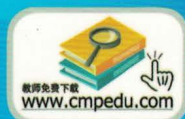


普通高等教育应用型本科规划教材

# 冲压工艺 与模具设计

成虹◎主编



配套电子课件  
习题参考答案

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育应用型本科规划教材

# 冲压工艺与模具设计

主 编 成 虹

副主编 慕 东 胡志华

参 编 江秉华 谢 建



机械工业出版社

本书是普通高等教育应用型本科规划教材。全书除绪论外共分9章。内容包括：冲压变形的基本原理；冲裁、弯曲、拉深、其他成形工艺及模具设计；多工位精密级进冲压工艺及模具设计；汽车覆盖件成形工艺及模具设计；特殊冲压成形技术；冲压工艺规程的编制等。本书在内容上注重理论联系实际，案例主要取自模具生产和使用企业，所选案例、标准、数据资料新，具有较强的实用性。

为了便于教师的教学和读者的学习，每章后均有与课程内容紧密相关的习题与思考题，在附录中还提供有本课程建议的教学指南。

本书是大学应用型本科材料成型及控制工程专业（模具方向）的教学用书，也可供机械制造类其他专业使用，还可供从事模具设计与制造的有关工程技术人员和自学者参考。

本书配套有电子课件和习题参考答案，凡选用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教育服务网 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册后免费下载。咨询电话：010-88379375。咨询邮箱：[cmpgaozhi@sina.com](mailto:cmpgaozhi@sina.com)。

## 图书在版编目（CIP）数据

冲压工艺与模具设计/成虹主编. —北京：机械工业出版社，2017.8  
普通高等教育应用型本科规划教材  
ISBN 978-7-111-57183-4

I. ①冲… II. ①成… III. ①冲压-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（2017）第169130号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）  
策划编辑：于奇慧 责任编辑：于奇慧 责任校对：樊钟英  
封面设计：马精明 责任印制：李 昂  
河北鑫兆源印刷有限公司印刷  
2017年8月第1版第1次印刷  
184mm×260mm·20.75印张·509千字  
0001—1900册  
标准书号：ISBN 978-7-111-57183-4  
定价：49.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

# 前 言



本书是根据普通高等教育应用型本科材料成型及控制工程专业（模具方向）的教学计划和“冲压工艺与模具设计”课程教学大纲编写的，是应用型本科材料成型及控制工程专业的教学用书。

模具作为特殊的工艺装备，在现代制造业中越来越重要。从人们日常生活中接触到的汽车、手表、手机、各种电器产品，到装备制造、国防军工产品，都离不开模具成形加工零件。模具质量的高低决定着产品质量的高低。

冲压技术是在工业生产中应用极为广泛的材料成形技术。特别是随着《中国制造 2025》向制造强国推进的战略实施，传统的冲压生产工艺，冲压模具设计的方法、典型结构、设计参数，已不能满足技术发展的需要。本书收集了近年来国内外冲压工艺及模具在实际应用的成熟技术和科研成果，吸收了国外的先进技术、资料、标准与方法，力求既适应当前我国国情又能与国际接轨，满足冲压技术转型升级发展的要求。

全书除绪论外共分 9 章。第 1 章为冲压变形的基本原理。该章介绍了金属塑性变形的基本概念，变形毛坯的力学特点、应力与应变之间的关系，板料冲压成形性能和常用的冲压材料。第 2 章至第 5 章分别介绍冲裁、弯曲、拉深及其他冲压成形工艺，叙述了这些基本成形工艺的变形特点及在生产中的应用；讲述了其工艺计算、工艺设计、模具结构设计、模具材料等技术问题。第 6 章为多工位精密级进冲压工艺及模具设计。多工位精密级进模是近年来冲压工艺及冲压模具发展较快的一种高效率、高精度、低成本的冲压生产方式，广泛地应用于大批量生产的电子电器产品零件和汽车各种钣金零件冲压生产。该章较详细地叙述了多工位精密级进模排样设计方法，凸模、凹模的设计要点和技术要求，各种使用在多工位级进模中的机构或装置、安全保护措施和级进模结构设计。第 7 章为汽车覆盖件成形工艺及模具设计。该章简要介绍了大型覆盖件冲压成形的特点、覆盖件冲压成形工艺设计、覆盖件成形模具的典型结构和主要零件设计要点。第 8 章为特殊冲压成形技术。该章针对汽车轻量化技术的要求，介绍了目前汽车零部件生产应用的热冲压成形和内高压成形技术。第 9 章为冲压工艺规程的编制，介绍了其主要内容和编制步骤。

全书的各章既相互独立又相互联系，既有理论分析又结合生产实际，书中选编了一些典型设计案例。本书内容力求适应应用型本科教学要求，注重学习者工程能力的培养。

本书由成都工业学院成虹担任主编，并编写绪论及第 6、8、9 章；慕东编写第 4、5 章；胡志华编写第 2 章；江秉华编写第 1、7 章；谢建编写第 3 章。成都宏明双新科技股份有限公司、重庆平伟科技集团为本书提供了大量的生产案例。

本书在编写过程中，得到了机械工业出版社的大力支持和帮助，参考了一些兄弟院校的反馈意见，在此表示诚挚的感谢。同时还应感谢所引用文献的作者，他们辛勤研究的成果为本书增色不少。

