

制造工艺丛书

电火花加工工艺 及应用

刘志东 高长水 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

制造工艺丛书

电火花加工工艺及应用

刘志东 高长水 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书分为三部分:第一部分为电火花加工工艺基础,包括第一、二、三章,主要介绍电火花加工基础知识、电火花成形加工设备、数控电火花线切割设备;第二部分为电火花成形加工,包括第四、五、六章,主要介绍电火花成形加工的基本规律和特点、电火花成形加工工艺、电火花高速小孔加工;第三部分为电火花线切割加工,包括第七、八、九、十章,主要介绍电火花线切割加工基本规律、数控电火花线切割机床操作及加工工艺、高速往复走丝电火花线切割加工经验集锦、电火花线切割技术的最新进展。

本书可供从事电火花加工的工程技术人员使用,也可供机械制造、精密仪器、机电一体化、模具设计与制造、自动化等专业的本科生及研究生使用。

图书在版编目(CIP)数据

电火花加工工艺及应用 / 刘志东,高长水编著.

—北京:国防工业出版社,2011.4

(制造工艺丛书)

ISBN 978-7-118-07289-1

I. ①电... II. ①刘...②高... III. ①电

火花加工—生产工艺 IV. ①TG661

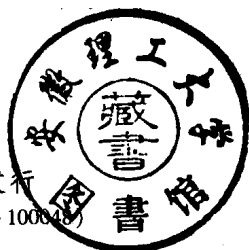
中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第051530号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

鑫马印刷厂印刷

新华书店经售



*

开本 787×1092 1/16 印张 18¼ 字数 448 千字

2011年4月第1版第1次印刷 印数 1—4000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

电火花成形加工、电火花高速小孔加工及电火花线切割加工作为先进制造技术中的新工艺、新技术,目前在航天、航空等国防工业和汽车、模具等民用工业部门、乡镇企业和民营企业中已经获得日益广泛应用,并发挥着无可替代的重要作用。目前我国电火花成形加工机床、电火花高速小孔加工机床及电火花线切割加工机床年产量已经超过5万台,拥有量居世界首位;同时,相关的工程技术人员和操作工人的数量也居世界之首。这支庞大技术队伍水平的提高,对提高我国电火花加工技术水平和充分发挥其在国防及民用工业中的作用,加快我国由制造大国向制造强国的转化进程具有重要意义。但电火花加工技术要求机电一体化、多学科交叉,并且工艺要求很强,因此企业工程技术人员及操作人员在短时期内掌握工艺应用具有较高的难度。本书编写的目的在于首先从理论上对电火花加工三种工艺方法的规律及特点进行分析,并以此为依据阐述这三种工艺方法的特点及规律,使企业工程技术人员及操作人员知道如何应用电火花加工的工艺方法去解决工程实践中的问题,并从理论上知道其实质及原因。

本书分为三部分:第一部分为电火花加工工艺基础,包括第一、二、三章,主要介绍电火花加工基础知识、电火花成形加工设备、数控电火花线切割加工设备;第二部分为电火花成形加工,包括第四、五、六章,主要介绍电火花成形加工的基本规律和特点、电火花成形加工工艺、电火花高速小孔加工;第三部分为电火花线切割加工,包括第七、八、九、十章,主要介绍电火花线切割加工基本规律、数控电火花线切割机床操作及加工工艺、高速往复走丝电火花线切割加工经验集锦、电火花线切割技术的最新进展。

本书由中国机械工程学会特种加工分会电火花线切割专业委员会副主任委员、江苏省电加工学会主任委员、南京航空航天大学博士生导师刘志东教授及南京航空航天大学高长水副教授编写,其中刘志东编写了第一、三、六、七、八、九、十章,高长水编写了第二、四、五章。

本书编写过程中,参阅了国内外同行有关资料,得到了电火花加工界许多专家和同志的支持与帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,以及技术的迅速发展,书中难免有错误和不妥之处,望读者批评指正。

作者的电子邮箱:

刘志东:liutim@nuaa.edu.cn

高长水:meeecsgao@nuaa.edu.cn

编 者

2010年11月

目 录

第一章 电火花加工基础知识 1	
1.1 电火花加工的产生、发展及分布	1
1.2 电火花加工的特点	3
1.3 电火花加工应具备的条件	4
1.4 电火花加工的工艺类型及适用范围	5
1.5 电火花加工对材料可加工性和结构工艺性等的影响	6
1.6 电火花放电的微观过程	7
1.7 电火花加工的极性效应	9
1.8 影响电火花加工蚀除速度的因素	10
1.9 蚀除(加工)速度和电极损耗的关系	13
1.9.1 加工速度	13
1.9.2 工具电极相对损耗速度和相对损耗比	13
1.10 影响电火花加工精度的主要因素	15
1.11 电火花加工的表面质量	16
1.11.1 表面粗糙度	16
1.11.2 表面变质层	17
1.11.3 表面力学性能	17
第二章 电火花成形加工设备 19	
2.1 电火花成形加工机床的结构及组成	19
2.1.1 主机	19
2.1.2 脉冲电源	25
2.1.3 放电自动进给机构	29
2.1.4 工作液系统	33
2.2 电火花成形加工数控系统	36
2.2.1 电火花加工单轴数控系统	37
2.2.2 电火花成形加工多轴数控系统	38
2.2.3 数控摇动加工	38
2.2.4 电火花加工数控编程	38
2.3 电火花成形加工机床常用附件	40
2.3.1 电极夹具	40
2.3.2 平动头	43
2.3.3 油杯	44
2.3.4 电极自动交换装置	45
2.3.5 C 轴	45
2.4 数控电火花成形加工机床的工作精度(加工技术指标考核)	45
2.5 安全防护	46
2.5.1 电气安全	46
2.5.2 火灾的防止	46
2.5.3 有害气体的防护	47
第三章 数控电火花线切割设备 49	
3.1 电火花线切割基本原理	49
3.2 电火花线切割加工特点	50
3.3 电火花线切割加工的应用范围	50
3.4 电火花线切割机床分类	51
3.4.1 高速往复走丝电火花线切割机床	51

3.4.2	低速单向走丝电火花线切割机	52	4.1.1	加工速度	116
3.5	数控电火花线切割机		4.1.2	电极损耗	117
	主机	53	4.1.3	表面粗糙度	118
3.5.1	高速往复走丝电火花线切割机基本组成	53	4.1.4	加工精度	118
3.5.2	低速单向走丝电火花线切割机	75	4.2	电火花成形加工脉冲参数选择原则	118
3.6	数控电火花线切割机控制系统	89	4.3	影响电火花成形加工精度和表面质量的因素	120
3.6.1	高速往复走丝电火花线切割机控制系统	89	4.3.1	影响加工精度的主要因素	120
3.6.2	低速单向走丝电火花线切割机驱动系统	98	4.3.2	电火花加工的表面质量	121
3.7	数控电火花线切割加工脉冲电源	100	4.4	加工过程中的参数控制	124
3.7.1	高速往复走丝电火花线切割加工脉冲电源	100	4.4.1	过程控制的目的	124
3.7.2	低速单向走丝电火花线切割加工脉冲电源	104	4.4.2	过程控制的难度	124
3.8	典型高速往复走丝电火花线切割机控制系统	107	4.4.3	离线控制参数	124
3.9	线切割编程方法及仿形编程	108	4.4.4	在线控制参数	125
3.9.1	ISO 代码	108	4.4.5	出现拉弧时的补救措施	125
3.9.2	3B 程序	111	4.4.6	适应控制系统	125
3.9.3	自动编程系统	113	4.5	电火花成形加工中放电不稳定现象产生原因及改善	126
3.9.4	仿形编程系统	113	4.5.1	机床性能产生的放电不稳定现象	127
第四章	电火花成形加工的基本规律和特点	116	4.5.2	电参数调节对放电稳定性的影响	127
4.1	电火花成形加工的主要工艺指标及其影响因素	116	4.5.3	工作液对放电稳定性的影响	128
			4.5.4	电极材料的种类、质量及与加工电参数匹配对放电稳定性的影响	128
			4.5.5	工艺方法对放电稳定性的影响	128
			4.5.6	难加工部位对加工稳定性的影响	129
			4.5.7	加工操作的处理对	

加工稳定性的影响	129	5.7.3 型腔模电火花加工	
第五章 电火花成形加工工艺	131	实例	147
5.1 电火花成形加工基本		5.7.4 塑料叶轮注塑模电火	
工艺过程	131	花型腔加工实例	148
5.1.1 加工方法的选择	131	第六章 电火花高速小孔加工	150
5.1.2 电极的准备	132	6.1 电火花高速小孔加工原理	151
5.1.3 工件的准备	137	6.1.1 电火花高速小孔加工	
5.1.4 加工参数的选择	137	工艺特点	151
5.2 电火花穿孔加工方法	138	6.1.2 电火花高速小孔加工	
5.2.1 直接加工法	138	工艺规律	152
5.2.2 间接加工法	138	6.1.3 高速小孔加工极间正	
5.2.3 混合加工法	139	常放电状态的维持	153
5.3 电火花型腔加工方法	139	6.1.4 电极旋转移动放电通	
5.3.1 单电极平动加工法	139	道避免电极烧伤	153
5.3.2 多电极更换加工法	139	6.2 电火花高速小孔加工	
5.3.3 分解电极加工法	140	机床的组成	154
5.3.4 电火花铣削加工	140	6.2.1 床身结构	154
5.4 电火花成形加工的一些		6.2.2 主轴、密封旋转系统	
综合技巧	141	和导向器	154
5.4.1 穿孔电极的反拷贝		6.2.3 工作液高压供液	
修正	141	系统	156
5.4.2 电火花加工模具的		6.2.4 工作液系统使用	
后继抛光方法	142	操作	157
5.5 电火花成形加工工艺发展		6.2.5 电气系统的组成与	
与模具制造的相关性	142	功能	157
5.6 电火花成形加工技术在模具		6.3 电火花小孔加工工艺及	
制造中的应用	144	故障处理	159
5.6.1 注塑模加工	144	6.3.1 加工参数选择	159
5.6.2 冲模电火花穿孔		6.3.2 非故障的异常情况	
加工	144	处理	160
5.6.3 精密微细加工	144	6.3.3 一般故障的处理	160
5.7 电火花成形加工工艺分析与		6.3.4 维护保养和检查	161
操作案例	145	第七章 电火花线切割加工基本	
5.7.1 工艺美术品凹模型		规律	163
腔电火花加工实例	145	7.1 切割速度	163
5.7.2 连杆锻模电火花加工		7.1.1 电参数的影响	163
实例	146		

