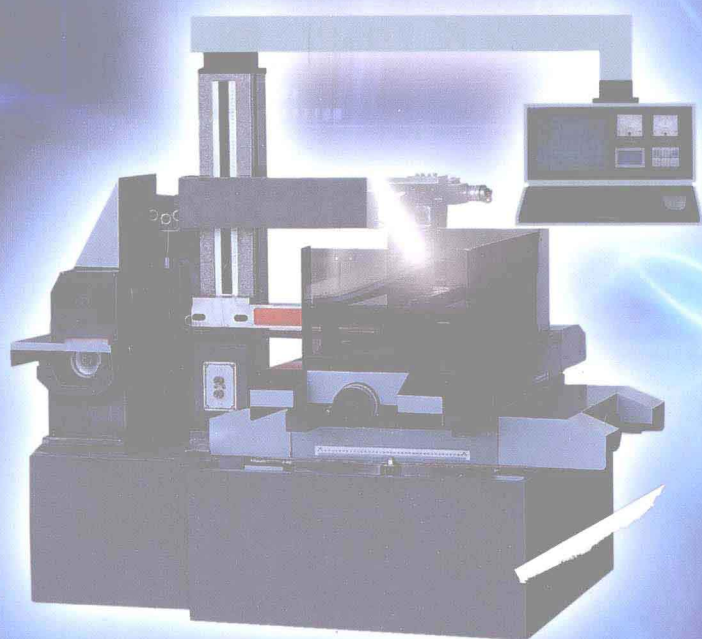


SHUKONG DIANHUOHUA
JIAGONG GONGYI YU JIQIAO

数控电火花 加工工艺与技巧

周 晖 编著

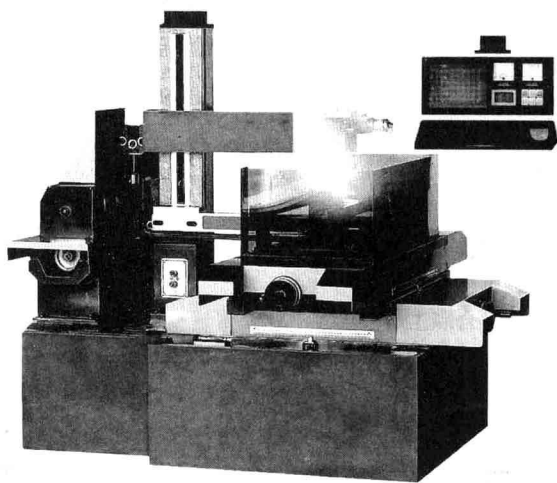


化学工业出版社

SHUKONG DIANHUOHUA
JIAGONG GONGYI YU JIQIAO

数控电火花 加工工艺与技巧

周 晖 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

数控电火花加工工艺与技巧/周晖编著. —北京:
化学工业出版社, 2008.10
ISBN 978-7-122-03680-3

I. 数… II. 周… III. 数控机床-电火花加工
IV. TG661

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 138796 号

责任编辑: 王 烨
责任校对: 凌亚男

文字编辑: 陈 喆
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16½ 字数 431 千字 2009 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

化学工业出版社 数控专业图书

国家技能型紧缺人才培养教程——数控工艺与编程技术 (含 1CD)	48.00
国家技能型紧缺人才培养教程——数控车削加工实训及案例解析	39.00
国家技能型紧缺人才培养教程——数控铣削加工实训及案例解析	39.00
FANUC 系统数控车床培训教程 (含 1CD)	42.00
FANUC 系统数控铣床和加工中心培训教程 (含 1CD)	42.00
数控车床技能鉴定考点分析和试题集萃	28.00
数控铣床/加工中心技能鉴定考点分析和试题集萃	30.00
FANUC 数控系统用户宏程序与编程技巧 (原著第二版)	38.00
数控编程手册 (原著第二版)	96.00
数控加工与编程 (原著第二版)	45.00
数控机床技术工人培训读本——数控铣床 (第二版)	32.00
数控机床技术工人培训读本——数控加工中心 (第二版)	28.00
数控机床技术工人培训读本——数控电加工机床 (第二版)	32.00
数控铣削编程与加工	25.00
数控铣削变量编程实例教程	16.00
数控机床加工实训丛书——数控加工中心	36.00
数控机床加工实训丛书——数控车床	38.00
数控机床加工实训丛书——数控铣床	32.00
现代数控机床结构及设计丛书——数控铣床设计	35.00
现代数控机床结构及设计丛书——数控车床设计	45.00
现代数控机床结构及设计丛书——数控系统	36.00
现代数控机床结构及设计丛书——数控机床系统设计	36.00
现代数控机床结构及设计丛书——数控加工中心设计	45.00
实用数控技术丛书——数控技术英语	24.00
实用数控技术丛书——数控加工工艺	28.00
实用数控技术丛书——数控编程技术	30.00
实用数控技术丛书——数控原理与数控机床	30.00
实用数控技术丛书——CAD/CAM 与数控自动编程技术	30.00
实用数控技术丛书——数控加工综合实训	33.00
数控机床编程与操作实训 (第二版)	41.00
数控机床故障维修	36.00
虚拟数控技术及应用 (附光盘)	42.00
数控技术与制造自动化	28.00
数控加工生产实例	29.00
加工中心编程实例	32.00