由于编者的学识水平有限，疏漏与错误之处在所难免，敬请读者不吝赐教，并致以衷心的感谢。

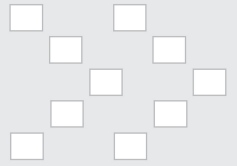
编 者

· III ·

# 目 录

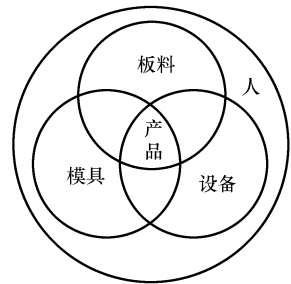


前言	
绪论	1
0.1 冲压加工的工艺、模具、设备和材料	1
0.2 冲压加工的特点及其应用	1
0.3 冲压工艺的分类	2
0.4 冲压技术的发展	5
0.5 学习要求和学习方法	6
第1章 冲压变形的基本原理	7
1.1 金属塑性变形的基本概念	7
1.2 金属塑性变形的力学基础	11
1.3 冲压成形时毛坯的力学特点与分类	18
1.4 板料冲压成形性能及冲压材料	22
习题与思考题	27
第2章 冲裁工艺与冲裁模设计	28
2.1 冲裁变形分析	29
2.2 冲裁模具的间隙	32
2.3 冲裁模刃口尺寸的计算	36
2.4 冲压力和压力中心的计算	42
2.5 冲裁件在材料上的排样设计	45
2.6 冲裁工艺设计	49
2.7 冲裁模的结构设计	55
2.8 冲裁模主要零部件的结构设计与标准 选用	64
2.9 精密冲裁工艺与精冲模简介	83
习题与思考题	98
第3章 弯曲工艺与弯曲模设计	99
3.1 弯曲变形过程分析	100
3.2 弯曲卸载后弯曲件的回弹	103
3.3 弯曲成形工艺设计	108
3.4 弯曲模的典型结构设计	118
习题与思考题	126
第4章 拉深工艺与拉深模设计	127
4.1 拉深变形过程分析	128
4.2 直壁旋转体零件拉深	135
4.3 轴对称曲面旋转体零件拉深	147
4.4 盒形零件拉深	151
4.5 拉深工艺设计	156
4.6 拉深成形模具设计	160
4.7 其他拉深方法	167
习题与思考题	171
第5章 其他成形工艺与模具设计	172
5.1 胀形	172
5.2 翻边	178
5.3 缩口	184
5.4 旋压	187
习题与思考题	189
第6章 多工位精密级进冲压工艺与 模具设计	190
6.1 多工位精密级进冲压工艺的特点与 应用	190
6.2 多工位精密级进冲压工艺排样设计	192
6.3 多工位精密级进模主要零部件的 设计	208
6.4 多工位精密级进模的安全保护	239
6.5 多工位精密级进模自动送料装置	245
6.6 多工位精密级进模案例分析	251
习题与思考题	263
第7章 汽车覆盖件成形工艺与 模具设计	264
7.1 覆盖件的结构特征与成形特点	265
7.2 覆盖件冲压工艺设计	268
7.3 覆盖件模具的典型结构和主要零件 设计	274
习题与思考题	292
第8章 特殊冲压成形技术	293
8.1 热冲压成形技术	293
8.2 液压成形技术	297
习题与思考题	305
第9章 冲压工艺规程的编制	306
9.1 冲压工艺规程编制的主要内容和 步骤	306
9.2 典型冲压件冲压工艺设计实例	314
习题与思考题	318
附录	320
附录A 几种常用的冲压设备规格	320
附录B 冲压模具零件的常用公差配合及 表面粗糙度	321
附录C 中外主要模具用材料对照表	322
附录D 冲压工艺与模具设计课程教学 指南	323
参考文献	326



# 绪 论

冲压加工是利用安装在压力机上的模具，对放置在模里的板料施加变形力，使板料在模具里产生变形，从而获得一定形状、尺寸和性能的产品零件的生产技术。由于冲压加工常在室温下进行，因此也称冷冲压。冲压成形是金属压力加工方法之一，它是建立在金属塑性变形理论基础上的材料成形工程技术，冲压加工的原材料一般为板料或带料，故也称板料冲压。冲压工艺是指冲压加工的具体方法（各种冲压工序的总和）和技术经验；冲压模具是指将板料加工成冲压零件的特殊工艺装备。



板料、模具和冲压设备是构成冲压加工的三个必备要素，如图 0-1 所示。

图 0-1 冲压加工的三个必备要素

## 0.1 冲压加工的工艺、模具、设备和材料

冲压工艺可分解为冲裁、弯曲、拉深、翻边、胀形、局部成形等基本工序，形状复杂的冲压件往往需要通过多道单工序或组合工序顺序加工完成。冲压工艺是研究如何根据零件的材料性能、形状特点、技术要求和成形规律，制订既经济又科学的工艺方案。

冲压模具是执行冲压加工的特殊工艺装备。根据工序的组合方式，可以分为单工序模、复合模、级进模；根据不同的用途和要求，又可以分为普通冲模、简易冲模、精密冲模、高效自动冲模（多工位级进模、多工位传递模等）、高寿命冲模（如硬质合金模）等。冲压模具结构方案的选择和模具设计，必须综合考虑冲压件的生产批量、技术要求、生产条件和经济成本等要素。