7.1.2	非电参数的影响	167	8.6	低速走丝加工水压、走丝速度 及张力的调整	215
7.2	表面粗糙度	172	8.6.1	水压的调整	215
7.3	加工精度	176	8.6.2	走丝速度的调整	216
7.4	电极丝损耗及耐用度	179	8.6.3	电极丝张力大小的 调整	216
第八章	数控电火花线切割机床操作 及加工工艺	182	8.7	低速走丝加工料芯的处理 及无芯切割	216
8.1	高速往复走丝电火花线切割 机床搬运与安装要求	182	8.8	低速走丝加工异常的处理	217
8.1.1	搬运要求	182	8.8.1	加工精度异常	217
8.1.2	安装要求	182	8.8.2	频繁断丝	219
8.2	高速走丝机安全操作规程	182	8.8.3	切割进给速度异常	221
8.3	高速走丝机加工基本操作	183	8.8.4	加工表面线痕过多	221
8.3.1	上丝	183	8.8.5	加工表面粗糙度 异常	222
8.3.2	紧丝	183	第九章	高速往复走丝电火花线切割 加工经验集锦	223
8.3.3	调整线臂高度	184	9.1	电火花线切割加工流程图	223
8.3.4	校正电极丝垂直	184	9.2	电火花线切割加工中应注意 的事项	223
8.4	高速走丝加工应用及工艺	186	9.3	电火花线切割操作常用工具 及使用方法	224
8.4.1	加工基本工艺路线	186	9.4	线切割加工跟踪最佳点的 摸索	225
8.4.2	零件图纸工艺分析	186	9.5	切割 X 负方向(L_3)时容易 断丝的原因	226
8.4.3	工件备料	188	9.6	延长电极丝使用寿命的 方法	226
8.4.4	穿丝孔加工	189	9.7	延长导轮和导轮轴承寿命 的方法	227
8.4.5	加工路线的确定及 切入点的选择	190	9.8	断丝原因及处理方法	227
8.4.6	工件的一般装夹	191	9.9	避免断丝后退回原点加工 的方法	228
8.4.7	维护与保养	195	9.10	断丝后原地穿丝的方法	229
8.4.8	常见故障排除	197	9.11	线切割加工中短路处理 方法	229
8.5	低速单向走丝电火花线切割 机床操作	198	9.12	切割表面发黑及工作液泡沫	
8.5.1	安全注意事项	198			
8.5.2	影响机床加工的 外界因素	199			
8.5.3	机床的调整	202			
8.5.4	加工前的检查	204			
8.5.5	工件的安装	206			
8.5.6	不同类型的夹具	207			
8.5.7	典型零件的装夹 方式	213			

