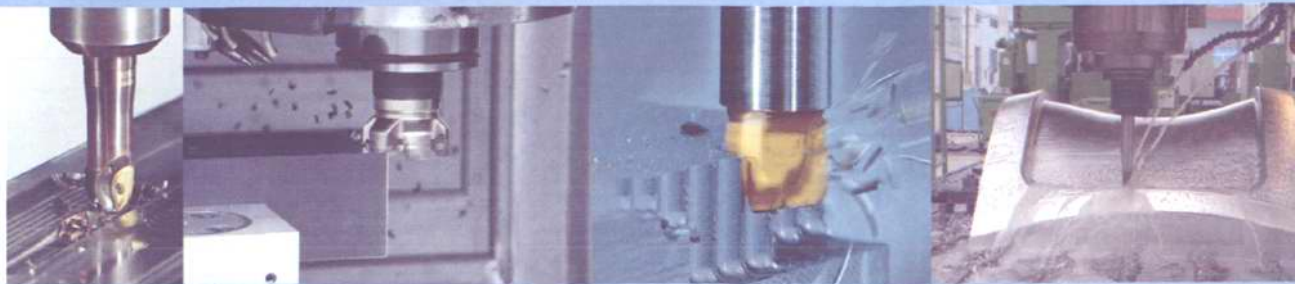


未来刀具

Future Cutting Tool

刀具发展涉及刀具材料、刀具结构，刀具材料是提升刀具性能的基础，刀具结构是提高工件加工精度的关键。高速、高效、高精度切削加工要求刀具具有多种优异性能，“高韧性高强度基体+高硬度高耐磨性刃部”将成为刀具的主要发展方向。



21世纪PCBN刀具的发展与展望

Development and Propection of PCBN Cutting Tool in The 21st Century

北京理工大学机械与车辆学院 张京英 于启勋 庞思勤



张京英
机械制造及其自动化专业, 博士, 北京理工大学机械与车辆学院副教授。

随着制造技术的迅猛发展,切削加工作为制造技术的基础工艺,进入了以发展高效切削、开发新切削工艺和加工方法、提供成套技术为特征的新发展阶段。与此同时,制造技术和难加工材料的发展推动着刀具技术的发展,刀具技术也向着高态切削、高速切削、高精度和干式加工的方向发展。可实现高效率、高稳定性、长寿命加工的超硬刀具的应用也日渐普及,在汽车、航空航天、能源、军事、

20世纪前半期,硬质合金的出现代替了1/2的高速钢,使机械加工领域面目一新;21世纪,PCBN刀具必将有很大的发展,前景应用不可限量,一旦攻克技术关键,即使替代一部分(比如1/5~1/4)硬质合金刀具和陶瓷刀具,也将会出现相当惊人的革命性变化。

模具等领域发挥着重要作用。

在机械加工中,刀具材料是决定加工效率、加工质量和加工成本的关键因素之一,正确选择和应用刀具材料至关重要。现代刀具材料主要是高速钢、硬质合金和陶瓷,它们主要的硬质相成分是碳化物、氮化物和氧化物,加上粘结材料后,刀具的硬度在HV2000以下。对于某些现代难加工材料的加工,上述硬度已不能满足要求,于是超硬刀具材料便应运而生。PCBN(聚晶立方氮化硼)刀具、陶瓷刀具、涂层刀具等均具有很高的硬度、耐磨性和化学稳定性,能满足高速切削、干式切削、硬态切削等绿色制造的要求。由于PCBN刀具在加工精度、切削效率、刀具寿命等各个方面具有无可比拟的优越性,因此,PCBN刀具的推广和应用可创

造巨大的经济效益。

本文主要阐述CBN刀具材料的制造方法、物理性能及其应用和新发展,并展望了21世纪PCBN刀具发展的前景。

CBN刀具材料的制造方法

立方氮化硼CBN(Cubic Boron Nitride)是20世纪50年代首先由美国通用电气(GE)公司利用人工方法在高温高压条件下合成的,其硬度达HV8000,仅次于金刚石(HV10000)而远远高于其他材料,它与金刚石统称为超硬材料。