冲压设备是为安装在其上的模具提供执行冲压加工的运动和动力的设备。常用的有：机械压力机（冲床）、摩擦压力机、液压（压力）机（适用于中、小批量生产中的大型厚板件的成形工序）、高速压力机（适用于大批量生产的冲压件）、数控冲模回转头压力机、折弯机（适用于多品种、小批量弯曲件）、精冲压力机等。

冲压加工的材料主要是金属及其合金（如钢、铝合金、铜合金等），也可以是非金属材料（如塑料、皮革、纸板等）。金属材料主要是板材、带材、线材、型材。

## 0.2 冲压加工的特点及其应用

冲压生产靠模具和压力机完成对材料的成形加工，与其他加工方法相比，在技术和经济方面有如下特点：

1) 冲压件的形状和尺寸精度、表面质量取决于模具精度，不受冲压工人的技术水平影响，在大批量生产中，产品可获得稳定的加工质量，互换性好。

2) 由于利用模具使材料产生塑性变形形成制件，所以可获得其他加工方法所不能或难以制造的壁薄、重量轻、刚性好、表面质量高、形状复杂的零件。

3) 冲压加工一般不需要加热毛坯，也不像切削加工那样大量切削金属，不但节能，而且节约金属。

4) 普通压力机每分钟可生产几十件零件，而高速压力机每分钟可生产数百件零件。所以它是一种高效率的加工方法。此外，冲压加工所用原料为板料或带料，通常又是在室温下加工，易于实现机械化与自动化。

由于冲压加工具有上述突出的特点，因此在国民经济各个领域广泛应用。例如，航空航天、机械、电子信息、交通、兵器、家用电器及轻工等产业都有冲压加工。冲压可制造钟表及仪器中的小型精密零件，也可制造汽车、拖拉机上的大型覆盖件。冲压材料可使用黑色金属、有色金属以及某些非金属材料。

冲压也存在一些缺点，主要表现在冲压加工时的噪声和振动。这些问题并不完全是冲压工艺及模具本身带来的，而主要是由于传统的冲压设备落后所造成的。随着科学技术的进步，这些问题一定会得到解决。

### 0.3 冲压工艺的分类

为满足冲压生产中各种冲压零件的形状、尺寸、精度、批量大小、原材料性能的要求，冲压加工的方法是多种多样的，通常冲压工艺分类如图 0-2 所示。

概括起来，可以将冲压工艺分为分离工序与塑性成形工序两大类（按变形的性质来分）。分离工序又可分为落料、冲孔和切断等，目的是在冲压过程中使冲压件与板料沿一定的轮廓线相互分离，见表 0-1。塑性成形工序可分为弯曲、拉深、成形（各种不同性质的局部变形，还可进一步细分，如翻边、胀形、缩口等），目的是使冲压毛坯在不破坏的条件下发生塑性变形，进而得到所要求的零件形状，见表 0-2 和表 0-3。

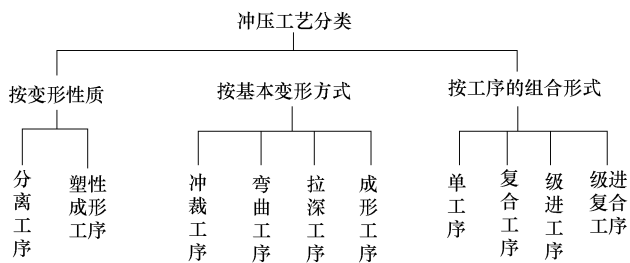


图 0-2 冲压工艺分类

表 0-1 分离工序

工序名称	工序简图	工序特征	模具简图
切断		用模具将材料沿不封闭的曲线分离	

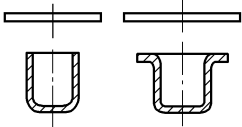
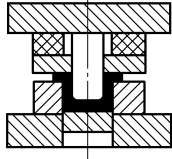
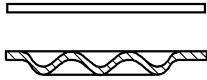
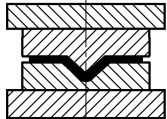
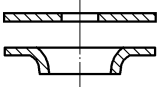
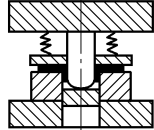
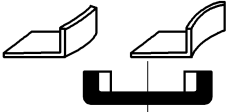
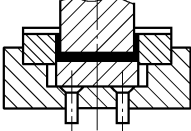
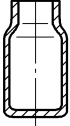
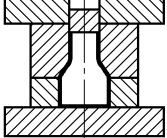
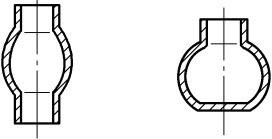
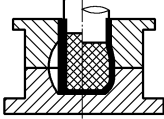
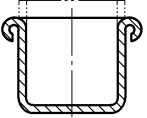
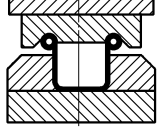
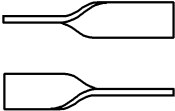
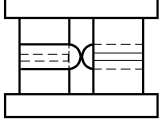
(续)

