



国防特色教材·职业教育

# 特种加工技术

TEZHONG JIAGONG JISHU

赵广平 主编

 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社



国防特色教材·职业教育

# 特种加工技术

赵广平 主 编  
刘晓红 副主编  
孙雯萍

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

## 内容简介

本书共分10章。内容包括电火花加工、电火花线切割加工、电化学加工、激光加工、超声波加工、电子束加工和离子束加工等主要的加工方法,以及近些年出现的快速成形加工、超高压水射流切割、纳米级加工等。重点介绍了电火花加工和电火花线切割加工的基本原理、一般加工工艺及基本规律,并列举了较为丰富的例题和加工方法的应用。从工件安装、电极制造、电参数选择、工作液使用到加工工艺的制定等,都作了较为全面的叙述,理论联系实际,突出了工作过程中知识的系统应用。

本书可作为高职高专院校模具、机械、数控技术应用等专业的教材,也可作为电火花线切割机床操作工的职业培训用书,还可作为有关特种加工技术的培训用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

特种加工技术/赵广平主编.—哈尔滨:哈尔滨  
工程大学出版社,2010.1

ISBN 978-7-81133-601-6

I. ①特… II. ①赵… 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(2009)第 223177 号

## 特种加工技术

赵广平 主编

责任编辑 张彦丁伟

\*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街124号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail: [heupress@hrbeu.edu.cn](mailto:heupress@hrbeu.edu.cn)

黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:14.25 字数:300千字

2010年6月第1版 2010年6月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-81133-601-6 定价:38.00元

# 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的部位来去除材料的加工方法。由于特种加工主要不是依靠机械能和切削力进行加工,因而可以用软的工具(甚至不用工具)加工硬的工件,可以用来加工常规切削加工很难甚至无法加工的各种难加工材料、复杂表面、微细结构和某些有精密、特殊要求的零部件。特种加工已成为常规加工的重要补充和发展方向之一。

特种加工是先进制造技术的重要组成部分,不仅直接影响着尖端技术和国防工业的发展,还影响到机械产品的加工精度和加工表面质量,影响产品的国际竞争能力。目前,世界各国都非常重视特种加工技术,将其作为发展先进制造技术中的优先发展内容。

近年来,我国在特种加工技术方面取得了很大的进步,对改造和提升我国的制造业水平及提高产品国际竞争力起到了很大的推动作用。但必须注意的是,目前我国在特种加工技术及设备方面与西方发达国家相比还有很大的差距,严重制约着我国的尖端技术和国防工业发展,影响自主知识产权产品和核心竞争力产品的开发,需要加大这方面的研究开发和推广等工作。

本书内容主要包括电火花加工技术、数控电火花线切割加工技术、电化学技术、快速成形加工技术、激光加工技术、超声波加工技术、电子束加工和离子束加工技术以及超高压水射流切割技术等特种加工方法,讲述其基本加工原理、基本设备、工艺特点和适用范围,并根据工学结合的要求列举了大量生产应用实例和典型的工程培训实例,力求深入浅出,强调实用性和可训练性。在编写方法上,不过多陈述原理,而重在介绍先进的工艺方法,突出实际应用。所以,本书可为模具专业工程技术人员以及大、中专学生提供一个把握特种加工技术的有实用价值的学习平台。

本书由九江职业技术学院赵广平任主编,刘晓红及中船重工第七〇七研究所孙雯萍任副主编。参加编写的人员有:赵广平(第2章)、九江职业技术学院刘晓红(第5章,第6章,第7章)、陈修禹(第3章,第4章)、陈丽君(第8章,第9章,第10章)、中船重工第七〇七研究所孙雯萍(第1章)。

本书由哈尔滨工程大学的郭黎滨教授主审,中国船舶工业第6354研究所邹秀

斌副所长参加了本书的审稿工作。

本书的内容涉及面较广,由于编者水平所限,书中难免有不足和欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2009年12月

# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 特种加工的产生及发展 .....	1
1.2 特种加工的分类和综合比较 .....	4
1.3 特种加工对材料可加工性和结构工艺性等的影响 .....	6
思考题和习题 .....	8
<b>第 2 章 电火花加工</b> .....	9
2.1 电火花加工的基本原理和特点 .....	9
2.2 电火花加工的基本规律 .....	12
2.3 电火花加工机床 .....	21
2.4 电火花穿孔加工 .....	28
2.5 电火花成形加工 .....	37
2.6 电火花加工的应用实例 .....	44
2.7 电火花加工典型训练实例 .....	54
思考题和习题 .....	57
<b>第 3 章 电火花线切割加工</b> .....	58
3.1 电火花线切割加工的基本原理和特点 .....	58
3.2 电火花线切割加工机床 .....	60
3.3 电火花线切割程序编制 .....	66
3.4 电火花线切割加工工艺 .....	81
3.5 电火花线切割的应用实例 .....	92
3.6 电火花线切割典型训练实例 .....	94
思考题和习题 .....	97
<b>第 4 章 电化学加工</b> .....	99
4.1 电化学加工原理 .....	99
4.2 电解加工 .....	101
4.3 电铸、电刷镀及复合镀加工 .....	111

思考题和习题	123
<b>第 5 章 快速成形加工</b>	124
5.1 光敏树脂液相固化成形	124
5.2 选择性激光粉末烧结成形	127
5.3 薄片分层叠加成形	129
5.4 熔丝堆积成形	131
思考题和习题	132
<b>第 6 章 激光加工</b>	133
6.1 激光加工的原理和特点	133
6.2 激光加工设备	138
6.3 激光打孔工艺	144
6.4 激光束切割	148
6.5 激光焊接和表面处理	153
思考题和习题	158
<b>第 7 章 超声波加工</b>	159
7.1 超声波加工的原理和特点	159
7.2 超声波加工设备	161
7.3 超声波加工速度、精度、表面质量及其影响因素	167
7.4 超声波加工工艺及应用	171
7.5 超声波加工典型演示实例	177
思考题和习题	180
<b>第 8 章 电子束加工和离子束加工</b>	181
8.1 电子束加工	181
8.2 离子束加工	186
思考题和习题	192
<b>第 9 章 超高压水射流切割</b>	193
9.1 超高压水射流切割原理和特点	193
9.2 超高压水射流切割设备	195
9.3 超高压水射流切割工艺和应用	200
思考题和习题	203

---

---

<b>第 10 章 其他精密与特种加工技术简介</b> .....	204
10.1 等离子体加工 .....	204
10.2 磨料喷射加工 .....	207
10.3 光刻加工 .....	209
10.4 纳米级加工 .....	212
思考题和习题 .....	218
<b>参考文献</b> .....	219



# 第1章 概述

## 1.1 特种加工的产生及发展

传统的机械加工已有几千年的历史,从石器时代、铜器时代、铁器时代到现代的高分子塑料时代,从手工制作、机器制作到现代的智能控制自动化制作,从一般精度加工、精密加工到现代的超精密加工及纳米加工,它对人类的生产和物质文明起到了极大的推动作用。例如,在18世纪70年代就发明了蒸汽机,但苦于加工不出高精度的蒸汽机汽缸而无法推广应用,直到有人创造和改进了汽缸镗床,解决了蒸汽机主要部件的加工工艺,才使蒸汽机获得广泛应用,爆发世界性的第一次产业革命。这一事例充分说明了加工方法在新产品研制、推广和社会经济等方面起着多么重大的作用。随着新材料、新结构的不断出现,情况将更是如此。

但是从第一次产业革命以来,一直到第二次世界大战,在这段长达150多年都靠机械切削加工(包括磨削加工)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,人们的思想还局限在传统的用机械能量和切削力来除去多余的金属,以达到加工的要求。

直到1943年,前苏联拉扎连柯夫妇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,从而创造性地发明了电火花加工方法,即用铜丝在淬火钢上加工出小孔,用软的工具加工任何硬度的金属材料,首次摆脱了传统的加工切削方法,直接利用电能和热能来去除金属,获得“以柔克刚”的效果。

