

文章编号: 1001-1455(2013)06-0638-09

银加载爆轰实验中生成的固体粒子表征^{*}

马 浚^{1,2}, 唐元明², 张勤英², 刘 强², 龚有进², 闫钊通², 杜卫星², 刘 浩¹, 蒋 刚¹

(1. 四川大学原子与分子物理研究所, 四川 成都 610065;

2. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 使用 X 射线衍射、扫描电子显微镜、X 射线能谱、比表面和孔隙度等分析方法, 对加载货币银爆轰实验生成样品的成分含量、粒子形貌、形成物相、金属银的晶粒度、比表面及孔隙度进行了分析。结果表明, 银和铜在爆后的粒子中仍然为共熔体, 相对金属银, 晶格参数减小, 生成银粒子的晶粒度为 15.9~22.2 nm; 由于高温高压和实验环境的影响, 银粒子爆后和其他杂质粒子粘结在一起形成较大的颗粒, 含有许多其他成分, 氧化亚铁来源于爆炸罐的罐体, 大量无定形碳粉来源于缺氧环境下炸药的不完全燃烧, 铝和硅来源于实验装置。对生成样品的形貌分析证明了 XRD 对银晶粒度的分析结果。因为样品中含有较多量的碳粉, 为了弄清对气体的吸附作用, 对样品进行了比表面、孔隙度以及孔径分析。

关键词: 爆炸力学; 固体粒子; 爆轰实验; 货币银; 表征

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

材料在极端条件下的物理特性一直是一个热门的研究方向。关于爆轰机理的研究很多, 但对于爆轰后生成的粒子的分析则报道较少。而在许多情况下, 人们很关心气溶胶粒子的粒径, 因为在许多核材料事故中, 生成的气溶胶粒子的粒径越小, 沉降越困难, 迁移的距离越远, 造成的危害也越大。人们研究事故中钚燃烧所生成的粒子的粒径发现: 金属钚和氢化物反应生成的氧化物, 仅有 0.07% (质量分数) 粒径在 10 μm 以下, 而在钚的氢化物和氧气的反应中, 有 25% (质量分数) 粒径在 10 μm 以下^[1]。

另一方面, 核材料中裂变气体的释放研究能更好地预知材料的老化、腐蚀等信息, 而裂变气体的释放和粒子的晶粒度是紧密相关的, 所以在核材料中生成粒子的晶粒度是研究人员关注的焦点。目前, 关于气体在核材料中的释放的理论和实验研究已有很多报道^[2-5]。

爆轰法进行纳米粒子的合成行为跟一些核事故中核材料的行为有许多共同之处, 因此研究人员试图通过一些跟核材料性质相似的金属的爆轰行为的研究, 来模拟在高压和高温实验或核事故下的核材料的行为。纳米材料有许多优良性能, 但合成这类物质难度很大, 成本也很高。近年来, 人们尝试用爆轰法进行纳米材料的合成, 合成的最典型的物质是纳米金刚石^[6-8], 对合成的产物进行表征可知, 生成的金刚石的粒子粒径是很小的, 大多数实验合成的金刚石的晶粒度都在 10 nm 以下, 并且多数粒子都呈现球形或多边形, 仅有少量粒子为规则的立方晶^[9-10], 这些微小的粒子粘在一起形成具有分层结构的团聚体^[11]。采取的合成介质不同, 生成的纳米金刚石的晶粒度和石墨化程度也不同, 而水为介质时, 对金刚石微粒的形成最为有利^[12-13], 炸药的粒度、加入的催化剂和爆炸体结构对金刚石生成产率影响较大^[14-15]。根据生成颗粒的形貌和爆轰的特性, 人们提出了一种解释形成纳米金刚石的机理, 即液滴凝聚模型^[16-17]。通过爆轰制备六方结构的纳米石墨粉的研究也有很多报道^[18-19], 研究表明, 这种石墨除了晶粒度在 10 nm 以下外, 制备的石墨呈球形或椭球形^[20-21], 并且有较好的比表面积^[22-23], 进行储放氢气实验, 其性能好于纳米碳纤维, 但逊于超级活性炭^[24]。

因为纳米材料在工业生产中的广泛应用, 近年来, 人们尝试用爆轰的方法进行纳米粒子的合成。王小红等^[25]用硝酸铁、硝酸锰作为主要氧化剂, 利于爆轰方法成功合成了较为复杂的物质 MnFe_2O_4 , 研究表明, 这种粒子的平均粒径为 30 nm, 粒子呈球形。李晓杰等^[26]用爆轰方法合成的氧化铝球形粒子,

