

特种加工新技术

余承业 等编著

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

特种加工新技术/余承业等编著. —北京:国防工业出版社,1995

ISBN 7-118-01291-2

I. 特… II. 余… III. 特种加工-测试技术 IV. TG66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 03562 号

特种加工新技术

余承业 等编著

责任编辑 蒋 怡

*

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)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 16¹/₈ 418 千字

1995 年 1 月第 1 版 1995 年 1 月北京第 1 次印刷 印数 1—3500 册

ISBN 7-118-01291-2/TG·84 定价:19.80 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,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. 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,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防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,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,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,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工业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

第二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

刘琯德

委员

尤子平 朱森元 朵英贤

(按姓氏笔划为序)

刘 仁 何庆芝 何国伟

何新贵 宋家树 张汝果

范学虹 胡万忱 柯有安

侯 迁 侯正明 莫梧生

崔尔杰

前 言

50年代以来,航空航天工业、核能工业、电子工业以及汽车机械工业的迅速发展,科学技术的突飞猛进,众多产品均要求具备很高的强度重量比与性能价格比,有些产品则要求在高温、高压、高速或腐蚀环境下长期而可靠地工作。为适应这一要求,各种新结构、新材料与复杂的精密零件大量出现,其结构形状愈来愈复杂、材料性能愈来愈强韧、精度要求愈来愈高、表面完整性愈来愈严格,因此,使机械制造面临一系列严峻的任务。

在生产的迫切需求下,人们通过各种渠道,借助于多种能量形式,探求新的工艺途径,于是各种区别于传统切削加工方法的特种加工方法先后应运而生。目前,特种加工技术已成为机械制造技术中不可缺少的一个组成部分。

特种加工技术是直接借助电能、热能、声能、光能、电化学能、化学能以及特殊机械能等多种能量或其复合以实现材料切除的加工方法。与机械加工方法相比较具有许多独到之处:

1. 加工范围不受材料物理、机械性能的限制,能加工任何硬的、软的、脆的、耐热或高熔点金属以及非金属材料。
2. 易于加工复杂型面、微细表面以及柔性零件。
3. 能获得良好的表面质量,热应力、残余应力、冷作硬化、热影响区以及毛刺等均比较小。
4. 各种加工方法易复合形成新工艺方法,便于推广应用。

以上是特种加工工艺所具有的根本优越性,近二、三十年来发展迅速,目前已达数十种之多,其内涵已十分广泛而丰富,随着现代工业的发展需要与科学技术的促进推动,必将进一步扩大与深化。

当前,常用特种加工方法的性能与适用范围参见下表。

常用特种加工方法的性能与适用范围

加工方法	可加工材料	工具损耗率 (%) 最低/平均	材料去除率 (mm ³ /min) 平均/最高	可达到尺寸精度 (mm) 平均/最高	表面粗糙度 R_a (μ m) 平均/最低	棱角 半径 (mm)	加工 斜度	主要适用范围
电火花加工 (EDM)	任何导电的金属 材料,如硬质 合金、耐 热合金、 淬火钢、 钛合金 等	0.1/50	30/3000	0.05/0.005	6.3/0.10	0.03	<0.01 mm/mm	从微米级的孔、槽到数米的超大型模具、工件等,如异形孔、微孔、深孔、锻模等加工、表面强化、刻字、涂覆
电火花线切割加工 (WEDM)		极小 (可补偿)	5/100	0.01/0.005	3.2/0.16			切削各种冲模、样板、喷丝板异形孔等,也可切削半导体或非导体
电解加工 (ECM)		不损耗	100/10000	0.1/0.01	0.8/0.1	0.3	≥ 0.01 mm/mm	从小零件到一吨重大型工件,如涡轮叶片、压气机叶片、机匣、炮管螺旋线、各种异形孔、锻模等型面加工、抛光、去毛刺
电解磨削 (ECG)		1/50	1/100	0.02/0.001	0.8/0.02			硬质合金刀具、涡轮叶片榫头、量具、蜂窝结构件、小孔、深孔等磨削

(续)

