

# 特种加工手册

*Te Zhong Jia Gong Shou Ce*

曹凤国 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 特种加工手册

主 编 曹凤国

副主编 杨大勇 翟力军 伏金娟 张勤俭 桂小波

参 编 叶书强 王 荣 陈玉宁 付 伟 康凯敏 高素芳

黄建宇 黄 健 吴康体 胡绛梅 卢学军 徐国军

刘 媛 贾云海

机 械 工 业 出 版 社

本手册共分为7章：概论、电火花成形加工、电火花线切割加工、激光加工、电化学加工、超声加工和其他特种加工。第1章介绍了特种加工的发展、分类、名词术语、符号和标准。第2章介绍了电火花加工基本原理、工艺规律、脉冲电源、控制系统、机床和附件以及其他电火花加工。第3章介绍了电火花线切割加工的基本原理、分类、特点及应用，高速（往复）走丝、低速（单向）走丝电火花线切割加工机床，脉冲电源及控制系统、工艺及应用。第4章主要介绍了激光加工的基本原理、去除加工技术、焊接加工技术、表面改性技术、快速成形技术、精密微细加工技术和在加工中的安全防护及标准。第5章介绍了电解加工、电解磨削加工、电镀加工、电铸加工和电化学表面处理与抛光等技术。第6章介绍了超声加工的基本原理、超声波发生器、超声换能器、超声变幅杆以及超声材料去除加工、表面光整加工、焊接加工等技术。第7章主要介绍了电子束加工、离子束加工、水射流加工、等离子弧加工、化学加工、火焰切割加工等技术。

本手册可供从事特种加工的工程技术人员使用。

## 图书在版编目（CIP）数据

特种加工手册/曹凤国主编. —北京：机械工业出版社，2010.12  
ISBN 978-7-111-31633-6

I. ①特… II. ①曹… III. ①特种加工-技术手册 IV. ①TG66-62

中国版本图书馆CIP数据核字（2010）第162892号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：周国萍 责任编辑：崔淑惠

版式设计：霍永明 责任校对：李欣宇

封面设计：陈 沛 责任印制：乔一宇

北京机工印刷厂印刷（三河市胜利装订厂装订）

2010年11月第1版第1次印刷

184mm×260mm·54印张·2插页·1519千字

0 001—4 000册

标准书号：ISBN 978-7-111-31633-6

定价：130.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

编辑热线：(010) 88379733

社服务中心：(010) 88361066 网络服务

销售一部：(010) 68326294 门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010) 88379649 教材网：<http://www.cmpedu.com>

读者服务部：(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

# 前言

特种加工技术也称“非传统加工技术”，泛指利用电、磁、声、光、热、液、化学等能量单独或多种能量组合，达到去除或增长材料或材料改性的加工方法，从而实现材料被去除、增长、变形、改性或被镀覆等。特种加工技术包括：电火花成形加工、电火花线切割加工、激光加工、电化学加工、超声加工、电子束加工、离子束加工、等离子弧加工、化学加工、水射流加工、火焰切割加工及其他特种加工技术等。主要应用领域和加工特点是：①加工范围不受材料物理、力学性能的限制，对于难加工材料，如钛合金、耐热不锈钢、高强钢、复合材料、工程陶瓷、金刚石、红宝石、硬化玻璃等高硬度、高韧性、高强度、高熔点材料也都能找到解决的方法；②易于加工复杂型面、微细结构零件，如复杂的三维型腔、型孔、群孔、窄槽、窄缝等的加工；③可用于低刚度零件，如柔性零件、薄壁零件、弹性零件等的加工；④易获得良好的表面质量，热应力、残余应力、冷作硬化、热影响区等均比较小；⑤各种加工方法还可以复合形成新的工艺方法，有利于新工艺、新产品的研制、开发。

新的加工技术推动了历次工业革命。特种加工技术在国际上被称为 21 世纪的技术，是新经济、新技术发展的重要推动力，受到了国家的高度重视，被列为重点发展领域。随着科学技术的高速发展，新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现，特种加工技术以其“以柔克刚，精密微细，仿形逼真”三大特点，在航空航天、仪器仪表、汽车、模具、电子、石油、地质等行业得到了广泛的应用。同时，由于特种加工具有易于实现数控化、自动化、智能化及绿色环保等显著优势，其在现代制造领域的地位将更加重要。

为了满足广大工程技术人员在研发生产、设计制造、培训、教学等方面的迫切需要，特编写本手册。本手册集多年科研与实践经验，结合国内外先进的技术、装备、工艺、数据、标准等，详细介绍了特种加工技术，同时提供了主要的设备厂商供用户选用参考。本手册力求贴近时代，贴近实际，具有很强的实用性、综合性，且内容新颖，数据翔实，是一本非常实用的工具性手册。

本手册分为 7 章：概论、电火花成形加工、电火花线切割加工、激光加工、电化学加工、超声加工和其他特种加工。第 1 章介绍了特种加工发展、分类、名词术语、符号和标准。第 2 章介绍了电火花加工基本原理、工艺规律、脉冲电源、控制系统、机床和附件以及其他电火花加工。第 3 章介绍了电火花线切割加工基本原理、分类、特点及应用，高速（往复）走丝、低速（单向）走丝电火花线切割加工机床，脉冲电源及控制系统、工艺及应用。第 4 章介绍了激光加工的基本原理、去除加工技术、焊接加工技术、表面改性技术、快速成形技术、精密微细加工技术和在加工中的安全防护及标准。第 5 章主要介绍了电解加工、电解磨削加工、电镀加工、电铸加工和电化学表面处理与抛光等技术。第 6 章主要介绍了超声加工的基本原理、超声波发生器、超声换能器、超声变幅杆以及超声材料去除加工、表面光整加工、焊接加工等技术。第 7 章介绍了电子束加工、离子束加工、水射流加工、等离子弧加工、化学加工、火焰切割加工等技术。

本手册由北京市电加工研究所组织编写，曹凤国研究员任主编，负责全书统稿，杨大勇、翟力军、伏金娟、张勤俭、桂小波任副主编。第 1 章由曹凤国、伏金娟撰写，第 2 章由杨大勇、叶书强、王荣、陈玉宁、付伟撰写，第 3 章由桂小波、康凯敏、高素芳撰写，第 4 章由

伏金娟、黄建宇、黄健、吴康体撰写，第5章由翟力军、叶书强、胡绛梅、卢学军撰写，第6章由张勤俭、卢学军、黄建宇、徐国军撰写，第7章由张勤俭、刘媛、贾云海撰写。在成稿过程中，刘萍做了大量的组织工作，朱会颖做了大量的文稿处理工作。

