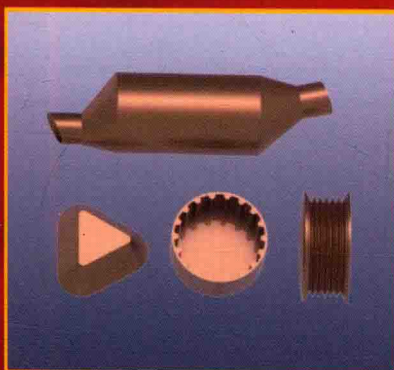




“十二五”国家重点图书出版规划项目
21世纪先进制造技术丛书

特种旋压成形技术

· 夏琴香 著 ·



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
“十二五”国家重点图书出版规划项目

21 世纪先进制造技术丛书

特种旋压成形技术

夏琴香 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在简要介绍旋压技术的发展及应用、金属旋压成形中的创新与创造,以及对传统旋压技术及特种旋压技术进行分类的基础上,首先对传统旋压成形技术中的拉深旋压、剪切旋压、流动旋压工艺过程及成形机理进行了阐述及分析;然后重点对无芯模缩径旋压成形技术、三维非轴对称零件旋压成形技术、非圆横截面零件旋压成形技术、多楔带轮旋压成形技术及杯形薄壁内齿轮旋压成形技术进行了全方位的介绍,并包含了目前旋压类指导书籍未曾提及的旋压成形数值模拟理论基础与实际操作细则,理论与实践并重。在分析旋压成形技术共性和普遍性规律的同时,阐述了不同旋压技术的个性及特殊性成形规律,读者通过对本书的学习能对整个旋压成形技术形成较为清晰的认识,达到触类旁通的目的。

本书适于有一定旋压成形技术基础的专业工程技术人员阅读,也可以作为高等院校机械学科研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

特种旋压成形技术/夏琴香著. —北京:科学出版社,2017

(“十二五”国家重点图书出版规划项目:21世纪先进制造技术丛书)

ISBN 978-7-03-051163-8

I. ①特… II. ①夏… III. ①旋压-可塑成型 IV. ①TG386

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 318210 号

责任编辑:裴 育 罗 娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝 正

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张:29 1/2

字数:564 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



夏琴香,湖北黄梅人,1964年4月出生于江西九江市,博士,留学归国人员。现为华南理工大学机械与汽车工程学院教授、博士生导师,兼任中国机械工程学会塑性工程分会理事,中国塑性工程分会旋压学术委员会常委,广东省机械工程学会锻压分会理事长,广东省模具工业协会专家委员会主任委员,《锻压技术》、《模具技术》、《模具工业》、《精密成形工程》编委等。

长期从事金属旋压成形工艺与设备、模具数字化设计与制造等方面的研究工作,取得了多项创新性成果,如 XPD 型数控旋压成形机床的研制及应用、三维非轴对称零件旋压成形理论及方法研究、海红旗导弹发射筒前盖的研制、高强度钢板件精密级进模虚拟制造技术及产业应用、船舶工业用大型锻件锻造减量化及余热能源利用技术与产业应用等。

近年来,先后主持完成国家自然科学基金(50275054、50475097、50775076、51075153、51375172),教育部高校博士点基金(20130172110024)等 17 项;合作主持完成广东省教育部产学研结合项目(2006D90304021、2010B090400094、2010B080701101),广东省重大科技专项(2011A080402012、2009A080304004),粤港关键领域重点突破项目(2007168206),广东省中科院全面战略合作项目(2012B091100251、2009B091300019)等 20 余项;主持完成企事业单位委托科技开发项目“精密旋压成形技术研究及设备研制”等 30 余项。发表研究论文 200 余篇,其中被三大索引收录 90 余篇,任国际著名刊物 *International Journal of Machine Tools & Manufacture*、*Journal of Materials Processing Technology* 等 20 余种杂志特约审稿人。获国家发明专利授权 20 余件、计算机软件著作权 4 件。出版教材 2 部、专著 2 部、标准 4 部。

《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编:熊有伦(华中科技大学)

编 委:(按姓氏笔画排序)

