

光机电一体化丛书

超精密加工技术与设备

文秀兰 林宋 谭昕 钟建琳 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

光机电一体化丛书

超精密加工技术与设备

文秀兰 林宋 谭昕 钟建琳 编著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

超精密加工技术与设备/文秀兰等编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 3

(光机电一体化丛书)

ISBN 7-5025-8449-8

I. 超… II. 文… III. ①精密切削②精密切削-机床 IV. TG50

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 025181 号

内 容 提 要

本书分 10 章, 第 1 章对超精密加工技术及其应用发展等进行了较为全面的阐述; 第 2 章~第 4 章介绍超精密加工方法与设备, 包括超精密切削、超精密磨削、超精密研磨与抛光、超精密特种加工技术; 第 5、6、7 章论述超精密加工的检测、误差补偿技术, 超精密加工材料和环境控制技术; 第 8、9 章介绍超精密加工应用实例; 第 10 章介绍纳米加工技术。本书收集了国内、外超精密加工的大量文献资料和最新研究成果, 内容丰富新颖, 实例材料翔实。全书配有大量图例, 尽量避免出现繁复冗长的公式推导, 偏重普及性、实用性和新颖性, 在内容深度和语言叙述方面力求面向不同层次的读者。

本书可选作机械工程类研究生和本科生的选修教材和辅助教材, 也可供从事机械制造精密超精密加工的科技人员作为参考书使用。

光机电一体化丛书

超精密加工技术与设备

文秀兰 林宋 谭昕 钟建琳 编著

责任编辑: 任文斗

文字编辑: 闫 敏

责任校对: 于志岩

封面设计: 尹琳琳

*

化 学 工 业 出 版 社

工业装备与信息工程出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 22¼ 字数 546 千字

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8449-8

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

光机电一体化是激光技术、微电子技术、计算机技术、信息技术与机械技术的相互交叉与融合,是诸多高新技术产业和高新技术装备的基础。它包括产品和技术两方面:光机电一体化产品是集光学、机械、微电子、自动控制和通信技术于一体的高科技产品,具有很高的功能和附加值;光机电一体化技术是指其技术原理和使光机电一体化产品得以实现、使用 and 发展的技术。

目前,国际上产业结构的调整使得各个行业不断融合和协调发展。作为光学、机械与电子相结合的复合产业,光机电一体化以其特有的技术带动性、融合性和普适性,受到了国内外科技界、企业界和政府部门的特别关注,在提升传统产业的过程中,它以其高度的创新性、渗透性和增值性,成为未来制造业的支柱,被誉为 21 世纪最具魅力的朝阳产业。我国已经将发展光机电一体化技术列为重点高新科技发展项目。

随着光机电一体化技术的不断发展,各个行业的技术人员对其兴趣和需求也与日俱增。《光机电一体化丛书》第一批(共 9 册)的出版,受到了广大读者的欢迎。为满足读者的进一步需求,我们联合北方工业大学、上海交通大学、东华大学、华中科技大学、海军工程大学、北京机械工程学院、中国船舶工业集团船舶系统工程部、上海大学、吉林大学、江汉大学、河南理工大学等高校的教师及科研部门的工程技术人员编写《光机电一体化丛书》第二批(共 21 册),拟在 2005 年初开始陆续出版发行,主要内容为光机电一体化技术在测试传感、驱动控制、激光加工、精密加工、机器人等方面的应用,以满足科研单位、企业和高等院校的科研及生产和教学的需求,为有关工程技术人员在开发光机电一体化产品时,提供有价值的参考素材。

本丛书的基本特点是:①内容新颖,力求及时地反映光机电一体化技术在国内外的最新进展和作者的有关研究成果;②系统全面,丛书分门别类地归纳总结了光机电一体化技术的基本理论和在国民经济各个领域的应用实例,重点介绍了光机电一体化技术的工程应用方法和实现方法;③深入浅出,每本书重点突出,注重理论联系实际,既有一定的理论深度,又具有很强的实用性,力求满足不同层次读者的需求,适合工程技术人员阅读和高校机械类专业教学的需要。

由于本丛书涉及内容广泛,相关技术发展迅速,加之作者水平有限,时间紧促,书中错误和不妥之处在所难免,恳请专家、学者和读者不吝赐教。

《光机电一体化丛书》编辑委员会

2004 年 10 月于北京

前 言

超精密加工技术是为了适应现代高科技发展需要而兴起的一种机械加工新工艺，它的发展综合地利用了机床、工具、计量、环境技术、光电子技术、计算机技术、数控技术和材料科学等的进步成果，它是先进制造技术的重要支柱之一。超精密加工技术是发展尖端技术产品不可缺少的关键性加工手段，不管是国防工业，还是民用工业都需要这种先进的加工技术。如激光核聚变系统、超大规模集成电路、高密度磁盘、精密雷达、导弹火控系统、精密机床仪器、录像机磁头、复印机磁鼓、煤气灶转阀等都要采用超精密加工技术。目前，世界各主要发达国家对它都很重视，并投入大量人力、物力和财力，将其作为先进制造技术中的优先发展内容。

