

高等院校机电类 **工程教育** 系列规划教材

特种加工技术

■ 主 编 花国然 刘志东

→ **特种加工技术**：本书秉承“工程教育”的教学理念，实例丰富，内容全面，论述深入浅出。其内容包括绪论、电火花加工、电火花线切割加工、高能束加工、电化学加工、其他特种加工方法（涉及超声加工、磨料流加工、液体喷射加工和复合加工），以及特种加工新技术（涉及快速成形技术、微细加工技术和微机电系统应用）。详细内容请见目录>>>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等院校机电类工程教育系列规划教材

特种加工技术

主编 花国然 刘志东

副主编 田宗军 沈理达 赵建社

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书秉承“工程教育”的教学理念，实例丰富，内容全面，论述深入浅出。其内容包括绪论、电火花加工、电火花线切割加工、高能束加工、电化学加工、其他特种加工方法（涉及超声加工、磨料流加工、液体喷射加工和复合加工），以及特种加工新技术（涉及快速成形技术、微细加工技术和微机电系统应用）。同时，本书还配有电子课件和书中所有插图，可通过华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）进行申请。

本书可作为普通高等院校或独立学院机械工程及自动化专业和相关专业的教材，也可供从事精密加工、特种加工、微细加工等研究的工程技术人员和研究生参考。

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

图书在版编目(CIP)数据

特种加工技术/花国然，刘志东主编. —北京：电子工业出版社，2012.3

高等院校机电类工程教育系列规划教材

ISBN 978-7-121-16115-5

I. ①特… II. ①花… ②刘… III. ①特种加工—高等学校—教材 IV. ①TG66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 034835 号

策划编辑：余 义

责任编辑：余 义 特约编辑：张 玉

印 刷：北京市李史山胶印厂

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：15 字数：403 千字

印 次：2012 年 3 月第 1 次印刷

定 价：32.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

序

2008年7月间,电子工业出版社邀请全国20多所高校几十位机电领域的老师,研讨符合“工程教育”要求的教材的编写方案。大家认为,这适应了目前我国高等院校工科教育发展的趋势,特别是对工科本科生实践能力的提高和创新精神的培养,都会起到积极的推动作用。

教育部于2007年1月22日颁布了教高(2007)1号文件《教育部财政部关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》。同年2月17日,紧接着又颁布了教高(2007)2号文件《教育部关于进一步深化本科教学改革全面提高教学质量的若干意见》。由这两份文件,可以看到国家教育部已经决定并将逐步实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称质量工程),而质量工程的核心思想就在于培养学生的实践能力和创新精神,提高教师队伍整体素质,以及进一步转变人才培养模式、教学内容和方法。

教学改革和教材建设从来都是相辅相成的。经过近两年的教改实践,不少老师都积累了一定的教学经验,借此机会,编写、出版符合“工程教育”要求的教材,不仅能够满足许多学校对此类教材的需求,而且将进一步促进质量工程的深化。

近一年来,电子工业出版社选派了骨干人员与参加编写的各位教授、专家和老师们进行了深入的交流和研究。不仅在教学内容上进行了优化,而且根据不同课程的需要开辟了许多实践性、经验性和工程性较强的栏目,如“经验总结”、“应用点评”、“一般步骤”、“工程实例”、“经典案例”、“工程背景”、“设计者思维”、“学习方法”等,从而将工程中注重的理念与理论教学更有机地结合起来。此外,部分教材还融入了实验指导书和课程设计方案,这样一方面可以满足某些课程对实践教学的需要,另一方面也为教师更深入地开展实践教学提供丰富的素材。

随着我国经济建设的发展,普通高等教育也将随之发展,并培养出适合经济建设需要的人才。“高等院校机电类工程教育系列规划教材”就站在这个发展过程的源头,将最新的教改成果推而广之,并与之共进,协调发展。希望这套教材对更多学校的教学有所裨益,对学生的理论与实践的结合发挥一定的作用。

最后,预祝“高等院校机电类工程教育系列规划教材”项目取得成功。同时,也恳请读者对教材中的不当、不贴切、不足之处提出意见与建议,以便重印和再版时更正。



中国工程院院士、西安交通大学教授

教材编写委员会

主任委员 赵升吨(西安交通大学)

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

芮延年(苏州大学)

胡大超(上海应用技术学院)

钱瑞明(东南大学)

袁清珂(广东工业大学)

参编院校

(按拼音排序)

※ 安徽工业大学

※ 沈阳工业大学

※ 长安大学

※ 苏州大学

※ 东南大学

※ 苏州科技学院

※ 广东工业大学

※ 同济大学

※ 华南理工大学

※ 五邑大学

※ 华南农业大学

※ 武汉科技学院

※ 淮海工学院

※ 西安电子科技大学

※ 吉林师范大学

※ 西安工程大学

※ 南通大学

※ 西安工业大学

※ 山东建筑大学

※ 西安交通大学

※ 陕西科技大学

※ 西安科技大学

※ 上海应用技术学院

※ 西安理工大学

※ 深圳大学

※ 西安文理学院

前 言

特种加工技术就是借助电能、电化学能、热能、声能、光能、化学能及特殊机械能等多种能量，将其施加或复合施加到工件的被加工部位上，从而实现材料被去除、变形、改变或镀覆等的非传统加工方法的统称。近年来，特种加工技术飞速发展，在航空航天、军工、汽车、模具、冶金、机械、电子、轻纺、交通等领域得到广泛应用。特种加工技术已成为衡量一个国家先进制造技术水平和能力的重要标志。

