

激光与光电子学进展

超薄陶瓷纳秒紫外激光高深宽比盲切工艺研究

陈兴华, 李文元, 荣佑民*, 黄禹

华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要 氧化铝陶瓷具有热导率高、散热性好、介电常数小等特点,是移动通信、集成电子等领域常用的基板材料,但其高硬度、高脆性的特性致使其在常规的机械加工过程中极易出现裂纹、崩裂等。本课题组采用纳秒紫外激光对超薄陶瓷板的盲切工艺进行研究,通过控制纳秒激光的三个主要加工参数——激光重复频率、扫描速度和重复次数,分析切缝深度和切缝宽度的变化规律。实验结果表明:随着激光重复频率增大,切缝宽度先增大后基本不变,切缝深度则先增大后减小;随着扫描速度减小和重复次数增多,切缝深度先增大后减小,切缝宽度的波动较小。以切缝深宽比为指标,通过正交试验得到超薄陶瓷基板盲切时单道多次扫描的最大深宽比是 4.0137,最优参数组合为:激光重复频率 40 kHz,扫描速度 0.07 m/s,重复次数 25 次。

关键词 激光技术; 脉冲激光; 陶瓷基板; 切缝深度; 切缝宽度

中图分类号 TN24

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0114010

High-Aspect Ratio Blind Cutting of Ultra-Thin Ceramic by Nanosecond Ultraviolet Laser

Chen Xinghua, Li Wenyuan, Rong Youmin*, Huang Yu

School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Alumina ceramics have high thermal conductivity, good heat dissipation, and a small dielectric constant. It is a common substrate material used in mobile communication and integrated electronics; however, its high hardness and brittleness make it crack easily during conventional machining. In this study, we utilized a nanosecond ultraviolet laser to study the blind cutting process of an ultra-thin ceramic plate. Moreover, we analyzed the slit width and depth variations by controlling the three main processing parameters of the nanosecond laser, which were laser repetition frequency, scanning speed, and repetition times. The experimental results show that as the laser repetition frequency increases, the slit width increases and remains unchanged, and the slit depth first increases and then decreases. As the scanning speed decreases and the number of repetition times increases, the slit depth first increases and then decreases, and the slit width slightly fluctuates. With the slit depth-width ratio as the index, we obtain the following conclusions through an orthogonal experiment: the maximum depth-width ratio of single-pass multiple scanning in the blind cutting process of the ultra-thin ceramic substrate is 4.0137, and the optimal laser parameter combination is 40 kHz laser frequency, 0.07 m/s scanning speed, and 25 repetition times.

Key words laser technique; pulse laser; ceramic plate; slit depth; slit width

收稿日期: 2021-03-06; 修回日期: 2021-04-13; 录用日期: 2021-04-29

基金项目: 工信部制造业高质量发展专项(TC200H02H)

通信作者: *rym@hust.edu.cn

1 引言

陶瓷材料具有绝缘性能优越、介电常数小、热膨胀系数小、气密性好等优点,在航空航天、移动通信及集成电子等领域具有广阔的应用前景^[1]。氧化铝陶瓷作为应用最为广泛的一类电子陶瓷基板类材料,是由共价键和离子键或其混合键形成的等轴晶种,其原子键能特别高,并且方向性也很强,因此塑性变形小,抗断裂能力差^[2]。

半导体逐渐向小型化、集成化方向发展,这对封装基板性能提出了更高要求。氧化铝陶瓷基板是一种高性能的无机基板,其高质量、高效率的切割是目前亟待解决的问题。在很多陶瓷基板的制作工艺中,陶瓷基板在划线裂片后还需要经过光刻、刻蚀等制造工艺^[3-4]。如,直接镀铜陶瓷基板(DCP),在对其加工制作前需要进行裂片处理,随后在基板上电镀金属层,镀膜和光刻显影技术使陶瓷基板上金属线路的线宽维持在 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ ^[5-7],如此精细的电路铺设减小了电子元件的体积,提高了封装集成度。因此,作为后序加工制作的基础,陶瓷基板的大深宽比盲切显得尤为重要。若切缝较浅,裂片时极易使基板断裂;若直接切断基板,陶瓷基板背面会产生变形,导致基板性能下降^[8-9]。传统的机械加工方法,如磨削加工、切削加工等,很容易使基板发生应力集中进而产生裂纹,甚至断裂,故障率较高,难以完成大深宽比的精密加工。而一些特种加工方法都存在一定的不足,如:高压磨料水射流加工方法的噪声大,而且加工出的陶瓷表面比较粗糙,精度较差^[10];在超声波加工法中,工具磨损严重,而且工具的通用性较差^[11]。

