

PCBN 刀具切削性能和磨损机理研究综述^{*}

崔金蒙¹, 孟德忠^{2,3,4}, 吴哲¹, 岳文^{1,3,4}, 王成彪^{3,4}

(1. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083)

(2. 中国地质大学(北京) 数理学院, 北京 100083)

(3. 中国地质大学(北京) 郑州研究院, 郑州 451283)

(4. 中国地质科学院 郑州矿产综合利用研究所, 郑州 450006)

摘要 聚晶立方氮化硼(PCBN)刀具是继聚晶金刚石刀具之后的又一种超硬刀具,以其独特的“以车代磨”、“硬态加工”、“干式切削”等方式被誉为 21 世纪的绿色环保刀具。PCBN 刀具在金属切削方面具有广泛的应用,主要用来加工各种淬硬钢、耐磨铸铁等铁基材料。本文介绍了 PCBN 刀具成分、几何形状、切削参数等对其切削性能的影响,在此基础上分析了不同材料加工时刀具的主要磨损机理,还简单对比了硬质合金和 PCBN 刀具切削性能上的差异。

关键词 PCBN 刀具; 磨损机理; 切削性能; 以车代磨; 刀具寿命

中图分类号 TG71; TG58 **文献标志码** A **文章编号** 1006-852X(2020)06-0083-09

DOI 码 10.13394/j.cnki.jgszz.2020.6.0014

Review on cutting performance and wear mechanism of PCBN tools

CUI Jinmeng¹, MENG Dezhong^{2,3,4}, WU Zhe¹, YUE Wen^{1,3,4}, WANG Chengbiao^{3,4}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

(2. School of Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

(3. Zhengzhou Research Institute, China University of Geosciences (Beijing), Zhengzhou 451283, China)

(4. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengzhou 450006, China)

Abstract Polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) tool is another kind of superhard tool after polycrystalline diamond tool. It is known as the green environmental protection tool in the 21st century for its unique advanced cutting methods such as turning instead of grinding, hard machining and dry cutting. PCBN tools are widely used in metal cutting, which is mainly used for processing various kinds of hardened steel, wear-resistant cast iron and other iron-based materials. This paper introduces the influences of tool composition, tool geometry and cutting parameters on the cutting performance of PCBN tools. On this basis, the main wear mechanism of cutting tools in machining different materials are analyzed, and the cutting performance differences between cemented carbide and PCBN tools are also briefly compared.

Key words PCBN tools; wear mechanism; cutting performance; turning instead of grinding; tool life

立方氮化硼(CBN)是 20 世纪 50 年代发展起来的超硬材料,其晶体结构与金刚石相似,热稳定性高于金刚石的,且具有仅次于金刚石的高硬度、高耐磨性、高

化学稳定性、高导热性和低摩擦系数等优异性能^[1]。CBN 通过人工合成制备^[2-3],聚晶立方氮化硼(PCBN)的制备也是如此^[4]。

PCBN 是以 CBN 微粉为原料,在适当黏结剂的作用下或 CBN 本身经过高温高压烧结而成^[4-6]。PCBN 与铁族金属有良好的化学稳定性,在 1 200~1 300 °C 的高温下不与其发生化学反应^[1,3],因此可用作铁族金属材料的切削刀具,广泛应用于各种淬硬钢、耐磨铸铁类材料的加工上,且弥补了金刚石材料高温下易石墨化、与铁族元素反应等缺点^[3]。与硬质合金刀具相比,采用 PCBN 刀具切削时工件可获得更好的加工表面质量,是一种“以车代磨”的新型刀具,据统计 50% 的 PCBN 刀具用来替代磨削工具^[7]。此外,PCBN 刀具还可进行干式切削等,减少了切削液用量,对环境污染小。

2010 年我国设立“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项,明确支持对超硬刀具的制造和研究^[8];另外,“十三五”规划《新材料产业发展指南》也指出:调整超硬材料品种结构,发展高精密人造金刚石和立方氮化硼材料,并解决高档数控机床专用刀具材料的制约^[9]。由此可见,发展 PCBN 刀具已成为机械制造业的重要议题之一。

作为性能独特且可实现绿色应用的刀具,PCBN 刀具的切削性能和磨损研究得到国内外研究者的广泛关注,相比于传统硬质合金等刀具的优势也凸显出来。本文在前人研究的基础上综述影响 PCBN 刀具切削性能的因素,并总结 PCBN 刀具加工不同材料时的磨损机理等。

1 影响 PCBN 刀具切削性能的因素

材料被切削加工成合格零件时的难易程度被称为材料切削加工性能,一般而言,切削加工性能可由刀具寿命、已加工表面质量、切削力、断屑性能等来衡量^[10]。因此,研究刀具切削性能影响因素可为提高刀具寿命、优化已加工表面质量和减小切削力等提供依据。研究发现 PCBN 刀具成分、几何形状、切削参数等会对刀具的切削性能产生影响。

1.1 刀具成分的影响

1.1.1 CBN 含量

在一定范围内,CBN 含量越高,刀具磨损量越多。张松锋等^[11]发现:CBN 质量分数为 75% 时刀具的磨损率明显高于 CBN 质量分数为 50% 和 60% 时刀具的。另外,CBN 含量也对刀具切削形式和使用寿命产生影响。研究显示:CBN 质量分数为 85%~90% 时的