本书秉承“工程教育”的教学理念，将理论知识和实际工程应用并重，对理论推导化繁为简，侧重于结合工程实例介绍各种特种加工技术，有助于学生理解各种特种加工方法的加工原理，并使其开拓眼界，了解特种加工技术的前沿成果和发展趋势。

本书内容主要包括电火花加工、电火花线切割加工、高能束加工、电化学加工、超声加工、磨料流加工、水切割加工等特种加工方法的基本原理、设备、工艺规律、主要特点和应用范围，还包括快速成形技术、微细加工技术、微机械加工等特种加工新技术。同时，本书还配有电子课件和书中所有插图，可通过华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）进行申请。本书可作为普通高等院校或独立学院机械工程及自动化专业和相关专业的教材，也可供从事精密加工、特种加工、微细加工等研究的工程技术人员和研究生参考。

本书由南通大学花国然教授、南京航空航天大学刘志东教授任主编，南京航空航天大学田宗军教授、沈理达副教授、赵建社副教授任副主编。全书共分7章，第1章由花国然编写，第2、3章由刘志东编写，第4章由沈理达、花国然编写，第5章由赵建社编写，第6章由南通大学居志兰、张华编写，第7章由田宗军编写。

在本书编写过程中，大量参阅了国内外同行有关资料，得到了特种加工界许多专家和朋友的支持与帮助，在此表示衷心的感谢。

本书力求结构体系清晰，取材新颖，便于学以致用，但科学技术发展迅猛，知识更新速度不断加快，加之编者水平有限，对内容的取舍及繁简深浅的把握难以准确，缺点错误在所难免，恳请广大师生、读者多提宝贵意见。

编 者
2012年2月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.6.2 电火花小孔磨削	42
1.1 特种加工的由来与定义	1	2.6.3 电火花共轭回转加工	43
1.2 特种加工的分类	2	2.6.4 非导电材料电火花加工	43
1.3 特种加工的特点及其对机械制造领域的影响	4	2.6.5 电火花表面强化和刻字	45
1.4 特种加工的研究热点	7	2.7 电火花加工安全防护	46
1.5 特种加工的地位和作用	8	2.8 电火花加工技术的发展	47
第 2 章 电火花加工	9	2.9 习题	49
2.1 概述	9	第 3 章 电火花线切割加工	50
2.1.1 电火花加工的概念	9	3.1 概述	50
2.1.2 电火花加工的分类	9	3.1.1 电火花线切割加工的概念	50
2.2 电火花加工的基本原理及机理	10	3.1.2 电火花线切割加工基本原理	50
2.2.1 电火花加工的基本原理	10	3.2 电火花线切割机床	52
2.2.2 电火花加工的机理	11	3.2.1 机床本体	52
2.2.3 电火花加工的极性效应	13	3.2.2 脉冲电源	65
2.2.4 电火花加工的特点	14	3.3 电火花线切割基本规律	69
2.3 电火花加工的一些基本规律	15	3.3.1 切割速度及其影响因素	69
2.3.1 影响材料放电腐蚀的主要因素	15	3.3.2 电参数对加工的影响	69
2.3.2 电火花加工的加工速度和工具的损耗速度	17	3.3.3 电极丝对加工的影响	71
2.3.3 影响加工精度的主要因素	19	3.4 电火花线切割加工工艺	72
2.3.4 电火花加工的表面质量	20	3.5 电火花线切割加工编程	76
2.4 电火花加工机床	22	3.5.1 3B 程序格式	76
2.4.1 电火花加工机床的型号及分类	22	3.5.2 ISO G 代码程序	77
2.4.2 电火花加工机床本体	23	3.5.3 自动编程系统	79
2.4.3 电火花加工脉冲电源	25	3.5.4 仿形编程系统	80
2.5 电火花加工的应用	31	3.6 习题	81
2.5.1 火花加工工艺类型	31	第 4 章 高能束加工	82
2.5.2 电火花型腔加工	31	4.1 激光加工	82
2.5.3 电火花穿孔加工	37	4.1.1 激光加工的原理与特点	82
2.5.4 电火花加工工艺参数关系图	39	4.1.2 材料加工用激光器简介	83
2.6 其他电火花加工技术	41	4.1.3 激光切割和打孔技术	87
2.6.1 电火花高速小孔加工	41	4.1.4 激光焊接技术	90
		4.1.5 激光表面处理技术	95
		4.1.6 其他激光加工简介	98
		4.2 电子束加工	99

