

# 96%氧化铝陶瓷基板的激光切割划片及工艺优化

孙智龙 蔡志祥\* 杨伟

深圳光韵达光电科技股份有限公司, 广东 深圳 518000

**摘要** 介绍了激光氧化铝陶瓷基板划片的基本原理,由三维固体中的热传导微分公式描述激光与材料的热过程,对激光加工的氧化铝陶瓷基板表面的损伤阈值进行了计算分析。利用相干公司400 W的E400射频CO<sub>2</sub>激光器、IPG公司YLR-150/1500-QCW-AC 150 W准连续型光纤激光器搭建了激光加工平台,对1 mm厚度内的96%氧化铝陶瓷基板进行了切割和划片加工实验。实验中,通过在陶瓷基板表面涂抹吸收剂,利用氮气作为辅助气体,解决了光纤激光器在连续波模式下加工时由于氧化铝陶瓷高反特性出现的切割和划片断点问题。实验表明,当光纤激光器工作在准连续波模式时,实现了无需对陶瓷表面进行涂吸收剂处理,直接用空气作为辅助气体对1 mm厚度内96%氧化铝陶瓷基板的切割和划片。

**关键词** 激光光学;激光陶瓷划片;氧化铝陶瓷基板;激光加工;准连续光纤激光器;射频CO<sub>2</sub>激光器

中图分类号 O436; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.101404

## Laser Cutting and Scribing of 96% Alumina Ceramic Substrate and Parameter Optimization

Sun Zhilong Cai Zhixiang Yang Wei

*<sup>1</sup>Shenzhen Sunshine Laser & Electronics Technology Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong 518000, China*

**Abstract** Processing of alumina ceramic substrate by laser scribing is introduced, and alumina ceramic surface gasification threshold of laser processing is analyzed based on the three-dimensional heat conduction model. A laser processing experimental platform used for alumina ceramic substrate is built with a Coherent E400 radio frequency CO<sub>2</sub> laser and an IPG YLR-150/1500-QCW-AC fiber laser. 96% alumina ceramic substrate with the thickness within 1 mm is used for cutting and scribing experiments. The processing results are compared. During the experiment, in fiber laser continuous wave mode, breaking problems during cutting and scribing are solved by using absorbent on the ceramic surface and nitrogen as auxiliary gas. The experimental results show that 96% alumina ceramic substrate with thickness within 1 mm can be processed by cutting and scribing by using air as auxiliary gas without absorbent and with appropriate technology parameters in the qwas-continuous wave mode.

**Key words** laser optics; laser ceramic scribing; alumina ceramic substrate; laser processing; qwas-continuous wave fiber laser; radio frequency CO<sub>2</sub> laser

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 350.3850

## 1 引言

陶瓷基板与金属和树脂基片<sup>[1-2]</sup>相比,具有突出的电绝缘性能、优异的高频特性、较好的导热率、热膨胀率、与各电子元件兼容、化学性质稳定等优点,在基片领域的应用越来越广泛。特别是近年来,通讯电子领域对超高频要求越来越高,频率达到吉赫兹量级,传统的基片很难达到要求,未来陶瓷在高频集成电路基板和多层布线基板领域将大有可为。氧化铝陶瓷是现在应用最为广泛的陶瓷之一,我国氧化铝陶瓷基片的年需求量已经超过 $10^7$  m<sup>2</sup>,且每年以10%~20%的幅度递增<sup>[3]</sup>。随着对氧化铝陶瓷基板加工精度和效率要求的提高,传统机械式加工方式<sup>[4-7]</sup>已经不能满足需求。而激光加工技术具有非接触性、柔性化、效率高、易实现数

收稿日期: 2015-02-04; 收到修改稿日期: 2015-05-14; 网络出版日期: 2015-09-23

作者简介: 孙智龙(1988—),男,硕士,工程师,主要从事激光加工设备开发及材料加工工艺等方面的研究。

E-mail: zlsun@sunshine-laser.com

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

字化控制、精度高等优点,成为现今陶瓷加工最理想的手段之一。

氧化铝陶瓷激光加工中<sup>[8-11]</sup>,在基板切割和划片领域 CO<sub>2</sub>激光器和光纤激光器相比其他种类激光器,容易实现高功率,价格相对便宜,加工维护成本相对较低。氧化铝陶瓷对 10.6 μm 波长的 CO<sub>2</sub>激光吸收率非常高(80%以上),使得 CO<sub>2</sub>激光器被广泛应用于氧化铝陶瓷基片加工中<sup>[12-14]</sup>。但是 CO<sub>2</sub>激光加工陶瓷基板时聚焦光斑较大,因而限制了加工精度。相比而言,光纤激光陶瓷基板加工时允许得到更小的聚焦光斑,划片线宽更窄,切割口径更小,更符合精密加工要求。但是氧化铝陶瓷基板对 1.06 μm 波长附近的激光反射率很高,超过 80%<sup>[15]</sup>,导致加工时常常会产生断点、断线、切割深度不一致等问题。本文利用 CO<sub>2</sub>激光器和新型的准连续波(QCW)光纤激光器搭建陶瓷基板加工平台,进行工艺实验,对加工工艺进行优化。

