聚晶立方氮化硼(PCBN)性能与平均自由程关系的研究

刘一波
(冶金部钢铁研究总院·北京·100083)
屠厚泽
(中国地质大学·北京·100083)
彭先奇
(冶金部钢铁研究总院·北京·100083)
陈庆寿
(中国地质大学·北京·100083)

根据Gorland强度理论中平均自由程与材料性能的关系,通过一系列的试验和回归分析,研究了PCBN的内部结构,成份组成与其抗压强度和磨耗比之间的关系,建立了CBN粒度、结合剂掺入量与PCBN平均自由程、抗压强度、耐磨性之间的关系式,对提高PCBN的性能具有重要的指导价值。

关键词 聚晶立方氮化硼 刀具材料 平均自由程 性能 强度 耐磨性

聚晶立方氮化硼是以立方氮化硼(CBN)微粉为主要成份,并添加一定的添加剂,在超高压高温条件下烧结而成的,由于它具有热稳定性好,硬度高,对铁族金属的化学惰性优异,热传导性能好的特性,是加工硬而韧的难加工铁族金属材料的最佳工具材料。在切削加工工件时,PCBN刀片刃部受到1000℃的高温和切削力的作用,要求PCBN材料具有优良的性能。因此PCBN的强度和耐磨性一直是国内外研究人员十分关心的重要问题。由于材料的性能最终是由材料的组织结构与成份所决定的。本文通过一系列的试验、测试和回归分析,并借鉴Gorland强度理论,围绕PCBN的内部结构、成份组成与强度、耐磨性的关系,深入研究了PCBN的抗压强度和磨耗比性能与平均自由程的关系。

1 试验和测试方法

1.1 PCBN样品合成方法

首先将按一定粒度配比配制的CBN混合粉与结合剂($Al + TiC_{0.47} + B$)按表1中的配比称重配料,然后再在玛瑙钵中将料研磨混合均匀。将配混均匀的CBN和结合剂粉料装入石墨模具,置入真空炉内进行处理,真空炉内保持高于1×10^{-2}Pa的真空度,最高处理温度850℃,保温1 h。将处理后的料按图1所示的合成块组装结构进行组装,并在DS—029型6×10^4 KN压机上合成。合成的PCBN试样规格为Ø8 mm×4 mm。

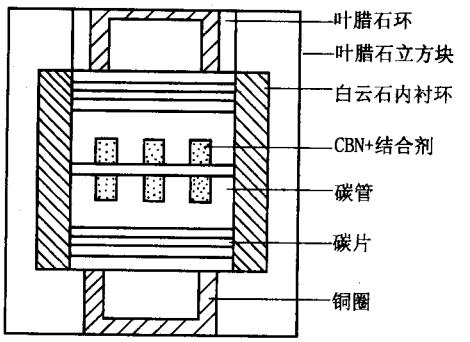


图1 合成块组装结构示意图
叶腊石块边长为36.5 mm×36.5 mm×36.5 mm;
合成腔体直径Ø18 mm,白云石内衬管外径
为Ø24 mm,内径Ø18 mm,高20 mm

1.2 PCBN的磨耗比测定方法

将合成的PCBN样品参照人造金刚石聚晶磨耗比测量原理进行:在规定的转速和负荷条件下使PCBN聚晶体和TL80# Z_2AP 100×16×20规格的SiC陶瓷平行砂轮在规定的装置上相互对磨。按式(1)计算:

$$A = K\frac{M_s}{M_j} \qquad (1)$$

本文1997年10月收到,王 梅编辑。

式中：A— 磨耗比；M_s— 砂轮磨耗量；M_j —PCBN 磨耗量；K— 修正系数，以砂轮喷坑值 3.70 为标准。

1.3 PCBN 的抗压强度 σ_b 的测定

先将 PCBN 样品在普通磨床上将两端磨平。然后在 2t 级万能材料试验机上进行试样压馈试验。σ_b 由下式确定：

$$\sigma_b = P/\pi r^2 \qquad (2)$$

式中：σ_b —抗压强度，(kgf/mm^2)；P —加载负荷，(kgf)；r —试样半径，(mm)。

1.4 PCBN 的平均自由程及其测量方法

PCBN 的平均自由程是指 PCBN 中弥散相颗粒 CBN 之间的平均距离，即 CBN 晶粒间粘结相层的平均厚度。Gorland 强度理论指出：若假定 CBN 颗粒在烧结过程中元长大，兼并等情况出现，则平均自由程是 CBN 晶粒原始平均粒度和结合剂掺入量的函数，并可用下式计算：

$$P = \frac{4(1-f)}{\pi d Ns} \qquad (3)$$

式中：d —CBN 原始平均粒度；f —CBN 的体积分数；P —平均自由程；Ns —单位面积上连续的 CBN 颗粒数

将 PCBN 样品磨抛光后，在扫描电镜下选取 3 个不同视场的背反射电子象照片中测量 10～12 个单位面积上的 Ns 和 f，取平均值代入(3) 式即可算出 P 值。

2 试验测试结果

表 1 是不同 CBN 原始平均粒度和不同结合剂掺入量试验合成的 PCBN 样品的磨耗比，抗压强度和平均自由程测试结果。

表 1 试验方案和测试结果表

CBN 平均原始粒径 μm	测试项目	结合剂掺入量(wt%)						
		4	8	10	12	15	20	25
W28	平均自由程 (μm)	0.047	0.325	0.601	0.951	1.306	1.777	
	抗压强度 (kgf/mm^2)	179.4	273.6	310.2	301.9	279.3	230.6	
	磨耗比($\times 10^3$)	1.50	8.30	11.80	8.40	7.20	3.94	
W20	平均自由程 (μm)	0.0112	0.1424	0.386	0.749	0.987	1.345	
	抗压强度 (kgf/mm^2)	160.50	230.1	300.7	335.1	320.1	290.5	
	磨耗比($\times 10^3$)	0.90	6.80	8.90	9.75	9.30	6.40	
W14	平均自由程 (μm)	0.004	0.042	0.105	0.597	0.817	1.097	1.532
	抗压强度 (kgf/mm^2)	146.7	220.5	286.7	310.3	347.1	340.8	281.5
	磨耗比($\times 10^3$)	0.80	3.70	5.50	10.40	9.47	7.80	3.71
W7	平均自由程 (μm)		0.008	0.041	0.101	0.540	0.819	
	抗压强度 (kgf/mm^2)	85.5	120.4	241.3	267.5	297.4	352.3	
	磨耗比($\times 10^3$)	很差	<0.3	2.00	3.10	4.90	7.30	

3 分析与讨论

3.1 PCBN 的平均自由程与 CBN 平均原始粒度和结合剂掺入量两因素的关系

1)相同的结合剂掺入量时，随 CBN 粒度的细化，PCBN 的平均自由程值下降；

2)相同的平均自由程时，随 CBN 粒度的细化，结合剂掺入量增加。

由此可知，CBN 原始粒度和结合剂掺入量对 PCBN 的平均自由程有综合的影响。为进一步分析这两因素，对平均自由程的影响程度及试验数据进行回归分析：由试验结果

可以看出 PCBN 的平均自由程随结合剂掺入量和 CBN 的原始平均粒度增加而增大。

若取变量 X_1 为 CBN 的原始粒度,变量 X_2 为结合剂掺入量,则可假设平均自由程 P 与 X_1、X_2 如下关系:

$$P = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2$$

对表 1 的试验数据进行二元回归分析(表 2)。

回归系数 b_0, b_1, b_2 应满足方程组

$$\begin{cases} 1335.96b_1 + (-126.875)b_2 = 30.50 \\ -126.875b_1 + 729.625b_2 = 60.9603 \\ b_0 = 0.597 - 17.5417b_1 - 12.375b_2 \end{cases}$$

解得:$b_1 = 0.0313$;　　$b_2 = 0.089$;

