



现代机械制造技术丛书

复合加工

Combined Machining

张建华 张勤河 贾志新 赵玉刚 等编著



化学工业出版社



现代机械制造技术丛书

复合加工



Combined Machining

张建华 张勤河 贾志新 赵玉刚 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

复合加工是同时采用多种加工方法的复合作用,利用多种能量形式的综合作用实现对工件材料的去除,其中包括传统加工和特种加工的复合、特种加工与特种加工的复合,优势互补,相辅相成。本书系统地介绍了几种典型的复合加工技术,包括化学-机械复合加工、磁场辅助研抛加工、切削复合加工、磨削复合加工、放电复合加工和电火花放电复合表面强化等,重点介绍技术原理、工艺、设备和应用等。

本书适用于机械制造研究人员、工程技术人员以及高等院校机械专业师生学习和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

复合加工 / 张建华等编著. —北京: 化学工业出版社, 2014. 7

(现代机械制造技术丛书)

ISBN 978-7-122-20824-8

I. ①复… II. ①张… III. ①复合加工 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 111711 号

责任编辑: 张兴辉

文字编辑: 张绪瑞

责任校对: 吴 静

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 315 千字 2015 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

现代加工技术通常是指特种加工技术,即将电、磁、声、光、化学等能量或其组合施加在工件的被加工部位上,从而实现材料被去除、变形、改性或表面处理等的非传统加工方法。

各种新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现,对机械制造业提出了一系列迫切需要解决的新问题。例如,各种难切削材料的加工;各种结构形状复杂、尺寸或微小或特大、精密零件的加工;薄壁、弹性元件等低刚度、特殊零件的加工等等。对此,采用传统的加工方法十分困难,甚至无法加工,于是产生了相应的特种加工技术。近年来,国家非常重视制造新技术的研发,加大了投入,特种加工技术发展迅速,许多新的特种加工技术和设备已经投入生产应用。当前,特种加工技术正在向工程化和产业化方向发展,高效率、高精度、多功能、高可靠性、智能化的加工技术和设备研究开发是发展的重点。

从当前制造业的发展趋势来看,现代加工技术将具有巨大的发展潜力和应用空间。在这样的形势下,化学工业出版社组织出版了《现代机械制造技术丛书》,包括《超声加工》、《电火花加工》、《电化学加工》、《激光加工》、《复合加工》。

复合加工是同时采用多种加工方法的复合作用,利用多种能量形式的综合作用实现对工件材料的去除,其中包括传统加工和特种加工的复合、特种加工与特种加工的复合,优势互补,相辅相成。由于复合加工技术可以扬长避短,取得很好的技术和经济效益,特别受到工业发达国家的关注。随着精密加工和超精密加工技术的发展,特别是微细加工、纳米加工、微型机械等的发展,特种加工技术的范畴有了更大发展,复合加工在特种加工技术中所占的比重愈来愈大,逐渐成为特种加工领域中一个十分重要的分支,研究开发和应用前景广阔。

本书比较系统地讲述了复合加工的主要内容,适合用于机械制造类专业的选修课程教材,也适合从事制造业的工程技术人员作为参考书使用。

本书各章的编著者如下:第1章(张建华)、第2章(张建华)、第3章(赵玉刚、张勤河、金洙吉)、第4章(张勤河、沈学会)、第5章(张建华、张洪丽)、第6章(贾志新、张勤河、张建华)、第7章(董春杰、张建华)。全书由张建华统稿。

本书内容涉及的面比较广泛,相关研究内容和研究成果得到国家自然科学基金的支持(基金项目编号包括50575127、50275087、50305018、50575128、50775128、50875157等)。

