

激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石过程中声发射信号检测试验

罗志良, 谢小柱, 魏昕, 胡伟, 任庆磊, 江伟

广东工业大学机电工程学院, 广东广州 510006

摘要 利用声发射仪对脉冲光纤激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石的过程进行了试验研究。在激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石的过程中检测到的声发射信号包含丰富的特征信息;利用声发射信号的幅度、能量计数和撞击计数等特征参数对激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石过程进行表征;蓝宝石未被切穿时声发射信号表现为声发射事件少,幅度大(90~100 dB),能量计数较大,撞击计数较小;蓝宝石被切穿后声发射信号表现为声发射事件多,幅度小(40~80 dB),能量计数基本为0,撞击计数较大。

关键词 激光技术;激光诱导背向湿式刻蚀;声发射信号;蓝宝石

中图分类号 TN249; O426

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0402003

Experimental Study on Acoustic Emission Signal Detection in Process of Laser-Induced Backside Wet Etching of Sapphire

Luo Zhiliang, Xie Xiaozhu, Wei Xin, Hu Wei, Ren Qinglei, Jiang Wei

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

Abstract An experimental study on the process of backside wet etching sapphire induced by pulse fiber laser is carried out by acoustic emission detector. In the backside wet etching sapphire process induced by laser, the detected acoustic emission signal contains a lot of characteristic information. The backside wet etching sapphire process can be characterized by parameters such as amplitude, marse and hit-counting of acoustic emission signal. Before the sapphire is cut through, the acoustic emission signal shows few acoustic emission events, large amplitude of 90-100 dB, large marse and small hit-counting. After the sapphire is cut through, the acoustic emission signal shows many acoustic emission events, small amplitude of 40-80 dB. Meanwhile, the marse becomes nearly zero, and the hit-counting is large.

Key words laser technique; laser-induced backside wet etching; acoustic emission signal; sapphire

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 140.3440; 140.3430

1 引言

蓝宝石具有高耐磨性、高硬度、高熔点及化学性能稳定等特点,是重要的光学元件和半导体衬底材料,广泛应用于工业、国防和科研等领域^[1-4]。激光诱导背向湿式刻蚀技术具有加工无重凝层、微裂纹少和热影响区域小等优点,工作液体在加工过程中还能起到冷却工件的作用。Zimmer等^[1-5]研究了利用波长为248 nm的激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石、石英等透明材料的机理,结果表明刻蚀温度决定着刻蚀效率,而激光光斑

收稿日期: 2016-11-16; **收到修改稿日期:** 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(51575114)、广东省普通高校特色创新项目(2014KTSCX059)、广州市科技计划(201607010156)、广东省自然科学基金(S2013010014070)

作者简介: 罗志良(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光精密加工过程检测技术方面的研究。

E-mail: 1157740692@qq.com

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

E-mail: xiaozhuxie@gdut.edu.cn(通信联系人)

区域内存在的表面改性也是改变刻蚀效率的原因; Ehrhardt 等^[6-7]使用皮秒激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石等透明材料,该研究表明激光加工参数会影响材料的刻蚀效率,随着激光能量密度的增加,在低能量密度和高能量密度范围内,刻蚀速率以不同的增长率呈线性增长。Dolgaev 等^[8]采用铜蒸气激光(波长为 510 nm)和高锰酸钾、铬铁矿、氯化铁等无机溶液刻蚀加工蓝宝石,激光切口处有金属氧化物沉积层生成,但沉积厚度不均匀。国内外研究人员对激光诱导背向湿式刻蚀技术进行了大量的研究,通过试验与理论相结合的方式研究激光诱导背向湿式加工机理。但是,激光诱导背向湿式刻蚀技术机理较为复杂,涉及激光与样件、工作液体等多层介质层材料相互作用的问题,本课题组在前期研究中发现不同激光工艺参数下,激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石过程中存在声发射信号变化的现象。因此,迫切需要对激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石过程进行声发射信号的检测研究。

材料(或结构)受外力(或内力)作用产生形变(或断裂)时,以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射。声发射技术具有无需接触被测物体、对动态缺陷敏感等优点,广泛应用于加工检测研究领域。毛怀东等^[9-10]利用声发射技术在线检测激光熔覆及冷却过程中裂纹的发生和扩展,对 3 种熔覆粉末的裂纹信号进行了对比分析,发现随着熔覆层面积厚度及冷却速度的增加,裂纹数增多。2005 年,Luo 等^[11]采用神经网络技术处理试验过程中采集到的声发射信号,实现了对焊接缺陷的诊断;2011 年,Huang 等^[12]针对激光焊接高强钢 DP980 过程中产生的声发射信号,建立了神经网络预测模型,该模型可以预测不同激光焊接工艺、参数组合下焊缝熔深的尺寸。刘京雷等^[13]研究了平板激光堆焊的声发射信号,发现声发射信号的强度和功率频谱分布与焊缝熔深具有良好的对应关系,以激光焊接过程中产生声发射信号作为传感信息,采用人工神经网络技术建立了声发射信号与焊缝熔深之间的关系模型。该模型能够根据声发射信号特征定量地检测焊缝熔深,为激光非熔透焊接熔深的实时监测提供了一种有效的手段。在激光切割应用中,Kurita 等^[14-15]利用麦克风传感器检测激光切割不同材料时的声音信号,建立了材料去除率与声音信号的关系;Grum 等^[16-17]利用压电声发射传感器检测激光切割钢板的过程,研究发现激光切割时的氧气流是声发射信号的主要来源,激光切割质量与声发射脉冲有良好的对应关系,强烈的声发射脉冲主要是由激光切割时材料的开裂和表面氧化层的剥离所产生。

