



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

特种加工技术

TEZHONG JIAGONG JISHU

③ 李玉青 主编



配教学资源



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

特种加工技术

主 编 李玉青

副主编 王姗姗

参 编 王敬艳 李桂娇 兰天鹏 于 洋
赵洪波 李桂玲

主 审 张树东



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书是“十二五”职业教育国家规划教材,是根据《教育部关于“十二五”职业教育教材建设的若干意见》及教育部新颁布的《高等职业学校专业教学标准(试行)》,同时参考电切削操作工职业资格标准编写的。本书作为机械类特种加工教材全面介绍了特种加工概述、电火花加工技术、电火花线切割加工技术、电化学加工技术、快速成形技术、激光加工技术和等离子体加工技术,全书注重实用性,强调动手操作。为便于教学,本书配套有电子教案、助教课件、教学视频等教学资源,选择本书作为教材的教师可来电(010-88379193)索取,或登录 www.cmpedu.com 网站,注册、免费下载。

本书可作为高等职业院校数控技术、模具设计与制造专业及相关专业教材,也可作为特种加工岗位培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

特种加工技术/李玉青主编. —北京:机械工业出版社,2014.3

“十二五”职业教育国家规划教材

ISBN 978-7-111-47094-6

I. ①特… II. ①李… III. ①特种加工—高等职业教育—教材
IV. ①TG66

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第132271号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:汪光灿 责任编辑:王莉娜

责任校对:刘怡丹 封面设计:张静

责任印制:刘岚

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2014年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11.25印张·268千字

0001—2000册

标准书号:ISBN 978-7-111-47094-6

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前言

本书是按照教育部《关于开展“十二五”职业教育国家规划教材选题立项工作的通知》，经过出版社初评、申报，由教育部专家组评审确定的“十二五”职业教育国家规划教材，是根据《教育部关于“十二五”职业教育教材建设的若干意见》及教育部新颁布的《高等职业学校专业教学标准（试行）》，同时参考电切削操作工职业资格标准编写的。

本书主要介绍电火花加工技术、电火花线切割加工技术、电化学加工技术、快速成形技术、激光加工技术和等离子体加工技术。本书编写过程中力求体现实用技术与必要的理论知识相统一、应用思路与技巧相统一。本教材编写模式新颖，文字简练，图文并茂，确保良好的教学效果。全书注重实用性，强调动手操作。作为特种加工技术，其加工过程与传统的机械加工完全不同。它是直接利用电能、热能、化学能及光能等作为加工能源，在不产生切削力的情况下，以低于工件硬度的工具去除工件上多余材料，达到“以柔克刚”的目的，便于实现加工过程的自动化。随着特种加工技术的迅速发展，解决了大量传统切削加工难以实现或无法实现的加工问题，在机械、电子、航空航天及国防工业中得到了广泛应用。目前特种加工已成为机械制造业中不可缺少的重要部分。

本书在内容处理上主要有以下几点说明：①本书中介绍的加工方法很多，在讲授时，应着重讲解每种加工方法的相异之处，通过比较可加深同学们对各种加工方法的理解；②本书的特点是多学科交叉、知识面宽（电火花、电化学、化学、光等方面）、知识跨度大；③特种加工方法很多，内容非常丰富，而教学课时有限。在教学过程中，应根据目前制造领域对特种加工技术的应用情况整合教学内容，重点介绍电火花加工技术、电火花线切割加工技术和快速成形技术，而其他加工技术如激光加工技术、电化学加工技术、等离子体加工技术等则可作简单介绍；④学时安排见下表。

教学内容	建议学时（32学时）	
	理论学时	实践学时
特种加工概述	2	
电火花加工技术	4	2
电火花线切割加工技术	8	2
电化学加工技术	4	
快速成形技术	4	2
激光加工技术	2	
等离子体加工技术	2	

全书共7章,由长春职业技术学院李玉青主编,其他参与编写人员及具体分工如下:长春职业技术学院王敬艳编写第1章,李玉青编写第2、3、4章,王珊珊编写第5、6章,于洋、赵洪波编写第7章,李桂娇、兰天鹏和衡水学院工程技术学院李桂玲也参与了部分内容的编写。机械工业第九设计研究院张树东担任本书的主审。本书经全国职业教育教材审定委员会审定,教育部专家在评审过程中对本书提出了很多宝贵的建议,在此对他们表示衷心的感谢!

