

[文章编号] 1004- 0609(2001)02- 0258- 06

金刚石表面镀钛对金刚石锯片性能的影响^①

朱永伟^{1, 2}, 张新明¹, 谢光灼²

(1. 中南大学 材料科学与工程系, 长沙 410083; 2. 长沙矿冶研究院, 长沙 410012)

[摘 要] 金刚石表面镀钛与否对 Co 基和 Cu-Sn 基胎体抗弯强度、金刚石锯片切割性能的对比研究表明, 金刚石表面镀钛可提高金刚石工具的寿命及切割效率。采用扫描电镜对抗弯强度试验样品断面和使用过的锯片刀头的观察分析, 确立了镀钛层与不同胎体的结合类型。

[关键词] 金刚石表面镀钛; 工具寿命; 切割效率

[中图分类号] TG 174. 444

[文献标识码] A

金刚石锯片的热压过程一般在 800~ 1000 ℃温度下进行, 胎体中的 Co, Ni 和 Fe 等组份对金刚石有明显的石墨化、碳化等作用。众所周知, 这几个元素是高温高压下合成金刚石的催化剂, 由于催化作用是可逆的, 在热压条件下, 金刚石转变为石墨的过程可自动进行^[1]。由于这几个元素在高温下与碳形成固溶体, 溶解一定量的金刚石, 降温时, 又以石墨的形式析出, 减弱了金刚石与胎体的结合强度。Borse 的研究也证实了当温度大于 700 ℃时, Co, Ni 和 Fe 可在金刚石表面腐蚀形成大量凹坑, 使工具中金刚石强度比原始强度降低了 1~ 3 kg。Naidich^[2] 在研究中发现, 表面镀 Co, Ni 和 Fe 镀层的金刚石, 加热到一定温度时, 金刚石表面出现碳化, 并使镀层与金刚石之间结合强度降低。为了减少金刚石在热压过程中的强度损失以及增强其与胎体的结合强度, 国内外开展了许多这方面的研究。臧建兵等^[3] 比较圆满地解决了国内外超硬磨料各类镀附技术(如磁控溅射、化学气相沉积、热蒸发镀等)所存在的单次镀附量少、镀层与磨料结合强度低、镀附过程温度高而损伤超硬磨料以及镀附成本高等一系列工业应用问题。De Beers 公司还推出了镀钛的 SDA85-T、SDA100-T 等金刚石品种。本文作者对镀钛金刚石在热压及锯切过程中镀层与胎体的各种作用, 作了比较深入的研究, 探讨了金刚石表面镀钛的作用机理。

1 实验方法

采用 SMD 品级的金刚石, 静压强度为 136 N,

将其中一部分进行表面镀钛处理。制作样品用的粉末为小于 74 μm 的 Cu-10Sn, Cr, Fe, Ni, Co 和 WC。A 配方以 Co 为基, 加以少量的 Cu-10Sn 和 WC; B 配方以 Cu-10Sn 为基, 加入 WC, Fe 及 Ni 粉和少量的 Co 及 Cr 粉。

抗弯强度试验样品尺寸制成 40 mm × 8 mm × 6 mm, 切割试验用刀头尺寸制成 40 mm × 3.2 mm × 6.5 mm, 金刚石体积分数为 8%。热压烧结工艺见表 1。

表 1 实验用配方热压工艺参数

Table 1 Parameters for hot pressing

Type	Temperature/℃	Pressure/MPa	Keeping time/s
A	900	25	80
B	870	25	80

在进行混凝土双刀头切割试验中, 切割对象为硬化 2 个月的混凝土板, 厚度为 7~ 8 cm, 沿混凝土纵向、横向放置若干直径为 6 mm 的钢筋, 切割条件见表 2。

表 2 切割试验条件

Table 2 Conditions for cutting concrete

Factors	Work condition
Forward speed/(cm·min ⁻¹)	90
Backward speed/(cm·min ⁻¹)	900
Cutting depth per turn/mm	1.8
Diameter of saw blade/mm	350
Peripheral speed of saw blade/(m·s ⁻¹)	35
Coolant	Water

