

## 红外晶体等距恒速单点金刚石车削

王 朋, 薛栋柏, 张 昊, 杨 坤, 李伟皓, 回长顺

(天津津航技术物理研究所, 天津 300380)

**摘 要:** 单点金刚石车削技术广泛应用于红外脆性晶体材料光学表面的加工。然而, 受车削参数、材料特性、刀具参数等多因素的影响, 将会导致车削表面质量的不均匀。为了获得更为均匀优质的表面质量, 在分析单点金刚石车削影响因素的基础上, 提出了等距恒速的车削方法。详细介绍了等距恒速车削的原理, 分析了车削参数的确定过程, 得到了等距恒速车削的工件转速和进给速度曲线。最后应用一 CVD ZnS 材料进行了车削试验, 获得了该材料车削最佳的线速度, 应用此参数进行车削, 得到了均匀优质的车削表面, 整体表面粗糙度由  $Ra=6.4$  nm 降低到了  $Ra=4.1$  nm。

**关键词:** 红外晶体; 等距恒速; 单点金刚石车削

**中图分类号:** TH161+.14 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0742001

## ESCV cutting method during infrared crystal single point diamond turning process

Wang Peng, Xue Dongbai, Zhang Hao, Yang Kun, Li Weihao, Hui Changshun

(Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300380, China)

**Abstract:** Single Point Diamond Turing (SPDT) technology has been widely used in the infrared optical surface manufacturing field. However, the micro-nano texture of turned surface is influenced by the turning parameters, the infrared material properties, tip's parameters of the diamond tools and so on. Based on the detailed analyses of the factors which will affect the turned surface quality during the infrared optical surface SPDT process, a new type of cutting movement that called Evenly tool marks Space and Constant linear Velocity (ESCV) cutting method was proposed for obtaining high surface quality in the paper. The principle of the ESCV method was introduced in detail, the process of cutting parameters determination of the ESCV was given out, and the curve of spindle speed and federate of the ESCV was simulated based on the cutting parameters. A CVD ZnS workpiece was turned via ESCV method, it's best cutting linear velocity was 3.14 m/s, the  $Ra$  value of whole surface roughness was decreased from 6.4 nm to 4.1 nm before and after ESCV. The uniform quality turned surface is gained.

**Key words:** infrared crystal; Evenly tool marks Space and Constant linear Velocity(ESCV);  
Single Point Diamond Turning(SPDT)

收稿日期: 2019-02-05; 修订日期: 2019-03-03

基金项目: 天津市自然科学基金(17JCZDJC38600)

作者简介: 王朋(1980-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事超精密加工与检测技术方面的研究。Email: wpeng605@126.com

## 0 引言

单点金刚石车削 (Single Point Diamond Turning, SPDT) 技术由于可以加工出高精度的光学表面而广泛应用于红外光学零件的冷加工领域<sup>[1-2]</sup>。随着红外光学系统小型化、高质量、多模复合等发展趋势,光学系统不仅对光学零件的面形精度提出了更高的要求,而且对光学表面的微观质量也提出了要求,因此,提升红外光学零件表面微观质量势在必行<sup>[3]</sup>。然而,可车削红外材料多为硬脆性晶体材料,受材料特性、单点金刚石车削刀具精度<sup>[4]</sup>、车削参数和机床震动等多种因素的影响,导致车削表面质量不均匀,从而影响到光学系统的质量<sup>[5-6]</sup>。

对于红外晶体硬脆材料,要获得高质量的车削表面,必须使其处于塑性区域加工,实现材料的塑性去除。研究表明,高静压是硬脆材料实现塑性变形的必要条件,同时适当地增加切削过程中的法向压力、增大刀具的圆弧半径、在一定范围内增加刀具前角,能够有利于实现塑性切削<sup>[7]</sup>。可车削的红外晶体有单晶和多晶之分,其中单晶材料各向异性的特性对表面质量的影响很大,在相同的车削参数下,切削力和挤压力将随着晶向的变化波动,这也因此影响着被车削表面的粗糙度,导致车削表面质量的不均匀。相对于单晶材料,多晶材料中各个晶粒随机排布,且其车削过程在单个晶粒的内部进行,相当于在不同的方向车削单晶材料,造成其车削表面质量的控制更加困难<sup>[8-10]</sup>。因此,在材料和单点金刚石车床参数一定前提下,尽量保证车削过程的中材料去除过程一致,是获得优质均匀红外车削表面的先决条件之一。

