



“十三五”国家重点出版物出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

冲压成形原理与方法

Principle and Method of Stamping Forming

● 于洋 崔令江 主 编
● 韩飞 王传杰 副主编

哈尔滨工业大学出版社



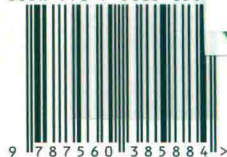
材料科学与工程
图书工作室

策划编辑 许雅莹
杨 桦
责任编辑 庞 雪
封面设计 卞秉利

院士专家著书 体现先进性 前瞻性 反映材料领域的研究成果
学科融合贯通 注重交叉性 学术性 立足材料科学的人才培养
内容丰富翔实 追求研究性 实用性 促进材料工程的创新发展

CHONGYA CHENGXING YUANLI YU FANGFA

ISBN 978-7-5603-858



9 787560 385884 >

定价 30.00 元



“十三五”国家重点出版物出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

机械工业出版社

北京

ISBN 978-7-111-52888-2

定价：45.00元

（随书附赠光盘）

冲压成形原理与方法

于洋 崔令江 主编

冲压成形原理与方法

Principle and Method of Stamping Forming

- 于洋 崔令江 主编
- 韩飞 王传杰 副主编

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书共 9 章,主要阐述各种冲压加工中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的规律,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。

本书可作为高等院校材料成型及控制工程专业本科生的教学用书,也可供从事塑性加工技术的工程技术人员参考。

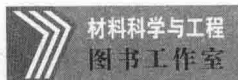
图书在版编目(CIP)数据

冲压成形原理与方法/于洋,崔令江主编. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2020.3

ISBN 978-7-5603-8588-4

I. ①冲… II. ①于… ②崔… III. ①冲压—工艺学
IV. ①TG38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 255716 号



材料科学与工程
图书工作室

策划编辑 许雅莹 杨 桦

责任编辑 庞 雪

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江艺德印刷有限责任公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 11.75 字数 279 千字

版 次 2020 年 3 月第 1 版 2020 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-8588-4

定 价 30.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

冲压技术在各种工业生产中占有很重要的地位,应用十分广泛。冲压工艺学是材料加工工程和材料成型及控制工程专业教学的基本内容,同时也是材料成型及控制工程专业的主要专业课。

冲压生产技术是多方面的,但最主要的基础内容是,在充分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过程,获得高质量的冲压产品。因此,本书的内容重点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。

本书力求从塑性变形本身的基本规律出发,将其与金属塑性加工成形进行有机融合,使读者从塑性变形基本规律的总体角度,认识理解金属塑性加工各种工艺方法的基本规律,掌握塑性成形工艺技术要点、影响加工质量的因素及控制措施等,从而全面系统地掌握塑性加工工艺的基本规律。

在课程教学过程中,教师应力求从冲压塑性变形基本规律的角度出发,明确各种冲压成形工艺的基本概念与基本规律,如分离工序与成形工序的分类与变形区别、板材拉深与胀形的应力和变形区别、宽板弯曲与窄板弯曲的应力和应变区别等。同时,在教学过程中,应注意分析各种影响质量问题的因素及控制措施的矛盾转化,使学生能深入浅出地去学习。对于部分教材内容,可以以学生自学为主,提高学生的学习兴趣,激发学生的学习主动性。

在经常用到的冲压加工方法中,有一部分冲压加工方法占有一定的比重,可是却缺少其变形分析方面的资料,鉴于这种情况,在本书里对曲面翻边、校形、胀形等变形分析方面的内容做了一定程度的补充与加强。同时也增加了

特种冲压工艺,既可以增强学生的科研兴趣,也加强了对专业的深层次了解。

本书第1~5章由于洋编写,第6、7章由崔令江编写,第8章由韩飞编写,第9章由王传杰编写,全书由于洋统稿。另外,在此对哈尔滨工业大学(威海)王刚副教授及孙金平博士在审稿过程中提出的修改意见表示感谢。

本书可作为高等院校材料成型及控制工程专业本科生的教学用书,也可供从事塑性加工技术的工程技术人员参考。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,望广大读者批评指正。

