

# 精密、超精密切削技术发展概况\*

## Overview of Precision and Ultra-Precision Cutting Technology

河南科技学院机电学院 马利杰

北京理工大学机械与车辆学院 王西彬



马利杰

工学博士,副教授,中国机械工程师学会高级会员,研究方向为先进切削理论与技术。近年来主持/参与省部级以上项目6项;发表学术论文30余篇;通过科技鉴定6项,其中获河南省科技进步二等奖1项。

切削加工是指利用刀具切除毛坯上多余的材料,以获得加工精度和表面质量都符合要求的机械零件的工艺方法<sup>[1]</sup>。自世界上第一台切削机床发明以来,切削加工发展至今已有240多年的历史,已成为机械制造业中最基本的工艺方法<sup>[2]</sup>。据统计,

我国在精密和超精密机床、精密切削刀具、超精密检测等精密切削的关键技术方面与德国、日本、美国等制造强国相比仍有很大的差距。随着机床和刀具技术的发展,精密切削技术将朝着更高精度(分子去除、原子去除、量子技术等)等方面发展。因此,要达到甚至超过国外精密切削技术水平,我们仍有很长的路要走,至少还需要20~30年的努力。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.16.058

目前机械加工总量中约70%以上是由切削加工完成的,其在国民经济中具有重要的地位<sup>[3]</sup>。

随着科学技术的飞速发展,机械装备的精度要求越来越高,产品更新换代也越来越快。此外,环境恶化和能源枯竭都要求传统制造技术做出相应的改进和提高。为了适应制造技术的总体发展要求,传统切削加工也在不断优化和创新,呈现出精密化、高效化、绿色化的发展趋势,产生了诸如金刚石超精密切削、微细切削、振动切削、塑性切削等精密加工工艺,高速切削、强力切削等高效加工工艺,以及低温冷风切削、MQL润滑切削、干切削等绿色加工工艺。

在对精密切削的一般机理和关键制约因素简要论述的基础上,本文主要对金刚石超精密切削、微细切削、振动切削、塑性切削4种典型的

精密切削工艺的内涵、特点、应用及其发展进行了简要分析和概括。

### 精密切削及其关键制约因素

#### 1 精密切削及其加工机理

##### 1.1 精密和超精密切削的内涵

精密加工主要是根据加工精度和表面粗糙度两项指标来划分的。通常将加工精度在 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 、表面粗糙度 $R_a$ 在 $0.01\sim 0.1\mu\text{m}$ 之间的切削方法称为精密切削,而把加工精度高于 $0.1\mu\text{m}$ 、加工表面粗糙度 $R_a$ 小于 $0.025\mu\text{m}$ 的切削方法称为超精密切削<sup>[4]</sup>。

精密切削的关键是能够在被加工表面进行微量去除,即采用精密机床和精密刀具通过微量的切削深度和进给量在工件上切除极小的余量,以达到所需的加工精度和表面粗糙度要求。故精密和超精密切削的加

\* 国家自然科学基金资助项目(50935001),河南省青年骨干教师资助项目(2011GGJS-130),河南省科技攻关计划项目(132102210152)资助。

工原理是微量切削,又称为“极薄切削”<sup>[5]</sup>。

## 1.2 精密和超精密切削的加工机理

常规尺度切削时,由于切削深度和进给量较大,切削刀具刃口半径 $\rho$ 与切削厚度 $h_D$ 相差很远,常忽略刃口半径 $\rho$ 的影响。而在精密和超精密切削条件下,受加工尺度和刃口半径的共同影响,将发生一系列特有的加工现象和机理,这就是所谓的刃口半径效应。刃口半径效应是精密切削特有的切削特征,将导致实际负前角、临界切削厚度等特殊现象。

图1为精密切削的圆弧刃切削模型,由于切削厚度 $h_D$ 与刃口半径 $\rho$ 相当,切削区刃口各点的实际前角各不相同,总体上表现为较大的负值,相比较刀具名义切削前角 $\gamma_0$ ,刀刃几何形状产生的实际负前角 $\gamma_c$ 对精密切削的影响较大<sup>[6]</sup>。由于实际负前角的影响,被加工材料的剪切滑移不是发生在刀具与工件接触区的最低点 $O$ ,而是发生在临界点 $A$ 处,即剪切平面上剪切应力最大的位置。因此,把与 $A$ 点对应的有效切削厚度称为临界切削厚度 $h_{Dmin}$ <sup>[7]</sup>。精密和超精密切削时,临界切削厚度 $h_{Dmin}$ 是刀具所能实现的极限切削厚度,它的大小与刀工摩擦系数 $\mu_{tw}$ 和刀具刃口半径 $\rho$ 直接相关。

