

高等学校教材

冲压工艺学

吴诗惇 主编
何声健 副主编

西北工业大学出版社

高等学校教材

冲压工艺学

吴诗惇 主 编
何声健 副主编

西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书是根据 1982 年 10 月航空高等工业院校锻压专业教材小组所拟定的冲压工艺学教学大纲编写的。它主要介绍冲压中各种工艺方法的基本理论、工艺特点、工艺计算、模具结构和模具设计。

本书共分七章。着重介绍了冲裁、弯曲、拉延、成形和冷挤压五种主要冲压工艺方法。此外，还介绍了板料冲压性能与成形极限以及计算机辅助设计在冲压中的应用等。

本书是航空高等工业院校锻压专业冲压工艺课程的教材，也可供其它有关院校或短训班作为教材使用。此外，还可供从事冲压生产的工程技术人员和科学研究人员参考。

高等学校教材

冲 压 工 艺 学

主 编：吴诗惇

副 主 编：何声健

责任编辑：刘述尧

•

西北工业大学出版社出版

(西安市友谊西路 127 号)

陕西省新华书店发行

西北工业大学出版社印刷厂印装

•

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 19.625 480 千字

1987 年 6 月第一版 1987 年 6 月第一次印刷

印数 0001—5000 册

ISBN 7-5612-0014-5/TG·3

统一书号：15433·051

定价：3.25 元

前 言

冲压工艺在航空、兵工、汽车、拖拉机、电器、电子、仪表及日用品生产中应用十分广泛，占有很重要的地位。它是锻压专业教学的主要内容之一。

本书是根据 1982 年 10 月 航空高等工业院校锻压专业教材小组所拟定的冲压工艺学教学大纲编写的。它主要介绍冲压中各种工艺方法的基本理论、工艺特点、工艺计算、模具结构和模具设计。

此外，本书将板料冲压性能和成形极限列成专章。在该章中，总结了最近国内外对冲压材料研究的一些新成果。

本书在第七章中，介绍了在冲压新进展中最为活跃或令人感兴趣的几个方面，特别是计算机辅助设计在冲压设计中的应用。该章不属于教学大纲规定的内容，只供学生阅读参考，以扩大眼界。

由于受到课程学时和教材篇幅的限制，本书只列入讲授时必需使用的部分设计资料。如果需要使用或阅读其它有关的设计资料，可以参考王孝培主编的《冲压设计资料》（机械工业出版社出版，1983 年）一书或其它有关资料。

本书由西北工业大学吴诗惇主编。南昌航空工业学院何声健任副主编。参加本书编写工作的人员是：西北工业大学吴诗惇（绪论、第三章 § 3-11、第六章 § 6-6 至 § 6-10、第七章和附录）、蒋侠民（第四章）、张仲元（第五章）、唐才荣（第六章 § 6-1 至 § 6-5）和南昌航空工业学院何声健（第一、第二、第三章 § 3-1 至 § 3-10）。

本书由清华大学锻压教研室郑可煌同志主审，并提出许多宝贵意见，在此深表感谢。

编 者

1987 年 2 月

目 录

结 论	1
第一章 板料冲压性能与成形极限	5
§ 1—1 板料冲压性能的工艺试验	5
§ 1—2 板料机械性能指标与板料冲压性能之间的关系	12
§ 1—3 板料的成形极限	16
§ 1—4 常用材料的冲压性能	22
第二章 冲 裁	25
§ 2—1 冲裁变形过程分析	25
§ 2—2 冲裁件质量分析及影响冲裁质量的因素	28
§ 2—3 冲裁模间隙	32
§ 2—4 去除毛刺的方法	36
§ 2—5 凸、凹模工作部分尺寸计算及其制造公差	37
§ 2—6 冲裁力的计算与降低冲裁力的方法	42
§ 2—7 材料的经济利用	45
§ 2—8 冲裁的工艺设计	51
§ 2—9 冲裁模分类	55
§ 2—10 冲裁模典型结构	56
§ 2—11 冲裁模主要零件的设计与标准选用	65
§ 2—12 冲裁模结构设计	81
§ 2—13 其它冲裁方法	82
第三章 弯 曲	103
§ 3—1 弯曲变形过程分析	103
§ 3—2 宽板立体纯塑性弯曲时的应力分布与应力中性层的位置	107
§ 3—3 弯曲时应变中性层的位置	111
§ 3—4 最小弯曲半径	112
§ 3—5 弯曲力矩与弯曲力的计算	116
§ 3—6 弯曲件的回弹	118
§ 3—7 弯曲毛坯尺寸的确定	128
§ 3—8 弯曲件的工艺性和工艺安排	131
§ 3—9 弯曲模的典型结构	134
§ 3—10 弯曲模工作部分尺寸的确定	142
§ 3—11 管料的弯曲加工	144
第四章 拉 延	147
§ 4—1 拉延变形过程的应力与应变状态	147

