

文章编号 1004-924X(2009)11-2771-08

微纳 V 槽脆/塑性域切削的 3D 激光检测及评价

谢 晋¹, 韦 凤¹, 田牧纯²

- (1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640;
2. 北见工业大学 微纳加工学研究室, 日本 北见 090-8507)

摘要:针对微纳米级功能 V 槽微细加工及评价困难的问题,采用单点金刚石切削方法在超精密机床上对光学玻璃进行了 V 槽的微纳尺度加工,且利用非接触激光检测技术展现了 V 槽的加工形貌。依靠单晶金刚石的锋锐刃角在光学玻璃上进行 V 槽的微纳尺度切削试验,利用 3D 激光超精密检测仪器检测加工的 V 切痕,构建了微 V 槽切痕的形貌图,并建立了 V 槽形状误差 PV 值和 V 槽尖角圆弧半径的评价模式。最后,分析了微纳尺度加工中切除深度与 V 槽角度的形成机理以及切削深度对 V 槽形状误差及其尖角圆弧半径的作用机制。结果表明,在亚微米级尺度加工中存在一个脆/塑性域切除加工状态转变的临界切削深度 $0.386 \mu\text{m}$ 。在切削深度 $< 0.386 \mu\text{m}$ 的塑性域切削中,金刚石刀具尖角形状可以复制到工件表面,形成深度 $< 0.386 \mu\text{m}$ 、形状误差 PV 值约为 $0.103 \mu\text{m}$ 的 V 槽。此外,由于 V 槽尖角圆弧半径在塑性域切削中随着切削深度减小而减小,所以切削深度需控制在 V 槽临界成型深度 $0.365 \mu\text{m}$ 以下,才能形成尖角半径为 $0.182 \mu\text{m}$ 的完整 V 槽。实验也表明,利用非接触激光检测的 3D 数据建立 V 槽形状误差 PV 值和尖角圆弧半径的参数模型,可用于 V 槽加工精度和微细程度的评价。

关键词:脆/塑性域切削;激光检测;形状误差;尖角圆弧半径

中图分类号:TG501;TN247 **文献标识码:**A

Laser measurement and evaluation for brittle / ductile cutting of micro/nano scale V-shaped groove

XIE Jin¹, WEI Feng¹, TAMAKI Junich²

- (1. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Micro/Nano Machining Laboratory, Kitami Institute of Technology, Kitami 090-8507, Japan)

Abstract: To improve the measurement and evaluation methods of a machined micro/nano scale V-shaped groove, a single-point diamond turning was employed to machine the V-shaped groove of optic glass in micro/nano scale, and a non-contact laser measuring technology was used to analyze the topography of machined V-shaped groove. The micro/nano scale cutting of the V-shaped groove of optic glass was conducted by using the sharp cutting edge of a single crystal diamond. Then, the machined V-shaped groove was measured by a 3D laser meter to compare its profile, and the evaluation mode of the shape error PV and tip arc-radius of the V-shaped groove was established. Finally, the form prin-

收稿日期:2008-12-24; **修订日期:**2009-02-23.

基金项目:教育部留学回国人员科研启动基金资助项目;日本 JASSO 资助项目;广东省自然科学基金博士启动基金资助项目(No. 05300140)

ciple of cutting depth and the angle of V-shaped groove were analyzed and the effect of sub-micro scale cutting depth on the shape error PV and the tip arc-radius was investigated. The results show that there exists a critical cutting depth of $0.386 \mu\text{m}$, when cutting mode is transferred from a brittle cutting to a ductile cutting in sub-micron-scale space. In ductile mode cutting with a cutting depth less than $0.386 \mu\text{m}$, the diamond tool tip can be replicated to the workpiece surface and to produce a sub-micro-scale V-shaped groove with a cutting depth less than $0.386 \mu\text{m}$ and a shape error PV about $0.103 \mu\text{m}$. In addition, the tip arc-radius of V-shaped groove decreases in ductile mode cutting when the cutting depth is decreased, so to get a V-shaped groove with the tip arc-radius of $0.182 \mu\text{m}$, the cutting depth should be controlled below the critical V-form cutting depth of $0.365 \mu\text{m}$. These results also show that the parameterized model of shape error PV and tip arc-radius can be established by using 3D data derived from non-contact laser measurement, and can be employed to evaluate the machining precision of micro-scale V-shaped grooves.

