


高等学校“十一五”规划教材

 机械设计制造及其自动化系列


**TECHNOLOGY OF
NON-TRADITIONAL
MACHINING**

特种加工技术

主编 白基成 郭永丰 刘晋春

哈尔滨工业大学出版社

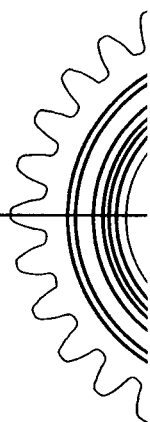
高等学校“十一五”规划教材

 机械设计制造及其自动化系列

**TECHNOLOGY OF
NON-TRADITIONAL
MACHINING**

特种加工技术

主编 白基成 郭永丰 刘晋春



哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书讲述常规与传统切削、磨削加工技术以外的特种加工新技术,主要有电火花加工、数控电火花线切割加工、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、化学加工等技术。它们的主要特点是不依靠机械能、切削力,而是采用电、热、光、声、化学等多种能量,可以“以柔克刚”,用软的工具加工硬的工件。

书中讲述各种特种加工的基本原理、基本设备、基本工艺规律、主要特点和应用范围。

本书可作为高等院校、中专学校机械制造工艺及机械电子专业和模具制造专业的特种加工课程的教材,也可作为机械制造、机械加工、模具加工等工程师、技术人员和技术工人的自学教材和参考书。

Non-Traditional Machining (NTM) is a category of technologies beyond conventional cutting and grinding. It covers Electrical Discharge Machining (EDM), Wire Electrical Discharge Machining (WEDM), Electrochemical Machining (ECM), Laser Beam Machining (LBM), Electron Beam Machining (EBM), Ion Beam Machining (IBM), Ultrasonic Machining (USM), Rapid Prototyping (RP), Chemical Machining (CHM), et al. NTM uses electrical energy, thermal energy, light energy, sonic energy and chemical energy as their primary sources of energy, but not mechanical energy, so NTM can use tools of soft materials to shape workpieces of hard materials.

图书在版编目(CIP)数据

特种加工技术/白基成,郭永丰,刘晋春主编. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2006.8
ISBN 7-5603-2327-8

I.特… II.①白… ②郭… ③刘… III.特种加工 IV.TG66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 008110 号

责任编辑 黄菊英
封面设计 卞秉利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 16.5 字数 400 千字
版 次 2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷
印 数 1~4 000 册
定 价 26.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

高等学校“十一五”规划教材

机械设计制造及其自动化系列

编写委员会名单

(按姓氏笔画排序)

| | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 主任 | 姚英学 | | | | |
| 副主任 | 尤波 | 巩亚东 | 高殿荣 | 薛开 | 戴文跃 |
| 编委 | 王守城 | 巩云鹏 | 宋宝玉 | 张慧 | 张庆春 |
| | 郑午 | 赵丽杰 | 郭艳玲 | 谢伟东 | 韩晓娟 |

编审委员会名单

(按姓氏笔画排序)

| | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 主任 | 蔡鹤皋 | | | | |
| 副主任 | 邓宗全 | 宋玉泉 | 孟庆鑫 | 闻邦椿 | |
| 编委 | 孔祥东 | 卢泽生 | 李庆芬 | 李庆领 | 李志仁 |
| | 李洪仁 | 李剑峰 | 李振佳 | 赵继 | 董申 |
| | 谢里阳 | | | | |

总 序

自 1999 年教育部对普通高校本科专业设置目录调整以来,各高校都对机械设计制造及其自动化专业进行了较大规模的调整和整合,制定了新的培养方案和课程体系。目前,专业合并后的培养方案、教学计划和教材已经执行和使用了几个循环,收到了一定的效果,但也暴露出一些问题。由于合并的专业多,而合并前的各专业又有各自的优势和特色,在课程体系、教学内容安排上存在比较明显的“拼盘”现象;在教学计划、办学特色和课程体系等方面存在一些不太完善的地方;在具体课程的教学大纲和课程内容设置上,还存在比较多的问题,如课程内容衔接不当、部分核心知识点遗漏、不少教学内容或知识点多次重复、知识点的设计难易程度还存在不当之处、学时分配不尽合理、实验安排还有不适当的地方等。这些问题都集中反映在教材上,专业调整后的教材建设尚缺乏全面系统的规划和设计。

