

# 机械工程手册

第 49 篇 特 种 加 工

(试 用 本)

机械工程手册  
电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社

# 机械工程手册

## 第49篇 特种加工

(试 用 本)

机械工程手册  
电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社

本篇介绍电火花加工、电解加工、电解磨削、电铸、激光加工、超声加工、化学加工等常用的特种加工方法。其内容包括：加工原理、特点、适用范围、加工设备和工艺，并以工艺为重点，指出了加工中的关键问题，提供了一些主要数据和资料。

## 机 械 工 程 手 册

### 第 49 篇 特 种 加 工

(试 用 本)

第一机械工业部苏州电加工机床研究所 主编

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本  $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张  $5^{1/4}$ ·字数 119 千字

1979 年 8 月北京第一版·1979 年 8 月北京第一次印刷

印数 00,001—62,000·定价 0.43 元

\*

统一书号：15033·4636

## 编 辑 说 明

(一) 我国自建国以来，机械工业在毛主席的革命路线指引下，贯彻“独立自主、自力更生”和“洋为中用”的方针，取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学研究方面的经验，同时采用国外先进技术，加强机械工业科学技术的基础建设，适应实现“四个现代化”的需要，我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用，也可供教学及其他有关人员参考。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书，着重介绍各专业的理论基础，常用计算公式，数据、资料，关键问题以及发展趋向。在编写中，力求做到立足全局，勾划概貌，反映共性，突出重点。在内容和表达方式上，力求做到深入浅出，简明扼要，直观易懂，归类便查。读者在综合研究和处理技术问题时，《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成，构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分，共七十九篇；《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分，共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的，有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员，更为广泛。许多地区

的科技交流部门，为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中，广泛征求意见，发挥了广大群众的智慧和力量。

（五）为了使手册早日与读者见面，广泛征求意见，先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验，试用本在内容和形式方面，一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证，提出批评和建议，以便今后出版合订本时加以修订。

（六）本篇是《机械工程手册》第49篇，由第一机械工业部苏州电加工机床研究所主编，参加编写的有营口电火花机床厂、上海第八机床厂、上海交通大学、中国科学院电工研究所、上海有线电厂、第三机械工业部625所、西北工业大学、第一机械工业部北京机床研究所、天津第六机床厂、上海机械制造工艺研究所、上海汽轮机厂、上海激光技术研究所、上海无线电十三厂、第四机械工业部1411所、上海超声波仪器厂、上海中国唱片厂、上海新江机器厂、上海新新机器厂、第七机械工业部703所、上海复旦大学、上海照相制版厂、北京制版厂、上海无线电十九厂等单位。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助，在此一并致谢。

机械工程手册 编辑委员会编辑组  
电机工程手册

# 目 录

## 编辑说明

## 前 言

### 第1章 电火花加工

- 1 电火花加工的基本原理和特点 .....49-1
  - 1.1 加工原理 .....49-1
  - 1.2 放电腐蚀的物理过程 .....49-2
  - 1.3 放电腐蚀的极性效应 .....49-2
  - 1.4 电火花加工的基本规律 .....49-3
  - 1.5 加工特点和应用范围 .....49-6
- 2 电火花加工机床 .....49-6
  - 2.1 脉冲电源 .....49-6
  - 2.2 机床本体 .....49-6
- 3 电火花成形加工工艺及应用 .....49-10
  - 3.1 成形加工工艺过程 .....49-10
  - 3.2 工具电极 .....49-10
  - 3.3 排屑 .....49-15
  - 3.4 成形加工方法 .....49-16
  - 3.5 典型加工实例 .....49-19
- 4 电火花线切割加工工艺和应用 .....49-22
  - 4.1 加工原理 .....49-22
  - 4.2 电极丝(工具电极)的选择 .....49-22
  - 4.3 影响线切割加工工艺指标的因素 .....49-22
  - 4.4 典型夹具和附件 .....49-23
  - 4.5 线切割机床加工前的工艺准备 .....49-24
  - 4.6 线切割加工的应用 .....49-25
- 5 其他电火花加工及应用 .....49-26
  - 5.1 小孔加工 .....49-26
  - 5.2 精密微细加工 .....49-26
  - 5.3 共轭回转式电火花螺纹加工 .....49-27
  - 5.4 电火花磨削加工 .....49-27
  - 5.5 齿轮电火花跑合 .....49-28
  - 5.6 电火花强化 .....49-28
  - 5.7 去除折断工具 .....49-28
  - 5.8 阳极机械切割 .....49-28

### 第2章 电解加工

- 1 电解加工的基本原理和特点 .....49-29

- 1.1 加工原理 .....49-29
- 1.2 电化学反应及阳极金属的溶解量 .....49-29
- 1.3 加工特点和应用范围 .....49-29
- 2 电解加工机床 .....49-31
  - 2.1 机床组成和类型 .....49-31
  - 2.2 机床本体 .....49-32
  - 2.3 直流稳压电源 .....49-32
  - 2.4 电解液系统 .....49-33
- 3 加工间隙、加工精度和表面质量 .....49-33
  - 3.1 加工间隙 .....49-33
  - 3.2 加工精度 .....49-35
  - 3.3 表面质量 .....49-35
- 4 电解液 .....49-35
  - 4.1 作用与要求 .....49-35
  - 4.2 特点和配方 .....49-36
  - 4.3 供给方式 .....49-36
- 5 混气电解加工 .....49-38
  - 5.1 作用和特点 .....49-38
  - 5.2 气液混合比 .....49-38
  - 5.3 气液混合腔 .....49-38
- 6 典型电解加工的工艺要点 .....49-38
  - 6.1 锻模型腔加工 .....49-38
  - 6.2 叶片型面加工 .....49-40
  - 6.3 整体涡轮加工 .....49-41
  - 6.4 花键孔加工 .....49-41
  - 6.5 去毛刺 .....49-42
  - 6.6 刻印 .....49-42

### 第3章 电解磨削

- 1 电解磨削的基本原理和特点 .....49-43
  - 1.1 加工原理 .....49-43
  - 1.2 电化学反应 .....49-43
  - 1.3 加工特点和应用范围 .....49-43
- 2 电解磨床 .....49-44
  - 2.1 电解磨床的组成 .....49-44
  - 2.2 绝缘和导电 .....49-44
  - 2.3 防腐蚀 .....49-45
  - 2.4 电解液系统 .....49-45

