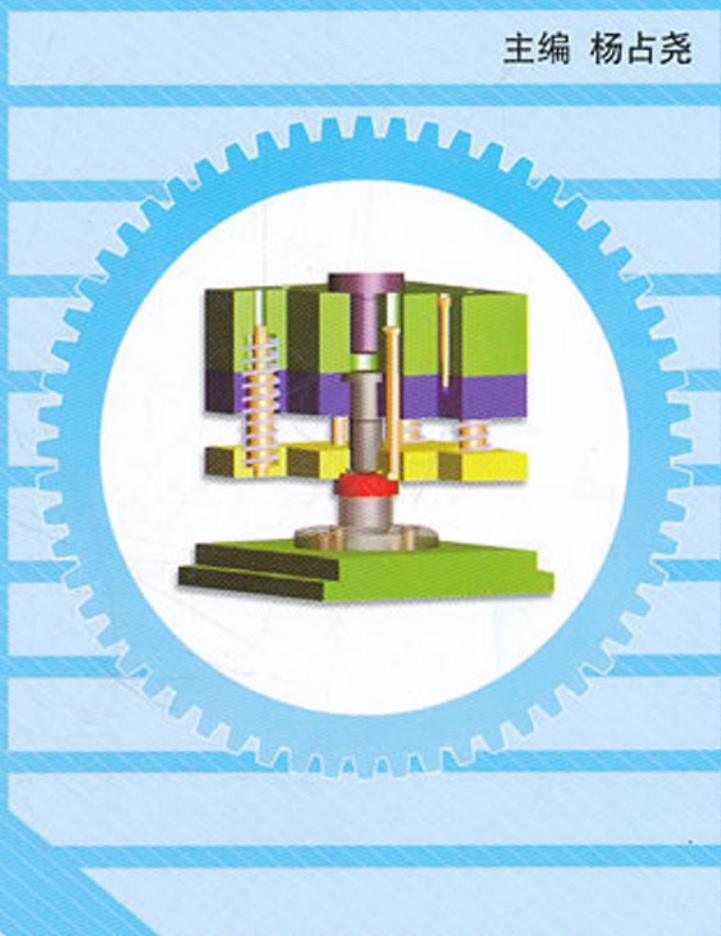
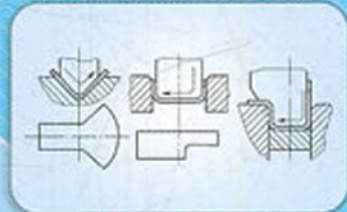
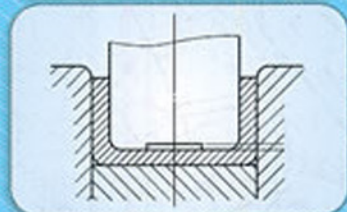
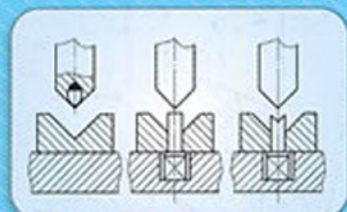




全国高等职业教育“十二五”精品教材

冲压成形工艺 与模具设计

主编 杨占尧



航空工业出版社

全国高等职业教育“十二五”精品教材

冲压成形工艺与模具设计

主 编 杨占尧

副主编 张咸华 余昌全

- 国家级教学名师主编统稿
- 国家级精品课程配套使用
- 工作过程导向项目式教学
- 内容含课程设计系统完整

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书以培养学生冲压成形工艺的制定与模具设计能力为核心,按照冲压模具设计的整个工作过程,将冲压成形加工原理、冲压设备、冲压成形工艺制定与冲模设计有机融合,以8套典型模具为载体,突出实用性、综合性、先进性,综合训练学生的应用能力。

本书内容通俗实用,紧扣生产实际,以冲压成形工艺的制定与模具设计技术为主线,设置了9个综合性训练项目,分别是冲压加工基础、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、其他冲压工艺与模具设计、多工位级进模具设计、冲压设备的选用与操作维护、垫片成形工艺与模具设计和冲压模具课程设计等。全书内容从冲压加工基础开始直至冲压模具课程设计为止,形成一个完整的闭环系统,既具有职业特征,体现任务综合性,又富有教学价值。在每个项目最后都配有实训与练习,引导学生将所学知识与企业实际零距离对接。

