

先进制造技术丛书

高能率成形技术

High Energy Rate Forming

李春峰 编著



国防工业出版社

先进制造技术丛书

高能率成形技术

High Energy Rate Forming

李春峰 编著

国防工业出版社
·北京·

图书在版编目(CIP)数据

高能率成形技术/李春峰编著. —北京:国防工业出版社, 2001. 11

(先进制造技术丛书)

ISBN 7-118-02549-6

I. 高... II. 李... III. 高能成型—技术 IV. TG39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 25715 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 100044)

三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 $6\frac{3}{4}$ 169 千字

2001 年 11 月第 1 版 2001 年 11 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 18.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成

(以姓氏笔划为序) 刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

《先进制造技术丛书》编委会名单

顾 问	师昌绪	中国工程院院士,中国科学院院士、主席团顾问
主 任	胡壮麒	中国科学院金属研究所学术委员会主任,工程院院士
副主任	张立同	西北工业大学教授,工程院院士
	徐滨士	装甲兵工程学院教授,工程院院士
	雷廷权	哈尔滨工业大学教授,工程院院士
	艾 兴	山东工业大学教授,工程院院士
	周 济	华中理工大学校长,工程院院士
委 员	赵连城	哈尔滨工业大学教授,博士生导师
	曾松岩	哈尔滨工业大学教授,博士生导师
	黄树槐	华中理工大学教授,博士生导师
	李庆春	哈尔滨工业大学教授,博士生导师
	田锡唐	哈尔滨工业大学教授,博士生导师
	王仲仁	哈尔滨工业大学教授,博士生导师
	董 申	哈尔滨工业大学教授,博士生导师
	吴复兴	北京 625 所科学技术委员会主任,研究员
	方洪洲	哈尔滨工业大学材料学院副院长,博士生导师
秘 书	王桂伟	哈尔滨工业大学材料学院教学秘书

序

制造业是我国国民经济的支柱产业,其增加值约占我国国内生产总值(GDP)的40%以上,振兴制造业是启动我国经济新高潮的杠杆,日本和美国的经验均可资借鉴,而先进制造技术是振兴制造业的系统工程中的重要组成部分之一。

先进制造技术(AMT—Advanced Manufacturing Technology)作为一个专有名词提出始于20世纪80年代末期,当时美国根据本国制造业面临的挑战与机遇,以及存在的问题进行了深刻反省,同时为了加强制造业的竞争能力和促进国民经济增长而提出先进制造技术新概念。从技术进步角度看,以计算机为中心的新一代信息技术的发展,全面推进了制造技术的飞跃发展,在不断汲取其他相关领域新技术的基础上,使创新贯穿于制造全过程,并使技术与管理相结合,不断推出新的制造模式,推动人类生产活动不断进步。

先进制造技术这一名词一经提出,立即获得世界各国的积极响应,将制造技术的发展推向新的高潮,经过20多年的努力,先进制造技术由于专业和学科间不断渗透、交叉、融合,技术日趋系统化、集成化,已发展成为集机械、电子、信息、材料和管理技术为一体的新兴交叉学科,可以称之为“制造工程”。

先进制造技术的核心和基础是优质、高效、低耗、清洁、无污染工艺,它是由传统的制造工艺发展起来的,并与计算机、信息、自动化、新材料及现代管理技术实现了局部或系统集成,以实现优质、高效、低耗、无污染和灵活生产,实现可持续发展。

未来先进制造技术的发展趋势是精密化、柔性化、智能化与集成化。首先设计技术不断现代化,突出反映在数值模拟与仿真以

及虚拟现实技术和产品建模理论等方面。成形制造技术向精密成形或近净成形方向发展,包括精密铸造、精密塑性成形和精密连接技术等。加工制造技术向超精密、超高速及发展新一代制造装备的方向发展。随着激光、电子束、离子束、分子束等新能源或其载体的引入,新型的高密度特种加工方法以及复合工艺不断发展,以至设计、材料应用、加工制造等专业学科界限日渐淡化,逐步趋向一体化。由于工艺模拟技术的迅速发展,也使工艺逐渐发展为工程科学。虚拟现实技术在制造业中获得日益广泛的应用。

