材料、结构与工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021101904

飞秒激光能量密度对 SiC 陶瓷微孔加工的影响

王宏建[1*]，杨　涛[1]，吴小雪[1,2]，廖润钱[1]，邓辅秦[3,4]

（1. 松山湖材料实验室，广东 东莞 523808；2. 广州大学 物理与材料科学学院，广州 510006；
3. 五邑大学 智能制造学部，广东 江门 529030；4. 深圳市人工智能与机器人研究院，广东 深圳 518129）

摘　要： 采用飞秒激光对 SiC 陶瓷进行螺旋微孔加工实验，研究了能量密度对材料微孔加工形貌及孔形的影响，分析了微孔孔径、圆度及锥度随激光加工工艺参数的变化规律。实验结果表明，相比于微孔出口而言，微孔入口受能量密度的影响较小，更高的能量密度有利于提高微孔的加工质量。该研究获得了孔径小于 250 μm、圆度大于 0.95、锥度小于 1°的近圆柱 SiC 陶瓷微孔。对加工区域进行检测，发现材料表面存在一定程度的氧化现象，分析了位于不同加工区域元素含量变化的原因。

关键词： 飞秒激光；能量密度；SiC；螺旋制孔

中图分类号： TN249　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0864－04

Effect of Femtosecond Laser Energy Density on Drilling of SiC Ceramic

WANG Hongjian[1], YANG Tao[1], WU Xiaoxue[1,2], LIAO Runqian[1], DENG Fuqin[3,4]

(1. Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, CHN;
2. School of Physics and Materials Science, Guangzhou University, Guangzhou 510006, CHN;
3. School of Intelligent Manufacturing, Wuyi University, Jiangmen 529030, CHN;
4. Shenzhen Institute of Artificial Intelligence and Robotics for Society, Shenzhen 518129, CHN)

Abstract: Helical drilling experiments of SiC ceramic were carried out by femtosecond laser. The effects of energy density on the processing morphology and shape of micro-hole in material were studied. The laws of variation of diameter, circularity and taper of micro-hole with laser machining parameters were analyzed. The experimental results show that micro-hole at entrance is less affected by energy density in comparison with that at exit. Higher energy density is conducive to improve the processing quality of micro-hole. Near cylindrical micro-hole of SiC ceramic with the diameter less than 250 μm, the circularity more than 0.95 and the taper less than 1° was obtained. It was found that a certain degree of oxidation existed on the surface of material by detecting the machining zone. The reasons for elemental contents change in different processing areas were analyzed.

Key words: femtosecond laser; energy density; SiC; helical drilling

0　引言

作为重要的结构材料，SiC 陶瓷因具有高硬度、高强度、良好的耐高温性与耐腐蚀性等优异性能，广泛应用于功率器件、射流喷嘴、加工刀具等工业领域[1-3]。就当今高速发展的半导体行业而言，微孔加工技术尤为重要，在一定程度上直接决定了功率器件的性能[4]。然而，SiC 陶瓷的硬脆特性使得传统机械加工方式难度较大，不仅易造成材料崩边，且易磨损工具，加工成本高且效率低[5-6]。激光加工技术

收稿日期：2021－10－19.

基金项目：广东省基础与应用基础研究基金项目(2020A1515111183)；广东省教育厅重点领域专项项目(2019KZDZX1025)；深圳市人工智能与机器人研究院重点探索型科研项目(AC01202101026).

* **通信作者：**王宏建

的出现为硬脆材料的微孔加工难题提供了新的解决思路[7]。

飞秒激光超短的脉冲宽度与极高的峰值功率，可大幅降低加工时产生的不利热影响，是获得高质量陶瓷微孔的理想方法[8]。微孔加工过程中形成的熔渣会在一定程度上阻碍激光能量的传输，增大了深孔的加工难度。通过逐层进给激光聚焦平面，即螺旋微孔加工，可有效改善这一现象。将此种加工方式与飞秒激光相结合，已成功运用于 Al_2O_3[9]，TiC[10]及玻璃[11]等硬脆材料的微孔加工，但对于 SiC 陶瓷的相关研究较为欠缺。

