

精密加工技术 实用手册

主 编 王先遼
副主编 李庆祥
刘成颖

精密加工技术实用手册

主 编 王先逵
副主编 李庆祥 刘成颖



机械工业出版社

精密加工和超精密加工技术是先进制造技术的基础和关键，是一个国家制造工业水平的重要标志之一。

本书分5篇共14章，内容包括总论、精密加工常用材料、金刚石刀具超精密车削、精密磨削和超精密磨削、光整加工、超精密加工机床、精密特种加工、微细加工技术、微型机械与微型机电系统、精密测量技术、微尺寸测量技术、微位移技术、误差的在线检测与补偿技术、精密和超精密加工的支持环境及精密基准件加工等。

图书在版编目(CIP)数据

精密加工技术实用手册/王先逵主编；李庆祥 刘成颖副主编. —北京：机械工业出版社，2001. 3

ISBN 7-111-08579-5

I. 精... II. ①王... ②李... III. 精密切削-技术手册 IV. TG506. 9-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 58454 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：熊万武 版式设计：张世琴 责任校对：申春香

封面设计：姚 毅 责任印制：郭景龙

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·40 印张·3 插页·1041 千字

00 001—4 000 册

定价：79.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

先进制造技术是当前世界各国发展国民经济的主攻方向和战略决策,同时又是一个国家独立自主、繁荣昌盛、经济上持续稳定发展、科学上保持先进的长远大计。精密加工和超精密加工技术是先进制造技术中最具有实质性的重要组成部分,它是先进制造技术的基础和关键,是一个国家制造工业水平的重要标志之一。

精密加工和超精密加工从概念上来说具有相对性,它们代表了加工精度发展的不同阶段,由于生产技术的不断发展,划分的界限将随着历史进程而逐渐向前推移,过去的精密加工对今天来说已是一般加工,因此,其划分界限是相对的,并且在具体数值上至今没有准确定义。当前,精密加工是指加工精度为 $1 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 、表面粗糙度为 $R_a 0.1 \sim 0.01 \mu\text{m}$ 的加工技术,超精密加工是指加工误差小于 $0.01 \mu\text{m}$,表面粗糙度小于 $R_a 0.025 \mu\text{m}$ 的加工技术,又称之为亚微米级加工。现在,超精密加工已进入纳米级,称之为纳米加工,并出现了相应的纳米技术。有时又统称为微米/纳米加工。从精密加工和超精密加工范畴来看,它应该包括微细加工和超微细加工、光整加工和精整加工等加工技术。

国外,精密加工和超精密加工技术的发展是从 70 年代初期开始的,主要集中在美、日、英等国家,在 80 年代中期取得了举世瞩目的成果,主要表现在机床、集成电路、仪器仪表和家用电器等诸方面,出现了美国加利福尼亚大学 Lawrence Livermore 实验室、英国 Cranfield 大学精密工程研究所(CUPE)、日本精密工学会等一些著名研究机构和学术团体。我国的精密加工和超精密加工技术在 70 年代后期有了长足进步,80 年代中期结合航天、航空工业,电子工业等需求,出现了一些具有世界水平的超精密机床和部件、集成电路制造设备。很多单位,如哈尔滨工业大学、清华大学、国防科技大学、航空工业总公司 303 研究所、中国科学院长春光学精密机械研究所等,都在进行这一领域的研究。

国内,在精密加工和超精密加工技术的发展过程中,广大从事精密工程的技术人员和高等工科学校的教师和学生迫切需要一本关于精密和超精密加工的工具书,作为科研和教学工作的参考。而在 1991 年由机械工业出版社出版的《机械加工工艺手册》(孟少农主编)中,只有专门一章论述精密加工及超精密加工。此后,1997 年出版的《机械工程手册》(何光远主编)中,没有单独立章,而是分散在各有关章节内容中。因此,出版一本专门的《精密加工技术实用手册》是十分必要的。本书的出版将是我国第一部专门的精密加工技术手册。

本手册从 1995 年开始酝酿,1996 年 9 月确定编写人员,历经三年多才得以完成。全书共分 5 篇,它们是:精密切削磨削加工及其机床、精密特种加工、微细加工与微型机械、精密测量和质量保证、典型精密元件加工。手册在编写过程中,力求贯彻“准确性、先进性、实用性”的编写原则,使其具有如下特点:

