

激光加工电子陶瓷基板孔的形貌特征及其工艺调控综述

赵万芹^{1,2}, 梅雪松^{1,2*}, 杨子轩^{1,2}

¹西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710064;

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 710064

摘要 电子器件的高质量和高密度互联对激光加工硬脆电子陶瓷基板表面孔的质量提出了更高的要求。综述了长脉冲毫秒激光、短脉冲纳秒激光和超快激光加工的电子陶瓷基板孔的形貌特征, 主要包括孔的表面形貌特征(如孔口圆度、孔表面喷溅物、孔表面微裂纹和孔表面热影响区等)及孔的侧壁形貌特征(如孔的锥度、孔侧壁重铸层和孔侧壁表面微裂纹等)。

关键词 激光技术; 电子陶瓷基板; 孔的形貌特征; 毫秒激光; 纳秒激光; 超快激光

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1002403

1 引言

随着现代科学技术特别是电子信息技术的快速发展, 微电子器件向大规模集成、微型化、高效率、高可靠性等方向发展, 电子系统集成度的提高导致功率密度升高, 进而电子元件和系统工作产生的热量上升, 系统工作温度升高, 从而引起半导体器件性能恶化, 器件破坏、分层等, 甚至使封装材料烧毁。因此, 研究开发具有高热导率及良好综合性能的新型封装材料已成为当务之急^[1-4]。陶瓷基板是常用的一种电子封装基片材料, 与金属基片和树脂基片相比, 其主要优点^[5-6]在于: 绝缘性能好, 可靠性高; 介电系数较小, 高频特性好; 热膨胀系数小, 热失配率低; 热导率高; 气密性好, 化学性能稳定; 耐蚀性好, 不易产生微裂等现象。总之, 陶瓷基板基本上能够满足微电子器件封装的一切性能要求, 被广泛应用于航空、航天和军事工程中。常用的电子封装陶瓷基板材料有三氧化二铝陶瓷(Al_2O_3 陶瓷)、氮化铝陶瓷(AlN 陶瓷)、碳化硅陶瓷(SiC 陶瓷)和氮化硅陶瓷(Si_3N_4)等。其中, Al_2O_3 陶瓷和 AlN 陶瓷优异的性能(如高硬度、高热导率、与芯片匹配的热膨

胀系数)及较为成熟的制作工艺使其成为电子封装基板的主流材料^[7-9]。但由于陶瓷材料的硬脆特性, 传统机械加工方法费时费力, 且易对基板造成损伤。过去几十年里, 特种加工方法迅速发展, 但这些方法对于陶瓷材料的孔加工依然存在局限性^[10], 如电火花加工主要应用于导电材料^[11], 对于非导电材料则需要通过电解电火花复合的方式实现加工, 超声加工方法的效率低下^[12], 化学腐蚀方法难以加工深腔体孔^[13]等。

激光加工是一种无接触加工方法, 无刀具磨损, 具有高精度及高灵活性, 是硬脆材料加工的首选方法^[14-15]。目前, 关于激光加工孔特征尺寸的研究较多, 而往往忽略了孔的特征形貌。但高能量长脉冲激光聚焦于材料上时无法避免的强烈热效应等^[16]导致加工的陶瓷基板表面孔带有重铸层、微裂纹及变性热影响区等, 影响孔的形貌, 进而影响基板性能。必须指出的是, 热效应与激光脉冲宽度具有较高的相关性, 以毫秒激光为代表的长脉冲激光的热效应最为严重, 加工的孔带有严重的孔口喷溅物、重铸层和微裂纹; 以纳秒激光为代表的短脉冲激光的热效应相对较小, 加工孔的形貌质量普遍有很大提

收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2021-12-23; 录用日期: 2022-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(51735010, 52105465)

通信作者: *xsmei@xjtu.edu.cn

升;而超快激光(脉冲宽度 ≤ 12 ps)具有“冷加工”特性,可以最大限度地限制热效应的影响,进而加工出更高形貌质量的孔^[17-19]。本文主要综述了长脉冲毫秒、短脉冲纳秒和超快激光加工的电子陶瓷基板材料孔的形貌特征。

2 激光加工电子陶瓷基板孔的形貌特征评价

2.1 激光加工孔的形貌特征评价简介

对于孔的激光加工,涉及的评价内容主要包括:微孔的特征尺寸,即孔的直径和深度,如图1(a)所示;孔的特征形貌,包括孔的表面形貌特征(如孔口圆度、孔口表面喷溅物、孔口表面热影响区和孔口表面微裂纹)及孔的侧壁形貌特征[如孔的锥度、孔的

侧壁表面形貌(含表面微裂纹)、侧壁重铸层和侧壁热影响区],如图1(b)所示。

在孔的形貌特征中有两个定量评价的指标,即孔口圆度和孔的锥度^[20]。

$$C_i = \frac{D_{\min}}{D_{\max}}, \quad (1)$$

式中: C_i 为孔口圆度; D_{\min} 为孔的短轴直径; D_{\max} 为孔的长轴直径。

$$\alpha = \arctan\left(\frac{D_1 - D_2}{2h}\right), \quad (2)$$

式中: α 为孔的锥度; D_1 为孔的入口直径; D_2 为孔的出口直径; h 为孔的深度。对于通孔而言,孔底部直径 D_2 即是孔的出口直径,孔的深度 h 即是陶瓷基板厚度。

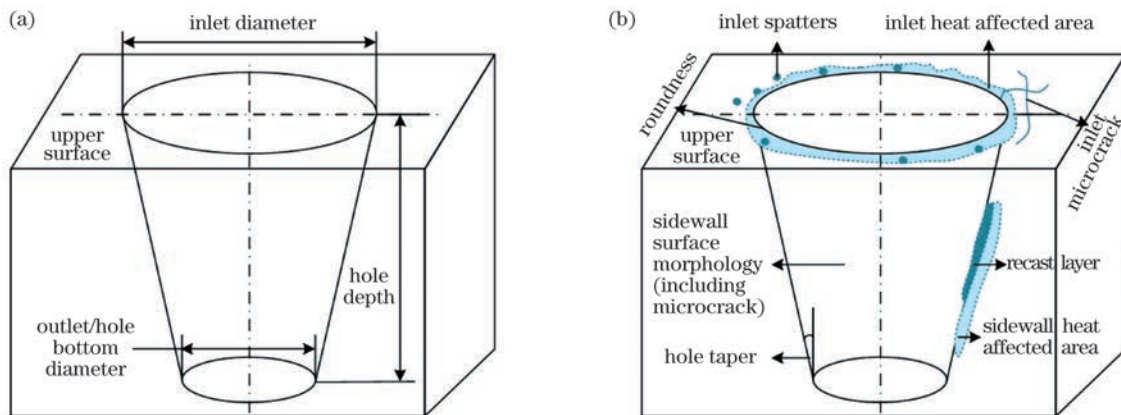


图1 激光加工微孔的尺寸和形貌特征的评价。(a)尺寸特征;(b)形貌特征

Fig. 1 Evaluation on dimension and morphological characteristics of laser ablated micro-hole. (a) Dimension characteristics; (b) morphological characteristics

孔口表面喷溅物可通过喷溅物高度和范围表征;孔口表面热影响区、侧壁重铸层和侧壁热影响区主要通过热影响区/重铸层宽度(厚度)表征;孔口表面微裂纹和孔的侧壁表面形貌(含表面微裂纹)的检测主要依靠显微放大仪器如光学显微镜、电子扫描显微镜(SEM)等。

2.2 激光加工孔的裂纹形成机理

对于陶瓷的激光加工,由于其原子间结合键的特点和气孔杂质的存在,材料内部的缺陷在激光加工热应力的作用下断裂形成微裂纹。图2(a)所示为单孔裂纹形态趋势图^[21],其中,裂纹主要包括沿孔口边扩展的径向裂纹及环孔边缘与孔边缘有一定距离的环状裂纹,且裂纹主要形成在孔周围的热影响区内。在激光加工陶瓷表面孔的过程中,热影响区内会诱发切

向应力和径向应力,当应力超过材料断裂阈值时,孔边缘将产生径向和环形裂纹。其中,切向应力普遍在孔边缘处达到最大值,引起径向裂纹的扩展,径向应力在距离孔边缘一定位置处达到最大值,改变了径向裂纹的扩展方向或产生了环状裂纹。图2(b)所示为毫秒激光加工氧化铝陶瓷单孔表面裂纹图^[22]。

当进行纵横阵列孔加工时,普遍先加工一行/列孔,然后跳转至下一行/列,进行下一行/列孔加工,如图2(c)所示^[23],箭头表示激光加工孔的顺序, L 为孔中心间距。对于陶瓷等硬脆材料的激光加工,如果孔的排列太紧密,单孔裂纹会扩展、延伸,当微裂纹尖端处的应力难以通过塑性形变而得到释放时,裂纹会逐渐扩大,最终贯穿整个样片,导致材料破裂,如图2(d)所示^[24]。

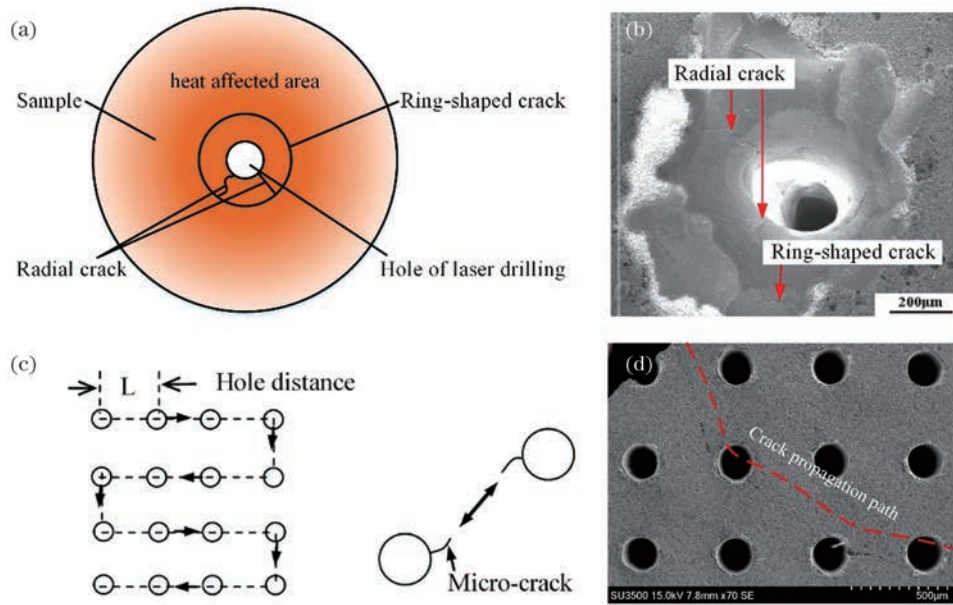


图2 激光加工孔裂纹。(a)单孔裂纹形态趋势图^[21]；(b)毫秒激光加工氧化铝陶瓷单孔表面裂纹图^[22]；(c)群孔裂纹形态趋势图^[23]；(d)纳秒激光加工氧化铝陶瓷群孔裂纹图^[24]

Fig. 2 Laser processed hole cracks. (a) Trend diagram of single hole crack morphology^[21]; (b) single hole cracks on aluminum oxide ceramics processed by millisecond laser^[22]; (c) trend diagram of group hole crack morphology^[23]; (d) group hole cracks on aluminum oxide ceramics processed by nanosecond laser^[24]

3 毫秒激光加工电子封装陶瓷基板孔的形貌特征及其工艺调控

毫秒激光与氧化铝、氮化铝陶瓷相互作用时的机理本质上是一个热熔过程^[25]。激光聚焦后照射在陶瓷表面,高密度能量被加工区域材料吸收、累积,当激光作用区域的材料温度升高到熔点时,陶瓷熔化形成熔池。熔融态会增大材料对激光的吸收率,使得熔池温度进一步升高,当温度升高使得部分材料气化,诱发的等离子体聚集在熔池上方形成高压蒸气团,并产生反冲压力,促使熔池内的熔融材料沿孔入口边缘排出^[26-28]。当加工区域的材料在激光作用下不断熔化、蒸发时,陶瓷材料分解,表现为氧

化铝分解成单质铝和氧气,氮化铝分解为单质铝和氮气排出^[29],材料表面形成稳定的孔结构。

3.1 孔的表面形貌特征及其工艺调控

虽然轨迹加工时激光以圆形运动形式去除材料,普遍能够获得很好圆度的孔,但在毫米激光陶瓷加工过程中,较严重的热效应使得孔口表面堆积很多重熔物,这会显著影响孔的圆度。研究表明,随着激光扫描速度的增加,孔入口和出口的平均圆度均呈现减小的趋势,即孔口圆度变差,如图3所示^[30],且激光扫描速度对出口孔圆度的影响要大于其对入口孔圆度的影响。这是因为当激光扫描速度增加时,孔的加工时间相应减少,从而总输入热能减少,所以扫描速度越高,输入热能下降越快,孔深越大,

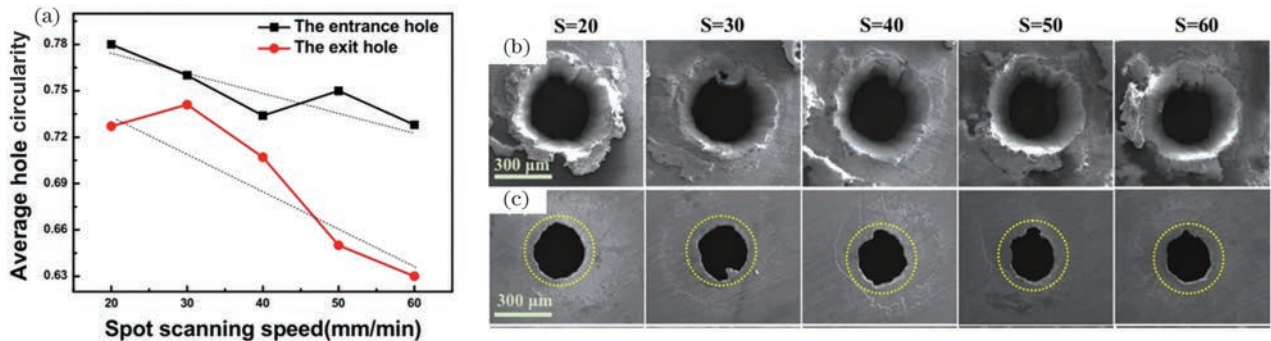


图3 毫秒激光加工碳化硅陶瓷孔^[30]。(a)扫描速度对孔圆度的影响；(b)孔的入口电镜图；(c)孔的出口电镜图

Fig. 3 Millisecond laser processed holes on silicon carbide ceramics^[30]. (a) Effect of scanning speed on hole circularity; (b) SEM images of inlet; (c) SEM images of outlet

出口热能越小,孔的出口圆度减小得越快。

与在空气中的激光加工相比,在盐溶液和水中进行毫秒激光氧化铝陶瓷表面孔加工可以明显提高孔的圆度,且当液体中的光程为 0.5 mm 时可以获得最大的孔入口/出口圆度,即孔的入口和出口圆度均最好,如图 4(a)、(b)所示^[31]。通过激光溶液辅助加工示意图可以看出,如图 4(c)所示^[32],当样品放

置于溶液中进行激光加工时,激光作用产生的熔渣会随着溶液流的搅动而更好地排出,避免气化产物和喷溅熔渣对光束产生阻碍,提高了作用在陶瓷表面的光束质量,进而增加了孔的圆度。然而,当液体中的光程较大如为 1 mm 时,溶液对光束的折射占主导作用,导致激光在溶液的搅动下不稳定且能量损失过大,孔圆度变差。

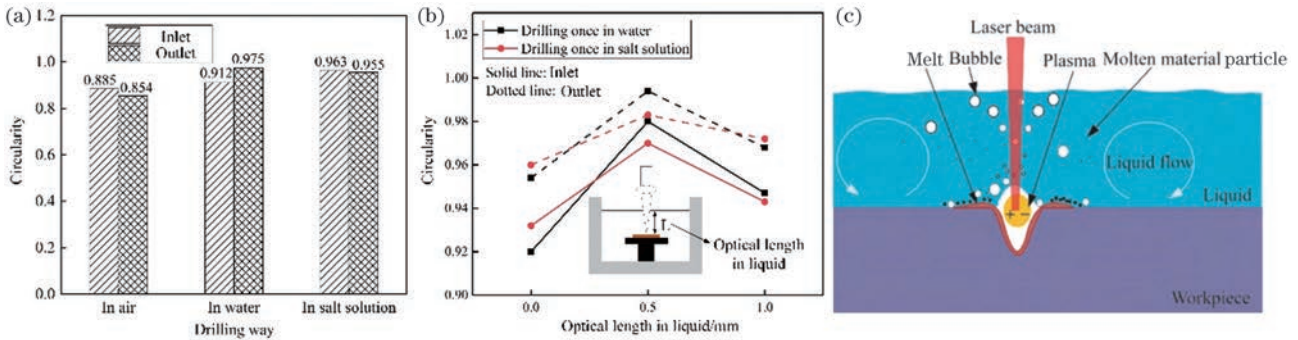


图 4 空气和溶液环境下毫秒激光加工氧化铝陶瓷孔。(a)空气、水和盐溶液环境下激光加工孔的入/出口圆度^[31]; (b)液体中的光程对激光加工孔入/出口圆度的影响^[31]; (c)激光溶液辅助加工示意图^[32]

Fig. 4 Millisecond laser processed holes on aluminum oxide ceramics in air and liquid. (a) Inlet/outlet circularity of hole for laser processing in air, water and salt solution^[31]; (b) effect of optical length in liquid on inlet/outlet roundness of hole^[31]; (c) schematic of laser processing assisted by liquid^[32]

激光加工孔的表面形貌主要包括孔表面喷溅物、孔表面微裂纹和孔表面热影响区。毫秒激光加工陶瓷材料时,由于光热作用熔化去除的熔融材料冷凝后会形成熔凝物,并覆盖孔入口边缘,形成厚度

和覆盖区域达百微米的孔口喷溅。一般情况下,激光脉冲宽度越大[图 5(a)]或激光功率越大[图 5(b)]或重复频率越高[图 5(c)],熔凝物覆盖范围越大。如图 5(a)~(c)所示,当脉冲宽度从 1 ms 增大到 4 ms

