

第 3 章

现代加工技术

3.1 概述

3.1.1 现代加工技术的内涵

广义的现代加工技术是对各种加工方法和制造工艺规程的总称。在机械制造领域,现代加工技术的内容主要涉及先进切削加工技术、成形加工技术、变形加工技术、连接加工技术、材料性能调整技术、特种加工技术等,如图 3-1 所示。

成形加工技术主要指将不定形的原材料(块状、颗粒状、液态等)转化为所需形状的加工工艺,如铸造、粉末冶金、塑料成形等。变形加工技术主要包括使工件的原始几何形状从一种状态转变为另一种状态,如锻造、钣金、轧制、挤压、拉拔等。连接加工技术主要指将单个工件连接成组件或最终产品,如机械连接、焊接、粘接和装配等。材料性能调整技术是指不改变工件的几何形状,仅仅改变其材料性能的加工技术,如热处理技术和其他表面处理技术等。特种加工技术主要利用化学、电化学以及物理(声、光、热、磁)等方法对材料进行加工,一般用于各种特殊物理机械性能的材料、精密细小、形状复杂等工件的加工,或者难以采用传统切削工艺进行加工的场合。

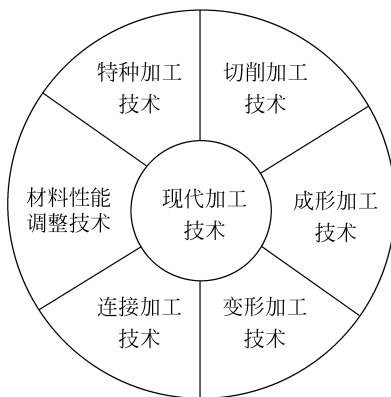


图 3-1 现代加工技术的种类

随着制造技术的迅速发展,加工技术也取得了突飞猛进的提高,在各种加工技术领域都有大量的新工艺、新方法不断涌现。本章着重介绍超高速加工技术、超精密加工技术、现代特种加工技术、微细加工与纳米加工技术、增材制造技术等内容。

3.1.2 现代加工技术的特点

现代加工技术的发展非常迅速,其主要特点如下:

(1) 加工精度高。随着机械制造工艺技术水平的提高,加工制造精度在不断提高,目前机械加工的尺寸精度、形状精度和表面粗糙度等均已达到纳米级。

(2) 加工效率高。超高速切削、超高速磨削技术的应用,车、铣、镗、钻、磨等不同工序以及粗加工的不同工序的综合集中,极大地提高了加工效率。

(3) 加工材料范围广。新型特种加工技术突破了传统的金属切削方法,伴随超硬材料、超塑材料、高分子材料、复合材料、工程陶瓷、非晶微晶合金、功能材料等新型材料的应用,扩展了加工对象,同时导致了崭新加工技术的出现。

(4) 加工设备先进。加工设备普遍采用计算机控制技术,自动化程度高。采用 CAD/CAM 技术,有利于制造形状复杂的零部件,同时制造设备的柔性更好。

(5) 切削加工能耗低,可实现“干切削”。随着金属切削加工工艺的提高,由于切削力可减小到原来的 $1/3$ 左右,因此加工时的能量损耗大大降低。切削时 95% 以上的切削热能被切屑带走,故一般切削可不用冷却液实现“干切削”。

3.1.3 现代加工技术的发展趋势

随着社会经济和科学技术的不断发展,新材料、新能源、新设计、新产品的不断出现,人们对物质产品的需求更加多样化,因而对机械制造工艺技术提出了更多、更高的要求。从总体发展趋势看,优质、高效、低耗、柔性、洁净是机械制造业的追求目标,也是现代加工技术的发展目标。

进入 21 世纪,先进的精密、超精密加工技术,特种加工技术,超高速切削及超高速磨削技术,微型机械加工技术,新一代制造装备技术及虚拟制造技术等,将成为现代加工技术的主要发展方向和重要领域。在社会经济和科学技术不断发展的同时,经济全球化的程度正在不断提高,拥有先进的制造加工技术是提高中国企业国际市场竞争力的最基本、最重要的条件之一,因此我们必须重视现代加工技术的研究和应用,全面提升我国制造业的制造工艺技术水平。