以上图书由**化学工业出版社 机械·电气分社**出版。如要以上图书的内容简介和详细目录,或者更多的专业图书信息,请登录 www.cip.com.cn。如要出版新著,请与编辑联系。

地址:北京市东城区青年湖南街 13 号 (100011)

购书咨询:010-64518888 (传真:010-64519686) 编辑:010-64519272; wangye@cip.com.cn

前言

随着电火花加工技术的快速发展，电火花加工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机和数控电火花线切割机床在模具制造业中有着广泛应用。在我国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，只能进行简单加工程序的编制，严重影响了加工设备的使用。电火花加工是实践性与理论性都很强的一门技术，因此，用户既要掌握电火花工艺方面的知识，又要充分熟悉数控电火花机床的功能与编程、操作。为适应现代化加工技术的要求，电火花机床操作者需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己的技术水平，成为企业急需的应用型人才。

为此，笔者根据多年从事教学和在企业的实践经验，编写了本书。本书以“够用为度、强化应用”为原则，将理论知识与实践操作有机地结合起来，列举了大量加工实例，突出实用性。希望通过本书的学习，能让读者真正掌握数控电火花加工的操作流程，将所学知识在实际生产中充分发挥作用。

本书在编写过程中，得到了南昌大学实训中心实训教师的支持与帮助，江西江铃股份有限公司模具加工中心工程师热心提供参考资料，江西蓝天学院魏晖、白杨，江西洪都集团公司一些从事电加工一线的技师对书稿也提出了不少宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不足之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2008年8月

目 录

第 1 章 电火花加工基础	1
1.1 电火花加工的特点和应用	1
1.2 电火花加工的分类	2
1.3 电火花加工常用术语	3
第 2 章 电火花成形加工	9
2.1 电火花成形加工原理	9
2.1.1 电火花成形加工原理及应具备的条件	9
2.1.2 电火花成形加工的机理	10
2.1.3 电火花加工的基本规律	13
2.2 电火花成形加工机床	20
2.2.1 电火花成形加工机床的类型与性能	20
2.2.2 电火花成形加工机床脉冲电源	21
2.2.3 电火花成形加工机床自动控制系统	27
2.2.4 电火花成形加工机床工作液循环过滤系统	31
2.2.5 电火花成形加工机床附件	32
2.3 电火花成形加工的基本工艺规律	36
2.3.1 影响加工速度的主要因素	36
2.3.2 影响电极损耗的主要因素	40
2.3.3 影响加工精度的主要因素	44
2.3.4 影响电火花加工表面质量的主要因素	47
2.4 电火花成形加工的工艺及运用	52
2.4.1 电火花成形加工的工艺方法	52
2.4.2 电火花成形加工的工艺	55
2.5 电火花成形加工实例及操作技巧	69
2.5.1 电火花成形加工实例	69
2.5.2 电火花成形加工中的操作技巧	117
2.5.3 电火花成形加工中的安全操作规程	132
第 3 章 电火花线切割加工	136
3.1 电火花线切割加工的原理、特点及应用	137
3.1.1 快走丝电火花线切割加工的原理	137
3.1.2 慢走丝电火花线切割加工的原理	138
3.1.3 电火花线切割加工的特点和应用	139
3.2 电火花线切割加工机床	140

