

高等学校试用教材

# 特种加工

哈尔滨工业大学 刘晋春 主编  
陆纪培

GAODENG XUE  
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

本书是根据机械制造(冷加工)类教材编审委员会制订的教学计划和分工,以及高等工业院校特种加工教学研究会制订的教学大纲和审定的编写大纲编写的,内容主要阐述电火花加工、电化学加工、超声加工、激光加工、电子束和离子束加工以及化学加工、磨料流动加工等特种加工方法的基本原理、基本设备、工艺规律、主要特点和适用范围。本书作为高等工业院校机械制造工艺及设备专业《特种加工》课程的教材,也可供从事机械制造方面的工程技术人员和技术工人参考和自学之用。

### 特 种 加 工

哈尔滨工业大学 刘晋春 主编  
陆纪培

责任编辑:高文龙

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)  
(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  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$  · 印张  $11 \frac{1}{2}$  · 字数 273 千字  
1987年6月北京第一版·1987年6月北京第一次印刷  
印数 00,001~11,530 · 定价 2.00 元

统一书号: 15033 · 6879



## 前 言

本书是根据机械制造（冷加工）类教材编审委员会制订的教学计划和分工，以及高等工业院校特种加工教学研究会制订的教学大纲和审定的编写大纲编写的。

特种加工是指传统的切削加工以外的新的加工方法。由于特种加工主要不是依靠机械能、切削力进行加工，因而可以用软的工具（甚至不用工具）加工硬的工件，可以用来加工各种难加工材料、复杂表面和有某些特殊要求的零件。

各种特种加工方法在生产中的应用日益广泛，近十几年来，仅电加工机床年产量的平均增长率无论在国内或国外，均大大高于金属切削机床的增长率，生产中已形成一支从事特种加工的技术队伍。为了适应特种加工技术的迅速发展和应用的需要，近年来我国已有愈来愈多的工科院校陆续开设《特种加工》课程，并举办了很多短训班。

本书内容主要包含电火花加工、电化学加工、超声加工、激光加工、电子束和离子束加工以及化学加工、磨料流动加工等特种加工方法的基本原理、基本设备、工艺规律、主要特点和范围。

本书作为高等工业院校机械制造工艺和设备专业及其它相近专业的《特种加工》课程的教材，也可供从事机械制造方面的工程技术人员和技术工人参考和自学之用。

本书由哈尔滨工业大学刘晋春、陆纪培主编，具体分工如下：刘晋春（第一章、第三章§3-4、第七章§7-1）；陆纪培（第二章§2-1、2、3、6、7、9，第三章§3-1、2、3，第七章§7-2、3、4、5）；上海交通大学李明辉（第二章§2-4、5、8）；华东纺织工程学院徐仁、贺庆华（第四章）；吉林工业大学孙坤（第五章）；深圳大学朱企业（第六章）。本书由上海交通大学陈德清主审。参加审稿的还有哈尔滨船舶工程学院范广信、广东工学院陆友慈、哈尔滨科技大學张园林、机械工业部教材编辑室高文龙，以及哈尔滨工业大学李家宝、赵家齐、任宝昌等。

由于收集的资料有一定限度，而且本书包括的内容相当广泛，书中难免有不足和欠妥之处，恳请广大读者批评指正。

编者

1986年2月

## 本书所用主要符号

|                 |                                  |           |                     |
|-----------------|----------------------------------|-----------|---------------------|
| $A$             | 振幅, 加工面积                         | $\bar{P}$ | 平均功率                |
| $a$             | 加速度, 有效离子浓度                      | $P$       | 压力强度, 能量密度          |
| $B$             | 宽度, 分隔符                          | $Q$       | 蚀除量, 流量             |
| $b$             | 宽度, 缩放量                          | $Q_a$     | 正极 (阳极) 蚀除量         |
| $C$             | 电容, 热容量, 双曲线常数                   | $Q_c$     | 负极 (阴极) 蚀除量         |
| $c$             | 波速, 光速                           | $Q_g$     | 气体流量, 工件蚀除量         |
| $D, d$          | 直径                               | $Q_l$     | 液体流量                |
| $E$             | 直流电源电压, 电位, 电极电位, 光子<br>能量, 原子能级 | $q$       | 单个脉冲蚀除量             |
| $E'$            | 平衡电极电位                           | $q_g$     | 气化潜热                |
| $E^0$           | 标准电极电位                           | $q_r$     | 熔化潜热                |
| $E_a$           | 阳极电压降                            | $R$       | 电阻, 半径              |
| $E_c$           | 阴极电压降                            | $S$       | 放电间隙, 颤圆, 加工间隙, 位移量 |
| $e$             | 电子负电荷                            | $S_B$     | 最佳放电间隙              |
| $f$             | 频率, 焦距                           | $S_m$     | 物理因素造成的机械间隙         |
| $G$             | 重量, 计数方向                         | $T$       | 温度                  |
| $g$             | 重力加速度                            | $T_f$     | 沸点                  |
| $H$             | 磁场强度, 高度                         | $T_r$     | 熔点                  |
| $h$             | 深度, 高度, 厚度, 普克朗常数                | $t$       | 时间                  |
| $I$             | 电流, 纸带孔符号                        | $t_c$     | 充电时间                |
| $I_0$           | 光强度, 同步孔符号                       | $t_d$     | 放电时间                |
| $i$             | 电流密度                             | $t_i$     | 脉冲宽度 (简称脉宽)         |
| $i_a$           | 切断电流密度                           | $t_0$     | 脉冲间隔 (简称脉间)         |
| $i_e$           | 放电电流                             | $t_p$     | 脉冲周期                |
| $\hat{i}_e$     | 脉冲电流幅值                           | $u$       | 电压                  |
| $\bar{i}_e$     | 平均放电电流                           | $u_d$     | 击穿电压                |
| $J$             | 能量密度, 计数长度                       | $u_e$     | 放电电压                |
| $K$             | 重量电化学当量, 热传导率, 某种常数,<br>腐蚀系数     | $u_r$     | 平均电压                |
| $K_a, K_c, K_u$ | 与工艺参数有关的函数                       | $u_r$     | 短路电压                |
| $K_R$           | 与材料有关的常数                         | $u_R$     | 欧姆压降                |
| $L$             | 电感, 长度                           | $V$       | 体积, 进给速度            |
| $l$             | 长度                               | $V_A$     | 加工速度 (以长度表示)        |
| $M$             | 克分子浓度, 质量, 质量                    | $V_c$     | 阴极进给速度              |
| $N$             | 逆圆                               | $V_d$     | 进给速度                |
| $n$             | 离子价数, 转速                         | $V_{dA}$  | 空载时工具电极的进给速度        |
| $P$             | 作用力, 压力, 功率                      | $V_{d0}$  | 短路时工具电极的回退速度        |
|                 |                                  | $V_E$     | 工具损耗速度              |
|                 |                                  | $V_G$     | 加工速度 (以重量表示)        |