工序名称	工序简图	工序特征	模具简图
落料		用模具沿封闭轮廓曲线冲切板料,封闭线内冲下的部分是工件	
冲孔		用模具沿封闭轮廓曲线冲切板料,封闭线内冲下的部分是废料	
切舌		利用模具将板料局部切开,而不完全分离,切开部分材料发生弯曲	
切边		利用模具修切成形件的边缘,使成形零件的边缘修切整齐或切成一定高度、一定形状	
剖切		利用模具将成形工件一分为几,主要用于不对称零件的成双或成组冲压成形后的分离	

表 0-2 塑性成形工序

工序名称	工序简图	工序特征	模具简图
弯曲		用弯曲模使材料产生塑性变形,弯成一定形状和角度的零件	

(续)

工序名称	工序简图	工序特征	模具简图
拉深		用模具将平板毛坯冲压成形为任意形状的开口空心件	
起伏 (压筋)		用模具在板材表面局部压制各种形状的凸起与凹陷	
翻孔		用模具将板料上的孔冲制出竖直边缘,其直径比原内孔大	
翻边		用模具将板料边缘翻成直立直边,分外缘和内缘翻边	
缩口		用模具对空心工件或管状件口部(局部)加压,使其局部直径缩小	
胀形		用模具将空心工件或管状件沿径向往外扩张,形成局部直径增大	
卷边		将空心件口部边缘卷成接近封闭的圆形,如口杯	
扭曲		将平直或局部平直工件的一部分相对于另一部分扭转一定角度	

(续)


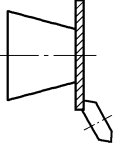
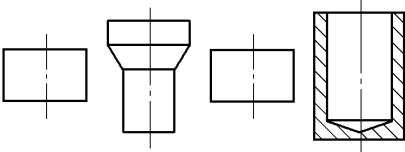
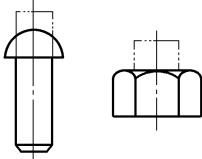

工序名称	工序简图	工序特征	模具简图
校平、整形		利用模具将形状、尺寸不够准确的工件校正到准确形状和尺寸	
旋压		用旋轮使旋转状态下的坯料逐步成形为各种旋转体空心件	

表 0-3 立体塑性成形工序

工序名称	工序简图	成形特点及应用范围
挤压		对放在模具型腔内的坯料施加强大压力,使冷态下的金属产生塑性变形,并将其从凹模孔或凸、凹模之间的间隙挤出,以获得空心件或横截面积较小的实心件
冷镦		用冷镦模具使坯料产生轴向压缩,使其横截面积增大,从而获得螺钉、螺母类的零件
压印		压印是强行局部排挤材料,在工件表面形成浅凹花纹、图案、文字或符号,但在压印表面的背面并无对应于浅凹花纹的凸起

## 0.4 冲压技术的发展

随着科学技术的不断进步和工业生产的迅速发展,冲压工艺和冲模技术也在不断地提高和发展。冲压加工技术的发展方向,主要有以下几个方面:

1) 工艺分析计算的现代化。冲压技术与现代数学、计算机技术结合,对复杂曲面零件(如汽车覆盖件)进行计算机模拟和有限元分析,可预测某一工艺方案对零件成形的可能性与成形过程中将会发生的问题,供设计人员进行修改和选择。这种设计方法是将传统的经验设计升华为优化设计,缩短了模具设计与制造周期,节省了昂贵的模具试模费用等。

2) 模具计算机辅助设计、制造与分析(CAD/CAM/CAE)的研究和应用,将极大地提

高模具制造效率,提高模具的质量,使模具设计与制造技术实现 CAD/CAM/CAE 一体化。在模具数字化制造、系统集成、逆向工程、快速原型/模具制造及计算机辅助应用技术等方面形成全方位解决方案,提供模具开发与工程服务,全面提高企业水平和模具质量。

3) 冲压生产的自动化。为了满足大量生产的需要,冲压生产已向自动化、无人化方向发展。现已利用高速压力机和多工位精密级进模实现单机自动冲压,其每分钟可冲压几百次。大型零件的生产已实现了多机联合生产线,从板料的送进到冲压加工、最后检验,均由计算机控制,极大地减轻了工人的劳动强度和提高了生产率。目前冲压生产已逐步向无人化生产形成的柔性冲压加工中心发展。

4) 冲压模具重点发展技术是中高档轿车大中型覆盖件模具,高强度板和不等厚拼焊板的冲压模具,大型多工位级进模和多工位传递模;发展电子信息精密级进模以及高精度、高效率和多功能精冲模。

5) 为适应市场经济需求,适应大批量与多品种小批量共存的生产模式,发展适宜于小批量生产的各种简易模具、经济模具和标准化且容易变换的模具系统。

6) 模具加工的重点是发展高速加工和高精度加工。高速加工主要是发展高速铣削、高速研抛、高速电加工及快速制模技术。高精度加工主要是发展模具零件精度达  $1\mu\text{m}$  以下和表面粗糙度  $Ra \leq 0.1\mu\text{m}$  的各种精密加工。

7) 重点发展模具表面的各种强化超硬处理等技术,提高模具使用寿命。

## 0.5 学习要求和学习方法

通过本课程的学习、课程设计和实验的训练,将使学生初步掌握冲压成形的基本原理;掌握冲压工艺过程和冲压模具设计的基本方法;具有拟定一般复杂程度冲压件的工艺过程和设计一般复杂程度冲压模具的能力;能够运用已学习的基本知识,分析和解决生产中常见的冲压产品质量、工艺及模具方面的技术问题;能够合理选用冲压设备和自动冲压的辅助设备;了解冲压成形新工艺、新模具结构及冲压工艺的发展动向。

