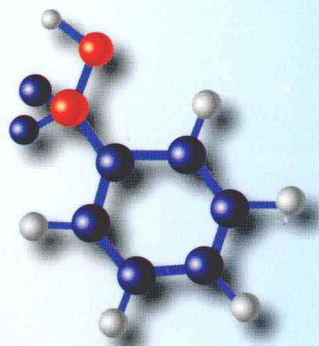




21世纪全国高等院校材料类**创新型**应用人才培养规划教材



MATERIALS

特种塑性成形理论及技术

主 编 李 峰
主 审 刘晓晶

Materials



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

特种塑性成形理论及技术

主 编 李 峰

副主编 初冠南 林俊峰 李 超



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

“特种塑性成形”是材料成型及控制工程专业的基础课,本书以特种塑性成形—体积成形—板材成形—高能率成形为内容体系,将“非常规”塑性成形方法进行了分类介绍。本书共分10章,包括绪论、超塑性成形、微塑性成形、锻造成形、挤压成形、摆动辗压、板材成形、拼焊成形、旋压成形和高能率成形。本书在编写过程中,注重基础知识及概念的强化,并力求联系实际,通过应用案例对每种塑性工艺进行深入浅出的阐述,增强学生对相关知识的理解;内容丰富且循序渐进,适合于学生学习及掌握。

本书可作为全国高等院校材料成型及控制工程、材料加工工程、金属材料和冶金工程等相关专业本科生、研究生的通用教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

特种塑性成形理论及技术/李峰主编. —北京:北京大学出版社, 2011. 1

(21世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-18345-8

I. ①特… II. ①李… III. ①金属压力加工—塑性变形—高等学校—教材 IV. ①TG301

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第260423号

书 名: 特种塑性成形理论及技术

著作责任者: 李 峰 主编

策 划 编 辑: 童君鑫

责 任 编 辑: 宋亚玲

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-18345-8/TG·0013

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 河北滦县鑫华书刊印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 13.75印张 314千字

2011年1月第1版 2011年1月第1次印刷

定 价: 30.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

编审指导与建设委员会

成员名单（按拼音排序）

白培康（中北大学）	陈华辉（中国矿业大学）
崔占全（燕山大学）	杜彦良（石家庄铁道大学）
杜振民（北京科技大学）	耿桂宏（北方民族大学）
关绍康（郑州大学）	胡志强（大连工业大学）
李楠（武汉科技大学）	梁金生（河北工业大学）
林志东（武汉工程大学）	刘爱民（大连理工大学）
刘开平（长安大学）	芦笙（江苏科技大学）
裴坚（北京大学）	时海芳（辽宁工程技术大学）
孙凤莲（哈尔滨理工大学）	孙玉福（郑州大学）
万发荣（北京科技大学）	王春青（哈尔滨工业大学）
王峰（北京化工大学）	王金淑（北京工业大学）
王昆林（清华大学）	卫英慧（太原理工大学）
伍玉娇（贵州大学）	夏华（重庆理工大学）
徐鸿（华北电力大学）	余心宏（西北工业大学）
张朝晖（北京理工大学）	张海涛（安徽工程大学）
张敏刚（太原科技大学）	张锐（郑州航空工业管理学院）
张晓燕（贵州大学）	赵惠忠（武汉科技大学）
赵莉萍（内蒙古科技大学）	赵玉涛（江苏大学）

前 言

塑性加工是一门方兴未艾的工程科学。塑性加工方法既是材料制备的主要手段，又是金属加工及制造的重要支柱技术之一。随着信息时代的到来，与其相关的新兴产业得到迅猛发展，但塑性加工并未就此沦为“夕阳技术”，反而是与时俱进、充满生机地不断向前发展。

“特种”塑性工艺是相对于“常规”塑性工艺而言的，主要是指在特定应用领域内很有发展前途的塑性工艺方法。它不仅能补充常规塑性工艺，还是常规塑性工艺有益的延续及发展。特种塑性成形理论与技术作为材料成型及控制工程学科相关院校高年级本科生及研究生开设的一门专业课，可提高学生对塑性加工学科的整体认识，避免了“只见树木，不见森林”的片面了解。但目前与之相配套的教材较少，需要有一本全面介绍这方面新技术的书籍。本领域的学术大师王仲仁教授曾于1994年组织相关学者编写了《特种塑性成形》一书，受到同行及业内人士的一致好评，国内部分院校至今仍然沿用这套教材。近年来，随着科技的飞速发展，特别是计算机模拟技术的引入，使人们在认识和掌握金属塑性成形新工艺及拓宽其应用方面取得了显著成效，如液压成形、拼焊成形、多点成形及激光成形等“新”、“特”塑性成形工艺不断涌现并得到广泛应用。

