

# 特种加工

TE ZHONG JIA GONG

金工教研室编

郑州粮食学院

1987

## 编 者 的 话

本教材是为本院机械系开选修课而编写的。主要简述电火花加工，电解加工，电超声波加工，激光加工，电子束加工，离子束加工等特种加工的基本原理，工艺规律，主要特点，适用范围及基本设备。

金工教研室傅隆

1987·元

# 目 录

概 述	1
第一章 电火花加工	4
第一节 电火花加工的特点及应用范围	4
第二节 电火花加工方法及原理	5
第三节 影响材料放电腐蚀的因素	9
第四节 电火花加工的基本工艺规律	16
第五节 电火花成型加工机床	27
第六节 电火花成型加工及其应用	33
第七节 其它电火花加工方法简介	38
第二章 电解加工	43
第一节 电解加工的特点及应用	43
第二节 电解加工的方法和原理	45
第三节 电解液	54
第四节 电解加工中的基本规律	60
第五节 电解加工机床	69
第六节 混气电解加工	72
第七节 典型零件的电解加工	75
第八节 电解磨削	77
第三章 超声波加工	83
第一节 超声波加工的原理和特点	83
第二节 超声加工机	85
第三节 影响超声波加工的因素	93
第四节 超声波加工的应用	96
第四章 激光加工	100

第一节	激光加工的原理及特点.....	100
第二节	激光加工机简介.....	101
第三节	激光加工的工艺规律及其应用.....	109
第五章	其它特种加工简介.....	114
第一节	电子束加工.....	114
第二节	离子束加工.....	115
附 录	.....	118



## 特 种 加 工

### 概 述

众所周知，传统的切削加工是通过刀具与工件之间的相对运动来实现的。在切削过程中，金属工件材料受到刀具的作用，发生剪切变形形成切屑，与此同时产生切削力，切削热。因此切削加工受到许多局限和具有许多固有的不利特性，第一刀具的硬度必须大于工件的硬度；第二，无论工件或刀具都必须具有一定的刚度和强度，以承受切削过程中所受到的切削力的作用。除此之外，大量的能量消耗于产生无用的产物——切屑，为了排除和处理这些切屑还要耗费能量和资金。切削中大量的能量转变为不需要的热，常常使得工艺系统变形，需要冷却。大的切削力也会使得工艺系统变形，影响加工精度，同时还常常产生不希望有的冷加工硬化，有时需要作进一步的处理来消除其影响，鉴于上述情况传统的切削加工的应用受到一定的限制。

随着科学技术的发展，在一些尖端科学技术部门和新兴的工业，诸如原子能工业，宇宙航天工业，喷气发动机工业，现代电子工业等等领域中，它们的许多设备必须在高温，高压及其它恶劣的条件下工作，在这些领域中使用的设备，愈来愈多地使用各种高强度，高硬度，高脆性，高韧性，难熔的材料，这些材料使用传统的切削加工方法难以加工甚至无法加工。同时，在现代的机械制造中，有些零件的加工尺寸极其微细，有的加工形状特别复杂，有的对加工表面质量有严格的要求，这也是传统切削方法难以完成的。例如，化学纤维喷丝头：其材料为硬质难熔金属，要在直径 $\varnothing 100$ 毫米的喷头上打一万多个孔径仅 $\varnothing 0.06$ 毫米的小孔，若采用传统的切

削方法，加工显然是十分困难，又例如，发动机叶片的型面，形状复杂，扭角大，精度高，材料一般为耐热钢或高温合金，这种型面若采用传统切削加工，则工序多，刀具磨损快，加工时间长，生产效率很低。因此，要求机械制造工业开拓新的加工领域，寻找新的加工方法，以适应科学技术的发展。在另一方面，正是因为科学技术的发展，又为机械加工开辟了新的加工途径，科学技术的新成就被运用到机械加工领域中来，就形成了今天的“特种加工”。

应当指出，特种加工是区别于传统的切削加工而言。国外有的称其为“非传统加工”，“物理化学加工”等。实质上是指直接利用电能，光能，声能、化学能，电化能来进行材料去除加工的方法。

