



机电工程系列丛书

电火花加工技术

第2版

DIANHUOHUA JIAGONG JISHU

郭永丰 白基成 刘晋春 主编
赵家齐 主审



哈尔滨工业大学出版社

机电工程系列丛书

电火花加工技术

(第2版)

郭永丰 白基成 刘晋春 主编
赵家齐 主审

哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨

内 容 提 要

本书从电火花加工的原理、机理和常用名词术语讲起,结合作者多年来的教学和科研实践经验,由浅入深地阐明电火花加工工艺的基本规律、基本设备,包括脉冲电源、伺服进给系统和数控系统等,并用较大的篇幅讲述了电火花穿孔加工、成形加工和其它电火花加工的应用实例。另外在附录中还给出了国内外电火花成形机的主要生产厂商及其主要机床型号、电火花加工主要附件配件、消耗品和外围工艺设备及其生产厂和中华人民共和国机械工业部工人技术培训等级标准。

本书取材丰富,图文并茂,由浅入深,论述清楚,说理透彻。既有一定的理论深度,又有丰富的实践内容。

本书可作为电火花加工和模具制造工人提高技术水平的自学用书及培训教材,对从事电火花加工的工程技术人员以及高校、大专机械制造及自动化专业的师生,也有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电火花加工技术/郭永丰等主编.—2版.—哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2005.3
ISBN 7-5603-1530-5

I.电… II.郭… III.电火花加工—高等学校—
教材 IV.TG661

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 042649 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
印 刷 肇东市粮食印刷厂印刷
开 本 787×1092 1/16 印张 11.75 字数 301 千字
版 次 2005 年 3 月第 2 版 2005 年 3 月第 3 次印刷
书 号 ISBN 7-5603-1530-5/TH·83
印 数 9 001~13 000
定 价 16.00 元

第1版前言

电火花加工技术是先进生产制造技术中的一个重要组成部分,是机械制造业中最广泛采用的机械切削和磨削加工的重要补充和发展。其最大特点是:工具和工件间是非接触加工,加工中没有宏观的切削力,因而可以用软的铜、石墨等材料加工任何硬度和强度的难加工金属材料;可以加工非常复杂的立体成型表面;可以加工低刚度、薄壁、深孔、微细孔等特殊精密零件。在各类模具制造业中,电火花加工技术是必不可少的关键技术。在航空、航天、仪器、仪表等工业部门中,电火花加工技术也获得日益广泛的应用。电火花加工机床设备的制造业,已发展成为一个专门化的产业,电火花加工机床设备的操作使用人员队伍也已发展成为一支庞大的技术队伍,且每年还有成千上万的新生力量加入到这支队伍中来。

由于电火花加工技术是机电一体化技术,是机械、电工、电子、数控、自动控制、计算机应用等多门学科、专业知识的综合应用。而目前大专院校、中等技术专科学校受学时的限制又不可能深入讲授上述内容,本书就是为了满足从事电火花加工的工人、技术人员提高理论水平和操作实践能力,进行较系统、深入学习的需要而编写的。

本书可以作为电火花加工工人、技术人员培训或自学的教材,也可作为工厂、研究院、所从事电火花加工的科技人员和大专院校、高职、中技校机械制造专业教师和学生的教学、自学参考用书。

本书从电火花加工的原理、机理和常用名词术语讲起,结合多年来的教学和科研实践经验,由浅入深地阐明电火花加工工艺的基本规律、基本设备,包括脉冲电源、伺服进给系统和数控系统等,最后用较大的篇幅讲述了电火花穿孔加工、成形加工和其它电火花加工的应用实例。

本书由哈尔滨工业大学特种加工及机电控制研究所所长、中国机械工程学会电加工学会副理事长赵万生教授(博导)主编,参加编写的有耿春明、宋博岩在职博士生,刘华工程师,杨晓东博士,迟关心、王刚博士后,王振龙副教授、郭永丰副教授、狄士春教授等。

全书由中国机械工程学会电加工学会原理事长(第四届)、哈尔滨工业大学刘晋春教授(博导)主审。

由于时间仓促,加之编写人员水平有限,书中难免有不足和疏漏之处,恳切希望广大读者提出宝贵意见。

编 者

2000年3月

第2版前言

电火花加工技术一书自2000年5月问世以来,受到了广大电火花加工工程技术人员、科研院所科研人员和大专院校师生的欢迎和好评。普遍认为本书在现代先进制造技术电火花加工工艺和设备方面起到了知识更新和技术储备的作用,具有由浅入深、讲述系统、理论联系实际等优点。对于初学者,易于入门,对于已有一定电火花加工基础的读者,可更快地登堂入室,获得更多的理论和实用知识。而且还能启发人们创造性的思维和培养解决问题的能力。