精密和超精密切削时,单位体积切削能量的 $W$ ( $J/cm^3$ )的大小与加工单位的大小、材料缺陷分布的大

小有关。由于材料内部存在晶界空隙、点缺陷、位错缺陷、微裂纹等不同层级的缺陷,当应力作用的区域不同时,材料切除的破坏方式不同,则加工单位体积材料所消耗的切削能量 $W$ 也就不同<sup>[8]</sup>。

## 2 实现精密切削的关键制约因素

### 2.1 精密和超精密切削机床

机床性能是工件加工精度和表面质量的决定性因素,在切削过程中,机床的主轴回转精度、导轨运动精度、定位精度、刚度及其稳定性都要在已加工表面上得到复映。根据机械加工的一般规律:工作母机的精度通常要比被加工零件的精度高约一个数量级。因此,精密和超精密机床的主轴回转精度通常都在 $1\mu m$ 之内,有的甚至小于 $0.05\mu m$ ;导轨直线度一般小于 $10\mu m/100mm$ ;定位精度小于 $0.1\mu m$ ,有的超精密车床可达 $0.01\mu m$ ;目前超精密机床的刚度一

般为 $10^8\sim 10^9N/m$ ,工作运转稳定,无振动。此外,大多精密和超精密机床都具有能够进行微量切削且具有在线误差补偿的微量进给系统。表1为美国 Moore 公司的 M-18G 金刚石精密切削车床的主要性能指标<sup>[9]</sup>。

### 2.2 精密切削刀具

切削加工是利用刀具与工件之间的相对运动,通过刀具对工件材料的挤压、变形、剪切、撕裂等一系列作用去除多余材料的工艺方法<sup>[10]</sup>,因此精密切削刀具的几何精度、表面质量和物理力学性能对被加工零件的精度和质量都有直接而显著的影响。

除具备普通刀具的所有性能要求之外,精密切削刀具必须满足以下几个特性:

(1) 刀具刃口必须非常锋利。刀具的刃口半径 $\rho$ 大小直接决定了临界切削厚度 $h_{Dmin}$ 的大小,从而最终影响到加工精度和表面质量。刃

表1 M-18G金刚石精密切削车床的主要性能指标

项目	指标	
主轴径向圆跳动/mm	$\leq 0.0001$	
主轴轴向圆跳动/mm	$\leq 0.0001$	
滑台运动的直线度/mm	$\leq 0.001/150$	
横滑台对主轴的垂直度/mm	$\leq 0.002/100$	
重复定位精度( $\pm 2\sigma$ )/mm	$\leq 0.0002/100$	
主轴前气体静压轴承( $\phi 100mm$ )的刚度/( $N\cdot\mu m^{-1}$ )	径向	1140
	轴向	1020
主轴后气体静压轴承( $\phi 80mm$ )的刚度/( $N\cdot\mu m^{-1}$ )	640	
纵横滑台的静压支承刚度/( $N\cdot\mu m^{-1}$ )	720	
数控系统分辨率/mm	0.0001 或 0.00005	

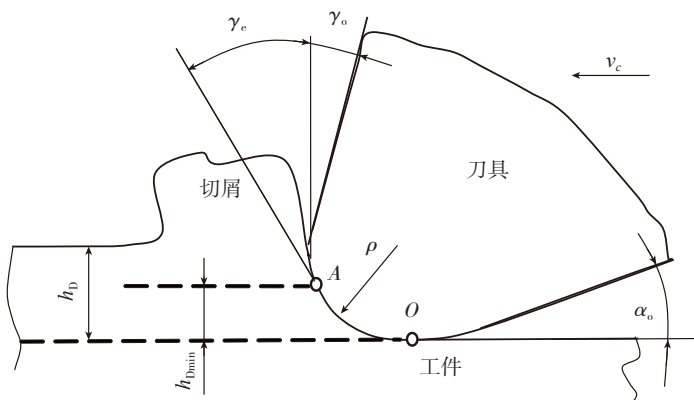


图1 精密切削的圆弧刃切削模型

口半径越小,刀具对切削层的挤压作用就越小,弹性恢复就越小,加工表面的变质层就越小。普通刀具刃口半径 $\rho$ 一般为 $5\sim 50\mu m$ ,而精密切削刀具的刃口半径 $\rho$ 通常都在亚微米级,甚至纳米级。当前,用来精密切削的刀具材料主要有:金刚石、超细晶粒硬质合金和高性能高速钢。