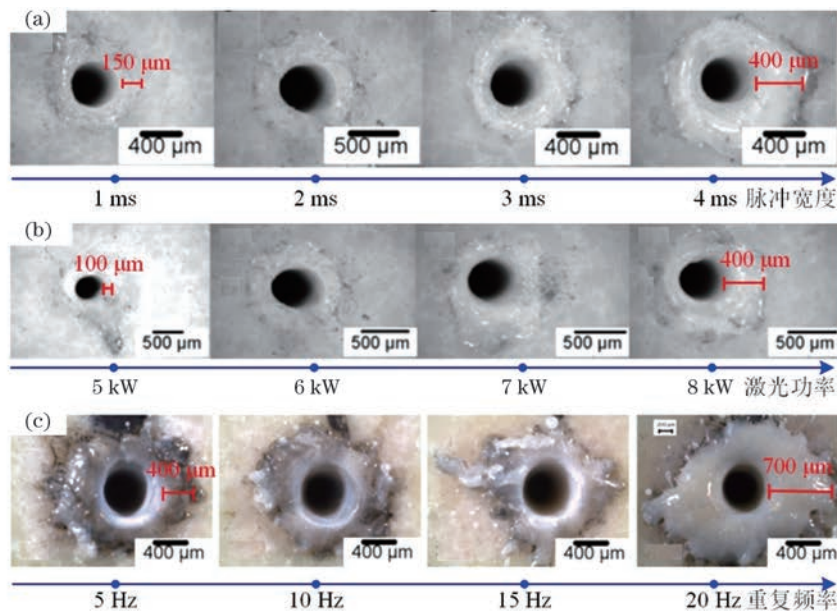


图 5 毫秒激光加工氧化铝陶瓷孔入口图。(a)脉冲宽度对孔入口表面熔凝物的影响^[33]; (b)激光功率对孔入口表面熔凝物的影响^[33]; (c)重复频率对孔入口表面熔凝物的影响^[34]

Fig. 5 Inlet images of millisecond laser processed holes on aluminum oxide ceramics. (a) Effect of pulse duration on inlet melting material^[33]; (b) effect of laser power on inlet melting material^[33]; (c) effect of repetition rate on inlet melting material^[34]

时,熔凝物覆盖区域的圆环宽度从约 150 μm 增大到约 400 μm ;当激光功率从 5 kW 增大到 8 kW 时,熔凝物宽度从约 100 μm 增大到约 400 μm ;当重复频率从 5 Hz 增大到 20 Hz 时,熔凝物宽度从约 400 μm 增大到约 700 μm ^[33-34]。进一步地,从图 5 中可以看出,熔融材料重新凝固为光亮白色固体,经 X 射线衍射(XRD)测试得知,其由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 两种相组成。孔入口表面的熔凝物严重影响了电子基板导通孔性能,为了去除孔入口表面的喷溅物,Guo 等^[35]利用凝胶注模成型(Gelcasting)技术制备了陶瓷素坯,其较低的蒸发热和相对松散的生坯结构可以有效抑制孔表面喷溅物的产生。

当熔液滴或气物质喷溅排出时,会在孔入口表面处形成熔渣。由于其喷射时较大的动量和辅助气体的压力作用,熔渣喷溅范围远大于熔凝物覆盖区域。激光峰值功率和脉冲宽度的增大都会促进熔渣的喷射,扩大孔入口表面喷溅物的覆盖区域,如图 6(a)~(c)所示^[36]。为了消除孔表面的喷溅物,Adelmann 等^[37]提出了一种预着色的方法,在打孔之前使用水溶性标记物对陶瓷样品表面进行着色以阻断熔渣与基体之间的连接,加工完成后将样品放置于肥皂水中进行超声波清洗约 3 min,可以完全去除孔表面的颜色和喷溅物,如图 6(d)、(e)所示。

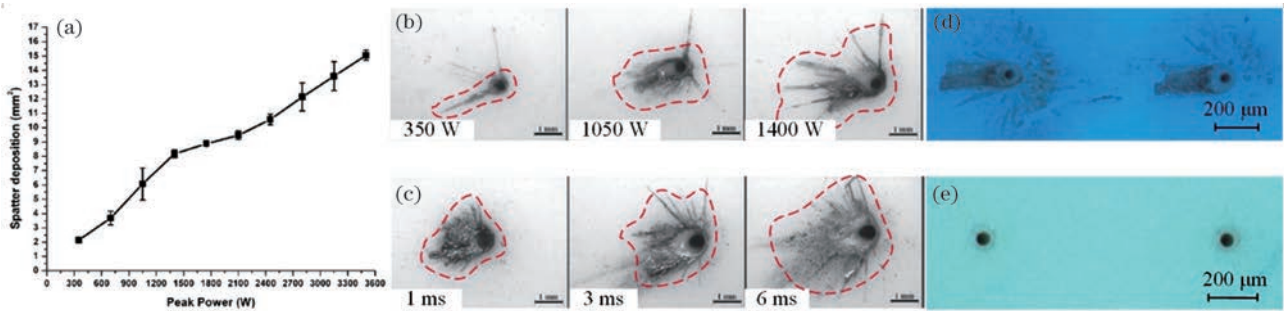


图 6 毫秒激光加工氧化铝陶瓷孔。(a)(b)峰值功率对孔入口表面喷溅物的影响^[36]; (c)脉冲宽度对孔入口表面喷溅物的影响^[36]; (d)无预着色条件下激光加工孔的入口表面^[37]; (e)预着色条件下激光加工孔的入口表面^[37]

Fig. 6 Millisecond laser processed holes on aluminum oxide ceramics. (a)(b) Effect of peak power on inlet spatters^[36]; (c) effect of pulse duration on inlet spatters^[36]; (d) inlet surface for laser machining without pre-coloring^[37]; (e) inlet surface for laser machining with pre-coloring^[37]

激光加工参数对裂纹的形成及其长度有很大的影响,如图 7 所示,激光脉冲宽度越大,或重复频率越高,裂纹越易形成且长度越长^[38]。主要是由于在较大的脉冲宽度下,激光单脉冲能量较大,孔周围材料吸收了较多的热量,引起了较大的温度梯度,这容易诱发热裂纹生长。当采用高重复频率加工时,单

位时间内加工区域接收的能量增多,产生的热影响也相应增大,同样更易诱发热裂纹生长。研究发现,降低脉冲的占空比、增大冷却气体压力和离焦加工等方法可以有效降低热影响区的拉应力,避免裂纹产生^[39]。此外,由于孔边缘的微裂纹极易扩展,因此在群孔加工中,如果孔边间距太小,很可能发生裂

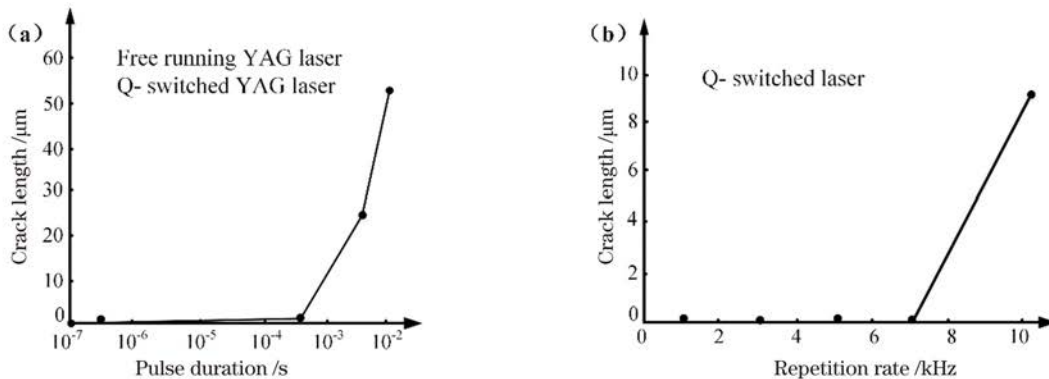


图 7 毫秒激光加工氮化硅陶瓷孔^[38]。(a)脉冲宽度对裂纹长度的影响;(b)重复频率对裂纹长度的影响

Fig. 7 Millisecond laser processed holes on silicon nitride ceramics^[38]. (a) Effect of pulse duration on crack length; (b) effect of repetition rate on crack length

纹互联,最终基板破裂,故在群孔加工中要合理考虑孔边间距。如 Tsai 等^[23]用毫秒激光在氧化铝基板表面进行大面积孔阵列加工时,发现当孔中心间距设定为 20 mm 时,基板出现明显裂纹,而在基板不破裂的情况下可以获得的最小孔中心间距是 30 mm。

改变样片的加工环境可以有效减少甚至去除毫秒激光加工陶瓷孔中的微裂纹。图 8 所示为空气和水环境中毫秒激光在氧化铝表面加工的孔阵列^[23]。在空气中加工孔中心间距为 20 mm 的孔阵列时,氧

化铝陶瓷表面出现了图 8(a)所示的明显裂纹。用环切钻孔的方法加工较大直径孔时,在水中可以得到直径为 10, 20, 30 mm 的同轴孔,而在空气中加工相同尺寸孔时,氧化铝样片破碎,如图 8(b)所示。采用水下加工的方式可以得到最小孔中心间距为 5 mm 的无微裂纹孔阵列,如图 8(c)所示。水下加工能够有效减少甚至消除微裂纹的主要原因是,与空气中加工相比,水下加工能有效冷却熔融表面,降低孔周围的温度梯度,避免微裂纹的产生。

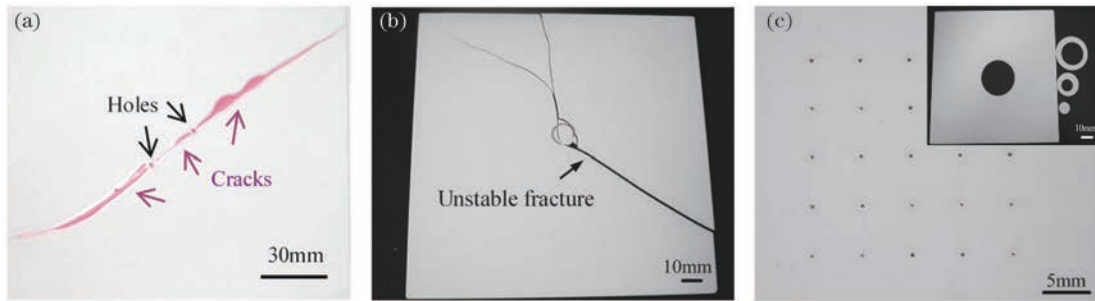


图 8 加工环境对毫秒激光氧化铝陶瓷孔加工的影响^[23]。(a)(b)空气中;(c)水下

Fig. 8 Effects of processing environment on millisecond laser processed holes on aluminum oxide ceramics^[23].

(a)(b) In air; (c) under water

3.2 孔的侧壁形貌特征及其工艺调控

肖磊等^[40]对比研究了脉冲宽度 ≥ 1 ms 的 CO₂ 激光和脉冲宽度为 0.2 ms 的光纤激光加工厚度为 0.38 mm 的氧化铝陶瓷通孔,如图 9(a)~(d)所示。其中,CO₂ 激光加工中透镜的焦距为 50 mm,理论焦深为 ± 0.21 mm,当激光离焦量为 0~0.4 mm 时,孔的锥度几乎相同,约为 13.5°;光纤激光加工中聚焦透镜的理论焦深值为 ± 0.181 mm,当离焦量为-0.2 mm 时,可以获得最小锥度约为 3.5°的孔。再者,对于 CO₂ 激光加工,辅助气体压力为 1 MPa 时,孔的锥角最小,而对于光纤激光加工,辅助气体压强要达到 2 MPa 才能获得锥角最小的孔。对于激光平均功率和重复频率,均存在一个临界值,在该临界值下可以获得最小锥度的孔。进一步地,临界值可能是一个区间,如 Chen 等^[41]研究发现,当脉冲宽度为 3~8 ms 时,可以获得最小锥度的孔,如图 9(e)~(g)所示。

上述研究是针对毫秒激光直冲孔加工中加工参数对孔锥度的影响。对于轨迹孔加工,加工参数也对孔的锥度有很大的影响。如增大激光扫描速度可以增大孔的平均锥度,如图 10 所示^[30]。当激光扫描速度增大时,陶瓷材料加工区域单位面积与激光的作用时间减少,导致热量输入减少,随着加工的进行,激光难以通过狭窄的孔腔进入孔底进行材料去

除,孔入口直径变化不大,出口直径减小,导致孔锥度增大。

孔的侧壁形貌包括孔的侧壁形状和侧壁表面形貌。Chen 等^[41]和 Samant 等^[42-43]分别研究了毫秒激光氧化铝陶瓷孔加工中孔的侧壁形貌随激光能量和脉冲数的变化,如图 11(a)、(b)所示。从图 11(a)可以看出,孔的侧壁表面存在大量沿着孔深方向分布的沟壑,随着激光能量的增加,仅孔口处变得平整,沟壑被去除,其他位置处的沟壑依然很明显,尤其是孔深的中心位置。脉冲数对孔形状的影响如图 11(b)所示,孔整体呈锥形,当脉冲数增加到 30 时,在孔口位置附近出现了侧壁变窄的束腰,束腰之下孔的侧壁先变宽再变窄。上述研究表明,激光参数对孔的侧壁形貌影响较大。在毫秒激光陶瓷孔加工中,优化激光参数(包括脉宽、单脉冲能量、重复频率和离焦量等)可以将呈喇叭口状的孔调控为锥度较小甚至呈倒锥形的孔,优化前后的孔侧剖图如图 11(c)、(d)所示^[40]。优化前参数为:重复频率 80 Hz,占空比 14%,实际激光功率 146 W,氧气辅助,气压 1.4 MPa,激光焦点中心位置的离焦量 0。优化后加工参数为:重复频率 10 Hz,占空比 10%,实际激光功率 104 W,氧气辅助,气压 1.0 MPa,激光焦点中心位置的离焦量 0.2 mm。

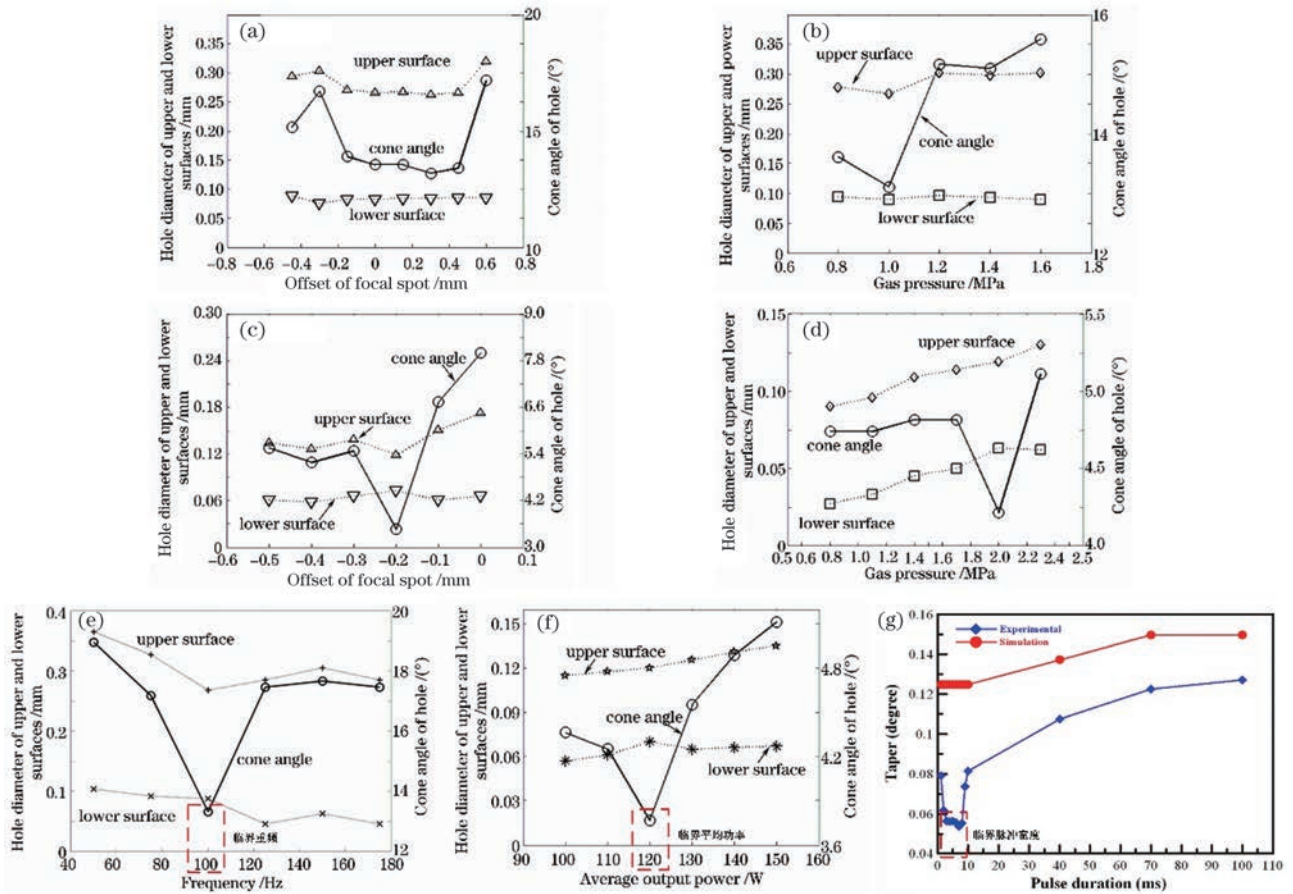


图9 毫秒激光加工氧化铝陶瓷孔的直径和锥度。(a)二氧化碳激光焦点中心位置的离焦量对陶瓷微孔直径和锥度的影响^[40]；(b)辅助气体压强对二氧化碳激光加工陶瓷微孔直径和锥度的影响^[40]；(c)光纤激光焦点中心位置的离焦量对陶瓷微孔直径和锥度的影响^[40]；(d)辅助气体压强对光纤激光加工陶瓷微孔直径和锥度的影响^[40]；(e)重复频率对二氧化碳激光加工陶瓷孔直径和锥度的影响^[41]；(f)平均功率对光纤激光加工陶瓷孔直径和锥度的影响^[41]；(g)脉冲宽度对孔锥度的影响^[41]

Fig. 9 Diameters and tapers of millisecond laser processed holes on aluminum oxide ceramics. (a) Effect of offset of focus spot of CO₂ laser on hole diameter and taper^[40]; (b) effect of auxiliary gas pressure on CO₂ laser processed hole diameter and taper^[40]; (c) effect of offset of focus spot of optical fiber laser on hole diameter and taper^[40]; (d) effect of auxiliary gas pressure on optical fiber laser processed hole diameter and taper^[40]; (e) effect of repetition rate on CO₂ laser processed hole diameter and taper^[41]; (f) effect of average power on optical fiber laser processed hole diameter and taper^[41]; (g) effect of pulse duration on hole taper^[41]