第二次世界大战后,特别是进入20世纪50年代以来,随着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、化学工业等,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、高温、高压、大功率、小型化等诸多方向发展,以及在高温高压、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、新材料和形状复杂的精密零件大量出现,它们所采用的材料越来越难加工,零件形状越来越复杂,加工精度、表面粗糙度和某些特殊要求也越来越高,对机械制造部门提出了以下新的要求。

### (1) 解决各种难切削材料的加工问题

如硬质合金、钛合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、金刚石、石英以及锆、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的加工。

### (2) 解决各种特殊复杂型面的加工问题

如喷气涡轮机叶片、整体蜗轮、发动机机匣、锻压模、注射模等的立体成形表面,各种冷冲模、冷拔模等特殊断面的型孔,炮管内膛线、喷油嘴、栅网、喷丝头上的小孔、窄缝等的加工。

### (3) 解决各种超精密、光整或具有特殊要求的零件的加工问题

如对表面质量和精度要求很高的航空航天陀螺仪、伺服阀、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零件的精细表面加工,形状和尺寸精度要求在  $0.1 \mu\text{m}$  以上,表面粗糙度  $R_a$  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。

要解决上述一系列工艺问题,仅仅依靠传统的切削加工方法就很难实现,有些甚至根本无法实现。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,不断探索新的加工方法。特种加工就是在这种历史条件下产生和发展起来的。但外因是条件,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。

切削加工的本质和特点有:

- (1) 刀具材料比工件更硬;
- (2) 利用机械能和切削力把工件上多余的材料去除。

一般情况下这是行之有效的方法。但是在工件材料越来越硬、加工表面越来越复杂的情况下,矛盾转化,“物极必反”,原来行之有效的方法转化为限制生产率和影响加工质量的不利因素了。于是人们开始探索用软的工具加工硬的材料,不仅用机械能,而且还采用电、化学、光、声、热、磁、原子能等能量来进行加工。到目前为止,已经找到了多种此类的加工方法。为区别于现有的金属切削加工,这类新加工方法统称为特种加工,国外称为非传统加工(NTM, Non-Traditional Machining)或非常规机械加工(NCM, Non-Conventional Machining)。

特种加工与切削加工的不同点有:

- (1) 特种加工主要依靠电、化学、光、声、热、磁、原子能等能量去除金属材料,而不主要依靠机械能;
- (2) 工具的硬度可以低于被加工工件材料的硬度,有些情况下,例如在激光加工、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,特别适合精密加工低刚度零件。

由于特种加工工艺具有上述特点,就总体而言,特种加工技术可以加工任何硬度、强度、韧性、脆性的金属、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。

特种加工技术不仅可以采取单独的加工方法,还可以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。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。一些高硬度、高脆性的难加工材料,例如淬火钢、硬质合金、陶瓷、石英、金刚石等,一些刚度差、加工中易变形的零件,例如薄壁零件、弹性零件等,在精密加工和超精密加工时,特种加工已经成为必要的手段,甚至是唯一的手段,形成了精密特种加工技术。

我国的特种加工技术起步较早。20世纪50年代中期,我国已研制出电火花穿孔机床、电火花表面强化机。中国科学院电工研究所、原机械工业部机床研究所、原航空工业部625研究所、哈尔滨工业大学、原大连工学院等相继成立电加工研究室,并开展电火花加工和电化学加工的科研工作。20世纪50年代末,营口电火花机床厂开始成批生产电火花强化机和电火花机床,成为我国第一家电加工机床专业生产厂。随后,上海第八机床厂、苏州第三光学仪器厂、苏州长风机械厂和汉川机床厂等也开始专业生产电火花加工机床。

20世纪50年代末,电解加工在兵器工业部系统开始用来加工高射炮管内的膛线等,后来逐步用于航空工业中加工喷气发动机叶片和汽车、拖拉机行业中加工型腔模具等。同一时期,我国曾出现“超声波热”,把超声技术用于强化工艺过程和加工,成立了上海超声仪器厂和无锡超声电子仪器厂等。