3.2 超高速加工技术

3.2.1 概述

1. 超高速加工的概念

超高速加工是指采用超硬材料刀具、磨具和高速运动的制造设备,加工制造零件的现代制造加工技术。超高速加工的核心是通过极大地提高切削或磨削速度,来实现提高加工质量、加工精度和降低加工成本的目的。

通常认为切削速度达到普通切削速度的 10 倍左右即为超高速切削。但不同的加工方式、不同的材料,其切削速度也不同。各种材料的超高速加工切削速度范围为:钢 $600 \sim 3000 \text{m/min}$; 铸铁 $900 \sim 5000 \text{m/min}$; 铝合金 $2000 \sim 7500 \text{m/min}$; 钛合金 $150 \sim 1000 \text{m/min}$; 超耐热镍合金 500m/min ; 纤维增强塑料 $2000 \sim 9000 \text{m/min}$ 。各种制造加工工序的切削速度范围为:车削 $700 \sim 7000 \text{m/min}$; 铣削 $300 \sim 6000 \text{m/min}$; 磨削 150m/s 以上; 钻削 $200 \sim 1100 \text{m/min}$ 。

2. 超高速加工技术的现状

1976年美国的 Vought 公司首次推出第一台有级超高速铣床,采用内装式电动机主轴系统,最高转速达到了 20000r/min,功率为 15kW。随后,美、德、法、日等国的厂商和研究机构对超高速加工机理及设备进行了大量的研究与开发。到 20 世纪 80 年代中后期,基本实现了超高速加工机床的专业化生产,产品也从单一的超高速铣床发展成超高速车铣床、超高速钻铣床以及加工中心等。

欲实现超高速加工,最关键的是主轴转速的超高速。在这方面,日本的 FANUC 公司和电气通信大学合作研制了一种超精密铣床,其主轴转速可达 55000r/min;意大利 FIDIA 公司生产的产品,其主轴转速可达 75000r/min。许多厂商的加工中心,如美国 Cincinnati 及 Ingersoll、日本牧野、意大利 Rambaudi 等公司,其标准主轴转速配置可达 10000r/min,可选配置为 20000r/min。

进给速度是实现超高速加工的又一重要因素。上述厂商的加工中心产品,在进给系统中采用滚珠丝杠,快速进给速度可以达到 40~60m/min,加速度达到(1~2)g,工作进给速度达到 30m/min,定位精度达到 20~25 μ m。如果采用直线电动机的进给驱动系统,则快速进给速度可以达到 160m/min,工作进给速度达到 80m/min,进给加速度达到 2.5g 以上,定位精度高达 0.05~0.5 μ m 甚至更高。这些加工中心的刀具到刀具的换刀时间最快小于 1s,切削到切削的换刀时间小于 2.4s,托盘交换时间小于 10s。

在超高速磨削技术方面,德国公司于 1983 年研制出了高效深磨磨床(high efficiency deep grinding, HEDG)磨床,其主轴功率为 60kW,转速达 10000r/min,CBN 砂轮直径为 300mm,砂轮线速度达 140~160m/s。HEDG 被认为是超高速磨削技术的突破性成果。

国内的生产企业与研究机构在大功率高速主轴单元、高加减速直线进给电动机、陶瓷滚动轴承等方面也进行了大量的研究与开发,超高速机床的主轴转速在 10000r/min 左右,快速进给速度在 30m/min 左右,但总体水平与国际水平尚有一定的差距。

