

电火花加工用脉冲电源

雷鸣达 主编

机械工业出版社

# 用脉冲电源

主编

机械工业出版社

本书介绍了我国三十多年来电火花加工用脉冲电源的研究、应用经验。主要内容有：脉冲电源参数对电火花加工效果的影响；各个发展阶段工业生产用脉冲电源的工作原理、结构、特点及其应用范围；今后脉冲电源的发展趋向。

本书可供电火花加工机床的广大用户、生产厂和研制单位的技术人员和工人查阅参考。

## 电火花加工用脉冲电源

雷鸣达 主编

\*

责任编辑：吕敏成

封面设计：田淑文

\*

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登记证出字第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  $850 \times 1168^{1/32}$  · 印张  $6^{7/8}$  · 字数 177 千字

1988年3月北京第一版·1988年3月北京第一次印刷

印数 0,001—3,000 · 定价：1.95 元

\*

ISBN 7-111-00421-3/TM·71

## 序 言

电火花加工是现代金属加工的一种特种加工方法，它利用脉冲放电的电蚀过程蚀除金属而实现尺寸加工。这种方法不仅能够加工任何硬度和特性的金属材料，而且可以加工形状复杂的各种模具和零件，因此在电机、电器、仪表、汽车、拖拉机和轻工、国防等行业及部门中获得了愈来愈广泛的应用。

脉冲电源是电火花加工机床的重要组成部分，其性能好坏将直接影响到加工的各项工艺指标——加工速度、加工精度、表面粗糙度和工具电极损耗等，因而一直为从事电火花加工的人们所重视。从我国电火花加工的发展过程来看，几次工艺指标的跃进和应用范围的扩大，其中脉冲电源的革新都起了决定性的作用。

50年代初，我国便开始应用电火花加工。自那时以来，相继研制出一系列的电火花加工用脉冲电源。在50年代初至60年代初，生产中应用的主要是 $RC$ 型电路和 $RLC$ 型电路的弛张式脉冲电源。这种电源一般用来加工小型冲模、小型型腔模以及取出折断在机械零件中的工具残部。弛张式脉冲电源的主要优点是结构简单，使用可靠；缺点是加工速度低，工具电极损耗大，加工精度差以及输出功率受到限制等。尽管如此，这种电源还是使电火花加工显示出优越性，给人以深刻的印象，并为我国电火花加工的发展打下了基础。

50年代后期，鉴于弛张式脉冲电源的局限性及加工大、中型型腔模的需要，在1958年研制成了4.3kW整流子式脉冲发电机，接着1959年又研制成15kW脉冲发电机。这种脉冲电源的特点是加工速度高（可达 $3000\text{mm}^3/\text{min}$ 以上），工具电极损耗小，为较大的型腔模具提供了有效的粗、中加工装置。其缺点是不能进行精加工，运转时的振动和噪声太大。

1964年,我国研制成功单闸流管独立式脉冲电源,1965年又研制成双闸流管电源。这种脉冲电源的特点是,加工速度快,加工精度也高,能成功地用于冲模、特别是小斜度(4~5分)复式冲模的加工。双闸流管脉冲电源自1966年投产至1984年止已生产了两千多台(其中一部分出口外销),是我国电火花加工装置中拥有量很大的一种电源。与此同时,还研制成功性能类似的电子管独立式脉冲电源。这类电源的主要缺点是需用脉冲变压器输出功率,以便将闸流管或电子管的高压、小电流脉冲转换成电火花加工所需的低压、大电流脉冲。这使得加大脉冲宽度受到一定的限制,因而不能很方便地用于型腔模具的加工。

60年代末至70年代,我国研制成几种独立式晶闸管脉冲电源,其作用和特点与脉冲发电机类似,适用于石墨电极的粗、中加工。它运转时没有振动,也没有脉冲发电机那样大的噪声,因而逐步取代了脉冲发电机的位置。此后,又研制成我国特有的高频晶闸管脉冲电源,其使用频率可达20000Hz,提高了加工精度和减小了粗糙度。

70年代初,研制出晶体管独立式脉冲电源,可用于中小型的型腔模加工。

在上述各种电源中,闸流管和电子管的脉冲电源适用于穿孔冲模的加工,而其他电源则适用于各种型腔模的加工。

1976年研制成JF-420Q型四回路晶体管脉冲电源(即所谓“多回路”脉冲电源)。它能在所需的加工精度下大幅度地提高加工速度,既能高效地进行“钢打钢”、即加工穿孔冲模,特别是大中型的复式冲模,又能加工各种中小型的型腔模。

