

PCBN 刀具最新发展及应用

Current Development and Application of PCBN Cutting Tool

哈尔滨理工大学机械动力工程学院高效切削及刀具国家地方联合工程实验室 计伟 刘献礼 孙轶龙



计伟

哈尔滨理工大学博士研究生,研究方向为超硬刀具技术,参与课题包括国家科技重大专项“汽车、航空航天和发电设备用高效精密数控刀具高可靠性设计制造与切削性能评价”(2012ZX04003051)、国家重点实验室开放课题“高温合金和钛合金切削机理及加工用超硬刀具设计”(DMETKF2012011)及国家科技重大专项“复杂数控刀具创新能力平台建设”(2012ZX04012021)等。

随着装备、航空航天、武器、能源、汽车等行业的不断发展,淬硬钢、铸铁、高温合金等一大批难加工材料的应用越来越广泛,它们的硬度高、耐磨性高等特点给刀具带来了较大的挑战。采用硬质合金等刀具切削加工以上几种难加工材料时,存

高精度、高效率是现代的机械加工的方向,这对刀具提出的要求更高;并且随着更多各种各样的难加工材料的出现,刀具面临着更大的考验。PCBN 刀具是未来制造业很有潜力的刀具之一,随着对 PCBN 刀具加工各种难加工材料的研究的进一步深入,其应用范围必将得到进一步拓展,在未来的刀具行业中必然占据更多的市场。

在刀具磨损严重、刀具寿命短、加工质量差、加工效率低等缺点,所以需要选用更加先进的刀具材料,其中包括超硬刀具材料聚晶立方氮化硼(PCBN)。PCBN 刀具的性能特点突出,经过多年的研究,采用 PCBN 刀具加工淬硬钢、铸铁、高温合金等,在一定程度上解决了以上问题。相对硬质合金刀具,PCBN 刀具的磨损程度低、切削加工质量高、加工效率高,并且在一些行业中都有一定的应用。PCBN 刀具越来越多地出现在“高速切削”、“干式切削”、“以车代磨”、“以铣代磨”等绿色加工工艺方法中,这不但在一定程度上提高了加工质量,而且大大提高加工效率,同时又减少了对环境的污染。但是由于 PCBN 刀具材料的脆性较大,易发生破损,所以在加工中,PCBN 刀具的应用技术不同于硬质合金、高速钢等传统刀

具。本文针对 PCBN 刀具切削淬硬钢、铸铁及高温合金的研究进展以及加工案例进行分析研究。

PCBN 刀具的性能特点

PCBN 刀具是继人造金刚石之后,人工合成的超硬刀具切削材料。PCBN 刀具的性能特点^[1]:

(1) 具有较高的硬度和耐磨性。CBN 微粉的显微硬度为 HV8000~9000,其烧结体 PCBN 的硬度一般为 HV3000~5000。在切削耐磨材料时其耐磨性为硬质合金刀具的 50 倍,为陶瓷刀具的 25 倍,非常适合加工硬度较大的工件材料。

(2) 具有很高的热稳定性。CBN 的耐热性可达 1400~1500℃,PCBN 在 800℃时的硬度还高于陶瓷和硬质合金的常温硬度,可以保证 PCBN 刀具在高温下的物理性能,可以加工

一些耐高温材料工件。

(3) 具有优良的化学稳定性。CBN 的化学惰性特别大, 在 1200~1300℃ 时也不与铁系材料发生化学反应, 与碳在 2000℃ 时才发生反应, 非常适合加工铁族材料工件; 在中性、还原性的气体中, 对酸碱都是稳定的。

(4) 具有较好的导热性。在各类刀具材料中 CBN 的导热性仅次于金刚石, 导热系数为 1300W/(m·℃) 是紫铜的 3.2 倍, 是硬质合金的 20 倍, 而且随着温度的升高 PCBN 导热系数是增加的, 这样可以使热量迅速的从切削刃传递出来, 降低切削刃的热量, 并且可以降低刀具磨损。

(5) 具有较低的摩擦系数。硬质合金与不同材料间的摩擦系数为 0.4~0.6, 而 CBN 为 0.1~0.3, 且随着切削速度的提高, 摩擦系数减小, 有效减小 PCBN 刀具与工件之间的摩擦力, 降低刀具的磨损速度。

