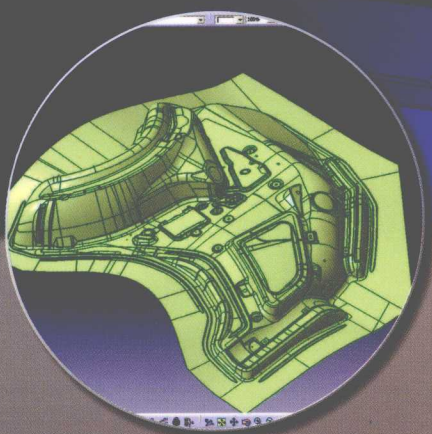


冲压工艺与 冲模设计



成 虹 编

本书为《冲压工艺与模具设计》教材，可作为高等院校机械类、材料类、能源动力类等专业的教材，也可供从事冲压工艺与模具设计工作的工程技术人员参考。

冲压工艺与冲模设计

本书共分10章，主要内容包括：绪论、冲压工艺规程的编制、冲模设计、冲模的制造与装配、冲模的调试与维护、冲压件的检验、冲压生产的安全与环保、冲压工艺的改进与创新、冲压工艺的标准化、冲压工艺的国际化。

成 虹 编

图书在版编目(CIP)数据

冲压工艺与冲模设计 / 成虹编. — 北京: 机械工业出版社, 2010.10
ISBN 978-7-111-32009-10

I. 冲… II. 成… III. 冲压工艺—教材 IV. TB61-43

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第184100号

00001-3000册

机械工业出版社 (北京·百万庄大街24号)

邮政编码 100007

电话 (010) 88379000

电传 (010) 88379001

网址 <http://www.mechp.com.cn>

定价: 38.00元

印数: 00001-3000册

版次: 2010年10月第1版

印次: 2010年10月第1次印刷

印张: 16.5

字数: 400千字

印数: 00001-3000册

版次: 2010年10月第1版

印次: 2010年10月第1次印刷

印张: 16.5

字数: 400千字

印数: 00001-3000册

版次: 2010年10月第1版

印次: 2010年10月第1次印刷

印张: 16.5

字数: 400千字

印数: 00001-3000册

版次: 2010年10月第1版

印次: 2010年10月第1次印刷

印张: 16.5

字数: 400千字

印数: 00001-3000册



机械工业出版社

地址: 北京市百万庄大街24号 邮编: 100007
电话: (010) 88379000 电传: (010) 88379001
网址: <http://www.mechp.com.cn>
E-mail: service@mechp.com

冲压工艺在现代机械、汽车、电子信息产品等制造业中有着广泛的应用,冲压模具是进行冲压工艺生产的重要工艺装备。本书从冲压变形工艺基础和冲压模具设计实践两个方面作了较为详细的分析介绍。本书突出典型冲压模具结构设计,图例新颖,标准、数据资料新,具有实用性强,便于自学等特点。全书共8章,主要内容有:冲压变形的基本概念,冲裁、弯曲、拉深、局部成形工艺和模具设计;汽车覆盖零件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;冲压工艺规程的编制等。

本书可供从事冲压模具设计制造的工程技术人员使用,也可供大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

冲压工艺与冲模设计/成虹编. —北京:机械工业出版社,2009.10
ISBN 978-7-111-28343-0

I. 冲… II. 成… III. ①冲压-工艺②冲模-设计 IV. TG38

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第167817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:曲彩云 责任编辑:白刚 封面设计:姚毅

责任校对:刘志文 责任印制:李妍

中国农业出版社印刷厂印刷

2010年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·20.75印张·513千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-28343-0

定价:39.00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

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

模具作为特殊的工艺装备,在现代制造业中越来越重要。有了模具,企业有可能向社会提供品种繁多、质优价廉的商品,满足人们日益增长的多方面的消费需要。有了模具,人们的衣、食、住、行,可直接或间接地变得丰富多彩。人们日常生活中接触到的汽车、手表、手机、电话、计算机、空调器、电视机、冰箱、照相机、玩具等,都离不开用模具成形加工或用模具生产其中某个零件。模具关系现代制造业的发展与进步,是现代制造业的重要工艺装备,是企业效益的倍增器。

冲压模具是模具中应用最为广泛的模具之一。特别是随着我国汽车、电子信息等工业的迅速发展,促使冲压工艺理论、冲压生产技术、冲压模具设计与模具制造方法发生了根本的变革。一些旧的方法、典型结构、设计数据已不能满足设计的要求。为了适应新技术、新发展,面向生产第一线的工程技术人员和工科院校相关专业师生的需要,我们编写了这本《冲压工艺与冲模设计》。本书收集了近年来我国冲压模具设计、应用的实践经验和成熟的科研成果,同时吸收国外的先进技术、资料、标准与方法,力求既适应当前我国国情又能与世界接轨,满足现代冲压技术发展的要求。

