

温度对汽车零部件切削加工用PCBN复合材料 结构与性能的影响研究^①

杨桂娟¹, 杨胜才², 王冠群³

(1.唐山工业职业技术学院 自动化工程学院 河北 唐山 063000; 2.福州大学 材料科学与工程学院, 福建 福州 350116; 3.福建省新材料制备与成形技术重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要:以TiN作为主要结合剂,加入一定量的Al粉和Ti粉,研究了烧结温度(1300~1600℃)对TiN-Al-Ti结合立方氮化硼(CBN)烧结合成聚晶立方氮化硼(PCBN)复合材料的组成、显微结构以及力学性能的影响。结果表明,PCBN试样的物相主要为BN、TiB₂、TiN、AlN,烧结过程中Ti与CBN反应生成TiN和TiB₂相;PCBN的相对密度、抗弯强度以及硬度随着烧结温度升高总体上呈上升趋势。1500℃烧结时,可以得到综合性能好的复合材料,其相对密度、抗弯强度、断裂韧性和显微硬度分别为99.1%、807.8 MPa、6.2 MPa·m^{1/2}和3233HV。

关键词:超硬材料;立方氮化硼;聚晶立方氮化硼;烧结;结合剂;TiN;BN;TiB₂;切削

中图分类号: TG74

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.02.032

文章编号: 0253-6099(2023)02-0145-04

Effect of Temperature on Structure and Performance of PCBN Composites for Automotive Parts Machining

YANG Guijuan¹, YANG Shengcai², WANG Guanqun³

(1. College of Automation Engineering, Tangshan Polytechnic College, Tangshan 063000, Hebei, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian, China; 3. Fujian Key Laboratory of Preparation and Forming Technology for Advanced Materials, Fuzhou 350118, Fujian, China)

Abstract: Polycrystalline Cubic boron nitride (PCBN) composites were synthesized by adding a certain amount of Al and Ti, with TiN as the main binder. The effects of temperature (1300–1600 °C) on the composition, microstructure and mechanical properties of the PCBN composites sintered with TiN-Al-Ti in combination with CBN were investigated. It is found that the phases of PCBN specimen are mainly composed of BN, TiB₂, TiN and AlN, and almost all Ti reacts with CBN in the sintering process to form TiN and TiB₂ phases. The relative density, flexural strength and hardness of PCBN are generally trending up with the rising of sintering temperature. And composite material with good comprehensive performance can be obtained at a sintering temperature of 1500 °C, showing its relative density of 99.1%, flexural strength of 807.8 MPa, fracture toughness of 6.2 MPa·m^{1/2}, and micro-hardness of 3233HV.

Key words: super-hard material; CBN; PCBN; sintering; binder; TiN; BN; TiB₂; cutting

随着现代科技快速发展,在工件材料性能得到改善和同时,出现了大量难加工材料,导致传统刀具不能满足零件加工需要,但超硬刀具材料的出现解决了这一难题。聚晶立方氮化硼(PCBN)刀具适合于切削加工各种淬硬钢、冷硬铸铁及其他高硬黑色金

属^[1-6]。目前关于PCBN刀具切削加工汽车零部件已有相关报道,研究结果表明PCBN刀具具有优异的切削性能^[7-9]。

PCBN刀具材料是立方氮化硼(CBN)颗粒和结合剂在高温高压下烧结制备的。结合剂是合成PCBN的

① 收稿日期: 2022-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(51871057)

作者简介: 杨桂娟(1967—),女,河北唐山人,副教授,主要研究方向为机械设计及机械工程材料。

通信作者: 杨胜才(1987—),男,河北唐山人,博士,讲师,主要研究方向为功能高分子材料、能源与环境材料的制备及应用。

关键材料,其类型包括金属黏结剂和陶瓷黏结剂。金属黏结剂主要有 Co、Al、Ti、Hf 和 Ni^[10-14]等;陶瓷黏结剂主要是金属钛、铝等的氮化物、硼化物和碳化物,在与 CBN 发生化学反应时虽然不如金属剧烈,但可以在超高压高温下相互熔渗而烧结成 PCBN^[15-19]。本文从配方体系出发,选择 TiN 作为主要结合剂,并加入一定量的 Al 粉和 Ti 粉,研究 TiN-Al-Ti 体系结合 CBN 烧结合成 PCBN 复合材料的组成、显微结构和力学性能,以期得到具有优异切削性能的刀具材料。

