

(Second Edition)

Modern Hydroforming Technology

现代液压成形技术 (第2版)

苑世剑 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

现代液压成形技术

(第2版)

Modern Hydroforming Technology
(Second Edition)

苑世剑 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

现代液压成形技术/苑世剑著. —2版. —北京:
国防工业出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-118-11249-8

I. ①现… II. ①苑… III. ①液压成型 IV.
①TG39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 032427 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 23¼ 字数 411 千字

2016 年 12 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

苑世剑教授是长江学者特聘教授、国家杰出青年基金获得者、教育部创新团队/国防科技创新团队带头人。现任哈尔滨工业大学材料科学与工程学院院长,金属精密热加工国家级重点实验室主任,哈尔滨工业大学流体高压成形技术研究所所长。

苑世剑教授长期从事复杂薄壁结构流体高压成形研究。面向飞行器、汽车等迫切需求的板、管、壳三大类典型结构和塑性成形领域国际

学术前沿,发明了深腔复杂曲面板件复合加载流体高压成形技术,研发出变截面异形管件内高压成形技术与装备,发展了大型壳体无模内压成形技术,创立了流体高压成形理论与技术体系,形成了理论/工艺/装备一体化特色,取得了系统性创新成果。研究成果已在我国新一代运载火箭、战略/战术导弹、载人航天、飞机等多种型号装备中获得实际应用,并广泛应用于一汽、奥迪等轿车构件的大批量生产,为航天、航空、汽车等行业发展做出了突出贡献。获国家技术发明二等奖1项、国家科技进步二等奖2项、省部级技术发明一等奖2项;发表SCI论文120余篇,有关流体高压成形的SCI论文数在Web of Sciences数据库中世界排名第一;获授权发明专利50余项;曾任第三/第七届液压成形国际会议主席,第三届新成形技术国际会议主席。

主要学术兼职:国际塑性加工会议(SAB/ICTP)常务理事、中国塑性工程学会理事长、中国机械工程学会常务理事、中国汽车学会理事;国家973计划制造和工程领域咨询专家、国防973项目技术首席科学家;《材料科学与工艺》主编,《塑性工程学报》副主编,《有色金属学报》《中国机械工程学报》《锻压技术》编委,ISI International 顾问编委。



液压成形是塑性加工领域的一项成形新技术,它又可分为管材液压成形(内高压成形)、板材液压成形与壳体液压成形三种。由苑世剑教授等编写的《现代液压成形技术》是第一本全面论述上述三种液压成形方式的新著作,对于读者了解液压成形的全貌来说是一本难得的好书。

管材内高压成形由于能提供结构轻量化的零件,是近年来塑性成形的一个亮点。所成形材料已由低碳钢管扩展到不锈钢管和铝合金管及镁合金管,内高压成形件的形状已由直轴线变径管扩展到弯曲轴线和带支叉的多通管零件,成形的温度已经由室温扩展到高温。板材充液拉深与普通拉深相比具有成形极限高、尺寸精度高和道次少等优点,由于内压的作用能使工件紧贴于冲头上,避免在拉深抛物面形件或半球底曲面零件时因工件悬空而引起内皱,这种工艺已成功地应用于汽车灯罩等零件的成形。壳体无模液压成形是本人的发明,曾先后得到国家发明奖和国家科技进步奖,已在球形水塔、液化气球形储罐和城市建筑装饰方面得到应用。在此方向上先后培养了7名博士,他们的一些研究工作也在书中也得到了反映。

液压成形虽然模具比较简单甚至无需模具(壳体无模液压胀形时),但工件中的应力分布是很复杂的,易引起屈曲、起皱、开裂等缺陷,为避免缺陷的发生,需要对变形过程进行应力应变分析和数值模拟,多年来的研究生的论文工作为此奠定了基础,所以此书也是具有较高水平的学术著作。

