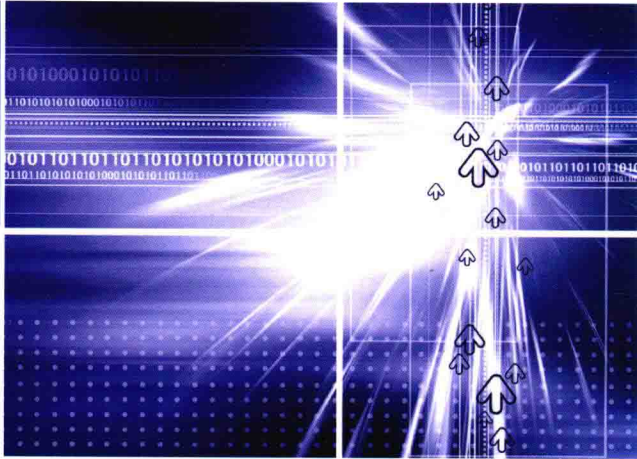


普通高等教育“十二五”规划教材



板料成形性能 及CAE分析



龚红英 主编

 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



板料成形性能及 CAE 分析

主 编 龚红英
副主编 肖海峰 黄桂美
参 编 王 斌 付云龙 苏晓斌
主 审 李名尧



机械工业出版社

本书首先对板料成形基础理论以及板料成形 CAE 分析涉及的基础理论及关键技术等内容进行了详细阐述。然后以常用的板料成形有限元分析软件 DYNAFORM 和 PAM-STAMP 为平台,通过对该两种软件的基本功能的介绍,结合编者多年从事相关教学及应用研究的丰富经验,着重选取了不同类型的板料成形工艺实例加以讲解。对实例中所涉及的零件成形过程和板料成形性进行全面分析,将基于 DYNAFORM 和 PAM-STAMP 软件进行的板料成形 CAE 分析的各个环节(模型建立、前置处理、求解计算以及后置处理等)做了详尽的讲解,以引导读者掌握 CAE 分析软件的应用,提升解决板料成形工程实际问题的技能。

本书可作为材料成形及控制工程专业的专业特色课程的主讲教材或参考教材,也可作为从事板料冲压成形方向 CAE 分析的工程技术人员学习和培训的入门级应用教程。

图书在版编目(CIP)数据

板料成形性能及 CAE 分析/龚红英主编. —北京:机械工业出版社, 2014. 6

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-46422-8

I. ①板… II. ①龚… III. ①板料冲压—成型—计算机辅助分析—高等学校—教材 IV. ①TG386.41-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 072715 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 责任编辑:冯春生 陈建平

版式设计:赵颖喆 责任校对:肖琳

封面设计:张静 责任印制:李洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2014 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·20.5 印张·496 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-46422-8

定价:42.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前言

随着我国汽车、航空航天、模具、电子电器、日用五金等工业的迅速发展，企业和相关研究部门的技术人员对新型板料的成形性能研究以及采用先进板料成形 CAE 分析技术进行具体零件成形分析研究的需求与日俱增，本书是可满足专业技术人员掌握相关理论和将板料成形 CAE 分析技术应用到实际生产环节的一本实用教程。

本书是一本理论与实际操作相结合的专业课程教材，内容分为三大部分：①对板料成形性理论进行详细的阐述，此部分内容涉及板料成形性相关影响因素、如何进行板料成形性物理试验测试；②对板料成形 CAE 分析基本理论和关键技术进行详细阐述；③采用板料成形仿真软件 DYNAFORM 和 PAM-STAMP，进行具体板料成形 CAE 分析实例讲解。

本书由龚红英担任主编，肖海峰和黄桂美担任副主编，参加编写的还有王斌、付云龙和苏晓斌。其中，上海工程技术大学龚红英负责第 1、2 章和第 4~6 章的编写，厦门理工学院黄桂美负责第 3 章的编写，湖北汽车工业学院肖海峰负责第 7 章的编写，王斌、付云龙、苏晓斌等参与完成本书实例部分建模、模拟分析试验及文稿修改等工作。书后所列参考文献为本书的编写起了重要的参考作用，在此谨向相关作者表示感谢！