特种加工的材料去除原理完全不同于传统的切削加工，在加工中工件和工具一般不受显著的切削力的作用，其工具的硬度也不必大于工件的硬度。不存在传统切削加工所受的限制，故此，能够解决传统切削方法所难于解决的加工问题。但是如果单从材料去除的速度看，特种加工一般低于传统的切削方法，因此在现阶段的机械加工领域中，还是以常规的切削加工方法占主导地位。特种加工主要用于难切削材料，如高强度，高韧性，高硬度，高脆性，耐高温，磁性材料等的加工，微细加工，特殊复杂形状的加工以及高精度，和有特殊表面质量要求的加工。实践证明，用传统加工方法愈是难于完成的加工，特种加工则愈能显示其优越性和经济性。

虽然特种加工尚处于研究发展阶段，但是它已经成为今天的机械制造中一种不可缺少的加工方法，并为新产品设计打破了许多加工手段限制的禁区，为新材料的应用提供了基础。特种加工的种类很多，目前在生产中应用较多的主要有：电火花加工，电解加工，电解磨削，其次是激光加工，超声波加工，化学加工，电子束加工，

等离子加工，喷射加工，放电成形，电磁成形等以上这些加工方法，其加工原理及工艺方法各不相同，应用范围也有差异。有的尚处于发展阶段，还需要不断改进提高，我们对其中应用较广泛的几种作以概略的介绍。

加工方法	加工能力				经济性			主要用途
	成形能力	可加工材料	加工精度	表面粗糙度	加工速度 <sup>②</sup>	设备投资	功率消耗	
电火花加工	较好	金属	较好	一般	中	中	中	穿孔、型腔加工、切割磨削强化
电解加工	较好	金属	一般	较好	高	高	大	型腔加工、型孔加工，去毛刺刻印
激光加工	差	金属 非金属	一般	一般	高	高	小	微小孔加工、切割焊接、热处理
超声加工	较好	金属 非金属	较好	一般	中	低	小	穿孔、套料、切割、研磨、复合加工
等离子加工	差	金属 非金属	差	差	高	低	小	切割、焊接
电子束加工	差	金属 非金属	一般	一般	高	高	小	微小孔加工、刻细槽切割、焊接
化学加工 <sup>①</sup>	差	金属	一般	一般	低	低	小	减重、蚀刻图形、薄板型孔加工
喷射加工	差	金属 非金属	一般	一般	高	低	小	切割、穿孔

① 主要指化学切。

② 指单件加工时间。

## 第一章 电火花加工

电火花加工，又称为“放电加工”或“电蚀加工”，用EDM表示（Electro-discharge machining），它是基于脉冲放电的蚀除原理，通过工件表面上的高能量电火花的作用，去除金属，是一种新型的加工方法。

关于脉冲放电蚀除金属的原理，人们知道已有很久，早在1786年，Priestly就发现了电火花对金属的腐蚀现象，但一直未被用于加工，到了1943年苏联学者拉扎连柯Лазаренко，提出了电火花加工的方法，到目前电火花加工已得到了较广泛的应用。

### 第一节 电火花加工的特点及应用范围

#### 一、电火花加工特点

1、可以加工任何硬度、脆、韧、软，高熔点的导电材料。此外在一定条件下，还可以加工半导体材料和非导电材料。

2、加工时，工具电极与工件材料不接触，两者之间宏观作用力极小，工具电极材料不须比工件硬，因此工具电极制造容易。

3、加工时“无切削力”的存在，有利于小孔，薄壁，窄槽以及各种复杂截面的型孔，曲线孔型腔等零件的加工，也适合于精密细微加工。

4、当脉冲宽度不大时，对整个工件而言，几乎不受热的影响，因此可以减小热影响层，提高加工后的表面质量，也适用于加工热敏感很强的材料。



5、脉冲参数可以任意调节，可以在同一台机床上连续进行粗，半精和精加工。加工精度为 $0.01\text{mm}$ 时，表面粗糙度不大于 $0.8$ ，微精加工时，精度为 $0.002\sim 0.004\text{mm}$ ，粗糙度为 $0.1\sim 0.05$ 。