太多的处理方法	229	9.33 电火花线切割用于单件、 小批的薄板加工	243
9.13 线切割“花丝”现象分析与 解决	230	9.34 电火花线切割用于薄带 加工	244
9.14 提高电火花线切割的自动对 中心精度注意的问题	230	9.35 电火花线切割在凸模 加工中的接痕处理	244
9.15 线切割加工中要注意保持穿 丝孔的完整性	231	9.36 小凸模在终点产生凹痕 的处理方法	245
9.16 提高断丝保护功能的可靠 性的方法	231	9.37 线切割加工对称度要求 高的零件	245
9.17 电火花线切割脉冲电源参 数的设置	231	9.38 解决线切割加工圆柱体同 心度及对称度的方法	246
9.18 分析电火花线切割的 加工误差	232	9.39 线切割表面产生沟痕及 解决方法	246
9.19 运丝及走丝系统异响 问题的判断	232	9.40 精密冲压模线切割加工 变形影响及对策	247
9.20 机床电气故障检修的 一般方法	232	9.41 线切割加工长条形零件 的工艺	248
9.21 精密模具切割时线切割 程序补偿量的确定	233	9.42 多次切割预留段切割的处理 方法与技巧	249
9.22 电极丝换向条纹的处理及 表面亮泽度的提高	233	9.43 易变形细长凸模的多次 切割方法	250
9.23 改善线切割加工表面粗 糙度的措施	233	9.44 电火花线切割机床精度 检测标准	252
9.24 大厚度工件的切割工艺	234	9.45 高速走丝电火花线切割 机床选择比较	253
9.25 大厚度“紫铜件”切割 问题	234	9.46 国内主要电火花加工机床 的生产厂	254
9.26 铝合金电火花线切割加工	235		
9.27 对于局部淬裂或加工走错 模具的修补	236		
9.28 克服切割件变形、不易装夹、 裂纹的几点措施	237		
9.29 在线切割机床上实现接刀 加工的方法	239		
9.30 超长工件加工方法	241		
9.31 改变工件定位方式,扩大 机床加工范围	241		
9.32 一种简易线切割夹具的 设计	242		
		第十章 电火花线切割技术的 最新进展	256
		10.1 高效及智能型切割	256
		10.1.1 高效切割	256
		10.1.2 智能型高频脉冲 电源	260
		10.2 一次切割	261
		10.3 多次切割	262
		10.4 高速走丝机实现多次切割	

的基本条件	263	加工	271
10.5 切割精度	265	10.7.1 半导体电火花线切割	
10.5.1 实际修整量与理论		意义与必要性	271
修整量关系问题 ...	265	10.7.2 半导体放电模型 ...	271
10.5.2 基于复合工作液		10.7.3 半导体进电特性 ...	272
的切割精度提高		10.7.4 半导体体电阻的	
方式	266	影响	273
10.5.3 智能电极丝张力		10.7.5 半导体蚀除机理 ...	274
控制系统	268	10.7.6 半导体切割实例 ...	275
10.5.4 电机内置式储丝		10.8 工作液改进及应用导致的	
筒运丝系统	268	线切割发展	277
10.6 切割表面完整性的研究	269	参考文献	278
10.7 高阻半导体材料的电火花			

第一章 电火花加工基础知识

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。如图 1-1 所示,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气化而被蚀除下来。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,其表面由无数个不规则的放电凹坑组成。图 1-2 所示为磨削加工表面、电火花成形加工表面及电火花线切割表面的微观形貌。

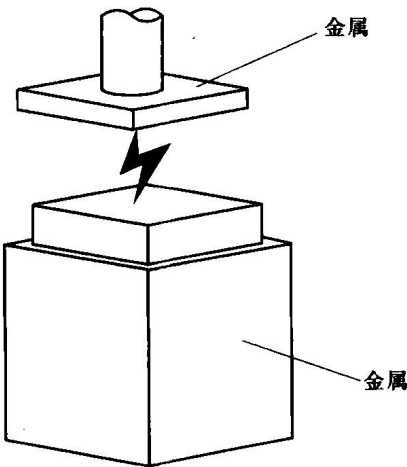


图 1-1 电火花加工原理图

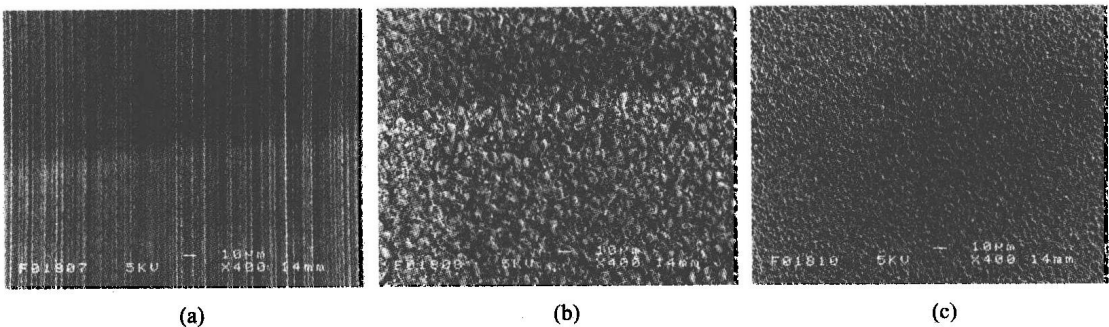


图 1-2 不同加工方式表面微观形貌照片
(a) 磨削加工; (b) 电火花成形加工; (c) 电火花线切割加工。

1.1 电火花加工的产生、发展及分布

真正的电火花放电加工开始于 1943 年,以苏联莫斯科大学的教授拉扎连科夫妇(Professors Dr. Boris Lazarenko and Dr. Natalya Lazarenko)发现电火花放电原理为标志。当时正值第二

次世界大战时期,苏联政府要求他们夫妇领导的科研小组研究如何减少钨开关触点由于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,因为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(图 1-3),希望可以减少火花导致的电蚀现象,但实验并未获成功,不过结果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。于是他们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,由此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。

