



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

塑性加工工艺学

崔令江 韩飞 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

塑性加工工艺学

主编 崔令江 韩 飞

参编 王 刚 孙金平

主审 赵国群 赵振铎



机械工业出版社

本教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

“塑性加工工艺”是材料成形与控制工程专业的主要专业课。在以前的专业课程设置中分别为“锻造工艺学”和“冲压工艺学”两门课程，目前有很多高校已将两门课程合并为一门课程讲授。本课程力求从塑性加工本身的基本规律出发，对课程内容进行有机的融合，并从教材、教学手段、实验教学等方面进行相应的改革，使学生从塑性加工的总体角度，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，同时教材适当增加了质量控制的内容，以利于学生结合实例理解塑性加工的基本规律。

图书在版编目 (CIP) 数据

塑性加工工艺学/崔令江, 韩飞主编. —北京: 机械工业出版社, 2007.9
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-21649-0

I. 塑… II. ①崔…②韩… III. 金属压力加工-塑性变形-高等学校-教材 IV. TG301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 085921 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: 冯春生、邓海平 责任编辑: 邓海平 版式设计: 张世琴
责任校对: 张晓蓉 封面设计: 王伟光 责任印制: 李妍

保定市中国美凯印刷有限公司印刷

2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 18 印张 · 440 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-21649-0

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379715

封面无防伪标均为盗版

前 言

“塑性加工工艺”是材料成形与控制工程专业的主要专业课。在以前的专业课程设置中分别为“锻造工艺学”和“冲压工艺学”两门课程，目前有很多高校已将两门课程合并为一门课程讲授。本课程力求从塑性加工本身的基本规律出发，对课程内容进行有机的融合，并从教材、教学手段、实验教学等方面进行相应的改革，使学生从塑性加工的总体角度，认识和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。

本教材从内容结构上适当增加了对金属塑性加工工艺中基本变形规律的有关内容，适当增加了塑性加工质量控制的内容，以利于学生结合实例理解塑性加工的基本规律，能较好地应用于工程实践。教师在讲授这门课程时，应安排一定量的材料性能及工艺试验，使学生能更好地掌握塑性加工工艺的主要知识。在对塑性加工新技术有关内容的处理上，本教材采取了简介的方式，教师在授课中可以适当掌握，详细的有关知识内容将在选修课中讲授。同时，建议教师在授课过程中，根据授课学时的多少、重点讲解核心内容，以引导学生学习为主，部分内容可以采用研讨式教学和结合实验教学。

参与本教材编写的作者多年来一直从事塑性加工理论与技术的研究工作，并为本科生、研究生讲授课程，积累了一定的教学经验。同时，本教材承蒙山东大学赵国群教授和赵振铎教授担任主审，他们为本教材提出了许多建设性意见，谨此表示衷心感谢。

本教材是被列为国家教育部“十一五”规划立项教材，适用高等院校材料成形与控制工程专业本科生教学，也可以供从事塑性加工技术的工程技术人员参考。由于时间仓促和作者水平有限，错误难免，望广大读者批评指正，以便进行修订。

作 者

目 录

前言	
第一章 塑性加工概论	1
第一节 塑性加工的特点及应用	1
第二节 金属塑性成形基本规律	1
第三节 板材性能与试验方法	3
第四节 塑性加工新技术	8
第二章 锻造用坯料及加热	19
第一节 锻造用坯料及下料	19
第二节 锻前加热与锻造温度范围	23
第三节 锻造加热规范	28
第四节 锻后冷却及热处理	32
第三章 自由锻成形	37
第一节 自由锻件的分类	37
第二节 自由锻工艺方法	38
第三节 自由锻件变形方案的确定 方法	43
第四节 自由锻工艺过程的制订	46
第四章 模锻成形	54
第一节 模锻件分类	54
第二节 模锻工艺方法和变形分析	57
第三节 锤模锻	74
第四节 压力机模锻	75
第五节 模锻件图设计	79
第六节 模锻工艺设计	90
第七节 模锻变形工步的确定	93
第八节 坯料尺寸确定	105
第九节 模锻设备选择	108
第五章 锻模设计	111
第一节 模膛设计	111
第二节 模膛布置	124
第三节 锻模外形设计	127
第六章 模锻的后续工序	132
第一节 切边、冲孔及其模具设计	132
第二节 精压和校正的应用及模具 设计	139
第三节 模锻件的表面清理	142
第七章 板材冲裁	144
第一节 冲裁过程	144
第二节 冲裁模间隙	145
第三节 冲裁工艺力的计算	149
第四节 冲裁模	152
第五节 精密冲裁	169
第八章 弯曲	174
第一节 弯曲变形特点	174
第二节 最小弯曲半径	180
第三节 弯曲工艺设计	182
第四节 弯曲模	189
第五节 弯曲件质量控制	191
第九章 胀形	199
第一节 胀形变形的特点	199
第二节 平板毛坯的局部胀形	200
第三节 管件胀形	201
第十章 直壁形状零件的拉深	204
第一节 圆筒形零件拉深时的 变形特点	205
第二节 极限拉深系数与拉深次数	210
第三节 带法兰边零件的拉深	213
第四节 阶梯形零件的拉深	217
第五节 反拉深	218
第六节 圆筒形零件用拉深模工作部分 尺寸的确定	219
第七节 盒形零件的拉深	222
第十一章 复杂曲面形状零件的 拉深	231
第一节 曲面形状零件拉深的特点	231
第二节 球面形状零件的拉深方法	233
第三节 锥形零件的拉深方法	236
第十二章 翻边	240