20世纪60年代初,中国科学院电工研究所研制成功我国第一台靠模仿形电火花线切割机床,这是我国电火花线切割加工的“春燕”。20世纪60年代末,上海电表厂张维良工程师在阳极-机械切割技术的基础上发明出我国独创的高速走丝线切割机床,上海复旦大学配套研制出电火花线切割数控系统,从此如雨后春笋一般,电火花、线切割加工技术在我国迅速发展起来。

1979年我国成立了全国性的电加工学会,创办了全国发行的《电加工》杂志(2000年更名为《电加工及模具》,2001年电加工学会更名为特种加工学会)。1981年在我国高校间成立了特种加工教学研究会。同年我国在机床与工具协会下还成立了特种加工机床行业协会,挂靠在苏州电加工机床研究所,这对电加工和特种加工的普及和提高起了很大的促进作用。由于我国幅员辽阔,人口众多,在工业化过程中,特种加工技术既有广大的社会需求,又有巨大的发展潜力。1997年我国电火花穿孔、成形机床的年产量大于1000台,电火花数控线切割机床年产量超过3800台,其他电加工机床在200台以上。2002年电火花穿孔、成形机床年产量超过3000台,电火花数控线切割机床年产量超过15000台。2004年的产量更是翻一番还多,电加工机床生产企业已由50家增到150家以上。2005年电火花成形机床年产量约4000台,高速电火花小孔加工机床年产量约2500台,快走丝线切割机床年产量约4万台,慢走丝线切割机床年产量约2400台。电加工、特种加工的机床总拥有量也居世界前列。我国已有多名科技人员荣获电火花线切割、超声波、电化学加工等八项国家级发明奖。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还有一定差距,高档电加工机床每年还要从国外进口300台以上,这些都有待于我们去努力创新。

## 1.2 特种加工的分类和综合比较

特种加工的分类目前还没有明确的规定,一般按能量来源、作用形式和加工原理可分为表 1.1 所示的形式。

表 1.1 常用特种加工方法分类表

特种加工方法		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	电化学能、机械能	阳极溶解、磨削	EGM(ECG)
	电解研磨、珩磨	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
快速成形	液相固化法	光能、化学能	增材法加工	SL
	粉末烧结法			SLS
	纸片叠层法	光能、热能、机械能		LOM
	熔丝堆积法	电能、热能、机械能		FDM
激光加工	激光切割、打孔	光能、热能	溶化、汽化	LBM
	激光打标记	光能、热能	溶化、汽化	LBM
	激光处理、表面改性	光能、热能	溶化、相变	LBT
超声加工	切割、打孔、雕刻	声能、机械能	磨料高频撞击	USM
电子束加工	切割、打孔、焊接	电能、热能	溶化、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
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

在发展过程中也形成了某些介于常规机械加工和特种加工之间的过渡性工艺。例如,在切割过程中引入超声振动或低频振动切削,在切削过程中通以低电压大电流的导电切削、加热

切削以及低温切削等。这些加工方法是在切削加工的基础上发展起来的,目的是改善切削的条件,基本上还属于切削加工,本书对此不予论述。

在特种加工范围内还有一些属于减小表面粗糙度或改善表面性能的工艺,前者如电解抛光、化学抛光、离子束抛光等,后者如电火花表面强化、镀覆、刻字,激光表面处理、改性、电子束曝光、离子镀和离子束注入掺杂等。

随着半导体大规模集成电路生产发展的需要,上述提到的电子束、离子束加工,就是近年来提出的超精微加工,即所谓原子、分子单位的纳米加工方法。

此外,还有一些不属于尺寸加工的特种加工,如液中放电成形加工、电磁成形加工、爆炸成形加工及放电烧结等,本书中也不予阐述。

本书主要讲述电火花、电化学加工、快速成形、激光、超声、电子束、离子束、超高压水流等加工方法的基本原理、基本设备、主要特点及适用范围,表 1.2 为上述特种加工方法的综合比较。