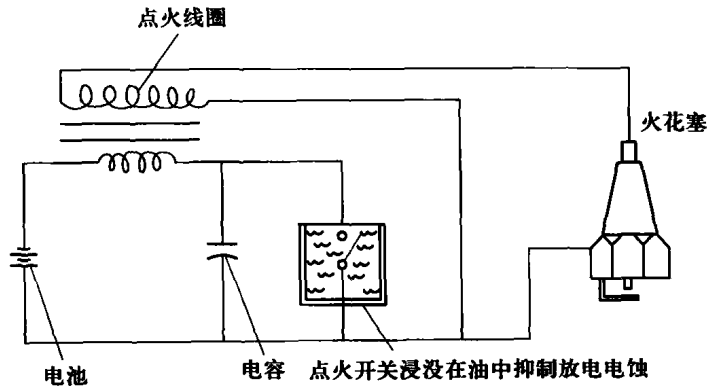


图 1-3 拉扎连科夫妇实验用的钨开关自动点火系统

而几乎与此同时,美国一家公司的三个电器工程师 Harold Stark、Victor Harding 和 Jack Beaver 也发明了一种用电火花加工的方法,以去除在铝制水阀上折断的钻头和丝锥的机器(图 1-4),做法是采用手动的方法将电极首先与水阀生产过程中折断的钻头或丝锥接触,而后脱离,利用脱离时瞬间产生的火花放电来蚀除钻头或者丝锥,而后他们又对这种方法进行了不断的改进并申请了专利。

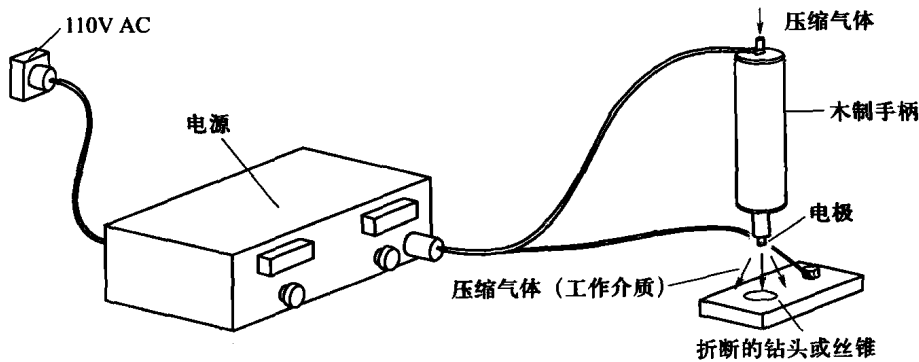


图 1-4 美国工程师研制的电火花取钻头和丝锥试验系统

随着人们对电火花蚀除研究的逐步深入,到 20 世纪 50 年代,出现了第一台商业化的电火花加工机床。到 60 年代,半导体工业的振兴为电火花加工的发展提供了良机,提高了电火花成形机床的可靠性,而且加工表面质量也得到改善。在这个时期,电火花线切割开始起步。到 60 年代末 70 年代初,数控技术的介入使加工更加精确,同时使电火花线切割加工技术前进了一大步。通过几十年的努力,电火花加工电源技术、自动化技术以及控制功能都得到了极大提高。

中国第一台电火花加工机床诞生于1954年。1958年研制成功的DM5540型电脉冲机床具有效率高、电极损耗小的优点,从而开始了电火花加工机床进入以模具加工为主的时期。1965年出现的采用晶体管脉冲电源的D6140电火花成形加工机床拓宽了电火花加工在型腔模具加工中的应用。晶闸管电源和晶体管电源的电火花加工机床,在20世纪70年代得到较大的发展,它们与不断完善的手动头相结合,使型腔模具电火花加工手动工艺日趋成熟。

约在1960年,苏联科学院中央电工实验室,首先研制出第一台低速单向走丝靠模仿形电火花线切割机床,以后两三年中,从靠模仿形又发展到光电跟踪。1962年前后瑞士阿奇公司开始研究电火花线切割加工的数字控制技术,五六年后达到了实用化程度。中国科学院电子研究所于1964年研制出光电跟踪电火花线切割机床,较大地提高了切割速度、缩短了制造周期并降低了加工成本,增加了切割更复杂型面的可能性,提高了工艺的适应性和“柔性”。

第一代电火花线切割机床的走丝速度很低,在煤油介质中切缝较窄,排屑不畅,所以切割速度也很低,只有 $2\text{mm}^2/\text{min} \sim 5\text{mm}^2/\text{min}$,且电极丝一次性使用也很浪费。我国上海电表厂张维良工程师对此作了创新性改进,在阳极机械切割工艺和机床的基础上,采用了往复、高速走丝和乳化液为加工介质的方式,使切割速度获得成倍、数十倍提高,且可进行大厚度切割。此后上海机床电器厂又和复旦大学数学系联合研制出线切割简易数控系统,后经用户、生产厂、科研院所、高等院校等技术工人和科技人员多方面改进和完善,形成了具有我国自主知识产权和中国特色的数控高速往复走丝电火花线切割机床。

