

光纤激光切割蓝宝石基片的工艺研究

蔡志祥 高勋银* 杨伟 孙智龙 叶玉梅

深圳光韵达光电科技股份有限公司, 广东 深圳 518051

摘要 采用波长为 1070 nm 的光纤激光对蓝宝石基片进行切割加工。研究了蓝宝石基片切割过程中, 蓝宝石基片下表面产生粉末物质和崩边的原因, 并分析了激光加工工艺参数(激光能量密度、切割速度、重复频率、辅助气体压力)与蓝宝石基片上下表面崩边尺寸的关系。研究表明: 光纤激光与蓝宝石之间的相互作用主要是光热作用, 蓝宝石材料吸收激光能量后发生熔化、气化现象。同时, 伴随辅助气体 N_2 被击穿后产生的等离子体对激光的吸收, 在蓝宝石内部出现了钥匙孔现象, 钥匙孔的长度对切割质量有较大的影响。综合考虑激光切割蓝宝石基片工艺参数以及辅助气体压力等因素, 激光能量密度为 $5.7 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 、切割速度为 6 mm/s、重复频率为 1.8 kHz、 N_2 压力为 0.9 MPa 时, 获得了厚度为 0.31 mm 的蓝宝石基片, 上表面崩边为 3 μm , 下表面崩边为 8 μm 。

关键词 激光光学; 材料; 激光切割; 光纤激光; 1070 nm; 蓝宝石

中图分类号 O436; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.081403

Study on Fiber Laser Cutting of Sapphire Substrate

Cai Zhixiang Gao Xunyin Yang Wei Sun Zhilong Ye Yumei

Shenzhen Sunshine Laser and Electronics Technology Co, LTD, Shenzhen, Guangdong 508051, China

Abstract A fiber laser with wavelength of 1070 nm is employed to cut the sapphire substrate. The reasons for the generation of powder materials on the sapphire substrate surface and the collapse edge during the laser cutting sapphire substrate are researched, and the relation between the laser processing parameters (laser fluence, cutting velocity, repetition frequency, the pressure of assistant gas) and the collapse edge size on both sides of sapphire substrate is analyzed. The results show that the interaction between laser and sapphire is mainly thermal effect, which makes the sapphire material melt and evaporate. With the absorption of plasma which is produced by nitrogen for laser, the phenomenon of keyhole appears inside the sapphire structure and the length of keyhole have a significant effect on cutting quality. When the sapphire which thickness is 0.31 mm cut by laser, the collapse edge size on the sapphire substrate surface is 3 μm , and collapse edge size under the surface is 8 μm with the optimized laser processing parameters, that laser fluence is $5.7 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$, cutting velocity is 6 mm/s, repetition frequency is 1.8 kHz, the pressure of assistant gas is 0.9 MPa.

Key words laser optics; materials; laser cutting; fiber laser; 1070 nm; sapphire

OCIS codes 140.3510; 160.3380; 350.3390

1 引言

蓝宝石具有高耐磨性、高硬度和优良的热传导性、电绝缘性、化学性能稳定等优异的物理、化学特点, 被广泛地应用于高端智能手机、平板电脑、平板电视等电子显示行业领域^[1-2]。由于蓝宝石是硬脆性材料, 传统的机械加工存在易产生裂纹、碎片、分层、崩边、边缘破裂和刀具易磨损等缺陷, 又由于蓝宝石化学稳定性较好, 使得传统的化学加工方法对其难以加工。然而激光切割技术是一种高速度、高质量的切割方法, 对蓝宝石晶片进行切割, 不仅具有加工速度快、切口质量好并且可以对任意图形进行切割。通常用于蓝宝石切割的激光器主要有超短脉冲激光、Nd:YAG 激光、紫外激光; 皮秒、飞秒超短脉冲激光加工蓝宝石热影响区较小, 但光子能量损失大, 材料去除率低, 且在加工区域周围形成无规则的纳米晶体形态和裂纹^[3]以及在作用

收稿日期: 2015-02-05; 收到修改稿日期: 2015-03-27; 网络出版日期: 2015-07-28

作者简介: 蔡志祥(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事激光加工技术应用及系统装备开发的研究。