由于冲压工艺与模具设计属于应用技术科学,是一门实践性和应用性很强的课程,它以金属学与热处理、机械设计基础、金属塑性成形原理以及许多其他技术学科为基础,与冲压设备、模具制造工艺密切联系。因此在学习本门课程时,应注意与这些课程的衔接,注意综合运用基础学科知识和专业知识。要认真参加课程实验、实习、设计等实践教学环节,参与冲压生产现场实践,才能在学习时联系生产实际,从而加深理解。

# 第 1 章



## 冲压变形的基本原理



### 学习目标

了解金属塑性变形的基本概念，了解影响金属塑性与变形抗力的主要因素，了解点的主应力、主应变状态图和塑性变形时应力与应变的关系；熟悉冲压变形时毛坯的分区与变形区的应力应变特点；掌握伸长类变形和压缩类变形的特点及影响其极限变形程度的因素。

### 1.1 金属塑性变形的基本概念

金属在外力作用下产生形状和尺寸的变化称为变形。变形分为弹性变形和塑性变形。冲压加工就是利用金属的塑性变形成形制件的一种金属加工方法。要掌握冲压成形加工技术，首先必须了解金属塑性变形的一些基本原理。

#### 1.1.1 塑性变形的物理概念

绝大部分金属具有晶体结构，原子在晶体所占的空间内有序排列。在没有外力作用时，金属中的原子处于稳定的平衡状态，金属物体具有自己的形状与尺寸。施加外力，就会破坏原子间原来的平衡状态，造成原子排列畸变，引起金属物体形状与尺寸的变化。假若除去外力，金属中的原子立即恢复到原来稳定平衡的位置，原子排列畸变消失和金属物体完全恢复原始形状和尺寸，则这样的变形称为弹性变形。增大外力，原子排列的畸变程度增加，移动距离有可能大于受力前的原子间距离，这时晶体中的一部分原子相对于另一部分原子产生较大的错动。外力除去以后，原子间的距离虽然仍可恢复原状，但错动了的原子并不能再回到其原始位置，金属物体的形状和尺寸则发生了永久改变。这种在外力作用下产生不可恢复的永久变形称为塑性变形。

金属物体受外力作用时，原子总是离开平衡位置而移动。因此，在塑性变形条件下，金属物体总变形既包括塑性变形，也包括除去外力后消失的弹性变形。

#### 1.1.2 塑性变形的基本方式

##### 1. 晶内变形

塑性加工的金属绝大部分是多晶体，每个微观上的晶体的变形表现为金属在宏观上的弹性或塑性变形。就单个晶体的塑性变形而言，又表现为滑移和孪生两种形式。

(1) 滑移 当作用在晶体上的切应力达到一定数值后，晶体的一部分沿一定的晶面、沿一定的方向，与另一部分之间做相对移动，这种现象叫滑移，如图 1-1 所示。金属的滑移面，一般都是晶格中原子分布最密的面，滑移方向则是原子分布最密的结晶方向，因为沿着

原子分布最密的面和方向滑移的阻力最小。金属晶格中，原子分布最密的晶面和结晶方向越多，产生滑移的可能性越大，金属的可塑性就越好。晶格的滑移可通过位错理论来解释。滑移时并不需要整个滑移面上的全部原子一齐移动，而只是在位错中心附近的少数原子发生移动。

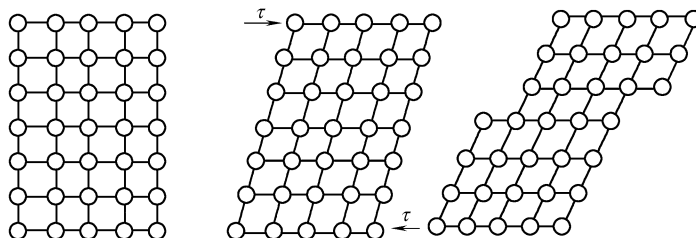


图 1-1 单晶体的滑移

(2) 孪生 孪生也是在一定的切应力作用下，晶体的一部分相对另一部分，沿着一定的晶面和方向发生转动的结果，已变形部分的晶体位向发生改变，与未变形部分以孪晶面对称，如图 1-2 所示。

