

文章编号: 1001-3806(2017)03-0346-05

## 长脉宽激光切割聚晶立方氮化硼工艺研究

贾志新<sup>1</sup>, 黄金刚<sup>1</sup>, 高坚强<sup>2</sup>, 房泽旭<sup>2</sup>, 张亚洲<sup>1</sup>, 崔子月<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学 机械工程学院 机械制造及自动化系, 北京 100083; 2. 苏州新火花机床有限公司, 苏州 215128)

**摘要:** 为了获得聚晶立方氮化硼(PCBN)最优的激光切割质量和切割效率,依据烧蚀直径和入射激光脉冲能量的函数关系,得出PCBN烧蚀阈值为 $1.796\text{J}/\text{cm}^2$ 。采用Nd:YAG激光器对型号为BN250的PCBN进行切割试验,分析了切割速率、激光功率以及脉冲频率对切割质量的影响规律。通过切缝的显微观测对比,总结出不同激光工艺参量下PCBN缝宽的变化趋势。结果表明,对于脉宽为 $100\mu\text{s}$ 的激光,当激光功率为28W、脉冲频率为60Hz、切割速率为 $20\text{mm}/\text{min}$ 时,能够获得PCBN激光切割的最优切缝和较高的切割效率。该工艺方法和数据的建立,对今后PCBN或其它超硬材料的激光加工有着重要参考价值。

**关键词:** 激光技术; 激光切割; 聚晶立方氮化硼; 烧蚀阈值; 切割工艺

**中图分类号:** TG485 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.03.009

## Technological study on long pulse laser cutting of polycrystalline cubic boron nitride

JIA Zhixin<sup>1</sup>, HUANG Jingang<sup>1</sup>, GAO Jianqiang<sup>2</sup>, FANG Zexu<sup>2</sup>, ZHANG Yazhou<sup>1</sup>, CUI Ziyue<sup>1</sup>

(1. Department of Mechanical Manufacturing and Automation, School of Mechanical Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Suzhou New Spark Machine Tool Co. Ltd, Suzhou 215128, China)

**Abstract:** In order to obtain the optimal laser cutting quality and efficiency of polycrystalline cubic boron nitride(PCBN), the ablation threshold of PCBN material was obtained as  $1.796\text{J}/\text{cm}^2$ , based on the function relationship between the ablation diameter and laser energy. Cutting experiments of model BN250 PCBN with Nd:YAG laser were carried out. The effects of cutting speed, laser power and pulse repetition rate on cutting quality were analyzed. The changing trend of slit width of PCBN under different laser parameters was summarized by contrasting the microscopic observation. The results show that, the best quality of slit and the higher cutting efficiency can be obtained at the condition of laser power 28W, pulse repetition rate 60Hz, and cutting speed  $20\text{mm}/\text{min}$ , by laser pulse with pulse duration  $100\mu\text{s}$ . The method and process data have an important reference value for laser processing of PCBN or other superhard materials.

**Key words:** laser technique; laser cutting; polycrystalline cubic boron nitride; ablation threshold; cutting technology

### 引言

聚晶立方氮化硼(polycrystalline cubic boron nitride, PCBN)是继人造金刚石之后的又一种新型超硬合成材料,因其较高的硬度、热稳定性和化学惰性在刀具行业中得到广泛应用,它的出现为黑色金属及硬、韧、难加工材料的切削加工开拓了广阔的前景。作为21世纪更新换代的新型刀具材料,PCBN在硬态切削、干式切削、高效高精密切削等现代切削加工中的使用,已显示出独特优势和巨大的经济价值,受到世界各国的

关注和重视。国外对PCBN刀具的研究已基本进入成熟阶段,产品也向系列化、多样化发展,其中英国Element Six公司最新研制的AMB90型PCBN整体圆片直径更是达到了 $101.6\text{mm}$ ,使材料利用率得到显著提升。相比之下,我国PCBN的发展滞后,PCBN的品种单一、产品系列少,性能的稳定也有待进一步提高<sup>[1-6]</sup>。

