

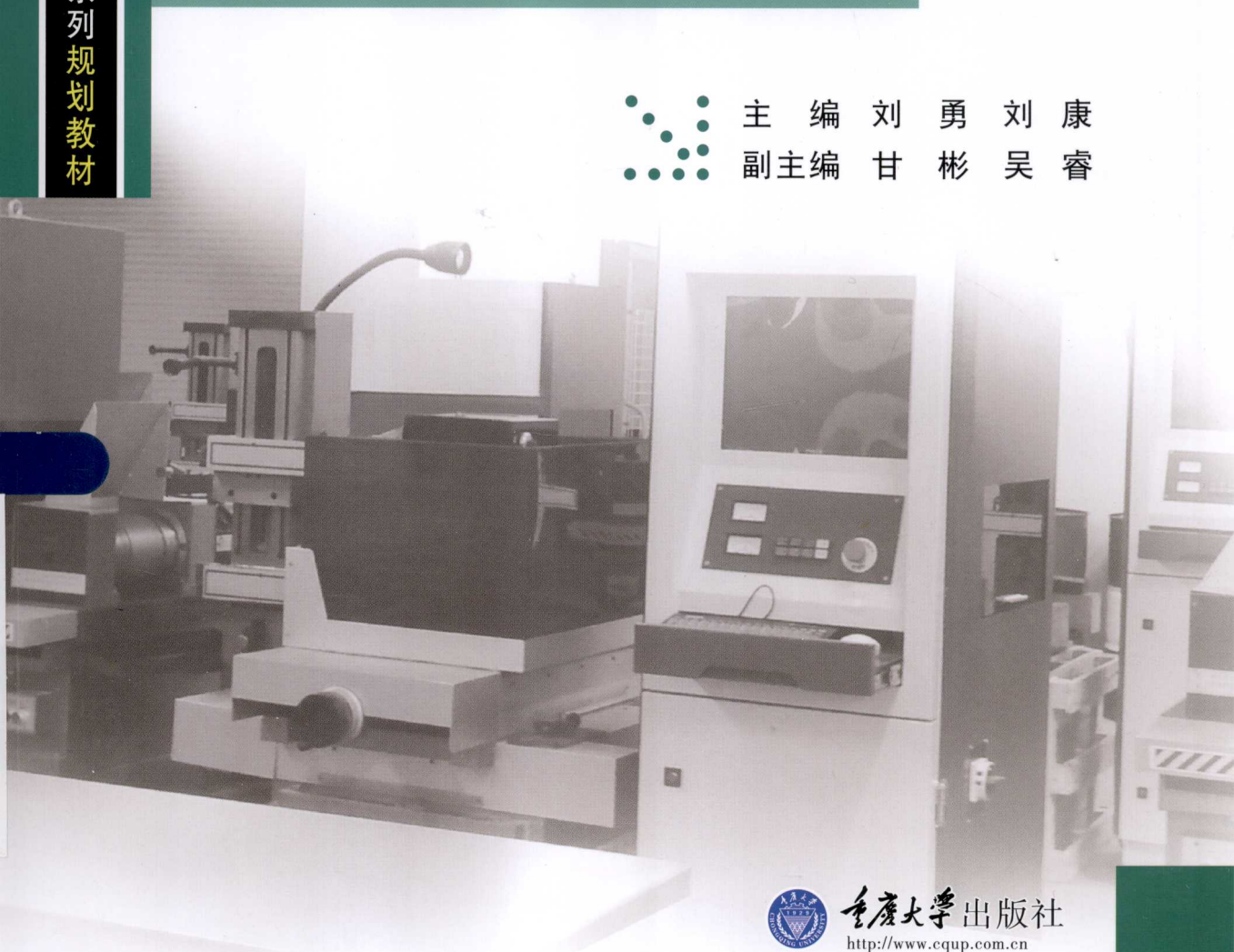
机械设计制造及其自动化专业本科系列规划教材

TEZHONG
JIAGONG JISHU

特种加工技术



主 编 刘 勇 刘 康
副主编 甘 彬 吴 睿



重庆大学出版社
<http://www.cqup.com.cn>

013024494

TG66-43
09

特种加工技术

主 编 刘 勇 刘 康
副主编 甘 彬 吴 睿



重庆大学出版社



TG66-43
09

内 容 提 要

本书从特种加工的基本理论出发,较详尽地阐述了各种特种加工方法的基本原理和特点、基本设备组成、基本工艺规律和应用范围。全书共7章,主要内容有电火花成型加工、电火花线切割加工、电解加工、电解磨削、电铸和涂镀加工、激光加工、电子束和离子束加工、高压水射流加工、超声加工及快速成型技术等,每一章后附有思考题,以引导思维、掌握重点、巩固基本理论。在内容的编写过程中,尽量结合生产实际,注重能力培养。

本书适用于高等院校“机械设计制造及其自动化”“材料成型及控制工程”专业或其他机械类专业学生的特种加工课程教材,也可作为职工大学、电视大学、函授大学和业余自修等学生的参考教材,还可作为从事机械制造行业的工程技术人员的培训教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

