

电火花 加工技术问答

郭洁民 编著



化学工业出版社

电火花加工技术问答

郭洁民 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书按章节以问答的形式解答各种电火花加工的技术问题,包括电火花加工技术基础知识;电火花加工机床设备;电火花加工工艺;电火花加工相关技能;电火花加工的综合技巧;电火花加工的疑点难点;电火花加工的新设备、新技术、新工艺、新材料及其他电火花加工的若干问题。力求简单明了,通俗易懂、回答明白透彻、论述清楚、特别是电火花加工技术的基本概念、基本常识、说明较详细,既有一定的理论深度,又有丰富的实践内容,同时列举大量典型加工实例,是从事电火花加工的工程技术人员的必读参考书籍,对在实际工作中遇到的具体问题,可从中获得帮助;该书还可供从事模具设计人员和模具工艺编制人员参考;并可作为从事电火花加工设备操作工人的培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

电火花加工技术问答/郭洁民编著. —北京:化学工业出版社, 2007. 10

ISBN 978-7-122-01323-1

I. 电… II. 郭… III. 电火花加工-问答 IV. TG661-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 159067 号

责任编辑:王苏平

文字编辑:余纪军

责任校对:宋 玮

装帧设计:关 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 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 22¼ 字数 580 千字 2008 年 2 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: 48.00 元

版权所有 违者必究

前 言

电火花加工技术是现代生产制造技术中的一个重要组成部分，在计算机技术飞速发展的推动下，电火花加工技术也在不断的发展，并广泛地应用在航空、航天、航海、汽车、仪器仪表、电子工程、电力工程、机械制造、建筑工程、地质勘探工程及计算机等行业，已成为现代制造业不可缺少的关键技术。

随着电火花加工技术的不断发展，应用范围的不断扩大，出现了各式各样的电火花加工技术问题。为了更好地普及推广电火花加工技术，解答各种疑点、难点的问题，本人参阅了大量的文献资料，结合四十多年的生产实践经验和学习心得体会，编写了本书。

《电火花加工技术问答》一书，按章节以问答题的形式对电火花加工技术问题进行了较系统地、由浅入深地讲解，着重阐述电火花加工技术基础知识，尤其注重通过典型加工实例，讲述加工原理、工艺方法及应用技术，以利于读者尽快掌握电火花加工的工艺过程，更好地掌握电火花加工技术。

全书共分八章：电火花加工技术基础；电火花加工的机床设备；电火花加工的工艺基础；电火花加工的相关技能；电火花加工的综合技巧；电火花加工的疑点、难点；电火花加工的新设备、新技术、新工艺、新材料；其他电火花加工。总共 320 道问答题，分别进行解答讲解，力求简单明了，通俗易懂，回答问题定义准确、表达清楚。该书是从事电火花加工的工程技术人员的必读书籍，对在实际工作中遇到的具体问题，可从中获得帮助；该书还可供从事模具设计的人员和模具工艺编制人员参考；并可作为从事电火花加工设备操作人员的培训教材。

本书在编写过程中，引用了大量电火花加工技术图表和数据，均为我国电加工工程技术人员的辛勤劳动成果；同时参阅了国内外电火花加工界同行的有关资料，并得到很多专家和同志的支持与帮助。在此借本书出版的机会向这些同志表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不足和疏漏之处，恳切希望电火花加工行业的专家、学者及广大读者给予指正，提出宝贵意见。

编者

2007 年 8 月

目 录

第一章 电火花加工技术基础

一、电火花加工的基本原理	1	4. 怎样利用传热效应?	14
1. 什么是电火花加工?	1	5. 怎样选择合适的电极材料?	14
2. 什么是电火花加工的基本原理?	1	五、电火花加工的加工速度	15
3. 电火花加工的特点是什么?	3	1. 什么是电火花加工的加工速度?	15
4. 电火花加工是如何分类的?	3	2. 为什么说脉冲能量影响加工速度?	15
5. 电火花加工常用名词、术语及符号是 什么?	3	3. 为什么说加工条件影响加工速度?	16
二、电火花加工的机理	6	六、电火花加工的加工精度	17
1. 什么是电火花加工的机理?	6	1. 什么是电火花的加工精度?	17
2. 电火花放电通道是如何形成的?	6	2. 为什么说机床精度影响加工精度?	18
3. 电火花放电是如何熔化、汽化金属 材料的?	7	3. 为什么说操作工艺影响加工精度?	19
4. 电极材料是如何抛出的?	8	4. 为什么说放电间隙影响加工精度?	19
5. 极间介质是如何消电离的?	8	5. 为什么说电极损耗影响加工精度?	20
三、电火花加工的放电腐蚀量	9	6. 为什么说加工斜度影响加工精度?	20
1. 什么是放电腐蚀量?	9	7. 为什么说棱角倒圆影响加工精度?	20
2. 极性效应是如何影响放电腐蚀量的?	9	七、电火花加工的表面质量	21
3. 电参数是如何影响放电腐蚀量的?	10	1. 什么是电火花加工的表面质量?	21
4. 金属材料热学物理常数是如何影响放电 腐蚀量的?	11	2. 电火花加工表面粗糙度的特点是什么?	21
5. 加工稳定性是如何影响放电腐蚀量的?	12	3. 影响电火花加工表面粗糙度的因素有 哪些?	21
四、电火花加工的电极损耗	12	4. 什么是电火花加工表面变质层? 其特点 是什么?	23
1. 什么是工具电极损耗?	12	5. 电火花加工表面显微裂纹是怎么形成的? 其特点是什么?	24
2. 怎样正确选择加工极性?	13	6. 电火花加工表面机械性能的特点 是什么?	25
3. 怎样利用吸附效应?	13		

