

超硬刀具和材料的研究与应用

Application and Research of Super-Hard Cutting Tool and Its Material

郑州博特硬质材料有限公司 李启泉 刘书锋
中原工学院机电学院 宗万栓

超硬复合材料是一种非常有发展前途的刀具材料,金刚石和立方氮化硼是其中的 2 种,在应用领域具有较好的互补性。先进的切削技术离不开先进的刀具,超硬刀具符合现代高速、高效、低成本以及环保的要求,是一种理想的切削刀具。

切削加工是现代制造业应用最广泛的加工技术之一。据统计,国外切削加工在整个制造加工中所占比例约为 80% ~ 85%,国内则高达 90%。

刀具是切削加工中的牙齿,无论是普通机床,还是先进的数控机床、加工中心和柔性制造系统,都必须依靠刀具才能完成切削加工。刀具的发展对提高生产率和加工质量具有直接影响。材料、结构和几何形状是决定刀具切削性能的三要素,其中刀具材料的性能起着关键性作用。一项研究报告中指出:“由于刀具材料的改进,允许的切削速度每隔 10 年几乎提高 1 倍”。刀具材料已从 20 世纪初的高速钢、硬质合金发展到现在的高性能陶瓷、超硬材料等,耐热温度已由 500 ~ 600℃ 提高到 1200℃ 以上,允许切削速度已超

过 1000m/min,从而切削加工生产率在不到 100 年时间内提高了 100 多倍。因此可以说,刀具材料的发展历程间接反映了切削加工技术的发展轨迹。

超硬材料刀具主要包括金刚石刀具和立方氮化硼刀具。其中金刚石刀具包括金刚石薄膜涂层刀具、金刚石厚膜沉积刀具、金刚石复合片(PCD)刀具和天然单晶金刚石刀具 4 种,立方氮化硼刀具包括整体聚晶立方氮化硼刀具、立方氮化硼复合刀具和立方氮化硼涂层刀具 3 种。其中以人造金刚石复合片(PCD)刀具、整体聚晶立方氮化硼刀具和立方氮化硼复合片刀具一般文献都称之为 PCBN (Polycrystalline Cubic Boron Nitride) 刀具。立方氮化硼涂层刀具各国正处于研发之中,一旦突破,该产品具有广阔的应用前景。

美国 G.E. 公司,英国 De.Beers 公司,日本住友、三菱公司,以及韩国日进公司等,在超硬刀具材料的制造研究和应用方面投入了大量的人力和物力,对其进行不断地研究开发,产品已经商品化。美国 G.E. 公司的金刚石复合片和立方氮化硼复合片有不同的规格,其中金刚石复合片最大已达 50.8mm,厚度最薄为 0.3mm,一般有粗、中、细 3 种粒度的不同牌号。英国 De.Beers 公司开发 AMBORITE 品牌 AMB90、DBA80、DBC50 和 DBN45 的 PCBN,是由不同 CBN 粒度、不同含量和不同结合剂表征的产品,适合加工不同的材料,复合片的最大直径为 101.6mm。日本住友公司生产的 BNX10、BNX20 等产品具有优良的抗热化学磨损性能,加工不锈钢效果优异。DECO 公司的 CBN300 不仅

可用于车削硬材料(HRC>45),同时在铣削工件上也表现卓越。

我国在超硬刀具材料方面的研究也比较早,主要集中在四川大学、天津大学、燕山大学、冶金部超硬材料研究所等高校和研究单位。目前有几个生产单位,但规模都不大,也未形成自己的品牌。究其原因,主要是因为研究投入不够、测试手段不全,另外我国在其他刀具的开发和应用方面一直落后先进国家很多,也间接影响了超硬刀具的发展。在产品质量上主要表现为材料的耐磨性能赶不上国外产品和产品的系列化不够。

