

高级数控技工培训丛书

数控线切

割加工

SUNNYTECH 浙大旭日-卫兵工作室

单岩 夏天 编著

481
74

工业出版社
MACHINE PRESS



高级数控技工培训丛书

数控线切割加工

SUNNYTECH 浙大旭日-卫兵工作室

单岩 夏天 编著



机械工业出版社

本书主要讲授数控电火花线切割技术的实用操作和编程技术。主要内容包括：数控线切割机床的结构、数控线切割的加工工艺、数控线切割加工操作、数控线切割的手工编程、CAXA 数控线切割自动编程、特种线切割加工、数控线切割编程实例等内容。

本书可作为具有中专以上文化程度的机械技术人员或在校学生的教材，或中等专科学校机电及模具专业以及相关培训机构的培训教材，并可作为相关技术人员的参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

数控线切割加工/单岩, 夏天编著. —北京: 机械工业出版社, 2004.7

高级数控技工培训丛书

ISBN 7-111-14418-X

I. 数... II. ①单...②夏... III. 数控线切割: 电火花线切割—技术培训—教材 IV. TG484

中国版本图书馆CIP数据核字 (2004) 第140355号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑: 周国萍 版式设计: 冉晓华 责任校对: 罗莉华

封面设计: 解辰 责任印制: 洪汉军

北京中兴印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所发行

2004年7月第1版第1次印刷

890mm×1240mm A5·5.75印张·166千字

0 001—4 000册

定价: 15.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

丛书序言

近年来，国内人才市场供需结构发生了深刻的变化。一方面，本科以上的高学历人才呈现相对饱和的状态，高校毕业生已不再是“天之骄子”；而另一方面，面向制造企业的技能型人才呈现供不应求的局面，甚至出现十几万年薪“抢”人才的现象。

全球制造业正向中国转移，且这种趋势已呈现出加速的势头。与此同时，传统的重高等教育、轻技能教育的观念也发生了变化。在国务院新闻办公室举办的2004年第一次新闻发布会上，发布了“以就业为导向，大力培养技能人才”的变革措施。政府计划在今后的若干年中加速培训数百万的技能型人才，以满足市场的需求。

然而，与这一趋势不相适应的是，面向制造的技能培训教材却相对较少。而一些相近的教材则普遍存在两个问题：一是理论部分比重偏大，实际操作、工艺、经验的比重偏小，与技能型人才的培训需求不相适应。二是知识结构往往比较陈旧，与当前的主流制造方式不相适应。如有的数控培训教材中还在讲授APT语言、纸带穿孔记录数据等过时的内容。

针对这一现状，我们推出了这套技能型人才系列培训教程，它围绕机械制造，特别是模具制造行业中的几种主流加工方式，即数控电火花加工、数控线切割加工、数控车加工、数控铣加工和模具数控加工，讲授数控设备的操作和应用技能，培养模具数控加工领域的技能型人才。

针对技能型人才的培养特点，本套教材打破以往将内容单纯按类别进行分割的板块式讲授方式，而是以相关技能的实际操作过程为主线进行讲解，即采用流程化的讲授方式，以便读者对相关技能的操作过程有更直观、更清晰的认识。此外，在内容的选取上尽可能减少理论，增加实际操作、工艺经验等方面的比重，以达到良好的实用性。

丛书作者既有多年从事数控技术研究和教学工作的高校教师，也

IV

有来自生产第一线的、具有丰富实际经验的工程师，从而保证了丛书编写中理论与实际应用的协调统一。

我们热切地期待广大读者对丛书提出宝贵意见，并通过网站：www.cad-lab.com 或电子信箱：book@sunnytech.cn 与我们进行交流。

浙大旭日-卫兵科技图书
高级数控技工培训丛书编委会
2004-1-8

前 言

随着科技的进步与发展,尤其是以计算机、信息技术为代表的高新技术的发展,使制造技术的内涵和外延发生了革命性的变化。数控加工技术使机械制造过程发生了显著的变化,是最具代表性的先进制造技术,目前在模具、汽配等行业已广泛应用。

在我国工业技术发展的新形势下,模具加工技术发展迅猛,数控电火花线切割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、数学以及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。目前,在很多行业新产品的研制和开发过程中,常采用数控电火花线切割技术直接切割零件,从而使研制和开发周期大大缩短,生产效率得以大幅度提高。