- 1) 内容涵盖面涉及精密加工、超精密加工的各个方面,包括微细加工、纳米加工、微型机械、微型机械系统等。

- 2) 强调了实用性,手册作为工具书,贵在实用,应有较丰富的资料,以便广大工程技术人员参考。

- 3) 精密加工和超精密加工正处于不断发展中,近年来,在超精密磨削、磨料加工、精密

特种加工、微细加工和微型机械、纳米加工等方面均有突破性进展,手册在保证基础内容的前提下,尽量反映先进技术。

4) 材料是影响精密加工和超精密加工的重要因素,但对其系统研究较少,为了反映这方面的内容,特别编写了精密加工材料一章。

5) 贯彻现行国家标准名词术语、代(符)号、量和单位,以满足行业和社会的需求。

6) 精密加工和超精密加工是一个系统工程,手册从体系上力求从系统论、信息论、控制论所形成的系统科学和方法论出发,使之具有科学性。

手册可供广大从事机械制造的工程技术人员参考,同时也可作为高等工科院校机械工程专业师生作为参考书。

手册由清华大学精密仪器与机械学系、材料工程系编写,其中总论、第3章、第6章、第14章由王先逵编写,第1章由程荫芊编写,第2章、第4章由吴丹编写,第5章由刘成颖编写,第7章、第8章由李勇编写,第9、10章由李岩编写,第11章由李庆祥编写,第12章由白立芬编写、第13章由段广洪编写。全书由王先逵教授任主编,李庆祥教授、刘成颖副教授任副主编。在编写的早期,贾惠波教授、尤政教授参加了大纲的拟订和定稿。在编写过程中得到了制造工程研究所、精密仪器研究所等单位老师的指导和帮助,在此表示衷心感谢。

由于作者水平所限,书中会有不少错误和不足之处,恳请读者不吝赐教。

编 者

2000年3月于清华园

目 录

前言		2.3 微量加工理论	12
总论	1	3 精密加工和超精密加工的体系	
1 精密加工和超精密加工范畴、特点、分类	1	结构	14
1.1 精密加工和超精密加工范畴	1	3.1 精密加工系统工程	14
1.2 精密加工和超精密加工的特点	1	3.2 影响精密加工和超精密加工的因素	15
1.3 精密加工和超精密加工方法及其分类	3	4 精密加工和超精密加工的形成和发展	20
2 精密加工和超精密加工机理及工艺原则	7	4.1 精密加工和超精密加工的形成	20
2.1 加工概念的扩展	7	4.2 精密加工和超精密加工的需求	24
2.2 进化加工原则	11	4.3 精密加工和超精密加工的技术地位和作用	25
		4.4 精密加工和超精密加工的发展趋势和技术前沿	26

第1篇 精密切削、磨削及其机床

第1章 精密加工常用材料	28	第2章 金刚石刀具超精密车削	65
1 精密加工对材料的要求	28	1 金刚石刀具超精密车削机理	65
1.1 精密加工对材料使用性能的要求	29	1.1 切削厚度与材料切应力的关系	65
1.2 精密加工对材料工艺性能的要求	32	1.2 材料缺陷及其对超精密车削的影响	66
1.3 精密加工对材料经济性的要求	39	1.3 加工表面的形成与质量	67
2 达到精密加工材料性能的工艺措施	41	2 金刚石刀具的设计和刃磨	69
2.1 热处理过程中的组织性能变化	41	2.1 超精密车削对刀具的要求	69
2.2 改善加工性能的热处理	43	2.2 金刚石的性能	71
2.3 提高力学性能的热处理	44	2.3 金刚石的结构	71
2.4 提高耐磨性、耐腐蚀性的表面处理技术	45	2.4 金刚石晶体的面网	73
2.5 消除应力、稳定组织的热处理	49	2.5 金刚石晶体各晶向的性能	75
3 精密加工常用金属材料	49	2.6 金刚石原料的选取	77
3.1 碳素钢和合金钢	49	2.7 金刚石晶体的定向	78
3.2 铸铁	51	2.8 金刚石刀具的设计	81
3.3 有色金属	56	2.9 金刚石刀具的刃磨	84
4 常用非金属材料	59	3 影响金刚石超精密车削的因素	87
4.1 工程陶瓷	60	3.1 金刚石刀具	87
4.2 工程塑料	61	3.2 被加工材料	88
4.3 复合材料	62	3.3 超精密车床	88
4.4 其他材料	63	3.4 工作环境	88
		3.5 测量技术	88
		4 金刚石刀具超精密车削工艺	89

