



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

成形工艺与模具设计

鄂大辛 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书针对当前先进制造技术现状,并根据未来工业制造技术的发展趋势,系统地介绍了金属冷冲压成形工艺、热锻工艺、冷锻工艺及塑料的成形基本原理、成形方法及其模具设计。其中,包括金属材料 and 塑料的基本性能、成形过程、工艺方案的制定、模具设计及其设备的选用等。特别是选入了金属塑性成形技术亟待发展的部分内容,如管材弯曲成形、非回转对称拉深成形等的研究结果,对于发展塑性成形技术,具有相应的启发意义。

本书可作为高等学校材料工程类、机械工程类、化工工程类本科及高职高专教材,也可作为从事各种金属、非金属成形加工及模具设计、制造的工程技术人员和科研人员的参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

成形工艺与模具设计/鄂大辛编著. —北京:北京理工大学出版社,
2007. 8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5640 - 1255 - 7

I. 成… II. 鄂… III. ①成型 - 工艺 - 高等学校 - 教材 ②模具 -
设计 - 高等学校 - 教材 IV. TG39 TG76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 063704 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / [http: // www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 29. 5

字 数 / 700 千字

版 次 / 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 4000 册

定 价 / 38. 00 元

责任校对 / 张 宏

责任印制 / 吴皓云

C 目 录

Contents



第一篇 材料变形基础

第一章 金属冷塑性变形	1
第一节 金属塑性变形的物理基础	1
第二节 金属塑性变形的力学基础	9
思考题	13
第二章 金属热塑性变形	14
第一节 金属热变形过程	14
第二节 热变形对金属组织和性能的影响	17
第三节 金属可锻性	18
思考题	20
第三章 工程塑料成型的基本知识	21
第一节 塑料的组成与分类	21
第二节 塑料的特性及其应用简介	22
第三节 塑料制品的成型工艺	24
思考题	27

第二篇 冲压工艺与模具设计

第四章 冲压工艺基础	28
第一节 冲压工艺概述	28
第二节 冲压工艺分类及特点	30
第三节 冲压材料	33
第四节 冲压设备	44
思考题	49
第五章 冲裁工艺与冲模设计	50
第一节 冲裁工艺分析	50
第二节 冲裁间隙	55
第三节 冲裁模刃口尺寸的计算	59

第四节	冲裁件的排样与搭边	64
第五节	冲裁力分析及计算	67
第六节	冲裁工艺设计	73
第七节	冲裁模结构设计	78
第八节	精密冲裁与其他冲裁工艺及模具简介	99
思考题		114
第六章	弯曲成形工艺与模具设计	115
第一节	板材弯曲成形及其变形分析	115
第二节	弯曲力矩及弯曲力	123
第三节	板材弯曲加工极限	127
第四节	弯曲回弹	130
第五节	弯曲板坯尺寸的展开	136
第六节	弯曲工艺设计	138
第七节	弯曲模工作部分设计计算	142
第八节	弯曲模的典型结构	144
第九节	管材弯曲成形	148
思考题		162
第七章	拉深工艺及模具设计	163
第一节	拉深过程的力学分析	163
第二节	拉深成形极限及拉深系数	168
第三节	拉深力、拉深功及压料力计算	176
第四节	旋转体拉深	180
第五节	盒形件拉深	195
第六节	拉深件工艺设计	209
第七节	其他拉深方法简介	211
思考题		215
第八章	其他板料成形工艺及模具设计	216
第一节	胀形工艺及模具	216
第二节	翻边工艺及模具	223
第三节	缩、扩口成形工艺及模具	230
第四节	旋压及模具	234
第五节	先进成形工艺简介	239
思考题		245
第三篇 锻造工艺与锻模设计		
第九章	锻造工艺概述	246
第一节	锻造工艺分类及特点	246
第二节	锻造工艺流程	249
第三节	锻造设备	251

思考题	256
第十章 热锻工艺及模具设计	257
第一节 锻造加热	257
第二节 自由锻造工艺	262
第三节 胎模锻造工艺及胎模具	275
第四节 模锻工艺及模具	278
第五节 模锻后续工序	318
思考题	324
第十一章 冷锻工艺及模具设计	325
第一节 冷锻工艺概述	325
第二节 冷锻工艺	326
第三节 精压工艺及模具	331
第四节 冷态模锻工艺	334
第五节 冷挤压工艺及模具	336
思考题	355
第十二章 其他金属体积成形方法简介	356
第一节 材料及零件体积成形工艺技术	356
第二节 特种成形工艺	367
第三节 快速原型制造技术简介	379
思考题	382

第四篇 塑料成型及模具设计

第十三章 塑件设计简介	383
思考题	388
第十四章 塑料注射成型工艺及模具设计	389
第一节 注射成型模的组成及分类	389
第二节 注射参数计算	391
第三节 浇注系统设计	394
第四节 成型零部件设计	404
第五节 其他辅助机构设计	415
思考题	428
第十五章 热固性塑料成型工艺及模具设计	429
第一节 热固性塑料及成型工艺简介	429
第二节 热固性塑料注射成型及模具设计	431
第三节 热固性塑料压缩成型及模具设计	437
第四节 压注成型工艺及模具设计	452
思考题	459
参考文献	460