6、直接使用电能加工，便于实现自动化。

## 二、电火花加工应用范围

目前，电火花加工技术已广泛地应用于宇航、航空，电子，原子能，计算技术，仪器仪表，电机电器，精密机械，汽车拖拉机，轻工业等行业以及科学研究部门。它的主要适用范围如下：

1、穿孔加工：型孔（圆孔，方孔，多边孔异形孔），曲线孔（弯孔，螺旋孔）小孔、微孔等。例如，落料模，复合模，级进模，拉丝模，喷嘴，喷丝孔等。

2、型腔加工，锻模，压铸模，挤压模，胶木模，整体叶轮，叶片等各种曲面零件。

3、线切割：切断、切割各种复杂型孔（例如冲裁模），以及零件和工具等的加工。

4、电火花磨削：磨平面和内外圆，小孔以及成形镗磨和铲磨等。

5、回转共轭加工：加工螺纹环规，丝规齿轮等回转零件。

6、表面强化：表面渗碳和涂覆特殊材料等。

7、其它加工：例如打印标记，雕刻，齿轮跑合，取出折断的丝锥和钻头，对已淬火零件进行修整等。

## 第二节 电火花加工方法及原理

## 一、电火花加工的方法

进行电火花加工时，是使工具电极（简称电极）与工件电极（简称工件）在绝缘液体中相互靠近，这时，极间电压将使两极间“相对最靠近点”间介质电离，形成脉冲放电，在放电通道中瞬时产生大量的热能，使金属局部熔化，甚至气化，并且在放电爆炸力的作用下，把熔化的金属抛出来，达到蚀除金属的目的。

但是，要把脉冲放电现象应用于工件的“尺寸加工”还必须具备以下条件：

- 1、具有适当的放电间隙；通常是数微米到数百微米，并能维持这一距离。
- 2、有足够的火花放电强度，即放电通道要有很大的电流密度，（一般为  $10^5 \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$ ），这样放电时产生大量的热，足以使任何导电材料局部熔化或汽化。
- 3、放电形式应是脉冲的，脉宽一般为  $0.1 \sim 3000 \mu\text{s}$ ，使脉冲放电时所产生的绝大部分热量来不及从极微小的局部加工区扩散到非加工区。
- 4、必须把加工过程中所产生的电蚀产物（包括加工屑、焦油、气体）及余热从微小的电极间隙中排除出去，否则加工将无法连续进行。
- 5、在每次脉冲放电之间的脉冲间隔内，电极间的介质必须来得及消电离，使下一个脉冲能够在两极间另一个“相对最靠近点”处击穿放电。以避免总是在同一点上放电而形成稳定电弧，从而使工件的形状尺寸逐点无限趋近于工具电极的形状尺寸。

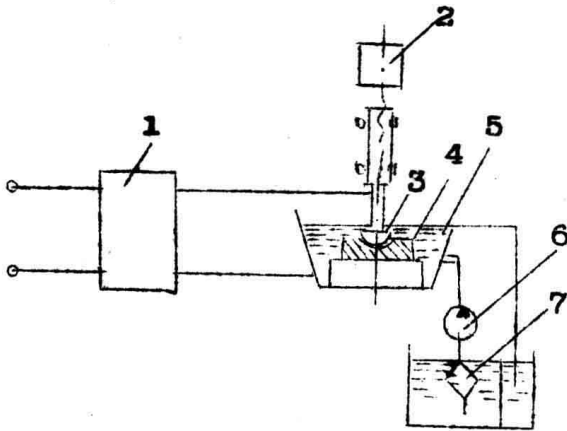
上述问题的综合解决是通过电火花加工设备来实现的。电火花加工设备由以下四大部分组成：

