

SHIYONG DIAN JIAGONG JISHU

SHIYONG DIAN JIAGONG JISHU

实用电加工技术

赵万生 刘晋春 等编著

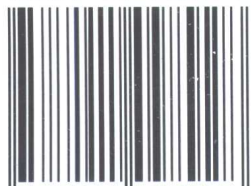


机械工业出版社
China Machine Press

● ISBN 7-111-09892-7/TG-1174

封面设计 / 电脑制作 : 陈沛

ISBN 7-111-09892-7



9 787111 098928 >

定价: 32.00 元

地址: 北京市百万庄大街22号
联系电话: (010) 68326294

邮政编码: 100037

网址: <http://www.cmpbook.com>

E-mail: online@cmpbook.com



实 用 电 加 工 技 术

赵 万 生 刘 晋 春 等 编 著



机 械 工 业 出 版 社

本书对电火花加工、数控电火花线切割加工、电解加工和电铸、刷镀加工进行了理论联系实际的论述,阐述了它们的基本原理、基本设备、基本工艺规律、加工特点和主要适用范围;对每种方法列举了多个加工实例,使读者可以开阔思路、举一反三,并能对电火花加工、数控电火花线切割加工、电解加工、电铸、刷镀等技术融会贯通,综合运用。

图书在版编目 (CIP) 数据

实用电加工技术/赵万生等编著. —北京:机械工业出版社,
2002.4
ISBN 7-111-09892-7

I. 实… II. 赵… III. 电火花加工 IV. TG661

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 009274 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:季顺利 版式设计:冉晓华 责任校对:魏俊云
封面设计:陈 沛 责任印制:路 琳
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2002 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·21.5 印张·529 千字
0 001—4 000 册
定价:32.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

电加工技术是常规切削、磨削加工技术的重要补充和发展。在发展过程中它们相互借鉴、渗透,形成了电火花铣削、电火花磨削和电化学磨削、研磨等电加工新工艺。

电加工技术中的几种主要工艺方法包括电火花加工、数控线切割加工和电化学(电解和电铸、刷镀等)加工,也是相互促进,与传统加工彼此交叉运用的。例如生产中最常见的冲模、型腔模具,可以用普通铣床、数控铣床或加工中心加工,也可用电火花穿孔成形机床、数控电火花线切割机床及电解加工机床进行加工。一般情况下,往往是淬火前先用切削法粗加工,淬火后再用电火花或线切割加工成形,有时还交替使用各种电加工工艺。例如线切割加工硬质合金冲模,须先用电火花高速打孔机加工出线切割的穿丝工艺孔,用数控线切割加工出冲模或拉丝模的型孔后,往往还需用电火花加工出落料空刀槽或拉丝模出入口处的锥角;电火花及线切割加工完模具后,往往还需用机械研磨或电解电火花超声波抛光模具表面,改善其表面粗糙度和去除其表面变质层,有时还需用电化学方法在模具表面加工出仿皮革花纹。有些电火花成形加工用的工具电极、甚至整套模具,可以采用电化学方法——电铸(快速电铸)来制造。对已淬火的耐热钢、不锈钢、硬质合金上的孔可用电火花或电解加工。对 $\phi 0.3\text{mm}$ ~ $\phi 3\text{mm}$ 深 $100\sim 300\text{mm}$ 的深小孔、斜孔,用高速电火花小孔加工机床是轻而易举的事情,对直径 $0.05\sim 0.1\text{mm}$ 的精微细孔,则应采用电火花反拷电极进行加工或超声波电火花复合加工。

由此可见,作为从事机械制造的工程技术人员,除了需要更好地掌握常规的机械制造工艺技术外,还应补充、丰富电火花加工、数控线切割加工和电化学加工等新的电加工知识,而且要求能融会贯通,综合运用。本书就是针对上述需求而编写的。

本书由哈尔滨工业大学赵万生教授(博导)、刘晋春教授(博导)、赵家齐教授、张学仁教授、郭永丰副教授、耿春明副教授、刘华工程师等编著。全书由中国科技大学于华教授主审。

由于时间仓促,书中难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正!