编者

2019年9月

第十章 目 录

第 1 章 冲压工艺概述	1
1.1 冲压工艺特点及应用	1
1.2 冲压工艺分类	2
1.3 金属塑性成形基本规律	6
1.4 板材性能与试验方法	7
1.5 冲压技术发展趋势	14
思考题与习题	20
第 2 章 板材冲裁	21
2.1 冲裁过程	21
2.2 冲裁模间隙	22
2.3 冲裁工艺力的计算	26
2.4 冲裁模	29
2.5 精密冲裁	52
思考题与习题	58
第 3 章 弯曲	59
3.1 弯曲变形特点	59
3.2 最小弯曲半径	66
3.3 弯曲工艺设计	69
3.4 弯曲模	77
3.5 弯曲件质量控制	79
思考题与习题	88
第 4 章 胀形	89
4.1 胀形变形的特点	89
4.2 平板毛坯的局部胀形	90
4.3 管件胀形	92
思考题与习题	94
第 5 章 直壁形状零件的拉深	95
5.1 圆筒形零件拉深时的变形特点	97
5.2 极限拉深系数与拉深次数	101
5.3 带法兰边零件的拉深	105
5.4 阶梯形零件的拉深	109
5.5 反拉深	110

5.6	圆筒形零件用拉深模工作部分尺寸的确定	112
5.7	盒形零件的拉深	115
	思考题与习题	124
第6章	复杂曲面形状零件的拉深	125
6.1	曲面形状零件拉深的特点	125
6.2	球面形状零件的拉深方法	128
6.3	锥形零件的拉深方法	131
	思考题与习题	135
第7章	翻边	136
7.1	伸长类翻边	136
7.2	压缩类翻边	144
	思考题与习题	145
第8章	其他冲压成形方法	146
8.1	校形	146
8.2	软模成形	150
8.3	差温拉深法	152
8.4	加径向压力的拉深法	153
8.5	带料连续冲压	154
8.6	变薄拉深	156
8.7	特种冲压工艺	156
	思考题与习题	164
第9章	冲压工艺与模具设计	165
9.1	冲压工艺设计的内容	165
9.2	冲压变形中的变形趋向性	166
9.3	冲压件工艺性分析	168
9.4	确定冲压加工方案、工序数目与顺序的原则	170
9.5	冲压工序间半成品的形状与尺寸的确定原则	177
9.6	冲压设备的选择	179
	思考题与习题	181
	参考文献	182

第1章 冲压工艺概述

1.1 冲压工艺特点及应用

利用金属在外力作用下产生的塑性变形来获得具有一定形状、尺寸和力学性能的毛坯或零件的生产方法,称为金属塑性加工成形,也称为压力加工。

金属塑性加工所用毛坯主要有棒材、锭材、板材和管材等。棒材和锭材主要采用锻造方法成形,一般要对毛坯进行加热后再进行成形加工,故又常称为热加工;而冲压是指在室温下靠压力机和模具对板材、带材、管材和型材等施加载荷,使其产生塑性变形或分离,从而获得所需形状和尺寸的工件的加工方法。板材和管材主要采用冲压方法成形,一般在常温下进行成形加工,故又常称为冷冲压。随着技术和新材料的发展,又出现了温、热冲压工艺。冲压生产的产品称为冲压件,冲压所用的模具称为冲压模具,简称冲模。图1.1所示为冲压工艺的应用举例。