超精密加工就其质来说是要实现以现有普通精密加工手段还达不到的高精度加工，就其量来说是要加工出亚微米乃至纳米级的形状与尺寸精度并获得纳米级的表面粗糙度，目前超精密加工已进入纳米级精度阶段，故出现了纳米加工及其相应的技术，纳米技术是现代制造业的前沿，也是将来制造技术的基础。

近年来，我国的超精密加工技术获得了很大的发展，超精密加工技术已得到较多的生产应用，并对改造和提升我国的制造业水平及提高产品竞争力起到了很大的推动作用。但应看到我国的超精密加工技术水平与发达国家比较还有较大的差距，制约了我国的尖端技术和国防工业的发展，因此我国亟须加速发展这方面的技术。

21 世纪工程教育的一个基本特征就是“适应性”。能适应，才能创业，才能发展。要能多方适应科学技术的突飞猛进和社会的不断进步，就得进一步合适地拓宽专业口径与专业基础，构建现代化的人才知识结构、能力结构和素质结构，努力实现培养模式的多样化。高等学校里成立多年的机械制造专业，也面临改进更新教学内容、增设新课程以跟上机械制造技术的发展要求。鉴于超精密加工技术在国民经济发展中的重要地位，已有很多高等学校为机械制造及其自动化专业本科生和研究生设立超精密加工技术的选修课程。本书的出版希望能为超精密加工技术的推广和应用尽一份绵薄之力。

本书分 10 章，全面系统地讲述了超精密加工技术的主要内容，收集了国内、外超精密加工的大量文献资料和最新研究成果，内容丰富新颖，实例材料翔实。其中第 1 章对超精密加工技术及其应用发展等进行了较为全面的阐述；第 2 章～第 4 章介绍超精密加工方法与设备，包括超精密切削、超精密磨削、超精密研磨与抛光、超精密特种加工技术；第 5、6、7 章论述超精密加工的检测、误差补偿技术、超精密加工材料和环境控制技术；第 8、9 章介绍超精密加工应用实例；第 10 章介绍纳米加工技术。全书配有大量图例，尽量避免出现繁复冗长的公式推导，偏重普及性、实用性和新颖性，在内容深度和语言叙述方面力求面向不同层次的读者。本书可选作机械工程类研究生和本科学科的选修教材和辅助教材，也可供从事机械制造精密超精密加工的科技人员作为参考书使用。

本书第 1 章由林宋编写，第 2 章由文秀兰、林宋编写，第 5、10 章由谭昕编写，第 6 章由钟建琳编写；其余章节由文秀兰编写；全书由文秀兰统稿，由徐盛林教授主审。

在本书的编写过程中，得到周鹏高级工程师，周仁魁研究员，盛步云教授，赵天婵、郭

明康、周德魁、王琳、张一兵、余晓琴副教授的热心指导与帮助，在此一并表示衷心感谢。

在本书的编写过程中，作者参考了大量国内外专家学者的最新科研成果和资料图片，在此向这些专家学者表示诚挚的谢意。

超精密加工技术所涉及的内容广泛，学科跨度大，新技术发展迅猛，加之编者的水平和视野所限，本书存在的不足之处在所难免，在此恳请读者提出宝贵意见。

编 者
2006 年 1 月

目 录

第 1 章 超精密加工技术概论	1
1.1 超精密加工技术的内容	1
1.1.1 超精密加工的范畴	1
1.1.2 超精密加工方法	1
1.1.3 纳米加工技术	4
1.2 超精密加工技术的作用	5
1.2.1 超精密加工技术的重要性	5
1.2.2 超精密加工的需求	6
1.3 超精密加工的关键技术	9
1.3.1 超精密主轴	9
1.3.2 超精密导轨	9
1.3.3 传动系统	10
1.3.4 超精密刀具	11
1.3.5 精密测量技术	11
1.3.6 微进给技术	12
1.3.7 加工原理	12
1.3.8 环境控制技术	12
1.3.9 超精密数控技术	13
1.4 超精密加工技术的发展状况与趋势	13
1.4.1 超精密加工技术的发展状况	13
1.4.2 超精密加工机理研究前沿	16
1.4.3 超精密加工技术的发展特点与趋势	18
1.4.4 新形势下面临的任务	19
第 2 章 超精密机械加工方法	21
2.1 超精密切削加工	22
2.1.1 概述	22
2.1.2 超精密切削加工的机理	22
2.1.3 超精密切削加工的特点	27
2.1.4 保证超精密切削加工质量的措施与方法	28
2.1.5 硬脆光学晶体材料的超精密切削简介	30
2.2 超精密磨削加工	32
2.2.1 超精密磨削机理	32
2.2.2 超精密磨削的工艺特点	33
2.2.3 超硬材料微粉砂轮超精密磨削技术	34
2.2.4 超精密砂带磨削技术	38
2.2.5 硬脆材料的塑性域超精密磨削加工	40
2.3 超精密研磨与抛光	41
2.3.1 研磨加工的机理	42

