

第3章

特种加工

【本章导读】 特种加工是单独利用机械能进行加工以外的其他加工方法的总称,它是将电能、电化学能、热能、声能、光能、化学能及特殊机械能等多种能量,单独或组合施加到被加工的部位上,从而实现材料去除、变形、改变或镀覆的加工方法。特种加工技术已广泛应用于加工各种高硬度、形状复杂、细微、精密的工件上,是我国从制造大国走向制造强国的重要技术手段之一。本章着重讲述各种特种加工技术的加工原理、加工特点和典型应用,主要包括电火花加工、电解加工、超声波加工、激光加工、电子束加工和离子束加工等。在学习完本章知识点之后,应能掌握特种加工的基本概念,以及各种特种加工技术的原理与特点,了解它们的典型应用,提高对特种加工的感性认识和深化理性认识,丰富对各种机械加工方法的了解。

随着科学技术发展和市场需求的拉动,新产品、新材料不断涌现,结构形状复杂的精密零件和高性能难加工材料零件也不断出现。这些零件的加工向人们提出了新的挑战。如高强度、高硬度、耐高低温材料零件的加工,这类材料有高强度合金钢、耐热钢等难加工金属材料,以及如陶瓷、人造金刚石、硅片等新型非金属材料。用传统加工技术和方法难以获得预期效果,有的甚至无法加工,而且在这类材料中进行一些高精度和极低表面粗糙度的表面加工,例如:复杂型面、薄壁、小孔、窄缝等特殊结构形状的加工,则更加困难。特种加工技术是解决上述问题的重要途径,也是衡量先进制造技术水平的重要指标之一,在精密和超精密加工技术上,微型机械和纳米技术代表了其发展水平和研究热点,也是先进制造技术中最活跃的因素,而许多精密工程和纳米技术需要特种加工的支持。所以可以预见,随着科学技术和现代工业发展的需求,特种加工必将不断完善和迅速发展,并发挥越来越重要的作用。

3.1 特种加工技术概述

3.1.1 特种加工技术背景

20 世纪 50 年代以来,航空航天工业、核能工业、电子工业以及汽车工业的迅速发展,科学技术的突飞猛进,众多产品均要求具备很高的强度质量比与性能价格比,有些产品则要求

在高温、高压、高速或腐蚀环境下长期而可靠地工作。为适应这一需求,各种新结构、新材料与复杂的精密零件大量出现,其结构形状越来越复杂,材料性能越来越强韧,精度要求越来越高,表面的完整性也相应的更加苛刻。这使机械加工、材料制造等部门面临一系列严峻的考验。解决以下加工技术问题是达到上述品质要求的关键:①各种难切削材料的加工问题,如硬质合金、钛合金、淬火钢、金刚石、宝石、石英,以及硼、硅等高硬度、高强度、高韧性、高脆性的金属及非金属材料的加工。②各种特殊复杂表面的加工问题,如喷气涡轮机叶片、整体涡轮、发动机壳体、锻压模和注射模的立体成形表面,喷油嘴、栅网、喷丝头上的小孔、窄缝等的加工。③各种超精、光整或具有特殊要求的零件的加工问题,如对表面质量和精度要求很高的航空航天陀螺仪、伺服阀,以及细长轴、薄壁零件、弹性元件等低刚度零件的加工。在现实生产的迫切需求下,人们通过各种渠道,借助于多种能量形式,探求新的工艺途径,探索、寻求各种新的加工方法。于是一种从加工原理本质上有别于传统加工方式的专用加工技术——特种加工技术应运而生,并成为现代机械制造技术中不可缺少的重要组成部分。

“特种加工”是通过电、热、化学和机械能或这些能量的组合,去除、变形、改变性能或被镀覆、增加材料等,更广义上就是运用电、磁、声、光和化学等相应能量组合,施加到工件的被加工部位之上,进而有效地对材料进行加工。对于这一加工形式无须考虑加工对象的力学性能,常见于对不同的硬、软、脆、纯等材料开展加工。并且能有效地进行不接触加工工作,即不借助工具或是使用工具等,也不与工件进行接触便能保证加工工作的完成。在实际生产中,不再单一局限于普通材料,而是可以实现在不同的新型材料中开展加工操作,如复合材料、钛合金、粉末材料,以及金属间化合物等多种性质的材料。