4.2.1	电子束加工的基本原理	99	6.2.1	磨料流加工的基本原理	167
4.2.2	电子束加工的特点	101	6.2.2	磨料流加工的三大要素	168
4.2.3	电子束加工设备	101	6.2.3	磨料流加工的基本特性	169
4.2.4	电子束加工的应用	103	6.2.4	磨料流加工的工艺特点	170
4.3	离子束加工	107	6.2.5	磨料流加工的实际应用	170
4.3.1	离子束加工的基本原理	107	6.3	液体喷射加工	171
4.3.2	离子束加工的特点	108	6.3.1	液体喷射加工的基本原理 和特点	171
4.3.3	离子束加工的设备	108	6.3.2	液体喷射加工的基本设备	172
4.3.4	离子束加工的应用	109	6.3.3	液体喷射加工的类型及应用	172
4.4	等离子弧加工	114	6.4	复合加工	173
4.4.1	等离子弧加工的基本原理	115	6.4.1	电解-电火花复合加工	173
4.4.2	等离子弧加工的特点	115	6.4.2	电解-电火花机械磨削	175
4.4.3	等离子弧加工的设备	115	6.4.3	超声放电加工	179
4.4.4	等离子弧加工的应用	116	6.4.4	复合电解加工	181
4.5	习题	117	6.4.5	复合切削加工	186
第5章	电化学加工	119	6.5	习题	190
5.1	概述	119	第7章	特种加工新技术	192
5.1.1	电化学加工的概念	119	7.1	特种加工与快速成形技术	192
5.1.2	电化学加工的分类	128	7.1.1	快速成形技术的概念	192
5.2	电解加工	128	7.1.2	快速成形工艺	193
5.2.1	电解加工过程及其特点	128	7.1.3	激光快速制造技术	201
5.2.2	电解加工的基本规律	131	7.2	微细加工技术	206
5.2.3	电解液	139	7.2.1	微细刻蚀	206
5.2.4	电解加工设备	142	7.2.2	LIGA 技术	208
5.2.5	电解加工的应用	148	7.2.3	微细电火花加工	210
5.3	电铸成形及电镀加工	153	7.2.4	微细电铸加工	212
5.3.1	电铸成形加工	153	7.2.5	微细电解加工	214
5.3.2	电镀加工	154	7.2.6	微细高能束流加工	215
5.3.3	射流电沉积	157	7.3	微机电系统应用	217
5.4	习题	161	7.3.1	微机电系统概述	217
第6章	其他特种加工方法	162	7.3.2	微机电系统中的集成电路 工艺	220
6.1	超声加工	162	7.3.3	微机械加工实例	223
6.1.1	超声加工技术发展概况	162	7.3.4	微机电系统的应用	225
6.1.2	超声加工的原理及设备	162	7.4	习题	228
6.1.3	超声加工的特点	164	参考文献		229
6.1.4	超声加工的应用	164			
6.2	磨料流加工	167			

第1章 绪论

1.1 特种加工的由来与定义

瓦特早在 18 世纪 70 年代就发明了蒸汽机，但为何到 19 世纪才得以应用？因为苦于制造不出高精度的蒸汽机汽缸，无法推广应用。直到有人创造出和改进了汽缸镗床，解决了蒸汽机主要部件的加工工艺，才使蒸汽机得到广泛应用，引起了世界性的第一次产业革命。冷战时期，前苏联用从日本东芝公司“购买”的大型三坐标数控铣床加工出高精度潜艇用螺旋桨，噪声大大降低，使美国设在全球的侦听网失效，不得不花费大量经费与时间来研制新的侦听设备，为此美国政府对东芝公司进行制裁，不许东芝公司在相当长一段时间内进入美国市场。如果你是 IT 迷，一定对 $0.13\ \mu\text{m}$ 不陌生，21 世纪计算机产业之所以高速发展，很重要的因素就是超大规模集成电路制造技术的不断进步。这些都归功于新技术、新加工方法的出现。

众所周知，传统的机械加工对推动人类的进步和社会的发展起到了重大的作用，从第一次产业革命到第二次世界大战前，在长达 150 多年里，人类都单纯地依靠机械切削来加工零件，用传统的机械能和切削力去除金属，其本质和特点是：

- (1) 靠刀具材料比工件硬；
- (2) 靠机械能切除工件上多余材料；
- (3) 切削这么硬的材料，车刀很快就蹦刃。

直到 1943 年，前苏联的拉扎林柯夫妇偶然发现电火花的瞬时高温可使金属融化和汽化，由此发明了电火花加工技术。这是人类首次摆脱传统的切削加工，直接利用电能和热能去除金属的“特种加工”。

第二次世界大战后，特别是进入 21 世纪以来，随着机械加工技术，材料科学、高新技术的飞速发展和激烈的市场竞争，以及尖端国防及科学研究的需求，不仅新产品更新换代日益加快，而且要求产品具有很高的强度重量比和性能价格比，并朝着高速度、高精度、高可靠性、耐腐蚀、耐高温高压、大功率、尺寸大小两极分化的方向发展。为此，各种新材料、新结构、形状复杂的精密零件大量涌现，对机械制造业提出了一系列迫切需要解决的新问题。

- (1) 各种难切削材料的加工问题 如硬质合金、钛合金、耐热钢、金刚石、宝石等。
- (2) 各种特殊复杂表面的加工问题 如各种结构形状复杂、尺寸或微小或特大、精密零件的加工，喷气涡轮机叶片，巡航导弹整体涡轮，各种模具，特殊断面的型孔、喷丝头等。
- (3) 具有特殊要求零件的加工问题 如薄壁、细长轴等低刚度零件，弹性元件等特殊零件的加工等。

为了解决上述问题，人们采取了以下办法：一是通过研究高效加工的刀具和刀具材料，自动优化切削参数，提高刀具可靠性和在线刀具监控系统，开发新型切削液，研制新型自动机床等途径，进一步改善切削状态，提高切削加工水平；二是采用特种加工方法。特种加工技术就是借助电能、热能、声能、光能、电化学能、化学能及特殊机械能等多种能量，或将

