

B

普通高等教育机电类规划教材

精密和超精密 加工技术

哈尔滨工业大学 袁哲俊 主编
清华大学 王先逵

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

精密和超精密加工技术

主编 袁哲俊 王先逵

参编 袁巨龙 段广洪

(按章节顺序排列)

ND 23/28



机械工业出版社

精密和超精密加工技术近年来获得飞跃发展。本书是全面系统讲述精密和超精密加工技术的书,内容包括:超精密切削和金刚石刀具,精密和超精密磨削、研磨与抛光,精密和超精密机床,精加工中的测量技术和在线误差补偿,微细加工技术,精加工的支撑环境,纳米技术。本书内容丰富,不仅系统讲述了精密加工的基础原理和技术,新技术在精加工中的应用,还介绍了国内外的最新发展和成就。本书可供机制专业研究生和本科生作教材,同时也是科技人员的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

精密和超精密加工技术/袁哲俊等主编. —北京:机械工业出版社, 1999. 10
普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-07155-7

I. 精… II. 袁… III. ①金属加工, 精密-高等学校-教材②超精加工-高等学校-教材 N. TG506. 9

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第18170号

出版人: 马九荣(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑: 高文龙 版式设计: 冉晓华 责任校对: 程俊巧
封面设计: 李丽 责任印制: 何全君
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1999年7月第1版第1次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·14.75印张·356千字
0 001—5 000册
定价: 20.00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

精密和超精密加工技术是机械制造业中最重要的部分之一，这是因为精密和超精密加工技术不仅直接影响尖端技术和国防工业的发展，而且还影响机械产品的精度和表面质量，影响产品的国际竞争力。例如陀螺仪现在是用超精密切削等方法加工的，它的精度直接影响导弹的命中精度。大规模集成电路的制造，使用了超精密研磨和微细加工等技术，它的加工工艺水平决定了集成电路上的线宽和元件数，直接影响微电子工业和计算机技术的发展。世界各国都非常重视发展精密和超精密加工技术，把它作为发展先进制造技术中的优先发展内容。

近年来各种新技术，例如微电子技术、计算机技术、自动控制技术、激光技术等，在精密加工中得到广泛的应用，使精密和超精密加工技术产生了飞跃的发展，大大地改变了它的技术面貌。精密加工技术的水平已是机械制造业水平的重要标志。当代的精密工程，其中包括精密加工，超精密加工技术，微细加工技术和纳米技术是现代制造业的前沿，也是明天制造技术的基础。

机械产品要求的精度不断提高，促使精密加工技术水平的迅速发展，精密和超精密加工达到的精度也在不断提高。在50年代精密加工能达到的精度水平是 $3\sim 5\mu\text{m}$ ，超精密加工达到的精度是 $1\mu\text{m}$ 。到70年代后期，精密加工达到的精度水平是 $1\mu\text{m}$ ，超精密加工达到的精度是 $0.1\mu\text{m}$ ，而现在精密加工达到的精度水平是 $0.1\mu\text{m}$ ，超精密加工达到的精度已是 $0.01\sim 0.001\mu\text{m}$ 。

近年来由于受到各方面的重视，我国的精密和超精密加工技术获得了很大的发展，超精密切削技术已获得较多生产应用，超精密机床已研制成功，多种精度甚高的精密机械和仪器已能生产，微细加工技术也已发展到相当水平。但应看到我国的精加工技术水平与发达国家比较还有相当大的差距。例如数控超精密车床我国还没有正式产品，大型超精密机床国内还没有。标志制造大规模集成电路水平的微细加工，我国现在导线的光刻加工，其线宽只能达到 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ ，国外生产中已可达 $0.1\mu\text{m}$ ，而实验室正在研究的是 $0.01\mu\text{m}$ 宽度，故国外生产的每个集成电路可以有数百万个元件，而我国则相差甚多。精密和超精密加工技术，因涉及尖端技术和国防工业的发展，关键的技术各国都保密，不允许技术转让或出口。各国都是自己投力量研究开发这方面的技术。因此我国也亟需加速发展这方面的技术。

高等学校的机械制造专业已是成立多年的较老的学科。近年来由于多种新技术在机械制造中的应用，机械制造业的面貌发生了极大的变化。学校的机械制造专业也面临改造，要求更新教学内容，增设新课程以跟上机械制造技术的发展。很多高等学校为研究生设立了精密和超精密加工技术的课程，同时也为本科生新开了精密加工的选修课。

本书系统全面地讲述了精密和超精密加工技术的各部分主要内容，收集了国内、外精密加工的大量资料文献，且结合了哈尔滨工业大学和清华大学等校多年来从事精密和超精密加工的研究成果而写成的。本书不仅系统讲授了精密加工的基础原理和技术，新技术在精加工中的应用，还介绍了国内外精密加工的最新发展和成就。

本书内容包括精加工涉及的全部主要内容：超精密切削和金刚石刀具，精密和超精密磨

削、研磨与抛光，精密和超精密机床设备，精密加工中的测量技术，在线测量和误差补偿技术，微细加工技术，精加工的支撑环境，典型精密零件的加工工艺，纳米技术。本书试图解决国内需要发展精密加工技术，而缺少这方面的科技书和教材的困难，可供机制专业研究生和本科学生作教材，同时也可供从事机械制造精密加工工作的科技人员作为一本重要的参考书。

本书各章的编者如下：第一、四章袁哲俊，第二章袁哲俊、周明，第三、六、八章王先逵，第五章袁哲俊、谢大纲、王晓蕙，第七章袁巨龙，第九章段广洪，第十章袁哲俊、高栋。由袁哲俊和王先逵担任主编。