为了适应世界知识经济时代的来临,促进先进制造技术在我国的发展,并为这一领域的科技人员提供必要的参考书,我们特地组织编写了本套《先进制造技术丛书》,希望它的出版有助于推动先进制造技术的快速进步,为我国的经济发展和国防现代化服务。

《先进制造技术丛书》编委会

2000年2月23日

前 言

高能率成形是一种先进的特种塑性成形技术,在国外已广泛用于航空、航天、兵器、汽车、医药、化工等工业领域。为了促进该项技术在我国的研究和进一步推广应用,作者以其本人及其课题组指导的研究生论文及科研成果为基础,结合国外最新进展编写本书。书中既有工艺基础理论分析,也有工艺参数确定及工装设计方法。

本书内容主要包括电磁成形,电液成形,电爆成形及爆炸成形等高能率成形技术。全书共分六章。第一章绪论,主要介绍高能率成形方法的工艺分类,成形特点及应用。第二章电磁成形工艺基础,主要介绍电磁成形电流、力能、变形等工艺基础知识及线圈、集磁器等工装设计。第三章电磁成形典型工艺分析,主要介绍板材电磁成形中,典型工艺的变形规律及工艺参数确定等。第四章电液及电爆成形,主要介绍工艺参数确定及工装设计方法。第五章放电成形设备设计,主要介绍放电成形设备的主回路、控制回路、触发回路设计及安全保护措施。第六章爆炸成形,主要介绍工艺基础,工装设计及典型工艺的参数确定。

书中第一章、第二章、第三章、第四章、第六章由李春峰编写,第五章由赵志衡编写,全书由李春峰主编。

由于作者水平有限,错误与不足之处在所难免,恳请读者给予指正。

编 者

2000 年 9 月

内 容 简 介

本书是关于高能率成形的学术专著。作者以其本人及课题组的研究成果为基础,结合国外最新研究进展,较系统地阐述了高能率成型的基础理论及工艺应用。

全书共分六章,分别介绍电磁成形、电液成形、爆炸成形等工艺技术及放电成形设备设计。

本书可供高等院校材料科学与工程学科的师生阅读,也可供有关专业领域的广大科技人员参考。

This book is an academic monograph on high energy rate forming, in which the author systematically expounds its fundamental theory and applications based on research achievements of his own and his team and latest relevant developments overseas.

The book consists of Six chapters, namely, electromagnetic forming, electrohydraulic forming, explosive forming and discharging forming equipment.

As a textbook and reference work in one, it will help effectively the researchers and engineers who are engaged in the study of high energy rate forming.

目 录

第一章 绪论	1
参考文献	5
第二章 电磁成形工艺基础	6
2.1 概述	6
2.2 磁场分析	12
2.3 放电电流分析	21
2.4 磁场力及放电能量	29
2.5 变形分析	36
2.6 线圈	44
2.7 集磁器、模具及驱动片	55
参考文献	63
第三章 板材电磁成形典型工艺分析	66
3.1 连接	66
3.2 管胀形	81
3.3 管缩径	99
3.4 平板毛坯成形	106
3.5 冲裁	112
参考文献	116
第四章 电液及电爆成形	118
4.1 概述	118
4.2 变形机理探讨	120
4.3 工艺参数确定	122
4.4 放电室	127
4.5 电爆成形	131

参考文献	134
第五章 放电成形设备设计	135
5.1 概述	135
5.2 充电回路	141
5.3 放电回路	152
5.4 保护回路	161
5.5 控制及触发回路	167
参考文献	172
第六章 爆炸成形	173
6.1 概述	173
6.2 工艺参数选择	174
6.3 典型工艺分析及工装设计	187
参考文献	199

CONTENTS

Chapter I	Introduction	1
	References	5
Chapter II	Technological fundamentals of electromagnetic forming	6
2.1	Survey	6
2.2	Magnetic field analysis	12
2.3	Current analysis	21
2.4	Force and energy of magnetic field	29
2.5	Deformation analysis	36
2.6	Coil	44
2.7	Field shaper, die and driver	55
	References	63
Chapter III	Analysis of typical technology of sheet metal electromagnetic forming	66
3.1	Joining	66
3.2	Tube expanding	81
3.3	Tube compressing	99
3.4	Flat sheet forming	106
3.5	Blanking	112
	References	116
Chapter IV	Electrohydraulic forming	118
4.1	Survey	118
4.2	Deformation mechanism	120
4.3	Technological parameters	122