70年代初,国外已采用所谓“适应控制”、“最佳控制”、“切断控制”、“逻辑控制”等新型脉冲电源,其电路原理虽各有不同,但实质上都是根据电火花加工中放电间隙的物理状态,来自动调节脉冲电源的电参数,以改善电火花加工的性能。这一类电源属于半独立式脉冲电源,我国近十年来已有正式产品,例如:JF-80B型“简易适应控制”电源;JF-420Q型“切断控制”的系

列电源; Z5K-1-100A的“适应控制”电源等。

80年代初, 针对型腔模中的沟槽、花纹以及某些要求工具电极损耗小的加工需要, 我国研制成功用于铜电极的低损耗、高效率脉冲电源。

随着数控技术、特别是微机技术的发展, 80年代初国外已出现了数控(NC)脉冲电源。我国近年来也在对这类电源进行探索和研制。

上述几种国产电火花加工用脉冲电源已先后在全国各地广泛使用, 不少电火花加工机床用户对脉冲电源的选择、使用和维修等方面深感资料缺乏, 工作中存在着一定的困难, 为此本书选择国内各发展阶段中生产的脉冲电源, 在工作原理、结构、特点、维修等方面加以介绍阐述, 以供大家参考。同时, 还对脉冲电源的电参数与工艺效果的关系以及电火花加工用脉冲电源的发展作些探讨, 可供有关生产厂、研制单位的技术人员参考。

为便于部分读者维修脉冲电源, 书中各种脉冲电源的电器元、部件, 均保持了原来的图形和代号。

本书的§3-2、§5-3由李洪洲、彭勃编写, §4-8、第6章由庞述圣编写, §7-2、§8-1、§8-2由黄荣禧编写, 其余各章节均由雷鸣达编写。全书由雷鸣达负责主编。

张和卓同志、刘名复同志为本书写作提供资料, 王之明同志、沈洪同志参加评阅书稿, 在此一并致以诚挚的谢意。

因篇幅和编著者水平、条件所限, 有些优良的脉冲电源资料未能收入书中, 书稿上也会存在一些不足之处, 谨希读者见谅和指正。

# 目 录

## 序言

|       |                    |     |
|-------|--------------------|-----|
| 第 1 章 | 概述                 | 1   |
| § 1-1 | 电火花加工过程            | 1   |
| § 1-2 | 脉冲电源的分类及性能要求       | 2   |
| § 1-3 | 脉冲电源的电参数及其对加工工艺的影响 | 4   |
| § 1-4 | 放电间隙的主要特性与作用       | 11  |
| 第 2 章 | 弛张式脉冲电源            | 17  |
| § 2-1 | RC 型脉冲电源           | 17  |
| § 2-2 | RLC 型脉冲电源          | 19  |
| § 2-3 | RLCL 及 RCR 型脉冲电源   | 20  |
| § 2-4 | 微精加工脉冲电源           | 21  |
| 第 3 章 | 长脉冲大功率脉冲电源         | 23  |
| § 3-1 | 脉冲发电机              | 23  |
| § 3-2 | 晶闸管脉冲电源            | 27  |
| 第 4 章 | 闸流管脉冲电源            | 37  |
| § 4-1 | 工作原理               | 37  |
| § 4-2 | 电源主回路的充放电过程        | 39  |
| § 4-3 | 脉冲变压器与引燃电路         | 53  |
| § 4-4 | 电源的检修和调试           | 59  |
| § 4-5 | 电火花加工操作顺序及主要技术指标   | 63  |
| § 4-6 | 部分电器元、部件的参数值       | 65  |
| § 4-7 | 脉冲停歇时间的适应控制        | 66  |
| § 4-8 | 加工型腔模的应用实例         | 70  |
| 第 5 章 | 晶体管脉冲电源            | 79  |
| § 5-1 | JF-420 Q 型四回路脉冲电源  | 79  |
| § 5-2 | JF-210 Q 型脉冲电源     | 123 |
| § 5-3 | JF-80 B 型脉冲电源      | 130 |
| § 5-4 | 改装电源单式回路实现钢电极加工    | 140 |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 第 6 章 | 低损耗脉冲电源 .....            | 144 |
| § 6-1 | 晶体管低损耗脉冲电源 .....         | 144 |
| § 6-2 | 晶闸管低损耗脉冲电源 .....         | 156 |
| 第 7 章 | 电火花线切割机床的脉冲电源 .....      | 165 |
| § 7-1 | 快速走丝线切割脉冲电源 .....        | 167 |
| § 7-2 | 慢速走丝线切割脉冲电源 .....        | 174 |
| 第 8 章 | 专用型及其他脉冲电源 .....         | 181 |
| § 8-1 | 电火花加工微细小孔用脉冲电源 .....     | 181 |
| § 8-2 | 高速电火花加工小孔用脉冲电源 .....     | 183 |
| § 8-3 | 数控脉冲电源 .....             | 185 |
| § 8-4 | 电火花成型加工数控脉冲电源的程序框图 ..... | 191 |
| 参考文献  | .....                    | 210 |

