

文章编号: 1000-5773(2004)01-0053-06

# PDC 材料烧结过程中钴在金刚石层中的 扩散熔渗迁移机制\*

邓福铭<sup>1</sup>, 陈启武<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京校区)材料科学与工程系, 北京 100083;  
2. 长沙矿冶研究院, 湖南长沙 410012)

**摘要:** 讨论了 PDC 材料烧结过程中钴在金刚石层中的固相扩散、钴液熔渗、两次钴高浓度峰的“波浪”式迁移过程中的运动规律及其作用机制, 并根据实验观测的数据进行了有关计算。结果表明: 在 5.8 GPa、1300 °C 条件下, 钴的扩散系数  $D \approx 1.6 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 是一般常压及相同温度条件下钴固相扩散系数 ( $3 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ ) 和相同压力条件下钴的液相扩散系数 ( $5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ ) 的中间值; 对于粒度  $W \geq 10 \mu\text{m}$  的金刚石烧结体系, 钴液熔渗作用时间非常短暂, 略大于 0.5 s, 而对于  $W \leq 1 \mu\text{m}$  的超细金刚石烧结体系而言, 钴熔渗作用时间为 28 s, 比粒度  $W \geq 10 \mu\text{m}$  的金刚石烧结要长得多; 两次钴高浓度峰的迁移速度分别约为 50  $\mu\text{m}/\text{s}$  和 100  $\mu\text{m}/\text{s}$ 。

**关键词:** 聚晶金刚石复合片(PDC); 烧结; 扩散; 熔渗

**中图分类号:** O791 **文献标识码:** A

## 1 引言

在硬质合金基体上高压高温烧结一层厚度为 0.3~0.7 mm 的金刚石微粉, 让硬质合金中的钴熔融并以波浪方式扫越推移金刚石层, 使金刚石再结晶并在再结晶过程中交互生长在一起。这种方法后来被称之为扫越式催化再结晶法, 即 STCR 法 (Sweep through Catalyst Recrystallization)。其典型产品 Compax<sup>[1~3]</sup> 以大量形成的金刚石-金刚石 (D-D) 结合为主要特征, 具有高的耐磨性, 已在石油地质勘探、机械加工等领域得到广泛的应用。STCR 法的关键是解决钴在金刚石层中的均匀扩散问题, 使钴在扩散迁移过程中, 使金刚石再结晶生长聚结在一起。因此深入了解 PDC (Polycrystalline Diamond Compacts) 材料烧结过程中钴在金刚石层中的扩散熔迁过程、规律及其机制, 对于更深入地了解 PDC 材料烧结过程与机理以及更合理地控制烧结工艺, 都具有十分重要的意义。作者采用停热卸压快速冷却固化实验技术, 获得了同一烧结压力下不同温度烧结的 PDC 材料样品 (见图 1), 在文献 [4] 中观察到 PDC 材料烧结中钴在金刚石层中的钴固相扩散、钴液熔渗、两次钴高浓度峰在金刚石层中的“波浪”式

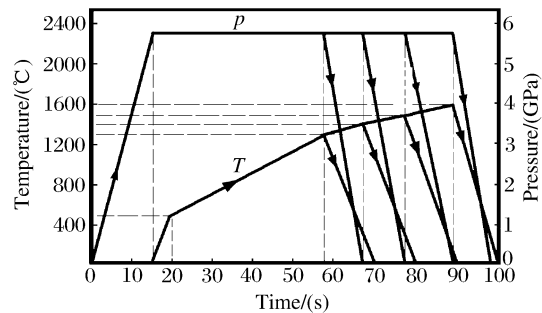


图1 PDC 材料超高压烧结工艺实验曲线图<sup>[4]</sup>  
Fig. 1 Diagram of high pressure and high temperature sintering of diamond<sup>[4]</sup>

\* 收稿日期: 2003-04-30; 修回日期: 2003-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50342017); 北京市自然科学基金项目

作者简介: 邓福铭 (1963—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 金刚石、碳纳米材料及其复合材料研究。