4.1 刀具的磨损和耐用度	89	2.3 研具	170
4.2 切削速度的选择	90	2.4 研磨剂	175
4.3 积屑瘤的生成规律	90	2.5 研磨工艺参数	178
4.4 刀具锋锐度对切削变形和加工表面质量的影响	93	2.6 研磨方法与研磨实例	179
4.5 进给量和修光刃对加工表面粗糙度的影响	95	2.7 研磨的常见故障及排除方法	184
5 金刚石刀具超精密车削的应用及其发展	95	3 抛光	186
第3章 精密磨削和超精密磨削	98	3.1 抛光机理与加工要素	187
1 概述	98	3.2 抛光轮	187
1.1 精密和超精密磨料加工方法分类	98	3.3 抛光剂	188
1.2 精密磨削和超精密磨削磨料	99	3.4 抛光工艺参数	189
1.3 精密磨具和超精密磨削磨具	107	3.5 影响抛光表面质量的因素	190
2 普通磨料砂轮精密磨削	118	4 珩磨	190
2.1 精密磨削及其机理	118	4.1 珩磨原理及工艺特点	190
2.2 精密磨削砂轮选择	119	4.2 珩磨头	192
2.3 精密磨床	119	4.3 工艺参数的选择	192
2.4 精密磨削时的砂轮修整	120	4.4 珩磨的切削过程	194
2.5 精密磨削时的磨削用量	122	4.5 珩磨液	195
2.6 精密磨削时的砂轮平衡	123	4.6 特种珩磨工艺	196
3 超硬磨料砂轮精密磨削	125	5 超精加工	202
3.1 超硬磨料砂轮磨削特点及应用范围	125	5.1 超精加工原理及特点	202
3.2 金刚石微粉砂轮精密磨削	126	5.2 加工机理	205
3.3 超硬磨料砂轮磨床	127	5.3 超精加工工艺参数与切削液	205
3.4 超硬磨料砂轮精密磨削工艺	127	5.4 超精加工头和超精加工油石	206
3.5 超硬磨料砂轮修整	130	5.5 轮式超精磨	207
4 超精密磨削	136	5.6 无心外圆超精加工	209
4.1 超精密磨削的概念、特点和应用	136	6 新型光整加工方法	210
4.2 超精密磨削机理	139	6.1 机械化学研磨	210
4.3 超精密磨床	140	6.2 磁力研磨	211
4.4 超精密磨削工艺	142	6.3 非接触研磨	215
5 精密和超精密砂带磨削	143	6.4 浮动抛光	215
5.1 砂带磨削方式、特点和应用范围	143	6.5 水合抛光	218
5.2 砂带磨削加工机理	155	第5章 超精密加工机床	220
5.3 精密砂带磨床和砂带磨削头架	156	1 概述	220
5.4 精密砂带磨削工艺	163	1.1 超精密机床发展现状	220
第4章 光整加工	167	1.2 超精密机床的发展趋势	221
1 光整加工的特点及类型	167	2 超精密加工机床的设计	223
2 研磨	167	2.1 对超精密机床的要求和设计原则	223
2.1 研磨特点和分类	167	2.2 超精密机床的分类	226
2.2 研磨机理和运动轨迹	169	2.3 超精密机床的基本问题	228
		3 超精密机床的基础元件和结构	234
		3.1 超精密机床的总体布局	235
		3.2 精密主轴部件	236
		3.3 床身和精密导轨部件	242

3.4 微量进给装置	246	4.5 2m 镜面车床	254
3.5 精密定位检测元件	249	4.6 LODTM 大型光学金刚石车床	254
4 典型超精密机床介绍	250	4.7 DTM-3 型大型超精密车床	256
4.1 半球车床	250	4.8 MSG-325 型超精密车床	257
4.2 半球体车床	251	4.9 OAGM 2500 大型超精密车床	257
4.3 Moore 车床	251	4.10 AHNIO 型高效专用车削、磨削超精密机床	258
4.4 R- θ 车床	253	4.11 超精密铣床	259