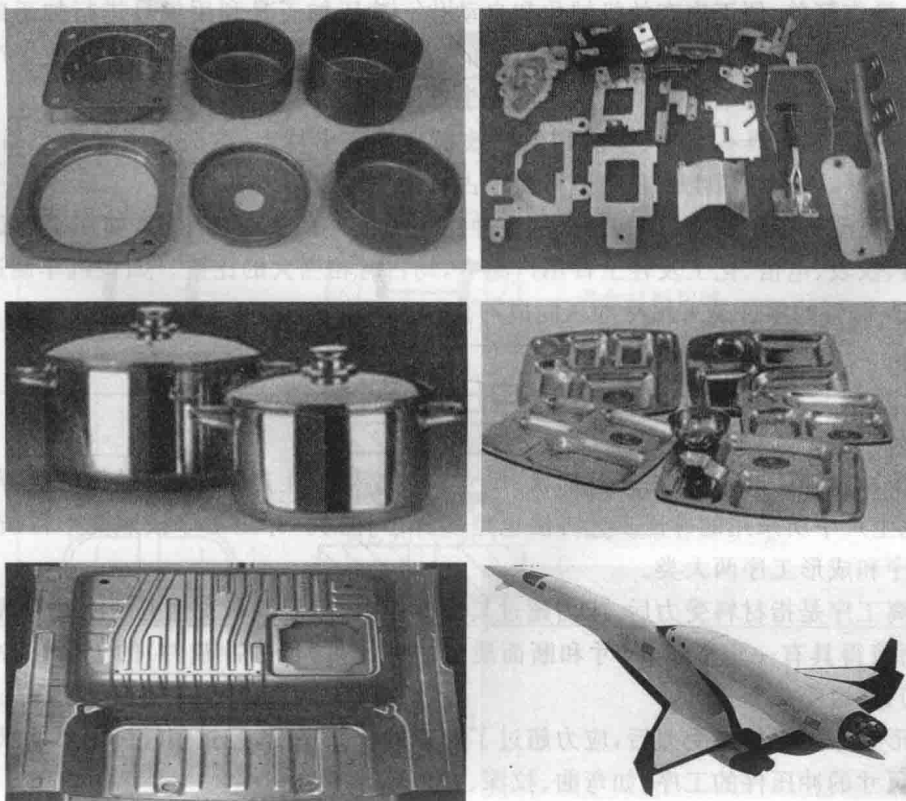


图 1.1 冲压工艺的应用举例

冲压是由设备和模具完成其对材料加工过程的,具备三个要素:冲压设备、模具和原材料。

与机械加工和塑性加工的其他方法相比,冲压加工具有许多显著的特点,主要表现在以下几点:

(1)力学性能好。由于塑性变形的强化作用,可以得到刚性好且强度高的零件。

(2)材料利用率高。塑性加工是通过金属的塑性变形与流动获得所需要的形状与尺寸,而不需要进行大量的切削加工,故成形中的废料较少,材料的利用率较高。普通冲压材料利用率一般可达70%~85%,有的高达95%,几乎无须进行后续机械加工即可满足普通的装配和使用要求。

(3)生产效率高。金属塑性加工主要是利用模具进行生产,故其生产效率较高,如高速冲床的生产效率可达每分钟数百次。

(4)产品尺寸稳定,互换性好,模具与产品有“一模一样”的关系。因为冲压加工主要是利用模具进行生产,而模具的精度变化很小,故冲压生产时零件的尺寸稳定性很好,互换性好。

(5)能生产形状复杂的零件,如壁厚为0.15 mm的薄壳拉深件、汽车覆盖件等薄板壳类零件及中空变径零件,这些零件用切削加工的方法制造存在困难大或者成本非常高等问题。

(6)操作简单,便于生产的机械化和自动化。冲压加工是利用模具进行加工的,故而操作简单,对操作工人的要求低,易于生产的机械化和自动化。在目前大工业生产中,很多冲压加工生产都是采用机械化或自动化生产线。

由于冲压加工具有节材、节能和生产效率高等突出特点,这决定了冲压产品成本低廉,效益较好,因此冲压生产在制造行业中占有重要地位。

在国民经济各工业部门中,几乎都有冲压加工或冲压产品的生产,如在交通运输、电机、电器、仪表、电信、化工及轻工日用产品中,均占有相当大的比重。如在汽车制造业中,有65%~75%的零件是采用冷冲压制成的。

1.2 冲压工艺分类

对于冲压加工的零件,由于其形状、尺寸、精度要求、生产批量、原材料性能等各不相同,因此生产中所采用的冲压工艺方法也是多种多样的。冲压工序按照变形性质可分为分离工序和成形工序两大类。

分离工序是指材料受力后,应力超过其强度极限,而使板料发生剪裂或局部剪裂而分离,从而获得具有一定形状、尺寸和断面质量的冲压件(俗称冲裁件)的工序,如冲孔、落料、剖切、切边等。

