

机械加工 工艺手册

第2卷

机械工业出版社

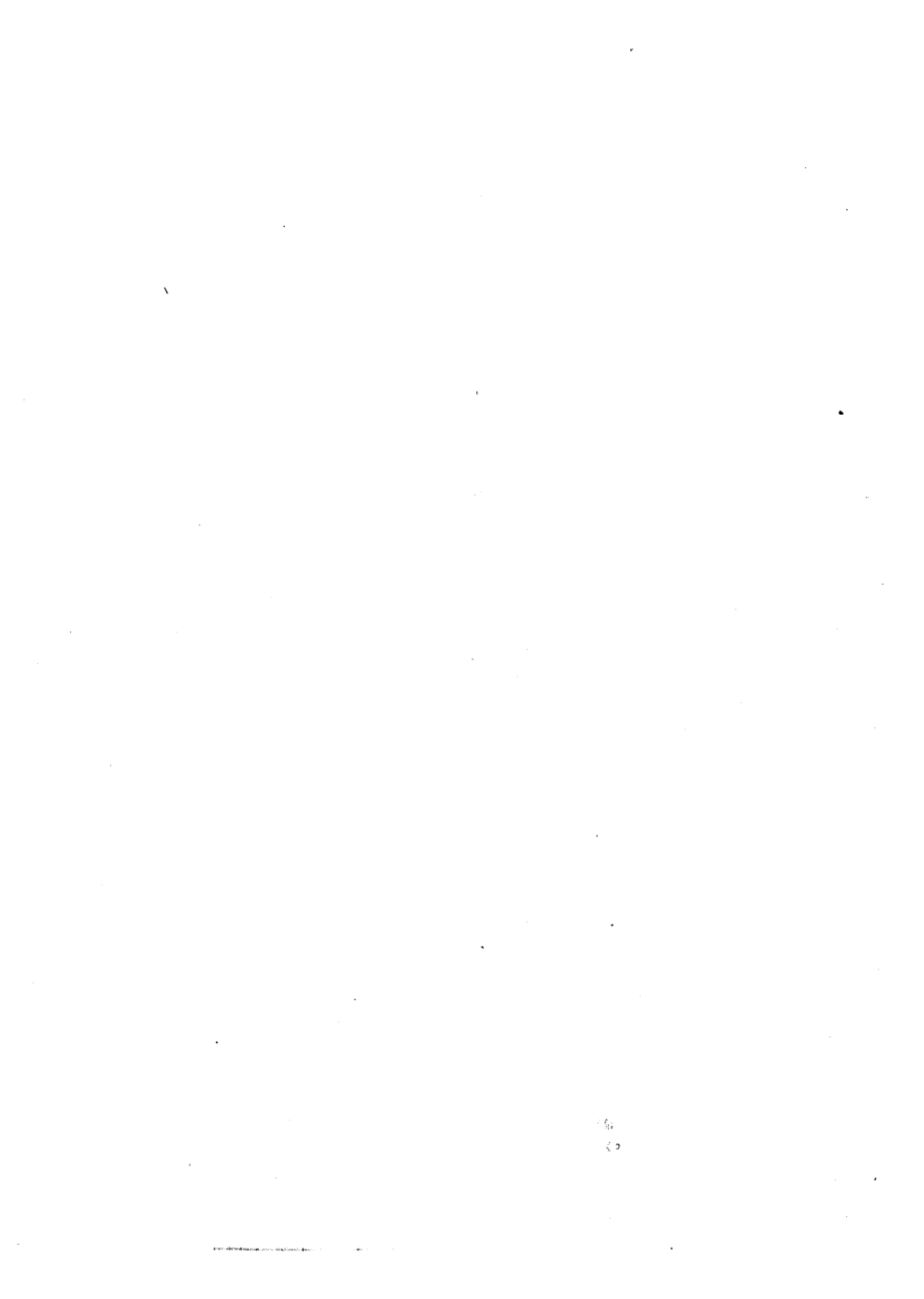
第14章 精密加工及 超精密加工

主 编 王先逵 (清华大学)
编 写 王先逵

主 审 庞 滔 (哈尔滨工业大学)

审 稿 赵培炎 (特邀) (长沙国防科技大学)

责任编辑 熊万武



第1节 概 述

1 精密加工和超精密加工的范畴

精密加工和超精密加工在当前机械和电子设备制造技术中占有十分重要的地位。所谓精密加工是指在一定发展时期中,加工精度和表面质量达到较高程度的加工工艺,当前是指被加工零件的加工精度为 $1\sim 0.1\mu\text{m}$ 、表面粗糙度为 $Ra0.2\sim 0.01\mu\text{m}$ 的加工技术;而超精密加工则是指加工精度和表面质量达到最高程度的精密加工工艺,当前是指被加工零件的尺寸精度高于 $0.1\mu\text{m}$ 、表面粗糙度 $Ra\leq 0.025\mu\text{m}$,以及所用机床定位精度的分辨率和重复性高于 $0.01\mu\text{m}$ 的加工技术。表14-1-1中列出了精密加工和超精密加工目前达到的水平。

表14-1-1 精密加工和超精密加工当前达到水平

项目	加工类别	
	精密加工	超精密加工
尺寸精度	2.5~0.75	0.3~0.25
圆度	0.7~0.2	0.12~0.06
圆柱度	1.25~0.38	0.25~0.13
平面度	1.25~0.38	0.25~0.13
表面粗糙度 Ra 值	0.1~0.025	≤ 0.025

目前,超精密加工正从微米、亚微米级($1\sim 10^{-2}\mu\text{m}$)的加工技术向纳米级($10^{-2}\sim 10^{-8}\mu\text{m}$, $1\text{nm}=10^{-9}\mu\text{m}$)的加工技术发展。纳米加工技术是当今最精密的制造工艺,从物质加工精度的理论上分析,纳米工艺的加工方法(如离子溅射去除、镀膜和注入等)可以达到去除、附着或结合以原子或分子为单位的物质层,因此已经深入到物质内部结构,这往往已经是单纯用常规加工方法所难以达到的了。

精密加工和超精密加工的划分主要是根据加工精度和表面质量这两类指标,这种划分是相对的,因为生产技术在不断发展,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就是一般加工。随着科学技术的不断发展,加工精度越来越高,图14-1-1表示了20世纪以来,一般加工、精密加工和超精密加工的发展历程^[3]。

当前,微细加工、超微细加工常常和精密加

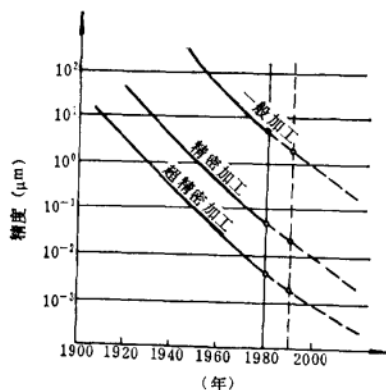


图14-1-1 加工精度的发展历程

工、超精密加工并提。微细加工技术是指制造微小尺寸零件的生产加工技术,超微细加工技术是指制造超微小尺寸零件的生产加工技术^[2]。微细加工和超微细加工的出现和发展与大规模集成电路有密切关系,集成电路要求在微小面积的半导体材料上能容纳更多的电子元件,以形成功能复杂而完善的电路。电路微细图案中的最小线条宽度是提高集成电路集成度的关键技术和标志。表14-1-2表示了集成电路集成度与最小线条宽度的关系。大规模集成电路的制造要采用微细加工技术;而超大规模集成电路的制造要采用超微细加工技术。

