

刘建伟 著

金属薄壁管 冲击液压胀形技术

清华大学出版社



刘建伟 著

金属薄壁管

冲击液压胀形技术

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是关于金属薄壁管冲击液压胀形技术研究的专著,以金属薄壁管塑性成形为研究对象,采用理论分析、试验研究与数值模拟相结合的方法,系统揭示管坯在冲击液压载荷作用下的成形机理与变形规律。全书共分6章,主要内容包括金属薄壁管液压胀形基础、冲击液压胀形技术机理、冲击液压胀形管件塑性本构关系构建、冲击液压胀形数值模拟及试验方法研究等。

本书内容力求精练,讲求实用,图文并茂,深入浅出。既注重理论深度,又有丰富的试验与仿真实例。

本书可以作为高等院校机械制造、材料加工工程等专业本科生、研究生研究与教学用书,对从事金属塑性成形的专业技术人员也有一定的参考价值。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

金属薄壁管冲击液压胀形技术/刘建伟著. —北京:清华大学出版社,2017

ISBN 978-7-302-47553-8

I. ①金… II. ①刘… III. ①金属管—薄壁钢管—金属压力加工—塑性变形—研究 IV. ①U173.1 ②TG301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 129176 号

责任编辑:赵 斌 魏贺佳

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京泽宇印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:148mm×210mm 印 张:3.625 字 数:98千字

版 次:2017年6月第1版 印 次:2017年6月第1次印刷

印 数:1~1000

定 价:39.80元

产品编号:075755-01

基金资助

国家自然科学基金项目资助出版(51564007)

广西自然科学基金项目资助出版(2016GXNSFAA380135)

广西汽车零部件与整车技术重点实验室资助出版(2014KFMS05)

机电综合工程训练中心国家级实验教学示范中心资助出版

前言

FOREWORD



起源于 20 世纪 40 年代的管材液压胀形 (tube hydroforming) 技术, 是一种先进、特殊、精密的异型截面金属薄壁管成形技术, 随着近年来的不断发展, 已成为塑性加工领域的热点研究方向。但管材液压胀形必须依赖昂贵、庞大的外部供液设备和控制系统, 成形难度较大、效率较低。为克服管材液压胀形技术的不足, 本书在液压胀形和冲压成形基础上提出了一种新型复合成形方法——冲击液压胀形 (liquid impact forming)。这种方法兼具液压胀形和冲压成形的优点, 在轻量化、一体化制造领域具有很好的发展前景和应用价值。

本书采用理论分析、试验研究与数值模拟相结合的方法对金属薄壁管冲击液压胀形成形机理和变形规律展开较深入研究。具体研究内容如下:

(1) 金属薄壁管冲击液压胀形新方法。通过对冲击液压胀形基本原理的分析, 全面剖析了金属薄壁管在冲击载荷下的变形过程。分析了冲击载荷下的金属薄壁管的受力情况和成形内压力的形成机理, 获得了冲击载荷作用下金属薄壁管型腔体积变化量与内压力之间的理论模型, 为冲击液压胀形后续研究奠定了良好基础。

(2) 基于真实应力下数字散斑相关法的金属薄壁管塑性本构关系的构建。通过对真实应力作用下金属薄壁管的力学行为和变形特点的分析, 建立了管坯等效应力、等效应变的数学模型。利用自行设

计的自由胀形装置进行管坯胀形试验,并采用三维数字散斑动态应变测量分析系统在线获取管坯变形轮廓参数,通过三维点云重构和管坯力学模型获取管材轴向曲率半径、周向曲率半径、等效应力、等效应变等多组重要参数。以 Hollomon 模型对离散等效应力、等效应变组进行拟合,构建了试验条件下的塑性本构关系,与数值模拟结果具有较好的一致性。