成形工序是指材料受力后,应力超过了材料的屈服强度,经过塑性变形后而获得一定形状和尺寸的冲压件的工序,如弯曲、拉深、翻边等工序。

上述两类基本工序,按照冲压方式不同又具体分为很多工序,见表1.1和表1.2。

表 1.1 分离工序

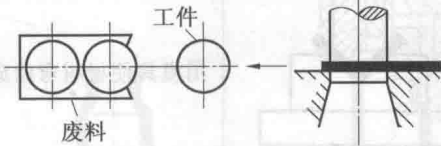
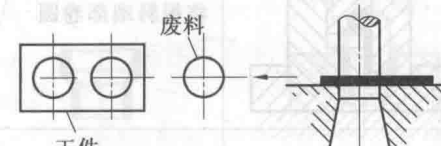

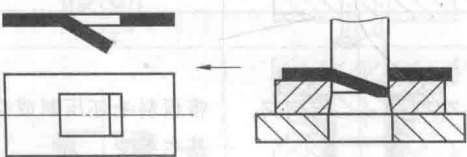
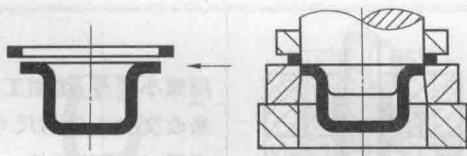
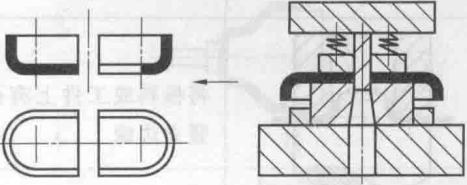
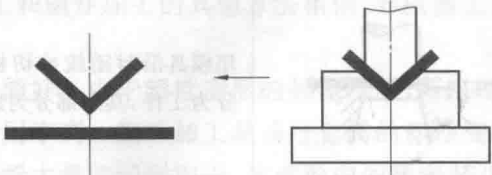
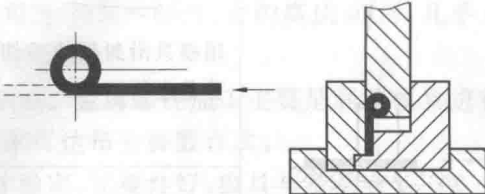
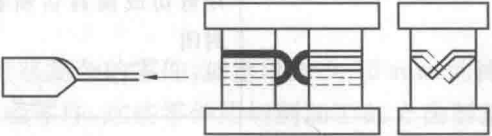
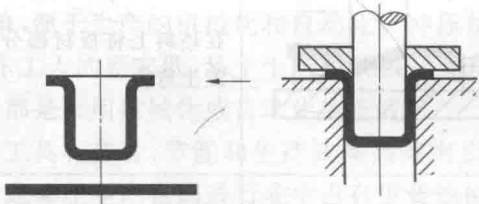
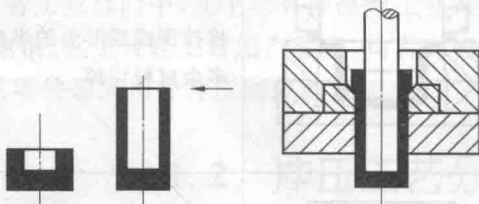
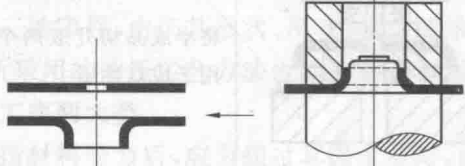
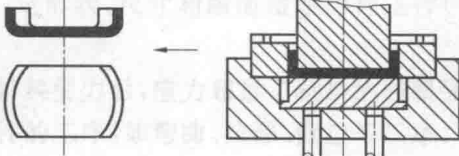
工序	图例	特点及应用范围
落料		用模具沿封闭线冲切板料, 冲下的部分为工件, 其余部分为废料
冲孔		用模具沿封闭线冲切板材, 冲下的部分是废料
剪切		用剪切或模具切断板材, 切断线不封闭
切口		在坯料上将板材部分切开, 切口部分发生弯曲
切边		将拉深或成形后的半成品边缘部分的多余材料切掉
剖切		将半成品切开成两个或几个工件, 常用于成双冲压