表14-1-2 集成电路集成度与最小线条宽度

参数与性能	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)
分类			
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的加工是不同的,一般尺寸加工时,精度是用所加工尺寸与尺寸误差的比值来表示的,如现行的尺寸公差就是这样制订的,而微细加工时,由于加工尺寸很小,精度就必须用尺寸的绝对值来表示^[2]。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,切削深度极小,切削可能

在材料晶粒内部进行,切屑大小(即去除的一块材料的大小)要用“加工单位尺寸”或称“加工单位”来表示。这种加工单位现在的限度是分子或原子。

精密加工和微细加工是有密切联系的,它们都是现代制造技术的前沿。微细加工是属于精密加工范畴内的。

2 精密加工和超精密加工方法

根据加工方法的机理和特点,精密加工和超精密加工方法可以分为以下四类。其所用工具、所能达到的精度和表面粗糙度以及应用见表14-1-3。

表14-1-3 常用的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 (μm)	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; 有色金属及其合金等软材料; 其他材料刀具, 各种材料	球、磁盘、反射镜
	精密、超精密铣削					多面棱体
	精密、超精密磨削					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	金刚石等磨料				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
	液中研抛	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	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
	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

(续)

分 类	加 工 方 法	加 工 工 具	精 度 (μm)	表面粗糙度 R_a (μm)	被加工材料	应 用
特 种 加 工	化学蚀刻	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	划线、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(如印刷电路板)
	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、铁丝)、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	打孔、切割、焊接、热处理
复 合 加 工	精密电解磨削	工具极、电解液、砂轮	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	工具极、电解液、磨料	1~0.1	0.025~0.008		平面、外圆、孔
	精密电解抛光	工具极、电解液、磨料	10~1	0.05~0.008	导电金属	平面、外圆、孔、型面
	精密超声车削	超声波发生器、换能器、变幅杆、车刀	5~1	0.1~0.01	难加工材料	外圆、孔、端面、型面
	精密超声磨削	超声波发生器、换能器、变幅杆、砂轮	3~1	0.1~0.01		外圆、孔、端面
	精密超声研磨	超声波发生器、换能器、变幅杆、研磨剂、研具	1~0.1	0.025~0.008		外圆、孔、平面
	机械化学研磨	研具、磨料、化学活化研磨剂	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	抛光器、增压活化抛光液	0.01	0.01	各种材料	外圆、孔、平面、型面
	化学机械抛光	抛光器、化学活化抛光液	0.01	0.01		外圆、孔、平面、型面

2.1 金刚石刀具超精密切削

金刚石刀具超精密切削主要是应用天然单晶金刚石车刀对铝、铜和其他软金属及其合金进行切削(车或铣)加工,可以得到极高的精度和极低的表面粗糙度参数值,所以称之为镜面车削。在金刚石车削的基础上,又发展了金刚石刀具超精密铣削和镗削,分别用来加工平面、型面和内孔。金刚石刀具超精密切削是当前软金属材料最主要的超精密加工方法。

在刀具方面,除金刚石材料外,还发展了立方氮化硼、复方氮化硅和复合陶瓷等新型超硬刀具材料。

2.2 精密和超精密磨料加工

精密和超精密磨料加工是利用细粒度的磨粒和微粉主要对黑色金属、硬脆材料等进行加工,得到

高加工精度和低表面粗糙度参数值。精密和超精密磨料加工可分为固结磨料和游离磨料两大类加工方式。

2.2.1 固结磨料加工

将磨粒或微粉与结合剂粘合在一起,形成一定的形状并具有一定强度(有时尚须进行烧结),如砂轮、砂条、油石等。也可将磨粒或微粉与结合剂涂敷在带基上而形成砂带。

(1) 精密和超精密砂轮磨削 精密砂轮磨削是利用精细修整的粒度为60~80 μm 的砂轮进行磨削,可以达到加工精度为1 μm 、表面粗糙度为 $R_a 0.025\mu\text{m}$ 。超精密砂轮磨削是利用经过仔细修整的粒度为W40~W5的砂轮进行磨削,可以获得加工精度为0.1 μm 、表面粗糙度为 $R_a 0.025\mu\text{m}$ 以下的加工表面。目前已应用金刚石、立方氮化硼等高硬磨料的砂轮来进行超精密磨削。

(2) 精密和超精密砂带磨削 利用粒度为 W28~W2.5 的砂带进行磨削, 分为开式和闭式(环带)两种磨削方式, 是近年来发展起来的新方法。

(3) 其他加工 精密砂带研抛、精密油石研磨、精密珩磨和超精加工。

2.2.2 游离磨料加工

在加工时, 磨粒或微粉成游离状态, 如研磨时的研磨剂、抛光时的抛光液, 其中的磨粒或微粉在加工时不是固结在一起的。游离磨料加工的典型方法有精密研磨和精密抛光等。近年来, 在这些传统工艺的基础上, 出现了许多新的工艺方法, 如喷射磨料加工(液体抛光、喷砂)、弹性发射加工、液体动力抛光、磁流体抛光等。

传统的研磨、抛光加工方法虽然古老, 但现在仍然是重要的和主要的精密加工和超精密加工手段。例如: 空气静压轴承、精密滑动导轨和精密丝杠等精密元件的制造, 其最终工序仍靠研磨等方法来保证其精度。

2.3 精密特种加工

特种加工是指非传统性加工, 它是相对于常规加工而言的, 主要有物理化学加工和电加工。当前, 许多特种加工向精密方向发展, 出现了精密电火花加工、精密电解加工、精密超声波加工、分子束加工、电子束加工、离子束加工、原子束加工、激光加工、微波加工、等离子体加工、光刻、电镀及变形加工等。特种加工不是依靠刀具和磨料来切削, 而是利用电能、光能、声能、热能和化学能等来去除材料, 在加工机理上与切削加工截然不同。在特种加工中, 有些加工方法不仅可以进行去除加工, 而且可以进行附着加工(沉积加工)和结合加工。附着加工可在被加工表面上覆盖一层不同材料, 即镀膜, 也可在局部地区沉积一块相同材料, 如离子沉积(离子镀)。结合加工是使两种材料结合在一起, 如将某些金属离子注入到工件表层, 以改变工件表面层材料的化学成分和组织, 达到要求的物理机械性质; 也可以是使两个工件或两种材料焊接或粘接在一起, 如激光焊接、化学粘接等。

特种加工中, 工具的硬度和强度可以低于工件的硬度和强度, 有些工具甚至无损耗, 如激光加工、离子束加工等, 因此扩大了被加工材料的范

围。

2.4 精密复合加工

复合加工是将几种加工方法叠合在一起, 发挥各个加工方法的长处, 达到高质量高效率。复合加工有三种方式。

2.4.1 传统加工和特种加工的复合

这种复合加工是将传统的切削加工和特种加工叠加在一起, 有两种作用叠加、三种作用叠加, 甚至四种作用叠加。如电解抛光是将机械抛光过程中加上电解作用, 如图14.1-2, 其中图a为外圆电解抛光, 图b为内圆电解抛光。机械化学研磨是研磨和化学加工的复合, 即在研磨剂中放入酸、碱、盐等活性物质, 与被加工表面产生化学反应, 使金属腐蚀溶解, 在研磨时受磨料的机械作用而被去除, 从而提高加工效率及质量。超声电解磨削是在磨削过程中加上电解作用, 同时使工件产生超声振动, 这是三种作用的复合。此外, 尚有超声电火花电解磨削, 这是四种作用的复合。