CBN晶体与金刚石晶体都属于闪锌矿型,且晶格常数相近,化学键类型相同,故CBN具有接近金刚石的硬度和抗压强度,又因为它是由N、B原子组成,因此具有比金刚石

更高的热稳定性和化学惰性。

CBN 刀具材料的制造方法主要是热压法,将压制 CBN 单晶粉的原料——六方氮化硼粉(HBN)置于叶蜡石的腔体中,加上触媒剂,用六面顶或两面顶的液压机,在 1600℃、5~6GPa 下热压 10min 形成 CBN 单晶粉。单晶粉可用于磨料、磨具。用 CBN 单晶粉加上触媒剂和粘结剂,在 1800℃、5~6GPa 下再压 3min 便可得到 PCBN 整体刀片或复合刀片(硬质合金垫底,上有 0.5mm 左右的 CBN 薄层)。

PCBN 刀具材料的性能

(1) 具有很高的硬度和耐磨性。

CBN 单晶显微硬度为 HV8000~HV9000,是目前已知的第二高硬度的物质。不同量粘结剂的 PCBN 刀具材料的硬度在 HV4000~6000 之间,而硬质合金刀具材料的硬度仅为 HV1100~1800;Al₂O₃ 陶瓷刀具材料硬度为 HV2000。由此可见,用于加工高硬度材料时 PCBN 刀具具有比硬质合金及陶瓷更高的耐磨性,可减少大型零件加工中的尺寸偏差或尺寸分散性,减少换刀调刀辅助时间,使其效能得到充分发挥。

(2) 具有很高的热稳定性和高温硬度。

CBN 的耐热性可达 1400~1500℃,在 800℃时的硬度为 Al₂O₃/TiC 复合陶瓷的常温硬度。切削温度较高时,会使被加工材料软化,与刀具间硬度差增大,有利于切削加工进行,而对刀具寿命影响不大。

(3) 具有很好的导热性。

CBN 的热导率达 1300W/(m·K),是紫钢的 3.5 倍。而硬质合金的热导率仅为 35~75W/(m·K)。CBN 材料的导热系数低于金刚石但大大高于硬质合金,并且,PCBN 刀具的导热系数随着切削温度的提高不断增大,因此可使刀尖处热量很快传出,有利于工件加工精度的提高。

(4) 具有很高的杨氏模量。

PCBN 的杨氏模量约为 750GPa,高于 WC、TiC、Al₂O₃ 等材料。

(5) 具有很小的热膨胀。

PCBN 的热膨胀系数约为 (2.1~2.3)×10⁻⁶/K,而硬质合金的热膨胀系数为 (5~7)×10⁻⁶/K。

(6) 具有较小的密度。

PCBN 的密度为 3.48g/cm³,与 Al₂O₃、Si₃N₄ 的密度相近。

(7) 具有较低的断裂韧性。

PCBN 的断裂韧性约为 (3.5~5) Pa·m^{0.5},仅为陶瓷刀具材料的一半。这是 PCBN 唯一不足之处。

(8) 具有优良的化学稳定性。

CBN 具有很高的抗氧化能力,在大气中,1000℃时也不产生氧化现象,PCBN 在 1300~1500℃尚不分解;在酸中不受侵蚀,对铁族材料呈惰性,在 1200~1300℃时也不发生化学反应。但 1000℃左右时会与水产生水解作用,造成大量 CBN 磨耗,因此使用 PCBN 刀具时宜采用干切方式。

(9) 具有较低的摩擦系数。

CBN 与不同材料的摩擦系数在 0.1~0.3 之间,低于硬质合金的摩擦系数 (0.4~0.6),摩擦系数随摩擦速度及正压力的增大而略有减小。切削时不易形成滞留层或积屑瘤,有利于表面加工质量的提高。