本书可作为材料成形及控制工程专业的专业特色课程的主讲教材或参考教材，也可作为从事板料冲压成形方向 CAE 分析的工程技术人员学习和培训的入门级应用教程。

由于编者水平有限，难免有不当之处，欢迎读者不吝赐教。

编者

前 言

第1章 板料成形性能理论..... 1

1.1 板料成形性基本理论 1

1.1.1 板料成形性能 1

1.1.2 板料成形应力、应变问题 2

1.1.3 板料成形工艺分类及特点 6

1.1.4 板料成形缺陷 14

1.2 板料成形有限元理论发展

概述 19

1.2.1 有限元法的孕育过程及诞生 和发展 19

1.2.2 有限元法的基本思想 19

1.2.3 有限元的应用及其发展 趋势 20

1.3 板料成形 CAE 分析技术

发展概述 20

第2章 板料成形极限理论 23

2.1 冲压成形极限 23

2.2 冲压成形极限曲线 24

2.2.1 成形极限曲线的试验测定 方法 25

2.2.2 板料成形极限图 (FLD) 理论计算 28

2.2.3 成形极限曲线 29

2.2.4 应变路径的成形极限图 (FLD) 31

2.2.5 成形极限应力图 (FLSD) 32

2.2.6 十字形双向拉伸试验及其 在 FLSD 中的应用 33

2.3 分散性和局部性失稳准则 34

2.4 成形极限曲线的应用 37

第3章 板料成形性能评估及测试 39

3.1 板料成形性能评估 39

3.1.1 板料的冲压成形性能 39

3.1.2 板料冲压性能试验及材料 特性值 40

3.1.3 板料的基本性能与冲压成 形性能的关系 40

3.2 板料成形性能测试 42

3.2.1 拉伸试验 42

3.2.2 拉深性能试验 44

3.2.3 胀形性能试验 47

3.2.4 翻边性能试验 48

3.2.5 弯曲性能试验 50

3.2.6 球底锥形件拉深试验 51

3.2.7 硬度试验 52

3.2.8 成形极限图测试试验 53

第4章 板料成形有限元理论 55

4.1 有限元计算的要点和特点 55

4.2 有限元计算与板料成形模拟 56

4.2.1 有限变形的应变张量 57



4.2.2	有限变形的应力张量	59
4.2.3	几何非线性有限元方程的建立	60
4.3	有限元求解算法	63
4.3.1	静力隐式算法	63
4.3.2	动力显式算法	64
4.3.3	静力显式算法	65
4.3.4	一步成形算法	65

第5章 板料成形 CAE 分析关键技术

5.1	板料冲压成形 CAE 分析技术概述	66
5.1.1	板料成形 CAE 分析的基本步骤	66
5.1.2	板料成形 CAE 分析流程	66
5.1.3	求解算法选择	67
5.2	材料各向异性屈服准则的运用	68
5.3	单元类型的选择	69
5.4	有限元网格划分	70
5.5	边界条件的处理	71
5.6	提高 CAE 分析效率的方法	73
5.7	常用板料成形 CAE 分析软件简介	73
5.7.1	DYNAFORM 软件	73
5.7.2	PAM-STAMP 软件	75
5.7.3	AUTOFORM 软件	76
5.8	板料成形 CAE 分析技术所能解决的主要问题	77
5.9	板料成形 CAE 分析技术的发展趋势	79

第6章 基于 DYNAFORM 软件进行金属板料成形 CAE 分析

6.1	DYNAFORM 软件系统结构及基本功能	84
-----	----------------------------	----

6.1.1	DYNAFORM 软件系统结构	84
6.1.2	DYNAFORM 5.6 软件基本功能	91
6.2	DYNAFORM CAE 分析实例	104
6.2.1	拉深成形过程模拟分析	104
6.2.2	液压胀形成形过程模拟分析	138
6.2.3	拼焊冲压成形过程模拟分析	154

第7章 基于 PAM-STAMP 软件进行金属板料成形 CAE 分析

7.1	PAM-STAMP 软件环境及操作	188
7.1.1	界面基本结构	188
7.1.2	对象的创建、修改及选择	190
7.1.3	常用工具	191
7.1.4	PAM-STAMP 常用文件格式	194
7.1.5	PAM-STAMP 求解器	195
7.2	PAM-STAMP 前处理模块	195
7.2.1	CAD 模型导入与网格划分	197
7.2.2	板料网格生成模式	206
7.2.3	定位板与定位销网格生成	208
7.2.4	网格手动操作与网格倒角	210
7.2.5	汽车结构件模型的导入与网格生成	212
7.3	PAM-STAMP 后处理模块	220
7.4	对象与属性	222
7.5	主要功能模块	232
7.5.1	冲压成形模拟及回弹补偿	232
7.5.2	钣金件坯料展开反求	245
7.5.3	模面快速设计	249
7.5.4	成形过程快速宏的构建	279
7.6	PAM-STAMP CAE 分析实例	291



7.6.1 汽车覆盖件拉深成形过程	
模拟分析.....	291
7.6.2 热成形过程模拟分析.....	300
7.6.3 特种成形过程模拟分析.....	307
参考文献.....	316

7.6.1 汽车覆盖件拉深成形过程	
模拟分析.....	291
7.6.2 热成形过程模拟分析.....	300
7.6.3 特种成形过程模拟分析.....	307
参考文献.....	316

第 1 章 板料成形性能理论

1.1 板料成形性基本理论

1.1.1 板料成形性能

所谓的板料成形性能，是指板料对各种冲压成形加工的适应能力，这种能力在日常生产中被成为板料的冲压成形性能，另外由于加工方式的多样性，板料适应各种加工方式的能力就称为板料成形性能。

自然界中绝大多数的材料都需要进行加工才能制成人们需要的产品。因此，材料除了应该具备必要的使用性能外，良好的加工性能也是必不可少的。加工性能和使用性能一样，都是材料基本的性能要求。在生产实践中，相比较于改进加工方法，改善材料的加工性能往往被大多数企业所选择，它能收到更大的经济效益。

根据 GB/T 15825.1—2008 定义：板料成形性就是指金属板料对于冲压成形过程的适应能力。其中具有最佳成形性能的材料应具有如下特点：均匀分布应变；承受平面内压缩应力而无起皱现象；可以达到较高应变而无缩颈和断裂；承受平面内切应力而无断裂；零件贴模性好；保持表面光洁，防止表面损伤。

板料加工阶段所需要的加工性能，一般来说包含两个方面，即冲剪性和成形性。冲剪性是指板料在冲裁工序中的适应能力，主要体现在冲裁后板料断面的质量情况。成形性是指板料适应各种成形加工的能力，包括对拉深、弯曲、胀形以及伸长类翻边（包括扩孔）这四类成形方法的适应能力。其主要体现在成形过程中的成形极限、贴模性和形状冻结性。