3.1.2 特种加工技术特点

与常规机械加工方法相比,特种加工具有以下特点:

(1) 特种加工对加工件所施加的能量主要是电能、光能、声能、热能和化学能等非机械式的能量。

(2) 特种加工进行作业过程中,具体的“刀具”与工件没有直接接触,也不会出现工件产生加工硬化和切削变形等现象。

(3) 特种加工的方法逐渐朝着多样化的方向发展,加工零件的精度也在提高。

(4) 特种加工很容易获得比较好的加工表面质量。

基于这些特点,使用特种加工能够得到一些传统工艺无法达到的效果,如:

(1) 加工时无明显机械作用力,故加工脆性材料和精密微细零件、薄壁零件、弹性元件时,工具硬度可低于被加工材料的硬度。

(2) 非接触加工,加工过程中对加工“刀具”几乎无损伤。

(3) 不受材料硬度限制,特种加工的瞬时能量密度高,可以直接有效地利用各种能量,造成瞬时或局部熔化,以强力、高速爆炸、冲击等能量去除多余材料;能够加工各种超硬超强材料、高脆性和热敏材料,非导电硬脆材料,以及特殊的金属和非金属材料。

(4) 微细加工,工件表面质量高。由于在特种加工过程中,工件表面不产生强烈的弹、塑性变形,故有些特种加工方法可获得良好的表面粗糙度。热应力、残余应力、冷作硬化、热影响区及毛刺等表面缺陷均比机械切削表面小。

(5) 简单进给运动,加工复杂型面工件。特种加工技术已成为复杂型面的主要加工手段。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。

由于特种加工对加工工件带来的这些变化,从而也促使了一些新工艺方面的变革。比如,改变不合格零件及传统工艺路线:特种加工将传统淬火工艺路线打破,对高硬度工件加工之前,传统的淬火热处理需要安排在磨削加工之外的其他切削成形加工之后。所以,在加工之前先进行淬火处理,就是为了避免成形加工之后进行淬火处理所引起的工件变形情况。特种加工技术的发展,可以将一些之前不合格的零件,通过特种加工方法进行修复。此外,改变传统结构工艺性概念:一些过去被列为结构设计禁区的,工艺性差的结构如小孔、方孔、弯孔、窄缝和深孔结构等,也因特种加工方法改变了这一现状,促使这些工艺结构,由之前的“差工艺性”向着可加工结构转变。最为重要的是促使结构工艺性变好,而不受加工方法的制约。从电火花穿孔工艺、电火花切割的角度而言,加工方孔与加工圆孔有着一样的难度。所以,特种加工能够迅速将设计理念变成具备相应功能的原型,令产品设计内选择的制造工艺方式、零件材质拥有更加广泛的选择余地,使产品的设计思路处于制造和创意相结合的局面。

3.1.3 特种加工技术存在的问题与发展方向

目前,常见的特种加工技术有:电火花加工、电解加工、超声波加工、激光加工、电子束加工、离子束加工等。这些新的加工方法,虽然解决了传统机械加工无法解决的问题,提高了材料的可加工性,但是也存在以下一些不足:

(1) 一些特种加工技术的加工机理尚不明确,加工工艺参数目前无法定量计算,且加工过程中比较复杂,不容易控制。

(2) 加工过程会对环境产生污染。如电化学加工,在加工过程中产生的废渣和有害气体会对环境和人体健康构成威胁。

(3) 加工精度和生产率还有待提高,而且需要解决加工精度和生产率的关系问题,在提高加工精度的同时,生产率也应提高,而不是下降。

(4) 一些特种加工设备复杂,设备成本高,使用维修费用高。

为此,未来特种加工的研究方向,需要对以上问题进行针对性的研究和改进,大致可以分为以下几个方面:

(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、加工稳定性等深入研究的力度,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CAD/CAM与FMS系统,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) 开发新工艺及复合工艺:如电解电火花加工、电解电弧加工等复合加工,以扬长避短。同时,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,以及聚晶金刚石等材料的加工。

(3) 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、小型化方向发

展,对产品零件的精度与表面粗糙度提出了更严格的要求。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(如等离子弧加工等)已成为重要的发展方向。

(4) 污染问题:考虑到一些特种加工技术对环境的污染,必须要着重解决废渣、废气、废液的“三废”转化问题,向“绿色”工业及可持续发展工业转化。

3.2 电火花加工

自 1943 年研制出世界上第一台实用化电火花加工装置以来,电火花加工技术得到了飞速的发展,目前已经广泛应用于机械、宇航、航空、电子、电动机、仪器仪表、汽车、轻工等行业。电火花加工不仅是一种有效的机械加工手段,而且已经成为在某些场合不可替代的加工方法。例如,在解决难、硬材料及复杂形状零件的加工问题时,应用电火花加工技术十分有效。随着科学技术的不断发展,现代制造技术及其相关技术为电火花加工技术的发展提供了良好机遇。柔性制造、人工智能技术、网络技术、敏捷制造、虚拟制造和绿色制造等现代制造技术正逐渐与电火花加工技术相融合,为电火花加工技术的发展带来了新的生机。

3.2.1 电火花加工的基本原理与特点



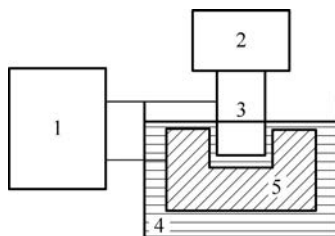
电火花加工原理

1. 电火花加工的基本原理

电火花加工是在一定的介质中通过工具电极和工件电极之间脉冲放电的电蚀作用,对工件进行加工的方法。加工原理如图 3-1 所示,具体的加工过程示意图如图 3-2 所示。工具电极 3 和工件电极 5 分别与直流脉冲电源 1 的两输出端相连接。自动进给系统 2 使工具和工件间经常保持很小的放电间隙,当脉冲电压加到两极之间,便在当时条件下相对某一间隙最小处或绝缘强度最弱处击穿介质,在该局部产生火花放电,瞬时高温使工具和工件表面局部熔化,甚至汽化蒸发而电蚀掉一小部分金属,各自形成一个小凹坑。脉冲放电结束后,经过脉冲间隔时间,使工作液 4 恢复绝缘后,第二个脉冲电压加到两极上,又会在当极间距离相对最近或绝缘强度最弱处击穿放电,再电蚀出一个小凹坑。整个加工表面将由无数小凹坑所组成。这种放电循环每秒钟重复数千次到数万次,使工件表面形成许许多多非常小的凹坑的现象,称为电蚀现象。随着工具电极不断进给,工具电极的轮廓尺寸就被精确地“复制”在工件上,达到成形加工的目的。

电火花成形加工是利用工具电极和工件电极,即正、负电极之间脉冲性火花放电时产生的电腐蚀现象,蚀除工件上多余的金属,以达到对工件预定的尺寸、形状和表面质量的加工要求。与线切割所用的钼丝工具电极不同,电火花成形加工所用的工具电极是按照工件的形状及其他要求专门制造的,其材料一般为紫铜或石墨。其特点为

- (1) 特别适合任何难以切削加工的导电材料。
- (2) 可以加工特殊或形状复杂的表面和零件。
- (3) 在加工过程中,工具和工件不接触,作用力极小。
- (4) 脉冲放电时间短,冷却作用好,加工表面热影响小。



