



'91国优教材

B

普通高等教育机电类教材

# 特种加工

第3版

刘晋春 赵家齐 赵万生 主编

机械工业出版社

665  
67  
3)

本书主要阐述电火花加工、电火花线切割加工、电化学加工、激光加工、电子束和离子束加工、超声加工以及化学加工、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。本书为高等工业院校机械类专业特种加工课程教材,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。

本书第1版获第二届全国高等学校机电类专业优秀教材一等奖。

## 特 种 加 工

第3版

刘晋春 赵家齐 赵万生 主编

责任编辑:钱飒飒 版式设计:霍永明

封面设计:姚毅 责任校对:唐海燕

责任印制:何全君

机械工业出版社出版(北京市百万庄大街22号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京交通印务实业公司印刷

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 11.5·字数 271 千字

1999年5月第3版第13次印刷

印数:71 951—76 950·定价:15.50元

ISBN 7-111-06868-8/TG·1244 (课)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

## 第 3 版 序 言

本书自 1994 年 5 月第 2 版第 8 次印刷以来,到 1998 年 5 月已第 11 次印刷,共计 66950 册。

本书被各高等学校采用作为普通高等教育机电类规划教材的教学过程中,普遍获得良好的反映。

随着近年来教学改革的不深入,在第 3 版中进一步删除了某些繁琐陈旧的内容,加强了一些概念性的论述,增加了一些特种加工技术的新进展,使全书概念更清晰、文字更流畅、内容更充实。

第 3 版由哈尔滨工业大学机电工程学院特种加工及机电控制研究所的刘晋春、赵家齐、赵万生主编,参编人员有哈尔滨工业大学郭永丰、狄士春和耿春明。全书由南京航空航天大学金庆同教授主审。

由于时间及水平有限,书中错误和不足之处恳请读者指正。

编者

1998 年 8 月

## 第2版序言

本书自1987年6月第1版第1次印刷后,到1992年4月已第6次印刷,共计33300册。

本书在各高等学校的试用过程中,普遍反映良好。1992年本教材被评为第2届全国高等学校机电类专业优秀教材一等奖和第2届普通高等学校的全国优秀奖。

根据近年来科技进步和生产发展的需要,并鉴于多年来各高等院校开设此课程已积累了更多的教学实践经验,感到原教材中如电火花加工一章有些内容已显得陈旧和繁琐,应适当删除和修改,而电火花线切割加工,尤其是数控线切割加工,在生产中日益获得广泛应用,在内容上应有所加强并另立为一章。其它章节也应本着这一精神有增有减,使之更能符合知识更新,更好满足教学、科研和生产发展的需要。

为此,全国机械制造工艺及设备专业教学指导委员会决定在原第1版的基础上,组织编写此第2版教材。

在第2版中,第四章内增加了复合镀加工,第八章内增加了磁性磨料研磨加工。同时为加强培养学生独立思考和解决问题的能力,每章之后还适当增加了一些思考题和习题。

第2版由哈尔滨工业大学刘晋春、赵家齐主编。具体章节的编写人员如下:第一章:哈尔滨工业大学刘晋春;第二章:哈尔滨工业大学赵万生、郭永丰;第三章:哈尔滨工业大学白基成;第四章:哈尔滨工业大学赵家齐;第五章:深圳大学朱企业;第六章:深圳大学朱企业、清华大学范玉殿;第七章:哈尔滨工业大学任宝仓;第八章:哈尔滨工业大学刘晋春、郭永丰。全书由南京航空学院金庆同教授主审。