1) 成形极限（也称抗破裂性）。成形极限是指板料成形中，板料在单向和双向拉应力条件下抵抗缩颈和破裂的能力，也就是在成形过程中不发生破裂而所能达到的最大变形程度。成形极限是表示板料成形性能好坏的重要参考指标，板料的成形极限越高，标志着板料的成形性能越好。成形极限分为总体成形极限和局部成形极限。总体成形极限反映板材失稳前某些特定的总体尺寸可以达到的最大变形程度，一般用压延系数、翻边系数、相对弯曲半径等来表示；局部成形极限反映的是板材失稳前局部尺寸可以达到的最大变形程度，可用坐标网格法来求得。对于变形分布均匀的零件，这两种指标基本是一致的；对于变形分布不均匀的零件，两者就有差别了，某一局部的变形程度已濒于破裂（达到极限），而其他部分的变形程度可能还很小，这时从整体变形来说也不可能很大。因此在成形性研究中，板料局部变形的能力和整体变形的能力，应摆在同一重要的地位。

2) 贴模性。贴模性是指板料在加工过程中取得模具形状的能力。影响贴模性的因素很多, 比如成形过程中的起皱、翘曲、塌陷和鼓起都会降低板材的贴模性。

3) 形状冻结性。形状冻结性是指板料脱模后保持其与模具内部型腔相同形状的能力。影响形状冻结性的主要因素是回弹。板料脱模后, 如果回弹超出控制范围, 则会产生较大的形状误差。

1.1.2 板料成形应力、应变问题

从本质上看, 板料成形就是在力的作用下使板料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板料成形性质的基本因素。根据变形区应力状态和变形特点进行的板料成形分类方法, 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。

绝大多数板料成形过程中, 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, 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, 在平面应力坐标系中(板料变形应力图)与相应的两向应变坐标系中(板料变形应变图)以应力与应变坐标决定的位置来表示。反过来讲, 在板料成形应力图与板料成形应变图中的不同位置都代表着不同的受力情况与变形特点。以下就板料成形中的应力、应变问题进行讨论。

1) 板料毛坯变形区受两向拉应力(径向应力和切向应力)作用时, 可以分为两种情况, 即径向应力 $\sigma_r > \text{切向应力 } \sigma_\theta > 0$, 且厚向应力 $\sigma_t = 0$ 和切向应力 $\sigma_\theta > \text{径向应力 } \sigma_r > 0$, 且厚向应力 $\sigma_t = 0$ 。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 当径向应力 $\sigma_r > \text{切向应力 } \sigma_\theta > 0$, 且厚向应力 $\sigma_t = 0$ 时, 按全量理论可以写出如下应力与应变的关系式

$$\frac{\varepsilon_r}{\sigma_r - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_\theta}{\sigma_\theta - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_t}{\sigma_t - \sigma_m} = K \quad (1-1)$$

式(1-1)中, ε_r 、 ε_θ 、 ε_t 分别是轴对称冲压成形时的径向主应变、切向主应变与厚度方向上的主应变; σ_m 是平均应力, 其值为: $\sigma_m = (\sigma_\theta + \sigma_r + \sigma_t)/3$; K 是常数。

在平面应力时, 式(1-1)具有如下形式

$$\frac{3\varepsilon_r}{2\sigma_r - \sigma_\theta} = \frac{3\varepsilon_\theta}{2\sigma_\theta - \sigma_r} = \frac{3\varepsilon_t}{-(\sigma_r + \sigma_\theta)} = K \quad (1-2)$$

因为 $\sigma_r > \sigma_\theta > 0$, 所以必定有 $2\sigma_r - \sigma_\theta > 0$ 与 $\varepsilon_r > 0$ 。

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, 即为伸长变形。

又因为 $\sigma_r > \sigma_\theta > 0$, 所以必定有 $-(\sigma_r + \sigma_\theta) < 0$ 与 $\varepsilon_t < 0$, 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 方向上的变形取决于 σ_r 与 σ_θ 的数值: 当 $\sigma_r = 2\sigma_\theta$ 时, $\varepsilon_\theta = 0$; 当 $\sigma_r > 2\sigma_\theta$ 时, 即 $\varepsilon_\theta < 0$; 当 $\sigma_r < 2\sigma_\theta$ 时, $\varepsilon_\theta > 0$ 。 σ_θ 的变化范围是 $\sigma_r > \sigma_\theta > 0$ 。在双向等拉应力状态时, $\sigma_r =$

σ_θ , 由式 (1-2) 得 $\varepsilon_\theta = \varepsilon_r > 0$ 及 $\varepsilon_t < 0$; 在受单向拉应力状态作用时 $\sigma_\theta = 0$, 由式 (1-2) 可得 $\varepsilon_\theta = -\varepsilon_r/2$ 。

根据以上的分析可知, 这种变形情况处于板料成形应变图中的 NOA 范围, 如图 1-1 所示; 而在板料成形应力图中则处于 GOH 范围, 如图 1-2 所示。



图 1-1 板料成形应变图



图 1-2 板料成形应力图

② 当切向应力 $\sigma_\theta > \sigma_r > 0$, 且厚向应力 $\sigma_t = 0$, 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 $\varepsilon_\theta > 0$ 。

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 $\varepsilon_t < 0$, 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 方向上的变形取决于 σ_r 与 σ_θ 的数值: 当 $\sigma_\theta = 2\sigma_r$ 时, $\varepsilon_r = 0$; 当 $\sigma_\theta > 2\sigma_r$ 时, 即 $\varepsilon_r < 0$; 当 $\sigma_\theta < 2\sigma_r$ 时, $\varepsilon_r > 0$ 。

σ_r 的变化范围是 $\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq 0$ 。在双向等拉应力状态时, $\sigma_\theta = \sigma_r$, 由式 (1-2) 得 $\varepsilon_\theta = \varepsilon_r > 0$ 及 $\varepsilon_t < 0$; 在受单向拉应力状态作用时 $\sigma_r = 0$, 由式 (1-2) 可得 $\varepsilon_r = -\varepsilon_\theta/2$, 也就是说在单向应力状态下, 其变形性质与一般的简单拉深是完全一样的。

