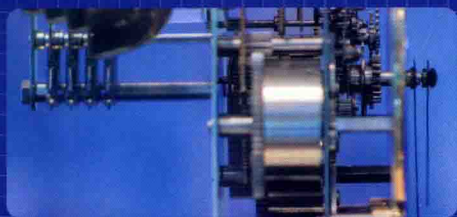
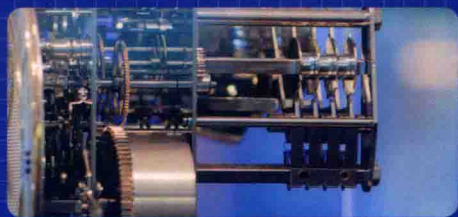


普通高等教育机电类“十三五”规划教材



MACHINE



精密与特种加工技术 (第2版)

主 编 明平美

- 以系统讲述精细与特种加工工艺为目的
- 以加工过程的主要能量来源及其作用形式为主线
- 以阐明各种加工技术的基本原理与方法为基础

 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育机电类“十三五”规划教材

精密与特种加工技术

(第2版)

明平美 主编

郑建新 秦 歌 彭子龙 王 蕾 副主编



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书涵盖了原机械制造类专业教学中精密与超精密加工、特种加工、微细加工与微机电系统、增材制造技术等课程内容,以系统地阐述精密与特种加工工艺为目的,以加工过程的主要能量形式为主线,以实现物理、化学和复合/组合加工的综合交叉为重点,全面构建了集精细加工、特种加工和复合/组合加工等技术为一体的课程内容;阐明了现代加工技术的基本原理与方法,注重培养和激发读者的创新思维 and 创新能力。全书共 10 章,主要内容包括精密/超精密切削与磨料加工、热/电化学/化学/机械等能量作用的特种加工及其复合/组合加工、增材制造、微纳制造与微机电系统等。

本书可作为高等工科院校机械设计制造及其自动化专业的教材,也可供从事机械制造业的工程技术人员参考使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

精密与特种加工技术/明平美主编. —2 版. —北京:电子工业出版社, 2019.3

普通高等教育机电类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-121-31815-3

I. ①精… II. ①明… III. ①精密切削—高等学校—教材 ②特种加工—高等学校—教材
IV. ①TG506.9 ②TG66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 129790 号

责任编辑:郭穗娟

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:17.25 字数:435 千字

版 次:2011 年 5 月第 1 版

2019 年 3 月第 2 版

印 次:2019 年 3 月第 1 次印刷

定 价:59.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254502, guosj@phei.com.cn。

第 2 版前言

精密、微细与特种加工是先进制造技术的重要组成部分，它们在工业生产与高科技产品研发中的地位与作用越来越重要。基于这些加工技术的发展情况，本书结合高等学校工科专业教学改革的需求，在继承第 1 版特色的基础上作了不少内容更新与增删。

本书涵盖原机械制造类专业精密与超精密加工、特种加工、增材制造、微细加工与机电系统等课程的教学内容，以系统地讲述精细与特种加工工艺为目的，以加工过程的主要能量来源及其作用形式为主线，以阐明各种加工技术的基本原理与方法为基础，以实现物理、化学和复/组合加工的综合交叉和融合为重点，以激发和培养创新意识、创新思维和创新能力的目标，力图构建集精细加工、特种加工、复/组合加工与增材制造为一体的现代精密与特种加工技术体系。

本书各章的编者如下：河南理工大学明平美教授（第 1 章、第 8 章）；河南理工大学郑建新教授（第 2 章、第 3 章、第 7 章）；青岛理工大学彭子龙副教授（第 4 章）；青岛科技大学王蕾副教授（第 5 章、第 6 章）；河南理工大学秦歌副教授（第 9 章、第 10 章）。全书由明平美担任主编和统稿，郑建新、秦歌、彭子龙、王蕾担任副主编。

在本书编写过程中，编者参阅了国内外同行撰写的有关资料，得到了特种加工技术界许多专家和朋友的的支持与帮助。河南理工大学特种加工技术与装备研究团队的不少研究生也参与了大量的编辑与整理工作，在此表示衷心感谢。