编者

本书所用主要符号

A	加工面积	l	长度
a	宽度,有效离子浓度	M	数控加工中辅助功能代码
B	宽度,分隔符	m	质量
b	宽度,缩放量	$NR_{1,2,3,4}$	线切割逆圆指令
C	电容,热容,尺寸,双曲线常数	$\bar{P}$	平均功率
c	比热容	p	压力、压强,能量密度
D	直径,停机码	q	蚀除量
d	直径	q'	单个脉冲蚀除量
E	工具电极,电规准代号	q_a	正极(阳极)蚀除量
e	电子负电荷	q_c	负极(阴极)蚀除量
F	作用力,偏差值;法拉第常数	q_g	气体流量
f	钼丝偏移量	q_l	电解液流量
f_p	频率	q_q	气化热
G	重力,计数方向	q_r	熔化热
G	数控加工中准备功能代码	R	电阻,半径
g	重力加速度	R_a	微观轮廓平面度的平均算术偏差值
H	磁场强度,高度	$R_{\max}$	微观轮廓平面度的最大高度值
$H_{\max}$	上一规准加工后表面微观不平度最大 值	R_z	微观不平度平均高度值
$h_{\max}$	本规准加工后表面微观不平度最大值	r	半径
h	深度,高度,厚度	S	放电间隙,加工间隙,位移量;顺圆
I	电流;纸带孔符号	S_B	最佳放电间隙
I_o	同步孔符号	S_F	端面放电间隙
I_p	峰值电流	S_L	侧面单边放电间隙
i	电流密度,间隙电流	S_m	物理因素造成的机械间隙
i_a	切断电流密度	$SR_{1,2,3,4}$	线切割顺圆指令
i_c	放电电流	S_V	伺服参考电压
$\hat{i}_c$	脉冲电流幅值,峰值电流	T	温度
$\bar{i}_c$	平均放电电流	T_f	沸点,气化点
i_s	短路电流	T_r	熔点
$\hat{i}_s$	短路峰值电流	t	时间
K	某种常数,腐蚀系数,传热系数;质量电 化学当量	t_c	充电时间
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_d	击穿延时
K_u	与工作液有关的常数	t_e	放电时间,电流脉冲宽度
K_R	与材料有关的常数	t_i	脉冲宽度(简称脉宽),电压脉冲宽度
L	电感,长度	t_o	脉冲间隔(简称脉间)
$L_{1,2,3,4}$	线切割直线指令	t_p	脉冲周期
		u	电压,间隙电压
		u_C	电容器充电电压
		u_d	击穿电压

u_c	放电电压	Δ_a	切断间隙
$\bar{u}_c$	平均电压	Δ_b	平衡间隙
$\dot{u}_c$	开路电压,脉冲峰值电压	Δ_f	端面间隙
U	平均间隙电压,电位差	Δ_n	法向间隙
U_a	阳极电压	Δ_o	起始间隙
U_c	阴极电压	Δ_s	侧面间隙
U_R	欧姆电压降	α	热扩散率,落料角,夹角
U^0	标准电极电位	β	刃口斜度;加工电流与短路电流的最佳比值
U'	平衡电极电位	δ	放电间隙,单边缩小量
V	体积,电位	η	效率,电流效率
v	进给速度	θ	工具电极的体积相对损耗率,角度,旋转运动
v_A	加工速度(以长度表示)	θ_L	长度相对损耗率
v_c	阳极蚀除速度	κ	温度扩散率
v_c	阴极进给速度	λ	热导率,有效脉冲利用率
v_d	工具电极的进给速度	ρ	密度,电阻率
v_{dA}	空载时工具电极的进给速度	σ	电导率
v_{d0}	短路时工具电极的回退速度	τ	时间常数,脉宽系数
v_E	工具电极损耗速度	ω	圆频率,角速度;体积电化学当量
v_m	加工速度(以质量表示)	$\varphi, \varphi_0, e, s, a, e'$	相对放电时间比,或称相对放电时间率,角标 d 表示空载、e 表示火花、s 表示短路、a 表示电弧、e' 表示不稳定火花放电
v_k	工件蚀除速度	ϕ	平均相对放电时间率
v_n	法向进给速度	Φ	平均绝对放电时间率
v_s	走丝速度	ψ	占空比
V_{sp}	加工效率		
v_w	加工速度(以体积表示)		
W	宽度,能量,功,工件		
W_M	单个脉冲能量		
Z	加工指令,加工余量;气液混合比		
Δ	加工间隙		