2.3.2	抛光加工的机理	42
2.3.3	影响超精密研磨、抛光的主要工艺因素	43
2.3.4	化学机械抛光	43
2.3.5	利用新原理的超精密研磨抛光	47
第3章	超精密加工机床与设备	51
3.1	超精密加工机床	51
3.1.1	概况	51
3.1.2	超精密机床的分类	54
3.1.3	对超精密机床的基本要求	55
3.1.4	超精密机床的基础元部件及其关键技术	55
3.1.5	超精密加工机床实例	78
3.2	超精密加工刀具与刃磨技术	86
3.2.1	超精密切削对刀具的要求	86
3.2.2	金刚石的性能与结构特性	87
3.2.3	金刚石刀具的刃磨	88
3.2.4	超精密切削刀具材料的发展	92
3.3	超精密夹具设计	95
3.3.1	夹具定位的稳定性与可靠性	95
3.3.2	夹具对工件的定位精度	95
3.3.3	采取有效措施保证精密夹具的设计要求	96
3.3.4	超精密夹具设计应用实例	96
第4章	超精密特种加工技术	99
4.1	概述	99
4.1.1	超精密特种加工技术特点	99
4.1.2	超精密特种加工的适用范围	99
4.1.3	超精密特种加工技术的内容	99
4.2	激光加工	100
4.2.1	激光加工原理	100
4.2.2	激光加工的特点	100
4.2.3	激光加工设备的组成	101
4.2.4	激光微细加工技术与应用实例	101
4.3	电子束微细加工	110
4.3.1	电子束加工原理	110
4.3.2	电子束加工的特点与应用范围	110
4.3.3	电子束加工装置的组成	111
4.3.4	电子束微细加工应用技术	112
4.4	离子束微细加工	116
4.4.1	离子束微细加工原理	116
4.4.2	离子束微细加工的特点	116
4.4.3	离子束微细加工设备	116
4.4.4	离子束加工的应用	117
4.5	微细电火花加工	120
4.5.1	概述	120
4.5.2	微细电火花加工特点	121

4.5.3	微细电火花加工的工艺和设备技术	121
4.5.4	加工应用	125
4.6	超声波微细加工	126
4.6.1	超声加工原理	126
4.6.2	超声微细加工的特点	127
4.6.3	超声加工机床组成	127
4.6.4	超声微细复合加工	128
4.7	电化学加工	133
4.7.1	电解抛光	134
4.7.2	电化学机械复合加工	137
4.8	ELID 镜面磨削技术	141
4.8.1	ELID 磨削镜面形成机理	141
4.8.2	ELID 磨削技术的工艺特点	141
4.8.3	ELID 磨削装置的组成	142
4.8.4	ELID 磨削技术的应用实例	143
4.9	微细磨料流动加工	144
4.9.1	磨料流加工的基本原理	144
4.9.2	磨料流加工的三大要素	144
4.9.3	磨料流加工的基本特性	146
4.9.4	磨料流加工的工艺特点	146
4.9.5	磨料流复合加工应用实例	146
4.10	磁力研磨加工和磁力电解研磨加工	148
4.10.1	磁力研磨加工	148
4.10.2	磁力电解研磨	151
4.11	磁流变抛光技术	152
4.11.1	磁流变抛光机理	153
4.11.2	磁流变液的组成及性质	153
4.11.3	磁流变抛光方法的特点与关键技术	154
4.11.4	磁流变抛光的应用	155
4.12	等离子体加工	155
4.12.1	等离子体	155
4.12.2	等离子弧加工	155
4.12.3	等离子体辅助抛光	157
4.13	基于微机器人的超精密加工技术	157
4.13.1	概述	157
4.13.2	微机器人超精密加工的类型及应用	158
第5章	超精密加工的检测、误差补偿技术	160
5.1	超精密加工精度检测	160
5.1.1	精密测量技术	160
5.1.2	典型几何量的测量与误差评定方法	166
5.1.3	超精密加工测量技术应用与实例	178
5.2	在线检测	187
5.2.1	概述	187
5.2.2	在线检测的基本原理	189