3.2.1	电火花线切割加工机床的型号及参数标准	140
3.2.2	电火花线切割加工机床的结构组成	141
3.3	快走丝电火花线切割加工的基本工艺规律	143
3.3.1	加工工艺指标	143
3.3.2	加工基本工艺规律	143
3.4	慢走丝电火花线切割加工的基本工艺规律	150
3.4.1	加工工艺指标	150
3.4.2	加工基本工艺规律	153
3.5	电火花快走丝线切割加工工艺及运用	160
3.5.1	图纸的分析与方案确定	160
3.5.2	编制加工程序	162
3.5.3	工件的找正与加工	168
3.5.4	工件的检验	172
3.6	电火花慢走丝线切割加工工艺及运用	172
3.6.1	图纸的分析和工艺方法制定	172
3.6.2	编制加工程序	173
3.6.3	工件的找正与加工	174
3.7	电火花线切割加工实例及运用技巧	177
3.7.1	电火花线切割加工实例	177
3.7.2	电火花线切割加工中的操作技巧	214
第4章	高速电火花小孔加工	224
4.1	高速电火花小孔加工的原理	224
4.1.1	高速电火花小孔加工管状电极	224
4.1.2	高压冲液强迫排屑维持间隙正常介电状态	225
4.1.3	电极旋转移动避免电极烧伤	225
4.1.4	窄脉宽高功率脉冲提高单个脉冲能量	225
4.2	高速电火花小孔加工机床的构造	225
4.2.1	主轴、密封旋转系统和导向器	226
4.2.2	工作液高压供油系统	227
4.2.3	高速电火花小孔加工机床脉冲电源	228
4.2.4	高速电火花小孔加工机床自动控制系统	228
4.3	高速电火花小孔加工的一般加工工艺	229
4.3.1	工作电极	229
4.3.2	工件材料对加工精度和加工效率的影响	229
4.3.3	电极导向器和电极卡头的使用注意事项	230
4.3.4	工作液对高速电火花小孔加工的影响	230
4.3.5	高速电火花小孔加工的锥度和垂直度问题	230
4.4	高速电火花小孔加工应用及加工实例	231
4.4.1	密集孔加工	231
4.4.2	深型腔内孔加工	233
4.4.3	薄壁深孔加工	234

第5章 其他电火花加工及复合加工	236
5.1 电火花回转加工与跑合加工	236
5.1.1 电火花回转加工	236
5.1.2 电火花跑合加工	237
5.2 电火花表面加工	238
5.2.1 电火花表面强化	238
5.2.2 电火花刻蚀(刻字)	240
5.3 超硬材料、非导体与半导体电火花加工	240
5.3.1 超硬材料的电火花加工	241
5.3.2 半导体的电火花加工	244
5.3.3 非导体的电火花加工	245
5.4 电熔爆加工	246
5.4.1 电熔爆加工原理与特点	246
5.4.2 电熔爆加工设备	247
5.4.3 电熔爆加工的应用	247
5.5 超声电火花复合加工	248
5.5.1 超声电火花复合抛光	248
5.5.2 超声电火花复合打孔	249
5.6 液体束流电火花微孔加工	250
第6章 电火花加工常见工艺问题的分析和解决方法	251
6.1 电火花成形加工的常见工艺问题和解决方法	251
6.2 电火花线切割加工的常见工艺问题和解决方法	254
参考文献	256

第1章 电火花加工基础

电火花加工又称放电加工 (electrical discharge machining, 简称 EDM), 其加工过程与传统的机械加工完全不同。电火花加工时, 工件与加工所用的工具为极性不同的电极对, 电极对之间多充满工作液, 起到恢复电极间的绝缘状态及带走放电时产生的热量的作用, 以维持电火花加工的持续放电。电火花加工时所用工具称为工具电极 (简称电极)。在正常电火花加工过程中, 电极与工件不接触, 而是保持一定的距离 (称作间隙), 在工件与电极间施加一定的电压, 当电极向工件进给至某一距离时, 两极间的工作液介质被击穿, 局部产生火花放电, 放电产生的瞬时高温将电极对的表面材料熔化甚至汽化, 逐步蚀除工件, 通过控制连续不断地脉冲式的火花放电, 就可将工件材料按人们预想的要求予以蚀除, 达到加工的目的, 因为其加工过程能看到火花, 故称作电火花加工。日本、美国、英国等国家通常称作放电加工。