加工方法	可加工材料	工具损耗率 (%) 最低/平均	材料去除率 (mm ³ /min) 平均/最高	可达到尺寸精度 (mm) 平均/最高	表面粗糙度 R_a (μ m) 平均/最低	棱角 半径 (mm)	加工 斜度	主要适用范围
超声波加工 (USM)	任何脆 性金属 及非金 属材料	0.1/10	1/50	0.03/0.005	0.4/0.1	0.03	0.005 mm/mm	加工硬脆材料如玻璃、金刚石等的型 孔、型腔、切割、弯孔、雕刻等
激光加工 (LBM)	任何材料	不损耗	瞬时去除率 很高。 受功率限制,平均去 除率不高	0.01/0.001	0.3/0.1	0.25	1°~2°	加工各种金属、半导体与非导体;能打 孔、切割、焊接、热处理等
电子束加工 (EBM)		不损耗	同上	0.01/0.001	0.3/0.1	0.25	1°~2°	在各种难加工材料上打微孔、镀膜、焊 接、曝光、切缝、蚀刻
离子束加工 (IBM)			很低	1/0.01 μ m	/0.006			对工件表面进行超精加工、超微量加 工、抛光、蚀刻、注入、镀膜等
等离子弧 加工			1500	1.5	粗		1°~7°	焊接、切割

为进一步提高特种加工技术水平并扩大应用范围,当前特种加工技术的总体发展趋势主要有以下三个方面:

1. 采用自动化技术。充分利用计算机技术对特种加工设备的控制系统、电源系统进行优化,建立综合参数自适应控制装置、数据库等,进而建立特种加工的 CAD/CAM 与 FMS 系统,这是当前特种加工技术的主要发展方向。

2. 开发新工艺方法及复合工艺。为适应产品的高技术性能要求与新型材料的加工要求,需要不断开发新工艺方法,如工程陶瓷、复合材料以及聚晶金刚石等,由于具有特殊的加工性,要求有新的工艺方法,有时还要求有新的复合工艺方法。

3. 趋向精密化研究。高技术的发展促使高技术产品向超精密化与小型化方向发展,对产品零件的精度与表面粗糙度提出更严格要求,为适应这一发展趋势,特种加工的精密化研究,已引起人们的高度重视,因此大力开发用于超精加工的特种加工技术已成为重要发展方向。

为加速我国特种加工技术的发展,扩大在工业中的应用,60年代初期,南京航空航天大学就成立了特种加工研究机构进行特种加工技术的开发与研究,于1978年被正式批准成为航空工业部的特种加工研究室,并为该项技术的研究中心之一。该研究室在余承业教授的指导下多年来承担国家各类科学研究基金的资助项目,并且接受横向协作研究开发任务。它既进行科学研究,也负责培养本科生、硕士研究生、博士研究生等教学任务。在科研与教学相结合的过程中,不断取得成绩并积累不少成果。

本书主要编录具有新颖性、启发性与应用性的研究成果。为便于阅读与参考,以加工工艺技术为主线进行编排,分设电火花加工、电火花线切割加工、电解加工、光整加工、激光加工以及测试技术等六章。

作者想通过本书的出版,以期达到交流经验、推广技术,进一步推动特种加工技术的研究与开发,更好地为社会主义经济建设服务。若读者能从本书中得到启迪,我们将感到极大的欣慰。

本书可供从事特种加工研究与应用开发的工程技术人员阅读参考,对机械制造等专业的大学生与研究生也有参考价值。

本书各章负责编写者为:第一章刘正坝,第二章黄因慧,第三章徐家文,第四章姚祥奎,第五章杨怡生,第六章赵国光。一、三章中的部分章节由朱荻负责编写,全书由余承业统稿。

由于缺乏经验,水平有限,缺点与错误在所难免,恳切希望广大读者批评指正。

目 录

第一章 电火花加工技术	1
1.1 电火花成形加工防电弧自动调整系统研究	3
1.1.1 电火花间隙放电状态判别	4
1.1.2 不可恢复烧伤性稳定电弧出现前的几个特征	9
1.1.3 控制策略	10
1.1.4 电火花成形加工防电弧自动调整系统	12
1.1.5 结论	15
1.2 电火花加工中电极损耗及其控制对策	15
1.2.1 电火花加工中的电极损耗	16
1.2.2 电极损耗的控制对策	19
1.2.3 电极超低损耗电火花加工试验	24
1.3 精密电极制造技术——精密电铸	33
1.3.1 电铸层质量的提高	33
1.3.2 电极精密电铸应用举例	42
1.4 电火花镜面加工技术的开发	52
1.4.1 低粗糙度表面电火花加工机理	53
1.4.2 电火花镜面加工中的极间电容放电	59
1.4.3 微精电火花加工机床伺服进给性能	66
1.4.4 镜面加工试验	77
1.5 细微孔电火花加工	80
1.5.1 细微孔电火花加工电源及进给系统	81
1.5.2 加工工艺试验及分析	90
1.5.3 结论	94
1.6 深小孔高速电火花加工	94
1.6.1 深小孔高速电火花加工原理	95
1.6.2 加工试验及其分析	97
1.6.3 结论	102