第二章 电火花加工的机床设备

一、电火花穿孔、成形加工机床	26	二、电火花加工的机床主体	31
1. 机床的名称和型号规格是什么?	26	1. 什么是机床主体? 它由哪几部分组成?	31
2. 机床主要参数标准是什么?	26	2. 床身、立柱的作用是什么? 其技术要求 是什么?	31
3. 机床的结构形式有哪几种? 特点是 什么?	26	3. 主轴头的作用是什么? 其技术要求是 什么?	31
4. 机床主要由哪几部分组成? 其作用是 什么?	28	4. 主轴头的结构由哪几部分组成?	32
5. 机床一般传动关系是什么?	29	5. 工作台的作用是什么? 其结构形式有哪 几种?	33
6. 机床是如何润滑与保养的?	30		

三、电火花加工的机床附件	34	3. 伺服进给系统是如何分类的?	50
1. 常见的机床附件有哪些?	34	4. 自动进给调节系统由哪几部分组成?	50
2. 可调节工具电极角度的卡头用途和作用是什么?	34	5. 什么是电-机械自动进给调节系统?	52
3. 平动头的用途和动作原理是什么?	34	六、电火花加工的自适应控制系统	52
4. 平动头的结构由哪几部分组成?	35	1. 什么是自适应控制系统?	52
5. 对平动头的技术要求是什么?	36	2. 什么是约束适应控制?	53
6. 平动头加工的特点是什么?	36	3. 什么是最佳自适应控制?	53
7. 平动头的操作及维护保养是什么?	37	4. 自适应控制的必要性是什么?	53
8. 油杯的作用是什么? 应注意什么?	38	5. 自适应控制系统中的控制环节是什么?	54
9. 永磁吸盘的用途和作用是什么?	39	6. 自适应控制系统的组成是什么?	55
10. 光栅数显的测量原理是什么?	39	七、电火花加工的数控系统	57
11. 光栅尺、数显表的技术参数是什么?	39	1. 什么是电火花加工的数控系统?	57
12. 光栅数显的基本功能是什么?	40	2. 什么是可控轴数和联动轴数?	57
四、电火花加工的脉冲电源	41	3. 数控进给分为几种控制系统?	57
1. 脉冲电源的作用是什么?	41	4. 单轴数控系统的工作原理是什么?	58
2. 对脉冲电源的要求是什么?	41	5. 多轴数控系统的工作原理是什么?	59
3. 脉冲电源是如何分类的?	41	6. 什么是 ISO 代码?	59
4. RC 线路脉冲电源的工作原理是什么?	41	7. 什么是数控摇动加工?	60
5. RC 线路脉冲电源的优缺点是什么?	42	8. 数控摇动加工的作用是什么?	61
6. 晶闸管式脉冲电源的原理是什么? 其特点是什么?	43	9. 水平数控摇动伺服方式有哪几种?	61
7. 晶体管脉冲电源的原理是什么?	44	10. 数控系统应具备哪些功能?	62
8. 什么是高低压复合脉冲电源?	45	11. 数控系统的硬件结构是什么?	64
9. 什么是多回路脉冲电源?	46	12. 数控系统的软件结构是什么?	65
10. 什么是等脉冲电源?	47	八、电火花加工的过滤系统	66
11. 什么是高频分组和梳形波脉冲电源?	47	1. 工作液的作用是什么?	66
12. 微机控制式脉冲电源的原理是什么?	48	2. 电火花加工对工作液的要求是什么?	67
五、电火花加工的伺服系统	49	3. 常用工作液有哪几种?	67
1. 什么是伺服进给系统?	49	4. 工作液的循环方式有哪几种?	67
2. 对伺服进给系统的技术要求是什么?	49	5. 什么是工作液的循环过滤系统?	68
		6. 循环过滤装置有哪几种?	69
		7. 循环过滤系统工作过程是什么?	69

第三章 电火花加工的工艺基础

一、电火花加工的工具电极	71	12. 在设计加工型腔的工具电极时还需注意哪些问题?	80
1. 工具电极必须具备的基本条件是什么?	71	13. 制造电极的依据是什么?	82
2. 常用电极材料有哪些?	72	14. 为什么工具电极的制作必须考虑工艺基准问题?	82
3. 工具电极材料的选择原则是什么?	73	15. 为什么工具电极的制作必须考虑精度稳定性问题?	83
4. 常见的电极结构形式有哪些?	73	16. 机械加工制造电极的优缺点是什么?	83
5. 确定电极结构的原则是什么?	75	17. 制造纯铜电极的方法有哪些? 其特点是什么?	83
6. 工具电极设计的原则是什么?	75	18. 制造石墨电极的方法有哪些? 其特点是什么?	84
7. 穿孔加工电极尺寸是如何确定的?	76	19. 制造钢电极的方法有哪些? 其特点	
8. 分级电极尺寸是如何确定的?	78		
9. 精密小孔穿透加工电极尺寸是如何确定的?	78		
10. 成形加工电极尺寸是如何确定的?	79		
11. 排气孔和冲液孔是如何设计的?	79		