P 序

reface



材料成形是先进加工技术的重要组成部分，属于少、无切屑加工，制造方法简单、生产效率高，特别是经过成形加工后的金属零件具有优越的力学性能，可满足工程需要。因此，成形加工在未来制造业技术发展中，将占有举足轻重的地位。而目前的成形加工，都需要采用相应的模具才能实现，模具工业的发展和提高是材料成形加工的必要保证。

在现代化基础建设中，模具工业已经逐渐形成为制造业的基础核心产业。越来越多的工业产品制造与模具有关，根据国际生产协会的专家预测，在 21 世纪末，50%~75%的机械加工（主要是切削加工）产品都将利用模具进行加工制造。模具是工业的基础工艺装备，用模具生产制件所表现出来的高精度、高复杂程度、高一致性、高生产力和低消耗，是其他加工制造方法所不能比拟的，工业发达国家的模具工业产值早已超过机床工业产值。因此，模具工业已经成为现代制造业的重要支柱性产业。特别是近些年来，模具设计制造的需求量以及高速度化、高效率化已经成为汽车制造业亟待提高的一项重要技术。模具生产技术水平的高低不仅是衡量一个国家产品制造水平高低的重要标志，而且在很大程度上决定着这个国家产品质量、效益及新产品的开发能力。

模具技术，既是先进制造技术的重要组成部分，又是先进制造技术的重要应用领域，其技术水平与先进制造技术的发展与应用密切相关。模具对于一般产品来说属于工具范畴，精度高、结构复杂，并有较高的材质要求，是典型的高附加值、高风险产品。其制造过程复杂，涉及产品设计、模具设计、毛坯制造、电加工、机械加工、测量技术、表面工程、热处理和快速原型制造技术等方面，需要多种技术装备，而且使用率极不平衡。

随着社会经济的发展，对于工业产品的品种、数量、质量及款式等都提出了越来越高的要求，因此，也促进了模具工业的快速发展。许多新产品的开发和生产，在很大程度上依赖于模具制造技术，特别是在汽车、轻工、电子和航天的行业中尤显重要。模具制造能力的强弱和模具制造水平的高低，已经成为衡量一个国家机械制造技术水平的重要标志之一，直接影响国民经济中许多部门的发展。

模具工业是国民经济发展的基础工业之一。模具的质量精度、寿命对其他工业的发展起着十分重要的作用，其在现代化工业生产中的重要地位不容忽视，并且随着模具技术的不断发展，其在国民经济建设中将发挥越来越重要的作用。因此，模具的内涵需要发展和丰

富，需要在实践的基础上不断进行研究、挖掘和补充，为这门实用技术注入新的理论和技术内容，使其在现代化制造领域中发挥更重要的作用。

作者曾在一汽集团长期从事模具研发工作，之后在国外留学工作期间一直围绕着材料成形机理及模具进行了广泛深入的研究和实践。作者从材料成形工艺与模具设计岗位走上高等学府讲台，是国内该领域中为数不多的既具有深厚的理论基础、又具有丰富实践经验的专家，对于材料成形及模具设计持有较深刻的理解和认识。教材的编写是对材料成形和模具技术发展进行系统研究和浓缩的结晶，内容基本涵盖了工程应用中最基本的成形方法和模具特征，既适用于高等学校教学需求，又可作为相关专业工程技术人员的参考用书，具有一定的理论探索意义和实际应用价值。

该书经教育部专家委员会评审遴选为高等学校国家级“十一五”规划教材，并向全国高等学校相关专业做出推荐，实为模具行业造就高素质创新人才提供了良师益友，希望该书能够受到广大读者的喜爱，并对热衷于学习和研究材料成形及模具设计的读者有所助益。

中国模具协会理事长 褚克辛
一汽模具有限公司总经理



前言

Introduction



材料成形及模具技术在现代工业中占有越来越重要的地位，并且将成为未来制造业的支柱性行业。这一点，已为诸多工业发达国家率先认识。因此，在新时代理工科大学、高职高专等学校的专业教学内容中，应尽快将这一门专业技术介绍给学生，使他们能够初步认识现代制造工业的发展趋势，在自己所学专业基础知识的基础之上，拓宽认识视野和明确发展方向。目前，材料成形工艺与模具设计课程已为许多大学及高职高专机械制造、材料成形、化工等专业的学生在校学习的主要学习内容之一。

成形工艺与模具设计是一个实践性很强的专业，需要从理论教学和实验教学两方面入手培养学生。教材中既要有成形的基础理论，还要有模具的基本结构，使学生在学习这门课程时，即了解材料的变形机理，又产生控制材料变形的理念，进而才能开发并创造新的成形工艺方法和新型成形模具。本书根据作者在国内、外多年生产实践和科研，以及大学及高职高专学校的教学经验积累的基础上，综合了国内、外的先进技术并吸取了现有类似教材或科技书籍的精华和长处，系统编著而成。书中深入浅出地融入了作者近 30 年在板材、管材成形及其模具设计制造工作中的真实试验研究成果，增添了既有基础性技术又有研究性启示的内容，既适合于理工科大学本科生，也适合于高职高专学生的技术基础教学使用，也可作为相关专业选修课教学使用，同时，还可供有关工程技术人员参考使用。

由于本书部分章节是有关试验研究现状的提示性内容，因此，不属于教学大纲范围内所规定的内容，可供相关技术人员及感兴趣的学生参考，教师在授课时可根据学科专业需求进行适当取舍选择。全书分为四篇，主要介绍材料成形基础知识、冲压工艺及模具、锻造工艺及模具、塑料成型工艺及模具。其中，还插入了一些新的成形原理、工艺及部分模具知识。

