



概 论

1. 特种加工的概念和特点

特种加工,又称为非传统加工(non-traditional machining,NTM),指借助电能、热能、声能、光能、电化学能、化学能以及特殊机械能等多种能量或其复合施加在工件上,实现材料去除、变形、改性、镀覆或添加等的加工方法。特种加工是制造技术中的重要组成部分。近年来,随着制造精细化、复杂化和结构特殊化逐渐增加,以及计算机技术、微电子技术和控制技术的迅速发展,社会需求和技术进步的结合促使特种加工技术实现了飞跃发展。

特种加工与常规切削加工相比,具有如下特点:

- (1) “以柔克刚”。因工具与工件不直接接触,在加工范围上不受材料的物理、机械性能的限制,能加工硬的、软的、脆的、耐热或高熔点金属及非金属材料。
- (2) 易获得良好的表面质量,残余应力、热应力、热影响区、冷作硬化等均较小。
- (3) 易于加工比较复杂的型面、微细表面及柔性零件。
- (4) 加工过程中工件与工具间不存在显著的机械切削力。
- (5) 各种加工方法易于复合形成新的工艺方法,便于推广和应用。

2. 特种加工的分类

特种加工技术所包含的范围非常广,随着科学技术的发展,特种加工的方法也在不断丰富。目前主要涉及的特种加工如表 1-1 所示。

表 1-1 特种加工方法

加 工 方 法		工 件 材 料	精度/ μm	表面粗糙度/ μm	应 用
电火花加工	成形加工	导电材料	50~1	2.5~0.02	型腔模等
	线切割加工		20~1	2.5~0.16	样板、冲模
	高速小孔加工		20~1	2.5~0.1	打孔
激光加工		任何材料	10~1	6.3~0.12	打孔、切割、焊接、热处理等
超声波加工		脆硬材料	30~5	2.5~0.04	型孔、型腔
快速成形加工		光敏树脂、陶瓷粉末、塑料、金属	100~10	50~1	产品原型、模具制造等
电子束加工		任何材料	10~1	6.3~0.12	微孔、镀膜、焊接、蚀刻、抛光
离子束加工		任何材料	0.01~0.001	0.02~0.01	蚀刻、抛光
电化学加工	电解	导电材料	100~3	1.25~0.06	金属型孔、型面、型腔
	电铸	金属	1	0.02~0.012	金属成形小零件



3. 特种加工的发展趋势

特种加工技术的发展趋势主要有以下几点:

(1) 采用自动化技术。充分利用计算机技术对特种加工设备的控制系统、电源系统进行优化,加大对特种加工的基本原理、加工机理、工艺规律、加工稳定性等研究的力度,建立综合工艺参数自适应控制装置、数据库等(如超声、激光等加工),进而建立特种加工的CAD/CAM与柔性制造系统(flexible manufacturing system, FMS),使加工设备向自动化、柔性化方向发展,这是当前特种加工技术的主要发展方向。

(2) 趋向精密化研究。高新技术的发展促使高新技术产品向超精密化与小型化方向发展,对产品零件的精度与表面粗糙度提出更严格的要求。为适应这一发展趋势,特种加工的精密化研究已引起人们的高度重视,因此,大力开发用于超精加工的特种加工技术已成为重要的发展方向。

(3) 开发新工艺方法及复合工艺。为适应产品的高技术性能要求与新型材料的加工要求,需要不断开发新工艺方法,包括微细加工和复合加工,尤其是质量高、效率高、经济型的复合加工,如工程陶瓷、复合材料以及聚晶金刚石等。

(4) 向“绿色”加工的方向发展。污染问题极大影响和限制了有些特种加工应用与发展。加工过程中产生的废渣、废气如果排放不当,会造成环境污染,影响工人健康,因此必须花大力气处理并利用废气、废液、废渣。