本书的写作特点如下：

(1) 分类新颖。按照特种塑性成形、体积成形、板材成形、高能率成形这样的知识体系来划分，可将繁杂多样的“非常规”塑性成形技术进行分门别类，在以往的文献中鲜有此种分类。

(2) 学术性强。尽管本书涉及技术领域的范围较广，但杂而不乱，且在深入浅出地介绍工艺理论及特点的基础上，又介绍了该技术的相应研究成果。

本书可作为材料成型及控制工程高年级本科生、研究生专业教材，也可作为工程技术人员参考用书。

本书由李峰负责全书结构的设计、写作提纲、组织编写、图表处理及最后统稿定稿，由哈尔滨工业大学(威海)初冠南博士(第1章、第6章、第8章)、哈尔滨理工大学李超博士、初冠南博士(第2章、第3章)、哈尔滨理工大学李峰博士(第4章、第5章、第7章7.8节)、哈尔滨工业大学林俊峰博士(第7章7.1~7.5节、第9章)；哈尔滨工业大学(威海)张鹏博士(第7章7.6~7.7节)、合肥工业大学袁宝国博士(第10章)编写。哈尔滨理工大学刘晓晶教授审阅了本书。重庆科技学院李建辉博士和福州大学邓将华博士对书稿提出了有益的建议，在此表示衷心的感谢。

本书涉及的知识内容范围较广且专业性较强，上述人员均为近几年内于哈尔滨工业大学塑性加工专业毕业的博士生，对本学科的了解和认识还十分有限，因此，本书在编写过程中，还参引了较多本领域著名专家学者的研究成果及相关资料，在此对他们表示衷心的感谢！本书在出版过程中，得到北京大学出版社的大力支持，在此一并致以深切的谢意。

由于编者对塑性成形理论和技术的一些问题仍然在研究及认识过程当中，书中难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2010年11月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.2.1 微尺度效应	33
1.1 国际塑性加工简介	2	3.2.2 微塑性成形的不均匀性 ...	36
1.1.1 塑性加工的概念	2	3.2.3 微塑性成形力学基础	37
1.1.2 代表性人物及组织	2	3.3 微塑性成形设备与装置	41
1.2 塑性成型的主要发展趋势	3	3.3.1 微塑性成形设备	41
1.2.1 省力成形	3	3.3.2 微型模具的加工	42
1.2.2 柔性成形	4	3.4 微塑性成形工艺	44
1.2.3 轻量化成形	5	3.4.1 板料微冲压成形	44
1.2.4 复合成形	5	3.4.2 微零件体积成形	47
习题	6	习题	50
第 2 章 超塑性成形	7	第 4 章 锻造成形	51
2.1 超塑性成形的概念及特点	8	4.1 精密锻造	52
2.1.1 超塑性的概念	8	4.1.1 原理及特点	52
2.1.2 超塑性变形的特点	9	4.1.2 应用概况	53
2.2 超塑性分类及影响因素	10	4.1.3 研究及发展现状	54
2.2.1 超塑性的分类	10	4.2 等温锻造	55
2.2.2 超塑性变形的影响因素 ...	13	4.2.1 原理及特点	55
2.3 超塑性变形的机理	16	4.2.2 工艺设计	56
2.3.1 组织变化	16	4.2.3 研究及发展现状	57
2.3.2 空洞特征	16	4.3 粉末锻造	59
2.3.3 变形机理	17	4.3.1 原理及特点	59
2.4 超塑性成型的应用	22	4.3.2 预成形坯设计	60
2.4.1 超塑性成型的应用概述 ...	22	4.3.3 研究及应用现状	61
2.4.2 铝合金超塑性成形	23	4.4 液态模锻	62
2.4.3 钛合金超塑性成形	23	4.4.1 原理及特点	62
2.4.4 镁合金超塑性成形	24	4.4.2 不同材料的液态模锻	63
2.5 超塑性成型展望	25	4.4.3 研究及应用现状	64
习题	28	4.5 闭塞式锻造	66
第 3 章 微塑性成形	29	4.5.1 原理及特点	66
3.1 微塑性成形概述	30	4.5.2 工艺设计	66
3.1.1 背景	30	4.5.3 研究及应用现状	67
3.1.2 原理及分类	31	4.6 局部加载成形	68
3.1.3 发展现状及趋势	31	4.6.1 原理及特点	68
3.2 微塑性成形理论基础	33	4.6.2 成形缺陷	68
		4.6.3 研究及应用现状	70
		习题	72