E-mail: zxcail@sunshine-laser.com

*通信联系人。E-mail: xygao@sunshine-laser.com

区域表面形成波纹^[4],并且加工设备成本较高;由于蓝宝石对 1070 nm Nd:YAG 红外激光的吸收率很低,要加工蓝宝石就需要提高激光能量密度,故很难加工且存在热效应明显、重凝严重等现象^[5];目前紫外激光($\lambda=355$ nm)切割蓝宝石基片时,由于激光功率较低且焦深较短,蓝宝石去除率较低,只能通过多次切割的同时焦点位置不断改变才能实现蓝宝石的切割,这样使得采用紫外激光器切割蓝宝石的切割效率较低。光纤激光的稳定性和光束质量较好并且能量密度较大,对脆性材料和较厚板材切割相对于 Nd:YAG 激光切割都有明显的优势^[6],采用光纤激光结合保护气体对蓝宝石晶片进行切割,并对切割过程中工艺参数的影响规律进行分析。

2 实验装置和材料

实验装置如图 1 所示,激光经过光纤传导到准直镜后通过聚焦镜,最终在焦平面获得直径为 20 μm 的激光光斑;自动控制系统控制移动平台能在 X, Y 方向移动。实验采用光纤激光器的脉宽为 0.13~0.2 ms、波长为 1070 nm、光斑直径为 20 μm 、重复频率为 0~5 kHz、能量密度变化范围为 0~ 2.4×10^5 J/cm²、切割速度变化范围为 0~100 mm/s。加工采用 N₂ 作为辅助气体,喷嘴直径为 2 mm。

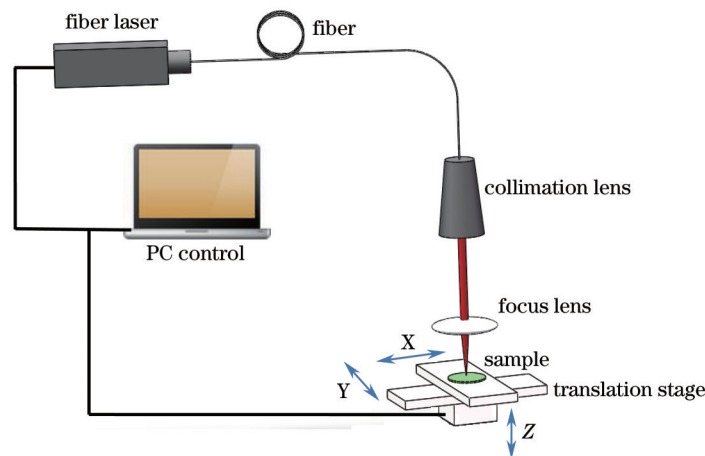


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

实验样件为光学级 C-面(0001)蓝宝石基片,直径 2 inches(1 inch=2.54 cm)、厚度 0.31 mm。具体蓝宝石基片的热学性能参数见表 1。

表 1 蓝宝石基片的热学性能参数

Table 1 Thermal property parameters of sapphire substrate

Physical quantity		Value
Thermal property parameters	Thermal conductivity W/(m.K)	46(solid state); 2.05 ± 0.15 (liquid state)
	specific heat J/(g.K)	0.777(solid state); 1.26(liquid state)
	Melting point /K	2327 \pm 6
	Boiling point /K	3253
	Latent heat of fusion /(J/g)	1066
	Vaporization heat /(J/g)	5400
	Thermal expansion coefficient /(K ⁻¹)	$5.0e-6$ (//c), $6.6e-6$ (\perp c) at 294 K; 7.9 (//c), 8.8 (\perp c) at

实验前对样件依次进行丙酮超声波清洗和去离子水清洗和无尘环境下烘干环节处理;实验后同样需要严格的清洗:先用 KOH 溶液超声清洗 5 min,然后依次用丙酮溶液、无水乙醇、去离子水超声清洗 5 min,最后在无尘埃环境下烘干。激光切割样件边缘都是通过基恩士(VK-8700)三维(3D)彩色激光共聚焦显微镜进行观察。

3 结果与讨论

3.1 激光能量密度对蓝宝石加工质量的影响

图 2 表示的是激光能量密度对激光切割蓝宝石崩边尺寸的影响,激光重复频率为 1 kHz,切割速度为 10 mm/s,辅助气体为 N₂,气压为 1 MPa,脉宽为 0.13 ms,激光能量密度从 $5.6 \sim 11.3 \times 10^3$ J/cm² 变化。

从图 2 可以看出,随着激光能量密度的增加,蓝宝石的正面崩边尺寸和背面崩边尺寸都有所增加,但是

正面崩边尺寸的变化较小,基本都在 $5\ \mu\text{m}$ 以下。图3表示的是激光能量密度对蓝宝石正面影响效果图,从图3可以看出正面加工形貌多存在锯齿状,主要是由于激光频率较低造成光斑分离现象所致,改变锯齿状现象的途径可通过改变激光切割速度和重复频率对其进行调整,并且在激光能量密度增加到一定大小时,正面崩边尺寸达到饱和。这是因为当激光脉冲能量密度达到去除阈值后,锯齿形状逐渐趋近于光斑轮廓;能量密度继续增加,在脉冲的作用时间内,材料的热扩散以及等离子体的形成使得材料表面的去除量增加,形成的锯齿有扩大趋势。

