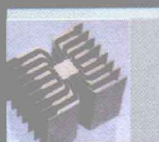


# 放电加工

徐维雄 著



海峡出版发行集团  
THE STRAITS PUBLISHING & DISTRIBUTING GROUP

福建科学技术出版社  
FUJIAN SCIENCE & TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

# 放电加工

FANGDIAN JIAGONG

徐维雄 著



海峡出版发行集团  
THE STRAITS PUBLISHING & DISTRIBUTING GROUP

福建科学技术出版社  
FUJIAN SCIENCE & TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

**图书在版编目 (CIP) 数据**

放电加工/徐维雄著. —福州: 福建科学技术出版社, 2010. 12

ISBN 978-7-5335-3782-1

I. ①放… II. ①徐… III. ①电火花加工 IV.  
①TG661

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 252156 号

|      |                         |
|------|-------------------------|
| 书 名  | 放电加工                    |
| 著 者  | 徐维雄                     |
| 出版发行 | 海峡出版发行集团<br>福建科学技术出版社   |
| 社 址  | 福州市东水路 76 号 (邮编 350001) |
| 网 址  | www.fjstp.com           |
| 经 销  | 各地新华书店                  |
| 排 版  | 福建科学技术出版社排版室            |
| 印 刷  | 福州晚报印刷厂                 |
| 开 本  | 787 毫米×1092 毫米 1/16     |
| 印 张  | 12.5                    |
| 字 数  | 334 千字                  |
| 版 次  | 2010 年 12 月第 1 版        |
| 印 次  | 2010 年 12 月第 1 次印刷      |
| 书 号  | ISBN 978-7-5335-3782-1  |
| 定 价  | 24.80 元                 |

书中如有印装质量问题, 可直接向本社调换

## 前 言

放电加工是一种利用电能和热能进行加工的新工艺，放电加工与一般切削加工的区别在于放电加工时工具与工件并不接触，而是靠工具与工件间不断产生的脉冲火花放电，利用放电时产生局部、瞬时的高温把金属材料逐步蚀除下来，由于在放电过程中有可见的火花产生，故放电加工又称电火花加工。

放电加工的应用几乎渗透到各个工业领域，如何写一本学了就能用的关于放电加工的书，一直是我考虑的问题，这也是我从事教学和生产实践多年产生的愿望。这本书我从三个方面写，一是从软件方面写，介绍线切割常用的 HL 编程软件，第三章和第四章，花了两章的篇幅来介绍 HL 线切割编程软件，本书介绍软件重在实操，特别是在第三章的第六节从实操的各个界面的变化来说明软件的使用，二是从经验方面写，更多是把有实践经验的师傅们的经验写进去，特别在本书的第六章所谈到的“线切割机床故障处理以及维修保养”是记录和整理许多现场师傅的工作经验，这些经验是宝贵的、可直接借鉴和引用的，把现场的经验写进书中是重要的。三是从控制方面写，介绍有关的控制电路。

此外，在本书中作者也提出了许多新的观点，如第二章第二节“电火花成型加工工艺”中提到“炭黑微粒在放电过程中的积极作用”，等等。

本书主要分为六章，第一、二章介绍电火花线切割加工技术和电火花成型加工技术；第三、四章介绍电火花线切割机床的 HL 软件编程；第五章介绍电火花的控制系统；第六章介绍线切割机床故障处理以及维修保养。

本书可作大、中专教材，也可作为学习这项技术的参考资料，作者认为这本书的实操性和针对性都很强，读了这本书就可以直接操作机器，但是由于本人水平有限，编写的时间相对仓促，编写难免有许多错误，请读者不吝赐教。