下面就应用广泛的金刚石复合片刀具、整体聚晶立方氮化硼刀具和立方氮化硼复合片刀具材料和刀具的研究做一些介绍。

PCD 金刚石刀具

1 PCD 金刚石刀具材料的制造

人造金刚石是一种在高温高压条件下人工合成的超硬材料。起初,人们将它作为一种磨料使用,由于它具有最高的硬度和耐磨性,作为切削工具材料是最容易想到的。1977年G.E.公司成功地开发了金刚石烧结合体(PCD),由磨削扩展到了切削,使人造超硬材料的用途进一步扩展,产品的附加值也大幅度提高。

PCD是将金刚石粉和金属钴粉或其他金属触媒粉末加以混合压制成型,经真空处理后于高温高压下烧结在硬质合金基板上研制而成的。通常聚晶金刚石(PCD)刀具的金刚石层厚度为0.5~1mm。金刚石刀片的聚晶结构没有方向性,性能稳定,其寿命比硬质合金高得多,强度和抗冲击能力也比单晶金刚石好得多,应用最为广泛。合格的复合片主要有3点要求:

(1) 金刚石聚晶层部分必须均匀致密、无裂纹;

(2) 在保证强度的情况下,聚晶

部分金刚石应有尽可能高的致密度;

(3) 聚晶层与硬质合金衬底之间结合良好,无分层裂纹现象。

要制备合格的金刚石复合片,必须有好的制备工艺,一般工艺如下:

配方→研磨、混料→压制→真空处理→组装→高压合成。

金刚石复合片制备的关键技术在于确立合成PCD原材料的成份及其质量标准和在高温高压烧结过程中优化合成工艺P-T-t曲线。该曲线必须与高压腔体的组装设计配合,即组装结构要合理,能改善腔体内的压力梯度和温度梯度。然后配以低温长时间的合成,产品的质量基本上有保证。粗粒度的金刚石复合片一般没有问题,细粒度金刚石的复合难度要大得多。我们采用2种方法制备细粒度的金刚石复合片,一种是添加较多的结合剂,另一种是采用上层为细粒度的金刚石+较少(不加)结合剂,下层为粗粒度的金刚石+较多的结合剂。第2种方法制备的产品质量十分好,形成上层的硬度最高、中层次之、下层最低。改善了材料的内应力状况及其耐磨性。

确立合成PCD原材料的成份及其质量标准十分必要,特别是微粉的含杂量。优化合成工艺具体来说就是对升温升压速度、烧结温度和压力、保压保温时间、降压速度、降温延迟时间以及降温时间曲线等参数进行优化。上述各参数对烧结成的复合片的性能都有直接的影响,尤其是降压速度、降温延迟时间以及降温时间曲线这3个参数对复合片的成品率起决定性作用,并且这3个参数的优化有相当大的难度,需要反复试验才能最终确定。因为聚晶层与硬质合金衬底之间的热膨胀系数以及弹性模量存在差异,当温度降至聚晶和硬质合金结

合剂的熔点以下时,温度和压力的变化会在聚晶层和硬质合金衬底之间引起应力。当温度和压力的变化匹配不当时,这种应力就会超过聚晶层/硬质合金衬底结合力所能承受的极限,从而导致复合块出现分层和裂纹等现象。

目前,在大直径切削用PCD复合片及石油钻探用高性能复合片的合成应用方面,我国与国外先进水平相比还有很大差距。2005年之前,我国有关单位研制开发的大直径PCD复合片的尺寸不超过 $\phi 30\text{mm}$,与国外同类产品相比差距较大。2006年黄河集团公司自主研发发出了国内最大直径($\phi 41\text{mm}$)PCD复合片。国外进口大直径($\phi 70 \sim 90\text{mm}$)聚晶复合片的价格为0.7~1.2万元/片,进口石油钻探用复合片($\phi 13 \sim 19\text{mm}$)的价格为0.13~0.2万元,价格极其昂贵,而且在技术上实行严格封锁。