针对上述问题,哈尔滨工业大学机电工程学院从“机械设计制造及其自动化”专业学生应具备的基本知识结构、素质和能力等方面入手,在校内反复研讨该专业的培养方案、教学计划、培养大纲、各系列课程应包含的主要知识点和系列教材建设等问题,并在此基础上,组织召开了由哈尔滨工业大学、吉林大学、东北大学等 9 所学校参加的机械设计制造及其自动化专业系列教材建设工作会议,联合建设专业教材,这是建设高水平专业教材的良好举措。因为通过共同研讨和合作,可以取长补短、发挥各自的优势和特色,促进教学水平的提高。

会议通过研讨该专业的办学定位、培养要求、教学内容的体系设置、关键知识点、知识内容的衔接等问题,进一步明确了设计、制造、自动化三大主线课程教学内容的设置,通过合并一些课程,可避免主要知识点的重复和遗漏,有利于加强课程设置上的系统性、明确自动化在本专业中的地位、深化自动化系列课程内涵,有利于完善学生的知识结构、加强学生的能力培养,为该系列教材的编写奠定了良好的基础。

本着“总结已有、通向未来、打造品牌、力争走向世界”的工作思路,在汇聚多所学校优势和特色、认真总结经验、仔细研讨的基础上形成了这套教材。参加编写的主编、副主编都是这几所学校在本领域的知名教授,他们除了承担本科生教学外,还承担研究生教学和大量的科研工作,有着丰富的教学和科研经历,同时有编写教材的经验;参编人员也都是各学校近年来在教学第一线工作的骨干教师。这是一支高水平的教材编写队伍。

这套教材有机整合了该专业教学内容和知识点的安排,并应用近年来该专业领域的科研成果来改造和更新教学内容、提高教材和教学水平,具有系列化、模块化、现代化的特点,反映了机械工程领域国内外的新发展和新成果,内容新颖、信息量大、系统性强。我深信:这套教材的出版,对于推动机械工程领域的教学改革、提高人才培养质量必将起到重要推动作用。

蔡鹤皋

哈尔滨工业大学教授

中国工程院院士

2005年8月10日

前 言

如果您是一位机械制造、机械加工工艺工作者,或是有志于机械制造的人员,则请您在阅读本书之前思考并回答下列问题:

- 1.如何在淬火钢上加工一个直径5 mm、深5 mm的定位销孔?
- 2.如何在厚10 mm的硬质合金上加工一个四方形或六角形的型孔?(有3~4种可能的加工方法)
- 3.如何在中碳钢的气动、液压元件上加工一个直径0.8~1 mm、深100 mm的小孔?
- 4.有哪些方法可以在0.2 mm厚的不锈钢板上加工出一排直径为 (0.1 ± 0.03) mm的小孔(有3~4种可能的加工方法)
- 5.有哪些方法可在0.2 mm厚的钨箔上加工出直径为 (0.05 ± 0.02) mm的微孔?

如果您对上述问题能正确回答出4道题以上,则可认为您对特种加工技术已基本了解;如果能正确回答3道题,则您对特种加工技术已基本入门;如果只能回答出2道题或更少,则您对特种加工技术知道甚少。本着与时俱进的要求,您迫切需要知识更新,学习特种加工新技术。

特种加工是指传统的切削加工以外的新的加工方法。特种加工主要不是依靠机械能、切削力进行加工,而是用软的工具(甚至不用工具)加工硬的工件,可以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,近十几年来无论在国内或国外,电加工机床年产量的平均增长率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,近年来我国已有越来越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。

本书内容主要包含:概述、电火花加工、电火花线切割加工技术、电化学加工技术、超声加工技术、激光加工技术、电子束和离子束加工技术、磨料流动加工、水射流切割、快速成形技术等特种加工方法的基本原理、基本设备、工艺规律、主要特点和应用范围。

本书可作为高等工业院校机械专业(制造工艺和设备)及其他相近专业的特种加工课程的教材,也可作为从事机械制造方面的工程技术人员和技术工人的参考书。

本书由哈尔滨工业大学机电学院特种加工及机电控制研究所白基成、郭永丰、刘晋春教授主编,参加编写人员有王蔚岷、赵家齐、王振龙、狄士春、胡富强、王致良、杨晓冬、迟关心、宋博岩、曹国辉、刘华、韩国柱等。全书由北京航空航天大学周正干教授主审。

由于本书涉及的内容较为广泛,但收集的资料有限,时间仓促,难免有不足和欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者
2006年8月

