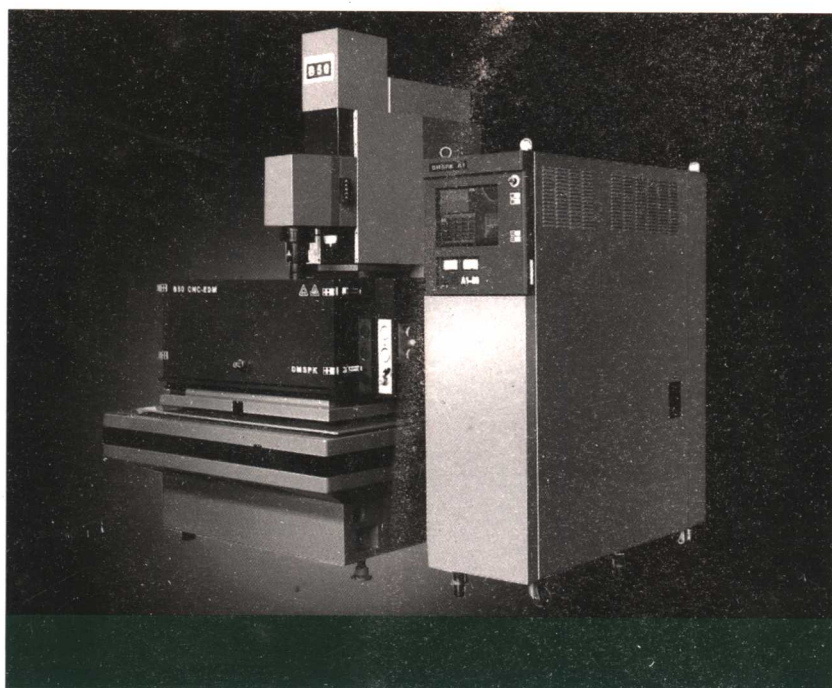


现代加工技术丛书

电火花加工技术

曹凤国 主编



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

现代加工技术丛书

电火花加工技术

曹凤国 主编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

电火花加工技术/曹凤国主编. —北京: 化学工业出版社, 2004. 8

ISBN 7-5025-6067-X

I. 电… II. 曹… III. 电火花加工 IV. TG661

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 088733 号

现代加工技术丛书

电火花加工技术

曹凤国 主编

责任编辑: 李玉晖 段志兵 刘丽宏

责任校对: 吴桂萍

封面设计: 于 兵

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 21½ 字数 515 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 7 月北京第 2 次印刷

ISBN 7-5025-6067-X/TB·75

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

现代加工技术通常是指特种加工技术,即将电、磁、声、光、化学等能量或其组合施加在工件的被加工部位上,从而实现材料被去除、变形、改性或表面处理等的非传统加工方法。

由于各种新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现,对机械制造业提出了一系列迫切需要解决的新问题。例如,各种难切削材料的加工;各种结构形状复杂、尺寸或微小或特大、精密零件的加工;薄壁、弹性元件等刚度、特殊零件的加工等。对此,采用传统加工方法十分困难,甚至无法加工,于是产生了特种加工技术。近年来,国家非常重视制造新技术的研发,加大了投入,特种加工技术获得了很大的发展,许多特种加工设备已经投入生产应用。当前,特种加工技术正在向工程化和产业化方向发展,大功率、高可靠性、多功能、智能化的加工设备的研发是重点。

从当前的制造业的发展趋势来看,现代加工技术将具有巨大的发展潜力和应用空间。在这样一个形势下,化学工业出版社组织出版了《现代加工技术丛书》。丛书共7种,包括《超声加工技术》、《激光加工技术》、《电火花加工技术》、《电化学加工技术》、《快速成形技术》、《微细加工技术》、《复合加工技术》。本书为《电火花加工技术》。

现代制造技术是新经济、新技术发展的重要推动力。随着生产的需要和科学技术的高速发展,新材料不断涌现,同时对工件的加工精度要求越来越高,传统的机械加工已很难满足需求。电火花加工技术以其独特的加工机理(工具和工件间非接触加工,无宏观切削力)和良好、稳定的加工性能成为现代制造技术不可缺少的加工手段之一。其特有的“以柔克刚、精密微细、仿形逼真”三大特点,在难加工材料、复杂型面、精细表面、低刚度零件和模具等制造领域中占有极其重要的地位,经过半个世纪的发展,已广泛应用于航空、航天、仪器仪表、汽车、地质等领域。为适应企业、学院科研、生产、教学、培训的需要,我们集多年科研与实践经验,编写了《电火花加工技术》一书。