1.7 工程陶瓷的电加工试验研究	102
1.7.1 加工可行性试验	103
1.7.2 电火花加工 HP-SiC 的工艺规律	105
1.7.3 结论	108
参考文献	109
第二章 电火花线切割加工技术	111
2.1 线切割加工基础	113
2.1.1 线切割加工特性的外部表现	114
2.1.2 高速走丝线切割系统结构特点	121
2.1.3 关于高速走丝线切割放电机理的假说	123
2.1.4 线切割加工的过程干扰及其频率特性	126
2.1.5 对线切割机床进给反馈控制系统的分析	135
2.2 线切割加工的自适应控制进给伺服系统	141
2.2.1 线切割进给自适应控制系统的递推识别方法	141
2.2.2 自适应控制系统的控制对策	150
2.3 线切割加工的断丝问题	159
2.3.1 国内外研究简况	159
2.3.2 断丝前放电波形的数据采集系统	161
2.3.3 断丝先兆	162
2.3.4 断丝的物理过程和原因	165
2.4 线切割四维数控技术	167
2.4.1 CNC 系统的结构	171
2.4.2 上下异型面切割技术	181
2.4.3 多次切割的轨迹控制问题	190
2.4.4 WEDM4A-1 型线切割 CNC 系统软件包	193
2.4.5 工艺试验	197
2.5 四轴联动线切割加工的自动编程	202
2.5.1 四轴联动线切割加工的编程方法	204
2.5.2 轨迹合成算法	209
2.5.3 扭曲类工件的自动编程	214
2.5.4 四轴联动的后置处理	221
参考文献	222
第三章 电解加工技术	224
3.1 钛合金加工电解液的研究	225

3.1.1	钛合金电解加工的特点——超钝化与点蚀	225
3.1.2	钛合金加工用电解液的加工特性	226
3.1.3	钛合金电解加工精度试验	229
3.1.4	钛合金常用电解液及加工精度	233
3.2	电解液的检测技术	235
3.2.1	混合电解液浓度的检测	235
3.2.2	混气电解加工中气液混合比的检测与控制	238
3.3	电解加工间隙中气液两相流的研究	244
3.3.1	电解加工间隙中气液两相流动模型	245
3.3.2	气液两相流音速和“阻塞”现象的研究	254
3.3.3	电解加工中流场对成形规律的影响	257
3.4	脉冲电流电解加工的流场特性研究	259
3.4.1	脉冲电流电解加工流场的试验研究	259
3.4.2	流场数学物理模型	264
3.4.3	用计算机模拟试验分析压力波对提高成形精度的作用	266
3.4.4	验证性工艺试验	270
3.5	脉冲电流电解加工阳极过程特性	273
3.5.1	试验研究	273
3.5.2	结果与讨论	275
3.5.3	结论	282
3.6	电解加工的阴极设计	283
3.6.1	阴极设计概述	283
3.6.2	电场分布数学模型	285
3.6.3	阴极设计反问题求解	288
3.6.4	关于非线性电流效率和变电导率	292
3.6.5	阴极设计试验研究	294
3.7	数控展成电解加工技术的研究	298
3.7.1	数控展成电解加工系统	299
3.7.2	旋转阴极展成电解加工的间隙特性	301
3.7.3	旋转阴极展成电解加工工艺试验	304
3.7.4	喷射式阴极展成电解加工的间隙特性	306
3.7.5	喷射式阴极展成电解加工工艺试验	311
	参考文献	315
	第四章 光整加工技术	317
4.1	电解机械研磨复合抛光	317