本文利用声发射技术研究了脉冲光纤激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石的过程、该过程中产生的声发射信号,以及声发射信号与加工质量之间的关系,为解释激光诱导背向湿式刻蚀机理和提高刻蚀质量提供参考依据。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

蓝宝石样件为重庆四联公司生产的光学级 c-面(0001)蓝宝石基片,其尺寸为 50.8 mm × 430 μm (直径为 50.8 mm,厚度为 430 μm),抛光面的表面粗糙度及擦痕/麻点比分别为 0.1 μm 和 60/40。工作液体采用硫酸铜(质量浓度为 28 g/L)、次磷酸钠(质量浓度为 40 g/L)和氨水(体积分数为 9:20)组成的硫酸铜混合溶液,pH 值控制在 12。

2.2 试验方法

试验采用掺镱光纤激光器(YLPM 系列,IPG 公司)作为光源,激光器参数为:波长为 1064 nm,脉冲宽度范围为 4~200 ns,最大重复频率为 1000 kHz,最大输出功率为 20 W,最大扫描速度为 2000 mm/s,聚焦光斑直径为 25 μm。检测仪器为美国物理声学公司的 PCI-Express 8 通道声发射仪,试验采用的传感器为压电传感器,频率为 150 kHz,带宽为 100~1000 kHz。

激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石过程中产生的声发射信号在传播过程中易受到声发射源位置、传感器布置和材料几何尺寸等因素的影响。在试验过程中,为了减少这些影响因素的干扰,将声发射信号检测系统的传感器紧贴于蓝宝石基片表面,传感器探头与蓝宝石基片之间采用白凡士林耦合,并用胶带固定,如图 1 所示。传感器获取的信号通过前置放大器(增益为 40 dB)放大后,由计算机采集存储,采样频率为 2 MHz,采样门阈值为 40 dB。每次试验前进行断铅试验,以校正系统灵敏度。

试验前对样件依次进行丙酮超声波清洗、去离子水清洗和无尘环境下烘干处理^[18]。试验后工作液体的残留、光化学反应生成的沉积层以及表面重凝碎屑的污染不利于刻槽微结构的观测及尺寸测量。因此,对样件依次进行以下清洗:使用氢氧化钾溶液进行 5 min 的超声波清洗,使用丙酮溶液进行 5 min 的超声波清

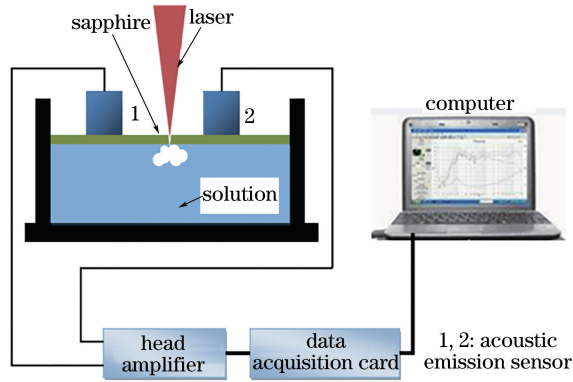


图 1 激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石过程中声发射信号检测示意图

Fig. 1 Diagram of acoustic emission signal detection in process of laser-induced backside wet etching of sapphire

洗,使用酒精溶液进行 5 min 清洗,使用去离子水进行 5 min 的超声波清洗,最后烘干。划槽表面形貌通过超景深三维显微镜进行观察。

3 结果与讨论

3.1 激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石过程中声发射信号的产生机理

目前,激光诱导背向湿式刻蚀过程包括光-热物理模型、光-热-力物理模型和光-化学-热物理模型的作用^[19]。试验过程中常出现几个模型的混合作用,以达到刻蚀材料的目的,同时在加工过程中还会产生等离子效应,激光入射到固-液交界面后,瞬间会产生等离子体高压和冲击波,随后激光诱导的气泡开始膨胀、塌陷和反弹^[20],这些都是导致声发射信号产生的原因。这些现象的产生由激光参数(如脉冲能量、脉宽和波长等)和材料属性等因素决定。本课题组的前期研究表明,脉冲能量和脉宽对激光诱导湿式刻蚀蓝宝石的加工效果有很大影响。为了研究激光不同脉冲能量和脉宽对激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石的作用规律,分别进行脉宽和能量密度的单因素试验,并采集不同条件下的声发射信号。此外,声发射信号参数(如撞击计数、能量计数和幅度等)与激光诱导背向湿式刻蚀较好地关联。幅度表示声发射事件的强度,不受门槛影响;能量计数反映声发射事件的相对强度;撞击计数反映声发射事件的总量和频度,常用于声发射活动性评价。材料内部微裂纹扩展时产生的声发射信号幅度与微裂纹尺度的关系为^[21]