是什么?	86	2. 冲模的主要结构是什么?	111
20. 为什么要根据配合间隙要求腐蚀工具电极?	86	3. 冲模的主要技术要求是什么?	112
21. 电极安装的目的是什么?	88	4. 冲模电火花加工的特点是什么?	113
22. 常见的电极夹具有哪些?	88	5. 冲模中主要凹模的加工工艺是什么?	113
23. 电极装夹时应注意什么?	89	6. 什么是“钢打钢”、“反打正用”直接配合加工法? 举例说明。	116
24. 什么是工具电极工艺基准的校正?	89	7. 什么是间接配合加工法? 举例说明。	117
25. 什么是工具电极人工校正?	89	8. 什么是阶梯工具电极加工法? 举例说明。	119
26. 常见的工具电极校正方法有哪些?	90	9. 什么是二次电极加工法? 举例说明。	121
27. 什么是3R快速装夹?	91	10. 冲模电火花加工还应注意哪些问题?	123
二、电火花加工的工件	92	11. 哪些冲模适合采用数控线切割加工?	123
1. 选择工件材料的依据是什么?	92	12. 哪些冲模适合采用电火花方法加工?	124
2. 常用工件金属材料有哪些? 其名称、牌号及用途是什么?	92	五、型腔模电火花加工工艺及实例	124
3. 如何选择定位基准?	93	1. 什么是型腔模? 包括哪些类型?	124
4. 怎样按工件工艺基准进行校正?	94	2. 型腔模的主要结构是什么?	126
5. 对工件夹紧的要求是什么?	94	3. 型腔电火花加工的工艺特点是什么?	127
6. 常见工件压装方法有哪些?	96	4. 型腔电火花加工对设备的要求是什么?	127
7. 常见的对正方法有哪些?	98	5. 什么是单电极直接成形法? 举例说明。	127
8. 什么是3R工艺基准定位系统?	100	6. 什么是手动侧壁修光法? 举例说明。	130
三、电火花加工的工艺规范	101	7. 什么是分解工具电极加工法? 举例说明	131
1. 什么是电火花加工的工艺规范?	101	8. 什么是多工具电极更换加工法? 举例说明。	134
2. 什么是冷冲模加工规范?	101	9. 什么是多工具电极组合加工法? 举例说明。	136
3. 什么是型腔模加工规范?	102	10. 什么是单电极平动加工法? 举例说明。	137
4. 如何确定平动量的大小?	102	11. 什么是单电极摇动加工法? 举例说明。	139
5. 平动量调节的原则与方法是什么?	103	12. 型腔电火花加工还应注意哪些问题?	146
6. 如何按工艺指标曲线和图表选择工艺参数?	103		
7. 正确选择电火花加工工艺参数规范的方法是什么?	108		
8. 电火花加工数据库是怎么回事?	109		
四、冲模电火花加工工艺及实例	110		
1. 什么是冲模? 冲模是怎么分类的?	110		

第四章 电火花加工的相关技能

一、作业前的准备	148	1. 机床操作的准备工作包括哪些内容?	153
1. 为什么要看懂电火花加工机床的使用说明书?	148	2. 怎样正确使用电极夹头?	154
2. 电火花加工的安全技术规程是什么?	149	3. 怎样正确使用油杯?	154
3. 如何正确执行电火花加工安全操作规程?	149	4. 怎样正确选择或配制工作液?	154
4. 什么是岗位责任制?	151	5. 怎样正确拆洗、更换过滤器?	154
5. 如何做到文明生产?	151	6. 一般电火花穿孔、成形加工机床的操作过程是什么?	155
6. 为什么要安全用电?	152	7. 一般电火花成形加工机床操作面板装置有哪些作用?	156
7. 机床维修保养的主要内容是什么?	153	8. 数控电火花成形加工机床操作过程是什么?	158
二、机床操作技能	153		

9. 数控电火花成形加工机床手控盒按键的功能是什么?	159	数控精度?	170
10. 数控电火花成形加工机床操作键盘的功能是什么?	159	4. 怎样检验电火花穿孔、成形加工机床的工作精度(加工技术指标考核)?	171
11. 数控电火花成形加工机床系统启动操作步骤是什么?	161	四、机床故障维修技能	174
三、机床精度与性能检验的技能	165	1. 怎样排除电火花机床电器的故障?	174
1. 电火花穿孔、成形加工机床的精度等级和技术指标是什么?	165	2. 怎样排除脉冲电源的故障?	177
2. 怎样检验电火花穿孔、成形加工机床的几何精度?	167	3. 怎样排除伺服电动机主轴头的常见故障?	180
3. 怎样检验数控电火花成形加工机床的		4. 怎样使用数控机床自诊断功能排除故障?	183
		5. 怎样排除数控机床机械方面的常见故障?	183

第五章 电火花加工的综合技巧

一、排屑与排气的技巧	186	3. 怎样进行电火花套料加工?	200
1. 为什么要进行排屑与排气?	186	4. 怎样进行穿孔电极的反拷贝修正?	200
2. 什么是冲液、抽液的排屑与排气?	186	5. 怎样用平动(或摇动)功能加工内螺纹或花纹、商标、字母?	201
3. 什么是“挤压”式的排屑与排气?	189	6. 怎样进行深孔的电火花加工?	202
4. 什么是“振动”式的排屑与排气?	190	7. 怎样进行硬质合金的电火花加工?	204
5. 怎样合理选择确定排气孔进行排屑与排气?	191	8. 怎样进行电火花切断加工?	206
二、操作工艺的技巧	192	四、成形加工的技巧	207
1. 控制调整哪些参数才能避免拉弧、短路和异常放电?	192	1. 什么是电火花成形加工?	207
2. 异常电弧是怎样产生的?	193	2. 怎样加工窄而深的筋槽?	208
3. 怎样避免工具电极产生异常放电?	195	3. 怎样加工表面粗糙度样板?	210
4. 怎样减少石墨电极的损耗?	196	4. 怎样进行电火花的“亚光”加工?	211
5. 怎样减少紫铜电极的损耗?	196	5. 怎样使用普通电火花机床加工内斜齿轮塑料模?	212
6. 怎样利用主轴伺服进给功能实现电极与工件的找正?	197	6. 怎样进行分型面合模的电火花加工?	213
7. 怎样利用好液面保护、液温保护功能装置?	197	7. 怎样加工对开模?	214
三、穿孔加工的技巧	198	8. 怎样加工有重复定位精度的模具?	216
1. 什么是电火花穿孔加工?	198	9. 怎样进行电火花刻字与雕刻?	218
2. 怎样取出断入工件中的钻头或丝锥?	199	10. 怎样进行电火花加工表面的后继抛光?	219

