

第1章 绪 论

1.1 特种加工的由来与定义

瓦特早在 18 世纪 70 年代就发明了蒸汽机，但为何到 19 世纪才得以应用？因为苦于制造不出高精度的蒸汽机汽缸，无法推广应用。直到有人创造出和改进了汽缸镗床，解决了蒸汽机主要部件的加工工艺，才使蒸汽机得到广泛应用，引起了世界性的第一次产业革命。冷战时期，前苏联用从日本东芝公司“购买”的大型三坐标数控铣床加工出高精度潜艇用螺旋桨，噪声大大降低，使美国设在全球的侦听网失效，不得不花费大量经费与时间来研制新的侦听设备，为此美国政府对东芝公司进行制裁，不许东芝公司在相当长一段时间内进入美国市场。如果你是 IT 迷，一定对 $0.13\ \mu\text{m}$ 不陌生，21 世纪计算机产业之所以高速发展，很重要的因素就是超大规模集成电路制造技术的不断进步。这些都归功于新技术、新加工方法的出现。

众所周知，传统的机械加工对推动人类的进步和社会的发展起到了重大的作用，从第一次产业革命到第二次世界大战前，在长达 150 多年里，人类都单纯地依靠机械切削来加工零件，用传统的机械能和切削力去除金属，其本质和特点是：

- (1) 靠刀具材料比工件硬；
- (2) 靠机械能切除工件上多余材料；
- (3) 切削这么硬的材料，车刀很快就蹦刀。

直到 1943 年，前苏联的拉扎林柯夫妇偶然发现电火花的瞬时高温可使金属融化和汽化，由此发明了电火花加工技术。这是人类首次摆脱传统的切削加工，直接利用电能和热能去除金属的“特种加工”。

第二次世界大战后，特别是进入 21 世纪以来，随着机械加工技术，材料科学、高新技术的飞速发展和激烈的市场竞争，以及尖端国防及科学研究的需求，不仅新产品更新换代日益加快，而且要求产品具有很高的强度重量比和性能价格比，并朝着高速度、高精度、高可靠性、耐腐蚀、耐高温高压、大功率、尺寸大小两极分化的方向发展。为此，各种新材料、新结构、形状复杂的精密零件大量涌现，对机械制造业提出了一系列迫切需要解决的新问题。

- (1) 各种难切削材料的加工问题 如硬质合金、钛合金、耐热钢、金刚石、宝石等。
- (2) 各种特殊复杂表面的加工问题 如各种结构形状复杂、尺寸或微小或特大、精密零件的加工，喷气涡轮机叶片，巡航导弹整体涡轮，各种模具，特殊断面的型孔、喷丝头等。
- (3) 具有特殊要求零件的加工问题 如薄壁、细长轴等低刚度零件，弹性元件等特殊零件的加工等。

为了解决上述问题，人们采取了以下办法：一是通过研究高效加工的刀具和刀具材料，自动优化切削参数，提高刀具可靠性和在线刀具监控系统，开发新型切削液，研制新型自动机床等途径，进一步改善切削状态，提高切削加工水平；二是采用特种加工方法。特种加工技术就是借助电能、热能、声能、光能、电化学能、化学能及特殊机械能等多种能量，或将

其复合施加在工件的被加工部位上，从而实现材料的去除、变形、改变或镀覆等非传统加工方法的统称。

近年来，特种加工技术飞速发展，一方面，计算机技术、信息技术、自动化技术等特种加工中已获得广泛应用，逐步实现了加工工艺及加工过程的系统化集成；另一方面，特种加工能充分体现学科的综合性和交叉性，学科（声、光、电、能、化学等）和专业之间不断渗透、交叉、融合。因此，特种加工技术本身同样趋于系统化、集成化的发展方向。这两方面说明，特种加工已成为先进制造技术的重要组成部分。一些发达国家也非常重视特种加工技术的发展。如日本把特种加工技术和数控技术作为跨世纪发展先进制造技术的两大支柱。特种加工技术已成为衡量一个国家先进制造技术水平和能力的重要标志。



图 1-1 特种加工实例

自 20 世纪 50 年代以来，随着生产和科学技术的迅速发展，很多工业部门，尤其是国防工业部门要求尖端科技产品向高精度、高速度、耐高温、耐高压、大功率、小型化等方向发展，对机械制造部门提出了需要解决各种难切割材料，各种特殊复杂表面和各种超精、光整或具有特殊要求零件的加工问题。欲解决上述一系列工艺问题，仅仅依靠传统的切削方法很难实现，甚至根本无法实现。工艺师借助各种能量形式，探寻新的工艺途径，于是各种异于传统切割加工方法的新型特种加工应运而生。特种加工技术在国际上被称为 21 世纪的技术，主要用以解决工业制造中用常规方法无法实现的加工难题，对于军工制造业的发展，起着举足轻重的作用。

特种加工也称为非传统加工或现代加工，泛指用电能、热能、光能、水能、电化能、化学能、声能及特殊机械能等能量达到去除或增加材料的加工方法。特种加工技术主要包括激光加工技术、高压水射流加工技术、电子束加工技术、离子束及等离子技术和电加工技术等内容。到目前为止，已经找到了多种这一类的加工方法，为区别现有的金属切削加工，将这类传统切削加工以外的新的加工方法统称为特种加工。

1.2 特种加工的分类

特种加工一般按能量来源及形式、作用原理进行分类，如表 1-1 所示。

表 1-1 常用特种加工方法分类表

特种加工		能量来源及形式	作用原理	英文缩写
电火花加工	电火花成形加工	电能、热能	熔化、汽化	EDM
	电火花线切割加工	电能、热能	熔化、汽化	WEDM
电化学加工	电解加工	电化学能	金属离子阳极溶解	ECM（ELM）
	电解磨削	电化学、机械能	阳极溶解，磨削	EGM（ECG）
	电解研磨	电化学、机械能	阳极溶解，磨削	ECH
	电铸	电化学能	金属离子阴极沉积	EFM
	涂镀	电化学能	金属离子阴极沉积	EPM
激光加工	激光切割、打孔	光能、热能	熔化、汽化	LBM
	激光打标记	光能、热能	熔化、汽化	LBM
	激光处理、表面改性	光能、热能	熔化、相变	LBM
电子束加工	切割、打孔、焊接	电能、热能	熔化、汽化	EBM
离子束加工	蚀刻，镀覆，注入	电能、动能	原子撞击	IBM
等离子弧加工	切割（喷镀）	电能、热能	熔化、汽化（涂覆）	PAM
物料切蚀加工	超声加工	声能、机械能	磨料高频撞击	USM
	磨料流加工	机械能	切蚀	AFM
	液体喷射加工	机械能	切蚀	FJM
化学加工	化学铣削	化学能	腐蚀	CHM
	化学抛光	化学能	腐蚀	CHP
	光刻	光、化学能	光化学腐蚀	PCM
快速成形	液相固化法	光、化学能	增材法加工	SL
	粉末冶金法	光、热能		SLS
	制片叠层法	光、机械能		LOM
	熔丝堆积法	电、热、机械能		FDM
复合加工	电化学电弧加工	电化学能	熔化、汽化腐蚀	ECAM
	电解电火花机械磨削	电、热能	离子转移、熔化、切削	ESMG
	电化学腐蚀加工	电化学能、热能	熔化、汽化腐蚀	ECCM
	超声放电加工	声、热、电能	熔化、切蚀	EDM－UM
	电解机械抛光	电化学、机械能	切蚀	ECMP
	超声切削加工	机械、声、磁能	切蚀	UVC

特种加工从加工原理和特点来分类，可以分为去除加工、结合加工、变形加工三大类，如表 1-2 所示。

去除加工又称为分离加工，是从工件上去除多余的材料，如金刚石刀具精密车削、精密磨削、电火花加工、电解加工等。

结合加工是利用理化方法将不同材料结合（bonding）在一起。按结合的机理、方法、强弱又可以为非附着（deposition）、注入（injection）、连接（joined）三种。附着加工又称为沉积加工，是在工件表面上覆盖一层物质，属于弱结合，如电镀、气象沉积等。注入加工又称为渗入加工，是在工件的表层注入某些元素，使之与工件基体材料产生物化反应，以改变工件表层材料的力学、机械性质，属于强结合，如表面渗碳、离子注入等。连接是将两种相同或不同的材料通过物化方法连接在一起，如焊接、粘接等。

变形加工又称为流动加工，是利用力、热、分子运动等手段使工件产生变形，改变其尺寸、形状和性能，如液晶定向。

表 1-2 特种加工方法

分类	加工成形原理		主要加工方法
去除加工	电物理加工		电火花线切割加工、电火花加工
	电化学加工、化学加工		电解加工、蚀刻（电子术曝光）、化学机械抛光
	力学加工（力喷射）		超声加工、离子溅射加工、等离子体加工、磨料喷射加工、超
	热物理加工（热蒸发、热扩散、热溶解）		高压水射流加工、电子束加工、激光加工
结合加工	附着加工	化学	化学镀、化学气相沉积
		电化学	电镀、电铸
		热物理（热熔化）	真空蒸镀、熔化镀
		力物理	离子镀（离子沉积）、物理气相沉积
	注入加工 （渗入加工）	化学	氧化、渗氮、活性化学反应
		电化学	阳极氧化
		热物理（热扩散）	晶体生长、分子束外延、渗杂、渗碳
		力物理	离子束外延、离子注入
	连接加工	热物理、电物理 化学	激光焊接、快速成形加工、化学粘接
变形加工 （流动加工）	热流动，表面热流动		塑性流动加工（气体火焰、高频电流、热射线、电子束、激光）
	黏滞流动		液体流动加工（金属、塑料、橡胶等注塑或压铸），液晶定向
	分子定向		

目前，特种加工技术已成为先进制造技术中不可缺少的分支，在难切割、复杂型面、精细表面、优质表面、低刚度零件及模具加工等领域中已成为重要的工艺方法。

就总体而言，特种加工可以加工任何硬度、强度、韧性、脆性的金属或非金属材料，且专长于加工复杂、微细表面和低刚度零件，同时，有些方法还可以进行超精加工、镜面光整加工和纳米加工。

外因是条件，内因是根本，事物发展的根本原因在于事物的内部。特种加工之所以能产生和发展的内因，在于它具有切削加工所不具有的本质和特点。同时，也充分说明三新（新材料、新技术、新工艺）对新产品的研制、推广和社会经济的发展起着重大的推动作用。

1.3

特种加工的特点及其对机械制造领域的影响

现代特种加工（non-traditional machining）技术是借助电能、热能、光能、声能、电化学能、化学能及特殊机械能等多种能量或其复合以实现切除材料的加工方法。与常规机械加工方法相比，现代特种加工具有如下特点。

(1) 主要用其他能量去除金属材料。

有些加工方法，如激光加工、电火花加工、等离子弧加工、电化学加工等是利用热能、化学能、电化学能等去除多余材料。这些加工方法在加工范围上不受材料的物理、机械性能限制，能加工硬、软、脆、耐热或耐腐蚀、高熔点、高强度、特殊性能的金属和非金属材料。

(2) “以柔克刚”，非接触加工。

特种加工不一定需要工具。有的要使用工具，但与工件不接触，加工时不受工件的强度和硬度的制约，工件不承受大的作用力，加工过程中工具和工件间不存在机械切削力，故可加工超硬材料和精密微细零件，以及刚性极低的元件和弹性元件，甚至工具材料的硬度可低于工件材料的硬度。

(3) 易于加工比较复杂的型面、微细表面及柔性零件。

有些特种加工，如超声、电化学、水射流、磨料流等，加工余量都是微细的，故不仅可加工尺寸微小的孔或狭缝，而且能获得较高精度、较低粗糙度的加工表面。

(4) 两种或更多种不同类型的能量可相互组合形成新的复合加工，其复合加工效果明显，且便于推广使用。

各种加工方法的任意复合可扬长避短，形成新的复合工艺方法，更突出其优越性，便于扩大应用范围。近年来复合加工的方法发展迅速，应用十分广泛。目前，许多精密加工和超精密加工方法采用了激光加工、电子束加工、离子束加工等特种加工工艺，开辟了精密加工和超精密加工的新途径。

(5) 加工能量易于控制和转换，加工范围广，适应性强。

特种加工中的能量易于实现转换和控制，工件在一次装夹中可实现粗、精加工，有利于保证加工精度，提高生产率。

(6) 向精密加工方向发展。

当前已出现了精密特种加工，许多特种加工方法同时又是精密加工方法、微细加工方法，如电子束加工、离子束加工、激光束加工等就是精密特种加工。精密电火花加工的加工精密可达 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ ，表面粗糙度 Ra 可达 $0.02 \mu\text{m}$ 。

(7) 用简单运动加工复杂型面。

特种加工技术只需简单的进给运动即可加工出三维复杂型面，故已成为加工复杂型面的主要加工手段。

(8) 不产生宏观切屑，可以获得良好的表面质量。

不产生强烈的弹、塑性变形，残余应力、热应力、热影响区、冷作硬化等均比较小，尺寸稳定性好，不存在加工中的机械应变或大面积的热应变，热影响区及毛刺等表面缺陷均比机械切割表面小。

由于特种加工技术具有其他常规加工技术无法比拟的优点，在现代加工技术中，占有越来越重要的地位。表面粗糙度 $Ra < 0.01 \mu\text{m}$ 的超精密表面加工，非采用特种加工技术不可。特种加工已经成为必要的手段，甚至是唯一的手段。如今，特种加工技术的应用已遍及民用和军用的各个加工领域。

当前，虽然传统加工方法仍占有较大的比例，是主要的加工手段，应该重视并进一步发展，但由于特种加工的迅速兴起，不仅出现了许多新的加工机理，而且出现了各种复合加工技术，将几种加工方法融合在一起，发挥各自所长，相辅相成，因而提高了加工精度、表面质量和加工效率，扩大了加工应用范围。

由于特种加工技术逐渐被广泛应用，已经引起了机械制造领域内的许多变革。例如，对材料的可加工性、工艺路线的安排、新产品的试制过程、零件结构设计、零件结构工艺性好坏的衡量标准等产生了一系列的影响。

1) 提高了材料的可加工性

一般情况下，认为金刚石、硬质合金、淬火钢、石英、玻璃、陶瓷等是难加工的。现在已经广泛采用的聚晶金刚石、聚晶立方氮化硼等制造的刀具、工具、拉丝模等，可以采用电火花、电解、激光等多种方法来加工。工件材料的可加工性不再与其硬度、强度、韧性、脆性等直接的关系。对于电火花、线切割等加工技术而言，淬火钢比未淬火钢更容易加工。

2) 改变了零件的典型工艺路线

工艺人员都知道，除磨削外，其他切削加工、成形加工等都应在淬火热处理之前加工完毕，但特种加工的出现，改变了这种定型的程序格式。因为特种加工基本上不受工件硬度的影响，而且为免除加工后淬火热处理的变形，一般都先淬火后加工。例如，电火花线切割加工、电火花成形加工和电解加工等都是在淬火后进行的。

特种加工的出现还对以往工序的“分散”和“集中”引起了影响。以加工齿轮、连杆等型腔锻模为例，由于精密加工与特种加工过程中没有显著的机械作用力，机床、夹具、工具的强度和刚度不是主要矛盾，即使是较大的、复杂的加工表面，往往使用一个复杂工具，经过一次安装、一道工序加工出来，工序比较集中。

3) 缩短了新产品的试制周期

在新产品试制时，若采用光电、数控电火花线切割，便可直接加工出各种标准和非标准直齿轮（包括非圆齿轮、非渐开线齿轮）、微电机定子和转子硅钢片、各种变压器铁心、各种特殊或复杂的二次曲面体零件，从而省去设计和制造相应的刀具、夹具、量具、模具及二次工具，大大地缩短了试制周期。快速成形技术更是试制新产品的必要手段，改变了过去传统的产品试制模式。

4) 影响产品零件的结构设计

例如，为了减小应力集中，花键孔、轴的齿根部分应设计和制成小圆角。但拉削加工时刀齿做成圆角对切削和排屑不利，且容易磨损，故只能设计与制成清棱清角的齿根；而用电解加工时由于存在尖角变圆现象，因此可用来加工采用圆角的齿根。又如各种复杂冲模（山形硅钢片冲模），常规制造方法由于不易制造往往采用镶拼结构，而采用电火花线切割加工后，即使是硬质合金的刀具、模具，也可以制成整体结构。喷气发动机涡轮也由于电加工而采用扭曲叶片带冠整体结构，大大提高了发动机性能。由此可见，特种加工使产品零件可以更多地采用整体性结构。

5) 重新衡量传统结构工艺性的好坏

方孔、小孔、弯孔和窄缝等过去被认为工艺性很坏，在结构上应尽量避免，而特种加工的应用改变了这种现象。对于电火花穿孔、电火花线切割工艺来说，加工方孔和加工圆孔的难易程度是一样的。对于喷油嘴小孔，喷丝头小异形孔，涡轮叶片中大量的小冷却深孔、窄缝，静压轴承、静压导轨的内油囊型腔，采用电加工后由难变易了。过去，若淬火后忘了钻定位销孔、铣槽等工艺，淬火后这种工件只能报废，现在则大可不必，可用电火花打孔、切槽进行补救。相反，有时为了避免淬火开裂、变形等影响，故意把钻孔、开槽等工艺安排在淬火之后，这在不了解特种加工的审查人员看来，将认为是工艺、设计人员的“过错”，其实是他们没有及时进行知识更新。过去很多不可修复的废品，现在都可用特种加工的方法进行修复。例如，啮合不好的齿轮用电火花跑合；尺寸磨小了的轴、磨大了的孔，以及工作中磨损了的轴和孔，均可用电刷镀修复。

如何经济高效地加工超强超硬材料上的细长孔是一个现实的问题。目前，细长孔的机加工

方式主要采用枪钻和改良型专用钻头。加工超强材料时,枪钻磨损很大,效率很低,易折断,加工成本高,更难以进行批量加工。改良型专用钻头因为很长,刚性极差,加工出的细长孔往往出现偏斜,且一旦钻头磨损,很容易出现强度极高的毛刺,若在盲孔内出现毛刺,则去除将非常困难,从而严重影响产品的性能。因此,对于超硬材料产品上的超长孔(如孔径 $\phi 2\text{ mm}$,孔深 300 mm 以上),可采用电加工方法加工细长孔。

综上所述,特种加工技术在机械制造中发挥着重要作用,已成为现代制造技术不可分割的重要组成部分。随着科学技术和现代工业的发展,特种加工必将不断完善和迅速发展,反过来又必将推动科学技术和现代工业的发展,并发挥越来越重要的作用。

1.4 特种加工的研究热点

国外电解加工应用较广,除叶片和整体叶轮外已扩大到机匣、盘环零件和深小孔加工,用电解加工可加工出高精度金属反射镜面。目前,电解加工机床最大容量达到 5 万安培 ,并已实现CNC控制和多参数自适应控制。电火花加工气膜孔采用多通道、纳秒级、超高频脉冲电源和多电极同时加工的专用设计,加工效率为 $2\sim 3\text{ s/孔}$,表面粗糙度为 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。通用高档电火花成形及线切割已能提供微米级加工精度,可加工 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的微细孔和 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的孔。根据上述现状,为进一步提高特种加工技术的应用范围,今后特种加工技术的发展趋势有以下3个方面。

1) 微细化

特种加工技术适宜于复杂微机械结构的加工。目前,国内外对电火花、电化学、激光和超声微细加工的研究方兴未艾,微细化已经成为特种加工技术的重要发展方向。

在理论研究方面,英国的D. T. Pham等人对微细电火花加工的工艺和面临的问题进行了综述。电火花微细加工的主要工艺方法有线切割加工(线电极直径小于 $20\text{ }\mu\text{m}$)、成形钻削(电极直径 $5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$)和铣削(电极直径 $5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$)。而电极的装夹和在线制作、电极和工件的在线测量、加工精度的测量和评价,以及火花放电过程的随机性,都是阻碍电火花加工应用于微细领域的主要问题。

在实际应用方面,瑞士的Ivano Beltrami等人研制出了一种小型化的高精度微细电火花加工机床,工作行程为 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$,具有 5 nm 的分辨率和 600 Hz 的带宽。而英国的Hideki Takezawa等人则研制出了一种微细电火花加工中心,可用于工件的加工和测量。

2) 复合化

许多新的特种加工方法来自于几种已有加工方法的结合,通过对多种加工方法进行取长补短,形成新的复合加工方法,从而获得更高的加工精度和加工效率。

电解电火花加工综合了电解加工和电火花加工的特点。工具和工件间充满了电解液,使用直流脉冲电源,工具接阴极,工件接阳极,这样加工工件既包括了电火花的蚀除作用,又包括了电化学的溶解作用。电解电火花加工同时具有电火花加工的高精度和电化学加工的高效率。例如,电解电火花加工可用于非导电脆性材料(如光学玻璃和石英棒)的切片。

在微细加工中,可将线电极电火花磨削(WEDG)和单脉冲电火花放电(OPED)结合起来制造了微球形探针,该探针可应用于坐标测量机。这种方法先利用线电极电火花磨削加工电极,然后将加工后的电极移动到工件上方进行单脉冲电火花放电加工。

3) 自动化

以计算机技术、通信技术和控制技术为代表的信息技术已成为社会生产力发展的重要推动力。制造技术与信息技术相结合,使得加工过程具有自动化、柔性化、集成化和智能化的特点,以 CAD/CAM 为代表的 CAX 技术、以模糊逻辑控制和人工神经网络为代表的智能控制技术,在特种加工的各个领域都得到了广泛的应用。

基于 PC 的开放式数控系统有 PC 嵌入 NC、NC 嵌入 PC 和全软件 NC 等结构。中国台湾的颜木田等人开发的微细电火花线切割加工数控系统采用了 NC 嵌入 PC 的结构。该系统主要由 PC 和基于 DSP (TMS320C32) 的运动控制卡组成,二者通过双端口 RAM 通信。PC 主要实现数控代码解释、人机界面和网络功能,运动控制卡主要实现逻辑控制、运动控制和程序控制功能。

