



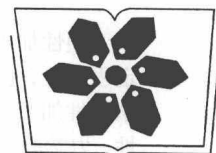
Advanced Metal
Forming Technology

塑性加工先进技术

张士宏 程 明 等 编著
宋鸿武 刘劲松



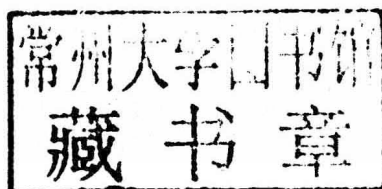
科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

塑性加工先进技术

张士宏 程 明 宋鸿武 刘劲松 等 编著



科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

塑性加工技术广泛应用于国民经济建设和国防建设的各个领域,在一定程度上,它反映了一个国家的制造业水平。本书重点介绍国内外近十年来塑性加工先进技术的最新科研进展、发展趋势及企业应用,注重材料特性、力学原理与工艺技术相结合所带来的创新及其相关的技术进步。本书内容分为5章:第1章为绪论部分;第2章介绍体积成形新技术;第3章介绍轧制与旋转加工成形先进技术;第4章介绍板材成形新技术;第5章介绍管材管件制备成形技术。

本书适合高等院校和科研院所材料加工工程专业的高年级本科生、研究生和相关企事业单位工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

塑性加工先进技术 / 张士宏等编著. —北京: 科学出版社, 2012
ISBN 978-7-03-034992-7

I. 塑… II. 张… III. 先进技术-塑性加工 IV. TG301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 134198 号

责任编辑: 张淑晓 丛洪杰/责任校对: 刘小梅
责任印制: 钱玉芬/封面设计: 耕者设计工作室

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>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 7 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2012 年 7 月第一次印刷 印张: 28 3/4

字数: 560 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

塑性加工技术广泛应用于国民经济建设和国防建设的各个领域，它在一定程度上反映了一个国家的制造业水平。塑性加工技术离不开先进的设备与模具，而且与信息、控制技术紧密相连。近十几年来，塑性加工技术发展异常迅速，一大批新技术在我国相继出现并得到应用。这得力于信息技术和控制技术的进步，更得力于中国经济的飞速发展。本书在此背景下出版，极具现实意义，对于相关行业研究生、科研人员及工程技术人员有重要的指导价值。

塑性加工是一门古老的技术，在我国有三千多年的历史，在埃及和欧洲也有很长的历史。从青铜器和铁器时代开始，塑性加工技术逐渐用于制造狩猎工具、劳动工具、生活器具和武器及其部件，比如出土的早期刀剑、炊具、器皿等古物。但这门技术在历史的长河中主要作为一门技艺以师徒方式传承下来，真正成为一门技术科学而得到快速发展和广泛应用还是在 19 世纪以后。自从法国科学家 Tresca 于 1864 年提出最大剪应力屈服准则并进行试验研究以来，全世界越来越多的科学家和工程技术人员投入到塑性加工理论和技术的研究开发当中。随着塑性加工力学理论的建立和发展、材料科学的成长以及信息和控制技术的进步，大量新型的设备诞生了，塑性加工技术发展越来越快。尤其是在 20 世纪 70 年代有限元技术开始应用到塑性加工研究和技术开发后，塑性加工技术成为一门真正的技术科学。

塑性加工技术主要包括金属材料的塑性加工制备技术和零件的成形加工技术两个领域。前者包括钢铁和有色金属板带管棒型材的轧制、挤压、拉拔等塑性加工制备技术，属于基本材料的制备领域，俗称金属材料的一次加工，且大多属于体积成形，主要特点为通过材料流动实现塑性成形和组织性能的控制。后者属于零件成形制造领域，主要包括零件的锻造、挤压和板材成形等，俗称二次加工。零件的锻造、挤压和一些厚壁管棒型材的成形也主要表现为体积成形的特点，材料不但发生形状变化，还伴随着显著的材料流动。大部分板材和管材的成形加工则表现为形状的显著变化，而材料流动不明显，应变量较小。旋转加工技术大多起源于轧制工业，在塑性成形中有很明显的特点，加工效率高、设备吨位小、变化多样，在企业界受到广泛重视，不但用于材料制备加工，还大量应用于零件成形制造。管材表现为品种规格和加工手段多样，出现了很多专门的管材成形工艺。

