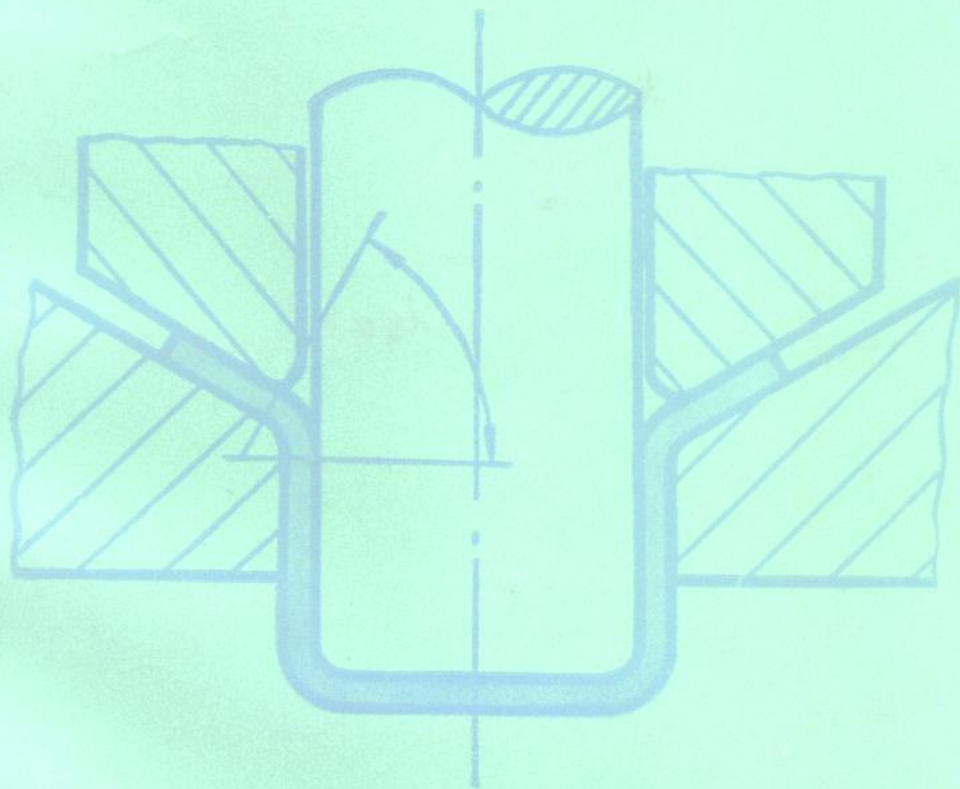


冲压工艺及冲模设计

《冲压工艺及冲模设计》编写委员会 编著



国防工业出版社

7938
79

冲压工艺及冲模设计

《冲压工艺及冲模设计》编写委员会 编著

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

冲压工艺及冲模设计/《冲压工艺及冲模设计》编写委员会编著.

—北京:国防工业出版社,1993

ISBN 7-118-01147-9

I. 冲…

I. 冲…

Ⅱ. ①冲压-工艺 ②冲模-设计

N. TG38

冲压工艺及冲模设计
《冲压工艺及冲模设计》编写委员会 编著
责任编辑 周润芬

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京市怀柔县王史山印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 印张 30 725 千字

1993 年 7 月第一版 1993 年 7 月第一次印刷 印数:00001—7000 册

ISBN 7-118-01147-9/TG. 76 定价:24.80 元

机械电子工程师进修大学兵器学院
西南分校继续工程教育教材开发
领导小组成员

顾问	王之光	研究员级高级工程师
组长	王兆泉	高级工程师
副组长	罗书林	高级工程师
	丁福泉	高级工程师
	欧世民	高级工程师
成员	罗万达	讲师
	王方平	工程师
	潘守勤	工程师

《冲压工艺及冲模设计》编辑委员会成员

主编	严寿康	高级工程师
副主编	孙伦宝	副教授
	刘汉贵	高级工程师
	李德华	高级工程师
主审	陈观鹏	副教授
	袁世增	副教授

前 言

继续工程教育是适应新技术挑战和经济竞争的主要战略措施。随着新产品的不断开发，在发展商品经济的工业企业中，大量采用了新技术、新工艺、新材料以及现代管理方法，使军工企业的产品结构发生了重大的变化。从而要求广大专业技术人员具有较高的技术业务素质，并对新科学和新知识不断地进行拓宽、加深和提高。