在本书的编著过程中,山东大学机械工程学院的任升峰、徐明刚、白文峰、段彩云、王涛、李刚、陶国灿、张义、杨浩等帮助做了大量的辅助工作,编著者表示衷心的感谢。

由于编著者水平所限,书中难免有不足和欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

张建华

目 录

CONTENTS

Chapter 01	第 1 章 概论	1
	1.1 制造新技术的产生和发展	1
	1.1.1 特种加工技术的特点及其对制造领域的影响	1
	1.1.2 加工方法及分类	3
	1.2 复合加工技术	7
	1.2.1 比较典型的复合加工技术	7
	1.2.2 复合加工技术的研究发展方向	9
	参考文献	10
Chapter 02	第 2 章 化学复合加工	11
	2.1 化学加工	11
	2.1.1 化学铣削	11
	2.1.2 光化学加工	12
	2.1.3 化学表面处理	12
	2.2 电化学加工	12
	2.2.1 电解加工的机理	13
	2.2.2 电解加工设备	13
	2.2.3 电解加工工艺	18
	2.3 化学-机械复合加工	22
	2.3.1 机械-化学复合抛光	22
	2.3.2 化学-机械复合抛光	23
	2.4 电化学-机械复合加工	24
	2.4.1 电化学-机械复合加工的分类	25
	2.4.2 电化学-机械复合加工的特点	25
	2.4.3 常用的电化学-机械复合加工技术	26
	2.5 超声电解复合抛光	32
	2.5.1 超声电解复合抛光的机理	32
	2.5.2 影响超声电解复合抛光加工质量和效率的因素	32
	参考文献	33
Chapter 03	第 3 章 磁场辅助研抛加工	34
	3.1 磁性磨料浮动抛光	34
	3.1.1 加工机理	34
	3.1.2 磁性流体的组成及特点	35

3.1.3	磁流体的制备	35
3.1.4	磁流体抛光装置及其应用	36
3.2	磁粒研磨加工	40
3.2.1	磁粒研磨加工机理	40
3.2.2	磁粒研磨加工的特点	41
3.2.3	常用磁粒研磨加工装置	42
3.2.4	磁粒研磨加工的影响因素和影响规律	44
3.2.5	磁性磨料的制备	49
3.3	小结	52
	参考文献	52

Chapter 04	第4章 切削复合加工	53
4.1	加热切削	53
4.1.1	加热切削的机理	53
4.1.2	加热热源应具备的条件	53
4.1.3	常用的加热切削方法	54
4.2	超声振动车削	62
4.2.1	超声振动车削的装置和原理	63
4.2.2	超声振动车削的应用范围	65
4.2.3	超声振动系统的安装与调整	66
4.2.4	超声振动车削用量选择	67
4.2.5	车刀刀尖高度的调整	67
4.2.6	切削液的选择	67
4.2.7	超声振动车削过程中的运动分析	67
4.2.8	超声振动车削的工艺效果	68
4.2.9	超声振动车削实例	70
4.3	超声振动钻削	71
4.3.1	超声振动钻削原理和实现方式	71
4.3.2	超声振动钻削系统	72
4.3.3	轴向超声振动钻削运动学分析	72
4.3.4	轴向超声振动钻削的动态特性	73
4.3.5	振动钻削过程中钻头的静止化与刚性化效果	78
4.3.6	超声振动钻削加工工艺效果分析	80
4.3.7	均质单一材料的轴向振动钻削过程	86
4.3.8	新型材料的振动钻削工艺	87
4.3.9	超声振动钻削实例	89
4.4	超声振动铣削	91
4.4.1	单向超声振动铣削过程运动分析	91
4.4.2	超声振动铣削力实验研究	97
4.4.3	超声振动铣削加工表面及其摩擦磨损特性	102
4.5	小结	109
	参考文献	109

Chapter 05	第 5 章 磨削复合加工	111
	5.1 概述	111
	5.2 基于松散或游离磨粒的复合加工技术	112
	5.2.1 研磨	113
	5.2.2 抛光	117
	5.3 电解电火花磨削复合加工	119
	5.3.1 MEEC 法的原理	119
	5.3.2 MEEC 法的特点与应用	119
	5.3.3 新 MEEC 法	120
	5.4 超声振动磨削复合加工	121
	5.4.1 超声振动磨削	121
	5.4.2 超声振动砂带磨削	125
	5.4.3 超声振动珩磨	125
	5.5 在线电解修锐砂轮磨削技术 (ELID)	126
	5.5.1 ELID 磨削技术的特点	126
	5.5.2 ELID 磨削的在线电解修锐	126
	5.5.3 ELID 磨削装置	127
	5.5.4 ELID 磨削方式	129
	5.5.5 ELID 精密镜面磨削分析	130
	5.5.6 ELID 磨削的镜面形成机理	132
	5.5.7 ELID 磨削技术研究和应用	132
	5.6 断续磨削-机械脉冲放电复合加工	133
	5.6.1 断续磨削	133
	5.6.2 机械脉冲放电加工	135
	5.6.3 断续磨削-机械脉冲放电复合加工	136
	参考文献	141

Chapter 06	第 6 章 放电复合加工	143
	6.1 超声放电复合加工	143
	6.1.1 超声电火花放电复合加工	143
	6.1.2 超声频间隙脉冲放电加工	144
	6.2 超声频调制的超声振动-放电复合研磨技术	153
	6.3 电解放电复合加工	154
	6.3.1 电解放电复合加工基本原理及特点	154
	6.3.2 电解放电复合加工的应用	155
	6.4 超声振动辅助气中放电加工	155
	6.4.1 加工原理	155
	6.4.2 试验研究	156
	6.5 压电自适应微细电火花加工	159
	6.5.1 加工原理及加工过程	160
	6.5.2 加工机理	161
	6.5.3 材料去除率模型	165
	6.5.4 加工特性	166