第 5 章 挤压成形 73

- 5.1 静液挤压 74
 - 5.1.1 原理及特点 75
 - 5.1.2 特殊材料静液挤压 76
 - 5.1.3 研究及发展现状 78
- 5.2 连续挤压 79
 - 5.2.1 工艺原理 79
 - 5.2.2 技术特点及优势 79
 - 5.2.3 研究及应用概况 80
- 5.3 积极摩擦挤压 81
 - 5.3.1 摩擦的作用方式 81
 - 5.3.2 金属流动行为 82
 - 5.3.3 研究概况 83
- 5.4 侧向挤压 84
 - 5.4.1 原理及特点 84
 - 5.4.2 等径角挤压(ECAP) 84
- 5.5 半固态挤压 85
 - 5.5.1 原理及特点 86
 - 5.5.2 研究及应用现状 86
- 5.6 其他挤压成形技术 87
 - 5.6.1 带内锥冲头挤压 87
 - 5.6.2 剪切挤压 88
 - 5.6.3 弯曲型材挤压 89
 - 5.6.4 变断面型材挤压 90
 - 5.6.5 固态连接挤压 91
 - 5.6.6 固相再生挤压 92
- 习题 93

第 6 章 摆动辗压 94

- 6.1 摆动辗压的原理及特点 95
 - 6.1.1 摆动辗压的原理 95
 - 6.1.2 摆动辗压的特点 96
 - 6.1.3 摆动辗压的适用范围 97
- 6.2 摆动辗压工艺参数的确定 98
 - 6.2.1 接触面积率 98
 - 6.2.2 摆辗力 98
 - 6.2.3 每转进给量 99
 - 6.2.4 摆头倾角 99
 - 6.2.5 摆头转速 99
 - 6.2.6 压力能 99
- 6.3 加载方式对金属流动的影响 100
 - 6.3.1 圆柱摆动辗压模型 100

- 6.3.2 应力、应变速率分析 101
- 6.4 摆动辗压成形的模具 105
 - 6.4.1 模具受力特点及材料 105
 - 6.4.2 摆辗模具设计 105
- 习题 109

第 7 章 板材成形 110

- 7.1 充液拉深 111
 - 7.1.1 原理及特点 111
 - 7.1.2 主要工艺参数 116
 - 7.1.3 发展趋势和展望 116
- 7.2 内高压成形 117
 - 7.2.1 原理及特点 117
 - 7.2.2 主要工艺参数 118
 - 7.2.3 研究及应用概况 120
- 7.3 粘性介质成形 124
 - 7.3.1 原理及特点 124
 - 7.3.2 成形工艺设计 125
 - 7.3.3 应用及发展 126
- 7.4 聚氨酯成形 127
 - 7.4.1 原理及特点 127
 - 7.4.2 聚氨酯特性与分类 128
 - 7.4.3 典型成形工艺 129
- 7.5 多点成形 131
 - 7.5.1 原理及特点 131
 - 7.5.2 成形方式及工艺过程 134
 - 7.5.3 应用与发展 135
- 7.6 数控增量成形 137
 - 7.6.1 原理及特点 137
 - 7.6.2 研究及应用概况 139
- 7.7 激光成形 141
 - 7.7.1 成形原理 141
 - 7.7.2 工艺特点 142
 - 7.7.3 主要影响因素 142
- 7.8 高强度热成形 143
 - 7.8.1 高强度钢的力学性能 143
 - 7.8.2 工艺特点及实例 145
 - 7.8.3 主要技术条件 146
- 习题 148