编者本着简明、先进、实用、可靠的指导思想进行编写。在阐明冲压工艺的基础上,详细讲述了正确设计冲压工艺和冲压模具结构的基本方法,分析了冲压工艺、冲压模具、冲压设备、冲压材料、冲压件质量和冲压件经济性之间的关系;讲述了冲裁工艺及冲裁模具设计、弯曲工艺及弯曲模具设计、拉深工艺和拉深模具设计等。本书还根据冲压技术的发展,较详细地讲述了多工位精密级进模的设计和汽车覆盖件的成形方法和模具设计。全书的各章既相互独立又相互联系,语言简明精练、通俗易懂,既有理论分析又结合生产实际选编了一些典型设计案例,增强了实用性,目的是使读者对冲压工艺与模具设计有完整的认识,具有能正确编制冲压件工艺规程和设计中等复杂程度模具的能力。

由于作者的学识水平有限,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

目 录

前言

第1章 冲压加工的基础 1

1.1 冲压加工的特点及其应用 1

1.2 冲压工艺的分类 1

1.3 金属冲压变形的基本概念 4

1.3.1 金属塑性变形的物理概念 4

1.3.2 塑性变形的的基本方式 4

1.3.3 金属的塑性与变形抗力 5

1.3.4 影响金属塑性和变形抗力的主要因素 6

1.3.5 金属冲压时变形毛坯内点的应力与应变 7

1.3.6 金属塑性变形的屈服条件 9

1.3.7 塑性变形时应力与应变的关系 9

1.3.8 硬化与硬化曲线 11

1.4 金属冲压成形时变形毛坯的力学特点与分类 12

1.4.1 变形毛坯的分区 12

1.4.2 变形区的应力应变特点 13

1.4.3 冲压成形中的变形趋向性及其控制 14

1.5 板料冲压成形性能及冲压材料 17

1.5.1 板料的冲压成形性能 17

1.5.2 板材冲压成形试验的试验方法 17

1.5.3 金属板料的力学性能与冲压成形性能的关系 17

1.5.4 常用的冲压材料及其性能 18

1.6 冲压设备的选用及模具安装 21

1.6.1 冲压设备的选用 21

1.6.2 模具的安装 26

习题与思考题 26

第2章 冲裁工艺及冲裁模设计 27

2.1 冲裁变形分析 27

2.1.1 冲裁变形时板料变形区受力分析 27

2.1.2 冲裁时板料的变形过程 28

2.1.3 冲裁件断面质量及其影响因素 29

2.2 冲裁模具的间隙 31

2.2.1 间隙对冲裁件尺寸精度的影响 31

2.2.2 间隙对模具寿命的影响 32

2.2.3 间隙对冲裁工艺力的影响 32

2.2.4 间隙值的确定 32

2.3 凸模与凹模刃口尺寸的计算 34

2.3.1 冲裁模刃口尺寸计算的基本原则 34

2.3.2 刃口尺寸的计算方法 35

2.4 冲裁力和压力中心的计算 41

2.4.1 冲裁力的计算 41

2.4.2 压力机公称压力的选取 42

2.4.3 降低冲裁力的措施 42

2.4.4 冲压模具压力中心的确定 42

2.5 排样设计 44

2.5.1 材料的经济利用 44

2.5.2 排样方法 45

2.5.3 搭边和条料宽度的确定 46

2.6 冲裁工艺设计 49

2.6.1 冲裁件的工艺性分析 49

2.6.2 冲压加工的经济性分析 52

2.6.3 冲裁工艺方案的确定 53

2.7 冲裁模的结构设计 55

2.7.1 单工序冲裁模 55

2.7.2 复合冲裁模 59

2.7.3 级进冲裁模 61

2.8 冲裁模主要零部件的结构设计与标准选用 66

2.8.1 模具零件的分类和标准化 66

2.8.2 凸模与凸模组件的结构设计 67

2.8.3 凹模的结构设计 71

2.8.4 定位零件的设计 73

2.8.5 卸料与推件零件的设计 79

2.8.6 标准模架和导向零件 82

2.8.7 弹性元件的选择 85

2.9 精密冲裁工艺与精冲模具简介 90

2.9.1 精密冲裁概述 90

2.9.2 其他精密冲裁的工艺方法	92	计算	149
2.9.3 精冲件的工艺性	95	4.2.3 无凸缘圆筒形拉深件的拉深次数 和工序件尺寸的计算	152
