

# PCBN 刀具以车代磨加工 20CrMnTi 合金钢试验研究<sup>①</sup>

苏 君, 冯佩佩

(河南工业职业技术学院, 河南 南阳 473000)

**摘要:** 采用聚晶立方氮化硼(PCBN)刀具,以车代磨对 20CrMnTi 合金钢进行精密切削加工。分析了切削过程中 PCBN 刀具的磨损形式和磨损机理,研究了不同切削参数对刀具寿命与工件表面粗糙度的影响。结果表明,切削过程中刀具发生了扩散、崩刃以及氧化磨损;在硬态切削三要素中,切削进给量和切削速度对刀具磨损量影响较大,切削进给量对工件表面粗糙度影响较大。

**关键词:** 超硬刀具; PCBN 刀具; 切削; 20CrMnTi; 以车代磨

中图分类号: TG712; TB34

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.04.033

文章编号: 0253-6099(2023)04-0154-04

## Experimental Study on Cutting 20CrMnTi Alloy Steel with PCBN Tool by Turning Instead of Grinding

SU Jun, FENG Peipei

(Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, Henan, China)

**Abstract:** 20CrMnTi alloy steel was precisely cut by turning instead of grinding using a polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) tool. Based on analysis of the form and mechanism of PCBN tool wear during the cutting process, the influences of different cutting parameters on tool life and surface roughness of workpiece were studied. The results show that the tool is subjected to diffusion, chipping and severe oxidative wear. Among those three elements of hard material cutting, both feed rate and cutting speed bring great influence to tool wear, and feed rate has great influence on the surface roughness of machined workpiece.

**Key words:** super-hard tool; PCBN tool; cutting; 20CrMnTi; turning instead of grinding

20CrMnTi 合金钢是工业上应用较广的金属材料,具有高耐磨性、高强度和韧性等性能,但 20CrMnTi 合金钢经精密磨削加工后会出现局部裂纹和擦伤等缺陷,影响零件的使用寿命和性能<sup>[1-3]</sup>。采用以车代磨的方式可以有效解决 20CrMnTi 合金钢在砂轮磨削过程中出现的这些问题。立方氮化硼(CBN)超硬刀具具有高硬度、高耐磨损性、高加工精度等优势,能以车代磨实现高速精密车削金属材料,得到较好的工件表面加工质量<sup>[4-6]</sup>。目前关于聚晶立方氮化硼(PCBN)刀具切削难加工材料已有较多相关报道<sup>[7-13]</sup>,结果表明 PCBN 刀具具有优异的切削性能。本文以 PCBN 刀具车削代替磨削,加工 20CrMnTi 合金钢,研究切削参数对刀具耐用性和工件表面粗糙度的影响规律,分析了 PCBN 刀具的磨损形式与机理,为以车代磨加工

20CrMnTi 合金钢提供技术依据。

### 1 试 验

试验设备为云南机床厂生产的 CY-K6105B/2000 大孔经普通车床,主电机功率 7.5 kW。加工刀具材料为 PCBN 复合片,通过切割焊接制成型号为 CNGA 120408/2T 的刀具(刀尖半径 0.8 mm,切刃长 4.5 mm),如图 1 所示。在进行切削试验前,运用 X 射线衍射仪分析刀具材料物相,并通过扫描电镜(S4800-SEM)表征 PCBN 材料表面微观结构;测定刀具材料的显微硬度、抗弯强度等力学性能。表 1 为 20CrMnTi 合金钢化学成分。加工工件直径 100 mm,总长 330 mm,切削长度 280 mm。

本次测试中,将切削深度  $a_p$  设为固定值,切削速

① 收稿日期: 2023-02-15

基金项目: 2018 年河南省科技发展计划(182102210266); 2021 年河南省科技攻关计划项目(212102210372)