第 8 章 拼焊成形 149

- 8.1 拼焊成形原理及特点 151
 - 8.1.1 拼焊成形的基本原理 151

8.1.2 拼焊成形的特点	151	9.3.3 封头普旋成形	175
8.2 拼焊成形提出及应用	151	9.3.4 车轮钢旋压	175
8.2.1 拼焊成形的提出	151	9.3.5 无缝整体气瓶旋压	175
8.2.2 拼焊成形的应用	152	9.3.6 带轮旋压	176
8.3 拼焊板成形工艺	154	9.3.7 带内外纵向齿筒体旋压 ...	176
8.3.1 焊缝的移动问题	154	9.3.8 波纹管旋压	177
8.3.2 成形极限	155	9.4 新型旋压成形工艺	177
8.3.3 起皱问题	157	9.4.1 分形旋压成形工艺	177
8.3.4 成形的其他问题	158	9.4.2 张力旋压成形工艺	180
8.3.5 影响成形质量的主要因素	158	习题	183
8.4 拼焊管成形工艺	159	第 10 章 高能率成形	184
8.4.1 成形极限问题	160	10.1 高能率成形原理及特点	185
8.4.2 焊缝移动问题	161	10.1.1 成形原理	185
8.4.3 壁厚分布问题	161	10.1.2 成形特点	186
8.5 拼焊成形的焊接技术	163	10.1.3 应用领域	187
8.5.1 概述	164	10.2 爆炸成形	187
8.5.2 滚压电阻焊	164	10.2.1 成形原理	188
8.5.3 电子束焊	165	10.2.2 工艺参数	189
8.5.4 激光焊	165	10.2.3 成形特点	191
习题	166	10.2.4 应用领域	192
第 9 章 旋压成形	167	10.3 电液成形	193
9.1 旋压成形原理及特点	168	10.3.1 成形原理	193
9.1.1 成形原理	168	10.3.2 成形特点	196
9.1.2 工艺特点及设备	169	10.3.3 电爆成形	196
9.1.3 变形及受力分析	170	10.3.4 应用领域	197
9.2 旋压工艺分类及材料	172	10.4 电磁成形	198
9.2.1 有色金属	172	10.4.1 成形原理	198
9.2.2 钢材	173	10.4.2 成形特点	200
9.3 典型旋压成形技术	174	10.4.3 应用领域	201
9.3.1 筒形件强力旋压	174	习题	205
9.3.2 锥形件剪切旋压	174	参考文献	206

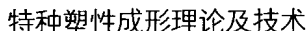
第1章

绪论



本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
国际塑性加工 领域简介	掌握塑性加工的概念 了解代表性人物及组织	塑性加工概念及“特”的含义 各国代表性人物及国际组织
塑性成形的主 要发展趋势	了解塑性成形的主要发展趋势	省力成形、柔性成形、轻量化成形、 复合成形等趋势



所谓“特”，其实只是个相对概念，是相对常规或传统塑性成形而言的。从时间来看，特种塑性成形多是历史较短、发展迅速、应用领域有逐渐扩大趋势的成形方法。一种新工艺之所以能产生并得到迅速发展，首先是由于它符合技术发展的总趋势，且它也是活学活用学科基本知识及相关规律的必然产物。例如：液压成形技术的出现是顺应工艺过程柔性化、零件整体化、制品尺寸易于变更等发展的总趋势，如内高压成形仅需部分模具，且显著地较少了成形工序及成本；无模胀球时甚至不需要模具、压力机等“硬件”，又是将塑性力学活用的结果。

特种塑性成形的产生及发展同样离不开世界这个“大舞台”，因此，应从与国际接轨的角度来了解和认识塑性加工领域日新月异的变化及发展趋势。

1.1 国际塑性加工简介

1.1.1 塑性加工的概念

塑性加工 (Technology of Plasticity; Mechanical Working Technology; Metal Forming), 顾名思义就是利用材料的可塑性进行加工的一种方法。塑性两字起源于中国, 但日本一直沿用“塑性加工”一词, 与俄文的“压力加工”相当, 涵盖轧制、拉压、拉拔、锻造与冲压工艺。前三种工艺的产品主要是管、棒、型、线、板及带材; 后两种工艺主要是对前述材料进行再加工(二次加工), 仍然是利用材料的可塑性, 这时产品主要是零件毛坯或直接制成零件。

在日本及西欧的高等学校与研究所,对一次加工及二次加工的界限并不明显。而在俄罗斯,两者分工比较明显:冶金类院校主要从事一次加工,机械类院校则主要从事二次加工。长期以来,我国也受到其影响。最近,高等学校与研究单位正在逐步取消一次加工与二次加工的界限。

1.1.2 代表性人物及组织

目前,世界各国从事塑性加工领域相关研究的学者很多,其中,较著名的代表性人物见表 1-1。

表 1-1 各国塑性加工领域著名的代表性人物

国家	代表性人物						
美国	T. Altan	G. Lahoti	K. J. Weinmann	R. Wagnor	R. Shivpuri	B. Avitzur	S. kobayashi
德国	K. Lange	M. Geiger	E. Doege	R. Koop	E. Vollertsen	K. Siegert	

(续)

