

机械加工  
工艺师手册

单行本

主编 杨叔子  
常务副主编 李斌 张福润

# 特种加工



本手册汇集了机械制造技术各个主要方面的内容,较全面地反映了现代先进制造技术的新进展,具有内容简明,叙述通俗,便于使用的特点,是一部具有很高使用价值的机械加工工艺师手册。

本手册为修订版。内容分为8篇,包括机械加工工艺基础、金属切削机床及工艺装备基础、切削加工、数控加工、特种加工、加工过程自动化、检测和机械装配等。

本手册可供广大从事机械制造的工程技术人员以及工科院校机械类专业的师生使用及参考。

本单行本主要包括特种加工总论、电火花加工、电解加工、高能束加工、超声加工、化学加工与复合加工、其他特种加工、微细加工、表面工程技术等内容。

## 图书在版编目(CIP)数据

特种加工/杨叔子主编. —北京:机械工业出版社,2012.4

(机械加工工艺师手册:单行本)

ISBN 978-7-111-38030-6

I. ①特… II. ①杨… III. ①特种加工—工艺 IV. ①TG66

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第067672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:李万宇 责任编辑:李万宇 刘本明

版式设计:霍永明 责任校对:任秀丽 姚培新

封面设计:姚毅 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2012年5月第1版第1次印刷

169mm×239mm·12.5印张·303千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-38030-6

定价:30.00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

策划编辑:(010)88379732

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>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

# 《机械加工工艺师手册》单行本

## 出版说明

《机械加工工艺师手册》第2版分为8篇51章，汇集了机械加工工艺各个方面的内容。第2版的出版和第1版相距9年，修订时在内容编排及体系结构上作了较大调整，充分反映了现代制造技术的新进展、采用了最新国家标准，适应我国机械加工工艺师技术水平的发展和工作要求。

《机械加工工艺师手册》第2版注重实用性、先进性、系统性，以工艺为基础，以工艺方法为主线，工艺数据和工艺方法紧密结合，具有“内容丰富实用、结构合理便查、技术先进翔实、标准全新适用”的突出特色，是机械加工工艺师必备的案头工具书。

《机械加工工艺师手册》第2版自2011年出版以来，受到了包括企业、科研院所，以及高校等专业读者的广泛欢迎。从读者的反馈来看，手册能为读者提供可靠数据、实用技术和先进资料，帮助读者解决工作中遇到的各种工艺问题。

在手册第2版的使用过程中，一些读者提出了手册较厚、使用不方便的问题，为此，我们针对手册的形式进行了调研，结果表明，单行本的模式得到了许多读者、作者的肯定和期待。为了满足机械加工工艺人员对某个专题工艺技术的需求，更加方便工艺人员查用，我们决定编辑出版《机械加工工艺师手册》有关篇的单行本。

从工艺工作的实际出发，考虑到一些工艺人员从事相对更具体、更独立的专业工艺工作，《机械加工工艺师手册》单行本包括：《金属切削机床及工艺装备基础》、《切削加工》、《数控加工》、《特种加工》、《机械装配》等，读者可根据需要灵活选购。

机械工业出版社

# 《机械加工工艺师手册》第2版前言

《机械加工工艺师手册》第1版于2001年出版至今已9年有余，按照机械工业出版社的意见，我们对第1版进行了修订。

本手册此次再版，秉承了第1版“简明、实用、先进”的原则。与第1版相比较，本次修订时重点作了如下几项工作：

## 1. 内容编排及体系结构上作了较大调整

为了方便读者使用，本手册修订时，将第1版第2篇 金属切削机床的部分内容、第3篇 机床夹具与刀具的部分内容，以及第4篇 切削加工合并成为一篇，并对每一种加工技术，都按照工艺方法—加工机床—切削刀具的顺序撰写。这样做不仅在内容及体系结构上更为合理，减少了许多不必要的重复，还有利于读者查阅。

为了适应数字制造技术的快速发展，将第1版分散在各篇的相关内容集中在一起，作为第4篇 数控加工编撰出，并增加了数控系统，数控加工机床的选型，数控机床的安装、调试及验收，以及数控机床维护维修等重要内容。