① [收稿日期] 2000- 05- 29; [修订日期] 2000- 09- 25

[作者简介] 朱永伟(1967-), 男, 高级工程师, 博士。

2 结果与讨论

2.1 材料的断裂强度

三点弯曲试验加载时的应力状态从受拉的一侧来看,基本上与静拉伸时的状态相同,因而常用来测定铸铁、硬质合金等脆性材料的断裂强度^[4]。

表 3 为空白胎体、加入未镀钛金刚石与加入镀钛金刚石后试样的三点弯曲试验结果。

从表 3 可以发现,加入金刚石后,胎体的抗弯强度均比空白胎体的低;而加入镀钛的金刚石后胎体的抗弯强度与未镀钛的相比,均有不同程度的提高,对于钴基胎体, σ_{bb} 提高了 3.2%; 而对于 Cu-Sn 基胎体,则提高了 4.1%。

若金刚石的体积浓度为 φ , 则长度方向的平均线密度为 $\sqrt[3]{\varphi}$, 任意截面上金刚石的平均面密度为 $\sqrt[3]{\varphi}$, 现考虑图 1 状况下复合材料的拉伸断裂强度。根据复合材料的加和效应^[5]可知:

$$\sigma_b = \sigma_{b0}(1 - S_d) + \sigma_d S_d$$

(1)

式中 σ_b , σ_{b0} , σ_d 分别为复合材料、基体和金刚石的断裂强度; S_d 为金刚石的面积分数。

由于材料弯曲试验中受拉一侧的应力状态与静拉伸时状态相同,故关于 σ_b 的讨论同样也适用于 σ_{bb} , 即

$$\sigma_{bb} = \sigma_{bb0} \times (1 - S_d) + \sigma_{bbd} \times S_d$$

(2)

式中 σ_{bb} , σ_{bb0} , σ_{bbd} 分别为复合材料、基体和金刚石的抗弯强度。

当金刚石表面未镀钛层时,金刚石与胎体之间无多大结合力,金刚石部分相当于孔洞,外界加到试样上的力全部落到基体部分,此时有

$$\sigma_{bb} = \sigma_{bb0}(1 - S_d)$$

(3)

实验中,金刚石的体积分数为 8%,根据上面的论述,其平均面密度为 0.186,按照式(3)计算,

A, B 配方加入未镀钛金刚石后胎体的抗弯强度 σ_{bb} 应分别为 729 MPa 和 771 MPa,与实验中得出的结果 735 MPa 和 760 MPa 相近,前者的实验值稍高于计算值,后者的实验值稍低于计算值。这是由于 A 配方中,钴含量相当高,金刚石与钴之间形成了钴的碳化物和钴与碳的固溶体,由于它们的存在,使金刚石与钴基胎体之间形成了少量的冶金结合^[6],从而提高了其抗弯强度。而 Cu-Sn 基胎体与金刚石界面没有冶金结合力,加上两者之间有一定的间隙,使不受力部位大小稍大于金刚石本身的体积,因而其抗弯强度值稍小于理论值。

当表面镀钛后的金刚石加入到胎体中后,由于钛一方面与金刚石形成岛状或层状 TiC^[3],另一方面又与 Cu, Fe, Ni, Co 等元素互相扩散,形成有限固溶体(见图 2),使金刚石与胎体之间的结合强度得到了改善。式(2)可改写为

$$\sigma_{bb} = \sigma_{bb0}(1 - S_d) + K \sigma_{bbd} S_d$$

(4)

式中 $0 < K < 1$, 与金刚石表面状况、粒度、胎体成分及烧结工艺等参数有关。从实验结果也可以看出,对于 A, B 配方, σ_{bb} 值分别提高了 3.2% 和 4.1%。

图 3 是金刚石镀钛和未经处理加入到 A, B 配方后抗弯强度样品的断口微观形貌。由图可知,无论是 Cu-Sn 基胎体,还是钴基胎体,加入未镀钛的金刚石胎体断面上(见图 3(a), (c)), 金刚石脱落后形成的脱落坑边缘形状极其平直;而金刚石镀钛后加入胎体,断面上金刚石的脱落坑边缘极不平直(见图 3(b), (d)), 表明金刚石脱落时带走了部分金属胎体,由此说明,镀钛后,金刚石与胎体之间形成了某种比较牢固的冶金结合,这与 σ_{bb} 试验结果是相对应的。将金刚石表面镀钛后加入胎体中,胎体的 σ_{bb} 值比金刚石未经处理而直接加入胎体中分别提高了 3.2% 和 4.1%。