高 CBN 含量(H-CBN)刀具适合间断切削,CBN 质量分数为 50%~60% 时的低 CBN 含量(L-CBN)刀具适合连续切削^[12],且连续切削时 L-CBN 刀具的寿命比 H-CBN 刀具的高 2~3 倍^[13-14]。这主要是因为 H-CBN 刀具断裂韧性好,更适应间断切削时的冲击^[13];而连续切削时 L-CBN 刀具不但寿命更长,且被加工表面的质量更优。KUMAR 等^[15]研究 PCBN 刀具加工不同硬度工件时发现:L-CBN 刀具加工工件的表面粗糙度轮廓算术平均差 R_a 变化范围是 0.6~1.2 μm ,而 H-CBN 刀具已加工表面的 R_a 变化范围是 0.8~1.6 μm ,如图 1 所示。这可能是由于 H-CBN 刀具热传导率相对较高,切削热更易扩散到工件表面上导致工件表面变软,从而造成工件表面质量变差所致。综合起来发现:相同切削条件下,L-CBN 刀具耐磨性更好,刀具寿命更长,更能加工出好的表面质量;而 H-CBN 刀具断裂韧性更好,更适用于间断切削。2 种类型的刀具性能对比如表 1 所示。

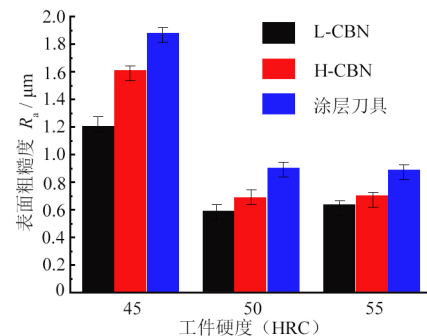


图 1 不同 PCBN 刀具加工不同硬度工件的表面粗糙度对比^[15]

Fig. 1 Comparison of surface roughness of workpiece with different hardness machined by different PCBN tools^[15]

表 1 L-CBN 和 H-CBN 刀具切削性能对比

Tab. 1 Comparison of cutting performances between L-CBN and H-CBN tools

项目	L-CBN	H-CBN	原因
刀具寿命	连续切削 时寿命高	连续切削 时寿命低	H-CBN 刀具中的 CBN 颗粒更易被拔出
已加工表面质量	表面精度高	表面精度低	H-CBN 刀具热导 率高,切削热更易扩 散到已加工表面, 使工件表面软化
适合的切削形式	连续切削	间断切削	H-CBN 刀具断裂 韧性更好,适应间断 切削时的冲击

1.1.2 黏结剂

根据 PCBN 刀具中是否有黏结剂把 PCBN 刀具分为黏结剂型 PCBN 刀具和纯相 PCBN 刀具^[4],且黏结剂影响工件已加工表面质量和刀具磨损量。BUSHLYA 等^[16]研究不同 CBN 含量的刀具连续精加工冷作模具钢时发现:黏结剂较多的 L-CBN 刀具的加工表面质量最好,无黏结剂刀具(即纯相 PCBN 刀具)的次之,黏结剂较少的 H-CBN 刀具的最差;由于无黏结剂刀具自锐性好,刀具不断进行自我磨损修锐,所以无黏结剂刀具的磨损量是 L-CBN 刀具的 3~5 倍。

另外,黏结剂型 PCBN 刀具的黏结剂类型有金属型和陶瓷型的,由于陶瓷型黏结剂有良好的热稳定性^[4],所以表现出独特的切削性能。张弘弢等^[17]对比了不同黏结剂 PCBN 刀具加工等温淬火球墨铸铁时的切削性能,发现当使用含钨的陶瓷黏结剂刀具切削时,其切削力和摩擦系数均较小,且二者随着切削速度的增加逐渐减小;当使用金属型黏结剂刀具时,其摩擦力和摩擦系数均较大。这是因为陶瓷黏结剂耐高温性能优异,能适应切削时产生的切削热;而金属型黏结剂抗高温能力较差,在高温下容易软化导致刀具硬度降低,从而改变其切削性能。

在探究不同种类刀具切削 GH706 材料时还发现:与陶瓷型黏结剂刀具相比,金属型黏结剂刀具更耐磨,所以更适合加工高温合金材料^[18]。进一步研究也发现:刀具中的钨元素可以提高 PCBN 刀具寿命,这可能是因为加入钨元素后的刀具断裂韧性好,所以这种刀具不易产生微崩刃^[19]。在实际生产中,针对不同类型的工件,应选择适当种类的黏结剂类型刀具来加工,这样才能够增加刀具寿命、降低成本、提高生产效率等。

1.2 刀具几何形状的影响

刀具几何形状(包括刀具前角、后角、主偏角、刃倾角、刀尖半径、刃口倒棱角度和倒棱宽度等)对切削热、刀具寿命、切削力有很大影响,合理的选择刀具几何形状参数不仅能提高刀具的切削性能,还可提高生产效率、降低生产成本等^[20]。PCBN 刀具广泛用来加工淬硬钢(50 HRC 以上),因此常叫作“硬态加工”。在使用其加工时,刀具的进给量和切削深度相对较小($< 0.2 \text{ mm}$),通常与刀尖几何尺寸近似,故 PCBN 刀具的前角、后角、主偏角等对其切削性能影响较小,而刃倾角、刀尖半径、刀具倒棱角度和倒棱宽度等几何形状参