金刚石具有极高的硬度和耐磨性,是最硬的刀具材料。金刚石刀具刃刃锋利、导热性好、线膨胀系数小、摩擦系数小。因此可利用PCD材料实现有色金属及耐磨非金属材料的高精度、高效率、高稳定性和低表面粗糙度加工。但是,金刚石刀具在加工铁系金属材料时容易产生化学磨损而失效,生成 Fe_3C ,因此一般不用于铁系金属的加工。另外,金刚石在裸露的情况下,600℃左右会发生氧化反应,因此,切削加工要注意切削温度或使用冷却液。且PDC金刚石刀具一般是焊接刀具,切削温度高,容易产生复合片脱落。2002年,“黛杰”推出整体烧结合晶金刚石钻头刀具,该工具整体烧结合晶成形与传统的金刚石钻头相比,可进行理想的高速加工而不必担心会产生脱落现象。

PCD刀具从结构上主要可分为焊接式PCD刀具和可转位式PCD刀片2类,可制成车刀、铣刀、铰刀、钻头、圆锯片等;在刀具材料上,大

致可以分为3种。表1为郑州博特硬质材料有限公司的PCD刀具材料说明。

2 PCD刀具的切削应用^[1-2]

(1) 高速切削轻金属及其合金和非金属材料。

PCD刀具在切削铝合金材料时,可以达到非常高的速度。在这种情况下,限制切削速度的主要因素已经不是刀具材料。有些PCD刀具切削铝合金的速度甚至可达到7000m/min以上。采用PCD刀具加工有色金属时,由于金刚石硬度高,表面与金属亲和力小,且刀具一般抛光成镜面,不易产生积屑瘤,加工尺寸稳定性以及表面质量都很好,刀具寿命比硬质合金刀具长几百倍。例如,加工硅铝合金零件,表面粗糙度 $R_a \leq 0.1 \mu\text{m}$,刀具寿命可达几千至几万件,尤其适合于汽车、摩托车零件的大批量生产和飞机零件的高速大加工量切削。采用PCD刀具加工电动机整流子的紫铜换向器,可达到表面粗糙度 $R_a = 0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$,刀具寿命 > 5000 件,而采用硬质合金刀具则只能加工几件。目前,金刚石刀具应用最多的是木工刀具和成型钻头阶梯刀。

(2) 精密和超精密高速切削。

由于金刚石材料的结合强度高,进行微切削量加工时,可以实现非铁金属的镜面加工,这种工艺可用于精密和超精密以及光学元件的精加工。一般采用单晶金刚石刀具,可实现球

体的镜面加工。

(3) 难加工材料的加工。

在加工高硬度、耐磨的难加工有色金属以及非金属材料(如高硅铝合金、增强纤维塑料、硬质合金、陶瓷等)时,应用PCD刀具具有明显的优越性。据报道,以“比梦”VN-SPE S2-60端铣刀加工材质为可切削陶瓷的半导体钻模,切削条件为:主轴转速370r/min,切削速度7m/min,进给速度15mm/r(分步进给,每步进给0.05mm),轴向切深5mm,纵向切深0.5mm,冷却液状态为湿式,刃口状态为磨损。通过加工可得出,在一样的加工条件下,用“比梦”端铣刀与金刚石涂层铣刀相比,寿命可提高20倍。

立方氮化硼刀具

1 立方氮化硼及其刀具的特性

立方氮化硼是采用超高温高压技术制成的另一种超硬材料。作为

刀具材料,它具有如下几个方面的优势:

(1) 具有仅次于金刚石的高硬度(HV8000~9000)和耐磨性。

(2) 具有比金刚石更好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 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 陶瓷的常温硬度。因此,当切削温度较高时,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) 化学稳定性好,在1000℃以下时不发生氧化,与铁系金属在1200~1300℃时也不易起化学反应。因此,高速切削淬火钢、冷硬铸铁时,粘接和扩散磨损比较小。