由于本书涉及的内容广泛且相关技术发展速度很快，限于编者的技术水平，疏漏和不当之处在所难免，殷切地希望广大师生及读者提出宝贵意见。

编者的电子信箱：mingpingmei@163.com。

编 者

2018 年 12 月

第1版前言

为满足高等院校机械制造类专业宽口径的培养要求,以及适应高等教育课程体系更加系统化和综合化的发展趋势,编者结合现代加工技术发展情况及近年来对相关专业的教学改革与探索的实践,把目前众多机械制造类专业常开的特种加工、精密加工等课程的内容进行系统性综合,编成本书。

本书在编写中具有以下几个特色。

1. 集成性

现代机械制造技术的发展呈现出高度综合集成趋势,各学科、专业之间不断渗透、交叉和融合,其界限逐渐模糊。因此,在教材内容构建方面,着力突出其系统集成性,以拓宽读者视野和树立通识教育观。

2. 逻辑性

各种加工方法的根本区别是其加工机理,现代加工技术分类的主要基础是其能量来源及其作用形式。本书按加工方法的能量作用形式,从常规机械能到非常规能量,从单一能量、复合能量到组合能量,来串接各种加工技术,以便于读者理解各种加工技术的本质特点。

3. 先进性

各式各样新的应用需求,以及新产品、新材料的出现,不断推动现代加工技术的创新与发展。鉴于此,编者在教材内容取舍方面,在确保其基础内容系统完整的基础上,尽可能吸收本领域及相关领域的最新发展成果,使教材具有鲜明的时代特征。

4. 实用性

精细加工、特种加工和复合加工都是现代机械制造业生产中最重要加工技术,也是先进制造工艺技术的重要组成部分。本书突破了传统模式,将精细加工、特种加工和复合加工有机地整合为一体,按能量来源及其作用形式来编排,是教材建设与改革的新尝试。此外,各项技术的介绍均力求结合实际应用进行,最大限度地突出其实用性。

本书涵盖原机械制造类专业教学中精密与超精密加工、特种加工、微细加工等课程的教学内容,以系统地讲述精细与特种加工工艺为目的,以加工过程的主要能量来源及其作用形式为主线,以阐明现代加工技术的基本原理与方法为基础,以实现物理、化学和复合加工的综合交叉和融合为重点,以激发和培养学生创新意识、创新思维和创新能力的目标,力图构建出集精细加工、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体系。

本书各章的编者如下：河南理工大学明平美（第1章、第8章）、河南理工大学郑建新（第2章、第7章）、河南理工大学杨志波（第3章、合编第4章、第9章）、南阳理工学院李国慧（合编第4章）、郑州航空工业管理学院马高山（合编第4章、第6章）；黄河科技学院邹景超、杨汉嵩（第5章）。全书由明平美任主编，负责审稿、统稿，杨志波、郑建新任副主编。

由于本书编写是一种探索和尝试，疏漏和不当之处在所难免，殷切地希望广大师生及读者提出宝贵意见。

编者

2011年5月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 精密与超精密加工的产生与特点	1
1.2 特种加工的产生与特点	3
1.3 精密与特种加工的分类	4
1.4 特种加工技术对机械制造工艺的影响	9
1.5 精密与特种加工技术的地位与发展趋势	10
1.5.1 精密与特种加工技术的地位	10
1.5.2 精密与特种加工技术的发展趋势	10
思考题	11
第2章 精密与超精密切削加工技术	12
2.1 概述	12
2.2 精密与超精密切削机理	14
2.2.1 概述	14
2.2.2 切屑的形成	14
2.2.3 加工表面的形成	15
2.2.4 表面破坏层及应力状态	16
2.3 金刚石刀具	17
2.3.1 金刚石的结构与性能	18
2.3.2 金刚石晶体的定向	19
2.3.3 金刚石刀具的设计	20
2.4 精密与超精密切削加工的应用	21
2.4.1 精密与超精密车削加工	21
2.4.2 精密与超精密铣削	23
思考题	25
第3章 精密与超精密磨料加工技术	26
3.1 概述	26
3.2 精密与超精密磨削加工	27
3.2.1 精密与超精密砂轮磨削加工	27
3.2.2 砂带磨削加工	33
3.3 精密研磨与抛光加工	36
3.3.1 精密研磨与抛光加工机理	36
3.3.2 影响精密研磨与抛光的工艺因素	37

