



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20200111

立方氮化硼刀具材料的激光水射流复合工艺加工方法

何同继¹, 谢皆睿¹, 王巍¹, 王石¹, 王一桦¹, 赵静楠²

(1. 中铁十六局集团北京轨道交通工程建设有限公司, 北京 100018; 2. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 研究了激光水射流(LWJ)复合工艺加工聚晶立方氮化硼(PCBN)切削机理. LWJ系统集成了高功率CO₂激光束和低压水射流,采用快速加热和冷却,实现了沿加工路径的断裂萌生和扩展.通过扫描电镜(SEM)和拉曼实验,确定了相变导致的断裂扩展切削机理.实验结果表明:激光加工和水射流淬火导致试样表面首先产生划痕,同时部分立方氮化硼(cBN)沿切割路径相变为六方氮化硼(hBN).由于hBN比cBN占有更大的体积,这导致周围材料的拉伸应力受约束膨胀和扩展.应力驱动激光加工的沟槽沿厚度方向传播,使试样分离,完成材料的切割.相变致裂是一种有效的切削机理,该模型可作为控制加工参数以提高立方氮化硼材料的加工质量.

关键词: 激光水射流(LWJ); 激光加工; 聚晶立方氮化硼; 相变

中图分类号: TH161 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2021)04-0057-04

Laser/Waterjet (LWJ) Machining of Polycrystalline Cubic Boron Nitride Tool Material

HE Tongji¹, XIE Jierui¹, WANG Wei¹, WANG Shi¹, WANG Yihua¹, ZHAO Jingnan²

(1. Beijing Rail Transit Engineering Construction Co., Ltd., China Railway 16th Bureau Group, Beijing 100018, China;
2. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: This paper investigated a novel ceramic material cutting mechanism through controlled crack propagation of the Polycrystalline Cubic Boron Nitride (PCBN) substrates with Laser/Waterjet (LWJ) machining system. The LWJ system integrates a high-power CO₂ laser beam with a low-pressure waterjet, and applies rapid heating and quenching to achieve fracture initiation and propagation along the machining path. Cutting mechanism of phase transformation induced fracture propagation was identified through SEM and Raman tests. These tests results show that laser irradiation and waterjet quenching caused scratches on the sample surface, and part of cubic boron nitride (cBN) was transformed into hexagonal boron nitride (hBN) along the cutting path. Because hBN occupied more volume than cBN, this resulted in constrained expansion and development of tensile stresses in the surrounding materials. Furthermore, the stresses drove the laser machined groove to propagate through the thickness, thus separating the specimen and completing the cutting of the material. These results suggest that phase transformation induced fracture is an efficient mechanism and the model could be used as a guide to control processing parameter for improving cutting quality.

Key words: Laser/Waterjet; laser machining; PCBN; phase transformation

立方氮化硼(cBN)具有超高硬度,是一种难加工的陶瓷材料.聚晶立方氮化硼(PCBN)具有良好的热稳定性和化学稳定性,工业上已被用作金刚石的替代品.PCBN不与黑色金属反应,抗氧化能力强^[1],是加工硬铸铁、高铬合金钢、高强度镍超合金、粉末金属

合金及金属基复合材料的理想工具材料^[2].PCBN刀具坯料由细小晶体组成,在高温高压条件下与金属(Co)或其他黏结剂烧结而成.常用的黏结剂相包括镍^[3]、碳酸镁^[4-5]和陶瓷(AIN和TiN).氮化硼与碳类似,既存在类金刚石sp³键合相(cBN和wBN),也存

收稿日期: 2020-06-30; 修回日期: 2020-10-19

作者简介: 何同继(1984—),男,湖南永州人,高级工程师;通信作者: 赵静楠,副教授, jingnanzhao@tust.edu.cn

在类石墨 sp^2 键合相 (hBN 和 rBN), 在高温高压下, 这两种相之间会发生转化^[6]. 此外, sp^2 键结构比 sp^3 键结构占有更大的体积^[7], 因此转化后的材料有膨胀原材料的趋势并产生较大的相变应力.