(1) 脉冲电源：产生所需要的重复脉冲而且加在工件与工具电极上，使产生脉冲放电。是放电蚀除的能量。

(2) 电极间隙自动调节系统：自动调节极间距离和工具电极的进给速度，以保证极间放电间隙的恒定，防止电弧放电（短路）与开路。

(3) 机床本体：用来实现工件和工具电极的装夹，固定以及调整其相对位置精度的机械系统。

(4) 工作液及其循环过滤系统



- 1 — 电源
- 2 — 伺服系统
- 3 — 工具电极
- 4 — 工 件
- 5 — 工作液
- 6 — 泵
- 7 — 过滤器

电火花加工机床示意图

## 二、电火花加工的物理本质

放电蚀除的物理过程是电磁学，热力学，流体动力学等综合作用的过程，在液体介质小间隙中进行单个脉冲放电时，材料电腐蚀过程大致可以分为电离，放电，热熔，金属抛出等几个连续的阶段，但实现电火花加工，必须连续多次进行脉冲放电，为了使每次脉冲放电正常进行，一般情况下相邻两次脉冲放电之间还要有间隙介质消电离的过程。

我们知道，电极的微观表面是凸凹不平的。当脉冲电压加到两极时，由于两电极表面的凸凹不平，使得极间电场强度分布很不均匀，这样会在场强最大的地方产生场致电子发射，由阴极表面逸出电子。在电场作用下，电子高速向阳极运动，并在运动中撞击介质中的中性分子和原子，产生碰撞电离，形成带负电的粒子（主要是电子）和带正电的粒子（正离子），导致带电粒子雪崩式地增多，当电子达到阳极时，介质被击穿，产生电火花，形成导电通道。

此外介质中的杂质也会有助于介质的击穿。

介质击穿过程非常迅速，一般为  $10^{-7} \sim 10^{-5}$  秒。介质一旦被击穿便形成导电通道，间隙电阻从绝缘状态骤降致几分之一欧姆，间隙电流迅速上升，由于放电通道受到放电时的磁场力和周围液体介质的压缩，放电通道的膨胀受到阻碍，因而横断面极小，故通道中的电流密度非常大，可高达  $10^6 \sim 10^9 \text{ A/cm}^2$ 。

通道是数量大体相等的带正电和带负电粒子及中性粒子组成的等离子体，电子和离子在电场作用下高速运动，相互之间发生剧烈碰撞，在通道中产生大量的热，而且阳极和阴极表面分别受到电子流和离子流的高速轰击，也将产生大量的热，这样，电极间隙内沿放电通道形成一个瞬时高温热源，放电通道中心温度可高达  $10000^\circ\text{C}$  左右。

在热源作用下，极微小区域的工具电极及工件表面很快就加热到熔点，甚至沸点以上，使局部金属熔化和汽化，通道周围的工作液（一般为煤油之类的碳氢化合物）则被瞬时高温分解为低分子碳氢化合物，氢和碳粒。这种熔化、汽化和分解的过程非常短促，具有爆炸的特性，爆炸力把熔化的金属抛离电极表面。

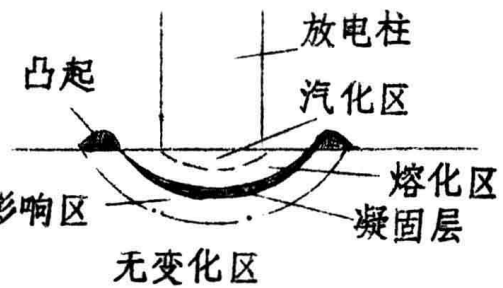
另外，放电通道周围所形成的气泡迅速扩展，即使在放电结束

以后，由于气泡外围扩展运动着的液体具有惯性，气泡体积仍继续增大，但内部压力将大大降低，致使高温时溶解在金属液体中的气体伴随着气化金属从小坑中喷爆出来，进而使一部分熔化了金属额外地抛离电极表面。

总之，材料的抛出是热爆炸力，流体动力等综合作用的结果，人们对这复杂的抛出机理的认识还在不断深化中。

熔化和汽化的金属被抛离电极表面时，除绝大部分在工作液中冷却凝固成球状小颗粒外还可能飞溅，粘附，覆盖在相对的电极表面上，同时由工作液分解的碳也附着在电极表面上一部分。

