



全国机械类职业岗位
技能培训系列教材

电加工基本技能

李玉青 主编



**与生产岗位对接
提升技能**

全国机械类职业岗位技能培训系列教材

电加工 基本技能

主 编 李玉青
副主编 赵冬辉 刘欣欣
参 编 汪洪宇
主 审 肖 鹏

藏书章



机械工业出版社

本书是根据国家劳动和社会保障部制定的《电切削工国家职业标准》中级技术工人等级标准编写的,全面介绍了电火花成形及数控线切割的基本技能,主要内容包括电火花成形加工基础、电火花加工设备与操作、数控线切割加工基础、数控线切割手工编程、TurboCAD 绘图式计算机自动编程、数控线切割设备与操作和数控线切割加工实训。全书注重实用性,强调动手操作。

本书可作为中等职业学校、技校及企业培训等模具制造技术相关专业的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

电加工基本技能/李玉青主编. —北京:机械工业出版社, 2012. 6
全国机械类职业岗位技能培训系列教材
ISBN 978-7-111-38362-8

I. ①电… II. ①李… III. ①电火花加工—技术培训—教材
IV. ①TG661

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 096042 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:汪光灿 责任编辑:汪光灿 王莉娜

版式设计:霍永明 责任校对:肖琳

封面设计:赵颖喆 责任印制:乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2012 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 9.75 印张 · 236 千字

0001-3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-38362-8

定价: 22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066 门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010)88379649

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前

言

中等职业学校担负着培养初、中级技能型人才和高素质劳动者的任务。目前,在我国工业技术发展的新形势下,模具制造技术发展迅猛,而数控电火花加工技术正是模具加工工艺领域中的一项关键技术。此项技术跨越机械、电子、控制、计算机应用等多个领域,是当代机械专业学生和工程技术人员应该了解的新技术。在这样的背景下,编者总结了自己多年的教学体会,结合当前职业教育的实际情况和企业要求,以教育部颁布的“技能型紧缺人才指导性教学计划”为指导,编写了这本教材。

本书在内容安排上注重实用技术与理论知识的统一以及应用思路与技巧的统一,文字简练,图文并茂,通过知识讲解及大量的实例练习,使读者迅速掌握电加工中最实用的技术内容。

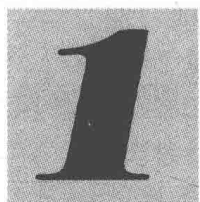
全书共七个单元,内容包括电火花成形加工基础、电火花加工设备与操作、数控线切割加工基础、数控线切割手工编程、TurboCAD 绘图式计算机自动编程、数控线切割设备与操作和数控线切割加工实训。全书注重实用性,强调动手操作。

本书由长春市机械工业学校李玉青主编,赵冬辉、刘欣欣任副主编,汪洪宇参与了编写,肖鹏任主审。具体编写分工如下:刘欣欣编写了单元一、二;李玉青编写了单元三至七;汪洪宇编写了附录 A;赵冬辉编写了附录 B、C、D。在编写过程中参阅了国内同行的相关文献、资料和教材,并得到许多专家和同行的支持与帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

前言	
单元一 电火花成形加工基础	1
第一节 电火花加工的产生	1
第二节 电火花成形加工原理 及应用	2
第三节 电火花加工常用术语	4
第四节 电火花成形加工工艺	6
思考与练习	13
单元二 电火花加工设备与操作	15
第一节 机床主体	15
第二节 工作液介质循环过滤系统	16
第三节 机床附件	17
第四节 数控系统的功能	19
第五节 电火花成形设备的操作	20
第六节 电火花成形加工中的安全 操作规程	24
第七节 特殊材料的电火花成形 加工	26
第八节 操作实例	29
思考与练习	32
单元三 数控线切割加工基础	33
第一节 数控线切割加工概述	33
第二节 数控线切割加工工艺	37
思考与练习	47
单元四 数控线切割手工编程	48
第一节 3B 代码编程	48
第二节 ISO 代码编程	59
思考与练习	65
单元五 TurboCAD 绘图式计算机 自动编程	67
第一节 画图指令	67
第二节 编辑指令	73
第三节 3B 程序生成指令	83
第四节 例题讲解	85
思考与练习	89
单元六 数控线切割设备与操作	90
第一节 数控线切割加工设备 简介	90
第二节 数控线切割机床的使用与 维护	98
思考与练习	100
单元七 数控线切割加工实训	101
第一节 数控线切割加工操作	101
第二节 线切割加工控制器的 操作	102
第三节 加工过程中几种特殊情况 的处理	108
第四节 数控线切割加工实例	110
思考与练习	118
附录	119
附录 A 电切削工国家职业标准	119
附录 B 数控电火花加工技术工人 职业技能鉴定(中级) 模拟试题	124
附录 C 数控电火花加工技术工人 职业技能鉴定(中级) 模拟试题部分参考答案	136
附录 D 单元思考与练习答案	140
参考文献	149