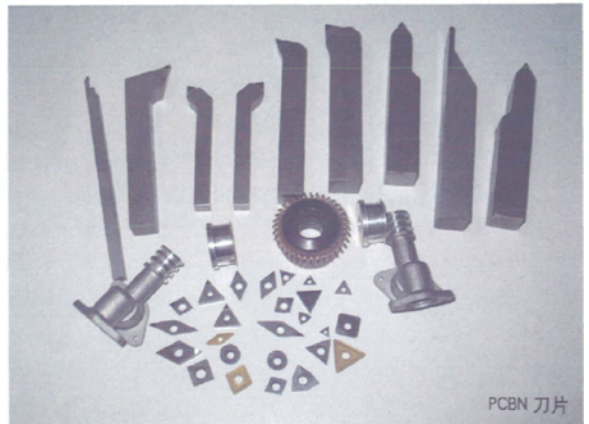
PCBN 刀具分类 及其性能的影响因素

PCBN 刀具材料同其他种类的刀具材料一样,由于组成成分的不同,具有很多牌号,适应于不同的用

途。PCBN 的性能与 CBN 的含量、粒径及结合剂的种类有关,通过调整 CBN 的含量、晶粒大小和结合剂比例及种类可以获得不同性能、适应不同加工要求的 PCBN 刀具。

(1) PCBN 刀具按添加成分大致可分为两大类:一类直接由 CBN 单晶热压烧结而成,CBN 含量较多(70%以上),硬度高,适用于耐热合金、铸铁和铁系烧结金属的切削加工;另一类是以 CBN 晶粒为主体,添加一定比例的陶瓷结合剂(主要有 TiN、TiC、TiCN、AlN、Al₂O₃ 等)烧结而成的热压体,这类 PCBN 中 CBN 含量较少(70%以下),硬度较低,适用于淬硬钢的切削加工。

(2) PCBN 的结合剂主要有 3 类:金属结合剂,由金属或合金组成,如 Co、Ni 等,金属结合剂 PCBN 烧结体的韧性和导电性好,缺点是高温下结合剂软化,耐磨性能下降;陶瓷结合剂,如 Al₂O₃ 等,陶瓷结合剂 PCBN 烧结体具有较高的耐高温磨损能力和较强的抗粘接能力,这解决了金属结合剂高温软化的问题,但其抗冲击性较差,脆性大;金属陶瓷结合剂,如 TiN、TiC、TiCN、AlN 等,



PCBN 刀片

解决了上述存在的问题,具有较好的综合性能。

(3) PCBN 刀具按制造复合方式可分为:整体 PCBN 热压块和与硬质合金复合热压的 PCBN 复合片。整体 PCBN 刀片刚性好,适用于粗

加工;复合 PCBN 刀片的成本较低,适用于精加工或半精加工。

(4) 已有的研究表明,采用纯 CBN 材料制备的刀具在很多情况下并不能获得最佳加工效果,CBN 的含量一般在 50%~95%之间。CBN 含量主要影响 PCBN 的硬度和热导率,随着 CBN 含量的增加,PCBN 的硬度、耐磨性和热导率升高,韧性下降;当 CBN 的含量低于 50%时,PCBN 的硬度下降,导致切削刃发生塑性变形而使刀片破损。当 CBN 含量超过 95%时,PCBN 性能变差,脆性加大,CBN 晶粒易脱落,耐磨性大减。

PCBN 刀具的应用

1 PCBN 是硬态切削加工技术的最佳刀具材料

(1) 利用超硬材料制备的刀具具有高硬度、高杨氏模量、高导热性能、低摩擦和低热膨胀的特点,可切削各种硬材料和难加工材料。PCBN 刀具的红硬性、耐磨性在硬态干式切削难加工材料中具有很大的优势。PCBN 刀具通常用来加工硬度高于 HRC50 的材料,在切削温度高达 1500℃ 时仍具有很高的硬度,最适合各种淬硬钢、冷硬铸铁及其他高硬黑色金属的切削。

(2) 对淬硬件(硬度高于 HRC55)的精加工,通常采用磨削加工的方法完成,然而随着刀具材料的发展及数控机床加工精度的提高,以硬态切削代替磨削完成零件的最终加工已成为一个新的精加工途径。

