

大锥度缩口类零件成形 关键技术研究

许兰贵 著



Key Technology of Thin-Walled Nosing Tube Forming with Large Tapers



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

大锥度缩口类零件成形 关键技术研究

许兰贵 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

• 北京 •

内 容 提 要

本书主要从两方面展开研究:为达到减轻产品重量以节省材料的目的,对包装罐进行变壁厚结构优化;为得到个性化的外观,对大锥度包装罐的成形技术进行研究。

本书主要内容包括:铝罐挤压及缩口过程的计算机数值模拟理论、变壁厚反挤压模面优选、缩口变形力学分析、带直管薄壁筒形件缩口变形颈口弯曲变形研究、大锥度铝罐成形工艺分析及计算机数值模拟等。

本书论述严谨,结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,可供从事机械加工工程技术人员参考使用,是一本值得学习研究的著作。

图书在版编目(CIP)数据

大锥度缩口类零件成形关键技术研究 / 许兰贵著

— 北京:中国水利水电出版社,2017.6

ISBN 978-7-5170-5438-2

I. ①大… II. ①许… III. ①罐头空罐—成型—研究
IV. ①TS293

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第122256号

书 名	大锥度缩口类零件成形关键技术研究 DA ZHUIDU SUOKOU LEI LINGJIAN CHENGXING GUANJIAN JISHU YANJIU
作 者	许兰贵 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:sales@waterpub.com.cn 电话:(010)68367658(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京亚吉飞数码科技有限公司
印 刷	三河市同力彩印有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 9.5印张 123千字
版 次	2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

单片铝质气雾罐由于其阻气性能良好,防潮性极佳,而且遮光性能强、便于印刷,在包装行业中应用极广。随着材料成本的提高,减轻单罐重量,降低生产成本,以达到提高利润的目的是很多企业的追求目标。同时随着人们对于产品的个性化、多样化、品位等需求越来越高,个性化的外观设计及其生产实现也成为包装罐生产一个需要考虑的重要方面。总之,制造出重量更轻、更省物料、更环保、更具视觉魅力的包装新产品是行业的发展趋势。鉴于此,本书主要从两方面展开了研究:为达到减轻产品重量以节省材料的目的,对包装罐进行变壁厚结构优化;为得到个性化的外观,对大锥度包装罐的成形技术进行了研究。主要研究内容如下:

变壁厚反挤压模面优选。建立了形成变壁厚薄壁铝罐筒形毛坯的变直径反挤压模型,开发了能够形成变壁厚薄壁铝罐筒形毛坯的变直径反挤压凹模,其型面结构与传统冷挤压凹模相异,且只需通过一次反挤压就能达到成形的目的。通过理论研究和有限元分析相结合的方法,揭示了饼型毛坯通过变直径反挤压凹模进行反挤压形成变壁厚筒形件的金属流动规律,建立了阶梯型、直线型、余弦线型、椭圆线型四种过渡曲面的变壁厚筒形件反挤压有限元模型,得出采用椭圆线型过渡型面的变直径凹模进行反挤压可以获得理想的变壁厚筒壁的结论,同时椭圆线型过渡型面凹模对挤压成形载荷、金属流动和应力场的影响都优于其他几种型面,而且能够有效的降低变壁厚制件的偏摆缺陷,并通过理论解析进一步证明了椭圆型过渡型面优于其他几种型面;讨论了

几种工艺参数对挤压成形的影响,优选出最优的工艺参数组合。

大锥度缩口变形理论分析。采用轴对称回转壳体的薄膜理论对锥模缩口和圆弧模缩口变形过程进行力学分析,分别建立了带出口直管的圆弧缩口模和圆锥缩口模的力学模型,并在此基础上比较了两种模具结构对成形力的影响。研究表明:圆弧形缩口模具在降低缩口力、抑制变形、提高管材的缩口极限(在圆筒处出现屈曲)是很有效的,因此在半锥角比较大时,在锥模入口处引入圆弧形结构是十分有效的;根据锥形模具缩口时管坯的受力模型,研究了半锥角较大时锥形缩口变形模式的转化条件,得出了最大锥形缩口半锥角为 $50^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 的结论。