激光加工是一种高能束的精密加工技术,其以高效、高精度、无机械作用力以及无接触式的加工特点在高硬脆性材料的打孔、切割、焊接、熔覆等加工方面有着独特优势。目前,国内外在陶瓷板激光加工方面的研究有很多,主要包括切割速度、激光加工功率等激光切割工艺参数对陶瓷加工的影响^[12],激光与其他加工工艺的复合加工^[13-14],有限元数值模拟分析^[15]等,但对于通过精准控制激光加工参数从而在超薄陶瓷基板上实现大深宽比盲切的工艺研究还比较少。Beausoleil等^[16]采用皮秒激光对氧化铝陶瓷进行高深度、高精度切割,通过优化工艺参数,加工出了深宽比为3的高精度切缝;冯运亨^[17]利用 CO_2 脉冲激光器对 $1000\ \mu\text{m}$ 厚陶瓷板进行

切割加工,得到了深宽比为4的切缝;Esmail等^[18]采用优化的皮秒激光加工参数在 $2540\ \mu\text{m}$ 厚氧化铝陶瓷上获得了高精度烧蚀、光滑无缺陷的切缝,但其深宽比并没有超过3。本文以 $225\ \mu\text{m}$ 厚氧化铝陶瓷基板为对象,研究纳秒紫外激光的三种加工参数(激光扫描速度、扫描次数和激光重复频率)对陶瓷基板切缝的影响规律,以深宽比为指标,提取出纳秒紫外激光加工氧化铝陶瓷基板的最优参数组合,以为现代微电子行业用陶瓷基板的切割加工提供理论支持。

2 实验与方法

2.1 陶瓷材料及实验平台

表1是氧化铝陶瓷的主要热力学性能参数。实验所用样片是尺寸为 $740\ \text{mm}\times 650\ \text{mm}\times 0.225\ \text{mm}$ 的氧化铝陶瓷薄板,如图1所示,其脆性大,易崩裂。

表1 氧化铝陶瓷基板材料的热力学性能参数

Table 1 Thermodynamic parameters of alumina substrate materials

Parameter	Value
Thermal expansion coefficient / ($10^{-6}\ \text{K}$)	5-7.5
Thermal conductivity / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	20-40
Dielectric constant	6-9
Density / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	3-4



图1 氧化铝陶瓷基板

Fig. 1 Alumina substrate

实验平台是紫外纳秒激光平台,其相关数据如表2所示。激光器的输出波长为 $355\ \text{nm}$ 。激光加工系统如图2所示,该系统主要由紫外激光器、扩束镜、振镜、场镜、计算机和水冷机组成。激光器为固体紫外激光器 Poplar-355/12A,其采用一体化设计,将外光路与电源控制系统集成在一个腔体内,结构紧凑,并且,该激光器的光斑模式和热稳定性均较

表 2 紫外激光平台的相关参数

Table 2 Relevant parameters of UV laser platform

Parameter	Value
Pulse width /ns	<15
Focal spot size / μm	37
Ambient temperature / $^{\circ}\text{C}$	25
Spot diameter /mm	<2
Roundness of focusing beam	85%

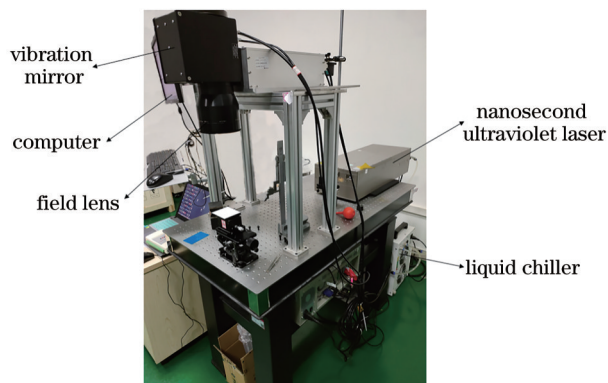


图 2 紫外纳秒激光加工平台

Fig. 2 UV nanosecond laser processing platform

好。实验用场镜为远心场镜,焦距为 167 mm,具有精度高、幅面均匀性好、损伤阈值高的特点。实验中使用的振镜型号为 Scanlab,扫描头型号为 intelliSCAN 14,水冷机所用循环冷却水是去离子水。

采用共聚焦激光显微镜和扫描电子显微镜观察陶瓷切缝的形貌。共聚焦激光显微镜以激光作为光源,非接触无损伤地对材料进行断层扫描和成像,能够得到清晰的三维图像。扫描电子显微镜可以获得高分辨率的切缝表面形貌。

2.2 实验设计

本次实验通过控制单个变量参数(激光扫描速度、重复次数、激光重复频率)进行切割加工,研究切缝宽度和深度随加工参数的变化规律以及各加工参数的作用机理。通过正交试验分析方法,以深宽比作为指标获取最优的工艺参数组合。正交表格设计为三因素三水平 $L_9(3^3)$,三因素分别为激光重复频率、激光扫描速度和重复次数,每个因素包含的 3 个水平如表 3 所示。为了减小加工测量误差,每组实验重复测量三次,取均值作为最终的测量结果。通过计算不同因素水平的均值求出极差。极差的大小反映了该因素对实验结果的影响程度。