为适应工程技术人员对新理论、新技术学习和应用的需要，也为继续工程教育提供一本简明实用的教材，根据兵器工程师进修学院课程设置规划和教材开发的要求，在兵器工程师进修学院和西南兵工教材开发领导小组的共同组织下，由具有坚实理论基础和丰富教学经验的大学教师、长期从事军民品冲压工艺技术研究的研究人员和冲压工艺应用设计的企业工程技术人员，并结合十年来军民品生产开发中的冲压新技术，以及由国外引进的先进冲压模具设计、生产实践的基础上编写而成。在编写中坚持理论联系实际的原则和适宜成人学习的特点，因而具有较强的实用性和先进性。

本书的编写自始至终得到兵器学院和西南兵工教材开发领导小组的精心组织和具体指导。在编写过程中得到了国营嘉陵机器厂、国营长安机器厂、国营红宇机器厂、西南技术工程研究所等单位的大力支持和热情帮助，同时，孙冠弘同志在文稿及图稿整理中做了大量的工作。在此一并表示衷心的感谢。

本书各章的编写人员如下：第一章孙伦宝，第二章洪奕，第三章崔淑兰，第四章严寿康、王方平，第五章姚克智，第六章曾畅基、叶思华，第七章陈茂农，第八章李德华、杨坤兴、周亚，第九章许定亚、丁世仁，第十章詹治恩，第十一章王少华、涂仲益，第十二章杨晓卢、谯永强。

由于编者水平所限，本书难免有不当之处，敬请读者批评指正。

内 容 简 介

本书对冲压工艺及冲模设计作了系统论述。全书包括两篇共 12 章。第一篇冲压工艺,介绍冲压的基本理论与冲裁、弯曲、拉深和成形工艺。第二篇冲模设计,介绍常用冲模设计、各种复杂精密冲模设计、模具 CAD 以及冲压安全技术与冲压设备的选用。全书以冲模设计为主,重点阐述复杂汽车覆盖件冲模设计、高精度、高效率及高寿命多工位级进模设计和精密精冲模设计等内容。本书反映了国内外冲模设计的新成就和新结构,对推广复杂、精度模具设计具有实用价值。

本书可作为科技工作者继续工程教育和成人高等教育的教材,供工厂、科研单位的工程技术人员和高等院校师生参考,也可作为专业技术培训提高的教材。

目 录

第一篇 冲压工艺

第一章 冲压成形的基本理论	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 金属塑性变形的力学规律	(5)
第三节 硬化与硬化曲线	(8)
第四节 冲压成形的力学特点与分类	(12)
第五节 板料的冲压成形性能	(14)
第六节 成形极限图	(25)
第二章 冲裁	(28)
第一节 冲裁的变形过程	(28)
第二节 冲裁间隙	(29)
第三节 冲裁力和压力中心的确定	(37)
第四节 排样与搭边	(45)
第五节 整修与精密冲裁	(50)
第三章 弯曲	(59)
第一节 弯曲变形过程分析	(59)
第二节 应变中性层的位置及最小弯曲半径的确定	(64)
第三节 弯曲力的计算	(68)
第四节 弯曲件的回弹	(70)
第五节 弯曲毛坯尺寸的确定	(78)
第四章 拉深(拉延)	(83)
第一节 概述	(83)
第二节 拉深力与拉深功	(89)
第三节 起皱和拉裂	(96)
第四节 拉深件毛坯计算	(102)
第五节 直壁类回转件的拉深	(108)
第六节 非直壁类回转件的拉深	(117)
第七节 盒形件的拉深	(125)
第八节 变薄拉深	(129)
第五章 成形	(135)
第一节 胀形	(135)
第二节 翻孔与翻边	(143)