## 2 激光陶瓷基板加工工艺参数选择

### 2.1 激光陶瓷划片原理

激光划片又叫划痕切割或控制断裂切割,其机理是激光光束通过导光系统聚焦到氧化铝陶瓷基板表面,发生放热反应产生高温,烧蚀、融化并气化陶瓷划线区域,在陶瓷表面形成相互衔接的盲孔孔洞(沟槽)。若沿划线区施加应力,由于应力集中,材料很容易准确地沿划片线路折断,完成分片。图 1 为陶瓷激光划片的原理图,图 2 为氧化铝陶瓷表面划片孔洞放大图及划片后的陶瓷断面和截面形貌图。

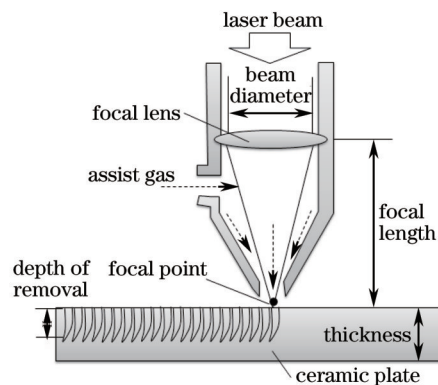


图 1 激光陶瓷划片原理图

Fig.1 Schematic diagram of laser alumina ceramic scribing

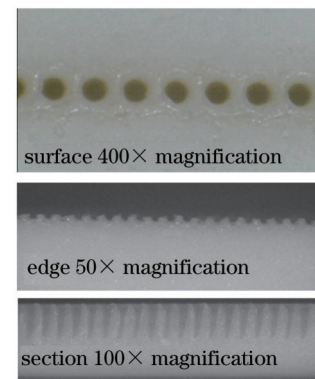


图 2 划片陶瓷表面及断裂形貌

Fig.2 Surface and fracture morphology of scribed ceramic

陶瓷划片盲孔孔洞由单个脉冲加工产生,即一个孔洞对应一个脉冲,一般划片盲孔的深度达到加工陶瓷厚度的 1/4~1/3 即可较好地完成分片。假设每个脉冲打出的孔洞直径为  $D_1$ ,外围包含热影响区直径为  $D_2$ ,一般陶瓷划片的重叠率按  $D_2$  来计算,为 0~50%,这样每个脉冲能量造成的热扩散区域相互连接,方便分片。因此,假设划片时激光器的频率为  $\nu$ ,则可以推导出陶瓷划片的最大速度  $v_{\max}$  和最小速度  $v_{\min}$  分别为  $v_{\max} = \nu D_2$ ,  $v_{\min} = \nu D_2 / 2$ 。

### 2.2 工艺参数选择依据

激光划片时,聚焦光束能量被陶瓷表面部分吸收,吸收率随陶瓷表面温度上升而增大,使得陶瓷片表层聚焦光斑周围很小的区域内产生高达二、三千摄氏度的高温,陶瓷表面气化形成有黑体效应的孔洞,有效吸收后续激光的能量。陶瓷基片表面材料被气化冲击波带走,同时该冲击波在陶瓷基片内部还产生定向机械应力,形成小裂纹。表 1 为氧化铝陶瓷的主要热性能参数<sup>[12]</sup>。

表 1 氧化铝陶瓷的主要热性能参数

Table 1 Primary thermal performance parameters of alumina ceramics

Parameter	Value
Density $/(g \cdot cm^{-3})$	3.99
Heat capacity $/(J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$	1.0~1.52 (at 273 K~3000 K)
Thermal expansion coefficient $/(10^{-6} K^{-1})$	5~7.5 (at 293 K~773 K)
Gasification point /°C	2980
Melting point /°C	2050±10
Thermal diffusivity $/(cm^2 \cdot s^{-1})$	1.0~0.012 (at 273 K~3000 K)
Thermal conductivity $/[W/(m \cdot K)]$	0.07

激光加工和划片过程中,激光与材料的热作用过程可以由三维固体中的热传导微分方式描述:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{\rho c}, \quad (1)$$