全书共分5篇:电火花加工的基本原理,电火花成形加工,高速走丝电火花线切割加工,低速走丝电火花线切割加工,其他电火花加工及复合加工。

本书由北京市电加工研究所组织科技人员编写,曹凤国研究员任主编。参加编写的有:曹凤国(绪论,第一篇第1章、第2章),杨大勇(第二篇第3章、第4章,第四篇第12章、第13章),伏金娟(第二篇第5章、第6章、第7章),高素芳(第三篇第8章、第9章、第11章),张潮(第三篇第10章,第四篇第14章),吴桂琴(第四篇第15章、第16章),翟力军(第五篇第17章、第18章)。在成稿过程中,孙连珍做了大量组织工作。

本书编写过程中,参阅了国内外同行有关资料,得到了电加工界许多专家和同志的支持与帮助,在此一并表示衷心的感谢。

本书可作为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、自动化等专业的学生使用，还可供从事电火花加工设备操作的技术工人学习使用。

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

北京市电加工研究所
《电火花加工技术》编委会
2004年6月

目 录

绪 论

0.1 我国电火花加工发展概况	1
0.2 电火花加工的特点和用途	3
0.3 电火花加工实现的基本条件	4
0.4 电火花加工常用术语和符号	4
0.5 电火花加工工艺方法的分类	6

第一篇 电火花加工的基本原理

第1章 电火花加工的物理本质	10
1.1 单次放电腐蚀模型	10
1.2 重复放电腐蚀模型	12
第2章 影响材料放电腐蚀的主要因素	16
2.1 极性效应	16
2.2 覆盖效应	16
2.3 间隙效应	18
2.4 面积效应	19
2.5 脉冲放电特性	19
2.6 介质效应	22
2.7 电极与工件材料特性	23

第二篇 电火花成形加工

第3章 电火花成形加工脉冲电源	26
3.1 弛张式脉冲电源	26
3.1.1 RC型脉冲电源	26
3.1.2 RLC型脉冲电源	28
3.2 可控硅式脉冲电源	29
3.2.1 可控硅主回路	30
3.2.2 可控硅触发回路	33

3.3	双极型晶体管式脉冲电源	33
3.4	场效应管、绝缘栅双极型晶体管脉冲电源	36
3.4.1	常用的两种驱动电路	36
3.4.2	常用的脉冲电源类型	37
3.5	不同波形的脉冲电源	39
3.6	连续放电脉冲电源	41
3.7	多回路脉冲电源	42
3.8	绿色低功耗脉冲电源	43
3.9	高精度镜面加工脉冲电源	44
3.10	智能化、自适应控制脉冲电源	45
第4章	电火花成形加工自动控制系统	46
4.1	伺服控制系统	46
4.1.1	伺服控制系统的作用、要求及分类	46
4.1.2	伺服控制系统的基本组成	47
4.1.3	伺服控制系统工作范围的调整	50
4.1.4	伺服控制系统的类型	51
4.2	加工过程参数控制系统	56
4.2.1	加工过程参数控制系统的作用	56
4.2.2	加工过程参数控制的方法	56
4.2.3	加工过程参数自适应控制系统	58
4.3	电火花成形加工的数控系统	63
4.3.1	单轴数控系统	63
4.3.2	多轴数控系统	64
第5章	电火花成形加工机床	78
5.1	电火花成形加工机床主机	78
5.1.1	机床的分类及结构形式	78
5.1.2	机床各部件名称和传动轴方向定义	81
5.1.3	机床主机各部分的结构及其作用	82
5.1.4	机床主要精度和技术指标检验	87
5.2	电火花成形加工机床用附件	98
5.2.1	机床通用附件	99
5.2.2	机床专用附件	101
5.3	电火花成形加工用工作液过滤系统	109
5.3.1	主要组成部分和作用	109
5.3.2	工作液过滤系统设计的要求	110
5.3.3	工作液的选择	114
第6章	电火花成形加工的基本工艺规律	117
6.1	影响加工速度的主要因素	117
6.1.1	电参数对加工速度的影响	117
6.1.2	非电参数对加工速度的影响	118