2.9.4 精密冲裁模的设计要点	96	4.2.4 带有凸缘圆筒形件的拉深	154
2.9.5 精冲模具结构及其特点	98	4.2.5 阶梯形零件的拉深	159
2.9.6 精冲模主要零件齿圈的设计	100	4.3 非直壁旋转体零件拉深成形特点	160
2.10 硬质合金冲裁模	103	4.3.1 曲面形状零件的拉深特点	160
2.10.1 硬质合金材料性能及其模具 寿命	103	4.3.2 球面零件的拉深方法	161
2.10.2 硬质合金冲模的设计特点	104	4.3.3 抛物面零件的拉深方法	162
2.10.3 硬质合金块的固定	105	4.3.4 锥形零件的拉深方法	162
2.10.4 硬质合金模具的典型结构	107	4.4 盒形件拉深	164
习题与思考题	107	4.4.1 盒形件拉深变形特点	164
第3章 弯曲工艺与弯曲模具设计	108	4.4.2 盒形零件拉深毛坯的形状与尺寸 确定	165
3.1 弯曲变形过程分析	109	4.4.3 盒形件多次拉深的工艺计算	167
3.1.1 弯曲变形过程	109	4.5 拉深工艺设计	169
3.1.2 板料弯曲变形的特点	109	4.5.1 拉深件的结构工艺性分析	169
3.1.3 弯曲时变形区的应力和应变	110	4.5.2 拉深工艺力的计算	170
3.2 弯曲卸载后弯曲件的回弹	113	4.5.3 拉深成形过程中的辅助工序	173
3.2.1 回弹现象	113	4.6 拉深成形模具设计	174
3.2.2 影响回弹的主要因素	113	4.6.1 拉深模的典型结构	174
3.2.3 回弹值的确定	114	4.6.2 拉深模工作零件的结构和尺寸	176
3.2.4 减小回弹的措施	115	4.7 其他拉深法	181
3.3 弯曲成形工艺设计	118	4.7.1 软模拉深	181
3.3.1 最小相对弯曲半径	118	4.7.2 变薄拉深	182
3.3.2 弯曲件的结构工艺性	120	习题与思考题	185
3.3.3 弯曲工艺力的计算	122	第5章 其他成形工艺及模具设计	186
3.3.4 弯曲件毛坯展开尺寸的计算	123	5.1 胀形	186
3.3.5 弯曲件弯曲工序的安排	125	5.1.1 胀形变形特点与胀形极限变形 程度	186
3.4 弯曲模的典型结构设计	127	5.1.2 平板毛坯的起伏成形	187
3.4.1 典型的弯曲模结构	127	5.1.3 空心毛坯的胀形	189
3.4.2 弯曲模主要工作零件结构参数的 确定	134	5.1.4 胀形模设计举例	192
习题与思考题	136	5.2 翻边	193
第4章 拉深工艺与拉深模具设计	138	5.2.1 内孔翻边	193
4.1 拉深变形过程分析	138	5.2.2 平面外缘翻边	197
4.1.1 板料拉深变形过程及其特点	138	5.2.3 变薄翻边	198
4.1.2 拉深过程中变形毛坯各部分的 应力与应变状态	140	5.2.4 翻边模结构设计及举例	198
4.1.3 拉深变形过程的力学分析	142	5.3 缩口	200
4.1.4 拉深成形的障碍及防止措施	144	5.3.1 缩口成形特点与变形程度	200
4.2 直壁旋转体零件拉深工艺设计	146	5.3.2 缩口工艺计算	201
4.2.1 圆筒形拉深件毛坯尺寸计算	147	5.3.3 模具结构设计及举例	202
4.2.2 无凸缘圆筒形件的拉深工艺		习题与思考题	203

第6章 汽车覆盖件成形工艺及模具

设计	204
6.1 覆盖件的结构特征与成形特点	205
6.1.1 覆盖件的结构特征	205
6.1.2 覆盖件的成形特点	205
6.1.3 覆盖件的成形分类	206
6.1.4 覆盖件的主要成形障碍及其防止措施	207
6.2 覆盖件冲压成形工艺设计	208
6.2.1 确定冲压方向	208
6.2.2 拉深工序的工艺处理	211
6.2.3 拉深、修边和翻边工序间的关系	215
6.3 覆盖件成形模具的典型结构和主要零件的设计	216
6.3.1 覆盖件拉深模	216
6.3.2 覆盖件修边模	222
6.3.3 覆盖件翻边模	227
习题与思考题	229