本手册在撰写过程中，参阅了大量国内外同行的有关资料、文献和书籍，手册中未一一列出，同时得到了业内很多专家的支持、帮助，在此表示诚挚的感谢！

限于编者水平有限，手册中不足之处在所难免，诚恳希望广大读者谅解并给予批评和指正。

曹凤国

# 目 录

## 前言

## 第1章 概论 ..... 1

### 1.1 特种加工的基本概念 ..... 1

#### 1.1.1 特种加工的定义 ..... 1

#### 1.1.2 特种加工的特点 ..... 1

#### 1.1.3 特种加工的发展概况 ..... 1

#### 1.1.4 特种加工的分类与选择 ..... 2

### 1.2 特种加工的名词术语、符号和标准 ..... 4

#### 1.2.1 电火花加工的名词术语和符号 ..... 4

#### 1.2.2 电化学加工的名词术语和符号 ..... 7

#### 1.2.3 激光加工的名词术语和符号 ..... 10

#### 1.2.4 超声加工的名词术语和符号 ..... 15

#### 1.2.5 其他特种加工的名词术语和符号 ..... 17

#### 1.2.6 特种加工机床行业的现行标准 ..... 21

## 第2章 电火花成形加工 ..... 23

### 2.1 电火花加工的基本原理和工艺规律 ..... 23

#### 2.1.1 电火花加工的原理 ..... 23

#### 2.1.2 影响放电腐蚀的主要因素 ..... 25

#### 2.1.3 电火花加工的基本工艺规律 ..... 29

### 2.2 电火花成形加工脉冲电源 ..... 41

#### 2.2.1 电火花成形加工脉冲电源的特点及分类 ..... 41

#### 2.2.2 弛张式和晶闸管式脉冲电源 ..... 43

#### 2.2.3 双极型晶体管式脉冲电源 ..... 46

#### 2.2.4 场效应管、绝缘栅双极型晶体管式脉冲电源 ..... 48

#### 2.2.5 其他形式的电火花成形加工脉冲电源 ..... 53

### 2.3 电火花成形加工控制系统 ..... 60

#### 2.3.1 伺服控制系统 ..... 60

#### 2.3.2 加工过程参数控制系统 ..... 70

#### 2.3.3 电火花成形加工数控系统 ..... 77

### 2.4 电火花成形加工机床及附件 ..... 89

#### 2.4.1 电火花成形加工机床的分类及结构形式 ..... 89

#### 2.4.2 电火花成形加工机床各部件的结构及功能 ..... 94

#### 2.4.3 电火花成形加工工作液的选择 ..... 109

#### 2.4.4 电火花成形加工机床用附件 ..... 111

#### 2.4.5 电火花成形加工机床的精度和主要技术指标的检验 ..... 121

#### 2.4.6 电火花成形加工机床的维护与保养 ..... 134

### 2.5 其他电火花加工及复合加工 ..... 135

#### 2.5.1 混粉电火花镜面加工 ..... 136

#### 2.5.2 电火花小孔加工 ..... 137

#### 2.5.3 电火花回轮加工与跑合加工 ..... 143

#### 2.5.4 电熔爆加工 ..... 145

#### 2.5.5 金属电火花表面强化与刻字 ..... 148

#### 2.5.6 半导体与非导体的电火花加工 ..... 151

#### 2.5.7 电火花超声复合加工 ..... 160

### 2.6 电火花成形加工工艺及应用 ..... 162

#### 2.6.1 电火花成形加工工艺方法 ..... 162

#### 2.6.2 电火花成形加工工艺技术 ..... 165

#### 2.6.3 电火花成形加工实例 ..... 187

## 第3章 电火花线切割加工 ..... 202

### 3.1 电火花线切割加工机床的分类、基本原理、特点及应用 ..... 202

#### 3.1.1 电火花线切割加工机床的分类 ..... 202

#### 3.1.2 电火花线切割加工的基本原理 ..... 204

#### 3.1.3 电火花线切割加工的特点 ..... 206

#### 3.1.4 电火花线切割加工的应用 ..... 208

### 3.2 高速走丝电火花线切割加工机床 ..... 209

#### 3.2.1 高速走丝电火花线切割加工机床的型号及主要技术参数 ..... 209

#### 3.2.2 高速走丝电火花线切割加工机床的结构组成 ..... 218

### 3.3 高速走丝电火花线切割加工脉冲电源及控制系统 ..... 230

#### 3.3.1 高速走丝电火花线切割加工脉冲电源 ..... 230

#### 3.3.2 高速走丝电火花线切割加工数控系统 ..... 240

### 3.4 高速走丝电火花线切割加工工艺及应用 ..... 256

#### 3.4.1 高速电火花线切割加工的基本工艺规律 ..... 256

#### 3.4.2 高速走丝电火花线切割加工工艺

|                                           |     |                                          |     |
|-------------------------------------------|-----|------------------------------------------|-----|
| 及应用 .....                                 | 262 | 4.3.5 人造金刚石工具的激光焊接 .....                 | 412 |
| 3.4.3 中速走丝电火花线切割加工机床<br>及加工工艺 .....       | 275 | 4.3.6 激光焊接设备及应用 .....                    | 413 |
| 3.4.4 对高速走丝线切割加工过程中及<br>结果异常现象的分析 .....   | 278 | 4.4 激光表面改性技术 .....                       | 422 |
| 3.5 低速走丝电火花线切割加工机床 .....                  | 281 | 4.4.1 激光表面改性的特点与分类 .....                 | 423 |
| 3.5.1 低速走丝电火花线切割加工机床<br>结构 .....          | 283 | 4.4.2 激光相变强化和激光熔凝强化 .....                | 424 |
| 3.5.2 低速走丝电火花线切割加工机床<br>型号及主要技术参数 .....   | 291 | 4.4.3 激光表面熔覆及合金化 .....                   | 431 |
| 3.5.3 低速走丝电火花线切割加工机床<br>消耗品 .....         | 294 | 4.4.4 激光表面非晶化 .....                      | 440 |
| 3.5.4 低速走丝电火花线切割加工机床<br>维护及常见故障分析 .....   | 296 | 4.4.5 激光冲击硬化 .....                       | 444 |
| 3.5.5 低速走丝电火花线切割加工机床<br>附件 .....          | 299 | 4.4.6 激光表面改性技术的工业应用 .....                | 448 |
| 3.6 低速走丝电火花线切割加工脉冲电源<br>及控制系统 .....       | 302 | 4.4.7 激光表面改性的设备 .....                    | 450 |
| 3.6.1 低速走丝线切割加工脉冲电源及<br>主要技术参数 .....      | 302 | 4.5 激光快速成形制造 .....                       | 451 |
| 3.6.2 低速走丝电火花线切割加工机床<br>控制系统及主要技术参数 ..... | 307 | 4.5.1 快速成形制造技术的基本原理、<br>方法、工艺流程和特点 ..... | 451 |
| 3.7 低速走丝电火花线切割加工工艺<br>及应用 .....           | 320 | 4.5.2 快速成形制造技术的主要工艺<br>方法 .....          | 452 |
| 3.7.1 低速走丝电火花线切割加工基本<br>工艺规律 .....        | 320 | 4.5.3 快速成形的软件与设备 .....                   | 456 |
| 3.7.2 低速走丝电火花线切割加工工艺 .....                | 329 | 4.5.4 快速成形制造用材料 .....                    | 463 |
| 3.7.3 典型零件加工实例 .....                      | 343 | 4.5.5 激光烧结快速成形 .....                     | 466 |
| 3.7.4 对加工过程中及加工结果异常现<br>象的分析 .....        | 357 | 4.5.6 快速模具制造技术 .....                     | 472 |
| <b>第4章 激光加工</b> .....                     | 359 | 4.6 激光精密微细加工 .....                       | 479 |
| 4.1 激光加工基本原理 .....                        | 359 | 4.6.1 准分子激光微细加工 .....                    | 480 |
| 4.1.1 激光加工的特点与分类 .....                    | 359 | 4.6.2 超短脉冲激光的微细加工 .....                  | 483 |
| 4.1.2 激光产生的基本原理 .....                     | 359 | 4.6.3 激光微型机械加工 .....                     | 488 |
| 4.1.3 激光器系统 .....                         | 363 | 4.6.4 激光诱导原子加工 .....                     | 492 |
| 4.2 激光去除加工 .....                          | 375 | 4.6.5 激光制备纳米材料 .....                     | 494 |
| 4.2.1 激光打孔 .....                          | 375 | 4.6.6 脉冲激光沉积薄膜技术 .....                   | 497 |
| 4.2.2 激光切割 .....                          | 388 | 4.7 激光加工中的安全防护及标准 .....                  | 498 |
| 4.2.3 激光打标 .....                          | 397 | 4.7.1 激光的危险性与分类 .....                    | 498 |
| 4.3 激光焊接加工 .....                          | 400 | 4.7.2 激光防护 .....                         | 500 |
| 4.3.1 激光焊接的原理、特点与分类 .....                 | 400 | 4.7.3 激光安全标准 .....                       | 501 |
| 4.3.2 激光热传导焊接 .....                       | 401 | <b>第5章 电化学加工</b> .....                   | 504 |
| 4.3.3 激光深熔焊接 .....                        | 407 | 5.1 电解加工 .....                           | 504 |
| 4.3.4 常用材料的激光焊接 .....                     | 409 | 5.1.1 电解加工的基本原理和特点 .....                 | 504 |
|                                           |     | 5.1.2 电解加工设备 .....                       | 510 |
|                                           |     | 5.1.3 提高电解加工精度的主要途径 .....                | 529 |
|                                           |     | 5.1.4 电解加工的应用 .....                      | 532 |
|                                           |     | 5.2 电解磨削加工 .....                         | 551 |
|                                           |     | 5.2.1 电解磨削的基本原理和加工蚀除<br>量的计算 .....       | 551 |
|                                           |     | 5.2.2 影响电解磨削生产率和加工质量<br>的因素 .....        | 553 |
|                                           |     | 5.2.3 电解磨削中电解液的选择和非加<br>工表面的保护 .....     | 557 |
|                                           |     | 5.2.4 导电磨轮的制作与应用 .....                   | 561 |