近年来,国内机械制造行业对数控加工的需求高速增长,但数控技术人才包括数控线切割加工人才严重短缺。因此该方向已逐渐成为就业市场上的热点,对此项技术的培训需求也不断增长。

本书在内容安排上注重实用技术与必要的基础知识的统一、应用思路和技巧的统一,文字简练,图文并茂,确保了扎实的培训效果。通过对数控线切割加工专题的讲解及大量的实例练习,使读者迅速掌握数控加工中最实用的技术内容,具备数控线切割机床操作编程的能力。本书采用通俗直观的方式,重点讨论了数控线切割机床的结构、数控线切割的加工工艺,数控线切割加工操作、数控线切割的手工编程、CAXA 数控线切割自动编程、特种线切割加工、数控线切割编程实例等内容,使具有中专以上文化程度的读者能在较短的时间内理解和掌握基本实用技术,为以后进一步提高技术水平打下良好基础。

本书可作为具有中专以上文化程度的机械技术人员或在校学生的教材,或中等专科学校机电及模具专业以及相关培训机构的培训教材,并可作为相关技术人员的参考资料。

VI

本书由浙大旭日-卫兵工作室编写。在编写过程中参阅了国内外同行的文献、资料和教材，得到了许多专家和同行的支持和帮助，在此表示衷心感谢。

限于作者的知识水平和经验，书中难免有欠妥和错误之处，恳请广大专家和读者批评指正。读者可通过网站 www.cad-lab.com 与我们交流。

编者

2004年4月

目 录

丛书序言

前言

第 1 章 概述	1
1.1 电火花线切割加工的特点与应用	1
1.1.1 电火花线切割加工的特点	1
1.1.2 电火花线切割加工的应用	2
1.2 电火花线切割加工放电基本原理	3
1.3 高速走丝数控电火花线切割和低速走丝数控电火花线切割	5
1.3.1 高速走丝数控电火花线切割机床	6
1.3.2 低速走丝电火花线切割加工机床	6
1.4 电火花线切割技术的应用现状及发展趋势	7
第 2 章 电火花线切割加工设备	10
2.1 线切割机床	10
2.1.1 X、Y坐标工作台	10
2.1.2 走丝机构	14
2.1.3 丝架	15
2.1.4 工作液循环系统	16
2.2 控制器	18
2.2.1 数字控制系统 (NC)	18
2.2.2 计算机数字控制系统 (CNC)	19
2.3 脉冲电源	19
2.3.1 对电火花线切割脉冲电源的基本要求	19
2.3.2 脉冲电源的种类	21
2.4 线切割机床的控制面板	24

2.4.1	数控脉冲电源柜面板	25
2.4.2	手控盒操作面板	26
2.4.3	储丝筒操作面板	26
第3章	电火花线切割加工工艺	28
3.1	线切割加工工艺的一般规律	28
3.1.1	电火花线切割加工的切割速度及其主要影响因素	28
3.1.2	电火花线切割加工的加工精度及其主要影响因素	31
3.1.3	电火花线切割加工的表面粗糙度及其主要影响因素	35
3.2	电参量对加工工艺指标的影响	37
3.2.1	短路峰值电流对工艺指标的影响	38
3.2.2	脉冲宽度对工艺指标的影响	38
3.2.3	脉冲间隔对工艺指标的影响	38
3.2.4	开路电压对工艺指标的影响	39
3.3	线切割工作液对工艺指标的影响	40
3.4	电极丝对线切割工艺性能的影响	41
3.4.1	常用电极丝材料的种类、名称和规格	41
3.4.2	电极丝直径的影响	42
3.4.3	电极丝上丝、紧丝对工艺指标的影响	42
3.4.4	电极丝垂直度对工艺指标的影响	43
第4章	电火花线切割加工操作	44
4.1	电火花线切割加工操作流程	44
4.2	加工前的准备	45
4.2.1	工件材料的选定和处理	45
4.2.2	工件的工艺基准	45
4.2.3	电极丝的选择	45
4.2.4	穿丝孔的加工	47
4.2.5	加工路线的选择	48
4.2.6	工件的装夹	49
4.2.7	工件位置的找正	52
4.3	线切割加工的控制器的操作	54
4.3.1	线切割加工步骤	54