其复合施加在工件的被加工部位上,从而实现材料的去除、变形、改变或镀覆等非传统加工方法的统称。

近年来,特种加工技术飞速发展,一方面,计算机技术、信息技术、自动化技术等特种加工中已获得广泛应用,逐步实现了加工工艺及加工过程的系统化集成;另一方面,特种加工能充分体现学科的综合性和交叉性,学科(声、光、电、能、化学等)和专业之间不断渗透、交叉、融合。因此,特种加工技术本身同样趋于系统化、集成化的发展方向。这两方面说明,特种加工已成为先进制造技术的重要组成部分。一些发达国家也非常重视特种加工技术的发展。如日本把特种加工技术和数控技术作为跨世纪发展先进制造技术的两大支柱。特种加工技术已成为衡量一个国家先进制造技术水平和能力的重要标志。

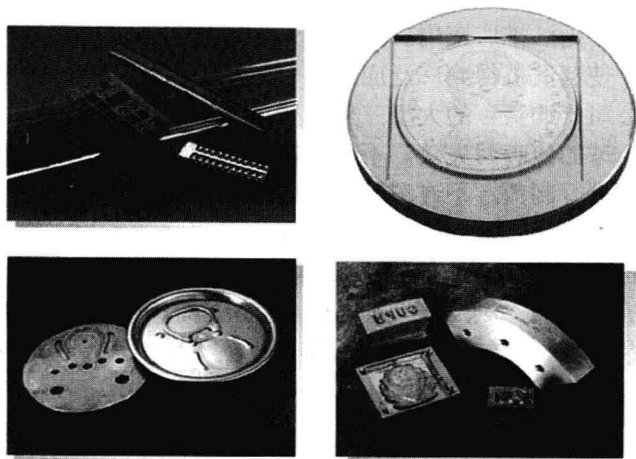


图 1-1 特种加工实例

自 20 世纪 50 年代以来,随着生产和科学技术的迅速发展,很多工业部门,尤其是国防工业部门要求尖端科技产品向高精度、高速度、耐高温、耐高压、大功率、小型化等方向发展,对机械制造部门提出了需要解决各种难切割材料,各种特殊复杂表面和各种超精、光整或具有特殊要求零件的加工问题。欲解决上述一系列工艺问题,仅仅依靠传统的切削方法很难实现,甚至根本无法实现。工艺师借助各种能量形式,探寻新的工艺途径,于是各种异于传统切割加工方法的新型特种加工应运而生。特种加工技术在国际上被称为 21 世纪的技术,主要用以解决工业制造中用常规方法无法实现的加工难题,对于军工制造业的发展,起着举足轻重的作用。

特种加工也称为非传统加工或现代加工,泛指用电能、热能、光能、水能、电化学能、化学能、声能及特殊机械能等能量达到去除或增加材料的加工方法。特种加工技术主要包括激光加工技术、高压水射流加工技术、电子束加工技术、离子束及等离子技术和电加工技术等内容。到目前为止,已经找到了多种这一类的加工方法,为区别现有的金属切削加工,将这类传统切削加工以外的新的加工方法统称为特种加工。

1.2

特种加工的分类

特种加工一般按能量来源及形式、作用原理进行分类,如表 1-1 所示。

表 1-1 常用特种加工方法分类表

特种加工		能量来源及形式	作用原理	英文缩写
电火花加工	电火花成形加工	电能、热能	熔化、汽化	EDM
	电火花线切割加工	电能、热能	熔化、汽化	WEDM
电化学加工	电解加工	电化学能	金属离子阳极溶解	ECM (ELM)
	电解磨削	电化学、机械能	阳极溶解, 磨削	EGM (ECG)
	电解研磨	电化学、机械能	阳极溶解, 磨削	ECH
	电铸	电化学能	金属离子阴极沉积	EFM
	涂镀	电化学能	金属离子阴极沉积	EPM
激光加工	激光切割、打孔	光能、热能	熔化、汽化	LBM
	激光打标记	光能、热能	熔化、汽化	LBM
	激光处理、表面改性	光能、热能	熔化、相变	LBM
电子束加工	切割、打孔、焊接	电能、热能	熔化、汽化	EBM
离子束加工	蚀刻, 镀膜, 注入	电能、动能	原子撞击	IBM
等离子弧加工	切割(喷镀)	电能、热能	熔化、汽化(涂覆)	PAM
物料切蚀加工	超声加工	声能、机械能	磨料高频撞击	USM
	磨料流加工	机械能	切蚀	AFM
	液体喷射加工	机械能	切蚀	FJM
化学加工	化学铣削	化学能	腐蚀	CHM
	化学抛光	化学能	腐蚀	CHP
	光刻	光、化学能	光化学腐蚀	PCM
快速成形	液相固化法	光、化学能	增材法加工	SL
	粉末冶金法	光、热能		SLS
	制片叠层法	光、机械能		LOM
	熔丝堆积法	电、热、机械能		FDM
复合加工	电化学电弧加工	电化学能	熔化、汽化腐蚀	ECAM
	电解电火花机械磨削	电、热能	离子转移、熔化、切削	ESMG
	电化学腐蚀加工	电化学能、热能	熔化、汽化腐蚀	ECCM
	超声放电加工	声、热、电能	熔化、切蚀	EDM-UM
	电解机械抛光	电化学、机械能	切蚀	ECMP
	超声切削加工	机械、声、磁能	切蚀	UVC