表 3 正交表三因素下 3 个水平的选取

Table 3 Selected three levels under three factors in orthogonal table

Level	Laser repetition frequency /kHz	Laser scanning speed /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Repetition times
1	40	0.07	15
2	50	0.1	20
3	60	0.2	25

3 实验结果与讨论

在陶瓷基板加工过程中可以发现,加工区域同时存在熔化和蒸发现象。纳秒紫外激光多次扫描加工对陶瓷材料的去除机理包括两个方面:材料的直接蒸发以及蒸发反作用力引起的熔化喷射^[19-21]。

3.1 激光重复频率对陶瓷基板划线的影响规律

激光重复频率通过控制脉冲能量和平均功率的大小来影响切缝的深度和宽度。本次实验所用激光器的平均功率、脉冲能量与激光重复频率之间的关系如图 3 所示。

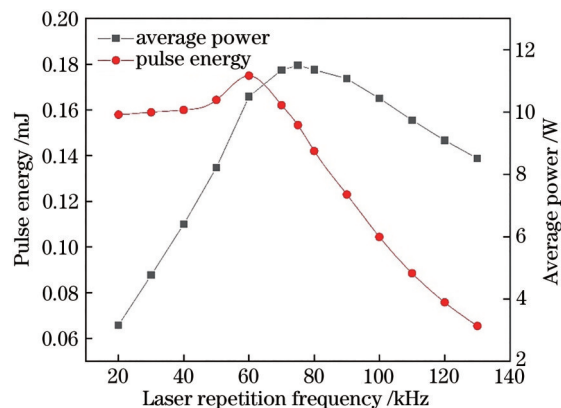


图 3 激光器平均功率与脉冲能量随激光重复频率的变化
Fig. 3 Variations of average power and pulse energy with laser repetition frequency

在保持其他参数不变(扫描速度 0.2 m/s,重复次数 20 次)的条件下,用 20~150 kHz 的激光重复频率在陶瓷板上盲切时发现,随着激光重复频率增大,切缝深度先增大后减小,如图 4 所示。这是因为激光重复频率增大使得激光器的平均功率和脉冲能量都增大,加工区域吸收更多的能量,增大了材料的去除率;而当激光重复频率增大到 80 kHz 之后,平均功率开始逐步减小,切缝吸收的能量减小,切缝深度降低。从图 3 和图 4 中可以看出,切缝深度的变化曲线与激光器平均功率的变化曲线一致。因此,相较于脉冲能量,切缝深度可能受激光器平

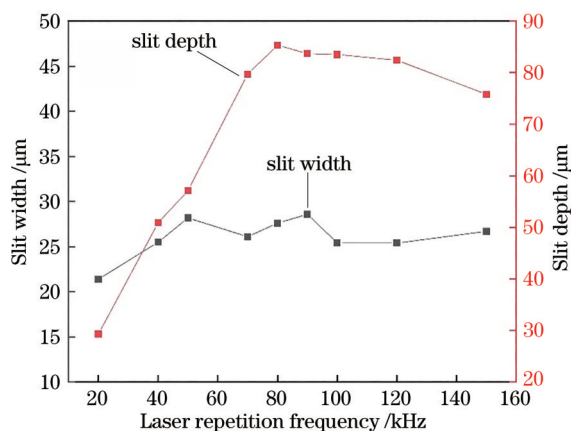


图 4 切缝宽度与深度随激光重复频率的变化

Fig. 4 Variations of slit width and depth with laser repetition frequency

均功率的影响较大。

从图 4 中还可以看出,随着激光重复频率增大,切缝宽度先增大后趋于不变。这主要是受激光光

斑内能量分布的影响。激光光斑内的能量沿半径方向呈高斯分布,光斑中心处的能量最大,超过了陶瓷材料的烧蚀阈值,而半径较大位置处的光斑能量较低,不足以烧蚀陶瓷材料,因此激光加工时只有光斑中心处的材料被去除,这也是激光加工能够突破传统工艺精度极限实现高精度加工的原因。当激光重复频率为 20 kHz 时,激光器的平均功率和脉冲能量低;随着激光重复频率增加,光斑内的能量增加,切缝宽度增加,但在激光重复频率增至 40 kHz 后,切缝宽度的波动维持在 $(27 \pm 2) \mu\text{m}$ 范围内。这是因为光斑内的能量虽然在增加,但是半径较大处的能量增幅小,扩散的热量低于材料的烧蚀阈值。由图 4 可以看出,切缝的宽度在 $25 \sim 29 \mu\text{m}$ 范围内波动。其原因有两方面:1) 加工和测量误差;2) 氧化铝陶瓷自身不均匀(氧化铝材料较高的烧结温度导致晶粒粗大且气孔较多),因此在加工陶瓷材料时,切口边缘呈锯齿形,如图 5 所示。

