

模具加工技术丛书

电火花加工技术在模具制造中的应用

马名峻 蒋亨顺 郭洁民 主编



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电火花加工技术在模具制造中的应用/马名峻, 蒋亨顺, 郭洁民主编. —北京: 化学工业出版社, 2004. 6
(模具加工技术丛书)
ISBN 7-5025-5811-X

I. 电… II. ①马…②蒋…③郭… III. 模具-电火花加工 IV. TG76

中国版本图书馆CIP数据核字 (2004) 第 075930 号

模具加工技术丛书

电火花加工技术在模具制造中的应用

马名峻 蒋亨顺 郭洁民 主编

责任编辑: 王苏平

文字编辑: 王金生

责任校对: 郑捷

封面设计: 潘峰

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市兴顺印刷厂印刷

北京市兴顺印刷厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 355 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5811-X/TH·211

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

当前我国经济的快速发展，对技术工人，尤其是中高级技术工人的需求大幅上升，供需矛盾突出。为了适应人才市场对中高级电火花技术人才的迫切需求，特组织一批长期从事电火花加工的工程技术人员，将各自在生产中积累的经验进行总结，编成本书。

本书不是一部完整的电火花加工技术方面的理论书籍。它的读者群是中高级电火花加工技术人员，故主要针对各企业尤其是模具行业的中高级电火花加工技术工人工作中经常遇到的问题进行叙述。

本书全部采用电加工行业的定义、术语、参数符号及已发布的相关国家标准的有关规定，以免增加读者学习与应用的困难。为了尽可能地把所要讨论的问题适当地联系起来，有部分内容不可避免地与目前已出版发行的电火花加工技术方面的书籍重复。书中引用的大量电火花加工技术图表和数据，始终包含着我市电火花加工工程技术人员的多年劳动成果。在此，借本书出版的机会向这些同志表示衷心的感谢。

随着电加工技术的不断发展，人们对电火花加工的研究日益深入，无论是加工速度还是加工精度均有了长足的进步，机床加工的自动化程度也大大提高，对模具的制造和模具的使用寿命也起到了可靠保障的作用。本书结合目前生产中的实际应用状况作主要论述。考虑本书读者群的具体情况，在叙述应用实例时，对理论和技术基础予以省略，尽量减少公式的推导过程。着重介绍技术细节及应用技巧。仅供同行参考。

本书由北京易通电加工技术研究所所长马名峻工程师和该所高级顾问蒋亨顺、郭洁民主编，参加编写的人员均为北京易通电加工技术研究所的顾问和技术专家，书中第一章由蒋亨顺教授级高级工程师编写；第二章由郭洁民、周喻初、聂福龙工程师编写；第三章由郭洁民编写；第四章由马名峻、李名杰工程师编写；第五章由马名峻工程师编写；第六章和第七章由陈世模、陈五洲工程师编写；第八章由郭洁民、刘惠来工程师编写。北京易通电加工技术研究所工艺室的陈廓承担了本书大部分文字和插图的录入整理工作。

由于编写时间仓促，加之编者水平有限，书中取材不当和解释错误之处在所难免，竭诚希望特种加工行业各方面的专家、学者及广大读者给予指正。本书在编写过程中，承蒙北京市模具工业协会单加祥秘书长、北京市技术交流站、北京电加工专业协会的陈建民高级工程师、于学文研究员及周喻初、蒋亨顺、刘惠来、郭洁民、北京二轻工业学校傅宏生老师等各位专家的指导与帮助，在此一并表示衷心地感谢！

编 者

2004 年 4 月

目 录

第一章 电火花加工技术概述	1
第一节 电火花加工的特点与分类	1
一、电火花加工的特点	1
二、电火花加工工艺方法分类	2
第二节 电火花加工的发展状况及应用前景	4
一、发展状况	4
二、应用前景	5
第三节 电火花加工在模具制造中的应用	6
一、电火花成形加工技术在模具制造中的应用	6
二、电火花线切割加工技术在模具加工中的应用	6
第二章 电火花成形加工技术的应用	8
第一节 电火花成形加工的原理	8
一、电火花成形加工的原理及应具备的条件	8
二、电火花成形加工的机理	9
三、电火花加工脉冲参数对工艺指标的影响	12
四、电火花加工常用名词术语及符号	17
第二节 电火花成形加工机床的构成情况	21
一、电火花成形加工机床的名称、型号、规格与技术性能	21
二、电火花成形加工机床的结构、组成部分及作用	22
三、机床主体	24
四、电火花成形加工机床的脉冲电源	26
五、电火花成形加工机床的伺服系统	32
六、电火花成形加工机床的工作液循环过滤系统	34
七、电火花成形加工的机床附件	36
第三节 电火花模具成形加工工艺	40
一、单电极直接加工成形工艺	40
二、手动侧壁修光成形工艺	43
三、分解电极加工成形工艺	45
四、多工具电极更换加工成形工艺	48
五、单电极平动加工成形工艺	49
六、单电极数控摇动加工成形工艺	53
第四节 电火花成形加工中操作技巧和安全操作规程介绍	62

