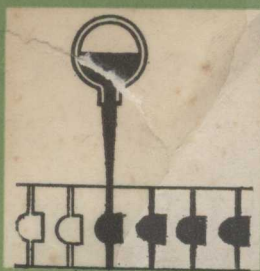
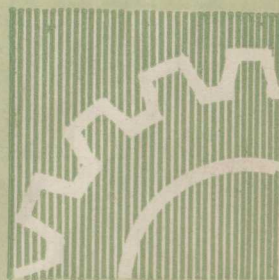
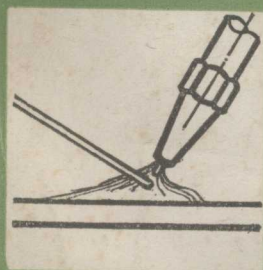
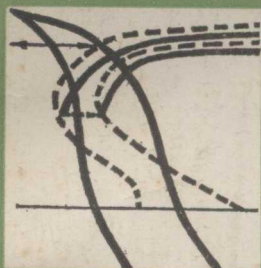


高等学校试用教材



冲压工艺学

哈尔滨工业大学李硕本 主编



机械工业出版社

TG386-43

Z1

高等学校试用教材

冲压工艺学

哈尔滨工业大学李硕本 主编



机械工业出版社

高等工业学校教材

冲压工艺学

哈尔滨工业大学李硕本 主编

冲 压 工 艺 学

哈尔滨工业大学李硕本 主编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

南宁地区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 15·字数 362 千字

1982年1月广西第一版·1982年1月广西第一次印刷

印数 00,001—19,000·定价 1.60 元

*

统一书号：15033·5093

前 言

冷冲压在锻压生产中占有很重要的地位,在各种工业部门中的应用十分广泛,它也是锻压专业教学的基本内容。

冷冲压生产技术是多方面的,但其中最为主要的基础内容是,在充分地了解和掌握各种冲压变形规律的基础上解决冲压加工中出现的各种实际问题,确定最佳工艺参数,以最简便的方式在消耗最低的条件下实现冲压加工过程,获得高质量的冲压产品。因此,确定本教材的内容重点是,以分析讨论各种冲压加工中板料毛坯的受力与变形特点、各种冲压变形的共同规律和每种冲压变形本身的规律为主,并在此基础上进一步研究冲压变形的控制、冲压成形极限的确定与提高、冲模设计的基本原理等各种实际问题的解决原则与方法。

为了便于从变形的规律出发分析和研究各种实际问题,把生产中出现的种类繁多的各种冲压加工方法,按其变形特点、变形性质和变形规律等各方面的特点进行分类,把变形性质和变形规律相同的加工方法归纳在一起,做为本书的理论体系和划分章节的根据。例如,把生产中所谓的拉深件的加工问题,按冲压变形的本质可以分为三个部分,即以分析和解决在一向拉应力和一向压应力作用下使毛坯的外缘部分产生拉深变形为主的直壁旋转体零件的拉深成形部分;以分析和解决冲压毛坯外缘部分的拉深变形和毛坯中间部分的胀形变形之间的相互作用关系为主的曲面零件成形部分;以分析和解决沿毛坯周边产生的不均匀拉深变形为主的非旋转体零件成形部分。这样做,不仅可以在一章之内集中地深入分析讨论某一种冲压成形所特有的问题和规律,而且还可以做到由浅入深地从简单的冲压变形分析开始,逐步地扩展到较为复杂的非旋转体曲面零件的成形问题。这样的课程体系,既便于从变形特点的角度分清各种冲压变形之间的差别,又可以清楚地从变形性质上看到它们之间存在的联系。

在冲压生产当中经常用到的冲压加工方法当中,有一部分冲压加工方法占有一定的比重,可是在当前的冲压书籍里却缺少关于其变形分析方面的资料。根据这种情况,在本书里对曲面翻边、校形、胀形等的变形分析方面的内容做了一定程度的补充与加强。

由于全国各兄弟院校的专业方向、教学计划和教学重点等都不相同,对冷冲压课程的内容、重点、时数等方面的要求也有很大的差别,所以在本书编写时只能根据一般的要求,对冷冲压课程的基本内容做了必要的保证,而各兄弟院校在使用过程中完全可以根据本校教学上的要求,在内容上做必要的取舍或补充,而在讲授顺序上也可适当地调整。如果教学时数较少时,可以把讲课重点放在基本成形方法的分析部分,而删去复杂形状零件成形的特殊问题。本书第二章冲压变形基础中部分内容概括性较强,涉及到各种冲压变形的共同性规律,所以这部分内容的讲授方法应根据具体条件灵活处理,例如,可以在前边先建立基本的概念,而在以后讲解各种变形的基本分析时逐步地加深理解;也可以在讲课结束时再做全面的总结与概括;也可以供学生在总结课程内容时做为参考。