式中  $\rho$  为材料密度,单位为  $\text{kg/m}^3$ ,  $c$  为比热容,单位为  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,  $T$  为温度,单位为  $\text{K}$ ,  $t$  为时间,单位为  $\text{s}$ ,  $K$  为材料的热传导系数,单位为  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $\alpha = K/\rho c$  为热扩散系数,单位为  $\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $Q$  为材料单位体积内输入的热量,单位为  $\text{J}$ 。

对上述模型进行简化处理,假设聚焦光斑能量分布均匀,材料表面受热均匀,各种物理性质不随温度变化,激光脉冲波形为矩形,功率密度不随时间发生变化,忽略热传导过程中的辐射和对流,只考虑材料表面向内部的热传导。对上述偏微分方程进行简化求解,最终可以得到材料表面熔化和气化的激光脉冲能量密度阈值公式<sup>[16]</sup>:

$$\Delta E_0 = I_0 \tau = \frac{\rho c (T_m - T_0) \sqrt{\alpha \pi \tau}}{2(1-R)}, \quad (2)$$

$$\Delta E_1 = I_1 \tau = \frac{2\rho L_b \sqrt{\alpha \tau}}{1-R}, \quad (3)$$

式中  $R$  为材料表面的激光反射百分比,最大值为 1,  $T_m$  和  $T_0$  分别为材料熔点和初始温度,单位为  $\text{K}$ ,  $\tau$  为激光的脉宽,单位为  $\text{s}$ 。  $I_0$  和  $\Delta E_0$  为材料熔化的功率密度和能量密度阈值,  $I_1$  和  $\Delta E_1$  为材料气化的功率密度和能量密度阈值,  $L_b$  为气化热。取脉宽  $\tau$  为  $200 \mu\text{s}$ ,  $T_0 = 297 \text{ K}$ ,  $R = 0$ , 代入氧化铝陶瓷基板材料的相关参数,可以计算得到  $I_0 = 1.75 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ ,  $\Delta E_0 = 33.81 \text{ J/cm}^2$ ,  $I_1 = 3.38 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ ,  $\Delta E_1 = 676 \text{ J/cm}^2$ 。

根据(2)式和(3)式计算不同脉宽下氧化铝陶瓷基板的熔化和气化阈值  $I_0$ ,  $\Delta E_0$ ,  $I_1$ ,  $\Delta E_1$ , 假设  $R = 0$ , 可以得到图3所示曲线。

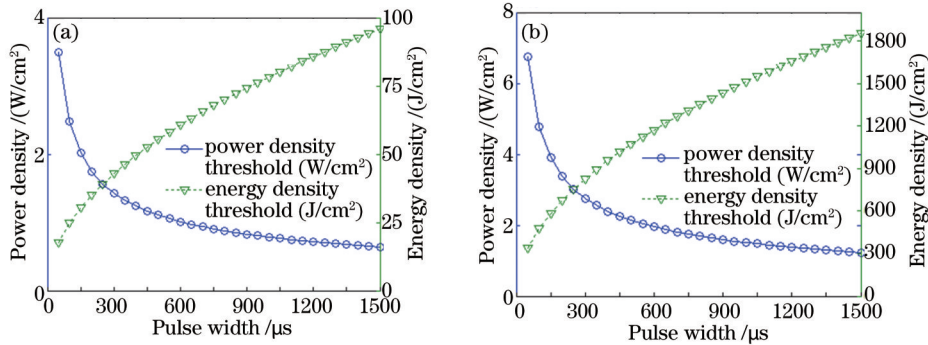


图3 氧化铝陶瓷基板表面熔化和气化阈值曲线。(a) 熔化阈值; (b) 气化阈值

Fig.3 Melting and gasification threshold curves of alumina ceramic substrate. (a) Melting threshold; (b) gasification threshold

由图3可以看出,激光加工氧化铝陶瓷时,陶瓷表面熔化和气化所需要的峰值功率密度与脉宽成反比,所需要的能量密度与脉宽成正比。

在激光脉冲陶瓷划线物理过程中,近似认为基片吸收的激光能量及陶瓷放热反应能量全部用于熔化和气化,且其他热传导、辐射、对流热损失忽略不计。则可以通过能量平衡来推导激光陶瓷划片中相关的参数关系<sup>[17-19]</sup>:

$$P_l / v h = b \rho [c \Delta T_1 + L + \phi (c \Delta T_2 + L_b) - Q_R], \quad (4)$$