内高压成形的装备比起通用液压机要复杂得多,不仅是多了两个(或三个)水平缸,而且要有提供内高压的超高压压力源(约400MPa),还要能实现各液压缸的轴向位移与工件内的压力数值按给定曲线变化的数控,因此此设备的进口价格相当高。哈尔滨工业大学在国内首次成功研制了数控3150kN内高压机,掌握了核心技术,形成了自主知识产权,并已经应用于汽车零件和航天用零件的制造,这使国外某著名内高压机制造商感到惊奇。应该指出的是,本书的作者都在该领域从事专门的研究,因此编写时不仅有亲身的体会,还有自己的实验数据,这远不同于仅利用他人的资料进行汇总。

十分高兴的是,本书各章的作者都是本人不同时期的弟子或隔代弟子,近年来,苑世剑教授领导团队在内高压成形领域的研究与开发方面做出了突出成

绩,作为一名老教师为弟子们能够活跃于学科前沿,运用基础理论知识解决复杂的成形问题并使其用于生产而感到高兴,为液压成形团队的持久兴旺而受到鼓舞。有鉴于此,应苑世剑教授之邀,欣然命笔作序。

王仲仁

2008年8月

《现代液压成形技术》自 2009 年出版后受到高校师生、研究机构科研人员和企业技术人员的普遍欢迎,第 1 版早已售罄。一方面,近年来本团队在液压成形基础理论、关键技术、大型装备和工业应用方面取得了一系列重要进展(2010 年获得国家科技进步二等奖、2016 年获得国家技术发明二等奖),推动了液压成形技术在中国的快速发展;另一方面,不断有各方面人士希望尽快对该书进行修订,把本团队取得的新成果反映在该书中。综合这两方面的因素,本书作者决定对该书进行修订和补充,以飨读者。

本次修订的主要内容包括:①补充了 2010 年以来的新成果,主要有典型零件内高压成形技术应用、大型数控内高压成形设备、板材液压成形工艺和设备、双母线椭球液压成形和热态内压成形技术方面的新进展;②对全书的插图进行了全面修改和三维化(3D 图),使得图形更加美观,增强了可读性;③补充了 2010 年以来液压成形领域世界各国主要研究机构的代表性文献,供读者查阅。

参与具体修改工作的有何祝斌教授,韩聪副教授,凡晓波博士,博士生陈一哲和张鑫龙,张伟玮博士和崔晓磊博士也参与了部分工作,凡晓波和张鑫龙负责后期的插图处理及出版工作,在此对他们的辛勤劳动表示衷心感谢!本次修订采用的内容大多来自本团队主要成员(刘钢教授、徐永超教授、何祝斌教授、韩聪副教授、刘伟副教授、王小松副教授等)的研究成果,以及近年来毕业的硕士生和博士生的学位论文,这些成果先后得到国家各类计划项目和企业合作项目的支持,在此一并表示衷心感谢!

因时间和水平所限,本书内容难免存在错误和疏漏,敬请广大读者不吝指教并给予批评指正。

苑世剑

2016 年 11 月 14 日

现代液压成形技术是指 20 世纪 80 年代中期发展起来的并在工业生产得到广泛应用的几种液压成形新技术,与传统的液压成形技术相比,它的主要特点表现在以下几个方面:一是液体作为传力介质具有实时可控性,通过液压闭环伺服和计算机控制系统可以按设定的曲线精确控制压力,确保工艺参数在设定的数值内,并且随时间可变可调,实现数控加载成形。二是仅需要凹模或凸模,液体介质相应地作为凸模或凹模,省去一半模具费用和加工时间。而对于壳体液压成形,不使用任何模具。三是成形的零件形状复杂,液体作为模具可以成形很多刚性模具无法成形的复杂零件,内高压成形可以加工整体三维轴线复杂封闭截面空心构件。四是形状和尺寸精度高,通过在成形最后阶段增加压力整形保证零件形状和尺寸精度高,尤其是局部特殊形状,内高压成形的压力可高达 400MPa,使得封闭截面回弹小且形状精度高。