* 收稿日期: 2012-06-29; 修回日期: 2012-08-13

作者简介: 马 浚(1973—), 男, 硕士研究生, 副研究员。

平均粒径为 20~50 nm。通过进一步的研究人们还发现,可以通过混合炸药的爆轰参数来控制合成纳米粒子的生长时间,最终选择生成粒子的尺寸^[27]。氧化铝是由分子态或离子态直接凝聚而成,生成过程没有择优取向^[28]。经过透射电镜实验,生成的氧化物晶粒之间普遍存在着团聚现象,形成的球形颗粒的尺寸为 1~100 nm^[29]。除氧化铝之外,人们也尝试进行其他氧化物的爆轰法合成,以硝酸铯为前驱体成功合成了 CeO₂ 纳米粒子,用不同的爆轰条件,即炸药和硝酸铯混合、炸药和硝酸铯混合物中添加尿素或亚硝酸钠生成了 3 种不同粒径的纳米粒子,粒径分别为 45、64、33 nm,研究结果表明:尿素的加入可以使生成的纳米粒子更接近球形,而加入亚硝酸钠可以减小纳米粒子的粒径^[30]。多种组分和晶相纳米级的铁磁体粒子是高科技技术必不可少的关键材料,但这种粒子不仅易于团聚,也非常易氧化,为了防止其氧化失去功能,可以在表面镀一层保护性薄膜,因为在爆轰实验中,在生成目标粒子的同时,由于炸药不完全燃烧也生成了大量的游离碳和石墨^[31],因此控制好爆轰的条件,可以合成碳包覆的纳米金属材料。罗宁等^[32]通过爆轰方法合成了碳包覆的纳米镍晶粒和纳米钴晶粒,颗粒大小为 10~25 nm,晶核周围的碳主要由无定形碳、石墨和微量富勒烯构成。形成的纳米结构颗粒,呈球形或椭球形,具有完好的核壳结构形貌^[33],碳包覆厚度为 1~2 nm^[34]。目前,通过爆轰实验合成纳米粒子这种方法,除了以上介绍的外,氧化物中还有纳米氧化铁^[35]、氧化钛^[36]、氮化碳^[37]等,这种方法操作简单,材料来源广泛,成为有前途的纳米材料合成方法。碳包覆材料的研究还处于起步阶段,要合成真正能用于工业的原料还需要进一步的研究。

铯是一种重要的核材料,尤其在反应堆中有重要应用,但这种金属有很大的毒性和放射性,当发生核事故时,这种金属形成气溶胶分散在空气中,少量吸入肺中就可以引起死亡^[38]。在我们的工作中,以货币银模拟核材料^[39],研究爆后生成的金属粒子的晶粒度、形貌、孔径等参数,从而预测核材料事故后,裂变气体的释放情况,为气体取样测量提供依据。实验将爆炸装置置于爆炸罐中心位置,炸药爆炸后对金属银施加强大的载荷,使金属获得巨大的能量,当获得的内能大于汽化热阈值时,发生汽化形成气溶胶^[40],其后又跟形成的碳和其他杂质形成较大的颗粒。爆后取罐中样品进行筛分、分析。XRD 和 SEM 研究表明,爆炸后生成的 20 nm 左右的金属银粒子被大量的炸药不完全燃烧生成的碳粉及爆炸环境中的其他杂质包裹,在筛分的样品中,粒子越小,含银量越大。对生成样品的孔隙度和形貌也进行了研究。

1 实验

1.1 仪器

实验仪器包括 S-450 HITACHI PER MIN 扫描电子显微镜-EDAX9100-60 X 射线能谱仪、X'Pert Pro MPD 飞利浦 X 射线衍射仪、Dmax2400 X 射线衍射仪、JSM-6460LV 型扫描电子显微镜、NOVA4000 型高速自动比表面与孔隙度分析仪、分样筛等。

1.2 实验装置和爆炸装置

实验在流体物理研究所爆炸罐中进行,各法兰密封良好,爆炸罐体积 7.3 m³。

爆炸装置如图 1 所示,两边为 2 块 $\varnothing 200$ mm \times 15 mm 的圆饼形 RHT-901 炸药,质量分别为 776、753 g。厚 1 mm、质量 133.5 g 的货币银箔(含银 92.2%,其余为铜)剪成 $\varnothing 160$ mm 的圆形,用胶带固定后夹在两块炸药中间,两块炸药的外表结合处用铝带密封,悬挂于爆室中心位置。

1.3 实验过程

将实验装置固定好,法兰口密封,并将爆炸罐抽真空至 40 kPa,引爆实验装置,隔天后开罐,等待其中有害气体散去,取罐中爆炸粉末,除去大的木块、玻璃渣等杂质,将生成的较细粉末置于保干器待用。

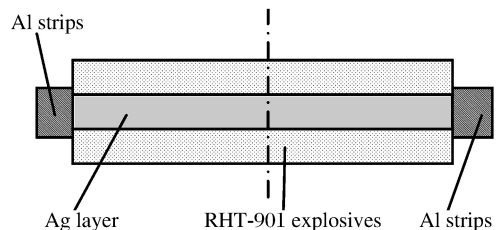


图 1 实验爆炸装置示意图

Fig. 1 Schematic map of the explosion facility in experiment

2 结果与讨论

2.1 实验中生成的固体粒子的分级

本次实验还进行了六氟化硫示踪气体对罐体密封性能的检验工作,因此爆后的爆炸罐中,存在有大量的盛六氟化硫气体的玻璃瓶碎渣,并且形成的大量碳粉将生成的大小粒子完全包裹,使对样品的分析变得困难。由于爆后取得的样品粒子大小差异太大,成分较为复杂,将其筛分以利于对其进行分析。筛分的粒子大小如表 1 所示,表中 d 表示粒径。