由于水平有限,书中难免有错误和不足之处,请读者指正。

编者 1993年7月

## 第1版前言

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，具体编写分工如下：刘晋春（第一章、第二章 § 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湛清主审。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、哈尔滨科技大学张国林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                  | $q_g$ 气体流量              |
| $a$ 加速度, 有效离子浓度               | $q_l$ 液体流量              |
| $B$ 宽度, 分隔符                   | $q_v$ 气化热               |
| $b$ 宽度, 缩放量                   | $q_r$ 熔化热               |
| $C$ 电容, 热容, 双曲线常数             | $R$ 电阻, 半径              |
| $c$ 比热容, 波速, 光速               | $S$ 放电间隙, 顺圆, 加工间隙, 位移量 |
| $C_B$ $B$ 的浓度或称 $B$ 的物质的量浓度   | $S_B$ 最佳放电间隙            |
| $D, d$ 直径                     | $S_m$ 物理因素造成的机械间隙       |
| $E$ 光子能量, 原子能级                | $T$ 温度                  |
| $e$ 电子负电荷                     | $T_i$ 沸点                |
| $F$ 偏差值, 作用力, 法拉第常数           | $T_r$ 熔点                |
| $f$ 频率, 焦距                    | $t$ 时间                  |
| $G$ 重力, 计数方向                  | $t_c$ 充电时间              |
| $g$ 重力加速度                     | $t_e$ 放电时间              |
| $H$ 磁场强度, 高度                  | $t_i$ 脉冲宽度 (简称脉宽)       |
| $h$ 深度, 高度, 厚度, 普克朗常数         | $t_0$ 脉冲间隔 (简称脉间)       |
| $I$ 电流, 纸带孔符号                 | $t_p$ 脉冲周期              |
| $I_0$ 光强度, 同步孔符号              | $u$ 电压                  |
| $i$ 电流密度                      | $u_d$ 击穿电压              |
| $i_a$ 切断电流密度                  | $u_e$ 放电电压              |
| $i_c$ 放电电流                    | $\bar{u}_e$ 平均电压        |
| $\hat{i}_c$ 脉冲电流幅值            | $u_i$ 开路电压              |
| $\bar{i}_c$ 平均放电电流            | $U$ 电位差                 |
| $J$ 能量密度, 计数长度                | $U_a$ 阳极电压              |
| $K$ 质量电化学当量, 传热系数, 某种常数, 腐蚀系数 | $U_c$ 阴极电压              |
| $K_a, K_c, K_o$ 与工艺参数有关的常数    | $U_R$ 欧姆电压              |
| $K_R$ 与材料有关的常数                | $U'$ 平衡电极电位             |
| $L$ 电感, 长度                    | $U^0$ 标准电极电位            |
| $l$ 长度                        | $V$ 体积, 电位              |
| $m$ 质量                        | $v$ 进给速度                |
| $\bar{P}$ 平均功率                | $v_A$ 加工速度 (以长度表示)      |
| $p$ 压强, 能量密度                  | $v_a$ 阳极蚀除速度            |
| $q$ 蚀除量, 流量                   | $v_c$ 阴极进给速度            |
| $q'$ 单个脉冲蚀除量                  | $v_d$ 工具电极的进给速度         |
| $q_a$ 正极 (阳极) 蚀除量             | $v_{dA}$ 空载时工具电极的进给速度   |
| $q_c$ 负极 (阴极) 蚀除量             | $v_{d0}$ 短路时工具电极的回退速度   |
|                               | $v_E$ 工具损耗速度            |

|            |                   |                 |                                |
|------------|-------------------|-----------------|--------------------------------|
| $v_m$      | 加工速度 (以质量表示)      | $\alpha$        | 热扩散率, 落料角                      |
| $v_g$      | 工件蚀除速度            | $\beta$         | 刃口斜度                           |
| $v_n$      | 法向进给速度            | $\delta$        | 放电间隙                           |
| $v_s$      | 走丝速度              | $\eta$          | 效率, 电流效率                       |
| $v_w$      | 加工速度 (以体积表示)      | $\theta$        | 工具电极的相对损耗率, 角度, 旋转运动, 发散角, 入射角 |
| $W$        | 宽度, 能量, 功         | $\kappa$        | 温度扩散率                          |
| $W_M$      | 单个脉冲能量            | $\lambda$       | 波长, 热导率                        |
| $Z$        | 加工指令, 加工余量, 气液混合比 | $\lambda_0$     | 中心波长                           |
| $\Delta$   | 加工间隙              | $\Delta\lambda$ | 光源的谱线宽度                        |
| $\Delta_c$ | 切断间隙              | $\rho$          | 密度, 电阻率                        |
| $\Delta_b$ | 平衡间隙              | $\sigma$        | 电导率                            |
| $\Delta_f$ | 端面间隙              | $\tau$          | 时间常数                           |
| $\Delta_n$ | 法向间隙              | $\omega$        | 体积电化学当量, 圆频率, 角速度              |
| $\Delta_0$ | 起始间隙              | $\varphi$       | 有效脉冲利用率                        |
| $\Delta_s$ | 侧面间隙              |                 |                                |

