

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.04.003

重复频率对飞秒激光直冲式加工 氮化铝陶瓷盲孔的影响

王旭¹, 马盼^{1*}, 王宁¹, 刘浩东², 赵万芹³

(1. 上海工程技术大学 材料科学与工程学院, 上海 201620;

2. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110086;

3. 西安交通大学 机械制造系统国家重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:为探究飞秒激光加工参数中激光重复频率对盲孔尺寸和形貌的影响规律,课题组使用飞秒激光直冲方式对氮化铝陶瓷表面进行盲孔加工,通过实验探索激光重复频率对盲孔入口直径、孔深、孔口形貌以及孔侧壁形貌的影响规律。研究表明:随着激光重复频率的增大,盲孔的入口直径和孔深均呈现出增大至饱和的趋势且在重复频率为0.3 MHz左右达到饱和;盲孔的孔口形貌和侧壁形貌均随着重复频率的增大而变差,孔口周围的熔溅物堆积现象愈发严重,侧壁重铸层附着愈发严重。重复频率过高或者过低都会使得直冲式加工的盲孔达不到理想的尺寸和形貌。

关键词:飞秒激光;氮化铝陶瓷;盲孔;直冲式加工

中图分类号:TN249;TH161

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2023)04-0021-07

Effect of Repetition Frequency on Femtosecond Laser Direct Punch Machining of Aluminum Nitride Ceramic Blind Hole

WANG Xu¹, MA Pan^{1*}, WANG Ning¹, LIU Haodong², ZHAO Wanqin³

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. AVIC Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110086, China;

3. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to investigate the influence of laser repetition frequency on the size and shape of blind holes among the parameters of femtosecond laser processing, the femtosecond laser direct punching method was used to process the blind holes on the surface of aluminum nitride ceramics to experimentally explore the influence of laser repetition frequency on the diameter, depth, shape and side wall shape of blind holes. The results show that with the increase of laser repetition frequency, the entrance diameter and hole depth of the blind hole tend to increase to saturation and reach saturation at the repetition frequency of 0.3 MHz; with the increase of the repetition frequency, the morphology of the orifice and side wall of the blind hole deteriorate, the accumulation of molten spatter around the hole becomes more serious, and the adhesion of the side wall recast layer becomes more severely. Too high or too low repetition frequency will make the blind hole machined by direct punching to fail to achieve the desired size and morphology.

Keywords: femtosecond laser; aluminum nitride ceramics; blind hole; direct punching processing

随着材料技术的发展,工程陶瓷以其良好的性能在航空航天、半导体等领域得到了极其广泛的应用^[1]。而氮化铝陶瓷作为工程陶瓷中的翘楚有着强度高、导热性好、抗腐蚀能力强、耐冲击性良好以及介

收稿日期:2022-12-08;修回日期:2023-03-25

基金项目:国家自然科学基金(52105465)。

第一作者简介:王旭(1996),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要研究方向为激光精密加工。通信作者:马盼(1986),女,山东泰安人,博士,副教授,主要研究方向为金属增材制造、激光精密加工。E-mail: mapan@sues.deu.cn

