

面向微小零件加工的微细切削技术

梁迎春¹, 赵岩^{1,2}, 王波¹, 白清顺¹, 陈明君¹, 孙雅洲¹

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛, 066004)

摘要: 比较了传统的精密/超精密机床与微小型机床在微细切削中的优缺点, 综述了微小型机床在日本、美国、韩国以及中国的研制情况。分析了最小切削厚度和工件微结构对微细切削的影响, 讨论了微细切削在微毛刺、表面形成、切削力建模及微刀具磨损方面的机理问题并指出了微细切削今后应当着重解决的技术难点。

关键词: 机械制造工艺; 机床; 微小型机床; 微细切削; 微刀具

中图分类号: TG501.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2008)05-1069-08

State-of-the-art of microcutting technology for the manufacture of microparts

LIANG Ying-chun¹, ZHAO Yan^{1,2}, WANG Bo¹, BAI Qing-shun¹, CHEN Ming-jun¹, SUN Ya-zhou¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The advantages and disadvantages between micromachine tools and traditional precision/ultraprecision machine tools were compared. The developments of the micromachine tools in Japan, America, Korea and China were presented. The effects of minimum chip thickness and material microstructure on the microcutting were analyzed. The other mechanisms of microcutting, such as microburrs, surface generation, cutting force modelling, and microcutter wear were also discussed. Finally, some comments on future needs and directions for the microcutting were offered.

Key words: mechanical manufacturing technology; machine tool; micromachine tool; microcutting; microcutter

一百年前, 钟表里面的微齿轮可能是世界上唯一的工业化微型零件, 随着社会需求的变化以及科学技术日新月异的发展, 各种各样的微型零件正在悄然改变着人类与大自然交往的方式。比如在生物医药领域, 无痛诊查和手术是患者所希望的, 而达到这一目的的方法之一就是把你所用的医疗器械微型化^[1]。目前, 微型化技术已经在通讯、光学、航空、航天和汽车等许多领域得到了成功应用, 移动电话和数码相机是人们经常接

触的产品。一些微型零件外形尺寸一般在几十微米到数毫米之间, 重量轻但功能反而更强。在2005年, 微型零件的产值已经达到380亿美元, 是2000年的两倍^[2], 正是市场对微型零件需求的快速增长推动了微细加工技术的发展。

在目前的多种微细加工技术中, 微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)一直是主流技术之一。由于MEMS技术衍生于微电子技术, 它的主要加工对象被限制在硅基材料

收稿日期: 2007-05-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50675050); 黑龙江省杰出青年基金项目(JC200614).

作者简介: 梁迎春(1964-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 超精密加工与纳米技术; 精密非标设备的设计与制造.

E-mail: zhaoyanhit@163.com

上,并且工件的几何形状基本上是简单的二维形状,另外 MEMS 设备价格之昂贵也不是一般的企业和研究机构能够接受的,需要国家的巨额投入才能运行,且只有在大规模集成电路的批量制造等方面才是经济的^[3-6]。使用微细切削技术来制造微型零件的想法来源于把常规切削技术应用到微观领域的思想。从理论上讲,微细切削可以加工出各种具有三维复杂形貌或者自由曲面的微型零件,并且加工材料几乎不受限制,可以满足微型零件对材料多样性的要求。

世界上几个著名的实验室和大学都相继开展了微细切削加工的研究项目。“International Workshops for Microfactories”国际会议已经开过 4 届,美国国家科学基金会也在 2000 年召开了微米-中间尺度机械制造的专题讨论会,认为利用微细切削技术来填补微/纳尺度加工和宏观加工之间的空白是一个值得关注的课题^[7-14]。

本文通过综述 20 世纪 90 年代以来微细切削技术的发展过程,比较了微细切削加工中传统的精密/超精密机床与正在发展的各种微小型机床的优缺点,重点介绍了日本、美国、韩国以及国内哈尔滨工业大学精密工程研究所在微小型机床研制上所做的工作。另外,在微细切削机理方面,分析了最小切削厚度现象及材料微结构对微细切削的影响,讨论了微细切削中的表面形成与微毛刺,切削力建模及微刀具磨损等方面所做的工作。对基于对微细切削技术的理解指出了今后应重点解决的技术问题。