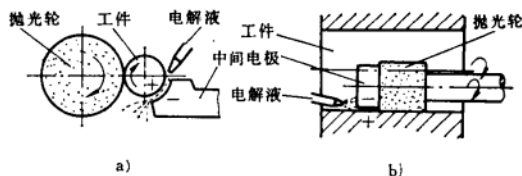


图14.1-2 电解抛光加工

a) 外圆电解抛光 b) 内圆电解抛光

2.4.2 特种加工和特种加工的复合

如电火花电解加工是电物理和电化学两种特种加工的复合。超声电解加工是力学和电化学两种特种加工的复合。还有超声电火花加工等都是特种加工的复合加工。

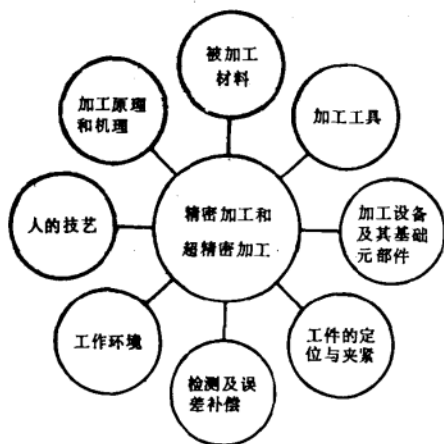
2.4.3 传统加工与传统加工的复合

近年来, 出现了传统加工与传统加工的复合加工, 如研抛加工就是研磨与抛光的复合, 传统的研磨加工是用铸铁、硬木等硬质研具和研磨剂来进行加工的, 可获得很高的尺寸精度、几何形状精度和很低的表面粗糙度参数值, 但效率较低; 传统的抛光加工是用软(布)轮和抛光剂(液)来进行加工

的,可获得很低的表面粗糙度参数值和高效率,但精度不一定高。把研磨和抛光两者结合起来,将铸铁研具改为由硬橡胶、塑料等半硬半软的研具,即可取得研抛加工的效果。例如,砂带研抛就是适当选择接触轮的材料和硬度(如选用邵氏55°硬橡胶)以达到同时发挥研磨与抛光的作用。

3 影响精密加工和超精密加工的因素

精密加工和超精密加工发展到今天,已不再是一种孤立的加工方法和单纯的工艺过程,而是形成了内容极其广泛的制造系统工程,它涉及超微量切除技术、高稳定性和高净化的加工环境、计量技术、工况监控及质量控制等,由此可以归纳出影响精密加工和超精密加工的因素有:加工原理和机理、被加工材料、加工工具、加工设备及其基础元部件、工件的定位与夹紧、检测及误差补偿、工作环境和人的技艺等,见图14-1-3。



3.1 加工原理与加工机理

一般加工时,“工作母机”的精度总是要比被加工零件的精度高,这一规律称之为“母性”原则。对于精密和超精密加工,由于被加工零件的精度要求很高,用更高精度的“工作母机”来加工有时已不可能,这时可利用精度低于工件精度要求的机床设备,借助于工艺手段和特殊工具来加工,这是创造性加工原则,而且是一种直接式创造性原则。另外,用较低精度的机床设备和工具,制造出加工精度比被加工零件精度更高的机床设备和工

具,即第二代“工作母机”和工具,再用此设备加工高精度工件,为间接式创造性加工。进行创造性加工多采用各种误差补偿方法来提高加工精度。

精密加工和超精密加工的关键是在最后一道工序能够从被加工表面微量去除表面层,微量去除表面层越薄,则加工精度越高,因此微量去除是精密加工和超精密加工的又一条重要原则。金刚石刀具超精密切削是当前最成功的微量切除加工工艺,其切削机理和一般切削加工是有差别的。

3.2 被加工材料

精密加工和超精密加工的被加工材料,在化学成分、物理机械性能和制造工艺上都有严格的要求;应该质地均匀,性能一致、稳定,无外部及内部微观缺陷。

超精密加工用的材料,其化学成分的误差应在 $10^{-2} \sim 10^{-8}$ 数量级,且不能含有杂质;其物理机械性能(拉伸强度、硬度、延伸率、弹性模量、热导率、膨胀系数等)应达 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ 数量级。冶炼、铸造、轧辗、热处理等工艺过程均应严格控制,温度控制、熔渣过滤、晶粒大小和方向的控制都对材料的性能有很大影响。

精密加工和超精密加工应该用相应的精密加工和超精密加工用材料,用一般加工用的材料或不合要求的材料进行精密加工和超精密加工是不能达到预期效果的。

3.3 加工工具

对于有色金属等软材料的精密加工和超精密加工,一般都采用金刚石刀具,天然金刚石有较好的切削性能,但价格昂贵;用人造聚晶金刚石刀具进行超精密切削时,其加工质量不如天然金刚石,因此,目前大多采用天然金刚石刀具进行超精密切削。金刚石刀具的角度选择和刃磨是一个关键问题,其中有晶体定向、切削刃钝圆半径的刃磨等,它们对刀具耐用度和加工表面粗糙度有直接影响。

由于金刚石是由碳原子组成的,与铁原子有较大的亲和力,故不用金刚石刀具切削黑色金属。除金刚石刀具外,还可以采用立方氮化硼、陶瓷、涂层硬质合金及细粒度硬质合金等刀具进行精密和超精密切削,这些刀具材料的切削效果不如金刚石,但能加工黑色金属。

对黑色金属等硬脆材料的精密加工和超精密加

工,一般多采用磨削、研磨、抛光等方法。精密和超精密磨削时,通常采用粒度为 $240^{\circ}\sim W7$ 或更细的白钢玉(WA)或铬钢玉(PA)磨料和树脂结合剂制成的紧密组织砂轮,经金刚石精细修整后进行加工。在精密和超精密研磨、抛光中,除采用铸铁做研具、呢毡等做抛光器外,还采用锡、聚酯等做研具或抛光器,并在研磨、抛光前进行精细修整,能获得低表面粗糙度参数值的表面。至于磨粒和微粉,除采用粒度为 $W40\sim W0.5$ 的氧化铝、碳化硅外,已大量采用金刚石和立方氮化硼等超硬磨料或一些如金刚石、铬刚玉等软质磨料。超硬微粉可以高效率地得到高质量的加工表面,而软质磨料主要不易划伤加工表面,这对加工一些软质材料时是很关键的。磨料要求颗粒均匀,粒度合适,细粒度磨料虽然可以达到极低的表面粗糙度参数值,但生产率很低。现在,最细的微粉,其磨粒基本尺寸可小于 $0.5\mu\text{m}$,甚至可达 7nm 。

3.4 加工设备及其基础元部件

精密加工和超精密加工所用的加工设备主要是指精密切削机床、超精密切削机床、各种研磨机和抛光机等。以超精密车床为代表,用来加工轴、盘、球和各种带曲面的零件等;而超精密铣床,配有精密转台,用来加工多面体。研磨机和抛光机,过去都认为要求不高,实际上用于超精密加工时,必须有很高的精度。因此,对于精密加工和超精密加工所用的加工设备应有以下一些要求:

1) 高精度。要达到高的几何精度、定位精度和分辨率,加工设备必须具有高精度的主轴系统、进给系统(包括微位移装置),现在的超精密车床,其主轴回转精度可达 $0.02\mu\text{m}$,导轨直线度可达 $1000000:0.025$,定位精度 $0.013\mu\text{m}$,进给分辨率 $0.005\mu\text{m}$ 。其回转零件应进行精密的动平衡。

2) 高刚度。包括静刚度和动刚度,不仅要注意零件本身的刚度,而且要考虑接触刚度,从而使机床受力后的变形极小。

3) 高稳定性。整个设备应长时间保持精度,不受温度等影响。在使用和运输过程中,应有很高的抗振性。因此,运动零件的材料应有较好的耐磨性,运动件的结构形式可采用气动、液动或滚动以减少摩擦磨损;基础件(床身、底座)应选用抗振性较好的材料;设备应配置温控系统等。而设备当然应在恒温、净化、防振的环境中工作。