第三节 缩口	(151)
第四节 校平与整形	(156)
第六章 冲压工艺设计	(160)
第一节 冲压用材料	(160)
第二节 工艺性分析	(164)
第三节 确定冲压件的最佳工艺方案	(170)
第四节 冲压件工艺过程编制实例	(176)

第二篇 冲模设计

第七章 常用冲模设计	(192)
第一节 概述	(192)
第二节 冲裁模设计	(194)
第三节 弯曲模设计	(203)
第四节 拉深模设计	(209)
第五节 冲模零部件设计	(218)
第六节 冲模常用材料及热处理	(233)
第八章 覆盖件冲模设计	(237)
第一节 汽车覆盖件特点与要求	(237)
第二节 拉延件的确定	(239)
第三节 拉延模设计	(249)
第四节 修边模设计	(265)
第五节 翻边模设计	(292)
第六节 扣合模设计	(304)
第七节 多工位压力机模具设计	(314)
第八节 覆盖件冲模使用的材料	(326)
第九章 精冲	(328)
第一节 精冲的基本概念	(328)
第二节 精冲变形原理与应力分析	(329)
第三节 精冲件的工艺性分析	(335)
第四节 精冲模结构	(339)
第五节 精冲模设计	(342)
第六节 精冲材料	(364)
第七节 典型精冲模设计实例	(369)
第十章 多工位级进模	(378)
第一节 概述	(378)

第二节	排样图设计	(378)	第三节	冲裁件的图形输入	(435)
第三节	多工位级进模结构设计	(387)	第四节	冲裁工艺设计	(438)
第四节	多工位级进模零、部件设计 ...	(398)	第五节	冲模结构设计	(445)
第五节	多工位级进模典型结构	(422)	第十二章	冲模的安全技术与冲压	
第十一章	冲模计算机辅助设计	(428)		设备的选用	(453)
第一节	概述	(428)	第一节	冲模的安全技术	(453)
第二节	冲模 CAD 系统	(431)	第二节	冲压设备的选用	(462)

第一篇 冲压工艺

第一章 冲压成形的基本理论

第一节 概 述

一、冲压工艺的特点

冲压是一种先进的金属加工方法。它是建立在金属塑性变形的基础上，利用模具和冲压设备对板料施加压力，使板料产生塑性变形或分离，从而获得一定形状、尺寸和性能的零件。

冲压生产依靠模具和冲压设备完成加工过程，因此它具有生产率高、操作简便、便于实现机械化和自动化的特点。采用精密复杂的模具，能加工出用其他方法难于生产的形状复杂的零件，且尺寸精度稳定，材料利用率高，零件重量轻。在大批量生产中，是一种先进的优质、高产、低消耗和低成本加工方法。

由于冲压生产的上述特点，因此在兵工、航空、电子、汽车、电机电器、精密仪器以及轻工等各个生产领域中得到广泛的应用。随着汽车和家用电器等工业的高速发展，在许多先进工业国家里，冲压生产和模具工业得到高度的重视，例如美国和日本，模具工业的产值已超过机床工业，模具工业成为重要的产业部门，而冲压生产则成为生产优质先进机电产品的重要手段。

板料、模具和冲压设备是冲压生产的三要素。为了获得质优价廉的冲压零件，必须提供优质的板料、先进的模具和性能优良的冲压设备；还应该掌握板料的成形性能和变形规律，必须设计并制造出各种精密的复杂模具，必须生产出各种满足工艺要求的通用和专用的冲压设备。目前世界各国不断研制出冲压性能良好的板料，研究板料的冲压成形性能，不断改善模具加工设备，设计研制高质量模具，生产出了对冲压生产具有关键作用的高效率、高精度和高寿命的大型复杂模具，从而使冲压生产与模具工业进入了一个崭新的阶段。

二、冲压工序分类

冲压工序可分为分离工序和成形工序两大类。分离工序是在冲压过程中使冲压零件与板料沿一定的轮廓线相互分离，同时冲压零件的分离断面要满足一定的质量要求。成形工序是板料在不破裂的条件下产生塑性变形，获得所要求形状的零件，同时也应满足

