

微细切削加工技术(上)

中国航空精密机械研究所 (北京 100076) 荣烈海

随着民用和尖端国防等领域对微小型产品需求的不断增加,对微小零件的加工精度、结构复杂程度、材料特性等要求越来越高。微细加工技术可以满足微余量、三维微形状和材料多样性的加工需求,是达到极限尺寸加工精度的手段。现已发展成为克服 MEMS(微机械或微机电系统)技术局限性的重要使能技术之一。

在现代制造技术领域中,微细加工技术占有极为重要的位置。它不仅是制造高新技术产品的关键技术,而且也是取得国际竞争优势的重要技术之一。它的开发与应用使微电子工业、汽车工业、航空航天、生物医学工程、计算机、精密仪器、光学、移动通信、医疗器械和工业自动化等行业发生了重大变革。

自 20 世纪末期以来,美国、日本、德国、英国等工业发达国家十分重视发展微细加工技术,纷纷投入了相当数量的财力和人力,确定发展战略,制订长远规划,设立专门的研究机构,使微细加工技术迅速发展,现已初步形成了具有特色的微细加工技术及微型产品制造业。我国也投入了一定的力量进行了开发及研制,目前处于研发阶段。

1. 微细切削加工的特点

微细加工包含:微细切削加工、微细电火花加工、微细激光加工、微细电子束和离子束加工、光刻加工等。随着机械制造及其相关科学技术的发展,目前切削加工技术可以达到很高的加工精度和极微细的尺寸,已经成为微细加工领域中极为重要的手段。微细切削加工是指微小尺寸零件的切削加工技术,由于精密和超精密加工既加工大尺寸又加工小尺寸,所以可以说微细切削加工属于精密加工范畴。

在微细切削加工中,由于切削深度很小,切削常在晶粒中进行,所以其单位面积上的切削应力将急剧增大。例如,当在切削深度为 $100\mu\text{m}$ 的普通车削时,其切

削应力只有 500MPa ;当切削深度为 $0.8\mu\text{m}$ 的微细切削时,切削应力增到约为 $10\,000\text{MPa}$ 。由此可见,在微细切削时,切削刃上所承受的切削应力会急速地增加并变得很大,从而在切削刃的单位面积上产生极大的热量,使切削刃尖端处的温度极高,处于高温、高应力的工作状态。为此要求采用高温强度高、耐热性高、硬度高、耐磨性强的刀具材料,即超高强度材料,最常用的是金刚石、立方氮化硼等。

由于切削力能够清晰地反映切屑去除过程,因此对于切削特性的理解切削力是一个很重要的物理参数。在微细切削时虽然切削力的幅值不大,但其单位切削力却极大。与常规切削时切削力随着背吃刀量的增加而增大不同,在微细切削时,切削力却随着背吃刀量的增加而减小,但在背吃刀量很小时,切削力将急速上升,这是一种典型的尺寸效应。

在微细切削中,刀具刃口半径的微小变化将使切削变形产生很大变化,刃口半径增大将使切削变形明显加大。在背吃刀量 $\leq 1\mu\text{m}$ 时,造成的切削变形已占总切削变形的很大比例。因此在背吃刀量很小的超微细切削时,应特别注意采用刃口半径很小的锋锐刀具。欲获得高表面质量的超微细切削加工,必须对微细切削时的切削力与切削能量进行分析与解释。

在微细切削时,由于低的切削能量、金刚石刀具及工件的高导热性,同传统的切削加工相比,微细切削的温度是非常低的。但是由于加工尺度和刀具尺度的微小化,使得刀具上很小的温升就会导致刀杆的膨胀并引发加工精度的下降。在金刚石刀具的化学损伤中,温升是一个极为重要的因素,这是由于切削温度(温升)通常被认为是决定刀具磨损率的主要因素。而即使是刀具的微米级损伤(磨损),对于微切削表面的形成来说也是致命的。为此,在当前的微切削领域,迫切需要深入研

