

KDP 晶体飞切加工表面缺陷的抑制方法

汪圣飞^{1**}, 许乔¹, 王健¹, 张飞虎², 雷向阳^{1*}

¹成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041;

²哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 研究了磷酸二氢钾(KDP)晶体表面典型缺陷的形成原因及抑制方法。通过飞切加工及表面染色切削实验证明了成因分析结果的正确性,进一步明确了 KDP 晶体表面缺陷的形成过程。建立了适用于描述 KDP 晶体表面缺陷形成过程的理论模型,提出了获得无缺陷晶体表面的工艺条件。对飞切加工参数及刀具结构进行了优化,实验验证了缺陷抑制措施的有效性。研究表明,在飞切条件下,KDP 晶体(001)晶面的脆塑转变(BDT)深度变化范围为 125~268 nm,当沿 45°方向切削时 BDT 深度最大,此时只要保证进给速率小于 36.6 $\mu\text{m}/\text{r}$ 即可避免在晶体表面形成凹坑。通过优化刀具结构,可消除晶体表面的凸起缺陷,有效抑制 KDP 晶体的表面缺陷,最终获得了粗糙度小于 2 nm 的光滑 KDP 晶体表面。

关键词 材料; 金刚石加工; 表面质量; 缺陷抑制; 磷酸二氢钾(KDP)晶体; 飞切

中图分类号 TH161

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1116001

Methods for Surface Defect Suppression in Fly-Cutting Fabrication of KDP Crystals

Wang Shengfei^{1**}, Xu Qiao¹, Wang Jian¹, Zhang Feihu², Lei Xiangyang^{1*}

¹Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu, Sichuan 610041, China;

²Department of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The formation reasons and suppression methods of the typical defects generated on the surface of the potassium dihydrogen phosphate (KDP) crystal are investigated. The correctness of the analysis results of the formation reasons are confirmed via the fly-cutting fabrication and the surface painting fly-cutting experiments, and the formation process of the surface defects of the KDP crystal are further clarified. Theoretical models which are suitable for the description of the formation process of the surface defects of the KDP crystal are established and the process conditions for the realization of the defect-free KDP surfaces are shown. The fly-cutting fabrication parameters and the cutting tool structures are optimized, and thus the validity of the suppression methods is verified. The research results show that, the variance range of the brittle ductile transition (BDT) depth of the (001) plane of KDP crystal is 125-268 nm under the fly-cutting conditions. When the cutting is along 45° direction, the BDT depth reaches the maximum. At this point, the fracture pits can be avoided on the crystal surface as long as the feed rate does not exceed 36.6 $\mu\text{m}\cdot\text{r}^{-1}$. Besides, the convex defects are eliminated by the optimization of the cutting tool structures, the surface defects of the KDP crystal can also be suppressed effectively, and thus a smooth KDP surface with a roughness less than 2 nm is obtained.

Key words materials; diamond machining; surface quality; defect suppression; potassium dihydrogen phosphate (KDP) crystal; fly-cutting

OCIS codes 160.4670; 220.1920; 230.4320; 350.4600

1 引 言

磷酸二氢钾(KDP)是唯一一种可在人工条件下

生长到 500 mm 以上的非线性光学晶体,被广泛应用于惯性约束核聚变(ICF)驱动装置激光光路中^[1-2]。在激光驱动器的运行过程中,高能激光光束将直接辐

收稿日期: 2018-04-12; 修回日期: 2018-05-31; 录用日期: 2018-06-13

基金项目: 科学挑战专题资助(JCKY2016212A506-0503)、国家自然科学基金(51702302,51535003)

* E-mail: Leixy_rclf@sohu.com; ** E-mail: robertwsf@sina.com

照 KDP 晶体表面,因此对 KDP 晶体的加工表面质量提出了严苛的要求。但 KDP 晶体具有硬度低、脆性大及各向异性性能显著等不利于机械加工的力学特性,当采用传统的研磨、抛光方法进行加工时,极易导致磨粒嵌入,降低其加工表面质量^[3-4];而使用超精密车削方法进行加工时,受材料各向异性性能的影响,晶体表面不同区域的加工质量存在显著差异^[5]。因此,大口径 KDP 晶体被国际光学界公认为是最难加工的激光光学元件之一^[6]。单点金刚石飞切技术可有效避免磨粒嵌入的问题,可最大程度地减小材料各向异性对加工表面质量的影响,是目前国际上最常用的大口径 KDP 晶体加工方法^[7]。

经过多年的发展,大口径 KDP 晶体的飞切加工技术在晶体元件的面形误差控制、波纹度控制及粗糙度控制等方面取得了长足的进展^[8-10]。但是,现有的飞切工艺条件还是会不可避免地再精加工晶体表面上形成各种类型的表面缺陷。在强激光辐照条件下,表面缺陷不仅会影响元件的的光学性能,还极易导致元件发生激光损伤,缩短其使用寿命^[11-12]。Guillet 等^[13]对比了激光辐照前后 KDP 晶体表面缺陷的形貌,发现随着激光能量的增大及辐照次数的增多,表面缺陷的尺寸将显著增长,最终导致晶体表面发生严重的损伤。Cheng 等^[14]分析了表面裂纹对 KDP 晶体激光损伤性能的影响,发现表面裂纹将使晶体的表面损伤阈值降低 2/3。针对 KDP 晶体的表面缺陷,Geraghty 等^[15-16]提出采用机械微修复及离子束抛光等方法对晶体表面进行后处理。尽管这些方法可在一定程度上降低表面缺陷的不利影响,但由于对 KDP 晶体表面缺陷的形成原因及抑制方法缺乏系统研究,目前还无法从根源上杜绝晶体表面缺陷的形成。