$$A_i = \sqrt{\Delta E_i / \alpha} = \beta G_i \sigma \sqrt{C_i \Delta l_i (1 - \nu^2) / E}, \quad (1)$$

式中 A_i 为幅度, ΔE_i 为信号能量, G_i 为材料的剪切模量, E 为材料的弹性模量, ν 为材料的泊松比, α 为信号的阻尼系数, σ 为作用外力, C_i 为裂纹长度, Δl_i 为裂纹每次扩展的长度, β 为比例系数。可以看出,缺陷的扩展尺度越大,则应力集中卸载的能量越大,能量的释放速度越快,声发射信号的能量和幅度也越大^[21]。因此,这里采用声发射信号参数关联分析方法,利用幅度、能量计数和撞击计数 3 个声发射信号特征参数联合表征试验结果,建立了声发射信号特征与刻蚀质量之间的联系。

3.2 不同脉冲能量下的声发射信号特征

根据本课题组前期进行的蓝宝石湿式加工试验,选取激光脉冲能量分别为 0.48, 0.64, 0.8 mJ 进行试验。其他试验条件为:激光脉宽为 100 ns, 重复频率为 25 kHz, 扫描速度为 100 mm/s, 扫描次数为 1000。观察不同脉冲能量下加工过程的声发射信号特征,结果如图 2~4 所示。

根据试验观察及检测,脉冲能量为 0.48 mJ 时,蓝宝石没有被切穿,由于脉冲能量较低,只形成一道很浅的划槽,如图 2(d) 所示,但形貌较好;当脉冲能量为 0.64 mJ 时,蓝宝石被切穿,此时脉冲能量合适,表面质量较好,边缘比较齐整,如图 3(d) 所示;当脉冲能量为 0.8 mJ 时,蓝宝石被快速切穿,此时脉冲能量较大,如图 4(d) 所示,边缘不规整,且形成的熔融物较多。

由图 2(a)~(c) 可以看出,当脉冲能量较小时,声发射事件数较少,声发射信号幅度主要集中在 70~80 dB 之间,能量计数小于 4000,撞击计数在切割过程中比较稳定,这说明脉冲能量为 0.48 mJ 时,蓝宝石刻蚀效率较低,反应温和,难以达到切割的目的。当脉冲能量为 0.64 mJ 时,切割过程可以分为 2 个阶段:反应

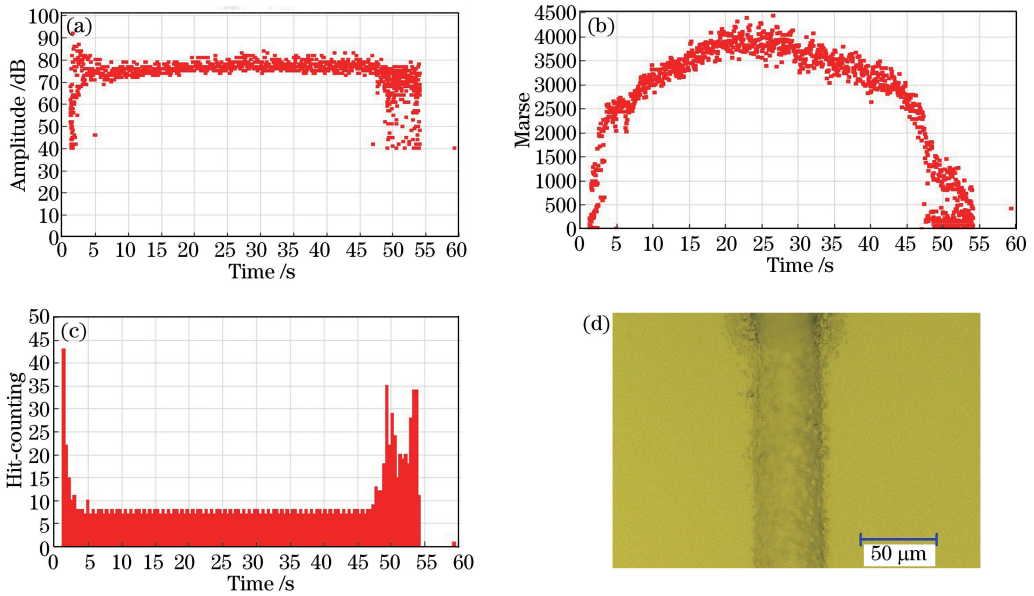


图 2 脉冲能量为 0.48 mJ 时的声发射信号特征和切槽表面形貌。(a)幅度;(b)能量计数;(c)撞击计数;(d)切槽表面形貌
Fig. 2 Acoustic emission signal characteristics and cutting groove surface topography when pulse energy is 0.48 mJ.

