

· 特邀综述 ·

# 电子陶瓷基板表面激光孔加工综述

梅雪松<sup>1</sup>, 杨子轩<sup>1</sup>, 赵万芹<sup>2,1\*</sup>

<sup>1</sup>西安交通大学机械制造系统国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

<sup>2</sup>上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620

**摘要** 毫秒和纳秒激光以其高可靠、高效率、低成本和可加工硬脆难加工材料的独特优势, 成为加工氧化铝和氮化铝陶瓷的首选, 在电子陶瓷基板表面孔的工业化加工中具有不可替代的作用。介绍了毫秒和纳秒激光加工作为电子基板的陶瓷材料的去除机理, 如材料烧蚀阈值、光热作用和光化学作用等, 讨论了毫秒和纳秒激光加工参数、加工环境等因素对陶瓷材料表面孔加工尺寸(如直径、深度和锥度等)的影响规律, 总结了目前陶瓷基板表面激光孔加工工业化应用面临的问题, 并对其未来的发展方向进行了展望。

**关键词** 激光技术; 电子陶瓷基板; 氧化铝; 氮化铝; 毫秒激光; 纳秒激光; 孔

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0500011

## Laser Hole Drilling on Surface of Electronic Ceramic Substrates

Mei Xuesong<sup>1</sup>, Yang Zixuan<sup>1</sup>, Zhao Wanqin<sup>2,1\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University,  
Xi'an, Shaanxi 710049, China;

<sup>2</sup>School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

**Abstract** Millisecond and nanosecond lasers have become the preferred processing tools for alumina and aluminum nitride ceramics owing to the lasers' unique advantages of high reliability, high efficiency, low cost, and ability to process hard, brittle, and difficult-to-machine materials. These lasers play an irreplaceable role in the industrialized processing of group holes on ceramic substrate surfaces. This paper introduces the removal mechanisms with respect to laser processing ceramic materials of electronic substrates, including material ablation threshold, photothermal effect, and photochemical effect. The effects of the lasers' processing parameters and ambient environments on the hole size of ceramic materials, such as diameter, depth, and taper, are discussed. Current problems in the industrial application of laser hole drilling to ceramic substrates are summarized, and future development trends are presented.

**Key words** laser technique; electronic ceramic substrate; alumina; aluminum nitride; millisecond laser; nanosecond laser; hole

**OCIS codes** 140.3390; 140.3430; 140.3538

## 1 引 言

电子陶瓷基板主要包括氧化铝和氮化铝基板, 具有硬度、导热性、电阻率和热稳定性高, 介电常数低, 热膨胀系数与芯片匹配等特点, 是新一代微电子器件或系统的首选, 在高端大功率电子元件中具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。为实现电子系统的高密度互联, 需要在陶瓷基板表面进行多尺寸、多间距的盲、

通孔加工, 且孔质量需满足芯片导通和引脚固定的封装要求<sup>[4-6]</sup>。然而, 氧化铝和氮化铝陶瓷是典型的硬脆材料, 传统的机械加工极易导致基板断裂, 而特种加工方法也存在极大限制<sup>[7]</sup>, 如: 化学刻蚀和超声波加工氧化铝、氮化铝陶瓷材料的去除效率低<sup>[8-9]</sup>; 电火花不能加工陶瓷等非导电材料<sup>[10]</sup>; 电子束加工设备昂贵, 且会产生极大的热效应, 损伤陶瓷基板<sup>[11]</sup>; 磨料水射流不仅加工精度低而且噪声大<sup>[12]</sup>;

收稿日期: 2020-01-18; 修回日期: 2020-02-09; 录用日期: 2020-02-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51735010)、机械制造系统工程国家重点实验室开放课题(skllms2019003)

\* E-mail: linazhaolinazhao@foxmail.com

等等。

激光作为一种非接触式的高能束精密加工技术,具有高效可控、热影响区小、无切削作用力、无“刀具”磨损,以及可加工高硬度、高脆性、高熔点等难加工材料的特点<sup>[13-20]</sup>。激光的脉冲宽度是一个重要参数,是指单个激光脉冲释放能量即真正作用于材料的时间。对于脉冲激光加工,根据脉冲宽度可将其分为以毫秒激光(MPL,通常指脉冲宽度为1~1000 ms)为代表的长脉冲激光加工、以纳秒激光(NPL,通常指脉冲宽度为1~1000 ns)为代表的短脉冲激光加工和超短脉冲激光加工(UPL,通常指脉冲宽度 $\leq 10$  ps)。其中:超短脉冲激光因加工效率低、稳定性不够、激光设备昂贵等原因目前还无法满足陶瓷基板工业化加工的要求;而毫秒激光和纳秒激光具有较为成熟的理论基础和适宜的经济性,加工柔性和稳定性好,极易与装备的数控系统融合,非常适合用于电子陶瓷基板表面的群孔加工<sup>[21-23]</sup>。电子陶瓷基板激光孔加工的工业化应用刚刚起步,人们对毫秒和纳秒激光加工工艺的研究及其在陶瓷基板领域产业化应用的认知还不十分成熟,对利用这两种激光进行装备开发、选型等存在困惑。鉴于此,本文主要综述了毫秒和纳秒激光烧蚀氧化铝和氮化铝陶瓷基板的材料去除机理和各激光加工参数对孔尺寸的影响规律,为激光陶瓷基板群孔加工的工业化应用提供支持。

## 2 陶瓷基板表面孔的毫秒激光加工

### 2.1 毫秒激光去除陶瓷材料的机理

毫秒激光加工氧化铝、氮化铝陶瓷时的材料去除过程是一个多物理场耦合作用、多种化学反应同时发生的复杂过程。下面将从温度场效应、应力场效应、化学反应和材料阈值等方面对毫秒激光陶瓷基板材料加工的去理机理进行分析。

#### 2.1.1 温度场效应

毫秒激光对陶瓷材料的去除主要是通过热效应实现的。激光能量与材料的相互作用使得激光作用区域的材料温度发生变化,进而使得该区域的材料在激光作用过程中呈现出不同的物理状态。毫秒激光温度场作用下材料的去除过程主要分为三个阶段<sup>[24]</sup>,如图1所示。首先,激光能量被材料吸收后在材料内部累积,使得激光作用区域材料的温度达到熔点,材料熔化,熔池形成。此时,材料的熔融态使得其对激光的吸收率增大,熔池进一步加深,同时,温度升高使得材料气化且气化比例剧增,在热应力场作用下,材料以气化飞出和液态飞溅的形式被去除,即第二阶段。这里需要特别说明的是,该阶段是毫秒激光材料去除的主要过程,为稳定的孔形成过程。第三阶段,激光能量作用在孔口及孔道内诱发等离子体,大量的等离子体对激光形成屏蔽作用,阻碍激光能量向孔内传输,并阻碍被去除的气、液相材料向孔外排出。

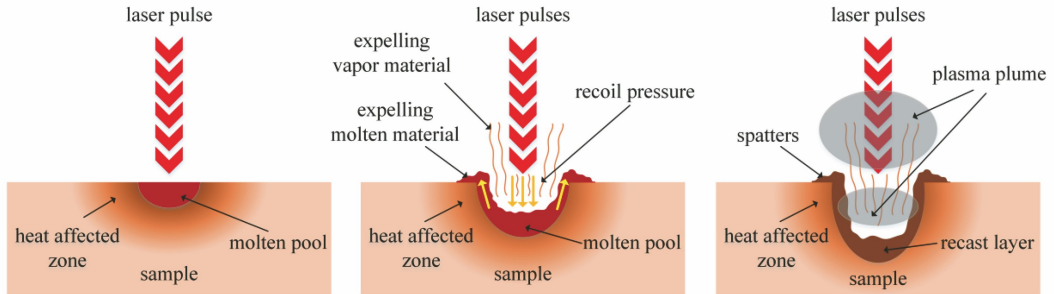


图1 毫秒激光温度场作用下材料去除过程示意图

Fig. 1 Schematic of material removal process under temperature field by millisecond laser

#### 2.1.2 应力场效应

毫秒激光诱发的高温场同时伴有强烈的热应力场,其对材料的去除有很大贡献。具体为,激光作用区域的材料气化后聚集在熔池上方形成高温高压的蒸气团,它会对熔池产生一股反向冲击波<sup>[25-26]</sup>,即反冲压力,促使熔池内的熔融材料沿熔体边缘排出,如图2(a)所示<sup>[27]</sup>。反冲压力与激光

平均能量密度、作用区域的瞬时表面温度有关,表现为随着激光能量密度的增大而线性增加。此外,陶瓷材料是由陶瓷粉末烧结而成的,其内部存在大量的气孔,加工中反冲压力将驱使熔融材料流入孔隙,从而延长了材料的实际熔化深度,扩大了熔池体积,进一步加速了材料的熔融去除,如图2(b)所示<sup>[28]</sup>。

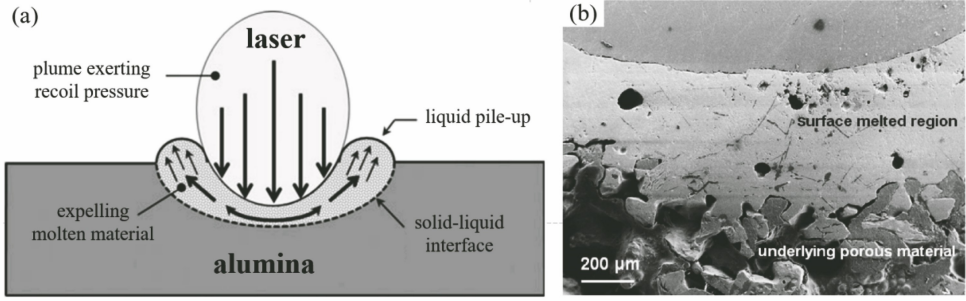


图 2 应力场效应。(a)反冲压力与材料相互作用示意图<sup>[27]</sup>;(b)熔融材料在反冲压力下深入氧化铝孔隙内<sup>[28]</sup>  
 Fig. 2 Stress field effect. (a) Schematic of interaction between recoil pressure and material<sup>[27]</sup> ;  
 (b) molten material penetrates into Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pores due to recoil pressure<sup>[28]</sup>

### 2.1.3 化学反应

氧化铝在毫秒激光高温、高压场作用下将发生一系列化学反应,如表 1 所示。随着加工区温度升高,氧化铝由稳定的固相开始熔化,达到满足化学反应的前置条件。当温度高于 3250 K 时,氧化铝发生