1 微小型机床及微刀具

精密机床和刀具对于微细切削来说是至关重要的,因为它们决定了所能加工的微型零件的表面质量和形状精度。目前微型零件的切削加工主要有两种方法:一是利用传统的精密/超精密机床;另一种方式就是利用新近发展起来的微小型机床。传统的精密/超精密机床加工精度高,但是设备占用空间大,对加工环境的温湿度有严格的要求,设备的制造成本和维护费用与加工的微型零件不相称。以日本为代表的许多国家从 20 世纪 90 年代初开始研制各种微型机床,用它来加工微结构,目的是在增加系统柔性的同时,大大降低设备制造成本。微型机床具有体积小、重量轻、消耗能源少和移动方便的特点。

1.1 微小型机床的研制

在 1988 年,日本通产省组织的一个研究机构(Micro-Machine Center, MMT)和前日本机械工业实验室(Mechanical Engineering Laboratory, MEL)就开始了机床微型化的研究工作,并且把这一工作作为日本微机床技术(Micromachine Technology)国家项目的一部分^[15]。在把微型机床由概念变为现实的早期工作中,1996 年研制的一台微型车床是第一个成型的微型机床^[16],它比人的手掌还要小,这激起了学者们在机床微小型化方面更大的热情和信心。此微型车床长 21 mm,宽 25 mm,高 30.5 mm,重量只有 100 g。由压电致动器驱动 X-Y 直线平台,主轴最高转速 10 000 r/min,电机额定功率只有 1.5 W,表现出了机床结构尺寸减小后在能源消耗上的优势。它能够切削微黄铜柱,表面粗糙度 $1.5 \mu\text{m}$,圆柱度 $2.5 \mu\text{m}$,工件直径最小可达 $60 \mu\text{m}$,加工能力证明了机床微型化的可行性。

在微型车床研制成功的推动下,紧接着又产生了两台微型机床^[17],一台微型铣床和一台微型冲床。这两台机床与前面的微型车床、一个微型手臂及一个双手指的微操作手装配在一起组成了世界上第一个“微型工厂”(见图 1)。其中的微铣床($119 \text{ mm} \times 119 \text{ mm} \times 102 \text{ mm}$)主轴电机使



图 1 便携式“微型工厂”

Fig. 1 Portable “microfactory”

用 36 W 无刷直流伺服电机,额定转速 20 000 r/min,可以使用刀柄直径 3 mm 的刀具进行铣削和钻孔;微型冲床($111 \text{ mm} \times 66 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$)使用 100 W 交流伺服电机可以产生 3 kN 的压力;其中的微手臂重量轻、结构紧凑、刚性好,在灵活的水平铰链和同步铰链的帮助下,能够以 $20 \mu\text{m}$ 的水平精度在直径 200 mm 的圆形范围内运动;微操作手有 2 个针状手指,每个手指模块有 3 个内置的压电致动器和一个并行铰链机构。在加工实例中制造了一个外径只有 0.9 mm 的球轴

承。所有部件装在了一个 $625\text{ mm} \times 490\text{ mm} \times 380\text{ mm}$ 的箱子里,加上所有的辅助设备重量只有 34 kg 。整个系统功耗 60 W 。此系统成为“微型工厂”的原型,虽然系统中的机床很小,与常规机床相比结构也简单,但它已经能够加工实际零件。

1998年,奥林巴斯在日本新能源与技术开发组织(New Energy and Technology Development Organization, NEDO)的资助下开展了一项自动孤岛型桌面微型工厂(见图 2)的研究项目,此设备主要用于内窥镜里面的光学微零件的装配。

1999年,Shinanogawa 技术研发组织在 NEDO 的资助下研制了一台小尺寸车削中心(见图 3),把 4 个平台组装到一个机器中,能源消耗减少到常规的 $1/3$,占地面积是普通机床的 $1/6$ 。

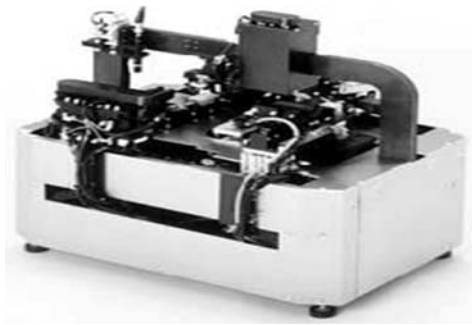


图 2 奥林巴斯内窥镜光学微零件装配用机床
Fig. 2 Olympus Co. assembly microfactory for the optical microparts of endoscope