作者简介: 苏 君(1977—),女,河南南阳人,硕士,副教授,主要从事机械工程材料研究。

度  $v$  和切削进给量  $f$  为变量。根据前期加工试验结果,取  $a_p = 0.2 \text{ mm}$  较为合适。在数控车床上进行外圆干切削,采用便携式 TR200 粗糙度仪测量粗糙度,分辨率为  $0.001 \mu\text{m}$ 。采用体视显微镜观察 PCBN 刀具磨损情况,通过测量磨损区的宽度 (VB) 来表征刀具寿命。通过场 SEM 观察分析刀具后刃的磨损程度。在切割过程中,当切割里程为 2 km、4 km、6 km 时,使用超景深显微镜观察并测量 PCBN 刀具后刀面磨损区宽度。

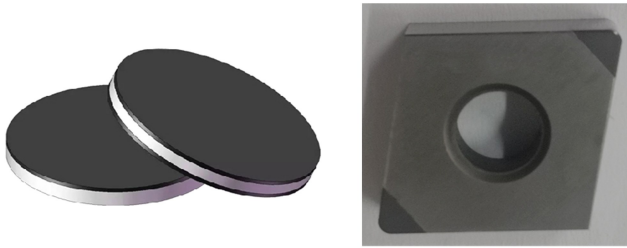


图1 PCBN 复合片及 CNGA120408 型刀具

表1 20CrMnTi 合金结构钢化学成分(质量分数) %

C	Mn	Si	Cr	S
0.17~0.23	0.80~1.10	0.17~0.37	1.00~1.30	<0.035
P	Ni	Cu	Ti	Fe
<0.035	<0.030	<0.030	0.04~0.10	余量

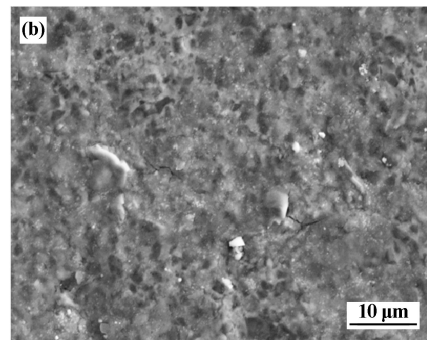
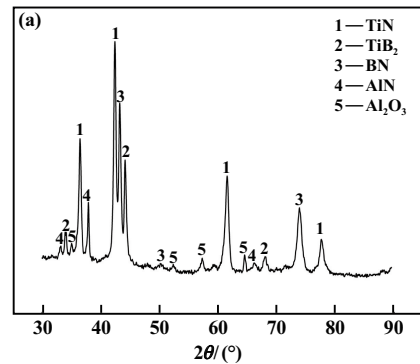
## 2 结果分析

### 2.1 PCBN 刀具材料分析

图2为PCBN复合片XRD及BSEM图。由图2(a)可知,TiN主峰的峰高最高,BN其次,因此可以断定,复合片中TiN含量较多,BN相对较少,为低含量PCBN复合片。复合片的物相组成为BN,TiN,TiB<sub>2</sub>,AlN以及Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。对XRD图谱进行半定量分析,各物相含量如表2所示。由表2可知,PCBN复合片中结合剂以TiN和TiB<sub>2</sub>为主,其含量分别为28.22%和16.04%;AlN以及Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为辅助结合剂,其含量分别为3.41%和1.11%。二硼化钛和氮化钛力学性能优异,在陶瓷材料中属于高强、高硬陶瓷,使用它们作为结合剂,能够制备出具有优良性能的PCBN复合材料<sup>[14]</sup>。综上所述,本试验所用PCBN复合片非常适用于20CrMnTi合金结构钢的加工。

由图2(b)可知,图中深色CBN颗粒通过白色与灰色结合剂黏结在一起,PCBN材料内部各微粒紧密相连,致密性好,显微组织紧密,不存在大气孔,有效提高了材料内部各微粒间的结合强度。在高速切削加工20CrMnTi合金结构钢的过程中预计能有效地减少刀具材料颗粒脱落和崩塌,保持较好的切削效