(5) 进一步开拓特种加工技术。以多种能量同时作用,相互取长补短的复合加工技术,如电解磨削、电火花磨削、电解放电加工、超声电火花加工等,需要不断发展。



电火花加工技术

学习内容和要求

- (1) 掌握电火花加工原理及特点;
- (2) 了解电火花加工分类及加工过程;
- (3) 了解电火花加工的影响因素;
- (4) 熟悉电火花成形加工方法;
- (5) 了解电火花高速小孔加工方法。

电火花加工是特种加工中最常见、最重要的加工方法之一,在国防、航空、民用以及科学研究等方面得到广泛应用,其相应的设备已有较成熟的技术支撑,功能也日趋完善。

2.1 电火花加工概述

1. 电火花加工起源

电火花加工中的电蚀现象早在 19 世纪末就被人们发现,如开关的启闭所产生的电火花对接触表面的损害。但真正将电蚀现象运用到实际加工中的是:20 世纪早期苏联的拉扎林科在研究开关触点遭受火花放电腐蚀、损坏的现象和原因时,发现电火花的瞬时高温使局部金属熔化、气化而被蚀除掉,从而开创和发明了电火花加工方法,并于 1943 年利用电蚀原理研制出世界上第一台实用化的电火花加工装置。我国在 20 世纪 50 年代初期开始研究电火花设备,并于 60 年代初研制出第一台靠模仿形电火花线切割机床。

2. 电火花加工概念

电火花加工是一种利用电能和热能进行加工的新工艺,俗称放电加工(electrical discharge machining, EDM)。电火花加工与一般切削加工的区别在于:电火花加工工具与工件并不接触,而是靠工具与工件间不断产生的脉冲性火花放电,利用放电时产生局部、瞬时的高温把金属材料逐步蚀除下来,由于在放电过程中有可见火花产生,故称电火花加工。

3. 电火花加工原理

电火花加工是利用处于一定介质中的工具电极和工件电极之间火花放电时的电腐蚀现象对材料进行加工的方法。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

放电延续时间和加工过程必须在具有绝缘性能的介质中进行等。电火花加工原理示意图如图 2-1 所示。

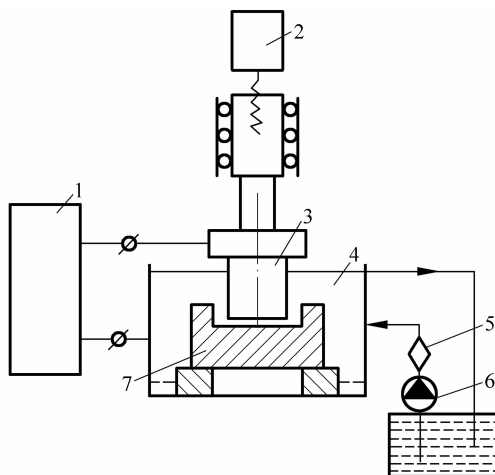


图 2-1 电火花加工原理图

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

当工件与工具两电极间电压加到直流 100V 左右,极间某一间隙最小处或绝缘强度最低处介质被击穿引起电离并产生火花放电,产生瞬时高温,使工件表面蚀除掉一小部分金属,形成一个小凹坑。然后经过一段时间间隔,排除电蚀产物和介质恢复绝缘,再在两级间加电,……,如此连续的重复放电,工具电极不断地向工件进给就可将工具的形状复制在工件上,加工出所需要的零件。

根据工件所接极性的不同,电火花加工分为正极性接法和负极性接法。所谓正极性接法就是工件接正极,工具接负极;相反,如果工件接负极,工具接正极,则称为负极性接法。其示意图如图 2-2 所示。

