结构等的影响。

板料的贴模性和定形性是决定零件形状和尺寸精度的重要因素。但由于材料抗破裂性差, 会导致零件破裂, 因此, 生产中主要用抗破裂性作为评定板料冲压成形性能的指标。

2. 对力学性能的要求

板料力学性能指标与板料冲压性能有密切关系。一般来说, 板料的强度指标越高, 产生相同变形量所需的力就越大; 塑性指标越高, 成形时所能承受的极限变形量就越大; 刚性指标越高, 成形时抗失稳起皱的能力就越大。对冲压成形性能影响较大的力学性能指标有以下几项。

(1) 屈服极限 σ_s 。 σ_s 小, 材料容易屈服, 则变形抗力小, 易于变形而不易出现受压起皱现象, 且弯曲变形时回弹小, 即贴模性与定形性均好。

(2) 屈强比 σ_s/σ_b 。它是屈服极限 σ_s 与强度极限 σ_b 的比值, 其值小, 即 σ_s 小而 σ_b 大, 则材料容易产生塑性变形而不易产生拉裂。如对拉深变形, σ_s/σ_b 小时, 凸缘区的材料易于变形, 而传力区的材料又因较高强度而不易被拉裂, 有助于提高拉深变形程度。

(3) 伸长率 δ 和均匀伸长率 δ_0 。这是塑性变形能力的主要指标。 δ 是拉伸实验中试样拉断时的伸长率。 δ_0 是开始产生缩颈时的伸长率, 表示板料产生均匀的或稳定的塑性变形的能力。翻孔变形程度与 δ_0 成正比。

(4) 弹性模量 E 。它是材料的刚度指标。其值大, 抗压失稳能力强, 卸载后弹性恢复小, 材料的定形性好, 有利于提高零件尺寸精度。

(5) 硬化指数 n 。它表示在塑性变形中材料的硬化程度。 n 值大, 说明在变形中材料加工硬化严重。板料拉伸时, 先是产生均匀变形, 然后出现局部变形, 形成缩颈, 最后被拉断。拉伸过程中, 一方面材料因断面尺寸减小使变形抗力减小, 另一方面因加工硬化使变形抗力提高。变形总是遵循阻力最小定律, 既弱区先变形, 变形区不断转移, 在宏观上就表现为均匀变形。开始时硬化作用是主要的, 变形到一定时刻, 断面减小的影响相对变大, 于是局部变形开始, 发展为缩颈、断裂。因此, 对伸长类变形如胀形, n 值大时变形均匀, 不易变薄, 零件不易产生裂纹。

(6) 塑性应变比 r 。板料单向拉伸时, 宽向真实应变 ϵ_b 与厚向真实应变 ϵ_t 之比 $r = \epsilon_b/\epsilon_t$ 。它反映板料抵抗变薄或变厚的能力。 r 值越大, 表示板料越不易在厚度方向上产生变形, 即不易出现变薄或增厚, 有助于提高拉深变形程度。

(7) 各向异性系数 Δr 。板料在不同方位上塑性应变比不同, 造成板平面内各向异性。各