E-mail: dfm@cumtb.edu.cn

迁移过程;发现在钴-碳共晶点以下(1300 °C)烧结的样品,虽然此时钴液熔渗过程尚未开始,但在距硬质合金基体界面 150  $\mu\text{m}$  左右的金刚石层中检测到已有钴扩散存在;而在 1400 °C 和 1600 °C 烧结样品的金刚石层中,观察到钴的高浓度峰宽度分别约为 100  $\mu\text{m}$  和 50  $\mu\text{m}$ (见图 2)。本文在文献[4]的基础上进一步探讨 PDC 材料烧结过程中,钴在金刚石层中的钴固相扩散、钴液熔渗、两次钴高浓度峰在金刚石层中的“波浪”式迁移过程中的运动规律及其作用机制问题,根据上述实验观察到的数据进行了进一步的分析计算,以期对 PDC 材料超高压高温烧结过程有更深入的了解。

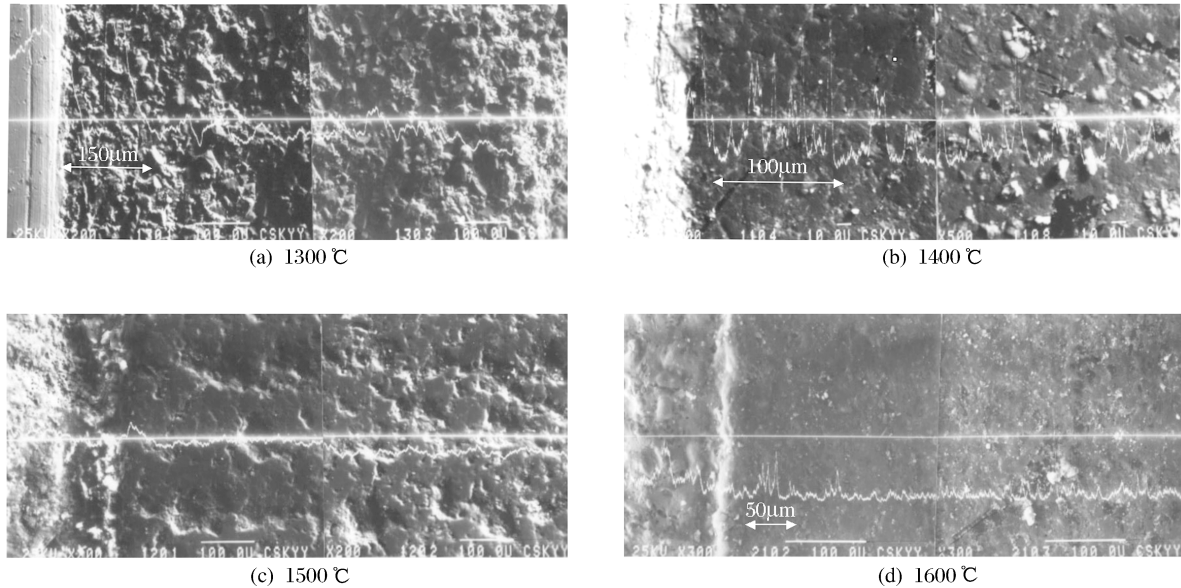


图 2 在 5.8 GPa、W10、不同温度烧结的 PDC 样品中钴沿金刚石层的线分布(EDX, Co  $K_{\alpha}$ )分析结果<sup>[4]</sup>

Fig. 2 Distribution of cobalt concentration along the axial line in the polished section of samples (W10) sintered under 5.8 GPa and at different temperature (Co  $K_{\alpha}$  by EDX)<sup>[4]</sup>

## 2 金属钴在金刚石层中的扩散熔渗迁移机制

在金刚石-硬质合金系统超高压烧结过程中,金属钴在金刚石层中经历了固相扩散、熔渗、“波浪”式迁移三个基本阶段<sup>[4]</sup>,其中不同阶段由于动力学机制不一样,因而使其运动学规律也不一样。由于实验本身的对称性,可以假定不存在钴沿径向方向的扩散熔渗迁移,为处理问题的方便,可以将上述钴在金刚石层中的扩散熔渗迁移问题作为沿轴向( $x$  方向)的一维问题来处理(见图 3)。

### 2.1 钴的固相扩散过程

在 PDC 材料烧结中,由于实验组装结构决定硬质合金中的钴是通过金刚石层扩散到周边的钨管中。Co-Mo 相图<sup>[5]</sup>表明,在实验 Co、Mo 数量条件下,Mo 能吸收大量 Co 原子构成固溶体。因此可以对钴扩散的边界条件不作任何处理,而认为是无限扩散的。根据 Fick 第二定律,可写出沿  $x$  轴方向钴扩散的连续方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: $C$  为钴浓度,为金刚石、钴两相中钴的含量; $t$  为扩散时间; $D$  为钴的扩散系数。

