

车削加工硫化锌晶体工艺

李世杰, 徐超, 黄岳田, 王守义, 刘卫国

(西安工业大学光电工程学院 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021)

摘要: 随着硫化锌晶体光学元件在红外光学系统中的广泛应用, 对其表面质量的要求越来越高, 但由于该材料的脆性特点, 很难获得高质量的表面粗糙度。为了获得高质量的硫化锌晶体表面, 首先, 介绍了基于单点金刚石车床的车削加工与飞切加工的技术原理, 以及影响表面粗糙度的因素。然后, 通过工艺实验, 采用单一变量法, 研究了不同参数的金刚石刀具和不同的加工参数对硫化锌平面元件的表面粗糙度的影响。采用显微镜和白光干涉仪对加工表面的质量进行了检测, 并反馈了优化加工参数。最后, 基于最优加工参数, 采用两种加工方式均获得了表面粗糙度 Sa 为 1 nm 左右的高质量硫化锌平面光学元件。该研究结果对高质量硫化锌光学元件的研制提供了技术支持, 具有广泛的工程应用价值。

关键词: 硫化锌晶体; 车削加工; 飞切加工; 表面粗糙度

中图分类号: O439; TB133 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190567

Processing technology of cutting ZnS crystal

Li Shijie, Xu Chao, Huang Yuetian, Wang Shouyi, Liu Weiguo

(Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Films Technology and Optical Test, School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: With the wide application of ZnS crystal optical elements in infrared optical system, the surface quality of ZnS crystal optical elements is more and more demanding, but due to the brittleness of the material, it is difficult to obtain high quality surface roughness. In order to obtain high quality surface of ZnS crystal, the principle of cutting and fly-cutting based on single point diamond lathe was introduced, as well as the factors affecting surface roughness. And then the influence of different parameters of diamond tool and different processing parameters on the surface roughness of ZnS flat element was studied by single variable method through process experiment. The quality of the machined surface was tested by microscope and white light interferometer, and the processing parameters were optimized by feedback. Finally, based on the optimal processing parameters, high quality ZnS flat optical elements with surface roughness Sa of about 1 nm were obtained in the both different methods. The results provide technical support for the development of high quality optical elements of ZnS crystal and have good engineering application value.

Key words: ZnS crystal; cutting; fly-cutting; roughness

收稿日期: 2020-11-11; 修订日期: 2020-04-16

基金项目: 陕西省科技厅项目 (2020GY-045); 西安市科技局科技创新引导项目 (201805031YD9CG15(2)); 西安市智能探视感知重点实验室项目 (201805061ZD12CG45)

作者简介: 李世杰 (1988-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为先进光学制造技术。Email: lishijie@xatu.edu.cn

0 引言

近年来,随着国防技术,空间技术和军事科学的发展,红外光学系统的应用越来越多,其对高质量红外光学元件的需求越来越迫切。在红外成像及制导技术领域,CVD ZnS 多晶材料,不仅具有较强的透光性,而且具有良好的物理稳定性^[1-2]。它们已成为大多数长波红外窗口,整流罩和一些光学元件的关键材料,其中多光谱 ZnS 晶体,可以用于实现光电探测系统中的多波段共口径投射功能^[2-3]。因此,ZnS 晶体的加工工艺及特性研究,成为光学制造领域的研究热点。早期,ZnS 晶体材料的加工是仿照光学玻璃的镜面加工方式,也就是“成型-粗磨-精磨-抛光”,即磨抛技术。采用传统磨抛技术对 ZnS 晶体材料进行加工,由于该材料较软(其莫氏硬度为 3,而玻璃的莫氏硬度为 6.5),而且还较脆,加工过程中很容易产生划痕、凹坑和微裂纹等缺陷,严重影响其表面质量,难以获得高质量的表面粗糙度^[4-5]。而且,磨抛技术的工艺复杂、周期长、生产效率低,难以实现批量生产,这也严重制约着该技术在 ZnS 晶体材料加工方面的应用。黄建东采用固结磨料抛光,采用最优化加工参数,获得 ZnS 晶体表面的粗糙度 Sa 为 2.7 nm,但表面划痕还是比较明显。陈琦等人采用单点金刚石车削加工进行粗加工,然后在用抛光工艺进行精度提升的方式,获得了面形精度优于 0.155 μm,表面光洁度达到Ⅲ级以上的高精度 ZnS 元件^[6]。该方法比较复杂,最终还是回归到传统的研磨抛光工艺之中,不具有广泛的推广性。在近几年来,随着单点金刚石车削技术(Single Point Diamond Turning, SPDT)的发展,以及对红外光学元件使用需求量逐渐增加,使得以往加工工艺不能满足其制作要求,为了满足其制作要求就需要一种高精度、高效率、低成本、工艺简单的方法。曹志民采用车削加工方式,采用圆弧半径为 4.93 mm,前角为 -30°的金刚石刀具,对 ZnS 平面元件进行加工,并采用原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)对表面粗糙度进行检测,获得的最佳结果 Sa 为 7.3 nm^[7]。类似地,李伟皓等人采用车削加工方式,采用 Zygo Newview 白光干涉仪进行检测,得到了表面粗糙度 Ra 小于 4 nm 的 ZnS 晶体元件,基本实现镜面车削加工^[8]。王朋等人采用等距恒速的车削方法,对 ZnSe 晶体进行了加工,采用 Taylor 的轮廓仪进行检测,获得了表面粗糙度 Ra 为 4.1 nm 的 ZnSe 晶体表面^[9]。但该量级的表面粗糙度还比较大,不能满足高端光学系统的应用需求。