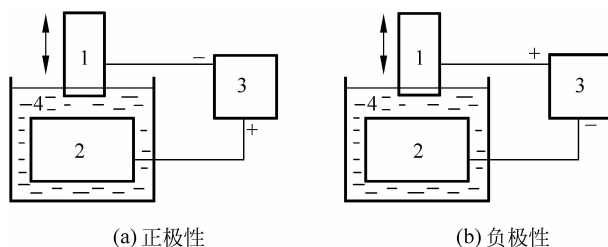


图 2-2 电火花极性示意图

1—工具电极；2—工件；3—脉冲电源；4—工作介质

4. 电火花加工分类

电火花加工工艺及机床设备的类型较多,但按工艺过程中工具与工件相对运动的特点和用途来分,大致可以分为七大类:电火花成形加工、电火花线切割加工、电火花磨削和镗磨、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、电火花表面强化及刻

字。前六类属于电火花成形、尺寸加工,是用于改变零件形状或尺寸的加工方法;后者则属于表面加工方法,用于改善或改变零件表面性质。其中应用最广、数量较多的是电火花线切割机床和电火花成形加工机床。表 2-1 所列为总的分类情况及各类加工方法的主要特点和用途。

表 2-1 电火花加工工艺方法分类

类别	工艺方法	特 点	用 途	备 注
1	电火花成形加工	(1) 工具和工件间主要有一个相对的伺服进给运动; (2) 工具为成形电极,与被加工表面有相同的截面或形状	(1) 型腔加工:加工各类型腔模及各种复杂的型腔零件; (2) 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	约占电火花机床总数的 30%,典型机床有 D7125, D7140 等电火花穿孔成形机床
2	电火花线切割加工	(1) 工具电极为沿着其轴线方向移动着的线状电极; (2) 工具与工件在两个水平方向同时有相对伺服进给运动	(1) 切割各种冲模和具有直纹面的零件; (2) 下料、截割和窄缝加工; (3) 直接加工出零件	约占电火花机床总数的 60%,典型机床有 DK7725, DK7740 等数控电火花线切割机床
3	电火花磨削和镗磨	(1) 工具与工件有相对的旋转运动; (2) 工具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、微型轴承内环、钻套等; (2) 加工外圆、小模数滚刀	约占电火花机床总数的 3%,典型机床有 D6310 电火花小孔内圆磨床
4	电火花同步共轭回转加工	(1) 成形工具与工件均作旋转运动,但两者角速度相等或成整数倍,接近的放电点可有切向相对运动速度; (2) 工具相对工件可作纵、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,加工各种复杂形面的零件,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	约占电火花机床总数的 1% 以下,典型机床有 JN-2, JN-8 等内外螺纹加工机床
5	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,管内冲入高压水基工作液; (2) 细管电极旋转	(1) 加工速度可高达 60mm/min ,深径比可达 $1:100$ 以上; (2) 线切割预穿丝孔; (3) 深径比很大的小孔,如喷嘴等	约占电火花机床总数的 2%,典型机床有 D7003A 电火花高速小孔加工机床
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) 适合用简单电极加工复杂形状; (2) 由于加工效率不高,一般用于加工较小零件	各种多轴数控电火花加工机床有此功能
7	电火花表面强化及刻字	(1) 工具在工件表面上振动; (2) 工具相对工件移动	(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	占电火花机床总数的 $2\% \sim 3\%$,典型机床有 D9105 电火花强化机等



2.2 电火花加工的特点与过程

1. 电火花加工的特点

电火花加工与一般的切削加工方法有所不同,其优点主要体现在:

(1) 在加工过程中,工件与工具不相互接触,不存在宏观作用力,因此电火花加工不受工件材料的物理和力学性能的限制;

(2) 电火花加工是利用热效应来“腐蚀”金属,热影响区小,属于局部放热现象;

(3) 电火花加工表面由很多小弧坑组成,有利于冷却介质的进入;

(4) 易于实现自动化。

电火花加工的局限性主要包括:

(1) 电火花加工属于电加工,因此主要加工导电材料,只有在特定条件下才能加工半导体和绝缘体材料;

(2) 电火花加工效率较低;

(3) 电火花加工必须要工具电极,而且随着加工的进程,电极存在一定的损耗;