徐维雄

2009 年 12 月 30 日

## 目 录

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| <b>第一章 电火花切割加工技术</b> .....       | (7)   |
| 第一节 数控电火花线切割机床简介.....            | (8)   |
| 第二节 线切割机床加工前的准备 .....            | (13)  |
| 第三节 数控电火花线切割机床的基本操作 .....        | (19)  |
| 第四节 快走丝线切割和慢走丝线切割 .....          | (24)  |
| 第五节 中走丝线切割 .....                 | (32)  |
| <b>第二章 电火花成型加工技术</b> .....       | (35)  |
| 第一节 电火花成型加工技术概述 .....            | (36)  |
| 第二节 电火花成型加工工艺 .....              | (40)  |
| 第三节 电火花成型机床的操作 .....             | (47)  |
| 第四节 电火花成型机床的穿孔加工 .....           | (53)  |
| 第五节 电火花型腔加工 .....                | (62)  |
| 第六节 电火花成型机床常见故障与处理 .....         | (76)  |
| <b>第三章 线切割机床 HL 软件编程</b> .....   | (79)  |
| 第一节 HL 线切割软件介绍 .....             | (80)  |
| 第二节 图形编辑操作 .....                 | (92)  |
| 第三节 图形加工操作 .....                 | (96)  |
| 第四节 AUTOP 线切割软件使用概述 .....        | (101) |
| 第五节 图形输入操作.....                  | (106) |
| 第六节 HL 线切割软件使用图解 .....           | (114) |
| <b>第四章 线切割机床 HL 软件应用实例</b> ..... | (119) |
| 第一节 直线和圆弧组成图形的绘图和编程.....         | (120) |
| 第二节 直线、圆弧、过渡圆及对称图形的绘图和编程.....    | (126) |
| 第三节 两圆的公切线及公切圆.....              | (130) |
| 第四节 等分旋转图形.....                  | (136) |
| 第五节 三点圆及三切圆.....                 | (142) |
| 第六节 综合图形编程.....                  | (147) |
| <b>第五章 电火花加工控制系统</b> .....       | (157) |
| 第一节 电火花加工机床的控制简介.....            | (158) |

---

|            |                       |              |
|------------|-----------------------|--------------|
| 第二节        | PCI 总线技术 .....        | (165)        |
| 第三节        | 线切割机床的步进电源 .....      | (171)        |
| 第四节        | 线切割机床的高频电源 .....      | (173)        |
| 第五节        | 线切割机床的电气系统 .....      | (179)        |
| <b>第六章</b> | <b>线切割机床的维修 .....</b> | <b>(183)</b> |
| 第一节        | 线切割机床断丝原因 .....       | (184)        |
| 第二节        | 线切割机床常见故障与处理 .....    | (187)        |
| 第三节        | 线切割机床典型故障与处理 .....    | (192)        |
| 第四节        | 线切割机床的维修 .....        | (197)        |



# 第一章 电火花切割加工技术



## 第一节 数控电火花线切割机床简介

### 一、数控电火花线切割加工原理

数控电火花线是利用细金属线（常用的为钼、黄铜、紫铜等材料）作为负极，工件作为正极，在线电极和工件之间加以高频的脉冲电压，并置于乳化液或者去离子水等工作液中，使其不断产生火花放电，工件不断被电蚀，从而达到对工件进行加工的目的。

图 1-1-1 是数控电火花线切割加工的原理图。加工过程中线电极穿过工件上的穿丝孔，在运丝机构的带动下经过导向轮相对于工件不断往复运动（快走丝机床）或单向运动（慢走丝机床）。工件安装在十字工作台上并与其绝缘，工作台在数控装置的控制下沿 x、y 轴方向按要求的加工轨迹运动，将工件切割成型。