# 目 录

## 第3版序言

## 第2版序言

## 第1版序言

## 本书所用主要符号

## 第一章 概论 ..... 1

### 第一节 特种加工的产生及发展 ..... 1

### 第二节 特种加工的分类 ..... 3

### 第三节 特种加工对材料可加工性和结构工艺性等的影 响 ..... 4

### 思考题和习题 ..... 5

## 第二章 电火花加工 ..... 6

### 第一节 电火花加工的基本原理及其 分类 ..... 6

### 第二节 电火花加工的机理 ..... 9

### 第三节 电火花加工中的一些基本 规律 ..... 12

### 第四节 电火花加工用脉冲电源 ..... 21

### 第五节 电火花加工的自动进给 调节系统 ..... 27

### 第六节 电火花加工机床 ..... 32

### 第七节 电火花穿孔成型加工 ..... 34

### 第八节 其它电火花加工 ..... 45

### 思考题和习题 ..... 51

## 第三章 电火花线切割加工 ..... 52

### 第一节 电火花线切割加工原理、特点 及应用范围 ..... 52

### 第二节 电火花线切割加工设备 ..... 54

### 第三节 电火花线切割控制系统和编程 技术 ..... 60

### 第四节 影响线切割工艺指标的因素 ..... 66

### 第五节 线切割加工工艺及应用 ..... 68

### 思考题和习题 ..... 71

## 第四章 电化学加工 ..... 72

### 第一节 电化学加工原理及分类 ..... 72

### 第二节 电解加工 ..... 77

### 第三节 电解磨削 ..... 102

### 第四节 电铸、涂镀及复合镀加工 ..... 111

### 思考题和习题 ..... 118

## 第五章 激光加工 ..... 119

### 第一节 激光加工的原理和特点 ..... 119

### 第二节 激光加工的基本设备 ..... 123

### 第三节 激光加工工艺及应用 ..... 126

### 思考题和习题 ..... 130

## 第六章 电子束和离子束加工 ..... 131

### 第一节 电子束加工 ..... 131

### 第二节 离子束加工 ..... 136

### 思考题和习题 ..... 141

## 第七章 超声加工 ..... 142

### 第一节 超声加工的基本原理和特点 ..... 142

### 第二节 超声加工设备及其组成部分 ..... 145

### 第三节 超声加工速度、精度、表面 质量及其影响因素 ..... 150

### 第四节 超声加工的应用 ..... 151

### 思考题和习题 ..... 155

## 第八章 其它特种加工 ..... 156

### 第一节 化学加工 ..... 156

### 第二节 等离子体加工 ..... 163

### 第三节 挤压珩磨 ..... 166

### 第四节 磨料喷射加工 ..... 168

### 第五节 水射流切割 ..... 169

### 第六节 磁性磨料研磨加工和磁性磨料 电解研磨加工 ..... 171

### 思考题和习题 ..... 173

## 参考文献 ..... 174

# 第一章 概 论

## 第一节 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 18 世纪 70 年代就发明了蒸汽机，但苦于制造不出高精度的蒸汽机汽缸，无法推广应用。直到有人创造出和改进了汽缸镗床，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，前苏联拉扎林柯夫妇研究开关触点遭受火花放电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 50 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）解决各种难切削材料的加工问题 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、整体涡轮、发动机机匣和锻压模和注射模的立体成型表面，各种冲模冷拔模上特殊断面的型孔，炮管内膛线，喷油嘴、栅网、喷丝头上的小孔窄缝等的加工。