## 49-VI 目 录

|                 |       |
|-----------------|-------|
| 2.5 直流电源        | 49-45 |
| 3 导电磨轮          | 49-45 |
| 4 电解液           | 49-46 |
| 5 主要工艺参数        | 49-47 |
| 5.1 电流密度        | 49-47 |
| 5.2 加工电压        | 49-47 |
| 5.3 磨削压力        | 49-47 |
| 5.4 磨轮线速度       | 49-47 |
| 5.5 工件走刀速度      | 49-47 |
| 5.6 电解液供给方式和供给量 | 49-47 |
| 5.7 电解液温度和浓度    | 49-48 |

### 第4章 电 铸

|               |       |
|---------------|-------|
| 1 电铸加工的原理和特点  | 49-48 |
| 1.1 加工原理      | 49-48 |
| 1.2 加工特点和应用范围 | 49-49 |
| 2 电铸设备        | 49-49 |
| 2.1 电铸槽       | 49-49 |
| 2.2 直流电源      | 49-49 |
| 2.3 搅拌和循环过滤系统 | 49-49 |
| 2.4 加热和冷却装置   | 49-49 |
| 3 工艺过程及加工要点   | 49-50 |
| 3.1 原模材料      | 49-50 |
| 3.2 原模的前处理    | 49-50 |
| 3.3 电铸溶液成分及特点 | 49-51 |
| 3.4 电铸操作注意事项  | 49-52 |
| 3.5 衬背和脱模     | 49-52 |

### 第5章 激光加工

|                 |       |
|-----------------|-------|
| 1 激光加工的原理和特点    | 49-53 |
| 1.1 加工原理        | 49-53 |
| 1.2 加工特点和应用范围   | 49-53 |
| 2 激光加工机         | 49-53 |
| 2.1 固体激光打孔机     | 49-53 |
| 2.2 二氧化碳激光切割机   | 49-56 |
| 3 影响激光打孔的因素     | 49-57 |
| 3.1 影响打孔直径的主要因素 | 49-57 |
| 3.2 影响打孔深度的主要因素 | 49-58 |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| 3.3 影响打孔圆度的主要因素 | 49-58 |
| 3.4 影响打孔锥度的主要因素 | 49-58 |
| 4 激光切割特性及其影响因素  | 49-58 |
| 4.1 切割速度        | 49-58 |
| 4.2 切缝宽度        | 49-59 |
| 4.3 切割厚度        | 49-59 |

### 第6章 超声加工

|                   |       |
|-------------------|-------|
| 1 超声加工的原理和特点      | 49-60 |
| 1.1 加工原理          | 49-60 |
| 1.2 加工特点和应用范围     | 49-60 |
| 2 超声加工机           | 49-61 |
| 2.1 超声电源          | 49-62 |
| 2.2 加工机本体         | 49-62 |
| 2.3 超声振动系统        | 49-63 |
| 3 工具设计和工件安装       | 49-65 |
| 3.1 工具磨损与材料选择     | 49-65 |
| 3.2 工具设计及其与变幅杆的连接 | 49-66 |
| 3.3 工件安装          | 49-67 |
| 4 工艺参数            | 49-67 |
| 4.1 加工速度及其影响因素    | 49-67 |
| 4.2 提高加工速度的方法     | 49-68 |
| 4.3 加工精度          | 49-69 |
| 4.4 表面质量          | 49-70 |

### 第7章 化学加工

|                 |       |
|-----------------|-------|
| 1 化学铣切          | 49-70 |
| 1.1 加工原理和特点     | 49-70 |
| 1.2 工艺过程及加工要点   | 49-71 |
| 2 照相制版(凸版)      | 49-72 |
| 2.1 加工原理和特点     | 49-72 |
| 2.2 工艺过程及加工要点   | 49-73 |
| 3 光刻            | 49-74 |
| 3.1 加工原理和特点     | 49-74 |
| 3.2 工艺过程及加工要点   | 49-74 |
| 3.3 影响光刻质量的主要因素 | 49-76 |
| 参考文献            | 49-77 |

# 前言

特种加工是直接利用电能、光能、化学能、电  
化学能、声能等来进行加工的方法。主要用于加工  
难切削材料，如高强度、高韧性、高硬度、高脆性、  
耐高温、磁性材料，以及精密细小和复杂形状的零  
件。目前在航天、电子、电机、电器、仪表、透平  
机械、汽车、拖拉机以及轻工等制造工业部门中，  
已经成为不可缺少的加工法。

目前特种加工尚处于研究发展阶段，其种类较  
多，在生产中应用的主要是电火花加工、电解加  
工、电解磨削，其次是激光加工、超声加工、化学  
加工、电铸加工，以及电子束加工、等离子加工、  
喷射加工、放电成形、电磁成形等。

几种主要特种加工方法的综合比较如下表：

| 加工方法  | 加工能力 |            |     |       | 经济性   |      |      | 主要用途             |
|-------|------|------------|-----|-------|-------|------|------|------------------|
|       | 成形能力 | 可加工材料      | 加精度 | 表面光洁度 | 加工速度② | 设备投资 | 功率消耗 |                  |
| 电火花加工 | 较好   | 金属         | 较好  | 一般    | 低     | 中    | 小    | 穿孔、型腔加工、切割、磨削、强化 |
| 电解加工  | 较好   | 金属         | 一般  | 较好    | 高     | 高    | 大    | 型腔加工、型孔加工、去毛刺、刻印 |
| 激光加工  | 差    | 金 属<br>非金属 | 一般  | 一般    | 高     | 高    | 小    | 微小孔加工、切割、焊接、热处理  |
| 超声加工  | 较好   | 金 属<br>非金属 | 较好  | 一般    | 中     | 低    | 小    | 穿孔、套料、切割、研磨、复合加工 |
| 等离子加工 | 差    | 金 属<br>非金属 | 差   | 差     | 高     | 低    | 小    | 切割、焊接            |
| 电子束加工 | 差    | 金 属<br>非金属 | 一般  | 一般    | 高     | 高    | 小    | 微小孔加工、刻细槽、切割、焊接  |
| 化学加工① | 差    | 金属         | 一般  | 一般    | 低     | 低    | 小    | 减重、蚀刻图形、薄板型孔加工   |
| 喷射加工  | 差    | 金 属<br>非金属 | 一般  | 一般    | 高     | 低    | 小    | 切割、穿孔            |