# 第 1 章 概 述

电火花加工的工艺效果与脉冲电源的性能紧密相关。为了说明脉冲电源的电参数对工艺指标的影响，有必要对电火花加工过程、脉冲电源的性能、放电间隙特性以及电火花加工工艺指标先作一般性的阐述。

## § 1-1 电火花加工过程

电火花加工是将被加工工件和工具电极浸没在工作液(介质)中，利用脉冲式的放电过程逐步蚀除工件上的金属，使之对工具电极的轮廓仿形，最后实现工件的尺寸加工。

当脉冲电源的电压加在电极和工件之上、且二者之间的间隙又很小时，脉冲电压将在间隙中形成高强度的电场。在电极与工件之间最近点的尖端处，或由导电微粒形成桥路之处，其电场强度最大。在此高强度的电场作用下，阴极表面场致发射的电子和间隙中的电子（残余电子、外界射线激励产生的电子等）快速向阳极运动，冲击介质的分子而引起电离<sup>[1]</sup>，并产生新的电子和正离子。这种冲击电离作用迅速发展下去，在极短的时间内（数十毫微秒）出现雪崩式过程，当先导电流到达阳极表面时，便将电极与工件之间的间隙击穿，形成放电通道。

从脉冲电压加到放电间隙的瞬时至间隙击穿的一段时间，称为击穿延时。它是一个能很好反映放电间隙物理状态的参数，可用来检测间隙状态，借以控制电极的进给运动和调节脉冲电源的电参数，使电火花加工条件适应间隙状态而取得更好的工艺效果<sup>[2, 3]</sup>。

放电通道形成之后，脉冲电源的能量便迅速输入，使通道中的电子和正离子被加速，各自轰击阳极和阴极的表面。带电粒子

越多、速度越高，轰击的作用就越显著。由于放电产生的电磁力和液体介质的惯性及压缩作用，开始时放电通道的直径很小，在脉冲作用时间内则逐步扩展，但总的说来，电极表面受到轰击之点的能量还是高度集中，能够立即产生超过工件材料熔化或气化的高温，使局部金属熔化或气化。

由于这一过程的时间短促和能量集中，此熔化或气化的金属液粒和蒸汽，在外界压力骤降之际（主要在脉冲終了瞬时）即以爆炸形式被抛掷出去。这些蚀除物除少量飞越间隙而粘附到对方电极表面上之外，绝大部分都在工作液中冷凝和排除出去。因此，在工件表面形成了一个抛出金属后的圆坑，完成金属的一次蚀除。当然，与此同时工具电极也有一定的损耗。正确地选择脉冲电参数和极性，可使工件的蚀除量增大，工具电极的损耗减小。

当脉冲电压周期地加在放电间隙上时，上述过程便周期性地重复，工件表面被一点一点地蚀除掉。最后，按照工具电极的表面形状，在工件上完成尺寸加工。

工具电极和工件都必须浸没在工作液中（煤油或变压器油等），以保证每次放电时电极表面喷射出的金属液粒和蒸汽以及其他电蚀产物，能及时地冷却和排除出去。

随着蚀除的不断进行，放电间隙将逐渐加大，最后大到脉冲电压不能击穿间隙，使电火花加工中止。为此，需要采用自动进给装置，根据放电间隙的工作状态，自动地保持工具电极与工件的间隙大小适当，以保证电火花加工能连续、稳定地进行下去。