PCBN 工具通常有两种形式: 固态紧凑型或与碳化钨基体复合型. PCBN 在加工过程中提供了高耐磨性, 碳化钨基板提供了所需的韧性和低成本, 使复合工具成为制造厂的理想选择. PCBN 坯料的厚度范围为 1.6 ~ 4.8 mm, 可用于制造圆形、方形、菱形和三角形的刀片, 以适应不同行业的特殊用途.

PCBN 刀具毛坯硬度极高, 加工难度较大. 在刀具生产过程中, 材料加工速度是一个重要的标准. 目前有很多 PCBN 加工方法的研究, 但尚未有最优的方法可满足工业生产率所要求的速度、加工精度和成本效益的结合. 目前 PCBN 刀具的制造方法主要有金刚石锯、电火花加工、线切割和 Nd: YAG 激光切割等, 这些方法速度慢、精度低. 由于刀具磨损较快且加工过程较慢, 金刚石磨削加工主要用于精加工. PCBN 的电火花加工 (EDM)^[8-9] 和电火花磨削 (EDG)^[3,10] 加工成本高、速度慢、效率低. 如果待切削材料不导电 (例如带 AlN 黏结剂的 PCBN), 则无法使用电火花加工. 线切割自动化程度高, 但价格昂贵, 同时由于 PCBN 中 cBN 单晶颗粒不导电, 线切割加工难度大, 易断丝. 常规 Nd: YAG 激光切割存在颗粒形成 (由于气化) 和热损伤等问题, 其切口普遍较大, 材料损失较多. 水射流/激光诱导技术^[11] 是由瑞士联邦理工学院的研究人员开发的全新技术, 可以

精确切割 PCBN 材料获得较小的切口和良好的表面光洁度. 与传统的激光加工和电火花加工相比, 其公差要小得多. 然而, 该工艺的切割速度非常慢, 据报道, 每切割一个零件需要 120 道工序, 每道工序的切割速度为 25 mm/s, 切割厚度为 1.6 mm^[11-14].

为提高 PCBN^[4] 的加工效率和质量, 本课题组开发了一种连续波 CO₂ 激光与水射流 (LWJ) 相结合的新工艺. CO₂-LWJ 加工系统实现了高功率激光加热和低压水射流淬火, 实现了裂纹萌生和沿切削路径的传播控制. 已完成的实验表明, 单次切割速度可达 42.3 mm/s. CO₂-LWJ 的优势在于比传统的 Nd: YAG 激光器加工具有更小的切口 (切口宽度可以达到微米级)、较好的表面光洁度、非常小的热影响区和更快的切削速度.

1 材料与方法

切割实验的样品是一种以碳化钨 (WC) 为底板的双层 PCBN 材料. 材料厚为 1.6 mm, 其中 PCBN 厚度为 1 mm, 剩余部分为碳化钨基板. PCBN 的组成为 cBN 和黏结剂, 二者各占质量的 50%, 黏结剂的组成为氮化钛. 不同材料的性能见表 1. 首先用 0.2 mm 聚焦激光束进行单道直线切割, 形成初始凹槽. 此后采用激光水射共同作用的工艺, 离焦光斑为 0.5 mm, 使现有裂纹在整个试件中延展. 激光功率维持在 400 W, 激光扫描速度维持在 42.3 mm/s, 激光器能量密度为 3.18×10^6 kJ/m².

表 1 PCBN、hBN、WC 的材料性能

Tab. 1 Material properties of PCBN, hBN and WC

样品	密度/(kg·m ⁻³)	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	泊松比	杨氏模量/GPa	热膨胀系数	断裂韧性/(MPa·m ^{1/2})
PCBN	3 450	200	900	0.15	710	5.6×10^{-6}	5 ~ 7.7
hBN	2 010	360	600	0.20	70	2.0×10^{-6}	—
WC	15 360	80	300	0.22	570	5.0×10^{-6}	12 ~ 16

所有的实验均采用波长 10.6 μm 的连续波 CO₂ 激光器. 切割样品安装在由数控系统控制的数控平台上. 激光光束通过一个 127 mm 聚焦透镜, 在样品表面照射 0.2 mm 的聚焦光斑. 通过调节激光头与样品表面的距离, 可以实现离焦. 水射流在试样表面以 2 mm 的距离跟随激光束. 所有实验均保持恒水压 (0.4 MPa). 激光束周围空气压力为 35 kPa, 以防止激光与水射流的直接相互作用.