Key words: brittle/ductile mode cutting; laser measurement; form error; tip arc-radius

1 引言

微机电系统(MEMS)通常需要在部件上加工出微结构功能表面来集成工作系统和提高工作效率,其中,微纳米尺度的 V 槽精密加工最引人关注。例如,在液晶导光板上加工出微细的导光棱镜 V 槽,可以制作成超薄的液晶显示器。此外,微 V 槽功能表面也开始应用于微纳空间的驱动装置、精密粘结以及导热装置等系统中。

微细机械加工的研究表明,在微型铣床上用微型刀具可以加工出微细形状^[1],但这并不适用于超硬零部件材料的加工,而微纳系统中的零部件大多采用单晶硅、玻璃、陶瓷等高性能的硬脆性材料。与光化学等微细腐蚀加工技术相比,机械加工的微细程度仍然受机床精度、加工力和热变性、刀具精度、工具磨损等因素的限制。目前,微细加工主要采用光化学等腐蚀加工技术^[2-3],但是,它也存在加工效率低、成本高、形状精度难控制、腐蚀化学液难处理等问题。虽然等离子束加工的微细程度可以达到纳米级的尺度,但在加工微米级及亚微米级的空间领域时会由于加工时间过长致使微细形状无法控制。

不过,随着加工设备精度和工具精度的提高以及控制技术的发展,微细机械加工已越来越引起研究者的关注。这是因为微细机械加工与光化学等微细腐蚀加工相比能够较大幅度地提高加工

效率,而且加工中采用循环冷却水,不会污染环境。目前,利用修整成弧形的单点金刚石刀具可以在超精密车床上进行非球面的镜面加工^[4],用单晶金刚石尖角刀具还实现了微细功能表面加工^[5]。

但是,在微纳空间中,机械加工机理与宏观加工机理不同,例如,当切除深度小到亚微米级时,硬脆性材料的加工表面就会发生脆/塑域变形的转变^[6-7],这说明在塑性域切除加工内刀具的形状可以复制到工件表面,实现微细精密机械加工。另外目前对 V 槽微细机械加工的评价还没有成熟的方法,这在一定程度上阻碍了微细机械加工技术的发展。

检测微纳空间形貌通常采用接触式轮廓仪和原子力显微镜(AFM)。前者在检测不平滑的微细轮廓时容易损伤测量探头,影响加工精度;后者在识别原子之间位置时需要大量的检测时间。非接触激光检测不会损伤工件,且检测效率高,该技术已经用于非球面的精密检测中^[8],但是,对微细功能表面的激光检测尚未开始深入的研究。

因此,本文采用具有 V 尖角轮廓的单点金刚石工具在超精密机床上对光学玻璃进行了超精密切削加工试验。利用单晶金刚石的 V 尖角并控制切削进给深度实现了微 V 槽的脆/塑域切削加工状态的转变,然后用超精密 3D 激光检查仪检测 V 槽的加工形貌,并在微纳空间内观测 V 槽的形成机理。在此基础上,建立了微 V 槽形状误差

PV 值和 V 槽尖角圆弧半径的评价模式,并分析了微纳尺度的切削深度对 V 槽的形状误差和尖角圆弧半径的影响。

2 超精密切削实验

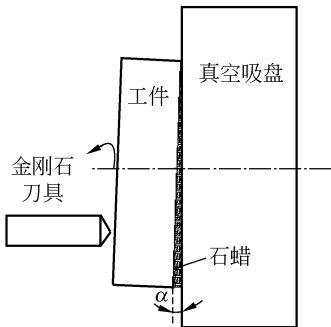
图 1 为 AHP20-25 (Toyoda) 单点金刚石切削设备,其主轴配置有油静压轴承,保证设备的加工精度。在实验中,主轴转速为 1 500 r/min;刀具采用具有 V 尖角的 #46 单晶金刚石磨粒,焊接在刀杆上;冷却液采用水溶性切削液;工件为光学玻璃(硼硅酸玻璃)。