3.3.3	精密研磨与抛光工具	38
3.3.4	研磨抛光新工艺	39
3.4	光整加工	41
3.4.1	珩磨加工	42
3.4.2	超精加工	46
	思考题	49
第4章	热作用特种加工技术	50
4.1	电火花加工	50
4.1.1	电火花加工的基本原理、分类与应用	50
4.1.2	电火花加工机理	53
4.1.3	电火花加工机床	56
4.1.4	电火花加工工具电极的制备	70
4.1.5	电火花加工的基本工艺规律	73
4.1.6	电火花加工的典型应用	82
4.2	电火花线切割加工	90
4.2.1	电火花线切割加工原理、特点及应用范围	90
4.2.2	电火花线切割加工设备	92
4.2.3	电火花线切割加工控制系统和编程	96
4.2.4	电火花线切割加工工艺指标及影响因素	102
4.2.5	电火花线切割加工的扩展应用	105
4.3	激光加工	107
4.3.1	激光加工原理及典型激光器	107
4.3.2	激光加工主要应用领域	110
4.4	电子束加工	118
4.4.1	电子束加工设备与加工机理	118
4.4.2	电子束加工主要应用领域	120
4.4.3	电子束加工的优点与局限性	122
	思考题	123
第5章	电化学作用特种加工技术	125
5.1	概述	125
5.1.1	基本原理	125
5.1.2	基本概念	126
5.1.3	分类与特点	130
5.2	电解加工	130
5.2.1	电解加工过程及工艺特点	131
5.2.2	电解加工设备	133
5.2.3	电解加工主要工艺指标及其影响因素	139
5.2.4	电解加工主要应用领域	143

5.3	电沉积加工	151
5.3.1	电铸加工	151
5.3.2	涂镀加工	154
5.3.3	复合电镀加工	156
	思考题	157
第6章	化学作用特种加工技术	158
6.1	化学铣切加工	158
6.1.1	化学铣切加工原理、特点及应用范围	158
6.1.2	化学铣切加工工艺流程	159
6.2	光化学腐蚀加工	161
6.2.1	概述	161
6.2.2	光化学腐蚀加工原理	162
6.2.3	光化学腐蚀加工工艺流程	162
6.2.4	光化学腐蚀加工应用举例	167
6.3	化学抛光	169
6.3.1	化学抛光的机理和特点	169
6.3.2	化学抛光的工艺条件及应用	170
6.4	化学镀加工	172
	思考题	173
第7章	机械作用特种加工技术	174
7.1	超声波加工	174
7.1.1	概述	174
7.1.2	超声波加工原理	175
7.1.3	超声波加工设备	177
7.1.4	超声波加工主要工艺指标的影响因素	184
7.1.5	超声波加工主要应用领域	186
7.2	水射流加工	189
7.2.1	概述	189
7.2.2	水射流加工设备	191
7.2.3	水射流加工工作参数	192
7.2.4	水射流加工主要应用领域	193
7.3	离子束加工	194
7.3.1	离子束加工原理、分类与特点	194
7.3.2	离子束加工主要应用领域	196
7.4	挤压珩磨加工	198
7.4.1	挤压珩磨加工机理	199
7.4.2	挤压珩磨加工工艺系统	199
7.4.3	挤压珩磨加工主要应用领域	201

7.5	磁性磨料研磨加工	202
7.5.1	加工机理	203
7.5.2	磁性磨料	203
7.5.3	磁性磨料研磨装置	204
7.5.4	主要应用领域	205
	思考题	206
第8章 复合或组合能量作用特种加工技术		207
8.1	概述	207
8.2	电化学复合加工	207
8.2.1	电解磨削	207
8.2.2	电解珩磨	214
8.2.3	电解研磨	215
8.2.4	电化学机械复合抛光	215
8.2.5	超声波辅助电化学加工	217
8.2.6	激光辅助电解加工	218
8.2.7	电解电火花复合加工	218
8.3	热作用复合加工	220
8.3.1	磨削放电加工	220
8.3.2	超声波辅助电火花加工	221
8.4	化学复合加工	223
8.4.1	机械-化学复合抛光	223
8.4.2	化学-机械复合抛光	225
8.5	LIGA 和准 LIGA 技术	226
8.5.1	LIGA 技术	227
8.5.2	准 LIGA 技术	228
	思考题	230
第9章 增材制造技术		231
9.1	概述	231
9.2	典型增材制造技术	232
9.2.1	光固化成形	232
9.2.2	熔融沉积成形	233
9.2.3	激光选区烧结成形	235
9.2.4	三维立体打印	237
9.2.5	材料喷射成形	239
9.3	其他增材制造技术	240
9.3.1	激光选区熔化成形	240
9.3.2	激光近净成形	242
9.3.3	电子束熔丝沉积	243