- | | |
|--------------------|-----------------|
| 丁 汉(上海交通大学/华中科技大学) | 张宪民(华南理工大学) |
| 王 煜(香港中文大学) | 周仲荣(西南交通大学) |
| 王田苗(北京航空航天大学) | 赵淳生(南京航空航天大学) |
| 王立鼎(大连理工大学) | 查建中(北京交通大学) |
| 王国彪(国家自然科学基金委员会) | 柳百成(清华大学) |
| 王越超(中科院沈阳自动化所) | 钟志华(同济大学) |
| 冯 刚(香港城市大学) | 顾佩华(汕头大学) |
| 冯培恩(浙江大学) | 徐滨士(解放军装甲兵工程学院) |
| 任露泉(吉林大学) | 黄 田(天津大学) |
| 刘洪海(朴次茅斯大学) | 黄 真(燕山大学) |
| 江平宇(西安交通大学) | 黄 强(北京理工大学) |
| 孙立宁(哈尔滨工业大学) | 管晓宏(西安交通大学) |
| 李泽湘(香港科技大学) | 雒建斌(清华大学) |
| 李涤尘(西安交通大学) | 谭 民(中科院自动化研究所) |
| 李涵雄(香港城市大学/中南大学) | 谭建荣(浙江大学) |
| 宋玉泉(吉林大学) | 熊蔡华(华中科技大学) |
| 张玉茹(北京航空航天大学) | 翟婉明(西南交通大学) |

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪,先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点,同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展,为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术,出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合,产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战,要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展,激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升制造学科的学术水平。我们相信,有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持,以及编委们的共同努力,本丛书将为发展制造科学,推广先进制造技术,增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物,在制造业中的应用范围很广,从喷漆、焊接到装配、抛光和修理,成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科,已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一,并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展,因此,本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后，我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。

熊有伦

华中科技大学

2008年4月

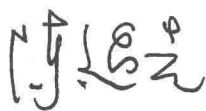
序

锻压(塑性)成形是制造技术的重要组成部分,在传世三千余年的希腊神话中就出现了为诸神打造兵器、用具和饰品的锻压之神(火神)赫淮斯托斯(Hephaestus)。旋压是锻压领域中一颗闪亮的明珠,根据文献记载,陶瓷的制坯方法可能为金属旋压提供了工艺的雏形。我国早在三千五百年到四千年前的殷商时代,就已经会使用陶轮(或陶车)制作陶瓷制品。这种制陶工艺发展到10世纪初就孕育出了金属普通旋压工艺,并于13世纪传入欧洲。在普通旋压工艺基础上发展起来的强力旋压工艺,于第二次世界大战前后开始应用于欧洲的民用工业,并迅速在火箭、导弹和宇航领域得到广泛应用。20世纪60年代,强力旋压工艺传入中国,带动了我国旋压事业的蓬勃发展。

我国旋压技术的现代化进程始于20世纪60年代中期,至80年代中期的前20年为初创期。在60年代中期,国内开始研究强力旋压技术并用以制造航空和特殊冶金制品。随后,此技术又被陆续推广到兵器、核能、电子等行业。热旋压过程还在粉末烧结材料与铸造材料的开坯以及钨、钼、铌、锆、钛等难熔金属制品的成形中发挥了重要作用。在这一时期,我国旋压技术的发展以强力旋压为主,并以军工产品为主线。自80年代中期至今是我国旋压技术的转型和发展期。在这个时期,我国旋压技术的发展由以强力旋压为主转为强力旋压和普通旋压并重,由以军工为主线转为军民兼顾。而旋压设备的控制,则由液压控制转为数字控制。

目前,随着旋压可加工零件范围的不断扩展,旋压成形技术也获得不断发展。传统的旋压技术是用于成形薄壁空心回转体零件的,不论普通旋压还是强力旋压,经旋压成形后的工件壁厚沿圆周方向均匀分布。而汽车上使用的各种皮带轮、轮毂、车轮、排气歧管、离合器及变速箱齿轮等的旋压成形,已超出了传统旋压成形技术的定义范围,形成了独特的三维非轴对称件旋压成形技术、非圆截面件旋压成形技术及齿形件旋压成形技术等。由于这些新型旋压成形技术的塑性变形方式与传统旋压技术有较大的不同,所以迫切需要对其变形机理进行全面的理论分析和试验研究,对于深入了解、推广和应用这些新的旋压工艺技术具有重要意义。华南理工大学夏琴香教授的这本学术新著适时地满足了这方面的需求,填补了国内外对该技术领域的了解和认知上的一些空白。书中明确提出了特种旋压成形技术的概念,并围绕具体的特种旋压成形工艺,从成形方法、成形机理、数值模拟建模关键技术及成形试验等方面进行了详细阐述,综合反映了作者在该领域的科研成果及国内外最新的研究动向。在理论分析中充分运用先进的有限元分析软件,选择数值

