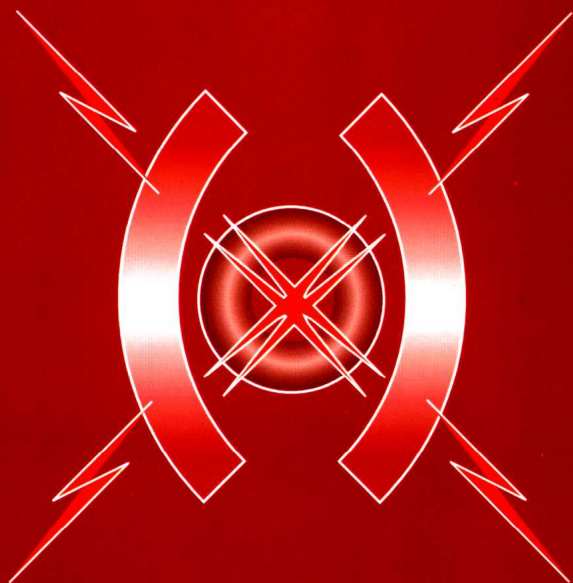


先进制造技术丛书

先进电火花加工技术

Advanced Electrical Discharge Machining Technology

赵万生 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

先进制造技术丛书

先进电火花加工技术

Advanced Electrical Discharge Machining Technology

赵万生 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

先进电火花加工技术/赵万生著. —北京:国防工业出版社, 2003.10

(先进制造技术丛书)

ISBN 7-118-03127-5

I. 先... II. 赵... III. 电火花加工 IV. TG661

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 022943 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)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 11% 291 千字

2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:29.00 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

IV

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 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序)

刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 韩祖南 舒长胜

《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	山东大学教授,工程院院士
	周济	华中科技大学教授,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	华中科技大学教授,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
	方洪渊	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,在不断汲取其它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

每一次制造技术的进步,都给生产力的发展带来极大的促进。电火花加工从诞生之日起,就以其独特的加工原理和对加工材料的广泛适应性而在国防与民用工业等领域发挥着重要的作用。在国家“十五”科技发展规划中,明确地将“先进制造及自动化”技术列为优先发展的高新技术领域,充分体现了我国对于制造技术在强国富民方面的重要作用的认知,这也是多年实践总结出来的重要结论。毕竟我国在未来几十年时间内,主要的财富积累将来源于制造,正如美国学者经过沉痛反思后所感悟出的至理名言所云,“要想生活好,就要生产好。”

在计算机技术、微电子技术、控制技术飞速发展的推动下,电火花加工技术已经可以对工艺过程实施更加精确的控制,因而促进了加工工艺水平的飞速提高。特别是近几年来,这种提高更是呈加速趋势。不仅如此,许多新的电火花加工方法与控制方法也不断涌现,如镜面电火花加工技术、微细电火花加工技术、电火花放电沉积表面改性技术、分层式电火花铣削加工技术、非导电材料的电火花加工技术、气体中放电电火花加工技术、电火花加工过程模糊控制技术等。这些新技术的不断涌现,极大地丰富了电火花加工技术的内涵,并突破了以往人们对于这一工艺方法在认识上的局限性。目前,这一技术不仅可以有效地去除材料达到加工的目的,也可以将材料沉积、生长在某种基体上;不仅可以加工任意硬度、强度和韧性的导电材料,也可以加工诸如工程陶瓷等很多不导电的材料;不仅可以在绝缘工作液中加工,也可以在气体中加工;不仅可以加工巨大的零件,也可以加工出微米尺度的零件。从而可以看出,电火花加工技术在不断走向成熟的同时,也在不断发

展与完善。

本书结合作者多年来从事先进电火花加工的研究实践,总结了近年来的部分研究成果,并介绍了国内外研究人员对于各项技术发展的主要贡献。相信它对于从事电火花加工技术的人员来说,不仅可以从中学到具体的先进技术,而且可以从中体会到各种新技术发展的内在动力以及不断挑战极限、突破障碍、创新求变的过程。同其它加工方法一样,电火花加工技术的发展远没有到达终点。尽管它已相对成熟,但近年来的发展趋势表明,更高水平的加工技术正在不断涌现;尽管它在模具型腔加工方面受到了高速铣削加工的严峻挑战,但相反也成为促进电火花加工向高速化方向发展的一个动力,促使它在更加专长的领域发挥更好的作用。

本书以国防制造中常用的先进电火花加工方法为主线,重点介绍了近 10 年发展起来的各种先进电火花加工技术的基本原理、加工机理及工艺特性,同时从应用角度出发,讲述各种加工方法的适用范围、典型应用实例。本书若对读者有所启迪,笔者将不胜欣慰。同时由于作者的涉猎有限,加上成书的时间短促,疏漏和谬误在所难免,敬请读者见谅,并提出宝贵意见。