|                                 |     |                                                            |     |
|---------------------------------|-----|------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.5 电解磨削设备及加工工艺 .....         | 565 | 6.6 超声表面光整加工 .....                                         | 700 |
| 5.2.6 电解磨削应用技术的发展 .....         | 572 | 6.6.1 超声抛光 .....                                           | 700 |
| 5.3 电镀加工 .....                  | 576 | 6.6.2 超声珩磨 .....                                           | 702 |
| 5.3.1 电镀加工的基本概念及原理 .....        | 576 | 6.6.3 超声砂带抛光 .....                                         | 705 |
| 5.3.2 常规电镀加工 .....              | 578 | 6.6.4 超声压光 .....                                           | 707 |
| 5.3.3 刷镀加工 .....                | 594 | 6.6.5 超声表面光整加工机床的主要<br>生产企业 .....                          | 711 |
| 5.3.4 摩擦电喷镀加工 .....             | 599 | 6.7 超声焊接加工和超声加工的其他应用 .....                                 | 711 |
| 5.3.5 复合电镀加工 .....              | 600 | 6.7.1 超声焊接加工 .....                                         | 711 |
| 5.4 电铸加工 .....                  | 604 | 6.7.2 超声清洗 .....                                           | 717 |
| 5.4.1 电铸加工的基本原理和特点 .....        | 604 | 6.7.3 超声电镀 .....                                           | 720 |
| 5.4.2 电铸设备及电铸工艺流程 .....         | 605 | 6.7.4 超声处理 .....                                           | 720 |
| 5.4.3 电铸原模设计与制作 .....           | 606 | 6.7.5 超声金属塑性加工 .....                                       | 725 |
| 5.4.4 电铸工艺 .....                | 612 | 6.7.6 超声设备相关信息 .....                                       | 727 |
| 5.4.5 电铸应用实例 .....              | 620 | <b>第7章 其他特种加工</b> .....                                    | 729 |
| 5.5 电化学表面处理与抛光 .....            | 623 | 7.1 电子束加工 .....                                            | 729 |
| 5.5.1 电化学抛光的基本原理及工艺<br>流程 ..... | 623 | 7.1.1 电子束加工的基本原理和特点 .....                                  | 729 |
| 5.5.2 电化学抛光应用举例 .....           | 629 | 7.1.2 电子束加工装置 .....                                        | 730 |
| 5.5.3 电化学抛光样品 .....             | 633 | 7.1.3 电子束加工应用技术 .....                                      | 731 |
| 5.5.4 电化学抛光设备 .....             | 633 | 7.1.4 典型的电子束加工机床——日本<br>Sodick 公司 EB300 型电子束加工<br>机床 ..... | 745 |
| <b>第6章 超声加工</b> .....           | 635 | 7.2 离子束加工 .....                                            | 746 |
| 6.1 超声加工的基本原理和特点 .....          | 635 | 7.2.1 离子束加工的原理及特点 .....                                    | 746 |
| 6.1.1 超声波的特性 .....              | 635 | 7.2.2 离子束加工装置 .....                                        | 747 |
| 6.1.2 超声加工的基本原理及其设备 .....       | 637 | 7.2.3 离子束加工的应用 .....                                       | 751 |
| 6.2 超声波发生器 .....                | 641 | 7.2.4 典型离子束加工设备 .....                                      | 761 |
| 6.2.1 模拟电路超声波发生器 .....          | 641 | 7.3 水射流加工 .....                                            | 765 |
| 6.2.2 数字电路超声波发生器 .....          | 650 | 7.3.1 水射流加工的基本原理 .....                                     | 765 |
| 6.3 超声换能器 .....                 | 651 | 7.3.2 水射流加工系统 .....                                        | 765 |
| 6.3.1 磁致伸缩换能器 .....             | 651 | 7.3.3 水射流加工的分类和特点 .....                                    | 767 |
| 6.3.2 压电换能器 .....               | 657 | 7.3.4 水射流加工技术的应用 .....                                     | 768 |
| 6.4 超声变幅杆 .....                 | 664 | 7.3.5 典型的水射流加工机床 .....                                     | 780 |
| 6.4.1 纵向振动变幅杆 .....             | 664 | 7.3.6 水射流加工机床的主要生产厂商 .....                                 | 781 |
| 6.4.2 有负载的变幅杆 .....             | 670 | 7.4 等离子弧加工 .....                                           | 781 |
| 6.4.3 超声变幅杆的设计 .....            | 672 | 7.4.1 等离子弧加工的基本原理 .....                                    | 781 |
| 6.5 超声材料去除加工 .....              | 675 | 7.4.2 等离子弧的主要结构及工艺<br>参数 .....                             | 783 |
| 6.5.1 磨料冲击超声加工 .....            | 675 | 7.4.3 等离子弧焊接 .....                                         | 785 |
| 6.5.2 超声旋转加工 .....              | 682 | 7.4.4 等离子弧切割 .....                                         | 792 |
| 6.5.3 超声磨削 .....                | 688 | 7.4.5 等离子弧喷涂 .....                                         | 797 |
| 6.5.4 超声车削 .....                | 691 | 7.5 化学加工 .....                                             | 802 |
| 6.5.5 超声锯料 .....                | 694 | 7.5.1 化学铣切 .....                                           | 802 |
| 6.5.6 超声振动滚齿加工 .....            | 696 | 7.5.2 化学抛光 .....                                           | 804 |
| 6.5.7 典型的超声加工机床 .....           | 697 |                                                            |     |
| 6.5.8 超声材料去除加工机床生产企业 .....      | 700 |                                                            |     |