特种加工技术/刘勇,刘康主编. —重庆:重庆大学出版社,2013. 1

机械设计制造及其自动化专业本科系列规划教材

ISBN 978-7-5624-7073-1

I. ①特… II. ①刘…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 277296 号

特种加工技术

主 编 刘 勇 刘 康

副主编 甘 彬 吴 睿

策划编辑:曾令维

责任编辑:李定群 高鸿宽 版式设计:曾令维

责任校对:刘 真 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617183 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

自贡兴华印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:13.25 字数:331千

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-7073-1 定价:28.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

随着教学改革的不深入,21 世纪教学和课程体系改革正在逐步完善,为了适应“机械设计制造及自动化”宽口径专业的各个专业方向的主干专业课教学的需要,我们特编写了本教材。“特种加工技术”是机械类各个专业方向选修的专业课,主要包括除传统的机械加工外的其他主要特种加工方法。本书共 7 章,内容有电火花成型加工、电火花线切割加工、电解加工、电解磨削、电铸和涂镀加工、激光加工、电子束和离子束加工、水射流加工、超声加工和快速成型技术等。本书是按 40 学时左右的课时内容来编写的,学校可根据自己不同的教学要求来调整学时和教学内容。本书与其他机制专业的专业课教材有本质上的不同,内容较多,涉及的知识面广,每一章的内容相对独立没有必然的联系。

“特种加工技术”是高等工科院校机械设计制造专业方向的主要专业选修课程。通过多年的教学实践,并参考了近年来所出版的同类教材,我们编写了这本教材。本书反映了各种特种加工技术的基本原理、基本设备、工艺规律、主要特点及应用范围,各章节内容除包含加工方法上述内容以外,还尽量包含或体现特种加工领域的一些新成果和新的工艺方法。在该课程的教学,应强调培养学生应用各种技术的能力,培养学生实际的工艺分析能力,兼顾对学生的工程实践能力的培养,在内容上注重先进性、科学性和实用性。教材力求通俗易懂,把较深奥的理论部分简化后编入教材。根据一般学生实践知识不足的实际情况,多举一些由浅入深的实际例子和图例,并可通过开设一些必要的实验课和现场授课来增加学生感性认识,拓宽学生的知识面。相信,通过本课程的学习和实践环节(实验、实习等),学生能较好地掌握特种加工的基本理论和应用知识。

本课程可根据各学校试验设备的具体情况设置以下内容的实验课:

- ①电火花成型加工实验。
- ②电火花线切割编程加工实验。
- ③激光打孔或切割实验。
- ④超声加工实验。
- ⑤电解加工或电解磨削加工实验。

特种加工已经是现代制造工业的重要组成部分,随着电子、航空、汽车、模具等工业的迅速发展,对零件的精度要求越来越高、结构形状越来越复杂,使特种加工技术和工艺方法不断更新增加,有必要让机械制造专业的学生掌握一些新的加工技术,了解机械制造的各种不同的新工艺方法,以适应制造业的发展,所以本教材涉及的内容较为广泛。本书可供机械设计制造及自动化本科专业教学使用,也可供专科、电大和其他的机械类专业方向的师生参考阅读,如书中部分内容上课没有讲授,学生可自学和课外阅读,本书还可作为从事机械制造方面的工程技术人员和技术工人的参考书。

本书由西华大学刘勇和四川理工学院刘康任主编,重庆理工大学甘彬和重庆科技学院吴睿任副主编。具体编写的章节:刘勇(第1章、第6章、第7章)、刘康(第2章、第3章)、甘彬(第4章)、吴睿(第5章),全书由西华大学刘渝教授主审。

由于我们水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳请读者、专家批评指正。

编者
2012年9月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 特种加工在现代制造工业中的作用和发展趋势 ...	1
1.2 特种加工的特点和类型	3
1.3 特种加工对被加工材料、结构和加工工艺的影响	5
思考题	6
第2章 电火花成型加工	7
2.1 电火花成型加工的基本原理和特点	7
2.2 电火花加工的微观机理分析	10
2.3 电火花成型加工用的脉冲电源	14
2.4 电火花加工的自动进给调节系统	21
2.5 电火花成型加工机床组成	29
2.6 电火花成型加工的基本工艺规律	33
2.7 电火花成型穿孔加工工艺应用	46
2.8 其他电火花加工	56
思考题	63
第3章 电火花线切割加工	64
3.1 电火花线切割加工原理和特点	64
3.2 电火花线切割机床及设备组成	66
3.3 电火花线切割数控编程系统	76
3.4 电火花线切割的工艺规律	85
3.5 线切割加工工艺应用	89
思考题	91
第4章 电化学加工技术	92
4.1 电化学加工基本原理和分类	92
4.2 电解加工	98
4.3 电解磨削加工	120
4.4 电铸、涂镀及电解抛光	127
思考题	138