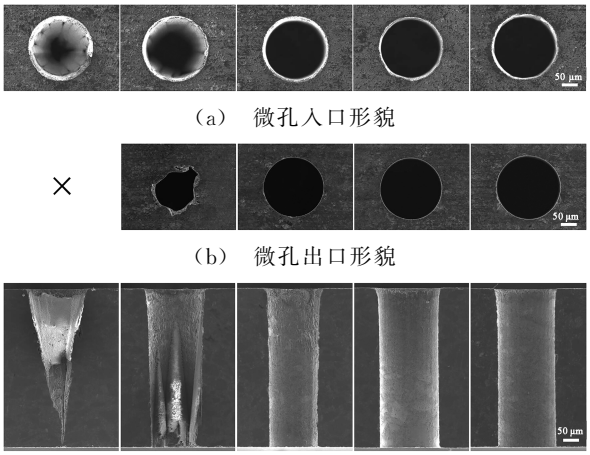
本文采用螺旋微孔加工，研究了飞秒激光能量密度对 SiC 陶瓷微孔形貌的影响及孔形尺寸的变化规律，分析了微孔加工过程中材料发生的物化反应及组分的变化趋势，为获得高精度陶瓷微孔提供了加工工艺参考。

1　实验

以商用 0.5 mm 厚度的 SiC 陶瓷为加工对象，采用波长为 1 030 nm、脉宽为 223 fs 的飞秒激光(Pharos-PH1，Light Conversion，Lithuania)进行螺旋微孔加工实验。激光聚焦于材料表面，聚焦光斑直径为 20 μm。将 SiC 陶瓷沿微孔加工深度方向均匀划分为 30 层，激光在各加工进给层的扫描圈数为 15 r、扫描速度为 2 400 r/m。设定激光重复频率为 80 kHz、同轴压缩空气压强为 0.4 MPa，采用不同的激光能量密度加工，每组实验参数重复 5 次。加工完成后，将 SiC 陶瓷置于无水乙醇中超声清洗 30 min。采用扫描电子显微镜(JSM-IT500，Jeol，Japan)观察微孔加工形貌，光学显微镜(FJ-5A，Finial，China)测量微孔孔形，材料组分由集成于扫描电子显微镜上的能谱仪检测。

2　SiC 陶瓷微孔加工形貌

如图 1 所示为 SiC 陶瓷在不同能量密度下加工的微孔入口、出口及截面形貌，从左至右依次为 7.25，14.29，21.18，28.11 及 34.99 J/cm^2。显然，能量密度对 SiC 陶瓷微孔形貌变化影响显著，是影响加工质量的重要工艺参数。由图 1(a)可知，随着能量密度的增大，从 SiC 陶瓷微孔入口方向观察，材料的去除量逐渐增大，这在能量密度较低时更为明显。同样的情况也体现在微孔出口形貌的变化上，如图 1(b)所示。当能量密度为较低的 7.25 J/cm^2 时，激光无法击穿材料；当能量密度增大至 14.29 J/cm^2 时，激光虽然可以击穿材料，但孔形不规则；当能量密度进一步增大至 21.18～34.99 J/cm^2 范围时，微孔出口呈现出规则的圆形。结合 SiC 陶瓷微孔截面形貌的变化，如图 1(c)所示，可以更清晰地反映能量密度对微孔加工质量的影响。较低的能量密度虽然可以在一定程度上去除材料，但随着微孔加工深度的增加，产生的大量熔渣使得激光难以与未加工材料直接作用，导致微孔加工质量不理想。增大能量密度不仅可以提高微孔加工深度，而且能够逐渐消除微孔锥度，获得近圆柱形的 SiC 陶瓷微孔。



(a)　微孔入口形貌

×

(b)　微孔出口形貌

(c)　微孔截面形貌

图 1　SiC 陶瓷在不同能量密度下加工的微孔形貌

3　SiC 陶瓷微孔加工孔形

3.1　微孔孔径的变化规律

图 2 所示为 SiC 陶瓷微孔孔径随能量密度的变化规律。显然，材料微孔入口及出口孔径展现出了完全不同的变化趋势。随着能量密度的增大，微孔入口孔径的变化不大，较为平稳。相比之下，微孔出口孔径明显增大。由于激光是从 SiC 陶瓷表面向微孔深度方向逐层进给加工，随着进给层数的增多，材料向微孔入口方向喷射的去除物也将增多，这不仅降低了作用到未加工区域的激光能量，还会阻碍其传递。材料未来得及去除，将造成激光聚焦平面位于实际加工位置的下方，影响了 SiC 陶瓷微孔的进一步加工。因此，当能量密度较低时，微孔出口无法被击穿。当增大能量密度时，可在一定程度上弥补因熔渣喷射、孔壁反射、等离子体形成等因素造成的能量损耗[12-13]，更有利于增大微孔加工的深度，进而将 SiC 陶瓷击穿。此时，微孔出口加工将更加充分，