分解,形成大量稳定的 AlO(g)、Al(g)、和少量 Al<sub>2</sub>O(g)、AlO<sub>2</sub>(g),实现第一阶段的化学分解过程;当温度进一步上升到 5000 K 时,次氧化物完全分解,形成铝蒸气和氧气,实现第二阶段的化学分解过程<sup>[29-30]</sup>,且两个反应过程均不受含氧环境的影响。

表 1 毫秒激光加工氧化铝和氮化铝的化学分解过程

Table 1 Chemical decomposition process of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and AlN during millisecond laser processing

Material	Step	Chemical equation	Note
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Process 1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> → Al + AlO + AlO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O AlO → Al + O <sub>2</sub>	The temperature rises to about 3250 K
	Process 2	AlO <sub>2</sub> → Al + O <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O → Al + O <sub>2</sub>	The temperature rises to about 5000 K
	Total reaction	2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 4Al + 3O <sub>2</sub>	The gas phase material generates recoil pressure to spurt material out
AlN	Process 1 (oxygen environment)	4AlN + 3O <sub>2</sub> = 2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 2N <sub>2</sub>	High temperature and high pressure promote the oxidation reaction of aluminum nitride, and the local temperature rises to about 1600 K
	Process 2	2AlN → 2Al + N <sub>2</sub>	The local temperature of the material rises to about 2800 K

不同于氧化铝的毫秒激光加工,在氮化铝的加工过程中,含氧环境会导致氮化铝先发生氧化反应<sup>[31]</sup>,生成氮气和氧化铝,如表 1 所示。氧化反应会产生大量的热,伴随着激光能量的持续注入,瞬间将材料的局部温度提升到 2800 K,使得还未氧化的氮化铝基体分解,直接生成纯铝和氮气,且析出的纯铝在冷却后呈点状白色颗粒分布于孔壁。如果在无氧环境中进行氮化铝的加工,则无氧化铝生成。

### 2.1.4 材料阈值

对毫秒激光加工区域材料的热传导过程进行建模求解,可以得到材料表面熔化和气化的激光能量密度阈值,计算公式见(1)~(2)式<sup>[32]</sup>。

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

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

式中: $\alpha = K / (\rho c)$ ,为热扩散系数,单位为 cm<sup>2</sup>/s; $K$ 为材料的导热系数,单位为 W/(m·K); $\rho$ 为材料的密度,单位为 kg/m<sup>3</sup>; $c$ 为比热容,单位为 J/(kg·K); $R$ 为材料表面的激光反射百分比,最大值为 1; $T_m$ 和  $T_0$ 分别为材料的熔点和初始温度,单位为 K; $\tau$ 为激光的脉冲宽度,单位为 s; $I_0$ 和  $\Delta E_0$ 为材料熔化的功率密度阈值和能量密度阈值; $I_1$ 和  $\Delta E_1$ 为材料气化的功率密度阈值和能量密度阈值; $L_b$ 为气化热。取  $T_0 = 297$  K(环境温度 24 °C), $R = 0$ (材料对激光完全吸收),将陶瓷材料的相关参数代入(1)式和(2)式就可以计算出其熔化阈值  $I_0$ 、 $\Delta E_0$ 和 气化阈值  $I_1$ 、 $\Delta E_1$ 。氧化铝毫秒激光烧蚀阈值的计算结果见图 3<sup>[32]</sup>。从图中可以看出,氧化铝陶瓷的熔化能量密度阈值和 气化能量密度阈值均随着脉冲宽度的增加而升高,相反,功率密度阈值随脉冲宽度的增加而减小。

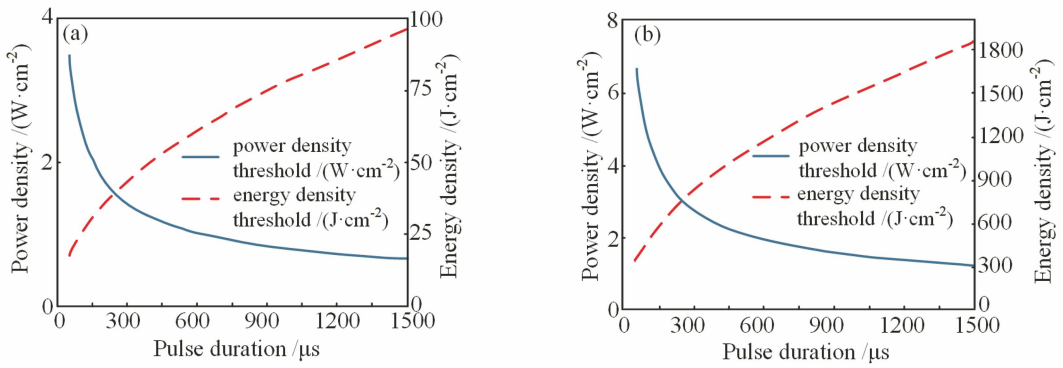


图 3 毫秒激光加工氧化铝的阈值<sup>[32]</sup>。(a)熔化阈值;(b)气化阈值

Fig. 3 Thresholds of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> during millisecond laser processing<sup>[32]</sup>. (a) Melting threshold; (b) vaporization threshold

## 2.2 毫秒激光加工陶瓷材料表面孔的尺寸特征参数

陶瓷基板表面孔的尺寸特征参数主要包括出入口的直径、深度和锥度。在激光陶瓷表面孔加工中,影响孔特征尺寸的加工参数主要包括脉冲宽度、激光能量、加工时间、重复频率、离焦量和加工环境等。

### 2.2.1 孔直径

#### 2.2.1.1 脉冲宽度对孔直径的影响

采用毫秒激光在陶瓷表面加工孔时,脉冲宽度对孔直径的影响与陶瓷基片的厚度相关。当氧化铝厚度小于 2.2 mm 时,随着脉冲宽度增加,孔入口直径增大直到饱和,孔出口直径则先增大后减小,如图 4(a)所示<sup>[33]</sup>;当氧化铝厚度约为 10 mm 时,随着脉冲宽度增加,孔入口直径保持不变,出口直径增大直到趋于饱和,如图 4(b)所示<sup>[34]</sup>。这是因为在较薄的

陶瓷上进行孔加工时,脉冲宽度的增加延长了激光作用在氧化铝表面的时间,加工区域吸收了更多的热量,增大了熔池体积,导致孔入口、出口直径增加。但由于光斑直径的限制,热量扩散不足以使熔池边缘更多的材料被熔化,孔入口直径达到饱和;同时,脉冲宽度增加会导致激光峰值功率降低,在熔池深度方向材料的气、液相比比例减小,影响孔出口处材料的排出,孔出口直径减小。对于厚度为 10 mm 的氧化铝,熔融材料在反冲压力下从孔入口处喷出并在入口周围重新凝固,再凝固体积随着脉冲宽度的增加而增加,使基体上扩张的孔入口重新缩小,最终保持不变;而孔出口处的熔融材料则可直接排出,不受重凝物的影响,随着脉冲宽度增大,出口附近材料的吸收能量增多,在热传导作用下孔出口直径增大直到饱和。

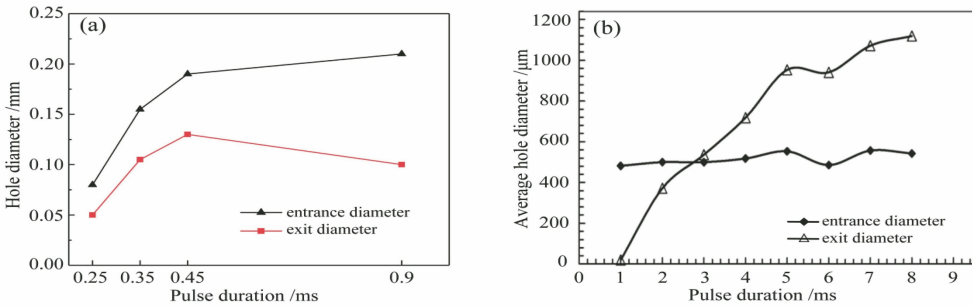


图 4 毫秒激光脉冲宽度与孔直径的关系<sup>[33-34]</sup>。(a)厚 2.2 mm 的氧化铝;(b)厚 10 mm 的氧化铝(激光峰值功率为 6 kW)

Fig. 4 Relationship between millisecond laser pulse duration and hole diameter<sup>[33-34]</sup>. (a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with thickness of 2.2 mm; (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with thickness of 10 mm (laser peak power of 6 kW)

#### 2.2.1.2 激光能量对孔直径的影响

采用毫秒激光在陶瓷表面加工孔过程中,对于不同的脉冲宽度(0.25~8 ms)和样片厚度(0.635~10 mm),孔的平均直径(即入口直径与出口直径的均值)均表现为随着激光能量的增加而增大直到最终饱和的趋势<sup>[24,33-36]</sup>,但在孔径增加过程中可能存在阶段性饱和现象<sup>[34]</sup>,如图 5 所

示<sup>[33-34]</sup>。产生该现象的原因主要是,随着激光能量增加,加工区域温度升高,熔融区域的体积增大,气、液相材料的排出量增加,导致孔径增加。但是,当熔融区域增大到一定值时,激光光斑尺寸有限等因素导致热传导引起的能量扩散有限,熔池边缘材料的温度无法达到熔点,材料不能够进一步熔化喷出,孔径达到饱和。由图 5(b)所示的

孔直径与激光功率的关系<sup>[34]</sup>可以看出,当激光功率为 4~7 kW 或 9~10 kW 时,孔的平均直径均呈略微减小的阶段性饱和态,这主要与激光诱导等离子体的屏蔽效应有关。等离子体屏蔽导致材料

表面实际吸收的激光能量维持在一个相对固定的值,使得烧蚀孔径几乎不变。此后,随着激光能量增加,等离子体屏蔽效应被打破,材料吸收的激光能量增加,材料进一步被熔化去除,孔径继续增大。

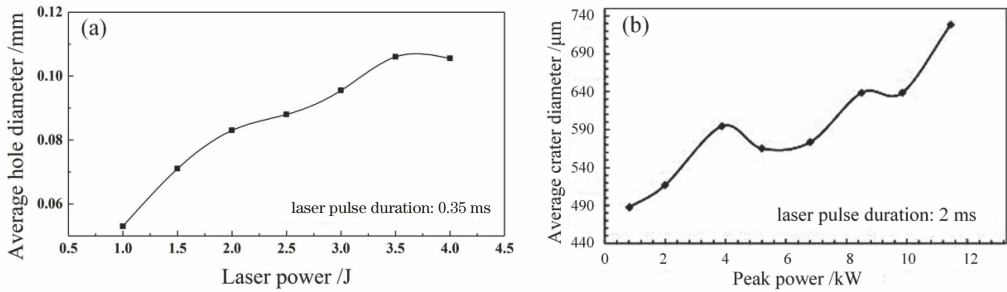


图 5 毫秒激光功率与孔直径之间的关系<sup>[33-34]</sup>。(a)厚 2.2 mm 的氧化铝;(b)厚 10 mm 的氧化铝

Fig. 5 Relationship between millisecond laser power and hole diameter<sup>[33-34]</sup>.