PCBN 刀具的应用现状

PCBN 刀具应用于各个行业的难加工材料的加工中, 下面重点分析研究 PCBN 刀具切削淬硬钢、铸铁及高温合金等的切削机理、刀具磨损以及应用的发展现状。

1 PCBN 刀具切削淬硬钢现状

淬硬钢是一种典型难加工的材料, 主要包括普通淬火钢、淬火态模具钢、轴承钢、轧辊钢及高速钢等。其切削过程主要有以下几个特点^[1]: 硬度和强度极高, 当淬硬钢硬度达 HRC55~HRC60 时, 其强度可高达 2110~2600MPa, 并且塑性很小; 单位切削力大, 刀具所承受的冲击力是切削软态淬硬工件的 3 倍以上, 单位切削力高达 4500~5000MPa, 而且由于切削深度较小, 切深抗力是所有切削力中最大的, 在切削过程中易引起振动; 刀-屑接触长度短, 导热系数小, 切削温度高达 800℃ 以上, 而且集中在切削刃附近, 刀具磨损激烈, 极易

导致普通刀具的迅速失效。

使用硬质合金刀具切削加工淬硬钢, 刀具寿命非常短, PCBN 刀具出现前, 淬硬钢加工多采用磨削加工工艺, 其加工效率低, 生产成本较高, 而且对环境污染大。PCBN 刀具出现后, 利用 PCBN 刀具车削淬硬钢, 研究表明 PCBN 是最适合加工淬硬钢的刀具材料之一, 并且可以实现“干式切削”、“以车代磨”、“以铣代磨”等绿色加工工艺。

(1) PCBN 刀具切削淬硬钢的特殊性。

现在对 PCBN 刀具切削淬硬钢的研究已经取得了一定的进展。对机理的研究主要有切削力、切削温度、刀具磨损等方面。李海波等^[2]通过 PCBN 刀具切削淬硬轴承钢切削力试验得出: PCBN 复合片的摩擦系数随着切削速度的提高而减小, 当切削速度 v 为 150m/min 时最小。在文献[3]中, 通过试验得出结论, PCBN 刀具和淬硬钢的摩擦系数随着进给量 f 的增加呈线性减小趋势; 刀具和工件的摩擦系数随着切深 a_p 的增加呈线性递增趋势。有学者利用有限元分析的方法对 CBN 刀具切削 AISI 52100 直角切削的切削力进行预测, 其切屑分离准则是基于等效塑性应变, 刀-屑接触面的库伦摩擦定律, 速度修正温度的材料本构模型, 并且考虑了非弹性变形能和摩擦热的能量耗散的热分析。通过试验验证, 切削力的误差可以控制在 15% 以内^[4]。刘献礼教授通过 PCBN 刀具干式切不同硬度 GCr15 试验研究指出: PCBN 刀具车削淬硬钢材料时, 当工件硬度高于 HRC50 时, 切削温度和切削力的变化不再符合传统切削理论, 切削力和切削温度出现降低的趋势, 原因是金属软化效应的作用, 如图 1 所示; 由锯齿形切屑带走大量的切削热^[1,5]。

淬硬钢工件的表面质量是衡量切削加工质量的重要标准, 其中包

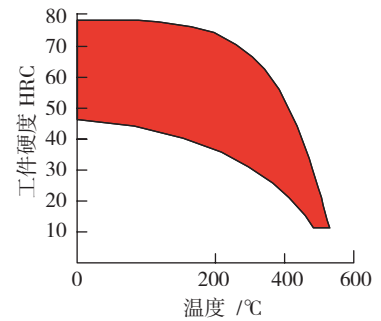
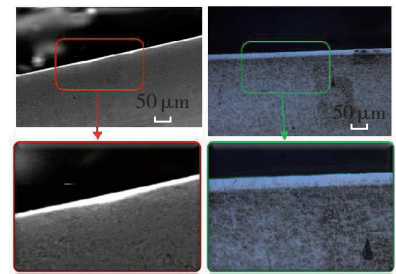


图1 硬态切削的金属软化效应^[1]