(4) 导热率较高。导热率虽比金刚石小(约为金刚石的1/2),但远高于陶瓷刀具。

(5) 摩擦系数较小,CBN与不同材料的摩擦系数在0.1~0.3之间,



(a) PCD 刀具材料

(b) PCD 刀具

PCD刀具及材料

表1 郑州博特硬质材料有限公司的PCD刀具材料

牌号	粒度/ μm	规格(直径/mm)	适用范围	特别适合的用途举例
BT005	< 5	13.5, 31.8	较耐磨的细粒度材料,低粗糙度值、高抗冲击韧性,常用于有色金属的精密加工、木材加工、强化地板的型刀等	有色金属精加工刀具(如电机刀等);木工铣刀、V-CUT圆刀盘
BT010	10	13.5, 31.8	中粒度材料,较耐磨,抗冲击性较好,适合于有色金属及非金属材料的精密加工及半精加工	有色金属加工用车刀、铣刀;木工锯片、木工铣刀、强化地板型刀等
BT028	28	13.5, 31.8	粗粒度材料,高耐磨,抗冲击性较好,用于加工超硬难加工有色金属合金或非金属材料	各种车刀、铣刀、钻头、轮毂刀等;木材加工刀具(如锯片、修边刀及高耐磨的成型刀等)

远远低于硬质合金的摩擦系数(0.4 ~ 0.6),而且随摩擦速度及正压力的增大而略有减小。低的摩擦系数及优良的抗粘结能力,使 CBN 刀具切削时不易形成滞留层或积屑瘤,有利于加工表面质量的提高。

(6)可用于粗加工领域。由于 CBN 刀具的缺点是强度和韧性差,因此很多文献报道 CBN 刀具只能应用于精加工。其实不然,在粗加工领域,整体 CBN 刀具具有比陶瓷刀具、硬质合金刀具更为优秀的切削性能^[3]。

根据 CBN 刀具的上述特点,它应该最适合于高硬度淬火钢、高温合金、可切削轴承钢(HRC60 ~ 62)、工具钢(HRC57 ~ 60)、高速钢(HRC62)等材料的高速加工。在淬硬模具钢的加工中,用 CBN 刀具进行高速切削可以起到以铣代磨的作用,大大减少手工修光工作量,因而可大幅度提高加工效率。另外,我们通过对 CBN 刀具的改性研究,添加不同的材料组分,以获得不同切削性能的 CBN 刀具材料,在灰铸铁、合金铸铁、烧结铁等粗、精加工,尤其是粗加工工序和断续加工方面取得了巨大的成功,效率成倍提高,刀片的使用寿命是普通陶瓷刀具的 10 倍,是硬质合金刀具的 100 倍。这些是金刚石刀具所不能胜任的。由此可见,这两大超硬刀具材料之间有互补的作用。

无论是整体立方氮化硼刀片,还是立方氮化硼复合刀片的聚晶层部分都是由无数细小的、任意排列的晶体组成,具有各向同性的特点。晶粒中 CBN 的含量为 45% ~ 98% 时,它具有很高的抗压强度和化学稳定性,主要用于硬切削。增加 CBN 的含量,可提高其耐磨能力,但抗冲击性能有所下降。总之,改变刀具材料的任一组分,可能彻底地改变材料的耐磨性、抗冲击性和切削性能,每一牌号有不同的被加工材料相适应。

表 2 和表 3 为博特产品说明。

2 整体立方氮化硼刀片和立方氮化硼复合刀片的类型

整体立方氮化硼刀片有带孔和不带孔的 2 种;PCBN 刀具可分为焊接式 PCBN 刀具和可转位式 PCBN 刀片 2 类。

以往使用的 CBN 刀片是将制备出的 PCBN 复合片切割成小块,以单刃或多刃的方式焊接在硬质合金基体上得到的。该刀片存在焊接应力,切削载荷大时容易脱落,故一般用于精加工。焊接式 PCBN 刀具主要有车刀、镗刀、绞刀等。另外,也可制造成可转位刀片,可转位刀片是将一块 PCBN 刀片焊接在带空硬质合金基片的多角上,制成铣刀和车刀。

