

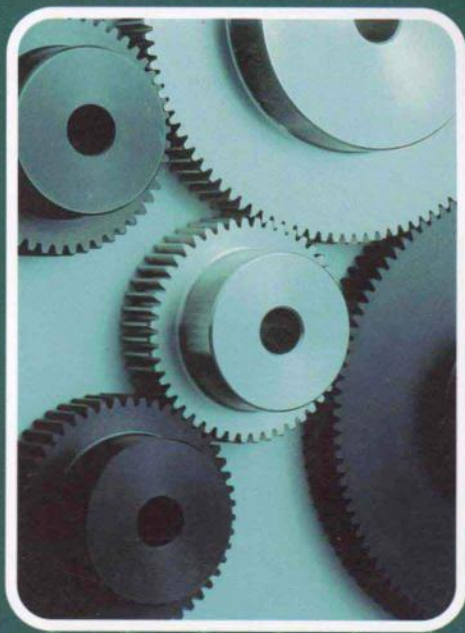


全国普通高等学校机械类“十二五”规划系列教材

丛书顾问 李培根 林萍华

# 精密与特种 加工技术

张国智 王中营 主编



JINGMI YU TEZHONG  
JIAGONG JISHU

JX



JIXIELEI SHIERWU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

全国普通高等学校机械类“十二五”规划系列教材

# 精密与特种加工技术

主 编 张国智 王中营  
副主编 王元刚

华中科技大学出版社

## 内 容 简 介

基于现代加工的应用背景,紧跟时代的科技发展步伐,本书收集了最新的国内外大量文献资料,基于精密与特种加工的机理与本质,以全新的宏微观课程体系结构为主线,较系统地介绍了精密与特种加工技术。

本书分为6章,除第1章概论、第2章工艺功能设计方法外,其他章节涵盖了最新应用及广泛采用的精密与特种加工技术,包括:金刚石刀具精密切削加工,精密与超精密磨料加工,挤压珩磨加工,磨料喷射加工,磁性磨料研磨加工,车铣加工,超声波加工,旋压、辊挤、摆碾、楔横轧、累积叠轧、等通道角挤压、高压扭转加工,电火花加工,电火花线切割,电化学加工,激光加工,电子束、离子束、等离子体加工,超高压水射流切割加工,LIGA和准LIGA加工,扫描隧道显微加工。

本书可作为机械类专业本科生的教材,同时也可作为航空航天、军事、机械、建筑、生物制造等领域的工程应用人员及相关科学研究人员进行工程应用和科学研究的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

精密与特种加工技术/张国智 王中营 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2013.6  
ISBN 978-7-5609-8533-6

I. 精… II. ①张… ②王… III. ①精密切削 ②特种加工 IV. ①TG506.9 ②TG66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 276218 号

## 精密与特种加工技术

张国智 王中营 主编

策划编辑:俞道凯

责任编辑:姚同梅

封面设计:范翠璇

责任校对:朱 玢

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:仙桃市新华印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:11.75

字 数:309千字

版 次:2013年6月第1版第1次印刷

定 价:26.00元



华中大

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

全国普通高等学校机械类“十二五”规划系列教材

## 编审委员会

顾问：李培根 华中科技大学

林萍华 华中科技大学

主任：吴昌林 华中科技大学

副主任：(按姓氏笔画顺序排列)

王生武 邓效忠 轧 钢 庄哲峰 杨家军 杨 萍

吴 波 何岭松 陈 炜 竺志超 高中庸 谢 军

委员：(排名不分先后)

许良元 程荣龙 曹建国 郭克希 朱贤民 贾卫平

丁晓非 张生芳 董 欣 庄哲峰 蔡业彬 许泽银

许德璋 叶大鹏 李耀刚 耿 铁 邓效忠 宫爱红

成经平 刘 政 王连弟 张庐陵 张建国 郭润兰

张永贵 胡世军 汪建新 李 岚 杨术明 杨树川

李长河 马晓丽 刘小健 汤学华 孙恒五 聂秋根

赵 坚 马 光 梅顺齐 蔡安江 刘俊卿 龚曙光

吴凤和 李 忠 罗国富 张 鹏 张高君 柴保明

孙 未 何 庆 李 理 孙文磊 李文星 杨咸启

秘 书：俞道凯 万亚军

# 全国普通高等学校机械类“十二五”规划系列教材

## 序

“十二五”时期是全面建设小康社会的关键时期,是深化改革开放、加快转变经济发展方式的攻坚时期,也是贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》的关键五年。教育改革与发展面临着前所未有的机遇和挑战。以加快转变经济发展方式为主线,推进经济结构战略性调整、建立现代产业体系,推进资源节约型、环境友好型社会建设,迫切需要进一步提高劳动者素质,调整人才培养结构,增加应用型、技能型、复合型人才的供给。同时,当今世界处在大发展、大调整、大变革时期,为了迎接日益加剧的全球人才、科技和教育竞争,迫切需要全面提高教育质量,加快拔尖创新人才的培养,提高高等学校的自主创新能力,推动“中国制造”向“中国创造”转变。

