

脉冲光纤激光控制断裂切割超薄钛酸锶陶瓷基片

江伟 谢小柱 魏昕 胡伟 任庆磊 翁清

广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006

摘要 钛酸锶陶瓷是软脆难加工的材料,机械加工容易导致表面产生划痕和破裂。采用主控振荡器的功率放大器(MOPA)脉冲光纤激光控制断裂切割钛酸锶陶瓷基片,通过实验得到了激光控制切割机理。首先用激光扫描去除材料,形成应力槽;随着扫描次数的增加,切槽深度增加;热应力达到该材料的断裂阈值,使裂纹沿应力槽扩展,直至完全断裂。该过程属于自适应裂片,无需后续裂片工艺。此外还发现在激光烧蚀材料过程中出现表面平坦化现象。通过选择合适的工艺参数,可以实现0.3 mm厚钛酸锶陶瓷基片的成形切割。

关键词 激光技术;激光控制断裂切割;光纤激光器;软脆材料;钛酸锶陶瓷

中图分类号 O436; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0503008

Pulse Fiber Laser Controlled Fracture Cutting of Ultrathin Strontium Titanate Ceramic Substrate

Jiang Wei Xie Xiaozhu Wei Xin Hu Wei Ren Qinglei Weng Qing

School of Electro-Mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract Strontium titanate ceramics with the feature of soft and brittle is difficult to process by mechanical processing method, because this method can easily cause crack and scratch on the surface. Master oscillator power amplifier (MOPA) pulsed fiber laser is conducted to controlled fracture cutting strontium titanate ceramic substrate. The mechanism of laser controlled fracture cutting is revealed as follows. Firstly the grooves formed by laser ablation. The groove depth then increases with the increase of the scanning times. When the thermal stress reaches the fracture threshold value of the material, the crack extends along the stress groove until it is completely split. It is an adaptive splitting process without the subsequent breaking procedure. In addition, it is found that the surface flattening and smoothing phenomenon occur in laser ablation of material. Strontium titanate ceramic substrate with the thickness of 0.3 mm can be shape cut by selecting appropriate laser processing parameters.

Key words laser technique; laser controlled fracture cutting; fiber laser; soft and brittle material; strontium titanate ceramics

OCIS codes 140.3390; 140.3430; 140.3510; 140.6810

1 引言

作为一种新型多功能电子陶瓷材料,钛酸锶陶瓷具有介电常数大、介电损耗低、热稳定性好、电绝缘性能好、禁带宽度大等优点,同时又具有优良的光催化活性、微波特性和温度稳定性^[1-3]。钛酸锶陶瓷作为微电子元件的衬底被广泛地应用在电子、通讯、自动控制等领域^[4]。然而,钛酸锶陶瓷的莫氏硬度为5~6,属于软质材料,表面易产生划痕;此外,钛酸锶陶瓷的晶界层厚度薄,脆性系数高,容易产生脆性断裂破坏^[5],因此钛酸锶陶瓷属于难加工的软脆材料。采用钛酸锶陶瓷基片制作电子元件时,对基片的尺寸形状、表面形貌、表

收稿日期: 2016-01-12; **收到修改稿日期:** 2016-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(51575114, 51275096)、广东省自然科学基金(S2013010014070)、广东省普通高校特色创新项目(2014KTSCX059)

作者简介: 江伟(1991-),男,硕士研究生,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: jiangweime@outlook.com

导师简介: 谢小柱(1975-),男,博士,教授,主要从事激光加工和超精密加工技术等方面的研究。

E-mail: xiaozhuxie@gdut.edu.cn(通信联系人)

面粗糙度等都有严格的要求。因此,钛酸锶陶瓷基片切割技术对于提高电子元器件的成品率和加工效率具有重要的意义。

传统加工方法一般先烧结成型得到钛酸锶陶瓷,然后用切片机切割,但是切片机容易使工件发生破碎和翘曲,难以加工复杂的图形,且加工效率较低。另外,由于钛酸锶陶瓷的化学稳定性较好,因此难以通过化学加工方法对其进行加工,而使用连续激光切割钛酸锶陶瓷又容易使其炸裂。相比之下,脉宽可调谐的主控振荡器的功率放大器(MOPA)脉冲光纤激光器更适合对钛酸锶陶瓷基片进行加工,因为这种激光器具有高光束质量($M^2 < 1.2$)、窄脉宽(4~200 ns)、高峰值功率、高重复频率等优点,有利于低损伤去除表面材料^[6-7]。