为了获得更高质量的 ZnS 晶体元件,得到接近于超光滑表面(优于 1 nm)的表面粗糙度值,该研究以 ZnS 晶体的平面光学元件作为加工对象,以单点金刚石车床为基础,采用不同的车削加工方式,利用单一变量法,优化相应的加工参数,研究车削加工 ZnS 晶体元件的高精度加工工艺,为 ZnS 晶体元件的广泛应用提出技术支持。

1 SPDT 不同加工方式

单点金刚石车床是制造光学元件常用的加工设备,可以实现金属材料、红外晶体材料、有机玻璃材料的光学元件加工。基于被加工元件的不同面型需求,可以基于单点金刚石车床采用不同的加工方式进行加工,如车削、快刀伺服、慢刀伺服等^[10]。该研究主要是针对 ZnS 晶体材料的平面元件,因此,飞切加工方式和车削加工方式是加工该类元件最方便的加工方式。

1.1 飞切加工方式

飞切加工是基于单点金刚石车床,加工平面元件最为常用的加工方式。在加工过程中,金刚石刀具通过飞刀盘安装在旋转主轴上,并随之高速旋转,同时给予 X 方向的进给速率,对固定于工作台上的工件表面进行弧线型去除加工,如图 1 所示。此种加工方式只能加工平面元件,而且球面、非球面元件无能为力。