(2) 刀面和刃口的表面粗糙度必须非常低。切削加工时,刀面及刃口的轮廓和粗糙度在被切削表面都

能得到复映,所以精密切削刀具的刀面和切削刃的表面粗糙度  $R_a$  都要求在  $0.01\sim 0.005\ \mu\text{m}$  之间,约为普通刀具的  $5\%\sim 10\%$ 。

(3) 刀具材料与切削材料的亲和作用要小。刀具材料和工件材料的亲和作用将导致切削力、热、摩擦作用加剧,刀屑之间的粘结作用增强,从而破坏了刀面和刀刃的原始性状,最终导致刀具磨损加剧,加工表面质量下降。

### 2.3 工作环境

精密和超精密切削要求具有稳定的工作环境,尤其是超精密切削加工,必须处于稳定(防振隔振)、恒温、超净的工作环境中。

防振隔振是精密及超精密机床非常重要的问题。超精密机床多安放在带防振沟和隔振器的防振地基上隔离外界振源,还可使用空气弹簧(垫)对低频振动进行隔离<sup>[11]</sup>。此外,电动机和主轴的回转频率也应远离共振区。例如,美国 LLL 实验室 LODTM 大型立式金刚石车床被公认为目前世界上精度最高的超精密车床,采用空气弹簧等防振隔振措施后,其轴承部件的相对振动振幅为  $2\text{nm}$ ,并可防止  $1.5\sim 2\text{Hz}$  的外界振动传入。

热变形是精密和超精密切削中误差的主要来源之一,若要保证  $0.01\sim 0.1\ \mu\text{m}$  的加工精度,环境温度应分别控制在  $\pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}$  和  $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$  的范围内<sup>[12]</sup>。所以,精密和超精密机床的恒温控制是研究的重点,如机床导轨可采用膨胀系数小的人造花岗岩;采用恒温油(水)浇淋机床内部各发热部件,造成局部小环境的高度恒温等。

随着精密和超精密切削的飞速发展,对空气洁净度也提出了更加苛刻的要求,被控制的微粒直径从  $0.5\ \mu\text{m}$  减小到  $0.3\ \mu\text{m}$ ,有的甚至减小到  $0.1\ \mu\text{m}$  或  $0.01\ \mu\text{m}$ ,已经远远超过无菌手术室的空气洁净度要求。

## 金刚石超精密切削

### 1 金刚石超精密切削的内涵及特点

金刚石超精密切削是指在超精密数控机床上,采用具有纳米级锋利度的金刚石刀具,在对机床和加工环境进行精确控制条件下,直接利用金刚石刀具单点切削出符合质量要求的精密零件的加工方法<sup>[13]</sup>。金刚石

价键,具有较强的结合力、稳定性和方向性。金刚石独特的晶体结构使其具有优良的物理力学性能(如表 2 所示),非常适合于超精密加工,尤其是天然单晶金刚石被公认为理想的、不能代替的超精密切削刀具材料。但金刚石的耐热温度为  $700\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$ ,高于这个温度就会发生石墨化现象,刀具将很快磨损。

表2 金刚石和硬质合金物理力学性能对比

性能指标	材料种类		备注
	金刚石	硬质合金	
硬度 HV	6000~10000 (随晶体方向和温度有别)	2200~3200	为硬质合金的 2~5 倍
抗弯强度 /MPa	210~490	780~2160	
抗压强度 /MPa	1500~2500	—	
弹性模量 / (N·m <sup>-2</sup> )	(9~10.5) × 10 <sup>11</sup>	—	为硬质合金的 1.5~2 倍
导热系数 / (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	146.5 (天然金刚石)	21~88	为硬质合金的 1.5~9 倍
摩擦系数	0.05~0.07 (与铝、黄铜之间)	—	为硬质合金的 50%~20%
耐磨性	金刚石为硬质合金的 60~120		
热胀系数	金刚石比硬质合金小几倍		

超精密切削是超精密加工技术的重要分支,也是超精密加工技术中发展最早的、应用最为广泛的技术之一。目前,主要包括金刚石超精密车削和金刚石超精密飞切两种工艺。

金刚石超精密切削通常以切除金属层的厚度为其加工水平的标志之一。目前,最小切削厚度可达亚微米级,甚至几十纳米,此时切削厚度可能已经小于晶粒的大小,切削过程在晶粒内部进行,因此切削力一定要超过晶体内部的原子、分子结合力,刀刃上所承受的剪应力急速增加并变的非常大,甚至接近于材料剪切强度极限。

