

高等学校教材

电子设备制造工艺

陈冠方 主编

电子科技大学出版社

内 容 简 介

本教材广泛地介绍了电子设备的各种制造加工工艺,内容包括:特种加工,胶粘,塑料零件的成型与装饰,表面处理,天线工艺,微波元件工艺,印制电路板的加工工艺,电子组装及精冲等。书中每章均附有复习思考题,以利读者复习巩固。

本书为高等院校工科专业教材,亦可供从事电子机械、电子设备结构、精密机械以及其它机械工作的工程技术人员参考。

高 等 学 校 教 材

电 子 设 备 制 造 工 艺

陈冠方 主编

*

电子科技大学出版社出版

(中国成都建设北路二段四号)

电子科技大学出版社印刷厂印刷

四川省新华书店发行

*

开本 787×1092 1/16 印张 14.375 字数 350 千字

版次 1990 年 11 月第一版 印次 1990 年 11 月第一次印刷

印数 1—2500 册

中国标准书号 ISBN 7-81016-210-9/TH·10

(15452·94) 定价: 5.10 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二至一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社、天津科学技术出版社和电子科技大学出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部
电子类教材办公室

前 言

本教材是根据全国高等学校工科电子机械教材编审委员会审定的《电子设备制造工艺》编写要求编写而成的。在电子机械教材编审委员会召开的教材评选会议上评定中标，并推荐出版。

本教材的教学时数为50学时左右。使用本教材前，读者应学完技术基础课。本课程宜安排在生产实习前进行。有些内容可在下厂实习和现场教学时进行。

该教材由桂林电子工业学院陈冠方主编，电子科技大学贾昌晔主审。第一章由伍世荣编写，第三、四、七章由曲元隆编写，第二、五、六、八、九章由陈冠方编写。由于编者水平有限，书中缺点错误在所难免，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 特种加工	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 电火花加工	(2)
第三节 超声波加工	(12)
第四节 电解加工	(18)
第五节 激光加工	(24)
第六节 其它特种加工	(29)
第二章 胶粘	(38)
第一节 概论	(38)
第二节 几种胶粘剂简介	(43)
第三节 胶粘剂的选用	(56)
第四节 粘接接头设计	(62)
第五节 粘接工艺	(65)
第六节 粘接的应用	(73)
第三章 塑料零件的成型与装饰	(77)
第一节 塑料的工艺性能	(77)
第二节 塑料零件的成型与加工	(77)
第三节 塑料零件的结构设计	(84)
第四节 塑料零件的装饰	(92)
第四章 表面处理	(96)
第一节 金属的电镀	(96)
第二节 铝及铝合金的表面处理	(102)
第三节 钢铁的氧化和磷化处理	(105)
第四节 涂装工艺	(109)
第五章 天线制造工艺	(118)
第一节 反射面的制造工艺	(118)
第二节 型材的成形	(126)
第三节 主力骨架的制造工艺及反射面的精度检测简述	(128)
第六章 微波元件加工工艺	(130)
第一节 概述	(130)
第二节 波导元件加工工艺	(131)
第三节 腔体加工工艺	(138)
第四节 银钎焊工艺	(141)

第五节 波纹喇叭的加工	(142)
第七章 印制电路板的加工工艺	(146)
第一节 概述	(146)
第二节 基板材料	(151)
第三节 照相底版的制作	(154)
第四节 图象转移	(156)
第五节 化学镀和电镀	(162)
第六节 蚀刻和机械加工	(166)
第七节 可焊性涂覆和处理	(171)
第八节 多层印制电路板加工工艺	(174)
第八章 电子组装	(178)
第一节 概 述	(178)
第二节 互连技术	(179)
第三节 电视机、收音机、收录机装联	(187)
第四节 微电子组装技术	(189)
第五节 表面安装技术(SMT)	(195)
第九章 精 冲	(200)
第一节 精冲的基本概念	(200)
第二节 精冲的类型及其特征	(202)
第三节 齿圈压板精冲工艺水平及精冲机理	(204)
第四节 精冲零件的工艺性	(206)
第五节 精冲零件的质量	(212)
第六节 精冲模具	(216)
参考文献	(224)

第一章 特种加工

第一节 概述

一、特种加工的产生与发展

传统的机械加工方法,如车、铣、刨、钳、磨等,已有几百年的历史,它对社会生产力的发展起了极大的作用。由于这些方法只需要用强度、硬度比工件材料更高的工具,并施加足够外力来克服工件内部的分子间的结合力,从而把工件多余材料切除下来,以达到所要求的尺寸、形状和表面质量,所以它是一种应用广泛的有效加工方法,今后仍将是一种重要的加工方法。

但是,二十世纪以来,科学技术发展到一个新的阶段。特别是进入四十年代以后,生产和科学技术的发展更加迅速,很多工业部门,尤其是国防工业部门,要求尖端科学技术产品向高精度、高速度、高温、高压、大功率和小型化等方向发展。它们所使用的材料愈来愈难加工,零件形状愈来愈复杂,加工精度、表面质量和某些特殊要求也愈来愈高。例如,对硬质合金、钛合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、金刚石、宝石、陶瓷、锗、硅等各种高硬度、高强度、高韧性、高脆性的金属和非金属材料的加工,对各种模具上特形断面的型孔、喷油嘴、栅网、喷丝头上的小孔、窄缝等的加工;对加工精度和表面质量要求很高的细长零件、薄壁零件、弹性元件等低刚度零件的加工等等。