由于作者水平所限和编写时间仓促，书中错误和不足之处，希望读者给予指正。

编者

1999年1月

目 录

前言	
第一章 精密和超精密加工技术及其发展展望	1
第一节 发展精密和超精密加工技术的重要性	1
第二节 超精密加工技术的现状	4
第三节 超精密加工技术发展展望	7
复习思考题	8
第二章 超精密切削与金刚石刀具	9
第一节 超精密切削的切削速度选择	9
第二节 超精密切削时刀具的磨损和耐用度	10
第三节 超精密切削时积屑瘤的生成规律	12
第四节 切削参数变化对加工表面质量的影响	15
第五节 刀刃锋锐度对切削变形和加工表面质量的影响	18
第六节 超精密切削时的最小切削厚度	21
第七节 金刚石刀具晶面选择对切削变形和加工表面质量的影响	23
第八节 超精密切削对刀具的要求及金刚石的性能和晶体结构	25
第九节 金刚石晶体各晶面的耐磨性和好磨难磨方向	30
第十节 单晶金刚石刀具的磨损破机理	32
第十一节 金刚石晶体的定向	33
第十二节 金刚石刀具的设计与制造	37
复习思考题	42
第三章 精密磨削和超精密磨削	43
第一节 精密和超精密磨削概述	43
第二节 精密磨削	47
第三节 超硬磨料砂轮磨削	51
第四节 超精密磨削	57
第五节 精密和超精密砂带磨削	60
复习思考题	69
第四章 精密和超精密加工的机床设备	70
第一节 精密和超精密机床发展概况	70
第二节 典型超精密机床的简介	72
第三节 精密主轴部件	78
第四节 床身和精密导轨部件	82
第五节 进给驱动系统	90
第六节 微量进给装置	93
第七节 机床运动部件位移的激光在线检测系统	98
第八节 机床的稳定性和减振隔振	100
第九节 减少热变形和恒温控制	103
复习思考题	106
第五章 精密加工中的测量技术	107
第一节 精密测量技术概述	107
第二节 长度基准	108
第三节 测量平台	109
第四节 直线度、平面度和垂直度的测量	111
第五节 角度和圆分度的测量	114
第六节 圆度和回转精度的测量	117
第七节 激光测量	122
复习思考题	126
第六章 在线检测与误差补偿技术	128
第一节 概述	128
第二节 在线检测与误差补偿方法	134
第三节 微位移技术	141
复习思考题	147

第七章 精密研磨和抛光	148	第一节 空气环境和热环境	189
第一节 研磨抛光机理	148	第二节 振动环境	196
第二节 精密研磨、抛光的主要工艺因素	150	第三节 噪声环境	200
第三节 超精密平面研磨和抛光	151	第四节 其它环境	203
第四节 采用新工作原理的超精密研磨抛光	157	第五节 精密和超精密加工的环境设施	205
复习思考题	162	复习思考题	206
第八章 微细加工技术	163	第十章 纳米技术	207
第一节 微细加工技术的出现	163	第一节 纳米技术概述	207
第二节 微细加工的概念及其特点	165	第二节 纳米级测量技术	207
第三节 微细加工机理	167	第三节 纳米级表层物理力学性能的检测	215
第四节 微细加工方法	169	第四节 纳米级加工技术	219
复习思考题	188	第五节 纳米级器件、微型机械和微型机电系统	223
第九章 精密和超精密加工的支撑环境	189	复习思考题	226
		参考文献	227

第一章 精密和超精密加工技术及其发展展望

第一节 发展精密和超精密加工技术的重要性

机械工业是国民经济发展的基础，因为它需要为其它生产部门提供技术装备。机械工业提供技术装备的水平和质量，将直接影响国民经济各部门生产技术水平的高低和经济效益的好坏。因此加强发展机械制造业是发展国民经济的一项关键性措施；是加强经济竞争能力的强有力的手段。

在平时机械制造业将为国民经济提供各种商品和机器设备，在战时将提供武器。因此机械工业是经济现代化和国防现代化的基础工业部门。据国外统计，在经济发展阶段，机械工业的发展速度要高出整个经济发展速度 20%~25%。历史证明，哪一个国家不重视机械制造业，它就会遭到历史的惩罚。

美国过去长期在机械制造技术上处于领先地位，但在第二次世界大战后不重视机械制造业，新技术研究开发不力，对机械制造专业人才不重视培养，日本则大力支持了机械制造业的发展。两国政府的不同政策形成鲜明的对比，后果极为明显：70年代和80年代两国在汽车工业和微电子工业的竞争中，日本的汽车、摩托车、电视机、录音机、录像机、照相机等不仅大量抢占了美国原来的国际市场，而且大量进入美国国内市场。美国上述工业面临严重的威胁，美国公众惊呼这已危及国家安全。美国在关于工业竞争的总统委员会的报告中检讨：美国在重要而又高速增长的技术市场上失利的一个重要因素是没有将自己的技术应用到制造业上。美国工程科学院和国家研究理事会经过反复讨论，重新重视制造技术，而不是将制造列入到从属设计工程或设计风格的位置上。

我国现在的机械制造技术水平和国外相比还有相当大的差距，主要表现在两个发展方向上：一个是高度自动化技术，以 FMS、CIMS 和敏捷制造为代表；另一个是精密和超精密加工，以超精密加工为代表。这里只谈精密和超精密加工技术问题。

精密和超精密加工已经成为在国际竞争中取得成功的关键技术。因为许多现代技术产品需要高精度制造。发展尖端技术，发展国防工业，发展微电子工业等都需要精密和超精密加工制造出来的仪器设备。当代的精密工程、微细工程和纳米技术是现代制造技术的前沿，也是明天技术的基础。