第7章 多工位精密级进模的设计

7.1 概述	230
7.2 多工位精密级进模的排样设计	231
7.2.1 多工位级进模条料排样的设计原则	231
7.2.2 工序的确定与排序	233
7.2.3 带料排样的载体设计	236
7.2.4 分段冲切的设计	238
7.2.5 空位工位及步距设计	240
7.2.6 定位形式的选择与设计	242
7.2.7 排样设计后的检查	243
7.3 多工位精密级进模主要零部件的设计	243
7.3.1 凸模	243
7.3.2 凹模	247
7.3.3 带料的导正定位	254
7.3.4 带料的导向和托料装置	256
7.3.5 卸料装置的设计	260
7.3.6 限位装置	263
7.3.7 侧向冲压和反向冲压	263

7.3.8 成形凸模工作高度的微量调节机构	270
7.3.9 间歇切断装置	271
7.3.10 级进模模架	275
7.4 多工位精密级进模的安全保护	283
7.4.1 防止制件或废料的回升和堵塞	283
7.4.2 模面制件或废料的清理	284
7.4.3 模具的安全检测装置	286
7.5 多工位精密级进模自动送料装置	289
7.5.1 钩式送料装置	289
7.5.2 辊式送料装置	291
7.5.3 夹持式送料装置	292
7.6 多工位精密级进模的典型结构	294
7.6.1 冲裁、弯曲、成形多工位级进模	294
7.6.2 膜片级进模	297
7.6.3 引线框架精密级进模	302
习题与思考题	305

第8章 冲压工艺规程的编制

8.1 冲压工艺规程编制的主要内容和步骤	307
8.1.1 分析冲压件的工艺性	307
8.1.2 确定冲压件的成形工艺方案	307
8.1.3 确定冲压模具的结构形式	310
8.1.4 选择冲压设备	310
8.1.5 冲压工艺文件的编写	312
8.2 典型冲压件冲压工艺设计实例	312
8.2.1 冲压件的工艺分析	312
8.2.2 冲压件冲压工艺过程的确定	313
8.2.3 冲压工艺过程卡的编写	317
习题与思考题	318

附录

附录A 几种常用的冲压设备规格	319
附录B 冲压模具零件的常用公差配合及表面粗糙度	320
附录C 中外主要模具用材料对照表	321
附录D 冲压工艺与冲模设计课程学习指南	323

参考文献

参考文献	325
------------	-----

第1章 冲压加工的基础

冲压加工是借助安装在压力机上的模具，对放置在模具里的板料施加变形力，使板料在模具里产生变形或分离，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。冲压加工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和控制的工程技术，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和技术经验；冲压模具是指将板料加工成冲压零件的特殊专用工具。

板料、模具和冲压设备（压力机）是构成冲压加工的三个必备要素，见图 1.0.1。

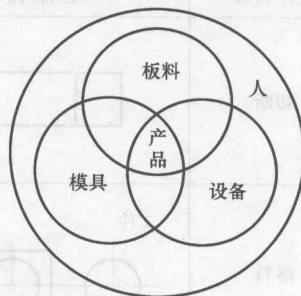


图 1.0.1 冲压加工的三个必备要素

1.1 冲压加工的特点及其应用

冲压生产靠模具和压力机完成制件的生产过程，与其他机械加工方法相比，在技术和经济方面有如下特点：

- 1) 冲压件的尺寸精度由模具来保证，具有一模一样的特征，所以质量稳定，互换性好。
- 2) 由于利用模具加工，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，所以它不但节能，而且节约金属。
- 4) 对于普通压力机每分钟可生产几十件，而高速压力机每分钟可生产几百上千件。所以它是一种高效率的加工方法。

由于冲压工艺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、日用电器及轻工等产业都有冲压加工。不但产业界广泛用到它，而且每一个人每天都直接与冲压产品发生联系。冲压可制造钟表及仪器中的小型精密零件，也可制造汽车、拖拉机的大型覆盖件。冲压材料可以是黑色金属、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、振动两种公害。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，这两种公害一定会得到解决。

1.2 冲压工艺的分类

生产中为满足冲压零件形状、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。但是，概括起来可以分为分离工序与成形工序两大类。分离工序又可分为落料、冲孔和剪切等，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 1.2.1。成形工序可分为弯曲、拉深、翻孔、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，并转化成所要求的制件形状，见表 1.2.2。表 1.2.3 是立体塑性成形工序的冲压工艺。