尺寸精度的要求。

常用的各种冲压工序见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 分离工序

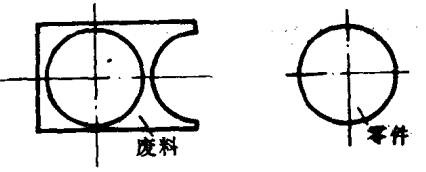
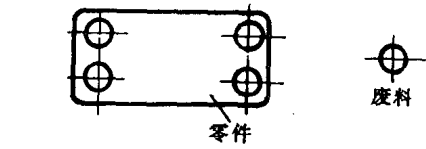
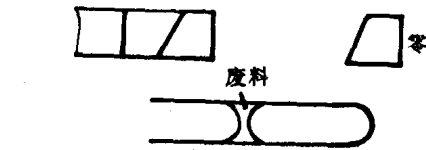

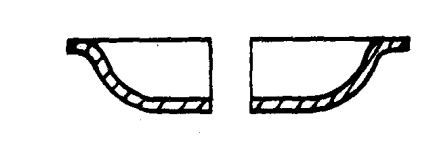
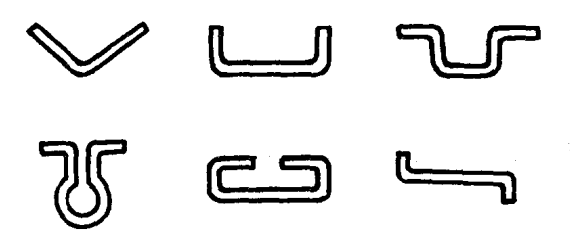
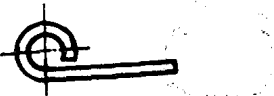

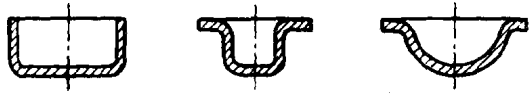




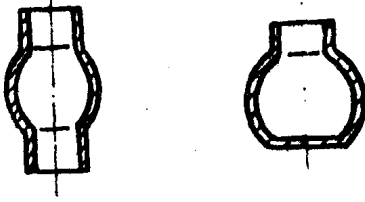


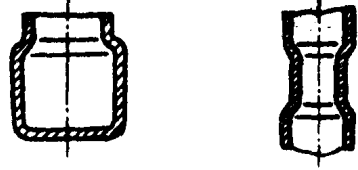
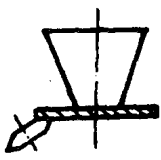
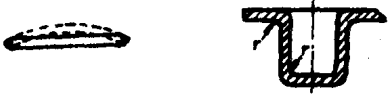
工序名称	简 图	特点及应用范围
落 料		<p>用冲模沿封闭轮廓曲线冲切，冲下部分是零件。用于制造各种形状的平板零件</p>
冲 孔		<p>用冲模按封闭轮廓曲线冲切，冲下部分是废料</p>
切 断		<p>用剪刀或冲模沿不封闭曲线切断，多用于加工形状简单的平板零件</p>
切 边		<p>将成形零件的边缘修切整齐或切成一定的形状</p>
剖 切		<p>把冲压加工成的半成品切开成为两个或数个零件，多用于不对称零件的成双或成组冲压成形之后</p>

表 1-2 成形工序

工序名称	简 图	特点及应用范围
弯 曲		<p>把板料沿直线弯成各种形状，可以加工形状极为复杂的零件</p>

(续)

工序名称	简 图	特点及应用范围
卷 圆		把板料端部卷成接近封闭的圆头，用以加工类似铰链的零件
扭 曲		把冲裁后的半成品扭转成一定角度
拉 深		把板料毛坯成形制成各种空心的零件
变薄拉深		把拉深加工后的空心半成品进一步加工成为底部厚度大于侧壁厚度的零件
翻 孔		在预先冲孔的板料半成品或未经冲孔的板料上冲制成竖立的边缘
翻 边		把板料半成品的边缘按曲线或圆弧成形成竖立的边缘
拉 弯		在拉力和弯矩共同作用下实现弯曲变形，可得精度较好的零件