特种加工从加工原理和特点来分类, 可以分为去除加工、结合加工、变形加工三大类, 如表 1-2 所示。

去除加工又称为分离加工, 是从工件上去除多余的材料, 如金刚石刀具精密车削、精密磨削、电火花加工、电解加工等。

结合加工是利用理化方法将不同材料结合 (bonding) 在一起。按结合的机理、方法、强弱又可以为非附着 (deposition)、注入 (injection)、连接 (joined) 三种。附着加工又称为沉积加工, 是在工件表面上覆盖一层物质, 属于弱结合, 如电镀、气象沉积等。注入加工又称为渗入加工, 是在工件的表层注入某些元素, 使之与工件基体材料产生物化反应, 以改变工件表层材料的力学、机械性质, 属于强结合, 如表面渗碳、离子注入等。连接是将两种相同或不同的材料通过物化方法连接在一起, 如焊接、粘接等。

变形加工又称为流动加工，是利用力、热、分子运动等手段使工件产生变形，改变其尺寸、形状和性能，如液晶定向。

表 1-2 特种加工方法

分类	加工成形原理		主要加工方法
去除加工	电物理加工		电火花线切割加工、电火花加工
	电化学加工、化学加工		电解加工、蚀刻（电子束曝光）、化学机械抛光
	力学加工（力溅射）		超声加工、离子溅射加工、等离子体加工、磨料喷射加工、超高压水射流加工、电子束加工、激光加工
	热物理加工（热蒸发、热扩散、热溶解）		
结合加工	附着加工	化学	化学镀、化学气相沉积
		电化学	电镀、电铸
		热物理（热熔化）	真空蒸镀、熔化镀
		力物理	离子镀（离子沉积）、物理气相沉积
	注入加工（渗入加工）	化学	氧化、渗氮、活性化学反应
		电化学	阳极氧化
		热物理（热扩散）	晶体生长、分子束外延、渗杂、渗碳
		力物理	离子束外延、离子注入
连接加工	热物理、电物理 化学	激光焊接、快速成形加工、化学粘接	
变形加工（流动加工）	热流动，表面热流动		塑性流动加工（气体火焰、高频电流、热射线、电子束、激光）
	黏滞流动		液体流动加工（金属、塑料、橡胶等注塑或压铸），液晶定向
	分子定向		

目前，特种加工技术已成为先进制造技术中不可缺少的分支，在难切割、复杂型面、精细表面、优质表面、低刚度零件及模具加工等领域中已成为重要的工艺方法。

就总体而言，特种加工可以加工任何硬度、强度、韧性、脆性的金属或非金属材料，且专长于加工复杂、微细表面和低刚度零件，同时，有些方法还可以进行超精加工、镜面光整加工和纳米加工。

外因是条件，内因是根本，事物发展的根本原因在于事物的内部。特种加工之所以能产生和发展的内因，在于它具有切削加工所不具有的本质和特点。同时，也充分说明三新（新材料、新技术、新工艺）对新产品的研制、推广和社会经济的发展起着重大的推动作用。

1.3 特种加工的特点及其对机械制造领域的影响

现代特种加工（non-traditional machining）技术是借助电能、热能、光能、声能、电化能、化学能及特殊机械能等多种能量或其复合以实现切除材料的加工方法。与常规机械加工方法相比，现代特种加工具有如下特点。

(1) 主要用其他能量去除金属材料。

有些加工方法，如激光加工、电火花加工、等离子弧加工、电化学加工等是利用热能、化学能、电化能等去除多余材料。这些加工方法在加工范围上不受材料的物理、机械性能限制，能加工硬、软、脆、耐热或耐腐蚀、高熔点、高强度、特殊性能的金属和非金属材料。

(2) “以柔克刚”，非接触加工。

特种加工不一定需要工具。有的要使用工具，但与工件不接触，加工时不受工件的强度和硬度的制约，工件不承受大的作用力，加工过程中工具和工件间不存在机械切削力，故可加工超硬材料和精密微细零件，以及刚性极低的元件和弹性元件，甚至工具材料的硬度可低于工件材料的硬度。

(3) 易于加工比较复杂的型面、微细表面及柔性零件。

有些特种加工，如超声、电化学、水射流、磨料流等，加工余量都是微细的，故不仅可加工尺寸微小的孔或狭缝，而且能获得较高精度、较低粗糙度的加工表面。

(4) 两种或更多种不同类型的能量可相互组合形成新的复合加工，其复合加工效果明显，且便于推广使用。

各种加工方法的任意复合可扬长避短，形成新的复合工艺方法，更突出其优越性，便于扩大应用范围。近年来复合加工的方法发展迅速，应用十分广泛。目前，许多精密加工和超精密加工方法采用了激光加工、电子束加工、离子束加工等特种加工工艺，开辟了精密加工和超精密加工的新途径。

(5) 加工能量易于控制和转换，加工范围广，适应性强。

特种加工中的能量易于实现转换和控制，工件在一次装夹中可实现粗、精加工，有利于保证加工精度，提高生产率。

(6) 向精密加工方向发展。

当前已出现了精密特种加工，许多特种加工方法同时又是精密加工方法、微细加工方法，如电子束加工、离子束加工、激光束加工等就是精密特种加工。精密电火花加工的加工精密可达 $0.5\sim 1\ \mu\text{m}$ ，表面粗糙度 Ra 可达 $0.02\ \mu\text{m}$ 。