(a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with thickness of 2.2 mm; (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with thickness of 10 mm

## 2.2.2 孔深度

### 2.2.2.1 脉冲宽度对孔深度的影响

图 6 所示为不同脉冲宽度的毫秒激光在厚度为 10.5 mm 的氧化铝表面进行加工后得到的孔的横截面图<sup>[36]</sup>。从图 6 中可以看出,当激光峰值功率保持

6 kW 不变时,仅通过增大激光的脉冲宽度就可以调节加工孔的深度。这主要是因为随着脉冲宽度增大,激光作用于加工区域的时长增加,熔池吸收了更多的能量,导致其深度方向的材料不断地熔融排出,从而增加了孔的深度。

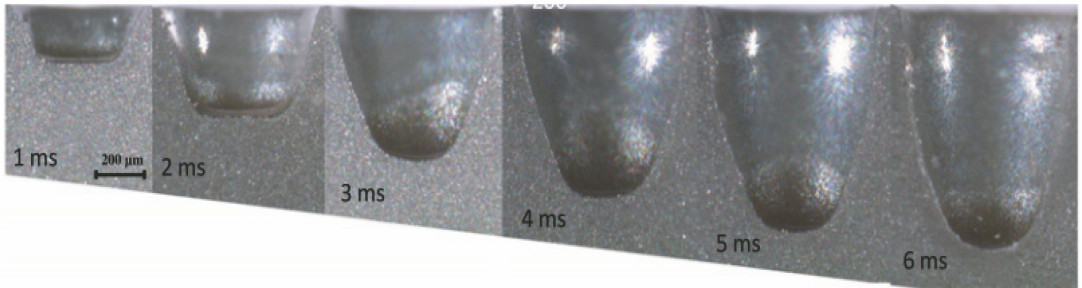


图 6 毫秒激光加工氧化铝表面孔的横截面图(厚 10.5 mm 的氧化铝,激光峰值功率 6 kW)<sup>[36]</sup>

Fig. 6 Cross-section images of the holes on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> drilled by millisecond laser<sup>[36]</sup>

(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with thickness of 10.5 mm, laser peak power of 6 kW)

### 2.2.2.2 激光能量对孔深度的影响

激光能量对孔深度的影响表现为随着能量增大孔深增加<sup>[27,36-37]</sup>。图 7(a~c)给出了 2 ms 激光在氧化铝表面进行烧蚀加工而得到的孔深度的实验值和模拟值,可见:随着激光峰值功率从 5 kW 上升到 9 kW,孔的深度从 330 μm 增加到 490 μm,呈明显增加的趋势。图 7(c)中红色区域为模拟激光加工过程中温度超过氧化铝熔点的部分,即可认为是孔轮廓,其深度也随激光峰值功率的增加而明显增加。此外,Vora 等<sup>[27]</sup>采用 COMSOL 软件模拟了毫秒激光在氧化铝上的孔加工过程,得到了相同的结论,如图 7(d)所示。当激光能量密度从  $3.5 \times 10^7$  J/m<sup>2</sup> 增大到  $17.7 \times 10^7$  J/m<sup>2</sup> 时,盲孔深度从 148.79 μm 骤

升到 1809.6 μm。另外,对于氮化铝材料,随着激光能量密度的持续增大,孔深度会增大至饱和,如图 7(e)所示<sup>[37]</sup>,当能量密度从 0 增大到 40 J/cm<sup>2</sup> 时,孔深度不断增大至 140 μm,当能量密度继续增大到 60 J/cm<sup>2</sup> 时,孔深度仅增大至 150 μm,趋于饱和。孔深度随激光能量增大而先增加后趋于饱和的主要原因是,激光能量的增大提高了加工区域材料气、液相的比例,同时增大了熔池深度方向的体积和反冲压力,导致孔底部更多的熔融材料被排出,孔深增加。然而,较高的激光能量将导致材料大量气化,促使材料表面或孔通道内产生大量的等离子体,等离子体会对激光形成屏蔽作用,使得到达加工区域的实际激光能量减少,从而限制了后续的材料去除。

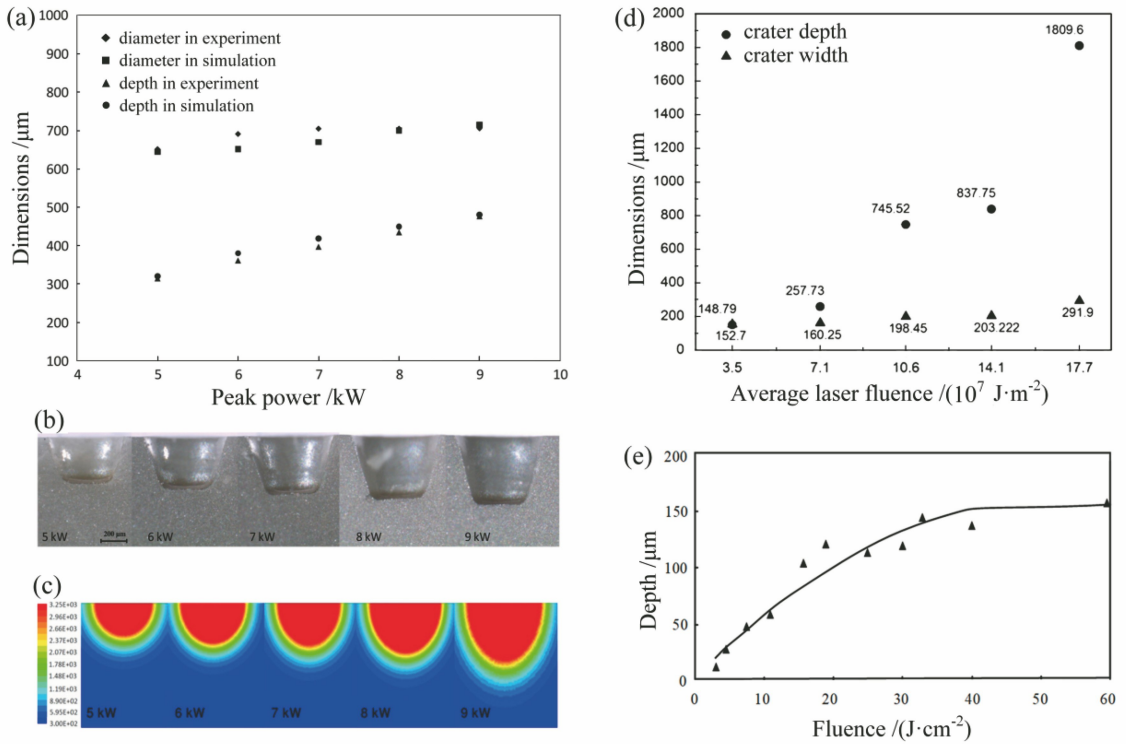


图 7 毫秒激光能量与孔深度的关系。(a)激光功率与孔深度的关系<sup>[36]</sup>,厚 10.5 mm 的氧化铝,脉冲宽度为 2 ms;(b)氧化铝表面孔的横截面图<sup>[36]</sup>;(c)氧化铝表面孔加工温度场模拟图<sup>[36]</sup>;(d)氧化铝表面孔深度的模拟结果<sup>[27]</sup>;(e)激光能量密度与孔深度的关系(氮化铝,1000 脉冲)<sup>[37]</sup>

Fig. 7 Relationship between of millisecond laser energy and hole depth. (a) Relationship between laser power and hole depth<sup>[36]</sup>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with thickness of 10.5 mm, and pulse duration of 2 ms; (b) cross-section image of the holes on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[36]</sup>; (c) simulated temperature field of the holes drilled on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[36]</sup>; (d) simulated hole depth on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[27]</sup>; (e) relationship between laser fluence and hole depth(AlN, 1000 pulses)<sup>[37]</sup>

### 2.2.2.3 作用时间对孔深度的影响

采用毫秒激光在陶瓷表面加工孔时,激光作用时间越长,相同重复频率下加工区域接收到的脉冲数越多,孔的深度就越大,但孔的深度不会一直增

加,而是表现为先增加后趋于饱和的趋势,如图 8 所示<sup>[24, 36]</sup>。该现象在多种材料的激光加工中均被发现,如镍基合金<sup>[38]</sup>、碳化硅<sup>[39]</sup>、氮化硅陶瓷<sup>[40]</sup>及复合陶瓷<sup>[41]</sup>等。产生该现象的主要原因是,激光在已

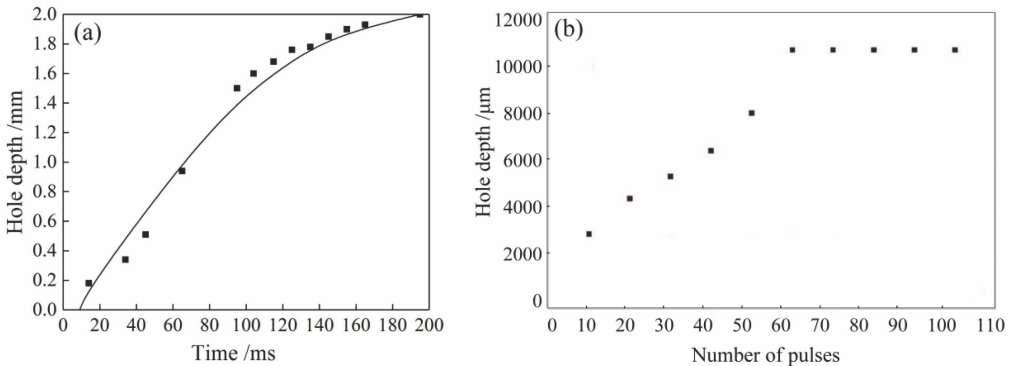


图 8 毫秒激光作用时间与孔深度的关系<sup>[24,36]</sup>。(a)厚 1 mm 的氧化铝,脉冲宽度为 15 ms,

激光能量为 600 mJ;(b)厚为 10.5 mm 的氧化铝,脉冲宽度为 2 ms,峰值功率为 8 kW,重复频率为 10 Hz

Fig. 8 Relationship between millisecond laser action time and hole depth<sup>[24,36]</sup>. (a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with thickness of 1 mm, pulse duration of 15 ms, and laser energy of 600 mJ; (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with thickness of 10.5 mm, pulse duration of 2 ms, peak power of 8 kW, and repetition rate of 10 Hz