第一节	伸长类翻边	240	第一节	冲压工艺设计的内容	259
第二节	压缩类翻边	247	第二节	冲压变形中的变形趋向性	260
第十三章	其他常用冲压成形		第三节	冲压件工艺性分析	262
	方法	249	第四节	确定冲压加工方案、工序数目与	
第一节	校形	249		顺序的原则	264
第二节	软模成形	252	第五节	冲压工序间半成品的形状与尺寸	
第三节	差温拉深法	254		的确定原则	271
第四节	加径向压力的拉深法	255	第六节	冲压设备的选择	272
第五节	带料连续冲压	256	附录	思考题与习题	275
第六节	变薄拉深	258	参考文献	279	
第十四章	冲压工艺与模具设计	259			

第一章 塑性加工概论

第一节 塑性加工的特点及应用

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；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。

金属塑性加工具有许多显著的特点，主要表现在：

1) 力学性能好。金属经塑性变形之后，所成形的零件具有完整的流线，因而具有优良的力学性能。

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。

3) 生产率高。金属塑性加工主要是利用模具进行生产，故其生产率较高。如高速压力机可达每分钟数百次，金属塑性加工的材料利用率较高和生产率高，均使其生产成本大大降低。

4) 产品尺寸稳定，互换性好。也因为金属塑性加工主要是利用模具进行生产，而模具的精度变化很小，故塑性加工成形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。利用塑性加工可以生产形状复杂的零件，如汽车覆盖件等薄板壳类零件，曲轴、连杆等复杂形状零件等。这些零件用切削加工的方法制造或者很困难，或者成本非常高。

6) 操作简单，便于生产的机械化和自动化。塑性加工是利用模具加工，故而操作简单，对操作工人的技术水平要求低，易于生产的机械化和自动化。在目前大工业生产中，很多塑性加工生产都是采用机械化或自动化生产线。

由于上述特点，塑性加工被广泛应用在机械、电器、仪表、汽车、航空航天、轻工日用品等各个领域。

第二节 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。

一、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，要定量描述流动规律非常困难，可以应用最小阻力定律定性地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，这就叫最小阻力定律。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1-1 a、b、c分别为圆形、方形和矩形断面毛坯墩粗成形时各质点的流动方向，图1-1d是方形断面毛坯墩粗后的断面变化过程。

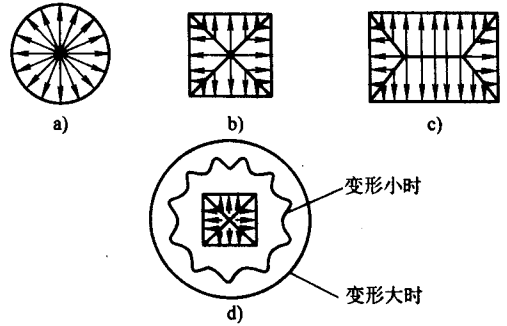


图1-1 最小阻力定律示意图

二、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，由于金属材料连续而且致密，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：

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

三、应力应变关系

认为塑性加工变形主要是塑性变形，而弹性变形可以忽略不计，则应力与应变之间关系表达为：

$$\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \frac{3}{2} \frac{\epsilon_i}{\sigma_i} \quad (1-2)$$

式中 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 ——三个主方向的主应变；

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ——三个主方向的主应力；

ϵ_i ——综合应变；

σ_i ——综合应力。

四、变形硬化模型

在塑性加工中，材料随着变形的增加其流动应力也增加，这种现象称之为应变硬化现象。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 为应力； K 为系数； ϵ 为应变； n 为硬化指数。

五、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，其绝对值也很小。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，故不能作平面应力处理。

