

59-64

聚晶立方氮化硼刀具及其制造技术综述

刘一波 屠厚泽 陈庆寿

(中国地质大学·北京·100083)

TG711

首先介绍了聚晶立方氮化硼(PCBN)刀具的优异性能及其应用领域。然后从几个方面综述了 PCBN 刀具制造的关键技术及其发展现状。

关键词 聚晶立方氮化硼(PCBN) 切削刀具 超硬材料 立方氮化硼(CBN)



1 立方氮化硼刀具

聚晶立方氮化硼(PCBN)刀具是 70 年代发展起来的一种新型刀具。立方氮化硼(CBN)是继人工合成金刚石之后出现的,利用超高压高温技术,用结构与石墨相似的六方氮化硼(hBN)转变而获得的第二种超硬材料。性能见表 1。

表 1 立方氮化硼性能表

指 标	人造金刚石	CBN
硬度 Ho(MPa)	100000	80000~90000
理论密度(g/cm ³)	3.51	3.47
结构晶格	立方	立方
晶格常数	3.567	3.615
最小原子间隙(Å)	1.54	1.56
热稳定性(℃)	700~800	1300~1400
对铁族元素化学反应	反应	呈惰性

聚晶立方氮化硼刀具的刀头材料是聚晶 CBN,它是由无数细小的 CBN 单晶无方向性组成的。因此刀具的韧性和抗劈裂能力比单晶制作的刀具大幅度提高;而且聚晶随切削具的磨损不断露出新的晶体,使 PCBN 刀具呈现优良的切削性能。

PCBN 刀具具有下述优异特性:(1)它的硬度和耐磨性很高,仅次于金刚石,耐用度是硬质合金刀具的 3~15 倍;(2)PCBN 刀具的热稳定性很高,耐热性可达 1400℃,比金刚石工具(700℃~800℃)高;(3)化学惰性很大,与铁系材料直至 1200℃~1300℃时也不易起化学作用,因而能对这些材料高速切削加工,且精度和表面光洁度很高,而金刚石刀具因高温下易与铁族材料发生反应而使之难以切削黑色金属材料;(4)良好的热传导性,大大高于高速钢及硬质合金,仅次于金刚石,且随温度提高,PCBN 刀具的导热系数逐渐增加,可导致刀尖处切削温度的降低;(5)较低的摩擦系数。

上述 PCBN 刀具一系列优点,使它在下述难加工材料领域获得广泛应用:(1)硬度值为 HRC45~68 的冷硬铸铁;(2)硬度值为 HRC45~68 的淬硬锻造钢件;(3)硬度值为 HRC45~65 的镍铬冷硬耐磨铸铁件;(4)硬度值接近 HRC60 的淬硬冷拔钢件;(5)渗碳氮化或渗碳火焰淬火的淬硬件;(6)白口铸铁或压铸件。

由于 PCBN 刀具是加工上述材料最合适的刀具。各发达国家将其作为提高机加工工业中提高经济效益(节能、高效、精密、自

动化)的重要工具加以发展,尤其是在汽车、宇航、军工等工业中更为突出。前苏联 1972 年开始展出 PCBN 刀具,美国 G. E 公司 1973 年制成 PCBN 刀具,De. Beers 公司 70 年代中期投产 PCBN 刀具,日本 1975 年引进 G. E 公司技术,1977 年开发本国产品。目前世界立方氮化硼刀具的年消耗量,约 50 亿日元,且年增长率高于其它各类刀具材料。随着高科技发展的需求,自动化加工技术的应用日趋普及,对切削效率和精度要求愈来愈高,各种新型耐磨、高硬度的材料在工业上应用日趋增加,对高硬、高强、耐高温耐腐蚀的难加工材料加工量日益增大,为此 PCBN 刀具的前景十分光明。我国 1973 年开始对 PCBN 刀具进行研究,目前已有小批量生产,但与国外产品在质量上、品种上仍存在相当大的差距,因此对 PCBN 刀具制造和应用的研究意义重大。