由于烧结过程中扩散钴的质量保持不变,且假定硬质合金中有充足的钴供扩散用,可把图 3 所示当

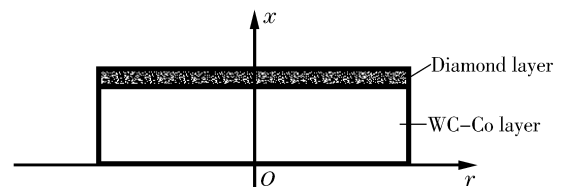


图 3 PDC 材料烧结中 Co 扩散熔渗示意图  
Fig. 3 Schematic diagram for cobalt diffusion and infiltration during the sintering process of PDC material

作半无限长棒的扩散问题来处理。此时扩散的边界条件为:  $t=0, x>0, C=0$ ;  $t>0, x=0, C=C_0$ 。则(1)式的误差函数解为

$$C(x, t) = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (2)$$

在(2)式中若已知扩散系数  $D$ , 则可计算出在  $x$  处  $t$  时刻的钴浓度。然而在超高压高温条件下, 实验测定金刚石-钴系统中钴的扩散系数是很困难的。而这一工作对于高压物理研究及实际超高压合成又具有特别重要的意义, 因此国内外学者非常重视有关方面的研究。在本实验条件下, 从钴的表面扩散温度  $0.3T_m \approx 450^\circ\text{C}$  升温到  $1300^\circ\text{C}$  大约需要  $40\text{ s}$ (见图 1), 由图 2(a) 的测试结果可以看出, 在约  $40\text{ s}$  的时间内, 钴已扩散到离界面  $150\ \mu\text{m}$  左右, 那么根据(2)式, 由  $C(x, t)=0$  得出:  $\operatorname{erf}[x/(2\sqrt{Dt})]=1$ , 查表得  $x/(2\sqrt{Dt}) \geq 3$ 。若  $x/(2\sqrt{Dt})=3$ , 可初步估算出在  $5.8\text{ GPa}$ 、 $1300^\circ\text{C}$  条件下钴的扩散系数  $D = x^2/(36t) = (0.15 \times 10^{-1})^2/(36 \times 40) \approx 1.6 \times 10^{-7}\text{ cm}^2/\text{s}$ 。此值比一般常压下钴液相扩散系数  $5 \times 10^{-5}\text{ cm}^2/\text{s}$ <sup>[6]</sup> 低两个数量级, 比一般常压相同温度条件下钴扩散系数  $3 \times 10^{-10}\text{ cm}^2/\text{s}$  高 3 个数量级<sup>[7]</sup>, 差不多处在两者之间。这可能与超高压状态下金刚石被挤压变形造成金刚石表面缺陷较多有关<sup>[8]</sup>, 具体原因尚待进一步深入研究。

## 2.2 钴熔渗过程

当烧结温度升到钴-碳共晶点以上时, 钴-碳共晶液形成, 钴熔体将在超高压作用下渗透浸入金刚石晶粒间隙。为讨论烧结过程中钴熔体在金刚石粉末中的熔渗规律, 我们假定: (1) 金刚石晶粒间隙中气相的流动压缩对钴熔体在金刚石空隙中渗流流动阻力可忽略不计; (2) 金刚石粉末层中各晶粒间隙连通成半径为  $R$  的毛细管; (3) 钴熔体沿毛细管半径的速度分布呈抛物线, 即在金刚石自由表面渗流速度低, 在晶粒间隙中心处渗流速度最大。根据 HaBe-CTOKCa 公式<sup>[9]</sup>

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{d^2L}{dt^2} = \frac{\Delta p}{\rho L} + \frac{2\sigma\cos\theta}{\rho RL} - \frac{4\eta}{\rho R^2} \cdot \frac{dL}{dt} \quad (3)$$