|            |              |                 |                         |
|------------|--------------|-----------------|-------------------------|
| $V_w$      | 加工速度 (以体积表示) | $\alpha$        | 传温系数, 落料角               |
| $V_s$      | 走丝速度         | $\beta$         | 刃口斜度                    |
| $V_n$      | 法向进给速度       | $\delta$        | 平面度, 加工余量               |
| $v_a$      | 阳极蚀除速度       | $\eta$          | 效率, 电流效率                |
| $v_c$      | 阴极蚀除速度       | $\theta$        | 工具电极的相对损耗, 角度, 发散角, 入射角 |
| $v_g$      | 工件蚀除速度       | $\kappa$        | 温度扩散率                   |
| $W$        | 尺寸, 能量, 功率   | $\lambda$       | 波长, 有效脉冲利用率, 导热系数       |
| $W_M$      | 单个脉冲能量       | $\lambda_0$     | 中心波长                    |
| $Z$        | 加工指令, 气液混合比  | $\Delta\lambda$ | 光源的谱线宽度                 |
| $\Delta$   | 加工间隙         | $\rho$          | 密度, 电阻率                 |
| $\Delta_a$ | 切断间隙         | $\sigma$        | 电导率                     |
| $\Delta_b$ | 平衡间隙         | $\tau$          | 时间常数                    |
| $\Delta_f$ | 端面间隙         | $\nu$           | 光的频率                    |
| $\Delta_n$ | 法向间隙         | $\omega$        | 体积电化学当量, 圆频率, 角速度       |
| $\Delta_0$ | 起始间隙         |                 |                         |
| $\Delta_s$ | 侧面间隙         |                 |                         |

# 目 录

## 本书所用主要符号

### 第一章 概论 ..... 1

- § 1-1 特种加工的产生及发展 ..... 1
- § 1-2 特种加工的分类 ..... 2
- § 1-3 特种加工对结构工艺性等的影响 ..... 3

### 第二章 电火花加工 ..... 5

- § 2-1 电火花加工的基本原理及其分类 ..... 5
- § 2-2 电火花加工的机理 ..... 7
- § 2-3 电火花加工中的一些基本规律 ..... 11
- § 2-4 电火花加工用脉冲电源 ..... 21
- § 2-5 电火花加工自动进给调节系统 ..... 27
- § 2-6 电火花加工机床 ..... 31
- § 2-7 电火花成型穿孔加工 ..... 36
- § 2-8 电火花线切割加工 ..... 47
- § 2-9 其它电火花加工 ..... 55

### 第三章 电化学加工 ..... 61

- § 3-1 电化学加工原理及分类 ..... 61
  - 一、电化学加工的基本原理 ..... 61
  - 二、电化学加工的分类 ..... 67
- § 3-2 电解加工 ..... 68
  - 一、电解加工过程及其特点 ..... 68
  - 二、电解加工时的电极反应 ..... 69
  - 三、电解液 ..... 71
  - 四、电解加工的基本规律 ..... 75
  - 五、提高电解加工精度的途径 ..... 83
  - 六、电解加工的基本设备 ..... 87
  - 七、电解加工工艺及其应用 ..... 90

### § 3-3 电解磨削 ..... 96

- 一、电解磨削的基本原理和特点 ..... 96
- 二、影响电解磨削生产率和加工质量的因素 ..... 98
- 三、电解磨削用电解液及其设备 ..... 100
- 四、电解磨削的应用 ..... 102

### § 3-4 电铸和涂镀加工 ..... 104

- 一、电铸加工 ..... 104
- 二、涂镀加工 ..... 108

### 第四章 超声加工 ..... 114

- § 4-1 超声加工的基本原理和特点 ..... 114
- § 4-2 超声加工设备及其组成部分 ..... 115
- § 4-3 超声加工速度、精度、表面质量及其影响因素 ..... 120
- § 4-4 超声加工的应用 ..... 122

### 第五章 激光加工 ..... 126

- § 5-1 激光加工的理论基础、原理和特点 ..... 126
- § 5-2 激光加工的基本设备 ..... 131
- § 5-3 激光加工工艺规律 ..... 137
- § 5-4 激光加工工艺的应用 ..... 140

### 第六章 电子束和离子束加工 ..... 143

- § 6-1 电子束加工 ..... 143
- § 6-2 离子束加工 ..... 148

### 第七章 其它特种加工 ..... 154

- § 7-1 化学加工 ..... 154
- § 7-2 等离子体加工 ..... 162
- § 7-3 磨料流动加工 ..... 165
- § 7-4 磨料喷射加工 ..... 170
- § 7-5 液力加工 ..... 172

