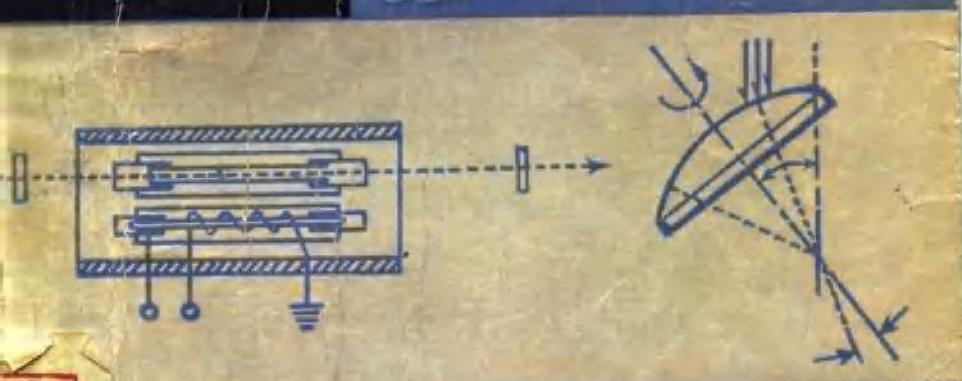
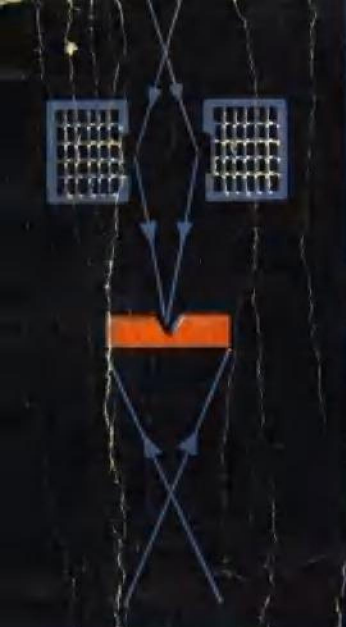


特种加工

TEZHONG JIAGONG

哈尔滨工业大学 刘晋春 陆纪培 主编



吉林人民出版社



特 种 加 工

刘晋春 陆纪培 主编

*

吉林人民出版社出版 吉林省新华书店发行

长春新华印刷厂印刷

*

787×1092毫米32开本 896印张 179,000字

1981年1月第1版 1981年1月第1次印刷

印数 1—9,080册

书号: 15091·168 定价: 0.76元

内 容 提 要

本书为全国三十九所工科院校联编教材之一，主要阐述电火花加工、电解加工、电解磨削、激光加工、超声波加工、电子束加工以及离子束加工等特种加工的基本原理、基本设备、工艺规律、主要特点、适用范围和应用实例。可作为工科院校机械制造工艺及设备专业《特种加工》课程的教学用书，也可作为厂办工人大学及电加工短训班的教材，并适应有关工程技术人员和工人参考自学之用。

前 言

特种加工是指切削加工以外的一些新的加工方法，如电火花加工、电解加工、电解磨削、激光加工、超声波加工、电子束加工和离子束加工等。由于特种加工主要不是依靠机械能、切削力进行加工，可以用软的工具（甚至不用工具）加工硬的工件，因此可用来加工各种难加工的材料、复杂的表面和某些特殊要求的零件。

特种加工新工艺、新技术在生产中的应用日益广泛。近十年来，仅电加工机床年产量的平均增长率无论在国内或国外，都比金属切削加工机床的增长率高十倍以上。生产中已形成一支从事电加工等特种加工的技术队伍。由于特种加工技术的迅速发展和应用，这支队伍迫切需要补充和提高。为了适应这种要求，我国近年来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。1976年三十九所院校机制专业教材联合编写组组织编写了这本教材，1978年一机部在天津召开的对口专业座谈会上决定各校机械制造工艺及设备专业增设《特种加工》选修课程，并以此书作为该课程的通用教材。

本书的编写单位及编者有：哈尔滨工业大学 831 教研室刘晋春、陆纪培；上海纺织工学院机械制造工艺教研室徐仁；上海交通大学 610 教研室陈湛清、李明辉等同志。由刘晋春、陆纪培主编，陈湛清、李明辉主审。