4.1.1	电解机械研磨复合抛光的原理	317
4.1.2	加工参数对表面质量的影响	320
4.2	超声电火花复合抛光	325
4.2.1	超声电火花复合抛光的机理	325
4.2.2	影响超声电火花复合抛光的因素	326
4.3	超声电解复合抛光	329
4.3.1	超声电解复合抛光的机理	329
4.3.2	影响抛光质量和速度的因素	330
4.4	磁力研磨抛光	332
4.4.1	干性磁力研磨的原理	332
4.4.2	磁场的形状与磁场分布的关系	333
4.4.3	磁性磨料	335
4.4.4	研磨参数对抛光质量的影响	336
4.4.5	磁性研磨应用实例	337
4.5	挤压珩磨	338
4.5.1	挤压珩磨的加工原理	339
4.5.2	影响挤压珩磨的因素	340
4.5.3	挤压珩磨的应用范围	344
	参考文献	344
第五章 激光加工技术		345
5.1	激光热处理	347
5.1.1	激光辐照温度场数值计算及其应用	348
5.1.2	激光辐照对金属疲劳断裂性能的影响	364
5.1.3	激光辐照对金属疲劳寿命的影响	375
5.1.4	激光辐照表面层残余应力的分布	383
5.2	激光冲击强化	388
5.2.1	激光冲击强化的基本原理	388
5.2.2	试件材料、尺寸及其加工	389
5.2.3	试件的激光冲击	391
5.2.4	激光冲击对材料机械性能的影响	392
5.3	激光切割	397
5.3.1	试件材料、试验过程及参数	399
5.3.2	影响激光切割速度的主要因素	400
5.3.3	激光切割钛合金的质量	407
	参考文献	412

第六章 电加工研究中的测试技术	413
6.1 微机辅助数字存储示波器测试系统	413
6.1.1 自动测试系统	413
6.1.2 DSO 的一些特点	415
6.1.3 控制器(计算机)的选择	419
6.1.4 应用软件编制	421
6.1.5 Tektronix 468—HP-85B DOS 测试系统	423
6.1.6 Gould 4035—IBM PC DOS 测试系统	429
6.1.7 Tektronix 2430A 和 HP3314A—HP-9807 测试系统	432
6.2 DSO 波形测试系统的应用	435
6.2.1 电火花加工研究中的电波形测试	435
6.2.2 电火花成形加工机的电特性测试	438
6.2.3 电火花线切割机的电特性测试	444
6.2.4 电火花成形加工机主轴头振动的测试	452
6.2.5 电火花成形机的伺服系统性能的测试	459
6.2.6 其他应用实例	462
6.3 电火花加工工艺指标的综合表示方法及工艺曲面	467
6.3.1 电火花成形机床工艺指标的综合表示方法	467
6.3.2 工艺指标数据的可靠性	471
6.3.3 工艺曲面的拟合法	472
6.3.4 软件结构与特点	474
6.3.5 工艺曲面的表达方式	476
6.3.6 工艺曲面的应用	480
6.4 电火花加工过程的状态检测	480
6.4.1 基本脉冲分类	480
6.4.2 脉冲鉴别器	482
6.4.3 工艺指标特征量	487
参考文献	496

第一章 电火花加工技术

电火花加工是在一定的加工介质中,利用两个电极之间产生火花放电时的电蚀效应来蚀除金属材料的加工方法。电火花加工的基本原理如图 1-1 所示。

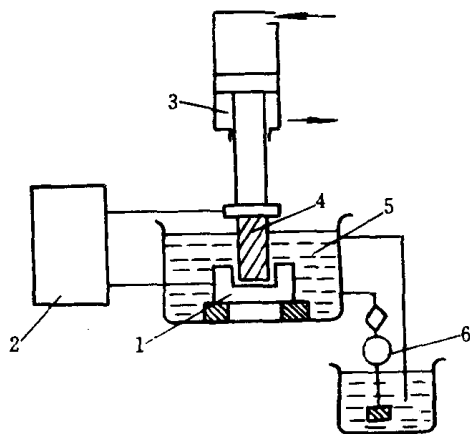


图 1-1 电火花加工原理图

1—工件;2—脉冲电源;3—自动进给调节装置;
4—工具;5—工作液;6—泵。

电火花加工的火花放电的特征是:在空间上和时间上相互分开的、不稳定的或准稳定的。由于在电极之间工件材料的微小体积上可集中很高的能量($10^6 \sim 10^7 \text{W/mm}^2$),足以使材料熔化或蒸发。同时,总能量的一部分也释放到工具电极上,而造成工具损耗。因此,工具电极的损耗和加工精度低是电火花加工方法的一个重要问题,也是电火花加工研究工作主攻方向之一。

由于电火花加工有其独特的优点,其应用领域日益扩大,已在机械、宇航、航空、电子、仪器等部门用来解决各种难加工材料和复