

文章编号: 1006-9941(1999)01-0038-07

# 炸药爆轰法制备纳米金刚石

金增寿<sup>1</sup>, 徐康<sup>2</sup>

(1. 甘肃省化工研究院, 甘肃 兰州 730020)

(2. 中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑开发研究实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**介绍了用炸药爆轰制备纳米金刚石的方法和产品的性质。讨论了制备和后处理过程的各种因素对制备结果和产品性质的影响。同时,还介绍了这种金刚石粉的一些应用,讨论了它的应用前景。

**关键词:** 金刚石; 制备; 炸药爆轰; 应用

**中图分类号:** TQ 560.71

**文献标识码:** A

## 1 引言

利用负氧平衡含碳炸药,或其它含碳添加物的炸药,使其在一个充有惰性介质封闭爆炸容器内爆炸,以生成纳米尺寸的金金刚石颗粒。这种方法无论在原理上还是在制备工艺上,都不同于由石墨相变生成金刚石的爆炸冲击法。前者是化学反应过程,而后者是相变过程。这是80年代后期出现的制备金刚石的新方法,其产品——纳米金刚石是合成金刚石的一个新品种。

1988年原苏联和美国的科学家<sup>[1,2]</sup>报道了该工作的进展情况。1992年以来徐康、金增寿等人<sup>[3-5]</sup>在其制备、分离、分散和应用等方面开展了研究工作,已发表了一篇综述文章<sup>[6]</sup>。

该技术中常用的炸药是TNT与RDX或HMX的混合物,所使用的爆炸室容积为0.2~3m<sup>3</sup>,爆炸装药量为0.1~2.0kg,爆炸容器中需要充填一些气相或液相介质,以便对爆轰产物中的金刚石进行冷却和保护,比较常用的介质有二氧化碳和水等。据报道,有人在直径为12m的爆炸室中进行了装药140kg的爆炸,金刚石的收率达到10%<sup>[7]</sup>;原苏联在1990年已实现了试生产<sup>[8]</sup>。

这种纳米金刚石具有独特的机械、光电、热、磁性能,有可能在机械、电子、化工、医疗等领域中得到广泛应用。该技术具有生产成本低、原料易得和制造设备简单等优点,利用类似的技术还可以制备一些金属和非金属的纳米材料<sup>[9]</sup>。

## 2 制备方法

### 2.1 炸药

作为碳源最常用的炸药是TNT,作为增压炸药是RDX或HMX、PETN,一般选用TNT/RDX(70~40)/(30~60),长径比为1.4以上的圆柱形药柱,所用RDX的颗粒应不超过160μm。也可以添加一些含碳物质以增加碳源。曾用过的添加物有硝基苯、苯、辛醇、乙二醇、甘油、苯胺、己烷、丙炔醇、石蜡等有机液体<sup>[10]</sup>。

### 2.2 爆轰产物的冷却介质

常用的冷却介质有二氧化碳和水。二氧化碳气体填充到较高压力时得到的结果较好,但装药重量大于0.1kg时最好不要采用。当使用水为冷却介质时,有三种作法:水套法<sup>[11]</sup>、水下法<sup>[4]</sup>、注水法<sup>[12]</sup>。用水作冷却介质的制备方法已用于试生产<sup>[8]</sup>。

### 2.3 爆炸室

炸药爆炸应在含有冷却介质的密封爆炸室内进行,以便收集含有纳米金刚石的固体爆轰产物。常用的爆炸室是容积(V)为0.2~3m<sup>3</sup>的钢制厚壁罐体,进行爆炸的炸药所占体积不超过0.5V<sup>[13]</sup>。

我们在实验中使用的爆炸室容积为0.18m<sup>3</sup>,内径0.5m,高1m,装药量为0.1kg。文献[12]中使用了容积为0.6m<sup>3</sup>的爆炸室,装药量为0.4kg,在爆炸室中安装有460个孔径为3~8mm的喷水孔,在喷注水量达6~12kg时引爆。文献[14]中使用的爆炸室容积为2m<sup>3</sup>,壁厚60mm,两端为半球形封头,最大装药量为1kg。

### 2.4 黑粉的收集

爆炸后可以在爆炸室中收集到经冷却介质“淬火”