图 4 则是金刚石表面和金刚石脱落而留下的脱落坑的扫描电镜定性成分分析。但通过对 Cu-Sn 基

表 3 抗弯强度试验结果

Table 3 Results of transverse rupture strength

T type	TRS σ_{bb} /MPa				Improvement of σ_{bb} after diamond coated with titanium/ %
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Average	
A, Segments without diamond	902	896	889	896	
A, Segments with uncoated diamond	760	715	731	735	3.2
A, Segments with Ti coated diamond	778	745	743	759	
B, Segments without diamond	943	976	925	948	
B, Segments with uncoated diamond	754	759	766	760	4.1
B, Segments with Ti coated diamond	793	788	793	791	

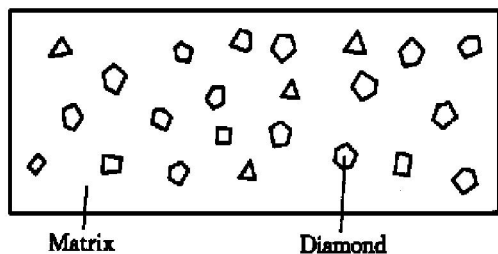


图 1 金属/金刚石复合材料的分布示意图

Fig. 1 Distribution of metal/ diamond composite

胎体中金刚石表面及其脱落坑的各元素相对含量对比分析, 可以发现: 尽管配方中 Cu-10Sn 及 WC 的含量在 30% 以上, Fe, Ni 和 Co 各占 10% 左右, Cr 含量只有 2%~3%, 但在金刚石表面, Fe, Ni, Co, Cr 元素明显富集; 图 4(a), (c) 中, Fe, Ni, Co, Cr 含量超过了 Cu, Sn 的含量, 而在图 4(a) 中, 更是未觅到 Sn 的成分峰。图 4(b) 和 (d) 谱线亦不相同, 说明金刚石表面镀钛与否, 直接影响到与金刚石相邻的胎体的成分分布。在热压条件下, 一些碳化物形成元素如 Fe, Co, Cr 等可与金刚石形成如 Fe_3C , Co_3C , Cr_3C_2 , Cr_{23}C_6 等碳化物^[7, 8], 并牢固地粘附

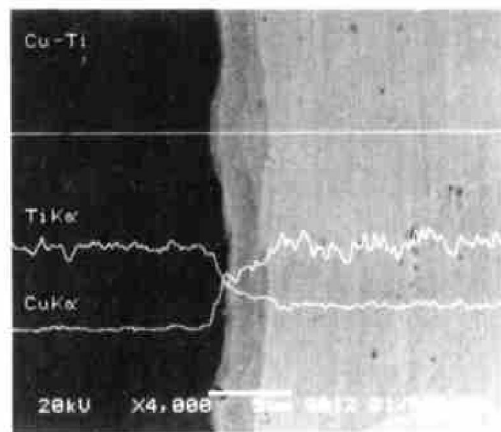


图 2 钛片与 Cu 粉热压后的扩散层照片

Fig. 2 Photograph of diffusion between titanium plate and copper powders
(Temp= 800 °C, p = 18 MPa, Time= 120 s)

在金刚石表面, 而 Cu, Sn 等元素在热压条件下无法与金刚石发生反应, 即使机械地粘附在金刚石表面, 也会在断裂过程中从表面撕脱下来, 因而减弱了其结合强度。图 4(a) 由于镀钛层的存在, 在热压条件下, Ti 可与金刚石形成 TiC, 同时, Fe, Ni,