5.2.3 在线检测实例·····	190
5.3 误差补偿·····	191
5.3.1 误差补偿方法·····	191
5.3.2 误差补偿系统应用实例·····	192
5.4 检测设备和仪器·····	195
5.4.1 双频激光干涉仪·····	195
5.4.2 光栅检测系统·····	201
第6章 超精密加工材料 ·····	207
6.1 概述·····	207
6.1.1 超精密加工对材料的基本要求·····	207
6.1.2 超精密加工材料的分类·····	207
6.2 工件材料方面诸因素对切削加工性的影响·····	208
6.2.1 工件材料的物理、力学性能对切削加工性的影响·····	208
6.2.2 金属材料的化学成分对切削加工性的影响·····	209
6.2.3 热处理状态和金相组织对切削加工性的影响·····	210
6.3 超精密加工常用金属材料·····	211
6.3.1 钢·····	211
6.3.2 铸铁·····	214
6.3.3 有色金属·····	214
6.3.4 精密合金·····	216
6.4 常用非金属材料·····	217
6.4.1 陶瓷·····	217
6.4.2 工程塑料·····	227
6.4.3 复合材料·····	227
6.4.4 其他材料·····	231
第7章 超精密加工的环境控制 ·····	234
7.1 空气环境·····	234
7.1.1 空气中微粒的分布情况及对超精密加工的影响·····	234
7.1.2 空气的洁净度标准·····	235
7.1.3 净化空气的方法和措施·····	236
7.2 温度环境·····	242
7.2.1 温度对超精密加工的影响·····	242
7.2.2 恒温条件·····	242
7.2.3 环境温度的控制·····	242
7.3 湿度环境·····	245
7.3.1 湿度概念·····	245
7.3.2 湿度对超精密加工的影响·····	245
7.3.3 湿度的范围与控制标准·····	245
7.3.4 温湿度的控制方法与实例·····	245
7.4 振动环境·····	248
7.4.1 振动对超精密加工的影响·····	248
7.4.2 主要振源及防震措施·····	248
7.4.3 超精密机床防震实例·····	250
7.5 噪声环境·····	253

7.5.1 噪声及其危害	253
7.5.2 噪声源	253
7.5.3 控制噪声的基本途径	254
7.6 其他环境	257
7.6.1 静电环境	257
7.6.2 光环境	257
7.6.3 电磁波环境	257
7.7 超精密加工环境设施	257
第8章 光学非球面零件的超精密加工技术与设备	259
8.1 概述	259
8.1.1 光学非球面零件的性能特点	259
8.1.2 光学非球面零件的制作工艺	260
8.1.3 非球面的切除加工方法	260
8.2 非球面零件超精密加工技术	261
8.2.1 非球面零件超精密切削机床	262
8.2.2 非球面零件超精密磨削加工技术	262
8.2.3 光学非球面零件的 ELID 镜面磨削技术	263
8.2.4 非球面零件的超精密抛光(研磨)技术	264
8.2.5 非球面零件复制技术	265
8.2.6 非球面零件离子束加工	265
8.2.7 非球面磁流变研磨加工	265
8.3 光学非球面零件的检测技术	266
8.3.1 光学非球面零件的形状精度	266
8.3.2 非球面的非接触测试仪	266
8.4 大型非球面镜的研抛加工	268
8.4.1 计算机控制光学表面成形技术	268
8.4.2 应力盘抛光技术	270
8.4.3 离子束成形技术	272
8.5 超精密非球曲面加工机床实例	274
8.5.1 大型非球面加工机床的设计	274
8.5.2 超精密非球面加工机床 Nanosystem300	276
8.6 超精密非球面加工技术的发展趋势	279
第9章 大直径硅片的超精密加工	281
9.1 概述	281
9.2 硅片的加工工艺	281
9.2.1 硅片的传统加工工艺	281
9.2.2 大直径硅片的现代加工工艺	283
9.3 大直径硅片的高效超精密磨削加工技术	284
9.3.1 旋转工作台式磨削	284
9.3.2 硅片自旋转磨削	285
9.3.3 微粉金刚石磨盘的研磨和磨抛工艺	287
9.4 硅片背面减薄加工技术	287
9.4.1 硅片背面减薄技术的分类	288
9.4.2 硅片背面磨削减薄技术	289

9.5 大尺寸硅片的超精密平坦化技术	291
9.5.1 保证硅片平坦化的方法——化学机械抛光	292
9.5.2 硅片平坦化技术的新进展	293
第 10 章 纳米加工技术	297
10.1 纳米加工技术概述	297
10.1.1 纳米加工技术的特点	298
10.1.2 纳米加工的方法及设备	298
10.1.3 发展纳米加工技术的途径	301
10.2 扫描隧道显微加工技术	302
10.2.1 扫描隧道显微技术的原理	302
10.2.2 STM 在纳米加工中的应用	304
10.2.3 SPM 在纳米加工中的应用	308
10.3 LIGA 技术	310
10.3.1 LIGA 技术	310
10.3.2 准 LIGA 技术进展	313
10.3.3 SLIGA 技术	315
10.3.4 M ² LIGA 技术	316
10.3.5 抗蚀剂回流 LIGA 技术	316
10.4 纳米材料制造技术	317
10.4.1 纳米材料的分类与应用	318
10.4.2 纳米材料的制备方法及其特点	320
10.5 纳米加工检测技术	332
10.5.1 纳米测量与定位控制技术	332
10.5.2 基于自然基准的纳米检测技术	334
10.5.3 纳米微粒粒径的检测方法	336
参考文献	338