为了进一步提升红外晶体光学表面的车削质量,文中将对红外晶体车削表面三维形貌的形成和影响因素进行分析,在此基础上提出改善红外晶体车削表面微观形貌的等刀纹间距恒线速度(等距恒速, Evenly tool marks Space and Constant linear Velocity, ESCV)的车削方法,并对该方法的原理和参数确定方法进行详细分析讨论,最后进行试验验证。

## 1 红外晶体超精密车削表面形貌形成分析

一般红外晶体的单点金刚石车削过程沿轴线方

向的投影如图 1 所示,采用等转速恒进给速度的车削方式,即工件以恒定速度  $\omega$  旋转的同时,刀具以恒定速度  $F$  横向进给,理想情况下,二者联动在被车削表面残留规律性的车削刀纹,呈阿基米德螺旋线分布。此理想车削刀纹表面的表面粗糙度为<sup>[11-12]</sup>:

$$P-V=f_r^2/(8R_t) \quad (1)$$

式中: $f_r$  为刀纹间距,且  $f_r=F/\omega$ ;  $R_t$  为单点金刚石刀尖圆弧半径。

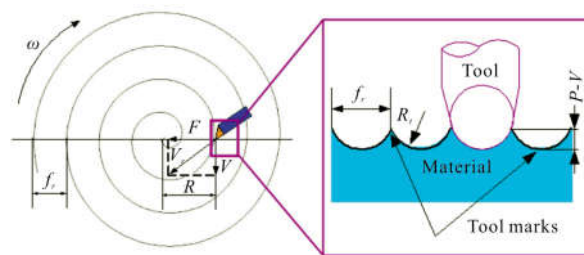


图 1 单点金刚石车削示意图

Fig.1 Illustration of Single Point Diamond Turning(SPDT)

由此可以看出,理想车削刀纹表面粗糙度仅与车削刀具的几何形状和刀纹间距有关。但红外晶体在实际车削过程中,除上述两个影响因素以外,车削表面三维微观形貌的形成还与被车削材料本身特性、机床抖动和主轴跳动等机床特性以及除刀纹间距以外的其他车削参数相关。图 2 给出了红外晶体车削三维微观表面的形成因素分析,除理想车削刀纹微观表面外,还包括由机床特性、材料特性和车削参数共同作用形成的表面微观缺陷以及由机床特性决定的表面波纹度。零件在车削过程中,刀具的几何形状、被车削材料以及机床特性是固定不变的,如要提升被车削表面的微观形貌质量,优化车削参数是最为简便和行之有效的方法之一。

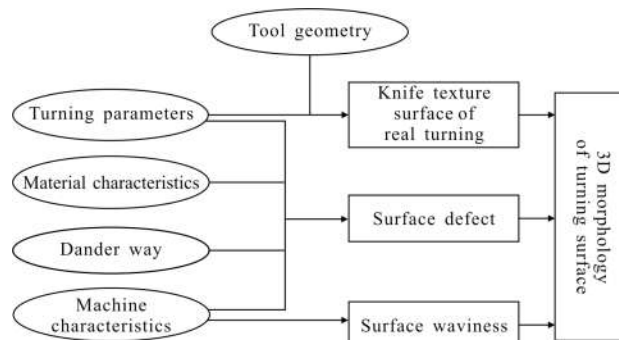


图 2 红外晶体车削表面三维形貌的形成分析

Fig.2 Formation analysis of 3D morphology of infrared crystal turning surface

## 2 等距恒速车削原理

### 2.1 等距恒速车削方式提出

现有等转速恒进给速度的车削方式中,零件表面任意环带  $R$  上的切削速度  $V_r$  为:

$$V_r = \sqrt{F^2 + \omega^2 R^2} \quad (2)$$

式中:  $R$  为车削点处的回转半径。

此时切削速度  $V_r$  为回转半径  $R$  的函数,不同环带切削速度不一致。试验表明,在车削设备、刀具、材料、切削深度等各项参数不变的情况下,虽然此种加工方式的刀纹间距恒定,但是在车削某些红外晶体材料时,由于切削速度的不同,也将会导致车削表面的不均匀,影响表面的光学性能。