## § 1-2 脉冲电源的分类及性能要求

电火花加工用脉冲电源可按以下几个方面分类：

### 1. 根据脉冲宽度分类

- (1) 短脉冲——脉冲宽度  $1 \sim 50\mu s$
- (2) 中长脉冲——脉冲宽度  $50 \sim 500\mu s$
- (3) 长脉冲——脉冲宽度在  $500\mu s$  以上

## 2. 根据主要元部件或结构分类

- (1) 弛张式脉冲电源
- (2) 脉冲发电机
- (3) 闸流管或电子管脉冲电源
- (4) 晶闸管脉冲电源
- (5) 晶体管脉冲电源
- (6) 集成电路-晶体管混合脉冲电源
- (7) 数控脉冲电源

## 3. 根据受放电间隙状态影响程度分类

- (1) 非独立式脉冲电源
- (2) 独立式脉冲电源
- (3) 半独立式(自动调节电参数)脉冲电源

## 4. 根据主要用途分类

### (一) 通用型脉冲电源:

- (1) 加工冲模用脉冲电源
- (2) 加工型腔用脉冲电源
- (3) 既能加工冲模又能加工型腔的脉冲电源
- (4) 线切割用脉冲电源

### (二) 专用型脉冲电源:

- (1) 加工硬质合金用脉冲电源
- (2) 加工宝石用脉冲电源
- (3) 加工小孔用脉冲电源
- (4) 加工深孔用脉冲电源

## 5. 根据加工的回路数分类

- (1) 单回路脉冲电源
- (2) 多回路脉冲电源

对电火花加工用的脉冲电源的主要性能要求:

1. 能输出强电流脉冲, 以蚀除金属
2. 一般应是单向脉冲, 或负向脉冲峰值较小的加工脉冲, 借以减小工具电极的损耗。但对以水为工作液的机床, 则宜采用

双向脉冲，以消除电解层。

3. 脉冲电源的主要电参数（如脉冲宽度、脉冲间隔、脉冲电流幅值等）应能满足相应的加工工艺要求，且各自独立可调，甚至能根据放电间隙的不同状态实现自动调节。

4. 性能稳定，使用可靠，操作容易，维修方便。

### § 1-3 脉冲电源的电参数及其对加工工艺的影响

电火花加工是靠脉冲电源将能量输向放电间隙以实现尺寸加工，所以脉冲电源的电参数对各项加工工艺指标起着决定性的作用。以下简要分析一下它的影响。

#### 一、脉冲电源的电参数

脉冲电源影响电火花加工工艺指标或用于电路计算的电参数主要有下列几项：

##### （1）脉冲宽度（ $\tau_K$ ）

一般是指脉冲电压的持续时间，习惯用  $\mu s$  表示。电火花加工用的脉冲宽度范围一般为  $1 \sim 2000 \mu s$ ，在特殊情况下也可以小于  $1 \mu s$  或大于  $2000 \mu s$ 。

##### （2）脉冲间隔（ $\tau_J$ ）或称停歇时间

指两个脉冲电压之间电压为零的时间。在电火花加工中，脉冲间隔的范围为数微秒至数百微秒。

##### （3）脉冲周期（ $T$ ）和脉冲频率（ $f$ ）

脉冲周期等于脉冲宽度与脉冲间隔之和

$$T = \tau_K + \tau_J \quad (1-1)$$

脉冲频率是单位时间内发生的脉冲数

$$f = 1/T \quad (1-2)$$

电火花加工用的脉冲频率范围，一般为  $50 \sim 100000 \text{ Hz}$ 。其上限受放电间隙消电离的限制；但如采用多回路脉冲电源（参见第5章），改善排屑条件，或使用小能量窄脉冲，都可大幅度提高使用频率的上限。

##### （4）脉冲间隔度（ $Q$ ）和脉宽系数（ $\tau_J$ ）

脉冲间隔度等于脉冲周期与脉冲宽度之比

$$Q = T/\tau_K \quad (1-3)$$

脉冲间隔度的大小表示脉冲的稀密程度。图1-1为几种不同脉冲间隔度的示意。在电火花加工中，脉冲间隔度的范围一般为1.1~15；其中大间隔度用于精加工；中等间隔度用于中加工；小间隔度用于粗加工。特殊使用情况不受此限。