第 1 章 超精密加工技术概论

超精密加工技术是适应现代高技术需要而发展起来的先进制造技术，它综合应用了机械技术发展的新成果以及现代电子、传感技术、光学和计算机等高新技术，是高科技领域中的基础技术，在国防科学技术现代化和国民经济建设中发挥着至关重要的作用。作为现代高科技的基础技术和重要组成部分，超精密加工技术的发展促进了半导体技术、光电技术、材料科学技术等多门技术的发展进步。从某种意义上说，超精密加工担负着支持最新科学技术进步的重要使命，也是衡量一个国家科学技术水平的重要标志。

1.1 超精密加工技术的内容

1.1.1 超精密加工的范畴

精密加工和超精密加工代表了加工精度发展的不同阶段，通常，按加工精度划分，可将机械加工分为普通加工、精密加工、高精度加工、超精密加工和极超精密加工。由于生产技术的不断发展，划分的界限将逐渐向前推移，过去的精密加工对今天来说已是普通加工，因此，其划分的界限是相对的，且在具体数值上至今没有固定。从超精密加工的范畴来看，它应该包括微细加工、超微细加工、光整加工、精整加工等加工。加工精度的划分见表 1-1。

表 1-1 加工精度的划分

级别	普通加工	精密加工	高精度加工	超精密加工	极超精密加工
加工精度/ μm	100~10	10~3	3~0.1	0.1~0.005	≤ 0.005

微细加工技术是指制造微小尺寸零件的加工技术；超微细加工技术是指制造超微小尺寸零件的加工技术；它们是针对集成电路的制造要求而提出的，由于尺寸微小，其精度是用切除尺寸的绝对值来表示的，而不是用所加工尺寸与尺寸误差的比值来表示的。

光整加工一般是指降低表面粗糙度和提高表面层力学性质的加工方法，不着重于提高加工精度，其典型加工方法有珩磨、研磨、超精加工及无屑加工等。实际上，这些加工方法不仅能提高表面质量，而且可以提高加工精度。精整加工是近年来提出的一个新的名词术语，它与光整加工是对应的，是指既要降低表面粗糙度和提高表面层力学性质，又要提高加工精度（包括尺寸、形状位置精度）的加工方法。

超精密加工有两种含义，一是指向传统加工方法不易突破的精度界限挑战的加工，即高精度加工；二是指向实现微细尺寸界限挑战的加工，即以微电子电路生产为代表的微细加工。另外，超精密加工不仅涉及精度指标，还必须考虑到工件的形状特点和材料等因素。一般认为，加工精度高于 $0.1\mu\text{m}$ 、表面粗糙度小于 $0.01\mu\text{m}$ 的加工即为超精密加工，因此，超精密加工又称为亚微米级加工。目前超精密加工已进入纳米级精度阶段，故出现了纳米加工及其相应的技术。

1.1.2 超精密加工方法

根据加工方法的机理和特点，超精密加工可以分为超精密切削（如超精密金刚石刀具镜

面车削、镗削和铣削等)、超精密磨削、超精密研磨(如机械研磨、机械化学研磨、研抛、非接触式浮动研磨、弹性发射加工等)、超精密特种加工(如电子束、离子束、激光束加工以及微细电火花加工等)和复合加工,上述各种方法均能加工出普通精密加工所达不到的尺寸精度、形状精度和表面质量。每种超精密加工方法都是针对不同零件的要求而选择的。如图 1-1 所示。