## 2. 充分反映现代制造技术的新进展

制造业信息化是世界制造业发展的大趋势。用信息化带动工业化，促进传统制造业结构调整和优化升级，是我国机械制造业应对经济全球化，提高整体素质和国际竞争力的迫切需要和必然选择。为反映制造业信息化的巨大成就，在第1篇中，我们新编写了第6章 信息技术在机械制造中的应用概述，简要介绍了制造业信息化技术的五个主要发展方向，即管理数字化、设计数字化、企业数字化、生产过程数字化以及制造装备数字化的主要内容与进展。

发展高速切削技术等新的切削技术，促进制造工艺的发展，是现代制造技术面临的新任务。目前，高速切削技术已广泛应于汽车制造、模具加工等领域，对提高产品质量、加工效率、降低加工成本效果十分显著。因此，我们在第3篇中新撰写了第13章 高速切削加工，较详细地介绍了高速切削技术的特点、机理及应用，高速加工机床的特征，高速切削用刀具材料及刀具结构，以及高速切削的安全性等诸方面内容，以满足读者在高速切削应用上的需求。

为了适应微电子技术的迅速发展和再制造技术愈来愈广泛的应用，我们在第5篇中增写了第8章 微细加工和第9章 表面工程技术等内容，较深入地介绍了光刻加工技术、光刻—电铸—压铸复合成形技术、微细电火花加工、封接技术、分子装配技术，以及表面化学热处理、表面热喷涂技术、热喷焊技术、堆焊技术、表面电镀技术和表面镀膜技术等的应用。

此外，我们还对若干章节内容进行了修改、补充，甚至重写。

## 3. 采用了最新国家标准

为适应制造业和制造技术的快速发展，并与国际接轨，推动中国制造业走出国门，近年来，有关部门相继对我国的许多国家标准和行业标准作了重大修改。本次手册修

订时，我们注意采用了这些新修订的国家标准，很好地适应这种形势的变化。

在手册编写出版过程中我们得到了机械工业出版社的大力支持，得到了华中科技大学机械学院及华中科技大学文华学院的大力支持，在此谨表诚挚谢意。我们更要衷心感谢李万宇副编审为手册的修订出版所付出的辛勤劳动！

由于编者水平有限，手册中一定存在许多不尽如人意的地方，甚至谬误。“嘤其鸣矣，求其友声。”我们殷切希望同行专家和广大读者不吝赐教！

中国科学院 院士 杨叔子  
华中科技大学 教授

2010年9月19日

# 《机械加工工艺师手册》第1版前言

鉴古知今，放眼人类历史，应该说，材料、能源、信息与制造是人类文明的四大支柱。

制造业是所有与制造有关的行业的总称，它是国民经济的支柱产业之一。制造技术是使原材料变成产品的技术，是国民经济与社会得以发展，也是制造业本身赖以生存的关键基础技术。没有制造业、没有制造技术的进步，就没有生产资料、生活资料、科技手段、军事装备等一切，也就没有它们的进步。统计资料表明，在美国，68%的财富来源于制造业，日本国民总产值的49%是由制造业提供的，中国的制造业在工业总产值中也占有40%的比例。可以说，没有发达的制造业就不可能有国家的真正繁荣和富强，而没有机械制造业，也就没有制造业。经济的竞争归根到底是制造技术与制造能力的竞争。改革开放20年来，我国机械制造业充分利用国内外两方面的技术资源，有计划地推进企业的技术改造，引导企业走依靠科技进步的道路，使制造技术、产品质量和水平及经济效益发生了显著变化，为繁荣国内市场，扩大出口创汇，推动国民经济发展作出了很大贡献。

为适应机械制造技术发展的需要，为进一步提高我国机械制造技术水平、加强我国机电产品在国际市场上的竞争能力尽一份绵薄之力，我们在机械工业出版社的大力支持下，编写出版了这本手册。

本手册汇集了机械制造技术各个方面的主要内容，具体包括机械加工工艺基础、金属切削机床、机床夹具与刀具、切削加工、特种加工、加工过程自动化、检测和装配等。全手册共8篇60章。

本手册的特点是以工艺为基础，以工艺方法为主线，工艺数据和工艺方法紧密结合；既论述大批大量生产中加工和装配的质量、效率及成本问题，也介绍多品种、小批量生产的工艺特点，强调生产的柔性化、集成化和可快速重组的观念；简明、实用，注意反映现代制造技术的新进展；采用最新国家标准。