收稿日期: 1998-04-22 修回日期: 1998-08-10

作者简介: 金增寿,男,1939年生,高级工程师,长期从事炸药爆轰参数测试、爆炸应用、爆炸加工等研究开发工作。

的黑粉。其主要成分是: 在爆轰过程中形成的超细金刚石粉、石墨、无定形碳粉、炸碎的雷管壳、电线、吊线、爆炸室壁脱落下来的钢渣和水套壳等杂物。可以用清扫或喷洗的方法收集黑粉, 用 80 目筛子过滤掉大部分杂物, 用沉淀或离心法去掉上面的清水, 将固体产物烘干后就得到了经过初步纯化的爆轰固体产物, 即所谓“黑粉”。

### 2.5 金刚石的纯化

一般的处理方法是: 首先用盐酸加热处理黑粉, 除去其中的金属(主要是铁)杂质; 然后利用金刚石的化学稳定性高、不容易被氧化, 而石墨和碳比较容易被氧化的特点, 用氧化法除去各种非金刚石碳。所用的方法又可分为气相氧化法和液相氧化法。这些方法与一般合成金刚石生产中所用方法相似。目前在大规模生产中广泛应用的仍然是液相氧化法。以前大量使用硫酸和高氯酸混合物处理的方法, 其处理效率和结果都比较好。但由于高氯酸有一定的危险性, 不便大量使用。因此, 近来大多改用硫酸、硝酸和发烟硫酸的混合物加热沸腾处理<sup>[15]</sup>。这个方法所需时间较长, 但比较安全。在这种处理过程中, 黑粉逐渐由黑色变为浅灰色。沉降后将酸倾去, 用水洗至中性。将这些固体产物烘干, 即可得到浅灰色的纳米金刚石粉。最后再用氢氟酸处理, 除去其中含硅杂质, 即可得到纯度超过 95% 的金刚石粉<sup>[3]</sup>。此外, 还有使用氧化铬与硫酸, 或用重铬酸钾与硫酸处理的方法, 但这些方法大都只在实验室应用。液相氧化法的主要缺点是产生大量废酸, 污染环境, 但是由于其价格较低, 又便于操作, 因此, 目前仍然被广泛采用。近年来俄罗斯已开始使用气相氧化法, 即在适当的温度下用空气中的氧将黑粉中的非金刚石碳氧化成气体产物<sup>[16]</sup>, 用气相氧化法制成的金刚石粉的稳定性优于液相氧化法的产品。

### 2.6 检测和鉴定

制备产物的主要参数有: 相对于炸药用量( $m_e$ )的黑粉收率  $m_1$  ( $m_e/m_e \times 100\%$ ,  $m_e$  为得到黑粉的质量), 金刚石的收率  $m_2$  ( $m_d/m_e \times 100\%$ ,  $m_d$  为得到金刚石的质量), 以及金刚石在黑粉中的含量  $m_3$  ( $m_d/m_e \times 100\%$ )。

用灼烧实验测定金刚石粉的灰分。用化学分析方法测定金刚石的元素组成。用透射电子显微镜(TEM)观测金刚石颗粒和团聚体的尺寸和形貌。用 X-射线衍射法(XRD)来判定金刚石的晶形、晶粒尺寸和纯度。用红外光谱确定金刚石表面的功能团。

## 3 物化性质

1) XRD 谱表明为立方晶系金刚石, 纯度在 95% 以上, 灰分含量一般小于 0.3%<sup>[4]</sup>。

2) 从 TEM 照片可见, 其基本颗粒为直径 5 ~ 15 nm 的微球, 它们聚集成不规则的聚集体, 其尺寸达 0.5 ~ 1.0  $\mu\text{m}$ <sup>[3,4]</sup>。

3) 密度 3.26 ~ 3.43  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 比表面积 240 ~ 450  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ; 微孔体积 0.6 ~ 1.0  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均孔径 8 ~ 12 nm<sup>[17]</sup>。

4) 元素组成<sup>[3,4]</sup> (%) : C, 84 ~ 90; H, 0.5 ~ 0.6; N, 1.5 ~ 2.0; 其余为 O。

5) 红外光谱图<sup>[4]</sup>表明这种金刚石表面有多种含氧功能团, 其中包括羟基、羰基、羧基、酯基、醚基等, 所占面积可达颗粒表面的 10% ~ 20%<sup>[17]</sup>。