3 CBN 和 PCBN 刀具的应用^[4]

(1) 硬加工,以车代磨。

由于 PCBN 刀具具有极高的硬度和红硬性,可使被加工的高硬度零件获得良好的表面粗糙度,所以采用 PCBN 刀具车削淬硬钢可实现“以

车代磨”。应用实例如汽车、摩托车齿轮孔的加工,此类零件材料一般为 20CrMnTi,渗碳淬火,表面硬度为 HRC60 ~ 62,齿轮孔精度为 IT6,表面粗糙度 $R_a \leq 0.8 \mu m$ 。传统加工工艺为:机加工—热处理—磨削。采用超硬刀具“以车代磨”的加工工艺为:粗加工—热处理—精加工。这种新工艺可大幅度提高加工效率,降低加工成本。例如,齿轮的精车加工采用 PCBN 刀具车削,切削参数:切速 $v=60 \sim 120 m/min$,进给量 $f \leq 0.12 mm/r$,吃刀深度 $a_p \leq 0.1 mm$,一班能加工 400 个小齿轮。大大提高了生产效率,单个齿轮的加工成本降低。

(2) 高速切削,高稳定性加工^[5]。

在汽车发动机生产线上,灰铸铁缸体的缸孔精加工是一个关键工序,要求缸孔加工尺寸精度高、表面粗糙度小、尺寸稳定性好。由于生产线加工节拍快,要求切削速度高(通常 $v \geq 500 m/min$)、刀具寿命长(加工孔数 ≥ 1000 个),且倒角、止口、粗

表2 全系列多晶立方氮化硼复合刀具材料 (PCBN)

品牌与牌号	CBN 含量 / %	CBN 粒度 / μm	应用范围
BN-A	> 90	10 ~ 20	车削铸铁、粉末冶金、特殊材料和耐热合金,高速铣削灰铸铁
BN-AC	> 90	20 ~ 28	灰铸铁、粉末冶金
BN-X001	< 50	1 ~ 3	断续加工淬火钢
BN-X002	60 ~ 70	4 ~ 7	连续、断续车削球墨铸铁、灰铸铁
BN-X003	70 ~ 80	7 ~ 10	高速连续加工淬火钢
BN-D, BN-AX	70 ~ 80	7 ~ 10	适合加工双金属复合材料、高强度合金

表3 全系列多晶立方氮化硼 (CBN) 整体烧结密实体刀具材料

品牌与牌号	CBN 含量 / %	CBN 粒度 / μm	应用范围
BN-S150	> 90	15	断续切削灰铸铁及高合金耐磨铸铁
BN-S100	> 90	10	断续切削硬铸铁及高合金耐磨铸铁
BN-S050	> 90	5	连续切削高合金铸铁
BN-SD	90	4	连续切削高合金铸铁
BN-SX	60 ~ 70	3	连续切削淬硬钢

精镗等多个工位的刀片寿命均应满足耐用度的要求。采用PCBN刀具即可实现发动机缸孔的高速切削及高稳定性加工,其典型切削参数为: $v=500\text{m}/\text{min}$, $f=0.2\sim 0.4\text{mm}/\text{r}$, $a_p=0.2\sim 0.7\text{mm}$,可达到的加工表面粗糙度尺 $R_a\leq 1.6\mu\text{m}$,刀具寿命 > 1000 件。

(3) 干式切削,清洁化生产。

公司采用PCBN刀具复合刀具,牌号BN-AX,加工含硼的铸铁缸套,切削参数: $v=200\text{m}/\text{min}$, $f=0.1\text{mm}/\text{r}$, $a_p=0.2\sim 1\text{mm}$,可达到的加工表面粗糙度 $R_a\leq 1.6\mu\text{m}$,精度IT6,两次刃磨间刀具寿命 > 110 件,实现了“以车代磨”。由于采用干式切削,避免了切削液对环境的污染,切屑也可回收再利用,符合清洁化生产的要求。

4 整体CBN、PCBN刀具材料的制备和关键技术

(1) 整体CBN刀具材料的制备^[6-7]。

将微米级立方氮化硼颗粒和陶瓷添加剂、金属结合剂混合均匀,装入石墨模具中,在超高压高温条件下烧结。在添加剂的作用下,CBN颗粒之间烧结形成CBN骨架,添加剂和CBN之间融合并填充在CBN骨架的间隙形成多晶CBN密实体。该密实体的形状取决于所用石墨模具的形状(相关发明专利号:ZL200410060270.8)。