2 PCBN 是进行干切削加工工艺的理想刀具材料

由于经济与环保方面的原因,近几年来,干切削加工工艺已成为机械制造领域中的重点研究课题。干切削加工工艺已在西方工业发达国家有了相当好的应用。与湿切相比,干切又能大大提高生产率,其机理是由于切削速度很高时,产生的热量聚集

于刀具前部,使切削区附近材料达到红热状态,屈服强度下降,进而获得提高切削效率的效果。采用干切削工艺的前提条件是在较高切削温度下,被切材料强度有明显下降,变得易切削,而刀具材料的强度在同样状态下要有较好的红硬性及热稳定性,还要有较好的耐磨性和抗粘结性。适用于干切工艺的刀具材料有陶瓷、金属陶瓷、涂层硬质合金及 PCBN 刀具材料等,但就红硬性和热稳定性来说,PCBN 材料是最适合干切工艺的刀具材料。

3 PCBN 刀具适应于自动化加工及难加工材料加工

(1) PCBN 刀具具有很高的硬度及耐磨性,能在高切削速度下长时间地加工高精度零件(尺寸离散性小),大大减少换刀次数和刀具磨损补偿停机所花费的时间,适合于数控机床及自动化程度较高的加工设备。

(2) PCBN 刀具可成功实施硬态精加工工艺,除节省使用冷却润滑液和与此相关的原料而具有经济上和生态上的优点以外,它还能代替磨削工艺。在难加工材料应用方面,PCBN 刀具也显示出卓越的性能,如表面喷焊(涂)材料的加工,用其他材料的刀具加工,刀具寿命极低,也无法采用磨削方法加工,而 PCBN 是惟一适合的刀具材料。

(3) 在石油、电站设备中使用的高合金耐磨铸铁,采用 PCBN 刀具加工较硬质合金刀具切削效率提高 4 倍以上,单件刀具成本下降为原来的 1/5。另外在硬质合金等热压材料的切削加工方面,PCBN 刀具也显示了很好的切削性能。PCBN 刀具可用于精车淬硬钢以及高速铣削灰铸铁和硬铸铁。精车后的淬硬钢表面粗糙度 R_a 可达 0.3~0.6 μm ,尺寸精度可控制在 0.013mm 以内。PCBN 刀具还可用于加工高温合金、硬质合金、工程陶瓷及其他难加工材料。

(4) 在切削冷硬铸铁方面,PCBN 的耐用性能和加工效率远远好于硬质合金刀具。由于金刚石刀会与黑色金属发生反应,不能用来切削钢、铁。在工业工程和机械制造中,黑色金属尤其是钢、铁用量最大,所以 PCBN 在这方面有着得天独厚的优势。

(5) PCBN 刀具能加工金刚石刀具所不能加工的黑色金属材料,特别适合数控设备及自动化生产线的使用。PCBN 刀具具有很高的耐磨性,其使用寿命远远高于硬质合金,可加工大部分高硬度材料,在许多场



合可以以车、镗、铣等代替磨削,能使被加工零件获得较高的精度和良好的表面质量,并大大提高生产效率。国外 PCBN 刀具已广泛用来加工淬硬钢、高硬度铸铁和抗磨零件,并带来了巨大的经济效益。随着机械零件的硬度和抗磨损性能要求的进一步提高,PCBN 刀具的使用必将更加广泛。

PCBN 刀具推广应用现状

(1) 早期的 PCBN 刀具坚硬但

缺乏足够的韧性,因此,PCBN 刀具的使用范围受到限制。PCBN 刀具对中等硬度以下的调质钢和一般硬度的正火钢不太适用,而在实际应用中,中硬和低硬钢用得很多,因此,人们用硬质合金刀具比较多,PCBN 刀具主要用于硬材料的精加工和半精加工。

(2) PCBN 刀具在国内已经发展了近 30 年,但其使用比例始终有限。在全部刀具中所占份额与高速钢和硬质合金相比微不足道,究其原因,主要是:人们对 PCBN 刀具的认识不足;PCBN 制造成本较高,价格昂贵;刀片的韧性受到加工条件的约束。