本书可作为高等职业院校、高等专科院校、五年制高职、成人高校、民办高校及本科院校举办的二级职业技术学院模具专业的教学用书,也可作为数控技术、机械设计与制造等专业拓宽知识面,增设冲压选修课的教学用书,同时可满足模具领域工程技术人员的工作需要。

图书在版编目(CIP)数据

冲压成形工艺与模具设计 / 杨占尧主编. -- 北京 :
航空工业出版社, 2012. 3

ISBN 978-7-80243-886-6

I. ①冲… II. ①杨… III. ①冲压—工艺—高等职业
教育—教材②冲模—设计—高等职业教育—教材 IV.
①TG386②TG385.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第266737号

冲压成形工艺与模具设计 Chongya Chengxing Gongyi yu Muju Sheji

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话: 010-64815615 010-64978486

北京市科星印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经售

2012年3月第1版

2012年3月第1次印刷

开本: 787×1092

1/16

印张: 18.5

字数: 462千字

印数: 1—3000

定价: 38.00元



进入 21 世纪, 制造技术发展迅猛, 模具技术作为现代制造技术的一个重要组成部分, 对国民经济的发展起着越来越重要的作用。冲压加工具有生产率高、生产成本低、操作简单、适合大批量生产等优点, 在航空、机械、电子、家电等各个领域得到越来越广泛应用。

冲压模具是应用最广的模具品种之一, 《冲压成形工艺与模具设计》是模具设计与制造专业的一门主干核心专业技术课。本教材根据模具技术应用及发展对应用性人才的实际要求, 按照工程过程系统化的思想, 以工作过程为导向, 根据冲压成形工艺与模具设计实际工作, 整合相应的知识和技能, 重构课程结构和知识序列, 选择典型项目, 精选项目载体, 培养学生进行冲压工艺设计、典型冲压模具设计以及冲压模具装调等工作能力。

本教材具有以下特点。

1. 全书在深度分析模具专业所面对的产业基础、发展导向和岗位要求基础上, 以典型工作项目统领整个教学内容, 以典型模具设计、制造的完整工作过程为导向, 通过案例引入、任务驱动, 完成单个项目的训练。

2. 本教材是 2010 年国家级精品课程《家电产品模具工艺与制造》的配套教材, 具有明显的工学结合的职教特色。

3. 本教材是在高职高专国家示范性专业建设成果和“双证课程”研究与实践的基础上编写的, 教材内容强化职业技能和综合技能的培养, 与职业技能鉴定相融合。在教学时, 要求教师在“教中做”、学生在“做中学”, 实现“教、学、做”合一。

4. 多方参与。充分利用各种资源, 尤其是行业、企业的资源, 在学校参与的基础上, 着重行业企业的参与。

本书的参考学时为 60~90 学时, 各项目的参考学时参见学时分配表。

学时分配表

项 目	项 目 内 容	学 时
项目一	冲压加工基础	3 ~ 4
项目二	冲裁工艺与模具设计	16~20
项目三	弯曲工艺与模具设计	10~14
项目四	拉深工艺与模具设计	10~14
项目五	其他冲压工艺与模具设计	4 ~ 8
项目六	多工位级进模具设计	6 ~10
项目七	冲压设备的选用与操作维护	4 ~ 8
项目八	垫片成形工艺与模具设计	4 ~ 6
项目九	冲压模具课程设计	3 ~ 6
课时总计		60~90



全书由第五届高等教育国家级教学名师、河南机电高等专科学校杨占尧教授任主编并统稿，新乡职业技术学院张咸华、湖北三峡职业技术学院余昌全任副主编，参加本书编写的有河南工业大学王高平，新乡职业技术学院杨彬彬、刘俊杰，河南机电高等专科学校高坤、范蕾、李敏、李好学，苏州工业园区职业技术学院李耀辉、新乡航空工业集团公司张宏，许昌职业技术学院李亚男、姚瑞央等。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，希望广大师生提出宝贵意见。

