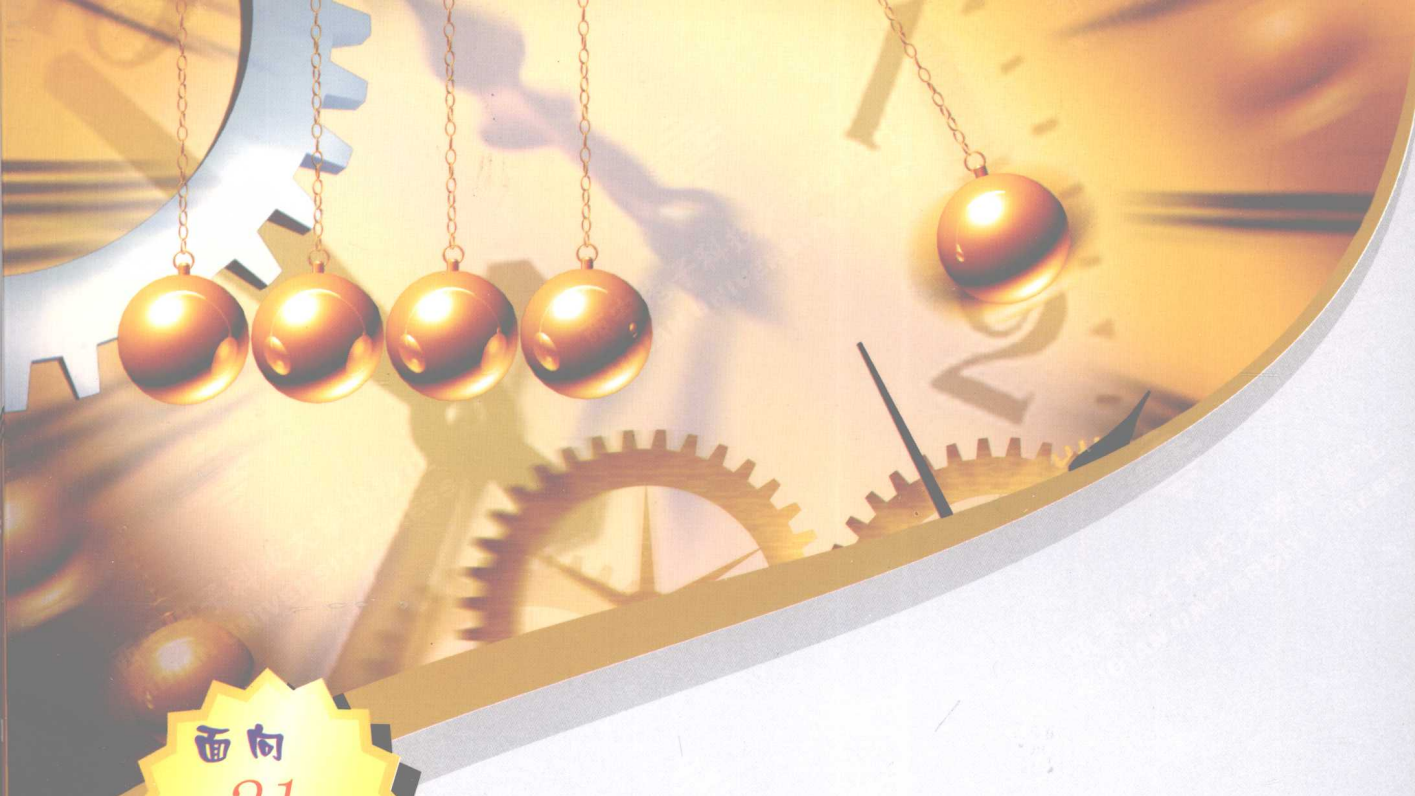




面向
21世纪
高级应用型人才

高职高专系列规划教材

特种加工

主 编 杨武成
主 审 宋文学



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高职高专系列规划教材

特种加工

主 编 杨武成

副主编 张康智 黄 勇

主 审 宋文学

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书共8章,内容包括概述、电火花加工、电火花线切割加工、电化学加工、激光加工、超声波加工、电子束和离子束加工、其他特种加工等。重点介绍了电火花加工、电火花线切割加工、电化学加工的原理、工艺规律、加工工艺及其应用实例等。根据高职高专教学要求,本书兼顾特种加工理论和具体加工工艺,理论讲述与实例分析并重,力争使读者能学以致用、融会贯通。

