

文章编号 1004-924X(2007)06-0894-09

微细加工中的微型铣床、微刀具 磨损及切削力的实验研究

赵 岩, 梁迎春, 白清顺, 王 波, 孙雅洲, 陈明君
(哈尔滨工业大学 精密工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:由于微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)在微小零件加工中存在不足,微细铣削加工作为一项补充技术正在日益受到人们的重视。介绍了研制的微型精密三轴联动立式铣床(300 mm×300 mm×290 mm)的系统构成,开发了中文控制软件并集成了视频采集系统,此设备在薄膜型工件(膜厚 65 μm)的微槽加工中取得了满意的效果(膜厚方向上材料去除率 90.7%,成品率大于 80%)。对微径端铣刀进行了力学特性分析,并通过刀具磨损试验分析了微径硬质合金 TiAlN 涂层及非涂层铣刀的磨损机理。最后通过槽铣硬铝 2A12 的试验研究了切削用量(主轴转速、背吃刀量和每齿进给量)对微细铣削力的影响,为微细铣削切削机理的深入研究奠定了基础。

关键词:微细铣削; 微型铣床; 刀具磨损; 切削力

中图分类号: TG501 **文献标识码:** A

Micro-milling machine tool, micro-tool wear and cutting forces in micro-machining

ZHAO Yan, LIANG Ying-chun, BAI Qing-shun, WANG Bo, SUN Ya-zhou, CHEN Ming-jun

(Center for Precision Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The system construction of a 3-axis precision micro-milling machine tool with overall size 300 mm×300 mm×290 mm was presented. The control software package integrated with a video collecting system in Chinese was developed to facilitate users' operation. This micro-milling machine tool has been successfully used in manufacturing a micro-groove in film work piece (the film thickness is 65 μm, material removal rate of the micro-groove along the film thickness is 90.7%, surface roughness of the bottom of the micro-groove is 0.365 μm, and the yield is more than 80%). Furthermore, the experiments with the TiAlN coated and uncoated carbide micro-end-milling tools were carried out to analyze the mechanical characteristics and wear mechanism of the tool. Finally, the effects of cutting parameters (spindle speed, cut depth and feed per tooth) on cutting forces were discussed. The works mentioned above are the foundation of next research on the mechanism of micro-end-milling.

Key words: micro-milling; micro-milling machine tool; tool wear; cutting force

收稿日期:2006-11-22;修订日期:2007-01-07.

基金项目:国防基础科研资助项目(No. 2320060098)

1 引言

随着科学技术的发展,近年来在 IT、医疗器械以及通讯领域,人们对微小型零件(如:微型传感器、微型加速度计、微透镜阵列等)的需求日益增加。这种需求的增加促进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上,并且工件的几何形状基本上是简单的二维形状,因而只有在大规模集成电路的批量制造等方面才是经济的^[1-3]。微细切削加工技术,特别是微细铣削作为 MEMS 技术的补充,由于其几乎不受加工对象材料和几何形状的限制而受到研究人员的重视,正在成为微细加工技术中的新生力量。

目前的微细铣削加工中,微型零件大多是在常规尺寸的超精密机床上加工出来的。由于这些常规尺寸的超精密机床本来主要是用于高精度大尺寸零件的精密/超精密加工,在小批量的微型零件生产方面显得缺乏柔性、成本高、消耗的能源和空间与微型零件不相称,为此美国国家科学基金会于 2000 年专门主办了“微米与中间尺度机械制造”专题研讨会,探讨了精密三维微型零件的加工方法和设备^[4]。现在,国外许多学者已经开始了微型机床的研究工作。韩国首尔国立大学的学者 Y. B. Bang 等人研制了一台五轴微型铣床(294 mm×220 mm×328 mm,具有三个直线平台,二个旋转平台,主轴为空气涡轮主轴),并用此微型铣床加工了一些微型薄壁(厚度 25 μm,高 650 μm)和微立柱(30 μm×30 μm×320 μm),显示出了很好的加工能力^[5]。日本机械工程实验室的 M. Tanaka 等人开发了一套可方便移动的微型机床系统。这套系统由一台微型车床(30 mm×25 mm×30 mm),一台微型铣床(170 mm×170 mm×102 mm),一台微型冲床(111 mm×66 mm×170 mm)组成。在微型 CCD 显微镜的辅助下由一个微型手臂来装卡工件,利用这套系统已经成功加工出了直径为 0.9 mm 的球轴承^[6]。