编写过程中,编者参阅了国内外出版的有关教材和资料,得到了吉林大学张长春教授的有益指导,在此一并表示衷心感谢!

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 特种加工概述	1
1.1 特种加工及其发展趋势	1
1.2 特种加工的特点及分类	2
1.3 特种加工对材料可加工性和结构工艺性的影响	6
复习题	6
第2章 电火花加工技术	7
2.1 电火花加工的原理基础	7
2.1.1 电火花加工的产生	7
2.1.2 电火花加工的原理及特点	7
2.1.3 电火花加工的常用术语	9
2.2 电火花加工设备	11
2.2.1 机床型号、规格和分类	11
2.2.2 电火花加工机床的结构	11
2.3 电火花加工工艺规律	23
2.3.1 影响材料电蚀量的因素	23
2.3.2 影响加工速度的主要因素	26
2.3.3 影响电极损耗的主要因素	29
2.3.4 影响加工精度的主要因素	32
2.3.5 影响表面质量的因素	33
2.3.6 加工稳定性和电参数的选择	34
2.4 电火花加工工艺	36
2.4.1 电火花加工的准备工作的	37
2.4.2 电火花加工方法	45
2.5 电火花加工操作实例	48
2.6 特殊材料的电火花加工	53
2.7 电火花加工中应注意的一些问题	56
复习题	57
第3章 电火花线切割加工技术	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	61
3.1.3 电火花线切割加工的应用	62

3.1.4	电火花线切割加工常用术语	62
3.2	电火花线切割加工机床	63
3.2.1	常用电火花线切割机床的种类及性能	63
3.2.2	电火花线切割机床的基本结构	65
3.3	电火花线切割机床的基本操作	69
3.3.1	操作前的准备	69
3.3.2	机床的操作程序	69
3.3.3	电火花线切割机床常见的故障与排除方法	70
3.3.4	机床的润滑系统	71
3.3.5	电火花线切割机床的使用	71
3.4	电火花线切割编程	74
3.4.1	3B 代码编程	74
3.4.2	ISO 代码编程	82
3.5	电火花线切割加工工艺指标及影响因素	88
3.5.1	电火花线切割的主要工艺指标	88
3.5.2	影响电火花线切割主要工艺指标的因素	89
3.5.3	工艺参数的合理选择	95
3.6	电火花线切割加工工艺	97
3.7	电火花线切割加工的工艺方法	102
3.8	电火花线切割加工的常见工艺问题和解决方法	102
3.9	电火花线切割加工操作与实例	104
3.9.1	加工前的准备工作	104
3.9.2	加工过程中几种特殊情况的处理	106
3.9.3	电火花线切割加工实例	107
	复习题	110
第4章	电化学加工技术	112
4.1	电化学加工的原理、特点及分类	112
4.1.1	电化学加工的基本原理	112
4.1.2	电化学加工的特点	115
4.1.3	电化学加工的分类	116
4.1.4	电化学加工的适用范围	116
4.2	电化学加工设备	116
4.3	电化学加工的基本规律	118
4.3.1	电化学加工的生产率及影响因素	118
4.3.2	电化学加工的表面质量和加工精度	119
4.4	电 解 加 工	120
4.4.1	电解加工的基本原理和基本规律	120
4.4.2	电解加工时的电极反应	121
4.4.3	电解液	122
4.4.4	电解加工质量的提高	123
4.4.5	电解加工工艺及应用	124
4.5	电 解 磨 削	128
4.5.1	电解磨削的原理及特点	128



4.5.2	影响电解磨削生产率和加工质量的因素	129
4.5.3	电解磨削的应用	130
4.6	电 解 抛 光	130
4.6.1	电解抛光的原理及特点	130
4.6.2	电解抛光的影响因素	131
4.6.3	电解抛光的应用	132
4.7	电铸、涂镀和复合镀加工	132
4.7.1	电铸加工	133
4.7.2	涂镀加工	135
4.7.3	复合镀加工	138
4.8	电化学加工典型训练实例	138
	复习题	139