哈尔滨工业大学特种加工及机电控制研究所为微细电火花铣削开发了专用的 CAD/CAM 系统。该系统能针对微三维结构的形状选择最优的加工路径,并对电极的损耗进行补偿,能保证自由曲面加工的精度。利用微细电火花铣削方法在直径 1 mm 的圆形范围内加工出人脸轮廓。

特种加工技术是机械、电子、信息和材料技术的集成,体现了各项技术的最新研究成果,发展十分迅速。加工尺度的微细化、加工方法的复合化和加工过程的自动化,已成为近年来特种加工的研究热点。随着科学技术的飞速发展,特种加工技术必将进一步更新和扩展,在制造业中发挥更大、更重要的作用。

1.5 特种加工的地位和作用

特种加工技术已经成为在国际竞争中取得成功的关键技术。发展尖端技术、国防工业、微电子工业等,都需要特种加工技术来制造相关的仪器、设备和产品。在制造业自动化领域,已经进行了大量有关计算机辅助制造软件的开发,如计算机辅助设计 (CAD)、计算机辅助工程分析 (CAE)、计算机辅助工艺过程设计 (CAPP)、计算机辅助加工 (CAM) 等;又如面向装配的设计 (DFA)、面向制造的设计 (DPM) 等,统称为面向工程的设计 (DFX);同时进行了计算机集成制造技术 (CIM),生产模式如精良生产、敏捷制造、虚拟制造及绿色制造等研究,这些都是十分重要和必要的,代表了当今社会高新制造技术的一个重要方面。但是,作为制造技术的主战场,作为真实产品的实际制造,必然要依靠特种加工技术。例如,计算机工业的发展不仅要在软件上,还要在硬件上,即在集成电路芯片上有很强设计、开发和制造能力。目前,我国集成电路的制造水平制约了计算机工业的发展。

我国对特种加工技术既有广大的社会需求,又有巨大的发展潜力。目前,我国特种加工的整体技术水平与发达国家还存在着较大的差距,需要我们不断地拼搏和努力,加速开展在这些方面的研究开发和推广应用等工作。

特种加工主要用于航空航天、军工、汽车、模具、冶金、机械、电子、轻纺、交通等工业中。例如,航空航天工业中各类复杂深小孔加工,发动机蜂窝环、叶片、整体叶轮加工,复杂零件三维型腔、型孔、群孔和窄缝等的加工。在军事工业中,尤其对新型武器装配的研制和生产中,无论飞机、导弹,还是其他作战平台,都要求减小结构重量及燃油消耗,提高飞行速度,增大航程,达到战技性能高、结构寿命长、经济可承受性好的目的。在这些领域,特种加工发挥着极其重要的并且是不可替代的作用。

第 2 章 电火花加工

2.1 概述

2.1.1 电火花加工的概念

所谓电火花加工（Electrical Discharge Machine, EDM），是在介质中，利用两极（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，以使零件的尺寸、形状和表面质量达到预定要求的加工方法。在火花放电时，火花通道内会瞬时产生大量的热，致使电极表面的金属产生局部熔化甚至汽化而被蚀除下来。电火花加工表面不同于普通金属切削表面具有规则的切削痕迹，其表面是由无数个不规则的放电凹坑组成。图 2-1 中分别展示了磨削加工表面、电火花成形加工表面及电火花线切割加工表面的微观形貌。

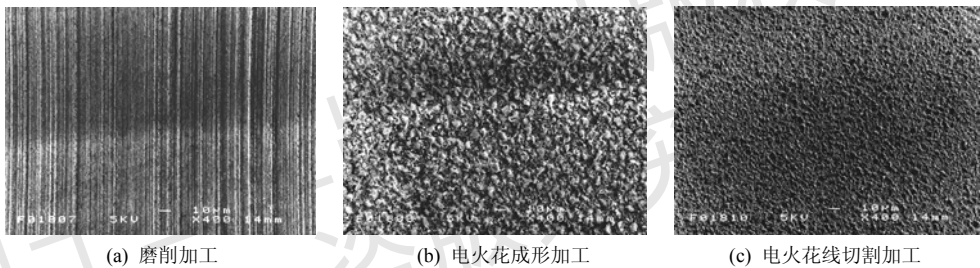


图 2-1 不同加工方式表面微观形貌照片

【背景知识 2-1】 电火花加工是如何发明的？

真正的电火花加工开始于 1943 年，以前苏联莫斯科大学的教授拉扎连科夫妇发现的电火花放电原理为标志。当时正值第二次世界大战时期，前苏联政府要求他们夫妇领导的科研小组研究如何减小钨开关触点因通电时产生火花而导致的电腐蚀，以延长钨开关的使用寿命。该问题在当时的机动车辆，尤其是坦克上尤为突出，并大大影响了坦克的使用可靠性及寿命。在实验中他们把触点浸入油中，希望可以减少火花导致的电蚀现象，但实验并未成功。不过，他们却发现浸入油中的触点产生的火花电蚀凹坑比空气中的更加一致并且大小可控，于是就想到利用这种现象采用火花放电的方法进行材料的放电腐蚀，从而发明了世界上第一台电火花加工机床。1946 年，拉扎连科夫妇因此获得斯大林奖章。

2.1.2 电火花加工的分类

按工具电极与工件相对运动的方式和用途的不同，电火花加工大致可分为电火花穿孔成形加工，电火花线切割加工，电火花内孔、外孔和成形磨削，电火花同步共轭回转加工，电火花高速小孔加工，电火花表面强化与刻字六大类。前五类属于电火花成形、尺寸加工，是用于改变工件形状和尺寸的加工方法；后一类则属于表面加工方法，用于改善或改变零件表面性质。

目前，以电火花穿孔成形加工和电火花线切割加工应用最为广泛。表 2-1 中列出了电火花加工的分类及适用范围。

表 2-1 电火花加工的分类及适用范围

类别	工艺类型	特点	适用范围	备注
1	电火花穿孔成形加工	(1) 工具和工件间有一个相对的伺服进给运动 (2) 工具为成形电极，与被加工表面有相对应的形状	(1) 穿孔加工：各种冲模、挤压模、粉末冶金模、异形孔及微孔等 (2) 型腔加工：加工各类型腔模及各种复杂的型腔工件	约占电火花加工机床总数的 20%，典型机床有 DK7125、D7140 等电火花成形机床
2	电火花线切割加工	(1) 工具电极为移动的线状电极 (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	约占电火花机床总数的 70%，典型机床有 DK7725、DK7632 等数控电火花线切割机床
3	电火花内孔、外圆和成形磨削	(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、小模数滚刀等	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等
4	电火花同步共轭回转加工	(1) 成形工具与工件均做旋转运动，但二者角速度相等或成整数倍，相对应接近的放电点可有切向相对运动速度 (2) 工具相对工件可做纵、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，加工各种复杂型面的零件，如高精度的异形齿轮，精密螺纹环规，高精度、高对称度、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不足 1%，典型机床 JN—2、JN—8 内外螺纹加工机床等
5	电火花高速小孔加工	(1) 采用细管 ($>\phi 0.3\text{ mm}$) 电极，管内冲入高压水 (2) 细管电极旋转 (3) 穿孔速度高 ($30\sim 60\text{ mm/min}$)	(1) 线切割预穿丝孔 (2) 深径比很大的小孔，如喷嘴等	约占电火花加工机床总数的 3%，典型机床有 D703A 电火花高速小孔加工机床等
6	电火花表面强化与刻字	(1) 工具在工件表面上振动，在空气中火花放电 (2) 工具相对工件移动	(1) 模具刀口，刀、量具刀口表面强化和镀膜 (2) 电火花刻字、打印记	约占电火花机床总数的 1%~2%，典型设备有 D9105 电火花强化机等

2.2 电火花加工的基本原理及机理

2.2.1 电火花加工的基本原理

实现电火花加工应具备如下条件。

(1) 工具电极和工件电极之间在加工中必须保持一定的间隙，一般是几个微米至数百微米。若两个电极距离过大，则脉冲电压不能击穿介质，也不能产生火花放电；若两个电极短路，则在两个电极间没有脉冲能量消耗，也不可能实现电腐蚀加工。因此，加工中必须用自动进给调节机构来保证加工间隙随加工状态而变化，如图 2-2 所示。

(2) 火花放电必须在有一定绝缘性能的液体介质中进行，如火花油、水溶性工作液或去离子水等。液体介质有压缩放电通道的作用，同时液体介质还能把电火花加工过程中产生的金属蚀除产物、碳黑等从放电间隙中排出去，并对电极和工件起到较好的冷却作用。

(3) 放电点局部区域的功率密度足够高，即放电通道要有很高的电流密度（一般为 $10^5\sim 10^6\text{ A/cm}^2$ ）。放电时所产生的热量，足以使工件表面金属局部瞬时熔化甚至汽化，从而在被加工材料表面形成一个电蚀凹坑。

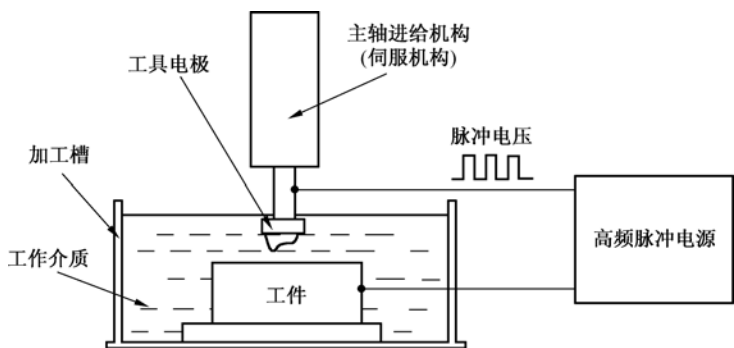


图 2-2 电火花加工原理图

(4) 火花放电是瞬时的脉冲性放电，放电的持续时间一般为 $10^{-7} \sim 10^{-3}$ s。由于放电时间短，放电时产生的热量来不及扩散到工件材料内部，能量集中，温度高，放电点集中在很小范围内。如果放电时间过长，就会形成持续电弧放电，使加工表面材料大范围熔化烧伤而无法作为尺寸加工的工艺方法进行。

(5) 在先后两次脉冲放电之间，有足够的停歇时间，排除电蚀产物，使极间介质充分消电离，恢复介电性能，以保证下次脉冲放电不在同一点进行，避免发生局部烧伤现象，使重复性脉冲放电顺利进行。

脉冲电源的放电电压及电流波形如图 2-3 所示。

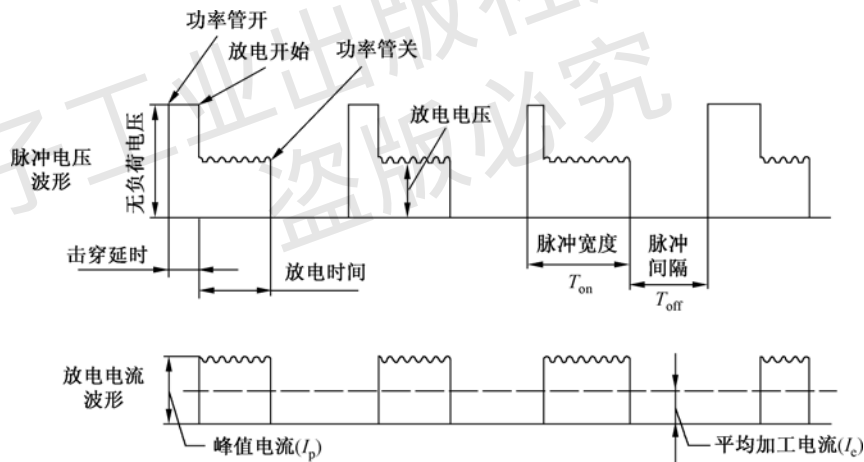


图 2-3 脉冲电源的放电电压及电流波形

2.2.2 电火花加工的机理

每次电火花放电的微观过程都是电场力、磁力、热力、流体动力、电化学和胶体化学等综合作用的过程。这一过程大致可分以下四个连续阶段：极间介质的电离、击穿，形成放电通道；介质热分解、电极材料熔化、汽化热膨胀；电极对材料的抛出；极间介质的消电离。

(1) 极间介质的电离、击穿，形成放电通道。任何物质的原子均是由原子核与围绕着原子核并且在一定轨道上绕行的电子组成，而原子核又由带正电的质子和不带电的中子组成，如图 2-4 所示。对于极间的介质，当极间没有施加脉冲电压时，两电极的极间状态如图 2-5 所示。当脉冲电压施加于工具电极与工件之间时，两电极间立即形成一个电场。电场强度与电压成正比，与

距离成反比，随着极间电压的升高或极间距离的减小，极间电场也将随着增大。由于工具电极和工件的微观表面凹凸不平，极间距离又很小，因而极间电场强度是不均匀的，两电极间离得最近的突出或尖端处的电场强度最大。当电场强度增加到一定程度后，将导致介质原子中绕轨道运行的电子摆脱原子核的吸引成为自由电子，而原子核成为带正电的离子，并且电子和离子在电场力的作用下，分别向正极与负极运动，形成放电通道，如图 2-6 所示。

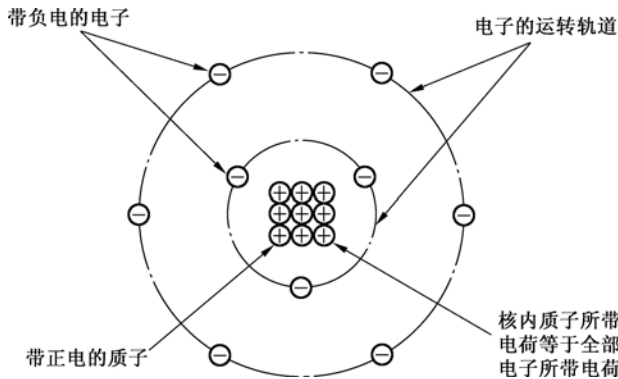


图 2-4 介质原子结构示意图

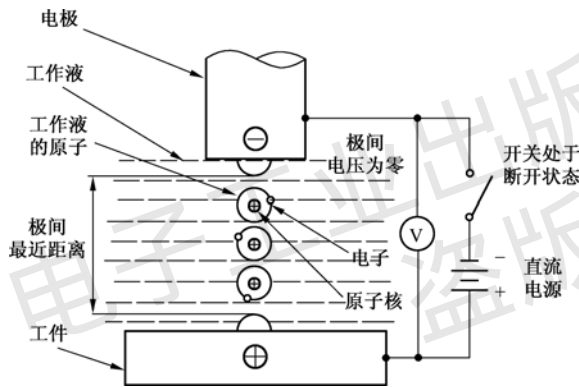


图 2-5 极间未施加放电脉冲时的情况

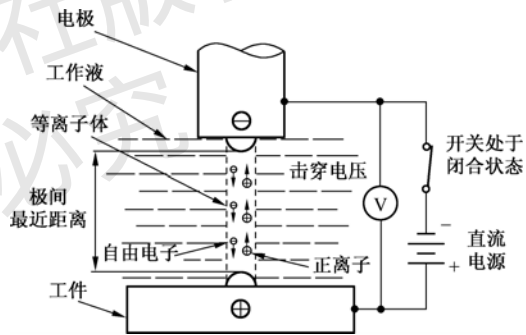


图 2-6 极间施加放电脉冲形成放电通道的情况

(2) 介质热分解、电极对材料熔化、汽化热膨胀。极间介质一旦被电离、击穿，形成放电通道后，脉冲电源将使通道内的电子高速奔向正极，正离子奔向负极，电能变成动能，动能通过带电粒子对相应电极材料的高速碰撞转变为热能。于是，在通道内正极和负极表面分别产生瞬时热源，并达到很高的温度。正负极表面的高温除使周围工作液汽化、热分解外，也使金属材料熔化甚至沸腾汽化，这些汽化的工作液和金属蒸气，瞬间体积猛增，在放电间隙内成为气泡，迅速热膨胀，就像火药、爆竹点燃后具有爆炸特性一样。观察电火花加工过程，可以看到放电间隙间冒出气泡，工作液逐渐变黑，并可听到轻微而清脆的爆炸声。

【机理解释 2-1】 粒子轰击作用的直观解释

在放电通道内，电子、正离子在电场作用下奔向正极、负极的过程就犹如陨石从天外受到地球的吸引而撞击地球表面一样，由于陨石高速运动而发生的撞击，将产生巨大的热量，从而发生爆炸，形成陨石坑。

(3) 电极材料的抛出。通道内的正负电极表面放电点瞬时高温使工作液汽化并使两电极对应

表面金属材料产生熔化、汽化，如图 2-7 所示。通道内的热膨胀产生很高的瞬时压力，使汽化了的气体体积不断向外膨胀，形成一个扩张的“气泡”，从而将熔化或汽化的金属材料推挤、抛出，使其进入工作液中。抛出的两极带电荷的材料在放电通道内汇集后进行中和及凝聚，如图 2-8 所示，最终形成了细小的中性圆球颗粒，成为电火花加工的蚀除产物，如图 2-9 所示。实际上，熔化和汽化了的金属在抛离电极表面时，向四处飞溅，除绝大部分抛入工作液中收缩成小颗粒外，还有一小部分飞溅、镀覆、吸附在对面的电极表面上。这种互相飞溅、镀覆及吸附的现象，在某些条件下可以用来减小或补偿工具电极在加工过程中的损耗。

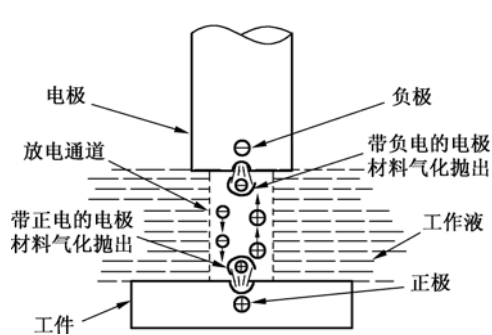


图 2-7 电极表面产生熔化甚至汽化

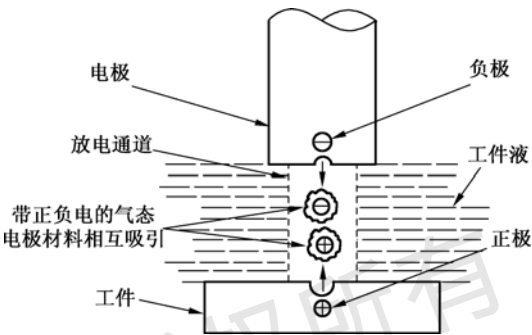


图 2-8 两电极被蚀除的材料在放电通道内汇集

(4) 极间介质的消电离。随着脉冲电压的结束，脉冲电流也迅速降为零，但此后仍应有一段间隔时间，使间隙介质消除电离。即放电通道中的正负带电粒子复合为中性粒子（原子），并且将通道内已经形成的放电蚀除产物及一些中和的带电微粒尽可能排出通道，恢复本次放电通道处间隙介质的绝缘强度，以及降低电极表面温度等，从而避免由于此放电通道绝缘强度较低，下次放电仍然可能在此处击穿而导致的总是重复在同一处击穿产生电弧放电的现象，以保证在别处按两极相对最近处或电阻率最小处形成下一个放电通道，从而形成均匀的电火花加工表面。

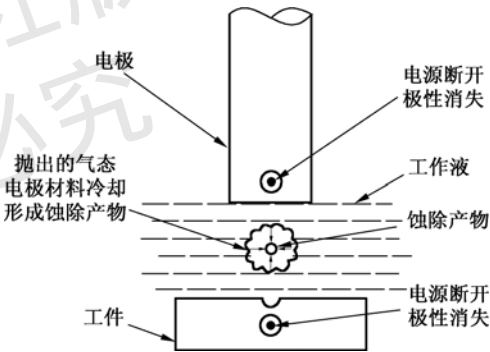


图 2-9 极间熔化汽化产物在放电通道内汇集形成蚀除产物

2.2.3 电火花加工的极性效应

由电火花放电的微观过程可知，在电火花加工过程中，无论是正极还是负极，都会受到粒子轰击产生不同程度的电蚀。即使是相同材料（例如用钢加工钢），正、负电极的电蚀量也不同。这种单纯由于正、负极性不同而彼此电蚀量不一样的现象称为极性效应。如果两极材料不同，则极性效应更加复杂。在我国，通常把工作件接脉冲电源的正极（工具电极接负极）时，定义为“正极性”加工；反之，工件接脉冲电源的负极（工具电极接正极）时，定义为“负极性”加工，又称“反极性”加工。

产生极性效应的原因很复杂，对这一问题的原则性解释是：在火花放电过程中，正、负电极表面分别受到负电子和正离子的轰击和瞬时热源的作用，由于两极表面所分配到的能量不一样，因而熔化、汽化抛出的电蚀量也不一样。因为电子的质量和惯性均小，容易获得很大的加速度和速度，在介质击穿放电的初始阶段就有大量的电子奔向正极，把能量传递到正极表面，

使其迅速熔化和汽化；而正离子则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，大量的正离子来不及到达负极表面，到达负极表面并传递能量的只有一小部分正离子。所以，在用短脉冲加工时，负电子对正极的轰击作用大于正离子对负极的轰击作用，正极的蚀除速度大于负极的蚀除速度，这时工件应接正极。当采用长脉冲（即放电持续时间较长）加工时，质量和惯性大的正离子将有足够的时间加速，到达并轰击负极表面的离子数将随放电时间的延长而增多。由于正离子的质量大，对负极表面的轰击破坏作用强，故长脉冲时负极的蚀除速度将大于正极，这时工件应接负极。因此，当采用窄脉冲（如纯铜电极加工钢时， $T_{on} < 10 \mu s$ ）精加工时，应选用正极性加工；当采用长脉冲（如纯铜加工钢时， $T_{on} > 100 \mu s$ ）粗加工时，应采用负极性加工，以得到较高的蚀除速度和较低的电极损耗。

能量在两极上的分配对两电极电蚀量的影响是一个极为重要的因素，而电子和正离子对电极表面的轰击则是影响能量分布的主要因素，因此，电子轰击和正离子轰击无疑是影响极性效应的重要因素。但是，近年来的生产实践和研究结果表明，正电极表面能吸附分解油性工作介质因放电高温而产生游离出来的碳微粒，减小电极损耗。因此，极性效应是一个较为复杂的问题，它除了受脉宽、脉间的影响外，还要受到正极吸附碳黑保护膜和脉冲峰值电流、放电电压、工作液及电极对材料等因素的影响。