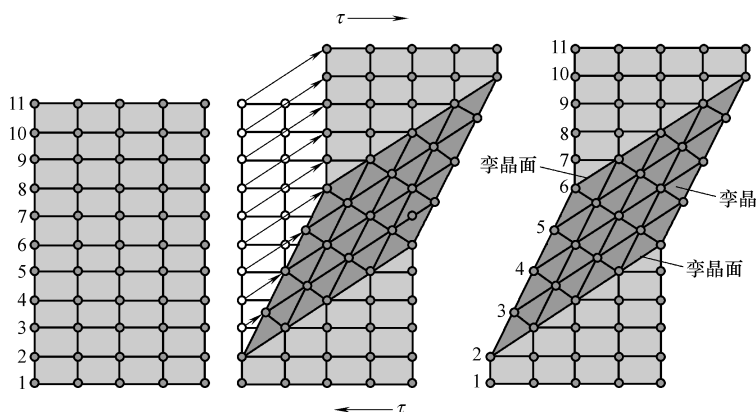


图 1-2 单晶体的孪生

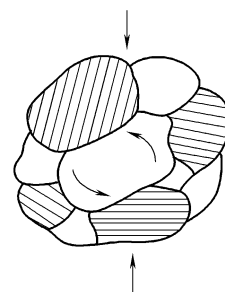


图 1-3 晶间的相互作用

孪生与滑移的主要差别是：①滑移过程是渐进的，而孪生过程是突然发生的；②孪生时原子位置不会产生较大的错动，因此晶体取得较大塑性变形的方式主要是滑移作用；③孪生后，晶体内部出现空隙，易于导致金属的破坏；④孪生所要求的临界切应力比滑移要求的临界切应力大得多，只有滑移过程很困难时，晶体方可发生孪生。

## 2. 晶间变形

多晶体中的每个单晶体（晶粒）要受到四周晶粒的牵制，变形不如自由单晶体单纯，可塑性也不易充分发挥，会造成变形不均匀。多晶体的变形方式除晶粒本身的滑移和孪生外，还有在外力作用下晶粒间发生的相对移动和转动而产生的变形，即晶间变形，晶间的相互作用如图 1-3 所示。凡是加强晶间结合力、减少晶间变形、有利于晶内发生变形的因素，均有利于晶体进行塑性变形。当多晶体间存有杂质时，会使晶间结合力降低，晶界变脆，不利于多晶体进行塑性变形；当多晶体的晶粒为均匀球状时，由于晶粒界面对晶内变形的制约作用相对较小，则多晶体具有较好的可塑性。

### 1.1.3 金属的塑性与变形抗力

#### 1. 塑性及塑性指标

所谓塑性，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。塑性不仅与材料本身的性质有关，还与变形方式和变形条件有关。所以，材料的塑性不是固定不变的，不同的材料在同一变形条件下会有不同的塑性；而同一种材料，在不同的变形条件下，会表现不同的塑性。塑性反映金属的变形能力，是金属的一种重要加工性能。

塑性指标是衡量金属在一定条件下塑性高低的数量指标。它是以材料开始破坏时的塑性变形量来表示的，它可借助于一些实验方法测定。常用的塑性指标（拉伸试验）有：

$$\text{断后伸长率} \quad \delta = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

$$\text{断面收缩率} \quad \psi = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中  $L_0$ 、 $S_0$ ——拉伸试样原始标距长度（mm）和原始截面积（ $\text{mm}^2$ ），见图 1-4；

$L_u$ 、 $S_u$ ——拉伸试样断裂后标距间长度（mm）和断裂处最小截面积（ $\text{mm}^2$ ）。

除了拉伸试验外，还有弯曲试验（测定板料胀形和弯曲时的塑性变形能力）等。需要指出，各种试验方法测定的都是相对于特定的状况和变形条件下材料的塑性变形能力，它们说明在某种受力状况和变形条件下，金属塑性的相对高低；或者对某种金属来说，在什么样的变形条件下塑性好，而在什么样的变形条件下塑性差。

#### 2. 变形抗力

塑性变形时，使金属发生变形的的外力称为变形力，而金属抵抗变形的反作用力称为变形抗力。在某种程度上，变形抗力反映了材料变形的难易程度。它的大小，不仅取决于材料的流动应力，而且还取决于塑性变形时的应力状态、摩擦条件以及变形体的几何尺寸等因素。

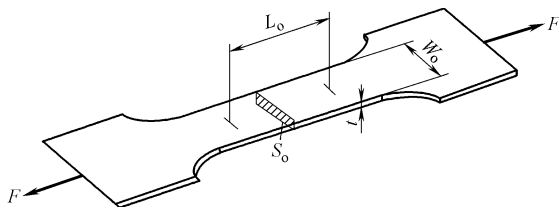


图 1-4 板料冲压类试样

塑性和变形抗力是两个不同的概念，前者反映塑性变形的能力，后者反映塑性变形的难易程度，它们是两个独立的指标。人们常认为塑性好的材料，变形抗力低；塑性差的材料，变形抗力高，但实际情况并非如此。如奥氏体不锈钢在室温下可经受很大的变形而不破坏，说明这种钢的塑性好，但其变形抗力却很高。

### 1.1.4 影响金属塑性和变形抗力的主要因素

影响金属塑性和变形抗力的主要因素可分为两类，其一是变形金属本身的晶格类型、化学成分和组织状态等内在因素；其二是变形时的外部条件，如变形温度、变形速度和变形的力学状态等。因此，只要有合适的内、外部条件，就有可能改变金属的塑性行为。

#### 1. 化学成分和组织状态对塑性和变形抗力的影响

化学成分和组织状态对塑性和变形抗力的影响非常明显也很复杂。下面以钢为例来说明。

(1) 化学成分的影响 在碳钢中,铁和碳是基本元素。在合金钢中,除了铁和碳外还包含有硅、锰、铬、镍、钨等。在各类钢中还含有某些杂质,如磷、硫、氮、氢、氧等。

碳对钢的性能影响最大。碳能固溶于铁而形成铁素体和奥氏体,它们都具有良好的塑性和低的变形抗力。当碳的含量超过铁的溶碳能力时,多余的碳便与铁形成具有很高硬度的化合物  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,金属的抗拉强度得到提高,但塑性指标下降。

