

[新材料·新设备·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.06.012

液体辅助氮化铝陶瓷飞秒激光直冲式盲孔加工

王宁¹, 马盼^{1*}, 王旭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工程国家重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:为探究采用液体辅助加工技术提高飞秒激光直冲式盲孔加工质量的可行性,课题组设计了一种液体辅助激光加工装置。选择纯水、质量分数为75%的乙醇溶液以及盐酸乙醇混合溶液作为辅助液体用于激光加工,在激光加工参数重复频率为0.3 MHz、单脉冲能量为20 μ J、脉冲数为250~20 000时,探究了不同液体辅助加工条件下盲孔尺寸和盲孔的孔口、侧壁形貌变化规律,并分析了相关形貌和缺陷的产生原因和机理。结果表明:在盐酸乙醇混合溶液中进行直冲式盲孔加工,加工出的盲孔孔形相对规整,孔口和侧壁的形貌质量较高。液体辅助激光加工是提高氮化铝陶瓷飞秒激光直冲式盲孔加工质量的一种有效方法。

关键词:激光加工;氮化铝陶瓷;盲孔;液体辅助

中图分类号:TN249;TH161

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2023)06-0082-05

Liquid-Assisted Aluminium Nitride Ceramics Femtosecond Laser Direct-Punch Blind Hole Processing

WANG Ning¹, MA Pan^{1*}, WANG Xu¹, 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 110034, China;

3. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

Abstract: To investigate the feasibility of using liquid-assisted processing technology to improve the quality of femtosecond laser direct punching blind hole, a liquid-assisted laser processing device was designed. Pure water, an ethanol solution with a mass fraction of 75% and a hydrochloric acid-ethanol mixture were selected as auxiliary fluids for liquid-assisted laser processing. The changes rules in blind hole size and the morphology of blind hole openings and sidewalls under different liquid assisted processing conditions were investigated, when the laser processing parameters were repetition frequency of 0.3 MHz and single pulse energy of 20 μ J and the pulses of 250 to 20 000. And the causes and mechanisms of related morphologies and defects were analyzed. The results show that direct punching of blind hole in a mixture of hydrochloric acid and ethanol results in relatively well-processed blind holes with high quality orifices and sidewalls. Liquid-assisted laser processing is an effective method for improving the quality of femtosecond laser direct-punch blind hole in aluminium nitride ceramics.

Keywords: laser processing; aluminum nitride ceramics; blind hole; liquid assist

氮化铝陶瓷是一种性能优异的陶瓷材料,具有硬度高、禁带宽度大、热导率高以及电阻率高等优点,目前已经成为微电子器件制造等领域的理想材料,广泛

应用于航空航天、5G通信和大功率半导体等领域^[1-3]。高密度的微孔阵列是微电子器件的核心结构之一,其提供了高密度的内部电路互连。氮化铝陶瓷基板的微

收稿日期:2023-03-08;修回日期:2023-07-23

基金项目:国家自然科学基金(52105465)。

第一作者简介:王宁(1997),男,江苏徐州人,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.edu.cn

孔加工质量对微电子器件的性能起到重要的作用^[4-5]。氮化铝陶瓷是一种典型的硬脆材料,目前主要有机械加工、化学刻蚀和等离子体加工等方法^[6-7]。机械加工使用的微型钻头极易造成陶瓷基板的断裂,化学刻蚀和等离子体加工等特殊加工方式存在加工设备复杂和加工效率低等问题^[8]。随着激光技术的进步,飞秒激光因其热效应低、精度高、非接触加工和加工路径可控等优点成为氮化铝陶瓷硬脆材料打孔的优良工具^[9-10]。激光打孔是将极高能量密度的激光聚焦在陶瓷材料表面,以烧蚀的方式去除材料,然而加工出的盲孔会存在诸如熔溅物堆积、重铸层附着、孔弯曲以及孔底分叉等缺陷^[11]。相比于空气环境下的激光烧蚀,液体环境中的激光加工因其产生液体冲击等效应具有潜在优势^[12-14]。实验在优化后的盲孔激光加工参数基础上,通过引入液体辅助加工技术探究提高飞秒激光直冲式盲孔加工质量的可行性。