电性能良好等优秀性能,使得其在半导体领域中有着更为广泛的应用,尤其在大功率电子元件中,氮化铝陶瓷主要用作电路陶瓷基板^[2]。陶瓷基板材料应用中需要在氮化铝陶瓷上进行相关的微孔加工以满足芯片导通和引脚固定的封装要求^[3]。目前,氮化铝陶瓷上的孔加工方式主要为:机械铣磨加工^[4-5]、电火花加工^[6]以及激光加工^[7]。其中,机械铣磨加工存在刀具磨损较快、加工质量不理想、加工效率低以及难以加工大深径比的微孔等问题^[8];电火花加工受脉冲电源的影响,设备庞大、加工不稳定以及加工效率低^[9]。激光作为一种能量密度高、应力小、可控性强以及无接触加工的技术手段,在氮化铝陶瓷加工领域得到了极其广泛的应用^[10]。氮化铝陶瓷激光微孔加工技术主要分成直冲式加工^[11]和螺旋式加工^[12]。其中,直冲式加工更适合加工小直径的微孔^[13]。Liu等^[14]利用皮秒激光在SiC复合陶瓷材料上打孔,发现在其他参数不变的情况下,通孔的直径随着重复频率的增大而增大,锥度随着重复频率的增大而减小。Kanan等^[15]利用掺铒光纤激光器在AA7475/SiC/ZrSiO陶瓷基复合材料上加工方形通孔,发现随着重复频率的提高,孔的表面热影响区面积在扩大,孔锥度降低,材料去除率提高。Mishra等^[16]利用CO₂激光对铝板进行微孔烧蚀加工,实验结果表明:随着重复频率的增大,通孔锥度减小,孔口有熔溅物堆积,孔壁有重铸层附着。目前,对于氮化铝陶瓷直冲式的孔加工主要集中在通孔方面^[17],而对于直冲式盲孔加工领域则极少有深入的且成体系的研究。因此,针对飞秒激光直冲式盲孔加工工艺的深入研究,不仅可以更加全面地了解飞秒激光与氮化铝陶瓷之间的相互作用,还可以准确和清晰地了解直冲孔在加工过程中的尺寸和形貌变化规律。针对上述问题,课题组探究了飞秒激光加工参数中的重复频率对盲孔尺寸和形貌的影响规律,以便为后续的氮化铝陶瓷激光加工工艺的优化提供技术支持。

1 实验

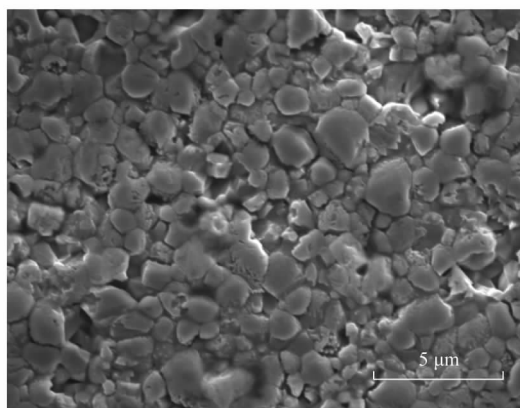
1.1 实验材料和设备

实验使用广州铠虹飞电子公司生产的厚度为0.5 mm的氮化铝陶瓷基片,具体参数如表1所示,氮化铝陶瓷表面和内部显微形貌如图1所示。

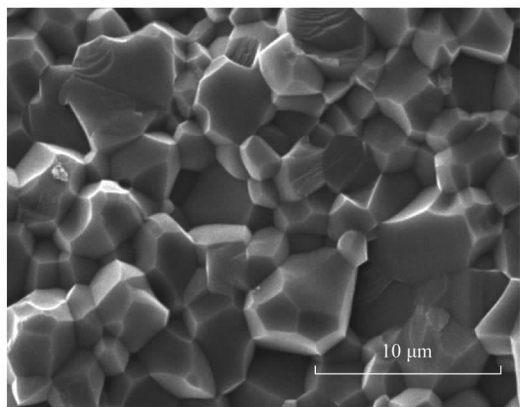
表1 氮化铝陶瓷基本参数

Table 1 Basic characters of AlN ceramic

密度/ (g · cm ⁻³)	热导率/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	介电常数	热膨胀 系数/(°C ⁻¹)
3.29	320	3.6	4.5 × 10 ⁻⁶



(a) 基材表面显微形貌



(b) 基材内部显微形貌

图1 氮化铝陶瓷显微形貌

Figure 1 Micromorphology of aluminum nitride ceramics

实验采用安扬激光股份有限公司生产的FemtoYL-50红外飞秒激光器,最大输出功率50 W,脉宽220 fs,重复频率0.25 ~ 5.00 MHz,波长1 064 nm,光斑直径4 μm。计算机控制软件控制激光器输出激光后,激光束先通过扩束镜,扩充倍率为3.5倍。再通过小孔光阑进入振镜系统,振镜系统基本参数如表2所示。激光束经过振镜系统的调整,作用于基材表面的激光光斑直径为20 μm。

表2 振镜系统基本参数

Table 2 Basic parameters of oscilloscope system

振镜型号	最高扫描速度/ (mm · s ⁻¹)	场镜型号
AGV-10HP	5 000	TSL-1064-50-100Q-D10
场镜视场/(mm × mm)	场镜焦距/mm	
50 × 50	100	