脉宽系数等于脉冲宽度与脉冲周期之比，为脉冲间隔度的倒数：

$$\tau_f = \frac{\tau_K}{T} = \frac{1}{Q} \quad (1-4)$$

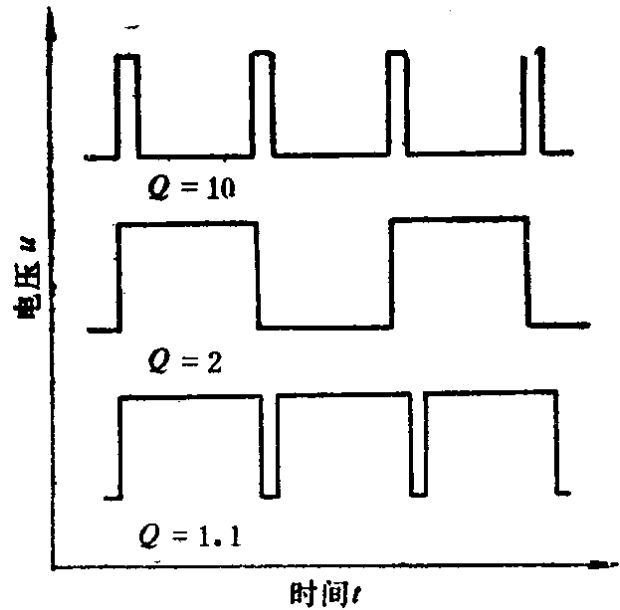


图1-1 不同间隔度的脉冲波形

#### (5) 脉冲电源的电压 ( $E$ )

通常是指直流电源的电压，其范围从数十伏至数百伏。

#### (6) 脉冲电源的电流

可分为以下四项：

- 1) 间隙短路时的脉冲电流幅值 ( $I_{km}$ ), A;
- 2) 短路电流的平均值

$$I_k = I_{km} \frac{\tau_K}{T} \quad A \quad (1-5)$$

- 3) 正常脉冲放电的电流幅值 ( $I_m$ ), A;

- 4) 加工的平均工作电流

$$I = I_m \frac{\tau_K}{T} \quad A \quad (1-6)$$

平均工作电流是在加工过程中用仪表检测到的，通常用来表示电规准的强弱，也可用来表示脉冲电源的电流容量。在加工稳定时，平均工作电流的大小标志着加工速度的高低。

### (7) 单个脉冲能量 ( $w_n$ )

指一次放电中脉冲电源输向放电间隙的能量, 其表示式

$$w_n = I_n e \tau_K \quad \text{J} \quad (1-7)$$

式中  $e$  是放电间隙的等效反电动势, V。

### (8) 脉冲功率 ( $P_{pn}$ )

一次放电输向放电间隙的脉冲功率为

$$P_{pn} = I_n e = \frac{w_n}{\tau_K} \quad \text{W} \quad (1-8)$$

周期性脉冲输向放电间隙的平均功率为

$$P_p = P_{pn} \frac{\tau_K}{T} = \frac{w_n}{T} \quad (1-9)$$

当电火花加工过程稳定时, 此平均功率则表示加工速度。

### (9) 极性

电火花加工中以工件为准来确定极性: 脉冲电源的正极接工件的, 称为“正极性”; 脉冲电源的负极接工件的, 称为“负极性”。

## 二、脉冲电源电参数对工艺指标的影响

电火花加工的主要工艺指标为加工速度、表面粗糙度、工具电极损耗、放电间隙大小等。

### 1. 单个脉冲能量的影响

单个脉冲能量与加工表面粗糙度有密切的关系。每放一次电, 便在电极表面蚀除掉一小块金属, 形成一个小圆坑。此圆坑的体积 ( $V$ ) 和深度 ( $h$ ) 一般可用下式表示:

$$V = K_v w_n \quad (1-10)$$

$$h = K_h w_n^{\frac{1}{3}} \quad (1-11)$$

式中  $K_v$  和  $K_h$  是与电极材料、极性、工作液类型和脉冲宽度等因素有关的比例系数。

由式 (1-10) 可以看出, 单个脉冲能量愈大, 则每次蚀除的金属量就愈大, 当放电的频率一定时加工速度就愈高; 而式 (1-11) 则表明, 单个脉冲能量愈大, 圆坑就愈深, 即粗糙度愈高。

