

doi: 10.3788/gzxb20174605.0524001

单点金刚石飞切 KDP 晶体表面缺陷深度的研究

冉钰庭^{1,2,3}, 黄宏彪¹, 尹进^{1,2}, 朱健强^{1,3}

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 上海科技大学 物质科学与技术学院, 上海 201210)

摘 要: 基于印压断裂力学理论分析了磷酸二氢钾晶体表面缺陷面积与中位裂纹深度的关系. 在刀具参量和主轴转数一定的情况下, 采用不同切削深度和进给速率对磷酸二氢钾晶体进行单点金刚石飞切加工实验, 并计算晶体表面单位面积缺陷的占比系数. 实验结果表明, 晶体表面缺陷深度与面积占比系数成正相关, 与理论分析结果相符, 进而提出了利用计算晶体表面缺陷占比系数估测缺陷深度的方法. 最后基于该方法得到高效率切削步骤, 并加工获得了表面粗糙度算术平均值优于 5 nm 的超光滑晶体表面.

关键词: 非线性光学; 缺陷深度估测; 飞切加工; 磷酸二氢钾晶体; 高效率切削

中图分类号: TH161; TG84

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)05-0524001-7

Study on Defect Depth of Surface of KDP Crystals Fabricated by Single Point Diamond Turning

RAN Yu-ting^{1,2,3}, HUANG Hong-biao¹, YIN Jin^{1,2}, ZHU Jian-qiang^{1,3}

(1 *National Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China*)

Abstract: On the basis of the theory of indentation fracture mechanics, the relationship between the surface defect area and median crack of potassium dihydrogen phosphate crystals were analyzed theoretically. In the machine tool parameters and spindle speed in certain circumstances, the potassium dihydrogen phosphate crystal was processed by single point diamond turning under different cutting depth and feedrate. And then the ratio coefficient of unit area defect on the surface of the crystal was calculated. The experimental results show that the depth of surface defect is proportional to the ratio coefficient of area, which is consistent with the theoretical analysis, so the estimation method for the depth of surface defects by calculating the ratio coefficient of the surface defect area was processed. Finally, the high efficiency cutting process based on this method was proposed, the obtained arithmetic mean height value of surface roughness is better than that of 5 nm by the actual processing.

Key words: Nonlinear optics; Defect depth estimation; Fly-cutting processing; Potassium dihydrogen phosphate crystals; High efficiency cutting

OCIS Codes: 240.4350; 120.6660; 220.1920

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61405211)和中以高功率激光技术国际合作研究项目(No. 2010DFB70490)资助

第一作者: 冉钰庭(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为单点金刚石飞切加工 KDP 晶体表面粗糙度. Email: ranyt@siom.ac.cn

导师(通讯作者): 朱健强(1964-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为高功率激光元器件特种工艺及检测、光学精密机械设计与制造工艺等. Email: jqzhu@mail.shenc.ac.cn

收稿日期: 2016-11-28; **录用日期:** 2017-02-21

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

磷酸二氢钾(Potassium Dihydrogen Phosphate, KDP)晶体具有较大的非线性光学系数和较高的激光损伤阈值,是一种典型的软脆性功能晶体材料,已被广泛用做为普克尔斯盒、二倍频和三倍频的倍频晶体^[1]. 目前 KDP 晶体也是唯一可用于惯性约束核聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)、强激光武器等高功率激光系统中激光倍频、电光开关器件的非线性光学晶体材料^[2-6]. 然而它具有质地软、脆性高、易开裂、易潮解、各向异性等一系列不利于光学元件加工的特点,研磨抛光加工时磨料极易嵌入晶体表面,会严重降低激光损伤阈值^[7-8]. 单点金刚石切削(Single Point Diamond Turning, SPDT)加工大尺寸 KDP 晶体元件不仅可以避免研磨抛光加工方式中存在的问题,还能减少塌边现象以及保证刀具的切削方向与晶体晶轴的精确定向,是目前加工 KDP 晶体主要采用的方式^[9]. KDP 晶体表面质量对 ICF 终端靶场系统频率的转换以及能量的输出起着至关重要的作用,SPDT 加工 KDP 晶体会在晶体表面产生凹坑、瑕疵和裂纹等表面缺陷,如何方便快捷地测量切削加工后晶体表面的缺陷状态对切削加工中预测表面质量以及安排加工步骤具有重要的意义.