### 2 金刚石刀具

金刚石是实现金刚石超精密切削的必须刀具材料,它是单一碳原子的结晶体,晶体结构属原子密度最高的等轴面心立方晶系。金刚石晶体中碳原子间的连接键为  $\text{sp}^3$  杂化共

价键,为保证刀具强度,前角和后角都取值较小,前角  $\gamma$ 。一般取  $0^\circ$ ,可根据被切材料选定,后角  $\alpha$ 。取  $5^\circ\sim 10^\circ$ ,主偏角取  $30^\circ\sim 90^\circ$ ,通常多取  $45^\circ$ 。金刚石刀具的刃口半径  $\rho$  一般为  $0.2\sim 0.4\ \mu\text{m}$ ,前后刀面的表面粗糙度通常应研磨到  $0.008\sim 0.012\ \mu\text{m}$ 。金刚石刀具的切削刃形状有直线形和圆弧形两种,目前国内所用高精度圆弧金刚石刀具还主要依赖进口<sup>[4]</sup>。当前,金刚石刀具刃口半径  $\rho$  一直在向更小的方向发展,据日本大阪大学井川直哉教授介绍,最小可达  $2\sim 4\text{nm}$ (通过切削获得厚度为  $1\text{nm}$  的切屑推算),这是当前的最高水平<sup>[4]</sup>。

### 3 金刚石超精密切削的应用及发展

目前,在科研和生产中经常遇到一些纳米级的几何形状精度和表面质量要求,如精密轴、孔的圆度和圆柱度,精密球体(如陀螺球、计量用标

准球)的球度,制造集成电路用单晶硅基片的平面度,激光透镜和反射镜的平面度等,依靠传统加工方法难以达到此类纳米加工要求,而采用金刚石超精密切削可以满足这种要求。当前,金刚石超精密切削主要用来加工有色金属、树脂、塑料、结晶体、陶瓷、复合材料等。由于金刚石材料的化学成分是碳,与铁系材料有亲和力,在加工中会发生化学磨损,所以不能用于加工黑色金属<sup>[15]</sup>。

当前,金刚石超精密切削的技术难题主要有:(1)新型金刚石刀具的定向;(2)刀面及刀刃的研磨抛光;(3)刃口钝圆半径的精密测定;(4)脆性材料及难加工材料的金刚石超精密切削。金刚石超精密切削的发展趋势主要体现在:(1)向更高精度、高效率发展;(2)采用计算机技术补偿加工精度;(3)加工、计量一体化;(4)发展模块化的超精密机床。

## 振动切削

振动切削是20世纪50年代日本宇都宫大学隈部淳一郎教授提出的一种精密切削技术,其通过给刀具(或工件)施加以适当方向、一定频率 $f_z$ 和振幅 $A$ 的单一或复合振动,从而实现改变传统切削机理、提高切削工艺效果的目的<sup>[16-17]</sup>。

按照振动频率的不同,振动切削可以分为:低频振动切削、中高频振动切削和超声振动切削。由于外界振动的叠加,使传统切削技术具有了脉冲切削、变速切削、变角切削、分离冲击等独特性能,从而使刀屑摩擦减小、切削液作用效果提高、加工稳定性提高、材料加工性能得到改善,最终实现了降低切削力和切削热、减小切削振动、提高加工质量、延长刀具寿命的目的。因此,振动切削技术在难加工材料的加工方面具有独特的优势。

近40年来,振动切削技术的研究和应用受到越来越多的关注,特

别是工业发达国家日本、德国、美国等都很重视其研究开发,已取得不少实用化的成果,如德国研制的ULTRASONIC 20linear DMG小型超声切削加工中心。振动切削技术的未来发展将主要集中在:(1)玻璃、陶瓷等难加工材料振动切削机理与应用基础研究;(2)振动切削技术的工艺拓展;(3)更多商品化振动切削机床的研制与推广。

## 塑性切削

塑性切削,又称为延性域切削,主要是针对脆性材料而言,其命名源自该种工艺的切屑形成机理,即切削脆性材料时,切屑形成与塑性材料相似,切屑通过剪切的形式被刀具从基体上切除下来。因此,切削后的表面没有形成微裂纹,也没有脆性剥落时的无规则的凹凸不平,呈现出有规则的纹理。