近年来,国内外电火花加工技术不断进步,应用范围日益扩大。为了更好地体现与时俱进、精益求精的精神,特组织编写了此修订版(第2版)。本次修订时推陈出新,增加了一些新的内容,以更好地满足从事电火花加工读者们的需要。

本修订版中除对整书各章节稍作增、删和对某些疏漏之处作了修改之外,重点在第三章3.5节电火花的伺服进给系统中增加了一些具体的控制线路,在第七章中增加了7.4节空气介质中电火花加工技术及7.5节铝合金电火花微弧氧化表面陶瓷化处理技术等新内容。

本书从电火花加工的原理、机理和常用名词术语讲起,结合作者多年来的教学和科研实践经验,由浅入深地阐明电火花加工工艺的基本规律、基本设备,包括脉冲电源、伺服进给系统和数控系统等,最后用较大的篇幅讲述了电火花穿孔加工、成形加工和其它电火花加工的应用实例。

本书可以作为电火花加工工人、技术人员培训或自学的教材,也可作为工厂、研究院、所从事电火花加工的科技人员和大专院校、高职、中技校机械制造专业教师和学生的教学、自学参考用书。

本书由哈尔滨工业大学机电工程学院特种加工及机电控制研究所郭永丰、白基成、刘晋春主编,参加编写的有杨晓东副教授、刘华工程师、胡富强研究员、狄士春教授和王振龙教授。

全书由哈尔滨工业大学机电工程学院特种加工及机电控制研究所赵家齐教授主审。

由于时间仓促,加之编写人员水平有限,书中不足和疏漏之处在所难免,恳请广大读者提出宝贵批评和建议。

编者
2005年2月

本书所用主要符号

A	宽度,尺寸,加工面积	q	蚀除量
a	宽度,尺寸	q'	单个脉冲蚀除量
B	宽度,尺寸	q_a	正极(阳极)蚀除量
b	宽度,缩放量	q_c	负极(阴极)蚀除量
C	电容,热容,尺寸,比热容	q_q	气化热
D, d	直径	q_r	熔化热
E	工具电极,电规准代号	R	电阻,半径
e	电子负电荷	R_a	微观轮廓平面度的平均算术偏差值
F	作用力	$R_{\max}$	微观轮廓平面度的最大高度值
f_p	频率	R_z	微观不平度平均高度值
G	重力,质量	r	半径
G	数控加工中准备功能代码	S	放电间隙,加工间隙,位移量
g	重力加速度	S_B	最佳放电间隙
H	磁场强度,高度	S_F	端面放电间隙
$H_{\max}$	上一规准加工后表面微观不平度最大值	S_L	侧面单边放电间隙
$h_{\max}$	本规准加工后表面微观不平度最大值	S_m	物理因素造成的机械间隙
h	深度,高度,厚度	S_V	伺服参考电压
I	电流	T	温度
I_p	峰值电流	T_f	沸点
i	电流密度,间隙电流	T_r	熔点
i_c	放电电流,电流脉冲宽度	t	时间
$\hat{i}_c$	脉冲电流幅值,峰值电流	t_c	充电时间
$\bar{i}_c$	平均放电电流	t_d	击穿延时
i_s	短路电流	t_e	放电时间
$\hat{i}_s$	短路峰值电流	t_i	脉冲宽度(简称脉宽),电压脉冲宽度
K	某种常数,腐蚀系数	t_o	脉冲间隔(简称脉间)
K_a, K_c	与工艺参数有关的常数,角标 a, c 分别表示阳极和阴极	t_p	脉冲周期
K_u	与工作液有关的常数	u	电压,间隙电压
K_R	与材料有关的常数	u_C	击穿电压
L	电感,长度	u_c	放电电压
l	长度	$\bar{u}_c$	平均电压
M	数控加工中辅助功能代码	$\hat{u}_i$	开路电压,脉冲峰值电压
m	质量	U	平均间隙电压
$\bar{P}$	平均功率	V	体积,电位
p	压力、压强,能量密度	v	进给速度

v_A	加工速度(以长度表示)	Δ	加工间隙
v_a	阳极蚀除速度	α	热扩散率,落料角,夹角
v_c	阴极进给速度	β	刃口斜度
v_d	工具电极的进给速度	δ	放电间隙,单边缩小量
v_{dA}	空载时工具电极的进给速度	η	效率
v_{d0}	短路时工具电极的回退速度	θ	工具电极的体积相对损耗率,角度,旋转运动
v_E	工具电极损耗速度	θ_L	长度相对损耗率
v_m	加工速度(以质量表示)	κ	温度扩散率
v_g	工件蚀除速度	λ	热导率,有效脉冲利用率
v_n	法向进给速度	ρ	密度,电阻率
v_s	走丝速度	σ	电导率
V_{sp}	加工效率	τ	时间常数,脉宽系数
v_w	加工速度(以体积表示)	ω	圆频率,角速度
W	宽度,能量,功,工件	φ	相对放电时间比,或称相对放电时间率
W_M	单个脉冲能量	ϕ	平均相对放电时间率
Z	加工指令,加工余量	Φ	平均绝对放电时间率
		ψ	占空比