图 3 集成型 4 轴车削中心
Fig. 3 Integrated 4-spindle turning center

Nagano 技术基金会组织了 14 个企业和几个研究机构组成了一个协会。他们正在研究“微型工厂”或者“桌面工厂”的理念,目的是把这一思想应用到生产实践中去。在 2003 年,该协会研制了一台 A3 纸大小的车铣中心(见图 4),由 3 个平台和 2 个主轴组成,并配有自动换刀装置。该车铣中心的研制时间仅用了 3 个月。协会的成员公司

已经把这些理念应用到了他们正在研制的产品中

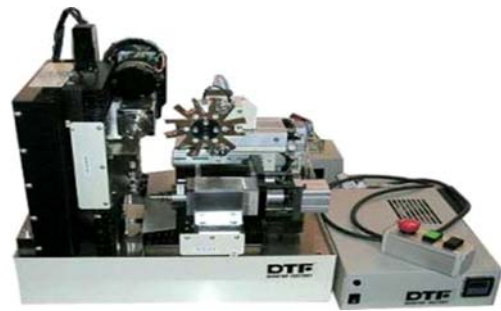


图 4 Nagano 桌面型车铣中心

Fig. 4 Nagano desktop turning-milling center (例如去微毛刺机床,微车/钻/3D 铣机床,电镀设备和微装配系统)。

在微型机床技术项目的支持下,日本的许多微型机床设备已经实用甚至商品化了,RIKEN 是日本的一个著名研究机构,已经研制了一系列的微型机床用于形貌测量、高速铣削和 ELID 磨削等。一些本来对这一领域不太重视的机床企业在客户需求的推动下也开始进入这一领域。在日本的带动下,世界上许多其他国家的科研机构也相继开始了微型机床的研究工作。

美国伊利诺斯大学厄巴纳-香槟分校研制了一台微型铣床^[18]。高速涡轮驱动空气主轴最高转速 $150\,000\text{ r/min}$,最大跳动量约为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。系统定位精度 $1\text{ }\mu\text{m}$,并在竖直平台上安装了 Kistler 9018 型三向测力仪以测量切削过程中的切削力。

韩国首尔国立大学的学者们研制了一台 5 轴微铣床^[19]。总体尺寸为 $294\text{ mm} \times 220\text{ mm} \times 328\text{ mm}$ 。整个系统由 3 个直线平台和 2 个旋转平台及 1 个气动主轴组成。但是每个平台没有配置编码器和位置传感器,这在一定程度上降低了系统的加工精度。

国内对微型机床的研究刚刚开始,哈尔滨工业大学精密工程研究所目前已经制造了 2 台微型铣床(立式和卧式各一台)^[20]。其中三轴联动立式微型铣床的构成见图 5。机床总体外形尺寸为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 290\text{ mm}$,共有 5 个组成部分:PMAC 8 轴运动控制卡,完成插补运算,位置控制等实时任务;工控机系统,提供系统初始化,代码编程,参数管理等非实时性任务;精密工作台,由压电陶瓷超声直线电机驱动;空气涡轮高速主轴,为微径铣刀提供 $160\,000\text{ r/min}$ 的转速;CCD 视频采集系统,用于把微径铣刀和微小工件放大后方便对刀并实时观测切削状态。高速主轴

及精密定位平台参数见表 1。

此系统在某薄膜型工件的微槽加工中显示出

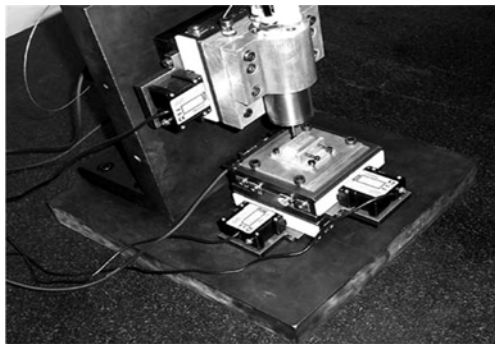


图 5 微型精密三轴联动立式铣床

Fig. 5 3-axis vertical micromilling machine tool

表 1 精密定位平台及高速主轴参数

Table 1 Parameters of the precision positioning bed and the high-speed spindle

	参 数	值
	行程/mm	60
纳米	最大速度/(mm·s ⁻¹)	200
定位	静态保持力/N	28
平台	重复定位精度/μm	0.25
	编码器精度/μm	0.1
	最高转速/(r·min ⁻¹)	160 000
主轴	最大径向跳动/μm	1
	空气消耗量/(L·min ⁻¹)	140