缩口变形颈口弯曲变形研究。通过对薄壁圆筒形工件缩口成形中颈口弯曲部分进行力学分析,导出了出口处自由弯曲半径的计算公式,并通过实验进一步证明了该公式的正确性。由实验和模拟结果知:出口弯曲圆弧半径随半锥角的增大而减小;随出口端直径和壁厚的增大而增大,并通过零件的成形过程验证了该公式的实用性,可以作为设计带直管缩口件颈口弯曲圆弧半径设计的依据,能够满足一般工程计算的需要。

大锥度铝罐成形工艺分析及数值模拟验证。提出了以多道次圆弧缩口和滚压加工相结合的成形工艺,解决了大锥度薄壁铝罐的成形难题,开发了与该工艺相应的新型模具。该工艺根据零件薄壁、半锥角大的特点,采用在圆锥模口部引进圆弧的结构;建立了大锥度薄壁铝罐成形的有限元分析模型,对圆弧缩口变形过程及滚压变形过程进行了模拟分析,并与实验结果进行比较,证明了该工艺过程的可行性和有效性。

本书在写作过程中加入了自己的研究积累,参考并引用了大量前辈学者的研究成果和论述,在此向相关内容的原作者表示诚挚的敬意和谢意。鉴于作者水平有限,加之时间仓促,存在不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2017年3月

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 本书写作背景及意义	1
1.2 铝罐成形的研究方法	6
1.3 冷挤压研究现状	10
1.4 缩口工艺研究进展	14
1.5 本书的主要研究内容	17
第 2 章 铝罐挤压及缩口过程的计算机数值模拟理论	19
2.1 板壳描述	19
2.2 大锥度缩口成形中的动力显式有限元分析方法	21
2.3 单片铝罐管坯反挤压成形的刚塑性有限元法	25
2.4 有限元模拟中的几个问题的处理	29
2.5 动力显式有限元模拟(ABAQUES/Explicit) 计算实例	32
2.6 本章小结	33
第 3 章 变壁厚反挤压模面优选	34
3.1 变壁厚反挤压技术	34
3.2 反挤压凹模的型面对变壁成形的影响概述	36
3.3 变壁型腔处挤压凹模型腔曲线数学描述	37
3.4 型腔曲线优选模拟分析	38
3.5 凹模变壁处型腔曲线优选模拟	42
3.6 变壁厚反挤压成形理论解析	50
3.7 工艺参数对反挤压成形的影响	54

3.8	最优工艺参数组合模拟	62
3.9	本章小结	68
第4章	缩口变形力学分析	69
4.1	轴对称回转壳体的薄膜理论	69
4.2	缩口变形分析与建模前提	72
4.3	带出口直管的锥形缩口力学分析	73
4.4	带出口直管的圆弧形缩口力学分析	79
4.5	圆弧形缩口模与圆锥形缩口模比较	83
4.6	锥形模缩口的成形极限	86
第5章	带直管薄壁筒形件缩口变形颈口弯曲变形研究	96
5.1	引言	96
5.2	分析模型	97
5.3	实验验证	101
5.4	影响出口弯曲半径的因素	103
5.5	带直管的小出口圆弧薄壁圆筒件缩口 成形实例	107
5.6	本章小结	108
第6章	大锥度铝罐成形工艺分析及计算机数值模拟	110
6.1	大锥度薄壁铝罐缩口成形工艺分析	110
6.2	管坯圆弧缩口变形过程的计算机模拟	113
6.3	圆弧面滚压成形及金属流动规律分析	119
6.4	大锥度铝罐成形实验研究	124
6.5	本章小结	131
第7章	本书总结	132
7.1	主要结论	132
7.2	创新点	134
7.3	有待进一步研究的问题	134
参考文献		136