本书是根据1978年4月在天津召开的《高等学校一机部对口专业座谈会》精神和同年12月在重庆召开的《高等学校一机部对口锻压专业教材编审计划会议》所拟定的大纲编写的。全书由哈尔滨工业大学李硕本副教授(第一、二、六、七、八、九、十、十一、十三、

十四章)、于连仲(第四、十二章)、杨玉英(第五、七章)、武汉工学院姜奎华副教授(第三章)等编写。主编李硕本副教授,主审西安交通大学庄礼庭副教授,责任编辑一机部教编室周衍康。参加编写工作的还有哈尔滨工业大学李春峰和王典钧。另外,在本书定稿时,曾请西安交通大学储家佑、张娴如副教授、上海交通大学阮雪榆教授、西北工业大学吴诗惇副教授、清华大学郑可煌副教授、华南工学院刘良沐、重庆大学王孝培、华中工学院肖祥芝等审阅并提出了许多有益的意见,在此深表感谢!

目 录

前言		
第一章 概述	1	
第二章 冲压变形基础	5	
2-1 冲压变形中的应力与变形特点	5	
2-2 硬化与硬化曲线	7	
2-3 各种冲压成形方法的力学特点与分类	10	
2-4 冲压成形中的变形趋向性及其控制	16	
2-5 板料的冲压性能及试验方法	21	
第三章 冲裁	28	
3-1 冲裁过程的分析	29	
3-2 冲裁模间隙	31	
3-3 凸模与凹模刃口尺寸的确定	35	
3-4 冲裁力和功	36	
3-5 精密冲裁	38	
3-6 整修	43	
3-7 聚氨酯橡胶冲裁	45	
第四章 冲裁模	47	
4-1 概述	47	
4-2 冲裁模的基本型式与构造	47	
4-3 冲裁模主要部件与零件的构造	53	
4-4 冲裁模设计要点	63	
第五章 弯曲	67	
5-1 概述	67	
5-2 弯曲时的应力分析与弯矩的计算	70	
5-3 弯曲时的弹复	74	
5-4 提高弯曲件精度的方法	79	
5-5 最小弯曲半径	84	
5-6 弯曲毛坯长度的确定	86	
5-7 弯曲力的计算	89	
5-8 弯曲模	90	
第六章 胀形	95	
6-1 胀形的特点	95	
6-2 平板毛坯的局部胀形	98	
6-3 圆柱形空心毛坯的胀形	100	
第七章 直壁形状零件的拉深	103	
7-1 拉深工艺的特点	103	
7-2 圆筒形零件拉深时的变形特点	105	
7-3 圆筒形零件的拉深系数与拉深次数的确定	110	
7-4 圆筒形件拉深时的起皱及其防止措施	113	
7-5 圆筒形零件用拉深模工作部分尺寸的确定	117	
7-6 拉深件毛坯尺寸的确定	120	
7-7 反拉深	121	
7-8 带法兰边零件的拉深方法	122	
7-9 阶梯形零件的拉深方法	126	
7-10 盒形零件的拉深方法	127	
7-11 其它非旋转体直壁零件的拉深方法	135	
第八章 复杂曲面形状零件的拉深	138	
8-1 曲面形状零件拉深的特点	138	
8-2 球面形状零件的拉深方法	142	
8-3 锥形零件的拉深方法	145	
8-4 非旋转体曲面形状零件的拉深特点	149	
第九章 翻边	153	
9-1 伸长类翻边	153	
9-2 压缩类翻边	162	
第十章 校形工艺	164	
10-1 平板零件的校平	164	
10-2 空间形状零件的校形	166	
第十一章 其它冲压方法	169	
11-1 软模成形	169	
11-2 差温拉深法	171	
11-3 加径向压力的拉深法	172	
11-4 爆炸成形	172	
11-5 电水成形	177	
11-6 电磁成形	179	
11-7 带料连续冲压	180	

11-8 变薄拉深	183	13-1 冲压件的工艺性	209
11-9 旋压	184	13-2 确定冲压加工方案、工序数 目与顺序的几项原则	211
第十二章 冷挤压	186	13-3 冲压工序间半成品的形状与 尺寸的确定原则	219
12-1 概述	186	13-4 冲压设备的选择	220
12-2 冷挤压力的计算	189	第十四章 冲压生产的发展方向	224
12-3 冷挤压模具	201	附录 工艺计算举例	228
12-4 冷挤压工艺过程设计的几个 问题	205		
第十三章 冲压工艺过程设计	209		