故孔径增大。

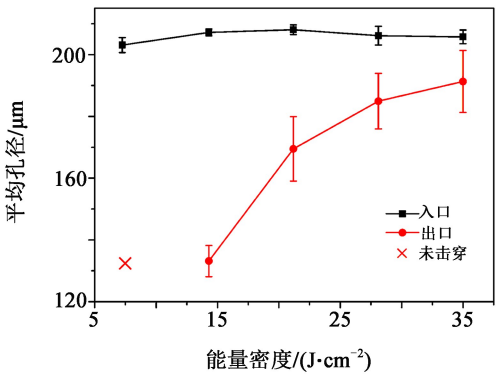


图 2 SiC 陶瓷微孔孔径随能量密度的变化规律

3.2 微孔圆度的变化规律

图 3 所示为 SiC 陶瓷微孔圆度随能量密度的变化规律。可以看到，材料微孔入口圆度的变化范围较小，但微孔出口圆度随能量密度的增大而显著增大，最终保持稳定。为提高微孔的圆度，需在击穿 SiC 陶瓷的前提下，同时将激光扫描轮廓内的材料去除，使得微孔实际加工路径与理想加工路径一致。考虑到在螺旋微孔加工过程中，激光在各加工进给层以固定的扫描圈数加工，增大能量密度可增大微孔边缘的材料去除量，最终获得高圆度的圆孔[14]。所以，更高的能量密度可在确保实现 SiC 陶瓷通孔加工的前提下，对微孔出口轮廓进行更为充分地扫描，提高微孔出口圆度。然而，激光是以微孔入口为起点，再逐层向深度方向进给的，高能量密度将在一定程度上造成微孔边缘轮廓的过度加工，这反而会降低微孔入口圆度。尽管如此，由于此时激光的加工平面已位于微孔底部，对微孔入口的影响较弱，所以其圆度变化较小，仍稳定在 0.95 以上。

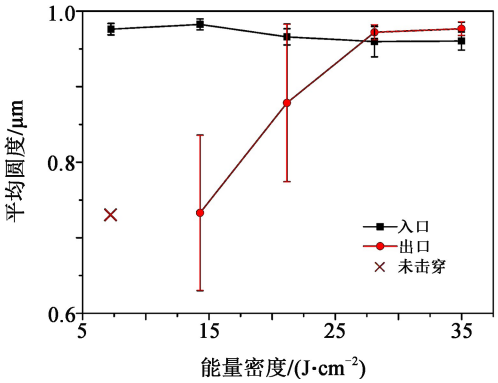


图 3 SiC 陶瓷微孔圆度随能量密度的变化规律

3.3 微孔锥度的变化规律

图 4 所示为 SiC 陶瓷微孔锥度随能量密度的变化规律。当材料厚度一定时，微孔锥度由入口、出口孔径决定。根据对 SiC 陶瓷微孔孔径的变化规律分析可知，微孔入口及出口孔径在高能量密度下更为接近，直接缩小了两者之间的差值，故降低了微孔锥度。可以看到，本实验在 34.99 J/cm^2 的能量密度下，获得了锥度小于 1°的 SiC 陶瓷微孔。螺旋微孔加工时，激光是沿材料深度方向以固定的孔径逐层进给加工，理想情况下可获得圆柱孔[15]。实际加工时，由于激光与材料复杂的相互作用，通常加工出正锥孔形。这可主要归因于激光能量沿微孔深度方向的损耗、去除材料在孔壁的沉积及高温等离子体对激光能量的屏蔽吸收等因素[16-17]，导致微孔出口孔径往往小于入口孔径。这种现象同样也存在于冲孔、旋切等微孔加工方式中。相比之下，螺旋加工获得的微孔锥度更小，更有利于实现近圆柱孔的加工。