工序名称	简 图	特点及应用范围
胀 形		<p>在双向拉应力作用下实现的变形, 可以成形各种空间曲面形状的零件</p>
起 伏		<p>在板料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</p>
扩 口		<p>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</p>
缩 口		<p>在空心毛坯或管状毛坯的某个部位上使其径向尺寸减小的变形方法</p>
旋 压		<p>在旋转状态下用辊轮使毛坯逐步成形的方法</p>
校 形		<p>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</p>

第二节 金属塑性变形的力学规律

冲压成形时，外力通过模具或其他工具作用在板料上，使板料内部产生应力，由于外力的作用状况、板料的形状和模具的尺寸千差万别，因而引起板料内各点的应力与变形也各不相同，因此必须研究变形物体内部各点的应力状态、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。

一、变形物体的应力应变状态

假设在变形物体内部任意点取一个六面单元体，该单元体上应力状态可取其互相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九个应力分量，其中包括三个正

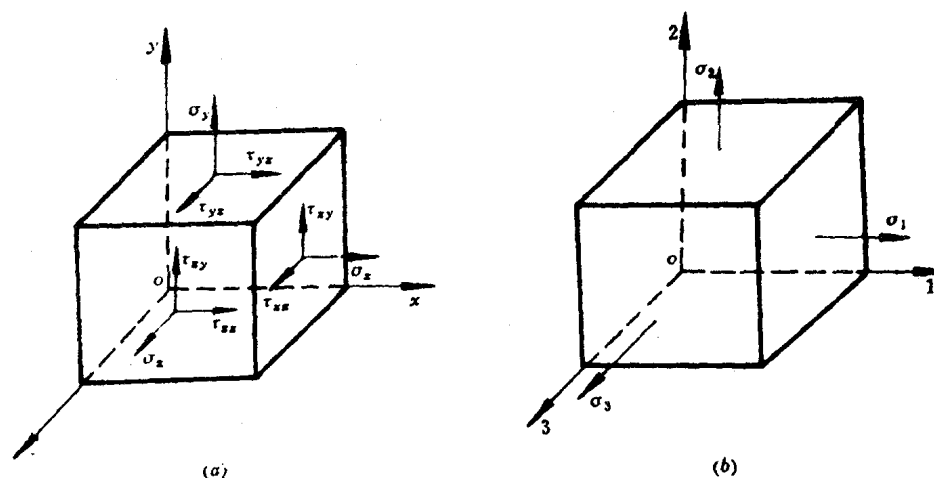


图 1-1 点的应力状态

(a) 任意坐标系；(b) 主轴坐标系。

应力和六个剪应力，如图 1-1 (a) 所示。由于单元体处于静力平衡状态，故单元体各轴的合力矩为零，可得出互相垂直平面上剪应力互等， $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ， $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ ， $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ ，因此已知三个正应力和三个剪应力，那么该点的应力状态就可以确定了。由于坐标轴所取的方位不同，这六个应力分量的大小也不一样，可以证明，对任何一种应力状态，总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剪应力，如图 1-1 (b) 所示。这时，三个坐标轴就称为主轴，三个坐标轴的方向就称为主方向，而三个正应力就叫做主应力，一般按其代数值大小依次为 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 ，即 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 。三个主应力的作用面称主平面。

一般情况下，单元体的三个主方向都有应力存在，这种应力状态称为三向应力状态，或称空间或立体应力状态，如宽板弯曲变形。但板料的大多数成形工序，沿材料厚度方向的厚向应力 σ_1 与其他两个垂直方向的主应力（即径向应力 σ_r 与切向应力 σ_θ ）比较，相对来说往往很小，可以忽略不计，如拉深、翻孔和胀形变形，这种应力状态称平面应力

状态或两向应力状态。三个主应力中有两个为零，只在一个方向有应力，称为单向应力状态，在板料的内孔边缘和外形边缘处常常是自由表面，故径向应力 σ_r 为零，而板料大多数成形工序的厚向应力 σ_t 也为零，故此处为单向应力状态。