第5章 高能束加工技术	139
5.1 概述	139
5.2 激光加工	139
5.3 电子束加工	151
5.4 离子束加工	157
5.5 水射流加工技术	165
思考题	171
第6章 超声加工	172
6.1 超声加工的基本原理和特点	172
6.2 超声加工设备	174
6.3 超声加工的基本工艺规律	177
6.4 超声加工的应用	179
思考题	181
第7章 快速成型技术	182
7.1 概述	182
7.2 快速成型制造工艺	184
7.3 快速模具制造工艺	192
7.4 快速成型制造技术的应用	197
思考题	202
参考文献	203

第 1 章

绪 论

1.1 特种加工在现代制造业中的作用和发展趋势

特种加工技术(non-traditional machining, NTM)的发展可追溯到 20 世纪 40 年代初。1943 年,苏联科学家拉扎连柯夫妇研究了电器开关在闭合与断开时经常发生电火花烧蚀现象,能否变有害作用为可用的加工方法呢?考虑到金属在电火花放电的高温中可被瞬间熔化腐蚀,从而进行了电火花放电加工金属材料的研究,经过反复的试验研究,终于发明了电火花加工技术,并发表了世界第一篇关于电火花放电加工的学术论文。电火花加工是工具和工件的非接触加工,可使用软的工具加工高硬度、高强度的工件材料,是一种不靠机械切削力来去除材料的加工方法。

20 世纪 50 年代以来,在新技术革命浪潮推动下,生产和科学技术的发展非常迅速,许多工业部门特别是国防工业部门,高技术产品要求精度越来越高、形状越来越复杂、对材料的要求越来越高,向着高温、高压、大功率和小型化方向发展。这样就出现大量的具有高熔点、高强度、高硬度、高脆性等特殊性能的材料。为了满足高技术产品的高性能要求,零件的结构形状更复杂,对精度、表面粗糙度和表面质量的要求更加的高,特别是对表面完整性提出了更加严格的要求。现代高性能的飞机和航空发动机上大量采用了钛合金、复合材料、粉末冶金和定向凝固高温合金材料。在高性能的战斗机上钛合金用量反映出飞机的性能,一般使用钛合金越多飞机性能越好,如 F-22 战斗机钛合金用量已经创纪录地达到 36%。航空发动机的热端部件将持续发展高温、高强度、高韧性的合金。因此,新材料和新结构的大量采用使得现代化工业装备的可加工性和可生产性成为亟待解决的问题,对制造技术提出更高的要求。许多新型材料和新型结构采用常规加工方法是难以加工甚至是根本无法加工的。为此必须使用新的工艺方法来解决:

①难加工材料的加工问题(如钛合金、耐热合金、金刚石、宝石等)。

②特殊复杂型面的加工问题(如涡轮叶片、锻压注塑模具成型面、炮管内膛线、喷丝板等)。

③高精密表面的加工(微米级、纳米级精度的航空陀螺仪、伺服阀等)。

④特殊要求零件的加工(如壁厚不超过 0.1 mm 薄壁和弹性零件,高精度低刚度细长轴等)。

20 世纪 50 年代以来国内外工业界通过各种渠道,依靠不同的能量形式,探寻不同的加工途径,相继采用了多种与传统加工方法截然不同的新型的特种加工方法,如电火花加工、电解加工、化学加工、超声波加工以及激光、电子束、离子束等高能束加工等。目前,以数控精密电加工技术和高能束流为能源的特种加工技术已成为许多精密工业产品制造技术中不可缺少的加工方法。在难加工材料、复杂型面、精密表面、低刚度零件及模具加工等领域起着重要的作用。

20 世纪 50 年代后期我国先后研制了电火花穿孔机床和线切割机床。一些先进工业国,如瑞士、日本也加入电火花加工技术研究行列,使电火花加工工艺在世界范围取得巨大的发展,应用范围日益广泛。我国电火花成型机床经历了电液伺服主轴头,力矩电机或步进电机主轴头,直流伺服电机主轴头,交流伺服电机主轴头,到直线电机主轴头的发展历程;控制系统也由单轴简易数控逐步发展到双轴、三轴联动乃至更多轴的联动控制;脉冲电源也以最初的 RC 弛张式电源和脉冲发电机,逐步推出电子管电源,闸流管电源,晶体管电源,晶闸管电源及 RC,RLC 电源复合的脉冲电源。成型机床的机械部分也以滑动导轨、滑动丝杠副逐步发展为滑动贴塑导轨、滚珠导轨、直线滚动导轨及滚珠丝杠副,机床的机械精度达到了微米级,最佳加工表面粗糙度 R_a 已由最初的 $3.2\text{ }\mu\text{m}$ 提高到目前的 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 以下,从而使电火花成型加工步入镜面、精密加工技术领域,与国际先进水平的差距逐步缩小。

