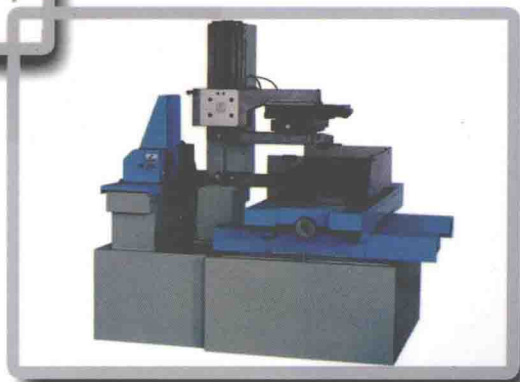


高等职业教育“十二五”机电类规划教材
高等职业教育双证制教学改革用书
电切削工职业技能鉴定考核培训教程

shukong xianqiege caozuogong peixun jiaocheng

数控线切割操作工 培训教程

◎ 孙庆东 主编



配电子课件
习题答案



高等职业教育“十二五”机电类规划教材

高等职业教育双证制教学改革用书

电切削工职业技能鉴定考核培训教程

数控线切割操作工培训教程

主 编 孙庆东

副主编 徐小青 王传红

参 编 王志伟 李小忠



机械工业出版社

本书是依据《国家职业标准 电切削工》中数控线切割操作工的知识和工作要求,为职业技能鉴定而编写的培训教材。

本书全面系统地介绍数控线切割机床的加工原理和操作,主要内容有数控电火花线切割加工基础知识、数控电火花线切割机床结构、数控电火花线切割编程技术、数控电火花线切割加工工艺、数控线切割操作工(电切削工)职业技能鉴定理论试题和操作技能试题、电火花线切割机床的基本操作。HF 系统线切割机床操作实训、AutoCut 系统线切割机床操作实训等,并介绍提高切割形状精度的方法和线切割加工中常见问题的处理。尤其是针对职业技能鉴定中的操作技能环节,精选典型样题,并进行操作流程的详细讲解,以便读者迅速提高操作技能、增加学习兴趣。

本书可作为电切削工职业技能培训与鉴定考核用书,也可作为大中专、高职、技校等相关院校相关课程的教材,还可以作为数控线切割编程与操作工程技术人员实用参考书。

本书配有电子课件,凡使用本书作教材的教师可登录机械工业出版社教育服务网(<http://www.cmpedu.com>)下载,或发送电子邮件至 cmpgaozhi@sina.com 索取。咨询电话:010-88379375。

图书在版编目(CIP)数据

数控线切割操作工培训教程/孙庆东主编. —北京:
机械工业出版社, 2014. 12
高等职业教育“十二五”机电类规划教材 高等职业
教育双证制教学改革用书 电切削工职业技能鉴定考核培
训教程
ISBN 978-7-111-45577-6

I. ①数… II. ①孙… III. ①数控线切割-高等职业
教育-教材 IV. ①TG481

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 016315 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:王英杰 责任编辑:王英杰

版式设计:霍永明 责任校对:陈秀丽

封面设计:赵颖喆 责任印制:张楠

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·14.25 印张·349 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-45577-6

定价:29.00 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

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前言

电火花加工技术是一种利用电能和热能进行加工的新技术,是传统机械切削加工方法的重要补充和发展,是模具制造的重要工艺手段。随着数控技术的发展及其在电火花加工中的应用,电火花加工技术在精密加工与特种加工领域发挥着越来越重要的作用。数控电火花加工是数控、模具专业高技能人才必须掌握的技能。

本书是为了适应职业教育发展和教学改革的需要,根据电切削工国家职业标准和职业资格技能鉴定的要求,以生产实际为目的,并结合职业院校理论教学和实践教学的特点编写而成的。本书加强了针对性和实用性,强化了实践操作技能。

全书共9章,主要内容包括数控电火花线切割加工基础知识、数控电火花线切割机床结构、数控电火花线切割编程技术、数控电火花线切割加工工艺、电火花线切割机床的基本操作、HF系统和AutoCut系统线切割机床操作实训。在内容安排上,将技能鉴定中理论知识考核和操作技能考核分别编排在理论知识和机床操作系统讲解结束后,以符合认知和学习的规律。尤其是数控线切割操作技能考核环节,对精选的样题作了绘图、编程及加工的详细讲解。通过本书的学习,读者可具备数控电火花线切割机床的工艺制订、操作实施的能力。

本书主要特色如下:

(1) 依据《国家职业标准 电切削工》中的知识和技能要求编写,具有很强的实用性和通用性。

(2) 技能操作的样题具有很强的代表性,并对考核流程中的绘图、编程和加工等重要环节进行详细讲解,且样题均经过机床操作验证。

(3) 对CAXA线切割XP系统与机床操作的HF系统及AutoCut系统的综合应用作了操作讲解和有益的探讨,有利于读者掌握多系统操作的方法。

本书编写分工如下:孙庆东编写第4、8、9章,徐小青编写第5、6、7章,王传红编写第3章和附录,王志伟编写第1章,李小忠编写第2章。全书由孙庆东担任主编,徐小青、王传红担任副主编,并由孙庆东完成统稿。

