

一招鲜·就业技术速成丛书

数控线切割操作入门

段传林 编 著



安徽科学技术出版社

《一招鲜·就业技术速成丛书》

编写委员会

主 编 石伟平

副主编 刘春玲 汪立亮

委 员 (按姓氏笔画为序)

王新华	艾春平	卢小虎	张志刚	张 军
张能武	李春亮	苏本杰	季明善	杨昌明
杨奉涛	罗中华	夏红民	徐 森	黄 芸
程美玲	程国元	满维龙		

前 言

改革开放以来,我国机床消费额大致和国民经济 GDP 增长值同步,10 年翻了一番。20 世纪 80 年代初,我国机床消费额为 10 亿美元,90 年代初达 20 亿美元,2000 年为 37.88 亿美元。2000 年世界机床最大消费国美国,消费额约为 68 亿美元。原预计 2010 年中国将成为世界最大机床消费市场,令人意想不到的是,2003 年中国已首次成为世界第一机床消费大国和世界第一机床进口大国。

目前,我国制造企业已开始广泛使用先进的数控技术,而掌握数控技术的机电复合人才奇缺。2003 年,国家数控系统工程技术研究中心的一项调研结果显示,仅数控机床的操作工就短缺 60 多万人。调研同时显示,我国目前的数控技术人才不仅存在数量短缺问题,而且质量、知识结构也不能完全满足企业需求。根据 2004 年 2 月国家劳动和社会保障部、教育部等六部门调查研究和分析预测,数控技术应用人才是我国劳动力市场技能型人才中最为短缺的四类人才之一,并位居第一。

为了满足我国高等职业技术教育发展及应用型技术人才培养的需要,我们经过反复的实践与总结,编写了这本《数控线切割操作入门》。本书系统而全面地介绍了数控电火花线切割的加工工艺、编程知识,以及数控电火花线切割机床的操作、自动编程、维护与保养技术等。本书在内容上突出实用性和针对性,尽可能使读者通过阅读本书来独立解决工作中所出现的各种问题。

本书在编写过程中得到众多专家的指导和鼎力相助,同时参考了大量的企业内部训练资料和图书资料,谨此表示衷心的感谢和崇高的敬意!

因编者水平有限,加上时间仓促,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 数控电火花线切割加工概述	1
第一节 电火花加工技术	1
一、电火花加工原理、过程及影响因素	1
二、电火花加工的特点	5
三、电火花加工工艺方法分类	6
第二节 数控电火花线切割加工	10
一、数控电火花线切割加工原理	10
二、数控电火花线切割特点及机床分类	13
三、数控电火花线切割加工的应用范围及发展趋势	15
第三节 数控电火花线切割加工设备	19
一、数控电火花线切割机床的工作原理	20
二、数控线切割机床的结构组成	23
三、数控电火花线切割机床的型号及技术参数	36
四、数控电火花线切割机床电极丝材料种类、名称和规格	37
第二章 数控电火花线切割加工工艺	39
第一节 电火花线切割加工的步骤及要求	39
一、对图样进行分析和审核	39
二、编程	40
三、加工	41
四、检验	42
第二节 穿丝孔、起切点及走丝路线的确定	43
一、穿丝孔的确定	43
二、起切点的确定	46
三、走丝路线的确定	46

第三节	线切割工艺参数的选择	47
一、	脉冲参数对工艺指标的影响	47
二、	根据加工对象合理选择电参数	51
第四节	常用夹具及工件的正确装夹	57
一、	常用夹具介绍	57
二、	工件装夹的一般要求	58
三、	支撑装夹方法	59
四、	工件的正确装夹方法	60
第五节	线切割加工工艺影响因素分析	67
一、	线切割工作液对工艺指标的影响	67
二、	电极丝对线切割工艺性能的影响	70
第六节	穿丝孔的精度及其加工方法	73
一、	穿丝孔精度对定位误差的影响	73
二、	提高穿丝孔定位精度的方法	74
三、	穿丝孔的加工方法	76
第七节	电火花线切割加工产生废品或质量差的原因 及预防	77
一、	电火花线切割产生废品及质量差的原因	77
二、	预防电火花线切割加工工件报废或质量差的方法	78
第八节	电火花线切割加工的某些工艺技巧	79
一、	复杂工件的电火花线切割加工工艺方法	79
二、	切割薄片工件的工艺方法	80
三、	切割不易装夹工件时的装夹方法	81
第三章	数控电火花线切割编程基础	85
第一节	线切割编程的常用数学基础	85
一、	坐标	85
二、	函数	87
三、	编程常用三角计算公式	88
第二节	数控编程基础	90