从提高加工生产率和减小工具损耗的角度来看，极性效应越显著越好，故在电火花加工过程中必须充分利用极性效应。当用交变的脉冲电压加工时，单个脉冲的极性效应便会相互抵消，增加工具的损耗，因此，电火花加工一般都采用单向脉冲电源。

除了充分利用极性效应、正确选用极性、最大限度地降低工具电极的损耗外，还应合理选用工具电极的材料，根据电极对材料的物理性能和加工要求选用最佳的电参数，使工件的蚀除速度最大，工具损耗尽可能小。

【机理解释 2-2】 极性效应的直观解释

可以把电子和正离子直观地比喻为小汽车和火车。小汽车的质量小，加速很快，而火车的质量很大，加速起来很慢，因此在短时间内小汽车可以很快获得高速，而火车的加速时间却很长，但一旦火车获得高速后其产生的冲击作用比小汽车要巨大得多。

2.2.4 电火花加工的特点

电火花加工是与机械加工完全不同的一种工艺方法，由于电火花加工有其独特的优越性，再加上数控水平和工艺技术的不断提高，因此其应用领域日益扩大，已经覆盖到机械、宇航、航空、电子、核能、仪器、轻工等部门，用以解决各种难加工材料、复杂形状零件和有特殊要求的零件制造，成为常规切削、磨削加工的重要补充和拓展。其中，模具制造是电火花加工应用最多的领域，而且非常典型。

电火花加工的优点如下：

(1) 适合于难切削材料的加工。由于加工中材料的去除是靠放电时的电热作用实现的，材料的可加工性主要与材料的导电性及其热学特性，如电阻率、熔点、沸点（汽化点）、比热容、热导率等有关，而几乎与其力学性能（硬度、强度等）无关，因此可以突破传统切削加工中对刀具的限制，实现用软的工具加工硬、韧的工件，甚至可以加工像聚晶金刚石、立方氮化硼一类的超硬材料。目前，电极材料多采用纯铜（俗称紫铜）或石墨，因此工具电极较容易制得。

(2) 可以加工特殊及复杂形状的零件。由于加工中工具电极与工件不直接接触，没有机械加工的切削力，因此适宜加工低刚度工件及进行微细加工。由于可以简单地将工具电极的形状复

制到工件上,因此特别适用于复杂表面形状工件的加工,如复杂型腔模具加工等。另外,数控技术的采用使得用简单电极加工复杂形状工件也成为可能。

(3) 易于实现加工过程自动化。由于是直接利用电能加工,而电能、电参数较机械量易于实现数字控制、适应控制、智能化控制和无人化操作等。

(4) 可以改进结构设计,改善结构的工艺性。可以将拼镶结构的硬质合金冲模改为用电火花加工的整体结构,缩短了加工工时和装配工时,延长了使用寿命。如喷气发动机中的叶轮,采用电火花加工后可以将拼镶、焊接结构改为整体叶轮制造,既大大提高了工作可靠性,又大大减小了体积和质量。

(5) 脉冲放电持续时间极短,放电时产生的热量传导范围小,材料受热影响范围小。

电火花加工也有其一定的局限性,具体是:

(1) 只能用于加工金属等导电材料。不像切削加工那样可以加工塑料、陶瓷等绝缘的非导电材料。但近年来研究表明,在一定条件下也可加工半导体和聚晶金刚石等非金属超硬材料。

(2) 加工速度一般较慢。因此,通常安排工艺时,多采用切削方法先去除大部分余量,然后再进行电火花加工,以求提高生产率。但最近的研究表明,采用特殊水基不燃性工作液进行电火花加工,其粗加工生产率基本接近于切削加工。

(3) 存在电极损耗。由于电火花加工靠电、热来蚀除金属,电极也会产生损耗,而且电极损耗多集中在尖角或底面,影响成形精度。但近年来粗加工时已能将电极相对损耗比降至 0.1%,甚至更小。

(4) 最小角部半径有限制。一般电火花加工能得到的最小角部半径略大于加工放电间隙(通常为 0.02~0.03 mm),若电极有损耗或采用平动头加工,则角部半径还要增大。但近年来的多轴数控电火花加工机床,采用 X、Y、Z 轴数控摇动加工,可以棱角分明地加工出方孔、窄槽的侧壁和底面。

(5) 加工表面有变质层甚至微裂纹。

2.3 电火花加工的一些基本规律

2.3.1 影响材料放电腐蚀的主要因素

1) 电参数的影响

研究表明,在电火花加工过程中,无论正极或负极,单个脉冲的蚀除量与单个脉冲能量在一定范围内成正比的关系,而工艺系数与电极材料、脉冲参数、工作介质等有关。某一段时间内的总蚀除量约等于这段时间内各单个有效脉冲蚀除量的总和,故正、负极的蚀除速度与单个脉冲能量、脉冲频率成正比。

从形象的角度而言,如图 2-10 所示,假使放电击穿延时时间相等,则放电脉宽决定了放电凹坑直径的大小,而如图 2-11 所示,放电的峰值电流则决定了放电凹坑的深浅。

由上述分析可知,如果要提高蚀除速度,可以采用提高脉冲频率,增加单个脉冲能量,或者增加平均放电电流(或峰值电流)和脉冲宽度,减小脉间的形式获得。

当然,实际加工时要考虑到这些因素之间的相互制约关系和对其他工艺指标的影响。例如脉冲间隔时间过短,将产生电弧放电;随着单个脉冲能量的增加,工件表面粗糙度值也随之增大等。

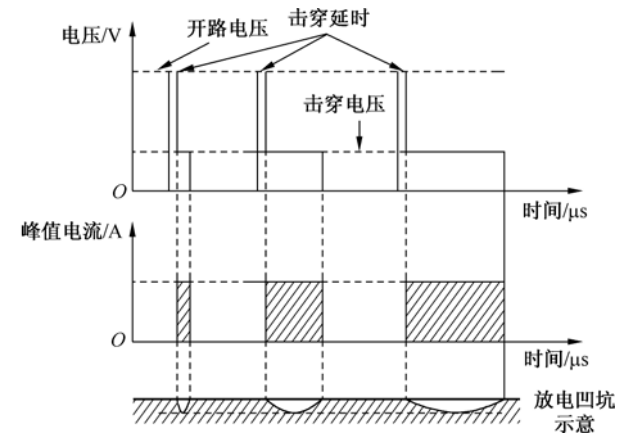


图 2-10 放电凹坑与放电脉冲宽度的对应关系

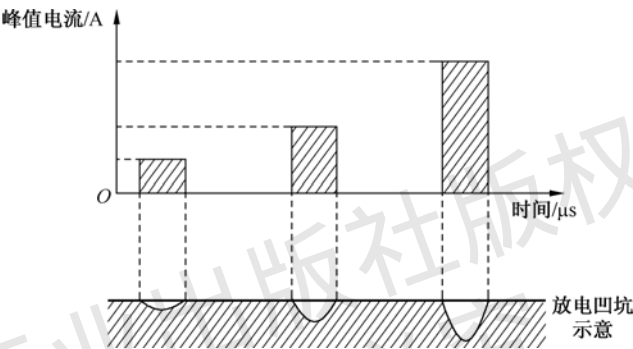


图 2-11 放电凹坑与放电脉冲峰值电流的对应关系

2) 金属材料热学常数对电蚀量的影响

金属热学常数是指熔点、沸点（汽化点）、热导率、比热容、熔化热、汽化热等。显然，当脉冲放电能量相同时，金属的熔点、沸点、比热容、熔化热、汽化热越高，电蚀量将越少，越难加工；另一方面，热导率越大，瞬时产生的热量越容易传导到材料基体内部，因而也会减少放电点本身的蚀除量。

钨、钼、硬质合金等熔点、沸点较高，所以难以蚀除；纯铜的熔点虽然比铁（钢）的低，但因导热性好，所以耐蚀性也比铁好；铝的导热系数虽然比铁（钢）的大好几倍，但其熔点较低，所以耐蚀性比铁（钢）差。石墨的熔点、沸点相当高，导热系数也不太低，故耐蚀性好，适合于制作电极。表 2-2 列出了几种常用材料的热学物理常数。

表 2-2 常用材料的热学物理常数

热学物理常数	材料				
	铜	石墨	钢	钨	铝
熔点 $T_f/^\circ\text{C}$	1083	3727	1535	3410	657
比热容 $c/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	393.56	1674.7	695.0	154.91	1004.8
熔化热 $q_f/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	179 258.4	—	209 340	159 098.4	385 185.6
沸点 $T_b/^\circ\text{C}$	2595	4830	3000	5930	2450
汽化热 $q_b/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	5 304 256.9	46 054 800	6 290 667	—	10 894 053.6
热导率 $\lambda/\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	3.998	0.800	0.816	1.700	2.378
热扩散率 $a/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	1.179	0.217	0.150	0.568	0.920
密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	8.9	2.2	7.9	19.3	2.54

3) 工作介质对电蚀量的影响

在电火花加工过程中,工作介质的作用是:形成火花击穿放电通道,并在放电结束后迅速恢复级间的绝缘状态;对放电通道产生压缩作用;帮助抛出和排除电蚀产物;对工具、工件起到冷却作用。因此,它对电蚀量也有较大的影响。介电性能好、密度和黏度大的工作液有利于压缩放电通道,提高放电的能量密度,强化电蚀产物的抛出效果。但黏度大,不利于电蚀产物的排出,影响正常放电。目前,电火花成形加工主要采用油类作为工作介质。粗加工时采用的脉冲能量大,加工间隙也较大,爆炸排屑抛出能力强,往往选用介电性能较好、黏度较大的机油,且机油的燃点较高,大能量加工时着火燃烧的可能性小;而在中、精加工时放电间隙比较小,排屑比较困难,故一般均选用黏度小、流动性好、渗透性好的煤油作为工作液,但考虑到实际加工的方便性,一般均采用火花油或煤油作为工作介质。

由于油类工作液有味、容易燃烧,尤其在大量粗加工时工作液高温分解产生的烟气很大,故寻找一种像水那样的流动性好、不产生碳黑、不燃烧、无色无味、价廉的工作液一直是人们努力的目标。水的绝缘性能和黏度较低,在同样加工条件下,和煤油相比,水的放电间隙较大,对通道压缩作用差,蚀除量较少,且易锈蚀机床。但经过加入各种添加剂,可以改善其性能。最新的研究结果表明,水基工作液加工时的蚀除速度大大高于煤油,甚至接近切削加工,但在大面积精加工方面较煤油还有一段距离。对于电火花线切割而言,低速单向走丝选用去离子水作为工作介质;高速往复走丝则采用乳化液、水基工作液或复合工作液等水溶性工作介质。

4) 影响电蚀量的一些其他因素

影响电蚀量的还有其他一些因素。首先是加工过程的稳定性,加工过程不稳定将干扰以致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,严重时将产生结碳拉弧,使加工难以进行。为了改善排屑条件,提高加工速度和防止拉弧,常采用强迫冲油和工具电极定时抬刀等措施。

如果加工面积较小,而采用的加工电流较大,也会使局部电蚀产物浓度过高,放电点不能分散转移,放电后的余热来不及扩散而积累起来,造成过热,形成电弧,破坏加工的稳定性。

2.3.2 电火花加工的加工速度和工具的损耗速度

1. 电火花加工的加工速度

电火花成形加工的加工速度一般采用体积加工速度 V_w (mm^3/min) 来表示,即被加工掉的体积除以加工时间:

$$V_w = \frac{V}{t}$$

有时为了测量方便,也采用质量加工速度 V_m 来表示,单位为 g/min 。

提高加工速度的途径在于增加单个脉冲能量,提高脉冲频率,提高工艺系数,同时还应考虑这些因素间的相互制约关系和对其他工艺指标的影响。

单个脉冲能量的增加,即增大脉冲电流和增加脉冲宽度,可以提高加工速度,但同时会使表面粗糙度变差并降低加工精度,因此一般只用于粗加工和半精加工的场合。

提高脉冲频率可有效地提高加工速度,但脉冲停歇时间过短,会使加工区放电通道内工作介质来不及消电离,不能及时排除电蚀产物及气泡,以恢复其介电性能,从而形成破坏性的稳定电弧放电,使电火花加工过程不能正常进行。

提高工艺系数的途径很多,例如合理选用电极材料、电参数和工作液,改善工作液的循环过滤方式等,从而提高有效脉冲利用率,达到提高工艺系数的目的。

电火花成形加工速度分别为:粗加工(加工表面粗糙度 Ra 为 $10\sim 20\ \mu\text{m}$)时可达 $200\sim 300\ \text{mm}^3/\text{min}$,半精加工(Ra 为 $2.5\sim 10\ \mu\text{m}$)时降低到 $20\sim 100\ \text{mm}^3/\text{min}$,精加工(Ra 为 $0.32\sim 2.5\ \mu\text{m}$)时一般都在 $10\ \text{mm}^3/\text{min}$ 以下。随着表面粗糙度值的减小,加工速度显著下降。加工速度与平均加工电流 I_e 有关,对于电火花成形加工,一般条件下,每安培平均加工电流的速度约为 $10\ \text{mm}^3/\text{min}$ 。

2. 电火花加工工具的损耗速度

在生产实际中用来衡量工具电极是否损耗,不仅要看工具损耗速度 V_e ,还要看同时能达到的加工速度 V_w 。因此,一般采用相对损耗或损耗比 θ 作为衡量工具电极损耗的指标,即

$$\theta = \frac{V_e}{V_w} \times 100\%$$

式中,加工速度和损耗速度如均以 mm^3/min 为单位计算,则 θ 为体积相对损耗比;如以 g/min 为单位计算,则 θ 为质量相对损耗比。

为了降低工具电极的相对损耗,必须充分利用好电火花加工过程中的各种效应。这些效应主要包括极性效应、吸附效应、传热效应等。这些效应又是相互影响、综合作用的。

1) 正确选择极性

一般来说,在短脉冲精加工时采用正极性加工(即工件接电源正极),而长脉冲粗加工时则

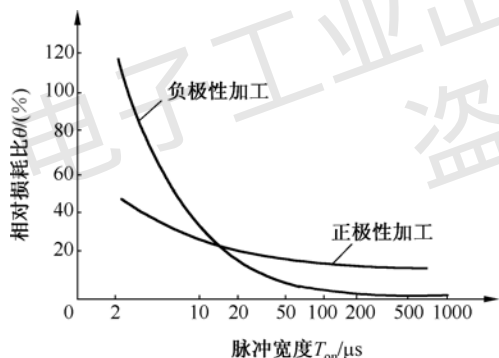


图 2-12 电极相对损耗与极性、脉宽的关系

采用负极性加工。人们曾对不同脉冲宽度和加工极性的关系做过许多实验,得出了如图 2-12 所示的试验曲线。试验用的工具电极为 $\phi 6\ \text{mm}$ 的纯铜,加工工件为钢,工作介质为煤油,矩形波脉冲电源,加工峰值电流为 $10\ \text{A}$ 。由图可见,负极性加工时,纯铜电极的相对损耗随脉冲宽度的增大而减小,当脉冲宽度大于 $120\ \mu\text{s}$ 后,电极相对损耗比将小于 1% ,可以实现低损耗加工。如果采用正极性加工,不论采用哪一档脉冲宽度,电极的相对损耗比都难以低于 10% 。然而在脉宽小于 $15\ \mu\text{s}$ 的窄脉宽范围内,正极性加工的工具电极相对损耗比负极性加工的小。

2) 利用吸附效应

由于碳黑膜只能在正极表面形成,因此,要利用碳黑膜的补偿作用来实现电极的低损耗,必须采用负极性加工。影响“吸附效应”的除了峰值电流、脉冲间隔等电参数外,还有冲、抽油的影响。采用强迫冲、抽油,有利于间隙内电蚀产物的排除,使得加工稳定;但强迫冲、抽油使吸附、镀覆效应减弱,因而增加了电极的损耗。所以,在加工过程中采用冲、抽油时,在稳定加工的前提下,要注意控制其冲、抽油的压力,使其不要过大。

3) 利用传热效应

在放电初期,限制脉冲电流的增长率(dI/dt)对降低电极损耗是有利的,可使电流密度不至于太高,也就使电极表面温度不至于过高而遭受较大的损耗。当脉冲电流增长率太高时,对在热冲击作用下易脆裂的工具电极(如石墨)的损耗,影响尤为显著。另外,由于一般采用的

工具电极的导热性能比工件好,如果采用较大的脉冲宽度和较小的脉冲电流进行加工,导热作用将使电极表面温度升高较小而损耗减小,而工件表面温度仍较高而使工件遭到蚀除。

4) 选用合适的材料

钨、钼的熔点和沸点较高,损耗小,但其机械加工性能不好,价格又贵,所以除电火花线切割用钨钼丝外,其他电火花加工很少采用。纯铜的熔点虽较低,但其导热性好,因此损耗也较小,又方便制成各种精密、复杂的电极,常作为中、小型腔加工的工具电极。石墨电极不仅热学性能好,而且在长脉冲粗加工时能吸附游离的碳,补偿电极的损耗,所以相对损耗很低,目前已广泛用做型腔加工的电极。铜碳、铜钨、银钨合金等复合材料,不仅导热性好,而且熔点高,因而电极损耗小,但由于其价格较贵,制造成形比较困难,所以一般只在精密电火花加工时采用。

上述各因素对电极损耗的影响是综合作用的,应根据实际加工经验,进行必要的试验和调整。

2.3.3 影响加工精度的主要因素

与传统的机械加工一样,机床本身的各种误差,以及工件和工具电极的定位、安装误差都会影响到加工精度,但是,电火花加工精度主要还是取决于与电火花加工工艺相关的因素。

影响加工精度的主要因素有:放电间隙的大小及其一致性、工具电极的损耗及其稳定性。

电火花加工时,工具电极与工件之间存在着一定的放电间隙。如果加工过程中放电间隙能保持不变,则可以通过修正工具电极的尺寸对放电间隙进行补偿,以获得较高的加工精度。然而,放电间隙的大小实际上是变化的,影响着加工精度。

除了间隙能否保持一致性外,间隙大小对加工精度也有影响,尤其是对复杂形状的加工表面,棱角部位电场强度分布不均,间隙越大,影响越严重。因此,为了减小加工误差,应该采用较小的加工规范,缩小放电间隙,这样不但能提高仿形精度,而且放电间隙越小,可能产生的间隙变化量也越小。另外,还必须尽可能使加工过程稳定。电参数对放电间隙的影响是非常显著的,精加工时的放电间隙一般只有 0.01 mm (单面),而在粗加工时则达到 0.5 mm 左右。

工具电极的损耗对尺寸精度和形状精度都有影响。电火花穿孔加工时,电极可以贯穿型孔而补偿电极的损耗。型腔加工时则无法采用这一方法,精密型腔加工时一般可采用更换电极的方法保障加工精度。

影响电火花加工形状精度的因素还有“二次放电”。二次放电是指在已加工表面上由于电蚀产物等的介入而再次进行的非正常放电,集中反映在加工深度方向产生斜度和加工棱角棱边变钝等方面。

加工过程中,由于工具电极下端加工时间长,绝对损耗大,而电极入口处的放电间隙则由于电蚀产物的存在,“二次放电”的概率增大而使得间隙扩大,从而产生了如图 2-13 所示的加工斜度。

电火花加工时,工具的尖角或凹角很难精确地复制在工件上,这是因为当工具为凹角时,工件上对应的尖角处放电蚀除的概率大,容易遭受电蚀而成为圆角,如图 2-14(a)所示。当工具为尖角时,一则由于放电间隙的等距性,工件上只能加工出以尖角顶点为圆心、放电间隙为半径的圆弧;二则工具上的尖角本身因尖端放电蚀除的概率大而损耗成圆角,如图 2-14(b)所示。采用高频窄脉宽精加工,放电间隙小,圆角半径可以明显减小,因而提高了仿形精度,可以获得圆角半径小于 0.01 mm 的尖棱,这对于加工精密小模数齿轮等冲模是很重要的。

目前,电火花加工的精度可达 $0.01\sim 0.05\text{ mm}$,在精密光整加工时可小于 0.005 mm 。

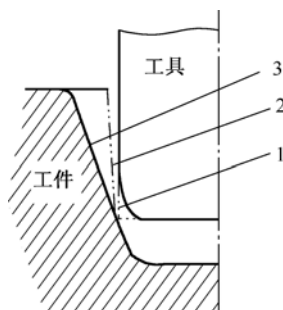


图 2-13 电火花加工时的加工斜度

- 1—电极无损耗时的工具轮廓线；
2—电极有损耗而不考虑二次放电时的工件轮廓线；
3—电极有损耗并考虑二次放电时的工件轮廓线

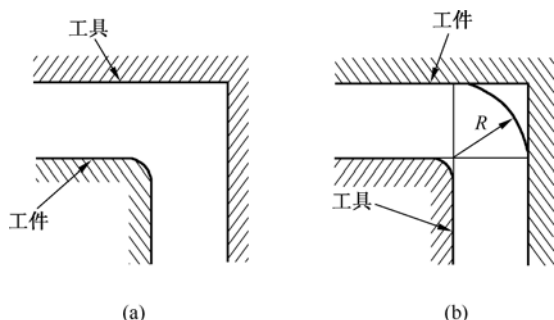


图 2-14 电火花加工时尖角变圆

2.3.4 电火花加工的表面质量

电火花加工的表面质量主要包括表面粗糙度、表面变质层和表面机械性能三部分。

1. 表面粗糙度

电火花加工的表面和机械加工的表面不同，它是由无方向性的无数放电凹坑和硬凸边叠加而成，有利于保存润滑油，而机械加工表面则存在着切削或磨削刀痕，具有方向性。两者相比，在相同的表面粗糙度和有润滑油的情况下，其表面的润滑性能和耐磨损性能均比机械加工的表面好。

对表面粗糙度影响最大的因素是单个脉冲能量，因为脉冲能量大，每次脉冲放电的蚀除量也大，放电凹坑既大又深，从而使表面粗糙度恶化。

电火花穿孔、型腔加工的表面粗糙度可以分为底面粗糙度和侧面粗糙度，同一规准加工出来的侧面粗糙度因为有二次放电的修光作用，往往要稍好于底面的粗糙度。要获得更好的侧壁表面粗糙度，可以采用平动头或数控摇动工艺来达到。

