

普通高等教育“十二五”规划教材

# 精密与特种加工

◎ 王贵成 王振龙 主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

# 精密与特种加工

主 编 王贵成 王振龙  
副主编 王树林 任家隆  
参 编 任旭东 翁江翔



机械工业出版社

本书涵盖了原机械类专业教学中精密和超精密加工、特种加工及微细加工等课程的主要内容。全书以系统讲述精细加工工艺技术为主线,以阐明先进加工制造工艺的基本原理和方法为基础,以实现机械、物理、化学和复合加工的综合交叉和融合为重点,以培养学生工程能力和创新能力为目标,构建出集精密加工、特种加工和复合加工技术为一体的现代精密与特种加工技术课程新体系。

本书分为七章。内容包括:概论,精密和超精密切削加工,精密和超精密磨削加工,电火花加工,电化学加工,高能束加工和复合加工,较系统地反映了国内外本领域最新成果及发展趋势。

本书可作为高等工科院校机械类及相关专业的教材,也可供从事精密加工、特种加工和微细加工等技术研究的工程技术人员和研究生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

精密与特种加工/王贵成,王振龙主编. —北京:机械工业出版社, 2013.5

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-41957-0

I. ①精… II. ①王… III. ①精密切削—高等学校—教材②特种加工—高等学校—教材 IV. ①TG506.9②TG66

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第061216号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘小慧 责任编辑:刘小慧 张丹丹 冯 钡

版式设计:潘 蕊 责任校对:张玉琴 肖 琳

封面设计:张 静 责任印制:乔 宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2013年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16印张·395千字

标准书号:ISBN 978-7-111-41957-0

定价:29.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

为适应教育部颁布的最新本科专业目录（2012年版）中机械类专业，特别是“机械设计制造及其自动化”专业的教学需要，按照教育部普通高等学校机械学科教学指导委员会关于课程教学的有关要求，我们结合先进加工制造工艺技术发展及近年来系统开展的机械类专业教学内容和课程体系改革的研究与实践，将原机械类专业《精密和超精密加工》、《特种加工》和《微细加工》课程的主要教学内容进行系统整合与集成，编写出《精密与特种加工》一书。

本书以系统讲述精细加工工艺为主线，以阐明先进加工制造工艺原理和方法为基础，以实现机械、物理、化学和复合加工的综合交叉与融合为重点，以培养和激发学生的创新意识、创新思维和创新能力的目标，以利于构建出集精密加工、特种加工和复合加工技术为一体的现代精密与特种加工技术课程新体系。

本书编写是新时期机械类专业创新人才培养中教学内容和课程体系改革的一种尝试，在以下几个方面进行了大胆探索：

## 1. 注重先进性

机械制造技术的基础是制造工艺，只有优化传统加工工艺，以及开发新型加工工艺等，才能实现机械零（部）件的优质、高效、低耗、柔性和洁净化加工目标。本书在内容取舍方面，将精密加工、特种加工和复合加工方法与技术有机地融为一体，在确保其系统完整的基础上，注重其学术思想和技术上的先进性，尽可能吸纳国内外先进制造技术领域及相关领域取得的最新成果，以利于拓宽学生的学术视野，主动适应机械科学的新发展及制造企业（集团）的新需求，使教材具有鲜明的时代特征。

## 2. 强化综合性

机械制造技术的发展呈现出高度分化又高度综合，以高度综合为主的趋势，特别是材料科学、信息科学和控制理论与技术的发展，使得本学科专业与相关学科专业之间融合与渗透力度不断加大，导致其学科专业所属技术的特征逐渐淡化，新型复合技术及方法的比重显著增加。本书在系统构建方面，强化了技术与方法的综合交叉，努力增强学生综合分析问题的能力，逐步树立大工程学习观和大工程系统观。

## 3. 突出实用性

精密加工、特种加工和复合加工是现代机械制造业生产中常用的最重要的加工方法，也是先进加工制造工艺技术的内容。本书在工程实例选用方面，尽可能结合精密与特种加工生产实际，突出其典型性、系统性和实用性，以利于培养和提高学生解决工程实际问题的能力。此外，为本课程涉及的主要专业术语和词组加注了英语单词或词组，以适应学生英语能力不断提高的新形势及深化国际学术交流的迫切需要。

参加本书各章节编写的人员为：第1章和第3章，王贵成；第2章，王树林、王贵成；第4章和第5章，王振龙；第6章，任旭东、翁江翔；第7章，任家隆。全书由王贵成和王振龙任主编，王树林和任家隆任副主编。

本书的编写是教学改革的一种尝试，加之作者水平所限，错误和不足之处恳请广大师生及读者给予批评指正。

编 者  
于镇江金山

# 目 录

## 前言

### 第 1 章 概论 ..... 1

- 1.1 精密与特种加工技术的形成及作用 ..... 1
- 1.2 精密与特种加工方法及分类 ..... 2
- 1.3 精密与特种加工技术的发展展望 ..... 5