表 1.2.1 分离工序

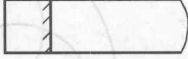
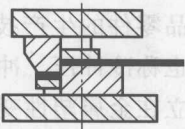
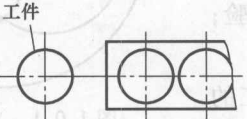
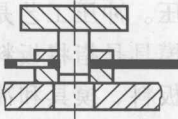
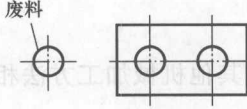
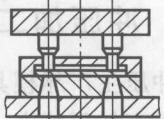
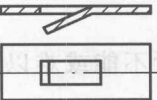
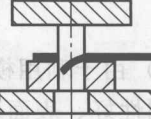
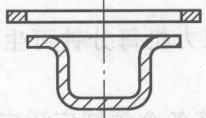
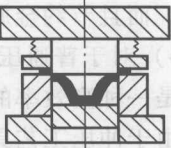
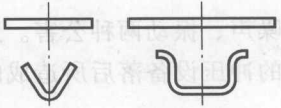
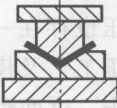
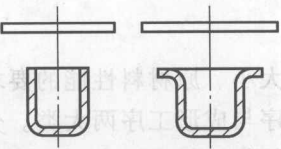
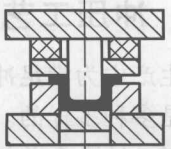
工序名称	工序简图	工序特征	模具简图
切断		用剪刀或模具切断板料，切断线不是封闭的	
落料		用模具沿封闭线冲切板料，冲下的部分为工件	
冲孔		用模具沿封闭线冲切板料，冲下的部分为废料	
切口		用模具将板料局部切开而不完全分离，切口部分材料发生弯曲	
切边		用模具将工件边缘多余的材料冲切下来	

表 1.2.2 成形工序

工序名称	工序简图	工序特征	模具简图
弯曲		用模具使板料弯成一定角度或一定形状	
拉深		用模具将板料压成任意形状的空心件	

(续)

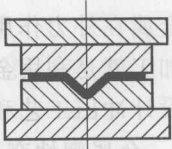
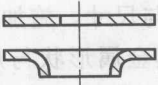
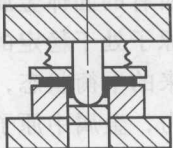
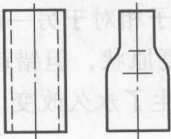
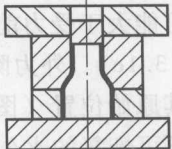
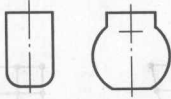
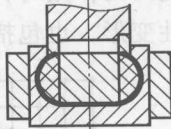
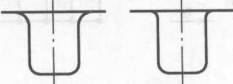
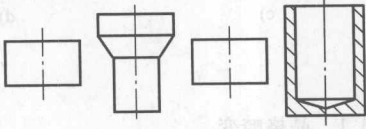
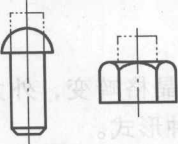
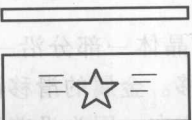
工序名称	工序简图	工序特征	模具简图
起伏(压肋)		用模具将板料局部拉伸成凸起和凹进形状	
翻边		用模具将板料上的孔或外缘翻成直壁	
缩口		用模具对空心件口部施加由外向内的径向压力,使局部直径缩小	
胀形		用模具对空心件加向外的径向力,使局部直径扩张	
整形		将工件不平的表面压平;将原先的弯曲件或拉深件压成正确形状	同拉深模具

表 1.2.3 立体塑性成形

工序名称	工序简图	特点及应用范围
冷挤压		对放在模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,以获得空心件或断面积较小的实心件
冷墩		用冷墩模使坯料产生轴向压缩,使其断面积增大,从而获得螺钉、螺母类的零件
压花		压花是强行局部排挤材料,在工件表面形成浅凹花纹、图案、方案或符号,但在压花表面的背面并无对应于浅凹花纹的凸起

1.3 金属冲压变形的基本概念

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。而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，设计冲压工艺和冲压模具，必须了解板料冲压时，金属塑性变形的一些基本原理。

1.3.1 金属塑性变形的物理概念

所有的固体金属都是晶体，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（图 1.3.1b）引起金属形状与尺寸的变化。假若除去外力，金属中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，这时晶体中一部分原子相对于另一部分产生较大的错动（图 1.3.1c）。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（图 1.3.1d），金属的形状和尺寸也都发生了永久改变。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。