(3) 金属薄壁管冲击液压胀形数值模拟研究。根据冲击液压胀形特点,采用瞬态动力学数值模拟(ANSYS WORKBENCH)和成形过程数值模拟(DYNAFORM)相结合的方法对金属薄壁管冲击液压胀形进行仿真。通过 ANSYS WORKBENCH 瞬态动力学数值模拟,得到了不同冲击载荷作用下金属薄壁管型腔内压力的变化规律,并结合理论分析对结果进行修正。利用获得的内压参数,进行 DYNAFORM 成形过程数值模拟,获得了不同冲击速度、相同模具条件下金属薄壁管的胀形参数。通过对其胀形高度、填充半径和壁厚分布的比较与分析发现,随着冲击速度的提高,管材成形效率相应提高,填充性和成形性受到一定影响,但均在可控范围之内。

(4) 金属薄壁管冲击液压胀形试验研究。为了进行金属薄壁管冲击液压胀形的验证试验,本书自主研制了一套简易胀形系统。对系统的整体结构、冲压部分、液压胀形部分等关键技术进行了探索性研究。采用与数值模拟相同的方案进行验证试验,结果表明,两者具有较好的一致性,符合液压胀形要求。

本书内容主要来源于作者在攻读博士期间和近年来所做的研究工作,并借鉴、引用、吸收了国内外同行专家的相关研究成果。作者期望本书的出版能对管材液压胀形技术的开发起到抛砖引玉的作用。

由于作者学识和水平有限,书中难免存在错误疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

作者

2017 年 3 月

目 录

CONTENTS



第 1 章 绪论	1
1.1 液压胀形技术	1
1.2 金属薄壁管液压胀形技术研究现状	3
1.2.1 成形方式研究现状	3
1.2.2 塑性本构关系研究现状	7
1.2.3 成形极限研究现状	9
1.3 冲击液压胀形技术的引出	12
第 2 章 金属薄壁管冲击液压胀形基础	14
2.1 引言	14
2.2 金属薄壁管冲击液压胀形原理	15
2.3 冲击液压胀形内压形成机理	16
2.3.1 体积改变量	17
2.3.2 液体内压	21
2.3.3 不同模具型腔下的内压分析	21
2.4 金属薄壁管不同状态下的受力分析	23
2.4.1 密封与预紧	24
2.4.2 合模启动	26

2.4.3	合模冲压	27
2.4.4	整形填充	27
2.5	本章小结	28
第3章	基于数字散斑相关法的管件塑性本构关系构建	29
3.1	引言	29
3.2	数字散斑相关法	30
3.3	塑性本构关系理论分析	32
3.3.1	本构关系模型选定	32
3.3.2	等效应力	32
3.3.3	等效应变	34
3.4	塑性本构关系试验系统	34
3.4.1	管材胀形装置	35
3.4.2	胀形参数采集装置	35
3.5	试验流程	36
3.5.1	试验准备	36
3.5.2	试验过程	40
3.5.3	后处理	42
3.6	塑性本构关系验证	46
3.6.1	DYNAFORM 简介	46
3.6.2	金属薄壁管成形数值模型的建立	47
3.6.3	模拟结果及分析	49
3.7	本章小结	51
第4章	金属薄壁管冲击液压胀形数值模拟研究	53
4.1	引言	53
4.2	冲击液压胀形数值模拟分析	53
4.3	基于 ANSYS WORKBENCH 的数值模拟分析	55
4.3.1	ANSYS WORKBENCH 简介	55
4.3.2	ANSYS WORKBENCH 数值模拟	55

4.3.3 模拟结果分析	60
4.4 基于 DYNAFORM 的数值模拟分析	63
4.4.1 DYNAFORM 数值模拟	63
4.4.2 模拟结果分析	65
4.5 本章小结	73
第 5 章 金属薄壁管冲击液压胀形试验研究	75
5.1 引言	75
5.2 冲击液压胀形装置	75
5.2.1 装置功能分析	75
5.2.2 装置整体结构	76
5.3 金属薄壁管冲击液压胀形试验	78
5.3.1 试验管材	78
5.3.2 试验方案	79
5.3.3 试验过程	80
5.4 试验结果与讨论	82
5.4.1 不同冲击速度对管材胀形高度的影响	83
5.4.2 不同冲击速度对管材填充半径的影响	85
5.4.3 不同冲击速度对管材壁厚分布的影响	87
5.5 本章小结	89
第 6 章 总结	91
参考文献	94
致谢	103