### 第 2 章 精密和超精密切削加工 ..... 8

- 2.1 概述 ..... 8
  - 2.1.1 精密和超精密切削加工分类 ..... 8
  - 2.1.2 精密和超精密切削加工与经济性 ..... 8
  - 2.1.3 实现精密和超精密加工的基本条件 ..... 9
- 2.2 超精密机床 ..... 11
  - 2.2.1 超精密机床的特征及分类 ..... 11
  - 2.2.2 超精密机床的关键部件及其系统 ..... 13
  - 2.2.3 在线检测与误差补偿技术 ..... 24
  - 2.2.4 典型超精密机床简介 ..... 26
- 2.3 金刚石刀具及切削机理 ..... 28
  - 2.3.1 金刚石特性及金刚石刀具 ..... 28
  - 2.3.2 切削变形及切削过程 ..... 36
  - 2.3.3 刀具磨损、破损及寿命 ..... 39
- 2.4 精密切削加工零件的棱边(毛刺)质量 ..... 43
  - 2.4.1 毛刺的特征参数及分类体系 ..... 43
  - 2.4.2 毛刺形成与变化的基本规律 ..... 46
  - 2.4.3 主动控制毛刺的方法及途径 ..... 51
- 2.5 精密和超精密切削技术应用 ..... 55
  - 2.5.1 磁盘基片的精密切削 ..... 55
  - 2.5.2 光学元器件的精密切削 ..... 59
  - 2.5.3 SiC 晶须增强铝基复合材料的超精密切削 ..... 62
  - 2.5.4 陶瓷材料的精密切削 ..... 64

思考题与习题 ..... 67

### 第 3 章 精密和超精密磨削加工 ..... 68

- 3.1 概述 ..... 68
  - 3.1.1 精密和超精密磨削加工方法 ..... 68

- 3.1.2 精密磨削磨具和超精密磨削磨具 ..... 70
  - 3.2 普通磨料砂轮精密磨削 ..... 75
    - 3.2.1 精密磨床 ..... 75
    - 3.2.2 精密磨削过程及磨削力 ..... 77
    - 3.2.3 精密磨削温度和磨削液 ..... 80
    - 3.2.4 普通砂轮精密磨削机理 ..... 83
    - 3.2.5 磨削质量和裂纹控制 ..... 84
  - 3.3 超硬磨料砂轮精密磨削 ..... 89
    - 3.3.1 超硬磨料砂轮精密磨削特点 ..... 89
    - 3.3.2 超硬磨料砂轮磨床 ..... 90
    - 3.3.3 超硬磨料砂轮磨削工艺 ..... 91
  - 3.4 精密和超精密磨削砂轮的选择与修整 ..... 92
    - 3.4.1 精密磨削砂轮的选择 ..... 92
    - 3.4.2 精密磨削砂轮的修整 ..... 93
    - 3.4.3 超硬磨料砂轮的平衡 ..... 94
    - 3.4.4 超硬磨料砂轮的修整 ..... 95
  - 3.5 超精密磨削加工 ..... 96
    - 3.5.1 超精密磨削加工的特点 ..... 96
    - 3.5.2 超精密磨床 ..... 97
    - 3.5.3 超精密磨削机理 ..... 98
    - 3.5.4 超精密砂带磨削 ..... 99
    - 3.5.5 研磨 ..... 102
- 思考题与习题 ..... 107

### 第 4 章 电火花加工 ..... 108

- 4.1 概述 ..... 108
  - 4.1.1 电火花加工特点及应用领域 ..... 108
  - 4.1.2 电火花加工工艺方法的分类 ..... 109
- 4.2 电火花加工原理 ..... 110
  - 4.2.1 电火花加工形成过程 ..... 110
  - 4.2.2 电火花加工机理 ..... 111
  - 4.2.3 影响材料放电蚀除的主要因素 ..... 114
  - 4.2.4 电火花加工的基本工艺规律 ..... 117
- 4.3 电火花加工机床及应用 ..... 122
  - 4.3.1 电火花成形加工机床 ..... 122

