

无黏结剂层状 BN 增韧 cBN 刀具材料的研究

陈俊云^{1,2}, 孙磊², 靳田野^{1,2}, 罗坤², 赵智胜², 田永君²

(燕山大学 1. 机械工程学院; 2. 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 高压科学研究中心, 秦皇岛 066004)

摘要: 无粘结剂 cBN 材料制作的切削刀具韧性较差, 并且这种材料的合成压力高。为此, 本研究在工业压力下制备了超硬、高韧的新型无粘结剂层状 BN 增韧 cBN (Lt-cBN) 块材, 通过切削硬质合金实验, 分析了 Lt-cBN 材料内部微观结构对其切削性能和耐磨性的影响。研究表明: Lt-cBN 材料的韧性高达 $8.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 可超精密切削硬质合金, 获得了粗糙度 R_a 低于 10 nm 的超光滑表面; Lt-cBN 材料内部存在少量层状 BN, 不仅提高了韧性, 还降低了表层材料的非晶化程度及磨损速率; 相对于商品化的纯相 cBN 材料, Lt-cBN 材料展现出更好的切削性能和耐磨性; Lt-cBN 材料的主要磨损形式为后刀面的部分非晶化, 并在摩擦作用下逐渐被去除而导致的磨料磨损。

关键词: 无粘结剂 cBN; 层状 BN; 超精密切削; 耐磨性; 硬质合金

中图分类号: TH145 文献标志码: A

Binderless Layered BN Toughened cBN for Ultra-precision Cutting

CHEN Junyun^{1,2}, SUN Lei², JIN Tianye^{1,2}, LUO Kun², ZHAO Zhisheng², TIAN Yongjun²

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Center for High Pressure Science, State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Poor toughness and high synthesis pressure of binderless cBN limits its application in the field of cutting tool. To enhance its toughness, an advanced layered BN toughened cBN (Lt-cBN) bulk was developed under industrial pressure. Then, the cutting performance and wear resistance of Lt-cBN was analyzed based on the unique microstructure during tungsten carbide cutting. It is found that the Lt-cBN reaches a high fracture toughness of $8.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, and is capable of realizing ultra-precision cutting of tungsten carbide with smooth surface of roughness lower than R_a 10 nm. The layered BN at the intersection of cBN grains within Lt-cBN contributes to the enhanced toughness, which further slows down the transformation of amorphization as well as the wear rate of the surface layer. Thus Lt-cBN exhibits better cutting performance and wear resistance in contrast to commercial binderless pure cBN material. The wear of Lt-cBN can be explained by the soft partially amorphous layer formed on the flank surface being rubbed and continuously removed in the form of abrasive wear.

Key words: binderless cBN; layered BN; ultra-precision cutting; wear resistance; tungsten carbide

收稿日期: 2021-05-12; 收到修改稿日期: 2021-06-15; 网络出版日期: 2021-06-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0703400); 国家自然科学基金(52090020, 51775482, 91963203)

National Key Research and Development Program of China (2018YFA0703400); National Natural Science Foundation of China (52090020, 51775482, 91963203)

作者简介: 陈俊云(1983-), 女, 教授. E-mail: sophiacjy@ysu.edu.cn

CHEN Junyun (1983-), female, professor. E-mail: sophiacjy@ysu.edu.cn

通信作者: 赵智胜, 教授. E-mail: zzhao@ysu.edu.cn

ZHAO Zhisheng, professor. E-mail: zzhao@ysu.edu.cn

立方氮化硼(cBN)是硬度仅次于金刚石的超硬材料,且热稳定性和化学稳定性优于金刚石,在超硬刀具领域中应用广泛^[1-2]。常用 cBN 刀具材料主要有两类,即含粘结剂的聚晶 cBN (PcBN)和无粘结剂 cBN^[3]。其中,在 5~6 GPa、1300~1400 °C 的条件下采用微米尺寸的 cBN 颗粒与金属或陶瓷粘结剂结合制备 PcBN,但是粘结剂降低了材料的硬度和耐磨性,硬度仅为 27~40 GPa^[4-5]。为了提高 PcBN 的硬度,研究者们以六方氮化硼(hBN)、热解类六方氮化硼(pBN)或 cBN 粉为原料在压力 ≥ 7.7 GPa 条件下合成了亚微米或纳米晶粒的无黏结剂纯相 cBN,该类材料的硬度、耐磨性和热传导性均优于 PcBN 材料^[4,6-8]。