目 录

第一章 电火花加工的基础知识	1
1.1 电火花加工的基本原理	1
1.2 电火花加工的特点和适用范围	2
1.3 电火花加工的机理	3
1.4 电火花加工常用术语和符号	7
1.5 电火花加工工艺方法的分类	13
第二章 电火花加工工艺中的基本规律	15
2.1 影响材料放电腐蚀量的主要因素	15
2.2 电火花加工的加工速度和工具电极的损耗速度	19
2.3 影响电火花加工精度的主要因素	21
2.4 电火花加工的表面质量	23
2.5 电火花加工工艺参数选择及工艺参数曲线图表	27
第三章 电火花加工的机床设备	38
3.1 电火花加工机床及其组成部分	38
3.2 电火花穿孔成形加工机床主机各部分及其作用	40
3.3 电火花加工用的工作液过滤系统	43
3.4 电火花加工用的脉冲电源	44
3.5 电火花加工用的伺服进给系统	52
3.6 加工过程中的参数控制	62
3.7 电火花加工的数控系统	66
3.8 电火花加工机床主要精度指标和技术指标及其检验方法	72
第四章 电火花穿孔加工工艺及实例	82
4.1 电火花简单穿孔、套料加工	82
4.2 冲模电火花加工的要点	83
4.3 简单方孔冲模的电火花加工	90
4.4 电机转子冲孔落料模加工	91
4.5 钟表齿轮精密冷冲模加工	92
4.6 小孔、小深孔、异形小孔、多孔、微孔等电火花加工	93
4.7 超声波电火花复合加工小孔	98
第五章 电火花成形加工工艺及实例	102
5.1 单工具电极直接成形法	102
5.2 单电极平动、摇动加工法	105
5.3 分解工具电极法	110
5.4 手动侧壁修光法	111
5.5 多工具电极更换法	111
5.6 对开模(无毛边模具)加工实例	112

5.7 洗衣机调节螺母注塑模加工实例	112
5.8 伞齿轮精锻模加工实例	114
5.9 塑料叶轮注塑模加工实例	115
5.10 高精度压胶型腔模加工实例	117
5.11 用平动(摇动)功能加工内螺纹	120
5.12 电火花展成法刻字(计算机辅助电火花雕刻)	120
5.13 日本三菱公司数控电火花成形加工机床的编程和选择规准举例	122
第六章 模具加工技术中的一些综合技巧	128
6.1 电火花加工中的冲、抽油	128
6.2 穿孔电极的反拷贝修正	133
6.3 电火花加工模具的后继抛光法	133
6.4 混粉电火花大面积光泽面加工	134
6.5 电火花加工实践数据的积累整理	137
第七章 其它电火花加工技术	139
7.1 电火花磨削	140
7.2 特殊材料的电火花加工	148
7.3 电火花表面强化和刻字	151
7.4 气体介质中电火花加工	154
7.5 铝合金电火花微弧氧化表面陶瓷化处理技术	157
第八章 电火花加工中的技术保安及防火	161
8.1 电火花加工中的技术安全规程	161
8.2 正确执行电火花加工安全操作规程	162
附录	164
附录 I 1999 年 10 月北京国际机床展览会上国内外展出的电火花穿孔、成形加工机床 及其生产厂商	164
附录 II 国内外电火花成形机床主要生产厂商及其主要机床型号	167
附录 III 电火花加工主要附件配件、消耗品和外国工艺设备及其生产厂	173
附录 IV 中华人民共和国机械工业部工人技术等级标准(通用部分)(续)	174
参考文献	179

第一章 电火花加工的基础知识

电火花加工又称放电加工(Electrical Discharge Machining,简称 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,工具和工件并不接触,而是靠工具和工件之间不断的脉冲性火花放电,产生局部、瞬时的高温把金属材料逐步熔化和气化蚀除掉。由于放电过程中可见到火花,故我国称之为电火花加工,日本、英国、美国称之为放电加工,俄罗斯称之为电蚀加工。目前这一工艺技术已广泛用于加工淬火钢、不锈钢、模具钢、硬质合金等难加工材料;用于加工模具等具有复杂表面的零部件,在民用和国防工业中获得愈来愈多的应用,已成为切削加工的重要补充和发展。