6.5.5 加工参数对放电效果的影响·····	169
6.6 小结·····	172
参考文献·····	172

Chapter 07	第7章 超声振动辅助电火花放电表面强化 ·····	174
	7.1 电火花放电表面强化的研究现状·····	175
	7.1.1 液体介质中电火花放电表面强化·····	175
	7.1.2 气体介质中电火花放电表面强化·····	177
	7.2 超声振动辅助电火花放电表面强化·····	177
	7.2.1 超声振动辅助电火花放电表面强化的原理·····	177
	7.2.2 超声振动辅助电火花放电表面强化工艺·····	178
	7.2.3 超声振动辅助电火花放电表面强化机理·····	179
	7.2.4 超声振动参数对强化层的影响·····	182
	7.3 超声振动辅助混粉电火花放电表面强化·····	186
	7.3.1 超声振动辅助混粉电火花放电表面强化原理·····	186
	7.3.2 超声振动辅助混粉电火花放电表面强化工艺·····	188
	参考文献·····	197

概论

1.1 制造新技术的产生和发展

制造技术的发展过程已经有几千年的历史,从石器时代、铜器时代、铁器时代到现代的高分子塑料时代;从手工制作、机器制作到现代的智能控制自动化制作;同时,从一般精度加工、精密加工到现代的超精密加工及纳米加工。

由于现代科学技术的迅猛发展,机械工业、电子工业、航空航天工业、化学工业等,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、大功率、小型化等方向发展,以及需要在高温、高压、重载荷或腐蚀等环境下长期可靠地工作。为了适应这些要求,各种新结构、新材料和复杂形状的精密零件大量出现,其结构和形状愈来愈复杂,材料的性能愈来愈强韧,对精度的要求也愈来愈高,对加工表面粗糙度和表面完整性的要求愈来愈严格,使制造业面临着一系列严峻的任务。

① 解决各种难切削材料的加工问题:例如硬质合金、钛合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、金刚石、石英以及锗、硅等各种高硬度、高强度、高韧性、高脆性的金属、非金属材料以及新型复合材料的加工。

② 解决各种特殊复杂型面的加工问题:例如喷气涡轮机叶片、整体涡轮、锻压模等的立体成形表面,各种冲模、冷拔模等特殊截面形状 of 型孔,炮管内膛线、喷油嘴、喷丝头上的小孔、窄缝等的加工。

③ 解决各种超精密、光整零件的加工问题:例如对表面质量和加工精度要求很高的航天、航空、航海陀螺仪、精密光学透镜、激光核聚变用的曲面镜、高灵敏度的红外传感器等零件的精细表面加工,形状和尺寸精度要求在 $0.1\mu\text{m}$ 以上,表面粗糙度 Ra 要求在 $0.01\mu\text{m}$ 以上。

④ 特殊零件的加工问题:例如大规模集成电路、光盘基片、复印机和打印机的感光鼓、微型机械和机器人零件、细长轴、薄壁零件、弹性元件等低刚度零件的加工等。

要解决上述一系列问题,仅仅依靠传统的切削加工方法很难实现,有些则根本无法实现。在生产的迫切需求下,人们通过各种渠道、借助于多种能量形式,不断研究和探索新的制造技术和方法。

1.1.1 特种加工技术的特点及其对制造领域的影响

特种加工是一门多学科综合的现代技术,要获得高精度和高质量的加工表面,不仅要考

虑加工方法本身,而且涉及被加工的工件材料、加工设备及工艺装备、检测方法、工作环境和操作人员的技艺水平等。特种加工技术与系统论、方法论、计算机技术、信息技术、传感器技术、数字控制技术的结合,促成了特种加工系统工程的形成。

特种加工是指利用电、声、光、热、化学、磁、原子能等能量形式来进行加工的非传统加工方法,它们与传统切削加工的主要不同点包括:①不是主要依靠机械能,而是主要用其他的能量(如电能、热能、光能、声能以及化学能等)去除工件材料;②工具材料的硬度可以低于被加工工件材料的硬度,在有些情况下,例如激光加工、电子束加工、离子束加工等的加工过程中,根本不需要使用工具;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作用,工件不承受宏观机械力,特别适合于精密加工低刚度零件。

由于具有上述特点,总体而言,特种加工技术可以加工任何硬度、强度、韧性、脆性的金属、非金属材料或复合材料,而且特别适合于加工复杂、微细零件和低刚度的零件,同时,有些特种加工方法还可以用于进行超精密加工、镜面加工、光整加工以及纳米级(原子级)的加工。