### 参考文献 ..... 175

# 第一章 概 论

## § 1-1 特种加工的产生及发展

传统的机械加工已有很久的历史，它对人类的生产和物质文明起了极大的作用。例如十八世纪七十年代就发明了蒸汽机，但苦于制造不出高精度的蒸汽机气缸，无法推广应用。直到有人创造出和改进了气缸镗床，解决了蒸汽机主要部件的加工工艺，才使蒸汽机获得广泛应用，引起了世界性的第一次产业革命。这一事实充分说明了加工方法对新产品的研制、推广和社会经济等起着多么重大的作用。随着新材料、新结构的不断出现，情况将更是这样。

但是从第一次产业革命以来，一直到第二次世界大战以前，在这段长达 150 多年都靠机械切削加工（包括磨削加工）的漫长年代里，并没有产生特种加工的迫切要求，也没有发展特种加工的充分条件，人们的思想一直还局限在自古以来传统的用机械能量和切削力来除去多余的金属，以达到加工要求。

直到 1943 年，苏联拉扎林柯夫妇研究火花放电时开关触点遭受腐蚀损坏的现象和原因，发现电火花的瞬时高温可使局部的金属熔化、气化而被蚀除掉，开创和发明了电火花加工方法，用铜丝在淬火钢上加工出小孔，可用软的工具加工任何硬度的金属材料，首次摆脱了传统的切削加工方法，直接利用电能和热能来去除金属，获得“以柔克刚”的效果。

第二次世界大战后，特别是进入五十年代以来，随着生产发展和科学实验的需要，很多工业部门，尤其是国防工业部门要求尖端科学技术产品向高精度、高速度、高温、高压、大功率、小型化等方向发展，它们所使用的材料愈来愈难加工，零件形状愈来愈复杂，表面精度、粗糙度和某些特殊要求也愈来愈高，对机械制造部门提出了下列新的要求：

（1）解决各种难加工材料的加工问题 如硬质合金、钛合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、金刚石、宝石、石英以及锗、硅等各种高硬度、高强度、高韧性、高脆性的金属及非金属材料的加工。

（2）解决各种特殊复杂表面的加工问题 如喷气涡轮机叶片和锻压模的立体成型表面，各种冲模冷拔模上特殊断面的型孔，喷油嘴、栅网、喷丝头上的小孔窄缝等的加工。

（3）解决各种具有特殊要求的零件的加工问题 如对表面质量和精度要求很高的细长零件、薄壁零件、弹性元件等低刚度零件的加工。

要解决上述一系列工艺问题，仅仅依靠传统的切削加工方法就很难实现，甚至根本无法实现，人们相继探索研究新的加工方法，特种加工就是在这种前提条件下产生和发展起来的。但是，外因是条件，内因是根本，事物发展的根本原因在于事物的内部，特种加工所以能产生和发展的内因，在于它具有切削加工所不具有的本质和特点。

切削加工的本质和特点：一是靠刀具材料比工件更硬，二是靠机械能把工件上多余的材料切除。一般情况下这是行之有效的方法。但是，当工件材料愈来愈硬，加工表面愈来愈复杂的情况下，原来行之有效的方法转化为限制生产率 and 影响加工质量的不利因素了。于是人

们开始探索用软的工具加工硬的材料,不仅用机械能而且还采用电、化学、光、声等能量来进行加工。到目前为止,已经找到了多种这一类的加工方法,为区别于现有的金属切削加工,统称为特种加工。它们与切削加工的不同点是:

(1) 不是主要依靠机械能,而是主要用其它能量(如电、化学、光、声、热等)去除金属材料。

(2) 工具硬度可以低于被加工材料的硬度。

(3) 加工过程中工具和工件之间不存在显著的机械切削力。

## § 1-2 特种加工的分类

特种加工的分类还没有明确的规定,一般按能量来源和作用原理可分为:

电、热——电火花加工,电子束加工,等离子束加工;

电、机械——离子束加工;

电化学——电解加工;

电化学、机械——电解磨削,阳极机械磨削;

声、机械——超声加工;

光、热——激光加工;

化学——化学加工;

液流——液力加工;

流体、机械——磨料流动加工、磨料喷射加工。

在其发展中也形成了某些过渡性的工艺,它具有特种加工和常规机械加工的双重特点,

表1-1 几种常用特种加工方法的综合比较

| 加工方法     | 可加工材料              | 工具损耗率<br>(%)<br>最低/平均 | 材料去除率<br>(mm <sup>3</sup> /min)<br>平均/最高 | 可达到尺寸<br>精度(mm)<br>平均/最高 | 可达到表面粗<br>糙度(μm)<br>平均/最高 | 主要适用范围                                                                          |
|----------|--------------------|-----------------------|------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 电火花加工    | 任何导电               | 0.1/10                | 30/3000                                  | 0.03/0.003               | Ra10/<br>Ra0.04           | 从数微米的孔、槽到数米的超大型模具、工件等。如圆孔、方孔、异形孔、深孔、微孔、弯孔、螺纹孔以及冲模、锻模、压铸模、塑料模、拉丝模。还可刻字、表面强化、涂覆加工 |
| 电火花线切割加工 | 金属材料<br>如硬质合金、耐热钢、 | 较小<br>(可补偿)           | 20/200①<br>mm <sup>2</sup> /min          | 0.02/0.002               | Ra5/Ra0.32                | 切割各种冲模、塑料模、粉末冶金模具二维及三维直纹面组成的模具及零件。可直接切割各种样板、磁钢、硅钢片冲片。也常用于钨、钨、半导体材料或贵重金属的切割      |
| 电解加工     | 不锈钢、淬火钢、钛合金等       | 不损耗                   | 100/10000                                | 0.1/0.01                 | Ra1.25/<br>Ra0.16         | 从细小零件到一吨重的超大型工件及模具。如仪表微型小轴、齿轮上的毛刺、蜗轮叶片、炮管膛线、螺旋花键孔、各种异形孔、锻造模、铸造模,以及抛光、去毛刺等       |
| 电解磨削     |                    | 1/50                  | 1/100                                    | 0.02/0.001               | Ra1.25/<br>Ra0.04         | 硬质合金等难加工材料的磨削。如硬质合金刀具、量具、轧辊、小孔、深孔、细长杆磨削,以及超精光整研磨、珩磨                             |