1 实验

1.1 PCBN 试样制备

实验原料包括:CBN(粒径 1~3 μm,纯度 99.9%,富耐克超硬材料有限公司),TiN(粒径 1~2 μm,纯度 99.9%,中国医药集团上海化学试剂公司),Al(粒径 1~2 μm,纯度 99.9%,河南省远洋铝业有限公司),Ti(粒径 1~2 μm,纯度 99.9%,中国医药集团上海化学试剂公司)。

按表 1 进行配料,其中 TiN:Ti:Al=8:5:2(质量比)。在不锈钢球磨罐中研磨混料 2 h,然后将混好的粉料放在 120 ℃干燥箱中烘干 2 h;取出烘干粉料进行过筛处理,然后将粉料装入直径 35 mm 的圆柱形钨杯中,再在冷压成型机上预压成块;然后进行高温(800 ℃)真空处理;最后装入叶腊石模具中,在铰链六面顶压机上高温超高压烧结,烧结温度为 1 300~1 600 ℃(±10 ℃),烧结压力 6 GPa,保温时间 700 s。

表 1 实验原料配方(质量分数) %

表 1 实验原料配方(质量分数) %	
CBN	TiN+Ti+Al
55	45

1.2 性能表征

将经过高温超高压烧结得到的 PCBN 样品先在平面磨床上进行平磨和外圆处理,然后用金刚石自动抛光机研磨、抛光成亚光面,制样进行相关分析。运用 X 射线衍射仪(X'pert PRO)分析 PCBN 样品物相组成;用阿基米德排水法测定 PCBN 样品的相对密度以及气孔率;通过场发射扫描电子显微镜(S-4800 SEM)对 PCBN 的显微结构、晶粒形态和断面形貌进行表征;利用微机控制电子万能材料试验机(CMT-4304)通过三点抗弯法测试样品的三点抗弯强度,跨距为 10 mm,加载速度为 0.5 mm/min;通过维氏显微硬度计(VH-5)测定显微硬度和断裂韧性,施加载荷 98 N,保压时间 15 s。

2 实验结果与讨论

2.1 物相分析

图 1 为不同烧结温度下 PCBN 试样的 XRD 图谱。从图 1 可知,经过高温超高压烧结得到的 PCBN 烧结体中,物相组成无明显差异,都是由 BN、TiB₂、TiN、AlN 组成。在 XRD 图谱中没有检测到单质金属钛和金属铝的存在,说明单质钛和铝与 CBN 之间发生了化学反应,生成了新相 TiB₂、TiN 以及 AlN。TiB₂ 具有高硬度、优异的热稳定性以及耐磨性,因此可以提高 PCBN 复合材料的韧性和强度。通过 XRD 图谱可以看出,在低温(1 300~1 400 ℃)烧结时,AlN 具有较高的衍射峰,而 TiB₂ 衍射峰较低;当温度升高到 1 600 ℃时,AlN 衍射峰变化不大,而 TiB₂ 衍射峰升高,这可能是由于铝的熔点低,在较低温度下就能完全与 CBN 反应生成 AlN,而 Ti 则需要在较高的温度下才能反应完全,生成 TiB₂ 和 TiN。同时在 XRD 图谱中没有检测到 hBN 的存在,可能是反应时间短,或者是因为 AlN 的存在抑制了 CBN 到 hBN 的相变。同时在 XRD 图谱中也没有检测出其他杂质相的存在,一方面说明粉料的纯度较高,另一方面也说明混料工艺合理,混料罐和混料球材料的脱落极少。

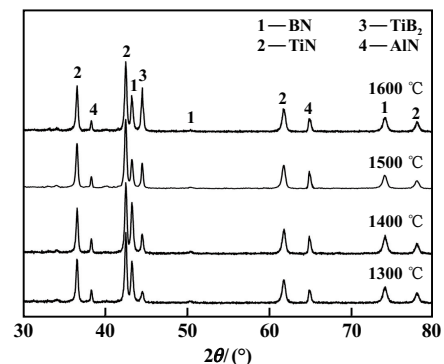
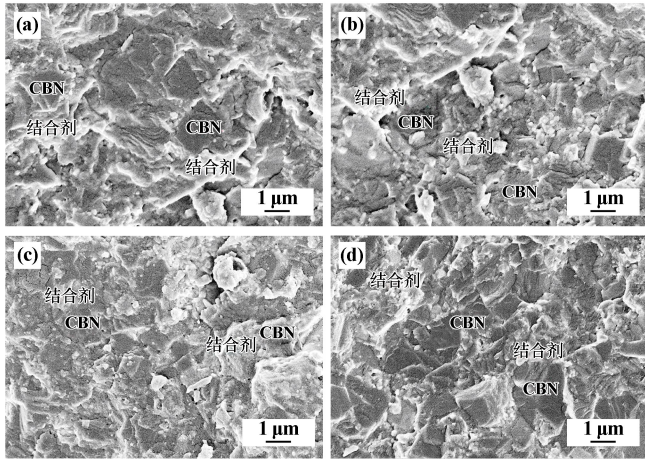