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 $1\mu\text{m}$ ，与此相应，通常将加工精度在 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ ，加工表面粗糙度在 $R_a0.02\sim 0.1\mu\text{m}$ 之间的加工方法称为精密加工，而将加工精度高于 $0.1\mu\text{m}$ ，加工表面粗糙度小于 $R_a0.01\mu\text{m}$ 的加工方法称为超精密加工。

现代机械工业之所以要致力于提高加工精度，其主要的原因在于：提高制造精度后可提高产品的性能和质量，提高其稳定性和可靠性；促进产品的小型化；增强零件的互换性，提高装配生产率，并促进自动化装配。

超精密加工技术在尖端产品和现代化武器的制造中占有非常重要地位。例如：对于导弹

来说, 具有决定意义的是导弹的命中精度, 而命中精度是由惯性仪表的精度所决定的。制造惯性仪表, 需要有超精密加工技术和相应的设备。例如: 美国民兵 II 型洲际导弹系统陀螺仪的精度为 $0.03^{\circ}\sim 0.05^{\circ}/h$, 其命中精度的圆概率误差为 500m, 而 MX 战略导弹(可装载 10 个核弹头) 制导系统陀螺仪精度比民兵 II 型导弹高出一个数量级, 从而保证命中精度的圆概率误差只有 50~150m。如果 1kg 重的陀螺转子, 其质量中心偏离其对称轴 0.5nm, 则会引起 100m 的射程误差和 50m 的轨道误差。惯性仪表中有许多零件的制造精度都要求达到小于微米级。例如: 激光陀螺的平面反射镜的平面度为 $0.03\sim 0.06\mu\text{m}$, 表面粗糙度为 $0.012\mu\text{m}$ 以下, 反射率为 99.8%。人造卫星的仪表轴承是真空无润滑的轴承, 其孔和轴的表面粗糙度达到 $R_{\text{max}}^{\ominus}=1\text{nm}$ ($0.001\mu\text{m}$), 其圆度和圆柱度均以 nm 为单位。雷达的关键元件波导管, 其品质因数与内表面的粗糙度有很大关系。内腔表面粗糙度值越小越好。其端面要求有很小的粗糙度、垂直度和平面度值。采用超精密车削, 波导管内腔粗糙度可达 $R_a 0.01\sim 0.02\mu\text{m}$ 或 $\nabla 0.01\mu\text{m}$, 端面粗糙度可达 $\nabla 0.01\mu\text{m}$, 平面度小于 $0.1\mu\text{m}$, 垂直度小于 $0.1\mu\text{m}$, 可使波导管的品质因数值达到 6000, 而用一般方法生产的只能达到 2000~4000。红外探测器中接收红外线的反射镜是红外导弹的关键性零件, 其加工质量的好坏决定了导弹的命中率。该反射镜表面的粗糙度要求达到 $R_a 0.015\sim \nabla 0.01\mu\text{m}$ 。只有采用超精密车削, 方能满足上述要求。

又如, 已被美国航天飞机送入空间轨道的, 用来摄制亿万公里远星球图象的哈勃望远镜(HST), 其一次镜要求使用直径 2.4m, 重达 900kg 的大型反光镜, 并且具有很高的分辨率。为此, 专门研制了超精密加工(形状精度为 $0.01\mu\text{m}$) 光学玻璃用的 6 轴 CNC 研磨抛光机。由于 HST 计划的实施, 大大促进了硬脆材料的超精密加工技术, 发展了能反馈加工精度信号的 CNC 研磨加工技术。从上所述, 可以看出只有采用超精密加工技术才能制造精密陀螺仪、精密雷达、超小型电子计算机及其它尖端产品。

又如据英国 Rolls-Royce 公司的资料, 若将飞机发动机转子叶片的加工精度由 $60\mu\text{m}$ 提高到 $12\mu\text{m}$, 而加工表面粗糙度 R_a 由 $0.5\mu\text{m}$ 减小到 $0.2\mu\text{m}$, 则发动机的压缩效率将从 89% 提高到 94%。又传动齿轮的齿形及齿距误差若能从目前的 $3\sim 6\mu\text{m}$ 降低到 $1\mu\text{m}$, 则单位齿轮箱重量所能传递的扭距将近提高一倍。

大规模集成电路的发展, 促进了微细工程的发展, 并且密切依赖于微细工程的发展。因为集成电路的发展要求电路中各种元件微型化, 使有限的微小面积上能容纳更多的电子元件, 以形成功能复杂和完备的电路。因此, 提高超精密加工水平以减小电路微细图案的最小线条宽度就成了提高集成电路集成度的技术关键(表 1-1)。

表 1-1 集成度与最小线条宽度

参数与性能 分类名称	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	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	$12\sim 100$	$100\sim <1000$	≤ 6
大规模集成电路	$>100\sim <10^4$	$1000\sim <10^5$	$3\sim 6$
超大规模集成电路	$\geq 10^4$	$\geq 10^5$	$0.1\sim 2.5$

⊖ 此为日本标准, 相当于我国 R_v 。

目前工业发达国家都在发展微细加工技术,为减小“线宽”而奋斗。日本研究与开发公司的高技术探索研究项目(ERATO)正在探索在硅基片上以黄金作为导体,加工出 20nm 的线宽,并已论证 5nm 的线宽在理论上是可行的。其目标是指向下一代的电子装置,即所谓静电感应晶体管(SIT)。美国国防部的甚高速集成电路项目(VHSIC),正在试图将集成电路的线宽比目前减小 10 倍。英国格拉斯哥大学于 1985 年以电子束加工技术,加工出 30nm 的线宽。