图 1 超精密车削设备

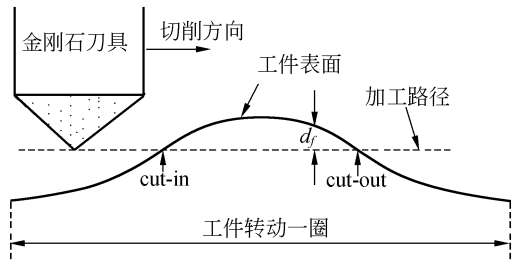
Fig. 1 Setup of ultra-precision turning

图 2 为微纳切削实验的示意图。为了在微纳尺度里观测加工的 V 槽形貌与切削深度的作用关系,先将工件固结在铝合金盘上,相对工件平面倾斜一个角,然后将铝合金盘放置在真空卡盘上,如图 2(a)所示。当金刚石刀具接触到工件表面时,切削深度 d_f 从零开始切入(cut-in)工件,逐渐到达最大切深,然后逐渐减小到零,再切出工件表面(cut-out),如图 2(b)所示。



(a) 切削装置

(a) Cutting equipment



(b) 切削路径

(b) Cutting toolpath

图 2 微纳切削实验的示意图

Fig. 2 Scheme of micro/nano cutting experiment

3 3D 激光检测

图 3 为 NH-3P (Mitaka) 3D 激光检测仪,3D 激光检测是非接触检测方式。在检测中,水平面 X、Y 方向上分别以 $2 \mu\text{m}$ 的间隔对切削的 V 槽痕迹进行逐点检测,垂直面 Z 方向上的分辨精度为 1 nm。



图 3 超精密 3D 激光检测仪

Fig. 3 Ultra-precision 3D laser meter

图 4 为非接触激光检测的工作原理图。激光先通过显微镜镜筒,从物镜的一端开始向光轴中心聚焦,再由工件的加工表面反射后经物镜返回,通过聚焦 AF 感应器聚焦成像。然后,移动物镜使激光点最小且位置在光轴心以确定垂直方向的位置。此时,将聚焦点的 XYZ 坐标以线性形式输入到计算机,获取 V 槽加工表面的轮廓形状数据。

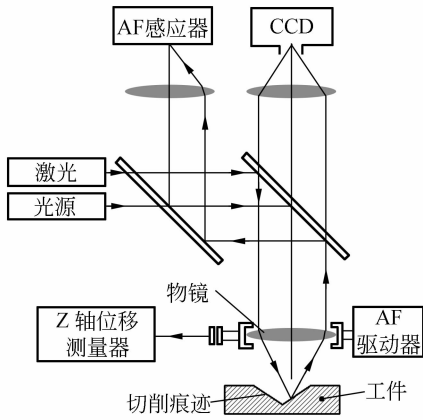
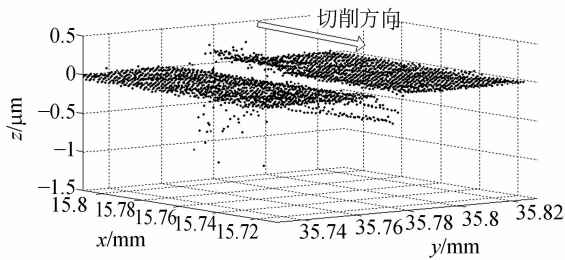


图 4 非接触激光检测的工作原理

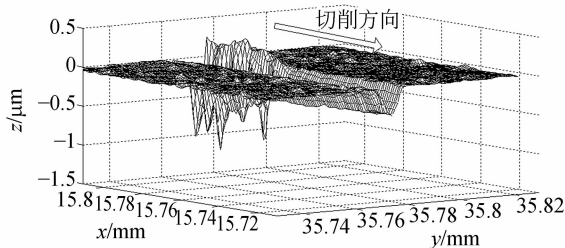
Fig. 4 Working principle of non-contact laser measurement

4 微纳空间的 V 切槽形貌

图 5 为 V 切槽的检测点云及拟合形貌图。检测部分为图 2 所示的切出部分 (cut-out), 且切除深度按照图 2 所示的切削方式沿着切削方向逐



(a) 检测的 3D 点云
(a) Measured 3D point cloud



(b) 拟合的 3D 形貌
(b) Fitted 3D topography

图 5 加工 V 槽的 3D 检测点云及拟合形貌图

Fig. 5 Three dimensional measured point cloud and fitted topography of machined V-shaped groove

渐由大减小。因为检测点云是有限的,不能反映出 V 槽的连续形貌特征,如图 5(a) 所示,所以先将 3D 检测的数据点拟合成面图,展现出 V 槽切削后的 3D 形貌,如图 5(b) 所示。