本书适合作为高职高专院校模具、机械制造、机电、数控技术应用等专业的特种加工课程的教材,也可作为电火花成型加工、线切割加工等机床操作工的职业培训用书,还可供从事模具制造等机械制造行业的专业人员参考。

★本书配有电子教案,需要者可登录出版社网站,免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

特种加工/杨武成主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2009.8

高职高专系列规划教材

ISBN 978-7-5606-2314-6

I. 特… II. 杨… III. 特种加工—高等学校:技术学校—教材 IV. TG66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 119131 号

策 划 云立实

责任编辑 马晓娟 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安市高陵县印刷厂

版 次 2009年8月第1版 2009年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 13.375

字 数 313千字

印 数 1~4000册

定 价 20.00元

ISBN 978-7-5606-2314-6/TG·0024

XDUP 2606001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

特种加工是将电、热、光、声、化学等能量或其组合施加到被加工工件的特定部位上去去除材料的加工方法,也被称为非传统加工。特种加工技术应用日益广泛,因此成为高技能型人才必须掌握的一门技术,“特种加工”课程也成为机械类专业学生必修的一门专业课程。

在实际应用中,特种加工设备的90%以上主要用于模具加工,占模具加工总量的30%~60%,成为模具制造的重要工艺技术手段。在其他制造行业,特种加工广泛应用于加工各种高硬度、形状复杂、微细、精密、薄壁等常规加工无法完成或很难完成的工件。近十几年来,国内外仅电加工机床年产量的平均增长率就已经大大高于金属切削机床的增长率,相应地,对从事特种加工的技术人员的需求也不断地增长。为了适应高层次技能型人才培养的需要,适应特种加工技术的迅速发展和应用的需要,我国高职高专层次的机械类专业均开设了“特种加工”课程,并且模具专业对该课程的要求还相对其他专业较高。

本书按照企业实际应用情况重点讲解了电火花加工、电火花线切割加工、电化学加工的原理、工艺规律、加工工艺及其应用实例分析等,简单介绍了其他特种加工的原理及其应用。在具体内容编写时,以模具专业(45学时)为主要使用对象编排,其他专业,如机械制造专业、机电专业(30学时)可以适当删减部分内容,以达到教学大纲的要求。

本书适合作为高职高专院校模具、机械制造、机电、数控技术应用等专业的“特种加工”课程的教材,也可作为电火花成型加工、线切割加工等机床操作工的职业培训用书,还可供从事模具制造等机械制造行业的专业人员参考。

本书由西安航空技术高等专科学校机械工程系杨武成(第1章、第2章2.6节、第3章、第4章4.3和4.4节、第5章)、张康智(第2章2.1~2.5节、第4章4.1和4.2节)和黄勇(第6~8章)编写。全书由杨武成统稿。西安航空技术高等专科学校机械工程系主任宋文学担任主审。在本书编写过程中,得到了西安航空技术高等专科学校机械工程系领导、西安电子科技大学出版社云立实编辑等的大力支持和帮助,也参考了部分同类教材,引用了部分标准和技术文献资料,在此对相关单位、专家和老师一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2009年5月

目 录

第1章 概述	1
1.1 特种加工的产生原因	1
1.2 特种加工的定义及分类	2
1.3 特种加工对制造业的影响	5
1.4 特种加工的发展趋势	6
习题与思考题	6
第2章 电火花加工	7
2.1 电火花加工概述	7
2.1.1 电火花加工的产生	7
2.1.2 电火花加工的特点	7
2.1.3 电火花加工的分类	8
2.1.4 电火花加工在当前制造业中的应用现状及趋势	10
2.2 电火花加工的机理	11
2.2.1 电火花加工的基本原理	11
2.2.2 电火花加工的形成条件	12
2.2.3 电火花加工的机理	13
2.3 电火花加工的基本规律	17
2.3.1 影响材料放电腐蚀的因素	17
2.3.2 影响加工速度的主要因素	20
2.3.3 影响工具相对损耗的主要因素	23
2.3.4 影响表面粗糙度和加工精度的主要因素	25
2.3.5 电火花加工后的表面层状态	27
2.4 电火花加工的设备	28
2.4.1 电火花加工机床的分类、型号及结构	28
2.4.2 电火花加工的脉冲电源	31
2.4.3 自动进给调节系统	38
2.5 电火花加工工艺	43
2.5.1 电火花加工工艺	43
2.5.2 电火花加工的工艺步骤	52
2.5.3 电火花加工中应注意的一些问题	52
2.6 电火花加工应用实例	54
2.6.1 电机转子冲孔落料模的电火花加工	54
2.6.2 去除断在工件中的钻头和丝锥的电火花加工	55
2.6.3 塑料叶轮注塑模的电火花加工	57

