

现代加工技术

第2版

张辽远 编著



现代加工技术

第2版

张辽远 编著

张辽远 (110) 张辽远 (110) 张辽远 (110)

机械工业出版社

本书以现代加工技术中的基本原理、装备工艺与技术、工艺方法、工艺规律及特点、实际应用为主线,阐述了超声波加工,电化学加工,电火花加工,电火花线切割加工,激光加工,电子束、离子束加工,化学、等离子体、快速成型、磁性磨料加工,以及直接相关的加工技术和复合加工技术等,充分反映了当前现代加工前沿的技术和应用进展。

本书为高等院校机械工程及相关专业“现代加工技术”课程的教材,也可供机械、电子、航空航天等领域从事特种加工技术的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代加工技术/张辽远编著. —2版. —北京:机械工业出版社, 2008.7 (2018.1重印)

ISBN 978-7-111-10680-7

I. 现… II. 张… III. 特种加工 IV. TG66

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第071197号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:张秀恩 责任校对:申春香

封面设计:鞠杨 责任印制:李昂

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018年1月第2版第7次印刷

169mm×239mm·21.25印张·414千字

13501—14500册

标准书号:ISBN 978-7-111-10680-7

定价:45.00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) 88379770

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

封面防伪标均为盗版

第2版前言

传统的切削加工已有很久的历史，它对人类的生产和物质文明起到了极大的推动作用。近年来随着科技的进步和生产的发展，出现了许多由坚硬而又难加工材料制成的、具有精密公差尺寸和低表面粗糙度的复杂零件的加工，导致许多新的加工方法的产生。这些加工方法不同于以往的切削加工，称之为现代加工方法。

《现代加工技术》第1版自2002年出版以来，受到广大读者的好评，已连续印刷7次，印数达19500册。由于现代加工技术的发展较快，出现了许多研究成果，作者近几年来也积累了一些研究成果和经验，需要对第1版进行修订，以满足广大读者的需要。本次修订充分反映了现代加工的前沿技术和应用进展。

本书的主要内容包括超声波加工、电火花加工、电化学加工、激光加工、电子束和离子束加工等现代加工方法的基本原理、设备、工艺规律、主要特点和应用。

本书为高等工科院校的机械制造及自动化和机械电子工程专业及相近专业的“现代加工技术”课程教材，也可供从事现代加工技术的工程技术人员参考和自学之用。

由于本书内容广泛，限于作者的水平，书中难免有错误和不足之处，请读者批评指正。

编 者

第1版前言

传统的切削加工已有很久的历史，它对人类的生产和物质文明起到了极大的推动作用。近年来随着科技的进步和生产的发展，出现了许多由坚硬而又难加工材料制成的、具有精密公差尺寸和低表面粗糙度的复杂零件的加工，导致了許多新的加工方法的产生。这些加工方法不同于以往的切削加工，现称之为现代加工方法。

本书的内容主要包括超声波加工、电化学加工、电火花加工、激光加工、电子束和离子束加工等现代加工方法的基本原理、设备、工艺规律、主要特点和应用。

本书为高等工业院校的机械电子工程专业及相近专业的“现代加工技术”课程的教材，也可供从事现代加工技术的工程技术人员参考和自学之用。

由于书中内容广泛，各方面条件的限制和作者的水平，书中难免有错误和不足之处，请读者批评指正。

编者

目 录

第2版前言

第1版前言

第一章 绪论	1
第一节 现代加工方法的产生及发展	1
第二节 现代加工方法的分类	2
第三节 现代加工方法的选择	2
第二章 超声波加工	6
第一节 超声波加工的基本原理和特点	6
一、超声波及其特性	6
二、超声波加工的基本原理	9
三、超声波加工的特点	10
第二节 超声波加工设备	10
一、超声波发生器	11
二、超声波换能器	14
三、超声波变幅杆	37
四、超声波加工机床	45
五、磨料悬浮液	45
第三节 超声波加工速度、加工精度、表面质量及其影响因素	47
一、超声波加工速度及其影响因素	47
二、超声波加工精度及其影响因素	49
第四节 超声波加工材料去除机理	50
第五节 超声波加工的应用	52
一、型孔、型腔加工	52
二、切割加工	53
三、超声清洗	53
四、焊接加工	54
五、超声波处理	54
第六节 超声振动切削加工	65
一、振动切削概述	66
二、超声振动切削的运动学分析	83
三、超声振动切削的应用	85
第七节 磨料喷射加工	95