§ 4—2 拉延过程的力学分析	151
§ 4—3 拉延中的起皱与破裂	157
§ 4—4 拉延力与拉延功	163
§ 4—5 圆筒形件的拉延	165
§ 4—6 拉延模的典型结构	182
§ 4—7 其它形状零件的拉延	184
§ 4—8 其它拉延方法	201
§ 4—9 拉延件的工艺性分析及工艺规程拟订	208
§ 4—10 拉延中的辅助工序	213
第五章 成 形	219
§ 5—1 局部成形	219
§ 5—2 胀形	221
§ 5—3 内缘和外缘翻边	225
§ 5—4 缩口	232
§ 5—5 校形	234
§ 5—6 旋压和变薄旋压	236
第六章 冷 挤 压	239
§ 6—1 冷挤压的概念	239
§ 6—2 冷挤压的基本原理	240
§ 6—3 目前冷挤压用的金属材料	246
§ 6—4 冷挤压的变形程度	249
§ 6—5 冷挤压时的变形力	252
§ 6—6 冷挤压变形工序的制订	264
§ 6—7 冷挤压毛坯的制备	272
§ 6—8 冷挤压模具	279
§ 6—9 冷挤压压力机的选择	289
§ 6—10 温热挤压	289
第七章 冲压工艺及其模具设计的新进展	293
§ 7—1 计算机辅助设计在冲压设计中的应用	293
§ 7—2 超塑性成形	299
§ 7—3 蠕变成形	301
§ 7—4 锌合金模具	303
附录一 国际单位制与公制的换算	306
附录二 新旧国际公差等级对照表	306
附录三 冲压常用公差与配合的新旧国家标准对照表	306
主要参考文献	307

绪 论

冲压工艺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程度时，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，从而获得一定的形状、尺寸和性能的零件。

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。

由于利用模具加工，所以可以获得其他加工方法所不能或难以制造的、形状复杂的零件。

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

冲压加工一般不需要加热毛坯，也不像切削加工那样大量切削金属，所以它不但节能，而且节约金属。冲压产品的表面质量较好，用的原材料是冶金工厂大量生产的轧制板料或带料，在冲压过程中材料表面不受破坏。

因此，冲压工艺是一种产品质量较好而且成本低的加工工艺。不但如此，而且用它生产的产品一般还具有重量轻而刚性好的特点。

所以冲压工艺在航空、兵工、汽车、拖拉机、电机、电器、电子仪表以及日常生活用品的生产方面占据十分重要的地位。仅就航空方面而论，例如，航空喷气发动机上的整流罩、压气机后机匣、尾喷管、火焰筒以及加力燃烧室等都是用冲压工艺加工的。现代各先进工业国家的冲压生产都是十分发达的。在我们实现四个现代化的过程中，冲压生产是占有它的重要地位的。

我们祖先早在青铜器时期已经发现金属具有锤击变形的性能。可以肯定，中国劳动人民远在两千三百多年以前已经掌握了锤击金属以制造兵器和工具的技术。因为钢铁材料在冷态下进行塑性加工需要很大的力和功，冷压钢铁的技术在古代是不可能广泛使用的。当人们发现金、银、铜等金属塑性较好，变形时需力不大时，锤击压制技术迅速向金、银、铜的装饰品和日用品范围发展。在西安的陕西省博物馆中陈列的一个汉代（公元前 206 至公元 220 年）的匱（量器），厚度约 2 毫米，制作精美，花纹细致，就在今天看来，也算是一个精品，充分显示了我国古代劳动人民高度精巧的手工艺技术水平。

解放以前，我国处于半封建半殖民地状态，机器制造业十分落后，冲压工艺只应用在一些轻工业日用品中，技术当然也是十分落后的。解放后，才建立起一批具有现代规模和技术先进的冲压车间。

由于冲压加工的零件形状、尺寸、精度要求、批量大小、原材料性能的不同，当前在生产中所采用的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。