模拟和主应力法等,有针对性地开发了多种数值模拟建模技术和相应的数值模拟模型,对于理论分析结果均进行了严格的试验研究加以验证。同时,自主研发了相关旋压设备,并进行了旋压力的测量;对设备关键零部件进行了优化设计,并建立了相应的仿真模型。在详细阐述成形机理的同时,充分结合生产和工程应用,展示了一目了然的产品图片,并深入浅出地提出了生产指导意见。这本新著是夏琴香教授近三十年来投身于旋压事业,集科研、教学、生产等所付出的心血和取得的丰硕成果的结晶,也是作者及其团队对多项国家自然科学基金投入的一个负责任的交代。衷心祝福这本新著的问世,相信该书有助于特种旋压成形技术在我国推广应用以及我国在特种旋压领域技术水平和竞争力的提高。同时,希望该书能为相关企业、院校的技术人员和师生提供启迪和支持。



第一至九届全国旋压学术委员会副主任

2016年2月

前 言

金属旋压成形是一门古老的技术,起源于我国古代的制陶工艺,因其具有成形力低、成形工具简单、材料利用率高、成本低、制品性能优,且易实现产品的轻量化和制造的柔性化等特点,现已广泛应用于航空、航天、军械、车辆、造船、电子、家电等领域。

传统旋压技术是指借助于旋轮的进给运动,加压于随芯模沿同一轴线旋转的金属毛坯,使其产生连续的局部塑性变形而成为所需空心零件的一种塑性成形方法,所成形的零件均为回转体轴对称、横截面上壁厚相等(简称等壁厚)及渐变壁厚产品。而随着工业产品朝着几何形体复杂化和成形质量的高精度化方向发展,新的旋压成形技术不断涌现,传统旋压技术仅用于成形薄壁空心轴对称、圆形横截面、等壁厚产品的局限不断被突破。用于旋制三维非轴对称零件、非圆横截面零件、齿形零件等的特种旋压技术的出现,拓宽了传统旋压技术的理论范畴和应用领域。对于上述特种旋压成形技术,很难用传统的旋压分类方法及机理进行归类及解释。针对目前国内旋压专业书籍种类少,对旋压技术的介绍仍仅停留在薄壁空心回转体、等壁厚及渐变壁厚产品层面的现状,特撰写本书,以对近年来新出现的特种旋压工艺进行分类,并对其技术原理进行全面剖析,力求为从事旋压成形技术研究和生产的科技人员提供有力帮助,进而推动我国旋压制造水平的进一步提升。

本书首先简要介绍旋压技术的发展、旋压技术的应用及金属旋压成形中的创新与创造,并对传统旋压技术及特种旋压技术进行分类;其次对传统旋压成形技术中的拉深旋压、剪切旋压、流动旋压工艺过程及工艺参数进行阐述及分析;在此基础上,重点对无芯模缩径旋压成形技术、三维非轴对称零件旋压成形技术、非圆横截面零件旋压成形技术、多楔带轮旋压成形技术及杯形薄壁内齿轮旋压成形技术,分别从成形方法、成形工艺、成形机理、成形质量控制、旋压力的求解及测试、工艺试验及优化等方面进行全方位的介绍。金属旋压成形过程是一个非常复杂的弹塑性大变形过程,既存在材料非线性、几何非线性,又存在复杂的边界接触条件的非线性,这些因素使其变形机理非常复杂,难以用准确的数学关系式进行描述,往往需要借助于有限元数值模拟手段进行分析。本书对上述旋压过程中的有限元数值模拟关键技术进行详细的介绍,包括计算模型的建立、材料性能的描述及边界条件的设立等。

本书是作者在总结多年科学研究、技术开发、教学和生产实践经验的基础上撰写而成的,包含作者及研究团队近三十年的研究成果及专利技术,并参考了国内外

的相关专著和科技论文,理论与实践并重。相关工作获得多项国家自然科学基金、广东省自然科学基金、广东省教育部产学研合作项目、广东省工业科技计划项目等的资助。相关研究成果已在上海宝山钢铁股份有限公司、陕西晟泰机械制造有限公司、宁波创科旋压机械科技有限公司、中山中炬精工机械有限公司、揭阳市兴财金属制品有限公司、广东康宝电器有限公司、江门市浩盈不锈钢制品有限公司等多家企业获得推广应用。本书试图在对所述旋压技术进行机理分析的基础上,对其成形方法、成形理论、成形工艺及工装设备进行全面的剖析,对推动上述特种旋压技术的实际生产应用及丰富旋压技术理论,均具有重要的实践意义和学术价值。