联系方式：E-mail:yangzhanyaoyzy@126.com。

本书配套课件及相关资料可到<http://www.bjjqe.com>网站下载。如果您有什么疑问，也可到该网站咨询。

编 者

2012年2月



目 录

项目一 冲压加工基础	1
一、项目引入	1
二、相关知识	1
(一) 冲压加工的特点、应用及分类	1
(二) 板料塑性变形及其基本规律	4
(三) 冲压常用材料	8
(四) 冲压模具常用材料	10
三、项目实施	12
项目二 冲裁工艺与模具设计	13
一、项目引入	13
二、相关知识	14
(一) 冲裁及其模具	14
(二) 冲裁变形分析	15
(三) 冲裁间隙确定与选择	18
(四) 凸、凹模刃口尺寸计算	21
(五) 冲裁力及其降低措施	26
(六) 冲裁压力中心的计算	30
(七) 冲裁的排样设计	32
(八) 冲裁工艺设计	39
(九) 冲裁模的组成与典型结构	45
(十) 冲裁模零部件设计	52
三、项目实施	66
(一) 设计的前期准备	66
(二) 紫铜板冲孔模总体方案的确定	67
(三) 紫铜板冲孔工艺计算	69
(四) 紫铜板冲孔模装配图的设计绘制	71
(五) 模具零件图的设计绘制	72
(六) 编写、整理技术文件	77
四、项目拓展	78
(一) 非金属材料冲裁	78
(二) 冲裁件断面质量和精度的提高	78
(三) 冲裁模的试模与调整	80
【实训与练习】	81
(一) 实训	81



(二)练习	81
项目三 弯曲工艺与模具设计	83
一、项目引入	83
二、相关知识	84
(一)弯曲变形过程及特点	84
(二)弯曲件质量分析	86
(三)弯曲件毛坯展开尺寸的计算	92
(四)弯曲力计算	95
(五)弯曲件的工艺性	96
(六)弯曲的工序安排	100
(七)弯曲模的典型结构	101
(八)弯曲模工作部分结构参数的确定	109
三、项目实施	113
(一)设计的前期准备	113
(二)弯曲模总方案的确定	113
(三)弯曲件展开长度计算	113
(四)弯曲力的计算	114
(五)模具工作部分尺寸的计算	114
(六)弯曲模装配图的设计绘制	114
(七)弯曲模零件图的设计绘制	115
(八)编写、整理技术文件	120
四、项目拓展—弯曲模的试模与调整	120
【实训与练习】	121
(一)实训	121
(二)练习	121
项目四 拉深工艺与模具设计	122
一、项目引入	122
二、相关知识	123
(一)圆筒形零件拉深工艺分析	123
(二)拉深件的工艺性	127
(三)圆筒形零件拉深工艺计算	129
(四)拉深力与压边力的计算	134
(五)拉深模工作部分设计	137
(六)拉深模的典型结构	142
(七)带凸缘筒形零件的拉深	145
(八)阶梯形状零件的拉深	148
三、项目实施	149
(一)设计的前期准备	149
(二)工艺方案的确定	150

(三)拉伸工艺计算·····	150
(四)模具工作部分尺寸的设计·····	151
(五)拉深模装配图的设计绘制·····	152
(六)拉深模零件图的设计绘制·····	153
(七)编写、整理技术文件·····	156
四、项目拓展·····	156
(一)拉深工艺的辅助工序·····	156
(二)拉深模的试模与调整·····	157
【实训与练习】 ·····	159
(一)实训·····	159
(二)练习·····	159
(三)拉深模具设计·····	159
项目五 其他冲压工艺与模具设计 ·····	160
一、项目引入·····	160
二、相关知识·····	161
(一)校形·····	161
(二)翻边·····	163
(三)胀形·····	170
(四)缩口·····	175
三、项目实施·····	178
(一)衬套翻边工艺分析·····	178
(二)衬套翻边工艺计算·····	178
(三)衬套翻边模装配图的设计绘制·····	178
(四)衬套翻边模零件图的设计·····	178
【实训与练习】 ·····	181
(一)实训·····	181
(二)练习·····	182
项目六 多工位级进模具设计 ·····	183
一、项目引入·····	183
二、相关知识·····	184
(一)多工位级进模具的特点和分类·····	184
(二)多工位级进模具的排样设计·····	185
(三)级进模典型结构·····	200
(四)多工位级进冲压模设计·····	202
三、项目实施·····	217
(一)冲压件工艺性分析·····	217
(二)冲压工艺方案的确定·····	217
(三)模具结构形式确定·····	217
(四)主要设计计算·····	217