目 录

前言

本书所用主要符号

第 1 章 概述 1

- 1.1 电加工技术的范畴、
分类及特点 1
- 1.2 电加工技术的发展 1
- 1.3 几种电加工方法的综合比较
及主要适用范围 2
- 1.4 电加工对材料可加工性和结构
工艺性等的影响 3

第 2 章 电火花加工技术 5

- 2.1 电火花加工的基本原理、特点、
工艺类型及适用范围 5
 - 2.1.1 电火花加工的原理和机理 5
 - 2.1.2 电火花加工的特点 10
 - 2.1.3 电火花加工的工艺类型及适用
范围 11
- 2.2 电火花加工的机床设备 12
 - 2.2.1 电火花加工典型机床型号
及分类 12
 - 2.2.2 电火花加工机床设备的
组成部分 14
 - 2.2.3 电火花加工机床的工作液和循环
过滤系统 17
 - 2.2.4 电火花加工机床的脉冲
电源 19
 - 2.2.5 电火花加工机床的伺服进给和参数
控制系统 26
 - 2.2.5.1 电火花加工用的伺服
进给系统 26
 - 2.2.5.2 电火花加工用的参数
控制系统 32
 - 2.2.6 电火花加工机床的数控
系统 36
 - 2.2.7 电火花加工机床主要精度和技术

指标检验 41

- 2.2.7.1 电火花穿孔成形加工机床的
几何精度 43
- 2.2.7.2 数控电火花加工机床的
数控精度 46
- 2.2.7.3 电火花穿孔成形加工机床
的工作精度（加工技术指标
考核） 48
- 2.3 电火花加工的工艺规律和
质量控制 49
 - 2.3.1 影响电火花蚀除量的主要
因素 49
 - 2.3.2 电火花加工时工件的加工速度
和工具电极的损耗速度 53
 - 2.3.3 电火花加工的尺寸和形状精度
及其控制 56
 - 2.3.4 电火花加工的表面质量 57
 - 2.3.5 电火花加工的工艺曲线图表
和正确选择电火花加工的工艺
规准 60
 - 2.3.5.1 电火花加工的工艺
曲线图表 60
 - 2.3.5.2 正确选择电火花加工工艺
参数规准 70
- 2.4 电火花穿孔加工工艺及
应用实例 71
 - 2.4.1 电火花简单穿孔、套料
加工 71
 - 2.4.2 冲模电火花加工的要点 73
 - 2.4.3 简单方孔冲模的电
火花加工 79
 - 2.4.4 电机转子冲孔落料模的
电火花加工 80
 - 2.4.5 钟表齿轮精密冷冲模的电
火花加工 82
 - 2.4.6 小孔、小深孔、异形小孔、多孔、微
孔等的电火花加工 83