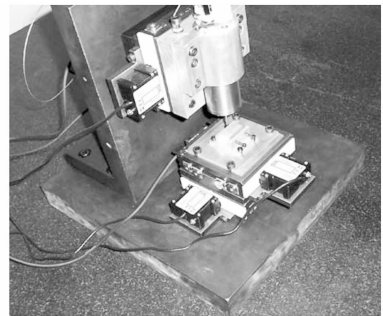
国内有关微细铣削技术的研究报道还很少见,本文介绍了哈尔滨工业大学精密工程研究所

研制的微型精密三轴联动立式铣床的系统构成以及被用户满意接受的加工实例,建立了 NC 嵌入 PC 型开放式数控系统,开发了界面友好的控制软件并集成了视频采集模块;对微径铣刀进行力学分析,研究其振动、应力及变形特征;通过刀具磨损实验分析了 TiAlN 硬质合金涂层及非涂层微径铣刀的磨损机理;通过槽铣硬铝 2Al2 的实验研究了切削用量对微细铣削力的影响,为微细铣削工艺的深入研究奠定了基础。

2 微型精密三轴联动立式铣床与加工实例

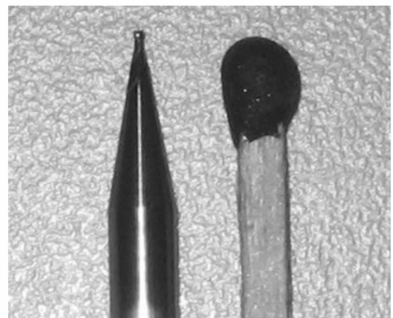
2.1 微型精密铣床的结构及参数

研制的微型精密三轴铣床以及所使用的微径端铣刀如图 1 所示。机床总体外形尺寸为 300 mm×300 mm×290 mm,由以下五部分组成:



(a) 微型铣床

(a) Micro-milling machine tool



(b) 微型端铣刀

(b) Micro-end-milling cutter

图 1 微型精密三轴联动立式铣床及微端铣刀
Fig. 1 3-axis precision micro-milling machine tool and micro-end-milling cutter

(1) PMAC 八轴运动控制卡,完成插补运算,位置控制等实时任务。

(2) 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。

(3) 精密工作台,由压电陶瓷超声直线电机驱动。

(4) 空气涡轮高速主轴,为微径铣刀提供最高 160 000 r/min 的转速。

(5) 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。

高速主轴及纳米定位平台参数见表 1。

表 1 纳米定位平台及高速主轴参数

Tab.1 Parameters of nano-positioning stage and high-speed spindle

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

2.2 数控系统开发

2.2.1 系统模式选择

随着计算机技术的发展,数控系统 PC 化是实现开放式数控系统的主要途径,目前的开放式数控系统主要有三种模式^[7,8]:

(1) PC 嵌入 NC 型开放式数控系统。这种系统 PC 部分界面开放,但 NC 部分仍然是传统的体系,用户仍无法进入控制系统核心,且结构复杂价格昂贵。

(2) 基于软件的开放式数控系统。此种模式采用全软件形式的数控系统来实现 NC 硬件的功能。但由于存在操作系统实时性、标准统一性以及系统稳定性问题,目前还处于初步探索阶段,还没有应用到实际生产当中。

(3) NC 嵌入 PC 型开放式数控系统。在这种系统中把运动控制板插入 PC 机标准插槽中,由运动控制卡实现插补运算、运动补偿等实时控制功能,PC 机实现非实时控制功能。美国 Delta Tau 公司的 PMAC-NC 系统、德国 PA 公司的 PA8000 系统、德国 Indramat 公司的 MTC2000

等都采用了这种模式。这种模式下,用户可以在操作系统下自行开发所需要的控制系统、灵活性好、功能强、可以共享丰富的计算机资源。

鉴于以上三种模式的比较,文中的微小型精密铣床选用第三种模式。

2.2.2 数控系统软件开发

由于系统采用美国 Delta Tau 公司的 PMAC 八轴运动控制卡,功能强大,但其全英文操作使得用户需要较长时间的培训才能对其丰富的变量指令熟练使用,为此专门开发了界面友好的中文控制软件。软件设计中遵循了操作简便、布局合理的思路。另外由于 CCD 视频采集系统有另一套单独的应用程序,在加工时需要单独打开,加工过程中需要在控制系统和视频系统间来回切换,很不方便,所以把视频采集系统也同时集成到控制软件中,方便操作人员在控制机床的同时观察加工状态。软件见图 2,控制软件主要分为三个功能模块:

(1) 程序操作模块,主要完成用户加工程序的调用、检查和自动执行。

(2) 主控制模块,主要完成系统的初始化、各参数设置、程序编辑和手动操作等功能。

(3) 系统状态实时显示模块,完成对各主轴命令位置、实际位置、跟随误差和实际速度的实时显示,以及对微细铣削加工的实时视频显示。

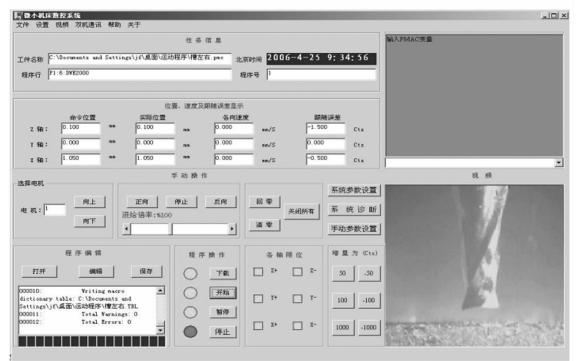


图 2 微细铣床控制系统

Fig.2 Control system of micro-milling machine tool

2.2.3 系统调节及加工实例

在数控系统的调节过程中特别采用了积分分离式 PID 调节和摩擦前馈。积分分离法的关键是把比例环节 P 和积分环节 I 分开,当偏差较大时只让比例 P 起作用以快速减小偏差;当偏差低到一定程度后,再将积分 I 投入以最终消除稳态

误差。摩擦前馈可对机械摩擦阻力和垂向不平衡起到提前补偿的作用。图 3、4 为系统调节后的阶跃响应和抛物线响应曲线,可以看出位置控制无超调,系统能够快速准确的定位,跟随误差在±24 cts 之间波动(1 cts=0.1 μm),跟随误差较小。

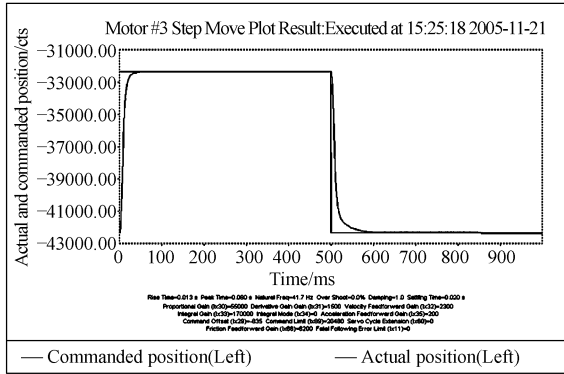


图 3 系统阶跃响应曲线

Fig. 3 Step response curve of system

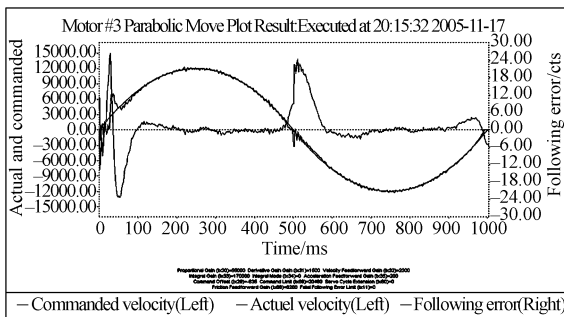


图 4 系统抛物线响应曲线

Fig. 4 Parabolic response curve of system

此系统在某薄膜型工件的微槽加工中显示出了理想的加工性能。加工用刀具为直径 0.15 mm 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>55 μm 的微槽。图 5 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



图 5 薄膜微槽 CCD 显微放大 200 倍侧视图

Fig. 5 End view of film groove amplified with CCD (amplification ratio: 200)

的材料去除率为 90.7%,槽底表面粗糙度 0.365 μm,批量加工成品率高于 80%,取得满意的加工效果。

3 硬质合金微径铣刀的力学特性及磨损机理

3.1 微径铣刀力学特性分析

铣刀承载的应力及其变形对刀具在切削过程中的稳定性和刀具寿命有很大影响,研究其振动、应力和变形的特征对切削实践很有指导意义^[9],因此本文采用有限元方法对微径铣刀的力学特性进行分析,实验选用刀具的几何参数和材料属性如表 2、3 所示。