六、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，一般假设板材在拉深成形之前毛坯的面积等于拉深成形之后拉深件的表面积。

第三节 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 1-2）。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。

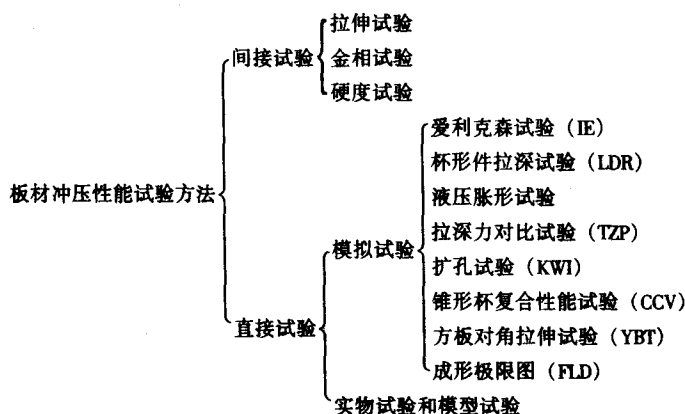


图 1-2 冲压性能试验方法

一、单向拉伸试验

板材拉伸试验一般用图 1-3 所示形状的标准试样在材料试验机上进行，可得到图 1-4 所示的应力与伸长率之间的关系曲线，即拉伸曲线。

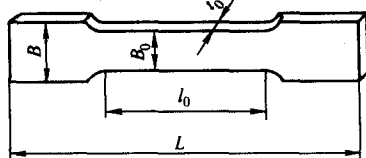


图 1-3 拉伸试验的试样

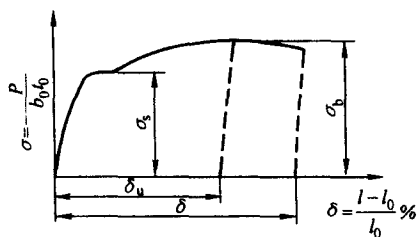


图 1-4 拉伸曲线

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。常用的几个参数有：

1. δ_u 与 δ

δ_u 叫做均匀伸长率，是拉伸试样开始产生局部集中变形（细颈时）的伸长率。 δ 叫做

总伸长率，或简称伸长率，是在拉伸试样破坏时的伸长率。

δ_0 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_0 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、胀形系数等等。

$$2. \frac{\sigma_s}{\sigma_b}$$

σ_s/σ_b 称为屈强比，是材料的屈服强度与抗拉强度的比值。较小的屈强比几乎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 $\sigma_s/\sigma_b \approx 0.57$ 时，其极限拉深系数 $m = 0.48 \sim 0.5$ ；而 65Mn 的 $\sigma_s/\sigma_b \approx 0.63$ ，其极限拉深系数 $m = 0.68 \sim 0.7$ 。

在伸长类的成形工艺中，如胀形、拉型、拉弯、曲面形状零件的成形等，当 σ_s 低时，为消除零件的松弛等弊病和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）所需的拉力也小。这时由于成形所必需的拉力与毛坯破坏时的拉断力之差较大，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 低时，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 σ_s/σ_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：用于具有相当大胀形成分的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，真实应力增加的要多。 n 值大时，在伸长类变形过程可以使变形均匀化，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 值与爱利克森试验值之间存在有正比例关系。

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 ，也叫做 r 值，它是板材试验拉伸试验中宽度应变 ϵ_b 与厚度应变 ϵ_t 之比，即

$$r = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_t} = \frac{\ln \frac{B}{B_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} \quad (1-4)$$

上式中 B_0 、 B 、 t_0 与 t ，分别是变形前后试样的宽度与厚度。

r 值的大小，表明板材在受单向拉应力作用时，板平面方向和厚度方向上的变形难易程

度的比较,也就是表明在相同的受力条件下,板材厚度方向上的变形性能和板平面方向上的差别,所以叫做板厚方向性系数,有时也叫塑性应变比。当 $r > 1$ 时,板材厚度方向上的变形比宽度方向上的变形困难。所以 r 值大的材料,在复杂形状的曲面零件拉深成形时,毛坯的中间部分在拉应力作用下,厚度方向上变形较困难,即变薄量小,而在板材平面内与拉应力相垂直的方向上的压缩变形比较容易,结果使毛坯中间部分起皱的趋向性降低,有利于冲压加工的进行和产品质量的提高。

r 值大时,使筒形件的拉深极限变形程度增大,用软钢、不锈钢、铝、铜、黄铜等所做的试验也证明了拉深程度与 r 值之间的关系(见表 1-1)。

表 1-1 拉深程度与 r 值间关系

r 值	0.5	1	1.5	3
拉深程度 $K = \frac{D}{d}$	2.12	2.18	2.25	2.5

板材的 r 值可以用拉伸试验的方法测定。 r 值的大小,除决定于材料的性质外,也随拉伸试验中的伸长率的增大而变化(稍有降低)。因此,一般资料中都规定 r 值应取相对伸长率为 20% 时测量的结果。