4) 高度自动化。现代化的精密加工和超精密加工设备多有计算机数字控制以实现自动化、扩大技术性能和减少人为因素的影响。

精密加工和超精密加工设备中的主要基础元部件有主轴及轴承、导轨、微位移装置、分度转台等。

工件无变形,装夹所用的夹具是加工设备中的一个关键部分。

3.5 工件的定位与夹紧

在精密加工和超精密加工时,除一般定位原则外,可考虑以下一些原则:

1) 可采用过定位结构以提高工件刚度。

2) 要解决工件的无变形安装。由于超精密加工时是微量去除,可能产生安装变形大于切削余量的情况。对于薄片状零件(如磁盘等),极易变形,可用真空吸盘来装夹。对于一些小零件,可采用液状橡胶、沥青及低温腊等将工件粘于夹具上进行加工。

3) 尽量减少装夹次数,在一次装夹下加工较多的表面,以保证加工余量要求和相对位置精度。

4) 可采用以加工表面本身来定位的方法得到均匀的加工余量,保证微量去除。

3.6 检测及误差补偿

精密加工和超精密加工必须具备相应的检测技术和手段,这不仅要进行加工零件的精度和表面粗糙度的检验,而且要测量加工设备的精度和基础元部件的精度。

高精度的尺寸和几何形状可采用分辨率为 $0.1\sim 0.01\mu\text{m}$ 的电子测微计、分辨率为 $0.01\sim 0.001\mu\text{m}$ 的电感测微仪或电容测微仪来测量。圆度还可以用精度为 $0.01\mu\text{m}$ 的圆度仪来测量。

轴系回转精度的测量是一个比较复杂的问题,低速时静态检测可用电感或电容测微仪与基准球来测量,精度可达 $0.1\sim 0.005\mu\text{m}$;高速时的动态检测可利用电容测微仪和同步示波器测量定点峰值变动的方法,精度可达 $0.01\mu\text{m}$ 。

导轨直线度可采用电子水平仪、自准直仪和激光干涉仪等角度检测方法来测量,精度为 $1000000:0.5\sim 0.02$ 。此外,也可用基准平尺与电子测微计分离平尺误差的方法来测量,精度可达 $1000000:0.1$ 。

表面粗糙度的测量可分为接触式和非接触式。接触式测量多用触针式的表面轮廓仪或表面形貌仪来检测,其传感器多为电感式和压电晶体式,这种测量表面粗糙度方法的最大不足是易划伤已加工表面,因此出现了许多非接触测量方法。非接触式测量方法很多,有气动法、电容法、超声微波法和光学法等。

表面应力与表面变质层深度可采用X光衍射法和激光干涉法等来测量。

精密检测和自动化检测是检测技术的两个重要发展方向。在自动化检测领域里,非接触在线测量和误差分离、补偿技术是两个主要发展方面。误差分离与误差补偿有密切关系。误差分离技术是用多个传感器在多个方位上同时对工件的形位误差和机床运动部件的运动误差进行检测,利用微机处理分离各自的误差成分,以便分析造成误差的原因。误差补偿又可分为静态误差补偿和动态误差补偿两类。静态误差补偿是事先测出误差值,按需要的误差补偿值设计制造出补偿装置(如校正尺等),加工时进行误差补偿。在数控机床床上,可利用微机建模软件补偿来代替硬件补偿。动态误差补偿是在在线检测的基础上,通过计算机建模和反馈控制系统进行实时补偿,因此,需要形成一个闭环的自适应误差补偿系统。

误差预防和误差补偿是提高超精密加工精度的两大策略。误差预防策略是通过提高机床制造精度、保证加工环境的条件等来减少误差源或减少误差的影响。误差补偿策略是消除误差本身的影响。

3.7 工作环境

精密加工和超精密加工的工作环境主要有温度、湿度、洁净和隔振等方面的要求,保证一定条件的工作环境是必要的,它和加工效果有密切关系。

(1) 恒温 根据不同要求环境温度可控制在 $\pm 1 \sim \pm 0.1^\circ\text{C}$,在要求更高的地方,可采用多层小环境恒温的办法,如将超精密机床放在大恒温间的小恒温室内,再用恒温罩罩上,罩内用恒温液喷淋机床,恒温精度可达 $\pm 0.02 \sim \pm 0.0005^\circ\text{C}$ 。

(2) 恒湿 在恒温室内,一般湿度保持在55%~60%,主要为了防止锈蚀、花岗石膨胀和激光干涉仪飘移等。

(3) 净化 净化主要是为了避免尘埃的影

响。超精密加工时,空气中的尘埃可能会划伤低表面粗糙度参数值的加工表面。超精密研磨或抛光时,尘埃的颗粒可能比微粉磨料的颗粒大,从而破坏了加工表面的粗糙度。一般洁净度要求10000~100级(100级指每立方英尺含大于 $0.5\mu\text{m}$ 的尘埃不超过100个,余类推)。由于大面积的超净间造价很高,且不易达到高洁净度,因此出现了超净工作台、超净工作腔等小面积的超净环境,这时,在其内通入正压洁净空气,以达到要求的洁净度。

(4) 防振与隔振 精密加工和超精密加工设备多安放在带防振沟和隔振器的防振地基上,但对低频振动的隔离效果较差。使用空气弹簧(垫)对低频振动的隔离效果较好,且灵活方便,因此应用十分广泛。

3.8 人的技艺

操作者的技术水平、知识面和操作熟练程度,往往是影响超精密加工质量和效率的重要因素。当前,精密加工和超精密加工的加工质量在一定程度上靠操作工人的技艺来保证。机床设备的精度、检测仪器的精度和操作者的技艺水平三者决定了工件的加工精度。从事精密加工和超精密加工的操作者,不仅要有高超的技艺和专业学识,而且要有进取攻坚的思想素质。以金刚石刀具的刃磨为例,其刃磨质量与刃磨操作者的技艺水平关系十分密切,操作者要熟悉金刚石的构造和性能、各种研磨磨料的特性和高超的研磨技艺,同时还要了解新型检测仪器的性能和操作,才能在相应设备、检测装置等支持环境下,刃磨出高质量的金金刚石刀具。又如在空气静压轴承制造中,内外环的配合间隙仍靠技术工人的高超研磨技艺来保证,达到回转精度和刚度的要求。可见要重视人的技艺的培养。

4 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,当前有如下几个特点。

(1) 精密加工和超精密加工是一门多学科的综合高级技术 精密加工和超精密加工要达到高精度和高表面质量,不仅要考虑加工方法本身,而且要考虑整个制造工艺系统和综合技术,因此涉及面较广。如果没有这些综合技术和条件的支持,孤立的加工方法是不能得到满意的效果的。在研究超精

密切削理论和表面形成机理、建立数学公式和模型的同时,还要研究各相关技术。

(2) 精密加工和超精密加工与微细加工和超微细加工密切相关 精密加工和微细加工有共同的基础和相同的加工方法。这些加工方法除切削加工、磨削加工、特种加工外,还包括涂层加工、蚀刻、切片、焊接和变形加工等。精密加工比微细加工的范围更广阔,内容也更丰富。

(3) 精密加工和超精密加工出现了许多新工艺和复合加工技术 精密加工和超精密加工打破了传统加工工艺的范围,出现了激光加工、离子束加工等许多特种加工新工艺。特种加工方法的出现,开辟了精密加工的新途径,不仅可以加工一些高硬度、高脆性的难加工材料,如硬质合金、淬火钢、金刚石、陶瓷、石英等。同时可以加工刚度很差的精密零件,如薄壁零件、弹性零件等。