2.4.7 超声波电火花复合 加工小孔	91
2.5 电火花成形加工工艺及 应用实例	95
2.5.1 单工具电极直接成形法	95
2.5.2 单电极平动、摇动加工法	98
2.5.3 分解工具电极法	103
2.5.4 手动侧壁修光法	104
2.5.5 多工具电极更换法	104
2.5.6 对开模（无毛边模具） 加工实例	105
2.5.7 洗衣机调节螺母注塑模 加工实例	105
2.5.8 锥齿轮精锻模加工实例	107
2.5.9 塑料叶轮注塑模加工实例	108
2.5.10 高精度压胶型腔模加工 实例	110
2.5.11 用平动（摇动）功能加工 内螺纹	112
2.5.12 电火花展成法刻字（计算机辅助 电火花雕刻）	114
2.5.13 日本三菱公司数控电火花成形 加工机床的编程和选择规范 举例	115
2.6 其它电火花加工实用技术	121
2.6.1 电火花磨削	122
2.6.2 特殊材料的电火花加工	131
2.6.3 电火花表面强化和刻字	133
2.7 模具电火花加工技术中的一些 实用技巧	136
2.7.1 电火花加工中的冲、抽油	136
2.7.2 穿孔电极的反拷贝修正	140
2.7.3 电火花加工模具的后继抛光 及处理	141
2.7.4 混粉电火花大面积光泽 面加工	142
2.7.5 电火花加工实践数据的 积累整理	144
2.8 电火花加工时的防火及 技术保安	146
2.8.1 电火花加工中的技术安全 规程	146
2.8.2 正确执行电火花加工安全操作	

规程	147
----------	-----

第3章 电火花数控线切割加工 技术

3.1 电火花数控线切割加工的基本原理、 特点及适用范围	149
3.1.1 电火花数控线切割加工基本 原理	149
3.1.2 电火花线切割加工的特点	151
3.1.3 线切割加工的适用范围	152
3.2 电火花数控线切割的设备 类型及组成	152
3.2.1 电火花数控线切割加工设备 的类型	152
3.2.2 电火花数控线切割机床设备 的组成	154
3.2.3 电火花线切割加工机床 本体	154
3.2.4 电火花线切割加工机床的工作液 循环过滤系统	162
3.2.5 电火花线切割加工机床的 脉冲电源	164
3.2.6 电火花线切割加工机床的数控 系统和伺服进给等加工控制 系统	174
3.2.6.1 电火花线切割加工的数控 系统	174
3.2.6.2 电火花线切割的伺服进给等 加工控制系统	182
3.2.6.3 典型线切割微机控制器 电路分析	185
3.3 电火花线切割加工的数控编程 系统	195
3.3.1 人工数控线切割编程	196
3.3.2 计算机数控线切割自动 编程	207
3.4 电火花数控线切割加工的基本 工艺规律	209
3.4.1 电火花数控线切割加工的主要 工艺指标	209
3.4.2 电参数对线切割加工 指标的影响	209

3.4.3 非电参数对线切割加工指标的影响	210	4.4.3 表面质量	277
3.4.4 线切割加工工艺参数的选择	217	4.5 各种工艺类型的电解加工及其应用实例	278
3.4.5 电火花数控线切割加工产生废品的原因及预防方法	220	4.5.1 电解扩孔加工	278
3.5 电火花数控线切割加工工艺	222	4.5.2 电解型孔和型腔加工	279
3.5.1 电火花线切割加工的步骤及要求	222	4.5.3 电解套料加工	280
3.5.2 线切割常用工夹具、附件及工件的正确装夹方法	224	4.5.4 叶片的电解加工	281
3.5.3 数控线切割加工中的穿丝孔	230	4.5.5 电解倒棱去毛刺	282
3.5.4 电火花线切割加工的某些工艺技巧	231	4.5.6 电解刻字、印花	283
3.5.5 电火花数控线切割机床的应用扩展	234	4.5.7 小深孔束流电解加工	285
3.6 电火花数控线切割加工机床的精度检验方法	242	4.5.8 薄板上多个小孔的电解加工	285
3.7 电火花数控线切割加工应用实例	243	4.5.9 电解抛光	286
第4章 电化学加工技术	251	4.6 电解磨削和电解研磨加工	288
4.1 电化学加工的原理和工艺类型	251	4.6.1 电解磨削加工	288
4.1.1 电化学加工的原理	251	4.6.2 电解珩磨和研磨	295
4.1.2 电化学加工的工艺类型	257	4.7 电铸(快速电镀)技术	296
4.2 电解加工的工艺过程及正负极表面的电化学反应	257	4.8 刷镀(无槽电镀)技术	299
4.3 电解加工的基本设备	260	4.9 复合电镀技术	304
4.4 电解加工的生产率、加工精度和表面质量的基本规律	267	4.10 电化学加工中的技术防护和环境保护	304
4.4.1 电解加工的生产率及其影响因素	267	附录 A 国内外电火花成形机床主要生产厂商及其主要机床型号	307
4.4.2 电解加工的精度成形规律和加工精度	270	附录 B 国内外电火花数控线切割机床主要生产厂商及其主要机床型号	319
		附录 C 电化学加工主要机床设备和电加工外围工艺设备及其生产厂	328
		附录 D 电加工用主要附件、配件、消耗品及其生产厂	330
		参考文献	333