超高速加工技术发展的基本趋势如下:在超高速切削方面,依托加工中心或柔性制造技术,实现高效高速化;在超高速磨削方面,依托磨削加工自动化以及超硬磨料磨具开发应用,实现高效高速化。总体而言,通过采用现代超硬材料(金刚石、立方氮化硼)的工具,运用现代超高速切削、磨削技术以及高柔性、高自动化设备,以实现大多数工程材料的超高速加工,实现复杂表面形状零件的加工,实现精密甚至超精密加工。

3. 超高速切削的关键技术以及应用领域

超高速加工的关键技术主要包括超高速切削、磨削的机理,超高速主轴单元制造技术,超高速进给单元制造技术,超高速加工用刀具、磨具制造技术,超高速机床支撑及辅助单元制造技术,超高速加工测试技术与控制技术等。

随着超高速加工机理、大功率超高速主轴单元技术、高性能直线电动机技术、超硬耐磨长寿命刀具材料及结构、超高速冷却技术以及高性能 CNC 控制技术的一系列重要技术不断取得突破,超高速加工开始得到应用,并在实践中不断加以完善。

超高速加工的费用较高,目前主要应用在一些特殊的领域,例如:

(1) 大批量的生产领域,如汽车工业。

- (2) 刚度不足的零件加工,如航空航天领域,其工件最薄壁厚度仅为 1mm。
- (3) 加工复杂曲面领域,如模具工具制造。
- (4) 超精密微细切削加工领域,如微型零件加工。
- (5) 加工困难材料领域,如超硬材料、超塑材料等。

3.2.2 超高速加工机理

超高速切削和磨削机理研究主要指在超高速加工条件下,切削、磨削过程产生的各种切削磨削现象的理论研究。

1. 超高速切削机理

德国学者萨洛蒙(Salomon)于 1931 年提出了著名的超高速切削理论,可用萨洛蒙曲线来描述,如图 3-2 所示。

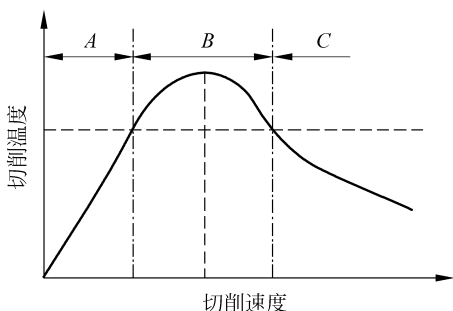


图 3-2 萨洛蒙曲线

在常规的切削速度范围内(A 区),切削温度随切削速度的增大而提高;在 B 区的速度范围内,由于切削温度太高,任何刀具都无法承受,切削加工不可能进行,这个范围称为死谷(dead valley),如能越过这个死谷而在超高速区(C 区)进行工作,则可进行超高速切削,提高机床的生产率。当然,萨洛蒙曲线只是提供了一种启示,超高速加工机理尚需进行大量的研究工作。

研究人员通过对超高速切削切屑形成的研究,来寻找超高速切削的途径。研究表明,按照加工材料及加工工艺的不同,存在着连续切削和断续切削两种类型。对于高导热低硬度的合金或金属材料(如铝合金、软低碳钢等),超高速切削时易形成连续切屑;而低导热高硬度的材料(如钛合金、超耐热镍合金、高硬度合金钢),超高速切削时易形成断续切屑。由于切屑变形的影响,切削力也将发生变化。随着切削速度的提高,塑性材料的切屑形态将从带状、片状到碎屑不断演变,单位切削力初期呈上升趋势,而后急剧下降,塑性变形区变浅,残余应力及硬度变化减小。

大量的超高速切削机理研究表明,超高速加工除了可以提高生产率之外,还有其他许多优点。例如,超高速切削情况下切削力可降低 30% 左右,借此可加工薄壁类零件;超高速切削特别适用于对温度十分敏感的零件进行加工;由于超高速切削激振频率提高,使激振频率远离机床固有频率,有利于提高表面加工质量;在超高速切削情况下刀具耐用度提高 70% 左右,降低了加工成本。