|                                  |     |                                     |     |
|----------------------------------|-----|-------------------------------------|-----|
| 7.5.3 化学镀膜 .....                 | 805 | 能和用途 .....                          | 830 |
| 7.5.4 化学沉积 .....                 | 805 | 7.10.4 微弧氧化表面处理技术的典型<br>设备和应用 ..... | 830 |
| 7.6 挤压珩磨 .....                   | 809 | 7.11 阳极机械切割 .....                   | 831 |
| 7.6.1 挤压珩磨的基本原理 .....            | 809 | 7.11.1 阳极机械切割的基本原理 .....            | 831 |
| 7.6.2 挤压珩磨的特点 .....              | 811 | 7.11.2 阳极机械切割机的组成及结构<br>特点 .....    | 832 |
| 7.6.3 挤压珩磨的应用领域 .....            | 811 | 7.11.3 阳极机械切割的典型设备 .....            | 832 |
| 7.6.4 挤压珩磨的影响因素 .....            | 811 | 7.12 火焰切割 .....                     | 833 |
| 7.6.5 挤压珩磨基本工艺 .....             | 812 | 7.12.1 火焰切割的基本原理 .....              | 833 |
| 7.6.6 挤压珩磨的典型设备 .....            | 813 | 7.12.2 火焰切割机系统的组成 .....             | 833 |
| 7.6.7 挤压珩磨应用实例 .....             | 815 | 7.12.3 影响火焰切割质量的因素分析 .....          | 834 |
| 7.7 光刻技术 .....                   | 816 | 7.12.4 典型的火焰切割机床 .....              | 835 |
| 7.7.1 光刻技术的基本原理及基本<br>流程 .....   | 816 | 7.13 砂线切割 .....                     | 836 |
| 7.7.2 光刻技术加工中的关键技术 .....         | 817 | 7.13.1 砂线切割的基本原理 .....              | 836 |
| 7.7.3 典型光刻设备 .....               | 818 | 7.13.2 砂线切割的基本特点 .....              | 836 |
| 7.8 磁性磨料加工 .....                 | 820 | 7.13.3 砂线切割的典型机床 .....              | 837 |
| 7.8.1 磁性磨料加工的基本原理 .....          | 820 | 7.13.4 硅片的多砂线切割机床 .....             | 837 |
| 7.8.2 磁性磨料的分类及特性 .....           | 821 | 7.14 爆炸加工 .....                     | 839 |
| 7.8.3 典型加工工艺参数 .....             | 822 | 7.14.1 爆炸加工的特点 .....                | 839 |
| 7.8.4 磁性磨料加工应用实例 .....           | 822 | 7.14.2 爆炸加工的分类 .....                | 840 |
| 7.8.5 磁性磨料加工设备 .....             | 822 | 7.14.3 爆炸加工基本工艺 .....               | 842 |
| 7.9 喷射成形加工 .....                 | 823 | 7.15 液中放电成形 .....                   | 843 |
| 7.9.1 喷射成形加工的基本原理 .....          | 823 | 7.15.1 液中放电成形加工的原理、装置<br>及参数 .....  | 843 |
| 7.9.2 喷射成形加工的特点 .....            | 824 | 7.15.2 液中放电成形的特点 .....              | 844 |
| 7.9.3 镍基高温合金喷射成形 .....           | 824 | 7.15.3 液中放电成形方式及特点 .....            | 845 |
| 7.9.4 金属粉末喷射成形 .....             | 824 | 7.16 电磁成形 .....                     | 846 |
| 7.9.5 喷射成形加工的应用领域 .....          | 826 | 7.16.1 电磁成形的基本原理 .....              | 846 |
| 7.9.6 喷射成形加工产品实例及现状 .....        | 826 | 7.16.2 电磁成形的应用 .....                | 847 |
| 7.9.7 喷射成形加工典型设备 .....           | 827 | 7.17 电泳磨削 .....                     | 847 |
| 7.10 微弧氧化表面处理技术 .....            | 828 | 7.17.1 电泳磨削的机理 .....                | 847 |
| 7.10.1 微弧氧化表面处理技术的基本<br>原理 ..... | 828 | 7.17.2 电泳磨削的工艺规律 .....              | 847 |
| 7.10.2 微弧氧化表面处理技术的工艺<br>特点 ..... | 829 | 参考文献 .....                          | 850 |
| 7.10.3 微弧氧化后的表面陶瓷层的功             |     |                                     |     |

# 第 1 章 概 论

## 1.1 特种加工的基本概念

### 1.1.1 特种加工的定义

传统的机械加工 (traditional machining), 大都是采用比被加工工件材料还硬的工具 (刀具), 通过机械力的作用, 将工件材料去除, 使其变形或改变其性能, 达到所需要的形状尺寸和表面质量要求。

特种加工 (non-traditional machining) 方法, 不是使用普通刀具来切削工件材料, 也不需要加工过程中施加明显的机械力, 而是将电能、热能、光能、声能、磁能等物理能量及化学能量或其组合乃至与机械能的组合直接施加到被加工的部位上, 从而实现材料去除、增长或表面改性, 并达到所需的形状尺寸和表面质量要求的加工方法。

目前, 特种加工已成功开发应用的就有数十种, 如电火花加工、激光加工、电化学加工、超声加工、电子束加工、离子束加工、化学加工、快速成形 (RP) 加工等。特种加工技术在难加工材料的加工、模具及复杂型面的加工、零件的精密微细加工等领域已成为重要的加工方法或仅有的加工方法, 是现代制造技术的前沿。

### 1.1.2 特种加工的特点

特种加工与传统机械加工有着本质的不同, 主要区别在于应用加工能量的形式不同。传统的机械加工是单纯依靠机械能, 并通过切削刀具实现的, 而特种加工则依靠其他形式的能, 且不一定要通过刀具来实现。因此, 特种加工具有如下特点:

(1) 以柔克刚 在加工过程中, 工具和工件之间不存在显著的机械切削力。另外, 特种加工的能量密度很高 (如激光加工为  $10^8 \text{ W/cm}^2$ , 电火花加工为  $10^6 \text{ W/cm}^2$ , 超声加工为  $10^3 \text{ W/cm}^2$  等), 因此能用“软”的工具加工“硬”的工件, 甚至有些特种加工还可以不用工具。这非常适用于高硬度、高熔点、高强度、高耐热、高脆性及耐蚀性等材料的加工。

(2) 精密微细 由于加工使用的物理或化学能量可精确地控制, 工具与工件间又无明显机械作用力, 因此可实现精密微细加工, 如模具和零件的窄缝、窄槽、微细小孔加工, 以及不能承受机械力作用的薄壁零件和微细零件的加工等。加工精度可达微米级, 甚至纳米级。

(3) 仿形逼真 直接利用物理或化学能量加工, 便于实现加工过程的自动化和智能化。同时, 简单的进给运动就可以加工复杂的多维曲面工件。现代化计算机技术的应用使加工工件的仿形更加逼真。

(4) 表面优质 在特种加工中, 由于工件表面不像切削加工那样产生强烈的弹、塑性变形, 故许多特种加工方法都可以获得非常小的表面粗糙度值, 其残余应力、冷作硬化、热应力及毛刺等表面缺陷均比传统机械加工小得多。