6.2 影响电极损耗的主要因素	121
6.2.1 电参数对电极损耗的影响	122
6.2.2 非电参数对电极损耗的影响	123
6.3 影响表面粗糙度和加工精度的主要因素	126
6.3.1 表面粗糙度	126
6.3.2 影响表面粗糙度的主要因素	127
6.3.3 加工精度	128
6.3.4 影响加工精度的主要因素	129
6.4 电火花加工后表面层状态	131
6.4.1 表面变化层	131
6.4.2 表面变化层的力学性能	134
第7章 电火花成形加工工艺及应用	137
7.1 电火花成形加工工艺方法	137
7.2 电火花成形加工工艺技术	139
7.2.1 电火花成形加工的基本工艺技术	139
7.2.2 数控电火花成形加工的工艺技术	152
7.3 电火花成形加工实例	161

第三篇 高速走丝电火花线切割加工

第8章 高速走丝电火花线切割加工控制系统	179
8.1 加工轨迹控制系统	180
8.1.1 靠模仿型控制系统	180
8.1.2 光电跟踪控制系统	180
8.1.3 数字控制系统	181
8.1.4 计算机数字控制系统	182
8.2 伺服进给控制系统	186
8.2.1 伺服进给速度的控制方法	187
8.2.2 伺服进给驱动电路	188
8.3 加工程序的编制方法	190
第9章 高速走丝电火花线切割加工脉冲电源	197
9.1 脉冲电源的要求和组成	197
9.2 脉冲电源的典型电路	198
9.3 其他形式的脉冲电源	202
9.4 脉冲电源的波形测量与加工状态监测	205
第10章 高速走丝电火花线切割加工机床	208
10.1 机床的型号及主要技术参数	208
10.2 机床各部分的结构及其作用	209
10.2.1 床身	209
10.2.2 X、Y坐标工作台	210

10.2.3 走丝机构·····	214
10.2.4 工作液循环与过滤系统·····	218
10.3 锥度切割的结构·····	219
第 11 章 高速走丝电火花线切割加工工艺及应用 ·····	222
11.1 加工技术指标与基本工艺规律·····	222
11.1.1 加工技术指标·····	222
11.1.2 基本加工工艺规律·····	223
11.2 加工工艺方法·····	230
11.2.1 加工工艺步骤·····	230
11.2.2 编制加工程序·····	232
11.2.3 工件的加工·····	236
11.2.4 工件的检验·····	239
11.3 加工应用与实例·····	240

第四篇 低速走丝电火花线切割加工

第 12 章 低速走丝电火花线切割加工脉冲电源 ·····	246
12.1 RC 型脉冲电源·····	247
12.2 晶体管与场效应管脉冲电源·····	248
12.3 晶体管与场效应管控制的 RC 脉冲电源·····	249
12.4 无电解作用式脉冲电源·····	249
第 13 章 低速走丝电火花线切割加工自动控制系统 ·····	252
13.1 伺服控制系统·····	252
13.1.1 保持平均放电间隙的进给控制·····	252
13.1.2 加工过程参数控制系统·····	252
13.2 自适应控制系统·····	254
13.3 低速走丝线切割加工的数控系统·····	255
第 14 章 低速走丝电火花线切割加工机床 ·····	258
14.1 低速走丝电火花线切割加工机床结构·····	258
14.1.1 床身、立柱·····	258
14.1.2 X、Y 坐标工作台·····	258
14.1.3 走丝系统·····	260
14.2 工作液系统·····	264
第 15 章 低速走丝电火花线切割加工基本工艺规律 ·····	266
15.1 加工技术指标·····	266
15.1.1 切割速度·····	266
15.1.2 表面质量·····	267
15.1.3 加工精度·····	268
15.2 加工基本工艺规律·····	269
15.2.1 电参数对工艺指标的影响·····	269

15.2.2 非电参数对工艺指标的影响·····	271
第 16 章 低速走丝电火花线切割加工工艺及应用 ·····	279
16.1 低速走丝线切割加工工艺·····	279
16.1.1 低速走丝线切割加工工艺步骤·····	280
16.1.2 加工前的准备工作·····	281
16.1.3 典型加工实例·····	286
16.2 无芯切割与锥度切割·····	296
16.2.1 无芯切割的加工工艺方法·····	296
16.2.2 锥度切割的加工工艺方法·····	297
16.2.3 双丝切割的加工工艺方法·····	299