数对 PCBN 刀具切削性能的影响较大^[21]。

KLIMENKO 等^[22]在研究刃倾角对刀具寿命影响时发现,刃倾角为 50° 时刀具寿命最长。此外,刀尖半径也影响刀具的寿命,当刀尖半径较小时,切屑变厚,产生的切削热多且热量不易散发,最终导致刀尖半径变小,刀具寿命缩短^[23]。倒棱角度和倒棱宽度也是影响 PCBN 刀具切削性能的最主要因素,这是由于在“硬态加工”过程中,为增加 PCBN 刀具的刃口强度,通常会对刃口进行倒棱处理^[20]。CHEN 等^[24]通过改变刀具倒棱角度和倒棱宽度探究切削过程产生的切削热,发现随着倒棱角度和倒棱宽度增加,切削温度随之增加,如图 2 和图 3 所示。这主要是由于倒棱角度和倒棱宽度的增加促使剪切区发生变形,使刀具和工件之间的摩擦逐渐增加,从而使切削温度升高。进一步研究发现:随着刀具倒棱角度和倒棱宽度增加,切削力呈逐渐上升趋势,尤其是径向力的增加更明显,且当倒棱角度为 20° 时,切屑锯齿化程度最低^[24-25]。李启泉等^[26]用不同 PCBN 刀具车削硼铸铁时发现:倒棱宽度增加切削温度和刀具磨损不断增加,刀具寿命降低。原因是随着倒棱宽度的增加,切削刃有向工件回转中心下方移动的偏差,这导致刀具磨损加大。研究还发现:与其他刀具参数相比(如刀尖圆弧半径和后角),刀具倒棱角度对刀具寿命的影响最明显^[20]。

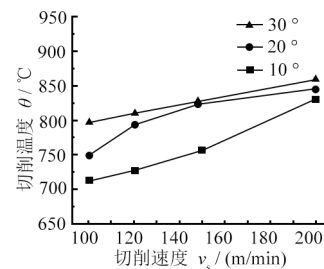


图 2 不同切削速度下刀具倒棱角度对切削温度的影响^[24]

Fig. 2 Influences of tool chamfering angles on cutting temperatures at different cutting speeds^[24]

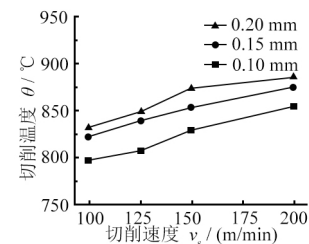


图 3 不同切削速度下刀具倒棱宽度对切削温度的影响^[24]

Fig. 3 Influence of tool chamfering width on cutting temperature at different cutting speeds^[24]

鉴于刀具倒棱角度对刀具切削性能产生显著影响,众多学者研究了可变倒棱角度刀具和固定倒棱角度刀具的磨损特性。顾名思义可变倒棱角度刀具的倒棱角度是变化的,其可以形成空间弯曲的刀刃,如图 4 所示,图 4 中的 L 是固定值,倒棱角 α_i ($i=A, B, C, D, E$) 沿拐角半径线性变化,且最小倒棱角度为 15° ,最大倒棱角度为 30° [27]。可变倒棱角度刀具的轴向和径向载荷在一定程度上被分解,产生的径向力和轴向力相对较小,且可提高切屑去除性能,刀具寿命相应延长[27-30]。进一步研究还发现:由于可变倒棱角度刀具产生相对较小的切削力,刀具侧面磨损面积较小,已加工工件表面的质量较好[31]。总之,机械加工时刀具倒棱角度严重影响刀具的切削性能,因此可适当采用可变倒棱角度的刀具,以提高刀具切削性能。

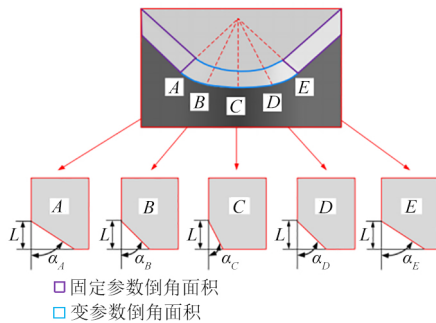


图 4 具有可变倒棱角度的刀具结构[27]

Fig. 4 PCBN tool structures with variable chamfering angles[27]

1.3 切削参数的影响

切削参数(含背吃刀量、进给量、切削速度等)也是影响刀具切削性能的一个重要因素。研究发现:背吃刀量越大切削力越大,由于 PCBN 的韧性较低,故刀具容易发生断裂[32]。李庆华等[33]在分析切削用量对 PCBN 刀具车削钛合金的影响时发现:切削力随着背吃刀量和进给量的增加而增大,其中背吃刀量对切削力的影响最大,这是因为随着背吃刀量的增加,切削宽度和切削层面积不断增大,所以工件与刀具之间的摩擦加大,造成刀具切削力增大。进一步研究发现:切削参数对切削温度同样影响显著,其中切削速度对切削温度的影响最大,其次是进给量和背吃刀量的影响[33-34]。

实际加工中,切削速度对 PCBN 刀具切削性能的影响比进给量和背吃刀量等的更加显著。一般而言,切削速度越高,切削温度也会越高[35],温度升高将导致刀具硬度线性下降[36],由于刀具硬度和刀具

使用寿命密切相关,所以切削速度升高会降低刀具使用寿命。在用 PCBN 刀具连续车削淬硬钢时发现,切削速度每增加 40.0 m/min ,刀具寿命会缩短 1 倍[37]。虽然切削速度升高会显著降低 PCBN 刀具的寿命,但其依然可以在高速切削时使用,而硬质合金刀具却在高速切削时失去切削能力。BOING 等[38]研究硬质合金刀具、PCBN 刀具加工 GCr15 钢时发现:当切削速度为 187.5 m/min 和 234.0 m/min 时,硬质合金刀具失效而 PCBN 刀具依然可以切削,所以相比硬质合金刀具,PCBN 刀具更适合高速车削,且铣削时也有相似结论[39]。这是因为 PCBN 的热稳定性高于硬质合金的,如表 2 所示,所以在较高的切削速度下,硬质合金刀具的硬度下降相对较快,并伴随崩刃断裂等现象[40],最终导致硬质合金刀具高速切削时失去切削性能。