如果三个主应力大小都相等，即 $\sigma_p = \sigma_s = \sigma_t$ ，称为球应力状态，深水中物体就承受三向等压应力称静水压力。冲裁工序中，静水压力的大小对极限塑性应变值和裂纹的产生都有很大影响。除主平面不存在剪应力外，单元体其他方向的截面上均存在剪应力，而在与主平面成 45° 的截面上的剪应力达到极值，称主剪应力，同样，主剪应力及其作用面共有三组，且互相垂直。可以证明，如果 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ，则最大剪应力 $\tau_{\max} = \pm (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ 。最大剪应力与材料的塑性变形关系很大。还有一个与塑性变形密切有关的量称等效应力 σ_i （或称应力强度），其表达式为

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

等效应力不是真正作用在单元体某截面上的实际应力，而是衡量该点应力状态受载程度的一个指标。对整个受力的变形物体而言，外力增加称为加载，外力减小称为卸载。但对物体中某点来说，就不能简单根据外载荷的变化来判断，因为随着外载荷的变化，物体发生变形，物体内部各点的应力状态也随之变化，而相互之间的关系是很复杂的，这时就应根据该点等效应力 σ_i 的变化来确定是加载还是卸载。如果在某瞬间 σ_i 是增大的，那么对该点而言，这一瞬间是加载。反之，如果 σ_i 是减小的，则该点就是卸载。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。简单加载时，三个应力主轴的方向是不会改变的，而应力应变的关系也得到简化。

应力产生应变，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剪应变，也可找到一组坐标轴，使单元体各表面上剪应变为零，这样的坐标轴称应变主轴，沿应变主轴方向上的正应变称主应变，主应变也有三个，分别为 ε_1 、 ε_2 和 ε_3 ，按代数大小排列为 $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$ 。

实践证明，塑性变形时物体主要发生形状的改变，而体积的变化很小，可以忽略不计，即认为

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (1-2)$$

这就是塑性变形体积不变定律，它反映了三个正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，即上式中 $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$ 时， ε_1 必然为零。在平面应变状态时（若 $\varepsilon_3 = 0$ ），则另外两个应变绝对值必然相等，而符号相反（即 $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$ ）。

二、塑性条件

当物体中某点处于单向应力状态时，只要该点的应力达到材料的屈服极限，该点就进入塑性状态。可是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已经屈服，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。

1864年屈雷斯加(H. Tresca)提出：“任意应力状态下只要最大剪应力达到某临界值

后材料就开始屈服”。这就是最大剪应力理论。通过单向拉伸试验可得出，此临界值等于屈服极限的一半（即 $\sigma_s/2$ ）。设 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ，最大剪应力理论可表达为

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

最大剪应力理论，虽然形式简单与试验结果基本相符，用于分析板料成形问题也有足够精度，但只考虑最大剪应力的作用（也即在三个主应力中忽略了中间主应力 σ_2 的作用），理论上未免有些欠缺。

1913年米塞斯（Von Mises）提出另一塑性条件对此加以修正，提出：“当某点的等效应力达到某一临界值时，材料就开始屈服”。同样通过单向拉伸试验可确定，该值就是材料的屈服极限 σ_s 。米塞斯塑性条件可表达如下

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

或

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 \quad (1-4)$$

实际上，米塞斯准则与屈雷斯加准则之间差别很小，如果将式（1-4）中消去 σ_2 ，可得

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta\sigma_s \quad (1-5)$$

式中 β ——与中间应力 σ_2 有关的系数。

经过计算可求出：当单向拉伸（ $\sigma_1 > 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ）、单向压缩（ $\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 < 0$ ）、双向等拉（ $\sigma_1 = \sigma_2 > 0, \sigma_3 = 0$ ）、双向等压（ $\sigma_1 = 0, \sigma_2 = \sigma_3 < 0$ ）时， $\beta = 1$ 。纯剪（ $\sigma_1 = -\sigma_3, \sigma_2 = 0$ ）、平面应变（ $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ ）时， $\beta = 1.155$ 。可以证明 β 值的变化范围为 $1 \leq \beta \leq 1.155$ 。在应力分量未知情况下， β 可取平均值 1.1。