当前,传统加工方法仍然占有较大的比例,而且是主要加工手段,经过长时期的发展,有很厚实的基础,由于特种加工的发展,出现了各种复合加工技术,可以提高精度、降低表面粗糙度参数值、提高效率,而且扩大了加工应用范围。

(4) 加工检测一体化 超精密加工的在线检测和在位检测(工件加工完毕卸下,在机床上直接进行检测)极为重要,因为加工精度很高,表面粗糙度参数值很低,如果工件加工完毕卸下后再检测,发现问题就难再进行加工。因此要进行在线检测和在线检测的可能性和精度的研究。

(5) 精密加工和超精密加工与自动化技术联系紧密 采用微机控制、误差补偿、适应控制和工艺过程优化等技术可以进一步提高加工精度和表面质量,避免手工操作人为引起的误差,保证加工质量及其稳定性。

第2节 金刚石刀具 的超精密切削

1 金刚石刀具超精密切削机理

1.1 切屑厚度与材料剪切应力的关系

金刚石刀具超精密切削的机理和一般切削是有较大差别的,因为金刚石刀具超精密切削的切屑厚度极小,这时切削深度可能小于晶粒的大小,切削就在晶粒内进行,因此,切削力一定要超过晶体内

部非常大的原子、分子结合力,刀刃上所承受的剪切应力就急速地增加并变得非常大。在切削低碳钢的情况下,这个应力值接近材料(低碳钢)的剪切强度极限。切屑厚度与剪切应力的关系见图 14-2-1。图中被加工材料为 Y12 易切削钢,其切变模量

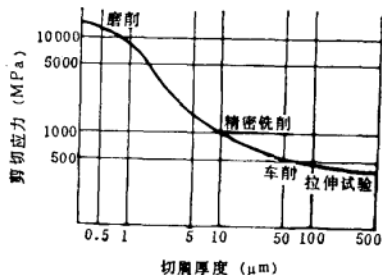


图14-2-1 切屑厚度与剪切应力的关系

$G = 8.2 \times 10^4 \text{ MPa}$, 剪切应变 $\gamma \approx 3$, 理论剪切应力 $\tau_{th} = G/2\pi \approx 1.3 \times 10^4 \text{ MPa}$, 临界剪切能量密度 $\delta = \frac{\tau_{th}^2}{2G} = 3.26 \times 10^3 \text{ J/cm}^3$ 。从图中可以看

出,当切屑厚度在 $1 \mu\text{m}$ 以下时,被切材料的剪切应力可达 13000 MPa 。这时刀刃将会受到很大的应力,同时产生很大的热量,刀刃切削处的温度将极高,因此要求刀具应有很高的高温强度和高温硬度,金刚石刀具能够胜任。金刚石刀具不但有很高的高温强度和高温硬度,而且由于金刚石材料本身质地细密,经过精细研磨,切削刃钝圆半径可达 $0.01 \sim 0.002 \mu\text{m}$,并且切削刃的几何形状极好,表面极光滑,因此能够进行 $Ra 0.05 \sim 0.008 \mu\text{m}$ 的镜面切削,这是当前其他刀具材料所无法比拟的。

1.2 材料缺陷及其对超精密切削的影响

金刚石刀具超精密切削是一种原子、分子级加工单位的去除(分离)加工方法,要从工件上去除材料,需要相当大的能量,这种能量可用临界加工能量密度 $\delta \text{ (J/cm}^3\text{)}$ 和单位体积切削能量 $\omega \text{ (J/cm}^3\text{)}$ 来表示。临界加工能量密度 δ 就是当应力超过材料弹性极限时,在切削相应的空间内,由于材料缺陷而产生破坏时的加工能量密度;单位体积切削能量 ω 则是指在产生该加工单位切屑时,消耗在单位体积上的加工能量。从工件上去除的一块材料的大小(切削应力所作用的区域)就是加工单位,加工单位的大小和材料缺陷分布的尺寸大小不

同时,被加工材料的破坏方式就不同。

材料微观缺陷分布或材质不均匀性,可以分为以下几种情况:

1) 晶格原子、分子:它的破坏就是把原子、分子一个一个地去除。

2) 点缺陷:点缺陷就是在晶体中存在空位和填隙原子。点缺陷的破坏是以原子缺陷(包括空位和填隙原子)为起点来增加晶格缺陷的破坏。晶体中存在的杂质原子也是一种点缺陷。

3) 位错缺陷和微裂纹:位错缺陷就是晶格位移,它在晶体中呈连续的线状分布,故又称为线缺陷,即有一列或若干列原子发生了有规律的错排现象。这种破坏方式是通过位错线的滑移或微裂纹引起晶体内的滑移变形。

4) 晶界、空隙和裂纹:它们的破坏是以缺陷面为基础的晶粒间破坏。

这几种缺陷分布见图14-2-2。

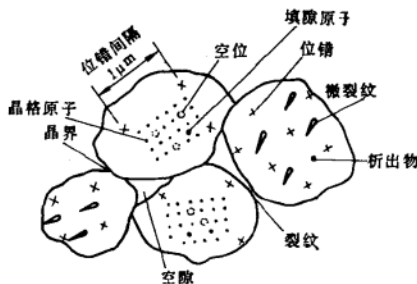


图14-2-2 材料微观缺陷分布

当应力作用的区域仅仅限制在上述各种缺陷空间的狭窄范围内,则会以加工应力作用区域相应的破坏方式而破坏;如果加工应力作用的范围更广,则会以更容易破坏的方式而破坏了。如在由微细的晶粒(数微米到数百微米)所组成的金属材料中,在晶粒内部,一般在大约 $1\mu\text{m}$ 的间隔内就有一个位错缺陷,即 10^8 个/ cm^2 。当加工应力作用在比位错缺陷平均分布间隔 $1\mu\text{m}$ 还要狭窄的区域时,在此狭窄区域内是不会发生由于位错线移动而产生材料滑移变形,因此,实际的剪切强度接近于理论值。当加工应力作用在比位错缺陷平均分布间隔还要宽的范围时,则位错线就会在位错缺陷的基础上发生滑移,同时在比剪切力理论值低得多的加工应力作用下,晶体产生滑移变形或塑性变形。当加工应力作用在比晶粒大小更宽时,则多数情况

易发生由晶界缺陷所引起的破坏。实际上,在比位错缺陷平均分布间隔还要小的范围内,还存在着空位、填隙原子等缺陷,会演变成位错并发生局部塑性滑移,因此实际剪切强度总比理论值低,实际的临界加工能量密度 δ 和单位体积切削能量 ω 比理论值也要低得多。

表14-2-1列出了常用的几种去除(分离)加工在

表14-2-1 临界加工能量密度 δ J/cm^3

加工单位 (cm)	10^{-8}	10^{-7}	10^{-5}	10^{-3}	10^{-1}
材料微观缺陷	晶格原子	点缺陷	位错缺陷	晶界、空隙、裂纹	
加工机理					
化学分解、电解	$10^5 \sim 10^4$	$10^4 \sim 10^3$			
脆性破坏				$10^3 \sim 10^2$	
塑性变形 (微量切削、抛光)		$10^4 \sim 10^3$		$10^3 \sim 10$	
熔化去除	$10^5 \sim 10^4$	$10^4 \sim 10^3$			
蒸发去除	$10^5 \sim 10^4$	$10^4 \sim 10^3$			
晶格原子去除 (离子轰击、电子性刻)	$10^5 \sim 10^4$	$10^4 \sim 10^3$			