式中  $P_l$  为陶瓷基板吸收的激光功率,  $v$  为划片速度,  $h$  为划缝深度,  $b$  为划线宽度,  $\Delta T_1$  为环境温度与熔点的温度差,  $\Delta T_2$  为熔点与沸点温度差,  $L$  和  $L_b$  分别为熔化热和汽化热,  $\phi$  为材料熔化后再气化的质量百分比,  $Q_R$  为单位质量被划材料的反应热。对于同一批次陶瓷基板,(4)式右端为常数,即

$$P_l / v h = \text{constant}. \quad (5)$$

由(5)式可知,影响划片速度和划缝深度的主要因素是激光功率和材料特性,划片速度与陶瓷表面有效功率密度成正比,与材料密度成反比,与划缝深度成正比。

### 3 加工平台及实验

#### 3.1 陶瓷基板加工平台

应用相干公司功率为 400 W、型号为 DIAMOND E400 的射频 CO<sub>2</sub> 激光器, IPG 公司型号为 YLR-150/1500-QCW-AC 的 150 W 准连续型光纤激光器搭建陶瓷基板激光加工平台, 实验光路示意图如图 4 所示。

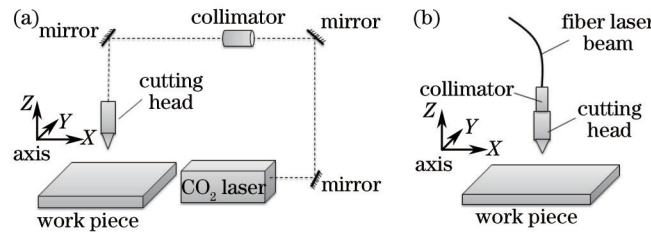


图 4 陶瓷基板加工平台光路示意图。(a) CO<sub>2</sub> 陶瓷加工平台; (b) 光纤陶瓷加工平台

Fig.4 Light paths of ceramic substrate processing platforms. (a) CO<sub>2</sub> laser ceramic processing platform; (b) fiber laser ceramic processing platform

YLR-150/1500-QCW-AC 激光器能够在 CW(连续)和 QCW(准连续)模式下工作, 在 CW 模式下功率可达到 250 W, QCW 模式下平均功率可达到 150 W, 最大峰值功率可达到 1500 W, 基本激光参数如表 2 所示。

表 2 YLR-150/1500-QCW-AC 激光参数

Table 2 Laser parameters of YLR-150/1500-QCW-AC

Parameter	CW mode	QCW mode
Wavelength /nm	1070	1070
Maximum average power /W	250	150
Maximum peak power /W	250	1500
Duty cycle limitation	-	Less than 50%
Pulse width limitation /ms	-	0.2~50
Maximum pulse energy /J	-	15

根据(2)式和(3)式, 假设  $R = 0$ , 计算不同聚焦光斑大小、不同加工脉宽下氧化铝陶瓷基板表面的阈值峰值功率曲线, 如图 5、6 所示。很显然聚焦光斑越小, 加工时熔化和气化峰值功率阈值以及单脉冲能量也越小。