为此,近年来教育部先后印发了《教育部关于实施卓越工程师教育培养计划的若干意见》(教高[2011]1号)、《关于“十二五”普通高等教育本科教材建设的若干意见》(教高[2011]5号)、《关于“十二五”期间实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”的意见》(教高[2011]6号)、《教育部关于全面提高高等教育质量的若干意见》(教高[2012]4号)等指导性意见,对全国高校本科教学改革和发展方向提出了明确的要求。在上述大背景下,教育部高等学校机械学科教学指导委员会根据教育部高教司的统一部署,先后起草了《普通高等学校本科专业目录机械类专业教学规范》、《高等学校本科机械基础课程教学基本要求》,加强教学内容和课程体系改革的研究,对高校机械类专业和课程教学进行指导。

为了贯彻落实教育规划纲要和教育部文件精神,满足各高校高素质应用型高级专门人才培养要求,根据《关于“十二五”普通高等教育本科教材建设的若干意见》文件精神,华中科技大学出版社在教育部高等学校机械学科教学指导委员会的指导下,联合一批机械学科办学实力强的高等学校、部分机械特色专业突出的学校和教学指导委员会委员、国家级教学团队负责人、国家级教学名师组成编委



会,邀请来自全国高校机械学科教学一线的教师组织编写全国普通高等学校机械类“十二五”规划系列教材,将为提高高等教育本科教学质量和人才培养质量提供有力保障。

当前经济社会的发展,对高校的人才培养质量提出了更高的要求。该套教材在编写中,应着力构建满足机械工程师后备人才培养要求的教材体系,以机械工程知识和能力的培养为根本,与企业对机械工程师的能力目标紧密结合,力求满足学科、教学和社会三方面的需求;在结构上和内容上体现思想性、科学性、先进性,把握行业人才要求,突出工程教育特色。同时注意吸收教学指导委员会教学内容和课程体系改革的研究成果,根据教指委颁布的各课程教学专业规范要求编写,开发教材配套资源(习题、课程设计和实践教材及数字化学习资源),适应新时期教学需要。

教材建设是高校教学中的基础性工作,是一项长期的工作,需要不断吸取人才培养模式和教学改革成果,吸取学科和行业的新知识、新技术、新成果。本套教材的编写出版只是近年来各参与学校教学改革的初步总结,还需要各位专家、同行提出宝贵意见,以进一步修订、完善,不断提高教材质量。

谨为之序。

国家级教学名师

华中科技大学教授、博导

2012年8月



# 前 言

精密与特种加工技术是先进制造技术的重要组成部分,随着科技与时代的发展,在不断地发生变革,以满足社会的需求,并适应世界工业发展的需要。精密与特种加工技术的发展程度也是衡量一个国家制造技术的重要指标,目前,世界各国都非常重视精密与特种加工技术,并将其作为发展先进制造技术中的优先发展内容。

此外,多种先进技术的发展,以及边缘、交叉学科的发展,给精密与特种加工技术带来了迅猛发展的契机,因而,近几十年来,出现了很多新的精密与特种加工技术,并且,推广应用到一些工程领域,如航空航天、国防、机械制造等工程领域。目前,加工精度的最高水平可达到原子级。

在此种工程背景下,机械工程专业作为古老、传统的专业,需要紧跟科技发展的步伐,拓宽科技视野,进而才能适应世界机械行业的发展需要,因而,对于机械工程专业的教学,迫切需要更新教学内容、增设新的课程,以适应机械行业的快速发展。在这种形式下,精密与特种加工技术课程的设置是必需的。

本书共分6章:第1章介绍了精密与特种加工技术的工程背景、发展趋势等;第2章介绍了工艺功能设计方法,作为精密与特种加工技术工艺分析的方法基础;第3章介绍了利用机械强力进行精密与特种加工的工艺方法,包括金刚石刀具精密切削加工,精密与超精密磨料加工,挤压珩磨加工,磨料喷射加工,磁性磨料研磨加工,车铣加工,超声波加工,旋压、辊挤、摆碾、楔横轧、累积叠轧、等通道角挤压、高压扭转加工;第4章介绍了利用电腐蚀进行精密与特种加工的工艺方法,包括电火花加工、电火花线切割、电化学加工;第5章介绍了利用局部聚能进行精密与特种加工的工艺方法,包括激光加工,电子束、离子束、等离子体加工,超高压水射流切割加工;第6章介绍了目前常用的主要微小零件的纳米加工方法,包括LIGA和准LIGA加工、扫描隧道显微加工。