1.2 实验方法

开始正式实验前,先将氮化铝陶瓷基片切割成 20 mm × 10 mm × 0.5 mm 的小型陶瓷片样片,以便于后续的处理。再将样片置于无水乙醇中超声波振动清洗 20 min,并烘干备用,以去除材料表面的污渍。随后将氮化铝陶瓷基片固定在三维工作台的表面,控制振镜系统运动使得激光束的焦点位于基片的上表面。在直冲式加工中,由于激光束与基材之间无相对位移^[18],因此只需通过激光控制软件改变激光加工参数中的重复频率。最终,根据预实验选定激光加工参数中单脉冲能量为 $E_p = 20 \mu\text{J}$ 、脉冲个数 N 为 5 000,即可进行探究激光重复频率对氮化铝陶瓷盲孔尺寸和形貌的影响的相关实验。加工完成后对基材进行清洗、烘干以及镀金处理后,置于场发射扫描显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)中观察其表面形貌并测量盲孔的入口直径尺寸。具体测量方法如图 2(a)所示,测量公式为:

$$D = \frac{\sum_{n=1}^6 d_n}{6} \quad (1)$$

式中: D 为盲孔的孔入口直径平均值, $d_1 \sim d_6$ 为选择盲孔边缘任意位置作为起点的 6 个测量直径。

随后将加工后样片按图 2(b)所示进行侧剖打磨处理,再观测其侧壁形貌并记录相关尺寸。

2 实验结果与分析

图 3 所示为脉冲个数 N 为 5 000 时飞秒激光重复频率对盲孔的孔入口直径和孔深的影响。从图 3(a)中可知在给定脉冲数的情况下盲孔的入口直径随着重复频率的增大呈现出增大至饱和的趋势,且在改变单脉冲能量的加工条件下这种趋势始终存在。当重复频率 $f \leq 0.3 \text{ MHz}$ 时,随着激光重复频率的提升,盲孔的入口直径迅速增长;当 $f > 0.3 \text{ MHz}$ 时,随着激光重复

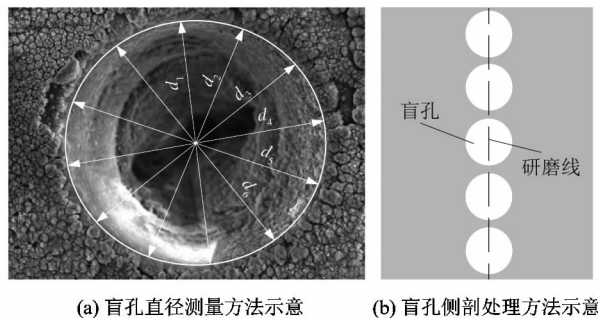
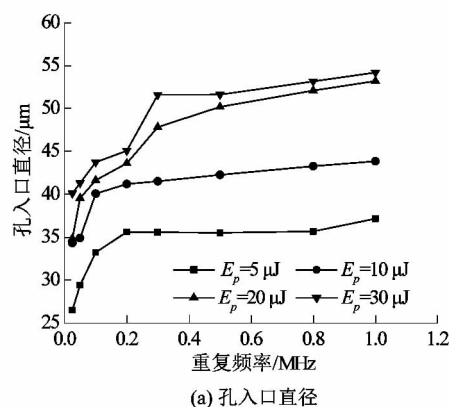


图2 盲孔测量和处理方法

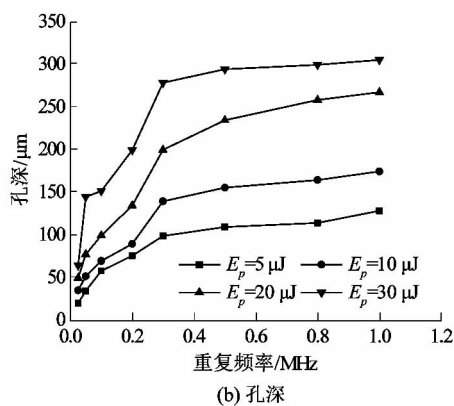
Figure 2 Blind via measurement and handling method