第一章 概 述

冷冲压是塑性加工的基本方法之一,它主要用于加工板料零件,所以有时也叫板料冲压。冲压加工的应用范围十分广泛,不仅可以加工金属板料,而且也可以加工非金属材料。冲压加工时,板料在模具的作用下,于其内部产生使之变形的内力。当内力的作用达到一定的数值时,板料毛坯或毛坯的某个部分便会产生与内力的作用性质相对应的变形,从而获得一定形状、尺寸和性能的零件。

冷冲压生产靠模具与设备完成加工过程,所以它的生产率高,而且由于操作简便,也便于实现机械化与自动化。一般的冲压加工,每分钟一台冲压设备可生产零件的数目是几件到几十件;但是,目前已有相当数量高速冲床的生产率已达每分钟数百件或千件以上。

冷冲压产品的尺寸精度是由模具保证的,所以质量稳定,一般不需再经机械加工即可使用。

冲压加工不需要加热,也不像切削加工那样在把金属切成大量碎屑时要消耗很大的能量,所以它是一种省能的加工方法;冲压制品的表面质量较好,用的原材料是冶金厂大量生产的廉价的轧制钢板或钢带,在冲压过程中材料表面不受破坏,能够把表面质量好、重量轻和成本低等各种优点集中在一起,这是任何其它加工方法所不能与之竞争的。因此,冷冲压在现代汽车、拖拉机、电机、电器、仪表以及日常生活用品的生产方面占据十分重要的地位。另一方面,在国防工业生产中冷冲压也是一个重要的加工方法,如在飞机、导弹、各种枪弹与炮弹的生产中冷冲压加工量的比例也是相当大的。冲压生产的发展是我们实现四个现代化和提高人民生活水平过程中必须十分注意的问题。现代各先进的工业国家冲压生产都是非常发达的。

由于冷冲压加工的零件形状、尺寸、精度要求、批量大小、原材料性能等的不同,当前在生产中所采用的冷冲压工艺方法也是多种多样的。但是,概括起来可以分为分离工序与成形工序两大类。分离工序的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,同时,冲压件分离断面的质量,也要满足一定的要求。成形工序的目的,是使冲压毛坯在不破坏的条件下发生塑性变形,并转化成所要求的成品形状,同时也应满足尺寸精度方面的要求。常用的各种冷冲压加工方法,可见表 1-1 与表 1-2。

表1-1 分离工序

工序名称	简 图	特 点 及 应 用 范 围
落 料		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

(续)

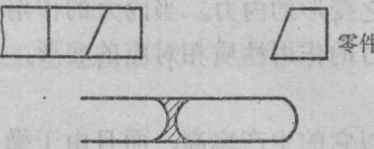
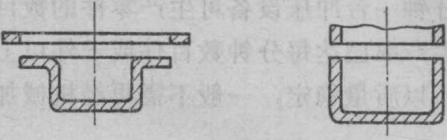
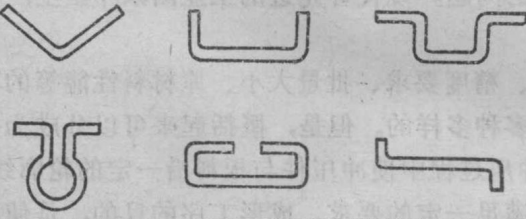
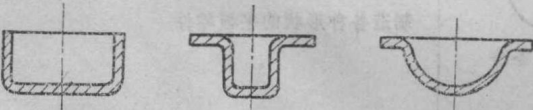
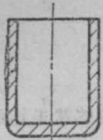
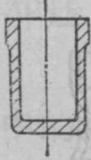
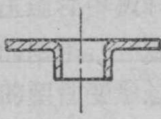
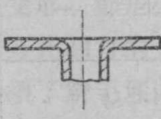
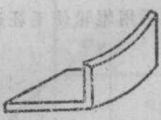
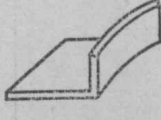
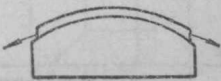
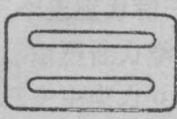
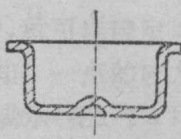
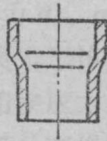
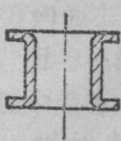
工序名称	简 图	特 点 及 应 用 范 围
冲 孔		用冲模按封闭轮廓曲线冲切，冲下部分是废料
切 断		用剪刀或冲模沿不封闭曲线切断，多用于加工形状简单的平板零件
切 边		将成形零件的边缘修切整齐或切成一定形状
剖 切		把冲压加工成的半成品切开成为二个或数个零件，多用于不对称零件的成双或成组冲压成形之后