目前对材料加工损伤的检测手段可以分为无损检测和有损检测^[10-11]. Owczarek 等^[12]采用体积比为 1 : 1 的丙酮+水对晶体进行刻蚀以观察晶体生长产生的位错点. 吴江东等^[13]采用体积为 2 : 1 的冰醋酸+水的腐蚀液,用截面显微法和择优刻蚀法对线切割、磨削加工后的 KDP 晶体亚表面缺陷进行了观测得到两种工艺下亚表面缺陷深度分别为 89.59 μm 和 8.55 μm . 王国强等^[14]对磨削加工后的 KDP 晶体进行角度抛光后,采用体积配比为 60 mL 冰醋酸+5 mL 水+4 滴 H_2SO_4 的腐蚀液进行刻蚀观测到亚表面裂纹深度为 19~48 μm . 铁贵鹏等^[15]采用磁流变抛光斑点技术对单点金刚石车削后的 KDP 晶体的缺陷深度进行观察,得到不同切削参量下的缺陷深度各不相同.

溶液刻蚀法简单易行并且不会引入新的亚表面缺陷,但整个腐蚀过程耗时较长且不好控制,易造成晶体表面质量恶化和缺陷的扩展;磁流变抛光斑点技术抛光液稳定性较难控制,铁粉易嵌入晶体表面,采用此方法检测需要多道工序加工,成本高、步骤较繁琐. 本文在加工刀具参量和主轴转速一定的情况下,对 KDP 晶体进行 SPDT 加工,通过 CMM-30 金相显微镜(长方光学仪器有限公司,上海)观察在不同切削深度和进给速率时,晶体表面缺陷面积的大小,并计算单位面积的缺陷占比系数,从而得到晶体表面缺陷深度与占比系数的关系. 最后基于此估测方法提出高效切削加工步骤.

1 实验原理及方法

实验采用卧式单点金刚石飞切机床,对脆性材料进行飞切或者车削是以脆性材料在尖锐的金刚石压头下能够产生塑性变形为基础的,但是在粗加工和半精加工阶段,大部分的材料去除还是处于脆性加工区域,假设 KDP 晶体在飞切过程中材料以脆性断裂方式为主.

单点金刚石飞切加工 KDP 晶体过程可简化为脆硬材料表面大规模的印压作用,因此可以利用印压断裂力学理论研究表面缺陷深度与面积占比系数之间的关系. 当尖锐压头印压载荷超过某一临界值时,在印压区域下将产生不可恢复的塑性变形,进一步增大载荷形成具有弹塑性接触特征的中位裂纹(Median crack)和侧向裂纹(Lateral crack)系统. 侧向裂纹近似平行于试件表面扩展,形状一般为圆形或蝶形,当其扩展至晶体表面会引起表面剥落和碎裂,此时压痕完全被去除,试件表面残留弹坑状缺陷^[16]. 但实际切削是一个复杂的动态过程,飞切加工中的快速应变、温升以及高中频振动等会对裂纹的产生和扩展产生重要影响,另外飞切过程中所产生的剪切应力对材料的破坏也远大于静态印压过程中的剪切应力^[17]. KDP 晶体粗加工后表面的沟槽内部会产生与切削方向大体垂直的摩擦裂纹(Friction crack),

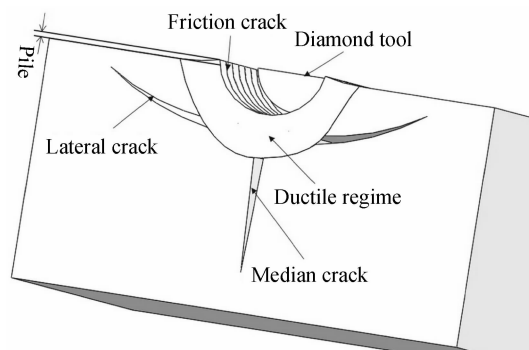


图 1 KDP 晶体表面微裂纹形成示意图
Fig. 1 Diagram of formation of micro cracks on the surface of KDP crystals

其只在动态切削过程中在刀刃切向和法向的共同作用下才产生,与工具和工件之间的动态摩擦有关.图 1 为飞切过程 KDP 晶体表面微裂纹形成示意图.