针对飞切加工 KDP 晶体过程中形成的表面缺陷,通过缺陷显微成像、缺陷元素组成分析,结合切削加工实验,确定了其形成原因。建立了适用于描述缺陷形成过程的理论模型,明确了无缺陷晶体表面的形成条件。提出了 KDP 晶体表面缺陷的抑制

措施,并开展切削工艺实验对其进行了验证。研究结果对优化 KDP 晶体飞切加工工艺、提高晶体元件表面的加工质量具有现实的工程意义。

2 KDP 晶体的飞切加工表面缺陷

单点金刚石飞切加工 KDP 晶体的原理如图 1 所示。在飞切过程中,安装于飞刀盘边缘位置的金刚石刀具随主轴高速旋转以完成主切削运动,旋转角速度为 ω ;装卡于真空吸盘上的 KDP 晶体随滑台进行进给运动, f 为进给量。KDP 晶体是典型的软脆性材料,其脆塑转变(BDT)深度仅约为 100 nm^[17],为了实现塑性去除以获得光滑的晶体表面,在飞切加工中多采用半径 R 较大的圆弧刃刀具。

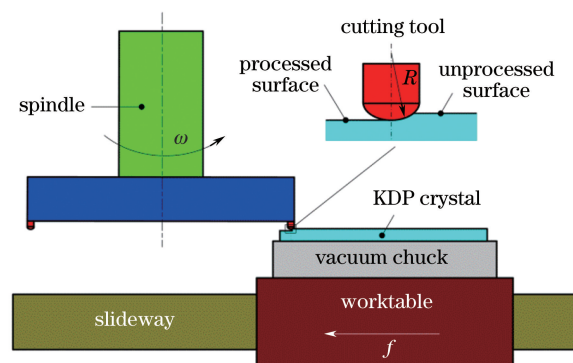


图 1 单点金刚石飞切加工 KDP 晶体原理图

Fig. 1 Schematic of single-point-diamond fly-cutting of KDP crystal

在现有的飞切工艺条件下加工 KDP 晶体时,通常会在加工完成后的晶体表面形成大量的表面缺陷。使用扫描电镜(SEM)及白光干涉仪(WLI)观测其微观形貌,发现飞切过程中形成的表面缺陷可大致分为两种不同的类型。第一类缺陷表现为局部凹坑,其显微形貌及表面轮廓分别如图 2(a)和图 3(a)所示,在坑状缺陷的内部及边缘伴随有裂纹,该现象表明这类缺陷与晶体表面材料的断裂有关。另一类常见的表面缺陷表现为局部凸起点,单个凸起点的高度为数微米,高度为数十纳米至百纳米,如图 2(b)和图 3(b)所示,这类缺陷的显著特征为凸起点

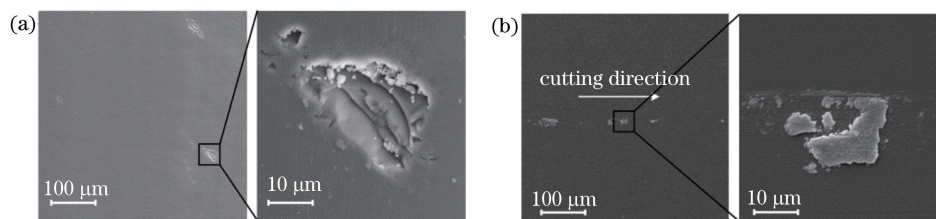


图 2 KDP 晶体飞切加工表面典型缺陷的 SEM 图像。(a)凹坑;(b)凸起

Fig. 2 SEM images of typical surface defects generated in fly-cutting fabrication of KDP crystal. (a) Pits; (b) convex

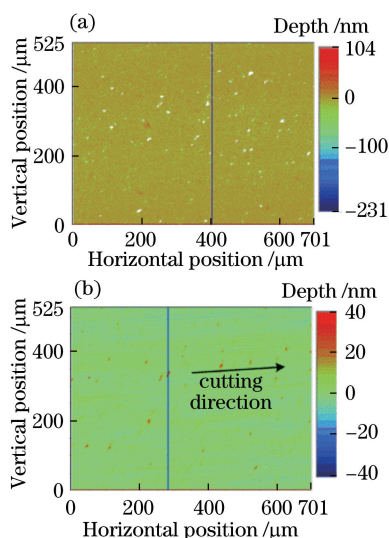


图 3 KDP 晶体飞切加工表面典型缺陷的 WLI 图像。

(a) 凹坑; (b) 凸起

Fig. 3 WLI images of typical surface defects generated in fly-cutting fabrication of KDP crystal. (a) Pits; (b) convex along cutting direction discontinuous distribution.