果。同时从图2(b)可以看出复合片具有细粒度晶粒结构,CBN晶粒约为2 μm,适合粗、精加工中的连续、断续加工。



(a) XRD 图谱; (b) BSEM 图

图2 PCBN 复合片 XRD 及 BSEM 图

表2 物相含量半定量分析结果(质量分数) %

BN	TiB <sub>2</sub>	TiN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	AlN
51.22	16.04	28.22	1.11	3.41

### 2.2 PCBN 刀具的磨损形式及机理分析

图3为切削参数  $v = 160 \text{ m/min}$ 、 $f = 0.15 \text{ mm/r}$ 、 $a_p = 0.2 \text{ mm}$ 、 $s = 6 \text{ km}$  条件下PCBN刀具后刀面的扫描照片及相应区域的线扫描能谱分析结果。试验前,刀具用酒精擦拭干净,放入超声波容器内清洗,去除表面杂质。从图3(a)可以看出,刀具磨损后发生了崩刃现象,暴露出刀具的新鲜表面。根据扩散第一定律,只要有浓度梯度,就会引起原子间的扩散<sup>[15]</sup>。刀具、工件以及切屑都有很大的化学活性,因此刀具与20CrMnTi工件接触点处的化学元素会相互扩散,从而影响刀具的化学成分和切削性能。PCBN刀具材料线扫描分析结果表明,刀具表面元素的种类和元素含量发生了变化,说明20CrMnTi工件材料的扩散和溶解加剧了刀具扩散和磨损的发生。根据切削试验结果,后刀面中Cr和Mn元素含量沿刀尖向刀具内部先小幅上升后逐渐下降,而Fe和Ni含量呈稳定上升趋势,说明Fe和Ni元素的扩散更强。Fe、Ni、Cr、Mn元素是工件