本手册由中国科学院院士杨叔子教授任主编，张福润、常治斌、汤漾平、鲍剑斌、柯群、何兆太、杨曙年、严晓光任副主编。参加各篇(章)编审的人员及分工如下：

- 第1篇 编写人 张福润  
审稿人 宾鸿赞
- 第2篇 编写人 常治斌、林军、黎新、毛履国  
审稿人 钟华珍
- 第3篇 编写人 汤漾平、李小平、叶仲新  
审稿人 张福润、钟华珍
- 第4篇 编写人 鲍剑斌、熊良山、张华书、张福润、汤漾平  
审稿人 黄奇葵、张福润、王延忠
- 第5篇 编写人 何兆太、王青云

- 审稿人 宾鸿赞、孙洪道  
第6篇 编写人 柯群 王建军 王伯藤  
审稿人 孙洪道  
第7篇 编写人 杨曙年  
审稿人 宾鸿赞、张福润  
第8篇 编写人 严晓光  
审稿人 张福润

由于编审人员较多，编者水平有限，手册中难免有不妥之处，我们热忱期望读者提出批评和建议，以期有助于编者水平的提高与手册质量的改进。

谨以此手册，献给新的世纪。

《机械加工工艺师手册》编写组

2000年11月18日

# 目 录

《机械加工工艺师手册》单行本出版说明

《机械加工工艺师手册》第2版前言

《机械加工工艺师手册》第1版前言

## 第5篇 特种加工

### 第1章 总 论

- 1.1 特种加工技术概念及作用 ..... 5-3
- 1.2 特种加工方法的分类及性能比较 ..... 5-3
  - 1.2.1 特种加工方法的分类 ..... 5-3
  - 1.2.2 几种常见特种加工方法的综合比较 ..... 5-3
- 1.3 特种加工的特点和选用原则 ..... 5-4
  - 1.3.1 特种加工的特点 ..... 5-4
  - 1.3.2 特种加工的选用原则 ..... 5-5
- 1.4 特种加工机床型号编制方法 (JB/T 7445.2—1998)简介 ..... 5-5
  - 1.4.1 型号表示方法 ..... 5-5
  - 1.4.2 特种加工机床分类及其代号 ..... 5-5
  - 1.4.3 通用特性代号 ..... 5-6

### 第2章 电火花加工

- 2.1 电火花加工的特点、应用及分类 ..... 5-7
  - 2.1.1 电火花加工的特点、应用 ..... 5-7
  - 2.1.2 电火花加工方法分类 ..... 5-7
- 2.2 电火花成形加工 ..... 5-8
  - 2.2.1 电火花成形加工的基本原理 ..... 5-8
  - 2.2.2 电火花成形加工机床 ..... 5-8
  - 2.2.3 脉冲电源 ..... 5-11
  - 2.2.4 工作液系统 ..... 5-11
  - 2.2.5 自动进给调节系统 ..... 5-14
  - 2.2.6 工具电极的设计与制造 ..... 5-15
  - 2.2.7 电火花成形加工的基本

- 规律 ..... 5-17
- 2.2.8 工具电极装夹与校正 ..... 5-22
- 2.3 电火花加工应用 ..... 5-26
  - 2.3.1 电火花型孔加工方法 ..... 5-26
  - 2.3.2 电火花磨削 ..... 5-28
  - 2.3.3 小孔加工和细微孔加工 ..... 5-29
  - 2.3.4 深小孔高速加工 ..... 5-30
  - 2.3.5 同步回转电火花加工 ..... 5-30
  - 2.3.6 电火花表面强化 ..... 5-31
  - 2.3.7 电火花刻字、打印 ..... 5-32
- 2.4 电火花成形加工的数控技术 ..... 5-32
  - 2.4.1 数控电火花成形机床的类型及应用 ..... 5-32
  - 2.4.2 数控摇动加工 ..... 5-32
- 2.5 电火花成形加工机床常见故障和加工中的异常现象 ..... 5-34
  - 2.5.1 电火花成形加工机床的常见故障 ..... 5-34
  - 2.5.2 数控电火花成形机床常见问题及其处理办法 ..... 5-35
  - 2.5.3 电火花成形加工中的异常现象 ..... 5-35
- 2.6 电火花线切割加工 ..... 5-35
  - 2.6.1 电火花线切割加工的原理与特点 ..... 5-35
  - 2.6.2 电火花线切割加工机床及型号 ..... 5-36
  - 2.6.3 电火花线切割机床的组成 ..... 5-40
  - 2.6.4 人工编程技术 ..... 5-44
  - 2.6.5 自动编程技术 ..... 5-51
  - 2.6.6 典型加工实例 ..... 5-52
  - 2.6.7 电火花线切割的其他应用 ..... 5-56