线切割加工机床的控制也经历了靠模仿形、光电跟踪、简易数控等发展阶段,特别是我国发明了世界独创的快速走丝线切割技术后,出现了众多形式的数控线切割机床,线切割加工技术突飞猛进,为我国国民经济,特别是模具工业的发展作出了巨大的贡献。随着精密模具需求的增加,对线切割加工的精度要求越来越高,快速走丝线切割机床目前的结构与其配置已无法满足生产的精密要求,为了提高加工精度已经研发出了中走丝线切割机床,在大量引进国外慢走丝精密线切割机床的同时,国产慢走丝机床的研制工作也同步进行,至今已有多种国产慢走丝线切割机床问世。我国的线切割加工技术的发展要高于电火花成型加工技术,大厚度($>300\text{ mm}$)及超大厚度($>600\text{ mm}$)线切割机床使大型模具与工件的线切割加工得以实现,拓宽了线切割工艺的应用范围。由于各种直接用能量(声、光、电等)的加工设备不断问世,“电加工”这一概念已不能覆盖这一新工艺领域的诸多方面,于是采用“特种加工”替代“电加工”。特种加工领域除了传统的电火花成型加工、电火花线切割加工、电解加工外,还包括电铸加工、激光加工(激光焊接、打孔、快速成型等)、电子束加工、离子束加工、超声波加工(清洗、打孔等)以及一些工艺技术的复合加工等诸多方面。

特种加工技术的发展趋势:随着现代航空和模具技术的发展,特种加工技术起着越来越重要的作用,已经成为现代工业的关键制造技术,工业发达国家各个工业部门都高度重视先进特种加工技术的发展。20 世纪 70 年代以后,先进特种加工技术有了长足的进步,到了 80 年代已经成为制造业中难加工材料和复杂结构稳定的高质量加工方法。目前为了加速国防、航空航天和电子等高新技术工业的发展,对特种加工技术的技术水平、经济性和自动化程度提出了更高的要求,从而促进特种加工技术的发展。

特种加工技术的总体发展趋势:

①广泛采用自动化技术,实现计算机数控化。开发应用自适应控制和加工过程最佳化技术,实现无人化加工,提高加工效率和加工精度。充分利用计算机数控技术对特种加工设备的控制系统、电源系统进行优化,进而建立特种加工的 CAD/CAM 和 FMS 系统,这是当前特种加工技术的主要发展趋势。

②特种加工技术不仅可采取单独的加工方法,更可采用复合加工的方法。近年来复合加工的方法发展迅速,应用十分广泛。新型结构材料和高精密复杂结构的大量采用,使传统的结构工艺性面临挑战,但单一的特种加工方法难以达到高精度、高质量、高效率 and 低成本综合技术与经济指标要求,因而进一步加速开发和应用新型特种加工技术和由多种能源组成的复合工艺。目前由两种能源复合的特种加工技术,如电解电火花复合加工、电火花机械复合加工、机械超声波复合加工等复合工艺已成为国内外工业和机械工业着力发展的特种加工技术。由于复合工艺可扬长避短,经济高效,可取得明显的技术经济效果,因此受到先进工业国家的工业部门的普遍关注。

③大力开展精密化研究。随着高新技术的发展,对零件的精度要求更高,超精密加工技术的发展,正从亚微米级向毫微米(10^{-9} m)和纳米级(10^{-15} m)发展。为适应这一发展趋势的需要,以高能束流加工技术为代表的先进特种加工技术的精密化研究引起工业界的高度重视。因此,大力发展超精加工的特种加工技术是今后相当长的时期内的重要发展方向。

1.2 特种加工的特点和类型

特种加工技术和传统的机械切削加工有着本质的不同,机械切削是靠机械能通过硬度高的刀具切除较软的工件上多余的材料,而特种加工是直接利用电能、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其复合能量,以实现材料切除的加工方法,且工具的硬度可比工件的硬度低。特种加工的类型有电火花加工(电火花成型加工、电火花线切割加工)、电化学加工(电解加工、电铸加工、涂镀加工)、高能束流加工(激光束加工、电子束加工、离子束加工、高压水射流加工)、超声波加工及多能源复合加工。

特种加工的特点如下:

①特种加工主要靠电、化学、光、声、热等能量去除材料,而不只是靠传统的机械能。

②工具硬度可低于工件硬度,因工具与工件不直接接触,加工时无明显的机械作用力,特别适合于精密加工低刚度零件,加工脆性和高硬度材料时工具硬度可低于被加工材料的硬度,有些情况下,如在激光加工、电子束加工、离子束加工等加工过程中根本不需要使用任何工具。

③以简单的进给运动可加工复杂型面,许多特种加工技术只需简单运动即可加工出三维复杂型面。

④不受材料硬度限制,因特种加工技术的瞬时能量密度高,可直接有效地利用各种能量,造成瞬时或局部熔化,同时以强力、高速爆炸、冲击去除材料,其加工性能与工件材料的强度和硬度无关,故可加工各种超硬超强材料、高脆性和热敏材料以及特殊的金属和非金属材料。