(3) 目前国内用户使用较多的是 PCBN 车刀,这类刀具在冷硬铸铁、淬硬钢,以及其他一些难加工材料零件的连续车削加工中均取得了良好的效果,为推广使用 PCBN 刀具奠定了良好的基础。PCBN 刀具在国内的市场主要有以下几个行业:汽车、石油勘探、矿业公司、相关的各类钢管厂、电站设备和汽轮机厂以及其他各类机械厂。

(4) 我国专门用于轴承生产的磨床已经超过 4000 台,轴承出口一直呈现良好形势,而且供不应求。目前国内轴承内外圈的加工除采用磨削加工方式外,主要采用陶瓷刀具进行加工,PCBN 刀具尚未有效地开发,如果改用 PCBN 刀具进行轴承钢的硬态切削,其经济效益将十分可观。

PCBN 刀具的新进展

随着刀片制造技术的发展,国产 PCBN 刀具已经取得了重要的进步,其刀片的物理性能发生了重要的变化,无论从价格上还是从品质上,PCBN 刀具都发生了革命。新型 PCBN 刀具的应用必将会打破 PCBN 刀具不能在重载切削领域和断续切削状态应用的格局。

(1) 随着科学技术的发展,人们通过以下调整和改进,提高了 PCBN 刀具的性能,逐步扩大了其应用范围。

(a) 改进制造工艺,降低 PCBN 的制造成本。改变粘结相材料及其与硬质相的配比,减少硬质相,增多粘结相,使 PCBN 的韧性和热压效率得到提高。新型 PCBN 刀具的硬度已达到 HV3000 ~ 6000,可以对硬脆金属或非金属材料进行粗加工,效果很好。

(b) 提高机床设备级别,推广使用较贵的 PCBN 刀具。虽然 PCBN 刀具的价格比硬质合金刀具略贵,但加工效率的提高所创造的收益足以弥补价格因素的影响。有数字表明,在现代加工中刀具费用仅占制造成本的 3% ~ 4%,但它对总制造成本的影响却要大得多。即使压低刀具价格的 30% 或提高刀具寿命的 50%,所能节约的总成本仅有 1% 左右,可以说效果很小;而如果刀具价格提高 50%,由于性能改善,加工效率提高 20%,就可使总成本下降 15% 左右,这个比值对于制造成本产生了举足轻重的影响。不少企业花巨资引进高效率的机床,却使用低性能的焊接刀具,好马未配好鞍,难以发挥引进设备的作用,反而造成了更大的浪费。

对一般中小企业来说,精加工工序的磨削加工始终是制造过程的瓶颈,若购置性能好的车床,采用 PCBN 刀具,应用以车代磨等先进切削加工工艺,既可节省设备投资,提高生产率,又可大大增加加工过程的柔性。另外,目前由于人员费用的增加及环境保护方面的要求,大力推广使用 PCBN 刀具,充分发挥其潜在效能,提高切削加工技术水平也是具有重要意义。

(2) 近年来,PCBN 刀具的应用逐渐增多,最明显的是进入冶金工业中轧辊和汽车工业中汽车刹车车轂

以及钻探工程的泥浆泵的加工。与原用的硬质合金和陶瓷刀具相比,PCBN 刀具取得了令人满意的结果,

工过程的要求,改善加工性能,扩大应用范围。例如汽车工业运用新研制的 PCBN 整体式厚刀片,可以有

的比例非常少。在我国,高速钢的年生产量为 5 ~ 6 万 t,占全世界的 1/4 ~ 1/3, 硬质合金的年生产量

表 1 改进后的 PCBN 车削刹车毂和轧辊的切削用量

工件名称	工件材料	工序	切削深度 a_p /mm	进给量 f /(mm·r ⁻¹)	切削速度 v /(m·min ⁻¹)	刀具寿命 T /min
汽车刹车毂	HT250 (HB250)	粗车	4	0.5 ~ 1	220	60
		精车	0.5 ~ 1	0.32 ~ 0.5	450	75
轧辊	高 Cr 钢 (HS75)	粗车	5	0.6 ~ 0.8	20 ~ 30	60 ~ 90
		精车	0.3 ~ 0.5	0.5	50	60
轧辊	冷硬铸铁 (HS75)	粗车	0.6	0.32	75	30
		精车	0.3	0.3	100	30
水泵叶片	高合金铸铁 (HRC60) 断续切削	粗车	3.5	0.1	63	-