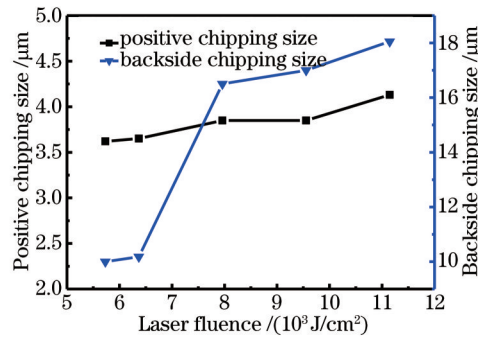


图2 激光能量密度对崩边情况的影响

Fig.2 Effect of laser fluence on chipping size of laser cutting sapphire

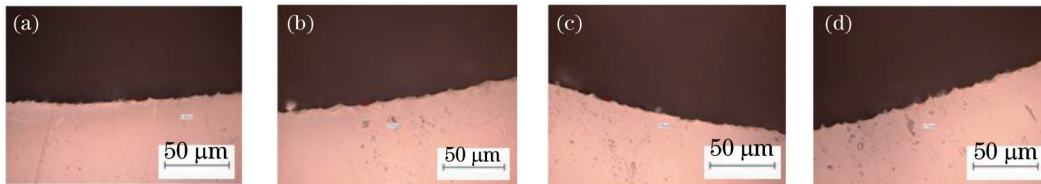


图3 激光能量密度对蓝宝石正面崩边影响。(a) $5.7 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$; (b) $6.4 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$; (c) $9.5 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$; (d) $11.1 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$
Fig.3 Effect of laser fluence on positive chipping size of laser cutting sapphire. (a) $5.7 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$; (b) $6.4 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$; (c) $9.5 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$; (d) $11.1 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$

图4表示的是激光能量密度对蓝宝石背面崩边影响效果图。从图4可以看出,激光能量密度越大,蓝宝石背面的崩边现象越明显,崩边尺寸越大,所以在保证蓝宝石能被切穿的同时降低激光功率对蓝宝石背面崩边情况有一定改善,但是能量越小在背面存在的挂渣就越严重,且不易清除。若适当增大激光能量可使得蓝宝石背面熔融材料成为粉末状,从而可以改变蓝宝石背面切割效果,故激光能量密度在 $5.7 \sim 6.3 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$ 为最佳。

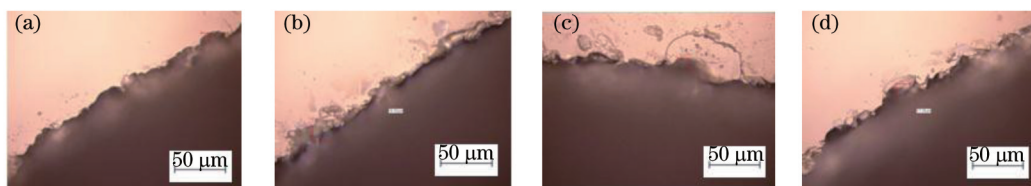


图4 激光能量密度对蓝宝石背面崩边影响。(a) $5.7 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$; (b) $6.4 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$; (c) $9.5 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$; (d) $11.1 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$
Fig.4 Effect of laser fluence on backside chipping size of laser cutting sapphire. (a) $5.7 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$; (b) $6.4 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$; (c) $9.5 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$; (d) $11.1 \times 10^3\ \text{J}/\text{cm}^2$

当激光照射蓝宝石表面时,透过保护气体的高斯光斑使蓝宝石表面迅速升温,为了简化蓝宝石材料加热过程的理论分析,热模型进行了以下假设,蓝宝石是均匀且热物理性质各向同性的材料,蓝宝石的光学和热力学参数与温度无关,忽略传热过程中的辐射和对流,只考虑材料表面向内的热传导,得到激光加热和冷却阶段的温度场分布,即加热阶段表面温度变化规律如(1)和(2)式所示。

加热阶段:

$$\Delta T(z,t)_{0 < t < \tau} = \frac{AF}{\kappa\tau} (4Dt)^{1/2} \text{ierfc} \left[\frac{z}{(4Dt)^{1/2}} \right], \quad (1)$$