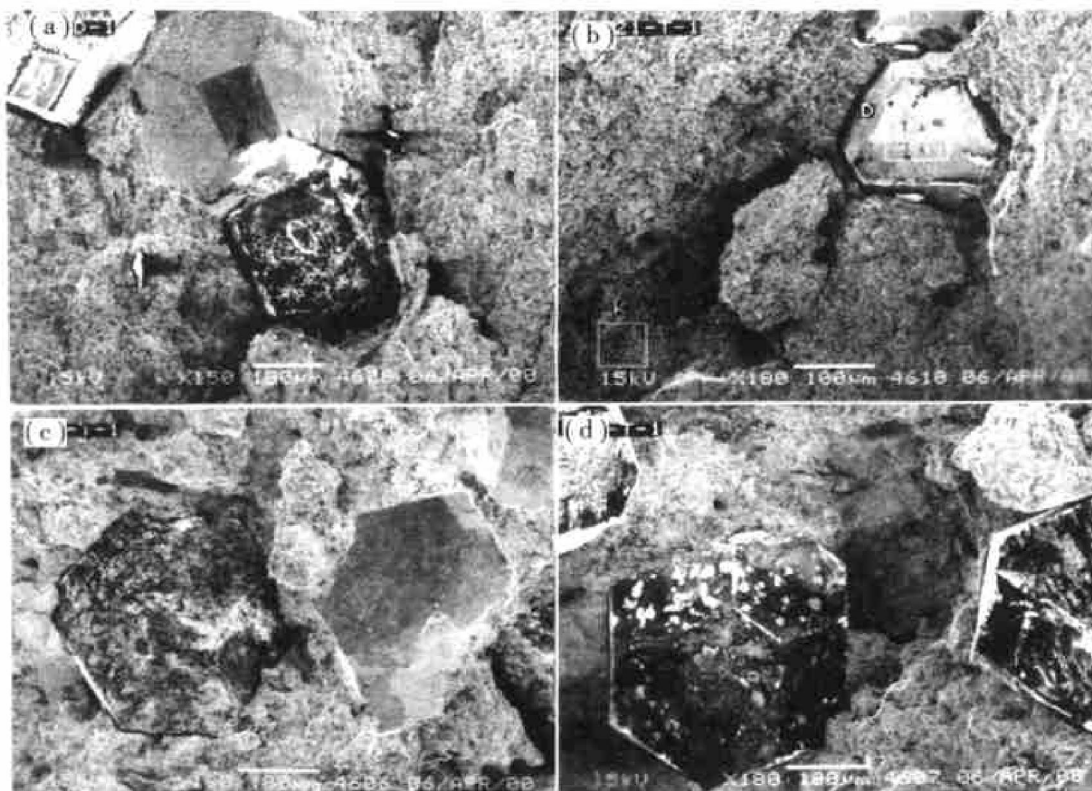


图 3 抗弯强度试验样品断口微观形貌

Fig. 3 Fractographs of samples for TRS

- (a) —Co based segment, uncoated diamond; (b) —Co based segment, Ti coated diamond;
(c) —Cu-Sn based segment, uncoated diamond; (d) —Cu-Sn based segment, Ti coated diamond