| 加工方法  | 可加工材料       | 工具损耗率<br>(%)<br>最低/平均        | 材料去除率<br>(mm <sup>3</sup> /min)<br>平均/最高 | 可达到尺寸<br>精度(mm)<br>平均/最高 | 可达到表面粗<br>糙度(μm)<br>平均/最高 | 主 要 适 用 范 围                                                                 |
|-------|-------------|------------------------------|------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 超声加工  | 任何脆性<br>的材料 | 0.1/10                       | 1/50                                     | 0.03/0.005               | Ra0.63/<br>Ra0.16         | 加工、切削脆硬材料。如玻璃、石英、宝石、金刚石、半导体单晶锗、硅等。可加工型孔、型腔、小孔、深孔、切削等                        |
| 激光加工  | 任何材料        | 不 损 耗<br>(三束加工, 没有成形的<br>工具) | 瞬时去除率<br>②很高, 受功<br>率限制, 平均              | 0.01/0.001               | Ra10/<br>Ra1.25           | 精密加工小孔、窄缝及成型切削、刻蚀。如金刚石拉丝模、钟表宝石轴承、化纤喷丝头、镍、不锈钢板上打小孔, 切削钢板、石棉、纺织品、纸张, 还可焊接、热处理 |
| 电子束加工 |             |                              | 去除率不高                                    |                          |                           | 在各种难加工材料上打微孔、切缝、蚀刻, 曝光以及焊接等, 现常用于制造中、大规模集成电路微电子器件                           |
| 离子束加工 |             |                              | 很低②                                      | /0.01μm                  | /Ra0.01                   | 对零件表面进行超精密、超微量加工、抛光、刻蚀、掺杂、镀膜等                                               |

① 线切割加工的金属去除率按惯例均用mm<sup>2</sup>/min为单位。

② 这类工艺, 主要用于精微和超精微加工, 不能单纯比较材料去除率。

是介乎二者之间的加工方法。例如在切削过程中引入超声振动或低频振动切削; 在切削过程中通以低电压大电流的导电切削; 加热切削, 以及低温切削等。这些加工方法是在切削加工的基础上发展起来的, 目的是改善切削的条件, 基本上还属于切削加工。

在特种加工范围内还有一些属于改善表面粗糙度或表面性能的工艺, 前者如电解抛光、化学抛光、离子束抛光等, 后者如电火花表面强化、镀膜、刻字、电子束曝光、离子束注入掺杂等。

随着半导体大规模集成电路生产发展的需要, 上述提到的电子束、离子束加工, 就是近年来提出的超微量加工, 即所谓原子、分子单位的加工方法。

此外, 还有一些不属于尺寸加工的特种加工, 如液中放电成形加工、电磁成形加工、爆炸成形加工及放电烧结等等。

本课程主要讲述电火花、电解、电解磨、激光、超声、电子束、离子束等加工方法的基本原理、基本设备、主要特点及适用范围, 表 1-1 为上述特种加工方法的综合比较。

### § 1-3 特种加工对结构工艺性等的影响

由于上述各种特种加工工艺的特点以及逐渐广泛地应用, 引起了机械制造工艺技术领域内的许多变革, 例如对: 1) 工艺路线的安排, 2) 新产品的试制过程, 3) 产品零件设计的结构, 4) 零件结构工艺性好、坏的衡量标准等产生了一系列的影响。

(1) 改变了零件的典型工艺路线 以往除磨削外, 其它切削加工、成型加工等都必须安排在淬火热处理工序之前, 这是一切工艺人员决不可违反的工艺准则, 特种加工的出现, 改变了这种一成不变的程序格式。由于它基本上不受工件硬度的影响, 而且为了免除加工后再引起淬火热处理变形, 一般都先淬火而后加工。最为典型的是: 电火花线切割加工、电火花成型加工和电解加工等。

特种加工的出现还对工序的“分散”和“集中”引起了影响。以加工齿轮、连杆等型腔锻模为例，由于特种加工时没有显著的切削力，机床、夹具、工具的强度、刚度不是主要矛盾。因此，即使是较大的、复杂的加工表面，往往宁可用一个复杂工具、简单的运动轨迹、一次安装、一道工序加工出来，工序比较集中。

(2) 试制新产品时，采用光电，数控电火花线切割，可以直接加工出各种标准和非标准直齿轮（包括非圆齿轮，非渐开线齿轮）、微电机定子、转子硅钢片，各种变压器铁心，各种特殊、复杂的二次曲面体零件。可以省去设计和制造相应的刀、夹、量具、模具及二次工具，大大缩短了试制周期。

(3) 特种加工对产品零件的结构设计带来很大的影响 例如花键孔、轴、枪炮膛线的齿根部分，从设计观点为了减少应力集中，最好做成小圆角，但拉削加工时刀齿做成圆角对排屑不利，容易磨损，只能设计与制造成清棱清角的齿根，而用电解加工时由于存在尖角变圆现象，非采用小圆角的齿根不可。又如各种复杂冲模如山形硅钢片冲模，过去由于不易制造，往往采用拼镶结构，采用电火花、线切割加工后，即使是硬质合金的刀具、模具，也可做成整体结构。喷气发动机涡轮也由于电加工而可采用整体结构。