第 2 篇 精密特种加工

第 6 章 精密特种加工	260	4.7 电镀加工	338
1 概述	260	5 电子束加工	341
1.1 特种加工含义	260	5.1 电子束的热效应及其加工	341
1.2 特种加工方法的种类	260	5.2 电子束的化学效应及其加工	344
1.3 特种加工的特点	261	5.3 电子束加工装置	345
1.4 特种加工技术的应用范围	262	5.4 电子束加工的特点及应用	346
2 电火花加工	264	6 离子束加工	346
2.1 电火花加工的基本原理、特点及分类	265	6.1 离子束的力效应及溅射现象	346
2.2 电火花加工的基本规律	270	6.2 离子束加工方法	348
2.3 电火花成形加工设备	274	6.3 离子束加工装置	350
2.4 工具电极	286	6.4 离子束加工的特点及应用	351
2.5 电火花穿孔成形加工工艺	289	7 激光束加工	352
3 电火花线切割加工	295	7.1 激光的产生过程及特性	352
3.1 电火花线切割加工原理、分类、特点及应用范围	295	7.2 激光加工机理	353
3.2 电火花线切割加工设备	298	7.3 激光加工方法	354
3.3 电极丝	303	7.4 激光加工设备	356
3.4 电火花线切割工艺	304	7.5 激光加工的特点及应用	358
4 电解加工	308	8 光刻加工	359
4.1 电解加工基本原理、特点及应用	308	8.1 工作原版制作	359
4.2 电解加工中的基本规律	320	8.2 光刻	359
4.3 电解加工机床	325	9 超声加工	360
4.4 电解质溶液	328	9.1 超声加工的基本原理和特点	361
4.5 电解加工工艺方法	333	9.2 超声加工设备	361
4.6 电解磨削	335	9.3 超声加工工艺	365
		9.4 超声加工的应用	367

第 3 篇 微细加工与微型机械

第 7 章 微细加工技术	370	1.3 加工实例	372
1 半导体微细加工技术	370	2 LIGA 工艺	374
1.1 氧化、掺杂与沉积	371	3 特种微细加工技术	375
1.2 刻蚀	372	3.1 微细电火花加工	375

3.2 光成形微细加工	377	2.2 微型加速度传感器	387
3.3 其他微细加工方法	378	2.3 微型陀螺仪	389
4 粘接装配技术	380	3 微型致动器	391
4.1 粘接技术	380	3.1 微型旋转/角位移致动器	391
4.2 微操作装配技术	381	3.2 微型直线/振动型致动器	393
第8章 微型机械与微型机电系统	383	4 微量流体控制器件与系统	396
1 概述	383	4.1 微型阀	397
2 微型传感器	385	4.2 微型泵	398
2.1 微型压力和流量传感器	385	4.3 微量流体控制系统	400

第4篇 精密测量和质量保证

第9章 精密测量技术	402	2.2 外差干涉轮廓测量	468
1 精密测量原理	402	3 平面度和表面粗糙度的测量	469
1.1 测量的一般概念	402	3.1 平面度误差的测量和数据处理	469
1.2 精密测量原理	403	3.2 表面粗糙度的测量及仪器	472
1.3 制定测量方案时应考虑的 若干因素	407	4 微细图形尺寸的测量	476
2 典型几何量的测量方法与仪器	410	4.1 比较测量	476
2.1 常见的几何量测量仪器	410	4.2 直接测量	478
2.2 轴类零件的测量	415	5 台阶、膜厚的测量及其他	481
2.3 孔类零件的测量	416	5.1 台阶测量	481
2.4 锥度测量	417	5.2 膜层厚度测量	482
2.5 螺旋线的测量	418	第11章 微位移技术	490
2.6 渐开线的测量	419	1 概述	490
3 典型物理量的精密测量方法 与仪器	420	1.1 微位移机构的分类	490
3.1 常用的力学性能测试	420	1.2 微位移系统的应用	491
3.2 振动性能检测	426	2 微位移机构的原理	493
4 精密测量的精度分析	431	2.1 压电、电致伸缩器件	493
4.1 测量误差的来源分析	431	2.2 电磁驱动器件	499
4.2 评定测量精度的两个综合性指标	434	2.3 电热式微位移机构	502
4.3 精密测量中的误差理论	434	2.4 机械式微位移机构	503
5 典型精密测量系统简介	446	3 柔性铰链	507
5.1 双频激光外差干涉仪及应用	446	3.1 柔性铰链的类型及特点	507
5.2 圆度仪及圆度测量	452	3.2 柔性铰链的设计	507
5.3 三坐标测量机	453	4 精密微动工作台的设计及其特 性分析	514
5.4 莫尔条纹技术	458	4.1 精密微动工作台的设计要求	514
第10章 微尺寸测量技术	465	4.2 精密微动工作台设计中的几个 问题	514
1 微小尺寸测量的概念和特点	465	4.3 精密微动工作台的设计	517
2 微位移的测量	467	5 常用的微动工作台简介	523
2.1 光干涉法微位移的测量	467	5.1 柔性支承—压电或电致伸缩微位移驱	