因无黏结剂 cBN 材料优良的机械性能及其在切削领域广阔的应用前景,使无黏结剂 cBN 材料切削性能的研究备受关注。如 Taniguchi 等^[9]通过高温高压(≥ 7.7 GPa, >2000 °C)直接烧结 cBN 粉获得了无黏结剂 cBN 块材,制备成刀具并实现了硬质合金的精密切削。Fujisaki 等^[10]采用超细晶粒无黏结剂 cBN 制备刀具,切削出不锈钢镜面,其耐磨性优于金刚石。Sumiya 等^[7]以 hBN 和 pBN 为原料通过高温高压(≥ 8 GPa, ≥ 2200 °C)下的相变获得了无黏结剂 cBN,切削淬硬钢的性能较好。Wang 等^[11-12]研究表明,无黏结剂 cBN 材料在钛合金高速铣削中的耐磨性优于 PcBN 和聚晶金刚石刀具。另外, Bushlya 等^[13]发现无黏结剂 cBN 在 SiC 增强 Al-Si 合金切削中的耐磨性比 PcBN 提高了 20%~30%。然而,上述无黏结剂纯相 cBN 材料的韧性较低, $K_{IC}=5\sim 6$ MPa·m^{1/2},在硬质合金、淬硬钢等难加工材料的切削中很难实现超精密切削,刀具材料的韧性是影响切削刃锋利度和耐磨性的主要因素。此外,无黏结剂纯相 cBN 的合成压力一般高于 7.7 GPa,不利于工业化生产,制备成本高。

为提高无黏结剂 cBN 材料的韧性,赵智胜等^[14]在工业压力(6 GPa)下合成了一种超硬、高韧的层状 BN 增韧 cBN (Lt-cBN)材料,其断裂韧性 $K_{IC}=8\sim 10$ MPa·m^{1/2}、维氏硬度 40~50 GPa。Lt-cBN 的韧性高于上述无黏结剂纯相 cBN、PcBN 和单晶金刚石等刀具材料,并且合成压力低、易于工业化,很有希望成为超精密切削领域的新型刀具材料。因此,亟待研究该材料的切削性能和耐磨性。此外,硬质合金是典型的硬脆难加工材料,切削加工中易产生脆性断裂及严重刀具磨损,目前采用单晶金刚石刀具辅助振动切削或电化学处理技术可以进行硬质合金的超精密切削,但是刀具的切削距离极短^[15-16]。目前文献中尚未有关于硬质合金直接超精密切削的报道。

本研究针对硬质合金的超精密切削,在实验基础上研究了 Lt-cBN 材料应用于难加工材料超精密切削的性能,并与商品化无粘结剂纯相 cBN 材料进行对比,研究材料内部微观结构对其切削性能和耐磨性的作用机理。

1 实验方法

1.1 制备层状 BN 增韧 cBN (Lt-cBN)块材

以 cBN 粉末为原料,采用六面顶压机,在压力 6 GPa、温度 1700 °C 的条件下合成了层状 BN 增韧 Lt-cBN 块材,其直径为 5 mm、厚度约 3.5 mm,如图 1(a)所示,材料内部组织致密,无气孔及其它缺陷,平均晶粒尺寸约为 0.683 μm 。经检测该材料的维氏硬度为 45 GPa,断裂韧性 K_{IC} 为 8.5 MPa·m^{1/2},热稳定性在 1277 °C,压缩强度为 6.5 GPa。采用透射电镜分析发现,在合成材料的晶界交汇三角区形成了柔韧的类石墨 BN 薄层,上述少量层状 BN 既不影响材料整体硬度又起到了增韧的作用,见图 1(b)。

1.2 超精密切削实验

采用机械刃磨法将 Lt-cBN 块材制备成圆弧刀车削刀具。首先将圆柱形的 Lt-cBN 块材焊接在硬质合金刀柄上,然后基于平面研磨机床和刃磨圆弧的辅助装置分别进行前、后刀面的刃磨。刀具参数为:圆弧半径 1.0 mm,刀具前角-30°、-15°和 0°,后角 15°,切削刃平均钝圆半径为 0.214 μm ,前刀面的粗糙度 R_a 小于 1 nm。选用硬质合金 YG6X 为切削工件,其中 WC 的晶粒尺寸为 0.8 μm ,维氏硬度 17.42 GPa。为评价 Lt-cBN 刀具的切削性能,对比 Lt-cBN 和商品化纯相 cBN 刀具-NCB100 (Sumitomo, Japan),检测结果表明 NCB100 的硬度(50~55 GPa)略高于 Lt-cBN 刀具,但是韧性(5.0~6.0 MPa·m^{1/2})较差。