1.1 电火花加工的基本原理

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时的电腐蚀现象来蚀除多余的金属,以达到对零件的尺寸、形状及表面质量预定的加工要求。电腐蚀现象早在20世纪初就被人们发现,例如在插头或电器开关触点开、闭时,往往产生火花而把接触表面烧毛,腐蚀成粗糙不平的凹坑而逐渐损坏。长期以来,电腐蚀一直被认为是一种有害的现象,人们不断地研究电腐蚀的原因并设法减轻和避免电腐蚀的发生。但事物都是一分为二的,只要掌握规律,在一定条件下可以把坏事转化为好事,把有害变为有用。1940年前后,前苏联科学院电工研究所B.P.拉扎连柯教授夫妇的研究结果表明,电火花腐蚀的主要原因是:电火花放电时火花通道中局部、瞬时产生大量的热,达到很高的温度,足以使任何金属材料局部熔化、气化而被蚀除掉,形成放电凹坑。这样,人们在研究抗电腐蚀办法的同时,开始研究利用电腐蚀现象对金属材料进行尺寸加工,终于在1943年拉扎连柯夫妇研制出利用电容器反复充电放电原理的世界上第一台实用化的电火花加工装置,并申请了发明专利,以后在生产中不断推广应用,拉扎连柯因此被评为前苏联科学院院士。

实践经验表明,要把有害的火花放电转化为有用的加工技术,必须创造条件,做到以下几点:

① 使工具电极和工件被加工表面之间经常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,因而不会产生火花放电;如果间隙过小,很容易形成短路接触,同样也不能产生火花放电。为此,在电火花加工过程中必须具有工具电极的自动进给和调节装置。

② 使火花放电为瞬时的脉冲性放电,并在放电延续一段时间后,停歇一段时间(放电延续时间一般为 $10^{-7} \sim 10^{-3}$ s)。这样才能使放电所产生的热量来不及传导扩散到其余部分,把每一次的放电点分别局限在很小的范围内;否则,像持续电弧放电那样,使放电点表面大量发热、熔化、烧伤,只能用于焊接或切割,而无法用作尺寸加工,故电火花加工必须采用脉冲电源。

③ 使火花放电在有一定绝缘性能的液体介质中进行,例如煤油、皂化液或去离子水等。液体介质又称工作液,必须具有较高的绝缘强度($10^3 \sim 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$),以有利于产生脉冲性的火花放电。同时,液体介质还能把电火花加工过程中产生的金属小屑、碳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。

以上问题的综合解决,是通过图 1.1 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(此处为电动机及丝杆、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分金属,各自形成一个小凹坑,如图 1.2 所示。其中图 1.2(a)表示单个脉冲放电后的电蚀坑,图 1.2(b)表示多次脉冲放电后的电极表面。脉冲放电结束后,经过一段间隔时间(即脉冲间隔 t_0),使工作液恢复绝缘后,第二个脉冲电压又加到两极上,又会在当时极间距离相对最近或绝缘强度最弱处击穿放电,又电蚀出一个小凹坑。这样随着相当高的频率,连续不断地重复放电,工具电极不断地向工件进给,就可将工具端面和横截面的形状复制在工件上,加工出所需要的和工具形状阴阳相反的零件,整个加工表面将由无数个小凹坑所组成。

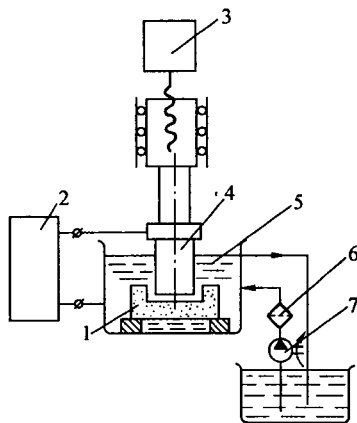


图 1.1 电火花加工原理示意图

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

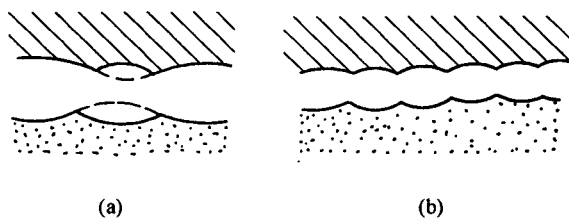


图 1.2 电火花加工表面局部放大图

1.2 电火花加工的特点和适用范围

(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取决于材料的导电性及其热学特性,如熔点、沸点(气化点)、比热容、导热系数、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,可以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,如扭曲的叶片、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。由于是直接利用电能加工,而电能、电参数较机械量易于数字控制、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。例如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。又如喷气发动机中