## 4 影响纳米金刚石的制备及其性质的因素

影响爆轰法制备纳米金刚石及其性质的因素, 最主要的是爆轰波的参数和其中的化学反应情况, 而它们又受到炸药和添加物组成和性质、爆炸环境等因素的制约。

### 4.1 炸药的组成

目前常用碳源炸药 TNT 爆轰时分解生成的游离碳的质量分数可达 18% (按爆轰产物中的碳氧化成 CO 计算) 或 28% (按氧化成  $\text{CO}_2$  计算)。但是, 它的爆轰压力不利于金刚石的生成, 因此, 通常使用 TNT 与 RDX、HMX 等的混合物, 使爆轰区的压力  $p_{\text{CJ}} \approx 30\text{GPa}$ , 以利于金刚石的生成。

表 1<sup>[18]</sup>、图 1<sup>[19]</sup> 和图 2<sup>[20]</sup> 给出了上述混合炸药中 TNT 含量对金刚石收率和颗粒平均尺寸( $\bar{d}$ ) 的影响。结果表明: 炸药组成为 TNT/RDX 60/40、TNT/HMX 60/40、TNT/PETN 70/30 时金刚石收率最大, 其中又以 TNT/RDX 的结果最好。随着 TNT/RDX 炸药中 RDX 中含量的增加, 所形成的金刚石颗粒的平均尺寸增大, 金刚石在黑粉中的含量也增加。因此, 选择 TNT/RDX 的配比时要综合考虑上述  $m_1$ ,  $m_2$  和  $m_3$  三个指标。

### 4.2 装药的形状、尺寸和结构的影响

文献[11, 21]中研究了装药形状(图 3)和装药量(图 4)对金刚石收率的影响。结果表明: 制备纳米金刚石时, 最好选用药量大于 0.3 kg、长径比大于 1.4 的药柱, 因为这种装药的金刚石收率比其它形状和药量

较小的药柱高出一倍以上。文献[21]中还给出了金刚石颗粒平均直径  $\bar{d}$  与装药直径  $d$  的关系,  $\bar{d} \propto d^{1/3}$ 。

文献[18,22]使用了一种复合装药结构(图5),在圆柱形 TNT 药柱外覆上一层 TNT/HMX(70/30)。这样,爆轰时可以在 TNT 药柱中产生一个超压的马赫

波盘,从而大大提高了 TNT 爆轰产物的爆轰压力,可使 TNT 产生的游离碳 80%~90% 转变成金刚石,可提高金刚石收率。文献[9]列举了六种产生这种超压的复合装药结构。

表 1 TNT 与 RDX、HMX 的混合物组成对金刚石收率和粒度的影响

Table 1 Effect of the composition of TNT with RDX or HMX on the particle size and yield of diamond

炸药组成	$m_e/g$	$m_c/g$	$m_d/g$	$m_1/\%$	$m_2/\%$	$m_3/\%$	$\bar{d}_{ep}/nm$
TNT	280	50.8	8.0	18.1	2.8	15.7	4.9
TNT/RDX	90/10	288	42.4	11.9	14.7	4.1	28.0
	70/30	310	38.4	25.7	12.4	8.3	66.9
	60/40	312	29.4	21.3	9.4	6.8	72.7
	50/50	320	29.4	23.0	9.2	7.2	78.4
	40/60	320	25.3	20.4	7.9	6.4	80.7
	30/70	310	21.7	16.9	7.0	5.4	78.0
TNT/HMX	70/30	298	37.3	24.5	12.5	8.2	65.7
	30/70	315	20.2	11.8	6.4	3.8	58.4

注: 爆炸室容积  $V=2.0m^3$ , 冷却介质为  $CO_2$

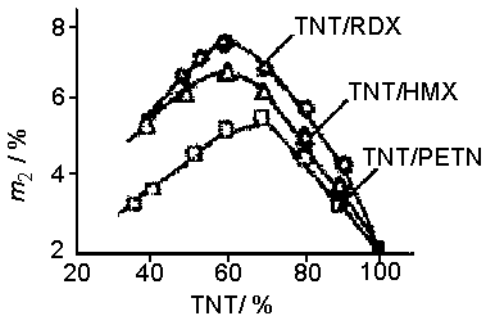


图 1 TNT/RDX、TNT/HMX、TNT/PETN 混合物中 TNT 含量对金刚石收率的影响

Fig. 1 Effect of TNT content in TNT/RDX, TNT/HMX, TNT/PETN mixtures on diamond yield