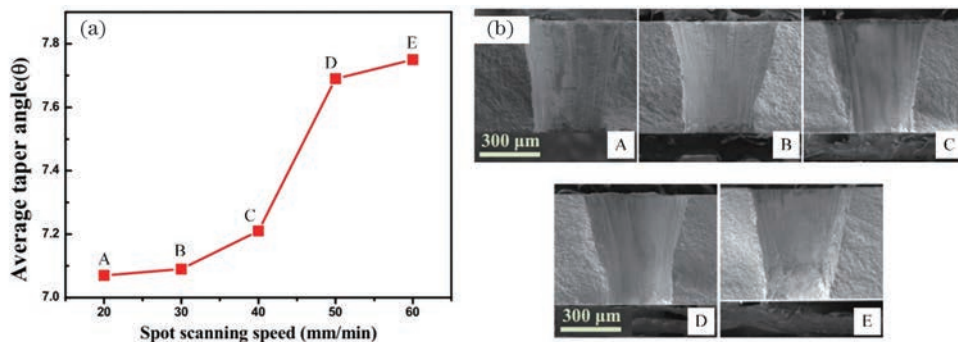


图10 毫秒激光加工碳化硅孔^[30]。(a)扫描速度对孔锥度的影响；(b)孔侧剖电镜图

Fig. 10 Holes ablated by millisecond laser processing on silicon carbide^[30]. (a) Effect of spot scanning speed on hole taper; (b) SEM images of hole sidewall

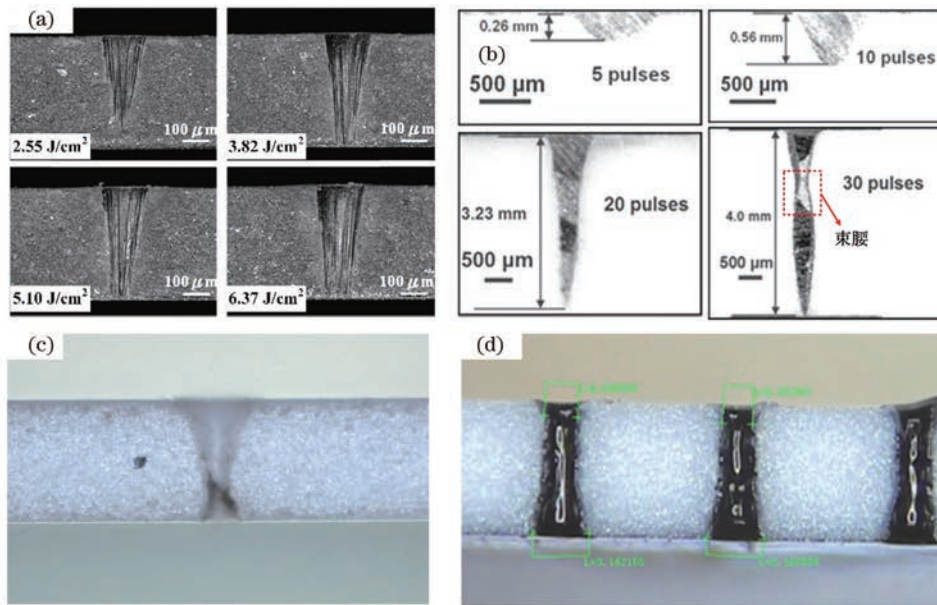


图 11 毫秒激光加工氧化铝陶瓷孔侧剖图。(a)不同能量密度下^[41];(b)不同脉冲数下^[42, 43];(c)优化前^[40];(d)优化后^[40]
 Fig. 11 Sidewall images of millisecond laser processed holes on aluminum oxide ceramics. (a) Under different energy densities^[41]; (b) under different numbers of pulses^[42-43]; (c) before optimization^[40]; (d) after optimization^[40]

毫秒激光陶瓷孔加工时,由于熔融材料的重新凝固,在孔侧壁普遍会形成厚度为 3~200 μm 的重铸层。图 12(a)所示为氧化铝孔侧剖图^[34],可以看出,随着脉冲数的增多,孔深逐渐增大,同时重铸层的厚度也在增加。这主要是由于随着孔深的增加,反冲压力不足以使熔融材料从孔入口处喷出,更多

的熔融材料在孔内冷却凝固,形成重铸层。从图 12(a3)可以发现,靠近孔底位置 X2 处的重铸层厚度比孔上部 X1 处薄,这是由于在孔未打穿时,激光在孔腔体中发生多次反射,熔融物在反冲压力作用下聚集在孔通道靠近入口部位,导致靠近孔入口位置处的孔壁上大量凝结熔融材料,重铸层较厚,而孔底

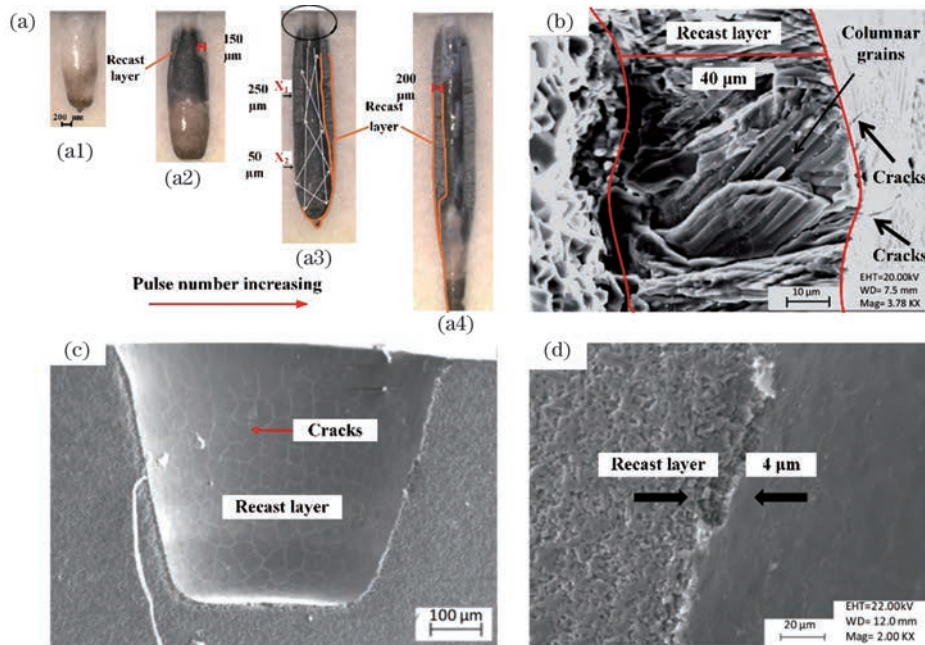


图 12 毫秒激光加工氧化铝陶瓷孔侧剖图和表面形貌^[34]。(a)孔侧剖图;(b)孔侧壁重铸层和裂纹;(c)孔侧剖电镜图;
 (d)孔侧壁重铸层

Fig. 12 Sidewall images and surface morphologies of millisecond laser processed holes on aluminum oxide ceramics^[34].
 (a) Side profiles of hole; (b) recast layer and crack of hole sidewall; (c) SEM image of hole sidewall; (d) recast layer of hole sidewall

部重铸层较薄。当通孔形成后,孔底部的熔融材料从孔出口处流出,因此靠近孔出口位置处的孔壁只被极薄的重铸层覆盖,如图 12(a3)、(a4)所示。陶瓷基片是由陶瓷粉末烧结而来,成型后晶体颗粒尺寸为 $5\sim 20\ \mu\text{m}$,分布不均匀且存在孔隙,因此陶瓷基片表面具有较大的粗糙度^[44]。与基体材料不同,重铸层是由陶瓷熔化后再固化而形成的,其表面明显光滑,即具有较小的表面粗糙度,但是由于熔融物冷却阶段产生的拉伸应力等,重铸层表面普遍带有大量的微裂缝。具体而言,如图 12(b)所示^[34],重铸层表面由直径约为 $6\ \mu\text{m}$ 的柱状晶粒组成,晶粒方向垂直于孔壁,且这些结构与孔壁的垂直取向间接诱发了微裂纹的产生。Hanon 等^[34]用毫秒激光在氧化铝表面进行孔加工时,在孔壁上发现了约 $4\ \mu\text{m}$ 厚的重铸层,且其表面也有大量的微裂纹,如图 12(c)、(d)所示。

为了减小孔壁重铸层的厚度,激光水射流复合加工是一个有效的方法^[45-48],其示意图如图 13(a)所示^[32]。图 13(b)、(c)和图 13(d)、(e)所示分别为毫秒激光和毫秒激光水射流复合加工氧化铝陶瓷孔的入口图和侧壁图^[45]。对比发现,单一激光加工下获得的孔的重铸层厚度约为 $220\ \mu\text{m}$,而激光水射流

复合加工可以使孔的重铸层厚度减小到约为 $70\ \mu\text{m}$,且激光水射流复合加工孔表面光滑,熔渣数量较少。分析认为,主要是由于水射流在加工过程中将激光作用产生的熔渣冲走,其冷却作用也促进了熔融物的凝固,避免熔融材料粘附在陶瓷加工表面形成重铸层。进一步地,水射流流速直接影响重铸层的厚度。如图 13(f)所示,重铸层厚度随水射流流速的增加呈先减小后增加然后饱和的趋势^[45]。其中,当水射流流速为 $12\ \text{m/s}$ 时,重铸层厚度最小,约为 $65\ \mu\text{m}$ 。这是因为当水射流流速较小时,流速的增大有利于熔渣的排出,这种效果在流速 $\leq 12\ \text{m/s}$ 时占主导地位;当水射流流速 $> 12\ \text{m/s}$ 时,水射流虽然起到了冲刷熔渣的作用,但是同时也带走了激光能量,使得陶瓷材料不能全部熔化,部分熔融物和未脱落材料粘附在陶瓷内壁和表面,增大了重铸层厚度;当水射流流速增大至 $18\ \text{m/s}$ 时,其冲刷作用和能量衰减作用达到平衡,流速继续增大,重铸层厚度保持不变。需要指出的是,在水射流加工过程中,由于表面水层对激光的吸收、散射等作用,激光加工孔的深度较浅,辅助超声振动加工时,高频振动可促进产物的抛出、水解反应,可在一定程度上提高加工深度^[32,49]。

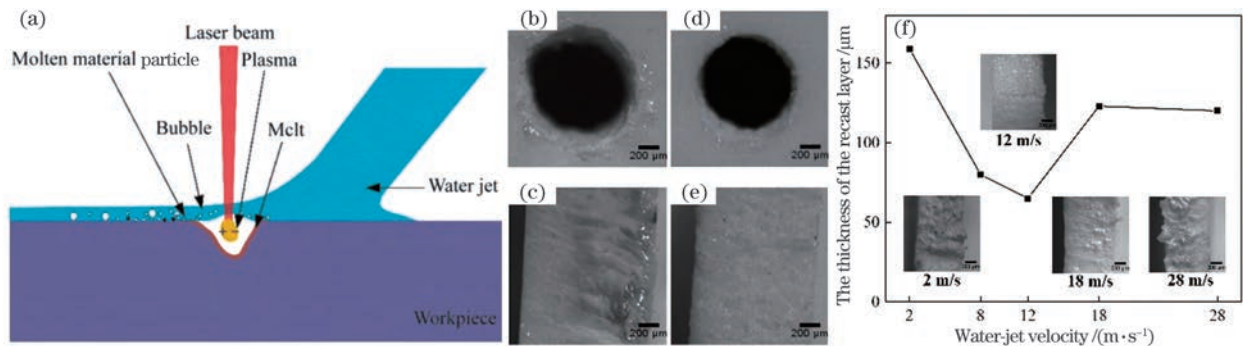


图 13 毫秒激光和激光水射流复合加工氧化铝陶瓷孔。(a)激光水射流复合加工示意图^[32];(b)(c)激光加工孔^[45];(d)(e)激光水射流复合加工孔^[45];(f)水射流流速对重铸层厚度的影响^[45]

Fig. 13 Millisecond laser or water-jet assisted laser processed holes on aluminum oxide ceramics. (a) Schematic of water-jet assisted laser processing^[32]; (b)(c) laser processed hole^[45]; (d)(e) water-jet assisted laser processed hole^[45]; (f) effect of water-jet velocity on thickness of recast layer^[45]

激光孔加工中的孔壁热影响区是指位于孔壁重铸层后方的晶体组织结构和力学性能等在热影响作用下发生改变的部分,如图 14(a)所示^[34]。Yan 等^[36]研究了毫秒激光孔加工热影响区组织和成分的变化,如图 14(b)所示,可以看出,激光打孔热影响区主要分为重铸层、过度生长晶粒区和部分熔化区三部分。在孔加工过程中,材料粘附在孔壁上,形成重铸层,晶粒沿温度梯度方向重新生长成柱状。

进一步测量后发现,在最佳工艺参数下,重铸层厚度约为 $30\ \mu\text{m}$,过度生长晶粒区紧邻重铸层且毫秒激光加工中显著的热效应导致晶粒过度生长,部分熔化区位于热影响区边缘,晶粒部分熔化后再凝固为玻璃相。毫秒激光陶瓷孔加工中,孔壁热影响区的厚度受激光加工参数的影响。Bharatish 等^[50]采用恒定扫描速度和激光功率进行氧化铝表面孔加工,发现当激光脉冲的重复频率增加时,热影响区的厚

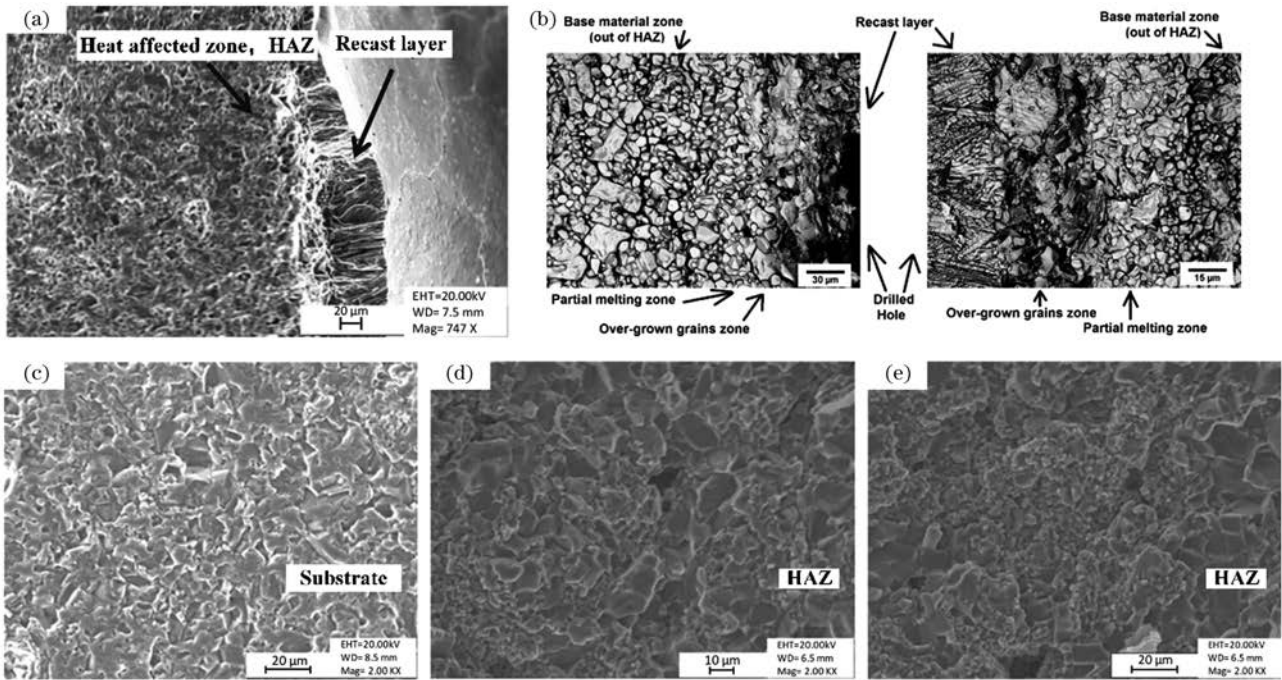


图 14 氧化铝陶瓷晶粒。(a)热影响区^[34]；(b)重铸层^[36]；(c)基体^[21]；(d)(e)热影响区^[21]

Fig. 14 Grains of aluminum oxide ceramics. (a) Heat affected zone^[34] ; (b) recast layer^[36] ; (c) substrate^[21] ; (d)(e) heat affected zone^[21]

度减小。这主要是因为随着脉冲频率的增加，总功率不变的情况下激光单脉冲能量密度降低，热量积累的减少限制了热影响区的形成。此外，较低的激光功率、较小的脉冲宽度和较大的辅助气压都可以减少加工区域的热量积累，减小热影响区的厚度^[51]。再者，热影响区材料的微观组织会发生变化，如图 14(c)、(d)所示^[21]，颜色由灰白变为黑色，且热影响区材料的晶粒尺寸随着激光平均功率的增加而增大，如图 14(d)、(e)所示^[21]，主要是因为较大的平均功率促使氧化铝加工区域的热量积累增多，晶粒在高温环境中进一步生长变大。

4 纳秒激光加工电子封装陶瓷基板孔的形貌特征及其工艺调控

纳秒激光加工陶瓷材料时的去除机理主要包括光热作用和光化学作用。光热作用发生时，材料吸收激光能量熔化蒸发，在反冲压力作用下排出孔口，与长脉宽激光加工陶瓷材料时的去除机理相同，也会产生严重热效应，造成孔形貌损伤。而光化学作用发生时，材料直接吸收激光光子能量，导致其分子键断裂，陶瓷晶粒被消融成为更小的分子，在外力作用下被去除，整个过程基本无热量产生，不会对孔形貌造成不利影响^[52]。还需要指出的是，光化学作用发生的条件是激光光子能量大于材料的化学键键

能，而氧化铝和氮化铝陶瓷均属于绝缘体材料，分子键能大于几乎所有波段激光的单光子能量，难以被单个光子破坏。但由于宽带隙材料的自身缺陷，激光加工氧化铝和氮化铝陶瓷时会发生“多光子吸收”现象，材料分子能同时吸收多个光子的能量，导致其分子键断裂，从而发生光化学作用，实现材料去除^[52-54]。纳秒激光加工陶瓷材料时，两种去除机理多是同时发生，受加工参数和环境条件的影响，两种去除机理将会占不同的主导地位，从而产生不同的孔形貌。

4.1 孔的表面形貌特征及其工艺调控

纳秒激光加工陶瓷孔入/出口圆度随着激光重复频率的增大而增加，随着扫描间距的减小而减小，如图 15 所示^[55-56]。这是因为较高的重复频率使得单位时间内有更多的脉冲对未加工完成的侧壁凸起和重凝物进行更多次的去除，起到了对孔入/出口毛刺修理的作用，而较低重复频率下孔入口圆度高于孔出口圆度，这是因为入口位置吸收激光能量更多，材料去除更完整。如图 15(b)所示，随着扫描间距从 0.2 μm 增加到 0.6 μm，出口的圆度大于入口圆度，当扫描间距继续增大到 1.0 μm 时，入口圆度的下降趋势较慢，出口圆度显著减小且小于入口圆度。分析认为，随着孔深的增加，加工中产生的碎屑在孔底堆积，当通孔形成后，碎屑将从出口排除，随着扫