4.3.2 电火花成形加工的应用 .....	130	6.2.3 离子束加工应用 .....	174
4.3.3 电火花线切割加工的应用 .....	138	6.3 电子束加工 .....	185
思考题与习题 .....	139	6.3.1 电子束加工的基本原理 .....	185
<b>第5章 电化学加工</b> .....	140	6.3.2 电子束加工设备 .....	186
5.1 概述 .....	140	6.3.3 电子束加工应用 .....	188
5.1.1 电化学加工方法及分类 .....	140	6.4 激光束加工 .....	192
5.1.2 电化学加工的特点及应用 .....	140	6.4.1 激光束加工的基本原理 .....	192
5.2 电化学加工基本原理 .....	141	6.4.2 激光束加工设备 .....	193
5.2.1 电化学加工过程 .....	141	6.4.3 激光束加工应用 .....	196
5.2.2 影响电化学加工的主要因素及其控制 .....	141	思考题与习题 .....	210
5.3 电解加工 .....	146	<b>第7章 复合加工</b> .....	211
5.3.1 电解加工的基本原理和特点 .....	146	7.1 概述 .....	211
5.3.2 电极反应和电解液 .....	147	7.1.1 复合加工概念及发展 .....	211
5.3.3 电解加工的基本工艺规律 .....	152	7.1.2 复合加工方法及分类 .....	211
5.3.4 电解加工的基本设备 .....	157	7.2 复合切削加工 .....	212
5.3.5 电解加工新工艺 .....	158	7.2.1 超声振动切削 .....	212
5.3.6 电解加工的应用 .....	159	7.2.2 磁化切削加工 .....	217
5.4 阴极沉积加工 .....	163	7.2.3 低(高)温切削加工 .....	220
5.4.1 电铸加工 .....	163	7.3 电解机械复合加工 .....	225
5.4.2 电刷镀加工 .....	166	7.3.1 复合电解磨削 .....	225
5.4.3 复合镀加工 .....	169	7.3.2 复合电解珩磨 .....	230
思考题与习题 .....	169	7.3.3 电解研磨复合光整加工 .....	231
<b>第6章 高能束加工</b> .....	171	7.4 超声电火花(电解)复合加工 .....	237
6.1 概述 .....	171	7.4.1 超声电火花复合加工 .....	237
6.1.1 高能束加工概念及特点 .....	171	7.4.2 超声电解加工 .....	238
6.1.2 高能束加工方法及分类 .....	171	7.5 电解电火花磨削加工 .....	240
6.2 离子束加工 .....	172	7.6 其他复合加工方法简介 .....	243
6.2.1 离子束加工的基本原理 .....	172	思考题与习题 .....	248
6.2.2 离子束加工设备 .....	173	<b>参考文献</b> .....	250

# 第1章 概 论

## 1.1 精密与特种加工技术的形成及作用

近年来,随着航空航天(Aerospace Industry)、核能热电(Nuclear Power Thermoelectric Industry)、化学工业(Chemistry Industry)以及微电子工业(Microelectronics Industry)的快速发展,各种新结构、新材料、复杂形态及微小结构的精密零件大量出现,其结构和形状也越来越复杂,而且此类零部件在加工精度和高可靠性方面也都提出了新的更高要求,这就使得传统的制造工艺技术发展受到了以下严峻挑战:

### 1. 难加工材料的加工问题

随着材料科学(Materials Science)及冶炼(成型)工艺技术的发展,各种新型难加工材料,如硬质合金、钛合金、耐热钢、淬火钢、不锈钢、金刚石、陶瓷、石英及硅等金属和非金属材料相继涌现,它们都具有高硬度、高韧性或高脆性的特征,使用传统的制造工艺技术几乎无法对其进行有效的加工。

### 2. 特殊复杂型面零件的加工问题

面对各种特殊复杂型面(Complex Surface)的零件,如原子锅炉、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,各种冷拔模、冲模等特殊端面的型孔,以及喷油嘴、炮管内膛线、喷丝头上的微小孔、窄缝等的加工;以及特殊零部件的加工,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、薄壁零件、弹性元件等低刚度零件的加工,利用传统的制造方法和工艺技术几乎无法实现其加工。

### 3. 高精度和高可靠性零件的加工问题

随着制造业(Manufacturing Industry)的快速发展,现代机械装备对零部件的加工精度(Processing Accuracy)和可靠性(Reliability)提出了新的更高要求,如航空航天用的陀螺仪、导弹红外探测器中接收红外线的反射镜、激光核裂变用的曲面镜、雷达的关键元件波导管内腔表面、高精度光学透镜等零件的超精密加工(Ultra-precision Machining)或精细表面加工等,其形状和尺寸精度要求在 $0.1\mu\text{m}$ 以上,表面粗糙度 $Ra$ 要求达到 $0.01\mu\text{m}$ 以上,面对如此高精度和高可靠性零件的制造问题,传统切削加工技术几乎是无能为力。

为解决上述传统制造工艺技术(Manufacturing Technology)发展面临的难题,精密与特种加工技术(Precision and Special Processing Technology)逐步形成并成长为先进加工技术的主要发展方向之一,在机械制造技术领域发挥着越来越大的作用。根据国际生产工程学会(College International pour la Recherche en Productique, CIRP)有关研究报告,近年来,在难加工材料、模具及复杂型面和零件精细加工中,有50%以上的精密零件、75%以上的模具与复杂型面及85%以上的精细零件加工是由精密与特种加工方法完成的。可见,精密与特种加工技术已成为先进制造的主要方法和关键技术,从某种意义上讲,精密与特种加工技术已成为衡量一个国家制造业整体水平及核心竞争力的主要标志。

随着经济全球化和制造业国际化,装备制造业已成为一个国家迈向现代化强国的重要基



础。我国制造业对精密与特种加工技术既有强烈的市场需求，又有巨大的发展潜力。目前，我国精密与特种加工的整体水平与工业发达的美国、德国和日本等国家相比还有一定的差距，迫切需要精密与特种加工技术人员顽强拼搏，系统深入地开展精密与特种加工的应用基础研究及推广应用工作。