图 1 不同烧结温度下试样的 XRD 图谱

2.2 显微结构分析

图 2 为不同烧结温度下试样的微观形貌图。从图 2 可以看到,低温条件下,存在结合剂聚集情况,结合剂较为松散,熔融性较差,与 CBN 之间的结合性很差,裂纹最有可能发生在不同 CBN 之间;结合剂不能完全烧结,也不能保持颗粒,并且可以观察到一些孔隙。随着烧结温度升高,结合剂的聚集状态逐渐消失,能较为均匀地分布在试样内部。烧结温度升高使得结合剂的熔融性变好,同时内部气孔也变少,样品变得更加致密,这种致密性有助于样品强度的提升。温度为 1 600 ℃时,CBN 颗粒被结合剂包裹着,可观察到明显的晶界

和光滑的晶面,同时在样品断面扫描图中还发现有颗粒拔出后留下的孔洞,说明各样品均存在沿晶断裂, CBN 与结合剂的界面结合力较强。



(a) 1300 °C; (b) 1400 °C; (c) 1500 °C; (d) 1600 °C
图 2 不同烧结温度下试样的 SEM 图谱

2.3 致密性和抗弯强度分析

图 3 为试样的相对密度和三点抗弯强度与烧结温度的关系图。由图 3 可知,烧结温度从 1300 °C 升高至 1500 °C,试样相对密度从 98.5% 增加到 99.1%,继续升高温度,试样相对密度变化不大。烧结温度较低时,烧结体内部所获取的能量较少,结合剂不能渗透到 CBN 颗粒中,不利于结合剂与 CBN 晶粒的均匀分布,从而导致 CBN 颗粒在烧结过程中彼此接触,形成搭桥现象,产生缝隙,PCBN 复合材料的组织致密化程度较低。随着烧结温度升高,液相在材料内部的扩散速度加快,材料内部的能量也提高,加速了金属钛与 CBN 的反应速度,内部孔隙被充填,试样致密性增强。三点抗弯强度和相对密度曲线呈现出相似的变化趋势,温度从 1300 °C 提高到 1500 °C,三点抗弯强度从 515.6 MPa 增加到 807.8 MPa,继续升高温度,三点抗弯强度变化不大。

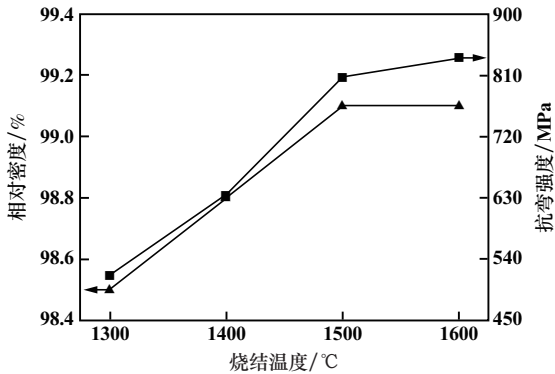


图 3 不同烧结温度下试样的相对密度和抗弯强度

2.4 显微硬度和断裂韧性分析

图 4 为不同烧结温度下试样显微硬度和断裂韧性曲线。试样断裂韧性随烧结温度升高先增加后降低,1500 °C 时试样断裂韧性最大,为 6.2 MPa · m^{1/2}。试样断裂韧性与相对密度、硬度以及内部的增强相有关,原位反应生成的 TiB₂ 与 CBN 结合良好,有利于断裂韧性的提高。试样显微硬度同样与烧结温度密切相关;低温时试样未完全烧结,内部疏松,存在较多气孔,试样显微硬度较低;温度升高到 1500 °C,试样烧结基本完成,致密度较高,显微硬度也较高,为 3233HV。