### 1.1.3 特种加工的发展概况

加工技术的发展推动着历次工业革命。例如, 18 世纪 70 年代瓦特发明了蒸汽机, 但苦于难以制造出高精度的气缸活塞、缸体, 使蒸汽机无法推广应用。只有在 25 年后, 威尔逊发明镗床并解

决气缸活塞和缸体的加工工艺后,才使蒸汽机获得了广泛的应用,引发了震动世界的第一次工业革命。

第一次工业革命后,一直到第二次世界大战以前,在这段长达 150 多年都靠传统的机械切削(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。

第二次世界大战后,特别是进入了 20 世纪 50 年代以来,随着生产的发展和科学实验的需要,许多工业部门,特别是国防军事工业部门,要求尖端的产品向高精度、高速度、大功率、耐高温、微型化等方向发展。其产品零件使用的材料大都是高硬度、高耐磨度、高熔点的,零件的形状越来越复杂,要求的精度越来越高,表面粗糙度值越来越低。因此,如果采用传统机械加工的方法,只能提高切削工具的强度,会使加工成本增加,并且有时根本无法加工。于是人们开始探索采用除机械能以外的加工方法。

前苏联学者拉扎连珂夫妇 1943 年运用逆向思维,从研究防止开关触点电火花腐蚀,转而利用电火花腐蚀现象对金属材料进行尺寸加工,用铜棒在淬火钢上加工出小孔,从而开创和发明了电火花加工方法。电火花加工发明以后,各类特种加工方法如雨后春笋般应运而生,并快速发展,特别是美国学者 1960 年发明激光加工方法以来,相继出现了数十种特种加工的新方法,如电化学加工、超声加工、电子束加工、离子束加工、水射流加工、等离子弧加工、化学加工和快速成形技术(RP)等。

快速成形技术(Rapid Prototyping Technology, RP)是 20 世纪 80 年代中后期发展起来的一种新的特种加工方法,它是综合利用 CAD 技术、数控技术、激光加工技术和材料技术实现从零件设计到三维实体原型制造一体化的系统技术。它的问世,迅速得到广泛的应用,并被称为制造业的又一次革命。总之,特种加工技术在难加工材料加工、模具及复杂型面加工、零件精细加工等领域已成为重要的加工方法,甚至成为唯一的加工方法。

## 1.1.4 特种加工的分类与选择

### 1.1.4.1 特种加工的分类

常用的特种加工方法可以按加工能量形式和加工原理进行分类,详见表 1.1-1。

表 1.1-1 常用特种加工方法分类

| 序号 | 英文缩写符号  | 加工方法     | 能量类型   | 传递介质     | 加工机理  |
|----|---------|----------|--------|----------|-------|
| 1  | EDM     | 电火花成形加工  | 电能、热能  | 射线       | 熔化、汽化 |
| 2  | WEDM    | 电火花线切割加工 | 电能、热能  | 射线       | 熔化、汽化 |
| 3  | LBM     | 激光加工     | 光能、热能  | 射线       | 熔化、汽化 |
| 4  | ECM     | 电化学加工    | 电化学能   | 电介质      | 离子转移  |
| 5  | USM     | 超声波加工    | 声能、机械能 | 高速粒子     | 切蚀    |
| 6  | EBM     | 电子束加工    | 电能、热能  | 射线       | 熔化、汽化 |
| 7  | IBM     | 离子束加工    | 电能、热能  | 高温气体     | 熔化、汽化 |
| 8  | PAM (C) | 等离子弧加工   | 电能、机械能 | 高温气体     | 熔化、汽化 |
| 9  | WJM     | 水射流加工    | 机械能    | 高速粒子     | 切蚀    |
| 10 | AJM     | 磨料射流加工   |        |          |       |
| 11 | AFM     | 磨粒流加工    |        |          |       |
| 12 | CHM     | 化学加工     | 化学能    | 易反应的周围介质 | 腐蚀    |
| 13 | FCM     | 火焰切割     | 热能     | 高温气体     | 熔化、汽化 |
| 14 | RPM     | 快速成形     | 热能、机械能 |          | 热熔化成形 |

除表 1.1-1 所列的特种加工方法外, 还有如下一些新的特种加工方法。

1) 复合特种加工技术, 如超声电火花加工 (超声 + 电火花)、电解磨削加工 (电解 + 磨削)、超声切削加工 (超声 + 切削)、电解放电加工 (电解 + 电火花) 等。

2) 改变工件表面粗糙度或表面性能的加工, 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、电子束曝光、离子束注入等。

3) 最近 10 年来提出的“微纳加工”, 即在物理上达到所谓分子、原子单位的加工。

4) 不属于尺寸加工的成形加工方式, 如液中放电成形、电磁成形、爆炸成形及放电烧结加工等。

#### 1.1.4.2 特种加工的性能比较

在实际产品的加工中, 究竟采用何种特种加工方法, 才是最科学和正确的, 这是一个极其重要并应认真考虑的问题。应根据加工工件的材质、几何形状、尺寸、精度、效率及其经济性, 并结合不同特种加工方法进行综合比较分析, 然后作出正确的选择。

几种常用的特种加工方法的综合性能比较见表 1.1-2。

表 1.1-2 几种常用特种加工方法的综合性能比较

| 加工方法   |                 | 适合加工材料      | 加工速度<br>/(mm <sup>3</sup> /min)  | 加工精度<br>/μm | 表面粗糙度<br>Ra/μm | 加工间隙<br>/μm | 表面损伤<br>深度/μm | 主要适用范围                               |
|--------|-----------------|-------------|----------------------------------|-------------|----------------|-------------|---------------|--------------------------------------|
| 电火花加工  | 电火花成形加工 (EDM)   | 金属材料及部分导电材料 | 10 ~ 3000                        | 5 ~ 50      | 0.2 ~ 12.5     | 20 ~ 300    | 10 ~ 125      | 各类型腔模、各种深小孔、窄槽及难加工材料加工, 还可用于表面强化、涂覆等 |
|        | 电火花线切割加工 (WEDM) |             | 10 ~ 300<br>mm <sup>2</sup> /min | 2 ~ 20      | 0.2 ~ 5.0      | 15 ~ 50     | 5 ~ 50        | 各类冷冲模和镶拼型腔模, 各种精密零件切割                |
| 激光加工   | 激光加工 (LBM)      | 任何材料        | 0.1 (瞬时速度高)                      | 1 ~ 20      | 1 ~ 10         | 10 ~ 20     | 1 ~ 10        | 各种精密小孔、窄缝加工, 难加工材料的打孔、切割、焊接和热处理      |
| 超声加工   | 超声加工 (USM)      | 硬脆材料        | 0.1 ~ 20                         | 1 ~ 30      | 0.1 ~ 0.63     | 5 ~ 50      | 0.5 ~ 5       | 主要用于加工金刚石、玻璃、玉石、陶瓷、单晶硅等硬脆材料; 还可用于清洗等 |
| 电化学加工  | 电解加工 (ECM)      | 金属材料        | 100 ~ 20000                      | 10 ~ 150    | 0.1 ~ 1.25     | 10 ~ 100    | 1 ~ 5         | 各种工件和模具, 特别是大型锻模、铸造模等                |
|        | 电解磨削            | 硬质合金等难加工材料  | 1 ~ 200                          | 1 ~ 20      | 0.04 ~ 1.25    | 5 ~ 20      | 0.5 ~ 5       | 主要用于硬质合金材料磨削                         |
| 其他特种加工 | 电子束加工 (EBM)     | 任何材料        | 0.01 ~ 0.1<br>(瞬时速度高)            | 0.1 ~ 5     | 0.01 ~ 0.1     | 0.1 ~ 0.5   | 0.01 ~ 0.05   | 主要用于大规模集成电路 IC 的制造; 在难加工材料上加工微孔及焊接等  |
|        | 离子束加工 (IBM)     | 任何材料        | 0.01 ~ 0.1<br>(瞬时速度高)            | 0.01 ~ 1    | 0.01 ~ 0.05    | 0.05 ~ 0.1  | 0.01 ~ 0.05   | 零件表面超精加工、刻蚀、抛光、注入、掺杂, 以及镀膜等          |
|        | 等离子弧加工 (PAM)    | 金属材料        | 30 ~ 750                         | 30 ~ 300    | 1.25 ~ 5.0     | 75 ~ 300    | 10 ~ 100      | 各种金属材料的切割、焊接, 以及工件表面强化               |
|        | 水射流加工 (WJM)     | 任何材料        | 30 ~ 1000                        | 50 ~ 300    | 1.25 ~ 5.0     | 50 ~ 500    | 5 ~ 50        | 各种材料的切割                              |
|        | 火焰切割 (FCM)      | 金属材料        | 50 ~ 1000                        | 50 ~ 500    | 5.0 ~ 10       | 100 ~ 1000  | 20 ~ 200      | 金属材料的切割                              |
|        | 化学腐蚀加工 (CHM)    | 金属材料        | 1 ~ 50                           | 10 ~ 50     | 1.25 ~ 5.0     | 5 ~ 100     | 1 ~ 5         | 金属材料的刻蚀加工                            |