动器驱动的微动工作台	523
5.2 平行弹簧导轨	526
5.3 滚动导轨—压电器件驱动	528
5.4 气浮导轨	529
第 12 章 误差的在线检测与 补偿技术	530
1 概述	530
1.1 先进制造技术及其发展	530
1.2 先进制造系统中的质量监控技术	532
1.3 影响加工精度的因素	533
1.4 保证加工精度的途径	535
2 误差检测技术	535
2.1 误差检测技术简述	535
2.2 位移量的检测	536
2.3 机械加工振动及其检测方法	561
3 误差补偿技术	565
3.1 几何误差的补偿	565
3.2 热误差的补偿	569
3.3 机床误差的其他补偿方法	581
4 在线检测与补偿系统举例	583
4.1 阿贝误差实时修正系统	583

4.2 机床热误差的测量与补偿	587
第 13 章 精密和超精密加工的 支持环境	589
1 空气的环境和热环境	589
1.1 空气环境	589
1.2 热环境	591
1.3 洁净室	594
1.4 分层次的局部环境	598
2 振动环境	598
2.1 振动干扰的影响	598
2.2 振动干扰的消除	599
2.3 隔振器的隔振原理	600
2.4 隔振元器件	601
3 噪声环境	603
3.1 噪声及其影响	603
3.2 噪声源	604
3.3 噪声控制	604
4 其他环境	607
4.1 光环境	607
4.2 静电环境	608
5 精密和超精密加工的环境设施	609

第 5 篇 典型精密元件加工

第 14 章 精密基准件加工	612
1 精密平板和直角尺加工	612
1.1 精密平板的加工	612
1.2 精密直角尺的加工	616
2 精密分度板(盘)加工	616
2.1 精密分度板的技术要求	616

2.2 精密分度板的加工工艺	617
2.3 精密分度方法	617
3 精密球加工	622
3.1 球面研磨原理	623
3.2 四轴自动球面研磨原理	623
参考文献	626

总 论

1 精密加工和超精密加工范畴、特点、分类

1.1 精密加工和超精密加工范畴

制造技术的发展已有几千年的历史,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、精密加工到超精密加工,现在已达到广为流传的纳米加工境界,并逐渐接近加工精度和表面质量的极限,代表了当前先进制造技术的一个重要方面。因此,精密加工和超精密加工代表了加工精度发展的不同阶段,由于生产制造技术的不断发展,划分的界限将随着历史进程而逐渐向前推移,过去的精密加工对今天来说已是一般加工,其划分的界限是相对的,并且在具体的精度数值上至今没有确切的定义。

当前,精密加工是指加工精度为 $1 \sim 0.1\mu\text{m}$ 、表面粗糙度为 $R_a 0.1 \sim 0.01\mu\text{m}$ 的加工技术,超精密加工是指加工误差小于 $0.1\mu\text{m}$,表面粗糙度小于 $R_a 0.025\mu\text{m}$ 的加工技术,又称之为亚微米级加工。但是,目前超精密加工已进入纳米级,并称之为纳米加工及相应的纳米技术。

从精密加工和超精密加工的范畴来看,它应该包括微细加工和超微细加工、光整加工和精整加工等加工技术。

微细加工和超微细加工技术是指制造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,其精度是用切屑的大小来表示的,而不是像一般尺寸那样,用所加工尺寸与尺寸误差的值来表示。