针对 KDP 晶体表面的凸起点状缺陷, 采用能谱仪(EDS)对其元素组成进行了分析, 结果如图 4 所示。结果表明, 晶体表面的凸起缺陷由 O、P、K 元素组成(在 EDS 测试中, H 元素无法测出), 即凸起缺陷与 KDP 晶体具有相同的元素组成。由此可

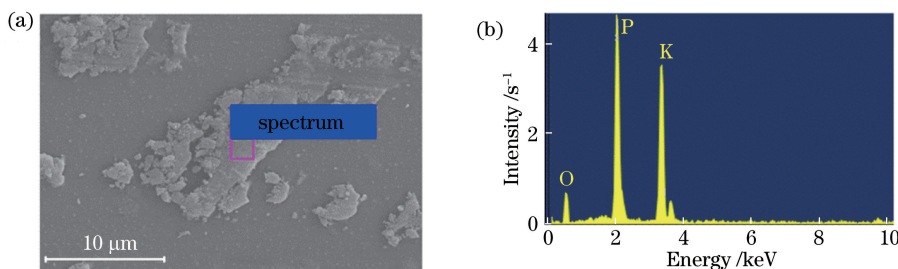


图 4 KDP 晶体表面凸起缺陷的能谱测试结果。(a) 缺陷显微图像; (b) 谱线图

Fig. 4 EDS analysis of convex defects on KDP surface. (a) Microscopic image of defects; (b) spectral diagram

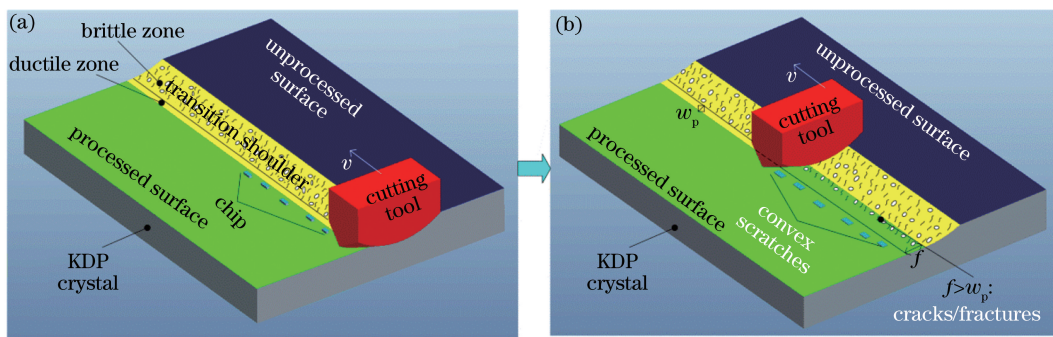


图 5 KDP 晶体表面缺陷的形成过程。(a) 凹坑; (b) 凸起

Fig. 5 Formation process of surface defects of KDP crystal. (a) Pits; (b) convex

推断, 凸起缺陷的本质是粘结在晶体表面的 KDP 粉末或切屑。

3 KDP 晶体飞切加工表面缺陷的形成机制

3.1 表面缺陷成因分析

根据 KDP 晶体表面缺陷的形貌及元素组成特征, 提出了晶体表面凹坑及凸起缺陷的形成过程, 如图 5 所示。KDP 晶体的 BDT 深度仅有百纳米左右, 在使用圆弧刃刀具切削时将在过渡表面(已加工表面与未加工表面之间的圆弧状表面)上形成脆性破坏区域; 在飞切过程中, 若工艺参数选择不当, 例如当进给量 f 大于过渡面上的塑性去除域宽度 w_p 时, 过渡面上的脆性破坏区域无法被后续加工过程完全去除, 就会在加工完成后的晶体表面上形成脆性凹坑。与凹坑的形成机制不同, 圆弧刃刀具对切屑的挤压作用是导致晶体表面凸起缺陷的主要原因。KDP 晶体脆性大, 在飞切过程中形成的切屑容易发生断裂, 这些断裂的切屑或落在靠近切削区域的已加工表面上, 或直接被高速运动的刀具卷入切削区域, 这为凸起缺陷的形成提供了必要的条件。此外, 加工 KDP 晶体时所使用的刀具具有较大的圆弧半径, 副切削刃与已加工表面间的间距极小。

当两者间的距离小于切屑厚度时, KDP 切屑就可能在刀具的挤压作用下粘结在已加工表面上, 形成凸起缺陷。

3.2 表面缺陷成因的验证实验

在 KDP 晶体(001)晶面上沿[100]晶向进行切削, 所使用的圆弧刃刀具的半径为 5 mm, 主轴转数设定为 390 r/min, 切削深度为 5 μm。在切削过程中将进给速度由 60 μm/s 突然增大至 300 μm/s, 加工完成后使用 SEM 观测晶体表面的微观形貌, 结果如图 6 所示。可以看出, 当进给速度较大时, KDP 晶体表面形成了凹坑缺陷, 当进给速度减小时, 表面凹坑缺陷消失。实验结果与上述分析结果一致, 因此可以确定 KDP 晶体表面的凹坑缺陷是由晶体表面材料发生断裂形成的。