本书在编写过程中参考了苏州工业园区江南赛特数控设备有限公司、苏三光科技有限公司、阿奇夏米尔机电有限公司、沙迪克机电有限公司等企业的技术资料;此外,还参考了一些书籍的案例,这些对本书的编写起到了重要的作用。在此向这些资料和案例的原创公司 and 作者一并表示衷心的感谢。

由于笔者知识水平和经验有限，书中难免存在不足之处，恳请广大专家和读者给予批评指正。

本书配有电子课件，凡使用本书作教材的教师可登录机械工业出版社教材服务网 (<http://www.cmpedu.com>) 下载，或发送电子邮件至 sunqd17@sina.com 或 cmpgaozhi@sina.com 索取。咨询电话：010-88379375。

编 者

目 录

前言

第1章 数控电火花线切割加工基础

知识 1

1.1 数控电火花线切割加工方法概述 1

1.1.1 数控电火花线切割加工的产生与发展 1

1.1.2 数控电火花线切割技术的发展趋势 2

1.1.3 数控电火花线切割加工的特点 4

1.1.4 线切割加工的应用 5

1.2 电火花线切割加工原理 6

1.2.1 电火花线切割加工的基本原理 6

1.2.2 电火花加工的物理本质 6

1.2.3 数控电火花线切割加工的必备条件 10

1.3 数控电火花线切割机床简介 11

1.3.1 数控电火花线切割机床的分类 11

1.3.2 数控电火花线切割机床的型号 12

1.3.3 数控电火花线切割机床的常见功能 13

第2章 数控电火花线切割机床

结构 15

2.1 数控电火花线切割机床的组成 15

2.1.1 数控快走丝线切割机床的组成 15

2.1.2 数控慢走丝线切割机床的组成 15

2.2 数控电火花线切割机床结构 16

2.2.1 快走丝电火花线切割机床结构 16

2.2.2 慢走丝电火花线切割机床

结构 17

2.3 数控电火花线切割加工机床的

脉冲电源 19

2.3.1 脉冲电源的要求及分类 19

2.3.2 典型脉冲电源的工作原理 21

2.4 数控电火花线切割机床的工作液

及其循环过滤系统 24

2.4.1 数控线切割加工用工作液的性能 24

2.4.2 工作液的配制及使用方法 25

2.4.3 工作液循环系统及过滤系统 25

2.5 数控电火花线切割机床的控制

系统 26

第3章 数控电火花线切割编程

技术 29

3.1 数控电火花线切割 3B 代码编程

技术 29

3.1.1 3B 代码程序格式 29

3.1.2 直线的编程方法 30

3.1.3 圆弧的编程方法 31

3.2 数控电火花线切割 ISO 代码编程

技术 35

3.2.1 ISO 代码程序格式 35

3.2.2 ISO 代码终点坐标的两种表达方式 36

3.3 CAXA 数控电火花线切割自动编程

技术 38

3.3.1 用户界面 39

3.3.2 基本操作 40

3.3.3 应用 CAXA 线切割 XP 系统编制程序 43

第4章 数控电火花线切割加工

工艺 51

4.1 电火花加工常用术语 51

4.2 线切割加工工艺的基本规律 53

4.2.1 工艺指标的概念	53	6.1 电火花线切割机床的安全操作 规程	105
4.2.2 电参数对工艺指标的影响	54	6.2 电火花线切割机床的维护与保养	105
4.2.3 非电参数对工艺指标的影响	57	6.2.1 机床的维护	106
4.3 线切割加工工艺	64	6.2.2 机床的保养	106
4.3.1 线切割加工操作流程	64	6.3 快走丝线切割机床的操作顺序 流程	107
4.3.2 图样分析与毛坯准备	65	6.4 工件的装夹与找正	108
4.3.3 线切割穿丝孔	67	6.4.1 工件的装夹	108
4.3.4 加工路径的确定与切入点的 选择	68	6.4.2 工件的找正	109
4.4 锥度加工与上下异形件加工	68	6.5 线切割机床的穿丝	111
4.4.1 锥度的线切割加工	68	6.5.1 快走丝线切割机床的上丝及 穿丝	111
4.4.2 上下异形件的线切割加工	72	6.5.2 慢走丝线切割机床的穿丝	113
4.5 慢走丝线切割的多次切割	73	6.6 电极丝垂直度的找正	114
4.6 提高切割形状精度的方法	77	6.7 电极丝的精确定位	116
4.6.1 增加超切程序和回退程序	77	第7章 HF 系统线切割机床操作 实训	119
4.6.2 减小线切割加工中变形的 手段	78	7.1 HF 系统全绘编程软件的操作	119
4.7 电火花线切割加工方法	80	7.1.1 界面	119
4.7.1 特殊工件的线切割加工方法	80	7.1.2 功能简介	120
4.7.2 不易装夹工件的线切割加工 方法	80	7.2 HF 系统加工界面的操作	123
4.7.3 薄片工件的线切割加工方法	81	7.3 操作技能实训案例	127
4.8 线切割加工中的常见问题及处理 方法	82	第8章 AutoCut 系统线切割机床 操作实训	135
4.8.1 线切割短路原因分析及处理	82	8.1 AutoCut CAD 绘图界面的操作	135
4.8.2 线切割断丝原因分析及处理	83	8.1.1 辅助绘图	135
4.8.3 产生废品的原因及预防方法	85	8.1.2 轨迹设计	137
4.8.4 线切割机床的常见故障及排 除方法	86	8.1.3 轨迹加工	143
第5章 数控线切割操作工（电切 削工）职业技能鉴定理论 试题	88	8.1.4 修改加工轨迹	144
5.1 数控线切割操作工职业技能鉴定 （初级）理论知识试题	88	8.1.5 工艺库（专家库）	145
5.2 数控线切割操作工职业技能鉴定 （中级）理论知识试题	93	8.2 AutoCut 线切割控制软件的使用	146
5.3 数控线切割操作工职业技能鉴定 （高级）理论知识试题	98	8.2.1 界面	147
第6章 电火花线切割机床的基本 操作	105	8.2.2 加工任务的载入	147
		8.2.3 开始加工	149
		8.2.4 其他功能简介	149
		8.3 操作技能实训案例	153
		第9章 数控线切割操作工（电切 削工）职业技能鉴定操作 技能试题	158