第 1 章 概 述

1.1 电加工技术的范畴、分类及特点

电加工技术是指常规、传统的切削、磨削加工以外的一些新的加工技术，它们主要是直接利用电能来对工件进行加工。

电加工的主要范畴和工艺类型有：

- 1) 靠电火花穿孔、成形的加工，简称电火花成形加工或简称电火花加工。
- 2) 电火花线切割加工，按控制类型又分为靠模仿形线切割、光电跟踪线切割和数字控制线切割（简称数控线切割）。现在应用最广泛的是数控线切割加工。
- 3) 电化学加工，又可分为：电解加工和电镀、电铸加工。前者是把工件表面无用的材料用电化学的方法电解去除；后者则是用电化学的方法在工件表面沉积、镀覆上一层有用的材料。

电加工相对于常规切削、磨削加工的特点是：

- 1) 不用机械能量、不靠切削力去除金属，而是直接利用电能，加工过程易于控制，易于自动化。
- 2) 加工过程中没有常规切削加工中的切削力，可以“以柔克刚”。可以加工薄壁、低刚度、弹性、微细、复杂零件。
- 3) 可以加工任何硬度的金属材料、导电材料，包括硬质合金和导电陶瓷、导电聚晶金刚石等。

正是由于这些特点，使得电加工技术在对难加工材料、复杂的表面和有特殊要求的工件加工方面大有用武之地，成为常规切削、磨削加工的重要补充和发展。

1.2 电加工技术的发展

电加工技术有它自己的发展过程。自 1919 年起，在德国、美国、前苏联就有人对此进行过探索。直到 1943 年，前苏联科学院院士拉扎连柯夫妇首次利用电容器充放电回路，发明了世界上第一台实用的电火花加工装置，1943 年 4 月获得了前苏联的发明证书，1946 年先后获得了法国、瑞士、美国、英国和瑞典的专利权。此后在前苏联科学院中央电工研究所的组织和领导下，开展了对电火花加工的机理、脉冲电源、控制系统、机床、工艺应用等各方面的研究，相继研制出 RC、RLC、RCLC 线路脉冲电源，脉冲发电机式脉冲电源、电子管、闸流管、晶闸管、晶体管式等脉冲电源和各种伺服控制系统的电火花加工机床。1957 年开始研究电火花线切割加工技术，把慢慢移动的铜丝作为线电极，在 xy 平面内可以切割出复杂的轮廓。在 1960 年前后发明研制出靠模仿形线切割加工机床，用一块薄的金属片做成与切割截面相同的形状作为样板靠模，当工作台在 $x(y)$ 方向移动时，保持电极丝与靠模样板“若接若离”状

态，按样板轮廓进行仿形切割。以后又研制出光电仿形线切割机床，免去了制作靠模样板的麻烦。当时苏联的电火花加工技术处于世界领先水平。随后美国、日本、瑞士、德国等奋起直追，日本三菱公司、瑞士阿奇公司在 20 世纪 50 年代初也先后研制出第一台电火花加工机床，其样机至今仍保留在该公司的陈列馆中。