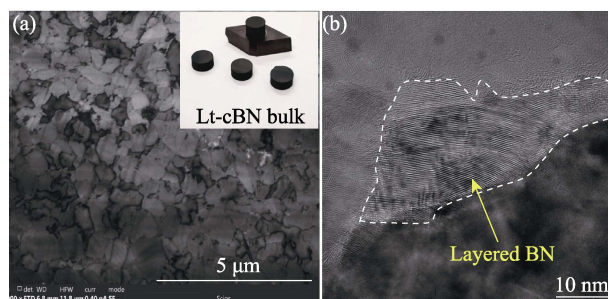


图 1 Lt-cBN 内部微观结构(插图为 Lt-cBN 照片)(a)和晶粒交界处的层状 BN 结构形貌(b)

Fig. 1 Images of Lt-cBN microstructure with insert showing its bulk (a) and layered BN at the intersection of grains (b)

切削实验装置如图2所示,将工件安装在超精密机床(Nanotech 450UPL, Moore)的主轴上,通过测力仪(91192AA2, Kistler)将刀架固定在机床的B轴。工艺参数为主轴转速 4000 r/min,进给量 2 $\mu\text{m}/\text{r}$,切削深度 3 μm ,干式切削。采用原子力显微镜(Dimension Icon, Bruker)观察切削的表面形貌和粗糙度,采用金相显微镜(DM2700M Leica)和扫描电镜(Scios, FEI, ThermoFisher)观测刀具的磨损形貌和尺寸,采用透射电镜(Talos, FEI, ThermoFisher)检测刀具的亚表层微观结构。

2 结果与讨论

2.1 Lt-cBN 材料在硬质合金表面的切削分析

对于硬质合金等难加工材料的切削,刀具前角是影响临界未变形切屑厚度的重要因素,本研究在前角 -30° 、 -15° 和 0° 的条件下对 Lt-cBN 和 NCB100 刀具进行切削。硬质合金表面粗糙度见表1,可以看出负前角的角度越大则切削表面粗糙度越高,这表明刀具负前角不利于硬质合金材料的塑性域去除。由于刀具负前角越大,切屑形成中的剪切角越小,对切削材料和切屑的挤压作用就越严重,即材料沿着剪切面发生塑性变形消耗的能量越大。同时切屑也发生了严重的弹塑性变形,因严重挤压加剧了刀

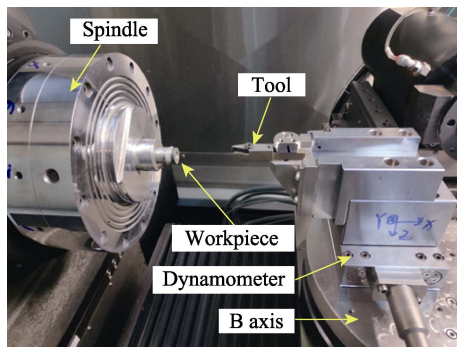


图2 切削实验装置

Fig. 2 Cutting experimental device

表1 硬质合金切削表面粗糙度和切削力

Table 1 Surface roughness of tungsten carbide and cutting force

Rake angle/ $^\circ$	Tool	Surface roughness, R_a/nm	Rake angle/ $^\circ$	Cutting force/N
0	Lt-cBN	13.3	0	0.296
	NCB100	33.4	0	1.528
-15	Lt-cBN	25.2	-15	2.990
	NCB100	41.1	-15	6.018
-30	Lt-cBN	49.6	-30	—
	NCB100	52.0	-30	—