1 实验材料和装置

1.1 实验材料

氮化铝陶瓷是一种灰白色的硬脆陶瓷材料,实验中使用的是由氮化铝粉末烧制而成,其相关参数如下:厚度约为 0.5 mm,密度为 3.29 g/cm³,热导率为 320 W/(m·K),热膨胀系数为 4.5 × 10⁻⁶ °C⁻¹,介电常数为 3.6。

1.2 实验装置和检测方法

实验使用的飞秒激光直写系统主要由飞秒激光、光束调制系统和三维运动系统组成。红外飞秒激光器的主要参数为:波长为 1 035 nm,重复频率为 0.25 ~ 5.00 MHz,脉冲宽度为 327 fs,最大功率为 50 W,最大脉冲能量为 100 μJ,激光光束质量为 $M^2 < 1.3$,原始光斑直径为 2.8 mm × 2.5 mm,偏振模式为线偏振。光束调制系统的主要组成器件有 45°全反射镜、1~8 倍可变扩束镜、振镜和场镜(焦距为 100 mm)。二维高速扫描振镜通过高速伺服控制系统实现激光二维扫描控制,控制精度可达到纳米级。通过光束调制系统可以将激光光束传导聚焦至加工表面,获得直径约为 20 μm 的光斑。三维运动平台的行程为 200 mm,精度为 0.005 mm,通过该三维机械运动平台系统可以精准实现振镜和平台的三维运动。

由于所使用的激光为红外飞秒激光,辅助加工液体对红外激光的吸收程度较高,故液层的厚度需要控制在相对较小的范围之内。考虑到较小厚度的液层控制难度较高,故需要单独的辅助加工系统对液层厚度进行控制,液体辅助加工系统如图 1 所示。该系统主要由有机玻璃和蓝宝石玻璃制成,二者光滑且平整的表面可以尽可能的减小因容器表面不平整带来的系统误差。容器上盖由蓝宝石玻璃制作而成,容器中间预留空窗以便激光束进行加工。同时,严格控制氮化铝陶瓷的加工上表面到蓝宝石玻璃的距离,该距离即为液层的最终厚度。液体会吸收部分激光能量,如果液层厚度过大,激光能量将会被液体完全吸收从而不会对氮化铝陶瓷形成有效烧蚀。在实验中发现,0.3 mm 厚度的液层在保证了对激光加工起到辅助作用的同时还能尽可能的降低对激光能量的吸收。因此,在后续的加工过程中液层厚度控制在 0.3 mm 左右。

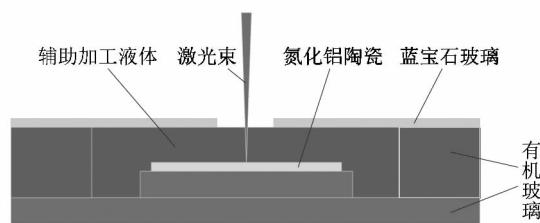


图 1 液体辅助加工系统

Figure 1 Liquid auxiliary processing system

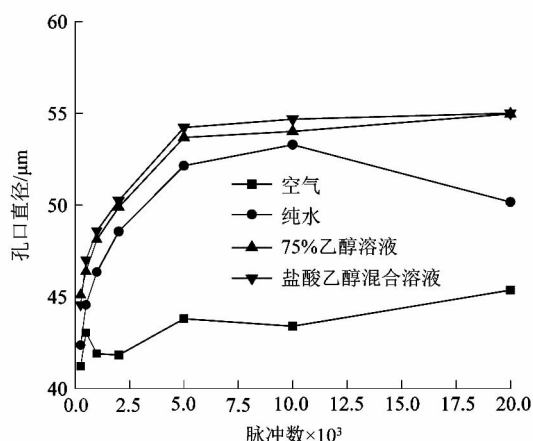
为防止被激光加工后表面产生的杂质影响,对加工后的表面依次使用无水乙醇和去离子水进行超声清洗并烘干备用。采用扫描电子显微镜 HITACHI S-3000H 表征加工微孔的结构尺寸和形貌。