2. 超高速磨削机理

对于磨削机理和磨削加工工艺,研究人员也开展了大量的研究工作,并取得了突破性进展。1979 年法国学者 Wemer 提出了新的 HEDG 热机理论,预言了高效深磨区的存在。研究表明,在较低磨除率下,随着砂轮线速度的增加,磨削力的降低差不多呈线性变化,但在高磨除率情况下,随着砂轮线速度的增大,磨削力在砂轮线速度 100m/s 前后的某区间内出

现陡降,降幅达 50%,而且随着磨削效率的提高,这种趋势更加明显。在给定的高效深磨条件下,砂轮达到超高速状态之后,工件表面温度出现回落。HEDG 机理的另一要点是必须提高工件进给速度。在较低的磨除率情况下,随着工件进给速度的增大,工件表面温度逐渐上升,直到出现烧伤,这便是缓进深磨难以为继的原因;但是,在高磨除率情况下,由于磨削热源快速离开已加工表面,使得多数热量进入切屑和冷却液,导致工件表面温度下降。

高速磨削中诸多磨削现象可通过引入最大切屑(磨屑)厚度 h 来解释。在保持其他参数不变,仅增大砂轮线速度的情况下,若 h 减小,则每个磨削刃上作用的切削力减小。 h 减小也能改善工件表面加工质量,且减缓切削力对砂轮的磨损。另外,总磨削力随砂轮线速度的增大而减小。若保持 h 不变,在增大砂轮线速度的同时,成比例地提高工件进给速度,则每个磨削刃上作用的切削力及磨削力并没有改变,但是,由于工件进给速度的提高,而成比例地提高了材料磨除率。

超高速磨削时,在很短暂的磨屑形成时间内完成的切屑的高应变率形成过程,将不同于普通磨削的情况,而将导致工件表面塑性变形层变浅,磨削沟痕两侧因塑性流动而形成的隆起高度变小,使磨屑形成中的耕犁和滑擦距离变小,使工件表层硬化及残余应力倾向减小。超高速磨削时磨粒在磨削区上的移动速度会增加几倍,工件进给速度也大大加快,加上应变率响应的温度滞后,将导致工件表面磨削温度有所降低,能越过容易发生热损伤的区域,从而极大地扩展了磨削工艺参数的应用范围。

3.2.3 超高速加工用刀具与磨具

刀具与磨具的材料及制备技术,对于金属切削性能起着关键性的作用。超高速加工用刀具、磨具主要指超高速铣削用刀具和超高速磨削用砂轮,其关键技术主要涉及超高速加工用刀具材料及制备技术、超高速加工用刀具结构及刀具几何参数研究、超高速磨削砂轮的超硬磨料、结合剂、基体的开发研究、超高速磨削用超硬磨具制备技术、超硬磨料超高速砂轮应用技术以及硬脆材料及难加工材料的超硬磨料磨具的超高速磨削实用化技术等。

1. 超高速切削刀具材料

超高速加工用刀具切削刃主要选用超细晶粒硬质合金、聚晶金刚石(PCD)、立方氮化硼(CBN)、氮化硅(Si_3N_4)陶瓷材料、混合陶瓷和碳(氮)化钛基硬质合金,以及采用气相沉淀法的超硬材料涂层刀具等。涂层材料为氮化钛(TiN)、氮化铝钛(TiAlN)等。涂层技术由单一涂层发展为多层、多种涂层材料的涂层。

2. 超高速切削刀具的参数

选择切削参数时,针对圆刀片和球头铣刀,应注意有效直径的概念。高速铣削刀具应按动平衡设计制造。刀具的前角比常规刀具的前角要小,后角略大。另外,通过主、副切削刃连接处修圆或导角,可以增大刀尖角,防止刀尖处热磨损。加大刀尖附近的切削刃长度和刀具材料体积,可以提高刀具刚性。刀具材料与切削材料应具有较小的化学亲和力。刀具悬伸尽可能短,刀柄要比刀具直径粗壮,连接柄呈倒锥状,以增加其刚性。尽量在刀具及刀