计算机磁盘的存贮量在很大程度上取决于磁头与磁盘之间的距离(即所谓“飞行高度”, Flying Height),目前已达到 $0.3\mu\text{m}$,近期内可争取达到 $0.15\mu\text{m}$ 。为了实现如此微小的“飞行高度”,要求加工出极其平坦、光滑的磁盘基片及涂层。IBM 公司开发的磁盘,其记忆密度在 1957 年为 $300\text{bit}/\text{cm}^2$,而 1982 年已达到 254 万 bit/cm^2 ,即在 25 年内增加一万倍,这除了原材料和涂层技术的改进外,在很大程度上应归功于超精密加工带来的磁盘基片加工精度的提高和表面粗糙度的减小。

当代多种加工方法所能达到的精度,及其发展趋势预测,见图 1-1。

由图中可见,预计到 2000 年普通机械加工、精密加工与超精密加工的精度可以分别达到 $1\mu\text{m}$, $0.01\mu\text{m}$ 及 $0.001\mu\text{m}$ (1nm)。而且可见精密工程正在向其终极目标—原子级精度的加工逼近,也就是做到“移动原子”。为了达到这一目标,各工业发达国家都在努力冲刺。日本的 ERATO 计划中,纳米技术作为其六项优先技术之一,在由政府、大学和工业界联合开发。材料在纳米范围内的物理力学性能将予以分析,基本的测试系统与加工设备正在研制中。美国的 VHSIC 计划正在进行,海军研究室(Office of Naval Research)正在资助几所学校精密工程的研究项目。美国精密工程学会(American Society for Precision Engineering)已经成立。在大学和工业界有七个小组正在扫描隧道工程方面进行卓有成效的研究工作。在 Arizona 大学,纳米技术工作站(NEWS)已经开始工作。在英国国家纳米技术(NION)计划已开始实行,纳米技术战略委员会(Nanotechnology Strategy Committee)已建立,正在实行合作的研究计划,1990 年 6 月英国正式出版《纳米技术》学术期刊。

在过去相当的一段时期,精密加工,特别是超精密加工的应用范围很狭窄。近十几年来,随着科学技术和人们生活水平的提高,精密和超精密加工不仅进入了国民经济和人民生活的各个领域,而且从单件小批生产方式走向大批量的产品生产。例如:磁带录像机的磁鼓加工精度要求很高,是超精密加工的典型零件,而录像机的产量在 1985 年已达到 3300 万台。在机械制造行业,已经改变了过去那种将精密机床放在后方车间,仅用于加工工具,卡具,量具的陈规。现在,工业发达国家已经将精密机床搬到前方车间,直接用于产品零件的加工。

超精密加工走向大批量产品生产的事实使人们不得不正视长期以来一直被忽视的问题:成本和效率,现代超精密加工不仅必须达到极高的加工精度和表面质量,同时应该保证成本低,效率高,成品率高。这对精密和超精密加工提出了更加严格的要求。

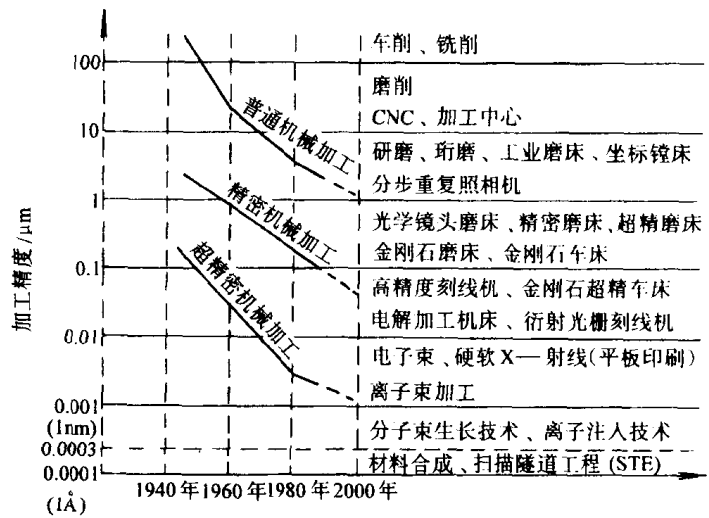


图 1-1 各种加工方法所能达到的精度及其发展趋势预测

我国当前某些精密产品尚靠进口,有些精密产品靠老工人手艺,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能挑选出一台合格品,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。1996年我国进口精密机床价值达23亿多美元(主要是精密机床和数控机床),相当于同年我国机床的总产值,某些大型精密机械和仪器国外还对我们禁运。这些都说明我国必须大力发展精密和超精密加工技术。

精密和超精密加工目前包含三个领域:

1) 超精密切削,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) 精密和超精密磨削研磨,例如解决了大规模集成电路基片的加工和高精度硬磁盘等的加工。

3) 精密特种加工,如电子束,离子束加工,使美国超大规模集成电路线宽达到 $0.1\mu\text{m}$ 。

本书将重点介绍超精密切削和磨削加工技术,包括切削机理,金刚石刀具,超精密机床,精密测量,超精加工工艺,超精加工的环境条件等。

第二节 超精密加工技术的现状

一、超精密加工技术的新发展

超精密切削加工技术发展到今天,已经获得了重大的进展,超精密切削加工已不再是一种孤立的加工方法和单纯的工艺问题,而成为一项包含内容极其广泛的系统工程。实现超精密切削加工,不仅需要超精密的机床设备和刀具,也需要超稳定的环境条件,还需要运用计算机技术进行实时检测,反馈补偿。只有将各个领域的技术成就集结起来,才有可能实现超精密切削加工。

使用天然单晶金刚石刀具对超精密零件进行超精密切削,始于50年代末期。初期的被加工工件多为形状简单的圆柱表面、平面和球面,只要求达到 $R_{\text{max}}0.1\mu\text{m}$ 的镜面即可。后来发展要求加工非球曲面反射镜,再发展要求加工大型反射镜。要求很高的形状精度和很小的表面粗糙度。