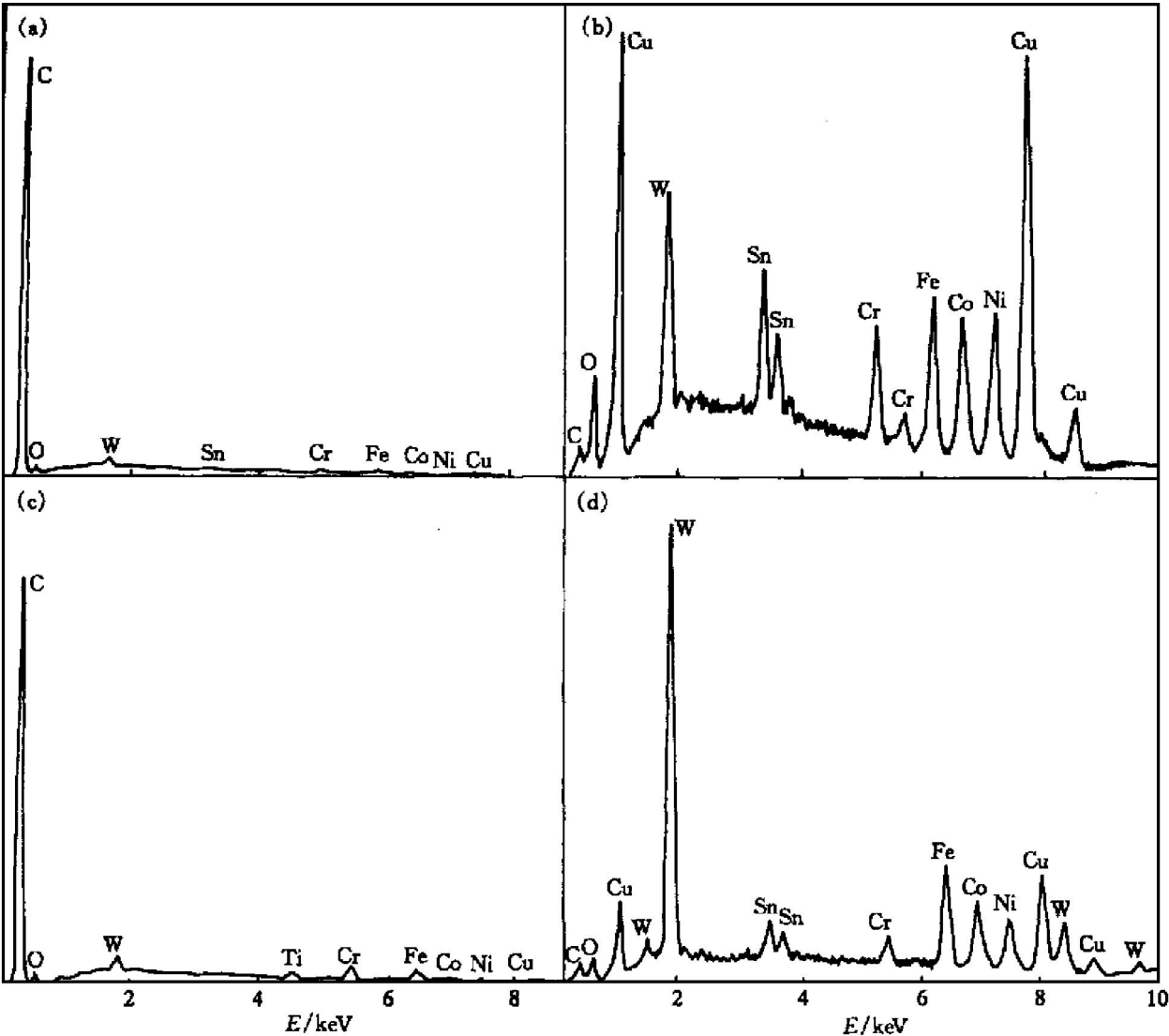


图 4 金刚石表面和脱落坑扫描电镜成分分析

Fig. 4 Composition of diamond surface and fell-out pits
(a) —Surface of Ti-coated diamond; (b) —Fell-out pit of Ti-coated diamond;
(c) —Surface of uncoated diamond; (d) —Fell-out pit of uncoated diamond

Co, Cr 等元素通过扩散, 与 Ti 形成固溶体, 如果条件合适, 可进一步与金刚石直接接触生成碳化物, 增强了胎体与金刚石的结合强度。

2.2 混凝土切割试验

为了确保实验的可靠性, 材料单次切割面积都超过了 0.4 m², 最后以刀头平均高度下降 1 mm 时切割混凝土的面积来衡量刀头的性能。从表 4 可知, 金刚石镀钛后, A, B 配方的刀头性能均有大幅度的提高, 各提高了 47.0% 和 20.1%。由于金刚石刀头的性能取决于金刚石与胎体性能的相互匹配, 刀头在工作过程中, 在切削混凝土的同时, 其本身也受到了磨损, 如: 金刚石磨粒粘附混凝土而引起的剪切磨损; 硬粒子对金刚石表面的摩擦磨损; 工