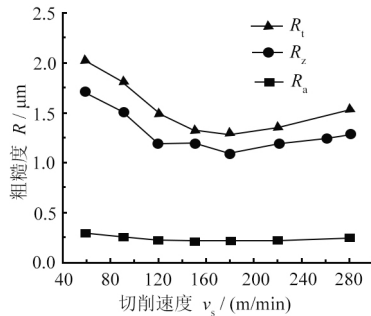
PCBN 刀具的已加工表面粗糙度值在一定切削速度范围内呈下降趋势,如图 5 所示。从图 5 中可以看出:当切削速度从 60 m/min 增加到 120 m/min 时,工件的表面粗糙度轮廓算术平均差 R_a 、表面粗糙度轮廓峰谷总高度 R_t 、表面粗糙度轮廓最大幅度值 R_z 都呈下降趋势,当切削速度为 120 m/min 时 R_a 达最低值;切削速度继续增大到 280 m/min , R_a 基本保持不变。这是由于切削速度增加切削力逐渐下降,因此加工系统逐渐稳定,使 R_a 基本保持不变[41]。通过研究发现:在使用 PCBN 刀具加工 Cr12MoV 时,已加工表面的 R_a 稳定在 $0.2 \mu\text{m}$ [42];而在相同试验条件下使用硬质合金刀具加工,已加工表面的 R_a 范围是 $1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$,且切削速度对工件表面精度影响很大,导致已加工表面质量变化剧烈[43]。由于 PCBN 刀具与不同材料之间的摩擦系数为 $0.1 \sim 0.3$,小于硬质合金刀具的摩擦系数 $0.4 \sim 0.6$ [1],并且随切削速度增加 PCBN 刀具的摩擦系数还不断减小[44],故 PCBN 刀具可实现“以车代磨”,能加工出表面质量更好的工件。

进一步研究还发现:切削速度增加时,切削力逐渐下降。TU 等[45]在探究 PCBN 刀具切削温度变化时发现:随着切削速度增加,切削力不断减小。这主要是因为切削速度越高,产生的切削热越多,金属工件逐渐被软化,加工所需要的切削力也会降低。综合以上的结果表明,进给量、背吃刀量、切削速度等都会影响刀具寿命和工件表面质量等,因此实际生产中可通过对切削参数进行优化来提高刀具切削性能。

表 2 CBN 和硬质合金性能比较

Tab. 2 Comparison of properties between CBN and cemented carbide

性能	取值	
	CBN	硬质合金
密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	3.48	15.10
热传导率 $\lambda / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	130	54
维氏硬度 H_v / GPa	40~45	13~15
热稳定温度 $\theta / ^\circ\text{C}$	1 300~1 500	900~1 000
热膨胀系数 α_l / K^{-1}	3.5×10^{-6}	4.5×10^{-6}

图 5 切削速度对粗糙度的影响^[41]Fig. 5 Influence of cutting speed on roughness^[41]

1.4 冷却条件的影响

切削液会带走一部分热量,改善工件被加工表面的热软化情况,显然使用切削液可提高工件已加工表面质量且延长刀具使用寿命,但 PCBN 刀具不加冷却液时,对工件的加工也可达到理想的表面质量且刀具有较长的使用寿命,所以 PCBN 刀具是独特的“干式切削”刀具。另外,CBN 易在 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 时发生水解^[1],所以不能用水性切削液进行冷却。张松峰等^[11]发现湿切时刀具的寿命要高于干切时刀具的寿命,这显然是由于润滑剂的作用;但对于 H-CBN 刀具,其湿切时的刀具寿命小于干切时的刀具寿命。进一步研究发现:由于湿切时刀具承受较大的热冲击而产生热裂纹,导致刀具的磨损量增加^[46]。但在探究固体润滑剂对 PCBN 刀具切削性能影响时发现:干切削时刀具的寿命比使用纯油润滑时缩短 28.7%,比使用固体润滑剂时缩短 36.4%^[47]。因此,在硬车削中使用固体润滑剂是解决刀具磨损、提高其寿命的途径之一。

1.5 PCBN 刀具切削对机床的要求

PCBN 是一种相对较脆的材料,因此机床的任何不稳定都会对刀具的磨损及其切削力产生负面影响,进而影响工件的表面质量。与此同时,PCBN 刀具主要用于加工淬硬钢及耐磨铸铁等难加工材料,刀具有负倒棱,因而径向力较大,这就要求机床刚度和精度要

好,系统振动要小,刀具安装时的悬臂要小等。CHRYSSOLOURIS 等^[48]发现当机床不稳定时,刀具磨损加快,从而缩短了刀具的使用寿命,使刀具的可靠性下降;而当设备足够刚性时,PCBN 刀具的磨损比较平稳,且还发现已加工表面质量对刀架的振动更敏感等。因此,使用高精度机床是提高 PCBN 刀具切削性能的重要途径,这些高精度机床可在加工过程中进行监控,且具有补偿工件、刀具和刀架的热膨胀效应等功能^[49]。

2 PCBN 刀具的磨损机理

PCBN 刀具与工件接触时刀面上的压力可达 2~3 GPa,切削温度达 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 以上,刀具发生磨损是不可避免的^[10,50]。当刀具磨损达到一定程度后,其使用寿命达到极限。同时,刀具过度磨损会造成其切削力过高,从而造成刀具故障,调查显示由于刀具故障导致机床的停用时间占总使用时间的 20%^[51]。刀具的磨损状态很大程度上影响着已加工表面的质量,使用过度磨损的刀具进行加工将导致工件报废、切削效率降低、切削成本提高等。