冷挤压虽然不属于板料成形，但它属于体积冲压的一部分。

常用的各种冲压加工方法，可见表 0-1 与表 0-2。

表 0-1 分离工序

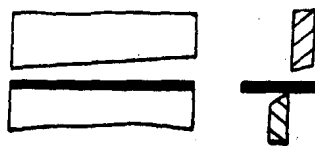
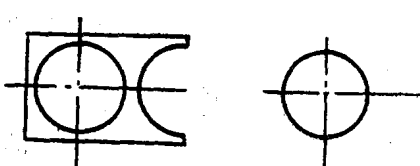
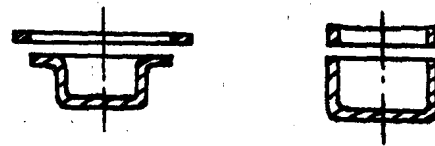
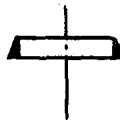
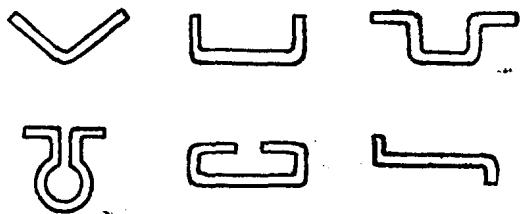
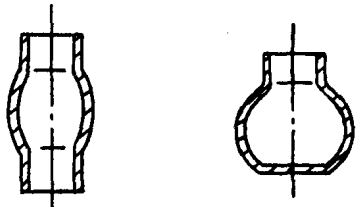
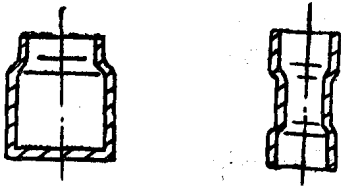
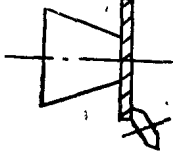
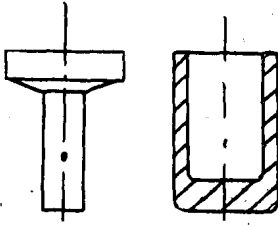
工序名称	简 图	特 点
剪切		将板料剪成条料或块料
冲裁		用冲模沿封闭轮廓曲线冲切
切口		用冲模将板料冲切成部分分离，但未完全分开
切边		将成形零件的边缘修切整齐或切成一定形状
剖切		将冲压成形的半成品切开成为二个或数个零件
整修		将冲裁成的零件的断面整修垂直和光洁

表 0-2 成形工序

工序名称	简 图	特 点
弯 曲		将板料沿直线弯成各种形状
卷 圆		把板料端头卷成接近封闭的圆头
拉 延		把板料毛坯冲制成各种空心的零件
变薄拉延		把拉延或反挤所得的空心半成品进一步加工成为侧壁厚度小于底部厚度的零件
翻 边		在预先冲孔的板料上冲制竖直的边缘
局部成形		在板料或零件的表面上制成各种形状的突起或凹陷
胀 形		使空心件或管状毛坯向外扩张, 胀出所需的凸起曲面

(续表 0-2)

工序名称	简 图	特 点
缩口或缩径		使空心件或管状毛坯的端头或中间直径缩小
旋 压		在旋转状态下用辊轮使板坯逐步成形
整 形		为了提高已成形零件的尺寸精度或为了获得小的圆角半径而采用的成形方法
冷挤压		迫使金属块料产生塑流, 通过凸模与凹模间的间隙或凹模出口, 制造空心或剖面比毛坯断面要小的零件。

第一章 板料冲压性能与成形极限

§ 1-1 板料冲压性能的工艺试验

板料的冲压性能是指板料对各种冲压方法的适应能力。不同的冲压工序，板料的应力状态、变形特点及变形区和传力区之间的关系将各不相同，所以对板料的冲压性能的要求也都不相同。为便于研究各种冲压工序对板料性能的要求，根据变形区的应力应变状态，将各种冲压工序分为以伸长为主的变形方式（如胀形、翻边和弯曲变形的区等）和以压缩为主的变形方式（如拉延、管材缩口和弯曲变形的内区等）两大类。