一、数控、数控编程的概念	90
二、数控程序的分类	91
三、数控程序的格式及组成	92
四、数控系统的基本功能	93
五、数控编程常用术语	95
第三节 线切割编程基础	96
一、线切割编程简介	96
二、线切割加工典型化编程法	97
三、带尺寸公差的编程计算方法	104
第四章 数控电火花线切割编程	106
第一节 3B 代码程序格式	106
一、3B 代码程序格式	106
二、直线的编程	106
三、圆弧编程	108
四、3B 代码编程中的补偿	110
第二节 ISO 标准 G 代码编程	114
一、程序格式	114
二、准备功能(G 功能)	116
三、线切割 G 代码编程常用辅助功能	121
第三节 线切割加工编程实例	122
实例一:直线切割	122
实例二:圆弧切割	124
实例三:凸模线切割加工	126
实例四:齿轮线切割加工	129
第四节 数控电火花线切割模具加工应用实例	130
一、一般冲裁模	130
二、复杂冲裁模	139
第五章 数控电火花线切割机床的操作	156
第一节 典型线切割机床简介	156

一、DK77 系列线切割机	156
二、SCX-I 型线切割机	165
第二节 加工前的准备	176
一、工件材料的选定和处理	176
二、工件的工艺基准	176
三、电极丝的选择	177
四、穿丝孔的加工	178
五、加工路线的选择	179
第三节 电火花线切割机床一般操作顺序	180
一、电火花线切割机床一般操作顺序	180
二、储丝筒上丝	181
三、穿丝操作	182
四、储丝筒行程调整	182
五、电极丝垂直找正	183
六、工件的装夹及找正	185
七、线切割工作液的工作要求、配制与更换	190
八、紧丝、断丝操作	191
九、加工操作注意事项	192
第四节 加工过程中特殊情况的处理	193
一、短时间临时停机	193
二、断丝	193
三、控制器出错或突然停电	194
四、短路	194
第五节 电火花线切割加工的安全技术规程	195
第六章 数控电火花线切割自动编程简介	197
第一节 CAXA 线切割 V2 的特点、基本功能及用户界面	198
一、CAXA 线切割 V2 的特点	198
二、CAXA 线切割 V2 的基本功能	198
三、CAXA 线切割 V2 的用户界面	199

第二节 点、圆和直线输入方法	201
一、点的输入	201
二、圆的输入(绘制圆)	203
三、直线输入(绘制直线)	204
第三节 CAXA 线切割轨迹生成和代码生成	206
一、CAXA 线切割轨迹生成	206
二、CAXA 线切割代码生成	211
第四节 CAXA 线切割 V2 编程实例	213
一、绘出图形	213
二、裁剪	216
三、生成加工轨迹	217
四、轨迹仿真	218
五、计算切割面积	218
六、代码生成	218
第七章 电火花线切割机床的维护保养与故障处理	223
第一节 线切割机床的维护和保养	223
一、机床的清理	223
二、机床的润滑	223
三、机床易损件的维护	224
第二节 线切割机床故障与处理	224
一、线切割机床常见故障与处理	224
二、线切割机床典型故障与处理	229
参考文献	234

第一章 数控电火花线切割加工概述

第一节 电火花加工技术

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。电火花加工中,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,通过控制连续不断的脉冲式的火花放电,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、电火花加工原理、过程及影响因素

1. 电火花加工的基本原理

电火花加工是指通过工具电极和加工工件相互靠近并达到一定的放电间隙后,两者之间产生脉冲性火花放电并伴随局部瞬时的高温,使金属局部熔化甚至汽化的电蚀现象来蚀除金属材料。

要产生火花放电应具备一定的条件,如合适的放电间隙、一定的放电延续时间和工作在具有绝缘性能的液体介质中。图 1-1 为电火花加工的原理示意图。

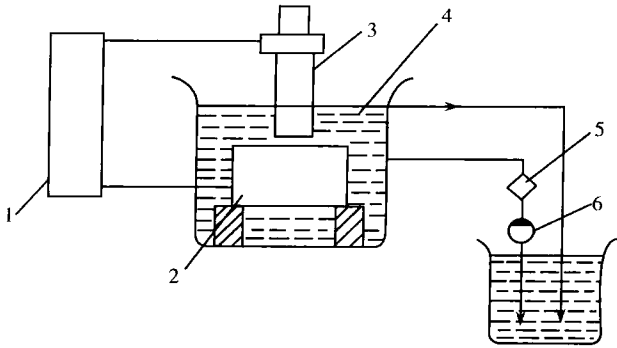


图 1-1 电火花加工的原理示意图

1-脉冲电源 2-工件 3-工具电极
4-工作液 5-过滤器 6-工作液泵

工件 2 和工具电极 3 分别与脉冲电源 1 的两个输出端相连接，工件 2 和工具电极 3 之间的间隙由电火花加工机床的自动调节装置进行控制。当两者之间的间隙达到放电间隙时，便在最小间隙处击穿工作液介质，产生局部瞬时高温，使工件和工具电极蚀除掉一小部分金属材料。脉冲放电结束后，经过一段脉冲间隙时间使工作液恢复绝缘，接着第二个脉冲电压又加到工件和工具电极上，形成第二次介质击穿，产生第二次金属蚀除。如此反复连续不断地放电，使工具电极不断向工件进给，最终把工具电极的形状复制到工件上，达到电火花加工的目的。