成型的孔底部发生散焦,导致加工区域的激光能量密度降低,同时,狭窄的孔通道和一定角度的侧壁反射回部分激光,进一步减少了实际到达孔底加工位置的激光能量,阻碍了材料的去除。此外,应力场对熔融材料流向的作用也影响着孔深。当小孔的深度增加到某个临界值后,反冲压力受到表面张力和重力的作用,不足以将熔融材料排出,熔融材料流回孔内,在孔壁和孔底重新凝固形成重铸层,孔的深度不再增加<sup>[27]</sup>。

#### 2.2.2.4 重复频率对孔深度的影响

从图 9 中可以发现:当重复频率 $\leq 10$  Hz 时,可以实现通孔加工,孔深为样片厚度 10.5 mm<sup>[36]</sup>;当重复频率增加到 15 Hz 时,仅可实现深度为 9.3 mm

的盲孔加工,继续增大重复频率,孔的深度逐渐减小。产生上述现象的最主要原因是毫秒激光与氧化铝相互作用过程中的熔融效应。具体为,随着重复频率增大,加工区域在单位时间内接收的脉冲数增多,孔通道内熔融物的积累增多,不规则的熔体在排出过程中重新冷却凝固成重铸层,改变了孔通道的形状。在重复频率达到 15 Hz 时,熔融物产生的速度大于其排出的速度,大量的熔体堆积在孔出口位置重新凝固,将孔出口填堵成深度为 9.3 mm 的盲孔。随着重复频率继续增大到 20 Hz,孔通道内更多的材料熔融流回孔底后冷却凝固,孔壁被重铸层覆盖,阻碍后续激光能量对孔底材料的去除,盲孔深度减小至 8.6 mm,如图 9(b)所示<sup>[36]</sup>。

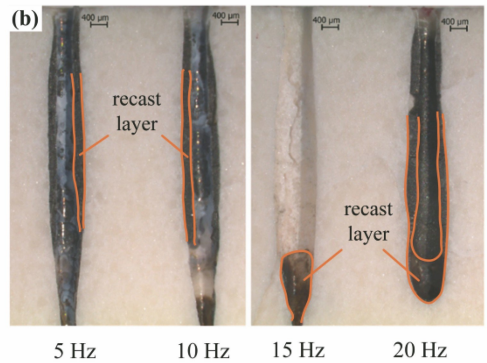
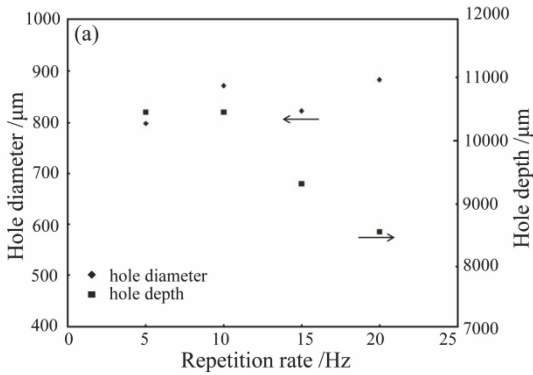


图 9 毫秒激光重复频率与孔直径、深度的关系<sup>[36]</sup>。(a)厚 10.5 mm 的氧化铝,脉冲宽度为 2 ms,峰值功率为 8 kW,离焦量为 -2 mm;(b)氧化铝表面孔的横截面图

Fig. 9 Relationship between millisecond laser repetition rate and hole diameter and depth. (a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  with thickness of 10.5 mm, pulse duration of 2 ms, peak power of 8 kW, and focal plane position of -2 mm; (b) cross-section images of the holes on  $\text{Al}_2\text{O}_3$

#### 2.2.3 孔锥度

通孔锥度的表征方法通常为:测量孔的入口直径  $D_{\text{ent}}$ 、出口直径  $D_{\text{ext}}$  和材料厚度  $h$ ,采用(3)式计算锥度  $\alpha$ <sup>[42]</sup>。

$$\alpha = \arctan\left(\frac{D_{\text{ent}} - D_{\text{ext}}}{2h}\right). \quad (3)$$

由(3)式可知:当入口直径大于出口直径时,  $\alpha > 1$ ,为正锥度孔;当入口直径等于出口直径时,  $\alpha = 1$ ,为无锥度圆柱孔;当入口直径小于出口直径时,  $\alpha < 1$ ,为负锥度孔。

##### 2.2.3.1 脉冲宽度对孔锥度的影响

随着脉冲宽度的增加,毫秒激光加工陶瓷表面孔的锥度呈减小的趋势,如图 10 所示<sup>[34]</sup>。这是因为增大脉冲宽度会相应提高激光的单脉冲能量,促进孔通道内材料的熔化,向上喷出的熔融材料在入口边缘重新凝固,导致孔入口直径基本保持不变,而向下喷出的熔融材料对孔出口边缘造成侵蚀,导致

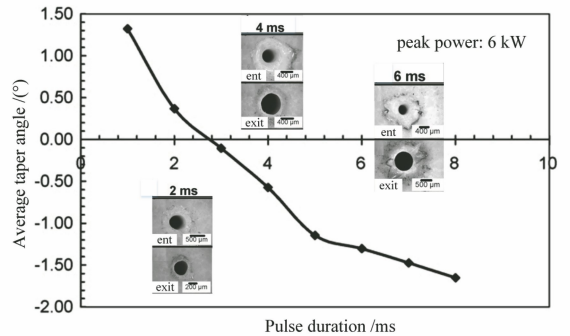


图 10 毫秒激光脉冲宽度与孔锥度的关系(厚 10 mm 的氧化铝)<sup>[34]</sup>

Fig. 10 Relationship between millisecond laser pulse duration and hole taper ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  with thickness of 10 mm)<sup>[34]</sup>

孔出口直径增大,因此孔锥度不断减小甚至出现负锥度孔。

##### 2.2.3.2 激光能量对孔锥度的影响

毫秒激光在不同厚度(10 mm<sup>[34]</sup>和 2 mm<sup>[42]</sup>)

的氧化铝表面进行孔加工时,随着激光峰值功率增大,孔锥度减小,甚至会出现负锥度孔。由图 11(a)可知:当激光峰值功率从 5 kW 增大到 7 kW 时,孔入口直径和出口直径同时增大,但由于聚焦光斑的直径有限,孔入口直径增幅较小,而孔出口位置的材料在较大激光能量下熔化去除,出口直径大幅增加,孔锥度减小;当激光峰值功率增大到 8 kW 时,由材

料表面上方高的蒸气压引起的反冲压力,推动孔通道内积累的熔融材料向上排出,并在重力作用下飞溅到孔顶部周围,重新凝固形成重铸层,如图 11(b)所示<sup>[34]</sup>。当此过程占据主导地位时,孔入口将被重铸层覆盖,导致其直径减小,而孔出口在熔融物排出侵蚀过程中持续扩大,当孔出口直径大于孔入口直径时,负锥度孔出现。

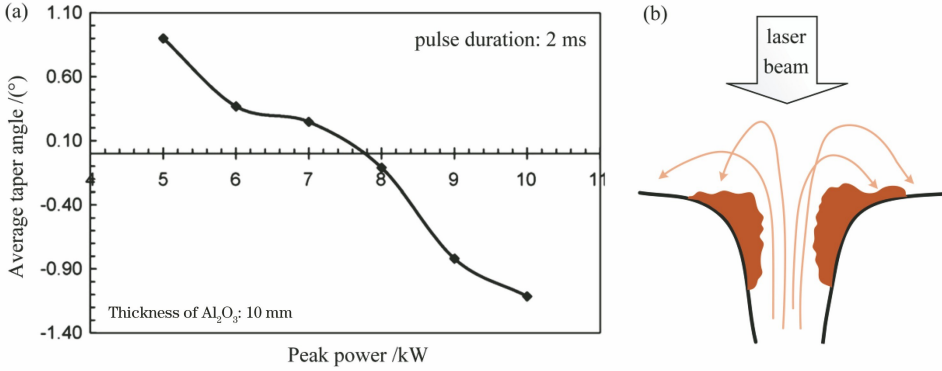


图 11 毫秒激光峰值功率与孔锥度的关系以及孔入口周围重凝物示意图<sup>[34]</sup>。

(a)峰值功率与孔锥度的关系;(b)重凝物示意图

Fig. 11 Relationship between millisecond laser peak power and hole taper, and schematic of ejected particles resolidified around hole entrance<sup>[34]</sup>. (a) Hole taper versus laser peak power; (b) schematic of ejected particles resolidified around hole entrance

### 2.2.3.3 焦点位置对孔锥度的影响

采用毫秒激光在陶瓷表面加工孔时,最佳离焦位置与陶瓷基片的厚度有关。当陶瓷基片厚度为 1~10 mm 时,采用正离焦(激光焦面位于样品表面之上)加工可以获得较小锥度的孔的,如图 12(a)所示<sup>[24]</sup>;对于厚度大于 10 mm 的极厚氧化铝陶瓷,用离焦量为-2 mm 的负离焦方法加工能获得最小锥度孔,如图 12(b)所示<sup>[36]</sup>。分析认为,当样品厚度小

于 10 mm 时,影响孔锥度的主要因素是孔的入口直径,采用负离焦加工时,激光以会聚的方式进入孔腔,入口处即样品表面处光斑直径变大,导致孔入口增大,锥度较大;而采用正离焦加工时,材料加工区域的去除机理主要是蒸发,由热传导产生的熔池较小,孔的入口直径较小,孔的锥度较小。当样品厚度大于 10 mm 时,影响孔锥度的主要因素是激光的穿透力,即孔腔中作用在材料上的激光能量,而适当的