2 PCBN 刀具制造关键技术综述

PCBN 刀具制造技术主要包括作切削工具头用的 CBN 基烧结材料的研制、CBN 刀头的焊接及刀具的刃磨技术等。

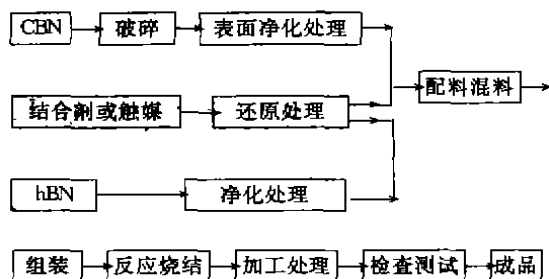
2.1 CBN 基烧结材料的制造

聚晶立方氮化硼(PCBN)是由许多小的 CBN 单晶体在高温高压条件下烧结而成的。其烧结可以是固相烧结,也可以用液相烧结或分散形烧结等。烧结时可 CBN 直接烧结或添加某些粘结剂,也可以利用 hBN 直接转变为 CBN 并烧结在一起。PCBN 烧结体生产过程中影响因素众多,制造技术复杂。为了获得高性能的 PCBN 烧结体刀具材料,各国研究者对其制造方法及有关问题进行了大量研究。下面是静态高压法 PCBN 烧结体制造工艺流程图。

PCBN 刀具材料制造工艺中的关键技术综述如下:

2.1.1 原材料的净化处理

由于 CBN 微粉、结合剂粉末中均含有



立方氮化硼聚晶制造工艺流程图

杂质及吸附着氧、水汽等,对烧结无利,甚至难以烧结;一般市售 CBN 还残余一部份 WBN、叶腊石、石墨、镁、铁等杂质。因此 CBN 原材料的净化处理是确保烧结质量的重要环节之一,净化可采用物理和化学方法。通常首先用 HCl 在电热板上煮沸除去残余金属;然后再在 300℃ 左右下进行碱处理去叶腊石和 hBN;其次水洗至中性并烘干;最后真空处理,一般用压力 10^{-3} Pa,加温至 400~500℃ 处理 3~5h 除去 CBN 的表面污垢。

2.1.2 结合剂材料的选择及加入量

尽管 CBN 制造可以不加结合剂也可制成烧结体,但 CBN 表面一层致密的 B_2O_3 膜阻碍了粒子间的结合,难以获得足够高强度的烧结体。因此 CBN 烧结一般均加入不同材料作结合剂混合烧结使其成为 PCBN 粘结的桥梁。同时由于 CBN 有比金刚石更好的可塑性,更易实现自身的键结合,因此加入适量结合剂可降低烧结时的压力、温度等工艺参数,并改善烧结体的性能。

实践表明可作为 PCBN 结合剂的材料很多,归纳列于表 2。

上述结合剂大致可分为 3 类:(1)金属结合剂:由金属或合金组成。金属结合剂 PCBN 烧结体韧性好,缺点是高温下结合剂软化、耐磨性下降;(2)陶瓷结合剂:解决了金属结合剂高温软化问题,但其高温下抗冲击性差、脆性大、易崩刃破损,寿命短;(3)金属陶瓷结合剂:该类结合剂的 PCBN 则解决了上述聚晶所存在的问题。

表2 PCBN 烧结体的结合剂

种 类	元素或化合物
非金属	硅、硼
金 属	钙、钛、铝、铁、钴、镍、铜、铬、钨、钼、铌
碳化物	碳化(钛、锆、钨、钽、铌、钽、钨、钼、铌、钽)
氮化物	氮化(钛、锆、钨、钽、铌、钽、钨、钼、铌、钽)
硅化物	硅化(铝、钛、钨、钽、铌、钽、钨、钼、铌、钽)
硼化物	硼化(钛、锆、钨、钽、铌、钽、钨、钼、铌、钽)
氧化物	三氧化二铝
碳氮化物	碳氮化钛、碳氮化锆
氮硼化物	氮硼化钙、氮硼化镁
金属陶瓷	碳化物、氮化物、硅化物、硼化物与钴、镍形成的固溶化合物

日本等对提高CBN聚晶的韧性和耐磨性进行了研究,提出:(1)必须严格控制金属

陶瓷结合相中陶瓷与金属或合金各自的含量;(2)陶瓷中如果含有 Al_2O_3 、 AlN 、 AlB ,有提高强度的效果;(3)聚晶含有 Al_2B 和 TiB 的结构形式,高温下的强度及耐磨性好;(4)钨、钼、铌为主要成份的氧化物、氮化物等稀土金属化合物浸入到CBN晶格间或陶瓷晶粒间使其致密,可提高烧结体强度;(5)将与CBN亲和性差的Co或Ni放在陶瓷结合剂中,能提高结合剂的密度和强度。结合剂的加入量一般说应充足但又不能过多。确定结合剂最少加入量是以高压高温下结合剂溶剂能达到一定活性为原则,加入量上限是以其严重阻碍CBN晶间联结为原则。表3为几种主要结合剂的加入量范围。