第 1 章 绪 论

1.1 本书写作背景及意义

随着社会的进步和科学技术的发展,塑性成形生产中对零件形状的复杂多样性及尺寸的精度要求越来越高。传统的粗放的塑性成形加工技术不能满足市场、信息、环境和资源可持续发展的要求^[1]。因此,作为先进制造技术(Advanced Manufacturing Technology)重要组成部分的先进塑性加工技术迎来了新的发展契机^[2-5]。尤其在铝质气雾罐包装业,随着人们对于产品的个性化、多样化、品位等需求越来越高,单片罐的罐形和产量在不断增加,并已成为一些产品促销的重要手段。它包括滚筋罐、膨胀罐、浮雕罐以及兼具滚筋、浮雕和膨胀特点的复合异形罐等(见图 1-1)。

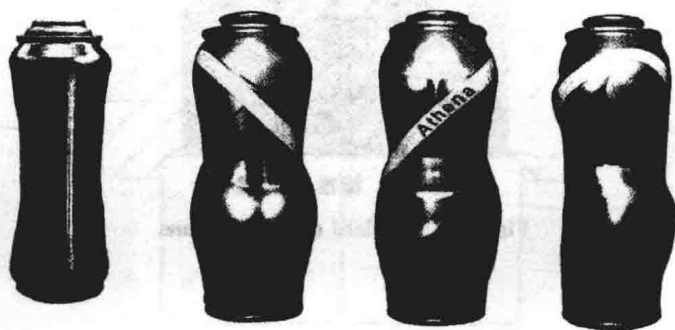


图 1-1 铝罐外形

Fig. 1-1 The shape of aluminium cans



图 1-1 铝罐外形(续图)

Fig. 1-1 The shape of aluminium cans

迄今为止,国产的气雾罐几乎都是标准的圆柱形,如图 1-2 所示。然而,异形罐的质量标准与普通罐相同,价格却比普通罐高 10%~15%。我国在异形罐的设计与制造方面技术落后,尤其在制造大锥度铝罐时经常出现口部起皱现象,如图 1-3 所示。所谓大锥度铝罐是指铝罐口部为锥形缩口,但锥形半锥角大于 40° ,利用传统的锥形缩口工艺无法成形的罐型。

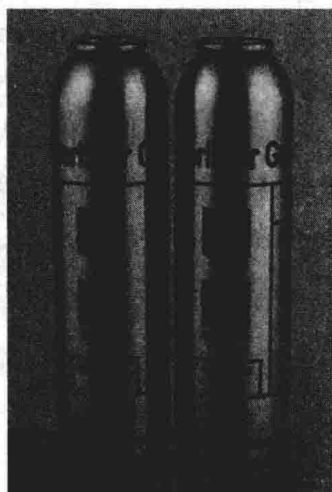


图 1-2 标准圆柱罐

Fig. 1-2 Standard cylindrical cans

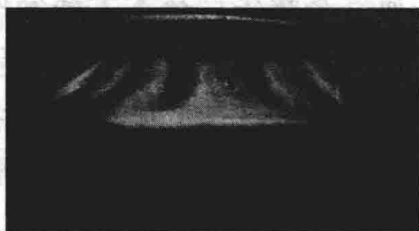


图 1-3 大锥度罐缩口起皱

Fig. 1-3 Nosing wrinkle of large taper can

为方便密封,铝罐的口部要进行卷边,一般要求缩口后保证 3mm 的出口圆弧,如图 1-4 所示。由于缩口后材料内部应力的释放,出口处会出现自由弯曲,如果出口圆弧设计不合理,会出现不贴膜现象,如图 1-5 所示,这些问题都限制了铝罐模具的自主开发。