单元一

电火花成形加工基础

知识目标

- 理解电火花成形加工的原理。
- 掌握电火花成形加工的特点和应用。
- 掌握电火花成形加工工艺。
- 了解电加工基本术语。

第一节 电火花加工的产生

在日常生活中，我们经常使用各种电器开关，当开关破损时，就会常常伴随“噼噼啪啪”声并伴有蓝色火花，开关触点处会出现小黑点并产生接触不良。1870 年英国科学家普里斯特利（Priestley）最早发现电火花对金属的腐蚀作用，1943 年前苏联科学家拉扎连科夫率先对这种电腐蚀现象做了进一步研究，由此产生了一种新的金属加工方法——电火花加工。

20 世纪中叶以来，特种加工的迅速发展解决了大量传统切削加工难以实现或无法实现的加工问题，使其在机械、电子、航空航天及国防工业中得到了广泛应用。目前，特种加工已成为机械制造业中不可缺少的重要部分，电火花加工就是其中的一种。

电火花加工又称电蚀加工或放电加工（简称 EDM），其加工过程与传统的机械加工完全不同。它利用工件与工具电极之间的间隙脉冲放电所产生的局部瞬时高温将工件表面材料熔化甚至汽化，逐步蚀除以达到加工的目的。目前，世界各国统称之为放电加工，简称电加工，如日本、美国和英国等。

电火花成形加工是在一定的加工介质（工作液介质）中，通过工具电极和工件电极之间脉冲放电时的电腐蚀作用，对工件进行加工的一种工艺方法。电火花成形加工是电火花加工的方法之一，是模具制造中的一种重要加工手段。它利用电极和工件在液体介质（煤油）中进行小间隙的脉冲放电，使工件产生电腐蚀。由于电极和工件微观表面凹凸不平，液体介质中也混有杂质，在工件和电极间施加电压后所产生的电场强度分布很不均匀，距离最近且



绝缘最差的部分最先被击穿而放电。经过连续多次的脉冲放电，最后把工件加工成与电极表面凹凸刚好相反的形状。

第二节 电火花成形加工原理及应用

一、电火花成形加工原理

如图 1-1 所示为电火花成形加工的原理图，进给装置 2 保证工件 1 与工具电极 3 之间具有一定间隙，脉冲电源输出的脉冲电压加在工件与电极上，会使工件附近的工作液介质 4 逐步被电离。当工作液介质被击穿时，形成放电通道，产生火花放电。由于放电时间极短且发生在工件与电极间距离最近的一点上，所以能量集中，引起金属材料的熔化或汽化，而且具有突然膨胀、爆炸的特性。爆炸力将熔化和汽化了的金属抛入工作液介质中并冷却，凝固成细小的圆球状颗粒。在泵 5 的作用下，循环流动的工作液介质将电蚀产物从放电间隙中排出，并对电极表面进行较好的冷却。

一个物体无论采用何种加工方法，无论从宏观看上去是多么平整，但在微观表面上总是凹凸不平的。当工具电极与工件被接通电源后，两极间就建立起一个电场，电场强度取决于两极间的电压和两极间的距离。两极间距离越小，电场强度越大。所以，工作液介质最先在两极间最近点被击穿，形成放电通道，释放出大量的能量，工件表面被电蚀出一个小坑，一次脉冲放电发生，两极之间的电压随之急剧下降到接近于零，间隙中的工作液介质又恢复到绝缘状态。此后，两极之间电压再次升高，又在另一处绝缘强度较低（两极间距离最近、电场强度最大）的地方重复上述放电过程。经多次脉冲放电，使整个被加工表面由无数个放电小凹坑组成，如图 1-2 所示，电极的形状就被复制在工件上，最终达到加工的目的。

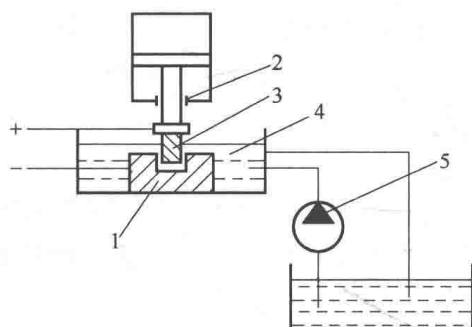


图 1-1 电火花成形加工的原理图

1—工件 2—进给装置 3—工具电极
4—工作液介质 5—泵

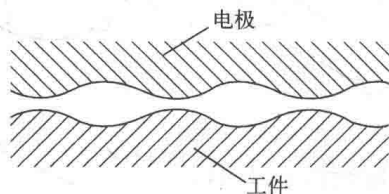


图 1-2 加工表面放大图

二、电火花成形加工的特点

与常规的金属切削加工相比，电火花成形加工有如下优点。

1) 便于加工在机械加工中难以加工甚至是无法加工的材料，如淬火钢、硬质合金钢、耐热合金钢和模具钢等。因为在电火花加工中材料的蚀除是靠火花放电所产生的电热实现



的,材料的加工性能主要取决于材料本身的热学性质,如熔点和比热容等,而几乎与材料的力学性能(如硬度、韧性和强度等)无关。

2) 便于加工深孔、型腔及复杂形状的工件。因为电极与工件不发生实际接触,机械作用力小,因此适宜进行微细加工。

3) 电极材料不必比工件材料硬。一般采用纯铜、石墨作为电极材料,大大降低了电极的设计与制造成本。

4) 直接利用电能、热能作为加工能源,便于实现加工过程的自动化。

由于电火花成形加工有其独特的优点,加之电火花成形加工的工艺技术不断提高,目前数控电火花成形加工已在模具制造、机械、航空、电子等领域用以解决一般机械加工难以解决的加工问题。