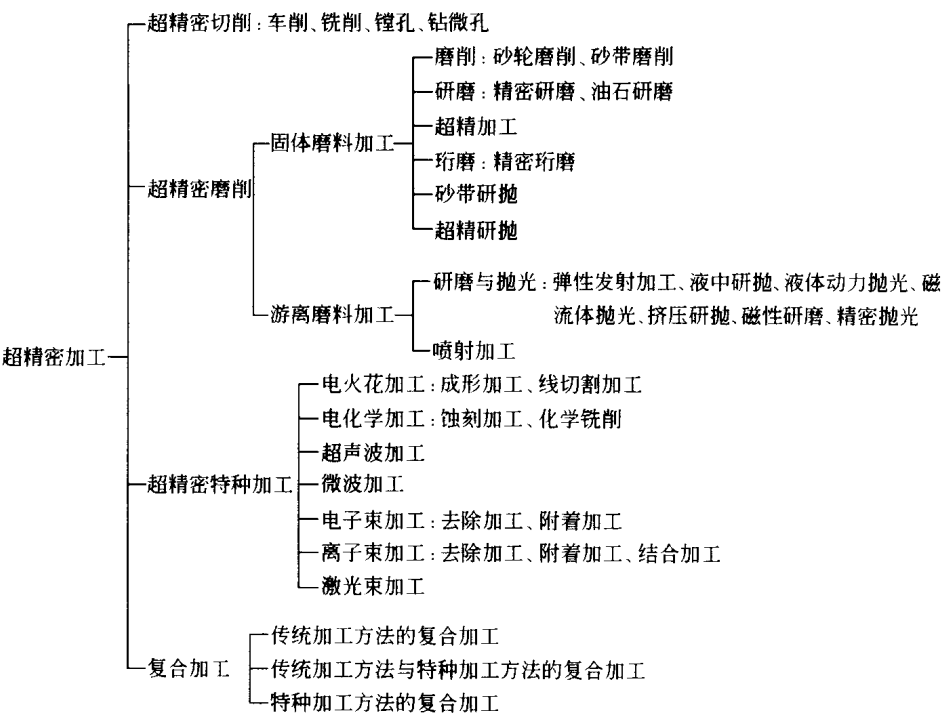


图 1-1 超精密加工方法

(1) 超精密切削

超精密切削加工的特点是借助锋利的金刚石刀具对工件进行车削和铣削。金刚石刀具与有色金属亲和力小，其硬度、耐磨性以及导热性都非常优越，且能刃磨得非常锋利，刃口圆弧半径可小于 $0.01\mu\text{m}$ ，可加工出小于 $R_a0.01\mu\text{m}$ 的表面粗糙度。此外，超精密切削加工还采用了高精度的基础元部件（如空气轴承、气浮导轨等）、高精度的定位检测元件（如光栅、激光检测系统等）以及高分辨率的微量进给机构。机床本身采取恒温、防震以及隔振等措施，还设有防止污染工件的装置。机床必须安装在洁净室内。进行超精密切削加工的零件材料必须质地均匀，没有缺陷。在这种情况下加工无氧铜，表面粗糙度可达 $R_a0.005\mu\text{m}$ ，加工直径 800mm 的非球面透镜，形状精度可达 $0.2\mu\text{m}$ 。超精密切削加工技术的应用十分广泛，见表 1-2 所示。

(2) 超精密磨削

超精密磨削技术是在一般精密磨削基础上发展起来的。超精密磨削不仅要提供镜面级的表面粗糙度，还要保证获得精确的几何形状和尺寸。所以对于超精密磨削系统，不仅要考虑各种工艺因素，还必须具有高精度、高刚度以及高阻尼特征的基准部件，消除各种动态误差的影响，并采取高精度检测手段和补偿手段。

目前超精密磨削的加工对象主要是玻璃、陶瓷等硬脆材料，磨削加工的目标是加工出 $3\sim5\text{nm}$ 的平滑表面，也就是通过磨削加工而不需抛光即可达到要求的表面粗糙度。要实现

表 1-2 超精密切削加工的应用范围

领域	应 用 范 围
航空及航天	1 高精度陀螺仪浮球,球度 $0.2\sim 0.6\mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a 0.1\mu\text{m}$ 2 气浮陀螺和静电陀螺的内外支承面球度 $0.06\sim 0.5\mu\text{m}$,尺寸精度 $0.6\mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a 0.012\sim 0.025\mu\text{m}$ 3 激光陀螺平面反射镜 平面度 $0.05\mu\text{m}$,反射率 99.99% ,表面粗糙度 $R_a 0.001\mu\text{m}$ 4 油泵、液压马达转子及分油盘 转子柱塞孔圆柱度 $0.5\sim 1\mu\text{m}$,尺寸精度 $1\sim 2\mu\text{m}$ 分油盘平面度 $0.5\sim 1\mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a 0.05\sim 0.1\mu\text{m}$ 5 电机整流子 6 雷达波导管 内腔表面粗糙度 $R_a 0.01\sim 0.02\mu\text{m}$,平面度和垂直度 $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$ 7 航空仪表轴承 孔、轴的表面粗糙度 $R_a 0.001\mu\text{m}$
光学	1 红外反射镜表面粗糙度 $R_a 0.01\sim 0.02\mu\text{m}$ 2 激光制导反射镜 3 非球面光学元件 型面精度 $0.3\sim 0.5\mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a 0.005\sim 0.020\mu\text{m}$ 4 其他光学元件表面粗糙度 $R_a 0.01\mu\text{m}$
民用	1 计算机磁盘平面度 $0.1\sim 0.5\mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a 0.03\sim 0.05\mu\text{m}$ 2 磁头平面度 $0.4\mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a 0.1\mu\text{m}$,尺寸精度 $\pm 2.5\mu\text{m}$ 3 非球面塑料镜成形模形状精度 $0.3\sim 1\mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a 0.05\mu\text{m}$

