

制造工艺丛书

数控电火花线切割 加工工艺及应用

李明辉 杨晓欣 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

制造工艺丛书

数控电火花线切割加工 工艺及应用

李明辉 杨晓欣 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统而全面地论述了数控电火花线切割加工工艺及应用方面的理论及相关知识,主要包括数控电火花线切割加工原理、特点、应用范围及发展情况;数控线切割加工设备及编程;电火花线切割加工的基本规律;线切割加工工艺应用及实例;人们所关心的线切割加工表面条纹、加工质量、故障与处理方法、工艺效果预测及工艺参数优化技术等。

本书适合于从事数控电火花线切割加工工艺研究与应用的工程技术人员和操作人员阅读,也可供从事模具设计与制造的技术人员以及大专院校机械制造及模具制造专业师生学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控电火花线切割加工工艺及应用 / 李明辉, 杨晓
欣编著. —北京: 国防工业出版社, 2010. 8
(制造工艺丛书)
ISBN 978 - 7 - 118 - 06889 - 4

I. ①数… II. ①李… ②杨… III. ①数控线切割:
电火花线切割 - 加工工艺 IV. ①TG484

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 127904 号

※

国防工业出版社 出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京奥鑫印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$ 字数 466 千字
2010 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422
发行传真: (010) 68411535

发行邮购: (010) 68414474
发行业务: (010) 68472764

前 言

数控电火花线切割加工是一种直接利用电能进行材料加工的现代加工方法。它蚀除量少,材料利用率高,不仅能加工各种各样的硬、脆、韧金属材料,而且还能加工各种各样的精密复杂零件。因而从 20 世纪 50 年代刚刚开发时起,就受到国内外制造业的广泛关注,并迅速成为制造业中一种必不可少的重要加工方法。至 2007 年底,中国数控电火花线切割机的年产量已突破 3.5 万台,在生产实践中运行的数控电火花线切割机约有 30 万台,相关从业人员将近 100 万人。

数控电火花线切割加工技术发展至今日,技术已比较成熟,各类数控电火花线切割加工机也都比较完善和稳定。然而,无论是哪一类数控电火花线切割加工机,其工艺效果都会或多或少受到操作者技术水平影响;了解和熟悉数控电火花线切割加工工艺的操作者,可以最大限度挖掘数控电火花线切割加工机的潜力,获得尚佳工艺效果;不了解数控电火花线切割加工工艺的操作人员,即使是使用高档数控电火花切割机,也难获得好的工艺效果。而且广大数控电火花线切割加工机操作人员都有同感,了解和学会操作线切割机比较容易,但要获得最佳工艺效果,加工出高精密复杂零件则很难。

为了帮助广大数控电火花线切割加工从业人员学习和了解数控电火花线切割加工工艺知识,迅速提高我国电火花线切割加工工艺水平,作者在中国机械工程学会特种加工分会电火花线切割加工技术委员会的关心和支持下,总结自己在上海交通大学上海模具技术研究所的数十年电火花线切割加工试验研究成果及教学经验,编写了这本《数控电火花线切割加工工艺及应用》,希望能有助于相关从业人员学习和了解数控电火花线切割加工工艺知识,共同提高我国电火花线切割加工工艺水平,充分用好现有数控电火花线切割加工设备,争取创造出更大的效益。

在编写过程中,上海大量电子有限公司不仅提供了很多宝贵的参考资料,而且为编写工作提供了许多其他便利条件;苏州三光科技技术有限公司、上海沙迪克机电有限公司、上海三菱电机自动化有限公司、北京阿奇夏米尔工业电子有限公司、牧野机床(中国)有限公司、上海东洋炭素有限公司、北京润滑剂有限公司等单位也提供了许多资料;上海大量电子有限公司张晓霞还参加了部分内容的编写工作,借此表示衷心感谢!