本书各章的编者如下:第1、2、3章由新乡学院张国智编写,第4、6章由大连大学王元刚编写;第5章由河南工业大学王中营编写。全书由张国智任主编并统稿。

本书具有以下特色:

(1)紧跟科技发展前沿,彰显科技发展的时代特色。精密与特种加工技术变革、更新速度快,因而,本书收集了近几十年来的国内外大量的文献,并涵盖了近十年来发展应用的精密与特种加工技术,如深度塑性加工方法等,并收集了最新的研究成果。

(2)逻辑结构清晰,系统性强。精密与特种加工技术涉及的内容多,而且比较杂,系统性差。本书基于加工的机理及本质,归纳总结了精密与特种加工技术的脉络,提出了全新的课程结构,并给出了逻辑结构好、系统性强、宏观微观课程体系。

(3)以加工设计方法的机理本质分析为工艺分析基础。本书增加了工艺功能设计方法的介绍,目的是为精密与特种加工技术的工艺分析提供方法基础,并结合典型的精密与

特种加工工艺,进行了案例解析,从而有助于读者深入理解精密与特种加工技术产生的机理与本质。

由于本书涉及的内容广而杂,而且编写时间仓促,加上作者水平有限,书中错误、纰漏之处在所难免,欢迎广大读者、业内人士、专家批评指正。

书中有任何问题都请与本书主编联系。主编邮箱:guozhi\_z@126.com。

编 者

2012年8月



# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	(1)
1.1 精密与特种加工技术的工程背景 .....	(1)
1.2 精密与特种加工技术的特点 .....	(1)
1.3 精密与特种加工技术的分类及课程体系 .....	(2)
1.4 精密与特种加工技术的应用现状及发展趋势 .....	(4)
<b>第 2 章 工艺功能设计方法</b> .....	(7)
2.1 工艺功能的相关定义 .....	(7)
2.2 物-场分析法及工艺系统的三要素 .....	(7)
2.3 工艺功能的设计思路 .....	(7)
<b>第 3 章 机械强力加工方法</b> .....	(10)
3.1 去除加工方法.....	(10)
3.2 变形加工方法.....	(45)
<b>第 4 章 电腐蚀加工方法</b> .....	(57)
4.1 电火花加工.....	(57)
4.2 电火花线切割加工.....	(85)
4.3 电化学加工 .....	(102)
<b>第 5 章 局部聚能加工方法</b> .....	(124)
5.1 激光加工 .....	(124)
5.2 电子束、离子束、等离子体加工 .....	(142)
5.3 超高压水射流切割加工 .....	(155)
<b>第 6 章 纳米加工方法</b> .....	(162)
6.1 纳米加工的物理实质及应用现状 .....	(162)
6.2 纳米加工精度 .....	(165)
6.3 典型的纳米加工方法 .....	(168)
<b>参考文献</b> .....	(174)

# 第 1 章 概 论

## 1.1 精密与特种加工技术的工程背景

制造技术是促进社会发展的潜动力,也是发展较早的科学技术,目前已有几千年的发展历史,经历了石器时代、铜器时代、铁器时代、现代的高分子塑料时代,从手工制作、机器制造发展到现代的智能控制自动化制造阶段,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。同时,随着科学技术的迅速发展,新型工程材料不断涌现和被采用,工件的复杂程度以及要求的加工精度越来越高,对机械制造工艺技术提出了更高的要求。由于受刀具材料性能、结构、设备加工能力的限制,使用传统的切削加工方法很难完成对高强度、高韧度、高硬度、高脆性、耐高温和磁性等性能新材料,以及精密复杂、微细构件和难以处理的形状的加工。为了解决这些制造业加工的难题、适应时代的发展需要,精密与特种加工技术应运而生。

此外,精密与特种加工技术是先进制造技术的重要组成部分。随着精密与特种加工技术的发展,一方面,计算机技术、信息技术、自动化技术等精密与特种加工中广泛应用,逐步实现了加工工艺及加工过程的系统集成,另一方面,精密与特种加工充分体现了学科的综合性和专业之间的渗透、交叉、融合性。目前,精密与特种加工技术已成为一个国家制造业水平的重要标志,对机械工业、航天工业、化学工艺等,尤其是国防工业的技术提升起着至关重要的作用。近年来,国家有关部门将精密与特种加工技术列为关键技术,并已制定发展规划准备付诸实施,精密与特种加工技术迎来了前所未有的飞速发展时机。