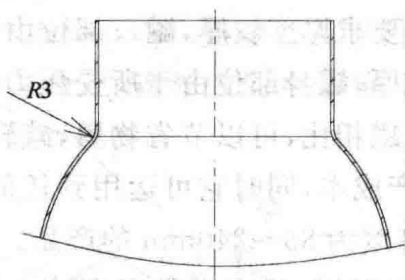


图 1-4 缩口口部圆弧

Fig. 1-4 The exit arc of nosing part

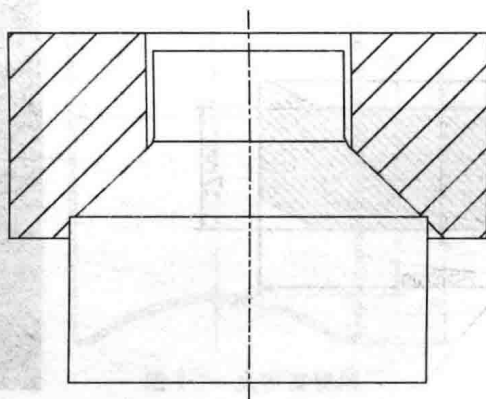


图 1-5 出口区变形示意图

Fig. 1-5 Sketch of the nosing exit deformation

国内的单片铝质气雾罐生产技术大部分依赖国外的设备供应商。尤其是制造铝罐的精密模具,国内自主开发能力有限,限制了新产品的开发和占领市场的能力。有关的市场信息还表明:对国外的高档次铝罐生产技术和设备方面也还存在技术引进壁垒,有些即使没有壁垒,引进价格也相当昂贵。

同时,随着人们生活质量的迅速提高,化妆品尤其是高档化妆产品的消费日趋旺盛,铝质气雾罐的用量必定逐年上涨。而铝质气雾罐是用单片铝材挤压成形,如图 1-6 所示。随着国产铝片材生产能力的提高,将促使企业最大限度地追求减少板料用量,减轻单罐质量,降低生产成本,以达到利润最大化,于是出现了变壁厚结构的气雾罐。变壁罐是指反挤压成形时罐的底部和口部的壁厚较厚而罐身的壁厚较薄的气雾罐。罐底厚度为了保证变形压力和爆破压力要求厚度较厚,罐口部位由于要保证收颈及卷边的质量也需要较厚,罐身部位由于所受压力较小可稍薄。它与均匀壁厚铝质气雾罐相比,可以节省物料,减轻单罐质量,提高材料利用率,降低生产成本,同时它可运用到任何直壁罐的生产,直径为 35~66mm,高度为 88~240mm 的产品。世界上制造的单片铝质气雾罐,多为直壁罐,只有少数国家的个别厂商有能力生产变壁罐。变壁罐生产技术在我国仍属空白项目。