1.1 电火花加工的特点和应用

(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 (汽化点)、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, 因此电火花加工突破了传统切削加工对刀具的限制, 实现了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紫铜或石墨, 这样的工具电极较容易加工。

② 可以加工特殊及复杂形状的零件。电火花加工中工具电极和工件不直接接触, 没有机械加工的切削力, 因此适宜加工低刚度工件及微细加工。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。由于数控技术的采用, 可以使用简单的电极加工复杂形状零件。

③ 易于实现加工过程自动化。电火花加工直接利用电能加工, 而电能、电参数易于数字控制, 因此电火花加工适应智能化控制和无人化操作等。

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, 又大大减小了体积和质量。

(2) 电火花加工的局限性

① 只能用于加工金属等导电材料, 不能用来加工塑料、陶瓷等绝缘的非导电材料, 在

一定条件下可以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来去除大部分余量,然后再进行电火花加工,以求提高生产率,如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0.02~0.3mm),若电极有损耗或采用平动头加工,则角部半径还要增大。现在,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) 电火花加工的主要应用

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 加工各种复杂形状难加工的型孔和型腔工件,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,进行蜂窝密封结构件、深窄槽及狭缝等加工,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,跑合齿轮啮合件等。

由于电火花加工具有许多传统切削加工所无法比拟的优点,因此其应用领域日益扩大,电火花加工技术已广泛用于机械(特别是模具制造)、航天、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,以解决难加工材料及复杂形状零件的加工问题,加工范围从微小的轴、孔、缝,到超大型模具和零件。为各种新型材料的发展和應用开辟了广阔的途径,为各种工业产品的设计改进与制造提供了新的加工技术,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。

1.2 电火花加工的分类

根据电火花加工过程中工具电极与工件相对运动方式和主要加工用途的不同,电火花加工大致可分为:电火花穿孔成形加工、电火花线切割加工、电火花高速小孔加工、电火花磨削和镗磨、电火花同步共轭回转加工、电火花表面加工与刻字六大类。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,电火花穿孔成形加工及电火花线切割加工应用得最为广泛,约占电火花加工生产的90%左右。因此本书主要针对电火花成形、穿孔加工及电火花线切割加工工艺及其操作技巧进行讲述,其他几类加工工艺,应根据待加工工件的具体要求,选择相应的加工工艺。表1-1为电火花加工工艺方法分类。

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	电火花穿孔成形加工	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 K7725、DK7740 数控电火花线切割机
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	电火花高速小孔加工	1. 采用细管($>\phi 0.3$)电极,管内充入高压水基工作液 2. 细管电极旋转 3. 穿孔速度很高($30\sim 60\text{mm/min}$)	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 DT03A 电火花高速小孔机加工机床
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,但两者角速度相等或成整倍数,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
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

1.3 电火花加工常用术语

为了更好地熟悉和掌握电火花加工技术,现将电火花加工中常用的主要名词术语和符号摘录如下。

(1) 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,故称工具电极,简称工具或电极,如图 1-1 所示。

(2) 放电间隙

放电间隙指加工时工具和工件之间产生火花放电的距离间隙。在加工过程中,则称为加工间隙 S ,一般在 $0.01\sim 0.5\text{mm}$ 之间,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 (图 1-1)。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

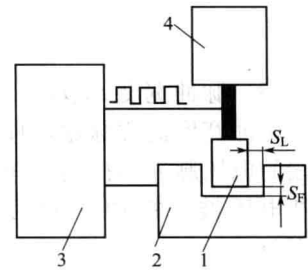


图 1-1 电火花加工示意图
1—工具电极；2—工件；3—脉冲电源；4—伺服进给系统

情况下 S_F 稍小于 S_L , S_{in} 稍小于 S_{out} 。

(3) 脉冲电源

脉冲电源是电火花加工设备的主要组成部分之一, 它给放电间隙提供一定能量的电脉冲, 是电火花加工时的能量来源, 常简称电源。有 RC 线路脉冲电源、电子管脉冲电源、闸流管脉冲电源等, 现在广泛采用的是晶体管脉冲电源和可控硅脉冲电源。

(4) 伺服进给系统

伺服进给系统是电火花加工机床的重要组成部分, 用做使工具电极伺服进给, 自动调节, 使工具电极和工件在加工过程中保持一定的平均端面放电间隙 (图 1-1)。现在多采用步进电机或大力矩、宽调速直流电机以及交流伺服电机作为伺服进给系统。