式中:  $L$  为钴熔渗深度,  $\text{m}$ ;  $\sigma$  为液态金属表面张力,  $\text{J}/\text{m}^2$ ;  $\theta$  为浸润角;  $\eta$  为钴熔体动力粘度系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $R$  为孔隙(毛细管)半径,  $\text{m}$ ;  $\rho$  为钴熔体密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。(3)式中的右边第一项为作用在钴熔体上的外压, 第二项为毛细管压力, 第三项为钴熔体在毛细管中流动的内摩擦力。随着钴熔渗过程进行, 钴扩散渗流速度  $dL/dt$  增高, (3)式第三项熔体内摩擦力增大, 当  $\tau = \rho R^2/(8\eta)$  时, 由于  $dL/dt$  提高, 钴熔体内摩擦力显著增大。(3)式左边惯性项  $dL^2/dt^2$  迅速地减小。当  $t \geq \tau$  时, 钴熔渗的主要动力外力  $\Delta p$  和毛细管力  $2\sigma\cos\theta/(\rho RL)$  与熔体内摩擦力最终达到平衡, 此时(3)式左边等于 0, 由此得到

$$\frac{4\eta}{R^2} \cdot \frac{dL}{dt} = \frac{1}{L} \left( |\Delta p| + \frac{2\sigma\cos\theta}{R} \right) \quad (4)$$

由  $t=0, L=0$ , 解上式得到

$$L^2 = \frac{R^2}{2\eta} \left( |\Delta p| + \frac{2\sigma\cos\theta}{R} \right) t \quad (5)$$

对于钴-碳熔体,  $\sigma_{L-v} = 1.8\text{ J}/\text{m}^2$ <sup>[10]</sup>。对原始晶粒为  $W10$  的金刚石粉末, 由于超高压碎化作用使实际晶粒间毛细管半径减小,  $R \approx 10\text{ nm} = 10^{-8}\text{ m}$ <sup>[9]</sup>。钴熔体在  $1495^\circ\text{C}$  时,  $\theta = 35^\circ$ <sup>[10]</sup>。将上述数据代入下式得出毛细管作用力

$$\frac{2\sigma\cos\theta}{R} = \frac{2 \times 1.8 \times \cos 35^\circ}{10^{-8}} \approx 3.1 \times 10^8 (\text{Pa}) = 0.31 (\text{GPa}) \quad (6)$$

由于  $|\Delta p|$  高达  $4.0\text{ GPa}$  以上, 显然相对  $|\Delta p|$  而言, 毛细管压力很小, 可忽略不计, 而认为此时钴熔体渗流的主要驱动力来自外压  $|\Delta p|$ 。

当原始晶粒采用  $W1 (W \leq 1\ \mu\text{m})$  时, 如果此时晶粒间隙处的毛细管平均半径也相应降低一个数量级, 即  $R = 1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$ , 此时毛细管作用力

$$\frac{2\sigma\cos\theta}{R} = \frac{2 \times 1.8 \times \cos 35^\circ}{10^{-9}} \approx 3.1 \times 10^9 (\text{Pa}) = 3.1 (\text{GPa}) \quad (7)$$

此时钴熔渗过程的毛细管作用力已接近超高压压力差  $|\Delta p|$  值, 毛细管作用力不可忽略。因此对于微细金

刚石粉末而言,钴熔渗的驱动力来自超高压差和毛细管力的共同作用。

对一般金刚石烧结体系而言,如原料粒度  $W10$ , 金刚石层厚  $1\text{ mm}$ , 在合成压力  $5.8\text{ GPa}$ 、温度  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  时,  $R=10^{-8}\text{ m}$ ,  $L=1\text{ mm}=10^{-3}\text{ m}$ ,  $|\Delta p|=4.0\text{ GPa}=4\times 10^9\text{ Pa}$ ,  $\eta=0.1\text{ Pa}\cdot\text{s}^{[9]}$ , 由(5)式忽略毛细管力作用可得到

$$t=2L^2\eta/(R^2|\Delta p|) \quad (8)$$

将上述数据代入(8)式得

$$t=\frac{2\times(10^{-3})^2\times 0.1}{(10^{-8})^2\times 4\times 10^9}=0.5(\text{s}) \quad (9)$$