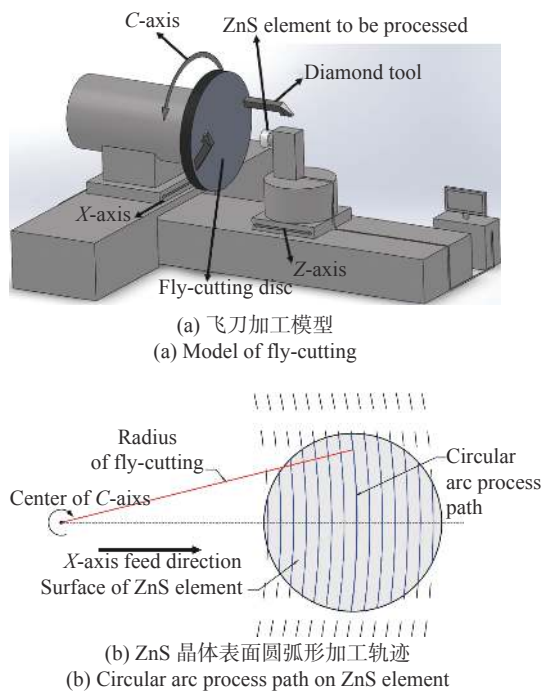


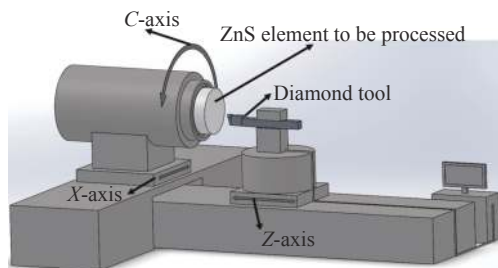
图 1 飞切加工示意图及圆弧形加工轨迹

Fig.1 Schematic diagram of fly-cutting and its arc profile

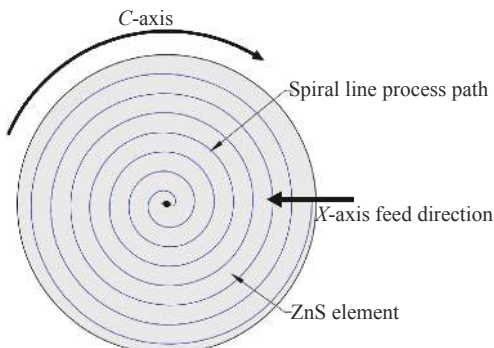
在飞切加工中,金刚石刀具一直在工件表面进行断-续加工,对刀具的磨损比较严重。如果被加工工件的口径较大,加工时间增加,由于刀具磨损的存在,可能出现加工前期和后期的表面质量不一样的情况。

1.2 车削加工方式

与飞切加工不同,车削加工是将 ZnS 晶体工件固定于旋转主轴上,随之高速旋转,而金刚石刀具固定于工作台上,同时随着 X 方向和 Z 方向的协同运动,对工件表面进行螺旋线去除,如图 2 所示。



(a) 刀削加工模型
(a) Model of cutting



(b) ZnS 晶体表面螺旋线加工轨迹
(b) Spiral line process path on ZnS element

图 2 车削加工方式与工件表面螺旋线加工轨迹

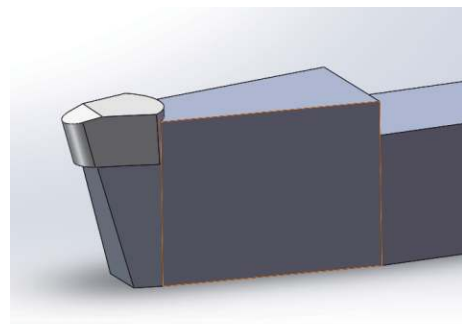
Fig.2 Schematic diagram of cutting and its spiral line process path

如果 Z 方向进给量为零,即保持不动,则加工工件表面为平面;如果 Z 方向进给量不为零,则可加工球面、非球面,甚至更加复杂的曲面,但所加工的曲面均为旋转对称元件。

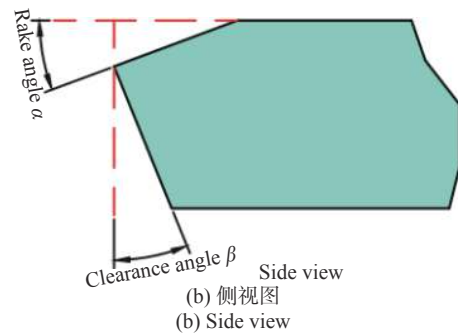
1.3 影响表面粗糙度的因素

无论是车削加工,还是飞切加工,金刚石刀具都是最主要的加工工具。采用天然金刚石制作而成的金刚石刀具,主要参数有刀具半径、前角、后角、波纹度等,其定义如图 3 所示。对于 ZnS 晶体加工而言,由于其脆性的材料特性,需要采用负前角的刀具抑制其脆性形变,才能获得高质量的加工表面质量^[11-12]。

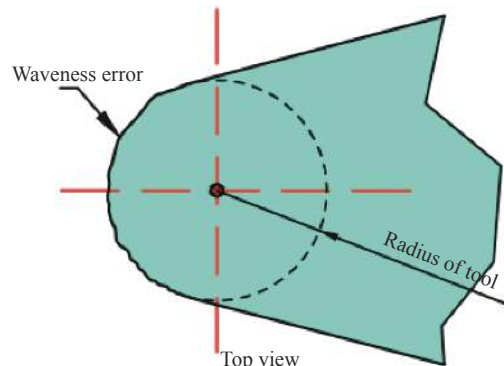
此次实验过程中,对于金刚石刀具而言,主要改变其前角度数与刀具圆弧半径,研究不同参数的刀具对 ZnS 晶体加工的影响。虽然波纹度对工件加工的表面质量有影响,但由于加工 ZnS 晶体为平面,金刚石刀具与工件表面的接触点为同一个点(固定点),故即使刀具的波纹度较差,也对 ZnS 晶体平面的表面质量影响不大。