再者,精密与特种加工技术的产生也是为了解决以下一系列机械制造业所面临的瓶颈问题。

(1) 各种难切削材料的加工问题。如硬质合金、钛合金、耐热钢、淬火钢、不锈钢、金刚石、石英、锗、硅等各种高硬度、高强度、高韧度、脆性强的金属及非金属材料的加工。

(2) 各种特殊复杂型面的加工问题。如喷气涡轮机叶片、整体涡轮、发动机机匣、锻压模等的立体成形表面,各种冲模、冷拔模等特殊断面的型孔,以及炮管内膛线、喷油嘴等的加工。

(3) 各种超精密、光整零件的加工问题。如表面质量和精度要求很高的航空航天陀螺仪、精密光学透镜、激光核聚变的曲面镜、高灵敏度的红外传感器等零件的精细表面加工,该类零件的形状和尺寸精度要求在  $0.1\ \mu\text{m}$  以上,其表面粗糙度  $Ra$  值要求在  $0.01\ \mu\text{m}$  以下。

(4) 特殊零件的加工问题。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,以及细长轴、薄壁零件、弹性元件等低刚度零件的加工。

## 1.2 精密与特种加工技术的特点

精密与特种加工技术是一门多学科综合的高级技术,精密加工的范畴包括微细加工、光整加工和精整加工等,与特种加工技术关系密切,而且很多精密加工是由特种加工技术实现的。

特种加工(又称非传统加工)是第二次世界大战后发展起来的一类有别于传统切削与磨削

加工方法的总称。特种加工方法将电、磁、声、光等物理量及化学能量或其组合直接施加在工件被加工的部位上,从而使材料被去除、累加、变形或性能改变等。用特种加工方法可以完成用传统加工方法难以实现的加工,如高强度、高韧度、高硬度、高脆性、耐高温材料和工程陶瓷、磁性材料等难加工材料的加工,以及精密、微细、复杂形状零件的加工等。特种加工技术有以下五个特点。

(1) 加工方法主要不是依靠机械能,而是用其他能量(如电能、光能、声能、热能、化学能等)去除材料。

(2) 传统加工方法要求刀具的硬度必须大于工件的硬度,即“以硬切软”,而对于特种加工,由于工具不受显著切削力的作用,特种加工对工具和工件的强度、硬度和刚度均没有严格要求。

(3) 加工没有明显的切削力作用,一般不会产生加工硬化现象,又由于工件加工部位变形小、发热少,或发热仅局限于工件表层加工部位,工件热变形小,由加工产生的应力也小,易于获得好的加工质量,且可在一次安装中完成工件的粗、精加工。

(4) 特种加工中能量易于转换和控制,有利于保证加工精度和提高效率。

(5) 特种加工方法的材料去除速度一般低于常规加工方法,这也是目前常规加工方法在机械加工中仍占主导地位的主要原因。

## 1.3 精密与特种加工技术的分类及课程体系

### 1.3.1 基于加工成形原理的分类

精密与特种加工技术从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。

(1) 去除加工 又称分离加工,是从工件上去除多余材料的加工,例如金刚石刀具精密车削、精密磨削、电火花加工、车铣加工等。

(2) 结合加工 它是利用物理和化学方法将不同材料结合(bonding)在一起的加工方法,按结合的机理、方法、强弱等又可分为附着(deposition)、注入(injection)、连接(jointed)三种。附着加工又称沉积加工,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。注入加工又称深入加工,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理、化学反应,以改变工件表层材料性质及力学性能,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、黏结等。

(3) 变形加工 又称流动加工,是利用力、热、分子运动等手段使工件产生变形,改变尺寸、形状和性能,例如锻造、铸造等。

从材料在加工过程中的流动来分析,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的加工,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的加工,这种流动称为汇合流。变形加工是指在加工过程中工件材料基本不变的加工,这种流动称为直通流。

此外,近年来,提出和发展了电铸、晶体生长、分子束外延、快速成形加工等加工方法,突破了传统加工大多局限于分离去除加工和表面结合加工的概念。特别是快速成形加工,它是一种利用离散、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,可按二维实体成形,再叠加而得到所需零件的原型。