第1章

绪论

1.1 液压胀形技术

管材液压胀形(tube hydroforming, THF)是一种利用管材内部液压力和管端轴向推力的协调作用使管坯发生塑性变形的精密(或半精密)近净成形技术,因其生产件具有质量轻、强度刚度高等优点,现已广泛应用于航天、航空、汽车、家电等诸多行业所需的复杂异形截面中空件的生产,典型成形零件如图 1-1 所示^[1-5]。

管材液压胀形技术的成形原理如图 1-2 所示:(a)将管坯放置于上下模具型腔的相应位置;(b)闭合上下模具,并使管端两堵头相向运动,密封管坯;(c)源源不断的高压液体经堵头注入管坯内部形成内压 P ,管端堵头施加轴向压力 F_z ;(d)管坯在内压 P 和轴向压力 F 的作用下胀形,填充模具型腔。

与传统的管材成形技术相比,液压胀形技术的主要优点如下:

(1) 结构轻量化。管材液压胀形原材料在保证强度相同的条件下,以空心薄壁中空管件代替实心原料,实现了构件极大程度上的轻



图 1-1 典型液压胀形零件

(a) 排气歧管；(b) T 型管；(c) 凸轮轴；(d) 副车架

量化,节约了原材料。对于梁、框类零件,管材液压胀形件比冲压件减重 20%~40%;对于空心轴类件,可减重 40%~50%^[6]。

(2) 加工件强度高,刚度好。管坯在变形过程中的加工硬化现象和一体化成形工艺有利于提高零件强度和刚度。

(3) 工艺简单,成本低。管材液压胀形属于一次整体成形,无需复杂的拼焊与组装,胀形所需模具数量少,大大降低了成形难度,提高了成形效率,节约了生产成本^[7,8]。

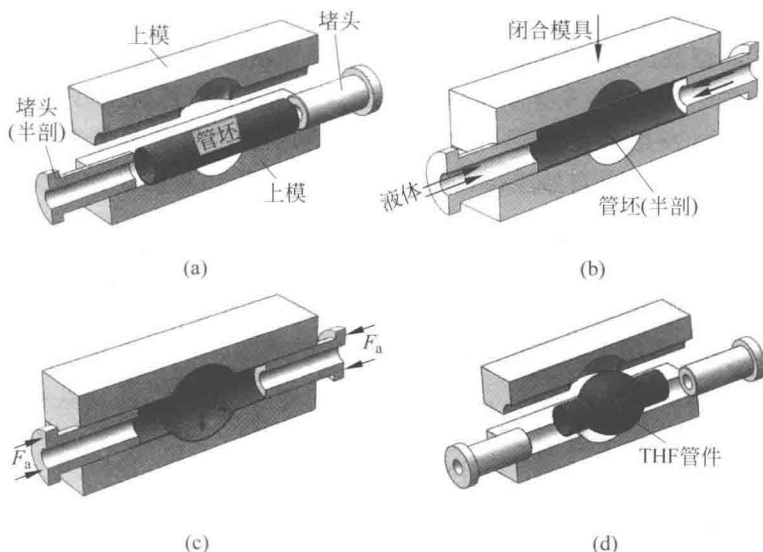


图 1-2 管材液压胀形原理

(a) 安装与定位; (b) 合模与密封; (c) 加载; (d) 成形

1.2 金属薄壁管液压胀形技术研究现状

起源于 20 世纪 40 年代末的管材液压胀形技术经过几十年的发展,在理论、试验、数值模拟等方面的研究取得了较大突破,为该技术的推广应用奠定了良好的理论基础和试验依据。在这过程中,为推动管材液压胀形技术的发展,国内外研究者和工业界同仁们主要在成形方式、塑性本构关系及成形极限等方面展开了深入研究。