第五篇 其他电火花加工及复合加工

第 17 章 其他电火花加工 ·····	303
17.1 电火花小孔加工·····	303
17.1.1 高速电火花小孔加工·····	303
17.1.2 小孔及深孔的电火花磨削·····	306
17.2 电火花回转加工与跑合加工·····	309
17.2.1 电火花回转加工·····	309
17.2.2 电火花跑合加工·····	310
17.3 金属电火花表面强化与刻字·····	311
17.3.1 金属电火花表面强化·····	311
17.3.2 电火花刻字·····	314
17.4 半导体与非导体的电火花加工·····	314
17.4.1 超硬材料的电火花加工·····	314
17.4.2 半导体的电火花加工·····	320
17.4.3 非导体的电火花加工·····	320
17.5 电熔爆加工·····	322
17.5.1 电熔爆加工原理、特点·····	322
17.5.2 电熔爆加工设备·····	323
17.5.3 电熔爆加工的应用·····	323
第 18 章 电火花与其他加工技术的复合加工 ·····	325
18.1 超声电火花复合加工·····	325
18.1.1 超声电火花复合抛光·····	325
18.1.2 超声电火花复合打孔·····	327
18.2 液体束流电火花微孔加工·····	327
18.2.1 液体束流电火花加工原理·····	327
18.2.2 液体束流电火花加工的特点·····	327
主要参考文献 ·····	329

绪 论

电火花加工 (Electro Spark Erosion) 又称放电加工 (Electro Discharge Machining) 和电蚀加工 (Electroerosion Machining), 在日本称为放电加工, 在前苏联称为电蚀加工。它是利用两极间脉冲放电时产生的电腐蚀现象, 对材料进行加工的方法。在学术上它属于电物理加工范畴。电火花加工技术是特种加工技术中最重要的部分之一。

电火花加工是与机械加工性质完全不同的一种新工艺、新技术。机械加工是通过机床部件的相对运动, 用比工件材料硬的刀具去切除工件上多余的部分, 来得到成品零件的。但随着工业生产的发展和科学技术的进步, 具有高熔点、高硬度、高强度、高脆性、高黏性、高韧性、高纯度等性能的新材料不断出现, 具有各种复杂结构与特殊工艺要求的工件越来越多, 仍然采用单独机械加工方法, 有时是难以加工或无法加工的。因此, 人们除了进一步发展和完善机械加工方法之外, 还努力寻求新的加工方法。电火花加工方法能够适应生产发展的需要, 并在应用中显出很多优异的性能, 因此得到了迅速发展和日益广泛的应用。

0.1 我国电火花加工发展概况

1943 年, 前苏联学者拉扎连珂夫妇发明了电火花加工, 20 世纪 50 年代初期传入我国, 我国开始研究和应用电火花加工技术。先是应用电火花强化 (镀覆), 把硬质合金材料镀覆于高速钢车刀和冷冲模刃口上, 显著地提高了车刀和模具的使用寿命; 同时使用电火花加工进行穿孔、制模、切断、磨削、刻写、取折断工具和修理工件等。

50 年代末期, 我国电火花加工开始从研究试用阶段进入到生产应用阶段。研制成功了各种各样的电火花成形加工设备。脉冲电源一般都采用 RC、RLC 及 RLCL 非独立弛张式电路; 放电间隙自动控制系统采用电机机械式主轴头, 如电磁悬浮式、单电机式、双电机式、双机差动式等; 主要用于加工一般中小型冷冲模。同时, 研制成功脉冲发电机作电源的电火花加工设备, 用于型腔模具主要是锻模的加工。

60 年代初期, 我国研制成功靠模仿型电火花线切割加工设备, 能够切割尺寸精小、形

状复杂、材料特殊的冲模和零件。同时，自行设计的电火花成形加工设备开始成批生产，推动了电火花加工的发展。

在这期间，脉冲电源和控制系统也有很大进展，陆续研制出电子管式、闸流管式等多种脉冲电源及喷嘴-挡板式液压头。使冷冲模加工，由小型精密冲模到直径达1m的大型电机冲模，由单槽落料模到复式和跳步模，由钢冲模到硬质合金模等都获得了应用。

60年代中期，在电火花线切割加工中也开始采用电子管式脉冲电源，加工速度比采用RC电源提高了3倍以上。1967年，我国把光电跟踪控制技术成功地应用于电火花线切割加工中，用自动跟踪图线运动代替靠模仿型控制，进一步提高了加工精度。同时，高速走丝机构进一步完善和推广，并以乳化液代替煤油，使加工速度大大提高。60年代末期，我国研制出数字程序控制电火花线切割加工设备，并进行批量生产。

