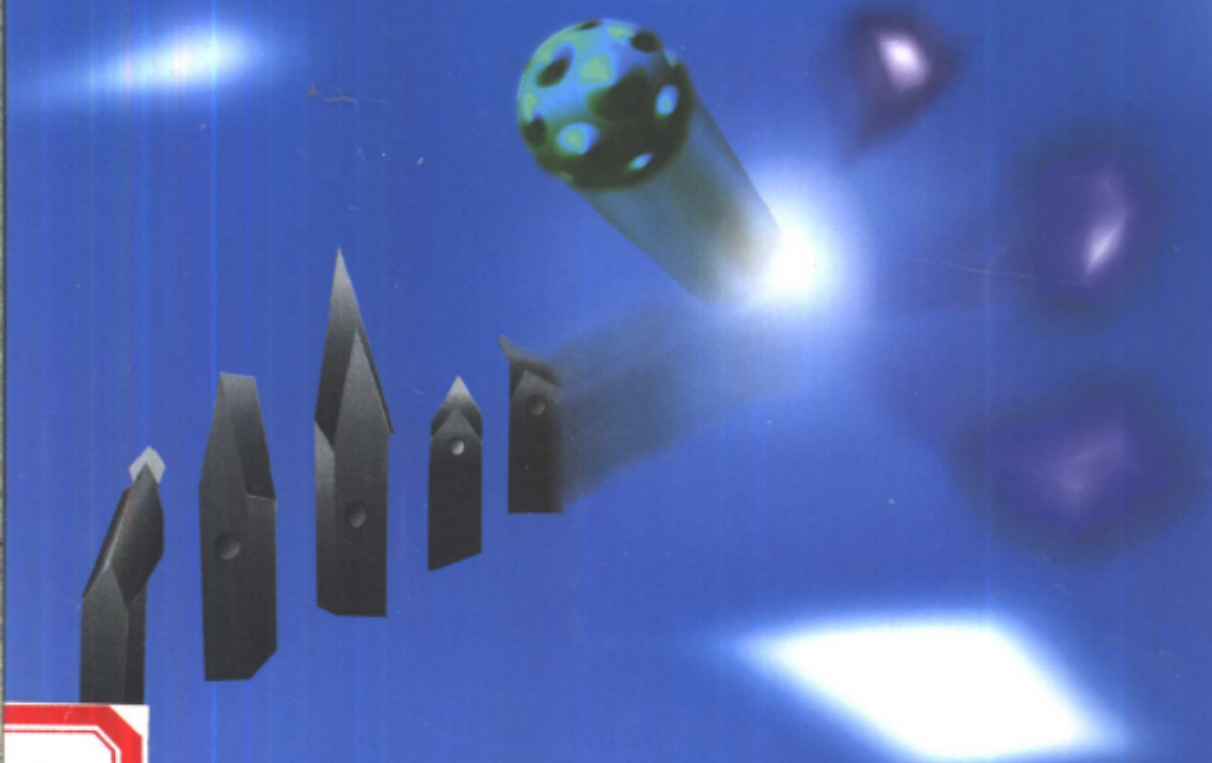


超精密加工技术

庞滔 郭大春 庞楠 编



5.9

国防工业出版社

超精密加工技术

庞滔 郭大春 庞楠 编

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

超精密加工技术/庞滔等编. —北京:国防工业出版社, 2000.8

ISBN 7-118-02109-1

I. 超… II. 庞… III. 超精加工 - 工艺 IV. TG506.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 14407 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

(河市腾飞胶印厂印刷)

新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 24 1/4 565 千字

2000 年 8 月第 1 版 2000 年 8 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

内 容 简 介

本书是作者在长期教学研究的基础上广泛收集国内外超精密加工技术的资料编写的,较系统、全面地介绍了世界上已达到的超精密加工技术。内容包括超精密加工基础,超精密切削,超精密磨削,超精密研磨与抛光,特种加工,金属超精密加工实例,硬脆非金属材料的超精密加工,半导体基片的超精密加工等章。

本书可供从事超精密加工工作的科技人员及大专院校师生参考,也可作为研究生教材。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 超精密加工技术的概念	1
第二节 超精密加工技术的意义和应用	3
第三节 超精密加工技术的新课题	10
第二章 超精密加工基础	12
第一节 决定加工精度的主要因素	12
第二节 热变形	15
第三节 力变形—刚度	20
第四节 磨损	25
第五节 表面质量	29
第六节 超精密加工机械用的部件	35
第七节 超精密加工环境	46
第三章 超精密切削	51
第一节 绪言	51
第二节 超精密金刚石刀具切削的机理	53
第三节 超精密切削加工用金刚石刀具	65
第四节 金刚石刀具切削的精度与表面粗糙度	78
第四章 超精密磨削	92
第一节 概述	92
第二节 磨削加工理论	94
第三节 磨削表面质量和加工精度	106
第四节 超精密磨削砂轮	112
第五节 磨削条件	122
第六节 砂轮电解镜面的磨削	125
第五章 超精密研磨与抛光	131
第一节 绪言	131
第二节 研磨、抛光用磨料	136
第三节 研磨、抛光用的工具	145
第四节 手工研磨与干式研磨	148
第五节 平面机械研磨	154
第六节 利用新原理的超精密研磨	166
第六章 特种加工	180
第一节 概述	180