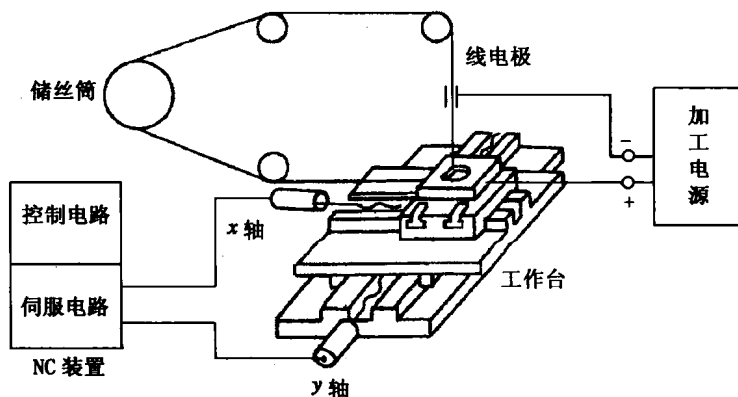


图 1-1-1 数控电火花线切割的加工原理

### 二、机床的组成

电火花线切割机床由床身、工作台（拖板）、运丝、线架、水箱、电器、附件、夹具、包装箱等组成。其中最重要的是以下 4 个部分以及电器部件。

#### 1. 工作台（拖板）部件

工作台是用来装夹被加工工件，它主要由上下拖板、滚珠丝杆、无齿隙齿轮组和导轨组成。上下拖板沿着导轨往复移动，而其动力是由步进电动机通过无齿隙齿轮组传到滚珠丝杆上来实现的，由于要达到一个脉冲使上下拖板移动 0.001mm 的要求，而且在运行中要求灵活、平稳，因而对导轨、滚珠丝杆、无齿隙齿轮组、拖板都有严格要求，不但精度要求高（如齿轮为 6 级精度、滚珠丝杆为 2 级精度），对刚度和耐磨性也有一定的要求。

#### 2. 运丝部件

运丝部件主要是用来带动电极丝按一定线速度移动并将电极丝整齐地排绕在储丝筒上，运丝机构是由储丝筒组件、上下拖板、同步带组件、换向装置组成。

它的基本要求是：

- (1) 储丝筒一边转动一边移动，以保证电极丝在储丝筒上整齐排列；
- (2) 储丝筒的径向跳动和轴向窜动要小；
- (3) 储丝筒需要正反转；
- (4) 储丝机构应与床身绝缘；
- (5) 润滑措施得当。

### 3. 线架部件

线架部件和储丝筒部件共同组成了电极丝的运动系统，线架的主要功能是在电极丝按给定线速度运动时对电极丝起支撑作用，并使电极丝工作部分与工作台面保持一定的几何速度。

对线架的基本要求是：

- (1) 有足够的刚度和强度。在电极丝运动时不应出现振动和变形。
- (2) 导轮有较高的运动精度（导轮转速达 6000 转/min），径向和轴向窜动 $\leq 5\mu\text{m}$ 。
- (3) 线架不但能保证电极丝垂直于工作台面，而且还具有使电极丝与工作台面成一定几何角度的功能，这样便可以加工锥度工件。

### 4. 床身部件

床身为整体方箱式结构，因而刚度、强度均较好，其上部装有工作台部件、线架部件、运丝部件、其下部装有工作液箱、机床电器部件。

## 三、数控电火花线切割加工的特点及应用

(1) 加工对象不受硬度的限制，特别适用于对淬火工具钢、硬质合金等高硬度材料的加工。

(2) 能加工细小、复杂的工件。由于电极丝直径最小可达 0.01mm，所以能加工出窄缝、锐角（小圆角半径）等微细结构。

(3) 加工精度较高。由于电极丝的磨损很小，并采用各种先进的线切割技术和设备，目前电火花加工精度已能达到  $\mu\text{m}$  级，表面粗糙度  $R_a$  可达  $1.6\mu\text{m}$ （快走丝）和  $0.1\mu\text{m}$ （慢走丝），完全可以满足一般精密零件的加工要求。