从 V 切槽的 3D 形貌图中可知,当切除深度 d_f^* 较大时,加工表面破坏程度较大,V 槽轮廓无法形成;但是,随着切除深度减小到一定程度时,V 槽轮廓形貌逐渐变得完整。因此,当切除深度被控制到亚微米级尺度时,金刚石刀具的尖端 V 形可被复制到工件表面,形成形状轮廓较好的 V 槽。

5 V 槽形状误差

图 6 为 V 槽形状的评价模式。切除深度 d_f^* 定义为切痕的最低点 A 与工件表面间的距离。因为工件发生脆性破坏,刀具形状无法复制到工件表面,此时切削深度 d_f 与切除深度 d_f^* 不一致。在塑性域切除加工中,切削深度 d_f 与切除深度 d_f^* 基本一致,所以切削深度 d_f 可以利用塑性域切削后的 V 槽深度 d_f^* 求得。此外,V 槽角度 β 定义为 V 槽两侧检测的轮廓拟合成直线间的夹角。

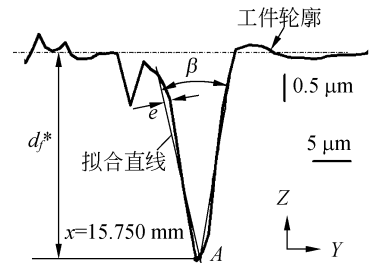


图 6 V 槽形状的评价模式

Fig. 6 Evaluation mode of machined V-shaped groove

图 7 为 V 槽形状误差分布及其 PV 值。V 槽形状误差 e 定义为 V 槽轮廓上的点相对于两侧拟合直线的垂直偏差。其中,V 槽轮廓上的点由检测的拟合 V 槽面图相距 $1 \mu\text{m}$ 插值获得。如图所示,V 槽轮廓误差 e 均匀地分布在零水平线上下,因此,V 槽形状误差 PV 值定义为形状误差 e 分布轮廓的峰谷值,可以作为 V 槽形状精度的评价指标。PV 值越小,其 V 槽加工的形状精度

也越高;反之亦然,而当该 PV 值趋近为 0 时,加工的 V 槽也接近于一个理想的 V 槽。

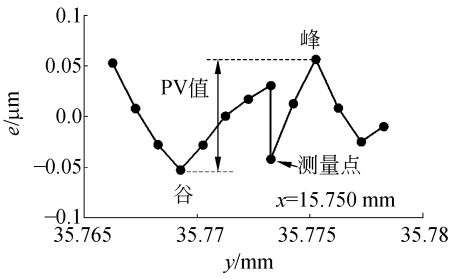


图 7 V 槽形状误差分布及其 PV 值

Fig. 7 Error distribution of V-shaped groove and its PV

6 V 槽尖角圆弧半径

V 槽尖角的尖锐程度通常用 V 槽尖角圆弧半径 r 表示,它也可作为可加工微细程度的评价指标。即当 V 槽尖角圆弧半径 r 越小,V 槽的尖锐程度也越高,V 槽加工的微细程度也越好。这也说明微纳尺度的 V 槽需要 V 槽尖角圆弧半径达到微纳尺度或更小。

因为 3D 激光检测为有限的间断点,所以很难评价 V 槽尖角圆弧半径。因此,V 槽尖角圆弧半径 r 定义为 V 槽检测的最低点与拟合 V 槽尖端的距离,如图 8 所示。该距离越大,V 槽底部轮廓在理想的尖角分布的离散程度越大,V 槽尖角越钝,反之亦然。当该距离趋近于 0 时,V 槽尖角半径 r 也近似于 0。因此,该定义的 V 槽尖角圆弧半径可以作为 V 槽加工的微细程度的近似评价指标。

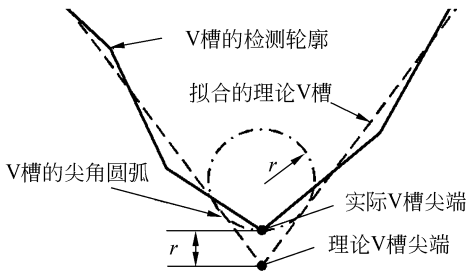


图 8 检测 V 槽的尖角圆弧半径模式

Fig. 8 Mode of tip arc-radius of measuring V-shaped groove

7 结果和分析

7.1 V 槽的切除深度和角度

图 9 为 V 槽的切除深度。切削深度 d_f 随着切削位置 x 的减小而减小,最后为 0,即刀具脱离工件(cut-out),如图 2 所示。由图 9 可知,当切削位置 $x < 15.775$ mm 时,切除深度 d_f^* 沿着相关性较好的拟合直线逐渐减小,与切削深度 d_f 保持一致,此时工件发生塑性域变形切除加工。