表3 几种结合剂的加入范围

结合剂种类	加 入 量	备 注
Al_2O_3	$7.5vol\% < Al_2O_3 < 80vol\%$	平均粒度 $< 1\mu m$
AlN	$3vol\% < AlN < 20vol\%$	升温升压时抑制 $CBN \rightarrow hBN$
高熔点金属化合物 A	$3.75vol\% < A < 40vol\%$	最佳为含Ti的化合物
金属或合金 B	$1vol\% < B < 2vol\%$	最佳为Co、Ni或(Co,Al)(NiAl)金属间化合物
稀土化合物 C	$0.5vol\% < C < 5vol\%$	

2.1.3 聚晶中CBN的含量及粒度的选择

为了保证PCBN的质量,PCBN烧结体中CBN的含量一般保持在70%~90wt%。如果CBN的含量低于50wt%,则烧结体的硬度下降,导致切削刃发生塑性流动而使刀片破损;如果含量超过95wt%,则烧结体性能变差,CBN晶粒易脱落,耐磨性大减,导致刀具的月牙洼形成量增加,从而使切削刃部变锋利而最终破损。另外,CBN颗粒粒度和含量也有一定的对应关系。当CBN粒子的平均粒度 $> 2\mu m$ 时,PCBN烧结体中CBN含量 $< 65vol\%$ 时,强度硬度都较低。因此CBN含量必须达到65vol%~75vol%。但当CBN平均粒度 $> 30\mu m$ 时,刀具的切削刃容易由于CBN颗粒自身的崩裂而破损。因此CBN粒径最好不要超过30 μm 。但若只用平均粒度小于2 μm 的CBN

粒子时,若CBN含量 $> 65vol\%$ 时,不可能获得组织结构均匀的烧结体。因此,当用小于2 μm (特别是 $< 1\mu m$)的CBN时,含量为混合料总体积的50vol%~65vol%时,能获得组织结构均匀、硬度高的烧结体。

CBN的粒度对合成PCBN影响很大。小颗粒的CBN晶粒能提供较大的反应表面积,产生诱发转变和晶体外延生长,得到显微结构完全致密的PCBN。同时根据所需要的加工精度和表面质量要求,制造切削工具用的CBN粒度大约分为:粗粒度20~30 μm ;中等粒度3~10 μm ,细粒度 $\leq 2\mu m$ 。由于单一粒度时其堆积密度小,烧结的聚晶体内孔隙大,因而耐磨性低,这种情况粒度越粗越显著;而按密堆积理论确定粒度配比的混合料由于堆积密度高,孔隙小,因而聚晶体的耐磨性高。同时采用混合粒度的

CBN 粒子,显著抑制了 CBN 粒子间的架桥现象和烧结体中微孔的形成,可提高刀头材料的强度,使之不易产生崩刃。

配方是决定切削工具 CBN 基烧结材料性能的主要因素。通过综合考虑以上讨论的

各因素,并针对各种加工材料和加工质量的要求,即可进行配方设计,按配比混料,在高温高压设备中进行烧结。表 4 给出了日本几家大公司开发的切削刀具用 CBN 基烧结材料的配方。

表 4 切削工具用 CBN 基烧结材料配方

公司	序号	CBN 含量及粒度	结 合 剂	用 途
三菱金属公司	1	CBN 含量: 80vol%; 其中 $1 \sim 5\mu\text{m}$, 占 67%, $5 \sim 18\mu\text{m}$, 占 33%	TiCN, 12vol%; Al_2O_3 : 8vol%	适用于高速钢, 铸铁, 模具钢的高速切削, 重切削
	2	CBN 含量: 60vol%; 其中 $<1\mu\text{m}$, 占 13%, $1 \sim 5\mu\text{m}$, 占 37%, $5 \sim 18\mu\text{m}$, 占 50%	TiCN, 15vol%; TiB_2 : 5vol%; Al_2O_3 : 20vol%	
	3	CBN 含量: 65vol%;	TiN: 15vol%; $\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$: 20vol%	适用于淬火钢的高速切削
	4	CBN 含量: 70vol%	TiN: 10vol%; $\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$: 10vol%; TiB_2 : 10vol%	
	5	CBN 含量: 74vol%	$\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$: 21vol%; $\text{Ti}_2\text{AlC}_{0.6}\text{N}_{0.4}$: 5vol%	冷硬铸铁, 高硬度钢的重切削
	6	CBN 含量: 81vol%	TiC_2 : 13vol%; $\text{TiAlC}_{0.6}\text{N}_{0.4}$: 6vol%	
昭和电工	7	CBN 含量: 85vol%, (CBN 为采用真空沉积或离子溅射法先后涂附 400 Å 厚的 Al, 再涂附 200 Å 厚的 Ni)	TiC: 15vol%, 衬底: WC-Co	高硬度钢的间断切削