特种加工技术不仅可以采取单独的加工方法,更可以采用复合加工的方法,近年来发展迅速并且应用广泛。

复合加工技术将几种加工方法融合在一起,发挥各自所长,相辅相成,可以提高加工精度、加工表面质量和加工效率,并且扩大了加工应用的范围。

随着特种加工技术逐渐被广泛应用,已经引起了机械制造领域内的许多变革,例如对工件材料的可加工性、工艺路线的安排、新产品的试制过程、产品零件结构设计、零件结构工艺性好与坏的衡量标准等等产生了一系列重要的影响。

(1) 提高了工件材料的可加工性

在机械加工领域,金刚石、硬质合金、石英、玻璃、陶瓷等都属于难加工材料。现在已经广泛采用的金刚石、聚晶金刚石、聚晶立方氮化硼等制造的刀具、工具、拉丝模等,可以采用电火花、激光等多种方法进行加工。工件材料的可加工性不再与其硬度、强度、韧性、脆性等直接的关系。对于电火花、线切割等特种加工技术,淬火钢比未淬火钢更容易加工。

(2) 改变了零件的典型工艺路线

在传统的加工领域,除了磨削加工以外,其他的切削加工、成形加工等一般都安排在淬火热处理工序之前,这是工艺人员不可违反的工艺准则。特种加工技术的出现改变了这种一成不变的程序格式。由于基本上不受工件材料硬度的影响,而且为了避免加工后再引起淬火热处理变形,一般都是先淬火热处理而后进行加工。最为典型的是电火花线切割加工、电火花成形加工、电解加工等都是先进行淬火热处理后再加工。

特种加工技术的出现还对以往工序的“分散”和“集中”引起了影响。以加工齿轮、连杆等型腔锻模为例,由于特种加工过程中没有显著的机械作用力,机床、夹具、工具的强度、刚度不是主要矛盾,即使是较大的、复杂的加工表面,基本上都可以使用一个复杂工具加简单的运动轨迹,经过一次安装、一道工序加工出来,工序比较集中。

(3) 加快新产品的开发

试制新产品时,采用特种加工技术可以直接加工出各种标准和非标准直齿轮、微电机定子、转子硅钢片,各种变压器铁芯,各种特殊、复杂的二次曲面体零件,可以节省设计和制造相应的刀具、夹具、量具、模具以及二次工具,缩短新产品的试制周期,并显著降低成本。

(4) 对产品零件的结构设计产生影响

例如,为了减少应力集中,花键孔、轴以及枪炮膛线的齿根部分最好做成小圆角,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。采用电解加工技术时,由于存在尖角变圆的现象,非采用小圆角的齿根不可。各种复杂冲模,例如山形硅钢片冲模,以往由于难以制造经常采用拼镶式结构,现在采用电火花、线切割等特种加工技术,即使是硬质合金的模具或刀具,也可以制成整体式结构。喷气发动机涡轮也由于电解等特种加工技术的出现可以采用整体式结构。

(5) 对传统结构工艺性好与坏的衡量标准产生重要影响

以往普遍认为方孔、小孔、弯孔、窄缝等是工艺性差的典型,是设计人员和工艺人员非常“忌讳”的,有些甚至是机械结构设计的“禁区”。对于电火花穿孔加工、电火花线切割等特种加工来说,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、涡轮叶片上大量的小冷却深孔、窄缝、静压轴承和静压导轨的内油囊型腔等,采用电火花加工技术以后都变难为易了。过去在淬火处理以前忘记加工定位销孔、铣槽等工艺,淬火处理后这种工件只能报废,现在则可以使用电火花加工等特种加工技术进行打孔、切槽等进行补救。相反,现在有时为了避免淬火处理产生开裂、变形等缺陷,把钻孔、开槽等工艺安排在淬火处理之后,工艺路线安排更灵活。

1.1.2 加工方法及分类

(1) 加工成形的原理

根据加工成形的原理和特点来分类,可以分为去除加工、结合加工、变形加工三大类。

去除加工又称为分离加工,是从工件上去除多余的材料,例如车削加工、磨削加工、电火花加工、电解加工等。

结合加工是利用理化方法将不同的材料结合(Bonding)在一起,按结合的机理、方法、强弱等又可以分为附着(Deposition)、注入(Injection)、连接(Jointed)三种。附着加工又称为沉积加工,是在工件表面上覆盖一层物质,为弱结合,例如电镀、气相沉积等。注入加工又称为渗入加工,是在工件的表层注入某些元素,使之与工件基体材料产生物化反应,以改变工件表层材料的力学、机械性质,属于强结合,例如表面渗碳、离子注入等。连接加工是将两种相同或不同的材料通过物理化学方法连接在一起,例如焊接、粘接等。