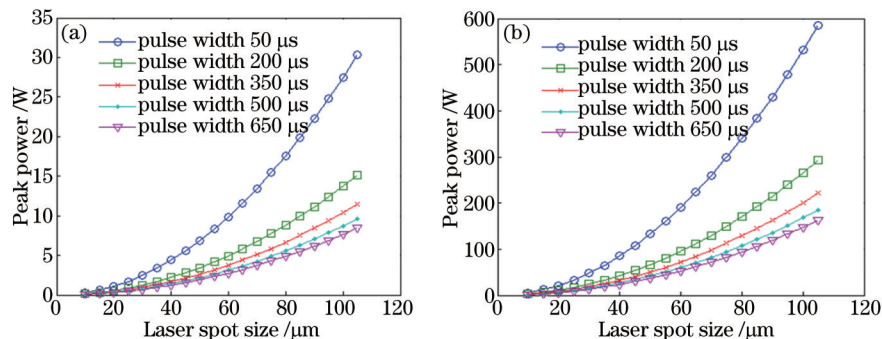


图 5 氧化铝陶瓷表面峰值功率阈值。(a) 熔化; (b) 气化

Fig.5 Peak power threshold of alumina ceramic. (a) Melting; (b) gasification

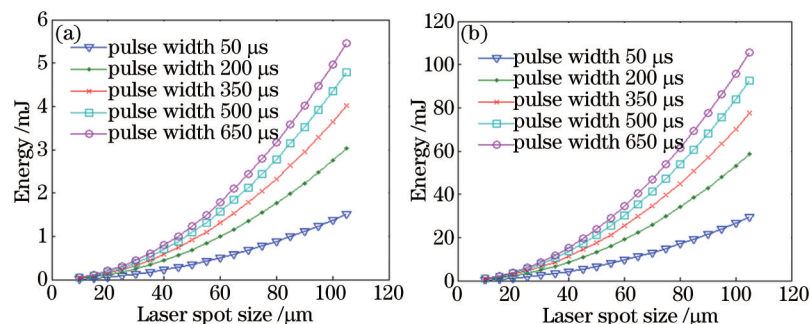


图 6 氧化铝陶瓷表面能量阈值。(a) 熔化; (b) 气化

Fig.6 Pulse energy threshold of alumina ceramic. (a) Melting; (b) gasification

CO<sub>2</sub>激光加工氧化铝陶瓷基板时,吸收率一般大于80%,当聚焦光斑达到60 μm,一般峰值功率大于250 W就能够达到陶瓷表面气化阈值。氧化铝陶瓷基板对光纤激光反射率比较高,吸收率通常为10%~20%,当聚焦光斑为20 μm时,一般峰值功率密度大于150 W就能够达到陶瓷气化的阈值。实际加工时,为了得到较高的材料去除率,在热影响区可接受范围内,激光参数可以设置为气化阈值的数倍。

### 3.2 氧化铝陶瓷基板划片切割实验

采用的实验平台中CO<sub>2</sub>激光聚焦光斑设计值为60 μm,按照陶瓷表面对10.6 μm激光波长吸收率80%计算,得到图7所示阈值曲线。

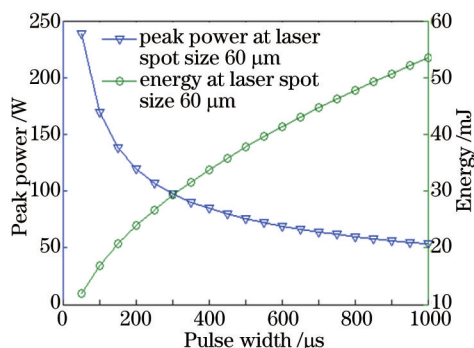


图7 陶瓷表面气化阈值随脉宽的变化曲线

Fig.7 Surface gasification threshold versus pulse width of ceramic

图7可以作为加工时参数选择的参考,激光加工参数的设定值应该在曲线上方所示范围才能达到陶瓷表面气化阈值。利用搭建的实验平台,对1 mm厚度的96%氧化铝陶瓷基板进行切割和划片实验。实验平台中采用的CO<sub>2</sub>激光器峰值功率一般在1000~1500 W范围内,远大于图7计算的数值。因为峰值功率太大,实验中加工陶瓷时容易让陶瓷表面发黑,划片效果较差。实验发现,在光路中加入光阑将加工的峰值功率密度减小到原来的1/3左右时,划片效果最好,此时峰值比阈值高出很多,且单脉冲能量能够保持在图7所示曲线之上。实验结果表明,用空气作为辅助气体,无需对陶瓷做表面处理,CO<sub>2</sub>实验平台能够很好地对1 mm厚度的陶瓷基板进行切割和划片,切割速度大于5 mm/s,划片速度大于90 mm/s。图8为该CO<sub>2</sub>激光器实验平台切割和划片实物图,切割参数如下:频率500 Hz,占空比30%,切割速度6 mm/s,加速度500 mm/s<sup>2</sup>,气压0.7 MPa,喷嘴口径1.5 mm,距离切割面1.5 mm。划片参数如下:频率800 Hz,占空比30%,速度100 mm/s,加速度5000 mm/s<sup>2</sup>,气压0.4 MPa,喷嘴口径1.5 mm,距离切割面1.5 mm。

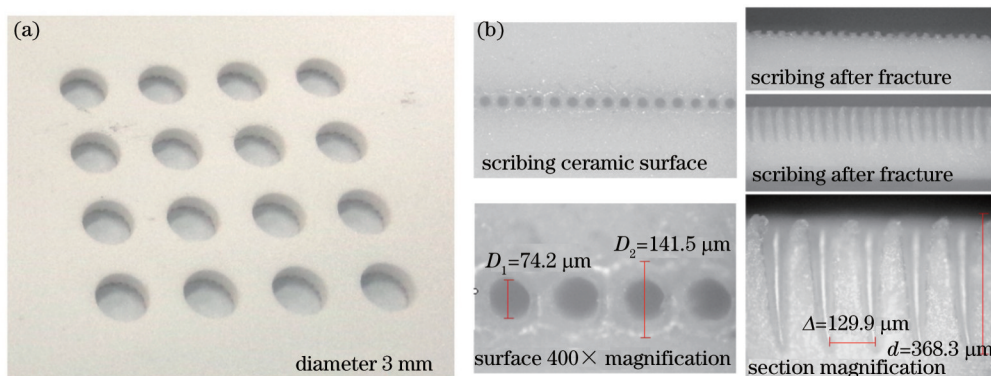


图8 1 mm厚度氧化铝陶瓷切割与划片。(a) 切割小孔;(b) 划片测量

Fig.8 Cutting and scribing of 1 mm thick alumina ceramic. (a) Cutting holes; (b) scribing measurement

