DOI: 10.3901/JME.2019.09.198

纳米孪晶立方氮化硼的飞秒激光材料去除机理*

靳田野¹ 陈俊云² 王金虎¹ 赵清亮¹

(1. 哈尔滨工业大学精密工程研究所 哈尔滨 150001;

2. 燕山大学车辆与能源学院 秦皇岛 066004)

摘要: 为实现能应用于超精密切削的新型超硬纳米孪晶立方氮化硼(nt-cBN)刀具的制备, 探索了飞秒激光烧蚀方法对 nt-cBN 的材料去除特性。使用激光单点烧蚀方法及理论公式计算出了 nt-cBN 的烧蚀阈值及阈值功率, 分别为 0.523 J/cm^2 和 4.1 mW ; 基于烧蚀阈值, 对 nt-cBN 材料在多种烧蚀功率下的单点烧蚀圆孔形貌进行了表征, 并分析了不同阶段圆孔内壁多种微结构的形成与演变机理, 阐明了随激光功率增加, nt-cBN 表面经历了快速热汽化、熔化和相爆炸三种材料去除机理, 并形成了纳米驼峰、爆裂和周期性波纹等不同烧蚀显微结构; 对 nt-cBN 块材进行了直线扫描烧蚀加工, 提出了基于光束扫描的动态烧蚀过程对材料的破坏形式及去除原理, 并与单点烧蚀形成对比; 建立了不同烧蚀功率下, 飞秒激光扫描速度与加工微槽宽度和深度的关系曲线, 并分析了烧蚀功率和扫描速度对加工效率和加工质量的影响规律, 提出了能够保证加工效率并同时改善加工质量的激光扫描速度在 0.1 mm/s 左右。

关键词: 飞秒激光; 纳米孪晶立方氮化硼; 烧蚀阈值; 周期性微结构

中图分类号: TN249

Material Removal Mechanism of Nanotwinned Cubic Boron Nitride by Femtosecond Laser Ablation

JIN Tianye¹ CHEN Junyun² WANG Jinhu¹ ZHAO Qingliang¹

(1. Center for Precision Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;

2. College of Vehicles and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: To fabricate the cutting tool of newly developed nanotwinned cubic boron nitride (nt-cBN) bulk applying for ultra-precision cutting, material removal mechanism of femtosecond ablation is studied. Damage threshold and the corresponding threshold power of nt-cBN are calculated by function relationship computation with single point ablation experiment, namely 0.523 J/cm^2 and 4.1 mW . Based on damage threshold, morphology and formation mechanism of ablation areas by multiple laser powers is analyzed, especially of the microstructure on the wall of micro holes. Rapid evaporation, fusion and phase explosion are three main material removal mechanisms as accelerating laser power when machining nt-cBN surface. Nano humps, explosive cracks and periodicity ripples are found during different machining stages. Microgrooves are etched on nt-cBN surface by line scanning ablation. Dynamic material damage characteristics and removal mechanism in terms of scanning ablation are studied compared with single point ablation. The relation curve graphs between scanning speeds and the length and depth of microgrooves under different laser power are established respectively. The influence of laser power and scanning speed on ablation surface quality is analyzed. Scanning speed of about 0.1 mm/s is proved beneficial for both high processing efficiency and well ablation quality.

Key words: femtosecond laser; nanotwinned cubic boron nitride; damage threshold; periodicity micro structure

0 前言

新型纳米孪晶立方氮化硼(nt-cBN)具有优异的

综合性能, 其硬度(约 108 GPa)与天然金刚石相当, 断裂韧性和抗氧化特性都高于传统的超硬材料^[1]。此外, cBN 材料化学惰性较强, 所以 nt-cBN 基刀具有望应用于硬度较高的难加工材料, 特别是铁基金属材料的精密及超精密切削加工, 解决刀具机械或化学磨损严重的问题。因此, nt-cBN 刀具的制备方