（3）解决各种超精、光整或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航天、航空陀螺仪、伺服阀，以及细长轴、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,“物极必反”,原来行之有效的方法转化为限制生产率和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,这类新加工方法统称为特种加工,国外称作非传统加工(NTM, Non-Traditional Machining)或非常规机械加工(NCM, Non-Conventional Machining)。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。

正因为特种加工工艺具有上述特点,所以就总体而言,特种加工可以加工任何硬度、强度、韧性、脆性的金属或非金属材料,且专长于加工复杂、微细表面和低刚度零件,同时,有些方法还可用以进行超精加工,镜面光整加工和纳米级(原子级)加工。

我国的特种加工技术起步较早。50年代中期我国工厂中已设计研制出电火花穿孔机床、电火花表面强化机,中国科学院电工研究所、原机械工业部机床研究所、原航空工业部625研究所、哈尔滨工业大学、原大连工学院等相继成立电加工研究室和开展电火花加工的科研工作。50年代末营口电火花机床厂开始成批生产电火花强化机和电火花机床,成为我国第一家电加工机床专业生产厂。以后上海第八机床厂等专业生产电火花加工机床。

60年代初,中国科学院电工研究所研制成功我国第一台靠模仿形电火花线切割机床。这是我国电火花线切割加工的“春燕”。60年代末上海电表厂张维良工程师在阳极-机械切割的基础上发明出我国独创的高速走丝线切割机床,上海复旦大学研制出电火花线切割数控系统。从此如雨后春笋一般,电火花、线切割加工技术在我国迅速发展。

50年代末电解加工也开始在原兵器工业部采用,用来加工炮管内的膛线等。以后逐步用于航空工业中加工喷气发动机叶片和汽车拖拉机行业中的型腔模具等。

50年代末我国曾出现“超声波热”,把超声技术用于强化工艺过程和加工。成立了上海超声仪器厂和无锡超声电子仪器厂。

1963年哈尔滨工业大学最早开设特种加工课程和实验,并编印出相应的教材。以后经修订成为39所院校统编教材和现机制专业的通用教材。

1979年我国成立了全国性的电加工学会。1981年我国高校间成立了特种加工教学研究会。这对电加工和特种加工的普及和提高起了很大的促进作用。由于我国幅员辽阔,人口众多,在工业化过程中,对特种加工技术既有广大的社会需求,又有巨大的发展潜力。1997年我国电火花穿孔、成型机床的年产量大于1000台,电火花数控线切割机床的年产量超过3800台,其它电加工机床在200台以上。已有50多个电加工机床生产企业,电加工、特种加工的机床总拥有量也居世界的前列。我国已有多名科技人员获电火花、线切割、超声波、电化学加工等八项国家级发明奖。但是由于我国原有的工业基础薄弱,特种加工设备和整体技术水平与国际先进水平还有不少差距,高档电加工机床每年还从国外进口300台以上,有待于我们去努力赶超。