单个脉冲经过上述过程，完成了一次脉冲放电，而在工件上留下一个带有凸边的小凹穴，虽然这种凹穴是十分微小的，但无数脉冲放电蚀除量的积累，就使工件达到所需的加工要求来。



放电痕剖面示意图

在一次脉冲放电结束后，一般应用有一间隔时间，使间隔介质消电离，即通道中的带电粒子复合为中性粒子，恢复间隙中液体介质的绝缘强度，使下一个脉冲能在两极间另一个“相对最靠近点”处击穿放电，以免总在同一点放电而形成稳定电弧，因为稳定电弧放电时间长，金属熔化较深，只能起焊接和切断作用，不可能使遗留下来的表面准确光整，也就不可能进行尺寸加工。

### 第三节 影响材料放电腐蚀的因素



电火花加工中，材料放电腐蚀的规律和机理是十分复杂的。下面对影响材料放电腐蚀的一些主要因素作些简单分析介绍。

### 一、极性效应

电火花加工时，相同材料两电极的腐蚀量是不同的。其中一个电极比另一个电极的腐蚀量大，这种现象叫做极性效应。如果两极材料不同，则极性效应更加复杂。

我们把阴极蚀除量与阳极蚀除量的比值叫做极性系数，极性系数小于1称为正极性，此时工件接脉冲电源的正端，工具电极接负端。反之，极性系数大于1为负极性，这时工件接脉冲电源的负端，工具电极接正端。极性系数的改变意味着两极间能量分布的改变。

为了减少工具电极的损耗和提高生产率，总希望极性效应越显著越好，即工件蚀除越快越好，而工具蚀除越慢越好。若要采用交流脉冲电源，工件与工具的极性不断改变，使总的极性效应为零，因此电火花加工电源应选择直流脉冲电源。

产生极性效应的原因是传递给两电极上的能量不同。在电火花加工时，由于电场的作用，通道口的电子奔向阳极，正离子奔向阴极，分别轰击两电极表面。一般认为电子的质量小，在短时间内可获得较大的速度，由于加速度大即使放电时间很短（脉冲宽度小）大量电子也能达到阳极表面进行轰击。离子质量大，加速度小，如放电时间短，部分离子就来不及达到并轰击阴极表面，所以在放电时间短时（脉冲宽度小），离子对阴极表面的轰击程度不如电子对阳极的轰击。此时电子传递给阳极的能量大于正离子传递给阴极的能量，使阳极蚀除量大于阴极蚀除量，为正极性。但当放电时间长（脉冲宽度大）时，离子也有足够的时间到达阴极表面，并可获得较大的速度，加上它的质量大，因而离子轰击阴极表面的程度远远

大于电子对阳极的轰击，这时由于传递给阴极能量大，阴极蚀除量大于阳极蚀除量，为负极性。

从能量分布的时间特性来看，脉冲宽度是影响极性效应的重要因素，除此之外，阴阳两极的蚀除量还与电极材料等因素有关。

在习惯上，通常把工件接正的加工称为正极性加工，工件接负的称为负极性加工。

## 二、覆盖效应

在材料放电腐蚀过程中，一个电极的电蚀产物转移到另一个电极表面上，形成一定厚度的覆盖层，这种现象叫做覆盖效应。合理地利用覆盖效应有利于降低电极消耗。

在油类介质中加工时，覆盖层主要是石墨化的碳素层，其次是粘附在电极表面的金属微粒粘结层。碳素层具有很高的耐电腐蚀性，对电极表面有一定保护作用，例如，在煤油中用铜加工钢时，电极表面生成的碳素层与铜基体组成耐蚀层。当碳素层厚度为6微米时，铜基体表面上的温度仅为碳素层的三分之一。粘结层为钢的微粒，强度不牢，耐蚀性不高，但也有补偿电极损耗的作用，在宽脉冲大电流加工中这种补偿作用尤为明显，只是粘结层的厚度和均匀性难以控制，易引起电极型面畸变，甚致使电极尺寸增大。