9.4 增材制造技术的应用与发展	244
思考题	245
第 10 章 微纳米加工技术与微纳机电系统	246
10.1 半导体加工工艺	246
10.1.1 光刻	247
10.1.2 体硅微结构加工技术	248
10.1.3 面硅微结构加工技术	250
10.1.4 键合技术	254
10.2 纳米技术与纳米加工	254
10.2.1 扫描探针加工技术	255
10.2.2 电子束直写光刻技术	255
10.2.3 聚焦离子束技术	256
10.2.4 纳米压印技术	256
10.3 微纳机电系统	258
思考题	259
参考文献	260

第1章 绪论

“直立与劳动创造了人，劳动是从制造工具开始的”。加工技术历史悠久，内容丰富，它伴随着人类社会发展的脚步，走过了漫长的发展历程。尽管机械切削加工技术在快速发展中不断完善和创新，但面对丰富多彩的加工任务和各式各样的加工要求，单纯依靠基于机械能作用的常规机械加工方法显然难以完成。为此，巧妙地利用自然界其他能量形式如电能、热能、化学能等来实现材料的去除、叠加或变形的非传统加工方法逐渐被开发出来，并与常规机械加工方法一起，构成了现今各具特色、包罗万象的现代加工技术群。同时，制造技术从一般精度加工、精密加工逐步发展到现代的超精密加工与纳米加工。

1.1 精密与超精密加工的产生与特点

机械工业是国民经济发展的基础，也是经济现代化和国防现代化的基础。历史已证明，哪一个国家不重视机械制造业，终将会遭到历史的惩罚。德国和日本等发达国家因为对机械制造业的长期重视，多年来一直保持制造强国和工业强国地位。

制造技术发展和提高的核心主要包含两个方面：一是自动化智能制造技术，以柔性自动化技术和智能制造为代表；二是精密与超精密加工，尤其是超精密加工技术。精密与超精密加工技术已经成为在国际竞争中取得成功的关键技术。这是因为许多高技术产品需要高精度；发展尖端技术、国防工业、微电子工业等都需要精密与超精密加工制造出来的仪器、设备和装备；当代的微细工程、纳米工程技术作为现代制造技术的前沿，也需超精密加工技术作为支撑。从现实生产角度看，提高产品的加工精度有利于提高产品的性能与质量、提高产品的稳定性和可靠性、促进产品的小型化、增强零件的互换性并提高装配生产率、促进装配自动化，等等。

目前，在工业发达国家中，一般工厂能稳定掌握的加工精度是 $1\ \mu\text{m}$ 。与此相对应，通常将加工精度为 $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$ 、加工表面粗糙度 Ra 为 $0.02\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 的加工方法称为精密加工，而将加工精度高于 $0.1\ \mu\text{m}$ 、加工表面粗糙度 Ra 小于 $0.01\ \mu\text{m}$ 的加工方法称为超精密加工。

精密与超精密加工不是指某一特定的加工方法，也不是指比某一给定的加工精度高一个量级的加工技术，而是指在机械加工领域中，某一个历史时期所能达到的高量级或最高加工精度的各种精密加工方法的总称。精密与超精密加工的精度界限，不同的时代与科学发展阶段，有不同的标准。例如，在瓦特时代发明蒸汽机时，加工汽缸的精度是用厘米来衡量的，所以能达到毫米级的精度即为超精密加工。从那以后，大约每 50 年加工精度便提高一个量级。进入 20 世纪以后，大约每 20 年提高一个量级，如图 1-1 所示。目前，人类已经实现了原子级（亚纳米级）精度的加工。