和冷却阶段:

$$\Delta T(z,t)_{t>\tau} = \frac{2AFD^{1/2}}{\kappa\tau} \left\{ t^{1/2} \operatorname{ierfc} \left[\frac{z}{(4Dt)^{1/2}} \right] - (t-\tau)^{1/2} \operatorname{ierfc} \left[\frac{z}{[4D(t-\tau)]^{1/2}} \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 $\operatorname{ierfc}(\cdot)$ 为高斯补误差函数的一次积分值, τ 为脉宽(s), D 为热扩散率(m^2/s), A 为吸收率, k 为热导率($\text{W}/\text{m}/\text{K}$), t 为时间(s), F 为激光功率密度(J/cm^2), z 为远离上表面的距离(μm)。

在激光脉冲的起始段,激光作用于蓝宝石表面,使得蓝宝石的状态发生一定的变化,改变了晶体表面的吸收系数,蓝宝石对激光束能量的吸收迅速增加。当表面温度达到一定温度时,蓝宝石被熔化甚至气化,蓝宝石表面温度随时间变化如图5所示。导致气体温度的迅速上升,甚至使气体电离,经计算实验采用的激光功率密度可到 $10^4 \text{ J}/\text{cm}^2$ 数量级。如图5所示,在能量密度为 $1.24 \times 10^4 \text{ J}/\text{cm}^2$,作用时间为 $7 \mu\text{s}$ 时就能达到蓝宝石的熔点,在作用时间为 $14 \mu\text{s}$ 时达到蓝宝石的气化温度,随后对激光的吸收会使蓝宝石晶片表面产生局部的电离化^[7],从而晶片表面对激光的吸收系数增大,激光束能使周围的保护气体击穿,瞬间产生等离子体,使晶体表面形成所谓的钥匙孔形状的损伤形貌^[8-9]。所以当激光能量密度达到蓝宝石气化阈值后,通过增加激光功率来改变正面的钥匙孔现象进而减少锯齿状并不明显。并且在强激光作用下形成一个充满等离子体的钥匙孔,在钥匙孔中等离子体对激光的吸收率会大大增加,进入孔中激光的能量基本上大部分被等离子体吸收^[8]。如果使用图7中a部分对蓝宝石进行切割,在靠近蓝宝石正面的钥匙孔中,由于等离子体浓度较大,等离子体的高温可使得蓝宝石更多地去掉,这也造成正面边缘锯齿状变得严重,在背面边缘处温度过高,热应力梯度过大,造成崩边更加严重。

图6是激光切割蓝宝石晶片断口形貌图,从图6可以看出,在切缝底部出现钥匙孔现象,并且钥匙孔之间的间距相同,呈均匀分布。经过计算,两个钥匙孔之间的间距为两个脉冲的间距。

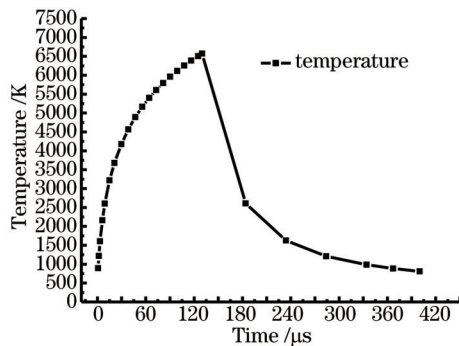


图5 表面温度与时间的关系

Fig.5 Relationship between surface temperature and heating time

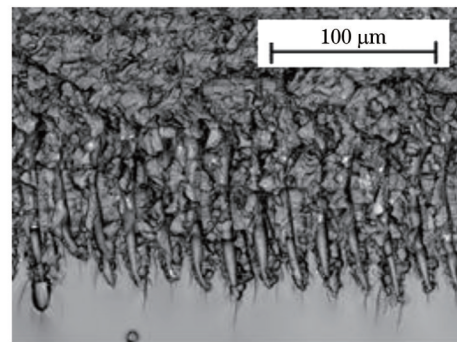


图6 激光切割蓝宝石晶片断口形貌图

Fig.6 Topography of cross-section for sapphire after laser cutting

激光加工出的钥匙孔尖端部分是熔渣形成部分,同时也是材料的热应力集中区,对于蓝宝石试样厚度大于钥匙孔深度的情况下,深处的热应力会很大,使得蓝宝石未切透的部分在热应力作用下开裂^[10],若样件轮廓为直线,会沿着切割线开裂,使得切割下表面非常光滑,崩边较小甚至无崩边,但是对于切割弧形轮廓样件,则无法实现切割。需要适当增大激光功率,使得钥匙孔尖端超出蓝宝石的下表面,且使用图7中b部分对蓝宝石进行切割。