70年代中期，电火花线切割加工技术，已经成为我国冲模和一些零件加工的极为有效的加工方法之一。带有间隙偏移、齿隙补偿、切割斜度等功能的设备多种多样，并不断完善。编制程序方法不断简化，自动编制程序已经实现，小型电子计算机控制和群控也在试用。新型的各种波形的脉冲电源不断出现，加工范围进一步扩大，加工工艺指标显著提高。

电火花成形加工发展也很快。我国研制出晶体管式和可控硅式脉冲电源。在自动控制方面，我国主要采用的液压头，已由滚动导轨发展到静压导轨；喷嘴-挡板发展到伺服阀。采用数字控制的步进电机和力矩电机的主轴控制系统及适应抬刀已开始应用。由于这一系列改进，我国型腔模电火花加工进入了一个新的阶段，广泛用于锻模、压铸模、塑料模、胶木模、陶土模、橡皮模、玻璃模和粉末冶金模的加工中。

此外，我国在电火花磨削等方面也有所发展，磨制小孔具有一定的经验，并成批生产小孔电火花磨削加工设备。在材料表面的电火花强化方面，也有新的进展。表面粗糙度可达 $R_a 0.2 \sim 0.05 \mu\text{m}$ 、精度为微米级的回转式电火花加工，也取得了显著的效果。

80年代，我国开始改革开放，国民经济的迅速发展，带动电火花加工技术快速发展到一个新阶段。电火花线切割加工技术发展最快，特别是单板机、单片机数控线切割加工机床达到年产上万台的数量，成为我国冲模加工制造的主要手段。线切割加工的主要工艺指标已达加工速度 $120 \text{mm}^2/\text{min}$ ，加工精度 $0.02 \sim 0.03 \text{mm}$ ，加工表面粗糙度 $R_a 2.5 \mu\text{m}$ 。低速走丝线切割也开始引进日本法那科技术，在国内小批量生产。

电火花成形加工技术稳步发展，脉冲电源由晶体管、可控硅电源逐步发展为场效应管电源；自动控制系统采用单片机单轴数控系统。机床已由液压主轴头发展为步进电机和伺服电机主轴头，三坐标采用数显装置。

90年代，计算机技术“雪崩式”的发展，更加推动电火花加工技术的进步，特别是在加工精度、加工质量、可靠性、自动化方面更有长足进步。高速走丝电火花线切割加工机床，普遍采用微电脑控制，并且有人机对话、自动编程、全自动控制、大斜度加工等多项功能，加工工艺指标进一步稳定提高。同时，低速走丝线切割加工机床在我国快速发展，除了大量引进瑞士、日本等国的机床之外，国产低速走丝线切割加工机床质量、产量逐渐接近了国际水平，加工精度进入了微米级。

电火花成形加工技术已从单轴数控、多轴数显，发展为多轴数控，并具有一定的人工智能，大大提高了加工精度、质量和可靠性。脉冲电源从场效应管发展到IGBT；主轴头已由步进电机、直流伺服电机，发展到交流伺服电机和直线电机。多种机械加工难以实现的复

杂、精密模具和零件被电火花加工技术所攻克。多种高硬度、高熔点难加工材料,也被电火花加工技术逐一解决。

进入 21 世纪,电火花加工技术更加迅猛发展,成为现代制造技术重要组成部分。电火花加工的数控系统进一步采用人工神经网络技术、混沌理论、仿真技术,以进一步提高加工的各项工艺指标、加工的可靠性和自动化程度。脉冲电源则在保证电火花加工工艺指标的前提下,向环保、绿色、节能方向发展。电火花加工技术在“微纳”加工、“镜面”加工、半导体和超硬材料加工中将会发挥越来越重要的作用。

0.2 电火花加工的特点和用途

(1) 电火花加工的特点

①“以柔克刚”。加工时,工具电极与工件材料不接触,两者之间基本没有宏观机械作用力,因此能用“软”的工具电极加工“硬”的工件。如用石墨、紫铜电极可加工淬火钢、硬质合金,甚至金刚石。

②“精密微细”。由于脉冲放电的能量密度可精确控制,两极间又无宏观机械作用力,因此可实现精密微细的加工。如模具和零件窄缝、窄槽、微细小孔等加工,加工精度可达微米级,甚至亚微米级。