一、操作技巧的基本内容	63
二、安全操作规程介绍	78
第三章 电火花模具成形加工实例	82
第一节 锻模加工实例	82
一、连杆锻模的电火花成形加工	82
二、半轴锻模的电火花成形加工	83
三、活络扳子热压精锻模加工实例	84
四、螺旋伞齿轮精锻模的加工实例	86
第二节 塑料模具加工实例	88
一、电机扇叶塑压模	89
二、传动斜齿轮塑料模	90
三、圆珠笔尖对开塑料模	91
四、瓶盖塑料模	94
五、果盘塑料模具	94
第三节 压铸模加工实例	97
一、电机端盖压铸模型腔的电火花加工	97
二、微电机机壳后盖压铸模	99
三、铝合金手轮压铸模型芯	100
四、仪表风扇轴承座压铸模	102
五、汽缸罩压铸模	103
六、医疗手术器械肋骨剪刀黑色冶金压铸模的电火花加工	104
第四节 特殊模具加工实例	106
一、工艺美术花纹模具的电火花加工	106
二、硬质合金模具的电火花加工	109
三、聚晶金刚石的电火花加工	112
四、复杂表面的电火花展成加工	115
五、电火花混粉光泽面加工	119
第四章 电火花线切割加工技术的应用	122
第一节 电火花线切割加工的原理	123
一、慢走丝电火花线切割加工的加工原理	124
二、快走丝电火花线切割加工的加工原理	124
第二节 电火花线切割加工机床的构成及发展情况	125
一、电火花线切割机床名称型号规格与技术性能	125
二、电火花线切割机床组成部分、机床结构及其作用	126
三、电火花线切割机床技术的发展状况及其展望	136
第三节 电火花线切割加工工艺规律及操作技巧	140
一、电火花线切割加工的工艺规律和一般操作要求	140
二、电火花线切割加工操作技巧	154

第五章 电火花线切割模具加工实例	157
第一节 一般冲裁模	157
一、落料模	157
二、冲孔模	159
三、切弯模	160
第二节 复杂冲裁模	163
一、复合冲模	163
二、级进模	171
第三节 挤压型材模具	173
一、直接切割成形法	173
二、窄缝镶拼成形法	174
三、微细电极挤出模	174
第四节 特殊无间隙冲裁模	175
第六章 电火花穿孔加工技术的应用	177
第一节 电火花穿孔加工的原理	177
一、电火花穿孔加工	177
二、窄脉宽高功率脉冲提高单个脉冲能量	178
三、高压冲液强迫排屑维持间隙正常介电状态	179
四、旋转电极移动放电通道避免电极烧伤	180
第二节 电火花穿孔机床的构成	180
一、床身结构	180
二、主轴、密封旋转系统和导向器	181
三、工作液高压供液系统	182
四、主轴伺服系统	182
五、高速脉冲加工电源	183
第三节 电火花穿孔加工的一般加工工艺介绍	184
一、对于电极管的一般要求和选择	184
二、工件材料对加工精度和加工效率的影响	185
三、电极导向器和电极卡头的使用注意事项	186
四、工作液对电火花穿孔加工的影响	187
第七章 电火花穿孔应用技巧及加工实例	188
第一节 密集孔加工	188
第二节 深型腔内孔加工	198
第三节 深孔和薄壁孔加工的锥度和垂直度问题	200
第八章 模具制造中电火花加工技术的一些综合应用技巧	203
第一节 模具制造中对电火花加工工艺的技术要求	203

一、模具制造中正确分析选择电火花成形加工和电火花线切割加工	203
二、模具制造中,对电火花线切割加工工艺的技术要求	204
三、模具制造中,对电火花成形加工工艺的技术要求	205
第二节 采用电火花加工工艺对模具进行表面处理	206
一、表面强化	206
二、亚光面处理	208
第三节 模具的修复	209
一、冲模刃口的镶拼与修复	209
二、型腔模具的镶拼与修复	212
第四节 电火花加工常见工艺问题的分析和解决办法	215
一、线切割加工常见工艺问题的分析和解决办法	215
二、电火花成形加工常见工艺问题的分析和解决办法	217
参考文献	222

第一章 电火花加工技术概述

第一节 电火花加工的特点与分类

电火花加工又称放电加工（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，加工时，电极对之间多充满工作液，主要起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。为便于理解和对比，将电火花加工时所用工具称为工具电极（简称电极），而工件则仍称作工件。在正常电火花加工过程中，电极与工件并不接触，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，故称作电火花加工。日、美、英等国通常称作放电加工。

一、电火花加工的特点

正常电火花加工过程中，工具电极与工件并不直接接触，工件材料靠放电产生的瞬时高温蚀除，工件的加工性能主要取决于其材料的导电性及热学特性（如熔点、沸点、比热容及电阻率等），而与工件材料的力学特性（硬度、强度等）几乎无关。因此，对于常规机械加工十分困难的超硬材料（如聚晶金刚石、立方氮化硼及硬质合金等）采用电火花加工工艺，具有很大的技术优势。

在加工过程中，主轴头除了承受外载荷电极重量外，还有放电产生的爆炸及作用力，主轴头快速升降时产生的真空吸力与排开工作液的阻力及惯性力。这些力加在一起，远小于传统切削加工时的切削力，所以在加工规格尺寸相似时，电火花机床的刚度和主轴驱动功率要求比机械切削机床低得多。

由于电火花加工时工件材料是靠一个个火花放电予以蚀除的，加工速度相对切削加工而言是很低的，所以，为提高生产率、降低成本考虑，凡能采用切削加工工艺时，就尽可能不要采用电火花加工工艺。