习题与思考题	58
第3章 电火花线切割加工	59
3.1 电火花线切割加工概述	59
3.1.1 电火花线切割加工的原理	59
3.1.2 电火花线切割加工的特点	60
3.1.3 电火花线切割加工的分类及应用	61
3.1.4 电火花线切割加工的机床	63
3.2 电火花线切割加工的工艺规律	68
3.2.1 主要工艺指标	68
3.2.2 电参数对工艺指标的影响	69
3.2.3 非电参数对工艺指标的影响	70
3.2.4 合理选择电火花线切割加工的工艺指标	76
3.3 电火花线切割加工的编程	77
3.3.1 编程原理	77
3.3.2 3B 程序编程	77
3.3.3 ISO 程序编程	82
3.3.4 自动编程	85
3.4 电火花线切割加工工艺	86
3.4.1 电火花线切割加工的工艺过程	86
3.4.2 电火花线切割加工的常规步骤	94
3.4.3 线切割加工的工艺技巧	94
3.5 电火花线切割加工的应用实例	98
3.5.1 六方套的电火花线切割加工	98
3.5.2 少齿数齿轮的电火花线切割加工	103
习题与思考题	105
第4章 电化学加工	107
4.1 电化学加工的原理及分类	107
4.1.1 电化学加工的原理	107
4.1.2 电化学加工的分类及特点	111
4.2 电解加工及电解磨削	112
4.2.1 电解加工	112
4.2.2 电解磨削	135
4.3 电铸加工、电镀加工及电刷镀加工	140
4.3.1 电铸加工	141
4.3.2 电镀加工	143
4.3.3 电刷镀加工	143
4.4 电化学加工的应用实例	145
习题与思考题	146
第5章 激光加工	147
5.1 激光加工的原理及特点	147
5.1.1 激光加工的原理	147
5.1.2 激光加工的特点	147

5.2 激光加工的设备	148
5.3 激光加工的应用	149
5.3.1 常用的激光加工工艺	149
5.3.2 激光加工应用实例	152
习题与思考题	152
第6章 超声波加工	153
6.1 超声波加工的原理及特点	153
6.1.1 超声波简介	153
6.1.2 超声波加工的原理	154
6.1.3 超声波加工的特点	155
6.2 超声波加工的设备及其组成部分	155
6.2.1 超声发生器	155
6.2.2 超声振动系统	156
6.2.3 机床本体	159
6.2.4 磨料工作液及其冷却循环系统	159
6.3 超声波加工的工艺参数及其影响因素	160
6.3.1 加工速度及其影响因素	160
6.3.2 加工精度及其影响因素	162
6.3.3 表面质量及其影响因素	163
6.3.4 工具磨损	163
6.4 超声波加工的应用	164
6.4.1 超声波的型孔、型腔加工	164
6.4.2 超声波切割	165
6.4.3 超声清洗	166
6.4.4 超声焊接	167
6.4.5 超声波复合加工	168
习题与思考题	170
第7章 电子束和离子束加工	171
7.1 电子束加工	171
7.1.1 电子束加工的原理及特点	171
7.1.2 电子束加工的装置	172
7.1.3 电子束加工的应用	174
7.2 离子束加工	177
7.2.1 离子束加工的原理及特点	177
7.2.2 离子束加工的装置	178
7.2.3 离子束加工的应用	179
习题与思考题	184
第8章 其他特种加工	185
8.1 快速成型技术	185
8.1.1 光敏树脂液相固化成型	186
8.1.2 选择性激光粉末烧结成型	188
8.1.3 薄片分层叠加成型	189

8.1.4 熔丝堆积成型	190
8.2 化学加工	191
8.2.1 化学蚀刻加工	191
8.2.2 光刻加工	192
8.2.3 化学镀膜	193
8.3 水射流加工	193
8.3.1 水射流加工的原理及特点	193
8.3.2 水射流加工的设备	195
8.3.3 水射流加工的应用	196
8.4 其他常见特种加工技术简介	197
8.4.1 等离子体加工	197
8.4.2 挤压珩磨加工	199
8.4.3 磨料喷射加工	200
8.4.4 磁性磨料研磨加工	202
8.4.5 复合加工概述	204
习题与思考题	205
参考文献	206