第5章	快速成形技术	140
5.1	快速成形的原理及特点	140
5.1.1	快速成形技术产生的背景	140
5.1.2	快速成形技术原理	141
5.1.3	快速成形技术的特点与不足	141
5.1.4	快速成形技术的应用	142
5.2	快速成形工艺过程及分类	143
5.2.1	快速成形工艺过程	143
5.2.2	快速成形技术的分类	144
5.3	光固化成形工艺	145
5.3.1	光固化成形工艺的基本原理及应用	145
5.3.2	光固化成形工艺的特点及不足	145
5.4	叠加实体制造工艺	146
5.4.1	叠加实体制造工艺的原理及特点	146
5.4.2	叠加实体快速成形技术的特点	147
5.4.3	误差分析及改进措施	147
5.5	选择性激光烧结工艺	148
5.5.1	选择性激光烧结工艺的原理	148
5.5.2	选择性激光烧结工艺的特点	149
5.5.3	选择性激光烧结工艺的应用	150
5.6	熔融沉积成形工艺	150
5.6.1	熔融沉积成形工艺的原理与特点	151
5.6.2	熔融沉积成形工艺的应用	152
	复习题	152

第6章	激光加工技术	154
6.1	激光加工的原理及特性	154
6.1.1	激光的产生	154
6.1.2	激光加工的原理	155
6.1.3	激光加工的特性	155
6.2	激 光 打 孔	155

6.2.1	激光打孔工艺	156
6.2.2	激光打孔的特点	157
6.3	激光切割	157
6.3.1	激光切割的分类	157
6.3.2	激光切割工艺及应用	158
6.4	激光焊接	158
6.4.1	激光焊接的特点	159
6.4.2	激光焊接的应用	159
6.5	激光表面处理	160
6.5.1	激光表面处理工艺	160
6.5.2	激光表面处理的特点	161
6.5.3	激光表面处理的应用领域	161
	复习题	162

第7章	等离子体加工技术	163
7.1	等离子弧及其发生器	163
7.1.1	等离子弧的产生	163
7.1.2	等离子弧发生器	163
7.2	等离子弧加工的特点和种类	164
7.2.1	等离子弧的主要特点	164
7.2.2	等离子弧的种类	165
7.2.3	等离子弧的应用	165
7.3	等离子弧切割	165
7.3.1	起弧方式	166
7.3.2	切割的种类	166
7.3.3	切割工艺及特点	167
7.4	等离子弧焊接与喷涂	169
7.4.1	等离子弧焊接	169
7.4.2	等离子弧喷涂	169
	复习题	170

附录	部分复习题参考答案	171
----	-----------	-----

参考文献		172
------	--	-----

第 1 章 特种加工概述

学习目标

- ❖ 了解特种加工及其发展趋势。
- ❖ 掌握特种加工的特点及分类。
- ❖ 理解特种加工对材料可加工性和结构工艺性的影响。

1.1 特种加工及其发展趋势

1. 特种加工的由来

众所周知,蒸汽机(图 1-1)的发明效果是不可估量的。它使人类获得了一种把热能转化为机械能的机械装置,从而满足了对动力能源的需要。从那以后,工厂开始了大规模的生产,工厂工人取代了手艺人。所以说,蒸汽机带来了科学技术史上具有伟大意义的第一次技术革命。然而,蒸汽机并不是发明出来就很快被应用到工业实际中来的,原因是气缸的制造精度不够。直到气缸镗床的研制和改进,蒸汽机的应用才得到推广。由此可见,加工方法和手段对新产品研制和社会经济发展所起的推动作用是十分巨大的。

从蒸汽机的使用到第二次世界大战,传统的切削加工方法几乎占据了整个机械加工业。切削加工就是用切削工具(包括刀具、磨具和磨料)把坯料或工件上多余的材料层切去,使工件获得规定的几何形状、尺寸和表面质量的加工方法,如车削、铣削和磨削等。任何一种切削加工都必须具备三个基本条件:切削工具、工件和切削运动。切削工具应有刃口,其材质必须比工件坚硬。