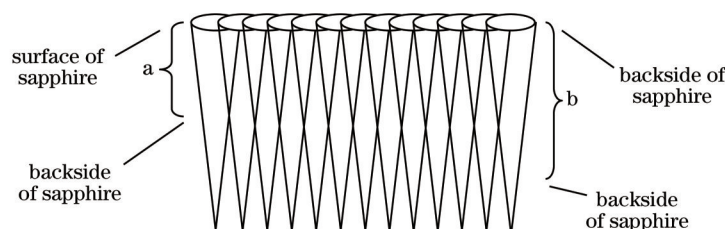


图7 激光切割蓝宝石晶片断口形貌示意图

Fig.7 Schematic diagram of cross-section for sapphire after laser cutting

3.2 激光切割速度对蓝宝石加工质量的影响

图8表示的是激光切割速度对激光切割蓝宝石崩边尺寸的影响,激光重复频率为 1 kHz ;激光能量密度

为 $6.3 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$; 辅助气体为 N_2 ; 气压为 1 MPa ; 脉宽为 0.13 ms , 切割速度为 $1 \sim 13 \text{ mm/s}$ 。由于激光重复频率的限制, 为避免切割边缘存在锯齿状现象, 降低激光加工速度, 从而改变激光光斑重叠率。同时, 考虑到前激光脉冲与蓝宝石材料间的热积累影响, 故对激光切割速度对蓝宝石加工质量的影响进行研究。切割速度直接影响了激光与材料间的相互作用时间。当切割速度增加时, 作用时间减小, 材料的气化量减少, 故切割边缘锯齿状随着减小。

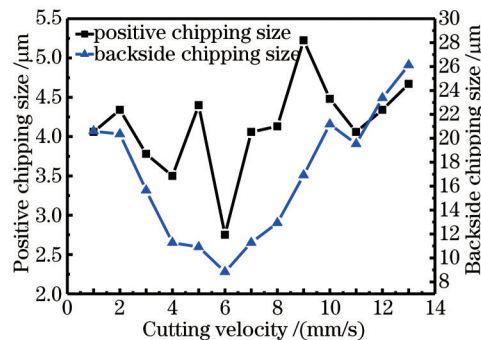


图8 切割速度对崩边情况的影响

Fig.8 Effect of cutting velocity on chipping size of laser cutting sapphire

从图8中看出, 切割速度对蓝宝石正背面崩边尺寸均有一定的影响, 在正面和背面崩边尺寸上, 整体趋势为随切割速度的增加, 崩边尺寸先减小后增加, 这是由于切割速度影响光斑重叠率, 光斑重叠率过高, 激光脉冲在蓝宝石表面的作用时间越长, 热积累越多, 产生崩边尺寸较大, 光斑重叠率过低造成光斑近似分离, 切割边缘出现较大锯齿状。图9为切割速度对蓝宝石正面崩边尺寸的影响。

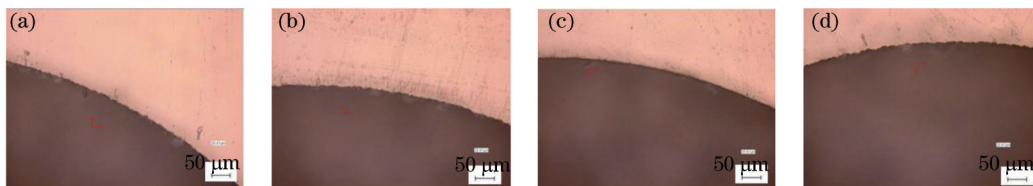


图9 切割速度对蓝宝石正面崩边尺寸的影响。(a) 1 mm/s; (b) 3 mm/s; (c) 6 mm/s; (d) 9 mm/s

Fig.9 Effect of cutting velocity on positive chipping size of laser cutting sapphire.