### 1.1.4.3 特种加工方法的选择

在考虑到表 1.1-2 及其他因素时, 特种加工方法的选用见表 1.1-3。

表 1.1-3 特种加工方法的选择

| 加工方法   |        | 工件材料 |       |      |     | 工件形状 |      |    |      | 加工精度<br>/ $\mu\text{m}$ |      |     | 加工速度<br>/ $(\text{mm}^3/\text{min})$ |          |       | 基本投资 |   |   | 表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$ |          |      |
|--------|--------|------|-------|------|-----|------|------|----|------|-------------------------|------|-----|--------------------------------------|----------|-------|------|---|---|------------------------|----------|------|
|        |        | 金属   | 非金属材料 | 粉末冶金 | 高合金 | 型腔   | 微孔窄缝 | 型孔 | 花纹图案 | <1                      | 1~50 | >50 | <100                                 | 100~1000 | >1000 | 高    | 中 | 低 | <0.32                  | 0.32~2.5 | >2.5 |
|        |        |      |       |      |     |      |      |    |      |                         |      |     |                                      |          |       |      |   |   |                        |          |      |
| 电火花加工  | 成形加工   | ●    | —     | ●    | ●   | ●    | ●    | ●  | ●    | —                       | ●    | ●   | ●                                    | ●        | —     | ●    | ● | — | —                      | ●        | —    |
|        | 线切割加工  | ●    | —     | ●    | ●   | —    | —    | —  | —    | —                       | ●    | —   | ○                                    | ○        | —     | ●    | ● | — | ●                      | ●        | —    |
| 激光加工   | 激光加工   | ●    | ●     | —    | —   | —    | ●    | ●  | ●    | —                       | ●    | ●   | —                                    | ●        | ●     | ●    | ● | — | —                      | —        | ●    |
|        | 快速成形   | ●    | ●     | —    | —   | △    |      |    |      | —                       | —    | ●   | —                                    | ●        | —     | ●    | — | — | —                      | —        | ●    |
| 超声加工   | 超声加工   | ●    | ●     | ●    | ●   | ●    | ●    | ●  | —    | —                       | ●    | —   | —                                    | —        | ●     | —    | ● | ● | ●                      | ●        | —    |
| 电化学加工  |        | ●    | —     | ●    | ●   | —    | —    | —  | —    | —                       | ●    | ●   | —                                    | —        | —     | —    | ● | ● | ●                      | ●        | —    |
| 其他特种加工 | 电子束加工  | ●    | ●     | ●    | ●   | ●    | ●    | —  | —    | —                       | ●    | ●   | —                                    | ●        | —     | —    | ● | ● | —                      | ●        | —    |
|        | 离子束加工  | ●    | ●     | ●    | ●   | —    | —    | —  | —    | —                       | —    | —   | —                                    | —        | —     | —    | ● | ● | —                      | —        | —    |
|        | 等离子弧加工 | ●    | —     | —    | —   | —    | —    | —  | —    | —                       | —    | —   | ●                                    | ●        | —     | —    | ● | ● | —                      | ●        | ●    |
|        | 水射流加工  | ●    | ●     | ●    | ●   | —    | —    | —  | —    | —                       | —    | —   | ●                                    | ●        | —     | —    | — | — | —                      | ●        | ●    |
|        | 火焰切割   | ●    | ●     | —    | —   | —    | —    | —  | —    | —                       | —    | —   | ●                                    | ●        | —     | —    | — | — | —                      | —        | ●    |
|        | 化学腐蚀加工 | ●    | —     | —    | —   | —    | —    | —  | —    | —                       | —    | —   | —                                    | ●        | —     | —    | — | — | —                      | ●        | ●    |

注: 1. ○表示电火花线切割加工, 加工速度单位为  $\text{mm}^2/\text{min}$ 。

2. △表示激光快速成形加工, 适用于各种成型零件加工。

## 1.2 特种加工的名词术语、符号和标准

### 1.2.1 电火花加工的名词术语和符号

表 1.2-1 给出了电火花加工的常用名词术语和符号。

表 1.2-1 电火花加工的常用名词术语和符号

| 序号 | 名词术语   | 英文及缩写                       | 符号  | 定 义                                                             |
|----|--------|-----------------------------|-----|-----------------------------------------------------------------|
| 1  | 电火花加工  | electro-discharge machining | EDM | 在一定的介质中, 通过工件和工具电极间脉冲火花放电, 使工件材料熔化、汽化而被去除或在工件表面进行材料沉积的加工方法      |
| 2  | 工具电极   | tool-electrodes             | EL  | 用以对工件进行电火花加工的工具, 因其是火花放电时的电极之一, 故称工具电极, 简称工具或电极 (见图 1.2-1)      |
| 3  | 放电间隙   | discharge gap               | S、Δ | 放电发生时, 工件与工具电极之间为维持正常放电加工所需的距离称为放电间隙。在加工过程中, 则称为加工间隙 (见图 1.2-1) |
| 4  | 侧向间隙   | overcut gap                 | —   | 加工过程中工件与工具电极侧面之间的距离                                             |
| 5  | 脉冲电源   | pulse power supply          | PG  | 以脉冲方式向工件和工具电极间的加工间隙提供脉冲放电能量的电气装置                                |
| 6  | 伺服进给系统 | servo feed system           | —   | 用作使工具电极伺服进给、自动调节的系统, 使工具电极和工件在加工过程中保持一定的加工间隙 (见图 1.2-1)         |