归纳起来，电火花加工具有如下特点。

（1）适用于无法采用刀具切削或切削加工十分困难的场合，如航天、航空领域的众多发动机零件、蜂窝密封结构件、深窄槽及狭缝等加工，特别适宜于加工弱刚度、薄壁工件的复杂外形，异形孔以及形状复杂的型腔模具，弯曲孔等。

（2）对于高温合金、钛合金、硬质合金及聚晶金刚石等导电的难加工材料，用紫铜或石墨制成电极即可实现电火花加工，充分显示电火花加工“以柔克刚”的特点。尤其是 IC 行业近年来广泛使用的多工位硬质合金精密跳步冲裁模具与封装模具，电火花精密线切割加工已成为此类精密模具的主要加工工艺手段。

(3) 由于是直接利用火花放电蚀除工件材料，加工时几乎没有大的作用力，因此易于实现加工过程的自动控制及实现无人化操作。

(4) 由于火花放电时工件与电极均会被蚀除，因此电极的损耗对加工形状及尺寸精度的影响比切削加工时刀具的影响要大。电火花成形加工时电极损耗的影响又比线切割加工时大，这点在选择加工方式时应予以充分考虑。

综上所述可以看出，在现代制造业中，电火花加工工艺是切削加工工艺的补充工艺手段之一，具体选用时，要根据本企业的设备特点及工艺习惯，选择适合本企业的工艺方法，充分发挥各种工艺的特长，以获得最佳的经济、技术效益。

二、电火花加工工艺方法分类

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，电火花加工工艺大致可粗略分为：电火花成形加工，电火花线切割加工，电火花磨削，电火花高速小孔加工，电火花表面加工及电火花复合加工六大类（见图 1-1）。而应用十分普遍的是电火花成形加工及电火花线切割加工，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装备进行讲述，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。

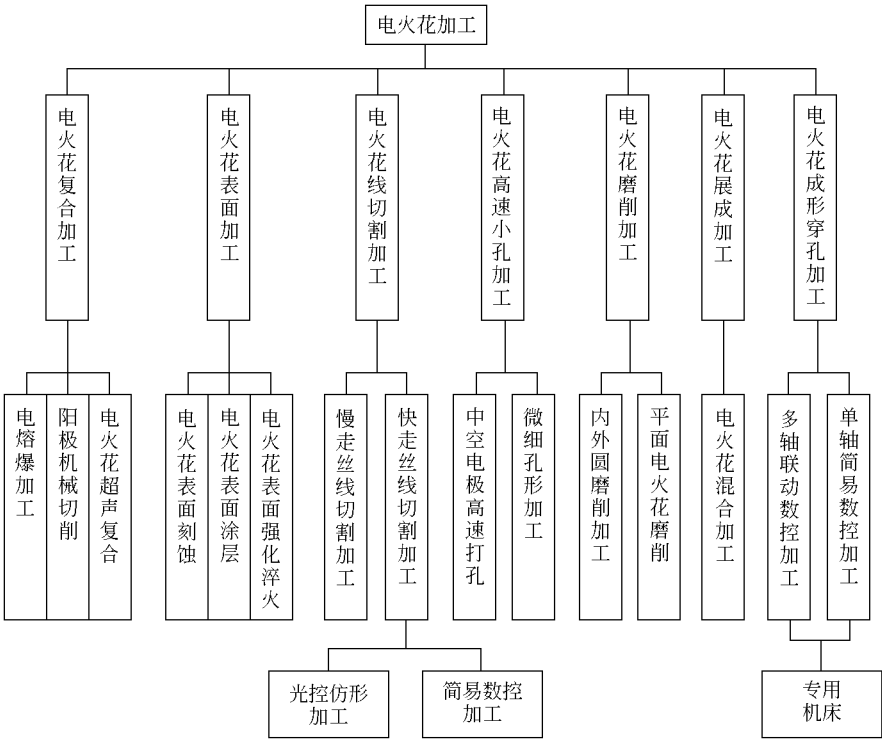


图 1-1 电火花加工分类

目前，这些电火花加工工艺技术已广泛应用于淬火钢、耐热合金、硬质合金及聚晶金刚石等难加工材料的加工，尤其是对模具及常规切削刀具难以发挥作用的、具有复杂形状表面零件的加工，具有广泛的应用前景，已成为机械制造业不可或缺的重要补充工艺手段。

电火花成形加工，其工具电极与工件间主要有相对的伺服进给运动，电极在多数情况下

为成形电极（1个或多个电极组合），其与工件成形截面相似，尺寸偏差为两个放电间隙。为了进行型腔模具加工，要先制造一个与模具内腔相同的凸状的电极；而加工冷冲模时，则需加工与冲头形状相同的电极，具体尺寸的缩放等技术问题，后续章节中将予以介绍。

电火花加工主要用于加工各类冷冲模具、挤压模、拉丝模、粉末冶金模及异形孔类和微孔等。对于型腔模具及有复杂型腔的零件加工具有独特的优越性。近年来开发的多轴联动电火花机床，已可使用简单形状电极加工出复杂的型腔，大大降低了电极的制造难度。

电火花线切割加工的特点是：工具电极为柔性的线状电极，加工时电极与工件在 X 、 Y 及 U 、 V （切锥度进给）两个水平方向同时有相对伺服进给运动及垂直方向的直线相对运动。慢走丝线切割加工因电极丝只单向移动且仅一次性使用，因此电极损耗对加工精度的影响远小于快走丝线切割加工。线切割加工广泛用于各类精密冲压模具及上、下面不同的工件加工，也可用于贵重的下料切割及窄缝类零件的加工。由于线切割加工无需制作复杂截面形状的电极，因此在冷冲模具加工领域已取代了绝大部分电火花成形加工工艺。