光整加工技术,一般是指降低表面粗糙度值和提高表面层力学及机械性质的加工方法,不强调加工精度的提高。近年来,提出了相对应的精整加工概念,强调了精度和表面质量两个方面。但从光整加工和精整加工的概念上来说,含有毛刺加工方面。

1.2 精密加工和超精密加工的特点

精密加工和超精密加工处于发展中,当前有以下几个特点。

(1) 形成了系统工程 精密加工和超精密加工是一门多学科的综合高级技术,要达到高精度和高表面质量,不仅要考虑加工方法本身,而且涉及被加工材料、加工设备及工艺装备、检测方法、工作环境和人的技艺水平等。因此,孤立的加工方法是不能达到预定的效果的,必须有综合技术和条件的支持,从而形成了精密加工系统工程。精密加工技术与系统论、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,更促成了精密加工系统工程的形成。在研究精密加工和超精密加工理论和表面形成机理、建立数学模型的同时,还要研究各项相关技术。

(2) 精密加工和超精密加工与微细加工和超微细加工关系密切 微细加工和超微细加工是指制造微小尺寸零件和超微小尺寸零件的生产加工技术。微细加工和超微细加工的出现和发展与集成电路密切相关,集成电路要求在微小面积的半导体材料芯片上制造出更多的元件,形成

各种复杂功能的电路。因此，单元芯片上的单元逻辑门电路数、单元芯片上的电子元件数和最小线条宽度是集成电路集成度的标志，同时也表示了其制造难度和水平，如表 0-1 所示，表中列出了小、中、大、超大规模集成电路的参数与性能。

表 0-1 集成电路集成度的标志

参数与性能 分 类	单元芯片上的单元逻辑 门电路数(个)	单元芯片上的电 子元件数(个)	最小线条宽度 / μm
小规模集成电路	$< 10 \sim 12$	< 100	≤ 8
中规模集成电路	$12 \sim \leq 100$	$100 \sim < 1000$	≤ 6
大规模集成电路	$> 100 \sim < 10^4$	$1000 \sim < 10^5$	$6 \sim 3$
超大规模集成电路	$\geq 10^4$	$\geq 10^5$	$2.5 \sim 0.1$

微细加工与一般尺寸加工在概念和机理上是不同的，一般尺寸加工时，精度是用公差单位来表示的，公差 = 公差等级系数 $\times$ 公差单位，相同精度有相等的公差等级系数，但公差单位随基本尺寸的大小而不同，基本尺寸愈大，公差单位愈大，按基本尺寸的分段范围有不同的公式来计算。而微细加工时，由于加工尺寸很小，精度就用尺寸的绝对值来表示。因为从工件的角度来看，一般加工和微细加工的最大差别是切屑的大小(厚度)不同。微细加工时背吃刀量极小，切削在材料的晶体内部进行，切削去除量用“加工单位尺寸”或称“加工单位”来表示，“加工单位”的大小代表了加工精度的水平，如分子级加工、原子级加工。

微细加工与一般尺寸加工虽然在概念和机理上有所不同，但从加工技术上来看，微细加工主要是加工微小尺寸，而精密加工和超精密加工既加工大尺寸，也加工小尺寸，因此，微细加工是属于精密加工和超精密加工范畴。实际上，两者的许多加工方法都是相同的，只是加工对象有所不同而已。

(3) 精密加工和超精密加工与特种加工关系密切 特种加工是指利用机、光、电、声、热、化学、磁、原子等能源来进行加工的非传统加工方法，近年来发展很快，不仅可以采取单独加工方法，更可采用复合加工方法，应用十分广泛。目前，许多精密加工和超精密加工方法采用了激光加工、离子束加工等特种加工工艺，开辟了精密加工和超精密加工的新途径，一些高硬度、脆性的难加工材料，如淬火钢、硬质合金、陶瓷、石英、金刚石等，一些刚度差、加工中易变形的零件，如薄壁零件、弹性零件等，在精密加工和超精密加工时，特种加工已是必要手段，甚至是唯一手段，形成了精密特种加工。

