

[新材料·新设备·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.03.014

# 蓝宝石飞秒激光直冲孔加工研究

沈小伟<sup>1</sup>, 赵万芹<sup>1,2\*</sup>, 刘昊栋<sup>1</sup>

(1. 上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620;  
2. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:**为了在电子衬底蓝宝石表面加工多种尺寸的微孔结构,课题组采用飞秒激光直冲方式进行蓝宝石表面微孔加工,通过实验探索了激光脉冲数、单脉冲能量和重复频率对孔直径和孔表面形貌的影响规律。研究表明:在不同单脉冲能量下,孔径均在脉冲数为50 000左右达到饱和;孔径均随着单脉冲能量和重复频率的增加而增加;飞秒激光加工蓝宝石孔口周围均无飞溅物,主要的缺陷为孔口裂纹,且裂纹数量和尺寸普遍表现为随激光加工参数的增大而增大。

**关键词:**飞秒激光;蓝宝石;直冲加工;单脉冲能量;重复频率

中图分类号:TN249;TH742

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2022)03-0085-05

## Research on Sapphire Femtosecond Laser Straight Punching Processing

SHEN Xiaowei<sup>1</sup>, ZHAO Wanqin<sup>1,2\*</sup>, LIU Haodong<sup>1</sup>

(1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In order to process microporous structures of various sizes on the surface of sapphire on electronic substrate, femtosecond laser straight punching was used to process micropores on the surface of sapphire. The effects of laser pulse number, single pulse energy and repetition frequency on hole diameter and hole surface morphology were explored through experiments. The results show that the aperture always reaches saturation under different single pulse energy when the number of pulses is about 50 000; the aperture increases with the increase of single pulse energy and repetition frequency. There is no splash around the sapphire hole in femtosecond laser processing, and the main defect is the hole crack. The number and size of cracks generally increase with the increase of laser processing parameters.

**Keywords:** femtosecond laser; sapphire; percussion drilling; single pulse energy; repetition frequency

蓝宝石晶体硬度高、透光性强,有化学惰性,对普通酸和碱具有很强的抗蚀能力,且有高温稳定性和高而稳定的介电常数,因其特有的化学、物理、光学和电学特性,被广泛应用于机械、光学、电子和国防等领域<sup>[1-4]</sup>。但由于其高硬度和化学稳定性,采用机械和化学方式往往难以加工或加工精度等受限,传统的机械加工易产生崩边、裂纹及刀具磨损等问题,而传统的化学刻蚀也很难满足加工要求<sup>[5-6]</sup>。由于激光加工技术具有非接触、应用范围广、灵活度高等特点,非常适合于蓝宝石类硬脆性材料的微加工,被认为是一种高效

快捷的加工方式<sup>[7-8]</sup>。

近年来,超短脉冲激光烧蚀被用于加工精确的微米级材料,蓝宝石的超短脉冲激光烧蚀技术得到了广泛应用<sup>[9-11]</sup>。与长脉冲激光烧蚀相比,超短激光烧蚀的优点在于能够在热扩散发生之前产生非常高的峰值功率,并将能量传递到材料中<sup>[12]</sup>。热量的及时传递降低了热应力出现的可能性,可以最小化热影响区。因此,探索蓝宝石的飞秒激光孔加工是非常有意义的。

课题组利用1 030 nm的飞秒激光器,在0.4 mm厚的蓝宝石上进行直冲式孔加工,系统地研究了脉冲

收稿日期:2021-12-02;修回日期:2022-02-20

基金项目:国家自然科学基金(21703137)。

第一作者简介:沈小伟(1998),男,安徽亳州人,硕士研究生,主要研究方向为激光精密加工技术。通信作者:赵万芹(1983),女,黑龙江齐齐哈尔人,博士,副教授,主要研究方向为激光精密加工技术。E-mail:linazhaolinazhao@foxmail.com