由于我们的水平有限,书中难免出现错误,望广大读者批评指正。

作者
2010 年 7 月于上海

目 录

第1章 概论	1	1.6 电火花线切割机床使用规则及安全技术规准	30
1.1 电火花加工的产生及分类	1	1.6.1 电火花线切割机床使用规则及维护保养方法	30
1.1.1 电火花加工的产生	1	1.6.2 电火花线切割加工的安全技术规程及实施方法	31
1.1.2 电火花加工分类	1	1.6.3 低速走丝电火花线切割机操作注意事项	33
1.1.3 电火花线切割加工常用专业名词术语	3	第2章 数控电火花线切割加工设备与编程	35
1.2 电火花线切割加工原理	6	2.1 概述	35
1.2.1 电火花线切割加工基本原理	6	2.1.1 线切割设备基本组成部分	35
1.2.2 电火花线切割加工物理过程	7	2.1.2 线切割机型号及主要参数	37
1.2.3 电极丝动态特性	9	2.2 机床精度标准及检验方法	38
1.3 电火花线切割加工特点及应用范围	14	2.2.1 机床精度标准与检验工具	38
1.3.1 电火花线切割机加工特点	14	2.2.2 高速走丝线切割机床的精度检验	38
1.3.2 电火花线切割加工应用范围	14	2.2.3 低速走丝线切割机床的精度检验	44
1.4 电火花线切割机分类	15	2.3 机床本体结构	48
1.4.1 按加工轨迹的控制方法分类	15	2.3.1 床身	48
1.4.2 按电极丝移动方式分类	16	2.3.2 坐标工作台	49
1.5 电火花线切割加工技术发展历程与趋势	18	2.3.3 储丝筒	49
1.5.1 电火花线切割加工技术发展历程	18	2.3.4 锥度线架	51
1.5.2 我国电火花线切割加工技术发展过程	19	2.3.5 导轮组件	52
1.5.3 电火花线切割加工技术研究现状	21	2.3.6 工作液过滤及供应系统	53
1.5.4 我国电火花线切割技术的近期进展	24	2.4 脉冲电源	55
1.5.5 我国电火花线切割加工技术的发展趋势及主要任务	28	2.4.1 脉冲电源的基本要求与组成	55
		2.4.2 典型脉冲电源电路	59
		2.4.3 自适应控制脉冲电源	65

2.5	数控装置与机床电气·····	66	3.5.3	电极丝材料及移动速度·····	113
2.5.1	数控功能要求、结构 与分类·····	66	3.5.4	工作液·····	114
2.5.2	伺服进给系统·····	67	第4章	数控电火花线切割加工工艺·····	116
2.5.3	机床电器·····	70	4.1	数控电火花线切割加工基本 工艺路线及工艺分析·····	116
2.6	电火花线切割加工程序编制·····	72	4.1.1	线切割加工基本工艺路线 及应用场合·····	116
2.6.1	程序编制的步骤与方法·····	72	4.1.2	零件图样工艺分析·····	116
2.6.2	ISO“G”代码程序格式·····	74	4.1.3	影响正常加工的主要 因素·····	119
2.6.3	分隔符固定顺序“3B” 指令格式·····	76	4.1.4	加工工序安排·····	120
2.6.4	电火花线切割加工的 程序编制·····	78	4.1.5	编程的工艺性·····	123
第3章	电火花线切割加工的基本规律·····	85	4.2	数控电火花线切割加工前 的工艺准备·····	127
3.1	电火花线切割加工的 工艺指标及测试方法·····	85	4.2.1	工件备料·····	127
3.1.1	主要工艺指标·····	85	4.2.2	工件装夹·····	131
3.1.2	常用的测试方法·····	86	4.2.3	数控电火花线切割 机床的调整·····	137
3.1.3	各工艺指标之间的关系·····	90	4.2.4	加工参数设置与调整·····	144
3.2	影响切割速度的主要因素·····	91	4.3	电火花线切割加工多次 切割工艺·····	151
3.2.1	脉冲参数对切割速度 的影响·····	92	4.3.1	电火花线切割加工 的工艺类型·····	151
3.2.2	非电参数对切割速度的 影响·····	96	4.3.2	高速走丝线切割机多次 切割的必要性与条件·····	154
3.3	影响加工精度的主要因素·····	102	4.3.3	电极丝的空间形位变化·····	155
3.3.1	加工尺寸精度·····	102	4.3.4	多次切割工艺及其效果·····	158
3.3.2	加工形位精度·····	105	4.4	大厚度工件电火花线切割 加工·····	161
3.4	影响加工表面质量的 主要因素·····	108	4.4.1	切缝中工作液的流动 状态·····	161
3.4.1	影响加工表面粗糙度 的主要因素·····	108	4.4.2	实现大厚度工件稳定 切割的几种途径·····	164
3.4.2	影响切割条纹的主要 因素·····	109	4.4.3	大厚度工件线切割加工 工艺·····	165
3.4.3	影响加工表面组织 变化层的主要因素·····	110	4.4.4	大厚度工件线切割实例·····	167
3.5	影响电极丝损耗的主要因素·····	112			
3.5.1	脉冲参数·····	112			
3.5.2	脉冲波形·····	113			