第二节	电火花加工	180
第三节	电子束加工	184
第四节	离子束加工	188
第五节	激光加工	192
第六节	电解加工	200
第七节	超声波加工	206
第七章	金属超精密加工实例	213
第一节	球面非球面反射镜的超精密切削	213
第二节	多面反射镜的超精密切削	224
第三节	硬磁盘基片的超精密切削	232
第四节	高精度模具加工	246
第八章	硬脆非金属材料的超精密加工	253
第一节	陶瓷加工	253
第二节	磁头的超精密加工	271
第三节	光学透镜、棱镜的加工	289
第四节	反射光栅的加工	303
第五节	石英振子的加工	307
第六节	宝石加工	311
第七节	金刚石的超精密加工	327
第九章	半导体基片的超精密加工	340
第一节	半导体基片的加工特性	340
第二节	半导体基片的加工技术	343
第三节	其他加工方法和加工装置	364
第四节	半导体基片加工的外围技术	370
参考文献		378

第一章 绪 论

第一节 超精密加工技术的概念

产品的精度,主要以其几何特性的形状和位置的精度、大小的尺寸精度及表面质量三项指标来衡量。随着科学技术的发展,单用表面粗糙度已不能衡量出产品质量的好坏,而必须用加工表面材料的物理机械性能及加工变质层、残留应力的大小来衡量。

所谓超精密加工技术,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最高加工精度的各种精密加工方法的总称。如何区分和定义精密加工与超精密加工很是困难,因为精密和超精密是与那个时代的加工与测量技术水平紧密相关的。随着科学技术的进步,精密与超精密的标准也在不断地变化和提高了。尤其是当今科学技术突飞猛进地发展,昨天的超精密,在今天就变成为精密,而今天的精密,到明天又会成为普通了。

究竟达到什么样的精度才算得上是超精密加工呢?目前对它的认识有两种概念。

一种是随着科学技术的进步,每个时代都有该时代的加工精度界限。达到或突破本时代精度界限的高精度加工,可称为超精密加工。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 30 年提高一个量级。如图 1-1 所示,在 50 年代,把 $0.1\mu\text{m}$ 精度的加工技术称为超精密加工,而到了 80 年代,则把 $0.05\mu\text{m}$ 的精度称为超精密加工。

如果要把每个时代的普通加工、精密加工与超精密加工区别开来,是否可这样区分:在所处的时代里,用一般的技术水平,即可以实现的精度称为普通精度。而对于必须用较高精度的加工机械、工具及高水平的加工技术才能达到的精度,属于精密加工技术。超精密加工技术是在所处的时代里,并非可以用较高技术轻而易举地就可以达到,而是采用先进的技术经过探讨、研究、实验之后才能达到的精度,并且实现这一精度指标尚不能普及的加工技术称为超精密加工技术。目前,如果从零、部件的加工精度来划分的话,可以把亚微米以上精度的加工,称为超精密加工。表 1-1 列出机械、电子、光学等产品所要求的精度及它们所属的加工范畴。

另一种概念是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。

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($\text{\AA}$), $1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm}$)的破坏。如果在加工中能以原子级为单位去除被加工材料,即是加工的极限,从这一角度来定义,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,如图 1-2 所示。去除材料的单位为 10^{-3}cm 时将以龟裂的形式发生破坏,见图中的 IV;以微米(μm)级

