



普通高等教育“十五”国家级规划教材

荣获第二届全国高等学校优秀教材一等奖

特种加工

第4版

Non-Traditional Machining



附光盘

哈尔滨工业大学

刘晋春 赵家齐 赵万生 主编



普通高等教育“十五”国家级规划教材
荣获第二届全国高等学校优秀教材一等奖

特种加工 第4版

主编 刘晋春 赵家齐 赵万生
参编 白基成 郭永丰 王振龙 曹国辉
主审 孟庆鑫

机械工业出版社

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、快速成形以及化学加工、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。

本书配有学生版CAI光盘和教师版CAI课件。

图书在版编目(CIP)数据

特种加工/刘晋春等主编.—4版.—北京：机械工业出版社，2004.1
(2007.2重印)

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-06868-6

I.特... II.刘... III.特种加工—高等学校—教材 IV.TG66

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第110578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：高文龙 版式设计：冉晓华

责任校对：李秋荣 责任印制：杨曦

北京机工印刷厂印刷

2007年2月第4版·第10次印刷

184mm×260mm·13印张·320千字

标准书号：ISBN 978-7-111-06868-6

ISBN 7-89492-044-4(光盘)

定价：24.00元(含1CD)

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

第4版前言

本书第1版自1987年6月第1次印刷到1992年4月第6次印刷,共计发行33000册,第2版自1994年5月第8次印刷到1998年5月第11次印刷,共计发行76950册,第3版自1999年1月第12次印刷以来,到2003年1月第19次印刷,共计发行41000册,1、2、3版累计共印刷发行了109950册,深得各高等院校师生以及广大读者的好评,认为本教材在现代先进制造技术领域内向读者介绍了很多具体的先进加工工艺方法和设备,很好地起到了知识更新和知识储备的作用。

为了更好地体现与时俱进、精益求精的精神,自2003年1月至10月,组织编写了第4版。

本书第4版主要作了以下三方面的改进:

(1)对书中内容进一步推陈出新。删除了某些陈旧繁琐的内容,增加了一些特种加工技术中新发展的内容。例如加强了电火花展成、磨削加工,增加了第八章快速成形技术和在第九章其它特种加工中增加了第六节铝合金微弧氧化表面陶瓷化处理技术等。

(2)对原书中各章末的思考题和习题,增加了标准答案。应广大读者(包括学校师生和企业中的工程技术人员)来电来函的要求,特组织编写了这些思考题和习题的标准答案,供广大读者作启发参考。为了不致使教材的文图篇幅超限,特将这些标准答案收录入随书发行的电子光盘中。

(3)本书同时制作并配套发行了多媒体CAI课件——《特种加工》多媒体课件V1.0版,此套多媒体课件共有两张光盘,一张光盘为学生版,随书发行;另一张光盘为教师版,需另订购。无论学生版或教师版,课件内容的形式有:文字表格、图片、摄像片断和动画等四种。

本套多媒体课件的目的和作用在于增加学生、读者的感性认识,深化理性认识,提高学习效果;对授课教师而言,提供教案编排系统,典型的讲课教案和大量的备课素材,丰富教学内容,提高教学效果。

教师版光盘课件的内容及功能为:

教学演示:按章节编排,对教材中的难点用多媒体方式进行演示讲解;

教案编排:提供创建教案、修改教案、教案演示和典型教案等强大功能,使教师逐步摆脱黑板和粉笔的束缚;

习题解答:包括教材的课内习题和扩充的课外习题及答案,使教师具有更广阔的习题参考空间;

实验指导:涵盖实验指导、实验报告及部分实验仿真内容;

教材作者:介绍本书的三位主编教授;

使用帮助:提供课件的软件说明和国内外与特种加工相关的网站连接,以及推荐其它参考书目;

知识扩展:增加一些教材之外的特种加工工艺实例、样件图片,以及教材中个别内容的

进一步补充等知识背景；

全书插图：可根据书中的图号很方便地查找和调用《特种加工》第4版书中所有的插图，以便于教师组织教案和多媒体教学。

学生版光盘课件的内容及功能为：

教学演示：同教师版；

习题解答：包括教材中的习题及其答案；

实验指导：同教师版；

教材作者：同教师版；

使用帮助：同教师版。

本书第4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刘晋春、赵家齐、赵万生三位教授主编，由哈尔滨工程大学孟庆鑫教授主审。