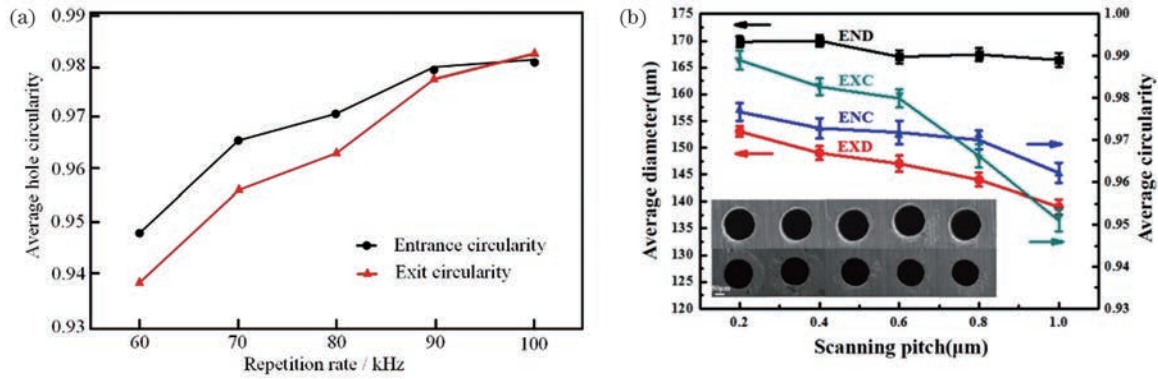


图 15 纳秒激光加工氮化硅孔^[55-56]。(a)重复频率对孔圆度的影响;(b)扫描间距对孔圆度的影响

Fig. 15 Nanosecond laser processed holes on silicon nitride ceramics^[55-56]. (a) Effect of repetition rate on hole circularity; (b) effect of scanning pitch on hole circularity

描间距的增大,更多的熔渣与基地材料的黏附可能导致出口的形状更加不规则,进而导致出口圆度变差。

笔者研究了纳秒激光氮化铝孔加工中扫描间距对孔口圆度和表面形貌的影响,图 16(a1)~(b4)和图 16(c1)~(d4)所示分别为扫描 10 次和扫描 50 次时孔的表面形貌图。当扫描次数 $N=10$ 时,可以清楚地观察到孔入口内围附着一层熔融材料,如图 16(a1)所示。随着扫描间距的减小,如图 16(a2)~(a4)所示,孔的入口圆度和质量均较好,无熔融材料。对于出口,不同扫描间距下加工的孔出口都呈

现不规则的圆形,如图 16(b1)~(b4)所示。经过 50 次扫描后,出口孔径达到饱和状态,但扫描间距 S 为 $22.5 \mu\text{m}$ 时仍然可以观察到孔入口内围附着的一层熔融物,表明 $S/(2\omega_0)=1/2(\omega_0$ 为聚焦光斑的半径)时不适合通孔加工。对于其他的扫描间距,孔入口形态几乎相同,孔出口圆度随着 S 的增大而增加,如图 16(d1)~(d4)所示,当 $S \leq 10 \mu\text{m}$ 时,出口形貌接近。综合考虑孔的质量和加工效率,当 $S/(2\omega_0)$ 为 $2/9 \sim 1/3$ 时可以实现具有较好圆度和质量的孔加工。

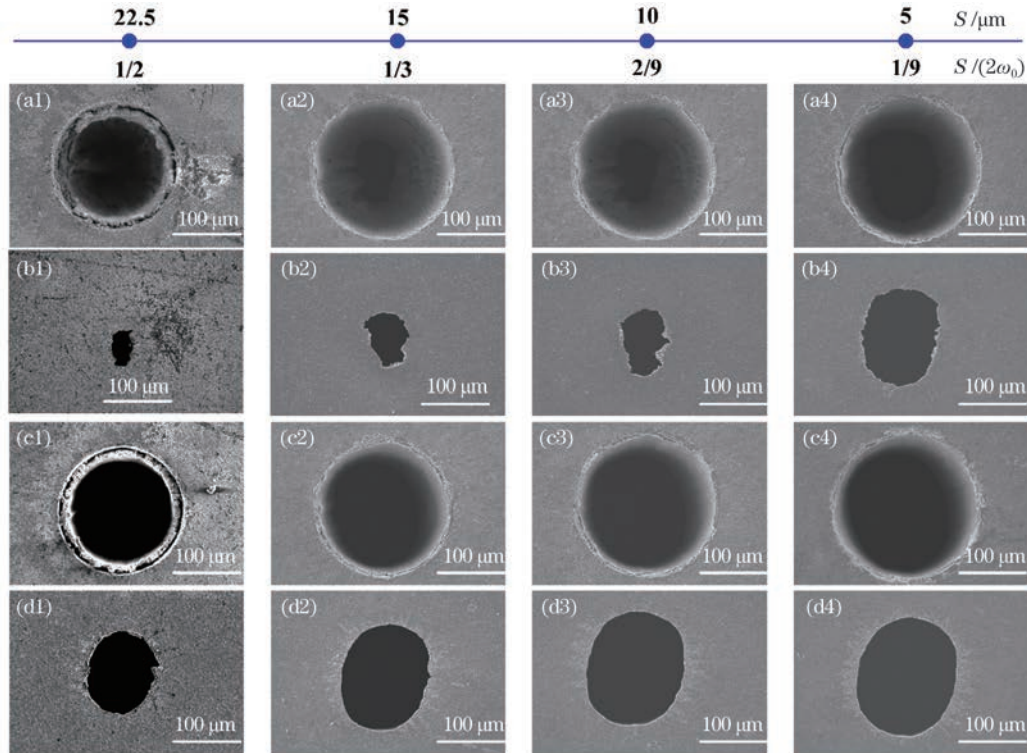


图 16 纳秒激光加工氮化铝孔。(a1)~(a4)扫描 10 次时的孔入口;(b1)~(b4)扫描 10 次时的孔出口;(c1)~(c4)扫描 50 次时的孔入口;(d1)~(d4)扫描 50 次时的孔出口

Fig. 16 Nanosecond laser processed holes on aluminum nitride ceramics. (a1)~(a4)Inlets for ten scanning times; (b1)~(b4)outlets for ten scanning times; (c1)~(c4) inlets for fifty scanning times; (d1)~(d4)outlets for fifty scanning times

热效应使得激光加工后孔口热影响区常呈现为不同于基底的颜色,如图 17(a)所示^[57],且热影响区的直径随着激光能量和重复频率的增大而增大,随着脉冲宽度的增大而减小。热影响区的元素含量可通过能量弥散 X 射线探测器(EDX)测量获得,距离孔口不同位置处的元素含量如图 17(b)所示^[57],可以发现,相比区域 5 的氮元素含量 65%,孔口附近区域 1 的氮元素含量约为 45%,含量明显降低,而孔口附近热影响区域 1 的氧元素含量明显高于远离孔口的区域 5。导致该现象的原因主要是氮化铝加

工区域在激光引起的高温作用下发生氧化,氮元素形成氮气排出,而铝元素形成固体铝层和部分氧化铝,使得越靠近孔中心位置,氮元素含量越低而氧元素含量越高。笔者使用紫外纳秒激光在氧化铝表面进行孔加工,发现孔入口周围出现白色热烧蚀痕迹,不同部位的能量色散谱(EDS)分析结果如图 17(c)所示。可以看到孔壁的氧含量明显较高,白色热影响区的氧含量次之,基体部位的氧含量最低。这主要是由于在靠近激光加工区域,高温环境使得氧化铝中的铝析出并蒸发,过多的氧元素得到保留。

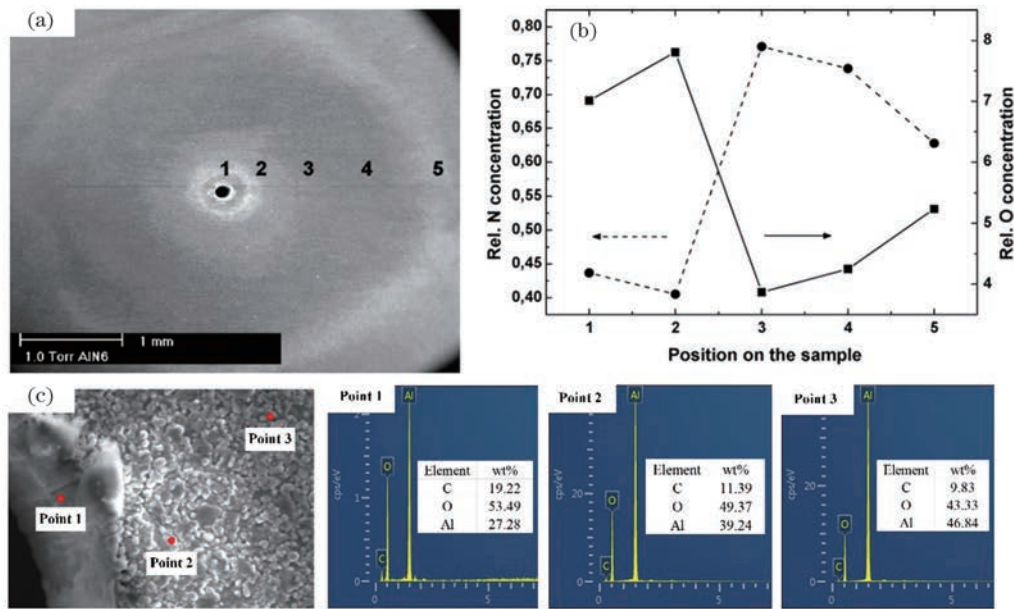


图 17 纳秒激光加工氧化铝和氮化铝陶瓷孔。(a)氮化铝孔电镜图^[57]; (b)氮化铝孔热影响区的元素含量^[57]; (c)氧化铝孔热影响区的元素含量^[24]

Fig. 17 Nanosecond laser processed holes on aluminium oxide and aluminium nitride ceramics. (a) SEM image of aluminium nitride hole^[57]; (b) element content in heat affected zone of aluminium nitride hole^[57]; (c) element content in heat affected zone of aluminium oxide hole^[24]

笔者使用紫外纳秒激光在氧化铝表面进行入口直径为 200 μm 的孔的旋切加工,发现孔入口边缘处附着少量熔凝物和碎屑,且微裂纹从孔壁延伸至孔口周围,如图 18 所示。孔边缘处的熔凝物宽度约为 15 μm ,呈现出较平滑的结构,其上分布着部分未完全烧蚀的晶粒和直径约为 1 μm 的气孔。孔表面微裂纹的缝宽约为 1 μm ,沿着晶粒之间的缝隙径向扩展至热影响区。笔者建立了纳秒激光孔加工氧化铝陶瓷模型,推导出氧化铝陶瓷表面温度场与应力场分布的物理方程,解析后发现孔周围材料上的切向拉应力在孔边缘处达到最大值,引起了重铸层上的径向裂纹的扩展,而径向拉应力在距孔边缘约 0.3 mm 处达到最大值,由此改变了径向裂纹的扩展方向或产生环状裂纹^[24]。

笔者采用多物理场耦合分析软件(COMSOL Multiphysics)对大面积群孔激光加工基片表面温度场进行仿真,结果如图 19 所示。可以看出,随着加工的进行,基片表面温度快速上升后趋于饱和,饱和时刻约为 22 s,饱和平均温度约为 1000 K,如图 19(a)所示。对某一激光加工位置进行温度仿真,发现激光加工时该位置的温度突变至峰值,且受周围区域加工热传递的影响,如图 19(b)所示。具体而言,随着激光加工的开始,该点的温度约在 22 s 时达到饱和态,且饱和温度与样片表面平均温度一致。但当加工时长到达约 49 s 时,该点温度急剧上升,峰值温度可达约 1550 K,持续约 1 s 时间后,温度急剧下降,恢复到约 1000 K。即当激光直接作用在该位置时,该处温度会出现急剧上升达到峰值的

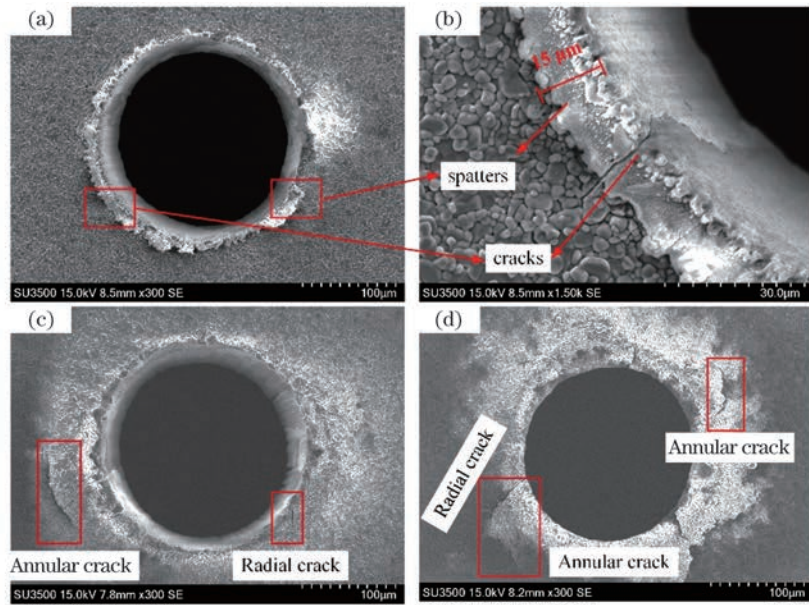


图 18 纳秒激光加工氧化铝陶瓷孔入口^[24]。(a)孔口电镜图;(b)孔口局部放大图;(c)(d)孔口裂纹
 Fig. 18 Inlets of nanosecond laser processed holes on aluminum oxide ceramics^[24]. (a) SEM image of hole;
 (b) partially enlarged hole; (c)(d) cracks of hole

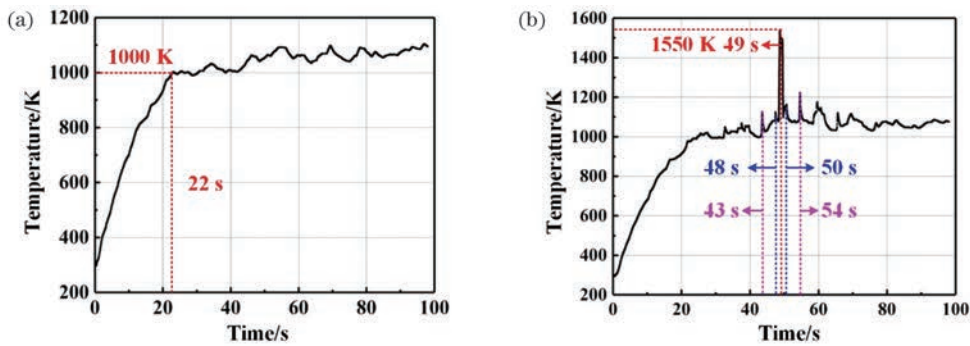


图 19 纳秒激光加工氧化铝陶瓷孔^[24]。(a)样片表面的平均温度;(b)样片表面中心点温度
 Fig.19 Nanosecond laser processed holes on aluminum oxide ceramics^[24]. (a) Average temperature of sample surface;
 (b) temperature at center of sample surface

现象。此外,在加工时长为 43 ,48 ,50 ,54 s 等时,该处温度均出现小的峰值,说明当激光加工周围区域时,热传递会对该点温度产生影响,使得该点温度上升。进一步地,通过红外测温仪对大面积群孔激光加工基片表面温度场分布进行实验验证,发现仿真与实验得到的取样点温度变化趋势基本一致,且越靠近取样点,峰值温度越高,即邻近点对取样点的热影响较大,且受热积累影响,波谷温度逐渐升高,即基板平均温度升高。

采用更短波长的准分子纳秒激光可以实现无熔凝物无微裂纹的氧化铝表面孔加工^[58]。这是因为紫外波长的准分子激光具有极大光子能量,能直接击断陶瓷中的化学键,使激光照射区域的材料瞬间气化,其过程接近“冷加工”,避免了熔凝物和热裂纹

的产生。再者,通过甲醇溶液辅助加工,可有效去除激光加工碳化硅陶瓷孔表面的熔凝物残留^[59]。主要是由于甲醇的高挥发性和低沸点促使甲醇更快地流动以带走热量和熔融碎片,且甲醇在激光作用下形成空泡,与微小的烧蚀颗粒结合并析出,起到清洁的作用。

4.2 孔的侧壁形貌特征及其工艺调控

孔的锥度随着同心圆扫描间距的增加呈增大趋势,如图 20(a)所示^[56],主要是由于随着扫描间距的增加,孔入口直径几乎不变,孔的出口直径变小[图 15(b)所示的孔口电镜图],导致孔的锥度变小。再者,填充样式也对孔的锥度有很大影响,图 20(b)所示为笔者采用螺旋填充和多圆环填充加工的孔锥度对比^[24,60],可以发现,与螺旋填充相比,纳秒激光