根据印压断裂力学理论和理想塑性材料孔洞扩张的 Hill 模型分别获得基于尖锐压头的中位裂纹和侧向裂纹深度的理论计算公式为^[18]

$$c = \alpha_k^{2/3} \cdot \left(\frac{E}{H}\right)^{(1-m) \cdot 2/3} \cdot (\cot \varphi)^{4/9} \cdot \left(\frac{P}{K_c}\right)^{2/3} \quad (1)$$

$$b = 0.43 \cdot (\sin \varphi)^{1/2} \cdot (\cot \varphi)^{1/3} \cdot \left(\frac{E}{H}\right)^m \cdot \left(\frac{P}{H}\right)^{1/2} \quad (2)$$

式中, $\alpha_k = 0.027 + 0.090 \cdot (m - 1/3)$, c 为中位裂纹深度, b 为侧向裂纹深度, E 为材料的弹性模量, H 为材料的硬度, E/H 为脆性材料常量, m 为一无量纲常量,取值介于 $1/3$ 和 $1/2$, φ 为压头锐度角, P 为印压载荷, K_c 为材料的断裂韧性. 消去参量 P 联立式(1)和(2)可得中位裂纹深度与侧向裂纹深度的关系为

$$c = 3.08 \cdot \alpha_k^{2/3} \cdot \frac{H^{2m}}{E^{2(m-1/3)} \cdot (\sin \varphi)^{2/3} \cdot K_c^{3/2}} \cdot b^{4/3} \quad (3)$$

由侧向裂纹深度可得,表面缺陷面积为

$$A = \pi \cdot b^2 \quad (4)$$

将式(4)带入式(3)可得,中位裂纹深度与表面缺陷面积的关系为

$$c = 3.08 \cdot \alpha_k^{2/3} \cdot \frac{H^{2m}}{E^{2(m-1/3)} \cdot (\sin \varphi)^{2/3} \cdot K_c^{3/2}} \cdot \left(\frac{A}{\pi}\right)^{2/3} \quad (5)$$

由式(5)可知,中位裂纹深度与表面缺陷面积成单调递增的非线性关系,即 $c \sim A^{2/3}$. 由于侧向裂纹在动态切削过程中极易扩展到晶体表面形成弹坑状表面缺陷,通过计算飞切加工后表面缺陷面积的占比系数就能估测表面缺陷的深度,从而可初步预测下一步的切削参量,提高加工效率.

基于以上理论,在室温为 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 、湿度为 40% 以下的环境中,采用湿切的加工方式对 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 I 类 KDP 晶体进行飞切加工实验. 实验中主轴转速恒定为 $S = 200 \text{ r/min}$, 刀具前角 $\gamma_0 = -45^\circ$, 后角 $\alpha_0 = 10^\circ$, 刀尖圆弧半径 $R = 5 \text{ mm}$.

如图 2,为了提高实验效率,将 KDP 晶体划分为 5 个宽度为 10 mm 的带状区域,在每次整面飞切完成后,对每个带状切削区域取 5~6 个点进行取样记录.