(5) 工作液介质

电火花加工时, 工具和工件间的放电间隙必须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。一般将煤油作为电火花加工时的工作液。

(6) 电蚀产物

电蚀产物是指电火花加工过程中被电火花蚀除下来的产物。狭义而言, 指工具和工件表面被蚀除下来的金属微粒小屑和煤油等工作液在高温下分解出来的炭黑, 也称为加工屑。广义而言, 电蚀产物还包括煤油在高温下分解出来的气体氢、甲烷等小气泡。

(7) 电规准电参数

电规准电参数指电火花加工时选用的电加工用量、电加工参数, 主要有脉冲宽度 t_i 、脉冲间隔 t_0 、峰值电压 $\hat{u}_i$ 、峰值电流 $\hat{i}_e$ 等脉冲参数 (图 1-2), 这些脉冲参数在每次加工时必须事先选定。日本等翻译过来的说明书中把电规准电参数称为加工条件。

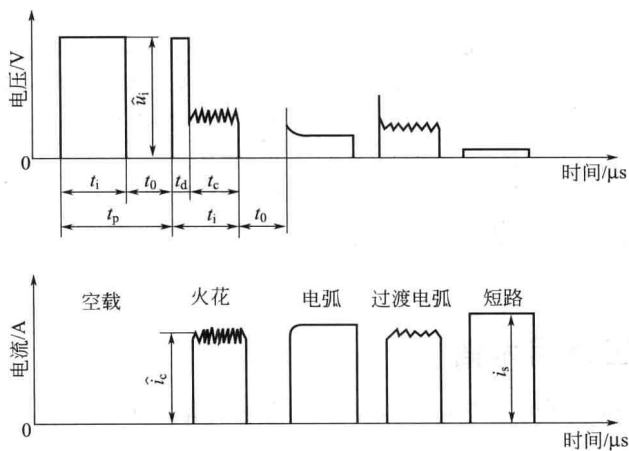


图 1-2 脉冲参数与脉冲电压、电流波形

(8) 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 (图 1-2)。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。粗加工时可用较大的脉宽, $t_i > 100\mu s$; 精加工时只能用较小的脉宽, $t_i < 50\mu s$ 。

(9) 脉冲间隔 $t_0/\mu s$

脉冲间隔简称脉间或间隔, 日本及英、美常用 t_{off} 或 τ_{off} 表示。它是两个电压脉冲之间的间隔时间 (图 1-2)。间隔时间过短, 放电间隙来不及消电离和恢复绝缘, 容易产生电弧放

电, 烧伤工具和工件; 脉间选得过长, 将降低加工生产率。加工面积、加工深度较大时, 脉间也应稍大。

(10) 放电时间 (电流脉宽) $t_e/\mu s$

放电时间是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 (图 1-2)。 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 。由于每个脉冲的电压脉宽 t_i 是不变的, 而每个脉冲击穿后的电流脉宽 t_e 是变化的, 因此在选择电规准时常用电压脉宽 t_i , 只有等电流脉冲电源时用 t_e 。从图 1-2 的示波器图形上可以看出, 只有在火花放电时间内, 电压波形和电流波形上才会有较浓的锯齿状高频振荡的波形 (高频分量), 它是区别火花和电弧的重要特征。

(11) 击穿延时 $t_d/\mu s$

从间隙两端加上脉冲电压后, 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, 称为击穿延时 (图 1-2)。它与平均放电间隙大小有关, 工具欠进给时, 平均放电间隙偏大, 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。

(12) 脉冲周期 $t_p/\mu s$

一个电压脉冲开始到下一个电压脉冲开始之间的时间称脉冲周期, 显然 $t_p = t_i + t_0$ (图 1-2)。

(13) 脉冲频率 f_p/Hz

脉冲频率是指单位时间 (1s) 内电源发出的脉冲个数, 与 t_p 互为倒数, 即: $f_p = 1/t_p$ 。

(14) 脉宽系数 τ

脉宽系数是脉冲宽度 t_i 与脉冲周期 t_p 之比, 其计算公式为 $\tau = t_i/t_p = t_i/(t_i + t_0)$ 。

(15) 占空比 ω

占空比是脉冲宽度 t_i 与脉冲间隔 t_0 之比, $\omega = t_i/t_0$ 。粗加工时, 占空比可较大, $\omega = (10:1) \sim (2:1)$; 精加工时应较小, $\omega = (1:1) \sim (1:10)$, 否则放电间隙来不及消电离恢复绝缘, 容易引起电弧放电。