采用扫描电镜 (JEOL JSM-606LV 型, 20 kV) 对切削质量进行了检测, 并对切削特征进行了表征. 采用光学显微镜测量切口深度. 利用拉曼光谱对横切

面和未切割的样品中存在的材料进行结构分析.

2 理论分析

通过断裂力学分析, 确定 PCBN-WC 试样激光水射流加工实验的裂纹扩展行为. 由图 1 可知: 在激光扫描的作用下, 材料沿激光的扫描路径产生水平和垂直的微裂纹, 破坏了材料原介质的连续性. 由于惯性和载荷在微裂纹附近集中, 导致裂纹的进一步扩展, 进而使材料沿着激光扫描路径和垂直于激光扫描路径的 V 型口扩展. 激光扫描使材料表面受热, 产生

局部切割,导致裂纹成形和扩展.在随后的激光水射流复合加工开始时,试样的边缘会产生裂纹.随着激光束的移动,现有的裂纹沿着 LWJ 路径向板的中心扩展,实现了材料的分离.

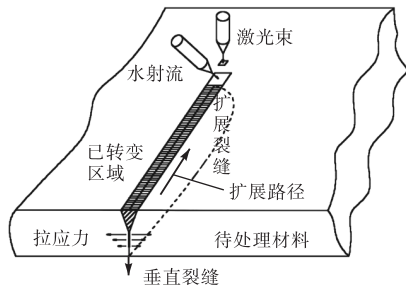
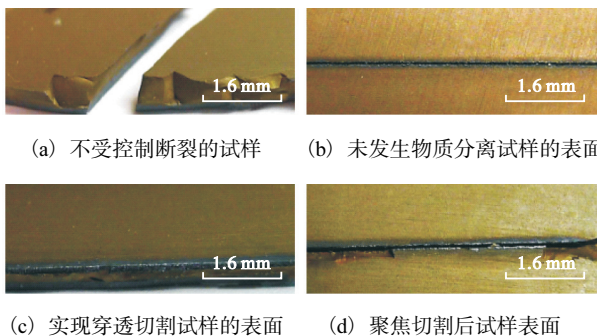


图 1 裂纹扩展机制

Fig. 1 Crack propagation mechanism

3 结果与讨论

CO₂-LWJ 聚焦和离焦光束切割 PCBN-WC 试样的照片如图 2 所示.



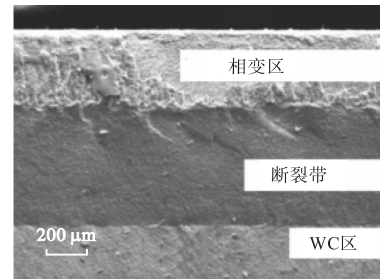
(c) 实现穿透切割试样的表面 (d) 聚焦切割后试样表面

图 2 CO₂-LWJ 聚焦和离焦光束切割 PCBN-WC 试样结果图

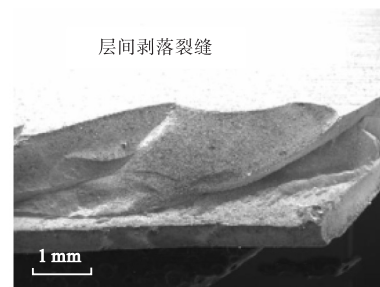
Fig. 2 Results of cutting PCBN-WC samples with CO₂-LWJ focusing and defocusing beams