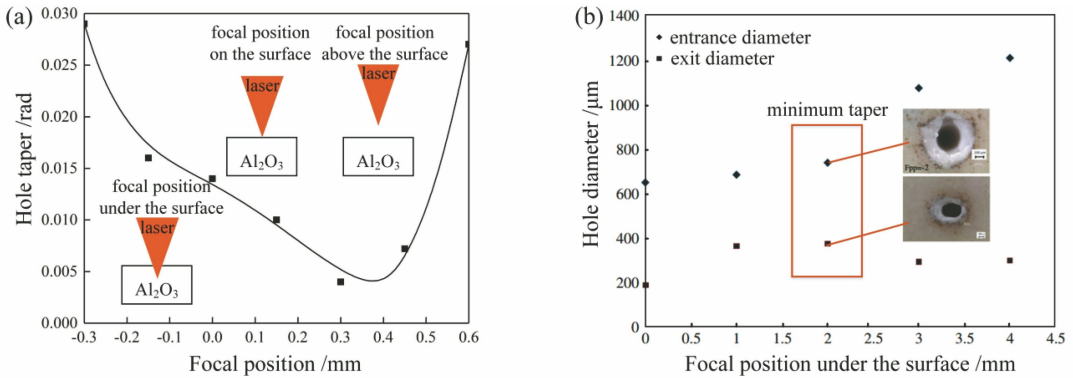


图 12 毫秒激光焦点位置与孔锥度的关系。(a)厚 1 mm 的氧化铝,脉冲宽度为 15 ms,激光能量为 600 mJ,重复频率为 5 Hz<sup>[24]</sup>; (b)厚 10.5 mm 的氧化铝,脉冲宽度为 2 ms,峰值能量为 8 kW,重复频率为 10 Hz<sup>[36]</sup>

Fig. 12 Relationship between millisecond laser focal plane position and hole taper. (a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with thickness of 1 mm, pulse duration of 15 ms, laser energy of 600 mJ, and repetition rate of 5 Hz<sup>[24]</sup>; (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with thickness of 10.5 mm, pulse duration of 2 ms, peak power of 8 kW, and repetition rate of 10 Hz<sup>[36]</sup>



负离焦量可以减少经孔壁反射损失的能量,使激光在孔底部加工区域聚焦,得到更大的能量密度,提高激光的穿透力,增大孔出口直径;正离焦或较大负离焦加工会使材料表面的聚焦光斑增大,平均光照功率密度减小,激光不足以穿透极厚陶瓷,所以在极厚陶瓷上使用适宜的负离焦进行加工可以得到更小锥度的孔。

### 3 陶瓷材料表面孔的纳秒激光加工

#### 3.1 纳秒激光去除陶瓷材料机理

##### 3.1.1 光热作用与光化学作用

纳秒激光加工陶瓷材料的去除机制包括光热作用和光化学作用<sup>[43]</sup>。激光波长决定了激光光子能量,即

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda, \quad (4)$$

式中: $h$  为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ;  $c$  为光速, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $\lambda$  为波长。一般情况下,当激光波长  $\geq 500 \text{ nm}$ ,光子能量小于材料的化学键时,材料的去除机理以光热作用为主。具体表现为,被照射区域吸收激光光子能量后将其转化为热能,热能使材料熔化甚至蒸发,在反冲压力的作用下达到材料去除的目的,这与采用毫秒激光加工时材料的去除机理基本一致。而当激光波长  $< 500 \text{ nm}$  时,光子能量大于材料的化学键,材料的去除机理以光化学作用为主。具体表现为,高能的光子直接破坏材料结合的分子键,使材料以小分子颗粒的形式从母体剥离,实现材料的去除。如:紫外激光的波长较短,采用紫外波段的纳秒激光对陶瓷材料进行加工时,可获得较高的光子能量,该能量可直接破坏陶瓷材料的分子键,实现光化学作用的“冷加工”<sup>[44]</sup>。

##### 3.1.2 多光子吸收

氧化铝的分子键为共价键,键能约为  $9.1 \text{ eV}$ ,属于绝缘体材料,几乎所有波段激光的单光子能量均小于其分子键能,理论上单个光子无法产生光化学作用<sup>[45]</sup>。但氧化铝属于宽带隙材料,因材料掺杂及其自身缺陷,可在靠近常规能带的中间位置产生新能带,帮助价电子吸收光子能量,从而使价电子依靠多个光子的能量跃迁到导带,此过程称为“多光子吸收”。多光子吸收现象使得陶瓷材料分子能同时吸收多个光子能量而导致陶瓷分子键断裂,从而发生光化学作用,实现材料的去除。

##### 3.1.3 等离子体效应

研究表明,在不考虑等离子体影响时,纳秒激光单脉冲烧蚀氧化铝的深度会随着激光能量密度的增

加而迅速增大<sup>[46]</sup>;而考虑等离子体屏蔽作用时,纳秒激光对氧化铝的单脉冲烧蚀作用就会明显减弱,且随着激光能量的升高,在较低能量密度时烧蚀深度增长较快,在较高能量密度时烧蚀深度增长缓慢,如图 13 所示<sup>[47]</sup>。这是因为较高能量密度的激光与气化材料相互作用会产生大量等离子体,等离子体对激光向孔内传输起到了屏蔽作用,从而降低了氧化铝加工区域用于去除材料的激光能量。

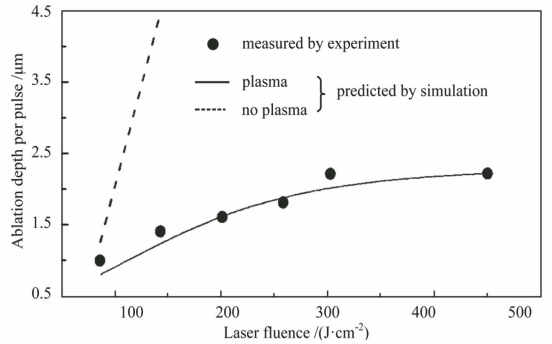


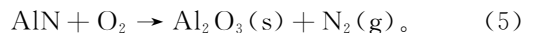
图 13 纳秒激光能量密度和氧化铝单脉冲烧蚀深度的关系(脉冲宽度为  $10 \text{ ns}$ ,重复频率为  $1 \text{ Hz}$ )<sup>[47]</sup>

Fig. 13 Ablation depth per pulse of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  versus nanosecond laser fluence (pulse duration of  $10 \text{ ns}$  and repetition rate of  $1 \text{ Hz}$ )<sup>[47]</sup>

##### 3.1.4 化学反应

无氧环境中纳秒激光加工氮化铝过程的材料去除机理如图 14(a)所示<sup>[48-49]</sup>。当图 14(a)中的反应 1 指代的反应在材料去除中占主导地位时,氮元素气化去除,而铝则以固体或液体的形式排出,这种固、液、气三相同同时存在的不稳定过程会影响孔的成形,导致在接近氮化铝烧蚀阈值条件下加工出的孔形不规则。当图 14(a)中的反应 2~4 指代的反应控制烧蚀时,氮化铝直接蒸发并产生形状规则的孔,孔壁由铝单质层覆盖,如图 14(b)所示<sup>[48]</sup>。

有氧环境中纳秒激光加工氮化铝过程的材料去除机理为



氮化铝在纳秒激光照射区域的高温、高压作用下与氧气结合生成氧化铝和氮气,氧化铝黏附在氮化铝基体表面,凝结成孔壁和部分热影响区,其过程与毫秒激光加工氮化铝表面孔的材料去除过程一致。笔者采用紫外纳秒激光在空气环境中进行了氮化铝表面孔的加工,并测得了孔出口各部位的元素含量,如图 15 所示。基体位置取样点“2”处氮元素的质量分数约为  $24\%$ ,氧元素的质量分数约为  $1\%$ ,而靠近孔口位置白色烧蚀区域取样点“1”处无氮元

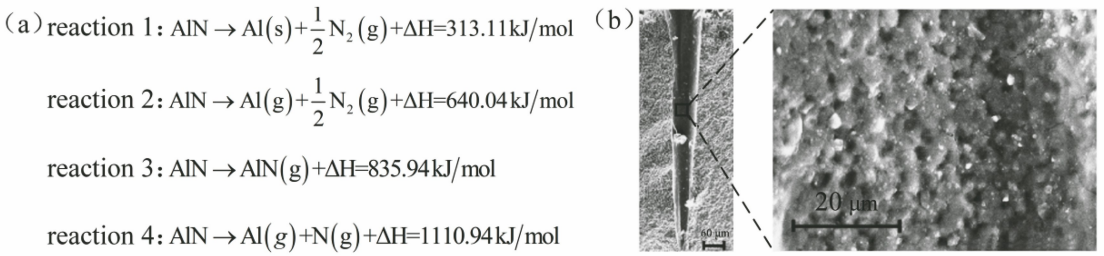


图 14 纳秒激光加工氮化铝过程的材料去除机理及孔壁形貌<sup>[48-49]</sup>。

(a) 纳秒激光加工氮化铝过程的化学反应；(b) 氮化铝基板上孔的横截面电镜图

Fig. 14 Material removal mechanism of nanosecond laser processing aluminum nitride, and morphology of hole wall<sup>[48-49]</sup>. (a) Chemical reaction for AlN drilled by nanosecond laser; (b) SEM image of hole cross-section on AlN