要解决上述问题,仅仅依靠传统的机械加工方法就很困难,有时甚至根本无法实现。为此,近几十年来,人们相继探索研究了新的加工方法,例如电火花加工、电解加工、激光加工、超声波加工、电子束加工和离子束加工等。特种加工就是在这种情况下产生和发展起来的。

二、特种加工的含义和特点

如上所述的电火花加工、电解加工、激光加工、超声波加工等加工方法,它们都不使用普通刀具来切削金属,而是直接利用电能、化学能、热能、光能、声能等来对工件进行加工,这类加工方法统称为特种加工,也叫非传统加工方法。

这类加工方法与传统的机械加工方法相比较,有以下特点:

1. 加工所用工具的硬度通常低于被加工材料的硬度。有些特种加工方法甚至直接利用光束、电子束、离子束等作为工具。
2. 主要不是依靠常规的机械力和机械能,而是直接利用电能、化学能、热能、光能以及各种微粒机械能来去除工件多余材料。
3. 在加工过程中,实体工具与工件之间不直接接触,无显著切削力存在。

三、特种加工的分类

目前,特种加工一般按照直接用于去除工件材料的能源种类和作用原理分为四大类,

特种加工— { 特种机械能——超声波加工、磨料流加工等
热能——电火花加工、激光加工、电子束加工、离子束加工等
电化学能——电解加工等
化学能——化学加工等

常用的几种主要特种加工方法的综合比较如表 1-1 所示。

表 1-1 各种常用特种加工方法比较

加工方法	可加工材料	金属 切除率 (mm ³ /min)	公差 (μm)	表面 粗糙度 R _a (μm)	表面损伤深度 (μm)	工具 耗损比	基本 投资	适用范围
电火花加工	各种导电材料	800	15	0.2~12.5	125	6.6	中等	各种尺寸、形状的孔类加工，模具加工，金属表面强化、刻字及刀具、样板切割，零件加工等。
电解加工		1500	50	0.1~2.5	5.0	0	很高	各种异形孔、枪炮膛线、模具、抛光去毛刺等。
激光加工	任何材料	0.1	25	0.4~1.25	125	—	高	小孔、窄缝的加工、切割、焊接、表面处理等。
电子束加工		1.6	25	0.4~2.5	250	—	高	加工微孔、窄缝、刻蚀、曝光、焊接等。
离子束加工		很低	0.01	0.01	—	—	很高	超精度、超微量加工、抛光、刻蚀、掺杂、镀覆等。
超声波加工		300	7.5	0.2~0.5	25	10	低	加工硬脆材料型孔、型腔、切割、焊接、清洗等。
磨料流加工	硬脆材料	0.80	50	0.5~1.2	2.5	—	很低	去毛刺、抛光、切割硬脆材料等。
化学加工	可蚀除材料	15.0	50	0.4~2.5	50	—	中等	表面去除金属、蚀刻、腹板减薄等。

第二节 电火花加工

电火花加工是在二十世纪四十年代初产生和发展起来的一种新工艺、新技术。它是利用带电的两极(工具和工件)间脉冲放电时产生的电腐蚀现象，对工件材料进行尺寸加工的一种方法，因此也叫“放电加工”或“电腐加工”。

一、电火花加工的原理与机理

(一) 电火花加工原理及设备组成

电火花加工的原理是基于电极间产生脉冲性放电时的电腐蚀现象，以此来去除金属材料，达到其加工目的。它之所以能把金属材料腐蚀下来，是因为电火花放电时，火花通道中产生大量的热，达到很高的温度，促使电极表面的局部金属熔化、气化而被蚀除，从而形成放电凹坑的结果。

根据电火花加工原理，电火花加工设备应包括如图 1-1 所示的四个部分；

1. 脉冲电源

电火花加工用的脉冲电源，亦即脉冲发生器，是把普通的交流电或直流电转变成频率较高的脉冲电流，以供给电极放电间隙所需要的电能来腐蚀金属材料的能源系统。它对电火花加工的加工速度、加工精度和表面质量、加工过程的稳定性和工具的损耗等技术经济指标都有较大的影响。

2. 自动进给调节系统

自动进给调节系统是自动调节工具的进给速度，以维持最佳极间间隙的装置。因加工中随着工件和工具不断被蚀除，放电间隙逐渐增大，因此必须使工具电极不断向工件进给，以保持一适当间隙，提高脉冲利用率，有效地防止拉弧烧伤，使加工稳定，达到较好的工艺指标。

3. 机床本体

电火花加工机床本体是用于支承和固定工件、电极，完成必要的辅助运动，调整工件与工具的相对位置。

4. 工作液及其循环过滤系统

工作液的主要作用是：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；压缩放电通道；帮助电蚀产物的抛出与排除以及对工具和工件进行冷却。在电火花成型加工中常用油类(如机油、煤油)作为工作液；在电火花线切割加工中，常用乳化液和去离子水作为工作液。

工作液循环过滤系统包括工作液(煤油)箱、电动机、泵、过滤装置、工作液槽、油杯、管道、阀门以及测量仪表等。

(二) 电火花加工机理

电火花加工机理，亦即电火花腐蚀的微观过程。了解这一微观过程有助于掌握电火花加工的基本规律，以及对机床设备、脉冲电源和进给系统等提出合理要求。

但是，由于放电时间极短，间隙很小，这一微观过程相当复杂。根据对大量实验资料的分析，初步认为电火花腐蚀的微观过程是电磁学、热力学、流体动力学等综合作用的过程。这一过程大致可分为以下三个连续的阶段：