也因此,本书将先进塑性加工技术领域划分为体积成形、旋转加工、板料成形、管材成形四个部分。

法国和英国是世界上塑性加工技术发展最早的国家,随后德国、美国、俄罗斯和日本成为塑性加工技术研发的主要国家,目前这些国家仍是世界上塑性加工技术和设备最先进的几个国家。近20年来,中国、韩国的塑性加工技术也得到了快速发展,可以说,目前国际塑性加工技术发展的中心已经转移到了中国。德国、中国、日本和韩国成为塑性加工技术发展最快、规模投入最大的几个国家。近20年也是世界塑性加工技术发展最快的时期。冷挤压技术在德国、日本、美国得到了全面应用。超塑成形、等温锻造等新工艺也在世界各国得到应用。1995年,德国率先应用管材液压成形技术,随后在美国、日本、欧洲和中国得到快速发展。计算机模拟技术已成为各工业化国家塑性加工工艺和模具设计的常规设计和分析手段。

我国在过去20年也取得了诸多成果。我国的零件轧制技术、连续挤压技术、多点成形技术、铜管行星轧制技术已处于国际领先水平。同时,管材液压成形、超塑成形、等温成形、板材热成形等很多技术也达到了国际先进水平。可以说,改革开放以来,我国塑性加工科技工作者为国家的工业发展做出了很多重要贡献,构成世界塑性加工技术发展的重要组成部分。

基于国内外塑性加工技术近20年的发展,张士宏研究员及其团队编著了本书。本书凝炼了近20年来国内外塑性加工主要新技术的发展成果,反映了国际塑性加工技术的当前水平。本书也涵盖了作者团队十几年来在塑性加工领域所做的一些重要工作和科研进展。

张士宏研究员周围聚集了一批青年科技人才。他们是朝气蓬勃、有志于材料加工技术尤其是塑性加工技术创新与应用研究的年轻学者。他们将材料科学、塑性加工力学与工艺技术相结合进行创新性研究,将技术创新与企业应用紧密结合起来,与金龙精密铜管集团股份有限公司合作十余年,对铜管铸轧技术进行长期系统的研究和攻关,推动该企业成为国际同行业的龙头企业,进入全国制造业500强,是科研与生产相结合的一个典范。该团队还在高温合金管材热挤压制坯和特薄壁管材滚珠旋压技术方面取得了突破性进展,研制了多批高温合金、不锈钢管材,成功应用于航空航天等重要工程。此外,所承担的航空合金热锻成形热力组织多场耦合模拟与工艺优化研究(“973”项目)成果获得英国机械工程师学会(IMEchE)2010年度唯一的A. M. Strickland奖,这也是该奖项设立十余年来首次授予中国大陆学者。该团队积累了十余年的科研工作成果,为撰写这部有价值的著作奠定了基础。与此同时,作者注意汲取国内外同行的研

究成果，丰富了本书的内容。相信该书对于材料加工领域研究生、企业研发人员和科研工作者了解有关塑性加工方面的新进展与国内外动态有重要作用，特作序推荐。

全国塑性工程学会名誉理事长

王仲仁

2012年5月

前 言

塑性加工技术在机械、冶金、汽车、航空、航天、兵器、铁路、能源设施等工业部门得到广泛的应用。塑性加工技术发展速度之快、学科领域交叉之广，是过去任何时代都无法比拟的，把握塑性加工技术的现状和发展前景有助于及时研究、推广和应用高新技术，推动塑性加工技术的不断发展。目前国内市场上还没有一部全面、系统阐述塑性加工先进技术及其相关基础理论最新进展的专著，现有资料多是零散的文献报道，这给相关人员学习、消化、理解与应用塑性加工先进技术带来了很大麻烦。鉴于此，我们决定编写《塑性加工先进技术》一书。