(4) 用户不需要制造电极，节约了电极制造时间和电极材料，降低了制造成本。

(5) 便于实现自动化。采用数控技术，只要编好程序，就能自动加工，如果采用计算机控制，就能进一步扩大用途和提高电火花线切割加工的工艺效果。

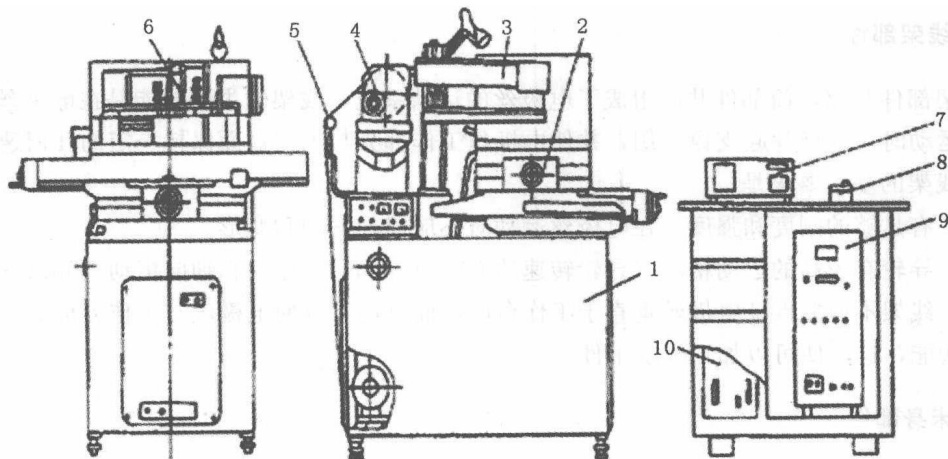
综上所述，电火花线切割加工特别适用于以下场合：

- (1) 模具加工，特别是冲裁模的凸凹模加工。
- (2) 样板和成型刀具加工。
- (3) 微细孔、槽、缝等加工。
- (4) 切割稀有、贵重、超硬金属材料。

## 四、数控电火花线切割机床的分类

根据电极丝运动的方式可将数控电火花线切割机床分为两大类，即快走丝线切割机床和慢

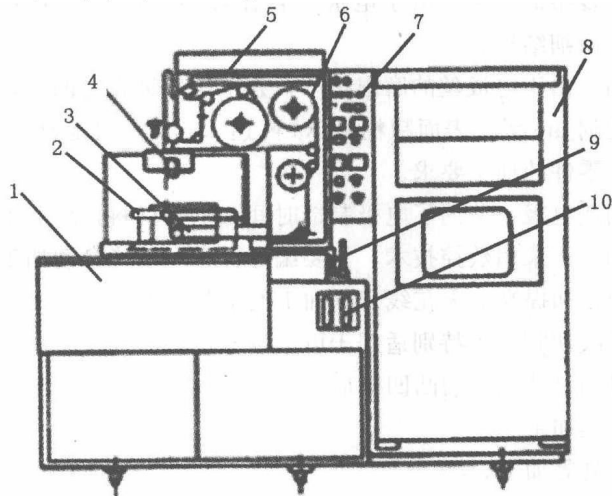
走丝线切割机床。快走丝线切割机床是我国在 20 世纪 60 年代研制成功的,其主要特点是电极丝运行速度快 ( $300\sim 700\text{m/min}$ ),加工速度较高,排屑容易,机构比较简单,价格相对便宜,因而在我国应用广泛。但由于其运丝速度快容易引起机床的较大振动,丝的振动也大,从而影响加工精度。它的一般加工精度为  $\pm 0.015\sim 0.02\text{mm}$ ,所加工工件的表面粗糙度  $R_a$  为  $1.25\sim 2.5\mu\text{m}$ 。快走丝线切割机床一般采用钼丝作为电极,双向循环往复运动,电极丝直径  $0.1\sim 0.2\text{mm}$ ,工作液常用乳化液。图 1-1-2 为快走丝线切割机床的结构简图。



1—床身 2—工作台 3—导丝架 4—储丝筒 5—紧丝装置  
6—工作液循环系统 7—控制箱 8—程控机头 9—脉冲电源 10—驱动电源

图 1-1-2 快走丝线切割机床

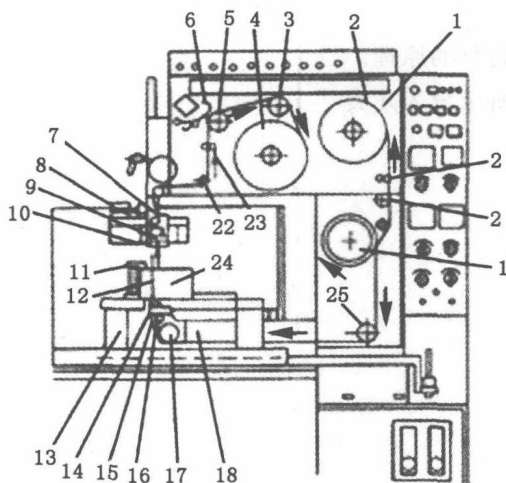
图 1-1-3 所示为慢走丝线切割机床的结构简图。它的运丝速度一般为  $3\sim 5\text{m/min}$ ,最高为  $15\text{m/min}$ 。电极丝采用黄铜、紫铜等材料,直径为  $0.03\sim 0.35\text{mm}$ ,电极丝单向运动且为一次性使用,这使电极丝尺寸一致性好,加工精度相对较高。一般这类线切割机床运丝系统较复杂



