

冲压工艺

理论与新技术

00.00.29

00.00.30

00.08.60

00.08.61

00.08.62

00.08.63

00.08.64

00.08.65

00.08.66

00.03.53

李硕本 等编著

00.00.28



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

冲压工艺理论与新技术

李硕本 李春峰 编 著
郭斌 赵军 金森



机械工业出版社

本书全面介绍了冲压工艺理论基础与各种冲压方法的成形机理,并在此基础上深入介绍了新工艺、新技术开发与应用问题。本书可供已经掌握冲压工艺基本知识的工程技术人员和本专业研究生自学提高的参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

冲压工艺理论与新技术/李硕本等编著. —北京: 机械工业出版社, 2002.11
ISBN 7-111-10836-1

I. 冲... II. 李... III. 冲压—工艺 IV. TG38

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 065252 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 刘彩英 张亚秋 版式设计: 霍永明 责任校对: 刘志文

封面设计: 陈 沛 责任印制: 付方敏

三河市宏达印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 11 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·6.125 印张·236 千字

0 001—4 000 册

定价: 18.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

前 言

近几十年来, 冲压技术有了飞速的发展, 它不仅表现在许多新工艺与新技术在生产中的广泛应用上, 更重要的是人们对冲压技术认识与掌握的程度有了质的飞跃。在 20 世纪 50 年代, 冲压技术还处于主要依靠从实践中总结出来的冲压工艺方法和工艺参数, 能够制造出具有典型特征与规则形状的冲压件。但是对所应用的冲压成形方法的变形机理和冲压成形的规律并不十分了解, 缺少必要的理论知识作为实际工作的指导。因此, 当冲压生产中遇到与变形机理有关较为复杂的问题时, 就会感到束手无策, 无从着手, 致使问题长时间得不到解决。到 20 世纪末, 冲压技术有了很大的进步, 人们已经对常用的各种工艺方法的成形机理有了基本的了解, 也总结出一些可以作为冲压成形理论内容的冲压变形规律, 可以在对冲压成形机理深入了解的基础上, 开发更为先进的冲压工艺方法和改进冲压工艺过程。即使遇到复杂的与变形机理有关的难题, 也知道用什么方法去解决。

对于冲压技术的这种变化, 理应在技术书籍中也有反映, 以便促进冲压生产水平的提高。考虑到这样的客观情况, 我们决定编写这本书, 力图确切反映冲压技术现状。

本书包括两部分内容。冲压变形理论基础是本书的基础部分, 它包括冲压变形的特点、冲压变形的力学分析与分类、冲压变形趋向性规律、冲压中的应力、冲压中的破坏、冲压中的起皱等具有普遍意义的基础问题的分析。其中冲压变形趋向性规律是制定冲压工艺过程时确定变形工序顺序和确定极限成形参数的基本原则。第二部分是在对各种冲压成形工序中变形机理进行分析的基础上, 介绍各种新工艺和新技术的开发与应用问题, 例如无毛刺冲裁、各种精密冲裁方法的原理、高盒形件与曲面形状零件的成形方法、拉深筋的应用、冲压过程智能化控制技术的开发等。

这本书的内容是各位作者部分科学研究工作结果的汇集。参加这些科学研究工作的人很多, 除李硕本外还有于连仲、杨玉英、李春峰、崔令江、常志华、杨合、张守彬、郭斌、李顺平、万敏、邢忠文、郭刚、胡福太、赵军、姜海峰、金森、秦泗吉等。

本书中关于冲压变形基础理论方面的内容, 是各位作者在长期工作中逐步形成的, 它经历了不断丰富和完善的过程。由于这个原因, 本书中作为全书基础的冲压变形基础理论部分的内容, 可能与其他过去出版的书籍有部分的重复, 请读

IV

者谅解。

编写这本书的目的，是为了给已经具有冲压基础知识的工程技术人员和本专业研究生等提供自学提高用的参考书，所以在一般的冲压书籍里可以很方便地查阅到的关于冲压的基础知识（如合理冲裁间隙的确定、最小弯曲半径、拉深系数等），都没有纳入编写范围。