屑界面的摩擦作用。上述综合作用导致切削力增大(表1中的切削力为沿着切削方向的主切削力),其中 -30° 前角的切削过程不稳定,未采集到有效的切削力信号。

对于硬质合金(WC-Co 复合相)材料的切削,两相界面处的结合力相对于单相材料较弱,所以切削力越大,材料表面亚微米尺寸的 WC 颗粒越容易被拔出或部分破碎,使得切削表面质量变差。从表1中还可以看出,相同工艺参数下 Lt-cBN 刀具在硬质合金切削中表现出更好的切削性能。与 NCB100 相比, Lt-cBN 切削的表面粗糙度较低,切削力较小,这主要与刀具在切削中的磨损状态有关。

选用 0° 前角的 Lt-cBN 刀具,进给量 0.5 $\mu\text{m}/\text{r}$,其它工艺参数同上,硬质合金切削表面形貌如图3(a)所示,可以看到工件表面规则分布的切削条纹;图3(b)为加工过程中收集的切屑,连续、完整的切屑表明切削过程中以塑性域方式去除硬质合金材料,根据切削参数可以计算出未变形最大切屑厚度为 38.6 nm,而 WC 颗粒平均尺寸约为 800 nm,表明 Lt-cBN 刀具能够切动 WC,且以塑性域方式去除硬质合金材料,这与文献[17]报道的 Co 黏结剂的塑性去除有所不同,因此 Lt-cBN 刀具加工出粗糙度 R_a 低于 10 nm 的光滑表面,见图3(c)。

2.2 Lt-cBN 刀具材料的耐磨损性能

Lt-cBN 刀具的主要磨损形式为后刀面磨损,因此采用后刀面磨损区的最大宽度 VB_{\max} 来评价其磨损程度。在主轴转速 4000 r/min、进给量 2 $\mu\text{m}/\text{r}$ 、切削深度 3 μm 、切削距离 56.5 m 的条件下, Lt-cBN 刀具的磨损情况见图4。与 0° 前角相比,负前角刀具的磨损较严重,且相同条件下 Lt-cBN 刀具后刀面磨损量均小于 NCB100,即 Lt-cBN 刀具材料的耐磨损性能更好。

0° 前角刀具切削 113 m 后的磨损形貌如图5所示, Lt-cBN 刀具磨损区域形貌较均匀,能够观察到沿着切削方向的大量沟槽,沟槽的宽度为 0.5~

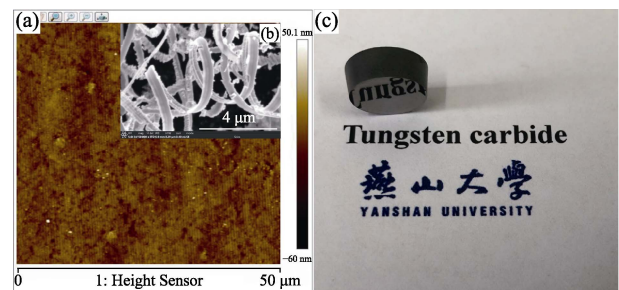


图3 硬质合金的切削表面形貌(a)、切屑(b)和切削工件(c)
Fig. 3 Machined surface morphology (a), chips produced during cutting (b) and mirror-like surface of workpiece (c)

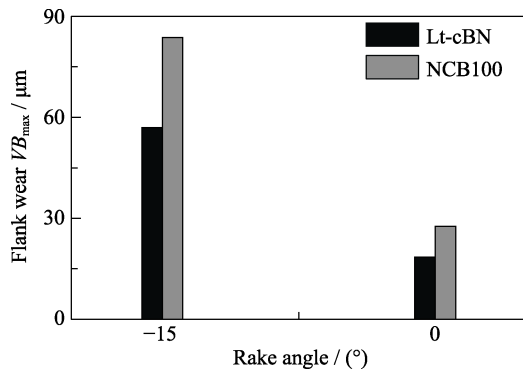
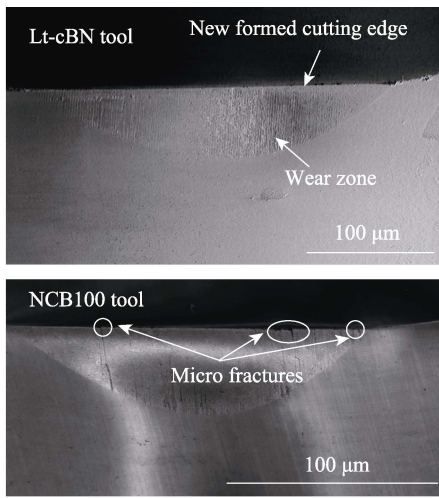
图 4 后刀面磨损区域的最大宽度 VB_{max} Fig. 4 The maximum width VB_{max} of the flank wear area