在之前对固体 PCBN 的切割研究中,成功地利用单通道聚焦 LWJ 光束实现了材料的分离.但由于碳化钨的高韧性,即使在相同的切削条件下,以碳化钨为基体的 PCBN 也不能进行切割.增加能量输入会导致试样的破坏性崩裂和不受控制的断裂(图 2(a)).由于采用聚焦光束切割实验结果不理想,随后的实验引入聚焦与离焦相结合的激光水射流加工工艺,实现了裂纹可控并且切口较小的加工完成度.首先,聚焦的 LWJ 光束在没有物质分离的情况下产生表面切痕(图 2(b)).然后进行激光水射流离焦光束加工,成功地实现了该双层试样的穿透切割,且没有造成太大的表面损伤(图 2(c)).虽然有时仍能观察到侧向裂缝,但与聚焦切割(图 2(d))相比明显减少.

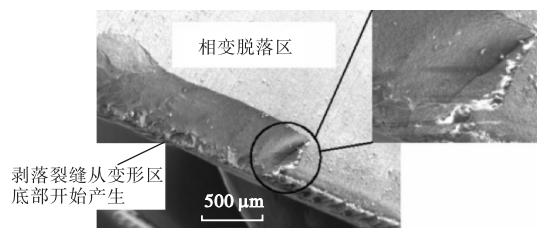
采用扫描电镜(SEM)对试样横截面的显微结构特征进行了研究,结果如图 3 所示,其中图 3(a)为三层不同表面形貌的横截面.



(a) 经过离焦加工后的 WC-PCBN 横截面表面形貌



(b) 材料切削剥落部分



(c) 层间界面出现剥落裂缝

图 3 扫描电镜(SEM)下试样横截面的显微结构特征

Fig. 3 Microstructural characteristics of cross section of samples under scanning electron microscope (SEM)

对整个厚度的多个位置进行拉曼光谱分析,结果如图 4 所示.顶层为 LWJ 系统加工区域,没有 cBN 相,但在 1160、1370、1530 cm⁻¹ 附近出现了几个新的波峰.其中 1370 cm⁻¹ 处的吸收峰为 hBN 相,证明了在激光加热和水射流加工过程中,发生由原来的 PCBN 到 hBN 的相变.1560 cm⁻¹ 处的吸收峰为碳化硼峰,被认为是线性链的不对称拉伸所致.此外,1530~1560 cm⁻¹ 处的吸收峰为 LWJ 切割时黏结剂化学反应产生的碳簇峰.拉曼结果验证了激光加工区域的相变,因此在 SEM 照片中标记为相变区(图 3(a)).断裂形貌的中间层仅在 1057 cm⁻¹ 和 1302 cm⁻¹ 处出现 cBN 的吸收峰,与未加工试样组成相同,如图 3(a)所示为断裂带.底层标记为 WC 区,

是由裂纹在 WC 材料中的扩展而形成的. 根据图中显示, 相变 PCBN-WC 样本的深度约 400 μm . 离焦光束在较深区域内对材料的相变转化是单通道聚焦光束的两倍. 图 3(b) 为 PCBN 与 WC 界面间横向裂纹

扩展导致的剥落 PCBN 层. 图 3(c) 为转化材料的剥落和从转化区底部开始横向微裂纹的萌生. 严重的损坏不仅造成材料的浪费, 而且给样品的后处理带来不便, 需要后续以精加工的方式完成材料的切削.