电火花磨削加工时，电极与工件间有相对旋转运动；而为了达到工件要求的形状与尺寸，电极与工件还有径向及轴向的进给运动，这是与上两类加工方式的最大不同点。由于电极与工件的特殊相对运动方式，电火花磨削适用于加工弱刚度或切削工具无法进行的工件（如静压腔），还可进行大型齿轮副的跑合加工，增大齿轮副的啮合面积，从而大大延长齿轮副的使用寿命。近年来，电火花磨削工艺用于加工航天、航空发动机及各类涡轮发动机的蜂窝类密封环，取得了可喜的成功，应用前景很好。

电火花高速小孔加工是近十几年来发展迅速的一种工艺方法。它采用中空的细铜管（黄铜或紫铜管）作电极，管中用高压水泵（压力约 $2\sim 5\text{MPa}$ ）通入高压水基工作液，一般加工小孔的速度可达 $20\sim 60\text{mm/min}$ ，加工速度已超过机械钻削小孔，孔径愈小（ $<0.5\text{mm}$ ），优势愈明显。为了防止短路拉弧烧伤及便于排屑，高速打小孔时，电极在进给的同时作旋转运动（近似普通钻削运动方式）。目前这一工艺已广泛用于线切割加工模具时的穿丝孔加工，由于它的效率高，装备本身造价低，因此几乎全部取代了慢走丝线切割机床的打穿丝孔的附件功能。又由于细管电极的柔性较好（ $<0.5\text{mm}$ ），配上弯曲的导向器还可加工弯曲的孔。

电火花表面加工技术中，应用较多的是电火花表面强化、淬火工艺。它利用电极在工件表面振动，在空气中放电，使模具的刃口或机床导轨表面强化、淬火。由于放电时电极表面熔化，部分电极材料可涂镀到工件表面，当采用硬质合金作为工具电极时，工件表面耐磨能力大幅提高。利用这一工艺方法，还可对磨损的轴或孔进行修复、涂镀，恢复原来的配合精度。

电火花强化工艺方法简单，装备造价低，经济效益明显，因而广泛应用模具、导轨及齿轮、轧辊工件面的表面涂覆强化。此外还可以采用不同电极材料对工件表面的性能进行改性处理，亦可收到非常明显的工艺效果。例如铝合金与铝合金不易钎焊，而采用铅或银作电极对上述两种金属表面进行涂覆后，就很容易将两者钎焊到一起；又如航空发动机某些高速旋转的轴，其滑动轴承工件部位温度很高，无法采用油脂类润滑，常采用在轴或轴承内表面电火花涂覆一层石墨来降低此处的摩擦。

电火花刻字、打印记的应用也相当普遍。尤其是对字体或印记要求不高时，可用手持式电笔在需刻字处直接书写即可。目前，由于激光技术的快速发展及商品对外观要求的不断提高，电火花刻字与打印记已大半被激光打标记或电解刻印所取代，仅在中、小企业中起补充

作用。

电火花复合加工技术在生产中应用不太普遍，目前应用较多的是电火花与拉丝模具孔形加工。阳极机械加工及电熔爆加工，其加工原理为短电弧及一定的电解作用联合，加工后表面很粗糙，加工时噪声很大，故仅限于下料等加工场合。电熔爆加工近年已推出多个品种的设备，有望成为备料加工的一支生力军。

第二节 电火花加工的发展状况及应用前景

一、发展状况

20 世纪 40 年代后期，前苏联科学家鲍·拉扎连科发现家用电器开关在闭合与断开时经常发生电火花烧蚀现象，能否变有害作用为可用的加工方法？经过反复的试验研究，他终于发明了电火花加工技术，把对人类有害的电火花烧蚀转化为对人类有益的一种全新工艺方法。20 世纪 50 年代初研制出电火花加工装置：采用双继电器作控制元件，控制主轴头电机的正、反转，达到调节电极与工件间隙的目的。这台装置只能加工出简单形状的工件，自动化程度很低。随后又研制出线切割机床，采用靠模跟踪方式进行仿形切割，采用煤油作工作液，切割效率很低，仅为每分钟几个平方毫米。我国是国际上开展电火花加工技术研究较早的国家之一，由中国科学院电工所牵头，到 20 世纪 50 年代后期也先后研制了电火花穿孔机床和线切割机床。一些先进工业国，如瑞士、日本也加入电火花加工技术研究行列，使电火花加工工艺在世界范围取得巨大的发展，应用范围日益广泛。

我国电火花成形机床经历了双机差动式主轴头，电液压主轴头，力矩电机或步进电机主轴头，直流伺服电机主轴头，交流伺服电机主轴头，到直线电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对双轴、三轴联动乃至更多轴的联动控制；脉冲电源也以最初的 RC 弛张式电源，及脉冲发电机，逐步推出电子管电源，闸流管电源，晶体管电源，晶闸管电源及 RC、RLC 电源复合的脉冲电源。成形机床的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，机床的机械精度达到了微米级，最佳加工表面粗糙度已由最初的 $R_a 3.2\mu\text{m}$ 提高到目前的 $R_a 0.02\mu\text{m}$ ，从而使电火花成形加工步入镜面、精密加工技术领域，与国际先进水平的差距逐步缩小。