第 1 章 概 述

1.1 特种加工的产生原因

推动人类社会进步的两个工具是语言和劳动工具。劳动工具经历了石器时代、青铜器时代后进入了机器化时代，而机械加工则是伴随着时代的进步而发展的。

传统的机械加工已有非常悠久的历史，它对人类的生产活动和物质文明起到了极大的推动作用。例如，18 世纪 70 年代就发明了蒸汽机，但苦于制造不出高精度的蒸汽机汽缸而无法推广应用。直到后来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，才使得蒸汽机获得广泛应用，引起了世界性的第一次产业革命。这一事实充分说明了加工方法对新产品的研制、推广和社会经济的发展等起着重大的作用。

但是，从第一次产业革命直到第二次世界大战之前，在这段长达 150 多年靠机械切削加工的漫长年代里，并没有产生特种加工的迫切要求，也没有发展特种加工的充分条件，人们的思想一直局限在自古以来传统的用机械能量或热能所提供的切削力来除去多余的金属，以达到加工要求的方式。

随着社会生产的需要和科学技术的进步，20 世纪 40 年代，前苏联科学家拉扎连柯夫妇在研究开关触点遭受火花放电腐蚀损坏的现象和原因时，发现电火花的瞬时高温可使局部的金属熔化、汽化而被蚀除掉，从而开创和发明了变有害的电蚀为有用的电火花加工的方法。他们用铜杆在淬火钢上加工出小孔的实验验证了用软的工具可加工任何硬度的金属材料这一事实，首次摆脱了传统的切削加工方法，直接利用电能和热能来去除金属，获得了“以柔克刚”的效果。

进入 20 世纪 50 年代以来，由于现代科学技术的迅猛发展，机械工业、电子工业、航空航天工业、化学工业、医药工业、国防工业等蓬勃发展，尤其是国防工业部门，要求尖端科学技术产品向高精度、高速度、大功率、小型化方向发展，以及能在高温、高压、重载荷或腐蚀环境下长期可靠地工作。为了适应这些要求，各种新结构、新材料和复杂形状的精密零件大量出现，其结构和形状越来越复杂，材料越来越强韧，对精度要求越来越高，对加工表面粗糙度和完整性要求越来越严格，使机械制造面临着一系列严峻的任务：

(1) 解决各种难切削材料的加工问题。如硬质合金、钛合金、高温合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、金刚石、石英以及锗、硅等各种高硬度、高强度、高韧性、高脆性的金属及非金属材料加工。

(2) 解决各种特殊复杂型面的加工问题。如喷气涡轮机叶片、整体涡轮、发动机机匣、锻压模和注塑模等的立体成型表面,各种冲模、冷拔模等特殊断面的型孔,炮管内膛线、喷油嘴、喷丝头上的小孔、异形孔、窄缝等的加工。

(3) 解决各种超精密、光整零件的加工问题。如对表面质量和精度要求很高的航天用仪器、航空陀螺仪、精密光学透镜、激光核聚变用的曲面镜、高灵敏度的红外传感器等的精细表面加工,形状和尺寸精度要求在 $0.1\ \mu\text{m}$ 以上,表面粗糙度要求在 $0.01\ \mu\text{m}$ 以上。

(4) 特殊零件的加工问题。如大规模集成电路、光盘基片、复印机和打印机的感光鼓、微型机械、微型医疗器械和机器人零件、细长轴、薄壁零件、弹性元件等低刚度零件的加工。

要解决上述一系列问题,仅仅依靠传统的机械切削加工方法很难实现,有些根本无法实现。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,不断研究和探索新的加工方法。特种加工技术就是在这种环境和条件下产生和发展起来的。

目前,特种加工已经成为制造领域不可缺少的重要方面,在难切削材料、复杂型面、精细零件、低刚度零件、模具加工、快速原形制造以及大规模集成电路等领域发挥着越来越重要的作用。

1.2 特种加工的定义及分类

传统切削加工的本质和特点:一是所用刀具材料比工件更硬;二是利用机械能把工件上多余的材料切除。借助于除机械能以外的其他能量形式去除工件多余材料的新加工方法,统称为“特种加工”,国外称为“非传统加工”或“非常规机械加工”。