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,既大大提高了工作可靠性,又大大减小了体积和质量。

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、陶瓷等非导体超硬材料。

(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,但最近的研究成果表明,采用特殊水基不燃性工作液进行电火花加工,其粗加工生产率甚至高于切削加工。

(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,而且电极损耗多集中在尖角或底面,影响成型精度。但最近的脉冲电源在粗加工时已能将电极相对损耗比降至 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 ~ 0.3 mm),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。

(5) 加工后的表面由无数小凹坑组成,粗中加工时较毛糙,且表面有一薄的变质层。

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,目前已广泛应用于机械(特别是模具制造)、宇航、航空、电子、电机、电器、精密微细机械、仪器仪表、汽车、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。加工范围已达到小至几十微米的小轴、孔、缝,大到几米的超大型模具和零件。

1.3 电火花加工的机理

火花放电时,电极表面的金属材料究竟是怎样被蚀除下来的,这一微观的物理过程也就是电火花加工的物理本质,或称机理。了解这一微观过程,有助于掌握电火花加工工艺的基本规律,对脉冲电源、进给装置、机床设备等提出合理的要求。从大量实验资料来看,每次电火花腐蚀的微观过程是电场力、磁力、热力、流体动力、电化学和胶体化学等综合作用的过程。这一过程大致可分为以下四个连续阶段: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。

一、极间介质的电离、击穿,形成放电通道

图 1.3(a)和(b)为矩形波脉冲放电时的电压和电流波形。当脉冲电压施加于工具电极与工件之间时(图 1.3 中 0 ~ 1 段和 1 ~ 2 段),两极之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是极间距离的减小,极间电场强度也将随着增大。由于工具电极和工件的微观表面是凹凸不平的,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点或尖端处的电场强度一般为最大。

液体介质中不可避免地含有某种杂质(如金属微粒、碳粒子、胶体粒子等),也有一些自由电子,使介质呈现一定的电导率。在电场作用下,这些杂质将使极间电场更不均匀,当阴极表面某处的电场强度增加到 10^5 V/mm (100 V/ μ m) 左右时,就会产生场致电子发射,由阴极表面

向阳极逸出电子。在电场作用下电子高速向阳极运动,并撞击工作液介质中的分子或中性原子(在化学、物理中任何分子都是由一种或多种元素的原子组成的。任何原子都是由带正电荷的原子核和围绕原子核高速运动着的带负电荷的电子所组成,不同元素的原子有不同的电子数,但整个原子的正、负电荷都相等,因而是电中性的),产生碰撞电离,把最外层轨道上的负电子撞离出去,形成带负电的粒子(主要是电子)和带正电的粒子(原子核和轨道上剩余的电子构成的正离子),导致带电粒子雪崩式增多,使介质击穿而电阻率迅速降低,形成放电通道。这种由于电场强度增高引起电子发射形成的间隙击穿称为场致发射击穿。另有一种由于阴极表面温度高,局部过热而引起大量电子发射形成的间隙击穿称为热击穿。电火花加工中,热击穿过多,易引起放电点集中而不分散,导致积碳而转为电弧放电。

从雪崩电离开始到建立放电通道的过程非常迅速,理论上仅需 $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ s}$ ($0.1 \sim 0.01 \mu\text{s}$),间隙电阻从绝缘状态迅速降低到几分之一欧姆,间隙电流迅速上升到最大值(几安到几百安)。由于通道直径很小,所以通道中的电流密度可高达 $10^5 \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$ ($10^3 \sim 10^4 \text{ A/mm}^2$)。间隙电压则由击穿电压($80 \sim 100 \text{ V}$)迅速下降到火花维持电压(一般为 $20 \sim 30 \text{ V}$),电流则由 0 上升到某一峰值电流(图 1.3 中 2~3 段)。间隙电路中导线有了电感,或脉冲电源开关元件频率响应低,则上升、下降沿都会不陡。

放电通道是由数量大体相等的带正电(正离子)和带负电粒子(电子)以及中性粒子(原子或分子)组成的等离子体。正、负带电粒子相反方向高速运动相互碰撞,产生大量的热,使通道温度相当高,但分布是不均匀的,从通道中心向边缘逐渐降低,通道中心温度可高达 $10\,000^\circ\text{C}$ 以上。电子流动形成的电流按电工学右手螺旋定则产生磁场,磁场又反过来对电子流产生向心的磁压缩效应,电子流动又同时受周围介质惯性动力压缩效应的作用,使通道瞬间扩展受到很大阻力,故放电开始阶段通道截面很小,而通道内由高温热膨胀形成的初始压力可达数十兆帕。高压高温的放电通道以及随后瞬时金属气化形成的气体(以后发展成气泡)急速扩展,产生一个强烈的冲击波向四周传播。在放电过程中,同时还伴随着一系列派生现象,其中有热效应、电磁效应、光效应、声效应及频率范围很宽的电磁辐射和爆炸冲击波等。