电火花成形加工的应用范围从单纯的穿孔加工冷冲模具、取出折断的丝锥与钻头，逐步扩展到加工汽车、拖拉机零件的锻模、压铸模及注塑模具，近几年又大踏步跨进精密微细加工技术领域，为航空、航天及电子、交通、无线电通讯等领域解决了切削加工无法胜任的一大批零部件的加工难题，例如心血管的支架、陀螺仪中的平衡支架、精密传感器探头、微型机器人用的直径仅 1mm 的电机转子等的加工，充分展示了电火花加工工艺作为常规机械加工“配角”的重要作用。

我国的线切割加工机床也经历了靠模仿形、光电跟踪、复旦型简易数控等发展阶段，在上海张维良高级技师发明了世界独创的快速走丝线切割技术后，出现了众多形式的数控线切割机床，线切割加工技术突飞猛进，全国的线切割机床拥有量突破了万台大关，为我国国民经济，特别是模具工业的发展作出了巨大的贡献。随着精密模具需求的增加，对线切割加工的精度要求愈来愈高，快速走丝线切割机床目前的结构与其配置已无法满足生产的精密要求。在大量引进国外慢走丝精密线切割机床的同时，也开始了国产慢走丝机床的研制工作，

至今已有多种国产慢走丝线切割机床问世。我国的线切割加工技术的发展要高于电火花成形加工技术，如在国际市场上除高速走丝技术外，我国还陆续推出了大厚度（ $\geq 300\text{mm}$ ）及超大厚度（ $\geq 600\text{mm}$ ）线切割机床，在大型模具与工件的线切割加工方面，发挥了巨大的作用，拓宽了线切割工艺的应用范围，在国际上处于先进水平。

今天，由于各种直接用能量（声、光、电等）的加工设备不断问世，“电加工”这一概念已不能覆盖这一新工艺领域的诸多方面，于是采用“特种加工”替代“电加工”。特种加工领域除了传统的电火花成形加工、电火花线切割加工、电解加工外，还包括电铸加工、激光加工（激光焊接、打孔、快速成形等）、电子束加工、离子束加工、超声波加工（清洗、打孔等）以及一些工艺技术的复合加工等诸多方面。

由于特种加工领域中电火花成形加工及电火花线切割加工工艺在生产中，特别是在模具加工中的应用最广泛、最普遍，故本书将这两类工艺技术作为主要讲述内容。

二、应用前景

伴随现代制造技术的快速发展，传统切削加工工艺也有了长足的进步：四轴、五轴甚至更多轴的数控加工中心先后面世，其主轴最高转速已高达 $(7\sim 8)\times 10^5\text{r/min}$ 。机床的精度与刚度也大大提高，再配上精密超硬材料刀具，切削加工的加工范围，加工速度与精度均有了大幅提高。目前绝大多数大型汽车覆盖件模具及大型铸模已采用机械切削加工。这种变化，对电火花加工技术造成了很大压力。只有将这种压力转化为发展电火花加工技术的动力，才能不断地发展，在激烈的市场竞争中占有一定的市场份额。“逆水行舟，不进则退”，作为一种新技术，只有不断地开拓发展，才能跟上时代前进的步伐，否则将会被市场淘汰。阳极机械加工由于其工作液（水玻璃）的四处飞溅及加工时极高噪声造成的环境污染，长期以来未能得到及时有效的控制与解决，使这项工艺技术已处于停滞状态，生产中已很少见到应用实例。

面对现代制造业的快速发展，电火花加工技术不应与切削加工去争夺市场，而是扬长避短，甘当配角，在“一特二精”方面进行努力。“一特”即特殊材料加工，应抓住切削工具难以加工的超硬材料工艺研究，例如硬质合金、聚晶金刚石以及其他新研制的难切削材料的电火花加工工艺研究，在这一领域，切削加工难以涉足，是电加工的最佳研究开发领域。“二精”是精密模具及精密微细加工。如 IC 整体硬质合金凹模，切削加工几乎难以进行，只有采用分体拼镶方式，但却难以满足工件需要，用精密线切割加工正好发挥电加工的优势；而对于机械加工能胜任的凸模加工，则要核算本企业生产成本后，再确定选用哪种工艺进行加工。对于精密模具与零件，大面积、大余量部位的材料去除是切削加工的强项，待其将大部分余量去除后，采用电火花加工作为其补充加工手段，由于此时加工余量小，切削刀具又难以满足工件加工要求，有的部分甚至无法使用刀具加工，采用电火花加工工艺对工件的边边角角要求精密的部位进行补充加工，可获得较高的经济效益。微精加工是切削加工的一大难题，而电火花加工由于作用力小，对加工微细零件非常有利。

随着计算机技术的快速发展，我们将以往的成功工艺经验进行归纳总结，建立数据库，开发出专家系统，使电火花成形加工及线切割加工的控制水平及自动化、智能化程度大大提高。新型脉冲电源的不断研究开发。使电极损耗大幅降低，再辅以低耗新型电极材料的研究开发，有望将电火花成形加工的成形精度及线切割加工的尺寸精度再提高一个数量级，达到亚微米级，则电火花加工技术在精密微细加工领域可进一步扩大其应用范围。这些局面的开