纳米级磨削加工,要求机床具有高精度及高刚度,脆性材料可进行可延性磨削(Ductile Grinding)。此外,砂轮的修整技术也相当关键。尽管磨削比研磨更能有效地去除物质,但在磨削玻璃或陶瓷时很难获得镜面,主要是由于砂轮粒度太细时,砂轮表面容易被切屑堵塞。日本理化大学大森整博士发明的电解在线修整(ELID)铸铁纤维结合剂(CIFB)砂轮技术可以很好地解决这个问题。

目前,超精密磨削技术能加工出 $0.01\mu\text{m}$ 圆度、 $0.1\mu\text{m}$ 尺寸精度和 $R_a 0.005\mu\text{m}$ 粗糙度的圆柱形零件,平面超精密磨削能加工出 $0.03\mu\text{m}/100\text{mm}$ 的平面。

(3) 超精密研磨

超精密研磨包括机械研磨、化学机械研磨、浮动研磨、弹性发射加工以及磁力研磨等加工方法。超精密研磨和抛光,用铸铁、锡、聚酯、呢毡等材料做研具或抛光器,采用金刚石、立方氯化硼、锆刚玉、铬刚玉、氧化铝、碳化硅等磨料,进行非接触研磨抛光、软质粒子研磨抛光、液中研磨抛光等,可获得高精度和低表面粗糙度。

目前超精密研磨能加工出的球面度可达 $0.025\mu\text{m}$,表面粗糙度可低至 $R_a 0.003\mu\text{m}$,平面度 $1/200$ ($\phi 100\text{mm}$);利用弹性发射加工可加工出无变质层的镜面,可达到 $5\text{\AA}$ (埃) ($1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$) 的表面粗糙度;用 CeO_2 超微粉和氟素泡沫树脂抛光工具,可研抛出 $R_a < 0.3\text{nm}$ 的极高质量玻璃表面;超精密研磨主要用于加工高表面质量与高平面度的集成电路芯片和光学平面及蓝宝石窗口等。

超精密研磨的关键条件是几乎无振动的研磨运动、精密的温度控制、洁净的环境以及细小而均匀的研磨剂。此外高精度检测方法也必不可少。

(4) 超精密特种加工

超精密特种加工是指一些利用力、热、声、光、电、磁、原子、化学等能源的物理的、

化学的非传统加工方法实现的超精密加工。超精密特种加工的范围很广，如电子束加工是指在真空中将阴极（电子枪）不断发射出来的电子向正极加速，并聚焦成极细的、能量密度极高的束流，高速运动的电子撞击到工件表面，动能转化为势能，使材料熔化、气化并在真空中被抽走。控制电子束的强弱和偏转方向，配合工作台 XY 方向的数控位移，可实现打孔、成形切割、刻蚀、光刻曝光等工艺。集成电路制造中广泛采用波长比可见光短得多的电子束光刻曝光，可以达到 $0.25\mu\text{m}$ 的线条图形分辨率。

离子束加工是在真空中将离子源产生的离子加速、聚焦，使之撞击工件表面。由于离子带正电荷且质量比电子大数千万倍，加速以后可以获得更大的动能，它是靠微观的机械撞击能量而不是靠动能转化为热能来加工的，可用于表面刻蚀、超净清洗，实现原子、分子级的切削加工。

激光束加工是由激光发生器将高能量密度的激光进一步聚焦后照射到工件表面，光能被吸收瞬时转化为热能。根据能量密度的高低，可实现打孔、精密切割、加工精微防伪标志等。

微细电火花加工是在绝缘的工作液中通过工具电极和工件间脉冲火花放电产生的瞬时局部高温来熔化和气化去除金属的。加工过程中工具与工件间没有宏观的切削力，只要精密地控制单个脉冲放电能量并配合精密微量进给就可实现极微细的金属材料的去除，可加工微细轴、孔、窄缝、平面、曲面以及微三维结构等。

（5）复合加工

复合加工是指采用几种不同能量形式、几种不同的工艺方法，互相取长补短、复合作用的加工技术，例如电解研磨、超声电解加工、超声电解研磨、超声电火花、超声切削加工等，比单一加工方法更有效，适用范围更广。

1.1.3 纳米加工技术

正如制造技术在当今各领域所起的重要作用一样，纳米加工技术在纳米技术的各领域中也起着关键作用。纳米加工技术包含机械加工、化学腐蚀、能量束加工、LIGA 技术以及 STM 加工等许多方法。关于纳米加工技术目前还没有一个统一的定义，尺寸为纳米级（ $<10\text{nm}$ ）的材料加工和使用称为纳米加工。加工表面粗糙度为纳米级的也称为纳米加工。笔者认为所谓纳米加工技术是指零件加工的尺寸精度、形状精度以及表面粗糙度均在 $0.1\sim100\text{nm}$ 范围内。通过以下加工技术可以实现纳米级加工。