作者最近在机械工业出版社出版了一套音像教学光盘《模具设计系列 VCD 教程》，其中包括《冲裁工艺与模具设计》、《拉深工艺与模具设计》、《弯曲工艺与模具设计》、《挤出吹塑气压成型工艺与模具设计》、《热塑性塑料成型工艺与模具设计》和《热固性塑料成型工艺与模具设计》。本书相关内容可与之配套使用。

本书在编写过程中，经吉林大学宋玉泉教授（科学院院士）悉心指教，并提出许多建设性意见，在此深表感谢。另外，借此机会对为本书编写完稿做了大量工作的刘小亦、李悦、王立石、贾震、丁洁、古涛、魏乐愚等人士以及所参考文献的作者表示深厚的谢意，同时，

前 言

对曾经工作 20 年始终保持合作研究并对本书成稿给予大力支持的一汽集团公司深表谢意。

本书于 2006 年 8 月经教育部专家委员会评审，遴选为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。本书的出版得到了北京理工大学和北京理工大学出版社“十一五”国家级规划教材的项目资助，作者在此表示衷心的感谢！

由于时间仓促，加之作者水平所限，书中不妥之处敬请读者不吝指正。

编著者

拉深工艺及模具设计

拉深是利用模具将板料毛坯成形为开口空心零件的冲压加工方法，圆筒形件拉深成形如图 7-1 所示。拉深时，凸模下表面接触到板坯后随其下行将板坯压向凹模口内，凹模表面上的板坯在半径方向上受到拉伸变形的同时，沿圆周切线方向收缩变形，随凸模进入凹模口的板坯生成侧壁。侧壁可以是圆筒形、锥形、抛物面形、盒形或其他不规则形状。板料拉深与其他冲压工艺结合，可以制出各种复杂的零件。因此，在汽车、航空、机电等部门和日常用品的生产中被广泛的应用。

第一节 拉深过程的力学分析

一、拉深变形过程

由拉深所成形的制件形状是多种多样的，为便于理解它的成形机理，现以圆形板坯拉深成圆筒形件为例，来分析拉深的变形过程（图 7-1）。

假想在圆形板坯表面画出网格如图 7-2 所示，从外缘开始将圆形板坯上的小三角形 b_1 、 b_2 、 b_3 …切除，只留下矩形小窄条 a_1 、 a_2 、 a_3 …。然后沿直径为 d 的圆周线将小窄条折起，就可以形成一个直径为 d 的圆筒形制件。但是在实际拉深过程中，由于材料的连续性，这部分“多余”的小三角形材料不可能消失。又由于凹模口轮廓线尺寸的限制，小三角中的一部分材料沿圆周方向挤入两侧的小窄条区域，另一部分沿着半径方向向外延展。拉深过程中，压料面上板料厚度增加，拉深结束后，制件侧壁厚度增加了 Δt ，成形的制件高度 $h > (D - d)$ ，即制件高度比板坯原始径向长度增加了 Δh 。

为了分析拉深过程中板料的流动情况，再假想在板坯表面刻画出许多径向间距为 l 的同心圆和等分度半径线，如图 7-3 所示。拉深结束后，可以发现圆筒底部的网格基本上保持原来的形状，只是筒底和侧壁交接处径向略有伸长，即 $l' > l$ ，而筒壁部分的网格发生了很大的变化。原来的同心圆变成了筒壁的水平圆周线，原始径向间距 l 增大，越靠近筒口部增大越多，即 $l_1 > l_2 > l_3 > \dots > l_n$ 。另外，原来筒底以外的等分度半径线变成了与筒轴平行的垂直线，如果忽略板料各向异性的影响，在筒壁上间距完全相等，即 $s_1 = s_2 = s_3 = \dots = s_n$ 。

观察板坯上网格的变化情况发现，原始的扇形网格拉深后变成了矩形，如果忽略板厚的微小变化，可以近似认为拉深前、后网格保持了原有的初始面积。由于拉深变形的主体实际

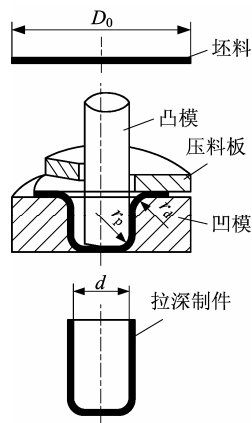


图 7-1 拉深成形

就是这些小网格的形状、尺寸变化，因此，利用这些原始的小扇形拉深后变成等面积小矩形的现象，可以近似地描述板料拉深变形的过程如下。

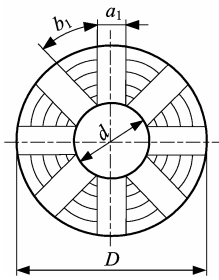


图 7-2 板坯与拉深制件的材料分配关系

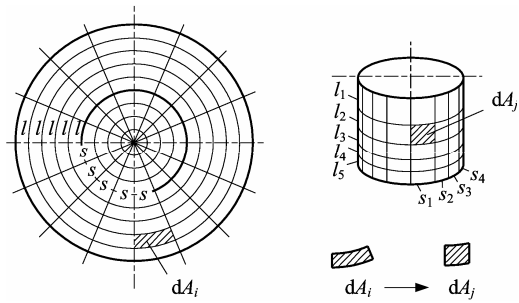


图 7-3 板坯表面网格拉深后的变化

1) 在凸模接触板坯的拉深初始时刻，由于压料压力、压料面和凸模底表面摩擦力的作用，在凸模底部和压料面上法兰材料还没来得及反应的瞬间，变形首先发生在凸、凹模之间的间隙处。使凸模圆角附近板料受到较大且带有冲击性的径向拉变形，板坯表面形成所谓冲击线。凸模下行，凹模肩圆角处板料在径向拉伸变形的同时，产生了一定量的周向压缩变形。