1—直流脉冲电源；2—进给系统；3—工具电极；4—工作液；5—工件电极。

图 3-1 电火花成形加工原理示意图

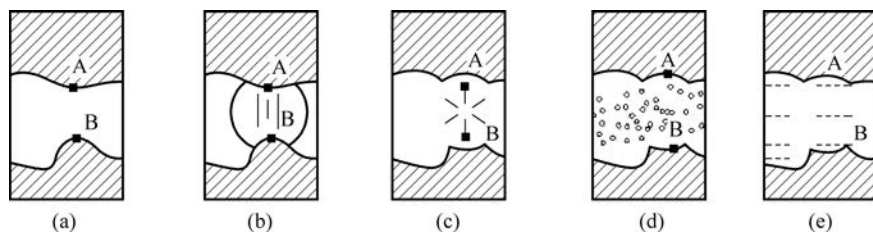


图 3-2 电火花成形加工过程示意图

(a) 电离；(b) 放电；(c) 火花放电；(d) 电极材料抛出；(e) 消电离

然而，传统电火花成形加工还存在以下缺陷：

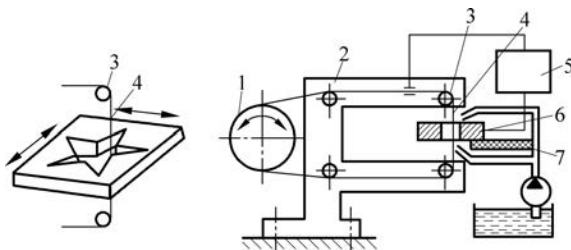
(1) 对于非导电材料无法加工，主要用于加工金属等导电材料。

(2) 加工速度较慢，且必须预加工，去除大部分余量，以提高加工效率。

(3) 在加工过程中存在电极损耗，这对于成形加工电极的设计和制造提出了更高的要求。

电火花线切割加工作为电火花加工的一个重要分支，它具有能加工难加工材料和精密复杂零件，以及表面成形精度高等特点，同时可以节省大量的原材料。其工作原理是利用移动的细金属导线（铜丝或钼丝）作电极，对工件进行脉冲火花放电切割成形。根据电极丝的走丝速度，电火花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，另一类是低速单向走丝电火花线切割机床。

如图 3-3 所示的高速走丝电火花线切割工艺及装置，利用细钼丝作工具电极进行放电切割，储丝筒使钼丝做正反向交替移动，一般走丝速度为 $8 \sim 10 \text{ m/s}$ ，加工能源由脉冲电源供给。工作液为乳化液，复合工作液或水基工作液等。工作台在水平面两个坐标方向各自按预定的控制程序，根据火花间隙状态作伺服进给移动，从而合成各种曲线轨迹，把工件切割成形，加工精度可达 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 。



1—储丝筒；2—支架；3—导向轮；4—钼丝；5—脉冲电源；6—工件；7—绝缘底板。

图 3-3 电火花线切割加工示意图

低速单向走丝电火花切割机床,一般走丝速度低于 0.2m/s ,工作介质用去离子水,特殊情况下用煤油。低速走丝系统运行平稳,加工精度比较高,一般可达 $\pm 0.005\text{mm}$,最高可达 $\pm 0.001\text{mm}$ 。



电火花加工特点

2. 电火花加工的特点

电火花可以用硬度不高的紫铜或者石墨做工具电极,去加工任何硬、脆、韧、软和高熔点的导电材料。而其借助电火花作用在工件上,使电极可以加工成各种所需形状,具备了加工任何特殊及复杂形状工件的能力。由于电火花的加工没有机械加工时那样的切削力,因此适于加工薄壁、窄槽、低刚度及微细精密的零件。总体来说,电火花加工具有以下特点:

- (1) 能加工用切削的方法难于加工或无法加工的高硬度导电材料。
- (2) 便于加工细长、薄、脆性零件和形状复杂的零件。
- (3) 工件变形小,加工精度高。
- (4) 易于实现加工过程的自动化。



电火花成形加工

3.2.2 电火花加工的典型应用

电火花加工一般可应用于以下几类产品:

(1) 加工模具。适用于各种形状的冲压模具和直通的模具型腔。加工各种形状的冲模、注塑模、挤压模、粉末冶金模、弯曲模等。调整不同的间隙补偿量,只需一次编程就可以切割凸模、凸模固定板、凹模及卸料板等。此外,还可加工挤压模、粉末冶金模、塑料模等。



电火花穿孔加工

采用锥度线切割,可加工带锥度的模具零件。

(2) 加工电火花成形用的电极。电火花穿孔加工用的电极,以及带锥度型腔加工用的电极,以及铜钨、银钨合金之类的电极材料,用线切割加工特别经济,同时也适用于加工微细复杂形状的电极。



电火花线切割工艺

(3) 加工试制新产品的零件。用线切割在坯料上直接割出零件,例如试制切割特殊微电动机硅钢片定转子铁芯,由于不需另行制造模具,可大大缩短制造周期、降低成本。另外修改设计、变更加工程序比较方便,加工薄件时还可多片叠在一起加工。

(4) 加工品种多、数量少的零件以及特殊难加工材料的零件。如材料试验样件,各种型孔、型面、特殊齿轮、凸轮、样板、成形刀具等。采用具有锥度切割的线切割机床,还可以加工“天圆地方”等上下异形面零件。

除此之外,在生产中往往会遇到一些较深、较小的孔,而且精度和表面粗糙度要求较高,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。采用研磨方法加工这些小孔时,生产率低,采用内圆磨床磨削也很困难(内圆磨床磨削小孔时砂轮轮轴很细,刚度差,砂轮转速很难达到要求)。电火花磨削可在穿孔、成形机床上附加一套磨头来实现,使工具电极做旋转运动,如工件也附加旋转运动,则磨得的孔可更圆。也有设计成专用电火花磨床或电火花坐标磨孔机床,也可用磨床、铣床、钻床改装,工具电极做往复运动,同时还做回转运动。在坐标磨孔机床中,工具还要做公转,工件和孔径的距离靠坐标数控系统来保证。这种操作方法比较方便,但机床结构复杂,制造精度要求高。

随着加工要求的不断提高,单纯的电火花加工已不能满足有些加工的要求,因此出现了多种类型的电火花复合加工方法。

电火花共轭回转加工：在加工过程中,电极与工件具有特殊的相对运动形式,包括同步回转式、展成回转式、倍角速度回转式、差动比例回转式、相位重合回转式等不同方法。这些方法的共同特点是工件与工具电极之间的切向相对运动线速度值很小,几乎接近于零。所以在放电加工区域内,工件和工具电极近于纯滚动状态。例如,同步回转式加工内外齿轮,在加工过程中,工件与带有齿轮的工具电极始终保持同步回转,两者之间无轴向位移,工具电极不断做径向进给,使工具电极与工件维持在能产生火花放电的距离内。这样就可在工作件上得到与电极齿形相同的内齿轮或外齿轮。

电火花跑合加工：在相互绝缘的工件与工具电极(或工件与工件)之间,加上交变的脉冲电压和电流,使其进行对磨跑合放电加工。一般采用多点、电刷进电的方式。由于是对磨放电加工,因而不需要考虑极性效应和损耗。电火花跑合加工能有效地消除毛刺及不规则棱边、拐点等影响工件质量的部位。

电火花磨削加工：它是在电火花成形加工的基础上发展起来的。机床运动形式与普通砂轮磨削相似。脉冲电源的两极分别接砂轮与工件。与电火花成形加工不同的是,电火花磨削蚀除金属的原理是一般的电火花加工与磨削加工的结合。电火花加工在微尺度方面热软化工件材料,方便研磨,减少磨削力。熔化的金属一部分被蚀除下来,另一部分重新凝固在工件材料表面,在熔化凝固和热影响下,工件表层包含了无数微小裂纹,选择合适的砂轮粒度可磨除微小裂纹层,改善加工表面质量并提高加工效率。