1. 电离放电

电极的微观表面是凹凸不平的，两个电极靠得最近的尖端处的电场强度最大，其间液体介质最先被电离，分解成正离子和电子，形成放电通道。在电场力作用下，通道内的电子高速奔向阳极，正离子奔向阴极，形成火花放电，如图1-2(a)所示。

2. 能量转换

火花放电时，放电间隙的电阻由原来的绝缘状态降低到几欧甚至几分之一欧，所通过的电流亦相应地由零增加到相当大的数值，而放电间隙电压由原来的击穿电压降到20V左右的

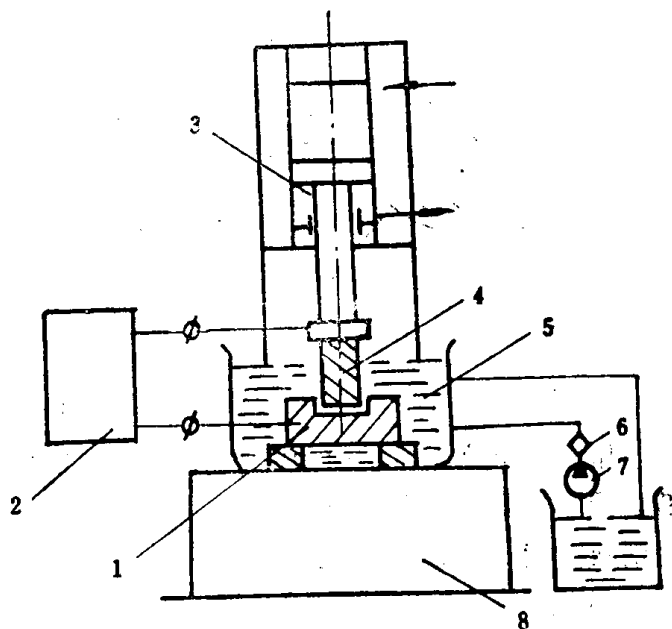


图 1-1 电火花加工原理示意图

1—工件；2—脉冲电源；3—自动进给调节装置；4—工具；
5—工作液；6—过滤器；7—工作液泵；8—机床本身。

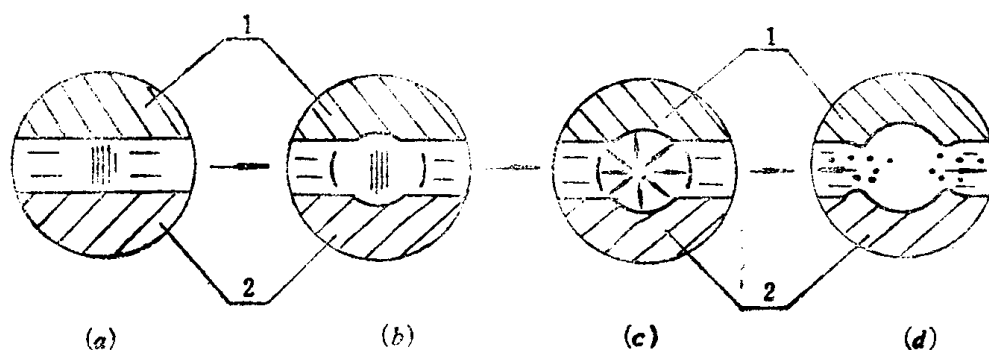


图 1-2 电火花加工过程

1—工具电极； 2—工件。

维持电压。由于放电通道中的电子、离子受到放电时磁场力和周围液体介质的压缩，所以通道截面很小，电流密度很大，达 $10^4 \sim 10^7 \text{ A/cm}^2$ ；通道内高速运动的电子、离子及中性原子发生剧烈碰撞产生大量的热。同时阳极表面受到电子的高速碰撞，阴极表面受到离子碰击，在放电点表面也会产生大量的热，整个通道形成一个瞬时热源，可达 10000°C 左右的高温。大部分电能转变为热能，如图 1-2(b) 所示。

3. 电蚀产物的抛出与消电离

在瞬时热源的作用下，通道内局部电极表面被加热到熔点、沸点以上的温度，使局部金属材料熔化和气化蒸发。同时通道周围的工作液一部分气化为蒸气，另一部分被瞬时高温分解为游离碳、氢和碳氢化合物等气体而析出。由于上述过程非常短促 ($10^{-7} \sim 10^{-4}$ 秒)，因此金属的熔化、气化以及工作液的分解具有爆炸的性质，而发出劈啪声，爆炸力把熔化和气化了了的金属抛离电极表面，向四周飞溅，绝大部分被抛入工作液中，由于表面张力和内聚力作用而凝成具有最小表面积的球状颗粒。在电极金属表面则形成一个四周微凸的微小圆坑。一部分被抛出的金属和工作液析出物会飞溅到对面的电极表面上，从而吸附、镀覆在其表面上，产生所谓“覆盖效应”，如图 1-2(c) 所示。

一次放电结束之后，由于电蚀产物迅速排出，通道中的带电粒子复合成中性粒子，使间隙迅速消电离，恢复绝缘状态，以待下一次脉冲到来，重复上述的放电过程。如图 1-2(d) 所示。