4.3.2	线切割加工基本操作	55
4.3.3	加工操作注意事项	58
4.4	加工过程中特殊情况的处理	59
4.4.1	短时间临时停机	59
4.4.2	断丝处理	59
4.4.3	控制器出错或突然停电	60
4.4.4	短路的排除	60
4.5	电火花线切割加工的安全技术规程	60
4.6	电火花线切割机床的使用规则及维护保养方法	61
4.6.1	电火花线切割机床的使用规则	61
4.6.2	电火花线切割机床的保养方法	62
4.6.3	交流稳压电源的使用方法	63
第 5 章	数控线切割手工编程	64
5.1	3B 格式程序	64
5.1.1	程序格式	64
5.1.2	直线的编程	65
5.1.3	圆弧编程	66
5.1.4	带有间隙补偿的 4B 编程	68
5.2	ISO 标准 G 代码编程	69
5.2.1	程序格式	69
5.2.2	准备功能 (G 功能)	70
5.2.3	指定有关机械控制 (T 功能)	75
5.2.4	辅助功能 (M 功能)	75
5.3	编程常用的数学基础	76
5.3.1	坐标系	76
5.3.2	函数	77
5.3.3	编程常用的三角计算公式	78
5.3.4	利用 CAD 软件进行尺寸和坐标查询	80
第 6 章	CAXA 数控线切割自动编程	81
6.1	线切割 CAD/CAM 软件简介	81
6.2	CAXA 线切割的操作界面	82

6.2.1 绘图功能区	82
6.2.2 菜单系统	83
6.2.3 状态栏	90
6.3 图形绘制	90
6.3.1 基本曲线	90
6.3.2 高级曲线	100
6.3.3 曲线编辑	110
6.4 加工轨迹	120
6.4.1 轨迹生成	121
6.4.2 轨迹跳步	125
6.4.3 取消跳步	125
6.4.4 轨迹仿真	126
6.4.5 查询切割面积	127
6.5 后处理生成代码	127
6.5.1 生成 3B 加工代码	128
6.5.2 生成 4B/R3B 加工代码	130
6.5.3 校核 B 加工代码	130
6.5.4 生成 G 加工代码	131
6.5.5 校核 G 加工代码	132
6.5.6 查看/打印代码	132
6.5.7 粘贴加工代码	133
第 7 章 特种线切割加工	135
7.1 锥度线切割加工	135
7.1.1 线切割加工斜度的加工原理	135
7.1.2 锥度线切割加工实例	139
7.2 上下异形面线切割加工	141
第 8 章 数控线切割编程实例	144
附录	159
附录 A 电火花线切割常用名词术语	159
附录 B 电火花线切割加工工人等级标准	163

附录 C CAXA 线切割 V2 快捷键	166
附录 D 数控线切割加工操作流程索引表	168
参考文献	169

第 1 章 概 述

1.1 电火花线切割加工的特点与应用

所谓电火花线切割,就是以移动着的细丝(直径约在 0.5mm 以内)做电极,在电极丝与工件之间产生火花放电,并同时按所要求的形状驱动工件进行加工。

1.1.1 电火花线切割加工的特点

电火花线切割加工归纳起来有以下一些特点:

(1) 它以 0.03~0.35mm 的金属线为电极工具,不需要制造特定形状的电极。

(2) 虽然加工的对象主要是平面形状,但是除了有金属丝直径决定的内侧脚步的最小直径 R (金属线半径 + 放电间隙) 这样的限制外,任何复杂的形状都可以加工。

(3) 轮廓加工所需加工的余量少,能有效地节约贵重的材料。

(4) 可无视电极丝损耗(高速走丝线切割采用低损耗脉冲电源;慢速走丝线切割采用单向连续供丝,在加工区总是保持新电极丝加工),加工精度高。

(5) 依靠微型计算机控制电极丝轨迹和间隙补偿功能,同时加工凹凸两种模具时,间隙可任意调节。

(6) 采用乳化液或去离子水的工作液,不必担心发生火灾,可以昼夜无人连续加工。

(7) 无论被加工工件的硬度如何,只要是导体或半导体的材料都能实现加工。

(8) 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,因而很适合小批量零件和试制品的生产加工,加工周期短,应用灵活。