(a) 金刚石刀具模型
(a) Model of diamond tool



(b) 侧视图
(b) Side view



(c) 俯视图
(c) Top view

图 3 金刚石刀具参数示意图

Fig.3 Schematic diagram of diamond tool parameters

当加工方式与金刚石刀具选择好后,对 ZnS 晶体平面元件进行加工,加工参数对表面粗糙度有重要的影响,无论是飞切加工,还是车削加工,其加工参数主要有三个:主轴转速、进给速率、切削深度。虽然单

点金刚石车削技术加工有表面粗糙度的理论公式,但是对于脆性晶体材料而言,该理论公式并不适用^[13]。因此,对于 ZnS 晶体的加工,需要根据具体情况,采用大量的工艺实验,研究获得最佳的加工工艺参数。

2 工艺实验及数据分析

为了获得高质量的 ZnS 晶体加工表面,采用 SPDT 技术对 ZnS 晶体的工艺实验中,主要考虑加工参数与刀具参数对加工表面质量的影响。无论是飞切加工实验,还是车削加工实验,都采用了参数不同的金刚石刀具和不同的加工参数,对 ZnS 平面进行了加工。ZnS 晶体均为口径为 $\Phi 50$ mm,厚度为 10 mm 的 ZnS 平面元件。该实验所采用的加工设备为 Precitech 公司的单点金刚石车床 Nanoform 700 Ultra。表面粗糙度检测设备为 Zygo 公司的 Newview 8200。所有的加工与检测实验均在万级超净间中完成,温度变化范围为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度为 45%~55%RH。

2.1 ZnS 晶体平面初始粗糙度

为了保持初始参数的一致性,每次加工前,都采用相同的参数对 ZnS 平面元件进行粗加工,获得相对一致的初始参数。采用前角为 -25° ,半径为 1 mm 的刀具,加工参数为:主轴转速为 1000 RPM,切削深度为 $6\text{ }\mu\text{m}$,进给速率 10 mm/min。加工后用白光干涉仪和显微镜对其表面质量进行检测,获得的检测结果如图 4 所示。如图所示,其表面粗糙度 $Sa=74.516\text{ nm}$, $Sq=109.283\text{ nm}$,远远没有达到光学元件应用的要求。从图 4(b)可以看出,其表面有很多斑纹,这是由于加工过程中的脆性形变造成的。脆性形变的存在,导致在工件表面容易产生裂纹与崩裂,这也是车削加工 ZnS 元件常见的问题。

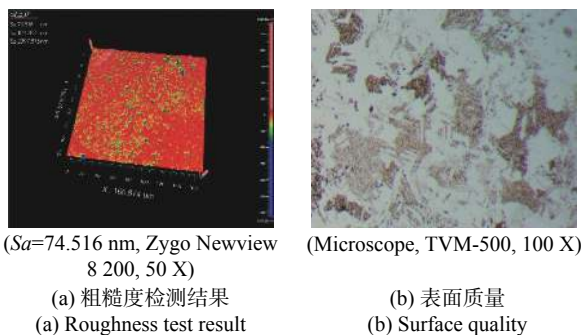


图 4 ZnS 晶体元件初始表面质量

Fig.4 Initial surface quality of ZnS crystal element

2.2 金刚石刀具参数对表面粗糙度的影响

首先分析了刀具参数对 ZnS 元件加工表面质量的影响。负前角的金刚石刀具能够有效抑制脆性形变的产生,故在 ZnS 晶体元件的加工过程中,全部采用负前角刀具进行加工。常见负前角金刚石刀具的前角为 -15° 与 -25° ,为此,笔者等在实验中使用的三把金刚石刀具的参数如下表所示。

采用如表 1 所示的三把金刚石刀具对 ZnS 平面元件进行飞切加工,所采用的加工参数为:主轴转速 2500 RPM,切削深度 $2\text{ }\mu\text{m}$,进给速率 0.5 mm/min。加工完成后,用 Zygo NewView 8200 白光干涉仪进行检测,粗糙度用 Sa 进行评价,其数据分布如图 5 所示。

表 1 不同参数的金刚石刀具

Tab.1 Diamond tool of different parameters

Diamond tool	Rake angle/ $^{\circ}$	Arc radius/mm
Tool 1#	-25°	1.056
Tool 2#	-15°	0.755
Tool 3#	-25°	5.000