PCBN因其难加工的性质,一直制约着超硬刀具的应用与发展,PCBN的切割方法一般有金刚石砂轮切除式切断、电火花线切割和激光切割3种<sup>[3]</sup>。采用金刚石砂轮切割方法简单,但加工质量差,产品合格率低,已逐渐为后两者取代。由于CBN颗粒的导电性差,使得电火花切割PCBN很难高效率实现,HE<sup>[7]</sup>和JIANG<sup>[8]</sup>等人曾通过在PCBN烧结过程中加入导电性好添加剂和增大压力的方法,提高了PCBN电火花线切割的可加工性,但其仅能实现小批量制作和生产,国

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(3162020)

作者简介:贾志新(1968-),男,博士,教授,现主要从事特种加工技术及数控机床可靠性的研究。

E-mail:13693618482@163.com

收稿日期:2016-03-31;收到修改稿日期:2016-05-04

内外大多 PCBN 仍无法加工。激光切割在加工 PCBN 中凸显了加工效率高、切割质量好等优点。XIAO 等人<sup>[9]</sup>曾做过电火花线切割与激光切割 PCBN 的对比试验,获得了 PCBN 复合片线切割粗糙度  $R_a \approx 5\mu\text{m}$ 、激光切割粗糙  $R_a \approx 1\mu\text{m}$  的实验结果,验证了激光是切割 PCBN 实现高质量、高效率加工的有效方法。水导激光因优良的切割特性也逐渐被使用<sup>[10]</sup>。WU 等人<sup>[11]</sup>利用水导激光的方法切割 PCBN,有效降低了热影响区,减少了裂纹的产生。瑞士 EWAG 公司最新生产的 LASER LINE ULTRA 激光磨床,更是实现了超硬刀具的切割、成型加工及刃口修整一步到位,成为激光加工超硬材料领域新的标杆。

目前 PCBN 的激光切割已经实现了工业应用,但在加工生产过程中,因其材料本身脆硬难加工性,切割参量选择不当,易出现裂纹、崩边等现象。同时由于激光设备与材料价格比较昂贵,还很少有全面且完善的激光切割 PCBN 复合片的工艺性研究。本文中作者从研究 PCBN 材料本身入手,试验获得 PCBN 的激光烧蚀阈值,并做了简要分析;通过不同切割参量的工艺试验,分析了激光功率、脉冲频率、切割速率对 PCBN 切割质量的影响规律,在保证切割效率的同时,获得了最优的激光切割参量。

## 1 实验条件及方法

本实验中激光设备采用 NSC-LC-100 型 Nd:YAG 脉冲激光切割机,激光波长  $\lambda = 1064\text{nm}$ ,脉冲宽度  $\tau = 100\mu\text{s}$ ,最大输出功率为 100W;采用三片式复合聚焦镜,焦距为 150mm,聚焦光斑直径为 0.1mm ~ 0.18mm;喷嘴高度为 1mm,采用压缩空气为辅助气体,气体压力为 0.6MPa。为了获得最小的切缝宽度和较优的切割质量,离焦方式采用零离焦,即激光焦点位于材料上表面。实验材料为日本住友生产的聚晶立方氮化硼 BN250,CBN 含量 60%,颗粒度  $1\mu\text{m}$ ,粘结剂为 TiN,实验设备及材料如图 1 所示。