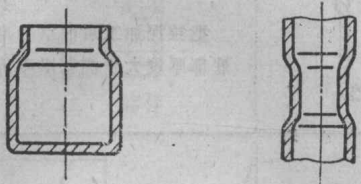
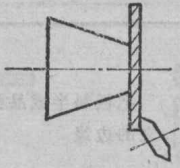
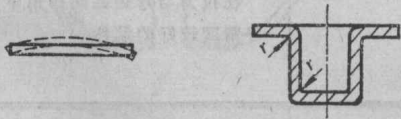
表1-2 成形工序

工序名称	简 图	特 点 及 应 用 范 围
弯 曲		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
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

(续)

工序名称	简	图	特 点 及 应 用 范 围
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上或未经冲孔的板料冲制成竖立的边缘
翻 边			把板料半成品的边缘按曲线或圆弧形成竖立的边缘
拉 弯			在拉力与弯矩共同作用下实现弯曲变形, 可得精度较好的零件
胀 形			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
起 伏			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
扩 口			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

(续)

工序名称	简 图	特 点 及 应 用 范 围
缩 口		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
旋 压		在旋转状态下用辊轮使毛坯逐步成形的方法
校 形		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

第二章 冲压变形基础

2-1 冲压变形中的应力与变形特点

在各种冲压过程中板料毛坯的塑性变形，都是模具对毛坯施加的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力的大小都对应着一定的变形。因此，为了研究和分析金属的塑性变形过程，首先必须了解毛坯内的作用力与塑性变形之间的关系。

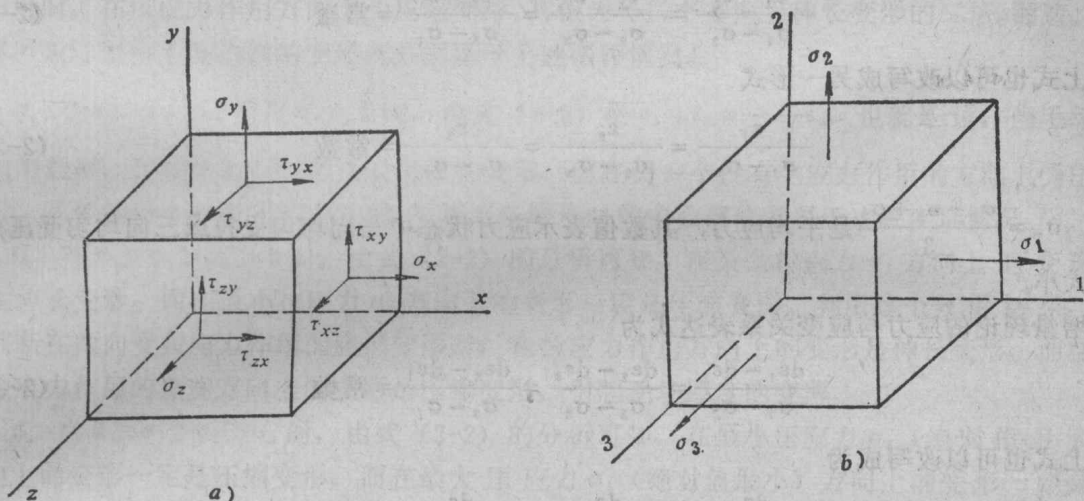


图2-1 点的应力状态

a—任意座标系统 b—主轴线座标系统

在一般的情况下，变形毛坯内各点的变形和受力情况都是不同的。毛坯内每一点上的受力情况，通常称为点的应力状态，要有九个应力分量，即三个正应力和六个剪应力来确定（图2-1a）。但是，由于其中三对剪应力是相等的（ $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{zx} = \tau_{xz}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ ），实际上只需要六个应力分量，即三个正应力和三个剪应力，就可以确定该点的应力状态。由塑性力学的分析可知，一点的应力状态也可以用三个主应力 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 表示（图2-1b）。只要三个主应力是已知的，就可以计算出任意平面作用的正应力与剪应力，所以也就可以认为该点的应力状态是已知的。