虽然作者的主观愿望是按既定的要求完成这本书的编写工作，使它对读者能有所裨益，但是，由于受到作者的学术水平的限制，难免有误与不当之处，敬请批评指示。

作 者

目 录

前言

第 1 章 冲压成形的特点与基本规律	1
1.1 冲压成形的特点	1
1.2 冲压成形中毛坯的分析	3
1.3 冲压变形的分类	4
1.4 冲压变形趋向性及其控制	13
1.5 冲压变形中的应力	19
1.6 冲压成形中的破坏	25
1.7 冲压成形中的起皱	27
1.8 冲压成形的研究方法	31
参考文献	33
第 2 章 冲压用原材料与板材冲压性能	35
2.1 冲压用原材料	35
2.2 板材冲压性能及其鉴定方法	40
2.3 板材的硬化特性与冲压性能的关系	48
参考文献	52
第 3 章 冲裁	53
3.1 冲裁过程	53
3.2 冲裁间隙	55
3.3 冲裁毛刺	57
3.4 精密冲裁	60
3.5 冲裁力	61
参考文献	63
第 4 章 弯曲	64
4.1 弯曲变形的特点	64
4.2 弯矩的计算	67
4.3 弯曲变形时的弹复	68
4.4 模具压弯	71
4.5 拉弯	77
参考文献	80
第 5 章 拉深	81

5.1 拉深变形过程分析	81
5.2 圆筒形件拉深的力学分析	82
5.3 盒形件的拉深	87
参考文献	96
第 6 章 曲面形状零件的成形	97
6.1 曲面成形机理	97
6.2 球面形状零件的成形	100
6.3 浅圆锥形件的一次成形	103
6.4 深圆锥形件的成形	107
参考文献	108
第 7 章 翻边	109
7.1 平面翻边	109
7.2 曲面翻边	115
参考文献	126
第 8 章 拉深筋	127
8.1 板料通过圆角时的变形机理	128
8.2 圆角阻力及其影响因素	131
8.3 拉深筋的结构形式及选取原则	137
8.4 拉深筋几何形状对力能特性的影响	140
参考文献	145
第 9 章 对向液压拉深	148
9.1 概述	148
9.2 对向液压拉深成形极限及其影响因素	150
9.3 对向液压拉深对锥形件起皱的影响	155
9.4 圆筒形件对向液压拉深成形精度	158
9.5 对向液压拉深新工艺	163
参考文献	165
第 10 章 圆锥形零件的智能化冲压	166
10.1 概述	166
10.2 轴对称曲面零件拉深过程的解析模拟	168
10.3 材料性能参数和摩擦系数的在线识别	172
10.4 最佳工艺参数的在线预测	177
10.5 锥形件智能化拉深系统	184
参考文献	188

第 1 章 冲压成形的特点与基本规律

燕山大学 李硕本

冲压成形是塑性加工的一种方法。虽然它也是利用材料的塑性变形能力，改变其几何形状与尺寸，从而达到冲压成形的目的，但是，由于冲压成形所用板料毛坯的几何形状特点和所用设备与模具的特殊性，使冲压成形除具有塑性加工普遍存在的特点和遵循其一般的变形规律外，它还具有一些与一般的压力加工不同的特点与独特的规律。对这些特点与规律的研究，不仅有助于深入而清晰地认识冲压成形过程的本质和各种现象产生的机理，掌握变形规律，科学而合理地制定冲压工艺过程，确定合理的工艺参数与模具参数，而且还可以准确而迅速地分析冲压成形过程中产生的缺陷与不良现象发生的原因。另外，对这些问题的研究，还能够推动冲压技术与理论工作的进步。

1.1 冲压成形的特点

在生产实践中应用的冲压成形工艺方法很多，有多种形式和名称，但它们在本质上是相同的，都是使平面形状的板料毛坯，在力的作用下，按既定的要求产生不可恢复的塑性变形，从而完成一定形状与精度零件的制造工艺。从利用原材料的塑性进行加工这个基本原则看，它和其他所有的塑性加工方法是一样的，但是，由于冲压成形中的毛坯是厚度远小于板平面尺寸的板料以及由此决定的外力作用方式与大小等原因，致使冲压成形具有如下几个非常突出的特点。

(1) 由于冲压成形中的板料毛坯的厚度远小于它的板面尺寸，工具对毛坯的作用力只能方便地作用于板料的表面，而且数值不大的垂直于板面方向的单位压力，即可引起在板面方向上数值足以使板材产生塑性变形的内应力。由于垂直于板面方向上的单位压力的数值远小于板面方向上的内应力，所以大多数的冲压变形都可以近似地当作平面应力状态来处理，使变形力学的分析和工艺参数的计算等工作，都得到很大的简化。

(2) 由于冲压成形用的板料毛坯的相对厚度（与板面尺寸相比）很小，在压应力作用下的抗失稳能力也很差，所以在没有抗失稳装置（如压力圈等）拘束作用的条件下，很难在自由状态下顺利地进行冲压成形过程。因此，在各种冲压成