目前电火花加工机床在发达国家的生产企业主要分布在日本及欧洲地区,而美国及美洲地区就很少,其主要原因是因为日本在第二次世界大战中基础工业设施遭受到毁灭性的重创,工业在一片废墟中开始恢复,因此对于电火花加工这种新型的加工方式十分愿意接纳,同时也投入了相当的精力促成了电火花加工业在日本的发展;同样在欧洲的电火花加工业借助于苏联研究成果也迅速在欧洲进行了推广;而对于美国而言,由于第二次世界大战并没有触及到其工业基础并且还拥有众多熟练的产业工人,因此直到现在对电火花加工产业的接受方面仍然需要一定的过程。

1.2 电火花加工的特点

电火花加工是与机械加工完全不同的一种工艺方法,由于电火花加工有其独特的优越性,再加上数控水平和工艺技术的不断提高,其应用领域日益扩大,已经覆盖到机械、航天、航空、电子、核能、仪器、轻工等部门,用以解决各种难加工材料、复杂形状零件和有特殊要求的零件制造,成为常规切削、磨削加工的重要补充和拓展。模具制造是电火花加工应用最多的领域,而且非常典型。

电火花加工的优点如下:

(1) 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,材料的可加工性主要与材料的导电性及其热学特性,如电阻率、熔点、沸点(气化点)、比热容、热导率等有关,而几乎与其力学性能(硬度、强度等)无关。因此可以突破传统切削加工中对刀具的限制,实现用软的工具加工硬、韧的工件,甚至可以加工像聚晶金刚石、立方氮化硼一类的超硬材料。目前电极材料多采用纯铜(俗称紫铜)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与工件不直接接触,没有机械加工的切削力,因此适宜加工低刚度工件及进行微细加工。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。另一方面,数控技术的采用使得用简单电极加工复杂形状工件也成为可能。

(3) 易于实现加工过程自动化。由于是直接利用电能加工,而电能、电参数较机械量易于实现数字控制、适应控制、智能化控制和无人化操作等。

(4) 可以改进结构设计,改善结构的工艺性。可以将拼镶结构的硬质合金冲模改为用电火花加工的整体结构,减少了加工工时和装配工时,延长了使用寿命。如喷气发动机中的叶轮,采用电火花加工后可以将拼镶、焊接结构改为整体叶轮制造,既大大提高了工作可靠性,又大大减小了体积和质量。

(5) 脉冲放电持续时间极短,放电时产生的热量传导范围小,材料受热影响范围小。

电火花加工也有其一定的局限性,具体是:

(1) 只能用于加工金属等导电材料。不像切削加工那样可以加工塑料、陶瓷等绝缘的非导电材料。但近年来研究表明,在一定条件下也可加工半导体和聚晶金刚石等非导体超硬材料。

(2) 加工速度一般较慢。因此通常安排工艺时多采用切削方法以去除大部分余量,然后再进行电火花加工,以求提高生产率。但最近的研究表明,采用特殊水基不燃性工作液进行电火花加工,其粗加工生产率基本接近于切削加工。

(3) 存在电极损耗。由于电火花加工靠电、热来蚀除金属,电极也会产生损耗,而且电极损耗多集中在尖角或底面,影响成形精度。但近年来粗加工时已能将电极相对损耗比降至0.1%,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0.02mm~0.03mm),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,可以棱角分明地加工出方孔、窄槽的侧壁和底面。

(5) 加工表面有变质层甚至微裂纹。

1.3 电火花加工应具备的条件

实现电火花加工应具备的条件:

(1) 工具电极和工件电极之间在加工中必须保持一定的间隙,一般是几微米至数百微米。若两电极距离过大,则脉冲电压不能击穿介质,也不能产生火花放电;若两极短路,则在两电极间没有脉冲能量消耗,也不可能实现电腐蚀加工。因此,加工中必须用自动进给调节机构来保证加工间隙随加工状态而变化,如图1-5所示。

(2) 火花放电必须在有一定绝缘性能的液体介质中进行,如火花油、水溶性工作液或去离子水等,液体介质有压缩放电通道的作用,同时液体介质还能把电火花加工过程中产生的金属蚀除产物、碳黑等从放电间隙中排出去,并对电极和工件起到较好的冷却作用。

(3) 放电点局部区域的功率密度足够高,即放电通道要有很高的电流密度(一般为 $10^5 \text{ A/cm}^2 \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$)。放电时所产生的热量,足以使工件表面金属局部瞬时熔化甚至气化,从而在被加工材料表面形成一个电蚀凹坑。