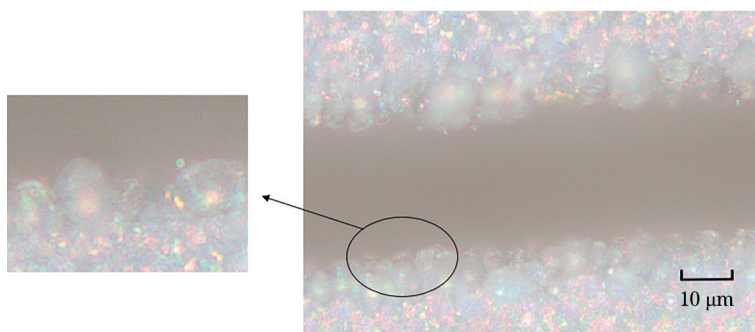


图 5 光学显微镜下切缝的表面形貌

Fig. 5 Surface morphology of the slit under optical microscope

3.2 激光扫描速度和重复次数对陶瓷基板划线的影响规律

激光扫描速度通过控制激光光斑的重叠率来影响陶瓷基板切缝的深度和宽度。当扫描速度较慢时,陶瓷材料加工区域单位体积内接收到的脉冲数增多,相邻脉冲重叠率增大,材料去除率增大。紫外激光对陶瓷材料的去除机理分为直接蒸发去除和蒸发反作用力引起的熔化喷射^[22-24],随着重复次数的增加,由蒸发反作用力引起的熔化喷射占比变大,切缝内部质量就会变差。

在激光重复频率为 50 kHz、扫描速度为 0.07 m/s、重复 30 次的条件下切割时,陶瓷基板会直接断裂。这主要是因为扫描速度过慢,加工区域内相邻脉冲重叠率增大,接收到的脉冲数增多,温度升高;同时,激光束扫描产生空气对流,过大的温度梯度导致热应力较大,当材料部分区域内的热应

力超过其强度极限时,就会产生裂纹,随着裂纹进一步扩展,基板碎裂。如图 6 所示,当激光重复次数

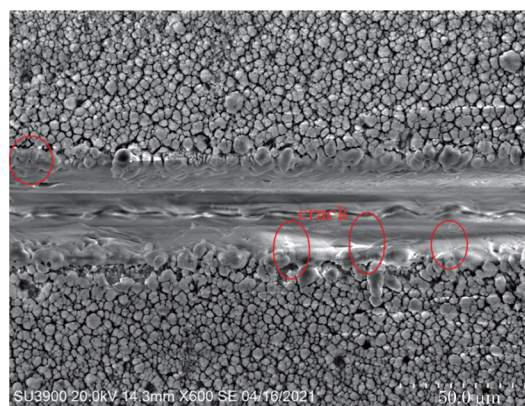


图 6 激光扫描速度为 0.07 m/s、重复次数为 25 次时,切缝表面的扫描显微镜图像

Fig. 6 Scanning microscopy image of the slit surface with laser scanning speed of 0.07 m/s and repetition times of 25

为 25 次时,可以观察到在切缝边缘的重熔层上已经有裂缝生成。

设置实验参数(扫描速度为 0.07 m/s,重复次数为 10~25 次;扫描速度为 0.1, 0.2, 0.5 m/s,重复

次数为 10~30 次)进行切割实验,研究切缝深度和宽度的变化。如图 7 所示,受光斑内半径较大处能量低且增幅小的影响,切缝宽度的变化幅度较小,而切缝深度一直在增大。