材料的断裂可以分为两个过程:一是微裂纹的产生,二是裂纹的扩展。目前控制断裂切割的方法主要有以下几种:1)采用传统机械法加工,然后采用机械方法进行裂片^[8-9];2)采用激光进行划切或打孔,然后采用机械方式进行裂片^[10];3)先采用聚焦激光进行划切,然后采用离焦光斑进行扫描裂片^[11-13];4)采用激光进行划切,然后配合使用水射流冷却液或者喷冷却气体进行裂片^[14]。以上控制裂片法都需要后续施加辅助裂片工艺。

本文提出采用 MOPA 脉冲光纤激光控制断裂切割超薄钛酸锶陶瓷的新方法,实现超薄基片的任意形状的成形切割,无需后续辅助裂片工艺。采用量热法测定钛酸锶陶瓷基片对 1064 nm 激光的吸收率,研究激光烧蚀钛酸锶陶瓷基片的机理和激光控制断裂切割的过程,采用激光共聚焦显微镜测量切槽尺寸和表面粗糙度,采用扫描电镜(SEM)观察陶瓷基片表面和断面的微观形貌,采用能谱仪(EDS)分析加工前后基片的表面成分。

2 实 验

2.1 实验材料

样件为无压烧结的钛酸锶陶瓷基片,尺寸为 39 mm × 39 mm,平均厚度约为 0.3 mm,翘曲度约为 0.1 mm。钛酸锶陶瓷的原始表面 SEM 图如图 1 所示,由于样件通过无压烧结方式制备而成,因此可以看到样件表面存在较多的气孔,致密性较差,表面凹凸不平。

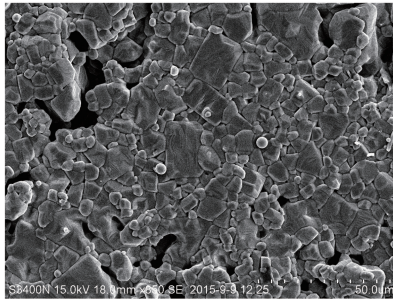


图 1 钛酸锶陶瓷基片 SEM 图

Fig. 1 SEM image of the strontium titanate ceramic substrate

2.2 实验方法

实验的加工装置如图 2 所示。实验采用 IPG 公司的 YLPM 系列掺镱光纤激光器作为光源,激光器参数如表 1 所示。扫描振镜采用 SCANLAB 公司生产的高速振镜,最大转速可达 100 rad/s,最大扫描速度可达 2000 mm/s。

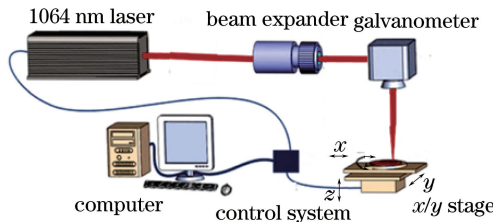


图 2 加工装置示意图

Fig. 2 Sketch map of the experimental setup

表 1 激光器主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of the laser

Technical parameter	Value
Wavelength λ /nm	1064
Pulse duration τ /ns	4~200
Max repetition frequency f /kHz	1000
Max output power P /W	20
Max scanning velocity / (mm/s)	2000
Focal spot size / μm	17

由于附着在表面的污染物会影响钛酸锶陶瓷对激光的吸收率,造成实验误差;激光加工后陶瓷的切槽周围会有重凝层和碎屑,不利于对切槽微细结构进行观测。因此,实验前对样品用去离子水进行超声波清洗,然后进行干燥处理;实验后对样品依次使用丙酮溶液、去离子水各进行一次超声波清洗,每次清洗时间为 5 min,最后进行干燥处理^[15]。样品对激光的吸收率采用量热法通过激光功率计测算得到,实验后样品的表面和断面微观形貌通过 SEM(Philips Nova NanoSEM 230)进行观察,样品的表面成分通过 EDS 进行分析,样品的微观尺寸和表面粗糙度通过激光共聚焦显微镜(OLYMPUS 4000)测得。实验中选取刻槽的 3 个不同位置(均匀分布在刻槽上)进行测量,然后求取测量值的平均值,这样能够保证测量值具有较好的一致性。

3 结 果

3.1 激光烧蚀钛酸锶陶瓷的机理

3.1.1 脉宽的影响

激光与材料相互作用时会受到激光参数(能量密度、脉宽、波长、脉冲数等)及材料属性等因素的影响。目前激光与材料相互作用的机理可以分为光热、光化学和光物理作用。在实验过程中,往往是几个机理混合作用才能达到材料去除的目的,很难确切区分^[16-17]。