本书由华南理工大学夏琴香教授撰写,博士研究生肖刚锋参与了本书部分章节的修订工作。全书的插图绘制工作分别由博士研究生肖刚锋、朱宁远、徐腾、渠聚鑫等及硕士研究生王孟飞、杜飞等负责完成,排版工作由硕士研究生王孟飞负责完成,插图及排版校对工作由博士研究生肖刚锋负责完成。

在此感谢团队的博士研究生孙凌燕、赖周艺、肖刚锋、盛湘飞及硕士研究生梁佰祥、杨明辉、陈家华、陈依锦、潘东升、胡昱、冯万林、王玉辉、尚越、谢世伟、李小龙、王甲子、詹欣溪、王映品、张鹏、袁玉军、黄成龙、时丰兵、曾超、周宇静、罗杜宇、张帅斌、吴小瑜、任晓龙、何艳斌、张赛军等,他们的研究工作为本书奠定了良好的基础。

感谢华南理工大学的阮锋、丘宏扬、张世俊、叶邦彦等教授对本书部分章节研究工作的指导。

感谢广州民航职业技术学院程秀全教授对本书研究工作的指导及对本书的技术校对。

特别感谢我国旋压技术开拓者之一、航空报国奖获得者、北京航空制造工程研究所陈适先研究员为本书作序,并对本书提出宝贵的修改意见。

感谢国家自然科学基金(50275054、50475097、50775076、51075153、51375172),教育部高校博士点基金(20130172110024),广东省工业科技计划项目(2006B11901001、2003C102013),广东省自然科学基金重点项目(04105943),广东省自然科学基金(020923,10151040301000000),广东省教育部产学研结合项目(2006D90304021),广东省精密装备与制造技术重点实验室项目(PEMT1202)等对本书研究工作的资助。

感谢国家科学技术学术著作出版基金对本书出版的资助。

由于作者水平有限,书中难免出现疏漏和不足之处,殷切期望读者提出宝贵意见。

作者

2016年2月

主要符号表

符号	含义	单位	符号	含义	单位
应力和应变					
ϵ	真实应变	—	σ	真实应力	MPa
$\bar{\epsilon}$	等效应变	—	$\bar{\sigma}$	等效应力	MPa
ϵ_a	轴向应变	—	σ'	平均变形抗力	MPa
ϵ_b	横向应变	—	σ_a	轴向应力	MPa
ϵ_l	纵向应变	—	σ_{fr}	摩擦应力	MPa
ϵ_r	径向应变	—	σ_r	径向应力	MPa
ϵ_t	厚向应变	—	σ_θ	切向应力	MPa
ϵ_θ	切向应变	—	$\Delta\bar{\sigma}$	工件内外表面平均等效应力差	MPa
$\Delta\bar{\epsilon}$	工件内外表面平均等效应变差	—			
材料参数					
E	杨氏模量(弹性模量)	GPa	μ'	摩擦系数	—
G	剪切模量	GPa	ρ	材料密度	kg/m ³
K	强化系数	—	ρ'	电阻系数	$\Omega \cdot m$
n	硬化指数/转速	—/(r/min)	σ_b	抗拉强度	MPa
ν'	厚向异性指数	—	σ_s	屈服强度	MPa
μ	泊松比	—	ν	摩擦因子	—
工件参数					
A	横截面直边长边长度	mm	$d_f(r_f)$	齿根圆直径(半径)	mm
B	横截面直边短边长度	mm	d_m	芯模直径	mm
b'	齿槽宽	mm	e	偏心距	mm
D_0	板坯或管坯直径	mm	G'	夹紧力	N
d	工件内径	mm	H	工件高度	mm
d'	半成品直径	mm	H'	相对高度	—
d_0	工件中径	mm	h_0	理论高度	mm
d_1	工件外径	mm	$\bar{h}$	成形轮齿的平均高度	mm
d_e	内齿轮外径	mm	N	旋轮数目	—