图 5 切削硬质合金后刀具的磨损形貌

Fig. 5 Morphologies of wear zone on the tool flank

$0.8 \mu\text{m}$, 而硬质合金中 WC 颗粒的平均尺寸为 $0.8 \mu\text{m}$, 说明切屑形成过程中因严重挤压变形导致少量 WC 颗粒脱落, 并流动到刀具后刀面和已加工表面之间, 与后刀面发生摩擦从而在磨损区形成了大量沟槽。因此 Lt-cBN 刀具的磨损形式主要是正常的磨料磨损, 磨损过程较为平稳。此外, Lt-cBN 刀具的后刀面在正常磨损过程中形成了新的、锋利的切削刃(图 5), 所以 Lt-cBN 刀具磨损后仍可以保持较好的切削性能。Nakamoto、Zhan、Liu 等学者^[18-20]也发现一定程度的刀具磨损对切削性能的影响不明显。相对比, NCB100 后刀面的磨损区域有少量较深的沟槽, 仔细观察后还发现新形成的切削刃上分布着少数大小不等的崩口, 这是由于刃口处的裂纹扩散导致 cBN 材料脱落, 脱落的 cBN 材料与后刀面摩擦形成了较深的沟槽, 所以 NCB100 刀具磨损后切削性能严重下降, 并且加快了后续刀具磨损。

2.3 Lt-cBN 材料的磨损机制

Lt-cBN 刀具材料磨损区域亚表面检测结果见图 6, 磨损表面下方形成了厚度约 23.7 nm 的部分非

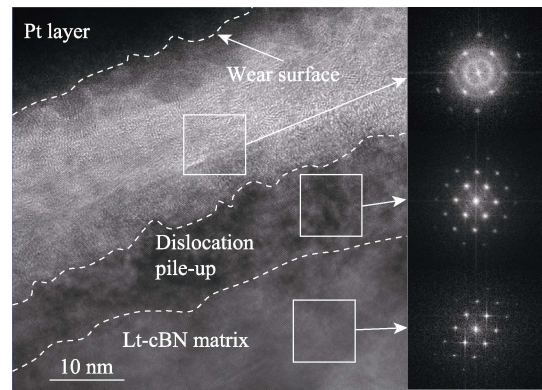


图 6 Lt-cBN 刀具磨损区域内的透射电镜高分辨图像和对应的快速傅里叶变换

Fig. 6 HRTEM image and the corresponding fast Fourier transform behind the wear zone of Lt-cBN tool

晶化层, 其中局部区域仍为单晶 cBN 的晶体结构, 其它部分则相变为无序的类石墨层状氮化硼。从高分辨图像的快速傅里叶变换结果也可以看出, 在部分非晶化层中同时存在无序层状氮化硼结构的衍射晕以及 cBN 晶体的衍射斑点, 见图 6 右侧。此外, 在部分非晶化层和正常 Lt-cBN 基体之间还发现了厚度约 10.7 nm 的位错堆积层, 这是由于刀具在切削力的作用下表层材料发生挤压和剪切变形, 导致 cBN 发生无序层状氮化硼的结构相变, 形成部分非晶化层。当切削应力向深度方向扩展时, 应力不断变小, 仅能使 cBN 晶体内部产生位错, 而不能完全破坏晶体结构, 因此形成了位错堆积层。

进一步分析 Lt-cBN 材料和 NCB100 材料的耐磨性能, 对图 5 中 NCB100 刀具磨损区亚表面进行透射电镜观察, 见图 7。结合高分辨图像及其快速傅里叶变换的结果可以判断, NCB100 刀具磨损表面下方一层材料已全部非晶化, 变成了无序的类石墨层状氮化硼结构, 非晶层中无 cBN 晶体结构, 该非晶层的厚度约为 41.1 nm , 大于相同测试条件下 Lt-cBN 刀具产生的部分非晶化层厚度。此外, 在 NCB100 刀具产生的非晶层下方也发现了位错堆积层, 其平均厚度约 16.9 nm 。通过显微结构分析证实 NCB100 是纯相纳米聚晶 cBN 的烧结体, 其晶粒内部存在大量的堆垛层错, 晶粒之间结合紧密, 无层状 BN 结构, 见图 8。根据表 1, 在 0° 前角条件下两种刀具的切削力相差不大, 但在 NCB100 刀具材料中产生的非晶层更厚, 说明在切削力作用下 NCB100 中的 cBN 更易非晶化, 这是由于 cBN 晶粒之间的结合为刚性连接, 在动态切削过程中无法变形, 导致直接发生相变, 形成较软的无序层状氮化硼, 进而与已加工表面摩擦, 以磨料磨损的形式不断被去除。相比而言, Lt-cBN 刀具材料内部没有大