了理想的加工性能。加工用刀具是直径为 0.15 mm 的硬质合金平头立铣刀,工件为 3J21 弹性合金。此工件为一薄膜型微型工件,膜厚 65 μm,要求在薄膜上加工出宽 150 μm,深度大于 55 μm 的微槽。图 6 所示为薄膜工件加工完成后放大 200 倍的侧面图,槽底厚仅为 6 μm,在薄膜厚度方向上的材料去除率为 90.7%,槽底面表面粗糙度为 0.365 μm,批量加工成品率高于 80%,取得满意的加工效果。

除了上述机构外,德国的 Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation(FHG-IPA)、瑞典的 EPEL 以及新加



图 6 薄膜微槽 CCD 显微放大 200 倍侧视图

Fig. 6 End view of the film groove amplified with CCD (amplification ratio: 200)

坡国立大学和南洋理工大学等也都开展了微型机床及微细切削机理等方面的研究工作。

1.2 微细切削用微刀具

精密微切削刀具的性能在很大程度上决定了所能加工的微结构的尺寸和精度。精密/超精密加工中广泛使用的金刚石刀具在加工黑色金属时由于碳元素与铁元素之间有很强的亲和力,会造成刀具快速磨损,这一特性使金刚石刀具的应用被限制在了有色金属上。而微细切削中要应用到各种钢及合金,并且对于一般的微型零件也并不要求达到超精密加工的水平。商品化的微刀具(如微端铣刀和微钻头等)都是由硬质合金烧结而成,具有高温下保持高硬度、高强度的特点。目前,商品化的微端铣刀直径已经可以做到 0.05 mm,螺旋角是由磨削加工而来。

Onikura^[21]使用超声振动磨削的方法以减少摩擦力,生产出了直径 0.011 mm 的微径硬质合金铣刀。Sandia Labs^[22]利用聚焦离子束加工出了直径 0.25 mm 的 5 刃硬质合金微端铣刀,并用它加工出了深宽都为 25 μm 的微槽。Fang^[23]使用有限元与实验的方法研究了微径硬质合金铣刀几何形状对加工能力的影响,发现半圆形刀齿比三角形或者传统的 2 刃端铣刀加工效果要好。

2 微细切削机理

微细切削与常规切削一样,都是通过刀具机械去除工件表面材料,但由于工件、刀具尺寸的大幅减小导致微细切削中表现出许多与常规切削不同的现象。通过对微细切削机理的研究有助于提高加工质量,推动微细切削的实用化进程。

2.1 最小切削厚度效应

在常规切削中,切削厚度比刀具刃口半径大,所以常规切削模型中都假定刀具可以完全去除工件表面材料而形成切屑。然而在微细切削中由于刀具直径和工件尺寸的减小,切削厚度接近甚至经常小于刃口半径,使得并不是每一个刀齿切过后都会形成切屑,工件材料在表面会产生弹塑性变形。刀具对工件表面的这种挤压耕犁作用使表面质量变差。

Liu^[24]采用实验的方法来确定切屑的形成和微切削力。研究发现,可以通过测量轴向力的突然变化来确定最小切削厚度。轴向力的这种突然变化可以解释为耕犁或滑移域向剪切域的突然转变。Son^[25]从工件和刀具的摩擦系数以及刃口半

径出发来确定最小切削厚度,并且用公式近似表达为: $h_m = R_c(1 - \cos(\pi/4 - \beta/2))$ 。其中 β 为刀具和待加工金属表面的摩擦角, R_c 是刃口半径。Son同时还发现,当以最小切削厚度切削时,会产生连续性切屑,表面质量较好。Weule^[26]在微铣削中也发现了最小切削厚度效应并分析了其对表面粗糙度的影响。Weule使用刃口半径 $5\ \mu\text{m}$ 的硬质合金微铣刀铣削在不同温度下回火处理后的SAE1045钢,然后测量加工表面,并观察到了锯齿状形貌。作者认为,是最小切削厚度导致了这种锯齿形貌。Vogler^[27]使用有限元仿真的方法确定微细切削钢材料时的最小切削厚度为刀具刃口半径的 $20\% \sim 30\%$ 。Vogler还在文献[28]中做了微细铣削实验以研究最小切削厚度对切削力的影响,发现当进给量小于最小切削厚度时,切削力频谱中包含有一个分频谐波。这个分频谐波表现为每 n 个刀齿切过后重复出现一次,表明当以小进给量切削时,由于最小切削厚度的影响,在刀齿切过时,被切削层金属累积,随着切削力的增大,直到 n 个刀齿切过后累积的切削厚度大于最小切削厚度之后才会形成切屑,所以会在切削力的频谱中观察到分频谐波。