* 国家自然科学基金(51775482)和河北省自然科学基金(E2016203372)资助项目。20180419 收到初稿, 20181016 收到修改稿

法正亟待探索。

对比短脉冲的纳秒和皮秒激光, 超快飞秒激光具有峰值功率高, 热影响区小, 烧蚀阈值准确等优势^[2-4], 其在国内外陶瓷类硬脆材料加工领域具有广泛的应用。从 2000 年以来, 各国学者对 SiC 基材料的飞秒激光烧蚀机理进行了大量的研究^[5-8]。

研究发现, 飞秒激光烧蚀区呈现三种特征区域, 即改性区、定向波纹区和烧蚀区, 其烧蚀机理是热汽化、超快熔化、相爆炸、库伦相爆炸和材料缺陷受热激发等多因素协同作用的结果。近年来, 随着飞秒激光加工技术的不断成熟, 其研究成果也不断丰富。如西班牙学者 AROA 利用飞秒激光在金属-陶瓷复合材料上加工出了均匀点阵结构^[9], 其材料去除机理为快速热汽化以及金属的氧化; 瑞士学者 EBERLE 利用飞秒激光对蓝宝石进行了表层和亚表层的改性烧蚀^[10], 其材料去除机理以热熔化为主; 日本学者 YASUTAKA 利用飞秒激光在 SiO₂ 上加工出了纳米级光栅结构^[11], 其特征结构由激光诱导周期性波纹形成, 形成机理以热熔化为主; 意大利学者 SCITI 利用飞秒激光在 TaC 陶瓷太阳能电池板的上加工出了有利于光束吸收的连续微槽^[12], 其直线扫描材料去除机理以快速汽化为主, 而热熔化为形成周期性微结构的主要原因。综上所述, 飞秒激光烧蚀方法能够实现多尺度、复杂结构的加工, 而且其材料去除原理不受材料机械性能的限制, 理论上可应用于 nt-cBN 刀具的制备。针对陶瓷材料, 快速汽化和热熔化为主要材料去除机理, 但针对 nt-cBN 的超快激光材料去除机理尚无相关研究成果。

基于前期对 nt-cBN 材料去除方法的理论及试验探索, 传统的刀具机械刃磨工艺受磨料尺寸影响, 难以在保证加工精度的同时提高加工效率^[13-14], 而飞秒激光加工虽然加工表面质量略有降低, 但对 nt-cBN 刀具几何轮廓和表面在亚微米级精度的去除是现实可行的。本文从理论和试验角度, 研究了飞秒激光烧蚀 nt-cBN 的表层材料去除机理, 分析了激光烧蚀工艺参数对加工质量及加工效率的影响, 为飞秒激光 nt-cBN 刀具研制奠定了基础。

1 试验样品及试验设备

试验中使用的 nt-cBN 块材是利用洋葱结构 BN 通过高温(1 800 °C)高压(15 GPa)的方法压制而成, 块材直径约为 2 mm, 高度 1 mm, 其主要性能参数如表 1 所示。试验前先将块材表面研磨至表面粗糙度 Ra=50 nm 以下。

表 1 nt-cBN 块材性能参数

参数	数值
硬度 H_v /GPa	83.446
断裂韧性 K_{IC} (MPa · m ^{0.5})	12.1
氧化温度 T /°C	1 294
晶粒厚度/nm	50~120

飞秒激光设备为 Coherent 公司生产, 其型号为 Astrella-1K-USP。光源采用掺钛蓝宝石飞秒激光源, 光源单元输出的光束参数分别为: 脉冲宽度 50 fs, 波长 800 nm, 重复频率 1 kHz, 最大单脉冲能量 2.5 mJ。加工系统的搭建如图 1 所示。光束经过光路传输单元, 最终通过焦距为 50 mm 的聚焦透镜, 得到理论光斑直径为 7 μm。三维平移系统采用德国 PI 公司生产的 M-521.DD/DDB 直线位移平台搭建, 运动精度 0.1 μm。辅助装置中, CCD 用于调整工件与焦点的相对位置, 以及对加工形貌的在位检测; 运用压缩空气作为辅助气体以及时清除烧蚀区域残屑, 改善因残屑快速冷凝而粘附于加工表面的现象, 压力为 0.3 MPa。