表 1 爆轰实验中各样品成分分析

Table 1 Element analysis results of the products in the detonation experiment

样品号	$d/\text{目}$	$w/\%$	$w_{\text{Ag}}/\%$	$w_{\text{Cu}}/\%$	$w_{\text{Fe}}/\%$	$w_{\text{Al}}/\%$	$w_{\text{Si}}/\%$	$w_{\text{S}}/\%$	$w_{\text{Cl}}/\%$	$w_{\text{Ca}}/\%$
1	<120	31.9	58.9	5.1	21.6	6.9	3.1	1.80	1.54	1.17
2	80~120	6.7	22.0	2.8	38.4	7.0	26.0	0.87	1.16	1.77
3	50~80	13.5	17.4	2.2	31.4	5.0	40.7	0.86	0.43	2.05
4	30~50	18.7	19.1	2.3	30.1	4.8	41.1	0.67	0.47	1.57
5	20~30	25.3	18.4	1.4	26.0	4.6	46.5	0	0	3.06
6	8~20	3.9	15.1	1.8	42.5	5.4	22.7	0.52	0.50	4.13

注:表中粒径的单位“目”与分样筛筛孔内径的关系为:目数 $\approx 14\ 832.4/(\text{筛孔内径 } \mu\text{m})$ 。

2.2 样品成分分析

实验爆炸装置悬挂在爆炸罐的中心部位,只在罐底有一块直径约 500 mm 的木质圆形脚踏板,爆后也没有严重炭化,所以爆后木炭的影响较小,黑色碳粉主要是有机炸药不完全燃烧形成的,加载的金属成分主要是货币银,其中含有少量的铜,铝条也有部分形成了细小的粒子,但也有一部分还是片状。用 EDS 方法对样品的成分进行分析,结果如表 1 所示。

对于表中的 6 种样品来说,银主要分布在粒径较小的样品中,小于 120 目的样品中银的含量几乎接近 60%,大约是 8~20 目银含量的 4 倍,这主要是因为银处于爆炸装置的爆心位置,生成的银的颗粒粒径是很小的,和罐中炸药形成的碳粉混合,粘合成较大的颗粒,这些颗粒的尺寸也大多处于 120 目以下。在较大的粒子中含有的银粒子,并不是其粒径大,而是被大粒子粘附或包裹在大粒子中,尤其在高温高压下,处于爆心的物质被液化甚至汽化,细小的粒子在液滴滚落过程中相互粘结合形成较大的粒子。30~50 目样品银含量和 50~80 目样品比较接近,这是因为盛装 SF_6 的玻璃瓶在爆炸作用下产生大量玻璃碎屑的结果,玻璃瓶放置在离爆心较远的人孔位置,受到的冲击力较小。由各样品中硅的含量可知,产生的大量的玻璃碎屑粒径在 20~80 目的范围内,在筛分后的样品中,占据了相对较大的比例,从而形成了在 20~80 目样品中银含量变化不大。铜含量和银含量的趋势是相同的,它们都出自货币银。铁的含量较大,而且铁的含量分布在粒径较大的粒子中,主要来自于爆炸罐内壁的铁锈。硫来自于示踪气体 SF_6 的燃烧分解。铝在各个粒径粒子中的含量变化不大,分布比较均匀,这与铝在爆炸前所处的位置有关系,属于形成一部分大颗粒也形成一部分小颗粒的爆炸装置边缘区。钙和硅含量的增长趋势较一致,可能来源于罐中的灰分或玻璃渣。根据回收物的银含量计算,银样品的回收率约 30%。

2.3 样品的晶粒度分析

图 2 是样品 1 的 XRD 图谱,其他样品的图谱跟样品 1 相似。从图中可以看出,在 $2\alpha = 38.301^\circ$ 、 44.583° 、 64.744° 处的 3 个衍射峰与面心立方银的衍射卡相一致,分别对应面心立方银晶面(111)、(200)和(220)的衍射峰,没有观察到其他形式的银的衍射峰信号,说明生成的银的纳米粒子为单晶面心立方结构。利用 Scherrer 公式计算银的平均晶粒度为 18.2 nm。这与文献[33]中采用爆轰方法合成碳包覆纳米钴、镍磁性材料的粒径分别为 30~50、25~60 nm 以及文献[32]中进行爆轰条件优化后制备的镍钴粒子的晶粒度为 10~25 nm 的报道相吻合。但从表 2 的数据可知,本次实验生成的银粒子的晶粒度更加均匀、范围更小,在 15.9~22.2 nm 范围内。表 2 中 D 表示银晶粒度, l 表示粒子晶格参数。