2) 随着凸模继续下行深入凹模，压料面上法兰材料克服垂直于板面的压料力和压料板及凹模表面的摩擦力，开始向凹模口方向移动。每个小扇形单元体之间相互作用，产生半径方向的拉伸应力 σ_1 及圆周切线方向上的压缩应力 σ_3 。靠近凹模口附近，径向拉变形增大，而板坯外缘处，周向压缩变形大于径向拉伸变形，且板厚增加显著。

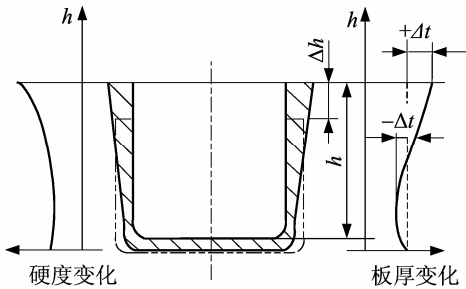


图 7-4 沿直壁高度方向硬度和厚度的变化

3) 压料面上法兰材料在产生塑性变形的同时，逐渐被拉至凹模口，并在凹模口肩圆角处产生弯曲、反弯曲变形之后形成圆筒侧壁。

4) 拉深过程中，如果忽略板料各向异性影响，法兰同一半径的圆周线上各点变形相同，但沿半径线上各点变形量因半径大小而异。如图 7-4 所示，形成圆筒后的筒口部分板厚增加，并且因变形硬化导致板面硬度增加。

二、拉深变形过程中板材的应力应变状态

拉深成形过程中，由于材料所处位置不同，导致各部分的变形状态不同。如图 7-5 所示，根据应力应变的分布情况，可将其分为五个不同的变形区。

1. 凸缘部分

凸缘或称法兰，是拉深的主变形区，板面内变形路径如图 7-6 所示。板料随凸模下行被拉向凹模口，受径向拉应力 σ_r 作用产生径向拉伸变形 ϵ_r 。在流向凹模口的同时，由于流入半径相对小，材料必须在圆周方向上缩小线长度，在周向压缩应力 σ_θ 作用下产生周向压缩变形 ϵ_θ 。因此，如果忽略板厚方向变形，法兰部材料处于平面应变的拉压变形区。法兰板料变形中，压缩应变始终占优势，即 $|\epsilon_\theta| > \epsilon_r$ ，这种趋势在法兰外缘处最为明显，随着靠近凹模口附近逐渐减弱。

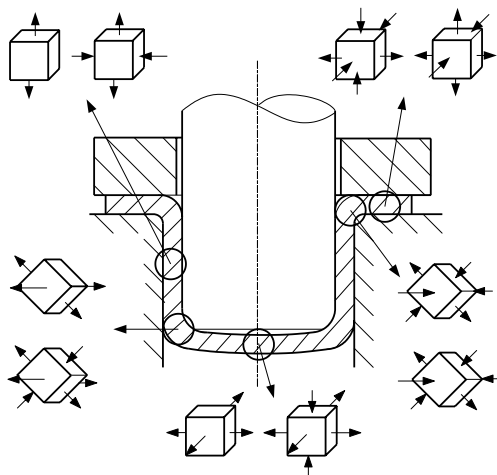


图 7-5 拉深过程中各特征区的应力应变分布状态

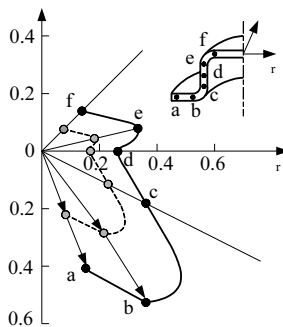


图 7-6 拉深应变路径简图

实际拉深成形中，法兰板料必然产生板厚变化，通常板厚变形分为两种情况。不压料拉深时，板厚方向的应力 $\sigma_t=0$ ，板料流向凹模口时厚度方向上产生自由变形 ϵ_t ，处于板坯外缘部的材料变形程度最大， ϵ_t 也最大，板料增厚严重；压料拉深时，板厚方向上作用有压应力 σ_t ，材料移动时凹模与压料板工作表面之间产生摩擦力 μF ，由于材料流动阻力增大而使径向拉应力 σ_r 增大。在远离凹模口的外缘处，材料沿板厚方向的变形受到一定抑制，需要转移的材料多，使径向拉应力增大的同时，最大板厚应变 ϵ_t 仍产生在这里。因此，压料板与凹模工作表面之间的压料力基本作用在外缘处，即压料面上板料的流入阻力主要产生在该处。

2. 凹模肩圆角部

凹模肩圆角同样应分为点入口（线）**b**和出口点（线）**c**。入口点是指法兰流入凹模口的入口点，即凹模肩圆角弧线与压料平面的切点（线）。**b**点应力应变状态与压料面上倾向基本一致。所不同的是，进入凹模肩圆角部之后，板面内两向应变的比例发生了变化，即径向拉应变 ϵ_r 增大，而周向压缩应变的绝对值 $|\epsilon_\theta|$ 略有减小的趋势。