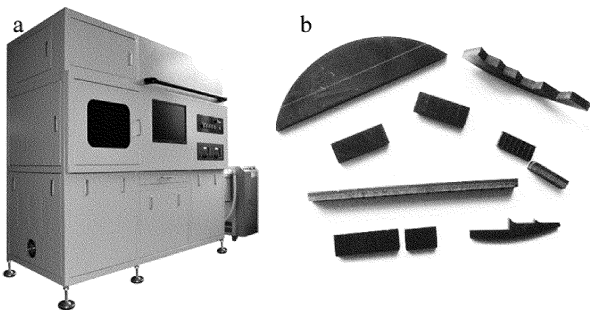


Fig. 1 Laboratory equipment and materials

a—NSC-LC-100 laser cutting machine b—polycrystalline cubic boron nitride

进行工艺试验时,采用打孔方式来计算得出 PCBN

在该条件下的烧蚀阈值,通过切割试验获得各切割参量对切割质量的影响。实验完成后,采用 MV6000 金相显微镜对切缝表面和侧面进行测量和分析。

## 2 实验及结果分析

### 2.1 PCBN 激光烧蚀阈值的实验测定

所谓烧蚀阈值就是对材料产生不可逆破坏时去除单层材料所需能流密度<sup>[12]</sup>,单脉冲激光能量密度很大程度上决定着激光烧蚀的效率。理论上讲,激光脉冲能量稍大于烧蚀阈值时加工质量最好,但在实际中由于能量不同程度的散失,一般经验表明,在合理的去除速率条件下最好的精度可以通过功率密度选择在 5 倍 ~ 10 倍的阈值激光脉冲获得。因此分析 PCBN 激光烧蚀阈值可以一定程度上指导实验,避免能量过大造成裂纹和能量过小造成的切不透或者效率低等现象。

目前确定烧蚀阈值的方法主要有在线观测、形貌检测及数值计算等。本实验中采用数值计算的方法<sup>[13]</sup>并辅以显微观测,推导出烧蚀直径  $D$  与脉冲激光能量  $E$  的函数关系,将线性曲线外推至  $D = 0$  处,从而得出材料的破坏阈值,同时还能够获得光束的焦点半径。

不同能量密度的激光加工 PCBN 时,材料表面会形成不同直径的孔,得到半径  $r$  与脉冲能量  $E$  的关系为<sup>[14]</sup>

$$r^2 = \rho^2 \ln\left(\frac{E_0}{E_{th}}\right) \quad (1)$$

式中, $\rho$  为脉冲空间半径, $E_0$  为入射脉冲激光能量, $E_{th}$  为烧蚀半径为  $r$  时的脉冲激光能量。光束焦点半径  $w_0$  的平方是空间半径  $\rho$  平方的 2 倍,因此(1)式可以变为普遍的研究烧蚀直径  $D$  与聚焦后焦点半径  $w_0$  以及入射脉冲激光能量  $E_0$  的关系<sup>[15]</sup>:

$$D^2 = 2w_0^2 \ln E_0 - 2w_0^2 \ln E_{th} \quad (2)$$

此处应当指出,本实验中为多脉冲烧蚀,单脉冲与多脉冲烧蚀阈值之间关系式可表示为<sup>[16]</sup>:

$$F_{th}(N) = F_{th}(\infty) + [F_{th}(1) - F_{th}(\infty)] \exp[-a(N-1)] \quad (3)$$

式中, $F_{th}(1)$  为单脉冲烧蚀阈值; $F_{th}(\infty)$  为多脉冲烧蚀阈值; $a$  为能量累积强度; $N$  为脉冲个数。由此可见,当脉冲个数逐渐增大,烧蚀阈值有减小的趋势,这是因为多脉冲烧蚀存在着能量累积。当脉冲个数增大到一定数值时烧蚀阈值趋近定值,且材料的吸收系数越大烧蚀阈值就越低。

通过 PCBN 不同激光功率密度下的烧蚀显微观测,获得了入射脉冲激光能量  $E_0$  与烧蚀孔径形貌之间的关系如图 2 所示。

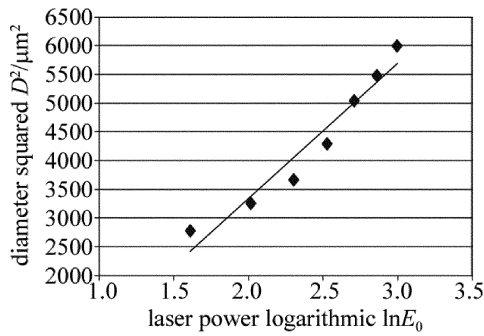


Fig. 2 Relationship between log of laser power and square of ablation diameter

拟合数据结果得到斜率  $k(k = 2w_0^2)$  值为 2361.5, 推出激光焦点半径  $w_0 = 34.4 \mu\text{m}$ , 同时依据上述理论, 由拟合直线与横坐标截距, 可得出脉冲宽度  $100 \mu\text{s}$ 、重复频率  $50\text{Hz}$ 、波长  $1064\text{nm}$ 、脉冲时间  $0.5\text{s}$  时, PCBN 激光烧蚀阈值为  $1.796\text{J}/\text{cm}^2$ 。