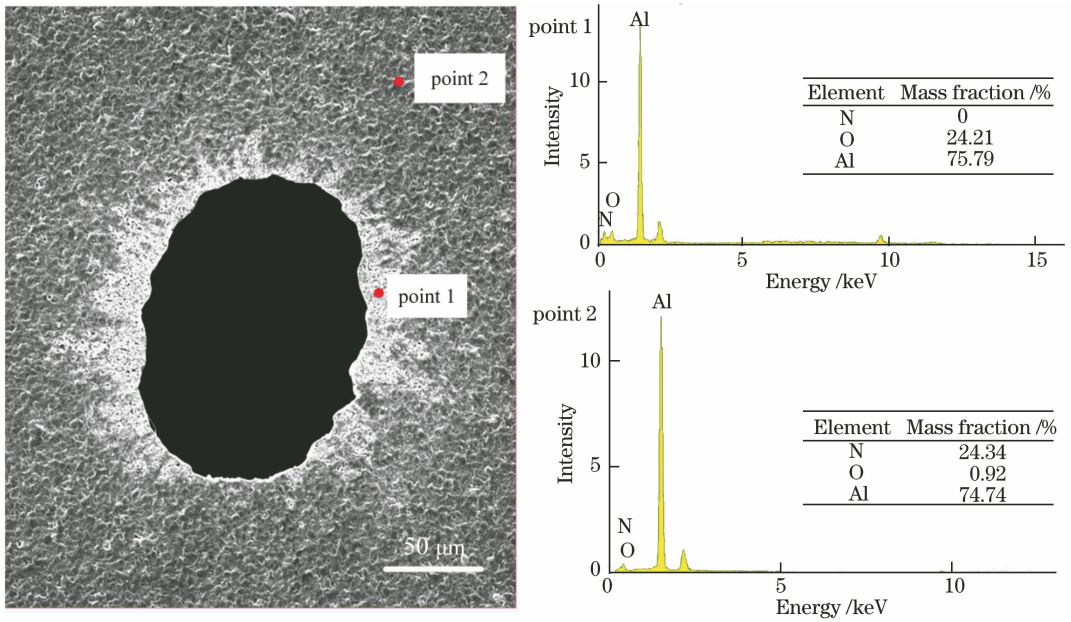


图 15 纳秒激光加工 0.38 mm 厚氮化铝表面孔出口各部位元素的含量

(激光功率为 8 W, 重复频率为 50 kHz, 扫描速度为 20 mm/s, 扫描次数为 40 次)

Fig. 15 Element content in different parts of hole exit on AlN by nanosecond laser processing (laser power of 8 W, repetition rate of 50 kHz, scanning speed of 20 mm/s, and repeat counts of 40)

素, 氧元素的质量分数约为 24%。这是因为孔周围靠近激光作用区域的氮化铝发生了氧化反应, 靠近孔口位置的氮元素气化排出, 导致氮元素含量降低而氧元素含量升高。

### 3.2 纳秒激光加工陶瓷材料表面孔的尺寸特征参数

#### 3.2.1 孔直径

##### 3.2.1.1 激光能量对孔直径的影响

纳秒激光在加工陶瓷材料时, 激光参数对孔直径的影响规律与毫秒激光参数对孔直径的影响规律基本相同。对于不同的激光波长和环境压力, 孔的平均直径均表现为随着激光能量的增加而线性增大的趋势, 但在 760 Torr (0.1 MPa) 的环境压力下, 当激光功率增大至 210 mW 时, 孔直径略微下降, 如图 16 所示<sup>[50]</sup>。这是由于当激光能量较高时, 等离

子体的屏蔽作用在一个大气压力下较为明显, 阻碍了激光对氧化铝的去除, 而在较小的环境压力下, 即接近真空环境中, 等离子体屏蔽作用减弱甚至消失。

##### 3.2.1.2 扫描速度和扫描次数对孔直径的影响

笔者在紫外纳秒激光旋切氧化铝表面孔的实验中发现: 随着扫描速度增大, 孔入口直径减小。对在相同扫描速度和不同扫描次数下加工的孔入口直径进行比较后发现, 增加扫描次数, 孔入口直径增大, 且在较大扫描速度下的增幅大于在较小扫描速度下的增幅, 如图 17 所示。前者是因为随着扫描速度增大, 氧化铝加工区域单位面积内接收的脉冲数减少, 吸收能量减少, 导致孔入口直径减小。后者则是因为在较小的扫描速度下, 孔入口直径更接近饱和值, 扫描次数的变化对其影响不大; 而在较高的扫描速

度下,加工区域孔入口处的烧蚀不完全,增大扫描次数也就增大了入口处的材料去除量,入口直径大幅增大。激光扫描速度和扫描次数对孔出口直径的影响规律与对孔入口直径的影响规律一致。

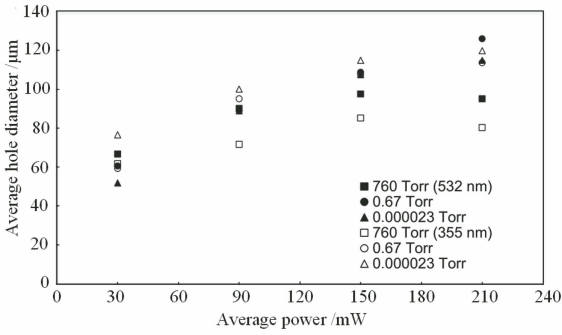


图 16 纳秒激光功率与孔直径的关系(厚 0.8 mm 的氧化铝,重复频率为 5 Hz)<sup>[50]</sup>

Fig. 16 Relationship between nanosecond laser power and hole diameter ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  with thickness of 0.8 mm and repetition rate of 5 Hz)<sup>[50]</sup>

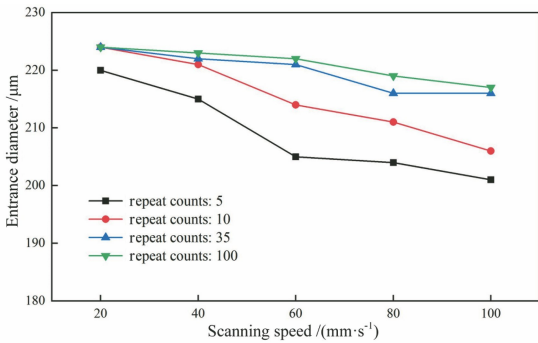


图 17 纳秒激光加工孔入口直径与扫描速度的关系(厚 0.12 mm 的氧化铝,激光功率为 8 W,重复频率为 50 kHz)

Fig. 17 Relationship between hole entrance diameter and scanning speed for nanosecond laser processing ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  with thickness of 0.12 mm, laser power of 8 W, and repetition rate of 50 kHz)

### 3.2.2 孔深度

#### 3.2.2.1 激光能量、重复频率和扫描速度对孔深度的影响

对纳秒激光加工氧化铝的刻蚀深度进行研究后发现,增大平均功率,减小重复频率,减小扫描速度均可以提高氧化铝的刻蚀深度,如图 18(a~c)所示<sup>[45]</sup>。这是因为增大激光功率可以提高加工区域吸收的能量,增大材料的去除率;减小重复频率可以提高激光的峰值功率,从而提高材料去除率;而减小激光扫描速度,氧化铝加工区域单位面积内接收的激光脉冲数会相应增多,刻蚀深度得以提高。

#### 3.2.2.2 水下加工

由于水对紫外波长激光的吸收率较小,且具有冷却激光加工区域及冲刷材料熔渣的作用,因此常用水下加工的方法调控刻蚀深度。水下激光刻蚀氧化铝的深度大于空气中的刻蚀深度,且当水下光程 > 4 mm 时,刻蚀深度随着水下光程的增大而减小,如图 18 所示<sup>[45]</sup>。这主要是因为激光在水下与材料相互作用会产生蒸汽形成空泡,空泡的出现与破裂会对被加工区域产生强冲击作用,使得氧化铝表面的熔渣迅速脱离,加快材料的去除速率。当水下光程增加时,氧化铝表面的水膜越厚,其能量损耗就越大,水的散射作用也就越明显,导致激光刻蚀的材料去除率降低,刻蚀深度减小。当水下光程分别为 2 mm 和 4 mm 时,刻蚀深度基本保持不变,这是由于氧化铝表面的水膜较薄,在水流扰动下对激光产生的吸收作用和散射作用较小,水下光程对刻蚀深度的影响还不明显。

#### 3.2.2.3 组合脉冲序列

在采用纳秒激光加工陶瓷材料孔过程中,加工区域会产生等离子体屏蔽,从而极大地衰减了样品表面的激光能量,影响加工效率,这种情况在加工高深径比孔腔时更为明显。为克服等离子体的屏蔽效应,Klimentov 等<sup>[51]</sup>提出了由皮秒脉冲序列和纳秒脉冲序列组成的组合脉冲加工方法,该组合脉冲序列的单个纳秒脉冲峰值能量比相同总能量下的普通纳秒激光单脉冲峰值能量至少低两个数量级,结果发现:相比于单脉冲纳秒或单脉冲皮秒激光,组合脉冲激光在氧化铝材料表面加工孔时,加工表面的等离子体密度更低,烧蚀速率更快,孔直径更接近光斑直径。组合脉冲序列在氧化铝表面进行孔加工时,材料烧蚀深度随脉冲数的变化如图 19 所示<sup>[51]</sup>。可以看到,随着脉冲数增加,烧蚀深度增大,且烧蚀速率趋向于两个恒定的特征区域,即从一开始的高烧蚀速率变化到一定深度孔时的低烧蚀速率。这是因为激光在波导状的孔通道结构中发生了菲涅耳损耗,导致烧蚀速率降低。

#### 3.2.3 孔锥度

笔者采用纳秒激光在 0.12 mm 厚氧化铝表面进行孔加工时发现,孔锥度随着激光能量的增加而增大,如图 20 所示。这主要是由于增大激光能量引起的孔入口直径增幅比引起的孔出口直径增幅更明显,其根本原因是激光能量的增大会增强材料中的热传导过程,使熔池向孔径向和深度方向扩张,其中孔径向扩张更为明显。对比在相同激光能量和不同扫