当前，虽然传统加工方法仍占有较大的比例，是主要加工手段，应该重视并进一步发展，但由于特种加工的迅速兴起，不仅出现了许多新加工机理，而且出现了各种复合加工技术，它将几种加工方法融合在一起，发挥各自之所长，相辅相成，具有很大的潜力，可以提高加工精度、表面质量和效率，并且扩大了加工应用范围。

(4) 加工检测一体化 精密加工和超精密加工的加工精度和表面质量都很高，因此，一定要有相应的检测手段，才能说明是否达到技术要求。所以，在精密加工和超精密加工中，加工和检验都是难题，而且往往检测的难度更大，只有采用加工检测一体化的策略，在加工的同时

考虑检测。

从检测过程的时域来分析,检测可分为离线检测、在位检测和在线检测三大类。离线检测是指加工完成后,在检验室检测,因此,加工与检测是分离的,如果检测不合格,由于加工精度很高,一般很难返修。在位检测是指加工完成后,工件不卸下,在机床上进行检测,如果检测不合格,可及时返修,不会产生返修时再次装夹造成的误差,但要考虑离线检测和在线检测由于检测环境的差异对检测结果的影响。在线检测是在加工的过程中进行实时检测,随时掌握加工误差值及其发展趋势,并进行实时控制,是一种动态检测过程。

误差补偿是提高加工精度的一个有效技术措施,可分为静态误差补偿和动态误差补偿两大类。静态误差补偿主要用来补偿工艺系统中的系统误差,如误差校正尺。动态误差补偿是加工过程中的实时补偿,可以补偿工艺系统中的随机误差和系统误差,动态误差补偿和在线检测是密切相关的。

数控技术、计算机控制技术、传感器技术、微位移机构的发展,丰富了误差补偿方法,特别是使在线检测与动态误差补偿有了长足进步。在精密加工和超精密加工中,检测与误差补偿是加工检测一体化的重要举措。

(5) 精密加工和超精密加工与自动化技术联系密切 制造自动化是先进制造技术的重要组成部分,它的作用不仅是提高效率、提高劳动生产率、改善工作环境和工人劳动条件,而且是提高加工精度和表面质量、避免手工操作引起的人为误差、保证加工质量及其稳定性的重要举措。同时,它又是快速响应市场需求、缩短生产制造周期的有力措施。精密加工和超精密加工要达到高质量,必须依靠自动化技术才能保证。如工艺过程优化与适应控制、检测与误差补偿、计算机控制等技术都是提高和保证加工质量的自动化技术。

虽然精密加工和超精密加工的加工质量在当前仍靠工人的技艺来保证,如研磨、刮研等加工方法仍依赖于手工,但从发展的趋势来看,自动化技术代替手工的比例越来越大,加工效果也越来越好。

(6) 精密加工和超精密加工的发展与产品需求联系紧密 精密加工和超精密加工由于在加工质量上要求高,技术上难度大,涉及面广,影响因素多,因此,往往投资很大,所以精密加工和超精密加工的发展与具体的产品需求关系密切,例如,美国加利福尼亚大学 Lawrence Livermore 实验室和 Y-12 工厂在能源部支持下,于 1989 年联合研制成功的 DTM-3 型超精密金刚石车床,就是针对了加工激光核聚变用的各种反射镜、大型天体望远镜的天线等,反映了航天技术的需求。我国在精密加工和超精密加工技术的发展上也是结合了航天、航空技术上的具体需求进行的。当前,精密机床、超精密机床的规格化、系列化远不及普通机床,品种也不够多,主要是由于在技术上推广不够,通用性不强,价格又十分昂贵,随着市场需求的扩大、产品质量的提高和精密加工技术的不断成熟,通用化、系列化的精密加工和超精密加工设备一定会更为广泛地应用于生产实际中。

1.3 精密加工和超精密加工方法及其分类

1.3.1 加工成形原理

现代精密加工和超精密加工从加工成形的原理和特点来分类,可分为去除加工、结合加工和变形加工三大类:

去除加工又称为分离加工,是从工件上去除一部分材料,如车削、铣削、磨削、电火花加工等。

结合加工是利用理化方法将不同材料结合(Bonding)在一起,按结合的机理、方法、强弱等又可分为附着(Deposition)、注入(Injection)和连接(Jointed)三种。附着加工又称沉积加工,是在工件表面上覆盖一层物质,为弱结合,如电镀、气相沉积等。注入加工又称渗入加工,是在工件表层上注入某些元素,使之与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,属强结合,如氧化、渗碳、离子注入等。连接是将两种相同或不同材料通过物化方法连接在一起,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,如锻造、铸造、液晶定向等。