图 1 飞秒激光加工系统

2 nt-cBN 的飞秒激光单点烧蚀

2.1 nt-cBN 的烧蚀阈值计算

在对 nt-cBN 的烧蚀加工前, 首先应确定材料的烧蚀阈值。烧蚀阈值即为激光对样品表面烧蚀而产生不可逆的破坏时所需的最小能流密度。波长 800 nm 的飞秒激光的光子能量约为 1.55 eV, 而 cBN 能带隙为 6.4 eV 属于宽带隙材料, 因此激光能量主要是通过多光子吸收等非线性机制吸收而激发电子并去除材料。在超短脉冲激光的超强电场作用下, 多个激光光子的同时吸收使得自由电子的能量超过能带隙而激发电子, 实现材料的加工去除。

根据飞秒激光的高斯分布特点, 其单脉冲能量的空间分布为^[15]

$$\phi(r) = \phi_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) \quad (1)$$

式中, ϕ_0 为光斑中心峰值能流密度; r 为考察点距光斑中心距离; ω_0 为光斑束腰半径。

设飞秒激光单脉冲单点烧蚀区域直径为 D , 则烧蚀边缘对应的激光能量密度为

$$\phi_h = \phi_0 \exp\left(-\frac{D^2}{2\omega_0^2}\right) \quad (2)$$

结合能流密度 ϕ 、光强 E 与激光功率 P 的相互计算关系, 推导出峰值能流密度 ϕ_0 与激光功率 P 的关系

$$\phi_0 = \frac{2P}{f\pi\omega_0^2} \quad (3)$$

式中, f 为飞秒激光重复频率。结合式(2)、(3), 取得 D^2 - $\ln P$ 的线性关系式

$$D^2 = 2\omega_0^2 \left[\ln P + \ln \frac{2}{f\pi\omega_0^2\phi_h} \right] \quad (4)$$

此时 D^2 - $\ln P$ 曲线的斜率为 $2\omega_0^2$, x 轴截距为 $\ln \frac{2}{f\pi\omega_0^2\phi_h}$ 。根据飞秒激光单点烧蚀圆孔的测量孔径, 可求出单脉冲烧蚀阈值 ϕ_h 以及对应的阈值功率 P_h 。

研究表明, 当激光烧蚀作用脉冲数较少时(针对 SiC 的烧蚀约为 500 个脉冲以内), 烧蚀阈值与脉冲数近似于线性关系, 并且随作用脉冲数的增加而减小; 当脉冲数较多时, 烧蚀阈值随脉冲数增加而减小的趋势减缓, 并最终饱和并趋于一定值^[6]。在多脉冲作用的情况下, 多脉冲与单脉冲阈值之间的关系为

$$\phi_h(N) = \phi_h(\infty) + [\phi_h(1) - \phi_h(\infty)] \exp[-k(N-1)] \quad (5)$$

式中, N 为脉冲数; k 为累积系数; $\phi_h(\infty)$ 为饱和阈值。

研究表明, 激光烧蚀阈值随着累积脉冲数的增加而降低, 针对实际飞秒激光材料加工过程, 多脉冲烧蚀起主要作用, 所以饱和阈值对于实际加工意义更大。因此, 对 nt-cBN 表面多脉冲单点烧蚀试验的烧蚀时间设定为 4 s, 在 1 kHz 重复频率下相应的脉冲数为 4 000 个, 此时基本能保证阈值饱和。单点烧蚀试验在不同功率下的烧蚀圆孔直径值如表 2 所示。将功率与孔径数据拟合为 D^2 - $\ln P$ 曲线, 结果如图 2 所示。通过曲线拟合及数值计算, 得出 nt-cBN 的烧蚀阈值为 0.523 J/cm^2 , 对应的阈值功率为 4.1 mW。

表 2 各功率烧蚀圆孔直径值

激光功率 P/mW	圆孔直径 $D/\mu\text{m}$	激光功率 P/mW	圆孔直径 $D/\mu\text{m}$
5.4	15.8	30.0	29.5
10.4	17.6	34.2	29.8
14.8	19.4	39.5	33.2
20.0	25.5	45.0	35.2
24.3	27.4	50.0	35.5