2.2 工件材料微结构

由于大多数常用工程材料的晶粒大小在 $100\ \text{nm}$ 到 $100\ \mu\text{m}$ 之间,而微细切削时用到的背吃刀量一般在数微米到几十微米范围内,比晶粒尺寸要小,切削时刀齿会在工件内不同相的晶粒中切过,那么就不能使用常规切削时工件材料的均质假设。这是微细切削与常规切削相比一个显著不同的地方,切削过程中不同的晶粒结构造成了微细切削的不稳定。为了更好地理解材料微结构对微细切削力的影响,Vogler在文献[28]中使用了直径 $500\ \mu\text{m}$ 的2刃硬质合金端铣刀对单一铁素体基、珠光体基以及多相的铁素体-珠光体基球墨铸铁件进行了一系列铣槽实验。在以 $30\ 000\ \text{r}/\text{min}$ 的主轴转速和 $2\ \mu\text{m}$ 的每齿进给量下对珠光体质量分数为 50% 的球墨铸铁件铣槽时,在切削力频谱中观察到除了主轴频率 $500\ \text{Hz}$ 、刀齿切过频率 $1000\ \text{Hz}$ 外,还有一个很明显的 $12\ \text{kHz}$ 的波动信号。对于由 $30\ 000\ \text{r}/\text{min}$ 的主轴转速产生的 $48\ \text{m}/\text{min}$ 的切削速度来说, $12\ \text{kHz}$ 相当于波长 $65.4\ \mu\text{m}$,这个数值与铁素体的平均晶粒尺寸 $70\ \mu\text{m}$ 很相近。在切削单一铁素体基或珠光体基球墨铸件时就没有出现 $10\ \text{kHz}$ 以上的信号。对

比证明,多相材料微结构造成了切削力的波动。

Weule^[26]建议使用均质材料克服材质不均匀给切削带来的负面影响。他在 $180 \sim 600\ ^\circ\text{C}$ 范围内对SAE1045钢进行淬火、回火的热处理来获得均质材料,发现进给量的增加可以在一定程度上改善表面质量,这与Liu^[24]的微细切削中过低进给量会造成切削不稳定的结论是一致的。

2.3 表面形成与微毛刺

基于刀具几何形状和铣削过程的宏观尺度铣削表面形成模型,已经能够比较精确地预报铣削过程中表面形貌的形成,但是却不能合理地描述微细切削过程。另外,由于微型零件本身小尺寸的特点,一般不太可能对加工完成的微型零件再进行去毛刺的后处理,所以尽量减少加工过程中产生的微毛刺对于工件质量是很重要的。

Vogler^[27]采用刃口半径 $5\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ 的两种铣刀在同样的进给量范围内进行微端铣实验来研究微细切削的表面形成机理。他使用Wyko光学轮廓测量仪测量槽底面的表面粗糙度,发现刃口半径对表面粗糙度有很大影响,采用刃口半径 $5\ \mu\text{m}$ 的铣刀时得到的表面粗糙度比 $2\ \mu\text{m}$ 时大很多。他还发现,进给量对表面粗糙度也有明显影响,即在以小进给量切削时,当进给量小到一定程度后表面粗糙度反而会增加,这与常规切削中进给量减小表面粗糙度会减小是矛盾的。Vogler认为其原因是由于大进给量切削时进给量对表面质量的影响类似于宏观切削,但是当进给量小到一定程度后,最小切削厚度就开始起主要作用,所以会存在一个最优的进给量。Damazo^[29]使用直径 $200\ \mu\text{m}$ 的微端铣刀进行了微薄壁的加工实验,发现毛刺的存在很大程度上限制了所能加工薄壁的最小厚度。实验采用的材料包括铝、黄铜、铸铁、模具钢和不锈钢,成功加工出了高 $305\ \mu\text{m}$ 、厚度 $25.4\ \mu\text{m}$ 的薄壁。