(a) 1 mm/s; (b) 3 mm/s; (c) 6 mm/s; (d) 9 mm/s

从图8和图9中可以看出, 由于切割速度在 $1 \sim 13 \text{ mm/s}$, 光斑重叠率激光的切割速度对正面崩边的影响不大, 在 $2 \sim 5 \text{ μm}$ 之间。当速度为 6 mm/s 时, 正面崩边尺寸最小为 2.75 μm , 光斑重叠率为 85% 左右。图10为切割速度对背面崩边尺寸的影响, 从图10背面崩边情况看, 在切割速度为 6 mm/s 时背面崩边在 10 μm 以下, 故激光切割速度在 $5 \sim 7 \text{ mm/s}$ 为最佳。

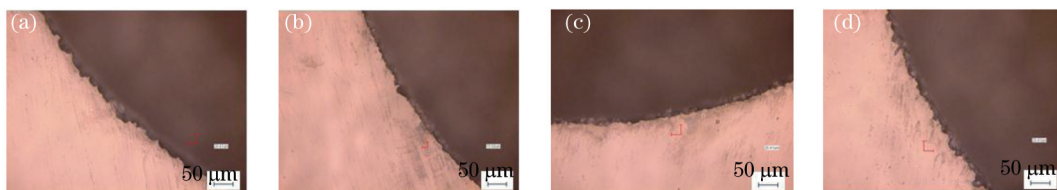


图10 速度对蓝宝石背面影响效果图。(a) 1 mm/s; (b) 3 mm/s; (c) 6 mm/s; (d) 9 mm/s

Fig.10 Effect of cutting velocity on backside chipping size of laser cutting sapphire.

(a) 1 mm/s; (b) 3 mm/s; (c) 6 mm/s; (d) 9 mm/s

3.3 重复频率对蓝宝石加工质量的影响

图11表示的是激光重复频率对激光切割蓝宝石崩边尺寸的影响, 辅助气体压力为 1 MPa ; 激光能量密度为 $6.3 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$; 辅助气体为 N_2 ; 切割速度为 6 mm/s ; 脉宽为 0.13 ms , 由于重复频率过高会使激光能量密度降低, 当降低到一定程度后, 蓝宝石的穿透性切割较为困难, 作用时间影响材料受热应力的影响造成的崩边现象。重复频率较高, 激光单脉冲能量将会降低, 边缘的热积累减小^[11], 对蓝宝石去除率有所降低, 故重复频率选为 $0.7 \sim 2.1 \text{ kHz}$ 。

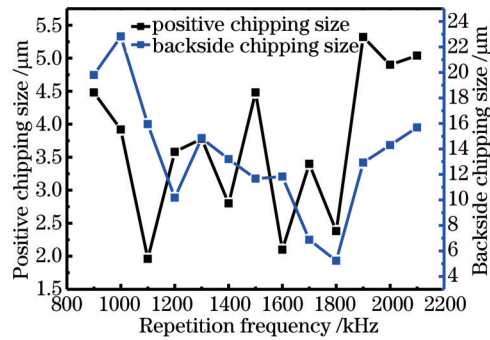


图 11 重复频率对蓝宝石边缘崩边情况的影响

Fig.11 Effect of repetition frequency on chipping size of laser cutting sapphire

从图 11 中可以看出,重复频率的变化,正面崩边尺寸存在一定的小波动,基本上在 3~5 μm ;从图 12 可以看出,背面崩边影响较大,在重复频率为 1.8 kHz 时,崩边尺寸达到最低,达到 5 μm 左右,并且锯齿状切口得到改善。由于加工过程中,脉宽不变,当重复频率过高时,温度积累过多,造成损伤扩大化,进而造成崩边现象严重,故激光重复频率在 1.6~1.8 kHz 为最佳。

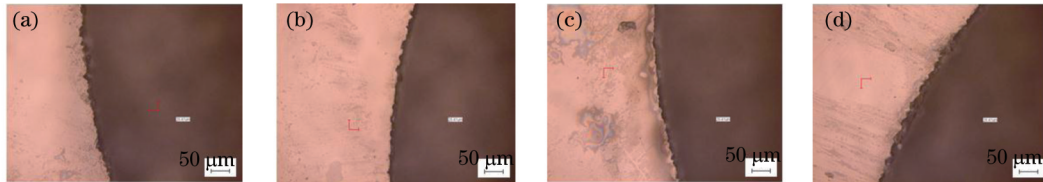


图 12 重复频率对蓝宝石背面影响效果图。(a) 1.3 kHz; (b) 1.5 kHz; (c) 1.8 kHz; (d) 2.0 kHz

Fig.12 Effect of repetition frequency on backside chipping size of laser cutting sapphire.