究切削温度对金刚石刀具磨损的影响以及温升的合理控制这两个难题。

表面形貌（表面粗糙度）的形成是由刀具的轮廓映射到工件上的结果。为此表面粗糙度决定了刀具与工件之间相对运动的可控制性及刀具轮廓映射到工件上的保真度。在很多实际的切削加工中，由于多种误差源造成的综合影响会产生数十纳米的表面粗糙度峰谷值的变化。而在微切削表面的形成过程中，即使纳米量级的相对振动也会非常敏感的受到影响，同样也受到切屑去除过程几何形态的影响。除了加工装置（机床）的运动误差，工件材料的性质（性能）也会严重影响到微切削加工表面的微观结构（表面粗糙度、表面的不完整性等）。对于硅、锗单晶体工件的加工，由于其晶向相对于切削力方面的改变也会引起表面局部区域的质量改变。

对于上述微切削过程中所发生的一些现象（特点）是难以用传统的机械学理论解释的，只有从原子学观点出发，通过分子运动学分析，可以对切屑去除及加工表面纳米级微观形貌的形成过程作出合理的解释，分子动力学分析是理解纳米切削过程及确定微小表面最终可以达到的加工精度的有效工具。它在物理、机械、生化、材料学和摩擦学等领域得到了广泛的应用。

2. 实现微细切削加工的主要条件

微细切削加工技术具有单项技术的极限、常规技术的突破和高技术综合三个方面的特点。实现微细切削加工的主要条件包括：微细切削加工机床与夹具，微细切削刀具（磨具）及其刃磨技术，高性能被加工材料，工件检测，工艺过程编制，加工环境的合理控制和操作者的技艺。

（1）微细切削加工机床与夹具 微细切削加工机床是微细切削加工最重要、最基本的加工设备。微细切削加工机床技术是一项综合技术，包括机床的结构、关键基础部件、测控技术和环境技术等。其关键部件是主轴及其驱动系统、导轨及其驱动系统、检测装置和微进给机构等。微细切削加工机床应具备以下功能：①为达到很小的进给量，需要各轴能实现足够小的微量移动，微量移动应可小至几十个纳米。②高灵敏、高精度跟踪性能的伺服进给系统。③低热变形结构设计。④高的主轴转速及极低的动不平衡。⑤高的定位精度及重复定位精度。⑥稳固的床身构件并隔绝外界的振动干扰。⑦刀具

的稳固夹持和高的重复夹持精度。⑧具有刀具破（磨）损及微型钻头折断的敏感的监控系统。

微细切削加工中，在大多数情况下总是要设计专用精密微细夹具，并往往成为零件加工的关键。为此在设计制造时应注意以下几点：①要按照精密夹具设计的要求进行设计、制造。②要充分重视微细工件的夹紧变形。③夹具上的定位基准面需“就地加工”。

（2）微细切削加工刀具 在微细切削加工时，使用的刀具必须具备下列条件：①刀具刃口的锋利性，衡量切削刀具锋利性的极为重要的指标是刃口的圆弧半径。刃口半径越小则被切削表面的弹性恢复量就越小，加工变质层也越小。②切削刃的粗糙度，在理想状态下，切削刃的粗糙度决定切削表面的粗糙度。③刀具与被切削材料的亲和性，亲和性是指在切削过程中，刀具与被切削材料接触的界面上发生凝着和熔着等界面反应的难易程度。如发生了界面反应，就会加快刀具的微观磨损。④刀具的切削刃强度高、耐磨损，微细切削加工刀具的耐磨损性能极为重要，同时刃口也必须有足够的强度。通常作为微细切削加工的刀具都有很高的硬度，但他们都具有相当的脆性。

目前用于微细切削加工的超硬刀具材料主要有金刚石、立方氮化硼和陶瓷等。但是单晶金刚石刀具以其纳米级的刃口锋利性（其刃口圆弧半径可小到10nm左右）、细的刃口表面粗糙度（可达 $R_a = 0.1 \sim 0.27 \mu m$ ）、好的形状再现性及抗磨损能力得到了特别的重视。随着对金刚石原材料的遴选、晶体定向（用激光）、晶向选择、切削刃形面和几何角度设计、抛光刃磨、磨损机理等研究与分析的深入和解决，目前已可较好地控制刀具的磨损状态，并获得一致性及可靠性更高的金刚石切削。目前已经开始采用聚焦离子束刻蚀加工、化学机械抛光等方法对金刚石刀具进行加工。可以使被加工的微细刀具获得亚微纳米级的形状精度。原子力显微镜（AFM）已经成为刃口半径分析的更为有效的测量方法。通常刀具的更换是通过检测工件的表面状况来决定的，因为目前微切削加工中刀具的寿命特性还未系统地建立起来。