光纤激光聚焦光斑设计值为20 μm,陶瓷表面对光纤激光波长吸收率按15%计算,得到如图9所示阈值曲线。

选择激光加工参数时,为了达到氧化铝陶瓷表面的破坏阈值,需要将峰值功率脉宽参数设置在图9所示两条曲线上方的范围内。一旦陶瓷表面气化形成孔洞和痕迹,因为黑体吸收效应以及表面性质的变化导致材料对激光吸收率迅速增大,远大于之前的15%,从而使得此时的激光峰值和单脉冲能量远远高于阈值,导致聚焦高斯光斑之外的区域也能够达到氧化铝陶瓷基板的气化阈值,最终形成的孔洞要比聚焦光斑大出许多。

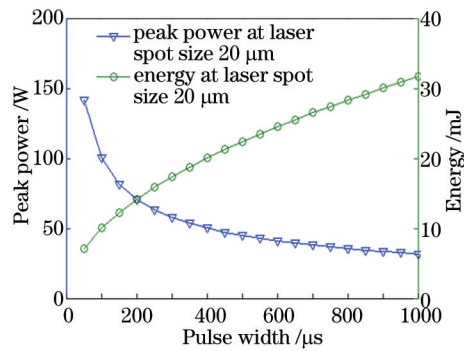


图9 氧化铝陶瓷表面气化阈值随脉宽的变化曲线

Fig.9 Surface gasification threshold versus pulse width of alumina ceramic

用空气作为辅助气体,不对陶瓷做任何表面处理。实验结果表明,光纤激光器在CW模式下,当参数设置在图9所示曲线下方或者上方附近范围切割和划片时常常会出现断点、断线现象,如图10所示,划片孔洞直径约为 $27\ \mu\text{m}$ 。切割断点和断线导致切割部分无法掉落,分片时导致陶瓷炸裂,在正常生产加工中是不允许出现的。加工参数设置在图9所示曲线上方越远,断点和断线现象越少,当激光器峰值功率调至曲线计算值的2倍时,切割断点和断线现象极少出现,但依然不能够完全消除。

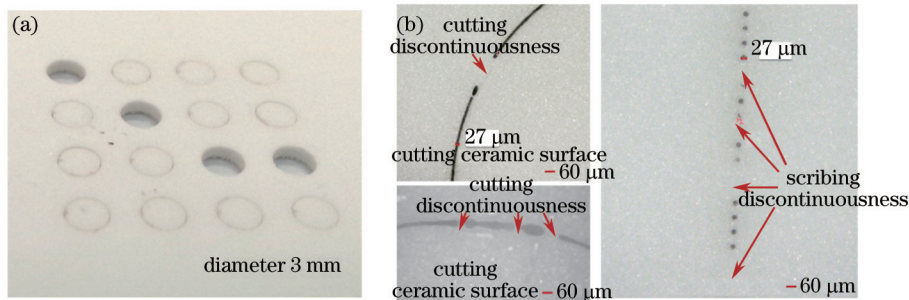


图10 1 mm厚度氧化铝陶瓷基板光纤连续模式下加工断点现象。(a) 切割小孔;(b) 切割和划片断点

Fig.10 Breaking on 1 mm thick alumina ceramic substrate processed with fiber laser CW mode. (a) Cutting holes; (b) breaking of scribing and cutting

经初步分析可知,断点和断线可能是由于陶瓷表面吸收率低,吸收不均匀导致的。实验中,通过在陶瓷表面涂抹一定的带颜色吸收剂(有色墨水和酒精按比例混合而成),减小陶瓷表面对激光的反射,在很大程度上减少了断点和断线的出现。同时,用氮气替代空气作为辅助气体进行加工,当加工参数设置在图9所示曲线上方1.5倍计算值以上时,基本上消除了切割和划片时的断点和断线现象,1 mm氧化铝陶瓷基板切割速度大于 $10\ \text{mm/s}$ ,划片速度大于 $150\ \text{mm/s}$ 。但是陶瓷切割截面和划片截面上出现了发黑的迹象,难以消除,原因可能是用氮气加工时生成了一定的氮化铝附着在陶瓷加工截面上,如图11所示,划片孔洞直径约为 $27\ \mu\text{m}$ 。