在激光加工领域,脉冲宽度的定义为:激光功率维持在一定值的时间,不同的脉冲宽度所对应的加工机理不尽相同。因此,有必要研究不同脉冲宽度的激光作用于钛酸锶陶瓷材料时的特点。目前所用激光器均为脉宽可调设备,脉冲宽度有 8 个档位:4、8、14、20、30、50、100、200 ns。为了研究不同脉冲宽度对激光切割钛酸锶陶瓷材料去除机理的影响,进行了脉宽的单因素实验,除脉宽外其他的实验条件为:脉冲能量 0.4 mJ,频率 25 kHz,扫描速度 750 mm/s,扫描次数 5 次。观测不同脉宽所对应的加工结果,如图 3 所示。

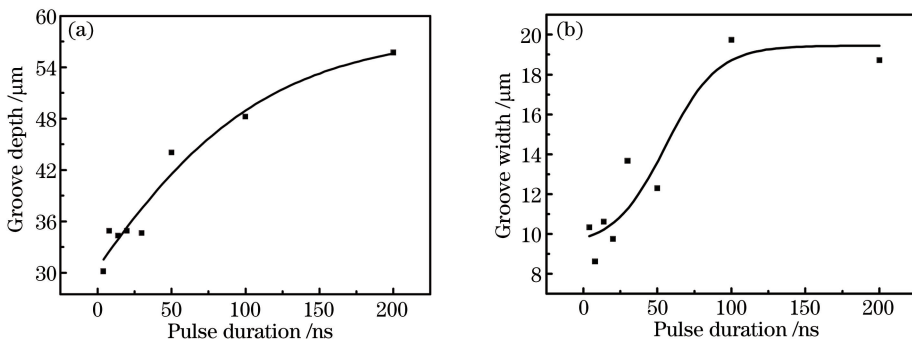


图 3 不同脉宽对刻槽的(a)深度和(b)宽度的影响

Fig. 3 Effect of pulse duration on (a) depth and (b) width of the groove

目前关于激光脉冲宽度变化对材料去除机理的影响有两种学说^[18-19]: 1) 随着脉冲宽度的增大,时间能量密度减小,材料蒸发减弱,熔化增强,因此蒸汽压力减小,从而导致材料的去除量减小; 2) 随着脉冲宽度的增大,热作用时间变长,热积累效应增强,从而使材料的去除量增加。从图 3 可知,随着脉冲宽度的增加,刻槽的深度和宽度整体呈增加的趋势。因此可从实验结果得知:当脉宽尺度在纳秒级别,脉宽变化时,热积累效应对材料去除的影响占主导地位。

由不同脉冲宽度样品表面的 SEM 形貌可知:脉冲红外激光作用于钛酸锶陶瓷时,材料去除机制以光热作

用为主。选择脉宽为 100 ns 时所对应的表面 SEM 图(图 4)进行观察,可以看到烧蚀区域的形貌特征明显,表明在烧蚀过程中存在热积累效应。图 4(b)所示为局部放大图,可以看到刻槽底部有细微的裂纹产生,两侧有堆积产生,因此可以判断出纳秒激光加工钛酸锶陶瓷基片的材料去除机理主要是熔化和气化。脉宽为 100 ns 时,可形成质量相对较好的应力槽,有利于控制断裂切割。因此选择脉宽为 100 ns 进行后续机理研究。

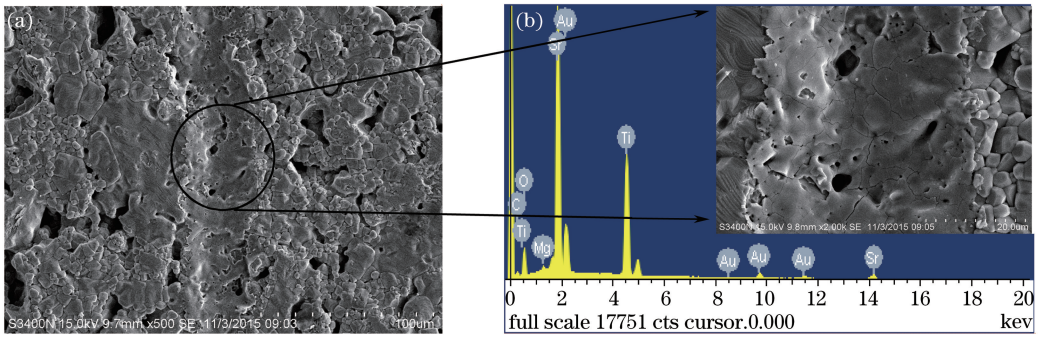


图 4 脉冲宽度为 100 ns 时(a)样件表面的 SEM 图; (b)刻槽局部放大 SEM 图和 EDS 结果

Fig. 4 (a) SEM image of the sample surface; (b) SEM image and EDS result of the partial enlargement groove at the pulse duration of 100 ns