4.5	电火花线切割加工工作液与电极丝	168		线切割编程	220
4.5.1	工作液的作用及其对工艺效果的影响	168	5.4.6	成型刀具线切割加工	224
4.5.2	几种常用乳化液及其配制使用方法	170	5.5	典型零件线切割加工	231
4.5.3	水溶性线切割工作液	171	5.5.1	成型工具电极线切割加工	231
4.5.4	电极丝的材料特性与种类	174	5.5.2	微细小型零件线切割加工	231
第5章	数控电火花线切割加工应用实例	178	5.5.3	异形喷丝板线切割加工	231
5.1	冲裁模线切割加工	178	5.5.4	回转端面曲线型面线切割加工	232
5.1.1	冲裁工艺及冲裁模简介	178	5.5.5	弹性零件线切割加工	233
5.1.2	冲裁模制造工艺路线及线切割加工顺序	181	5.5.6	360°等分开放性风叶轮线切割加工	233
5.1.3	几种典型冲裁模电火花线切割加工	182	5.6	特种材料线切割加工	236
5.1.4	一次同时加工出凸模和凹模	187	5.6.1	工件材料的可加工性	236
5.2	超行程大型工件线切割加工	189	5.6.2	几种典型特殊材料线切割加工	239
5.2.1	移位校正加工法	190	第6章	线切割加工过程中人们关注的几个问题	244
5.2.2	同心旋转定位法	191	6.1	线切割加工的表面条纹	244
5.2.3	旋转坐标系法	191	6.1.1	高速走丝机的切割条纹比较明显	244
5.2.4	超行程工件加工实例	193	6.1.2	高速走丝机黑白条纹产生原因	244
5.3	锥度零件线切割加工	194	6.1.3	限制黑白切割条纹的方法及效果	245
5.3.1	锥度切割的基本原理	195	6.1.4	超短行程往返走丝线切割技术	246
5.3.2	带锥度典型模具线切割加工实例	199	6.2	电火花线切割加工质量问题	248
5.3.3	直齿锥齿轮线切割加工	204	6.2.1	几个常见的加工质量问题	249
5.4	上下异形复杂零件线切割加工	206	6.2.2	改善线切割加工精度的几种工艺方法	250
5.4.1	上下异形加工原理	206	6.2.3	改善线切割加工表面质量的工艺方法	253
5.4.2	工件上下面轨迹线性化处理	208	6.3	电火花线切割加工故障与处理	255
5.4.3	上下线架投影轨迹计算	210			
5.4.4	回转联动编程简要算法	213			
5.4.5	典型上下异形零件				

6.3.1	电火花线切割加工 故障诊断	255		工艺效果预测及参数优化 ...	269
6.3.2	电火花线切割加工断丝 现象及其排除方法	258	6.4.4	大厚度工件切割 仿真系统	273
6.3.3	电火花线切割加工的 异常现象及处理方法	259	6.5	电火花线切割加工 CAD/CAM 系统	276
6.4	电火花线切割加工计算机 仿真	261	6.5.1	概述	276
6.4.1	电火花线切割加工计算机 仿真技术概述	261	6.5.2	高速走丝线切割加工 CAD/CAM 系统	277
6.4.2	电火花线切割加工神经 网络模型	265	6.5.3	工艺数据库系统的建立 ...	282
6.4.3	高速走丝电火花线切割加工		附录	高速走丝电火花线切割 加工工艺数据表	286
			参考文献		291

第1章 概 论

1.1 电火花加工的产生及分类

1.1.1 电火花加工的产生

电火花加工是在一定介质中,利用阴极和阳极(工具电极与工件电极)之间脉冲性火花放电时的电腐蚀现象对材料进行加工,以达到一定形状、尺寸和表面粗糙度要求的加工方法。这种加工方法有时也被称为“放电加工”或“电蚀加工”。

早在19世纪初人们就发现,电器开关的触头在开闭的一瞬间,会产生放电现象而使其接触部位烧蚀损坏。这种由于放电所引起的电极烧蚀现象,通常称为电腐蚀现象。长期以来,人们为了延长电器触头的寿命,曾对电腐蚀现象进行了大量研究,并提出了许多有效的抗腐蚀方法。与此同时,人们逐渐认识了产生电腐蚀的原因。当二极接近而产生火花放电时,会在放电通道中产生大量的热,致使电极表面的局部金属瞬时熔化和气化。到19世纪末,美国发明了用低压大电流施加在电极与工件之间的方法来刻印文字和花纹。20世纪初,人们又发现,在液体介质中放电可以产生金属粉末。苏联学者拉扎连柯夫妇(Б. Р. Назаренко, Н. И. Назаренко)为了解释和利用电腐蚀原理,在金属工件上打出了小孔,创立了所谓的“电蚀加工法”。次年,苏联研制出了第一台电火花穿孔机。

能够把电腐蚀现象用于金属材料的尺寸加工,是因为解决了如下几个问题:

(1) 工具电极与工件之间始终保持一定的距离(通常为数微米至数百微米),介质可以被击穿放电而又不至于短路。

(2) 极间充有一定介质。对导电材料进行尺寸加工时,极间应充有液体介质;进行表面强化时,极间为气体介质。

(3) 维持正常的火花放电,使放电点局部区域的功率密度足够高,即放电通道有很高的电流密度(一般为 $10^5 \text{ A/cm}^2 \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$)。这样,放电时所产生的热量就可以达到很高的温度而使金属材料瞬时熔化和气化。

(4) 放电是短时间的脉冲性放电。放电的持续时间为 $10^{-7} \text{ s} \sim 10^{-3} \text{ s}$ 。由于放电持续时间短,放电时产生的热量就来不及传散到电极材料的内部。