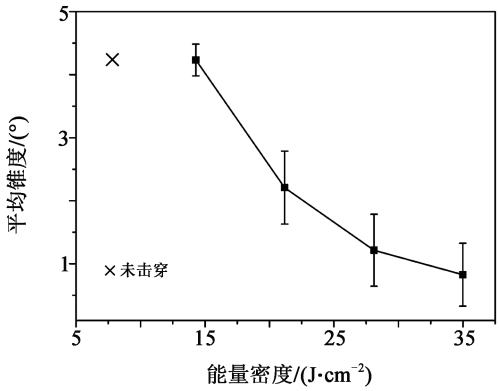


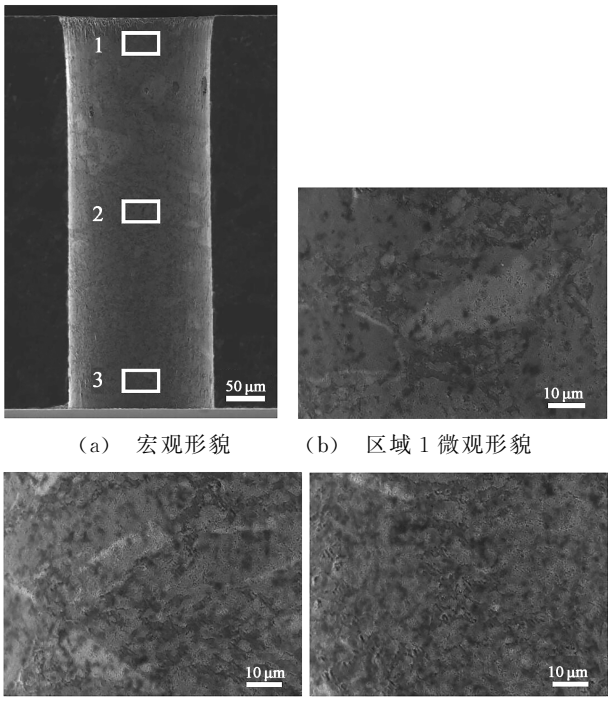
图 4 SiC 陶瓷微孔锥度随能量密度的变化规律

4 SiC 陶瓷微孔加工区域组分分析

根据上述对微孔加工形貌特点及孔形变化规律的研究，此处选取最小微孔锥度，即能量密度为 34.99 J/cm^2 下的 SiC 陶瓷进行组分分析。图 5 所示为该工艺参数下 SiC 陶瓷微孔加工截面不同区域的形貌。从图 5(a)中可以看到，微孔截面无明显的加工缺陷，呈现出较好的加工质量。将位于微孔截面入口、中部及出口的区域分别标记为数字序号 1～3。对比图 5(b)～(d)发现，尽管各区域位于微孔不同深度，但微观形貌并没有较大的差异。这说明采用飞秒激光加工 SiC 陶瓷微孔呈现出了较好的一致性。

对此区域依次进行组分分析，得到 SiC 陶瓷微孔截面不同区域的元素含量测试结果，如表 1 所示。SiC 陶瓷在激光加工过程中会与空气环境下的 O 元素发生化学反应，生成 Si 与 C 的氧化物，最终以

SiO_2 化合物的形式存在于材料加工表面[18]。由于激光是从微孔入口为起点加工，靠近入口的区域 1 受激光的作用更为频繁，含有更多的氧化物熔渣，所以 Si 与 O 元素含量较高。此处 C 元素转化为气体的程度较其他区域更为剧烈，故 C 元素含量较低。区域 2 与 3 的 Si，C，O 元素含量差别不大，但相比于区域 1 而言，均有所变化。这可能是因为随着微孔加工深度的增加，SiC 陶瓷不断被去除，导致 Si 元素含量降低。此时距离微孔入口较远，C 元素受氧化生成 CO 与 CO_2 程度降低，所以 C 元素含量上升、O 元素含量下降。



(a)　宏观形貌　　(b)　区域 1 微观形貌

(c)　区域 2 微观形貌　　(d)　区域 3 微观形貌

图 5　SiC 陶瓷微孔加工截面不同区域的形貌

表 1　SiC 陶瓷微孔截面不同区域的元素含量百分比(%)