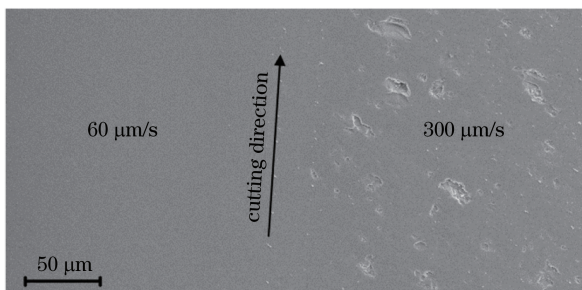


图 6 进给速度对 KDP 晶体表面凹坑缺陷的影响

Fig. 6 Influence of feed rate on surface pit defects of KDP crystal

为了验证 KDP 晶体表面凸起缺陷的形成原因, 开展了图 7 所示的晶体表面染色切削实验。将一块 KDP 晶体表面染为红色, 待染料干燥后使用飞切机床加工该晶体。该切削过程中形成的切屑顶端带有颜色, 若所提的凸起缺陷的形成原因正确, 则可能会有部分染色的切屑被压入晶体表面, 并最终形成带有颜色的表面缺陷。加工完成后使用显微镜

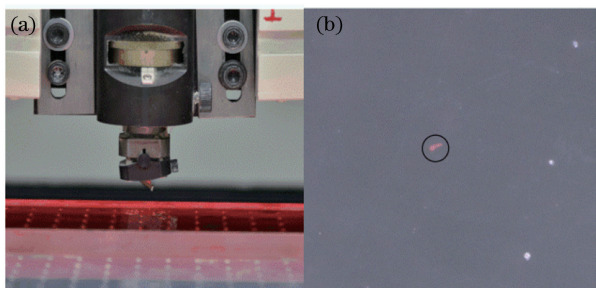


图 7 KDP 晶体的表面染色切削实验。(a)加工前的染色表面; (b)加工后的表面显微图像

Fig. 7 Surface painting fly-cutting of KDP crystal. (a) Painted surface before processing; (b) microscopic image of processed surface

观察 KDP 晶体表面, 发现晶体表面的确有部分表面缺陷为红色, 由此可证明飞切过程中切屑会在刀具的挤压作用下形成表面缺陷。另一方面, 实验中观测到的大部分表面缺陷都没有颜色, 这主要是由于染色切削实验中所形成的切屑仅在其顶端带有颜色, 而新形成的切屑表面未被染色。当刀具对切屑的挤压发生在不带有颜色的表面上时, 切屑在刀具的挤压作用下破裂并粘接在晶体表面, 最终形成了不带有颜色的表面凸起缺陷。

3.3 无缺陷表面的形成条件

图 8 所示为使用圆弧刃刀具加工 KDP 晶体时表面凹坑及凸起缺陷的形成示意图。可以看出, 为了避免在 KDP 晶体表面形成凹坑缺陷, 需要满足的第一个条件为脆性切削区域中形成的凹坑及裂纹不会扩展到最终的加工表面以下, 该条件可表述为

$$Y_c < h = \frac{2fx}{\sqrt{R^2 - (x + f/2)^2} + \sqrt{R^2 - (x - f/2)^2}}, \quad (1)$$

式中 Y_c 为脆性域中任意凹坑或裂纹的深度, h 为凹坑或裂纹起始点与最终加工表面间的距离, x 为切削起始点与裂纹起始点间的水平距离。

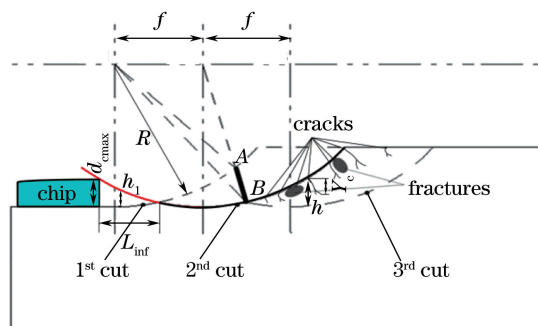


图 8 圆弧刃刀具加工引入表面缺陷的示意图

Fig. 8 Schematic of introduction of surface defects by processing with circular-edge cutting tool

还需满足的另一个条件为切削过程中使用的进给量足够小, 以保证前一刀加工中形成的断裂切削区域可被后续的加工过程完全去除。具体来说, 图 8 中 AB 等于材料的 BDT 深度 t_c , 根据 t_c 的定义可知, B 点左侧的区域为塑性去除区域, 右侧的区域为断裂去除区域。为了获得光滑的加工表面, 在下一刀加工时需要将 B 点右侧的断裂表面完全去除, 该条件的极限情况为下一刀切削的起始位置正好与 B 点重合。根据图 8 中的几何关系, 可得到 AB 的长度与进给量 f 和刀具圆弧半径 R 间的关系^[18]为

$$|AB| = \frac{f^2}{R}. \quad (2)$$

在上述临界条件下, $|AB| = t_c$, 因此, 由(1)、(2)式可知, 为避免在 KDP 晶体表面形成凹坑, 飞切工艺参数需满足

$$\begin{cases} h = \frac{2fx}{\sqrt{R^2 - (x + f/2)^2} + \sqrt{R^2 - (x - f/2)^2}} > Y_c \\ \sqrt{t_c \cdot R} \geq f \end{cases} \quad (3)$$