合金元素加入钢中,不仅改变了钢的使用性能,而且改变了钢的塑性变形能力,其主要表现为:塑性降低,变形抗力提高。这是由于合金元素溶入固溶体 ( $\alpha\text{-Fe}$  和  $\gamma\text{-Fe}$ ),使铁原子的晶体点阵发生不同程度的畸变;合金元素与钢中的碳形成硬而脆的碳化物(碳化铬、碳化钨等);合金元素改变钢中相的组成,造成组织的多相等,都造成钢的变形抗力提高,塑性降低。

杂质元素对钢的塑性变形一般都有不利的影响。磷溶入铁素体后,使钢的强度、硬度显著增加,塑性、韧性明显降低。在低温时,造成钢的冷脆性。硫在钢中几乎不溶解,与铁形成塑性低的易溶共晶体  $\text{FeS}$ ,热加工时会出现热脆开裂现象。钢中溶氢,会引起氢脆现象,使钢的塑性大大降低。

(2) 组织状态的影响 钢在规定的化学成分内,由于组织的不同,塑性和变形抗力亦会有很大的差别。单相组织比多相组织塑性好,变形抗力低。多相组织由于各相性能不同,使得变形不均匀,同时基本相往往被另一相机械地分割,故塑性降低,变形抗力提高。

晶粒的细化有利于提高金属的塑性,但同时也提高了变形抗力。这是因为在一定的体积内细晶粒的数目比粗晶数目要多,塑性变形时有利于滑移的晶粒就较多,变形均匀地分散在更多的晶粒内。另外,晶粒越细,晶界面越曲折,对微裂纹的传播越不利,这些都有利于提高金属的塑性变形能力。此外,晶粒多,晶界也越多,滑移变形时位错移动到晶界附近将会受到阻碍并堆积,若要位错穿过晶界则需要很大的外力,从而提高了变形抗力。

另外,钢的制造工艺,如冶炼、浇铸、锻轧、热处理等都会影响金属的塑性和变形抗力。

## 2. 变形温度对塑性和变形抗力的影响

变形温度对金属和合金的塑性有很大的影响,就多数金属和合金而言,随着温度的升高,塑性增加,变形抗力降低。可以这样来理解:①温度升高,发生回复和再结晶,再结晶能完全消除加工硬化,变形抗力降低;②原子热运动加剧,使临界剪应力降低,可能出现新的滑移系,滑移系的增加,提高了变形金属的塑性;③原子的热振动加剧,晶格中的原子处于不稳定状态,此时,如晶体受到外力作用,原子就会沿应力场梯度方向,由一个平衡位置转移到另一个平衡位置,使金属产生塑性变形;④晶界强度下降,使得晶界的滑移容易进行。

就大多数金属而言,其总的趋势是:随着温度的升高,塑性增加,但并不是简单的直线上升,在某些温度区间由于晶粒边界的变化或相变而出现脆性。

如图 1-5 所示,在  $-200^\circ\text{C}$  时;钢的塑性几乎为零;在  $200\sim 400^\circ\text{C}$  时,出现了塑性降低,该区间称为蓝脆区;在  $800\sim 950^\circ\text{C}$  时,也有塑性降低的现象,这个区间称为热脆区。温度的变化对塑性指标的影响相当复杂。

## 3. 变形速度对塑性和变形抗力的影响

所谓变形速度,是指单位时间变形物体应变的变化量。塑性成形设备的加载速度,在一

一定程度上反映了金属的变形速度，它对塑性有两个方面的影响。

1) 变形速度大时，要同时驱使更多的位错更快地运动，金属晶体的临界剪应力将提高，使变形抗力增大。当变形速度大时，塑性变形来不及在整个变形体内均匀地扩展，此时，金属的变形主要表现为弹性变形。根据胡克定律，弹性变形量越大，则应力越大，变形抗力也就越大。另外，变形速度增加后，变形体没有足够的时间进行回复和再结晶，从而使金属的变形抗力增加，塑性降低。

2) 在高变形速度下，变形体吸收的变形能迅速地转化为热能（热效应），使变形体温升高（温度效应）。这种温度效应一般来说对塑性的增加是有利的。

常规的冲压设备的工作速度都较低，对金属塑性变形的性能影响不大。考虑变形速度因素，主要基于零件的尺寸和形状。对于大型复杂的零件成形，变形量大且极不均匀，容易局部拉裂和起皱，为了便于塑性变形的扩展，有利于金属的流动，宜采用低速的压力机或液压机。对于小型零件的冲压，一般不考虑变形速度对塑性和变形抗力的影响，主要考虑其对生产效率的影响。

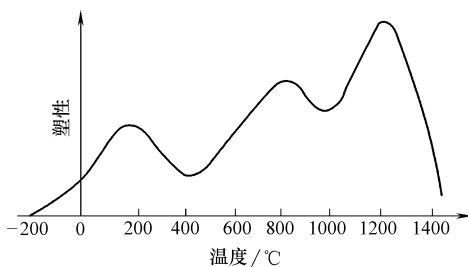


图 1-5 温度变化对钢的塑性指标的影响

## 1.2 金属塑性变形的力学基础

金属板料冲压工艺的目的，是使毛坯的形状和尺寸发生变化并成为成品或半成品零件。在这个过程中，毛坯的变形都是模具对毛坯施加外力所引起的内力或由内力直接作用的结果。一定的力的作用方式和大小都对应着一定的变形。为了研究冲压时毛坯的变形性质和变形规律，为了控制变形的发展，首先必须了解金属塑性变形时力的作用性质和力的大小。