⑤可获得良好的表面质量,特种加工过程中,没有明显的机械切削力,工具表面不产生强烈的弹、塑性变形,故有些特种加工方法可获得良好的表面质量和表面粗糙度,并且残余应力、冷作硬化、热影响区及毛刺等表面缺陷均比机械切削小。

表 1.1 特种加工方法种类和比较

特种加工种类	特种加工方法	精度 /(μm)	表面粗糙度 R_a /(μm)	应用实例
电火花加工	电火花成型加工	50 ~ 1	2.5 ~ 0.02	各种金属型腔模、异形孔、深孔、螺纹
	电火花线切割加工	20 ~ 3	2.5 ~ 0.16	金属冲模、样板切割、成型刀具、模具卸料板
电化学加工	电解加工	100 ~ 3	1.25 ~ 0.06	金属型腔模具、型孔、涡轮叶片、异形孔、炮管膛线、钛合金型面
	电铸加工	1	0.02 ~ 0.012	金属成型精密零件、唱片模、票证印刷版、光碟模
	涂镀加工	500 ~ 1	1.25 ~ 0.1	金属成型零件的修复、局部填补、镀层
化学加工	化学刻蚀	0.1	2.5 ~ 0.2	金属、非金属和半导体刻线、刻图
	化学铣削	20 ~ 10	2.5 ~ 2	金属下料和成型加工
高能束流加工	激光加工	10 ~ 1	6.3 ~ 0.12	各种材料打孔、焊接、切割热处理、熔覆
	电子束加工	10 ~ 1	6.3 ~ 0.12	各种材料微孔、窄缝、焊接、刻蚀
	离子束加工	0.1 ~ 0.01	0.1 ~ 0.01	各种材料刻蚀、注入
	高压水射流加工	20 ~ 10	20 ~ 5	各种材料下料、切割
超声加工	超声打孔、成型、切割	30 ~ 5	6.3 ~ 0.16	玻璃、石英、宝石等各种脆性材料的切割、型腔、型孔
快速成型加工	快速固化、烧结、分层叠加、堆积	30 ~ 10	10 ~ 2.5	快速制造样件、模具
复合加工	精密电解磨削、研磨和抛光	20 ~ 0.1	0.08 ~ 0.008	金属孔、外圆、平面
	精密超声车削、磨削和研磨	5 ~ 0.1	0.1 ~ 0.008	难加工材料的孔、外圆、平面
	机械化学研磨、抛光和化学机械抛光	0.1 ~ 0.001	0.01 ~ 0.008	各种材料的孔、外圆、平面、型面

由于特种加工具有上述特点,与传统机械切削加工相比,特种加工技术可加工任何硬度、强度、韧性、脆性的金属、非金属材料或复合材料,而且特别适合于加工复杂、微细表面和低刚

度的零件,同时,有些方法还可用于进行超精密加工、镜面加工、光整加工以及纳米级(原子级)的加工。

1.3 特种加工对被加工材料、结构和加工工艺的影响

虽然目前特种加工的应用还没有传统机械加工那样广泛,但随着高新技术的不断发展,它的应用也越来越普及,并引起了机械制造领域内的许多变化。例如,对材料的可加工性的影响,对工艺路线安排的影响,对新产品试制过程的影响,对产品零件结构设计和零件结构工艺性好坏的标准影响,等等,这些都会对产品设计、材料选用、新产品开发及加工工艺过程等产生许多变革。具体主要有以下5个方面:

(1) 提高了难加工材料的可加工性

一般情况下认为淬火钢、不锈钢、钛合金、硬质合金、金刚石、石英、玻璃及陶瓷等是难加工的材料。但现已广泛使用的金刚石、聚晶金刚石、聚晶立方氮化硼等制造的刀具、工具、拉丝模和航空航天工业大量使用的钛合金、高温合金等,都可采用电火花、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,这不但扩大了材料的使用和加工范围,也对今后推动新材料的研发和应用具有重要意义。

(2) 零件的典型工艺路线被改变

在传统的加工过程中,淬火热处理工序后工件硬度高只能安排磨削加工,而其他的切削加工、成型加工等都必须安排在淬火之前,这是作为机械工艺人员应遵循的工艺准则。但特种加工技术改变了这种一成不变的工艺安排程序。由于特种加工不受工件材料硬度的影响,可淬火后再进行成型加工,避免加工后再淬火热处理引起的工件加工面的变形。电火花成型加工、电火花线切割加工、电解加工等一般都必须先进行淬火处理后再加工,这就是特种加工和传统加工的工艺安排的不同。特种加工的出现还对以往工序的“分散”和“集中”产生影响。以加工齿轮、连杆等型腔锻模为例,由于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、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、简单的运动轨迹,经过一次安装、一道工序加工出来,工序比较集中。