所谓出口点实际是指侧壁板料的脱模点（线），该处材料在径向拉应力 σ_r 的拉压作用下，经过弯曲、反弯曲（拉直）变形后被拉入凹模内孔，应力应变关系比较复杂。在圆周方向上，因凹模口径减小受切应力 σ_θ 作用而产生周向收缩变形 ϵ_θ 。板料脱离凹模肩圆角后，即进入侧壁板厚无拘束自由状态，通常认为变形接近于沿拉深方向的单向拉伸。因此，当忽略各向异性影响的情况下， $\epsilon_\theta \approx -\epsilon_t$ ，该点在应变路径简图上处于 $\epsilon_\theta = -\epsilon_t/2$ 线上。即在板厚方向上，因在凹模肩圆角上弯曲、反弯曲变形时可能作用有板厚方向压应力 σ_t 。

3. 侧壁部分

侧壁部分板料的一端是凹模脱模点**b**，另一端是凸模脱模点**d**，即属于拉-压变形向双拉变形的过渡区。如果变形是连续的，那么必然有一点处于单向拉伸变形状态，如图中**d**点。侧壁材料主要传递由法兰流动变形抵抗引起的凸模力，拉深方向上产生伸长变形 ϵ_r 。板料在凸、凹模间隙中处于厚向自由状态，如果看作平面应变，则其切向应力 $\sigma_\theta = \sigma_r/2$ 。实际上，

拉深时这部分板料随拉深深度增加而略有变薄, 如果认为 $\sigma_t \neq 0$, 且 ϵ_θ 也很小, 即而可看作单向拉伸, 此时, 轴向拉应变 $\epsilon_r = (\epsilon_\theta + \epsilon_t)/2$ 。但实际上, 对于非变薄拉深, 随着拉深深度增大, 因半径略有减小而产生很小的周向压缩变形 ϵ_θ 。

4. 凸模肩圆角部

凸模肩圆角处板料变形通常可按肩圆角与底部平面及侧壁面的两条相切线划分, 如图7-6中的e点(线)和f点(线)。其中, f点变形处于双拉区。板料在径向拉应力 σ_r 作用下产生较小拉应变 ϵ_r , 同时因圆周方向上产生一定线伸长, 而作用有较小的周向拉应力 σ_θ , 如果不计板料各向异性的影响, 该点(线)材料处于两向等值拉伸, 接近于胀形, 即 $\epsilon_r = \epsilon_\theta$ 。通常, 板厚略有减薄(减薄率1%~3%), 由于凸模底部摩擦阻力影响, 板料径向流动变形很小。但随着靠近凸模边缘, ϵ_r 值和 $|\epsilon_t|$ 值明显增大。当法兰变形抵抗较强时, 该处材料将有一部分在径向拉应力 σ_r 作用下流向肩圆角。

另一点(线)e同样处于双拉区, 但 $\epsilon_r > \epsilon_\theta$, 产生双向不等值拉伸。该处板料承担着侧壁伸长变形和法兰流动变形抵抗, 被拉压在凸模肩圆角上产生弯曲、反弯曲变形, 同时需克服凸模肩圆角表面的摩擦阻力流向侧壁。因而径向拉应力 σ_r 最大, 板厚变薄最严重, $|\epsilon_t|$ 最大。特别是拉深初期位于凸模肩圆角处的板料, 变形硬化较弱, 离开脱模点时又伴随板面增加变形, 当板厚过薄而达到材料强度极限时, 即产生断裂, 因而通常称此处为断裂危险区。

三、拉深变形的近似解析

现从工程应用角度出发, 对圆筒形件拉深进行近似解析。拉深中各部分几何及应力应变关系如图7-7所示, 其中应力应变符号同前述说明。

1. 不压料拉深时平面应变条件下的近似解析

为了简化分析, 假设拉深过程中板料厚度变化较小而近似认为不变, 即将法兰视为平面应变状态, 且不考虑压料力的影响, 可作如下近似解析。

首先, 写出半径方向的受力平衡方程式

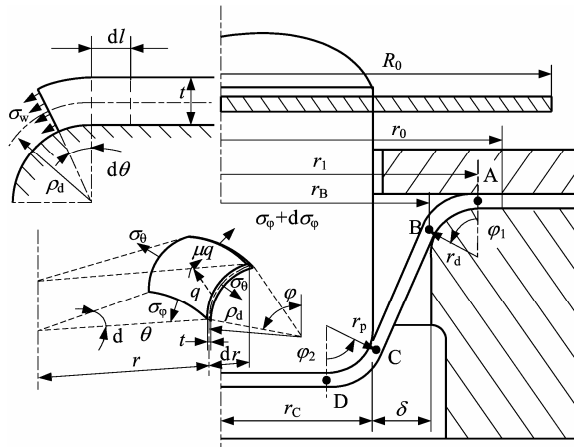


图7-7 筒形件拉深中各部分几何及应力应变关系

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (7-1)$$

在法兰部 $\sigma_r \geq 0 > \sigma_\theta$, 密席斯准则可简化成 $\sigma_r - \sigma_\theta = \beta \sigma_s$ 的形式(应力状态系数 β 的变化范围为1~1.155), 代入(7-1)式并进行积分可得 $\sigma_r = C_1 - \sigma_s \cdot \ln r$ 。法兰外缘 $r = r_0$ 处 $\sigma_r = 0$, 因此

$$\sigma_r = \beta \sigma_s \cdot \ln \frac{r_0}{r}, \quad \sigma_\theta = -\beta \sigma_s \left(1 - \ln \frac{r_0}{r} \right) \quad (7-2)$$