电火花成形加工也有一定的局限性,主要如下:

1) 一般只能加工金属等导电材料。

2) 加工速度较慢,效率低,所以应尽可能先采用常规机械加工方法去除大部分待加工工件的加工余量,再进行电火花成形加工以提高生产率。

3) 电火花加工中,电极也会损耗,影响加工精度。

4) 电蚀产物在排除过程中常会引起二次放电,形成加工斜度,影响加工精度。

三、电火花成形加工的应用

1. 加工模具

电火花成形加工可以在淬火后进行,不必修正热处理后的变形问题。复杂型腔可采用成形电极一次加工,可以避免由于一般机械加工后拼装而造成的误差问题。

2. 加工耐热合金钢等难加工材料

对于硬而脆的耐热合金钢,常规加工易打刀,很难保证加工精度。由于电火花成形加工中工件与电极不发生机械作用力,所以比较适合难加工的材料。

3. 细小的精加工

可进行 $0.01 \sim 1\text{mm}$ 范围内的型孔加工。

4. 加工各种成形刀具

加工各种成形刀具、样板和工具等成形零件。

四、电火花加工的两效应

1. 极性效应

在电火花加工过程中,工件和工具电极都会受到不同程度的电腐蚀,但由于所接电源的极性不同,两极的蚀除量也不同,即使是同种材料制成的正、负极(如采用钢作为工具电极加工钢材料),其电腐蚀程度亦不相同,这种现象被称为极性效应。当正极蚀除速度大于负极时,应将工件接在正极加工,称为“正极性效应”或“正极性加工”。反之,当负极蚀除速度大于正极时,则将工件接在负极加工,称为“负极性效应”或“负极性加工”。

从提高生产率和减少工具电极损耗的角度来看,极性效应越显著越好。极性效应不仅与脉冲宽度有关,而且还受电极及工件材料、加工介质(工作液介质)、电源种类、单个脉冲能量等多种因素的综合影响。



温馨提示

我国电加工学会将工具电极接电源正极、工件接电源负极的加工称为“负极性加工”，如上所述。而实际生产中的数控电火花加工机床关于极性的定义与之刚好相反，所以在实际工作中应特别注意。

2. 覆盖效应

工件材料在被放电腐蚀的过程中，工件的电蚀产物就会通过工作液介质被转移到工具电极表面上，形成一定厚度的覆盖层，这种现象被称为覆盖效应。

在油类介质中加工时，覆盖层主要是石墨化的碳素层，因其具有很好的耐蚀性所以对电极表面具有一定的保护作用，同时也具有补偿电极损耗的作用，尤其是在大电流加工中，这种补偿作用尤为明显，只是覆盖层的厚度和均匀性很难把握，容易引起电极尺寸增大，影响工件的加工精度。

在乳化类介质中加工时，就不会产生覆盖层，但会出现另一种覆盖现象——镀覆现象，即在工具电极表面形成致密的电镀层，同样可以起到减少和补偿电极损耗的作用。产生这种镀覆层的一个重要条件是电加工必须在具有一定离子、导电的水溶液中进行，同时工具电极必须接负极。

合理利用覆盖效应，有利于降低电极损耗，甚至使电极“无损耗”，这样可以大大降低加工工具电极的成本。但是，由于覆盖层的厚度和均匀性均很难控制，一旦出现覆盖现象，就会使电极尺寸增大，反而破坏了工件的加工精度。

第三节 电火花加工常用术语

以下内容是根据中国机械工程学会电加工学会公布的材料编写的。

1) 放电加工：在一定的加工介质中，通过两极（工具电极，简称电极和工件电极，简称工件）之间的火花放电或短电弧放电的电蚀作用来对材料进行加工的方法称为放电加工（简称 EDM）。

2) 电火花加工：当采用电火花脉冲放电形式来进行电加工时，称电火花加工。

3) 电火花穿孔、成形加工：又可分为电火花穿孔和电火花成形加工，有时也统称为电火花成形加工。

4) 电火花成形：一般指三维型腔和型面的电火花加工，一般用于非贯通孔的加工。

5) 放电：电流通过绝缘介质（气体、液体或固体）的现象。

6) 脉冲放电：脉冲放电是脉冲性的放电，这种放电在时间上是断续的，在空间上放电点是分散的，是电火花加工采用的一种放电形式。

7) 火花放电：介质被击穿后伴随着火花的放电，其特点是火花放电通道中的电流密度很大，瞬时温度很高。

8) 电弧放电：电弧放电是一种渐趋稳定的放电，这种放电在时间上是连续的，在空间



上是完全集中在一点或在一点的附近放电。放电加工中如遇到电弧放电,常常会引起电极和工件的烧伤。电弧放电往往是放电间隙中排屑不良或脉冲间隔过小,来不及消除电离恢复绝缘,或脉冲电源损坏变成直流放电等所引起的。