数  $N$ 、单脉冲能量  $E_p$  及重复频率  $f$  对直冲孔加工尺寸和形貌的影响,为蓝宝石的飞秒激光加工工程应用提供参考。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验所采用的光学级 c-面(0001)蓝宝石基片的蓝宝石晶体由谱兴光电科技有限公司提供,样片尺寸为  $0.4\text{ mm} \times 15.0\text{ mm} \times 20.0\text{ mm}$ ,其主要的物理参数如表 1 所示<sup>[13]</sup>。

表 1 蓝宝石晶体物理参数

Table 1 Physical parameters of sapphire crystal

| 密度/<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )                              | 莫氏硬度                                  | 熔点/ $^{\circ}\text{C}$                       | 沸点/ $^{\circ}\text{C}$ |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------|
| 3.98                                                                    | 9                                     | 2 050                                        | 3 500                  |
| 热导率/<br>( $\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) | 热膨胀<br>系数/( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) | 透光率<br>( $0.3 \sim 5.0\text{ }\mu\text{m}$ ) | 折射率                    |
| 0.184                                                                   | $5.8 \times 10^{-6}$                  | $\geq 80\%$                                  | 1.76                   |

### 1.2 实验设备

飞秒微纳加工平台示意图如图 1 所示,首先红外飞秒激光器输出激光束,激光束通过 2 次  $45^{\circ}$  调节全反射镜对激光光束进行传导,经扩束镜扩大输出光斑直径,再经过反射镜传导至小孔光阑,由小孔光阑去除杂光,再由 2 次反射镜传导后,通过振镜和场镜的传导和聚焦,最终光束沿着竖直方向进行传播,将光束聚焦在材料的上表面,获得束腰半径约为  $11\text{ }\mu\text{m}$  的聚焦光斑。该微纳加工平台配置的激光器为安扬公司的红外飞秒 FemtoYL-50 激光器。该激光器的主要参数为:波长  $1\,035\text{ nm}$ ;重复频率  $25 \sim 5\,000\text{ kHz}$  可调;脉冲宽度  $0.4 \sim 6.0\text{ ps}$  可调。其机械运动系统来源于 AEROTECH 公司,该设备的定位精度为  $5\text{ }\mu\text{m}$ ,最大行程为  $200\text{ mm}$ 。此外,该加工平台配有专门的编程系统 A3200 Motion Composer,可以通过编程方便地调节激光器的参数输出,实现对机械运动平台  $X, Y, Z$  向的控制及加工图案的绘制等。

由于蓝宝石样品表面的污渍会影响其对激光的吸收,加工后的碎屑等又会影响实验后的观察和测量。因此实验前后都要使用无水乙醇和去离子水依次各清洗  $5\text{ min}$ ,进行超声清洁后烘干。采用扫描电子显微镜