Lee和Dornfeld^[30]进行了铝6061-T6的微铣削实验,研究微毛刺的形成机理。试验中分别采用直径 127 、 254 和 $635\ \mu\text{m}$ 的微径铣刀,并考虑了不同的进给量和背吃刀量。使用扫描电镜观察到了旗型、滚柱型、波浪型和锯齿型微毛刺。考虑到毛刺大小与进给量的关系发现,微铣削中产生的毛刺比常规切削产生的毛刺大,作者认为其原因是由于微铣削切削速度低,刃口半径与进给量之比相对较大造成的。在低转速下,切屑的卷曲比碎断要多,当刀具切出工件时,切屑卷曲形成毛

刺。另外,作者在实验中发现,逆铣比顺铣产生的顶端毛刺要小。

2.4 切削力建模

切削力与表面质量、刀具变形、切屑及微毛刺的产生都直接相关,对切削力的深入分析可以帮助操作人员正确地选择工艺参数。由于微细切削中刀具刃口半径与切削厚度在同一量级,从而造成了较大的负前角,使得常规切削中的尖刃切削力模型不再适用于微细切削,另外,微细切削中的弹-塑性变形对微细切削力也有较大影响。

Kim^[31]在他们的切削力分析模型中既考虑了沿刀具后刀面的工件表面弹性恢复的影响,也考虑了刀具刃口产生的耕犁作用。Kim 在 4 个不同区域进行切削力仿真来研究弹性恢复对微细切削力的影响,发现仿真结果与 Moriwaki^[32]以及 Lucca^[33]等人的实验结果很相近,从而证明了常规切削中的尖刃模型不适合微细切削。

Liu^[34]从 Jardret^[35]的研究结果出发,使用弹性恢复率把微细切削时的弹性恢复分为 3 类:完全弹性变形,即不能形成切屑;弹性变形与剪切同时存在,即能产生切屑但还有部分弹性恢复存在;剪切变形,即完全产生切屑不会发生弹性变形。Liu 在不同进给量下做了多组切削试验后,发现进给量非常低时,由于工件表面材料的弹性恢复使得切削不稳定,造成了切削厚度的变化而产生切削振动。

Dow^[35]通过预测轴向力来补偿微细切削中微刀具的变形误差。既然微细切削中刀具变形和切削力互相影响,那么在建立切削力模型时就应当把这种相互影响考虑进来。

Bao^[36]在考虑刀尖轨迹效应的情况下建立了微细切削力的解析模型。但是他没有考虑负前角、工件表面材料的弹-塑性变形及刀具变形的影响。按照 Bao 的观点,当每齿进给量与刃口半径的比值大于 0.1 时就不应当把常规切削中的切削力模型应用到微细切削中来。

2.5 微刀具磨损

刀具的磨损、破损及耐用度关系到切削加工的质量、成本和效率。当刀具磨损达到一定程度时,可以明显地发现切削力上升,切削温度提高,加工质量下降。目前有关微细切削中刀具磨损的报道还不多。

Tansel^[37-38]以实验中获得的切削力及刀具磨损数据为基础,利用神经网络方法建立了刀具磨

损预测模型,并以此模型研究微细切削铝和钢时的刀具磨损。他发现切削铝时的微刀具磨损比切削钢时要小,这与 Weule^[26]在软/硬材料微细切削时观察到的结果一致。然而,利用神经网络来研究刀具磨损时需要大量的实验数据,并且通常在以不同的切削参数加工不同的工件材料时模型是不通用的。

童立冬^[39]通过使用直径 0.5 mm 细颗粒硬质合金 TiAlN 涂层铣刀和非涂层铣刀铣削硬铝 2A12 的实验来观察微径铣刀的磨损。利用扫描电镜观察和 X 射线能谱分析后发现 TiAlN 涂层微铣刀的主要磨损形式为涂层脱落、扩散磨损和刀尖破损。与常规铣削刀具磨损主要发生在后刀面不同,由于微细切削背吃刀量小,刀尖部位强度又弱,造成了微铣刀的磨损主要发生在刀尖附近。非涂层硬质合金微铣刀由于失去了 Al₂O₃ 氧化膜的保护,刀尖破损更为严重,并且有明显的粘接现象。