本书重点介绍塑性加工技术近十年来的最新进展，尤其是信息化和自动化的应用给塑性加工技术带来的最新发展和应用。本书注重塑性加工技术关于材料特性与加工工艺相结合所带来的应用及相关的技术问题，注重塑性加工先进技术发展趋势和最新科研进展，具体包括体积成形技术、轧制与旋转加工成形先进技术、板材成形新技术及管材管件制备成形技术。本书内容包括本团队多年的研究成果与专利并参考了近年来国内外出版的主要专著和大量科技论文。塑性加工技术领域近年来在国内外得到了快速发展，在国际主要前沿领域，国内同行也取得了很多重要研究成果，其中不乏一些中国独立开发的国际领先科技研究成果，例如北京科技大学的楔横轧技术、大连交通大学的连续挤压技术、吉林大学的多点成形技术、东北大学的板带铸轧技术等，这些内容都在本书中得到了反映。

全书理论与实践并重，在阐述基础理论的同时充分结合生产和工程应用实际，反映最新科技发展成果，具有较高的学术价值和实际应用价值。通过阅读本书，读者可以掌握塑性加工先进技术的最新发展趋势与研究热点，将理论分析与工程实践紧密联系起来。本书有助于我国塑性加工行业对国内外先进加工制造技术的引进、消化、推广与应用，从而提升我国塑性加工企业的技术水平，增强市场竞争能力。

本书主要由张士宏(第1、4章)、程明(第3章)、刘劲松(第5章)、宋鸿武(第2章)编写，张士宏负责全书统稿和定稿，程明负责全书的校对，宋广胜参与了部分章节的修改。很多国内同行为本书有关内容撰稿或提供帮助。例如，大连交通大学李冰就连续挤压技术(2.2节)，吉林大学刘化民就闭塞模锻(2.4节)，沈阳理工大学王忠堂就无模拉伸成形(2.9节)和薄壁管材与内螺纹管材滚珠旋压(5.5节)，沈阳大学张海渠就楔横轧与斜轧(3.1节)、辊锻(3.2节)、摆动辗压(3.5节)及拉深成形新工艺(4.3节)，武汉理工大学兰箭就环件轧制(3.4节)，机械科学研究总院陆辛就高

能率成形技术(4.4 节),首都航天机械总公司张文忠、朱平萍就磁脉冲成形技术(4.5 节),吉林大学李明哲就多点成形技术(4.6 节),金龙精密铜管集团股份有限公司于传富就外翅片管铜管生产加工及工艺(5.4 节),本团队博士后宋广胜就连铸连轧(3.6 节)、博士生唐伟东就铜管浮动芯头拉拔(5.3 节)、博士毕业生肖寒就管材弯曲(5.7 节)提供了稿件,上海交通大学李淑慧教授参与了激光拼焊毛坯成形(4.7 节)的撰写。在此表示衷心的感谢!