在电火花加工时，覆盖层不断形成，又不断被破坏。为了实现电极低消耗，达到提高加工精度的目的，必须使覆盖层形成与破坏达到动态平衡。

## 三、脉冲放电的参数与波形

脉冲放电的参数与波形对放电腐蚀过程的影响很大，它决定着

每次脉冲放电形成的放电痕的大小，进而影响着加工的工艺指标。

根据放电热学理论，放电痕的体积  $V$  可以由下式表示：

$$V = \frac{Q}{\varepsilon} = \frac{S(\varphi - \varphi')}{\varepsilon}$$

式中： $Q$ ——电极上脉冲放电区域积聚的热量；

$\varepsilon$ ——单位体积的相变全热；

$\varphi$ ——进入电极表面的单位热流；

$\varphi'$ ——电极体内单位表面积因热传导而散失的热流；

$S$ ——放电痕表面积。

即，放电痕体积决定于放电痕内积聚的热量或者说，决定于热源传给放电痕的热量与因热传导向电极内散失掉的热量的差。

毫无疑问，放电痕内积聚的热量主要取决于单个脉冲的能量  $W_0$ 。故此说，决定放电痕尺寸的主要参数是单个脉冲能量。而单个脉冲能量  $W_0$  是放电电压  $U$ ，放电电流  $I$  和脉冲宽度  $\tau_K$  的函数：

$$W_0 = \int_0^{\tau_K} U(\tau) I(\tau) dt$$

一般说来，在一定加工条件下，单个脉冲的放电电压变化不大。因此在放电时间（脉冲宽度） $\tau_K$  一定时，放电电流  $I_m$  减小，意味着单个脉冲能量  $W$  减小，进而使  $\varphi$  减小， $Q$  减小，故放电痕体积  $V$  减小。

放电痕体积  $V$  与脉冲宽度  $\tau_K$  的关系比较复杂，在  $I_m$  一定的条件下， $\tau_K$  小时，放电痕直径小，热流密度高，热传导作用来不及使热量从表面向电极内部传播，因此热量积聚在一个不大的体积上，使之骤然加热，其中部分被熔化和汽化。由于汽化潜热比熔化潜热大得多，如果汽化部分相对较多时，耗费热量多，蚀除量就少。随

着 $\tau_k$ 增加,热传导也随之起作用,放电产生的热量传给了较大体积,故蚀除量增多。 $\tau_k$ 增加到一定值时,放电蚀除量达到最大值,此后继续增加 $\tau_k$ ,则因热传导向电极内散失的热量太多,放电痕内积聚的热量相对减少,使蚀除量也相应减少。这时 $\tau_k$ 愈大,蚀除量愈少。由于各种材料的导热系数不同,其蚀除量最大值对应的 $\tau_k$ 也不相同。

脉冲波形,特别是放电电流波形对放电蚀除过程影响颇大,从热过程观点来看,放电蚀除量不仅与放电痕积的热量有关,而且与热量传递的时间特性,即与送能速度有关。在一定能量条件下,若放电电流波形的上升率与下降率不同,则脉冲放电的前期与后期的送能速度不同,将导致热源的几何尺寸和热流密度有较大的差异。

在脉冲放电的初始阶段,如果电流上升率很高,则送能速度很快,通道将剧烈扩展,热流密度降低,放电蚀除量不大,如果电流上升率变低,送能速度降低,这时通道直径不大,热流密度却较大,则热传导熔化的体积增大,蚀除量增多。电流上升率为某一值时,对应着最大蚀除量。如果电流上升率继续降低,则随着前段放电所产生的气泡的增加,通道迅速扩展,热传导散失的热量增多,结果热流密度降低,蚀除量减少。因此,在一定条件下,脉冲电流波形的上升率不同,工件材料的蚀除量也不同,其中一种电流上升率对应着最大的蚀除量。

电流波形的下降率缓慢也会减少工件的蚀除量,但它对通道截面的影响不大。如果电流下降率很低,则会使熔化小坑的冷凝量增加,影响脉冲放电后期和放电结束后材料的抛出过程,也使蚀除量减少。

此外,电极材料不同,脉冲波形的影响也不同。