频率的增加,入口直径增长幅度放缓,直至最终饱和。随着激光重复频率的增加,相邻 2 次脉冲的间隔变短,相同时间内作用于基材表面的脉冲个数增多,热量累积程度会有相应提高,加工出的孔径会变大。由于激光器输出的光斑为高斯光斑,受高斯光斑能量分布的影响^[19],盲孔入口直径不会无限制增大。当盲孔的孔口直径增大到一定程度时,激光束的能量就无法直接作用于基材,只能依靠孔口累积的热量与基材相互作用达到继续扩大入口直径的效果。但是,通过累积的热量与基材的作用来增大入口直径的过程相对缓慢^[20],导致了增长曲线趋于平缓以及入口直径饱和的现象。由图 3(b)可知:当 $f \leq 0.3 \text{ MHz}$ 时,盲孔的孔深增长迅速;当 $f > 0.3 \text{ MHz}$ 时,孔深增长幅度放缓直至趋于饱和。增大重复频率,相同时间内进行烧蚀的脉冲数增多,与材料进行有效烧蚀的时间就越长,烧蚀深度就越深。当盲孔到达一定的深度后,激光束只有少量的能量被用于向更深处进行烧蚀,大量的能量被盲孔周围的基材吸收,从而使得盲孔的深度缓慢增长直至最终深度饱和。

图 4 所示为单脉冲能量 $E_p = 20 \mu\text{J}$ 、脉冲个数 N 为 5 000 时的盲孔孔口形貌。从图中可知:随着重复频率的增大,盲孔的孔口直径增大,盲孔的孔形趋于圆形,孔口的熔溅物堆积和孔周围加工碎屑附着现象愈发严重。由于激光器输出激光束的特性,光斑呈现一定程度的椭圆,即使经过扩束镜以及小孔光阑的调整,光斑的形状依旧无法呈现完美的圆形;同时,线偏振激光束在不同偏振方向上能量分布不均匀^[21],并且材料对不同偏振方向上能量吸收程度不同^[22],使得加工出



(a) 孔入口直径



(b) 孔深

图3 重复频率对氮化铝陶瓷盲孔尺寸的影响

Figure 3 Effect of repetition frequency on blind hole size of aluminum nitride ceramic

的盲孔基本呈现椭圆形,如图4(a)所示。随着激光重复频率的增大,能量大量累积,大量的能量一部分用于拓宽孔口,另一部分用于弥补材料因能量吸收不均匀造成的缺陷,盲孔的孔形趋向圆形,如图4(f)所示。但是大量累积的能量在增加盲孔深度的同时,也使得大量的加工后产物喷溅而形成熔溅物堆积在盲孔的孔口周围,形成一圈熔溅物组织;还有部分加工产物受孔口堆积能量的影响,喷溅距离更远,溅射到远离孔口的区域并粘附在基材表面。

图5所示为单脉冲能量 $E_p = 20 \mu\text{J}$ 、脉冲个数 N 为 5 000 时激光重复频率对盲孔侧壁形貌的影响。随着激光重复频率的提高,盲孔的孔深在增大,孔形弯曲程度加大,孔侧壁粗糙程度增大。受激光束特性的影响,当重复频率 $f = 0.05 \text{ MHz}$ 时,孔口能量累积较少,盲孔整体形状主要受激光束的能量分布的影响呈现倒锥形,如图5(a)所示;当重复频率持续增大,孔内能量