变形加工又称为流动加工,是利用力、热、分子运动等手段使工件产生变形,改变其尺寸、形状和性能,例如锻造、铸造、液晶定向等。

表 1.1 列出了上述三大类加工方法,范围十分广泛。

根据材料在加工过程中的流动分析,去除加工是使工件材料逐步减少,一部分工件材料变成切屑,这种流动称为分散流。结合加工是使工件材料在加工过程中逐步增加,这种流动称之为汇合流。变形加工是指在加工过程中工件材料基本不变,称为直通流。

近年来又研究发展了电铸、晶体生长、分子束外延、快速成形加工等加工方法,突破了传统加工技术大多局限于分离去除加工和表面结合加工的概念。

快速成形加工是一种利用离散/堆积成形技术的分层制造方法,将一个三维空间实体零件分散为在某个坐标方向上的若干层有很小厚度的三维实体,由于厚度很小,可以按照二维实体成形,再叠加成为所需零件的原形。

表 1.1 加工方法（一）

分 类	加工成形原理		主要加工方法
去除加工 (分离加工)	电物理加工 化学加工、电化学加工 力学加工 热物理加工（热蒸发、热扩散、热熔解）		电火花线切割加工、电火花成形加工 电解加工、蚀刻（电子束曝光）、化学机械抛光 切削、磨削、研磨、抛光、珩磨、超声加工、磨料喷射加工、高压水射流加工 电子束加工、激光加工
结合加工	附着加工	化学 电化学 热物理（热熔化） 力物理	化学镀、化学气相沉积 电镀、电铸 真空蒸镀、熔化镀 离子镀（离子沉积）、物理气相沉积
	注入加工 (渗入加工)	化学 电化学 热物理（热扩散） 力物理	氧化、氮化、活性化学反应 阳极氧化 晶体生长、分子束外延、掺杂、渗碳、烧结 离子束外延、离子注入
	连接加工	热物理、电物理 化学	激光焊接、快速成形加工、卷绕成形 化学粘接
变形加工 (流动加工)	热流动、表面热流动 黏滞流动 分子定向		锻造、塑性流动加工（气体火焰、高频电流、电子束、激光） 铸造、液体流动加工（金属、塑料、橡胶等注塑、压铸） 液晶定向

(2) 加工机理

根据加工机理分类，加工技术可以分为传统加工、特种加工、复合加工。

传统加工是指使用刀具进行的切削加工以及磨削加工。

特种加工是指利用电、声、光、热、化学、磁、原子能等能量形式进行加工的非传统加工方法。

复合加工是同时采用多种加工方法的复合作用，其中包括传统加工与特种加工的复合、特种加工与特种加工的复合等，优势互补，相辅相成。

目前，在制造业中占主要地位的仍然是传统的加工方法，特种加工和复合加工是重要的发展方向。

表 1.2 列出了按刀具切削加工、磨料加工、特种加工、复合加工分类的各种常用的加工方法及其所用的工具、所能达到的精度和表面粗糙度、被加工材料以及应用情况。

表 1.2 加工方法（二）

分类	加工方法		加工工具	精度 / μm	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	被加工材料	应 用
刀具切削加工	切削	精密、超精密车削	天然单晶金刚石刀具、人造聚晶金刚石刀具、立方氮化硼刀具、陶瓷刀具、硬质合金刀具等	1~0.1	0.05~0.008	有色金属及其合金、非金属材料	球、磁盘、反射镜
		精密、超精密铣削					多面棱体
		精密、超精密镗削					活塞销孔
	微孔钻削		硬质合金钻头，高速钢钻头	20~10	0.2	低碳钢、铜、铝、石墨、塑料	印刷线路板、石墨模具、喷嘴