件与金刚石发生化学反应而引起的金刚石强度或硬度损伤以及由于机械或热过载而引起的金刚石磨粒破碎。在正常的加工条件下, 金刚石会经历“出露→磨平→局部破碎→脱落”四个阶段^[9]。切割工件时形成的碎屑和冷却液混合在一起, 对胎体产生了包括冲蚀磨损和摩擦磨损等复杂的磨损现象^[10]。如果两者同步磨损的话, 工具具有最优的表现; 如果胎体磨损过快, 金刚石没有完全发挥作用就会脱落下来; 如果金刚石表现出过长的磨平期, 首先刀具的锋利度受到严重影响, 其次金刚石也会未完全发挥作用就脱落, 从而影响工具的寿命; 如果胎体磨损过慢, 金刚石就很难出露, 因此很难达到一定的锋利度。Beers 给出了 SDA100+ 和 SDB1000 金刚石品种的磨损机制示意图^[11], 方便用户对金

表 4 不同胎体刀头性能试验结果

Table 4 Cutting results of different saw blades

Diamond type	Segment height before cutting [*] / mm	Segment height after cutting/mm	Area cutting/m ²	Life/(m ² •mm ⁻¹)
A, Uncoated	6. 21	4. 09	0. 423	0. 200
A, Coated with Ti	6. 13	4. 64	0. 437	0. 293
B, Uncoated	6. 34	4. 59	0. 444	0. 254
B, Coated with Ti	6. 15	4. 70	0. 442	0. 305

^{*} Heights are calculated from the mass of segments

金刚石的选择。金刚石镀钛之后, 由于隔离(或者部分隔离) 了金刚石与外界的联系, 有效地减少了金刚石的石墨化趋势, 大大减少了它和 Fe, Co 及 Ni 元素形成固溶体的机会, 使金刚石在热压之后强度降低较少, 加上镀附层对金刚石表面缺陷的弥合, 使金刚石强度比镀钛前有所提高。

从表 5 可以看出, 由于镀附了钛层, 室温下金刚石强度比原来有所提高, 高温热压后的金刚石静压强度与同类相比, 有大幅度的提高, 在 A, B 配方中, 950 ℃热压后, 金刚石强度与未镀钛金刚石在室温下的静压强度相当, 因此可以说, 金刚石镀附钛层后, 相当于提高了金刚石的档次。

表 5 热压后金刚石静压强度变化

Table 5 Strength change of diamond after hot pressing

Temp. / ℃	Strength/ N			
	A		B	
	Uncoated	Coated with Ti	Uncoated	Coated with Ti
25	130	141	130	141
750	127	140	127	141
850	120	138	115	136
900	112	135	108	135
950	101	130	98	125

金刚石镀钛后, 还使金刚石与胎体之间的结合力增加, 这在抗弯强度的试验结果及其断面的扫描电镜观察中得到了证实。在金刚石本身强度足够的情况下, 可以提高金刚石的出露高度, 提高切割效率, 减少胎体磨损, 从而提高了工具寿命。通常认为, 金刚石的出露高度与其粒度比值(β) 越高, 说明胎体对金刚石的包镶能力越好。胡焕校^[12] 在研究中发现, 一般胎体的 β 值在 1/3 左右, 图 5 中的金刚石出露系数 β 值估计为 0. 42 以上(根据图中的出露高度与所加 155~ 157 μm 金刚石的上检查筛的尺寸估计而得), 有了较大幅度的提高, 由于上述几条原因, 使金刚石镀钛后 A, B 配方刀头寿命有了大幅度的提高, 锋利程度也有所改善。