(7) 用简单运动加工复杂型面。

特种加工技术只需简单的进给运动即可加工出三维复杂型面，故已成为加工复杂型面的主要加工手段。

(8) 不产生宏观切屑，可以获得良好的表面质量。

不产生强烈的弹、塑性变形，残余应力、热应力、热影响区、冷作硬化等均比较小，尺寸稳定性好，不存在加工中的机械应变或大面积的热应变，热影响区及毛刺等表面缺陷均比机械切割表面小。

由于特种加工技术具有其他常规加工技术无法比拟的优点，在现代加工技术中，占有越来越重要的地位。表面粗糙度 $Ra < 0.01\ \mu\text{m}$ 的超精密表面加工，非采用特种加工技术不可。特种加工已经成为必要的手段，甚至是唯一的手段。如今，特种加工技术的应用已遍及民用和军用的各个加工领域。

当前，虽然传统加工方法仍占有较大的比例，是主要的加工手段，应该重视并进一步发展，但由于特种加工的迅速兴起，不仅出现了许多新的加工机理，而且出现了各种复合加工技术，将几种加工方法融合在一起，发挥各自所长，相辅相成，因而提高了加工精度、表面质量和加工效率，扩大了加工应用范围。

由于特种加工技术逐渐被广泛应用，已经引起了机械制造领域内的许多变革。例如，对材料的可加工性、工艺路线的安排、新产品的试制过程、零件结构设计、零件结构工艺性好坏的衡量标准等产生了一系列的影响。

1) 提高了材料的可加工性

一般情况下,认为金刚石、硬质合金、淬火钢、石英、玻璃、陶瓷等是难加工的。现在已经广泛采用的聚晶金刚石、聚晶立方氮化硼等制造的刀具、工具、拉丝模等,可以采用电火花、电解、激光等多种方法来加工。工件材料的可加工性不再与其硬度、强度、韧性、脆性等有直接的关系。对于电火花、线切割等加工技术而言,淬火钢比未淬火钢更容易加工。

2) 改变了零件的典型工艺路线

工艺人员都知道,除磨削外,其他切削加工、成形加工等都应在淬火热处理之前加工完毕,但特种加工的出现,改变了这种定型的程序格式。因为特种加工基本上不受工件硬度的影响,而且为免除加工后淬火热处理的变形,一般都先淬火后加工。例如,电火花线切割加工、电火花成形加工和电解加工等都是在淬火后进行的。

特种加工的出现还对以往工序的“分散”和“集中”引起了影响。以加工齿轮、连杆等型腔锻模为例,由于精密加工与特种加工过程中没有显著的机械作用力,机床、夹具、工具的强度和刚度不是主要矛盾,即使是较大的、复杂的加工表面,往往使用一个复杂工具,经过一次安装、一道工序加工出来,工序比较集中。

3) 缩短了新产品的试制周期

在新产品试制时,若采用光电、数控电火花线切割,便可直接加工出各种标准和非标准直齿轮(包括非圆齿轮、非渐开线齿轮)、微电机定子和转子硅钢片、各种变压器铁心、各种特殊或复杂的二次曲面体零件,从而省去设计和制造相应的刀具、夹具、量具、模具及二次工具,大大地缩短了试制周期。快速成形技术更是试制新产品的必要手段,改变了过去传统的产品试制模式。

4) 影响产品零件的结构设计

例如,为了减小应力集中,花键孔、轴的齿根部分应设计和制成小圆角。但拉削加工时刀齿做成圆角对切削和排屑不利,且容易磨损,故只能设计与制成清棱清角的齿根;而用电解加工时由于存在尖角变圆现象,因此可用来加工采用圆角的齿根。又如各种复杂冲模(山形硅钢片冲模),常规制造方法由于不易制造往往采用镶拼结构,而采用电火花线切割加工后,即使是硬质合金的刀具、模具,也可以制成整体结构。喷气发动机涡轮也由于电加工而采用扭曲叶片带冠整体结构,大大提高了发动机性能。由此可见,特种加工使产品零件可以更多地采用整体性结构。

5) 重新衡量传统结构工艺性的好坏

方孔、小孔、弯孔和窄缝等过去被认为工艺性很坏,在结构上应尽量避免,而特种加工的应用改变了这种现象。对于电火花穿孔、电火花线切割工艺来说,加工方孔和加工圆孔的难易程度是一样的。对于喷油嘴小孔,喷丝头小异形孔,涡轮叶片中大量的小冷却深孔、窄缝,静压轴承、静压导轨的内油囊型腔,采用电加工后由难变易了。过去,若淬火后忘了钻定位销孔、铣槽等工艺,淬火后这种工件只能报废,现在则大可不必,可用电火花打孔、切槽进行补救。相反,有时为了避免淬火开裂、变形等影响,故意把钻孔、开槽等工艺安排在淬火之后,这在了解特种加工的审查人员看来,将认为是工艺、设计人员的“过错”,其实是他们没有及时进行知识更新。过去很多不可修复的废品,现在都可用特种加工的方法进行修复。例如,啮合不好的齿轮可用电火花跑合;尺寸磨小了的轴、磨大了的孔,以及工作中磨损了的轴和孔,均可用电刷镀修复。