形方法中，以拉应力作用为主的伸长类冲压成形过程多于以压应力为主的压缩类成形过程。

(3) 在冲压成形时，板料毛坯里的内应力数值接近或等于材料的屈服应力，有时甚至小于板料的屈服应力。而在模锻和挤压时，有时毛坯的内应力可能超过其屈服应力许多倍。在这一点上，两者的差别是很大的。因此，在冲压成形时，变形区应力状态中的静水压力成分对成形极限与变形抗力的影响及其影响规律，已失去其在体积成形时的重要程度，有些情况下，甚至可以完全不予考虑，即使有必要考虑时，其出发点与处理方法也不相同。

(4) 在冲压成形时，模具对板料毛坯作用力所形成的拘束作用程度较轻，并不像体积成形（如模锻等）靠与制件形状完全相同的模腔对毛坯的全面接触而实现的强制成形。在冲压成形中，大多数情况下，板料毛坯都有某种程度的自由度，常常是只有一个表面与模具接触，而另侧表面是非接触的自由表面，甚至有时存在板料两侧表面都不与模具接触的变形部分。在这种情况下，这部分毛坯的变形是靠模具对其相邻部分施加的外力实现其控制作用的。例如球面与锥面零件成形时的悬空部分和管坯端部的捲边成形等都是这种情况。

由于冲压成形具有上述一些在变形与力学方面的特点，致使冲压技术也形成了自己的一些与一般塑性加工不同的特点。

(1) 由于不需要在板料毛坯的表面作用数值很大的单位压力即可使其成形，所以在冲压技术中关于模具强度与刚度的研究并不十分重要，相反地却发展了许多简易模具技术。由于相同的原因，也促使靠气体或液体压力成形的工艺方法得以发展。

(2) 因冲压成形时的平面应力状态或更为单纯的应变状态（与体积成形相比），当前对冲压成形中毛坯的变形与力能参数方面的研究较为深入，有条件运用合理的科学方法进行冲压加工。现在不仅采用合理设计的冲模工作部分几何形状与尺寸以控制冲压变形过程，以获得高质量冲压件的传统技术方法，而且运用压边力与变压边力对冲压变形的控制技术，甚至借助于电子计算机与当代的测试手段，在对板材性能与冲压变形参数进行适时测量与分析的基础上，实现冲压过程智能化控制的研究工作也在开展。^[1~7]

(3) 人们在对冲压成形过程有了较为深入的了解后，已经认识到冲压成形与原材料有十分密切的关系。所以对板材冲压性能即成形性与形状冻结性的研究，目前已成为冲压技术的一个重要内容。对板材冲压性能的研究工作不仅是冲压技术发展的需要，而且也促进了钢铁工业制造技术的发展，为其提高板材的质量提供了一个基础与依据。

1.2 冲压成形中毛坯的分析

在冲压成形过程中，为使板料毛坯改变其原始形状成为零件，必须在毛坯各部分之间形成一定的受力与变形关系。每一种冲压成形方法都要求毛坯各部分之间存在一定的力与变形的关系。这是能够顺利地完冲压成形的基本保证，所以对冲压毛坯进行受力与变形方面的分析是十分必要的。

图 1-1 是几种典型冲压成形中毛坯的分析。在这四种成形工序中 A 是变形区，它是在冲压成形中产生塑性变形的部分；B 是传力区，它的作用是把冲模的作用力传递给变形区。图 1-1b 中的 D 是暂不变形的待变形区。虽然在图示的状态下它不参与变形，但随冲压成形过程的进行，它将不断地进入变形区参与变形。图中的 C 是自始至终都不参与变形的不变形区。有时也会出现传力区本身也是产生塑性变形的变形区，它在本身变形的同时，把模具的作用力传给另一个变形区。图 1-1c 所示的球面零件成形中的 E 就是这种情况。