具系统中央留有冷却液孔。球头立铣刀要考虑有效切削长度,刃口要尽量短。超高速切削条件下刀具与机床的连接界面结构装夹要牢靠,工具系统应有足够的整体刚性,同时,装夹结构设计必须有利于迅速换刀并有广泛的互换性和较高的重复精度。

3. 超高速磨削的磨具材料

超高速磨削用砂轮的磨具材料主要有立方氮化硼(CBN)和聚晶金刚石(PCD),结合剂有树脂结合剂、陶瓷结合剂和金属结合剂。采用陶瓷或树脂结合剂 Al_2O_3 、SiC 或 CBN 磨料砂轮,线速度可达 125m/s; 极硬的 CBN 或金刚石砂轮的线速度可达 150m/s; 而单层电镀 CBN 砂轮的线速度可达 250m/s 左右。近年来,国外采用高温钎焊代替电镀,开发出了单层高温钎焊超硬磨料砂轮,由于结合强度显著提高,其线速度可达到 500m/s 以上,又由于砂轮锋利、容屑空间大、不易堵塞,因此在与电镀砂轮相同的加工条件下,磨削力、功率消耗、磨削温度会更低,可接近实现冷态切削。

3.3 超精密加工技术

3.3.1 概述

1. 超精密加工的概念

超精密加工是指加工精度和表面质量达到极高程度的精密加工工艺。一般而言,超精密加工的精度在 $0.1\sim 0.01\mu\text{m}$,表面粗糙度 Ra 在 $0.025\sim 0.01\mu\text{m}$,如金刚石刀具超精密切削、超精密磨料加工、超精密特种加工和复合加工等。目前超精密加工的精度正在向纳米级工艺水平发展。随着技术的提高,超精密加工技术已成体系,它包括超精密切削、超精密磨削、超精密微细加工、超精密计量等。

超精密加工主要适用于激光核聚变系统、高密度磁盘、磁鼓、复印机感光筒、精密雷达、惯导陀螺、计量标准元件、超大规模集成电路等的制造。

2. 超精密加工的相关技术

超精密加工相关技术包含以下几个方面:

(1) 加工技术。包括加工方法与加工机理,主要有超精密切削、超精密磨料加工、超精密特种加工及复合加工等。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。

(2) 材料技术。包括加工工具材料和被加工材料。例如,金刚石刀具是超精密切削中的关键,其中晶面的选择对刀具的使用性能有着重要的关系。金刚石刀具的超精密刃磨,其刃口钝圆半径应达到 $2\sim 4\text{nm}$,同时应解决其检测方法。刃口钝圆半径与切削厚度关系密切,若切削的厚度欲达到 10nm ,则刃口钝圆半径应为 2nm 。

(3) 加工设备及其基础元部件。包括超精密切削机床、各种研磨机、抛光机以及各种特种精密加工、复合加工设备,对于这些加工设备有高精度、高刚度、高稳定性、高度自动化的要求。

(4) 测量及误差补偿技术。精密和超精密加工必须具备相应的检测手段和方法,不仅要對工件和表面质量进行检验,而且要检验加工设备和基础元部件的精度。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有一定困难,但用误差补偿可以达 10nm 以下。超精密机床实际上是反馈补偿原理的体现,它用激光干涉测长仪测出工作量台实际位置,通过反馈控制其运动。

(5) 工作环境。精密和超精密加工的工作环境是保证加工质量的必要条件。影响环境的因素主要有温度、湿度、污染和振动等。环境温度可根据加工要求控制在 $\pm 0.02 \sim \pm 1^{\circ}\text{C}$, 甚至达到 $\pm 0.0005^{\circ}\text{C}$ 。一般湿度应保持在 55%~60%。空气的洁净度要求 100~1000 级(100 级指每立方英尺空气中所含直径大于 $0.5\mu\text{m}$ 的尘埃不超过 100 个)。