从烧蚀阈值来看, 完成 PCBN 去除仅需要微小能量, 但对于  $2\text{mm}$  厚的 PCBN 来讲, 实现高效的激光切割能量远远不够, 能量过小会造成如图 3a 所示的切不透现象。同时多次试验表明, 过小能量切割 PCBN 表面粗糙度较差。由于 PCBN 材料的脆硬性影响, 能量过大则会出现严重的崩边与裂纹, 如图 3c 所示。在图 3b 中看到, 孔右上角部分呈现椭圆形, 那是因为激光光束垂直度不足导致, 该现象也是导致切缝较宽表面质量差的一个重要原因。

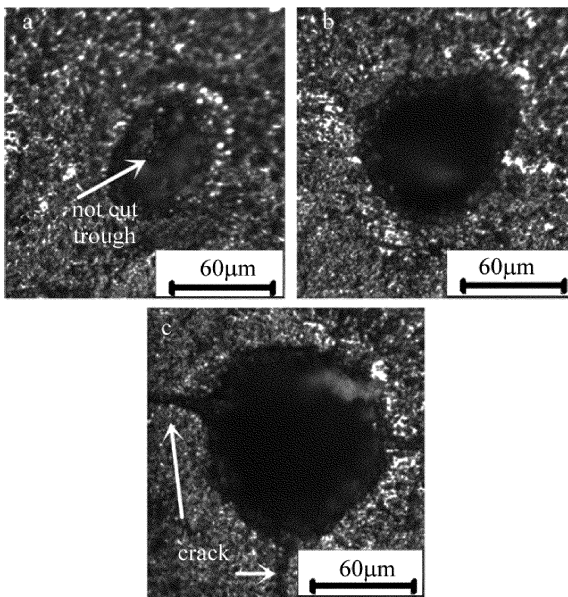


Fig. 3 The perforated microstructure under different laser powers  
a— $P = 5\text{W}$  b— $P = 20\text{W}$  c— $P = 40\text{W}$

## 2.2 PCBN 激光切割试验与分析

2.2.1 切割速率对切割质量的影响 切割速率的变化意味着激光与材料相互作用时间的变化, 材料在单位面积上得到的激光能量发生改变。图 4 为激光功率为  $20\text{W}$ 、脉冲频率为  $50\text{Hz}$ 、切割速率分别为  $10\text{mm}/\text{min}$ ,