参编人员有哈尔滨工业大学白基成教授、郭永丰教授、王振龙教授和曹国辉博士等。

参加编制本书第4版多媒体课件的有：哈尔滨工业大学机电工程学院刘晋春、赵家齐、赵万生、白基成、郭永丰、王振龙教授，制图教研室栾英艳副教授，特种加工及机电控制研究所曹国辉博士，机电工程学院硕士生杭观荣、孙姝，本科生辛跃、李露妮，计算机学院学生李静和张露等。

由于时间及水平有限，书中和课件中难免会有错误和不足之处，恳请广大读者指正。

编者

2003年11月

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

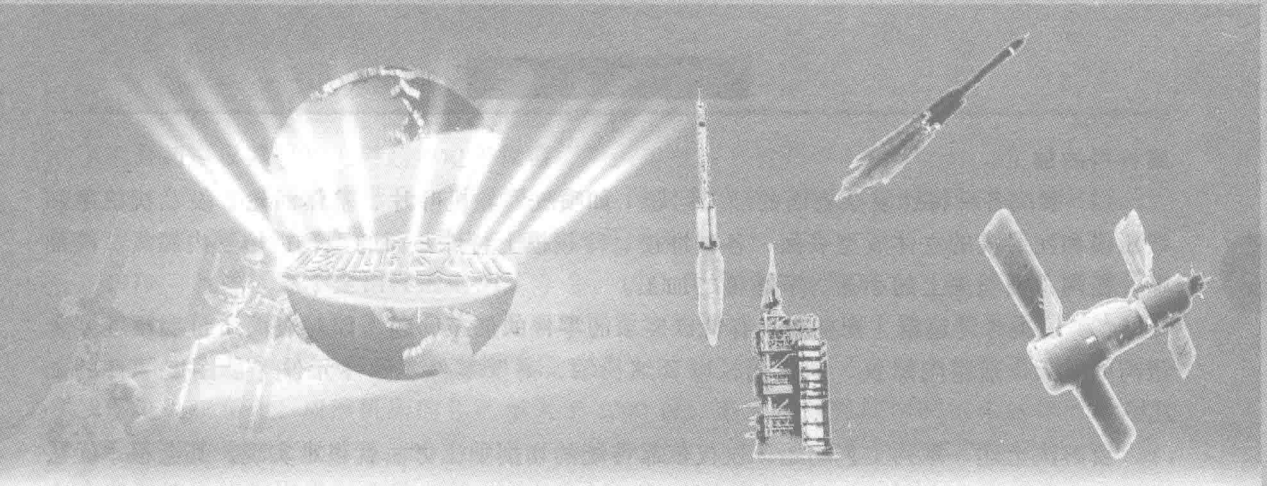
本书所用主要符号

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

- v_{dA} 空载时工具电极的进给速度
 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)
 v_E 工件蚀除速度
 v_n 法向进给速度
 v_s 走丝速度
 v_w 加工速度 (以体积表示)
 W 宽度, 能量, 功
 W_M 单个脉冲能量
 Z 加工指令, 加工余量, 气液混合比
 Δ 加工间隙
 Δ_a 切断间隙
 Δ_b 平衡间隙
 Δ_f 端面间隙
 Δ_n 法向间隙
 Δ_0 起始间隙
 Δ_s 侧面间隙
 α 热扩散率, 落料角
 β 刃口斜度
 δ 放电间隙
 η 效率, 电流效率
 θ 工具电极的相对损耗率, 角度, 旋转运动, 发散角, 入射角
 κ 温度扩散率
 λ 波长, 热导率
 λ_0 中心波长
 Δ_λ 光源的谱线宽度
 ρ 密度, 电阻率
 σ 电导率
 τ 时间常数
 ω 体积电化学当量, 圆频率, 角速度
 φ 有效脉冲利用率