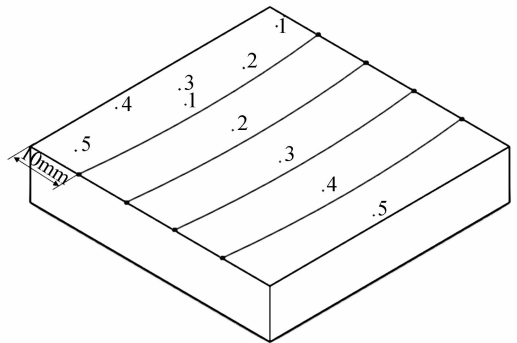


图 2 KDP 晶体切削区域划分
Fig. 2 Division area of crystal cutting

整个实验安排如图 3,实验采用 5 种切削深度 $a = 20, 10, 6, 4, 1 \mu\text{m}$ 分别对 KDP 表面进行 5 次完

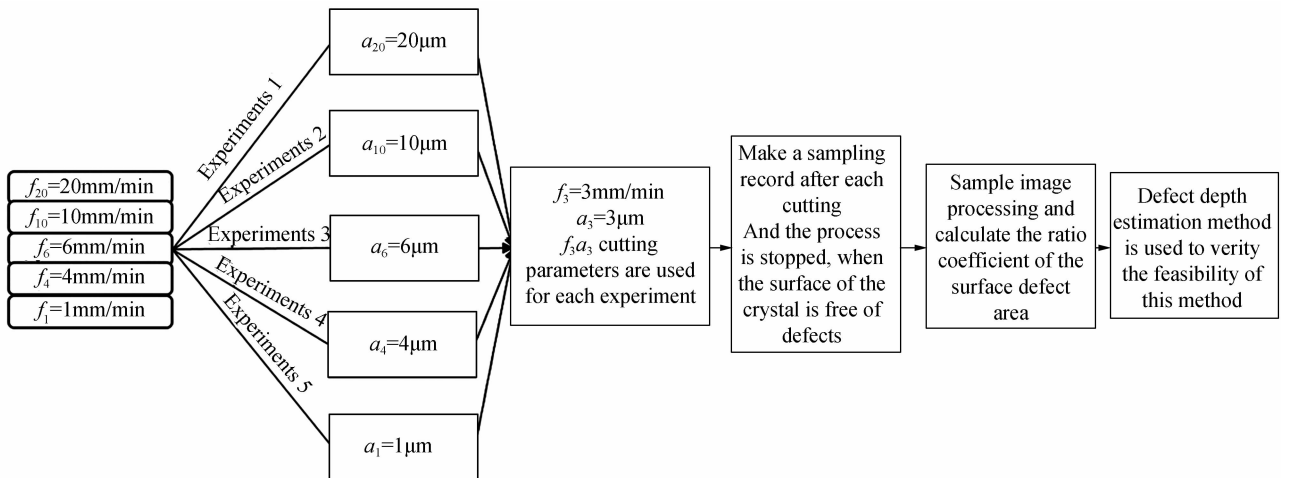


图 3 实验步骤流程
Fig. 3 Flow chart of experimental steps

整的飞切,每次飞切对 1~5 号带状区域分别采用 $f=1, 3, 6, 10, 20$ mm/min 的进给速率,一共分成 5 组实验分别进行,每组实验第一次飞切完成后,采用无表面缺陷产生的切削参量 $f_3 a_3$ (进给速率为 $f_i = i$ mm/min, 切削深度为 $a_i = i$ μm) 对晶体多次飞切,并取样记录每次飞切后晶体的表面状态.当在显微镜下观察不到表面缺陷时停止切削,然后将所取样区域图片通过 MATLAB 处理,计算出缺陷面积的占比系数,并得出不同切削参量和缺陷面积占比系数与缺陷深度的对应关系,进而提出表面缺陷深度估测方法.

2 实验结果与讨论

实验采用切削参量 $f_3 a_3$ 对 50 mm \times 50 mm \times 10mm 的 I 类 KDP 晶体进行多次飞切,分别完成图 3 所示的 5 组实验.

当切削深度 $a_{20} = 20$ μm 时,对图 2 所示 1~5 号带状区域分别采用 $f_1, f_3, f_6, f_{10}, f_{20}$ 进行飞切,并对其表面进行取样记录,得到的表面状态如图 4. 图 5 为第一次切削进给速率为 $f_{20} = 20$ mm/min, 切削深度为 $a_{20} = 20$ μm 时,后续每次采用 $f_3 a_3$ 切削取样记录到的表面状态.

