

DIANHUOHUA JIAGONG JISHU

电火花加工技术

刘 哲◎主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电火花加工技术

主编 刘 哲

参编 程仲文 范 昕 杨宪章

主审 龚 俊

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统地介绍了电火花成形加工及电火花线切割加工的技术基础、加工机床、加工工艺及编程方法。全书以拓宽基础、注重应用、提高能力为宗旨,以典型实例为导向,突出强化操作技能。

本书由电火花加工技术基础,电火花成形加工机床、加工工艺及编程,电火花线切割加工机床、加工工艺及编程三部分组成。全书共分9章,内容包括:概论,电火花加工技术基础,电火花成形加工机床,电火花成形加工工艺,数控电火花成形加工编程,电火花线切割加工机床,电火花线切割加工工艺,数控电火花线切割编程,其他电火花加工。

本书不仅可以作为高职高专机制类、模具类、数控类专业教学用书,以及电火花加工机床操作工的职业培训教材,还可以作为从事模具制造等行业的工程技术人员和技术工人的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电火花加工技术/刘哲主编. —北京:国防工业出版社, 2010.8

ISBN 978-7-118-07040-8

I. ①电… II. ①刘… III. ①电火花加工
IV. ①TG661

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18 字数 412 千字

2010 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 35.00 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

随着我国机械制造业的快速发展,电火花加工技术在民用和国防工业中的应用越来越多,特别是数控电火花成形加工机床和数控电火花线切割加工机床不仅在模具制造业中广泛应用,而且在一般机械加工企业中逐渐普及。电火花加工技术是实践性与理论性都很强的一门技术,用户既要掌握电火花工艺方面的知识,又要充分熟悉电火花机床的功能与编程知识。目前,我国的电火花机床操作者中,大多只经过短期培训,缺乏系统的理论知识,只能进行简单加工的程序编制,严重影响了加工设备的高效使用。为适应现代化加工技术的要求,电火花机床操作者,要全面掌握所需的专业知识;从事电火花加工的技术人员也需要提高自身的技术水平;企业也急需一批电火花加工方面懂工艺、会编程,能够熟练操作和维护机床的应用型技术人才。

针对上述现状,作者对高职高专目前常见的电火花加工技术方面的教材进行了认真研究,并对国内数十家企业进行了调研,根据电火花加工技术人才知识结构的 市场需求,从培养学生必备的基础知识和操作技能出发,汇集多年的教学和在企业的实践经验,编写了本书。

本书由电火花加工技术基础,电火花成形加工机床、加工工艺及编程,电火花线切割加工机床、加工工艺及编程三部分组成。学生在学习本课程前,已学过“机械制造技术”和“数控原理及其应用”课程,并已进行过金工实习或生产实习,对机械加工工艺和数控机床已有初步了解。本书第1章和第2章介绍电火花加工技术的产生、发展、特点、用途、加工原理、加工的基本规律及电火花加工的工作液、脉冲电源和自动进给调节系统,使学生对电火花加工技术有一个基本的了解;第3章至第5章针对电火花成形加工从设备、工艺及编程等方面进行系统介绍,并通过典型实例使学生掌握电火花成形加工的工艺方法和编程、操作技能;第6章至第8章针对电火花线切割加工从设备(分快走丝和慢走丝)、工艺及编程等方面进行系统介绍,也通过典型实例使学生掌握电火花线切割加工(快走丝和慢走丝)的工艺方法和编程、操作技能;第9章介绍不同于电火花成形和线切割加工的其他电火花加工方法,使学生对电火花加工技术有更全面、系统的了解。为了便于自学及巩固所学内容,各章末附有习题与思考题。

本书以“够用为度,强化应用”为原则,以技能素质培养为根本目标,注意基本知识、基本理论的阐述,注重理论联系实际,突出系统性、实用性和先进性,列举了一定数量的典型加工实例,进一步强化实践操作技能。