(续)

| 序号 | 名词术语   | 英文及缩写                             | 符号          | 定 义                                                                                                 |
|----|--------|-----------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7  | 工作液介质  | —                                 | —           | 电火花加工时, 工具电极和工件间的放电间隙一般浸泡在有一定绝缘性能的液体介质中, 此液体介质即称工作液介质或简称工作液                                         |
| 8  | 电蚀产物   | erosion product                   | —           | 是指电火花加工过程中被蚀除下来的产物。一般指工具电极和工件表面被蚀除下来的微粒小屑及煤油等工作液在高温下分解出来的炭黑和其他产物, 也称为加工屑                            |
| 9  | 电参数    | —                                 | —           | 主要有脉冲宽度、脉冲间隔、峰值电压、峰值电流等脉冲参数 (见图 1.2-2), 又称电规准                                                       |
| 10 | 脉冲宽度   | pulse duration                    | $t_i$       | 脉冲宽度简称脉宽。它是加到电极间隙两端的电压脉冲开通时刻到关断时刻之间的持续时间 (见图 1.2-2), 单位为 $\mu s$ 。日本及英美常用 $t_{on}$ 或 $\tau_{on}$ 表示 |
| 11 | 脉冲间隔   | inter-pulse interval/off time     | $t_o$       | 脉冲间隔简称脉间, 也称脉冲停歇时间。加到电极间隙两端电压脉冲的关断时间 (见图 1.2-2), 单位为 $\mu s$ 。日本及英美常用 $t_{off}$ 或 $\tau_{off}$ 表示   |
| 12 | 放电持续时间 | discharge time/discharge duration | $t_e$       | 是指工作液介质击穿后, 间隙中通过放电电流的时间, 亦即电流脉宽, 它比电压脉宽稍小, 差一击穿延时 $t_d$ , 单位为 $\mu s$                              |
| 13 | 击穿延时   | ignition delay                    | $t_d$       | 从间隙两端施加脉冲电压起, 至介质击穿 (既建立起电流之前) 之间的时间 (见图 1.2-2), 单位为 $\mu s$                                        |
| 14 | 脉冲周期   | pulse cycle time                  | $t_p$       | 是指一个电压脉冲开始到下一个电压脉冲开始之间的时间 (见图 1.2-2), 单位为 $\mu s$ , 表示方法为 $t_p = t_i + t_o$                         |
| 15 | 脉冲频率   | pulse frequency                   | $f_p$       | 是指单位时间 (1s) 内电源发出的电压脉冲的个数, 单位为 Hz, 表示方法为 $f_p = \frac{1}{t_p}$                                      |
| 16 | 脉宽系数   | duty factor                       | $\tau$      | 是指脉冲宽度与脉冲周期之比, 表示方法为 $\tau = \frac{t_i}{t_p} = \frac{t_i}{t_i + t_o}$                               |
| 17 | 占空比    | —                                 | $\psi$      | 是指脉冲宽度与脉冲间隔之比, 表示方法为 $\psi = \frac{t_i}{t_o}$                                                       |
| 18 | 开路电压   | open circuit voltage              | $\hat{u}_i$ | 是指间隙开路时电极间的最高电压, 有时等于电源的直流电压, 单位为 V, 又称空载电压或峰值电压                                                    |
| 19 | 放电电压   | discharge voltage                 | —           | 介质击穿后, 通过放电电流时隙两端的瞬时电压                                                                              |
| 20 | 加工电压   | machining voltage/working voltage | $u$         | 是指加工时电压表上指示的放电间隙两端的平均电压, 单位为 V, 又称间隙平均电压                                                            |
| 21 | 间隙电压   | gap voltage                       | —           | 正常加工时间隙两端电压的算术平均值                                                                                   |
| 22 | 加工电流   | working current/machining current | $I$         | 加工时电流表上指示的流过放电间隙的平均电流, 单位为 A                                                                        |

(续)

| 序号 | 名词术语         | 英文及缩写                                                       | 符号             | 定 义                                                                                                                  |
|----|--------------|-------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 23 | 短路电流         | short circuit current                                       | $I_s$          | 是指放电间隙短路时(或人为短路时)电流表上指示的平均电流,单位为 A                                                                                   |
| 24 | 放电峰值电流       | discharge peak current/pulse peak current                   | $\hat{i}_d$    | 是指间隙火花放电时脉冲电流的最大值(瞬时),见图 1.2-2,单位为 A。日本及英美常用 $I_p$                                                                   |
| 25 | 短路峰值电流       | short circuit peak current                                  | $\hat{i}_s$    | 是指间隙短路时脉冲电流的最大值(瞬时),见图 1.2-2,单位为 A,表示方法为 $\hat{i}_s \tau = I_s$                                                      |
| 26 | 伺服参考电压       | —                                                           | $S_v$          | 是指电火花加工伺服进给时,事先设置的一个参考电压 $S_v$ (0~50V)。用它与加工时的平均间隙电压 $u$ 作比较,如 $S_v > u$ ,则主轴向上回退;反之则向下进给。因此, $S_v$ 大,则平均放电间隙越大;反之则小 |
| 27 | 有效脉冲频率       | effective pulse frequency                                   | $f_e$          | 是指每秒钟发生的有效火花放电的次数,又称工作(火花)脉冲频率                                                                                       |
| 28 | 脉冲利用率        | frequency ratio/relative frequency                          | $\lambda$      | 是指有效脉冲频率与脉冲频率之比,亦即单位时间内有效火花脉冲个数与该单位时间内的总脉冲个数之比,又称脉冲个数利用率,表示方法为 $\lambda = \frac{f_e}{f_p}$                           |
| 29 | 相对放电时间       | relative discharge duration                                 | $\varphi$      | 是指火花放电时间与脉冲宽度之比,又称相对脉冲时间利用率或放电时间比,表示方法为 $\varphi = \frac{t_e}{t_i}$                                                  |
| 30 | 电火花线切割加工     | wire electrical-discharge machining                         | WEDM           | 用沿着自身轴线方向运行的电极丝作工具电极,对工件进行切割的电火花加工                                                                                   |
| 31 | 单向走丝电火花线切割加工 | unidirectional travelling wire electrical-discharge machine | WEDM-LS        | 是指电极丝始终沿一个方向运行的电火花线切割加工,由于电极丝运动速度较低,又称为低速走丝线切割加工,一般走丝速度为 0.2~15m/min                                                 |
| 32 | 往复走丝电火花线切割加工 | reciprocating travelling wire electrical-discharge machine  | WEDM-HS        | 是指电极丝作往复循环运行的电火花线切割加工,由于电极丝运动速度较高,又称为高速走丝线切割加工,一般走丝速度为 7~11m/s                                                       |
| 33 | 走丝速度         | wire travelling speed                                       | $v_{\text{丝}}$ | 是指电极丝在加工过程中沿其自身轴线运动的线速度                                                                                              |
| 34 | 多次切割         | multiplicity cutting                                        |                | 是指同一加工面用两次或两次以上线切割加工的精密加工方法                                                                                          |
| 35 | 锥度切割         | taper cutting                                               | —              | 是指切割相同或不同斜度和上下具有相似或不相似横截面零件的线切割加工方法                                                                                  |
| 36 | 直壁切割         | —                                                           | —              | 是指电极丝与工件垂直切割的方法                                                                                                      |
| 37 | 加工轮廓         | —                                                           | —              | 是指被加工零件的尺寸和形状的几何参数                                                                                                   |
| 38 | 加工轨迹         | —                                                           | —              | 程序是按照加工轮廓的几何参数(电极丝的几何中心)进行编制的,而在加工时,电极丝必须偏离所要加工的轮廓,电极丝实际走的轨迹即为加工轨迹                                                   |