1—床身 2—工作台 3—下导向架 4—上导向架 5—电容箱 6—运丝机构  
7—机械操作盘 8—数控柜 9—绘图装置 10—去离子水流量计

图 1-1-3 慢走丝线切割机床

(图 1-1-4)，能够设定并调整丝张力，导向装置能够灵活进行断丝检测。最新的线切割机床还有自动穿丝和自动断丝功能。慢走丝线切割机床加工精度可达 $\pm 0.001 \text{ mm}$ ，所加工工件的表面粗糙度  $R_a$  可达  $0.3 \mu\text{m}$ ，工作液主要采用去离子水和煤油，切割速度目前能达到  $350 \text{ mm/min}$ 。



- 1—主体 2—送线盘 3—传动轮 4—卷线盘 5—丝进给轮 6—压紧轮 7—上导轮装置  
8—上导向作台 9—上导向器 10—上喷嘴 11—压板 12—电极丝 13—工件安装台  
14—下喷嘴 15—下导向器 16—电极销 17—下导向轮 18—横臂 19—制动轮  
20—滚轮 21—丝导向器 22—导向轮 23—断丝检测杆 24—工件 25—导向轮

图 1-1-4 慢走丝线切割机床的运丝结构

## 五、数控电火花线切割机床的加工过程

数控电火花线切割机床的加工过程：线切割加工通常是工件整个加工中的最后一道工序，所以加工质量要求很高。加工过程如图 1-1-5 所示。

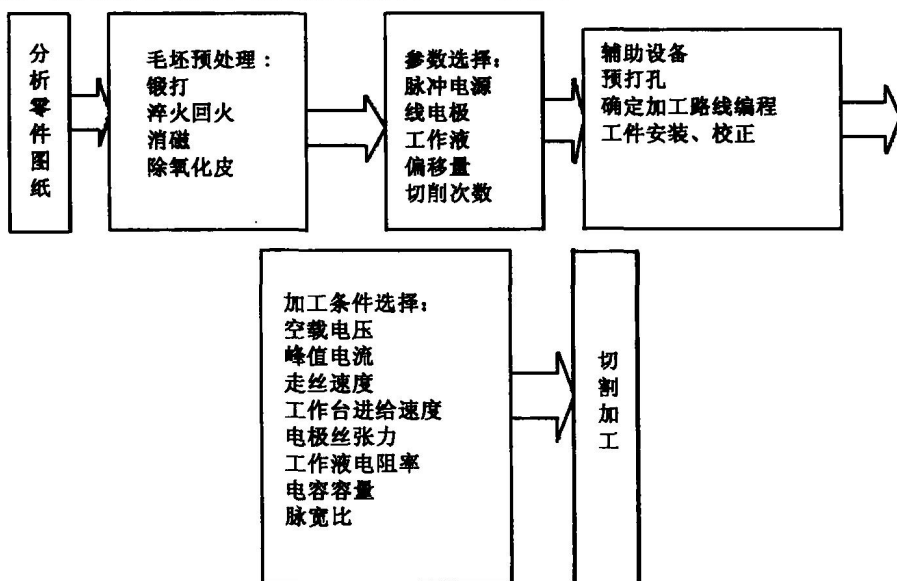


图 1-1-5 线切割机床的一般加工过程

编程是数控电火花线切割加工的一项重要工作，一般在加工前按工件的形状、尺寸及精度要求，根据加工路线编制出加工程序，再将程序输入机床进行加工。

**[思考题]**

1. 阐述数控电火花线切割的原理。
2. 数控电火花线切割机床分为几类？

## 第二节 线切割机床加工前的准备

### 一、工件材料的选定和处理

工件材料的选择是由图样设计时确定的。如模具加工，在加工前工件需要锻打和热处理。锻打后的工件在锻打方向与其垂直方向会有不同的剩余应力，淬火后也同样会出现剩余应力。

在加工中剩余应力的释放，可能使工件变形，从而达不到加工尺寸精度要求，淬火不当的工件还会在加工中出现裂纹，因此，工件应在回火后才能使用，而且回火要两次以上或者采用高温回火。另外，加工前要进行消磁处理及去除表面氧化皮和锈斑等。