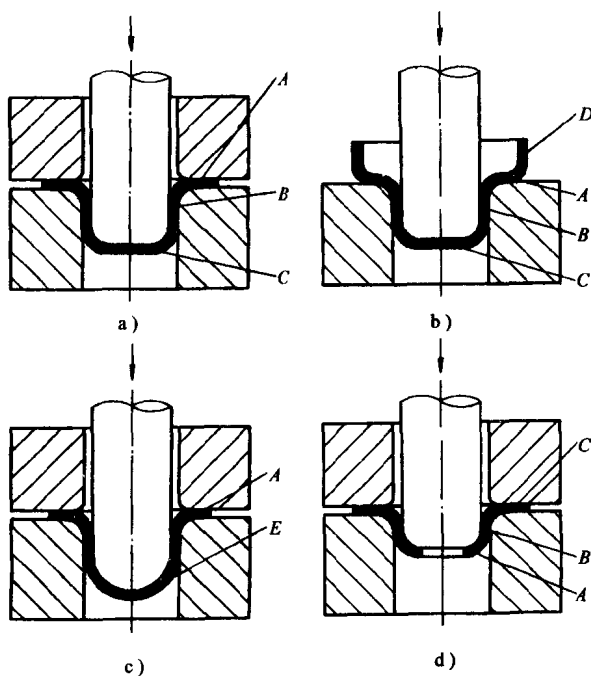


图 1-1 冲压毛坯的分析

a) 拉深 b) 再次拉深 c) 球面零件成形 d) 翻边

不变形区可能是传力区，也可能是不传力的已变形区或待变形区。但是，有时不变形区也可能是在全部过程中自始至终都不传力也不产生塑性变形对冲压成

形不起任何作用的无功能不变形区（图 1-1c）。

在冲压成形过程中各个区（部分）之间是在相互转化而不断变化的，例如待变形区内的板料不断地进入变形区，而变形区的金属又可能不断地进入已变形区并承担起传力的作用等。

对变形区与不变形区的判断，当然可以直观地根据该部分毛坯是否在改变其形状来决定。不过，有时候变形区的形状与尺寸并不发生变化（如再次拉深时的变形区），所以最根本的判断方法是：如果毛坯内某个部分内任意两点的距离不产生变化，也就是它们之间不产生相对的位移，即使该部分产生总体的位移，或做等角速度的转动，这部分也一定不是变形区，而是非变形区。

1.3 冲压变形的分类

在冲压加工的技术工作与生产管理工作中，根据各自不同的需要与目的，按不同的标准出现了许多分类方法，如按书籍编写工作的需要出现的分类方法^[8~10]等。吉田清太则根据成形毛坯与冲压件的几何尺寸参数把冲压成形分为胀形、拉深、翻边与弯曲等^[11,19]四类。

从本质上看，冲压成形就是冲压毛坯的变形区，在力的作用下产生相应的塑性变形，所以变形区内的应力状态和变形性质应该是决定冲压成形性质的基本因素。因此，根据变形区应力状态和变形特点进行的冲压成形分类方法，可以把成形性质相同的成形方法概括成同一个类型并进行体系化的研究^[12,13]。

绝大多数冲压成形时毛坯变形区均处于平面应力状态。通常在板料表面上不受外力的作用，即使有力作用，其数值也是较小的，所以可以认为垂直于板面方向上的应力为零。使板料毛坯产生塑性变形的是作用于板面方向上相互垂直的两个主应力。由于板厚较小，通常都近似地认为这两个主应力在厚度方向上是均匀分布的。基于这样的分析，可以把所有各种形式的冲压成形中的毛坯变形区的受力状态与变形特点，在平面应力的应力坐标系中（冲压应力图）与相应的两向应变坐标系中（冲压变形图）以应力与应变坐标决定的位置来表示。反过来讲，在冲压应力图与冲压变形图中的不同位置都代表着不同的受力情况与变形特点。为了说明这一点，做以下的分析。

1. 冲压毛坯变形区受两向拉应力作用时，可以分为两种情况，即 $\sigma_r > \sigma_\theta > 0$ 且 $\sigma_t = 0$ 和 $\sigma_\theta > \sigma_r > 0$ 且 $\sigma_t = 0$ 。在这两种情况下，绝对值最大的应力都是拉应力。以下对这两种情况分别进行分析。

（1）当 $\sigma_r > \sigma_\theta > 0$ ，且 $\sigma_t = 0$ 时 按全量理论可以写出如下应力与应变的关系式

$$\frac{\epsilon_r}{\sigma_r - \sigma_m} = \frac{\epsilon_\theta}{\sigma_\theta - \sigma_m} = \frac{\epsilon_t}{\sigma_t - \sigma_m} = \kappa \quad (1-1)$$

式中 ϵ_r 、 ϵ_θ 与 ϵ_t ——分别是轴对称冲压成形时的经向主应变、纬向主应变和厚度方向上的主应变；

σ_r 、 σ_θ 与 σ_t ——分别是轴对称冲压成形时的经向主应力、纬向主应力与厚度方向上的主应力；

σ_m ——平均应力，其值为 $\sigma_m = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_t}{3}$ ；

κ ——常数。

在平面应力时，式 1-1 具有如下形式

$$\frac{3\epsilon_r}{2\sigma_r - \sigma_\theta} = \frac{3\epsilon_\theta}{2\sigma_\theta - \sigma_r} = \frac{3\epsilon_t}{-(\sigma_r + \sigma_\theta)} = \kappa \quad (1-2)$$

因为 $\sigma_r > \sigma_\theta > 0$ ，所以必定有 $2\sigma_r - \sigma_\theta > 0$ 与 $\epsilon_r > 0$ 。这个结果表明：在两向拉应力的平面应力状态时，如果绝对值最大的拉应力是 σ_r ，则在这个方向上的主应变一定是正应变，即是伸长变形。