特种加工是指利用光、电、声、热、化学、磁、原子能等能源或其组合施加到工件被加工的部位上,从而实现材料去除的加工方法,也称为非传统加工方法(NTM, Non-Traditional Machining)。

特种加工的特点和与传统切削加工的区别主要有:

(1) 主要依靠机械能以外的其他能量(如电能、热能、光能、声能以及化学能或其组合等)来去除工件材料。

(2) 工具的硬度可以低于被加工工件材料的硬度,在某些情况下,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) 在加工过程中,工具和工件之间不存在显著的机械切削力作用,工件不承受机械力,特别适合于精密加工低刚度零件。

(4) 特种加工技术不仅可以采取单独的加工方法,更可以采用复合的加工方法。近年来,复合特种加工方法发展迅速,应用十分广泛。

由于具有上述特点,因此总体而言,特种加工技术可以加工任何硬度、强度、韧性、脆性的金属材料、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,有些方法还可以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。

特种加工一般按能量来源和作用形式以及加工原理不同,可分为如表1-1所示的各种加工方法。

表 1-1 常用特种加工方法分类表

加 工 方 法		主要能量形式	作用形式	符号
电火花加工	电火花成型加工	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	电化学能、机械能	阳极溶解、磨削	EGM(ECG)
	电解研磨	电化学能、机械能	阳极溶解、研磨	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
高能束加工	激光束加工	光能、热能	熔化、汽化	LBM
	电子束加工	电能、热能	熔化、汽化	EBM
	离子束加工	电能、机械能	切蚀	IBM
	等离子弧加工	电能、热能	熔化、汽化	PAM
物料切蚀加工	超声加工	声能、机械能	切蚀	USM
	磨料流加工	机械能	切蚀	AFM
	液体喷射加工	机械能	切蚀	HDM
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	光能、化学能	光化学腐蚀	PCM
复合加工	电化学电弧加工	电化学能	熔化、汽化腐蚀	ECAM
	电解电化学机械磨削	电能、电化学能、机械能	离子溶解、熔化、切割	MEEC

尽管特种加工优点突出,应用日益广泛,但是各种特种加工的能量来源、作用形式、工艺特点不尽相同,其加工特点与应用范围自然也不一样,而且各自还具有一定的局限性,因此为了更好地应用和发挥各种特种加工的最佳功能及效果,必须依据工件材料、尺寸、形状、精度、生产率、经济性等情况作具体分析,区别对待,合理选择特种加工方法。几种常见的特种加工方法性能和效果综合比较如表1-2所示。

表 1-2 几种常用特种加工方法的综合比较

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)	可达到的尺寸 精度/ mm (平均/最高)	可达到的表 面粗糙度/ μm (平均/最高)	主要适用范围
电火花 成型加工	任何导 电金属材料, 如硬 质合金钢、耐 热钢、不 锈钢、淬 火钢、钛 合金等	0.1/10	30/3000	0.03/0.003	10/0.04	从数微米的孔、槽到数 米的超大型模具、工件等, 如各种类型的孔、各种类 型的模具, 还可进行刻字、 表面强化等加工
电火花线 切割加工		较小(可补偿)	20/500 ^① (mm^3/min)	0.02/0.002	5/0.04	切割各种二维及三维直 纹面组成的模具及零件, 可直接切割样板等, 也常 用于铝、钨、半导体材料或 贵重金属的切削
电解加工		不损耗	100/10000	0.1/0.01	1.25/0.16	从微小零件到超大型工 件、模具的加工, 如型孔、 型腔的加工及抛光、去毛 刺等
电解磨削		1/50	1/100	0.02/0.001	1.25/0.04	硬质合金钢等难加工材 料的磨削, 如硬质合金刀 具、量具、轧辊的加工及小 孔研磨、珩磨等
超声波加工	任何脆 性材料	0.1/10	1/50	0.03/0.005	0.63/0.16	加工、切割脆硬材料, 如 玻璃、石英、宝石、金刚 石、硅等, 可加工型孔、型 腔、小孔等
激光加工	任何材料	不损耗(三 种加工没有 成型用的 工具)	瞬 时 去 除率很高; 受功率限 制, 平均去 除率不高	0.01/0.001	10/1.25	精密加工小孔、窄缝及 成型切割、蚀刻, 如金刚石 拉丝模、钟表宝石轴承等
电子束加工					1.25/0.2	在各种难加工材料上打 微小孔、切缝、蚀刻、焊接 等, 常用于制造大、中规模 集成电路微电子器件
离子束加工			很低 ^②	/0.01 μm	/0.01	对零件表面进行超精密、 超微量加工、抛光、刻蚀、 掺杂、镀覆等
水射流切割	钢铁、石材	无损耗	>300	0.2/0.1	20/5	下料、成型切割、剪裁
快速成型	增加材料方法加工, 无可比性			0.3/0.1	10/5	快速制作样件、模具