9.1 数控线切割操作工职业技能鉴定 (初级) 操作技能试题	158	附录	182
9.2 数控线切割操作工职业技能鉴定 (中级) 操作技能试题	163	附录 A 电切削工考试大纲标准及 内容	182
9.3 数控线切割操作工职业技能鉴定 (高级) 操作技能试题	169	附录 B 电切削工技师、高级技师技能 大赛相关题库及参考答案	189
		参考文献	219

第 1 章 数控电火花线切割加工基础知识

1.1 数控电火花线切割加工方法概述

1.1.1 数控电火花线切割加工的产生与发展

电火花加工又称放电加工 (EDM)，其加工过程与传统的机械加工完全不同。电火花加工是一种直接利用电能、热能加工的方法。加工时，工件与加工所用的工具为极性不同的电极对，电极对之间多充满工作液，主要起压缩放电通道、恢复电极间的绝缘状态及带走放电时产生的热量的作用，以维持电火花加工的持续放电。在正常电火花加工过程中，电极与工件并不接触，而是保持一定的距离（称为放电间隙），在工件与电极间施加一定的脉冲电压，当电极向工件进给至某一距离时，两极间的工作液介质被击穿，局部产生火花放电，放电产生的瞬时高温将电极对的材料表面熔化甚至汽化，使材料表面形成电腐蚀的坑穴。如果能适当控制这一过程，就能准确地加工出所需的工件形状。由于在放电过程中常伴有火花，故而这种加工方法称为电火花加工，日本、美国、英国等国家通常也称为放电加工。

电火花线切割加工 (Wire Cut EDM) 是电火花加工的重要分支，是在电火花加工基础上发展起来的一种新的工艺形式，它是用线状电极（钼丝或铜丝等）依靠火花放电对工件进行切割加工的，简称线切割。线切割加工技术已得到了迅速发展，逐步成为一种高精度和高自动化的加工方法，在模具、各种难加工材料、成形刀具和复杂表面零件的加工等方面得到了广泛应用。

1870 年，英国科学家普里斯特利 (Priestley) 最早发现放电对金属的腐蚀作用。在日常生活中，放电对金属的腐蚀作用是比较常见的现象。例如在插拔插头或开断电器开关触头时，常常发生放电而将接触表面烧毛，腐蚀成粗糙不平的凹坑现象。在很长一段时间里，电腐蚀一直被认为是有害的现象，直到 1943 年，前苏联科学家鲍·洛·拉扎林柯夫妇在研究开关触头遭受放电腐蚀损坏的现象和原因时，发现放电时产生的瞬时高温可使局部的金属熔化、汽化而被腐蚀。经过反复的试验研究，拉扎林柯夫妇利用电容器充放电回路发明了第一台实用的电火花加工装置，把对人类有害的电火花烧蚀转化为对人类有益的一种全新工艺方法，开创了人类利用电腐蚀的先河。随后前苏联又于 1955 年制成了电火花线切割机床，瑞士于 1968 年制成了数控电火花线切割机床。电火花线切割加工历经半个多世纪的发展，已经成为先进制造技术领域的重要组成部分。电火花线切割加工不需要制作成形电极，能方便地加工形状复杂的大厚度工件，工件材料的预加工量少，因此在模

具制造、新产品试制和零件加工中得到了广泛应用。尤其是进入 20 世纪 90 年代后,随着信息技术、网络技术、航空和航天技术、材料科学技术等高新技术的发展,电火花线切割加工技术也朝着更深层次、更高水平的方向发展。