又因为 $\sigma_r > \sigma_\theta > 0$ ，所以必定有 $-(\sigma_r + \sigma_\theta) < 0$ 与 $\epsilon_t < 0$ ，即在板料厚度方向上的应变是负的，即为压缩变形，厚度变薄。

在 σ_θ 方向上的变形决定于 σ_r 与 σ_θ 的数值：当 $\sigma_r = 2\sigma_\theta$ 时， $\epsilon_\theta = 0$ ；当 $\sigma_r > 2\sigma_\theta$ 时， $\epsilon_\theta < 0$ ；当 $\sigma_r < 2\sigma_\theta$ 时， $\epsilon_\theta > 0$ 。

σ_θ 的变化范围是 $\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq 0$ 。在双向等拉应力状态时， $\sigma_r = \sigma_\theta$ ，由式 1-2 得 $\epsilon_r = \epsilon_\theta > 0$ 及 $\epsilon_t < 0$ ；在受单向拉应力状态作用时 $\sigma_\theta = 0$ ，由式 1-2 可得 $\epsilon_\theta = -\frac{\epsilon_r}{2}$ 。

根据上边的分析可知，这种变形情况处于冲压变形图中的 AON 范围（图 1-2）；而在冲压应力图中则处于 GOH 范围（图 1-3）。

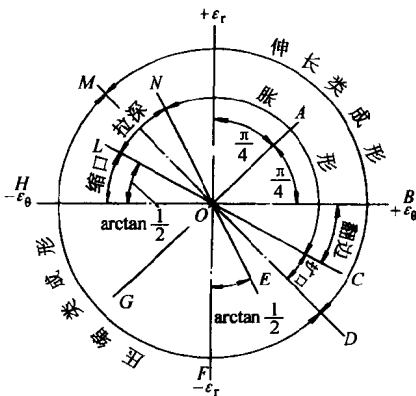


图 1-2 冲压变形图

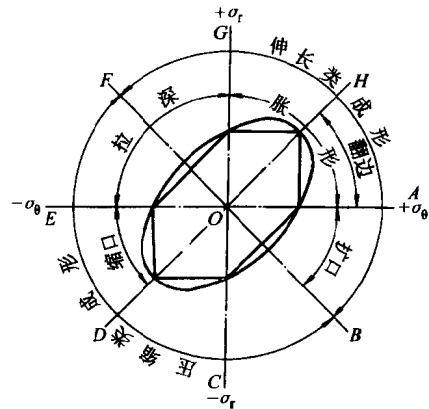


图 1-3 冲压应力图

(2) 当 $\sigma_\theta > \sigma_r > 0$, 且 $\sigma_t = 0$ 时 由式 1-2 可知, 因为 $\sigma_\theta > \sigma_r > 0$, 所以一定有 $2\sigma_\theta > \sigma_r > 0$ 与 $\epsilon_\theta > 0$ 。这个结果表明: 对于两向拉应力的平面应力状态, 当 σ_θ 的绝对值最大时, 则在这个方向上的应变一定是正的, 即一定是伸长变形。

又因为 $\sigma_\theta > \sigma_r > 0$, 所以一定有 $-(\sigma_r + \sigma_\theta) < 0$ 与 $\epsilon_t < 0$, 即在板厚方向上的应变是负值, 是压缩变形, 板厚变薄。

在 σ_r 方向上的变形决定于 σ_r 与 σ_θ 的数值, 当 $\sigma_\theta = 2\sigma_r$ 时 $\epsilon_r = 0$; 当 $\sigma_\theta > 2\sigma_r$ 时, $\epsilon_r < 0$; 当 $\sigma_\theta < 2\sigma_r$ 时, $\epsilon_r > 0$ 。

这时 σ_r 的变化范围是 $\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq 0$; 当 $\sigma_r = \sigma_\theta$ 时, $\epsilon_r = \epsilon_\theta > 0$, 也就是在双向等拉的应力状态下, 在两个拉应力方向上产生数值相同的伸长变形; 当 $\sigma_r = 0$ 时, $\epsilon_r = -\frac{\epsilon_\theta}{2} < 0$, 也就是说在单向应力状态下, 其变形性质与一般的简单拉伸是完全一样的。

这种变形与受力情况, 处于冲压变形图中的 AOC 范围 (图 1-2), 处于冲压应力图中的 AOH 范围 (图 1-3)。

上述两种冲压变形情况, 仅在最大应力的方向上不同, 而两个应力的性质与比值范围以及它们引起的变形都是一样的。因此, 对于各向同性的均质材料, 这两种变形是完全相同的。