### 二、工件的工艺基准的确定

电火花线切割时，除要求工件具有工艺基准面或工艺基准线外，同时还必须具有线切割加工基准。

由于电火花线切割加工多为模具或零件加工的最后一道工序，因此，工件大多具有规则、精确的外形。若外形具有与工作台 x、y 平行且垂直于工作台水平面的两个面，则可以选择一面作为加工基准面。若工件侧面不是平面，在对工件技术要求允许的条件下可以加工出工艺平面作为基准。工件上不允许加工工艺平面时，可以采用划线法在工件上划出基准线，但划线仅适用于加工精度不高的零件。若工件一侧只有个基准平面或只能加工出一个基准面时，则可用预先已加工的工件内孔作为加工基准。这时不论工件上的内孔原设计要求如何，必须在机械加工时使其位置和尺寸精度适应其作为加工基准的要求。若工件以划线为基准时，则要求工件必须具有可作为加工基准的内孔。工件本身无内孔时，可用位置和尺寸都准确的穿丝孔作为加工基准。

### 三、电极丝的选择

应根据工件加工的切缝宽窄、工件厚度和拐角尺寸大小选择电极丝的直径。如图 1-2-1 所示，对凹角内侧拐角 R 的加工，无法小于  $1/2\phi$  的切缝宽，即：

$$R \geq \frac{1}{2}\phi + \delta$$

式中： $\delta$  为放电间隙； $\phi$  为电极丝直径。

目前电极丝的种类很多，有纯铜丝、钼丝、钨丝、黄铜丝和各种专用铜丝。表 1-2-1 是电火花线切割使用的电极丝。

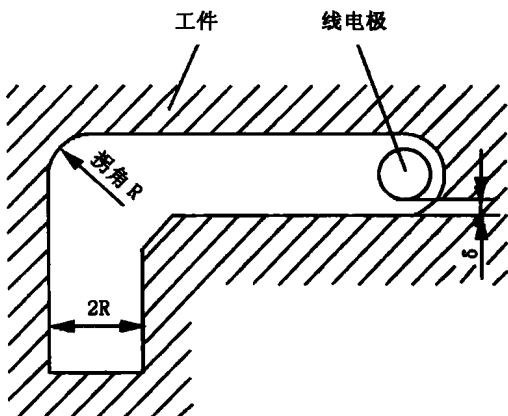


图 1-2-1 切缝和拐角

表 1-2-1 各种电极丝的特点

| 材质   | 线径/mm     | 特 点                                     |
|------|-----------|-----------------------------------------|
| 纯铜   | 0.1~0.25  | 适合于线切割速度要求不高的精加工。丝不易卷曲，抗拉强度低，容易断丝       |
| 黄铜   | 0.1~0.30  | 适合高速加工，加工面蚀屑附着少，表面粗糙度和加工面的平度较好          |
| 专用黄铜 | 0.05~0.35 | 适合于高速、高精度加工，以达到理想的表面粗糙度，并能自动穿丝，但价格高     |
| 钼    | 0.06~0.25 | 由于它的抗拉强度高，一般用于高速走丝，在进行细微、窄缝加工时，也可用于低速走丝 |
| 钨    | 0.0~0.1   | 由于抗拉强度高，可用于各种窄缝的细微加工，但价格昂贵              |

为了满足切缝和拐角的要求，需要选用线径小的电极丝，但是线径太小，能够加工的工件厚度会受到限制。表 1-2-2 列出电极丝线径、拐角  $R$  极限和能加工的工件厚度的极限。