(16) 开路电压 (空载电压) 或峰值电压 $\hat{u}_i/\text{V}$

开路电压是间隙开路时电极间的最高电压, 等于电源的直流电压, 一般晶体管方波脉冲电源的峰值电压 $\hat{u}_i = 80 \sim 100\text{V}$, 高低压复合脉冲电源的高压峰值电压为 $175 \sim 300\text{V}$ 。峰值电压高, 放电间隙大, 生产率高, 但成形复制精度稍差。

(17) 火花维持电压

火花维持电压是每次火花击穿后, 在放电间隙上火花放电时的维持电压, 一般在 25V 左右, 但它实际是一个高频振荡的电压 (图 1-2)。电弧的维持电压比火花的维持电压低 5V 左右, 高频振荡频率较低, 一般示波器上观察不到高频成分, 观察到的是一水平亮线, 过渡电弧的维持电压则介于火花和电弧之间 (图 1-2)。

(18) 加工电压或间隙平均电压 U/V

加工电压或间隙平均电压是指加工时电压表上指示的放电间隙两端的平均电压, 它是多个开路电压、火花放电维持电压、短路和脉冲间隔等电压的平均值。在正常加工时, 加工电压在 $30 \sim 50\text{V}$, 它与占空比、预置进给量等有关。占空比大、欠进给、欠跟踪、间隙偏开路, 则加工电压偏大; 占空比小、过跟踪或预置进给量小 (间隙偏短路), 加工电压即偏小。

(19) 加工电流 I/A

加工电流是加工时电流表上指示的流过放电间隙的平均电流。精加工时小, 粗加工时

大；间隙偏开路时小，间隙合理或偏短路时则大。

(20) 短路电流 I_s/A

短路电流是放电间隙短路时（或人为短路时）电流表上指示的平均电流（因为短路时还有停歇时间内无电流）。它比正常加工时的平均电流大 20%~40%。

(21) 峰值电流 $\hat{i}_e/A$

峰值电流 $\hat{i}_e$ 是间隙火花放电时脉冲电流的最大值（瞬时），日本、英国、美国常用 I_p 表示（图 1-2），峰值电流不易直接测量，但它是实际影响生产率、表面粗糙度等指标的重要参数。在设计制造脉冲电源时，每一功率放大管串联限流电阻后的峰值电流是预先选择计算好的。为了安全，每个 50W 的大功率晶体管选定的峰值电流约为 2~3A，电源说明书中也有说明，可以按此选定粗、中、精加工时的峰值电流（实际上是选定用几个功率管进行加工）。

(22) 短路峰值电流 $\hat{i}_s/A$

短路峰值电流是间隙短路时脉冲电流的最大值（瞬时值，亦即不考虑停歇时间）（图 1-2），它比峰值电流 $\hat{i}_e$ 大 20%~40%，与短路电流 I_s 相差一脉宽系数的倍数， $\hat{i}_s\tau = I_s$ 。例如测得某规准时的短路电流 $I_s = 5A$ ，查得加工时选用的占空比 $\omega = 100 : 50$ ，脉宽系数 $\tau = \frac{t_i}{t_p} = \frac{t_i}{t_i + t_0} = \frac{100}{100 + 50} = \frac{2}{3}$ ，由此可以算出： $\hat{i}_s = \frac{I_s}{\tau} = 5 \times \frac{3}{2} = 7.5A$ 。

(23) 正、负极性加工

加工时以工件为准，工件接脉冲电源正极（高电位端），称正极性加工，反之，工件接电源负极（低电位端），则称负极性加工。高生产率、低损耗粗加工时，常用负极性长脉宽加工。

(24) 放电状态

放电状态指电火花加工时放电间隙内每一脉冲放电时的基本状态，一般分为五种放电状态和脉冲类型（图 1-2）。

① 开路（空载脉冲） 放电间隙没有击穿，间隙上有大于 50V 的电压，但间隙内没有电流流过，为空载状态（ $t_d = t_i$ ）。

② 火花放电（工作脉冲，或称有效脉冲） 间隙内绝缘性能良好，工作液介质击穿后能有效地抛出、蚀除金属，波形特点是：电压上有 t_d ， t_e 和 $\hat{i}_e$ 波形上有高频振荡的小锯齿。