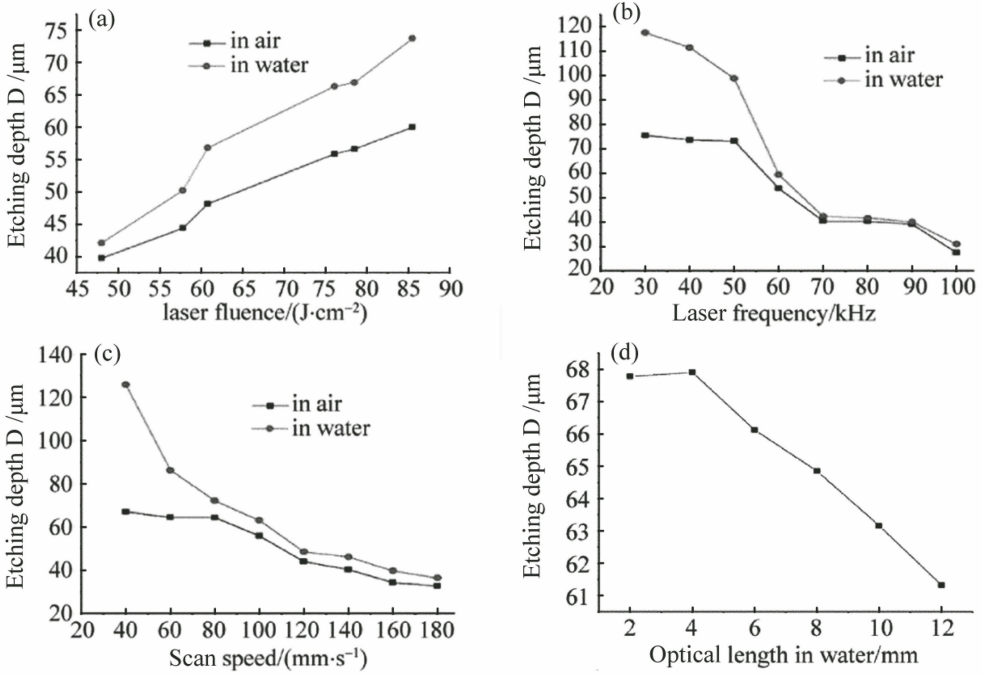


图 18 纳秒激光加工参数对氧化铝刻蚀深度的影响<sup>[45]</sup>。(a)激光能量密度;(b)重复频率;  
(c)扫描速度;(d)水下光程(厚 0.5 mm 的氧化铝,激光能量密度为  $78.5 \text{ J}/\text{cm}^2$ ,重复频率为 60 kHz,扫描速度为 100 mm/s)  
Fig. 18 Influence of nanosecond laser processing parameters on etching depth of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[45]</sup>. (a) Laser fluence;  
(b) repetition rate; (c) scanning speed; (d) optical length in water ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  with thickness of 0.5 mm, laser  
fluence of  $78.5 \text{ J}/\text{cm}^2$ , repetition rate of 60 kHz, and scanning speed of 100 mm/s)

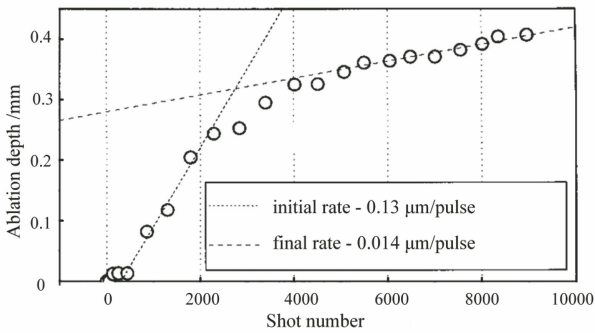


图 19 组合激光脉冲数与烧蚀深度的关系(0.6 mm 厚氧化铝,激光能量密度为  $600 \text{ J}/\text{cm}^2$ )<sup>[51]</sup>  
Fig. 19 Relationship between shot number and ablation depth ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  with thickness of 0.6 mm and laser fluence of  $600 \text{ J}/\text{cm}^2$ )<sup>[51]</sup>

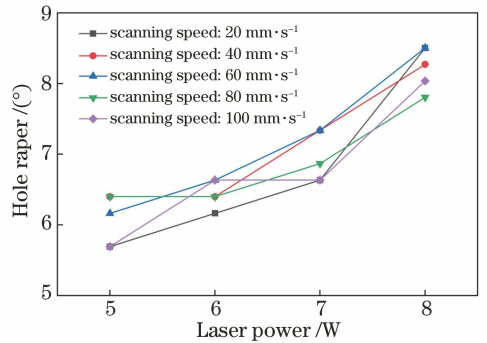


图 20 激光功率与孔锥度的关系(0.12 mm 厚氧化铝,重复频率为 50 kHz,扫描次数为 100 次)  
Fig. 20 Relationship between laser power and hole taper ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  with thickness of 0.12 mm, repetition rate of 50 kHz, and repeat counts of 100)

描速度下加工的孔锥度可以发现,当激光功率为 5~8 W 时,扫描速度对孔锥度基本无影响。不同的是,采用纳秒激光在厚度为 1 mm 的氧化铝表面进行孔加工时,孔锥度会随着激光能量的增加而减小<sup>[52]</sup>。这是因为在较厚的陶瓷上加工孔时,激光能量在孔通道内衰减,对孔出口位置材料的去除不完全,此时增大激光能量可以提高孔出口材料的去除率,孔出口直径的增幅大于入口直径的增幅,锥度减小。此外,使用较小脉冲宽度的激光进行加工时,增大重复

频率和辅助气体压力均可有效减小孔锥度<sup>[52]</sup>。

## 4 结束语

本文综述了毫秒和纳秒激光烧蚀氧化铝和氮化铝陶瓷基板材料去除机理以及各激光加工参数对孔尺寸的影响规律。对于陶瓷材料的去除机理,毫秒激光加工主要包括温度场效应、应力场效应、化学反应和材料阈值;而纳秒激光加工则主要包括光热作用、单光子光化学作用、多光子吸收、等离子体屏

蔽和化学反应。毫秒和纳秒激光在陶瓷材料加工中的各加工参数对孔尺寸特征参数的影响规律基本一致:增加脉冲宽度、激光能量、扫描次数或减小扫描速度,孔的平均直径均先增大后饱和,在等离子体屏蔽作用下可能会出现阶段性饱和;增加脉冲宽度、激光能量、激光脉冲数或减小重复频率和扫描速度,均可以使孔深度先增大后达到饱和;使用水下加工或组合脉冲加工的方法也可以增大孔深度。对于毫秒激光,增大脉冲宽度或激光能量均能减小孔锥度,甚至获得负锥度孔。

目前,毫秒和纳秒激光加工技术更加成熟,而且激光器的性能稳定、成本较低,人们在陶瓷基板孔加工烧蚀理论与实验探索等方面已有丰富的经验。然而,毫秒和纳秒激光加工电子陶瓷基板表面孔的工业化应用仍面临巨大挑战,主要表现在三个方面。

### 1) 加工精度与加工质量

由于毫秒和纳秒激光的脉冲宽度和功率均较高,在实际加工中无法避免产生严重的热量积累,从而会破坏加工区域材料的形貌和性能,因此加工精度和加工质量无法做到精准调控。此外,采用毫秒和纳秒激光在陶瓷材料表面进行工业化大面积群孔加工时,受热裂纹的影响,需要以牺牲加工效率的方式来保证成品基片的完整,而且可加工陶瓷基板的厚度也受到了一定限制。

### 2) 高深径比微孔加工

随着电子系统集成化程度的提高,微器件微结构层出不穷,陶瓷基板表面孔的尺寸不断减小,高深径比微孔加工对加工方案提出了极高的要求。在几百微米厚的陶瓷材料上加工几十微米甚至十几微米直径的盲孔、通孔,且要保证孔锥度、圆度、位置精度、重铸层厚度、孔壁粗糙度及微裂纹等符合要求,这对毫秒和纳秒等非超短脉冲激光加工提出了巨大挑战。因此,当前一些研究工作对纳秒激光加工采取了与其他能场复合的方式来改进深孔加工中等离子体屏蔽带来的问题,以达到高深径比微孔加工的目的。如:将激光光束与水射流复合,以实现水助激光切割的深孔切割;采用超声波与激光加工复合的方式,以解决深孔加工中的排屑问题。

### 3) 激光加工系统的集成化

毫秒和纳秒激光在实际应用领域将与加工平台、在线检测、机械装备、通信系统和加工软件等构成一体化的智能化激光加工数控装备。光学系统与机械系统的协调控制,激光路径与工件运动的动态耦合,以及各部分间的通信连接和软件系统都对整

体装备的集成化提出了一定要求。

近年来,超快激光的研究与应用日趋成熟,已成为微纳加工领域的研究热点,其中皮秒激光在工业应用领域已开始崭露头角。与毫秒和纳秒激光相比,超短脉冲激光有着更短的脉冲宽度和更大的峰值功率,其与陶瓷材料的作用机理是一种非线性吸收的过程,同时可以超越衍射极限的特性带来了极小的加工尺度,实现超精细的纳米级加工。超快激光加工被称为“冷加工”,其加工区域的热量积累极小,有望消除孔壁上的重铸层和微裂纹,实现陶瓷基板上高质量、大面积群孔的加工。但超快激光在陶瓷材料表面加工孔的烧蚀机理以及孔进化过程方面的研究相对较少,加之超快激光器昂贵,使用、维护条件苛刻,加工效率较低,因此其实际工业化应用还需要一段较为漫长的过程。

除此之外,围绕激光时空整形<sup>[53]</sup>、双脉冲调控<sup>[54]</sup>、等离子体调控<sup>[55]</sup>等方法的探索已成为另一个提高陶瓷材料表面孔加工质量的方向。通过光路系统的优化调整(如脉冲延迟、偏振状态调控等),结合多种加工设备(如扫描振镜、光束整形器等),对激光焦点作用在材料上的烧蚀区域和耦合脉冲时序进行调控,可减小等离子体屏蔽效应,提高孔的深径比。另外,多种加工方式组合的激光复合加工也可以有效提高陶瓷表面孔的加工质量,精准调控孔形貌,如化学刻蚀激光复合加工、超声振动激光复合加工<sup>[56]</sup>等。激光器的发展日新月异,更短的波长和脉冲宽度、更高的功率,以及搭配集成化的系统和完善的加工工艺,使得毫秒和纳秒激光将在陶瓷基板表面孔加工领域具有广阔的前景。

## 参 考 文 献

- [1] Hao H S, Fu P, Gong L, et al. Recent achievement in research for electronic packaging ceramic substrate materials[J]. *Ceramics*, 2007(5): 24-27.  
郝洪顺, 付鹏, 巩丽, 等. 电子封装陶瓷基板材料研究现状[J]. *陶瓷*, 2007(5): 24-27.
- [2] Li T T, Peng C Q, Wang R C, et al. Research progress in ceramic substrate material for electronic packaging[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(7): 1365-1374.  
李婷婷, 彭超群, 王日初, 等. 电子封装陶瓷基板材料的研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(7): 1365-1374.
- [3] Tang T, Zhang X, Xu Z Z. Research progress and trends of electronic packaging materials[J]. *Journal of Nanjing University of Technology(Natural Science*