材料微观结构的各种缺陷情况下的临界加工能量密度 δ 。从表中可知,加工单位不同会引起临界加工能量密度的变化。应该指出,随着材料加工单位尺寸的不同,其加工机理也会变化,例如,对于玻璃等脆性破坏去除加工,由于微裂纹(一般微裂纹分布间隔约 $10\mu\text{m}$ 左右)所引起的应力集中而导致材料产生分离和断裂,其临界加工能量密度很低,几乎不存在发热现象。如果加工应力的作用在比微裂纹的分布间隔更狭窄的区域(如 $1\mu\text{m}$ 左右),则玻璃将会发生粘性流动式的滑移,从而产生发热现象,并需要极大的临界加工能量密度。

1.3 加工表面的形成与质量

1.3.1 金刚石刀具超精密切削表面的形成

用金刚石刀具超精密切削形成表面的主要影响因素有几何原因、塑性变形和机械加工振动等。

几何原因主要是指刀具的形状、几何角度、刀刃的表面粗糙度和进给量等。它主要影响与切削运动方向相垂直的横向表面粗糙度,图14-2-3a表示了在切削时,主偏角 κ_r 、副偏角 κ'_r 和进给量 f 对残留面积高度的影响。图中 a_p 为切削深度, R_a 为

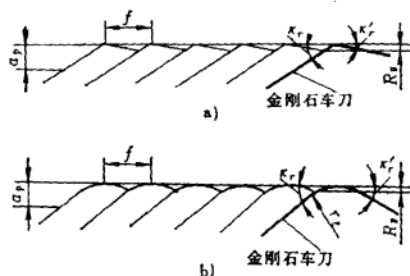


图14-2-3 金刚石刀具切削表面的形成

a) 主偏角 κ_r 、副偏角 κ'_r 和进给量 f 的影响b) 刀尖圆弧半径 r_e 和进给量 f 的影响

表面粗糙度的轮廓最大高度, 由几何关系可知:

$$R_y = f / (\cot \kappa_r + \cot \kappa'_r)$$

图14-2-3 b 表示了切削时, 刀尖圆弧半径 r_e 和进给量 f 对残留面积高度的影响, 其几何关系如下:

$$R_y \approx f^2 / 8r_e$$

塑性变形不仅影响横向表面粗糙度, 而且影响与切削运动方向相平行的纵向表面粗糙度。

加工中的振动对纵向表面粗糙度有影响, 因此, 在超精密切削中, 振动是不允许的。

1.3.2 金刚石刀具超精密切削的切屑形成

金刚石刀具超精密切削能够切除金属层的厚度标志其加工水平, 当前, 最小切深可达 $0.1\mu\text{m}$ 以下, 其最主要的影响因素是刀具的锋利程度, 一般以刀具的切削刃钝圆半径 r_a 来表示。超精密车削所用的金刚石车刀, 其切削刃钝圆半径一般小于 $0.5\mu\text{m}$, 而切削时的切削深度 a_p 和进给量 f 都很小, 因此, 在一定的切削刃钝圆半径下, 如果切深太小, 则可能不能形成切屑。切屑能否形成主要决定于切削刃钝圆圆弧处每个质点的受力情况, 在自由切削条件下, 切削刃钝圆圆弧上某一质点 A 的受力情况见图 14-2-4, 该点有切向分力 F_x 和法向分力 F_y , 合力为 $F_{y,z}$ 。切向分力使质点向前移动, 形成切屑; 法向分力使质点压向被加工表面, 形成挤压而无切屑。所以, 切屑的形成决定于 F_x 和 F_y 的比值, 当 $F_x > F_y$ 时, 有切削过程, 形成

切屑; 当 $F_x < F_y$ 时, 有挤压过程, 无切屑形成。由此, 可找出 $F_x = F_y$ 的分界质点 M , M 点以上的金属可切离为切屑, M 点以下的金属则被压入工件而不能切离。这样便可求得在一定的切削刃钝圆半径下的最小切削深度 $a_{p\min}$:

$$a_{p\min} = r_a - h = r_a (1 - \cos \psi)$$

$$\psi = 45^\circ - \varphi = 45^\circ - \arctan \frac{F_f}{F_n}$$

式中 φ ——金刚石车刀切削时的摩擦角

F_f ——金刚石车刀切削时的摩擦力

F_n ——金刚石车刀切削时的正压力

可见切削刃钝圆半径 r_a 是决定切屑形成的关键参数。

金刚石刀具超精密切削时, 刀具切削刃钝圆半径小, 切薄能力强, 形成流动切屑, 因此切削作用是主要的。但由于实际切削刃钝圆半径不可能为零, 以及修光刃等的作用, 因此还伴随着挤压作用。所以金刚石刀具超精密切削表面是由微切削和微挤压而形成, 并以微切削为主。

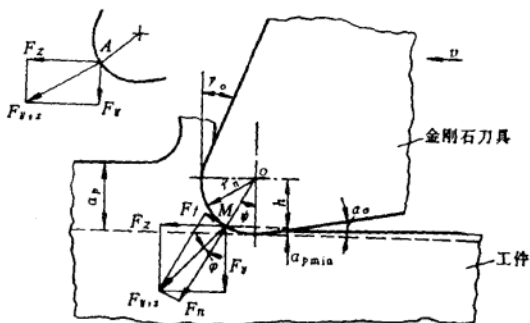


图14-2-4 金刚石车刀切削刃钝圆弧受力分析

1.3.3 表面破坏层及应力状态

金刚石刀具超精密切削时, 虽然切削深度和进给量都非常小, 在切削软金属时也会在被加工表面上留下较深的破坏层和较高的应力, 目前可参照图 14-2-5 a 所示的 Hill 球壳膨胀理论的图解^[10]来分析。对于铜、铝等软金属, 其弹性模量 E 与维氏硬度 HV 的比值较大, c/r_a 比值较大, 即塑性变形区较大; 而玻璃、酚醛树脂、氧化铝、硅和碳化钛

等硬脆材料,都具有较低的 E/HV 和 c/r_s 值,见图14·2-5 b。图中还表示了 E/HV 与 E/σ 的关系。

Hill公式为:

$$(c/r_s)^3 = E/3(1-\nu)\sigma$$

$$HV = \frac{2}{3}\sigma[1 + 3\ln(c/r_s)]$$

式中 r_s ——切削刃钝圆半径

c ——塑性变形区深度或半径

E ——被加工材料的弹性模量

HV ——被加工材料的维氏硬度

σ ——被加工材料的屈服应力

ν ——被加工材料的泊松比

金刚石刀具超精密切削时,工件表层产生塑性变形,内层产生弹性变形。切削后,内层弹性恢复,受到表层阻碍,从而使表层产生残余压应力。另一方面,由于微挤压作用,也使得工件表层有残余压应力。

应该指出,有关金刚石刀具精密切削和超精密切削的机理,尚有许多问题不够清楚,有待于进一步研究。

2 金刚石刀具超精密切削机床

2.1 超精密切削机床的结构特点

超精密切削机床的结构、精度、稳定性等均对加工质量有直接影响。因此,它应有如下的结构特点。

(1) 高精度 精密切削机床和超精密切削机床应具有高的几何精度、运动精度和分辨率,主要表现在主轴回转精度、进给运动直线度、定位精度、重复精度等。现代的精密切削机床和超精密切削机床大多采用液体静压轴承或空气静压轴承的主轴和导轨,并可以进一步采用误差补偿方法来提高其精度。这些结构可以使主轴在高转速下有高精度和高稳定性,使进给运动在低速时无爬行,高速时加速性能好,运动精度高。机床的工作台和刀架,大多采用精密滑动丝杠或精密滚珠丝杠传动,并有消除丝杠螺母副间隙的机构,以消除反向死区,提高定位精度。为了能进行微细切削,有些机床配有