$b_0 = -1.0533$

因此回归方程为:

$$P = 0.0313X_1 + 0.089X_2 - 1.0533 \quad (4)$$

由式(4)即可确定任何掺杂量和 CBN 原始粒度条件下合成的 PCBN 材料的平均自由程。同时由式(4)中 X_1、X_2 的系数 $b_1 : b_2 = 1 : 2.8$ 可知:结合剂掺入量对平均自由程的影响程度约是粒度因素影响程度的 3 倍。

3.2　PCBN 的平均自由程与磨耗比关系的分析

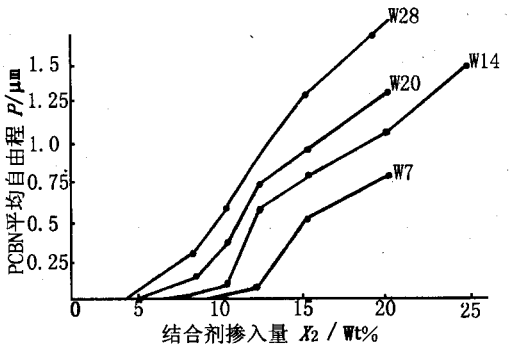


图 2　CBN 原始粒度和结合剂掺入量与 PCBN 平均自由程的关系曲线

表 2　二元回归分析表

$\bar{X}_1$	$\bar{X}_2$	$\bar{P}$	L_{00}	L_{11}	$L_{12} = L_{21}$	L_{22}	L_{10}	L_{20}
17.5417	12.375	0.597	6.754	1335.96	-126.875	729.625	30.500	60.9603

图 3 是根据表 1 所示的结果显示的 PCBN 的平均自由程对 PCBN 磨耗比的影响关系。从图中可以看出:

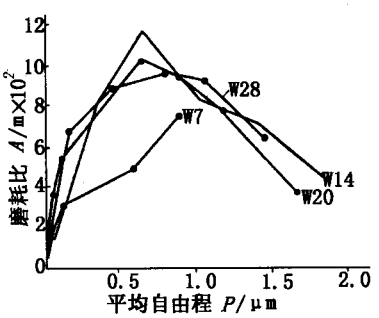


图 3　PCBN 的平均自由程对 PCBN 磨耗比的影响关系图

1)PCBN 的磨耗比随平均自由程变化经历了一个最大值,最大值出现在平均自由程为 0.6μm ~ 0.9μm 的区域内。

2)平均自由程小于或大于这一区域,PCBN 的耐磨性均下降。

3)随着 CBN 粒度细化,PCBN 的最大磨耗比值下降。

4)随着 CBN 粒度的细化,具有最高磨耗比值的 PCBN 的平均自由程值增大。

上述结果表明:PCBN 的耐磨性与平均自由程的关系同硬质合金中 WC 硬质相平均自由程与其性能关系很相似。只不过硬质合金中以塑性金属 Co 为粘结相层,PCBN 中,粘结相层则是由 Al + TiC + B 与 CBN 在高温高压烧结期间相互反应生成的 AlN、AlB_2、TiB_2 和 TiC 等陶瓷相构成。当平均自由程较小时,PCBN 中的该陶瓷粘结相层过薄,在 CBN 颗粒间的粘结层呈不连续分布,以至 CBN 颗粒间存在较多的直接接触,而在 PCBN 的试验合成温度压力条件下(1450℃ ~ 1700℃,60Kbar)尚不能实现 CBN—CBN 的键结合。因此 CBN 的直接接触区便成为 PCBN 中的结合弱区及潜在的裂纹源。平均自由程越小,

粘结层越薄，这类结合弱区就越多，因而表现出耐磨性能随平均自由程减小而降低的趋势，当平均自由程过大时，PCBN 的粘结相层过厚，粘结相自身的力学性能对 PCBN 的性能影响显著性明显增大，而粘结相的性能比 CBN 均低得多，从而导致过厚的粘结层降低 PCBN 材料的耐磨性。