## 1.2 精密与特种加工方法及分类

精密与特种加工是一门多学科综合的高新技术，它涉及机械学、光学、电子学、声学、热力学、化学、磁学、微细加工学和复合加工学等多个学术领域，其应用基础研究与技术开发工作是一项复杂的系统工程。

依据零件表面加工的成形原理，精密与特种加工的方法可以分为去除加工（也称为分离加工）、结合加工和变形加工（也称为流动加工）三大类（见表 1.1）。

表 1.1 精密与特种加工方法及分类

分 类	加工成形原理		主要加工方法示例
去除加工 (分离加工)	电物理加工 电化学加工、化学加工 力学加工（力喷射）		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、超精加工、珩磨、超声加工、离子溅射加工、等离子体加工、喷射加工
	热物理加工（热蒸发、热扩散、热熔解）		电子束加工、激光加工、脱碳处理、气割
结合加工	附着加工	化学	化学镀、化学气相沉积
		电化学 热物理（热熔化） 力物理	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、气焊、电焊、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		锻造、塑性流动加工（气体火焰、高频电流、热射线、电子束、激光）
	粘滞流动 分子定向		铸造、液体流动加工（金属、塑料、橡胶等注射、压铸）液晶定向

### 1. 去除加工

去除加工（Removal Processing）是将工件上多余的材料直接去除，如金刚石刀具（Diamond Cutting Tool）精密与超精密切削、精密与超精密磨削（Precision and Ultra-precision Grinding）、电火花加工（Electrical Discharge Machining）、电解加工（Electrochemical Machining）、电子束加工（Electron Beam Machining）等。该方法的主要特点是加工效率相对较高，加工过程易于控制及便于实现加工自动化。

### 2. 结合加工

结合加工（Bonding Processing）是利用物理化学的方法将不同的材料结合在一起。按照结合的机理、方法、强弱等又可分为附着（Deposition）、注入（Injection）和连接（Jointed）三种。附着加工又称为沉积加工，是在工件的表面上覆盖一层物质，为弱结合，如电镀气相



沉积等；注入加工又称为渗入加工，是在工件的表面渗入某种元素，使之与工件基体材料产生物化反应，以改变工件表层性能，如表面渗碳、离子注入等；而连接加工是将两种相同或不同的材料通过物化方法连接在一起，如焊接、粘接等。这种方法的主要特点是易于改变工件表层性能及增加零件的表面积，但加工效率不够高。

### 3. 变形加工

变形加工（Deformation Processing）是利用力、热和分子运动等手段使工件产生变形，进而改变其形状、尺寸和性能，如铸造、锻造及液晶定向等。此种方法的主要特点是通过加工可改变工件的形状和尺寸，但加工精度不高。

若按照零件加工的原理进行分类，则精密与特种加工也可分为传统加工（Traditional Processing）、非传统加工（Non-traditional Processing）和复合加工（Combined Machining）等。传统加工是指用刀具进行的切削加工和磨削加工方法；非传统加工是指利用机械能、电能、光能、声能、热能、化学能、磁能和原子能等对材料进行的特种加工方法；而复合加工是指采用两种或两种以上方法进行的加工，其中包括传统加工和非传统加工的复合，非传统加工和非传统加工的复合，从而使其优势互补，相辅相成。

表 1.2 列出了常用的精密与特种加工方法。目前，在制造业生产中，传统加工方法仍占主导地位，而非传统加工和复合加工是极其重要的发展方向，具有广阔的工程应用前景。

表 1.2 常用的精密与特种加工方法

分 类	加工方法		加工工具	精度/ $\mu\text{m}$	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	1 ~ 0.1	0.05 ~ 0.008	金刚石刀具 有色金属及其合金等软材料 其他材料刀具 各种材料	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					印制电路板、石墨模具、喷嘴
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	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					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	黑色金属等	外圆去飞边
		滚动研磨	固结磨料、游离磨料、化学或电解作用液体				型腔

(续)

分类	加工方法		加工工具	精度/ $\mu\text{m}$	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	被加工材料	应用
磨料加工	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	粘弹性物质 磨料	5	0.01	黑色金属等	型面、型腔 去飞边、倒棱
		喷射加工	磨料 液体	5	0.01 ~ 0.002	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	
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、煤油、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（如印制电路板）

(续)

分 类	加工方法		加工工具	精度/ $\mu\text{m}$	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	被加工材料	应 用
特种加工	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、钹丝)、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、切削
	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、镀膜、焊接、蚀刻
	离子束加工	离子束去除加工	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
		离子束附着加工		1 ~ 0.1	0.02 ~ 0.01		镀膜
离子束结合加工					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	精密电解磨削	工具极、电解液、砂轮	20 ~ 1	0.08 ~ 0.01	导电黑色金属、硬质合金	轧辊、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

### 1.3 精密与特种加工技术的发展展望

机械制造业是一个国家迈向工业现代化的重要基础。纵观机械制造业形成与发展历史，

大体上经历了三个主要阶段：传统机械制造技术（Traditional Mechanical Manufacturing Technology）阶段、现代机械制造技术（Modern Mechanical Manufacturing Technology）阶段和先进机械制造技术（Advanced Mechanical Manufacturing Technology）阶段。传统机械制造技术以“物质和能量”为基础，现代机械制造技术以“物质、能量和信息”为特点，而先进机械制造技术是以“物质、能量、信息和智能”为特征。