我国是国际上开展电火花加工技术研究较早的国家之一,由中国科学院电工研究所牵头,到 20 世纪 50 年代后期先后研制了电火花穿孔机床和线切割机床。电火花成形机床经历了双机差动式主轴头、电液压主轴头、力矩电动机或步进电动机主轴头、直流伺服电动机主轴头、交流伺服电动机主轴头到直线电动机主轴头的发展历程;控制系统也由单轴简易数控逐步发展到对双轴、三轴联动乃至更多轴的联动控制;脉冲电源也由最初的 RC 张弛式电源逐步推出了电子管电源、闸流管电源、晶体管电源、晶闸管电源及 RC、RLC 电源复合的脉冲电源;成形机床的机械部分也从滑动导轨、滑动丝杠副逐步发展为滑动贴塑导轨、滚珠导轨、直线滚动导轨及滚珠丝杠副,机床的机械精度达到了微米级;最佳加工表面粗糙度值已由最初的 $Ra32\mu\text{m}$ 提高到目前的 $Ra0.02\mu\text{m}$,从而使电火花成形加工步入镜面、精密加工技术领域,与国际先进水平的差距逐步缩小。线切割加工机床经历了靠模仿形、光电跟踪、简易数控等发展阶段,在上海张维良高级技师发明了世界独创的快走丝线切割技术后,出现了众多形式的数控线切割机床,线切割加工技术突飞猛进,为我国国民经济,特别是模具工业的发展作出了巨大的贡献。随着精密模具需求的增加,对线切割加工的精度要求越来越高,目前快走丝线切割机床的结构与配置已无法满足生产的要求。在大量引进国外慢走丝精密线切割机床的同时,也开始了国产慢走丝机床的研制工作,至今已有多种国产慢走丝线切割机床问世。我国的线切割加工技术的发展要高于电火花成形加工技术,如在国际市场上除快走丝技术外,我国还陆续推出了大厚度($\geq 300\text{mm}$)及超大厚度($\geq 600\text{mm}$)线切割机床,在大型模具与工件的线切割加工方面,发挥了巨大的作用,拓宽了线切割工艺的应用范围,在国际上处于先进水平。

1.1.2 数控电火花线切割技术的发展趋势

随着模具等制造业的快速发展,近年来我国电火花线切割机床的生产和技术得到了飞速发展,同时也对电火花线切割机床提出了更高的要求,促使我国电火花线切割生产企业积极采用现代研究手段和先进技术深入开发研究,向信息化、智能化和绿色化方向不断发展,以满足市场的需要。电火花线切割技术未来的发展,主要表现在以下几个方面:

1. 稳步发展快走丝线切割机床的同时,重视慢走丝电火花线切割机床的开发和发展

1) 快走丝机床依然稳步发展。快走丝电火花线切割机床是我国发明创造的。由于快走丝有利于改善排屑条件,适合大厚度和大电流高速切割,加工性价比优异,因而在未来较长的一段时间内,快走丝电火花线切割机床仍是我国电加工行业的主要发展机型。目前的发展重点是提高快走丝电火花线切割机床的质量和加工稳定性,使其满足那些量大面宽的普遍模具及一般精度要求的零件加工要求。根据市场的发展需要,快走丝电火花线切割机床的工艺水平必须相应提高,其最大切割速度应稳定在 $100\text{mm}^2/\text{min}$ 以上,而加工尺寸精度应控制在 $0.005 \sim 0.01\text{mm}$,加工表面粗糙度应达到 $Ra1 \sim 2\mu\text{m}$ 。这就需要积极采用各种先进技术,在机床结构、加工工艺、高频电流及控制系统等方面加以改善,重视窄脉

宽、高峰值电流的高频电源的开发及应用。

2) 重视慢走丝电火花线切割机床的开发和发展。慢走丝电火花线切割机床由于电极丝移动平稳,易获得较高加工精度和较低表面粗糙度值,适于精密模具和高精度零件的加工。我国在引进、消化、吸收的基础上,也开发并批量生产了慢走丝电火花线切割机床,满足了国内市场的部分需要。现在应该加强对慢走丝机床的深入研究,开发新的规格品种,为市场提供更多的国产慢走丝电火花线切割机床。与此同时,还应该在大量实验研究的基础上,建立完整的工艺数据库,完善 CAD/CAM 软件,使自主知识产权的 CAD/CAM 软件商品化。

2. 进一步完善机床结构设计,改进走丝机构

1) 为使机床结构更加合理,必须用先进的技术手段对机床总体结构进行分析。这方面的研究涉及运用先进的计算机有限元模拟软件对机床的结构进行力学和热稳定性分析。为了更好地参与国际市场竞争,还应注意造型设计,在保证机床技术性能和清洁加工的前提下,使机床结构合理,操作方便,外形新颖。

2) 为了提高坐标工作台精度,除考虑热变形及先进的导向结构外,还应采用螺距误差补偿和间隙补偿技术,以提高机床的运动精度。

3) 快走丝电火花线切割机床的走丝机构是影响其加工质量及加工稳定性的关键部件,目前存在的问题较多,必须认真加以改进。目前已开发的恒张力装置及可调速的走丝系统,应在进一步完善的基础上推广应用。

4) 支持新机型的开发研究。目前新开发的自旋式电火花线切割机床、高低双速电火花线切割机床、走丝速度连续可调的电火花线切割机床,在机床结构和走丝方式上都有创新。尽管它们还不够完善,但这类的开发研究工作都有助于电火花线切割技术的发展,必须积极支持,并帮助完善。

3. 积极推广多次切割工艺,提高综合工艺水平

根据放电腐蚀原理及电火花线切割工艺规律可知,切割速度和加工表面质量是一种矛盾,要想在一次切割过程中既获得很高的切割速度,又要获得很好的加工质量是很困难的。提高电火花线切割的综合工艺水平,采用多次切割是一种有效的方法。

多次切割工艺在慢走丝电火花线切割机床上早已推广应用,并获得了较好的工艺效果。当前的任务是通过大量的工艺实验来完善各种机型的各种工艺数据库,并培训广大操作人员合理掌握工艺参数的优化选取,以提高其综合工艺效果。在此基础上,可以开发多次切割的工艺软件,帮助操作人员合理掌握多次切割工艺。