(a) 1.3 kHz; (b) 1.5 kHz; (c) 1.8 kHz; (d) 2.0 kHz

3.4 辅助气体压力对蓝宝石加工质量的影响

由于激光的高能量,激光与辅助气体相互作用,使得辅助气体发生电离,而电离产生的一定的等离子体会对激光产生等离子体屏蔽效应,而屏蔽的效果与保护气体的第一电离能存在着一定的关系,保护气体的第一电离能越高,对激光的屏蔽效果越小。 O_2 的第一电离能为 13.618 eV, N_2 的第一电离能是 14.53 eV; O_2 形成的等离子体对激光的屏蔽效应较强, N_2 相对较低,因而蓝宝石对激光的能量吸收较强,蓝宝石表面的等离子体的温度高,激光与等离子体作用,使蓝宝石晶体表面温度过高迅速气化甚至爆沸,脱离蓝宝石基体并使蓝宝石冷却的液体回落到蓝宝石表面形成粉末^[12]。

图 13 表示的是辅助气体压力对激光切割蓝宝石崩边尺寸的影响,激光重复频率为 1.8 kHz;激光能量密度为 $6.3 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$;辅助气体为 N_2 ;切割速度为 6 mm/s;脉宽为 0.13 ms,辅助气体压力变化范围为 0.6~1.0 MPa。

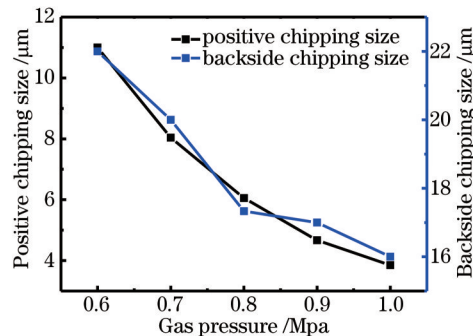


图 13 辅助气体压力对蓝宝石边缘崩边情况的影响

Fig.13 Effect of the assistant gas pressure on chipping size of laser cutting sapphire

在辅助气体为 N_2 的前提下,辅助气体的压力对切割效果也有明显的影响,辅助气体的压力主要影响切割速度和挂渣量。适当增大气体压力,由于气流动量增大,可提高排渣能力,进而提高切割速度和切割质量。图 14 和图 15 为辅助气体压力对蓝宝石正面和背面加工质量影响形貌图。

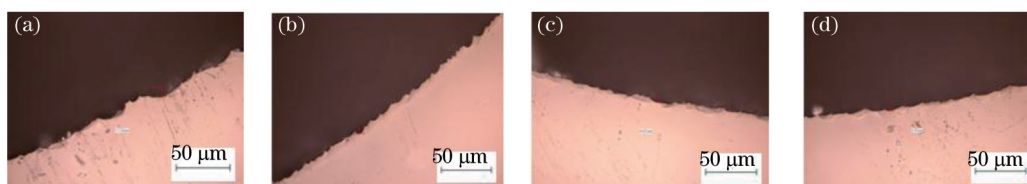


图 14 辅助气体压力对蓝宝石正面影响。(a) 0.6 MPa; (b) 0.8 MPa; (c) 0.9 MPa; (d) 1 MPa

Fig.14 Effect of the assistant gas pressure on positive chipping size of laser cutting sapphire. (a) 0.6 MPa; (b) 0.8 MPa; (c) 0.9 MPa; (d) 1 MPa

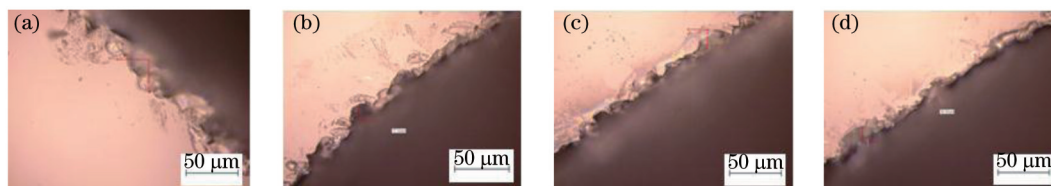


图 15 辅助气体压力对蓝宝石背面影响。(a) 0.6 MPa; (b) 0.8 MPa; (c) 0.9 MPa; (d) 1 MPa

Fig.15 Effect of the assistant gas pressure on backside chipping size of laser cutting sapphire. (a) 0.6 MPa; (b) 0.8 MPa; (c) 0.9 MPa; (d) 1 MPa

从图 14 和图 15 可以看出,辅助气体压力越大,正面和背面的崩边尺寸越少,且在背面的挂渣现象有一定的改善。实验结果表明,使用较高的气压能获得较好的切割质量,这也与较多的激光切割薄板材料所需要的气体压力较高有关,但是不能过高,气压过高,会在蓝宝石表面形成涡流,削弱气流去除材料的能力^[13],故辅助气体压力在 0.9 MPa 为最佳。