(4) 火花放电是瞬时的脉冲性放电。放电的持续时间一般为 $10^{-7} \text{ s} \sim 10^{-3} \text{ s}$ 。由于放电时间短,放电时产生的热量来不及扩散到工件材料内部,能量集中、温度高,放电点集中在很小范

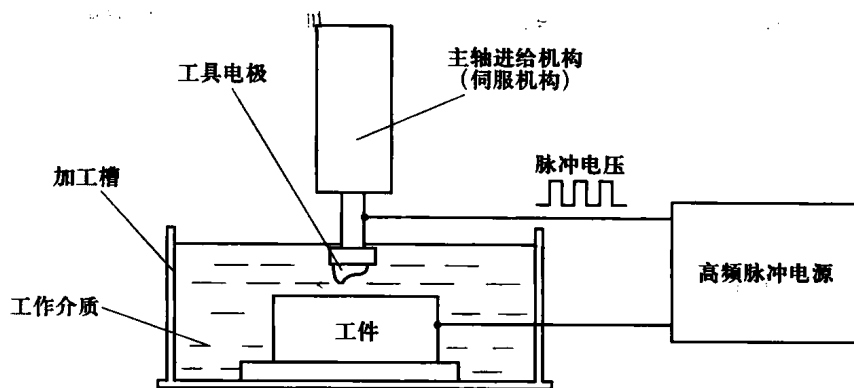


图 1-5 电火花加工原理示意图

围内。如果放电时间过长,就会形成持续电弧放电,使加工表面材料大范围熔化烧伤而无法作为尺寸加工的工艺方法进行。

(5) 在先后两次脉冲放电之间,有足够的停歇时间,排除电蚀产物,使极间介质充分消电离,恢复介电性能,以保证下次脉冲放电不在同一点进行,避免发生局部烧伤现象,使重复性脉冲放电顺利进行。

脉冲电源的放电电压及电流波形如图 1-6 所示。

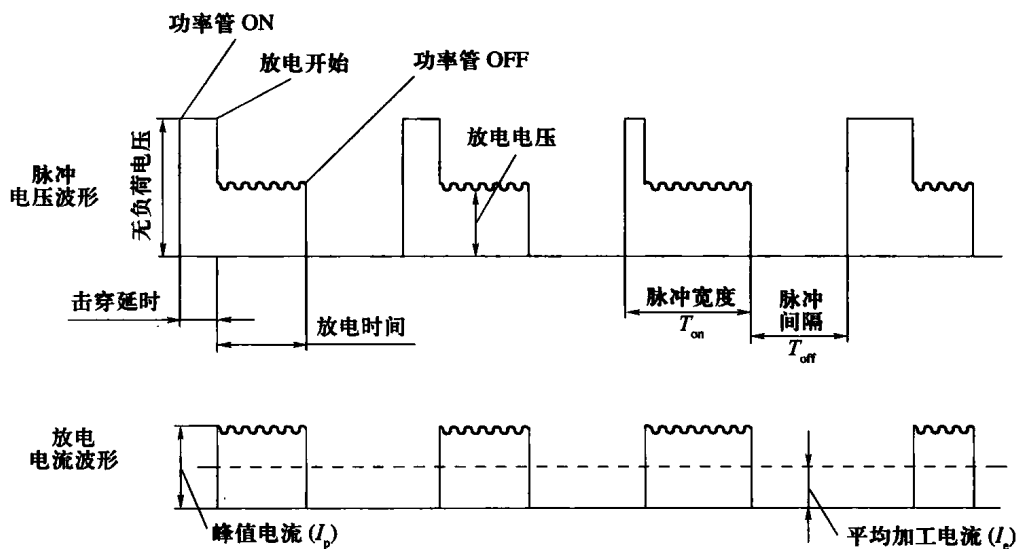


图 1-6 脉冲电源的放电电压及电流波形

1.4 电火花加工的工艺类型及适用范围

按工具电极和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、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。前五类属电火花成形、尺寸加工,是用于改变工件形状和尺寸的加工方法;后者则属表面加工方法,用于改善或改变零件表面性质。目前以电火花穿孔成形加工和电火花线切割应用最为广泛。表 1-1 为分类情况及各加工方法的特点及用途。