电火花加工的表面粗糙度和加工速度之间存在着很大的矛盾，例如 Ra 从 $2.5\ \mu\text{m}$ 提高到 $1.25\ \mu\text{m}$ ，加工速度要下降十多倍。为获得较好的表面粗糙度，需要采用很低的加工速度。因此，一般电火花加工要求 Ra 小于 $2.5\sim 0.63\ \mu\text{m}$ 时，通常采用研磨方法改善其表面粗糙度，这样比较经济。

工件材料对加工表面粗糙度也有影响，在相同能量下加工，熔点高的材料（如硬质合金）表面粗糙度要比熔点低材料（如钢）好。当然，加工速度会相应下降。

精加工时，工具电极的表面粗糙度也将影响到加工粗糙度。由于石墨电极很难加工到非常光滑的表面，因此用石墨电极加工的工件表面粗糙度较差。

虽然，影响表面粗糙度的因素主要是脉宽与峰值电流的乘积，亦即单个脉冲能量的大小。但实践中发现，即使单脉冲能量很小，但在电极面积较大时、 Ra 也很难低于 $0.32\ \mu\text{m}$ ，而且加工面积越大，可达到的最佳表面粗糙度越差。这是因为在火花油介质工作中的工具和工件相当于电容器的两个极，具有“潜布电容”（寄生电容），相当于在放电间隙上并联了一个电容器。当小能量的单个脉冲到达工具和工件时，由于能量太小，不能产生击穿放电，因此电能被此电容“吸收”，只能起“充电”作用而不会引起火花放电。只有当多个脉冲充电到较高的电压，积累了较多的电能后，才能引起击穿放电，此时的能量总释放便会打出较大的放电凹坑。这种由于潜布电容使加工较大面积时表面粗糙度恶化的现象称为“电容效应”。

20 世纪末日本首先出现了“混粉加工”工艺，它可以较大面积地加工出 Ra 为 $0.05\sim 0.1\ \mu\text{m}$

的光亮表面。其方法是在火花油工作介质中混入硅或铝等导电微粉，使工作介质的电阻率降低，放电间隙成倍扩大，潜布、寄生电容成倍减小；同时每次从工具到工件表面的放电通道，被微粉颗粒分割形成多个小的火花放电通道，到达工件表面的脉冲能量被“分散”，相应的放电凹坑也就较小，从而可以稳定获得大面积的光整加工表面。

2. 表面变质层

电火花加工过程中，在火花放电的瞬时高温和工作介质的快速冷却作用下，材料的表面层化学成分和组织结构会发生很大变化，材料表面层改变了的这一部分称为表面变质层，它又包括熔化层和热影响层，如图 2-15 所示。

(1) 熔化层。该层位于工件表面最上层，它被放电时的瞬时高温熔化而滞留下来，受工作介质的快速冷却而凝固。对于碳钢来说，熔化层在金相照片上呈现白色，故又称之为白层，它与基体金属完全不同，是一种树枝状的淬火铸造组织。

(2) 热影响层。该层位于熔化层和基体金属之间。热影响层的金属材料并没有熔化，只是受到高温的影响，使材料的金相组织发生了变化。对淬火钢，热影响层包括再淬火区、高温回火区和低温回火区；对未淬火钢，热影响层主要为淬火区。因此，淬火钢的热影响层厚度比未淬火钢的要厚。

熔化层和热影响层的厚度随着脉冲能量的增加而加大。由于熔化层是一种晶粒细小的树枝状的淬火铸造组织，因此，一般来说，电火花加工表面最外层的硬度比较高、耐磨性好。但对于滚动摩擦，由于是交变载荷，尤其是干摩擦，则因熔化凝固层和基体的结合不牢固，容易剥落而磨损。因此，有些要求高的模具需要把电火花加工后的表面变质层研磨掉。

(3) 显微裂纹。火花加工表面由于受到瞬时高温作用并迅速冷却而产生拉应力，往往出现显微裂纹。实验表明，一般裂纹仅在熔化层内出现，只有在脉冲能量很大情况下（粗加工时）才有可能扩展到热影响层。

脉冲能量对显微裂纹的影响是非常明显的，能量越大，显微裂纹越宽越深。不同工件材料对裂纹的敏感性也不同，硬脆材料容易产生裂纹。工件预先的热处理状态对裂纹产生的影响也很明显，加工淬火材料要比加工淬火后回火或退火的材料容易产生裂纹，因为淬火材料硬脆，原始内应力也较大。

3. 表面机械性能

1) 显微硬度及耐磨性

电火花加工后表面层的硬度一般均比较高，但对某些淬火钢，也可能稍低于基体硬度。对未淬火钢，特别是含碳量低的钢，热影响层的硬度都比基体材料的硬度高；对淬火钢，热影响层中的再淬火区硬度稍高或接近于基体的硬度，而回火区的硬度比基体的硬度低，高温回火区又比低温回火区的硬度低。

2) 残余应力

电火花加工表面存在着由于瞬时先热胀后冷缩作用而形成的残余应力，而且大部分表现为拉应力。残余应力的大小和分布，主要和材料在加工前的热处理状态及加工时的脉冲能量有关。因此，对表面层要求质量较高的工件，应尽量避免使用较大的放电加工规准加工。

3) 耐疲劳性能

电火花加工表面存在着较大的拉应力，还可能存在显微裂纹，因此其耐疲劳性能比机械加

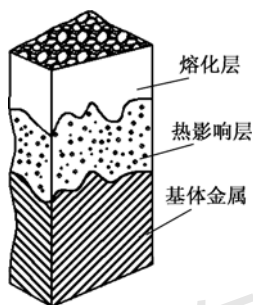


图 2-15 电火花加工表面变质层

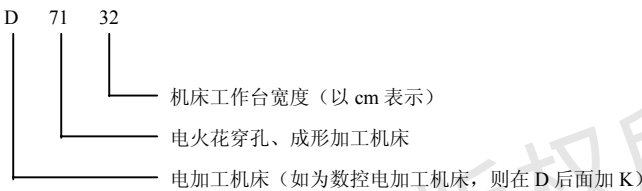
工的表面低许多倍。采用回火、喷丸处理等有助于降低残余应力，或使残余拉应力转变为压应力，从而提高其耐疲劳性能。

试验表明，当表面粗糙度值 Ra 在 $0.32\sim0.08\text{ }\mu\text{m}$ 时，电火花加工表面的抗疲劳性能将与机械加工表面相近。这是因为电火花精微加工表面所使用的加工规准很小，熔化凝固层和热影响层均非常薄，不会出现显微裂纹，而且表面的残余拉应力也较小。

2.4 电火花加工机床

2.4.1 电火花加工机床的型号及分类

电火花加工机床既可用于穿孔加工，又可用于成形加工，通常把电火花成形加工机床命名为 D71 系列，其型号表示方法如下：



电火花成形加工机床主机一般有 X 、 Y 、 Z 三轴传动系统。当 Z 轴用电动机伺服驱动， X 、 Y 轴为手动时，称为普通机床或单轴数控机床。当 X 、 Y 、 Z 三轴同时用电动机伺服驱动时，称为三轴数控机床。 C 轴为旋转伺服轴， R 轴为高速旋转轴。各传动轴的名称与方向定义如图 2-16 所示。

Z 轴（主轴）：主轴头上下移动轴。面对机床，主轴头移动向上为 $+Z$ ，向下为 $-Z$ 。

X 轴：工作台左右移动轴。面对机床，主轴向右（工作台向左）移动为 $+X$ ，反向为 $-X$ 。

Y 轴：工作台前后移动轴。面对机床，主轴向前（工作台向后）移动为 $+Y$ ，反向为 $-Y$ 。

C 轴：安装在主轴头下面的电极旋转伺服轴。从上向下看，电极逆时针方向旋转为 $+C$ ，顺时针方向旋转为 $-C$ 。

电火花成形加工机床结构有 C 形结构、龙门式结构、滑枕式结构、摇臂式结构、台式结构等多种类型，其中最常见的是 C 形结构。

C 形结构机床的结构特点是：床身、立柱、主轴头、工作台构成一“ C ”字形（如图 2-17 所示）。优点是结构简单，制造容易，具有较好的精度和刚性，操作者可从前、左、右三面充分靠近工作台。缺点是抵抗热变形能力较差，主轴头受热后易产生后仰，影响机床精度。

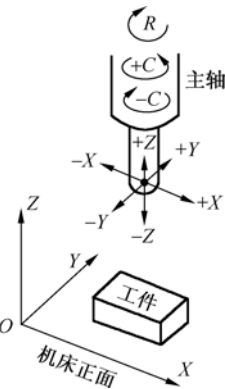


图 2-16 传动轴名称及方向定义

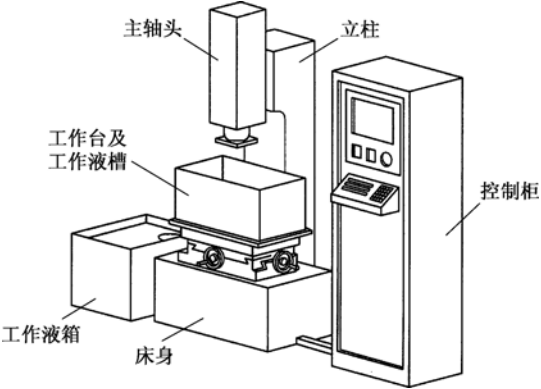


图 2-17 C 形电火花成形机床结构图

随着模具制造业的发展, 目前已有各种结构形式的三轴 (或多于三轴) 数控电火花成形加工机床及带工具电极库按程序自动更换电极的电火花加工中心。

2.4.2 电火花加工机床本体

电火花成形机床主机是由床身、立柱、主轴头、工作台、工作液槽等组成。随着制造技术的进步和对加工工件要求的提高, 电火花成形加工机床需要具备以下四项技术要求:

- (1) 传动机构的正反向间隙要小, 无爬行、滞后及超调;
- (2) 变速范围要大 (从零点几微米每分到几十米每分);
- (3) 响应速度要快, 定位精度要高;
- (4) 机床本身的刚性、伺服系统分辨率要高, 这样才能提高加工稳定性, 避免造成电弧放电, 提高加工效率。

下面以单立柱十字工作台型的电火花成形加工机床主机为例介绍各部分的结构和设计要求。

1) 床身、立柱

床身、立柱是基础结构件 (图 2-18 中的 1、2), 其作用是保证电极与工作台、工件之间的相互位置。它们的刚度和精度的高低对加工有直接的影响, 如果刚度不足, 加工精度难以保证。

2) 工作台

工作台主要用来支承和装夹工件, 可实现横向 (X)、纵向 (Y) 两轴的运动。工作台上上面装有工作液槽, 用以盛放工作液, 使电极和被加工工件浸泡在工作液里, 起到冷却、排屑作用。

工作台由中滑板、上滑板、工作台三部分组成 (图 2-18 中的 3、4、5)。中滑板安装在床身的导轨上实现了 X 轴方向运动, 其传动原理如图 2-19 所示。它是由伺服电动机 (或手轮) 通过联轴器带动丝杠转动, 进而带动螺母及中滑板移动。双向推力球轴承和单列向心球轴承起支撑和消除反向间隙的作用。另外, 丝杠副多采用消间隙结构。上滑板安装在中滑板的导轨上实现了 Y 轴方向运动, 其传动系统原理同 X 轴方向。工作台与上滑板做成一体, 上面有丁形槽或螺孔用于固定工件。精度要求高的机床有的采用花岗岩材质作为工作台。这种材质的工作台具有良好的绝缘性、热稳定性和非常小的变形。

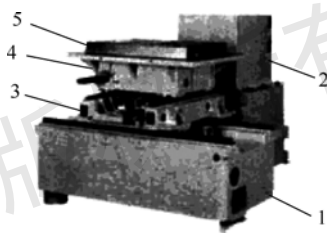


图 2-18 床身、立柱、工作台结构

1—床身; 2—立柱; 3—中滑板; 4—上滑板; 5—工作台

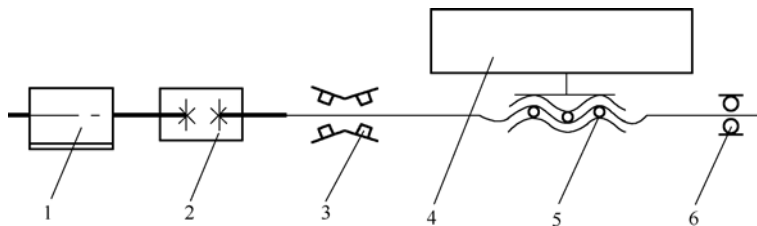


图 2-19 X 、 Y 轴方向的传动系统原理示意图

1—伺服电动机 (或手轮); 2—联轴器; 3—双向推力球轴承;
4—中滑板 (Y 向为上滑板); 5—丝杠副; 6—单列向心球轴承

3) 主轴头

主轴头是电火花成形加工机床的一个最为关键的部件, 可实现上、下方向的 Z 轴运动。它

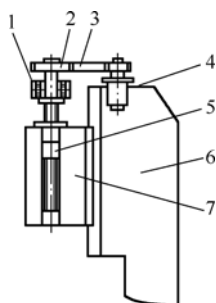


图 2-20 Z 轴方向的传动系统原理图

- 1—双向推力球轴承；2—带轮；
3—同步齿形带；4—伺服电动机；
5—丝杠副；6—立柱；7—主轴头

是由伺服进给机构、导向和防扭机构、辅助机构三部分组成，可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的工艺指标，如加工效率、几何精度及表面粗糙度。

普通手动、单轴数控机床已普遍采用步进电动机、直流电动机或交流伺服电动机作为主轴头的进给驱动元件。主轴头的伺服进给结构形式一般采用伺服电动机经同步齿形带带动齿轮减速，再带动丝杠副转动，进而驱动主轴作上下（Z 向）移动，其结构如图 2-20 所示。其导向和防扭是由矩形贴塑导轨或“平-V”形贴塑导轨构成，导轨结合面应施加一定的预紧力以消除间隙，保证运动精度。

主轴伺服电机内应装有抱闸装置。通电时，抱闸松开，主轴头可以实现伺服控制；断电时，抱闸吸合，主轴锁定。

4) 工作液槽

工作液槽与工作液过滤系统的结构有着紧密联系，电火花成形加工机床的工作液过滤系统是整机的重要组成部分。其作用主要有两点：①向加工区域输送干净的工作液，以满足电火花加工对液体介质的要求；②根据加工工艺的要求，实现各种冲抽液的方式。

电火花成形加工用的工作液过滤系统主要由工作液泵、储液箱、过滤器、管道、冲抽液方式控制部分及工作液压力调整部分等组成。

工作液循环方式按电蚀产物的排出方式可分为图 2-21 所示的几种，其中(a)为上冲液，(b)为下冲液，(c)为上抽液，(d)为下抽液，(e)为侧喷射。冲液(a)、(b)是把经过过滤的清洁工作液经泵加压，强迫冲入电极与工件之间的放电间隙里，放电电蚀的电蚀产物随同工作液一起从放电间隙中排出，以达到稳定加工的目的。在加工时，冲液的压力可根据不同工件和几何形状及加工的深度随时改变，一般压力选在 $0 \sim 0.2 \text{ MPa}$ 之间。抽液(c)、(d)是直接将放电间隙中电蚀产物抽出，并将清洁工作液补充到放电间隙中，这种方式必须在特定的抽液装置附件上完成。对盲孔加工采用(a)和(c)方式，从图中可看出，采用冲液的循环效果比抽液更好，特别在型腔加工中大都采用冲液方式，用以改善加工的稳定性。侧喷射方式(e)是在电极和工件都不易采用冲液和抽液情况下进行，特别适合深窄槽的加工。

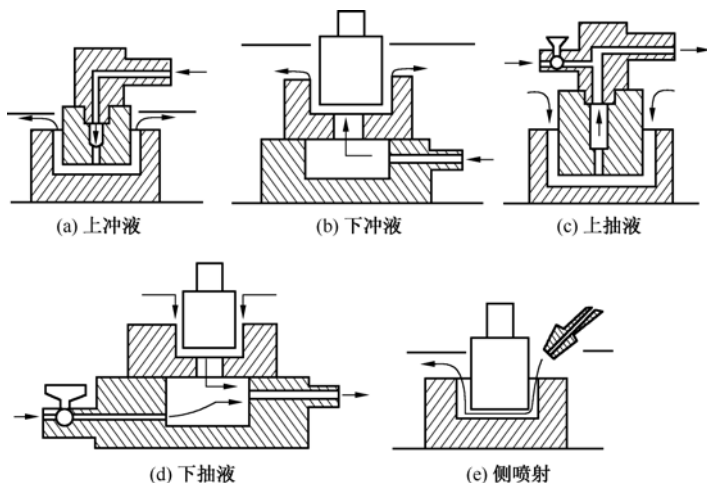


图 2-21 工作液循环方式示意图

需要说明的是,电火花加工过程虽没有机械切削力,但在抬刀时,由于抬起的瞬间电极间产生负压的作用,将使主轴头和工作台承受很大的作用力,因此在设计时应充分考虑强度和刚度,特别是数控电火花加工机床。

2.4.3 电火花加工脉冲电源

电火花成形加工脉冲电源的作用是在电火花加工过程中提供能量。它的功能是把工频正弦交流电转变为适应电火花加工需要的脉冲电源。脉冲电源输出的各种电参数对电火花加工的加工速度、表面粗糙度、工具电极损耗及加工精度等各项工艺指标都具有重要的影响。因此,脉冲电源性能的好坏在电火花加工设备和电火花加工工艺中,都具有十分重要的意义。

脉冲电源的组成首先要有一个参数可调整、脉冲波形可变化的脉冲发生器(主振级),还要有脉冲的功率放大部分,脉冲的功率输出部分,还应有可随机调整加工参数的适应控制部分。为了供给各部分能量,需有对交流电进行变压、整流、滤波的直流电源部分。另外,应有方便、直观的操作面板。

1. 脉冲电源的要求

为在电火花加工中做到高效低耗、稳定可靠和兼作粗精加工之用,一般对脉冲电源有以下要求。

(1) 脉冲电压波形的前后沿应该很陡,即脉冲电流及脉冲能量的变化较小,减小因电极间隙的变化或极间介质污染程度等引起工艺过程的波动。

(2) 脉冲是单向的,即没有负半波或负半波很小,这样才能最大限度地利用极性效应,实现高效低耗加工。

(3) 脉冲的主要参数如电流幅值、脉冲宽度、脉冲间隔等应能在很宽的范围内调节,以适应不同要求。

(4) 工作稳定可靠,操作维修方便,成本低,寿命长,体积小。

脉冲电源的分类方法很多,可以按构成脉冲电源的主要元件分类,按输出脉冲电源波形分类,按受间隙状态影响分类和按工作回路数目分类。

随着微电子技术的发展,目前脉冲电源的控制方式已经由单一的间隙电压的采样控制发展到先进的单片机控制脉冲电源、自适应控制脉冲电源、智能化控制脉冲电源、模糊控制脉冲电源等。这些电源控制水平的提高,使得电源的加工性能越来越好。脉冲电源正在朝着功率越来越大、体积越来越小、电能利用率越来越高、加工质量越来越好的方向发展。

2. 几种典型的脉冲电源

1) 弛张式脉冲电源

弛张式脉冲电源是电火花加工中应用最早、结构最简单的脉冲电源。其基本形式是 RC 电路,后又逐步改进为 RLC、RLCL、RLC-LC 电路;其优点是可产生脉冲宽度很小的窄脉冲,加工精度较高,表面粗糙度好,工作可靠,装置简单,易于制造,操作维修方便。缺点是加工速度低,电极损耗大,因此目前常用于精加工和微细加工回路。

图 2-22 是 RC 电源的工作原理图。它由两个回路组成:一个是充电回路,由直流电源 E、充电电阻 R(可调节充电速度,同时限流,以防电流过大及转变为电弧放电,故又称为限流电阻)和电容器 C(储能元件)组成;另一个是放电回路,由电容器 C、工具电极和工件及其间的放电间隙组成。

当直流电源接通后，电源经限流电阻 R 向电容器 C 充电，电容器 C 两端的电压按指数曲线逐步上升，因为电容器两端的电压就是工具电极和工件间隙两端的电压，因此当电容器 C 两端的电压上升到等于工具电极和工件间隙的击穿电压 U_d 时，间隙就被击穿，放电通道内电阻变得很小，电容器上存储的能量瞬时放出，形成较大的脉冲电流 i_c ，如图 2-23 所示。电容器上的能量释放后，电压瞬时下降到接近于零，间隙中的工作液又迅速恢复绝缘状态。此后电容器再次充电，又重复前述过程。如果间隙过大，则电容器上的电压 U_c ，按指数曲线上升到直流电源电压 E 。

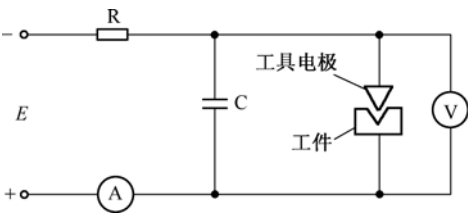


图 2-22 RC 脉冲电源原理图

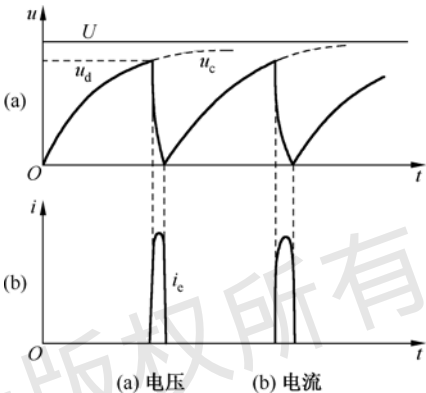


图 2-23 RC 电源脉冲电压、电流波形图

RC 线路脉冲电源的最大优点如下：

- (1) 结构简单，工作可靠，成本低；
- (2) 在小功率时可以获得很窄的脉宽（小于 $0.1\ \mu\text{s}$ ）和很小的单个脉冲能量，可用做光整加工和精微加工；
- (3) 电容器瞬时放电可达很大的峰值电流，能量密度很高，放电爆炸、抛出能力强，金属在汽化状态下被蚀除的百分比大，不易产生表面微裂纹，加工稳定。