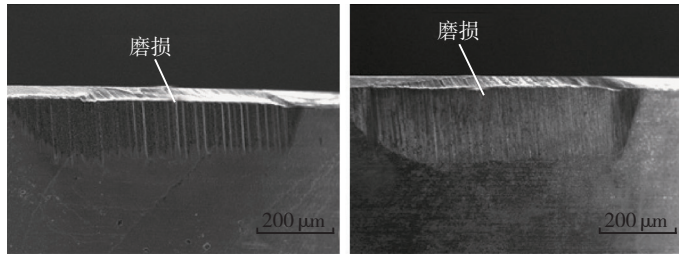
括表面粗糙度、白层和黑层以及残余应力等, 而刀具、切削用量及工件材料都是影响白层和黑层的厚度的主要因素。淬硬钢加工表面质量对其工作性能有较大影响, 通过试验 PCBN 刀具车削 AISI 52100 轴承钢, 研究了刀具磨损、切削速度以及进给量对工件白层和黑层(图 2)的影响: 它们的厚度随着刀具的磨损量的增加而增加; 切削速度增加, 白层和黑层厚度增加; 而进给量影响白层, 并不影响黑层^[6]。



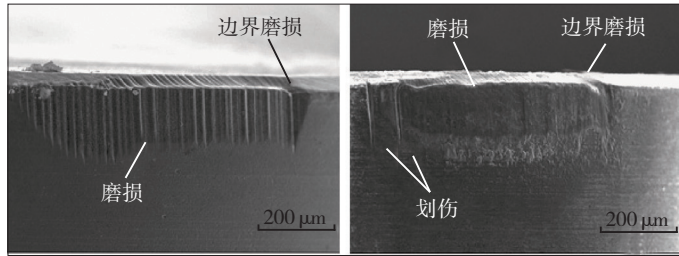
(a) 扫描电镜 (b) 光学显微镜图

图 2 AISI 52100 白层和黑层的图像

PCBN 硬态切削的磨损主要表现为后刀面磨损和月牙洼磨损。研究表明 PCBN 刀具切削淬硬钢刀具磨损的主要原因是机械磨损、氧化磨损以及化学磨损, 而在后刀面磨损区域有 CBN 晶粒脱落发生。通过试验得出结论: PCBN 刀具都承受着机械、热冲击、粘接剂、相变、扩散和化学磨损, 但干切削时的相变在磨损和热冲击磨损表现得更为严重^[7]。有学者使用 CBN 刀具车削 H13 工具钢过程中的热量分区和刀具磨损, 通过试验及有限元分析得



(a) PCBN 刀具 (b) 陶瓷刀具
图3 PCBN 刀具与陶瓷刀具连续切削的磨损对比



(a) PCBN 刀具 (b) 陶瓷刀具
图4 PCBN 刀具与陶瓷刀具断续切削的磨损对比

出结论：在高速切削条件下，第二变形区有大约 14% 的热量传递到刀具，而在普通切削中这个数值达到了 21%~22%^[8]。另有学者通过硬态车削试验，对 PCBN 和陶瓷刀具的磨损进行对比，如图 3、图 4 所示。连续切削时，PCBN 的刀具寿命大约是陶瓷刀具的 3 倍；在断续切削时，PCBN 刀具和陶瓷刀具寿命相当^[9]。

(2) PCBN 刀具刃口优化。

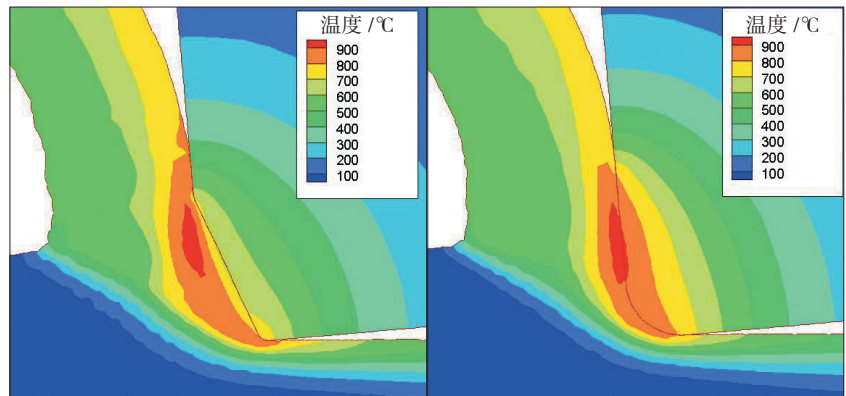
PCBN 刀具的脆性较大，为了增强切削刃的抗冲击性能，切削刃多做负倒棱处理、倒圆处理，如图 5 为负倒棱和倒圆在相对切削参数下的温度和应力分布情况。文献 [10] 中，研究干、湿切削 2 种加工条件下，PCBN 刀具的倒棱前角对切削力和刀具磨损的影响，指出：切削力随着倒棱前角从 5° 增大到 15° 左右时，切削力减小；从 15° 增大到 20° 时，切削力又出现增大的趋势。刀具磨损在倒棱前角为 20° 时最为严重，而且出现了微崩刃现象，5 度时的情况次之，在倒棱前角为 10° 和 15° 时刀具的磨损曲线十分接近。文献 [11] 研究了 PCBN 断续切削淬硬钢中，负倒棱参数对切削性能的影响：即当负倒棱角度较小时，影响刀具寿命的主要原