③“仿形逼真”。直接利用电能加工,便于实现加工过程的自动化、智能化、现代计算机技术的应用使加工工件仿形更加逼真。

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。

(2) 电火花加工的主要用途

①加工各种金属及其合金材料,导电超硬材料(如聚晶金刚石、立方氮化硼、金属陶瓷等),特殊的热敏材料,半导体和非导体材料。

②加工各种复杂形状 of 型孔和型腔工件,包括加工圆孔、方孔、多边孔、异形孔、曲线孔、螺纹孔、微孔、深孔等型孔工件,及各种型面的型腔工件。例如加工从数微米的孔、槽到数米的超大型模具和零件。

③各种工件与材料的切割,包括材料的切断、特殊结构零件的切断,切割微细窄缝及微细窄缝组成的零件(如金属栅网、慢波结构、异形孔喷丝板、激光器件等)。

④加工各种成型刀、样板、工具、量具、螺纹等成型零件。

⑤工件的磨削,包括小孔、深孔、内圆、外圆、平面等磨削和成型磨削。

⑥刻写、打印铭牌和标记。

⑦表面强化和改性,如金属表面高速淬火、渗氮、渗碳、涂覆特殊材料及合金化等。

⑧辅助用途,如去除折断在零件中的丝锥、钻头,修复磨损件,跑合齿轮啮合件等。

目前,电火花加工技术已广泛用于宇航、航空、电子、原子能、计算机技术、仪器仪表、电机电器、精密机械、汽车拖拉机、轻工等行业,以及科学研究部门。

总之,电火花加工是正在发展中的新工艺、新技术。它特有的功能,为各种新型材料的发展和应用开辟了广阔的途径,为各种工业产品的改革与制造提供了新的加工设备,为现代科学技术的发展和试验设计水平的提高提供了有效的手段。

0.3 电火花加工实现的基本条件

电火花加工实现的基本条件如下。

- ① 作为工具和工件的两极之间要有一定的距离（通常为数微米到数百微米），并能维持这一距离。
- ② 两极之间应充入介质。对导电材料进行尺寸加工时，两极间为液体介质；进行材料表面强化时，两极间为气体介质。
- ③ 输送到两极间的能量要足够大，即放电通道要有很大的电流密度（一般为 $10^5 \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$ ）。这样，放电时产生大量的热，足以使任何导电材料局部融化或汽化。
- ④ 放电应是短时间的脉冲放电，放电的持续时间为 $10^{-7} \sim 10^{-3} \text{ s}$ ，由于放电的时间短，放电产生的热来不及传导扩散开去，从而把放电点局限在很小的范围内。

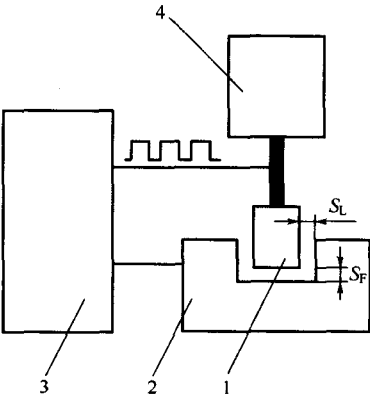


图 0-1 电火花加工原理示意图

1—工具电极；2—工件；3—脉冲电源；
4—伺服进给系统
 S_L, S_F —加工间隙

⑤ 脉冲放电需重复多次进行，并且每次脉冲放电在时间上和空间上是分散的，即每次脉冲放电一般不在同一点进行，避免发生局部烧伤。

⑥ 脉冲放电后的电蚀产物能及时排运至放电间隙之外，使重复性脉冲放电顺利进行。

在进行电火花加工（图 0-1）时，工具电极接脉冲电源的一极，工件接另一极，两极间充满液体介质，放电间隙自动控制系统控制工具电极向工件移动。当两极间达到一定距离时，极间的液体介质被击穿，发生脉冲放电，使工件被蚀除一个小坑穴，工具电极也会因放电而出现损耗。放电后的电蚀产物由液体介质排至放电间隙之外，同时经过短暂的间隔时间，使极间恢复绝缘，即消电离。然后再进行下一次脉冲放电，又使工件蚀除一个小坑穴。如此不断地进行放电蚀除，工具电极不断地向工件移动，维持适宜的放电间隙，就能在工件上加工出与工具电极形状相似的型孔或型腔。如果使工具电极或工件进行各种形式的相对运动，则可实现电火花切割加工、共轭回轮加工、磨削加工等。