基于此,为了获得均匀的表面质量,文中提出了一种等刀纹间距恒线速度(等距恒速)的车削方式,即在车削过程中首先要保持刀纹间距  $f_r$  不变,同时依据车削半径  $R$  的变化,匹配工件转速  $\omega$  和刀具进给速度  $F$ ,在满足公式(2)的条件下保持切削速度  $V_r$  为恒定值,从而保证车削过程中刀纹间距和切削速度均恒定不变,使车削表面更加均匀,从而提升表面光学性能。

### 2.2 等距恒速车削参数的确定

等距恒速车削过程中主要确定两个车削参数,即能够得到最优表面的刀纹间距  $f_{rb}$  和切削速度  $V_{rb}$ ,二者确定以后,通过工件转速  $\omega$  和刀具进给速度  $F$  的相互匹配得到具体的车削参数,再编程车削。具体的参数确定过程如下。

#### (1) 最优刀纹间距 $f_{rb}$ 和切削速度 $V_{rb}$ 的确定

根据被车削材料的特性,以现有能够获得的最优表面质量的参数,采用等转速恒进给速度的车削方式进行车削,记录此时的刀纹间距  $f_{rb}$ :

$$f_{rb} = F / \omega \quad (3)$$

车削完成后应用轮廓仪或者白光干涉仪等仪器测试被车削表面粗糙度,找到最优粗糙度的环带,记录此时环带位置的半径值为  $R_b$ ,将  $R_b$  代入公式(2),得到车削此类材料时的最优切削速度  $V_{rb}$ :

$$V_{rb} = \sqrt{F^2 + \omega^2 R_b^2} \quad (4)$$

#### (2) 等距恒速车削工件转速 $\omega_R$ 和刀具进给速度 $F_R$ 的确定

以最优线速度值  $V_{rb}$  和  $f_{rb}$  为基础,设置理论计算

的边界条件为:

$$\begin{cases} V_{rb} = \text{constant} \\ f_{rb} = \text{constant} \end{cases} \quad (5)$$

匹配工件转速和刀具进给速度等加工参数,得到各个环带  $R$  上的工件转速  $\omega_R$  和刀具进给速度  $F_R$  为:

$$\begin{cases} \omega_R = V_{rb} / \sqrt{f_{rb}^2 + R^2} \\ F_R = f_{rb} V_{rb} / \sqrt{f_{rb}^2 + R^2} \end{cases} \quad (6)$$

应用理论公式计算出的工件转速  $\omega_R$  和刀具进给速度  $F_R$  会随着  $R$  的减小而增大,尤其是工件转速  $\omega_R$  的数值在工件回转中心区域时将会超出机床允许的最高转速  $\omega_{max0}$ ,在此区域时,编程限定工件的最高转速为  $\omega_{max}$ ,需满足  $\omega_{max} \leq \omega_{max0}$ ,在此区域内将采用等刀纹间距式车削,加工参数为:

$$\begin{cases} \omega_R = \omega_{max} \\ F_R = \omega_{max} f_{rb} \end{cases} \quad (7)$$

联立公式(3)~(7),通过计算机建模仿真,得到等间距恒线速度车削参数曲线如图 3 所示,在中心区域的一定范围内,采用了等刀纹间距的车削方式。

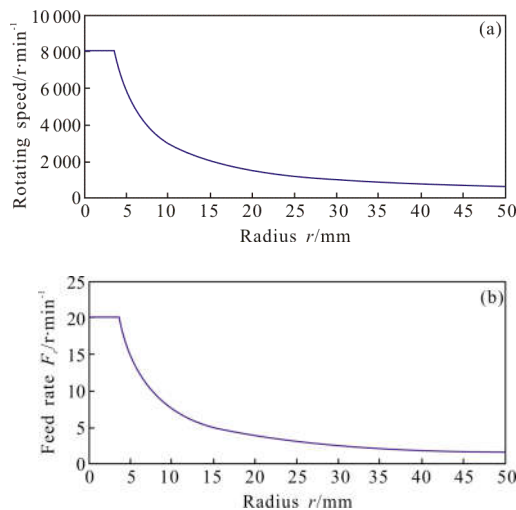


图 3 等间距恒线速度方法车削参数图

Fig.3 Turning parameter map of ESCV cutting method

## 3 等距恒速车削试验

### 3.1 试验设计

在理论分析的基础上,开展了等距恒速车削试验。试验基底选用了常用的 CVD ZnS 材料,试验车削设备采用 IL300 型单点金刚石车床,车削试验后

分别应用 Taylor Hobson PGI 2540D 轮廓仪对车削表面整体粗糙度分布情况进行测试分析,同时综合考虑其他因素作为评价标准。等距恒速车削中根据机床特点取最高安全转速为 8 000 r/min。