表 2 XRD 分析银晶粒度
Table 2 Grain size by XRD analysis

样品号	D/nm	l/nm
1	22.2	0.406 6
2	16.2	0.407 3
3	15.9	0.406 7
4	16.7	0.407 0
5	19.7	0.407 7
6	18.3	0.407 6

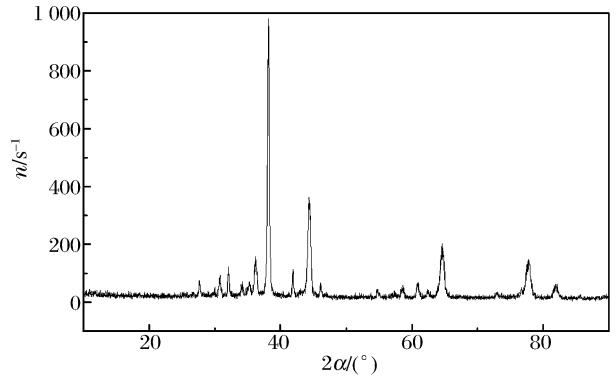


图 2 爆轰样品的 XRD 图

Fig. 2 XRD pattern of the detonation samples

纯银和铜的晶格参数分别为 0.408 6、0.316 5 nm。由表 2 中所列举的生成的银粒子的晶格参数可知，银的晶格参数减小。这是因为，由于铜的晶格参数比银小，在爆后形成的纳米粒子仍然是银和少量铜的共熔体。

对生成的银粒子粒径的测量表明，在爆轰条件下，处于爆炸中心附近的物质所生成的粒子的晶粒度很小，并且实验是在一个密闭的缺氧环境中进行，实验中炸药的不完全燃烧生成无定形碳或细小的石墨晶体夹杂着爆轰生成的金属粒子以及环境中的杂质，爆后密封放置，经过一天的逐渐沉降和凝结，各种小粒子粘结形成了较大的团聚大粒子。但如果爆轰在一个开放的环境中进行，处于一个富氧实验条件，则由于爆轰中处于爆轰中心的易燃物质的完全燃烧，生成的粒子的粒径将会较小，并且在环境中的扩散半径将大大增加。

2.4 样品形貌分析

实验爆炸装置金属成分较少，实验中碳粉基本是由 RHT-901 炸药不完全燃烧生成的。两块炸药中间的缝由铝条密封，爆时铝条向外飞散，与罐壁发生剧烈撞击，形成大小不一的粒子，并有少量块状和薄片状铝，大的直径约 1.5 cm，小的约 2 mm。爆后在罐底收集到许多小粒子形成的团聚物，这些粒子相互之间的结合力小，轻轻的摇晃也能使它们部分相互分离，分离后的粒子成球形颗粒，外包裹碳粉，经分析证明，它们主要是铝融化形成的。大粒径样品中，20~30 目的粒子玻璃片较多，大部分粒子形状不规则，30~50、50~80、80~120 目这 3 种样品除了玻璃碎片外，其余多为球形样品，经研究，这些粒子成分较为复杂，更多的是银粒子和其他杂质相互粘合在一起的团聚物。

图 3 是部分样品的 SEM 照片。图 3(a)是粒径约 150 μm 的粒子 840 倍 SEM 照片，它代表了大粒径的粘合粒子，由图中可以看出，粒子呈椭球形，表面凹凸不平，分布着许多形态各异的小粒子，而且这些粒子的结合不是很紧密，表明它是在温度不高的情况下，通过简单的物理粘合形成的。将此粒子表面放大至 7 000 倍，得到图 3(b)，可以看出表面是由许多更小的表面比较光滑的球形粒子和不规则的杂质粒子构成，这些球形粒子，小的直径约 0.1 μm，大的约 0.5 μm，并且这些粒子中间存在着比较大的孔隙，直径较大的约 1 μm，较小的约 0.2 μm。由 X 射线衍射分析，银的晶粒度约为 18 nm，即这些球形粒子大多也是碳粉、银及其他杂质的混合物，其结构也很复杂，但这些粒子结合得比较紧密，它们可能是爆后高温粒子相互粘结或高温粒子和其他物质粒子粘结形成的。图 3(c)~(d)是在清华大学电镜实验室制作的高倍 SEM 照片，图 3(c)中有许多球形粒子，经估算小的粒径在 30 nm 以下，估计是银粒子，稍大一些的是氧化亚铁粒子，还有一些不规则的可能是靠近密封边缘的铝片形成的粒子或管壁被大的碎片撞击脱落的小块铁片。对球形结合较为紧密的小粒子进一步放大，如图 3(d)，可以更清楚地看出球形粒子的粒径也在 30 nm 左右，与前面 XRD 计算的银的晶粒度相近，可以确定为银粒子。其中也含有许多不规则粒子，为铁和铝粒子，在这些粒子上也存在着许多小的微孔。