2. 冲压毛坯变形区受两向压应力的作用, 这种变形也分两种情况分析, 即 $\sigma_r < \sigma_\theta < 0$, 且 $\sigma_t = 0$ 和 $\sigma_\theta < \sigma_r < 0$, 且 $\sigma_t = 0$ 。

(1) 当 $\sigma_r < \sigma_\theta < 0$, 且 $\sigma_t = 0$ 时 由式 1-2 的分析可知: 因为 $\sigma_r < \sigma_\theta < 0$, 所以一定有 $2\sigma_r - \sigma_\theta < 0$ 与 $\epsilon_r < 0$, 这个结果表明, 在两向压应力作用的平面应力状态时, 如果绝对值最大的应力是 $\sigma_r < 0$, 则在这个方向上的应变一定是负的, 即压缩变形。

又因为 $\sigma_r < \sigma_\theta < 0$, 所以必定有 $-(\sigma_r + \sigma_\theta) > 0$, 即在板厚方向上的应变是正的, 板料增厚。

在 σ_θ 方向上的变形决定于 σ_θ 与 σ_r 的数值: 当 $\sigma_r = 2\sigma_\theta$ 时, $\epsilon_\theta = 0$; 当 $\sigma_r > 2\sigma_\theta$ 时, $\epsilon_\theta < 0$; 当 $\sigma_r < 2\sigma_\theta$ 时, $\epsilon_\theta > 0$ 。

这时 σ_θ 的变化范围是 σ_r 与 0 之间。当 $\sigma_\theta = \sigma_r$ 时, 是双向等压的平面应力状态, 故有 $\epsilon_\theta = \epsilon_r < 0$; 当 $\sigma_\theta = 0$ 时, 是单向受压的应力状态, 所以 $\epsilon_\theta = -\frac{\epsilon_r}{2}$ 。这种变形情况处于冲压变形图的 GOE 范围内 (图 1-2), 而在冲压应力图中则处于 COD 范围。

(2) 当 $\sigma_\theta < \sigma_r < 0$, 且 $\sigma_t = 0$ 时 由式 1-2 的分析可知: 因为 $\sigma_\theta < \sigma_r < 0$, 所以一定有 $2\sigma_\theta - \sigma_r < 0$ 及 $\epsilon_\theta < 0$, 这个结果表明: 对于两向压应力作用的平面应

力状态, 如果绝对值最大的应力是 σ_θ , 则在这个方向上的应变一定是负的, 一定是压缩变形。

又因为 $\sigma_\theta < \sigma_r < 0$, 必定有 $-(\sigma_\theta + \sigma_r) > 0$ 和 $\epsilon_r > 0$, 即在板厚方向上的应变是正的, 板厚增大。

σ_r 方向上的变形决定于应力 σ_r 与 σ_θ 的数值: 当 $\sigma_\theta = 2\sigma_r$ 时, $\epsilon_r = 0$; 当 $\sigma_\theta > 2\sigma_r$ 时, $\epsilon_r < 0$; 当 $\sigma_\theta < 2\sigma_r$ 时, $\epsilon_r > 0$ 。

这时, σ_r 的数值只能在 $\sigma_\theta \leq \sigma_r \leq 0$ 之间变化。当 $\sigma_\theta = \sigma_r$ 时是双向等压的应力状态, 所以 $\epsilon_\theta = \epsilon_r < 0$; 当 $\sigma_r = 0$ 时, 是单向受压的应力状态, 所以有 $\epsilon_r = -\frac{\epsilon_\theta}{2} > 0$ 。这种变形情况, 在冲压变形图中处于 GOL 范围 (图 1-2), 而在冲压应力图中处于 DOE 范围内 (图 1-3)。

3. 冲压毛坯变形区受两个方向上异号应力的作用, 而且拉应力的绝对值大于压应力的绝对值。

这种变形共有两种情况, 分别做如下的分析。

(1) 当 $\sigma_r > 0$, $\sigma_\theta < 0$ 及 $|\sigma_r| > |\sigma_\theta|$ 时 由式 1-2 可知: 因为 $\sigma_r > 0$, $\sigma_\theta < 0$ 及 $|\sigma_r| > |\sigma_\theta|$, 所以一定有 $2\sigma_r - \sigma_\theta > 0$ 及 $\epsilon_r > 0$, 这个结果表明, 在异号的平面应力状态时, 如果绝对值最大的应力是拉应力, 则在这个绝对值最大的拉应力方向上的应变是正的, 即为伸长变形。

又因为 $\sigma_r > 0$ 与 $\sigma_\theta < 0$; 所以必定有 $\epsilon_\theta < 0$, 即在压应力的方向上的应变是负的, 是压缩变形。