图 1-2 为利用电火花对带有棱角的盲槽工件进行加工的示意图。利用传统金属切削方法难以加工出盲槽的棱角，而利用电火花加工则能很好地解决问题。

2. 电火花加工的过程

电火花加工是一个非常复杂的过程，其微观过程是热力、流体力、电场力、磁力、电化学等综合作用的结果。这一过程主要分为以下几个阶段：

(1)极间介质的电离、击穿，并形成放电通道。自动调节装置控

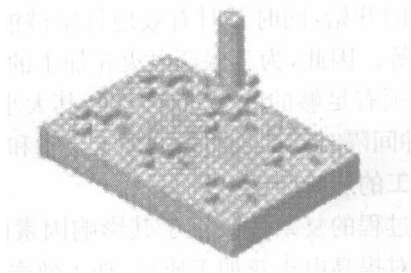


图 1-2 电火花加工的应用

制工具电极向工件缓慢靠近,两极间形成的电场随着距离的减小逐步增大,当两极间距离达到合适的放电间隙(通常为几微米到几百微米)时,由于两电极微观表面的凹凸不平,导致两极间电场不均匀,在距离最近的两点间电场强度最大,工作液介质中的杂质(如金属微粒)及自由电子在强大电场作用下,产生碰撞电离,形成带负电和带正电的粒子,带电粒子达到一定数量后导致工作液介质电离、击穿,形成放电通道。

由大量带正电、负电粒子和中性粒子组成的放电通道中,粒子间高速向相反方向运动,形成碰撞,产生大量热能,使通道中心温度达到 $10\,000^{\circ}\text{C}$ 以上。高温热膨胀形成的高压(达数十兆帕)产生强烈的冲击波向四周传播,同时伴随着热效应、光效应、声效应和电磁辐射,形成肉眼可见火花向四处飞溅。

(2)介质热分解,电极材料熔化、汽化,迅速热膨胀。工具电极和工件间液体介质被电离、击穿,形成放电通道后,脉冲电源使通道间带负电的电子高速奔向正极,而带正电的粒子高速奔向负极,粒子间相互碰撞,产生大量热能,使通道内达到很高的温度,将工作液热分解汽化,同时使金属材料表面熔化甚至汽化,产生爆炸特性。

(3)电极材料的抛出。通道间形成的高温、高压使汽化的体积不断向外膨胀,同时带着熔化、汽化了的金属材料抛向工作液中。

(4)通道间介质的电离消除。一次脉冲放电结束后,保留一段间隔时间,使通道间介质的电离消除,带电粒子恢复为中性粒子,等待

下一次脉冲放电的开始,同时及时有效地排出被蚀除下来的金属微粒、碳粒子、气泡等。因此,为了保证电火花加工的正常进行,在两次脉冲放电之间必须有足够的脉冲间隔时间,其大小根据加工具体情况调节,脉冲间隔时间的长短影响加工质量和加工效率。

3. 电火花加工的影响因素

电火花加工过程的复杂性决定了其影响因素的多样性,研究并掌握其影响因素对提高电火花加工质量、加工效率,降低工具电极的损耗均具有极其重要的意义。

(1)极性效应的影响。极性效应是指由于工具电极和工件所接脉冲电源正负极的不同,导致彼此间电蚀量的不同。在电火花加工中把工件接脉冲电源正极的方法,称“正极性”接线法,如图 1-3(a)所示。而把工件接脉冲电源负极的方法,称“负极性”接线法,如图 1-3(b)所示。

实际加工中接线方法的选择常根据脉冲电压的长短来决定,当采用长脉冲电压加工时,由于质量和惯性大的正离子有足够的加速时间,因此对负极表面的轰击破坏作用强,同时到达负极的正离子与负极表面的电子结合产生位能,故负极的蚀除速度大于正极,这时应采用“负极性”接线法,常用于粗加工的场合。当采用窄脉冲电压加工时,负离子对正极的轰击破坏作用远大于正离子对负极的轰击破坏,故正极的蚀除速度大于负极,这时应采用“正极性”接线法,常用于精加工的场合。