如何经济高效地加工超强超硬材料上的细长孔是一个现实的问题。目前,细长孔的机加工

方式主要采用枪钻和改良型专用钻头。加工超强材料时,枪钻磨损很大,效率很低,易折断,加工成本高,更难以进行批量加工。改良型专用钻头因为很长,刚性极差,加工出的细长孔往往出现偏斜,且一旦钻头磨损,很容易出现强度极高的毛刺,若在盲孔内出现毛刺,则去除将非常困难,从而严重影响产品的性能。因此,对于超硬材料产品上的超长孔(如孔径 $\phi 2\text{ mm}$,孔深 300 mm 以上),可采用电加工方法加工细长孔。

综上所述,特种加工技术在机械制造中发挥着重要作用,已成为现代制造技术不可分割的重要组成部分。随着科学技术和现代工业的发展,特种加工必将不断完善和迅速发展,反过来又必将推动科学技术和现代工业的发展,并发挥越来越重要的作用。

1.4 特种加工的研究热点

国外电解加工应用较广,除叶片和整体叶轮外已扩大到机匣、盘环零件和深小孔加工,用电解加工可加工出高精度金属反射镜面。目前,电解加工机床最大容量达到 5 万安培 ,并已实现CNC控制和多参数自适应控制。电火花加工气膜孔采用多通道、纳秒级、超高频脉冲电源和多电极同时加工的专用设计,加工效率为 $2\sim 3\text{ s/孔}$,表面粗糙度为 $0.4\ \mu\text{m}$ 。通用高档电火花成形及线切割已能提供微米级加工精度,可加工 $3\ \mu\text{m}$ 的微细孔和 $5\ \mu\text{m}$ 的孔。根据上述现状,为进一步提高特种加工技术的应用范围,今后特种加工技术的发展趋势有以下3个方面。

1) 微细化

特种加工技术适宜于复杂微机械结构的加工。目前,国内外对电火花、电化学、激光和超声微细加工的研究方兴未艾,微细化已经成为特种加工技术的重要发展方向。

在理论研究方面,英国的D. T. Pham等人对微细电火花加工的工艺和面临的问题进行了综述。电火花微细加工的主要工艺方法有线切割加工(线电极直径小于 $20\ \mu\text{m}$)、成形钻削(电极直径 $5\sim 10\ \mu\text{m}$)和铣削(电极直径 $5\sim 10\ \mu\text{m}$)。而电极的装夹和在线制作、电极和工件的在线测量、加工精度的测量和评价,以及火花放电过程的随机性,都是阻碍电火花加工应用于微细领域的主要问题。

在实际应用方面,瑞士的Ivano Beltrami等人研制出了一种小型化的高精度微细电火花加工机床,工作行程为 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$,具有 5 nm 的分辨率和 600 Hz 的带宽。而英国的Hideki Takezawa等人则研制出了一种微细电火花加工中心,可用于工件的加工和测量。

2) 复合化

许多新的特种加工方法来自于几种已有加工方法的结合,通过对多种加工方法进行取长补短,形成新的复合加工方法,从而获得更高的加工精度和加工效率。

电解电火花加工综合了电解加工和电火花加工的特点。工具和工件间充满了电解液,使用直流脉冲电源,工具接阴极,工件接阳极,这样加工工件既包括了电火花的蚀除作用,又包括了电化学的溶解作用。电解电火花加工同时具有电火花加工的高精度和电化学加工的高效率。例如,电解电火花加工可用于非导电脆性材料(如光学玻璃和石英棒)的切片。

在微细加工中,可将线电极电火花磨削(WEDG)和单脉冲电火花放电(OPED)结合起来制造了微球形探针,该探针可应用于坐标测量机。这种方法先利用线电极电火花磨削加工电极,然后将加工后的电极移动到工件上方进行单脉冲电火花放电加工。

3) 自动化

以计算机技术、通信技术和控制技术为代表的信息技术已成为社会生产力发展的重要推动力。制造技术与信息技术相结合,使得加工过程具有自动化、柔性化、集成化和智能化的特点,以 CAD/CAM 为代表的 CAX 技术、以模糊逻辑控制和人工神经网络为代表的智能控制技术,在特种加工的各个领域都得到了广泛的应用。

基于 PC 的开放式数控系统有 PC 嵌入 NC、NC 嵌入 PC 和全软件 NC 等结构。中国台湾的颜木田等人开发的微细电火花线切割加工数控系统采用了 NC 嵌入 PC 的结构。该系统主要由 PC 和基于 DSP (TMS320C32) 的运动控制卡组成,二者通过双端口 RAM 通信。PC 主要实现数控代码解释、人机界面和网络功能,运动控制卡主要实现逻辑控制、运动控制和程序控制功能。

哈尔滨工业大学特种加工及机电控制研究所为微细电火花铣削开发了专用的 CAD/CAM 系统。该系统能针对微三维结构的形状选择最优的加工路径,并对电极的损耗进行补偿,能保证自由曲面加工的精度。利用微细电火花铣削方法在直径 1 mm 的圆形范围内加工出人脸轮廓。