随着经济全球化和制造业国际化进程加快，先进加工制造工艺技术朝着高效化、精密化、智能化、集成化、数字化和洁净化方向迈进，优质、高效、低耗、柔性和洁净化是机械制造追求的目标。精密与特种加工理论及应用技术开发已成为彰显各国机械制造业核心竞争力的一个重要领域。

近年来，材料科学、计算机科学（Computer Science）与信息技术（Information Technology）、自动控制（Automatic Control Theory）与人工智能理论（Artificial Intelligence Theory）等与机械制造学科密切相关的学术领域也相继取得了长足的进展，为机械科学与制造技术的迅速发展提供了强有力的支撑。首先，制造工艺技术与材料科学、摩擦学、微纳技术交叉，将系统研究高速切削摩擦学、高速切削刀具材料及其涂层技术；其次，制造工艺技术与计算机技术、信息技术、人工智能技术交叉，将全面实现高速切削加工过程建模、仿真，建立高速切削数据库；再次，制造工艺技术与信息技术、微纳技术、控制技术、测试技术交叉，将深入研究高速加工过程的在线监控与故障诊断技术。

目前，我国精密与特种加工技术未来将重点研究的主要内容及发展方向如下：

### 1. 精密和超精密加工

精密和超精密加工包括精密与超精密切削加工技术（Precision And Ultra-precision Machining Technology）和高速与超高速磨削技术（High Speed and Super-high Speed Grinding）。精密与超精密加工技术的科学问题包括：超精密复杂曲面制造技术的理论与方法，微纳加工表面及亚表面完整性的评价与控制，超精密加工装备与新型工具的关键理论与方法。高速与超高速磨削技术的科学问题包括：高速和超高速磨削机理，强力高效磨削工艺及装备的基础理论与关键技术，复杂磨削应力状态下脆/塑性转变理论及硬脆材料磨削损伤学，磨削过程的智能监控理论与技术，新型磨具制备及加工性能定量评价技术及体系。

精密与超精密加工技术的主要发展方向为：精密/超精密切削加工技术，精密/超精密磨削加工技术；工程目标包括研制超光滑曲面加工的工艺和方法，使工件面形精度达到数十纳米和原子级的表面平坦性；提出对微纳米加工表面特性的检测、评价指标和加工条件对表面特性的影响及控制方法，形成表面完整性的评价体系，研制超精密加工装备、新型刀具，实现高效微纳米加工。高速与超高速磨削技术主要研究方向为：高速/超高速磨削技术，硬脆材料及石材高效磨削技术，磨削装备的数控化、智能化及虚拟化，高速和高效磨削的磨料磨具技术；工程目标包括生产效率提高，材料磨除率达到  $2 \times 10^3 \text{ mm}^3/\text{s}$ ；减小磨削力，提高磨削表面质量，磨削钢工件时表面残余应力深度小于  $10 \mu\text{m}$ ；实现对镍基耐热合金和钛合金等难磨材料的高速磨削加工；开发智能砂轮和磨削加工过程的仿真、标准和优化软件；研制微晶氧化铝磨料（SG）砂轮等。

### 2. 特种加工

特种加工包括电加工技术（电火花加工、电化学加工、超声加工）和高能束流加工技术（激光束、电子束、离子束和等离子体束）。电加工技术的主要科学问题为：探索材料去

除与增长相结合的可逆微细电加工技术 (Micro-electrical Processing Technology), 针对特种材料、复杂型面零件的微细电加工, 形成系统化的微细电加工技术体系; 充分发挥特种加工能量形式的多样性, 利用新的能量形式或最新技术发明电加工的新方法和新工艺; 采用新理论、测量手段、计算与仿真方法对电加工的基本现象与基本原理进行深入系统的研究。高能束流加工技术的主要科学问题为: 重点研究激光与材料的相互作用, 及激光与各种金属和非金属材料四种状态 (固态、液态、气态和等离子态) 相互作用的物理、化学、冶金现象和基本规律; 激光加工光束的传输、变换、检测与控制的理论及关键技术; 针对下一代计算机芯片、生物芯片、微机电系统的制造, 研究激光三维微纳制造新工艺、新方法和新技术。

特种加工的主要发展方向为: 进一步深化研究电加工工艺的基本现象、基本原理、基本规律, 探索新的电加工工艺方法; 用新的现代测量方法和观测手段, 从电、磁、光、热、声、力等多个视角对放电的基本现象重新审视和深化研究, 力争在高效、高速度、低损耗加工等方面带来重大突破; 同纳米学科展开交叉, 探讨纳米尺度加工的可能性和有效性; 开展微细电火花加工机床应用于生物医学技术方面的探索与研究, 利用材料科学及相关学科的最新技术提高电加工的效率和质量; 激光光源的小型化和高效化; 综合利用激光与传统热源的优点, 进一步拓展激光加工材料范围、工艺方法和应用领域; 金属零件的激光直接快速成形及微纳制造技术; 离子体弧诊断技术及获取优质弧柱的关键技术, 特别应深化对等离子体弧稳定性、能量分布等共性指标的控制机理等。