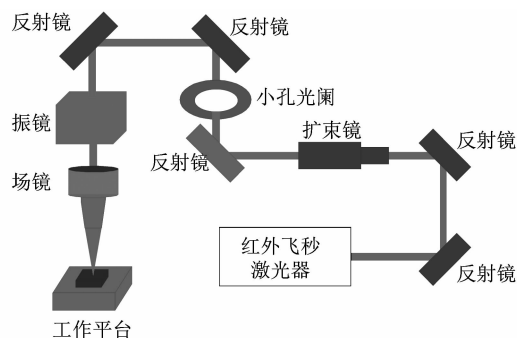


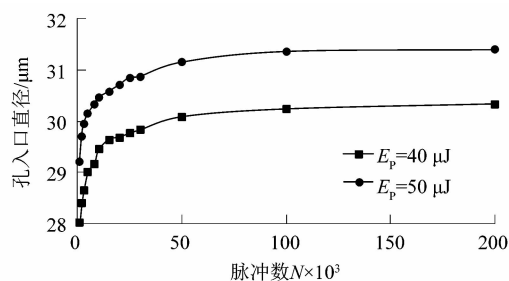
图 1 飞秒微纳加工平台

Figure 1 Processing platform of femtosecond micro-nano

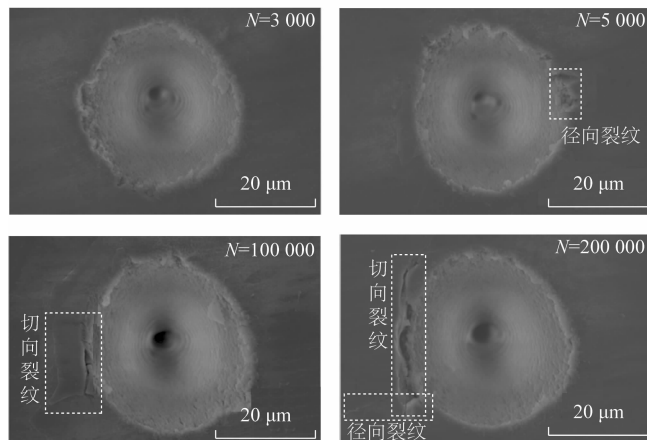
HITACHI S-3000H 来观测蓝宝石孔的形貌及尺寸。在扫描电子显微镜观测之前,在实验样品表面喷涂厚度约为  $20\text{ nm}$  的金属合金层用于导电。

## 2 脉冲数对孔直径和表面形貌的影响

图 2 所示为飞秒激光加工蓝宝石表面微孔脉冲数对孔直径和表面形貌的影响。



(a) 脉冲数对孔径的影响



(b)  $E_p = 60\text{ }\mu\text{J}$  时脉冲数对孔形貌的影响

图 2 直冲孔加工时脉冲数对孔的影响

Figure 2 Effect of pulse number on hole in straight punching

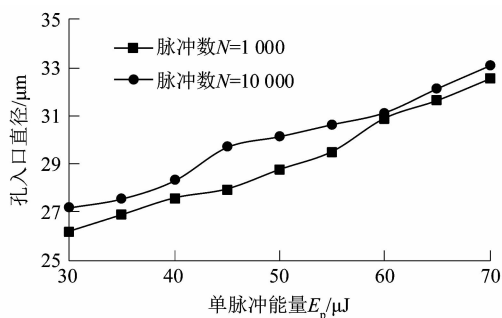
脉冲数对孔入口直径的影响规律如图 2(a) 所示,从图中可以看出,随着脉冲数的增加,单脉冲能量 40 和 50  $\mu\text{J}$  加工孔直径均呈现先增加后饱和的趋势。该现象在多种材料表面激光孔加工过程均出现,如金属<sup>[14-15]</sup>、硅<sup>[16]</sup>等,主要原因是随着脉冲数的增加,在激光照射区域逐渐达到材料的烧蚀阈值,孔入口直径逐渐增大,当所有激光照射区域均达到材料烧蚀阈值时,孔入口达到最大,后脉冲数进一步增加不会导致孔入口直径变大,因此孔入口直径达到饱和。还需要说明的是,不同单脉冲能量  $E_p$  时均在脉冲数为 50 000 左右时孔径达到饱和。图 2(b) 所示为  $E_p = 60 \mu\text{J}$  时脉冲数对孔口形貌的影响:当脉冲数为 3 000 时,孔口周围无任何喷溅物、微裂纹;随着脉冲数增加到 5 000 时,孔口周围虽然仍无喷溅物,但孔口出现径向裂纹;增加脉冲数到 100 000 时,孔口周围出现较明显的切向裂纹;进一步增加脉冲数至 200 000 时,孔口周围径向和切向 2 种裂纹都出现。

飞秒激光被称为“冷”加工,主要是由于它具有较短的脉冲宽度,可以最大限度的抑制加工中的热效应。然而在实际加工中,仍不可避免的会出现热效应,尤其对于硬脆材料的加工,即使采用脉冲宽度较小的飞秒激光在不合适的工艺参数下也可能会诱导出现孔口裂纹。研究表明,飞秒激光加工诱发产生孔口裂纹的主要因素是激光诱导的热应力超过材料的断裂阈值,径向应力将诱导切向裂纹,切向应力将诱导径向裂纹<sup>[17-19]</sup>。随着裂纹的扩展,径向和切向裂纹可能在某处结合并持续延伸,最终使得样片断裂。