参加本书编写的有兰州工业高等专科学校刘哲、程仲文、范昕和甘肃畜牧工程职业技术学院杨宪章。其中第1章、第2章由范昕编写，第3章、第9章由杨宪章编写，第4章、第5章由程仲文编写，第6~8章由刘哲编写。本书由刘哲主编并负责统稿和定稿，兰州理工大学龚俊教授担任主审。

本书编写时参阅了大量相关教材、资料和文献，部分资料来源于网络，还得到了单位领导和同事的支持与帮助，在此谨致谢意！

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者和专家批评指正。

编者

2010年6月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 电火花加工的产生及发展	1
1.2 电火花加工的特点和用途	3
1.3 电火花加工的分类	5
1.4 电火花加工常用术语	6
习题与思考题	10
第 2 章 电火花加工技术基础	11
2.1 电火花加工原理	11
2.1.1 电火花加工原理及应具备的条件	11
2.1.2 电火花加工的机理	12
2.2 电火花加工的基本规律	15
2.3 工作液	22
2.3.1 工作液的作用	22
2.3.2 工作液的主要性能	22
2.3.3 工作液的种类	23
2.3.4 工作液的使用要点	23
2.4 脉冲电源	25
2.4.1 对脉冲电源的要求及其分类	25
2.4.2 脉冲电源的种类	26
2.5 自动进给调节系统	31
2.5.1 动进给调节系统的作用、技术要求和类型	31
2.5.2 自动进给调节系统的基本组成部分	34
习题与思考题	36
第 3 章 电火花成形加工机床	37
3.1 电火花成形加工原理	37
3.2 电火花成形加工特点及应用	38
3.3 电火花成形加工机床的分类及结构形式	38
3.3.1 电火花成形加工机床的分类	38
3.3.2 电火花成形加工机床的结构形式	39
3.4 电火花成形加工机床的型号与技术参数	41
3.4.1 电火花成形加工机床的型号	41

3.4.2	电火花成形加工机床的主要技术参数	41
3.5	电火花成形加工机床的组成部分及其作用	43
3.5.1	机床本体	44
3.5.2	脉冲电源	45
3.5.3	自动控制系统	47
3.5.4	工作液循环过滤系统	56
3.5.5	机床附件	57
	习题与思考题	65
第4章	电火花成形加工工艺	66
4.1	电火花成形加工的主要工艺指标	66
4.2	影响电火花成形加工工艺指标的因素	70
4.2.1	影响加工速度的主要因素	70
4.2.2	影响电极损耗的主要因素	74
4.2.3	影响加工精度的主要因素	78
4.2.4	影响加工表面质量的主要因素	80
4.3	电火花成形加工的工艺方法	82
4.3.1	单电极直接成形法	82
4.3.2	单电极平动成形法	83
4.3.3	手动侧壁修光法	83
4.3.4	多电极更换成形法	84
4.3.5	分解电极成形法	85
4.3.6	数控摇动成形法	86
4.3.7	数控多轴联动成形法	88
4.4	电火花成形加工工艺	88
4.4.1	零件图工艺分析及加工方法选择	88
4.4.2	电极的准备	89
4.4.3	工件的准备	98
4.4.4	电极与工件的装夹定位	99
4.4.5	加工规准的选择、转换, 工艺余量的确定	108
4.4.6	工作液的处理	115
4.4.7	加工及检验	117
4.5	电火花成形加工实例	118
	习题与思考题	124
第5章	数控电火花成形加工编程	125
5.1	数控电火花成形加工编程基础	125
5.1.1	机床坐标系与工件坐标系	125
5.1.2	程序结构	127