在法兰内缘, 即上述凹模入口 $r = r_c + \delta + r_d$ 处, 利用凹模口肩圆角A点处子午线应力 σ_ϕ

与法兰内缘径向应力 σ_{r1} 相等的条件可得

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_{r1} = \beta\sigma_s \ln \frac{r_0}{r_c + \delta + r_d}, \quad \sigma_{\theta1} = -\beta\sigma_s \left(1 - \ln \frac{r_0}{r_c + \delta + r_d} \right) \quad (7-3)$$

同样, 在凹模肩圆角上, 将 $\sigma_{\varphi} - \sigma_{\theta} = \beta\sigma_s$ 的关系代入力的平衡方程式(7-1)中, 解得 $C_2 = \beta\sigma_s \left(\ln r + \ln \frac{r_0}{r_c + \delta + r_d} \right) = \beta\sigma_s \ln r_0$ 于是

$$\sigma_{\varphi} = \beta\sigma_s \cdot \ln \frac{r_0}{r}, \quad \sigma_{\theta} = -\beta\sigma_s \left(1 - \ln \frac{r_0}{r} \right) \quad (7-4)$$

凹模肩圆角上点 B 处 $r = r_B = r_c + \delta + r_d - (r_d + t/2)\sin\varphi$, 即脱模点的子午线应力

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi B} &= \beta\sigma_s \cdot \ln \frac{r_0}{r_c + \delta + r_d - (r_d + t/2)\sin\varphi_1} \\ \sigma_{\theta B} &= -\beta\sigma_s \cdot \left(1 - \ln \frac{r_0}{r_c + \delta + r_d - (r_d + t/2)\sin\varphi_1} \right) \end{aligned} \quad (7-5)$$

拉深中, 板坯被拉至凹模肩圆角上时受到弯曲变形, 此后又被拉直。因此, 拉深应力中应该附加一个弯曲、反弯曲应力。忽视摩擦的影响, 这部分应力可以近似取为 $2\sigma_w = \beta\sigma_s t / (2\rho_d)$ 。进而, B 点($r = r_B$)的子午线应力和周向应力

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi e} &= \beta\sigma_s \left\{ \ln \left[\frac{r_0}{r_c + \delta + r_d - (r_d + t/2)\sin\varphi_1} \right] + \frac{t}{2(r_d + t/2)} \right\} \\ \sigma_{\theta e} &= -\beta\sigma_s \left\{ 1 - \ln \left[\frac{r_0}{r_c + \delta + r_d - (r_d + t/2)\sin\varphi_1} \right] - \frac{t}{2(r_d + t/2)} \right\} \end{aligned} \quad (7-6)$$

2. 压料拉深时平面应变条件下的简化解析

假设作用于法兰板面上的压料力 F_H 恒定不变, 且法兰材料与压料板和凹模工作表面之间的摩擦系数为常数, 即 μ 为定值。从生产实际出发, 压料力的分布应根据板料材质、厚度及法兰变形面积等因素分别对待。也就是说, 可分为压料力均匀作用于拉深过程中的法兰板面上, 和可能集中作用在法兰外缘一局部区域中两种情况来分别对待。

平面应变状态下法兰径向应力和周向应力分别为

(1) 压料力均匀作用于法兰表面

假设拉深过程中压料面上板坯瞬时半径为 r_0 , 拉深凸模直径为 r_c , 其他符号同上。压料力 F_H 均匀作用于法兰表面时, 仅考虑 F_H 单独作用使板料厚度方向产生的瞬时压料应力

$$\sigma_H = \frac{F_H}{\pi[r_0^2 - (r_c + \delta + r_d)^2]} \quad (7-7)$$

由于将法兰变形看作平面应力状态, 因此, 仅计及压料力在材料流动方向上产生作用时的径向力平衡方程

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} + \frac{2\mu F_H}{\pi[r_0^2 - (r_c + \delta + r_d)^2]} \cdot t \quad (7-8)$$

将米西斯屈服准则的简化式 $\sigma_r - \sigma_\theta = \beta\sigma_s$ 代入上式积分, 同理, 在法兰外缘 $r = r_0$ 处 $\sigma_r = 0$, 可得

$$\sigma_r = \beta\sigma_s \cdot \ln \frac{r_0}{r} + \frac{2\mu F_H}{\pi[r_0^2 - (r_c + \delta + r_d)^2]} \cdot t (r_0 - r) \quad (7-9)$$

由此可得压料面上板坯在凹模入口, 即凹模肩圆角与工作平面相切处的径向应力为

$$\sigma_{rA} = \beta\sigma_s \cdot \ln \frac{r_0}{r_c + \delta + r_d} + \frac{2\mu F_H}{\pi [r_0 + r_c + \delta + r_d]} \cdot t \quad (7-10)$$

凹模口内板料脱模点处的径向应力

$$\sigma_{\phi B} = \beta\sigma_s \cdot \ln \frac{r_0}{r_c + \delta + r_d - (t/2 + r_d)\sin\phi_1} + \frac{2\mu F_H}{\pi [r_0 + r_c + \delta + (t/2 + r_d)\sin\phi_1]} \cdot t \quad (7-11)$$