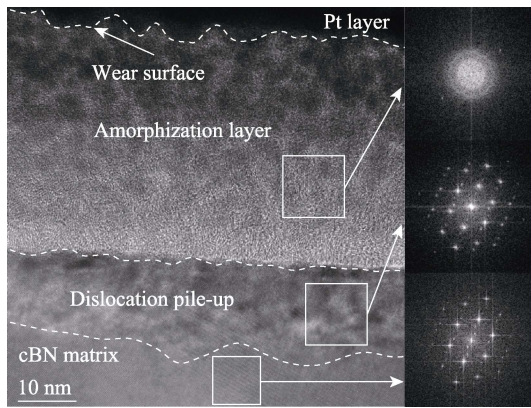


图 7 NCB100 刀具磨损区域内的透射电镜高分辨图像和对应的快速傅里叶变换

Fig. 7 HRTEM image and the corresponding fast Fourier transform behind the wear zone of NCB100 tool

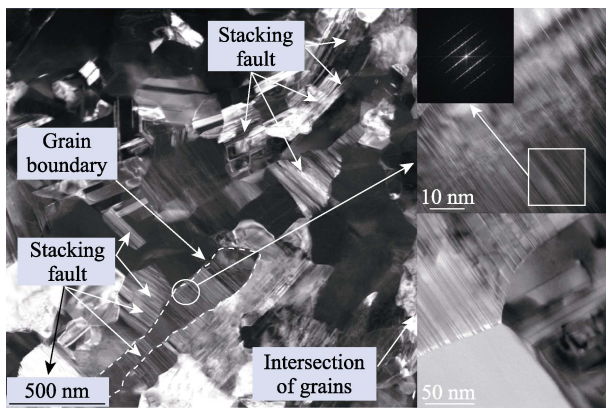


图 8 NCB100 材料基体的显微组织结构

Fig. 8 Initial microstructure of NCB100 material

量的堆垛层错, 且晶粒交汇处的三角区存在柔韧的类石墨层状 BN(见图 1), 它能够通过弹塑性变形吸收一部分能量, 因此在相似切削力的作用下 Lt-cBN 晶粒内部应力较小, 相变速率也得到减缓, 仅在磨损表层发生了部分非晶化。相对于 NCB100 完全非晶化的表层, Lt-cBN 部分非晶化的材料层内含有未相变的超硬 cBN 晶体结构, 导致表层的磨损速率降低, 从而表现出更好的抗磨损性能。采用 Lt-cBN 刀具材料切削硬质合金的磨损可以理解为较软的部分非晶化层与 WC 颗粒和已加工表面进行摩擦, 不断以磨料磨损的形式去除。

3 结论

在工业压力 6 GPa 条件下, 以 cBN 粉为原料制备的 Lt-cBN 块材的硬度和断裂韧性分别达到 45 GPa 和 $8.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。以 Lt-cBN 作为刀具材料, 通过硬质合金的超精密切削实验发现, Lt-cBN 材料

能够以塑性域方式去除硬质合金中的 WC, 加工出粗糙度 R_a 低于 10 nm 的硬质合金超光滑表面。与纯相 NCB100 相比, Lt-cBN 材料的硬度略低, 但是表现出更加优异的切削性能和耐磨损性能。这是由于 Lt-cBN 具有更高的韧性, 其晶粒交汇处的层状 BN 能够通过弹塑性变形吸收能量, 减少了晶粒内部承受的应力, 导致相变减缓, 磨损表层仅形成了较薄的部分非晶化层, 从而降低了刀具磨损速率。Lt-cBN 刀具材料的磨损为后刀面部分区域形成了相对基体较软的部分非晶化层, 该层材料与 WC 颗粒和已加工表面产生摩擦, 不断以磨料磨损的形式去除。