表 1.2 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 /( $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ) (平均/最高)	可达到尺寸精度/mm (平均/最高)	可达到表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ (平均/最高)	主要适用范围
电火花加工	任何导电的金属材料,如硬质合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、钛合金等	0.1/10	30/3 000	0.03/0.003	10/0.01	从数微米的孔、槽到数米的超大型模具、工件等,例如:圆孔、方孔、异型孔、深孔、微孔、弯孔、螺纹孔以及冲模、锻模、压铸模、塑料模、拉丝模。还可刻字、表面强化、涂覆加工
电火花线切割加工		较小 (可补偿)	20/200 <sup>①</sup> ( $\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ )	0.02/0.002	5/0.32	切割各种冲模、塑料模、粉末冶金模等二维及三维直线组成的模具及零件。可直接切割各种样板、磁钢、硅钢片冲片。也常用于钼、钨、半导体材料或贵金属的切割
电解加工		不损耗	100/10 000	0.1/0.01	1.25/0.16	从细小零件到 1 t 的超大型工件及模具,例如:仪表微型小轴,齿轮上的毛刺、蜗轮叶片、炮管膛线、螺旋花键孔、各种异型孔、锻造模、铸造模,以及抛光、去毛刺等
超声加工	任何脆性材料	0.1/10	1/50	0.03/0.005	0.63/0.16	加工、切削脆硬材料,例如,玻璃、石英、宝石、金刚石及半导体单晶锗、硅等,可加工型孔、型腔、小孔、深孔等

表 1.2(续)

加工方法	可加工材料	工具损耗率/% (最低/平均)	材料去除率/ $(\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1})$ (平均/最高)	可达到尺寸精度/mm (平均/最高)	可达到表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ (平均/最高)	主要适用范围
激光加工	任何材料	不损耗 (三种加工, 没有成形的工具)	瞬时去除率 <sup>②</sup> 很高, 受功率限制, 平均去除率不高	0.01/0.001	10/0.4	精密加工小孔、窄缝及成形切割、刻蚀, 例如: 金刚石拉丝模、钟表宝石轴承、化纤喷丝孔、镍、不锈钢板上打小孔, 切割钢板、石棉、纺织品、纸张, 还可焊接、热处理
电子束加工					1.25/0.2	在各种难加工材料上打微孔、切缝、蚀刻、曝光以及焊接等, 现常用于制造中、大规模集成电路微电子器件
离子束加工			很低 <sup>②</sup>	0.1/0.01 $\mu\text{m}$	0.1/0.01	对零件表面进行超精密、超微量加工、抛光、蚀刻、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、成形切割、剪裁
快速成形	增材加工, 无可比性			0.3/0.1	10/2.5	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以  $\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$  为单位;

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 特种加工对材料可加工性和结构工艺性等的影响

特种加工技术的特点以及其逐渐被广泛应用, 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、工艺线路的安排、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。主要有以下几方面。

### 1. 特种加工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。现在已经广泛采用的金刚石、聚晶(人造)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、脆性等有着直接的关系。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. 特种加工改变了零件加工的典型工艺路线

在传统的加工领域,除磨削加工以外,其他的切削加工、成形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。特种加工的出现,改变了这种一成不变的程序格式。由于基本上不受工件材料硬度的影响,而且为了免除加工后再引起淬火热处理变形,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、电火花成形加工、电解加工等必须先进行淬火处理,后加工。

特种加工的出现还对以往工序的“分散”和“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,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,也往往使用一个复杂工具,经历简单的运动轨迹,经过一次安装,一道工序加工出来,这样做工序比较集中。

## 3. 特种加工改变了试制新产品的模式

以往试制新产品时,必须先设计、制造相应的刀具、夹具、量具、模具及二次工装,现在采用数控电火花线切割,可以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),各种电动机定子、转子硅钢片,各种变压器铁芯,各种特殊、复杂的二次曲面零件。这样可以省去设计和制造相应的刀具、夹具、量具、模具及二次工装,大大缩短了试制周期。近年来实用化的快速成形技术,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. 特种加工对产品零件的结构设计带来很大影响

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,所以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,可加工出小圆角的齿根。