本书在编、审过程中得到中国科学院电工研究所六室、

一机部机床研究所十室、一机部苏州电加工机床研究所以及兄弟院校、有关工厂的热情支持和帮助，特此一并表示感谢。

由于我们的水平有限，书中定有不足和错误之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

1979年6月

本书所用主要符号

A 振幅	I_p 平均工作电流
a 离子有效浓度	i 瞬时电流, 电流密度
C 电容, 双曲线常数	i_0 起始电流
c 光速, 波速	i_c 充电电流
D 、 d 直径	i_{fd} 放电电流
E 直流电源电压, 电压降, 电极电位, 光子能量, 原子能级	J 能量密度
E' 平衡电极电位	K 重量电化学当量, 热传导率, 某种常数
E° 标准电极电位	K_a 、 K_c 、 K_g 与工艺参数有关的常数
E_a 阳极电压降	h 温度扩散系数
E_c 阴极电压降	L 长度, 电感
E_R 电解液的欧姆电压降	l 长度
e 电子负电荷	M 质量, 重量, 克离子浓度
F 面积	N 脉冲总数
f 频率, 焦距	N_c 脉冲间隔系数
G 重量	n 转速, 离子价数
g 重力加速度	P 作用力, 压力, 功率
H 高度	p 压力强度, 能量密度
h 高度, 普克郎常数	Q 蚀除量, 流量
I 电流, 光强度	Q_a 阳极蚀除量
I_{di} 短路电流	Q_c 阴极蚀除量
I_m 脉冲电流幅值	

Q_g 工件上的蚀除量, 气体流量

Q_l 液体流量

q 单个脉冲蚀除量

q_a 阳极上单个脉冲蚀除量

q_c 阴极上单个脉冲蚀除量

R, r 电阻, 半径

S 面积

T 周期

t 时间

t_c 充电时间

t_{fd} 放电时间

t_j 脉冲间隔

t_k 脉冲宽度

U 电压

U_{fd} 放电电压

U_{jc} 击穿电压

U_p 平均工作电压

u 瞬时电压

V 体积, 速度, 蚀除速度

V_a 阳极的蚀除速度

V_c 阴极的进给速度

V_d 电极工具的损耗速度,
电极工具进给速度

V_{dA} 空载时电极工具的进给速度

V_d 短路时电极工具的进给速度

V_g 工件蚀除速度

V_p 额定工作进给速度

W 重量, 能量, 功率

W_M 单个脉冲能量

W_{max} 最大功率

Z 气液混合比

γ 工具电极的相对损耗率、损耗比, 比重, 重度

δ 放电间隙

Δ 间隙

Δ_0 起始间隙

Δ_b 平衡间隙

Δ_n 法向间隙

Δ_s 侧面间隙

η 效率, 电流效率

θ 发散角

λ 波长

λ_0 中心波长

ν 光的频率

ρ 介质密度

σ 电导率

ω 体积电化学当量, 角速度, 圆频率

目 录

前 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
第二章 电火花加工.....	6
第一节 电火花加工的原理和机理	6
一、电火花加工的原理和设备组成	6
二、电火花加工的机理	9
第二节 电火花加工中的基本规律	12
一、影响电蚀量的主要因素	12
二、电火花加工的生产率和电极工具的损耗率	19
三、影响加工精度和表面质量的主要因素	22
第三节 电火花加工用的脉冲电源	26
一、对脉冲电源的要求	26
二、RC、RLC线路脉冲电源.....	27
三、闸流管式和电子管式脉冲电源	32
四、可控硅式脉冲电源	36
五、晶体管式脉冲电源	38
六、其它派生电源及线路	40
第四节 电火花加工用的自动进给调节装置	49
一、电火花加工对自动进给调节装置的要求	50
二、自动进给调节装置的基本组成部分	53
三、伺服电机进给调节装置	57
四、液压自动进给调节装置	63

五、步进电机自动进给调节装置	70
第五节 电火花加工工艺及机床	72
一、电火花穿孔、成型加工工艺及机床	72
二、电火花线切割工艺及机床	89
三、电火花磨削与电火花镗磨	94
四、电火花表面强化及刻字	99
第三章 电解加工	103
第一节 电解加工过程及其特点	103
第二节 电解加工的基本原理	106
一、电解质溶液	106
二、电极电位	108
三、电极的极化	112
四、金属的钝化	115
五、电解加工时的电极反应	116
第三节 电解液	120
一、对电解液的基本要求	120
二、三种常用电解液	121
三、电解液参数对加工过程的影响	124
四、电解液的流速及流向	127
第四节 电解加工中的基本规律	128
一、生产率及其影响因素	128
二、精度成型规律	135
三、表面质量	143
第五节 混气电解加工	145
一、混气电解加工原理及优缺点	145
二、气液混合比	148
第六节 电解加工的基本设备	150
一、直流电源	150
二、机 床	151

三、电解液系统	154
第七节 电解加工工艺及其应用	155
一、深孔扩孔加工	155
二、型孔加工	157
三、型腔加工	158
四、套料加工	161
五、叶片加工	162
六、电解倒棱去毛刺	163
七、电解抛光	164
第四章 电解磨削	165
第一节 电解磨削的基本原理和特点	165
一、电解磨削的基本原理	165
二、电解磨削的特点	166
三、电解磨削时电化学反应过程	167
第二节 影响电解磨削生产率和加工质量的因素	170
一、电化学当量	170
二、电解液	170
三、电流密度	172
四、砂轮磨料	173
五、工件转速和接触面积	175
第三节 电解磨削设备	175
第四节 导电砂轮	177
第五节 电解磨削的应用	178
第五章 激光加工	180
第一节 激光加工的理论基础	180
一、光的物理概念	180
二、激光的产生	182
三、激光的特性	185
四、激光加工的基本原理	189