2) 晶体管脉冲电源

晶体管脉冲电源是利用大功率晶体管作为开关元件而获得单向脉冲的，这类电源由于晶体管元件功率的限制，总输出功率一般都比较小。但由于它具有脉冲频率高，脉冲参数调节方便，脉冲波形较好，易于实现多回路控制和自适应控制等特点，故得到较为广泛的应用。特别是在 $100\ \text{A}$ 以下的中小型脉冲电源中，采用多管并联输出的方式，可使输出加工电流达到线性可调。它的主要组成部分如图 2-24 所示。由主振级、前置放大级、功率放大级和直流电源等组成。主振级发出一定脉冲宽度和停歇时间的脉冲信号，经过脉冲放大级放大，最后推动末级功率晶体管导通或截止，使直流电源的电压转换成为脉冲形式加到放电间隙上进行电蚀加工。

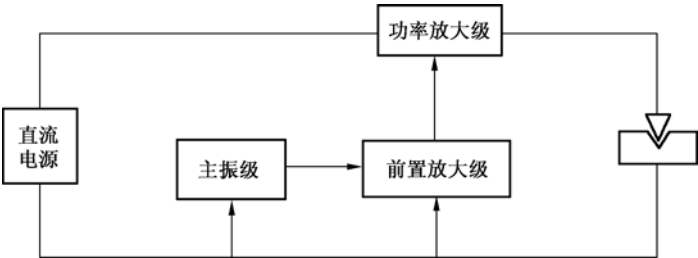


图 2-24 晶体管脉冲电源方框图

主振级为脉冲电源的重要组成部分，用以产生矩形脉冲信号。电源的脉冲参数，如脉冲宽度、间歇、频率等都是由此级决定的。根据电火花成形加工工艺的特点，对主振级要求振荡稳定，脉冲参数调节范围大，调节时相互牵制要小。近年来计算机控制电源，一般用晶振分频来形成脉冲。

主振级脉冲发生器的形式有很多种，最早的主振级是由分离元件构成的，随着高稳定性、高性能的集成电路问世，取代了原分离元件的主振电路，例如用 74 系列的 74804 集成芯片组成的主振级。

功率输出级在脉冲电源中起着向放电间隙输送脉冲能量的作用，它通过调节输出管的数量来改变输出电流的峰值。一般采取共发射级耦合脉冲放大电路及反向放大电路，也有采用设计输出级共集电极电路的。

3) 高频分组波和梳形分组波

如图 2-25 所示，这两组波形在一定程度上都具有高频脉冲加工表面粗糙度值小和低频脉冲加工速度快、电极损耗低的双重优点。而且梳形分组波在大脉宽期间电压不过零，始终加有一较低的正电压，其作用为当负极性精加工时，使正极工具有能吸附碳膜，获得较低的电极损耗。

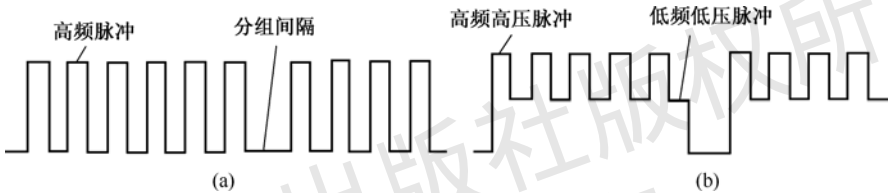


图 2-25 高频分组波和梳形分组波

4) 高、低压复合脉冲波形

高、低压复合脉冲电源的主回路如图 2-26 所示。在放电间隙并联两个供电回路：一个为高压脉冲回路，其脉冲电压较高（约 300 V），平均电流较小，主要起击穿间隙的作用，也就是控制低压脉冲的放电击穿点，因而也称之为高压引燃回路；另一个为低压脉冲回路，其脉冲电压比较低（60~90 V），可输出的电流比较大，起着蚀除金属的作用，所以称之为加工回路。二极管 VD 用以阻止高压脉冲进入低压回路。所谓高、低压复合脉冲，就是在每个工作脉冲电压（60~90 V）波形上再叠加一个小能量的高压脉冲（约 300 V），使放电间隙先击穿引燃而后再放电加工，这样将大大提高脉冲的击穿率和利用率，并使放电间隙加大，排屑良好，加工稳定。这种电路在“钢打钢”时显示出很大的优越性。

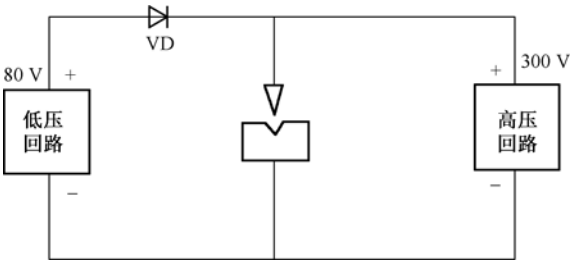


图 2-26 高、低压复合脉冲电源的主回路原理图

近年来，在高、低压复合脉冲电源形式方面，除了高压脉冲和低压脉冲同时触发加到放电间隙处之外[图 2-27(a)]，还出现了两种高压脉冲比低压脉冲提前一段时间 Δt 触发的形式，如

图 2-27(b)、(c)所示，此 Δt 时间是 $1\sim 2\ \mu\text{s}$ 。实践表明，图 2-27(c)的效果最好，因为高压矩形波加到电极间隙上去之后，往往也需有一小段延时才能击穿，在高压击穿之前低压脉冲不起作用，而在精加工窄脉冲时，高压不提前，低压脉冲往往来不及起作用而成为空载脉冲，为此，应使高压脉冲提前触发，与低压同时结束。

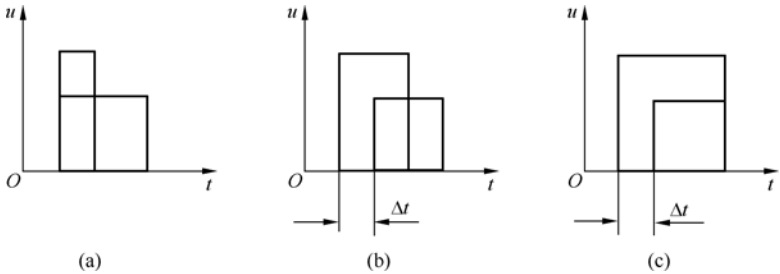


图 2-27 高、低压复合脉冲电源的形式

5) 多回路脉冲电源

所谓多回路脉冲电源，即在加工电源的功率级并联分割出相互隔离绝缘的多个输出端，可以同时供给多个回路进行放电加工。这样不依靠增大单个脉冲放电能量，可不使表面粗糙度值变大而可以提高生产率，这在大面积、多工具、多孔加工时很有必要，如电机定子和转子冲模、筛网孔等多孔穿透加工及大型腔模加工中经常采用该电源，如图 2-28 所示。多回路电源总的生产率并不与回路数目完全成正比增加，因为多回路电源加工时，电极进给调节系统的工作状态变坏，例如当某一回路放电间隙短路时，电极回升，全部回路都得停止工作。回路数越多，这种相互牵制干扰损失也越大，因此回路数必须选取得当，一般常采用 $2\sim 4$ 个回路。加工越稳定，回路数可取得越多。多回路脉冲电源中，同样可采用高低压复合脉冲回路。

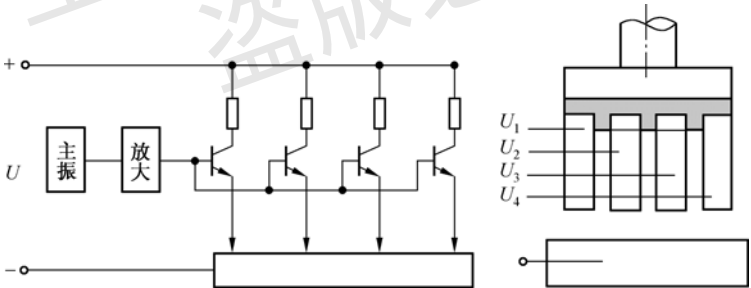


图 2-28 多回路脉冲电源和分割电极

6) 等能量脉冲波形

所谓等能量脉冲波形，是指每个脉冲在介质击穿后所释放的单个脉冲能量相等。对于矩形波脉冲电流来说，由于每次放电过程的电流幅值基本相同，因而能量脉冲电源也即意味着每个脉冲放电电流持续时间相等。

前述普通等频脉冲电源，虽然电压脉冲宽度和脉冲间隔在加工过程中保持不变，但因为放电间隙物理状态总是不断变化，每个脉冲的击穿延时有长有短，随机性很大，各不相同，结果使实际放电的脉冲电流宽度发生变化，单个脉冲能量的放电凹坑大小不等，也就使得加工表面粗糙度微观上不均匀。等能量脉冲电源能自动保持脉冲电流宽度相等，用相同的脉冲能量进行加工，从而可以在保证一定表面粗糙度的情况下，进一步提高加工速度。

获得等脉冲电流宽度的方法，通常是在间隙加上直流电压后，利用火花击穿信号（击穿后

电压突然降低)来控制脉冲电源中的一个单稳态电路,令它开始延时,并以此作为脉冲电流的起始时间,再经单稳态电路延时之后,发出信号关断导通着的功放管,使它中断脉冲输出,切断火花通道,从而完成一次脉冲放电。同时触发另一个单稳态电路,使其经过一定的延时(脉冲间隔),发出下一个信号,使功放管再次导通,开始第二个脉冲周期,这样所获得的极间放电电压和电流波形如图 2-29 所示,每次的脉冲电流宽度都相等,而电压脉宽则不一定相等。

7) 微精加工场脉冲电源

在电火花加工中,有时对加工工件的表面粗糙度要求较精细,例如 Ra 为 $0.1\sim0.4\ \mu\text{m}$,即所谓“微精”加工。图 2-30 是一种 VT—RC 型微精加工场效应管脉冲电源示意图,其中 VT 是场效应管, R 是限流电阻, C 是储能电容器, PG 是控制用的脉冲电路,图 2-31 是输出电压波形。这种电路综合了弛张式脉冲电源和场效应管脉冲电源的优点,适用于电火花加工中的微精加工。

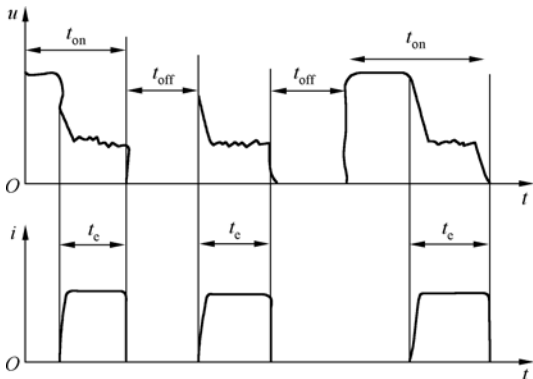


图 2-29 等能量脉冲电源电压和电流波形

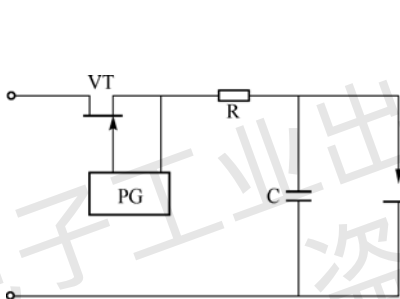


图 2-30 VT—RC 型微精加工场效应管脉冲电源示意图

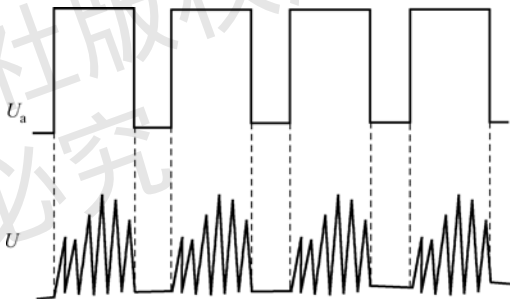


图 2-31 微精加工场效应管脉冲电源电压波形

工作时,脉冲控制电路 PG 输出的一系列的控制脉冲 U_a 。当它使场效应晶体管 VT 导通时,情况就如 RC 型弛张式脉冲电源一样,小容量的电容器 C (数十皮法至数千皮法)输出一群很窄的脉冲进行电火花加工。当脉冲处于停歇期,场效应管 VT 截止时,电容器停止充放电过程,让放电间隙进行消电离,这样就可弥补弛张式脉冲电源充电时间必须较长的缺陷。此时,加工的效率可显著提高。

根据 R、C 参数的不同配合,这种 VT—RC 电路能加工出 Ra 为 $0.1\sim0.4\ \mu\text{m}$ 范围内所需的表面粗糙度。此外,它还可用来配合其他脉冲电源对小型轮廓的表面进行精修。

8) 低功耗脉冲电源

目前,晶体管-电阻器型脉冲电源使用电阻器来限制放电电流,其原理图如图2-32所示。如果直流电源电压是 75 V,而放电电压是 15 V,则电阻器的功率消耗是 $(75-15)/75 = 0.8$ 。这就是说,来自直流电源的 80%的能量是电阻器消耗的,而没有被加工工件所使用。因此,这种电源需要一个大的直流电源和一些大体积的高功率电阻器。另外,功率消耗引起周围温度的上升会导致工件的热变形而引起加工误差。

为了避免这些缺点,用电感 L 代替电阻 R 来限制电流,由于电感 L 对直流阻抗很小,所用导线较粗,线电阻很小,随意流过时发热也很小。但是电感对脉冲突变电流有较大阻抗,电感 L

在限制电流突变时存储的能量将经过放电间隙反馈给电源，从而达到节能的目的。其工作原理参见后面第 3 章的高速往复走丝电火花线切割加工脉冲电源。节能型脉冲电源消耗的功率一般只有传统晶体管-电阻器型脉冲电源的 $1/5 \sim 1/10$ 。

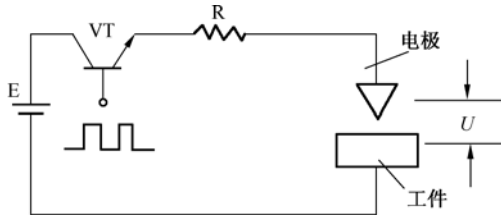


图 2-32 传统晶体管-电阻器型脉冲电源

9) 微机控制脉冲电源

由于计算机、集成电路技术的发展，人们可以把不同材料、粗、中、精电加工参数，规准都做成曲线表格，作为数据库写入只读存储器（EPROM）集成芯片内。操作者只要输入工具电极、工件材料和表面粗糙度等加工条件，通过微机内部“查表”，电源就可以“输出”较佳的加工规准参数（脉宽、脉间、峰值电流、电源、极性等），成为具有自选加工规准的脉冲电源。

智能化、自适应控制脉冲电源还有一个更完善的控制系统，能不同程度地代替人工监控功能，即能根据某一给定目标（保证一定表面粗糙度提高生产率）不断地检测放电加工状态，并与最佳模型（数字模型或经验模型）进行比较运算，然后按其计算结果控制有关参数，以获得最佳加工效果。当工件和工具材料、粗、中、精不同的加工规准，工作液的污染程度与排屑条件、加工深度及加工面积等现场条件变化时，自适应控制系统能自动地、连续不断地调节有关脉冲参数，如脉冲间隔 t_{on} 和进给、抬刀参数，防止电弧放电，并在表面粗糙度等加工质量不变的前提下，达到生产率最高的最佳稳定放电状态。

图 2-33 所示的是微机控制脉冲电源原理框图。它是由微处理器 CPU、只读存储器 ROM、读写存储器 RAM 和接口电路 IFC—A 和 IFC—B 组成的微型计算机。其系统软件由设计者写入 ROM，而数控软件也由设计者写入 ROM 或存于外存储器。微型计算机通过接口电路 IFC—A 与外设键盘 KB、录音磁带 REC（或光盘）及显示器 CRT 连接。键盘可输入各种工艺数据、电规准参数及典型工艺参数等。CRT 则显示有关数据、表格、工艺程序和加工状态等，实现人机对话。

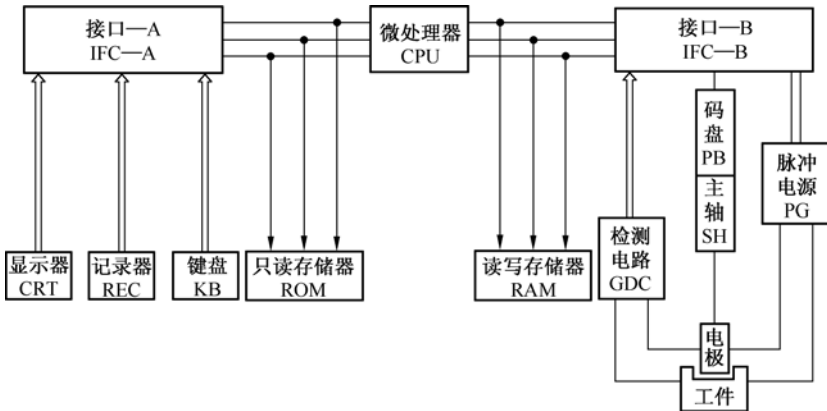


图 2-33 微机控制脉冲电源原理框图

微型计算机还可通过接口电路 IEC—B、数控脉冲电源 PG，与机床主轴 SH 的位置反馈装置 PB 及放电间隔的检测电路 GDC 相连接；如果是多轴数控，还应与 X、Y、Z、R 轴的位置反

馈装置相连接，以实现多轴联动控制。根据键盘脉冲电源的指令，使之产生加工所需的脉冲，输向放电间隙，进行电火花放电加工。加工中主轴 SH 上的位置反馈装置 PB（如码盘、光栅尺等）给微型计算机提供主轴行程的位置信息和速度信息，检测电路 GDC 则用来检测放电间隙状态，这些信息经微型计算机处理后用来控制脉冲电源输出的电参数，实现适应控制（包括适应抬刀、适应间歇等）及智能化，以提高电火花加工过程的稳定性和各项工艺指标。

2.5 电火花加工的应用

2.5.1 火花加工工艺类型

电火花成形加工可归纳为穿孔加工、型腔加工和切断加工。穿孔加工应用于冲模（包括凸凹模及卸料板、固定板）、粉末冶金模、挤压模（型孔）、型孔零件和小孔（ $\phi 0.01\sim 3\text{ mm}$ 小圆孔和异形孔）的加工；型腔加工用于型腔模（锻模、塑料模、胶木模等）及型腔零件的加工。

电火花成形加工的基本工艺路线如图 2-34 所示。

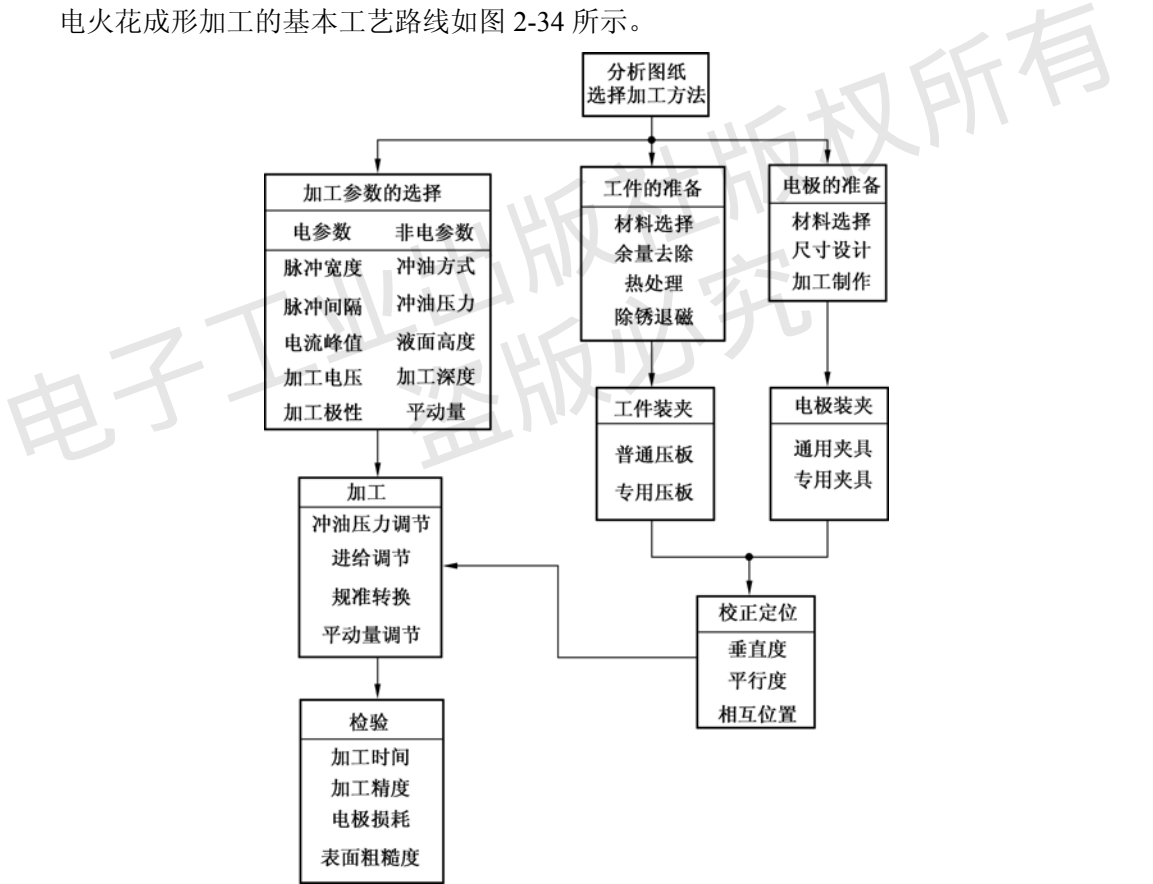


图 2-34 电火花成形加工的基本工艺路线

2.5.2 电火花型腔加工

型腔模主要包括锻模、压铸模、挤压模、玻璃模、陶瓷模、胶木模、塑料模等。因为都是盲孔，加工时金属蚀除量大，工作液循环困难，电蚀产物排除条件差，工具电极耗损后无法靠进给补偿，所以加工比较困难。