为了避免在晶体表面上形成凸起缺陷, 还必须保证副切削刃与已加工表面间的距离 h_1 大于切削过程中所形成切屑的最大厚度 d_{cmax} 。在使用圆弧刃刀具进行切削时, 副切削刃与已加工表面间的距离由零开始逐渐增大, 即刀具对切屑进行挤压的可能性始终存在, 因此直接比较 h_1 与 d_{cmax} 的值并不具有实际意义。用挤压效应的影响长度 L_{inf} 这一参数来描述刀具对切屑挤压效应的影响。在已知最大切屑厚度的前提下, 若副切削刃上某点与已加工表面间的距离等于 d_{cmax} , 则将该点与切削起始点间的水平距离定义为挤压效应的影响长度 L_{inf} 。根据图 8 中的几何关系, 可得到 L_{inf} 的表达式为

$$L_{\text{inf}} = \sqrt{2Rd_{\text{cmax}}} - f/2, \quad (4)$$

式中 d_{cmax} 可表达为

$$d_{\text{cmax}} = \alpha(R - \sqrt{R^2 + f^2 - 2f\sqrt{2R \cdot a_p - a_p^2}}), \quad (5)$$

式中 α 为切屑变形系数; a_p 为切削深度。将(5)式

代入(4)式中, 可得到 L_{inf} 的最终表达式为

$$L_{\text{inf}} = \sqrt{2\alpha R(R - \sqrt{R^2 + f^2 - 2f\sqrt{2R \cdot a_p - a_p^2}})} - f/2. \quad (6)$$

L_{inf} 越大, 刀具可能会挤压越多的切屑, 形成凸起缺陷的概率越大, 反之更有利于形成无缺陷的 KDP 晶体表面。

4 KDP 晶体飞切加工表面缺陷的抑制方法

4.1 KDP 晶体表面凹坑缺陷的抑制方法

为了对 KDP 晶体表面的凹坑缺陷进行有效抑制并保证其加工效率, 首先需要确定 KDP 晶体的 BDT 深度 t_c 及裂纹深度 Y_c 。通过切槽实验确定 t_c 及 Y_c 的值, 测量原理如图 9 所示, 其中黑色单箭头方向为切槽后观测的方向。在飞切机床上使用圆弧刃刀具进行切槽实验, 切削区域的切深由边缘位置的零逐渐增大, 根据 BDT 原理可知, 切削区域的表面将由光滑的塑性去除区域逐渐过渡为脆性去除区域。切槽实验结束后, 使用 SEM 观测槽表面的微观形貌, 并记录塑性去除区域的宽度 w_p 。同时, 使用台阶仪测量槽的截面轮廓, 获得距离切削区域边缘位置 w_p 处所对应的切削深度, 该深度值即为材料的 BDT 临界深度 t_c 。随后, 使用聚焦离子束 (FIB) 显微镜观测裂纹深度信息, 获得不同未变形切屑厚度 (UCT) 下 Y_c 的值。

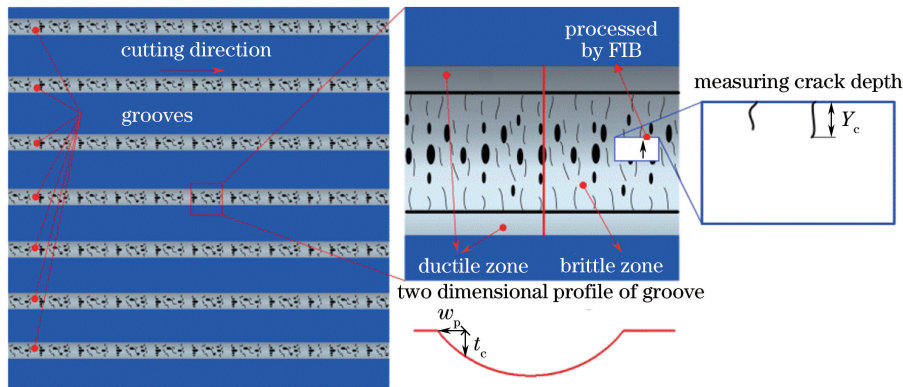


图 9 KDP 晶体的 BDT 深度及裂纹深度的测量原理

Fig. 9 Schematic for measuring BDT depth and crack depth of KDP crystal

切槽实验中所采用的切削参数见表 1。由于 KDP 晶体具有各向异性的力学性能, 因此在测量其 BDT 深度时需考虑切削方向的影响。以 KDP 晶体 (001) 晶面作为实验对象, 在该晶面内晶体具有四次对称性, 因此切削方向设定为 $0^\circ \sim 90^\circ$ (间隔 15°), 其中 0° 方向对应 $[100]$ 晶向, 90° 方向对应 $[010]$ 晶向。

图 10 所示为飞切条件下 KDP 晶体 (001) 晶面内 BDT 深度随切削方向的变化情况。可以看出, 沿 0° 方向切削时晶体的 BDT 深度最小为 125 nm, 而沿 45° 方向切削时 BDT 深度最大为 268 nm。因此, 在加工 KDP 晶体 (001) 晶面时, 可优先选择沿 45° 方向进行切削, 以提高表面加工质量及加工效率。

表 1 BDT 深度及裂纹深度的测量实验参数
Table 1 Experimental parameters for measurement of BDT depth and crack depth

Parameter	Content
Crystal plane	(001) plane
Cutting direction / (°)	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90
Cutting depth / μm	1
Revolution / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	390
Nose radius / mm	5

图 11 所示为不同 UCT 下裂纹起始点距最终表面距离 h 与裂纹深度 Y_c 的大小。可以看出, Y_c 的值随着 UCT 的增大而增大, 但是其增长速率远小于 h 的, Y_c 的值始终小于 h 。该结果表明, 在当前飞切条件下加工 KDP 晶体时, 过渡面上形成的裂纹不会扩展至最终加工表面以下, 即(3)式中的第一个不等式可自然满足。