表 1-2-2 线径、拐角  $R$  极限和能加工的工件厚度的极限

| 电极丝直径/mm |      | 拐角 $R$ 极限/mm | 切割工件厚度/mm |
|----------|------|--------------|-----------|
| 钨        | 0.05 | 0.04~0.07    | 0~10      |
|          | 0.07 | 0.05~0.10    | 0~20      |
|          | 0.10 | 0.07~0.12    | 0~30      |
| 黄铜       | 0.15 | 0.10~0.16    | 0~50      |
|          | 0.20 | 0.12~0.20    | 0~100 以上  |
|          | 0.25 | 0.15~0.22    | 0~100 以上  |

## 四、穿丝孔的加工

### 1. 加工穿丝孔的必要性

凹形类封闭形工件在切割前必须具有穿丝孔，以保证工件的完整性。凸形类工件的切割也有必要加工穿丝孔。由于工件坯料在切断时，会破坏材料内部应力的平衡状态而造成变形，影响加工精度，严重时甚至造成夹丝、断丝。当采用穿丝孔时，可以使工件坯料保持完整，从而减少变形所造成的误差。用不同方法加工穿丝孔如图 1-2-2 所示。

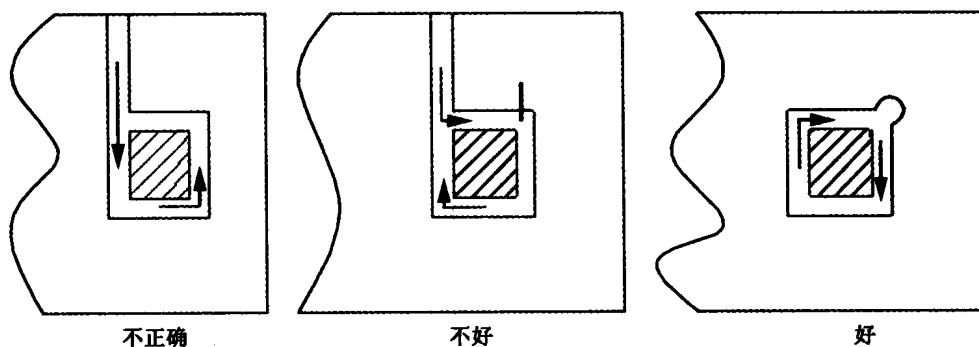


图 1-2-2 用不同方法加工穿丝孔的比较

## 2. 穿丝孔的位置和直径

在切割中、小孔形凹形类工件时，穿丝孔位于凹形的中心位置操作最为方便。因为这既能使穿丝孔加工位置准确，又便于控制坐标轨迹的计算。在切割凸形类工件或大孔形凹形类工件时，穿丝孔应设置在加工起始点附近，这样可以大大缩短无用切割行程。穿丝孔的位置，最好选在已知坐标点或便于计算的坐标点上，以简化有关轨迹控制的运算。穿丝孔的直径不宜太小或太大，以钻或镗孔工艺简便为宜，一般选在 3~10mm 范围内。孔径最好选取整数值或较完整数值，以简化用其作为加工基准的运算。

## 3. 穿丝孔的加工

由于多个穿丝孔都要作为加工基准，因此，在加工时必须确保其位置精度和尺寸精度，这就要求穿丝孔应在具有较精密坐标工作台机床上进行加工。为了保证孔径尺寸精度，穿丝孔可采用钻绞、钻镗或钻车等较精密的机械加工方法，也可以采用小孔放电的加工方法。穿丝孔的位置精度和尺寸精度，一般要等于或高于工件要求的精度。

## 五、加工路线的选择

在加工中，工件内部应力的释放易引起工件的变形，所以在选择加工路线时，必须注意以下几点：

- (1) 避免从工件端面开始加工，应从穿丝孔开始加工，如图 1-2-3 所示。
- (2) 加工的路线距离端面（侧面）应大于 5mm。
- (3) 加工路线开始应从离开工件夹具的方向进行加工（即不要一开始加工就趋近夹具），最后再转向工件夹具的方向。
- (4) 在 1 块毛坯上要切出 2 个以上工件时，不应连续 1 次切割出来，而应从不同穿丝孔开始加工。