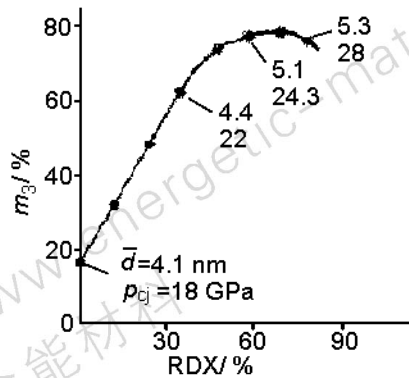


图 2 TNT/RDX 混合物中 RDX 含量对黑粉中金刚石含量和金刚石颗粒平均直径的影响

Fig. 2 Effect of RDX content in TNT/RDX mixtures on diamond content in soot and average particle diameter

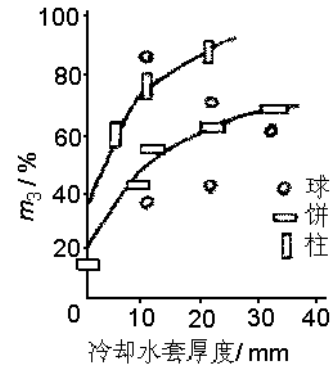


图 3 装药形状和冷却水套厚度对黑粉中金刚石含量的影响

Fig. 3 Effect of explosive charge shape and thickness of water coating on diamond content in soot

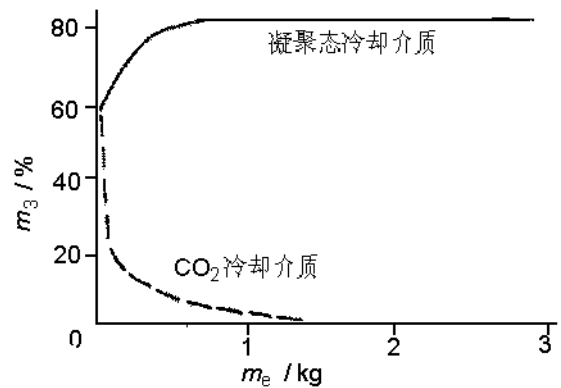


图 4 装药量和冷却介质对黑粉中金刚石含量的影响

Fig. 4 Effect of explosive weight and cooling media on diamond content in soot

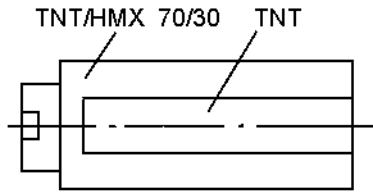


图 5 混合装药结构

Fig. 5 Structure of composite charge

4.3 冷却 (“淬火”)介质的影响

在爆轰波反应区里生成的金刚石,当爆轰产物膨胀时将发生氧化、石墨化、颗粒团聚、表面缺陷生成等

变化。这些都与产物的冷却 (“淬火”)介质和膨胀体积 (爆炸室容积)有关。为了提高金刚石的收率、改善金刚石的性质,必须选择适当的冷却介质,有关结果分别列于表 2<sup>[3,14]</sup>、表 3<sup>[4]</sup>、表 4<sup>[21]</sup>、表 5<sup>[21]</sup>和图 3、图 4 中。

表 2 不同冷却介质对金刚石收率 ( $m_2$ ) 的影响

Table 2 Influence of different cooling media on diamond yield ( $m_2$ )

炸 药	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	冷却介质	$m_2/\%$	备注
TNT/RDX 50/50	1.64	水	8.7	[3]
		二氧化碳气体	6.9	[14]
		氮气	5.7	[14]
		氩气	0.7	[14]

表 3 用水套法和水下爆炸法制备金刚石的收率

Table 3 Diamond yield by explosive charge with water coating and underwater detonation

制备方法	厚度或水深/mm	爆炸次数	$m_c/g$	$m_e/g$	$m_d/g$	$m_3/\%$	$m_2/\%$	$m_1/\%$	备注
水套	7	1	84.4	24.3	5.33	28.8	6.3	22	三发平均,充 $CO_2$ , 2.0MPa
	30	1	86.5		5.97		6.9		三发平均,充 $CO_2$ , 0.1MPa
	60	1	86.8	32.2	7.38	37.1	8.5	22.9	六发平均,充 $CO_2$ , 3.0MPa
水下爆炸	370	3	277	92.4	24.2	33.4	8.7	26.2	
	300	1	76.5	15.4	5.0	20.1	6.5	32.4	
	300	3	228.5	41.8	15.0	18.3	6.6	36.0	
	300	6	516.5	98.4	33.6	19.1	6.5	34.1	
	300	9	658.5	146.5	43.3	22.2	6.6	29.6	