本书由赵万生教授主编,参加编写的人员还有王振龙、郭永丰、狄士春、孟庆国、耿春明、杨晓冬、迟关心等,全书由刘晋春教授审核。

本书的部分研究得到了国家自然科学基金“微型机械零件的微细电火花加工技术研究(59275216)”、“超声直接驱动电极的微小电火花加工装置(59777020)”、“非导电超硬材料充气电解电火花加工基础及应用(59677019)”、“混粉电火花镜面加工技术研究(10276014)”、“金属表面陶瓷层的液中放电沉积生成方法与应用研究(50275038)”,重点项目“面向快速制造的特种加工技术(59935110)”,国家“863 计划”资助项目“基于液中放电沉积的金属表面陶瓷层的生成方法与应用(2001AA421240)”和国防先进制造技术预研重点项目、航天预研项目、国家教育部跨世纪优秀人才培养基金、资助优秀回国人员基金、博士点基金以及黑龙江省科研

基金,总装备部国防科技图书出版基金等的大力支持。可以说,没有这些支持,就不会有本书的出版,在此一并表示真诚的谢意。

作 者

2003 年 5 月 31 日

目 录

第 1 章 电火花加工技术基础	1
1.1 电火花加工的基本原理及其分类	1
1.1.1 电火花加工的原理和设备组成	1
1.1.2 电火花加工的特点及其应用	4
1.1.3 电火花加工工艺方法分类	5
1.2 电火花加工的机理	7
1.2.1 极间介质的电离、击穿,形成放电通道	7
1.2.2 介质热分解、电极材料熔化、汽化热膨胀	9
1.2.3 电极材料的抛出	10
1.2.4 极间介质的消电离	12
1.3 电火花加工中的一些基本规律	13
1.3.1 影响材料放电蚀除的主要因素	13
1.3.2 电火花加工的加工速度和工具的损耗速度	20
1.3.3 影响加工精度的主要因素	25
1.3.4 电火花加工的表面质量	27
1.4 电火花加工脉冲电源	32
1.4.1 对脉冲电源的要求及其分类	32
1.4.2 RC 线路脉冲电源	34
1.4.3 晶体管式脉冲电源	36
1.5 电火花加工的自动进给调节系统	37
1.5.1 自动进给调节系统的作用、技术要求和分类	37
1.5.2 自动进给调节系统的基本组成部分	41
主要参考文献	44
第 2 章 镜面电火花加工技术	45
2.1 镜面电火花加工技术的产生与实现手段	45

2.2 小面积镜面加工.....	46
2.2.1 精规准电源的设计	47
2.2.2 小面积镜面电火花加工工艺	48
2.3 大面积混粉电火花镜面加工	51
2.3.1 混粉电火花镜面加工机理	51
2.3.2 混粉电火花镜面加工工艺	54
2.3.3 混粉电火花镜面加工表面性能	63
2.3.4 混粉电火花镜面加工的特点	67
2.3.5 混粉电火花镜面加工在模具加工中的应用	70
主要参考文献	74
第3章 电火花表面改性技术	76
3.1 电火花表面强化与改性技术	76
3.1.1 气体中电火花表面强化技术	76
3.1.2 液中放电沉积表面改性处理	79
3.1.3 气体中放电沉积堆积造型	92
3.1.4 钛合金电火花放电着色	94
3.2 冷轧辊表面的电火花毛化技术.....	98
3.2.1 冷轧钢板与毛化技术	98
3.2.2 毛化板表面形貌的评定	99
3.2.3 几种典型的毛化工艺.....	100
3.2.4 电火花毛化设备.....	103
3.2.5 电火花毛化工艺.....	106
主要参考文献	113
第4章 精密与微细电火花加工技术	115
4.1 微细电火花加工的特点与实现条件	115
4.2 微细电极的在线制作	119
4.3 电火花加工装置的微型化	121
4.4 微细电火花加工的应用举例	125
4.5 小孔、深小孔电火花加工	128
4.5.1 小孔电火花加工的特点	128
4.5.2 深小孔的高速电火花加工.....	130
4.6 异形小孔的电火花加工.....	135