冲压生产所用的板材都是经过轧制的,其纵向和横向的性质不同,在不同方向上的 r 值也不一样。为了统一试验方法,便于应用,常用下式计算板厚方向性系数的平均值,并作为代表板材冲压性能的一项重要指标。

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad (1-5)$$

式中, r_0 、 r_{90} 与 r_{45} 分别是板材的纵向(轧制方向)、横向和 45° 方向上的板厚方向性系数。

5. 板平面方向性

当在板材平面内不同方向上截取拉伸试样时,拉伸试验中所测得的各种力学性能、物理性能等也不一样,这说明在板材平面内的力学性能与方向有关,所以称为板平面方向性。在圆筒形零件拉深时,板平面方向性明显地表现在零件口部形成的凸耳现象。板平面方向性越大,凸耳的高度越大。

板平面方向性在拉深、翻边、胀形等冲压过程中,能够引起毛坯变形的不均匀分布,其结果不但可能因为局部变形程度的加大,而使总体极限变形程度减小,而且还可能形成冲压件的不等壁厚,降低冲压件的质量。

在表示板材力学性能的各项指标当中,板厚方向性系数对冲压性能的影响比较明显,所以在冲压生产中都用 Δr 来表示板平面方向性的大小。 Δr 是板材平面内不同方向上板厚方向性系数 r 值的差值,其值为

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \quad (1-6)$$

由于板平面方向性对冲压变形和冲压件的质量都是不利的,所以生产中都尽量设法降低板材的 Δr 值,而且有的国家对板材的 Δr 值也有一定的限制。

间接试验的结果,能够在相当大的程度上反映板材的冲压性能,但不可能很确切地反映每个冲压成形方法中的冲压性能。

二、爱利克森试验（胀形性能试验）

爱利克森试验是一种较为古老，但也是目前应用较为广泛的一种试验方法，其原理如图 1-5 所示。

试验时将试样放在凹模平面上，用压边圈压边，并用球形的冲头将板材试样压入凹模。由于试样的外径（或宽度）具有比凹模孔大得多的尺寸，所以试验时试样外径不收缩，仅使板材的中间部分受到两向拉应力作用而胀形。试样在受拉下发生裂纹时冲头的压入深度，称为爱利克森试验深度或爱利克森值。在爱利克森试验时，试样的应力状态和变形特点与局部胀形时相同，所以其试验深度能够反映胀形类成形时的冲压性能。在复杂的曲面零件拉深时，毛坯中间部分的应力状态也属于这种情况，而且中间部分成形的好坏又是这类零件冲压的关键，所以爱利克森试验对润滑剂与润滑方法都有一定的要求，以便减小试验结果的波动。

三、拉深性能的试验

确定板材的拉深性能的试验方法主要有下边几种形式。

1. 确定最大拉深程度法

该试验又称斯韦福特试验，其原理如图 1-6 所示。用不同直径的圆形毛坯（直径相差 1mm），在图示的模具中进行拉深试验。取在侧壁不致破坏的条件下可能拉深成功的最大毛坯的直径 D_{max} 与冲头直径 d_p 的比值作为表示拉深性能的指标，又称为极限拉深比，用 LDR（最大拉深程度或极限拉深程度）表示，即