这时, σ_θ 的数值只能在 $\sigma_\theta = -\sigma_r$ 与 $\sigma_\theta = 0$ 的范围内。当 $\sigma_\theta = -\sigma_r$ 时, $\epsilon_r > 0$, $\epsilon_\theta < 0$, 而且 $|\epsilon_r| = |\epsilon_\theta|$; 当 $\sigma_\theta = 0$ 时, $\epsilon_r > 0$, $\epsilon_\theta < 0$, 而且 $\epsilon_\theta = -\frac{\epsilon_r}{2}$, 这是单向受拉的应力状态。这种变形状态处于冲压变形图中的 MON 范围 (图 1-2), 而在冲压应力图中处于 GOF 范围内 (图 1-3)。

(2) 当 $\sigma_\theta > 0$, $\sigma_r < 0$, $\sigma_t = 0$ 及 $|\sigma_\theta| > |\sigma_r|$ 时 利用式 1-2, 用与前项相同的方法分析可得 $\epsilon_\theta > 0$, 即在异号应力作用的平面应力状态下, 如果绝对值最大的应力是拉应力 σ_θ 则在这个方向上的应变是正的, 是伸长变形。而在压应力 σ_r 方向上的应变是负的 ($\epsilon_r < 0$), 是压缩变形。

这时 σ_r 的数值只能介于 $\sigma_r = -\sigma_\theta$ 与 $\sigma_r = 0$ 之间。当 $\sigma_r = -\sigma_\theta$ 时, $\epsilon_\theta > 0$, $\epsilon_r < 0$, 而且有 $|\epsilon_r| = |\epsilon_\theta|$; 当 $\sigma_r = 0$ 时, $\epsilon_\theta > 0$, $\epsilon_r < 0$, 而且 $\epsilon_r = -\frac{\epsilon_\theta}{2}$ 。这种变形处于冲压变形图中的 COD 范围内 (图 1-2), 而在冲压应力图中则处于 AOB 范围内 (图 1-3)。

虽然这两种情况的表示方法不同, 但从变形的本质上看是一样的。

4. 冲压毛坯变形区受两个方向上异号应力的作用, 而且压应力的绝对值大

于拉应力的绝对值。

以下对这种变形的两种情况，分别进行分析。

(1) 当 $\sigma_r > 0$, $\sigma_\theta < 0$, 而且 $|\sigma_\theta| > |\sigma_r|$ 时 由式 1-2 可知, 因为 $\sigma_r > 0$, $\sigma_\theta < 0$ 与 $|\sigma_\theta| > |\sigma_r|$, 必定有 $2\sigma_\theta - \sigma_r < 0$ 及 $\epsilon_\theta < 0$ 。这个结果表明: 在异号应力的平面应力状态下, 如果绝对值最大的应力是压应力 σ_θ , 则在这个方向上的应变是负的, 是压缩变形。

又因为 $\sigma_r > 0$, $\sigma_\theta < 0$, 必定有 $2\sigma_r - \sigma_\theta > 0$ 及 $\epsilon_r > 0$, 即在拉应力方向上的应变是正的, 是伸长变形。

这时, σ_r 的数值只能介于 $\sigma_r = -\sigma_\theta$ 与 $\sigma_r = 0$ 之间。当 $\sigma_r = -\sigma_\theta$ 时, $\epsilon_r > 0$, $\epsilon_\theta < 0$, 而且 $\epsilon_r = -\epsilon_\theta$; 当 $\sigma_r = 0$ 时, $\epsilon_r > 0$, $\epsilon_\theta < 0$, 而且 $\epsilon_r = -\frac{\epsilon_\theta}{2}$ 。这种变形处于冲压变形图中的 *MOL* 范围内, 而在冲压应力图中则处于 *EOF* 范围内 (图 1-2 与图 1-3)。

(2) 当 $\sigma_\theta > 0$, $\sigma_r < 0$, 而且 $|\sigma_r| > |\sigma_\theta|$ 时 利用式 1-2 的关系, 并用与前项相同的分析方法可得 $\epsilon_r < 0$, 即在异号应力作用的平面应力状态下, 如果绝对值最大的应力是压应力 σ_r , 则在这个方向上的应变是负的, 是压缩变形, 而在拉应力作用方向上的应变是正的, 是伸长变形。