3 结论及展望

微细切削技术是一项使能技术,它在常规切削加工与微/纳加工之间架起了一座桥梁。不过作为一项新技术,它要想以技术上可行、经济上有效的方式发展下去还面临着许多挑战。鉴于对过去十几年来微细切削技术的加工设备及切削机理发展的分析,作者认为今后还有以下问题需要解决。

(1) 由于微细切削中刀具和工件的微型化,使得加工过程中不可能用肉眼来观察加工状态和用手来移动、装配。因此加工过程中需要一系列专门设计的辅助设备,不然会严重阻碍微细切削技术的实用化进程。

(2) 研究新的微刀具加工方法对于提高刀具寿命、增加微细切削的经济性有重要意义。

(3) 目前对微细切削的研究以实验方法为主,建模仿真工作有待加强,特别是正在兴起的多尺度建模是一个值得重视的新方法。

(4) 在微细切削中,由于刀具和工件的尺寸都很小,这时切削热的影响不容忽视,但目前关于这方面的研究还未见报道。

(5) 工件材料微结构和最小切削厚度效应对微细切削的影响还有待进一步深入研究,以便更全面地理解微细切削的各种现象。

(6) 利用硬质合金刀具微细铣削加工微型钢

模具是一个有前途的方向,对这一领域内的工艺和切削机理的研究值得关注。

参考文献:

- [1] 刘国君, 范尊强, 董景石. 用于胰岛素推注的压电微泵[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(2):372-376.
Liu Guo-jun, Fan Zun-qiang, Dong Jing-shi. Piezoelectric micro-pump for insulin injection[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(2):372-376.
- [2] Luo X C, Cheng K, Webb D, et al. Design of ultra-precision machine tools with applications to manufacture of miniature and microcomponents[J]. J Mater Process Technol, 2005, 167(2/3):515-528.
- [3] 孙雅洲, 梁迎春, 程凯. 微米和中间尺度机械制造[J]. 机械工程学报, 2004, 40(5): 1-6.
Sun Ya-zhou, Liang Ying-chun, Cheng Kai. Micro-scale and meso-scale mechanical manufacturing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(5):1-6.
- [4] Kussul E, Baidyk T, Ruiz L, et al. Development of low-cost microequipment[C]//International Symposium on Micromechatronics and Human Science, Japan, 2002.
- [5] Masuzawa T. State of the art of micromachining[J]. Annals of CIRP, 2000, 49(2):473-488.
- [6] Kawahara N, Suto T, Hirano T, et al. Microfactories: new applications of micromachine technology to the manufacture of small products[J]. Microsystem Technologies, 1997, 3(2):37-41.
- [7] Miao J C, Chen G L, Lai X M, et al. Review of dynamic issues in micro-end-milling[J]. Int J Manuf Technol, 2007, 31: 897-904.
- [8] Kussul E M, Rachkovskij D A, Baidyk T N, et al. Micromechanical engineering: a basis for the low-cost manufacturing of mechanical microdevices using microequipment[J]. J Micromech Microeng, 1996, 6: 410-425.
- [9] Schmidt J, Spath D, Elsner J, et al. Requirement of an industrially applicable microcutting process for steel micro-structures[J]. Microsystem Technologies, 2002, 8: 402-408.
- [10] <http://www.mech.northwestern.edu/MFG/AML/M4/M4-files/Workshop%20Report.html>.
- [11] Friedrich C R, Coane P J, Vasile M J. Micromilling development and application for microfabrication[J]. Microelectronic Engineering, 1997, 35: 367-372.
- [12] Friedrich C R, Vasile M J. Development of the micromilling process for high-aspect-ratio microstructures[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1996, 5(1): 33-38.
- [13] Verettas I, Clavel R, Codourey A. Microfactory: desktop cleanrooms for the production of microsystems[C]//Proc of the 5th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, France, 2003.
- [14] 刘治华, 李成, 王春丽, 等. 微观条件下的材料表面摩擦学性能测试[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(1): 95-99.
Liu Zhi-hua, Li Cheng, Wang Chun-li, et al. Test for micro tribological performances of material surface[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(1): 95-99.
- [15] Kawahara N, Suto T, Hirano T. Microfactories [J]. Microsyst Technol, 1997, 3(2): 37-41.
- [16] Kitahara T, Ashida K, Tanaka M, et al. Microfactory and microlathe[C]//Proc IWMs, Japan, 1998, 1: 1-8.
- [17] Tanaka M. Development of desktop machining microfactory[J]. Riken Review, 2001, 34: 46-49.
- [18] Vogler M P, Liu X, Kappor S G, et al. Development of meso-scale machine tool (mMT) systems [J]. Tech Pap Soc Manuf Eng, MS, 2002, 181: 1-9.
- [19] Bang Y B, Lee K M. 5-axis micro milling machine for machining micro parts [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2004, 25(9/10): 888-894.
- [20] Liang Y C, Zhao Y, Bai Q S, et al. Study on micro-machine tools in fabrication of microparts[C]//Proc 1st NEMS, China, 2006, 1: 858-861.
- [21] Onikura H, Ohnishi O, Take Y. Fabrication of micro carbide tools by ultrasonic vibration grinding[J]. CIRP Annals, 2000, 49(1): 257-260.
- [22] Adams D P, Vasilem J, Benavides G, et al. Micromilling of metal alloy with focused ion beam-fabricated tool[J]. Precis Eng, 2001, 25(2): 107-113.
- [23] Fang F Z, Wu H, Liu X D, et al. Tool geometry study in micromachining[J]. J Micromech Micro-engineering, 2003, 13(5): 726-731.
- [24] Liu X, Jun M B, Devor R E, et al. Cutting mechanics and their influence on dynamic forces, vibrations and stability in micro-end-milling[C]//Proc ASME Manuf Eng Div, USA, 2004.
- [25] Son S M, Lim H S, Ahn J H. Effects of friction co-