这种变形情况处于板料成形应变图中的 AOC 范围 (图 H), 在板料成形应力图中则处于 HOA 范围 (图 1-2)。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) 板料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, 即径向应力 $\sigma_r < \sigma_\theta < 0$, 且厚向应力 $\sigma_t = 0$ 和切向应力 $\sigma_\theta < \sigma_r < 0$, 且厚向应力 $\sigma_t = 0$ 。

① 当径向应力 $\sigma_r < \sigma_\theta < 0$, 且厚向应力 $\sigma_t = 0$ 。由式 (1-2) 的分析可知, 因为 $\sigma_r < \sigma_\theta < 0$, 所以一定有 $2\sigma_r - \sigma_\theta < 0$, $2\sigma_r - \sigma_\theta < 0$ 与 $\varepsilon_r < 0$ 。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, 即为压缩变形。

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 方向上的变形取决于 σ_θ 与 σ_r 的数值, 当 $\sigma_r = 2\sigma_\theta$ 时, $\varepsilon_\theta = 0$; 当 $\sigma_r > 2\sigma_\theta$ 时,

$\varepsilon_\theta < 0$; 当 $\sigma_r < 2\sigma_\theta$ 时, $\varepsilon_\theta > 0$ 。

这时 σ_θ 的变化范围在 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 $\varepsilon_\theta = \varepsilon_r < 0$ 及 $\varepsilon_t > 0$; 当 $\sigma_\theta = 0$ 时, 是单向受压的应力状态, 所以 $\varepsilon_\theta = -\varepsilon_r/2$ 。这种变形情况处于板料成形应力图的 EOG 范围内 (图 1-2), 在板料成形应变图中则处于 COD 范围。

② 当切向应力 $\sigma_\theta < \sigma_r < 0$, 且厚向应力 $\sigma_t = 0$ 。由式 (1-2) 的分析可知, 因为 $\sigma_\theta < \sigma_r < 0$, 所以一定有 $2\sigma_\theta - \sigma_r < 0$ 与 $\varepsilon_\theta < 0$ 。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 $\sigma_\theta < 0$, 则在这个方向上的应变一定是负的, 即为压缩变形。

又因为 $\sigma_\theta < \sigma_r < 0$, 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_r 方向上的变形取决于 σ_θ 与 σ_r 的数值, 当 $\sigma_\theta = 2\sigma_r$ 时, $\varepsilon_r = 0$; 当 $\sigma_\theta > 2\sigma_r$ 时, $\varepsilon_r < 0$; 当 $\sigma_\theta < 2\sigma_r$ 时, $\varepsilon_r > 0$ 。

这时 σ_r 的变化范围在 σ_θ 与 0 之间。当 $\sigma_\theta = \sigma_r$ 时, 是双向等压的平面应力状态、故有 $\varepsilon_\theta = \varepsilon_r < 0$ 及 $\varepsilon_t > 0$; 当 $\sigma_r = 0$ 时, 是单向受压的应力状态, 所以 $\varepsilon_r = -\varepsilon_\theta/2 > 0$ 。这种变形情况处于冲压应变图 GOL 范围内 (图 1-1), 在冲压应力图中则处于 DOE 范围 (图 1-2)。

3) 板料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, 分别作如下的分析。

① 当径向应力 $\sigma_r > 0$, 切向应力 $\sigma_\theta < 0$, 厚向应力 $\sigma_t = 0$ 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 $\varepsilon_r > 0$ 。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 $\sigma_r > 0$, $\sigma_\theta < 0$, 所以必定有 $\varepsilon_\theta < 0$, 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, $\varepsilon_r > 0$, $\varepsilon_\theta < 0$, 而且 $|\varepsilon_r| = |\varepsilon_\theta|$; 当 $\sigma_\theta = 0$ 时, $\varepsilon_r > 0$, $\varepsilon_\theta < 0$, 而且 $\varepsilon_\theta = -\varepsilon_r/2$, 是单向受拉的应力状态。这种变形状态处于板料成形应变图中的 MON 范围 (图 1-1), 而在板料成形应力图中处于 FOG 范围内 (图 1-2)。

② 当切向应力 $\sigma_\theta > 0$, 径向应力 $\sigma_r < 0$, 厚向应力 $\sigma_t = 0$ 及 $|\sigma_\theta| > |\sigma_r|$ 时, 利用式 (1-2), 用与前项相同的方法分析可得 $\varepsilon_\theta > 0$, 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, 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, 是压缩变形。

这时 σ_r 的数值只能在 $\sigma_r = -\sigma_\theta$ 与 $\sigma_r = 0$ 的范围内。当 $\sigma_r = -\sigma_\theta$ 时, $\varepsilon_\theta > 0$, $\varepsilon_r < 0$, 而且 $|\varepsilon_r| = |\varepsilon_\theta|$; 当 $\sigma_r = 0$ 时, $\varepsilon_\theta > 0$, $\varepsilon_r < 0$, 而且 $\varepsilon_r = -\varepsilon_\theta/2$ 单向受拉的应力状态。这种变形状态处于板料成形应变图中的 COD 范围 (图 1-1), 而在板料成形应力图中处于 AOB 范围内 (图 1-2)。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) 板料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 当径向应力 $\sigma_r > 0$, 切向应力 $\sigma_\theta < 0$, 厚向应力 $\sigma_t = 0$ 及 $|\sigma_\theta| > |\sigma_r|$ 时, 由式 (1-2) 可知, 因为 $\sigma_r > 0$, $\sigma_\theta < 0$, $\sigma_t = 0$ 及 $|\sigma_\theta| > |\sigma_r|$, 必定有 $2\sigma_\theta - \sigma_r < 0$ 及 $\varepsilon_\theta < 0$ 。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，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 $\varepsilon_r > 0$ ，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， $\varepsilon_r > 0$, $\varepsilon_\theta < 0$ ，而且 $\varepsilon_r = -\varepsilon_\theta$ ；当 $\sigma_r = 0$ 时， $\varepsilon_r > 0$, $\varepsilon_\theta < 0$ ，而且 $\varepsilon_r = -\varepsilon_\theta/2$ 。这种变形处于板料成形应变图中的 *MOL* 范围内（图 1-1），而在板料成形应力图中则处于 *EOF* 范围内（图 1-2）。