9) 放电通道: 又称电离通道或等离子通道,是介质被击穿后在两极间形成的导电等离子体通道。

10) 放电间隙: 放电时两电极间的距离。它是加工电路的一部分,有一个随击穿而变化的电阻。在加工过程中,放电间隙则称为加工间隙,一般为 $0.01 \sim 0.5\text{mm}$,粗加工间隙较大,精加工间隙较小。

11) 电蚀: 在电火花放电作用下,蚀除工件材料的现象。

12) 电蚀产物: 工作液介质中电火花放电时的生成物。它主要包括从两极上电蚀下来的金属材料微粒和工作液介质分解出来的气体等。

13) 二次放电: 在已加工面上,由于金属屑等的介入而进行再次放电的现象。

14) 击穿电压: 放电开始或介质击穿时的瞬时极间电压。

15) 脉冲宽度 (μs): 加到间隙两端的电压脉冲的持续时间。对于方波脉冲,脉冲宽度等于放电时间。

16) 放电时间 (μs): 介质击穿后,间隙中通过放电电流的时间,亦即电流脉宽。

17) 脉冲间隔 (μs): 连接两个电压脉冲之间的时间。

18) 电参数: 电加工过程中的电压、电流、脉冲宽度、脉冲间隔、功率和能量等参数称为电参数。

19) 电规准: 电加工所用的电压、电流、脉冲宽度、脉冲间隔等电参数,称为电规准。

20) 极性效应: 电火花加工时,即使正极和负极是同一种材料,但正负两极的蚀除量也是不同的,这种现象称为极性效应。一般短脉冲加工时,正极的蚀除量较大;反之,长脉冲加工时,负极的蚀除量较大。

21) 正极性和负极性: 工件接正极,工具电极接负极,称正极性;反之,工件接负极,工具电极接正极,称为负极性,又称反极性。线切割加工时,所用脉宽较窄,为了增加切割速度和减少钼丝的损耗,一般工件应接正极,称正极性加工。

22) 脉冲电源: 脉冲电源是电火花加工设备的主要组成部分之一,它给放电间隙提供一定电压的电脉冲,是电火花加工时的能量来源,常简称电源。现在广泛采用的脉冲电源是晶体管脉冲电源和晶闸管脉冲电源。

23) 伺服进给系统: 伺服进给系统是电火花加工机床的重要组成部分,用作使工具电极伺服进给,自动调节,使工具电极和工件在加工过程中保持一定的放电间隙。

24) 切割速度: 在保持一定的表面粗糙度值的切割过程中,单位时间内电极丝中心线在工件上扫过的面积的总和 (mm^2/min)。

25) 快速走丝线切割 (WEDM—HS): 电极丝高速往复运动的电火花线切割加工,一般走丝速度为 $8 \sim 10\text{m/s}$ 。

26) 低速走丝线切割 (WEDM—LS): 电极丝低速单向运动的电火花线切割加工,一般走丝速度为 $10 \sim 15\text{m/min}$ 。

27) 线径补偿: 又称“间隙补偿”或“钼丝偏移”。为获得所要求的加工轮廓尺寸,数



控系统通过对电极丝运动轨迹轮廓进行扩大或缩小来做偏移补偿。

28) 线径补偿量: 电极丝几何中心实际运动轨迹与编程轮廓线之间的法向尺寸差值, 又称间隙补偿量或偏移量。

29) 进给速度: 加工过程中电极丝中心沿切割方向相对于工件的移动速度 (mm/min)。

30) 多次切割: 同一表面先后进行两次或两次以上的切割, 用以改善表面质量及加工精度的切割方法。

31) 锥度切割: 钼丝以一定的倾斜角进行切割的方法。

32) 工作液介质: 电火花加工时, 工具和工件间的放电间隙必须浸泡在有一定绝缘性能的液体介质中, 此液体介质称为工作液介质。一般将煤油作为电火花成形加工时的工作液介质; 由水、有机化合物及无机化合物组成的乳化溶液, 则作为电火花线切割加工时的工作液介质。