上述电蚀微观过程是一个连续的极短时间内完成的过程，参与这一过程的因素很多，并且其影响也很复杂。因此目前人们对电火花加工机理的认识还很不够，有待于进一步深入研究。

二、电火花加工的基本规律

电火花加工的主要工艺指标有加工速度、电极损耗、加工精度和表面质量等。影响工艺指标的因素很多。

(一) 加工速度

在电火花加工中，单位时间内工件的蚀除量叫做加工速度，亦即生产率，通常以 g/min 或 mm^3/min 为单位来表示，在电火花线切割时，采用单位时间内所切割的面积来表示，单位为 mm^2/min 。

因为电火花加工主要依靠电能转变为热能，将金属材料熔化和气化而蚀除下来，因此单个脉冲的能量愈大，脉冲频率愈高，则单位时间内产生的热量就愈多，加工速度也就愈高，

即,

$$V = KWf \quad (1-1)$$

式中: V ——加工速度; W ——单个脉冲能量; f ——脉冲频率; K ——与工件及工具电极材料、加工极性、脉冲波形、工作液等有关的系数。

由此看出, 影响加工速度的主要因素有脉冲频率、单个脉冲能量以及系数 K 。然而它们之间并非是独立的, 而是相互制约的。

提高脉冲频率, 一方面靠缩小脉冲停歇时间, 另一方面靠压缩脉冲宽度, 它是提高加工速度的有效途径。近年来高频脉冲电源已有很大发展, 脉冲频率可达 100kHz 以上。但提高脉冲频率是有限制的, 因为频率过高, 脉冲停歇时间过短, 会使加工区工作液来不及消电离、排除电蚀产物及气泡, 无法恢复其介电性能, 以致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。

增加单个脉冲能量主要靠加大脉冲电流和增加脉冲宽度。单个脉冲能量的增加可以提高加工速度, 但同时会使表面粗糙度变坏和降低加工精度, 因此一般只用于粗加工和半精加工の場合。

提高工艺系数 K 是增加生产率的有效途径。影响系数 K 的因素很多, 如加工极性、加工面积、工件与工具电极的材料和热力学常数、工作液及其循环方式等。

1. 加工极性

在其它条件相同的情况下, 即使是同一种材料的一对电极, 其正极和负极的蚀除速度是不一样的, 这种现象, 称为“极性效应”。当脉冲宽度较小时 ($<30\mu s$), 正极的蚀除速度比负极大; 脉冲宽度较大 ($>300\mu s$) 时, 通常负极的蚀除速度大于正极。其原因在于脉冲宽度不同时, 放电能量在两极上分配的比例不同。脉冲宽度较小时, 由于电子的质量和惯性比正离子小, 故在同样电场力作用下, 起动较快, 容易获得加速度和速度, 迅速奔向正极, 轰击正极表面; 而正离子质量和惯性较大, 起动慢, 获得的加速度和速度低, 到达阴极时, 对阴极表面轰击作用不如电子对正极表面撞击剧烈, 这时分配到正极的能量比负极多, 所以正极蚀除速度比负极高。但在脉冲宽度较大时, 正离子已有充分时间加速, 速度增大, 且其质量大, 故对负极表面轰击作用明显增强, 这时分配在负极上的能量比正极大, 所以负极蚀除速度比正极大。根据上述的极性效应现象, 为了使在加工中工件蚀除速度最大, 工具的蚀除速度最小, 因此, 当用较大脉冲宽度进行粗加工时, 宜把工件接负极, 工具接正极, 即用负极性加工; 反之, 用较小脉冲宽度进行精加工时, 工件接正极, 工具接负极, 即用正极性加工。

2. 加工面积

蚀除速度也受到加工面积的影响, 如果加工面积过小, 放电容易集中, 电蚀物排除不畅, 同时会产生气体排除液体现象, 造成放电在气体中进行, 使加工速度显著降低。因此, 对应于不同的电流峰值, 都存在有一个最小的临界面积。当加工面积小于这一临界面积时, 加工速度便大大下降; 当加工面积较大时, 它对蚀除速度影响不大。

3. 电极材料的热力学常数

由于电火花加工是一种将电能转变为热能的加工方法, 因此电极材料的热力学常数必然会影响到蚀除速度。其中影响最大的是熔点、沸点、导热系数, 其次是比热、熔解潜热、气化潜热等。一般说来, 金属材料的熔点、沸点愈高, 比热、气化潜热、熔解潜热愈大, 则

用于金属升温、熔化、气化所需要的热量就愈大，加工速度就低。此外，对于导热系数很大的工件材料，虽然其熔点、沸点、熔解潜热和气化潜热不高，但因热传导性好，热量散失快，其加工速度也降低。

4. 工作液

工作液对于加工速度也有较大影响。目前多采用石油产物作工作液，如机油、煤油等。机油粘度大，有利于压缩放电通道，使能量集中，加强蚀除效果。但放电产物的碳黑多，排屑不利，多用于粗加工。煤油粘度低，排屑条件好，广泛用于精加工。含碳氢化合物的工作液，在电火花加工时，容易分解出碳黑反粘到工件和工具电极表面上，形成覆盖效应，对蚀除速度起减缓作用。此外，在工作液中加入各种活化剂，对蚀除速度也有一定的影响。利用水作工作液是一个方向，它不含碳、易流动、散热快、不易燃、无味无臭，但普通的水是弱电解液，会产生离子导电过程，这是不利的。