作者所在的团队从事液压成形技术的研究与开发已有二十余年。1985 年,王仲仁教授发明球壳无模液压成形技术,而后逐渐扩展到椭球和环壳,于 2004 年获得国家科技进步二等奖。1999 年,苑世剑教授领导团队在国内首先系统地开展了对内高压成形基础理论、工艺和设备的研究,开发了具有自主知识产权的内高压成形设备,研究成果已经在国产轿车关键零件的批量生产和国防型号重要零件的研制中得到实际应用。随着汽车、航空、航天和机械行业对结构整体化和轻量化的需求越来越高,近十年来,液压成形技术尤其是内高压成形技术在我国得到了迅速发展,逐渐成为工业生产中制造复杂异型截面轻体构件的一种先进成形技术。作者所在的哈尔滨工业大学材料加工工程学科也把液压成形技术作为研究生的一门选修课。但至今国内尚没有一本关于液压成形技术的专著,制约了该技术的进一步推广应用。为了满足企业工程技术人员和研究生教学的需要,以作者所在团队二十余年的科研成果为基础,编写了这本专著。为了便于读者查阅,将国内外本领域的代表性论文和本书作者发表的主要论文按照章的顺序集中列于书后。

本书的特点在于:①分类新颖。按坯料种类,分别介绍管材液压成形(内高压成形)、板材液压成形和壳体液压成形;在内高压成形技术中按变径管、弯曲轴线管和多通管分别介绍,以往的文献中没有这种分类方法。②实用性强。以

零件种类成形技术为主线,有工艺参数计算、缺陷分析、设备选型、模具结构和典型零件工艺,供企业技术人员使用。③学术性强。具有应力应变状态分析、应力轨迹、塑性变形规律和缺陷形成机制等塑性理论分析内容,可供研究生教学和高年级本科生参考。

全书由苑世剑教授主持编写并统稿,参加编写的还有刘钢、滕步刚、徐永超、王小松、何祝斌和韩聪。刘钢教授负责全书图表和公式符号整理以及文字校对,参加图表及参考文献整理工作的博士生有齐军、汤泽军、初冠南、苑文婧和宋鹏等。

承蒙国际塑性加工会议(ICTP)常务理事、中国塑性工程学会原理事长王仲仁教授为本书作序,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

尽管我们从事液压成形技术研究已二十余年,但对液压成形理论和技术的一些问题仍然在认识过程中,书中难免有错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2008年8月8日

主要符号表	1
第 1 章 概论	3
1.1 液压成形技术种类和特点	3
1.1.1 液压成形定义和种类	3
1.1.2 内高压成形技术特点	3
1.1.3 板料液压成形技术特点	7
1.1.4 封闭壳体液压成形技术特点	9
1.2 液压成形技术现状	9
1.2.1 内高压成形技术现状	9
1.2.2 板料液压成形技术现状	13
1.2.3 壳体液压成形技术现状	15
1.3 液压成形技术发展趋势	17
1.3.1 内高压成形技术发展趋势	17
1.3.2 板料液压成形技术发展趋势	18
1.3.3 壳体液压成形技术发展趋势	19
1.4 液压成形技术新进展	19
1.4.1 管材内高压成形技术新进展	19
1.4.2 板材液压成形技术新进展	22
1.4.3 封闭壳体液压成形技术新进展	23
1.4.4 液压成形领域文献分析	23
第 2 章 变径管内高压成形技术	25
2.1 工艺过程和应用范围	25
2.1.1 工艺过程	25
2.1.2 应用范围	26
2.2 主要工艺参数的确定	26
2.2.1 初始屈服压力	26
2.2.2 开裂压力	27