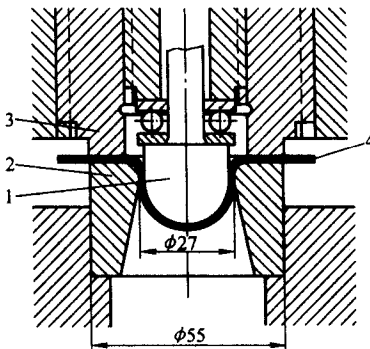


图 1-5 爱利克森试验装置的主要形状与尺寸

1—冲头 2—凹模 3—压边圈 4—试样

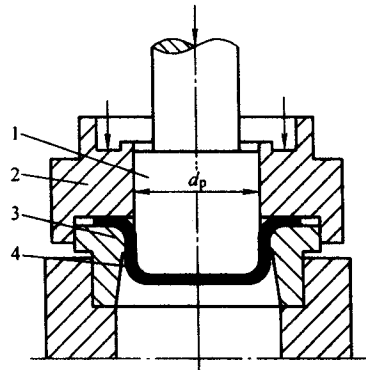


图 1-6 求 LDR 的试验方法原理

1—冲头 2—压边圈 3—凹模 4—试样

$$\text{LDR} = \frac{D_{\text{max}}}{d_p} \quad (1-7)$$

由于这种试验方法的原理和拉深时的变形条件是完全相同的，所得的结果，可以综合地反映出在拉深变形区和传力区不同受力条件下板材的冲压性能。但其主要缺点是，为了进行试验并取得最终的结果，需用较多数量的试件，而且还要经过多次的反复试验。另外，用此方法所得试验的结果，也因为受到操作上的各种因素（如压边力、润滑等）的影响而产生波动，所以试验结果的可靠性也不十分高。

2. 拉深力对比试验

拉深力对比试验法也叫 TZP 法，其原理是用在一定拉深变形程度（通常取拉深试验件毛

坯直径 D_0 与冲头直径 d_p 的比值为 $D_0/d_p = 52/30$ 下的最大拉深力与试验中已经成形的试样侧壁的拉断力之间的关系作为判断拉深性能的依据。当然，这两个力之间的差别越大，板材的拉深性能也越好。

试验方法的原理如图 1-7 所示。采用可以一次拉深成功、不致发生破坏的拉深试样直径，按一般方法进行拉深试验。当拉深力达到最大值 F_{\max} 以后，随即加大压边力使试样的外法兰边固定，消除其以后继续变形和被拉入凹模的可能。然后再增加冲头力直到使试样的侧部位被拉断，并测得拉断力 F 。试验曲线如图 1-8 所示，根据测得的最大拉深力 F_{\max} 与试样侧壁拉断力 F 的数值用下式来表示板材的冲压性能：

$$T = \frac{F - F_{\max}}{F} \times 100\% \quad (1-8)$$

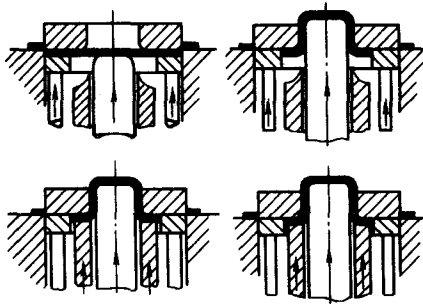


图 1-7 TYP 试验法

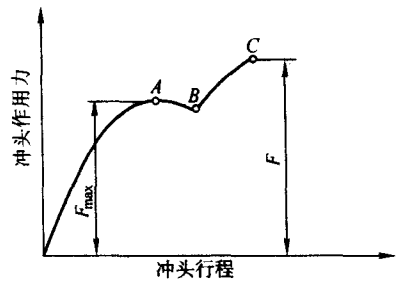


图 1-8 拉深性能 T 值的确定过程
A—最大拉深力 B—外边缘固定 C—拉断

三、锥形件拉深试验法

实际上锥形拉深试验法是确定板材的拉深性能和胀形性能的综合试验方法，其试验结果可以作为评定板材冲压性能的一项重要指标。试验所用装置如图 1-9 所示。用球形冲头和 60° 角的锥形凹模，在不同压力的条件下做圆形毛坯的拉深试验。一般取凸模直径 d_p 与试样毛坯直径 D_0 的比值 $\frac{d_p}{D_0} = 0.35$ 。试验中测量件于底部发生破坏时的上口直径，称之为 CCV 值并用以表示板材的冲压性能。由于材料方向性的影响，锥形件上口的直径在不同方向上也有差别（见图 1-10），所以通常采用其平均值，即取 CCV 为

$$D = \frac{D_{\max} + D_{\min}}{2} \quad (1-9)$$

或

$$D = \frac{D_0 + D_{90} + 2D_{45}}{4} \quad (1-10)$$

式中 D_{\max} 、 D_{\min} ——锥形拉深试样破坏时上口的最大直径和最小直径；

D_0 、 D_{90} 、 D_{45} ——板材纵向、横向和 45° 方向上锥形拉深件试样上口的直径。

锥形拉深件底部发生破坏时的上口直径越小，即 CCV 值越小，说明试验材料可能产生的变形越大，其冲压性能越好。锥形拉深试验不用压边装置，可以排除压边条件对试验结果的影响，而且用一个试样即可简便地完成试验。