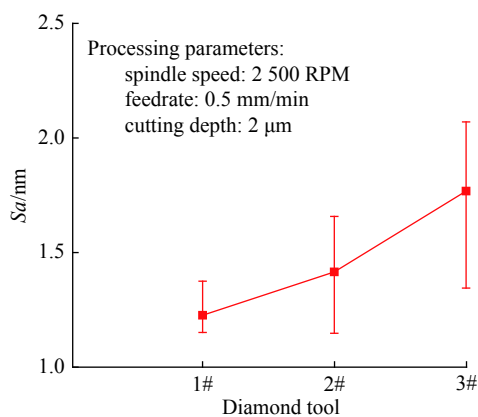


图 5 不同刀具飞切加工 ZnS 平面元件的表面粗糙度检测结果

Fig.5 Roughness test results of ZnS flat element processed by fly-cutting with different parameters of diamond tools

如图 5 所示,将 ZnS 平面用三把不同参数的金刚石刀具采用同样的参数进行飞切加工后,其表面粗糙度 Sa 值都差不多,在 1~2 nm 的范围内。该结果表明,采用 -15° 或 -25° ,不同半径的金刚石刀具,均能获得较好的表面粗糙度。后续实验中,主要采用刀具 1 进行加工,其参数为前角 -25° ,刀具圆弧半径 1.056 mm。采用该刀具,下面主要对飞切加工 ZnS 平面的加工参数进行研究,包括主轴转速、切削深度和进给速率。

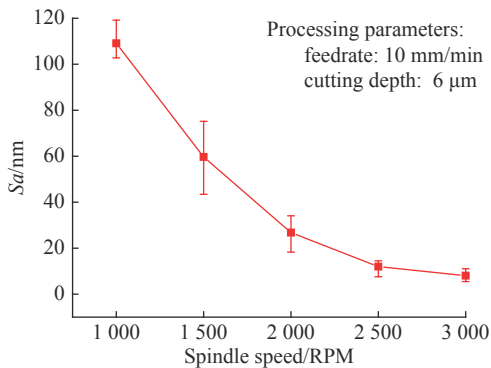
在这三个加工参数中,采用单一因素变量法进行研究。

2.3 飞切加工工艺实验

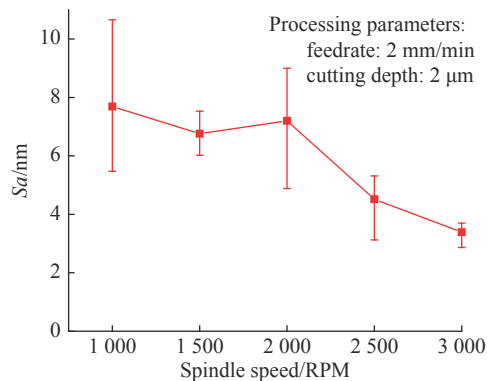
2.3.1 主轴转速对 ZnS 表面粗糙度的影响

常见的 SPDT 的主轴转速范围为 0~10000 RPM。实验中,结合前期加工经验以及加工过程稳定性,选择主轴转速的变化范围为 1000~3000 RPM,同时,固定其进给速率为 10 mm/min,切削深度为 6 μm 。加工得到的数据如图 6 所示。

从图 6 所示的表面粗糙度检测结果可以看出,当进给速率与切削深度相同时,不同的转速可以得到不同的表面粗糙度。随着主轴转速的逐渐增加,表面粗糙度迅速减小。特别是在 1000~2500 RPM 范围,粗糙度 S_a 变化的幅度非常大,直接从 100 nm 减小到 10 nm 左右。但在 2500~3000 RPM 范围内,虽然表面粗糙度 S_a 有所减小,但幅度却变缓了很多,说明此时主轴转速已经不是主要的影响因素了。



(a) 主轴转速 10 mm/min 与切削深度 6 μm
(a) Feedrate of 10 mm/min and cutting depth of 6 μm



(b) 主轴转速 2 mm/min 与切削深度 2 μm
(b) Feedrate of 2 mm/min and cutting depth of 2 μm

图 6 主轴转速对表面粗糙度的影响

Fig.6 Effect of spindle speed on surface roughness

重复此实验,当进给速率为 2 mm/min,切削深度为 2 μm 时,同样让主轴转速在 1000~3000 RPM 内变化,加工后的 ZnS 平面的表面粗糙度检测结果如下图所示。其粗糙度变化趋势也和图 4 类似,表明当主轴转速到 2500~3000 RPM 时,转速对表面粗糙度的影响就不再明显了。在后续的加工实验中,均采用主轴转速为 2500 RPM。