随着科学技术的进步和生产力的发展,工业、国防及航天航空业的技术产品均向高精度、高速度、高可靠性、耐腐蚀、高温高压等方向发展。为了适应产品更新换代,自 20 世纪 30 年代以后,尤其是 20 世纪 50 年代以来,新材料的研制与开发(如硬质合金、耐热钢、金刚石、半导体等各种难加工材料)对加工制造技术提出了更高的要求。人们一方面通过研究高效的加工刀具和刀具材料、自动优化切削参数、提高刀具的可靠性、开发新型切削液和在线监控系统、研制新型自动机床等途径进一步改善切削状态,

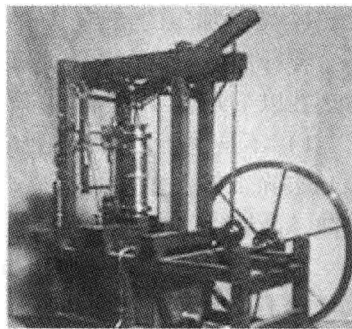


图 1-1 第一台蒸汽机

提高切削加工水平,解决了一些问题;另一方面则突破传统加工方法的束缚,不断探索,力图寻求新的加工方法。于是,一种本质上区别于传统加工方法的特种加工方法应运而生,并不断获得发展。其中,前苏联科学家拉扎连科夫妇在研究开关触点受电火花放电腐蚀损坏的现象时,发现电火花放电所产生的瞬间高温对金属材料有熔化和气蚀作用,于是产生了一种新的金属加工方法——电火花加工。该方法开创了从加工机理和加工形式上脱离传统切削加工方法的先河,形成了现在统称的“特种加工(Non-Traditional Machining, NTM)”技术,即利用电能、热能、光能和化学能等,在不产生切削力的情况下,以低于工件硬度的工具去除工件上多余的材料,达到“以柔克刚”的目的。

我国特种加工技术起步较早,20世纪50年代已设计研制出电火花穿孔机床,20世纪60年代末上海电表厂的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快走丝线切割机床,上海复旦大学也研制出了电火花线切割数控系统。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仍有不少差距,每年仍需从国外进口相当数量的特种加工设备。

2. 特种加工的发展趋势

1) 加大对特种加工的基本原理、加工机理、工艺规律、加工稳定性的研究力度,同时融合电子技术、计算机技术、信息技术和精密制造技术,使加工设备向自动化和柔性化方向发展。

2) 大力开发特种加工领域中的新方法,包括难加工材料、细微加工、特殊型面加工等方面,尤其是质量高、效率高、经济型的复合加工,并与适宜的制造模式相匹配,充分发挥特种加工的优势。

3) 某些特种加工方法的应用会造成环境污染,甚至影响操作人员的身心健康,必须加以重视,充分做好防污、治污工作,向绿色加工方向发展。

特种加工方法的广泛应用,使得机械制造技术不断面临新的挑战,也使得特种加工技术获得了新的机遇。随着各种新型材料的不断问世和新工艺的不断提出,特种加工技术正在以崭新的面貌出现在加工制造领域。

1.2 特种加工的特点及分类

1. 特种加工的特点

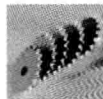
特种加工无论在加工原理还是在加工形式上都与传统的切削加工有着本质的区别,主要体现在以下几点。

1) 不是主要依靠机械能,而是采用其他能量(电能、热能、光能、化学能和电化学能等)去除工件上多余的材料;与加工对象的力学性能无关,故可加工各种硬、软、脆、耐腐蚀、高熔点、高强度等金属或非金属材料。