以下几种试验方法可用来鉴别板料对两类变形方式的适应能力：

一、板料的拉伸试验

板料的单向拉伸试验是确定其机械性能的简单而常用的方法。它所提供的机械性能指标，可用来定性地估计板料的冲压性能。

试验所用试样的形状和尺寸，根据 GB 228-76，可分带头和不带头的两种。带头的如图 1-1 所示。有短、长比例两种试样，其尺寸见表 1-1。

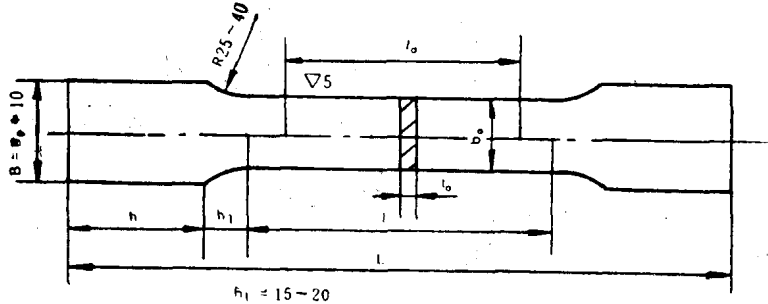


图 1-1 拉伸试样

将在板料三个不同方位上截取的试件（见图1-2）置于带自动记录装置的材料试验机上进行拉伸，试验条件按 GB228-76 规定进行。

试验时，测定并记录如下数据：

（1）屈服点附近，试样工作长度范围内试样的宽度 b 和相应剖面的厚度 t 以及屈服时的载荷大小 P_s （或 $P_{0.2}$ ）。

（2）最大载荷 P_{max} 及相应的剖面尺寸 b_f 和 t_f （即细颈出现时的尺寸）。

（3）当试样被拉断时，破坏载荷的数值及拉断试样工作长度 l_p 与剖面尺寸 b_p 、 t_p 。

根据试验数据，计算出各个载荷 P 下的实际应力与实际应变：

$$\sigma = \frac{P}{F} = \frac{P}{b \cdot t} \quad (1-1)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{F_0}{F} = \ln \frac{b_0 t_0}{bt} \quad (1-2)$$

表 1-1 拉伸试样尺寸 (毫米)

板料 厚度 t_0	板料 宽度 b_0	h	短 试 样 $l_0 = 5.65\sqrt{F_0}$			长 试 样 $l_0 = 11.3\sqrt{F_0}$		
			l_0	l	L	l_0	l	L
0.5	20	40	20	30	$l+2h_1+2h$	40	50	$l+2h+2h_1$
1	20	40	25	35		50	60	
1.5	20	40	30	40		60	70	
2	20	40	35	45		70	80	

注: F_0 为工作部分的剖面面积, $F_0 = b_0 \cdot t_0$ 。
 l_0 为工作部分长度

以 σ 为纵坐标, ε 为横坐标, 描绘出板料的硬化应力曲线。通过板料的单向拉伸试验, 可以得到板料如下的机械性能指标:

(1) 屈服极限 σ_s 或 $\sigma_{0.2}$: $\sigma_s = P_s / F_0$ (或 $\sigma_{0.2} = P_{0.2} / F_0$);

(2) 强度极限 σ_b : $\sigma_b = P_{\max} / F_0$;

(3) 细颈点应力 $\sigma_j = P_{\max} / F_j$;

(4) 屈强比: $\sigma_{0.2} / \sigma_b$ 或 σ_s / σ_b 之比值;

(5) 细颈点应变 ε_j : $\varepsilon_j = \ln(F_0 / F_j)$;

(6) 总延伸率 δ_{10} 或 δ_5 : δ_{10} 为长试样、 δ_5 为短试件的总延伸率, δ_{10} 或 $\delta_5 = (l_p - l_0) / l_0$;

(7) 均匀延伸率 $\delta_{均}$: 它是拉伸试样开始产生局部集中变形 (细颈) 时的延伸率;

(8) 总断面收缩率 Ψ : $\Psi = (F_0 - F_p) / F_0$;