(5) 在先后两次脉冲性放电之间,需有足够的间隔时间使介质电液充分消电离恢复其介电性能。

(6) 脉冲放电的电蚀产物能及时扩散,并从放电间隙中排出,以保证重复性脉冲放电顺利进行。

1.1.2 电火花加工分类

电火花加工法自创立以来,经过半个多世纪的不断完善和发展,现已广泛应用于国民经济的各个生产部门,其机床种类和应用形式也是多种多样的。按其工艺过程中工具与工件相对

运动的特点及用途不同,大约可以分为如下几类:电火花成形、电火花线切割、电火花磨削、电火花展成加工以及电火花表面强化、非金属电火花加工以及电火花刻印等,如图 1-1 所示。

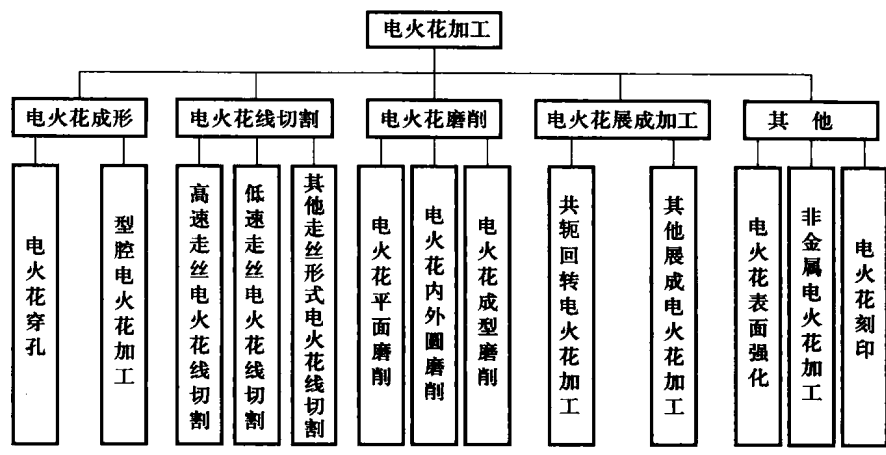


图 1-1 电火花加工分类

1. 电火花成形

这种加工方法是通过工具电极相对工件作进给运动,在加工过程中将工具电极的形状和尺寸反拷在工件上,从而加工出所需要的零件。它除了工具电极相对于工件作进给运动(这是主运动)外,有时还伴随着一两个辅助运动,如振动、抬起工具运动、转动、平动、行星运动或轨迹运动等。

这种加工方法还可以分为电火花穿孔和型腔电火花加工两类,前者一般指贯通的二维型孔的电火花加工,后者主要指三维型腔和型面电火花加工。

2. 电火花线切割

这种加工方法的加工原理不是用成型电极把形状尺寸复制在工件上,而是用移动着的线状金属电极丝按预定轨迹进行切割,加工出所需零件。其运动轨迹可以用靠模、光电或数字程序等方式来控制。如果电极丝再作某些辅助运动,还可以切割包括带斜度的任何以直线为母线的复杂零件。

根据电极丝上下移动的速度不同,又可分为高速走丝电火花线切割和低速走丝电火花线切割。此外,还有电极丝旋转的电火花线切割机以及电极丝的移动速度可以大范围调节的电火花线切割机。不同的走丝方式,电火花线切割机的结构形式及工艺特点也明显不同。

3. 电火花磨削

这种方法实质上是应用机械磨削的运动形式进行电火花加工。电火花磨削的工具电极与工件表面之间作相对运动,其中之一或二者作旋转或直线运动,但没有电火花成形时的那种伺服进给运动。

电火花磨削还可分为电火花平面磨削、电火花内外圆磨削以及电火花成型磨削(如电火花成型镗磨和铲磨等)。

4. 电火花展成加工

电火花展成加工是利用成型工具电极(通常形状较为简单)与工件电极作相对应的展成运动,逐点进行电火花加工以实现工件的整体成形。目前应用较多的有共轭回转电火花加工以及棱面展成、锥面展成、螺旋面展成加工等。

5. 其他电火花加工

电火花加工除上述四种工艺形式外,还有电火花表面强化、非金属电火花加工、电火花刻印以及其他多种复合加工形式。

电火花表面强化一般以空气为极间介质,工具电极相对工件作小振幅的振动,二者时而短接时而离开,在这过程中产生脉冲式火花放电,使空气中的氮或工具材料渗透到工件表面层内部,以改善工件表面的力学性能。

非金属电火花加工是指半导体和非导电材料电火花加工,一般是用高电压高频率脉冲电源,通过尖状电极施加在所需要加工的非金属工件上,并使其产生电火花放电而瞬时释放出大量的热量,从而使工件的局部材料瞬时熔化和气化,以达到加工的目的。

1.1.3 电火花线切割加工常用专业名词术语

为了便于电加工技术的国内外交流,在出版和教学方面都要有一套统一的名词术语、定义和符号。以下对电火花线切割加工常用专业名词术语做一介绍。

(1) 放电加工。在一定的加工介质中,通过两极(工具与工件)之间的火花放电或非稳定短电弧放电的电蚀作用来对材料进行加工的方法叫放电加工(简称 EDM)。

(2) 电火花加工。用脉冲电火花放电形式进行加工的,叫电火花加工。

(3) 电火花成形加工。采用成型工具电极,并通过工具电极相对工件作进给运动而把成型电极的形状尺寸复制在工件上的加工方法叫电火花成形加工,包括电火花穿孔和型腔电火花加工。