实际, 进入凹模口后, 上述径向应力 σ_r 可以写作 σ_ϕ 。同理, 可以求出上述两点处的周向应力 (从略)。

(2) 压料力集中作用在法兰外缘

实际拉深成形中, 法兰外缘板厚增厚最严重, 通常认为压料力集中作用在外缘板厚最厚的地方。此时, 作用于法兰外缘处的径向应力 σ_{r0} 与摩擦力 $2\mu F_H$ 的作用平衡, 即 $2\pi r_0 t \sigma_{r0} = 2\mu F_H$ 。将 $r = r_0$ 处, $\sigma_r = \sigma_{r0} = \mu F_H / (\pi r_0 t)$ 的边界条件代入式 (7-1) 的积分结果中, 可以得到

$$\sigma_r = \beta\sigma_s \ln \left(\frac{r_0}{r} \right) + \frac{\mu F_H}{\pi r_0 t} \quad (7-12)$$

如果计及板坯通过凹模肩圆角时产生的弯曲、反弯曲变形, 并认为其变形能与变形功相等, 由此产生的附加应力

$$\Delta\sigma_r = \beta\sigma_s \left(\frac{t}{2} \right)^2 / [t(t/2 + r_d)\sin\phi] = \beta\sigma_s \frac{t}{4(t/2 + r_d)\sin\phi_1} \quad (7-13)$$

如果再计入凹模肩圆角处弯曲、反弯曲拉入时因摩擦而增加的应力倍率 $e^{\mu\phi}$, 拉深总应力可以表示为

$$\begin{aligned} \sigma_{\phi B} &= \left[\beta\sigma_s \ln \left(\frac{r_0}{r} \right) + \frac{\mu F_H}{\pi r_0 t} \right] \cdot e^{\mu\phi_1} + \beta\sigma_s \frac{t}{4(t/2 + r_d)\sin\phi_1} (1 + e^{\mu\phi_1}) \\ &= \left\{ \beta\sigma_s \ln \left[\frac{r_0}{r_c + \delta + r_d - (t/2 + r_d)\sin\phi_1} \right] + \frac{\mu F_H}{\pi r_0 t} \right\} \cdot e^{\mu\phi_1} + \beta\sigma_s \frac{t}{4(t/2 + r_d)\sin\phi_1} (1 + e^{\mu\phi_1}) \end{aligned} \quad (7-14)$$

上述推导过程中, 没有考虑金属板料加工硬化和各向异性等所产生的影响, 可作为分析参考。

第二节 拉深成形极限及拉深系数

一、拉深成形极限

拉深成功与否, 主要由断裂、起皱及各种形状不良所决定, 同时受到压料条件、工具形状、板坯形状及润滑摩擦等变形条件的影响。一般, 当拉深制件产生断裂或形成的皱曲已经影响到使用性能或外表美观性时, 即认为达到了成形极限。

1. 拉深断裂及防止措施

(1) 拉深断裂现象

拉深的成形极限是由法兰变形抵抗与制件壁部材料抗断裂能力的平衡来决定的，所以，来自于各种成形条件的影响，几乎都可能由断裂的形式表现出来。板材拉深成形中产生的断裂，根据断裂的产生原因、产生形式及位置不同，通常可以分为拉深断裂、胀形断裂等。其中，拉深断裂的形成机理比较复杂，特别是产生在直壁部分的断裂，由于板坯连续且没有边界，因而与普通拉伸断裂不同。通常，断裂的产生首先经过塑性失稳，即缩颈的发生，接下去产生局部缩颈，变形集中在断裂部位，然后与板分离。

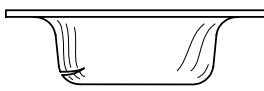


图 7-8 拉深断裂

如图 7-8 所示，拉深断裂通常发生在侧壁部分。特别是凸模肩圆角与侧壁交界附近，板料在拉深过程中始终处于双向不等值拉伸状态。断裂部材料在拉深初始时期，没有经过凹模肩圆角处的弯曲、反弯曲变形，在凸模肩圆角处受到纵向、周向拉伸和弯曲变形而减薄。当法兰变形抗力超过该处材料强度时，板材发生断裂。有时，圆筒形拉深的断裂也会产生在靠近法兰的侧壁部分，即通常所说因塑性变形过大引起的塑性破坏。

拉深断裂时的受力变形状态与薄壁筒轴向拉伸相似，不妨用后者产生塑性失稳时的临界应力作为拉深断裂危险处材料的抗拉强度

(2) 抗拉深断裂强度的估算

拉深断裂时的受力变形状态与薄壁筒轴向拉伸相似，不妨用后者产生塑性失稳时的临界应力作为拉深断裂危险处材料的抗拉强度

$$\sigma_k = 2 \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^{1+n} \sigma_b \frac{t}{r_c} \quad (7-15)$$

式中 n ——材料的硬化指数；

σ_b ——材料的抗拉极限 (MPa)。

对于产生在凸模肩圆角处的拉深断裂，需要考虑板坯受力向侧壁部流入时，在肩圆角处产生的弯曲、反弯曲变形时的弯曲应力，因为这个弯曲应力使得材料的抗拉强度有所降低。如果利用 (7-13) 的结果，凸模肩圆角处材料的实际抗断裂应力为

$$\sigma_k = 2 \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^{1+n} \sigma_b \frac{t}{r_c} - \beta \sigma_s \frac{t}{4(t/2 + r_p) \sin \varphi_2} \quad (7-16)$$