也可以从被加工部位发生破坏和去除材料大小的尺寸单位来划分各种加工方法。物质是由原子组成的，从机械破坏的角度看，最小则是以原子级为单位（原子颗粒的大小为几埃，



即 Å, $1\text{Å}=10^{-8}\text{cm}$) 的破坏。如果在加工中能以原子级为单位去除被加工材料, 即从加工的极限这一角度来定义, 可以把接近于加工极限的加工技术称为超精密加工。如果用去除材料的大小尺寸单位来区分各种加工, 可分为四种情况 (龟裂、位错、晶格破坏、原子级破坏), 如图 1-2 所示。有时, 人们把光整加工、精整加工和微细加工也归为精密与超精密加工。但实际上, 它们是有区别的。光整加工主要指降低表面粗糙度和提高表面层物理和力学性能的一些加工方法, 如研磨、抛光、珩磨、无屑加工 (滚压加工) 等, 而精整加工兼顾提高精度和提高表面质量。微细加工主要是指制造微小尺寸特征和零件的加工方法。

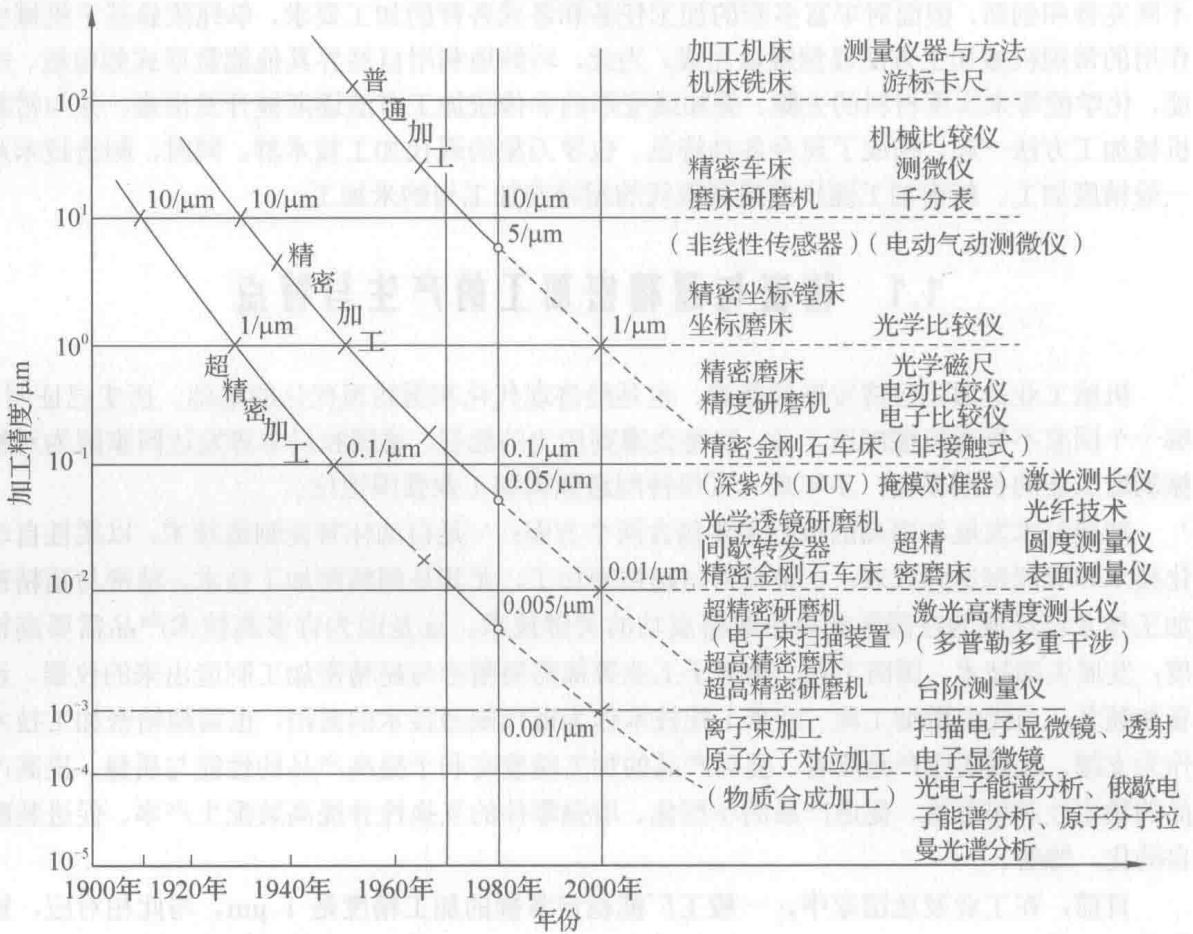


图 1-1 加工精度的发展趋势

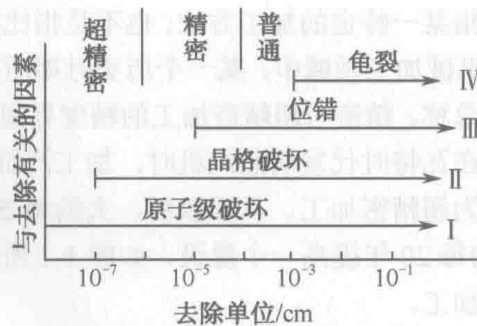


图 1-2 去除单位及其相关因素

实际上,加工精度的提高不仅取决于加工方法的选择,还与很多因素有关,如加工机理、被加工材料、加工设备、工艺装备、工件的定位与夹紧、检测与误差补偿、工作环境和人的技艺等。总之,加工精度是由综合因素共同决定的。一般而言,精密与超精密加工有如下特点:

- (1) 基于创造性原则,精密与超精密加工一般需要专门机床辅以特别工艺手段或仪器设备,以达到加工要求。
- (2) 微量去除。
- (3) 需要高品质的综合制造工艺系统。
- (4) 需要借助特种加工或复合加工手段。
- (5) 自动化程度高。
- (6) 加工检测一体化,精密与超精密加工不仅要进行离线检测,而且时常要进行在线检测和误差补偿。

就加工方法来说,精密与超精密加工主要包括3个领域:

- (1) 超精密切削加工,如超精密金刚石刀具切削,可加工各种镜面,它成功地解决了高精度陀螺仪、激光反射镜和某些大型反射镜的加工。