区域	Si	C	O
1	60.74±0.24	30.24±0.27	9.02±0.13
2	53.42±0.17	38.46±0.22	8.12±0.10
3	54.69±0.15	37.79±0.19	7.52±0.08

5　结论

本文采用飞秒激光对 SiC 陶瓷进行了螺旋微孔加工实验，研究了不同能量密度下，材料微孔加工形貌的特点及微孔孔形的变化规律，并对微孔加工截面进行了组分分析。主要研究结论如下：

(1)在较低能量密度下，材料去除不充分，甚至无法将材料击穿，微孔加工形貌差异较大。增大能量密度有利于促进材料去除，可在击穿 SiC 陶瓷的同时，获得形貌较为一致的微孔入口、出口及截面。

(2)微孔入口孔径与圆度受能量密度变化的影响不大，出口孔径与圆度随能量密度的增大而增大。更高的能量密度可加工出锥度更小的 SiC 陶瓷微孔，也利于加工质量的提高。经工艺优化，实现了孔径小于 250 μm、圆度大于 0.95、锥度小于 1°的高质量 SiC 陶瓷微孔加工。

(3)对于飞秒激光加工出的 SiC 陶瓷近圆柱孔，微孔截面入口、中部及出口区域的微观形貌无较大差异。入口区域的 Si，O 元素含量较高，C 元素含量较低。中部与出口区域的元素含量差别不大，但与入口区域相比，Si，O 元素含量下降，C 元素含量上升。

参考文献：

[1]　李辰冉，谢志鹏，康国兴，等. 国内外碳化硅陶瓷材料研究与应用进展[J]. 硅酸盐通报，2020，39 (5)：1353-1370.
Li C R，Xie Z P，Kang G X，et al. Research and application progress of SiC ceramics：A review[J]. Bull. Chin. Ceram. Soc.，2020，39 (5)：1353-1370.

[2]　Breede F，Hofmann S，Jain N，et al. Design，manufacture，and characterization of a carbon fiber-reinforced silicon carbide nozzle extension[J]. Int. J. Appl. Ceram. Technol.，2016，13(1)：3-16.

[3]　Zhao G L，Huang C Z，He N，et al. Preparation and cutting performance of reactively hot pressed TiB_2-SiC ceramic tool when machining Invar36 alloy[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol.，2016，86：2679-2688.

[4]　王宏建，杨　涛，廖润钱，等. SiC 及其功率器件的激光制孔研究进展[J]. 半导体光电，2021，42(4)：458-463，478.
Wang H J，Yang T，Liao R Q，et al. Research progress on laser drilling of silicon carbide and its power devices[J]. Semiconductor Optoelectronics，2021，42(4)：458-463，478.

[5]　Goel S. The current understanding on the diamond machining of silicon carbide[J]. J. Phys. D：Appl. Phys.，2014，47：243001.

[6]　吴国荣，高　超，王　生. 电镀金刚石钻头加工碳化硅陶瓷的试验研究[J]. 兵器材料科学与工程，2017，40(1)：46-50.
Wu G R，Gao C，Wang S. Drilling SiC ceramic with electroplated diamond bits[J]. Ordnance Material Science and Engineering，2017，40(1)：46-50.

[7]　Wang H J，Lin H T，Wang C Y，et al. Laser drilling of structural ceramics—A review[J]. J. Eur. Ceram. Soc.，2017，37(4)：1157-1173.

(下转第 874 页)

[3] Manikanda K R, Kumaraguruparan G, Sornakumar T. Experimental and numerical studies of header design and inlet/outlet configurations on flow mal-distribution in parallel micro-channels[J]. Appl. Thermal Engineering, 2013, 58(1/2): 205-216.

[4] Ihsan A G, Nor A C S, Natrah K, et al. The effect of manifold zone parameters on hydrothermal performance of micro-channel heatSink: A review[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer, 2017, 109: 1143-1161.

[5] Leela V V, Rajan K S. Computational analysis of new microchannel heat sink configurations[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86: 595-604.

[6] Yong J L, Singh P K, Lee P S, et al. Fluid flow and heat transfer investigations on enhanced microchannel heat sink using oblique fins with parametric study[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer, 2015, 81: 325-336.

[7] Khoshvaght-Aliabadi M, Deldar S, Hassani S M. Effects of pin-fins geometry and nanofluid on the performance of a pin-fin miniature heat sink (PFMHS)[J]. Inter. J. of Mechanical Sciences, 2018: 442-458.