① 主要指化学铣切。

② 指单件加工时间。

## 第1章 电火花加工

### 1 电火花加工的基本原理和特点

#### 1.1 加工原理

电火花加工是基于脉冲放电的腐蚀原理，所以  
也有称放电加工或电蚀加工的。当工具电极（简

称电极）与工件电极（简称工件）在绝缘液体中靠  
近时，极间电压将在两极间“相对最靠近点”电离  
击穿，形成脉冲放电，在放电通道中瞬时产生大量  
的热能，使金属局部熔化甚至气化，并在放电爆炸  
力的作用下，把熔化的金属抛出来。达到蚀除金属  
的目的。但是要将脉冲放电现象应用于“尺寸加

工”，还必须具备以下条件：

1) 在脉冲放电点必须有足够大的能量密度，使金属局部熔化和气化，并为使能量集中，通常在绝缘液体介质中进行；

2) 放电形式应是脉冲的，脉宽一般为  $0.1 \sim 3000 \mu\text{s}$ ，使脉冲放电时产生的绝大部分热量来不及从极微小的局部加工区扩散到非加工区；

3) 必须把加工过程中所产生的电蚀产物（包括加工屑、焦油、气体）及余热等从微小的电极间隙中排除出去，否则加工将无法正常地连续进行；

4) 在每次脉冲放电之间的脉冲间隔内，电极间的介质必须来得及消电离，使下一个脉冲能在两极间另一“相对最靠近点”处击穿放电，以避免总是在同一点上放电而形成稳定电弧，从而使工件的形状尺寸逐点无限趋近于工具电极的形状尺寸。

上述问题的综合解决是通过电火花加工设备来实现的。电火花加工设备由下面四大部分组成：

(1) 脉冲电源 产生所需要的重复脉冲而加在工件与工具电极上，产生脉冲放电，是放电腐蚀的供能装置；

(2) 间隙自动调节器 自动调节极间距离和工具电极的进给速度，维持一定的放电间隙，使脉冲放电正常进行；

(3) 机床本体 用来实现工件和工具电极的装夹固定以及调整其相对位置精度等机械系统；

(4) 工作液及其循环过滤系统。

电火花加工机床示意图，如图 49-1-1 所示。

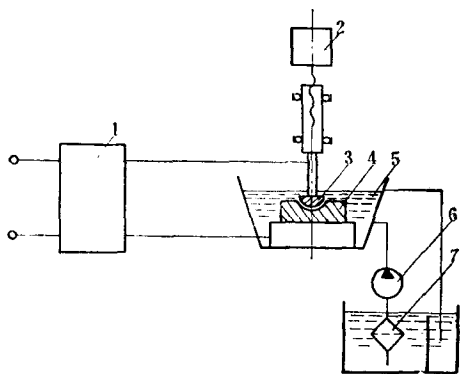


图49-1-1 电火花加工机床示意图

1—电源 2—伺服系统 3—工具电极 4—工件  
5—工作液 6—泵 7—过滤器

## 1.2 放电腐蚀的物理过程

放电腐蚀的物理过程是电磁学、热力学、流体动力学等综合作用的过程，可以大致分为电离、放电、热熔、金属抛出等阶段。

电极的微观表面是凹凸不平的，当脉冲电压加到两极时，极间介电性能相对薄弱的某凸点处电场强度最大，其间的工作液（绝缘介质）将最先被电离为负电子和正离子而被击穿，形成放电通道，电流随即剧增。由于放电通道受到放电时的磁场力和周围液体介质的压缩，放电通道的膨胀受到阻碍，因而横断面积小，故通道中的电流密度非常大，可达  $10^4 \sim 10^7 \text{ A/cm}^2$ 。电子和离子在电场作用下高速运动时相互碰撞，在通道中产生大量的热量。同时，阳极和阴极表面分别受到电子流和离子流的高速轰击，也将产生大量的热量。这样，电极间隙内将沿通道形成一个瞬时高温热源（放电通道中心温度可达  $10000^\circ\text{C}$  左右），在热源作用下的极微小区域的工具电极及工件表面，很快加热到熔点甚至沸点以上，使局部的金属熔化和气化，通道周围的工作液（一般为煤油之类的碳氢化合物）则被瞬时高温分解为低分子碳氢化合物、氢和碳粒。这种熔化、气化和分解的过程非常短促，具有爆炸的特性。爆炸力把熔化的金属抛离电极表面。另外，放电通道周围所形成的气泡迅速扩展，即使在放电结束以后，由于气泡外围扩展运动着的液体具有惯性，气泡体积仍继续增大，但内部压力将大大降低，致使高温时溶解在金属液体中的气体伴随着气化金属从小坑中喷爆出来，进而使一部分熔化了金属额外地抛离电极表面。

熔化和气化了金属在被抛离电极表面时，除绝大部分在工作液中冷却凝固成球状小颗粒外，还可能飞溅、粘附、覆盖在相对的电极表面上，同时分解的碳也附着在电极表面上。

单个脉冲经过上述过程，完成了一次脉冲放电，而在工件表面留下一个带有凸边的小凹穴，虽然这种凹穴是十分微小的，但无数个脉冲放电蚀除量的积累，就使工件达到所需的加工要求。

## 1.3 放电腐蚀的极性效应

放电腐蚀时，阳极和阴极表面分别受到电子和离子的轰击即瞬时热源的作用，因此它们都遭到电

腐蚀,但阴阳两极的电蚀蚀量是不一样的,这种两极蚀除量不一样的现象称为极性效应。这是因为电子的质量小,在短时间内可获得较大的速度,由于加速变大,即使放电时间很短(脉冲宽度小),大量电子也能达到阳极表面而进行轰击。离子的质量大,加速变小,如放电时间短,部分离子就来不及达到并轰击阴极表面,所以在放电时间短时,离子对阴极的轰击程度不如电子对阳极的轰击。但当放电时间长到一定程度时,离子也有足够的时间到达阴极面,并可获得较大的速度,加上它的质量大,因而离子对阴极的轰击程度要远远大于电子对阳极的轰击。