崩刃和磨损是金刚石刀具损伤的两种主要形式。崩刃是所有的刀具问题中最难进行预测及控制的。在正常切削状态下，经过数百千米的切削长度之后会产生亚微

数控电解修磨抛光技术研究与应

河南科技学院 (新乡 453003) 王振宁 侯凯歌 元国伟

随着工业设备和产品不断地向精密化方向发展,传统加工方法在有些领域已经很难胜任高精度的加工要求,特别是对复杂形状的模具精密抛光的问题尤其突出,因此新型修磨抛光加工工艺的研究就有着重要的意义。作为新型加工技术之一的电化学光整加工以其加工效率高、工具无损耗、加工后工件表面无热影响层、结构表面光滑、无内应力、无裂纹、加工不受材料硬度的限制等优点,在光整加工领域中得到快速的发展。但是到目前为止自动化的电化学光整加工还是主要应用在平面、轴类等形状简单零件上,对模具等复杂形状零件的加工还停留在手工操作上。采用手工操作的电化学修磨抛光加工,不仅对工人熟练度要求较高,而且劳动强度

较大,复杂模具的表面质量极不容易保证。为了解决这些问题,我们进行了数控电解修磨抛光技术的试验研究,使复杂形状模具零件的电化学修磨抛光加工完全实现了自动化。

1. 试验原理和方法

数控电解修磨抛光的原理如图1所示,工件5和修磨工具6分别接低压脉冲直流电源的正极和负极,电解液通过喷头8在两极间通入电解液,运行加工程序,数控机床主轴低速旋转,磨头沿着工件表面作仿形运动。接通电源后,在电化学的作用下工件表面发生阳极溶解并形成很薄的一层氧化膜,这层氧化膜电阻很大但很软,被旋转的修磨工具磨头迅速刮除,使工件被加工表面上

米级磨损量。金刚石刀具在切削时由于氧化、石墨化和碳化的形成还会形成热化学性磨损。对切削区域温度的升高进行抑制是一种比较有效的提高金刚石刀具抗磨损性能的方法。另外,在充满饱和碳气体中进行切削也可抑制金刚石的碳化。

(3) 被加工材料 在材料的微细切屑去除过程中,被加工材料的性能(如化学成分、物理和力学性能等)也是影响加工精度和表面粗糙度的重要因素之一。材料的选择是以纳米级的表面质量为前提的,可称之为“微加工性”,影响微加工性的因素有:材料与金刚石的内部亲和性(或化学反应)、晶体结构、杂质、缺陷及其分布和热处理等。为此,为了获得良好的加工精度和表面粗糙度,被加工材料必须是没有气泡、缺陷、晶粒细化无杂质的材料,加工后残余应力要小,能长期保持尺寸精度的稳定性。

(4) 工件检测 精密测量与加工一样重要。对于微细工件的高精度尺寸、几何形状及位置尺寸等,可以用电感测微仪和激光干涉仪等来检测;表面形貌及表面粗

糙度可用表面轮廓仪、隧道显微镜来测量。工件表面层的应力、变质层、微细裂纹等缺陷可以X光衍射法和激光干涉法检测。

(5) 工艺过程编制 在微细切削加工中工艺过程编制应充分考虑如下问题:加工时要循序渐进、严格要求;正确选择定位基准,控制定位基准面的加工质量;严控夹紧变形及在加工中的变形;妥善、合理安排热处理工序。

(6) 工作环境 微细切削加工的工作环境是保证加工质量的必要条件。对工作环境主要有温度、湿度、净化及防振等方面的要求。关键技术主要有:纳米级加工所需的工作环境;利用遥控、遥现等科学手段进行加工与检测,以消除人为的影响因素;空气、切削液等恒温方法的研究。

(7) 操作者的技艺 操作者不但要有高超的技艺,而且要有较宽的知识面,懂得机械、电子、计算机、物理、化学和材料学,才能胜任精密微细切削加工这项工作。MW (待续) (收稿日期:20101102)