塑性切削的机理至今尚不十分清楚,但部分研究表明<sup>[18-20]</sup>:在特定条件下,当刀具的刃口半径 $\rho$ 磨得非常小(达到纳米级),且临界切削深度 $h_{Dmin}$ 小于刀具的刃口半径 $\rho$ 时,垂直于加工表面的法向分力非常大,即可实现塑性切削。由于被加工材料强度越大,实现塑性切削所需的刃口半径 $\rho$ 越小,故塑性切削又被称为纳米塑性切削。

当前,纳米塑性切削技术的发展还很不成熟,距离工业应用尚有一定的距离。该技术的未来发展将主要集中在:(1)纳米塑性切削机理的研究;(2)适合于纳米塑性切削的刀具

材料和刀具结构的开发;(3)适用的纳米塑性切削工艺的开发。

## 微细切削

### 1 微细切削的内涵

微细切削(Micro-cutting)<sup>[8,21-22]</sup>是指对毫米级总体尺度的零件进行微米级切削层去除的切削加工,通常通过线度尺寸微小的实体刀具对微细切削层的挤压、摩擦、剪切、撕裂作用实现材料的微量去除。微细切削不是常规切削尺度上的简单缩小,从原理上讲它属于介观尺度加工的范畴,因而具有诸多常规切削所不具有的现象和本质<sup>[23]</sup>。

微细切削是为了适应产品小型化的全球商品市场发展的重要趋势而发展起来的先进切削技术。与硅基MEMS、高能束加工、LIGA等微细加工技术相比,微细切削在三维加工能力、加工柔性、加工效率和加工成本等方面具有一定的综合优势,近年来得到了迅猛发展。图2为微细切削的典型形面。

### 2 微细切削的关键技术

#### 2.1 微细切削机床

微细切削机床是实现微细加工的关键。为了适应微小型零件的加工需要,同时也为了降低能耗、减小浪费,除具有精密与超精密机床的共有特性之外,微细切削机床目前正朝着微型化和多功能化的方向发展。

自20世纪90年代,日本、美国、中国等相继开展了微小型机床的研究与开发工作。1996年日本通产省工业技术研究院机械工程实验室

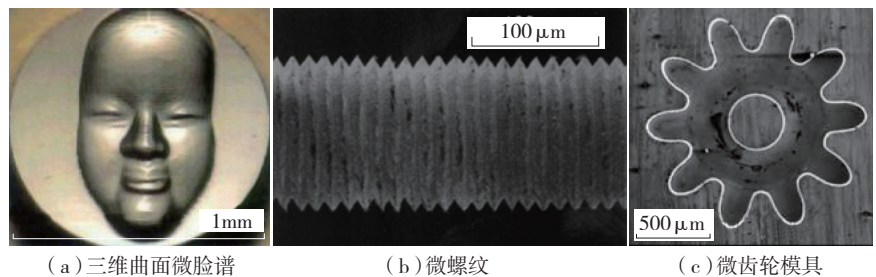


图2 微细切削的典型形面

(MEL)开发了世界上第一台微型车床,该机床体积 $32 \times 25 \times 30.5 \text{mm}^3$ ,重量约100g,主轴电机额定功率1.5W,转速10000r/min;切削黄铜获得表面粗糙度 $1.5 \mu\text{m}$ ,圆度 $2.5 \mu\text{m}$ ,加工出的最小外圆直径为 $60 \mu\text{m}$ ,切削试验中的功率消耗仅为普通机床的0.2%。1999年日本机械技术研究所以研制了世界上第一台桌面微型工厂,该微型工厂由微型车床、铣床、搬运机械手和2个装配机械手组成<sup>[8]</sup>。另外,为了满足不同结构零件的加工需求,微细切削机床必须具备高精度、多轴化、自动换刀、自动上下料等多功能化特性。

### 2.2 微细切削刀具

微细切削过程是微细切削刀具以“刀尖区”和“刀口区”的极端非自由切削方式进行的,切削过程复杂,刀具变形、摩擦磨损以及应力场、温度场均发生在一个极小尺度范围内。另一方面,由于高转速(高达几万转乃至十几万转)的影响,微细切削刀具必须具有高刚度、高承载能力、高稳定性等基本特征。为此,微细切削刀具,尤其是微径钻头和铣刀,无论从材料构成、几何结构,还是从制造工艺、涂层制备等方面都要进行重新设计和优化提高。图3为美国桑迪亚国家实验室制作的几种异型微细切削刀具。