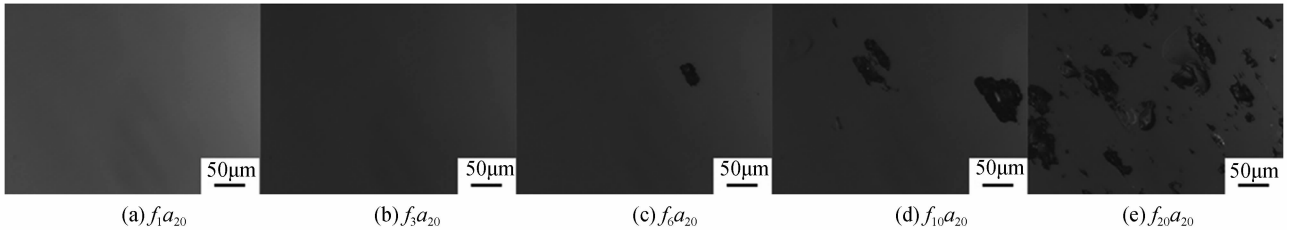


图 4 不同进给速率切削后的表面状态
Fig. 4 Surface state after cutting by different feedrate

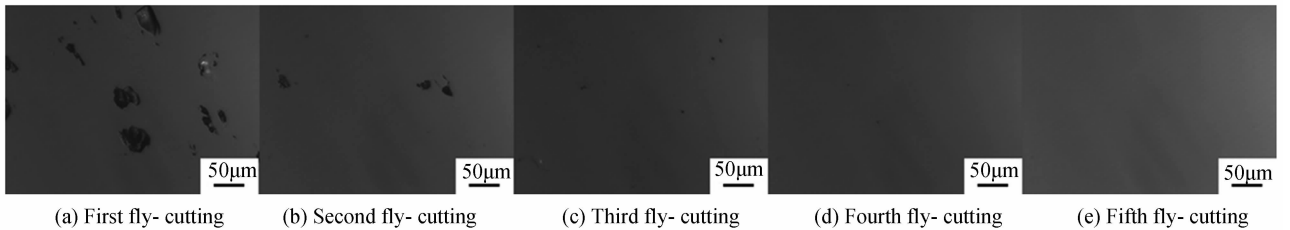
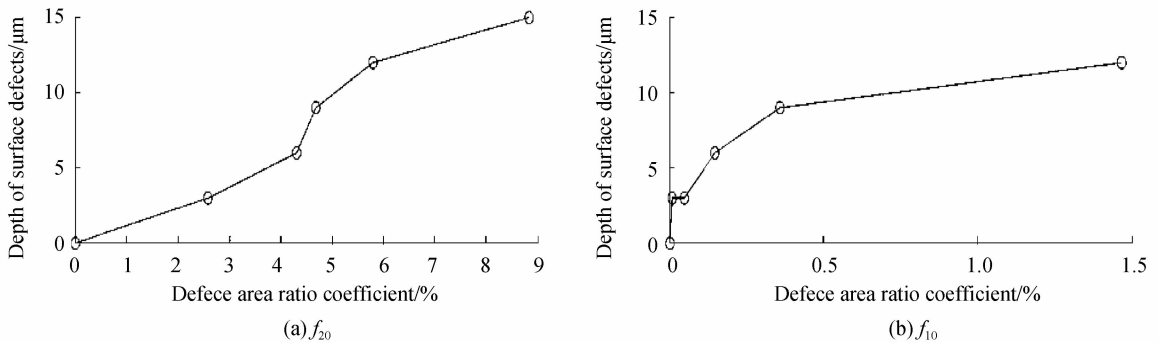


图 5 采用 $f_3 a_3$ 每切削一次后的表面状态
Fig. 5 Surface state after each cutting by $f_3 a_3$

对 5 组实验中取样的图片采用空间同态滤波和二值化算法处理后,计算出晶体表面缺陷面积占比系数,得到进给速率一定时表面缺陷面积占比系数与缺陷深度的关系,如图 6.

由图 6 可知 KDP 晶体表面缺陷面积占比系数与缺陷深度成正相关,大致符合理论上表面缺陷面积与中位裂纹深度的趋势.由于此次实验采用的最小切深为 $a_3 = 3$ μm ,图中平台区间表明当进给速率较小时不同切削深度得到的表面缺陷深度都在 3 μm 以内.

每组实验切削深度和进给速率与表面缺陷深度的关系如图 7. 随着切削深度和进给速率的减小,裂纹深度也随之减小,晶体的切削进入塑性域,此时在飞切实验过程中可以明显观察到晶体的切屑呈棉絮状.