图 2 nt-cBN 多脉冲烧蚀 D^2 - $\ln P$ 曲线

2.2 单点烧蚀形貌分析

飞秒激光 nt-cBN 单点烧蚀圆孔形貌使用扫描电子显微镜(美国 FEI 公司: HELIOS NanoLab 600i)观测。图 3 为低功率(5.4 mW、10.4 mW 和 20.0 mW)单点烧蚀圆孔形貌。如图 3a 和 3c 所示, 圆孔整体形状规则, 孔径从顶端到底端逐渐递减, 符合光束的高斯分布规律。在低功率下, 圆孔边缘未见热影响区或改性区, 说明此时弱烧蚀为主要作用机制。如图 3b 和 3d 所示, 低功率烧蚀后, 上层孔壁形成均匀、细长的纳米驼峰结构, 结构尖端宽度约为 100 nm, 平均长度随烧蚀功率的增大而减小。

(a) 5.4 mW 烧蚀圆孔整体形貌

(b) 5.4 mW 孔壁形貌

(c) 20 mW 烧蚀圆孔整体形貌

(d) 20 mW 上层孔壁形貌

图 3 低功率单点烧蚀形貌

分析圆孔内部形貌特征, 在飞秒激光单点烧蚀过程初期, 其材料去除机理主要为材料的快速热汽化。在多脉冲累积效应作用下, 表层材料随脉冲叠加而逐渐实现去除, 则烧蚀孔径逐渐增大。根据公式(1)、(3)可以得出关系式

$$\phi(r) = \frac{2P}{f\pi\omega_0^2} \exp\left(-\frac{D^2}{2\omega_0^2}\right) \quad (6)$$

如式(6), 当烧蚀功率一定时, 光束能流密度随截面直径的增加而减小; 当实际烧蚀孔径 D 大于高斯分布曲线在该截面的直径 $D(z)$ 时(z 为三维高斯曲面 z 轴坐标), 上层孔壁所吸收的光束能流密度将小于饱和阈值, 由于单脉冲阈值大于饱和阈值, 下一个脉冲仍然能够实现材料去除, 但此时激光能流密度不足以实现材料的快速热汽化, 因此其材料去除机理转变为快速熔化。熔化从某一点开始, 一部分材料受连续脉冲作用继续汽化消散, 另一部分在熔融状态下逐渐向远离熔化起始点的两侧动态移动并堆积, 最终形成试验中所体现出的纳米驼峰结构。针对多晶材料, 显微结构中缺陷较多, 特别是晶界区, 能量较低, 更易诱发熔化现象, 所以 nt-cBN 材料烧蚀纳米驼峰结构的特征尺寸较小(<100 nm)。纳米驼峰结构的形成原理如图 4 所示。圆孔底部由于吸收脉冲数少于上层孔壁处, 其材料去除量少, 孔径 D 较小, 此处烧蚀能流密度仍大于饱和阈值, 快速热汽化仍为材料去除的主要原理, 所以未观测到纳米驼峰结构。该现象在飞秒激光单点烧蚀 SiC 和晶体 Si 的研究中也有所体现^[6,16]。

图4 低功率单点烧蚀材料去除原理

随着激光单点烧蚀功率增大, 纳米驼峰结构长度减小, 尖端钝化, 直到提高功率至 30 mW, 圆孔上层孔壁出现爆裂状结构, 下层孔壁为纳米驼峰结构, 且两种结构间的过渡区较小, 边界清晰, 如图 5 所示。这种现象表明, 在较高功率下, 强烧蚀过程为材料去除的主要机制, 材料去除机理从单纯的