表 0-2 表示了该三大类精密加工和超精密加工方法,可见其加工范围十分广泛。

从材料在加工过程中的流动来分析,去除加工是使材料逐步减少,一部分材料变成切屑,这种流动称为分散流。结合加工是使材料在加工过程中逐步增加,这种流动称之为汇合流。近年来,提出了电铸、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解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,再迭加而成为所需零件的原型。变形加工是指在加工过程中材料基本不变,称为直通流。

表 0-2 精密加工和超精密加工方法

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) 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、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 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 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、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 粘滞流动 分子定向		锻造、塑性流动加工(气体火焰、高频电流、热射线、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

1.3.2 加工方法机理

从加工方法的机理来分类,精密加工和超精密加工又可分为传统加工、非传统加工和复合

加工。传统加工是指刀具切削加工、固结磨料和游离磨料的磨削加工；非传统加工是指利用机械能、光能、电能、声能、磁能、化学能、核能等对材料进行处理和加工的特种加工方法；复合加工是采用多种加工方法的复合作用，其中包括传统加工与非传统加工的复合、传统加工与传统加工的复合，非传统加工与非传统加工的复合，进行优势互补，相辅相成。目前，在制造业中，占主要地位的仍是传统加工方法，而非传统加工和复合加工是极其重要的发展方向。表0-3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精密加工和超精密加工方法，其所用工具、所能达到的精度和表面粗糙度、被加工材料以及应用。

表 0-3 常用精密加工和超精密加工方法

分类	加工方法	加工工具	精度 / μm	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	被加工材料	应用
刀具切削加工	精密、超精密车削	天然单晶金刚石刀具、人造聚晶金	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、超精密铣削	刚石刀具、立方氮化硼刀具、陶瓷刀具、硬质合金刀具			等软材料 其他材料刀具	多面棱体
	精密、超精密镗削				各种材料	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
磨料加工	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
	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
	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

(续)

分类	加 工 方 法		加 工 工 具	精 度 / μm	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	被加工材料	应 用
磨料加工	抛 光	挤压研抛	粘弹性物质 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 珩磨	精密超精加工	磨条 磨削液	1 ~ 0.1	0.025 ~ 0.01	黑色金属等	外圆
		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(如印刷线路板)
	超声加工	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、钼丝)、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

(续)

分类	加工方法	加工工具	精 度 / μm	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	被加工材料	应 用
复 合 加 工	电 解	精密电解磨削	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	1~0.1	0.025~0.008		平面、外圆、孔
		精密电解抛光	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	5~1	0.1~0.01	难加工材料	外圆、孔、端面、 型面
		精密超声磨削	3~1	0.1~0.01		外圆、孔、端面
		精密超声研磨	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	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	0.01	0.01	各种材料	外圆、孔、平面、 型面
		化学机械抛光	0.01	0.01		外圆、孔、平面、 型面

2 精密加工和超精密加工机理及工艺原则

2.1 加工概念的扩展

2.1.1 材料的生长堆积加工

长期以来,人们对加工的概念总是局限于经过各种各样的切削等加工,从毛坯上将多余的材料分离出去而形成零件。近年来,出现了采用生长、堆积方法来生成零件,在加工过程中,材料由少变多,逐步增长,与分离去除的原理正好相反,这种在加工概念上的变化,具有十分重要的意义。

材料的生长堆积加工大体上可以分为以下几类。

(1) 生长 如分子束外延、电铸、拉单晶等都是使材料逐渐增长,形成毛坯或零件。例如,电动剃须刀的网刀就是用精密电铸的方法制成的,其制作过程如图 0-1 所示。

1) 在铜板或铝板上涂敷光致抗蚀剂,将所需图形的照相底板与它贴紧,进行曝光、显影、定影后,得到由导体区(铜或铝)和绝缘区(光致抗蚀剂)所形成的所需图形,称为光刻。

2) 如果需要曲面网刀,则应将具有抗蚀剂图形的金属板弯曲成形。