一、基本原理	95
二、设备	96
三、加工速度、加工质量及影响因素	96
四、应用	96
第八节 水喷射加工	98
一、基本原理	98
二、设备	98
三、加工速度、加工质量及影响因素	99
四、应用	100
第三章 电化学加工	102
第一节 电化学加工原理、特点及分类	102
一、电化学加工原理	102
二、电化学加工的特点	102
三、电化学加工的分类	104
第二节 电化学加工设备	104
一、电化学加工设备的组成	104
二、电化学加工机床	105
三、电化学加工电源	107
四、工具、工件及电化学加工液	109
第三节 电化学加工的基本规律	112
一、生产率及其影响因素	112
二、精度成型规律	114
三、电化学加工表面质量	117
第四节 提高电化学加工精度的途径	117
一、脉冲电流电化学加工	117
二、小间隙电化学加工	118
三、混气电化学加工	118
四、磁力电化学加工	119
五、振动进给电化学加工	120
六、微精电化学加工	120
第五节 电化学加工的应用	121
一、深孔扩孔加工	122
二、型孔加工	122
三、型腔加工	123
四、套料加工	124
五、叶片加工	126
六、电化学倒棱去毛刺加工	126
第六节 电铸和涂镀加工	127

一、电铸加工	128
二、涂镀加工	133
第七节 电化学磨削	139
一、电化学磨削加工的基本原理	139
二、电化学磨削加工速度、精度及表面质量	140
三、电化学磨削的应用	141
第八节 电化学抛光	144
一、电化学抛光的机理	144
二、电化学抛光的条件	145
三、金属的电化学抛光	146
四、半导体的电化学抛光	148
第九节 电化学辅助在线削锐磨削	149
一、电化学式在线削锐磨削加工原理	150
二、电化学式在线削锐磨削加工设备	152
三、电化学辅助在线削锐磨削加工原理	155
第十节 微精电化学加工	156
一、微精电化学加工的理论基础	156
二、微精电化学加工方法	159
三、微精电化学加工的发展前景	162
第四章 电火花加工	165
第一节 电火花加工的基本原理和特点	165
一、电火花加工的基本原理	165
二、电火花加工的特点	168
第二节 电火花加工的基本规律	168
一、影响电蚀量的主要因素	168
二、电火花加工的速度和工具损耗速度	170
三、影响加工精度的主要因素	173
四、电火花加工的表面质量	175
第三节 电火花加工设备	177
一、电火花成形加工机床	177
二、数控电火花加工机床	178
三、电火花加工电源	180
四、电火花加工自动进给调节系统	186
第四节 电火花加工应用	200
一、冲模电火花加工	201
二、型腔模电火花加工	204
三、小孔电火花加工	210
四、异形孔电火花加工	211

第五节 其他电火花加工	212
一、电火花小孔加工	213
二、小孔及深孔的电火花磨削	214
三、电火花磨削硬质合金齿轮滚刀	218
四、电火花共轭同步回转加工螺纹	219
五、电火花加工聚晶金刚石等高阻抗材料	220
六、电火花表面强化和刻字	221
第六节 电熔爆加工	222
一、电熔爆加工原理、特点	222
二、电熔爆加工设备	223
三、电熔爆加工应用	224
第五章 电火花线切割加工	226
第一节 电火花线切割加工原理、特点及应用范围	226
一、线切割加工的原理	226
二、线切割加工的特点	227
三、线切割加工的应用范围	228
第二节 电火花线切割加工设备	228
一、机床本体	228
二、脉冲电源	231
三、工作液循环系统	233
第三节 电火花线切割控制系统和编程技术	233
一、线切割控制系统	233
二、线切割数控编程要点	236
三、自动编程	239
第四节 线切割加工工艺及应用	241
第六章 激光加工	245
第一节 激光加工的理论、原理和特点	245
一、激光的物理概念	245
二、激光的产生	245
三、激光的基本特性	247
四、激光加工的基本原理	248
五、激光加工的特点	251
第二节 激光加工设备	252
第三节 激光加工的基本规律	254
第四节 激光加工应用	255
一、激光打孔	255
二、激光切割	256
三、激光焊接	257