续表

符号	含义	单位	符号	含义	单位
工件参数					
R'	相对圆角半径	—	Δt	壁厚偏差	mm
R'_s	工件内外表面与旋轮 接触面积差值的绝对值	mm ²	Z	齿数	—
r	圆角半径	mm	α	锥形件半锥角	(°)
r'	底部圆角半径	mm	α'	齿形角	(°)
r_a	齿顶圆半径	mm	α_f	临界半锥角	(°)
r_p	分度圆半径	mm	$\Delta\alpha$	回弹角	(°)
S_r	齿轮饱和度	—	γ	公转角度	(°)
s	齿厚	mm	λ	相对齿高	%
t	工件壁厚	mm	ξ	齿顶不均匀度	—
t_0	板坯或管坯厚度	mm	ρ_m	芯模圆角半径	mm
t_{avg}	均值壁厚	mm	φ	三维非对称件倾斜角	(°)
t_f	工件实际壁厚	mm	φ'	带轮成形角	(°)
t_t	工件理论壁厚	mm			
旋压工艺参数					
a	轴向错距	mm	Δ	压下量	mm
b	径向错距	mm	Δ_n	名义压下量	mm
C	起皱系数	—	Δ_s	瞬时压下量	mm
c	旋轮与芯模之间的间隙	mm	δ	偏移量	mm
c'	毛坯与芯模间隙	mm	δ'	旋轮底面与下模间隙	mm
Δc	旋轮与芯模之间的相对间隙	%	θ	旋轮仰角	(°)
f	进给比	mm/r	θ_0	旋轮首道次仰角	(°)
m	旋压系数	—	θ_i	后期道次中工件的仰角	(°)
m'	名义拉深比	—	Ψ_n	道次减薄率	%
p	道次间距	mm	Ψ_t	壁厚减薄率	%
$\Delta t'$	偏离率	%	Ψ_{tmax}	最大壁厚减薄率	%
w	凸缘宽度	mm	ω	角速度	rad/s
β_0	坯料弯曲角	(°)			

续表

符号	含义	单位	符号	含义	单位
旋轮参数					
D_i	内旋轮直径	mm	S	旋轮公转平面到基准平面的距离	mm
D_o	外旋轮直径	mm	S'	旋轮位移	mm
$\bar{D}_R$	旋轮直径	mm	α_ρ	成形角	(°)
h_ρ	成形段台阶高度	mm	α'_ρ	旋轮接触角	(°)
l_ρ	光整段长度	mm	β'	旋轮安装角	(°)
r_ρ	旋轮圆角半径	mm	β_ρ	压光角	(°)
r'_ρ	旋轮大圆弧半径	mm	γ_ρ	趋近角	(°)
$r_{\rho 2}$	引导段与成形段的转角半径	mm	δ_ρ	退出角	(°)
其他					
A_r	径向投影面积	mm ²	P_r	径向旋压力	N
A_z	轴向投影面积	mm ²	P_t	厚度方向旋压力	N
A_θ	周向投影面积	mm ²	P_z	母线方向旋压力	N
a'	渐开线基圆半径	mm	P_θ	切向旋压力	N
$e_{\text{椭}}$	椭圆度	mm	q_0	端面收缩率	—
$e_{\text{直}}$	直线度	mm	R_a	粗糙度	μm
F	相对矢高	—	U	电压值	V
h'	弧高	mm	x_m	回转中心与芯模端面的距离	mm
l	上模下压位移	mm	y_m	回转中心与芯模侧面的距离	mm
P	旋压力	N	κ	齿高不饱和度	—
P_a	轴向旋压力	N	v	上模的下压速度	mm/s

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

序

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 旋压技术的发展	1
1.2 旋压技术的应用	3
1.2.1 旋压技术在汽车零件成形制造中的应用	3
1.2.2 旋压技术在民用产品制造中的应用	6
1.2.3 旋压技术在国防中的应用	8
1.2.4 其他应用	12
1.3 金属旋压成形中的创新与创造	12
1.3.1 三维非轴对称件旋压成形技术	13
1.3.2 非圆横截面件旋压成形技术	15
1.3.3 齿形件旋压成形技术	16
1.4 旋压成形技术的分类	19
1.4.1 传统旋压成形技术的分类	19
1.4.2 特种旋压成形技术的分类	22
1.5 本章小结	24
参考文献	25
第 2 章 旋压成形基础工艺及其原理	29
2.1 普通旋压	29
2.1.1 工艺过程	29
2.1.2 工艺参数	30
2.2 剪切旋压	60
2.2.1 工艺过程	60
2.2.2 工艺参数	62
2.2.3 柔性旋压	70
2.3 流动旋压	73
2.3.1 工艺过程	73