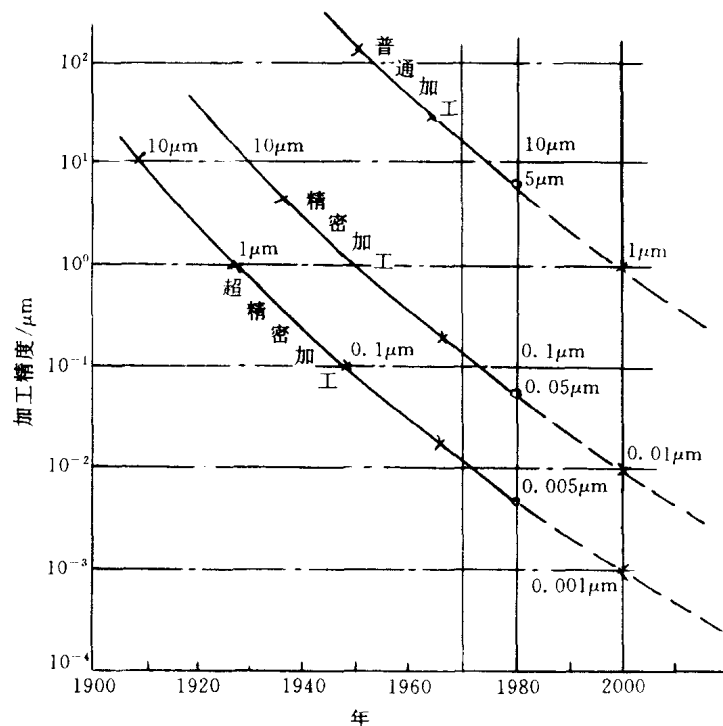


图 1-1 加工精度的发展趋势

表 1-1 各种产品与所要求的精度范围

加工精度范围		机械产品	电子产品	光学产品
普通加工	$200\mu\text{m}$ $50\mu\text{m}$	一般机器零件、家用机器 通用齿轮、螺纹、打字机零件、汽车零件、缝纫机零件	通用电气机具(开关、电动机) 电子零件外壳、小型电机、半导体、二极管	照相机壳体 照相机快门、照相机镜筒
	$5\mu\text{m}$	手表零件、精密齿轮、丝杠、高速回转轴承、滚动丝杠、回转式压缩机零件、胶版印刷原版	继电器、阻容线圈、记忆磁盘、IC 硅片、录像头、滚筒	透镜、棱镜、半导体纤维、接口
精密加工	$0.5\mu\text{m}$	滚动轴承、滚柱轴承、精密线材、液压伺服阀、陀螺轴承、空气轴承、导轨、精密模具、滚柱丝杠	VTR 磁头、磁尺、电荷耦合器件、石英振子、磁泡、IC 元件、磁控管	精密透镜、精密棱镜、光学分度尺、IC 曝光版、激光反射镜、多面反射镜、X 射线反射镜
	$0.05\mu\text{m}$	块规、金刚石压头、超高精度 $x-y$ 工作台导轨、超精密金属压印模具、薄片切片刀刃	IC 存储器、硬磁盘、大规模集成电路 (LSI 元件)	光学平晶、精密非涅耳透镜、衍射光栅、光盘
	$0.005\mu\text{m}$	超高精度形状的零件(平面、球面、非球面、螺旋面等)	超大规模集成电路(超 LSI)	超精密衍射光栅、超高精度形状的表面
	1nm 以下	超精密零件的表面粗糙度		

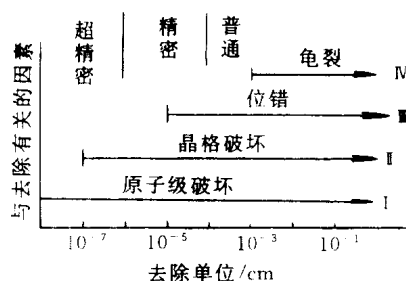


图 1-2 去除单位与其相关因素

尺寸去除,则表现为位错(见图中的Ⅲ);而以 $\text{\AA}$ 级去除则为原子单位去除(见图中Ⅰ)。按去除尺寸单位分,可以把Ⅲ—Ⅳ区间称为普通精度,Ⅱ—Ⅲ区间为精密加工,Ⅰ—Ⅱ区间为超精密加工。

第二节 超精密加工技术的意义和应用

一、超精密加工技术的发展

所谓加工技术,就是将原材料通过人的智能,加上必要的能量,使其变形,最后变成人们所要求的物品的手段。科学技术的进步,从某种意义上看,可以归纳为图 1-3 所示那样,加工技术伴随着发明、创造和设计技术的发展,促进了科学技术的发展。超精密加工技术则首当其冲。从第一节所介绍关于超精密加工的概念来看,从有了人类,便有了超精密加工技术。特别是产业革命之后,科学技术发展迅速,加工技术也日新月异。随着加工精度的提高,测量技术也不断地发展。加工与测量是互相影响、互相促进不可分离的整体。图 1-4 所示为产业革命以后,精密加工机械与测量装置相继发展的情况。

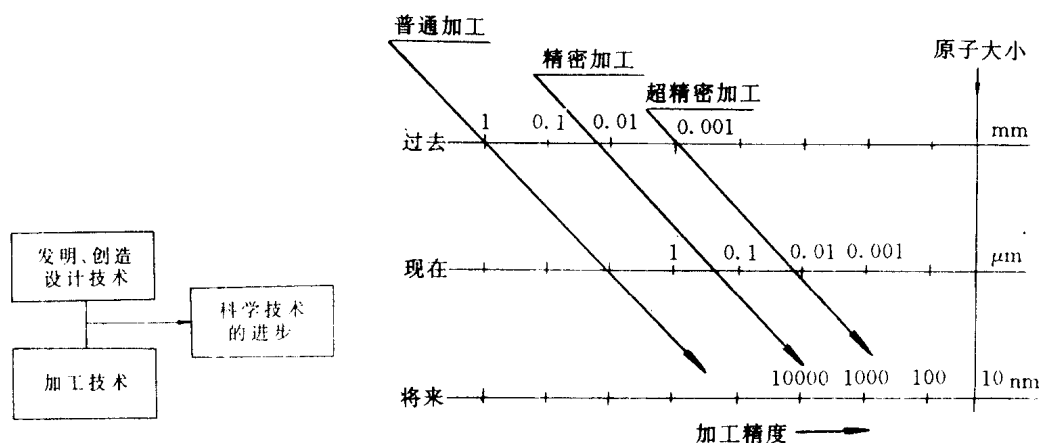


图 1-3 科学技术的进步过程

图 1-4 精密加工机械与测量装置的发展情况

1948 年开发了半导体技术之后,电子工业得到了蓬勃地发展,进而在大规模集成电路 IC、LSI 及超 LSI 的开发中,超精密加工技术得到了进一步发展,使其由对金属的加工