第六章 电火花加工的疑点、难点

一、小孔、深孔、微孔的电火花加工	222	1. 怎样在普通电火花机床上加工复杂模具?	231
1. 什么是小孔的电火花加工?	222	2. 怎样进行大型模具的多回路加工?	233
2. 什么是深小孔的电火花加工?	224	3. 怎样利用球面加工法加工、修光精密复杂的型腔模具?	235
3. 什么是异形小孔的电火花加工?	225	4. 怎样加工高精度多型腔压胶模?	237
4. 什么是微孔的电火花加工?	226	三、电火花加工的疑点、难点	240
5. 什么是筛网的电火花加工?	227	1. 电火花加工的控制、调节对象是什么?	240
6. 什么是整体小孔栅网的电火花加工?	228		
7. 什么是多孔、群孔的电火花加工?	230		
二、精密复杂工件的电火花加工	231		

2. 造成加工误差的原因是什么?	241	什么?	244
3. 钢材料作电极为什么不适合加工型腔 模具?	242	6. 聚晶金刚石电火花加工的疑点、难点是 什么?	245
4. 镜面电火花加工的难点是什么?	243	7. 非导电材料电火花加工的疑点、难点是 什么?	248
5. 半导体材料电火花加工的疑点、难点是			

第七章 电火花加工的新设备、新技术、新工艺、新材料

一、电火花加工的新设备	250	5. 什么是智能化控制系统?	263
1. EA 系列(日本三菱公司)数控电火花 成形加工机床的特点是什么?	250	6. 什么是 CAD/CAM?	263
2. AQ 系列(日本沙迪克公司)数控直线 电动机驱动的电火花成形加工机床的 特点是什么?	251	7. 什么是电火花加工 CAD/CAM 一体化 技术?	264
3. HT 系列(北京恒泰公司)数控步进 电动机驱动的电火花成形加工机床的 特点是什么?	252	8. 什么是数控电火花成形加工自动定位 技术?	265
4. 数控高效放电展成加工机床的特点 是什么?	253	9. 什么是数控电火花成形加工在机检测 技术?	266
5. 高速小孔加工机床由哪几部分组成? 其特点是什么?	253	10. 什么是铝合金表面微弧放电陶瓷化 改性新技术?	267
6. 精密螺纹电火花加工机床的特点 是什么?	255	三、电火花加工的新工艺	268
7. 数控轮胎模具电火花加工专用机床的 特点是什么?	256	1. 什么是大面积电火花混粉光泽面 加工?	268
8. 新颖脉冲电源有哪些? 其特点 是什么?	257	2. 什么是电火花轮廓加工?	270
二、电火花加工的新技术	260	3. 什么是电火花展成加工?	273
1. 什么是专家系统?	260	4. 什么是电火花跑合加工?	275
2. 什么是人工神经网络控制技术?	260	5. 什么是电火花毛化加工?	275
3. 什么是模糊控制技术?	261	6. 什么是气体介质电火花加工?	276
4. 什么是遗传算法?	262	四、电火花加工的新材料	278
		1. 什么是钛及钛合金的电火花加工?	278
		2. 什么是铝及铝合金的电火花加工?	280
		3. 什么是钨、钼材料的电火花加工?	282
		4. 新颖工具电极材料有哪些? 其特点 是什么?	284

第八章 其他电火花加工

一、线电极电火花加工	286	12. 什么是编程、控制一体化?	304
1. 什么是线电极电火花加工?	286	13. 电火花线切割脉冲电源的特点是 什么?	304
2. 什么是数字控制电火花线切割加工?	286	14. 电火花线切割工作液的特点是什么?	306
3. 什么是四轴联动电火花线切割加工?	288	15. 电火花线切割常用电极丝的特点是 什么?	307
4. 什么是低速走丝电火花线切割加工?	290	16. 什么是电火花线切割的切割速度?	309
5. 什么是电火花线切割编程?	292	17. 电火花线切割的基本工艺规律是 什么?	310
6. 编写 3B 程序的方法是什么?	292	18. 电火花线切割加工的步骤是什么?	311
7. 间隙补偿量的确定方法是什么?	294	19. 怎样切割简单冲模?	313
8. ISO 代码程序编制方法是什么?	297	20. 锥度切割的工艺方法是什么?	315
9. 计算机自动编程方法是什么?	299	21. 多次切割的工艺方法是什么?	316
10. 电火花线切割编程中的工艺技巧 是什么?	301		
11. 电火花线切割控制原理是什么?	303		