2.3.2 工艺参数	74
2.3.3 错距旋压	81
2.4 对轮旋压	89
2.5 本章小结	96
参考文献	97
第3章 无芯模缩径旋压成形技术	100
3.1 缩径旋压成形特点	100
3.2 弹塑性有限元基本理论及建模关键技术	102
3.2.1 旋压成形数值模拟建模理论基础	103
3.2.2 无芯模缩径旋压数值模拟关键技术	109
3.3 无芯模缩径旋压成形机理分析	118
3.3.1 成形机理分析	118
3.3.2 不同工艺参数对旋压力的影响规律	121
3.3.3 不同工艺参数对旋压件壁厚分布规律的影响	123
3.3.4 不同工艺参数对旋压件外径尺寸的影响	126
3.4 无芯模多道次缩径旋压模拟分析	127
3.4.1 往返程旋压成形工艺特点	127
3.4.2 工件应力应变分布规律	129
3.4.3 多道次旋压成形质量分析	132
3.5 试验研究	133
3.5.1 材料力学性能试验研究	133
3.5.2 单道次旋压工艺试验研究	137
3.5.3 旋压力的电测试验研究	139
3.5.4 多道次旋压工艺试验研究	144
3.5.5 成形缺陷分析	146
3.6 本章小结	147
参考文献	148
第4章 三维非轴对称零件旋压成形技术	151
4.1 三维非轴对称管件缩径旋压成形方法	152
4.1.1 三维非轴对称零件旋压成形原理	153
4.1.2 HGPX-WSM 型数控旋压机床的研制	157
4.2 三维非轴对称管件缩径旋压压力的解析解	161
4.2.1 旋压力求解常用的理论方法	162
4.2.2 主应力法的基本假设和工件受力分析	163
4.2.3 旋压力计算公式的推导	164

4.2.4 非轴对称管件缩径旋压力的变化规律	169
4.3 非轴对称管件缩径旋压三维数值模拟关键技术	173
4.4 非轴对称管件单道次缩径旋压成形机理	179
4.4.1 单道次缩径旋压有限元模型的建立	179
4.4.2 单道次缩径旋压过程的应力应变分布规律	182
4.4.3 工艺参数对缩径旋压成形质量的影响	189
4.4.4 三维非轴对称管件缩径旋压力的有限元数值模拟	198
4.5 非轴对称管件多道次缩径旋压成形机理	203
4.5.1 多道次缩径旋压有限元模型的建立	203
4.5.2 多道次缩径旋压过程的应力应变分布规律	206
4.5.3 旋压道次对非轴对称管件缩径旋压成形质量的影响	211
4.6 三维非轴对称管件缩径旋压的试验研究	213
4.6.1 非轴对称单道次缩径旋压的试验研究	214
4.6.2 非轴对称多道次缩径旋压的试验研究	217
4.6.3 三维非轴对称管件缩径旋压力的试验研究	221
4.6.4 三维非轴对称旋压件显微组织的变化	228
4.7 本章小结	231
参考文献	232
第5章 非圆横截面空心零件旋压成形技术	235
5.1 非圆横截面空心零件旋压成形工艺	236
5.1.1 非圆横截面件旋压成形工艺及分类	236
5.1.2 变形难易程度分析	243
5.2 非圆横截面件旋压成形数值模拟关键技术	245
5.2.1 非圆截面件旋压成形数值模拟模型	245
5.2.2 数值模拟运算效率与精度对比研究	252
5.3 非圆横截面件旋压成形机理研究	254
5.3.1 不同类型横截面空心零件旋压成形机理研究	254
5.3.2 三边形横截面空心零件旋压成形旋压力变化规律	266
5.3.3 工艺参数对三直边圆角形零件旋压成形质量的影响	272
5.4 三边形零件旋压成形试验研究	279
5.4.1 试验设备与靠模研制	279
5.4.2 三直边圆角形零件旋压成形试验研究	281
5.4.3 三边圆弧形零件旋压成形试验研究	289
5.5 本章小结	295
参考文献	297