## 第二节 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形式以及加工原理可分为表 1-1 所示的形式。

表 1-1 常用特种加工方法分类表

| 特 种 加 工 方 法 |           | 能量来源及形式 | 作用原理      | 英文缩写     |
|-------------|-----------|---------|-----------|----------|
| 电火花加工       | 电火花成形加工   | 电能、热能   | 熔化、气化     | EDM      |
|             | 电火花线切割加工  | 电能、热能   | 熔化、气化     | WEDM     |
| 电化学加工       | 电解加工      | 电化学能    | 金属离子阳极溶解  | ECM(ELM) |
|             | 电解磨削      | 电化学、机械能 | 阳极溶解、磨削   | EGM(ECG) |
|             | 电解研磨      | 电化学、机械能 | 阳极溶解、研磨   | ECH      |
|             | 电铸        | 电化学能    | 金属离子阴极沉积  | EFM      |
|             | 电镀        | 电化学能    | 金属离子阴极沉积  | EPM      |
| 激光加工        | 激光切割、打孔   | 光能、热能   | 熔化、气化     | LBM      |
|             | 激光打标记     | 光能、热能   | 熔化、气化     | LBM      |
|             | 激光处理、表面改性 | 光能、热能   | 熔化、相变     | LBT      |
| 电子束加工       | 切割、打孔、焊接  | 电能、热能   | 熔化、气化     | EBM      |
| 离子束加工       | 蚀刻、镀膜、注入  | 电能、动能   | 原子撞击      | IBM      |
| 等离子弧加工      | 切割(喷镀)    | 电能、热能   | 熔化、气化(涂覆) | PAM      |
| 超声加工        | 切割、打孔、雕刻  | 声能、机械能  | 磨料高频撞击    | USM      |
| 化学加工        | 化学铣削      | 化学能     | 腐蚀        | CHM      |
|             | 化学抛光      | 化学能     | 腐蚀        | CHP      |
|             | 光刻        | 光、化学能   | 光化学腐蚀     | PCM      |

在发展过程中也形成了某些介于常规机械加工和特种加工工艺之间的过渡性工艺。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减小表面粗糙度值或改善表面性能的工艺，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，激光表面处理、改性，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精微加工，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 1-2 为上述特种加工方法的综合比较。

表 1-2 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>%            | 材料去除率<br>$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$                  | 可达到尺寸<br>精度/mm      | 可达到表面粗<br>糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | 主 要 适 用 范 围                                                                     |
|----------|---------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 电火花加工    | 任何导电的金属<br>材料如硬<br>质合金、<br>耐热钢、<br>不锈钢、<br>淬火钢、<br>钛合金等 | 最低/平均                 | 平均/最高                                                         | 平均/最高               | 平均/最高                          | 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 |                                                         | 较小<br>(可补偿)           | 20/200 <sup>①</sup><br>$\text{mm}^2/\text{min}$               | 0.02/0.002          | 5/0.32                         | 切割各种冲模、塑料模、粉末冶金模等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     |                                                         | 不损耗                   | 100/10000                                                     | 0.1/0.01            | 1.25/0.16                      | 从细小零件到 1t 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          | 1.25/0.04                      | 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                             |
| 超声加工     | 任何脆性的材料                                                 | 0.1/10                | 1/50                                                          | 0.03/0.005          | 0.63/0.16                      | 加工、切割脆硬材料，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、切割等                            |
| 激光加工     | 任何材料                                                    | 不损耗<br>(三种加工，没有成形的工具) | 瞬 时 去<br>除 率 <sup>②</sup> 很<br>高，受功率<br>限制，平均<br>去 除 率 不<br>高 | 0.01/0.001          | 10/1.25                        | 精密加工小孔、窄缝及成形切割、刻蚀。如金刚石拉丝模、钟表宝石轴承、化纤喷丝孔、镍、不锈钢板上打小孔，切割钢板、石棉、纺织品、纸张，还可焊接、热处理       |
| 电子束加工    |                                                         |                       |                                                               |                     |                                | 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 <sup>②</sup>                                               | /0.01 $\mu\text{m}$ | /0.01                          | 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  $\text{mm}^2/\text{min}$  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。

### 第三节 特种加工对材料可加工性和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的应用，引起了机械制造工艺技术领域内的许多变革，例如对 ①材料的可加工性；②工艺路线的安排；③新产品的试制过程；④产品零件设计的结构；⑤零件结构工艺性好、坏的衡量标准等产生了一系列的影响。

(1) 提高了材料的可加工性 以往认为金刚石、硬质合金、淬火钢、石英、玻璃、陶瓷等是很难加工的。现在已经广泛采用金刚石、聚晶（人造）金刚石制造的刀具、工具、拉丝模具，可以用电火花、电解、激光等多种方法来加工它们。材料的可加工性不再与硬度、强