表 2 微径铣刀几何参数

Tab. 2 Tool geometry of micro-milling cutters

刃数	刃径	刃长	前角	后角	螺旋角
2	0.5 mm	1 mm	5°	12°	30°

表 3 微径铣刀的材料属性

Tab. 3 Material attribute of micro-milling cutter

道具材料	密度	杨式模量	泊松比
K30 硬质合金	14.7×10 ⁻⁶ kg/mm ³	6×10 ⁸ kPa	0.3

3.1.1 模态分析

首先对微型双刃立铣刀进行三维实体建模,然后导入到通用有限元软件包中进行模态分析。共划分网格单元 24 795 个,采用分块的兰索斯法进行分析得到前四阶固有频率和振型。固有频率见表 4,可以看出一、二阶固有频率接近,属于模态密集区;三、四阶相差较大,且三阶与一、二阶固有频率相差更大。这四阶模态的振型都是弯曲型,没有出现扭转和伸缩。系统选用的气动涡轮主轴的工作转速在 110 000~160 000 r/min 之间,刀具为双刃刀具,受到的外力频率约在 3 600~5 400 Hz 之间,与一阶固有频率相差一个数量级,不会发生共振现象。所以影响刀尖径向跳动的关键因素就在于主轴的回转精度,它对于加工后的表面质量有较大影响。

表 4 微径铣刀的固有频率

Tab. 4 Inherent frequencies of micro-milling cutter

一阶固有频率	42 017 Hz
二阶固有频率	42 061 Hz
三阶固有频率	109 587 Hz
四阶固有频率	122 656 Hz

3.1.2 应力变形分析

铣削加工是一个复杂的切削过程,如果选择在刀尖部位施加集中载荷会与实际情况相差甚远。文献[10,11]采取了线上加载的方法,切削力数据是通过经验公式或者仿真计算得到的,同样难于表达实际切削状态。本文为了尽量与实际切削状况接近,采取了面上加载的方法,并且施加的切削力是实验测得的实际数据。

切削力测量用仪器为 Kistler9251A 型精密三向测力仪,可以准确地获得径向力 F_x 、进给力 F_y 和轴向力 F_z 三个方向的切削力。

分别在刀尖附近的前刀面、主后刀面和副后刀面截取一块小区域(见图 6,前刀面截取一小块长方形区域,后刀面截取小的三角形区域,在后面的刀具磨损实验中证明这种区域截取方法是正确的),将这三个区域进行网格细分后,在结点上施加载荷,得到的变形云图和应力云图如图 7、8 所示。

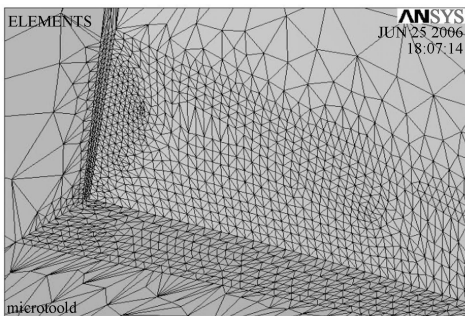


图 6 刀尖部分载荷施加区

Fig. 6 Loading area of tool nose

从变形云图看出,最大变形为 $1.44 \mu\text{m}$,集中在刀尖 $10 \mu\text{m}$ 左右的范围内,但刀具的全部变形并不是密集的集中在刀尖位置,而是分布在 $50 \mu\text{m}$ 范围内。

从应力云图可以看出最大应力为 14.2 GPa 出现在副后刀面上,而不是刀尖位置,距离刀尖大约 $0.1 \mu\text{m}$,相比之下刀尖处应力较小。前刀面上也有一块应力集中区,这两个应力集中区是造成

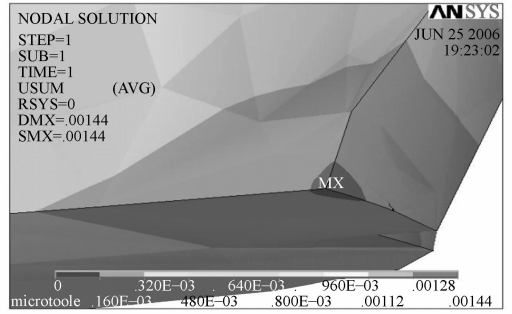
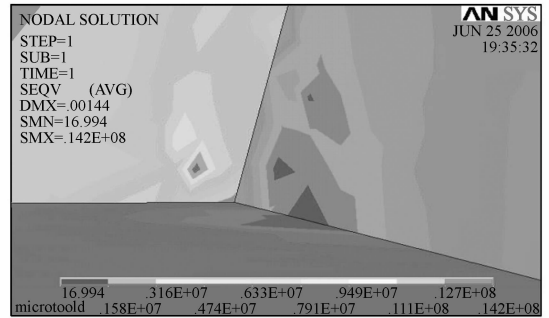