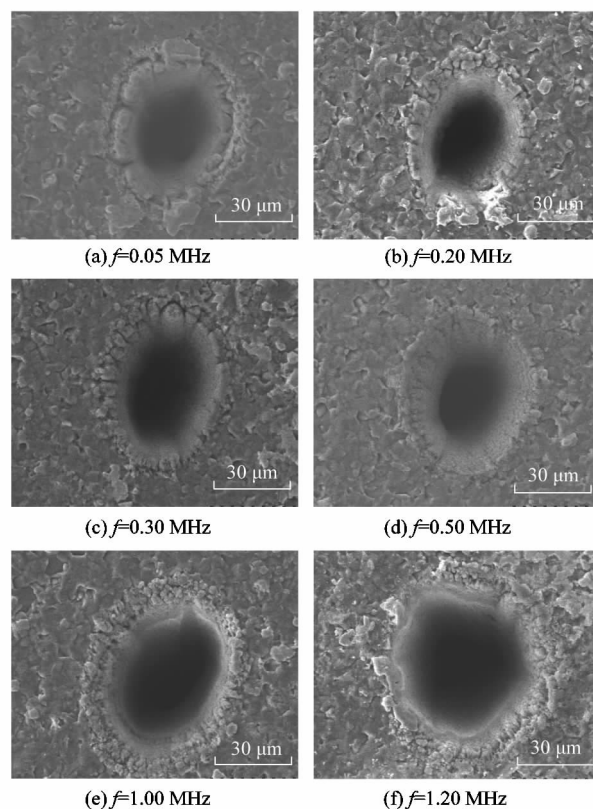


图4 重复频率对孔口形貌的影响

Figure 4 Effect of repetition frequency on orifice morphology

累积程度增大,作为能量累积程度最高的孔口区域,孔口的尺寸大幅度增大,而孔底区域能量累积程度较低,形状主要受激光束特性的影响,因此,孔形逐渐趋向“口大底小”的喇叭状,如图5(b)和(c)所示;随着重复频率的进一步增大,激光束所携带能量也在增大,盲孔的深度进一步增加,累积的热量持续地向盲孔深处传递,不断累积的能量在增加盲孔孔深的同时,还增大了盲孔深处的内径。由图5(d)、(e)和(f)可知:继续提高激光的重复频率,盲孔的弯曲程度虽然有所减轻,但侧壁上出现了大量的松散状大颗粒热组织,这些组织的出现使得盲孔的形貌变得更差。

图6为图5(a)所示的盲孔侧壁形貌局部放大图。由图可知即使重复频率处于一个较低的程度时,盲孔的侧壁依旧会有重铸层的附着和小颗粒的附着组织出现。这说明当激光加工盲孔的深度到达一定程度后,激光与基材相互作用后的产物排出不畅,高温加工产物在孔口处温度骤降,急速冷却形成重铸层组织并附

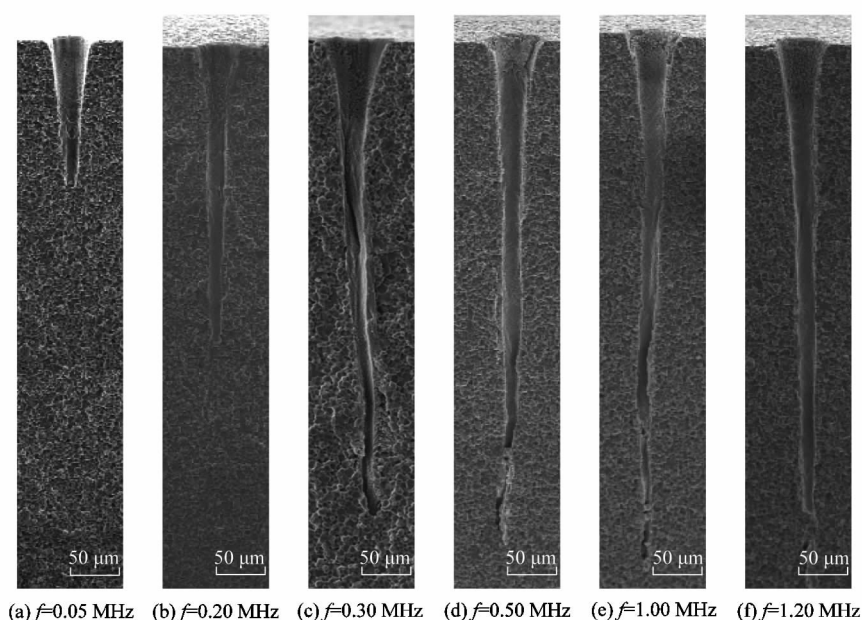
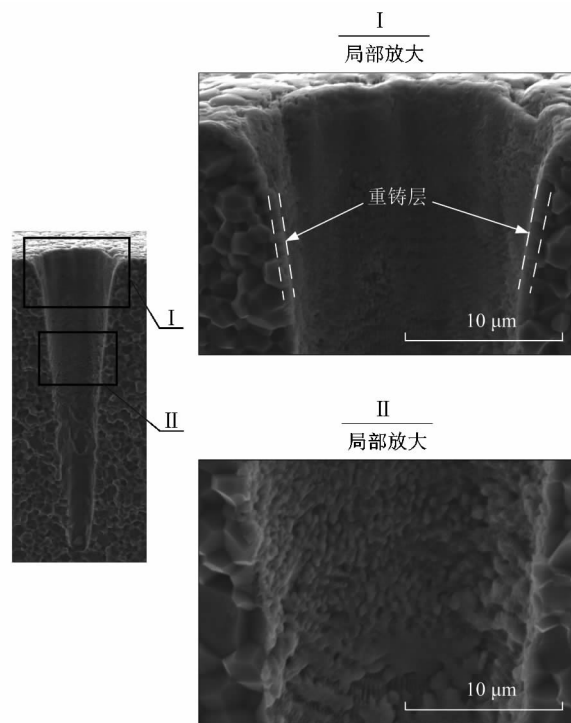