因为机械冲击；负倒棱角度较大时，切削温度与机械冲击综合作用是影响刀具寿命的主要因素。Klocke 和 Kratz 等设计了一种 PCBN 新型的

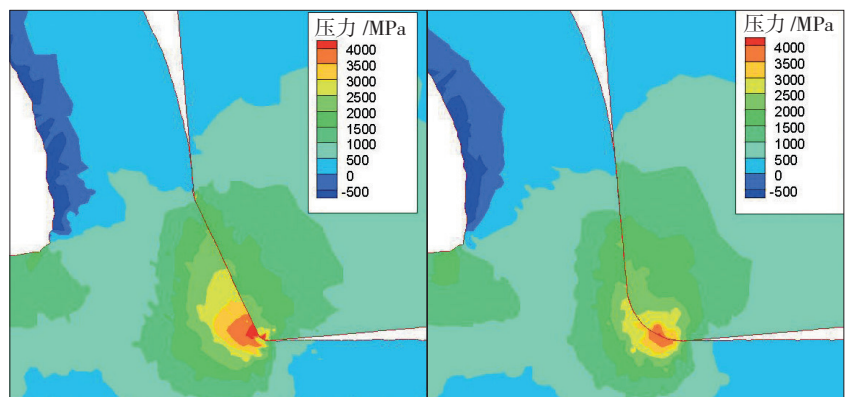
切削刃，与传统的切削刃相比，切削更加稳定并且刀具的寿命更长，图 8 为新型刀具与传统刀具的磨损对比图，新型切削刃的磨损为 2 个月牙注磨损，其切削时间比普通切削刃长 1/2^[12]。

(3) PCBN 刀具加工淬硬钢加工实例。

世界各大刀具厂家也有很多针对淬硬钢切削的刀具产品。日本住友刀具已经推出 BNC160 系列涂层 CBN 刀具，在专用 CBN 母材上，涂覆平滑的 TiCN 系特殊陶瓷涂层，可进行 IT 6 级尺寸公差的高精度加工，实现了“以车代磨”工艺。三菱综合材料的无涂层 CBN 刀具 MB835 断续加工淬火钢，其材料采用超微粒 CBN 粒子，在强断续切削时具有较好的抗破损性，在发生破损时，MB835 经历了 30000 多次冲击。山特维克公司所生产的 CB7015PCBN 刀具在材料



(a) 温度分布对比



(b) 应力分布对比

图 5 负倒棱和倒圆切削刃温度场、应力场分布

设计上采用了中等 CBN 含量 + 最佳陶瓷结合剂的方案使得该刀具适用于高硬度(58~63HRC)淬硬钢工件的高效、高精度车削加工。日本日进工具公司产品 SSR200PCBN 圆弧刃立铣刀在精加工硬度为 66HRC 的 DRM3 马特利克斯淬硬钢 3h45min 后, R 部分的磨损量仅为约 2 μ m, 实现了对高硬度工件的长时间、高精度、高效率加工。肯纳金属公司新推出的牌号为 KB9610 的 CVD 涂层 PCBN 刀片可用于淬硬钢材料(如 8620 钢、D2 工具钢、52100 钢等)的精密加工, 可显著提高加工效率。山高公司的 SecomaxPCBN100 刀片据称是首个用于淬硬钢精加工的整体 PCBN 牌号, 并且第一次采用了定位销孔结构。

我国大连瓦房店机械轴承集团有限公司是国内轴承产量较大的公司, 其使用 PCBN 刀具切削轴承套实现了“以车代磨”, 大大地提高了加工效率。

2 PCBN 刀具切削铸铁现状

铸铁是由铁、碳和硅组成的合金的总称, 主要分类: 灰口铸铁、白口铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、合金铸铁等。铸铁切削加工特点: 切削温度高、加工过程中易产生振动, 切削稳定性差, 并且加工球墨铸铁时, 容易出现加工硬化现象, 影响加工质量。