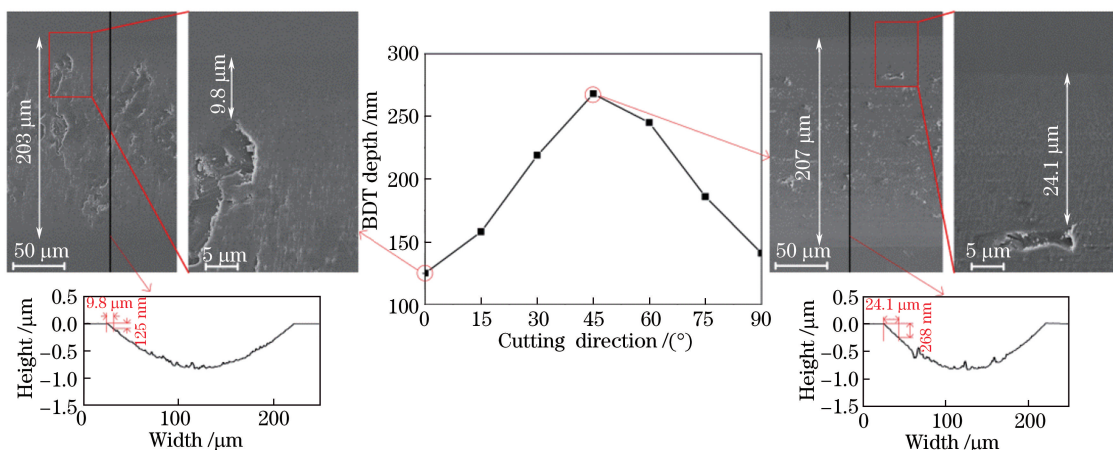


图 10 KDP 晶体 BDT 深度的测量结果
Fig. 10 Measured BDT depth of KDP crystal

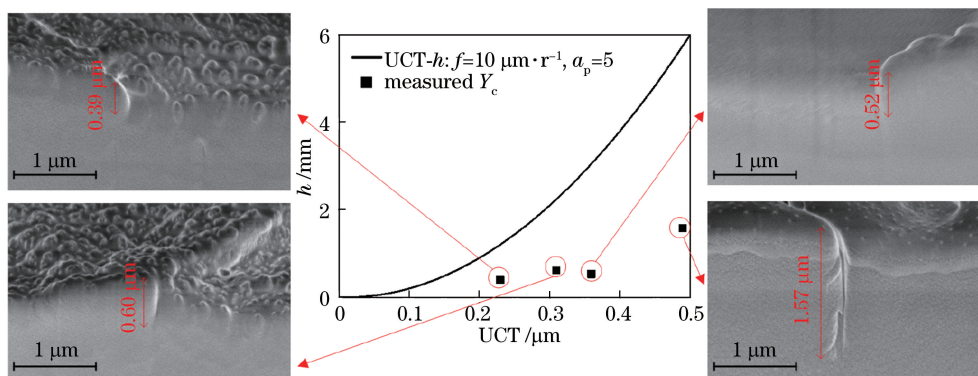


图 11 不同 UCT 下裂纹深度 Y_c 与 h 的对比
Fig. 11 Comparison between crack depth Y_c and h under different UCT

综合分析上述结果可获得抑制 KDP 晶体表面凹坑缺陷的工艺条件。当刀具圆弧半径为 5 mm 时, 在(001)晶面内沿 0° 方向进行切削时, 晶体的 BDT 深度为 125 nm, 根据(3)式中的第二个不等式可知, 当进给量小于 $25 \mu\text{m}/\text{r}$ 时, 可避免在晶体表面形成凹坑缺陷。而沿 45° 方向切削时, 晶体的 BDT 深度为 268 nm, 当进给量小于 $36.6 \mu\text{m}/\text{r}$ 时, 即可避免在晶体表面形成凹坑缺陷。为验证该分析结果, 在 KDP 晶体(001)晶面上分别沿 0° 和 45° 方向进行切削, 实验中主轴转速为 390 r/min, 切削深

度为 $5 \mu\text{m}$, 进给量分别为 15, 30, 45 $\mu\text{m}/\text{r}$ 。加工完成后使用原子力显微镜(AFM)观测加工表面形貌, 结果如图 12 所示。对于 0° 切削方向, 当进给量为 $15 \mu\text{m}/\text{r}$ 时, 可获得光滑的加工表面; 当进给量为 $30 \mu\text{m}/\text{r}$ 时, 晶体表面出现了凹坑缺陷, 如图 12 中圆圈标注所示。对于 45° 切削方向, 当进给量为 $45 \mu\text{m}/\text{r}$ 时, 晶体表面才会出现凹坑缺陷。该实验结果与上述预测结果一致, 证明了采用上述方法制定的工艺参数可对 KDP 晶体表面凹坑进行有效抑制。