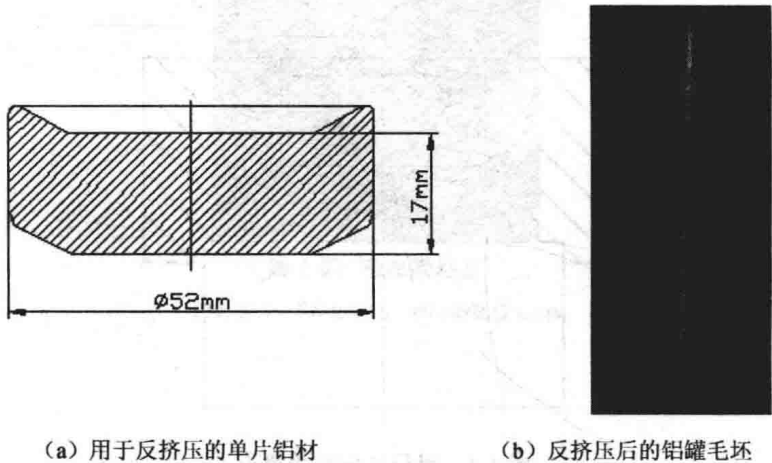


图 1-6 铝罐毛坯成形
Fig. 1-6 The blank forming of aluminium can

针对我国目前的单片铝罐生产现状和市场需求,本书对铝罐生产中的关键技术开展了研究,目的是开发出节约材料的罐身变壁厚技术和具有市场竞争优势的口部大锥度铝罐制造技术。单片铝罐制造工艺流程如下:铝圆片润滑→冷挤压成形→修边/刷光→清洗/烘干→内喷涂/烘干→涂底色/烘干→彩印/烘干→上光/烘干→收颈。本书对冷挤压成形和收颈两个主要工序进行研究。罐身变壁厚技术是通过改变原冷挤压成形阶段模具结构而实现;口部大锥度铝罐制造技术是利用模具使铝罐变形区先收缩为圆弧形,然后利用滚轮滚压成形的新工艺,同时通过合理设计过渡圆弧半径,保证正确的出口圆弧大小。利用该技术制造的零件具有工艺简单、工序少、成本低、质量好等一系列优点,甚至可以生产出用其他制造方法难以得到的零件。如图 1-7 所示的大锥度锥肩铝罐,锥肩半锥角达 54° ,出口圆弧半径为 3mm,该类锥肩在多种包装罐中均有出现,这样大的半锥角,若采用传统的缩径工艺来生产是不可能实现的。

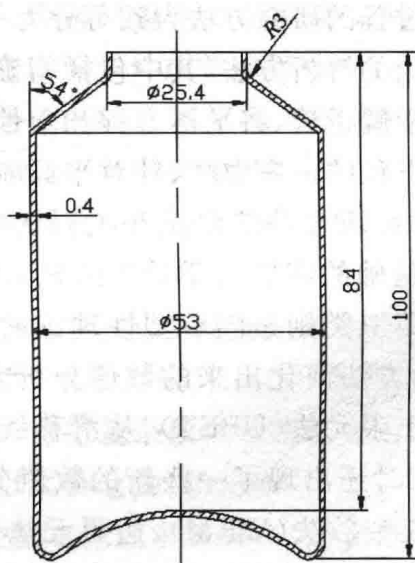


图 1-7 大锥度铝罐

Fig. 1-7 Large taper Aluminium can

概括来说,大锥度铝罐口部成形工艺是缩口与滚压组合,缩口部分类似于传统的圆弧缩口成形,圆弧面滚压成形工艺类似于

滚珠旋压成形工艺,如文献[6]研究的薄壁筒形件多道次滚珠旋压成形,但滚珠旋压属于多点局部成形,成形时变形区小,圆弧面滚压利用滚轮滚压成形,接触区域由点到线逐渐扩大,达到碾平表面的目的;又类似于大锥度管端回转扩口工艺,如文献[7]研究的管端回转扩口成型,同样是应用滚子滚压,本课题研究的是滚压缩口,而文献[7]研究的是滚压扩口。

由于变壁厚技术和大锥度罐口成形工艺具有很大的商业价值,这些成形技术日益受到包装行业的重视,在中山市科技攻关项目(20092A133)“异型薄壁罐成型技术的研发”的支持下,本书开展了变壁厚成形技术、大锥度铝罐缩口成形技术、铝罐出口圆弧半径控制方法、大锥度铝罐成形过程计算机模拟等研究。

1.2 铝罐成形的研究方法

金属塑性成形过程的研究方法大致可分为三类^[8-10]。第一类是基于经典塑性理论的解析方法,其中包括精确地联立求解塑性理论基本方程的数学解析法、将平衡方程和塑性条件简化后联立求解塑性理论基本方程的主应力法、针对平面应变问题提出的滑移线法、基于能量守恒原理的能量法和上限法等^[11-15];第二类是以实测数据为分析基础的实验力学研究方法,如视塑性法、网格法、密栅云纹法等;第三类则是随着塑性理论的发展和计算机应用的普及,由传统的方法演化出来的数值分析方法,其中包括从上限法发展而来的上限元法(UBET)、从滑移线法发展而来的矩阵算子法等,与此同时还出现了一些新的数值分析方法,如有限差分法(FDM)、加权余数法(WRM)、边界元法(BEM)和有限元法(FEM)等。