度、韧性、脆性等成直接、正比关系，对电火花、线切割加工而言，淬火钢比未淬火钢更易加工。

(2) 改变了零件的典型工艺路线 以往除磨削外，其它切削加工、成形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、电火花成形加工和电解加工等都必须先淬火，后加工。

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。这样做工序比较集中。

(3) 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。这样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。

(4) 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，刀齿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，即使是硬质合金的模具或刀具，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。

(5) 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”，其实是他们没有及时进行知识更新，不了解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。

## 思 考 题

1. 从特种加工的发生和发展来举例分析科学技术中有哪些事例是“物极必反”？（提示：如高空、高速飞行时，螺旋桨推进器被喷气推进器所取代）有哪些事例是“坏事有时变为好事”？（提示：如开关触头金属的电火花腐蚀转变为电火花加工，金属锈蚀转变为电化学加工）
2. 试例举几种采用特种加工工艺之后，对材料的可加工性和结构工艺性产生重大影响的实例。
3. 常规加工工艺和特种加工工艺之间有何关系？应该如何正确处理常规加工和特种加工之间的关系？

## 第二章 电火花加工

电火花加工又称放电加工 (Electrical Discharge Machining 简称 EDM), 在 20 世纪 40 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。因放电过程中可见到火花, 故称之为电火花加工, 日本、英、美称之为放电加工, 前苏联也称电蚀加工。

### 第一节 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加工要求。电腐蚀现象早在 19 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放电间隙, 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, 把每一次的放电蚀除点分别局限在很小的范围内; 否则, 像持续电弧放电那样, 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 为脉冲电源的空载电压波形, 图中  $t_i$  为脉冲宽度,  $t_0$  为脉冲间隔,  $t_p$  为脉冲周期,  $\hat{u}_i$  为脉冲峰值电压或空载电压。

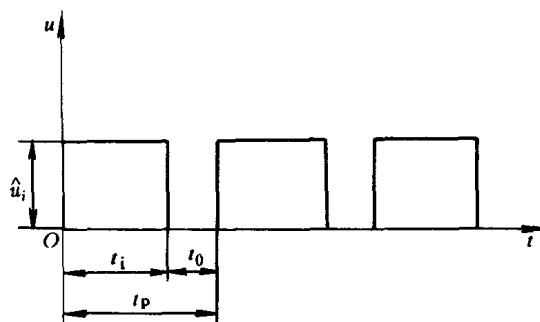


图 2-1 脉冲电源电压波形

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，它们必须具有较高的绝缘强度 ( $10^3 \sim 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ )，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、炭黑等电蚀产物从放电间隙中悬浮排除出去，并且对电极和工件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（此处为电动机及丝杆螺母机构）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。其中图 2-3a 表示单个脉冲放电后的电蚀坑，图 2-3b 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。

## 二、电火花加工的特点及其应用

### 1. 主要优点

#### (1) 适合于难切削材料的加工

由于加工中材料的去除是靠放电时的电热作用实现的，材料的可加工性

主要取决于材料的导电性及其热学特性，如熔点、沸点、比热容、热导率、电阻率等，而几乎与其力学性能（硬度、强度等）无关。这样可以突破传统切削加工对刀具的限制，可以实现用软的工具加工硬韧的工件，甚至可以加工像聚晶金刚石、立方氮化硼一类的超硬材料。目前电极材料多采用纯铜（俗称紫铜）或石墨，因此工具电极较容易加工。

(2) 可以加工特殊及复杂形状的零件 由于加工中工具电极和工件不直接接触，没有机械加工宏观的切削力，因此适宜加工低刚度工件及微细加工。由于可以简单地将工具电极的形状复制到工件上，因此特别适用于复杂表面形状工件的加工，如复杂型腔模具加工等。数控技术的采用使得用简单的电极加工复杂形状零件也成为可能。