研究发现:PCBN 刀具的磨损形式并不是单一的,而是相互作用、相互促进、共同影响的结果。GAO 等^[52]分析 PCBN 刀具加工淬硬钢的磨损形式时发现:黏着磨损、扩散磨损与化学磨损共存的磨损形式最终造成刀具的侧面磨损而使其失效。CHEN 等^[53]对干式加工高铬铸铁材料时的刀具的磨损性能进行评估时,发现 PCBN 刀具的磨损过程存在扩散、化学、磨粒这 3 种磨损机理,且磨粒磨损和磨粒碎裂密切相关。综合起来,PCBN 刀具的磨损形式主要是磨粒磨损、黏着磨损、扩散磨损和化学磨损。

2.1 磨粒磨损

PCBN 刀具的磨粒磨损是指切削过程中产生的硬颗粒造成刀具磨损的现象。在 PCBN 刀具车削 40CrNiMo 硬化合金钢时,发现工件中的硬质碳化物颗粒使刀具黏结剂产生磨损沟槽^[54];且被加工材料存在的硬颗粒和夹杂物不同,对刀具的寿命影响也不同^[55]。NAYAK 等^[56-57]使用 PCBN 刀具加工时发现:随着切削的进行,CBN 颗粒逐渐裸露,裸露的 CBN 颗粒充当微切削刃加剧了刀具的磨损。因此,加工时工件中的硬颗粒和夹杂物留在接触区域,造成刀具的磨粒磨损;同时,由于黏结剂相的磨损和脱落,导致 CBN

颗粒脱落,又充当了微切削刃加速了刀具磨损。

2.2 黏着磨损

黏着磨损指在适当的切削温度和压力下,工件与刀具材料接触达到原子间距时,接触区域的材料从一方表面迁移到另一方表面的现象。SIRTULI 等^[58]在研究 PCBN 刀具对磨 Cr12MoV 模具钢时,在刀具表面发现了明显的工件黏着材料,黏着材料使刀具的几何形状发生变化,且黏着层发生了化学反应,导致刀具产生磨损。在切削镍基合金时,PCBN 刀具表面发现有一层 B₂O₃ 黏着层,使刀具的切削能力下降且磨损加剧^[59]。

研究还发现黏着磨损与切削速度有关。BUSHLYA 等^[60]在研究 PCBN 刀具低速切削时的磨损机理时发现:刀具磨损主要是黏着磨损,但随着速度增加黏着磨损的现象不断减弱。因此,黏着磨损与切削速度有关,且黏着材料可能发生化学反应。

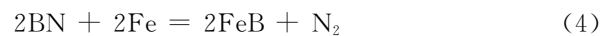
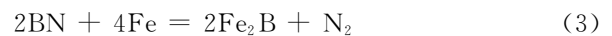
2.3 扩散磨损

扩散磨损主要是指在切削过程中,当刀具和工件之间处于高温状态时,工件中的材料元素活性增强,扩散到刀具中,从而在刀具表面及内部出现工件材料元素而造成磨损的现象。在用 PCBN 刀具高速切削淬硬轴承钢时,在刀具切削刃处发现大量的 Fe 和 C 等工件材料元素,而刀具本身的 N、Ti、Al 等元素含量却下降,证明刀具切削刃处发生了严重的扩散磨损^[61]。BUSHLYA 等^[62]在研究 PCBN 切削镍铬铁合金时发现:刀具中的 B 和 N 元素扩散到工件中形成固溶体,导致刀具的切削能力下降。ZOYA 等^[63]在研究 PCBN 刀具加工钛合金时发现:刀具的切削刃处发生碎裂和扩散磨损,且切削刃处有 O 元素存在,表明刀具伴随有化学磨损发生。故扩散磨损伴随氧化现象发生,为扩散磨损也为化学磨损的产生创造了条件。由于各元素的活化能不同导致不同材料的扩散能力不同,在 PCBN 刀具切削镍合金时发现,Ni 元素的扩散能力大于 Fe 元素的^[46]。

2.4 化学磨损

化学磨损主要是刀具材料与空气中的 O 元素发生化学反应造成的磨损。PCBN 刀具的化学磨损形式包括:刀具元素发生氧化反应生成氧化物,刀具元素与生成的氧化物反应以及刀具元素与工件元素反应生成 N₂^[64]。化学磨损与切削时产生的切削热有关。在研

究 O 元素对 PCBN 刀具切削铝高温合金材料的影响时发现:较低的切削速度下,刀具上会产生较浅的锯齿坑,但当以 200 m/min 的速度进行加工时,锯齿坑会明显加剧,并且在锯齿坑中检测出大量的 Al₂O₃ 氧化物,这表明在高速切削时,氧化机理在切削热的作用下被激活^[65]。进一步研究还发现,PCBN 与工件之间也会发生化学反应。胡小龙等^[64]切削镍基合金时发现:PCBN 刀具表面 N 含量下降而 O、Fe 和 B 含量增加,推测刀具发生了放氮反应,而 O 含量增加与刀具发生的氧化磨损有关。PCBN 刀具氧化磨损的化学反应式为:



3 结语及展望

PCBN 刀具以其独特的“以车代磨”、“硬态加工”、“干式切削”等方式被誉为 21 世纪的绿色环保刀具,故迫切需要研究 PCBN 刀具的切削性能和磨损机理。通过研究发现:PCBN 刀具成分、刀具几何形状、切削参数等会对刀具的切削性能产生影响,PCBN 刀具加工不同材料时的磨损主要有磨粒磨损、黏着磨损、扩散磨损和化学磨损。为提高 PCBN 刀具的切削性能,可使用可变倒棱角度的 L-CBN 刀具,同时不断优化切削参数,且在经济可控下可使用固体润滑剂、高精度机床等。