通常，称主应力 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 的作用方向为主轴。主轴的方向仅仅决定于该点的受力情况，而与座标轴的选取无关。利用主应力来研究冲压过程中毛坯内应力的作用特点及其分布规律有很多方便。例如在图

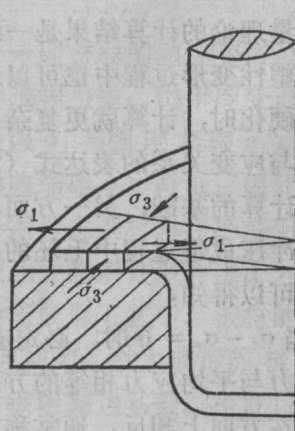


图2-2 拉深时毛坯变形区内主应力方向

2-2 中所示的拉深过程的应力分析时, 在忽略数值较小的表面摩擦力之后, 可以近似的取图中所示的三个主轴方向。这样做的结果可以使拉深毛坯变形区的应力分析及对拉深变形中许多问题的研究都得到很大程度的简化。

绝大多数冲压成形过程中毛坯的塑性变形区都不是处于单向受压或单向受拉的应力状态, 而相反地是受到二向或三向的应力作用。在单向受拉或单向受压时的应力与应变关系可以用硬化曲线或用硬化曲线的数学表达式来表示。但是, 在受到二向以上的应力作用时的复杂应力状态下, 处于塑性变形状态的毛坯变形区内应力与应变关系是相当复杂的。目前常用的有全应变理论和增量理论两种应力与应变关系。

全应变理论的应力与应变关系表达式为

$$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \text{常数} \quad (2-1)$$

上式也可以改写成另一形式

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_3}{\sigma_3 - \sigma_m} = \text{常数} \quad (2-2)$$

式中 $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ 是平均应力, 其数值表示应力状态中三向均匀受拉或三向均匀受压成分的大小。

增量理论的应力与应变关系表达式为

$$\frac{d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \text{常数} \quad (2-3)$$

上式也可以改写成

$$\frac{d\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_m} = \frac{d\varepsilon_2}{\sigma_2 - \sigma_m} = \frac{d\varepsilon_3}{\sigma_3 - \sigma_m} = \text{常数} \quad (2-4)$$

全应变理论仅仅表示塑性变形終了时的主应变与主应力之间的关系, 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。增量理论表示在塑性变形的某一个瞬间应变增量与主应力之间的关系, 经过积分便可以把变形过程的特点反映出来, 所以它更接近于实际的情况。假如塑性变形过程中的主应力方向不变, 而且各应力间的比例也保持不变, 全应变理论和增量理论的计算结果是一致的, 所以在这种情况下完全可以应用全应变理论。此外, 在单调的塑性变形过程中也可以应用全应变理论。增量理论在计算上引起的困难很大, 尤其在冷变形硬化时, 计算就更复杂了。

应力与应变关系的表达式 (2-1)、(2-2)、(2-3) 和 (2-4) 是对压力加工中各种工艺参数进行计算的基础; 另一方面, 也可以在不进行详细的理论分析与计算的条件下, 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出大致的分析和判断。例如从对式 (2-2) 的分析中可以得知:

1. 当 $\sigma_2 - \sigma_m = 0$ 时, 必定有 $\varepsilon_2 = 0$ 。利用体积不变条件 $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$ 可得 $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3$, 即在主应力与平均应力相等的方向上不产生塑性变形, 而另外两个方向上的塑性变形在数量上相等, 在方向上相反。通常称这种变形为平面变形。由此可得出一个在实践中常常用到的重要结论: 在平面变形时必定有 $\sigma_2 = \sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ (此式的另一种形式是 $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$)。宽板弯曲时, 在宽度方向的变形为零, 即属于这种情况。

2. 当 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_m$ 时, 由式 (2-2) 得 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$, 也就是说, 当三个主应力相等时, 毛坯受三向等拉或三向等压的应力状态作用。此时毛坯不产生任何塑性变形, 仅有弹性变形存在。