这时 σ_θ 的数值只能介于 $\sigma_\theta = -\sigma_r$ 与 $\sigma_\theta = 0$ 之间。当 $\sigma_\theta = -\sigma_r$ 时, $\epsilon_\theta > 0$, $\epsilon_r < 0$, 而且 $\epsilon_\theta = -\epsilon_r$; 当 $\sigma_\theta = 0$ 时, $\epsilon_\theta > 0$, $\epsilon_r < 0$; 而且 $\epsilon_\theta = -\frac{\epsilon_r}{2}$ 。这种变形处于冲压变形图中的 *DOE* 范围内 (图 1-2), 而在冲压应力图中则处于 *BOC* 范围内 (图 1-3)。实质上, 这两种变形 (*a* 与 *b*) 的变形性质与特点是完全相同的。

这四种变形与相应的冲压成形方法之间是相对应的, 它们之间的对应关系, 用文字标注在图 1-2 与图 1-3 上。

上边分析的四种变形情况, 相当于所有的平面应力状态, 也就是说这四种变形情况可以把全部的冲压变形毫无遗漏地概括为两大类别, 即伸长类与压缩类。当作用于冲压毛坯变形区内的拉应力的绝对值最大时, 在这个方向上的变形一定是伸长变形, 称这种冲压变形为伸长类变形。根据上边的分析, 伸长类变形在冲压变形图中占有五个区间, 即 *MON*、*NOA*、*AOB*、*BOC* 及 *COD*, 而在冲压应力图则占有 *FOG*、*GOH*、*HOA* 及 *AOB* 等四个区间。当作用于冲压毛坯变形区的压应力的绝对值最大时, 在这个方向上的变形一定是压缩变形, 称这种变形为压缩类变形。根据上边的分析, 压缩类变形在冲压变形图中占有五个区间: *MOL*、*LOH*、*HOG*、*GOF* 与 *FOD*, 而在冲压应力图中则占有 *FOE*、*EOD*、*DOC*、*COB* 等区间。*MD* 与 *FB* 分别是冲压变形图与冲压应力图中两类变形的分界线。分界线的右上方是伸长类变形, 而分界线的左下方是压

缩类变形。

由于塑性变形过程中材料所受的应力和由此应力所引起的应变之间存在有相互对应的关系，所以冲压应力图与冲压变形图也一定存在有一定的对应关系。每一个冲压变形都可以在冲压应力图上和冲压变形图上找到它固定的位置。根据冲压毛坯变形区内的应力状态或变形情况，利用冲压应力图或冲压变形图中的分界线（MD 或 FB），就可以容易地判断该冲压变形的性质与特点。

概括以上分析的结果，把各种应力状态在冲压应力图和冲压变形图中所处的位置以及两个图的对应关系，列于表 1-1。从表 1-1 中的关系可知，冲压应力图与冲压变形图中各区间所处的几何位置并不一样，但它们在两个图中的顺序是相同的。最重要的一点是：伸长类与压缩类变形的分界线，在两个图里都是与坐标轴成 45°角的一条斜线。

表 1-1 冲压应力状态与冲压变形状态的对照

应力状态		冲压变形 图中位置	冲压应力 图中位置	在绝对值最大的 应力方向上		变形类别
				应力	应变	
双向受拉 $\sigma_\theta > 0, \sigma_r > 0$	$\sigma_r > \sigma_\theta$	AON	HOG	+	+	伸长类
	$\sigma_\theta > \sigma_r$	AOC	HOA	+	+	伸长类
双向受压 $\sigma_\theta < 0, \sigma_r < 0$	$\sigma_r < \sigma_\theta$	GOE	DOC	-	-	压缩类
	$\sigma_\theta < \sigma_r$	GOL	DOE	-	-	压缩类
异号应力 $\sigma_r > 0, \sigma_\theta < 0$	$ \sigma_r > \sigma_\theta $	MON	FOG	+	+	伸长类
	$ \sigma_\theta > \sigma_r $	MOL	FOE	-	-	压缩类
异号应力 $\sigma_\theta > 0, \sigma_r < 0$	$ \sigma_\theta > \sigma_r $	DOC	BOA	+	+	伸长类
	$ \sigma_r > \sigma_\theta $	DOE	BOC	-	-	压缩类

表 1-2 是用低碳钢板进行典型冲压成形时，在冲压毛坯变形区内应变分布与应力分布的实测结果。把表 1-2 中各种成形加工中毛坯变形区的应变与应力所处的位置与范围，与图 1-2（冲压变形图）和图 1-3（冲压应力图）相对比，可以清楚地判断它们应该属于那种类型的冲压成形方法。用这个方法可以对所有冲压成形时毛坯变形区的变形性质、受力情况以及与此有关的问题做出准确的判断与识别，并可进一步对许多实际问题进行深入的分析。

表 1-2 典型的冲压成形中毛坯变形区内的应力与应变

成形名称	简图	应变状态	应力状态	所属类别
拉深				压缩类
翻边				伸长类
扩口				伸长类
缩口				压缩类
胀形				伸长类