0.4 电火花加工常用术语和符号

为满足国内外学术交流、图书出版以及专业教育培训的需要，我国电加工学会参照国际标准，制订了电火花加工的术语、定义和符号（见表 0-1），现摘录如下。

表 0-1 电火花加工中常用的名词术语和符号

序号	名词术语	符号	定 义	表示方法
1	工具电极	EL	电火花加工用的工具，因其是火花放电时电极之一，故称工具电极，简称工具或电极（见图 0-1）	

续表

序号	名词术语	符号	定 义	表示方法
2	放电间隙	S, Δ	放电发生时,工具电极和工件之间发生火花放电的距离称为放电间隙。在加工过程中,则称为加工间隙(见图 0-1)	
3	脉冲电源	PG	以脉冲方式向工件和工具电极间的加工间隙提供放电能量的装置	
4	伺服进给系统		用作使工具电极伺服进给、自动调节的系统,使工具电极和工件在加工过程中保持一定的加工间隙(见图 0-1)	
5	工作液介质		电火花加工时,工具电极和工件间的放电间隙一般浸泡在有一定绝缘性能的液体介质中,此液体介质即称工作液介质或简称工作液	
6	电蚀产物		是指电火花加工过程中被蚀除下来的产物。一般指工具电极和工件表面被蚀除下来的微粒小屑及煤油等工作液在高温下分解出来的炭黑和其他产物,也称为加工屑	
7	电参数		主要有脉冲宽度、脉冲间隔、峰值电压、峰值电流等脉冲参数(见图 0-2),又称电规准	
8	脉冲宽度	t_i	脉冲宽度简称脉宽。它是加到电极间隙两端的电压脉冲的持续时间(见图 0-2),单位为 μs 。日本及英美常用 t_{on} 或 τ_{on} 表示	
9	脉冲间隔	t_o	脉冲间隔简称脉间,也称脉冲停歇时间。相邻两个电压脉冲之间的时间(见图 0-2),单位为 μs 。日本及英美常用 t_{off} 或 τ_{off} 表示	
10	放电时间	t_c	是指工作液介质击穿后放电间隙中流过放电电流的时间,亦即电流脉宽,它比电压脉宽稍小,差一击穿延时 t_d ,单位为 μs	
11	击穿延时	t_d	从间隙两端施加脉冲电压到发生放电(既建立起电流之前)之间的时间(见图 0-2),单位为 μs	
12	脉冲周期	t_p	是指一个电压脉冲开始到下一个电压脉冲开始之间的时间(见图 0-2),单位为 μs	$t_p = t_i + t_o$
13	脉冲频率	f_p	是指单位时间(1s)内电源发出的电压脉冲的个数,单位为 Hz	$f_p = \frac{1}{t_p}$
14	脉宽系数	τ	是指脉冲宽度与脉冲周期之比	$\tau = \frac{t_i}{t_p} = \frac{t_i}{t_i + t_o}$
15	占空比	ψ	是指脉冲宽度与脉冲间隔之比	$\psi = \frac{t_i}{t_o}$
16	开路电压	u_i	是指间隙开路时电极间的最高电压,有时等于电源的直流电压,单位为 V。又称空载电压或峰值电压	
17	加工电压	U	是指加工时电压表上指示的放电间隙两端的平均电压,单位为 V。又称间隙平均电压	
18	加工电流	I	加工时电流表上指示的流过放电间隙的平均电流,单位为 A	
19	短路电流	I_s	是指放电间隙短路时(或人为短路时)电流表上指示的平均电流,单位为 A	
20	峰值电流	$\hat{i}_c$	是指间隙火花放电时脉冲电流的最大值(瞬时),见图 0-2,单位为 A。日本及英美常用 I_p	
21	短路峰值电流	$\hat{i}_s$	是指间隙短路时脉冲电流的最大值(瞬时),见图 0-2,单位为 A	$\hat{i}_s, \tau = I_s$
22	伺服参考电压	S_v	是指电火花加工伺服进给时,事先设置的一个参考电压 S_v (0~50V)。用它与加工时的平均间隙电压 U 作比较,如 $S_v > U$,则主轴向上回退,反之则向下进给。因此, S_v 愈大,则平均放电间隙愈大,反之则愈小	
23	有效脉冲频率	f_c	是指每秒钟发生的有效火花放电的次数。又称工作(火花)脉冲频率	