33) 电火花加工表面: 电火花加工过的由许多小凹坑重叠而成的表面。

34) 电火花加工表层: 电火花加工表面下的一层, 包括熔化层和热影响层。

35) 热影响层: 简称 HAZ。它是位于熔化层下面的、由于热作用改变了基体金属金相组织和性能的一层金属。

36) 基体金属: 位于热影响层下面的、未改变金相组织和性能的原来基体的金属。

37) 线电极电火花加工: 简称 WEDM, 是一种用线状电极做工具的电火花加工, 又称电火花线切割加工。

第四节 电火花成形加工工艺

一、电火花成形加工的基本工艺要素

电火花成形加工的基本工艺要素包括电极、工件的准备, 电极、工件的装夹与校正, 电火花工作液介质, 电参数的配置等。

1. 电极、工件的准备

(1) 电极的准备 电火花成形加工中的电极与常规机械加工中的刀具有着严格的区分。它不是通用的而是专用的工具, 必须按照工件的材料、形状、性能及加工要求来选择。一般情况下, 电极材料必须具备以下特点: 具有良好的导电性和耐电蚀性, 可加工性较好, 材料价格便宜, 来源丰富。常用作电火花成形加工的电极材料有石墨和纯铜。

1) 石墨。石墨电极一般采用常规的机械加工制造, 其优点是: 极易成形, 密度小, 易于大型电极的制作, 成本低, 仅为纯铜电极的 $1/2$; 缺点是: 容易烧弧, 容易在工件上形成积炭, 从而影响加工精度, 粉尘大且有一定的毒性, 性脆易产生崩刃。总之, 石墨电极适用于加工蚀除量较大的型腔, 适于用一个电极来完成整个型腔的加工, 且由于其粗加工效率高, 工件不必进行预加工。

2) 纯铜。纯铜是电火花成形加工中应用最广泛的电极材料, 其优点是: 可加工性好, 易成形, 电加工稳定性好, 不易产生烧弧; 缺点是: 磨削困难, 熔点低 (1083°C), 成本较高。总之, 纯铜适于较高精度的电火花成形加工, 经常采用分解电极多次成形加工而成。



温馨提示

采用石墨作为大型拼接电极时，不能采用两种不同牌号的石墨，否则会引起电极损耗不均；采用纯铜作为电极时，必须是无杂质的电解铜，最好经过锻打。

另外，在高精密模具及一些特殊场合的电火花成形加工中，也可采用铜钨合金作为电极材料。常用的铜钨合金材料中铜的质量分数为 25%，钨的质量分数为 75%。

(2) 工件的准备 工件的准备主要是指工件的预加工和热处理工序的安排。

1) 工件的预加工是指用常规的机械加工方法去除工件大部分的加工余量，以节省电火花粗加工的时间，提高生产率。一般工件预加工的单边余量为 0.3 ~ 1.5mm，同时尽量做到余量均匀。

2) 工件的热处理。工件可在预加工之后、电火花加工之前，安排热处理工艺（如淬火），这样可以避免由于热处理变形而导致的对加工后的型腔的影响。



温馨提示

工件在电火花加工之前必须除锈去磁，否则在电火花加工中，工件容易吸附金属屑，引起拉弧烧伤。

2. 电极、工件的装夹与校正

电极装夹与校正的目的是把电极牢固装夹在主轴的电极夹具上，并使电极轴线与主轴进给轴线一致，保证电极与工件的垂直和相对位置。

(1) 装夹电极的注意事项

1) 电极与夹具的安装面必须清洗或擦拭干净，保证接触良好。

2) 用螺钉或带柄螺纹紧固时，用力要适当（过大则容易产生电极变形，过小则容易使电极产生松动），同时尽量将电极夹正，以防垂直度误差过大，如图 1-3、图 1-4 所示。

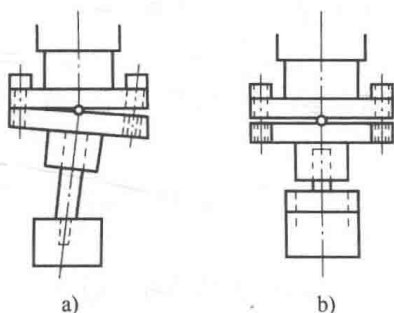


图 1-3 螺钉紧固

a) 不正确的装夹方式 b) 正确的装夹方式

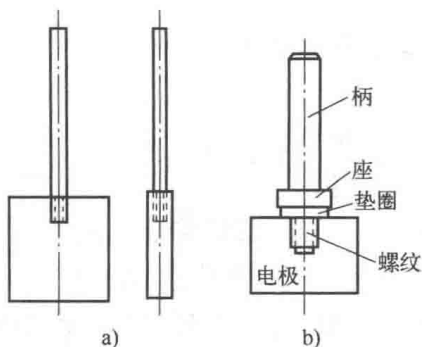


图 1-4 用带柄的螺纹紧固

a) 不正确的装夹方式 b) 正确的装夹方式



3) 对于细长电极, 伸出部分的长度在满足加工要求的前提下应尽可能短, 以提高刚性。

4) 对于大型电极, 夹具的刚度尤为重要, 否则易造成不必要的精度误差和加工效率的降低。当电极重量超过 15kg 时, 应采用固定板型夹具。

(2) 常用的电极校正方法

1) 按电极基准面校正电极。可采用百分表和精密角尺按直壁面校正。

2) 按辅助基准面(固定板)校正电极。用百分表检验辅助基准面与工作台的平行性即可, 如图 1-5 所示。

3) 按电极端面火花打印校正电极。采用精规准参数使电极在模块平面上放电打印, 调节电火花至均匀即可。

(3) 工件的装夹与校正 一般情况下, 工件可直接装夹在垫块或工作台上, 通过压板压紧即可, 也可采用永磁吸盘将工件吸牢在工作台上。若工作台有坐标移动时, 应使工件基准线与拖板一轴的移动方向一致, 便于电极与工件间的校正与定位。