材料 20CrMnTi 合金结构钢的主要组成元素而并非 PCBN 刀具材料的主要化学元素,表明在高速切削过

程中,20CrMnTi 合金结构钢中的元素在刀具上发生了扩散溶解,切削过程中有扩散磨损发生。

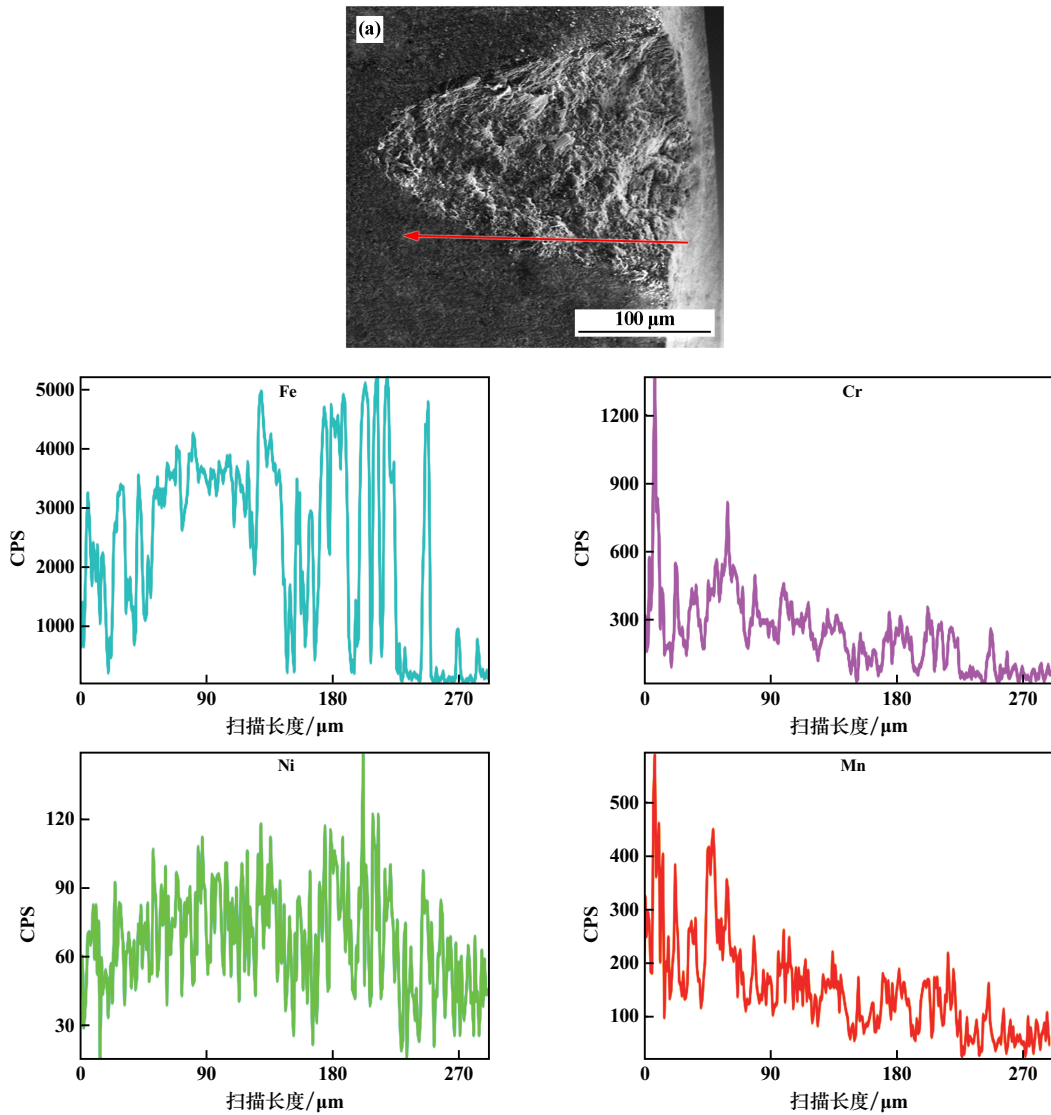
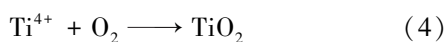
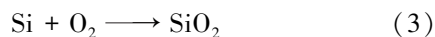
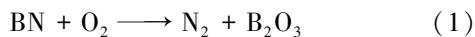


图3 PCBN 刀具后刀面的 SEM 照片及相应元素 SEM 线扫描曲线

图 4 为氧元素 SEM 线扫描曲线。O 元素含量沿着刀尖向刀具内部呈先小幅上升后逐渐下降的趋势,与 Cr、Mn 元素的变化趋势相似,这说明刀具在切削过程中发生氧化磨损,依据刀具与工件材料成分预测可能发生的氧化反应有:



由于这些氧化产物的生成,在刀具前刀面上将形成一层氧化膜,其成分主要为  $\text{B}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$  等,这些物质的存在降低了刀具切削性能,致使磨损加剧。

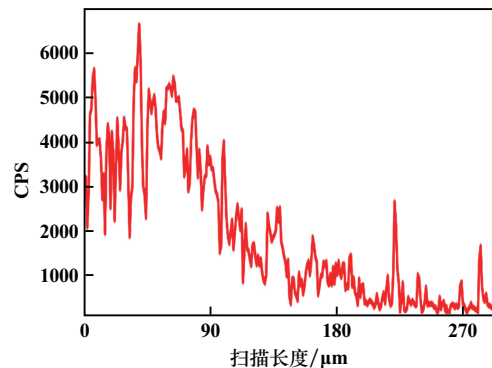


图4 氧元素 SEM 线扫描曲线

因此,PCBN 刀具后刀面的磨损主要为扩散磨损、氧化磨损以及崩刃磨损等多重磨损共同作用的结果。

如前所述,刀具后刀面与零件已加工面发生接触摩擦,显然,离切削刃越近,摩擦力越大,温升也越高;另一方面,零件已加工面呈硬化状态,而且由于切削速度很高,加工材料应变率大,刀具磨损严重。由于高硬度 CBN 颗粒本身不易变形,在切削过程中刀具与零件挤压摩擦时,PCBN 材料的结合相在持续的外力作用下会先疲劳脱落,造成一些 CBN 颗粒直接接触零件。在没有结合相的情况下,CBN 颗粒容易出现机械疲劳和松动脱落,使得刀具后刀面磨损逐渐增加。