2.6.8 电火花线切割加工常见故障及排除 .....	5-59	4.1.2 激光加工设备 .....	5-77
<b>第3章 电 解 加 工</b>		4.1.3 激光热处理 .....	5-78
<b>3.1 电解加工的基本原理与特点</b> .....	5-60	4.1.4 激光焊接 .....	5-80
3.1.1 加工原理 .....	5-60	4.1.5 激光冲击强化 .....	5-81
3.1.2 加工特点和应用范围 .....	5-60	4.1.6 激光切割 .....	5-82
<b>3.2 电解加工设备</b> .....	5-60	4.1.7 激光打孔 .....	5-82
3.2.1 机床本体 .....	5-60	<b>4.2 电子束加工</b> .....	5-84
3.2.2 直流电源 .....	5-62	4.2.1 电子束加工的原理与特点 .....	5-84
3.2.3 电解液循环过滤系统及其检测 .....	5-62	4.2.2 电子束加工设备 .....	5-84
<b>3.3 影响电解加工质量的因素及其控制方法</b> .....	5-67	4.2.3 电子束加工的应用 .....	5-84
3.3.1 加工间隙及其控制 .....	5-67	<b>4.3 离子束加工</b> .....	5-86
3.3.2 机床、工艺、工具等因素及其控制 .....	5-68	4.3.1 离子束加工的原理与特点 .....	5-86
3.3.3 影响表面质量的因素及其控制 .....	5-68	4.3.2 离子束加工设备 .....	5-86
<b>3.4 电解加工的阴极设计</b> .....	5-68	4.3.3 离子束加工的应用 .....	5-87
3.4.1 阴极的流场设计 .....	5-68	<b>第5章 超 声 加 工</b>	
3.4.2 阴极的尺寸设计 .....	5-69	<b>5.1 超声加工的原理、特点与应用</b> .....	5-90
3.4.3 阴极材料 .....	5-69	5.1.1 超声加工的基本原理 .....	5-90
3.4.4 阴极的绝缘 .....	5-70	5.1.2 超声加工的特点 .....	5-90
<b>3.5 混气电解加工</b> .....	5-70	5.1.3 超声加工的应用 .....	5-90
3.5.1 加工原理及特点 .....	5-70	<b>5.2 超声加工设备</b> .....	5-91
3.5.2 气液混合比 .....	5-71	5.2.1 超声加工设备的组成 .....	5-91
3.5.3 气液混合腔 .....	5-71	5.2.2 超声加工设备的规格和技术性能 .....	5-91
<b>3.6 电解加工的应用</b> .....	5-71	5.2.3 超声变幅杆 .....	5-92
3.6.1 穿孔套切加工 .....	5-71	5.2.4 超声加工的基本工艺规律 .....	5-99
3.6.2 叶片型面加工 .....	5-72	<b>5.3 超声材料去除加工</b> .....	5-102
3.6.3 锻模型腔加工 .....	5-73	5.3.1 超声车削 .....	5-102
3.6.4 去毛刺与倒圆 .....	5-73	5.3.2 超声钻孔和镗孔 .....	5-107
3.6.5 刻印 .....	5-73	5.3.3 超声磨削 .....	5-109
<b>3.7 数控展成电解加工技术</b> .....	5-74	<b>5.4 超声表面光整加工</b> .....	5-111
3.7.1 原理和设备 .....	5-74	5.4.1 超声珩磨 .....	5-111
3.7.2 内喷式展成电解加工 .....	5-74	5.4.2 超声抛光 .....	5-112
3.7.3 外喷式展成电解加工 .....	5-75	<b>5.5 超声加工的其他应用</b> .....	5-113
<b>第4章 高能束加工</b>		5.5.1 超声焊接 .....	5-113
<b>4.1 激光加工</b> .....	5-76	5.5.2 超声清洗 .....	5-114
4.1.1 激光加工的原理与特点 .....	5-76	<b>第6章 化学加工与复合加工</b>	
4.1.2 激光加工设备 .....	5-77	<b>6.1 化学加工</b> .....	5-115
4.1.3 激光热处理 .....	5-78	6.1.1 化学铣削 .....	5-115
4.1.4 激光焊接 .....	5-80		
4.1.5 激光冲击强化 .....	5-81		
4.1.6 激光切割 .....	5-82		
4.1.7 激光打孔 .....	5-82		
<b>4.2 电子束加工</b> .....	5-84		
4.2.1 电子束加工的原理与特点 .....	5-84		
4.2.2 电子束加工设备 .....	5-84		
4.2.3 电子束加工的应用 .....	5-84		
<b>4.3 离子束加工</b> .....	5-86		
4.3.1 离子束加工的原理与特点 .....	5-86		
4.3.2 离子束加工设备 .....	5-86		
4.3.3 离子束加工的应用 .....	5-87		