(9) 采用四轴联动,可加工上、下面异形体,形状扭曲曲面体,

变锥度和球形体等零件。

1.1.2 电火花线切割加工的应用

1. 试制新产品

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，无需模具，这样可以大大缩短新产品开发周期并降低试制成本。如在冲压生产时，未开出落料模时，先用线切割加工的样板进行成形等后续加工，得到验证后再制造落料模。

2. 加工特殊材料

切割某些高硬度、高熔点的金属时，使用机加工的方法几乎是不可能的，而采用线切割加工既经济又能保证精度。

3. 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、电火花型腔模的电极加工等。由于电火花线切割加工机床加工速度和精度的迅速提高，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，过去用分开模和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 $3/4 \sim 5/4$ ，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，已被电火花和电火花线切割加工所代替。表 1-1 表示电火花线切割加工的应用领域。

表 1-1 电火花线切割加工的应用领域

电 火 花 线 切 割 加 工	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、塑料用金属压模、塑料膜等分离面加工
	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、带锥度型模电极的加工
	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

1.2 电火花线切割加工放电基本原理

采用电极移动方式的电火花加工装置称为电火花线切割 (Wire-cut EDM 或 Traveling-Wire EDM)。前苏联于 1955 年制成了电火花线切割机床, 而瑞士于 1968 年制成了 NC 方式的电火花线切割机床。

电火花线切割加工与普通电火花加工不同之处, 首先在于, 电火花线切割是一边走丝一边放电, 所以无需形成电极, 而普通电火花加工, 则非有成形电极不可; 其次是工作液不同, 普通电火花加工主要采用油类, 而电火花线切割加工则用水, 主要是去离子水; 再者, 电火花线切割加工已实现装置化, 通常是一边移动工件一边进行加工, 或者是工件按仿形方式移动, 或者借助数控驱动工件。

火花放电时, 工件表面的金属究竟是怎样被蚀除下来的? 只有了解这一微观过程, 才有助于掌握电火花线切割加工的切割速度、加工精度、表面粗糙度、电极丝损耗等各种基本规律, 进而对脉冲电源、控制系统、供液系统、走丝机构、切割台等提出合理的要求。每次电火花蚀除的微观过程是热 (主要是表面热源) 和力 (电场力、磁场力、热力、流体动力) 等综合作用的过程。这一过程大致可分为以下相互独立又相互联系的几个阶段: 电离击穿、脉冲放电、金属熔化和气化、气泡扩展、金属抛出及消电离恢复绝缘强度。

电火花线切割加工时, 每一个脉冲放电释放的能量使工件表面放电点间的介质电离击穿, 造成放电点的熔化甚至气化, 最后这些金属被抛出而形成一个小凹坑。无数个脉冲连续放电产生无数个凹坑的叠加, 就能沿电极丝的轨迹形成一条切缝。电火花线切割是运动着的电极丝柔性件对刚性件的加工, 击穿放电主要是依靠“疏松”接触击穿, 即在电极丝与工件之间接触, 但在不造成短路的情况下发生击穿发电。根据实验, 电极丝与工件相距 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 时, 无击穿现象; 电极丝压过工件 $0.04 \sim 0.07 \mu\text{m}$ 时, 单脉冲的放电率接近 98%, 当电极丝压过工件 0.1mm 时, 则电极丝与工件之间发生短路, 不能形成放电通道, 如图 1-1 所示。