2.1.4 PCBN 烧结工艺的研究

烧结的主要参数是压力, 温度和合成时间。为了防止 CBN 向 hBN 逆转化, 温度和压力条件必须在 CBN 的热力学稳定区域内。由于烧结的最佳功率值 $W_{\text{最佳}}$ 和转化为 hBN 的 W_{h} 值较为接近, 所以温度必须控制在很窄的范围内。一般根据原料粒径、压力在 $5 \sim 6.5\text{GPa}$, 温度在 $1400^\circ\text{C} \sim 1600^\circ\text{C}$ 。

由于高压腔体内径向轴向温度的不均匀性而影响聚晶的质量和性能, 因此聚晶用的高压腔设计与选择也是很重要的。一般采用 NaCl 或白云石内衬管及改变叶腊石的焙烧工艺的组块可使腔内温度和压力分布更均匀些。

2.2 切削刀具用 CBN 基烧结材料的加工及焊接技术

CBN 基切削刀具材料一般是先将其切

割成一定形状, 再焊到刀体上。

聚晶 PCBN 烧结材料的切割方式有:

(1) 金刚石砂轮切除式切断: 该方法简单, 但切断部位不整齐, 加工留量大, 成品合格率较差; (2) 激光切割法: 该法精度好, 但加工表面变化区域比放电加工大一些, 对比较薄的场合, 切断效率高, 较厚的切割则很慢, 甚至不能加工; (3) 线切割放电加工, 切割精度高, 加工变质层非常小, 后加工程序或加工留量都可以很小, 大幅度降低了加工成本。

焊接是 CBN 基切削刀具制造过程中的一个重要程序。它是将已切割成一定形状的刀头材料通过焊接等方法固定在刀体上, 刀体材料根据实际情况可选用硬质合金、高速钢或普通结构钢、金属或合金等。焊接一般采用火焰加热或高频感应加热。前者工艺简单。热源来源方便, 价格低廉, 适宜于小批量

生产和试制;后者操作复杂,加热速度快,适宜大批量生产,但设备成本高,且耗水耗电。比较理想的焊接温度在 $650^{\circ}\text{C}\sim 750^{\circ}\text{C}$ 之间。高于 800°C 的焊接温度则需要在惰性气体或真空条件下进行。若焊温过低,焊接不能充分熔融,焊接强度不够,温度过高则会由于 CBN 烧结体内杂质或 hBN 化等因素影响烧结体性能。当焊料熔点在 $640^{\circ}\sim 740^{\circ}\text{C}$ 时,采用 700°C 的焊温即可牢固地焊接 CBN 烧结体。

CBN 烧结体焊接时常用焊料可根据上述焊接温度要求配制。目前常用焊料为 BAg-1。焊接前,为防止焊接刀面氧化需涂焊剂。

钎焊步骤:清洗刀片刀杆→在聚晶和刀槽焊面涂焊剂→在刀槽上焊片→放聚晶→高频焊→焊片熔融时轻压聚晶→冷却→清除焊剂。

2.3 刀具刃磨技术

此道工序是刀具制造过程中最关键的一步。刃磨使刀具获得正确的几何形状和表面粗糙度。刃磨磨床最好用主轴刚性高,有恒压力机构的专用工具磨床。砂轮可采用树脂结合剂金刚石砂轮。砂轮的金刚石粒度是影响磨削质量的关键因素。一般刃磨分粗磨、精磨、研磨等工序。为使刀具具有特别锋利的刃口,刃磨中所用的金刚石越细越好。国内粗磨采用 $180^{\#}\sim 240^{\#}$ 树脂结合剂金刚石砂轮,进刀量 $0.01\text{mm}/\text{双行程}$,精磨采用 $W_{10}\sim W_{11}$ 树脂结合剂砂轮,进刀量 0.005 。