扩展到对非金属硬脆材料的加工,其中有代表性的是 IC 硅片、Mn-Zn 铁淦氧磁头、石英振子等。如 $\phi 100 \sim \phi 125\text{mm}$ 的硅片,厚度为 $0.4 \sim 0.5\text{mm}$,平面度要求在数微米以内,粗糙度为数纳米,它们不但要求有较高的精度,同时也要求具有极高的表面质量,既没有表面缺陷也不允许有加工变质层。为满足电子工业发展的需要,新的超精密加工方法,如超精密研磨、电子束、离子束等超精密加工技术相继被开发和应用。目前,与超精密加工技术直接相关的各种技术发展也异常迅速,现在所达到的最高水平见图 1-5。

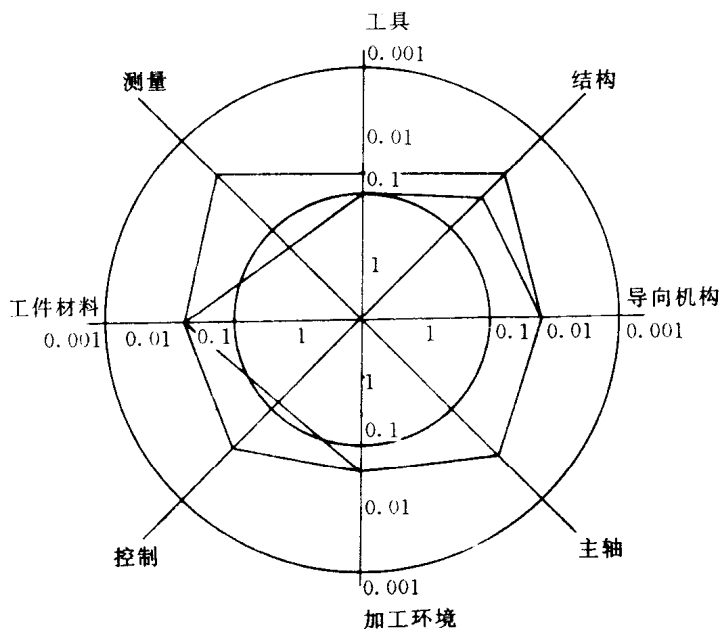


图 1-5 与超精加工直接相关的各种技术的水平(单位: μm)

二、超精密加工的意义

根据某一原理设计的机器或它的零、部件,都要经过加工、测试和组装、测试才能最后完成。对于像亚微米级机床、圆度仪、光刻机、激光测长仪、空气静压轴承等高精度的机械和仪器、装置,以及像“标准电感”、测量水的绝对密度的“标准球”、平面度的标准“光学平晶”等,作为测量标准的所谓“原器”,都必须具有极高的形位精度和尺寸精度及 R_a 值极小的表面粗糙度。1960 年以来,随着电子工业的电子计算机技术的发展,IC、LSI、超 LSI 基板的加工,以及激光核聚变用的平面反射镜、非球面抛物镜、VTR 的磁头等加工,不但要求有极高的形位公差及尺寸精度,而且也要求极高的表面质量。这些具有当代高技术的产品,都是靠当代最高的加工技术超精密加工来实现的。超精密加工的直接效果是促进了各种产品技术性能的提高,例如,机床、测试仪器、航空发动机、自动控制机械、电子产品、计算机及轴承等产品,通过超精密加工提高了性能,也就相应地促进了机械、电子、航空、航天、激光核聚变技术等高技术的发展。新的技术、精密尖端的机械设备及仪器的开发,又刺激和促进超精密加工技术的发展,这样不断螺旋式循环发展,就直接对科学技术的进步和人类文明做出贡献。

在加工中,加工精度与成本的关系,一般是随着精度的提高成本也将增加,其关系如图 1-6 所示。当加工精度接近于加工精度界限时,成本将急剧地增加,见图 1-6 中的 P_1 、