二、电火花磨削加工	317	四、复合放电加工	335
1. 什么是电火花磨削加工?	317	1. 什么是复合放电加工?	335
2. 什么是电火花小孔磨削加工?	318	2. 什么是超声放电复合加工?	335
3. 什么是细长锥杆的外圆磨削加工?	320	3. 什么是电解放电复合加工?	336
4. 硬质合金“冲头”是怎样磨削成形的?	320	4. 什么是激光放电复合加工?	338
5. 怎样磨削凹凸球面、球头工件?	322	五、短电弧加工	339
6. 怎样磨削航空发动机环形薄壁蜂窝环工件?	324	1. 什么是短电弧加工?	339
7. 什么是绝缘陶瓷电火花磨削加工?	326	2. 什么是阳极机械切割?	339
三、电火花表面强化加工	328	3. 阳极机械切割的原理是什么?	339
1. 什么是电火花表面强化加工?	328	4. 阳极机械切割的方法是什么?	340
2. 电火花表面强化的原理与特点是什么?	328	5. 阳极机械切割的特点是什么?	341
3. 电火花表面强化装置的特点是什么?	330	6. 什么是电熔爆加工?	342
4. 电火花表面强化的工艺特性是什么?	331	7. 电熔爆加工的原理、特点是什么?	342
5. 电火花表面强化的工艺方法是什么?	331	8. 电熔爆加工设备由哪几部分组成?	342
6. 什么是大功率电火花表面强化加工?	333	9. 影响电熔爆加工质量的因素是什么?	343
		10. 电熔爆加工的应用范围是什么?	344
		参考文献	345

第一章 电火花加工技术基础

一、电火花加工的基本原理

1. 什么是电火花加工？

电火花加工又称放电加工，简称 EDM，从 20 世纪 40 年代开始研究并逐步应用于生产。

电火花加工是指在一定的加工介质中，通过两电极（工具电极和工件电极）之间的火花放电和短电弧放电的电蚀作用，对材料进行尺寸加工的方法称为放电加工。

当放电加工只采用脉冲放电（广义火花放电）形式来进行加工时，称为电火花加工。

当放电加工只采用断续电弧放电（短电弧放电）形式来进行加工时，称为短电弧加工。

由于本加工方法的名称国内外尚未完全统一，考虑到我国的习惯，所以统称电火花加工。在日本、美国、英国等国家均称为放电加工，而前苏联及俄罗斯则称为电蚀加工。

电火花加工是由前苏联科学家鲍·拉扎连科夫妇在 1943 年发明的，20 世纪 50 年代传入我国，开始研究和应用电火花加工技术。

在我国电火花加工技术是随着现代科学技术的进步而逐步发展起来的。电火花成形加工机床经历了双机差动式主轴头、电液主轴头、力矩电动机主轴头、步进电动机主轴头、直流伺服电动机主轴头、交流伺服电动机主轴头，到直线电动机主轴头的发展历程；控制系统也由单轴简易数控逐步发展到二轴、三轴联动乃至多轴的联动控制；脉冲电源也以最初的 RC 弛张式脉冲电源及脉冲发电机电源，逐步推出电子管脉冲电源、闸流管脉冲电源、晶闸管脉冲电源、晶体管脉冲电源、场效应管脉冲电源、微机控制的各种形式复合脉冲电源等。机械部分也以滑动导轨、滑动丝杠副逐步发展为滑动贴塑导轨、滚珠导轨、直线滚动导轨及滚珠丝杠副。机械精度达到了微米级，最佳表面粗糙度由最初的 $R_a 3.2\mu\text{m}$ 提高到目前的 $0.02\mu\text{m}$ ，从而使电火花加工步入镜面、精密加工技术领域，已成为现代制造技术重要组成部分。

目前，电火花加工技术更加迅速发展，已广泛应用宇航、航空、汽车、拖拉机、电机、电器、仪器仪表、钢铁、建筑、轻工、电子、原子能、计算机及科研部门等，已获得愈来愈广泛的应用，同时电加工技术也朝着更深层次、更高水平的方向发展。

2. 什么是电火花加工的基本原理？

电火花加工的原理是基于工具电极和工件（正、负电极）之间脉冲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。电火花放电腐蚀的主要原因是：电火花放电时依靠电火花局部、瞬时产生的高温，使金属表面熔化、气化、蒸发，在爆炸力的作用下，把金属熔化蚀除下来，抛入工作液介质中，迅速冷却、凝固成微小的金属颗粒，金属颗粒被工作液迅速冲离火花放电区，从而使工件表面形成一个微

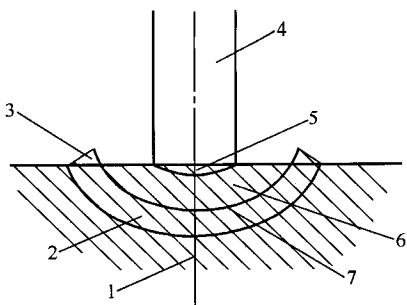


图 1-1 单个脉冲放电痕剖面放大示意图

1—无变化区；2—热影响区；3—翻边凸起；4—放电通道；5—汽化区；6—熔化区；7—熔化层

小的凹坑（见图 1-1）。这样不断的放电加工，使工件不断的被蚀除，实现金属材料的尺寸加工。满足被加工工件质量要求的加工方法称为电火花加工。实现电火花加工，必须解决下列关键技术。

(1) 放电间隙 必须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，一般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，就不会产生火花放电。如果间隙过小，就很容易形成短路接触，同样也不能产生火花放电。所以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) 脉冲放电 火花放电必须是瞬时的脉冲放电。放电延续一段时间后，需停歇一段时间，放电延续时间一般为 $1 \sim 1000 \mu s$ 。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，把每一次的放电蚀除点分别局限在很小的范围内；否则，会像持续电弧放电那样，使表面烧伤而无法用作尺寸加工。因此，接在工具电极和工件电极间电火花加工用的电源必须采用脉冲电源。