(a) Amplitude; (b) marse; (c) hit-counting; (d) cutting groove surface topography

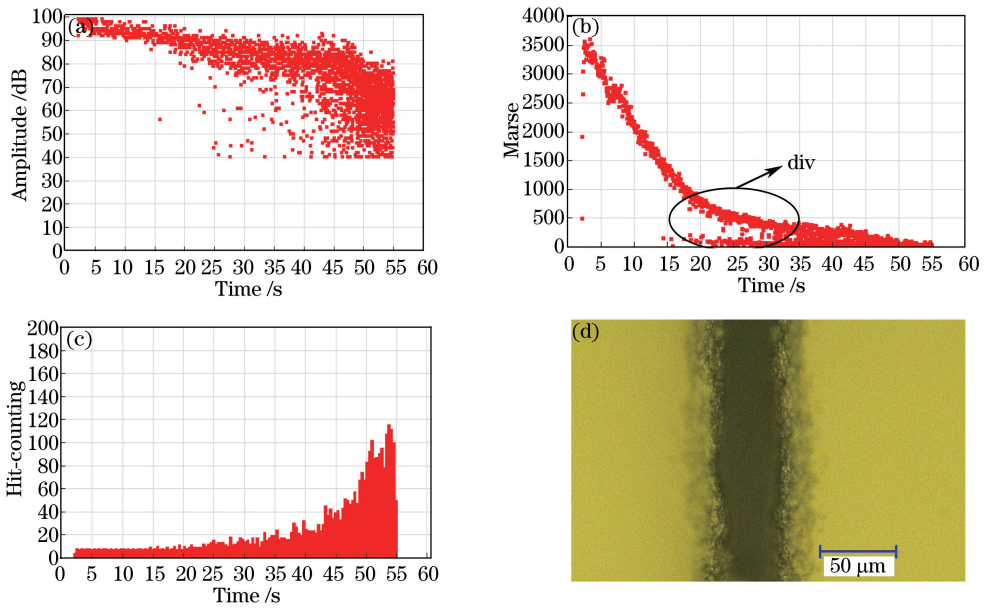


图 3 脉冲能量为 0.64 mJ 时的声发射信号特征和切槽表面形貌。(a)幅度;(b)能量计数;(c)撞击计数;(d)切槽表面形貌
Fig. 3 Acoustic emission signal characteristics and cutting groove surface topography when pulse energy is 0.64 mJ.

(a) Amplitude; (b) marse; (c) hit-counting; (d) cutting groove surface topography

时间小于 15 s 和大于 15 s。试验中,当反应时间为 15 s 时,部分蓝宝石被切穿;当反应时间小于 15 s 时,在激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石过程中,激光辐射能量充足,大部分激光能量被蓝宝石吸收,材料去除迅速,所以声发射信号幅度和能量计数都比较大,声发射事件少,声发射信号幅度介于 90~100 dB,如图 3(a)~(c)所示;随着反应继续进行,材料的去除速率逐渐降低,这可以从能量计数由 3.5×10^4 下降至 1×10^4 这一现象得到验证,此时声发射撞击计数较小;当反应时间大于 15 s 后,声发射事件增多,能量计数缓慢减小至 5000 以下。产生这种现象的原因主要是蓝宝石部分被切穿时,在切穿的部分区域,激光能量大部分被液体吸收,声发射信号主要来源于液体吸收激光能量后形成的光击穿^[22];而在未切穿的部分区域,声发射信号来源于激光刻蚀蓝宝石的过程中,但此时刻蚀速率较低,所以能量计数表现出 2 条信号线,如图 3(b)所示,一