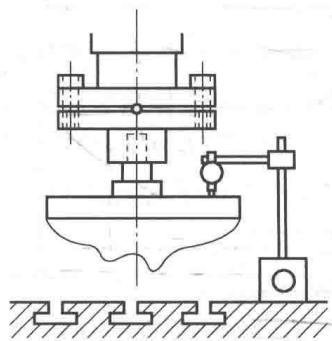


图 1-5 按辅助基准面校正电极

(4) 电极与工件相对位置的校正

1) 目测法。对于加工要求较低的工件, 可以目测电极与工件的相对位置, 利用工作台纵、横坐标的移动加以调整即可。

2) 打印法。先用目测法大致调整好电极与工件的相对位置, 采用弱规准参数使电极在模块上打印出一浅印, 调整工作台使模块周边放电加工量均匀即可。

3) 测量法。利用量具、块规、卡尺定位。

3. 电火花工作液介质

电火花加工时, 工具和工件间的放电间隙必须浸泡在有一定绝缘性能的液体介质中, 此液体介质称为工作液介质。

(1) 工作液介质的作用

1) 在一次火花放电之后能尽快恢复放电间隙的绝缘状态, 以便形成下一次火花放电。这就要求工作液介质必须具有一定的绝缘强度。

2) 有利于电蚀产物的顺利排出, 以免产生二次火花放电甚至是电弧放电。

3) 对工具电极和工件表面有冷却降温的作用, 以免因局部过热而产生积炭、烧伤等现象。

(2) 工作液介质的特点 要保证工作液介质具有上述作用, 则工作液介质必须具有以下特点。

1) 粘度低。只有低粘度的介质方能保证其良好的流动性和冷却性, 同时有利于电蚀产物的顺利排出。

2) 高闪点、高初馏点。闪点高, 不易起火, 能保证安全生产; 初馏点高, 不易汽化、损耗, 有良好的环保作用。

3) 绝缘性好, 以便能尽快恢复放电间隙的绝缘状态, 缩短加工时间, 提高效率。

4) 氧化稳定性好, 寿命长, 性价比高。

(3) 常用的工作液介质 电火花成形设备常用的工作液介质为煤油。煤油的性能比较



稳定,粘度低、密度小、绝缘性较好,符合电火花加工的基本要求。同时,煤油价格低廉,因此被广泛使用。但煤油的缺点也是显而易见的,尤其是它的闪点低(大约 46°C),使用中往往因为疏忽而导致火灾,所以电火花加工设备必须配备灭火设施。另外,煤油易挥发,容易产生对人体有害的气体,所以安放电火花加工设备的车间必须具备良好的通风设施。

4. 电参数的配置

电参数的配置也就是电规准的选择,应根据工件的加工要求合理选择电参数。电参数的配置是否合理,直接影响加工的各项工艺指标。选用电参数的最终目的是为了保证工件的加工尺寸和表面粗糙度要求。选用电参数时,基本上要考虑电极数目、电极损耗、工作液介质处理、工件表面粗糙度要求、加工面积和加工深度等因素。电火花成形加工中的电极损耗、加工速度、表面粗糙度和侧面间隙等几个主要指标是相互关联的,无论如何调节电加工参数,都无法使它们同时达到最佳状态。实际操作中为确保部分指标,只能放弃另一些要求,如在粗规准加工中放弃表面粗糙度和侧面间隙以求高的加工速度和几乎为零的电极损耗;在精规准加工中为确保表面粗糙度和侧面间隙这两项指标,只能牺牲电极损耗和加工速度。针对不同的加工要求,合理设置电参数,使加工出的产品符合要求,是用好电火花成形机的关键。电参数的配置与操作者的经验有着密切的关系,并不是一成不变的,它需要在实际操作中慢慢摸索,逐步掌握。

目前数控电火花加工机床有许多配置好的最佳成套电参数,自动选择电参数时,只要把与之相关的条件准确输入,即可自动配置好电参数。机床配置的电参数一般均能满足加工要求,操作简单,降低了对操作工人的要求,避免了加工中凭经验的人为干预。

二、电火花成形加工的主要工艺指标

电火花成形加工的主要工艺指标有加工速度、电极损耗、加工精度和表面粗糙度等,而影响工艺指标的因素有很多,现具体介绍如下:

1. 影响加工速度的因素

电火花成形加工的加工速度 v_w 是指在一定电规准下,单位时间 t 内从工件上蚀除下来的金属体积 V ,也称加工生产率,其单位为 mm^3/min ,即

$$v_w = V/t$$

脉冲能量的大小是影响加工速度的重要因素。当电流一定时,脉冲能量与脉冲宽度成正比,脉冲宽度增大,加工速度随之增大,但脉冲宽度过大会造成蚀除产物增多,使加工稳定性变差,加工速度反而降低。