下面描述线切割加工电蚀过程。在击穿前后, 电极丝和工件的微

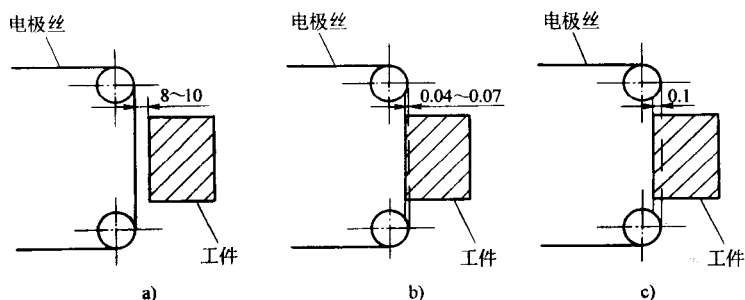


图 1-1 电极丝与工件之间放电率

a) 无击穿现象 b) 放电率 98% c) 短路, 不放电

观表面总是凹凸不平的。每次脉冲放电前, 电极丝和工件间离得最近的凸点处的电场强度最高, 其间的乳化液电阻值较低而最先被击穿, 即被分解成带负电的电子和带正电的离子而被电离, 形成放电通道。在电场力的作用下, 通道内的负电子高速奔向阳极, 正离子奔向阴极, 原先几百欧姆的电阻降低到 $1\sim 2$ 欧甚至几分之一欧, 所通过的电流亦相应的由零增大到相当大的数值, 而放电间隙电压则由开路电压降落到 20V 左右的放电电压。

由于放电通道中电子、离子受到放电时磁场力和周围液体介质的阻尼和压缩, 所以放电通道的截面很小, 通道中的电流密度很大, 达到 $10^4\sim 10^9\text{A}/\text{cm}^2$ 。电子、离子高速流动时相碰撞, 通道中放出大量的热, 同时阳极金属表面受到电子流的高速轰击。阴极表面受到离子流的轰击, 动能转化为热能, 在放电表面产生大量的热, 整个放电通道形成一个瞬时热源, 可形成 10000°C 以上的高温。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化合物等气体析出 (乳化液很快变脏变黑)。在热源作用区的局部电极丝及工件表面, 同时被加热到熔点, 甚至沸点以上的温度, 使局部的金属材料熔化和气化。由于这一加热过程非常短促 ($10^{-7}\sim 10^{-4}\text{s}$), 因此金属的熔化、气化及乳化液介质的气化都具有爆炸的特性 (线切割加工时可以听到吱吱声和轻微的噼啪声)。爆炸力把熔化的金属, 以及金属蒸气、乳化液蒸气抛进乳化液中冷却。当它们凝固成固体时, 由于

表面张力和内聚力的作用，均凝聚成具有最小表面积 of 细椭圆形颗粒（长半轴半径约 $0.1 \sim 500 \mu\text{m}$ ，因脉冲能量而异）。而电极丝表面则形成一个四周稍有凸缘的微小椭圆形凹坑。图 1-2 为放电间隙微观示意图，图 1-2a 为放电过程，图 1-2b 为放电后的情况。

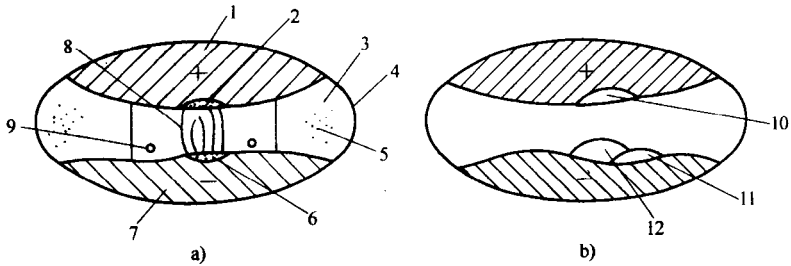


图 1-2 放电间隙微观示意图

a) 放电过程 b) 放电后

1—阳极 2—阳极电蚀区 3—金属融滴 4—工作液 5—金属微粒 6—阴极电蚀区
7—阴极 8—放电通道和气泡 9—小气泡 10—凸缘 11—凹坑 12—镀覆物

实际上熔化和气化了的金属在抛离电极丝表面时，沿切缝四处乱射飞溅，除绝大部分抛入工作液中收缩成球状小颗粒外，有一部分飞溅、吸附、镀覆在对面的电极丝表面上。这种相互飞溅、镀覆的现象在某些条件下可以用来减少或补偿电极丝在加工时的损耗。

观察电火花线切割在加工纯铜和黄铜后的电极丝表面可以看出粘有铜的痕迹。如果进一步分析电火花线切割的产物（电极丝为钼丝），在金相显微镜下可以看到除了游离碳粒、大小不等的铜的球状颗粒之外，还有一些铜包钼、钼包铜互相飞溅包容的颗粒，此外还有少数由气态直接冷凝成的中空金属颗粒。

1.3 高速走丝数控电火花线切割和低速走丝数控电火花线切割

数控电火花线切割加工机床，根据电极丝运动的方式可以分成高速走丝数控电火花线切割机床和低速走丝数控电火花线切割机床两大