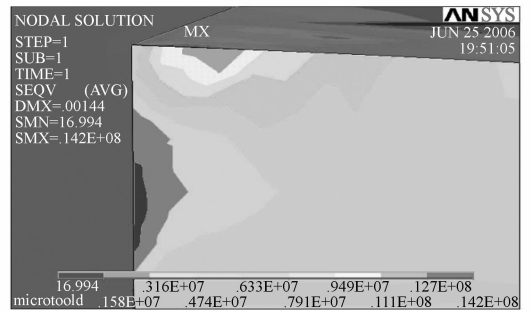
图 7 刀尖变形云图

Fig. 7 Deforming nephogram of tool nose



(a) 前刀面和副后刀面

(a) Rake face and minor flank



(b) 主后刀面

(b) Major flank

图 8 刀尖应力云图

Fig. 8 Stress nephogram of tool nose

刀尖破损的原因之一。主后刀面和副后刀面应力区呈现近似三角形,这与后面的刀具磨损实验得到的结果是一致的,从而证明了加载方式的合理性。

微型铣刀高速切削时的受力状态是复杂的,属于周期性交变载荷,疲劳应力的作用不容忽视,在这方面的研究还有待深入。

3.2 微径铣刀磨损机理分析

实验分别采用直径 0.5 mm, K30 细颗粒硬质合金 TiAlN 涂层铣刀和非涂层铣刀铣削硬铝 2Al2, 观察刀具的磨损形式, 为提高刀具耐用度, 改善加工质量提供依据。实验用切削参数见表 5。实验材料硬铝 2Al2 属高强度铝, 点焊性能良好, 常用来制造高负载零件, 其化学成份见表 6。

表 5 刀具磨损实验用切削参数

Tab. 5 Cutting parameters of tool wear experiments

主轴 转速	进给 速度	背吃 刀量	侧吃 刀量	刀具 悬伸量	冷却 方式
140 000 r/min	2 mm/s	40 μm	200 μm	12 mm	空冷

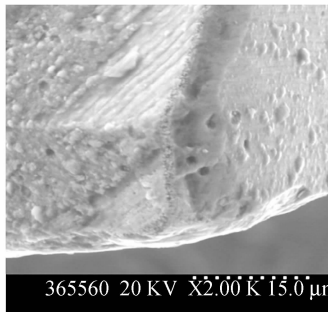
表 6 硬铝 2Al2 化学成分表

Tab. 6 Chemical composition of Al 2Al2

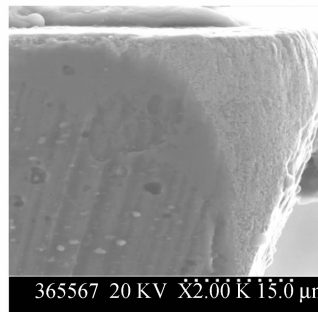
铜	镁	铁	硅	锰	锌	铬	铝
0.9%	1.8%	0.5%	0.5%	0.9%	0.25%	0.1%	其余

3.2.1 TiAlN 涂层硬质合金微径铣刀铣削硬铝 2Al2

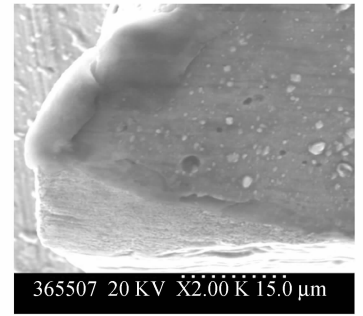
从扫描电子显微镜 (SEM) 照片和 X 射线能谱分析 (图 9、10) 可以看出涂层微径铣刀铣削硬铝 2Al2 时的主要磨损形式为: 涂层脱落、扩散磨损和刀尖破损。与常规尺寸铣刀的磨损主要发生在后刀面不同, 微径铣刀的磨损破损主要发生在刀尖附近。



(a) 前刀面
(a) Rake face



(b) 主后刀面
(b) Major flank



(c) 副后刀面
(c) Minor flank

图 9 TiAlN 涂层微径铣刀磨损 SEM 照片

Fig. 9 SEM photos of TiAlN coated carbide micro-milling cutters with wear

(1) 涂层脱落。由于高速切削过程中, 刀具和工件接触区频繁的温度变化使得涂层和刀具基体之间产生了高频交变热应力, 因此在前后刀面出现了涂层脱落现象。

(2) 扩散磨损。在高速铣削时, 切削接触区的剧烈摩擦使刀具和被加工材料的化学元素在固态下发生相互扩散, 从而改变了材料原来的成分结构, 这使得刀具表层变得脆弱, 加速了刀具磨损。图 9(b)、(c) 为典型的扩散磨损。从图 10 的能谱分析可以看出 Ti 元素已经大大减少, 刀具上还出现了 Cu、Fe、Cr 等元素, 说明涂层已经脱落, 工件上的元素也已经扩散到了微径铣刀上。