2) 非接触加工,即加工时工具与工件不发生直接接触,工具与工件间不存在作用力,故可加工高耐磨、刚性低的工件和弹性工件。

3) 由于加工时工具与工件不发生直接接触,故热应力、残余应力、冷作硬化等均比较小,可获得较低的表面粗糙度值,尺寸稳定性好。

4) 两种或两种以上的不同类型能量可以相互组合,形成新的复合加工,更突出其优越



性,综合加工效果明显,且便于推广使用。

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、细微表面或型腔零件。

2. 特种加工存在的问题

虽然特种加工已解决了传统切削加工难以解决的许多问题,在提高产品质量、生产率和经济效益上显示出了很大的优越性,但目前仍存在一些问题与不足。

1) 有些特种加工原理(如超声波加工和激光加工等)还不十分清楚,其工艺参数的选择和加工过程的稳定性均需进一步提高。

2) 有些特种加工(如电化学加工)在加工过程中会产生有毒的废渣和废气,若排放和处理不当会造成环境污染,影响人体健康。

3) 有些特种加工(如快速成形和等离子弧加工等)的加工精度和生产率还有待提高。

4) 有些特种加工(如电火花成形加工和电火花线切割加工等)只能加工导电材料,加工领域有待拓宽。

3. 特种加工的分类

特种加工的分类国际上还没有明确规定,目前大多数是按能量形式、作用形式和加工原理进行分类,见表 1-1。

表 1-1 特种加工的分类

加工方法		主要能量形式	作用形式	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	阳极溶解	ECM
	电铸加工	电化学能	阴极溶解	EFM
	涂镀加工	电化学能	阴极溶解	EPM
	电解磨削	电化学能、机械能	阳极溶解、机械磨削	ECG
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	超声波加工	声能、机械能	切蚀	USM
	磨料流加工	流体能、机械能	切蚀	AFM
	液体喷射加工	流体能、机械能	切蚀	LJC
快速成形加工	光固化法	光能、化学能	增加材料	SL
	粉末烧结法	光能、热能		SLS
	叠层实体法	光能、机械能		LOM
	熔丝堆积法	电能、热能、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
	电解电火花磨削	电能、热能	阳极溶解、熔化、切削	MEEC
	电化学腐蚀加工	电化学能、热能	熔化、汽化腐蚀	ECP
	超声放电加工	声能、热能、电能	熔化、切蚀	USEC
	复合电解加工	电化学能、机械能	切蚀	CECM
	复合切削加工	机械能、声能、磁能	切削	CSMM

(续)

加工方法		主要能量形式	作用形式	英文缩写
其他加工方法	化学加工	化学能	腐蚀	CM
	化学抛光	光能、化学能	光化学、腐蚀	OCM/OCC
	化学镀膜	化学能	腐蚀	CE

1) 电火花加工: 通过工具电极和工件电极之间脉冲放电时的电腐蚀作用, 对工件进行加工的一种工艺方法。电火花成形加工是模具制造中的一种重要加工手段, 如各种孔、槽等的加工; 电火花线切割加工适用于各种可切割样板、冲模及钼、钨或贵重金属等的加工。

2) 电化学加工: 通过电化学反应去除工件材料或在其表面镀覆金属材料等的特种加工方法。其中电解加工适用于加工深孔、型腔和抛光等; 电铸加工适用于形状复杂、精度高的空心零件, 如波导管、注塑模具和薄壁零件等; 涂镀加工适用于表面磨损、划伤和锈蚀等零件的加工, 以恢复其尺寸, 改善其表面性能。

3) 高能束加工: 利用能量密度很高的激光束、电子束或离子束等去除工件材料的特种加工方法。其中激光束加工主要应用于打孔、切割、焊接和金属表面的激光强化; 电子束加工有热型和非热型两种, 热型加工是利用电子束将材料的局部加热至熔化点或汽化点, 适用于打孔、切割槽缝及其他结构的细微加工, 非热型加工是利用电子束的化学效应进行刻蚀及大面积薄层的微细加工等; 离子束加工主要用于微细加工、溅射加工和注入加工等。

4) 物料切蚀加工: 利用超声波、高速射流和磨料流等将材料切割成所需形状的特种加工方法。超声波加工是利用超声振动的工具在有磨料的液体介质中或干磨料中产生冲击、抛光及由此产生的气蚀作用去除材料, 适用于成形加工、切割加工和超声清洗加工等; 液体喷射加工是利用水或在水中加添加剂的液体, 经水泵及增压器产生高速液体流, 喷射到工件表面, 从而达到去除材料的目的, 可加工薄而软的金属及非金属材料, 去除腔体零件内部毛刺, 使金属表面产生塑性变形等; 磨料流加工适用于去毛刺、表面清理、切割加工、雕刻、落料和打孔等。