创，有待广大读者在各自的生产岗位一步步地予以实现。

第三节 电火花加工在模具制造中的应用

一、电火花成形加工技术在模具制造中的应用

1. 冲模电火花加工

冲模是生产中应用较多的一类模具，其凹模大多数难以采用机械加工方法制作，且在热处理时常因淬火变形或开裂导致模具报废。采用电火花加工工艺，模板可先行淬火，令其变形后加工凹模，避免了热处理变形的弊病，而且模板可制成整体，无需镶拼，既简化了模具结构又能提高模具的强度与寿命。近年来，由于线切割机床的普及和工艺水平的提高，不少冲模的凹模加工为电火花线切割加工工艺所取代。

2. 精锻模具加工

摩托车变速齿轮及传动用锥齿轮的精锻模具，先采用机械切削加工模具外表及型腔预加工，留 $0.3 \sim 1\text{mm}$ 加工余量，用紫铜或石墨制作电极，然后采用电火花成形加工工艺，用单个电极经过几次规准转换直接加工成形。加工时采用低损耗工艺参数和经协作单位精修，锻模表面粗糙度可达 $1.25 \sim 2.5\mu\text{m}$ ，无需钳工修型或抛光即可交付使用。目前这类精锥面模具在大型企业中改由高速铣削加工中心担负加工任务，但对大多数中、小企业而言，因购置高速铣削中心经费困难，依然采用电火花成形加工工艺。

3. 注塑模具及压胶模具加工

大多数采用机械切削加工模具外表及粗铣型腔，仅将刀具精铣困难或无法精铣的部位留给电火花成形加工。电火花成形加工用电极用切削加工或线切割加工后镶拼制作。对于大型模具，目前大多采用铣削加工，只有个别切削加工难以完成的部位，才采用电火花成形加工作为补充加工手段。

4. 电火花展成加工

航空、航天领域的一些涡轮及扭曲叶片的压铸模具，采用机械切削十分困难，有些地方刀具与工件会发生干涉而无法加工。采用多轴联动的电火花成形机床，使用简单形状电极，通过编程即可实现展成加工。又如航空、航天领域的精压铸模及某些异形零件，采用数控多轴联动电火花成形机床加工，具有较高的经济效益。在这一领域采用电火花展成加工尚有很大的潜在市场。

5. 精密微细加工

随科学技术的不断发展，无论是模具还是装备都在向微型化发展，例如微型机器人中，许多零部件的尺寸均在 1mm 以内，采用切削工具加工，其工具尺寸更小。电火花加工特点使其在精密微细加工领域有着广阔的前景。近期国内多所重点大学都在开展这方面的研究，并取得了一定的进展。

二、电火花线切割加工技术在模具加工中的应用

1. 快走丝线切割机床

我国独创的快速走丝线切割机床是国内数控机床产量最大、应用最广泛的机床，在模具制造行业发挥着重要的作用。可以说，哪儿有模具加工，就一定有快速走丝线切割机床。近

年来，为了适应模具制造业的需要，快速走丝线切割机床自身的制造精度及加工精度日趋完善，锥度切割范围已超过 60° ，最大实用生产率也达到了 $100\sim 150\text{mm}^2/\text{min}$ ，最佳表面粗糙度达到了 $R_a 1.25\mu\text{m}$ 。目前各模具企业主要用快速走丝线切割机床加工中、低档次的冲模、压弯模、跳步模等，大多数中、小企业还用于精密模具的粗加工与半精加工，为精密线切割机床留下 $0.5\sim 1\text{mm}$ 左右精加工余量，最后用慢走丝机床经多次切割完成模具的精加工。

快速走丝线切割机床配用的脉冲电源及控制系统的进一步研究与完善，将使其切割质量与切割效率有较大幅度提高。对模具寿命影响较大的加工后表面的“变质层”，目前只能控制在 $0.01\sim 0.02\text{mm}$ ，若能将变质层控制在 $5\mu\text{m}$ ，则快速走丝线切割机床的适用范围将扩大很多。今后如在防止电极丝振动工作液飞溅方面取得突破，则高速走丝线切割的工艺指标及操作性能将会大幅提高，并有望走出国门，进入国际市场，成为慢走丝线切割机床必不可少的配套加工设备。

2. 慢走丝精密线切割机床

国内生产线上使用的慢走丝线切割机床，99%以上为进口设备，大多为瑞士和日本公司的产品。这些慢走丝线切割机床在生产中承担着精密模具凹凸模具及一些精密零件的加工任务。进口慢走丝线切割机床特别是瑞士阿奇生产的线切割机床，其设备精度保持性及正常加工精度可保持 10 年不变。目前最佳加工精度可稳定达到 $\pm 2\mu\text{m}$ ，在特定条件下甚至可加工出 $\pm 1\mu\text{m}$ 精度的模具。

国产慢走丝线切割机床起步较晚，精度保持性较差，不稳定，因此在生产线上拥有量很少，不足总占有量的 1%。随着机械行业的发展及国产元器件质量的不断完善，国产慢走丝线切割机床的水平将不断提升，预计未来 3~5 年内，模具生产线上国产慢走丝线切割机床的拥有量有望超过总拥有量的 2%。

第二章 电火花成形加工技术的应用

第一节 电火花成形加工的原理

电火花加工机床的出现从根本上改变了模具加工的工艺过程，改变了过去的模具加工生产时间过长、精度不高，还经常出现报废的现象。如以前的模具加工是先经过各道工艺加工后，再送去热处理加工，由于分子结构受热而改变了我们所要求的尺寸精度，更严重的是造成有的模具严重变形或开裂，致使模具报废，这不但影响了加工还影响了整个生产环节，从而造成时间和经济上的重大损失。