5.2 数控电火花成形加工常用编程代码	128
5.2.1 G 代码	128
5.2.2 M 代码	138
5.2.3 T 代码	140
5.2.4 H 代码	140
5.2.5 加工参数代码	140
5.2.6 关于运算	142
5.2.7 R 转角功能	142
5.2.8 用户宏指令功能	143
5.2.9 平动加工	143
5.3 数控电火花成形加工编程技巧	144
5.4 电火花成形加工编程实例	146
习题与思考题	153
第 6 章 火花线切割加工机床	154
6.1 电火花线切割加工原理	154
6.2 电火花线切割加工特点及应用	155
6.2.1 电火花线切割加工的特点	155
6.2.2 电火花线切割加工的应用范围	156
6.3 电火花线切割机床的分类	157
6.4 电火花线切割机床的型号及技术参数	159
6.4.1 电火花线切割机床的型号	159
6.4.2 电火花线切割机床的主要技术参数	159
6.5 电火花线切割机床的组成部分及其作用	162
6.5.1 床身	163
6.5.2 坐标工作台	164
6.5.3 快走丝机构	167
6.5.4 慢走丝系统	171
6.5.5 锥度切割装置	176
6.5.6 控制系统	177
6.5.7 脉冲电源	181
6.5.8 工作液系统	183
习题与思考题	185
第 7 章 电火花线切割加工工艺	186
7.1 电火花线切割加工的主要工艺指标	186
7.2 影响电火花线切割工艺指标的因素	188
7.2.1 脉冲电源参数对工艺指标的影响	188

7.2.2	机械传动精度对工艺指标的影响	190
7.2.3	电极丝对工艺指标的影响	192
7.2.4	工作液对工艺指标的影响	195
7.2.5	工件材料及厚度对工艺指标的影响	197
7.2.6	预置进给速度对工艺指标的影响	198
7.2.7	各因素对加工工艺指标影响的相互关系	198
7.3	电火花线切割加工工艺及运用	200
7.3.1	零件图的工艺分析	200
7.3.2	工艺准备	201
7.3.3	工件的装夹和位置校正	207
7.3.4	电极丝的穿丝及找正	210
7.3.5	加工工艺参数的选择	215
7.3.6	加工程序编制	216
7.3.7	工件的加工及检验	219
7.4	锥度线切割加工	220
7.4.1	单导轮移动	220
7.4.2	双导向移动	222
7.5	线切割机床的扩展运用	223
7.5.1	用普通线切割机床加工带斜度凹模的简易方法	223
7.5.2	用两轴控制加工三维曲面	224
7.6	电火花线切割加工实例	226
	习题与思考题	235
第 8 章	数控电火花线切割编程	237
8.1	3B 代码编程	237
8.1.1	3B 格式	237
8.1.2	编程实例	240
8.2	4B 代码编程	242
8.2.1	4B 格式	242
8.2.2	编程实例	243
8.3	ISO 代码编程	244
8.3.1	程序结构	244
8.3.2	G 代码	246
8.3.3	M 代码	253
8.3.4	T 代码	254
8.3.5	编程实例	254
8.4	线切割自动编程	257
	习题与思考题	258

第 9 章 其他电火花加工	259
9.1 电火花加工小孔	259
9.1.1 小孔的电火花加工	259
9.1.2 小深孔的高速电火花加工	260
9.1.3 异形小孔的电火花加工	261
9.1.4 微孔的电火花加工	263
9.2 电火花磨削	264
9.3 共轭回转电火花加工及双轴回转电火花加工	266
9.3.1 共轭回转电火花加工	266
9.3.2 双轴回转展成法电火花加工精密凹凸球面、平面	269
9.4 电火花表面强化及刻字	271
9.5 半导体和非导体的电火花加工	273
9.6 气体介质中电火花加工	275
9.7 混粉电火花镜面加工技术	275
9.8 电火花铣削加工技术	276
习题与思考题	277
参考文献	278

第1章 概 论

电火花加工 (Electro Spark Machining) 又称放电加工 (Electrical Discharge Machining, EDM), 是一种直接利用电能和热能进行加工的新工艺。电火花加工与金属切削加工的原理完全不同, 在加工过程中, 工具与工件并不接触, 而是靠工具和工件之间不断地脉冲性火花放电, 产生局部、瞬时的高温, 把金属材料逐步蚀除掉。因放电过程中可见到火花, 故我国称为电火花加工, 日本和欧美国家通常称为放电加工, 俄罗斯也称为电蚀加工 (Electroerosion Machining)。