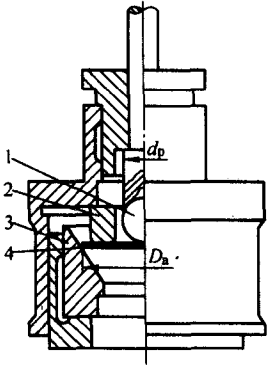


图 1-9 锥形件拉深试验法

1—球形冲头 2—支撑圈 3—凹模 4—试样

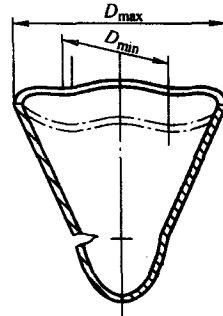


图 1-10 底部破坏后的锥形拉深

除上述各种冲压性能的试验方法外，还有确定弯曲性能的冷弯试验法、确定翻边性能的扩孔试验法、确定拉深性能的楔形拉伸试验法等，其原理均比较简单，而且试验中试样的受力情况和变形性质与实际冲压变形非常接近。

第四节 塑性加工新技术

塑性成形是一种古老的金属材料成形方法，随着科学技术的进步也不断焕发出新的活力，许多新的塑性成形方法不断被开发出来，应用到生产实践中去。

一、特种成形工艺

棒材和锭材一般经锻造成形获得锻件，锻件具有内部组织均匀、力学性能好等特点，但锻造成形需要较大的变形力，模具寿命较短。因此，根据不同类型的零件而开发了各种特种成形工艺。

1. 辊锻

辊锻成形是近几十年将纵向轧制引入锻造业并经不断发展而形成的锻造新工艺。图 1-11 是辊锻成形时的变形原理图。辊锻机的上、下两个锻辊轴线平行，转向相反。安装在锻辊上并随其旋转的辊锻模借助摩擦将纵向送进的毛坯拽入并连续地对其局部施压，使毛坯受压部位的截面积和高度都减小，宽度略有增加，长度的延伸较大。故辊锻多用于以延伸变形为主的锻造过程。与普通模锻相比，辊锻在同一时刻对毛坯的局部施压，变形面积小，从而所需的成形力大大减小。同时，辊锻成形还具有生产效率高（一般是锤上模锻的 5~10 倍）、材料利用率高（一般都在 80% 以上）及劳动条件好等优点。

2. 横轧

横轧也是一种局部成形的塑性成形方法。图 1-12 是横轧齿轮的原理图，两轧辊轴线相互平行，旋转方向相同；轧件旋转轴线与

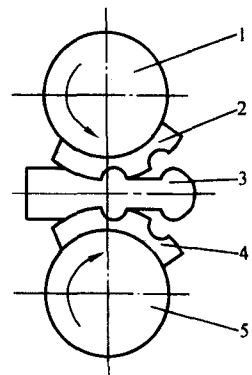


图 1-11 辊锻变形原理

1—上锻辊 2—辊锻上模
3—毛坯 4—辊锻下模
5—下锻辊

轧辊旋转轴线平行，但旋转方向相反。

3. 斜轧

斜轧与横轧主要不同在于两轧辊轴线交叉成一个小角度，旋转方向相同，轧件在两辊交叉中心线上作与轧辊旋转方向相反的运动，还作前进直线运动（图 1-13）。

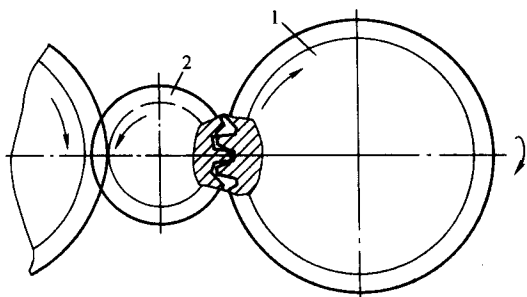


图 1-12 横轧齿轮原理图

1—轧辊 2—轧件

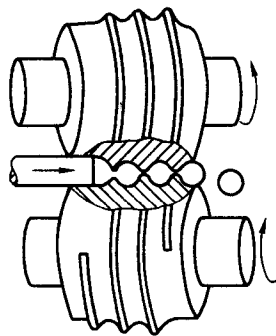


图 1-13 斜轧

4. 摆辗

摆辗是另一种形式的局部成形方法。如图 1-14 所示，摆辗成形时，上模的轴线与被辗压工件（放在下模）的轴线（称主轴线）倾斜一个小角度，上模一面绕主轴旋转，一面对坯料连续进行压缩，并同时作轴向进给运动，使坯料产生连续累计的塑性变形，最终成形出所需要的零件。摆辗成形具有省力，无冲击振动，噪声极小，劳动条件好等优点，适合于薄盘类零件成形，在工业生产中得到较广泛应用。