- (2) 精密与超精密磨削、研磨和抛光,如规模集成电路基片的加工和高精度硬磁盘等加工。
- (3) 精密特种加工,如电子束、离子束加工等。

1.2 特种加工的产生与特点

传统的机械加工在漫长的历史发展进程中,极大地推进了人类生产和物质文明的进步。例如,汽缸镗床的发明与不断改进,最终解决了蒸汽机主要部件的加工工艺问题,才使蒸汽机得以广泛应用,进而引起了世界性的第一次工业革命。这一事例说明,加工方法对技术进步、社会经济等起到重大的推动作用。

第一次世界大战以后,车削、镗削和铣削等机械切削加工技术已经比较广泛地应用于机械制造中,机械化、半自动化装备开始进入车间,机械制造实现了工业化规模生产。从20世纪30年代末开始,许多工业部门尤其是国防工业部门对产品的要求逐渐向高精度、高速度、高温、高压、大功率、小型化等方向发展。为了适应这些需求,各种新结构、新材料和复杂形状的精密与超精密零件大量出现,其形状越来越复杂,材料的强韧性越来越高,零件精度、表面粗糙度、完整性等要求也越来越高,这对机械制造部门提出了新的要求:

- (1) 解决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、高韧性、高脆性的金属及非金属材料加工。
- (2) 解决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,以及锻压模和注塑模的立体成形表面,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、喷丝头上的异形小孔、窄缝等的加工。
- (3) 解决超精密、光整零件的加工问题。如对表面质量和精度要求很高的航天航空陀螺仪、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 $0.01\mu\text{m}$ 以下。

(4) 解决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、微纳米级特征尺度零件、细长轴、薄壁零件、弹性元件等低刚度零件的加工。