表 1.2 成形工序

工序	图例	特点及应用范围
弯曲		用模具使材料弯曲成一定形状
卷圆		将板料端部卷圆
扭曲		将平板毛坯的一部分相对于另一部分扭转一个角度
拉深		将板料毛坯压制空心工件,壁厚基本不变
变薄拉深		用减小壁厚、增加工件高度的方法来改变空心件的尺寸,得到要求的底厚、壁薄的工件
翻边	孔的翻边 	将板料或工件上有孔的边缘翻成竖立边缘
	外缘翻边 	将工件的外缘翻起圆弧或曲线状的竖立边缘

续表 1.2

工序	图例	特点及应用范围
缩口		将空心件的口部缩小
扩口		将空心件的口部扩大,常用于管子
起伏		在板料或工件上压出肋条、花纹或文字,在起伏处的整个厚度上都变薄
卷边		将空心件的边缘卷成一定的形状
胀形		使空心件(或管料)的一部分沿径向扩张,呈凸肚形
旋压		利用擀棒或滚轮将板料毛坯擀压成一定形状(有变薄与不变薄两种)
整形		将形状不太准确的工件校正成形

续表 1.2

工序	图例	特点及应用范围
校平		将毛坯或工件不平面或弯曲予以压平
压印		改变工件厚度,在表面上压出文字或花纹

1.3 金属塑性成形基本规律

金属在外力作用下产生塑性变形,掌握其基本规律和基本假设对合理安排成形工艺及其参数具有重要意义。由于锻造工艺可以为冲压工艺提供毛坯,因此掌握其变形规律对于能否获得合格的冲压毛坯至关重要。

1. 最小阻力定律

金属塑性成形问题实质上是金属的塑性流动问题。塑性成形时影响金属流动的因素十分复杂,要定量描述线性流动规律非常困难,可以应用最小阻力定律定性分析金属质点的流动方向。金属受外力作用发生塑性变形时,如果金属颗粒在几个方向上都可以移动,那么金属颗粒就沿着阻力最小的方向移动,这就是最小阻力定律。在锻造工艺中用最小阻力定律可以更好地设计工艺流程,判断金属在锻造过程中可能的变形规律,预测可能会出现的质量问题。图 1.2 中,图(a)、(b)、(c)分别为圆形、方形和矩形断面毛坯镦粗成形时各质点的流动方向,图(d)是方形断面毛坯镦粗后的断面变化过程。

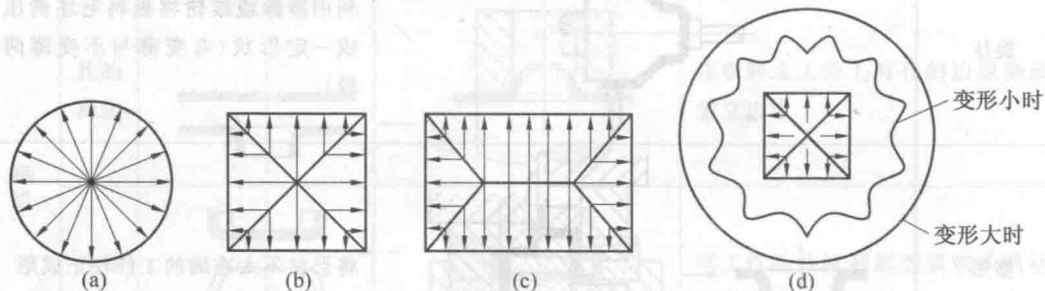


图 1.2 最小阻力定律示意图

2. 体积不变假设

金属弹性变形时,体积变化与形状变化比例相当,必须考虑体积变化对变形的影响。

但在塑性变形时,由于金属材料连续且致密,体积变化很微小,与形状变化相比可以忽略,因此假设体积不变(即塑性变形)时,变形前金属的体积等于变形后金属的体积。

采用真实应变表达塑性变形时,体积不变假设可表达为

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \quad (1.1)$$

3. 应力应变关系

塑性加工变形主要是塑性变形,则弹性变形可以忽略不计,那么应力与应变之间的关系可表达为

$$\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \frac{3}{2} \frac{\epsilon_1}{\sigma_1} \quad (1.2)$$

式中 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ——三个主方向的主应变;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——三个主方向的主应力,MPa;

ϵ_1 ——综合应变;