② 当切向应力 $\sigma_\theta > 0$ ，径向应力 $\sigma_r < 0$ ，厚向应力 $\sigma_t = 0$ 及 $|\sigma_r| > |\sigma_\theta|$ 时，由式 (1-2) 可知，因为 $\sigma_\theta > 0$, $\sigma_r < 0$, $\sigma_t = 0$ 及 $|\sigma_r| > |\sigma_\theta|$ ，必定有 $2\sigma_r - \sigma_\theta < 0$ 及 $\varepsilon_r < 0$ 。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，则在拉应力方向上的应变是负的，是压缩变形。

又因为 $\sigma_\theta > 0$, $\sigma_r < 0$ ，必定有 $2\sigma_\theta - \sigma_r > 0$ 及 $\varepsilon_\theta > 0$ ，即在拉应力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， $\varepsilon_\theta > 0$, $\varepsilon_r < 0$ ，而且 $\varepsilon_r = -\varepsilon_\theta$ ；当 $\sigma_\theta = 0$ 时， $\varepsilon_\theta > 0$, $\varepsilon_r < 0$ ，而且 $\varepsilon_\theta = -\varepsilon_r/2$ 。这种变形处于板料成形应变图中的 *DOE* 范围内（图 1-1），而在板料成形应力图中则处于 *BOC* 范围内（图 1-2）。实质上，这两种变形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见图 1-1 与图 1-2 上的文字。

以上分析的四种变形情况可以包含所有的平面应力状态。当作用于板料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，称这种板料变形为伸长类变形。根据以上分析，伸长类变形在板料成形应变图中占有五个区间，即 *MON*、*NOA*、*AOB*、*BOC* 及 *COD*，而在板料成形应力图则占有 *FOG*、*GOH*、*HOA* 及 *AOB* 等四个区间。当作用于板料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。根据以上分析，压缩类变形在板料成形应变图中占有五个区间，即 *LOM*、*HOL*、*GOH*、*FOG* 与 *DOF*，而在板料成形应力图中则占有 *EOF*、*DOE*、*COD*、*BOC* 等区间。*MD* 与 *FB* 分别是板料成形应变图与板料成形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，所以板料成形应力图与板料成形应变图也一定存在有一定的对应关系。每一个板料变形都可以在板料成形应力图上和板料成形应变图上找到它固定的位置。根据板料毛坯变形区内的应力状态或变形情况，利用板料成形应力图或板料成形应变图中的分界线（*MD* 或 *FB*），就可以容易地判断该板料变形的性质与特点。

概括以上分析的结果，把各种应力状态在板料成形应力图和板料成形应变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，板料成形应力图与板料成形应变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呈 45° 的一条斜线。

由于这种分类方法是以板料毛坯变形区的应力状态与变形的分析作为理论基础的，所以它可以充分地反映不同类别的成形方法在变形方面的特点以及变形密切相关的实际问题的

差别。表 1-2 中列出了伸长类变形与压缩类变形在板料成形工艺方面的特点。

表 1-1 板料应力状态与板料应变状态的对照

应力状态		板料应变图中的位置	板料应力图中的位置	在绝对值最大的应力方向上		变形类别
双向受拉 $\sigma_r > 0$, $\sigma_\theta < 0$	$\sigma_\theta < \sigma_r$	NOA	GOH	+	+	伸长类
	$\sigma_r < \sigma_\theta$	AOC	HOA	+	+	伸长类
双向受压 $\sigma_r < 0$, $\sigma_\theta < 0$	$\sigma_r < \sigma_\theta$	EOG	COD	-	-	压缩类
	$\sigma_\theta < \sigma_r$	GOL	DOE	-	-	压缩类
拉压受力 $\sigma_r > 0$, $\sigma_\theta < 0$	$ \sigma_r > \sigma_\theta $	MON	FOG	+	+	伸长类
	$ \sigma_\theta > \sigma_r $	LOM	EOF	-	-	压缩类
拉压受力 $\sigma_r < 0$, $\sigma_\theta > 0$	$ \sigma_\theta > \sigma_r $	COD	AOB	+	+	伸长类
	$ \sigma_r > \sigma_\theta $	DOE	BOC	-	-	压缩类

表 1-2 伸长类变形与压缩类变形在板料成形工艺方面的对比

对比项	伸长类变形	压缩类变形
变形时缺陷表现形式	拉应力或拉应变过大造成的破裂	压应力或压应变过大的失稳起皱
成形极限	1. 主要取决于板材的塑性和厚度 2. 可用伸长率、 n 值和 FLD 判断	1. 主要取决于传力区的承载能力 2. 取决于抗失稳能力 3. 板料的厚度
变形区板厚的变化	减薄	增厚
提高成形极限的方法	1. 改善板材的塑性 2. 使变形均匀化, 降低局部变形	1. 采用多道工序 2. 改善传力区与变形区力学关系 3. 采用防皱措施