电火花成型加工的加工速度，粗加工(加工表面粗糙度 $R_a 10\sim 20\mu\text{m}$)时可达 $200\sim 1000\text{mm}^3/\text{min}$ ，半精加工($R_a 2.5\sim 10\mu\text{m}$)时显著降低到 $20\sim 100\text{mm}^3/\text{min}$ ，精加工($R_a 0.32\sim 2.5\mu\text{m}$)时一般都在 $10\text{mm}^3/\text{min}$ 以下。随着表面粗糙度的改善，加工速度显著下降。电火花线切割的加工速度，当加工表面粗糙度在 $R_a 1.25\sim 5\mu\text{m}$ 时，一般为 $20\sim 80\text{mm}^2/\text{min}$ 。

(二) 工具相对损耗

与加工速度相似，单位时间内工具的电蚀量称为损耗速度，它们是一个问题的两个方面。但在生产实践中用来衡量工具电极是否耐损耗，不只是看工具损耗速度，还要看同时能达到的加工速度，就是每蚀除一单位金属量时，工具相应损耗是多少，此即称为工具的相对损耗。即：

$$\theta = \frac{V_T}{V_W} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中： θ ——工具相对损耗， V_T ——损耗速度， V_W ——加工速度。

在电火花加工中，降低工具相对损耗具有重大意义，它一直是人们努力追求的目标。为此，必须要合理选用电极材料、加工极性、电参数和工作液，以及利用各种有关效应等。

目前在电火花成型加工中，已能达到相对损耗小于1%的低损耗加工，在电火花线切割中，由于使用移动的长金属丝作为电极，单位长度金属丝的损耗较少，对加工精度影响小，特别在低速走丝线切割中，电极丝一次使用，电极损耗对加工精度影响更小。

(三) 加工精度

电火花加工精度是机床精度、电极制造精度、夹具安装定位精度以及加工规准(如脉冲电流、脉冲宽度等)、工作液情况、排屑条件等各种因素的综合作用结果。其中，与电火花加工工艺有关的主要因素有加工间隙以及工具电极的损耗。

严格地说，影响加工精度的并不是加工间隙本身的大小，而是加工间隙的一致性和变动量。如果加工过程中放电间隙能保持不变，则可以通过修整工具电极的尺寸或其他方法来对间隙进行补偿，获得较高的加工精度。但加工间隙小，加工规准弱，变动范围也小，间隙变化也小。因此精加工时，单边间隙通常为 $0.01\sim 0.1\text{mm}$ ，粗加工时可达 0.5mm 以上。

工具电极的损耗对尺寸精度和形状精度都有影响。电火花穿孔和型腔加工，由于电极损耗其尺寸变小，使工件沿加工深度方向出现斜度，同时电蚀产物等在已加工面与电极间的存在，也会产生二次放电，加大电极损耗和工件斜度。此外，因放电间隙的等距性和工具损耗的影

响, 工具尖角只能加工出圆弧, 如图 1-3 所示。

目前, 电火花穿孔加工精度达 $0.01 \sim 0.05 \text{mm}$, 型腔加工达 0.1mm 左右, 线切割可达 $0.005 \sim 0.01 \text{mm}$ 。

(四) 表面质量

电火花加工的表面质量主要包括表面粗糙度和表面层的化学物理机械性能两部分。

1. 表面粗糙度

影响表面粗糙度的主要因素是单个脉冲能量的大小, 亦即脉冲宽度和电流峰值。因为脉冲能量大, 每次脉冲放电的蚀除量也大, 放电形成的凹坑既大又深, 从而使表面粗糙度恶化。此外, 工件材料对加工表面粗糙度也有影响, 熔点高的材料(如硬质合金), 在相同能量下加工的表面粗糙度要比熔点低的材料(如钢)小。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表面非常光滑, 因此石墨电极加工工件的表面粗糙度较差。

电火花加工的表面与机械加工的表面不同, 它是由无数的小坑和光滑的硬凸边所组成的, 特别有利于保存润滑油; 而机械加工表面则存在着切削或磨削的刀痕, 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, 电火花加工表面的润滑性能和耐磨性能均比机械加工表面好。但应当指出, 电火花加工的表面粗糙度与加工速度之间存在着很大的矛盾, 例如从 $R_a 2.5 \mu\text{m}$ 提高到 $R_a 1.25 \mu\text{m}$, 加工速度要下降十多倍。

目前, 电火花成型、线切割的加工表面粗糙度为 $R_a 0.32 \sim 1.25 \mu\text{m}$, 电火花穿孔为 $R_a 0.04 \sim 0.63 \mu\text{m}$ 。因此要求更好的表面粗糙度时, 一般在电火花加工到 $R_a 0.63 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 之后, 再采用其他精加工方法来达到才比较经济。

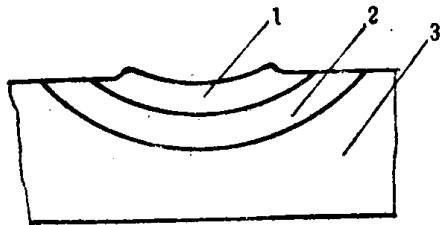


图 1-4 电火花加工钢试件典型横断面结构

1-熔化层; 2-热影响层;
3-金属本体。

2. 表面层化学物理机械性能

在电火花加工中, 金属的切除基本上是由于高温现象而产生的, 局部温度可达 $800^\circ\text{C} \sim 1200^\circ\text{C}$ 。这个温度对已加工面的影响大小取决于工件的材料种类和加工条件。例如加工钢时, 其横截面通常出现如图 1-4 所示的三个区域。此外, 有时在表面上可以观察到微小显微裂纹。这在加工硬质合金时尤易出现。而显微裂纹的大小与材料的种类和电规准等有关。