5. 半固态加工

半固态加工是利用金属在液态和固态之间转变时的各种特性进行成形加工的成形方法。可分为枝晶材料半固态加工、非枝晶材料半固态加工。枝晶材料半固态加工的特点是成形开始于液态金属，即和铸造加工一样，利用液态金属流动性好，并在压力下

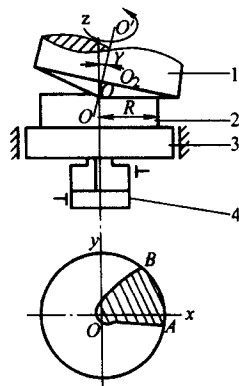


图 1-14 摆辗工作原理示意图

1—上模 2—毛坯

3—滑块 4—液压缸

在压力下进行充填的优点，实现高压凝固和塑性变形的复合过程，从液态经半固态到固态的转变过程是一个连续的过程。非枝晶材料半固态加工包括半固态压铸、半固态塑性加工，其实质是对合金进行特殊处理，使其具有球状结构的固相、液相共存的组织，具有触变性，即固体组分占 50% 的浆液，当剪切率低于或等于零时，其粘度大大提高，使浆液像软固体一样可以搬运，施以剪切力则又可以使其粘度降低，重新获得流动性，很容易成形。利用半固态加工可以加工铝合金、镁合金、锌合金、镍合金、铜合金和钢铁，利用半固态金属的高粘度，可以有效地使不同材料混合，制成新的复合材料。

6. 冷锻

冷锻技术属于金属在室温下的体积塑性成形，其成形方式有：冷挤压（如正挤压、反挤压、复合挤压）、冷镦压（如镦挤复合、镦粗等）。冷锻成型的主要特点是：节约材料，高效及零件质量高，尺寸精度高，表面粗糙度值低，可以减少或免去机械加工及研磨工序，零件

力学性能提高,有时可以不进行热处理。但由于冷锻在三向压应力下成形,金属冷变形抗力比其他塑性成形方法要显著增大,专用冷锻设备和模具方面的费用较高。故冷锻适用于小尺寸零件大批量生产。

7. 温锻

温锻是在冷锻基础上发展起来的一种少无切削的塑性成形加工方法,其变形温度通常认为是在室温以上再结晶温度以下的温度范围内。常见的温锻温度范围:对黑色金属来说,一般是 $200\sim 850^{\circ}\text{C}$;对有色金属来说,是从室温以上到 350°C 以下。温锻成形在一定程度上兼备了冷锻与热锻时的优点,同时也减少了它们各自的缺点。因而,温锻可以采用比冷锻更大的变形量和较小的变形力,减少工序数目,降低模具费用和压力机吨位;而与热锻相比,其加热温度低,氧化与脱碳减轻,产品尺寸公差等级较高,表面粗糙度值较低。

温锻主要适应于冷锻变形时硬化剧烈或者变形力高的不锈钢、合金钢、轴承钢和工具钢,冷变形时塑性差、容易开裂的铝合金 7A04、铜合金 HPb59-1,冷态难加工而热态严重氧化吸气的材料钛、钼、铬等。

8. 等温锻造与超塑性锻造

像钛合金、铝合金、镁合金、镍合金、合金钢等一些在常规锻造条件下难成形的材料,以及锻造温度范围较窄、或塑性较差、或变形抗力很高的材料塑性成形,特别是具有薄的腹板、高肋和薄壁的零件等,采用等温锻或超塑性锻造具有较大的成形优势。

等温锻造可分为等温模锻造和等温挤压等,与普通锻造的不同之处在于等温锻造时模具和坯料要保持在相同的恒定温度下(这一温度是介于冷锻温度和热锻温度之间的一个中间的温度),而且变形速度很低。因此,等温锻造具有变形力小,锻件尺寸精度高,余量小,表面质量高,力学性能好等优点,但模具成本较高。

超塑性可分为微细晶粒超塑性(又称恒温超塑性)、相变超塑性(又称变态超塑性)与其他超塑性。由于后两种超塑性在生产技术上较复杂,实际生产中所常讲的超塑性锻造主要是指微细晶粒超塑性锻造。微细晶粒超塑性成形需要三个基本条件,即材料具有等轴稳定的细晶组织(通常晶粒尺寸 $\leq 10\mu\text{m}$);温度 $T \geq 0.5T_m$ (T_m 为材料熔点的热力学温度);应变速率 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ 。在这些条件下,材料呈现出超塑性现象,具有低的流动应力,超高的伸长率,良好的流动性。因而可以成形出高质量、高精度的薄壁、薄腹板或高筋等复杂形状的锻件。