(4) 电火花穿孔。一般指贯通的二维形孔电火花加工,它既可以是圆孔,也可以是方孔或复杂的型孔。

(5) 型腔电火花加工。一般指三维型腔和型面电火花加工,通常是非贯通的,讲究深度方向形状和尺寸。

(6) 线电极电火花加工。指用线状电极作工具的电火花加工。电极沿轴向运动,其主要应用为电火花线切割加工。

(7) 放电。绝缘介质(气体、液体或固体)被电场击穿而形成高密度电流通过的现象。

(8) 脉冲放电。是指脉冲式的瞬时放电,这种放电不仅在时间上是断续的,而且在空间上是分散的,它是电火花加工采用的放电形式。

(9) 火花放电。介质被击穿之后的初始阶段是火花放电,极间电压与电流呈现一种负特性。火花放电通道中的电流密度很高,瞬时温度很高(可达 10000°C)。随着放电时间的延续,极间电压将维持在一定数值(维持火花放电的放电电压 U_c),而不随电流及间隙大小变化而变化,呈短电弧特性。但国内习惯上也称它为火花放电。

(10) 电弧放电。电弧放电是一种渐趋稳定的放电,这种放电在时间上是连续的,在空间上是完全集中在一点或一点的附近放电。放电加工时遇到电弧放电常常引起电极和工件的烧伤。电弧放电往往是放电间隙中排屑不良或脉冲间隙过小来不及消电离恢复绝缘,或脉冲电源损坏变成直流放电等引起的。

(11) 放电通道。放电通道又称电离通道或等离子通道,是介质击穿后极间形成导电的等离子体通道。

(12) 放电间隙 $\delta(\text{mm})$ 。放电时电极之间的距离。它是放电加工回路的一部分,有一个随击穿而变化的电阻。

t_p 的倒数,即 $f_p = 1/t_p$ 。

(32) 电参数。电加工过程中的电压、电流、脉冲宽度、脉冲间隔、功率和能量等参数叫电参数。

(33) 电规准。电加工所用的一组电压、电流、脉冲宽度、脉冲间隔等电参数,称之为电规准。

(34) 脉冲前沿 $t_r(\mu s)$,又称脉冲上升时间。此处指电流脉冲前沿的上升时间,即从峰值电流的 10% 上升到 90% 所需要的时间(图 1-3)。

(35) 脉冲后沿 $t_f(\mu s)$,又称脉冲下降时间。此处指电流脉冲后沿的下降时间,即从峰值电流的 90% 下降到 10% 所需的时间(图 1-3)。

(36) 开路脉冲。间隙未被击穿时的电压脉冲,这时没有电流脉冲。

(37) 工作脉冲。又称正常放电脉冲或有效脉冲,正常放电时极间既有电压,又有放电电流通过。

(38) 短路脉冲。指工具电极与工件之间发生短路时所通过的脉冲。此时极间理论上没有电压降,实际观察时会有一定的压降(极间接触电阻及取样观察之间的电极丝电阻压降);短路时,通过极间的电流(短路脉冲电流)最大。

(39) 极性效应。电火花(线切割)加工时,即使正极和负极是同一种材料,但正负两极的蚀除量也是不同的,这种现象称为极性效应。一般短脉冲加工时正极的蚀除量较大,反之长脉冲加工时,则负极的蚀除量较大。

(40) 正极性和负极性。工件接正极,工具电极接负极,在我国称正极性。反之,工件接负极,工具电极接正极为负极性,又称反极性。线切割加工时,所用脉宽较窄,为了增加切割速度和减少钼丝的损耗,一般工件应接正极,称正极性加工。

(41) 切割速度 $v_{wi}(\text{mm}^2/\text{min})$ 。在保持一定的表面粗糙度的切割过程中,单位时间内电极丝中心线在工件上扫过的面积的总和。

(42) 高速走丝线切割(WEDM-HS)。电极丝沿其轴线方向高速往复移动的电火花线切割加工。一般走丝速度为 $2\text{m/s} \sim 15\text{m/s}$ 。