快速热汽化转变为快速热汽化与相爆炸协同作用。而下层纳米驼峰结构的存在与脉冲数有关, 说明下层由于吸收脉冲数较少, 脉冲累积作用较小, 依然能够形成纳米驼峰结构, 而圆孔上层爆裂状区域是由大部分高功率脉冲的作用来实现的。此外, 两种结构间较小的过渡区域, 可能意味着强、弱烧蚀的转变是非常突然的, 当脉冲数与烧蚀功率增大到一定值时, 强烧蚀作用将会被瞬间激发。但由于强、弱烧蚀转变的临界脉冲数难以测量及控制, 所以针对临界转变脉冲数与烧蚀功率的准确数值, 目前还难以确定。

(a) 圆孔整体形貌

(b) 上层孔壁形貌

图5 30 mW 烧蚀圆孔形貌

图 6 为飞秒激光功率分别为 45 mW、50 mW 和 60.8 mW 时的单点烧蚀圆孔形貌。如图 6 所示, 进一步增大烧蚀功率, 圆孔边缘及附近未加工表面出现颗粒状物质, 其成因是汽化材料的快速冷凝、重铸并附着于外部表面。此时, 烧蚀热效应增强, 圆孔外围出现热影响区。文献[6,17]中显示, 多脉冲飞秒激光加工的热影响区面积较大, 且呈规则的圆形。但本试验中显示热影响区的圆形分布特征并不明显, 且圆孔边缘出现有别于爆裂去除特征的耳形分布区域。分析其原因在于, 本试验所使用的脉冲数远多于上述文献的研究, 相应的材料去除量较大, 导致烧蚀圆孔面积与热影响区分布面积近似重合, 所以并不明显; 耳形分布特征的出现与材料内部缺陷有关, 在高功率的热效应作用下, 材料亚表层内应力得到释放, 内部缺陷从亚稳态被激发, 形成气孔、裂纹等材料亚表层损伤, 导致表层形貌发生塌陷、隆起等畸变, 并自圆孔边缘的受激发位置向外发散式延伸, 形成耳形结构。由于多晶材料的微观组成非常复杂, 特别是在晶界处, 存在大量无定型原子排列, 较易形成材料缺陷并被激发, 所以理论上多晶材料较单晶材料在飞秒激光烧蚀后更易出现耳形分布特征。

如图 6d 所示, 60.8 mW 功率烧蚀圆孔孔壁无纳米驼峰结构, 而形成了一种周期性波纹。国内外大量研究表明, 周期性波纹的形成是由于在高强度入射激光作用下, 等离子体纳米泡破裂, 并由球体转

化为平面的结果,其方向与光束偏振特性有关^[12,18-20],并且这种现象同样也在针对金属材料的飞秒激光烧蚀中存在^[21-22]。针对 nt-cBN 材料烧蚀实验,其形成的周期性波纹宽度约为 200 nm,是典型的亚波长波纹(光源波长 800 nm)。通过进一步观察,孔壁上层仍然存在因强烧蚀而引发的爆裂结构,说明快速热汽化和相爆炸依然是主要的材料去除机理。

图 6 高功率单点烧蚀圆孔形貌

综合以上结论,在对 nt-cBN 进行飞秒激光单点烧蚀的过程中,随功率逐渐增大,材料去除机理经历了快速热汽化、热熔化和相爆炸的三种演变,形成了纳米驼峰、爆裂和周期性波纹等特征结构。在低功率下,材料去除区域以快速热汽化为主要方式,单点烧蚀质量较好,圆孔边缘规则,轮廓清晰;孔壁以纳米驼峰结构为主,形貌均匀、稳定,其成因以低能量密度作用下的热熔化为主。在高功率下,孔壁边缘及周围形成冷凝、重铸颗粒,内壁存在爆裂和周期性波纹等多种结构,并且强烧蚀的热效应可引发材料亚表层缺陷的激发及延伸,导致圆孔边缘的外表面恶化,为典型相爆炸材料去除特征。

3 nt-cBN 的飞秒激光扫描烧蚀

使用飞秒激光对 nt-cBN 材料进行直线扫描烧蚀。烧蚀微槽形貌及烧蚀微槽的几何尺寸与激光烧蚀功率和光斑重叠率有关,而光斑重叠率可通过控制光束进给速度,即扫描速度来实现。理论上说,单位面积材料表面所吸收的激光能流密度与激光烧蚀功率成正比关系;单位面积材料表面所吸收的激光脉冲数与扫描速度成反比关系,光斑重叠率表示为