(3) 工作液 火花放电必须在有一定绝缘性能的液体介质中进行，例如煤油、乳化液、去离子水等。这类液体介质又称工作液，它们必须具有较高的绝缘强度 ($10^3 \sim 10^7 \Omega \cdot cm$)，以有利于产生脉冲的火花放电。同时，工作液还能把电火花加工过程中产生的金属微粒、炭黑等电蚀产物从放电间隙中排除出去，并且对电极和工件表面有较好的冷却作用。

(4) 机床设备 要想实现电火花加工必须具备一定的机床设备。图 1-2 为电火花加工原理示意图，工件 1 与工具电极 5 分别与脉冲电源 7 的两输出端相联接。自动进给调节装置 4（此处为电动机及丝杆螺母机构）使工具电极和工件间经常保持一个很小的放电间隙，当脉冲电压加到两极之间，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，瞬时高温使工具电极和工件表面都蚀除掉一小部分金属，各自形成一个小凹坑（见图 1-1）。此次脉冲放电结束后，经过一段间隙时间（即脉冲间隔 t_0 ），使工作液恢复绝缘后，第二个脉冲又加到两极上，又会在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。这样以相当高的频率，连续不断地重复放电，工具电极不断地向工件进给，就可将工具的形状反向复制在工件上，加工出所需要的零件，整个加工表面是

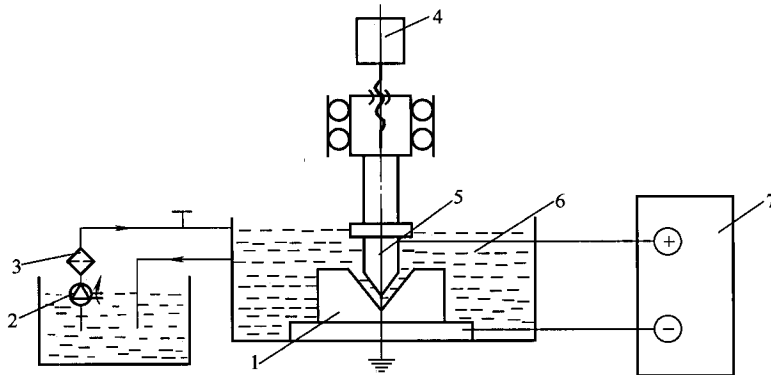


图 1-2 电火花加工原理示意图

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

由无数个小凹坑所组成的。

3. 电火花加工的特点是什么?

电火花加工具有很多优点,但又有一定的局限性,现将其主要特点简介如下。

(1) 适合于难切削导电材料的加工 由于脉冲放电的能量高度集中,放电区域产生的高温足以熔化、气化任何导电材料,所以能加工各种金属材料,甚至可以加工聚晶金刚石、立方氮化硼等超硬材料,如果具备一定条件还可以加工半导体和非半导体材料。

(2) 可以加工特殊复杂形状的零件 由于放电加工过程中工具电极与工件不直接接触,两者宏观作用力很小,没有机械加工的切屑力。因此,可以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,所以特别适用于复杂表面形状工件的加工,如复杂型腔模具的加工等。另外,采用数控技术,使用简单的电极配合数控轨迹运动,可以加工出复杂形状的零件;如航天、航空领域的众多发动机零件、蜂窝密封结构件、深窄槽及狭缝的加工等。

(3) 易于实现加工过程的自动化 由于是直接利用电能进行加工,而电能、电参数较机械量易于实现数字控制、自适应控制、智能化控制和无人操作等。

(4) 可以改进结构设计 由于电加工的特殊性,可以将产品结构进行改进;例如,将镶拼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,喷气发动机的叶轮,采用电火花加工后可以将镶拼、焊接结构改为整体叶轮,既提高了工作可靠性,又减小了体积和质量。

(5) 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,往往影响成形精度。随着电加工技术的发展;目前,粗规准加工时已能将电极相对损耗比降至0.1%以下,在中、精规准加工时将损耗比降至1%左右。

(6) 最小角部半径有限制 一般情况下,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。但采用多轴数控的电火花机床,应用X、Y、Z轴数控摇动加工,可以清棱清角地加工出方孔、窄槽的侧面和底面。

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,其加工应用领域日益扩大,加工范围已达到小至几微米的小轴、微孔、窄缝,大到几米的超大型模具和零件。

4. 电火花加工是如何分类的?

按工具电极和工件相对运动的方式和用途的不同,将电火花加工按工艺方法大致分为电火花穿孔成形加工、电火花线切割加工、电火花磨削加工、电火花同步共轭回转加工、电火花高速小孔加工、电火花铣削加工、电火花表面强化加工和短电弧加工8大类。表1-1为电火花加工工艺方法分类情况及主要特点和用途。

5. 电火花加工常用名词、术语及符号是什么?