### 1.3.2 基于加工方法机理的分类

从加工方法的机理来分类,精密与特种加工技术可分为传统加工、非传统加工、复合加工。

(1) 传统加工 它是指使用刀具进行的切削加工以及磨削加工。

(2) 非传统加工 它是指利用机、电、声、热、化学、磁、原子能等能源来进行的加工。

(3) 复合加工 它是指采用多种加工方法的复合作用进行加工,其中包括传统加工和非传统加工的复合、非传统加工与非传统加工的复合,因而,此种加工方式是一种多加工方法优势互补、相辅相成的加工方式。

目前,在制造业中,占主要地位的仍然是传统加工,而非传统加工和复合加工是加工制造业中极其重要的发展方向。

### 1.3.3 精密与特种加工技术的课程体系

精密与特种加工技术是一门涉及面广、更新快的机械类专业课程。近年来,随着微电子技术、计算机技术、自动控制技术等技术的发展飞速,精密与特种加工技术也发生了飞跃式的发展,因而,该课程对于机械工程专业本科生专业素养的培养和专业知识面的拓展也异常重要。但该课程的课程体系较为分散,逻辑联系不是很紧密,因而,课程体系的改革至关重要。本书提出了如图 1.1 所示的课程体系,该体系分为宏观课程体系和微观课程体系,其中宏观课程体系表征了该课程的重点及教学核心,微观课程体系将课程内容根据精密与特种加工技术的分类方法及工艺机理进行了归类。从图 1.1 中可见,该体系结构紧密,课程主线清晰,在教育改革的背景下,在缩减学时的同时而不减少主要教学内容,有利于提高授课的效率,也便于学生复习,适应了科技飞速发展的数字化新时代对机械工程专业教学的要求。

同时,所有的精密与特种加工工艺均可用工艺功能设计方法来分析、解释,应用该方法还可构思新的精密与特种加工工艺,因而,本书在以上微观课程体系基础上介绍了工艺功能设计方法。

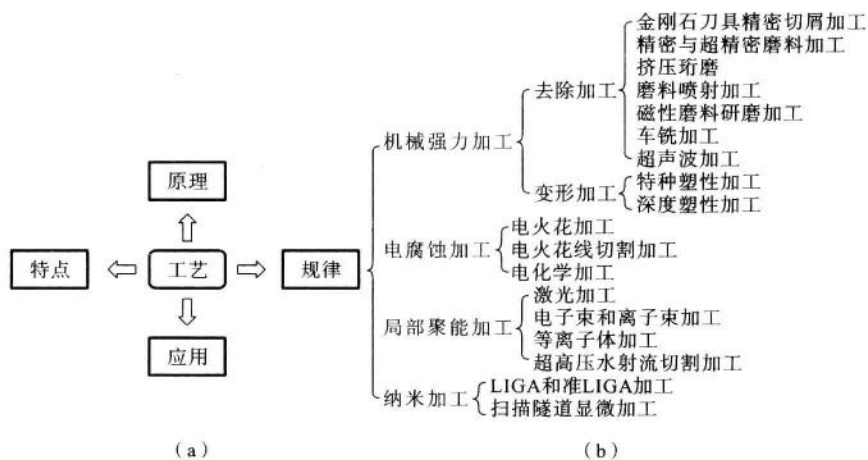


图 1.1 课程体系

(a) 宏观课程体系; (b) 微观课程体系

## 1.4 精密与特种加工技术的应用现状及发展趋势

### 1.4.1 精密与特种加工技术的应用现状

在航空航天、武器装备及发动机的设计中,整体构件设计被越来越多地采用,如图 1.2 所示的整体叶轮、整体径向扩压器、整体机匣等。整体构件的设计制造逐渐成为航空航天、武器装备及发动机设计制造的发展方向,对于实现武器装备轻量化、小型化、自动化、精确打击、全寿命可靠、高性能价格比等目标,具有重要推动作用。另外,在现代高速列车、大型船舶、先进涡轮机械等工业产品中,整体构件设计也逐渐获得应用,对于提高功率、提高速度、提高产品可靠性,以及节能减排、改善环境,都具有重大意义。