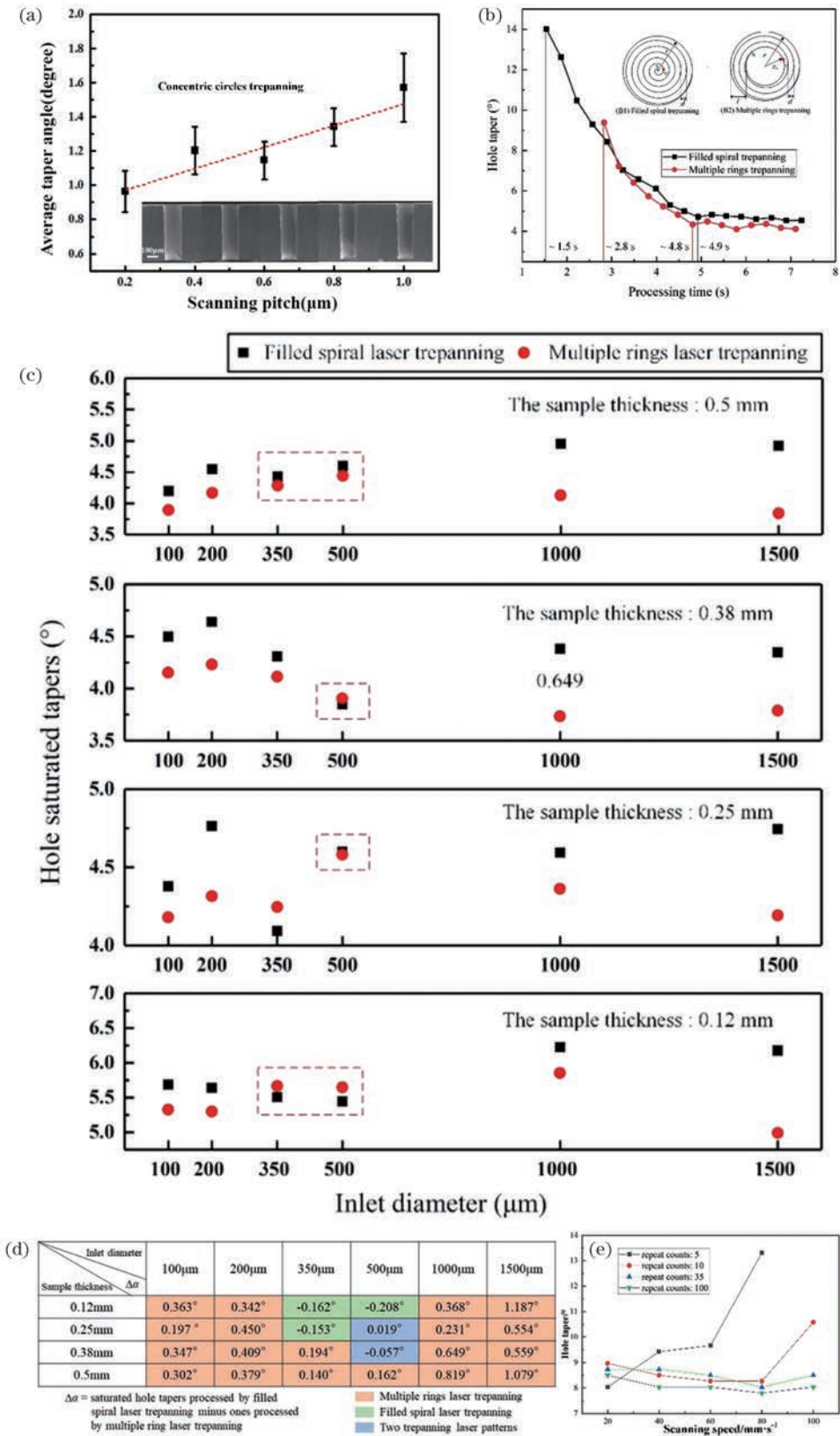


图 20 纳秒激光加工碳化硅和氧化铝陶瓷孔。(a)扫描间距对碳化硅孔锥度的影响^[56];(b)(c)(d)填充样式对氧化铝孔锥度的影响^[24,60];(e)扫描速度对氧化铝孔锥度的影响^[24,60]

Fig. 20 Nanosecond laser processed holes on silicon carbide and aluminum oxide ceramics. (a) Effect of scanning pitch on silicon carbide hole taper^[56]; (b)(c)(d) effect of trepanning pattern on aluminum oxide hole taper^[24,60]; (e) effect of scanning speed on aluminum oxide hole taper^[24,60]

多圆环填充可在氧化铝陶瓷表面加工出更小锥度的孔。进一步地,笔者在厚度为0.12~0.5 mm的氧化铝陶瓷上加工直径为100~1500 μm 的导通孔,得到了两种填充轨迹下导通孔的饱和锥度与孔尺寸的对对应关系,如图20(c)、(d)所示。对比后发现,当导通孔直径小于200 μm 或大于1000 μm 时,多圆环填充加工孔的饱和锥度均小于螺旋填充加工孔的饱和锥度;而对于直径为350 μm 和500 μm 的导通孔,两种轨迹加工方式得到的饱和孔锥度较为接近,数值相差在0.3之内。这是因为当孔直径很小时,多圆环填充加工可避免能量集中在孔中心穿透区域造成浪费,材料去除率更高,孔锥度更小;孔直径较大时,多圆环填充加工孔中心的材料切割掉落,加工效率较高,孔锥度较小。最后,为了获得较小的孔锥度,笔者给出了不同厚度氧化铝陶瓷表面加工不同孔径通孔时应该选用的填充样式。笔者还研究了扫

描速度对孔锥度的影响,发现当扫描次数为5时,孔锥度随着扫描速度的增加而增大;当扫描次数大于10时,扫描速度对孔锥度的影响较小,如图20(e)所示。

为了进一步减小陶瓷孔的锥度,Wee等^[59]使用了溶液辅助激光加工的方法,发现相比空气中加工,溶液中加工的孔锥度更小,且流动的水比静滞的水效果更好,而甲醇溶液中加工获得的孔锥度最小,如图21(a)所示。Chen等^[61]研究了纳秒激光在空气和水环境中加工陶瓷孔,发现空气中加工孔的锥度比水环境中小,且随着扫描速度的增加,空气环境中孔的锥度变大,而水环境中孔的锥度变小;通过孔的侧剖图可以发现,空气中孔锥度变大主要是由于孔的出口变小,而水环境中孔锥度变小主要是由于入口孔直径变小,相关研究结果如图21(b)所示。

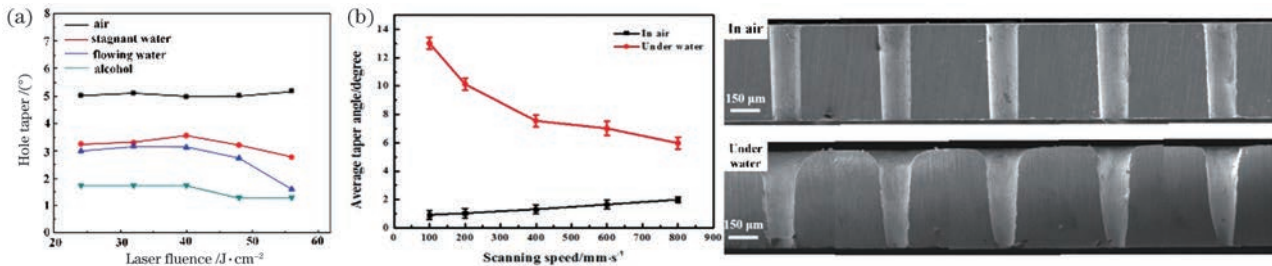


图21 纳秒激光加工碳化硅陶瓷孔。(a)不同溶液环境中激光能量密度对孔锥度的影响^[59]; (b)空气和水环境对加工锥度的影响^[61]

Fig. 21 Nanosecond laser processed holes on silicon carbide ceramics. (a) Effect of laser fluence on hole taper under different solutions^[59]; (b) effect of air and water environment on hole taper^[61]

笔者研究了螺旋加工中激光跳转方向(包括从外到内和从内到外)和扫描模式(循环扫描模式和顺序扫描模式)对孔侧壁形貌的影响^[62-63]。从图22(a)可以看出,当激光束从外向内跳转时,孔底部比较平整,孔侧壁除了有纵向条纹外还分布着多条具有一定间距的横向条纹;当激光束从内向外跳转时,孔底中心部位存在熔融物堆积的现象,随着扫描次数的增加,熔融物逐渐减少直至通孔形成,孔壁仅有激光加工普遍存在的纵向条纹,无横向分布的条纹。无论对于何种激光跳转方向,激光束移动时,熔化材料被迫进行与激光束的跳转方向相反的运动,进而使得激光束从外向内扫描时,液态的熔化材料向孔壁移动,而当激光束从内向外扫描时,液态熔融材料则向孔的中间部分移动。扫描过程完成后,熔融材料冷却下来,最终根据不同跳转方向分布在不同部位。因此,当跳转方向为由外向内时,会在孔壁上出现横向条纹及重熔物,当跳转方向为由内向

外时,在孔底部会有熔融物的堆积。不同扫描模式下加工孔的侧壁形貌差异较大,如图22(b)所示。当采用顺序扫描模式(sequential scanning mode, SS mode)时,在距离孔口约1/3孔深位置处有明显的大面积的孔壁脱落现象,当采用循环扫描模式(cyclical scanning mode, CS mode)时,孔壁平滑,没有大面积的侧壁脱落,表明采用循环扫描模式可以获得更高质量的孔侧壁形貌。

在陶瓷激光孔加工中,侧壁重铸层的厚度随着激光能量、重复频率的增加而变大^[58]。图23所示为纳秒激光加工氧化铝孔的侧壁电镜图。可以清晰看到孔侧壁被一层厚度约为4 μm 的重铸层覆盖,重铸层表面平整光滑、结构致密,但与基体连接部分疏松、易脱落,在加工过程中脱落可能会导致多层重铸层出现,如图23(b)所示。重铸层后沿孔径方向远离孔壁的部分是含有氧化铝晶粒的热影响区,其形貌接近基体。重铸层上的微裂纹宽度约为1 μm ,

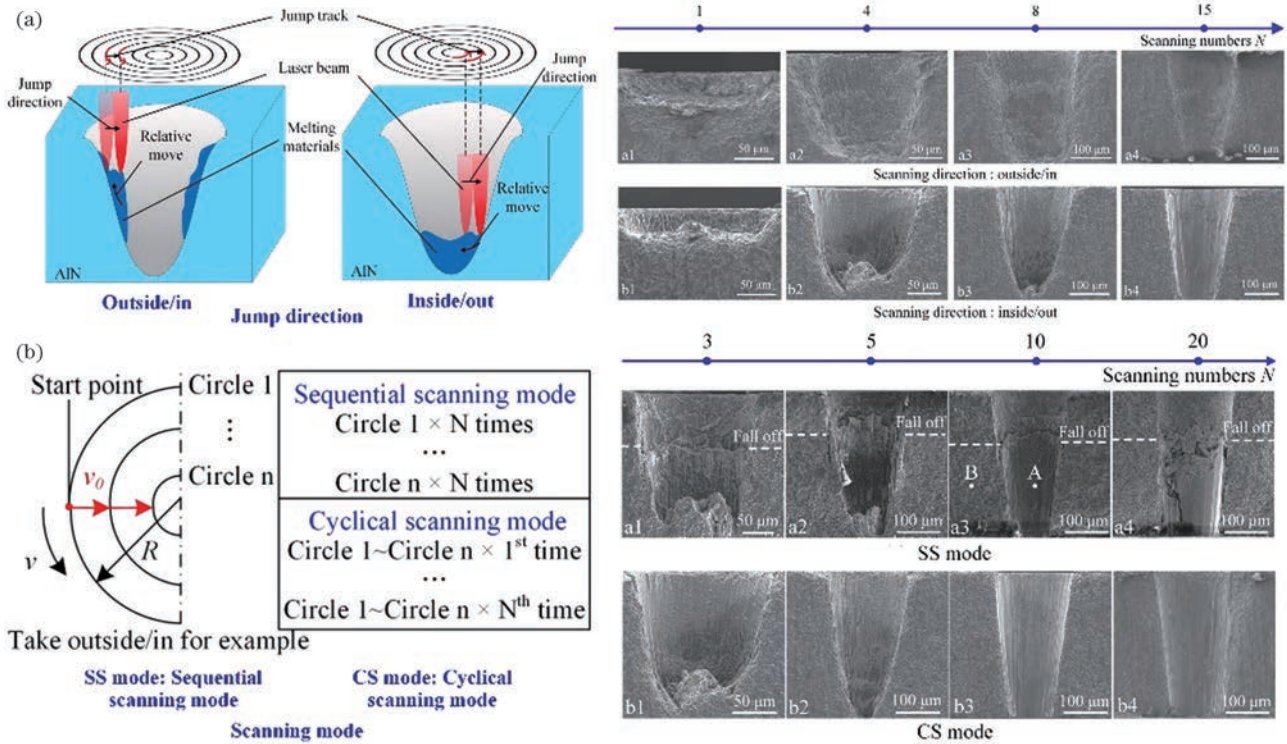


图 22 纳秒激光加工氮化铝陶瓷孔^[62,63]。(a)跳转方向对孔侧壁形貌的影响;(b)扫描模式对孔侧壁形貌的影响

Fig. 22 Nanosecond laser processed holes on aluminum nitride ceramics^[62,63]. (a) Effect of jump direction on morphology of hole sidewall; (b) effect of scanning mode on morphology of hole sidewall

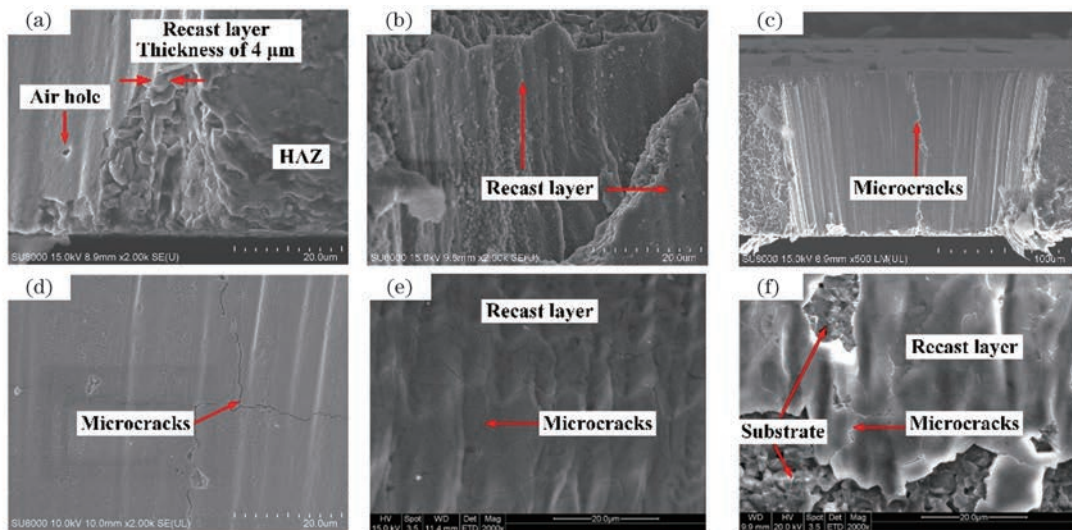


图 23 纳秒激光加工氧化铝陶瓷孔侧剖图^[64]。(a)(b)重铸层;(c)(d)微裂纹;(e)(f)裂纹沿晶界扩展

Fig. 23 Sidewall images of nanosecond laser processed holes on aluminum oxide ceramics^[64]. (a)(b) Recast layer;

(c)(d) microcracks; (e)(f) microcracks spreading along grain boundaries

沿孔壁轴向和环向扩展,在部分区域发生分叉,微裂纹的扩展可能会导致部分侧壁少量脱落,在不同加工参数下均发现相似现象,如图 23(c)、(d)所示。重铸层表面的裂纹普遍沿着晶界方向扩展,如图 23(e)、(f)所示,且侧壁重铸层可通过高温浓硫酸溶液浸泡约 2 h 去除^[64]。

5 超快激光加工电子封装陶瓷基板孔的形貌特征及其工艺调控

超快激光作用于陶瓷材料表面,多光子电离诱导光学击穿,使得陶瓷材料表面薄层转变为具有高吸收性的等离子体^[65-66],此后等离子体非线性吸收

激光能量加热材料,导致材料烧蚀去除。其光学击穿过程包括光致电离和碰撞电离^[67]。光致电离指材料中的价带电子吸收多个光子的能量,直接跃迁到导带的过程。光致电离产生的自由电子作为种子电子与束缚电子和晶格发生相位碰撞,吸收激光能量,当种子电子被加速到其动能超过材料带隙时,下一次与价带电子的碰撞将使种子电子电离,产生两个低动能的自由电子,此过程即为碰撞电离^[68]。碰撞电离重复进行,自由电子密度呈指数增长,即发生雪崩效应,最终达到等离子体临界密度,材料发生烧蚀^[69]。超快激光的“冷加工”特性使之产生的热效应极小甚至无热效应产生,相比非超快激光,其加工的陶瓷孔的形貌质量有了极大的提升。

5.1 孔的表面形貌特征及其工艺调控

激光孔加工时,激光的偏振特性和材料杂质会导致加工区域在不同方向上对激光能量的吸收存在差异,最终导致材料去除不均匀,进而使得加工孔口

出现偏心现象和椭圆形孔形貌^[70],影响孔的圆度。增大激光能量可以有效改善孔的圆度,如王禹茜等^[71]在旋切加工碳化钛陶瓷时,通过增大飞秒激光的能量,将陶瓷表面孔的出口圆度从86%提高到了95%。这是由于飞秒激光能量密度越大,材料越易通过多光子吸收诱导化学键断裂,激光对材料的去除能力越强,加工得到微孔的圆度就越好。此外,旋切法加工较小直径的微孔时,由于振镜扫描系统的分辨率限制,激光不会沿着圆形路径进行扫描,而是由插补系统控制形成六边形孔。为了消除这种现象,可以沿着激光扫描路径不断改变圆的起始点,这样由于多个六边形的平均效应,振镜扫描系统可以加工出平滑的圆形孔,如图24(a)~(c)所示^[72]。旋切加工较大的孔时,如果插补误差太大即插补线条数太少,将可能诱导出多边形的孔,只有当插补误差缩小到一定值即有足够多的插补线条数时,如图24(d)所示,插补误差为0.0005,才能获得圆度较好的孔^[24]。