(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(见图1-3)。

(2) 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0.01~0.5mm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 (见图1-3)。对于穿孔加工,又可分为入口间隙 S_{in} 和出口间隙 S_{out} (见图1-4)。

表 1-1 电火花加工按工艺方法分类

序号	分 类	特 点	用 途	备 注
1	电 火 花 穿 孔成形加工	1. 工具电极为成形电极,与 被加工表面有相同的截面形状 2. 工具电极和工作件间主要有 一个相对的伺服进给运动	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:加工各种型腔 模具及各种复杂的型腔零件	典型机床有 D7140、 D7125 等电火花穿孔、成形 机床约占电火花机床总数 的 30%
2	电 火 花 线 切割加工	1. 工具电极为沿着轴线方向 移动的线状电极 2. 工具电极与工件在两个水 平方向同时有相对伺服进给 运动	1. 切割加工各种冲模或直接 加工出零件 2. 切割各种窄缝及贵金属的 下料、裁割等	典型机床有 DK7740、 DK7725 数控电火花线切割 机床、约占电火花机床总数 的 60%
3	电 火 花 内 圆、外圆及成 形磨削	1. 工具电极与工件有相对的 旋转运动 2. 工具电极与工件间有径向 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、 微形轴承内环、钻套等 2. 加工外圆、小模数滚刀等	典型机床有 D6310 电火 花小孔内圆磨床。约占电 火花机床总数的 3%
4	电 火 花 高 速小孔加工	1. 采用 $\phi 0.3 \sim 3\text{mm}$ 空心管状 电极,管内冲入高压工作液 2. 细管电极旋转	1. 加工速度可达 60mm/min , 深径比达 $1:100$ 以上 2. 线切割穿丝预孔 3. 深径比很大的小孔,如喷 嘴等	典型机床有 D703A 电火 花高速小孔加工机床,约占 电火花机床总数的 2%
5	电 火 花 同 步共轭回转 加工	1. 工具电极与工件均作旋转 运动,两者角速度相等或成倍 数,接近的放电点有切向相对运 动速度 2. 工具电极相对工件可作 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、表面粗糙度值小的 内、外回转体表面等	典型机床有 JK-2、JK-8 等内外螺纹加工机床,约占 电火花机床总数的 1%
6	电 火 花 铣 削加工	工具电极相对工件作平面或 空间运动,类似常规铣削	1. 适合简单电极加工复杂 形状 2. 加工效率较低适用加工较 小的零件	各种多轴数控电火花成 形机床均有此功能
7	电 火 花 表 面强化	1. 工具电极在工件表面上 振动 2. 工具电极相对工件移动	1. 模具刃口、刀具、量具刃口 表面强化和镀覆 2. 电火花刻字、打印记	典型机床有 D9105 型电 火花强化机等,约占电火花 机床总数的 2%
8	短 电 弧 加 工(包括阳极 机械切割和 电熔爆加工)	1. 盘电极与带状电极与工件 有相对的旋转运动,在一定的电 解作用下实现切割 2. 旋转磨头作工具电极,对 旋转大型工件进行粗加工	1. 切割高温耐热合金、高铬、 高镍合金、钛合金等特种材料 2. 电熔爆加工,可去除大型 铸件、锻件表面硬化层	1. 阳极机械切割有 ZT- 009 型机床。 2. 电熔爆加工机床只有 少量生产

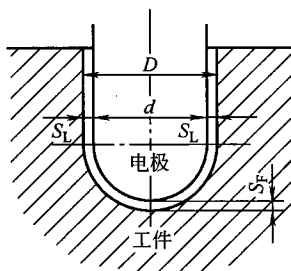


图 1-3 加工间隙

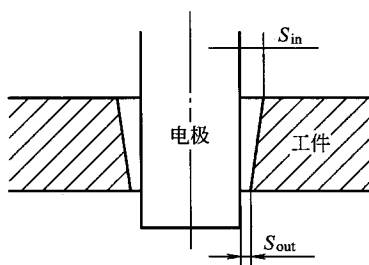


图 1-4 入口间隙与出口间隙

(3) 脉冲电源 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。

(4) 伺服进给系统 是指工具电极伺服进给、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。

(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必须浸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电火花蚀除下来的产物。狭义而言，指工具电极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 主要指电火花加工时选用的电加工用量、电加工参数，有脉冲宽度 t_i 、放电时间 t_e 、脉冲间隔 t_o 、峰值电压 U_i 、峰值电流 I_e 等脉冲参数，这些脉冲参数在每次加工时必须事先选定。

(8) 脉冲宽度 t_i 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（见图 1-5）简称脉宽。

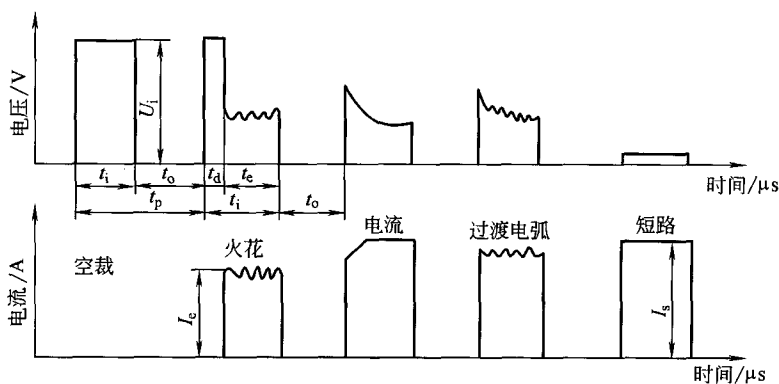


图 1-5 脉冲参数与脉冲电压、电流波形

(9) 脉冲间隔 t_o 它是两个电压脉冲之间的间隔时间（见图 1-5）简称脉间或间隔，也称脉冲停歇时间。

(10) 放电时间 t_e 它是工作液介质击穿后放电间隙中流过放电电流的时间，即电流脉宽，它比电压脉宽稍小，差一击穿延时 t_d （见图 1-5）。

(11) 击穿延时 t_d 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，此时间称击穿延时（见图 1-5）。