传统机械加工是通过机床部件的相对运动, 用比工件材料更硬的刀具去切除工件上多余的部分, 以得到成品零件。但随着工业生产的发展和科学技术的不断进步, 具有高熔点、高硬度、高强度、高脆性、高黏性、高韧性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, 常会产生难以加工或无法加工的现象。电火花加工方法能够适应生产发展的需要, 并在应用中显示出很多优异的性能, 因此得到了迅速发展和日益广泛的应用。本章主要介绍电火花加工的产生及发展、电火花加工的特点和用途、电火花加工的分类及电火花加工常用术语。

1.1 电火花加工的产生及发展

1943 年, 苏联科学家拉扎连珂夫妇在研究开关触点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以使局部的金属熔化、气化而被蚀除掉, 从而开创和发明了电火花加工方法, 在此后不到十年的时间里, 世界上工业比较发达的国家都相继研制成功了电火花穿孔机床 (基本上都是采用 RC 弛张式脉冲电源及电磁悬浮式间隙自动调节器)。

20 世纪 50 年代初, 出现电子管脉冲电源和闸流管脉冲电源, 以及伺服电机间隙自动调节器。1955 年开始, 根据加工中的热现象进行脉冲电源设计。次年, 出现了电脉冲机床 (其电源为脉冲发电机)。线切割放电机电也于 1960 年发明于苏联。50 年代末期, 还广泛研究采用电—液控制间隙自动调节器。60 年代初, 出现了晶体管脉冲电源和晶闸管脉冲电源。60 年代中期, 研制成功光电跟踪电火花线切割机床。1968 年, 研制了电火花加工的适应控制系统。1972 年, 国际上首次展出了计算机数字控制 (CNC) 电火花线切割机床。1973 年, 又展出了直接数字控制 (DNC) 电火花线切割机床。此后 CNC 电火花成形机床研制成功并进入发展阶段。

20 世纪 80 年代以来, 随着计算机和数控技术的发展, 更加推动了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发展。电火花成形加工设备及工艺实现了数控化和适应控制化。瑞士、日本等国的电火花机床生产商依靠其精密机械制造的雄厚实力, 通过两轴、三轴或多轴的数控系统, 解决了工艺技术中的定位精度问题; 通过自动工具交换系统, 简化了工具电极和成形工艺方法; 通过数控

或机械式的多方向伺服平动、摇动方案，优化了加工性能；通过高性能、多参数的适应控制、模糊控制，大大推动了加工无人化进程。在电火花线切割领域，广泛采用微型计算机系统对加工过程实行控制，数控编程采用计算机自动编程系统。建立在对电源、机械精度、加工精度、工作液影响等全面总结而确定的数学模型之上的适应控制、模糊控制技术，优化了加工性能。

智能控制技术的出现把数控电火花加工推向了新的发展高度。专家系统是数控电火花加工机床智能化的重要体现，它的智能化体现在精确的检测技术和模糊控制技术两方面。专家系统采用人机对话方式，根据加工的条件、要求，合理输入设定值后便能自动创建加工程序，选用最佳加工条件组合来进行加工，在线自动监测、调整加工过程，实现加工过程的最优化控制。

目前数控电火花加工在伺服系统和脉冲电源的改进、加工新工艺的应用等方面取得了重大成果，大大提高了数控电火花加工的质量、加工效率。伺服系统方面日前开发出的直线电机驱动的数控电火花加工设备，响应度高，精密定位可实现 $0.1\mu\text{m}$ 当量的控制，进给平滑无振动，提高了机械系统的稳定性，避免了动作滞后，使加工性能获得明显改善；数控电火花成形加工机床主轴采用直线电机的高速抬刀技术，使加工屑的排出性能进一步提高，进而提高了加工性能，实现免冲液加工；直线电机驱动的机床，由于高响应性伺服产生的良好跟踪性，能把加工深度误差控制在最小限度，达到高精度加工。高性能脉冲电源对高速、高品位的加工发挥着较大贡献。超精加工电源具有极小的单个脉冲能量（纳秒级脉冲宽度），用于电火花精密、微细加工中，在电路上通过其他措施解决了加工速度慢、电极损耗大与低脉宽的工艺矛盾。智能型自适应电源采用微机数字化控制技术，自选加工规准，自适应调节加工中相关脉冲参数，从而达到高生产率的最佳稳定放电状态。电火花加工工艺方面取得的重大成果主要体现在：快速装夹的标准化夹具能够保证极高的重复定位精度且不降低加工效率；混粉加工方法能够实现镜面加工效果，使精密复杂型腔模具镜面加工成为现实；摇动加工方法保证了高效率下放电间隙的一致性、维持高的稳定加工性，获得侧面与底面更均匀的表面粗糙度，更容易控制加工尺寸，实现了高精度、高质量的加工；多轴联动加工方法很方便地实现了传统电火花加工机床难以加工的复杂精密零件的切割和复杂型腔模具或微小零件的加工，如三维螺旋面、微细齿轮、微细齿条等。