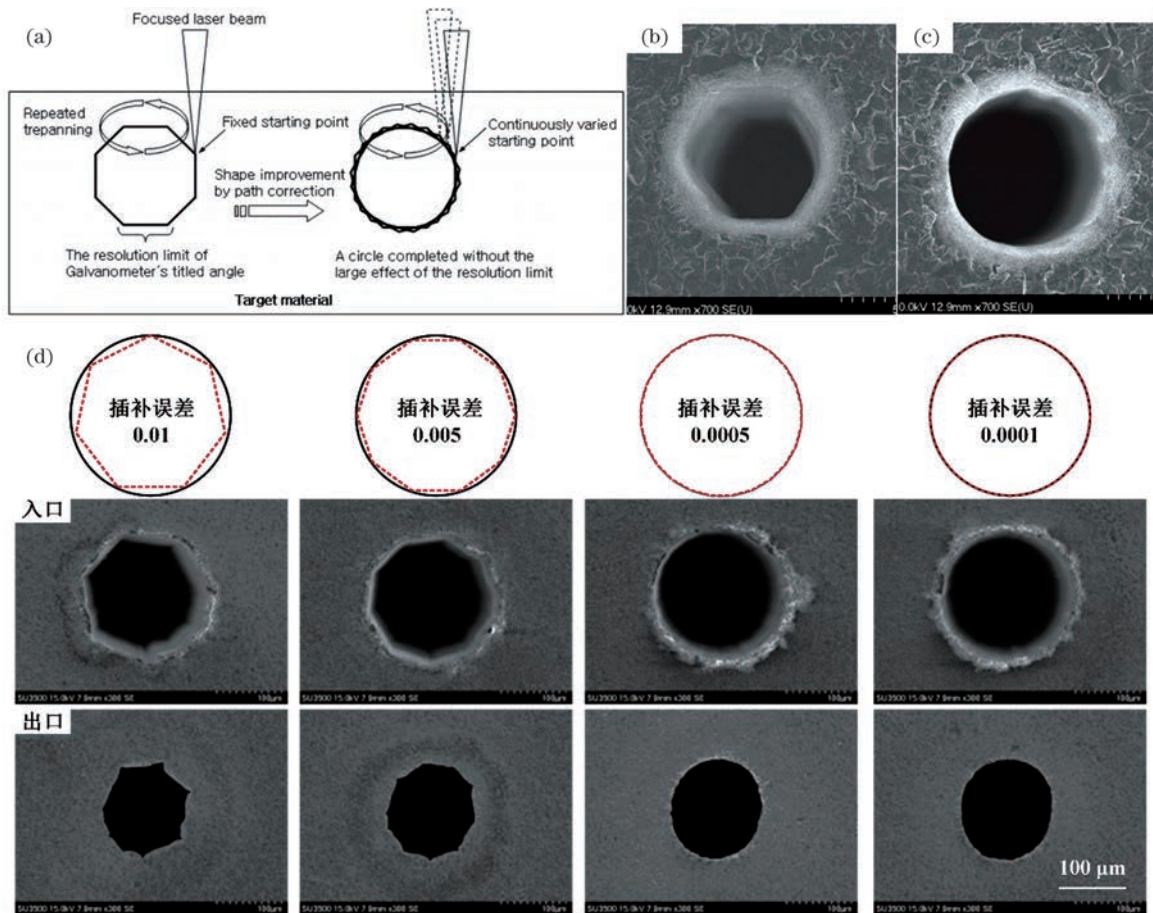


图24 飞秒激光加工氧化铝陶瓷孔。(a)固定起始点和变起始点下的孔加工示意图^[72]; (b)固定起始点下加工的孔^[72]; (c)变起始点下加工的孔^[72]; (d)插补误差对孔圆度的影响^[24]

Fig. 24 Femtosecond laser processed holes on aluminum oxide ceramics. (a) Schematic of hole processing with fixed starting point and variable starting point^[72]; (b) hole processed with fixed starting point^[72]; (c) hole processed with variable starting point^[72]; (d) effect of interpolation error on hole circularity^[24]

图 25(a)、(b)所示为飞秒激光脉冲数分别为 10 和 50 时烧蚀的氧化铝孔^[73]。当脉冲数为 10 时,材料表面仅出现微小的烧蚀坑,且坑底光滑无喷溅,此时材料发生弱烧蚀,材料的去除以气化蒸发为主,去除效率较低。当脉冲数为 50 时,烧蚀坑底部出现多孔特征并伴有表面喷溅物,此时材料发生强烧蚀,多次的脉冲叠加产生孵化效应,导致材料表面累积足够的缺陷,在强光场下诱发多光子吸收,将电子直

接从价带激发到导带,材料表面温度迅速上升至临界温度值,导致材料以蒸气和液滴混合物的相爆炸方式而得到去除,材料去除率显著增加^[73-75]。激光烧蚀孔的表面可能存在弱烧蚀区域和强烧蚀区域,如图 25(c)所示^[73]。可以看出,孔周围区域为细纹状结构,深度小于 0.7 μm ,为弱烧蚀区域;孔中心区域深度大于 10 μm ,为强烧蚀区域。同时,弱烧蚀区域表面存在由强烧蚀导致的液态物质喷溅落下的残渣。

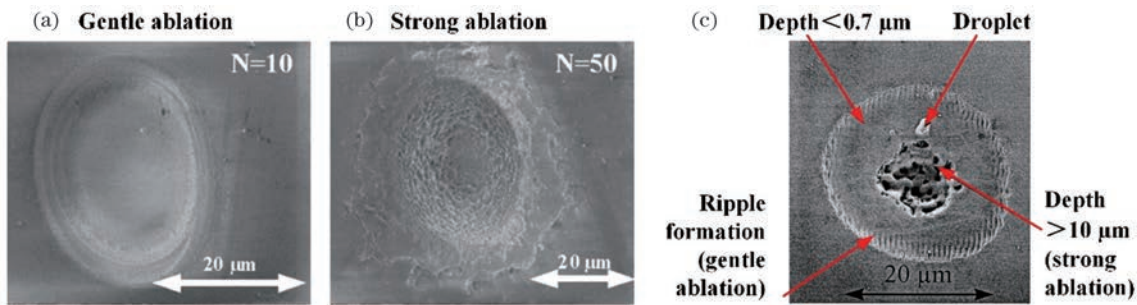


图 25 飞秒激光烧蚀氧化铝陶瓷孔^[73]。(a)弱烧蚀诱导孔形貌;(b)强烧蚀诱导孔形貌;(c)弱烧蚀和强烧蚀共同诱导孔形貌
Fig. 25 Holes ablated by femtosecond laser processing on aluminum oxide ceramics^[73]. (a) Hole morphology induced by gentle ablation; (b) hole morphology induced by strong ablation; (c) hole morphology induced by gentle ablation and strong ablation

对于具有不同导热率和热膨胀系数等特性的陶瓷材料,超快激光加工形成的烧蚀坑形貌也具有一定差异。如 Kim 等^[76]发现,在飞秒激光脉冲作用下, Al_2O_3 表面的烧蚀坑出现材料剥落现象和层状结构,烧蚀坑边缘没有熔化痕迹,随着脉冲数量的增加, Al_2O_3 材料逐层得到去除,最终形成孔,孔周围表面清洁无污染,如图 26(a)所示。而 AlN 的烧蚀坑出现明显的熔融痕迹,当脉冲数为 10 时,材料表面出现波纹图案且波纹周期方向垂直于激光偏振方向,随着脉冲数量的增加,烧蚀坑底

部熔融再凝形成孔,孔边缘出现部分喷溅物,如图 26(b)所示。出现这种差异是因为 Al_2O_3 具有更小的热导率和更大的热膨胀系数,与 AlN 相比, Al_2O_3 材料局部升温更剧烈,同时产生了更强的热应力,导致烧蚀坑在应力作用下出现剥落状形貌。还需要说明的是,光电子能谱(XPS)测定数据显示, Al_2O_3 和 AlN 陶瓷在飞秒激光烧蚀前后的化学性质基本相同,也就是说,飞秒激光加工后陶瓷可以保持原有的性能,该现象在 Perrie 等^[77]的研究中也被证实。

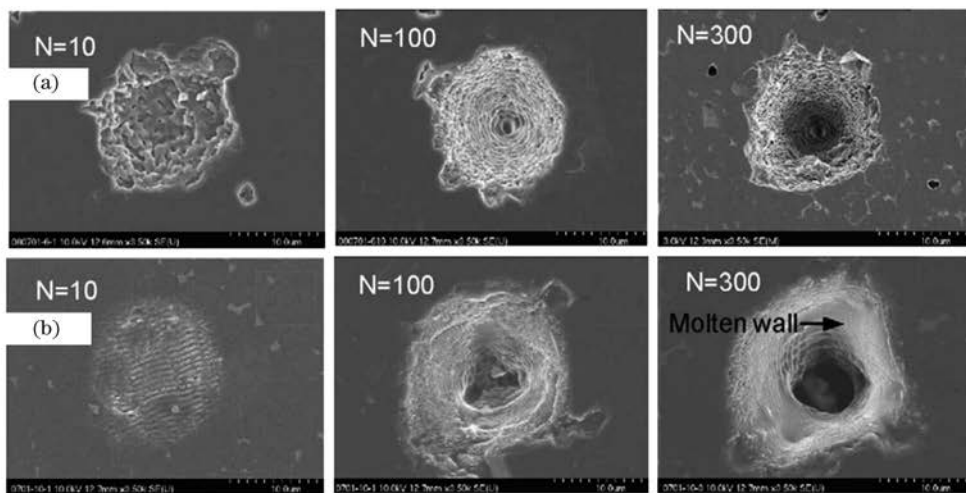


图 26 飞秒激光烧蚀陶瓷孔^[76]。(a)氧化铝陶瓷;(b)氮化铝陶瓷
Fig. 26 Femtosecond laser ablated holes on ceramics^[76]. (a) Aluminum oxide ceramics; (b) aluminium nitride ceramics

超快激光与陶瓷材料作用时,加工区域材料以蒸气与液滴混合物的相爆炸形式而得到去除,不可避免地会向周围区域喷溅出大量熔渣,造成孔形貌的恶化。Li 等^[78]研究了直冲和旋切孔加工中表面喷溅物的范围随激光参数的关系,发现熔渣喷溅时的径向扩散范围随着激光能量密度的增大而线性增大,且相同能量密度下旋切法加工时产生的熔渣扩散范围较直冲法加工时更小,如图 27(a)所示。此外,旋切法加工时,熔渣喷溅的径向扩散范围随着激光扫描速度的增大而线性增大,如图 27(b)所示。

同时,熔渣中的氧浓度高于未受激光加工影响的区域,这是由于熔渣来自于过饱和烧蚀粒子的冷凝,熔渣中的过量氧元素可能是由陶瓷材料在熔化、气化和冷凝过程中的完全氧化造成的。图 27(c)、(d)所示分别为直冲和旋切加工孔表面的电镜图,可以看出,表面喷溅物仅分布在孔口周围约十几 μm 的范围内,且喷溅物数量较少,表明飞秒激光陶瓷孔加工的表面质量较好。Perrie 等^[79]研究发现,飞秒激光加工后所产生的喷溅熔渣主要为直径为 20 nm~1 μm 、平均直径为 300 nm 的氧化铝单晶纳米颗粒。

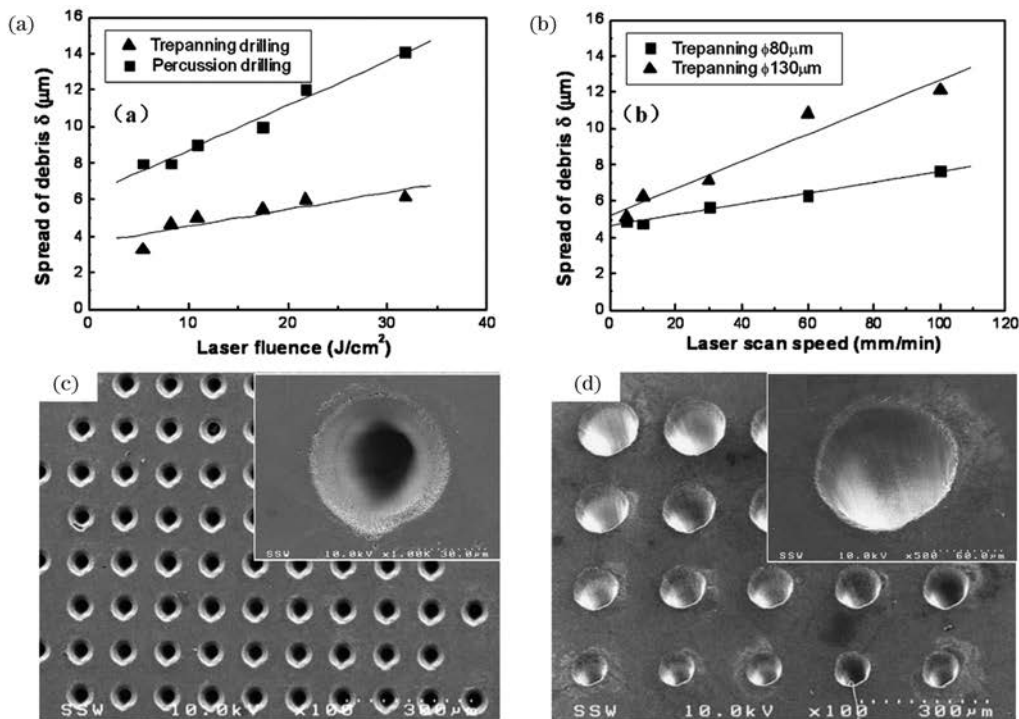


图 27 飞秒激光直冲和旋切加工氧化铝陶瓷孔^[78]。(a)能量密度对孔表面喷溅物喷溅范围的影响;(b)扫描速度对孔表面喷溅物喷溅范围的影响;(c)直冲加工孔电镜图;(d)旋切加工孔电镜图

Fig. 27 Holes ablated with percussion and trepanning drilling by femtosecond laser processing on aluminum oxide ceramics^[78]. (a) Effect of laser fluence on spattering range of hole surface debris; (b) effect of scanning speed on spattering range of hole surface debris; (c) SEM image of percussion drilled hole; (d) SEM image of trepanning processed hole

相比毫秒、纳秒激光,超快激光加工时产生的热量极少,但由于电子基板陶瓷材料极薄极脆的特性,仍然不可避免热裂纹的出现。为了控制热裂纹的产生,调控加工参数是首选的优化方法,如 Wang 等^[80]研究发现,在环切加工氧化铝陶瓷孔时,采用高环切速度结合更多的环切次数,有效减少了孔口周围的裂纹。此外,采用单环旋切法加工时,无论重复扫描多少次,0.625 mm 厚氧化铝陶瓷表面上直径大于 250 μm 的孔均无法实现通孔加工,如图 28(a)所示。其原因是随着孔加工的进行,激光束沿圆形照

射路径形成了较窄的切口,光束经过壁面不断反射,造成了较大的能量损耗,无法到达窄切口的底部,因此无法实现更深的切割。为了避免上述现象,可以采用多圆形填充图案旋切的加工方式,但该加工方式会诱发严重的热积累,导致入口处产生大量微裂纹,如图 28(b)所示。相较而言,进行多组间隔孔加工时,以 1 mm/s 的扫描速度,每进行 2 轮打孔暂停 30 s,可显著减少孔口的裂纹,如图 28(c)所示。最终,在厚度为 0.381 mm 的氧化铝陶瓷表面加工出了直径为 150 μm 的高质量通孔,如 28(d)所示。

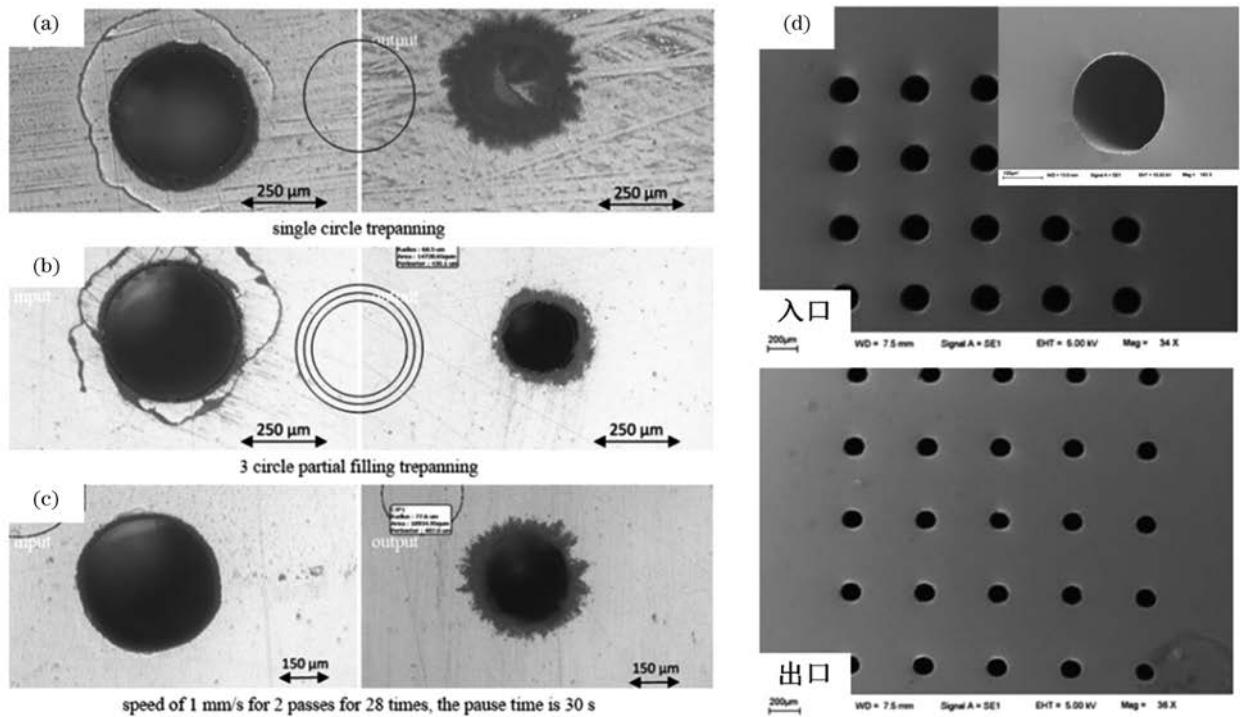


图 28 飞秒激光加工氧化铝陶瓷孔入口和出口^[80]。(a)单环旋切;(b)三环填充旋切;(c)多组间隔加工;(d)孔电镜图
Fig. 28 Inlet and outlet of femtosecond laser processed holes on aluminum oxide ceramics^[80]. (a) Single circle trepanning; (b) 3 circle partial filling trepanning; (c) multi-group interval machining; (d) SEM image of hole

5.2 孔的侧壁形貌特征及其工艺调控

超快激光环切加工陶瓷表面孔的锥度也与激光聚焦面的位置相关,如图 29(a)所示^[80]。可以看出,在焦点从正离焦位置移动到负离焦位置的过程中[图 29(a)中从右至左],孔入口直径逐渐减小,当离焦量为-0.3 mm 时,孔入口直径达到最小,此后,随着焦点距离样品表面越远,孔入口直径增大;而孔出口直径在焦点位置为-0.4 mm 时最大,此后随着离焦量的增大而减小。基于孔入/出口直径之间的差

异,孔的锥度在离焦量为-0.3 mm 和-0.4 mm 时达到最小。然而,由于孔入口直径明显大于孔出口直径,且更小的孔径是实现更高密度电路互联的基础,因此,焦点位置在-0.3 mm 处为最优加工位置。此外,Wang 等^[80]研究还发现,将总环切次数分为两组,并在两组之间设定间隔时间能够有效减小孔的锥度。与环切加工相比,激光聚焦面位置逐渐向材料内部即孔深度方向进给的螺旋加工能够获得更小锥度的孔。如 Hsu 等^[81]采用螺旋加工[光束