根据文献(4)，PCBN 的性能与平均自由程关系可采用回归方程：

$$A = \sum_{i=0}^{n} b_i P^i$$

式中：A —性能指标；b_i —系数；P —平均自由程。

当 $n = 3$ 时。已具有很好的适应性，此时展开该式：

$$A = b_0 + b_1 P + b_2 P^2 + b_3 P^3$$

根据表 1 的试验数据，PCBN 的平均自由程与磨耗比回归方程计算见表 3。

表 3 回归分析计算表

$\sum P$	$\sum A$	$\sum P^2$	$\sum A^2$	$\sum P^3$	$\sum P^4$	$\sum P^5$	$\sum P^6$	PA	P^2A	P^3A
14.3234	141.87	15.3123	1105.1111	19.2087	26.4945	$\sum P^5$	59.602	101.7	99.6325	113.167

$$n = 23$$

$$\bar{P} = \frac{\sum P}{n} = 0.6232$$

$$\overline{P^2} = \frac{\sum P^2}{n} = 0.6657522$$

$$\overline{P^3} = \frac{\sum P^3}{n} = 0.835161$$

$$\bar{A} = \frac{\sum A}{n} = 6.168261$$

$$L_{00} = \sum A^2 - (\sum A)^2/n = 230.02$$

$$L_{11} = \sum P^2 - (\Sigma P)^2/n = 6.39231$$

$$L_{12} = L_{21} = \sum P^3 - (\sum P)(\sum P^2)/n = 9.6729$$

$$L_{13} = L_{31} = \sum P^4 - (\sum P)(\sum P^3)/n = 14.5238$$

$$L_{22} = \sum P^4 - (\sum P^2)^2/n = 16.3$$

$$L_{23} = L_{32} = \sum P^5 - (\sum P^2)(\sum P^3)/n = 26.0546$$

$$L_{33} = \sum P^6 - (\sum P^3)^2/n = 43.56$$

$$L_{10} = \sum PA - (\sum P)(\sum A)/n = 43.56$$

$$L_{20} = \sum P^2A - (\sum P)^2(\Sigma A)/n = 13.288$$

$$L_{30} = \sum P^3A - (\sum P)^3(\sum A)/n = -5.3173$$

由此，回归系数 b_0、b_1、b_2、b_3 应满足方程组：

$$\begin{cases} 6.39231b_1 + 9.6769b_2 + 14.5238b_3 = 13.288 \\ 9.6729b_1 + 16.3b_2 + 26.0546b_3 = 5.18224 \\ 14.5238b_1 + 26.0546b_2 + 43.56b_3 = -5.3173 \\ b_0 = \bar{A} - b_1\bar{P} - b_2\overline{P^2} - b_3\overline{P^3} \end{cases}$$

解方程组：$b_1 = 18.75$　　$b_2 = -14.136$

$b_3 = 2.077$　　$b_0 = 2.16$

因此 PCBN 的磨耗比与其平均自由程的回归方程为：

$$A = (2.16 + 18.75P - 14.136P^2 + 2.007P^3) \times 10^3 \quad (5)$$

式(5)建立了 PCBN 的磨耗比与平均自由程的经验关系。

3.3 PCBN 的抗压强度 σ_b 与平均自由程的关系

图 4 是根据表 1 的试验结果显示的 PCBN 的平均自由程与抗压强度的关系曲线。

由图可知抗压强度与平均自由程的关系与磨耗比与平均自由程的关系具有相同的规律。

4 结　论

1)结合剂的掺入量和 CBN 粒度对 PCBN 的性能有综合作用,二者的综合影响可归结为平均自由程(即粘结相层的平均厚度)对其性能的影响。平均自由程对 PCBN 的性能影响反映了 PCBN 的结构和组份对其性能的关系。