阴阳两极的蚀除量不仅与放电时间或脉冲宽度有关,而且还与电极材料及单个脉冲能量等因素有关。

在电火花加工过程中,极性效应愈显著愈好,必须充分利用极性效应,合理选择加工极性,以提高加工速度及减少工具电极的损耗。

在习惯上,通常把工件接正的加工称为正极性加工,工件接负的加工称为负极性加工。

## 1.4 电火花加工的基本规律

### 1.4.1 影响加工速度的主要因素

加工速度或生产率是指单位时间内的工件蚀除量,通常以  $\text{mm}^3/\text{min}$  为单位。在线切割加工中,则一般用  $\text{mm}^2/\text{min}$  为单位。

a. 平均功率 在加工正常的情况下,加工速度与平均功率成比例增加,增大单个脉冲能量(增大脉冲峰值电流和峰值电压)以及减少脉冲间隔,一般都有利于提高加工速度。

b. 脉宽 脉冲宽度(或脉宽)对加工速度有很大的影响。在峰值电流不变的情况下,当脉冲宽

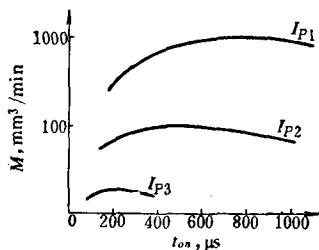


图49-1-2 不同峰值电流下的加工速度和脉冲宽度的关系

$I_{P1} > I_{P2} > I_{P3}$ ,  $I_P$ : 峰值电流

度由小增大时,有一个获得最高加工速度的最佳脉宽。增大峰值电流,最佳脉宽也相应增大。脉宽太小加工速度会下降,这是因为气态蚀除的比例增大,耗损在气化潜热上的能量增大;脉宽太大时加工速度也会下降,这是因为脉宽时间愈长,扩散掉的能量愈多。

脉冲宽度对加工速度的影响,如图49-1-2所示。

c. 极性 在一般情况下,高频(脉宽小)时将工件接正极,而低频(脉宽大)时将工件接负极,有利于加工速度的提高和工具电极损耗的降低。而钢打钢时,不论脉宽大小,工件都接负极,是有利于加工速度的提高。

d. 工件材料性能 加工速度与工件材料的性能(熔点、沸点、导热系数、热容量、熔解和气化的潜热等)有关,而不受它的硬度、强度等的影响。工件材料的熔点和沸点愈高,热容量、熔化和气化潜热愈大,加工速度就愈低。导电性能好,一般有利于加工速度的提高。材料的组织结构对加工速度也有一定的影响。

e. 面积效应 当加工电流一定时,面积过小会导致加工速度的降低,如图49-1-3。这是因为加工电流密度过大时,脉冲放电过分集中,致使电极间气泡及蚀除产物排除不畅所致。改善排屑条件有利于增大加工电流密度,提高加工速度。

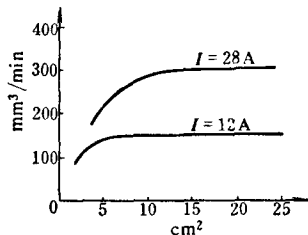


图49-1-3 加工面积和加工速度的关系

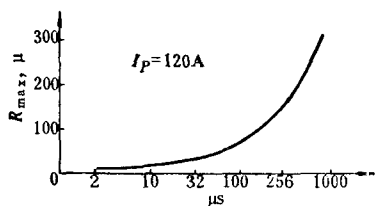
### 1.4.2 影响表面质量的主要因素

表面质量包括表面光洁度、表面组织变化层以及表面微观裂纹。

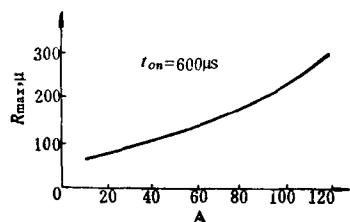
a. 表面光洁度 表面光洁度主要决定于单个脉冲能量,单个脉冲能量愈大,光洁度愈低。

电火花加工后的工件表面,是脉冲放电时所形成的大量凹穴的重叠结果。图49-1-4是脉冲宽度和峰值电流对光洁度的影响。电火花加工一般粗加工光洁度为  $\nabla 1 \sim \nabla 3$ ,而精加工可达  $\nabla 7 \sim \nabla 8$ ,微

精加工则可达 $\nabla 10$ 。加工熔点较高的硬质合金等可获得比钢更高一些的光洁度。由于电极的相对运动,侧壁光洁度要比端面高些。



a) 脉冲宽度



b) 峰值电流

图49-1-4 脉冲宽度和峰值电流对光洁度的影响

提高光洁度与加工速度是有矛盾的,通常提高一级光洁度,加工速度要成倍甚至数十倍地下降,特别是在精加工时更为明显。

**b. 表面组织变化层** 电火花加工后,工件表面的物理、化学和机械性能有所变化,变化层的深度与工件材料及电参数有关。单个脉冲能量愈大及脉冲宽度愈宽变化层就愈深。粗加工时变化层一般为0.1~0.5 mm,精加工时一般为0.01~0.05 mm。

未经淬火的钢材在电火花加工后表面有淬火现象,硬度变高而耐磨。淬火钢经电火花加工后,表面出现重新(二次)淬火层和热影响层。由于电参数、冷却条件及材料的原来热处理不同,表面硬度有时降低,有时有不同程度的提高。

**c. 表面微观裂纹** 加工硬质合金和金属陶瓷等硬脆材料,容易产生表面裂纹。工件材料愈脆、单个脉冲能量愈大、脉冲宽度愈宽,愈易产生裂纹。反之,则不易产生裂纹。

例如加工含钴量少的脆性硬质合金,采用单个脉冲能量 $W=0.01\sim 0.2\text{ J}$ ,脉宽 $t_{on}=13\text{ }\mu\text{s}$ ,就会产生30~50  $\mu\text{m}$ 深的表面裂纹,如果加工含钴量大的韧性硬质合金,采用 $W=0.2\text{ J}$ , $t_{on}=20\text{ }\mu\text{s}$ 的脉冲加工,也未发现有表面裂纹。根据不同的工

件材料,合理地选择脉冲参数及工艺过程,可以妥善地解决电火花加工中的表面裂纹问题。

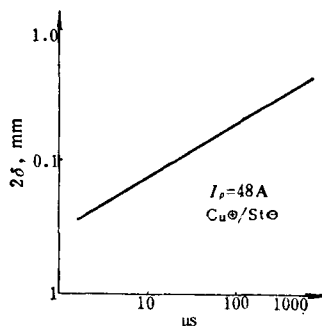
### 1.4.3 影响加工精度的主要因素

影响加工精度的因素很多,除电火花加工机床的机械结构、机械传动以及装夹定位的误差外,影响精度的主要因素有下述几方面:

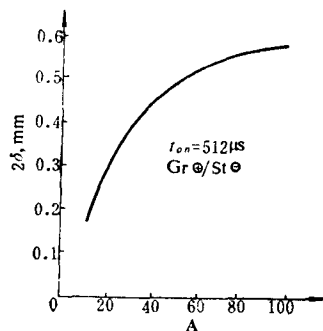
**a. 侧面间隙的变化** 恒定的侧面间隙可以不影响加工精度。但在加工过程中,有关参数不可避免地要发生变化,特别排屑条件及放电间隙中的电蚀产物浓度的变化,导致各处二次放电机会不同,造成侧面间隙的不均匀,形成斜度和不圆度。

提高脉冲峰值电压及增大单个脉冲能量,都会导致侧面间隙的增大。粗加工时,因脉冲峰值电流大,脉宽大,所以侧面间隙也大;精加工时,侧面间隙较小。

图49-1-5是脉冲宽度和峰值电流对双边间隙的影响。



a) 脉冲宽度



b) 峰值电流

图49-1-5 脉冲宽度和峰值电流对双边间隙影响

**b. 工具电极的损耗** 工具电极的损耗直接影响加工精度, 损耗愈小, 加工精度愈高。

**c. 尖角与棱边** 由于尖端部分电场强度大而出现尖端放电现象, 因此尖角和棱边处的工具电极损耗比较大, 故影响仿形精度。脉冲电压愈高, 以及单个脉冲能量愈大, 影响就愈大。

#### 1.4.4 影响工具电极损耗的主要因素

衡量工具电极损耗大小, 一般用工具电极的相对损耗率 (或称损耗率)  $\gamma$  来表示, 即

$$\gamma = \frac{m}{M} 100\% = \frac{q}{Q} 100\%$$

式中  $\gamma$  ——工具电极的相对损耗率

$m$  ——工具电极的绝对损耗  $\text{mm}^3/\text{min}$

$M$  ——工件的加工速度  $\text{mm}^3/\text{min}$

$q$  ——工具电极的蚀除量  $\text{mm}^3$

$Q$  ——工件的蚀除量  $\text{mm}^3$

工具电极的损耗率与工具电极材料、工件材料、电极极性、脉冲参数、工作液成分、排屑条件等有关。

**a. 工具电极材料** 工具电极材料的熔点、沸点愈高, 熔化潜热和气化潜热愈大, 导热性能愈好, 其损耗率一般愈小。

**b. 脉冲宽度** 一般情况下, 增大脉宽会使工具电极的损耗率减少。图 49-1-6 所示  $\gamma = f(t_{on})$  曲线是晶体管电源在煤油中用石墨加工钢时 (负极性) 的实验曲线。

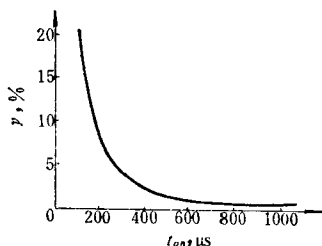


图49-1-6 脉宽与电极相对损耗的关系  
(晶体管电源, 煤油介质, 石墨加工钢, 负极性,  
峰值电流48A, 加工面积10cm<sup>2</sup>)

**c. 脉冲峰值电流** 在一般情况下, 如果脉宽不变, 电极的相对损耗率将随着脉冲电流峰值的增大而增大, 如图 49-1-7。电极相对损耗率还和脉冲宽度与电流峰值的比值 ( $t_{on}/I_p$ ) 有关, 随着比值的增大,  $\gamma$  将下降。当用石墨加工钢时, 通常

在满足  $t_{on}/I_p > 6$  的条件下, 可以获得低损耗 ( $\gamma < 1\%$ ) 加工。紫铜作为电极时, 上述比值还应大些。

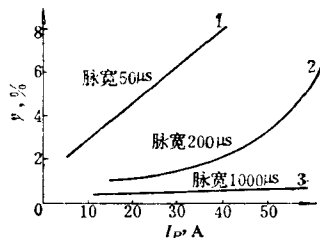


图49-1-7 脉冲峰值电流与电极相对损耗的关系  
(晶体管电源, 煤油介质, 紫铜加工  
CrMnW钢, 负极性)

**d. 面积效应** 在一定的加工电流下, 应有一个最小的加工面积, 小于这个加工面积时工具电极的相对损耗率将增加, 如图 49-1-8。

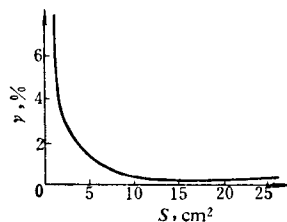


图49-1-8 加工面积与电极相对损耗率的关系  
(晶体管电源, 煤油介质, 紫铜加工 CrMnW钢, 负极性, 峰值电流48A, 平均电流32A, 脉宽1000μs)

**e. 极性** 由于极效应, 为获得较低的电极相对损耗率, 粗加工时采用负极性, 精加工时, 应采用正极性。唯有钢打钢时, 不论粗、精加工, 都采用负极性加工, 才能获得低损耗。图 49-1-9 所示的是晶体管电源在煤油中用紫铜加工钢时的试验曲线。在所试验的条件下, 为达到较低的电极损

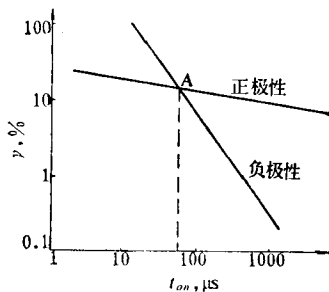


图49-1-9 极性对电极损耗率的影响  
(峰值电流48A, 加工面积10cm<sup>2</sup>)

耗,当 $t_{on} < 90 \mu s$ 时,应采用正极性; $t_{on} > 90 \mu s$ 时,则应采用负极性。A点的位置,随加工条件的不同而有所变化。

### 1.5 加工特点和应用范围

电火花加工特点:

1) 可以加工任何硬、脆、韧、软、高熔点的导电材料。此外在一定条件下,还可以加工半导体材料及非导电材料。

2) 加工时“无切削力”,有利于小孔、薄壁、窄槽以及各种复杂截面的型孔、曲线孔、型腔等零件的加工,也适合于精密细微加工。

3) 当脉冲宽度不大时,对整个工件而言,几乎不受热的影响,因此可以减小热影响层,提高加工后的表面质量,也适用于加工热敏感很强的材料。

4) 脉冲参数可以任意调节,可以在同一台机床上连续进行粗、半精、精加工。精加工时精度为 $0.01 \text{ mm}$ ,光洁度 $\nabla 7$ ;微精加工时精度可达 $0.002 \sim 0.004 \text{ mm}$ ,光洁度 $\nabla 10 \sim \nabla 11$ 级。