为了更清楚地了解元素的分布情况，我们对样品 1 中几种元素在表面的分布情况进行了扫描，如

图 4。从 SEM 图和元素扫描图中银的分布可以判断,球形金属粒子大部分为银粒子,银元素的含量最高。在元素扫描图中用红线标记的约含有几个暗色粒子的区域,银的含量明显较低,而铝、铁、氧含量高,应为铁铝氧化物粒子区域。

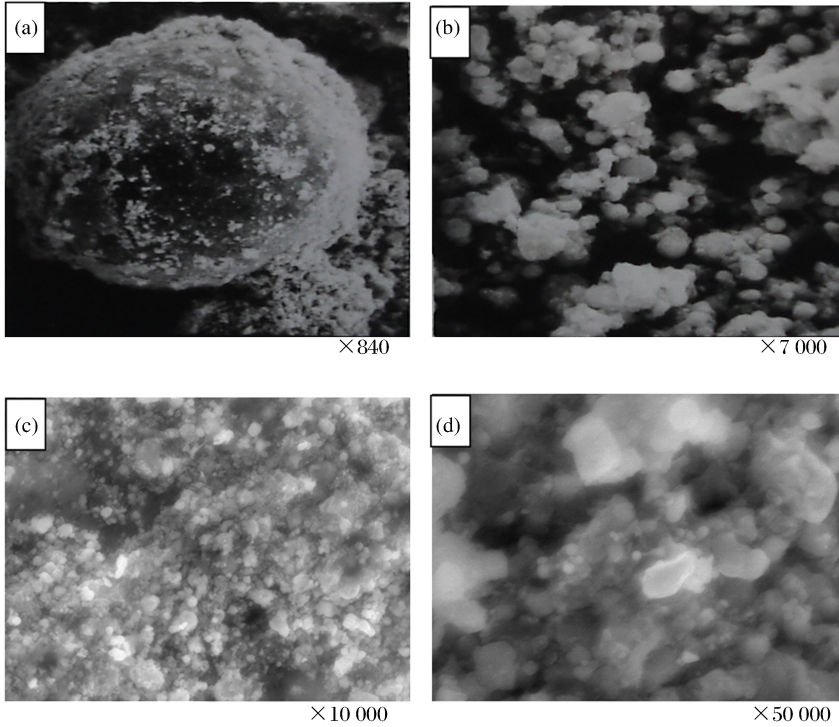


图 3 样品的 SEM 照片

Fig. 3 SEM images of the samples

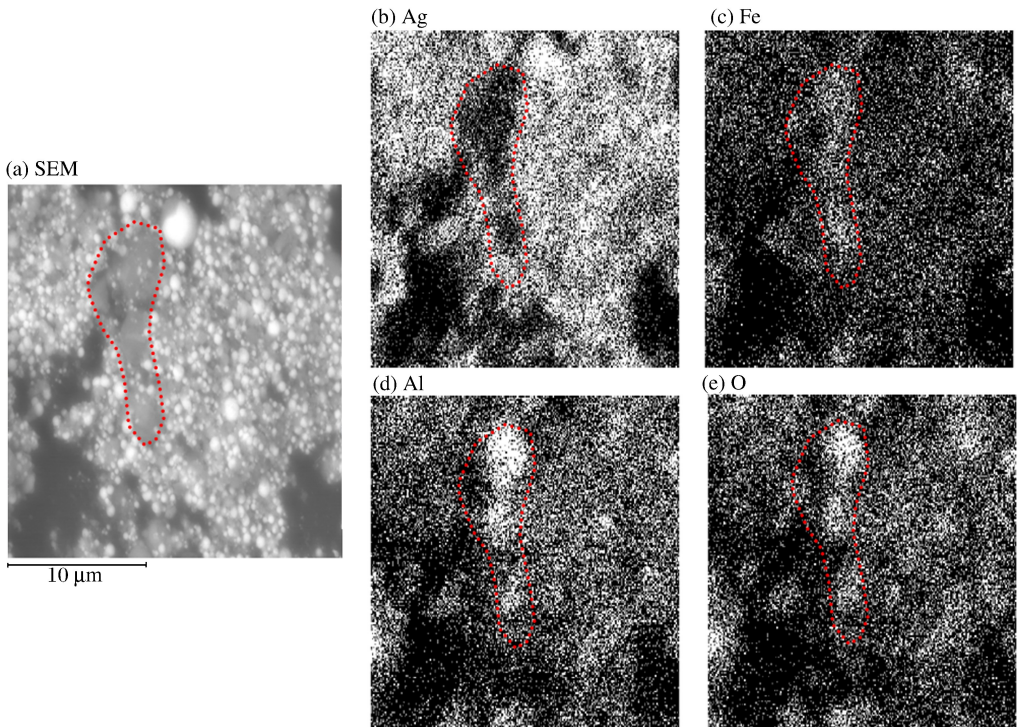


图 4 样品 1 中含金属和氧成分的扫描图

Fig. 4 Scanning images of oxygen and metal elements

经物理推算,在爆炸过程中,爆心压力约 26 GPa,温度超过 3 000 °C,其中夹在中间的银箔在这样巨大的能量作用下,瞬间相变为液体,然后向外剧烈飞散、滚落,相互沾附粘接,温度逐渐降低的同时也附着了许多未完全燃烧的碳粉和其他杂质,这样既形成了结构比较紧密、外表稍光滑、以金属为主要成分的较小粒子,也形成了结构比较松散、包含碳粉和其他杂质以及金属粒子的大的粒子,这种粒子有较大的孔隙。