3.3.2 超精密切削加工

超精密切削加工主要指使用金刚石刀具的超精密车削、铣削等,主要用于加工铜、铝等软金属材料及其合金,以及光学玻璃、大理石和碳素纤维板等非金属材料。

1. 超精密铣床

在精密机床中,镜面铣最为常见,其关键部件为高精度主轴和低摩擦高平稳性的滑台。在现有的镜面铣床中,主轴多采用气体静压支撑,只有个别的主轴采用液体静压支撑技术。滑台的支撑多数为气体静压系统,但近年来液体静压系统的使用呈上升趋势,其主要原因是液体静压系统具有高阻尼、高刚度的优点。

2. 超精密金刚石车床

超精密金刚石车床的机械结构较为复杂,技术要求也较为严格。除了必须满足很高的运动平稳性外,还必须具有很高的定位精度和重复精度。镜面铣削平面时,对主轴只需很高的轴向运动精度,而对径向运动精度要求较低。金刚石车床则须兼备很高的轴向和径向运动精度,才能减少对工件的形状精度和表面粗糙度的影响。目前市场上提供的金刚石车床的主轴大多采用气体静压轴承,轴向和径向的运动误差在 50nm 以下,个别主轴的运动误差已低于 25nm。金刚石车床的滑台采用了具有高刚性、高阻尼和高稳定性的液体静压支撑滑台。

3.3.3 超精密磨削和磨料加工

超精密磨削和磨料加工是利用细粒度的磨粒和微粉对材料进行加工,加工对象主要是黑色金属、硬脆材料等。通常可分为固结磨料加工和游离磨料加工两大类加工方式,其中固结磨料加工主要有超精密砂轮磨削、超精密砂带磨削、双端面精密磨削、电泳磨削以及超精密研磨与抛光等技术。

1. 超精密砂轮磨削技术

超精密磨削是加工精度在 $0.1\mu\text{m}$ 以下、表面粗糙度 Ra 在 $0.025\mu\text{m}$ 以下的砂轮磨削方

法。超精密磨削工件表面的微观轮廓是砂轮表面微观轮廓的某种复印,其与砂轮特性、修整砂轮的工具、修整方法和修整用量等密切相关。超精密磨削与普通磨削的不同之处主要是切削深度极小,可实现极低的表面粗糙度,这主要靠砂轮在线精细修正得到大量的、等高性很好的微刃,实现了微量切削作用,从而获得高质量表面。现代超精密磨削已采用超硬磨料砂轮,如采用 CBN 砂轮时,砂轮线速度一般为 60m/s 以上,工件进给速度为 5m/min 以上,修整进给量为 0.03mm/r ,表面粗糙度 Ra 达 $0.1\sim 0.5\mu\text{m}$ 。

2. 超精密砂带磨削技术

砂带磨削是 20 世纪 60 年代发展起来的机械加工方法,具有加工效率高、速度稳定、磨削精度高、成本低等特点。砂带磨削是一种弹性磨削,具有磨削、研磨、抛光的复合作用。随着砂带制作质量的迅速提高,砂带上砂粒的等高性和微刃性较好,从而可以达到高精度和低表面粗糙度值。用超声波砂带精密磨削加工硬盘基体,使用聚酯薄膜砂带,切削速度可以达到 35m/min 。若利用滚花表面接触辊,则其加工表面粗糙度 Ra 为 $0.043\mu\text{m}$;若用光滑表面接触辊,则可得到 Ra 为 $0.073\mu\text{m}$ 的加工表面。

3. 双端面精密磨削技术

双端面精磨为平面研磨运动,在磨削运动中,工件既作公转又作自转,磨具的磨料粒度也很细,一般为 $3000\# \sim 8000\#$ 。在磨削过程中,微滑擦、微耕犁、微切削和材料微疲劳断裂同时起作用,磨痕交叉而且均匀。该磨削方式属控制力磨削过程,有与精密研磨相同的加工精度和比研磨高得多的去除率,另外可获得很高的平面度和两平面的平行度。该技术目前已取代金刚石车削,成为磁盘基片等零件的主要超精加工方法。