要解决上述加工问题, 仅依靠传统的切削加工方法是很难实现的。于是, 人们一方面深入研究和揭示机械能在切削加工中新的作用形式及其机理, 以大幅度提高加工精度和表面质量; 另一方面探索除机械能以外的电能、化学能、声能、光能、磁能等能量形式在加工中的应用, 以开发新的加工方法。特种加工技术就是在这种环境和条件下产生和发展起来的。例如, 1943 年苏联拉扎林柯夫妇在研究开关触点遭受火花放电腐蚀损坏的有害现象和原因时, 发现电火花的瞬时高温可使局部的金属熔化、汽化而被蚀除, 从而开创和发明了电火花加工方法, 并用铜丝在淬火钢上加工出小孔, 实现了用软的工具进行硬金属材料的加工, 首次摆脱了传统的切削加工思想, 直接利用电能和热能来去除金属, 获得“以柔克刚”的效果。由于这些加工方法不必使用常规刀具对工件材料进行切削加工, 为了区别于金属切削加工, 人们将这类加工统称为特种加工, 国外称之为非传统加工 (Nontraditional Machining, NTM) 或非常规机械加工 (Nonconventional Machining, NCM)。

与切削加工不同, 特种加工不是依靠比工件材料更硬的刀具、磨具和主要借助机械能作用来实现材料去除的, 而是有自己内在的本质特点:

(1) 不是主要依靠机械能, 而是主要用其他形式的能量 (如电能、化学能、光能、声能、热能等) 来去除材料。

(2) 工具的硬度可以比被加工材料的低, 可以实现“以柔克刚”, 如水射流加工。此外, 用激光、电子束等加工时甚至没有成形的工具。

(3) 加工过程中工具和工件之间大都无明显的切削力作用, 如进行电火花加工或电解加工时工具与工件不接触。

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, 并且擅长于加工复杂、微细和低刚度等特殊几何特征或性能特征的结构与零件。此外, 不少特种加工方法还是超精密加工、镜面光整加工和纳米级 (原子级) 加工的重要手段。

特种加工技术不仅可以采取单独的加工方法, 还可以采用复合加工方法。近年来, 复合加工方法发展迅速, 应用十分广泛。目前, 许多精密与超精密加工方法采用了激光加工、电子束加工、离子束加工等特种加工工艺, 开辟了精密与超精密加工的新途径。一些高硬度、高脆性的难加工材料和刚度差、加工中易变形的零件等在精密加工和超精密加工时, 特种加工已经成为必要的手段, 甚至是唯一的手段, 形成了精密特种加工技术。

随着精密与特种加工技术的发展, 尤其是电加工、光学刻蚀加工等技术的长足发展, 促进了硅加工技术的出现, 从而使加工技术也进入一个新纪元, 逐渐形成了以“高速、高效、精密、微细、自动化、绿色化”为特征的现代加工技术体系。

1.3 精密与特种加工的分类

特种加工方法的分类至今还没有明确的标准, 根据需要有多种不同分类方法。精密与特种加工从成形原理和特点来分类, 可统分为去除加工、结合加工、变形加工三大类。根据应用目的不同, 精密与特种加工也可大致归纳为如图 1-3 所示的种类。从加工方法的机理来分

类,精密与特种加工还可分为传统加工、特种加工、复合加工。传统加工是指使用刃具进行的切削加工及磨削加工;特种加工是指利用机械能、光能、电能、声能、热能、化学能、磁能、原子能等能量来进行加工的工艺方法;复合加工是指采用两种或两种以上加工方法的复合作用(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)来进行优势互补、相辅相成的加工。目前,在制造业中,占主要地位的仍然是传统加工方法,而特种加工和复合加工是极其重要的补充,并且在国防、高新技术产品制造中所占的比重越来越大。表1-1列出了按切削加工、磨料加工、特种加工、复合加工分类的各种常用的精密加工方法,及其所用的工具、所能达到的精度/表面粗糙度、被加工材料及应用情况等。



图 1-3 精密与特种加工的基本分类

表 1-1 精密与特种加工方法

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
切削加工	精密与超精密车削	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	球、磁盘、反射镜
	精密与超精密铣削					多面棱体
	精密与超精密镗削					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	印制线路板、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
磨削	精密与超精密砂轮磨削	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
	精密与超精密砂带磨削					砂带
研磨	精密与超精密研磨	铸铁、硬木、塑料等硬质模具 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	外圆去毛刺
	滚动研磨	固结磨料、游离磨料、化学或电解作用的液体				型腔
磨料加工	精密与超精密抛光	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	带有楔槽工作表面扫/抛光器 抛光液	1~0.1	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	0.01~0.08	黑色金属、非金属材料、有色金属	平面
超精加工	精密与超精加工	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