(4) 对传统的结构工艺性的好与坏，需要重新衡量 过去对方孔、小孔、弯孔、窄缝等被认为是工艺性很“坏”的典型，对工艺、设计人员是非常“忌讳”的，有的甚至是“禁区”。特种加工的采用改变了这种现象。对于电火花穿孔，电火花线切割工艺来说，加工方孔和加工圆孔的难易程度是一样的。喷油嘴小孔，喷丝头小异形孔，涡轮叶片大量的小冷却深孔，窄缝，静压轴承、静压导轨的内油囊型腔，采用电加工后变难为易了。过去淬火前忘了钻定位销孔、铣槽等工艺，淬火后这种工件只能报废，现在则大可不必，可用电火花打孔、切槽进行补救。相反有时为了避免淬火开裂、变形等影响，故意把钻孔，开槽等工艺安排在淬火之后，这在不了解特种加工的审查人员看来，将认为是工艺、设计人员的“过错”，而特种工艺的产生和发展，使这种工艺安排成为可能，因而灵活性更大了。

## 第二章 电火花加工

电火花加工是一种利用电、热能量进行加工的方法，在二十世纪四十年代开始研究并逐步应用于生产。它是在加工过程中，使工具和工件之间不断产生脉冲性的火花放电，靠放电时局部、瞬时产生的高温把金属蚀除下来，通常称之为电火花加工，也有称之为放电加工或电蚀加工的。

### § 2-1 电火花加工的基本原理及其分类

#### 一、电火花加工的原理和设备组成

电火花加工的原理是基于工具和工件（正、负电极）之间脉冲性火花放电时的电腐蚀现象来蚀除多余的金属，以达到对零件的尺寸、形状及表面质量预定的要求。电腐蚀现象早在十九世纪初就被人们发现了，例如在插头或电器开关触点开、闭时，往往产生火花而把接触表面烧毛、腐蚀成粗糙不平的凹坑而逐渐损坏。长期以来电腐蚀一直被认为是一种有害的现象，人们不断地研究电腐蚀的原因并设法减轻和避免它。

但事物都是一分为二的，只要掌握规律，在一定条件下可以把坏事转化为好事，把有害变为有用。研究表明，电火花腐蚀的主要原因是：电火花放电时火花通道中瞬时产生大量的热，达到很高的温度，足以使任何金属材料局部熔化、气化而被蚀除掉，形成放电凹坑。这样，人们在研究抗腐蚀办法的同时，开始研究利用电腐蚀现象对金属材料进行尺寸加工。要达到这一目的，必须创造条件，解决下列问题：

1) 必须使工具电极和工件被加工表面之间经常保持一定的间隙，这一间隙随加工条件而定，通常约为几微米至几百微米。如果间隙过大，极间电压不能击穿极间介质，因而不会产生火花放电。如果间隙过小，很容易形成短路接触，同样也不能产生火花放电。为此，在电火花加工过程中必须具有工具电极的自动进给和调节装置。

2) 火花放电必须是瞬时的脉冲性放电，放电延续一段时间后，需停歇一段时间，放电延续时间一般为  $10^{-7} \sim 10^{-3} \text{ s}$ 。这样才能使放电所产生的热量来不及传导扩散到其余部分，把每一次的放电点分别局限在很小的范围内；否则，象持续电弧放电那样，使表面烧伤而无法用作尺寸加工。为此，电火花加工必须采用脉冲电源。图 2-1 为脉冲电源的电压波形，图中  $t_i$  为脉冲宽度， $t_0$  为脉冲间隔， $t_p$  为脉冲周期。

3) 火花放电必须在有一定绝缘性能的液体介质中进行，例如煤油、皂化液或去离子水等。液体介质又称工作液，它们必须具

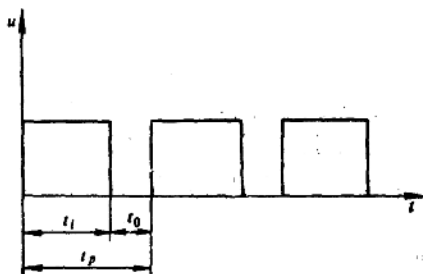


图 2-1 脉冲电源电压波形

有较高的绝缘强度 ( $10^4 \sim 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ ), 以有利于产生脉冲性的火花放电。同时, 液体介质还能把电火花加工过程中产生的金属小屑、碳黑等电蚀产物从放电间隙中悬浮排除出去, 并且对电极表面有较好的冷却作用。

以上这些问题的综合解决, 是通过图 2-2 所示的电火花加工系统来实现的。工件 1 与工具 4 分别与脉冲电源 2 的两输出端相联接。自动进给调节装置 3 (此处为液压油缸及活塞) 使工具和工件间经常保持一很小的放电间隙, 当脉冲电压加到两极之间, 便在当时条件下相对某一间隙最小处或绝缘强度最低处击穿介质, 在该局部产生火花放电, 瞬时高温使工具和工件表面都蚀除掉一小部分金属, 各自形成一个小凹坑, 如图 2-3 所示。a 图表示单个脉冲放电后的电蚀坑, b 图表示多次脉冲放电后的电极表面。脉冲放电结束后, 经过一段间隔时间 (即脉冲间隔  $t_0$ ), 使工作液恢复绝缘后, 第二个脉冲电压又加到两极上, 又会在当时极间距离相对最近或绝缘强度最弱处击穿放电, 又电蚀出一个小凹坑。这样随着相当高的频率, 连续不断地重复放电, 工具电极不断地向工件进给, 就可将工具的形状复制在工件上, 加工出所需要的零件, 整个加工表面将由无数个小凹坑所组成。图 2-4 所示的是电火花加工工件表面照片。

## 二、电火花加工的特点及其分类

电火花加工的主要特点是脉冲放电的能量密度很高, 可以加工用普通的机械加工方法难于加工或无法加工的特殊材料、复杂形状的工件。加工时, 工具电极与工件不直接接触, 两者之间的宏观作用力小, 不受工具和工件刚度的限制, 有利于实现微细加工, 而且工具电极材料不需比工件材料硬, 工具电极较易制造。因此, 电火花加工已广泛用于宇航、电子、电机电器、精密机械、汽车拖拉机、仪器仪表、轻工等各个机械制造业及科学研究部门, 成为不可缺少的一种加工方法。