1.2.1 成形方式研究现状

根据液压胀形过程中合模时间节点、内压、轴向压力等加载方式的不同,将其分为典型液压胀形、径压胀形和脉动液压胀形。

(1) 典型液压胀形

典型液压胀形包括自然胀形、轴压胀形和挤胀成形。其成形方法示意图如图 1-3 所示：(a)自然胀形：仅依靠其内部液压力 P 的作用使管材发生塑性变形，该方法主要适用于简单变径管的胀形；(b)轴压胀形：在自然胀形的基础上，同时对管坯施加轴向压力，使管材在内压 P 和轴向压力 F_a 的共同作用下成形，其主要适用于较复杂变径管、小长径比(长度与直径之比)的胀形；(c)挤胀成形：在轴压胀形基础上对管坯胀形区施加径向反压力 F' 以实现管材的复杂成形，主要适用于多通管(如 T、Y、X 型)的成形。

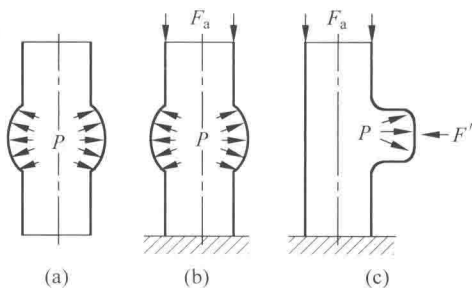


图 1-3 典型液压胀形方法

(a) 自然胀形；(b) 轴压胀形；(c) 挤胀成形

典型液压胀形都是在模具完全闭合之后，往管坯内腔注入高压液体(或施加轴压 F_a 和径向反压 F')来完成塑形，管坯的变形主要取决于内压 P 的大小，因此对内压提出了极高的要求，如稳定高效的外部供压源、防止高内压下管坯破裂失效等；再者，对于长径比较大或管端导向区较长的胀形件，轴向补料不仅不能有效解决管坯破裂失效问题，反而容易引起管端导向区起皱失效现象。

为了降低成形所需内压、提高大长径比胀形件的成形性能和成形质量，研究者们开始了对 THF 新技术的探索。

(2) 径压胀形

径压胀形(tube hydroforming with radial crushing)是利用管坯内部液压力与模具径向合模力共同作用使管材成形的一种复合液压

胀形方法。其原理如图 1-4 所示：首先，往安装定位好的管坯内部注入高压液体，使之在内压 P 作用下发生自由胀形，径向尺寸达到某一设定值 D_a ；保持当前内压，启动运行按钮使模具实现径向合模运动，管坯在径向合模力和内部液压力的共同作用下发生塑性变形，填充模具型腔。径压胀形具有成形压力小和无需轴向补料等优点，适用于大长径比液压胀形件的成形场合。