2.3.2 切削深度对 ZnS 表面粗糙度的影响

切削深度也是重要的加工参数。在研究切削深度对加工表面的粗糙度的影响时,同样采用单一变量法,选择主轴转速为 2500 RPM,进给速率为 2 mm/min。切削深度的变化范围为 0.5~4 μm 。加工后,粗糙度检测结果如图 7 所示。

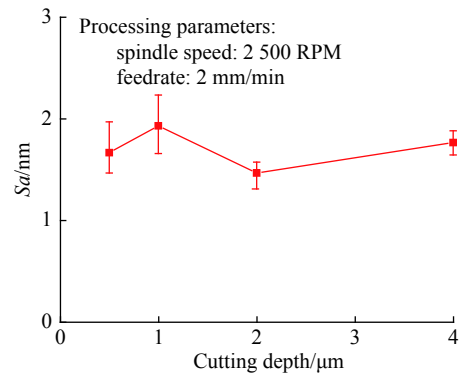


图 7 切削深度对表面粗糙度的影响

Fig.7 Effect of cutting depth on surface roughness

从图 4 为所示的表面粗糙度检测结果可以看出,切削深度在 0.5~4 μm 范围内变化时,加工获得的粗糙度 S_a 均为 2 nm 左右,表明在主轴转速为 2500 RPM,进给速率为 2 mm/min 时,切削深度变化对表面粗糙度的影响不大。但从图 4 中可以看出,当主轴转速为 2500 RPM,进给速率为 2 mm/min,切削深度为 6 μm 时,加工后的 ZnS 平面的表面粗糙度 S_a 明显大一些。说明切削深度也不能太大,只是在一定范围内变化时,其对表面粗糙度的影响不明显。后续加工实验中,均采用切削深度为 2 μm 。

2.3.3 进给速率对 ZnS 表面粗糙度的影响

通过前面的实验,基本确定了飞切加工 ZnS 平面元件时,较优的加工参数的主轴转速为 2500 RPM,切削深度为 2 μm 。当保持这两个参数不变时,让进给速率在 0.5~4 mm/min 内变化,对 ZnS 平面进行加工,对

应的粗糙度检测结果如图 8 所示。

根据图 8 所示的粗糙度检测数据,当主轴转速为 2500 RPM,切削深度为 2 μm 时,较小的进给速率得到的表面效果较好。同时,进给速率在 0.5~2 mm/min 变化时,表面粗糙度的变化不明显,但当进给速率增大到 4 mm/min 时,其表面粗糙度明显增大。所以在飞切加工 ZnS 平面时,较小的进给速率能获得更好的表面粗糙度。

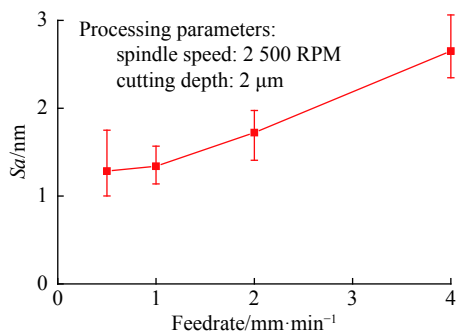
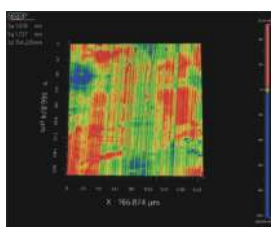


图 8 进给速率对表面粗糙度的影响

Fig.8 Effect of feedrate on surface roughness

结合以上四组对比实验,现采用主轴转速 3000 rev/min,切削量 2 μm,进给速率 0.5 mm/min 优化参数进行加工,可以得到表面粗糙度 $Sa=1.078$ nm, $Sq=1.727$ nm 的 ZnS 元件,如图 9 所示。



($Sa=1.078$ nm, Zygo Newview 8 200, 50 X)

(a) 粗糙度检测结果
(a) Roughness test result



(Microscope, TVM-500, 100 X)