当今模具工业的迅速发展，推动了模具制造技术的进步。电火花加工作为模具制造技术的一个重要分支，被赋予越来越高的加工要求。同时在数控加工技术发展新形势的影响下，促使电火花加工技术朝着更深层次、更高水平的数控化和精密化、自动化、智能化、高效化等方向发展。如今新型数控电火花机床层出不穷，如瑞士阿奇、瑞士夏米尔、日本沙迪克、日本牧野、日本三菱等机床在这方面技术都有了全面的提高，线切割加工精度在 $\pm 2\mu\text{m}$ 以内，表面粗糙度 $Ra < 0.2\mu\text{m}$ ，一般都能使用直径小于 $\phi 0.03\text{ mm}$ 的电极丝进行微精加工；电火花成形尺寸加工精度要求可达 $\pm (2\sim 3)\mu\text{m}$ 、底面拐角 R 值可小于 0.03mm ，最佳加工表面粗糙度 $Ra < 0.3\mu\text{m}$ 。

我国自1951年开始电火花加工的试验研究工作。1959年至1960年间先后派了许多技术人员到苏联进修电加工技术，此后成立了多家电加工研究所、研究室。自1960年后，我国的电加工技术从引进、仿制迅速走上独立、自行研究开发的道路。20世纪60年代初，

中国科学院电加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。1963年上海电表厂张维良工程师创新性地研制出我国独创的往复快走丝线切割机床，获得国家发明创造奖。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形控制，进一步提高了加工精度。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。同时，自行设计的电火花成形加工设备开始成批生产。70年代中期，带有间隙偏移、齿隙补偿、切割斜度等功能的电火花线切割加工设备多种多样，并不断完善。编程方法不断简化，自动编程已经实现，小型电子计算机控制和群控也在试用。电火花成形加工方面，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在电火花成形加工设备上已开始应用。

20世纪80年代，改革开放以后，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。90年代以来，计算机技术的飞速发展，更加推动电火花加工技术的进步。快走丝电火花线切割机床普遍采用微机控制，实现了人机对话、自动编程、全自动控制、大斜度加工，加工工艺指标进一步稳步提高。同时，慢走丝电火花线切割机床除了大量引进瑞士、日本等国的机床之外，国产慢走丝线切割加工机床质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、精密模具和零件的加工，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专家系统、人工神经网络技术、模糊控制技术、仿真技术等，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。总之，电火花加工技术将以高效率、高精度、低损耗、微细化、自动化、安全、环保等为目标，在现代制造业中不断发展。

1.2 电火花加工的特点和用途

1. 电火花加工的优点

(1) 适合于难切削材料的加工。电火花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取决于材料的导电性及其热学特性，如熔点、沸点、比热容、热导率、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，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。

(2) 可以加工特殊及复杂形状的表面和零件。电火花加工中工具电极和工件不直接接触，没有机械加工宏观的切削力，因此适宜加工低刚度工件及作微细加工。由于可以简单地将工具电极的现状复制到工件上，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) 易于实现加工过程自动化。由于直接利用电能加工，而电能、电参数易于数字控制，因此电火花加工便于实现加工过程的自动化、智能化控制和无人化操作。