通过 EDS 对激光加工区域和未加工区域进行分析,发现未经过激光加工的钛酸锶陶瓷材料主要含有 Ti、Sr、O 三种元素,其原子数分数分别为 24.256%、24.256%和 43.420%。经过激光加工后,刻槽底部的元素种类仍然是 Ti、Sr、O 三种元素,而且原子数分数基本没有变化,分别为 24.554%、32.327%和 43.118%,EDS 结果如图 4 所示。钛酸锶禁带宽度为 3.4 eV,波长 1064 nm 脉冲红外激光的光子能量为 1.3 eV,光子能量低于禁带宽度,很难通过单光子吸收直接破坏化学键;其功率密度仍未达到 10^6 W/cm²,所以不能发生明显的多光子吸收。因此,脉冲红外激光烧蚀钛酸锶陶瓷过程中不存在光化学作用,其作用机理主要属光热作用范畴。

3.1.2 表面平坦光滑化

此外,当扫描次数较少时,通过对比激光扫描前后的样件表面,发现样件表面的致密性变好,气孔变少甚至消失,表面变得更加平整与光滑,气孔率降低约 90%。从样件形貌可以发现:激光烧蚀钛酸锶陶瓷过程中具有表面平坦光滑化的阶段。对比激光加工前后钛酸锶陶瓷表面的粗糙度,也发现陶瓷的表面粗糙度减小(约 20%),如图 5 所示。此次实验参数为:脉冲能量 0.3 mJ,频率 25 kHz,扫描速度 1000 mm/s,扫描 5 次,脉宽 100 ns。

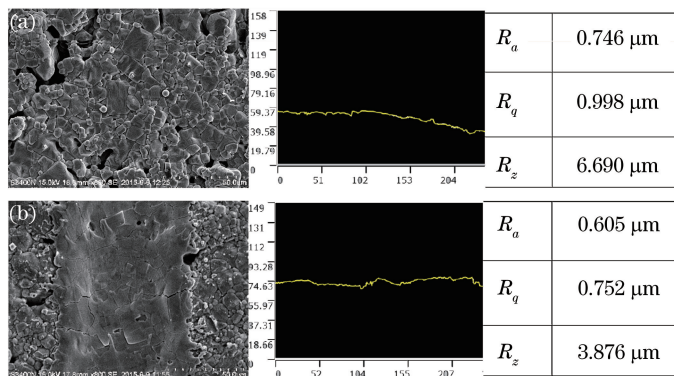


图 5 (a)加工前和(b)加工后的钛酸锶陶瓷表面形貌及粗糙度

Fig. 5 Surface micro-morphology and roughness of the strontium titanate ceramics (a) before and (b) after laser processing

从图 5 可知,经过激光加工后陶瓷的表面粗糙度数值明显变小,这也证实了激光加工使陶瓷表面经历了平坦光滑化的过程。出现这种现象的原因是:钛酸锶陶瓷表面经激光高温作用后,烧蚀区域内的材料迅速熔化甚至气化,然后冷却,熔融物冷却之后重新流动聚集,将原有的气孔填补上,降低了表面气孔率,提高了致密性,从而使表面更加致密和光滑,形成一个表面平坦光滑化的过程。

3.2 激光控制断裂切割的机理和过程

发生脆性变形的材料,在材料被去除之后会形成微裂纹,而这些微裂纹的端部正是应力集中的地方,其临近部分所储存的应变能逐步转变成断裂表面能,从而使裂纹进一步扩展,造成材料的强度降低,进一步导致材料的断裂。

材料的断裂可以看成是两个过程:1)微裂纹的产生,2)裂纹的扩展。根据 Inglis 微裂纹端部应力集中理论:

$$\sigma_m = \sigma \left[1 + 2 \left(\frac{c}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (1)$$

式中 σ_m 是微裂纹端部的最大应力, σ 是外加的应力, c 是微裂纹长度的一半, ρ 是端部曲率半径。当外力较小时,裂纹很快达到理论强度,从而使裂纹扩展,即 c 增长,如此往复,最终使材料断裂。

分析发现激光烧蚀机理主要是热作用,而钛酸锶陶瓷是软脆材料,断裂阈值低,可以利用热应力达到其断裂阈值,从而完成材料切割。

在激光加工钛酸锶陶瓷的过程中,能量传递到材料上,加工结束后材料快速冷却,并形成很大的热应力梯度,当热应力大于材料的断裂应力时,就会产生微裂纹。热应力计算公式^[20]为

$$\sigma = G\gamma \frac{AI \sqrt{\alpha t}}{\kappa(1-\nu)} \text{ierfc} \left(\frac{z}{\sqrt{4\alpha t}} \right), \quad (2)$$