本书所用主要符号

| | | | |
|-----------------|-----------------------------|----------------|---------------|
| A | 振幅,加工面积 | l | 长度 |
| a | 加速度,有效离子浓度 | m | 质量 |
| B | 宽度,数控线切割编程中分隔符号 | $NR_{1,2,3,4}$ | 线切割逆圆指令 |
| b | 宽度,缩放量 | \bar{P} | 平均功率 |
| C | 电容,热容,电解加工中双曲线常数 | p | 压强,能量密度 |
| c | 比热容,波速,光速 | q | 蚀除量,流量 |
| C_B | B的浓度或称B的物质的量浓度 | q' | 单个脉冲蚀除量 |
| D | 直径,线切割中的停机代码 | q_a | 正极(阳极)蚀除量 |
| d | 直径 | q_c | 负极(阴极)蚀除量 |
| E | 光子能量,原子能级,电源电压,工具电极 | q_g | 气体流量 |
| e | 电子负电荷 | q_l | 液体流量 |
| F | 偏差值,作用力,电化学中法拉第常数,(焦距) | q_q | 气化热 |
| f | 频率,焦距 | q_r | 熔化热 |
| G | 重力,数控线切割编程中计数方向,数控编程中准备功能代码 | R | 电阻,半径 |
| g | 重力加速度 | r | 半径 |
| H | 磁场强度,高度 | S | 放电间隙,加工间隙,位移量 |
| h | 深度,高度,厚度,普朗克常数 | S_B | 最佳放电间隙 |
| I | 电流,纸带孔符号 | S_L | 侧面单边放电间隙 |
| I_0 | 光强度,同步孔符号 | S_m | 物理因素造成的机械间隙 |
| i | 电流密度 | $SR_{1,2,3,4}$ | 线切割顺圆指令 |
| i_a | 切断电流密度 | T | 温度 |
| i_e | 放电电流 | T_f | 沸点 |
| \hat{i}_e | 脉冲电流幅值 | T_r | 熔点 |
| \bar{i}_e | 平均放电电流 | t | 时间 |
| J | 能量密度,数控线切割中计数长度 | t_c | 充电时间 |
| K | 质量电化学当量,传热系数,某种常数,腐蚀系数 | t_e | 放电时间 |
| K_a, K_c, K_u | 与工艺参数有关的常数 | t_i | 脉冲宽度(简称脉宽) |
| K_R | 与材料有关的常数 | t_0 | 脉冲间隔(简称脉间) |
| L | 电感,长度 | t_p | 脉冲周期 |
| $L_{1,2,3,4}$ | 线切割直线指令 | 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,电源电压,空载电压
 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 电解加工中阳极蚀除速度
 v_c 电解加工中阴极进给速度
 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 工具电极损耗速度
 v_m 加工速度(以质量表示)
 v_g 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 数控线切割中加工指令,加工余量,气液混合比
 Δ 加工间隙
 Δ_a 电解加工时的切断间隙
 Δ_b 电解加工时的平衡间隙
 Δ_f 电解加工时的端面间隙
 Δ_n 电解加工时的法向间隙
 Δ_0 电解加工时的起始间隙
 Δ_s 电解加工时的侧面间隙
 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
 θ_L 长度相对损耗率
 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 电火花加工有效脉冲利用率,相对放电时间率
 Φ 电火花加工绝对放电时间率
 ϕ 直径

目 录

| | |
|---------------------------------|-------|
| 第1章 概 述 | (1) |
| 1.1 特种加工的产生和发展 | (1) |
| 1.2 特种加工的分类 | (3) |
| 1.3 特种加工对材料可加工性和结构工艺性等的影响 | (5) |
| 思考题与习题..... | (6) |
| 第2章 电火花加工 | (7) |
| 2.1 电火花加工的基本原理及其分类 | (7) |
| 2.2 电火花加工的机理..... | (12) |
| 2.3 电火花加工中的一些基本规律..... | (15) |
| 2.4 电火花加工用的脉冲电源..... | (27) |
| 2.5 电火花加工的自动进给调节系统..... | (33) |
| 2.6 电火花加工机床..... | (39) |
| 2.7 电火花穿孔成形加工..... | (42) |
| 2.8 其他电火花加工..... | (55) |
| 思考题与习题 | (64) |
| 第3章 电火花线切割加工 | (66) |
| 3.1 电火花线切割加工原理、特点及应用范围 | (66) |
| 3.2 电火花线切割加工设备..... | (68) |
| 3.3 电火花线切割控制系统和编程技术..... | (74) |
| 3.4 影响线切割工艺指标的因素..... | (83) |
| 3.5 线切割加工工艺及其扩展应用..... | (89) |
| 思考题与习题 | (93) |
| 第4章 电化学加工 | (95) |
| 4.1 电化学加工原理及分类..... | (95) |
| 4.2 电 解 加 工 | (101) |
| 4.3 电 解 磨 削 | (132) |
| 4.4 电铸、涂镀及复合镀加工..... | (142) |
| 思考题与习题..... | (150) |
| 第5章 激光加工技术 | (152) |
| 5.1 激光加工的原理和特点 | (152) |
| 5.2 激光加工的基本设备 | (156) |
| 5.3 激光加工工艺及应用 | (161) |
| 思考题与习题..... | (166) |