5) 直接使用电能加工,便于实现自动化。

电火花加工适用范围:

(1) 穿孔加工 型孔(圆孔、方孔、多边孔、异形孔)、曲线孔(弯孔、螺旋孔)、小孔、微孔等,例如落料模、复合模、级进模、拉丝模、喷嘴、喷丝孔等。

(2) 型腔加工 锻模、压铸模、挤压模、胶木模,以及整体叶轮、叶片等各种曲面零件。

(3) 线电极切割 切断、切割各类复杂型孔(例如冲裁模),以及零件和工具等加工。

(4) 电火花磨削 磨平面和内外圆、小孔,以及成形磨磨和铲磨等。

(5) 回转共轭加工 螺纹环规、丝规、齿轮等回转体零件加工。

(6) 表面强化 表面渗碳和涂覆特殊材料等。

(7) 其他加工 打印标记、雕刻、齿轮跑合、取出折断的丝锥和钻头,以及对已淬火零件进行整修等。

## 2 电火花加工机床

电火花加工设备主要由脉冲电源、机床本体和工作液循环系统三大部分组成。在型腔和穿孔加工

中,为了能使工具电极和工件之间维持一定的放电间隙,保证正常的放电加工,还必须有自动调整工具电极进给的控制系统。对于线切割加工,还要有能使工件或电极丝按一定轨迹运动的控制进给系统。

### 2.1 脉冲电源

脉冲电源应满足以下工艺要求: 1) 高的加工速度,即脉冲电源应有足够的输出功率; 2) 小的工具电极损耗,以保证加工的尺寸精度; 3) 较高的加工表面光洁度; 4) 脉冲参数调节简便,电源性能稳定可靠,维护方便。各种脉冲电源的原理方框图,如图49-1-10所示。表49-1-1是各种脉冲电源的性能特点。

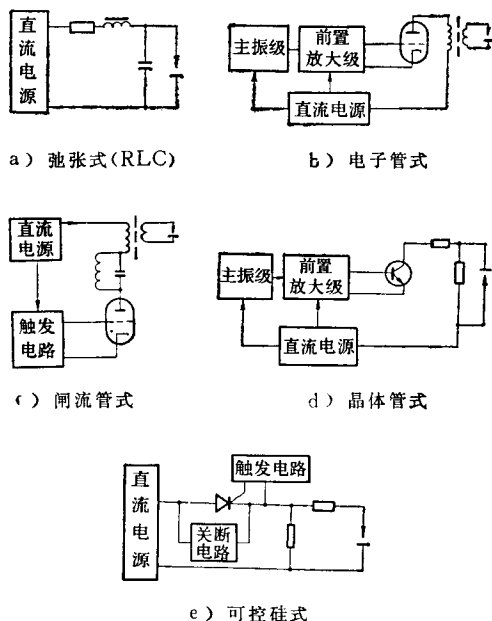


图49-1-10 各种脉冲电源原理方框图

线电极切割机床的脉冲电源输出功率较小,加工电流小,大多采用晶体管脉冲电源,其脉冲宽度一般 $2 \sim 25 \mu s$ ,加工电流 $1 \sim 3 \text{ A}$ 。最高加工速度 $150 \text{ mm}^2/\text{min}$ 。

### 2.2 机床本体

电火花加工虽没有机械切削力,但为保证加工精度,机床的机械传动件和支承件应具有一定的刚度,但不必作强度验算。当使用大型机床加工大形工件时,需从材料和结构方面充分考虑机床的刚性。

表49-1-1 电火花加工脉冲电源性能特点比较

| 名称                             | 弛张式                                                                              | 电子管式                                        | 闸流管式                                                                        | 晶体管式                                                                 | 可控硅式                                                               |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 种类                             | RC、RLC、RLCL、RLC-LC等                                                              | 单电子管、双电子管、四电子管等                             | 单闸流管、双闸流管、四闸流管等                                                             | 单回路、多回路、高低压、阶梯波、梳形波、等脉冲等                                             | 单回路、多回路、高低压、前后尖峰波回路等                                               |
| 主要参数                           | 电阻一般20~1000Ω, 电容一般0.005~6μf, 电感一般0.25~0.4H 空载直流电压一般100~350V                      | 频率10~100kHz, 脉冲宽度1.5~15μs, 空载脉冲电压80~180V    | 频率10~60kHz, 脉冲宽度4~20μs, 空载脉冲电压80~180V                                       | 频率0.25~100kHz, 脉冲宽度2~2000μs, 空载高压150~350V, 空载低压60~90V, 最大加工电流1200A以上 | 频率0.25~60kHz, 脉冲宽度5~1400μs, 空载高压250~300V, 空载低压60~80V, 最大加工电流300A以上 |
| 单回路最大加工速度 mm <sup>3</sup> /min | 100                                                                              | 400                                         | 400                                                                         | 2000                                                                 | 4000                                                               |
| 最高光洁度                          | ▽10                                                                              | ▽8                                          | ▽7                                                                          | ▽7                                                                   | ▽7                                                                 |
| 最小单面间隙 mm                      | 0.02                                                                             | 0.015                                       | 0.02                                                                        | 0.02                                                                 | 0.02                                                               |
| 侧面斜度                           | 30′                                                                              | 5′~15′                                      | 10′~20′                                                                     | 5′~30′                                                               | 7′~15′                                                             |
| 特点和应用                          | 结构简单, 使用和维修方便, 精加工光洁度高, 但电极损耗大, 加工速度低。适用于光洁度要求高的工件加工。可用晶体管或可控硅作开关元件组成RC微精加工用脉冲电源 | 脉冲参数调节方便, 精加工的光洁度和加工速度都较高, 但工具电极损耗大。多用于穿孔加工 | 线路比较简单, 但脉冲参数的调节与配合不易。操作中要注意高电压。精加工速度较高, 但电极损耗较大, 多用于穿孔加工, 但经过适当改进后也可用于型腔加工 | 脉冲参数调节范围广, 易于获得低损耗, 容易实现自动化控制, 常用多管并联来获得大的输出功率, 多用于型腔加工, 也适用于穿孔加工    | 线路比较简单, 易于获得低损耗, 电源输出功率较大。常由粗、半精加工用和精加工用两组电源组成。适用于中、大型工件穿孔和成形      |