续表

序号	名词术语	符号	定 义	表示方法
24	脉冲利用率	λ	是指有效脉冲频率与脉冲频率之比,亦即单位时间内有效火花脉冲个数与该单位时间内的总脉冲个数之比。又称脉冲个数利用率	$\lambda = \frac{f_c}{f_p}$
25	相对放电时间率	φ	是指火花放电时间与脉冲宽度之比。又称相对脉冲时间利用率或放电时间比	$\varphi = \frac{t_c}{t_i}$
26	低速走丝线切割	WEDM-LS	是指电极丝低速(低于 2.5m/s)单向运动的电火花线切割加工。一般走丝速度为 0.2~15m/min	
27	高速走丝线切割	WEDM-HS	是指电极丝高速(高于 2.5m/s)往复运动的电火花线切割加工。一般走丝速度为 7~11m/s	
28	走丝速度	V_s	是指电极丝在加工过程中沿其自身轴线运动的线速度	
29	多次切割		是指同一加工面用两次或两次以上线切割加工的精密加工方法	
30	锥度切割		是指切割相同或不同斜度和上下具有相似或不相似横截面零件的线切割加工方法	
31	直壁切割		是指电极丝与工件垂直切割的方法	
32	加工轮廓		是指被加工零件的尺寸和形状的几何参数	
33	加工轨迹		程序是按照加工轮廓的几何参数(电极丝的几何中心)进行编制的,而在加工时,电极丝必须偏离所要加工的轮廓,电极丝实际走的轨迹即为加工轨迹	
34	偏移量		在加工时,电极丝必须偏离加工轮廓,预留出电极丝半径、放电间隙及后面修整所需余量,加工轨迹和加工轮廓之间的法向尺寸差值称为偏移量。沿着轨迹方向电极丝向右偏为右偏移,反之,为左偏移(见图 0-3)	
35	镜像加工		是指加工轮廓与 X 轴或 Y 轴或 XY 轴完全对称,简化程序编制的加工方法	
36	主程序面		切割带有镜像图形、且带有锥度的工件时,用于编制程序采用的参考基准面	

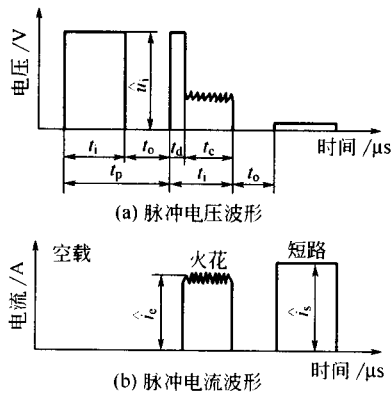


图 0-2 脉冲参数与脉冲电压、电流波形

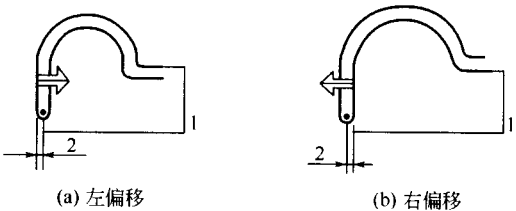


图 0-3 电极丝偏移量示意图

0.5 电火花加工工艺方法的分类

按工具电极和工件相对运动的方式和用途的不同,电火花加工工艺大致可分为电火花成

形加工、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。前五类属电火花成形、尺寸加工，是用于改变零件形状或尺寸的加工方法；后者则属于表面加工方法，用于改善或改变零件表面性质。电火花成形加工和电火花线切割加工应用最为广泛。表 0-2 所列为总的分类情况及各类加工方法的主要特点和用途。

表 0-2 电火花加工工艺方法分类

类别	工艺方法	特 点	用 途	备 注
1	电火花成形加工	1. 工具和工件间主要只有一个相对的伺服进给运动 2. 工具为成形电极，与被加工表面有相同的截面和相应的形状	1. 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 2. 型腔加工：加工各类型腔模及各种复杂的型腔零件	约占电火花机床总数的 30%，典型机床有 D7140、B35 等电火花穿孔成形机床
2	电火花线切割加工	1. 工具电极为顺电极丝轴线垂直移动着的线状电极 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、DK7740 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%，典型机床有 JN-2、JN-8 内外螺纹加工机床
5	电火花高速小孔加工	1. 采用细管(>φ0.3mm)电极，管内冲入高压水基工作液 2. 细管电极旋转 3. 穿孔速度很高(30~60mm/min)	1. 线切割穿丝预孔 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 D703A 电火花高速小孔机加工机床
6	电火花表面强化、刻字	1. 工具在工件表面上振动，在空气中放火花 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