2.5 比表面、孔径和孔体积测量

因为生成的样品中含有的碳的成分比较多,我们对表 1 中含碳量较高的 2 种样品的比表面积、孔隙度及孔径进行了分析,结果为样品 1 和样品 2 的比表面积分别为 8.7、5.7 m²/g,孔体积分别为 0.015、0.006 1 mL/g,孔径分别为 6.8、4.8 nm。发现 2 种样品比表面都比较小,这是因为在生成的样品中,含有的碳相对来说并不多,样品中主要成分还是金属。孔的宽度约 5 nm,说明这些金属粒子的结合比较紧密。

3 结 论

(1)用金属银模拟研究爆轰条件下核材料钚的行为,对爆轰后生成的粒子进行分析,依此来评价核爆炸事故对环境和人员的影响。核材料生成粒子的晶粒度,是我们研究得到的最重要数据。一方面,晶粒度影响包含在其中的裂变气体的释放,粒子越小,越有利于裂变气体的释放;另一方面,生成的粒子的晶粒度越小,扩散的距离也越远,污染的范围也越大。

(2)在爆炸罐中进行的爆轰实验是在缺氧环境中进行的,炸药的不完全燃烧生成了许多的无定形碳和细小的石墨晶体,并且此次实验带入了许多杂质,实验后又进行了充分的沉降和凝结,形成了粒径较大的团聚体,这些粒子粒径范围很宽,从 200 μm 到几十纳米,大粒径粒子所占的比例较大。但大多数的钚爆炸事故是在氧气充足的环境下进行的,生成的粒子粒径要小得多,对人和环境的危害也会更大。

(3)爆炸罐中,对加载银的爆轰实验样品进行的分析结果表明:筛分的样品,银主要分布在粒径较小的粒子中,X 射线衍射分析,银粒子晶粒度为 15.9~22.2 nm。高倍电子显微镜下,可以看到团聚体中银粒子的粒径约 30 nm,较好地印证了 XRD 分析的结果。这说明在爆轰条件下,加载在爆心位置的钚材料生成的粒子的粒径是很小的,其中含有的裂变气体很容易释放,造成气体污染;如果在氧气充足的自然环境下,没有其他爆轰产生的杂质和核材料生成的纳米级钚小粒子有效聚合,将可能扩散较大距离,造成大面积的环境污染。

(4)作为对钚爆炸事故的应急处理措施,可以在发生事故后,用高压枪或飞机喷洒带粘性的固体粒子,使其和细小的纳米级钚粒子粘合成较大粒子,以加速沉降,降低环境污染范围。

参考文献:

- [1] Haschke J M. Evaluation of source-term data for plutonium aerosolization[R]. Los Alamos National Laboratory: LA-12315-MS, 1992.
- [2] Peterson D E, Early J W, Starzynski J S, et al. Helium release from radioisotopic heat sources[R]. Los Alamos National Laboratory: LA-10023, 1984.
- [3] Barbara A M, Rohr D D, Mulford R N R. Helium release and microstructural changes in ²³⁸PuO₂[R]. LA-5524, 1974.
- [4] Govers K, Lemehov S, Hou M, et al. Molecular dynamics simulation of helium and oxygen diffusion in UO_{2+x}[J]. Journal of Nuclear Materials, 2009,395:131-139.
- [5] Freyss M, Vergnet N, Petit T. Abinitio modeling of the behavior of helium and xenon in actinide dioxide nuclear fuels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2006,352:144-150.
- [6] 王柏春,朱永伟,陈立勋,等.爆轰产物法合成纳米金刚石研究现状[J].矿冶工程,2002,22(3):96-100.
Wang Bai-chun, Zhu Yong-wei, Chen Li-fang, et al. Current state of nanodiamond synthesized by explosive detonation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2002,22(3):96-100.