《中国制造 2025》明确提出“全面推行绿色制造”,实施“绿色制造工程”,PCBN 刀具作为绿色环保刀具的代表,将在高精尖加工领域发挥重要作用。同时,“十三五”规划等明确指出“发展高精密人造金刚石和立方氮化硼材料”。PCBN 刀具作为 21 世纪的新型超硬刀具,未来的研究应注重其“以车代磨”的绿色环保特性,从 PCBN 刀具的制造入手,确保原材料性能稳定,并进一步拓展其应用空间,如开展特殊环境如真空、极低温的应用研究等,为 PCBN 刀具在未来空间探索中的应用提供重要的技术支撑。

参考文献:

- [1] 李丹,刘进,胡娟,等.聚晶立方氮化硼材料的性能及应用[J].

- 工具技术, 2006, 40(12): 11-13.
- LI Dan, LIU Jin, HU Juan, et al. Performance and application of polycrystalline cubic boron nitride [J]. Tool Engineering, 2006, 40(12): 11-13.
- [2] 张旺玺, 王艳芝, 孙长红, 等. 氮化硼系列材料的合成制备及应用研究进展 [J]. 陶瓷学报, 2018, 39(6): 661-671.
- ZHANG Wangxi, WANG Yanzhi, SUN Changhong, et al. The development of the applications and synthesis of boron nitride materials [J]. Journal of Ceramics, 2018, 39(6): 661-671.
- [3] 李翰. 金刚石人工合成与应用 [M]. 深圳: 海天出版社, 2013.
- LI Han. Diamond synthesis and application [M]. Shenzhen: Haitian Publishing House, 2013.
- [4] 李良, 陈玉奇, 周爱国. 聚晶立方氮化硼用结合剂及其制备工艺的研究进展 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39(2): 46-50.
- LI Liang, CHEN Yuqi, ZHOU Aiguo. Research progress of binders for polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) and preparation technology [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2019, 39(2): 46-50.
- [5] 彭进, 侯永改, 董企铭, 等. 聚晶立方氮化硼(PCBN)的制备及应用研究进展 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2008(4): 81-86.
- PENG Jin, HOU Yonggai, DONG Qiming, et al. Progress in preparation and application of polycrystalline cubic boron nitride [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2008(4): 81-86.
- [6] 陈永杰, 王海阔, 彭进, 等. 聚晶立方氮化硼的制备方法及应用进展 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2015, 35(2): 74-80.
- CHEN Yongjie, WANG Haikuo, PENG Jin, et al. Production methods and application of polycrystalline cubic boron nitride [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2015, 35(2): 74-80.
- [7] 华红艳. 国外 PCBN 刀具应用技术 [J]. 机械工艺师, 2001(3): 24-26.
- HUA Hongyan. Foreign PCBN tool application technology [J]. Machinery Manufacturing Engineer, 2001(3): 24-26.
- [8] 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.
- LI Yanguo, CHENG Zhaonan, ZOU Qin, et al. Research progress of PCBN superhard cutting tools [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2019, 39(3): 58-68.
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部. 新材料产业发展指南 [J]. 建材发展导向, 2017, 15(10): 3-8.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. New material industry development guide [J]. Development Guide to Building Materials, 2017, 15(10): 3-8.
- [10] 于英华. 机械制造技术基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- YU Yinghua. Fundamentals of mechanical manufacturing technology [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2013.
- [11] 张松锋, 谢辉, 方海江, 等. PCBN 刀具干湿切削加工淬硬钢时的磨损对比 [J]. 金刚石磨料磨具工程, 2009(3): 1-6.
- ZHANG Songfeng, XIE Hui, FANG Haijiang, et al. Comparison of wear during dry and wet cutting of quenched steel with PCBN cutting tool [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2009(3): 1-6.
- [12] 李迎. 硬切削加工技术的研究现状与发展趋势 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(6): 107-112.
- LI Ying. Recent advances in hard cutting and its future trend [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011(6): 107-112.
- [13] DOGRA M, SHARMA V S, SACHDEVA A, et al. Tool wear, chip formation and workpiece surface issues in CBN hard turning: A review [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2010, 11(2): 341-358.
- [14] DE OLIVEIRA J, BOING D, SCHROETER R B, et al. Effect of PCBN tool grade and cutting type on hard turning of high chromium white cast iron [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(5-8): 797-807.
- [15] KUMAR P, CHAUHAN S R, PRUNCU C I, et al. Influence of different grades of CBN inserts on cutting force and surface roughness of AISI H13 die tool steel during hard turning operation [J]. Materials, 2019, 12(1): 177-197.
- [16] BUSHLYA V M, GUTNICHENKO O A, ZHOU J, et al. Tool wear and tool life of PCBN, binderless CBN and WBN-CBN tools in continuous finish hard turning of cold work tool steel [J]. Journal of Superhard Materials, 2014, 36(1): 49-60.
- [17] 张弘强, 李海波, 董海. 不同聚晶立方氮化硼复合刀具加工等温淬火球墨铸铁的切削性能对比 [J]. 机械工程材料, 2008, 32(8): 43-46.
- ZHANG Hongtao, LI Haibo, DONG Hai, et al. Cutting properties in cutting Austempered ductile iron by PCBN compact tools [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 32(8): 43-46.
- [18] 计伟, 刘献礼, 范梦超, 等. PCBN 刀具切削 GH706 磨损特征研究 [J]. 摩擦学学报, 2015, 35(1): 37-44.
- JI Wei, LIU Xianli, FAN Mengchao, et al. PCBN tool wear characteristic in cutting superalloy GH706 [J]. Tribology, 2015, 35(1): 37-44.
- [19] 钟生林, 王鹏, 莫培程, 等. 陶瓷结合 PCBN 超硬材料的研究与发展 [J]. 超硬材料工程, 2018, 30(5): 51-54.
- ZHONG Shenglin, WANG Peng, MO Peicheng, et al. Research and development of ceramic bond polycrystalline cubic boron nitride [J]. Superhard Material Engineering, 2018, 30(5): 51-54.
- [20] 邓福铭, 邓雯丽, 张盼, 等. PCBN 刀具几何参数对高速干切削淬硬轴承钢寿命的影响 [J]. 硬质合金, 2016, 33(4): 250-254.
- DENG Fuming, DENG Wenli, ZHANG Pan, et al. Effect of geometrical parameters of PCBN cutting tool on tool life in high speed dry cutting of hardened bearing steel [J]. Cemented Carbide, 2016, 33(4): 250-254.
- [21] LAHIFF C, GORDON S, PHELAN P, et al. PCBN tool wear modes and mechanisms in finish hard turning [J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2007, 23(6): 638-644.
- [22] KLIMENKO S A, MANOKHIN A S, MELMICHUK Y A, et al. Wear and life of tools with inserts from CBN-based polycrys-