(五) 模具总体设计·····	219
(六) 模具主要零件设计·····	219
【实训与练习】·····	222
(一) 实训·····	222
(二) 练习·····	222
项目七 冲压设备的选用与操作维护 ·····	223
一、项目引入·····	223
二、相关知识·····	224
(一) 通用压力机的工作原理和构成·····	224
(二) 通用压力机的分类和表示方法·····	225
(三) 通用压力机的规格及选择·····	227
(四) 其他类型的通用压力机·····	230
(五) 压力机类型的选择·····	234
(六) 液压机的用途和分类·····	234
(七) 液压机的优缺点·····	235
(八) 通用液压机的用途和技术参数·····	236
(九) 冲压液压机·····	237
(十) 双动拉深液压机·····	238
(十一) 曲柄压力机的操作与维护·····	240
三、项目实施·····	243
(一) 紫铜板冲孔模(项目二所设计模具)的设备选用·····	243
(二) U形弯曲件弯曲模(项目三所设计模具)的设备选用·····	245
【实训与练习】·····	246
(一) 实训·····	246
(二) 练习·····	246
项目八 垫片成形工艺与模具设计 ·····	247
一、项目引入·····	247
二、相关知识·····	248
(一) 冲压工艺设计·····	248
(二) 冲压模具设计·····	253
(三) 冲压模具制造·····	257
三、项目实施·····	262
(一) 冲压件的工艺分析·····	262
(二) 工艺方案的确定·····	262
(三) 必要的工艺计算·····	266
(四) 模具总体设计·····	269
(五) 模具主要零部件的结构设计·····	269
(六) 冲压设备的选择·····	271
(七) 绘制模具总装图·····	271



【实训与练习】	272
(一)实训	272
(二)练习	272
项目九 冲压模具课程设计	274
一、项目引入	274
二、相关知识	274
(一)课程设计的内容及步骤	274
(二)冲压模具课程设计应注意的问题	276
(三)模具装配图设计	277
(四)模具零件图设计	278
(五)编写设计计算说明书	278
(六)总结和答辩	279
(七)考核方式及成绩评定	279
三、项目实施	281
参考文献	286

项目一 冲压加工基础

【能力目标】

- ◇ 掌握冲压加工与冲压模具的概念

【知识目标】

- ◇ 熟悉冲压加工的基本工序
- ◇ 了解金属塑性变形的基本概念
- ◇ 了解金属塑性条件
- ◇ 熟悉冲压与冲压模具常用材料
- ◇ 熟悉曲柄压力机和液压机的原理与组成

一、项目引入

在日常生活中，经常遇到如图 1-1 所示的各种制件，它们与我们的生活息息相关。



图 1-1 各种常见制品

以上制件是采用什么加工方法生产的，是采用什么材料生产的，要生产这些制件需要什么工具或模具，这些工具或模具是采用什么材料制造的，这是我们这门课程所要学习的内容。

二、相关知识

(一) 冲压加工的特点、应用及分类

1. 冲压加工与冲压模具的概念

冲压加工是现代机械制造业中先进、高效的加工方法之一，它是在室温下，利用安装在压力机上的模具对材料施力，使其产生分离或塑性变形，从而获得所需零件的一种压力加工方法。冲压加工是少无切削加工的一种主要形式。由于冲压加工通常在室温下进行，所以常常称为冷冲压。又由于它的加工材料主要是板料，又称为板料加工。冲压不但可以加工金属

材料，还可以加工非金属材料。

在冲压加工中，将材料加工成冲压零件（或半成品）的一种特殊工艺装备，称为冲压模具或冷冲模。冲压模具在实现冲压加工中必不可少，没有符合要求的冲压模具，冲压加工就无法进行；没有先进的冲压模具，先进的冲压工艺就无法实现。冲模设计是实现冷冲压加工的关键，一个冲压零件往往要用几副模具才能加工成形。在冲压零件的生产中，合理的冲压成形工艺、先进的模具、高效的冲压设备是必不可少的3要素，如图1-2所示。