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{\delta} = 1 - \frac{v}{f\delta} \quad (7)$$

式中, Δl 为两个相邻光斑重叠区的宽度, δ 为光斑直径, v 为扫描速度。针对理论光斑直径为 7 μm 的光束,当相邻两个脉冲恰巧不重合时,激光扫描速度为 7 mm/s。则试验选取 10 mW、20 mW 和 30 mW 烧蚀功率进行直线扫描烧蚀对比,每种功率下激光扫描速度分别为 0.01 mm/s、0.05 mm/s、0.1 mm/s 和 1.0 mm/s。将拟使用扫描速度代入式(7),得出各速度下的理论光斑重叠率分别为 0.998 6、0.992 9、0.985 7 和 0.857 1。

3.1 直线扫描烧蚀微槽形貌分析

使用 10 mW 烧蚀功率对 nt-cBN 表面直线扫描烧蚀的微槽形貌如图 7 所示。当激光扫描速度为 0.01 mm/s 和 0.05 mm/s 时,如图 7a、7b 所示,微槽自深度方向呈现两种形貌特征:上层边缘存在大量片层状爆裂以及快速冷凝、重铸的点状结构,为典型热效应作用下对材料的强烧蚀去除区,此时材料吸收的激光能流密度高,特征区域面积较大;下层轮廓清晰,烧蚀质量较好,并且出现了定向的周期性波纹,为典型的高能量、低脉冲数材料烧蚀去除特征,此时材料吸收的激光能流密度较低,特征区域面积较小。对比与静态的单点烧蚀,光束扫描的动态过程更易诱发材料的连续破坏,所以 10 mW 功率扫描烧蚀过程中强烧蚀区的出现有别于单点烧蚀圆孔的单一形貌。进一步提高扫描速度,如图 7c 所示,强烧蚀特征消失,烧蚀区域出现大面积周期性波纹结构,仅微槽外边缘存在少量孔状塌陷等热破坏特征。这种现象表明,在动态烧蚀过程中,由于光束重叠率变小,微槽每一点处吸收的激光脉冲数减少,能流密度降低。如图 7d 所示,当扫描速

图 7 10 mW 烧蚀直线槽形貌

度为 1 mm/s 时, 材料烧蚀去除量极小, 微槽呈现单一的周期性波纹结构, 此时微槽每点吸收的激光能流密度接近于阈值。

烧蚀功率 30 mW 时, 低、高速扫描微槽形貌如图 8 所示。使用 0.01 mm/s 扫描速度所烧蚀的微槽强烧蚀区出现显著锯齿状破坏特征, 如图 8a 所示。这种特征在强、弱烧蚀区分界处更加明显, 其原因可能是熔化、汽化后冷凝、重铸、材料缺陷激发等多重因素协同作用的结果, 说明烧蚀功率的提高更容易引发材料的动态破坏, 且破坏过程更加剧烈。如图 8b 所示, 增大烧蚀功率, 高速扫描烧蚀的微槽底端周期性波纹逐渐模糊, 且 30 mW 烧蚀微槽边缘处出现孔状塌陷特征。这种现象表明, 随着烧蚀功率的增大, 热效应逐渐增强, 热熔化作用破坏了周期性波纹形貌, 同时热应力激发了材料内部缺陷, 导致微槽边缘的破坏。