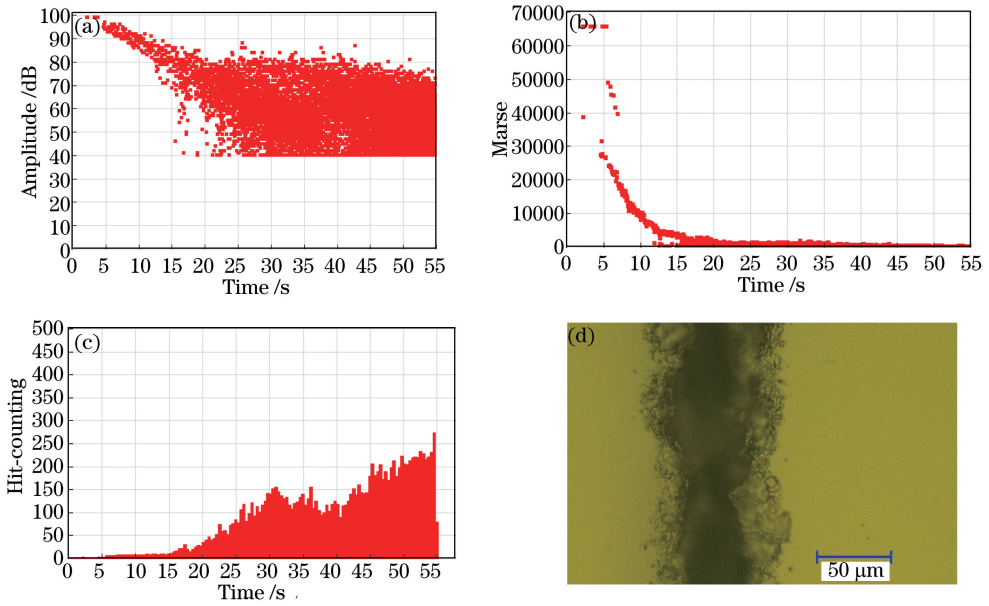


图 4 脉冲能量为 0.8 mJ 时的声发射信号特征和切槽表面形貌。(a)幅度;(b)能量计数;(c)撞击计数;(d)切槽表面形貌

Fig. 4 Acoustic emission signal characteristics and cutting groove surface topography when pulse energy is 0.8 mJ.

(a) Amplitude; (b)marse; (c) hit-counting; (d) cutting groove surface topography

条为能量计数近乎为 0 的信号线,另一条为能量计数逐渐下降的信号线,两条信号线最终在反应时间为 30 s 左右交叉合并为一条能量计数近乎为 0 的信号线,此时蓝宝石已完全被切穿,撞击计数快速上升到 100。当脉冲能量为 0.8 mJ 时,声发射信号特征与脉冲能量为 0.64 mJ 时的声发射信号特征有相同变化趋势,蓝宝石切穿时间为 11 s。

3.3 不同激光脉宽下的声发射信号特征

所采用激光的脉宽分别为 30, 50, 100, 150 ns, 其他试验条件:脉冲能量为 0.56 mJ, 频率为 25 kHz, 扫描速度为 100 mm/s, 扫描次数为 1000。观测不同脉宽下激光刻蚀蓝宝石过程中的声发射信号特征, 结果如图 5~8 所示。

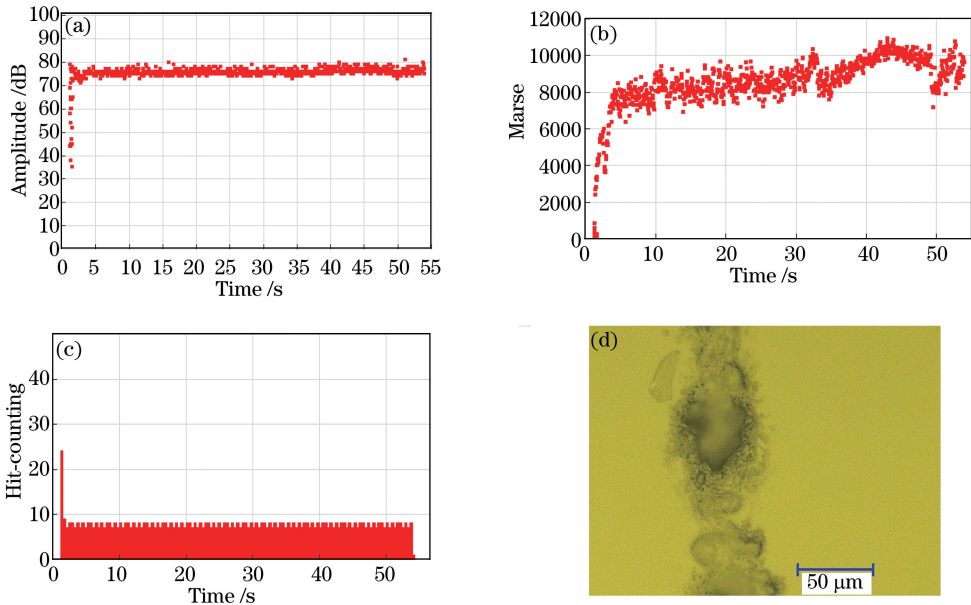


图 5 激光脉宽为 30 ns 时的声发射信号特征和切槽表面形貌。(a)幅度;(b)能量计数;(c)撞击计数;(d)切槽表面形貌

Fig. 5 Acoustic emission signal characteristics and cutting groove surface topography when laser pulse width is 30 ns.