陶瓷添加剂的种类和数量及采用的组装方式和烧结工艺,决定了该CBN密实体的导热性能和机械性能,并影响其应用。其技术关键在于残余的微量氧和水会与BN反应生成低强度的 H_3BO_3 ,从而造成CBN刀具的硬度和强度严重下降,所以在烧结之前必须彻底除去水等挥发性杂质。

整体多晶CBN烧结密实体材料,不但具备了多晶CBN复合体的性能,而且耐热性好。用它做成的整

体机夹式刀片,因为没有焊接点,更耐高温,不但能够满足各种精细加工要求,也能够满足断续重负荷等恶劣条件下的切削。

(2) 立方氮化硼复合片刀具材料的制备。

立方氮化硼复合片则是将CBN粉、金属粉、氮化物(MN_x , $0.6\leq X\leq 1$)和碳化物(MC_x , $0.6\leq X\leq 1$)加以混合、成型、高温合金化,然后在高温高压下烧结在硬质合金基板上。在高温高压条件下,CBN颗粒在结合剂的作用下烧结成多晶体,同时完成CBN多晶体和硬质合金的复合,形成多晶CBN-硬质合金的复合体。

陶瓷和金属添加剂的种类和数量,以及烧结工艺,决定了多晶CBN部分的热传导性能、断裂韧性和耐磨性能,从而决定了刀具的适用范围。

立方氮化硼复合片制作工艺、技术关键和难点与PCD复合片基本相似,只是原材料的种类、质量标准和成份配比不同。PCD复合片采用金刚石与金刚石在触媒Co的作用下形成D-D结合;而PCBN采用接合剂与CBN表面粒子反应,生成具有过渡层的三层结构体。现在接合剂一般是金属(合金)陶瓷,有文献报道,在烧结体内,存在由金属陶瓷和CBN组成的有序结构和合金、金属陶瓷组成的结构,2种结构相互穿插并紧密接触。在合成工艺上,压力对PCBN的影响敏感程度不如温度的影响。CBN聚晶一般采用较高的温度合成,可以提高其耐磨性;CBN复合片一般采用较低温度经长时间合成,可以做到耐磨性和抗冲击性能的平衡。

多晶CBN复合体耐高温(1500℃)、硬度(HV4000以上)、与黑色金属之间存在化学惰性,是黑色金属加工最优秀的刀具材料。另外,由于存在硬质合金基体的可焊接性,

可以将多晶CBN复合体分割成各种需要的形状,焊接到其他硬质合金或高速钢、高碳钢上,制成不同金属切削刀具。

当前我国超硬刀具存在的问题

(1) 我国在刀具材料研究方面投入不够,落后于先进发达国家,高档的PCD和PCBN材料全部依靠进口。复合片的内部存在较大的应力,复合层致密度不够。而复合层致密度不够严重影响到材料的耐磨性。

(2) 与国外相比,我国硬质刀具产品系列化远远不足,被加工材料有成千上万种,与之相匹配的刀具材料也应有所不同。问题的解决必须从材料、制造工艺以及切削试验多方面同时进行。

(3) 超硬刀具是一个市场门槛高、资金门槛高和技术门槛高的三高产品,国产化还有很长的路要走。目前除整体刀片外,应用较多的主要是国外产品,国内材料的研发严重滞后。

结束语

超硬复合材料是一种非常有发展前途的刀具材料,金刚石和立方氮化硼是其中的2种,在应用领域具有较好的互补性。了解材料的制造工艺、性能,合理选择超硬刀具及其结构和切削参数,才能充分发挥机床的潜力,降低制造成本。随着超硬刀具制造水平的提高、技术的不断成熟,超硬刀具的价格也越来越接近其他刀具。先进的切削技术离不开先进的刀具,超硬刀具符合现代高速、高效、低成本以及环保的要求,是一种理想的切削刀具。

注:本文有参考文献8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 小颖)