温馨提示

过高的加工速度往往也意味着电极损耗较大,故在实际生产操作中不宜采用,只有在不计电极损耗,单纯要求加工速度高的情况下采用。

2. 影响电极损耗的因素

电极损耗是导致工件误差的主要原因之一。



电极损耗分为绝对损耗和相对损耗。绝对损耗 V_E 是单位时间内电极的损耗量（单位为 mm^3/min ），相对损耗 θ 是电极的绝对损耗和工件加工速度的百分比，即

绝对损耗：
$$V_E = V/t$$

相对损耗：
$$\theta = V_E/v_w \times 100\%$$

脉冲宽度越小，电极损耗越大。一般情况下，采用石墨或纯铜作为电极，负极性加工，当脉冲宽度大于 $500\mu\text{s}$ 时，电极相对损耗 θ 可控制在 1% 以下；在采用低损耗回路加工时，当脉冲宽度仅大于 $150\mu\text{s}$ 时，电极相对损耗 θ 就可控制在 1% 以下。

所以当电流一定时，随着脉冲宽度的增大，一方面单位时间内放电次数少，电极损耗减少；另一方面极性效应效果显著，覆盖层厚度也相对地补偿了电极损耗。

3. 影响加工精度的主要因素

加工精度是指加工后工件尺寸和图样尺寸要求相符合的程度。两种尺寸不相符合的程度通常用加工误差来衡量。

加工精度主要体现在加工间隙 Δ ，加工间隙 Δ 的大小和一致性直接影响电火花成形加工的加工精度，即

$$\Delta = \delta + a + d$$

其中 δ ——单边起始放电间隙；

a ——单边放电蚀除量；

d ——电极单边损耗量。

当电流一定时，脉冲宽度越大，加工间隙越大，则加工精度显著降低。

4. 影响表面粗糙度的主要因素

电火花加工表面和机械加工表面有所不同，它由无方向性的无数小坑组成，有利于润滑油的储存，而机械加工表面则全部是切削和磨削痕迹，有一定的方向性。所以在相同条件下，电火花加工表面无论是润滑性能还是耐磨损性能均比机械加工表面的要好得多。

当电流一定时，脉冲宽度大，则一次放电能量就大，电蚀后所产生的小坑就大而深，故表面粗糙度值就大。当然，工件材料本身的热学特性也不可忽视，它对加工表面的表面粗糙度值也有一定的影响。在相同条件下，熔点高的材料（如硬质合金）的表面粗糙度值就要比熔点低的材料（如钢）小。

三、数控电火花加工的一般工艺方法

数控电火花加工的工艺方法较多，主要有单电极直接成形工艺、多电极更换成形工艺和数控平动成形工艺等，选择时要依据工件的技术要求、复杂程度以及机床类型等确定。

1. 单电极直接成形工艺

单电极直接成形工艺是指在电火花加工中只用一只电极加工出所有的型腔部位。该方法操作简单，不需要重复装夹定位，提高了生产率。下列几种情况适宜单电极直接成形工艺。

1) 没有精度要求的电火花加工场合，例如模具钳工中取出折断在工件中的钻头、丝锥等，利用单电极加工简单、方便、省时、省力。

2) 加工形状简单、精度要求不高的型腔。模具零件中很多部位是没有精度要求的，电火花加工时由于电极损耗而残留的部位还可以通过钳工修复来完成。

3) 加工深度很浅的型腔。例如模具表面上的一些图案、花纹等，由于深度较浅，所以



电极损耗小，单电极完全能满足其加工精度的要求。

4) 加工贯通型腔。采用单电极通过延伸加工方法完全可以保证贯通型腔的加工精度，如图 1-6 所示。

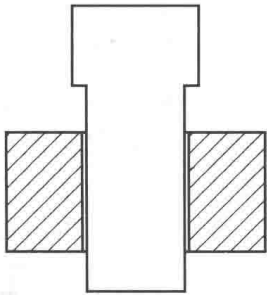


图 1-6 贯通加工

2. 多电极更换成形工艺

多电极更换成形工艺是指根据加工型腔在粗、半精、精加工中放电间隙不同的特点，采用几个尺寸有缩放量的电极，分别完成型腔的粗、半精和精加工。例如，加工深度为 5mm，电极缩放量单侧为 0.15mm，电极准为粗、半精、精加工三段，根据各段电极准放电间隙的大小来设置进给深度：粗规准进给深度为 4.85mm，半精规准进给深度为 4.92mm，精规准进给深度为 4.97mm。各段之间加工余量大小的控制与加工效率有很大关系。适当减小加工余量可以提高加工效率，尤其是在大面积精加工场合作用显著。如将上例中粗规准进给深度改为 4.9mm，半精规准进给深度改为 4.95mm，精规准进给深度仍为 4.97mm，则可以在一定程度上提高加工效率。如图 1-7 所示，首先采用粗加工电极去除大部分金属，然后采用半精加工电极完成过渡加工，最后采用精加工电极做最后加工。