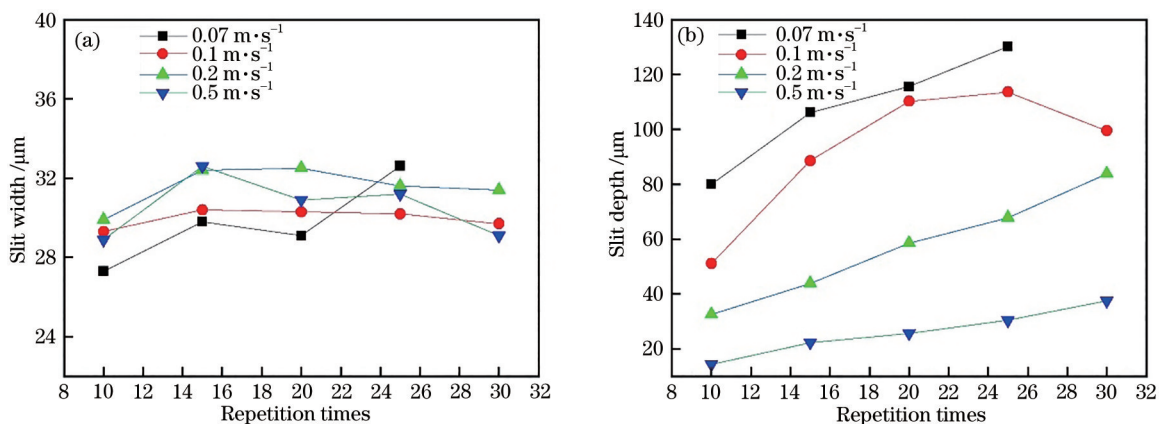


图 7 不同扫描速度和重复次数下切缝深度和宽度的变化。(a)切缝宽度;(b)切缝深度

Fig. 7 Changes of slit width and depth at different scanning speeds and repetition times. (a) Slit width; (b) slit depth

当扫描速度为 0.07 m/s 时,随着重复次数增加,切缝宽度整体上呈上升趋势。这是因为重复次数的增加使更多的能量被加工区域吸收,并且扫描速度较慢,激光光斑的重叠率高,热量扩散使得切缝边缘更多的材料被烧蚀,切缝宽度变大。当扫描速度为 0.1 m/s 和 0.2 m/s 时,随着重复次数增加,切缝宽度先增加,随后受激光光斑内能量分布的影响,切缝宽度的波动维持在 2 μm 附近。当扫描速度为 0.5 m/s 时,切缝宽度在重复次数为 25 次后小幅减小(约减小了 2 μm)。这是因为此时切口处生成了

重铸区,过快的扫描速度使切缝底部的熔融材料被溅射到切口表面,重新凝固。如图 8(c)所示,重复次数为 20 次时,切口边缘的晶粒比较粗大,但是此时还没有明显的重熔区。当重复次数增加至 25 次时,切口表面已经有溅射重熔的痕迹,从图 8(d)中能够看到一块块小的重熔块附着在切口边缘;若此时继续扫描切缝,切口附近的重熔块就会连接在一起形成重铸区,如图 8(e)所示,此时切缝宽度会稍稍减小。

随着激光扫描速度的增加,激光光斑重叠率降低,切缝烧蚀不完全,因此 0.5 m/s 下的切缝深度远

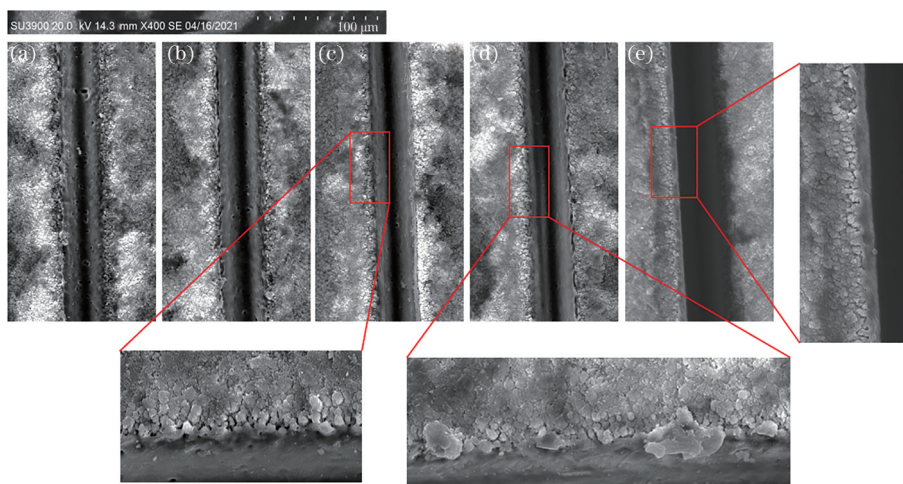


图 8 不同重复次数下切缝的扫描显微镜图像(激光扫描速度为 0.5 m/s)。(a)重复 10 次;(b)重复 15 次;(c)重复 20 次;(d)重复 25 次;(e)重复 30 次

Fig. 8 Scanning microscopy images of the slit with different repetition times at a laser scanning speed of 0.5 m/s. (a) Repetition times of 10; (b) repetition times of 15; (c) repetition times of 20; (d) repetition times of 25; (e) repetition times of 30

小于 0.07 m/s 下的切缝深度;增加激光重复次数,待加工区吸收的能量增多,材料的去除率增加,切缝深度增加。因此,减小扫描速度和增加激光重复次数均可以提高陶瓷的切缝深度。但随着重复次数的持续增加,切缝质量开始变差,如图 7 所示,当扫描速度为 0.1 m/s 时,随着重复次数从 25 增加至

30,切缝深度开始减小。观察此时切缝的形貌后发现切缝内部有溅射重熔痕迹,如图 9 所示。这是由于随着重复次数增加,加工区域吸收的能量增多,温度持续升高,气液相比比例增大,在蒸气的反作用力下,底部熔融材料溅射重熔,切缝质量变差,当溅射重熔的材料过多时就会导致切缝深度减小。