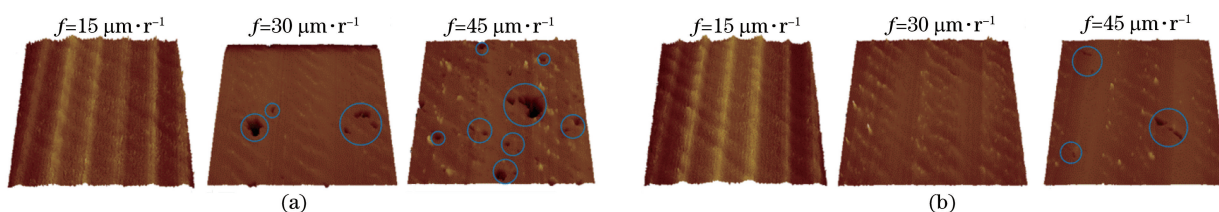


图 12 沿不同方向加工获得的 KDP 晶体表面的 AFM 图像。(a) 0°方向;(b) 45°方向

Fig. 12 AFM images of KDP crystal surfaces processed along different cutting directions. (a) 0° direction; (b) 45° direction

4.2 KDP 晶体表面凸起缺陷的抑制方法

由 KDP 晶体表面凸起缺陷的形成条件可知,减小 L_{inf} 可对这类表面缺陷进行有效抑制。根据这一思路对 KDP 晶体飞切加工刀具的结构进行了优化,如图 13 所示。与当前普遍使用的圆弧刃刀具不同,优化后的 KDP 晶体飞切刀具采用圆弧刃作为主切削刃,采用直线刃作为副切削刃。因此,该刀具既能实现晶体材料的塑性域去除,又能有效避免副切削刃对切屑的挤压作用。当 $a_p = 5 \mu\text{m}$, $f = 20 \mu\text{m}/\text{r}$ 时,通过(6)式计算知,在采用圆弧刃刀具加工时, L_{inf} 的值为 $85 \mu\text{m}$,即在距离切削起始位置 $85 \mu\text{m}$ 范围内的已加工表面上都可能形成凸起缺陷;而使用优化后的刀具进行加工时,可使 L_{inf} 减小至 $0.5 \mu\text{m}$ 。由此可见,优化后的刀具可显著

减小 L_{inf} 的值,有效避免凸起缺陷的形成。

为了验证凸起缺陷的抑制效果,分别使用圆弧刃刀具及结构优化刀具加工 KDP 晶体,并使用 WLI 对加工表面进行测量,结果如图 14 所示。该实验中采用的进给量、切削深度及主轴转速分别为 $10 \mu\text{m}/\text{r}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 及 $390 \text{ r}/\text{min}$ 。由图 14 可知,采用圆弧刃刀具进行切削时,将在 KDP 晶体表面形成凸起缺陷;而在相同的飞切参数下使用结构优化刀具进行加工时,可获得粗糙度 R_a 为 1.8 nm 的表面,在整个晶体表面上未见凸起缺陷。该结果表明,采用结构优化后的刀具可有效抑制 KDP 晶体表面凸起缺陷的形成。该实验结果还进一步证明了晶体表面凸起缺陷的确是由刀具副切削刃挤压切屑而形成的。

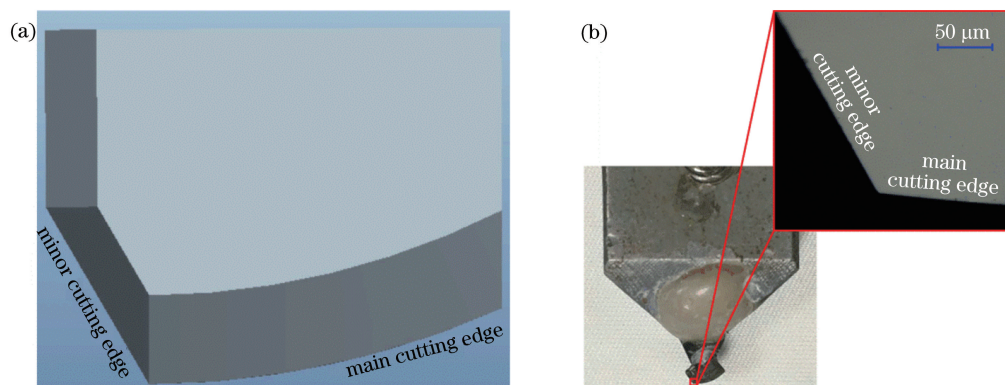


图 13 用于抑制 KDP 晶体表面凸起缺陷的刀具。(a) 三维模型;(b) 实物图

Fig. 13 Cutting tool used for suppressing convex defects on KDP surface. (a) 3D model; (b) photograph

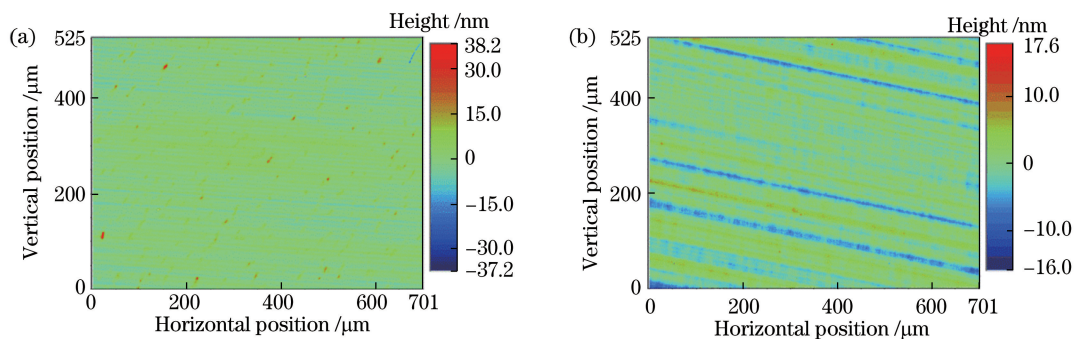


图 14 不同结构刀具加工得到的 KDP 晶体表面形貌。(a) 圆弧刃刀具;(b) 结构优化刀具

Fig. 14 Morphologies of KDP crystal surfaces processed by cutting tools with different structures.