金刚石刀具的超精密切削加工技术,主要应用于两个方面:单件的大型超精密零件的切削加工和大量生产的中小型零件的超精密切削加工技术。

单件大型零件超精密金刚石刀具切削,以美国最为发达,居于世界领先地位。美国超精密加工技术的发展出于国防的需要,通过能源部激光核聚变的任务,以及陆海空三军制造技术开发计划等,对超精密金刚石切削机床的研究开发投入了巨额资金和大量人力。其最高水平是LLL实验室(Lowrence Livermore Laboratory)1983年研制的第三号大型超精密金刚石车床(DTM-3型),该机可加工 $\phi 2100\text{mm}$,质量为4500kg和1984年研制的大型光学金刚石车床LODTM,可加工 $\phi 1625\text{mm}$,质量1360kg的非球面工件,其加工精度可达 $0.025\mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a 0.0045\mu\text{m}$ 。这是以庞大资金集20年的研究成果而创造的超精密车床。

大量生产的中小型超精密零件大多是感光鼓,磁盘,多面镜,以及平面,球面或非球面的激光反射镜等。材料多为铜,铝及其合金,非电解镀镍层,进而扩展至塑料及硬脆材料(如陶瓷),间或有铁氧体材料加工。最近也有用CBN精车黑色金属的报道。

这些零件的加工精度可用表1-2说明。

这些精密零件都是大量生产的。以磁盘为例，日本磁盘在世界市场的占有率：1984年17%，286万片；1985年24%，579万片；1987年44%，1442万片，预计1988年可达到49%的1741万片。

表 1-2 中小型精密零件的加工精度

加工零件例	平均加工精度
激光光学零件	表面粗糙度 R_a 0.01~0.005 μm 形状精度 0.1 μm
磁 头	表面粗糙度 R_{max} 0.02 μm 平面度 0.04 μm ，尺寸精度 $\pm 2.5\mu\text{m}$
多 面 镜	表面粗糙度 R_{max} 0.01~0.02 μm 反射率 85%~90% 平面度 0.04 μm ， $\lambda/5 \sim \lambda/10$
磁 盘	表面粗糙度 R_a 0.01~0.004 μm 波度 0.02~0.01mm
塑料透镜用 非球面模具	表面粗糙度 R_{max} 0.01 μm 形状精度 1~0.3 μm

日本1975年以前，超精密金刚石车床都是从欧美等国的 Symon--Bryani, Philips, Moore 公司进口的。但日本从1980年以后逐渐采用自己生产的超精密金刚石车床，后来居上，水平较高。现在日本生产超精密机床的工厂约有20家，如东芝公司，理研制钢公司，丰田工机，不二越，日立精机等。日本偏重发展中小型超精密机床，加工对象是电子产品，激光、录像、办公自动化设备等民用产品。为了适应大量生产的要求，降低成本提高生产率，设计和生产了专用的高生产率的超精密机床，如磁盘车床，多面镜加工机床，录像机磁鼓车床等。

再如磁带录像机(VTR)，1985年达到顶峰3300万台，日本占有60%。VTR的磁鼓也是大量生产的，其精度影响成像质量，因而要不断提高质量。

超精密切削加工是一项内容广泛的新技术，它的加工精度和表面质量是由所使用的超精密机床设备，金刚石刀具，切削加工工艺，计量和误差补偿技术，操作者的技术水平，环境支持条件等多种因素影响的综合结果，下面对其中几个主要方面的情况予以说明。

二、超精密切削的机床设备

超精密机床是实现超精密切削的首要条件，各国都投入大量人力物力研制超精密切削用机床。目前水平最高的是美国。其代表作是LLL实验室1983年研制成功的DTM—3型大型超精密车床，和1984年研制成功的大型光学金刚石车床LODTM，可分别加工 $\phi 2100\text{mm}$ ，质量4500kg和 $\phi 1625\text{mm}$ ，质量1360kg的工件。该机床采用空气轴承主轴和高压液体静压主轴，刚度好，动态性能好。为实现超精密位置的确定，采用了精密数字伺服方式，控制部分为内装式CNC装置和激光干涉测长仪，实现随机测量定位。为了实现刀具的微量进给，在DC伺服机构内装有压电式微位移机构，可实现nm级微位移。该车床采用了恒温油淋浴系统，油温控制在 $20 \pm 0.0005\text{C}$ ，消除了加工中的热变形。该车床还采用了压电晶体误差补偿技术，使加工精度达到0.025 μm ，该机床可用于加工平面，球面及非球面，用于加工激光核聚变工程的零件，红外线装置用零件以及大型天体望远镜。

在欧洲以具有研究开发超精密金刚石切削加工机械传统的 Philips 公司的中央研究所为中心，研究开发CNC超精密金刚石车床COLATH，1978年以后用于本公司的高精度零件的加工。

英国Cranfield公司与British Science and Engineering Research Council(SERC)签订合同，研制开发X射线天体望远镜用大型超精密机床OAGM2500，机床于1991研制成功，工作台2500mm \times 2500mm，可用于超精密车削、磨削和坐标测量，使用性能良好。

日本大型超精密金刚石切削机床的研究与开发，远远落后于欧美，至今未见有关的报道。日本有关方面正大声疾呼在这方面积极赶超欧美。

我国机床研究所最早研制成功加工球面的超精密车床,沈阳、上海、济南等地也都有超精密车床产品,但和国外比还有差距。非球面超精密车床虽已研制出样品,还不能正式生产,空气主轴、微位移机构、精密 CNC 伺服系统、机床热变形和结构稳定性等关键技术需要研究。我国还不能生产高质量的超精密数控金刚石车床的正式产品。

三、金刚石刀具和超精密切削机理的研究

金刚石刀具是超精密切削中的重要关键。

金刚石刀具有两个比较重要的问题:一是晶面的选择,这对刀具的使用性能有着重要的关系;再就是金刚石刀具的研磨质量——刃口半径 ρ ,它关系到切削变形和最小切削厚度,因而影响加工表面质量。