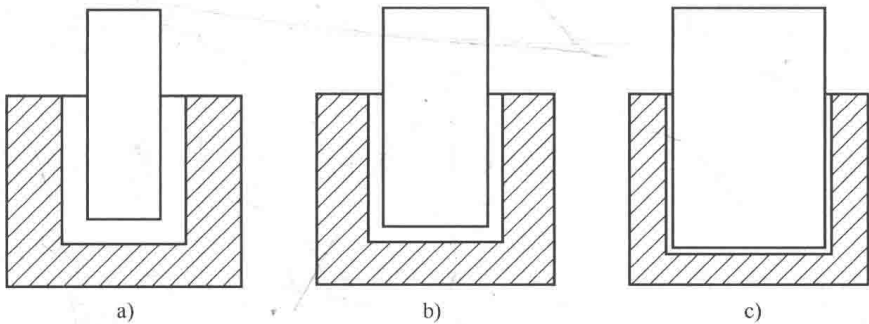


图 1-7 多电极更换成形工艺
a) 粗加工 b) 半精加工 c) 精加工

3. 数控平动成形工艺

数控电火花加工机床的数控系统能够实现 X、Y、Z 等多轴控制，电极和工件间可以按照预先编制好的程序进行微量移动，称为数控平动加工。

数控平动成形工艺可以与上述介绍的几种成形工艺（单电极直接成形工艺、多电极更换成形工艺）同时应用。电极在数控系统的控制下可以完成逐步修光侧面和底面、精确控制尺寸精度、加工型腔侧壁上的凹槽等工作，具有灵活多样的模式，可以适应复杂型腔加工的需要。

平动加工是数控电火花加工的一种重要工艺方法，其平动方式一般分为两种：自由平动和伺服平动。自由平动一般用于浅表加工，加工时边打边平动，可以改善排屑性能，提高加工速度，减少积炭；伺服平动一般用于深度加工场合，先加工完底面再修侧面。

四、电火花加工工艺实例

[例 1-1] 取出折断在工件中的钻头、丝锥。
工具钳工在钻孔或攻螺纹时，由于作为刀具的钻头或丝锥硬而脆，抗弯、抗扭强度低，



容易折断。为了避免工件的报废，可采用单电极加工方法取出折断在工件中的钻头或丝锥，其具体步骤如下：

1. 选择电极

电极的材料可以选用纯铜，因其来源广，机械加工方便，且纯铜电极相对损耗小，其缺点是加工过程欠稳定。但是本例中仅仅是取出折断在工件中的钻头或丝锥，所以选纯铜作为工具电极是符合要求的。

电极的直径可以根据钻头的直径和丝锥的规格按表 1-1 选择。

表 1-1 根据钻头的直径和丝锥的规格选择工具电极的直径

工具电极直径/mm	1 ~ 1.5	1.5 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	3.5 ~ 4.5	4 ~ 6	6 ~ 8
钻头直径/mm	M2	M3	M4	M5	M6	M8	M10
丝锥规格/mm	M2	M3	M4	M5	M6	M8	M10

2. 电极、工件的装夹

首先，将选好的电极安装在机床主轴的电极夹头中，用直角尺在 X、Y 方向调整，保证电极与机床工作台面垂直；其次，将工件安装在工作台面上，保证折断的钻头或丝锥的中心线与机床工作台面垂直，利用压板固定；最后，移动工作台，保证电极中心与折断的钻头或丝锥的中心一致。

3. 选择电参数

由于对加工精度和表面质量的要求都不高，所以选择加工速度快、电极损耗小的粗规范即可，可参考表 1-2 的标准。

表 1-2 低损耗粗加工规范

脉冲宽度/ μs	脉冲间歇/ μs	峰值电流/A
150 ~ 300	30 ~ 60	5 ~ 10

4. 工作液介质的选择

采用煤油作为工作液介质，打开工作液泵，使工作液介质充满工作液槽并高出工件表面 30 ~ 50mm，然后启动电源，加工深度由断在工件中的钻头或丝锥的长度决定。

【例 1-2】 冲模加工（材料为钢）。

冲模是在生产中常用的一种模具，其零件的尺寸精度、表面粗糙度直接取决于模具的凸凹模的加工精度。所以，凸凹模的制造就成为生产上的关键，尤其是凹模，采用常规的机械加工方法是困难的，甚至是无法加工的，而仅靠钳工修配一则劳动强度大，质量很难保证，二则往往因为淬火变形而导致工件的报废。如果采用电火花成形加工，就可以很好地解决这一难题，一方面电火花成形加工可以安排在工件淬火后进行，避免了因热处理而导致的工件变形，另一方面电火花加工可以不受材料硬度的限制，扩大了模具材料的选用范围。

1. 凸模的加工

由于材料是钢，可以采用数控线切割或成形磨削来加工完成。在这里需要注意的是，凸模的长度要加长（因为凸模要用来作为凹模加工的工具电极，多出的部分在凹模加工好后再切除）。