3. 当 $\sigma_1 > 0$ 而且 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 时, 毛坯受到单向拉应力作用。因为 $\sigma_1 - \sigma_m = \sigma_1 - \frac{\sigma_1}{3} > 0$, 故 $\varepsilon_1 > 0$, 而由式 (2-2) 又可得 $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2 = -2\varepsilon_3$; 也就是说, 在单向受拉时, 在拉应力作用方向上为伸长变形。在其余二个方向上产生数量相同的压缩变形, 而且伸长变形为每一个压缩变形的二倍; 当 $\sigma_3 < 0$ 而且 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ 时, 毛坯受到单向压应力的作用。因为 $\sigma_3 - \sigma_m = \sigma_3 - \frac{\sigma_3}{3} < 0$, 故 $\varepsilon_3 < 0$, 利用式 (2-2) 又可得 $-\varepsilon_3 = 2\varepsilon_2 = 2\varepsilon_1$, 即毛坯在单向压应力作用时, 在压应力作用方向上为压缩变形, 其值为另二个方向上伸长变形的二倍。翻边、缩口等冲压过程中毛坯边缘的变形就分别属于上述两种情况。

4. 当 $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$ 而且 $\sigma_3 = 0$ 时, 由式 (2-2) 得 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\frac{1}{2}\varepsilon_3$, 也就是说, 当毛坯受二向等拉时, 在拉应力作用方向上为伸长变形, 而在另一个没有主应力作用的方向上为压缩变形, 其值为每个伸长变形的二倍。平板毛坯胀形时的中心部位就属于这种变形情况。

5. 当 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ 时, 由式 (2-2) 的分析可知, 在最大拉应力 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。利用这个分析结果, 可以判断在两向受拉应力作用的胀形变形时, 在拉应力作用方向上的变形是伸长变形, 而在没有主应力作用的厚度方向上的变形是压缩变形, 引起毛坯厚度的变薄。

6. 当 $0 > \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 时, 由式 (2-2) 的分析可知, 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。

上述这几个由应力应变关系公式得出的推论, 可以帮助我们对冲压变形中毛坯上某些特定的有代表性的位置上金属的变形性质和应力状态做出定性的分析, 这在实际上是很有用的。

2-2 硬化与硬化曲线

在冲压生产中, 毛坯形状的变化与零件的形状形成过程——即材料的塑性变形过程都是在常温下进行的。对于常用的金属材料, 在常温下的塑性变形过程当中, 由于冷变形的硬化效应引起的材料机械性能的变化, 结果使其强度指标 (屈服极限 σ_s 与强度极限 σ_b) 随变形程度的加大而增加, 并且同时使其塑性指标 (延伸率 δ 与断面收缩率 ψ) 降低。因此, 在进行变形毛坯内各部分的应力分析和各种工艺参数的确定时, 必须考虑到材料在冷变形硬化中的屈服强度 (或称变形抗力) 的变化。另外, 板料的冷变形硬化性能对许多冲压工艺都有较大的影响: 有时是有利的, 有时是不利的。例如在伸长类的冲压成形工艺中, 板材的硬化能够减少过大的局部变形 (减小厚度的局部变薄量), 使变形趋向均匀, 增大成形的极限; 又如在翻边变形前孔边缘部分材料的硬化容易引起开裂, 降低了极限翻边系数。由此可见, 在处理冲压生产上许多实际问题时, 必须掌握和研究材料的硬化和硬化规律及它们对冲压工艺的影响。