(b) 表面质量
(b) Surface quality

图 9 飞切加工最佳参数下加工得到的表面粗糙度

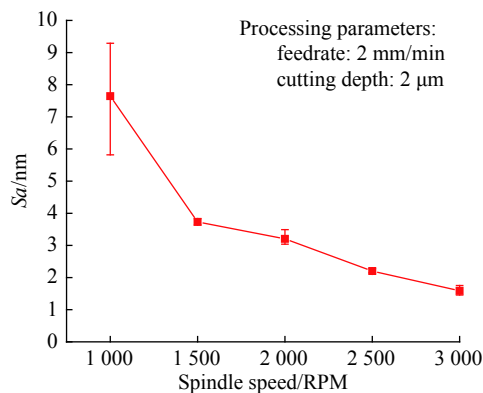
Fig.9 Roughness test results with the optimal processing parameters of fly-cutting

但在实际加工中,考虑加工效率,不能将进给速率无限减小,即使采用进给速率为 0.5 mm/min,加工时间也很长,但粗糙度却比进给速率为 2 mm/min 时提升不明显,故很少采用此参数。一般而言,在飞切加工 ZnS 平面时,采用进给速率为 2 mm/min(同时,主轴转速为 2500 RPM,切削深度为 2 μm),就能得到表面粗糙度 Sa 优于 2 nm 的高质量平面。

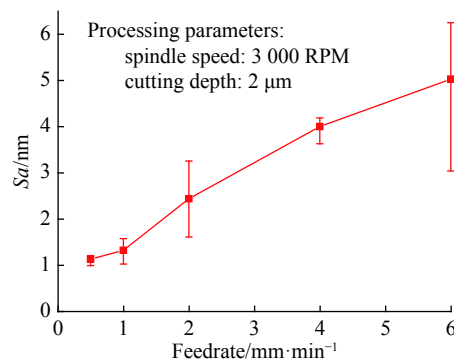
2.4 车削加工工艺实验

采用车削方式对 ZnS 晶体平面元件进行加工,同样需要采用负前角刀具,在此,采用如表 1 所示的刀具 2#进行加工(此时刀具 1#由于飞切实验而产生磨损),其对应参数为前角 -15° ,刀具圆弧半径 0.753 mm。实验过程与飞切实验类似,同样采用单一变量法,对主轴转速、进给速率、切削深度进行研究,分别获得的表面粗糙度检测结果如下所示。

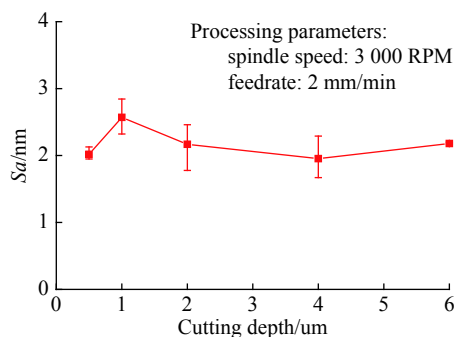
如图 10 所示的不同加工参数下检测获得的粗糙度检测结果可以看出,主轴转速和进给速率对表面粗



(a) 不同的主轴转速
(a) Different spindle speed



(b) 不同的进给速率
(b) Different feedrate



(c) 不同的切削深度
(c) Different cutting depth

图 10 单一变量法对车削加工参数进行分析

Fig.10 Analysis of the cutting parameters with single variable method

糙度的影响比较大。如图所示, 较快的主轴转速与较慢的进给速率有利于得到高精度的表面粗糙度。高转速与慢进给能够产生较大的切削力, 则能抑制 ZnS 晶体表面产生脆性形变, 从而有利于提高表面粗糙度。对于切削深度而言, 结合图 10(c) 的检测数据, 当其小于 6 μm 时, 其对表面粗糙度的影响不大。但如果将切削深度继续增加, 则会导致脆性形变的产生, 破坏表面质量。通常而言, 车削加工 ZnS 晶体时, 切削深度一般为 2~4 μm 即可。最后, 采用主轴转速 3 000 RPM, 进给速率 0.5 mm/min, 切削量在 2 μm, 可以得到较好的表面, 其中表面粗糙度 $Sa=1.000$ nm, $Sq=1.223$ nm 的 ZnS 晶体平面元件。