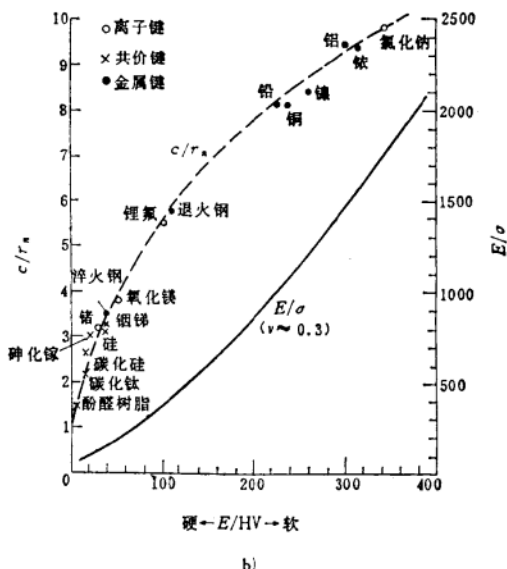
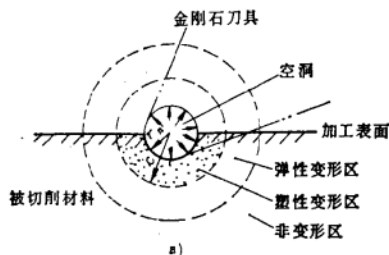


图14·2-5 Hill球壳膨胀理论

a) Hill球壳膨胀理论图解 b) 材料物理机械性能的影响
 r_s ——切削刃钝圆半径 c ——塑性变形区深度或半径 E ——被加工材料的弹性模量 HV ——被加工材料的维氏硬度 σ ——被加工材料的屈服应力 ν ——被加工材料的泊松比

微动工作台,采用电致伸缩、磁致伸缩、弹性元件等微位移机构,实现微进给。

对于数控精密和超精密切削机床,通常采用高精度步进电机—滚珠丝杠组成的开环系统,或宽调速直流或交流伺服电机—光栅位置检测闭环系统,以便于加工带有型面或孔系的高精度零件,采用激光干涉位置检测系统,可以获得极高的定位精度。

(2) 高刚度 精密加工和超精密加工时,切削深度和进给量很小,切削力非常小,但仍应该有足够的刚度,例如超精密磁盘车床加工铝合金基片的端面时,其主轴轴向刚度可达 $490\text{N}/\mu\text{m}$,可见刚度是很高的。

(3) 高稳定性 在机床结构

上, 现在多采用热导率低、热膨胀系数小、内阻尼大的天然花岗岩来制作床身、工作台等, 也可采用花岗岩粉与环氧树脂浇注的人造花岗岩制作床身、工作台和轴承等。花岗岩材料具有耐磨、耐腐蚀、不导电、不导磁等特点, 有极好的稳定性, 越来越受到广泛的采用。

为了防止热变形对加工精度的影响, 超精密切削机床除必须放在恒温室中使用外, 有些机床设计了控制温度的密封罩, 用液体淋浴或空气淋浴来消除来自外部和内部的热源影响, 如室温变化、运动件的摩擦热、切削热等。液体淋浴靠对流和传导带走热量, 可使温度保持在 $20^{\circ}\text{C} \pm 0.006^{\circ}\text{C}$, 比空气淋浴好, 但成本很高。淋浴式超精密半球金刚石车床见图14-2-6。

目前, 温控精度最高可达 $20^{\circ}\text{C} \pm 0.0005^{\circ}\text{C}$ 。

当然, 在结构上应采用热稳定性对称结构, 避免在精度敏感方向上产生变形, 工艺上应进行消除内应力的热处理等, 以保证机床有高稳定性。

(4) 抗振性好 超精密切削时的振动会破坏加工表面粗糙度, 影响加工质量。在机床结构上应尽量采用短传动链和柔性连接, 以减少传动元件和动力元件的影响, 如采用无接头的皮带传动、电动机与主轴做成一体的机内电机以缩短主运动传动链、或电动机与传动元件间采用非接触磁性联轴器、弹性元件(波纹管)联轴器等以减少电动机安装和运转不平稳等的影响。电动机等动力元件和机床的回转零件应进行严格的动平衡, 以使本身振动最小。为了隔离动力元件等振源的影响, 有些超精密机床采用了分离结构的形式, 即将电动机、油泵、真空泵等与机床本体分离, 单独成为一个部件, 放在机床旁边, 再用皮带传动方式连接起来, 获得了很好的效果。此外, 对于大件或基础件, 还应选用抗振性强的材料。

(5) 控制性能好 目前不少精密和超精密切削机床采用了微机数字控制, 在选择数控系统时, 不仅要考虑所需完成的功能, 而且应有良好的控制性能, 如插补、进给速度控制、刀具尺寸补偿、主轴转速控制等, 要求插补速度快、插补精度高、进

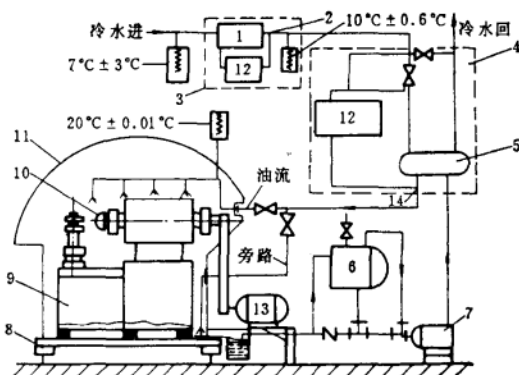


图14-2-6 淋浴式超精密半球金刚石车床

1—加热器 2—传感器 3—冷水温度控制系统 4—油流温度控制系统 5—热交换器 6—过滤器 7—油泵 8—气垫支承 9—金刚石车床 10—工件 11—透明塑料罩 12—开关控制 13—电动机 14—传感器

给速度稳定。同时还应有编程简便, 操作使用方便, 伴有跟踪显示等特点。

对于数控机床, 除应具有一般机床的静态和动态精度外, 还应有良好的随动精度。随动精度是指程序上给定的轨迹(即指令位置)和机床实际运动轨迹之间的相近程度。随动精度在稳态、动态和反向时分别表现为速度误差、加速度误差和位置误差。以上都涉及到控制性能的好坏。

2.2 超精密切削机床的类型及其加工质量

金刚石刀具超精密切削机床一个很主要的加工对象是镜面加工, 镜面的典型形状有平面镜、多面镜、球面镜、二次曲线面镜等, 其加工原理简图见图14-2-7。

2.2.1 平面镜车床

平面镜车床主要用来加工平面镜和磁盘基片, 在结构上将工作台和主轴相互垂直安装, 金刚石刀具以一定进给速度作垂直于主轴的直线运动, 工件作回转运动, 就能车削出平面零件, 见图14-2-7a。这种车床出现最早, 已有相当成功的产品。

这类机床的主轴, 大多采用回转精度高、刚度好的液体静压轴承或空气静压轴承, V—平型、双圆柱型或双V型液体静压导轨或空气静压导轨, 以

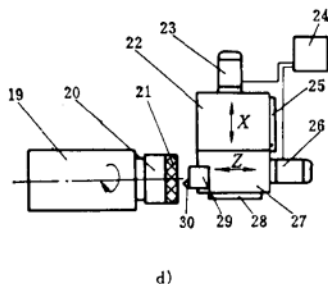
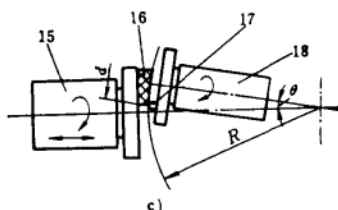
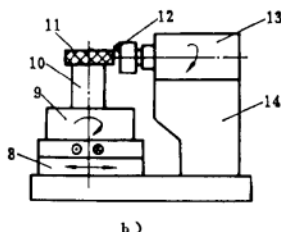
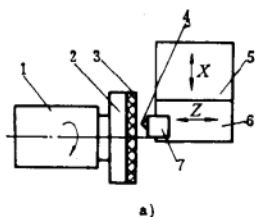