试验分两步进行,首先采用等刀纹间距的方式进行车削,车削参数如表 1 所示。选用常用的刀纹间距  $f_r=2.5 \mu\text{m}$ ;而后分析此种车削参数下得到的车削表面的测试结果和整体外观情况,选取合适环带确定切削线速度,最后计算得到等距恒速车削参数,并进行车削试验。

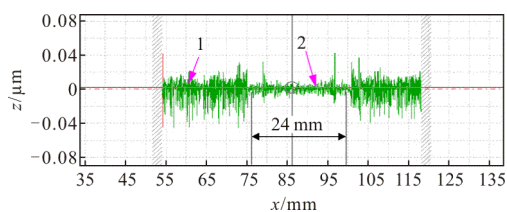
表 1 等刀纹间距车削参数

Tab.1 Turning parameters of evenly tool marks space

Turning parameters	value
Tool nose radius/mm	0.75
Spindle speed/r·min <sup>-1</sup>	2 500
Feed rate/mm·min <sup>-1</sup>	10
Cut depth/ $\mu\text{m}$	2

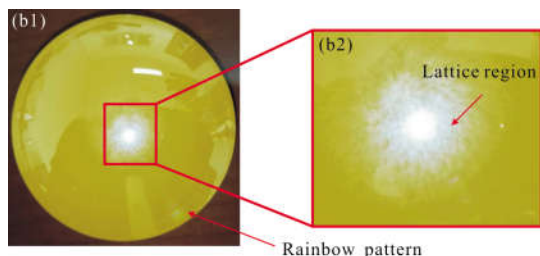
3.2 试验结果分析

等刀纹间距方式车削完成后测试结果如图 4 所



(a) 整体粗糙度  $Ra=6.4 \text{ nm}$

(a) Surface roughness  $Ra=6.4 \text{ nm}$



(b) 等刀纹间距车削外观情况

(b) Appearance of evenly tool marks space turning sample

图 4 等刀纹间距的车削方式表面情况

Fig.4 Surface condition of evenly tool marks space turning way

示。由图 4(a)可以看出,采用此种方式虽然得到的整体表面粗糙度  $Ra=6.4 \text{ nm}$ ,但是整个表面明显分为两个区域,在边缘环带上粗糙度较大,中心区域的粗糙度明显优于边缘区域。仔细观测车削样件表面,明显可以看到在边缘地带带有彩虹纹出现(如图 4 (b1)所示),在中心区域虽然获得了较好的表面粗糙度数值,但是出现了晶格结构,这些晶格结构对入射光产生了散射现象(如图 4(b2)所示),这种现象在实际应用中也是比较忌讳的。因此通过综合考虑,选择了直径 24 mm 中间环带处作为理想的车削环带,作为等距恒速车削的基础。

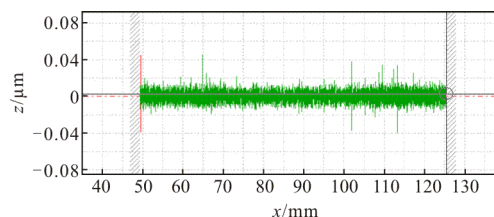
通过计算可得此时的车削速度为 3.14 m/s,因此可以得到等距恒速车削的参数如表 2 所示。

表 2 等距恒速车削参数

Tab.2 Turning parameters of EVSC

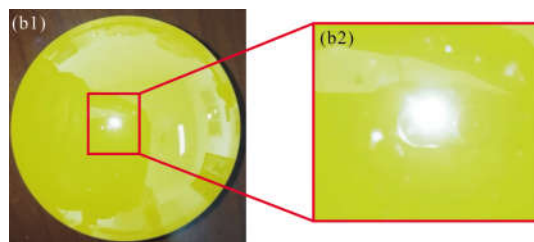
Turning parameters	value
Tool nose radius/mm	0.75
Turning linear velocity/m·s <sup>-1</sup>	3.14
Machine tool safe speed/r·min <sup>-1</sup>	4 800
Knife spacing/ $\mu\text{m}$	2.5
Cut depth/ $\mu\text{m}$	2