混粉工作液电火花镜面加工技术：混粉工作液电火花镜面加工技术的特点是通过在电火花工作液中添加硅、铝、镍等导电性微粒,不仅能降低大面积电火花成形加工表面的粗糙度值,还可以提高表面的硬度、耐磨性、耐蚀性,并且具有消除表面显微裂纹以及良好的脱模性能,从根本上克服了电火花加工表面粗糙度不佳,性能差的缺点。

微细电火花加工：微细电火花加工技术具有电极制造简单,电极与工件间宏观作用力小,可控性好等优点。因此,该技术已经成为微细机械制造领域的一个重要组成部分,在制造业中得到了广泛的应用。目前,在航空航天、微电子、医学、光学、模具等领域中有许多零件采用常规机床加工困难,甚至无法加工,特别是对狭小空间内的加工和微细孔加工等,如采用微小型电火花加工装置加工则会取得令人满意的效果。微小型电火花加工装置已经成为整个微型机械制造领域一个非常重要的研究方向,受到广泛重视。据统计,微细电火花加工,在电火花加工中所占的比重正逐年增加。未来,提高运动精度、响应速度,减小装置的尺寸,增强可靠性是微细电火花加工的发展方向。

陶瓷等非导电材料的加工：基于工作液(如煤油)在火花放电时的碳化导电现象,在非导电陶瓷(工件)端装有导电的辅助电极,这样在工具电极与辅助电极间就会产生通常的火花放电,进而使非导电陶瓷材料得以蚀除。将这一技术与混粉工作液相结合,加工表面质量明显提高。总体来看,近年来,电火花加工已逐步用于聚晶金刚石、立方氮化硼和工程陶瓷等弱导电或非导电超硬材料的加工。

电火花铣削加工技术：电火花铣削加工技术的出现被称为是电火花加工技术发展史上的重要里程碑。电火花铣削省去了成形电极的设计与制造过程,大大地简化了电火花加工的工艺流程,提高了电火花加工对多变市场的快速反应能力。由于电火花铣削加工中采用简单形状电极在数控系统控制下进行走刀加工,所以将大大提高复杂型腔的加工稳定性和加工质量。在传统电火花成形加工中,随着加工面积的增大及电容效应的影响,很难获得好的表面质量,而在采用简单形状电极的电火花铣削加工中,则可在保持相对较小加工面积的

状态下进行加工,可以有效地减小电容效应的影响,获得更好的表面质量。而且在电火花铣削过程中,可有效解决由于采用复杂形状成形电极而造成的电极损耗不均匀和加工间隙中工作液流场不稳定等问题,并大大地简化了电极损耗的补偿策略。同时在电火花铣削加工过程中,电极高速旋转以及相对放电位置的不断改变都可以有效地改善放电条件,避免电弧放电和短路现象的产生。电火花铣削加工技术的出现,给电火花成形加工提供了崭新思路,使飞速发展的 CAD/CAM 技术、柔性制造技术、网络制造技术等现代技术能更好地融入电火花加工中。

3.3 电解加工

电解加工技术是当前电化学加工领域中最活跃也是最热点的研究方向,该技术延续了 20 世纪 90 年代以来的良好发展势头,工艺水平和设备性能均得到了稳步发展,应用领域进一步扩展。但电解加工在很多方面还需要进一步发展和提高,如过程监测和控制、工具设计、电解液处理、加工精度的改善和设备的自动化程度等。电解加工间隙状态非常复杂,涉及电化学、电场、流场等多种因素的交互影响,因而使过程监测和控制非常困难。

3.3.1 电解加工的基本原理与特点

1. 电解加工的基本原理

电解加工是一种利用金属阳极电化学溶解原理来去除材料的制造技术。从加工机理上看,工件阳极上的金属原子在加工过程中不断地失去电子成为离子,然后从工件上溶解,其材料的减少过程,是以离子的形式进行。这种微离子去除方式使电解加工具有微细加工能力。又因为电解加工过程中工具电极和工件不接触,具有加工材料范围广泛,不受材料强度、硬度、韧性的影响,工件表面无加工应力、无变形以及热影响区、无工具电极损耗、加工表面质量好等一系列独特优点。