1. 型腔模加工基本工艺方法

型腔模加工主要有单电极平动法、多电极更换法和分解电极加工法等。

(1) 单电极平动法 单电极平动法主要是指用一个成形电极，通过平动头使电极各点做平面小圆运动，如图 2-35 所示，按着粗一中一精的顺序，逐级改变加工规准，依次加大电极平动量，以补偿前后两个加工规准之间放电间隙差值和表面粗糙度差值，实现型腔侧壁仿形修光，完成整个型腔模的加工。如果不采用平动加工，在用粗加工电极对型腔进行粗加工之后，型腔四周侧壁留下很大的放电间隙，而且表面粗糙度很差，如图 2-36(a)所示；此时再用精加工规准已无法进行加工，如图 2-36(b)所示；必要时只好更换一个尺寸较大的精加工电极，如图 2-36(c)所示，费时又费钱。如果采用平动（或摇动）加工，如图 2-36(d)、(e)所示，只要用一个电极向四周平动，逐步地由粗到精改变规准，就可以较快地加工出型腔来。

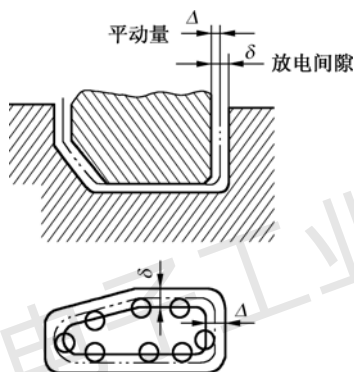


图 2-35 平动头运动原理图

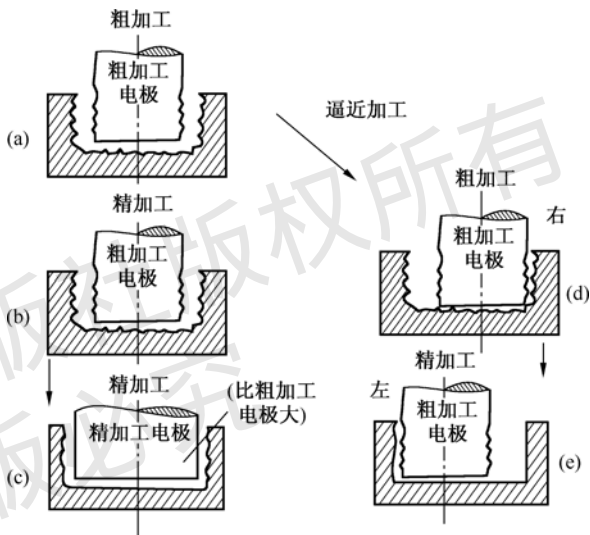


图 2-36 电极平动加工过程

单电极平动法最大的优点是只需要一个电极一次装夹定位，便可达到 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 的加工精度；其缺点是很难加工出清棱清角的型腔模，一般清角圆弧半径大于偏心半径。此外，电极在粗加工中因材料热疲劳容易引起表面龟裂，影响型腔表面粗糙度。为弥补这些缺陷，可采用精度较高的重复定位夹具，将粗加工后的电极取下来，经均匀修光后，再重复定位装夹，利用平动头完成形腔精加工。

单电极亦可采用工作台带动工件纵、横方向移动来实现型腔侧壁修光。为区别于主轴头附件的平动模式，通常将这种工作台的运动方式称之为摇动。由于摇动的轨迹是靠数控系统实现的，除了小圆轨迹运动外，还有方形、十字形轨迹运动，因此具有灵活多样的运动模式，能适应复杂形状的侧面修光，尤其可以做到尖角处的“清根”，这是平动运动一般无法做到的，图 2-37 为基本的摇动模式。图 2-37(a)为摇动加工修光六角形孔侧壁和底面，图 2-37(b)为摇动加工修光半圆柱侧壁和底面，图 2-37(c)为摇动加工修光半圆球柱的侧壁和球头底面，图 2-37(d)为摇动加工修光四方孔壁和底面，图 2-37(e)为摇动加工修光圆孔孔壁和孔底，图 2-37(f)为摇动加工三维放射进给对四方孔底面修光并清角，图 2-37(g)为摇动加工三维放射进给对圆孔底面、底边修光并清角，图 2-37(h)为用圆柱形工具电极摇动展成加工出任意角度的内圆锥面。

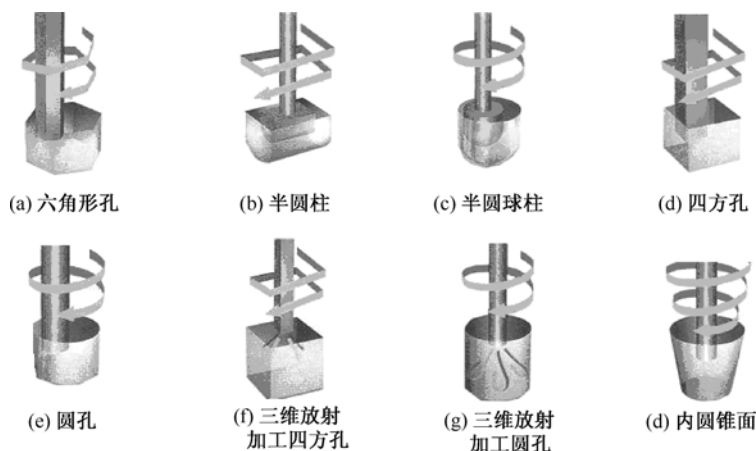


图 2-37 基本摇动模式

(2) 多电极更换法 多电极更换法是采用多个电极依次更换加工同一个型腔。如图 2-38 所示，各电极在有效工作范围内的直壁部分和倾斜部分的尺寸，必须根据不同规准的加工间隙来确定，每次加工必须把上一规准的放电痕迹去掉。一般用两个电极进行粗、精加工就可满足要求，只有在型腔模的精度要求很高，表面粗糙度值要求很小时，才需要采用三个或多个电极进行粗、半精和精加工。

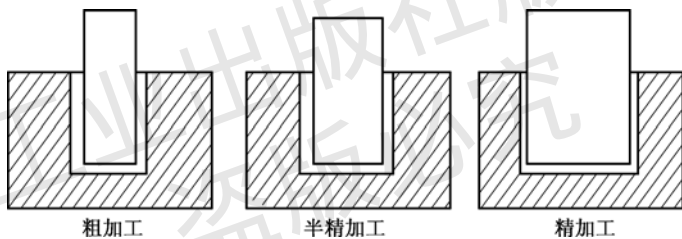


图 2-38 多电极更换成形加工工艺示意图

采用多电极加工，其仿形精度高，尤其适用于尖角、窄缝多的型腔模加工。不足之处是要求多个电极制造一致性好，制造精度要高；另外更换时要求定位装夹精度高。

(3) 分解电极加工法 分解电极加工法是单电极平动加工法和多电极更换加工法的综合应用。根据型腔的几何形状，把电极分解成主型腔电极和副型腔电极分别制造。先用主型腔电极加工出主型腔，后用副型腔电极加工尖角、窄缝等部位的副型腔。如图 2-39 所示，此方法的优点是：根据主、副型腔不同的加工条件，选择不同的加工规准，有利于提高加工速度和改善加工表面质量；同时可以简化电极制造，便于电极修整。缺点是主型腔和副型腔间的精确定位较难解决。

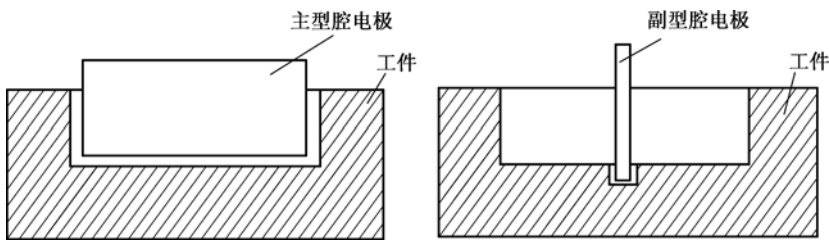


图 2-39 分解电极更换成形工艺示意图

2. 工具电极的设计与制造

1) 电极材料的选择

目前,应用最多的电极材料是石墨和紫铜。紫铜组织致密,制造时不易崩边塌角,适用于形状复杂、轮廓清晰、精度要求较高的胶木模、塑料模、工艺美术型腔模等。但机械加工成形性差,不宜成形磨削;而且比重大、价格贵,不适宜作为大、中型电极。石墨电极具有成形容易的突出优点,且比重小,适宜作为大、中型电极。但机械强度较差,在宽脉冲大电流加工时,容易起弧烧伤。

铜钨合金和银钨合金是较理想的电极材料,但价格较贵,只用于特殊型腔加工。

2) 电极的设计

(1) 结构形式的确定 整体式电极适用于尺寸大小和复杂程度都一般的型腔加工。它可分为有固定板和无固定板两种形式。无固定板式多用于型腔尺寸较小、形状简单、只用单孔冲油或排气的情况。有固定板式用于型腔尺寸稍大、形状较复杂、采用多孔冲油或排气的情况。

组合式电极适用于一模多腔的情况,可大大提高蚀除速度,简化各型腔之间的定位工序,提高定位精度。

镶拼式电极适用于型腔尺寸较大、单块坯料尺寸不够;或型腔形状复杂,只有分块才易于制作的电极。

(2) 电极尺寸的确定 斜壁型腔在半精、精加工时,仅需垂直进给就可将型腔修光,相应电极尺寸的确定较容易。对于直壁型腔,由于粗加工的放电间隙较大,仅靠垂直进给是无法修光侧面的。在半精、精加工时需用单电极平动加工法使电极作平面移动修光侧面,但电极必须缩小或放大大动量。此时的电极尺寸确定方法如下:

① 水平尺寸的计算。电极与主轴头进给方向垂直的尺寸称为水平尺寸(如图 2-40 所示),用下式确定:

$$a = A \pm Kb \quad (2-1)$$

式中 a ——电极水平方向的尺寸;
 A ——图纸上型腔的名义尺寸;
 K ——与型腔尺寸注法有关的系数;
 b ——电极单边缩放量(或平动头偏心量,一般取 $0.7 \sim 0.9 \text{ mm}$)。

$$b = S_L + H_{\max} - h_{\max} \quad (2-2)$$

式中 S_L ——最粗规准加工时单边加工间隙;

$H_{\max}$ ——最粗规准加工时表面微观不平度最大值;

$h_{\max}$ ——最精规准加工时表面微观不平度最大值。

式(2-1)中的“ $\pm$ ”号及 K 值按以下原则决定:

- 凡图纸上型腔凸出部分,其相对应的电极凹入部分的尺寸应放大,即用“+”;反之,凡图纸上型腔凹入部分,其相对应的电极凸出部分的尺寸应缩小,即用“-”。
- K 值的选择原则 当图中型腔尺寸完全标注在边界上(即相当于直径方向尺寸)时, K 取 2;一端以中心线或非边界线为基准(即相当于半径方向的尺寸)时, K 取 1;对于

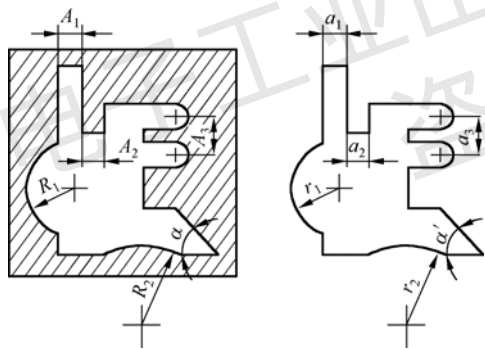


图 2-40 电极水平截面尺寸缩放示意图

图纸上型腔中心线之间的位置尺寸及角度值, 电极上相对应的尺寸不增不减, K 取 0。
对于圆弧半径, 亦按上述原则确定。

② 垂直方向的尺寸计算 电极上与主轴进给方向平行的尺寸, 称为垂直尺寸 (如图 2-41 所示), 用下式确定:

$$l = B \pm K \cdot \Delta \quad (2-3)$$

式中 l ——电极垂直方向的有效加工尺寸;

B ——型腔深度方向的尺寸;

K ——与尺寸注法有关的系数;

Δ ——加工时的放电间隙和电极损耗要求电极端面的修正量。

$$\Delta = \Delta l_{EF} - S_F \quad (2-4)$$

式中 Δl_{EF} ——电极端面损耗 ($\Delta l_{EF} \approx B \times 1\%$);

S_F ——最末挡精规准的加工间隙。

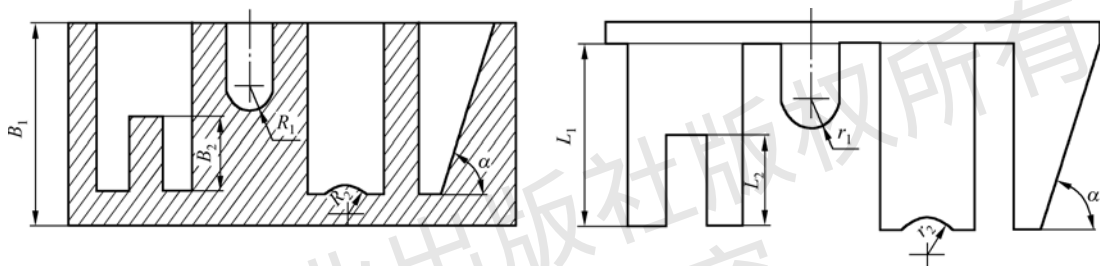


图 2-41 电极垂直方向尺寸示意图

③ 电极总高度 H 的确定 需根据实际情况, 如电极使用次数、装夹要求等决定。从图 2-42 可知:

$$H = l + L_1 + L_2 \quad (2-5)$$

式中 H ——除装夹部分外的电极总高度;

l ——电极每加工一个型腔在垂直方向的有效高度;

L_1 ——当需加工的型腔位于另一型腔中时, 电极需要增加的高度;

L_2 ——考虑到加工结束时, 电极夹具或固定板不和模块或压板发生碰撞, 以及同一电极能重复使用而需要增加的高度。

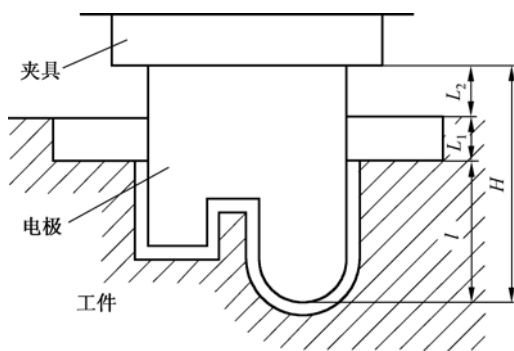


图 2-42 电极总高度设计示意图

(3) 排气孔与冲油孔的设计 型腔电火花加工一般均为盲孔加工, 所以排气、排屑状况直接影响加工效率与稳定性。精加工时则影响表面粗糙度, 因此必须引起足够重视。一般情况下, 冲油孔要开在不易排屑的拐角、窄缝处; 而排气孔则开在蚀除面积较大及电极端部有凹入的位置。冲油孔和排气孔的直径约为平动头偏心量的 1~2 倍, 一般取为 $\phi 1 \sim 2 \text{ mm}$ 。若孔开得过大, 则加工后残留的凸起太大, 不易清除。为有利于排气排屑, 常把排气孔、冲油孔的上端加大孔径为 $\phi 5 \sim 8 \text{ mm}$ 。孔的数目应以不产生蚀除产物堆积为宜, 孔距在 20~40 mm 左右, 孔要适当错开以减少“波纹”。

3) 电极的制造

制造电极的方法很多，主要是根据电极材料、模具型腔的精度和数量等来决定。

(1) 紫铜电极的制造 主要采用机械加工方法制造，并配合钳工的修整达到预定要求。还可采用电铸法、精锻法、油压成形和放电成形代替机械加工，然后用钳工精修。电铸电极能节省大量工时，减少钳工繁重劳动，适用于多电极更换加工法。另外对品种多、数量少、形状复杂的型腔模加工亦宜采用电铸电极。精密模锻和放电成形加工制造电极，工艺比较复杂，适用于同品种大批量电极制造。

(2) 石墨电极的制造 石墨材料的机械加工性能好，机加工后修整、抛光都很容易。因此，目前主要采用机械加工法制造。另外也有采用数控切割成形、振动加工成形和等离子喷涂成形等工艺。

在制造较大型腔电极时，石墨坯料尺寸不够可采用拼块的方法，用螺栓连接或采用环氧树脂、聚氯乙烯酸液等黏合。拼接时要注意石墨材料的方向性，否则方向不同将引起耗损不均而影响加工质量。

3. 加工规准选择、转换与平动量的分配

1) 加工规准的选择

(1) 粗规准 一般选取宽脉冲（大于 $400\ \mu\text{s}$ ）、高峰值电流进行粗加工。加工时，应注意加工面积与加工电流之间的配合关系。通常在石墨电极加工钢时，最高电流密度为 $3\sim 5\ \text{A}/\text{cm}^2$ ，紫铜电极加工钢时，电流密度可稍大些。选用粗规准加工速度快、表面粗糙、电极损耗低。

(2) 中规准 一般选用脉冲宽度为 $20\sim 40\ \mu\text{s}$ 、峰值电流较小的参数进行半精加工。中规准与粗规准之间并没有明显的界限，应按具体对象划分。中规准要在保持一定的蚀除速度情况下，尽量做到低的电极损耗，以利于修型。加工有小孔、窄缝等复杂型腔时，可直接用中规准粗加工型腔。

(3) 精规准 是在中规准加工的基础上，进行最后精加工的参数。精加工的去除量很小，一般不超过 $0.1\sim 0.2\ \text{mm}$ ，表面粗糙度 R_a 值小于 $1.6\ \mu\text{m}$ ，多选用 $10\sim 20\ \mu\text{s}$ 的窄脉宽、小峰值电流加工。电极相对损耗量在 $10\%\sim 25\%$ 左右。

2) 加工规准的转换和平动量的分配

加工规准转换的挡数，必须根据具体对象确定。对于小尺寸、形状简单的浅型腔加工，规准转换挡数可少些，对大尺寸、大深度、形状复杂的型腔，规准转换的挡数要多些。粗加工规准一般选定一挡，半精加工规准选 $2\sim 4$ 挡，精加工规准选 $2\sim 4$ 挡。

当每挡规准加工的凹坑底部与上一挡规准加工的凹坑底部一样平，即加工表面刚好达到本挡规准应达到的粗糙度时，就应及时转换规准。这样既达到修光的目的，又可使各挡的金属蚀除量最小，得到尽可能高的蚀除速度和尽可能低的电极损耗。

平动量如何分配是单电极平动加工法的一个很关键的问题。电极的平动量，主要取决于被加工表面由粗变细的修光量，此外还和电极损耗、平动头原始偏心量、主轴进给运动的精度等有关。当加工形状复杂、纹路棱槽细浅、深度较浅、尺寸较小的型腔时，加工规准较细，平动量应选得小些。反之，当加工形状简单、深度较深、尺寸较大的型腔时，加工规准较粗，平动量应选得大些。

因粗、中、精各挡规准产生的放电蚀除凹坑不一样，电极的平动量不能按每挡平均分配。一般，中规准加工平动量为总平动量的 $75\%\sim 80\%$ ，端面进给量为端面余量的 $75\%\sim 80\%$ 。中规准加工后，型腔基本成形，只留很少余量用精规准修光。

2.5.3 电火花穿孔加工

冲模是生产上应用最多的一种模具，由于形状复杂和尺寸精度要求高，所以它的制造已成为生产上关键的技术之一。特别是凹模，应用一般的机械加工是比较困难的，在某些情况下甚至不可能。而靠钳工加工则劳动量大，质量不易保证，常因淬火变形而报废。采用电火花加工能较好地解决这些问题。冲模采用电火花加工工艺和机械加工工艺对比有如下优点：

- (1) 电火花加工可以在工件淬火后进行，避免了加工后热处理变形的问题；
- (2) 电火花加工冲模的配合间隙和斜度均匀，刃口耐磨，提高了模具质量；
- (3) 电火花加工，可以加工机械加工难以加工的材料，扩大了模具材料的选用范围；
- (4) 对于复杂的凹模可以不用镶拼结构，一般都采用整体式，从而大大简化了模具的结构。

1. 基本方法

凹模的尺寸精度主要靠工具电极来保证。因此，对工具电极的精度和表面粗糙度都应有一定的要求。如凹模的尺寸为 L_2 ，工具电极相应的尺寸为 L_1 （图 2-43），单面火花间隙为 S_L ，则

$$L_2 = L_1 + 2S_L$$

式中，加工间隙值 S_L 主要取决于脉冲参数与机床的精度。只要加工规范选择适当，保证加工稳定，加工间隙 S_L 的误差是很小的。因此，只要工具电极的尺寸精确，用它加工出的凹模尺寸也是精确的。

对冲模来说，配合间隙是一个很重要的质量指标。它的大小和均匀性都直接影响冲件的质量及模具的寿命，因此在加工中配合间隙必须予以保证。最常用的保证配合间隙的方法有：直接配合法、间接配合法、冲头修配法和二次电极间接法等。

直接配合法是直接用加长的钢冲头作电极加工凹模，加工后再将其因作为电极而损耗的部分切除。此法通过调节脉冲参数，可保证加工间隙与要求的配合间隙均匀一致，加工的模具质量较高，制作周期短，还能节约电极材料。但用钢作电极，加工稳定性差，加工速度低。

间接配合法是将冲头和电极黏结在一起，用成形磨削同时磨出。加工时，调节脉冲电源参数，可保证电极穿透凹模的加工间隙与冲头和凹模的配合间隙一致，这样，凹模就可不用经任何修整而直接和冲头配合。采用此法，凸凹模间隙配合均匀，模具质量高。电极材料采用电火花加工性能好的铸铁，可提高蚀除速度。

冲头修配法是将冲头与电极分别用机械加工制出。但冲头不加工到最后尺寸，留下一定的待修余量。用制好的电极加工出凹模，然后按凹模修配冲头，以达到所需的配合间隙。

二次电极间接法（或称为二间法）多用于冲头制造比较困难，而凹模容易加工的情况。用已加工好的凹型工具电极，电火花加工冲头，并合理控制加工间隙，以保证冲头与凹模的配合间隙。