1.2.1 铝罐成形的解析方法

主应力法是最早用于分析塑性成形问题的一种解析方法。主应力法是一种简化的应力解析法,它又称近似数学解析法,通过对物体应力状态所作的一些简化假设,建立以主应力表示的简化平衡方程和塑性条件,然后联立求解接触面的正应力。

用主应力法解题的基本原理^[16]可以归纳如下:

(1)把变形体的应力—应变状态简化为轴对称问题或平面问题(包括平面应变状态和平面应力状态)。

(2)根据金属流动方向,沿变形体整个截面切取包括接触表面在内的基元体,或沿变形体部分截面切取包含有已知边界条件的表面在内的基元体,然后设作用于该基元体上的正应力都是均布的主应力。这样,就有可能在研究基元体的力的平衡条件时,获得简化的常微分平衡方程以代替精确的偏微分方程。

(3)假定模具与金属接触面上的边界条件为:正应力是主应力,剪应力服从库仑摩擦条件或常摩擦条件。

(4)假定材料是各向同性不可压缩的刚塑性材料,塑性变形沿整个体积是均匀的,原来的平面经变形后仍然保持平面。

(5)不考虑模具弹性变形,不考虑惯性力的作用,流动应力在所研究的特定变形区是常数。

由于上述原理是建立在假设基元体上作用着均布主应力的基础上,所以被称为“主应力法”。在有些著作中,考虑到该法的特点是切取基元体,和把复杂锻件分割为简单的轴对称问题和平面问题的单元,所以又称它为“切块法”。

利用主应力法基本原理求解锻压、拉拔等塑性成形工艺问题的变形力,数学演算比较简单,所得公式也能反映各种因素对变形力的影响。所以,主应力法是研究金属成形工艺和计算成形力的强有力的工具。

管材类成形属于平面应力问题,利用主应力解析方法可以解

释材料成形过程的力学机理。罗云华^[17]应用主应力法研究了管材端部的翻卷工艺;褚亮^[18]利用主应力法研究了缩口变形区材料在考虑材料厚度变化和加工硬化影响因素的情况下缩口力数学模型。文献[19]利用主应力法研究了缩口成形过程中管材的应力应变分布。文献[20-21]利用主应力法研究了反挤压和正挤压时挤压力的数学模型。本课题利用主应力法研究铝罐变壁厚反挤压过程挤压力随筒壁变化趋势,以确定最优凹模变壁过渡曲面;同时利用主应力法研究带出口直管的管坯缩口过程成形工艺力的数学模型。

1.2.2 铝罐成形的数值计算方法

实验力学研究方法所得的结果直接或间接地来自于实测数据,减少或回避了对变形条件及材料性能等方面的许多假设,所以它的突出优点是结果可靠。因此,实验力学研究方法长期以来一直是一种用于金属塑性成形过程的不可替代的研究方法。但是,此类方法的缺点是:难以简单、直接地给出各种影响因素在金属塑性成形过程中相互之间的关系,因而不便于进一步进行成形极限分析以及工艺参数的优化;而且,实验力学研究方法往往由于耗资大、周期长、局限性大等原因,有时因为大型问题或系统状态的复杂性,根本无法进行实验,因此难以满足研究和分析的需要。鉴于实验力学研究方法的特点,一般将实验用于理论解析与数值计算结果的验证。

数值分析方法的优点是:利用数学领域在数值分析方面的成就,克服了求解塑性理论中的三重非线性(几何非线性、物理非线性和边界条件非线性)偏微分方程组所遇到的数学方面的困难,可以给出复杂的金属塑性成形问题的数值解。此类方法中最为突出的是有限元法,利用该方法可在计算机上对金属塑性成形过程进行模拟和分析,求出应力场、应变场、变形所需的载荷和能量,可以给出成形过程中坯料几何形状、尺寸和性能的改变,预测