参考文献:

- [1] LIANG H, LIN W, WANG Q, *et al.* Ultrahard and stable nanostructured cubic boron nitride from hexagonal boron nitride. *Ceramics International*, 2020, **46**: 12788–12794.
- [2] ICHIDA Y, OHFUJI H, IRIFUNE T, *et al.* Synthesis of ultrafine nano-polycrystalline cubic boron nitride by direct transformation under ultrahigh pressure. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, **38**: 2815–2822.
- [3] ICHIDA Y, OHFUJI H, IRIFUNE T, *et al.* Synthesis of coarse-grain-dispersed nano-polycrystalline cubic boron nitride by direct transformation under ultrahigh pressure. *Diamond & Related Materials*, 2017, **77**: 25–34.
- [4] LIU T, KOU Z, LU J, *et al.* Preparation of superhard cubic boron nitride sintered from commercially available submicron powders. *Journal of Applied Physics*, 2017, **121**: 125902.
- [5] BUSHLYA V, PETRUSHA I, GUTNICHENKO O, *et al.* Sintering of binderless cubic boron nitride and its modification by $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ additive for hard machining applications. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2020, **86**: 105100.
- [6] SUMIYA H, UESAKA S, SATOH S. Mechanical properties of high purity polycrystalline cBN synthesized by direct conversion sintering method. *Journal of Materials Science*, 2000, **35**: 1181–1186.
- [7] SUMIYA H, HARANO K, ISHIDA Y. Mechanical properties of nano-polycrystalline cBN synthesized by direct conversion sintering under HPHT. *Diamond & Related Materials*, 2014, **41**: 14–19.
- [8] YANG M, KOU Z, LIU T, *et al.* Polycrystalline cubic boron nitride prepared with cubic-hexagonal boron nitride under high pressure and high temperature. *Chinese Physics B*, 2018, **27**(5): 056105.
- [9] TANIGUCHI T, AKAISHI M, YAMAOKA S. Sintering of cubic boron nitride without additives at 7.7 GPa and above 2000 °C. *Journal of Materials Research*, 1999, **14**(1): 162–169.
- [10] FUJISAKI K, YOKOTA H, FURUSHIRO N, *et al.* Development of ultra-fine-grain binderless cBN tool for precision cutting of ferrous materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209**: 5646–5652.
- [11] WANG Z G, WONG Y S, RAHMAN M. High-speed milling of titanium alloys using binderless CBN tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, **45**: 105–114.
- [12] WANG Z G, RAHMAN M, WONG Y S. Tool wear characteristics of binderless CBN tools used in high-speed milling of titanium

- alloys. *Wear*, 2005, **258**: 752–758.
- [13] BUSHLYA V, LENRICK F, GUTNICHENKO O, *et al.* Performance and wear mechanisms of novel superhard diamond and boron nitride based tools in machining Al-SiC_p metal matrix composite. *Wear*, 2017, **376–377**: 152–164.
- [14] 赵智胜, 罗坤, 韩俏怡, 等. 工业压力下合成无粘结剂聚晶氮化硼块材的方法及其应用. 中国, B23D79/00, ZL201910651003.4. 2019.07.18.
- [15] ZHANG J, SUZUKI N, WANG Y, *et al.* Fundamental investigation of ultra-precision ductile machining of tungsten carbide by applying elliptical vibration cutting with single crystal diamond. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, **214**: 2644–2659.
- [16] ZHANG X, HUANG R, LIU K, *et al.* Suppression of diamond tool wear in machining of tungsten carbide by combining ultrasonic vibration and electrochemical processing. *Ceramics International*, 2018, **44**: 4142–4153.
- [17] LIU K, LI X P. Ductile cutting of tungsten carbide. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **113**: 348–354.
- [18] NAKAMOTO K, KATAHIRA K, OHMORI H, *et al.* A study on the quality of micro-machined surfaces on tungsten carbide generated by PCD micro end-milling. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2012, **61**: 567–570.
- [19] ZHAN Z, HE N, LI L, *et al.* Precision milling of tungsten carbide with micro PCD milling tool. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, **77**: 2095–2103.
- [20] LIU K, LI X P, RAHMAN M, *et al.* CBN tool wear in ductile cutting of tungsten carbide. *Wear*, 2003, **255**: 1344–1351.