- [7] 陈权, 恽寿榕. 爆轰合成超细金刚石机理探讨[J]. 爆炸与冲击, 1996, 16(4): 326-332.
Chen Quan, Yun Shou-rong. Exploration of the mechanism of synthesis ultradispersed diamond by detonation[J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 16(4): 326-332.
- [8] 金增寿, 徐康. 炸药爆轰法制备纳米金刚石[J]. 含能材料, 1999, 7(1): 39-44.
Jin Zeng-shou, Xu Kang. Nanoscale diamond synthesized by explosive detonation[J]. Energetic Materials, 1999, 7(1): 39-44.
- [9] 徐洸, 赵家政, 徐康. 爆炸法合成纳米金刚石微粉的结构研究[J]. 电子显微学报, 1999, 18(4): 438-442.
Xu Tao, Zhao Jia-zheng, Xu Kang. Study on the structure of diamond nanoparticles formed by explosive detonation[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 1999, 18(4): 438-442.
- [10] 文潮, 孙德玉, 李迅, 等. 炸药爆轰法制备纳米石墨粉及其在高压合成金刚石中的应用[J]. 物理学报, 2004, 53(4): 1260-1264.
Wen Chao, Sun De-yu, Li Xun, et al. Nano-graphite synthesized by explosive detonation and its application in preparing diamond under high-pressure and high-temperature[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(4): 1260-1264.
- [11] 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.
Xu Kang, Xue Qun-ji. Nanometer-sized diamond powders synthesized by explosive detonation[J]. Progress in Chemistry, 1997, 9(2): 201-208.
- [12] 姚惠生, 黄风雷, 仝毅. 以水为保护介质爆轰法合成纳米石墨[J]. 含能材料, 2005, 13(5): 330-332.
Yao Hui-sheng, Huang Feng-lei, Tong Yi. Preparation of ultrafine graphite by explosive detonation in water protective medium[J]. Energetic Materials, 2005, 13(5): 330-332.
- [13] 陈权, 马峰, 陈鹏万, 等. 保护介质对爆轰固相产物生成的影响[J]. 高压物理学报, 1998, 12(2): 129-133.
Chen Quan, Ma Feng, Chen Peng-wan, et al. Effect of different preservative substances on the formation of condensed carbon in detonation[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1998, 12(2): 129-133.
- [14] 章冠人. 炸药爆炸产生超细金刚石微粉问题[J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(2): 118-122.
Zhang Guan-ren. Problems about synthesis ultra-dispersed diamond by detonation[J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(2): 118-122.
- [15] 陈权, 恽寿榕. 炸药爆轰合成纳米金刚石及其应用[J]. 人工晶体学报, 2000, 29(1): 90-93.
Chen Quan, Yun Shou-rong. Synthesizing nano-sized diamond through explosive detonation and its application[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2000, 29(1): 90-93.
- [16] 王建华, 刘玉存, 田俊荣, 等. 炸药粒度对爆轰合成超细金刚石得率的影响[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(3): 268-272.
Wang Jian-hua, Liu Yu-cun, Tian Jun-rong, et al. The effect of particle size of explosive on the yield of the explosively synthesized ultrafine diamonds[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(3): 268-272.
- [17] 王保国, 张景林, 王作山, 等. 爆轰和爆炸冲击复合合成金刚石微粉得率的影响因素研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(5): 429-433.
Wang Bao-guo, Zhang Jing-lin, Wang Zuo-shan, et al. Influencing factors of the yield of diamond powder synthesized by detonation and explosion shock[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(5): 429-433.
- [18] 陈鹏万, 恽寿榕, 黄风雷, 等. 爆轰过程中游离碳的状态研究[J]. 北京理工大学学报, 1999, 19(3): 291-295.
Chen Peng-wan, Yun Shou-rong, Huang Feng-lei, et al. Study of free carbon state in detonation[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1999, 19(3): 291-295.
- [19] 文潮, 关锦清, 孙德玉, 等. 爆轰合成纳米石墨粉的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(7): 748-758.
Wen Chao, Guan Jin-qing, Sun De-yu, et al. Preparation of nano-graphite powder by explosive detonation method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(7): 748-758.
- [20] 文潮, 刘晓新, 李迅, 等. 纳米石墨颗粒粒度的测量与表征[J]. 分析测试学报, 2004, 23(1): 1-4.
Wen Chao, Liu Xiao-xin, Li Xun, et al. Measurement and characterization of nano-graphite particles size[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2004, 23(1): 1-4.
- [21] 文潮, 金志浩, 关锦清, 等. 炸药爆轰法制备纳米石墨粉[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(6): 628-631.
Wen Chao, Jin Zhi-hao, Guan Jin-qing, et al. Nano-graphite synthesized by explosive detonation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(6): 628-631.