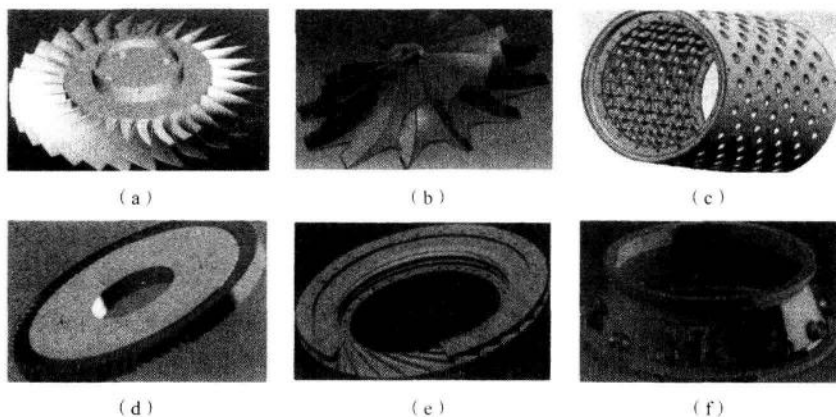


图 1.2 典型构件

(a) 整体叶轮 1(敞开式);(b) 整体叶轮 2(敞开式);(c) 导弹壳体(筒式薄壁件);  
(d) 带冠整体叶轮(半封闭式);(e) 整体径向扩压器(封闭式);(f) 整体机匣(筒式薄壁件)

然而,由于整体构件的几何构形复杂并且材料难以加工,其整体制造已经成为世界性制造技术难题,各先进工业国都在努力研究开发相关制造技术,以求优质、高效、低成本、快速地完成整体制造。对于一般由不锈钢、铝合金、甚至部分由钛合金材料制成,加工可达性较好的敞开式整体构件,利用传统加工工艺(如数控铣削、精密铸造等)已经能够较好地完成加工,即便如此,国外发达国家仍在大力研究新工艺、新方法,以求降低生产成本、提高加工精度;但对于如图 1.2 所示的高温合金等难切削材料制成,加工可达性很差的闭式、半闭式薄壁整体构件的整体制造,采用传统加工工艺存在较多问题,特种加工技术将是解决其加工问题的首选工艺方法,尤其在实现真正的整体制造(非传统上的先进行分体加工,然后再装配连接或焊接成整体构件的制造)中将占有重要地位。

精密与特种加工技术已经广泛应用于军工生产,其中整体叶轮的电解加工是目前比较成功的应用案例。整体叶轮的叶形呈弯扭态,叶身超薄,叶片进、排气边曲率变化急剧,两相邻叶片间通道狭窄,同时广泛采用高温合金、钛合金等难加工材料,精度、表面质量等方面的技术要求也十分苛刻,这些特点给其制造带来了极大困难。根据德国最大的航空发动机制造集团——MTU 的分析,在今后的 10~15 年,整体叶轮的主要制造方法有三种,分别是:电解加工、数控铣削和线性摩擦焊。其中线性摩擦焊占不到 10% 的份额(现有份额不足 1%),电解加

工和高速切削各占45%左右,而对于军用航空发动机,电解加工所占比例更大。图1.3所示为南京航空航天大学研制的数控电解加工设备和利用该设备加工的整体叶轮。

精密与特种加工技术在生产应用中有很多种类,根据其工作机理大致可以分为以下四种类别。

(1) 电气特种加工 它是利用金属在直流电场和电解液中产生阳极溶解的电化学原理对工件进行成形加工的一种方法,通常称为电化学加工或电解加工。它包括电解液冲刷加工、成形管电解加工、电化学抛光、电解磨削、电化学削平加工等方法。它适用于磨削、成形、去毛刺、车削、抛光,以及复杂型腔、型面及型孔等的加工。

(2) 机械特种加工 它不同于传统切削加工方法,是用机械能或间接用声能、热能、电化学能进行加工,可分为磨料流动加工、磨料喷射加工、高速流体加工、阳极机械切割、低应力磨削、热辅助加工、超声波加工、全成形加工等方法。它适用于切割、穿孔、研磨、去毛刺、蚀刻、磨削、拉削、铰削和套料等加工。

(3) 化学特种加工 化学特种加工是指利用化学溶液酸、碱、盐等使金属发生化学反应,使金属腐蚀、溶解而改变工件尺寸和形状的一种加工方法。

它可分为化学加工、光化学加工和热化学加工等,主要有化学铣切加工、照相制版加工、光刻加工、蚀刻加工和爆炸加工等方法。

(4) 热特种加工 热特种加工是用电子束、激光束、等离子束、电火花放电产生热量来熔蚀金属而达到加工目的的。它包括电子束加工、电火花磨削、电火花成形加工、电火花切割、电火花线切割、激光加工、离子束加工、等离子体加工等。

特种加工技术虽然解决了传统的机械加工无法解决的问题,提高了材料的可加工性,获得了很大的经济效益,但是也存在着以下一些不足:

(1) 一些特种加工技术的加工机理尚不明确,加工工艺参数目前无法定量计算,且加工过程比较复杂,不容易控制。

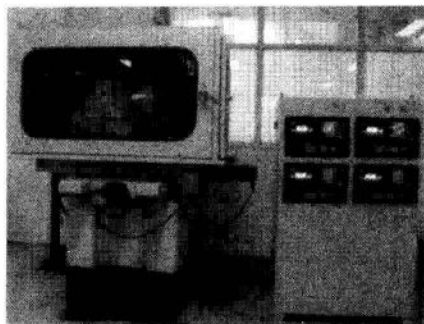
(2) 加工过程会对环境产生污染,如电化学加工,在加工过程中产生的废渣和有害气体会对环境和人体健康构成威胁。

(3) 加工精度和生产率还有待提高,而且需要解决加工精度和生产率的关系问题,在提高加工精度的同时,生产率也应提高,而不是下降。

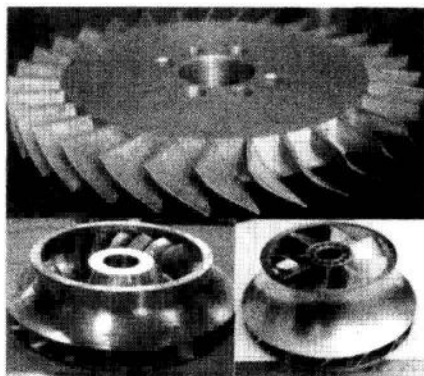
(4) 一些特种加工设备复杂,设备成本较高,使用和维修费用也较高。

#### 1.4.2 精密与特种加工技术的发展趋势

在新型航空航天、武器装备中大量采用的新结构、新材料,为精密与特种加工技术的发展



(a)



(b)

图 1.3 南京航空航天大学研制的数控电解加工设备和加工的整体叶轮

(a) 数控电解加工设备;(b) 整体叶轮



提供了广阔的应用前景,为了更加优质、高效、低成本地加工零件,各先进工业国大力创新发展精密与特种加工新技术,其发展趋势如下:

(1) 向着更加稳定、更加优质、更加高效的加工目标高速发展。整体构件上一般分布着几十、甚至上百个结构复杂的型腔、型面,且精度和表面质量要求高,因此,如何提高整体构件的加工精度、加工稳定性和加工效率,从而降低加工成本,对推广整体构件特种加工技术,具有重要作用。

(2) 基于加工原理拓展新加工技术。如为改进特种加工性能而发展新技术措施,或者寻求复合加工技术途径,以解决特殊材料、特殊结构、特殊要求(如高精度微细加工)方面的难题,是特种加工技术的重要发展趋势。

(3) 基于技术集成创新加工技术。如将两种或两种以上的加工工艺进行有机组合,合理应用相关数字化制造技术,进行技术集成创新,是整体构件特种加工技术的主要发展方向,尤其是对于闭式整体构件的整体制造,提升关键构件的可加工能力,具有独特的优势和广阔的发展空间。

(4) 研制高精度、高可靠性的特种加工装备。加工装备是实现加工技术的载体,没有先进的加工设备就难以在生产中实现先进的加工技术,而先进加工设备的设计又来源于先进加工技术构思的指导。创新、发展、完善一项加工技术,是从研制最初的工艺试验装置开始,到最终完善、落实到可以实现该先进加工技术的工艺设备。

(5) 扩大推广应用,在应用中发展提高。精密与特种加工是一种机械、电气、物理、化学、力学、计算机控制等众多学科交叉的集成技术,其生命力在于创造条件推广应用,在应用中继续解决具体的技术问题,从而使整体技术水平得到进一步发展和提高。

## 第 2 章 工艺功能设计方法

### 2.1 工艺功能的相关定义

工艺功能是指对被加工对象实施加工的功能。通过加工,可以改变被加工对象的形状、体积、表面形貌、材料状态和内在品质。

对被加工对象实施加工的过程就是对其施加某种作用,这种作用要以某种场作为媒介施加给被加工对象,而这种场的建立与边界条件有关。在工艺功能分析中,将用于构造场所需边界条件的实体称为工作头。

### 2.2 物-场分析法及工艺系统的三要素

#### 2.2.1 物-场分析法的基本思路

针对工艺功能的创新设计问题,苏联的一些科学家提出了一种分析方法,称为物-场分析法(substance-field)。物-场分析法认为:在任何一个最基本的工艺功能类技术系统中,至少存在一种被加工对象(物质 2)、一种工作头(物质 1)和一种作用方式(场),工作头(物质 1)通过某种作用方式(场)对被加工对象(物质 2)施加作用,实现对被加工对象的加工功能。工作头也称为工艺功能的主体,例如常见工艺系统中的刀具、工具等。被加工对象也称为工艺功能的客体,例如常见工艺系统中的工件、物料等。场是工作头对被加工对象实施作用的媒介,可以是重力场、引力场、电场、磁场、声场、光场、温度场、结构场等物理场,也可以是化学反应、生物作用等。