(43) 低速走丝线切割(WEDM-LS)。电极丝沿其轴线方向低速单向移动的电火花线切割加工。一般走丝速度在 0.2m/s 以下。

(44) 线径补偿,又称“间隙补偿”或“钼丝偏移”。为获得所要求的加工轮廓尺寸,数控系统通过对电极丝运动轨迹轮廓进行扩大或缩小来作偏移补偿。

(45) 线径补偿量(mm)。电极丝几何中心实际运动轨迹与编程轮廓线之间的法向尺寸差值,又叫间隙补偿量或偏移量。

(46) 进给速度 $v_f(\text{mm}/\text{min})$ 。加工过程中电极丝中心沿切割方向相对于工件的移动速度。

(47) 多次切割。同一表面先后进行二次或二次以上的切割,以改善表面质量及加工精度的切割方法。

(48) 锥度切割。钼丝以一定的倾斜角进行切割的方法。

(49) 乳化液。由水、有机或无机油脂混合在乳化剂作用下形成的乳化液,用于电火花线切割加工。

(50) 条纹。被切割工件表面上出现的相互间隔凹凸不平或色彩不同的痕迹。当导轮、轴承精度不良时条纹更为严重。

(51) 电火花加工表面。电火花加工过的由许多小凹坑重叠而成的表面(图 1-4)。

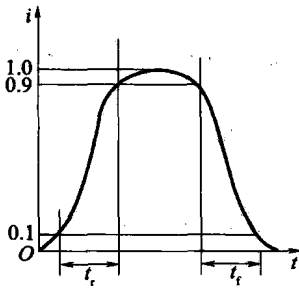


图 1-3 电流波形图

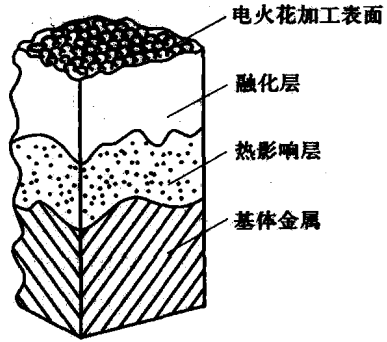


图 1-4 电火花加工表面与表层

(52) 热影响层(简称 HAZ)。它是指位于融化层下面的,由于热作用改变了基体金属金相组织和性能的一层金属(图 1-4)。

(53) 基体金属。位于热影响层下面的,未改变金相组织和性能的原来自体的金属(图 1-4)。

(54) 电火花加工表层。电火花加工表面下的一层,它包括融化层和热影响层(图 1-4)。

1.2 电火花线切割加工原理

1.2.1 电火花线切割加工基本原理

电火花线切割加工与电火花成形加工一样,都是基于电极之间脉冲放电时的电腐蚀现象。所不同的是,电火花成形加工必须事先将工具电极做成所需的形状及尺寸精度,在电火花加工过程中将它逐步复制在工件上,以获得所需要的零件。电火花线切割加工则不需要成型工具电极,而是用一根长长的金属丝做工具电极,并以一定的速度沿电极丝轴线方向移动(低速走丝是单向移动,高速走丝是双向往返移动),它不断进入和离开切缝内的放电区。加工时,脉冲电源的正极接工件,负极接电极丝,并在电极丝与工件切缝之间喷射液体介质;另外,安装工件的工作台,则由控制装置根据预定的切割轨迹控制伺服电机驱动,从而加工出我们所需要的零件。图 1-5 是电火花线切割加工原理图。

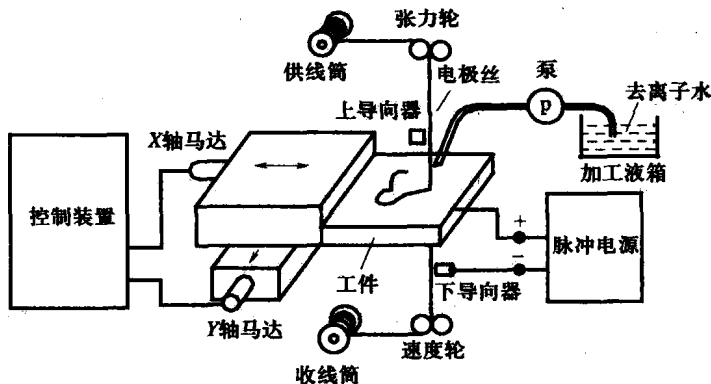


图 1-5 电火花线切割加工原理图

控制加工轨迹(加工的形状和尺寸)是由控制装置来完成的。根据控制方式不同,控制装置又可分为靠模仿形、光电跟踪及数字控制三种。随着计算机技术的发展,目前电火花线切割加工绝大部分都是采用 CNC(计算机数字控制)控制装置。

电火花线切割加工所用的液体介质,低速走丝电火花线切割加工一般为去离子水,也可用煤油;而高速走丝电火花线切割加工则用皂化油的乳化液或不含油的水溶液作工作液。

电极丝的移动由电极丝运丝系统(也称走丝机构)来完成,其收线筒控制电极丝移动速度,而供丝筒控制电极丝的张力。高速走丝电火花线切割机是靠走丝机构的储丝筒正反转来实现电极丝往返移动的。

1.2.2 电火花线切割加工物理过程

电火花线切割加工的物理过程是非常短暂而复杂的,根据大量实验资料的分析来看,每次电火花腐蚀的微观过程是电动力、电磁力、热动力以及流体动力等综合作用的过程,并可大致分为介质击穿和通道形成、能量转换和传递、电极材料的抛出、极间介质消电离等几个阶段。