### 2.3 切削参数对 PCBN 刀具寿命的影响

#### 2.3.1 切削速度的影响

$f=0.1 \text{ mm/r}$ 、 $a_p=0.2 \text{ mm}$  时,不同切削里程下切削速度  $v$  对 PCBN 刀具切削 20CrMnTi 合金结构钢时刀具后刀面磨损的影响如图 5 所示。不同切削速度下,随着切削里程增加,磨损量均增加。不同切削速度下,工具磨损量差距较大,切削速度 120 m/min、切削里程 2 km 时,刀具磨损达到 0.18 mm;切削速度 160 m/min、切削里程 2 km 时,刀具磨损仅 0.13 mm;切削速度 250 m/min 时,在切削后期出现了刀尖损伤崩刀现象,导致刀具寿命明显减少。

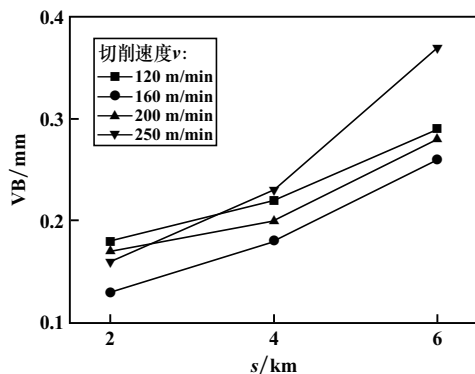


图 5 切削速度对刀具使用寿命的影响

#### 2.3.2 切削进给量的影响

$v=160 \text{ m/min}$ 、 $a_p=0.2 \text{ mm}$  时,不同切削里程下切削进给量  $f$  对 PCBN 刀具切削 20CrMnTi 合金结构钢时,平均后刀面磨损区宽度(VB)的变化见图 6。随着切削进给量增加,刀具 VB 值增加。进给量 0.3 mm/r 时,切削后期,发生 PCBN 刀具破损现象。随着进给量提升,刀具强烈地挤压和摩擦工件,在刀具和工件之间产生严重摩擦和巨大的切削力<sup>[16]</sup>。因此,进给量增加,刀具磨损加快。高进给量下,产生高切削温度,促进了黏附溶解扩散过程,并导致黏附磨损、凹坑磨损和切口磨损,加快了刀具的磨损。

### 2.4 工件表面粗糙度分析

$f=0.1 \text{ mm/r}$ 、 $a_p=0.2 \text{ mm}$  时,切削速度对表面粗

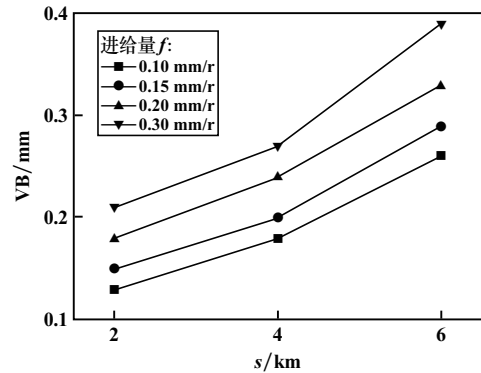
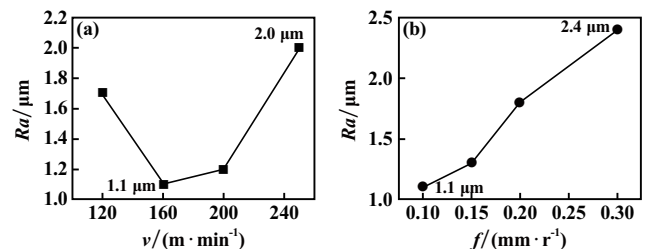