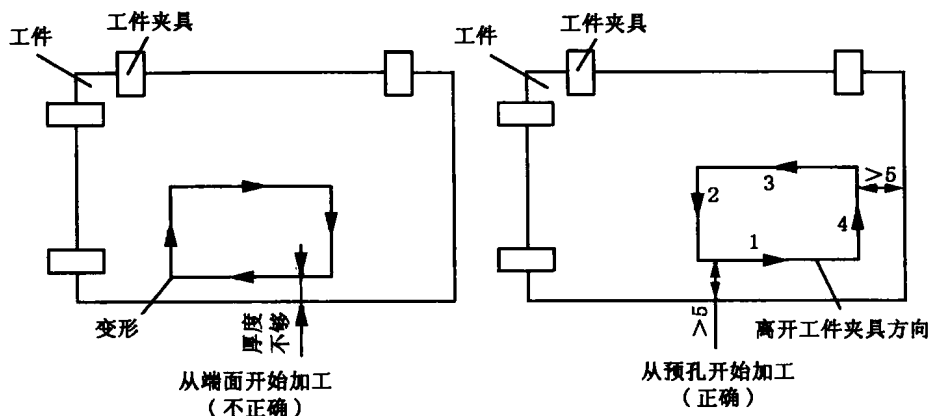


图 1-2-3 加工路线决定方法



## 六、工件的装夹

### 1. 工件装夹的一般要求

(1) 待装夹的工件其基准部位应清洁无毛刺，符合图样要求。经淬火的工件在穿丝孔或凹模类工件扩孔的台阶处，要清除淬火时的渣物及产生的氧化膜，否则会影响其与电极丝间的正常放电，甚至卡断电极丝。

(2) 所有夹具精度要高，装夹前先将夹具与工作台面固定好。

(3) 保证装夹位置在加工中能满足加工行程需要，工作台移动时不得和丝架臂相碰，否则无法进行加工。

(4) 装夹位置应有利于工件的找正。

(5) 夹具对固定工件的作用力应均匀，不得使工件变形或翘起，以免影响加工精度。

(6) 成批工件加工时，最好采用专用夹具，以提高工作效率。

(7) 细小、精密、壁薄的工件应先固定在不易变形的辅助小夹具上再进行装夹，否则无法加工。

### 2. 工件装夹的方式

(1) 悬臂式支撑方式。悬臂支撑通用性强，装夹方便，如图 1-2-4 所示。但由于工件单端固定，另一端呈悬梁状，因而工件平面不易平行于工作台面，易出现上仰或下斜，致使切割表面与其上下平面不垂直或不能达到预定的精度。另外，加工中工件受力时，位置容易变化。因此只有在工件的技术要求不高或悬臂部分较少的情况下，才能使用这种方式。

(2) 双端支撑方式。工件两端固定在夹具上，其装夹方便，支撑稳定，平面定位精度高，如图 1-2-5 所示，但不利于小零件的装夹。

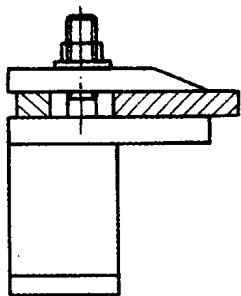


图 1-2-4 悬臂式支撑方式

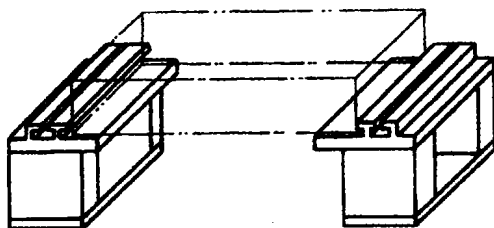


图 1-2-5 双端支撑方式

(3) 桥式支撑方式。采用两支撑垫铁架在双端支撑夹具上，如图 1-2-6 所示。其特点是通用性强，装夹方便，对大、中、小工件都可方便地装夹，特别是带有相互垂直的定位基准面的夹具，使侧面具有平面基准的工件可省去找正工序。如果找正基准也是加工基准，可以间接地推算和确定电极丝中心与加工基准的坐标。这种支撑装夹方式有利于外形和加工基准相同的工件实现成批量加工。