式中 G 为杨氏模量, γ 为线性热膨胀系数, A 为吸收率, I 为激光能量密度, α 为热扩散系数, t 为加热时间, κ 为热导率, z 为热源与作用面之间距离, ν 为泊松比, $\text{ierfc}()$ 为高斯补误差函数的一次积分值。由(2)式可知,激光能量密度越高,热应力越大。采用量热法测得钛酸锶陶瓷对不同入射角激光的吸收率如图 6 所示。

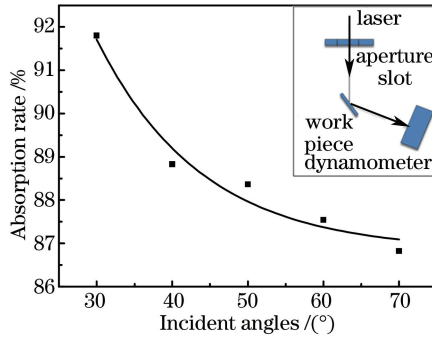


图 6 钛酸锶陶瓷对不同入射角激光的吸收率

Fig. 6 Laser absorptivity of the strontium titanate ceramics with different incident angles

钛酸锶陶瓷属于软脆材料,蓝宝石则属于硬脆材料,这两种材料的有关物理性质如表 2 所示。由(2)式可知:当热应力越大,且断裂应力越小时,材料越容易发生断裂。从表 2 可知,钛酸锶陶瓷材料的线性热膨胀系数、吸收率、热扩散系数等参数都远远大于蓝宝石,因此在加工条件相同时,钛酸锶陶瓷加工区域的热应力远远大于蓝宝石的热应力。另外,钛酸锶陶瓷材料的断裂应力阈值 σ_{th} 远远小于蓝宝石材料的断裂阈值,所以在相同的激光加工条件下,钛酸锶陶瓷作为一种软脆材料,由于断裂阈值低,吸收率高,较容易在加工过程中产生自适应断裂;而蓝宝石材料作为一种硬脆材料,由于断裂阈值高,吸收率低,较难出现热应力直接导致断裂的现象^[24],通常需要后续施加辅助裂片工艺。

表 2 钛酸锶陶瓷和蓝宝石的物理性质^[21-23]

Table 2 Physical properties of strontium titanate ceramics and sapphire

Physical property	Sapphire	Strontium titanate ceramic
G /GPa	345	300
γ /K ⁻¹	4.3×10^{-6}	9.4×10^{-6}
A	0.03	0.9
α /(cm ² /s)	0.096	22000
κ /(W · cm ⁻¹ · K ⁻¹)	0.325	0.06
ν	0.18	0.23
σ_{th} /GPa	20	0.16

为了验证上述理论分析,采用脉冲能量为 0.5 mJ、扫描速度为 1000 mm/s、重复频率为 25 kHz、脉冲宽度为 100 ns 的激光划切钛酸锶陶瓷基片。当扫描次数为 12 次时,钛酸锶陶瓷并未断裂,切槽深度仅为 42.68 μm 。但当保持其他条件不变,再扫描一次时,钛酸锶陶瓷立即被切穿。观察切穿后的陶瓷断面及其局部放大图,如图 7 所示,发现激光烧蚀区较浅,其深度约占整个材料厚度的 1/5,而且在激光烧蚀区域有明显的裂纹产生,裂纹扩展的方向与厚度放向一致,而断裂区域占到材料厚度的 4/5。

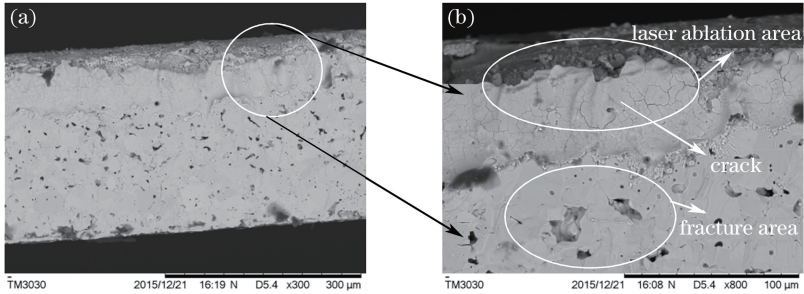


图 7 (a) 激光控制断裂切割钛酸锶陶瓷断面 SEM 图; (b) 局部放大图

Fig. 7 (a) Section SEM image of strontium titanate ceramics by laser controlled fracture cutting;
(b) partial enlargement image