注: 1) 爆炸室容积  $0.18m^3$ , 有效腔高 0.84m; 2) 炸药为 TNT/RDX 50/50, 药柱尺寸为  $\varnothing 40mm \times 60mm$ 。

表 4 冷却介质  $CO_2$  和水对金刚石性质的影响

Table 4 Influence of cooling media  $CO_2$  and  $H_2O$  on diamond characteristics

金刚石性质	冷却介质	
	$CO_2$	水
晶体颗粒平均尺寸/nm	5~6	2.0~3.5
比表面积/ $m^2 \cdot g^{-1}$	200~280	360~420
颗粒形状	球状	薄膜状 <sup>1)</sup>
金刚石粉密度/ $g \cdot cm^{-3}$	3.2~3.3	3.05~3.1
堆积密度/ $g \cdot cm^{-3}$	0.35~0.4	0.3~0.32
氧含量/%	5~10	2~10
不燃残余物/%	5~7	0.1~0.3
对苯蒸汽的相对吸附活性	1.0	1.5~2.0

注: 1) 我们的实验结果表明这种金刚石也是球形的。

表 5 冷却介质  $CO_2$  和水对黑粉性质的影响

Table 5 Influence of cooling media  $CO_2$  and water on soot characteristics

黑粉的性质	冷却介质		
	$CO_2$	水	
比表面积/ $(m^2 \cdot g^{-1})$	200~280	360~420	
黑粉中的最大金刚石含量/%	54	75~85	
达到最大金刚石含量的装药量/kg	0.5	不限	
组成/ %	超细金刚石	15~54	60~85
	涡轮叶片状碳	15~30	5~34
	无定形碳	-	1~5
	二价碳	-	1~5
	超细石墨	40~60	5~15
对苯蒸汽的吸附活性/ $mmol \cdot g^{-1}$	4.3~5.1	8.1~9.2	
对白蛋白的吸附活性/ $mmol \cdot g^{-1}$	45~53	85~110	

以二氧化碳气体或水作冷却介质时,金刚石收率和性质的实验结果表明:

1) 用比热容高的物质(例如:水,  $4.2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )作冷却介质,在生产效率和成本上都比低比热容的介质(例如:二氧化碳气体,  $0.8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )好。

2) 用水作冷却介质时,金刚石的收率随装药质量的增加而升高,超过  $0.3 \text{ kg}$  时达到恒定值。以二氧化碳气体作冷却介质时,随装药质量的增加,金刚石收率急剧下降。

3) 用水作冷却介质时,得到的金刚石和黑粉的颗粒尺寸,都比用二氧化碳气体时要小,比表面积要大,团聚体的尺寸也比较小。

4) 用水作冷却介质时,得到的金刚石颗粒表面活性比用二氧化碳时高。

5) 用水下爆炸法制备时,也可以得到高的金刚石收率,其效率和成本都大大低于其它的制备方法。

6) 用不同气体作冷却介质,可以影响金刚石的稳定性。例如,用二氧化碳气体作冷却介质得到的金刚石,开始氧化温度为  $733 \text{ K}$ ,而用氮气作冷却介质制备金刚石,开始氧化温度则只有  $703 \text{ K}$ <sup>[6]</sup>。

## 5 纳米金刚石的应用途径及其展望

爆炸制备的金刚石粉与传统方法合成的金刚石粉相比,具有较大的特色,下面就这种金刚石粉的应用前景进行一些展望。

### 5.1 作为润滑油添加物

据文献[8]报道:添加了这种金刚石的润滑油的润滑性能和减磨性能都有明显提高,已经在发动机上进行了应用试验,取得了良好的结果。我们对此也进行了一些研究<sup>[23,24]</sup>,发现在石蜡油中添加金刚石粉后,在摩擦过程中磨损量大大降低。文献[25]还指出,添加金刚石粉的润滑油,其静、动摩擦系数的差别明显减少,这对经常开、停的摩擦部件是一个良好的性能。

但是,金刚石粉的比重较大,在用作润滑油添加物时必须解决其长期悬浮或胶态稳定性问题,否则很难在生产中得到实际应用。这也许是影响金刚石粉大量用作润滑油添加物的重要原因。