特种加工技术是机械、电子、信息和材料技术的集成,体现了各项技术的最新研究成果,发展十分迅速。加工尺度的微细化、加工方法的复合化和加工过程的自动化,已成为近年来特种加工的研究热点。随着科学技术的飞速发展,特种加工技术必将进一步更新和扩展,在制造业中发挥更大、更重要的作用。

1.5 特种加工的地位和作用

特种加工技术已经成为在国际竞争中取得成功的关键技术。发展尖端技术、国防工业、微电子工业等,都需要特种加工技术来制造相关的仪器、设备和产品。在制造业自动化领域,已经进行了大量有关计算机辅助制造软件的开发,如计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程分析(CAE)、计算机辅助工艺过程设计(CAPP)、计算机辅助加工(CAM)等;又如面向装配的设计(DFA)、面向制造的设计(DPM)等,统称为面向工程的设计(DFX);同时进行了计算机集成制造技术(CIM),生产模式如精良生产、敏捷制造、虚拟制造及绿色制造等研究,这些都是十分重要和必要的,代表了当今社会高新制造技术的一个重要方面。但是,作为制造技术的主战场,作为真实产品的实际制造,必然要依靠特种加工技术。例如,计算机工业的发展不仅要在软件上,还要在硬件上,即在集成电路芯片上有很强的设计、开发和制造能力。目前,我国集成电路的制造水平制约了计算机工业的发展。

我国对特种加工技术既有广大的社会需求,又有巨大的发展潜力。目前,我国特种加工的整体技术水平与发达国家还存在着较大的差距,需要我们不断地拼搏和努力,加速开展在这些方面的研究开发和推广应用等工作。

特种加工主要用于航空航天、军工、汽车、模具、冶金、机械、电子、轻纺、交通等工业中。例如,航空航天工业中各类复杂深小孔加工,发动机蜂窝环、叶片、整体叶轮加工,复杂零件三维型腔、型孔、群孔和窄缝等的加工。在军事工业中,尤其对新型武器装配的研制和生产中,无论飞机、导弹,还是其他作战平台,都要求减小结构重量及燃油消耗,提高飞行速度,增大航程,达到战技性能高、结构寿命长、经济可承受性好的目的。在这些领域,特种加工发挥着极其重要的并且是不可替代的作用。

第2章 电火花加工

2.1 概述

2.1.1 电火花加工的概念

所谓电火花加工 (Electrical Discharge Machine, EDM), 是在介质中, 利用两极 (工具电极与工件电极) 之间脉冲性火花放电时的电腐蚀现象对材料进行加工, 以使零件的尺寸、形状和表面质量达到预定要求的加工方法。在火花放电时, 火花通道内会瞬时产生大量的热, 致使电极表面的金属产生局部熔化甚至汽化而被蚀除下来。电火花加工表面不同于普通金属切削表面具有规则的切削痕迹, 其表面是由无数个不规则的放电凹坑组成。图 2-1 中分别展示了磨削加工表面、电火花成形加工表面及电火花线切割加工表面的微观形貌。

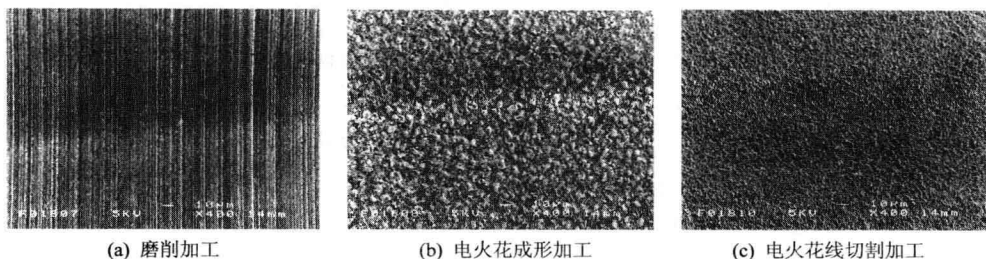


图 2-1 不同加工方式表面微观形貌照片

【背景知识 2-1】 电火花加工是如何发明的?

真正的电火花加工开始于 1943 年, 以前苏联莫斯科大学的教授拉扎连科夫妇发现的电火花放电原理为标志。当时正值第二次世界大战时期, 前苏联政府要求他们夫妇领导的科研小组研究如何减小钨开关触点因通电时产生火花而导致的电腐蚀, 以延长钨开关的使用寿命。该问题在当时的机动车辆, 尤其是坦克上尤为突出, 并大大影响了坦克的使用可靠性及寿命。在实验中他们把触点浸入油中, 希望可以减少火花导致的电蚀现象, 但实验并未成功。不过, 他们却发现浸入油中的触点产生的火花电蚀凹坑比空气中的更加一致并且大小可控, 于是就想到利用这种现象采用火花放电的方法进行材料的放电腐蚀, 从而发明了世界上第一台电火花加工机床。1946 年, 拉扎连科夫妇因此获得斯大林奖章。

2.1.2 电火花加工的分类

按工具电极与工件相对运动的方式和用途的不同, 电火花加工大致可分为电火花穿孔成形加工, 电火花线切割加工, 电火花内孔、外孔和成形磨削, 电火花同步共轭回转加工, 电火花高速小孔加工, 电火花表面强化与刻字六大类。前五类属于电火花成形、尺寸加工, 是用于改变工件形状和尺寸的加工方法; 后一类则属于表面加工方法, 用于改善或改变零件表面性质。