2.2.3	整形压力	27
2.2.4	轴向进给力	28
2.2.5	合模力	29
2.2.6	轴向起皱临界应力	30
2.2.7	补料量	30
2.3	缺陷形式和加载曲线	31
2.3.1	缺陷形式	31
2.3.2	成形区间和加载曲线	32
2.3.3	极限膨胀率	33
2.3.4	起皱的控制和利用	35
2.3.5	内外压复合作用下管材起皱行为	39
2.4	壁厚分布规律及影响因素	42
2.4.1	壁厚分布规律	42
2.4.2	厚度分界圆	43
2.5	内高压成形用管材	45
2.5.1	适用的材料	45
2.5.2	内高压成形对管材的要求	46
2.5.3	管材种类和规格	46
2.5.4	管材力学性能测试	48
2.5.5	各向异性管材力学性能测试方法与装置	50
2.6	内高压成形的摩擦与润滑	55
2.7	典型变径管内高压成形工艺	56
2.7.1	铝合金变径管内高压成形	56
2.7.2	低碳钢瓶形管件内高压成形	58
2.7.3	Ω 接头管件内高压成形	59
2.7.4	异形双锥管件内高压成形	60
2.7.5	空心曲轴内高压成形	62
2.7.6	长距波纹管内高压成形	64
第3章	弯曲异形截面管件内高压成形技术	67
3.1	工艺过程与典型截面	67
3.1.1	工艺过程	67
3.1.2	典型截面	68
3.2	管材弯曲工艺	70
3.2.1	常用弯曲工艺及特点	70
3.2.2	管材最小弯曲半径	72

3.2.3	管材截面形状畸变及其防止措施	72
3.2.4	弯曲力矩的计算	73
3.2.5	壁厚变化的计算	73
3.2.6	管材弯曲极限径厚比	74
3.3	管材充液压弯工艺	75
3.3.1	充液压弯原理及特点	75
3.3.2	管端无约束下的管材充液压弯	76
3.3.3	管端约束下的管材充液压弯	77
3.4	缺陷形式	80
3.5	正方形截面壁厚分布规律	83
3.5.1	膨胀率对壁厚分布的影响	84
3.5.2	摩擦因数对壁厚分布的影响	84
3.5.3	分模方式对壁厚分布的影响	84
3.5.4	材料力学性能对壁厚分布的影响	85
3.6	降低整形压力原理与方法	86
3.6.1	内凹式预成形截面降低整形压力的原理	86
3.6.2	切向推力与内凹式深度的关系	86
3.6.3	内凹式预成形截面的整形压力计算公式	88
3.6.4	内凹预制坯形状优化设计	90
3.6.5	预制坯充液压制工艺	94
3.7	典型弯曲轴线管件内高压成形	100
3.7.1	轿车副车架主管件内高压成形	100
3.7.2	仪表盘支架内高压成形	102
3.7.3	铝合金异形截面管内高压成形	103
3.7.4	铝合金副车架内高压成形	103
3.7.5	MPV 轿车副车架内高压成形	106
3.7.6	DP590 双相钢控制臂内高压成形	110
3.7.7	超高强钢(780MPa)扭力梁内高压成形	112
3.7.8	碰撞吸能盒内高压成形	114
3.7.9	汽车结构件内高压成形产品批量生产实例	115
第4章	薄壁多通管内高压成形技术	117
4.1	多通管种类与内高压成形工艺过程	117
4.2	缺陷形式与支管极限高度	119
4.2.1	缺陷形式	119

4.2.2	支管极限高度	121
4.3	三通管内高压成形壁厚分布规律	121
4.4	Y形三通管内高压成形	125
4.4.1	Y形三通管形状与材料	125
4.4.2	内压对Y形三通管内高压成形的影响	126
4.5	薄壁铝合金三通管内高压成形	128
4.5.1	薄壁三通管形状及成形难点	128
4.5.2	薄壁三通管多步成形数值模拟	129
4.5.3	薄壁三通管多步成形工艺	130
4.6	大直径超薄不锈钢三通管内高压成形	132
4.6.1	超薄三通管形状及成形难点	132
4.6.2	超薄三通管多步成形数值模拟	132
4.6.3	超薄三通管多步成形工艺	134
4.7	高温合金三通管内高压成形	135
4.7.1	高温合金三通管形状及成形难点	135
4.7.2	高温合金管多步成形工艺	136
第5章	内高压成形应力应变分析	138
5.1	变径管内高压成形应力应变状态及在屈服椭圆上的位置	138
5.1.1	初始填充阶段	139
5.1.2	成形阶段	139
5.1.3	整形阶段	141
5.2	弯曲轴线管和三通管内高压成形应力应变状态	142
5.2.1	弯曲轴线管内高压成形应力应变状态	142
5.2.2	三通管内高压成形应力应变状态	144
5.3	内高压成形过程的应力轨迹	145
5.4	圆角区应力状态与开裂机理	148
5.4.1	圆角区应力状态分析	148
5.4.2	圆角开裂机理分析	151
5.5	内压与轴向压力作用下管材塑性失稳起皱分析	154
第6章	内高压成形设备与模具	160
6.1	内高压成形机组成和功能	160
6.1.1	内高压成形机组成	160
6.1.2	内高压成形机各组成部分功能	160