(3) 刀尖破损。由于微细铣削中刀刃部分直径小, 刀尖强度低, 同时微细铣削的背吃刀量很小, 切削厚度与刃口半径在同一量级甚至更小, 切

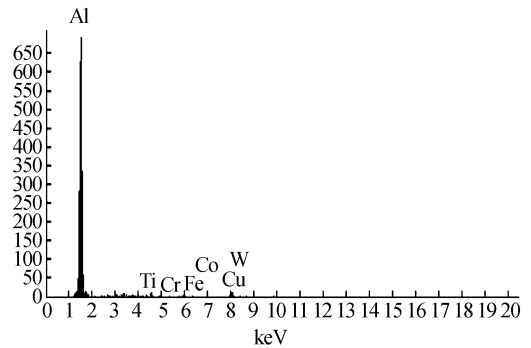


图 10 前刀面磨损后的能谱分析

Fig. 10 Gamma spectrum of rake face with wear

削主要集中在刀尖附近区域, 所以刀尖破损明显, 刀尖处出现明显的圆角和破损痕迹, 这是微径铣刀与常规铣刀磨损类型不同的主要原因。

使用 TiAlN 涂层硬质合金微径铣刀铣削硬

铝 2Al2 的过程中没有明显观察到磨料磨损、粘接磨损和氧化磨损。

3.2.2 非涂层硬质合金微径铣刀铣削硬铝 2Al2

利用直径 0.5 mm, K30 硬质合金微径铣刀在相同的切削参数下(见表 5)铣削加工硬铝 2Al2。

由 SEM 和能谱分析图(图 11、12)看出,非涂层硬质合金微径铣刀铣削硬铝 2Al2 时,除了刀尖破损和扩散磨损之外,一个主要的不同之处就是粘接现象严重。另外,由于失去了 Al_2O_3 氧化膜的保护,刀尖破损较 TiAlN 涂层铣刀更为严重。

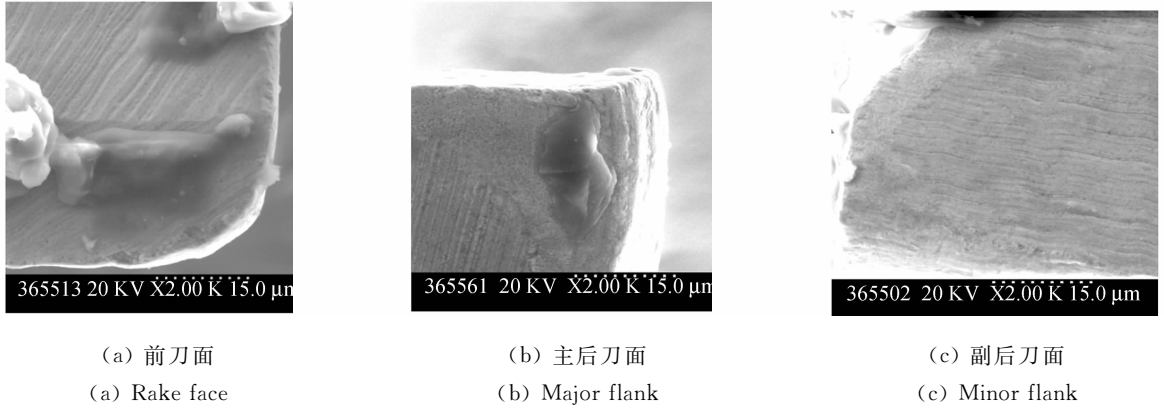


图 11 非涂层硬质合金微径铣刀磨损 SEM 照片

Fig. 11 SEM photos of uncoated carbide micro-milling cutters with wear

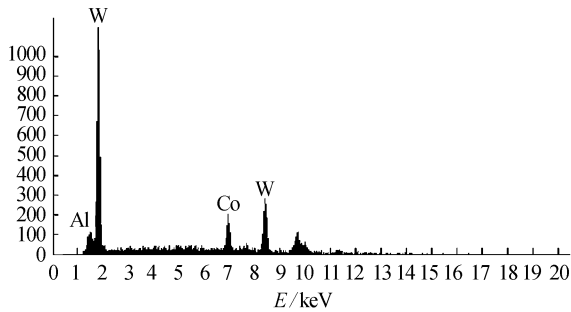


图 12 非涂层硬质合金微径铣刀磨损能谱图

Fig. 12 Gamma spectrum of uncoated carbide micro-milling cutters with wear

从能谱分析看, W 占 91.2%, Co 为 8.57%, Al 为 0.16%, Al 元素的存在证明了扩散磨损的存在。图 11、12 显示主副后刀面有明显的扩散磨损现象。