特别感谢全国塑性工程学会名誉理事长、哈尔滨工业大学王仲仁教授为本书作序。

感谢中国科学院科学出版基金对本书的出版提供资助。

由于作者水平有限,书中内容难免有错漏之处,还望读者不吝赐教。

张士宏

2012 年 5 月

目 录

序

前言

第1章 绪论	1
1.1 现代科学技术的发展为塑性加工新技术提供了技术支撑	1
1.2 材料、工艺与设备一体化是塑性加工技术的发展趋势	3
1.3 工业现代化为塑性加工技术提供了广阔的需求	5
1.4 中国学者为国际塑性加工技术的发展做出了重要贡献	7
参考文献	9
第2章 体积成形新技术	11
2.1 铝合金型材挤压工艺	11
2.1.1 挤压工艺概述	11
2.1.2 铝合金型材的可挤压性与挤压条件	16
2.1.3 铝合金型材挤压方法	18
2.1.4 用热挤压法生产大型铝合金型材的优缺点	27
2.2 连续挤压技术	28
2.2.1 连续挤压技术概述	29
2.2.2 连续挤压和连续包覆技术原理与工艺特点	29
2.2.3 连续挤压工艺	30
2.2.4 连续包覆工艺	35
2.3 超塑成形	38
2.3.1 超塑性及其特点	38
2.3.2 超塑性的分类	39
2.3.3 超塑性的本构关系	40
2.3.4 超塑成形技术	41
2.3.5 国内外超塑成形技术工程应用	42
2.4 闭塞模锻	47
2.4.1 引言	47
2.4.2 闭塞模锻原理	48
2.4.3 液压模架简介	49
2.4.4 闭塞模锻工艺	52

2.4.5 技术经济分析	54
2.5 粉末锻造	56
2.5.1 粉末锻造工艺原理	56
2.5.2 金属粉末的选择及制取	58
2.5.3 粉末锻件的后续处理和加工	58
2.5.4 粉末锻造工艺优点	58
2.5.5 粉末锻造的应用	60
2.5.6 粉末锻造的技术关键	61
2.5.7 粉末锻造设备的特性	65
2.5.8 粉末锻造的发展趋势	67
2.6 半固态成形技术	68
2.6.1 半固态成形技术的特点	68
2.6.2 半固态合金的制备方法	69
2.6.3 半固态成形工艺	77
2.6.4 金属半固态成形的工业应用	78
2.6.5 半固态成形技术研究和应用展望	79
2.7 快速成形技术	80
2.7.1 快速成形技术的基本原理和特点	80
2.7.2 快速成形技术类型	81
2.7.3 快速成形技术的应用	86
2.7.4 快速成形技术的发展方向	87
2.8 微塑性成形技术	88
2.8.1 微塑性成形技术概述	88
2.8.2 微塑性成形的应用前景	88
2.8.3 国内外微塑性成形研究现状	89
2.8.4 大块非晶合金微塑性成形技术的研究	99
2.9 无模拉伸成形	101
2.9.1 无模拉伸成形基本原理	101
2.9.2 无模拉伸工艺基本特征	102
2.9.3 无模拉伸变形机制	104
2.9.4 无模拉伸变形及力能参数	106
2.9.5 无模拉伸成形工艺应用	110
2.10 铝合金轮毂铸旋新技术	113
2.10.1 铝合金轮毂铸旋新技术的发展背景	113
2.10.2 铝合金轮毂铸旋新技术概述	114

2.10.3 铝合金轮毂铸坯热旋压工艺原理和设备	116
2.10.4 铝合金轮毂铸坯热旋压工艺参数	119
2.10.5 铝合金轮毂铸坯热旋压主要缺陷	122
2.10.6 铝合金轮毂铸坯热旋压过程的有限元模拟分析	123
参考文献	128
第3章 轧制与旋转加工成形先进技术	134
3.1 楔横轧与斜轧	134
3.1.1 楔横轧	134
3.1.2 孔型斜轧	139
3.1.3 仿形斜轧	145
3.2 辊锻	147
3.2.1 辊锻特点与辊锻机	147
3.2.2 辊锻变形与辊锻模膛	150
3.2.3 制坯辊锻设计	154
3.2.4 成形辊锻设计	156
3.2.5 辊锻力能与辊锻模具	158
3.3 高强钢板的辊压成形	161
3.4 环件轧制	167
3.4.1 环件轧制的起源和分类	167
3.4.2 环件轧制过程的基本原理和工艺流程	168
3.4.3 环件轧制的研究现状	170
3.4.4 环件轧制的应用	172
3.5 摆动辗压	173
3.5.1 工作原理、特点和应用	173
3.5.2 摆辗机	175
3.5.3 摆辗技术参数	178
3.5.4 摆辗变形流动	179
3.5.5 摆辗力能参数计算	182
3.5.6 摆辗模具	184
3.6 连铸连轧	186
3.6.1 连铸技术	187
3.6.2 连铸与连轧的关键技术	188
3.6.3 管材连轧	190
3.6.4 型材连轧	193
3.7 金属层状材料复合成形技术	196