图 6 切削进给量对刀具使用寿命的影响

糙度的影响如图 7(a) 所示。由图可见,随着切削速度增加,工件表面粗糙度先下降后上升,即工件表面质量先变好然后变差。 $v=250 \text{ m/min}$  时, $R_a=2.0 \mu\text{m}$ ,为最大值,表面质量最差; $v=160 \text{ m/min}$  时, $R_a=1.1 \mu\text{m}$ ,为最小值,表面质量最好。

$v=160 \text{ m/min}$ 、 $a_p=0.2 \text{ mm}$  时,进给量对工件表面粗糙度的影响见图 7(b)。 $f=0.1 \text{ mm/r}$  时, $R_a=1.1 \mu\text{m}$ ,粗糙度最小; $f=0.3 \text{ mm/r}$  时, $R_a=2.4 \mu\text{m}$ ,此时粗糙度最大。试验结果表明,工件表面质量随进给量增加而变差。



(a) 切削速度; (b) 进给量

图 7 切削参数对工件表面粗糙度的影响

## 3 结 论

1) 以 TiN 和  $\text{TiB}_2$  为主要结合剂的 PCBN 复合片具有细粒度晶粒结构,非常适用于 20CrMnTi 合金结构钢的加工。

2) 切削速度 160 m/min、切削深度 0.2 mm、切削进给量 0.1 mm/r 时,所加工工件表面粗糙度最小,为 1.1  $\mu\text{m}$ 。

3) PCBN 刀具在切削 20CrMnTi 合金结构钢时,对刀具使用寿命影响较大的是切削速度和切削进给量;对加工表面粗糙度影响较大的是切削进给量。

### 参考文献:

- [1] TANG Jinchi, HU Xiongfen, LAI Fuqiang, et al. Evolution of Fretting Wear Behaviors and Mechanisms of 20CrMnTi Steel after Carburizing[J]. Metals, 2020,10(2):179.

(下转第 163 页)

- 2013,33:176-183.
- [4] 杨刚毅,汪冰峰,刘源,等. 铸造铜合金冲刷腐蚀及机理研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(1):125-127.
- [5] 崔志国,鲁海洋,于海然,等. 不同处理态的高速列车用 TP2 铜导体腐蚀行为研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):124-128.
- [6] 武兴伟,聂全鑫,吴恒. 几种典型管路材料在流动海水中的冲刷腐蚀行为[J]. 材料保护, 2021,54(5):7-12.
- [7] 颜鹏飞,刘志义,柏松,等. Cu/Mg 比对 Al-Cu-Mg-Ag 合金耐腐蚀性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):218-220.
- [8] Lachowicz M M. A metallographic case study of formicary corrosion in heat exchanger copper tubes-ScienceDirect[J]. Engineering Failure Analysis, 2020,111:104502-1045018.
- [9] 张萌. 换热铜管泄漏原因分析[J]. 金属加工:热加工, 2019(10):24-26.
- [10] Situmorang R S, Kawai H. Investigating the mechanism behind ant nest corrosion on copper tube[J]. Materials, 2018,11(4):533-540.
- [11] 陈湘平,马春宇,陈德东,等. 外销除湿机蒸发器铜管腐蚀失效分析[J]. 腐蚀与防护, 2018,39(12):966-970.
- [12] LIU X, ZHU H, YU C, et al. Analysis on the corrosion failure of U-tube heat exchanger in hydrogenation unit[J]. Engineering Failure Analysis, 2021,125(6):105448.
- [13] Subramanian C, Ghosh D, Reddy D S, et al. Stress corrosion cracking of U tube heat exchanger used for low pressure steam generation in a hydrogen unit of petroleum refinery[J]. Engineering Failure Analysis, 2022,137:106245.
- [14] WU L, MA A, ZHANG L, et al. Intergranular erosion corrosion of pure copper tube in flowing NaCl solution[J]. Corrosion Science, 2022,201:110304.
- [15] 王凤平,康万利. 腐蚀电化学原理、方法及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2017.
- [16] Fayeka M Fazal. Effect of aluminum addition on the electrochemical corrosion behavior of Sn-3Ag-0.5Cu solder alloy in 3.5wt% NaCl solution[J]. Journal of Materials Science. Materials in Electronics, 2016,27(11):12193-12200.
- [17] Borode A O, Ahmed N A, Olubambi P A. Electrochemical corrosion behavior of copper in graphene-based thermal fluid with different surfactants[J]. Heliyon, 2021,7(1):e05949.
- [18] 邱婕. 高速管流管壁电化学腐蚀特性分析及预测[D]. 西安:西安石油大学机械工程学院, 2021.
- [19] LIU Y, LIU Z, XU A, et al. Understanding pitting corrosion behavior of AZ91 alloy and its MAO coating in 3.5%NaCl solution by cyclic potentiodynamic polarization[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022,10(5):1368-1380.
- [20] 曾莉. 管道弯管段冲刷腐蚀机理与流体动力学特征[D]. 武汉:华中科技大学化学与化工学院, 2017.
- 引用本文:肖来荣,王森,赵小军,等. 不同热处理态 TP2 铜的冲刷腐蚀性能研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):158-163.