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，总变形既包括塑性变形，也包括除弹性变形。

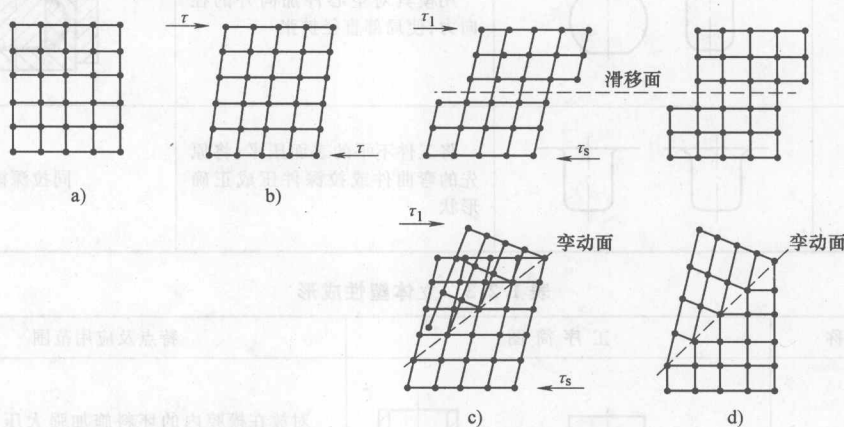


图 1.3.1 晶格畸变

a) 无外力作用 b) 外力作用产生弹性畸变 c) 晶格滑移或孪动 d) 外力卸去后的永久变形

1.3.2 塑性变形的的基本方式

金属塑性变形是金属在外力的作用下先产生晶格畸变，外力继续加大时，产生晶格错动，而这种错动通常在晶体中采取滑移和孪动两种形式。

1. 滑移

当作用在晶体上的切应力达到一定数值后，晶体一部分沿一定的晶面，向着一定的方向，与另一部分之间作相对移动，这种现象叫滑移。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。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。

2. 孪动

孪动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。

孪动与滑移的主要差别是:①滑移过程是渐进的,而孪动过程是突然发生的;②孪动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孪动后,晶体内部出现空隙,易于导致金属的破坏;④孪动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,晶体方发生孪动。

3. 晶间变形

滑移和孪动都是发生在单个晶粒内部的变形,称为晶内变形。工业生产中实际使用的金属则是多晶体。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动外,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。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,均有利于晶体进行的塑性变形。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,也具有较好的可塑性。

1.3.3 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。塑性是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,它可借助于一些实验方法测定。常用的塑性指标有:

$$\text{拉伸试验所得的伸长率: } \delta = \frac{L_K - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1.3.1)$$

$$\text{断面收缩率: } \psi = \frac{A_0 - A_K}{A_0} \times 100\% \quad (1.3.2)$$

式中 L_0 、 A_0 ——拉伸试样原始标距长度(mm)和原始断面积(mm^2);

L_K 、 A_K ——试样断裂后的标距间长度(mm)和断裂处的最小断面积(mm^2)。

除了拉伸试验外,还有爱力克辛试验、弯曲试验(测定板料胀形和弯曲时的塑性变形能力)和墩粗试验(测定材料锻造时的塑性变形能力)等。需要指出,各种试验方法都是相对于特定的状况和变形条件下,承受的塑性变形能力,它们说明在某种受力状况和变形条件下,这种金属的塑性比那种金属的塑性高还是低,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

塑性成形时,使金属发生变形的力称为变形力,而金属抵抗变形的反作用力,称为变

形抗力。变形力和变形抗力大小相等方向相反。变形抗力一般用单位接触面积上的反作用力来表示。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，而且还取决于塑性成形时的应力状态、摩擦条件以及变形体的几何尺寸等因素。

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，但变形抗力却很高。

1.3.4 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有两个方面，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. 化学成分和组织对塑性和变形抗力的影响

化学成分和组织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。在各类钢中还含有一些杂质，如磷、硫、氮、氢、氧等。

碳对钢的性能影响最大。碳能固溶到铁里形成铁素体和奥氏体固溶体，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的硬度，而塑性几乎为零的渗碳体，对基体的塑性变形起阻碍作用，降低塑性，抗力提高。可见含碳量越高，碳钢的塑性成形性能就越差。

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成形性能，其主要表现为：塑性降低，变形抗力提高。这是由于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，这些都造成钢的抗力提高，塑性降低。

杂质元素对钢的塑性变形一般都有不利的影响。如磷溶入铁素体后，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。钢中溶氢，会引起氢脆现象，使钢的塑性大大降低。

(2) 组织的影响 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，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。

晶粒的细化有利提高金属的塑性，但同时也提高了变形抗力。另一方面晶粒多，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，从而提高了塑性变形抗力。

另外，钢的制造工艺，如冶炼、浇铸、锻轧、热处理等都影响着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。这种情况，可以从以下几个方面进行解释：