- Edition), 2010, 32(4): 105-110.
- 汤涛, 张旭, 许仲梓. 电子封装材料的研究现状及趋势[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2010, 32(4): 105-110.
- [4] Tian M B, Liang T X, He W. Electronic packaging technologies and materials [J]. Semiconductor Information, 1995, 32(4): 42-61.
- 田民波, 梁彤翔, 何卫. 电子封装技术和封装材料[J]. 半导体情报, 1995, 32(4): 42-61.
- [5] Fu Y P, Tan K, Tian M B. Recent development of electronic packaging technology [J]. Semiconductor Technology, 2009, 34(2): 113-118.
- 傅岳鹏, 谭凯, 田民波. 电子封装技术的最新进展[J]. 半导体技术, 2009, 34(2): 113-118.
- [6] Zhang J L. Applications of laser processing in microelectronics packaging [J]. Printed Circuit Information, 2001, 9(10): 33-38.
- 张家亮. 激光加工在微电子封装中的应用[J]. 印制电路信息, 2001, 9(10): 33-38.
- [7] Samant A N, Dahotre N B. Laser machining of structural ceramics: a review [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2009, 29(6): 969-993.
- [8] Liu Z, Zhang H, Yan Y, et al. Corrosion of sintered SiC ceramics in mixed acid solution: temperature and time dependences[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2017, 52(1): 38-45.
- [9] Thoe T B, Aspinwall D K, Wise M L H. Review on ultrasonic machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38(4): 239-255.
- [10] Li H F, Li J, Wen Y, et al. EDM for ceramics and its research status [J]. Journal of Jinan University (Science and Technology Edition), 2008, 22(2): 178-182.
- 李洪峰, 李嘉, 温雨, 等. 陶瓷材料电火花加工技术及研究进展[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2008, 22(2): 178-182.
- [11] Yu W, Wang X C, Gong S L, et al. Rapid scanning electron beam processing technology and its potential application in aviation manufacturing industry [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(16): 44-47.
- 余伟, 王西昌, 巩水利, 等. 快速扫描电子束加工技术及其在航空制造领域的潜在应用[J]. 航空制造技术, 2010(16): 44-47.
- [12] Feng Y X. A study on milling ceramics with abrasive waterjet technology [D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- 冯衍霞. 磨料水射流铣削陶瓷材料加工技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [13] Mishra S, Yadava V. Laser beam micromachining (LBMM): a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 73: 89-122.
- [14] Wang H J, Lin H, Wang C Y, et al. Laser drilling of structural ceramics: a review [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37(4): 1157-1173.
- [15] Zhao W Q, Wang W J, Mei X S, et al. Investigations of morphological features of picosecond dual-wavelength laser ablation of stainless steel [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 58: 94-99.
- [16] Duan W Q, Wang K D, Dong X, et al. Study on machining of high-quality micro-holes by laser trepan drilling [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 95-103, 112.
- 段文强, 王恪典, 董霞, 等. 激光旋切法加工高质量微小孔工艺与理论研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 95-103, 112.
- [17] Liu B, Jiang G D, Wang W J, et al. Porous microstructures induced by picosecond laser scanning irradiation on stainless steel surface [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 78: 55-63.
- [18] Zhai Z Y, Wang W J, Mei X S, et al. Effect of temporal control of air/water environment on laser drilling of nickel-based alloy with thermal barrier coatings [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(9/10/11/12): 3395-3405.
- [19] Zhao W Q, Wang W J, Li B Q, et al. Wavelength effect on hole shapes and morphology evolution during ablation by picosecond laser pulses [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 84: 79-86.
- [20] Ahmed N, Darwish S, Alahmari A M. Laser ablation and laser-hybrid ablation processes: a review [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(9): 1121-1142.
- [21] Adelman B, Hellmann R. Rapid micro hole laser drilling in ceramic substrates using single mode fiber laser [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 221: 80-86.
- [22] Mendes M, Sarrafi R, Schoenly J, et al. Fiber laser micromachining in high-volume manufacturing [J]. Industrial Laser Solutions, 2015, 30(3): 23-27.
- [23] Gautam G D, Pandey A K. Pulsed Nd:YAG laser beam drilling: a review [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 100: 183-215.
- [24] Sun L H. The research of laser drilling on ceramics [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2007.
- 孙立华. 陶瓷激光打孔技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.
- [25] Semak V, Matsunawa A. The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing

- [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 30(18): 2541-2552.
- [26] Quintero F, Varas F, Pou J, et al. Theoretical analysis of material removal mechanisms in pulsed laser fusion cutting of ceramics [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(4): 655-666.
- [27] Vora H D, Santhanakrishnan S, Harimkar S P, et al. One-dimensional multipulse laser machining of structural alumina: evolution of surface topography [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(1/2/3/4): 69-83.
- [28] Harimkar S P, Samant A N, Dahotre N B. Temporally evolved recoil pressure driven melt infiltration during laser surface modifications of porous alumina ceramic [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(5): 054911.
- [29] Samant A N, Dahotre N B. Computational predictions in single-dimensional laser machining of alumina [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(12/13): 1345-1353.
- [30] Samant A N, Dahotre N B. Differences in physical phenomena governing laser machining of structural ceramics [J]. Ceramics International, 2009, 35(5): 2093-2097.
- [31] Ren L, Wang H L, Tang Y J, et al. The impact of laser drilling on insulating strength of AlN ceramics [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2006, 34(6): 451-455.  
任丽, 王海林, 唐跃进, 等. 激光打孔对氮化铝绝缘性能的影响 [J]. 低温与超导, 2006, 34(6): 451-455.
- [32] Sun Z L, Cai Z X, Yang W. Laser cutting and scribing of 96% alumina ceramic substrate and parameter optimization [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101404.  
孙智龙, 蔡志祥, 杨伟. 96%氧化铝陶瓷基板的激光切割切片及工艺优化 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101404.
- [33] Zhang Y J, Fang M G. The research of the ceramic drilling by Nd:YAG laser [J]. Laser & Infrared, 2001, 31(3): 161-162.  
张银江, 方鸣岗. 陶瓷激光精密打孔工艺研究 [J]. 激光与红外, 2001, 31(3): 161-162.
- [34] Kacar E, Mutlu M, Akman E, et al. Characterization of the drilling alumina ceramic using Nd:YAG pulsed laser [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(4): 2008-2014.
- [35] Zhang M F, Zheng Y J. Discussion on the best conditions for CO<sub>2</sub> laser drilling of alumina ceramic substrates [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(5): 449.  
张铭峰, 郑劭家. 氧化铝陶瓷基片 CO<sub>2</sub> 激光钻孔最佳条件之探讨 [J]. 中国激光, 1999, 26(5): 449.
- [36] Hanon M M, Akman E, Genc Oztoprak B, et al. Experimental and theoretical investigation of the drilling of alumina ceramic using Nd:YAG pulsed laser [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(4): 913-922.
- [37] Raman S, Lump J K. Laser machining and metallization of VIAS in aluminum nitride [J]. MRS Proceedings, 1995, 390: 269.
- [38] Zhang W. Numerical simulation and experimental study of pulsed laser drilling on nickel-based superalloy [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.  
张文. 镍基高温合金脉冲激光打孔数值模拟及实验研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [39] Iwatani N, Doan H D, Fushinobu K. Optimization of near-infrared laser drilling of silicon carbide under water [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 71: 515-520.
- [40] Samant A, Dahotre N. Ab initio physical analysis of single dimensional laser machining of silicon nitride [J]. Advanced Engineering Materials, 2008, 10(10): 978-981.
- [41] Laude L, Ogeret C, Jadin A, et al. Excimer laser ablation of Y-SiAlON [J]. Applied Surface Science, 1998, 127/128/129: 848-851.
- [42] Bharatish A, Narasimha Murthy H N, Anand B, et al. Characterization of hole circularity and heat affected zone in pulsed CO<sub>2</sub> laser drilling of alumina ceramics [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 53: 22-32.
- [43] Xie C Y, Lu X Z, Xie H H, et al. The impact of laser drilling on AlN ceramics [C] // 2011 IEEE International Conference on Information and Automation, June 6-8, 2011. Shenzhen, China. New York: IEEE, 2011: 882-885.
- [44] Yu J, Zeng Z J, Zhu S G, et al. Research on advantages of UV laser in fine processing technology [J]. Infrared, 2008, 29(6): 9-13, 40.  
俞君, 曾智江, 朱三根, 等. 紫外激光在微细加工技术中的优势研究 [J]. 红外, 2008, 29(6): 9-13, 40.
- [45] Kong L R, Zhang F, Duan J, et al. Research of water-assisted laser etching of alumina ceramics [J]. Laser Technology, 2014, 38(3): 330-334.  
孔令瑞, 张菲, 段军, 等. 水辅助激光刻蚀氧化铝陶瓷的研究 [J]. 激光技术, 2014, 38(3): 330-334.
- [46] Ho C Y, Lu J K. A closed form solution for laser drilling of silicon nitride and alumina ceramics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1/2/3): 260-263.

- [47] Atanasov P A, Eugenieva E D, Nedialkov N N. Laser drilling of silicon nitride and alumina ceramics: a numerical and experimental study [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(4): 2013-2016.
- [48] Nedialkov N, Sawczak M, Jendrzewski R, et al. Analysis of surface and material modifications caused by laser drilling of AlN ceramics [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 254(4): 893-897.
- [49] Nikolay N, Atanasov P A, M. S, et al. Laser drilling of AlN ceramics using nanosecond pulses [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5777: 850-853.
- [50] Mutlu M. Effects of the laser wavelength on drilling process of ceramic using Nd:YAG laser [J]. *Journal of Laser Micro*, 2009, 4(2): 84-88.
- [51] Klimentov S M, Garnov S V, Kononenko T V, et al. High rate deep channel ablative formation by picosecond-nanosecond combined laser pulses [J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 1999, 69(7): S633-S636.
- [52] Kuar A S, Acherjee B, Ganguly D, et al. Optimization of Nd:YAG laser parameters for microdrilling of alumina with multiquality characteristics via grey-taguchi method [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, 27(3): 329-336.
- [53] Jiang L, Wang A D, Li B, et al. Electrons dynamics control by shaping femtosecond laser pulses in micro/nanofabrication: modeling, method, measurement and application [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(2): 17134.
- [54] Wang Z C. The experimental and numerical simulation study on mass migration during the combined pulsed laser drilling [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.  
王子成. 双脉冲激光联合打孔过程中物质迁移的实验研究及数值模拟 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [55] Zhai Z Y, Wang W J, Mei X S, et al. Influence of plasma shock wave on the morphology of laser drilling in different environments [J]. *Optics Communications*, 2017, 390: 49-56.
- [56] Yuan Z Z. Design of ultrasonic vibration and jet-assisted laser composite machining system [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018.  
袁珠珠. 超声振动与射流辅助激光复合加工系统设计 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018.