注: ① 线切割加工的金属去除率按惯例均用 mm^3/min 为单位, 但低速走丝和高速走丝机床间指标差异较大。

② 这类工艺主要用于精微和超精微加工, 不能单纯比较材料去除率。

1.3 特种加工对制造业的影响

由于特种加工技术具有的特点以及逐渐被广泛应用,因此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、产品零件结构设计、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、陶瓷等是很难加工的,但是现在已经广泛采用的利用金刚石、聚晶金刚石、聚晶立方氮化硼等制造的刀具、工具、拉丝模具等都可以采用电火花、电解、激光等多种方法来加工,也即工件材料的可加工性不再与其硬度、强度、韧性、脆性等直接的关系。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。特种加工方法使材料的可加工范围从普通材料发展到硬质合金、超硬材料和特殊材料。

(2) 改变了零件的典型工艺路线。在传统的加工领域,除磨削加工以外,其他的切削加工、成型加工等都必须安排在淬火热处理工序之前,这是工艺人员不可违反的工艺准则。特种加工技术的出现,改变了这种一成不变的程序格式。由于特种加工基本上不受工件材料硬度的影响,而且为了免除加工后再淬火引起热处理变形,一般都是先淬火处理而后加工。最为典型的是,电火花线切割加工、电火花成型加工、电解加工等都必须先进行淬火处理后再加工。

特种加工的出现还对以往工艺路线的“工序分散”和“工序集中”产生了影响。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,因此机床、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、一道工序就可以加工出来,工序比较集中。

(3) 大大缩短了新产品的试制周期。以往试制新产品的关键零部件时,必须先设计、制造相应的刀、夹、量具和模具以及二次工装,现在试制新产品时,采用精密与特种加工技术就可以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,各种特殊及复杂的二次曲面体零件,可以不用设计和制造相应的刀具、夹具、量具、模具以及二次工装,大大缩短了新产品的试制周期。而快速成型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) 对产品零件的结构设计产生了很大的影响。例如,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,因此刀齿只能设计与制造成无棱角的齿根,而采用电解加工技术时,由于存在尖角变圆的现象,因此必须采用小圆角的齿根。各种复杂冲模,如山形硅钢片冲模,以往由于难以制造,经常采用镶拼式结构,现在采用电火花、线切割加工技术后,即使是硬质合金的模具或刀具,也可以制成整体式结构。喷气发动机涡轮也由于电解加工技术的出现而可以采用整体式结构。

(5) 对传统的结构工艺性好与坏的衡量标准产生了重要影响。以往普遍认为方孔、小孔、弯孔、窄缝等是工艺性差的典型,是设计人员和工艺人员非常“忌讳”的,有的甚至是机械结构的“禁区”。而对于电火花穿孔加工、电火花线切割加工来说,加工方孔和加工圆孔的难易程度是一样的。喷油嘴小孔,喷丝头小异形孔,涡轮叶片上大量的小冷却深孔、窄缝,静压

轴承和静压导轨的内油囊型腔等的加工,在采用电火花加工技术以后都变难为易了。过去,若淬火处理以前忘了钻定位销孔、铣槽等工艺,那么淬火处理后这种工件只能报废,现在则可以用电火花打孔、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,故意把钻孔、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。

(6) 特种加工已经成为微细加工和纳米加工的主要手段。近年来出现并快速发展的微细加工和纳米加工技术,主要是电子束、离子束、激光、电火花、电化学等电物理、电化学特种加工技术,学习和掌握这种加工技术后,可以使设计和工艺技术人员采用更小的结构,甚至微细结构。

1.4 特种加工的发展趋势

目前,国际上对特种加工技术的研究主要表现在以下几个方面:

(1) 微细化。目前,国际上对微细电火花加工、微细超声波加工、微细激光加工、微细电化学加工等的研究方兴未艾,特种微细加工技术有望成为三维实体微细加工的主流技术。

(2) 特种加工的应用领域正在拓宽。例如,非导电材料的电火花加工,电火花、激光、电子束表面改性等。

(3) 广泛采用自动化技术。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 和 FMS 系统,这是当前特种加工技术的主要发展趋势。