图5 重复频率对盲孔侧壁的影响

Figure 5 Effect of repetition frequency on side wall of blind hole

着于侧壁;而处于盲孔更深处加工产物在较低能量的作用下形成小颗粒状热组织附着于侧壁。也证明了飞秒激光与物质的作用过程较为复杂,材料的去除通常是在不同作用机理的共同作用下去除的,这个复杂的材料去除过程可能受材料属性和加工深度的共同影响。

图7为图5(e)中盲孔的显微形貌放大图,由图可知在高重复频率条件下盲孔的侧壁形貌会变得异常复杂。首先,高重复频率条件下,盲孔的孔口区域会累积大量的能量,这些能量会持续对附着在侧壁的重铸层组织进行加热,使得重铸层组织在吸收大量热量后产生松散的大颗粒过热组织,这种组织结构松散,在热应力的作用下组织破碎,使得盲孔侧壁出现裂纹、崩碎等现象,如图7中I视图所示;随着激光的烧蚀向盲孔更深处传导,激光加工产物受盲孔深度的增加影响排出不畅,只能附着在孔侧壁表面,由于盲孔深处的能量累积程度远低于孔口,此处的重铸层并未吸收过多能量产生如图7中I视图中的松散状大颗粒的过热组织,此处附着的重铸层组织致密且厚度较小,如图7中II视图所示;然而,在盲孔内部累积的能量伴随着激光的持续输入后,会使得一部分加工产物持续地吸收能量,在盲孔内部形成高温等离子气团,激光在进入气团后发生了偏转,使得激光烧蚀路径发生改变,并在盲孔侧

图6 重复频率 $f=0.05$ MHz时盲孔侧壁形貌显微放大Figure 6 Micromagnified view of side wall morphology of blind hole at repetition frequency $f=0.05$ MHz