[8] Wang Guilian, Qian Nan, Ding Guifu. Heat transfer enhancement in microchannel heat sink with bidirectional rib[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer, 2019, 136: 597-609.

[9] Assel S, Tseng K J. Comparison of pin-fin and finned shape heat sink for power electronics in future aircraft[J]. Appl. Thermal Engin., 2018, 136: 364-374.

[10] Dey P, Saha S K. Fluid flow and heat transfer in microchannel with porous bio-inspired roughness[J]. Inter. J. of Thermal Sciences, 2021, 161: 106729.

[11] 张天一, 郭张鹏, 牛风雷, 等. 机翼型微通道高效紧凑换热器流动换热特性[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(10): 1779-1786.
Zhang Tianyi, Guo Zhangpeng, Niu Fenglei, et al. Flow heat transfer characteristics of airfoil microchannel efficient compact heat exchanger[J]. Atomic Energy Science Technology, 2020, 54(10): 1779-1786.

[12] 王 晗, 袁 礼, 王 超, 等. 周期性分流微通道的结构设计及散热性能[J]. 物理学报, 2021, 70(10): 200-211.
Wang Han, Yuan Li, Wang Chao, et al. Structural design and heat dissipation performance of periodic shunt microchannel[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(10): 200-211.

[13] 陈刘涛, 张华伟, 刘 源, 等. 定向凝固多孔铜热沉传热的分段强化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(9): 1250-1254.
Chen Liutao, Zhang Huawei, Liu Yuan, et al. Segmentalized enhancement of heat sink heat transfer in directionally solidified porous copper[J]. J. of Qinghua University (Nature Science Edition), 2014, 54(9): 1250-1254.

作者简介:

曹卫华(1981—),女,湖南资阳人,博士,副教授,主要从事微结构加工方法及数字化设计研究;

朱继元(1978—),男,江苏丰县人,博士,副教授,主要从事表面处理研究。

(上接第 867 页)

[8] Kim S H, Balasubramani T, Sohn I B, et al. Precision microfabrication of AlN and Al_2O_3 ceramics by femtosecond laser ablation[J]. Proc. of SPIE, 2008, 6879: 68791O.

[9] 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.

[10] Zhang Y, Wang Y Q, Zhang J Z, et al. Micromachining features of TiC ceramic by femtosecond pulsed laser[J]. Ceram. Int., 2015, 41(5): 6525-6533.

[11] Lee H M, Choi J H, Moon S J. Determining the machining parameters for femtosecond laser helical drilling of aluminosilicate glass substrate[J]. Int. J. Precis. Eng. Manuf., 2017, 18(7): 923-930.

[12] Liu Y S, Wang C H, Li W N, et al. Effect of energy density and feeding speed on micro-hole drilling in C/SiC composites by picosecond laser[J]. J. Mater. Process. Tech., 2014, 214(12): 3131-3140.

[13] Sankaranarayanan S, Emminger H, Kar A. Energy loss in the plasma during laser drilling[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1999, 32: 1605-1611.

[14] Liu Y S, Wang J, Li W N, et al. Effect of energy density and feeding speed on micro-holes drilling in SiC/SiC composites by picosecond laser[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2016, 84: 1917-1925.

[15] Fornaroli C, Holtkamp J, Gillner A. Laser-beam helical drilling of high quality micro holes[J]. Phys. Proc., 2013, 41: 661-669.

[16] Wang H J, Chen Q, Lin D T, et al. Effect of scanning pitch on nanosecond laser micro-drilling of silicon nitride ceramic [J]. Ceram. Int., 2018, 44(12): 14925-14928.

[17] Wu B, Tao S, Lei S. The interactions of microhole sidewall with plasma induced by femtosecond laser ablation in high-aspect-ratio microholes[J]. J. Manuf. Sci. Eng., 2012, 134: 011007.

[18] Shigematsu I, Kanayama K, Tsuge A, et al. Analysis of constituents generated with laser machining of Si_3N_4 and SiC [J]. J. Mater. Sci. Lett., 1998, 17: 737-739.

作者简介:

王宏建(1989—),男,博士,工程师,主要研究方向为半导体材料的激光加工技术与装备。