- efficient on the minimum cutting thickness in micro cutting[J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 2005, 45(4/5): 529-535.
- [26] Weule H, Huntrup V, Tritsohle H. Micro-cutting of steel to meet new requirements in miniaturization [J]. *CIRP Annals*, 2001, 50(1): 61-64.
- [27] Vogler M P, Devor R E, Kapoor S G. On the modeling and analysis of machining performance in micro milling[J]. *J Manuf Sci Eng*, 2004, 126(4): 684-693.
- [28] Vogler M P, Devor R E, Kapoor S G. Micro-structure-level force prediction model for micro-milling of multi-phase materials[J]. *J Manuf Sci Eng*, 2003, 125(2): 202-209.
- [29] Damazo B N, Davies M A, Dutter B S. A summary of micro-milling studies[C]//Proc 1st European Society Precis Eng Nanotechnol, Germany, 1999.
- [30] Lee R, Dornfeld D A. An experimental study on burr formation in micro milling aluminum and copper[J]. *Trans NAMRI/SME*, 2002, 30: 1-8.
- [31] Kim J D, Kim D S. Theoretical analysis of micro-cutting characteristics in ultra-precision machining [J]. *J Mater Process Technol*, 1995, 49(3/4): 387-398.
- [32] Moriwaki T, Shamoto E. Ultra precision diamond turning of stainless steel by applying ultrasonic vibration[J]. *CIRP Annals*, 1991, 40(1): 559-562.
- [33] Lucca D A, Rhorer R L, Komanduri R. Energy dissipation in the ultra precision machining of copper [J]. *CIRP Annals*, 1991, 40(1): 69-72.
- [34] Jardret V, Zahouani H, Loubet J L. Understanding and quantification of elastic and plastic deformation during a scratch test[J]. *Wear*, 1998, 218(1): 8-14.
- [35] Dow T A, Miller E L, Garrard K. Tool force and deflection compensation for small milling tools[J]. *Precis Eng*, 2004, 28(1): 31-45.
- [36] Bao W Y, Tansel I N. Modeling micro-end-milling operations. part I: analytical cutting force model [J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 2000, 40(15): 2155-2173.
- [37] Tansel I N, Arkan T T, Bao W Y, et al. Tool wear estimation in micro machining. part I: tool usage-cutting force relationship [J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 2000, 40(4): 599-608.
- [38] Tansel I N, Arkan T T, Bao W Y, et al. Tool wear estimation in micro machining. part II: neural network based periodic inspector for nonmetals[J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 2000, 40(4): 609-620.
- [39] 童立冬. 微径铣刀的力学特性及磨损机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程, 2006.
- Tong Li-dong. Research on mechanics characteristics and wear mechanisms of micro milling cutter [D]. Harbin: School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 2006.