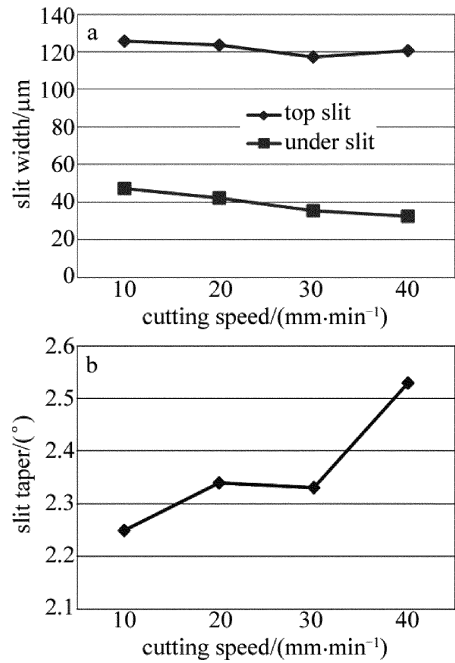


Fig. 4 Slit width and slit taper with the change of cutting speed

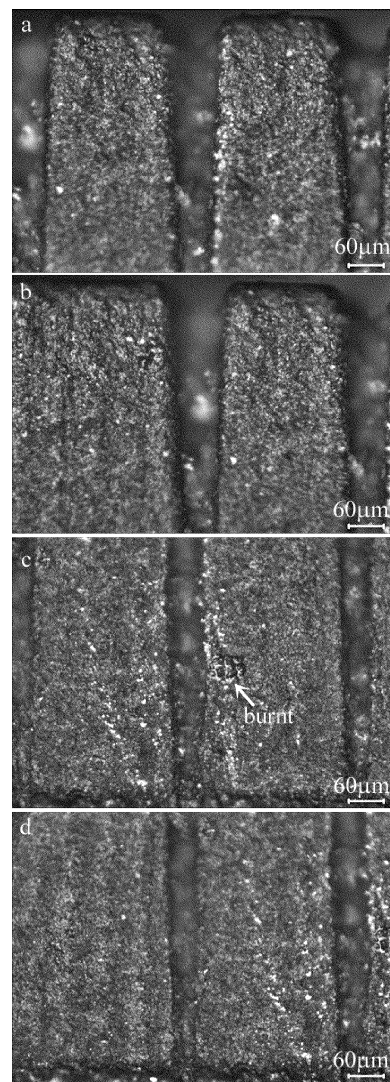


Fig. 5 Slit microstructure with different cutting speeds  
a—top slit,  $v = 10\text{mm}/\text{min}$  b—top slit,  $v = 30\text{mm}/\text{min}$  c—under slit,  $v = 10\text{mm}/\text{min}$  d—under slit,  $v = 30\text{mm}/\text{min}$

20mm/min, 30mm/min, 40mm/min 时, 切缝宽度与锥度的变化情况。通过实验可以看出, 随着激光切割速率的增大, 切缝宽度有减小趋势, 但上缝宽基本维持在 121 $\mu\text{m}$  左右, 如图 5a 和图 5b 所示变化不大, 下缝宽变化较为明显, 这直接反映到切割锥度上。切割速率增大, 切缝锥度变大, 切割质量有所降低。这是由于激光作用时间减小, 能量密度降低, 材料获得能量较少导致。切割速率过高易造成切口清渣不净或切不透, 切割速率过低会造成如图 5c 中所示的材料过烧现象, 切口宽度和材料热影响区过大、切割质量较差、生产效率低。由此可见, 切割速率为 20mm/min 时的 PCBN 激光切割质量要优于其它 3 种。

2.2.2 激光功率对切割质量的影响 激光能量是切割过程得以进行的主要能量来源, 功率大小将直接影响切割时的能量密度。图 6 为采用脉冲频率 50Hz、切割速率 30mm/min、激光功率分别为 16W, 20W, 24W, 28W 时, 切缝宽度与锥度随功率的变化情况。由实验可知, 激光功率对切缝宽度和锥度有重要影响, 随着功率的增大, 切缝宽度增大锥度减小, 材料去除量增加。

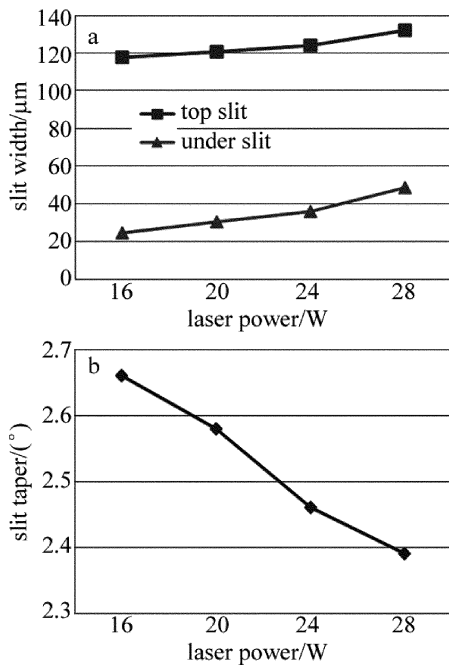


Fig. 6 Slit width and slit taper with the change of laser power

2.2.3 脉冲频率对切割质量的影响 图 7 为不同频率下缝宽和锥度的变化曲线。其中激光功率 20W, 切割速率 30mm/min, 脉冲频率分别为 30Hz, 40Hz, 50Hz, 60Hz。从图中看出, 激光脉冲频率对切缝宽度影响最大。随着频率的增大, 缝宽显著减小, 同时切割锥度也随之减小。脉冲频率的大小决定着激光光斑的重叠程度, 图 8 为 PCBN 激光切割、掰片、简单去熔渣后断面形貌图。上层为 PCBN, 下层为硬质合金。图中能明显看出切割后的条纹形状。根据单脉冲激光能