在冷变形中材料的变形抗力随变形程度的变化, 用硬化曲线来表示。图 2-3 即为几种材

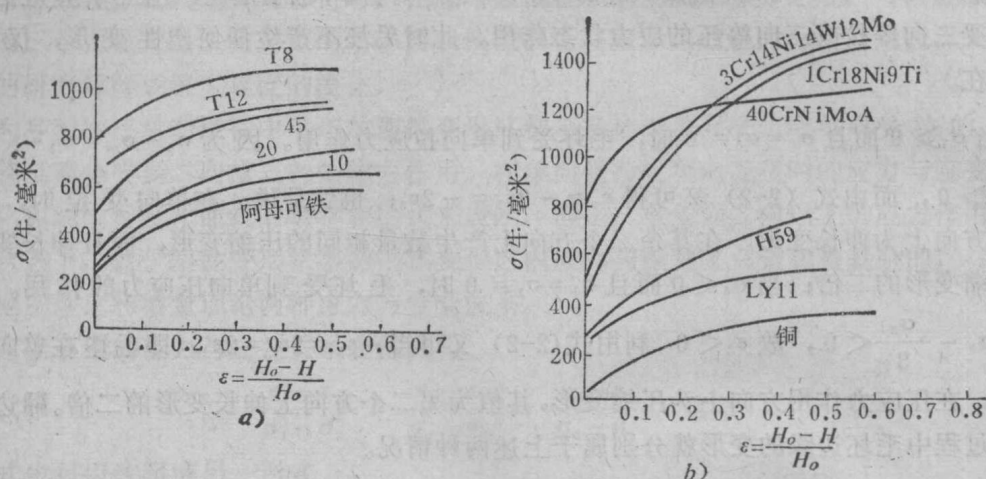


图2-3 各种材料的硬化曲线举例

料的硬化曲线举例。材料的硬化曲线可在普通的拉伸变形时用实验方法求得，但是，当超越材料的稳定变形区，产生集中的局部变形——细颈之后，应力状态也随着发生变化，这是拉伸实验的缺点。做材料的镦粗实验，也能得到硬化曲线。虽然镦粗时没有拉伸时产生局部细颈的问题，可是当变形程度较大时，试件断面形状发生的畸变也会引起实验上的误差。实验证明，拉伸实验和镦粗实验得到的硬化曲线基本上是一致的。对于板料，有时也用平板毛坯的液压胀形实验，经过一些换算后求得硬化曲线。这时毛坯中心点受双向等拉应力的作用，变形稳定性比单向拉伸时大得多，这是本方法的一个主要优点。图 2-3 是用镦粗方法得到的硬化曲线，变形程度用试件高度的相对变化表示。

由图 2-3 可见，几乎所有的硬化曲线都具有一个共同的特点，就是随变形程度的增大，材料的硬化强度 $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ （或称硬化模数）逐渐降低，也就是材料的硬化曲线的梯度变小。

为了实用上的需要，必须把硬化曲线用数学式表示出来。但是，由于各种材料的硬化曲线都具有不同的特点，那么用同一个数学式精确地把它们表示出来也是不可能的。实际上，常用的几种硬化曲线的数学表达式都是近似的，由于材料种类和性能的不同，其误差大小也不尽然相同。现在常用的有两种硬化曲线的表达式：用直线表示硬化曲线或用指数曲线表示硬化曲线。

用直线代替硬化曲线时有

$$\sigma = \sigma_0 + F\varepsilon \quad (2-5)$$

上式中 σ_0 是近似的屈服极限，也是硬化直线在纵坐标轴上的截距。 F 是硬化直线的斜率，称为硬化模数，它表示材料硬化强度的大小。由图 2-4 可见，用直线代替硬化曲线是非常近似的，而且仅在切点上它们的

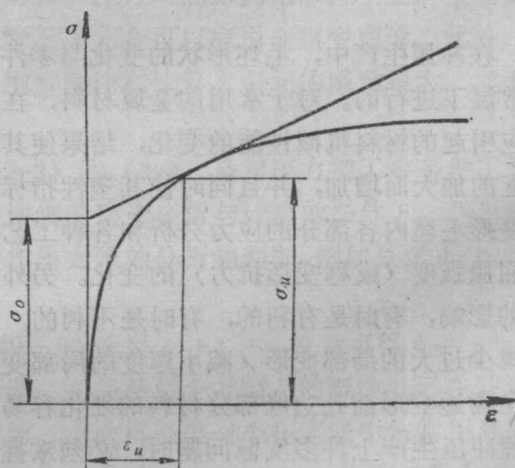


图2-4 硬化直线

数值是一致的,在其他各点两者都有差别,尤其在变形程度很小或很大时,差别是很显著的。

式(2-5)中的变形程度 ε 的表示方法不同,硬化直线的表达式也不一样。当用拉伸实验中的延伸率时,式(2-5)具有如下形式

$$\sigma = \sigma_b(1 + \delta) \quad (2-6)$$

式中 σ_b ——材料的强度极限;

δ ——延伸率。

当用断面收缩率表示拉伸实验的变形程度时,式(2-5)具有下边的形式

$$\sigma = \sigma_0 + F\psi \quad (2-7)$$

上式中

$$\sigma_0 = \sigma_b \frac{1 - 2\psi_u}{(1 - \psi_u)^2}$$

$$F = \frac{\sigma_b}{(1 - \psi_u)^2}$$

其中 ψ_u 是在拉伸试验中开始产生局部变形时的断面收缩率。

由于实际上的硬化曲线和硬化直线之间有很大的差别,所以在冲压生产中经常用指数曲线表示硬化曲线

$$\sigma = c\varepsilon^n \quad (2-8)$$

上式中 c 为系数,而 n 称为硬化指数, c 与 n 之值均决定于材料的种类和性能,其值列于表 2-1 中。

指数曲线 $\sigma = c\varepsilon^n$ 和材料的实际硬化曲线比较接近。系数 c 与硬化指数 n 都可以用拉伸实验方法得到。硬化指数 n 是表明材料冷变形硬化性能的重要参数,也叫 n 值,对板材在各种冲压成形中的冲压性能以及冲压件的质量都有较为重要的影响。图 2-5 是不同 n 值材料的硬化曲线的对比。硬化指数 n 大时,表示在冷变形过程中材料的变形抗力随变形的进展而迅速地增大。因此, n 值大时,材料的塑性变形稳定性较好,不易出现局部的集中变形和破坏,有利于增大伸长类变形的成形极限。