也就是说钴熔体在超高压作用下,将在  $0.5\text{ s}$  的时间里就可浸润渗透整个金刚石粉末层,这个过程的作用时间是非常短暂的。当然由于上述模型是一种理想化模型,对于实际烧结过程而言,实际熔渗作用时间可能会长一些。因为:(1) 金刚石粉末形状并非球形,因而这些颗粒间隙组成的毛细管半径也不会是一半径为  $R$  的直通毛细管;(2) 高压腔体中内部压力场并非均匀一致,中心部位压力低于边缘部位,因而中心部位钴熔渗过程比边缘部分要慢一些;(3) 在实际熔渗过程中,存在钴熔体与金刚石表面强烈的相互作用,金刚石表面会发生石墨化及石墨化碳源溶解-扩散过程,这些过程对钴的熔渗过程有影响。据此作者估计对  $W\geq 10\text{ }\mu\text{m}$  的金刚石烧结体系而言,实际钴熔渗作用时间略大于  $0.5\text{ s}$ 。

对于  $W\leq 1\text{ }\mu\text{m}$  的超细金刚石烧结体系而言,如原料粒度为  $W1$  时,  $R=10^{-9}\text{ m}$ , 由(7)式知,此时作用在钴熔体上的毛细管力不能忽略。将上述已知数据代入(5)式得

$$t=\frac{2\times(10^{-3})^2\times 0.1}{(10^{-9})^2\times(4\times 10^9+3.1\times 10^9)}\approx 28(\text{s}) \quad (10)$$

这就是说,在原料粒度为  $W1$  的金刚石烧结体系中,钴熔渗作用时间比原料粒度为  $W10$  的熔渗作用时间要长得多。从(3)式中可知,毛细管作用力与毛细管半径  $R$  成反比,而钴熔体的内摩擦则与毛细管半径的平方成反比。因而原料金刚石粉末越细,则熔渗阻力越大,烧结中钴熔渗越困难,钴熔渗过程需要的时间越长。这可能是导致微细金刚石粉末烧结困难的主要原因。据此作者建议在  $W\leq 1\text{ }\mu\text{m}$  的微细金刚石粉末高压烧结时,其烧结作用时间至少要比粒度大于  $W10$  的一般粒度的金刚石烧结延长半分钟左右。

### 2.3 钴的“波浪”式迁移过程

设钴熔渗充满整个金刚石层颗粒间隙后,金刚石层中平均钴浓度为  $C_1$  (体积分数),一般情况下  $C_1=25\%\sim 35\%$ 。考虑在  $t=x/v$  时刻,金刚石聚晶生长面迁移到  $x$  处,以  $x$  为原点,在  $x$  轴同方向的  $\xi$  轴上,研究钴熔体中金刚石再结晶生长效应问题。此处的钴熔体析出金刚石并沉积在聚晶生长面生长,随后将析晶后的钴液少部分充填在已生长聚晶金刚石晶粒间隙,其余大部分钴液沿析晶的反方向排出,该处的钴浓度记为  $C(\xi, t)$ 。这一过程可写出如下方程<sup>[11]</sup>

$$\partial C/\partial t=D\nabla^2 C+v\nabla C \quad (11)$$

这是与时间有关的二阶偏微分方程,对于稳态  $\partial C/\partial t=0$ ,则上式可改写为

$$D\frac{d^2 C}{d\xi^2}+v\frac{dC}{d\xi}=0 \quad (12)$$

微分方程(12)的解为

$$C(\xi)=C_1\left[1+\frac{1-k}{k}\exp\left(-\frac{v}{D}\xi\right)\right] \quad (13)$$

式中: $k$  为结晶平衡分配系数,  $k=C_d/C_1$ ,  $k\approx 0.2$ ;  $C_d$  为已生长聚晶金刚石区的钴浓度(体积分数),一般情况下  $C_d=5\%\sim 8\%$ ;  $C_1$  为金刚石层钴熔渗区的钴浓度(体积分数),一般情况下  $C_1=25\%\sim 35\%$ ;  $v$  为聚晶金刚石法向生长推移速度,  $\text{m/s}$ ;  $D$  为钴液相扩散系数,  $D=5\times 10^{-5}\text{ cm}^2/\text{s}^{[6]}$ 。