电火花加工方法按在加工过程中工具和

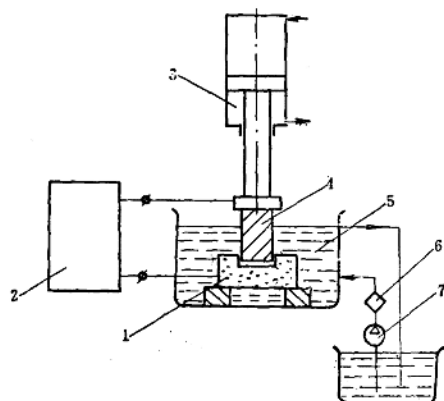


图2-2 电火花加工原理示意图

1—工件 2—脉冲电源 3—自动进给调节装置  
4—工具 5—工作液 6—过滤器 7—工作液泵

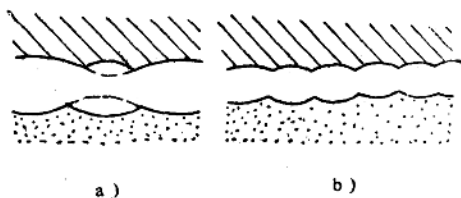


图2-3 电火花加工表面局部放大图



图2-4 电火花加工表面

工件相对运动的方式和用途的不同,大致可分为电火花穿孔成型加工,电火花线切割,电火花磨削和镗磨,电火花同步回转加工,电火花表面强化与刻字五大类。前四类属电火花成形、尺寸加工,是用于改变零件形状或尺寸的加工方法;后者则属表面加工方法,用于改善或改变零件表面性质;其中以电火花穿孔成型加工和电火花线切割应用最为广泛。表 2-1 所列为止的分类情况及各类加工方法的主要特点和用途。

表2-1 电火花加工工艺方法分类

| 类别  | 工艺方法          | 特 点                                                                     | 用 途                                                                            | 备 注                                         |
|-----|---------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| I   | 电火花穿孔成型加工     | 1.工具和工件间主要只有一个相对的伺服进给运动<br>2.工具为成型电极,与被加工表面有相同的截面或形状                    | 1.型腔加工,加工各类型腔模及各种复杂的型腔零件<br>2.穿孔加工,加工各种冲模,挤压模、粉末冶金模、各种异形孔及微孔等                  | 约占电火花机床总数的40%,典型机床有D7125, D7140等电火花成型机床     |
| II  | 电火花线切割加工      | 1.工具电极为顺电极丝轴线移动着的《线电极》<br>2.工具与工件在两个水平方向同时有相对伺服进给运动                     | 1.切割各种冲模和具有直纹面的零件<br>2.下料、截割和窄缝加工                                              | 约占电火花机床总数的50%,典型机床有DK6725, DK6732数控电火花线切割机床 |
| III | 电火花内孔、外圆和端面磨削 | 1.工具与工件有相对的旋转运动<br>2.工具与工件间有径向和轴向的进给运动                                  | 1.加工高精度、良好表面粗糙度的小孔,如拉模、挤压模、微型轴承内环、偏心钻套等<br>2.加工外圆、小模数滚刀等                       | 约占电火花机床总数的3~4%,典型机床有D6310电火花小孔内圆磨床等         |
| IV  | 电火花同步回转加工     | 1.成型工具与工件均作旋转运动,但二者角速度相等或成整数倍,相对应接近的放电点可有切向相对运动速度<br>2.工具相对工件可作纵、横向往复运动 | 以同步回转、展成回转、倍角速度回转等不同方式,加工各种复杂型面的零件,如高精度的异形齿轮、精密螺纹环规、高精度、高对称度、良好表面粗糙度的内、外回转体表面等 | 约占电火花机床总数的1~2%,典型机床有JN-2, SN-9内外螺纹加工机床      |
| V   | 电火花表面强化、刻字    | 1.工具在工件表面上振动<br>2.工具相对工件移动                                              | 1.模具刃口、刀、量具刃口表面强化和镀覆<br>2.电火花刻字、打印记                                            | 约占电火花机床总数的2~3%,典型机床有D9105电火花强化机等            |

## § 2-2 电火花加工的机理

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电火花加工的机理,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,才能对脉冲电源、进给装置、机床设备等提出合理的要求。从大量实验资料来看,每次电火花腐蚀的微观过程是电力、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几个连续的阶段:极间介质的击穿与放电;能量的转换、分布与传递;电极材料的抛出;间隙介质的消电离。

### 一、极间介质的击穿与放电

当脉冲电压施加于工具电极与工件之间时,两极之间立即形成一个电场。随着极间电压升高或是极间距离的减小,极间电场强度也将随着增大。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各种导电或不导电的杂质(如金属微粒、碳粒子、胶体粒子、微小水滴、微气泡等),在电场作用下,有些带电粒子及偶极子将迅速在电场强度最大处聚集,“接链”、“搭桥”,致使极间电场更不均匀,当阴极表面某处的场强增加到  $10^6 \text{ V/cm}$  以上时,就会产生场致电子发射,由阴极表面逸出电子。在电场作用下电子高速向阳极运动并撞击介质中的分子和中性原子,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,使介质击穿而放电。此外,混有杂质的液体介质中也有一些自由电子,使介质呈现一定的电导率。随着电场强度的增高,使带电粒子的迁移率增加,电导率也随之增加。如果间隙介质的散热条件不良,间隙过热,带电粒子的迁移率便会大大增加,在电场强度畸变最大、介电强度最薄弱处首先产生雪崩式的碰撞电离过程,导致介质击穿。

雪崩电离开始,到建立放电通道的过程非常迅速,一般为  $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ s}$ ,间隙电阻从绝缘状况迅速降低到几分之一欧姆,间隙电流迅速上升到最大值。由于通道直径很小,所以通道中的电流密度可高达  $10^5 \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$ 。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  $20 \sim 25 \text{ V}$ )。图 2-5 为矩形波脉冲放电时的电压  $u$  和电流  $i$  波形。