图14-2-7 超精密镜面切削机床

a) 平面镜车床 b) 多面镜机床 c) 球面镜机床 d) 二次曲线面车床

1、15、19—工件主轴 2、10、20—夹具 3、11、16、21—工件 4、30—金刚石刀具 5、22—X向工作台 6、27—Z向工作台 7、29—刀架 8—工作台 9—转台 12、17—金刚石刀具刀盘 13、18—刀具轴 14—立柱 23—X向直流伺服电机 24—数控装置 25—X向位移检测装置 26—Z向直流伺服电机 28—Z向位移检测装置

保证零件的镜面平面度。主轴通过与主机分离安装的直流电机经皮带传动进行无级变速回转，以避免

电机振动的影响。多数进给运动由油缸驱动，低速应有很好的速度稳定性，防止产生爬行。刀具的细微调整由差动精密丝杆机构实现。

对于磁盘等大而薄的平面零件，采用真空吸盘夹紧，以避免工件产生夹紧变形。为防止切屑划伤已加工表面，用喷气装置将切屑吹走，并用吸尘装置吸除。

2.2.2 多面镜机床

多面镜机床主要用来加工激光打印机的多面镜，多面镜还用于钢板探伤、印刷制版、激光加工等各种用途，是一个重要的镜面零件。多面镜加工多用一个单晶金刚石刀具的飞刀切削，即单刀铣削，因此也可称为金刚石刀具铣削。该类机床的布局（图14-2-7b）大多是主轴卧置，主轴前端装有飞刀盘，工作台为立轴布局，可作两个水平方向的进给运动，其上安装了分度装置，并装有夹具。刀具旋转时，工作作垂直于刀具轴方向的进给运动，就能切出多面镜的一面，然后进行分度，继续切削另一面，依次加工直至完成。因此，该类机床除主轴、双层十字工作台外，增加了高精度的分度装置。大多数的刀具轴采用静压轴承、工作台采用丝杠螺母、分度装置采用端齿盘等结构形式。

由于刀具轴上装有飞刀盘，且作高速回转，因此必须进行严格的动平衡。

当然，工件装夹时不得产生夹紧变形。

2.2.3 球面镜机床

球面镜的加工是按展成原理进行的，飞刀盘装在刀具轴上作高速回转，工件装于工件主轴上作低速回转，刀具轴与工件主轴安装在同一水平面上，并相交成一角度 θ ，图14-2-7c是加工凹球面镜的结构原理图。

加工球面的半径 R 由下式决定：

$$R = d / 2 \sin \theta$$

式中 d ——金刚石刀具回转半径

θ ——刀具轴与工件主轴的交角

用展成法加工球面，生产率高，工件中心不会出现残留面积。利用这一原理，还可以加工凸球面镜。

2.2.4 二次曲线面车床

该类车床主要用来加工抛物面、双曲面、椭圆

面等二次曲线面,多用两坐标联动数控机床,见图14-2-7d,刀架安装在十字工作台上,由直流伺服电机驱动,采用滚珠丝杠螺母副和激光干涉仪等检测装置组成闭环系统,脉冲当量可达 $0.2\mu\text{m}$ 。

数控超精密加工机床不但要有极高的精度,而且要有极小的脉冲当量,这是由于数控加工所获得的表面是台阶式的近似表面,脉冲当量越小,加工表面上的台阶越小,表面粗糙度参数值也越低,同时加工精度也越高。

除了上述几种超精密切削机床外,还有利用不同的超精密零部件作为模块,组成各种形式的模块化超精密机床,可以缩短生产周期,如采用空气静压轴承组件、空气静压导轨组件、进给装置、花岗石底座、隔振气垫等八种模块可组成加工磁盘、活

塞、转子、振动筒、红外抛物面反射镜、多面棱体、蓝宝石等零件的超精密加工设备。

有关国内外超精密切削机床的结构特点和加工质量见表14-2-2,表中只列出几个国家有代表性的公司、厂家所研制或生产的产品。从表中可知,当前精密切削机床和超精密切削机床大多采用空气静压轴承和液体静压轴承的主轴系统,并有向液体静压轴承方面发展的趋势;同时大多采用空气静压导轨和液体静压导轨,也有相同的趋向。在精度上,目前的水平是:主轴回转精度为 $0.02\mu\text{m}$,导轨直线度为 $1000000:0.025$,定位精度为 $0.013\mu\text{m}/1000\text{mm}$,进给分辨率为 $0.005\mu\text{m}$,温控精度为 $20^\circ\text{C} \pm 0.0005^\circ\text{C}$ 。加工表面粗糙度为 $Ra0.003\mu\text{m}$ 。

表14-2-2 国内外超精密切削机床的结构特点和加工质量

机 床 名 称 生 产 厂 家	结 构 特 点		加 工 质 量	
	主 轴 系 统	进 给 系 统	尺 寸 形 状 精 度	表 面 粗 糙 度
超精密车床 美国 Pneumo Precision	空气静压轴承 回转精度 $0.1\mu\text{m}$	空气静压导轨 导轨直线度 $200000:0.5$ (水平) $200000:1.7$ (垂直)	平面度 $0.13\mu\text{m}$	$Ra0.01\mu\text{m}$ (平面) $Ra0.02\mu\text{m}$ (成形面)
三轴数控超精密车床 美国 Moore Special Tool Co	空气静压轴承 回转精度 $0.025\mu\text{m}$	导轨直线度 $400000:0.05$	平面度 $500:0.0003 \sim 0.0012$ 曲面度 $0.45 \sim 1.9\mu\text{m}$	$Ra0.0075 \sim 0.02\mu\text{m}$ (平面) $Ra0.02 \sim 0.06\mu\text{m}$ (成形面)
超精密车床 美国 Lawrence Livemore Laboratory	液体静压轴承 回转精度 $0.025\mu\text{m}$ 恒温油浴	液体静压导轨 导轨直线度 $1000000:0.025$ 定位误差 $0.013\mu\text{m}/1000\text{mm}$	$0.025\mu\text{m}$	$Ra0.002 \sim 0.004\mu\text{m}$
超精密磁盘车床 英国 Bryant Symons	空气静压轴承 回转精度 $0.12\mu\text{m}$ (径向) $0.1\mu\text{m}$ (轴向)	转臂结构, 驱动精度 $0.025\mu\text{m}$	平面度 $< 1\mu\text{m}$ 圆度 $0.125\mu\text{m}$	$Ra0.008 \sim 0.01\mu\text{m}$
超精密车床 日本 丰田工机 AHP	液体静压轴承 回转精度 $0.025\mu\text{m}$	液体静压导轨 导轨直线度 $300000:0.15$	平面度 $0.5\mu\text{m}$ 圆度 $0.2\mu\text{m}$ 圆柱度 $0.1\mu\text{m}$	$Ra0.01 \sim 0.04\mu\text{m}$
超精密车床 日本 日立精工 DPL	空气静压轴承 回转精度 $0.05\mu\text{m}$ (径向) $0.03\mu\text{m}$ (轴向)	空气静压导轨 微位移精度 $0.075\mu\text{m}/50\text{mm}$	平面度 $400:0.0002$	$Ra0.003\mu\text{m}$
超精密磁盘车床 荷兰 Hembrug Microturn	液体静压轴承 $0.1\mu\text{m}$ (轴向)	液体静压导轨 导轨直线度 $200000:0.3$ (垂直)	平面度 $200:0.00013$	$Ra0.015 \sim 0.04\mu\text{m}$