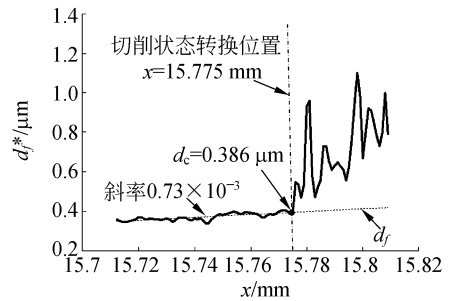


图 9 V 槽的切除深度

Fig. 9 Removal depth of machined V-shaped groove

当切削位置 $x > 15.775$ mm 时,切除深度却无规律地起伏向上,工件材料发生脆性破坏,使切除深度大于切削深度。综上所述,当切削深度小到某个零界值 d_c 时,工件材料的加工状态从脆性域变形向塑性域变形转变。

图 10 为 V 槽的角度。从图中可以看到,V 槽角度 β 有两个明显不同的变化状态。在切削位置 $x < 15.775$ mm 的加工状态中, β 始终保持稳定,位于 172.0° 左右,这就说明切除深度小到一定值后工件材料在切除加工中发生了塑性变形。此时,金刚石刀具将 V 尖角形状复制到工件表面,加工出 172.0° 的 V 槽。在 $x > 15.775$ mm 的工作状态中, β 却无规律地起伏减小,说明此时工件材料在加工中发生了脆性破坏,并随着切削深度加大,脆性破坏的程度也增大,V 槽角度无法稳定,这样脆/塑性切除状态的转换规律与图 9 的结果一致。

综合 V 槽切除深度和角度在两个不同加工状态下的变化规律可以发现,切削深度在 x 为 15.775 mm 处从大到小变化时,材料加工从脆性域切除状态转变到塑性域切除状态,该处的切削

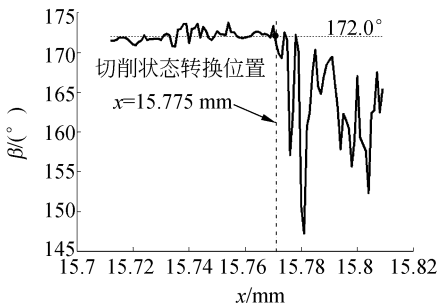


图 10 V 槽的角度

Fig. 10 Angle of V-shaped groove

深度为塑性域切削临界深度 d_c 。该零界深度 d_c 可以从塑性域加工区域的拟合切除深度直线(见图 9)在 x 为 15.775 mm 处求出,即 d_c 为 $0.386 \mu\text{m}$ 。因此,在切削深度 d_f 小于该临界深度 d_c 的塑性域切削加工过程中,单晶金刚石刀具可以将 172.0° 的 V 刃角形状复制到工件表面。

7.2 V 槽形状误差与切削深度的关系

图 11 为 V 槽形状误差 PV 值与切削深度的关系曲线。在塑性域切削加工中,金刚石刀具的尖端形状可以复制到工件表面,形成完整的 V 槽,所以 V 槽形状误差是以 V 槽检测轮廓的拟合直线为基准,比较检测轮廓点求出;而在脆性域切削加工中,材料加工为脆性破坏,加工的 V 槽与理想加工的 V 槽形状不一致,所以 V 槽形状误差是以塑性域加工的平均值 172.0° 的 V 角作为基准,比较检测的轮廓点求出。

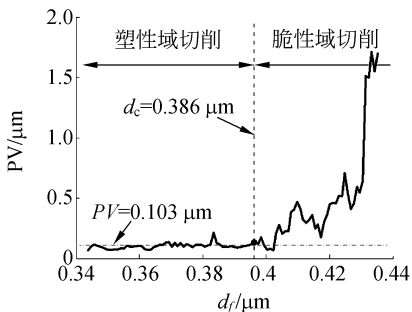


图 11 V 槽形状误差 PV 值与切削深度

Fig. 11 Shape error PV vs cutting depth of V-shaped groove

从图 11 可以看出,在脆性域切削加工中,工件发生脆性破坏,V 槽形状误差 PV 值随着切削

深度增大而逐渐剧烈增大。当切削深度增加到 $0.435 \mu\text{m}$ 时,该 PV 值快速增加约 15 倍。

但是,在塑性域切削加工中,工件发生塑性域切除,该 PV 值维持不变,保持在 $0.103 \mu\text{m}$ 左右。此时,V 槽形状误差 PV 值的突变点与脆/塑性域加工状态转变的临界点一致。因此,在切削深度小于临界深度 $0.386 \mu\text{m}$ 的塑性域切削加工中,可以形成形状精度较高、亚微米尺度的 V 槽。