### 2. 电火花加工的局限性

1) 主要用于加工金属等导电材料，但在一定条件下也可以加工半导体和非导体材料。

2) 一般加工速度较慢。因此通常安排工艺时多采用切削来去除大部分余量，然后再进行电火花加工以求提高生产率，但最近已有新的研究成果表明，采用特殊水基不燃性工作液进行电火花加工，其生产率甚至可不亚于切削加工。

3) 存在电极损耗。由于电极损耗多集中在尖角或底面，影响成形精度。但近年来粗加工

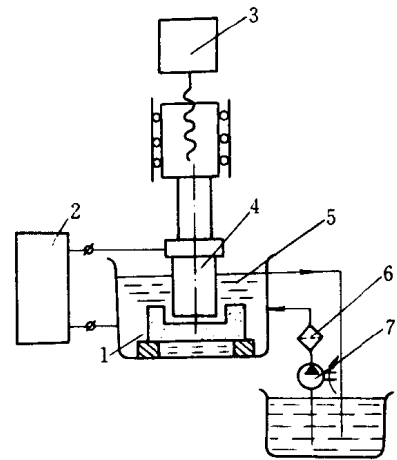


图 2-2 电火花加工原理示意图

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

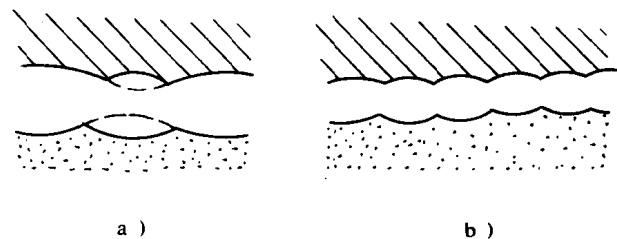


图 2-3 电火花加工表面局部放大图

时已能将电极相对损耗比降至 0.1% 以下, 甚至更小。

由于电火花加工具有许多传统切削加工所无法比拟的优点, 因此其应用领域日益扩大, 目前已广泛应用于机械 (特别是模具制造)、宇航、航空、电子、电机电器、精密机械、仪器仪表、汽车拖拉机、轻工等行业, 以解决难加工材料及复杂形状零件的加工问题。加工范围已达到小至几微米的小轴、孔、缝, 大到几米的超大型模具和零件。

### 三、电火花加工工艺方法分类

按工具电极和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、电火花同步共轭回转加工、电火花高速小孔加工、电火花表面强化与刻字六大类。前五类属电火花成形、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。以上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 所列为总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<br>孔成型加工           | 1. 工具和工件间主要只有一个<br>相对的伺服进给运动<br>2. 工具为成形电极, 与被加工表<br>面有相同的截面或形状                                     | 1. 型腔加工; 加工各类型腔模及<br>各种复杂的型腔零件<br>2. 穿孔加工; 加工各种冲模, 挤<br>压模、粉末冶金模、各种异形孔及<br>微孔等                         | 约占电火花机床总数<br>的 30%, 典型机床有<br>D7125, D7140 等电火花<br>穿孔成型机床   |
| II  | 电 火 花 线<br>切割加工            | 1. 工具电极为顺电极丝轴线垂<br>直移动着的线状电极<br>2. 工具与工件在两个水平方向<br>同时有相对伺服进给运动                                      | 1. 切割各种冲模和具有直纹面<br>的零件<br>2. 下料、截割和窄缝加工                                                                | 约占电火花机床总数<br>的 60%, 典型机床有<br>DK7725, DK7740 数控电<br>火花线切割机床 |
| III | 电 火 花 内<br>孔、外圆和成<br>形磨削   | 1. 工具与工件有相对的旋转运<br>动<br>2. 工具与工件间有径向和轴向<br>的进给运动                                                    | 1. 加工高精度、表面粗糙度值小<br>的小孔, 如拉丝模、挤压模、微型<br>轴承内环、钻套等<br>2. 加工外圆、小模数滚刀等                                     | 约占电火花机床总数<br>的 3%, 典型机床有<br>D6310 电火花小孔内圆<br>磨床等           |
| IV  | 电 火 花 同<br>步 共 轭 回 转<br>加工 | 1. 成形工具与工件均作旋转运<br>动, 但二者角速度相等或成整倍<br>数, 相对应接近的放电点可有切向<br>相对运动速度<br>2. 工具相对工件可作纵、横向往<br>复运动         | 以同步回转, 展成回转、倍角速<br>度回转等不同方式, 加工各种复杂<br>型面的零件, 如高精度的异形齿<br>轮, 精密螺纹环规、高精度、高对<br>称度、表面粗糙度值小的内、外回<br>转体表面等 | 约占电火花机床总数<br>不足 1%, 典型机床有<br>JN-2, JN-8 内外螺纹加工<br>机床       |
| V   | 电 火 花 高<br>速小孔加工           | 1. 采用细管 ( $>\phi 0.3\text{mm}$ ) 电极,<br>管内冲入高压水基工作液<br>2. 细管电极旋转<br>3. 穿孔速度极高 ( $60\text{mm/min}$ ) | 1. 线切割预穿丝孔<br>2. 深径比很大的小孔, 如喷嘴等                                                                        | 约占电火花机床 2%,<br>典型机床有 D7003A 电<br>火花高速小孔加工机床                |
| VI  | 电 火 花 表<br>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<br>强化和镀覆<br>2. 电火花刻字、打印记                                                              | 约占电火花机床总数<br>的 2%~3%, 典型机床有<br>D9105 电火花强化机等               |