4. 电泳磨削技术

电泳是指带电粒子在电场中向带相反电荷的电极移动的现象。电泳磨削技术的机理是利用超细磨粒的电泳特性,在加工过程中使磨粒在电场力作用下向磨具表面运动,并在磨具表面沉积形成细磨粒吸附层,利用磨粒吸附层对工件进行磨削加工,同时新的磨粒又不断补充。由于磨粒层表面凹陷处局部电流大,新磨粒更容易在凹陷处沉积,从而使磨粒层表面趋于均匀,保持良好的等高性。同时,磨具每旋转一周,磨粒层表面都有大量新磨粒补充,使微刃始终保持锋利尖锐。通过对电场强度、液体及磨粒特性等影响因素加以控制,就可使磨粒层在加工过程中呈现两种不同的状态:一种是在加工过程中使磨料的脱落量与吸附量保持动态平衡,这样就可以稳定吸附层的厚度,得到一个表面不断自我修整而尺寸不变的超细砂轮;另一种状态是在加工过程中,使磨料的吸附量超过脱落量,那么磨粒层厚度就会不断增加,这样就可以在机床无切深进给条件下实现磨削深度的不断增加,即所谓的自进给电泳磨削。

5. 超精密研磨与抛光技术

1) 超精密研磨技术

研磨是在被加工表面和研具之间放置游离磨料和研磨液,使被加工表面和研具产生相对运动并加压,磨料产生切削、挤压作用,从而去除表面凸起的技术。超精密研磨是一种加

工误差达 $0.1\mu\text{m}$ 以下、表面粗糙度 Ra 达 $0.02\mu\text{m}$ 以下的研磨方法,其加工尺寸可以达到原子、分子量级,主要是靠磨粒的挤压使被加工表面产生塑性变形,以及使工件表面生成氧化膜。超精密研磨常作为精密块规、球面空气轴承、半导体硅片、石英晶体、高级平晶和光学镜头等零件的最后加工工序。

2) 电解研磨

电解研磨是电解和研磨的复合加工,研具是一个与工件表面接触的研磨头,它既起研磨作用,又是电解加工的阴极,工件接阳极。研磨加工时,电解液通过研磨头的出口流经金属工件表面,工件表面在电解作用下发生阳极溶解,在溶解过程中,阳极表面形成一层极薄的氧化物被研磨头研磨掉,于是阳极工件表面上又露出新的表面并继续电解,这样,电解作用与研磨头刮除阳极膜作用交替进行,实现电解研磨。

3) 软质磨粒机械抛光

软质磨粒机械抛光的最小切除量可以达原子级,即可小于 $0.001\mu\text{m}$,直至切去一层原子,而且被加工表面的晶格不致变形,能够获得极小表面粗糙度和材质极纯的表面。它的加工实质是磨粒原子的扩散作用和加速的微小粒子弹性射击的机械作用的综合结果。微小粒子可利用振动法、真空中带静电的粉末粒子加速法、空气流或水流来加速,其中用水流使微粒加速的方法最稳定。软质磨粒机械抛光能达到的加工精度为 $\pm 0.1\mu\text{m}$,表面粗糙度 Ra 小于 $0.0005\mu\text{m}$ 。

4) 超精研抛

超精研抛是一种具有均匀复杂轨迹的精密加工,它同时具有研磨、抛光和超精加工的特点。超精研抛时,研抛头为一圆环状,装于机床的主轴上,由分离传动和采取隔振措施的电动机作高速旋转,工件装于工作台上。工作台由两个作同向同步旋转运动的立式偏心轴带动,作纵向直线往复运动,工作台的这两种运动合成为旋摆运动。研抛时,工件浸泡在超精研抛液池中,主轴受主轴箱内的压力弹簧作用对工件施加研抛压力。由于研抛头和工作台的运动形成复杂均密的运动轨迹,又有液中研抛的特性,因此可获得极高的加工精度和表面质量。