4. 发展计算机控制系统,扩充线切割机床的控制功能

随着计算机技术的发展,其性能和稳定性都在不断增强,而价格却持续下降,为电火花线切割机床开发应用计算机数控系统创造了条件。目前国内已有的基于计算机的电火花线切割数控系统,主要用于加工轨迹的编程和控制,但计算机的资源还没有得到充分开发利用,今后可以在以下几个方面进行深入开发研究:

1) 开发和完善开放式的数控系统。进一步充分利用、开发计算机的资源,扩充数控系统的功能。

2) 继续完善数控电火花线切割加工的计算机绘图、自动编程、加工规准控制及其缩放功能, 扩充自动定位、自动找中心、慢走丝的自动穿丝、快走丝的自动紧缩等功能, 提高电火花线切割加工的自动化程度。

3) 研究放电间隙状态数值检测技术, 建立伺服控制模型, 开发加工过程伺服进给自适应控制系统。为了提高加工精度, 还应对传动系统的螺距误差及传动间隙进行精确检测, 并利用计算机进行自动补偿。

4) 开发和完善数值脉冲电源, 并在工艺实验基础上建立工艺数据库, 开发加工参数优化选取系统, 以帮助操作者根据不同的加工条件和要求合理选用加工参数, 充分发挥机床潜力。

5) 深入研究电火花线切割加工工艺规律, 建立加工参数的控制模型, 开发加工参数的自适应控制系统, 提高加工稳定性。

6) 开发有自主知识产权的电火花线切割 CAD/CAM 和人工智能软件。在上述各模块开发利用的基础上, 建立电火花线切割 CAD/CAM 集成系统和人工智能系统, 并使其商品化, 以全面提高我国电火花线切割加工的自动化程度及工艺水平。

1.1.3 数控电火花线切割加工的特点

数控电火花线切割加工具有如下一些优点:

1) 数控电火花线切割加工能加工传统机床及切削方法难以完成或无法完成的结构形状复杂的零件, 如冲模、凸轮、样板、外形复杂的精密零件及窄缝等。

2) 电极丝在加工中不与工件接触, 两者之间的作用力很小, 因而不需要电极丝、工件及夹具具有足够的刚度来抵抗切削变形。

3) 电极丝不必比工件材料硬, 可以加工高硬度、高强度、高脆性、高韧性等难以加工的半导体材料。

4) 直接利用电能、热能进行加工, 可以方便地对影响加工精度的参数, 如加工电流、脉冲宽度、脉冲间隔等进行调整, 有利于加工精度的提高, 便于实现加工过程的自动化控制。

5) 由于线切割加工产生的切缝窄, 实际金属腐蚀量很少, 能有效地节约贵重材料, 提高材料利用率。

6) 与电火花成形机床相比, 数控电火花线切割机直接利用线状电极作为工具电极, 不需要做专用电极, 省去了成形工具电极的设计和制造费用, 缩短了生产准备时间。

7) 数控线切割加工的对象主要是平面形状, 但是除了所加工零件的内侧拐角处有最小圆弧半径的限制外 (最小圆弧半径尺寸为电极丝半径 + 放电间隙), 其他任何复杂的形状都可以加工。

8) 可忽略电极丝损耗。在快走丝线切割加工中采用低损耗脉冲电源, 而慢走丝线切割加工采用单向供丝, 在加工区总是保持新电极丝加工, 故加工精度高。

9) 数控线切割机床一般依靠微型计算机来控制电极丝的轨迹和间隙补偿功能, 因此在同时加工凸、凹模时, 配合间隙可以在一定范围内任意调节。

- 10) 采用乳化液或去离子水作为工作液,不必担心发生火灾,可以昼夜无人连续加工。
- 11) 任何复杂形状的零件,只要能编制加工程序就可以进行加工,因此特别适合小批量零件和试制品的加工。
- 12) 有的数控电火花线切割机床具有四轴联动功能,可以加工上、下异形件,形状扭曲曲面体,变锥度和球形体等零件。
- 数控电火花线切割加工的缺点是:不能加工不导电的材料。由于是用电极丝进行贯穿加工,所以不能加工不通孔的零件和阶梯表面。若加工表面有变质层、毛刺等,则需要处理后才能加工。线切割加工有厚度极限,工件过薄或过厚将使加工不稳定,甚至无法进行。另外,与传统切削加工相比,加工效率较低,加工成本较高,不宜加工形状简单的大批量零件。