(3) 缩短新产品试制周期

试制新产品时,采用特种加工技术特别是快速成型技术可直接加工出各种标准和非标准直齿轮,微型电动机定子、转子硅钢片,各种变压器铁芯,各种特殊、复杂的二次曲面体零件,没有必要再去设计和制造相应的刀具、夹具、量具及辅具等二次工具,这样会大大缩短新产品的试制周期,对新产品的快速开发和应用有很大的促进作用。

(4) 对产品零件的结构设计带来变化

为了减少应力集中,花键孔、轴以及枪炮膛线的齿根部分最好做成小圆角,但拉削加工时刀齿做成圆角对排屑不利,容易磨损,刀齿只能设计与制造成清棱清角的齿根。而采用电解加工技术时,由于存在尖角变圆的现象,非采用小圆角的齿根不可。各种复杂冲模,如山形硅钢片冲模,整体模具制造加工困难,经常采用镶拼式结构的镶拼模,现在采用电火花、线切割加工技术后,可制成整体式结构,大大提高了模具的强度和刚度。喷气发动机涡轮也由于电

解加工技术的出现,可采用整体式结构,这对发动机的寿命和使用性能都有很大的提高。

(5) 对传统的结构工艺性的衡量标准产生重要影响

根据传统结构工艺性的标准,一般认为方孔、异形孔、小深孔、弯孔、窄缝等加工困难,是工艺性差的典型。在机械结构设计中,非常“忌讳”这样一些“结构工艺性”差的结构,有的甚至是机械结构的“禁区”。对于电火花穿孔加工、电火花线切割等特种加工来说,加工异形孔和加工圆孔的难易程度是一样的,因此,“结构工艺性”的好坏会因特种加工而发生改变。一些其他的难加工的结构,如喷丝头异形小孔或窄缝、涡轮叶片上大量的小冷却深孔,静压轴承和静压导轨的内油囊型腔、炮管中的膛线、精密栅网等,采用特种加工技术以后都变难为易了。过去淬火处理以前忘了钻定位销孔、铣槽等工艺,淬火处理后这种工件只能报废,现在则可用电火花打孔、切槽等进行补救。相反,现在有时为了避免淬火处理产生开裂、变形等缺陷,故意将钻孔、开槽等工艺安排在淬火处理之后,使工艺路线安排更为灵活。总之,有了特种加工,原来“结构工艺性”好或坏的衡量标准发生了变化,作为一个现代机械工程技术人员熟悉和了解各种特种加工的工艺方法是很有必要的。

思考题

- 1.1 特种加工技术是在什么历史背景下不断发展的?它对现代机械制造业的作用是什么?
- 1.2 特种加工和传统机械切削加工相比较有哪些特点?它对机械制造领域带来了哪些变化?
- 1.3 请举例说明传统的结构工艺性差的结构实例,为什么对特种加工而言这些结构的加工并不困难?
- 1.4 特种加工是怎样改变传统加工工艺过程的?为什么会作这样的改变?

第 2 章

电火花成型加工

电火花加工又称放电加工 (Electrical Discharge Machining, EDM), 它是利用电、热能量加工的方法, 在 20 世纪 40 年代开始起步并逐步应用在机加工业特别是在模具加工业中得到大量应用。电火花加工在加工过程中, 使工具和工件之间不断产生脉冲性的火花放电, 靠放电时局部、瞬时产生的高温将金属蚀除下来。电火花成型加工 (Sinker EDM) 就是利用电火花加工原理反复使工件表面不断被蚀除, 在工件上复制出工具电极的形状, 从而达到成型加工的目的。因放电过程中可见到火花, 故在我国和苏联称之为电火花加工, 现俄罗斯称为电蚀加工, 日本、英国、美国称为放电加工。

2.1 电火花成型加工的基本原理和特点

利用电火花加工时, 两极间脉冲放电过程中伴随着发生的各种现象, 可进行不同的加工。例如, 利用导电材料 (特别是金属材料) 在液体介质中放电时的电腐蚀现象对材料进行尺寸加工; 利用导电材料在介质中放电时材料表面层的变化对材料进行表面强化; 利用导电材料放电时的热爆炸作用对非金属材料进行加工等。其基本加工原理基本相同, 但各自也有差别。这里主要介绍金属电火花加工的基本原理。

2.1.1 电火花成型加工必备条件和原理

早在 19 世纪初人们就发现了电腐蚀现象, 当插头或电器开关触点在闭合或断开时, 会出现明亮的蓝白色的火花, 把接触表面烧毛、腐蚀成粗糙不平的凹坑, 从而逐渐损坏。人们在研究如何延长电器触头使用寿命过程的同时, 开始研究利用电腐蚀现象对金属材料进行尺寸加工。苏联学者拉扎连柯夫妇在研究电腐蚀的基础上, 首次将电腐蚀原理运用在生产制造领域。

电火花加工的原理是基于工具和工件 (正、负电极) 之间脉冲性火花放电时的电腐蚀现象来蚀除多余的金属, 以达到对零件的尺寸、形状及表面质量预定的加工要求。实践经验表明, 由于电器触点电腐蚀后的形貌是随机的, 没有确定的尺寸和公差, 要使电腐蚀原理用于尺寸