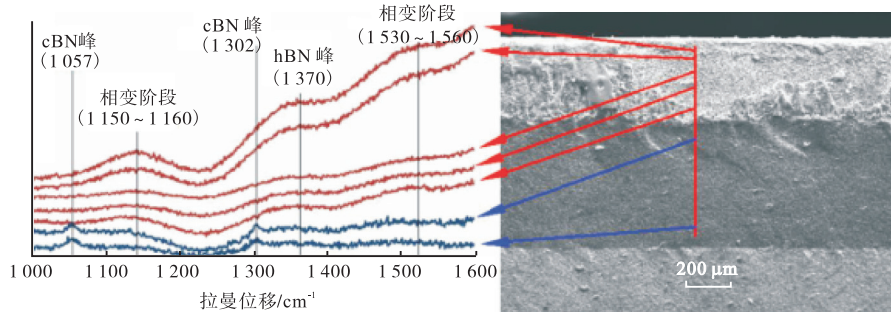


图 4 相变区和断裂带的拉曼光谱

Fig. 4 Raman spectrum of transformed zone and fracture zone

4 结 语

在 1.6 mm 碳化钨基体上进行 LWJ 切割 PCBN 的实验工艺参数为 42.3 mm/s 和 400 W. 采用单道聚焦光束直线切割, 形成初始凹槽后进行离焦激光与水射流共同作用的新方法, 成功地实现了全切割. 在集中切削过程中出现横向裂纹, 与集中切削相比, 激光水射加工能明显抑制不受控制的横向裂纹.

单道聚焦光束直线切割致使试样表面首先产生划痕, 然后在离焦激光与水射流的共同作用下部分立方氮化硼沿切割路径相变为六方氮化硼. 由于 hBN 比 cBN 占有更大的体积, 这导致周围材料的拉伸应力受约束膨胀和扩展, 应力驱动激光加工的沟槽沿厚度方向传播, 使试样分离, 完成材料的切割. 即在相变引起的体积膨胀所施加的应力场作用下, 通过控制断裂扩展, 证明了材料的分离机理, 由此为提高立方氮化硼材料的加工质量提供了一种新的思路.

参考文献:

[1] ZHAO J, GUO J, SHROTRIYA P, et al. A rapid one-step nanosecond laser process for fabrication of super-hydrophilic aluminum surface[J]. *Optics & laser technology*, 2019, 117: 134-141.

[2] 李艳国, 成照楠, 邹芹, 等. PCBN 超硬刀具研究与进展[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2019, 39(3): 58-68.

[3] MELAIBARI A A, WU Z, SHROTRIYA P, et al. Extreme hardness achievements in binderless boron nitride tools[J]. *Acta mater*, 2016, 102: 315-322.

[4] 蓝春录. CBN 刀具特性及其应用[J]. *设备管理与维修*, 2005(S1): 417-420.

[5] 屠厚泽. 聚晶立方氮化硼切削刀具的研究现状及其发展[J]. *探矿工程*, 1995(2): 14-16.

[6] ZHAO J, SHROTRIYA P. Increase the hardness of polycrystalline cubic/wurtzite boron nitride composite through hybrid laser/waterjet heat(LWH)treatment[J]. *Advances in applied ceramics*, 2017, 116(6): 333-340.

[7] 王军, 姜新桥, 瞿大中. 提高超硬刀具材料线切割加工效率的途径[J]. *电加工与模具*, 2004(4): 59-60.

[8] 蔡志祥, 刘佳, 王东, 等. PCD/PCBN 复合片激光切割工艺与质量研究[J]. *应用激光*, 2018, 38(2): 250-255.

[9] ZHAO J, WONG K S, SHROTRIYA P. Hybrid CO₂ laser waterjet heat(LWH)treatment of bindered boron nitride composites with hardness improvement[J]. *Ceramics international*, 2017, 43(11): 8031-8039.

[10] MA L, WANG L, LI C, et al. Hybrid nanosecond laser processing and heat treatment for rapid preparation of super-hydrophobic copper surface[J]. *Metals: open access metallurgy journal*, 2019, 9(6): 668.

[11] 刘超锋, 刘书锋, 方少明, 等. 国内外 PCBN 刀具新品[J]. *制造技术与机床*, 2008(6): 52-58.

[12] 郭妍. 基于正交试验分析的电火花放电磨削 PCBN 刀具工艺研究[C]//朱荻, 徐均良. 特种加工技术智能化与精密化: 第 17 届全国特种加工学术会议论文集(摘要). 广州: 中国机械工程学会特种加工分会, 2017.

[13] 张昌娟, 焦锋, 牛赢. PCBN 刀具激光超声复合切削硬质合金的磨损机理[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(8): 45-51.

[14] 贾志新, 黄金刚, 高坚强, 等. 长脉宽激光切割聚晶立方氮化硼工艺研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(3): 346-350.

责任编辑: 周建军