$\text{mm}/\text{双行程}$,研磨用 $W_5\sim W_{3.5}$ 的金刚石研磨膏。而国外采用的砂轮粒度大致为 $10\mu\text{m}$ 和 $5\mu\text{m}$,前者用于粗磨,后者用于精磨。实践表明,采用如此细的金刚石砂轮,能使刀具刀口质量得以保证。另外,精磨后的刀具前刀面必须经精密抛光至镜面程度,以减少切屑形成的积屑瘤,从而提高工件表面质量。

刃磨中应特别注意金刚石砂轮的开刃修整对刃磨的影响。尽管刃磨过程中,刀具在砂轮的整个端面来回摆动以使砂轮表面消耗一致,但实际上砂轮表面仍容易产生凸凹不平。因此必须经常对砂轮进行修整。

2.4 PCBN 刀具的几何参数

PCBN 刀具的寿命与其几何参数的关系也值得研究。合适的前后角可提高刀具的抗冲击性能,排屑能力及散热能力,刀具角度中,前角的大小直接影响切削刃的受力情况和刀片的内应力状态。前角选择不当就会影响刀具的寿命。在切削过程中,正前角和负前角在前刀面附近形成两种不同的应力状态。因 PCBN 刀具硬脆,在使用时为了避免刀尖承受机械冲击所造成的拉力过大,一般不采用正前角,而是采用负前角,以增大刀尖的抗冲击性和强度。同时,为减少后角的磨损,主副后角最佳选择为 6° ,并应在刀尖处磨一个半径为 0.5mm 的圆角,刀尖倒棱并研磨光滑。另外,刀具的几何角度选择还要根据加工工件的硬度和强度来选择。表 5 给出不同加工材料几何角度的选择。

表 5 不同加工材料几何角度的选择

被加工材料	γ (前角)	α (后角)	λ_s (刃倾角)	γ_1	倒 棱
淬硬碳素工具钢	-5°	6°	0°	0.2	$8^{\circ}\times 0.2\text{mm}$
淬硬高速钢	-5°	6°	-3°	0.3	$10^{\circ}\times 0.3\text{mm}$
冷硬球墨铸铁	-3°	6°	0°	0.6	$6^{\circ}\times 0.25\text{mm}$
高温合金	-4°	6°	0°	0.3	$10^{\circ}\times 0.2\text{mm}$
钛合金	-3°	6°	0°	0.3	$10^{\circ}\times 0.2\text{mm}$
电铸纯镍	-3°	6°	0°	0.3	$10^{\circ}\times 0.2\text{mm}$
钨	-4°	6°	0°	0.25	$8^{\circ}\times 0.25\text{mm}$

尽管目前工业发达国家的 PCBN 刀具制造和应用水平都取得了很大进展,但国内 PCBN 刀具制造技术水平还很低,应用范围也有限。但相信随着对 PCBN 刀具优异性

能的认识,制造和应用技术的不断发展以及 CBN 单晶自身质量的不断提高,相信 PCBN 刀具很快会有大的发展。

A SUMMARY ON POLYCRYSTALLINE CUBIC BORON NITRIDE CUTTER AND ITS MANUFACTURING TECHNOLOGY

Liu Yibo, Tu Houze, Chen Qingshou

The excellent properties of Polycrystalline Cubic Boron Nitride (PCBN) and its application fields are outlined firstly. Then the state-of-art of manufacturing technology of PCBN cutter and some key techniques are summarized.

Key Words: polycrystalline cubic boron nitride (PCBN), cutter, superhard material, cubic boron nitride (CBN)

《多工艺空气钻探》一书出版

地质矿产部科技重点攻关项目之一“多工艺空气钻进技术”经过有关院校、科研单位、生产单位广大技术人员努力合作,取得了一系列丰硕成果,技术经济效益与社会效益甚为显著。该成果于 1992 年列入国家科委《国家科技成果重点推广计划》,并于 1994 年被国家科委列入《国家科技成果重点推广计划创亿元产值项目 100 例》之一。

本书编著者包括参加该项目的单位和 20 余位科技人员与专家、教授。本书集中反映了该项目在气动潜孔锤钻探技术、空气双管反循环连续取样(心)钻探、气举反循环钻探技术、泡沫及泡沫钻探技术等领域内 20 多项技术成果与应用。中国地质勘查技术院项目总负责耿瑞伦和陈星庆任主编,由项目总顾问、中国工程院院士刘广志教授作序。全书 30 余万字。现已由地质出版社出版,并由勘探技术研究所情报室发行。

联系地址:河北省廊坊市金光道 77 号

邮编:102849

联系人:武玉兰

电话:0316-2015312