壁上留下因激光偏转烧蚀而产生的激光加工路径,如图7中Ⅲ视图所示;由于激光的偏转是随机且无序的,

也就造成了图7中Ⅳ视图所示的孔底的孔洞,那就是激光无序偏转形成的激光分叉通道的具体表现。

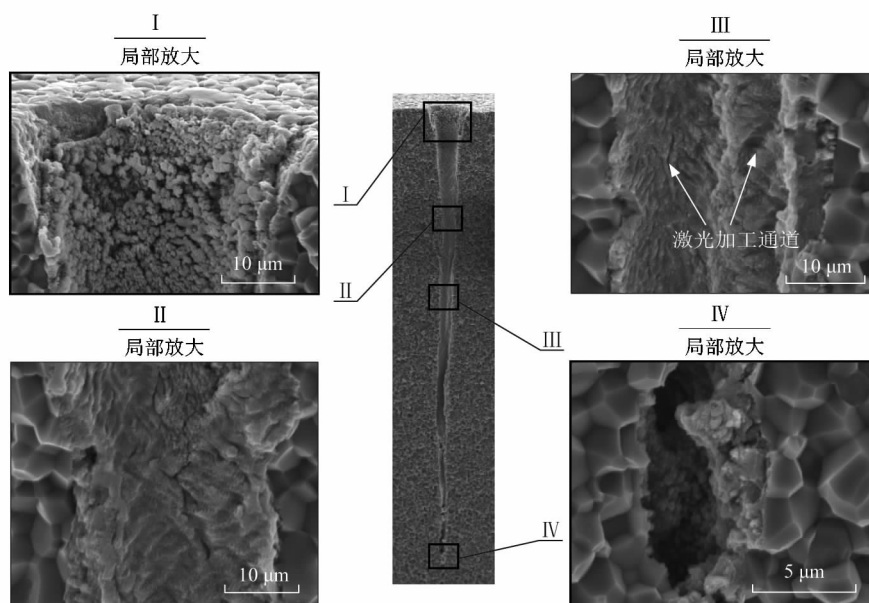


图7 重复频率 $f=1.0$ MHz时盲孔侧壁形貌显微放大

Figure 7 Micromagnified view of side wall morphology of blind hole at repetition frequency $f=1.0$ MHz

3 结语

课题组采用直冲式盲孔加工技术实验研究了重复频率对盲孔尺寸和形貌的影响规律。研究表明:随着重复频率的增大,盲孔的入口直径和孔深均表现出增大的趋势;当重复频率为0.3 MHz左右时,盲孔入口直径和孔深均呈现饱和状态;当重复频率较低时,孔口表面有少量熔溅物堆积,盲孔侧壁有轻微的重铸层附着;随着重复频率的增大,盲孔孔口的熔溅物大量堆积,并且伴随着熔溅物组织的裂纹和崩碎等现象,盲孔侧壁附着的重铸层厚度增大并出现过热组织和裂纹等缺陷,盲孔逐渐弯曲,侧壁出现激光加工通道,孔底出现严重的分叉现象。该试验结果为后续的飞秒激光加工参数影响实验提供了重复频率方面的参考依据,也为直冲式盲孔的加工提供了参考。

参考文献:

- [1] 秦明礼,曲选辉,林建凉.氮化铝陶瓷研究和发展[J].稀有金属材料,2002,31(3):8.
- [2] 李婷婷,彭超群,王日初.电子封装陶瓷基片材料的研究进展[J].中国有色金属学报,2010,20(7):1365.
- [3] 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):114.
- [4] 张勇,张纱,薛文强.可加工陶瓷精密铣磨加工技术研究[J].航天制造技术,2022(3):47.
- [5] 刘军,张清荣,李凤,等.超声磨削陶瓷表面刀痕系统振子的仿真及试验研究[J].机电工程,2021,38(2):177-183.
- [6] 王力,连海山.基于FPGA的绝缘陶瓷电火花加工脉冲电源的研制[J].机床与液压,2021,49(19):89.
- [7] 宋妮妮,林英华,朱卫华,等.不锈钢/陶瓷复合结构激光切割流场仿真模拟[J].机电工程技术,2022,51(3):108-111.
- [8] 左宇辰,马廉洁,付海玲.车削氧化锆工程陶瓷中刀具几何参数对刀具磨损的影响[J].科学技术与工程,2021,21(3):965.
- [9] 黄瑞宁,李毅,刘晓飞.节能型电火花加工脉冲电源的研究[J].中国机械工程,2016,27(18):2520.
- [10] WANG H J, LIN H T, WANG C Y, et al. Laser drilling of structural ceramics: a review [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017,37(4):1157.
- [11] 沈小伟,赵万芹,刘昊栋.蓝宝石飞秒激光直冲孔加工研究[J].轻工机械,2022,40(3):85.
- [12] 王海龙,李铁,王宏建. AlN 陶瓷的飞秒激光表面加工及制孔应用[J].半导体光电,2021,42(5):668.
- [13] 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,2019:126.