3.7.1	金属层状复合材料的发展及应用	197
3.7.2	金属层状材料传统复合技术	198
3.7.3	金属层状材料复合成形新技术	202
3.7.4	金属层状复合材料的轧制复合技术及其应用	206
3.8	板材异步轧制	215
3.8.1	板材异步轧制原理	216
3.8.2	异步轧制中“搓轧区”的形成	219
3.8.3	轧制力计算	220
3.8.4	异步轧制状态	221
3.8.5	异步轧制的应用	222
3.9	板材交叉轧制	223
3.9.1	交叉轧制型式和特点	223
3.9.2	交叉轧制原理	224
3.9.3	变形区金属流动规律	226
3.9.4	轧制压力计算	227
	参考文献	228
第4章	板材成形新技术	230
4.1	板材液压成形与充液拉深成形技术	230
4.1.1	液压成形的分类	230
4.1.2	板材液压成形	230
4.2	特种温热冲压成形技术	242
4.2.1	镁合金温热冲压成形	242
4.2.2	钛合金板材温热成形	251
4.2.3	汽车高强度热冲压热成形技术	255
4.3	拉深成形新工艺	265
4.3.1	拉深过程的变形流动	265
4.3.2	多次拉深	271
4.3.3	防皱压边问题	274
4.3.4	变薄拉深	278
4.4	高能率成形技术	282
4.4.1	电液成形	282
4.4.2	爆炸成形技术	287
4.5	磁脉冲成形技术	290
4.5.1	概述	290
4.5.2	磁脉冲加工原理	291

4.5.3 磁脉冲加工特点	291
4.5.4 基本加工方式	292
4.5.5 磁脉冲设备	293
4.5.6 感应器	293
4.5.7 磁脉冲加工典型工艺分析	294
4.5.8 国内外磁脉冲工艺应用现状分析	300
4.6 多点成形技术	303
4.6.1 多点成形原理与特点	303
4.6.2 多点成形设备	305
4.6.3 应用实例	308
4.6.4 应用前景	315
4.7 激光拼焊毛坯成形	315
4.7.1 拼焊板的应用	315
4.7.2 激光拼焊毛坯制备技术	316
4.7.3 激光拼焊板成形特性分析	318
4.7.4 激光拼焊板冲压成形失效分析	320
4.7.5 拼焊板冲压成形工艺及设备	322
4.7.6 激光拼焊板成形极限图实验方法	324
4.7.7 激光拼焊板冲压成形的数值模拟	331
4.8 渐进成形	333
4.8.1 渐进成形原理	334
4.8.2 渐进成形的研究现状	335
4.8.3 渐进成形的发展前景	337
参考文献	340
第5章 管材管件制备成形技术	345
5.1 管材高速挤压成形	345
5.1.1 挤压与高速挤压	345
5.1.2 高速挤压数值模拟	345
5.1.3 高速挤压试验	349
5.2 管材行星旋轧	352
5.2.1 两辊斜轧法	353
5.2.2 三辊行星旋轧	353
5.2.3 四辊行星轧机	367
5.3 管材浮动芯头拉拔	371
5.3.1 引言	371