(4) 电火花加工过程须在工作液中进行。

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。这一过程可分为以下四个阶段。

1) 极间介质的电离、击穿,形成放电通道

自动调节装置控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距离(通常只有几微米到几百微米)时,由于两电极微观表面的凸凹不平,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)和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。

由大量带电粒子和中性粒子组成的放电通道,粒子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 10000°C 以上。高温热膨胀形成的高压产生强烈的冲击波向四周传播,同时伴随热效应、光效应、声效应和电磁辐射,形成肉眼可见的火花。

2) 介质热分解、电极材料熔化、汽化热膨胀

极间介质一旦被电离、击穿、形成放电通道后,脉冲电源使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,动能通过碰撞又转化为热能。于是,在通道两端的正极和负极表面分别成为瞬间热源,并在瞬间达到很高的温度,从而将工作液介质汽化、热分解,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、高压使汽化了的气体体积不断向外膨胀,同时带着熔化、汽化了的金属材料抛向工作液中。

4) 极间介质的电离消除

随着一次脉冲电压的结束,脉冲电流也迅速降为零,标志着一次脉冲放电结束,但为了下一次放电的正常进行,此后应有一段间隔时间,使间隙介质消电离,即放电通道中带电子复合为中性粒子,恢复本次放电通道处间隙介质的绝缘强度,以免总是重复在同一处发生放电而导致电弧放电,同时及时有效地排出蚀除下来的金属微粒、碳粒子和气泡等。因此,为了保证电火花加工的正常进行,在两极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进行调节,脉冲间隔时间的长短影响加工质量和加工效率。

2.3 电火花加工的影响因素

电火花加工中,工件被腐蚀的过程是十分复杂的问题。通过研究影响加工工艺指标的因素,对应用电火花加工方法、提高电火花加工的生产率、降低工具电极的损耗极为重要。这些因素主要包括如下几方面。

1. 极性效应的影响

由于电火花加工中,工件和工具可以接不同极性,但是无论接正极还是负极,都会受到不同程度的电蚀现象。产生这种现象的主要原因是:在火花放电过程中,正电极表面受到负电子的撞击,而负电极表面受到正电子的撞击,各自受到瞬时热源的作用,在两极表面所分配到的能量不一样,因而电蚀量也不一样。

众所周知,电子的质量和惯性小,容易获得很高的加速度和速度,在击穿放电的初始阶段就有大量的电子撞击正极,把能量传递给正极表面,使电极材料迅速熔化、汽化。而正离子由于质量和惯性较大,启动和加速较慢,在击穿放电的初始阶段,大量的正离子还来不及到达负极表面,因此到达负极表面并传递能量的只有少部分的正离子。所以在用短脉冲(即放电持续时间较短)加工时,负电子对正极的撞击作用大于正离子对负极的撞击作用,故正极的蚀除速度大于负极的蚀除速度,这时应采用正极性接法。如果采用长脉冲加工时,质量和惯性较大的正离子将有足够的时间加速,到达并撞击负极表面的离子数将随放电时间的增长而增加,这时负极的蚀除速度大于正极的蚀除速度,因此应采用负极性接法。

2. 电参数的影响

电参数主要包括电压脉冲宽度、电流脉冲宽度、脉冲间隔、脉冲频率、峰值电流、峰值电压和极性等。

研究表明,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,就可以提高加工速度。但是,同时也将导致工件表面粗糙度的增加,因此应根据实际加工精度和表面粗糙度要求选择合理的电参数。

3. 金属材料热学常数的影响

热学常数是指材料的熔点、沸点、热导率、比热容、熔化热、汽化热等。单脉冲放电能量相同时,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。热导率大的金属由于传热快,其电蚀量也小。