3.3.4 超精密特种加工

超精密特种加工的方法多是分子、原子单位加工方法,可以分为去除(分离)、附着(沉积)、结合以及变形 4 大类。去除(分离)加工就是从工件上分离原子或分子,如电子束加工和离子束溅射加工等。附着(沉积)是在工件表面上覆盖一层物质,如电子镀、离子镀、分子束外延、离子束外延等。结合是在工件表面上渗入或涂入一些物质,如离子注入、氮化、渗碳等。变形是利用高频电流、热射线、电子束、激光、液流、气流和微粒子束等使工件被加工部分产生变形,改变尺寸和形状。

下面对电子束光刻技术作简要介绍。电子束光刻技术可以实现精细图形的绘图或复印,是大规模集成电路的掩膜或基片图形光刻的重要手段。它利用电子束透射掩膜,照射到涂有光敏抗蚀剂的半导体基片上,由于化学反应,经显影后,在光敏抗蚀剂涂层上就形成与掩膜相同的所需线路图形,如图 3-3 所示。光刻后有两种处理办法:一种是用离子束溅射去除,或称离子束刻蚀,再在刻蚀出的沟槽内进行离子束沉积,填入所需金属,经过剥离和整理,便可在基片上得到凹形所需电路;另一种是用金属蒸镀方法,即可在基片上形成凸形电

路。光刻工艺的图形密度、线宽是很重要的指标,由于电子束波长比可见光要短得多,其光刻线宽度可达 $0.1\mu\text{m}$ 。

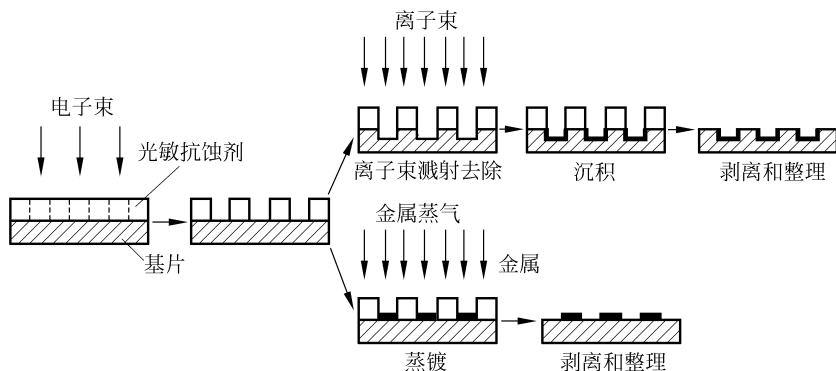


图 3-3 金属蒸镀法

3.3.5 超精密加工技术的发展趋势

超精密加工的发展趋势主要表现为以下几方面：

- (1) 向着高精度方向发展,由目前的亚微米级向纳米级进军,最终实现原子级加工精度;
- (2) 向大型化方向发展,研制大型超精密加工设备;
- (3) 向微型化方向发展,以适应微型机械、集成电路的加工需要;
- (4) 向超精结构、多功能、光机电一体化、加工检测一体化方向发展;
- (5) 新材料、新工艺不断涌现。

3.4 现代特种加工技术

3.4.1 概述

1. 特种加工的概念

特种加工(又称非传统加工)是第二次世界大战后发展起来的一类有别于传统切削与磨削加工方法的总称。特种加工将电、磁、声、光等物理量及化学能量或其组合直接施加在工件被加工的部位上,从而使材料被去除、累加、变形或改变性能等。特种加工可以完成传统加工方法难以实现的加工,如高强度、高韧性、高硬度、高脆性、耐高温材料和工程陶瓷、磁性材料等难加工材料的加工以及精密、微细、复杂形状零件的加工等。

2. 特种加工的分类

特种加工有多种分类方法。如按加工过程中材料的增减可分为去除加工、结合加工和变形加工等;按作用能源可分为机械能、热能、化学能、复合能等。图 3-4 所示为特种加工