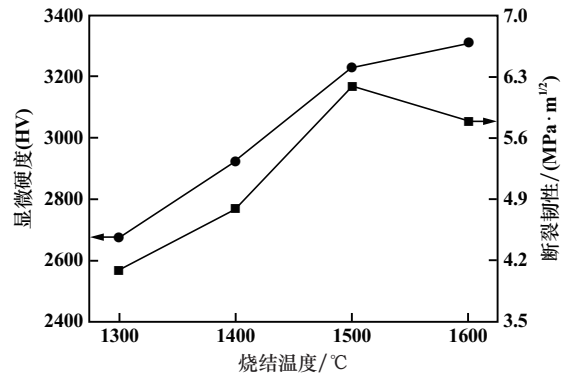
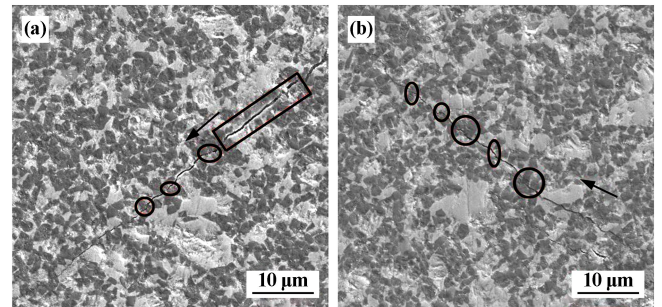


图 4 不同烧结温度下试样的显微硬度和断裂韧性

图 5 为不同烧结温度下试样断裂裂纹形貌图。由图 5 可知,烧结温度 1400 °C 时,试样断裂裂纹比较宽且裂纹路径比较直,裂纹拓展过程所遇阻碍较小,裂纹沿着灰色相裂开并穿过黑色颗粒,说明试样同时存在沿晶断裂和穿晶断裂;烧结温度 1500 °C 时,断裂裂纹较细且裂纹路径存在多处偏转,当裂纹尖端遇到 CBN 颗粒时,裂纹会沿颗粒分叉或沿颗粒偏转,有利于提高材料断裂韧性。随着烧结温度提高,试样致密度增大、硬质相颗粒尺寸有一定程度增大,裂纹扩展会碰到更大阻力,扩展路径发生偏转,呈现试样断裂韧性升高。



(a) 1400 °C; (b) 1500 °C

图 5 不同烧结温度下试样的断裂裂纹形貌

3 结 论

1) PCBN 试样的物相主要为 BN、TiB₂、TiN 和 AlN。

2) 随着烧结温度升高,试样相对密度、抗弯强度以及显微硬度总体呈上升趋势。

3) 烧结温度 1 500 °C 时,烧结基本完成,试样综合性能较好,其相对密度、抗弯强度、断裂韧性和显微硬度分别为 99.1%、807.8 MPa、6.2 MPa·m^{1/2}和 3 233HV。

参考文献:

- [1] 胡小龙,邵芳,王仁伟. PCBN 刀具切削镍基合金时的氧化与扩散磨损分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020,40(1):99-102.
- [2] 魏文静,沈浩. PCBN 刀具断续车削 Cr12MoV 钢表面粗糙度的试验研究[J]. 机械科学与技术, 2014,33(10):1514-1517.
- [3] 倪红海,纪飞飞,陈友广,等. PCBN 刀具材料的性能及切削 20CrMnTi 合金钢试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):125-128.
- [4] CHEN Z, LIN PENG R, ZHOU J, et al. Effect of machining parameters on cutting force and surface integrity when high-speed turning AD 730™ with PCBN tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019,100(9):2601-2615.
- [5] Mnok A S, Klimenko S A, Yu M, et al. Tribology of cutting by tools equipped with CBN-based PSHM[J]. Journal of Superhard Materials, 2014,36(2):124-135.
- [6] 崔金蒙,孟德忠,吴哲,等. PCBN 刀具切削性能和磨损机理研究综述[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020,40(6):83-91.
- [7] 史胜祥,丁胜明. CBN 刀片在发动机缸体缸盖出砂孔粗加工中的高效应用[J]. 汽车工艺师, 2019(21):51-54.
- [8] 代锐华. PCBN 刀具对汽车发动机缸体的加工性能及几何参数优化研究[D]. 南昌:南昌大学机电工程学院, 2013.
- [9] 聂建军,李辉. 整体 PCBN 刀具在高速重度断续切削端盖中的应用[J]. 工具技术, 2014,48(8):89-91.
- [10] 李启泉,张旺玺,刘书锋,等. Co/Al 金属在聚晶立方氮化硼中的作用及加工适用性[J]. 工具技术, 2020,54(1):37-41.