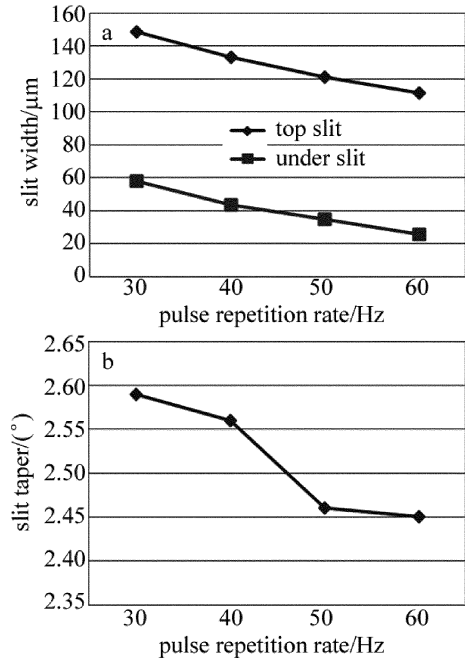


Fig. 7 Slit width and taper curve with pulse repetition rate

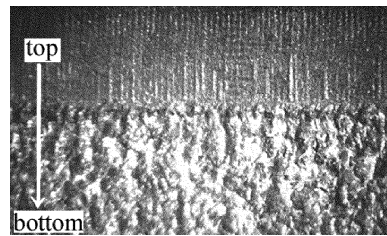


Fig. 8 Cutting cross-section morphology of PCBN

量  $E$  与平均输出功率  $P_{\text{ave}}$  和脉冲频率  $f$  的关系式  $E = P_{\text{ave}}/f$  可知, 随着脉冲频率的增加, 单脉冲能量减小, 光斑重叠度增大, 这对表面切割质量的提高和裂纹的减少起着重要作用。

### 2.3 激光切割机理分析

PCBN 的切割质量与激光作用在材料表面的能量密度有重要关系, 激光功率和切割速率决定着材料单位面积获得激光能量的大小。激光斑点上的功率密度  $I$  可表示为<sup>[17]</sup>:

$$I = \frac{4E}{\pi d^2 t_p} \quad (4)$$

式中,  $E$  为单脉冲激光能量,  $d$  为光斑直径,  $t_p$  为脉冲宽度。在脉宽和频率一定时, 提高输出功率能增大激光束功率密度, 较高的功率密度使加工过程中产生更多的蒸汽相物质, 切割宽度和深度增大, 断面质量较好, 也利于后续加工, 如图 9 所示。功率的增加使切割速率范围也随之扩大, 提高了切割的质量稳定性和效率, 但要避免功率过大而造成的崩边。脉冲频率的增加, 单脉冲能量减小, 峰值功率降低, 缝宽和锥度随之减小。

激光脉冲频率和脉冲宽度对裂纹的减少以及表面

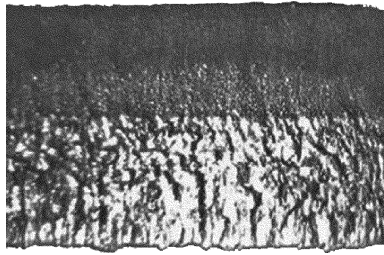


Fig. 9 Superior cutting cross-section

切割质量的提高有着重要影响。从传热学可知,热穿透深度为 $\sqrt{4\alpha t}$ (其中 $\alpha$ 为热扩散系数, $t$ 为热作用时间),可估算出脉宽为 $100\mu\text{s}$ 的Nd:YAG激光切割材料热穿透深度约为 $350\mu\text{m}$ <sup>[18]</sup>。脉冲宽度越窄,热影响区越小,烧蚀阈值也越小<sup>[14]</sup>。当脉冲宽度低于能量传递弛豫时间时,能够实现材料的“冷加工”去除<sup>[19]</sup>,有效改善切割表面质量。但短脉冲激光加工效率往往很低,无法实现超硬材料的快速切割。因此,如何兼顾质量与效率一直是值得探讨的话题。

### 3 结 论

(1) 当脉冲宽度 $100\mu\text{s}$ 、重复频率 $50\text{Hz}$ 、波长 $1064\text{nm}$ 、脉冲时间为 $0.5\text{s}$ 时,测得PCBN烧蚀阈值为 $1.796\text{J}/\text{cm}^2$ ,激光焦点半径 $w_0 = 34.4\mu\text{m}$ 。

(2) 激光功率和切割速率的配合决定着切割线能量的大小,适当增加线能量有利于切割质量的提高,但要避免材料的过烧和崩边现象。脉冲频率的增加,降低了激光单脉冲能量,切缝宽度与锥度均减小,有利于切割质量的改善。