若采用硬质合金刀具加工铸铁, 刀具的寿命短; 国内外一些学者使用陶瓷刀具切削加工铸铁^[13], 但是由于陶瓷刀具的脆性较大加工效果并没有达到理想的状态。而 PCBN 刀具加工铸铁刀具寿命长, 是一种比

较理想的刀具材料。

(1)PCBN 刀具切削铸铁寿命与磨损。

一些学者使用不同的刀具材料硬质合金、陶瓷以及 PCBN 加工铸铁进行对比。文献[14]探讨高铬铸铁的切削加工性, 相对于硬质合金刀具和陶瓷刀具, PCBN 刀具寿命最长。在文献[15]中, 对整体 PCBN 刀具和陶瓷刀具的切削性能进行了对比试验, PCBN 刀片与陶瓷刀片相比有诸多优点: 硬度大、耐热性高和耐磨性好。与陶瓷刀具相比, PCBN 可以采用较高的切削速度。文献[16]针对整体 PCBN 刀片高速切削灰铸铁的研究, 做了 PCBN 与硬质合金和陶瓷刀具切削性能的比较, 并着重分析灰铸铁的金相组织对加工性能的影响, 如表 1 所示。

刀具的 CBN 的含量以及切削刃对 PCBN 刀具的切削性能具有一定的影响。PCBN 刀具材料的选择对于铸铁的加工质量、刀具磨损有较大的影响, 通过研究 PCBN 复合片的切削性能, 指出粘接剂中含 Al、W、Co 较高的 PCBN 刀具不适合切削等温淬硬球墨铸铁 (ADI), CBN 含量低的 PCBN 刀具更适合切削 ADI^[17]; 张弘毅等^[18]通过用 4 种不同聚晶立方氮化硼 (PCBN) 复合刀具切削 ADI 进行试验, 得出了 BN500 复合刀具粘接剂中含有独特的陶瓷型粘接剂, 切削时轴向力、径向力以及主切削力小、摩擦因数较小等结论。在文献[19]中, 通过试验对比了 4 种牌号的 PCBN 复合片在车削等温淬硬球墨铸铁时的刀具寿命得出了 CBN 含量较高的 DBW5 切削性能较好, 并且

适合大于 130m/min 的高切削速度, 粘接剂中的 W 元素可以抑制 PCBN 刀具的化学磨损。切削球墨铸铁时负倒棱宜取较大倒棱角度, 在一定范围内, 倒棱角度越大, 加工的表面粗糙度 R_a 的波动越小, 是由于刀具对已加工表面的烫压作用加强^[20]。

(2)PCBN 刀具在铸铁加工中的应用实例。

现在 PCBN 刀具在铸铁加工行业中已经具有一定的应用规模, 例如, 铸铁发动机缸体、含硼铸铁缸套等。渣浆泵被广泛用于煤炭、矿山、电力、冶金、水利等重要行业。通过分析研究高合金抗磨铸铁渣浆泵叶轮的高速切削技术, PCBN 刀具能够满足其叶轮加工的技术要求被提出^[21]。文献[22]介绍了整体 PCBN 刀具高速铣削发动机缸体缸盖, 能够大幅度提高企业的

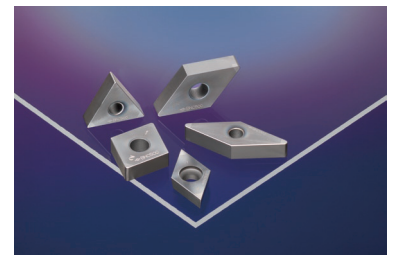


图6 BN500系列刀片

生产效率。日本牧野使用黛杰 CBN 铣刀加工铸铁 FC3000 机床工作台, 三角形刀片、60° 主偏角, 加工参数: $n=5000\text{r/min}$, $f=0.05\text{mm/r}$, $a_p=0.1\text{mm}$, 表面粗糙度值 $R_a=0.26\mu\text{m}$, 而在以往磨削加工时, 表面粗糙度值 $R_a=0.33\mu\text{m}$, 实现了“以铣代磨”。