我国开展对电加工技术研究的起步较早，自 1951 年起我国就开始了电火花加工的试验研究工作。1953 年大力推广电火花表面强化和电火花阳极机械刃磨。

1959~1960 年，我国科学院电工研究所、哈尔滨工业大学、上海交通大学先后派人去前苏联进修电加工技术，以后纷纷成立了电加工研究所、研究室。1960 年以后，我国的电加工技术从引进、仿制迅速走上独立自主、自行研究开发的道路。专业科研所、大专院校、电加工机床厂相结合，形成了电加工科研、电加工生产和电加工机床制造业。

在我国电加工发展史上值得特别提出的是，上海电表厂张维良于 1963 年创新性地研制出第一台高速走丝简易数控线切割样机，获国家发明创造奖，比瑞士阿奇公司早 5~7 年在线切割机床上采用数字程序控制系统。1967~1968 年间，上海复旦大学与上海交通电器厂联合研制成功了“复旦型”的高速走丝电火花数控线切割机床，形成了我国特有的线切割机床品种，是当时生产中应用面最广、数量最大的数控电加工机床。

1982 年南京江南光学仪器厂的孙昌树开发的共轭回转式电火花精密加工新工艺系统，获国家创造发明二等奖。以后还有聚晶金刚石电火花加工、大厚度线切割加工、扁电极数控组合加工喷丝板、晶闸管脉冲电源等项目先后获国家发明二、三、四等奖。

用电解加工抛光高射炮管和加工膛线的技术，1958 年在我国试验成功。以后在国防工厂中，广泛采用此法加工枪炮的膛线、花键孔、喷气发动机叶片等。在民品汽车、拖拉机、煤矿机械厂中，电解加工广泛用于加工各类锻模和特殊零件。

1.3 几种电加工方法的综合比较及主要适用范围

表 1-1、表 1-2 为几种常用电加工方法加工性能的综合比较和主要的适用范围。

表 1-1 几种常用电加工方法的综合比较

加工方法	可加工材料	工具损耗率 (%) (最低/平均)	材料去除率/ $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ (平均/最高)	可达到尺寸 精度/mm (平均/最高)	可达到表面粗 糙度 $R_a/\mu\text{m}$ (平均/最高)	主要适用范围
电火花加工	任何导电的金属 材料如硬质合金、耐 热钢、不锈钢、淬火 钢、钛合金 等	0.1/10	30/3000	0.03/0.003	10/0.04	从数微米的孔、槽到数米的超大型 模具、工件等。如圆孔、方孔、异形 孔、深孔、微孔、弯孔、螺纹孔以及冲 模、锻模、压铸模、塑料模、拉丝模，还 可刻字、表面强化、涂覆加工
电火花线切 割加工		较小 (可补偿)	20/200 ^① mm^2/min	0.02/0.002	5/0.32	切割各种冲模、塑料模、粉末冶金 模等二维及三维直纹面组成的模具 及零件。可直接切割各种样板、磁钢、 硅钢片冲片。也常用于钨、钨、半导体 材料或贵重金属的切割

(续)

加工方法	可加工材料	工具损耗率 (%) (最低/平均)	材料去除率/ $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ (平均/最高)	可达到尺寸 精度/mm (平均/最高)	可达到表面粗 糙度 $R_a/\mu\text{m}$ (平均/最高)	主要适用范围
电解加工	任何导电的金属 材料如硬 质合金、耐 热钢、不锈 钢、淬火 钢、钛合金 等	不损耗	100/10000	0.1/0.01	1.25/0.16	从细小零件到 1t 的超大型工件及模具。如仪表微型小轴、齿轮上的毛刺、涡轮叶片、炮管膛线、螺旋花键孔、各种异形孔、锻模、铸造模型,以及抛光、去毛刺等
电解磨削		1/50	1/100	0.02/0.001	1.25/0.04	硬质合金等难加工材料的磨削,如硬质合金刀具、量具、轧辊、小孔、深孔、细长杆磨削
电解研磨		0.01/0.1	0.1/1	0.005/0.001	0.03/0.01	工件尺寸的超精加工和表面的超精光整研磨、珩磨