6.2	内高压成形机主要参数	164
6.2.1	主要参数定义	164
6.2.2	主要参数选用原则	166
6.2.3	推荐的内高压成形机规格和参数	167
6.3	内高压成形机典型结构及特点	168
6.3.1	长行程内高压成形机	168
6.3.2	短行程内高压成形机	169
6.4	大型数控内高压成形机	171
6.4.1	超高压与多轴位移闭环伺服控制	171
6.4.2	数控系统与控制软件	172
6.4.3	数控内高压成形机系列与特点	173
6.4.4	内高压成形生产线构成与布置	175
6.5	大型短行程内高压成形机结构应力与变形分析	177
6.5.1	大型短行程内高压成形机组成与特点	177
6.5.2	合模压力机结构有限元分析	178
6.5.3	水平压力机结构有限元分析	179
6.6	内高压成形模具	180
6.6.1	模具结构和材料	180
6.6.2	模具应力和变形的影响因素	181
第7章	液力胀接和液压冲孔	187
7.1	液力胀接原理和特点	187
7.1.1	液力胀接原理	187
7.1.2	液力胀接工艺特点	187
7.2	实现液力胀接的条件	188
7.3	液力胀接内压的计算	191
7.4	液力胀接强度的影响因素	199
7.4.1	内压对胀接强度的影响	199
7.4.2	胀接初始间隙对胀接强度的影响	199
7.5	液力胀接技术的应用	200
7.5.1	组合式空心凸轮轴液力胀接原理及优点	200
7.5.2	铸铁凸轮组合式空心凸轮轴	202
7.5.3	钢制组合式空心凸轮轴	205
7.5.4	国外液力胀接组合式空心凸轮轴应用	208
7.5.5	液力胀接的其他应用	209

7.6	液压冲孔原理及分类	210
7.7	液压冲孔力计算	211
7.7.1	由内向外冲孔的冲孔力计算	211
7.7.2	由外向内冲孔的冲孔力计算	212
7.8	内压对冲孔质量的影响	212
7.8.1	内压对孔周塌陷和孔口形状的影响	212
7.8.2	内压对断口表面质量的影响	213
7.9	液压冲孔-翻边复合技术	215
7.10	多孔同步液压冲孔	217
第8章	板材充液拉深成形技术	220
8.1	成形工艺过程、特点及适用范围	220
8.1.1	成形工艺过程	220
8.1.2	板材充液拉深特点	222
8.1.3	板材充液拉深的适用范围	223
8.2	主要工艺参数计算	223
8.2.1	临界液室压力	223
8.2.2	拉深力	226
8.2.3	压边力	227
8.3	极限拉深比及缺陷形式	227
8.3.1	极限拉深比	227
8.3.2	缺陷形式	228
8.3.3	充液拉深缺陷形成机理	230
8.4	成形精度及壁厚分布	232
8.4.1	成形精度	232
8.4.2	壁厚分布	233
8.4.3	回弹变化规律	234
8.5	充液拉深成形设备及模具	236
8.5.1	充液拉深成形设备结构和组成	236
8.5.2	充液拉深成形设备特点及主要参数	241
8.5.3	模具结构和材料	242
8.6	径向加压充液拉深工艺	244
8.6.1	径向加压充液拉深成形原理	244
8.6.2	径向压力对成形极限的影响	245
8.6.3	径向压力对壁厚分布的影响	246
8.7	预胀充液拉深工艺	246
8.7.1	预胀充液拉深成形原理	246
8.7.2	预胀充液拉深壁厚分布规律	247