日本住友刀具已经推出 BN500 系列刀片(见图 6), 在切削参数为 $V_c=400\text{m/min}$, $f=0.2\text{mm/r}$, $a_p=0.2\text{mm}$ 时, 湿式切削球墨铸铁 FCD700 材料, 表面粗糙度 R_a 达到了 $0.6\mu\text{m}$; 而使用陶瓷刀片时, $R_a=2.3\mu\text{m}$ 。瓦尔特公司的 WCB30、50 牌号 PCBN 刀片为非涂层 PCBN 牌号, 用于铸铁车削和铣削加工。山高推出的 SecomaxTM 材质等级是为珠光体灰铸铁、冷硬铸铁等而研制的, 生产成本会显著

表1 铸件金相组织对刀具寿命的影响

工件材料: GG20	工件材料: GG25
金相组织: 20% 珠光体, 80% 铁素体	金相组织: 98% 珠光体, 2% 铁素体
$V_c=1200\text{m/min}$	$V_c=1200\text{m/min}$
$f=0.35\text{mm/r}$	$f=0.35\text{mm/r}$
刀具寿命: 80 件	刀具寿命: 2000 件

下降。在加工珠光体灰铸铁时, Secomax™ 刀片的寿命比陶瓷刀片高 30 多倍。

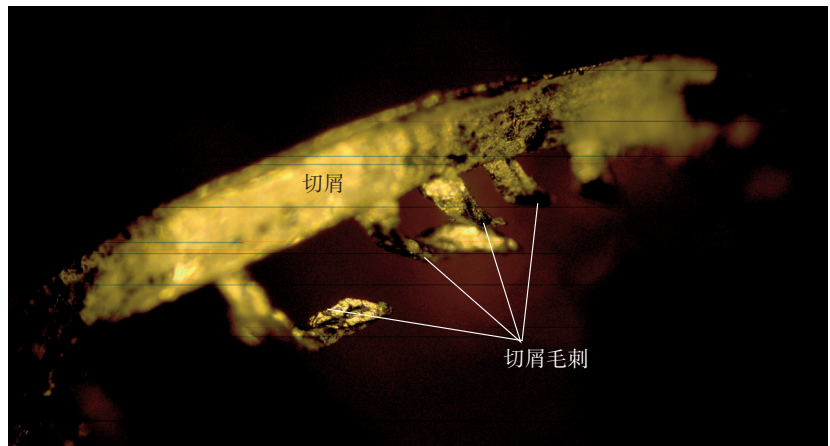
3 PCBN 刀具切削高温合金现状

高温合金是在 600~1200℃ 高温下能承受一定应力并具有抗氧化或抗腐蚀能力的合金,主要用于制造航空、舰艇和工业用燃气轮机的涡轮叶片、导向叶片、涡轮盘、高压压气机盘和燃烧室等高温部件,还用于制造航天飞行器、火箭发动机、核反应堆、石油化工设备以及煤的转化等能源转换装置^[23]。高温合金的分类(按照基体分类):铁基高温合金、镍基高温合金、钴基高温合金。

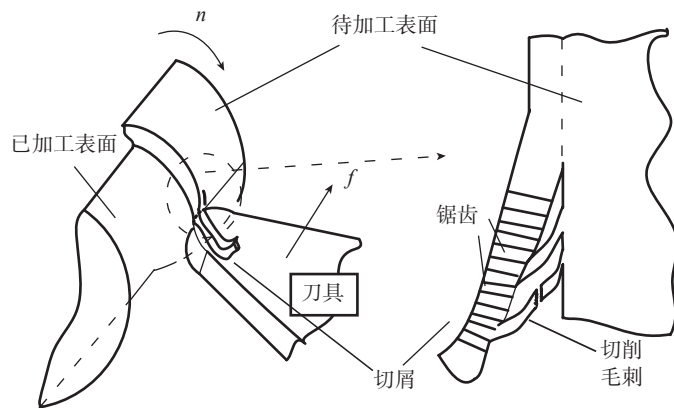
高温合金属于难加工材料,尤其是镍基高温合金^[24],其切削力较大、切削温度高、刀具磨损严重;机械磨损、粘结磨损、扩散磨损和氧化磨损均比较严重,加工硬化现象严重,切屑硬而韧,不易折断。现在生产中多使用涂层硬质合金刀具切削高温合金,但是在实际生产过程中涂层刀具的加工效率是非常低的,稳定的精加工切削速度一般不超过 50m/min,有些较大的铸造高温合金零部件的切削速度甚至不高于 20m/min。现在迫切需要更加先进的刀具材料加工高温合金,例如 PCBN 刀具,而现在对 PCBN 刀具切削高温合金的研究比较少。