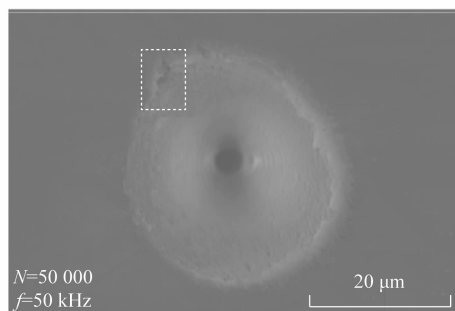
### 3 单脉冲能量对孔直径和表面形貌的影响

图 3 所示为飞秒激光加工蓝宝石表面孔单脉冲能量对孔直径和表面形貌的影响。从图 3(a) 可以看出,当脉冲数为 1 000 或者 10 000 时,随着单脉冲能量的增加,孔口直径均呈增加趋势。这是由于单脉冲能量的增加,烧蚀区域所吸收的能量增加,材料去除量增多,导致孔口变大。当  $E_p = 50 \mu\text{J}$  时,孔口表面无喷溅物但存在径向裂纹,如图 3(b) 所示;当  $E_p = 70 \mu\text{J}$  时,孔口表面既存在径向裂纹也存在切向裂纹,如图 3(c) 所示。也就是说,径向裂纹在较低的单脉冲能量下即被诱导,切向裂纹则需要更高的单脉冲能量。换句话

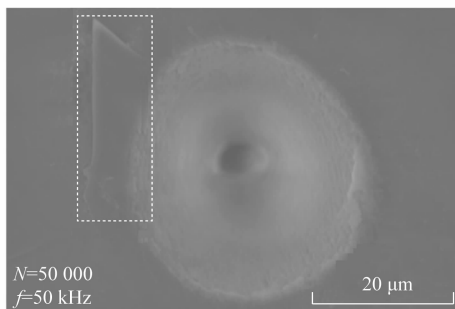
说,蓝宝石材料的切向应力断裂阈值低于其径向应力断裂阈值,该特性主要由实验采用蓝宝石材料晶格特性决定。



(a) 单能量脉冲对孔径的影响



(b)  $E_p = 50 \mu\text{J}$  的 SEM 图



(c)  $E_p = 70 \mu\text{J}$  的 SEM 图

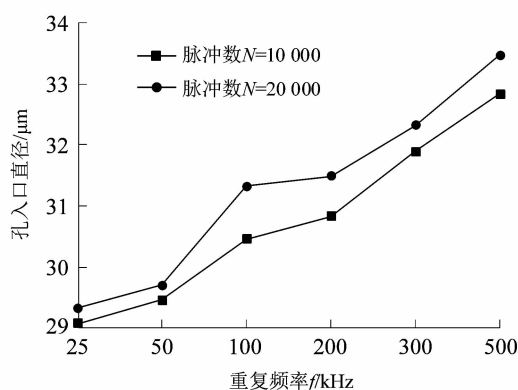
图 3 直冲孔加工时单脉冲能量对孔的影响

Figure 3 Effect of pulse energy on hole in straight punching

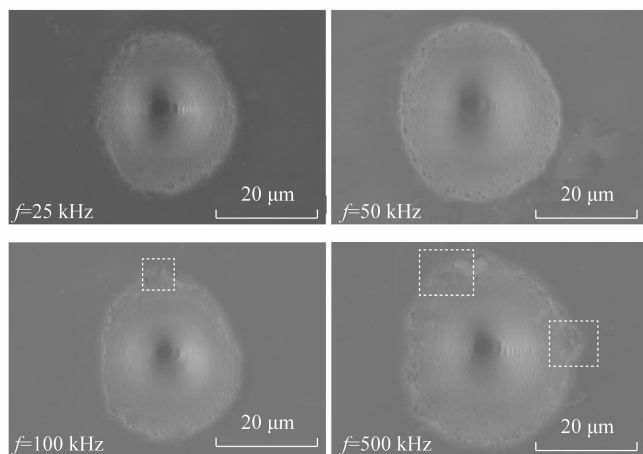
### 4 重复频率对孔直径和表面形貌的影响

图 4 所示为飞秒激光蓝宝石直冲孔加工时重复频率对孔的影响。随着激光重复频率的上升,脉冲数为 10 000 和 20 000 时孔入口直径均保持着上升的趋势,如图 4(a) 所示。这是由于随激光重复频率的增加,相邻脉冲之间的间隔变短,热量散失的时间也变短,进而导致热量的累积,烧蚀孔径会逐渐变大。图 4(b) 所示为重复频率对孔形貌的影响。在重复频率  $f = 25 \text{ kHz}$