5) 快速成形加工: 快速成形加工 (Rapid Prototyping Machining, RPM) 技术, 是 20 世纪 80 年代末发展起来的新兴制造技术, 是由三维 CAD 模型直接驱动的快速制造任意复杂形状三维实体的总称。它集成了 CAD 技术、数控技术、激光技术和材料技术等现代科技成果, 是先进制造技术的重要组成部分。由于它可把复杂的三维制造转化为一系列二维制造的叠加, 因而在不用模具和工具条件下生成任意复杂的零部件, 极大地提高了生产率和制造柔性。

6) 复合加工: 同时在加工部位上采用两种或两种以上不同类型能量组合去除工件材料的特种加工方法。例如, 电解电火花加工 (ECDM) 和电化学电弧加工 (ECAM) 就是两种特种加工复合而成的新的加工方法。

7) 其他加工方法: 包括化学加工、化学抛光和化学镀膜等。其中化学加工是利用化学溶液与金属产生化学反应, 使金属腐蚀溶解, 改变工件形状和尺寸的加工方法, 适用于较大面积金属表面的厚度减薄加工, 减薄厚度不宜过大, 否则会影响加工效率。如航天工业中大型薄壁构件的内表面刻蚀; 有选择地加工较浅或较深的腔体及凹槽, 可加工各种徽章、招牌和商标等, 但对工件窄缝、型孔等的加工精度及效率都较差; 还可以进行化学下料, 特别是加工栅板、圆盘、分频器、分度盘等。

常见特种加工方法的性能、用途和工艺参数见表 1-2。

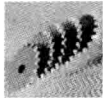


表 1-2 常见特种加工方法的性能、用途和工艺参数

加工方法	可加工材料	电极损耗 (%) (最低/平均)	材料去除率/ (mm^3/min) (平均/最高)	尺寸精度/mm (平均/最高)	表面粗糙度值 $Ra/\mu\text{m}$ (平均/最高)	主要适用范围
电火花成形加工	任何导电金属材料,如硬质合金、耐热钢、不锈钢和钛合金等	0.1/10	30/3000	0.03/0.003	10/0.04	从微米尺寸的孔、槽到数米的超大型模具和工件等,如圆孔、方孔、螺旋孔及冲模、锻模、压铸模、拉丝模和塑料模等,还可以刻字、表面强化
电火花线切割加工		较小可补偿	20/200 ^①	0.02/0.002	5/0.32	切割各种冲模和塑料模等,可切割各种样板、磁钢和硅钢片冲片,也可用于钨、钼、半导体或贵重金属的切割
电解加工		不损耗	100/10000	0.1/0.01	1.25/0.16	从细小零件到超大零件及模具,如仪表微型小轴、齿轮上的毛刺、涡轮叶片、炮管膛线、各种异形孔、锻造模、铸造模,以及抛光、去毛刺等
电解磨削		1/50	1/100	0.02/0.001	1.25/0.04	硬质合金等难加工材料的磨削,如硬质合金刀具、量具、轧辊、深孔、细长杆磨削,以及超精光整研磨和珩磨
超声波加工	任何脆性材料	0.1/10	1/50	0.03/0.005		加工、切割脆硬材料,如玻璃、石英、宝石、金刚石、半导体单晶锗、硅等,可加工型孔、型腔、深孔和槽缝等
激光束加工	任何材料	不损耗	瞬时去除率高,但受功率限制,平均去除率不高	0.01/0.001	10/1.25	精密加工小孔、窄缝及成形切割、刻蚀,如金刚石拉丝模、钟表宝石轴承、喷丝板的小孔、切割钢板、石棉、纺织品、焊接和热处理
电子束加工		无工具				难加工材料上的微孔、窄缝、刻蚀、焊接,应用中、大规模集成电路和微电子器件中
离子束加工			很低	0.01	0.01	对零件表面进行超精密、超微量加工,抛光、刻蚀、镀膜等

① 电火花线切割加工的金属去除率用 mm^2/min 为单位。

1.3 特种加工对材料可加工性和结构工艺性的影响

特种加工技术在机械制造业中的广泛应用对传统的机械制造工艺方法产生了很多重要影响,尤其是使零件的结构设计和制造工艺路线的安排产生了重大变革。

1. 提高了材料的可加工性

在特种加工技术出现之前,诸如金刚石、宝石、玻璃和陶瓷等非金属材料,以及硬质合金、淬火钢和耐热钢等合金材料,如果采用传统的切削加工方法则很难加工甚至是无法加工,但现在可以采用电火花、电解、激光等合适的特种加工方法对其进行加工,既可以满足生产率要求又可以提高加工质量。如利用特种加工技术制造金刚石刀具、硬质合金刀具及模具等,极大地拓宽了材料的应用领域。材料的可加工性不再与材料硬度、韧性、脆性和强度等成比例关系。例如,对电火花加工而言,淬火钢比未淬火钢更容易加工,更容易得到高的加工质量。