国家	代表性人物					
英国	T. A. Dean	A. Bramley	P. Standring	F. W. Travis	W. Johnson	
法国	J - L. Chenot	J - C. Gelin	Y. Q. Guo			
日本	T. Nakagawa	T. Aizawa	M. Kiuch	K. Kondo	K. Osakada	J. Yanagimoto H. Kudo
其他	M. S. J. Hashmi (爱尔兰)	N. Bay (丹麦)			D. Y. Yang (韩国)	

近年来,世界各国塑性加工领域的相关学者各种交流非常广泛与活跃,其中,较有代表性的国际会议与组织如下:

- (1) ICTP (International Conference on Technology of Plasticity);
- (2) NAMRC (North American Metalworking Research Conference);
- (3) NUMISHEET, NUMIFORM (Numerical Simulation);
- (4) ICNFT (International Conference on New Forming Technology);
- (5) ICFG (International Cold Forging Group);
- (6) IDDRG (International Deep Drawing Research Group);
- (7) CIRP (International Institution for Production Engineering)。

每三年召开一次的国际塑性加工会议(ICTP)是目前国际塑性加工领域规模最大、范围最广、水平最高、权威性最强的国际学术会议,被誉为塑性加工界的“奥林匹克”。ICTP从1984年至2008年共举办了9届,2011年第10届会议将在德国的亚琛召开。需特别指出的是,1993年第4届ICTP在中国北京举办,哈尔滨工业大学王仲仁教授为大会主席,会议举办非常圆满,得到了与会代表一致称赞。

1.2 塑性成型的主要发展趋势

塑性加工既是材料制备的主要手段,又是装备制造的重要环节,它正随着新材料的出现及对装备性能的不断完善而提出的新要求面临很多挑战与机遇,发展的总趋势如下。

1.2.1 省力成形

与铸造、焊接等工艺内部组织及产品性能等方面存在显著缺陷相比,塑性成形方法具有不可比拟的优势。但使材料达到塑性需要一定的外力,传统塑性工艺往往需较大吨位的压力机才能实现,相应的设备重量及初投资就很大。但是,人们并不是沿着大工件→大变形力→大设备→大投资这样的逻辑发展下去的。

塑性成形中所需载荷的表达式为

$$F=K\sigma_s A \quad (1-1)$$

式中: K 为应力状态系数,又称拘束系数,对于异号应力状态, $K<1$, 对于三向压应力状态, $K>1$, 有时可能达到 $K=6$, 甚至更高; σ_s 为流动应力, 它表征材料在特定条件下抵抗塑性变形的能力, 取决于所变形材料的成分、组织、变形温度、变形程度、变形速率等; A 为接触面积在主作用力方向上的投影。



由式(1-1)可以看出, 决定变形力 F 的主要因素及省力的主要途径有三种:

1. 减少应力状态系数 K

从塑性加工力学中得知, 产生塑性变形必须满足以下条件:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_s \quad (1-2)$$

式中: σ_1 为代数值最大的主应力; σ_3 为代数值最小的主应力。

由式(1-2)可见, 对于异号应力状态, 任何一个应力的绝对值皆小于 σ_s , 此时 $K < 1$ 。同理可见, 对于同号应力状态, 必有一个应力状态的绝对值大于 σ_s 。对三向压应力成形工序, 如果绝对值最小的应力数值较大, 相当于拘束较严重, 则变形所需绝对值最大的主应力也相应增加, 这将导致变形力大幅度地增加。然而, 固体与流体有显著区别, 固体的宏观流动是由变形体中各微区的变形积累引起的。它还可以承受拉应力, 在拉应力作用下, 也可能成形, 且这时更容易, 变形力也小。

2. 降低流动应力 σ_s

采用较低应变速率或较高温度下进行成形, 都可实现降低流动应力。这类成形方法包括超塑成形、半固态成形。

3. 减少接触面积 A

减少接触面积不仅使总压力减少, 也使变形区单位面积上的作用力减少, 因为减少了摩擦对变形的拘束。图 1.1 所示为利用减少接触作用面积而进行成形的塑性工艺, 属于这类成形工艺的有摆辗、旋压、楔横轧、数控增量、局部加载等。