目 录

第4版前言	
第3版序言	
第2版序言	
第1版前言	
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
第三节 特种加工对材料可加工性和结构 工艺性等的影响	5
思考题	6
第二章 电火花加工	7
第一节 电火花加工的基本原理及其 分类	7
第二节 电火花加工的机理	10
第三节 电火花加工中的一些基本 规律	13
第四节 电火花加工用的脉冲电源	23
第五节 电火花加工的自动进给 调节系统	28
第六节 电火花加工机床	33
第七节 电火花穿孔成形加工	35
第八节 其它电火花加工	46
思考题和习题	54
第三章 电火花线切割加工	55
第一节 电火花线切割加工原理、特点 及应用范围	55
第二节 电火花线切割加工设备	57
第三节 电火花线切割控制系统和编程 技术	62
第四节 影响线切割工艺指标的因素	67
第五节 线切割加工工艺及其扩展应用	72
思考题和习题	76
第四章 电化学加工	77
第一节 电化学加工原理及分类	77
第二节 电解加工	82
第三节 电解磨削	109
第四节 电铸、涂镀及复合镀加工	118
思考题和习题	125
第五章 激光加工	126
第一节 激光加工的原理和特点	126
第二节 激光加工的基本设备	130
第三节 激光加工工艺及应用	134
思考题和习题	138
第六章 电子束和离子束加工	139
第一节 电子束加工	139
第二节 离子束加工	144
思考题和习题	150
第七章 超声加工	151
第一节 超声加工的基本原理和特点	151
第二节 超声加工设备及其组成部分	154
第三节 超声加工速度、精度、表面 质量及其影响因素	159
第四节 超声加工的应用	160
思考题和习题	164
第八章 快速成形技术	165
第一节 光敏树脂液相固化成形	165
第二节 选择性激光粉末烧结成形	168
第三节 薄片分层叠加成形	171
第四节 熔丝堆积成形	172
思考题和习题	174
第九章 其它特种加工	175
第一节 化学加工	175
第二节 等离子体加工	183
第三节 挤压珩磨	185
第四节 水射流切割	187
第五节 磁性磨料研磨加工和磁性磨料 电解研磨加工	189
第六节 铝合金微弧氧化表面陶瓷 化处理技术	191
思考题和习题	195
参考文献	196



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气缸，无法推广应用。直到有人创造出和改进了气缸镗床，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 20 世纪 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

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、冷拔模上特殊截面的型孔,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为: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。20世纪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。20世纪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苏州第三光学仪器厂、苏州长风机械厂和汉川机床厂等专业生产电火花加工机床。

20世纪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”。20世纪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。

20世纪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。

20世纪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等。

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、成形机床的年产量大于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。2002年内电火花穿孔成形机床年产量大于3000台,电火花数控线切割机床年产量大于15000台,电加工机床生产企业已由50家增至100家以上。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小差距,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	EEM (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	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
快速成形	液相固化法	光、化学能	增材法加工	SL
	粉末烧结法			SLS
	纸片叠层法	LOM		
	熔丝堆积法	电、热、机械能		FDM

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、镀覆、刻字,激光表面处理、改性,电子束曝光,离子镀、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、分子单位的纳米加工方法。

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,本书中未予阐述。

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 (%) 最低/平均	材料去除率 $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 平均/最高	可达到尺寸精度/mm 平均/最高	可达到表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ 平均/最高	主要适用范围
电火花加工		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	任何导电的金属材料如硬质合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、钛合金等	较小 (可补偿)	20/200 ^① mm^2/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

(续)

加工方法	可加工材料	工具损耗率 (%) 最低/平均	材料去除率 $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 平均/最高	可达到尺寸精度/mm 平均/最高	可达到表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ 平均/最高	主要适用范围
激光加工	任何材料	不损耗(三种加工,没有成形的工具)	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、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					1.25/0.2	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 ^②	/0.01 μm	/0.01	对零件表面进行超精密、超微量加工、抛光、蚀刻、掺杂、镀膜等
水射流切割	钢铁、石材	无损耗	> 300	0.2/0.1	20/5	下料、成形切割、剪裁
快速成形	增材加工,无可比性			0.3/0.1	10/5	快速制作样件、模具

① 线切割加工的金属去除率按惯例均用 mm^2/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、淬硬钢、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,淬硬钢比未淬硬钢更易加工。特种加工方法使材料的可加工范围从普通材料发展到硬质合金、超硬材料和特殊材料。

(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。

(3) 特种加工改变了试制新产品的模式 以往试制新产品的关键零部件时,必须先设计、制造相应的刀、夹、量具和模具,以及二次工装,现在采用数控电火花线切割,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),微型电动机定子、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。快速成形技术,更是试制新

产品的必要手段,改变了过去传统的产品试制模式。

(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带冠整体结构,大大提高了发动机性能。特种加工使产品零件可以更多地采用整体性结构。

(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、深孔、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。过去很多不可修废品,现在都可用特种加工方法修复。例如,啮合不好的齿轮,可用电火花跑合;尺寸磨小了的轴,磨大了的孔,以及工作中磨损了的轴和孔,可用电刷镀修复。现代产品结构中可以大量采用小孔、小深孔、深槽和窄缝。

(6) 特种加工已经成为微细加工和纳米加工的主要手段 近年来出现并快速发展的微细加工和纳米加工技术,主要是电子束、离子束、激光、电火花、电化学等电物理、电化学特种加工技术。

思考题

1-1 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)

1-2 试举出几种因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。

1-3 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?