因此二者之间存在着矛盾，需要在实用中根据工艺要求作适当选择。

又从式 (1-7) 可以看出，单个脉冲能量与脉冲电流的幅值和脉冲宽度成正比，当单个脉冲能量保持一定时，如在一定范围内加大脉冲电流幅值，减小脉冲宽度，则放电通道的直径便会减小，电极表面放电点的能量密度加大，因而工具电极的损耗加大，工件的蚀除量也会相应加大，同时圆坑的深度与直径之比亦加大；反之，如减小电流幅值、加大脉冲宽度，则可明显地降低工具电极损耗，但也会相应降低加工速度。这同样要求在实用中根据工艺需要来进行选择。

当脉冲宽度一定时，只加大或减小脉冲电流的幅值，也将出现类似上述的效果，但变化程度不如同时改变电流幅值和脉冲宽度那样显著。同样，可以保持脉冲电流的幅值不变，而只改变脉冲宽度。当脉冲宽度很窄时，由于放电通道来不及扩展，能量将高度集中，熔化区很小，蚀除过程主要是以耗能较大的气化方式抛出金属，此时蚀除量相对于平均加工电流值即电流效率比 ( $\eta_i$ ) 不大。

$$\eta_i = \frac{\gamma}{I} \quad (1-12)$$

式中  $\gamma$  为电火花加工速度， $\text{mm}^3/\text{min}$ 。若将脉冲宽度加大，放电通道便得以扩展，电极表面熔化区也扩大，这时蚀除过程以耗能较小的熔化形式抛出金属，于是蚀除量就增大，电流效率也增大。但若再进一步加大脉冲宽度，则会因电极导热而分散加工区的能量，金属蚀除量便不能与电流成正比地增大，电流效率比就下降。例如在铜-钢电极对情况下，往往采用脉冲宽度超过  $1000 \mu\text{s}$ ，其实在  $500 \sim 600 \mu\text{s}$  以后蚀除作用便减小了。脉冲后部的作用，主要在使铜电极和放电间隙保持较高温度，以利于铜电极表面形成黑色保护层而降低其损耗。

## 2. 对工具电极损耗的影响

工具电极损耗 ( $W_e$ ) 通常用相对量表示，即

$$W_c = \frac{V_c}{V_w} \cdot 100\% \quad (1-13)$$

式中  $V_c$  是工具电极的蚀除量,  $V_w$  是工件的蚀除量, 单位均为  $\text{mm}^3$ 。

除上述通过减小电流幅值和加大脉冲宽度来降低工具电极损耗外, 还可用其他的方法, 例如选择正确的极性就很重要。一般, 放电通道中的电流密度越大, 电子电流对离子电流的比例越大, 也就是阳极与阴极能量分配的比值愈大 (换句话说, 即阳极与阴极的蚀除量之比愈大<sup>[4]</sup>), 此时宜采用正极性; 反之, 放电通道中电流密度较小, 宜采用负极性。

电极材料的不同也会影响电极对上的能量分配。如对于钢-钢电极对的组合, 脉冲宽度在  $1 \sim 100\mu\text{s}$  范围内都可采用负极性加工, 而对于铜-钢电极对的组合则不适用。

不同形式的脉冲电源其电流幅值对脉冲宽度的比值各不相同。弛张式脉冲电源通常产生大的电流幅值脉冲宽度比, 适用于正极性加工; 晶体管脉冲电源产生较小的电流幅值脉冲宽度比, 一般适用于负极性加工 (当脉冲宽度在  $10 \sim 20\mu\text{s}$  以下时, 铜-钢电极对还应采用正极性加工)。

如前所述, 无论是正极性或负极性, 每一次脉冲放电都会同时蚀除工件材料和工具电极材料, 因此要求脉冲电源最好输出单向脉冲, 以突出电火花加工的极性效应。如果存在反向脉冲, 应设法限制其幅值, 使之不产生反向放电而加大工具电极的损耗。但对于慢速走丝线切割机床和深孔加工机床, 由于采用去离子水作工作液, 单向脉冲放电会在工件加工表面形成脆弱的电解薄层, 影响工件的精度, 因此尚应采用双向脉冲加工, 以减小或避免电解层的形成<sup>[5, 6]</sup>。

在石油类工作液中进行宽脉冲或较宽脉冲的“铜打钢”时, 由于脉冲放电的热解作用, 从工作液中分解出来的碳粒子在条件适当时便会沉结在阳极铜电极的表面, 形成黑色的碳素层 (其中还有其他成分)。它的升华温度 (约  $3500^\circ\text{C}$ ) 比铜的熔点高得多,