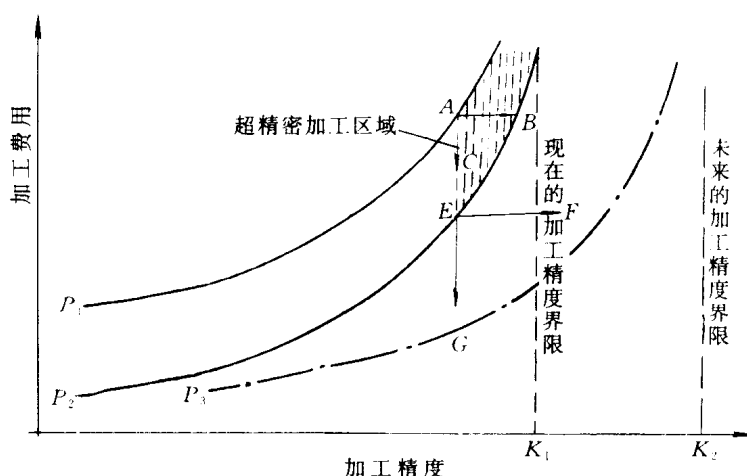


图 1-6 加工费用与加工精度的关系

P_2 精度-成本曲线。在超精密加工领域中的某一点 A, 花费同样多的成本可以得到不同的加工精度(B 点的精度高于 A 点的精度), 而在同一精度下, 也可花费不同的成本(A 点的费用高于 B 点的费用)。通过加工技术的提高, 可以由现在的加工精度界限 K_1 发展到未来的加工精度界限 K_2 。那么, 在 P_2P_3 之间的某一点 E 也有与上述的相同关系, 在同一成本下可取得 F 的精度, 而在同一精度下又可使成本降低至 G。为了实现用最低的成本达到最高的加工精度, 这就要靠超精密加工的潜在效果——合理地选择和应用超精密加工方法来实现。

三、超精密加工方法及其应用

目前, 超精密加工所要解决的问题, 不只限于形位公差、尺寸精度及粗糙度的问题, 在某些情况下, 无表面缺陷及无加工变质层则是解决问题的核心。加工本身也不只是从母体材料上去除材料, 即所谓分离加工(如金刚石车削、研磨等), 而在许多情况下是要在母体材料上附上某种材料, 即所谓附着和结合加工, 它在电子工业中的应用极为广泛(如镀膜、氧化、结晶、外延等等), 此外, 还有使材料产生变形的加工(如使材料经激光或电子束加热产生流动层等)。

根据不同的目的, 将目前所用的超精密加工方法归纳起来, 见图 1-7。

微细尺寸加工的主要方法, 是利用物理和化学能量进行加工的方法, 故可归纳于特种加工当中。表 1-2 列出根据所使用能量进行去除、附着、结合、变形等加工的各种加工方法。

过去精密与超精密加工主要应用于钢、铁等黑色金属, 随着科学技术的发展, 所应用的材料范围也在不断扩大。目前, 超精密加工的材料及其应用的相关技术领域见图 1-8。从图中可以看出, 超精密加工主要的对象是高硬度、高强度的耐热合金等难加工材料。从材料的角度看, 今后的主要对象将集中在无机硬脆非金属材料的超精密加工上。

不同的材料要使用不同的加工方法, 例如对无机非金属硬脆材料, 在目前使用车、铣、刨等切削金属的方法就无法对其进行超精密加工, 而必须采用磨料加工或特种加工的方法。各种不同的材料采用的超精密加工方法列于表 1-3。各种不同材料的产品所适用的