6.1.2 光化学加工 ..... 5 - 117

6.1.3 化学表面处理 ..... 5 - 117

**6.2 复合加工** ..... 5 - 117

6.2.1 超声电火花复合加工 ..... 5 - 117

6.2.2 超声电解复合加工 ..... 5 - 118

6.2.3 电解电火花复合加工 ..... 5 - 120

6.2.4 电解磨削复合加工 ..... 5 - 121

6.2.5 电解研磨复合加工 ..... 5 - 125

**第7章 其他特种加工**

**7.1 水射流切割** ..... 5 - 126

7.1.1 水射流切割的原理、类型、用途和特点 ..... 5 - 126

7.1.2 水射流切割的基本工艺规律与参数选择 ..... 5 - 127

7.1.3 水射流切割与加工的应用 ..... 5 - 132

**7.2 磨料喷射加工** ..... 5 - 135

7.2.1 加工原理与特点 ..... 5 - 135

7.2.2 基本工艺规律与参数选择 ..... 5 - 135

7.2.3 磨料喷射加工的应用 ..... 5 - 137

**7.3 磁力研磨** ..... 5 - 137

7.3.1 磁力研磨的原理与特点 ..... 5 - 137

7.3.2 研磨参数对加工效果的影响 ..... 5 - 138

7.3.3 磁力研磨的应用 ..... 5 - 138

**7.4 挤压珩磨** ..... 5 - 139

7.4.1 挤压珩磨加工的原理与特点 ..... 5 - 139

7.4.2 影响挤压珩磨加工的因素 ..... 5 - 139

7.4.3 挤压珩磨加工的应用 ..... 5 - 140

7.4.4 挤压珩磨的加工后处理 ..... 5 - 141

**7.5 电化学抛光** ..... 5 - 141

7.5.1 影响电化学抛光及抛光效果的主要因素 ..... 5 - 141

7.5.2 金属的电化学抛光 ..... 5 - 142

**7.6 快速成型技术(Rapid Prototyping Technology)** ..... 5 - 145

7.6.1 快速成型的基本原理 ..... 5 - 145

7.6.2 光固化成型法(Stereo Lithography Apparatus, SLA) ..... 5 - 145

7.6.3 选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS) ..... 5 - 146

7.6.4 叠层实体制造(Laminated Object Manufacturing, LOM) ..... 5 - 147

7.6.5 融积成型技术(Fused Deposition Modeling, FDM) ..... 5 - 148

**第8章 微细加工**

**8.1 微细加工的概念、特点与机理** ..... 5 - 150

8.1.1 微细加工的概念 ..... 5 - 150

8.1.2 微细加工的特点 ..... 5 - 150

8.1.3 微细加工机理 ..... 5 - 150

**8.2 微细加工技术** ..... 5 - 150

8.2.1 微细加工方法的分类 ..... 5 - 150

8.2.2 光刻加工技术 ..... 5 - 151

8.2.3 LIGA 技术(光刻—电铸—模铸复合成形技术) ..... 5 - 152

8.2.4 微细电火花加工 ..... 5 - 153

8.2.5 封接技术 ..... 5 - 154

8.2.6 分子装配技术 ..... 5 - 154

**第9章 表面工程技术**

**9.1 概述** ..... 5 - 155

**9.2 表面化学热处理** ..... 5 - 155

9.2.1 表面化学热处理的特点 ..... 5 - 155

9.2.2 表面化学热处理的分类及应用 ..... 5 - 155

**9.3 表面热喷涂技术** ..... 5 - 156

9.3.1 表面热喷涂技术的特点 ..... 5 - 156

9.3.2 热喷涂的相关标准 ..... 5 - 157

9.3.3 表面热喷涂技术的分类 ..... 5 - 157