4. 工作液的影响

电火花加工过程中,工作液的作用是:①形成火花击穿放电通道,并在放电结束后迅速恢复间隙的绝缘状态;②电蚀物的抛出与排除作用;③冷却作用;④压缩放电通道等。工作液的好坏直接影响电火花加工的质量。如果工作液的介电性能好、密度和粘度大,则有利于压缩放电通道,蚀除材料的抛出效果好,但是粘度大,不利于材料的排出,影响正常放电。粗加工时可以采用介电性能好和粘度大的工作液,精加工时一般采用粘度小、渗透性好的介质(如煤油)作为工作液。

5. 其他影响因素

影响电火花加工还有其他因素,主要是加工过程的稳定性。加工过程不稳定将干扰甚至破坏正常的火花放电,使有效脉冲利用率降低。随着加工深度、加工面积的增加或加工型面复杂程度的增加,都不利于电蚀产物的排出,影响加工稳定性,降低加工速度,严重时将造成结碳拉弧,使加工难以进行。

2.4 电火花成形加工及其应用

电火花加工工艺中应用最广、数量最多的是电火花成形加工和电火花线切割加工两种。由于电火花线切割加工内容较多,将在第3章详细介绍,本节主要介绍电火花成形加工方法。

电火花成形加工属电火花加工的一种,它是利用成形电极对工件进行火花放电,从而“镜像”出所需的形状。其成形电极主要采用铜、石墨和钢等导电材料。

1. 电火花成形加工机床构造

电火花成形加工机床主要包括机床主体部分、机床控制部分和工作液循环系统,如图2-3所示。

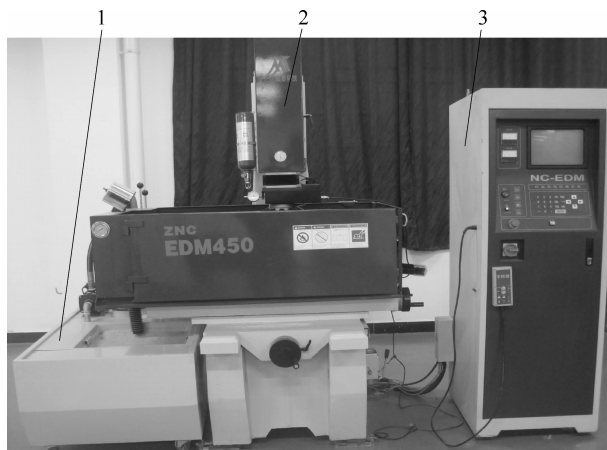


图 2-3 电火花成形加工机床

1—工作液循环系统；2—机床主体；3—机床控制柜

1) 机床主体部分

机床主体部分包括主轴头、立柱、工作台及床身等部分。

主轴头是电火花成形机床中最关键的部件之一,是自动调节系统中的执行机构。它由伺服进给机构、导向和防扭机构、辅助机构三部分组成。它控制工件与工具电极之间的放电间隙。主轴头的好坏直接影响加工工艺指标,如生产率、几何精度、表面粗糙度等。因此主轴头必须具备以下条件:具有足够的精度和刚度,能承受一定的负载,结构简单,传动链短,传动间隙小,热变形小等。

立柱和床身是机床的主要结构件,要有足够的刚度。床身工作台面与立柱导轨面间有一定的垂直度要求,并要有较好的精度保持性,这要求导轨具有较好的耐磨性和充分消除材料内应力的能力。

工作台主要用来支撑和装夹工件,它分上溜板和下溜板。在操作过程中,通过转动横纵向手轮来改变工件与工具的相对位置。工作台可分为普通工作台和精密工作台。目前国内已应用精密滚珠丝杠、滚动直线导轨和高性能伺服电机等结构,以满足精密模具加工的要求。

2) 机床控制部分

机床控制部分包括脉冲电源、自动进给调节系统、控制主机等组成。

脉冲电源的作用是将工频交流电流转换成一定频率的单向脉冲电流,以供给火花放电间隙所需要的能量。脉冲电源对电火花加工的生产率、表面质量、加工速度、加工稳定性以及成形电极损耗率等技术指标影响很大,因此脉冲电源是成形加工中非常重要的控制部分。目前电火花成形加工常用的脉冲电源是 RC 线路脉冲电源和晶体管式脉冲电源。