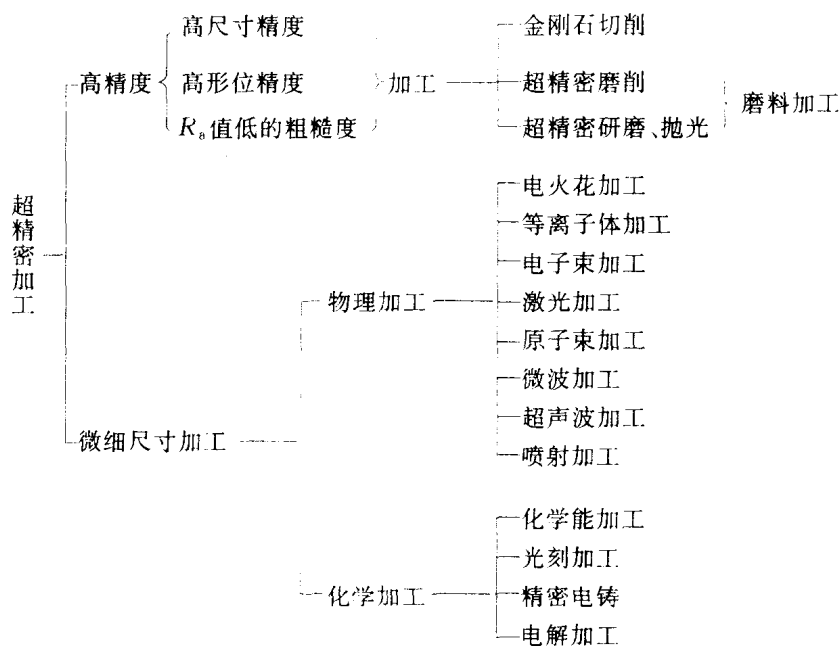


图 1-7 超精密加工的种类

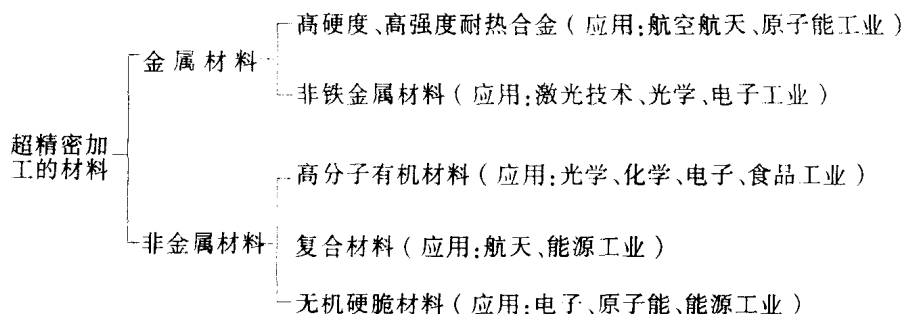


图 1-8 超精密加工的材料及其应用

超精密加工方法列于表 1-4。随着超精密加工技术的发展,各种加工方法的加工范围也在不断地扩大。表 1-4 中括号内的产品,为正在研究用超精密磨削的方法直接加工出高精度的光学零件。各种加工精度所对应的产品,各种机床、测量仪器工具等等,所能达到的精度列于表 1-5。例如在加工精度为 $0.1\mu\text{m}$ 所对应的各栏中,对应的机械零件有空气静压轴承、弹性弹簧导轨……,而这些零件都要求加工精度在 $0.1\mu\text{m}$ 左右。对应的加工机床中有精密磨床、精密金刚石车床……。这些加工设备可以达到 $0.1\mu\text{m}$ 的加工精度。依此类推,对应的其他各栏分别为在 $0.1\mu\text{m}$ 的精度下所使用的检测传感器、测量仪器、加工工具、加工方法、被加工表面分析方法以及工具及工件定位、控制装置等等。参考表 1-5,可适当地选择不同精度下的各种加工方法、测量仪器及使用的工具,等等。

表 1-2 特种加工法

能 量 形 式			去 除 加 工	附着、表面处理	结 合	变 形
物理加工	电 能	电火花	电火花加工	弧光、喷涂	电火花、焊接	电爆成形
			线切割			
		电子束	电子束加工	电子束蒸镀	电子束焊接	
				电子束热处理		
		离 子	离子束加工	离子喷镀		
			离子溅射	溅射离子喷镀		
			离子光刻	反应离子喷镀		
			反应溅射蚀刻	离子束蒸镀		
		等 离 子	等离子喷射加工	等离子束喷涂	等离子焊接	
			等离子弧加工	等离子喷镀		
	等离子光刻		等离子渗碳、渗氮			
	电 磁 能				电磁固相结合	电磁成形
	光 能	激光束加工	激光喷镀			
		激光光刻	激光热处理			
	声 能		超声波加工			
	水击能		流体喷射加工			
化学加工	化 学 能	化学研磨	化学镀层			
		化学磨削	非电解镀层			
			化学蒸镀			
		化学刻蚀	化学爆炸喷涂			
	电 化 学 能	电解磨削	电极沉积			
		电子研磨	电 镀			
		电解加工	电 铸			
		ES ^①	阳极氧化			
		STEM				

① ES—Electro—Sl.

① ES—Electro—Sl.

表 1-3 工件材料与加工方法

材 料		超精密加工方法
无机 硬 脆 材 料	半导体材料	超精密磨削
	陶瓷 玻璃 铁 淦 石 氧 蓝 英 金 宝 刚 石	超精密研磨 超精密抛光
软质金属 塑 料		超精密金刚石切削
耐热合金 复合材料		超精密磨削 超精密研磨、抛光

表 1-4 各种产品所适用的超精密加工方法

加工方法	超精密研磨、抛光		超精密金刚石切削		超精密磨削	
材 料	金属材料	非金属材料	金属材料	非金属材料	金属材料	非金属材料
被加工产品	块规 金属平板 平尺 机床导轨 面 精密载物 台 钢球 螺纹 齿轮 喷嘴 伺服阀 空气轴承 模具	石英振子 宝石 硅片 金刚石 透镜 棱镜 平晶 磁头 蓝宝石基 板 平板 金刚石刀 具	激光用反 射镜 复印机鼓 筒 VTR 转筒 磁盘 光学多面 体	红外线用零 件 塑料零件 (光学玻璃)	滚动轴承 轧辊 回转式压 缩机 录像及录 音机轴 空气轴承	(陶瓷) (光学玻 璃)
括号内产品与对应的超精密加工方法为正在研究之中的加工效果						