(9) 弹性模数 E

(10) 硬化指数 n : $n = \varepsilon_j$ 或由下列方法求得。(s 表示开始屈服, j 表示开始出现细颈, p 表示断裂)。

硬化应力曲线可用下列指数曲线方程表示:

$$\sigma = C \cdot \varepsilon^n \quad (1-3)$$

式中 C ——与材料种类及性能有关的系数;

n ——硬化指数; ε ——真应变。

将式 (5-3) 两边取对数

$$\log \sigma = \log C + n \cdot \log \varepsilon \quad (1-4)$$

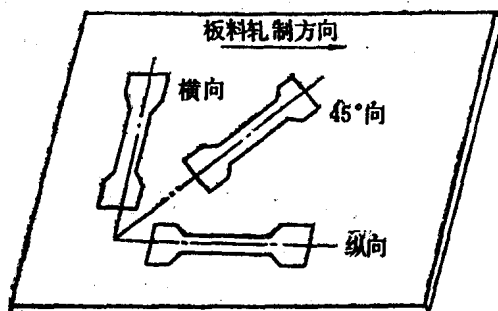


图 1-2 试样截取方位

式(1-4)是一直线方程,其斜率就是 n 值,如图 1-3 所示。因此, n 值可用下式进行计算:

$$n = \frac{\log \sigma_2 - \log \sigma_1}{\log \varepsilon_2 - \log \varepsilon_1} = \frac{\log(\sigma_2/\sigma_1)}{\log(\varepsilon_2/\varepsilon_1)}$$

$$n = \frac{\log \frac{P_2 l_2}{P_1 l_1}}{\log \frac{\ln(l_2/l_0)}{\ln(l_1/l_0)}} \quad (1-5)$$

在拉伸曲线上选择屈服后的两点的 P_1 、 l_1 和 P_2 、 l_2 值代入式(1-5),即可求得硬化指数 n 。但应指出,上述的用两点法求 n 值,误差较大。因此可采用最小二乘法求 n 值。

(11)厚向异性指数 r : 它是指拉伸试验时,试样均匀伸长为 15% 左右情况下,宽度方向的应变与厚度方向的应变之比值,即:

$$r = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_t} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} \quad (1-6)$$

由于厚度变化不易测量,所以可改用下式,即:

$$r = \varepsilon_b / \varepsilon_t = -\varepsilon_b / (\varepsilon_l + \varepsilon_b) = -[\ln(b/b_0)] / [\ln(l/l_0) + \ln(b/b_0)] \quad (1-6a)$$

当材料的 $r = 1$ 时,称为厚向同性材料;

当 $r \neq 1$ 时,称为厚向异性材料。

试样在板料中所取的方位不同,试验所得的厚向异性指数也不一样。所以板料的厚向异性指数,最好取为三个不同方位试样所得数据的平均值,以 $\bar{r}$ 表示:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad (1-7)$$

式中 r_0 ——纵向试样的厚向异性指数;

r_{90} ——横向试样的厚向异性指数;

r_{45} ——与轧制方向成 45° 的厚向异性指数。

(12)板平面各向异性指数 Δr : 由于板料在不同方位厚向异性不同,在板料平面内形成各向异性,以 Δr 表示:

$$\Delta r = r_0 + r_{90} - 2r_{45} \quad (1-8)$$

Δr 愈大,表示板平面内各向异性愈严重,拉伸时产生凸耳的现象愈严重。

二、板料的双向拉伸(胀形)试验

可采用杯突试验作为板料的双向拉伸(胀形)试验。其工作原理如图 1-4 所示。用一规定的钢球或球状冲头 3,向夹紧于规定的压模 1、4 内的试样 2 施加压力,直到开始产生裂缝为止,此时压入深度值(毫米)即为金属板料的杯突深度。此深度值用来判断材料延伸性能的优劣。

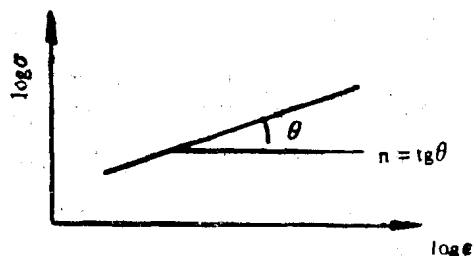


图 1-3 n 值的求法

试样的厚度为原材料厚度，形状为带形或方形。宽度尺寸当试样厚度在 0.5~2 毫米时取 70~90 毫米，冲头直径 20 毫米，上模孔径 27 毫米，垫模孔 33 毫米。试验条件按冶金工业部标准 YB 38-64《金属杯突试验法》进行。