续表

分类	加工方法		加工工具		精度 / μm	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	被加工材料	应 用
磨料加工	磨削	精密、超精密 砂轮磨削	氧化铝、碳化硅、立方氮化硼、金刚石等磨料	砂轮	5~0.5	0.05~0.008	黑色金属、硬脆材料、非金属材料	外圆、孔、平面
		精密、超精密 砂带磨削		砂带				平面、外圆 磁盘、磁头
	研磨	精密、超精密 研磨	铸铁、硬木、塑料等研具 氧化铝、碳化硅、金刚石等磨料	1~0.1	0.025~0.008	黑色金属、硬脆材料、非金属材料	外圆、孔、平面	
		油石研磨	氧化铝油石、玛瑙油石、电铸金刚石油石				平面	
		磁性研磨	磁性磨料	10~1	0.01	黑色金属	外圆 去毛刺	
		滚动研磨	固结磨料、游离磨料、化学或电解作用液体			黑色金属等	型腔	
	抛光	精密、超精密抛光	抛光器 氧化铝、氧化铬等磨料	1~0.1	0.025~0.008	黑色金属、铝合金	外圆、孔、平面	
		弹性发射加工	聚氨酯球抛光器、高压抛光液	0.1~0.001	0.025~0.008	黑色金属、非金属材料	平面、型面	
		液体动力抛光	带有楔槽工作表面的抛光器 抛光液	0.1~0.01	0.025~0.008	黑色金属、非金属材料、有色金属	平面、圆柱面	
		水合抛光	聚氨酯抛光器 抛光液	1~0.1	0.01	黑色金属、非金属材料	平面	
		磁流体抛光	非磁性磨料 磁流体	1~0.1	0.01	黑色金属、非金属材料、有色金属	平面	
		挤压研抛	黏弹性物质 磨料	5	0.01	黑色金属等	型面、型腔去毛刺、倒棱	
		喷射加工	磨料 液体	5	0.01~0.02	黑色金属等	孔、型腔	
		砂带研抛	砂带 接触轮	1~0.1	0.01~0.008	黑色金属、非金属材料、有色金属	外圆、孔、平面、型面	
		超精研抛	研具（脱脂木材、细毛毡）、磨料、纯水	1~0.1	0.01~0.008	黑色金属、非金属材料、有色金属	平面	
	超精加工	超精加工	磨条 磨削液	1~0.1	0.025~0.01	黑色金属等	外圆	
	珩磨	精密珩磨	磨条 磨削液	1~0.1	0.025~0.01	黑色金属等	孔	

分类	加工方法		加工工具	精度 / μm	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	被加工材料	应 用
特种加工	电火花加工	电火花成形加工	成形电极, 脉冲电源、煤油、去离子水	50~1	2.5~0.02	导电金属	型腔模
		电火花线切割加工	钼丝、铜丝、脉冲电源、去离子水	20~3	2.5~0.16		冲模、样板 (切断、开槽)
	电化学加工	电解加工	工具电极(铜、不锈钢) 电解液	100~3	1.25~0.06	导电金属	型孔、型面、 型腔
		电铸	导电原模 电铸溶液	1	0.02~0.012	金属	成形小零件
	化学加工	蚀刻	掩模板、光敏抗蚀剂、离子束装置、电子束装置	0.1	2.5~0.2	金属、非金属、半导体	刻线、图形
		化学铣削	刻形、光学腐蚀溶液、耐腐蚀涂料	20~10	2.5~0.2	黑色金属、有色金属等	下料、成形加工
	超声加工		超声波发生器、换能器、变幅杆、工具	30~5	2.5~0.04	任何硬脆金属和非金属	型孔、型腔
	微波加工		针状电极(钢丝、钽丝)、波导管	10	6.3~0.12	绝缘材料、半导体	打孔
	红外光加工		红外光发生器	10	6.3~0.12	任何材料	打孔、切割
	电子束加工		电子枪、真空系统、加工装置(工作台)	10~1	6.3~0.12	任何材料	微孔、镀模、焊接、蚀刻
	粒子束加工	粒子束去除加工	离子枪、真空系统、加工装置(工作台)	0.01~0.001	0.02~0.01	任何材料	成形表面、刃磨、蚀刻
		粒子束附着加工		1~0.1	0.02~0.01		镀模
		粒子束结合加工					注入、掺杂
	激光束加工		激光器、加工装置(工作台)	10~1	6.3~0.12	任何材料	打孔、切割、焊接、热处理
复合加工	电解	电解磨削	工具极、电解液、砂轮	20~1	0.08~0.01	导电黑色金属、硬质合金	轧棍、刀具刃磨
		精密电解研磨	工具极、电解液、磨料	1~0.1	0.025~0.008		平面、外圆、孔
		精密电解抛光	工具极、电解液、磨料	10~1	0.05~0.008	导电金属	平面、外圆、孔、型面
	超声	精密超声车削	超声波发生器、换能器、变幅杆、车刀	5~1	0.1~0.01	难加工材料	外圆、孔、端面、型面
		精密超声磨削	超声波发生器、换能器、变幅杆、砂轮	3~1	0.1~0.01		外圆、孔、端面、
		精密超声研磨	超声波发生器、换能器、变幅杆、研磨剂研具	1~0.1	0.025~0.008	黑色金属等硬脆材料	外圆、孔、平面
	化学	机械化学研磨	研具、磨料、化学活化研磨剂	0.1~0.01	0.025~0.008	黑色金属、非金属材料	外圆、孔、平面、型面
		机械化学抛光	抛光器、增压活化抛光液	0.01	0.01	各种材料	外圆、孔、平面、型面
		化学机械抛光	抛光器、化学活化抛光液	0.01	0.01		外圆、孔、平面、型面