2 实验结果和讨论

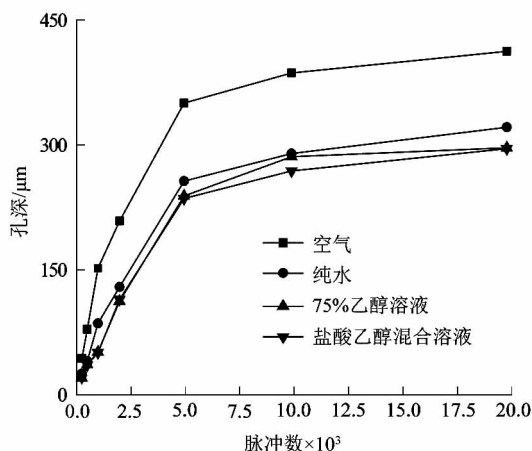
在预实验中发现当激光直冲式盲孔加工在重复频率 f 为 0.3 MHz、单脉冲能量 E_p 为 20 μJ 和脉冲数 N 为 250 ~ 20 000 时,盲孔加工质量相对较高,因此后续实验在此参数区间内进行。1 组陶瓷在空气中直接加工作为对照组,另外 3 组陶瓷分别选择纯水、质量分数为 75% 的乙醇溶液(下称“75% 乙醇溶液”)以及盐酸乙醇混合溶液辅助激光加工。其中,盐酸乙醇混合溶液由 75% 乙醇溶液和 1 mol/L 的盐酸溶液按照质量比 3:1 混合而成。

2.1 不同加工环境对盲孔尺寸的影响

图2所示为不同加工环境对飞秒激光氮化铝陶瓷直冲式盲孔加工的影响。



(a) 不同加工环境对孔口直径的影响



(b) 不同加工环境对孔深的影响

图2 不同加工环境对盲孔尺寸的影响

Figure 2 Influence of different processing environments on size of direct-punch blind hole

图2中分别展示了在相同加工参数下,分别在空气、纯水、75%乙醇溶液以及盐酸乙醇混合溶液中的不同脉冲数下盲孔的孔口直径和孔深。由图2(a)可知在液体辅助的加工环境下的盲孔孔口直径普遍大于在空气中直接加工的盲孔;盲孔孔口直径随着脉冲数的增大而增大,当直径增大至一定值后,再增大脉冲数,孔口直径增大速率明显降低,直至孔口直径不再增大,即孔口直径趋于定值。在液体环境的辅助作用下,阻碍激光加工的因素均得到不同程度的抑制,液体的加工环境和其自带的冷却作用会进一步抑制高温等离子

体对激光加工的影响,从而使更多的激光能量被直接作用于孔口,孔口直径变大。由于盐酸乙醇混合溶液在成分上相较于75%乙醇溶液仅多了起辅助作用且不与基材相互反应的盐酸溶液,同时乙醇溶液对大气泡的抑制作用依旧存在,故2种环境下加工出的盲孔孔口直径在变化规律方面高度相似。

不同的加工环境不仅影响孔口直径,还影响盲孔深度。图2(b)所示为不同加工环境对盲孔孔深的影响。由图可知在不同的加工环境下,盲孔的孔深均随着脉冲数的增大而增大,直至孔深增大速率减慢,孔深趋于定值。在液体辅助加工的条件下,激光穿透液体时会有部分激光能量被液体吸收,从而使得作用在氮化铝陶瓷表面的能量有所减少,降低了盲孔的深度。由于乙醇易挥发的特点,在75%乙醇溶液和盐酸乙醇混合溶液中,除去部分激光能量被液体本身吸收,还会有部分能量被乙醇吸收用于乙醇的形态变化,故在该环境下加工的盲孔孔深相比于纯水中更小。