(4) 可以改进加工零件的结构设计，改善其结构的工艺性。例如采用电火花加工，可以将拼镶结构的硬质合金冲模改为整体式结构，从而减少了模具加工工时和装配工时，延长了模具使用寿命。又如采用电火花加工喷气发动机中的叶轮，也可以将拼镶、焊接结构式叶轮改为整体式叶轮，既大大提高了工作可靠性，又大大减少了体积和质量。

2. 电火花加工的局限性

(1) 主要用于加工金属等导电材料，但在一定条件下也可以加工半导体和非导体材料。

(2) 一般加工速度较慢。安排工艺时，通常采用切削加工先去除大部分余量，然后再进行电火花加工，以求提高生产效率。但已有研究成果表明，采用特殊水基不燃性工作液进行电火花加工，其粗加工生产率可以高于切削加工。

(3) 存在电极损耗。由于电火花加工靠电、热来蚀除金属，电极也会遭受损耗，并且电极损耗多集中在尖角或底面，影响成形精度。现在，粗加工时电极相对损耗比可以降至 0.1% 以下，在中、精加工时能将损耗比降至 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等于加工间隙（通常为 0.02mm~0.3mm），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，可以清棱、清角地加工出方孔、窄槽的侧壁和底面。

3. 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) 加工各种复杂形状型孔和型腔工件，特别适宜于加工弱刚度、薄壁工件的复杂外形，及各种型面的型腔工件、弯曲孔等。可以加工从数微米的孔、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) 加工各种成形刀、样板、工具、量具、螺纹等成形零件。

(5) 工件的磨削，包括小孔、深孔、内圆、外圆、平面等的磨削和成形磨削。

(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，跑和齿轮啮合件等。

目前，电火花加工技术已广泛用于航天、航空、机械（特别是模具制造）、电子、原子能、计算机、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。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。

1.3 电火花加工的分类

根据工具电极和工件相对运动的方式和主要加工用途的不同，电火花加工大致可分为电火花成形加工、电火花线切割加工、电火花磨削和镗削、电火花高速小孔加工、电火花同步共轭回转加工、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；后者属表面加工方法，用于改善或改变零件表面性质。其中，电火花成形加工和电火花线切割加工应用最为广泛，约占电火花加工生产的 90%。表 1-1 为电火花加工分类及各类加工方法的主要特点和用途。

表 1-1 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. 工具和工件之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现状	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 D7140、B3 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方向移动着的线状电极； 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	电火花磨削和镗削	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. 穿孔速度较高(30mm/min~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 电火花高速小孔加工机床
5	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的 1%，典型机床有 JN-2、JN-8 内外螺纹加工机床
6	电火花表面强化与刻字	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	占电火花机床总数的 1%~2%，典型设备有 D9105 电火花强化机等

1.4 电火花加工常用术语

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，现摘录如下。

1. 放电加工

在一定的加工介质中，通过两极（工具电极和工件电极）之间的火花放电或短电弧放电的电蚀作用来对材料进行加工的方法，简称 EDM。

2. 电火花加工

当采用电火花脉冲放电形式来进行加工时，称为电火花加工。

3. 工具电极

电火花加工用的工具，因其是火花放电时电极之一，故称为工具电极，简称工具或电极，如图 1-1 所示。

4. 放电间隙

指放电发生时工具电极和工件之间产生火花放电的距离。在加工过程中，则称为加工间隙 S ，一般为 $0.01\text{mm} \sim 0.1\text{mm}$ ，粗加工时间隙较大，精加工时则较小。加工间隙又可分为端面间隙 S_F 和侧面间隙 S_L ，如图 1-1 所示。对于冲模等穿孔加工来说，又可分为入口间隙 S_{in} 和出口间隙 S_{out} ，一般情况下 S_F 稍小于 S_L ， S_{in} 稍小于 S_{out} 。