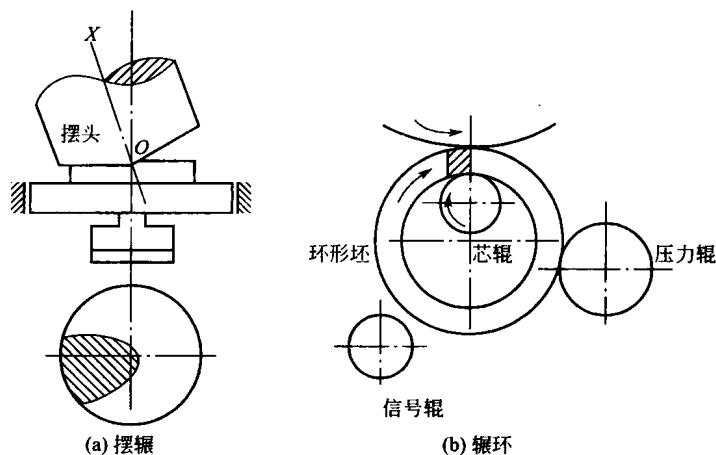


图 1.1 塑性成形中的实际接触面积(阴影部分)

1.2.2 柔性成形

柔性成形是指对产品变化适应能力很强的加工方法, 如单模、点模、小模、少模、无模、软模及可调节模等。

柔性成形是制造业的总趋势, 即一种迅速适应产品与构件多变性的加工制造方法。这不仅是市场竞争的需求, 也是塑性成形发展的大趋势。减少装备(包括模具)的数量无疑会增加制造的柔性, 软模成形(含液压成形、聚氨酯成形及气压成形)均可省去凸模或凹模,

甚至不用模具的无模胀形已经得到应用,利用可调节的离散化模具(多点成形)成形将会越来越受到重视。

塑性成形制品通常是借助工具或模具来实现。所以,提高塑性加工柔性的方法有两种:工具或模具可被替代(如液体,气体或弹、粘性物质)或可控(如运动方式、运动速度)。

单模成形是指仅用凸模或凹模成形,当产品形状尺寸变化时不需要同时制造凸凹模。属于这类成形方法的有爆炸成形、电液或电磁成形、聚氨酯成形及液压成形等。

点模成形也是一种柔性很高的工艺方法,将凸模或凹模用多个小冲头进行离散组合而成。图 1.2 为多点成形原理示意图,当曲面参数变化时,仅需调整一下上下冲头的位置即可。

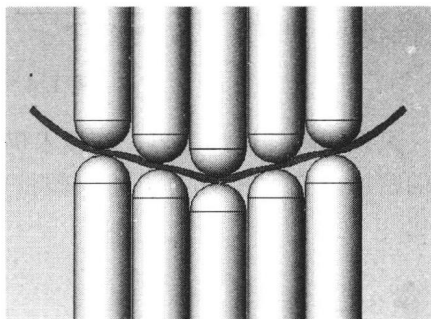


图 1.2 多点成形原理示意图

单点成形近年来得到较快发展,实际上钣金工历来就是逐点用锤敲打成很多复杂零件的,如日本在早期就采用这种方式造船的外板。近年来,随着数控技术的发展,使单点渐进成形数控化成为一个有相当应用前景的技术。但应当指出,单点成形时变形并不局限于所作用的点,周围也会发生变化,所以,要研究不同变形区间的协调作用关系。

本书中所述“无模胀球”也是一种柔度很高的制球工艺,当球的直径及厚底变化时,只需改变一下胀前的壳体形状及胀形压力即可。

拼焊成形是在绿色制造和轻量化制造的大背景下提出的,并在汽车制造上得到了广泛的应用,目前,有向飞机制造业等领域扩展的趋势。

1.2.3 轻量化成形

轻量化成形有两个主要途径:一是从材料角度,采用铝合金、镁合金及高强钢;二是从结构角度,采用液压成形和拼焊成形。前者是“按需配料,物尽其用”;后者是“以空代实”,在减轻质量的同时保持构件有很高的刚度。如管件内高压成形、拼焊板成形等均为此类成形方法。图 1.3 所示为内高压成形与机械加工分别获取阶梯轴零件的对比。

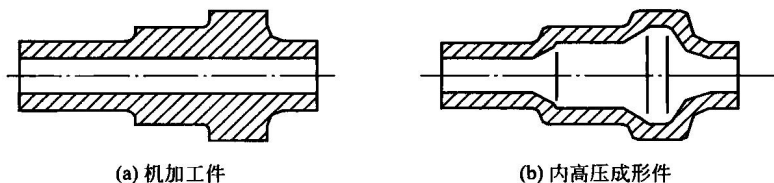


图 1.3 阶梯轴

1.2.4 复合成形

近年来,塑性成形与其他技术交叉及结合的方法不断涌现,并逐渐得到重视。复合成形不仅能有效地减少工序及成本,还能满足多种要求的实际需要。例如,高强钢板热冲压成形与淬火技术结合(图 1.4)、激光加热与成形结合、磁脉冲与冲压及内高压成形结合、