(a) Circular-edge cutting tool; (b) structure-optimized cutting tool

5 结 论

对 KDP 晶体飞切加工表面典型缺陷的形成原因及抑制方法进行了研究。通过分析缺陷的特征并结合缺陷成因验证实验,明确了表面材料断裂导致晶体表面的凹坑形成,而切屑在刀具副切削刃的挤压作用下粘结在已加工表面引起了凸起缺陷。建立了 KDP 晶体表面缺陷形成过程的理论模型,获得了无缺陷晶体表面的形成条件。针对凹坑缺陷,采用切槽实验获得了 KDP 晶体(001)晶面内 BDT 深度及裂纹深度的变化规律,结合缺陷形成过程理论模型得到沿 0° 和 45° 方向加工时避免凹坑形成的临界进给量分别为 $25 \mu\text{m}/\text{r}$ 和 $36.6 \mu\text{m}/\text{r}$,并通过切削实验对其进行了验证。对于凸起缺陷,通过对飞切加工刀具的结构进行优化,使挤压效应影响长度 L_{inf} 的值显著减小,避免了副切削刃对切屑的挤压效应。采用上述缺陷抑制方法,获得了表面粗糙度 R_a 小于 2 nm 的光滑 KDP 晶体表面,表面缺陷得到有效抑制。

参 考 文 献

- [1] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, *et al.* Description of the NIF laser[J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 25-145.
- [2] Su R F, Huang Z, Zhu M Z, *et al.* Thermal stress of mechanically mounted KDP crystals[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1214001.
苏瑞峰, 黄湛, 朱明智, 等. 机械夹持状态下 KDP 晶体的热应力[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1214001.
- [3] Chatterjee S. Simple technique for polishing optical components made from KDP group of crystals[J]. Journal of Optics, 2005, 34(2): 93-101.
- [4] Wang Q G. Study on precision slicing and grinding processes of KDP crystal[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010: 114-124.
王强国. KDP 晶体精密切割与磨削工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 114-124.
- [5] Tie G P, Dai Y F, Guan C L, *et al.* Research on full-aperture ductile cutting of KDP crystals using spiral turning technique[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(12): 2137-2144.
- [6] Baisden P A, Atherton L J, Hawley R A, *et al.* Large optics for the national ignition facility[J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 295-351.
- [7] Liang Y C, Chen W Q, Bai Q S, *et al.* Design and dynamic optimization of an ultraprecision diamond flycutting machine tool for large KDP crystal machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69 (1/2/3/4): 237-244.
- [8] Xu Q, Wang J. Analysis of the influence of vacuum chucking on the distortion of the KDP crystal[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4231: 464-468.
- [9] An C H, Zhang Y, Xu Q, *et al.* Modeling of dynamic characteristic of the aerostatic bearing spindle in an ultra-precision fly cutting machine[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(4): 374-385.
- [10] Chen H F, Dai Y F, Zheng Z W, *et al.* Effect of crystallographic orientation on cutting forces and surface finish in ductile cutting of KDP crystals[J]. Machining Science and Technology, 2011, 15(2): 231-242.
- [11] Zhang L X, Zhu X B, Li F Y, *et al.* Laser-induced thermal damage influenced by surface defects of materials [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0914001.
张龙霞, 朱晓冰, 李风雨, 等. 材料表面缺陷对激光热损伤的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0914001.
- [12] Wang S F, Wang J, Xu Q, *et al.* Influences of surface defects on the laser-induced damage performances of KDP crystal [J]. Applied Optics, 2018, 57(10): 2638-2646.
- [13] Guillet F, Bertussi B, Lameignere L, *et al.* Preliminary results on mitigation of KDP surface damage using the ball dimpling method[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6720: 672008.
- [14] Cheng J, Chen M J, Liao W, *et al.* Influence of surface cracks on laser-induced damage resistance of brittle KH_2PO_4 crystal [J]. Optics Express, 2014, 22(23): 28740-28755.
- [15] Geraghty P, Carr W, Draggoo V, *et al.* Surface damage growth mitigation on KDP/DKDP optics using single-crystal diamond micro-machining ball end milling contouring[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 5273: 273-280.
- [16] Chen S S, Li S Y, Peng X Q, *et al.* Research of polishing process to control the iron contamination on the magnetorheological finished KDP crystal surface[J]. Applied Optics, 2015, 54(6): 1478-1484.
- [17] Chen H F, Wang J M, Dai Y F, *et al.* Research on critical cutting thickness of KDP crystals by spirally grooving[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2011, 40(1): 22-26, 37.
陈浩锋, 王建敏, 戴一帆, 等. 基于螺旋刻划方法的 KDP 晶体临界切削厚度研究 [J]. 人工晶体学报, 2011, 40(1): 22-26, 37.
- [18] Wang S F, An C H, Zhang F H, *et al.* An experimental and theoretical investigation on the brittle ductile transition and cutting force anisotropy in cutting KDP crystal [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 106: 98-108.