1.2 复合加工技术

根据系统工程的观点，加大对特种加工技术的基本原理、加工机理、工艺规律、加工稳定性等深入研究的力度，同时充分融合以现代电子技术、计算机技术、信息技术和精密制造技术为基础的高新技术，使加工设备向自动化、柔性化方向发展。

不断研究开发特种加工领域的新方法，包括超精密微细加工和复合加工，尤其是加工质量好、效率高、经济型的复合加工，充分发挥其特点。由于复合加工技术可以优势互补，扬长避短，能够取得很好的技术和经济效果，在工业发达国家得到广泛关注，已经成为制造技术发展的重要方向。

复合加工是同时采用两种或两种以上加工方法，利用多种形式能量的综合作用来实现对工件材料的去除，其中包括传统加工与特种加工的复合、特种加工与特种加工的复合等。

如图 1.1 所示，根据加工工件材料的特性、加工精度及加工效率的要求，可以组合出为数众多、各具特点的新的复合加工技术。



图 1.1 不同能量形式的加工类型

1.2.1 比较典型的复合加工技术

(1) 化学-机械复合加工

化学加工是利用酸、碱、盐等化学溶液对金属或某些非金属工件表面产生化学反应，通过腐蚀溶解改变工件尺寸和形状的加工方法。如果仅仅进行局部有选择性的加工，则需要对

工件上的非加工表面用耐腐蚀性涂层覆盖保护,仅露出需要加工的部位。

化学-机械复合加工是一种精整加工方法,可以有效地加工硬质合金、工程陶瓷、单晶蓝宝石和半导体晶片等,可以防止机械加工引起的表面脆性裂纹和凹痕,避免磨粒的耕犁引起的隆起以及擦划引起的划痕,可以获得光滑无缺陷的表面。

常用的化学-机械复合加工技术有下列两种:

① 机械-化学抛光(CMP) 机械-化学抛光(CMP)的工作原理是利用比工件材料软的磨料对硬度较高的工件材料进行加工,由于运动的磨粒本身的活性以及因磨粒与工件之间在微观接触区的摩擦产生高压、高温,在很短的接触时间内出现固相反应,随后这种反应生成物被运动的磨粒以机械摩擦作用去除。

② 化学-机械抛光 化学-机械抛光的工作原理是由溶液的腐蚀作用形成化学反应薄层,然后由磨粒的机械摩擦作用去除化学反应薄层。

(2) 磁场辅助研抛加工

通过在磁场作用下形成的磁流体使悬浮其中的非磁性磨粒在磁流体的流体动力和浮力作用下压向旋转的工件进行研磨和抛光,能提高精整加工的质量和效率,可以获得 $Ra \leq 0.01 \mu\text{m}$ 的无变质层加工表面,并能研磨抛光复杂表面形状的工件。

常用的磁场辅助精整加工技术有磁性浮动抛光(Magnetic Float Polishing)和磁性磨料精整加工(Magnetic Abrasive Finishing)。

(3) 切削复合加工

切削复合加工(Cutting Combined Machining, CCM)主要通过改善切屑的形成过程,可以分为加热切削和超声振动辅助切削两种。

① 加热切削 通过对工件加工表面的局部瞬时加热,改变其物理力学性能和表层的金相组织,降低工件切削区材料的强度,提高其塑性,改善其切削加工性能。加热切削是对铸造高锰钢、不锈钢等难切削加工材料进行高效率切削加工的一种有效方法,常用的有电接触加热切削、等离子电弧加热车削、激光加热辅助车削等。

② 超声振动辅助切削 以超声振动的能量来减小刀具与工件之间的摩擦,并提高加工区工件材料的塑性,改变刀尖与工件加工表面之间的相对运动轨迹,可以改善车、钻、镗、绞、插、攻螺纹、切断等的切削过程,降低切削力,提高加工质量。

(4) 磨削复合加工

磨削复合加工(Grinding Combined Machining, GCM)主要是用于获得高的形状精度和表面质量。大规模集成电路的发展要求晶片达到小于 $0.01 \mu\text{m}$ 的平面度和纳米级的加工表面粗糙度,镜面的加工表面上无细微划痕、擦伤和裂纹,表层的变质层应极其微小。