1.1.4 线切割加工的应用

线切割加工为新产品试制、精密零件加工及模具制造等开辟了一条新的工艺途径,主要应用于以下几个方面。

- 1) 加工模具零件。电火花线切割加工主要应用于冲模、挤压模、塑料模的加工等。电火花线切割加工机床的加工速度和精度在迅速提高,目前已达到可与坐标磨床相竞争的程度。例如中小型冲模,材料为模具钢,过去用曲线磨削的方法加工,现在改用电火花线切割整体加工的方法,制造周期可缩短 $3/4 \sim 4/5$,成本降低 $2/3 \sim 3/4$,配合精度高,不需要熟练的操作工人。因此,一些工业发达国家的精密冲模的磨削等工序,已被电火花成形加工和电火花线切割加工所代替。
- 2) 切割电火花成形加工用的电极。一般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,电火花线切割也适用于加工微细复杂形状的电极。
- 3) 试制新产品及零件加工。在新产品开发过程中需要单件的样品,使用线切割直接切割出零件。例如试制切割特殊微电机硅钢片定子、转子铁心,由于不需要另行制造模具,可大大缩短制造周期、降低成本。又如在冲压生产时,未制造落料模时,先用线切割加工的试样进行成形等后续加工,得到验证后再制造落料模。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。在零件制造方面,可用于加工品种多、数量少的零件,特殊难加工材料的零件,材料试验件,各种型孔、型面、特殊齿轮、凸轮、样板、成形刀具。有些具有锥度切割的线切割机床,可以加工出“天圆地方”等上、下异形面的零件。同时还可进行微细加工,如异形槽和标准缺陷的加工等。表 1-1 为电火花线切割加工的应用领域。图 1-1 所示为电火花线切割加工的产品实例。

表 1-1 电火花线切割加工的应用领域

应用领域	具体说明
平面形状的金属模加工	冲模、粉末冶金模、拉拔模、挤压模的加工
立体形状的金属模加工	冲模用凹模的退刀槽加工、压铸模、塑料膜等分型面加工
电火花成形加工用电极制作	形状复杂的微细电极的加工、一般穿孔用电极的加工、带锥度电极的加工

(续)

应用领域	具体说明
试制品及零件加工	试制零件的直接加工、批量小品种多的零件加工、特殊材料的零件加工、材料试件的加工
轮廓量规的加工	各种卡板量具的加工、凸轮及模板的加工、成形车刀的成形加工
微细加工	化纤喷嘴加工、异形槽和窄槽加工、标准缺陷加工

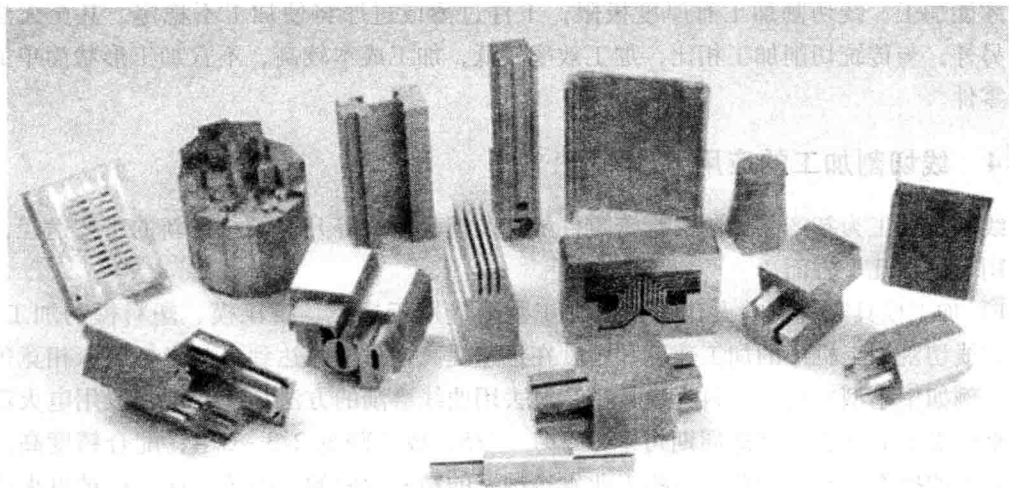


图 1-1 电火花线切割加工产品实例

1.2 电火花线切割加工原理

1.2.1 电火花线切割加工的基本原理

电火花线切割加工原理同电火花成形加工原理一样,利用工具电极(电极丝)和工件两极之间瞬时的脉冲放电产生的高温对工件进行尺寸加工。线切割加工时(图1-2),绕在滚丝筒(又称储丝筒)上的电极丝沿滚丝筒的回转方向以一定的速度移动,装夹在机床工作台上的工件由工作台按预定控制轨迹相对于电极丝做成形运动。脉冲电源的一极接工件,另一极接电极丝;在工件与电极丝之间总是保持一定的放电间隙且喷洒工作液,电极之间的火花放电蚀出一定的缝隙,连续不断的脉冲放电就切出了所需形状和尺寸的工件。

1.2.2 电火花加工的物理本质

电火花放电时,电极表面的金属材料究竟是怎样被蚀除下来的,这一微观的物理过程即所谓的电火花加工机理,也就是电火花加工的物理本质。了解这一微观过程,有助于掌握电火花加工的基本规律,从而能对脉冲电源、进给装置、机床设备等提出合理的要求。每次电火花腐蚀的微观过程是电场力、磁力、热力、流体动力、电化学和胶体化学等综合

作用的过程。这一过程大致可分为以下四个连续的阶段：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；蚀除产物的抛出；极间介质的消电离，如图1-3和图1-4所示。