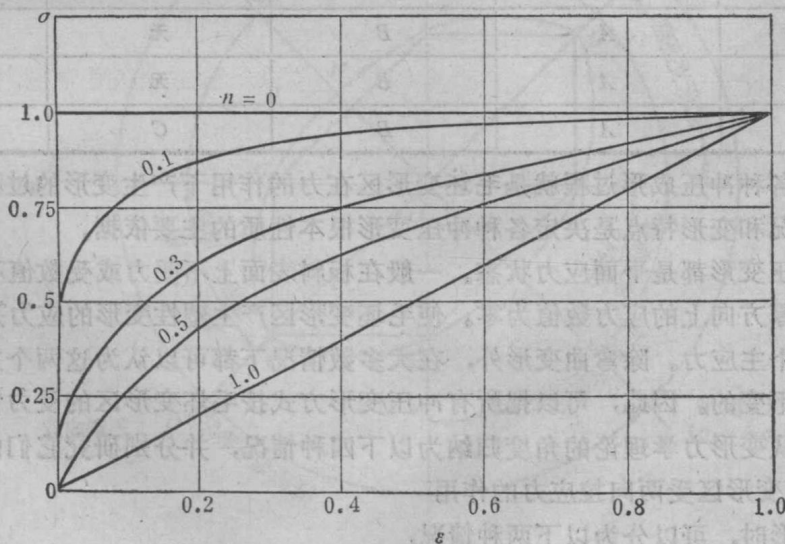


图2-5 n 值不同时的硬化曲线

表2-1 各种材料的c与n值

材 料	c 牛顿/毫米 ²	n
软 钢	710~750	0.19~0.22
黄 铜(60/40)	990	0.46
黄 铜(65/35)	760~820	0.39~0.44
磷青铜	1100	0.22
磷青铜(低温退火)	890	0.52
银	470	0.31
铜	420~460	0.27~0.34
硬 铝	320~380	0.12~0.13
铝	160~210	0.25~0.27

* 表中数据是指退火材料在室温和低变形速度下试验求得的。

2-3 各种冲压成形方法的力学特点与分类

正确的板料冲压成形工艺的分类方法，应该能够明确地反映出每一种类型成形工艺的共性，并在此基础上提供可能用共同的观点和方法分析、研究和解决每一类成形工艺中的各种实际问题的条件。在各种冲压成形工艺中毛坯变形区的应力状态和变形特点是制订工艺过程、设计模具和确定极限变形参数的主要依据，所以只有能够充分地反映出变形毛坯的受力与变形特点的分类方法，才可能真正具有实用的意义。

在冲压成形时，可以把变形毛坯分成变形区和不变形区。不变形区可能是已经经历过变形的已变形区或是尚未参与变形的待变形区，也可能是在全部冲压过程中都不参与变形的不变形区。当不变形区受力的作用时，叫作传力区。表 2-2 中列出拉深、翻孔与缩口时毛坯的变形区与不变形区的分布情况（图 2-6）。

表2-2 冲压变形毛坯各区的划分

冲 压 方 法	变 形 区	不 变 形 区		
		已 变 形 区	待 变 形 区	传 力 区
拉 深	A	B	无	B
翻 孔	A	B	无	B
缩 口	A	B	C	C

从本质上看各种冲压成形过程就是毛坯变形区在力的作用下产生变形的过程，所以毛坯变形区的受力情况和变形特点是决定各种冲压变形根本性质的主要依据。

绝大多数冲压变形都是平面应力状态。一般在板料表面上不受力或受数值不大的力，所以可以认为在板厚方向上的应力数值为零。使毛坯变形区产生塑性变形的应力是在板料平面内相互垂直的两个主应力。除弯曲变形外，在大多数情况下都可以认为这两个主应力在厚度方向上的数值是不变的。因此，可以把所有冲压变形方式按毛坯变形区的受力情况（应力状态）和变形特点从变形力学理论的角度归纳为以下四种情况，并分别研究它们的变形特点。

1. 冲压毛坯变形区受两向拉应力的作用

在轴对称变形时，可以分为以下两种情况：

$$\sigma_r > \sigma_\theta > 0, \text{ 且 } \sigma_z = 0$$