各种复杂冲模,例如山形硅钢片冲模,以往由于难以制造,经常采用镶拼式结构。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。喷气发动机蜗轮由于电加工技术的出现也可以采用整体式结构,大大提高了发动机的性能。

特种加工使产品零件可以更多地采用整体性结构。现代产品结构中可以大量采用小孔、小深孔、深槽和窄缝。

## 5. 特种加工对传统结构工艺性的好与坏的衡量标准产生重要影响

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”,特种加工改变了这种现象。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、喷丝头小异型孔、蜗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,采用电加工

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后,使工艺路线安排得更为灵活,这在不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,不了解特种加工的产生和发展使这种工艺安排已经成为了可能。过去很多不可修的废品,现在都可用特种加工方法修复。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。

#### 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。

## 思考题和习题

1-1 试举出几种因采用特种加工工艺之后,对材料的可加工性和结构工艺性产生重大影响的实例。

1-2 常规加工工艺和特种加工工艺之间有何关系?应该如何正确处理常规加工和特种加工之间的关系?

1-3 特种加工技术在机械制造领域的作用和地位如何?

1-4 特种加工技术的逐渐广泛应用引起机械制造领域的哪些变革?



## 第 2 章 电火花加工

电火花加工又称放电加工(EDM, Electrical Discharge Machining),它是在一定的液体介质中,利用脉冲放电对导电材料的电蚀现象来蚀除材料,从而使零件的尺寸、形状和表面质量达到预定技术要求的一种加工方法。在特种加工中,电火花加工的应用最为广泛,尤其在模具制造业、航空航天等军工领域有着极为重要的地位。

### 2.1 电火花加工的基本原理和特点

#### 2.1.1 电火花加工的原理

图 2.1 是电火花加工原理图。由脉冲电源 2 输出的电压加在具有一定绝缘度的液体介质(常用煤油或矿物油或去离子水)中的工件 1 和工具电极(亦称电极)4 上,自动进给调节装置 3(图中仅为该装置的执行部分)使电极和工件间保持很小的放电间隙。当脉冲电压加到两极之间,便将当时条件下极间最近点的液体介质击穿,形成放电通道。由于通道的截面积很小,放电时间极短,致使能量高度集中( $10^6 \sim 10^7 \text{ W/mm}^2$ ),放电区域的瞬时高温足以使材料熔化甚至汽化,以致形成一个小凹坑,如图 2.2 所示。第一次脉冲放电结束之后,经过很短的间隔时间,第二次脉冲又在另一极间最近点击穿放电。如此周而复始高频率地循环下去,工具电极不断地向工件进给,它的形状最终就复制在工件上,形成了需要的加工表面。整个加工表面将由无数个小凹坑所组成,如图 2.3 所示。与此同时,总能量的一小部分也释放到工具电极上,从而造成工具损耗。

从上面的叙述中可以看出,进行电火花加工必须具备以下四个条件:

(1)必须使接在不同极性上的工具和工件之间保持一定的距离以形成放电间隙。这个间隙的大小与加工电压、加工介质等因素有关,一般为  $0.01 \sim 0.1 \text{ mm}$  左右。在加工过程中还必须用工具电极的进给调节装置来保持这个放电间隙,使脉冲放电能连续进行。

(2)火花放电必须在具有一定绝缘强度( $10^3 \sim 10^7 \Omega \cdot \text{m}$ )的液体介质中进行。液体介质还

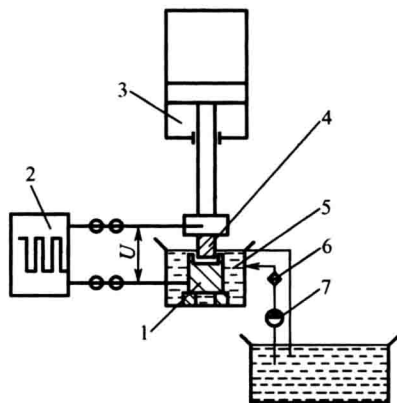


图 2.1 电火花加工原理图

1—工件;2—脉冲电源;3—自动进给装置;  
4—工具电极;5—工作液;6—过滤器;7—泵