四、激光热处理	257
五、激光抛光与修整	258
六、激光冲击强化	261
七、激光存储	262
第五节 激光微细加工	263
一、激光微细加工概述	263
二、激光微细加工方法及特点	266
三、准分子激光微细加工	269
四、光学材料激光微细加工	274
五、硅激光微细加工	277
六、激光微细加工在半导体材料加工中的应用	279
第七章 电子束、离子束加工	283
第一节 电子束加工	283
一、电子束加工的原理和特点	283
二、电子束的加工装置	284
三、电子束加工应用	286
第二节 离子束加工	290
一、离子束加工原理、分类和特点	290
二、离子束加工装置	292
三、离子束加工的应用	292
第八章 化学、等离子体、快速成型、磁性磨料加工	297
第一节 化学加工	297
一、化学蚀刻加工	297
二、光化学腐蚀加工	299
三、化学抛光	304
四、化学镀膜	305
第二节 等离子体加工	305
一、等离子体加工基本原理	305
二、等离子体加工材料去除速度和加工精度	307
三、等离子体加工设备	308
四、等离子体加工应用	309
第三节 快速成型技术	310
一、快速成型技术概述	310
二、快速成型技术设备	313
三、快速成型技术应用	316
第四节 磁性磨料研磨加工	317
一、磁性研磨加工基本原理	318
二、磁性研磨加工设备和工具	320

三、磁性磨粒研磨加工应用	323
第五节 挤压珩磨	324
一、挤压珩磨加工原理	324
二、挤压珩磨的工艺特点	325
三、粘性磨料介质	325
四、夹具	326
五、挤压珩磨应用	328
参考文献	330

第一章 绪 论

第一节 现代加工方法的产生及发展

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到了极大的推动作用。例如 18 世纪 70 年代发明了蒸汽机，但由于难以制造出高精度的气缸镗床，因此无法推广应用。直到 25 年后，制造出气缸镗床，解决了气缸缸体的加工工艺，才使蒸汽机获得广泛的应用，引起了世界性的第一次产业革命。

第二次世界大战后，特别是进入 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，尤其是国防工业部门，要求尖端的科学技术产品向高精度、高速度、耐高温、高压、大功率、微型化等方向发展。零件所使用的材料大多是坚硬而难加工的，零件的形状越来越复杂，精度要求高，表面粗糙度低。因此，如果加工工艺技术没有相应的改进，上述零件靠单纯提高材料的机械

强度的方法，会使总的加工成本增加，并且有时根本无法加工。图 1-1 示出工件材料硬度对机械加工费用的影响。鉴于这个问题的严重性，1960 年 Merchant 强调机械加工方法需要更新的概念。于是人们开始探索采用除机械能进行机械加工以外的电能、化学能、声能、光能、磁能等进行加工。这些加工方法，在某种意义上说，不是使用普通刀具来切削工件材料，而是直接利用能量进行加工。为了区别现有的金属切削加工，称之为“现代加工方法”或“特种加工方法”。它们与一般的机械加工的不同点是：

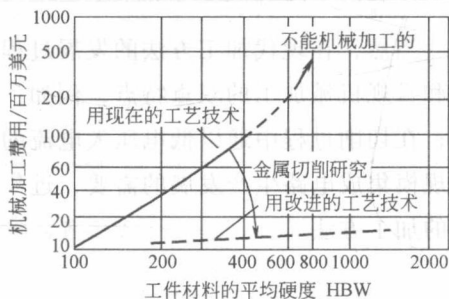


图 1-1 工件材料强度对机械加工费用的影响（美国）

1) 切除材料的能量不单纯是靠机械能，还可以用其他形式的能量。

2) 可以有工具，但工具材料的硬度可低于工件材料的硬度，也可以无工具。

3) 在加工过程中，工具和工件之间不存在显著的机械切削力。

第二节 现代加工方法的分类

现代加工方法的分类尚没有明确的规定，但一般是根据使用能量的基本类型进行分类。现代加工方法的分类见表 1-1。

表 1-1 现代加工方法的分类

能量类型	金属切削机理	传递介质	能 源	方 法
机械能	腐蚀	高速粒子	风动/液压	磨料射流加工 超声波加工 水射流加工
	剪切	直接接触	切削工具	普通机械加工
电化化学能	离子转移	电介质	大电流	电化学加工 电化学磨削
化学能	烧蚀定律	易反应的周围介质	腐蚀剂	化学加工
热电能	熔化	高温气体	游离材料	离子束加工 等离子电弧加工
		电子放射线	高压加强光	电火花加工 激光加工
	气化	离子流	游离金属	等离子电弧加工