4.4	Electrohydraulic house	127
4.5	Electrohydraulic forming with Electro detonator	131
	References	134
Chapter V	Discharging forming machine design	135
5.1	survey	135
5.2	Charging circuit	141
5.3	Discharging circuit	152
5.4	Protection circuit	161
5.5	Control circuit and trigger circuit	167
	References	172
Chapter VI	Explosive forming	173
6.1	Survey	173
6.2	Technological parameters	174
6.3	Aanalysis of typical technology and design of device	187
	References	199

第一章 绪 论

高能率成形(High Energy Rate Forming)也称高速成形(High velocity forming),是一种在极短时间内(微秒级)释放高能量而使金属变形的成形方法。

高能率成形的历史可追溯到一百多年前^[1]。但由于成本太高及当时工业发展的局限,该工艺并未得到应用,直到 50 年代,随着航空及导弹技术的发展,才使高能率成形方法进入到生产实践中。我国对该项技术的研究和应用始于 60 年代。

一、高能率成形工艺分类

高能率成形主要包括:

- 1) 利用高压气体使活塞高速运动来产生动能的高速成形;
- 2) 利用火药爆炸产生化学能的爆炸成形;
- 3) 利用电能的电液及电爆成形;
- 4) 利用磁场力的电磁成形。

一般情况下,“高能率成形”主要指后三种形式。电磁成形、电液成形及电爆成形设备原理是相同的,只是放电介质不同,因此也统称为放电成形。

爆炸成形利用储存化学能的炸药,在短时间爆炸时所释放的剧烈的能量使金属成形。它可利用专用设备,也可在空气中或水中进行。

电液成形是借助于水下两电极之间突然放电所产生的冲击波来成形零件。电极间连有金属丝即为电爆成形。

电磁成形也称磁脉冲成形。它是利用脉冲电容器突然释放储存的能量,通过线圈产生强而短促的磁场,同时在金属毛坯上产生感应磁场,利用磁场力使金属成形。

表 1-1 列出三种高能率成形方法的特性对比^[1,2]。

表 1-1 高能率成形特性

特性 成形方法	成形速度 /m·s ⁻¹	成形时间 /s	压力 /MPa	功率 /kW
爆炸成形	≥300	$5 \times 10^{-4} \sim 10^{-6}$	6×10^3	10^5
电液成形	≥300	$5 \times 10^{-4} \sim 10^{-6}$	10^3	10^4
电磁成形	≥300	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	300~500	$10^4 \sim 10^5$

二、高能率成形特点

在普通冲压加工时,毛坯产生塑性变形所需的能量都是通过冲压设备得到的。在全部冲压过程中,冲压设备把某一种形式的能量(如电能、液体或气体压力等)在一个比较长(相对地)的时间里连续不断地传给毛坯,并转化为后者塑性变形所消耗的功。而高能率成形时,化学能(如爆炸成形)或电能(如放电成形)在极短时间内转化为周围介质(空气或水)中的高压冲击波,并以脉冲波的形式作用于毛坯,使它产生塑性变形。可见,高能率成形的重要特征一个是能量释放时间短,仅为微秒级,而变形为毫秒级,因此变形功率极高。再一个是工件变形速度快,主要靠获得的动能,在惯性力作用下成形。

高能率成形中,工件变形能主要靠速度获得,由表 1-2 可见,变形速度极高时质量对变形所需能量的贡献可忽略不计。

表 1-2 质量、速度对整个动能的关系(50000ft·lb)^[3]

成形类型	质量/lb	速度/ft·s ⁻¹	速度/质量
爆炸成形(气体)	0.01	9×10^6	900×10^6
爆炸成形(液体)	0.20	5×10^5	2.5×10^6
放电成形	0.20	5×10^5	2.5×10^6
注:1lb(磅)=0.4536kg,1ft(英尺)=0.3048m。			

基于两种材料的真实应力-应变曲线如图 1-1 所示,图(a)表示应变速率的增加对总应变影响不大,再继续增加则使应变减小。