4 微细铣削力的试验研究

切削过程中,切削力的变化对于被加工工件的尺寸和形状精度、表面粗糙度和加工变质层等存在直接或间接的影响。另外,微细铣削中铣刀直径小、强度低、切削力的波动很容易造成微径铣

刀的破损甚至折断。由于目前的微细铣削机理研究还处于初级阶段,通过试验的方法研究切削参数对铣削力变化规律的影响成为基本的研究方法之一。

4.1 主轴转速 s 对微细铣削力的影响

图 13 为切削力随 s 的变化曲线图,从图中可以看出:槽铣硬铝 2Al2 时,随着主轴转速的增加切削力合力及各分力都呈现先增大后减小的趋势。在 2 档 121 800 r/min 时,切削力达到最大值。通过频域分析可以看出 2 档转速下,不仅切削力大,而且产生的干扰信号也明显增加,而在高的主轴转速下,切削力和干扰信号都有所减小,所以在微细铣削时应尽量选用较大的主轴转速。图 13 中横坐标代表值为:1 档表示 109 500 r/min, 2 档为 121 800 r/min, 3 档 135 000 r/min, 4 档为 146 100 r/min, 5 档为 159 500 r/min。

4.2 背吃刀量 a_p 对微细铣削力的影响

不同背吃刀量下微细铣削力的变化曲线如图 14 所示。各项切削分力及合力随着 a_p 的增加呈现出先增加然后小幅减小,最后又快速增大的趋势。切削力频域分析得出当 a_p 由 10 μm 增加到 30 μm 时切削力信号和干扰信号都有所增加;50

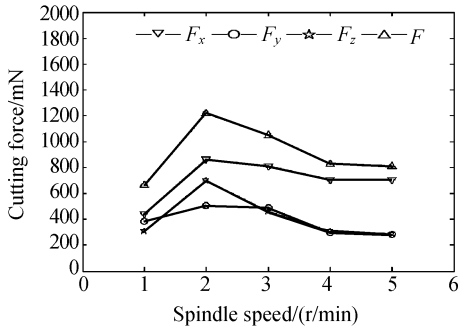


图 13 微细铣削力随主轴转速变化曲线

Fig. 13 Variation of micro-milling force with spindle speed

~60 μm 段同 30 μm 段相比变化不明显;当 $a_p > 70 \mu\text{m}$ 时干扰信号开始增大。从提高加工效率和保证加工质量的角度出发, a_p 应当选在 50 μm 以下,但避开 30 μm 时的切削力峰值点。

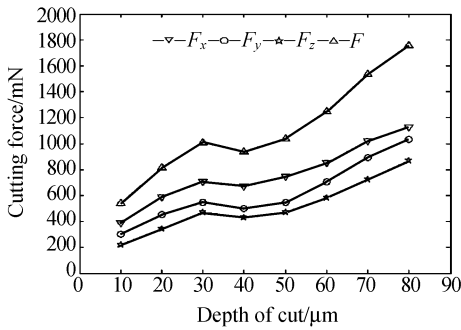


图 14 微细铣削力随背吃刀量变化曲线

Fig. 14 Variation of micro-milling force with depth of cut

4.3 每齿进给量 f_z 对微细铣削力的影响

图 15 为切削力随 f_z 的变化曲线图。由图可以看出各项分力及合力都呈现增加的趋势,三个分力中径向力 F_x 最大且在 $f_z < 0.3 \mu\text{m}$ 时增加迅速

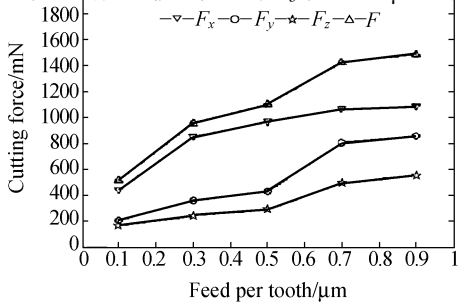


图 15 微细铣削力随每齿进给量 f_z 的变化曲线

Fig. 15 Variation of micro-milling force with feed per tooth

速,之后趋于平缓。经过频谱分析得出,随着 f_z 的增加,试验中始终存在的 6 100 Hz 的干扰信号在 $f_z > 0.5 \mu\text{m}$ 时开始减少,但同时伴随着其它频率干扰信号的增加。

5 结 论

微细铣削作为微细加工技术中的新生力量正在受到人们的重视。文中研制的微细铣削加工设备以及对刀具磨损机理和铣削力影响因素进行的分析为微细铣削机理的深入研究奠定了基础。