### 5.2 作为复合镀层添加物

复合电镀是一种提高镀层硬度和耐磨性能的方法,已得到广泛应用。近年来,有人将这种金刚石粉制成复合镀层,其硬度和耐磨性均有明显提高<sup>[26-28]</sup>。我

们也进行了这方面的研究,用电镀<sup>[29]</sup>或电刷镀<sup>[30]</sup>的方法,制成了含金刚石粉的复合镀镍层,与不含金刚石粉的镀镍层相比,其硬度增加了  $50\%$ ,耐磨性能增加更为显著。这种方法有可能在机械制造上得到实际应用。还有人使用类似的方法制成了磁盘或磁头的耐磨保护层,大大提高了使用寿命且不影响磁记录的性能<sup>[31]</sup>。

### 5.3 作为精细研磨材料

据一些文章和专利报道<sup>[32,33]</sup>,用这种金刚石粉制成的研磨液或研磨块,可以磨出光洁度极高的表面。例如:制作表面光洁度要求极高的 X-射线反射镜<sup>[34]</sup>。国内也用含有这种金刚石粉的研磨液对陶瓷滚珠进行了磁流体研磨,得到了粗糙度只有  $0.013 \mu\text{m}$  的表面<sup>[35]</sup>。用这种金刚石粉制成的超细研磨膏可能在机械部件、硬质材料、石料等表面精细抛光上得到实际应用。

### 5.4 其它应用

用于制造电子成像的感光材料,明显地改进了复印机的性能<sup>[36]</sup>;用这种金刚石粉做生物抗原载体,制造某些抗体药物,取得了良好结果<sup>[37]</sup>;将这种金刚石粉制成的悬浮液涂抹在用于化学气相沉积金刚石膜的单晶硅基片上,干燥后的硅片上可以形成金刚石微晶层,在进行化学气相沉积时,可大大加速金刚石膜的生长速度和提高膜的成核密度<sup>[36]</sup>。我们也作了上述试验,并取得了良好结果<sup>[39]</sup>。还有人试探用这种金刚石粉作为电子场发射材料,据说在性能上优于化学气相沉积金刚石膜,有可能在平面显像装置中得到应用<sup>[40]</sup>。

### 5.5 应用前景展望

正如前面所提,这种金刚石粉是金刚石材料的一个新品种,是一种纳米材料,用以前合成金刚石的方法是无法得到的,因此,可能开拓一些新的应用领域。但目前在这方面的研究和开发工作还很不够。从近年来对各种纳米材料的研究可看出,当物质达到纳米尺寸时,就会有一系列的特殊性质。例如,作为良好导体的金属银,当达到纳米尺寸的颗粒时,竟变成了绝缘体。这些特殊性质正在被广泛研究,相信一定会开发出一系列具有特殊用途的纳米材料。作为纳米尺寸的金刚石颗粒,也应该从纳米材料的特性上进行研究,例如:发光性能、光电性能、半导体性能等,但这方面的研究尚很少。前面所述一些应用领域,大部分还属于金刚石传统应用的范围,还没有涉及到这种金刚石的纳米特性。因此我们期望有更多的部门和科技人员注重这种纳米金刚石的研究和开发工作,以求在不远的将来,为这种价廉、易得的金刚石粉找到新的应用领域。

## 6 结 论

(1) 炸药爆轰法制备的金刚石粉是由尺寸5~10nm的基本颗粒组成,但是,它们经常形成尺寸达到微米和亚微米的团聚体,这是合成金刚石材料的一个新品种。

(2) 这种金刚石表面上含有相当数量的含氧极性功能团,因此属于类金刚石。制备过程和后处理过程对这种金刚石的性质和结构有不同程度的影响。

(3) 这种金刚石粉是由炸药中的碳在爆轰反应区中形成的,在爆轰产物膨胀冷却过程中部分被保存下来,形成具有分形结构的颗粒团聚体,冷却介质对金刚石收率和性质有很大影响。

(4) 已经在复合镀层、润滑油添加物、精细研磨磨料等方面对这种金刚石粉进行了一些应用开发研究,取得了良好的结果。

综上所述,炸药爆轰法制备的金刚石粉是一种很有特色的材料,但是由于其发展历史还不长,还有许多问题需要进一步研究。例如:改进制备工艺条件以提高金刚石收率,制备出具有符合各种应用要求的产品,进一步研究这种金刚石的性质,并进行各种改性(如:掺杂、表面改性等),以便适应和寻找新的应用途径;对这种金刚石颗粒的团聚体进行分散处理,以求得到分散性良好的粉体和悬浮体,可能会找到一些特殊的应用;对于这种金刚石的生成机理及其性质的进一步研究,将有助于上述问题的解决。