5. 脉冲电源

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。

6. 脉冲放电

脉冲性的放电，在时间上是连续的，在空间上放电点是分散的。它是电火花加工常采用的放电形式。

7. 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放电间隙。

8. 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。

9. 电蚀产物

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。

10. 二次放电

是指在已加工面上，由于加工屑等的介入而进行再次放电的现象。

11. 电参数电规准

电火花加工过程中的脉冲宽度、脉冲间隔、峰值电压、峰值电流等脉冲参数称为电参数。电火花加工时选用的脉冲宽度、脉冲间隔、峰值电压、峰值电流等脉冲参数，称

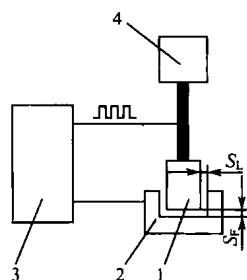


图 1-1 电火花加工示意图

1—工具电极；2—工件；

3—脉冲电源；4—伺服进给系统。

为电规准，这些脉冲参数在每次加工时必须事先选定。

12. 脉冲宽度 $t_i(\mu s)$

脉冲宽度简称脉宽，日本及英、美常用 t_{on} 或 τ_{on} 表示。它是加到工具和工件上放电间隙两端的电压脉冲的持续时间，如图 1-2 所示。为了防止电弧烧伤，电火花加工只能用断断续续的脉冲电压波。一般来说，脉宽较大时加工稳定性好，粗加工时可用较大的脉宽， $t_i > 80\mu s$ ；精加工时只能用较小的脉宽， $t_i < 50\mu s$ 。

13. 脉冲间隔 $t_o(\mu s)$

脉冲间隔简称脉间，也称脉冲停歇时间，日本及英、美常用 t_{off} 或 τ_{off} 表示。它是相邻两个电压脉冲之间的间隔时间，如图 1-2 所示。脉冲间隔过短，放电间隙来不及消电离恢复绝缘，容易产生电弧放电，烧伤工具和工件；脉冲间隔选得过长，将降低加工生产率。加工面积、加工深度较大时，脉冲间隔也应稍大。

14. 放电时间 $t_e(\mu s)$

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，二者相差一个击穿延时 t_d ，如图 1-2 所示。 t_i 和 t_e 对电火花加工的生产率、表面粗糙度和电极损耗有很大影响，但实际起作用的是电流脉宽 t_e 。

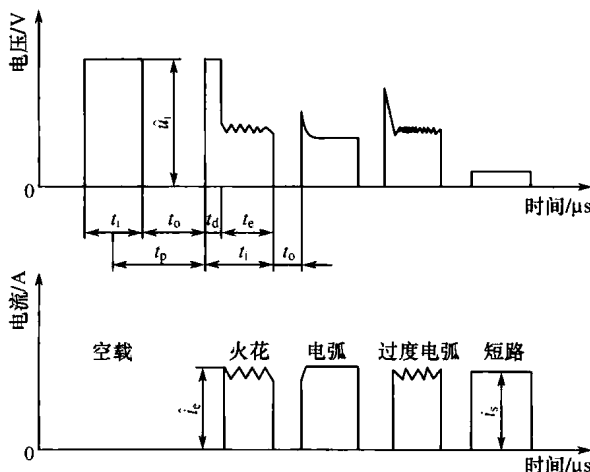


图 1-2 脉冲参数与脉冲电压、电流波形

15. 击穿延时 $t_d(\mu s)$

从间隙两端施加脉冲电压后，一般均要经过一小段延续时间 t_d ，工作液介质才能概率性地被击穿放电，这一小段时间 t_d 称为击穿延时，如图 1-2 所示。它与平均放电间隙大小有关，工具欠进给时，平均放电间隙变大，平均击穿延时 t_d 就大；反之，工具过进给时，放电间隙变小， t_d 也就小。

16. 脉冲周期 $t_p(\mu s)$

指一个电压脉冲开始到下一个电压脉冲开始之间的时间。它等于脉冲宽度 t_i 与脉冲间隔 t_o 之和，即 $t_p = t_i + t_o$ ，如图 1-2 所示。

17. 脉冲频率 $f_p(\text{Hz})$

指单位时间 (1s) 内电源发出的电压脉冲的个数。它与脉冲周期 t_p 互为倒数，即 $f_p = 1/t_p$ 。