9. 粉末锻造

粉末锻造是将粉末冶金和精密模锻结合在一起的一种塑性成形方法。粉末锻造能以较低的成本和较高的生产效率大批量生产高质量、高精度、形状复杂的结构零件。按工艺分类,可以分为粉末锻造、烧结锻造、锻造烧结和粉末冷锻等。

粉末锻造与普通锻造相比的主要优点表现在几个方面:能源消耗低,如粉末锻造连杆为普通锻造的49%;材料利用率高,可达80%~90%,普通锻造一般为40%~60%;粉末锻件精度高,力学性能好,内部组织无偏析,无各向异性。由于这些优势,粉末锻造在工具钢、硬质合金、高速钢、铝合金、钛合金、以及难熔和灰熔合金等的成形中得到广泛应用。

10. 内压成形

内压成形是利用气体或液体压力使板料、壳体或管坯成形的一种塑性加工方法。板料和壳体的内压成形所需要的压力一般较小,而管坯内压成形所需要的压力则较高,一般要达到

几百甚至上千兆帕。

内压成形时的变形一般属于胀形变形，毛坯的表面积增加，厚度减小，具有减轻零件重量，节约材料，减少模具数量，降低模具费用，制件强度与刚度，抗疲劳性能好，生产成本低等优点。因此，内压成形广泛用于航空、航天、汽车等行业的零件生产。

11. 电磁成形

电磁成形和电水成形、电爆成形都是高能高速的塑性成形方法，它们所用的电气装置原理和成形原理都是相同的，只是所采用的传递能量的介质不同。

电磁成形所使用的能量来自电气装置中的可充电容，放电过程中所产生的电磁场能量使处于磁场中的毛坯产生塑性变形，达到所要求的零件的形状与尺寸。图 1-15 是电磁成形原理图，当线路接通时，在线圈内形成很强的脉冲电流，此时线圈空间就产生一均匀强脉冲磁场，置于线圈内的管状金属毛坯的外表面就会产生感应脉冲磁场，管坯外表面在这种很大的磁场压力的作用下产生塑性变形。

电磁成形具有许多显著的优点，非常适合于某些特殊零件的生产。其主要优点有：电磁成形可以很方便地实现对各种工艺参数和成形过程的控制，容易实现生产过程的机械化和自动化；可以实现高速成形，每分钟可工作数百次；电磁成形不产生摩擦，无需润滑剂，零件不用进行清理，利于保护环境；工艺装备及模具简单，只需一个凸模或凹模即可实现加工，工装费用低；可以实现金属与非金属的连接与装配；所成形的零件精度高，残余应力低，形状冻结性好；用电磁成形方法加工导电性能差的金属时，加工效率低，需要利用良导体材料作“驱动片”进行间接加工。因为电磁成形方法具有这优良特点，常被用来进行板材、管材的缩口、胀形、翻边、冲孔、切断加工，以及完成装配和联接工序。

12. 充液拉深成形

充液拉深是在凹模兼液压室的型腔内充满液体（水或油），利用凸模（带动板材毛坯）进入凹模后建立的反向液压而使板材成形的方法（图 1-16）。

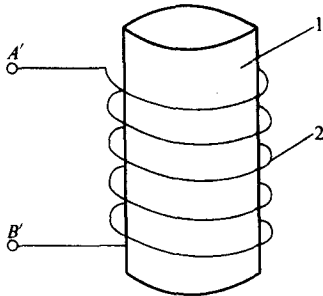


图 1-15 电磁成形原理图
1—管状毛坯 2—成形用线圈

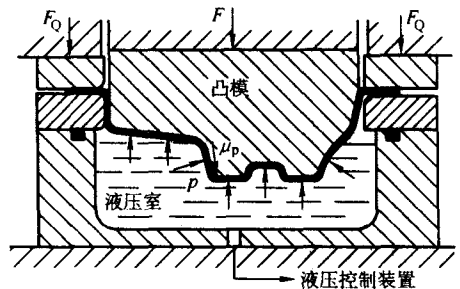


图 1-16 充液拉深

充液拉深成形不需要凹模，可大大降低模具成本、缩短模具制造周期。成形过程中，液压力使凸模与板材之间的摩擦保持作用，承担了大部分的成形力，使零件侧壁抗破裂能力大大加强，成形极限得到大大提高；在锥形、抛物线形等曲面零件成形时，毛坯悬空部分由于受到液体的压力与凸模紧贴在一起，从而不容易起皱。充液拉深方法还具有成形的零件形状精度和尺寸精度高，零件的内外表面精度高，板厚分布均匀等一系列特点。但这种方法中的密封橡胶膜寿命低，需要经常更换，这是在大批量生产中应用此方法所必须要解决的问题。