式中 r_p ——凸模肩圆角半径 (mm)；

φ_2 ——凸模肩圆角处板料包角 ($^\circ$)。

上述计算通过对如图 7-9 所示纯铜薄板圆筒形拉深实验验证，基本正确。但由于材料性能、模具尺寸及其他变形条件等改变，略有出入。一般认为断裂的产生是由于法兰变形程度过大，即拉深比 D/d 过大，当板坯直径超过一定尺寸之后，拉深载荷上升梯度急剧增加，导致成形初期即产生断裂。该实验采用自制石墨牛脂混合润滑剂进行压料面润滑，测得摩擦系数 $\mu < 0.1$ 。当改用润滑性能较差的极压拉深油润滑时， $\phi 70$ mm 的板坯在拉深初期即产生断裂。拉深比对断

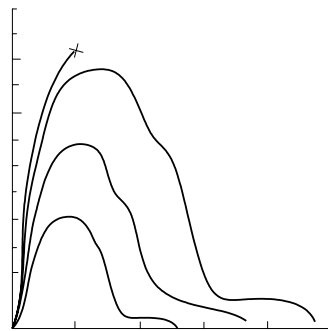


图 7-9 拉深力-行程曲线

裂的影响固然重要,但也不能忽视由于法兰压料力所产生的流入摩擦阻力过大,使断裂危险点处拉应力超过材料断裂极限导致拉深断裂的情况。上述理论计算公式没能计入其他变形条件的影响,可能会与实际生产有所偏差,因此,还有待于进一步修正。

(3) 防止措施

与起皱和各种形状不稳定性相比较,断裂是直接宣告拉深失败的信号。因此,断裂是拉深成形生产中最主要的工艺问题。抑制拉深断裂,通常需要从多方面影响因素来考虑。

单纯从材料的抗断裂强度来看,根据(7-16)式可知,选用屈强比 σ_s/σ_b 较小、硬化指数 n 较大的材料,可以相对提高拉深断裂危险处材料的抗断裂能力。另外,作为深拉深板料,还应具有较高的均匀伸长率、断面收缩率以及较小的各向异性系数等。

另一方面,则是如何降低断裂危险处材料变形应力的工艺问题。对于普通轴对称拉深来说,如工艺允许,增大凹模肩圆角半径和适当减小肩圆角表面粗糙度是防止断裂产生的有效措施。此外,还可以降低过大的压料力,采用适当的润滑剂减小法兰流入摩擦阻力,改善压料面表面粗糙度等等,都可以从不同角度来达到抑制断裂发生的目的。

2. 起皱及防止措施

(1) 拉深起皱

不压料拉深时,法兰厚向应力 $\sigma_t \approx 0$ 。利用塑性变形体积不变条件 $\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_t = 0$,将式(7-4)的关系代入简单加载条件的应力应变关系 $\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\varepsilon_r - \varepsilon_\theta} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_t}{\varepsilon_\theta - \varepsilon_t}$ 中,经整理可得板厚应变

$$\varepsilon_t = -\frac{1 - 2\ln\frac{r_0}{r}}{2 - \ln\frac{r_0}{r}}\varepsilon_\theta \quad (7-17)$$

利用上式并根据法兰周向应变 $\varepsilon_\theta < 0$ 的关系,可以近似判断法兰板厚变形的分布情况。当 $\ln(r_0/r) = 1/2$ 时,板厚应变 $\varepsilon_t = 0$ 。即在半径 $r = 0.607r_0$ 的圆周线上,板厚不发生变化,该圆周线上 $\varepsilon_r = -\varepsilon_\theta$,点应变位于图7-6中平面应变等拉-压线上;当 $r > 0.607r_0$ 时,上式分子中 $2\ln(r_0/r) < 1$, ε_t 与 $-\varepsilon_\theta$ 符号相反,板厚应变 $\varepsilon_t > 0$,说明板厚增厚变形;如果 $r < 0.607r_0$,则 ε_t 与 $-\varepsilon_\theta$ 同号,板厚应变 $\varepsilon_t < 0$,板厚减薄变形。也就是说,在不压料拉深时,如果忽略板材各向异性的变形条件影响,从凹模口至 $r = 0.607r_0$ 区域内,法兰产生板厚减薄变形,而从 $r = 0.607r_0$ 开始到法兰外缘为板厚增厚区。



图7-10 拉深起皱

在薄板拉深成形中,板厚尺寸与板面尺寸相比显著小,上述板料增厚区材料 ε_t 值过大时,对失稳的抵抗减弱而变得容易产生法兰皱曲,如图7-10所示。起皱的产生影响拉深制件的外观质量,并容易引起去掉时的断裂,还会加剧工具表面的磨损。

拉深成形过程中,法兰最外端板料所受周向压应力最大,当超过材料临界压应力时即发生起皱,因此,通常法兰外缘处首先发生起皱。法兰起皱类似于压杆的塑性失稳,且与变形板料的相对厚度 $t/(r_0-r)$ 有关。随拉深成形的进行,切向压应力和压缩变形量不断增大,板材失稳起皱的趋势也不断增大。但由于法兰变形区不断缩小,板厚增加的同时,相对厚度 $t/(r_0-r)$ 值也不断增大,即抗塑性失稳能力也随拉深成形的进行不断增强。因此,起皱与否取决于这两个影响因素的相互平衡。