金刚石晶体是各向异性,用于制造刀具需要晶体定向。

超精密切削中,刀刃的实际切削厚度与名义切削厚度不相同,有一个差值。实际切削厚度亦称有效切削厚度。切削厚度,小过一定界限就不能正常切削。能稳定切削的最小有效切削厚度称为最小切削厚度。最小切削厚度取决于金刚石刀具的刃口半径,刃口半径越小,则最小切削厚度越小。国外报道研磨质量最好的金刚石刀具,刃口半径可以小到数纳米的水平;而国内现在磨的金刚石刀具,刃口半径只能达到 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ 。提高金刚石刀具的质量,使刃口半径小于 $0.1\mu\text{m}$ 是一个我们需要研究解决的问题。目前刀具刃口半径测量用 SEM,但刃口半径 $< 0.01\mu\text{m}$ 时,测量就是一个难题。1986年2月日本精机学会与有关的企业团体设置研究规划:“超精密金刚石切削加工用刀具刀刃评价的研究”。最近日本大阪大学和美国 LLL 实验室合作研究超精密切削的最小极限,成功地实现了 1nm 级切削厚度的稳定切削,使超精密切削达到新的水平。

超精密切削机理的某些方面,如各种因素对金刚石刀具磨损的影响,最小切削厚度,积屑瘤的生存规律等有一定的特殊性,过去研究较少,研究这些问题对提高切削加工表面质量,减少变质层和减少表面残留应力等有直接影响。最近黑色金属的超精密切削正在研究,有用金刚石刀具的,也有用 CBN 刀具的,目前还在实验室研究阶段。

工件材料对超精密切削有重要影响。其主要原因有:1)表面出现不纯物,造成不规则的空穴和划伤;2)结晶的晶界出现阶梯;3)加工工件有残留变形和残留应力;4)对金刚石刀具的亲合性,产生粘接现象等。为解决这些问题,可以采用高纯度合金元素(例如 $99.99\% \text{Al}$ 等)在高真空中熔解铸造,用极高速度使铸件冷却,在高于再结晶温度进行长时间保温等。

四、检测和误差补偿

要达到亚微米级和纳米级的加工精度,检测是一个极为重要的方面。超精密加工对测量技术提出了严格要求。超精密加工要求测量精度比加工精度高一个数量级。如果超精密加工精度达到 1nm ,测量机要控制的精度则要达到 0.1nm 。因此,超精密加工需要与相应的测量技术配合。超精密测量技术的开发必须与超精密加工技术的开发保持同步。目前超精密测量仪正向高分辨率,高精度和高可靠性的方向发展。国外广泛发展非接触式测量方法并研究原子级精度的测量技术。例如, Johanness 公司生产的多次光波干涉显微镜的分辨率为 0.5nm , Oriens-Pass 公司生产的 MBI 重复反射干涉仪的测量精度可达 $\pm 0.001\text{nm}$ 。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,可用于测量金属和半导体零件表面的原子分布的形貌。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。

超精密加工中的测量,应包括机床超精密部件运动精度的检测和加工精度的直接检测。要提高机床的运动精度,首先要能检测出运动误差。用三点法所测得的高精度静压空气轴承的径向圆跳动一般为 50nm 左右。主轴的跳动加上静压工作台的直线运动误差,可以造成圆度和圆柱度等误差达数十纳米。

加工时机床的定位精度是一个重要问题。一般平面、圆柱表面、球表面、多面棱体加工时,工作台的运动精度相对地并不很高。但在加工非球面时就要求很高的连续的运动精度和定位精度。现在采用激光干涉测长仪精确测出工作台的位置,用反馈和闭环控制系统而制成精密 CNC 机床。

超精密加工中的误差补偿问题国内外学者专家的争议比较大。但从目前发展趋势看,要达到最高精度还需要使用在线检测和误差补偿。例如高精度静压空气轴承的径向圆跳动大约在 50nm 左右,工作台的直线运动误差也在数十纳米,要进一步实现更高精度就有一定困难。但用误差补偿可以达到 10nm 以下。

目前世界上精度最高的 LLL 实验室的 3 号超精密金刚石车床和大型光学金刚石车床 LODTM 是有误差补偿系统的,CNC 超精密机床实际上也是反馈补偿原理的体现,用激光干涉测长仪测出工作台实际位置,反馈而控制其运动。

五、超稳定的加工环境条件

加工环境条件的极微小变化都可能影响加工精度,使超精密加工达不到预期目的,因此,超精密加工必须在超稳定的加工环境条件下进行。超稳定环境条件主要是指恒温、防振、超净和恒湿四个方面的条件,相应地发展起恒温技术、防振技术和净化技术。

超精密加工必须在严密的恒温条件下进行,即不仅放置机床的房间应保持恒温,还要对机床采取特殊的恒温措施。据统计在精密加工中,由热变形产生的误差常占全部加工误差的 50% 以上,例如长 100mm 的钢件,温度升高 1℃,其长度将增加 1~1.2 μm ,铝件的长度将增加 2.2~2.3 μm 。因此超精密加工和测量必须在恒温条件下进行。如要保证 0.1~0.01 μm 的加工精度,温度变化应小于 $\pm 0.1\sim 0.01\text{℃}$ 。有些超精密机床,内部易产生热变形处用恒温油冷却,还有超精密机床外面加透明塑料罩,用恒温油浇淋。现在恒温油可控制在 $20\pm 0.0005\text{℃}$,室温可控制在 $20\pm 0.005\text{℃}$ 。