早在 20 世纪初期，人们就发现接触器等开关的触点通过重复接触而产生电火花，其电火花使其表面腐蚀成坑凹不平而烧损。前苏联科学院电工所拉札连柯夫妇通过电火花放电过程中，瞬间产生很大的热量能达到很高的温度，使金属材料局部熔化的电腐蚀现象的研究，终于在 1943 年利用电容反复充放电原理研制出世界上第一台实用的电火花加工装置。由于这一重大的发明，拉札连柯被评为前苏联科学院院士。

一、电火花成形加工的原理及应具备的条件

(1) 电火花加工又称放电加工 (Electrical Discharge Machining, 简称 EDM)，前苏联称之为电蚀加工，美国、英国、日本称之为放电加工，在电火花加工中是靠工具和工件之间不断的脉冲火花放电，在加工的金属表面产生局部瞬间的高温汽化并通过工作液把电腐蚀掉的金属屑不断地排除掉，这与金属切削的加工原理完全不同，工件和工具之间并不接触，它们之间完全是靠电火花放电来完成，因为其加工过程能看到火花，故称之为电火花加工，我国把电火花加工分为两大类，即电火花加工成形机床类 (简称电火花加工) 和电火花线切割机床类。目前这一加工技术已广泛用于模具钢、淬火钢、不锈钢、硬质合金钢、宝石等超高硬度和难加工材料中，同时可以加工模具等具有特殊要求和复杂表面的零部件，在民用和国防工业中的应用愈来愈多，它不仅补充和发展了金属切削加工，同时也已成为金属加工的另一重要手段，发展前景广阔。

(2) 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。就是把适当的脉冲电压 (正极和负极) 加到两个电极 (工件和工具)

上，使其经常保持一个很小的放电间隙，在理想的条件下即相对某一间隙最小处或绝缘强度最低处击穿工作液介质，在其加工表面产生火花放电。瞬时高温使工件和工具表面都蚀除掉一些金属，并形成一个小坑，如图 2-1 所示。

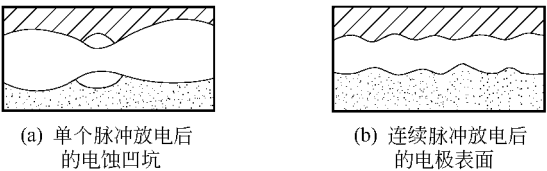


图 2-1 脉冲性火花放电的电腐蚀现象

当这一脉冲性放电过程结束后，经过一段时间间隔（即脉冲间隙），使工具和工件恢复绝缘后，第二个脉冲加到两极上，当极间间距相对最近与绝缘强度最弱处又会产生脉冲性击穿放电，又电蚀出一个小凹坑，实际上只要足够的高频脉冲能量连续不断地重复地产生脉冲性放电，工具电极反复不断地向工件进给，就可将工具的形象复制在工件上，整个工具和工件表面形成均匀的小凹坑面，从而达到加工目的。因此在电火花加工中必须使工具电极与工件表面之间保持一定的放电间隙，通常约为几微米至几百微米，它需要根据加工条件（电源电压、单个脉冲能量的大小、工件液介质绝缘程度的高低，工具电极和工件材料的结构等）和加工要求（粗、中、精）来确定。不难看出，如间隙过大，极间瞬时脉冲性放电不能击穿极间介质而放电，使其不能加工或加工慢，如果间隙过小，就会形成短路接触而烧伤，同样也不能产生火花放电而加工，所以在电火花加工过程中必须使工具电极具备有能自动进给及自动调节的装置。

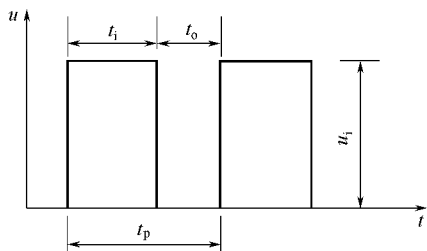


图 2-2 矩形波脉冲电源的电压波形

(3) 电火花加工不但要具备一定的间隙，还要具备有足够能量的高频脉冲电源才能进行加工，使其火花放电为瞬时的脉冲性放电，如图 2-2 所示。

图中 t_i 为脉冲宽度， t_o 为脉冲间隔， $t_i + t_o = t_p$ 为脉冲周期。在保持放电延续一段时间后，需停歇一段时间（一般放电延续时间在 $10^{-7} \sim 10^{-3} \text{ s}$ ，即 $0.1 \sim 1000 \mu\text{s}$ 之间）。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，使每一次的放电分别局限在很小范围内；否则，像持续电弧放电那样，使放电点大量发热、熔化，使工具电极和工件烧伤，就和电焊机切割焊接一样，从而无法进行尺寸加工，因此，电火花加工必须采用脉冲电源。