关于通道的结构,一般认为是单通道,即在一次放电时间内只存在一个放电通道;少数人认为可能有多通道,即在一次放电时间内可能同时存在几个放电通道,理由是单次脉冲放电后电极表面有时会出现几个电蚀坑。近期实验表明,单个脉冲放电时有可能出现多次击穿(即一个脉冲内间隙击穿后,有时产生短路或开路,接着又产生击穿放电)。另外,也出现通道受某些随机因素的影响而产生游动,因而在单个脉冲周期内先后会出现多个(或形状不规则)电蚀坑,但同一时间内只存在一个放电通道。因为晶体管脉冲电源小距离击穿通道后,间隙维持电压降至 $20 \sim 30 \text{ V}$,不可能有足够的电场强度同时再形成第二个放电通道(在大气中雷电高压大距离击穿放电时,可能同时有多个分支放电通道)。

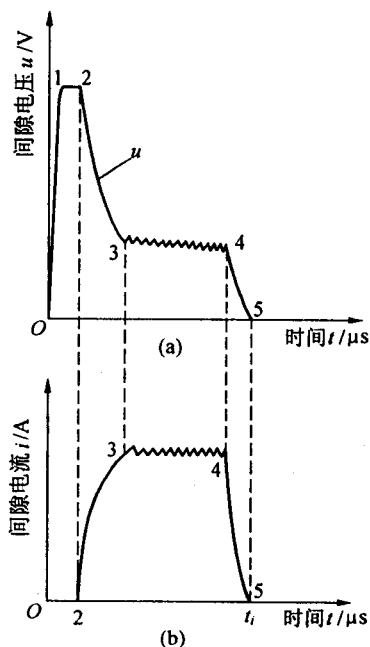


图 1.3 极间放电电压和电流波形

0~1—电压上升沿;1~2—击穿延时;
2~3—电压下降、电流上升沿;
3~4—火花维持电压和维持电流;
4~5—电压、电流下降沿

二、介质热分解、电极材料熔化、气化热膨胀

极间介质一旦被电离、击穿,形成放电通道后,脉冲电源使通道间的电子高速奔向正极,正离子奔向负极。电能变成动能,动能通过碰撞又转变为热能。于是在通道内正极和负极表面分别成为瞬时热源,达到很高的温度。通道高温将工作液介质气化,进而热裂分解气化,如煤油等碳氢化合物工作液,则高温后裂解为氢气 H_2 (约占 40%)、乙炔 C_2H_2 (约占 30%)、甲烷 CH_4 (约占 15%)、乙烯 C_2H_4 (约占 10%) 和游离碳黑等;水基工作液则热分解为 H_2 、 O_2 的分子甚至原子等。正负极表面的高温除使工作液汽化、热分解气化外,也使金属材料熔化甚至沸腾气化。这些气化后的工作液和金属蒸气,瞬间体积猛增,在放电间隙内成为气泡,迅速热膨胀,就像火药、爆竹点燃后那样具有爆炸的特性。观察电火花加工过程,可以看到放电间隙间冒出气泡,工作液逐渐变黑,听到轻微而清脆的爆炸声。电火花加工主要靠热膨胀和局部微爆炸,使熔化、气化了电极材料抛出蚀除,此过程相当于图 1.3(a)、(b) 中的 3~4 段。

三、电极材料的抛出

通道和正负极表面放电点瞬时高温使工作液气化和金属材料熔化、气化,热膨胀产生很高的瞬时压力。通道中心的压力最高,使气化了的气体体积不断向外膨胀,形成一个扩张的“气泡”。气泡上下、内外的瞬时压力并不相等,压力高处的熔融金属液体和蒸气,就被排挤、抛出而进入工作液中,这一过程相当于图 1.3(a)、(b) 中 3~4 段的后期。

由于表面张力和内聚力的作用,使抛出的材料具有最小的表面积,冷凝时凝聚成细小的圆球颗粒(直径约 $0.1 \sim 300 \mu m$, 随脉冲能量而异)。图 1.4(a)、(b) 为放电过程中放电间隙状态的示意图。