(a) Amplitude; (b) marse; (c) hit-counting; (d) cutting groove surface topography

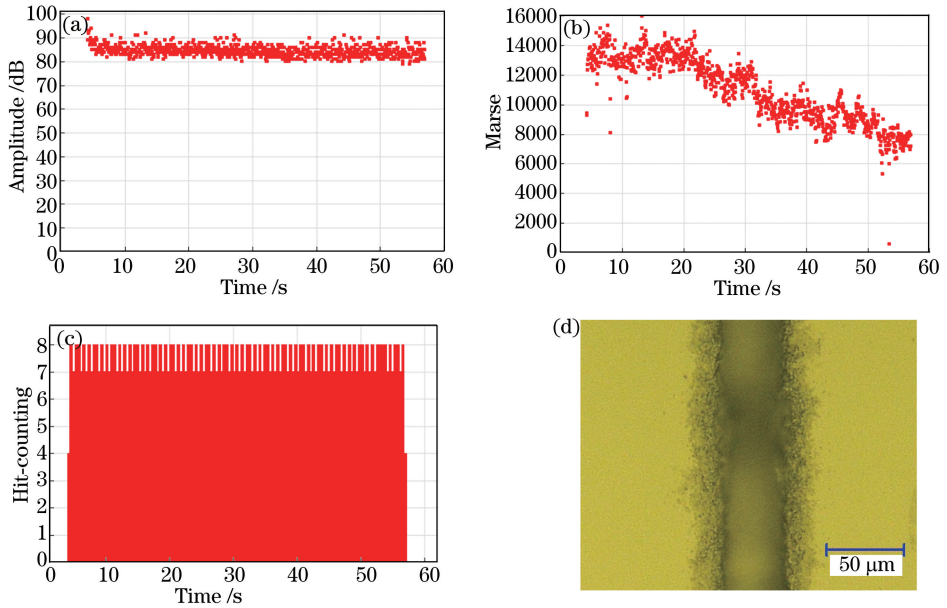


图 6 激光脉宽为 50 ns 时声发射信号特征和切槽表面形貌。(a)幅度;(b)能量计数;(c)撞击计数;(d)切槽表面形貌
Fig. 6 Acoustic emission signal characteristics and cutting groove surface topography when laser pulse width is 50 ns.
(a) Amplitude; (b)marse; (c) hit-counting; (d) cutting groove surface topography

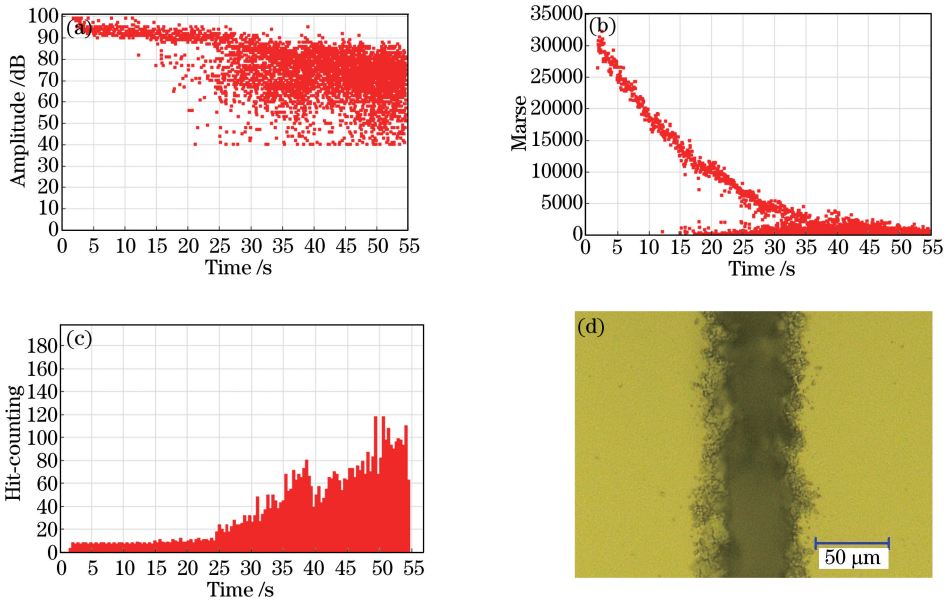


图 7 激光脉宽为 100 ns 时声发射信号特征和切槽表面形貌。(a)幅度;(b)能量计数;(c)撞击计数;(d)切槽表面形貌
Fig. 7 Acoustic emission signal characteristics and cutting groove surface topography when laser pulse width is 100 ns.
(a) Amplitude; (b) marse; (c) hit-counting; (d) cutting groove surface topography

根据试验观察和检测,当激光脉宽为 30 ns 时,蓝宝石只形成了一些点蚀,没有形成切槽,如图 5(d)所示;当激光脉宽为 50 ns 时,蓝宝石没有被切穿,只形成了切槽,如图 6(d)所示;当激光脉宽为 100 ns 和 150 ns 时,蓝宝石被切穿,如图 7(d)和图 8(d)所示,激光脉宽为 150 ns 时的蓝宝石边缘要好于脉宽为 100 ns 时的蓝宝石边缘。当激光脉宽为 30 ns 时,由图 5(a)~(c)可以看出,此时声发射事件较少,其幅度一直稳定在 70~80 dB 之间,能量计数范围为 $8000 \sim 1 \times 10^4$,撞击计数一直稳定在 8 左右;当激光脉宽为 50 ns 时,由图 6(a)~(c)可以看出,其幅度稳定在 80~90 dB 之间,能量计数范围为 $(1.2 \sim 1.4) \times 10^4$,撞击计数一直稳定在 8 左右。对比图 5、8 可以发现,随着激光脉宽的增大,幅度不断增大,能量计数也随之增加。这是因为随着激光脉宽的增大,热作用时间变长,热积累效应增强,从而使得单位时间内的材料去除量增加,声发射信号的幅度和