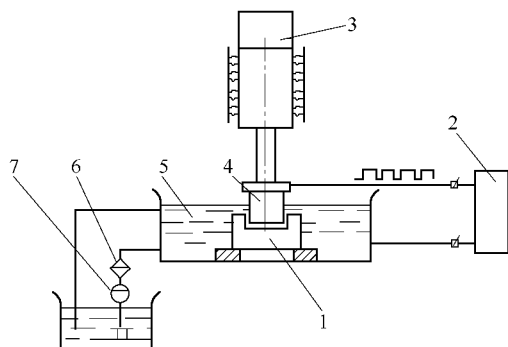


图 2-3 电火花加工原理示意

- 1—工件；2—脉冲电源；3—主轴头；
4—工具电极；5—工作液；
6—过滤器；7—工作液泵

如图 2-3 所示为电火花加工原理示意。

二、电火花成形加工的机理

脉冲性火花放电时，电极表面的金属材料被蚀除下来的这一微观物理过程就是电火花加工的物理本质，称之为机理。

以大量的实验资料来看，每次电火花蚀除的微观过程都是电场力、磁力、热力、电化学

和胶体化学等综合作用的过程，这一过程可分为以下三个彼此独立又相互关联的连续阶段。电离-击穿形成放电通道；放电-热蚀阶段；介质抛出-消电离阶段。因此，深入了解掌握并合理地利用这一机理，才能充分有效地进行加工。

(1) 电离-击穿形成放电通道实际上是当两极间施加电压时，两极（工具电极和工件）之间立即建立起一个电场，其场强（ F ）不仅取决于极间电压（ U_0 ），而且还取决于极间距离（ S ）。其公式为

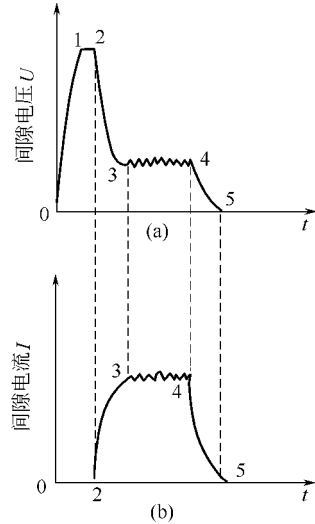
$$F=\frac{U_0}{S}$$

由公式不难看出，电场强度与电压成正比，与距离成反比，那么随着极间距离的减小，电压迅速升高而形成了一个电场，同时极间介质含有导电杂质也相应降低了间隙内介质的绝缘强度而增大了场强。使极间介质电离-击穿形成一个低阻的放电通道，并给第二阶段的介质分解熔化，汽化热膨胀提供了条件。还有由于工具电极和工件表面凹凸不平，距离又很小，电场强度是很不均匀的，而两极间离得最近的突出点尖端处的电场强度最大，从而使极间介质电离-击穿形成放电通道。如图 2-4 中 0-1 段 1-2 段。

当能量脉冲加于工具电极与工件之间，两极之间立即形成一个大的电场，其极间流体介质含有某种杂质（如金属微粒，碳粒子，胶体粒子与自由电子），使介质具有一定的电导率，在电场的作用下，这些杂质使极间电场更不均匀，当两极的尖端处，电场强度增加到 10^5 V/mm ($100\text{ V}/\mu\text{m}$) 左右时，在电场作用下电子高速向正极运动，并撞击介质中的分子或中性原子产生电离，把最外层轨道上的负电撞离出去，形成带负电的粒子（电子）和带正电的粒子（原子核等），导致带电粒子雪崩加快，使极间介质击穿而电阻迅速降低，形成放电通道，这种由于电场强度高而引起的电子发射形成的间隙介质击穿，称之为场致发射击穿。同时由于负极表面温度升高，局部过热而引起大量电子发射而形成的间隙介质击穿，称为热击穿。如图 2-5 所示电离-击穿阶段的初始电场和电子发射通道形成的示意。

图 2-4 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



左右时，在电场作用下电子高速向正极运动，并撞击介质中的分子或中性原子产生电离，把最外层轨道上的负电撞离出去，形成带负电的粒子（电子）和带正电的粒子（原子核等），导致带电粒子雪崩加快，使极间介质击穿而电阻迅速降低，形成放电通道，这种由于电场强度高而引起的电子发射形成的间隙介质击穿，称之为场致发射击穿。同时由于负极表面温度升高，局部过热而引起大量电子发射而形成的间隙介质击穿，称为热击穿。如图 2-5 所示电离-击穿阶段的初始电场和电子发射通道形成的示意。

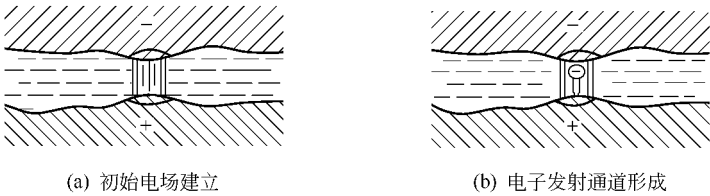


图 2-5 电离-击穿阶段

由于电离雪崩而形成的放电通道的过程非常迅速，理论上讲只需 $10^{-7} \sim 10^{-8}\text{ s}$ ($0.1 \sim 0.01\mu\text{s}$)，间隙电阻从绝缘状态连降至几分之一欧姆，由于通道直径面积小，致使信道中的电流密度高达 $10^5 \sim 10^6\text{ A/cm}^2$ ($10^3 \sim 10^4\text{ A/mm}^2$)，其间隙电压则由击穿电压连降至火花维持电压，一般为 $20 \sim 30\text{ V}$ 左右，电流则由零升到某一峰值电流，对照波形如图 2-4 中的 2-3 段，这期间如果电路中导线有电感，脉冲电源中的有关组件频率响应低，其波形上升下降都不会陡，因此会严重影响加工速度和加工精度。还有在电火花加工过程中，如电