表 1-5 不同加工精度要求的相关加工技术

加工精度 / μm	机器零件	机 床	测量仪器、 工具	测量机	工 具	加工方法	表面质量 测量方法	工具及工 件的控制
10	滚柱、 钢球、导 轨、轴承、 精密平导 轨、精密 丝杠	精密车 床、研磨 机、透镜 磨床、压 力机械	气动测 微计、千 分表、数 字千分 尺、光偏 转反射镜	机械比 较仪、气 动测微仪	高 速 钢、硬质 合金切削 工具、轧 制工具、 模 具 冲 头、滚光 器	电火花 加工、切 削加工、 线切割、 塑 性 加 工、粗研 磨、抛光	光学显 微镜、硬 度计、化 学分析、 光谱分析	交流伺 服电机、 电脉冲电 机、电-液 压脉冲电 机、逻辑 控制继电 器、磁性 流体离合 器
1	液体动 压轴承、 空气静压 轴承、导 轨、滚柱、 钢球、滚 针轴承、 液体静压 丝杠、滚 动丝杠	精密坐 标镗床、 坐 标 镗 床、研磨 机、透镜 研磨机、 精密压力 机械	差动变 压器、感 应式传感 器、光栅、 磁尺、精 密气动测 微计、扭 簧仪、光 导摄像 管、温度、 压力、位 置传感器	精密气 动比 较 仪、光电 数显测长 仪	各种磨 料、砂轮、 金刚石刀 具、精密 轧制、冲 压模 具、 光致抗蚀 剂	精密电 火花加 工、电解 研磨、超 精密切 削、磨削、 电子束加 工、激光 加工、精 密研磨	紫外线 显微镜、 活 化 分 析、显微 硬度计、 荧光分析	交、直 流伺服电 机、最适 应控制、 晶体管逻 辑控制继 电器

(续)

加工精度 / μm	机器零件	机 床	测量仪器、 工 具	测量机	工 具	加工方法	表面质量 测量方法	工具及工 件的控制
0.1	精密空 气静压轴 承、导轨、 弹性导 轨、硬质 合金、陶 瓷球、钢 球、含油 轴承、滚 珠丝杠	精密磨 床、精密 金刚石镜 面车床、 精密研磨 机、超精 密压力机 械、集成 电路图形 制作机械	精密差 动变压 器、激光 干涉仪、 光通量电 感、电容 传感器、 放射线计 量器	激光干 涉测长 仪、电磁 比较仪、 静电比较 仪	金 刚 石、CBN 等各种微 粉磨料、 单晶金刚 石、光致 抗蚀剂	镜面切 削、磨削、 真 空 镀 膜、镜面 研磨、化 学蒸镀、 电、化学 铸、金刚 石刀具超 精密切削	X 射线 微量分析 仪、扫描 电镜(反 射、透 射)、电子 束 IC 电 路检测仪	精 密 交、直流 伺 服 电 机、微机 自适应控 制
0.01	整体弹 性导轨、 电磁静电 微动导 轨、热变 形微动导 轨	精密光 学元件研 磨机、超 精密磨 床、IC 电 路光刻 机、光栅 加工装 置、IC 电 路 X 射线 光刻机	超精密 差动变压 器、激光 多普勒干 涉仪、光 纤维传感 器	激光干 涉测长 仪、光纤 维测长 仪、精密 轮廓仪、 泰勒圆度 仪	磨料、 研磨盘、 研磨液、 离子、激 光、电子、 X 射线光 致抗蚀 剂、超精 密冲压模 具	EEM、 机械化学 抛光、激 光热处理、 电子束光 刻、晶体 外延	电子衍 射、透射 电子显微 镜、离子 显微镜	高精度 直流伺服 电机、预 造控制电 磁伺服执 行元件、 微机
0.001	电子、 离子静 电、电磁 偏转元 件、电致 、磁致伸 缩导轨	超精密 研磨、精 密电子束 光刻、离 子束加工 装置	电子传 感器、X 射线传感 器、离子 传感器	激光精 度测长 仪、高精 度轮廓 仪、扫描 型透射电 镜、透射 电镜	原子、 分子、离 子、活性 原子	非接触 化学机械 抛光、离 子加工	离子分 析、电子 衍射、电 场放射电 镜	电致、 磁致超高 速电子计 算机
<0.001		IC、半 导体、原 子、分子 排列加工 装置	电子 线、离子 线、X 射 线传感器	X 射线 测定仪、 电子衍射 装置	原子、 分子、中 子	物质合 成加工		

在各种超精密加工方法中,按加工尺寸单位来划分,属于原子、分子级加工单位的加工方法列于表 1-6。这些加工方法因为在去除材料或附加材料的过程中是以原子级或分子级为单位的,故在被加工表面上不产生或很少产生加工变质层,所以能得到没有表面缺陷、与基体材料相同的物理、机械性能的表面。