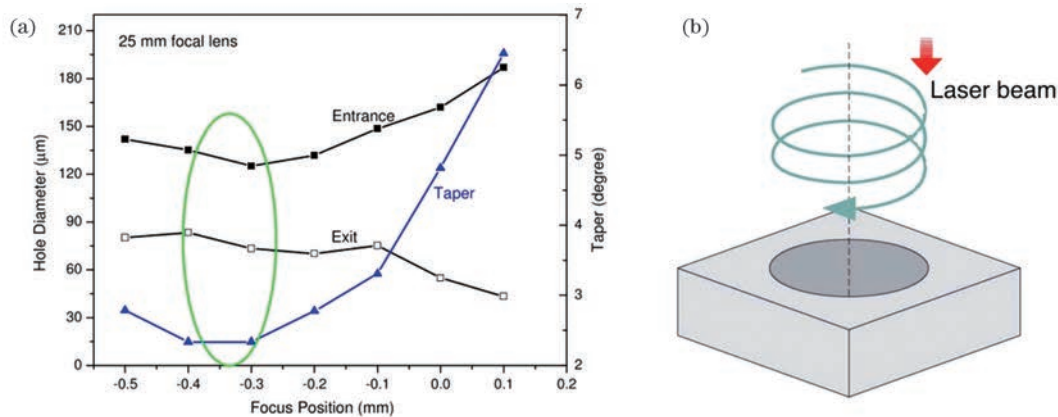


图 29 飞秒激光陶瓷孔加工中的孔锥度调控方法。(a)焦点位置对飞秒激光加工氧化铝陶瓷孔直径和孔锥度的影响^[80];
(b)螺旋激光路径^[81]

Fig. 29 Control method of hole taper by femtosecond laser processing on ceramics. (a) Effect of focus position on femtosecond laser processed hole diameter and taper on aluminum oxide ceramics^[80]; (b) helical laser path^[81]

路径如图 29(b)所示],在氧化铝陶瓷基板表面获得了入口直径为 $72\ \mu\text{m}$ 、出口直径为 $61\ \mu\text{m}$ 的通孔,入/出口直径之比为 1.2,该值远小于图 29 中环切加工孔的入/出口直径之比。

超快激光水辅助氧化铝加工可以改善孔的锥度。Ma 等^[82]提出并研究了半水浸式皮秒激光加工氧化铝陶瓷孔,与直接激光孔加工相比,该方法能够加工更小锥度的孔,但烧蚀的表面质量相对粗糙,激光加工和半水浸式激光加工的机理分别如图 30(a)、(b)所示。周翔等^[83-84][图 30(c)、(d)]和 Ren 等^[85][图 30

(e)、(f)]分别采用皮秒激光和飞秒激光在水下进行氧化铝陶瓷孔加工,发现在水环境中加工可以获得更小锥度的孔,最小孔锥度可达到 0.8° ,比空气中加工能够获得的最小孔锥度降低了约 1.6° 。从图 30(c)~(f)中空气环境和水环境下加工孔侧剖图也可以看出,水环境下加工孔的入口直径较空气环境下加工孔的入口直径有少许增大,但孔出口直径明显变大,因此孔的锥度变小。分析认为,主要原因是激光在水下加工时可诱导液体空化,产生的空泡对孔壁形成强大冲击力,促进孔底部材料的去除,因此孔锥度降低。

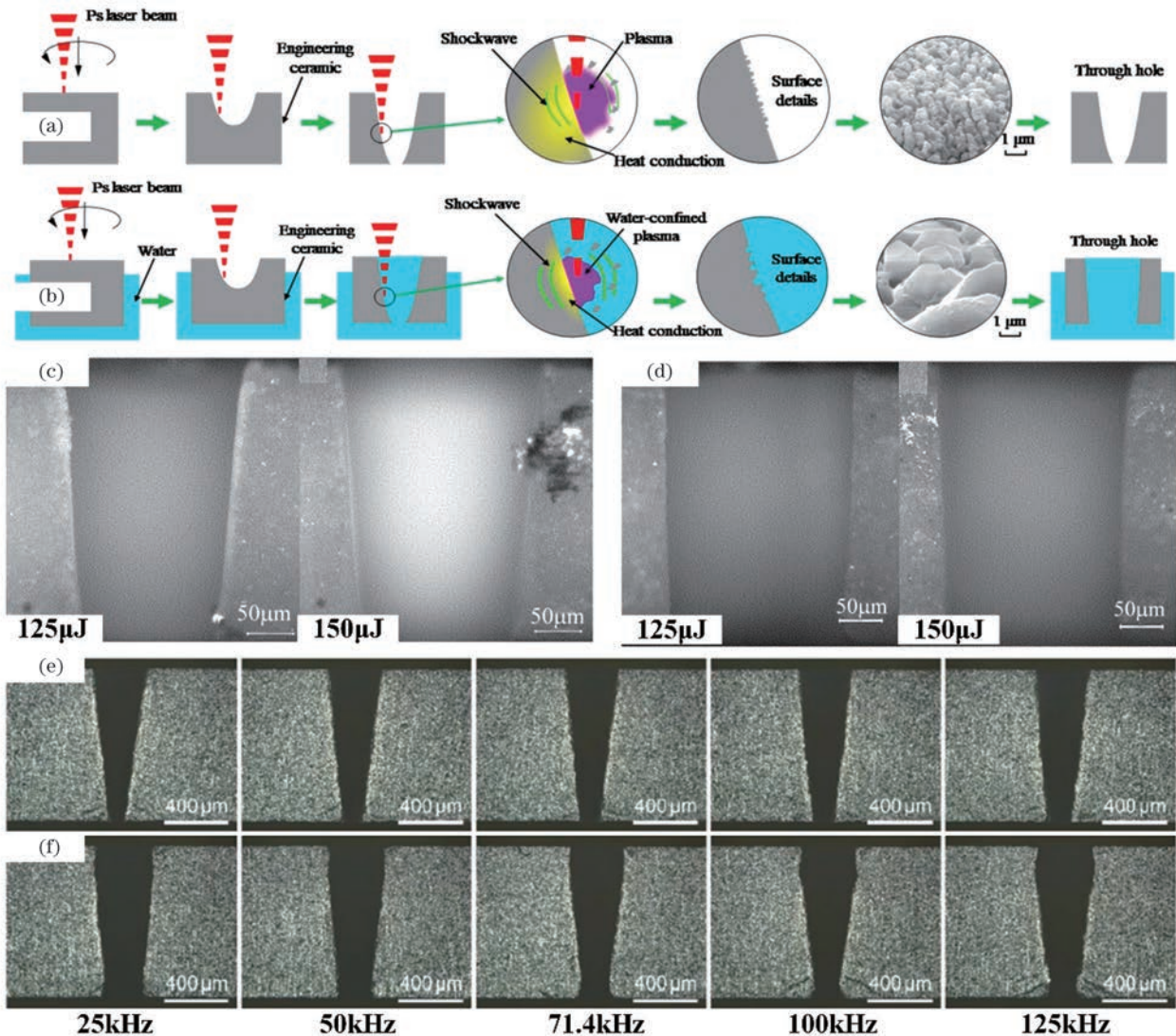


图 30 超快激光加工氧化铝陶瓷孔。(a)激光加工孔的机理示意图^[82]; (b)半水浸式激光加工孔的机理示意图^[82]; (c)空气环境下不同单脉冲能量加工的孔^[83-84]; (d)水环境下不同单脉冲能量加工的孔^[83-84]; (e)空气环境下不同重复频率加工的孔^[85]; (f)水环境下不同重复频率加工的孔^[85]

Fig. 30 Ultrafast laser processed holes on aluminum oxide ceramics. (a) Schematic of laser machining mechanism of hole^[82]; (b) schematic of semi-submerged assisted laser machining mechanism of hole^[82]; (c) holes ablated in air with different single pulse energies^[83-84]; (d) holes ablated under water with different single pulse energies^[83-84]; (e) holes ablated in air with different repetition rates^[85]; (f) holes ablated under water with different repetition rates^[85]

辅助气体形成的高压环境也会影响孔锥度。王禹茜等^[71,86]通过调控辅助气体气压在 0.2 ~ 0.5 MPa 之间变化,在碳化钛陶瓷上得到了锥度为 $-0.30^{\circ} \sim 2.17^{\circ}$ 的微孔,其中孔锥度随着辅助气压的增大而增大,当辅助气压为 0.3 MPa 时能得到无锥度通孔,如图 31(a)所示。这主要是由于适当的气压可以促使孔腔中的熔融物喷溅,得到较好的锥度;而过大的气压受强制对流的影响,会使得熔融物迅速冷却,抑制材料的去除,产生较大锥度,造成通孔的加工效果变差^[87]。在进行冲击陶瓷孔加工时,激光加工系统的透镜焦距也会对孔锥度产生较大影

响,如图 31(b)所示^[88]。可以发现,当透镜焦距为 20 mm 时,碳化硅陶瓷上加工的盲孔呈现出细长的孔通道,孔锥度约为 1° ;当透镜焦距为 50 mm 时,盲孔深度减小,孔入口直径增大,且入口处呈现喇叭口形貌,入口边缘较为平滑,此时的孔锥度约为 4° ;当透镜焦距为 100 mm 时,盲孔整体呈喇叭形,孔入口宽大而孔底尖细,孔锥度约为 9° 。这是由于激光束经短焦距透镜聚焦后的高斯光束空间分布具有一个尖锐的峰值,远大于较长焦距透镜聚焦后的数值,该激光在材料上作用时的能量密度更大,穿透力更强。

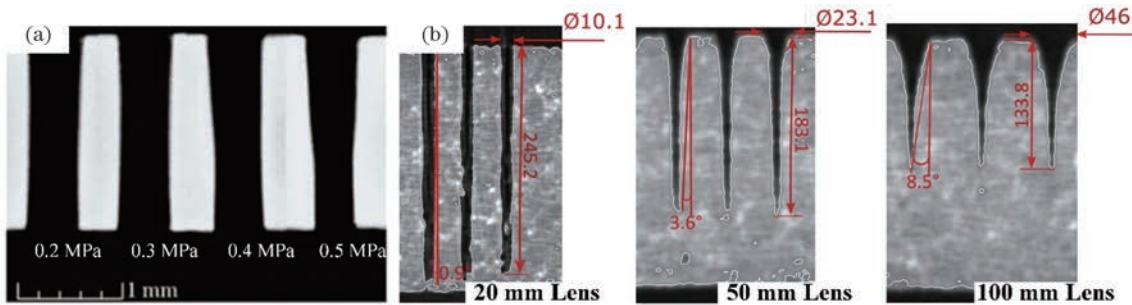


图 31 超快激光加工陶瓷孔。(a)辅助气体压力对孔锥度的影响^[71,86]; (b)透镜焦距对孔锥度的影响^[88]

Fig. 31 Ultrafast laser processed holes on ceramics. (a) Effect of auxiliary gas pressure on hole taper^[71,86]; (b) effect of lens focal length on hole taper^[88]

由于超快激光的“冷加工”特性,陶瓷表面孔在加工过程中几乎不发生热传导,可以加工具有极薄重铸层甚至无重铸层的孔。图 32(a)~(d)所示是飞秒激光冲击法和旋切法加工氧化铝陶瓷表面孔的横截面图^[78]。可以看到,孔壁被一层约 30 nm 厚的重铸层覆盖,重铸层为黑色蜂巢状疏松颗粒,可以推测其是由氧化铝晶粒在飞秒激光加工过程中连续的

熔融和再凝固所产生的。虽然飞秒激光加工的陶瓷孔侧壁的重铸层极薄,但其疏松结构依然会对电子基板导通孔的性能造成影响。为了进一步消除超快激光烧蚀孔的重铸层,学者探索了超快激光复合加工方式,如超快激光结合超声加工、超快激光结合其他环境加工等。其中,周翔等^[83-84]对比了皮秒激光在空气介质和水介质下加工氧化铝陶瓷孔的内壁形

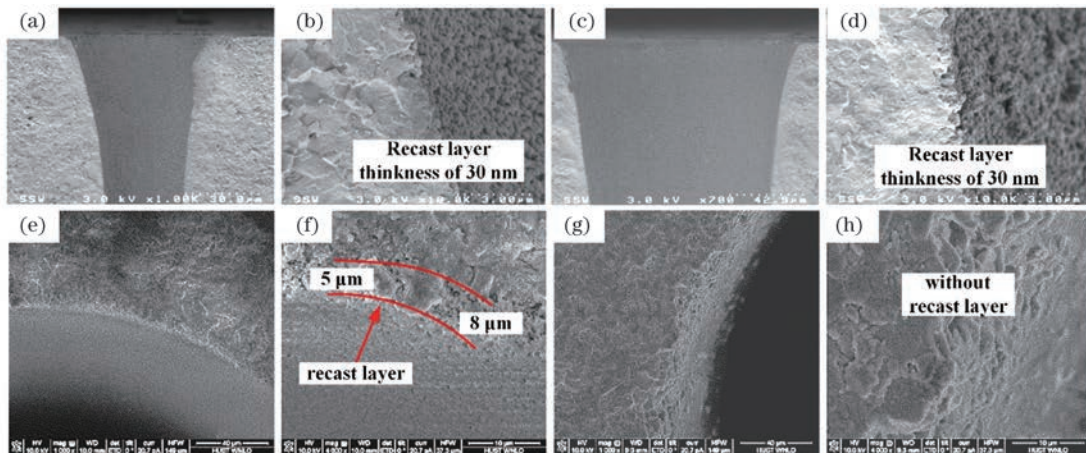


图 32 超快激光加工氧化铝陶瓷孔电镜图。(a)(b)直冲式加工的孔^[78]; (c)(d)旋切式加工的孔^[78]; (e)(f)空气环境中加工的孔^[83-84]; (g)(h)水环境中加工的孔^[83-84]

Fig. 32 SEM images of ultrafast laser processed holes on aluminum oxide ceramics. (a)(b) Percussion drilled holes^[78]; (c)(d) trepanning processed holes^[78]; (e)(f) holes processed in air^[83-84]; (g)(h) holes processed under water^[83-84]

貌,如图 32(e)~(h)所示,发现空气介质下加工得到的孔内壁附着了一层厚度为 $3.5 \sim 8.0 \mu\text{m}$ 的重铸层,且重铸层厚度随着单脉冲能量和扫描次数的增加而增加。而水介质下加工得到的孔表面无重铸层、微裂纹和发黑变质区,孔壁清洁度高、无激光烧蚀痕迹。这是因为水辅助激光钻孔时,水的冷却作用降低了陶瓷表面温度,避免了陶瓷相变发生,同时水的流动促进去除物质的排除,避免了重铸层的形成。此外,皮秒激光钻孔过程中具有高功率密度激光会引起液体空化现象^[89-90],空泡溃灭对孔壁产生强冲击作用,使得已产生的重铸层脱离基体,具有一定的清洁效应,从而彻底实现无重铸层钻孔。

6 结束语

氧化铝和氮化铝陶瓷作为优质的电子封装基板材料,其硬脆特性给表面孔加工带来了巨大的挑战。综述了长脉冲毫秒激光、短脉冲纳秒激光和超快激光加工电子陶瓷基板孔的形貌特征,具体研究了各激光加工参数对孔表面形貌特征(如孔口圆度、孔表面喷溅物、孔表面微裂纹和孔表面热影响区等)和孔的侧壁形貌特征(如孔的锥度、孔侧壁重铸层、孔侧壁表面微裂纹等)的影响。

对于孔的圆度,在毫秒激光加工中,增大扫描速度,孔的圆度变差;在纳秒激光加工中,重复频率越高,孔的圆度越好,存在最优扫描间距,此时可以获得较好的孔圆度;在超快激光加工中,选择合适的插补误差,既可以保证圆度又可以保证加工效率。对于孔口表面喷溅物,激光能量越大,重复频率越高,喷溅物范围越宽;在毫秒激光加工中,脉冲宽度越大,表面喷溅物越多,喷溅范围越宽;在超快激光加工中,扫描速度越大,喷溅物范围越宽。激光陶瓷基板孔加工的表面裂纹主要是由热效应导致的表面应力集中引起的,切向应力普遍诱导径向裂纹,径向应力诱发环状裂纹;孔间裂纹扩展,形成群孔裂纹扩展路径,最终使得样片断裂。水环境等辅助加工可以减少孔表面喷溅物和裂纹,提高孔的表面形貌质量。

激光加工陶瓷基板孔的锥度与激光能量、重复频率、脉冲宽度、焦点位置、气压及加工环境等均有关。在毫秒激光加工中,扫描速度越大,孔的锥度越大;在纳秒激光加工中,扫描间距越大,孔的锥度越大。对于不同厚度和直径的孔,选择合适的加工填充样式,可以获得更小的孔锥度。对于孔的侧壁重铸层,即便是采用具有“冷加工”特性的超快激光也无法完全避免,毫秒激光加工陶瓷基板孔侧壁的重

铸层较厚,在优化参数下,纳秒和超快激光加工孔侧壁的重铸层厚度差异不大。水射流辅助加工和水环境辅助加工等可以有效减小重铸层厚度。后处理如溶液腐蚀等可以完全去除孔侧壁的重铸层。还需要指出的是,孔侧壁重铸层表面普遍分布大量的微裂纹,尤其是毫秒激光加工,且裂纹沿晶粒方向扩展。