(13)式表明,在钴熔渗充满金刚石颗粒间隙后,在钴的“波浪”式迁移过程中存在三种钴的分布区:(1) 金刚石层钴熔体熔渗区,  $C=C_1$ ;(2) 已生长聚晶金刚石区,  $C_d=kC_1$  ( $k\approx 0.2$ ), 钴浓度很低;(3) 而在距聚晶金刚石生长界面  $\xi$  区域内,会形成一定宽度的钴高浓度分布区:  $C(\xi)=C_1\{1+[(1-k)/k]\cdot \exp(-v\xi/D)\}$ , 其宽度  $\xi$  可按下式计算

$$\frac{v}{D}\xi = 1, \text{ 即 } \xi = \frac{D}{v} \quad (14)$$

从(14)式可以看出,由金刚石再结晶生长形成的钴浓度峰的宽度取决于钴液扩散系数和聚晶金刚石生长推移速度。钴扩散系数在一定条件下为定值,因此钴峰宽度取决于聚晶生长面推移速度。而聚晶生长面推移速度又受金刚石-钴系统中金刚石溶解-扩散-再结晶-析出生长过程控制。即由钴熔体中碳的体扩散、析晶后的金刚石碳被生长面吸附、表面扩散、最后结合在生长台阶这一复杂的晶体生长过程所决定。然而要想实际测得烧结过程中聚晶金刚石生长面的推移速度是很困难的。由(14)式可知,若能测得钴峰的宽度  $\xi$ ,则可计算聚晶生长面的推移速度  $R$  值,亦即可知钴峰推移速度。作者的烧结实验表明,两次钴的“波浪”式推移存在钴高浓度峰,峰宽分别约为  $100 \mu\text{m}$  和  $50 \mu\text{m}$ (见图 2),由此大致可估算出这两个阶段钴峰的推移速度,亦即聚晶金刚石生长面的法向推移速度

$$v_1 = \frac{D}{\xi_1} = \frac{5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}}{100 \times 10^{-6} \text{ m}} = 5 \times 10^{-5} \text{ m/s} \quad (15)$$

$$v_2 = \frac{D}{\xi_2} = \frac{5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}}{50 \times 10^{-6} \text{ m}} = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s} \quad (16)$$

从(15)式、(16)式的计算结果可以看出,本实验在聚晶晶粒异常长大过程中的生长推移速度大约是聚晶金刚石结构形成过程中的生长推移速度的两倍。这说明提高烧结温度可显著提高系统的反应速率,因此在 PDC 材料烧结过程中,为防止晶粒异常长大,应严格控制烧结温度。

### 3 结 论

(1) 在  $5.8 \text{ GPa}$ 、 $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下,钴的固相扩散系数  $D \approx 1.6 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。此值比相同压力下钴的液相扩散系数低两个数量级,比一般常压下同温度条件下钴固相扩散系数高 3 个数量级,差不多处在两者之间。这可能与超高压状态下金刚石被挤压变形,造成金刚石表面缺陷较多有关。

(2) 对  $W \geq 10 \mu\text{m}$  的金刚石烧结体系而言,钴熔渗作用时间是非常短暂的,略大于  $0.5 \text{ s}$ 。而对于  $W \leq 1 \mu\text{m}$  的超细金刚石烧结体系而言,钴熔渗作用时间为  $28 \text{ s}$ ,比  $W \geq 10 \mu\text{m}$  的金刚石烧结体系要长得多。原料金刚石粉末越细,则熔渗阻力越大,烧结中钴熔渗作用时间越长。因此作者建议在  $W \leq 1 \mu\text{m}$  的超微金刚石粉末高压烧结时,其烧结作用时间至少要比粒度  $W \geq 10 \mu\text{m}$  的金刚石烧结延长半分钟左右。

(3) 在钴熔渗充满金刚石颗粒间隙后,钴的“波浪”式迁移过程中存在三种钴浓度分布区:① 金刚石层钴熔体熔渗区,  $C=C_1$ ;② 已生长聚晶金刚石区,  $C_d=kC_1$ ;③ 聚晶金刚石生长面钴的高浓度分布区,  $C(\xi)=C_1\{1+[(1-k)/k]\exp(-R\xi/D)\}$ 。这种钴的高浓度分布区是钴熔体中金刚石再结晶析出生长过程造成的,其中钴熔体中碳的浓度  $\Delta C$  以及腔体中的温度梯度  $\text{grad } T$  是烧结过程中钴高浓度区“波浪”式迁移的主要推动力。

(4) 在本实验中两次钴的“波浪”式迁移速度即聚晶金刚石生长面的正常生长和异常生长法向迁移速度分别为  $50 \mu\text{m/s}$  和  $100 \mu\text{m/s}$ 。后者的生长推移速度大约是前者的两倍。因此在 PDC 材料烧结过程中,为防止晶粒异常长大,应严格控制烧结温度。