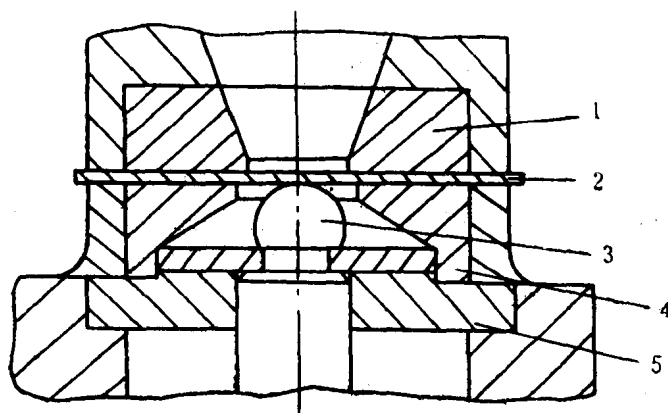


图 1-4 杯突试验

1—上模；2—试样；3—球状冲头；4—垫模；5—座板

试验前，在与冲头接触的试样面上及冲头球面上应涂无腐蚀性的润滑脂(如凡士林)。试样在模具中夹紧后，应将压模旋回 0.05 毫米，即保证模具与试样之间约有 0.05 毫米间隙。然后摇动手柄使冲头压向试样，冲头前进速度为 5~20 毫米/分。在接近破裂时，速度应降低到下限，以尽量减少试验的误差。此时除了可直接观察试样的破裂外，也能通过压力表指示的吨位的下降来判断它。一般来说，材料状态越软，破裂时的裂缝便越圆；而硬状态的材料，裂缝则成一直线，并往往伴有破裂带。

近年来，推荐最初加 10 千牛压边力的新杯突试验法。

从杯突试验中可测得冲头压入试样的深度——杯突深度（指示深度的游标尺可以读到 0.1 毫米的准确度）及最大冲力。

试验时，试样外径不收缩，仅使板料中间部分受到两向拉应力而胀形。因此，试验与局部胀形变形时的应力状态和变形特点相同，所以其值能反映以伸长为主的成形的冲压性能，如胀形、局部成形和复杂曲面的拉延等。杯突试验不能表示板料筒形件拉延变形时的冲压性能。

在杯突试验时，破裂点的确定、工具尺寸、表面光洁度、压边力、润滑、凸模速度等因素都影响试验值，由于操作偏差、设备偏差将使实验值出现波动。这样，即使用同样的材料也有相当大的偏差，这点必须注意。

用杯突试验也能预测关于成品件出现表面粗糙和表面状态变化。

因润滑对杯突深度影响较大，所以后来出现用液体压力代替球形刚性冲头，这样消除了润滑的影响，但目前使用还不普遍。

三、模拟试验

模拟试验的实质是突出实际冲压工序某一方面或几个方面的变形特点，加以模拟。在较为单纯的条件下所取得的试验结果，作为鉴定材料某种冲压性能的指标。

(一)反复弯曲试验 见图 1-5。以窄板条夹紧在专用试验设备的钳口内,左右反复折弯,直至破裂为止。折弯的半径越小,反复弯曲的次数越多,说明板料的冲压性能越好。这种试验主要用于鉴定 5 毫米以下板料的弯曲性能。试验条件按 GB 235-63 规定进行。

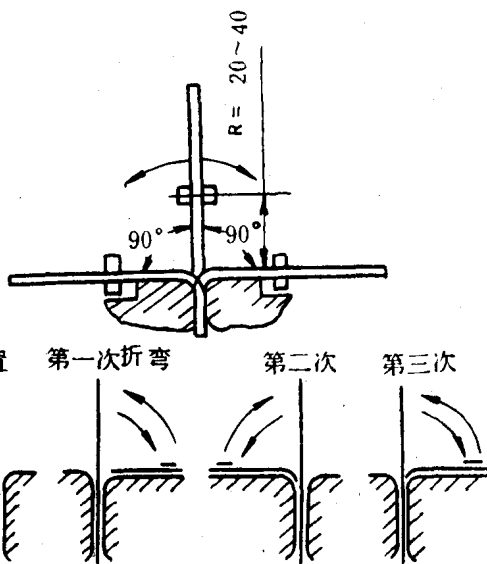


图 1-5 反复弯曲试验

(二)球形冲头锥形杯拉伸试验 (福井试验) 试验装置见图1-6。用球形冲头 3 和 60° 角的锥形凹模 2, 在不用压边的条件下对圆形试样 1 进行拉伸试验,直到球形底部发生细颈与破裂时为止。测量锥形件在底部发生破裂时的上口直径,称之为 CCV 值 (即锥形杯值 Conical Cup Value), 用以表示板料的冲压性能。CCV 值愈小,则成形性能愈好。