在液体辅助加工环境下,盲孔尺寸随着脉冲数的增大而增大,且在脉冲数为5 000时趋于定值。与空气中加工的盲孔相比,虽然在具体的尺寸上有所变化,但是整体的变化趋势并未受到加工环境的影响。

2.2 不同加工环境对盲孔孔口形貌的影响

在重复频率 f 为0.3 MHz,单脉冲能量 E_p 为20 μJ 的加工条件下,改变脉冲数 N 并分别在不同的环境下进行飞秒激光直冲式盲孔加工,盲孔的孔口形貌如图3所示。在脉冲数 N 为1 000时,盲孔普遍呈现椭圆形,孔内壁几乎都存在致密组织,但是在液体辅助环境中的盲孔的孔口区域无熔溅物堆积。由于脉冲数较低,激光与液体作用时间短,盲孔加工过程中产生的微气泡数量较少。因此,气泡对盲孔加工的辅助作用有限,液体只显示了最基本的冷却作用,所以孔内壁几乎都有致密组织,盲孔质量较差。当脉冲数 N 增大至20 000时,在空气中直接加工的盲孔呈现椭圆形,孔口周围熔溅物堆积明显,孔周围有明显的加工碎片附着,盲孔的加工质量较差。在盐酸乙醇混合溶液中加工的盲孔趋于圆形,孔口无熔溅物堆积,内壁无明显重铸层组织附着,加工质量较高。当脉冲数较高时,激光与液体的作用时间延长,产生的微气泡数量增多,微气泡的

辅助作用持续时间增长,可以及时去除加工熔溅物。同时,较长的加工时间,使得激光在液体中发生了自聚焦现象,从而使得盲孔得到了一定的孔形修正,最终使得盲孔在孔口直径增大的同时趋于圆形。

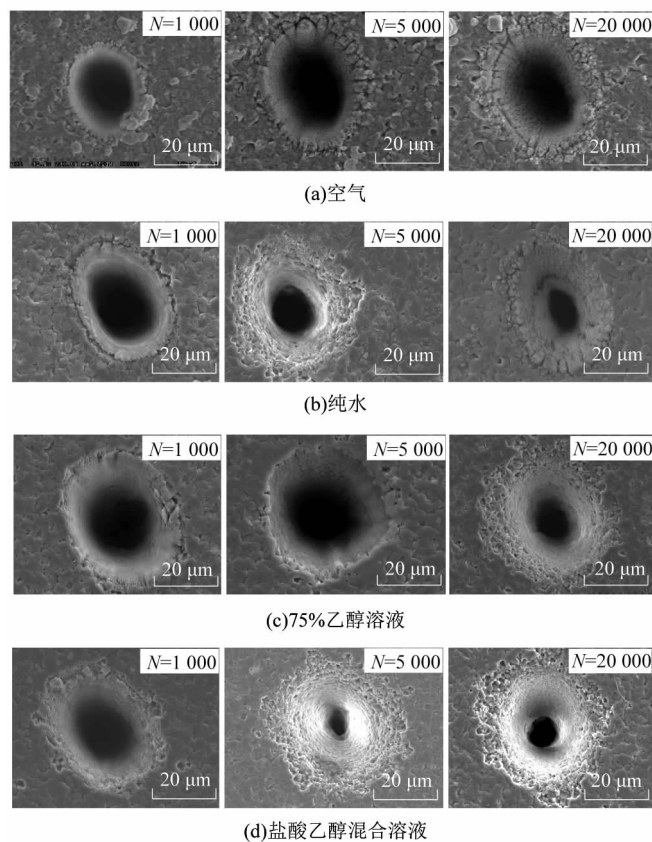


图3 不同加工环境对盲孔孔口形貌的影响

Figure 3 Influence of different processing environments on orifices morphology of blind hole