#### 2.2.2 工艺系统的三要素

构建工艺功能需要首先选择作用方式,即选择作用场的类型,然后确定施加场作用的工作头,包括确定工作头的材料、形状、运动轨迹和运动速度等。工艺系统中的作用场、工作头的形状和工作头的运动方式称为工艺系统的三要素。

### 2.3 工艺功能的设计思路

由于工艺功能系统原理方案设计中可以选择和变换的因素很多,所以具有很大的创造空间,也是新的制造工艺层出不穷的主要原因。在设计工艺功能时,由于问题的前提条件和设计所追求的目标不同,应采用不同的设计思路,现详细介绍常用的四种主要设计思路。

#### 2.3.1 为新的工艺系统选择作用场和工作头

当需要构造的是尚不存在的新的工艺系统时,首先应广泛地探索可能对被加工对象实施作用的各种场的形式。例如:当需要对工件进行抛光的工艺系统时,应首先广泛地探索能施加

电场、磁场、声场、光场等各种作用场而对工件进行抛光的可能性、加工精度等,同时构思施加这种作用场的工作头的形状及运动方式。

在为新的工艺系统选择作用场和工作头时,既要积极地在相近似的工艺系统中寻求有益的技术要素,又要注意避免过分地受到这些已有的工艺系统解决问题方法的约束,限制设计者探索新方法的范围。

例如,当需要对工件打精密异形孔的工艺系统时,不要将探索局限于通常采用的钻孔等常用的工艺系统的范围内,要选择其他更适合于进行打精密异形孔的作用场、工作头形状和运动方式。

又如,人类在手工切碎不同种类的食物时,大都通过人手驱动刀具进行直线往复的切削运动和进给运动来完成,但是通过机械装置实现直线往复运动的成本和难度远大于实现连续的旋转运动的成本和难度,所以,在实现此类作用的机械设备中,更多地采用连续旋转运动来代替直线往复运动。

再如,长期以来,人们试图通过化学反应来实现复印功能,但都失败了,探索的失败说明在化学功能领域很难找到适合于实现复印功能的方法,后来,美国人卡尔逊在物理功能领域中探索,最终发明了现在被广泛采用的静电复印技术。

此外,作用场和工作头的选择还与设计者所追求的设计目标紧密相关。例如,要对工件进行切割:若要求适合切割高硬度、高脆性材料,这时可选择激光加工;若要求切割后工件无表面残余应力,这时可选择超高压水切割。

### 2.3.2 改善已有工艺系统的作用场和工作头

在对已经存在的工艺系统进行改进时,可以针对工艺系统在使用中表现出来的缺陷,通过改变工作头的材料、尺寸、形状、运动方式以及作用场的各种作用参数,完善已有的工艺过程,改善工艺性能。

例如,在平板玻璃制造工艺中,长期采用垂直引上法来进行平板玻璃成形,即将处于熔融状态的玻璃从熔池中不断地向上牵引,使玻璃一边不断上升一边不断凝固,并通过轧辊的间距控制平板玻璃成形后的形状和尺寸。由于轧辊的表面尺寸、形状、位置误差,表面形貌及工作中的振动等因素,用这种方法制造的平板玻璃表面不可避免地存在波纹、厚度不均等表面缺陷。通过不断地探索改进,现在普遍采用的是浮法玻璃制造工艺,该方法是使熔融态的玻璃在低熔点、高密度的液态金属表面上一边向前流动一边凝固,用这种方法制造的平板玻璃表面既平整又光洁。在该种方法中,低熔点、高密度的液态金属为工作头,作用场是重力场,重力场中的液态金属为处在凝固过程中的玻璃提供了非常平整、光洁的支承平面,有效地避免了产生如波纹、厚度不均等表面缺陷。

又如,在使用钻头钻孔时,钻头的切削力与钻削速度、钻屑厚度和钻屑宽度有关,切削力与钻屑厚度和钻削宽度成正比,对钻屑宽度更敏感,而对钻屑厚度不敏感。在切削效率相同的条件下,适当地增大钻屑厚度、减小钻屑宽度,有利于减小切削力和切削热。对于传统的普通麻花钻头,钻屑厚度等于两条切削刃的总长度,通过在切削刃上刃磨出分屑槽,可有效地使钻屑长度减小、厚度增加,进而有效地提高钻孔的效率和钻削的质量。

### 2.3.3 为已有的工艺系统添加新的作用场和工作头

为了改善已有工艺系统的加工精度、加工效率等,可以在同一个工艺系统中使用多种工作