以叶片加工为例,常采用如图 3-4 所示的双面进给方式,两个阴极工具分别从叶片两侧以同样的进给速度相向(呈一角度)而行,加工出叶盆和叶背。对这种加工方式建模,进而实现间隙预测或阴极设计,具有重要的实用意义,但由于复杂的三维型面变化和叶片进、排气边急剧改变的曲率,使这一问题变得非常困难。

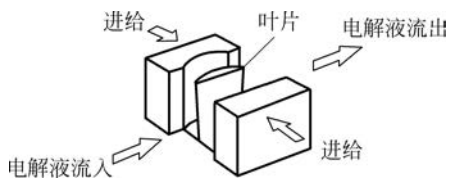


图 3-4 叶片电解加工

从图 3-4 中也不难发现,实际的阴极设计不仅要考虑工具形状,还要兼顾电解液流道、工具绝缘等问题。脉冲电流电解加工采用脉冲电流代替传统的连续直流。脉冲电解加工系统基本构成如图 3-5 所示。理论、试验研究和工业实践都已表明,脉冲电解加工可显著地改进电解加工过程。

在脉冲电解加工中,电解液的间断、周期性的更新,使间隙中的电解产物(阳极去除下来的金属、阴极析出的氢气、产生的热量)得到及时排除,因而其可以工作在比传统直流更高的电流密度和更小的加工间隙下。高电流密度可以提高表面加工质量,而小间隙可以显著改善加工精度,另外脉冲加工提供了更多的可调参数,为过程控制提供了便利。

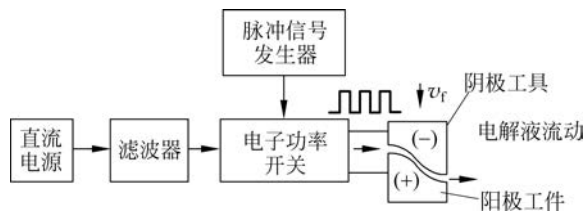
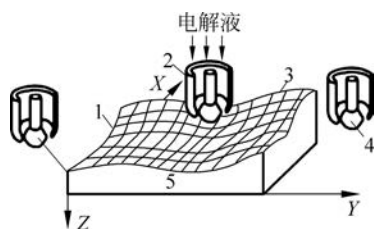


图 3-5 脉冲电解加工系统示意框图

使用短脉冲电流有利于加工过程的稳定,也便于采用更小的加工间隙(如小于 0.1mm)。由于加工精度随着加工间隙的减少而增加,因此短脉冲可以显著提高加工精度。另外,已发现在某些情况下,短脉冲电流可显著改善表面质量。在某些脉冲电解加工系统中,工具采取往复运动方式。在脉间的时候工具电极回退,以加强电解液冲刷和产物排出的效果;在脉冲间隔时,采用零位对刀方式进行加工间隙的检测,然后调整间隙到所需要的值。这种周期往复运动改善了加工的稳定性和保证了加工过程的重复性,提高了加工精度。其缺点是增加了系统的复杂性和降低了加工速度。电解加工研究中的一个重要课题是探索一种实用、有效的间隙在线检测方式。

脉冲电解加工相对低的加工速度和较大的投资限制了它更广泛的应用,因而需进一步深入研究脉冲电解加工的机理及设备改进。如前所述,工具电极的修整过程费时费工,因此电解加工一般只用于中、大批量生产,如发动机叶片。为了简化工具设计,减少生产准备时间,从而拓宽电解加工在小批量甚至单件生产中的应用,近些年来发展了采用简单形状电极的数控电解加工。数控电解加工采用与数控铣相仿的工作方式,使用简单形状电极进行多维运动,加工出所需工件形状,如图 3-6 所示。数控电解加工集成了电解加工的无工具损耗、不受材料硬度影响的优点和数控加工的柔性、自动化等优点。由于不需针对每一种新零件制造专用电极,因此可显著缩短生产准备时间。另外,由于实际加工面积大为减小,因此可用小电源加工大零件,降低对电源容量的要求,其缺点是以显著降低加工速度为代价的。