③ 短路（短路脉冲） 放电间隙直接短路相接，这是由于伺服进给系统瞬时进给过多或放电间隙中有电蚀产物搭接所致。间隙短路时电流较大，但间隙两端的电压很小，没有蚀除加工作用。

④ 电弧放电（稳定电弧放电） 由于排屑不良，放电点集中在某一局部而不分散，局部热量积累，温度升高，恶性循环，此时火花放电就成为电弧放电，由于放电点固定在某一点或某局部，因此称为稳定电弧，常使电极表面结炭、烧伤。波形特点是 t_d 和 高频振荡的小锯齿基本消失。

⑤ 过渡电弧放电（不稳定电弧放电，或称不稳定火花放电） 过渡电弧放电是正常火花放电与稳定电弧放电的过渡状态，是稳定电弧放电的前兆。波形特点是击穿延时很小或接近于零，仅成为一尖刺，电压电流波上的高频分量变低成为稀疏的锯齿形。

以上各种放电状态在实际加工中是交替、概率性地出现的（与加工规准和进给量等有关），甚至在一次单脉冲放电过程中，也可能交替出现两种以上的放电状态。

(25) 加工速度 v_w 或 $V_w/(mm^3/min)$

加工速度是单位时间 (min) 内从工件上加工蚀除下来的金属体积 (mm^3), 以质量 (g) 计算时用 v_m 或 $V_m(g/min)$ 表示, 也称加工生产率。大功率电源粗加工时 $v_w > 500mm^3/min$, 但电火花精加工时, 通常 $v_w < 20mm^3/min$ 。

(26) 加工效率 $V_{sp}/[mm^3/(A \cdot min)]$

加工效率是每安培加工电流每分钟加工蚀除掉的工件金属体积或质量 (我国常用体积), 这样可以抛开电源功率大小的影响, 来衡量评定不同功率的脉冲电源的加工速度和工艺水平。一般较好的脉冲电源的加工效率和工艺水平应为 $V_{sp} \geq 10mm^3/(A \cdot min)$, 国外先进水平可达 $V_{sp} = 10 \sim 15mm^3/(A \cdot min)$ 。

(27) 损耗速度 $v_E/(mm^3/min)$ 或 (g/min)

损耗速度是单位时间 (min) 内工具电极的损耗量 (体积或质量)。

(28) 相对损耗或损耗比 (损耗率) $\theta/\%$

相对损耗或损耗比是工具电极损耗速度和工件加工速度之比值, 并以此来综合衡量工具电极的耐损耗程度和加工性能。在实际生产中, 常用:

$$\text{体积相对损耗比} \quad \theta = \frac{v_E}{v_w} \times 100\%$$

在等截面电火花穿孔时, 也可用长度相对损耗比 $\theta_L = \frac{\Delta L_E}{L_w}$, 其中, L_w 为电极进给距离; ΔL_E 为电极损耗长度。

(29) 低损耗加工

低损耗加工指相对损耗比 $\theta \leq 1\%$ 时的电火花加工。一般用紫铜或石墨电极负极性加工钢, 并采用长脉宽粗加工时, 可实现低损耗加工。

(30) 无损耗加工

无损耗加工指相对损耗比 $\theta \leq 0.1\%$ 的电火花加工。一般在负极性长脉宽加工时充分利用工具电极正极表面吸附、镀覆一层游离炭黑膜才能实现。但过厚吸附炭黑膜, 会造成“负损耗”, 反而影响精度。

(31) 面积效应

面积效应指电火花加工时, 随加工面积大小变化而加工速度、电极损耗比和加工稳定性等指标随之变化的现象。一般加工面积过大或过小时, 工艺指标通常降低, 这是由“电流密度”过小或过大引起的。

(32) 深度效应

随着加工深度增加而加工速度和稳定性降低的现象称深度效应, 这主要是电蚀产物积聚、排屑不良所引起的。

(33) 伺服参考电压 S_V/V

伺服参考电压是指电火花加工伺服进给时, 事先设置的一个参考电压 $S_V(0 \sim 5V)$, 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 大, 则平均放电间隙愈大, 反之则小。