表 1-1 电火花加工的分类及适用范围

类别	工艺类型	特 点	适用范围	备 注
1	电火花穿孔成形加工	(1) 工具和工件间有一个相对的伺服进给运动 (2) 工具为成形电极,与被加工表面有相对应的形状	(1) 穿孔加工:各种冲模、挤压模、粉末冶金模、异形孔及微孔等 (2) 型腔加工:加工各类型腔模及各种复杂的型腔工件	约占电火花加工机床总数的 20%,典型机床有 DK7125、D7140 等电火花成形机床
2	电火花线切割加工	(1) 工具电极为移动的线状电极 (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 70%,典型机床有 DK7725、DK7632 等数控电火花线切割机床
3	电火花内孔、外圆和成形磨削	(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、表面粗糙度值小的小孔,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
4	电火花同步共轭回转加工	(1) 成形工具与工件均作旋转运动,但二者角速度相等或成整数倍,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、表面粗糙度值小的内、外回转体表面等	约占电火花机床总数不足 1%,典型机床 JN-2、JN-8 内外螺纹加工机床等
5	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 (2) 细管电极旋转 (3) 穿孔速度高 ($30\text{mm/min} \sim 60\text{mm/min}$)	(1) 线切割预穿丝孔 (2) 深径比很大的小孔,如喷嘴等	约占电火花加工机床总数的 3%,典型机床有 D703A 电火花高速小孔加工机床等
6	电火花表面强化、刻字	(1) 工具在工件表面上振动,在空气中火花放电 (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 1%~2%,典型设备有 D9105 电火花强化机等

1.5 电火花加工对材料可加工性和结构工艺性等的影响

由于电火花加工工艺独有的特点及在工业领域的广泛应用,已引起了机械制造工艺技术领域内的许多变革,例如对材料的可加工性、工艺路线的安排、新产品的试制、产品零件结构设计及零件结构工艺性好坏的衡量标准等产生了如下一系列的影响。

(1) 提高了材料的可加工性。由于材料的可加工性不再与硬度、强度、韧性、脆性等成直接关系,因此以往认为很难加工的材料,如聚晶金刚石、硬质合金、淬火钢均可以用电火花工艺进行加工。

(2) 改变了零件的典型工艺路线。以往除磨削外,其他切削加工、成形加工等必须安排在淬火热处理工序之前,但随着电火花加工的出现,由于它基本上不受工件硬度的影响,而且为了免除加工后再淬火引起热处理变形,一般都可先淬火而后加工。

(3) 改变了试制新产品的工序和工艺。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齿轮(包括非圆柱齿轮、非渐开线齿轮),微电机定子、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。这样可以省去设计和制造相应的刀、夹、量、模具,大大缩短了产品试制周期。

(4) 电火花加工对产品零件的结构设计带来很大的影响。例如各种复杂冲模如山形硅钢片冲模,过去由于不易制造,往往采用拼镶结构,采用电火花线切割加工后,即使是硬质合金的模具或刀具,也可做成整体结构。

(5) 改变了传统结构工艺性好与坏的评判准则。过去对方孔、小孔、弯孔、窄缝等均被认为是工艺性很“差”的典型,但对于电火花穿孔、电火花线切割工艺而言,加工方孔和加工圆孔的难易程度是一样的。

1.6 电火花放电的微观过程

每次电火花放电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。这一过程大致可分以下四个连续阶段:极间介质的电离、击穿,形成放电通道;介质热分解、电极材料熔化、气化热膨胀;电极材料的抛出;极间介质的消电离。

(1) 极间介质的电离、击穿,形成放电通道。任何物质的原子均由原子核与围绕着原子核并且在一定轨道上运行的电子组成,而原子核又由带正电的质子和不带电的中子组成,如图1-7所示。极间的介质也一样,当极间没有施加放电脉冲时两电极的极间状态如图1-8所示。当脉冲电压施加于工具电极与工件之间时,两极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,随着极间电压的升高或极间距离的减小,极间电场也将随着增大。由于工具电极和工件的微观表面凹凸不平,极间距离又很小,因而极间电场强度是很不均匀的,两极间离得最近的突出或尖端处的电场强度最大。当电场强度增加到一定程度后,将导致介质原子中绕轨道运行的电子摆脱原子核的吸引成为自由电子,而原子核则成为带正电的离子,并且电子和离子在电场力的作用下,分别向正极与负极运动,形成放电通道,如图1-9所示。

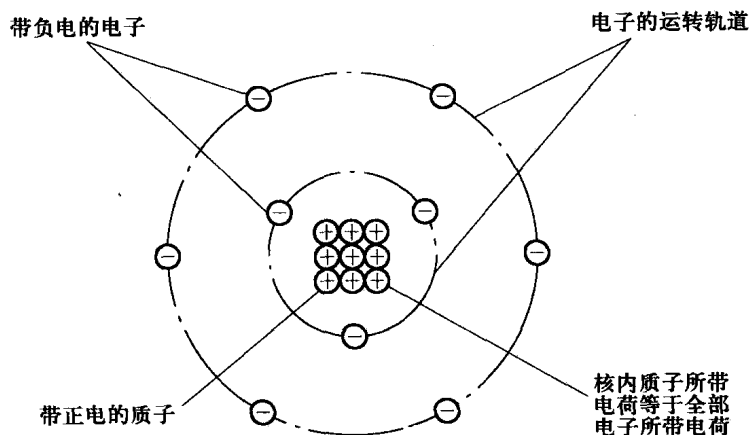


图1-7 介质原子结构示意图