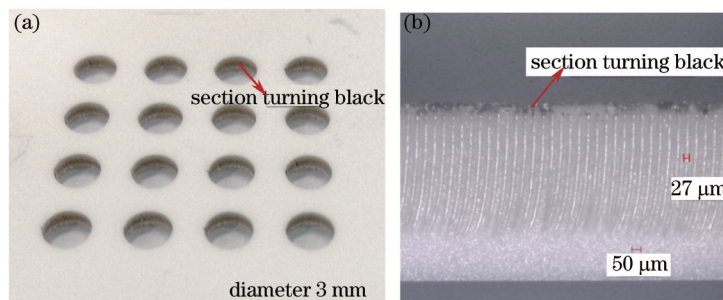


图11 用氮气作为辅助气体加工氧化铝陶瓷基板截面发黑。(a) 切割小孔;(b) 划片截面

Fig.11 Black section of alumina ceramic substrate using nitrogen as auxiliary gas for processing. (a) Cutting holes; (b) section of scribing

相比CW模式而言,QCW模式下能够实现更高的峰值功率,使聚焦光斑的峰值功率密度大幅度提升。QCW模式下峰值功率最大可以调节到 $1500\ \text{W}$ 。在实验中,设置激光峰值功率1.5~4倍于图9所示曲线的峰

值功率,同时保证单脉冲能量在曲线之上,利用空气作为辅助加工气体,无需在陶瓷表面涂抹吸收剂,实现大于150 mm/s的划片速度和大于7 mm/s的切割速度,切割面和划片截面没有发黑迹象,无断点、断线现象,如图12所示。采用切割参数如下:峰值功率600 W,频率1000 Hz,占空比20%,切割速度7 mm/s,加速度 $500 \text{ mm/s}^2$ ,气压0.7 MPa,喷嘴口径1 mm,距离切割面1 mm。划片参数如下:峰值功率300 W,频率1000 Hz,占空比15%,速度150 mm/s,加速度 $5000 \text{ mm/s}^2$ ,气压0.8 MPa,喷嘴口径1 mm,距离切割面1 mm。

利用QCW光纤激光高功率、大能量脉冲的特点,直接利用空气作为辅助气体对氧化铝陶瓷基板进行切割和划片,相比CW模式无需涂抹吸收剂和氮气辅助,实现了工艺简化,降低了加工成本。

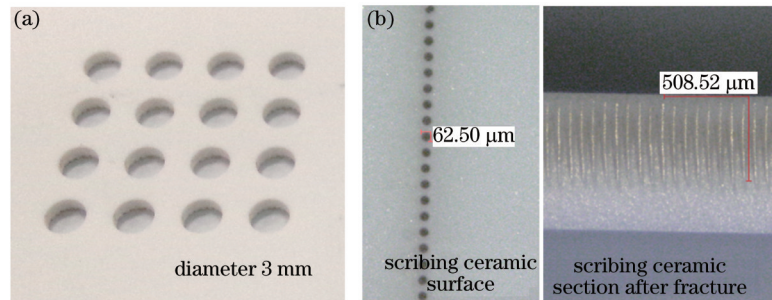


图12 QCW光纤激光加工1 mm厚度氧化铝陶瓷基板。(a)切割小孔;(b)划片测量

Fig.12 1 mm thick alumina ceramic substrate processed by QCW fiber laser. (a) Cutting holes; (b) scribing measurement

## 4 结 论

从氧化铝陶瓷基板激光加工的原理出发,由三维固体中的热传导微分方式描述激光与材料的热过程,对激光加工的氧化铝陶瓷基板表面的损伤阈值进行了计算分析,为激光加工氧化铝陶瓷基板工艺参数的设置提供了一定的参考依据。利用相干公司400 W的E400射频 $\text{CO}_2$ 激光器、IPG公司YLR-150/1500-QCW-AC 150 W准连续型光纤激光器搭建了激光加工平台,对1 mm厚度内的96%氧化铝陶瓷基板进行切割和划片加工实验。通过在氧化铝陶瓷基板表面涂抹吸收剂,并利用氮气作为辅助加工气体,解决了光纤激光加工氧化铝陶瓷基板因为吸收低下产生的断点问题。应用QCW模式光纤激光器高功率、单脉冲能量高的特点,实现了无需对陶瓷表面进行涂吸收剂处理,直接用空气作为辅助气体对1 mm厚度内96%氧化铝陶瓷基板的切割和划片,简化了工艺流程,降低了加工成本。