2.2.1 电火花成形加工机床

a. 成形加工机床的组成 机床主要由床身、立柱、主轴头、工作台及油箱等组成。按机床的布局 and 结构可以分四大类。见表 49-1-2。

b. 成形加工机床夹具和附件 机床应配备相应的专用夹具和附件。成形穿孔机床可配备用于改善排屑条件的冲油或抽油杯；修光型腔侧面和底面的二度或三度平动头；磨削内孔的专用夹具等。

c. 成形加工机床主参数系列 (表 49-1-3)

d. 自动调节器 在加工中为保持最佳的工作状态，应将放电间隙控制在最佳间隙附近，为此，安装工具电极的主轴头应有自动调节器，以自动调整电极的进给速度。

自动调节器应时间常数小、惯性小、传动精度

高，有较大的放大系数和稳定贮备，工作稳定，速度调节范围广。其机械部分应具有足够的刚性。

自动调节器是随动系统，其基本结构如图 49-1-11。

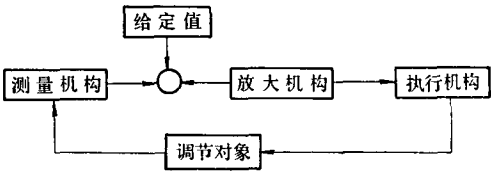


图49-1-11 自动调节器方框图

测量机构应测量放电的间隙状态，通常以间隙电压（峰值或平均电压）作为被测量参数。

放大与执行机构可采用电机传动方式-伺服电机、步进电机；液压传动方式-喷嘴挡板、电液伺服阀。

表49·1-2   电火花成形加工机床的主要类型

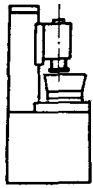
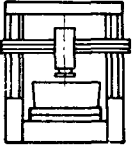
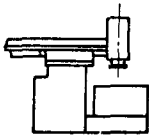
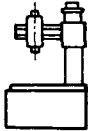
| 类 型                   | 立 柱 式                                                                             | 龙 门 式                                                                             | 滑 枕 式                                                                             | 摇 臂 式                                                                               |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 结<br>构<br>示<br>意<br>图 |  |  |  |  |
| 特<br>点                | 适用于中、小型机床，结构简单，制造、维修、装夹方便，加工中、小型模具                                                | 适用于大型机床，制造方便，以加工中、大型模具为主                                                          | 适用于中、大型机床，制造方便，以加工中、大型模具为主                                                        | 适用于中、大型机床，装夹方便，刚度、精度较低，加工中、大型模具为主                                                   |

表49·1-3   电火花成形加工机床主参数系列

|                          |     |     |     |     |     |      |      |      |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| 工作台台面宽度   mm             | 200 | 250 | 320 | 400 | 500 | 630  | 800  | 1000 |
| 工作台台面长度   mm             | 320 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1000 | 1250 | 1600 |
| 主轴头升降距离   mm             | 160 | 160 | 200 | 200 | 250 | 250  | 320  | 320  |
| 主轴头行程   mm               | 125 | 125 | 160 | 160 | 200 | 200  | 250  | 250  |
| 夹具端面到工作台台面<br>间最大距离   mm | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800  | 900  | 1000 |
| 电极最大重量   kg              | 25  | 25  | 50  | 50  | 100 | 100  | 200  | 200  |

液压传动方式较伺服电机传动方式刚性好，灵敏度高。步进电机传动方式也有较高的灵敏度，其低速状态工作特性较好。

e. 工作液及工作液循环过滤系统   工作液应有一定的介电能力，较好的冷却、洗涤、防锈、灭弧及去游离性能、无毒等。

表49·1-4   常用的过滤方式

| 过 滤 方 式                      | 特 点                            |
|------------------------------|--------------------------------|
| 介质过滤(木屑、黄砂、纸质、灯草芯、硅藻土、泡沫塑料等) | 结构简单，造价低，但使用时间较短，耗油多           |
| 离心过滤                         | 过滤效果较好，结构复杂，清渣较困难              |
| 静电过滤                         | 结构较复杂，使用时间长，但电压高，有安全问题，用于小流量场合 |
| 自然沉淀过滤                       | 适合于大容量的油箱或油池                   |

成形加工常用的工作液有煤油、10<sup>#</sup>机油、锭子油及其混合油，也可用去离子水或其他水质工作液。

工作液强迫循环过滤系统由泵、过滤器、阀等组成。其流量和压力一般可调。常用的过滤方式见表49·1-4。

2·2·2   电火花线切割加工机床

a. 线切割机床的组成   由于线切割机床的工具电极(电极丝)相对于工件作一定的轨迹运动，所以机床主要由床身、贮丝机构、线架、座标工作台和油箱等部件组成。机床外形见图49·1-12。

机床按不同的轨迹控制方式可以分三大类，见表49·1-5。

b. 线切割机床主要参数系列推荐值(表49·1-6)