(续)

| 序号 | 名词术语   | 英文及缩写                    | 符号 | 定 义                                                                                                 |
|----|--------|--------------------------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 39 | 电极丝偏移量 | wire offset              | —  | 在电火花线切割加工过程中, 由于电极丝径向尺寸、放电间隙及后序修整所需余量的存在, 电极丝轴线偏移工件设计尺寸的量称为偏移量。沿着轨迹方向电极丝向右偏为右偏移, 反之则为左偏移 (见图 1.2-3) |
| 40 | 偏移量补偿  | wire offset compensation | —  | 在电火花线切割加工过程中, 以工件设计尺寸为基准对电极丝偏移量所进行的补偿                                                               |
| 41 | 镜像加工   | —                        | —  | 是指加工轮廓与 $X$ 轴或 $Y$ 轴或 $XY$ 轴完全对称, 简化程序编制的加工方法                                                       |
| 42 | 主程序面   | —                        | —  | 切割带有镜像图形, 且带有锥度的工件时, 用于编制程序采用的参考基准面                                                                 |

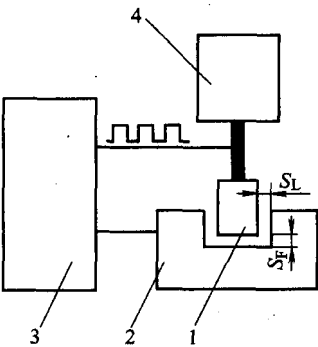


图 1.2-1 电火花加工原理示意图

1—工具电极 2—工件 3—脉冲电源 4—伺服进给系统

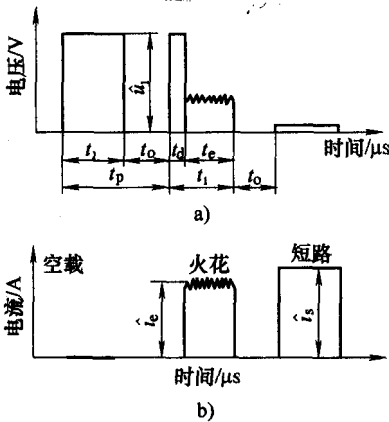


图 1.2-2 脉冲参数与脉冲电压、电流波形

a) 脉冲电压波形 b) 脉冲电流波形

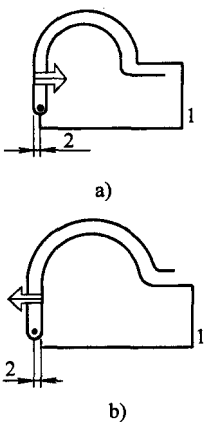


图 1.2-3 电极丝偏移量示意图

a) 左偏移 b) 右偏移

1.2.2 电化学加工的名词术语和符号

表 1.2-2 给出了电化学加工的常用名词术语和符号。

表 1.2-2 电化学加工的常用名词术语和符号

| 序号 | 名词术语   | 英文及缩写                               | 符号  | 定 义                                         |
|----|--------|-------------------------------------|-----|---------------------------------------------|
| 1  | 电化学加工  | electrochemical machining           | ECM | 利用电化学反应（或称电化学腐蚀）对金属材料进行加工的方法                |
| 2  | 电解加工   | electrolytic machining              | —   | 利用电化学阳极溶解的原理去除工件材料的加工方法                     |
| 3  | 混气电解加工 | gas-mixed electrochemical machining | —   | 在电解液中均匀混入一定量的气体, 借助所形成的气液两相流提高加工稳定性和精度的电解加工 |
| 4  | 电液束加工  | stream electrochemical machining    | —   | 将细小的电解液束流从内含有阴极的喷嘴射向加工点对工件穿孔的电解加工           |
| 5  | 电解成形   | electrochemical forming             | —   | 用成形工具阴极加工型腔、型面或型孔的电解加工                      |

(续)

| 序号 | 名词术语    | 英文及缩写                                    | 符号 | 定 义                                            |
|----|---------|------------------------------------------|----|------------------------------------------------|
| 6  | 电解切割    | electrochemical cutting                  | —  | 用线状、带状、盘状工具阴极对工件进行切割及在工件上开槽的电解加工               |
| 7  | 电解车削    | electrochemical turning                  | —  | 用块状工具阴极加工旋转体工件的电解加工                            |
| 8  | 电解去毛刺   | electrochemical debarring                | —  | 去除工件上的毛刺或进行倒角的电解加工                             |
| 9  | 电解抛光    | electrochemical polishing                | —  | 以改善工件表面质量为目的的电解加工                              |
| 10 | 电解刻印    | electrochemical marking                  | —  | 在工件上刻印字符、图案等的电解加工                              |
| 11 | 电解套形加工  | electrochemical trepanning               | —  | 采用一定形状的内空阴极使工件外表面成形的电解加工                       |
| 12 | 电解展成加工  | electrochemical generating machining     | —  | 利用工具阴极与工件之间作相对应的展成运动, 以实现工件整体成形的电解加工           |
| 13 | 光刻电解加工  | photoetching electrochemical machining   | —  | 利用光刻法制得的掩膜版对工件进行的选区电解加工                        |
| 14 | 电解擦削加工  | electrochemical burnishing machining     | —  | 利用擦削阴极对工件定域、定量材料去除或光整的电解加工                     |
| 15 | 微细电解加工  | micro electrochemical machining          | —  | 应用于微细加工范畴的电解加工                                 |
| 16 | 电解加工机床  | electrolytic machines                    | —  | 用电解加工方法加工工件的特种加工机床                             |
| 17 | 电解液供给系统 | electrolyte system                       | —  | 向加工区供给电解液的装置                                   |
| 18 | 电解液槽    | electrolyte reservoir                    | —  | 用于储存电解液的容器                                     |
| 19 | 电解液净化装置 | electrolyte purification system          | —  | 对电解液进行净化处理的装置                                  |
| 20 | 气液混合腔   | mixing chamber for gas with electrolyte  | —  | 混气电解加工时用以使气体和电解液均匀混合的装置                        |
| 21 | 电解加工电源  | power supply for electrochemical machine | —  | 向工件和工具阴极间的加工间隙提供金属电化学溶解能量的电气装置                 |
| 22 | 短路保护系统  | protective system for short-circuit      | —  | 能自动防止工件与工具阴极发生短路及烧伤的装置                         |
| 23 | 电流密度    | current density                          | —  | 单位面积电极上通过的电流强度, 单位为 $A/dm^2$                   |
| 24 | 电流效率    | current efficiency                       | —  | 电极上通过单位电量时, 电极反应生成物的实际质量与电化当量之比, 通常以百分数表示      |
| 25 | 电解质     | electrolyte                              | —  | 本身具有离子导电性或在一定条件下 (如高温熔融或溶于溶剂形成溶液) 能够呈现离子导电性的物质 |
| 26 | 电解液     | electrolytic solution                    | —  | 具有离子导电性的溶液                                     |
| 27 | 阴极      | cathode                                  | —  | 发生还原反应的电极, 即反应物于其上获得电子的电极                      |
| 28 | 阳极      | anode                                    | —  | 发生氧化反应的电极, 即能接受反应物所给出电子的电极                     |
| 29 | 析气      | gassing                                  | —  | 在电解过程中电极上有明显可见的气体析出现象                          |
| 30 | 活化      | activation                               | —  | 用调整有效离子浓度的方法, 达到理想行为以消除电极表面的钝化状态               |