产生这种现象的原因分析如下:随着扫描次数的增加,切槽的深度逐渐增加[图 8(a)],但是由于激光的热作用区域有限,因此切槽深度的增加趋势逐渐减缓,切槽的深度区域饱和,形成应力槽[图 8(d)]。继续增加扫描次数时,热应力变大,又由公式推导可知,钛酸锶陶瓷的断裂阈值很小,所以当热应力大于断裂应力时,就会产生微裂纹,形成应力槽。当激光继续扫描时,产生的热应力转变成断裂表面能,导致裂纹沿着厚度方向进一步扩展,造成材料的强度降低,直至钛酸锶陶瓷完全断裂。因此,可以在其他条件不变的情况下,逐渐增加扫描次数,并观察切槽的截面,如图 8 所示。可以看到随着扫描次数的增加,切槽的深度逐渐增加,但当扫描达到一定次数后,切槽两侧开始出现熔融和堆积,如图 8(e)所示。

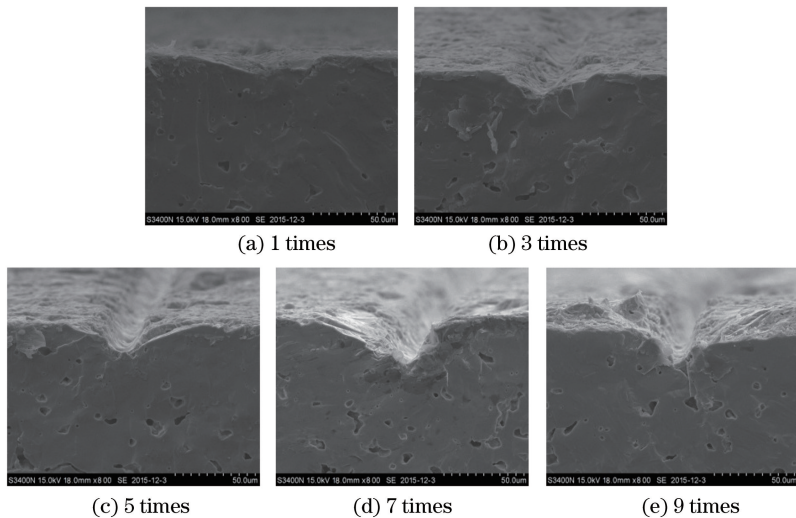


图 8 不同扫描次数对应的钛酸锶陶瓷截面 SEM 图

Fig. 8 Cross section SEM images of strontium titanate ceramics with different scanning times

通过上述实验结果可知,脉冲光纤激光控制断裂切割钛酸锶陶瓷材料的过程当中,导致材料被切穿的原因:在前几次激光扫描过程中,钛酸锶陶瓷材料去除量较少,形成应力槽[图 8(b)];随着激光扫描次数的增加,材料表面吸收的激光能量增多,使得热应力增加,直至达到钛酸锶陶瓷的断裂阈值,又由于应力槽处存在应力集中,使得裂纹沿槽深的方向形成定向扩展[图 8(c)~(d)],直至钛酸锶陶瓷定向断裂,最后完全断裂[图 8(e)]。因此,激光控制断裂切割钛酸锶陶瓷是一个自适应裂片的过程,详细的切割过程示意图如图 9 所示。

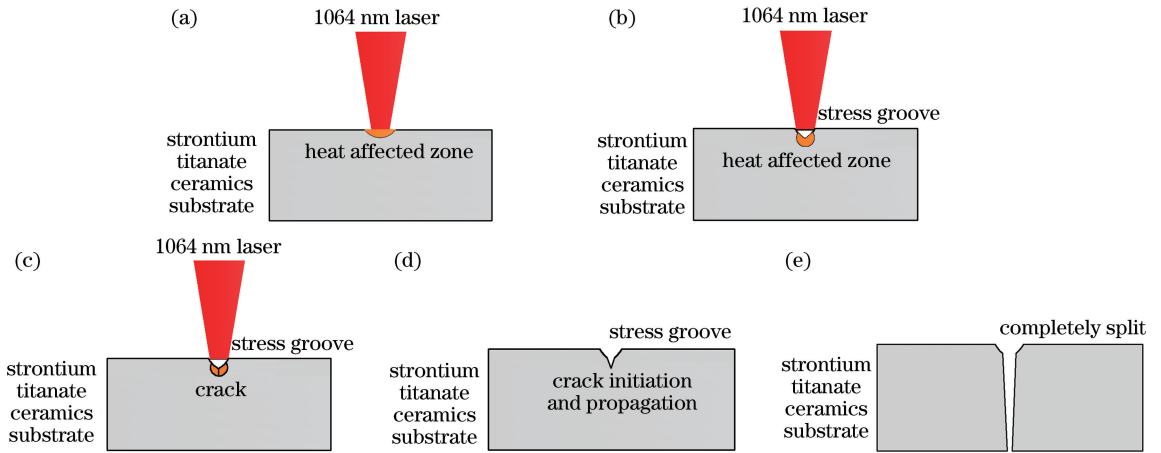


图 9 (a)~(e)为激光控制断裂切割钛酸锶陶瓷基片过程示意图

Fig. 9 (a)~(e) are schematic diagrams of laser controlled fracture cutting strontium titanate ceramic substrate