磨削复合加工可以分为以下几种:

① 基于松散磨料或游离磨料的复合加工 由于松散磨料加工使用柔性材料研具,游离磨料加工是通过磨料流运动而且无研具的约束,因而能根据与工件的接触情况自动调整吃刀量(切削深度),并使磨粒切削方位随机变换,保持磨粒的锐利性,实现微量切削,形成高质量的加工表面。在此基础上,复合液力、电子、磁场和化学等能量作用,可以有选择地控制工件表面不平度突起点位的加工,形成高质量的加工表面。

② 电解在线修整砂轮磨削法(ELID) ELID磨削技术是日本物理化学研究所大森整博士发明的,将细粒度金刚石或CBN砂轮与电解在线连续修整砂轮技术相结合,使磨料保持锋利和排列均匀,可以获得镜面的加工表面,而且生产率较高。

ELID磨削技术在日本、美国、英国、德国等国家得到广泛的重视和研究应用,主要用于对硬脆性材料表面进行超精密加工。目前,使用该技术对硬质合金、陶瓷、光学玻璃等脆性材料加工均实现了镜面磨削,加工表面粗糙度与在同样机床条件下的普通砂轮磨削相比有

大幅度的提高,部分工件的表面粗糙度 Ra 达到纳米级。

③ 机械脉冲放电-磨削复合加工 机械脉冲放电-磨削复合加工技术是通过使用专用的金刚石或 CBN 砂轮,专用砂轮和工件分别与直流电源的正负两极相连。在复合加工过程中,专用砂轮高速旋转,当导电的金属部分与工件相对时,极间电压击穿工作液介质产生电火花放电;当不导电的磨粒与工件接触时,进行磨削加工,电火花放电形成的烧蚀层被磨粒磨除,形成新鲜的表面。该复合加工技术适合用于导电难加工材料的高效精密加工。

(5) 放电复合加工

电火花放电复合加工 (Electro-discharge Combined Machining, EDCM) 是以电火花放电所产生的热能为主,与磨料机械能、超声振动能、电解的化学能等一种或几种能量形式复合进行的加工,可以提高加工表面质量和加工效率,主要有电解-放电复合加工、磨削-放电复合加工、超声-放电复合加工、超声振动-放电-磨削复合加工技术等。

(6) 其他复合加工

以化学加工为主,辅之以光学或液体动力学能量,而不是用磨料或电火花等加工方法。这类复合加工有光刻加工、水合抛光、非接触化学抛光等。光刻加工主要用于复杂的图形加工,水合抛光和非接触化学抛光主要用于加工蓝宝石和 GaAs 晶片,其加工表面粗糙度可以达到纳米级。

1.2.2 复合加工技术的研究发展方向

近年来,随着精密加工和超精密加工技术的发展,特别是微细加工、纳米加工、微型机械的发展,特种加工的范畴有了更大拓展,主要体现在复合加工技术的多样化、高效化和精密化。复合加工在特种加工技术中所占的比例愈来愈大,逐渐成为特种加工领域的一个重要分支,其研究开发和应用前景广阔。

复合加工技术的研究发展方向主要有以下几个方面:

(1) 复合加工技术的精密化、微型化

复合加工技术是几种加工方法的复合,加工设备复杂,安装、运输、使用等不便。复合加工技术将在保持原有加工特点的基础上,向精密化、微型化方向发展。

(2) 复合加工技术的自动化、柔性化、集成化、智能化

自动化有助于实现操作,提高加工质量和加工效率、快速响应市场需求;柔性化可以实现多品种小批量生产;集成化可以充分利用 CAD/CAM、CIMS 等技术实现设计制造一体化、并行设计、虚拟制造、反求工程等;智能化可以利用专家系统、模糊推理、人工神经网络、遗传基因等人工智能技术,解决制造过程中的复杂决策问题,提高实用性,代替人的部分劳动。

(3) 复合加工技术的多样化

随着材料科学、高新技术的发展,以及新产品更新换代的日益加快,有些产品要求具有很高的强度质量比和性能价格比,逐渐朝着高速度、高精度、高可靠性、耐腐蚀、高温高压、大功率、尺寸大小两极分化的方向发展。各种新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现,迫切需要研究开发新的复合加工方法。创新是技术发展的原动力,是科技进步和经济发展的源泉,是知识经济的核心,没有创新就没有今天的先进制造技术,也就没有丰富多彩的世界。

(4) 复合加工技术的绿色化

由于世界性的环境保护要求,制造业必须实现绿色化,在研究和发展复合加工技术时,必须注意保护环境,开发对环境友好,以人为本的绿色复合加工技术是发展的必然趋势。