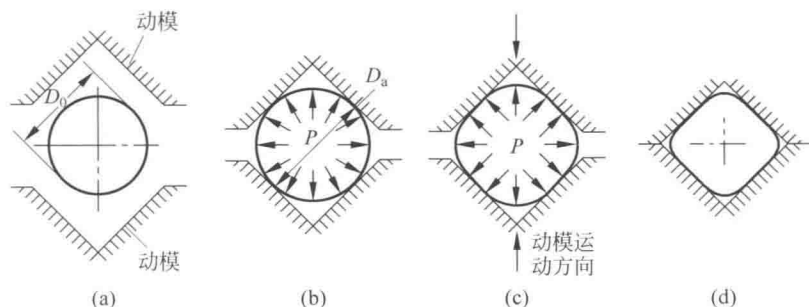


图 1-4 径压胀形原理

(a) 成形前；(b) 自由胀形；(c) 复合胀形；(d) 成形

Hwang 等^[9-11]分别采用自然胀形与径压胀形方法对圆形管材胀形进行了数值模拟分析，结果表明：径压胀形所需的最大成形压力和最大锁模力仅为自然胀形的 5% 和 7%，而且零件壁厚分布更加均匀，材料填充性更好。Kang 等^[12]对圆形管材径压胀形成复杂截面零件的成形过程进行了数值模拟，分析了管材尺寸对径压胀形成形性的影响。杨连发等^[13]基于径压胀形原理及其变形规律，构建了管材液压胀形区摩擦因素的新模型。Li 等^[14]借助 LS-DYNA 探索了模具分型面、管材直径及加载路径对径压胀形过程及成形零件的影响规律。Xu 等^[15]运用有限元分析对自然胀形和径压胀形成形梯形截面管成形性能、破裂、起皱等进行了研究，进一步验证了径压胀形的成形优势。Liu 等^[16]针对三角形截面径压胀形过程中的凹陷失效进行了研究，总结出了加载条件对凹陷失效的影响规律。Tao 等^[17]运用数值模拟方法分析了径压胀形成形裕度图的构建方法，为管材成形划定了安全区域。Yang 等^[18]采用遗传算法和二分法对径压胀

形的加载路径进行了研究,提出了一种径压胀形最优加载路径。

(3) 脉动液压胀形

为了进一步提高管材液压胀形壁厚均匀性,增加最大胀形高度,延缓管材破裂的产生,国内外学者在加载路径方面进行了深入研究,先后提出了诸如恒压加载、线性加载、折线加载等多种加载方式。2001年日本学者 Rikimaru^[19]发现:在管材液压胀形中,采用较小的脉动循环方式加载内压可获得较大的胀形量,并且壁厚分布更加均匀,极大程度延缓了破裂的产生。这种通过脉动液压加载使金属薄壁管成形的液压胀形技术称为管材脉动液压胀形。

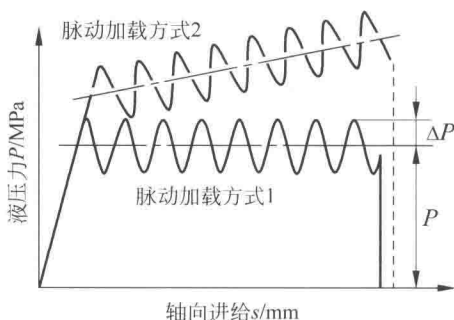


图 1-5 脉动液压胀形加载路径

该新技术一经出现,立即引起了学者们的高度关注。Hama 等^[20]通过试验与有限元分析,证实了脉动载荷作用能显著提高管材的成形性能。Mori 等^[21]采用摄像机全程记录管材脉动液压胀形过程,详细分析了微小起皱随脉动载荷的作用不断交替出现和抚平的现象,并通过直线与脉动加载方式的对比试验和仿真发现:脉动加载可以有效抑制管材破裂、起皱等失效形式。Mousavi 等^[22,23]通过对脉动载荷作用下的 T 型管成形件的壁厚和圆角填充规律的分析,证明了脉动液压胀形可以有效防止壁厚分布不均,并且能提高填充性。袁安营等^[24]和 Zhang 等^[25]通过对不同液压加载方式的仿真试验表明:脉动液压加载提高了管材变形均匀性,抑制了壁厚局部减薄。Mousavi 等^[26]研究了单层管、双层管在脉动液压载荷作用下的

成形性能及优化方法,并分析了脉动液压振幅和频率对管材成形性能的影响。Xu等^[27]以汽车支架为研究对象,对金属管材在脉动液压成形过程中的壁厚分布、表面成形质量和横截面形状等进行了分析,结果表明:较大的脉动振幅条件下成形的管材壁厚分布更加均匀,贴模性更好。杨连发等^[28-31]对线性和脉动加载下的管材液压胀形进行了大量的试验研究与数值模拟分析,结果表明:脉动液压加载得到的成形件的壁厚更加均匀,成形精度更高。