3.3 切割钛酸锶陶瓷基片成形件

通过振镜头来控制激光束的扫描路径,可以使扫描路径更加灵活。利用这种方法可以从 0.3 mm 厚的钛酸锶陶瓷片上获得任意形状的切割件,如图 10(a)所示,该图展示了使用脉冲光纤激光控制断裂切割技术从钛酸锶陶瓷基片上获得的圆形、椭圆形、正方形、多边形和字母 C 等多种形状的成形件。其中,圆形件的直径为 4 mm,正方形的边长为 3 mm。图 10(b)为成形件断面的 SEM 图,可以看到断面质量较好。通过这种方法还可以在钛酸锶陶瓷基片上获得其他形状的成型件。

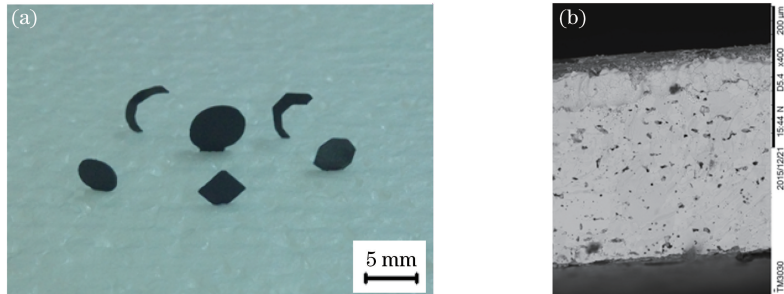


图 10 (a) 异形切割件; (b) 断面 SEM 图

Fig. 10 (a) Special-shaped cutting pieces; (b) SEM image of section

4 结 论

使用 MOPA 脉冲光纤激光控制断裂切割钛酸锶陶瓷基片,研究加工后的微观形貌和特征尺寸以及过程,分析加工机理和材料去除机制,得出以下结论。

1) MOPA 脉冲光纤激光烧蚀钛酸锶陶瓷基片的机理分析表明:应力槽的形成主要是基于光热作用,包括材料吸收热量、融化、气化、重凝、喷溅等过程。

2) 当扫描次数较少时,钛酸锶陶瓷基片被激光烧蚀后的区域呈现“平坦光滑化”的现象,被加工区域致密度显著提高,气孔率降低约 90%,表面粗糙度减小约 20%。

3) MOPA 脉冲光纤激光控制断裂切割钛酸锶陶瓷基片的过程如下:激光在前几次扫描过程中材料去除量较少,形成应力槽;随着激光扫描次数的增加,材料表面吸收的激光能量增多,使热应力增加,直至达到钛酸锶陶瓷的断裂阈值,又由于应力槽处存在应力集中状态,使得裂纹沿应力槽槽深的方向定向扩展,直至完全断裂成形。