由表 1-2 可以清楚地看出, 由于每一类别的板料成形方法, 其毛坯变形区的受力与变形特点相同, 而与变形有关的一些规律也都是一样的。所以在对各种具体的板料成形方法进行研究工作的同时, 也可开展综合性的体系化研究方法。体系化研究方法的特点是, 对每一类别的板料成形方法进行其共性规律的研究。体系化研究工作的结果, 对每一个属于该类别的成形方法都是适用的。这种体系化的研究方法, 不但可使研究工作效率得到提高, 而且也可使研究工作更加深入, 视野也更加开阔。这种体系化的研究工作, 在板材冲压性能、板料成形极限等方面, 已有一定程度的开展。

1.1.3 板料成形工艺分类及特点

板料的成形工艺主要包括有: 弯曲、拉深、胀形、翻边等, 当然依据不同的生产要求也会有不同分类方法, 这里就依据以上分类方法简要地讲解各个工艺分类的特点。

(1) 弯曲 弯曲是指将金属板料(也包括棒料、管料)弯成一定的角度和曲率,从而获得所需形状工件的成形工艺。根据弯曲成形方式的不同,弯曲方法分为压弯、折弯、滚弯、拉弯等,但最常见的是用弯曲模在普通压力机上进行弯曲。

通过对弯曲工艺进行网格分析及应力、应变分析,可获得弯曲变形的变形特点;针对弯曲可能出现的质量缺陷采用相应的措施,以保证弯曲顺利进行。

1) 弯曲变形的过程和特点。现以V形件弯曲为例说明弯曲的变形过程。

V形件弯曲是一种很普通的板料弯曲,其弯曲过程如图1-3所示。在开始弯曲时,板料与凸、凹模三点接触,板料的弯曲内侧半径为 r_0 。随着凸模的下压,板料的直边与凹模V形表面逐渐靠紧,弯曲内侧半径逐渐减小变为 r_1 ,同时弯曲力臂也逐渐减小, l_0 变为 l_1 ,直到板料与凸模三点接触,弯曲内侧半径和弯曲力臂分别减小为 r_2 和 l_2 。当凸模、板料与凹模三者完全压紧,板料的内侧弯曲半径及弯曲力臂达到最小时,弯曲过程结束,得到所需的零件。其变化过程为 $r_0 > r_1 > r_2 > r$, $l_0 > l_1 > l_2 > l$ 。

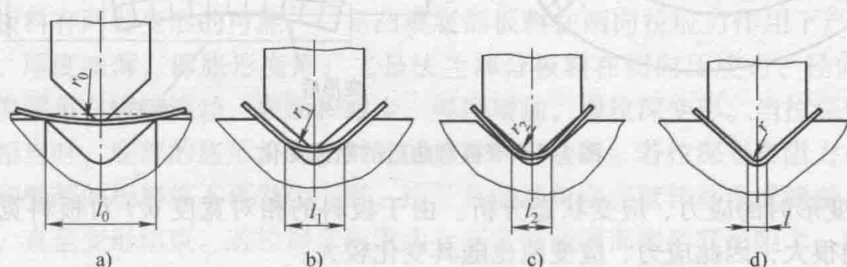


图1-3 弯曲过程

由于板料在弯曲变形过程中弯曲半径逐渐减小,因此弯曲变形程度逐渐增加;又由于弯曲力臂逐渐减小,弯曲变形过程中板料与凹模之间则产生相对滑动。凸模、板料与凹模三者完全压紧后,如果对弯曲件继续施压,则称为校正弯曲。在这之前的弯曲称为自由弯曲。自由弯曲是凸模、板料与凹模间的线接触,而校正弯曲是它们的面接触。

研究材料的冲压变形规律时,常采用画网格的方法进行辅助分析。如图1-4所示,先在板料毛坯侧面用机械刻线或照相腐蚀的方法画出网格,观察弯曲变形后网格的变形情况,就可分析出板料的变形特点。

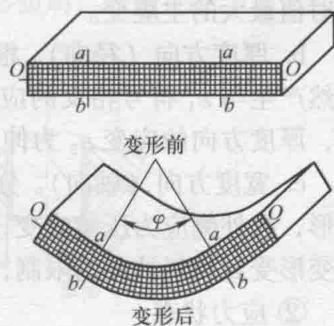


图1-4 材料弯曲前后的网格变化

① 弯曲变形区的位置。弯曲变形主要发生在弯曲带中心角 φ 范围内,弯曲带中心角以外直边部分离弯曲部分越远,变形就越小,可认为基本上不变形。弯曲后工件如图1-5所示,弯曲带中心角为 φ ,而弯曲后直边部分的弯曲角为 α ,两者的关系为: $\varphi = 180^\circ - \alpha$ 。

② 应变中性层。网格由正方形变成了扇形,靠近凹模的外侧纤维切向受拉伸长,靠近凸模的内侧纤维切向受压缩短,在拉伸与压缩之间存在一个既不伸长也不缩短的中间纤维层,称为应变中性层。



图1-5 弯曲角与弯曲带中心角

③ 变形区厚度和板料长度。根据试验所知:弯曲半径与

板厚之比 r/t 较小时 ($r/t \leq 4$)，应变中性层向内偏移。中性层内移的结果是：内层纤维长度缩短，导致厚度增加；外层纤维伸长，厚度相应变薄。由于厚度增加量小于变薄量，因此板料总厚度在弯曲变形区内变薄。同时，由于体积不变，故变形区的变薄使板料长度略有增加。

④ 变形区的断面。内层受压缩，宽度增加；外层受拉伸，宽度减小。这种状况由于板料的宽度不同又有所区别：当板料相对宽度 $b/t > 3$ （宽板）时，材料在宽度方向的变形受到相邻材料的制约，阻力大，流动困难，断面尺寸几乎不变，基本保持为矩形；而当板料相对宽度 $b/t \leq 3$ （窄板）时，宽度方向变形的约束较小，断面变成了内宽外窄的扇形。