三、塑性应力应变关系

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，物体在弹性变形阶段，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，应力和应变之间是单值关系，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。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。如图 1-2 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 ABC 曲线变化，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 CD 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。且在同一个应力 σ 时，因为加载历史不同，应变也不同，可能是 ϵ' ，也可能是 ϵ'' 。因此在塑性变形时，应变不仅与应力大小有关，而且与加载历史有着密切的关系。一般说来，塑性变形时，应力与全量应变 ϵ 之间不存在对应关系。为了建立物体受力与变形之间的关系，只能撇开整个变形过程，而取加载过程中某个微量时间间隔 dt 来研究。因此出现了应力与应变增量之间的关系式，称增量理论，其表达式为

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

式中 $d\varepsilon_1, d\varepsilon_2, d\varepsilon_3$ ——主应变增量。

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，在简单加载情况下，可得出全量理论，其表达式为

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

在板料成形中，要严格满足简单加载条件是不现实的。实践证明：工程问题的分析计算，只要近似满足简单加载条件，使用全量理论是容许的，这将大大简化分析计算的过程。

利用全量理论分析可以得出：

(1) 当 $\varepsilon_2 = 0$ 时，称平面应变（或称平面变形），由式（1-7）可得出 $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$ 。宽板弯曲就属这种情况。

(2) 当 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 时，由式（1-7）和利用体积不变条件 $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$ ，可得 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$ ，也就是说，当材料上三个主应力相等，即三向等拉或三向等压时，材料不产生塑性变形，仅有弹性变形。

(3) 当 $\sigma_1 > 0$ ，且 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 时，材料受单向拉应力作用。利用式（1-7）可得 $\varepsilon_1 > 0$ ，且 $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = - (1/2) \varepsilon_1$ ，也就是说，当单向拉伸时，在拉应力作用方向上为伸长变形，其余两方向上为压缩变形，且为伸长变形之半，翻孔变形材料边缘属此类。同理对单向压缩变形，即 $\sigma_3 < 0$ ，且 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ ，可以得出 $\varepsilon_3 < 0$ ， $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = - (1/2) \varepsilon_3$ ，即压应力作用方向为压缩变形，其余两方向为伸长变形，且为压缩变形之半，缩口变形材料边缘属此类。

(4) 当 $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$ ，且 $\sigma_3 = 0$ 时，由式（1-7）得 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 > 0$ 和 $\varepsilon_3 = -2\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2$ ，即当材料受两向等拉时，拉应力方向上为拉伸变形。而在材料厚度方向为压缩变形，其值为伸长变形的两倍。平板材料胀形时的中心部分就是双向等拉应力状态。

(5) 当 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ 时，由式（1-7）分析可知，最大拉应力 σ_1 方向上的变形一定是伸长变形。而在最小拉应力 σ_3 方向上的变形一定是压缩变形。在两向拉应力作用下的胀形变形，拉应力方向上的变形是伸长变形，而厚度方向是压缩变形，使材料变薄。

(6) 当 $0 > \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 时，由式（1-7）分析可知，在最小压应力 σ_3 （绝对值最大）方向上的变形一定是压缩变形。而在最大压应力 σ_1 （绝对值最小）方向上的变形一定是伸长变形。