7.3 V 槽尖角半径与切削深度的关系

图 12 为塑性域切削的 V 槽尖角圆弧半径与切削深度的关系曲线。在脆性域切削加工中,V 槽轮廓发生脆性破坏,与理想的加工 V 槽形状相差较大,所以不考虑脆性域加工状态的 V 槽尖角圆弧半径。V 槽尖角圆弧半径的计算模式如图 8 所示。因为当 V 槽尖角圆弧半径小于切削深度时才能形成 V 槽轮廓,否则 V 槽轮廓变成圆弧形轮廓,所以 V 槽尖角圆弧半径必须小于 V 槽的临界成型界线(尖角圆弧半径与切削深度相等),才能形成 V 形轮廓。

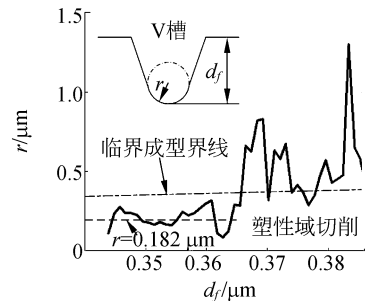


图 12 V 槽尖角圆弧半径与切削深度

Fig. 12 Tip arc-radius vs cutting depth of V-shaped groove

从图 12 可以看出,在塑性域切除加工中,切削深度 $< 0.386 \mu\text{m}$,V 槽尖角半径随着切削深度减小,当切削深度 $> 0.365 \mu\text{m}$ 时,V 槽尖角半径起伏变化较大,且大部分都大于 V 槽临界成型界线,因此无法形成完整的 V 槽。当切削深度 $< 0.365 \mu\text{m}$ 时,V 槽尖角圆弧半径趋近于稳定,且都小于 V 槽临界成型界线以下,维持在 $0.182 \mu\text{m}$ 左右,可以形成完整的 V 槽形状。

因此,为了确保亚微米级的 V 槽切削加工成型,不仅需要将切削深度控制到小于脆/塑性域切削临界深度 $0.386\ \mu\text{m}$,而且还要控制到更小的 V 槽临界成型深度 $0.365\ \mu\text{m}$ 以下。

8 结 论

本文在超精密激光检测仪上,利用获得的 3D 检测数据展现出微纳尺度的 V 槽脆/塑性切削后的 3D 形貌。在此基础上建立了 V 槽形状误差 PV 值和尖角圆弧半径的求解模式,分别作为 V 槽加工精度和微细程度的评价指标。对光学玻璃(硼硅酸玻璃)进行了 V 槽的微纳尺度切削试验,并且进行了 3D 激光检测及其评价,得出的具体结果如下:

(1)当切削深度在亚微米级领域内,工件切削时存在一个脆/塑域切除加工转变的临界切削深

度 $0.386\ \mu\text{m}$ 。在临界切削深度以下的塑性域切削加工中,金刚石刀具尖角可以复制到工件表面,形成角度为 172° ,深度 $<0.386\ \mu\text{m}$,形状误差 PV 值约为 $0.103\ \mu\text{m}$ 的 V 槽。

(2)在切削深度小于临界切削深度 $0.386\ \mu\text{m}$ 的塑性域切除加工中,V 槽形状误差 PV 值始终保持稳定,但是,在脆性域切除加工中,V 槽形状误差 PV 值随着切削深度增大而逐渐剧烈加大,当切削深度增加到 $0.435\ \mu\text{m}$ 时,V 槽形状误差 PV 值可快速增加约 15 倍。

(3)在塑性域切除加工中,V 槽尖角圆弧半径随着切削深度的减小而减小。为了确保亚微米级的 V 槽能够被切削加工成完整的形状,不仅需要将切削深度控制在小于脆/塑性域切削状态转变的临界切削深度 $0.386\ \mu\text{m}$ 以内,而且还要小于 V 槽临界成型切削深度 $0.365\ \mu\text{m}$,才能形成尖角半径约为 $0.182\ \mu\text{m}$ 的完整 V 槽。