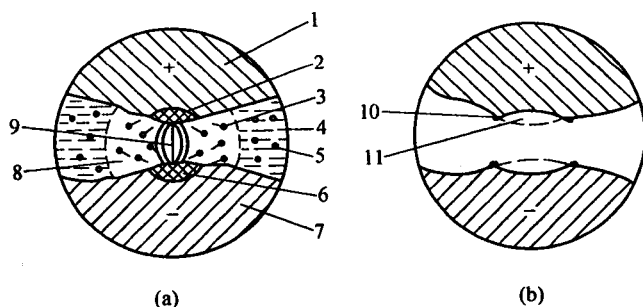


图 1.4 放电间隙状况示意图

1—阳极;2—从阳极上抛出金属的区域;3—熔化的金属微粒;4—工作液;5—在工作液中凝固的金属微粒;6—在阴极上抛出金属的区域;7—阴极;8—气泡;9—放电通道;10—翻边凸起;11—凹坑

实际上熔化和气化了金属在抛离电极表面时,向四处飞溅,除绝大部分抛入工作液中收缩成小颗粒外,还有一个小部分飞溅、镀覆、吸附在对面的电极表面上。这种互相飞溅、镀覆以及吸附的现象,在某些条件下可以用来减少或补偿工具电极在加工过程中的损耗。

半裸在空气中进行电火花加工时,可以见到橘红色甚至蓝白色的火花四溅,它们就是被瞬时、局部高压微爆炸抛出的金属高温熔滴和小屑,与砂轮磨削时飞溅出的火花有些类似。

观察铜打钢电火花加工后的电极表面时,可以看到钢上粘有铜、铜上粘有钢的痕迹。如果进一步分析电加工后的产物,在显微镜下可以看到除了游离碳粒、大小不等的铜和钢的球状颗

粒之外,还有一些钢包铜、铜包钢、互相飞溅包容的颗粒。此外还有少数由气态金属冷凝成的中心带有空泡的空心球状颗粒产物。

实际上,金属材料的蚀除、抛出过程远比上述讲的复杂。放电过程中工作液不断气化,正极受电子撞击、负极受正离子撞击,电极材料不断熔化、气化,气泡不断扩大。当放电结束后,气泡温度不再升高,但由于液体介质惯性作用使气泡继续扩展,致使气泡内压力急剧降低,甚至降到大气压以下,形成局部真空,使在高压下溶解在熔化和过热材料中的气体析出,材料本身在低压下也再沸腾。由于压力的骤降,使熔融金属材料及其蒸气从小坑中再次爆沸飞溅而被抛出,超高速摄影的图片证实了这些论断。

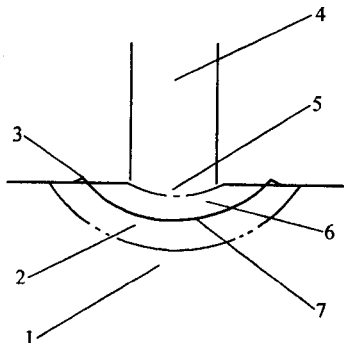


图 1.5 放电痕剖面示意图

熔融材料抛出后,在电极表面形成放电痕,如图 1.5 所示。熔化区未被抛出的材料冷凝后残留在电极表面,形成熔化层,在四周形成稍凸起的翻边。熔化层下面是热影响层,再往下才是无变化的材料基体。上述过程,发生在图 1.3(a)、(b)中 4~5 段,甚至更后的脉冲间隔时间内。

总之,材料的抛出是热爆炸力、电动力、流体动力等综合作用的结果,对这一复杂的抛出机理的认识还在不断深化中。

正极、负极受电子、正离子撞击的能量、热量不同,不同电极材料的熔点、气化点不同,脉冲宽度、脉冲电流大小不同,正、负电极上被抛出材料的数量也不会相同,目前还无法精确定量计算,但它们对加工速度、电极损耗、表面质量和加工精度等工艺指标却有很大影响,值得进一步研究。

四、极间介质的消电离

随着脉冲电压的结束,脉冲电流也迅速降为零,图 1.3 中 4~5 段标志着一脉冲放电结束,但此后仍应有一段间隔时间,使间隙介质消电离,即放电通道中的带电粒子复合为中性粒子,恢复本次放电通道处间隙介质的绝缘强度,以及降低电极表面温度等,以免下次总是重复在同一处发生放电而导致电弧放电,从而保证在别处按两极相对最近处或电阻率最小处形成下一次击穿放电通道。

在加工过程中产生的电蚀产物(如金属微粒、碳粒子、气泡等)如果来不及排除、扩散出去,就会改变间隙介质的成分,并降低绝缘强度。脉冲火花放电时产生的热量不及时传出,带电粒子的自由能不易降低,将大大减少复合的几率,使消电离过程不充分,结果将使下一个脉冲放电通道始终集中在某一部位,使介质和金属表面局部过热而破坏消电离过程。这样脉冲火花放电将恶性循环,转变为有害的稳定电弧放电。同时工作液局部高温分解后可能结碳,在该处堆积结聚成焦粒而在两极间搭桥,使加工无法进行下去,并烧伤电极和工件。