(1) 显微硬度及耐磨性 表面层的显微硬度随工件在加工前的热处理状态和加工电规准不同而不同。未淬火钢加工后, 显微硬度和耐磨性都有较大提高, 淬火钢加工后有时硬度会降低。电火花线切割中, 加工区域有可能暴露在空气中, 含碳量较高的钢可能产生表面脱碳而使熔化层硬度大大降低。

(2) 残余应力 电火花加工表面存在着由于热作用而形成的残余应力, 而且通常为拉应力。其大小和分布主要和工件材料在加工前的热处理状态及加工时的脉冲能量有关。因此对表面质量要求高的工件, 应尽量采用较小的电规准进行加工。

(3) 耐疲劳强度 由于电火花加工表面存在着较大的拉应力, 还有可能存在显微裂纹, 因此其耐疲劳性能比机械加工表面低许多倍。加工后进行回火处理、喷丸处理等, 有助于降

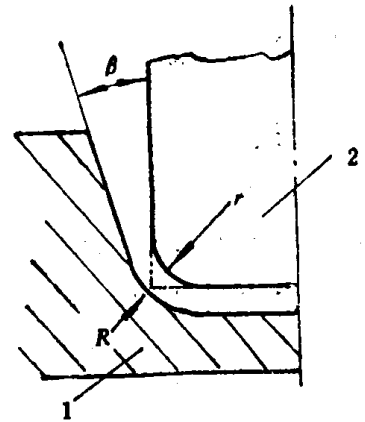


图 1-3 电火花加工时的斜度与圆角

1-工件; 2-工具。

低残余应力或改变应力性质，从而提高其耐疲劳性能。

三、电火花加工工艺应用

电火花加工的应用范围主要是成型加工和线切割加工，其他应用有电火花磨削、电火花强化、电火花刻字等等。随着生产的发展，其应用范围正不断扩大。

电火花成型加工一般分穿孔与型腔加工两类，前者指加工各种穿通的孔及槽，典型的应用是冲模加工，如各种粉末冶金模、拉丝模、挤压模等；后者是指加工各种形状的盲孔类内腔，典型应用是型腔模加工，如锻模、塑料模、胶木模等。

(一) 冲模电火花加工的工艺方法

冲模是生产中使用最多的一种模具，由于形状复杂、精度高，它的制造已成为生产上的关键技术之一。特别是凹模，一般的机械加工是很困难的，甚至是不可能的，而采用电火花加工则可以较好地解决这些问题。

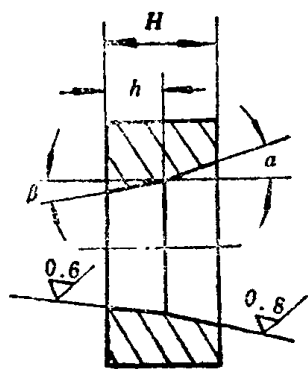


图1-5 凹模

如图1-5所示，凹模的材料一般为T10A、T8A、Cr12、GCr15等，其中Cr12采用较多。凹模的主要质量指标是尺寸精度，刃口高度 h ，刃口斜度和落料角 α 。对一副冲模来说，配合间隙是一个很重要的质量指标，加工中除用线切割外，达到配合间隙的方法主要有下面几种：

1. 直接配合法

这种加工方法既可把电极与冲头粘结或焊接在一起用成型磨同时磨出，加工完后再把它们分开，也可直接把冲头加长，用加长部分作电极，加工完后再切断。直接配合法，冲头与凹模的配合间隙即等于电火花放电间隙，如果要求配合间隙比放电间隙小或大，则要预先用浸蚀法把电极部分尺寸均匀缩小，或者在电极部位镀上一定厚度的铜层或锌层。这种加工方法的主要优点是间隙均匀，模具质量高，钳工工作量大，但对于直接加长冲头作电极来说，电极材料必须与冲头相同，而各种模具钢作电极时加工稳定性差，加工速度低。而选用合适的材料作电极精结或焊接到冲头上时，则不但增加了连接与拆除过程，而且由于磨削时冲头与电极材料不同而带来困难。

2. 冲头修配法

这种方法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，而留有余量，用经过电火花加工后的凹模来修配冲头。这种方法电极材料可合理选择，配合间隙大小均可由修配达到，但间隙不均匀，模具质量差，钳工工作量大。

3. 二次电极法

这种方法是将和冲头同一形状的工具电极磨削加工成型后作为一次电极，用电火花加工方式加工出凹模和二次电极，然后用二次电极加工出冲头，如图1-6所示。这种加工方法比较复杂，但合理调整火花间隙可得到极小间隙的精冲模具。收音管的云母片其上各孔位置精度很高，通常采用高精度冲模来加工，而此冲模上各异形孔用二次电极法加工是很有效的。

(二) 型腔模电火花加工工艺方法

型腔模加工虽与冲模加工同属于成型加工，但因它属盲孔类加工，所以电极损耗无法靠进给来补偿，同时加工面积变化大，工作液循环困难，排屑条件差，金属蚀除量大。其基本

加工方法有:

1. 单电极平动法

这种工艺方法在型腔模电火花加工中使用最广。加工开始时, 通常电极先不平动, 对工件进行高速低耗粗加工, 使型腔基本成型, 然后电极再平动, 使电极横截面上每一点都作相同圆周运动, 并且按粗、中、精的顺序改变加工规准, 同时依次加大平动量, 完成整个型腔的加工。这种方法的特点是只要一个电极一次安装便可达到 $\pm 0.05\text{mm}$ 的加工精度, 但难于获得高精度的型腔模, 特别是难于加工出清棱清角的型腔。此外, 电极在粗加工时因材料热疲劳容易引起表面龟裂, 影响型腔表面粗糙度。