(4) 用简单工具电极加工复杂的三维曲面是电解加工和电火花加工的发展方向。目前已实现用四轴联动线切割机床切出扭曲变截面的叶片。随着设备自动化程度的提高,实现特种加工柔性制造系统已成为各工业国家追求的目标。

我国的特种加工技术起步较早。20 世纪 50 年代中期,我国工厂已设计并研制出电火花穿孔机床。60 年代末,上海电表厂张维良工程师在阳极—机械切割的基础上发明了我国独创的高速走丝线切割机床,上海复旦大学研制出电火花线切割数控系统,从此,电火花、线切割加工技术在我国迅猛发展并遍地开花。1979 年,我国成立了全国性的电加工学会。2006 年,我国电火花穿孔成型机床年产量大于 3000 台;电火花数控线切割机床年产量大于 40 000 台;电加工机床生产企业由最初的 50 家增至 200 家以上。至此,我国电加工的机床总拥有量也跃居世界的前列。

但是,由于我国原有的工业基础薄弱,特种加工设备和整体技术水平与国际先进水平有不少差距,因此每年还需从国外进口 300 台以上高档电加工机床。我国大量生产的电加工机床往往是技术含量较低,售价和利润也较低的劳动力密集型的产品。这些都有待于我们去努力赶超,使我国从制造大国发展成制造强国。

习题与思考题

- 1-1 试阐述特种加工的产生缘由。特种加工的定义是什么?
- 1-2 说明特种加工与传统加工的本质区别。
- 1-3 特种加工带给制造业的重大影响有哪些?试举例说明。

第2章 电火花加工

2.1 电火花加工概述

电火花加工又称放电加工(Electrospark Machining)。电火花加工是一种电、热能加工方法。它是利用工具和工件两极间脉冲放电时局部瞬时产生的高温把金属熔化、汽化去除来对工件进行加工的一种方法。当用脉冲电流作用在工件表面上时,工件表面上导电部位即立即熔化,若电脉冲能量足够大,则金属将直接汽化,熔化的金属强烈飞溅而抛离电极表面,使材料表面形成电腐蚀的坑穴。如适当控制这一过程,就能准确地加工出所需的工件形状。在这一加工过程中,我们可看到放电过程中伴有火花,因此将这一加工方法称为电火花加工。

2.1.1 电火花加工的产生

早在19世纪初,人们就发现,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,因而烧损接触部位,而且使用较久的开关触点表面还可能出现许多麻点和缺口,这些就是火花放电和由它产生电腐蚀的结果。人们在研究如何延长电器触头使用寿命的过程中,认识了产生电腐蚀的原因,掌握了放电腐蚀的规律,但是并没有人将之应用于零件的加工。直到1943年,前苏联科学家拉扎连柯夫妇在研究电腐蚀现象的基础上,首次将电腐蚀原理运用到了生产制造领域,开创和发明了有用的电火花加工方法。人们经过试验发现,在煤油或机油中,火花放电所蚀除的金属量更多,并且能在工件表面上相当精确地复制出工具电极的轮廓,这就变害为利,逐渐发展为现在广泛应用的电火花加工。

目前,电火花加工技术已广泛应用于加工淬火钢、不锈钢、模具钢、硬质合金等难加工材料以及加工模具等具有复杂表面和特殊要求的零部件,在民用和国防工业中获得越来越多的应用。

2.1.2 电火花加工的特点

电火花加工的主要优点如下:

(1) 适合于任何难切削导电材料的加工。由于加工中材料的去除是靠放电时的电热作用实现的,因此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、导热系数、电阻率等,而几乎与其力学性能(硬度、强度等)无关。这样可以突破传统切削加工对刀具的限制,可以实现用软的工具加工硬韧的工件,甚至可以加工超硬材料。目前,电极材料多采用紫铜或石墨,因此工具电极较容易加工。

(2) 可以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, 没有机械加工的切削力, 因此适宜加工低刚度工件及微细加工。由于可以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。数控技术的采用使得用简单的电极加工复杂形状零件也成为可能。