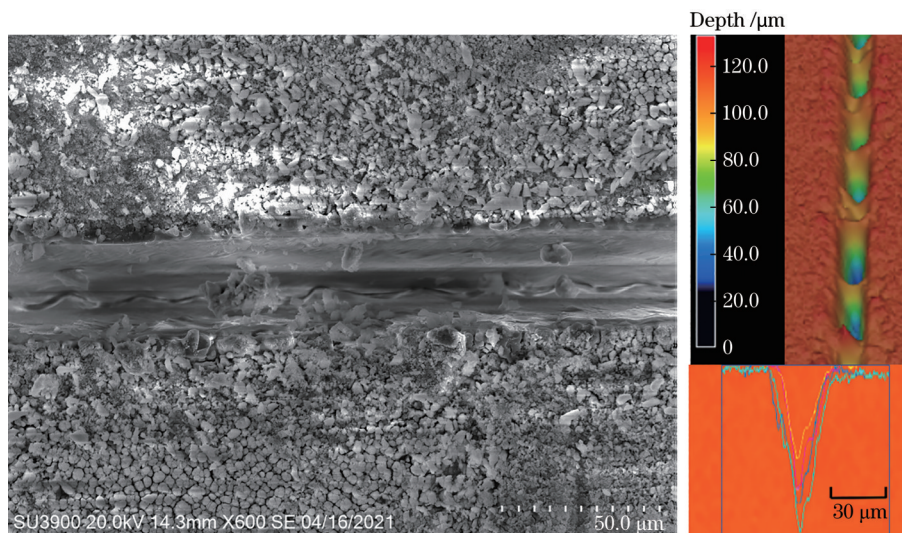


图 9 扫描速度为 0.1 m/s、重复次数为 30 时,切缝的扫描显微镜图像和三维形貌图

Fig. 9 Scanning microscopy image and three-dimensional topography of slit when scanning speed is 0.1 m/s and repetition times is 30

3.3 最优参数组合

工艺参数是控制划线深度和宽度的关键。通过正交试验分析方法可以得到深宽比最大时激光重复频率、扫描速度和重复次数的最优组合。根据 3.1 节和 3.2 的分析,选择如表 3 所示的三因素三水平,激光重复频率分别为 40、50、60 kHz,扫描速度分别为 0.07、0.1、0.2 m/s,重复次数分别为 15 次、20 次、25 次。表 4 中 \bar{T} 表示各水平下的平均深宽比; R 表示极差, R 越大表示该因素对实验结果的影响程度越大。

用极差法分析各因素对深宽比的影响,结果显示,激光重复频率的极差值为 1.3284,扫描速度的极差值为 0.5917,重复次数的极差值为 0.4503。可以看出,激光重复频率对深宽比的影响远大于扫描速度和重复次数。以深宽比为指标的最佳参数组合是:激光重复频率 40 kHz,扫描速度 0.07 m/s,重复次数 25 次。采用同样的方法分析各参数对切缝深度的影响,得到的结论是:扫描速度对切缝深度的影响最大,重复次数的影响次之,激光重复频率的影响最小。

正交试验结果表明激光重复频率对切缝深宽

比的影响最大。在激光重复频率较低条件下,当激光平均功率较小时,切缝宽度和深度都较小;随着激光功率增大,切缝深度增大的速度比宽度增大的速度大很多。这是因为激光光斑内的能量沿着半径衰减,切缝宽度方向上扩散的热量很快就不足以烧蚀更多的材料,导致深宽比增加。当激光重复频率增加时,平均功率减小,切缝深度和切缝宽度都减小,但是从图 3 可以看出,平均功率降低的幅度很小,切缝宽度变化不大,但切缝深度明显减小,深宽比下降。扫描速度和重复次数对切缝深度的影响最大,当扫描速度过快时,待加工区吸收的能量少,烧蚀不完全,切缝深度减小,深宽比减小;随着重复次数增加,切缝底部的熔融材料增多,并在蒸气反作用下发生溅射,切缝深度减小,若此时切缝本身就浅,熔融材料飞溅至切口形成重铸层,切缝宽度增加,深宽比也会下降。

综合考虑深宽比和切缝深度后,选择最优激光加工参数为:激光重复频率 40 kHz,扫描速度 0.07 m/s,重复次数 25 次。在此工艺参数下得到的切缝深宽比为 4.0137,切缝深度为 117.2 μm ,加工效果如图 10 所示。