2. 对零件结构工艺的影响

由于传统切削加工方法和加工工艺的限制,零件的某些结构不得不接受一些缺陷。例如,复杂模具由于传统切削加工方法和加工工艺的限制不得不采用镶拼结构,这样就会造成应力较大且较集中,而采用电火花和线切割等加工方法则可以做成整体式,既可以避免应力集中造成的危害,又可以增大模具的整体强度。如喷气发动机涡轮可以用电火花加工得到扭曲叶片带冠整体结构;花键轴的齿根部分可以利用电解加工得到一定圆角,以减少应力集中的程度。

3. 改变了零件的典型加工工艺路线

从传统的切削加工角度来讲,除磨削之外,所有的机加工都必须在零件淬火之前进行,这是机加工工艺的基本准则,因为淬火后材料硬度大,机加工困难,加工质量差。若采用特种加工,如电火花成形加工、电火花线切割加工和电解加工等,则可以在淬火后加工,而且加工质量好。例如,在淬火前加工对刀块上的小孔,淬火时容易产生裂纹和变形,而淬火后利用电火花打孔则能保证小孔的精度。

4. 对加工工艺评价标准的影响

对于低刚度零件、微小孔、异形孔和复杂空间曲面,传统的切削加工方法由于切削力大、工具尺寸受限及刀具轨迹等原因会使加工困难甚至无法加工,而现在可以采用电火花加工、电解加工等合适的特种加工方法进行加工。这是因为:特种加工技术中工具与工件不发生直接接触,故没有宏观的切削力和工件的变形,非常适合低刚度零件的加工;工件的形状完全由工具的形状决定,最适合异形孔和复杂空间曲面的加工;激光加工、电子束加工、离子束加工等方法可以加工微小孔,甚至加工纳米级材料。

复 习 题

1. 何谓特种加工? 特种加工主要有哪些加工方法?
2. 为什么特种加工能用来加工难加工的材料和形状复杂的工件?
3. 特种加工对材料的可加工性和结构工艺性有哪些影响?

第 2 章 电火花加工技术



学习目标

- ◆理解电火花加工的原理基础。
- ◆了解电火花加工的设备。
- ◆掌握电火花加工的工艺。
- ◆掌握电火花加工的方法。

2.1 电火花加工的原理基础

2.1.1 电火花加工的产生

在日常生活中,我们经常使用各种电器开关,尤其是当开关破损时,常常会伴随噼噼啪啪声,还时常见到蓝色的火花,开关处会出现小黑点,产生接触不良。1870年,英国科学家普里斯特利(Priestley)最早发现电火花对金属的腐蚀作用,1943年,前苏联科学家拉扎连科夫妇率先对这种电腐蚀现象做进一步研究,从而发现了一种新的金属加工方法——电火花加工。

电火花加工又称电蚀加工或放电加工(EDM),其加工过程与传统的机械加工完全不同。它是利用工件电极与工具电极之间的间隙脉冲放电所产生的局部瞬时高温将工件表面材料熔化甚至汽化,逐步蚀除工件上的多余材料,以达到加工的目的。目前世界各国统称电火花加工为放电加工,简称电加工。

电火花加工是在一定的加工介质(工作液)中,通过工具电极和工件电极之间脉冲放电时的电腐蚀作用,对工件进行加工的一种工艺方法。电火花加工是模具制造中的一种重要加工手段。它利用电极和工件在工作介质(煤油)中进行小间隙的脉冲放电,使工件产生电腐蚀。由于电极和工件微观表面凹凸不平,工作介质中也混有杂质,在工件和电极间施加电压后所产生的电场强度分布很不均匀,距离最近且绝缘最差的部分最先被击穿而放电。经过连续多次的脉冲放电,最后把工件加工成与电极表面凹凸情况刚好相反的形状。