目前,管材液压胀形的成形均依赖高性能的外部供液源提供合适的胀形内压,从而导致成形难度大、效率低、成本高,一定程度上影响了管材液压胀形技术的推广,因此,研究新型的管材液压成形技术具有重要的意义。

1.2.2 塑性本构关系研究现状

金属材料的塑性本构关系(又称应力应变关系)描述的是材料塑性成形过程中应力与应变、应变速率、温度等参数间的关系,它是评价材料性能的重要指标^[32]。在管材液压胀形中,金属薄壁管塑性本构关系不仅是影响成形件质量和精度的重要因素之一,更是用有限元对金属薄壁管塑性成形过程进行数值模拟的前提条件,因此探明准确的管坯塑性本构关系具有重要意义。目前,金属薄壁管本构关系的获取方法主要包括单向拉伸法、液压胀形法等。

(1) 单向拉伸法

单向拉伸法因简单易行而成为获取材料塑性本构关系常用的方法。最初的金属薄壁管拉伸试件直接取自卷曲前的板材,但由于板材的卷曲过程中会发生明显的塑性变形和加工硬化,从而与实际管材性能存在较大差异^[33],因此研究者考虑从管材上截取拉伸件进行拉伸。李波等^[34]以304不锈钢焊缝管母材和焊缝区材料作为拉伸试件,通过单向拉伸试验获得了不同区域材料的塑性本构模型。为了准确测量管材的环向力学性能,何祝斌等^[35]采用正压力线性变化假设对管材环向拉伸试件的力学模型和变形特点进行了分析,同

时完成了拉伸试验验证。M. Zhan 等^[36]对 Q215 焊缝管混合试件进行单向拉伸试验,研究了不同尺寸混合试件的塑性本构关系的影响因素。

但是,无论是采用平直试样还是环形试样进行拉伸,都不能真实反映管材在液压胀形环境下的力学行为和变形特点,为此研究者开始了新的本构关系的构建。

(2) 液压胀形法

为构建更加可靠、准确的金属薄壁管材塑性本构关系,基于真实应力状态下的液压胀形法是最合理的方法。目前,基于 THF 环境建立管材塑性本构关系的基本方法包括假设法和离线测量法。

假设法是先假定金属薄壁管胀形区轮廓为某一简单的曲线形状,推导出管材胀形时应力应变的计算公式,然后通过多次管材胀形试验测量或计算获得塑性本构关系。Fuchizawa 等^[37]基于胀形轮廓的圆弧形假设,通过动态测量胀形轮廓上 3 个点的胀形半径来确定子午向曲率半径,然后基于最大胀形处的静力平衡方程计算出管材本构关系。Strano 等^[38]假设胀形轮廓为二次函数,基于最小能量法计算出子午向曲率半径,获得本构关系。林艳丽等^[39]假设胀形轮廓为椭圆,利用轮廓曲线方程和离线测量最大胀形高度及厚度获取本构关系。然而上述假设法与真实的管材胀形轮廓曲线存在一定的差别,可能影响本构关系构建的精确性。

离线测量法是对多根管坯进行不同压力下的胀形试验,然后利用测量装置离线测量成形管材的胀形参数,再经过曲线拟合得到材料参数强度系数 K 和硬化指数 n 。Sokolowski 等^[39]采用离线测量各胀形参数,利用静力平衡法求解轴向和周向应力,然后获得等效应力和等效应变,用最小二乘法求解硬度系数 K 和硬化指数 n 。Song 等^[40-42]通过离线测量壁厚、轴向半径及胀形长度,利用径向和轴向静力平衡计算出轴向和周向应力,得到本构关系。杨连发等^[43-45]沿胀形轮廓离线测量周向半径和胀形轮廓坐标,拟合出胀形轮廓曲线方程,从而求解子午向曲率半径。然而离线测量法需要对多根管坯分别进行不同胀形条件的试验和测量,工作量大,操作较繁琐,而且由