表 4 正交试验方差分析计算表

Table 4 Calculation table of variance analysis of orthogonal test

No.	Laser repetition frequency /kHz	Scanning speed /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Repetition times	Random value	Depth-to-width ratio		Slit depth / μm	
	1	2	3	4				
1	40	0.07	15	1	3.795		88.8	
2	40	0.1	20	2	3.383		91.0	
3	40	0.2	25	3	3.291		90.5	
4	50	0.07	25	2	2.893		83.6	
5	50	0.1	15	3	2.912		86.2	
6	50	0.2	20	1	1.832		55.5	
7	60	0.07	20	3	2.104		50.7	
8	60	0.1	25	1	2.486		68.6	
9	60	0.2	15	2	1.894		57.4	
	Average depth-to-width ratio				Average slit depth			
	3.4897	2.9307	2.8670	2.7043	90.10	74.37	77.47	70.97
\bar{T}	2.5457	2.9270	2.4397	2.7233	75.10	81.93	67.97	77.33
	2.1613	2.3390	2.8900	2.7690	58.90	67.80	80.90	75.80
R	1.3284	0.5917	0.4503	0.0647	11.20	14.13	12.93	1.53

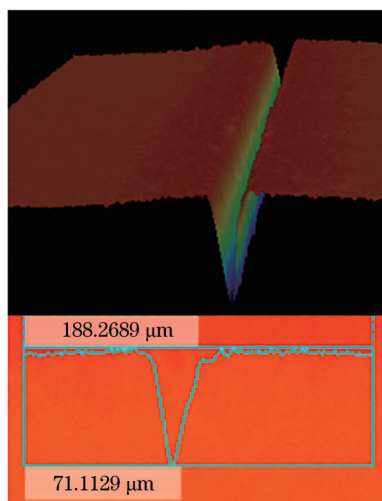


图 10 最优参数组合下的切缝形貌图

Fig. 10 Slit morphology under the optimal parameter combination

4 结 论

本课题组基于实验研究了激光重复频率、激光扫描速度和重复次数这三个参数对超薄氧化铝陶瓷基板盲切加工时切缝宽度和深度的影响,并得到以下结论:

1) 随着激光重复频率增大,切缝宽度先增大后基本维持不变,切缝深度则先增大后减小。这是由于激光重复频率在 20~150 kHz 范围内变化时,平均功率先增大后减小,平均功率增大时,待加工区

域接收的能量增多,材料去除率变大,切缝宽度和深度都增大;随后扩散的能量不足以烧蚀切缝边缘处更多的材料,切缝宽度维持不变;当激光重复频率增至 80 kHz 以后,平均功率减小,切缝深度随之同步减小。

2) 切缝深度受激光扫描速度和激光重复次数的影响较大。当扫描速度较快时,相邻脉冲重叠率减小,加工区域单位体积内吸收的脉冲数减少,即使重复次数的增加会促使深度增大,但随着重复次数增加,切缝内部熔融溅射的比例增大,切缝深度依旧会减小;当激光扫描速度过慢时,由于脉冲重叠率增加,切缝内温度升高,在激光束带来的空气对流的作用下,温度梯度增大,材料部分区域的热应力超过强度极限,产生裂纹,陶瓷基板发生碎裂。

3) 考虑到激光重复频率、扫描速度、重复次数这几个参数的综合影响,通过正交试验法确定了纳秒紫外激光高深宽比盲切的最优参数组合:激光重复频率 40 kHz,激光扫描速度 0.07 m/s,重复次数 25 次。在此工艺参数下得到的切缝的深宽比高达 4.0173,切缝深度为 117.2 μm 。

参 考 文 献

- [1] Song W D. Research status of ceramic substrate materials for electronic packaging[J]. Chinese Powder Industry, 2019(4): 25-27.