2.1.2 电火花加工的原理及特点

1. 电火花加工的原理

图 2-1 所示为电火花加工的原理,进给装置 2 保证工件 1 与工具电极 3 之间具有一定的

间隙,脉冲电源输出的脉冲电压加在工件与电极上,会使工件附近的工作介质4逐步被电离。当工作介质被击穿时,形成放电通道,产生火花放电。由于放电时间极短且发生在工件与电极间距离最近的一点上,所以能量集中,引起金属材料的熔化或汽化,而且具有突然膨胀、爆炸的特性。爆炸力将熔化和汽化了的金属抛入工作介质中冷却,凝固成细小的圆球状颗粒。在泵5的作用下,循环流动的工作介质将电蚀产物从放电间隙中排出,并对电极表面进行较好的冷却。

一个物体无论采用何种加工方法,无论从宏观看上去是多么平整,但在微观表面上总是凹凸不平的。当工具电极与工件被接通电源后,两极间就建立起一个电场,电场强度取决于两极间电压和两极间距离。两极间距离越小,电场强度越大,所以工作介质最先在两极间最近点被击穿,形成放电通道,释放出大量的能量,工件表面被电蚀出一个小坑,一次脉冲放电随之结束,两极之间的电压急剧下降到接近于零,间隙中的工作介质又恢复到绝缘状态。此后,两极之间的电压再次升高,又在另一处绝缘强度较低(两极间距离最近、电场强度最大)的位置重复上述放电过程。经多次脉冲放电后,整个被加工表面由无数个放电小凹坑组成,如图2-2所示,电极的形状就被复制在工件上,最终达到加工的目的。

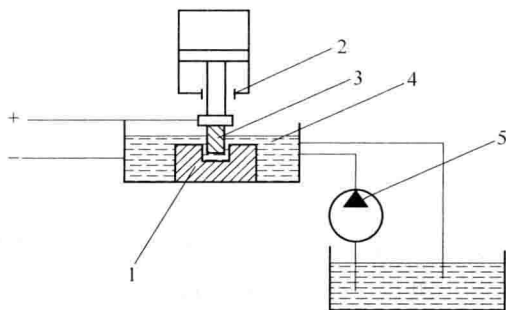


图 2-1 电火花加工原理图

1—工件 2—进给装置 3—工具电极 4—工作介质 5—泵

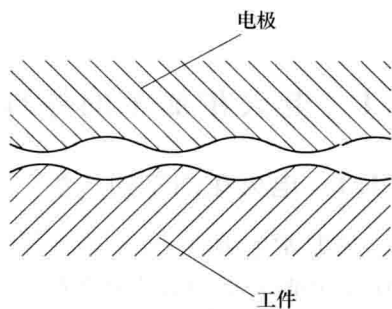


图 2-2 加工表面放大图

利用火花放电产生的电腐蚀效果来加工工件,必须解决以下几个问题。

1) 工具和工件之间必须保持一定的放电间隙,其间隙数值视具体的加工条件而定,一般为 $0.01 \sim 0.5\text{mm}$ 。如果间隙过大,两极间电压可能无法击穿工作介质,无法产生电火花;反之,如果间隙过小,有可能引起短路,产生持续放电,烧毁工件。所以,需要一个伺服进给系统,来确保工件和电极之间的间隙保持一个合适的数值。

2) 火花放电必须是脉冲放电,一般脉冲宽度正常时间为 $t_i = 1 \sim 1000\mu\text{s}$,而脉冲间隔停歇时间一般为 $t_o = 20 \sim 100\mu\text{s}$,这样才能使放电产生的热量和腐蚀下来的金属材料被流动的工作介质带走,否则便会产生电弧放电,烧伤工件而无法达到加工的目的。所以,电火花加工需要脉冲电源。

3) 火花放电必须在一定的绝缘介质中进行(如煤油、乳化液和去离子水等),以利于产生脉冲性火花放电,同时带走放电产物并对工件进行冷却。因此,电火花加工需要工作介质循环系统。

2. 电火花加工的特点

与传统的金属切削加工相比,电火花加工有如下优点。

1) 便于加工在传统切削加工中难以加工甚至是无法加工的材料,如淬火钢、硬质合