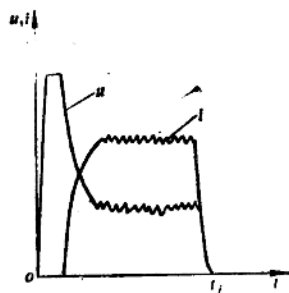


图2-5 极间放电电压和电流波形

放电通道是由数量大体相等的带正电和带负电粒子以及中性粒子组成的等离子体。带电粒子高速运动时相互碰撞,产生大量的热,使通道温度相当高,但分布是不均匀的,从通道中心向边缘逐渐降低,通道中心温度可高达  $10000^\circ\text{C}$  以上。由于受到放电时的磁压缩效应和周围介质动力压缩效应的作用,通道瞬间扩展受到很大阻力。放电开始阶段通道截面很小,其初始压力可达数十甚至上百个 MPa。高压放电通道以及瞬时形成的气体分子团(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;也有认为是多通道,即在一次放电时间内可能同时存在几个放电通道,因为单次脉冲放电后电极表面会出现几个电蚀坑。最近的实验表明,单个脉冲放电时也有可能多次击穿(即一个脉冲内间隙击穿后,有时产生短路或开路,接着又产生击穿放电),另外,也出现通道受某些随机因素的影响而产生游动,因而会出现多个或形状极不规则的电蚀坑,但同一时间内仍只存在一个放电通道。

## 二、能量的转换、分布与传递

极间介质一旦被击穿,脉冲电源就通过放电通道瞬时释放能量,把电能转换为热能、动能、磁能、光能、声能及电磁波辐射能等。其中大部分转换成热能,使两极放电点和通道本身温度剧增,该处即产生局部熔化或气化,通道中的介质也气化或热裂分解;还有一些热量在传导、辐射过程中消耗掉。

热功率在放电间隙中的分布与电位分布有关。极间电位分布为三个区域,如图2-6所示。中间是等离子体导电通道,称为放电柱,形成放电柱压降,放电柱与阳极表面之间极薄的一层为阳极区,形成阳极压降。同样在阴极表面与放电柱之间极薄一层为阴极区,形成阴极压降。

显然,间隙电压等于放电柱压降、阳极压降与阴极压降之和。间隙中的放电能量则为放电柱中的能量、阳极上能量与阴极上能量之和。

放电柱中能量主要消耗在热辐射和热传导上。随着极间距离、电位梯度、放电电流和放电时间的增大,放电柱中消耗的能量亦增大。

传递给电极上的能量是产生材料腐蚀的原因。能量传递有下列几种形式:

- 1) 在电场作用下,带电粒子(电子和正离子)对电极表面的轰击;
- 2) 电极材料的蒸气与电极之间的能量交换;
- 3) 放电柱中能量的辐射;
- 4) 放电通道中高温气体质点对电极表面的热冲击。

上述四种传递能量的形式中,主要是带电粒子对电极表面的轰击。在某些情况下,电极材料的蒸气传递的能量也不可忽视。放电柱的辐射、通道中高温气体质点对电极表面热冲击传递的能量是不大的,一般可忽略。

传递给两极的能量转化为热能,形成一个瞬时高温热源。按照导热原理,高温热源必然向周围和内部传递热量,放电点处温度最高,如超过材料沸点,便形成气化区,低于沸点而超过材料熔点时,形成熔化区。在电极表面形成放电痕,如图2-7所示。熔化区未被抛出的材料冷凝后残留在电极表面,形成熔化层。熔化层下面是热影响层,再往下才是无变化的材料基体。

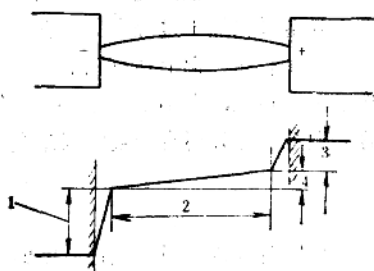


图2-6 两极间电位分布示意图

1—阴极压降 2—放电柱 3—阳极压降  
4—放电柱压降

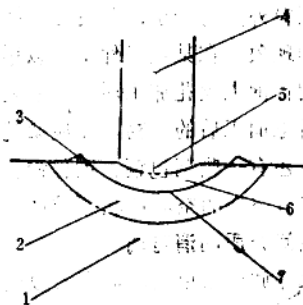


图2-7 放电痕剖面示意图

1—无变化区 2—热影响区 3—凸起 4—放电柱  
5—气化区 6—熔化区 7—熔化层

### 三、电极材料的抛出

脉冲放电的初期,瞬时高温使放电点的局部金属材料气化和熔化。由于气化过程非常短促,必然会产生一个很大的热爆炸力,使被加热至熔化状态的材料挤出或溅出。在脉冲放电的初始阶段或脉冲放电持续时间短时,这种热爆炸力抛出效应比较显著。而在整个脉冲放电期间,则主要是电动力和流体动力的作用。电动力是指通道中的正、负带电粒子在电场作用

下分别高速冲击阴极和阳极表面，产生很大的压力。同时电极蒸发、介质热解形成的气体也对电极表面产生很大的压力。往往放电柱中心的压力最高，其结果不仅使熔融金属材料抛出，而且还提高了熔融材料的沸点，当以后过热熔融材料内压力降低时又会引起气化沸腾，将熔化材料继续抛出一部分。

放电过程中产生的气泡内的压力很高，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，致使气泡内压力急剧降低，甚至降到大气压以下，形成局部真空，使在高压下溶解在熔化和过热材料中的气体析出，以及材料本身在低压下再沸腾。由于压力的骤变，使熔融金属材料及其蒸气从小坑中再次爆炸飞溅而被抛出。

总之，材料的抛出是热爆炸力、电动力、流体动力等综合作用的结果，对这一复杂的抛出机理的认识还在不断深化中。

由于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（直径约  $0.1 \sim 500 \mu\text{m}$ ，因脉冲能量而异）。图 2-8 为放电过程中放电间隙状态的示意图。