- [14] LIU C, ZHANG X Z, GAO L, et al. Feasibility of micro-hole machining in fiber laser trepan drilling of 2.5D C/SiC composite: Experimental investigation and optimization[J]. *Optik*, 2021, 242: 168.
- [15] KANNAN V S, LENIN K, KUMAR J S. A parametric study on laser square hole machining of AA7475/SiC/ZrSiO composites [J]. *Materialstoday:PROCEEDINGS*, 2022, 68(5):1375.
- [16] MISHRA S, YADAVA V. Modeling and optimization of laser beam percussion drilling of thin aluminum sheet [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 48:462.
- [17] WANG W, SONG H, LIAO K, et al. Water-assisted femtosecond laser drilling of 4H-SiC to eliminate cracks and surface material shedding [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 112:554.
- [18] 刘璇,宋立军. 飞秒激光叩击式微孔加工的实验研究[J]. *应用激光*, 2019, 39(6):981.
- [19] 张希,王德亮,韩晶. 激光光斑的高斯曲面拟合应用[J]. *科技传播*, 2019, 11(4):173.
- [20] CHA D, AXINTE D. Transient thermal model of nanosecond pulsed laser ablation: effect of heat accumulation during processing of semi-transparent ceramics [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 173:121227.
- [21] 吴贺贺,罗莎. 激光光斑成形技术专利趋势分析[J]. *中国科技信息*, 2022, 12:33-35.
- [22] WANG R J, DONG X, WANG K D, et al. Polarization effect on hole evolution and periodic microstructures in femtosecond laser drilling of thermal barrier coated superalloys [J]. *Applied Surface Science*, 2021, 537:148001.

(上接第13页)

- [47] YANG Y, ZHANG H, LIN Z H, et al. Human skin based triboelectric nanogenerators for harvesting biomechanical energy and as self-powered active tactile sensor system[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(10):9213-9222.
- [48] LAI Y C, DENG J A, NIU S M, et al. Electric eel-skin-inspired mechanically durable and super-stretchable Nanogenerator for deformable power source and fully autonomous conformable electronic-skin applications [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(45):10024-10032.
- [49] HE X, ZI Y L, GUO H Y, et al. A highly stretchable fiber-Based triboelectric nanogenerator for self-powered wearable electronics[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(4):1604378. 1-1604378.8.
- [50] HE X, ZOU H Y, GENG Z S, et al. A hierarchically nanostructured cellulose fiber-based triboelectric nanogenerator for self-powered healthcare products [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(45):1805540.
- [51] FAN W J, HE Q, MENG K Y, et al. Machine-knitted washable sensor array textile for precise epidermal physiological signal monitoring[J]. *Science Advances*, 2020, 6(11):eaay2840.

(上接第20页)

参考文献:

- [1] ISLEROGLU H, KEMERLI T, ÖZDESTAN Ö, et al. Effect of oven cooking method on formation of heterocyclic amines and quality characteristics of chicken patties: steam-assisted hybrid oven versus convection ovens[J]. *Poultry Science*, 2014, 93(9):2296-2303.
- [2] 贾泽宇,刘远晓,卞科,等. 过热蒸气对谷物淀粉结构及理化特性影响的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 48(12):288-293.
- [3] BAN C, LEE D H, JO Y, et al. Use of superheated steam to inactivate *Salmonella enterica* serovars typhimurium and Enteritidis contamination on black peppercorns, pecans, and almonds [J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 222:284-291.
- [4] MA Y S, XU D, SANG S Y, et al. Effect of superheated steam treatment on the structural and digestible properties of wheat flour [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112:106362.
- [5] FRAILE P, BURG P. Reheating of a chilled dish of mashed potatoes in a superheated steam oven[J]. *Journal of Food Engineering*, 1997, 33(1/2):57-80.
- [6] 黄宜坤,张会生. 蒸气辅助烤箱内蒸气行为与温度分布研究[J]. *食品工业*, 2015, 36(10):256-261.
- [7] MISTRY H, GANAPATHISUBBU S, DEY S, et al. A methodology to model flow-thermals inside a domestic gas oven[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(1):103-111.
- [8] 李海运,张凯,黄加禹. 基于数值模拟的烤箱控制风量研究及性能优化[J]. *食品与机械*, 2020, 36(7):92-96.
- [9] 顾思源,刘东,项琳琳. 影响烤箱内腔温度场均匀性的关键因素分析[J]. *建筑热能通风空调*, 2015, 34(2):54-58.
- [10] 袁宏. 强制对流烤箱流动与结构优化[D]. 浙江大学, 2018:5-65.