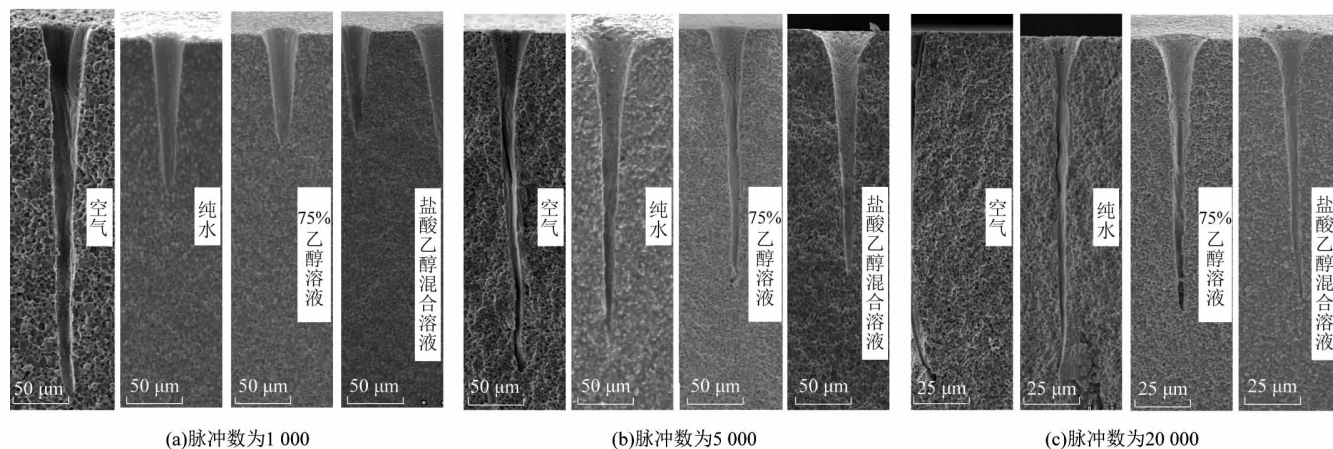


图4 不同加工环境对盲孔侧壁形貌的影响

Figure 4 Effects of different machining environments on blind hole sidewall morphology

2.3 不同加工环境对盲孔侧壁形貌的影响

图4所示为脉冲数 N 为1 000,5 000以及20 000的加工条件下盲孔的侧壁形貌图。当脉冲数 N 为1 000时,空气中加工的盲孔深度最大,侧壁上有轻微的重铸层组织附着和明显的组织分层,并伴随着孔底轻微的弯曲现象。这是因为即使在脉冲数较低时,只要盲孔的深度到达一定程度,孔内能量的不均匀分布就会使得孔壁各处的组织晶粒生长程度不一,造成组织分区。在液体环境中加工时,由于液体能吸收激光及激光能量,使得作用在氮化铝陶瓷上的激光能量大大减少,最终导致盲孔孔深减小。由于液体的冷却作用,盲孔侧壁几乎没有明显的组织分层现象出现。当脉冲数 N 为5 000时,空气中加工的盲孔出现了明显的弯曲现象,孔侧壁上还出现了明显的重铸层附着、组织分层以及激光加工通道等缺陷;而在液体中加工的盲孔几乎没有出现弯曲现象,孔侧壁也几乎无明显的组织分层等缺陷。当脉冲数 N 为20 000时,在空气和纯水环境下加工的盲孔质量极差,出现了孔形弯曲、孔底分叉、重铸层附着以及组织分区等缺陷;而在75%乙醇溶液和盐酸乙醇混合溶液中加工的盲孔几乎观测不到明显的弯曲,孔口区域几乎无明显的组织附着,侧壁也无明显组织分区。