其切削用量如表 1 所示。从表中可知,改进后的切削深度、进给量都很大,切削速度也较高,可以获得较高的加工效率。过去这类产品加工都用硬质合金和陶瓷车刀,现在已被 PCBN 刀具代替,这是一个很大的进步。

(3) 在现代机械制造中,黑色金属材料加工是机械加工的重头戏。近年来,PCBN 刀具材料的制造工艺和综合力学性能有了很大的发展,可有效地对黑色金属进行粗精加工。

(4) 高科技的发展和自动化加工技术的普及对切削效率和精度提出了新的要求。同时,各种新型耐磨高硬度材料在工业中的应用日益增加,这都要求刀具具有良好的物理、化学和机械性能,而 PCBN 的三高特性,完全符合这方面的要求。因此,研究 PCBN 刀具对机械制造行业的发展具有很大的意义。

(5) 随着刀具材料技术的发展和制造工艺的日益革新,PCBN 刀具的材料和韧性都发生了很大的变化。新型的 PCBN 刀具比起那些早期缺乏韧性的牌号有了革命性的变化。PCBN 刀具的设计和用途也出现了许多新的进展,PCBN 刀具能够更加广泛地满足特殊工件材料加

效地切削以往只能磨削的难加工硬质铸铁合金。目前 PCBN 刀具已广泛应用于车削、铣削和镗削等加工领域。

21 世纪 PCBN 刀具的展望

(1) PCBN 刀具作为 21 世纪的主要换代刀具之一,在工业发达国家工具使用总量中所占比重越来越大。难加工材料越来越多,作为切削难加工材料的主要刀具材料 PCBN 前途一片光明。例如,飞机主体骨架(超高强度钢)的加工十分困难,研究用 PCBN 刀具加工就是一个方向。另外,航空发动机上的高温合金零件很难加工,目前用 CBN 刀具加工的效果还不十分理想,这显然是一个十分诱人的攻关项目,一旦有所突破,必将给高温合金加工领域带来全新的变化。

(2) 随着材料科学和制造技术的发展,新一代难加工材料如高铬钢、高镍钢、高速钢、碳化钨、陶瓷等,为现代机械加工提出了新的课题,PCBN 刀具已成为切削难加工材料的最具竞争力的刀具。

据统计,在国内,硬质合金刀具用量占总刀具的 60%,高速钢占 30% ~ 40%,PCBN 刀具目前所占

为 1.25 万 t,占全世界的 40%。硬质合金材料要用到大量的钨,高速钢也用到钨,虽然我国是产钨大国(占世界的 80%),但 50 年后钨会渐渐枯竭,而 CBN 原料中不含钨,可以说 PCBN 的原料是用之不尽的,因此,发展 PCBN 具有非常重要的战略意义。

(3) 通过进一步改进 PCBN 的制造工艺,可降低制造成本;同时,进一步调整 PCBN 的粘结相材料及其与硬质相的配比,减少硬质相,增多粘结相份额,可使 PCBN 的韧性得到进一步提高,将硬度从 HV8000 降低到 HV4000 ~ 5000 (这个硬度仍是硬质合金刀具硬度的 1 倍以上),改变 PCBN 刀具脆的弱点,使之对加工低于 HRC45 中硬和低硬材料也具有优势,可大大扩大 PCBN 刀具的使用范围。

(4) 20 世纪前半期,硬质合金的出现代替了 1/2 的高速钢,使机械加工领域面目一新;21 世纪,PCBN 刀具必将有很大的发展,应用前景不可限量,一旦攻克技术关键,即使替代一部分(比如 1/5 ~ 1/4)硬质合金刀具和陶瓷刀具,也将会出现相当惊人的革命性变化。

(责编 萧董)