加工,必须创造以下加工条件:

①必须使工具电极和工件电极之间始终保持一定的放电间隙,这一间隙随加工条件而定(通常为 $0.02 \sim 0.1 \text{ mm}$)。因为电火花的产生是由于电极间的介质被击穿,如果间隙过大,极间电压不能击穿极间工作液介质而不会产火花放电;如果间隙过小,很容易形成短路接触,同样也不能产生火花放电。因此,在电火花加工过程中要求工具电极能自动进给和调节,采用自动进给装置而不能采用手动进给,一旦短路须迅速快退,无法手动实现。

②必须有脉冲电源,产生瞬时的脉冲性放电,如图 2.1 所示为脉冲电源空载电压波形,一般脉冲宽度 t_i 为 $1 \sim 1\,000 \mu\text{s}$,脉冲间隔 t_0 为 $20 \sim 100 \mu\text{s}$, t_p 为脉冲周期, $\hat{u}_i$ 为脉冲峰值电压或空载电压(一般 $80 \sim 100 \text{ V}$),这样可避免放电局域产生的热量传扩到其余部分,也可避免因短路造成烧伤,否则,像持续电弧放电使工件表面烧伤而无法用作精密的尺寸加工。因此,电火花加工必须采用脉冲电源。

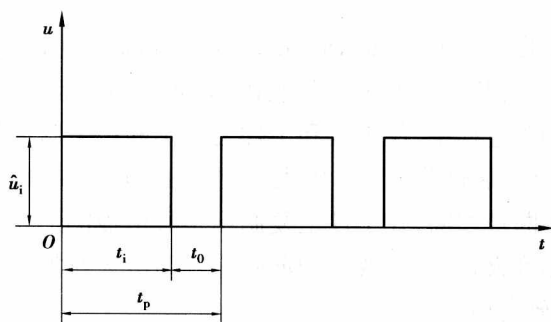


图 2.1 脉冲电源峰值电压(空载电压)波形

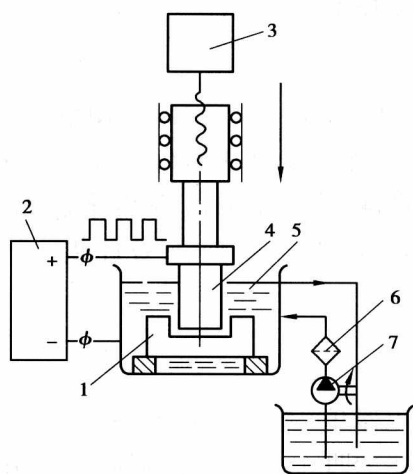


图 2.2 电火花加工原理示意图

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—过滤器;7—工作液泵

③火花放电必须在有一定绝缘性能的液体介质中进行,液体介质又称为工作液,常用的工作液有煤油、皂化液和去离子水等。要求绝缘强度较高(电阻率为 $10^3 \sim 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$),以有利于产生脉冲性的火花放电。同时工作液还能把电火花加工过程中产生的金属小屑、炭黑等电蚀产物从放电间隙中悬浮排除出去,并且对电极和工件表面有较好的冷却作用。

要同时具备以上 3 个条件,则需要有一个完整的工艺系统保证,才能将有害的火花放电转化为有用的加工技术。如图 2.2 所示为电火花加工原理示意图,工件 1 与工具 4 分别与脉冲电源 2 的负、正极两输出端相连接。自动进给调节装置 3 使工具和工件间始终保持一定的放电间隙。当脉冲电压加到两极上时,由于电极表面(微观)是凹凸不平的,某一相对间隙最小处或绝缘强度最弱处击穿液体介质,形成放电通道,电流随即剧增,在该局部产生火花放电,瞬时高温使工具和工件表面

都蚀除掉一小部分金属,单个脉冲经过上述过程,完成一次脉冲放电,在各自形成一个小凹坑。如图2.3(a)所示为单个脉冲放电后的电蚀坑。脉冲放电结束后,经过一段间隔时间(脉冲间隔 t_0),使工作液恢复绝缘后,第二个脉冲电压又加到两极上,又会在此时电极间距离相对最近或绝缘强度最弱点处击穿放电,又电蚀除一个小凹坑,如图2.3(b)所示为多次脉冲放电后的电极表面。这样以相当高的频率连续不断地重复放电,工具电极不断地向工件进给,就可将工具的形状复制在工件上,加工出所需要的零件,整个加工表面将由无数个小凹坑所组成。