### 3 微细切削技术的未来研究方向

微细切削技术的未来研究和发展的将主要集中在以下4个方面:(1)商品化的高精密微型机床的研制与开发;(2)微细切削过程监控,特

别是微细切削刀具的失效监控和微型零件加工质量的在线监测监控;(3)微细切削刀具的设计和制造技术研究;(4)难加工材料微细切削机理及应用基础研究。

## 结束语

精密切削在制造技术中占有十分重要地位,是一个国家制造业水平的重要标志,是先进制造技术的关键与基础。作为一个制造大国,我国在精密和超精密机床、精密切削刀具、超精密检测等精密切削的关键技术方面与德国、日本、美国等制造强国相比仍有很大的差距。随着机床和刀具技术的发展,精密切削技术将朝着更高精度(分子去除、原子去除、量子技术等)等方面发展。因此,要达到甚至超过国外精密切削技术水平,我们仍有很长的路要走,至少还需要20~30年的努力。

## 参考文献

- [1] 师汉民. 金属切削理论及其最新应用. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.
- [2] Krar S, Rapisarda M, Check A F. Machine tool and manufacturing technology. Delmar Cengage Learning, 1997.
- [3] 左敦稳, 黎向锋. 现代加工技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.
- [4] 袁哲俊, 王先逵. 精密和超精密加工技术(第二版). 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [5] 王先逵. 精密加工和纳米加工、高速切削、难加工材料的切削. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [6] Fang F Z, Zhang G X. An experimental study of edge radius effect on cutting single crystal silicon. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 6: 1-11.

[7] Chae J, Park S S, Freiheit T. Investigation of micro-cutting operation. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46: 313-332.

[8] 王振龙. 微细加工技术. 北京: 国防工业出版社, 2005.

[9] 马利杰. 先进制造技术. 北京: 北京师范大学出版社, 2011.

[10] 陆剑中, 孙家宁. 金属切削原理与刀具. 北京: 机械工业出版社, 2011.

[11] 巩岩, 赵磊. 单点金刚石机床及其在光学工程领域的应用. 中国光学, 2011, 4(6): 537-545.

[12] 吕亚玲, 杨晓红. 现代先进制造技术的趋势——精密与超精密. 机械制造, 2004 42(10): 25-26.

[13] 罗松保. 金刚石超精密切削刀具技术概述. 航空精密制造技术, 2007, 43(1): 1-4.

[14] 赵清亮, 王景贺, 李旦, 等. 超精密切削面临的课题. 制造技术与机床, 1999 (11): 5-8.

[15] 韩成顺, 张龙江, 董申, 等. 大型光学非球面零件超精密切削新方法. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(7): 1062-1065.

[16] 隈部淳一郎(日). 精密加工—振动切削(基础与应用). 北京: 机械工业出版社, 1985.

[17] 李祥林, 薛万夫, 张日升. 振动切削及其在机械加工中的应用. 北京: 北京科技出版社, 1985.

[18] Liu K, Li X P, Rahman M, et al. A study of the effect of tool cutting edge radius on ductile cutting of silicon wafers. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(7-8): 631-637.

[19] Liu K, Li X P. Ductile cutting of tungsten carbide. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1-3): 348-354.

[20] 王明海, 卢泽生. 单晶硅超精密切削表面质量各向异性的研究. 航空精密制造技术, 2007, 43(1): 13-16.

[21] Weule H, Huntrup V, Tritschler H. Micro-cutting of steel to meet new requirement in miniaturization. Annals of the CIRP, 2001, 50(1): 61-64.

[22] Lu Z N, Yoneyama T. Micro cutting in the micro lathe turning system. International Journal of Machine Tool & Manufacture, 1999, 39: 1171-1183.

[23] 王先逵. 广义制造论. 机械工程专业报, 2003, 39(10): 86-94.

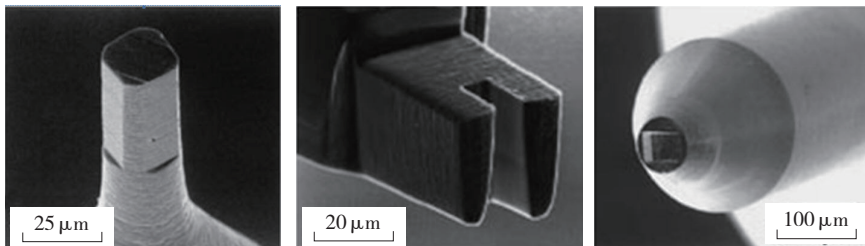


图3 美国桑迪亚国家实验室研制的异型微细切削刀具

(责编 小城 谷雨)