### References:

- [1] Katzman H, Libby W F. Sintered Diamond Compacts with a Cobalt Binder [J]. Science, 1971, 172: 1132-1134.
- [2] Wentorf R H. Diamond Tools for Machining [P]. USP3,745,623.
- [3] Gigl P D. Sweep through Process for Making Polycrystalline Diamond Compacts [P]. USP 4,518,659.
- [4] Deng F M, Ma F, Chen Q W. Diffusion and Infiltration Process of Cobalt through Diamond Layer during the Sintering of Polycrystalline Diamond Compact [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2003, 32(4): 185-189. (in Chinese)  
邓福铭, 马 峰, 陈启武. PDC 材料烧结中钴在金刚石层中的扩散熔渗迁移过程研究 [J]. 人工晶体学报, 2003, 32(4): 185-189.

- [5] Smithells, Metals Reference Book, Vol. 1(2nd ed) [Z]. Pittsburgh: Carnegie Press, 1985. 422.
- [6] Ding L Y, Luo X J, Wakatsuki M, et al. Transportation of Carbon in High Pressure Flux and Its Effect on Diamond Growth [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1994, 8(2): 146–152. (in Chinese)  
丁立业, 罗湘捷, 若木规雅男, 等. 金刚石生长的高压溶剂中碳的运输及其影响 [J]. 高压物理学报, 1994, 8(2): 146–152.
- [7] Hou Z S, Lu G X. Principles of Metals and Alloys [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1993. 118. (in Chinese).  
侯增寿, 卢关熙. 金属学原理 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1993. 118.
- [8] Deng F M, Chen Q W, Huang P Y. On the Crushing Rules of Diamond Powders under Ultra High Pressure [J]. Superhard Material Science and Engineering, 1998, 4: 9–15 (in Chinese).  
邓福铭, 陈启武, 黄培云. 金刚石粉末超高压挤压破碎规律研究 [J]. 超硬材料与工程, 1998, 4: 9–15.
- [9] Елютин В Л, Поляков В Л, Шалимов М Д, и др. Исследование Процесса Образования Поликристаллических Алмазов [J]. Химическая Технология, 1984, 275(1): 135–139.
- [10] Наёдич Ю В, Колесниченко Г А. The Interaction between Molten Metals and Diamond or Graphite (translated by Lu Z T) [J]. Journal of Synthetic Crystals, 1978, 11(1): 15–71 (in Chinese).  
奈基奇 Ю В, 科列斯尼钦科 Г А. 熔融金属与金刚石和石墨表面的相互作用(续)(卢照田译) [J]. 人工晶体, 1978, 11(1): 15–71.
- [11] Xu J A, Zhao Y X. On Mechanism of the Movement of Metallic Catalyst during the Growth Process of Polycrystalline Diamond [J]. Physics, 1976, 18(5): 479–482. (in Chinese).  
徐济安, 赵有祥. 多晶金刚石生长中金属触媒推移现象的机制 [J]. 物理, 1976, 18(5): 479–482.

## Diffusion and Infiltration Mechanisms of Cobalt through Diamond Layer during the Sintering of Polycrystalline Diamond Compacts

DENG Fu-Ming<sup>1</sup>, CHEN Qi-Wu<sup>1,2</sup>

(1. Department of Materials Science and Engineering, Beijing Campus, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;  
2. Changsha Institute of Mining and Metallurgy, Changsha 410012, China)

**Abstract:** The mechanisms of solid cobalt diffusion, molten cobalt infiltration and two wave-like cobalt peaks movement through diamond layer during the sintering process were discussed theoretically according to the experiment data. Results show that the solid cobalt diffusion coefficient under 5.8 GPa and at 1300 °C is about  $1.6 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ , which is almost the mean value between the solid cobalt diffusion coefficient ( $3 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ ) at the same temperature under atmospheric pressure and the liquid cobalt diffusion coefficient ( $5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ ) under 5.8 GPa and at 1300 °C. It also shows that the infiltration time of molten cobalt through diamond layer for diamond grain size 10  $\mu\text{m}$  and 1  $\mu\text{m}$  are about 0.5 s and 28 s respectively, and the moving velocity of the two wave-like cobalt peaks were about 50  $\mu\text{m}/\text{s}$  and 100  $\mu\text{m}/\text{s}$ , respectively.

**Key words:** polycrystalline diamond compacts (PDC); sintering; diffusion; infiltration