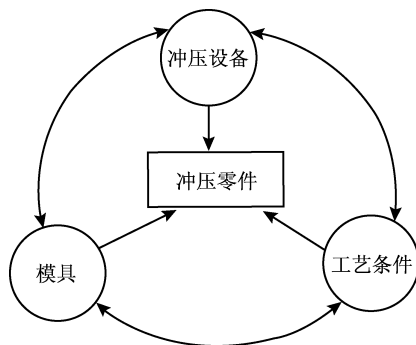


图 1-2 冲压零件质量的影响因素

2. 冲压加工的特点

与其他加工方法（如机械加工）相比，冲压成形具有以下特点。

(1) 可以获得其他加工方法不能或难以加工的形状复杂的零件，如汽车覆盖件、车门等。

(2) 由于尺寸精度主要由模具来保证，所以加工出的零件质量稳定，一致性好，具有“一模一样”的特征。

(3) 冲压加工是少无切削加工的一种，部分零件冲压直接成形，无需任何再加工，材料利用率高。

(4) 可以利用金属材料的塑性变形提高工件的强度、刚度。

(5) 生产率高、易于实现自动化。

(6) 模具使用寿命长，生产成本相对低。

(7) 冲压加工操作简便，但具有一定的危险性，生产中应注意安全。

3. 冲压加工的应用

由于冲压加工的诸多优点，使得冲压加工的应用十分广泛。在汽车、拖拉机、电机、电器、仪表玩具以及日常生活用品的生产方面，都占有十分重要的地位。不少过去用铸造、锻造、切削加工方法制造的零件，现在被刚度好、质量轻的冲压件所代替。

根据近年来的统计表明，在机电以及仪器、仪表生产中，有60%~70%的零件是采用冲压工艺完成的。在汽车生产中大概有60%~70%的零件是采用冲压工艺制成的，冲压生产所占的劳动量是整个汽车行业劳动量的25%~30%。在电子产品中，冲压件所占的比例也相当大。人们日常生活中所用的金属制品，冲压件所占的比例更大，如铝锅、不锈钢餐具等。因此，冲压技术应用非常广泛，学习、研究和发展冲压技术，对发展我国国民经济和加速现代化工业建设具有重要意义。

4. 冲压加工的基本工序

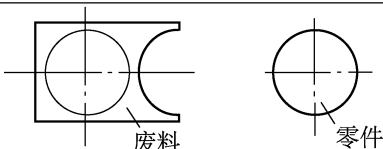
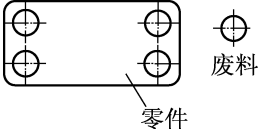
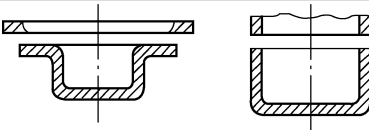
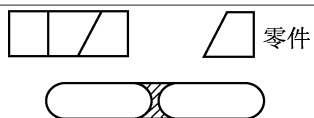
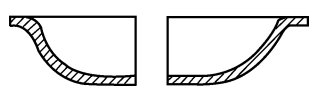
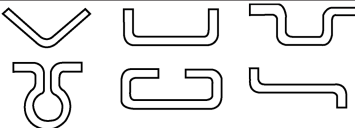
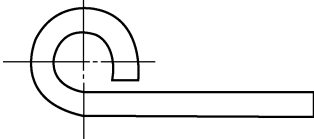
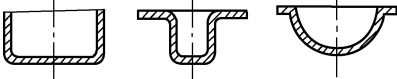
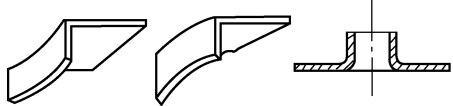
由于冲压件的形状、尺寸和精度不同，因此，冲压所采用的工序种类各异。根据其变形特点，可以分为以下两大类。

(1) 分离工序。使板料沿一定的轮廓线分离而获得一定形状、尺寸和断面质量的冲压件（俗称冲裁件）的工序。分离工序主要包括冲孔、落料、切边等工序。

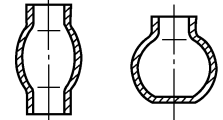

(2) 成形工序。使材料在不破裂的条件下产生塑性变形而获得一定形状、尺寸和精度的冲压件的加工工序。成形工序主要包括弯曲、拉深、翻边、胀形、缩口等。

常用的冲压工序见表 1-1。

表 1-1 常用的冲压工序

工序名称	简 图	特点及应用范围
分离工序	落料 	用冲模沿封闭轮廓线冲切，冲下部分是零件，或为其他工序制造毛坯
	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，多用于加工形状简单的平板零件
	剖切 	将冲压加工成的半成品切开，成为两个或多个零件，多用于不对称零件的成双或成组冲压成形之后
成形工序	弯曲 	将板材沿直线弯成各种形状，可以加工形状复杂的零件
	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
	拉深 	将板材毛坯拉成各种空心零件，还可以加工汽车覆盖件
	翻边 	将零件的孔边缘或外边缘翻出竖立成一定角度的直边