(1) 搭建了一台微型精密三轴联动立式铣床,总体尺寸为 300 mm \times 300 mm \times 290 mm,开发了中文控制软件,并利用此微型铣床成功实现了在微型弹性合金薄膜上铣削微槽的批量加工,微槽在膜厚方向上材料去除率为 90.7%,加工成品率高于 80%。

(2) 利用有限元方法对微径铣刀力学特性进行分析,得到了微径铣刀的前四阶固有频率和振型;把 Kistler 测力仪测得的实测切削力数据在刀尖部分前后刀面上进行了面上加载后,观察应力和变形云图发现最大变形发生在刀尖附近 10 μm 范围内,主后和副后刀面呈现出近似三角形,证实了在前后刀面上分区域面上加载的合理性。

(3) 与常规尺寸铣刀磨损主要发生在后刀面上不同,TiAlN 硬质合金微径立铣刀的磨损形式除了涂层脱落和扩散磨损外,一个显著的特点是刀尖破损严重。这是由于微细铣削背吃刀量小,与刃口半径在同一量级甚至更小,刀尖部位强度较弱造成的。非涂层硬质合金微径立铣刀与 TiAlN 涂层铣刀相比除了刀尖破损更为严重之外,粘接现象明显。

(4) 槽铣硬铝 2Al2 发现,微细铣削力的三个分力中径向力 F_x 始终占主要地位;随着主轴转速的提高,切削力呈现出先增加后减小的趋势,在 120 000 r/min 左右出现峰值;背吃刀量 a_p 和每齿进给量 f_z 对切削力影响显著,随着 a_p 的增加,切削力具有先增加后小幅减小然后再次增加的现象;当 f_z 增大时,始终存在的 6 100 Hz 的干扰信号在 $f_z > 0.5 \mu\text{m}$ 时开始减小,但同时伴随着其它频率干扰信号的明显增加。所以,在保证加工质量的前提下,为了提高加工效率,微细铣削硬铝 2Al2 时应当尽量选取高的主轴转速, a_p 选择在

50 μm 以下但应避免 30 μm 的峰值区, f_z 选在 0.3 μm 左右比较合适。

参考文献:

- [1] 孙雅洲, 梁迎春. 微米和中间尺度机械制造[J]. 机械工程学报, 2004, 40(5):1-6.
SUN Y ZH, LIANG Y CH. Micro-scale and meso-scale mechanical manufacturing[J]. *Chinese Journal of Mechanical Manufacturing*, 2004, 40(5):1-6. (in Chinese)
- [2] 郭锐, 赵万生, 李刚. 微细电火花加工的微细电极在线检测[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(6):998-1003.
GUO R, ZHAO W SH, LI G. Micro electrodes on-line measurement in micro EDM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):998-1003. (in Chinese)
- [3] 孙麟治, 李鸣鸣, 程维明. 精密定位技术[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(增):69-75.
SUN L ZH, LI M M, CHENG W M. Study on precision positioning technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(supp):69-75. (in Chinese)
- [4] NSF workshop report. Workshop on micro/meso-mechanical manufacturing[R]. *Evanston, Illinois, USA, Northwestern University*, 2000.
- [5] BANG Y B, LEE K M, OH S. 5-axis micro milling machine for machining micro parts[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 25(9):888-894.
- [6] TANAKA M. Development of desktop machining micro-factory[J]. *Riken Review*, 2001, 34:46-49.
- [7] 王岳宇, 赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞和蠕变的逆控制算法[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(6):1032-1040.
WANG Y Y, ZHAO X Z. Inverse control algorithm to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramic [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):1032-1040. (in Chinese)
- [8] 石宏, 蔡光起. 开放式数控系统的现状与发展[J]. 机械制造, 2005, 43(6):18-21.
SHI H, CAI G Q. Development of open CNC system[J]. *Machinery*, 2005, 43(6):18-21. (in Chinese)
- [9] 蔺小军. 金属切削刀具的有限元分析[D]. 西安:西北工业大学, 1999.
LIN X J. *FEM analysis of metal cutting tools*[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University, 1999. (in Chinese)
- [10] FANG F Z, WU H, LIU X D. Tool geometry study in micro-machining[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2003, 13(5):726-731.
- [11] 张华伟. 小直径铣刀高速铣削淬硬钢过程动力学仿真和有限元分析[D]. 南宁:广西大学, 2005.
ZHANG H W. *Dynamic simulation and finite element analysis of micro-end-milling hardened die & mould steel*[D]. Nanning: Guangxi University, 2005. (in Chinese)

作者简介:赵 岩(1977—),男,哈尔滨工业大学精密工程研究所博士研究生,主要研究方向为微/纳零件制造设备及微细切削机理。E-mail:zhaoyanhit@163.com