(上接第 157 页)

- [2] 王龙,唐修检,汪刘应,等. 20CrMnTi 钢齿轮磨削表面的摩擦磨损试验研究[J]. 工具技术, 2021,55(4):69-72.
- [3] 付钰,赵秀桐,魏俊华,等. 切削参数对车削 20CrMnTi 表面粗糙度的影响及优化研究[J]. 机床与液压, 2020,48(22):50-53.
- [4] MO P C, CHEN C, CHEN J R, et al. Effect of sintering temperature on synthesis of PCBN in cBN-Ti-Al-W system[J]. Diamond and Related Materials, 2020,103:107714.
- [5] 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.
- [6] 韩旭,李嫚,房祥辉. PCBN 刀具切削堆焊钴基合金的试验研究[J]. 工具技术, 2020,54(1):28-32.
- [7] 张燕,夏志辉,徐东鸣. PCBN 刀具高速精密切削 W-Ni-Fe 合金的性能研究[J]. 粉末冶金工业, 2016,26(6):35-40.
- [8] 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.
- [9] 高妮萍. 高速硬车 20CrMnTi 刀具耐用度研究[J]. 机械设计与制造工程, 2021,50(2):97-100.
- [10] Gutnichenko O, Bushlya V, Zhou J, et al. Tool wear and machining dynamics when turning high chromium white cast iron with pcBN tools[J]. Wear, 2017,390:253-269.
- [11] REN Z, QU S, ZHANG Y, et al. Machining performance of PCD and PCBN tools in dry turning titanium alloy Ti-6Al-0.6Cr-0.4Fe-0.4Si-0.01B[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019,102(5):2649-2661.
- [12] Diaz J, Criado V, Migulez H, et al. Pcbn performance in high speed finishing turning of inconel 718[J]. Metals, 2018,8(8):582.
- [13] 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.
- [14] 叶智彪,江文清,罗涛. PCBN 刀具高速切削淬硬钢材料的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021,41(2):69-74.
- [15] 胡小龙,邵芳,王仁伟. 基于热力学的聚晶立方氮化硼刀具切削镍基合金的磨损机理[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(3):123-126.
- [16] 林勇传,朱能熠,王凯,等. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN 涂层硬质合金刀具干切削 N 型 HT250 灰铸铁表面粗糙度研究[J]. 机床与液压, 2021,49(14):47-50.
- 引用本文:苏君,冯佩佩. PCBN 刀具以车代磨加工 20CrMnTi 合金钢试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):154-157.