上述四种冲模电火花加工方法，各有自己的特点和适用范围。

2. 工具电极的设计与制造

1) 电极材料的选择

电极材料必须是导电材料，并要求加工过程中损耗小，稳定，工件蚀除速度高，机械加工性好，来源丰富，价格便宜等。常用的电极材料有：紫铜、石墨、铸铁、钢、黄铜、铜钨合金、银钨合金等，最常用的是紫铜与石墨。

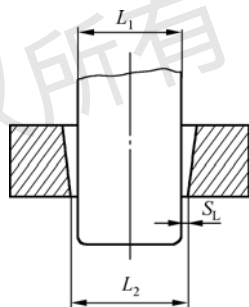


图 2-43 凹模电火花加工

2) 电极结构形式

由于凹模的精度主要决定于工具电极的精度,因而对工具电极要有严格的要求,要求它的尺寸精度比凹模高一级,一般不低于 IT7 级,表面粗糙度 Ra 值不大于 $0.8\ \mu\text{m}$ 。

正确设计电极,首先要了解机床主轴头的承载能力、工作台尺寸及负荷,其次还要了解脉冲电源各规准的蚀除速度、电极损耗、加工间隙等加工工艺指标。然后,再根据工件型孔的尺寸精度、几何形状精度、粗糙度等,决定电极的结构形式、轮廓尺寸及长度。

电极结构形式通常有整体式、镶拼式和组合式三种类型:

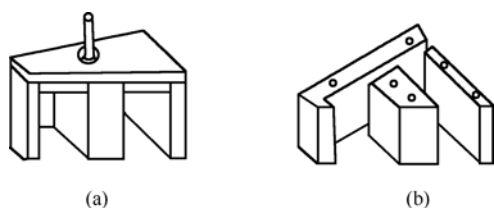


图 2-44 整体式与镶拼式电极结构示意图

① 整体式电极如图 2-44(a)所示,是最常用的结构形式。对于较大体积的电极,为了减轻重量,可在端面开孔或挖空。对于小体积、易变形的电极,可在有效长度的上部将截面尺寸增大。

② 镶拼式电极如图 2-44(b)所示,一般在机械加工困难时采用,如一些冲模电极,在磨削时,不能深入到底部,做到“清根、清角”。而采用几块分开制造后镶拼的方法,易得到“清角”,有时也有因整体式电极不能保证制造精度,而采用镶拼结构电极的。

③ 组合式电极是将多个电极组合在一起,用于一次加工多孔落料模、级进模和在一凹模上若干个型孔。用组合电极加工,只要垫块尺寸精确,组合时保证各电极间的平行度,装卡牢固,就可以加工出精度较高的凹模。

3) 电极的制造

冲模电极的制造,一般首先用普通机械加工,然后成形磨削。一些不易磨削加工的材料,可在机加工后,由钳工精修。目前,直接用电火花线切割加工电极已获得广泛应用。

采用钢冲头(凸模)直接作为电极时,可直接用成形磨削磨出。如果凸凹模配合间隙不在电火花加工间隙范围内,则作为电极的部分必须在此基础上增大或缩小。常采用化学侵蚀的办法制作出台阶并达到尺寸要求,或采用镀铜、镀锌的办法扩大到要求的尺寸。

3. 工件的准备

1) 加工预孔

电火花加工前,工件型孔部分要加工预孔,并留适当的电火花加工余量。余量的大小应以能补偿电火花加工的定位找正误差及机械加工误差为宜。若余量太大,将增加电火花加工工时;若余量太小,则不易定位找正,甚至使凹模刃口加工不出所要求的粗糙度而造成废品。一般情况下,单边余量以 $0.3\sim 1.5\ \text{mm}$ 为宜,并力求均匀。如遇到形状复杂的型孔,余量要适当增大。

凹模电火花加工部位采用阶梯空刀时,台阶加工深度尽量一致。型孔有尖角部位时,为减小电火花加工电极棱角损耗,加工预孔要尽量做到清角。

2) 热处理

工件在淬火前,除加工预孔外,螺纹孔、销孔均应先加工出来,再进行热处理。淬火硬度一般要求为 HRC58~62 左右。

3) 磨光、除锈、去磁

淬火后,为防止变形,需再磨光两平面。当需要用块规、角尺定位时,还要磨出基准面。最后,检验无淬火裂纹,并除锈去磁后便可进行电火花加工。

4. 电规准的选择及转换

所谓电规准，是指电火花加工过程中的一组电参数，如电压、电流、频率、脉宽、极性等。电规准选择正确与否将直接影响工艺指标。所以，必须根据工件的要求、电极与工件的材料、加工工艺指标和经济效果等，确定合理的加工规准，并在加工过程中，正确、及时地转换。

冲模加工中，粗、中、精三种规准都必须用上。

钢打钢时，粗规准主要用于蚀除加工余量大的部分；中规准主要用于过渡性加工，在由粗规准转换为精规准加工时，为使加工稳定和过渡圆滑，一般两者之间需用中规准加工 1~2 mm，再转入精规准；精规准主要是实现冲模要求的各项技术指标，如配合间隙、刃口斜度、表面粗糙度等。脉冲宽度一般为 2~6 μs，加工速度 7~10 mm³/min，表面粗糙度 Ra 值达 1.6 μm。

加工过程中，提高蚀除速度和改善表面粗糙度是互相矛盾的，在选择加工规准时，应根据不同的加工要求合理选用，可以利用电火花成形加工工艺曲线指导生产。

2.5.4 电火花加工工艺参数关系图

无论是成形加工还是穿孔加工，电火花加工的工艺参数都可以借助工艺参数曲线图来正确选择加工规准。主要工艺指标主要有：加工速度、电极损耗、表面粗糙度、加工精度等。图 2-45 是铜打钢时加工速度与脉冲宽度和峰值电流的关系曲线。

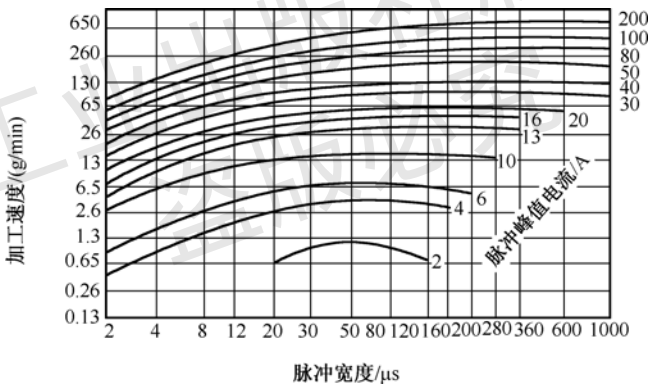


图 2-45 铜打钢时加工速度与脉冲宽度和峰值电流的关系曲线

在电火花成形加工中，工具电极的损耗直接影响仿形精度，特别是对于型腔加工，电极损耗这一工艺指标较加工速度更为重要。为了减小电极的损耗，必须很好地利用电火花加工中的各种效应（极性效应、吸附效应、热传导效应等），使电极表面形成碳黑膜，利用碳黑膜的补偿作用来降低电极损耗，并且这些效应又互相影响，互相制约。图 2-46 为铜打钢时电极损耗率与脉冲宽度和峰值电流的关系曲线。

工件的电火花加工表面粗糙度直接影响其使用性能，如耐磨性、接触刚度、疲劳强度等。尤其对于高速高压条件下工作的模具和零件，其表面粗糙度往往是决定其使用性能和寿命的关键，图 2-47 为铜打钢时表面粗糙度与脉冲宽度和峰值电流的关系曲线。

总之，只有协调好电参数，处理好效率与损耗、放电间隙、粗糙度之间的矛盾，才能快速、低损耗、高精度地完成工件的加工。

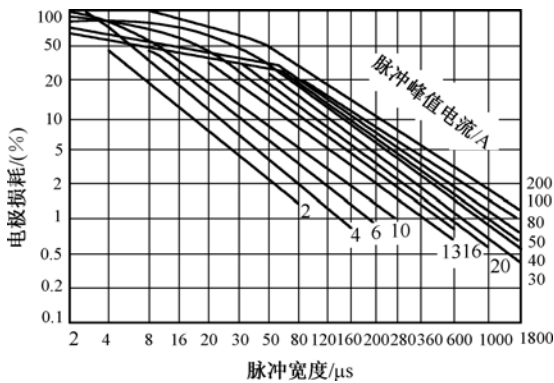


图 2-46 铜打钢时电极损耗率与脉冲宽度和峰值电流的关系曲线

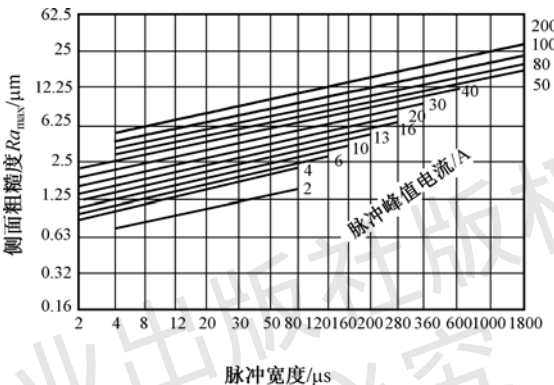


图 2-47 铜打钢时表面粗糙度与脉冲宽度和峰值电流的关系曲线

【应用实例 2-1】 电火花加工冲模型孔时，为什么要从模板底面开始向下加工？

在电火花穿孔加工时，放电间隙中存在着电蚀产物。这些电蚀产物在经火花间隙排出的过程中，会引起电极与已加工过的侧面的二次放电。二次放电会使已加工过的表面再次电蚀。在凹模的上口、电极进口处，二次放电机会就更多一些，这样就形成了锥度（如图 2-48 所示）。一般模具是需要锥度的，可作落料用。但由于模具上的锥度大口在底面，所以电火花穿孔时，要从模板的底面开始，使其锥度的方向正好相同。电火花加工自然形成的锥度一般在 $2' \sim 10'$ 之间，常在 $4' \sim 6'$ 左右，正好可满足冲模落料的需求。

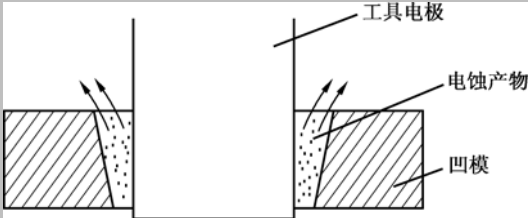


图 2-48 电蚀产物锥度的情况

2.6 其他电火花加工技术

2.6.1 电火花高速小孔加工

电火花高速小孔加工是近年来新发展起来的电火花加工技术。电火花加工的特点如下：不用机械能量，不靠切削力去除金属，而是直接利用电能进行加工，加工过程易于控制；加工过程中没有常规加工中的切削力；可以加工任何硬度的金属材料、导电材料，包括硬质合金、导电陶瓷和导电聚晶金刚石等。因此，可以利用电火花加工方法解决微孔加工、群孔加工、深小孔加工、异形小孔加工、特殊超硬材料的小孔加工等难题。

电火花高速小孔加工除了要遵循电火花加工的基本加工机理外，还有别于一般电火花加工方法，其主要特点有：一是采用中空的管状电极；二是管状电极中通有高压工作液，以强制冲走加工蚀除产物；三是加工过程中电极要做回转运动，可以使管状电极的端面损耗均匀，不致受到电火花的反作用力而产生振动倾斜，而且，高压高速流动的工作液在小孔壁按着螺旋线的轨迹排出小孔外，类似液静压轴承的原理，使得管状电极稳定保持在小孔中心，不会产生短路故障，可以加工出直线度和圆柱度很好的小深孔。从原理上，小深孔的深径比取决于管状电极的长度，只要有足够长的管状电极，就能加工出极深的小孔。加工时，管状电极作轴向进给运动，管状电极中通入 1~7 MPa 的高压工作液（自来水、去离子水、蒸馏水、乳化液或煤油），其加工原理如图 2-49(a)所示，加工区域的微观示意如图 2-49(b)所示。

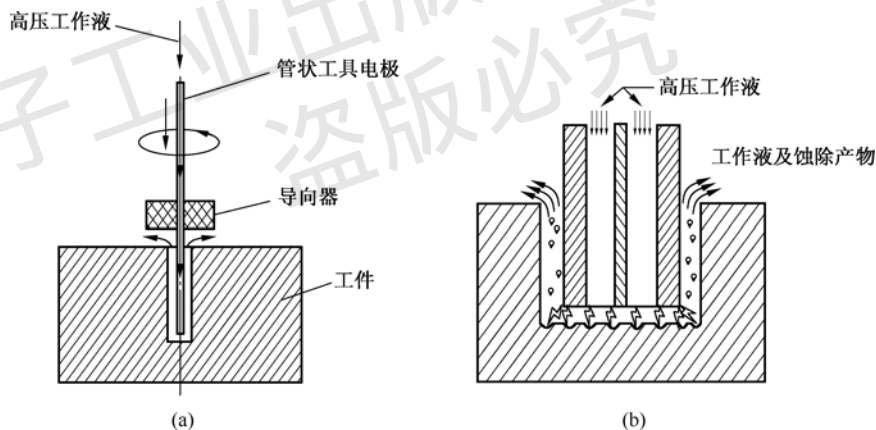


图 2-49 电火花高速小孔加工原理图

由于高压工作液能够迅速强制将电蚀产物排出，而且能够强化电火花放电的蚀除作用，因此这个加工方法的最大特点是加工速度很高，一般电火花小孔加工速度可以达到 30~60 mm/min，比机械加工钻削小孔快得多。这种加工方法最适于加工直径为 $\phi 0.3 \sim 3$ mm 的小孔，而且深径比可以超过 200:1。

用一般空心管状电极加工小孔，即使电极进行旋转也容易在工件上留下毛刺料芯，如图 2-50 所示，料芯会阻碍工作液的高速流通，且过长、过细时会歪斜，以致引起短路。为此，电火花高速加工小孔时通常采用专业厂特殊冷拔的双孔、三孔甚至四孔管状电极，其截面上有多个月形孔，如图 2-50 中断面放大图所示，这样加工中电极转动时，在工件上不会留下毛刺料芯。

电火花高速小孔加工方法还可以在斜面和曲面上打孔，已被广泛应用于线切割零件的预穿

丝孔、喷嘴和耐热合金等难加工材料的小孔加工中，并且已经应用在航空、航天工业产品中的小孔、深孔、斜孔等零件的加工方面。其典型的穿孔应用如图 2-51 所示。

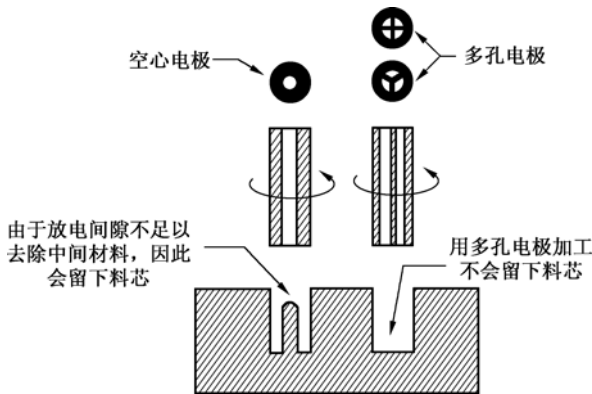


图 2-50 空心电极加工料芯示意及多孔电极截面

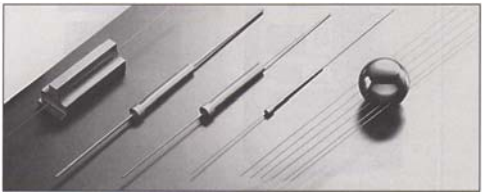


图 2-51 电火花高速小孔加工的典型应用

2.6.2 电火花小孔磨削

电火花小孔磨削实质上是应用机械磨削的成形运动进行电火花加工。它的工具电极与工件电极之间做相对运动，其中之一或二者做旋转运动。在加工过程中，不需要电火花成形那样的伺服进给运动。电火花磨削主要用于磨平面和内外圆、小孔、深孔，以及成形镗磨和铲磨，如电火花小孔磨削、电火花铲磨硬质合金小模数齿轮滚刀等。

在生产中往往遇到一些较深较小的孔，而且精度和表面粗糙度要求较高，而工件材料（如磁钢、硬质合金、耐热合金等）的机械加工性能很差。这些小孔采用研磨方法加工时，生产率太低，采用内圆磨床磨削也很困难，因为内圆磨削小孔时砂轮轴很细，刚度很差，砂轮转速很难达到要求，因而磨削效率下降，表面粗糙度值变大。而采用电火花磨削或镗磨能较好地解决这些问题。

图 2-52 为电火花镗磨机床原理图，工件 5 装夹在三爪自定心卡盘 6 上，由电动机带动旋转，电极丝 2 由螺钉 3 拉紧，并保证与孔的旋转中心线相平行，固定在弓形架上。为了保证被加工孔的直线度和表面粗糙度，工件（或电极丝）还做往复运动，这是由工作台 9 做往复运动来实现的。加工用的工作液由工作液管 1 供给。

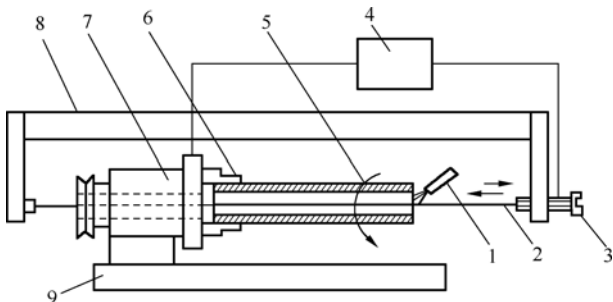


图 2-52 电火花镗磨机床原理图

1—工作液管；2—电极丝（工具电极）；3—螺钉；4—脉冲电源；5—工件；
6—三爪自定心卡盘；7—电动机；8—弓形架；9—工作台

电火花镗磨虽然生产率较低，但比较容易实现，而且加工精度高，表面粗糙度值小，小孔

的圆度可达 $0.003\sim 0.005\text{ mm}$ ，表面粗糙度 Ra 小于 $0.32\text{ }\mu\text{m}$ ，所以生产中应用较多，目前用来加工小孔径的弹簧夹头、硬质合金压模及微型轴承的内环、冷挤压模的深孔、液压件深孔等。

采用电火花铲磨硬质合金小模数齿轮滚刀的齿形，已开始用于齿形的粗加工和半精加工，提高生产率 $3\sim 5$ 倍，成本降低 4 倍左右。

2.6.3 电火花共轭回转加工

电火花共轭回转加工方法是利用成形工具电极与工件电极做相对应的展成运动（回转、回摆或往复运动等），使二者相对应的点保持固定重合的关系，逐点进行电火花加工。它的特点是工具与工件相互接近的部位切向相对运动线速度很小，有时几乎等于零。目前应用较广的是共轭回转加工，如螺纹环规、丝规、小模数齿轮、内螺旋齿轮等回转体零件加工，还有棱面展成、锥面展成、螺旋面展成加工等。如采用工件与电极同向同步旋转，同时工件或电极做径向进给来实现精密的内、外齿轮加工，特别适用于非标准内齿轮加工，如图 2-53(a)和(b)所示。

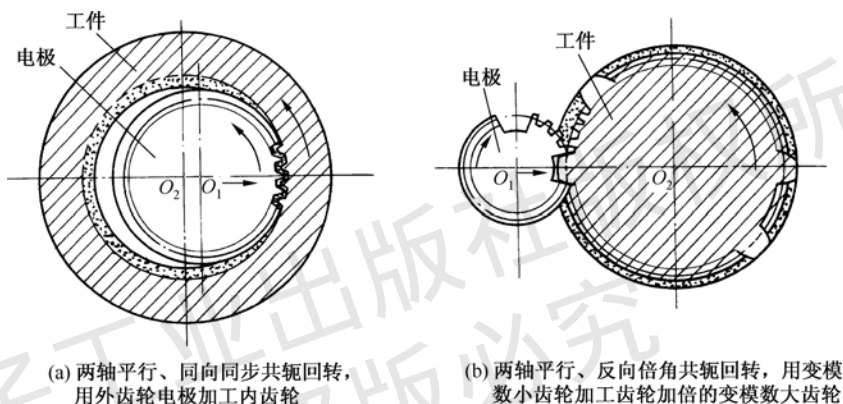


图 2-53 电火花共轭回转加工精密内齿轮和变模数非标齿轮

2.6.4 非导电材料电火花加工

1. 聚晶金刚石等高阻抗材料的电火花加工

聚晶金刚石被广泛用做拉丝模、刀具、磨轮等材料。它的硬度仅稍次于天然金刚石。金刚石虽是碳的同素异构体，但天然金刚石几乎不导电。聚晶金刚石是将人造金刚石微粉用铜、铁粉等导电材料作为黏结剂，搅拌、混合后加压烧结而成，因此整体仍有一定的导电性能，可以用于电火花加工。

电火花加工聚晶金刚石的要点如下：

- (1) 采用 $400\sim 500\text{ V}$ 较高的峰值电压，使有较大的放电间隙，易于排屑；
- (2) 采用较大的峰值电流，一般瞬时电流需在 50 A 以上。为此可以采用 RC 线路脉冲电源，电容放电时可输出较大的峰值电流，增加爆炸抛出力。

电火花加工聚晶金刚石的原理是靠火花放电时的高温将导电的黏结剂熔化、汽化蚀除掉，同时电火花高温使金刚石微粉“碳化”成为可加工的石墨，也可能因黏结剂被蚀除掉后而整个金刚石微粒自行脱落下来。有些导电的工程陶瓷及立方氮化硼材料等也可用类似的原理进行电火花加工。