9.3.4 火焰喷涂 ..... 5 - 159

9.3.5 等离子喷涂 ..... 5 - 161

9.3.6 冷喷涂技术 ..... 5 - 164

**9.4 热喷焊技术** ..... 5 - 165

9.4.1 火焰喷焊 ..... 5 - 165

9.4.2 等离子弧喷焊 ..... 5 - 165

9.4.3 热喷焊应用简介 ..... 5 - 166

**9.5 堆焊技术** ..... 5 - 166

9.5.1 堆焊的特点及分类 ..... 5 - 166

9.5.2 堆焊的选材 ..... 5 - 167

**9.6 表面电镀技术** ..... 5 - 168

9.6.1 电镀镀层的分类 ..... 5 - 168

---

9.6.2 电镀的基本原理 .....	5 - 168	<b>9.8 其他表面处理技术</b> .....	5 - 177
9.6.3 普通电镀 .....	5 - 169	9.8.1 基于电火花加工方法的	
9.6.4 化学镀 .....	5 - 170	表面处理 .....	5 - 177
9.6.5 非晶态合金电镀 .....	5 - 171	9.8.2 激光表面处理 .....	5 - 178
9.6.6 复合镀及电刷镀 .....	5 - 172	9.8.3 电子束表面处理 .....	5 - 179
<b>9.7 表面镀膜技术</b> .....	5 - 175	9.8.4 离子注入表面处理 .....	5 - 180
9.7.1 物理气相沉积(PVD) .....	5 - 175	<b>参考文献</b> .....	参 - 181
9.7.2 化学气相沉积(CVD) .....	5 - 176		
9.7.3 等离子体化学气相沉积			
(PCVD) .....	5 - 177		

# 第5篇 特种加工

主编 赵晓芬(黄石理工学院)

编写人

第1、2、4、7、8、9章 赵晓芬

第3章 周剑萍(黄石理工学院)

第5、6章 黄新明(黄石理工学院)



# 第 1 章 总 论

## 1.1 特种加工技术概念及作用

特种加工是常规切削、磨削加工以外的一些新型加工方法的总称，它是直接利用电能、化学能、光能、热能或特殊机械能等形式，将能量进行有效转化来去除或分离材料的加工方法。

科学技术的发展，特别是国防工业、航空航天、汽车工业技术的发展，对产品的机械性能、使用性能以及加工精度的要求越来越高，各种新结构、新材料和复杂形状的精密零件大量涌现，对先进制造技术提出新的挑战。特种加工技术正是在这种形势下得到了发展，并且在解决新问题

的过程中不断进步、不断完善。目前，国内外已开发应用的特种加工方法有数十种之多，并已逐步解决了许多关键技术；特种加工技术已成为现代机械制造技术中不可缺少的一个组成部分。实践证明，特种加工在生产中日益发挥出重要的作用。

## 1.2 特种加工方法的分类及性能比较

### 1.2.1 特种加工方法的分类(表 5.1-1)

### 1.2.2 几种常见特种加工方法的综合比较(表 5.1-2)

表 5.1-1 常用特种加工方法的分类

加工方法		主要能量形式	作用形式	符 号
电火花加工	电火花成形加工	电能、热能	熔化、汽化	EDM
	电火花线切割加工	电能、热能	熔化、汽化	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	电化学能、机械能	阳极溶解、磨削	EGM(EGC)
	电解研磨	电化学能、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
	涂镀	电化学能	金属离子阴极沉积	EPM
高能束加工	激光束加工	光能、热能	熔化、汽化	LBM
	电子束加工	电能、热能	熔化、汽化	EBM
	离子束加工	电能、机械能	切蚀	IBM
	等离子弧加工	电能、热能	熔化、汽化	PAM
物料切蚀加工	超声加工	声能、机械能	切蚀	USM
	磨料流加工	机械能	切蚀	AFM
	液体喷射加工	机械能	切蚀	HDM
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	光能、化学能	光化学腐蚀	PCM
复合加工	电化学电弧加工	电化学能	熔化、汽化腐蚀	ECAM
	电解电化学机械磨削	电能、热能	离子溶解、熔化、切割	MEEC