### 3. 复合加工

复合加工技术 (Combined Machining Technology) 的科学问题包括: 针对新材料、新结构、新生产需求, 进行多种能量形式的创新复合, 深入揭示其加工机理, 探索并掌握加工规律, 形成新的复合加工方法; 改变零件的内在或表观的材料结构, 提高零件的力学性能; 揭示多种复合加工之间的内在联系和共性问题, 为产生新原理的复合加工建立指导性的基础理论, 构建复合加工的结构体系; 获得超光滑表面 (Ultra Smooth Surface Finishing, USF)、超平坦表面的复合光整加工 (Combined Finishing, CF) 新原理、新方法的探索。

复合加工技术的主要发展方向为: 提高加工精度、表面质量、效率、微细程度, 充分发掘、释放复合加工的潜力和极限, 突出复合加工的目的性和有效性; 针对不断出现的新材料、新结构, 研究满足特殊加工需求的复合加工, 寻求新的复合加工概念及方法; 不仅仅限于零件加工成形, 而是要通过影响和改变零件的内在或表观的材料结构, 提高零件的力学性能, 进一步拓宽复合加工技术应用的新领域。

随着先进加工制造工艺技术的不断发展和完善, 精密与特种加工技术对我国机械制造业实现优质、高效、低耗、清洁和灵活生产将发挥重要作用, 为进一步提高我国机电产品参与国际市场的竞争能力作出新贡献。

## 第 2 章 精密和超精密切削加工

### 2.1 概述

超精密切削是 20 世纪 60 年代发展起来的新技术，它可以直接加工出超光滑表面。超精密切削（Ultra-precision Cutting）可以代替研磨等很费工的手工精加工工序，不仅节省工时，还可以提高零件的加工精度和表面质量。工业发达国家对精密和超精密加工技术极其重视，投入了大量的资金和人力物力开展系统深入的研究，以保证其尖端技术产品处于国际领先地位，进一步提高其产品的国际竞争力。可以说，精密与超精密切削技术的研究及应用水平，已成为衡量一个国家的机械制造技术及制造业水平的重要依据之一。

#### 2.1.1 精密和超精密切削加工分类

根据加工表面及加工刀具的特点，精密和超精密切削加工（Precision and Ultra-precision Machining）可分为精密和超精密车削、铣削、镗削和钻削加工四大类，见表 2.1。

表 2.1 精密和超精密切削加工方法

切削方法	切削工具	精度/ $\mu\text{m}$	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	被加工材料	应用
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	1 ~ 0.1	0.05 ~ 0.008	金刚石刀具：有色金属及其合金等软材料；其他材料刀具：各种材料	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
微孔加工	硬质合金钻头、高速钢钻头	20 ~ 10	0.2		印制电路板、石墨模具、喷嘴

精密切削研究是从金刚石精密车削（PCD precision turning）开始的。应用天然单晶金刚石车刀对铝、铜和其他软金属及其合金进行精密切削加工，可以得到极高的加工精度和极小的表面粗糙度值，从而产生了金刚石精密车削加工方法。在此基础上，又发展了金刚石精密铣削和镗削的加工方法，它们分别用于加工平面、型面和内孔，也可以得到极高的加工精度（Machining Precision）和表面质量（Surface Quality）。金刚石刀具精密切削是当前加工软金属材料最主要的精密加工方法。除金刚石刀具材料外，还发展了立方氮化硼（PCBN）、复方氮化硅（Compound SiN）和复合陶瓷（Composite Ceramic）等新型超硬刀具材料，它们主要用于黑色金属的精密加工。

#### 2.1.2 精密和超精密切削加工与经济性

由于精密加工机床价格昂贵，加工环境与条件要求极高，因此精密加工总是与高加工成本联系在一起。在过去相当长的一段时期，这种观点限制了精密加工的应用范围，它主要应

用于军事、航空航天等部门。近十几年来,随着科学技术的发展和人们生活水平的提高,精密加工产品已进入了国民经济和人民生活的各个领域,其生产方式也从过去的单件小批量生产走向批量生产。在机械制造行业,精密加工机床不再仅用于后方车间加工工具(Machining Tool)、夹具(Fixture)和量具(Measuring Tool),工业发达国家已将精密加工机床直接用于产品零件的精密加工,产生了显著的经济效益。

例如,加工一块直径为100mm的离轴抛物面反射镜,用金刚石精密车削工艺成本只有用研磨—抛光(Polishing)—手工修琢(Manual Dressing)传统工艺成本的十几分之一,而且精度更高,加工周期由12个月缩短为3周。我国精密加工技术比较落后,当前某些精密机械产品尚靠进口,还有些精密产品靠老工人手艺制造,因而废品率极高。例如现在生产的某种高精度惯性仪表,从十几台甚至几十台中才挑选出一台乃至几台合格品,磁盘生产质量尚未完全过关,激光打印机的多面棱镜尚不能生产。