- talline superhard materials in the finish turning of hardened steels at heavy feeds [J]. *Journal of Superhard Materials*, 2012, 34(1): 49-55.
- [23] SHINTANI K, UEKI M, FUJIMURA Y, et al. Optimum tool geometry of CBN tool for continuous turning of carburized steel [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1989, 29(3): 403-413.
- [24] CHEN T, YAN F G, WU C Y, et al. Effect of chamfered PCBN tool edge geometries on hard turning process [J]. *Key Engineering Materials*, 2008, 375-376: 187-191.
- [25] 陈涛, 刘献礼, 罗国涛. PCBN 刀具切削淬硬钢时倒棱参数对切削过程的影响 [J]. *农业机械学报*, 2008, 39(11): 169-175.
CHEN Tao, LIU Xianli, LUO Guotao. Effects of chamfered parameters on cutting processes in hard turning of hardened steel using PCBN cutting tools [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(11): 169-175.
- [26] 李启泉, 张旺玺, 刘书锋, 等. 不同 PCBN 刀具车削铸铁的对比研究 [J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2015, 35(2): 63-68.
LI Qiquan, ZHANG Wangxi, LIU Shufeng, et al. Comparative research on cutting boron-cast iron with PCBN [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2015, 35(2): 63-68.
- [27] CHEN T, SONG L, LI S, et al. Experimental study on wear characteristics of PCBN tool with variable chamfered edge [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 32(1): 1-9.
- [28] CHEN T, GUO J, WANG D Y, et al. Experimental study on high-speed hard cutting by PCBN tools with variable chamfered edge [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97: 4209-4216.
- [29] OZEL T. Computational modelling of 3D turning: Influence of edge microgeometry on forces, stresses, friction and tool wear in PCBN tooling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(11): 5167-5177.
- [30] OZEL T, KARPAT Y, SRIVASTAVA A, et al. Hard turning with variable micro-geometry PCBN tools [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2008, 57(1): 73-76.
- [31] LIU X, LI S, CHEN T, et al. Research on the surface characteristics of hardened steel with variable chamfer edge PCBN insert by high-speed hard turning [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2018, 19(2): 157-165.
- [32] WANG X Q, AI X, ZHAO J, et al. Predictive tool life model of CBN in Ti6Al4V high speed turning and cutting parameter optimization [J]. *Key Engineering Materials*, 2009, 407-408: 594-598.
- [33] 李庆华, 胡恺星, 曾煜. 切削用量对 PCBN 刀具车削钛合金的切削性能影响 [J]. *内燃机与配件*, 2019, 8: 113-114.
LI Qinghua, HU Kaixing, ZENG Yu. Influence of cutting parameters on the cutting performance of PCBN tool turning titanium alloy [J]. *Internal Combustion Engine & Accessories*, 2019(8): 113-114.
- [34] 郭再新, 王亚祥. PCBN 刀具干式精车 50 HRC 淬硬钢参数优化 [J]. *计算机仿真*, 2020, 37(6): 181-186.
WU Zaixin, WANG Yaxiang. Parameter optimization of 50 HRC hardened steel for PCBN tool dry finishing car [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 37(6): 181-186.
- [35] REN X, YANG Q, JAMES R D, et al. Cutting temperatures in hard turning chromium hard facings with PCBN tooling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 147(1): 38-44.
- [36] HARRIS T K, BROOKES E J, TAYLOR C J, et al. The effect of temperature on the hardness of polycrystalline cubic boron nitride cutting tool materials [J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2004, 22(2): 105-110.
- [37] 窦云巍, 寇自力, 亓磊, 等. PCBN 刀具连续车削淬硬钢性能的研究 [J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2010, 30(6): 54-57.
DOU Yunwei, KOU Zili, QI Lei, et al. Turning hardened bearing steel with PCBN tool [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2010, 30(6): 54-57.
- [38] BOING D, ZILLI L, FRIES C E, et al. Tool wear rate of the PCBN, mixed ceramic, and coated cemented carbide in the hard turning of the AISI 52100 steel [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104: 4697-4704.
- [39] TWARDOWSKI P, LEGUTKO S, KROLCZYK G M, et al. Investigation of wear and tool life of coated carbide and cubic boron nitride cutting tools in high speed milling [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7(6): 1-9.
- [40] MIR M J, WANI M F. Performance evaluation of PCBN, coated carbide and mixed ceramic inserts in finish-turning of AISI D2 steel [J]. *Jurnal Tribologi*, 2017, 14: 10-31.
- [41] YALLESE M A, CHAOUI K, ZEGHIB N, et al. Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(2): 1092-1104.
- [42] SRITHAR A, PALANIKUMAR K, DURGAPRASAD B, et al. Experimental investigation and surface roughness analysis on hard turning of AISI D2 steel using polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 16: 1061-1066.
- [43] SRITHAR A, PALANIKUMAR K, DURGAPRASAD B, et al. Experimental investigation and surface roughness analysis on hard turning of AISI D2 steel using coated carbide insert [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 97: 72-77.
- [44] FARHAT Z N. Wear mechanism of CBN cutting tool during high-speed machining of mold steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 361(1-2): 100-110.
- [45] TU L, XU F, WANG X, et al. Temperature distribution of cubic boron nitride-coated cutting tools by finite element analysis [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(7): 3197-3207.
- [46] 刘战强, 万熠. PCBN 刀具磨损形态与磨损规律的实验研究 [J]. *农业机械学报*, 2004, 35(5): 229-231.