σ_1 ——综合应力,MPa。

4. 应变硬化模型

在塑性加工中,随着变形的增加,材料的流动应力也增加,这种现象称为应变硬化现象。常用幂指数模型来表达这种硬化现象,即

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (1.3)$$

式中 σ ——应力,MPa;

ϵ ——应变;

K ——系数;

n ——硬化指数。

5. 薄板材成形时的平面应力假设

在薄板材冲压成形中,由于板平面的尺寸远大于板厚尺寸,即使在板厚方向受到较大的压力(如压边力、凸模作用力等),但其应力值却远远小于板平面内的主应力值。因此,在分析板材冲压成形时的受力状态时,一般按平面应力处理,即板厚方向的应力为零。但厚板弯曲成形时,板厚方向的应力对变形有较大影响,故不能进行平面应力处理。

6. 板材拉深成形时的面积不变假设

在板材拉深成形时,由于不同部位的应力状态不同,必然会存在有的部位板厚增加,而有的部位板厚减小,但这种板厚的变化所引起的板平面面积的变化却非常小。因此,在拉深成形时,一般假设材料在拉深前后表面积不变。

1.4 板材性能与试验方法

金属的材料性能对塑性加工有重要影响,甚至关系到成败。棒材和锭材在常温或高温下的各种性能主要采用常规的拉伸试验、冲击试验、抗弯试验等测试方法获得。

板材的冲压性能是指板材对各种冲压加工方法的适应能力,包括:便于加工,容易得到高质量和高精度的冲压件,生产率高(一次冲压工序的极限变形程度和总的极限变形程度大),模具消耗低,不易出废品等。

板材冲压性能的试验方法可分为直接试验和间接试验两类(图 1.3)。直接试验中板材的应力状态和变形情况与真实冲压时基本相同,所得的结果也比较准确;而间接试验时,板材的受力情况与变形特点都与实际冲压时有一定差别,所得的结果也只能间接地反映板材的冲压性能,有时还要借助于一定的分析方法才能做到这一点。