由于板料有方向性,故锥形件上口直径有差别,通常取平均值:

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

式中 $D_{\max}$ 与 $D_{\min}$ 为锥形件破裂时上口的最大值和最小值。

或用

$$CCV = \frac{D_0 + D_{90} + 2D_{45}}{4} \quad (1-9a)$$

式中 D_0 、 D_{90} 、 D_{45} 分别表示板料纵向、横向、45° 方向上锥形件上口直径。

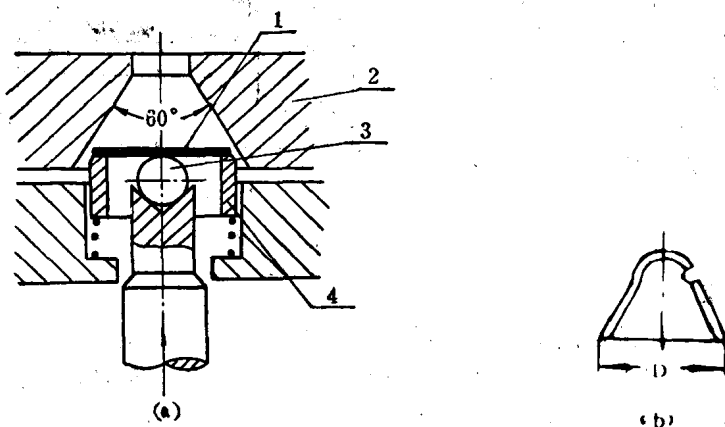


图 1-6 球形冲头锥形件拉伸试验

1—试样; 2—凹模; 3—球形冲头; 4—试样定位器

另有标准规定 CCV 值按下式确定:

$$CCV = \frac{D - D_m}{D} \quad (1-10)$$

式中 D ——毛坯直径；

$$D_m = \frac{1}{2}(D_{\max} + D_{\min})$$

$D_{\max}$ 与 $D_{\min}$ 意义同式(1-9)。

通常取球形冲头直径 d_p 与试样直径 D 的比值为： $d_p/D = 0.35$

此试验的优点有：因不用压边装置，故可排除压边力的影响。操作简单，无需仔细观察破裂的出现，CCV 值对冲压速度不敏感。可综合反映成形时“拉”和“压”两个方面的成形特点。但它只适用于 0.5~1.6 毫米的薄钢板。

此外，球形冲头锥形杯拉延试验还可以使拉延时产生凸耳的现象简便地再现，因此，也可利用它求各向异性率。

四、相似试验

这类试验方法，实质上是在类似实际生产的条件下进行试验，以取得各种数据。目前冲压设计资料中有关板料冲压性能的参数，大部分是通过这种方法得到的。其优点是结果具体，数据可靠，便于直接应用。缺点是试验周期长，费用高。

金属塑性变形的相似条件包含三方面内容。

物理相似 试样材料应与实际生产中的材料有相同的化学成分、金相组织、热处理状态、机械性能，试验时具有相同的变形温度和速度以及相同的外摩擦条件；

几何相似 试样和模具的形状、尺寸应与实际生产中的情况有相似比例。主要的困难是材料厚度很难按比例缩小（没有现成的薄料），往往不得不改用较厚的板料，因此在分析和利用试验数据时，必须考虑到相对厚度变化的影响。

力学相似 试样与实际情况之间有相同的加载条件与应力分布。

（一）Swift 的筒形件拉延试验（测极限拉延比 LDR） 其工作原理是用相差 1 毫米的不同直径的圆形试样在图 1-7 所示的模具中逐个进行拉延试验。取侧壁不破裂的条件下可能拉延成功的最大试样直径 $D_{\max}$ 与冲头直径 d_p 的比值表示拉延性能的指标。即：

$$LDR = \frac{D_{\max}}{d_p} \quad (1-11)$$

由于该试验方法与拉延变形条件完全相同，所以能合理的反映出在拉延变形区和传力区不同受力条件下的板料的冲压性能。其缺点是试验需要大量试样，要经过多次反复试验，并受到操作上的各种因素（压边力、润滑等）影响，因而影响了试验的可靠性。