① 线切割加工的金属去除率按惯例均用 mm^2/min 为单位。

表 1-2 电铸、电刷镀、复合电镀的综合比较

加工方法	可加工材料	表面沉积深度 /mm (最小/最大)	可达尺寸精 度/mm (平均/最高)	表面粗糙 度 $R_a/\mu\text{m}$ (平均/最高)	主要适用范围
电铸	可在金属或 非金属表面施 工	0.1/10	0.005/0.001	0.5/0.05	制造电火花加工用的成形电极,复制成形模具
电刷镀		0.2/2	0.005/0.001	0.8/0.08	修补已磨损的表面,表面改性
复合电镀		0.1/0.5	0.05/0.01	2/1	制造聚晶金刚石等复合镀层刀具,耐磨损、耐高温表面防护层

1.4 电加工对材料可加工性和结构工艺性等的影响

由于上述各种电加工工艺的特点以及逐渐广泛的应用,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,新产品的试制过程,产品零件设计的结构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 以往认为金刚石、硬质合金、淬硬钢、石英、玻璃、陶瓷等是很难加工的。现在已经广泛采用金刚石、聚晶(人造)金刚石制造的刀具、工具、拉丝模具,可以用电火花、电解、激光等多种方法来加工它们。材料的可加工性不再与硬度、强度、韧性、脆性等成直接的比例关系,对电火花、线切割加工而言,淬硬钢比未淬硬钢更易加工。

(2) 改变了零件的典型工艺路线 以往除磨削外,其它切削加工、成形加工等都必须安排在淬硬热处理工序之前,这是一切工艺人员决不可违反的工艺准则。特种加工的出现,改变了这种一成不变的程序格式。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硬引起热处理变形,一般都先淬硬而后加工。最为典型的是电火花线切割加工、电火花成形加工和电解加工等都必须先淬硬后加工。

电加工的出现还对工序的“分散”和“集中”产生了影响。以加工齿轮、连杆等型腔锻模为例,由于电加工时没有显著的切削力,机床、夹具、工具的强度、刚度不是主要矛盾。因

此，即使是较大的、复杂的加工表面，往往可用一个复杂工具、简单的运动轨迹、一次安装、一道工序加工出来。这样做工序比较集中。

(3) 改变了试制新产品的工序和工艺 采用光电、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圆柱齿轮（包括非圆柱齿轮，非渐开线齿轮），微电机定子、转子硅钢片，各种变压器铁心，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、模具及二次工具，大大缩短了试制周期。

(4) 电加工对产品零件的结构设计带来很大的影响 例如，花键孔、轴，枪炮膛线的齿根部分，设计上为了减少应力集中，常常设计成小圆角，但拉削加工时刀齿做成圆角对排屑不利，容易磨损，刀齿只能设计与制造成清棱清角的齿根，而用电解加工时由于存在尖角变圆现象，非采用小圆角的齿根不可。又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。喷气发动机涡轮也由于电加工而可采用整体结构。

(5) 改变了传统的结构工艺性好与坏的评判准则 过去对方孔、小孔、弯孔、窄缝等被认为是工艺性很“坏”的典型，对工艺、设计人员是非常“忌讳”的，有的甚至是“禁区”。电加工的采用改变了这种现象。对于电火花穿孔、电火花线切割工艺来说，加工方孔和加工圆孔的难易程度是一样的。喷油嘴小孔、喷丝头小异形孔、涡轮叶片大量的小冷却深孔、窄缝及静压轴承、静压导轨的内油囊型腔等，采用电加工后变难为易了。过去淬火前忘了钻定位销孔、铣槽等工艺，淬火后这种工件只能报废，现在则大可不必，可用电火花打孔、切槽进行补救。相反有时为了避免淬火开裂、变形等影响，故意把钻孔、开槽等工艺安排在淬火之后，这在不采用电加工的条件下，曾被认为是一种过错。