8.7.3	预胀充液拉深变形强化规律	248
8.8	典型零件充液拉深工艺	249
8.8.1	平底筒形件充液拉深成形	249
8.8.2	抛物线形件充液拉深成形	250
8.8.3	半球底筒形件充液拉深成形	252
8.8.4	方锥盒形件充液拉深成形	253
8.8.5	半环壳形件液体凸模拉深成形	254
8.8.6	单曲率盒形件充液拉深成形	256
8.8.7	双曲率盒形件充液拉深成形	260
8.8.8	2219 铝合金板材充液拉深成形	263
第9章	封闭壳体无模液压成形技术	267
9.1	封闭壳体结构形式及制造技术	267
9.2	球形容器无模液压成形技术	268
9.2.1	成形原理及优点	268
9.2.2	成形压力计算	268
9.2.3	胀前多面壳体结构和壁厚分布规律	269
9.2.4	球壳胀形过程壁厚和应力变化规律	271
9.3	液化气球罐无模液压成形	272
9.3.1	角变形宽板拉伸实验	272
9.3.2	带角变形宽板拉伸的塑性变形规律	275
9.3.3	LPG 球罐胀后安全性	278
9.4	椭球壳体内压成形技术	279
9.4.1	椭球内压成形原理与工艺过程	279
9.4.2	椭球壳应力与轴长比的关系	279
9.4.3	椭球壳胀形压力	281
9.4.4	椭球壳内压成形实验	283
9.4.5	椭球壳内压成形过程变形规律和起皱行为	284
9.5	双母线椭球壳内压成形技术	288
9.5.1	双母线椭球壳内压成形原理	288
9.5.2	双母线椭球壳结构设计	289
9.5.3	双母线椭球壳内压成形实验	291
9.5.4	双母线椭球壳内压成形过程曲率半径变化规律	293
9.5.5	双母线椭球壳内压成形过程体积变化规律	296
9.5.6	双母线椭球壳内压成形过程应力变化规律	297
9.6	长椭球壳内压成形技术	300
9.6.1	双母线长椭球壳结构设计	300

9.6.2	双母线长椭球壳内压成形实验	302
9.6.3	双母线长椭球壳内压成形体积变化	305
9.6.4	双母线长椭球壳内压成形厚度变化	305
9.6.5	双母线长椭球壳内压成形过程应力变化规律	306
9.7	环壳无模液压成形技术	307
9.7.1	环壳无模液压成形过程	307
9.7.2	环壳应力分布和成形压力	308
9.7.3	环壳无模液压胀形实验	309
9.7.4	环壳成形起皱分析	310
9.7.5	环壳初始结构对成形的影响	311
9.8	无模液压成形应用实例	313
第10章	轻合金管材热油介质成形技术	315
10.1	管材热油介质成形原理和特点	315
10.1.1	管材热油介质成形原理	315
10.1.2	管材热油介质成形特点	316
10.2	铝合金管材热塑性本构关系	316
10.2.1	高温力学性能	316
10.2.2	热塑性本构关系	318
10.3	铝合金管材高温成形性能	319
10.3.1	温度对极限膨胀率的影响	320
10.3.2	轴向补料对极限膨胀率的影响	321
10.4	镁合金管材热态内压成形性能	322
10.4.1	温度对极限膨胀率的影响	322
10.4.2	轴向补料对极限膨胀率的影响	324
10.5	镁合金管材热态内压成形起皱行为	326
10.5.1	临界起皱应力	326
10.5.2	补料量对皱纹形状的影响	327
10.5.3	内压对皱纹几何形状的影响	329
10.5.4	温度对皱纹形状的影响	330
10.6	变径管热油介质差温成形	331
10.6.1	管材热油介质差温成形原理	331
10.6.2	轴向温差对起皱行为的影响	332
10.6.3	轴向温差对成形过程的影响	333
10.6.4	加载路径对成形过程的影响	334
参考文献		335
索引		344