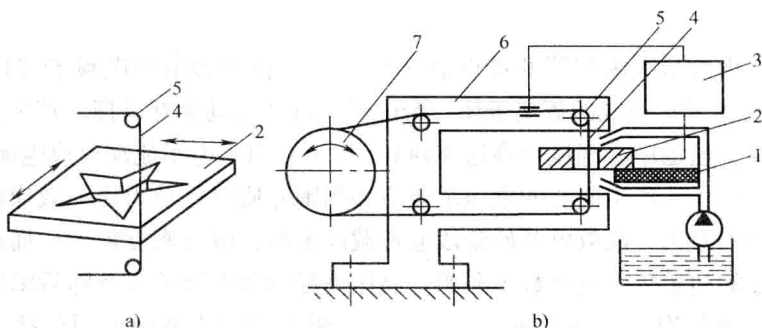


图 1-2 快走丝电火花线切割加工原理

a) 线切割工艺示意图 b) 装置结构

1—绝缘底板 2—工件 3—脉冲电源 4—钼丝 5—导丝轮 6—支架 7—储丝筒

1. 极间介质的电离、击穿，形成放电通道

图1-3所示为矩形波脉冲放电时的电压和电流波形。当80~100V的脉冲电压施加于工具电极与工件之间时（见图1-3a中的0~1段和1~2段），两极之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，即随着极间电压的升高或极间距离的减小，极间电场强度也随着增大。由于工具电极和工件的微观表面是凹凸不平的，极间距离又很小，因而极间电场强度是很不均匀的，两极间离得最近的突出点或尖端处的电场强度一般为最大。

液体介质中不可避免地含有某些杂质（如金属微粒、碳粒子、胶体粒子等），也有一些自由电子，使介质呈现一定的电导率。在电场作用下，这些杂质使极间电场更不均匀。当阴极表面某处的电场强度增加到 10^5 V/mm 即 $100 \text{ V}/\mu\text{m}$ 左右时，就会由阴极表面向阳极逸出电子。在电场作用下，电子高速向阳极运动并撞击工作液介质中的分子或中性原子，产生碰撞电离，形成带负电的粒子（主要是电子）和带正电的粒子（正离子），导致带电粒子雪崩式增多，使介质击穿而形成放电通道，如图1-4a所示。这种由于电场强度高而引起的电子发射形成的间隙介质击穿，称为场致发射击穿。同时，由于负极表面温度升高、局部过热而引起大量电子发射形成的间隙介质击穿，称为热击穿。

从雪崩电离开始到建立放电通道的过程非常迅速，一般小于 $0.1 \mu\text{s}$ ，间隙电阻从绝缘

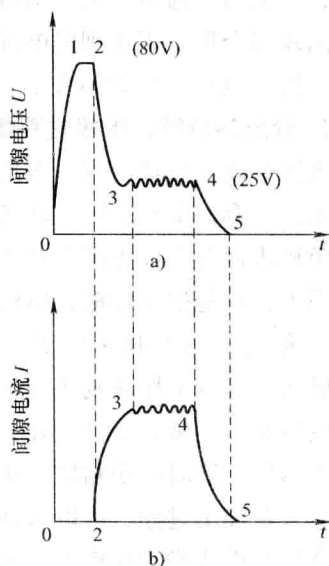


图 1-3 极间放电电压和电流波形

a) 电压波形 b) 电流波形

状况迅速降低到几分之一欧, 间隙电流迅速上升到最大值(几安到几百安)。由于通道直径很小, 所以通道中的电流密度可高达 $10^3 \sim 10^4 \text{ A/mm}^2$ 。间隙电压则由击穿电压迅速下降到火花维持电压(一般约为 25V), 电流则由 0 上升到某一峰值电流, 如图 1-3a、b 中的 2~3 段至 3~4)。

放电通道是由数量大体相等的带正电(正离子)粒子和带负电粒子(电子)以及中性粒子(原子或分子)组成的等离子体。带电粒子高速运动相互碰撞, 产生大量的热, 使通道温度相当高, 通道中心温度可高达 10000°C 以上。由于电子流动形成电流而产生磁场, 磁场又反过来对电子流产生向心的磁压缩效应和周围介质惯性动力压缩效应的作用, 通道瞬间扩展受到很大阻力, 故放电开始阶段通道截面很小, 电流密度很大, 而通道内由瞬时高温热膨胀形成的初始压力可达数十兆帕。高压高温的放电通道以及随后瞬时汽化形成的气体(以后发展成气泡)急速扩展, 并产生一个强烈的冲击波向四周传播。在放电过程中, 同时还伴随着一系列派生现象, 其中有热效应、电磁效应、光效应、声效应及频率范围很宽的电磁波辐射和局部爆炸冲击波等。

关于通道的结构, 一般认为是单通道, 即在一次放电时间内只存在一个放电通道; 少数人认为可能有多通道, 即在一次放电时间内可能同时存在几个放电通道, 理由是单次脉冲放电后电极表面有时会出现几个电蚀坑。最近的实验表明, 单个脉冲放电时有可能先后出现多次击穿(即一个脉冲内间隙击穿后, 有时产生短路和开路, 接着又产生击穿放电)。另外, 也会出现通道受某些随机因素的影响而产生游移、徙动, 因而在单个脉冲周期内会先后出现多个形状不规则的电蚀坑, 但同一时间内只存在一个放电通道, 这是因为形成通道后, 间隙电压降至 25V 左右, 不可能再击穿而形成第二个通道。