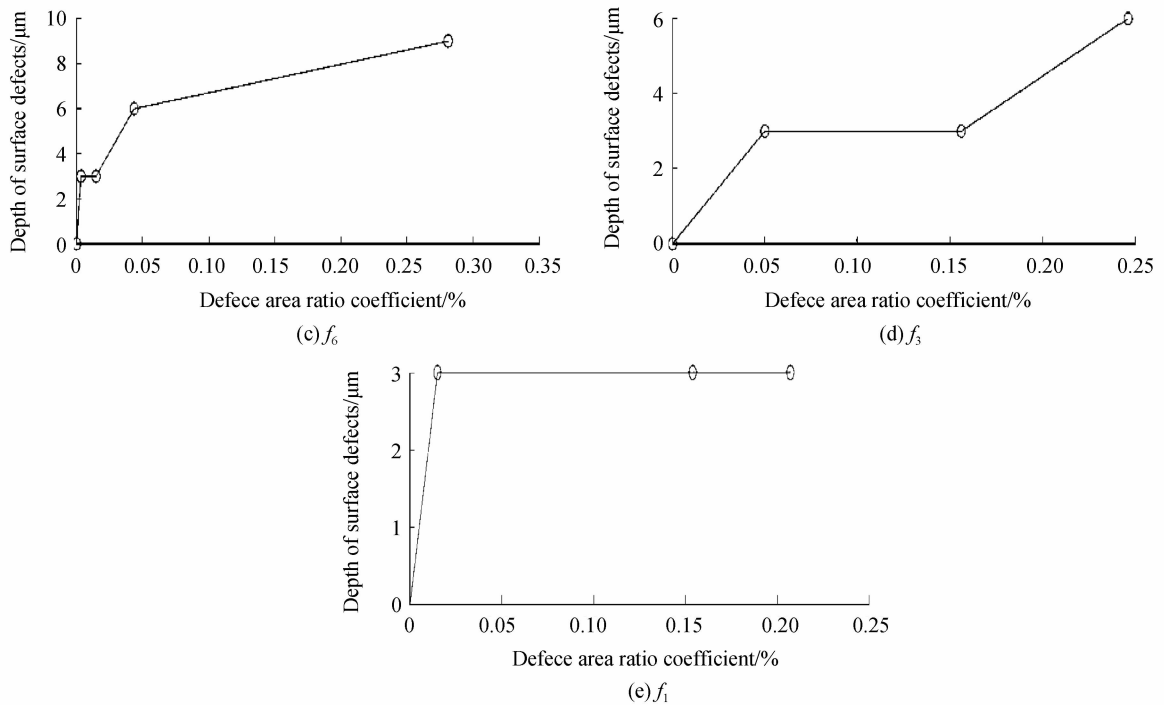


图 6 不同进给速率下表面缺陷面积占比系数与缺陷深度的关系

Fig. 6 Relationship between the ratio coefficient of the surface defect area and the depth of the defect with different feedrates