(a) 0.01mm/s

(b) 1.00mm/s

图 8 烧蚀功率 30 mW 时低、高速烧蚀形貌

3.2 直线扫描烧蚀微槽几何尺寸分析

对烧蚀微槽宽度及深度进行测量, 并建立不同功率下微槽宽度和深度与扫描速度的关系曲线。如图 9a 所示, 不同烧蚀功率下烧蚀微槽宽度与扫描速度基本成线性关系, 并随扫描速度的增大而减小; 增加烧蚀功率可以增大烧蚀微槽宽度, 提高烧蚀效率; 20 mW 和 30 mW 烧蚀微槽宽度远大于 10 mW, 说明动态强、弱烧蚀材料去除机制的转变在较低功率下就会发生。如图 9b 所示, 微槽深度在低速下随扫描速度的增大而显著减小, 说明在低速下, 高重叠率导致作用脉冲数较多, 材料去除量大, 去除效率较高; 进一步提高速度, 微槽深度降低趋势逐渐平缓, 并且当扫描速度达到 1 mm/s 时, 不同功率烧蚀微槽深度基本相同, 说明在高速下, 低重叠率导致作用脉冲数较少, 实现材料去除的能流密度在阈值附近, 此时烧蚀功率对微槽在深度方向的破坏较小。

综合以上结论, 针对 nt-cBN 块材的飞秒激光扫描烧蚀加工, 增大烧蚀功率的同时降低扫描速度可提高材料去除效率, 但会降低烧蚀表面质量; 大于 1.0 mm/s 的扫描速度或低于 10 mW 的烧蚀功率

(a) 微槽宽度 - 扫描速度

(b) 微槽深度 - 扫描速度

图 9 不同烧蚀功率下微槽深度和宽度与扫描速度的关系

不利于材料的高效去除; 烧蚀功率对加工效率的影响并不显著, 特别是在扫描速度较快时; 使用 0.1 mm/s 左右的扫描速度可在保证加工效率的同时改善烧蚀表面质量。

4 结论

(1) 使用脉宽 50 fs, 波长 800 nm, 重复频率 1 kHz 的飞秒激光加工时, nt-cBN 材料烧蚀阈值为 0.523 J/cm^2 , 相应阈值功率为 4.1 mW。

(2) 低功率单点烧蚀情况下, 圆孔内壁出现大量纳米驼峰结构, 其成因是低能流密度导致材料熔化并堆积, 此时材料去除的主导作用为弱烧蚀, 材料去除机理为快速热汽化和热熔化的协同作用。

(3) 高功率单点烧蚀情况下, 材料去除以强烧蚀为主, 孔壁下层存在典型的亚波长周期性波纹结构, 上层出现由热效应导致的爆裂特征, 且圆孔外边缘出现由于材料缺陷受热激发而引起的耳形破坏区, 材料去除机理为快速热汽化、热熔化和相爆炸的协同作用。

(4) 动态直线扫描烧蚀比单点烧蚀更容易引发材料破坏并去除, 低速直线扫描烧蚀微槽存在强、弱烧蚀两个特征区域, 强烧蚀区表面质量较差, 且

存在由多因素导致的锯齿形结构;弱烧蚀区面积较小,表面均匀。高速直线扫描烧蚀微槽以弱烧蚀为主要材料去除原理,槽底存在典型亚波长波纹,表面质量较好。

(5) 使用 0.1 mm/s 左右的扫描速度可在保证加工质量的同时提高加工效率,烧蚀功率对材料加工效率的整体影响小于扫描速度,但小于 10 mW 烧蚀功率时的加工效率将会显著降低。