喷射成形与连续挤压成形结合、铸锻成形结合、成形与焊接结合等复合成形技术正得到重视。值得一提的是, 以上所述各种复合成形方法, 在近些年的国家自然科学基金资助项目中均有体现, 可以看出, 通过学科交叉来实现技术创新是塑性成形领域将来发展的一个重要方向。

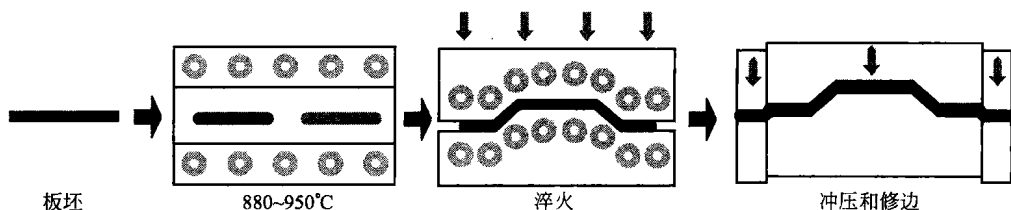
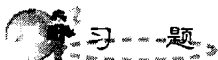


图 1.4 高强钢板热冲压成形与淬火

纵观国际塑性加工界, 新技术仍然层出不穷, 高等科研院所与相关企业及产品用户之间的密切合作, 将有助于加快塑性加工技术的创新步伐, 有助于研究成果迅速得到产业化。



习 题

1. 特种塑性成形中的“特”是什么意思?
2. 简述塑性加工一词在各国的区别。
3. 简述塑性成形的发展趋势。
4. 举例说明实现省力成形的途径。

第 2 章

超塑性成形



本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
超塑性成形的概念及特点	掌握超塑性概念 了解超塑性变形特点	超塑性的定义 超塑性状态下的宏观变形特征
超塑性的分类及影响因素	掌握超塑性的分类 熟悉超塑性变形的影响因素	组织超塑性、相变超塑性等概念及特点 应变速率、成形温度、晶粒尺寸等对超塑变形的影响
超塑性变形机理	掌握超塑变形过程中的组织变化及空洞特征 了解超塑性变形的机理	超塑性变形过程中的微观组织变化及空洞特征 几种典型的超塑性变形机理模型
超塑性成形的应用及展望	掌握超塑性成形的基本原理及特点 熟悉常用超塑性材料超塑成形技术的应用 了解超塑性成形的发展趋势	超塑性成形的基本原理及模具结构 各种常用超塑性材料的典型应用 超塑性成形的展望



导入案例

材料超塑性及其应用

超塑性现象最早的报道是在1920年,德国人罗森汉等发现Zn-4Cu-7Al合金在低速弯曲时,可以弯曲近 180° 。1928年英国物理学家森金斯下了一个定义:凡金属在适当温度下变得像软糖一样柔软,而且其应变速度为 10mm/s 时产生 300% 以上的延伸率的,均属超塑性现象。1945年苏联包奇瓦尔等针对这一现象提出了“超塑性”这一术语,并在许多有色金属共晶体及共析体合金中,发现了延展性特别显著的特异现象。

20世纪60年代以后,研究者发现许多有实用价值的锌、铝、铜合金中也具有超塑性。于是,苏联、美国和西欧一些国家对超塑性理论和加工发生了兴趣。特别在航空航天上,面对极难变形的钛合金和高温合金,普通的锻造和轧制等工艺很难成形,而利用超塑性加工却获得了成功。到了20世纪70年代,各种材料的超塑性成形已发展成流行的新工艺。

超塑加工具有很大的实用价值,只要很小的压力就能获得形状非常复杂的制品。试想一下,金属变成了饴糖状,从而具有可吹塑和可挤压的柔软性能。因此,过去只能用于玻璃和塑料的真空成形、吹塑成形等工艺被沿用过来,用以加工难变形的合金。而这时所需的压力很小,只相当于正常压力加工时的几分之一到几十分之一,从而节省了能源和设备。使用超塑性加工制造零件的另一优点是可一次成形,省掉了机械加工、铆焊等工序,达到节约原材料和降低成本的目的。在气胀超塑性合金薄板时,只需具备一种上模或下模即可,节省一半模具费用。超塑性加工的缺点是加工时间较长,由普通热模锻的几秒增至几分。

资料来源: <http://baike.baidu.com/view/381627.htm>.