(3) 采用脉宽为 $100\mu\text{s}$ 的激光,当激光功率为 $28\text{W}$ 、脉冲频率为 $60\text{Hz}$ 、切割速率为 $20\text{mm}/\text{min}$ 时,能够获得 $2\text{mm}$ 厚PCBN较优的激光切割质量,同时保证了切割效率。

### 参 考 文 献

- [1] LIU Y, LÜ Zh, GUO H, *et al.* Strategic consideration on developing polycrystalline cubic boron nitride in China[J]. Tool Engineering, 2008, 42(8): 3-6 (in Chinese).
- [2] DEN F M, CHEN Q W. Manufacturing, properties and applications of PDC cutting tool material[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 16-17 (in Chinese).
- [3] CHEN Y J, WANG H K, PENG J, *et al.* Production methods and application of polycrystalline cubic boron nitride[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2015, 35(2): 74-79 (in Chinese).
- [4] LIU X L. PCBN tool and its application[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1999: 20-50 (in Chinese).
- [5] KOU Z L, LI Y, DOU Y W. Situation and development of PCD/PCBN tools[C]//Superhard Materials and Products Professional Committee of Chian Materials Research Society. 50th Anniversary of China Superhard Materials and Products Featured Book. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2014: 435-441 (in Chinese).
- [6] ZHANG L L, LIN F, LIU Z H, *et al.* Discussion on the development and applications of PCBN in China[C]//Superhard Materials and Products Professional Committee of Chian Materials Research Society. 50th Anniversary of China Superhard Materials and Products Featured Book. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2014: 219-225 (in Chinese).
- [7] HE H H, LÜ Z, LIN F, *et al.* Factors of influencing on the process property of PCBN[J]. Superhard Material Engineering, 2007, 19(2): 6-10 (in Chinese).
- [8] JIANG W, PAN Y, LI L W, *et al.* Influence of synthetic pressure on wear resistance and electric conductivity of PCBN compacts[J]. Superhard Material Engineering, 2011, 23(3): 16-18 (in Chinese).
- [9] XIAO L, ZENG M X, WU H H, *et al.* Study on cutting technology of PCBN tool[J]. Tool Engineering, 2005, 39(10): 12-14 (in Chinese).
- [10] HUANG F M, XIE X Z, WEI X, *et al.* Newly developed techniques for laser dicing wafer[J]. Laser Technology, 2012, 36(3): 293-297 (in Chinese).
- [11] WU Z R, MELAI BARI A, MOLIAN P, *et al.* Hybrid CO<sub>2</sub> laser/waterjet (CO<sub>2</sub>-LWJ) cutting of polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) blanks with phase transformation induce fracture[J]. Optics and Laser Technology, 2015, 70: 39-44.
- [12] PECHOLT B, VENDAN M, DONG Y Y, *et al.* Ultrafast laser micromachining of 3C-SiC thin films for MEMS device fabrication[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(3): 239-250.
- [13] LENZNER M, KRÜGER J, SARTANIA S, *et al.* Femtosecond optical breakdown in dielectrics[J]. Physical Review Letters, 1998, 80(18): 4076-4079.
- [14] ZHAO Q L, JIANG T, DONG Z W, *et al.* Ablation threshold and material removal mechanisms of SiC processed by femtosecond laser[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(21): 172-177 (in Chinese).
- [15] GUDDE J, HOHLFELD J, MULLER J, *et al.* Damage threshold dependence on electron-photon coupling in Au and Ni films[J]. Applied Surface Science, 1998, 127/129: 40-45.
- [16] DONG Y Y, MOLIAN P. Femtosecond pulsed laser ablation of 3C-SiC thin film on silicon[J]. Applied Physics, 2003, A77(6): 839-846.
- [17] ZHOU B K, GAO Y Z, CHEN T R, *et al.* The principle of laser[M]. 7rd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 145-147 (in Chinese).
- [18] WU Y, ZHANG G F. Damage analysis of PDC cutted by Nd:YAG laser and WEDM[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(9): 1034-1039 (in Chinese).
- [19] JI L F, LING C, LI Q R, *et al.* Research progress and development of industrial application of picosecond laser processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(5): 115-126 (in Chinese).