## 参 考 文 献

- 1 Shi Gongqi, Wang Lian, Ding Peidao. Present research of ceramic substrate material[J]. Journal of Functional Materials, 1993, 24(2): 176-180.  
石功奇,王 琏,丁培道. 陶瓷基片材料的研究现状[J]. 功能材料, 1993, 24(2): 176-180.
- 2 Li Chunyang, Ren Ruiming, Dong Hongliang. Study on preparation and properties of alumina ceramic substrate[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 1993, 29(3): 54-57.  
黎春阳,任瑞铭,董洪亮.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基陶瓷基片的制备及其性能[J]. 大连交通大学学报, 1993, 29(3): 54-57.
- 3 Hou Lianping, Chen Peifeng, Chen Qingming. RF- $\text{CO}_2$  laser ceramic scribing machine[J]. Foshan Ceramics, 2003, 10(80): 31-34.  
侯廉平,陈陪峰,陈清明. 射频 $\text{CO}_2$ 激光陶瓷基板划片机[J]. 佛山陶瓷, 2003, 10(80): 31-34.
- 4 李企芳. 难加工材料的加工技术[M]. 北京:北京科学技术出版社, 1992: 9-10.
- 5 Ji Congping. Experimental Study of Laser Milling on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Ceramic[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.  
汲丛平.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷的激光铣削实验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
- 6 I Puertas, C J Luis. A revision of the application of the electrical discharge machining process to the manufacture of conductive ceramics[J]. Rev Met Madrid, 2002, 38(5): 358-372.
- 7 胡传忻,夏志东. 特种加工手册[M]. 北京:北京工业大学出版社, 2001: 121-136, 224-230.
- 8 Gao Yangyang, Liu Huixia, Li Pin, et al.. Study of laser transmission joining characteristics for Ti coated alumina ceramic and PET[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0303001.  
高阳阳,刘会霞,李 品,等. 镀钛氧化铝陶瓷与PET激光透射连接的工艺研究[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0303001.

- 9 Liao Xianyu, Yan Cuo, Xie Linchun, *et al.*. Surface quality investigation on pulse-laser assisted turning alumina ceramics based on orthogonal experiment method[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(s1): s103008.  
廖先宇, 鄢 铨, 谢林春, 等. 基于正交试验的脉冲激光辅助车削氧化铝陶瓷表面质量研究[J]. 中国激光, 2013, 40(s1): s103008.
- 10 Wu Dongjiang, Chu Yang, Niu Fangyong, *et al.*. Influence of temperature distribution of ceramic coating using top-hat assistant laser beam in dual-beam laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0703012.  
吴东江, 褚 洋, 牛方勇, 等. 双激光束熔覆过程平顶辅助光束对陶瓷涂层温度场的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0703012.
- 11 Hua Xiangang, Wei Xin, Zhou Min, *et al.*. Experimental study on mechanism of 355 nm ultraviolet laser polishing of  $Al_2O_3$  ceramics[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1203002.  
华显刚, 魏 昕, 周 敏, 等. 355 nm 紫外激光抛光  $Al_2O_3$  陶瓷作用机理的实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1203002.
- 12 M Päßler, G Lensch. Cutting and scribing of alumina ceramic using a  $CO_2$  laser[C]. SPIE, 1987, 801: 283-287.
- 13 A Yamamoto, H Hayashikawa, H Hongu. Experimental study on ceramics processing by using high power  $CO_2$  laser beam[C]. SPIE, 2003, 4843: 424-428.
- 14 B Lal, P Jain. Laser in ceramics processing [J]. International Journal of Modern Physics, 2013, 22: 701-707.
- 15 Chen Xiaochuan. Behavior Analysis and Control Research on Cut Surface Quality of Laser-Cut Ceramic[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012: 14.  
陈晓川. 激光切割陶瓷切缝表面行为分析及其控制研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012: 14.
- 16 Hou Lianping. Research on RF- $CO_2$  Laser Ceramic Scribing Machine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003: 8-19.  
侯廉平. RF- $CO_2$  激光陶瓷基板划片机的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003: 8-19.
- 17 Zhu Sanyou, Huang Xuanshao, Jiang Zhaohua. Ceramic substrate Nd: YAG Q-switching laser cutter[J]. Applied Laser, 1998, 18(6): 249-250.  
朱三又, 黄宣劭, 姜兆华. YAG 调 Q 激光陶瓷基板划片机[J]. 应用激光, 1998, 18(6): 249-250.
- 18 Wang Xiulin, Jiang Zhaohua, Wu Binchu. Technology of laser marking ceramics plate[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1997, 31(10): 80-82.  
汪秀琳, 姜兆华, 吴宾初. 激光陶瓷划片工艺研究[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(10): 80-82.
- 19 Hou Lianping, Chen Peifeng, Chen Qingming. Study on laser scribing of  $Al_2O_3$  ceramic substrate with RF  $CO_2$  laser[J]. Foshan Ceramics, 2002, 11(68): 3-7.  
侯廉平, 陈陪峰, 陈清明. 射频激光对氧化铝陶瓷基片划片的研究[J]. 佛山陶瓷, 2002, 11(68): 3-7.

栏目编辑: 吴秀娟