1) 温度升高，发生回复和再结晶。回复使金属的加工硬化得到一定程度的消除，再结

晶能完全消除加工硬化,从而使金属的塑性提高,变形抗力降低。

2) 温度升高,原子热运动加剧,动能增大,原子间结合力减弱,使临界切应力降低,不同滑移系的临界切应力降低速度不一样。因此,在高温下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) 温度升高,原子的热振动加剧,晶格中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。这种塑性变形的方式称为热塑性,也称扩散塑性。

4) 温度升高,晶界强度下降,使得晶界的滑移容易进行。同时,由于高温下扩散作用加强,使晶界滑移产生的缺陷得到愈合。

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,金属晶体的临界切应力将提高,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,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。对大型复杂的零件成形,变形量大且极不均匀,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。小型零件的冲压,一般不考虑变形的速度对塑性和变形抗力的影响,主要从生产效率来考虑。

1.3.5 金属冲压时变形毛坯内点的应力与应变

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. 一点的应力状态

一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 1.3.2a 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 1.3.2b 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: $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, $\tau_{zx} = \tau_{xz}$,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 1.3.2b 中的坐标系 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

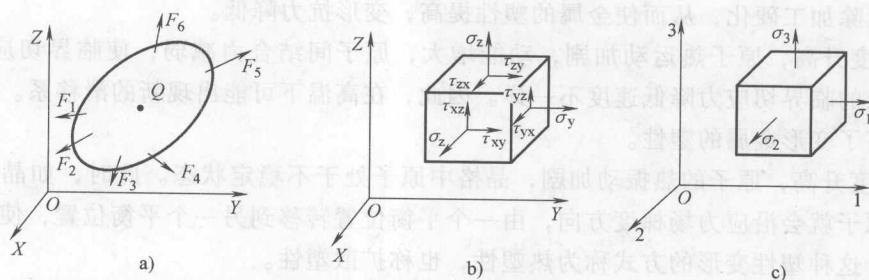


图 1.3.2 一点的应力状态

a) 受力物体 b) 任意坐标系 c) 主轴坐标系

面和方向分别称为主平面和主方向，如图 1.3.2c 所示。它们一般按代数值的大小依次用 σ_1 、 σ_2 、和 σ_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 9 种，如图 1.3.3 所示。主应力状态图虽然只有 9 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。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，可以把厚向应力看作零，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。

在主应力状态图中，作用于微元体的压应力数量越多对塑性变形越有利，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° 角的截面上，切应力达到极大值，称为主切应力。

2. 塑性变形时的体积不变定律

金属材料在塑性变形时，体积变化很小，可以忽略不计。因此，一般认为塑性变形时体积不变。设长方体试样的原始长、宽、厚分别为 l_0 、 b_0 、 δ_0 ，在均匀的塑性变形后成为 l 、 b 、 δ ，根据体积不变条件，则

$$\frac{lb\delta}{l_0b_0\delta_0} = 1 \quad (1.3.3)$$

等式两边取对数，得

$$\ln \frac{l}{l_0} + \ln \frac{b}{b_0} + \ln \frac{\delta}{\delta_0} = 0 \quad (1.3.4)$$

以真实应变的形式表示，即为

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (1.3.5)$$

式 (1.3.5) 是塑性变形时的体积不变定律。该方程反映了三个主应变值之间的关系，并说明：

1) 塑性变形时, 只有形状及尺寸的改变, 而无体积的变化。

2) 不论应变状态如何, 其中必有一个主应变的符号与其他两个主应变的符号相反, 该主应变绝对值最大, 称为最大主应变。

3) 当已知两个主应变的数值时, 第三个主应变即可算出。

根据上述结论, 对任何一种几何形状的金属物体的塑性变形, 其变形方式只有三种; 与此相对应、可能的主应变状态图也只有三种, 如图

1.3.4 所示。

1.3.6 金属塑性变形的屈服条件

当物体受单向应力作用时, 只要变形体内某点的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条件, 或称屈服准则。

1. 屈雷斯加 (H. Tresca) 屈服条件

屈雷斯加于 1864 年提出: 当材料中的最大切应力达到某一定值时, 材料即行屈服。因此, 该准则又称为最大切应力屈服条件。其数学表达式为

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) = K \quad (1.3.6)$$

当 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 时, 上式可写成:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = K \quad (1.3.7)$$

需要注意的是, 屈雷斯加准则中并未考虑中间主应力的影响。

2. 密席斯 (Von Mises) 屈服准则

密席斯于 1913 年提出了另一屈服准则: 当材料中的等效应力达到某一定值时, 材料就开始屈服。由单向拉伸试验可确定该值, 该值为材料的屈服点 σ_s 。其数学表达式为