宋维东. 电子封装用陶瓷基片材料的研究现状[J]. 中

- 国粉体工业, 2019(4): 25-27.
- [2] Zhou J G. Analysis of difficulties in alumina ceramic processing and selection of processing methods[J]. Chemical Enterprise Management, 2020(32): 148-149.
周继光. 95 氧化铝陶瓷加工难点分析及加工方法选择[J]. 化工管理, 2020(32): 148-149.
- [3] Xu Z M, Meng X K, Qu Y R, et al. Process parameter optimization of Al_2O_3 ceramics milled with nanosecond pulsed laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 231404.
许兆美, 孟宪凯, 屈彦荣, 等. 纳秒脉冲激光铣削 Al_2O_3 陶瓷工艺参数的优化[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 231404.
- [4] Ashkenasi D, Rosenfeld A, Varel H, et al. Laser processing of sapphire with picosecond and sub-picosecond pulses[J]. Applied Surface Science, 1997, 120(1/2): 65-80.
- [5] Cheng H, Chen M X, Hao Z L, et al. Progress of technologies and applications of ceramic substrate for the packaging of power electronics[J]. Electronic Components and Materials, 2016, 35(1): 7-11.
程浩, 陈明祥, 郝自亮, 等. 功率电子封装用陶瓷基板技术与应用进展[J]. 电子元件与材料, 2016, 35(1): 7-11.
- [6] Sebastian M T, Ubic R, Jantunen H. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties[J]. International Materials Reviews, 2015, 60(7): 392-412.
- [7] Zhang G L, Hao N, Yang Z G, et al. Research progress of electronic packaging ceramics [J]. Journal of Ceramics, 2021, 42(5): 732-740.
张光磊, 郝宁, 杨治刚, 等. 电子封装陶瓷的研究进展[J]. 陶瓷学报, 2021, 42(5): 732-740.
- [8] Ji L F, Yan T Y, Jiang R, et al. Picosecond laser precision processing of ceramic gear[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111429.
季凌飞, 燕天阳, 姜锐, 等. 陶瓷齿轮皮秒激光高精加工研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111429.
- [9] Zhang R H, Li W N, Liu Y S, et al. Machining parameter optimization of C/SiC composites using high power picosecond laser[J]. Applied Surface Science, 2015, 330: 321-331.
- [10] Liu Q, Meng F Z, Tian X L, et al. Research progress of machining ceramics by abrasive water jet [J]. Tool Engineering, 2018, 52(4): 3-6.
刘谦, 孟凡卓, 田欣利, 等. 磨料水射流加工陶瓷的研究进展[J]. 工具技术, 2018, 52(4): 3-6.
- [11] Huang Y T, Qu X H. Research on application and development of machining technology for engineering ceramics[J]. Journal of Beijing Polytechnic College, 2012, 11(4): 18-21.
黄宇婷, 曲晓海. 工程陶瓷加工技术的应用与发展研究[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2012, 11(4): 18-21.
- [12] Jia Z X, Huang J G, Gao J Q, et al. Study on laser cutting technology of Al_2O_3 ceramic[J]. Electromachining & Mould, 2017(1): 39-42, 64.
贾志新, 黄金刚, 高坚强, 等. Al_2O_3 陶瓷激光切割工艺研究[J]. 电加工与模具, 2017(1): 39-42, 64.
- [13] Zhang D M, Yuan G F, Xie B B. Experimental study on the quality of multi-pass laser cutting of Al_2O_3 ceramic assisted with water jet[J]. Applied Laser, 2016, 36(1): 67-71.
张大明, 袁根福, 谢兵兵. 水射流激光复合多道切割 Al_2O_3 陶瓷质量的试验研究[J]. 应用激光, 2016, 36(1): 67-71.
- [14] Ma L X, Wang L N, Guo J, et al. Study on cutting alumina ceramics by novel hybrid laser and water-jet [J]. Foundry Technology, 2019, 40(9): 895-898.
马林旭, 王丽娜, 郭健, 等. 新型复合式激光水射流切割氧化铝陶瓷实验方法研究[J]. 铸造技术, 2019, 40(9): 895-898.
- [15] Zhao J. Numerical simulation of laser cutting ceramic machining process[J]. Ceramics, 2019(11): 25-34.
赵婧. 激光切割陶瓷加工过程的数值模拟研究[J]. 陶瓷, 2019(11): 25-34.
- [16] Beausoleil C, Yazdani Sarvestani H, Katz Z, et al. Deep and high precision cutting of alumina ceramics by picosecond laser[J]. Ceramics International, 2020, 46(10): 15285-15296.
- [17] Feng Y H. Research on laser processing technology and optimization of traditional ceramics[D]. Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic University, 2020.
冯运亨. 传统陶瓷激光加工工艺及优化[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷大学, 2020.
- [18] Esmail I, Yazdani Sarvestani H, Gholipour J, et al. Engineered net shaping of alumina ceramics using picosecond laser[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 135: 106669.
- [19] Zhang F. UV laser micromachining technology and mechanism of electronic materials[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
张菲. 电子材料紫外激光微加工技术与机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [20] Wang X L, Jiang Z H, Wu B C. Technology of laser marking ceramics plate[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1997, 31(10): 82-84

- 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): 82-84
- [21] Mei X S, Yang Z X, Zhao W Q. Laser hole drilling on surface of electronic ceramic substrates[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500011.
梅雪松, 杨子轩, 赵万芹. 电子陶瓷基板表面激光孔加工综述[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500011.
- [22] Bai J X, Li H J. V500 CO₂ laser machine and its Al₂O₃ electronic ceramic substrate processing technology [J]. Ceramics, 2014(11): 31-33.
- 白军信, 李宏杰. V500 型 CO₂ 激光机及其 Al₂O₃ 电子陶瓷基板加工技术[J]. 陶瓷, 2014(11): 31-33.
- [23] Küper S, Stuke M. Ablation of UV-transparent materials with femtosecond UV excimer laser pulses [J]. Microelectronic Engineering, 1989, 9(1/2/3/4): 475-480.
- [24] Hanada Y, Sugioka K, Miyamoto I, et al. Double-pulse irradiation by laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) and mechanisms study[J]. Applied Surface Science, 2005, 248(1/2/3/4): 276-280.