缺陷的产生和分析成形质量等。有限元法目前已成为研究塑性成形规律、材料变形行为及各种物理场的强有力的工具之一,并得到了广泛的应用^[22-25]。有限元数值模拟方法的优点是:功能强,精度高,解决问题的范围广,可以用不同形状、不同大小和不同类型的单元来描述任意形状的变形体,适用于任意速度边界条件,可以方便合理地描述模具形状,处理坯料与模具间的摩擦,考虑材料硬化效应、温度等各种工艺参数对成形过程的影响,可以获得成形过程中任意时刻的力学信息和流动信息,如应变场、速度场、应力场、位移场、温度场,预测缺陷的生成和扩展等^[26]。并可在计算机上虚拟实现成形过程,反复演示、计算和优化,这是其他研究方法所无法比拟的。

塑性有限元法分为两类:一类是流动型塑性有限元,包括刚塑性有限元与刚粘塑性有限元;另一类是固体型塑性有限元,包括弹塑性有限元与弹粘塑性有限元^[27-29]。弹塑性有限元能有效处理卸载问题,计算残余应力与残余应变;但计算工作量大,数学处理比较复杂。刚塑性有限元由于简化了有限元计算列式,使计算过程大为简化,计算效率较高,故常用于大变形金属塑性加工过程的模拟;缺点是不能处理卸载问题与计算回弹量及残余应力等^[30-36]。

在世界范围内,已推出了一些应用商用软件,如 ABAQUS、PAM-STAMP、LS-DYNA 3D、MARC、DEFORM、ANSYS 等,它们的出现标志着数值模拟技术向实际应用阶段迈出了重要的步伐。这些软件都采用弹塑性有限元方法,并在工业中得到了广泛的应用。结合铝罐成形工艺,本课题利用刚塑性有限元法(Deform)对铝罐毛坯反挤压进行数值计算,利用弹塑性有限元法(ABAQUS)对铝罐口部缩口成形进行数值计算。

1.2.3 本书的研究方法

从以上对金属塑性成形研究方法的分析可见,经典塑性理论

解析、数值分析、实验力学方法是该领域的主要研究方法,本书针对单片铝罐的轴对称特点,采用薄壳理论的主应力解析法→数值分析→实验验证等研究方法,进行变壁厚大锥度铝罐的成形关键技术研究。包括对于变壁厚反挤压技术,根据材料流动规律,通过合理设计凸凹模间隙,并通过数值模拟技术(deform)优选出合理的凹模过渡型面,实现理想的变壁厚;针对大的半锥角在缩口成形时的受力特点,进行大锥度缩口成形过程的工艺研究,并通过数值模拟软件(abaqus)研究成形过程的材料流动,最后通过工艺试验进行验证。

1.3 冷挤压研究现状

1.3.1 冷挤压工艺的研究

冷挤压技术是一种比较传统的成形工艺,经过几个世纪的发展,世界各国在挤压工艺的成形机理及数值计算方面做了大量的工作,形成了较为完善的理论体系,以下介绍了前人在冷挤压方面所做的研究工作。

冷挤压的加工方法^[37-38]是在室温的条件下,将冷态的金属毛坯放入装在压力机上的模具型腔内,在强大的压力和一定的速度作用下,迫使金属产生塑性流动,通过凸凹模的间隙或者凹模出口,挤出断面比毛坯断面要小的空心或实心零件。故冷挤压工艺按照挤压时金属流动方向与凸模运动方向的相互关系,基本分类如下:

(1)正挤压:金属的流动方向与凸模的运动方向相同,图 1-8(a)即为正挤压实心工件的情形。

(2)反挤压:金属的流动方向与凸模的运动方向相反,图 1-8(b)即为反挤压空心杯形工件的情形。