(34) 有效脉冲频率 f_e

有效脉冲频率又称工作 (火花) 脉冲频率, 即每秒钟发生的有效火花放电的次数。

(35) 脉冲利用率 λ

脉冲利用率又称脉冲个数利用率, 是有效脉冲频率 f_e 与脉冲频率 f_p 之比: $\lambda = f_e/f_p$, 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。

(36) 相对放电时间率 φ

相对放电时间率又称相对脉冲时间利用率或放电时间比, 即火花放电时间 t_e 与脉冲宽度 t_i 之比: $\varphi = t_e / t_i$ 。

(37) 平均相对放电时间率 ϕ

平均相对放电时间率为一段时间内电火花放电时间 t_e 总和与该段时间内脉冲宽度 t_i 总和之比

$$\phi = \sum t_e / \sum t_i$$

因为电火花加工时放电状态检测装置很难测量单个脉冲宽度内的火花放电时间比 φ , 即使测得 φ , 也得取其平均值才能作为控制之用。

(38) 平均绝对放电时间率 Φ

平均绝对放电时间率是在一段时间内电火花放电时间 t_e 的总和与该段时间之比, 亦即与该段时间内脉冲周期 t_p 总和之比

$$\Phi = \sum t_e / \sum t_p = \sum t_e / \sum (t_i + t_0)$$

检测平均绝对放电时间率 Φ , 并用它来控制电火花加工过程, 可以不受脉冲间隔 t_0 的影响, 因为在自适应控制过程中, 脉冲间隔 t_0 是随时被调节变化的, 而且粗、中、精不同的加工规准, 脉冲间隔 t_0 的变化很大。

第2章 电火花成形加工

2.1 电火花成形加工原理

2.1.1 电火花成形加工原理及应具备的条件

电火花加工的原理是基于工具和工件（正负电极）之间脉冲性火花放电的电腐蚀现象来蚀除多余的金属，从而达到尺寸加工成形质量的预定要求。要想达到这一目的就必须做到以下要求和条件。

① 工具电极和工件被加工表面之间保持一定的放电间隙。这一间隙随加工条件而定，通常约为几微米至几百微米。如果间隙过大，极间电压不能击穿极间介质，因而产生不了火花放电；如果间隙过小，很容易造成短路接触，也不能产生火花放电。为此，在电火花加工过程中必须要有工具电极的自动进给和调节装置。

② 火花放电为瞬时的脉冲性放电，放电延续一段时间后，必须停歇一段时间（放电延续时间一般为 $10^{-7} \sim 10^{-3} \text{s}$ ）。这样使放电所产生的热量来不及传导扩散到其余部分，把每一次的放电点局限在很小的范围内；否则，形成持续电弧放电，使放电点表面大量发热、熔化、烧伤，无法用做尺寸加工，故电火花加工必须采用脉冲电源。

③ 火花放电必须在有一定绝缘性能的液体介质中进行。液体介质又称工作液（例如煤油、皂化液或去离子水等），必须具有较高的绝缘强度（ $10^3 \sim 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ ），这样有利于产生脉冲性的火花放电。同时，液体介质还有助于把电火花加工过程中产生的金属小屑、炭黑等电蚀产物从放电间隙中悬浮排除出去，并且对工具电极和工件表面有较好的冷却作用。因此，电火花加工需要一套工作液循环过滤装置。

以上问题的综合解决，是通过图 2-1 所示的电火花加工系统来实现的。工件 1 与工具 4 分别与脉冲电源 2 的两输出端相连接。自动进给调节装置 3（此处为电动机及丝杠、螺母、导轨）使工具和工件间经常保持一很小的放电间隙，当脉冲电压加到两极之间时，便在当时条件下相对某一间隙最小处或绝缘强度最低处击穿介质，在该局部产生火花放电，瞬时高温使工具和工件表面都蚀除掉一小部

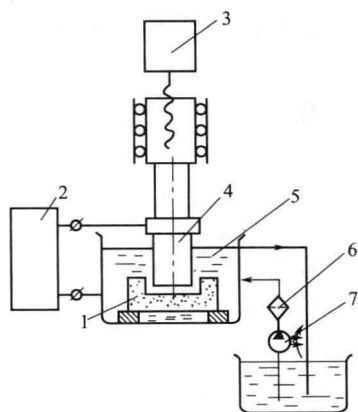


图 2-1 电火花加工原理示意图

- 1—工件；2—脉冲电源；3—自动进给调节装置；4—工具；
5—工作液；6—过滤器；
7—工作液泵