参考文献:

- [1] 赵岩,梁迎春,白清顺,等. 微细加工中的微型铣床、微刀具磨损及切削力的实验研究[J]. 光学精密工程, 2007,15(6):894-902.
- ZHAO Y, LIANG Y CH, BAI Q SH, *et al.*. Micro-milling machine tool, micro-tool wear and cutting forces in micro-machining [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(6):894-902. (in Chinese)
- [2] 李灵,杨立军,王扬,等. 水导激光微细加工中激光与水束光纤耦合技术 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(9):1614-1621.
- LI L, YANG L J, WANG Y, *et al.*. Laser and water-jet fiber coupling technology for water-jet guided laser micromachining [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,16(9):1614-1621. (in Chinese)
- [3] FASASI A Y, MWENIFUMBO S, RAHBAR N, *et al.*. Nano-second UV laser processed micro-grooves on $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ for biomedical applications [J]. *Mate-*

rials Science and Engineering C, 2009, 29:5-13.

- [4] 谢晋,耿安兵,熊长新,等. 红外线聚光非球面透镜的单点金刚石镜面切削方法 [J]. 光学精密工程, 2004,12(6):567-569.
- XIE J, GENG A B, XIONG CH X, *et al.*. Single-point diamond mirror truing of infrared aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 567-569. (in Chinese)
- [5] YAN J W, JUNICHI T, KATSUO S, *et al.*. Micro grooving on single-crystal germanium for infrared diffraction optical elements[C]. *Proc. Of 4th EU-APEN International Conference, Glasgow, Scotland (UK), May-June, 2004.*
- [6] YAN J W, JUNICHI T, KATSUO S, *et al.*. Single-point diamond turning of CaF_2 for nanometric surface [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, 24:640-646.
- [7] JUNICHI T, GEN S, KOUKI M, *et al.*. Effect of cutting edge of diamond abrasive grain on ductile

mode grinding of optical glass [J]. *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, 2005, 49 (6):335-340.

- [8] 谢晋. 光学非球面的超精密加工技术及非接触检测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 32 (2):94-98.

XIE J. Super-precision machining and non-contact measurement of the aspheric surface of optic parts [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 2004, 32(2):94-98. (in Chinese)

作者简介:



谢 晋(1963—),男,山西榆次人,副教授,1998年于武汉工业大学获得硕士学位,2002年于日本北见工业大学获得博士学位,主要从事精密加工、微细加工和数控加工的研究。E-mail: jinxie@scut.edu.cn



田牧纯一(1948—),男,日本人,博士,教授,日本砥粒加工学会会长,主要从事超精密磨削加工的研究。E-mail: tamaju@mail.kitami-it.ac.jp



韦 凤(1984—),女,广西柳州人,硕士研究生,2007年于中南大学获得学士学位,主要从事精密制造及非接触检测分析。E-mail: fwei@mail.scut.edu.cn

●下期预告

FY-3A 扫描辐射计可见近红外通道在轨场地定标

李 元,戎志国,郑照军,刘京晶,张立军,张里阳,胡秀清,张 勇,孙 凌
(中国气象局 国家卫星气象中心,北京 100081)

为了对刚刚发射的风云三号 A 星(FY-3A)极轨气象卫星的扫描辐射计(VIRR)进行在轨定标,于 2008 年 9 月在甘肃敦煌展开了中国遥感卫星辐射校正试验。通过使用 ASD FR 光谱仪测量场地地表反射比,使用 CE318 太阳光度计测量气溶胶光学厚度(AOD),使用敦煌国家气候观象台同步加放的探空仪器观测计算水汽总量(TWC),获取了 3 d 的有效试验数据。定标采用反射比基法并配合新的地表反射比修正算法开展:过境时刻地表反射比由陆表各向异性二向反射比模型算法(AMBRALS)计算并使用实测的地表反射比数据进行修正。由 6S 模型计算得到的表观反射比还经过了太阳天顶角和日地距离修正。结果显示:在非水汽吸收通道,计算得到的多天定标斜率稳定(相对标准差在 2.6%以内)。与发射前相比,不同通道的定标系数在 7.73%~21.52%之间变化。使用定标结果计算 23 种观测目标的表观反射比,与 TERRA/MODIS 相应通道结果一致,表明定标算法是稳定并且准确的。