2. 介质热分解、电极材料熔化、汽化热膨胀

极间介质一旦被击穿、电离、形成放电通道后, 脉冲电源使通道间的电子高速奔向正极, 正离子奔向负极。电能转换成动能, 动能通过碰撞又转变为热能。于是在通道内, 正极和负极表面分别成为瞬时热源, 温度急剧升高, 分别达到 5000°C 以上。放电通道在高温的作用下, 首先把工作液介质汽化, 进而热裂分解汽化, 如煤油等碳氢化合物工作液高温后裂解为 H_2 (约占 40%)、 C_2H_2 (约占 30%)、 CH_4 (约占 15%)、 C_2H_4 (约占 10%) 和游离碳等, 水基工作液则热分解为 H_2 、 O_2 的分子甚至原子等。正、负极表面的高温除使工作液汽化、热裂分解汽化外, 也使金属材料熔化, 直至沸腾汽化。这些汽化后的工作液和金属蒸气, 瞬时体积猛增, 迅速热膨胀, 就像火药、爆竹点燃后那样具有爆炸的特性。观察电火花加工过程, 可以看到放电间隙间冒出很多小气泡(图 1-4b), 工作液逐渐变黑, 并听到轻微而清脆的爆炸声。从超高速摄影中可以看到, 这一阶段中各种小气泡最后形成一个大气泡充满在放电通道的周围, 并不断向外扩大。

这种热膨胀和局部微爆炸, 使熔化、汽化了的电极材料抛出而形成蚀除, 相当于图 1-3 中 3~4 段, 此时 80~100V 的空载电压降为 25V 左右的火花维持电压, 由于它含有高频成分而呈锯齿状, 电流则上升为锯齿状的放电峰值电流。

3. 蚀除产物的抛出

通道和正、负极表面放电点瞬时高温使工作液汽化和金属材料熔化、汽化, 热膨胀产

生很高的瞬时压力。通道中心的压力最高，使汽化了的气体体积不断向外膨胀，形成一个扩张的气泡。气泡上下、内外的瞬时压力并不相等，压力高处的熔融金属液体和蒸气就被排挤、抛出而进入工作液中。

表面张力和内聚力的作用使抛出的材料具有最小的表面积，冷凝时凝聚成细小的圆球颗粒（直径为 $\phi 0.1 \sim 300 \mu\text{m}$ ，随脉冲能量而异），如图1-4c所示。图1-4a、b、c、d所示为放电过程中四个阶段放电间隙状态的示意图。

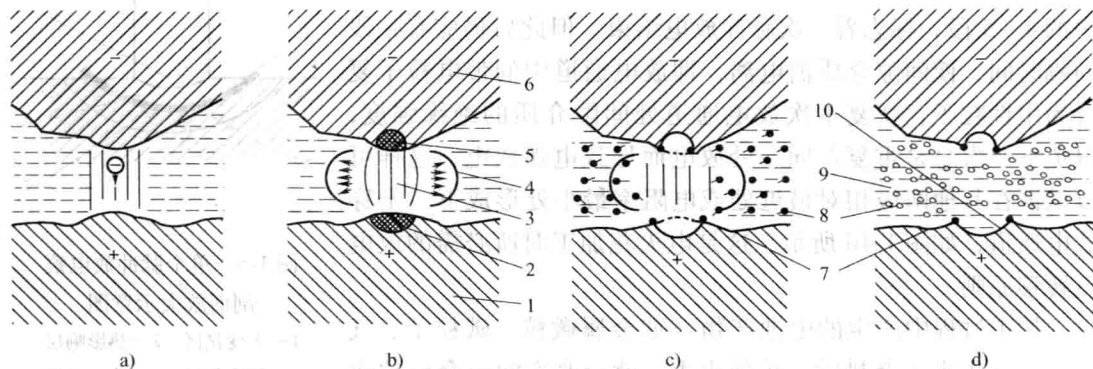


图1-4 放电间隙状态示意图

1—正极 2—从正极上熔化并抛出金属的区域 3—放电通道 4—气泡 5—在负极上熔化并抛出金属的区域
6—负极 7—翻边凸起 8—在工作液中凝固的微粒 9—工作液 10—放电形成的凹坑

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，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、镀覆以及吸附的现象，在某些条件下可以用来减少或补偿工具电极在加工过程中的损耗。

半裸在空气中进行电火花加工时，可以看到橘红色甚至蓝白色的火花四溅，它们就是被抛出的金属高温熔滴、小屑。

观察电火花加工中铜加工钢后的电极表面，可以看到钢上粘有铜、铜上粘有钢的痕迹。如果进一步分析电加工后的产物，在显微镜下可以看到除了游离碳粒、大小不等的铜和钢的球状颗粒之外，还有一些钢包铜、铜包钢互相飞溅包容的颗粒，此外还有少数由气态金属冷凝成的中心带有空泡的空心球状颗粒产物。

当放电结束后，气泡温度不再升高，但由于液体介质惯性作用使气泡继续扩展，气泡内压力急剧降低，甚至降到大气压以下，形成局部真空，再加上材料本身在低压下再沸腾的特性，使在高压下溶解在过热材料中的气体析出。压力的骤降使熔融金属材料及其蒸气从小坑中再次爆沸飞溅而被抛出。熔融材料抛出后，在电极表面形成单个脉冲的放电痕，其剖面放大示意图如图1-5所示。熔化区未被抛出的材料冷凝后残留在电极表面，形成熔化凝固层，在四周形成稍凸起的翻边。熔化凝固层下面是热影响层，再往下才是无变化的材料基体。

总之，材料的抛出是热爆炸力、电磁动力、流体动力等综合作用的结果，对这一复杂