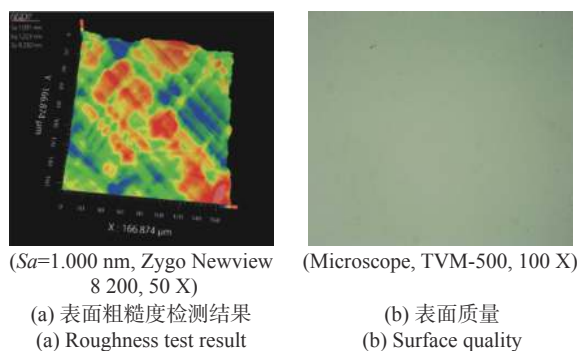


图 11 车削加工最佳参数下加工得到的表面粗糙度

Fig.11 Roughness test results with the optimal processing parameters of cutting

3 结 论

针对 ZnS 晶体材料难加工的特性, 文中基于单点金刚石车床, 采用两种不同的加工方式, 对 ZnS 晶体平面元件进行了加工实验研究。虽然飞切加工和车削加工是两种不同的加工方式, 其金刚石刀具、ZnS 晶体工件的放置位置不一样、加工轨迹也不一样, 但其都能对平面元件进行加工。在采用负前角金刚石刀具对 ZnS 晶体的加工实验中, -15° 和 -25° 的前角对加工表面的影响不明显, 同样, 刀具圆弧半径的大小也影响不明显。

除了金刚石刀具参数外, 文中还主要研究了加工参数对加工表面的影响, 包括主轴转速、进给速率、切削深度, 主要采用单一变量法对每个参数进行研究。无论是车削加工, 还是飞切加工, 主轴转速和进给速率对加工表面质量的影响比较大, 低转速和快进

给都会导致晶体表面发生脆性形变, 在 ZnS 晶体表面出现凹坑与裂纹, 严重破坏其表面质量。对于切削深度, 当其在 0.5~4 μm 范围内变化时, 其对表面质量的影响不明显。当采用主轴转速为 3 000 RPM, 进给速率 0.5 mm/min, 切削深度为 2 μm 时, 采用飞切加工, 可以得到 ZnS 晶体平面元件的表面粗糙度 $Sa=1.078$ nm; 采用车削加工, 可以得到 ZnS 晶体平面的表面粗糙度 $Sa=1.000$ nm。

在实际应用中, 综合考虑加工效率与加工稳定性, 采用前角为 -15° 和 -25° , 刀具半径为 0.5~1.0 mm 的金刚石刀具, 主轴转速为 2 500 RPM, 进给速率为 2 mm/min, 切削深度为 2 μm 时, 即可得到表面粗糙度 Sa 优于 2 nm 的高质量 ZnS 晶体元件。该研究成果对 ZnS 晶体材料在红外光学系统的应用提供了技术支持, 在工程应用方面具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Wang Lingxue, Cai Yi. Recent progress and perspectives of infrared optical systems [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(1): 1-12. (in Chinese)
- [2] Gao Ming, Xu Huangrong, Liu Jun, et al. Design of diffractive-refractive dual-band co-path parafocal optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0518003. (in Chinese)
- [3] Bai Yu, Liao Zhiyuan, Liao Sheng, et al. Infrared dual band athermal optical system with common aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 268-277. (in Chinese)
- [4] Huang Jiandong. Research on fixed abrasive polishing of ZnS crystal[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [5] Chen Bing, Guo Bing, Zhao Qiangliang, et al. Ultra-precision grinding of hot-pressed zinc sulfide [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2109-2116. (in Chinese)
- [6] Chen Qi, Fu Xiuhua, Jia Zonghe, et al. Research on processing technology of ZnS crystal [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2013, 36(3): 120-123. (in Chinese)
- [7] Cao Zhimin. Study on ultra-precision turning technology of cleartran ZnS crystals[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [8] Li Weihao, Tong Yi, Lian Weiyuan, et al. Experiment study on the cutting property of hot press Zinc Sulfide by single point diamond turning[C]//Pro of SPIE, 2014, 9281: 928116.

- [9] Wang Peng, Xue Dongbai, Hao Zhangjiu, et al. ESCV cutting method during infrared crystal single point diamond turning process [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0742001. (in Chinese)
- [10] Gong Yan, Zhao Lei. Single point diamond machines and their applications to optical engineering [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 537–545. (in Chinese)
- [11] Li Junqi, Zhang Yunlong, Su Jun, et al. Turning of DOE Ge single crystal with micro-circle diamond tool [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3053–3058. (in Chinese)
- [12] Ran Yuting, Huang Hongbiao, Yin Jin, et al. Study on defect depth of surface of KDP crystals fabricated by single point diamond turning [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(5): 0524001. (in Chinese)
- [13] 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.