图 1-6 所示为此种情况下的断面变化情况。

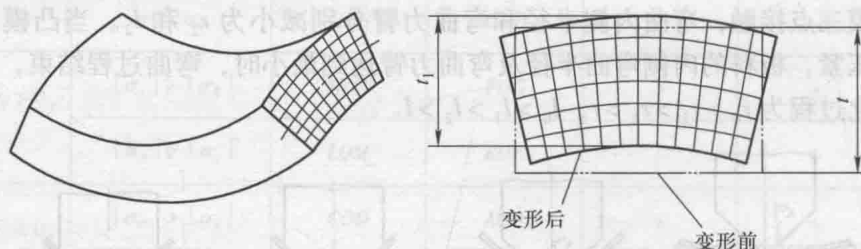


图 1-6 窄板弯曲后的断面变化

2) 弯曲变形时的应力、应变状态分析。由于板料的相对宽度 b/t 对板料宽度方向的应力、应变影响很大，因此应力、应变值也随其变化较大。

① 应变状态

a. 长度方向（切向）。外侧产生伸长应变，内侧产生压缩应变。长度方向的应变 ε_1 为绝对值最大的主应变。

b. 厚度方向（径向）。根据塑性变形体积不变条件可知，沿着板料的宽度和厚度方向，必然产生与 ε_1 符号相反的应变。在板料的外侧，厚度方向的 ε_2 为压缩应变；在板料的内侧，厚度方向的应变 ε_2 为伸长应变。

c. 宽度方向（轴向）。分两种情况：窄板弯曲 ($b/t \leq 3$) 时，材料在宽度方向可以自由变形，故外侧应为压缩应变，内侧为伸长应变；宽板弯曲 ($b/t > 3$) 时，沿宽度方向，板料的变形受到材料彼此的限制，故外侧和内侧方向的应变 ε_3 近似为零。

② 应力状态

a. 长度方向（切向）。外侧受拉应力，内侧受压应力，长度方向的应力 σ_1 为最大主应力。

b. 厚度方向（径向）。在弯曲过程中，材料有挤向曲率中心的倾向。越靠近板料外表面，其切向拉应力 σ_1 越大，材料间内挤的倾向越大。这就使得板料在厚度方向产生了压应力 σ_2 。在板料的内侧，也产生了压应力 σ_2 。

c. 宽度方向（轴向）。分两种情况：窄板弯曲 ($b/t \leq 3$) 时，由于材料在横向的变形不受限制，因此，其内侧和外侧的应力均可忽略为零；宽板弯曲 ($b/t > 3$) 时，外侧材料在横向的收缩受阻，产生拉应力 σ_3 ，内侧横向扩展受阻，产生压应力 σ_3 。

板料在弯曲过程中的应力、应变状态如图 1-7 所示。从图中可以看出，宽板弯曲是三维应力状态，窄板弯曲则是平面应力状态；窄板弯曲是三维应变状态，宽板弯曲则是平面应变状态。

(2) 拉深 拉深是在拉深模具的作用下,板平面内产生切向压应力和径向压应力,坯料通过拉深凹模向立壁流动,使板料成形为空心零件,或浅的空心毛坯成形为更深的空心零件的冲压工序。拉深变形总是与弯曲、胀形等其他的变形方式同时发生。在拉深加工中,拉深系数 $m = d/D$ (凸模直径/毛坯直径) 或它的倒数拉深比 $R = D/d$ 是决定工序成败及制件质量的最主要的工艺参数。在生产中,常用最小拉深系数 $m_{\min} = (d/D)_{\min}$ 或最大拉深比 $R_{\max} = (D/d)_{\max}$ 作为拉深变形的加工极限。

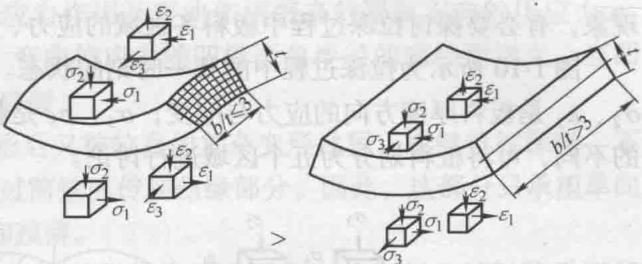


图 1-7 板料在弯曲过程中的应力、应变状态

1) 拉深变形的过程。图 1-8 所示是圆筒形零件的拉深变形过程示意图。当凸模下降与板料接触时,板料首先弯曲,在凸模圆角部位板料发生胀形变形并产生硬化。凸模继续下降,此时,板料有两种变形的可能:一是凸模底部板料在两向拉应力作用下产生伸长变形、表面积增加、厚度减薄,即胀形变形;二是法兰部分板料在切向压应力、径向拉应力作用下,通过凹模圆角向直壁流动,表面积减少,厚度增加,即拉深变形。当拉深变形阻力与胀形变形阻力相当时,底部的胀形将与法兰处的拉深同时进行。若拉深变形阻力小于胀形变形阻力,底部和壁部的板料将不再发生变形,法兰处的坯料向直壁转移形成筒壁,拉深变形得以顺利进行,直至变形结束。若拉深变形阻力大于底部或缝部胀形变形阻力,则将发生胀形变形。由于胀形变形程度有限,所以这种变形方式的转变意味着破裂的开始。因此,正常的拉深过程是弯曲、胀形、拉深的变形过程。否则,则为弯曲、胀形、拉深、胀形、破裂的过程。弯曲变形在拉深过程中始终存在。胀形变形或是存在于变形初期,或是存在于加工的全过程,或是与拉深变形交替进行直至变形结束或零件开裂。