4 结 论

采用波长为 1070 nm 的光纤激光对蓝宝石基片进行切割加工,研究加工后的特征尺寸和微观形貌,分析其加工机理以及不同工艺参数对蓝宝石切割质量的影响,得出以下结论:

1) 激光与 N_2 相互作用, N_2 被击穿以后形成等离子体;激光与等离子体的相互作用过程中,形成钥匙孔现象;钥匙孔的深度对蓝宝石背面切割质量影响较大;综合考虑理论与实验结果,激光能量密度选择为 $5.7\sim 6.3\times 10^9 J/cm^2$;

2) 根据激光切割速度与激光光斑重叠率的关系,以及对切割边缘锯齿状的影响;重叠率较低时,光斑处于分离状态,锯齿状较明显,但是较小时,由于热作用明显导致崩边较严重,所以切割速度为 6 mm/s 最佳;

3) 激光重复频率较低时,激光与蓝宝石的作用时间较长,背面崩边严重,所以重复频率选择为 1.8 kHz;

4) 在 N_2 的辅助下,激光作用后在蓝宝石下表面形成粉末碎屑,较易清除;辅助气体的压力对蓝宝石背面挂渣量有较大影响,气压较小时,碎屑不易清除,气压较大时,容易形成涡流,不利于碎屑清除,实验结果表明:辅助气体压力在 0.9 MPa 时为最佳。

参 考 文 献

- 1 Wang G, Zuo H, Zhang H, *et al.*. Preparation, quality characterization, service performance evaluation and its modification of sapphire crystal for optical window and dome application[J]. *Materials and Design*, 2010, 31(2): 706–711.
- 2 Akselrod M S, Bruni F J. Modern trends in crystal growth and new applications of sapphire[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2012, 360: 134–145.
- 3 Juodkakis S, Nishimura K, Misawa H. In-bulk and surface structuring of sapphire by femtosecond pulses[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(15): 6539–6544.
- 4 Qi L, Nishii K, Yasui M, *et al.*. Femtosecond laser ablation of sapphire on different crystallographic facet planes by single and multiple laser pulses irradiation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(10): 1000–1007.
- 5 Han J, Li C, Zhang M, *et al.*. An investigation of long pulsed laser induced damage in sapphire[J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(3): 339–344.
- 6 Lan H, Wang W, Shanguan Y, *et al.*. Fundamental studies on high power fiber laser cutting performance of 30 mm thick carbon steel plate[C]. 2011 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST), 2011, 1: 6–11.

- 7 Salleo A. High-Power Laser Damage in Fused Silica[M]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2001: 270.
- 8 Li Changqing, Wu Wanliang, Zuo Hongbo, *et al.*. Analysis of fracture surface for sapphire cut by long pulse laser[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2010, 39(4): 997-1001.
李长青, 武万良, 左洪波, 等. 长脉冲激光切割蓝宝石的断口分析[J]. *人工晶体学报*, 2010, 39(4): 997-1001.
- 9 Xie Xiaozhu, Huang Xiandong, Chen Weifang, *et al.*. Study on scribing of sapphire substrate by pulsed green laser irradiation[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1203010.
谢小柱, 黄显东, 陈蔚芳, 等. 脉冲绿激光划切蓝宝石基片过程研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1203010.
- 10 Ohmura E, Kawahito Y, Fukumitsu K, *et al.*. Analysis of internal crack propagation in silicon due to permeable pulse laser irradiation: study on processing mechanism of stealth dicing[C]. *International Society for Optics and Photonics Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies*, 2010: 799603.
- 11 Guan Bangui, Liao Jianhong, Qin Yanfu, *et al.*. Experimental study of cutting 0.125 mm stainless steel sheet with fiber laser[J]. *Applied Laser*, 2009, 29(2): 92-95.
官邦贵, 廖健宏, 秦炎福, 等. 0.125 mm厚不锈钢薄板光纤激光精密切割实验研究[J]. *应用激光*, 2009, 29(2): 92-95.
- 12 Miotello A, Kelly R. Critical assessment of thermal models for laser sputtering at high fluences[J]. *Appl Phys Lett*, 1995, 67(24): 3535-3537.
- 13 Feng Wenjie, Qin Fengdong, Chen Yingying, *et al.*. Analysis of technological parameter for laser cutting stainless steel sheet[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2011, (11): 191-192.
冯文杰, 秦丰栋, 陈莹莹, 等. 激光切割不锈钢板工艺参数研究[J]. *机械设计与制造*, 2011, (11): 191-192.

栏目编辑: 张浩佳