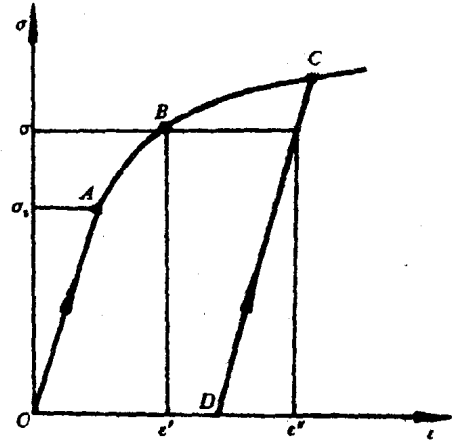


图 1-2 单向拉伸应力应变曲线

第三节 硬化与硬化曲线

前面讨论塑性条件和塑性应力应变关系时，为了使问题简化，假设材料具有理想塑

性性质，即屈服极限恒为一常数，与变形程度无关。但实际材料在塑性成形过程中，随着变形程度的增加，其变形抗力（即每一瞬间的屈服强度 σ_s ）是不断增高的，硬度也将提高，而塑性（金属在外力作用下能稳定地改变自己的形状和尺寸而不破坏的能力）下降，即塑性指标如延伸率下降，这种现象称为加工硬化。材料不同，变形条件（变形温度、速度等）不同，其加工硬化的程度就不同。材料的加工硬化对塑性变形的影响很大，不仅使所需的变形力增加，而且限制了材料进一步的变形，甚至要在后续变形工序前增加中间退火工序以消除硬化。但也有其有利的一面，板料硬化能够减小过大的局部变形（减小厚度的局部变薄），变形趋于均匀，增大成形极限。由此可见，在处理冲压生产中许多实际问题时，必须研究和掌握材料硬化和硬化规律以及它们对冲压工艺的影响。

材料的变形抗力随变形程度变化的情况可用硬化曲线来表示。硬化曲线一般可以通过对材料进行拉伸、压缩或板料胀形试验等多种方法获得。如图 1-3 所示为低碳钢拉伸图，可以看出由于材料变形后出现加工硬化，其应力 $\bar{\sigma}$ 随应变 δ 的增加而变化。伸长变形至 b 点，材料产生缩颈，以后变形集中在缩颈部分，为不均匀变形， b 点称失稳点，变形至 K 点断裂。但是上述曲线并未反映出加工硬化的真实情况，因为图中表示的应力者是以变形前试样的原始截面积 F_0 。计算的名义应力 $\bar{\sigma}$ ($\bar{\sigma}=P/F_0$)，而没有考虑变形过程中试样截面积的减小。另外，图中的应变也是用延伸率 δ ($\delta=(l-l_0)/l_0$) 表示，称名义应变，它只考虑了变形前和变形后两个状态试样的尺寸，而未考虑材料变形是一个逐渐积累的过程，即应变应与物体变形的全过程有关，因此用延伸率表示应变也是不准确的。为

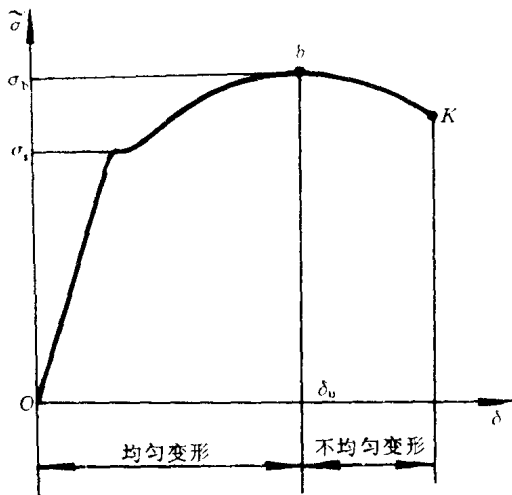


图 1-3 低碳钢拉伸图

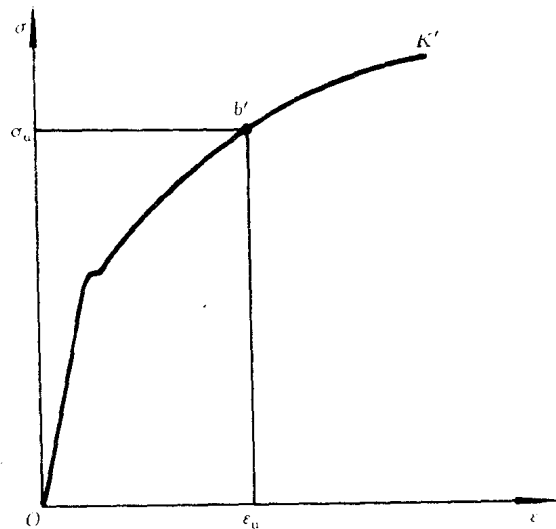


图 1-4 真实应力—真实应变曲线

了真实的反映硬化规律，必须采用真实应力与真实应变来表示。如图 1-4 所示真实应力 σ 为

$$\sigma = \frac{P}{F} \quad (1-8)$$

式中 F ——变形各瞬间的实际最小截面积。