参 考 文 献

- [1] 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.
Tian M B, Liang T X, He W. Electronic packaging technologies and materials [J]. Semiconductor Information, 1995, 32(4): 42-61.
- [2] 张兆生, 卢振亚, 陈志武. 电子封装用陶瓷基板材料的研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(11): 16-20.
Zhang Z S, Lu Z Y, Chen Z W. Research progress in ceramic substrate material for electronic packaging [J]. Materials Review, 2008, 22(11): 16-20.
- [3] 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.
Zhang J L. Applications of laser processing in microelectronics packaging [J]. Printed Circuit Information, 2001, 9(10): 33-38.
- [4] 张蜀平, 郑宏宇. 电子封装技术的新进展[J]. 电子与封装, 2004, 4(1): 3-9.
Zhang S P, Zheng H Y. New progress of electronic packaging technology [J]. Electronics & Packaging, 2004, 4(1): 3-9.
- [5] 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.
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.
- [6] 程浩, 陈明祥, 罗小兵, 等. 电子封装陶瓷基板[J]. 现代技术陶瓷, 2019, 40(4): 265-292.
Cheng H, Chen M X, Luo X B, et al. Ceramic substrate for electronic packaging [J]. Advanced Ceramics, 2019, 40(4): 265-292.
- [7] 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.
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.
- [8] 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.
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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
Li H F, Li J, Wen Y, et al. EDM for ceramics and its research status[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2008, 22(2): 178-182.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Ho C Y, Tsai Y H, Chen C S, et al. Ablation of aluminum oxide ceramics using femtosecond laser with multiple pulses[J]. Current Applied Physics, 2011, 11(3): S301-S305.
- [15] 阿占文, 吴影, 肖宇, 等. 超快激光微孔加工工艺研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(8): 0802013.
A Z W, Wu Y, Xiao Y, et al. Research progresses of process technology in ultrafast laser micro-hole drilling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(8): 0802013.
- [16] 张廷忠, 张冲, 李晋, 等. Ti_6Al_4V 合金毫秒激光打孔重铸层的形成机制[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0214001.
Zhang T Z, Zhang C, Li J, et al. Formation mechanism of recast layer in millisecond laser drilling of Ti_6Al_4V alloys[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0214001.
- [17] 赵万芹, 梅雪松, 王文君. 超短脉冲激光微孔加工(下): 实验探索[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(2): 129-140.
Zhao W Q, Mei X S, Wang W J. Ultrashort pulse laser drilling of micro-holes (part 2): experimental study[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(2): 129-140.
- [18] 赵万芹, 梅雪松, 王文君. 超短脉冲激光微孔加工(上): 理论研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 140-148.
Zhao W Q, Mei X S, Wang W J. Ultrashort pulse laser drilling of micro-holes(part 1): theoretical study [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(1): 140-148.
- [19] 陈亮, 刘晓东, 刘静, 等. 飞秒激光在石英玻璃表面刻蚀微槽的研究[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2314001.
Chen L, Liu X D, Liu J, et al. Microgroove etching with femtosecond laser on quartz glass surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2314001.
- [20] 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.
- [21] 闫胤洲, 季凌飞, 鲍勇, 等. 激光加工陶瓷裂纹行为的理论分析及实验验证[J]. 中国激光, 2008, 35(9): 1401-1408.
Yan Y Z, Ji L F, Bao Y, et al. Theory analysis and experiment verification on crack characters during laser processing ceramics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(9): 1401-1408.
- [22] Guo D, Cai K, Yang J L, et al. Spatter-free laser drilling of alumina ceramics based on gelcasting technology[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2003, 23(8): 1263-1267.
- [23] Tsai C H, Li C C. Investigation of underwater laser drilling for brittle substrates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(6): 2838-2846.
- [24] 杨子轩. 氧化铝陶瓷基板群孔激光加工工艺与应用研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2021.
Yang Z X. Research on processing and application of laser drilling group-holes on alumina ceramics [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2021.
- [25] 孙立华. 陶瓷激光打孔技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.
Sun L H. The research of laser drilling on ceramics [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2007.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
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.
- [30] Zhang J Y, Long Y, Liao S X, et al. Effect of laser scanning speed on geometrical features of Nd: YAG laser machined holes in thin silicon nitride substrate [J]. Ceramics International, 2017, 43 (3): 2938-2942.
- [31] 李光亮. 静态溶液辅助氧化铝陶瓷激光重复打孔实验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
Li G L. Study on static solution assisted laser drilling [D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [32] 姚燕生, 陈庆波, 汪俊, 等. 氮化硅陶瓷水射流辅助激光精密加工[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2723-2731.
Yao Y S, Chen Q B, Wang J, et al. Water-jet assisted laser precision processing of Si₃N₄ ceramics [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26 (11): 2723-2731.
- [33] 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.
- [34] Hanon M M, Akman E, Oztoprak B G, 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.
- [35] Guo D, Cai K, Huang Y, et al. A novel anti-splatter and anti-crack laser drilling technique: application to ceramics[J]. Applied Physics A, 2003, 76(7): 1121-1124.
- [36] Yan Y Z, Ji L F, Bao Y, et al. An experimental and numerical study on laser percussion drilling of thick-section alumina[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(6): 1257-1270.
- [37] 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.
- [38] 张珊, 康少英. 激光加工结构陶瓷的实验研究[J]. 中国激光, 1995, 22(10): 797-800.
Zhang S, Kang S Y. Experimental studies of laser processing of constructural ceramics [J]. Chinese Journal of Lasers, 1995, 22(10): 797-800.
- [39] 闫胤洲. 激光无裂纹切割陶瓷研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
Yan Y Z. Investigation on laser crack-free cutting of ceramics [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.
- [40] 肖磊, 赵建涛, 闫振峰, 等. 薄板陶瓷微孔的激光加工工艺研究[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s114012.
Xiao L, Zhao J T, Yan Z F, et al. Technologic investigation of laser micro-drilling on the thin ceramic plate[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s114012.
- [41] Chen M F, Hsiao W T, Wang M C, et al. A theoretical analysis and experimental verification of a laser drilling process for a ceramic substrate[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9/10/11/12): 1723-1732.
- [42] 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.
- [43] Samant A N, Dahotre N B. Differences in physical phenomena governing laser machining of structural ceramics[J]. Ceramics International, 2009, 35(5): 2093-2097.
- [44] 高鸣, 曹昆, 冯佳伦, 等. 氧化铝陶瓷加工表面粗糙度与材料显微结构间关系[J]. 真空电子技术, 2011(6): 44-46.
Gao M, Cao K, Feng J L, et al. The relation between machined surface roughness and microstructure of Al₂O₃ ceramics [J]. Vacuum Electronics, 2011(6): 44-46.
- [45] 陆平卫, 袁根福. Al₂O₃ 陶瓷低压水射流激光复合打孔形貌的研究[J]. 应用激光, 2014, 34(4): 323-326.
Lu P W, Yuan G F. Study on morphologies of Al₂O₃ ceramics with low-pressure water jet assisted laser drilling[J]. Applied Laser, 2014, 34(4): 323-326.
- [46] 陈春映, 袁根福, 王金华. 低压水射流激光复合切割 Al₂O₃ 陶瓷的研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2097-2102.
Chen C Y, Yuan G F, Wang J H. Low-pressure water jet and laser composite cutting on Al₂O₃ ceramic[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2097-2102.
- [47] 谢兵兵, 袁根福. 水射流激光复合蚀刻陶瓷的研究[J]. 激光技术, 2016, 40(5): 762-766.
Xie B B, Yuan G F. Research of water jet-laser complex etching of ceramics[J]. Laser Technology, 2016, 40(5): 762-766.
- [48] 逢志伟. 低压射流辅助激光打孔实验研究与数值模拟[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
Pang Z W. Experiment research and numerical simulation on the low pressure jet assisted laser drilling[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.

- [49] 姚燕生, 袁珠珠, 王园园, 等. 氮化硅陶瓷水下激光与超声复合加工方法及其机理研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 207-216.
Yao Y S, Yuan Z Z, Wang Y Y, et al. Research on ultrasonic-laser machining underwater and its mechanism for silicon nitride ceramics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 207-216.
- [50] Bharatish A, Narasimha Murthy H N, Anand B, et al. Characterization of hole circularity and heat affected zone in pulsed CO₂ laser drilling of alumina ceramics[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 53: 22-32.
- [51] Kuar A S, Doloi B, Bhattacharyya B. Modelling and analysis of pulsed Nd: YAG laser machining characteristics during micro-drilling of zirconia (ZrO₂) [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(12/13): 1301-1310.
- [52] 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 Press, 2011: 882-885.
- [53] 何立文. 准分子激光微加工 Al₂O₃ 陶瓷和硅晶片的实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
He L W. Experimental study on Al₂O₃ and silicon wafer by excimer laser micromachining [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [54] 罗艳, 吴晓斌, 周翊, 等. 准分子激光与 SiC 陶瓷的相互作用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 121403.
Luo Y, Wu X B, Zhou Y, et al. Interaction between excimer laser and SiC ceramic [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 121403.
- [55] 陈强. 基于纳秒脉冲激光的微孔加工技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
Chen Q. Study on micro-drilling technology based on nanosecond pulsed laser [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- [56] Wang H J, Chen Q, Lin D T, et al. Effect of scanning pitch on nanosecond laser micro-drilling of silicon nitride ceramic [J]. Ceramics International, 2018, 44(12): 14925-14928.
- [57] Nedialkov N, Sawczak M, Jendrzejewski 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.
- [58] 张罡, 梁勇. Al₂O₃ 陶瓷激光打孔重铸层的研究[J]. 沈阳工业学院学报, 2001, 20(2): 1-4.
Zhang G, Liang Y. Study on the re-cast layer for laser drilling of Al₂O₃ ceramics [J]. Journal of Shenyang Institute of Technology, 2001, 20(2): 1-4.
- [59] Wee L M, Khoong L E, Tan C W, et al. Solvent-assisted laser drilling of silicon carbide [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2011, 8(6): 1263-1276.
- [60] Zhao W Q, Mei X S. Optimization of trepanning patterns for holes ablated using nanosecond pulse laser in Al₂O₃ ceramics substrate [J]. Materials, 2021, 14(14): 3834.
- [61] Chen Q, Wang H J, Lin D T, et al. Characterization of hole taper in laser drilling of silicon nitride ceramic under water [J]. Ceramics International, 2018, 44(11): 13449-13452.
- [62] Wang L Z, Zhao W Q, Mei X S, et al. Improving quality and machining efficiency of hole during AlN trepanning with nanosecond pulse laser [J]. Ceramics International, 2020, 46(15): 24018-24028.
- [63] 王凌志. 氮化铝陶瓷短脉冲激光通孔加工及其应用研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2021.
Wang L Z. Study on short pulse laser through-hole machining and application of ALN ceramics [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2021.
- [64] Zhang F, Duan J, Zeng X Y, et al. UV laser microprocessing and post chemical etching on ultrathin Al₂O₃ ceramic substrate [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2011, 31(9): 1631-1639.
- [65] Kaiser A, Rethfeld B, Vicanek M, et al. Microscopic processes in dielectrics under irradiation by subpicosecond laser pulses [J]. Physical Review B, 2000, 61(17): 11437-11450.
- [66] Kautek W, Krüger J, Lenzner M, et al. Laser ablation of dielectrics with pulse durations between 20 fs and 3 ps [J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(21): 3146-3148.
- [67] 杜坤, 李晓炜, 杨炳东, 等. 飞秒激光非金属微孔加工研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111417.
Du K, Li X W, Yang B D, et al. Research progress of femtosecond laser microhole drilling on non-metallic materials [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111417.
- [68] 李晓溪, 贾天卿, 冯东海, 等. 超短脉冲激光照射下氧化铝的烧蚀机理 [J]. 物理学报, 2004, 53(7): 2154-2158.
Li X X, Jia T Q, Feng D H, et al. The mechanism of ablation of sapphire by an ultra-short pulse laser [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(7): 2154-2158.
- [69] Liu X, Du D, Mourou G. Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(10): 1706-1716.

- [70] 闵大勇, 王雪辉, 东芳, 等. 超快激光精密打孔设备及其实现方法[J]. 应用激光, 2016, 36(5): 590-594.
Min D Y, Wang X H, Dong F, et al. Ultrafast laser precision drilling equipment and realization method [J]. Applied Laser, 2016, 36(5): 590-594.
- [71] 王禹茜, 张军战, 刘永胜, 等. 飞秒激光工艺参数对加工 TiC 陶瓷微孔的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003010.
Wang Y Q, Zhang J Z, Liu Y S, et al. Effect of femtosecond laser parameters on TiC ceramic micro-hole drilling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(10): 1003010.
- [72] Kim S H, Balasubramani T, Sohn I B, et al. Precision microfabrication of AlN and Al₂O₃ ceramics by femtosecond laser ablation [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6879: 68791O.
- [73] Stoian R, Ashkenasi D, Rosenfeld A, et al. The dynamics of ion expulsion in ultrashort pulse laser sputtering of Al₂O₃ [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2000, 166/167: 682-690.
- [74] 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.
- [75] Ashkenasi D, Stoian R, Rosenfeld A. Single and multiple ultrashort laser pulse ablation threshold of Al₂O₃ (corundum) at different etch phases [J]. Applied Surface Science, 2000, 154/155: 40-46.
- [76] Kim S H, Sohn I B, Jeong S. Ablation characteristics of aluminum oxide and nitride ceramics during femtosecond laser micromachining [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(24): 9717-9720.
- [77] Perrie W, Rushton A, Gill M, et al. Characterization of ultrafast microstructuring of alumina (Al₂O₃) [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5714: 43-52.
- [78] Li C D, Lee S, Nikumb S. Femtosecond laser drilling of alumina wafers [J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(9): 2006-2012.
- [79] Perrie W, Rushton A, Gill M, et al. Femtosecond laser micro-structuring of alumina ceramic [J]. Applied Surface Science, 2005, 248(1/2/3/4): 213-217.
- [80] Wang X C, Zheng H Y, Chu P L, et al. Femtosecond laser drilling of alumina ceramic substrates [J]. Applied Physics A, 2010, 101(2): 271-278.
- [81] Hsu H C, Wu S J. An investigation on micro-via drilling on ceramic substrates by a picosecond laser [C] // 2016 IEEE 37th International Electronics Manufacturing Technology (IEMT) & 18th Electronics Materials and Packaging (EMAP) Conference, September 20-22, 2016, Georgetown, Malaysia. New York: IEEE Press, 2016: 16504416.
- [82] Ma Q, Zhu H, Zhang Z Y, et al. An investigation into picosecond laser micro-trepanning of alumina ceramics employing a semi-water-immersed scheme [J]. Materials, 2019, 12(11): 1812.
- [83] 周翔. 皮秒激光加工脆性材料工艺与机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
Zhou X. Study on the process and mechanism of picosecond pulse laser processing of brittle materials [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [84] 周翔, 段军, 陈航, 等. 水辅助激光无重铸层钻孔 Al₂O₃ 陶瓷实验研究[J]. 激光技术, 2018, 42(2): 271-275.
Zhou X, Duan J, Chen H, et al. Experimental study about water-assisted laser drill on Al₂O₃ ceramics without recast layer [J]. Laser Technology, 2018, 42(2): 271-275.
- [85] Ren N F, Xia K B, Yang H Y, et al. Water-assisted femtosecond laser drilling of alumina ceramics [J]. Ceramics International, 2021, 47(8): 11465-11473.
- [86] 王禹茜. 飞秒激光加工 TiC 陶瓷的工艺研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
Wang Y Q. The study of femtosecond laser processing on TiC ceramic [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [87] Chien W T, Hou S C. Investigating the recast layer formed during the laser trepan drilling of Inconel 718 using the Taguchi method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(3/4): 308-316.
- [88] Nasrollahi V, Penchev P, Jwad T, et al. Drilling of micron-scale high aspect ratio holes with ultra-short pulsed lasers: critical effects of focusing lenses and fluence on the resulting holes' morphology [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110: 315-322.
- [89] Isselin J C, Alloncle A P, Autric M. On laser induced single bubble near a solid boundary: contribution to the understanding of erosion phenomena [J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(10): 5766-5771.
- [90] 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.
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.

Review on Morphological Features and Process Control of Holes Drilled by Pulsed Laser on Surface of Electronic Ceramic Substrates

Zhao Wanqin^{1,2}, Mei Xuesong^{1,2*}, Yang Zixuan^{1,2}

¹ School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

² State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710064, Shaanxi, China

Abstract

Significance Ceramics substrates, Al_2O_3 and AlN , are commonly used as electronic packaging substrate materials, have many advantages such as small dielectric coefficient, small thermal expansion coefficient, high thermal conductivity, good insulation performance, and good corrosion resistance. In short, ceramics substrates can meet all the performance requirements of microelectronic device packaging and are widely used in the fields of aerospace and military engineering. However, due to the hard and brittle characteristics of ceramics materials, the traditional machining method is easy to cause damage to this kind of materials. Laser processing is an advanced processing technology with no contact processing, no tool wear, high precision, and high flexibility. It is the preferred method for hard and brittle materials processing. At present, there are many researches on the effect of characteristic dimension of laser ablated holes, but the study on the characteristic morphology of laser drilled holes is often ignored. Moreover, when a high energy laser is focused on the material, the strong thermal effect cannot be avoided, which leads to the recast layers, micro-cracks, and heat affected zones on the surface of the ceramics substrate, influencing the morphology of the holes and subsequently influencing the performance of the ceramics substrate. It must be pointed out that the thermal effect has a high correlation with the laser pulse duration. Specifically, the thermal effect of the long pulse laser represented by the millisecond laser is the most serious, and the holes ablated by them have serious spatters, recast layers and micro-cracks. The thermal effect of a short pulse laser represented by the nanosecond laser is relatively small, and the morphological quality of holes is improved greatly. The ultrafast laser (generally referred to the pulse duration ≤ 12 ps) has the characteristics of "cold ablating", which can limit the influence of the thermal effect to the maximum, and thus can be used to process the holes with a high morphological quality. In this paper, the morphological characteristics of holes in the electronic ceramics substrate ablated by a millisecond long pulse, a nanosecond short pulse, and an ultrafast laser pulse are reviewed.

Progress As for the hole circularity, it becomes worse when the scanning speed increases during the millisecond laser processing. During the nanosecond laser processing, the higher the repetition rate, the better the hole circularity. During the ultrafast laser processing, the circularity and machining efficiency can be ensured by selecting appropriate interpolation errors. For the spatters on the holes surfaces, the higher the laser energy, the higher the repetition rate, the wider the spattering range. During the millisecond laser processing, the larger the pulse duration, the more the surface spatters, the wider the spatters range. During the ultrafast laser processing, the faster the scanning speed, the wider the spattering range. The surface cracks of holes induced by laser ablating on the ceramics substrate are mainly caused by the surface stress concentration coming from the thermal effect. The radial cracks are generally induced by the tangential stress, and the ring cracks are by the radial stress. The cracks propagate to form the propagation path of the group hole cracks, which maybe cause the sample to fracture finally. The laser compound machining assisted by water and other liquids, the spatters and cracks on hole surfaces can be reduced and the surface morphologies of holes can be improved.

The laser processed hole taper on ceramics substrate is related to laser energy, repetition rate, pulse duration, focus position, air pressure, and processing environment. The faster the scanning speed, the larger the hole taper. During the nanosecond laser processing, the wider the scanning filling circle's interval, the larger the hole taper. For different hole diameters and depths, a smaller hole taper can be obtained by choosing the appropriate processing filling style. For the recast layer on the hole sidewall, even using an ultrafast laser with the "cold working" characteristics, it cannot be completely avoided. The hole recast layer processed by the millisecond laser is thicker. Under the optimized parameters, the thicknesses of the recast layer processed by the nanosecond and ultrafast lasers are almost the same. Furthermore, the thicknesses of the recast layer can be reduced effectively by the water jet

assisted machining and the water environment assisted machining, and it can be completely removed by a post-treatment such as solution corrosion. It should also be pointed out that a large number of microcracks extending along the grain direction are generally distributed on the surface of the recast layer, especially for the millisecond laser processing.

Conclusion and Prospect High quality holes have been required on the surface of a hard-brittle electronic ceramic substrate processed by a laser in order to achieve high quality and high density interconnection of electronic devices. Morphological features of holes drilled by a long pulse duration millisecond laser, a short pulse duration nanosecond laser and an ultrafast laser are reviewed, mainly including the hole surface morphological characteristics such as hole circularity, spatters, micro-cracks, and heat affected zones on the hole surfaces, and the hole side-wall morphological characteristics such as hole taper, recast layers and micro-cracks on the side-wall surface.

Key words laser technique; electronic ceramic substrate; morphological features of hole; millisecond laser; nanosecond laser; ultrafast laser