自动进给调节系统的任务在于维持一定的平均放电间隙,保证电火花机床正常、稳定地运行,以获取较好的加工效果。

控制主机主要由装有 EDM 软件系统的计算机和显示器组成。其作用相当于人的大脑,控制机床的整个加工过程。

3) 工作液循环系统

工作液循环系统包括工作液箱、电机、液压泵、过滤装置、工作液槽、油杯、油道、阀门和测量仪表等,油路原理图如图 2-4 所示。工作液循环方式分冲油式和抽油式两种。

工作液的主要作用如下:

- (1) 加速极间介质的冷却和消电离过程,提高蚀除速度;
- (2) 加剧放电时的流体动力过程,以利于蚀除材料的抛出;
- (3) 压缩放电通道,提高放电的能量密度,提高蚀除效果。

当前,我国电火花成形加工所用的工作液主要是煤油。但在加工过程中,由于电蚀产物的颗粒很小,当其存在于放电间隙中时,使加工状态不稳定,直接影响生产率和表面粗糙度。为了解决这类问题,常采用介质过滤的方法。介质过滤器可用木屑、黄砂、棉纱等作介质,现已基本被纸过滤器所代替。

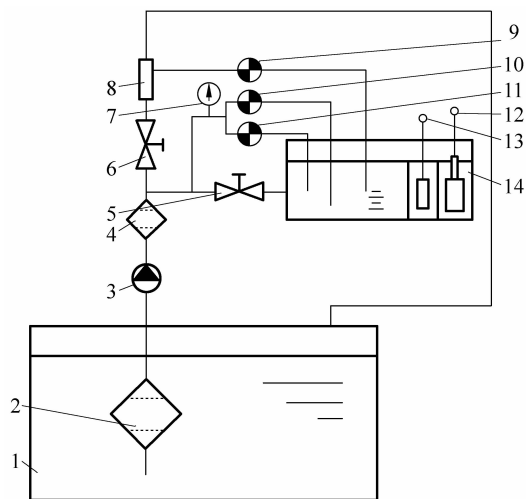


图 2-4 油路原理图

1—工作液箱；2—滤油器；3—泵；4—纸质过滤器；5—球泵；6—截止阀；7—压力表；
8—抽油接头；9—抽油用开关接头；10,11—冲油用开关接头；12—液位调整拉板；
13—泄油拉板；14—工作液油槽

2. 电火花成形加工机床型号及分类

电火花成形加工机床型号如图 2-5 所示。

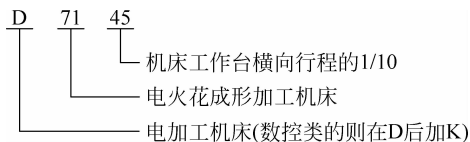


图 2-5 电火花成形加工机床型号

电火花成形加工机床按其大小可分为小型(D7125 以下)、中型(D7125~D7163)和大型(D7163 以上),按数控程度可分为非数控、单轴数控和多轴数控(三轴及以上)。

3. 电火花成形加工的主要用途

电火花成形加工属于非接触、无宏观作用力的加工方法,完全适合各种高熔点、高硬度、高强度、高脆性和高纯度材料的加工。因此电火花成形加工适应范围如下:

- (1) 加工任何难加工的导电材料,可以实现软的工具加工硬脆材料,甚至一些超硬材料;
- (2) 适用于复杂表面形状的加工,如复杂型腔模具的加工;
- (3) 适合薄壁、低刚度、微细孔、异形孔和深小孔等有特殊要求零件的加工。

4. 电火花成形电极

电火花成形电极常用导电性良好、熔点较高、易加工的耐电蚀材料,如紫铜、石墨、铜钨