### 参 考 文 献

- [1] Greiner N R, Phillips D S, Johnson J D. Diamonds in detonation soot[J]. Nature, 1988, 333(2): 440~442.
- [2] Лямкин А Е, Петров Е А, Эршов А П, и др. Получение алмазов из взрывчатых веществ[J]. ДАН СССР, 1988, 302(3): 611~613.
- [3] 徐康, 金增寿, 魏发学等. 炸药爆炸法制备超细金刚石粉末[J]. 含能材料, 1993, 1(3): 19~21.
- [4] 徐康, 金增寿, 饶玉山. 纳米金刚石粉制备方法的改进——水下连续爆炸法[J]. 含能材料, 1996, 4(4): 175~181.
- [5] 徐康, 金增寿. 纳米金刚石粉制备方法的改进和解团聚问题的初步探讨[C]. '96中国材料研讨会论文集, I-2. 北京: 化学工业出版社, 1997. 44~47.
- [6] 徐康, 薛群基. 炸药爆炸法合成的纳米金刚石粉[J]. 化学进展, 1997, 9(2): 201~208.
- [7] Выскубенко В А, Даниленко В В, Лин Э Э, и др. Влияние масштабных факторов на размеры и выход алмазов при детонационном синтезе. Физ. Гор. Взр., 1992, 28(2): 108~109.
- [8] Сакович Г В, Врыляков П М, Губаревич В Д, и др. Получение алмазных кластеров взрывом и их практическое использование [J]. Ж. Всес. Хим. Общ., 1990, 35(5): 600~602.
- [9] Eidelman S, Altshuler A. Synthesis of nanoscale materials using detonation of solid explosives [J]. Nanostructured Materials, 1994, 3: 31~41.
- [10] Мальков И Ю. Образование ультрадисперсной алмазной фазы углерода в условиях детонации гетерогенных смесевых составов [J]. Физ. Гор. Взр., 1991, 27(5): 136~140.
- [11] Volkov K V, Danilenko V V, Elin V L. Synthesis of diamond from the carbon in the detonation products of explosives [J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 1990, 26: 366~368.
- [12] Богданов С В, Мороз Э М, Коробов Ю А. Субструктурные характеристики высокодисперсных алмазов, полученных методом взрыва [J]. Неорганические Материалы, 1995, 31(6): 804~806.
- [13] Mikonochikov A L, Rumjantsev B V. Method for production of ultra dispersed diamond [P]. RU 2 036 835, 1995.
- [14] Ставер А М, Лямкин А Н. Получение ультрадисперсных алмазов из взрывчатых веществ. Во: Ультрадисперсные Материалы, Получение и Свойства. Межузовский Сборник, Красноярский Политехнический Институт, 1990.
- [15] Gubarevich T M, Dolmatov V Yu, Pjaterikov V F et al. Synthetic hydrocarbon diamond-containing material [P]. RU 2 046 094, 1995.
- [16] Чиганова Г А, Чиганов А С, Тушко Ю В. Влияние условий синтеза и очистки на окисляемость ультрадисперсных алмазов [J]. Ж. Прикл. Хим., 1992, 65(11): 2598~2600.
- [17] Верещагин А Л, Петров Е А, Сакович Г В, и др. Синтетический алмазосодержащий материал и способ его получения [P]. PCT Int. Appl. WO 93/13 016, 1993.
- [18] Тцтов В М, Анццчкци В Ф, Мальков И Ю. Синтез ультрадисперсных алмазов в детонационных волнах [J]. Физ. Гор. Взр., 1989, 25(3): 117~126; see also: Combustion, Explosion and Shock Waves, 1990, (3): 372~379.
- [19] Козырев Н В, Голубева Е С. Исследование процесса синтеза ультрадисперсных алмазов из смесей тротила с гексогеном, октогеном и тэном [J]. Физ. Гор. Взр., 1992, 28(5): 119~123.