## 第二节 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场力、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四个连续的阶段:极间介质的电离、击穿,形成放电通道;介质热分解、电极材料熔化、气化热膨胀;电极材料的抛出;极间介质的消电离。

### 一、极间介质的电离、击穿,形成放电通道

图 2-4 为矩形波脉冲放电时的电压和电流波形。当脉冲电压施加于工具电极与工件之间时(图 2-4 中 0~1 段和 1~2 段),两极之间立即形成一个电场。电场强度与电压成正比,与距离成反比,随着极间电压的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某种杂质(如金属微粒、碳粒子、胶体粒子等),也有一些自由电子,使介质呈现一定的电导率。在电场作用下,这些杂质将使极间电场更不均匀,当阴极表面某处的电场强度增加到  $10^5 \text{V/mm}$  即  $100 \text{V}/\mu\text{m}$  左右时,就会产生场致电子发射,由阴极表面向阳极逸出电子。在电场作用下负电子高速向阳极运动并撞击工作液介质中的分子或中性原子,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,使介质击穿而形成放电通道。

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(几安到几百安)。由于通道直径很小,所以通道中的电流密度可高达  $10^5 \sim 10^6 \text{A/cm}^2$  ( $10^3 \sim 10^4 \text{A/mm}^2$ )。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  $20 \sim 25 \text{V}$ ),电流则由 0 上升到某一峰值电流(图 2-4 中 2~3 段)。

放电通道是由数量大体相等的带正电(正离子)和带负电粒子(电子)以及中性粒子(原子或分子)组成的等离子体。带电粒子对高速运动相互碰撞,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。由于受到放电时电流产生磁场,磁场又反过来对电子流产生向心的磁压缩效应和周围介质惯性动力压缩效应的作用,通道瞬间扩展受到很大阻力。故放电开始阶段通道截面很小,而通道内由高温热膨胀形成的初始压力可达数十兆帕。高压高温的放电通道以及随后瞬时气化形成的气体(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

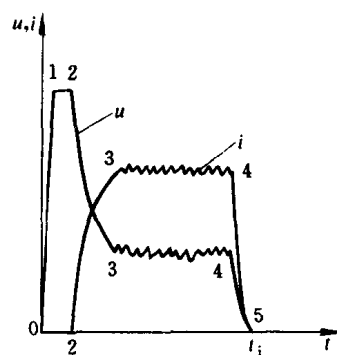


图 2-4 极间放电电压  
和电流波形