电火花线切割加工实际上是一个重复脉冲放电过程,前一个脉冲放电所形成的电蚀产物及放电凹坑必定会影响后一个脉冲的放电过程,因而实际加工时的放电过程会比单个脉冲放电过程复杂得多。但单个脉冲放电毕竟是研究电火花线切割加工机理的基础。为有助于掌握电火花线切割加工的基本规律,并对电火花线切割设备提出合理的要求,仍有必要进一步了解单个脉冲放电的微观过程。

1. 单个脉冲瞬时击穿放电过程

电火花线切割加工一般都是在水基工作液(去离子水和皂化油的乳化液,也有用煤油的)中进行的。当脉冲电压施加在电极丝与工件之间时,极间电场将会因电极表面的微观不平而变得极不均匀,极间介电液中的杂质以及弱电解质的极性分子都会在极间电场的作用下向电场较强的方向聚集、结键,进一步引起极间电场的畸变。当极间距离逐步缩小或是脉冲电压不断升高时,极间某处的电场强度将会超过极间介电液的介电强度,使介电液发生雪崩式的碰撞电离,并形成极间放电通道。此刻,极间电阻将在很短时间内从绝缘状态急速下降到数欧姆以下,而电流随即上升,极间电压相应下降到火花维持电压,如图1-6所示。

极间放电通道实际上是高温、高压的电离气体,其初始压力可达数百甚至数千个大气压。这个内部高压将极力使通道及其周围瞬时形成的分子团(以后发展成气泡)急速扩展,并产生强烈的冲击波向外传播。在放电的初始阶段,气泡和放电通道之间并没有明显的界面,但因放电通道除受到周围液体介质惯性的压缩作用外,还受到它自身电磁场箍束效应作用,因而气泡会在放电过程中与放电通道界面分离并继续扩展,放电通道则被约束成一个细小的通道,其截面甚小,致使通道中的电流密度高达 $10^5 \text{ A/cm}^2 \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$ 。放电通道是由数量大体相等的带正电和带负电离子以及中性离子组成的等离子体。通道中的正负带电离子在极间电场作用下高速运动时,将发生剧烈碰撞,并产生大量的热量,使通道温度升高到 10000°C 以上。与此同时,阳极表面和阴极表面分别受到电子流和离子流的高速轰击,也将产生大量热量。这

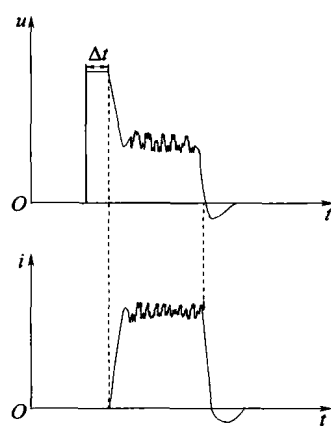


图1-6 矩形脉冲极间放电电压及放电电流波形

样,在两极之间将沿放电通道形成一个瞬时高温热源。

2. 电火花放电时的能量转换

极间介质一旦被击穿放电,脉冲电源将通过放电通道瞬时释放能量,并把电能转换为热能、动能、磁能、光能、声能以及电磁波辐射能等。其中大部分转换成热能,用于加热两极放电点及极间放电通道,使两极放电点的金属局部熔化或气化。

热能与电火花线切割加工密切相关,传递(或称分配)给电极表面的主要有以下几种形式:

- (1) 在电场作用下,带电粒子(电子和正离子)对电极表面的轰击;
- (2) 电极材料气化喷爆时所形成的蒸气炬对相对的电极表面的冲击;
- (3) 放电通道的热辐射;
- (4) 放电通道中高温气体质点对电极表面的热冲击。

在上述四种传递形式中,带电粒子对电极表面高速轰击是主要的。由于负电子的质量和体积都相当小,在电场作用下能获得很高的加速度和速度,所以在脉冲放电的最初阶段就会有大量的高速电子轰击阳极表面;而正离子则因质量惯性大,加速度小,在短时间内无法获得很高的速度。所以,采用高频窄脉冲电源的电火花线切割加工,都应选用正极性加工,即工件接电源正极,以充分利用电子的轰击作用来提高切割速度。

3. 电极表面被蚀材料的抛出

传递给电极表面的能量转化成热能,并在电极表面放电点附近形成一个瞬时高温热源。这个热源的中心处温度最高,并向工件材料内部传导,形成一个温度梯度场,即离放电点中心越远,温度越低。根据工件材料的熔点和气化点不同,使受热材料形成金属气化、金属熔融、金属固态受热三种情况。由于电极材料的熔化和气化过程十分短促,具有爆炸特性。爆炸力将把熔化和气化的金属材料抛离电极表面,而在电极表面留下一个小凹坑,如图1-7所示。

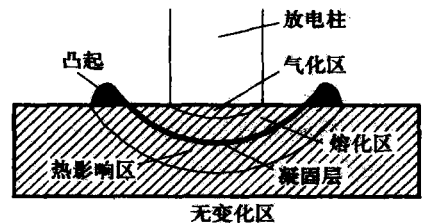


图1-7 放电凹坑形成

研究发现,在高速走丝电火花线切割加工情况下,脉冲放电时所形成的电极表面高温热源不可以简化成一个固定的点热源,而只能简化成快速移动的点热源。这种热源所形成的放电凹坑不是半球形,而是鸭蛋形。移动速度越快,以及脉冲放电持续时间越长,其凹坑的长度将越长。