2. 多电极更换法

这种工艺方法采用多个电极依次更换加工同一个型腔。各个电极在有效工作长度内的直壁和倾斜部分尺寸, 必须根据不同加工规准的加工间隙来确定, 每次加工必须把上次加工的放电痕迹去掉。它的主要特点是: 仿形精度高, 尤其适用于尖角、窄缝多的型腔模加工, 但需制作多个电极, 并对电极的重复制造精度和在机床上的重复定位精度要求很高。

3. 分解电极法

它是上两种方法的综合应用, 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。它的特点是主副型腔可采用不同的加工规准, 提高生产率, 改善加工表面质量, 简化电极制造, 便于电极修整, 但主副型腔间精确定位较难解决。

(三) 工具电极

电火花成型加工的精度与电极精度有密切的关系。为了保证电极的精度, 在设计电极时必须合理选择电极材料, 决定其几何尺寸并考虑其加工工艺性等问题。

1. 材料

目前, 最常用的电极材料是石墨和紫铜。

石墨电极的电加工性能良好, 粗加工时损耗小, 硬度低, 易加工成形, 比重小, 电极较轻, 但脆性大, 易塌角, 加工表面粗糙度稍差。紫铜电极电加工稳定性好, 生产率高, 精加工损耗小, 加工表面粗糙度好, 不易崩缺塌角, 但比重大, 磨削困难, 价格较贵, 所以适用于截面形状尺寸小而复杂特别是带尖角精度高的型腔模。

此外, 生铁、钢和铜钨合金、铜银合金等在一定的场合下也有应用, 但前者加工稳定性较差, 损耗较大, 而后者价格昂贵且机械加工困难。

2. 几何尺寸

冲模加工时, 工具电极的相应尺寸为凹模尺寸与两倍加工间隙之差, 如图 1-7 所示。尺寸精度比凹模高一级, 一般不低于 IT7, 表面粗糙度 R_a 值比凹模小一半, 一般 R_a 应小于 $1.25\mu\text{m}$ 。并且, 直线度、平面度和平行度不大于 $0.01/100$ 。工具电极的长度应考虑到被加

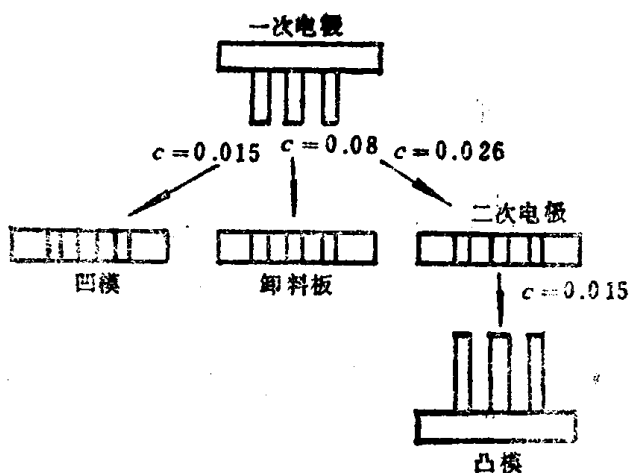


图 1-6 二次电极法的冲模加工(c —加工间隙)

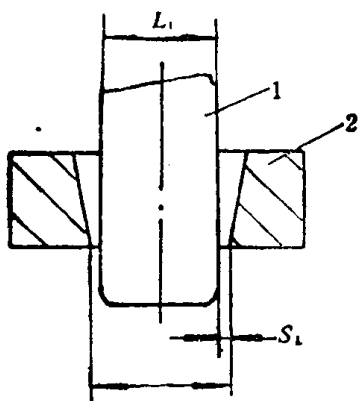


图 1-7 凹模的电火花加工
1—工具电极；2—工件。

工面的长度、夹头到加工面端部的距离、夹持部分长度及电极使用次数和损耗等。

型腔模加工时,若采用单电极平动加工法,电极尺寸可按下列原则决定:

(1)水平尺寸 按下式决定

$$a = A \pm K\delta \quad (1-3)$$

式中, a ——电极水平尺寸; A ——型腔水平尺寸; K ——与尺寸注法有关的系数。当型腔尺寸完全注在边界线上时取 $K=2$, 当尺寸线一端以中心线或非加工边界线为基准时取 $K=1$, 当尺寸线注在两中心线之间或为角度时取 $K=0$; δ ——平动头单边的偏心量、放电间隙及电极侧面单边损耗量之和。式中的正负号选择原则是: 若电极上尺寸是被包围尺寸, 取负, 否则取正。如图1-8所示, $r = R - \delta$, $a = A + 2\delta$ 。