五、激光加工的特点	190
第二节 激光加工的基本设备	191
一、激光加工机的组成部分	191
二、激光器	192
三、激光电源	197
四、光学系统	200
五、机械系统	202
第三节 激光加工工艺规律及其应用	203
一、激光照射面的能量分布	203
二、影响激光加工的主要因素	205
三、激光加工工艺的应用	209
第六章 超声波加工	214
第一节 超声波的物理基础	214
一、超声波的物理概念	214
二、超声波的物理特性	216
第二节 超声波加工的基本原理和特点	220
一、超声波加工的基本原理	220
二、超声波加工的特点	221
第三节 超声波加工设备及其组成部分	222
一、超声波发生器	222
二、声学部件	223
三、机 床	228
四、磨料工作液及其循环系统	228
第四节 超声波加工的生产率、精度和表面 质量及其影响因素	229
第五节 超声波加工的应用	230
第七章 电子束加工	234
第一节 电子束加工原理和特点	234

第二节 电子束加工装置的基本组成部分	236
一、电子枪系统	236
二、真空系统	237
三、控制系统	238
四、电源系统	239
第三节 电子束加工在生产中的应用	240
一、高速打孔	240
二、加工型孔及特殊表面	241
三、蚀 刻	243
第八章 离子束加工	245
第一节 离子束加工的原理及特点	245
一、离子束加工原理	245
二、离子束加工特点	246
第二节 离子束加工装置	246
一、“考夫曼型”离子源	247
二、双等离子管型离子源	248
第三节 离子束加工的应用	250
一、离子束加工	251
二、离子注入	252
三、离子溅射镀覆	252

主要参考书目

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。1784年英国瓦特改进和发明蒸汽机的前几年，苦于制造不出高精度的蒸汽机气缸，恰好1775年威尔逊创造和改进了气缸镗床，解决了蒸汽机主要部件的加工工艺，使它获得了广泛的应用，引起了第一次产业革命。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。

但是从威尔逊制造镗床以来一直到第二次世界大战前，在这段长达 170 多年都靠切削加工（包括磨削加工）的漫长年代里，并没有产生特种加工的迫切需要，也没有发展特种加工的充分条件，人们的思想一直束缚在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，苏联拉扎林可夫妇研究火花放电时从开关触点遭受腐蚀损坏的现象，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、光洁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情况下产生和发展起来的。

切削加工的本质和特点，一是靠刀具材料比工件材料更硬；二是靠机械能、机械力把工件上多余的材料切除下来。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，原来行之有效的有利因素，反而转化为限制生产率和影响加工质量的不利因素了。于是人们就探索用软的工具加工硬的工件材料；不用机械能而用电、化学、光、声等能量来进行加工。到目前为止，已经找到了多种多样这一类的加工方法，为区别于现有的金属切削

加工，暂统称之为特种加工。它们与切削加工的不同点是：

- 1) 不是主要依靠机械能来切除金属材料，而是用其它能量形式如电能、化学能、光能、声能、热能等来去除金属材料。
- 2) 加工用的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。

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原理可分为：

电、热——电火花加工，电子束加工，等离子束加工，
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——超声波加工；

光、热——激光加工。

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，是介乎二者之间的加工方法。例如在切削过程中引入超声波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；以及加热切削，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，目的是改善切削加工的条件，基本上还属于切削加工。

在特种加工范围内还有一些属于提高表面光洁度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、镀覆、刻字、电子束曝光、离

表1—1 特种加工方法比较

特种加工方法	可加工的材料	工具损耗率 (%) 最低/平均	金属去除率 (毫米 ³ /分) 平均/最高	尺寸精度 (毫米) 平均/最高	表面光洁度 平均/最高	特殊要求	主要适用范围
电火花加工	任何导电的金属材料, 如硬质合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢等	1/50	30/3000	0.05/0.005	▽4/▽10		各种冲、压、锻模及三维成型曲面的加工
电火花线切割		极小 (可补偿)	5/20	0.02/0.005	▽5.6/▽8		各种冲模及二维曲面的成型切割
电解加工		不损耗	100/10000	0.1/0.03	▽6.7/▽10	机床、夹具工件需采取防锈措施	锻模及各种二维、三维成型表面加工
电解磨削		1/50	1/100	0.02/0.001	▽7/▽12		硬质合金等难加工材料的磨削
超声波加工	任何脆硬的金属及非金属材料	0.1/10	1/50	0.03/0.005	▽8/▽10		石英、玻璃、锗、硅、硬质合金的加工、研磨
激光加工	任何材料	不损耗	瞬时去除率很高, 受功率限制, 平均去除率不高	0.01/0.001	▽4/▽7	需在真空中加工	精密加工小孔、小缝及成型切割、刻蚀
电子束加工							
离子束加工			很低	/0.01μ	▽/14		表面超精、超微量加工、抛光、刻蚀、掺杂、镀膜

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，近年来提出了超微量加工，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、超声波、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。