等距恒速车削结果如图 5 所示。通过图 5(a)可



(a) 整体粗糙度( $Ra=4.1 \text{ nm}$ )

(a) Surface roughness( $Ra=4.1 \text{ nm}$ )



(b) 等距恒速车削外观情况

(b) Appearance of EVSC turning sample

图 5 等距恒速车削结果

Fig.5 Results of EVSC turning method

以看出,等距恒速的车削方式对得到的表面质量有很大提升,整个表面微观起伏较均匀,且整体粗糙度数值也有一定改善,由  $Ra=6.4\text{ nm}$  提高到  $Ra=4.1\text{ nm}$ 。通过观测试验样件(图 5(b)),整体表面比较均匀光亮,边缘环带彩虹纹和中心区域晶格消失,且在灯光照射下能量集中未发生散射现象。通过上述试验表明,采用等刀纹间距恒线速度的车削方式可以获得比单一等刀纹间距方式更为均匀优质的表面质量。

## 4 结 论

单点金刚石车削技术是红外光学零件加工中不可或缺的技术之一。此文在分析了红外晶体单点金刚石车削表面微观形貌形成理论的基础上,结合实际加工,分析了红外晶体材料单点金刚石车削表面三维微观形貌的影响因素,并以此提出了一种等距恒速的车削方法。文中详细介绍了该车削方式中主要参数的确定方法,并以一 CVD ZnS 材料为例与传统的车削方式进行了对比车削试验,期间获得了 CVD ZnS 材料的最优的等距恒速车削参数。通过对比试验可知,采用等距恒速车削后,得到了均匀光亮的车削表面,表面整体粗糙度由传统车削时的  $Ra=6.4\text{ nm}$  减小到了  $Ra=4.1\text{ nm}$ ,而且边缘彩虹纹和中心区域晶格现象消失,达到了该车削方式的目的。后续还将以其他红外晶体材料为例开展相关研究,使该方法更加优化实用。

## 参考文献:

- [1] Yang Liangliang. Measurement of diffraction efficiency for diffractive optical elements with oblique incidence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0117003. (in Chinese)
- [2] Fu Qiang, Zhang Xin. Athermalization of the medium-wave infrared optical system based on chalcogenide glasses [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 45 (5): 1467-1471. (in Chinese)
- [3] Cheng Zhifeng, Liu Fuhe, Xun Xianchao. Opto-mechanical design and analysis of dual-band sharing aperture imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3366-3372. (in Chinese)
- [4] Lei Dajiang, Yue Xiaobing, Cui Hailong, et al. Measurement and evaluation of tool tip arc waviness of diamond tool[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(10): 2697-2705. (in Chinese)
- [5] Wang Peng, Tu Xue, Hui Changshun. Improvement of the diamond turned surface texture by bonnet polishing process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0322001. (in Chinese)
- [6] Tu Suet, Zhu Zhiwei, Wang Peng. Evolutionary diamond turning of optics for error correction covering a wide spatial spectrum[J]. *Opt Eng*, 2015, 54(1): 015103.
- [7] Cui Dan, Li Shujuan. Review on ductile regime machining of hard and brittle materials [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2014, 37(1): 125-132. (in Chinese)
- [8] Chen Qi, Fu Xiuhua, Jia Zonghe, et al. Research on processing technology of ZnS crystal [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2013, 36 (3-4): 120-123. (in Chinese)
- [9] Zhou Hongwei, Zhao Yongcheng, Deng Chunxia. Influence of the Anisotropy on Surface Roughness in Diamond Turning of Optical Crystal Materials [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2004, 27(3): 44-46. (in Chinese)
- [10] Li Weihao, Tong Yi, Lian Weiyan, et al. Experiment study on the cutting property of hot press Zinc Sulfide by single point diamond turning [C]//SPIE, 2014, 9281: 928116.
- [11] Chen Junyun, Zhao Qingliang. Investigation of surface roughness in single point diamond turning [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2012, 38(7): 1013-1019. (in Chinese)
- [12] Cheung C F, Lee W B. A theoretical and experimental investigation of surface roughness formation in ultra-precision diamond turning[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000, 40: 979-1002.