由此可见,为了保证电火花加工过程正常地进行,在两次脉冲放电之间一般要有足够的脉冲间隔时间 t_0 ,这一脉冲间隔时间的选择,不仅要考虑介质本身消电离所需的时间(与脉冲能量有关。但总的来说,消电离时间较快,只需 $5 \sim 50 \mu s$),还要考虑电蚀产物排离放电区域的难易程度(与脉冲爆炸力大小、放电间隙大小、抬刀及加工面积有关)。此外还应留有余地,使击穿、放电点分散、转移,否则若常在某一点附近放电,容易形成电弧。

到目前为止,人们对于电火花加工微观过程的了解还是很不够的,诸如工作液成分的作用,间隙介质的击穿,放电间隙内的状况,正负电极间能量的转换与分配,材料的抛出,电火花加工过程中热场、流场、力场的变化,通道结构及其振荡,以及煤油工作液的热分解、裂变,带电碳微粒在正电极上的吸附等胶体化学现象等等,都还需要进一步深入研究。

1.4 电火花加工常用术语和符号

1980年前后,我国电加工学会参照国际电加工界的电火花加工术语、定义和符号,制订了我国电火花加工的术语、定义和符号(试行稿),以有利于国内外学术交流、图书出版和学生教育培养等。现将电火花加工中常用的主要名词术语和符号摘录如下。

一、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,有时简称工具或电极(见图 1.6)。

二、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一层距离间隙。在加工过程中,则称为加工间隙 S ,它的大小一般在 $0.01 \sim 0.5 \text{ mm}$ 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 1.6)。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} 。

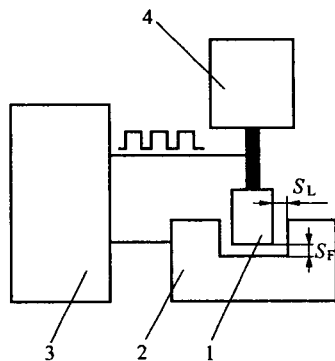


图 1.6 电火花加工示意图

1—工具电极；2—工件；3—脉冲电源；
4—伺服进给系统

三、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。最早用的是 RC 线路脉冲电源,稍后又有电子管脉冲电源、闸流管脉冲电源,现在广泛采用的是晶体管脉冲电源和可控硅脉冲电源。

四、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,用作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 1.6)。我国早期电火花加工机床中的伺服进给系统是液压式的,靠液压油缸和活塞产生进给运动,用喷嘴-挡板电机机械转换器或电液压伺服阀(后者用于精密、高档电火花加工机床)来控制油缸、活塞的运动速度和方向,实现伺服进给。现在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。

五、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。

六、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碳黑,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。

七、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_o 、峰值电压 $\hat{u}_i$ 、峰值电流 $\hat{i}_i$ 等脉冲参数(见图 1.7 及以下解释),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参数称为加工条件。

八、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 1.7)。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, $t_i < 50 \mu s$ 。

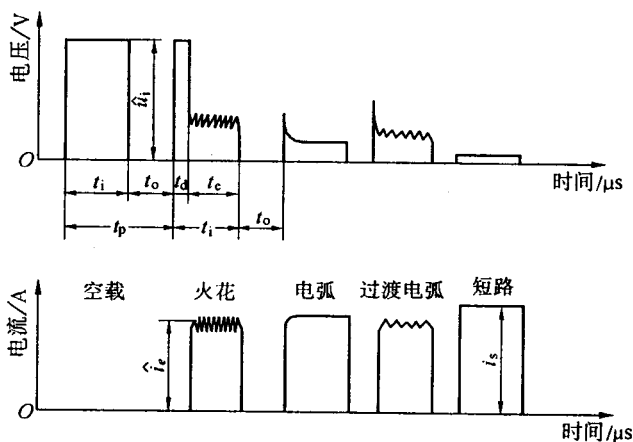


图 1.7 脉冲参数与脉冲电压、电流波形

九、脉冲间隔 $t_o(\mu s)$

脉冲间隔简称脉间或间隔,也称脉冲停歇时间。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 1.7)。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。

十、放电时间(电流脉宽) $t_c(\mu s)$

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 1.7)。 t_i 和 t_c 对电火花加工的生产率、表面粗糙度和电极损耗等有很大影响,但实际起作用的是电流脉宽 t_c 。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