表 1-6 原子、分子级单位的加工方法

加 工 机 理		加 工 方 法
去 除 加 工	剪切、拉伸破坏 化学分解(气体、液体、固体)	金刚石刀具超精密切削 化学腐蚀、反应性离子、等离子加工、机械化学加工、化学机械加工
	电化学分解(液体、固体) 蒸发(气体、固体、热式、真空) 扩散(气体、液体、固体、热式、真空) 熔化、溶解分离(气体、液体、固体、热式) 溅射(固体、力学)	电解研磨、电解加工 电子束加工、热射线加工、激光加工 去除扩散、离子扩散、脱碳 熔化、溶解去除 离子溅射加工、反应性离子溅射加工
结 合 加 工	化学沉积(气体、液体、固体) 电化学沉积(气体、液体、固体) 热沉积(气体、液体、固体) 沉积扩散、熔化结合(热式) 物理沉积、物理结合(力学) 注入(力学)	气相镀、化学镀、氧化、氮化、活性化学反应涂层 电镀、电铸、阳极氧化 蒸镀、晶体生长、晶体外延、分子束沉积 烧结、渗碳、离子氮化、掺杂、熔融涂层、浸镀 溅射沉积、离子束沉积、离子镀 离子注入

第三节 超精密加工技术的新课题

目前,超精密加工所能达到的精度为 $0.02 \sim 0.01 \mu\text{m}$,还不能以数埃的单个原子为单位进行加工,距加工的极限还有相当的距离。国外虽有人声称已开发了以原子级去除单位的加工方法,但还未在实际生产中应用。达不到原子级精度的原因,除去余量的单位达不到原子级以外,还有许多与其相关的其他问题,比如,材料的弹性变形和热变形,就很难使被加工件达到原子级的精度。例如,长 100mm 的钢制零件,要控制其热变形在 $0.01 \mu\text{m}$ 以内,就必须控制温度变化在 0.01°C 以内,这在加工领域中还很难实现。此外,还有许多的难题,需在将来解决。为了促进超精密加工技术迅速地发展,应深入研究和探讨下列问题。

1. 努力开发加工单位极小的超精密加工方法,必须在加工机理的本身就使其误差分散在 1nm 以下的水平上。

目前加工单位比较小的加工方法有弹性破坏加工(EEM)、化学加工、离子束加工、电子束加工等离子体加工等等。目前的单晶金刚石刀具的切削以及金刚石砂轮的超精密磨削,从它们的加工机理上看其加工单位就很大,从本质上讲,要想得到 $0.05 \mu\text{m}$ 的精度是极困难的。对于原子级或分子级的加工,也必须被加工表面的物理、机械性能及形位尺寸精度等用高精度的加工反馈装置及计算机进行控制,否则对加工中所发生的系统误差是无法除掉的。

2. 开发新的、高性能的加工机械及测试装置的移动导向机构及轴承。

到目前为止,已开发的超精密空气静压轴承和空气静压导轨,其精度最高的系统误差仍为 $0.1 \mu\text{m}$,随机误差为 $0.05 \mu\text{m}$ 左右。

新的机械导向从动零件采用整体弹性体或采用压电、磁致伸缩等微动伺服、从动机构或热变形机构,这些机构本身产生的随机误差为 $0.01 \mu\text{m}$ 左右。如果可用新的测量控制方式修整系统误差的话,精度还可提高。除这些之外,用高弹性合金、红宝石制造的滚动导轨,系统误差为 $0.5 \mu\text{m}$ 左右,随机误差可能超过 $0.1 \mu\text{m}$ 。

3. 开发系统误差极小的检测和控制方式,包括开发检测和控制装置。

高精度和高可靠性的检测仪器和控制装置可通过使用高精度、高可靠性、高速度、大容量的电子计算机的检测、控制方式达到要求。但是其前提是开发新的、高性能的传感器以及新的伺服从动机构。

由于用人工要产生随机误差,而且用人工的操作方式加工机械本身产生的随机误差也无法消除。为此需要使整个加工过程自动化和无人管理。

4. 为了制造出系统误差和随机误差都极小的超高精度的机床和超高精度的检测装置,必须大力开发、利用对加工装置和测试装置的动态、静态及温度特性等具有高性能、可靠的多功能的解析手段。例如,利用有限元法,计算机模拟、形态解析法等等。

5. 必须采用严格的质量管理,质量保证系统,为此就必须开发高精度、高速度和高可靠性的传感器和读出装置(数字式或模拟式),使生产过程中的质量管理自动化。而且要对大量生产的加工方式或单件、小批量生产的加工方式的超精密加工都能适用。

6. 为能加工出超高形位公差精度、超高尺寸精度和无加工变质层的产品,必须开发新的展成加工法和基于新原理的其他加工方法。例如,利用超高精度的数控加工几何学曲面的展成加工法和利用点、线、平面工具(金刚石工具、离子、原子、电子、平面研具等等)加工高精度曲面、平面的展成法等。

7. 开发适于超精密加工并能获得超高精度,超高表面质量的新型材料。例如最近开发的超微粉烧结金属、非结晶金属、超微粉陶瓷、非结晶半导体陶瓷、复合高分子材料、新高分子材料等。

只要在上述的某一个方面,能够得到发展或突破,必将导致超精密加工技术的相应的发展。