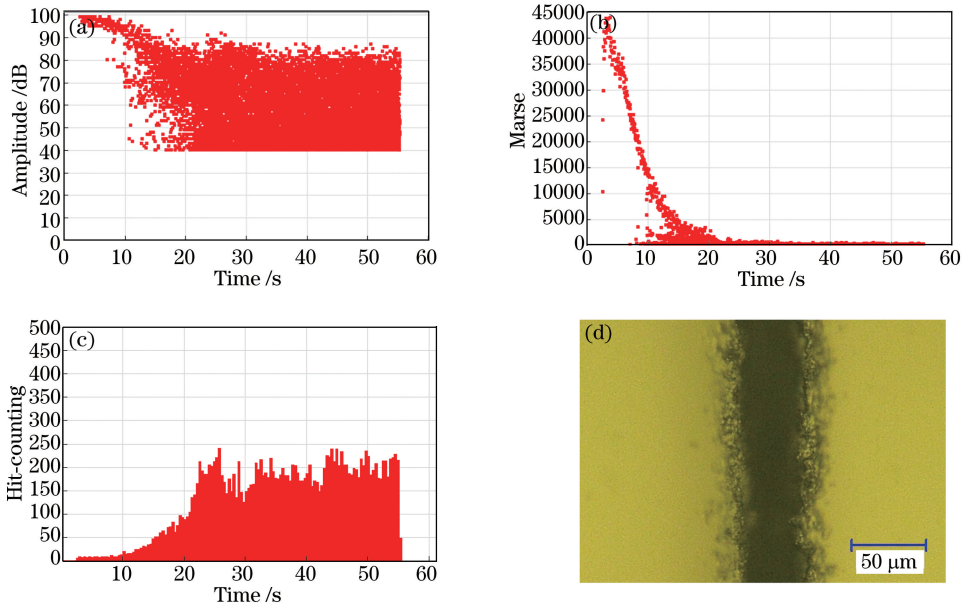


图 8 激光脉宽为 150 ns 时声发射信号特征和切槽表面形貌。 (a) 幅度; (b) 能量计数; (c) 撞击计数; (d) 切槽表面形貌
Fig. 8 Acoustic emission signal characteristics and cutting groove surface topography when laser pulse width is 150 ns.

(a) Amplitude; (b) marse; (c) hit-counting; (d) cutting groove surface topography

能量计数随着激光脉宽的增大而增大。对比图 7、8 可以看出,二者具有相同的趋势,只是切穿时间点不同。当激光脉宽为 100 ns 时,切穿时间点为 15 s 左右;当激光脉宽为 150 ns 时,切穿时间点为 10 s 左右。

此外,试验中还发现,不同的激光参数下蓝宝石被切穿过程中的声发射信号具有相同的变化趋势。以激光脉宽为 100 ns 为例,蓝宝石被切穿前表现为:声发射事件数少;幅度较大,介于 90~100 dB 之间;能量计数较大,从开始加工到切穿的过程中,能量计数从 3×10^4 呈线性减小到 1×10^4 ;撞击计数平稳且较低。蓝宝石被切穿后表现为:声发射事件数多;幅度较小,介于 40~80 dB 之间;撞击计数逐渐增大至 100;能量计数在 15 s 后出现 2 条信号线,如图 7(b) 所示,其中一条为能量计数近乎为 0 的信号线,另一条为能量计数逐渐减小的信号线,两条信号线最终在 30 s 左右时交叉合并为一条能量计数近乎为 0 的信号线,此时蓝宝石已完全被切穿。通过对比其他 3 组蓝宝石切穿的试验现象和结果,发现蓝宝石被切穿时的能量计数都会出现如图 7(b) 所示的交叉线。基于此,认为可以通过声发射信号来检测蓝宝石是否被切穿。

4 结 论

采用声发射系统对激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石的试验过程进行检测,研究刻蚀后的微观形貌和刻蚀过程,分析声发射信号特征,得出以下结论。

1) 随着激光脉冲能量和脉宽的增大,声发射信号的幅度和能量计数都相应地增大。当蓝宝石只形成点蚀时,声发射信号的最高幅度为 80 dB,最高能量计数为 1×10^4 ;当蓝宝石只形成刻槽时,声发射信号的最高幅度为 90 dB,最大能量计数为 1.2×10^4 ;当蓝宝石被切穿时,声发射信号的最高幅度为 100 dB,最大能量计数可达 7×10^4 。

2) 分析激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石基片过程中声发射信号的特征,可以发现,激光背向刻蚀蓝宝石时,声发射事件少,声发射信号的幅度较大,能量计数也较大,撞击计数较小。当形成部分切穿时,声发射事件逐渐增多,声发射信号的幅度减小,能量计数基本降为 0,撞击计数开始大幅增加。结合三者之间的关系,可以利用声发射信号的特征来判断蓝宝石是否被切穿。

参 考 文 献

[1] Zimmer K, Böhme R, Ehrhardt M, *et al.* Mechanism of backside etching of transparent materials with nanosecond UV-lasers[J]. Applied Physics A, 2010, 101(2): 405-410.