(1) PCBN 刀具切削高温合金机理。

现在对 PCBN 切削高温合金机理已经有所研究,Wei Ji 和 Xianli Liu 等^[25]研究了 PCBN 刀具切削高温合金 GH4169 的切削参数对切削力、切削温度、表面粗糙度的影响以及刀具失效形式、表层质量和切屑形态,如图 7 所示,在切屑的侧面形成了切屑毛刺,这种毛刺使切削振动加剧,引起表面质量降低。对 PCBN 切削高温合金切削加工工艺以及刀具的刃口参数也有一定的研究,在文献^[26]中,对 PCBN 切削镍基高温合



(a) 切屑图片



(b) 切削毛刺示意图

图7 高温合金切削的形态

金的切削性能进行了研究,指出刀具磨损随着刀尖圆弧半径的增大而减小,并且湿切比干切的刀具磨损减小 40%~50%。另有研究表明,刃口钝化半径对切削 GH4169 的影响,切削力随钝圆半径的增大呈先增大后减小再增大的趋势,当 PCBN 刀具切削刃的钝圆半径 $R_a=4.8\mu\text{m}$ 时,切削力出现减小的趋势,刀具磨损相对较小;并且形成切削测流,所以在前刀面上出现了沟槽磨损^[27]。

涂层对 CBN 刀具切削高温合金的性能有一定程度上的影响。在文献^[28]中, Jinming Zhou 等研究了涂层和非涂层 CBN 刀具切削高温合金 (Inconel 718) 的刀具寿命和加工表面质量。当切削速度 $<300\text{mm/min}$ 时,涂层 CBN 刀具的寿命高于无涂层 CBN 刀具,当切削速度 $>300\text{mm/min}$

时,则相反。无涂层 CBN 刀具加工的表面粗糙度小于有涂层 CBN。

(2) 切削高温合金的 PCBN 刀具产品。

现在高温合金生产厂家使用的较多的刀具是涂层硬质合金刀具和陶瓷刀具^[29]。虽然目前对 PCBN 在高温合金切削方面的应用较少,但已经出现了 PCBN 刀具,例如,伊斯卡等公司推出的切削高温合金用 PCBN 刀具,例如 IB05S、IB10S 系列车削刀片以及 ADKW 1505 PDER IB85 铣刀片,其推荐切削速度为 120~150m/min,较硬质合金刀具提高 2 倍以上。山高推出的 Secomax™ CBN170,PCBN 也晶须陶瓷粘合剂技术结合,可以有效提高刀具寿命,不影响工件加工的表面质量。

现在我国“高档数控机床与基

础制造装备”科技重大专项,支持的项目“钛合金、高温合金加工用高效可转位刀具系列及超硬刀具”中开展 PCBN 刀具切削加工高温合金刀具方面的研究,可见 PCBN 刀具在切削高温合金方面的潜能。

PCBN 刀具的发展趋势

(1)槽型在 PCBN 刀具上的应用。

数控机床是现代制造业的重要组成部分,随着其不断发展,对刀具断屑性能要求越来越高,和带有 3 维复杂槽型的硬质合金刀具相比,PCBN 刀具的断屑性能较差,主要原因是:PCBN 刀具的槽型的加工比较困难。现在随着特种加工机床的发展,出现了 PCBN 刀具断屑槽加工的机床,例如,激光加工机床,使超硬刀具的槽型加工成为可能。现在也出现了带有槽型的 PCBN 刀具,例如,国内出现了带有简单的槽型 PCBN 刀具 ZZ-C26490A。PCBN 刀具的槽型正向从无到有,从简单到复杂的方向发展着,以满足未来数控加工的发展需求。

(2)PCBN 刀具新型结构的需求。

PCBN 刀具在加工过程中易出现刀具破损而失效。例如,在断续加工中,PCBN 刀具的主要失效形式:切削刃破损,PCBN 刀片脱焊等。PCBN 的刀具材料的脆性大,很大程度上限制了刀具的应用,其切削刃保持的稳定性制约了其应用。所以需要更加适合于 PCBN 刀具材料特性的焊接、装夹等方面新型结构,以满足不同工况下的应用需要。

(3)刀具几何形状的复杂化。

硬质合金、高速钢刀具可以压制成比较复杂的刃型,而 PCBN 刀具只能采用刃磨的方式,但是由于刃磨机床的限制,加工复杂形状的刀具比较困难,这制约了 PCBN 刀具和应用推广。随着未来更加先进的加工方法的出现,PCBN 刀具的形状会向着更复杂的方向发展,可以满足复杂加工