5.3.2	管材拉拔历史及其发展	372
5.3.3	管材拉拔设备	372
5.3.4	浮动芯头拉拔工艺特点	373
5.3.5	模具磨损	375
5.3.6	影响模具寿命的因素	377
5.3.7	铜管多道次拉拔的道次优化	377
5.4	外翅片铜管生产加工及工艺	382
5.4.1	外翅片高效管产品类型及简介	382
5.4.2	生产工艺流程	387
5.4.3	外翅片高效管加工工艺原理及设计	387
5.5	薄壁管材与内螺纹管材滚珠旋压	389
5.5.1	旋压与滚珠旋压	389
5.5.2	滚珠旋压工艺特点	390
5.5.3	薄壁筒形(管形)件滚珠旋压发展和研究现状	391
5.5.4	滚珠旋压的数值模拟研究	393
5.5.5	滚珠旋压实验研究	396
5.5.6	管材滚珠旋压的典型工艺缺陷	397
5.5.7	内螺纹管材滚珠旋压	399
5.6	精密管材旋压技术	403
5.6.1	旋压工艺特点及分类	404
5.6.2	特种旋压工艺	409
5.6.3	旋压技术发展概况	413
5.6.4	国内外旋压技术和设备的差距及各自的特点	414
5.6.5	旋压设备和技术展望	415
5.7	管材弯曲	416
5.7.1	管材弯曲成形的研究现状	416
5.7.2	管材弯曲成形工艺方法分类	417
5.7.3	管材弯曲成形原理	418
5.7.4	管材弯曲变形程度及弯曲力矩的计算	419
5.7.5	管材弯曲成形缺陷	420
5.7.6	管材绕弯成形技术	423
5.7.7	管材压弯成形技术	424
5.7.8	管材滚弯成形技术	426
5.7.9	管材推弯成形技术	426
5.8	管材液压成形与脉动液压成形	428

5.8.1 工艺原理、材料及应用.....	429
5.8.2 设备(液压成形工装系统、增压器、模具).....	431
5.8.3 管材脉动加载液压成形.....	439
5.8.4 主要成形工艺缺陷	439
5.8.5 我国液压成形技术与设备的开发、存在的问题及发展思路	440
参考文献.....	444

第1章 绪 论

近 20 年来,国际塑性加工技术进入了高速发展的时期,尤其自中国于 2001 年加入世界贸易组织(WTO)以来,中国制造业高速发展,汽车、高速铁路、大型飞机、机床、电器、造船、航天、钢铁、风电、核电等塑性加工主流产业都在高速发展,同时伴随着制造技术的飞速提升,加之多方面的需求,制造技术获得了空前的改进和创新。

1.1 现代科学技术的发展为塑性加工新技术提供了技术支撑

1. 信息与自动化对塑性加工技术起到了推动作用

塑性加工技术是使材料在外力作用下发生永久变形的方 法,研究目标是如何利用金属的塑性使金属发生塑性变形以获得需要的形状和组织性能且不发生破坏。使金属发生塑性变形有很多方式,如锻造、挤压、冲压、轧制、拉拔、弯曲、拉形等,这些方法即为塑性加工工艺或塑性加工技术。在依据一定方式实现金属塑性变形加工时,需要对外载荷的方向、大小、速度及金属的外在条件如温度、摩擦力、流动方向和位移进行控制。原始的控制方式为人工操作,如早期的锻工。随着科学技术的进步,人们发明了锻锤、液压机、机械压力机、摩擦压力机等很多设备,可以实现载荷的增大、速度的加快、温度的提高;后来人们又发明了模具,实现了对材料的流动进行约束,可以实现批量生产,提高生产效率和零部件精度。随着计算机和控制技术的发展,人们还可以实现对成形时冲头速度、位移、载荷、温度等多种参数的自动控制,塑性加工过程可以按照人们事先设计好的方式和参数曲线进行,这使零部件的精度、形状的复杂性和生产效率得到充分的提高,并可以使材料的塑性成形能力得到最大限度的发挥。

生产过程信息化和自动化控制目前已成为大多数塑性加工过程的必要基础。目前,很多生产线都实现了自动化,而且其自动化是建立在大量数据积累和控制的基础上,生产过程也是信息化控制过程。

更重要的是,越来越多的塑性加工工艺要依靠自动化控制才能完成,没有自动控制技术是不可想象的。例如,板材多点成形技术,其上下模具可由几十个至上百个小冲头在液压缸的控制下随时组成不同的表面形状,因此一套模具可以代替多组模具,可以成形各种空间形状的板材零件。这些液压缸是在软件控制下实现板面形状的变化和定位的。整个变形过程的操作也是依靠软件协调控制的。