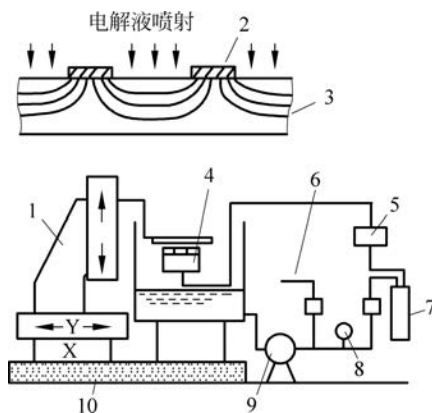
1—工具轨迹; 2—阴极工具; 3—加工表面; 4—加工结束位置; 5—工件。

图 3-6 数控电解加工示意图

在数控电解加工中,电极的几何形状和结构显著地影响着电解液流动、电场分布和间隙分布。柱状电极、球头电极、片状电极和锥状电极各具特色,如柱状电极或片状电极的加工面积较大,所以加工速度较快,球头电极适应性广,具有更大的柔性。

在电解加工中,材料去除是以离子溶解的形式进行的。这种微去除方式使电解加工具有微细加工的可能。电解加工概念已被成功地应用在电子工业中微小零件的电化学蚀刻加工中。与传统化学蚀刻相比,电化学法更容易控制和维护,对环境的影响也小得多。电化学

蚀刻可分为有遮蔽蚀刻和无遮蔽蚀刻。如图 3-7 所示,采用遮蔽电解蚀刻方式进行电解液加工,常用光敏材料在待加工材料上制成特定图案的遮蔽层,未被保护的材料在电解作用下逐渐腐蚀到所需要的深度。这种工艺已应用于高速打印机打印带、印制电路板等电子产品的制造。



1—XYZ 工作台；2—光敏材料；3—金属板材（阳极）；4—阴极；5—流量计；
6—阀门；7—过滤器；8—压力表；9—泵；10—底座。

图 3-7 单侧电化学蚀刻

无遮蔽电化学微蚀刻需要去除过程具有高度的选择性,常常用微细电解液射流来实现这一目的。采用微电解液流蚀刻在滚动轴承上加工出微小储油坑,如图 3-8 所示。在加工中,电解液流不仅限定了加工范围,而且还具有排除产物和清除钝化膜的作用。这项技术加工出的微坑光滑,无内应力、微裂纹等缺陷,比放电加工和激光加工的工艺效果更好。采用较大的加工间隙是电解加工精度受到限制的重要因素之一。如果加工间隙能大幅度减小,加工精度就会显著提高,利用电解进行微细加工的可能性也将增大。通过降低加工电压和电解液浓度,可以将加工间隙控制在 $10\mu\text{m}$ 以下。采用微动进给和金属微管电极,在厚度为 0.2mm 的镍板上可加工出 0.17mm 的小孔。

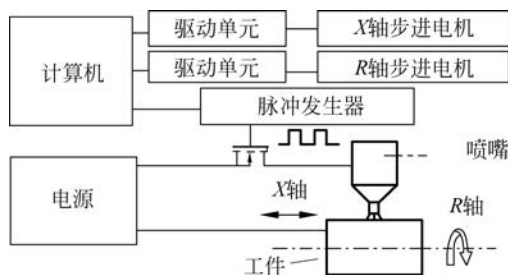


图 3-8 微细电解液射流喷射加工

2. 电解加工的特点和发展趋势

电解加工具有无工具损耗、与材料硬度无关、生产率高、表面质量好、可加工三维复杂形状等优势,它已成为航空航天制造业中一种关键技术,被广泛地应用在发动机叶片等零部件