当然，在现代加工方法的发展过程中也形成了某些过渡性工艺，具有现代加工和常规机械加工的双重特点，例如：在切削过程中引入超声振动和低频振动切削；在切削过程中通以低电压大电流的导电切削；以及低温切削等。随着半导体大规模集成电路生产发展的需要，近年来提出了超微量加工，所谓原子、分子单位的加工方法。

第三节 现代加工方法的选择

为了正确有效地应用现代加工方法，必须考虑以下几个方面的问题：

- 1) 物理参数。
- 2) 工件材料的力学性能和加工形状。
- 3) 生产能力。
- 4) 经济性。

表 1-2 至表 1-7 和图 1-2，分别就上述几个问题对现代加工方法进行了比较，由此可以选用合适的加工方法加工零件。

表 1-2 现代加工方法的物理参数

参数	超声波加工	磨料射流加工	电化学加工	化学加工	电火花加工	电子束加工	激光加工	等离子电弧加工
电位/V	220	220	10	—	45	150000	4500	100
电流/A	12(交流)	1.0	10000 (直流)	—	50(脉 动直流)	0.001(脉 动直流)	2(平均峰 值为200)	500 (直流)
功率/W	2400	220	100000	—	2700	150(平均峰 值为200)	—	50000
间隙/mm	0.25	0.75	0.20	—	0.025	100	150	7.5
介质	磨料在 水中	磨料在 气体中	电解液	化学品 液体	不导电 的液体	真空	空气	氩或氦

表 1-3 现代加工方法适用的形状

加工方法	孔				直通型腔		面		直通切割	
	精密的小孔		标准的		精密的	标准的	复式 轮廓	旋转 表面	浅的	深的
	直径 <0.25 mm	直径 >0.25 mm	长度 <20 <i>d</i> ^①	长度 >20 <i>d</i> ^①						
超声波加工	—	—	好	不好	好	好	不好	—	不好	—
磨料射流加工	—	—	尚好	不好	不好	尚好	—	—	好	—
电化学加工	—	—	好	好	尚好	好	好	尚好	好	好
化学加工	尚好	尚好	—	—	不好	尚好	—	—	好	—
电火花加工	—	—	好	尚好	好	好	尚好	—	不好	—
激光加工	好	好	尚好	不好	不好	不好	—	—	好	尚好
等离子电弧加工	—	—	尚好	—	不好	不好	—	不好	好	好

① *d* 为直径。

表 1-4 材料的适用性

加工方法	材 料							
	铝	钢	超级合金	钛	耐火材料	塑料	陶瓷	玻璃
超声波加工	不好	尚好	不好	尚好	好	尚好	好	好
磨料射流加工	尚好	尚好	好	尚好	好	尚好	好	好
电化学加工	尚好	好	好	尚好	尚好	不能用	不能用	不能用
化学加工	好	好	尚好	尚好	不好	不好	不好	尚好
电火花加工	尚好	好	好	好	好	不能用	不能用	不能用
电子束加工	尚好	尚好	尚好	尚好	好	尚好	好	尚好
激光加工	尚好	尚好	尚好	尚好	不好	尚好	好	尚好
等离子电弧加工	好	好	好	尚好	不好	不好	不能用	不能用

表 1-5 生产能力

加工方法	金属切除速率 /(mm ³ /min)	公差 /μm	表面粗糙度 R_a /μm	表面损伤深度 /μm	圆角半径 /mm
超声波加工	300	7.5	0.2~0.5	25	0.025
磨料射流加工	0.80	50	0.5~1.2	2.5	0.100
电化学加工	1500	50	0.1~2.5	5.0	0.025
电火花加工	800	15	0.2~12.5	125	0.025
电子束加工	1.6	25	0.4~2.5	250	2.5
激光加工	0.1	25	0.4~1.25	125	2.5
化学加工	15.0	50	0.4~2.5	50	0.125
等离子电弧加工	75000	125	粗糙	500	—
钢的逆铣	50000	50	0.4~0.5	25	0.050