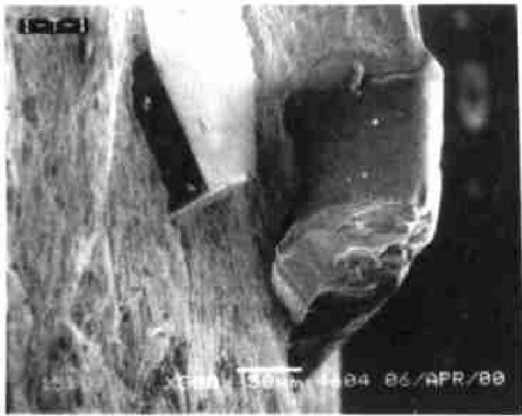


图 5 钴基镀钛金刚石刀头的磨粒工作状态

Fig. 5 Working situation of diamond in Co based segment

3 结论

- 1) 金刚石镀钛后, 与胎体的结合强度得到了改善, 抗弯强度有了一定程度的提高, 并用复合材料的强度模型初步解释了抗弯强度的试验结果。
- 2) 金刚石镀钛后, 隔绝(或部分隔绝) 了其 与胎体中 Fe, Co, Ni 等有催化作用的元素的接触, 减少了金刚石的石墨化以及 与它们形成没有牢固结合力的固溶体的趋势, 使金刚石热压后强度降低得到了控制; 同时, 其出露高度有所提高, 锋利度得到改善, 胎体磨损减少, 从而提高了其使用寿命。

[REFERENCES]

[1] ZANG Jian-bing(臧建兵), WANG Yarr-hui(王艳辉) and WANG Ming-zhi(王明智). 金刚石热稳定性的几个方面和影响因素的探讨 [J]. Diamond and Abrasives Engineering(金刚石与磨料磨具工程), 1997(5): 5-7.

[2] Naidich Yu V. Metal and alloy bond strengths to diamond [J]. Industrial Diamond Review, 1984(6): 327-331.

[3] ZANG Jian-bing(臧建兵), WANG Yarr-hui(王艳辉) and WANG Ming-zhi(王明智). Ti, Mo, W, Cr 及其

- 合金镀层与超硬磨料之间结合性能的研究 [J]. *Diamond and Abrasives Engineering* (金刚石与磨料磨具工程), 1997(2): 6– 8.
- [4] SU De-lin(束德林). *Mechanical Properties of Metals* (金属力学性能) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987. 11.
- [5] YU Shun-hai(余顺海) and TAO Yu-zhang(唐羽章). *Composite Mixture* (混杂复合材料) [M]. Changsha: National Defence University of Science and Technology Press, 1987. 9.
- [6] Molinali A. Study of the diamond-matrix interface in hot-pressed cobalt-based tools [J]. *Materials Science and Engineering*, 1990, A130: 257– 261.
- [7] WANG Feng-rong(王凤荣), ZHANG Jiu-yuan(张晋远) and ZHU Rui-zheng(朱瑞珍). 关于钴基胎体材料对金刚石具有高把持力机理的研究 [J]. *Diamond and Abrasives Engineering* (金刚石与磨料磨具工程), 1998 (4): 2– 6.
- [8] LI Cheng-hui(李晨辉). 金刚石锯切过程中几个基本问题的研究 [D]. Changsha: Central South University of Technology, 1999.
- [9] Tonshoff H K and Asche J. An indicator system for saw grit [J]. *Industrial Diamond Review*, 1997(1): 7– 13.
- [10] HU Huan-xiao(胡焕校) and LIU Jing(刘 静). 金刚石锯片胎体的耐磨性 [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2000, 10 (3): 400– 403.
- [11] Davis P R, Fish M L, Peacock S, et al. Wear of metal-bond diamond tools in the machining of stone [J]. *Industrial Diamond Review*, 1996(3): 84.
- [12] HU Huan-xiao(胡焕校). 金刚石锯片刀头优化设计的研究与应用 [D]. Changsha: Central South University of Technology, 1998.

Effect of Ti-coated on diamond surface on properties of diamond saw blade

ZHU Yong-wei^{1, 2}, ZHANG Xin-ming¹, XIE Gang-zuo²

(1. Department of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, P. R. China;

2. Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, Changsha 410012, P. R. China)

[Abstract] The effects of Ti-coated on diamond surface on transverse rupture strength (TRS) of Co based and Cu-Sn based samples and the cutting performance of saw blades were investigated. The results show that the TRS increases when using Ti-coated diamond and that the tool lives of Co based and Cu-Sn based saw blade with Ti-coated diamond were 47.0% and 20.1% longer than that of those with uncoated diamond, respectively. Scanning electron microscopy (SEM) photographs confirm that a metallurgical bonding layer exists when diamond is coated with titanium, which improves the bonding strength between diamond and matrix and impedes aggressive chemistry reaction between them.

[Key words] Ti-coated diamond; tool life; cutting efficiency

(编辑 龙怀中)