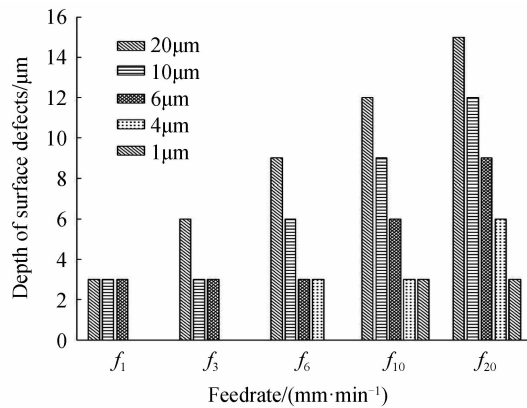


图 7 切削深度和进给速率与缺陷深度的关系

Fig. 7 Relationship among cutting depth, feedrate and depth of defects

在实际 KDP 晶体飞切加工之前,必须以较大的进给速率和切削深度 $f_{10} a_{60}$ 对金刚石线切割后的晶体毛坯进行粗加工,切去毛坯表面较大的凹坑和裂纹,并让切削表面与飞刀盘平行,以保证晶体加工完成后的面形.在对晶体进行粗加工、半精加工以及精加工的各个阶段,为了确定是否需要继续加工,需多次卸下晶体在暗室下观察晶体表面,以 50 mm 大小 KDP 晶体飞切为例,所得到的加工步骤如表 1. 如果将各个阶段中加工完成后的晶体表面在显微镜下进行取样计算表面缺陷面积占比系数,然后根据图 6 所示曲线初步估测缺陷深度,并依据图 7 中的数据选取合适的下一阶段切削参量,不仅能更加准确地确定后续的切削参量,简化加工步骤,而且也减少了观测、清洗和装夹次数.以 50 mm 大小 KDP 晶体飞切为例,采用表面缺陷深度估测法得到简化后的加工步骤如表 2. 在获得相同表面质量的情况下,相比实验室以前的加工步骤,简化后的飞切步骤将理论加工时间缩短为原来的一半.尤其在对大尺寸 KDP 晶体加工时,简便快捷的表面估测方法将极大地提高晶体整个加工过程的效率.

表 1 KDP 晶体飞切加工简化前的加工步骤

Table 1 Traditional cutting procedure of KDP crystals fly-cutting

| Feedrate $f/(mm \cdot min^{-1})$ | Cutting depth $a/\mu m$ | Number of cuts | Time/min |
|----------------------------------|-------------------------|----------------|----------|
| 20 | 20 | 2 | 5 |
| | 10 | | |
| 10 | 10 | 2 | 10 |
| | 6 | | |
| 6 | 6 | 2 | 16.7 |
| | 4 | | |
| 3 | 6 | 4 | 66.7 |
| | 4 | | |
| | 3 | | |
| 2 | 2 | 1 | 50 |
| | 1 | | |
| | 1 | | |
| | | 11 | 148.4 |

表 2 KDP 晶体飞切加工简化后的加工步骤

Table 2 Simplified cutting procedure of KDP crystals fly-cutting

| Feedrate $f/(mm \cdot min^{-1})$ | Cutting depth $a/\mu m$ | Number of cuts | Time/min |
|----------------------------------|-------------------------|----------------|----------|
| 20 | 20 | 1 | 2.5 |
| 6 | 20 | 2 | 16.7 |
| | 10 | | |
| 3 | 6 | 3 | 50 |
| | 3 | | |
| | 1 | | |
| | | 6 | 69.2 |

采用简化后的加工步骤加工得到无表面缺陷的晶体,利用白光干涉仪(Zygo)对其表面 9 个点进行表面粗糙度 Sa 的测量. 每个点的测量面积为 $1.14 mm \times 1.14 mm$,所有点的测量结果如表 3.

表 3 KDP 晶体的表面粗糙度

Table 4 Surface roughness of KDP crystals

| Point | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sa/ $(10^{-3} \mu m)$ | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 |

3 结论

本文对 KDP 晶体飞切表面缺陷状态进行了理论和实验分析,得出表面缺陷占比系数与其深度之间的关系,从而可以通过计算晶体各个加工阶段的表面占比系数估测缺陷深度,进而在后续加工中合理选取切削参数. 对 KDP 晶体飞切加工的实验结果表明,在保证较高晶体表面质量的情况下,相比简化前,简化后的加工步骤将加工效率提高了 1 倍. 尤其是在对大尺寸晶体批量生产中,该方法的应用将极大提高加工效率,对 KDP 晶体以及其他脆性光学晶体飞切加工过程中表面质量估测以及切削步骤的安排具有参考意义.

参考文献

- [1] LI Qiang, ZHANG Bin, CAI Bang-wei, *et al.* The effect of temporal phase modulation on high-power third harmonics conversion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 782-785.
李强, 张斌, 才邦威, 等. 时间位相调制对高强度三次谐波转换的影响[J]. *光子学报*, 2004, **33**(7): 782-785.
- [2] ZHU Jian-qiang. Shengguang- II high power laser facility[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2005, **20**(1): 42-44.
朱健强. 神光 II 高功率激光实验装置研制[J]. *中国科学院院刊*, 2005, **20**(1): 42-44.
- [3] YIN Bing-yu, LI Guo-yang, LI Xue-chun, *et al.* High power laser facility front-end energy control system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0414001.
殷冰雨, 李国杨, 李学春, 等. 高功率激光装置前端能量控制系统[J]. *光子学报*, 2014, **43**(4): 0414001.
- [4] HAWLEY R, GERAGHTY P, LOCKE S N, *et al.* NIF pockels cell and frequency conversion crystals[C]. SPIE, 2004, **5341**: 121-126.
- [5] NIKOGOSYAM D N. Nonlinear optical crystals; a complete survey[M]. New York: Springer Press, 2005.