| | |
|--|-------|
| 第6章 电子束和离子束加工技术 | (167) |
| 6.1 电子束加工 | (167) |
| 6.2 离子束加工 | (173) |
| 思考题与习题 | (179) |
| 第7章 超声加工技术 | (180) |
| 7.1 超声加工的基本原理和特点 | (180) |
| 7.2 超声加工设备及其组成部分 | (183) |
| 7.3 超声加工的速度、精度、表面质量及其影响因素 | (188) |
| 7.4 超声加工的应用 | (190) |
| 思考题与习题 | (195) |
| 第8章 快速成形技术 | (196) |
| 8.1 光敏树脂液相固化成形 | (196) |
| 8.2 选择性激光粉末烧结成形 | (198) |
| 8.3 薄片分层叠加成形 | (201) |
| 8.4 熔丝堆积成形 | (203) |
| 思考题与习题 | (206) |
| 第9章 其他特种加工技术 | (208) |
| 9.1 化学加工 | (208) |
| 9.2 等离子体加工 | (215) |
| 9.3 挤压珩磨 | (218) |
| 9.4 水射流切割 | (221) |
| 9.5 磁性磨料研磨加工和磁性磨料电解研磨加工 | (223) |
| 9.6 铝合金微弧氧化表面陶瓷化处理技术 | (225) |
| 思考题与习题 | (229) |
| 第10章 特殊、复杂、典型难加工零件的特种加工技术 | (230) |
| 10.1 航天、航空工业中小深孔、斜孔、群孔零件的特种加工 | (230) |
| 10.2 排孔、小方孔筛网的特种加工 | (232) |
| 10.3 薄壁、弹性、低刚度零件的特种加工 | (235) |
| 10.4 微细表面、零件的电火花加工 | (239) |
| 思考题与习题 | (244) |
| 第11章 特种加工中的安全、环保和绿色加工技术 | (245) |
| 11.1 特种加工中的安全、环保技术 | (245) |
| 11.2 特种加工中的绿色加工和节能技术 | (250) |
| 思考题与习题 | (251) |
| 参考文献 | (252) |

1.1 特种加工的产生和发展

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作用。例如,在 18 世纪 70 年代就发明了蒸汽机,但苦于加工不出高精度的蒸汽机气缸而无法推广应用,直到有人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,才使蒸汽机获得广泛应用,引起世界性的第一次产业革命。这一事例充分说明了加工方法对新产品研制、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,以达到加工的要求。

直到 1943 年,前苏联拉扎连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时,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,从而开创和发明了电火花加工方法,即用铜丝在淬火钢上加工出小孔,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、小型化等诸多方向发展,它们所采用的材料越来越难加工,零件形状越来越复杂,加工精度、表面粗糙度和某些特殊要求也越来越高,对机械制造部门提出了以下新的要求:

(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、石英以及锆、硅等各种高硬度、高强度、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、整体涡轮、发动机机匣及锻压模、注射模的立体成形表面,各种冲模、冷拔模特殊截面的型孔,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、低刚度零件等的加工。

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历史条件下产生和发展起来的。但外因是条件,内因是根本,事物发展的根本原因在于事物的内部,特种加工之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:一是刀具材料比工件更硬;二是利用机械能和切削力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,在工件材料越来越硬、加工表面越来越复杂的情况下,矛盾转化,“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,国外称为非传统加工(non-traditional machining,简称NTM)或非常规机械加工(non-conventional machining,简称NCM)。

特种加工与切削加工的不同点是:

① 特种加工主要依靠电、化学、光、声、热等能量去除金属材料,而不主要依靠机械能;

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,并开展电火花加工和电化学加工的科研工作。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”。60年代末上海电表厂张维良工程师在阳极-机械切割技术的基础上发明出我国独创的高速走丝线切割机床,上海复旦大学配套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起来。