为了提高超精密加工系统的动态稳定性,除了在机床设计和制造上采取各种措施之外,还必须用隔振系统来保证机床不受或少受外界振动的影响。超精密车床一般除用防振沟和很大的地基外,还都使用空气弹簧隔振。美国 LLL 实验室的大型超精密金刚石车床采用隔振措施后,轴承部件的相对振动振幅为 2nm,并可防止 1.5~2Hz 的外界振动传入。

超精密加工还必须有超净化的环境。对超精密加工车间一立方英尺的空气中直径大于 0.3 μm 以上的尘埃数应小于 10^2 (百级)。现在又提出 10 级的要求,尘埃粒度从 0.3 μm 减至 0.1 μm 。为建立 0.1 μm 的 10 级洁净室,国外已研制成功对 0.1 μm 的尘粒有 99.999% 净化效率的高效过滤器。

第三节 超精密加工技术发展展望

我们先分析一下欧美在发展超精密加工技术上的规划,它们是和宇航、天文、军事、核能等方面联系的。超精密加工的尖端部分承担着支承最新科学技术进步的重任,所以不把分散在各

个领域中的技术成就集结起来,把加工精度提高1~2个数量级是不成的。为此需要在国家的科学研究规划中投入大量的资金和人力。

探测宇宙的哈勃空间计划使用的哈勃空间望远镜 HST(Hubble Space Telescope),其一次镜为 $\phi 2400\text{mm}$ (94in),900kg 的大型镜,可以观测从波长为 $0.1\mu\text{m}$ 的紫外线到波长为 $10\mu\text{m}$ 的红外线的波长范围。为了在地面上获得0.1角秒的高分辨率(相当于在4000km距离分辨汽车两侧的照明灯),要求达到形状精度 $0.01\mu\text{m}$,紫外线波长 $\lambda/3$ 。现在开发了硬脆材料(玻璃)的六轴 CNC 抛光机。此外在 LLL 进行的核聚变炉 NOVA 计划,也需要对大直径的光学零件进行超精密加工,该计划投资450亿美元,使用100kJ 玻璃激光技术。

NOVA 计划中使用的主要光学零件中,最大的是 $\phi 1200\text{mm}$,380kg,加工精度 $\lambda/10$ ($\lambda=633\text{nm}$),耐能量强度1ns 脉冲 $3\times 10^9\text{W}/\text{cm}^2$ 。

值得注意的是,用于频率可变矩阵的 KDP 晶体,是由 Cleveland Crystals 公司和 Pneumo Precision 公司共同开发的金刚石刀具切削机床来加工,能控制 KDP 晶体的结晶方向进行切削。

从以上的资料来看,在美国的国家科研计划中超精密加工的研究,在材料方面从传统的铝铜扩展到难切削材料和非金属硬脆材料,从加工方式上看,从切削扩展到开发带有检测反馈的超精密技术以及最终表面涂层处理的综合的研究。

从日本发表的资料来看,日本通产省1987年开始的“超尖端加工系统的研究开发”大型研究规划提出了超精密加工发展设想。超精密加工方面主要是两大方面:一是高密度高能量的粒子束加工的研究和开发;另一方面以三维曲面加工为主的高性能的超精密机械加工技术以及作为配套的三维超精密检测技术和加工环境的控制技术。

根据我国的当前实际情况,参考国外的发展趋势,我国应开展超精密加工技术基础的研究,其主要内容包括以下四个方面:

- 1) 超精密切削磨削的基本理论和工艺;
- 2) 超精密设备的精度,动特性和热稳定性;
- 3) 超精密加工精度检测及在线检测和误差补偿;
- 4) 超精密加工的环境条件;
- 5) 超精密加工的材料。

“今后的制造技术基础在于超精密加工技术的完成”。这是美国军方人士的总结。参考国外精密加工技术的经验和我国实际情况,如果能对精密和超精密加工技术给予足够的重视,投入相当的人力物力进行研究,开发,在八五期间生产中稳定微米级加工技术的基础上,开始亚微米加工;九五期间在生产中稳定亚微米级加工并开始纳米级加工的试验研究。即在15~20年内达到美国等先进国家目前的水平,并在某些主要单项技术上达到国际先进水平。

复习思考题

- 1-1 试述精密和超精密加工技术对发展国防和尖端技术的重要意义。
- 1-2 从机械制造技术发展看,过去和现在达到怎样的精度可被称为精密和超精密加工?
- 1-3 精密和超精密加工现在包括哪些领域?
- 1-4 试展望精密和超精密加工技术的发展。
- 1-5 我国的精密和超精密加工技术和发达国家相比情况如何?
- 1-6 我国要发展精密和超精密加工技术,应重点发展哪些方面内容?

第二章 超精密切削与金刚石刀具

超精密切削是 60 年代发展起来的新技术，它在国防和尖端技术的发展中起着重要的作用。现在超精密切削是使用精密的单晶天然金刚石刀具加工有色金属和非金属，可以直接切出超光滑的加工表面。由于超精密切削可以代替研磨等很费工的手工精加工工序，不仅节省工时，同时提高加工精度和加工表面质量，近年来受到各国的重视和发展。

用金刚石刀具进行超精密切削，用于加工铝合金，无氧铜，黄铜，非电解镍等有色金属和某些非金属材料。在符合条件的机床和环境条件下，可以得到超光滑表面，表面粗糙度 $R_a 0.02 \sim 0.005 \mu\text{m}$ ，精度 $< 0.01 \mu\text{m}$ 。现在用于加工陀螺仪，激光反射镜，天文望远镜的反射镜，红外反射镜和红外透镜，雷达的波导管内腔，计算机磁盘，激光打印机的多面棱镜，录像机的磁头，复印机的硒鼓，菲尼尔透镜等。现在使用的面日益扩大，不仅有为国防尖端技术服务的单件小批生产方式，而且有为民用产品服务的大批量生产的方式。因此研究提高超精密切削的加工效率和加工表面质量，研究超精密切削的切削机理，已日益受到人们的重视。