2. 陶瓷材料电火花加工

非导电工业陶瓷材料如氧化铝、氧化锆、氮化硅及立方氮化硼等超硬材料的广泛应用，以及其形状的复杂化，使得研究对这些材料进行电火花加工已经成为该领域的新趋势之一。

目前采用的方法主要有如下两种。

1) 电解电火花复合加工方法

电解电火花复合加工方法是借助于电解液中火花放电作用来蚀除非导电工件的电加工方法。加工时，工具电极接负极，辅助电极接正极，当两极间加上脉冲电压时，由于电化学反应，在电极表面产生气泡，通过气泡，使工具电极表面与导电的工作液间形成高的电位梯度，引起火花，靠放电时的瞬时高温及冲击波等作用来达到蚀除工件的目的，其火花放电过程的原理图如图 2-54 所示。但由于实质放电是在工具电极通过气泡与导电工作液间进行的瞬时高温大部分被工作液所吸走，因此加工效率极低。

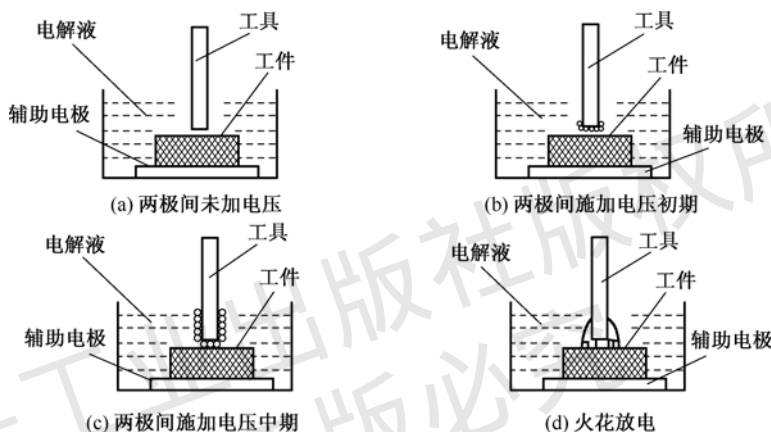


图 2-54 电解电火花复合加工中火花放电过程的原理图

2) 辅助电极法电火花加工

辅助电极法的原理是利用电极和辅助导电电极之间电火花放电，使煤油工作液中产生热分解出的碳沉积物在绝缘陶瓷加工表面不断形成导电膜，使绝缘陶瓷的加工表面具有导电性来实现对绝缘陶瓷的电火花放电加工。

图 2-55 是绝缘陶瓷辅助电极法电火花加工简图。在陶瓷工件上放置金属板（铜板）作为辅助电极，通过夹紧装置（压板）固定在工作台上，并与工作台导通，工具电极装夹在主轴上，辅助电极和工具电极分别接脉冲电源的正、负极。加工时，首先对辅助电极金属板进行电火花穿孔加工，当金属板辅助电极被电火花加工穿通后，才开始对陶瓷进行电火花穿孔成形加工。

图 2-56 是绝缘陶瓷辅助电极法加工原理图。图 2-56(a)表示普通电火花加工上边的辅助电极金属板；图 2-56(b)表示辅助电极金属板加工结束后，在陶瓷表面附着上加工粉末屑（主要由电极消耗产生的粉末）和由工作液煤油分解产生的碳黑膜，使要加工的陶瓷表面部分获得了导电性；图 2-56(c)表示辅助电极金属板加工一结束，在陶瓷加工面附着的加工粉末屑和碳的混合物的膜与工具电极间产生放电，由放电产生的热和冲击来加工陶瓷。这种加工方法是利用电极和辅助导电电极之间电火花放电，使煤油工作液中产生热分解出的碳沉积物在绝缘陶瓷加工表面不断形成导电膜，使绝缘陶瓷的加工表面具有导电性来实现对绝缘陶瓷的电火花放电加工的。这种加工方法不需要专门的设备，在普通电火花加工机床上就可进行加工，但加工效率很低。

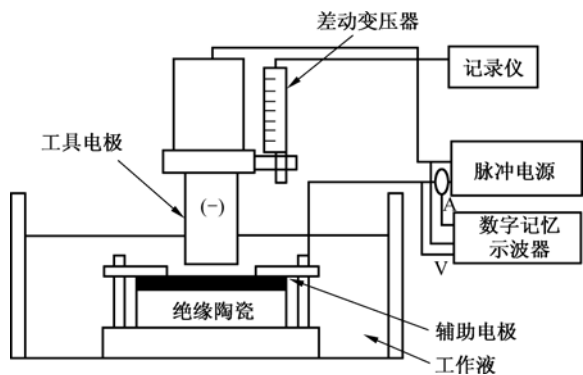


图 2-55 绝缘陶瓷辅助电极法电火花加工简图

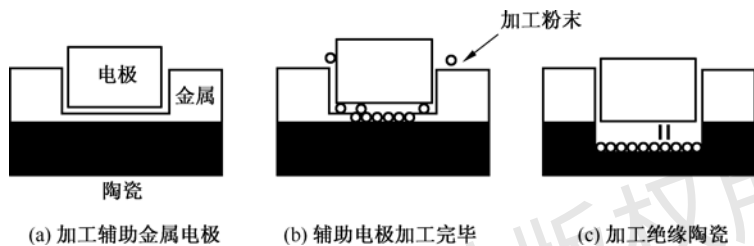


图 2-56 绝缘陶瓷辅助电极法加工原理图

2.6.5 电火花表面强化和刻字

1. 电火花强化工艺

电火花表面强化也称为电火花表面合金化。图 2-57 是金属电火花表面强化器的加工原理图。在工具电极与工件间接上 RC 直流电源，由于振动器 L 的作用，使电极与工件之间的放电间隙频繁变化，工具电极与工件间不断产生火花放电，从而实现对金属表面的强化。

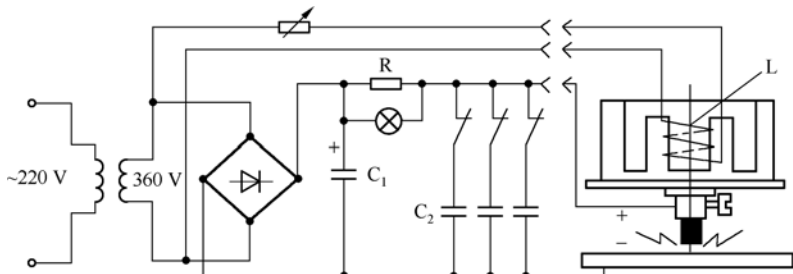


图 2-57 金属电火花表面强化器的加工原理图

电火花强化过程如图 2-58 所示。当电极与工件之间距离较大时，如图 2-58(a)所示，电源经过电阻 R 对电容器 C 充电，同时工具电极在振动器的带动下向工件运动。当间隙接近到某一距离时，间隙中的空气被击穿，产生火花放电[图 2-58(b)]，使电极和工件材料局部熔化，甚至汽化。当电极继续接近工件并与工件接触时[图 2-58(c)]，在接触点处流过短路电流，使该处继续加热，并以适当压力压向工件，使熔化了的材料相互黏结、扩散形成熔渗层。图 2-58(d)为电极在振动作用下离开工件，由于工件的热容量比电极大，使靠近工件的熔化层首先急剧冷凝，从而使工具电极的材料黏结，覆盖在工件上。

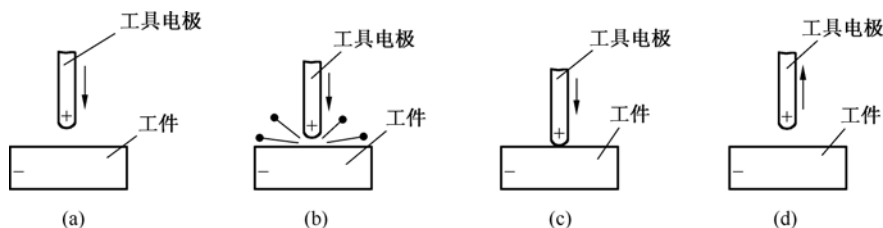
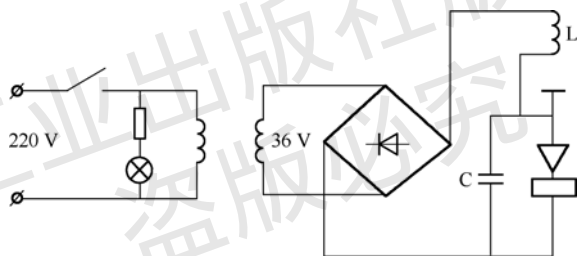


图 2-58 电火花表面强化过程原理图

电火花强化工艺方法简单、经济、效果好，因此广泛应用于模具、刀具、量具、凸轮、导轨、水轮机和涡轮机叶片的表面强化。

2. 电火花刻字工艺及装置

电火花表面强化的原理也可用于在产品上刻字、打印记，一般有两种办法。一种是把产品商标、图案、规格、型号、出厂年月日等用铜片或铁片做成字头图形，作为工具电极，如图 2-59 所示，工具一边振动，一边与工件间火花放电，电蚀产物镀覆在工件表面形成印记，每打一个印记约 0.5~1 s。另一种不用现成字头而用钼丝或钨丝电极，按缩放尺或靠模仿形刻字，每件时间稍长，约 2~5 s。如果不需字形美观整齐，可以不用缩放尺，而用手刻字的电笔。图 2-59 中用钨丝接负极，工件接正极，可刻出黑色字迹。若工件是镀黑或表面发蓝处理过的，则可将工件接负极，钨丝接正极，可以刻出银白色的字迹。



L—振荡器线圈； $\phi 0.5$ mm 漆包线 350 匝；铁心截面约 0.5 cm^2 ；C—纸介电容 $0.1 \mu\text{F}$ ，200 V

图 2-59 电火花刻字打印装置线路

2.7 电火花加工安全防护

1. 电气安全

电火花加工是直接利用电能使金属蚀除的工艺，使用的机床和电源上设有强电及弱电回路，除与一般机床相同的用电安全要求外，对接地、绝缘、稳压还有一些特殊需求。

电源（或控制柜）外壳、油箱外壳要妥善接地，防止人员触电，并起到抗干扰、电磁屏蔽的作用。

经常检查电极（主轴头）及工作台与电源连接线的绝缘完好，防止连接线的破损引起短路，造成电源故障或引起火灾。加工中，禁用裸手接触加工区任何金属物体，若调整冲液装置必须停机进行，保障操作人员及电极、工件的安全。不在工作箱内放置不必要或暂不使用的物品，防止意外短路。

稳压电源进线加装稳压及滤波环节，提高抗干扰能力，减少对外电磁污染。

2. 火灾的防止

当进行电火花加工时,工作液(通常是煤油)或加工中产生的可燃气在空气中被放电火花点燃时,就有引起火灾的危险。电火花加工时,工作液面要高于工件一定距离(30~100 mm),如果液面过低,加工电流较大,很容易引起火灾。为此,操作人员应该经常检查工作液面是否合适。由于操作不当,可能导致意外发生火灾的情况,如图 2-60 所示。还应该注意,在电火花放电转成电弧放电时,电弧放电点局部温度会因为温度过高,工件表面向上积碳并向上增长,同时主轴头向上回退,直至在空气中放电而引起火灾。在这种情况下,液面保护装置也无法防止。为此,除非电火花加工机床上装有烟火自动检测和自动灭火装置,否则操作人员不能较长时间离开。

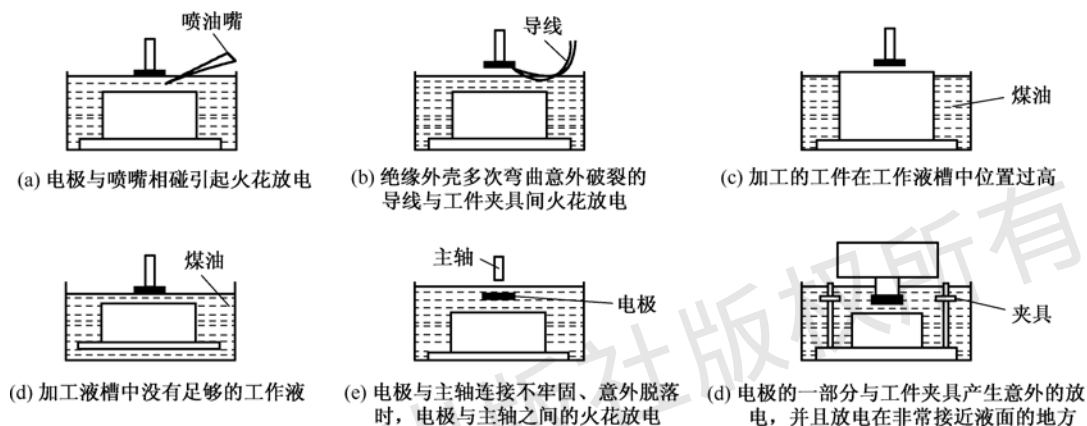


图 2-60 意外发生火灾的原因

电火花加工过程中,万一发生火灾,在最初的短暂时间内,着火范围一般局限在工作液槽内,火势容易控制,直至扑灭。所以,操作人员在机床开动,尤其是放电开始后,绝不允许远离机床,以便在产生火灾的初期及时将火扑灭。

如果发生火灾,首先应切断电源,即切断总电源或近处机床电源;然后用机床旁配备的灭火器材扑救,必要时向消防部门报警;在处理完事故、解除现场保护后,尽早清除灭火器材喷洒后的残留物,并检查损失,减少灭火药品造成的腐蚀等作用。

鉴于电火花加工中的灭火对象包括油类、电气设备及其他可燃物(如油漆、橡皮、塑料等涂层及零部件),所以灭火剂只能选用二氧化碳灭火剂、卤代烷灭火剂、干粉灭火剂等,不允许用水灭火剂或泡沫灭火剂。

3. 有害气体的防护

电火花加工时,现场空气中存在煤油(蒸发气体)、一氧化碳、丙烯醛、低碳氢化合物、氰化氢等对人体有害气体,因此需采取防护措施,主要是通风净化。

通风净化是排除有害气体、降低操作现场有害气体浓度的有效手段。电火花加工时的通风一般采用局部吸(排)气即可达到防护目的。

2.8 电火花加工技术的发展

电火花加工技术自 20 世纪 40 年代开创以来,历经半个多世纪的发展,已成为先进制造技术领域不可或缺的重要组成部分。尤其是进入 20 世纪 90 年代后,随着信息技术、网络技术、

材料科学技术等高新技术的发展,电火花加工技术也朝着更深层次、更高水平的方向发展,电火花加工的新技术也不断地涌现出来。

1. 加工工艺新技术

(1) 加工过程的高效化

在保证加工精度的前提下,提高粗、精加工效率同时,还应尽量缩短辅助时间(如编程时间、电极与工件定位时间、维修时间等),为此,采取了增强机床的在线后台编程能力,改进和开发适用的电极与工件定位装置等手段。

(2) 加工过程的精密化

在保证加工速度的前提下,电火花加工成形的精确度要求越来越高,特别是在模具行业中,镜面加工、微细加工技术和表面强化处理技术得以广泛应用。

(3) 加工电规准的智能化

随着计算机技术和自动控制技术在电火花加工中的运用,模糊控制、人工神经网络技术和专家系统也频繁地出现在电规准的制订中,使加工电规准更趋向于智能化。

(4) 电极材料的专一化

工具电极的材料选用一直是放电加工的关键环节,常用的电极材料是石墨和纯铜。近年来的研究表明,石墨电极将成为未来放电加工中的首选。

2. 电火花机床新技术

(1) 直线电动机伺服系统的运用

电火花成形加工设备采用直线电动机伺服系统,可使加工性能获得明显改善。由于它取代了传统的丝杠螺母传动链,减小了机械结构中的滞后,因此容易实现闭环控制。

(2) 机床多头主轴的运用

以往的电火花机床结构上采用一个主轴,目前出现了两个或三个主轴同时加工的机床。

(3) 机床电极库的运用

以往只在加工中心上看到换刀的情形,现在出现了电极库,可以在电极库中选择适合的电极实现放电加工。

(4) 机床环境保护的运用

绿色加工的提出,促进了电火花机床在环境保护上的进步。工作液配方上的改进,将工作液对环境的污染降到最低。机床全封闭的结构有利于改善工作液、烟雾、电磁辐射等对人体、机床、工作环境的污染。

【应用点评 2-1】 电火花铣削加工技术

电火花铣削加工是 20 世纪 90 年代发展起来的电火花成形加工技术,是利用简单电极(或称之为标准电极,如棒状电极)在数控系统控制下,按照一定轨迹做成形运动,借鉴数控铣削加工方式,通过简单电极与工件之间在不同相对位置(刀位)的放电加工出所需工件形状。电火花铣削加工技术已经成为三维型腔电火花加工的有力手段之一。

图 2-61 是几种典型的电火花铣削加工示意图。图中(a)、(b)、(c)、(d)采用圆柱电极,加工中电极可以高速旋转,如采用方形电极,则电极不旋转,可加工清棱清角的表面。图中(e)、(f)分别采用线框电极和板状电极进行加工,加工中电极不旋转,前者可用于有大量工件材料需要去除的加工场合,后者同时可利用旋转分度轴进行数控分度加工。

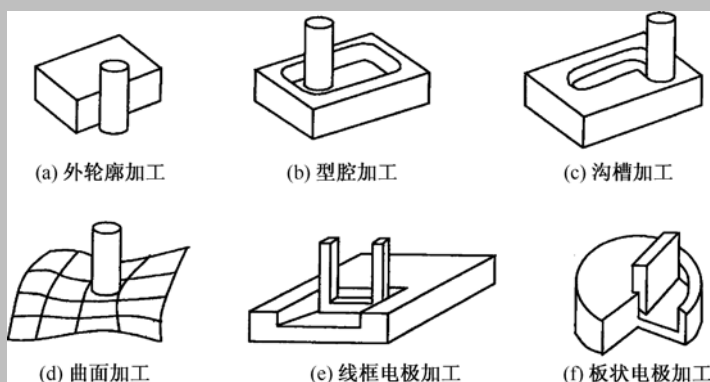


图 2-61 电火花铣削加工的几种形式

2.9 习题

- 2-1 什么是电火花加工？电火花加工是怎样被发明的？要实现电火花加工需具备什么条件？
- 2-2 电火花加工的微观过程即机理是怎样的？
- 2-3 什么是电火花加工时的极性效应？实际加工中如何实现合理选择极性？
- 2-4 电火花加工工艺有哪些类型？
- 2-5 电火花加工及其工艺有何特点和优缺点？
- 2-6 电火花加工的主要应用领域是什么？
- 2-7 电火花加工的主要工艺指标有哪些？
- 2-8 电火花加工的生产率即加工速度与哪些因素有关？如何提高其加工生产率？
- 2-9 电火花加工的表面质量包括哪几方面？电火花加工的表面粗糙度与哪些因素有关？如何达到较好的表面粗糙度？
- 2-10 如何减小电火花加工后的表面变质层和防止产生表面微裂纹？
- 2-11 电火花加工时的自动进给系统和车、钻、磨削时的自动进给系统，在原理上、本质上有何不同？为什么会引起这种不同？
- 2-12 有没有可能或在什么情况下，可以用工频交流电源作为电火花加工的脉冲电源？在什么情况下可用直流电源作为电火花加工用的脉冲电源？（提示：轧辊电火花对磨、齿轮电火花跑合时，不考虑电极相对损耗的情况下，可采用工频交流电源；在电火花磨削、切割下料等工具、工件间有高速相对运动时，可用直流电源代替脉冲电源，为什么？）
- 2-13 影响电火花加工稳定性的因素是什么？如何提高加工稳定性？
- 2-14 电弧放电和电火花放电有何区别？电弧放电有何危害？
- 2-15 $\phi 0.3 \sim 3 \text{ mm}$ 的小深孔如何用电火花加工？高速电火花加工小深孔的基本原理是什么？
- 2-16 如何提高型腔加工的稳定性？
- 2-17 什么是电火花数控摇动加工？它与平动加工在原理和作用上有何差别？
- 2-18 什么是工具电极的相对损耗？怎样测量？
- 2-19 电火花加工中如何实现工具电极低损耗？
- 2-20 电火花加工对工具电极材料有哪些要求？如何根据工件材料和加工要求正确选用电极材料？
- 2-21 电火花加工通常选用什么介质？使用的工作液介质起什么作用？

第 3 章 电火花线切割加工

3.1 概述

3.1.1 电火花线切割加工的概念

电火花线切割加工（Wire Cut EDM，WEDM）是在电火花加工基础上于 20 世纪 50 年代末发展起来的一种新的工艺形式，是用线状电极（铜丝或钼丝）靠火花放电对工件进行的切割，故称为电火花线切割，简称线切割。目前，国内外的线切割机床已占电火花加工机床的 70% 以上。

3.1.2 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，都是基于电极间脉冲放电时的电腐蚀现象，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用一根细长的金属丝做电极，并以一定的速度沿电极丝轴线方向移动，不断进入和离开切缝内的放电加工区。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注液体介质；同时，安装工件的工作台由控制装置根据预定的切割轨迹控制伺服电动机驱动，从而加工出所需要的零件。目前，电火花线切割加工都是采用 CNC（计算机数字控制）控制装置。图 3-1 是电火花线切割机床结构图。

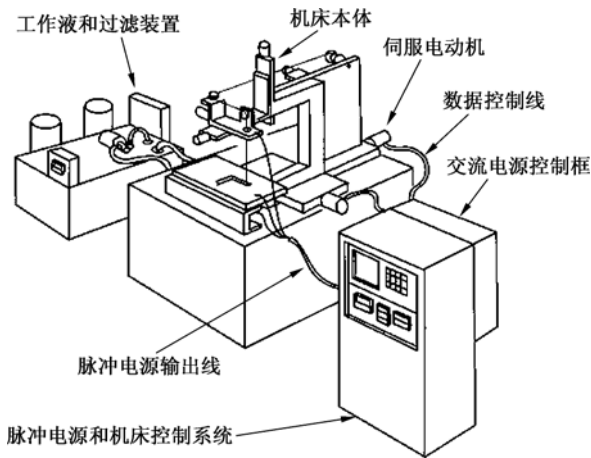


图 3-1 电火花线切割机床结构图

根据电极丝的走丝速度，电火花线切割机床通常分为两大类：一类是高速往复走丝电火花线切割机床（High Speed Wire Cut EDM），俗称高速走丝机，其电极丝做周期性高速往复运动，一般走丝速度为 8~10 m/s，这是我国生产和使用的主要机种，也是我国独创的电火花线切割加