20世纪50年代末电解加工在兵器工业部系统开始用来加工高射炮管内的膛线等,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加工型腔模具等。

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年哈尔滨工业大学在国内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所院校统编教材和机械制造专业的通用教材、规划教材。

1979年我国成立了全国性的电加工学会,创办了全国发行的《电加工》杂志(2000年改名为《电加工及模具》,2001年电加工学会改名为特种加工学会)。1981年在我国高校间成立了特种加工教学研究会。同年我国在机床与工具协会下还成立了特种加工机床行业协会,挂靠在苏州电加工机床研究所,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1 000台,电火花数控线切割机床的年产量超过3 800台,其他电加工机床在200台以上。2002年内电火花穿孔、成形机床年产量超过3 000台,电火花数控线切割机床年产量超过15 000台。2004年的产量更是翻一番还多,电加工机床生产企业已由50家增至150家以上。2005年电火花成形机床年产量约4 000台,高速电火花小孔加工机床年产约2 500台,快走丝线切割机床年产量约4万台,慢走丝线切割机床年产量约2 400台。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荣获电火花、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一定差距,高档电加工机床每年还要从国外进口300台以上,这些都有待于我们去努力创新。

1.2 特种加工的分类

特种加工的分类目前还没有明确的规定,一般按能量来源、作用形式和加工原理可分为表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 | EGM(ECG) |
| | 电解研磨、珩磨 | 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 | 溶化、气化 | LBM |
| | 激光打标记 | 光能、热能 | 溶化、气化 | LBM |
| | 激光处理、表面改性 | 光能、热能 | 溶化、相变 | LBT |
| 电子束加工 | 切割、打孔、焊接 | 电能、热能 | 溶化、气化 | EBM |
| 离子束加工 | 蚀刻、镀覆、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 | 溶化、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 | 光、热、机械能 | | 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,本书对此不予论述。

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,本书中不予阐述。

本课程主要讲述电火花、电解、电解磨削、激光、超声、电子束、离子束、快速成形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 $Ra/\mu\text{m}$ 平均/最高 | 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、 钛合金等 | 0.1/10 | 30/3 000 | 0.03/0.003 | 10/0.01 | 从数微米的孔、槽到数米的超大型模具、工件等,例如,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 | | 较小 (可补偿) | 20/200 ^D mm^2/min | 0.02/0.002 | 5/0.01 | 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,也可切割铝、钨、半导体材料或贵重金属 |
| 电解加工 | | 不损耗 | 100/10 000 | 0.1/0.01 | 1.25/0.16 | 从细小零件到 1t 的超大型工件及模具,例如,仪表微型小轴,齿轮上的毛刺,涡轮叶片,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 | | 0.1/0.5 | 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 |

续表 1.2

| 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 $Ra/\mu\text{m}$ 平均/最高 | 主要适用范围 |
|-------|-----------|-----------------------|--|-------------------------|--|---|
| 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,例如,玻璃、石英、宝石、金刚石及半导体单晶锗、硅等,可加工型孔、型腔、小孔、深孔等 |
| 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,例如,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 | | | | | | 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 | | | | | | 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 | 10/2.5 | 快速制作样件、模具 |

注:① 线切割加工的金属去除率按惯例均以 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。

1.3 特种加工对材料可加工性和结构工艺性等的影响

由于特种加工工艺的特点以及广泛的应用,引起了机械制造工艺技术领域的许多变革,主要有以下几个方面:

(1) 提高了材料的可加工性

以往认为金刚石、硬质合金、淬火锅、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,淬火锅比未淬火锅更易加工。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) 改变了零件加工的典型工艺路线

以往除磨削外,其他切削加工、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淬火热处理引起的变形,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

以往试制新产品时,必须先设计、制造相应的刀、夹、量具、模具及二次工装,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),各种电动机定子、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、模具及二次工装,大大缩短了试制周期。近年来实用化的快速成形技术,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

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,大大提高了发动机的性能。特种加工使产品零件可以更多地采用整体性结构。现代产品结构中可以大量采用小孔、小深孔、深槽和窄缝。

(5) 对传统结构工艺性的好与坏需要重新衡量

过去认为方孔、小孔、深孔、弯孔、窄缝等是工艺性很“坏”的典型,是工艺、设计人员应尽量避免的,有的甚至是禁区,特种加工改变了这种现象。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,采用电加工后由难变易了。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。过去很多不可修的废品,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,均可用电刷镀修复。

(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。

思考题与习题

1.1 从特种加工的发展史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“坏事可变为好事”? (提示:如开关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?