(3) 脉冲参数可以在一个较大的范围内调节, 因此可以在同一台机床上连续进行粗、半精及精加工。精加工时精度一般为 0.01 mm , 表面粗糙度为 $0.63\sim 1.25\text{ }\mu\text{m}$; 微细加工时精度可达 $0.002\sim 0.004\text{ mm}$, 表面粗糙度为 $0.04\sim 0.16\text{ }\mu\text{m}$ 。

(4) 直接利用电能进行加工, 便于实现加工过程的自动化, 并可减少机械加工工序。加工周期短, 劳动强度低, 使用维护方便。

电火花加工也存在局限性, 主要表现为:

(1) 主要用于加工金属等导电材料, 仅在特定条件下才可以加工半导体和非导体材料。

(2) 一般加工速度较慢。因此通常安排工艺时多采用机械切削来去除大部分余量, 然后再进行电火花加工以求提高生产率。但最近已有新的研究成果表明, 采用特殊水基不燃性工作液进行电火花加工时, 其生产率甚至高于切削加工。

(3) 存在电极损耗。由于电极损耗多集中在尖角或底面, 因此影响成型精度。但最近的机床产品已能将电极相对损耗比降至 0.1% 以下。

(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等于加工间隙(通常为 $0.02\sim 0.3\text{ mm}$), 若电极有损耗或采用平动或摇动加工, 则角部半径还要增大。

2.1.3 电火花加工的分类

电火花加工按工具电极和工件相对运动的方式和用途的不同, 大致可分为电火花穿孔成型加工、电火花线切割、电火花磨削和镗磨、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。前五类属电火花成型、尺寸加工, 是用于改变零件形状或尺寸的加工方法; 后一类则属表面加工方法, 用于改善或改变零件表面性质。以上六种类型中, 电火花穿孔成型加工和电火花线切割加工应用最为广泛。

表 2-1 所示为电火花加工总的分类情况及各类加工方法的主要特点和用途。

表 2-1 电火花加工工艺方法分类

类别	工艺方法	特 点	用 途	备 注
I	电 火 花 穿 孔 成型加工	1. 工具和工件间主要只有一个相对的伺服进给运动; 2. 工具为成型电极, 与被加工表面有相同的截面或相反的形状	1. 型腔加工: 加工各类型腔模及各种复杂的型腔零件; 2. 穿孔加工: 加工各种冲模、挤压模、粉末冶金模, 各种异形孔及微孔等	约占电火花机床总数的 30% , 典型机床有 D7125、D7140 等电火花穿孔成型机床

续表

类别	工艺方法	特 点	用 途	备 注
II	电火花线切割加工	1. 工具电极为顺电极丝轴线移动着的线状电极； 2. 工具与工件在两个水平方向同时有相对伺服进给运动	1. 切割各种冲模和具有直纹面的零件； 2. 下料、截割和窄缝加工	约占电火花机床总数的 60%，典型机床有 DK7725、DK7732 数控电火花线切割机床
III	电火花磨削和铰磨	1. 工具与工件有相对的旋转运动； 2. 工具与工件间有径向和轴向的进给运动	1. 加工高精度、良好表面精度的小孔，如拉丝模、挤压模、微型轴承内环、钻套等； 2. 加工外圆、小模数滚刀等	约占电火花机床总数的 3%，典型机床有 D6310，电火花小孔内圆磨床等
IV	电火花同步共轭回转加工	1. 成型工具与工件均作旋转运动，但二者角速度相等或成整倍数，相对应接近的放电点可有切向相对运动速度； 2. 工具相对工件可作纵、横向进给运动	以同步回转、展成回转、倍角速度回转等不同方式，加工各种复杂型面的零件，如高精度的异形齿轮，精密螺纹环规，高精度、高对称度、良好表面精度的内、外回转体表面等	约占电火花机床总数的 1%，典型机床有 JN-2，JN-8 内外螺纹加工机床
V	电火花高速小孔加工	1. 采用细管($>\phi 0.3\text{ mm}$)电极，管内冲入高压水基工作液； 2. 细管电极旋转； 3. 穿孔速度极高(60 mm/min)	1. 线切割穿丝孔； 2. 深径比很大的小孔，如喷嘴等	约占电火花机床总数的 2%，典型机床有 D7003A 电火花高速小孔加工机床
VI	电火花表面强化与刻字	1. 工具在工件表面上振动； 2. 工具相对工件移动	1. 模具刃口，刀、量具刃口表面强化和镀覆； 2. 电火花刻字、打印记	约占电火花机床总数的 2%~3%，典型机床有 D9105 电火花强化机等