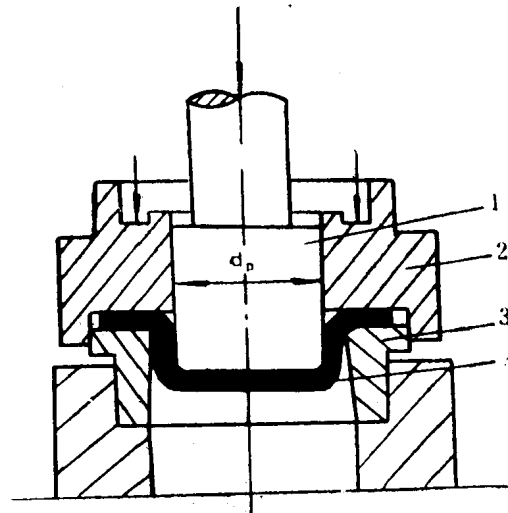


图 1-7 Swift 的筒形件拉延试验

1—冲头；2—压边圈；3—凹模；4—试样

这一方法已被国际上承认，并制订了试验标准。

(二) Engelhardt 的 TZP (Tief Ziehen Prüfung) 试验法 所谓 TZP 试验法，即是拉伸力对比试验法。其根据是：

1. 最大拉伸力与毛料大小成比例；
2. 最大毛料尺寸（极限拉伸系数）取决于危险断面的承载能力。

因此，用可能拉伸的一定直径的毛料（通常取拉伸试样件毛料直径 D_1 与冲头 d_p 的比值为 $D_1/d_p = 52/30$ ）进行拉伸，由在拉伸过程中的最大拉伸力和在拉伸的中途对凸缘施加强制的约束而使试样破裂时的拉断力，作为判断拉伸性能的依据。

试验过程见图 1-8 所示。采用直径为上述比例的试样或一次可以拉伸成功不致破裂的试样（直径设为 D_1 ），进行拉伸，记录其拉伸力 P 和行程 S 的变化曲线。当拉伸力达到最大值 P_1 后，增大压边力，使试样的外凸缘边固定，消除凸缘继续被拉入凹模的可能。然后凸模进一步下降，拉伸力继续增大，直到试样被拉断，测出拉断力 P （图中 C 点）。这时用：

$$T = \frac{P - P_1}{P_1} \times 100\% \quad (1-12)$$

来表示板料的冲压性能（即 T 值）。从 T 的表达式可看出 T 为正值。当 T 越大，板料的拉伸变形越大，拉伸性能越好。

根据试样的最大拉伸力 P_1 ，拉断力 P 与试样的毛料直径 D_1 ，即可确定板料的最大毛料尺寸 $D_{\max}$ 与极限拉伸系数 $m_{\min}$ 。

$$D_{\max} = \frac{P}{P_1} D_1 \quad (1-13)$$

$$m_{\min} = \frac{d_p}{D_{\max}} \quad (1-14)$$

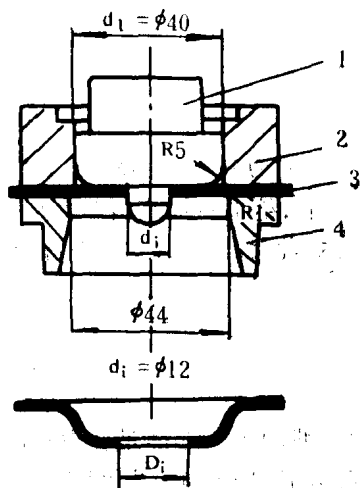


图 1-8 TZP 的说明

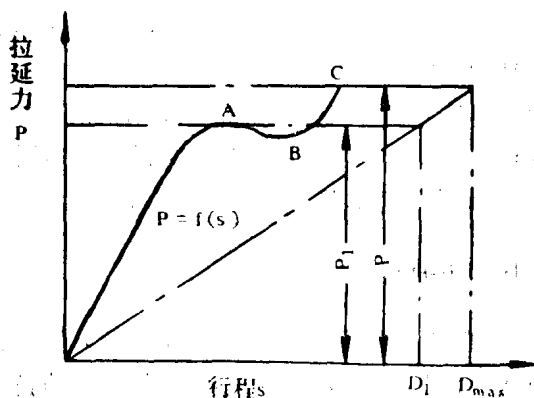


图 1-9 扩孔试验（图中尺寸板厚 $t < 2$

毫米，毛坯直径 $D > 70$ 毫米）

1—凸模；2—压料板；3—试件；4—凹模

(三) 翻边性能试验 图 1-9 所示的，是 Siebel 等提出的翻边试验（即 KWI 试验）。由于是采用圆柱形凸模进行扩孔，因此也称为扩孔试验。翻边成形的极限，根据内孔翻边成形