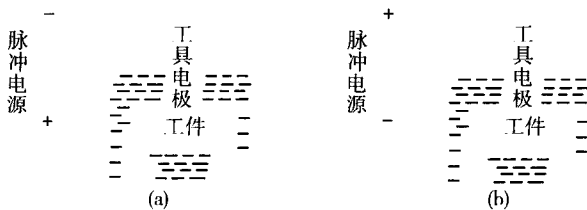


图 1-3 电极与脉冲电源接线法

(a)“正极性”接线法 (b)“负极性”接线法

(2)参数的影响。在电火花加工中,单个脉冲的电蚀量与单个脉冲能量、脉冲频率成正比,因此提高单个脉冲能量和脉冲频率,减小脉冲间隔时间,将提高电火花加工速度,但同时会使工件加工表面粗糙度增大,因此应根据实际加工精度和表面粗糙度要求合理确定电参数。

(3)金属材料热学物理性的影响。金属材料热学物理性包括熔点、沸点、热导率、比热容、熔化热、汽化热等。当脉冲放电能力相同时,金属材料的熔点、沸点、比热容、熔化热、汽化热越高,则电蚀量越少、加工难度越大。另外,热导率大的金属由于传热快,其电蚀量也小。表1-1列出了几种常用材料的热学物理常数。

表1-1 常用材料的热学物理常数

热学物理常数	材 料				
	铜	钢	钨	铝	石墨
熔点 $T_r/^\circ\text{C}$	1083	1535	3410	657	3727
沸点 $T_b/^\circ\text{C}$	2595	3000	5930	2450	4830
热导率 $\lambda/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	3.998	0.816	1.700	2.378	0.800
比热容 $C/[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	3935	695	15491	10048	16747

二、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性能(如熔点、沸点、比热容及电阻率等),而与工件材料的力学特性(如硬度、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,所以在加工工件的规格尺寸相似时,对电火花机床的刚度和主轴驱动功率的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，为提高生产效率、降低成本，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、航空领域的发动机零件、蜂窝密封结构件、深窄槽及狭缝等的加工。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密装模具，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密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。在选择加工方式时应予以充分考虑。

综上所述，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。

三、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分为：电火花成形穿孔加工、电火花线切割加工、电火花磨削加工、电火花高速小孔加工、电火花

表面加工、电火花复合加工六大类(见图 1-4)。其中应用十分普遍的是电火花成形穿孔加工及电火花线切割加工,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来选择。

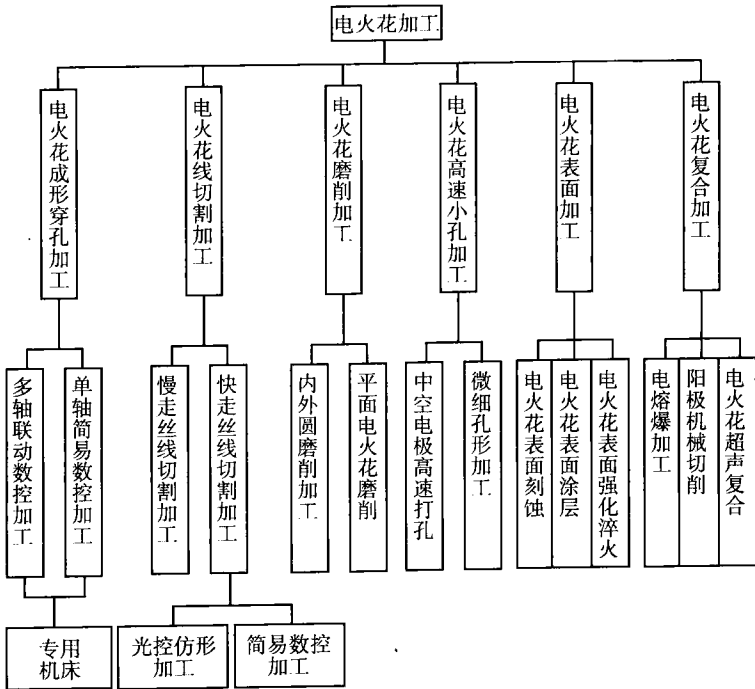


图 1-4 电火花加工分类

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、具有复杂外形零件的加工,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。

(1)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凹状的电极。而加工冷冲模具时,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。

电火花穿孔加工。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。

(2)电火花线切割加工。其特点是: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方向及垂直方向的直线运动。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。

(3)电火花磨削加工。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,电极与工件间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工件或切削工具无法加工的工件(如静压腔),还可进行大型齿轮副的啮合加工,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。

(4)电火花高速小孔加工。这是最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(压力为 $2 \sim 5$ 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, 孔径越小 ($< 0.5 \text{ mm}$), 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。

(5) 电火花表面加工。这一加工技术中, 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, 因而广泛用于模具、导轨及齿轮、轧辊工件的表面涂覆强化。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的方法来降低此处的摩擦。

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, 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对商品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取代, 仅在中、小企业中起补充作用。

(6) 电火花复合加工。在生产中应用不太普遍, 目前应用较多的是电火花超声复合加工。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, 加工时噪声很大, 加工后工件表面