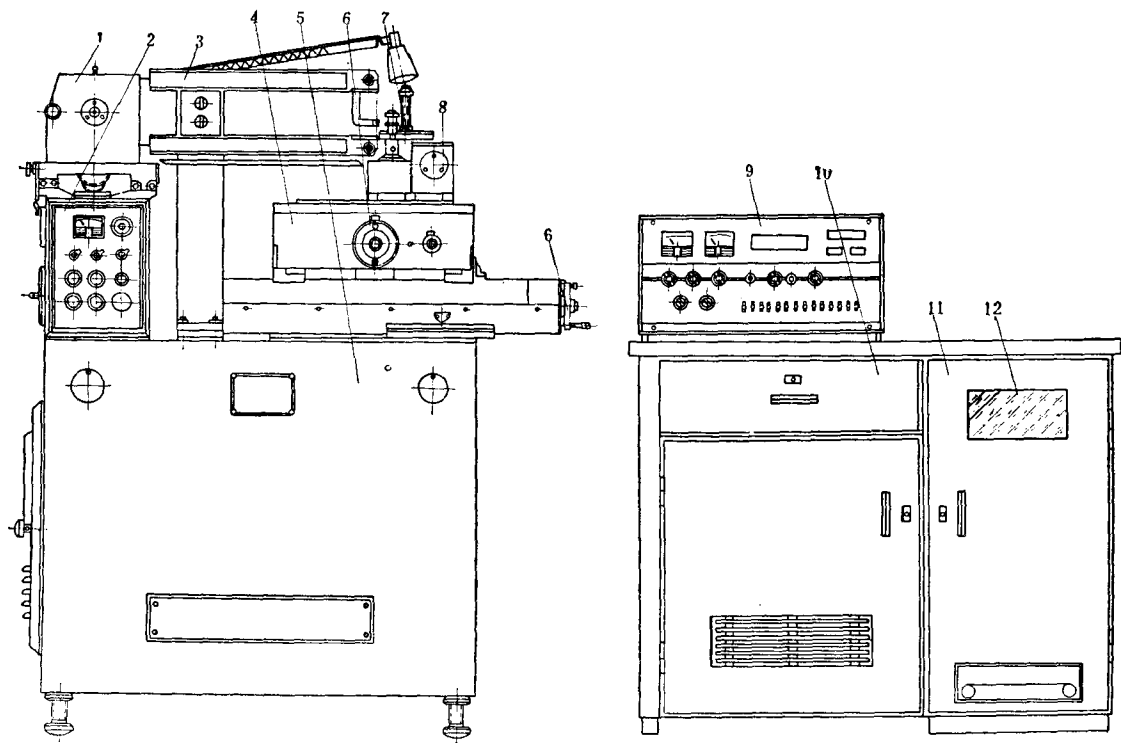


图 49-1-12 线切割机床外形图

1—贮丝筒 2—按钮板 3—线架 4—工作台 5—床身 6—进给手轮 7—夹具 8—转台 9—数控装置  
10—抽屉 11—机架 12—光电输入机

表 49-1-5 线切割机床类型及其特点

| 类 型    | 控 制 系 统                                 | 特 点                  |
|--------|-----------------------------------------|----------------------|
| 电气靠模   | 单机伺服系统                                  | 仿形精度高, 需制造靠模         |
| 光电跟踪   | 光通量比较法, 光电脉冲相位法, 光电-数字控制                | 特别适合于加工任意曲线的图形。需画放大图 |
| 数字程序控制 | NC { 无补偿<br>有补偿<br>CNC 控制系统<br>DNC 控制系统 | 自动化程度高, 控制精度高, 需进行编程 |

表 49-1-6 线切割机床主要参数系列推荐值

mm

| 项 目     | 推 荐 值 |     |     |     |      |
|---------|-------|-----|-----|-----|------|
| 工作台台面宽度 | 125   | 200 | 320 | 500 | 1000 |
| 工作台台面长度 | 160   | 250 | 400 | 800 | 1600 |
| 工作台横向行程 | 60    | 100 | 200 | 320 | 600  |
| 工作台纵向行程 | 80    | 150 | 250 | 500 | 1000 |
| 线架距离    | 40    | 60  | 80  | 120 | 160  |

c. 斜度加工方法 在加工斜度时(如切割凹模刃口斜度)要求电极丝与工件侧壁保持一定倾斜,其结构主要有以下两种:

(1) 单导轮平移 上(或下)导轮沿X、Y方向平移。其结构示意如图49·1-13所示。传动螺杆使弓架的上臂(或下臂)沿X、Y方向导轨移动,移动量由人工或步进电机控制。

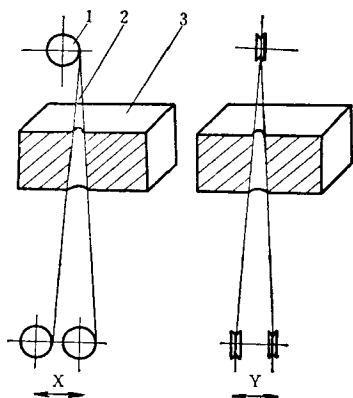


图49·1-13 单导轮平移示意图  
1—导轮 2—电极丝 3—工件

(2) 上下导轮同时绕一圆心平动或摆动 两只步进电机分别通过螺杆、螺母、滑块和带有斜槽的导向板,最后传动杠杆,使弓架的上下臂在X、Y方向绕一支点移动和摆动。X和Y方向的回转支点在理论上应是空间的同一个点,随之电极丝在X、Y方向也有一个交点。夹具设计使加工工件的顶面通过此点,即刃口面上的点。步进电机的脉冲当量也是0.001mm/脉冲。上下导轮平移示意如图49·1-14所示。

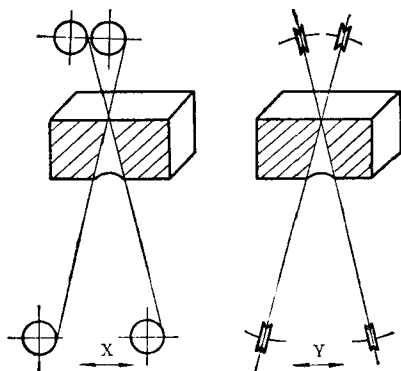


图49·1-14 上下轮平移示意图

### 3 电火花成形加工工艺及应用

#### 3.1 成形加工工艺过程

成形加工分穿孔和型腔加工两大类。穿孔加工的电极损耗可由进给补偿。型腔加工时,电极损耗直接影响仿形精度。成形加工的工艺过程如图49·1-15所示。

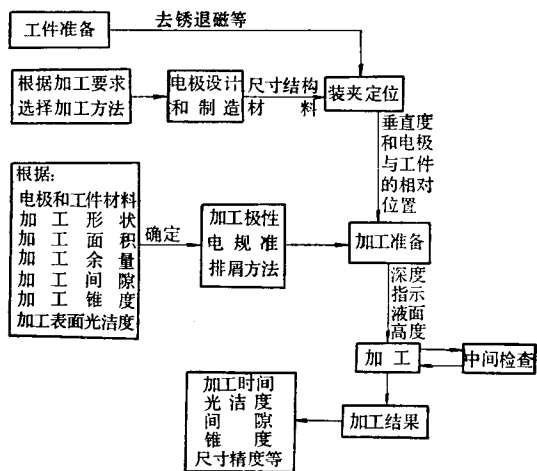


图49·1-15 成形加工工艺过程图

#### 3.2 工具电极

##### 3.2.1 常用电极材料

穿孔加工时常用电极材料的性能及特点见表49·1-7。

型腔加工通常使用紫铜和石墨作为电极材料。由于石墨较易于机械加工,故目前石墨电极使用更广泛些。适合电火花加工的石墨材料有KS-25、DS-52W、高纯石墨、GS-540、GS-800、SD高纯石墨。

石墨和紫铜电极的使用性能特点、电加工性能等见表49·1-8。

##### 3.2.2 穿孔电极的设计

电极横截面尺寸应为相应的型孔的中间公差尺寸加(或减)双边间隙或单边间隙。电极尺寸的公差一般定为型孔尺寸公差的一半。图49·1-16是某型腔尺寸和电极尺寸相互关系的例子。