表 5.1-2 几种常见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 (最低/平均) (%)	材料去除率 (平均/最高) /(mm <sup>3</sup> /min)	可达尺寸精度 (平均/最高) /mm	可达表面粗糙度 R <sub>a</sub> (平均/ 最高)/μm	主要适用范围
电火花成形加工	任何导电金属材料,如硬质合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、钛合金等	0.1/10	30/3000	0.03/0.003	10/0.04	从数微米的孔、槽到数米的超大型模具、工件等,如各种类型的孔、各种类型的模具
电火花线切割加工		较小 (可补偿)	20/200 <sup>①</sup> (mm <sup>2</sup> /min)	0.02/0.002	5/0.32	切割各种二维及三维直纹面组成的模具及零件,也常用于钼、钨、半导体材料或贵金属切削
电解加工		不损耗	100/10000	0.1/0.01	1.25/0.16	从微小零件到超大型工件、模具的加工,如型孔、型腔的抛光、去毛刺等
电解磨削		1/50	1/100	0.02/0.001	1.25/0.04	硬质合金钢等难加工材料的磨削,如硬质合金刀具、量具等
超声波加工	任何脆性材料	0.1/10	1/50	0.03/0.005	0.63/0.16	加工脆硬材料,如玻璃、石英、宝石、金刚石、硅等,可加工型孔、型腔、小孔等
激光加工	任何材料	不损耗 (三种加工,没有成形用的工具)	瞬时去除率很高,受功率限制,平均去除率不高	0.01/0.001	10/1.25	精密加工小孔、窄缝及成形切割、蚀刻,如金刚石拉丝模、钟表宝石轴承等
电子束加工						在各种难加工材料上打微小孔、切缝、蚀刻、焊接等,常用于制造大、中规模集成电路微电子器件
离子束加工						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以 mm<sup>2</sup>/min 为单位。

### 1.3 特种加工的特点和选用原则

#### 1.3.1 特种加工的特点

1) 特种加工主要不是依靠刀具和磨料、磨具来进行切削和磨削,而是利用电能、光能、声能、热能、化学能、磁能、分子动能等来加工金属和非金属材料,工件和工具之间无明显的切削力,只有微小的作用力,在机理上与传统加工有

很大不同。

2) 特种加工中,工具的硬度和强度可以低于工件的硬度和强度,因为它主要不是靠机械力来切削,适于加工高硬度材料、脆性材料等难加工材料,也适于加工精密微细零件、薄壁零件、弹性零件等易变形零件。又由于工具的损耗小,甚至无损耗,可加工复杂成形表面、型腔等。

3) 当前,特种加工已向精密加工方向发展

展, 出现了精密特种加工。许多特种加工方法同时又是精密加工方法、微细加工方法, 如电子束加工、离子束加工、激光束加工等就是精密特种加工; 精密电火花加工的加工精度可达微米级(0.5 ~ 1 $\mu$ m), 表面粗糙度可达镜面级( $R_a=0.02 \sim 0.012\mu\text{m}$ )。

4) 特种加工中的能量易于转换和控制, 工件在一次装夹中可实现粗、精加工, 有利于保证加工精度, 提高生产率。

5) 特种加工在加工概念的范畴上有很大扩展, 包含了去除、结合和变形等加工和处理。特别是快速成形制造, 采用分层堆积制造方法, 对制造技术的发展有重要意义。

**1.3.2 特种加工的选用原则**

尽管特种加工优点突出, 应用日益广泛, 但

是各种特种加工的能量来源、作用形式、工艺特点却不尽相同, 其加工特点与应用范围自然也不一样, 而且各自还都具有一定的局限性。为了更好地应用和发挥各种特种加工的最佳功能及效果, 必须依据工件材料、尺寸、形状、精度、生产率、经济性等情况作具体分析, 区别对待, 合理选择特种加工方法。选用特种加工方法, 可遵循下列几条原则:

(1) 根据被加工零件的材料特性来选择 如果是金属材料, 所有的特种加工方法都能加工; 如果是非金属材料, 除电火花加工、电解加工、化学加工要求材料导电外, 其他特种加工方法都能加工。其次, 要根据工件材料加工的难易程度选择相应的特种加工方法。表 5.1-3 列出了几种常用的特种加工方法对工件材料的适用性。

**表 5.1-3 特种加工对工件材料的适用性**

工件材料 加工方法	铝	钢	超 级 合 金	钛	难 熔 合 金	陶 瓷	塑 料	玻 璃
电解加工	良	优	优	良	良	不能加工	不能加工	不能加工
电火花加工	良	优	优	优	优	不能加工	不能加工	不能加工
电子束加工	良	良	良	良	优	优	良	良
等离子弧加工	优	优	优	良	劣	不能加工	劣	不能加工
激光加工	良	良	良	良	劣	优	良	良
超声加工	劣	良	劣	良	优	优	良	优
化学加工	优	优	良	良	劣	劣	劣	良
磨料喷射加工	良	良	优	良	优	优	良	优

(2) 根据被加工零件的工艺特点来选择

- 1) 型腔加工选择电火花加工、电解加工。
- 2) 微孔加工选择激光束加工、电子束加工等。
- 3) 小深孔加工选择电解液冲刷加工、成形管电解加工、电火花小孔磨削加工等。
- 4) 去毛刺加工选择磨料流动加工、磨料喷射加工、电化学加工和化学加工等。
- 5) 抛光加工选择磨料流动加工、电化学抛光加工和电抛光加工等。

另外, 在选择特种加工方法时, 还要考虑被

加工零件的尺寸精度、表面粗糙度以及经济效益等方面的问题, 这些方面的选择原则同常规加工方法一样。

**1.4 特种加工机床型号编制方法 (JB/T 7445.2—1998) 简介**

**1.4.1 型号表示方法**

通用特种加工机床型号表示方法见图 5.1-1。

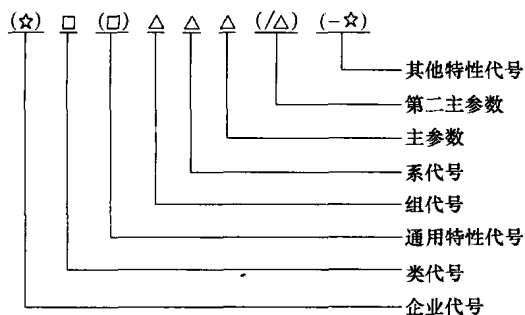
**1.4.2 特种加工机床分类及其代号**

特种加工机床分为 10 类, 用大写的汉语拼音字母表示类代号, 见表 5.1-4。

**表 5.1-4 特种加工机床分类**

类别	电火花 加工机床	电解 加工机床	超声 加工机床	高能束 加工机床	等离子弧 加工机床	磁脉冲 加工机床	磁磨料 加工机床	射流 加工机床	复合 加工机床	其他特种 加工机床
代号	D	DJ	CS	GN	DL	CC	C2	SL	FH	QT
读音	电	电解	超声	高能	等离	磁冲	磁料	射流	复合	其他





注

1. “□”为大写的汉语拼音字母。
2. “△”为阿拉伯数字。
3. “☆”为大写的汉语拼音字母、阿拉伯数字或两者组合。
4. 有“( )”者，当无内容时，则不表示；若有内容时，应不带括号。
5. 其他特性代号为阿拉伯数字时，其前加“—”，读做“至”；若为大写汉语拼音字母时，可不加“—”。

图 5.1-1 通用特种加工机床型号表示方法

1.4.3 通用特性代号

当某种类型特种加工机床除有普通形式外，还有下列某种通用特性时，则通用特性在类代号之后表示。一般在一个型号中表示最主要的一个通用特性（少数特殊情况下，可以表示两个）。通用特性代号在各类特种加工机床型号中表示的意义相同。特种加工机床通用特性代号见表 5.1-5。

表 5.1-5 特种加工机床通用特性代号

通用特性	高精度	精密	数控	仿形
代号	G	M	K	F
读音	高	密	控	仿
通用特性	轻型	简式	数显	高速
代号	Q	J	X	S
读音	轻	简	显	速