综上可得:在加工质量方面,75%乙醇溶液和盐酸乙醇混合溶液辅助加工的盲孔具有孔形趋于圆形、孔口无熔溅物堆积、侧壁无重铸层附着、内壁无组织分区以及孔底无分叉等优势,相较于在空气中和纯水中加

工的盲孔质量更为优秀;在加工效率方面,受到所使用的激光种类的影响,液体辅助加工中液层的厚度难以精准控制,溶液种类和配比的选择较为麻烦,加工后的液体需要经常更换以保证成分比例的精准,影响加工效率,因此在空气中加工效率更高。

3 结语

为改善飞秒激光直冲式盲孔加工的质量,课题组进行了3种液体辅助激光加工技术的实验。通过实验研究得到以下结果:

1) 在盲孔尺寸方面,由于辅助液体吸收激光能量等因素的影响,导致了在液体环境与在空气中加工的盲孔尺寸有所变化,但是其整体的变化趋势并未受到加工环境的影响。

2) 在盲孔形貌方面,在液体环境中加工的盲孔比在空气中加工的盲孔孔口形状更趋于圆形,孔口和侧壁的形貌质量较高,尤其在盐酸乙醇混合溶液中效果更佳。

实验表明液体辅助激光加工可以改善氮化铝陶瓷盲孔的加工质量,具有一定的应用价值,未来可以在液体种类和液层厚度控制等方面继续探索,以优化液体辅助激光盲孔加工技术。

参考文献:

- [1] QIN M L, LU H F, WU H Y, et al. Powder injection molding of complex-shaped aluminium nitride ceramic with high thermal conductivity[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(4): 952 – 956.
- [2] SINGH M, WIEDEMEIER H. High temperature thermal and environmental stabilities of boron nitride, aluminium nitride and silicon nitride ceramics[J]. *Materials at High Temperatures*, 1991, 9(3): 139 – 144.
- [3] ANSARI A. Single crystalline scandium aluminum nitride: an emerging material for 5G acoustic filters [C]//2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS). Guangzhou: IEEE, 2019: 1 – 3.
- [4] HICKMAN A L, CHAUDHURI R, BADER S J, et al. Next generation electronics on the ultrawide-bandgap aluminum nitride platform[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2021, 36(4): 044001.
- [5] LIU L J, YANG Z T, Ren Z. Research on the design and fabrication of aluminum nitride microwave multilayer xeramic package [C]//2021 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC). Shanghai: IEEE, 2021: 1 – 2.
- [6] 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): 187.
- [7] 冯广智, 叶言明, 沈华明, 等. 激光微钻孔技术综述[J]. *机电工程技术*, 2021, 50(12): 289 – 293.
- [8] 姜海涛, 杨子轩, 赵万芹, 等. 氧化铝陶瓷基板紫外纳秒激光打孔工艺研究[J]. *电子机械工程*, 2020, 36(4): 36 – 41.
- [9] 马国庆, 肖强. 飞秒激光微孔加工发展综述[J]. *激光与红外*, 2020, 50(6): 651 – 657.
- [10] 姜长城, 袁建东, 成海东, 等. 热辅助纳秒脉冲激光抛光试验研究[J]. *机电工程*, 2021, 38(5): 617 – 622.
- [11] 赵万芹, 梅雪松, 杨子轩. 激光加工电子陶瓷基板孔的形貌特征及其工艺调控综述[J]. *中国激光*, 2022, 49(10): 29 – 57.
- [12] SUN X Y, YU J L, HU Y W, et al. Study on ablation threshold of fused silica by liquid-assisted femtosecond laser processing [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(33): 9027 – 9032.
- [13] YUAN H, CHEN Z, WU P, et al. Prediction model for liquid-assisted femtosecond laser micro milling of quartz without taper [J]. *Micromachines*, 2022, 13(9): 1398.
- [14] GUO Y, QIU P, XU S L, et al. Laser-induced microjet-assisted ablation for high-quality microfabrication [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2022, 4(3): 122 – 130.