形线的加工要求。

结束语

PCBN 刀具切削淬硬钢的研究比较多,并且已经取得一定的进展。主要是切削的特殊规律、刀具磨损机理、淬硬钢的表面质量(白层、黑层、晶粒变形层等),并且对切削力进行预测。PCBN 刀具切削淬硬钢的表面质量和刀具失效的稳定性还有待进一步提高。在切削铸铁方面:主要是对比 PCBN 与硬质合金、陶瓷刀具、不同的 CBN 材料刀具对加工质量、刀具磨损、刀具寿命等的影响规律。并且其应用已经初具一定的规模,在一些行业上已经有大量应用案例,可以实现“以车代磨”、“以铣代磨”。在切削高温合金方面,目前仍处于初期阶段,现在大多数研究仅对切削参数、冷却条件方面有所研究,对高温合金切削加工层、刀具的刃型刃口等方面的研究远远不够。距离实际的应用还要进行大量的工作。

高精度、高效率是现代的机械加工的方向,这对刀具提出的要求更高;并且随着更多各种各样的难加工材料的出现,刀具面临着更大的考验。PCBN 刀具是未来制造业很有潜力的刀具之一,随着对 PCBN 刀具加工各种难加工材料的研究的进一步深入,其应用范围必将得到进一步拓展,在未来的刀具行业中必然占据更多的市场。

参考文献

[1] 刘献礼. 聚晶立方氮化硼刀具及其应用. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1999: 20-50.

[2] 李海波, 张弘毅, 董海, 等. 基于切削力的 PCBN 复合片表面摩擦系数研究. 金刚石与磨料磨具工程, 2008, 1: 63-67.

[3] 张京英, 于启勋, 庞思勤. PCBN 刀具切削力及摩擦系数试验研究. 航空制造技术, 2009(12): 70-73.

[4] Shi J, Liu C R. On predicting chip morphology and phase transformation in hard

machining. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 27(7-8): 645-654.

[5] Liu X L, Wen D H. Experimental study on hard turning hardened GCr15 steel with PCBN tool. Journal of Materials Processing Technology, 2002(129): 217-221.

[6] Cappellini C, Attanasio A. Formation of white and dark layers in hard cutting: influence of tool wear. International Journal of Material Forming, 2010, 3(S1): 455-458.

[7] 曹永泉, 张弘毅, 董海, 等. PCBN 刀具切削淬硬钢 GCr15 的磨损实验研究. 中国机械工程, 2006, 21(17): 2305-2308.

[8] Ghani M U, Abukhshim N A. An investigation of heat partition and tool wear in hard turning of H13 tool steel with CBN cutting tools. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(9-10): 874-888.

[9] de Oliveira A J, Diniz A E, Ursolinob D J. Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. Journal of Materials Processing Technology, 2009(209): 5262-5270.

[10] 佟艳娇, 张弘毅, 李嫚, 等. PCBN 刀具干车淬硬钢时倒棱前角对切削力和刀具磨损的影响. 金刚石与磨料磨具工程, 2007(2): 67-70.

[11] 任帅民, 李嫚, 张弘毅, 等. PCBN 刀具断续切削淬硬钢时负倒棱角度对其切削性能的影响. 工具技术, 2010, 6(44): 13-16.

[12] Klocke F, Kratz H. Advanced tool edge geometry for high precision hard turning. Ann CIRP, 2005, 54(1): 47-50.

[13] Laino S, Sikora J A, Dommarco R C. Development of wear resistant carbidaustempered ductile iron (CADI). Wear, 2008, 265: 1-7.

[14] 郭超, 王爱玲, 王子恒, 等. 高铬铸铁切削中刀具及切削用量优化研究. 现代制造工程, 2009, 10: 69-72.

[15] 神会存, 宗万栓, 刘书锋. 整体 PCBN 刀具高速切削高合金铸铁类材料的研究. 机械制造, 2009, 539(47): 53-55.

[16] 朱从荣, 王魄. 整体 PCBN 刀片高速切削灰铸铁的研究. 现代制造工程, 2002, (5): 31-33.

本文共有参考文献 29 篇, 因篇幅所限, 未能一一列出, 读者如有需要, 请向本刊编辑部索取。

(责编 小城)