第 2 章 电火花加工技术

2.1 电火花加工的基本原理、特点、工艺类型及适用范围

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蚀除掉。由于放电过程中可见到火花, 故称之为电火花加工, 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和有特殊要求的零部件, 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。

2.1.1 电火花加工的原理和机理

1. 电火花加工的原理

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, 以达到对工件的尺寸、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拉扎连柯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) 使工具电极与工件被加工表面之间始终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 $10^{-7} \sim 10^{-3} \text{s}$, 即 $10 \sim 1000 \mu\text{s}$)。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 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 的两输出端相联接。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 2-2 所示。其中图 2-2a 表示单个脉冲放电后的电蚀坑,图 2-2b 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。

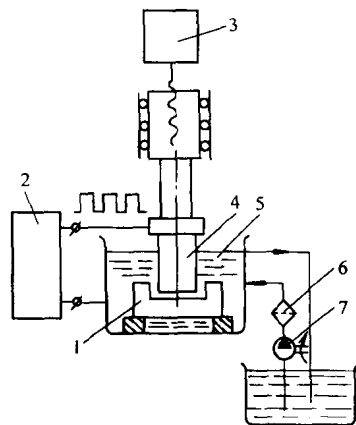


图 2-1 电火花加工原理示意图

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

2. 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。

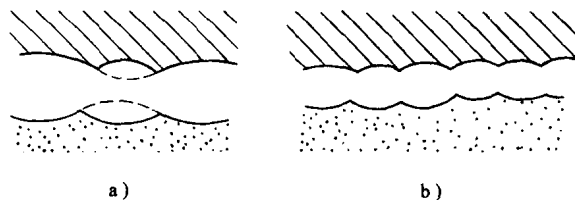


图 2-2 电火花加工表面局部放大图

(1) 极间介质的电离、击穿,形成放电通道 图 2-3 为矩形波脉冲放电时的电压(见图 2-3a)和电流波形(见图 2-3b)。当脉冲电压施加于工具电极与工件之间时(图 2-3 中 $O \sim 1$ 段和 $1 \sim 2$ 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凸凹不平的,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,当负极表面某处的电场强度增加到 10^5V/mm ($100 \text{V}/\mu\text{m}$) 左右时,就会产生场致电子发射,由负极表面向正极逸出电子。在电场作用下电子高速向正极运动,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。另有一种由于负极表面温度高,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,如果电极表面冷却不好,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迅速下降到火花维持电压(一般约为 $20 \sim 30 \text{V}$),电流则由 0 上升到某一峰值电流(图 2-3a、b 中 2~3 段)。如果间隙电路中导线有电感,或脉冲电源开关元件频率响应低,则上升、下降段都会不陡。

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 10000°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

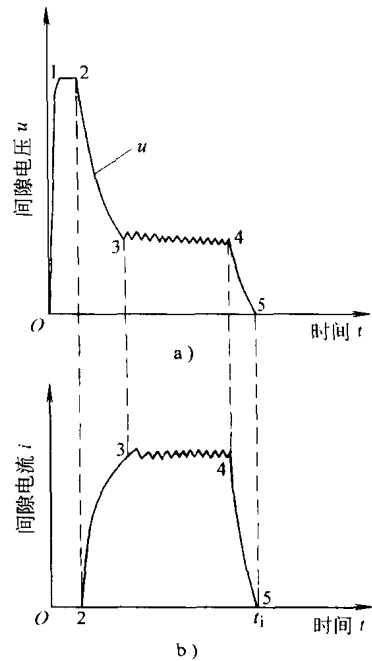


图 2-3 极间放电电压和电流波形

O~1—电压上升段 1~2—击穿延后

2~3—电压下降、电流上升段

3~4—火花维持电压和维持电

流 4~5—电压、电流下降段