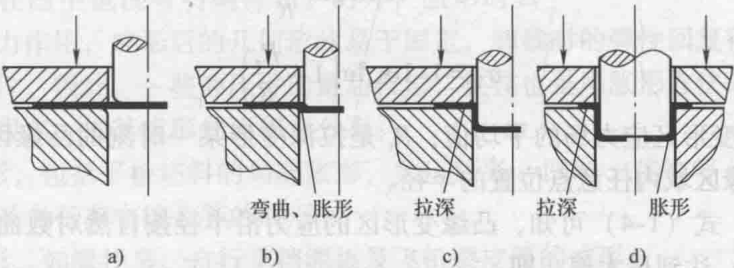


图 1-8 圆筒形零件的拉深变形过程示意图

2) 拉深变形的应力应变。从拉深件的纵截面上观察,厚度和硬度沿筒壁纵向是变化的,变化规律如图 1-9 所示。底部略有变薄,但基本上等于原板料的厚度;筒壁上端增厚,越接近边缘厚度越大;筒壁下端变薄,越靠近圆角处变薄越严重,由筒壁向底部转角偏上处,出现明显变薄,严重时可产生破裂。硬度沿高度方向也是变化的,越接近上边缘硬度越高,这说明在拉深过程中,板料各部分的应力、应变状态是不一样的。为了更深刻地认识拉深变形的本质,了解拉深过程中所发生的各种

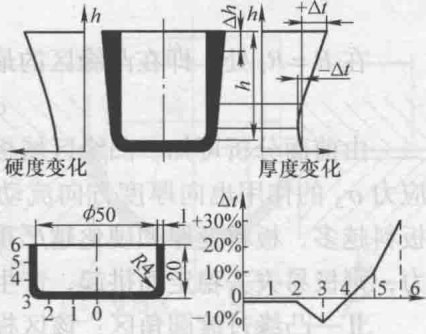


图 1-9 硬度和壁厚沿筒壁纵向变化

现象，有必要探讨拉深过程中板料各区域的应力、应变状态。

图 1-10 所示为拉深过程中的某一时刻的状态。其中， σ_1 、 ε_1 是板料径向的应力与应变； σ_2 、 ε_2 是板料厚度方向的应力与应变； σ_3 、 ε_3 是板料切向的应力与应变。根据应力、应变的不同，可将板料划分为五个区域进行讨论。

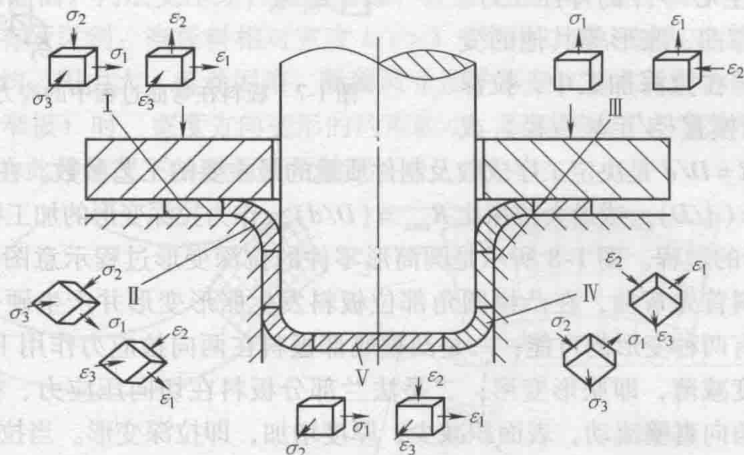


图 1-10 圆筒件拉深各部分的应力、应变状态

I—平面凸缘区：这是主要的变形区，这部分板料在径向拉应力 σ_1 和切向压应力 σ_3 的作用下，发生塑性变形而逐渐流入凹模。在凸缘厚度方向，由于受到压边力的作用，产生压应力 σ_2 。通常，径向拉应力 σ_1 和切向压应力 σ_3 的绝对值要比 σ_2 大得多，因此 σ_2 可忽略不计。

根据塑性力学定律， σ_1 、 σ_3 与拉深有关尺寸的关系为

$$\sigma_1 = 1.1 \sigma_m \ln \frac{R_t}{R} \quad (1-3)$$

$$\sigma_3 = 1.1 \sigma_m \ln \left(1 - \frac{R_t}{R} \right) \quad (1-4)$$

式中， σ_m 是凸缘变形区应力场的平均值； R_t 是拉深变形某一时刻的凸缘区的外圆半径； R 是拉深过程中凸缘区域内任意点位置的半径。

由式 (1-3)、式 (1-4) 可知，凸缘变形区的应力沿半径按自然对数曲线分布，在孔壁位置的凸缘上， σ_1 达到最大值，即

$$\sigma_{1\max} = 1.1 \sigma_m \ln \frac{R_t}{r} \quad (1-5)$$

在 $R = R_t$ 处，即在凸缘区的最边缘， σ_3 的绝对值达到最大值

$$\sigma_{3\max} = 1.1 \sigma_m \sigma_{3\max} = 1.1 \sigma_m \quad (1-6)$$

由前面分析可知，凸缘区域板料不仅沿径向流动，而且由于压应力 σ_3 的作用也向厚度方向流动，越靠近凸缘的外缘需要转移的板料越多，板料变厚和硬化越严重，如果没有足够厚度方向的压应力，则极易失去稳定而拱起，产生如图 1-11 所示的拉深起皱。

II—凸缘过渡圆角区：该区板料变形比较复杂，在径向受拉应力 σ_1 ，切向受压应力 σ_3 ，但 σ_1 的绝对值要大于 σ_3 的绝对值。此

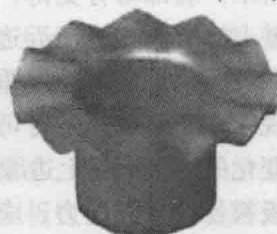


图 1-11 拉深起皱