4. 消电离和极间介电性能的恢复

一个脉冲放电结束之后,极间电场急速减小到零,碰撞电离也随之停止,而且放电通道会因消电离过程(即通道中的正负带电粒子复合成中性粒子过程)而使通道中的带电粒子急速减少,并逐渐恢复极间介电液的介电性能。

必须指出,正负带电粒子的复合速度是比较快的,极间电导将在很短的时间内减少。但是,正负带电粒子的复合和极间电导的减少,并不等于极间介电性能的恢复。因为放电后的电蚀产物(含有微粒、气泡及余热等)在短时间内还来不及扩散,介电液的高温及大量的电蚀产物都会降低其介电性能。因此,在电火花线切割加工中,为了保证加工的正常进行,在先后二次脉冲放电之间都应有足够的停歇时间。其最小脉冲停歇时间的选择,不仅要考虑极间介电液的消电离极限速度,而且还应该考虑电蚀产物的扩散和排出,以及放电通道中的热量传散。

5. 实际加工时的重复脉冲放电过程

从上面的论述中可以看出,一个脉冲经过击穿放电、能量转换、电极材料抛出以及极间消电离过程之后,便完成了一次电腐蚀,而在工件表面留下一个小凹坑。这个小凹坑是十分微小的,但无数个脉冲放电累积就可以加工出所需要的形状和尺寸。

此时,人们非常关心实际加工过程中重复脉冲放电是如何进行的。生产实践表明,加工过程中的每个脉冲放电,绝不是简单地在二极之间相对最近的尖端处进行,而是一个复杂的连续过程。

加工时,首先是在二极间介电能力最薄弱的凸起处产生火花放电。由于前一次放电所产生的加工屑及气泡等使放电周围的电蚀产物浓度增大,加上放电后的余热使此处的液温升高,都会降低此处工作液的介电能力,导致第二个脉冲容易在第一个脉冲放电的附近区域再次击穿放电。另外,没有发生脉冲放电的附近区域工作液比较干净,介电性能好,不易发生击穿放电。只有当加工区的间隙增大到超出能击穿放电的限度时,重复脉冲放电才会转移另一处相对易击穿的区域进行。正因为如此,电极丝移出加工区域的出口处放电间隙一般要比进口处的放电间隙大。

在实际电火花线切割加工过程中,由于电极材料的不断蚀除,电蚀产物及极间介电液的温度不断增加,加上电极丝的持续进给以及电极丝的振动等,使极间各处的间隙大小及物理状态千变万化,因而极间放电状态也是随机变化的。根据大量的实验资料可以得出:极间距离减小以及电蚀产物浓度增加,都会减小击穿延时时间,或降低击穿初始电压,以致发生极间短路,其规律如图 1-8 所示。图 1-8(c) 的放电电压波形反映其极间距离较大或介电液的介电性能良好,而图 1-8(b) 的电压波形则反映其极间距离小且介电液的介电性能差;图 1-8(a) 的电压波形是极间短路波形。

高速走丝电火花线切割加工因电极丝振动较明显,极间短路是不可避免的。为了抑制电极丝的振幅,一般都采取过跟踪方法控制线切割的进给速度,所以高速走丝电火花线切割加工时的空载波形出现的概率很小。实验发现,在一次放电过程中,也会出现空载、正常放电及短路三种不同波形,如图 1-9 所示。图 1-9(a) 为短暂时后立即击穿放电,图 1-9(b) 为击穿放电后产生瞬时短路又恢复击穿放电过程,图 1-9(c) 是从空载到短路再到正常放电。这是用示波器观察到的放电波形,其发生的机理有待进一步研究。

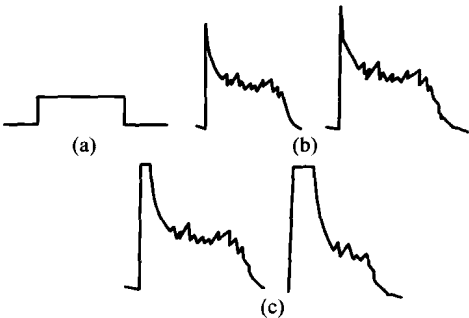


图 1-8 极间放电电压波形

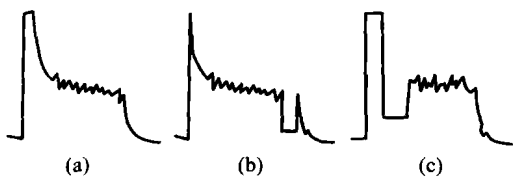


图 1-9 线切割时的极间电压波形

1.2.3 电极丝动态特性

1. 电极丝所受的力

在讨论电极丝的动态特性之前,应了解电极丝在加工过程中受到哪些力的作用。根据产