续表 1-1

工序名称		简 图	特点及应用范围
成形 工序	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

此外，为了提高劳动生产率，常将两个以上的基本工序合并成一个工序，如落料拉深、切断弯曲、冲孔翻边等，称为复合工序。在生产实际中，对于批量生产的零件绝大部分是采用复合工序完成的。

(二) 板料塑性变形及其基本规律

冲压件的冲压成形过程，实质是板料的塑性变形过程。关于塑性变形的基本理论，在有关塑性加工力学的著作中已有详尽、系统的论述，这里只对有关理论做简单描述。

1. 金属塑性变形的基本概念

(1) 塑性。

塑性是金属在外力作用下，能稳定地发生永久变形而不破坏其完整性的能力。它反映了金属的变形能力，是金属的一种重要加工性能。塑性的大小可以用塑性指标来评定。如拉伸实验时塑性指标可以用延伸率 δ 和断面收缩率 φ 来表示。金属的塑性不是固定不变的，它受金属的组织、变形温度、变形速度、制件尺寸等因素的影响。

(2) 塑性变形。

物体在外力的作用下产生变形，取消外力后，物体不能恢复到原始的形状与尺寸，这样的变形称为塑性变形。

(3) 变形抗力。

变形抗力是指金属抵抗形状变化和残余变形的能力。变形抗力反映了材料塑性变形的难易程度。一般来说，塑性好，变形抗力低，对冲压变形是有利的，但不能说某种材料塑性好，变形抗力就一定低。材料进行冷挤压时，在三向压应力作用下表现出很好的塑性，但冷挤压压力同样也很大。

(4) 应力。

在外力的作用下，物体各质点之间会产生相互作用的力，称为内力。单位面积上的内力叫做应力。应力有正应力和剪应力，正应力用 σ 表示，剪应力用 τ 表示。应力的单位一般为 MPa。

(5) 应变。

当物体受外力和内力作用时，要发生变形。表示物体变形大小的物理量称为应变。与应力一样，应变也有正应变和剪应变。正应变用 ϵ 表示，剪应变用 γ 表示。

(6) 点的应力状态。

材料内每一点的受力情况通常称为点的应力状态。点的应力状态通过在该点所取的单元体上相互垂直的各个表面上的应力来表示，如图 1-3 (a) 所示。一般可沿坐标方向将这些力分解为 9 个应力分量，其中包括 3 个正应力和 6 个剪应力，如图 1-3 (b) 所示。

(7) 主应力。

对任何一种应力状态，总是存在这样一组坐标系，使得单元体各表面只出现正应力，而没有剪应力，如图 1-3 (c) 所示。这 3 个正应力称为主应力，分别用 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 表示。当应力 $\sigma_1 > 0$ 时称为拉应力，当应力 $\sigma_1 < 0$ 时称为压应力。

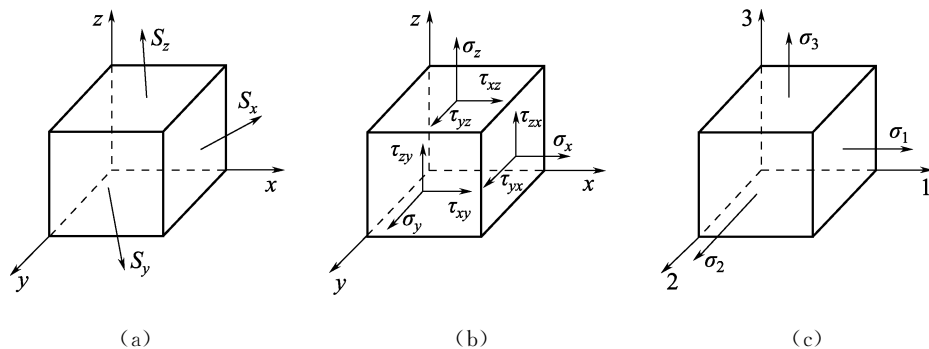


图 1-3 点的应力状态

实验证明，应力状态对金属的塑性影响很大，压应力的数目越多，数值越大，金属的塑性越好；拉应力的数目越多，数值越大，金属的塑性就越差。

(8) 主应变与主应变图。

变形体内存在应力必定伴随应变，点的应变状态也是通过单元体来表示的。与应力状态相似，也可以用应变状态图来表示点的应变状态。可以找到一组坐标系，使得单元体各表面只出现主应变分量 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 而没有切应变分量，如图 1-4 (a) 所示。一种应变状态只有一级主应变。其可能的应变状态仅有 3 种，如图 1-4 (b) 所示。