- LIU Zhanqiang, WAN Yi. Experimental study on the wear morphology and wear rule of PCBN cutting tool [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2004, 35(5): 229-231.
- [47] SUAREZ M P, MARQUES A, BOING D, et al. MoS₂ solid lubricant application in turning of AISI D6 hardened steel with PCBN tools [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 47: 337-346.
- [48] CHRYSOLOURIS G, TOENSHOFF H K. Effects of machine-tool-workpiece stiffness on the wear behavior of superhard cutting materials [J]. CIRP Annals, 1982, 31(1): 65-69.
- [49] LAHIFF C, GORDON S, PHELAN P, et al. PCBN tool wear modes and mechanisms in finish hard turning [J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2007, 23(6): 638-644.
- [50] 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. HU Xiaolong, SHAO Fang, WANG Renwei. Analysis on oxidation and diffusion wear of PCBN tool in cutting nickel base alloy [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(1): 99-102.
- [51] KURADA S, BRADLEY C. A review of machine vision sensors for tool condition monitoring [J]. Computers in Industry, 1997, 34(1): 55-72.
- [52] GAO H, LIU X, CHEN Z, et al. Cutting performance and wear/damage characteristics of PCBN tool in hard milling [J]. Applied Sciences, 2019, 9(4): 772-787.
- [53] CHEN L, STAHL J E, ZHAO W, et al. Assessment on abrasiveness of high chromium cast iron material on the wear performance of PCBN cutting tools in dry machining [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 110-120.
- [54] LUO S Y, LIAO Y S, TSAI Y Y. Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 88(1-3): 114-121.
- [55] ANMARK N, BJORK T, GANEA A, et al. The effect of inclusion composition on tool wear in hard part turning using PCBN cutting tools [J]. Wear, 2015, 334: 13-22.
- [56] NAYAK M K, SEHGAL R. Effect of tool material properties and cutting conditions on machinability of AISI D6 steel during hard turning [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2015, 40(4): 1151-1164.
- [57] 何光春. 高速切削硬 AISI H13 的 PCBN 刀具磨损机制研究 [J]. 机床与液压, 2019, 47(1): 185-188. HE Guangchun. Study of PCBN tool wear mechanism when high speed cutting hardened AISI H13 steel [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(1): 185-188.
- [58] SIRTULI L J, BOING D, SCHROETER R B, et al. Evaluation of layer adhered on PCBN tools during turning of AISI D2 steel [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 84(10): 49-77.
- [59] LI L B, WU M Y, LIN X L, et al. Experimental study of the wear behavior of PCBN inserts during cutting of GH4169 superalloys under high-pressure cooling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95: 1941-1951.
- [60] BUSHLYA V, GUTNICHENKO O, ZHOU J, et al. Effects of cutting speed when turning age hardened Inconel 718 with PCBN tools of binderless and low-CBN grades [J]. Machining Science and Technology, 2013, 17(4): 497-523.
- [61] 邓福铭, 邓雯丽, 杨雪峰, 等. PCBN 刀具高速切削淬硬轴承钢的磨损机理研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2016, 36(5): 50-54. DENG Fuming, DENG Wenli, YANG Xuefeng, et al. Wear mechanism of the PCBN cutting tools in high speed cutting of hardened bearing steel [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2016, 36(5): 50-54.
- [62] BUSHLYA V, BJERKE A, TURKEVICH V Z, et al. On chemical and diffusional interactions between PCBN and superalloy Inconel 718: Imitational experiments [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39(8): 2658-2665.
- [63] ZOYA A, KRISHNAMURTHY R. The performance of CBN tools in the machining of titanium alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 100(1): 80-86.
- [64] 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. HU Xiaolong, SHAO Fang, WANG Renwei. Wear mechanism of polycrystalline cubic boron nitride tools based on thermodynamics for cutting nickel-based alloys [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(3): 123-126.
- [65] BUSHLYA V, LENRICK F, STAHL J E, et al. Influence of oxygen on the tool wear in machining [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2018, 67(1): 79-82.

作者简介

崔金蒙, 女, 1993 年生, 硕士研究生。主要研究方向: 超硬材料刀具切削磨损性能研究。

E-mail: culjinmeng@163.com

通信作者: 孟德忠, 男, 1988 年生, 讲师。主要研究方向: 超硬材料的制备及表征。

E-mail: meng@cugb.edu.cn

岳文, 男, 1981 年生, 教授、博士生导师。主要研究方向: 机械摩擦学与表面工程。

E-mail: yw@cugb.edu.cn

(修回日期: 2020-09-09)

(编辑: 周万里)