通过精密和超精密切削加工,提高零件的加工精度,还可以达到以下效果:

### 1. 提高产品的稳定性和可靠性

英国Rolls-Royce公司的资料表明,将飞机发动机转子叶片的加工精度由 $60\mu\text{m}$ 提高到 $12\mu\text{m}$ ,加工表面粗糙度由 $Ra0.5\mu\text{m}$ 减小到 $Ra0.2\mu\text{m}$ ,则发动机的压缩效率将从89%提高到94%。20世纪80年代初,苏联从日本引进了四台精密数控铣床,用于加工螺旋桨曲面,使其潜艇的水下航行噪声大幅度下降,即使使用精密的声呐探测装置也很难发现潜艇的行踪,此事震惊了西方的国防部门。

### 2. 促进产品的小型化和微型化

传动齿轮(Gear)的齿形(Tooth Profile)及齿距误差(Pitch Error)直接影响了其传递扭矩(Transfer Torque)的能力。若将该误差从目前的 $3\sim 6\mu\text{m}$ 降低到 $1\mu\text{m}$ ,则齿轮箱单位重量所能传递的扭矩将提高近一倍,从而可使目前的齿轮箱尺寸大大缩小。IBM公司开发的磁盘,其记忆密度由1957年的 $300\text{bit}/\text{cm}^2$ 提高到1982年的254万 $\text{bit}/\text{cm}^2$ ,提高了近1万倍,这在很大程度上应归功于磁盘基片加工精度的提高和表面粗糙度值的减小。

### 3. 增强零件的互换性并推进自动化生产

自动化装配(Automatic Assembly)是提高装配生产率和装配质量的重要手段。自动化装配的前提是零件必须完全互换,这就要求严格控制零件的加工公差,从而导致零件的加工精度要求极高,精密加工使之成为可能。

正因为精密加工具有这些优良的特性,因此得到了世界各国的高度重视。我国必须大力发展精密加工技术,使其为我国国防事业和国民经济发展提供强有力的支撑。

## 2.1.3 实现精密和超精密加工的基本条件

精密和超精密加工技术是一项涉及内容广泛的综合性高新技术。实现精密加工,不仅需要精密的机床设备和工具,也需要稳定的环境条件,还需运用计算技术进行实时检测和反馈补偿,只有将各个领域的技术成果集成起来,才有可能实现和发展精密加工。为了实现精密和超精密加工,必须具备以下基本条件:

### 1. 精密加工机床

精密加工机床(Precision Machine Tool)是实现精密加工的首要条件。各国投入了大量的人力、物力和资金对它进行研究。目前主要研究方向是提高机床主轴(Spindle)的回转



精度，工作台（Workbench）的直线运动精度（Linear Motion Accuracy）以及刀具的微量进给精度（Micro Feed Accuracy）。精密机床主轴轴承要求具有很高的回转精度，转动平稳，无振动，其关键在于主轴轴承。早期的精密主轴采用超精密级的滚动轴承，而目前使用的精密主轴轴承是静、动态性能更加优异的液体静压轴承（Hydrodynamic Journal Bearing）和空气静压轴承（Aerostatic Bearing）。工作台的直线运动精度是由导轨决定的。精密机床使用的导轨有滚动导轨（Rolling Guide）、液体静压导轨（Hydrostatic Slideway）、气浮导轨（Gas Floating Guide）和空气静压导轨（Aerostatic Guide）。为了提高刀具的进给精度，必须使用微量进给装置（Micro Feed Device）。微量进给装置有多种结构形式和多种工作原理，目前只有弹性变形式（Elastic Deformation Form）和电致伸缩式（Electro Striction）微量进给机构比较适用，尤其是电致伸缩微量进给装置，可以进行自动化控制，有较好的动态特性，在精密机床进给系统中得到广泛的应用。

## 2. 金刚石刀具

精密切削加工必须能够均匀地切除极薄的金属层，而微量切除是精密加工的重要特征之一。金刚石刀具（PCD）是精密切削的重要手段。金刚石刀具有两个重要的问题要解决：一是金刚石晶体的晶面选择，这对刀具的使用性能有重要影响；二是金刚石刀具刃口的锋利性，即刀具刃口的圆弧半径，它直接影响到切削加工的最小切削深度，影响到微量切除能力和加工质量。先进国家刃磨金刚石刀具的刃口半径可以达到几个纳米（nm）的水平。我国在这方面的研究相对落后，刃磨金刚石刀具的刃口半径只能达到 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 。另外，当刃口半径小于 $0.01 \mu\text{m}$ 时，必须解决测量上的技术难题。

## 3. 精密切削机理及变化规律

精密切削是微量切削（Minimal Cutting）。微量切削过程中许多变形机理方面的问题都有其特殊性，如积屑瘤（Built-up Edge）的形成，鳞刺（Scale Thorn）的产生，切削参数及加工条件对切削过程的影响，以及它们对加工精度和表面质量的影响，都与常规切削有很大的不同。因此，必须对微量切削机理方面的问题进行深入研究，掌握其变化规律，以便更好地利用精密加工技术提高零件的加工精度和表面质量。