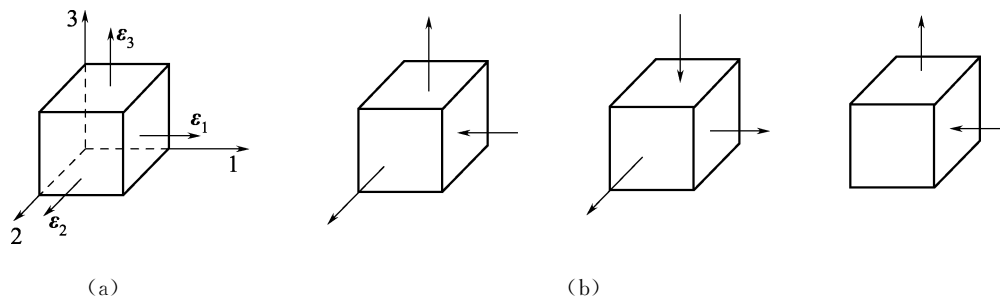


图 1-4 主应变状态图

应变状态对金属塑性有很大影响。由实践可知，单向压缩得到的变形程度比单向拉伸大得多，三向压应力状态的挤压比二向压缩一向拉伸的拉丝能发挥更大的塑性。应力状态中的压应力个数多、压应力大，则塑性好；反之，压应力个数少、压应力小，甚至存在拉应力，塑性就差。这是因为材料的裂纹与缺陷在拉应变的方向易于暴露和发展，沿着压应变的方向则不易暴露和发展。

2. 应力—应变曲线

图 1-5 所示是低碳钢拉伸试验下的应力—应变曲线。从图中看出，材料在应力达到初始屈服极限 σ_0 时开始塑性变形，此时，在应力不太增加的情况下能产生较大的变形，图上出现一个平台，这一现象称为屈服。经过一段屈服平台后，应力就开始随着应变的增大而上升（如图中 cGb 曲线）。如果在变形中途（如图中 G 处）卸载，应力应变将沿 GH 直线返回，

使弹性变形 (HJ) 回复而保留其塑性变形 (OH)。若对试件重新加载, 这时曲线就由 H 出发, 沿 HG 直线回升, 进行弹性变形, 直到 G 点才开始屈服, 以后的应力应变就仍按 GbK 曲线变化。可见 G 点处应力是试样重新加载时的屈服应力。如果重复上述卸载、加载过程, 就会发现, 重新加载时的屈服应力由于变形的逐次增大而不断地沿 Gb 曲线提高, 这表明材料在逐渐硬化。材料的加工硬化对板料的成形影响很大, 不仅使变形力增大, 而且限制毛料的进一步变形。例如拉深件进行多次拉深时, 在后次拉深之前一般要进行退火处理, 以消除前次拉深产生的加工硬化。但硬化有时也是有利的, 如在伸长类成形工艺中, 能减少过大的局部变形, 使变形趋向均匀。

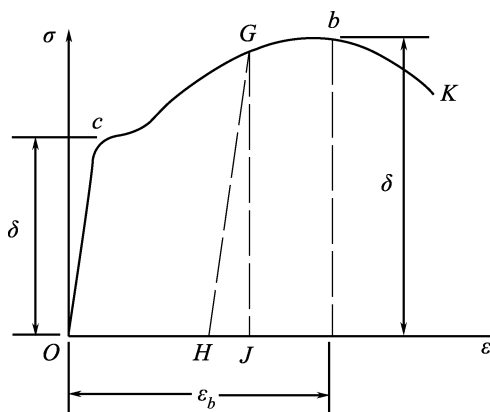


图 1-5 低碳钢拉伸试验下的应力—应变曲线

为了实用上的需要, 必须把应力—应变曲线用数学公式表示出来。但是, 由于各种材料的硬化曲线具有不同的特点, 用同一个数学公式精确地把它表示出来是不可能的, 目前常用的几种硬化曲线的数学表达式都是近似的。例如应力—应变曲线的线性表达式为

$$\sigma = \sigma_0 + F \epsilon \quad (1-1)$$

式中 σ_0 ——近似的屈服极限, 也是硬化直线在纵坐标轴上的截距;