- [11] 江文清,彭凡林,罗涛. TiN/WC/Al 合成 PCBN 复合材料及其性能研究[J]. 中国陶瓷, 2021,57(3):34-38.
- [12] 邹娟,成照楠,邹芹,等. CBN 含量对 PCBN 车刀切削性能影响的模拟与实验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):134-137.
- [13] 莫培程,陈超,陈家荣,等. CBN/TiC/Al 合成 PCBN 及其性能研究[J]. 人工晶体学报, 2020,49(3):480-484.
- [14] 莫培程,吴一,于文霖,等. CBN-Ti-Al-Si 原位合成 PCBN 复合材料及其力学性能[J]. 材料导报, 2018,32(14):2355-2359.
- [15] 邓福铭,贺雪花,邓雯丽,等. 不同 TiN 含量整体式 PCBN 复合材料微观组织及性能研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019,39(5):39-43.
- [16] ZHANG L L, LIN F, LV Z, et al. CBN-Al-HfC composites Sintering behaviors and mechanical properties under high pressure[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2015,50:221-226.
- [17] YU W L, WANG J L, WU Y, et al. In situ synthesis of polycrystalline cubic boron nitride with high mechanical properties using rod-shaped TiB₂ crystals as the binder[J]. Advances in Applied Ceramics, 2017,116(10):1-9.
- [18] WANG B, QIN Y, JIN F, et al. Pulse electric current sintering of cubic boron nitride/tungsten carbide-cobalt (CBN/WC-Co) composites: effect of CBN particle size and volume fraction on their microstructure and properties[J]. Mater Sci Eng: A, 2014,607:490-497.
- [19] LI L, ZHAO Y, SUN K, et al. Composition, microstructure and mechanical properties of CBN-based composites sintered with AlN-Al-Ni binder[J]. Ceramics International, 2018,44(14):16915-16922.

引用本文: 杨桂娟,杨胜才,王冠群. 温度对汽车零部件切削加工用 PCBN 复合材料结构与性能的影响研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):145-148.

(上接第 144 页)

优化算法精度更高、寻优性能更好,将其应用于板形识别时,识别结果优于其他传统板形识别方法,其中板形识别的均方误差相比传统算法结果误差更小(低 2 个数量级),具有较强的实用性和工业价值。

参考文献:

- [1] 曹建国,江军,邱澜,等. 新一代高技术宽带冷轧机全机组一体化板形控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019,50(7):1584-1591.
- [2] 王鹏飞,张智杰,李旭,等. 冷轧带材板形在线云图监控系统研究与应用[J]. 中国有色金属学报, 2019,29(12):2775-2784.
- [3] 王伟,林威,王楠,等. 以板形控制为目标的冷连轧过程压下规程优化技术[J]. 塑性工程学报, 2022,29(3):73-78.
- [4] 唐焱,王超,刘昌豹,等. 成品铝箔板形值离线自动检测应用研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(8):102-104.
- [5] 吴忠强,康晓华,于丹琦. 基于优化终端滑模模糊神经网络的板形模式识别[J]. 矿冶工程, 2017,37(5):109-113.
- [6] 毕志敏,王焱. 基于改进遗传算法优化 Elman 网络的板形识别方法[J]. 钢铁研究学报, 2017,29(4):305-311.
- [7] 吴忠强,康晓华,于丹琦. 基于小波消噪和优化支持向量机的板形模式识别[J]. 中国机械工程, 2018,29(1):95-103.

- [8] 张秀玲,李家欢,魏其珺,等. 基于 CGA-SNPOM 优化 RBF-ARX 模型的板形缺陷识别[J]. 矿冶工程, 2018,38(3):127-131.
- [9] 张秀玲,代景欢,康学楠,等. 基于多 RBF 神经网络的板形数据建模[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):124-128.
- [10] 张秀玲,李家欢,李金祥,等. 混合优化 RBF-BP 网络的板形缺陷识别[J]. 模糊系统与数学, 2020,34(1):149-156.
- [11] 王海霞,王庆华. 基于 Legendre 多项式的板形模式识别优化仿真及应用[J]. 材料与冶金学报, 2021,20(4):275-281.
- [12] Gurav Dhiman, Vijay Kumar. Seagull optimization algorithm: Theory and its applications for large-scale industrial engineering problems[J]. Knowledge-Based Systems, 2019,165(1):169-196.
- [13] 秦维娜,张达敏,尹德鑫,等. 一种基于非线性惯性权重的海鸥优化算法[J]. 小型微型计算机系统, 2022,43(1):10-14.
- [14] 施振稳,张志安,黄学功,等. 基于海鸥优化改进采样过程的 RB-PF-SLAM 算法[J]. 兵器装备工程学报, 2021,42(9):210-214.
- [15] 钟昌廷,李刚. 基于生物地理-海鸥群优化的高维结构可靠性分析[J]. 计算力学学报, 2022,39(1):1-6.
- [16] 罗浩,于靖康,潘一山,等. 基于海鸥优化的分位数差值矿震定位方法研究[J]. 地球物理学进展, 2022,37(1):421-429.

引用本文: 吕冠艳,田学东,李奋华. 基于改进海鸥算法结合 Elman 网络的板形模式识别方法[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):140-144.