表 1-6 对设备和工具的影响

加工方法	工具磨损比	加工介质的污染	安 全 性	毒 性
超声波加工	10	一般问题	无问题	无问题
磨料射流加工	—	一般问题	一般问题	无问题
电化学加工	0	关键问题	一般问题	无问题
电火花加工	6.6	一般问题	一般问题	一般问题
电子束加工	—	一般问题	一般问题	无问题
激光加工	—	无问题	一般问题	无问题
等离子电弧加工	—	无问题	无问题	无问题

注：工具磨损比 = 切除工件材料的体积/消耗掉的工具电极体积。

表 1-7 加工方法的经济性

加工方法	基本投资	工具和夹具	功率要求	效 率	工具消耗
超声波加工	低	低	低	高	中等
磨料射流加工	很低	低	低	高	低
电化学加工	很高	中等	中等	低	很低
化学加工	中等	低	高	中等	很低
电火花加工	中等	高	低	高	高
电子束加工	高	低	低	很高	很低
激光加工	中等	低	很低	很高	很低
等离子电弧加工	很低	低	很低	很低	很低
一般的机械加工	低	低	低	很低	低

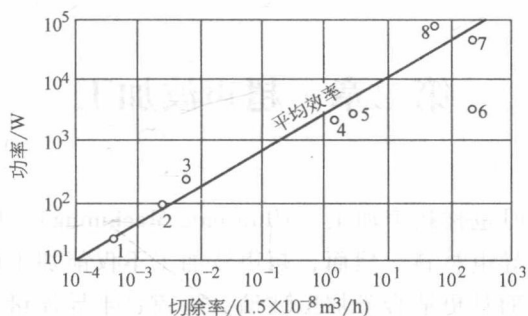


图 1-2 现代机械加工与普通加工方法的比较

- 1—激光加工 2—磨料射流加工 3—电子束加工 4—超声波加工
5—电火花加工 6—铰铰 7—等离子电弧加工 8—电化学加工

第二章 超声波加工

超声波加工有时也称超声加工 (Ultrasonic Machining)。电火花和电化学加工都只能加工金属导电材料。然而, 超声波加工不仅能加工硬质合金、淬火钢等脆硬金属材料, 而且更适合于加工玻璃、陶瓷、半导体锗、硅片等不导电的非金属脆硬材料, 同时还可以应用于清洗、焊接、探伤、测量、冶金等其他方面。

第一节 超声波加工的基本原理和特点

一、超声波及其特性

“超声波”这个名词术语, 用来描述频率高于人耳听觉频率上限的一种振动波, 通常是指频率高于 16kHz 以上的所有频率。超声波的上限频率范围主要是取决于发生器, 实际用的最高频率的界限, 是在 5000MHz 的范围以内。在不同介质中的波长范围非常广阔, 例如在固体介质中传播时, 频率为 25kHz 的波长约为 200mm; 而频率为 500MHz 的波长约为 0.008mm。

超声波和声波一样, 可以在气体、液体和固体介质中传播。由于超声波频率高、波长短、能量大, 所以传播时反射、折射、共振及损耗等现象更显著。在不同的介质中, 超声波传播的速度 c 亦不同, 例如 $c_{\text{空气}} = 331\text{m/s}$; $c_{\text{水}} = 1430\text{m/s}$; $c_{\text{铁}} = 5850\text{m/s}$ 。速度 c 与波长 λ 和频率 f 之间的关系可用下式表示:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2-1)$$

超声波具有下列主要性质:

(1) 超声波能传递很强的能量 超声波的作用主要是对其传播方向的物体施加压力 (声压)。因此, 可用这个压力的大小表示超声波的强度, 传播的波动能量越强, 则压力越大。

振动能量的强弱, 用能量密度来衡量。能量密度就是通过垂直于波的传播方向的单位面积上的能量, 用符号 J 来表示, 单位为 W/cm^2

$$J = \frac{1}{2} \rho c (\omega A)^2 \quad (2-2)$$

式中 ρ ——弹性介质的密度 (kg/m^3);

c ——弹性介质中的波速 (m/s);