超精密切削也是金属切削的一种，它当然也服从金属切削的普遍规律，它同时也有不少特殊规律。这是由金刚石刀具的特殊物理化学性能和切削层极薄等因素造成的。我们在这里将研究超精密切削的一些主要的特殊切削规律。

第一节 超精密切削的切削速度选择

超精密切削时使用天然单晶金刚石刀具，切削刃可磨得极锋利。金刚石的硬度极高，是我们所知道的材料中硬度最高的物质。它耐磨性好，热传导系数高，和有色金属间的摩擦系数低，因此切削温度低，在加工有色金属时刀具耐用度甚高，可以使用很高的切削速度（ $1000 \sim 2000 \text{m/min}$ ）而刀具可以长期切削磨损甚小。切削速度的高低对金刚石刀具的磨损大小影响甚微。

超精密切削要求得到超光滑的加工表面和高的加工精度，这要求刀具有高的尺寸耐用度，刀具是否已磨损，将以加工表面质量是否下降超差为依据。金刚石刀具的尺寸耐用度甚高，高速切削时刀具磨损亦甚慢。因此超精密切削时，切削速度并不受刀具耐用度的制约，这点是和普通的切削规律不同的。

超精密切削实际选择的切削速度，经常是根据所使用的超精密机床的动特性和切削系统的动特性选取，即选择振动最小的转速。因为在该转速时表面粗糙度最小，加工质量最高。获得高质量的加工表面是超精密切削的首要问题。使用质量好，特别是动特性好，振动小的超精密机床可以使用高的切削速度，可以提高加工的效率。

例如在批量生产计算机磁盘时，因产量大，要求高效率，如切 5 英寸磁盘（铝合金）采用 3000r/min ，而在单件小批生产一般只用每分数百转的切削速度。例如沈阳第一机床厂生产的 SI-255 液体静压主轴的超精密车床在 $700 \sim 800 \text{r/min}$ 时振动最大。因此用这机床进行超精密切削时，要避开该转速范围，用高于或低于该转速切削，均可得到较好的加工表面质量。在

加工批量小时可选低转速；在批量大要求生产率高时提高转速。

第二节 超精密切削时刀具的磨损和耐用度

用天然单晶金刚石刀具对有色金属进行超精密切削，如切削条件正常，刀具无意外损伤，刀具磨损甚慢，刀具耐用度极高。

天然单晶金刚石刀具用于超精密切削，破损或磨损而不能继续使用的标志为加工表面粗糙度超过规定值。金刚石刀具的耐用度平时以其切削路径的长度计。如切削条件正常，金刚石刀具的耐用度可达数百公里。

图 2-1 为美国 LLL 实验室进行的刀具磨损试验的结果，其中图 2-1a 为切最初 300m 时的加工表面粗糙度，图 2-1b 为切 20km 时的表面粗糙度。可以看到，在切削长度超过 20km 后，加工表面粗糙度 R_a 仍在 $0.01\mu\text{m}$ 以内，刀具仍能继续使用。由于刀具的磨损甚少，故同一刀具可以加工很多零件，零件的尺寸一致，基本不受刀具磨损的影响。

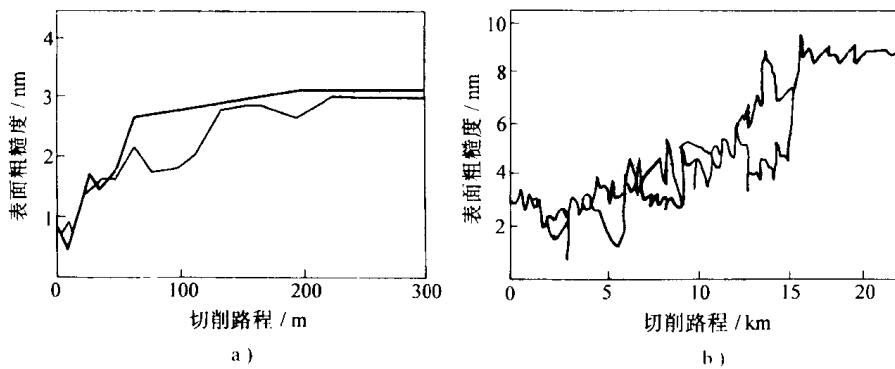


图 2-1 金刚石刀具的磨损试验 加工材料：非电解镍
a) 切最初 300m 时 b) 切 20km 时

实际使用中金刚石刀具常达不到上述的耐用度，常常是由于切削刃产生微小崩刃而不能继续使用，这主要是由于切削时的振动或刀刃的碰撞引起的。应注意天然单晶金刚石刀具只能用在机床主轴转动非常平稳的高精度机床上，否则由于振动金刚石刀具将会很快产生刀刃微观崩刃，不能继续使用。金刚石刀具要求使用维护极为小心，不允许在有振动的机床上使用。在刀具设计时应正确选择金刚石晶体方向，以保证刀刃有较高强度。

图 2-2 为金刚石刀具磨损区概貌。一般到加工表面粗糙度改变时，刀具磨损仍甚小，刀刃的正常磨损情况，如图 2-3a 所示。图 2-3b 中为剧烈磨损情况。从图中可看到磨损后成层状，即刀具磨损为层状微小剥落，这大概是由于金刚石沿 (111) 晶面有解理现象产生而造成这样的磨损形式。图 2-4 中是金刚石切削钢和镍时的磨损形式，沿切削速度方向出现磨损沟槽，这是由于金刚石和铁、镍的化学和物理亲和性而产生的腐蚀沟槽。图 2-5 为刀刃产生微小崩刃时情况，在金刚石刀具切削时，如有微小振动，就会产生刀刃微小崩刃。