因而能有效地保护工具电极，使之损耗降低（可低至千分之几）。对于形成黑色层的条件来说：放电间隙中的工作液介质较热，分解的炭粒子便多一些；而电极表面的温度较高，黑层便粘结得牢固一些。因此，缩短脉冲停歇时间，或在停歇时间内输入放电间隙以一定量的直流电流，或尽量减小工作液在放电间隙内的流动速度，都有利于形成黑色保护层，同时也有利于放电通道的扩展以降低放电的电流密度，从而降低铜质工具电极的损耗。

工具电极材料的物理特性对加工时的损耗影响也较大。导电性能好即导热性好的材料，例如紫铜，电极损耗就比较小，特别是在宽脉冲作用下能显著地减小工具电极损耗。熔点高的电极材料抗蚀性能较好。所以采用导电性能好而熔点又高的合成材料，如银钨合金、铜钨合金来制造工具电极，虽然造价较高，但能进一步减小工具电极的损耗。

### 3. 脉冲电源波形的影响

脉冲电源的电压波形，或者说脉冲电流的前沿上升率和后沿下降率，对工具电极的损耗也有一定的影响，特别是前沿上升率的影响更为显著。这种影响对于不同的电极材料，其程度也各不相同。例如，对于导热系数小而升华温度高的石墨电极，脉冲电流的前沿上升缓慢一些，可以减小气化量而降低工具电极损耗，也可避免陡峭的电流前沿冲击使石墨剥落。利用脉冲发电机的缓慢升降前后沿波形，便能较好地满足这些要求。对于导热性能好的铜电极，则只需脉冲电流上升边略为倾斜一些即可。

对于钢质工具电极亦有类似现象，只是在脉冲电流的幅值不大时不甚明显而已；当脉冲电流的幅值超过一定值时，脉冲电流的前沿陡削便会显著地增大工具电极的损耗。但钢电极对还有另一特点，即脉冲电流的前沿上升缓慢对工件的气化作用小了，而由熔化作用引起的大颗粒蚀除物的抛出和圆坑翻边现象，将使电火花加工过程难以稳定。因此，从提高穿孔冲模钢电极加工的稳定性出发，脉冲电源还应提供前沿陡峭的脉冲电流。这一点对于工具电极损耗来说也是可以接受的。因为，第一，在钢电极的穿

孔冲模加工中，只要脉冲电流的幅值不超过一定值时，工具电极的损耗并不显著；其次，只要略为增加工具电极的长度，不大的损耗即可得到补偿。

#### 4. 对加工速度的影响

电火花加工速度（ $\gamma$ ）等于单位时间内的工件蚀除量（ $\text{mm}^3/\text{min}$ ），即

$$\gamma = \frac{V_w}{t} = 60K_s w_n f \quad (1-14)$$

式中  $V_w$ ——工件在加工时间内的蚀除量， $\text{mm}^3$ ；

$t$ ——加工时间， $\text{min}$ ；

$K_s$ ——与电极材料、工作液类型、加工稳定性等因素有关的比例系数， $\text{mm}^3/\text{J}$ ；

$w_n$ ——单个脉冲能量， $\text{J}$ ；

$f$ ——脉冲频率， $\text{Hz}$ 。

由上式可以看出，提高脉冲频率  $f$  和加大单个脉冲能量  $w_n$ ，都能提高加工速度。但如式 (1-11) 所示，在加大单个脉冲能量同时，表面光洁度也将随之下降；而且在穿孔加工时，不仅会增大放电间隙，还会加大刃口斜度，使之不能满足工艺要求。此外，单个脉冲能量过大，还会在加工硬质合金时产生表面裂纹。只有在限制单个脉冲能量为  $10^{-2}\text{J}$  数量级、脉冲宽度为  $\mu\text{s}$  数量级的条件下，才可避免在硬质合金表面上产生裂纹〔7〕。

因此，在电火花加工中，特别是精加工时，过分增大单个脉冲能量是不适宜的。只有在保持一定的单个脉冲能量下（即保持所需的加工精度）提高脉冲频率来提高加工速度，才是有效的方法。但是，也不能过多地提高脉冲频率，因为它还受到放电间隙消电离过程的限制。频率过高，电火花加工过程便不能稳定，并可能烧伤电极。所以，必须同时注意改善蚀除产物的排除条件，提高伺服进给系统的性能，在保证加工过程稳定的前提下，来提高加工的脉冲频率。