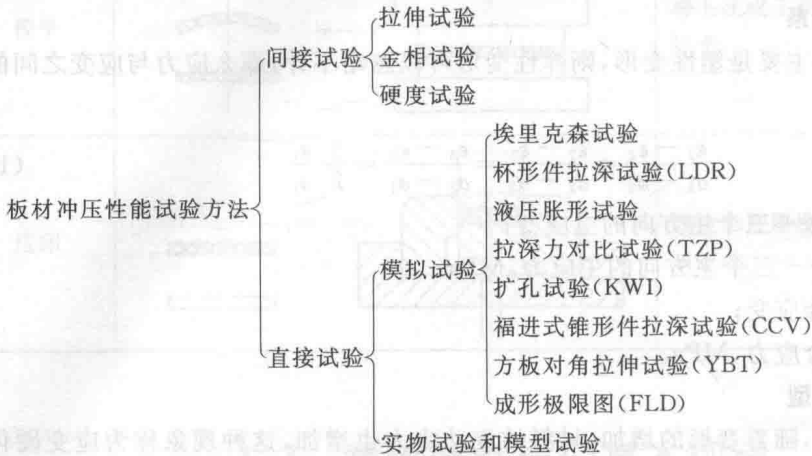


图 1.3 板材冲压性能的试验方法

1. 单向拉伸试验

板材拉伸试验一般用图 1.4 所示形状的标准试样在材料试验机上进行,可得到图 1.5 所示的应力(σ)与伸长率(δ)之间的关系曲线,即拉伸曲线。

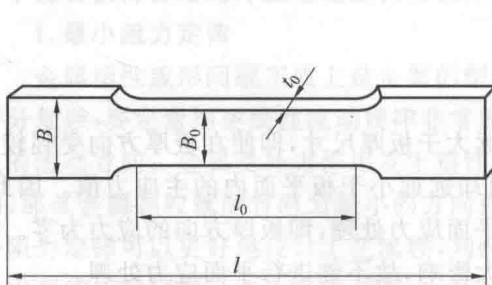


图 1.4 拉伸试验的标准试样

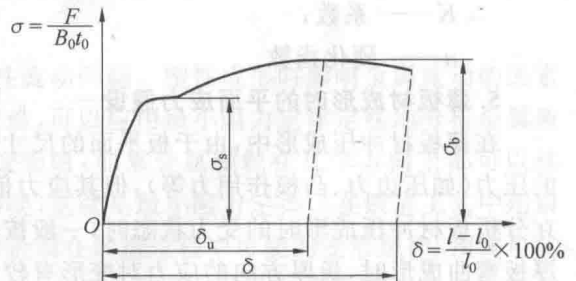


图 1.5 拉伸曲线

拉伸试验所得到的表示板材力学性能的指标与冲压性能有很好的相关性,有如下常用的几个参数。

(1) δ_u 与 δ 。

δ_u 称为均匀伸长率,是拉伸试样开始产生局部集中变形(缩颈时)的伸长率。 δ 称为总伸长率,或简称伸长率,是在拉伸试样破坏时的伸长率。

δ_u 表示板材产生均匀的或稳定的塑性变形的能力,它直接决定板材在伸长类变形中的冲压性能。可以用 δ_u 间接地表示伸长类变形的极限程度,如翻边系数、扩口系数、最小弯曲半径、胀形系数等。

(2) $\frac{\sigma_s}{\sigma_b}$ 。

$\frac{\sigma_s}{\sigma_b}$ 称为屈强比,是材料的屈服极限与强度极限的比值。较小的屈强比对所有的冲压成形都是有利的。

小的屈强比对于压缩类成形工艺是有利的。在拉深时,如果板材的屈服点 σ_s 低,则变形区的切向压应力较小,材料起皱的趋势也小,所以防止起皱所必需的压边力和摩擦损失都要相应地降低,结果对提高极限变形程度有利。例如,当低碳钢的 $\frac{\sigma_s}{\sigma_b} \approx 0.57$ 时,其极限拉深系数为 $m = 0.48 \sim 0.5$; 而 65Mn 的 $\frac{\sigma_s}{\sigma_b} \approx 0.63$, 其极限拉深系数为 $m = 0.68 \sim 0.7$ 。

在伸长类的成形工艺中,如胀形、拉形、拉弯、曲面形状零件的成形等,当 σ_s 较小时,为消除零件的松弛等弊病以及为使零件的形状和尺寸得到固定(指卸载过程中尺寸的变化小)所必需的拉力也小。这时成形所必需的拉力与毛坯破坏时的拉力之差较大,所以成形工艺的稳定性高,不容易出废品。

弯曲件所用板材的 σ_s 较小时,卸载时的回弹变形也小,有利于提高弯曲零件的精度。

当材料的种类相同,而且伸长率相近时,较小的屈强比表明其硬化指数 n 大,所以有时也可以简便地用 $\frac{\sigma_s}{\sigma_b}$ 代替 n 值,表示材料在伸长类成形工艺中的冲压性能。

由此可见,屈强比对板材的冲压性能的影响是多方面的,而且也是很重要的,所以在很多标准中都对冲压用板材的屈强比有一定的要求。例如我国冶金标准规定:用于复杂形状零件的深拉深用 ZF 级钢板的屈强比不大于 0.66。

(3) 硬化指数 n 。

硬化指数 n 也称 n 值,它表示在塑性变形中材料硬化的强度。 n 值大的材料,在同样的变形程度下,真实应力增加得要多。 n 值大时,在伸长类变形过程中可以使变形均匀化,具有扩展变形区、减少毛坯的局部变薄和增大极限变形参数等作用。尤其对于复杂形状的曲面零件的深拉深成形工艺,当毛坯中间部分的胀形成分较大时, n 值的上述作用对冲压性能的影响更为显著。试验表明, n 值与埃里克森试验值之间存在正比例关系。

硬化指数 n 的数值可以根据拉伸试验结果所得的硬化曲线,利用幂硬化模式在对数坐标系统里求得,也可以利用不同宽度的阶梯形拉伸试验的试验结果计算求得。

(4) 板厚方向性系数 r 。

板厚方向性系数 r 也称 r 值,它是板材拉伸试验中试样宽度应变 ϵ_b 与厚度应变 ϵ_t 之比,即

$$r = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_t} = \frac{\ln \frac{B}{B_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} \quad (1.4)$$

式中 B_0 和 B 、 t_0 与 t ——变形前后试样的宽度与厚度, mm。