2.1 超塑性成形的概念及特点

2.1.1 超塑性的概念

材料在变形过程中,若综合考虑其变形时的内外部因素,使其处于特定的条件下,如一定的化学成分、特定的显微组织(包括晶粒大小、形状及分布等)、固态相变(包括同素异构转变、有序-无序转变及固溶-脱溶变化等)能力、特定的变形温度和应变速率等,则材料会表现出异乎寻常高的塑性状态,即所谓的超塑性变形状态。关于超塑性的定义,目前还没有一个严格确切的描述。通常认为超塑性是指材料在拉伸条件下,表现出异常高的伸长率而不产生缩颈与断裂现象,当伸长率 $\delta \geq 100\%$ 时,即可视为超塑性。实际上,有些超塑性材料,其伸长率可达到百分之几百,甚至达到百分之几千,如在超塑拉伸条件下Sn-Bi共晶合金可获得 1950% 的伸长率,Zn-Al共晶合金的伸长率可达 3200% 以上。所谓超塑性,还可理解为材料具有超常的均匀变形的能力,因此,也有人用应变速率敏感性指数 m 值(m 值反映了材料抗局部收缩或产生均匀拉伸变形的能力)的大小来定义超塑性,即当材料的 m 值大于 0.3 时,可视为其具有超塑性。

超塑性成形(SuperPlastic Forming, SPF)的主要优越性在于它能极大地发挥材料塑性潜力和大大降低变形抗力,从而有利于复杂零件的精确成形,这对于像钛合金、铝合金、镁合金、合金钢和高温合金等较难成形的金属材料的成形,尤其具有重要意义。

近几十年来,对有关超塑性的本质特性、变形机理及应用技术等进行了广泛而深入的研究。在各种金属材料中(包括有色金属、钢铁、合金材料等),具备超塑性的组织状态和控制条件正越来越多地被开发出来,甚至在一些非金属材料,如陶瓷、有机材料等,亦发现具有超塑性。

2.1.2 超塑性变形的特点

材料在超塑性状态下的宏观变形特征,可用大变形、无缩颈、小应力、易成形等来描述。

1. 大变形

超塑性材料在单向拉伸时 δ 值极高(按目前国外报道,有的 δ 值可高达5000%),表明超塑性材料在变形稳定性、均匀性方面要比普通材料好得多。这样使材料成形性能大大改善,可以使许多形状复杂、难以成形的材料(如某些钛合金)变形成为可能。例如,对人造卫星上使用的钛合金球形燃料箱,其壁厚为0.71~1.5mm,如采用普通的方法几乎无法成形,只有采用超塑性成形才有可能。

2. 无缩颈

一般金属材料在拉伸变形过程中,当出现早期缩颈后,由于应力集中效应使缩颈继续发展,导致提前断裂。拉断后的试样具有明显的宏观缩颈。超塑性材料的变形却类似于粘性物质的流动,没有(或很小)应变硬化效应,但对变形速度十分敏感,有所谓“应变速率硬化效应”,即当变形速度增加时,材料会强化。因此,超塑性材料变形时虽有初期缩颈形成,但由于缩颈部位变形速度增加而发生局部强化,从而使变形在其余未强化部分继续进行,这样使缩颈传播出去,结果获得巨大的宏观均匀的变形。因此可以说,超塑性的无缩颈是指宏观的变形结果,并非真的没有缩颈。产生超塑性变形的试样,断口部位的断面尺寸与均匀部位的相差很小,整个试样的变形梯度缓慢而均匀,对于典型超塑性合金Zn-22%Al来说,断口部位可达到头发丝那样细的程度,此时断面收缩率(ψ)接近于100%,因此超塑性材料的变形具有宏观“无缩颈”的特点,而通常情况下,脆性材料拉伸变形时 $\psi \approx 0$,一般塑性材料 $\psi < 60\%$ 。

3. 小应力

超塑性材料在变形过程中的变形抗力很小,它往往具有粘性或半粘性流动的特点。在最佳超塑性变形条件下,其流动应力 σ 通常只是常规变形的几分之一乃至几十分之一。例如,Zn-22%Al在超塑性变形时的流动应力不超过2MPa,TC4合金在950℃下的流动应力为10MPa左右;GCr15钢在700℃时流动应力为30MPa。由于超塑性成形时载荷低、速度慢、不受冲击,故模具寿命长,可以采用低强度、廉价的材料来制作模具。但对于高温成形,应采用相应的耐高温材料制作模具。

4. 易成形,工艺简单

超塑性成形时,不但金属变形抗力小,且流动性和充形性好,可一次成形形状极为复