- [2] Ehrhardt M, Raciukaitis G, Gecys P, *et al.* Laser-induced backside wet etching of fluoride and sapphire using picosecond laser pulses[J]. *Applied Physics A*, 2010, 101(2): 399-404.
- [3] 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过程研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1203010.
- [4] 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.
- [5] Zimmer K, Ehrhardt M, Böhme R. Simulation of laser-induced backside wet etching of fused silica with hydrocarbon liquids[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(3): 034908.
- [6] Ehrhardt M, Raciukaitis G, Gecys P, *et al.* Laser-induced backside wet etching of fluoride and sapphire using picosecond laser pulses[J]. *Applied Physics A*, 2010, 101(2): 399-404.
- [7] Ehrhardt M, Raciukaitis G, Gecys P, *et al.* Microstructuring of fused silica by laser-induced backside wet etching using picosecond laser pulses[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(23): 7222-7227.
- [8] Dolgaev S I, Lyalin A A, Simakin A V, *et al.* Fast etching and metallization of via-holes in sapphire with the help of radiation by a copper vapor laser[J]. *Applied Surface Science*, 1997, 109-110: 201-205.
- [9] Mao Huaidong, Zhang Dawei. On-line study of cracks during laser cladding[J]. *Applied Laser*, 2007, 27(3): 186-191.
毛怀东, 张大卫. 激光熔覆过程中裂纹在线研究[J]. *应用激光*, 2007, 27(3): 186-191.
- [10] Wang F, Mao H, Zhang D, *et al.* Online study of cracks during laser cladding process based on acoustic emission technique and finite element analysis[J]. *Applied Surface Science*, 2008, 255(5): 3267-3275.
- [11] Luo H, Zeng H, Hu L, *et al.* Application of artificial neural network in laser welding defect diagnosis[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 170(1-2): 403-411.
- [12] Huang W, Kovacevic R. A neural network and multiple regression method for the characterization of the depth of weld penetration in laser welding based on acoustic signatures[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2011, 22(2): 131-143.
- [13] Liu Jinglei, Chen Yanbing, Xu Qinghong. Correlation of acoustic signals and weld depth laser welding[J]. *Transaction of the China Welding Institution*, 2006, 27(1): 72-75.
刘京雷, 陈彦宾, 徐庆鸿. 激光焊接声信号与熔深的相关性[J]. *焊接学报*, 2006, 27(1): 72-75.
- [14] Kurita T, Ono T, Morita N. Study on the relationship between laser processing sound and material removal characteristics[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 97(1-3): 168-173.
- [15] Kurita T, Ono T, Nakai T. A study of processed area monitoring using the strength of YAG laser processing sound [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 112(1): 37-42.
- [16] Kek T, Grum J. Monitoring laser cut quality using acoustic emission[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(1): 8-12.
- [17] Grum J, Kek T. Assessment of laser-cut quality on the basis of acoustic emission signals captured with a PZT sensor [J]. *Materials Science Forum*, 2008, 589: 215-220.
- [18] Jiang Wei, Xie Xiaozhu, Wei Xin, *et al.* Pulse fiber laser controlled fracture cutting of ultrathin strontium titanate ceramic substrate[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(5): 0503081.
江 伟, 谢小柱, 魏 昕, 等. 脉冲光纤激光控制断裂切割超薄钛酸锶陶瓷基片[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0503081.
- [19] Huang Xiandong. Numerical simulation and experimental investigation in laser-induced backside wet etching of sapphire [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.
黄显东. 激光背向湿式刻蚀蓝宝石过程的数值模拟与实验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- [20] Hu Manfeng. Study on laser induced cavitation bubbles and flow field distribution during laser-induced backside wet etching sapphire substrates[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.
胡满凤. 激光背向湿式蚀刻加工蓝宝石过程中光诱导气泡和微射流流场分布研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
- [21] Chang Zhisheng. Damage research of toughening ceramic based on acoustic emission technology[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
常智胜. 基于声发射技术的增韧陶瓷损伤研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [22] Chen Qingming, Cheng Zuhai. Research of laser acoustic effect in liquid[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(8): 623-626.
陈清明, 程祖海. 激光在液体中的声效应研究[J]. *激光与红外*, 2006, 36(8): 623-626.