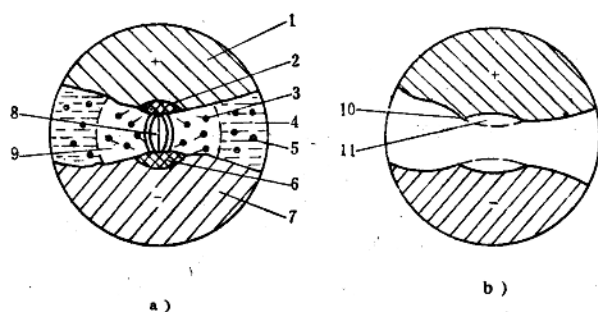


图2-8 放电间隙状况示意图

- 1—阳极 2—从阳极上抛出金属的区域 3—熔化的金属微粒 4—工作液 5—在工作液中凝固的金属微粒 6—在阴极上抛出金属的区域 7—阴极 8—放电通道 9—气泡 10—凸边 11—凹坑

实际上熔化和气化了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。

观察铜打钢电火花加工后的电极表面，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。

#### 四、极间介质的消电离

一次脉冲放电结束后，应有一段间隔时间，使间隙介质消电离，即放电通道中的带电粒子复合为中性粒子，恢复本次放电通道处间隙介质的绝缘强度，以免总是重复在同一处发生电弧放电，而顺利地按两极相对最近处或电阻率最小处形成下一击穿放电通道。

在加工过程中产生的电蚀产物（如金属微粒、碳粒子、气泡等）如果来不及排除、扩散出去，就会改变间隙介质的成分和降低绝缘强度，脉冲火花放电时产生的热量如不及时排出，带电粒子的动能不易降低，将大大减少复合的几率，使消电离过程不充分，结果将使下一个脉冲放电通道不能顺利地转移到其它部位，而始终集中在某一部位，使该处介质局部过热而破坏消电离过程，脉冲火花放电将转变为有害的稳定电弧放电，同时工作液局部高温分解后可能结炭，在该处聚成焦粒而在两极间搭桥，使加工无法进行下去。

由此可见，为了保证电火花加工过程正常地进行，在两次脉冲放电之间一般应有足够

的脉冲间隔时间,这一脉冲间隔时间的选择,不仅要考虑介质本身消电离所需的时间(与脉冲能量有关),还要考虑电蚀产物排离出放电区域的难易程度(与间隔大小、放电间隙大小及加工面积有关)。

到目前为止,人们对于电火花加工微观过程的了解还是很不够的,诸如间隙介质的击穿、放电间隙内的状况、正负电极间能量的转换与分配。材料的抛出、电火花加工过程中热场、流场、力场的变化,通道结构及其振荡等等,都还需要进一步研究。

## § 2-3 电火花加工中的一些基本规律

### 一、影响材料放电腐蚀的主要因素

电火花加工过程中,材料被放电腐蚀的规律是十分复杂的综合性问题。研究影响材料放电腐蚀的因素,对于应用电火花加工方法,提高电火花加工的生产率,降低工具电极的损耗是极为重要的。

#### 1. 极性效应

在电火花加工过程中,无论是正极还是负极,都会受到不同程度的电蚀。即使是相同材料,例如钢加工钢,正、负电极的电蚀量也是不同的。这种由于正、负极性不同而电蚀量不一样的现象叫做极性效应。如果两极材料不同,则极性效应更加复杂。在生产中,通常把工件接脉冲电源的正端、工具电极接负端时,称“正极性”加工;反之,工件接脉冲电源的负端,工具电极接正端时,称“负极性”加工,又称“反极性”加工。

产生极性效应的原因很复杂,对这一问题的笼统解释是:在火花放电过程中,正、负电极表面分别受到负电子和正离子的轰击和瞬时热源的作用,在两极表面所分配到的能量不一样,因而熔化、气化抛出的电蚀量也不一样。这是因为电子的质量和惯性均小,容易获得很高的加速度和速度,在击穿放电的初始阶段就有大量的电子奔向正极,把能量传递给阳极表面,使电极材料迅速熔化和气化;而正离子则由于质量和惯性较大,起动和加速较慢,在击穿放电的初始阶段,大量的正离子来不及到达阴极表面,到达阴极表面并传递能量的只有一小部分离子。所以在用短脉冲加工时,电子的轰击作用大于离子的轰击作用,阳极的蚀除速度大于阴极的蚀除速度,这时工件应接正极。当采用长脉冲(即放电持续时间较长)加工时,质量和惯性大的正离子将有足够的时间加速,到达并轰击阴极表面的离子数将随放电时间的增长而增多;由于正离子的质量大,对阴极表面的轰击破坏作用强,同时自由电子挣脱阴极时要从阴极获取逸出功,而正离子到达阴极后与电子结合释放位能,故阴极的蚀除速度将大于阳极,这时工件应接负极。因此,当采用窄脉冲(例如紫铜电极加工钢时,  $t_i < 12 \mu s$ )加工时,应选用正极性加工;当采用长脉冲(例如紫铜加工钢时,  $t_i > 50 \mu s$ )加工时,应采用负极性加工。

能量在两极上的分配对两个电极电蚀量的影响是一个极为重要的因素,而电子和正离子对电极表面的轰击则是影响能量分布的主要因素,因此,电子轰击和离子轰击无疑是影响极性效应的重要因素。但是,近年来的生产实践和研究结果表明,电极表面的吸附、覆盖和修复作用对极性效应的影响在某些条件下也不可忽视。例如,紫铜电极加工钢,当脉宽为  $8 \mu s$  时,通常的脉冲电源必须采用正极性加工,但在用分组脉冲进行加工时,虽然脉宽也为  $8 \mu s$ ,却需采用负极性加工,这时在阳极表面明显地存在着吸附的黑膜,保护了阳极,因而使阴极