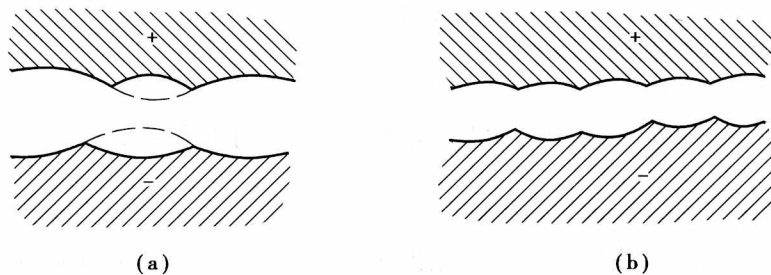


图2.3 电火花加工表面局部放大图

2.1.2 电火花成型加工特点

电火花成型加工是将工具电极的形状复制到工件上的仿形加工方法。它与传统靠机械能量产生切削力去除金属的传统切削加工不同,而是利用电能和热能来去除金属。它主要运用于加工各类型的型腔模及各种复杂的型腔零件的型腔加工和加工各种冲模、挤压模、粉末冶金模及各种小孔、深孔、异形孔、曲线孔等的穿孔加工。相对传统的机械加工,电火花成型加工具有以下特点:

(1) 主要优点

1) “以柔克刚”,适合于难切削材料的加工

由于加工中材料的去除是靠放电时的电热作用实现的,则材料的可加工性主要取决于材料的导电性及其热学特性,如熔点、沸点、比热容、热导率、电阻率等,而几乎与其硬度、强度等力学性能无关。因此能用“软”的工具电极加工“硬”的工件,如可用石墨、紫铜电极加工硬质合金、淬火钢,甚至聚晶金刚石、立方氮化硼等超硬材料。

2) “精密微细,仿形逼真”,可加工特殊及复杂形状的零件

由于加工中工具电极和工件不直接接触,无宏观切削力,因此适宜加工低刚度及微细加工。由于可简单地将工具电极的形状复制到工件上,因此特别适用于复杂表面形状工件的加工,如复杂型腔模具加工等。

3) 可实现加工过程自动化

由于电火花成型加工直接利用电能加工,较机械量而言,加工过程的电参数易于实现数字化、智能化控制和自适应控制等,可在设置好的加工参数后进行粗加工、半精加工、精加工的工序。

4) 可改进结构设计,改善结构的工艺性

采用电火花加工后可将拼镶、焊接结构改为整体结构,既大大提高了工件的可靠性,又大

大减少了工件的体积和质量,还可缩短模具加工周期。

5)可改变零件的工艺路线

由于电火花加工不受材料硬度影响,因此可在淬火后进行加工,这样可避免淬火过程中产生的热处理变形,如在压铸模或锻压模制造中,可将模具淬火到大于 56HRC 的硬度。

(2)主要局限性

1)主要用于加工金属等导电材料

不同于传统的切削加工那样可加工塑料、陶瓷等绝缘导电材料。但在一定条件下,也可加工半导体和聚晶金刚石等非金属超硬材料。

2)加工速度一般较慢,加工效率低

通常安排工艺时多采用切削加工来去除大部分余量,然后再进行电火花加工以求提高生产率,但已有研究成果表明,采用特殊水基不燃性工作液进行电火花加工,其生产率甚至高于切削加工。

3)有电极损耗,且加工表面有变质层甚至微裂纹

由于电火花加工靠电、热来蚀除金属,电极同样也会遭受损耗,而且损耗主要集中在尖角或底面,影响加工成型精度和工件表面的质量。但最近的机床产品在粗加工时已能将电极相对损耗比降至 1%,甚至更小。

4)最小角部半径有限制

一般电火花加工能得到的最小角部半径略大于加工放电间隙(通常为 0.02 ~ 0.30 mm),若电极有损耗或采用平动头加工,则角部半径还要增大。但近年来的多轴数控电火花加工机床,采用 X,Y,Z 轴数控摇动加工,可棱角分明地加工出方孔、窄槽的侧壁和底面。

2.2 电火花加工的微观机理分析

电火花加工的微观机理分析了电火花放电时,电极表面的金属材料怎样被蚀除的微观物理过程。从大量实验资料来看,每次电火花腐蚀的微观过程都是电场力、磁力、热力、流体动力、电化学和胶体化学等综合作用的过程。这一过程大致可分为 4 个连续阶段:

- ①极间介质的击穿与放电。
- ②介质分解、电极材料熔化、汽化热膨胀。
- ③电极材料的抛出。
- ④极间介质的消电离。

2.2.1 极间介质的击穿与放电

矩形波脉冲放电时极间放电电压和电流波形如图 2.4(a)、(b)所示,0 ~ 1 段为电压上升阶段,1 ~ 2 段为击穿延时,2 ~ 3 段为电压下降、电流上升阶段;3 ~ 4 段为火花维持电压和维持电流阶段,4 ~ 5 段为电压、电流下降段。当 80 ~ 100 V 的脉冲电压施加于工具电极与工件之间时,如图 2.4 中 0 ~ 1 段和 1 ~ 2 段,两级之间立即形成一个电场。电场强度与电压成正比,与距离成反比,即随着极间电压的升高或极间距离的减小,极间电场强度也随着增大。由于工具电极和工件的微观表面是凸凹不平的,且极间距离很小,因而电场强度是很不均匀的,一