参 考 文 献

- [1] TIAN Y J, XU B, YU D L, et al. Ultrahard nanotwinned cubic boron nitride[J]. *Nature*, 2013, 493: 385-388.
- [2] NIKUMB S, CHEN Q, LI C, et al. Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers[J]. *Thin Solid Films*, 2005, 477(1): 216-221.
- [3] BEATRIZ G, FANNY C. Direct analysis of solid samples by fs-LA-ICP-MS[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2007, 26(10): 951-966.
- [4] KARL-HERNZ L, BENJAMIN R, YVONNE R, et al. Metal ablation with short and ultrashort laser pulses [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 230-238.
- [5] ZOPPEL S, FARSARI M, MERZ R, et al. Laser micromachining of 3C-SiC single crystals[J]. *Microelectronic Engineering*, 2000, 83: 1400-1402.
- [6] DONG Y Y, MOLIAN P. Femtosecond pulsed laser ablation of 3C-SiC thin film on silicon[J]. *Appl. Phys.A*, 2003, 77: 839-846.
- [7] 陈洪新, 贾天卿, 黄敏, 等. 飞秒激光的波长对 SiC 材料烧蚀的影响[J]. *光学学报*, 2006, 26(3): 467-470.
CHEN Hongxin, JIA Tianqing, HUANG Min, et al. Effect of the wavelength of femtosecond laser on the ablation of SiC materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(3): 467-470.
- [8] 赵清亮, 姜涛, 董志伟, 等. 飞秒激光加工 SiC 的烧蚀阈值及材料去除机理[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(21): 172-177.
ZHAO Qingliang, JIANG Tao, DONG Zhiwei, et al. Ablation threshold and material removal mechanism of femtosecond laser processing SiC[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(21): 172-177.
- [9] AROA M R, KARMELE V, AITOR L, et al. Femtosecond laser micromachining of metallic/ceramic composite material for solid oxide fuel cell devices[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41: 17053-17063.
- [10] EBERLE G, SCHMIDT M, PUDE F, et al. Laser surface and subsurface modification of sapphire using femtosecond pulses[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 378: 504-512.
- [11] YASUTAKA N, NIKOLAY N, AKIHIRO T, et al. Fabrication of isolated platinum nanowire gratings and nanoparticles on silica substrate by femtosecond laser irradiation[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 394: 108-114.
- [12] SCITI D, TRUCCHI D M, BELLUCCI A, et al. Effect of surface texturing by femtosecond laser on tantalum carbide ceramics for solar receiver applications[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2017, 161: 1-6.
- [13] 靳田野, 陈俊云, 赵明慧, 等. 纳米孪晶立方氮化硼机械研磨机理研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(5): 95-100.
JIN Tianye, CHEN Junyun, ZHAO Minghui, et al. Study on mechanical grinding mechanism of nano twin crystal cubic boron nitride[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(5): 95-100.
- [14] CHEN Junyun, JIN Tianye, WANG Jinhu, et al. Study on machining mechanism of nanotwinned CBN cutting tool[C]//7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, 2014, SPIE 92811D: 1-7.
- [15] HIRLEMAN E D, STEVENSON W H. Intensity distribution properties of a Gaussian laser beam focus[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(21): 3496-3499.
- [16] GO O, RYOSUKE S, KENTO H, et al. Generation of nanoparticles at a fluence less than the ablation threshold using femtosecond laser pulses[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 282: 638-641.
- [17] GO O, RYOSUKE S, KENTO H, et al. Effect of air on debris formation in femtosecond laser ablation of crystalline Si[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 282: 525-530.
- [18] RIČARDAS B, MINDAUGAS M, SAULIUS J. Surface and bulk structuring of materials by ripples with long and short laser pulses: Recent advances[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2014, 38: 119-156.
- [19] LAURA G, MASAKI H, MASAHIRO S, et al. Metal-like self-organization of periodic nanostructures on silicon and silicon carbide under femtosecond laser pulses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(194903): 1-5.
- [20] HUANG Min, ZHAO Fuli, CHENG Ya, et al. Subwavelength ripples: Interference between surface plasmons and incident laser[J]. *ACS Nano*, 2009, 3(12): 17053-17063.

4062-4070.

- [21] SHUJI S, MASAKI H, SHIGEKI T, et al. Mechanism for self-formation of periodic grating structures on a metal surface by a femtosecond laser puls[J]. Physical Review B, 2009, 79(00349): 1-4.

- [22] VOROBIEV A Y, MAKIN V S, GUO Chunlei. Periodic ordering of random surface nanostructures induced by

femtosecond laser pulses on metals[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(034903): 1-4.

作者简介：靳田野，男，1989 年出生，博士研究生，主要从事新型纳米孪晶材料刀具研制方面的研究。

E-mail: jintianye3030@163.com

陈俊云(通信作者)，女，1983 年出生，副教授，硕士研究生导师，主要研究方向为新型纳米孪晶材料刀具研制和高精度汽车零部件制造技术。

E-mail: sophiacjy@ysu.edu.cn