4) 激光控制裂片切割钛酸锶陶瓷基片的过程是一种自适应裂片过程,无需后续裂片工艺,利用这种工艺可以获得各种切割质量良好的成形切割件。

参 考 文 献

- 1 Ranman Q I, Anmad M, Misra S K, *et al.*. Efficient degradation of methylene blue dye over highly reactive Cu doped strontium titanate (SrTiO_3) nanoparticles photocatalyst under visible light [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2012, 12(9): 7181-7186.
- 2 Zheng Xiaobing. Research on dielectric property of barium strontium calcium titanate-based ferroelectric ceramics[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011: 11-25.
郑晓斌. 钛酸锶钡钙基铁电陶瓷的介电性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2011: 11-25.
- 3 Wan Xiaojing, Wang Li, Chen Jiangbo, *et al.*. Effect of variable partial pressure of oxygen for SrTiO_3 thin films using pulsed laser deposition[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(9): 0907002.
万晓婧, 王 丽, 陈江博, 等. 氧分压对脉冲激光沉积 SrTiO_3 薄膜性质的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0907002.
- 4 Scott D J, Manos S, Coveney P V, *et al.*. Functional ceramic materials database: An online resource for materials research[J]. *Journal of Chemical Information & Modeling*, 2008, 48(2): 449-455.
- 5 Wang Wei. Study on two-sided lapping of SrTiO_3 ceramic substrates and its surface quality[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014: 11-20.
王 威. 钛酸锶陶瓷基片双面研磨工艺及其表面质量研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014: 11-20.
- 6 Zhang Wei, Li Guozhu, Wang Chunming, *et al.*. Process optimization and design of fiber laser cutting aluminium-lithium alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0203003.
张 威, 李国柱, 王春明, 等. 铝锂合金光纤激光切割的工艺优化与设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0203003.
- 7 Chen Cong, Gao Ming, Gu Yunze, *et al.*. Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0603004.
陈 聪, 高 明, 顾云泽, 等. 光纤激光切割铝合金薄板工艺特性研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0603004.
- 8 Kang H S, Hong S K, Oh S C, *et al.*. A study of cutting glass by laser[C]. *SPIE*, 2002, 4426: 367-370.
- 9 Zhimalov A B, Solinov V F, Kondratenko V S, *et al.*. Laser cutting of float glass during production[J]. *Glass and Ceramics*, 2006, 63(9): 3-5.
- 10 Tsai C H, Liou C S. Fracture mechanism of laser cutting with controlled fracture[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2003, 125(3): 519-528.
- 11 Tsai C H, Ou C H. Machining a smooth surface of ceramic material by laser fracture machining technique[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155-156: 1797-1804.
- 12 Tsai C H, Chen H W. Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 136(1-3): 166-173.
- 13 Pereles-Santiago V, Washington M, Brugan P, *et al.*. Faster and damage-reduced laser cutting of thick ceramics using a simultaneous prescore approach[J]. *Journal of Laser Applications*, 2005, 17(4): 219-224.
- 14 Kondratenko V S. Method of splitting non-metallic materials: US: 5609284A[P]. 1977-03-11.
- 15 Xie Xiaozhu, Huang Xiandong, Chen Weifang, *et al.*. Study on scribing of sapphire substrate by pulsed green laser irradiation[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 4(12): 1203010.
谢小柱, 黄显东, 陈蔚芳, 等. 脉冲绿激光划切蓝宝石过程研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1203010.
- 16 Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of heat in solids[M]. England: Oxford University Press, 1959: 33-50.
- 17 Zhao Qingliang, Jiang Tao, Dong Zhiwei, *et al.*. Ablation threshold and material removal mechanisms of SiC processed by femtosecond laser[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(21): 172-177.
赵清亮, 姜 涛, 董志伟, 等. 飞秒激光加工 SiC 的烧蚀阈值及材料去除机理[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(21): 172-177.
- 18 Yan Xingguo, Wang Wenxian, Cui Zeqin, *et al.*. Investigation of cutting process of AZ31B magnesium alloy plate via solid-state pulsed Nd:YAG laser[J]. *Applied Laser*, 2010, 30(5): 381-385.
闫兴贵, 王文先, 崔泽琴, 等. 固体脉冲 Nd:YAG 激光切割 AZ31B 镁合金的工艺研究[J]. *应用激光*, 2010, 30(5): 381-385.
- 19 Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan. Kerf roughness and quality control of laser precision cutting[J]. *Chinese J Lasers*, 2002, 29(2): 176-180.
李祥友, 曾晓雁. 激光精密切割不锈钢模板割缝质量控制[J]. *中国激光*, 2002, 29(2): 176-180.
- 20 Boley B A, Weiner J H. Theory of thermal stresses[M]. New York: Dover Publications Press, 1997: 62-95.
- 21 Dobrovinskaya E R, Lytvynov LA, Pishchik V. Sapphire: material, manufacturing, applications [M]. New York:

Springer Press, 2009: 35-66.

- 22 Yang Junfeng, Feng Yilong, Zhao Haifei, *et al.*. Grain boundary dielectric ceramics and the single layer chip capacitors [J]. *Materials Research and Application*, 2008, 2(3): 207-210.
杨俊锋, 冯毅龙, 赵海飞, 等. 晶界层介电陶瓷及其单层电容器[J]. *材料研究与应用*, 2008, 2(3): 207-210.
- 23 Li Ning, Wang Huiqiong, Zhang Yufeng, *et al.*. Thermal conductivity studies of SrTiO₃ [J]. *Material Sciences*, 2014, (4): 73-79.
- 24 Cai Zhixiang, Gao Xunyin, Yang Wei, *et al.*. Study on fiber laser cutting of sapphire substrate [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 081403.
蔡志祥, 高勋银, 杨 伟, 等. 光纤激光切割蓝宝石基片的工艺研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 081403.