(12) 脉冲周期 t_p 指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 $t_p = t_i + t_o$ 。（见图 1-5）。

(13) 脉冲频率 f_p 指单位时间内电源发出的脉冲个数。显然，它与脉冲周期 t_p 互为倒数，即

$$f_p = \frac{1}{t_p}$$

(14) 开路电压 U_i 是指间隙开路时电极间的最高电压，等于电源的直流电压，又称空载电压或峰值电压。

(15) 火花维持电压 是指每次火花击穿后，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（见图 1-5）。

(16) 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,它是多个开路电压、火花放电维持电压、短路和脉冲间隔等零电压的平均值,又称间隙平均电压。

(17) 加工电流 I 是指加工时电流表上指示的流过放电间隙的平均电流。

(18) 短路电流 I_s 是指放电间隙短路时电流表上指示的平均电流(因为短路时还有停顿时间内无电流)。

(19) 峰值电流 I_p 是指间隙火花放电时脉冲电流的最大值(瞬时),虽然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(见图 1-5)。

(20) 正、负极性加工 是指加工时以工件为准,工件接脉冲电源正极(高电位端),称正极性加工,反之,加工件接电源负极(低电位端),则称负极性加工。

(21) 放电状态 是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(见图 1-5)。

1) 开路 是指空载脉冲,放电间隙没有击穿,间隙上有大于 50V 的电压,但间隙因没有电流流过,为空载状态。

2) 火花放电 是指工作脉冲或有效脉冲,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。

3) 短路 指短路脉冲,放电间隙直接短路相接,这时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 是指稳定电弧放电,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,常使电极表面积炭、烧伤。

5) 过渡电弧放电 是指不稳定电弧放电,其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,是稳定电弧的前兆,早期检测出过渡电弧放电,对防止电弧烧伤有很大意义。

(22) 低损耗加工 是指相对损耗 $Q \leq 1\%$ 时的电火花加工。一般用纯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。

(23) 无损耗加工 是指相对损耗 $Q \leq 0.1\%$ 时的电火花加工。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。

二、电火花加工的机理

1. 什么是电火花加工的机理?

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、液体动力、电化学和胶体化学等综合作用的过程。这一过程大致可以分为四个连续阶段: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。

2. 电火花放电通道是如何形成的?

当脉冲电源电压加到工具电极与工件之间时,两极之间立即形成一个电场。电场强度

与电压成正比，与两极间距离成反比，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之增大。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 ，即 $100 \text{ V}/\mu\text{m}$ 左右时，就会产生场致电子发射，由阴极表面向阳极方向逸出电子。在电场力的作用下带负电荷的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，产生碰撞电离。形成带负电的粒子（电子）和带正电的粒子（正离子），导致带电粒子雪崩式增多，使介质击穿而形成放电通道 [见图 1-6 (a)]。

放电通道是由数量大体相等的带正电的正离子和带负电的电子以及中性粒子（原子或分子）组成的等离子体。带电粒子由于相对高速运动而相互碰撞，产生大量的热，使放电通道温度极高，但分布不均匀。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。由于受到放电时电流产生的磁场作用，对放电等离子体产生向心的磁压缩效应，同时受到周围介质惯性动力压缩效应的作用，放电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工作液介质瞬时汽化所形成的气体（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，还伴随着一系列物理现象，其中有热效应、电磁效应、光效应、声效应和频率范围很宽的电磁波辐射以及爆炸冲击波等。

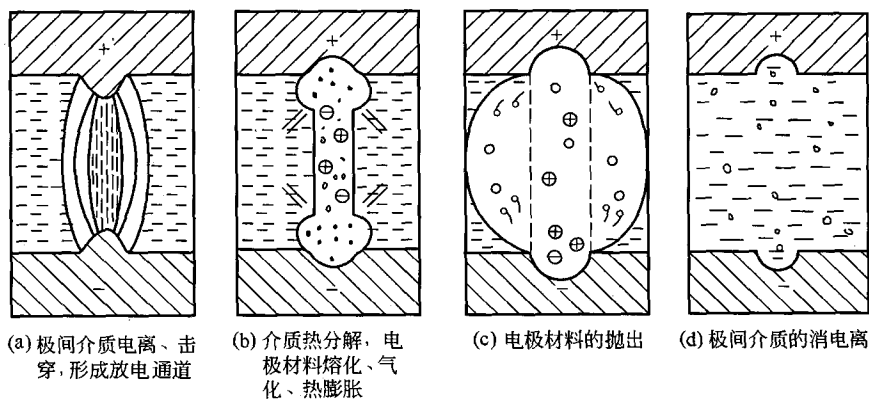


图 1-6 电火花放电过程示意

3. 电火花放电是如何熔化、汽化金属材料的？

当脉冲电压由空载电压降到工作电压时，使火花放电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。于是在通道两端的正极和负极表面分别成为瞬时热源，并且在瞬间达到很高的温度。通道的高温首先把工作液介质汽化 [如煤油等碳氢化合物工作液在通道高温的作用下裂解为 H_2 （约占 40%）、 C_2H_2 （约占 30%）、 CH_4 （约占 15%）、 C_2H_4 （约占 10%）和游离碳等，如水基工作液则热分解为氢和氧的分子甚至原子等]。正负极表面的高温使得金属材料熔化、直至沸腾汽化。这些汽化后的工作液和金属蒸气，瞬间体积猛增，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，可以见到放电间隙间冒出很多小气泡，工作液逐渐变黑，并听到轻微而清脆的爆炸声。主要靠此热膨胀和局部微爆炸，使熔化、汽化了的金属材料被抛出蚀