引起毛坯变形的内力有强弱之分，它的作用集度用应力表示。应力就是单位面积上作用的内力。应力应理解为一极小面积上的内力与该面积比值的极限，即

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \quad (1-3)$$

式中， $\Delta F$  为极小面积  $\Delta A$  上的总内力，应力的单位用 MPa 计量， $1\text{MPa} = 10^6\text{N/m}^2$ 。

在金属塑性变形过程中，塑性加工过程能否实现，加工过程的效率及加工产品的质量都与应力和应变有关。因此，了解塑性加工过程中成形工件内各点的应力与应变状态，以及产生塑性变形时各应力之间的关系、应力与应变之间的关系是十分重要的。

### 1.2.1 点的应力应变状态

板料冲压时，毛坯变形区内各点的受力和变形情况都是不同的。为了了解毛坯的变形规律，就必须研究变形体内各点的应力状态、应变状态以及产生变形时它们之间的关系。

#### 1. 点的应力状态

点的应力状态是指通过变形体内某点的微元体所有截面上的应力的有无、大小、方向等

情况。图 1-6a 所示为受力物体中任意一点  $Q$ ，用微分面切取一个正六面体，微六面体各面素与坐标平面平行，每个面素上的应力矢量可以分解为和坐标轴平行的三个分量，一个正应力和两个切应力。三个微分面上共有九个应力分量，如图 1-6b 所示。因此，一点的应力状态可用九个应力分量（三个正应力，六个切应力）来表示。由于微元体处于平衡状态，没有转动，根据切应力互等定理有  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ， $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ ， $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ ，实际上只需要六个应力分量，即三个正应力和三个切应力就可确定该点的应力状态。

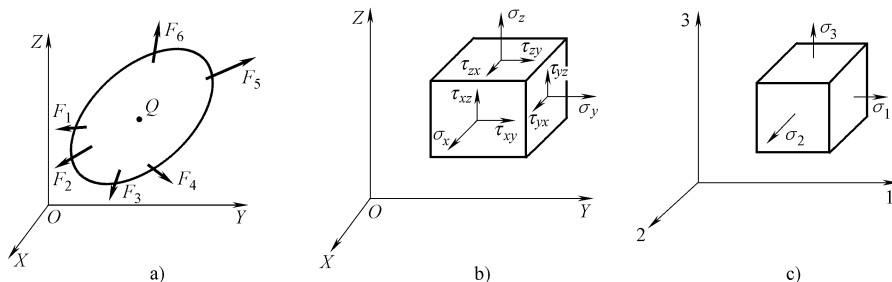


图 1-6 一点的应力状态

a) 受力物体 b) 任意坐标系 c) 主轴坐标系

图 1-6b 中的坐标轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$  的方向是任意的，如果坐标系统选取的方向不同，那么，虽然该点的应力状态并没有改变，但是用来表示该点应力状态的九个应力分量就会与原来的数值不同。可以证明，存在这样一组坐标系，使得微元体表面只有正应力、无切应力的作用。这样的坐标轴称为应力主轴，沿应力主轴作用的正应力称为主应力，主应力所作用的面和作用的方向分别称为主平面和主方向，如图 1-6c 所示。它们一般按代数值的大小依次用  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  表示，即  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 。以主应力表示点的应力状态称为主应力状态，定性说明一点应力作用情况的示意图，称为主应力状态图。主应力状态图共有九种，如图 1-7 所示。主应力状态图虽然只有九种，但主应力的数值可以是任意的。

在一般情况下，微元体的三个主方向都有应力，这种应力状态称为三向应力状态，如图 1-7 所示。但在板料冲压成形时，厚度方向的应力与其他两个方向的应力比较，往往可以忽略不计，因而可以把厚度方向的应力看作零，此时应力状态可视为平面应力状态。平面应力问题的分析计算比三向应力问题简单，这就为研究板料冲压成形问题提供了方便。

如果三个主应力大小都相等，即  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ，则称为球应力状态，习惯上常将三向等压应力称为静水压力。静水压力的大小对材料变形时的极限塑性应变值有很大的影响，静水压力越大，材料越能充分发挥其塑性。

除主平面不存在切应力外，微元体其他方向截面上都有切应力；在与主平面成  $45^\circ$  角的截面上，切应力达到极大值，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的关系是十分密切的。

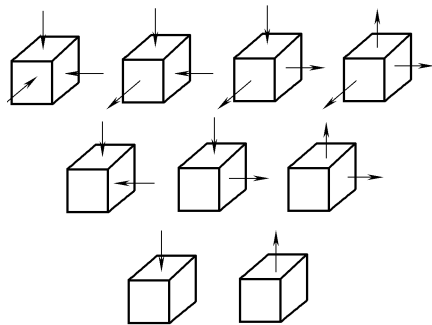


图 1-7 九种主应力状态图