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \sigma_s \quad (1.3.8)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 \quad (1.3.9)$$

大量实验表明, 绝大多数金属材料, 密席斯准则较屈雷斯加准则更接近于实验数据。这两个屈服准则实际上相当接近, 在两主应力相等的应力状态下两者还是一致的。

为了使用上的方便, 工程上常用屈服条件的简化形式, 见式 (1.3.10)。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_s \quad (1.3.10)$$

式中系数 β 是与中间主应力 σ_2 有关的系数, 其值 $\beta = 1 \sim 1.155$, 见表 1.3.1。

1.3.7 塑性变形时应力与应变的关系

物体受力产生变形, 所以应力与应变之间一定存在着某种关系。物体在弹性变形时, 应力与应变之间的关系是线性的、可逆的, 弹性变形是可以恢复的, 与加载历史无关。即一点的应变状态仅仅取决于该点的应力状态, 而与已经经历的变形过程无关。在物体进入塑性变形后, 此时的应力应变关系是非线性的、不可逆的, 应力应变不能简单叠加。

表 1.3.1 β 值

应力应变状态	中间主应力	应力取例	β
单向拉伸	$\sigma_2 = \sigma_3 = 0; \sigma_1 > 0$	软凸模胀形(中心点) 翻边(边缘)	1.0
单向压缩	$\sigma_2 = \sigma_1 = 0; \sigma_3 < 0$		
双向等拉	$\sigma_2 = \sigma_1 > 0; \sigma_3 = 0$		
双向等压	$\sigma_2 = \sigma_3 < 0; \sigma_1 = 0$		
纯剪	$\sigma_2 = 0; \sigma_1 = -\sigma_3$	宽板弯曲	1.155
平面应变	$\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$		
其他应力应变状态 (如平面应力状态)	σ_2 不属以上状态	缩口、拉深	≈ 1.1

图 1.3.5 所示为材料单向拉伸应力应变曲线。材料屈服后, 应力应变不再是线性关系, 加载时, 应力应变关系沿曲线 ABC 变化, 而在 C 点卸载时, 则应力应变沿 CD 线变化, 卸载后再加载时, 此时应力应变沿 DC 线上升, 而与初始加载时所经历的 $OABC$ 路线不同, 变形过程是不可逆的。且在同一应力 σ' 时, 因加载历史不同, 应变也不同, 可能是 ε' , 也可能是 ε'' ; 反之, 对应于同一个应变 ε_p , 应力可能是 σ'_p 、 σ''_p 。这就难以在应力和应变之间找到一种确定的关系。

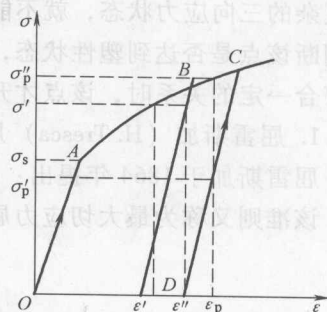


图 1.3.5 单向拉伸应力应变曲线

为揭示塑性变形时的应力应变关系, 塑性加工理论中

通常考虑用增量理论来建立起每一瞬间的应变增量与相应应力的关系。其表达式为

$$\frac{d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \text{常数} \quad (1.3.11)$$

增量理论在计算上引起的困难很大, 尤其材料有冷作硬化时, 计算就更复杂了。为了简化计算, 规定一简单加载的条件, 即在加载过程中, 只能加载, 不能卸载, 各应力分量按同一比例增加。当采取简单加载时, 塑性变形的每一瞬间, 主应力与主应变之间存在下列关系:

$$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \text{常数} \quad (1.3.12)$$

该式为全量理论, 全量理论表达了塑性变形时应力应变关系为主应力差与主应变差成比例(比值为正)。全量应变理论仅仅表示了塑性变形終了时的主应变与主应力之间的关系, 但它不能反映出变形过程中应力与应变的变化过程所产生的影响。增量理论表示塑性变形的某一瞬间应变增量与主应力之间的关系, 经过积分可把变形过程的特点反映出来, 它更接近于实际情况。增量理论具有普遍性, 但在实用上不够方便。全量理论是在增量理论的基础上得到的, 对于简单加载是正确的。上式也可改写成

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_3}{\sigma_3 - \sigma_m} = \text{常数} \quad (1.3.13)$$

全量理论的应力应变关系式(1.3.12)、式(1.3.13)是对塑性加工中各种工艺参数进行计算的基础。除此之外, 还可利用它们对某些冲压成形过程中毛坯的变形和应力的性质作