F ——硬化直线的斜率, 称为硬化模数, 它表示材料硬化强度的大小。

3. 塑性变形体积不变定律

实践证明, 在物体的塑性变形中, 变形前的体积等于变形后的体积, 这就是金属塑性变形体积不变定律。它是以后我们进行变形工序中毛坯尺寸计算的依据。用公式表示为

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \quad (1-2)$$

4. 塑性变形最小阻力定律

塑性变形破坏了金属的整体平衡而强制金属流动, 当变形体的质点有可能沿不同方向移动时, 则每个质点沿最小阻力方向移动, 这就是最小阻力定律。坯料在模具中变形, 其最大变形将沿最小阻力的方向。最小阻力定律在冲压工艺中有十分灵活和广泛的应用, 能正确指导冲压工艺及模具设计, 解决实际生产中出现的质量问题。

5. 塑性条件

所谓塑性条件就是在单向应力状态下, 如果拉伸或压缩应力达到材料的屈服点 σ_s 便可以屈服, 从弹性状态进入塑性状态。但对复杂应力状态就不能仅仅根据一个应力分量来判断一点是否已经屈服, 而要同时考虑各应力分量的综合作用。在复杂应力状态下, 各应力分量



之间符合某种关系时,才能同单向应力状态下确定的屈服点等效,从而使物体从弹性状态进入塑性状态,此时,应力分量之间的这种关系就称为塑性条件,或称为屈服准则。

塑性条件必须经过实验验证。经过实践检验并被公认的塑性条件有两种:屈雷斯加(H. Tresca)屈服准则和密西斯(Von Mises)屈服准则。

(1) 屈雷斯加屈服准则

1864年,法国工程师屈雷斯加(H. Tresca)认为:材料中最大剪应力达到一定值时开始屈服,即屈雷斯加屈服准则,其数学表达式为

$$\tau_{\max} = \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right| = \frac{\sigma_s}{2} \quad (1-3)$$

$$|\sigma_1 - \sigma_3| = \sigma_s \quad (1-4)$$

式中 σ_s ——材料的屈服极限。

(2) 密西斯(Von Mises)屈服准则

1913年,德国学者密西斯(Von Mises)提出:在一定的变形条件下,无论变形物体所处的应力状态如何,只要其3个主应力满足以下条件,材料便开始屈服,即密西斯屈服准则,其数学表达式为

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 \quad (1-5)$$

6. 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某种关系。当物体产生弹性变形时,应力与应变之间的关系是线性的、变形过程是可逆的,其变形可以恢复,与物体的加载过程无关,应力与应变之间的关系可以通过广义虎克定律来表示。物体进入塑性变形后,其应力与应变的关系就不同了。在单向受拉或受压时,应力与应变关系可以用硬化曲线来表示,然而在受到双向或三向应力作用时,变形区的应力与应变关系相当复杂。研究表明,简单加载(加载过程中只加载不卸载,且应力分量之间按一定比例递增)时,塑性变形的每一瞬间,主应力与主应变之间存在以下关系

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\varepsilon_2 - \varepsilon_3} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \quad (1-6)$$

也可表示为

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_m}{\varepsilon_1} = \frac{\sigma_2 - \sigma_m}{\varepsilon_2} = \frac{\sigma_3 - \sigma_m}{\varepsilon_3} = C \quad (1-7)$$

式中 C ——非负数的比例常数;

σ_m ——平均应力。在一定条件下, C 只与材料性质及变形程度有关,而与物体所处的应力状态无关,故 C 值也可由单向拉伸实验求出。

上述物理方程又称为塑性变形时的全量理论。

7. 加工硬化现象

常用的金属材料塑性变形时强度和硬度升高,而塑性和韧性降低的现象称为加工硬化或冷作硬化。加工硬化对许多冲压工艺都有较大影响,如由于塑性降低,限制了毛坯进一步变形,往往需要在后续工序之前增加退火工序以消除加工硬化。加工硬化也有有利的一面,如提高局部抗失稳起皱的能力。