- [6] DE YOREO J J, BURNHAM A K, WHITMAN P K. Developing KH_2PO_4 and KD_2PO_4 crystals for the world's most powerful laser[J]. *International Materials Reviews*, 2002, **47**(3): 113-152.
- [7] FUCHS B A, HED P P, BAKER P C. Fine diamond turning of KDP crystals[J]. *Applied Optics*, 1986, **25**(11): 1733-1735.
- [8] WANG Jing-he, CHEN Ming-jun, DONG Shen, *et al.* Recent advance in ultra precision machining technique of KDP crystal[J]. *Tool Engineering*, 2004, **38**(9): 56-59.
王景贺, 陈明君, 董申, 等. KDP 晶体光学零件超精密加工技术研究的新进展[J]. 工具技术, 2004, **38**(9):56-59.
- [9] WANG Hong-xiang, WANG Jing-he, SUN Tao, *et al.* An analysis on some problems in ultra-precision machining of potassium dihydrogen phosphate crystals[J]. *Acta Armamentarii*, 2006, **27**(5): 911-915.
王洪祥, 王景贺, 孙涛, 等. 磷酸二氢钾晶体超精密加工存在的若干问题分析[J]. 兵工学报, 2006, **27**(5):911-915.
- [10] LI Gai-ling, WU Yu-lie, WANG Zhuo, *et al.* Experiment study on the destructive measurement of the depth of SSD for optical material[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2006, **42**(6): 19-22.
李改灵, 吴宇列, 王卓, 等. 光学材料亚表面损伤深度破坏性测量技术的实验研究[J]. 航空精密制造技术, 2006, **42**(6):19-22.
- [11] SHEN Jian, LIU Shou-hua, YI Kui, *et al.* Subsurface damage in optical substrates[J]. *Optik*, 2005, **116**(6): 288-294.
- [12] OWCZAREK I, SANGWAL K. Selective etching of rough (001) faces of KH_2PO_4 crystals[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1990, **9**(4): 440-442.
- [13] WU Jiang-dong, CAO Xian-suo, WANG Guo-qiang, *et al.* Damage detection and analysis of machined KDP crystal subsurface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(11): 1721-1726.
吴东江, 曹先锁, 王国强, 等. KDP 晶体加工表面的亚表面损伤检测与分析[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(11):1721-1726.
- [14] WANG Guo-qiang, GAO Hang, PEI Zhi-jian, *et al.* Study on the subsurface damage of KDP crystal ground with ultrasonic vibration assistance[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2010, **39**(1): 67-71.
王国强, 高航, 裴志坚, 等. KDP 晶体超声辅助磨削的亚表面损伤研究[J]. 人工晶体学报, 2010, **39**(1):67-71.
- [15] TIE Gui-peng, DAI Yi-fan, GUAN Chao-liang, *et al.* Research on subsurface defects of potassium dihydrogen phosphate crystals fabricated by single point diamond turning technique[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(3): 033401.
- [16] WANG Hong-xiang, WANG Jing-he, MA En-cai, *et al.* Hardness indentation size effect of KDP crystals for ultra-precision machining surface[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, **38**(6): 856-858.
王洪祥, 王景贺, 马恩财, 等. KDP 晶体超精密加工表面硬度压痕尺寸效应研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, **38**(6): 856-858.
- [17] ZHAO Ju-bo. Study on partial cone cracks in nano-grinding of single crystal[D]. Dalian: Dalian university of technology, 2008:23-25.
赵巨波. 单晶硅纳米磨削过程的摩擦裂纹试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008:23-25.
- [18] WANG Zhuo, WU Yu-lie, DAI Yi-fan, *et al.* Rapid detection of subsurface damage of optical materials in lapping process and its influence regularity[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(1): 16-21.
王卓, 吴宇列, 戴一凡, 等. 光学材料研磨亚表面损伤的快速检测及其影响规律[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(1):16-21.