（1）机械加工技术

超精密机械加工方法有单点金刚石和 CBN 超精密切削、金刚石和 CBN 超精密磨削等多点磨料加工以及研磨、抛光、弹性发射加工等自由磨料加工或机械化学复合加工等。

目前利用单点金刚石超精密切削加工已在实验室得到了 3nm 的切屑，利用可延性磨削技术也实现了纳米级磨削，而通过弹性发射加工等工艺则可以实现亚纳米级的去除，得到埃级的表面粗糙度。

（2）能量束加工技术

能量束加工可以对被加工对象进行去除、添加和表面处理等工艺，主要包括离子束加工、电子束加工和光束加工等，此外电解射流加工、电火花加工、电化学加工、分子束外延、物理和化学气相沉积等也属于能量束加工。

离子束加工溅射去除、沉淀和表面处理，离子束辅助刻蚀亦是用于纳米级加工的研究开发方向。与固体工具切削加工相比，离子束加工的位置和加工速率难以确定，为取得纳米级

的加工精度,需要亚纳米级检测系统与加工位置的闭环调节系统。电子束加工是以热能的形式去除穿透层表面的原子,可以进行刻蚀、光刻曝光、焊接、微米和纳米级钻削和铣削加工。

(3) LIGA 技术 (Lithographie, Galvanoformung, Abformung)

LIGA 工艺是由深层同步辐射 X 射线光刻、电铸成形、塑铸成形等技术组合而成的综合性技术,其最基本和最核心的工艺是深度同步辐射光刻,而电铸和塑铸工艺是 LIGA 产品实用化的关键。与传统的半导体工艺相比,LIGA 技术具有许多独特的优点,主要有:

- ① 用材广泛,可以是金属及其合金、陶瓷、聚合物、玻璃等。
- ② 可以制作高度达数百微米至一千微米,高度比大于 200 的三维立体微结构。
- ③ 横向尺寸可以小到 $0.5\mu\text{m}$,加工精度可达 $0.1\mu\text{m}$ 。
- ④ 可实现大批量复制、生产,成本低。

用 LIGA 技术可以制作各种微器件、微装置,已研制成功或正在研制的 LIGA 产品有微传感器、微电机、微机械零件、集成光学和微光学元件、微波元件、真空电子元件、微型医疗器械、纳米技术元件及系统等。LIGA 产品的应用涉及面广泛,如加工技术、测量技术、自动化技术、汽车及交通技术、电力及能源技术、航空及航天技术、纺织技术、精密工程及光学、微电子学、生物医学、环境科学和化学工程等。

(4) 扫描隧道显微镜 (STM) 技术

C. binning 和 H. Robrer 发明的扫描隧道显微镜不但使人们可以以单个原子的分辨率观测物体的表面结构,而且也为以单个原子为单位的纳米级加工提供了理想途径。应用扫描隧道显微镜技术可以进行原子级操作、装配和改型。STM 将非常尖锐的金属针接近试件表面至 1nm 左右,施加电压时隧道电流产生,隧道电流每隔 0.1nm 变化一个数量级。保持电流一定,扫描试件表面,即可分辨出表面结构。一般隧道电流通过探针尖端的一个原子,因而其横向分辨率为原子级。

扫描隧道显微加工技术不仅可以进行单个原子的去除、添加和移动,而且可以进行 STM 光刻、探针尖电子束感应的沉淀和腐蚀等新的 STM 加工技术。

1.2 超精密加工技术的作用

1.2.1 超精密加工技术的重要性

从先进制造技术的技术实质性而论,主要有精密超精密加工技术和制造自动化两大领域,前者追求加工上的精度和表面质量极限,后者包括了产品设计、制造和管理的自动化,先进制造技术不仅是快速响应市场需求、提高生产率、改善劳动条件的重要手段,而且是保证产品质量的有效举措,两者有密切关系,许多精密和超精密加工要依靠自动化技术得以达到预期指标,而不少制造自动化有赖于精密加工才能准确可靠地实现。两者具有全局的、决定性的作用,是先进制造技术的支柱。

(1) 超精密加工是国家制造工业水平的重要标志之一

超精密加工所能达到的精度、表面粗糙度、加工尺寸范围和几何形状是一个国家制造技术水平的重要标志之一。超精密加工技术是尖端技术产品发展中不可缺少的关键环节。例如,关系到现代飞机、潜艇、导弹性能和命中率的惯导仪表的精密陀螺、激光核聚变的反射镜、大型天体望远镜的反射镜和多面棱镜、大规模集成电路的硅片、计算机磁盘及复印机的磁鼓等都需要超精密加工。