- [20] Коломийчук В Н, Мальков И Ю. Исследование синтеза ультрадисперсной алмазной фазы в условиях детонации смесевых составов [J]. Физ. Гор. Взр., 1993, 29(1): 120 ~ 128.
- [21] Саввакин Г И, Трефилов В И. Формирование структуры и свойств ультрадисперсных алмазов при детонации в различных средах конденсированных углеродсодержащих взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом [J]. ДАН СССР, 1991, 321(1): 99 ~ 103.
- [22] 赵升, 恽寿榕, 陈权等. 马赫反射效应在炸药爆轰合成金刚石中的应用 [J]. 高压物理学报, 1997, 11(2): 110 ~ 116.
- [23] Xu Tao, Zhao Jiazheng, Xu Kang. The Ball-bearing effect of diamond nanoparticles as an oil additive [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1996, 29: 2932 ~ 2937.
- [24] Xu T., Xu K., Xue Q J et al. Study on the tribological properties of ultradispersed diamond containing soot as an oil additive [J]. Tribology Trans., 1997, 40(1): 178 ~ 182.
- [25] 曲建俊, 罗云霞. 含超细金刚石的石墨粉润滑油摩擦磨损特性研究 [J]. 润滑与密封, 1995(2): 29 ~ 32.
- [26] Makarchenko L V. Electrochemical chromate bath for coating with Cr-based composite containing dispersed colloidal diamond [P]. RU 2 031 982, 1995.
- [27] Guslienko Yu A, Luchka M V, Savvakina G L. Composite electrolytical coatings on the basis of iron group metals [P]. RU 2 026 892, 1995.
- [28] 小林寿政. 含金刚石的复合镀液 [P]. 日本公开特许, 平 8-337883, 1995.
- [29] 阎逢元, 薛群基, 徐康等. 一种新型的减磨耐磨复合电镀层 [J]. 材料研究学报, 1994, 8(6): 573 ~ 576.
- [30] 冶银平, 陈建民, 徐康等. 含纳米金刚石的复合镍刷镀层的摩擦学特征 [J]. 表面技术, 1996, 25(4): 27 ~ 29.
- [31] Lin K, Chang J W, Romakiw L T. Highly wear resistant plated soft magnetic material by particle dispersion [J]. Proc. Electrochem. Soc., 1996, 95-18: 647 ~ 660.
- [32] Komarof V F, Sakovich G V. Synthetic diamond-based polishing suspension for semiconductor [P]. PCT Int. Appl., WO 94/22 970, 1994.
- [33] Maruyama M. Preparation of diamond polishing liquids [P]. 日本公开特许, 平 7 18250, 1995.
- [34] Chkhalo N L, Fedorchenko M V, Krulyakov E P et al. Ultradispersed diamond powders of detonation nature for polishing X-ray mirrors [J]. Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A, 1995, 359: 155 ~ 156.
- [35] 金洙吉, 王黎钦, 齐毓林等. 磁流体研磨法研磨陶瓷珠的试验研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1995, 27(3): 130 ~ 134.
- [36] 三岛直志, 深贝俊夫, 河崎佳明. 电子写真感光体 [P]. 日本公开特许, 平 7 28267, 1995.
- [37] Kossovsky N, Gelman A, Hnatyszyn H J et al. Surface-modified diamond nanoparticles as antigen delivery vehicles [J]. Bioconjugate Chem., 1995, 6: 507 ~ 511.
- [38] Makita H, Nishomura K, Jiang N et al. Ultrahigh particle density seeding with nanocrystal diamond particles [J]. Thin Solid Films, 1996, 281-282: 279 ~ 281.
- [39] 邵乐喜, 谢二庆, 徐康等. 纳米粉预处理的 CVD 金刚石薄膜成核与生长研究 [J]. 无机材料学报, 待发表.
- [40] Jin S, Zhu W, Kochanski G. Field-emission devices employing activated diamond particle emitters and their manufacture [P]. EP 725 415, 1996.

## Nanoscale Diamond Synthesized by Explosive Detonation

JIN Zeng-shou<sup>1</sup>, XU Kang<sup>2</sup>

(1. Gansu Institute of Chemical Industry, Lanzhou 730020, China)

(2. Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Preparation methods and properties of nanoscale diamond synthesized by explosive detonation and the influences of different preparation and aftertreatment conditions on the results and properties are reviewed. Some known and future applications of this kind of diamond powders are also discussed. It is suggested that, control of preparation conditions could improve the properties of products, which could be suitable to the requirements in different applications.

**Key words:** application; diamond; explosive detonation; preparation