时,孔口无裂纹存在;当重复频率增加到  $f = 50$  kHz 时,孔直径变大,仍未出现孔口裂纹;当重复频率提高到 100 kHz 时,孔口开始出现径向裂纹;重复频率增加到 500 kHz 时,切向裂纹和径向裂纹均出现。这主要是由于加工时所用的脉冲数为 10 000,对于重复频率为 25 kHz,加工时长是 0.40 s,而对于重复频率为 500 kHz,加工时长降低到 0.02 s,即随着重复频率呈倍数的增加,加工时长成倍数的减小,使得激光能量作用在材料表面的时长减小。



(a) 重复频率对孔径的影响



(b)  $N=10\,000$ ,  $E_p=40\,\mu\text{J}$  时对孔形貌的影响

图4 直冲孔加工时重复频率对孔的影响

Figure 4 Effect of repetition frequency on hole in straight punching

## 5 结语

课题组主要研究了飞秒激光蓝宝石表面直冲式微孔加工中激光脉冲数、单脉冲能量和重复频率对孔入口直径和孔表面形貌的影响。研究表明,随着脉冲数、单脉冲能量和重复频率的增加,孔入口直径均表

现为增大的趋势,当脉冲数为 50 000 左右时,孔入口直径呈饱和态。对于孔的入口形貌,飞秒激光加工蓝宝石孔口周围均无喷溅物,主要的缺陷为孔口裂纹,包括径向裂纹和切向裂纹,且裂纹数量和尺寸普遍表现为随激光加工参数的增大而增大。同时,由于蓝宝石本身的晶格特性等使得其径向断裂阈值和切向断裂阈值差异较大,使得径向和切向裂纹被诱导的激光参数不同。

## 参考文献:

- [1] AKSELROD M S, BRUNI F J. Modern trends in crystal growth and new applications of sapphire[J]. Journal of Crystal Growth, 2012, 360(1): 134–145.
- [2] WANG J H, GUO B, ZHAO Q L, et al. Dependence of material removal on crystal orientation of sapphire under cross scratching[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37(6): 2465–2472.
- [3] TANG H L, LI H J, XU J. Growth and development of sapphire crystal for LED applications[M]. Shanghai: Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 308–312.
- [4] REA E C. Scribing of thin sapphire substrates with a 266-nm Q-switched solid state laser[C]// Photon Processing in Microelectronics and Photonics III. San Jose, CA: The International Society for Optical Engineering, 2004: 231–240.
- [5] 边晓微, 陈豫, 李港. 355 nm 纳秒和 1 064 nm 皮秒激光加工蓝宝石研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 240–246.
- [6] XIE X Z, CHE R H, WEI X, et al. Study on the technological rule of laser-induced backside wet etching sapphire substrates[J]. Applied Laser, 2015, 35(2): 236–241.
- [7] CEFALAS A C. Current trends in 157 nm dry lithography[J]. Applied Surface Science, 2005, 247(1/2/3/4): 577–583.
- [8] 白帆. 蓝宝石材料的激光微加工及其应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 1–12.
- [9] OLIVEIRA V, SIVAKUMAR M, VILAR R. A mathematical description of surface texture development in laser-ablated dentin[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(10): 47.
- [10] GAMALY E G. The physics of ultra-short laser interaction with solids at non-relativistic intensities[J]. Physics Reports, 2011, 508(4/5): 91–243.
- [11] EBERLE G, SCHMIDT M, PUDE F, et al. Laser surface and subsurface modification of sapphire using femtosecond pulses[J]. Applied Surface Science, 2016, 378: 504–512.
- [12] BONSE J, KRUEGER J, HOHM S, et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structures[J]. Journal of Laser Applications, 2012, 24(4): 042006.

(下转第 100 页)