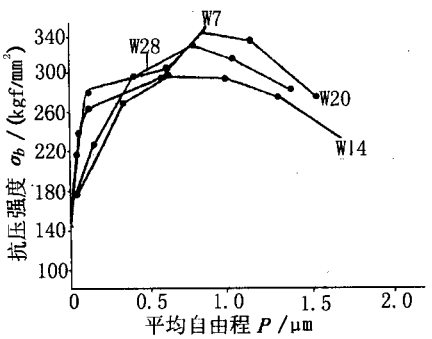


图 4　PCBN 的平均自由程与抗压强度 σ_b 的关系曲线

4)PCBN 性能较佳时的平均自由程范围在 0.6μm ~ 0.9μm 之间。CBN 粒度粗时取大值,随着 CBN 粒度的细化,最佳的平均自由程值也变小。另外可根据式(4)推导各种 CBN 粒度下 PCBN 具有较佳性能的结合剂掺入范围。

5)随着 CBN 粒度的细化,获得最佳性

按(6)中的回归方法可得 PCBN 的抗压强度 σ_b 与平均自由程 P 的关系:

$$\sigma_b = 184.14 + 471.253P - 449.975P^2 + 114.76P^3 \quad (6)$$

2)PCBN 的平均自由程 P 与结合剂掺入量 X_2 和 CBN 平均原始粒度 X_1 之间可采用如下公式确定:

$$P = 0.0313X_1 + 0.089X_2 - 1.0533$$

3)PCBN 的抗压强度 σ_b 和耐磨性 A 与平均自由程 P 之间有如下的经验关系式:

$$\sigma_b = 184.14 + 471.253P - 449.975P^2 + 114.76P^3$$

$$A = (0.216 + 18.75P - 14.136P^2 + 2.077P^3) \times 10^3$$

能 PCBN 的结合剂掺入量必须增加。

6)Al + TiC + B 系掺杂合成 PCBN 是依靠 AlN, AlB_2, TiB_2, TiN, TiC 等粘结相将 CBN 颗粒牢固结合起来的。当粘结相过薄时,存在 CBN 直接接触的结合弱区,而当粘结相层过厚时,粘结相材料强度,硬度等均不及 CBN,从而降低了 PCBN 强度和耐磨性。只有在平均自由程值适中时 PCBN 才具有良好的强度和耐磨性。此时的 PCBN 的扫描电镜照片可见粘结层刚好呈连续均匀的薄网状分布。

参考文献

1 曾德麟.粉末冶金材料.北京:冶金工业出版社,1989
2 文涛,等.Ti—Si—B 掺杂金刚石烧结过程的研究.粉末冶金技术,1992,10(1)
3 廖乾初,等.扫描电镜原理及应用技术.北京:冶金工业出版社,1990
4 李印江.陶瓷结合剂砂轮配方.北京:中国科技出版社,1991
5 王光祖,等.立方氮化硼.郑州:河南科技出版社,1995

STUDY ON THE RELATIONS OF PROPERTIES AND MEAN FREE PATH OF PCBN

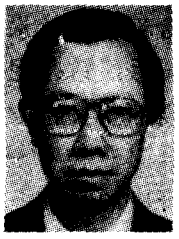
Liu Yibo, Peng Xianqi, Tu Houze, Cheng Qingshou

PCBN cutter will meet great cutting force and heat impact when it's used to cut the hard and tough ferrous materials. The relationships of the compressing strength and abrasion resistance of PCBN and the mean free path of CBN particles in it's microstructure were studied. The results showed the properties of PCBN were improved with the increasing of mean free path in the case of low content of dopant, decreased with the increasing of the mean free path in the case of high content of dopant. There is an appropriate range of the mean free path in which the best properties are obtained.

Key words　PCBN, cutting materials, mean free path, property, strength, abrasion resistance

(下转 57 页)

(上接33页)



第一作者简介:

刘一波　男,31岁。冶金工业部钢铁研究总院博士后,主要从事金刚石与立方氮化硼多晶材料及超硬材料制品的研究开发。

通讯地址:北京市学院南路76号　冶金工业部钢铁研究总院　邮政编码:100083