## 4. 稳定的加工环境

精密加工必须在稳定的加工环境下进行，主要包括恒温（Constant Temperature）、防振（Anti Vibration）和空气净化（Air Purification）三个方面的条件。精密加工必须在严格的多层恒温条件下进行，即不仅工作间应保持恒温，还必须对机床本身采取特殊的恒温措施，使加工区的温度变化极小。为了提高精密加工系统的动态稳定性，除在机床结构设计和制造上采取各种减振措施外，还必须用隔振系统来消除外界振动的影响。由于精密加工的加工精度和表面粗糙度要求极高，空气中的尘埃将直接影响加工零件的精度和表面粗糙度，因此必须对加工环境的空气进行净化，对大于某一尺寸的尘埃进行过滤。国外已研制成功了对 $0.1 \mu\text{m}$ 的尘埃有99%净化效率的高效过滤器。

## 5. 误差补偿技术

当加工精度高于一定程度后，若仍然采用提高机床的制造精度，保证加工环境的稳定性等误差预防措施提高加工精度，这将会使成本大幅度增加。这时应采取误差补偿（Error Compensation）措施，即通过消除或抵消误差本身的影响，达到提高加工精度的目的。国外的一些著名精密机床，均采用了误差补偿的方法，取得了很好的效果。

## 6. 精密测量技术

精密加工离不开精密测量技术 (Precision Measurement), 精密加工要求测量精度比加工精度高一个数量级。目前, 精密加工中所使用的测量仪器多以干涉法和高灵敏度电动测微技术为基础, 如激光干涉仪 (Laser Interferometer)、多次光波干涉显微镜 (Multiple Light Wave Interference Microscope) 及重复反射干涉仪 (Repeated Reflection Interferometer) 等。国外广泛采用非接触式测量方法并研究原子级精度的测量技术。Johanness 公司生产的多次光波干涉显微镜的分辨率为 0.5nm, 最近出现的隧道扫描显微镜的分辨率为 0.01nm, 是目前世界上精度最高的测量仪之一。最新的研究证实, 在扫描隧道显微镜下可移动原子, 实现精密工程的最终目标——原子级精密加工。

## 2.2 超精密机床

超精密机床是实现超精密加工的先决条件。随着加工精度要求的提高和精密加工技术的发展, 机床的精度不断提高, 超精密机床获得了迅速的发展。

第二次世界大战后, 为了满足国防工业和尖端技术发展的需要, 美国率先发展了金刚石刀具精密切削技术, 并为此开发了空气轴承 (Air Bearing) 的高性能精密车床。美国在这方面投入了大量的财力、人力和物力, 并研究开发了超精密切削机床 (Ultra-precision Machining Tool)。超精密机床是综合性新技术的结晶, 它综合应用多项近代新技术, 使精密机床产生质的飞跃。近年来, 精密和超精密切削技术在民用产品中亦得到广泛的应用, 如加工计算机磁盘、复印机的硒鼓、录像机磁鼓、激光打印机的多棱镜等。一些高生产率的中小型超精密机床陆续开发成功。现在美国和日本各有 20 多家工厂和研究所生产超精密机床, 英国、荷兰、德国等工业发达国家也都有工厂、研究所生产和研究开发超精密机床, 并达到了较高的水平。

目前, 美国在超精密机床研发和应用的水平最高, 它不仅有许多工厂生产中小型超精密机床, 而且为了满足国防和尖端技术的需要, 还研究开发了大型超精密机床。早在 1983 年, 美国 Lawrence Livermore 国家实验室就研制了 DTM-3 和 LODTM 大型金刚石超精密车床, 这两台机床是世界公认的水平最高的、达到当时技术最前沿的大型超精密机床。

我国在 20 世纪 60 年代起开始发展精密机床, 经过多年的努力, 已有相当规模, 不仅品种能基本满足生产需要, 而且精度和质量都达到了一定的水平。1987 年北京密云机床研究所研究成功加工球面的 JSC-027 型超精密车床。北京航空精密机械研究所研制成功的空气轴承超精密车床 (Ultra-precision Turning) 和金刚石镗床 (Diamond Boring Machine) 性能良好。哈尔滨工业大学研制成功的装有激光在线测量的空气轴承主轴数控超精密车床, 具有良好的性能。但我国超精密机床的生产和研制起步较晚, 和国外的差距还较大, 一些关键部件还依赖进口。由于涉及许多保密技术, 从国外引进超精密机床受到限制, 因此我们必须加大力度研制性能更优越的超精密机床, 为国防工业和尖端技术的发展创造条件。

### 2.2.1 超精密机床的特征及分类

#### 1. 超精密机床的特征

超精密机床是超精密加工最重要、最基本的加工设备, 具备以下基本技术特征:

(1) 高精度 高精度包括高静精度 (Static Precision) 和高动精度 (Dynamic Precision),