4.7 超声波电火花复合加工小孔	137
4.8 多孔、群孔的电火花加工	143
4.9 圆孔或方孔筛网的电火花加工	145
4.10 低刚度细长锥杆的精密电火花磨削	149
4.10.1 精密球头的电火花磨削	149
4.10.2 细长锥杆的电火花磨削	150
4.11 块状电极切向进给电火花磨削法及其仿真	151
4.11.1 块状电极切向进给法的原理和加工试验	152
4.11.2 块状电极切向进给法的计算机仿真	155
4.12 电火花共轭同步回转加工精密内外螺纹	156
4.13 双轴回转展成法电火花加工	162
主要参考文献	167
第5章 电火花铣削加工技术	170
5.1 电火花铣削加工技术的产生及特点	170
5.2 电火花铣削加工中的电极损耗补偿技术	174
5.2.1 影响电极损耗的主要因素	174
5.2.2 对电极损耗采取的策略	177
5.2.3 电极损耗的在线补偿	178
5.3 分层制造原理与电火花铣削加工	180
5.4 基于分层制造的电极等损耗电火花铣削加工技术	182
5.4.1 电火花加工中的电极等损耗概念	182
5.4.2 电极等损耗电火花铣削加工的基本原理	183
5.4.3 基于分层制造原理的电火花铣削加工技术的实现	184
5.5 分层去除电火花铣削加工中的 CAD/CAM 技术	191
5.5.1 分层去除电火花铣削 CAD/CAM 系统间的数据交换	191
5.5.2 CAD 模型的三维显示	195
5.5.3 分层去除电火花铣削加工的 CAM 技术	197
5.6 分层去除电火花铣削加工的工艺规律	200
5.6.1 分层厚度	201
5.6.2 轨迹重叠率	202
5.6.3 最大电流密度	203

主要参考文献	206
第 6 章 非导电材料与气体介质电火花加工	208
6.1 高电压辉光放电加工	208
6.2 电解电火花放电复合加工	209
6.2.1 通常电解电火花复合加工机理	213
6.2.2 机械电解电火花复合加工	215
6.3 充气式电解电火花复合加工	219
6.4 绝缘陶瓷辅助电极法电火花加工	224
6.4.1 辅助电极法电火花加工的原理和种类	224
6.4.2 辅助电极法电火花加工特性和特点	228
6.4.3 辅助电极法电火花加工实例	233
6.5 气体介质电火花加工	234
6.5.1 气体介质电火花加工原理	235
6.5.2 气体介质中电火花三维形状加工	236
6.5.3 气体介质电火花加工特性	236
6.5.4 气体介质电火花加工特点	241
主要参考文献	242
第 7 章 开放式电火花加工数控系统	243
7.1 电火花加工数控系统的基础知识	243
7.1.1 坐标轴	243
7.1.2 ISO 代码	245
7.1.3 数控摇动加工	247
7.2 开放式体系结构电火花加工数控系统的基本框架	249
7.2.1 开放式体系结构数控系统的基本特征	250
7.2.2 开放式电火花加工数控系统功能分析	251
7.2.3 开放式电火花加工数控系统的系统平台	255
7.2.4 开放式体系结构电火花加工数控系统的层次模型	256
7.3 开放式体系结构电火花加工数控系统的硬件结构	258
7.4 开放式体系结构电火花加工数控系统的软件结构	260
7.4.1 多任务的划分	260
7.4.2 加工控制的数据流程分析	261
7.4.3 开放式电火花加工数控软件的总体结构	263

7.5 电火花加工数控系统的插补技术	265
7.5.1 电火花加工数控系统的插补方法	265
7.5.2 电火花加工中的反向插补技术	267
7.5.3 电火花数控系统的刀具半径补偿	269
7.6 电火花加工数控系统的加工控制技术	270
7.6.1 轨迹伺服控制	270
7.6.2 抬刀控制	271
7.6.3 摇动控制	272
7.6.4 加减速控制	274
7.7 加工实例	275
主要参考文献	276
第8章 电火花加工的 CAD/CAPP/CAM 与智能工艺决策技 术	278
8.1 研究现状与分析	278
8.1.1 电火花加工计算机辅助工艺规划的研究	278
8.1.2 智能电火花加工工艺决策技术的研究	280
8.2 电火花加工 CAPP 的系统结构	283
8.2.1 EDM-CAD 模块	283
8.2.2 EDM-CAPP 模块	286
8.2.3 EDM-CAM 模块	290
8.3 智能电火花加工工艺决策技术	291
8.3.1 智能化 CAPP	291
8.3.2 基于混合智能的电火花加工工艺决策技术	292
8.3.3 电火花加工工艺决策技术中智能技术的应用实例	299
主要参考文献	311
第9章 电火花加工的智能模糊控制技术	313
9.1 电火花加工过程模糊控制的特点	313
9.2 放电状态的特征及实时检测	315
9.3 正常火花放电状态和过渡电弧的检测	319
9.4 稳定电弧的检测原理	321
9.5 电火花加工放电状态检测数据的统计处理	322