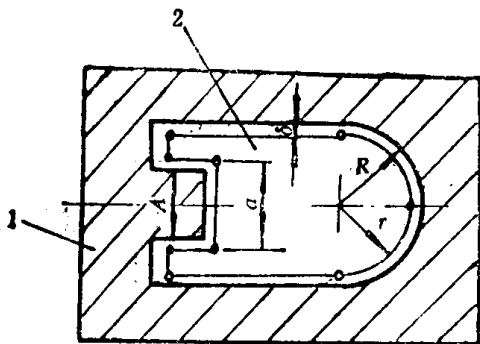


图 1-8 电极水平尺寸确定图
1—工件；2—工具电极。

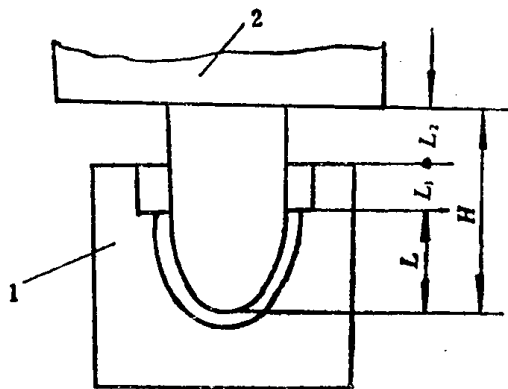


图 1-9 电极高度尺寸确定图
1—工件；2—电极。

(2)垂直尺寸 如图1-9所示, 除装夹部分外, 电极总高度可按下式计算,

$$H = L_1 + L_2 + L \quad (1-4)$$

式中, H ——电极总高度; L ——电极垂直有效加工尺寸; L_1 ——根据型腔情况, 电极需伸入型腔内加工时所需增加的电极高度; L_2 ——考虑加工终了时不发生电极固定板与模块相碰, 同一电极能多次重复使用等因素而增加的高度, 一般 $L_2 = 20 \sim 30 \text{ mm}$ 。

电极型面尺寸公差取相应的型腔尺寸公差的 $1/2 \sim 1/3$, 一般精度不低于 IT7, 电极型面的粗糙度 R_a 值比型腔面小一半, 通常 R_a 不大于 $0.63 \mu\text{m}$ 。

四、电火花线切割特点及其工艺应用

(一) 电火花线切割的特点

电火花线切割是在电火花加工的基础上发展起来的一项新工艺。其加工基本原理与电火花加工一样, 都是利用工具电极对工件材料进行脉冲放电而蚀除金属的。不同之处在于它不必制造成型电极, 而利用一根金属丝作为加工用电极, 与脉冲电源负极相接, 工件安装在工作台上, 与脉冲电源正极相接, 且随工作台按一定的轨迹运动, 切出所需要的工件形状, 如图1-10所示。其特点如下:

1. 不需要制造成型电极;

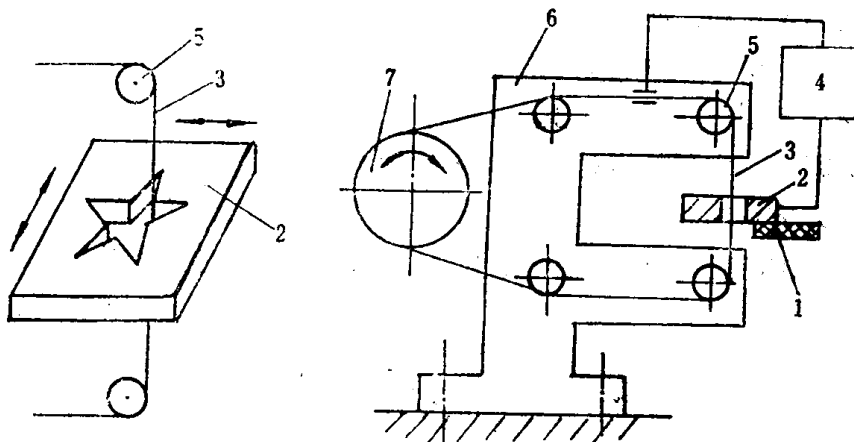


图 1-10 电火花线切割示意图

1—绝缘底板；2—工件；3—电极丝；4—脉冲电源；5—导向轮；6—支架；7—传动轮。

2. 工具电极丝损耗小；
3. 能加工精密细小、形状复杂的零件；
4. 便于实现自动控制和全自动化加工；
5. 加工周期短，成本低，适于试制产品的零件加工。

(二) 工艺应用

电火花线切割在各个工业部门和科研试验中都得到了广泛应用，并且愈来愈显示出它的重要作用。其应用范围主要包括：

1. 制造二维形状的各种复杂模具，如冲压模、挤压模、拉深模、塑料模等。由于不用成型电极，准备周期短，故在许多场合下它可取代电火花穿孔加工；
2. 加工微细孔、槽、窄缝等，如异形孔、喷丝板、射流元件、激光器件等的微孔窄缝，以及微型零件；
3. 加工试制品和多品种少批量的制品；
4. 加工电火花成型加工用的工具电极；
5. 加工成型刀具及样板。

由于电火花线切割的加工特点，在具体加工时应根据零件图纸进行必要的分析和审查，特别要注意到零件的内外尖角、表面粗糙度和工件材料及热处理。

如前所述，因线切割加工使用具有一定直径的线电极，再加上放电间隙，所以加工凹角得不到清角，该处必须由圆弧过渡，过渡圆弧半径 R_1 为

$$R_1 \geq R + \delta \quad (1-5)$$

式中： R ——电极丝半径； δ ——单边放电间隙。相应地在加工与此凹形相配的尖角时，其尖角处也应代之以过渡圆弧 R_2

$$R_2 = R_1 - \Delta \quad (1-6)$$

式中： R_1 ——凹形过渡圆弧半径； Δ ——冲头与凹形配合单边间隙。

因为线切割大都是在热处理后进行，并且线切割后仅进行钳工修整或直接使用，所以务必考虑切割后零件内应力重新分布而引起的变形。为此，零件的材料一般应选择锻造性好，淬透性高，热处理变形小的合金钢，如CrWMn、GCr15等。同时应正确选择加工方法和严格遵守热处理规范。