- [22] 刘晓新, 孙得玉, 李迅, 等. 爆轰法制备纳米石墨及其特性分析[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(6): 989-998.
Liu Xiao-xin, Sun De-yu, Li Xun, et al. Nano-graphite synthesized by detonation and its characteristics[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(6): 989-998.
- [23] 刘晓新, 林英睿, 关锦清, 等. 爆轰法合成纳米石墨粉中的碳元素状态表征[J]. 材料工程, 2006(增刊): 404-406.
Liu Xiao-xin, Lin Ying-rui, Guan Jin-qing, et al. The phase attribute of carbon element in the nano-graphite synthesized by detonation[J]. Journal of Materials Engineering, 2006(suppl): 404-406.
- [24] 文潮, 金志浩, 李迅, 等. 炸药爆轰制备纳米石墨粉储放氢性能实验研究[J]. 物理学报, 2004, 53(7): 2384-2388.
Wen Chao, Jin Zhi-hao, Li Xun, et al. Experimental study on the hydrogen storage and release in nano-graphite synthesized by explosive detonation[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(7): 2384-2388.
- [25] 王小红, 李晓杰, 张越举, 等. 爆轰法制备纳米 $MnFe_2O_4$ 粉体的实验研究[J]. 高压物理学报, 2007, 21(2): 173-177.
Wang Xiao-hong, Li Xiao-jie, Zhang Yue-ju, et al. Experiment research of nano manganese ferrite powders prepared by detonation method[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007, 21(2): 173-177.
- [26] 李晓杰, 谢兴华, 李瑞勇. 纳米金属氧化物粉体爆轰合成[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(3): 271-275.
Li Xiao-jie, Xie Xing-hua, Li Rui-yong. Detonation synthesis for nano-metallic oxide powders[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(3): 271-275.
- [27] 李瑞勇, 李晓杰, 闫鸿浩. 爆轰合成纳米氧化铝颗粒的生成时间估算[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(6): 669-672.
Li Rui-yong, Li Xiao-jie, Yan Hong-hao. Estimation of growth time of nanometer aluminum oxide prepared by detonation[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(6): 669-672.
- [28] 李晓杰, 李瑞勇, 赵峥, 等. 爆轰法合成纳米氧化铝的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(2): 145-150.
Li Xiao-jie, Li Rui-yong, Zhao Zheng, et al. Ultrafine aluminum oxide production by detonation[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(2): 145-150.
- [29] 李晓杰, 王小红, 谢兴华, 等. 乳化炸药在爆轰合成纳米氧化物颗粒中的应用[J]. 含能材料, 2007, 15(5): 468-473.
Li Xiao-jie, Wang Xiao-hong, Xie Xing-hua, et al. Application of emulsion explosive in detonation synthesis of nano-oxide particles[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(5): 468-473.
- [30] 杜云艳, 李晓杰, 王小红, 等. 硝酸铈爆轰制备球形纳米 CeO_2 颗粒[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(1): 41-44.
Du Yun-yan, Li Xiao-jie, Wang Xiao-hong, et al. Preparation of nano-sized CeO_2 particles utilizing $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ by detonation[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(1): 41-44.
- [31] Greiner N R, Philips D S, Johnson J D, et al. Diamonds in detonation soot[J]. Nature, 1998, 333: 440-442.
- [32] 罗宁, 李晓杰, 王小红, 等. 碳包覆镍/钴纳米颗粒的爆轰合成法[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(4): 390-394.
Luo Ning, Li Xiao-jie, Wang Xiao-hong, et al. Detonation synthesis of carbon-encapsulated nickel/cobalt nanoparticles[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(4): 390-394.
- [33] 罗宁, 李晓杰, 闫鸿浩, 等. 爆轰合成碳包覆钴、镍磁性纳米颗粒的探索[J]. 高压物理学报, 2009, 23(6): 415-420.
Luo Ning, Li Xiao-jie, Yan Hong-hao, et al. Detonation synthesis of carbon encapsulated cobalt/nickel nanoparticles[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(6): 415-420.
- [34] Luo Ning, Li Xiao-jie, Fei Hong-lu, et al. Detonation synthesis of carbon-encapsulated nickel nanoparticles[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(2): 111-117.
- [35] Fritz J N. A simple plane wave explosive lens[R]. Los Alamos National Laboratory Report; DE91-004297, 1990.
- [36] Vigil M G. Plane shock generator explosive lens[R]. Sandia Report; SAND94-3206. UC-742, 1996.
- [37] 于雁武, 刘玉存, 郑欣, 等. 冲击波作用合成氮化碳及表征[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(2): 113-118.
Yu Yan-wu, Liu Yu-cun, Zheng Xin, et al. Shock synthesis and characterization of carbon nitride[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(2): 113-118.
- [38] Condit R H. Plutonium dispersal in fires: Summary of what is known[R]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory; UCRL-ID-114164, 1993.
- [39] Sagertz M J. Violent reaction source term study[R]. Sandia Report, SAND94-3252. UC-610, 1995.
- [40] Mian Z, Ramana M V. Plutonium dispersal and health hazards from nuclear weapon accidents[J]. Current Science, 2001, 180(10): 1275-1284.

Characterization of solid-particle products in detonation experiment added coin silver*

Ma Jun^{1,2}, Tang Yuan-ming², Zhang Qin-ying², Liu Qiang², Gong You-jin²,
Yan Zhao-tong², Du Wei-xing², Liu Hao¹, Jiang Gang¹

(1. *Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichan University,*
Chengdu 610065, Sichuan, China;

2. *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academic of Engineering Physics,*
Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: The morphology, composition, structure, grain size, surface area, pore volume and pore size of the detonation products were characterized by using different techniques including the X-ray diffraction (XRD), the scanning electron microscopy (SEM), the X-ray photoelectron spectroscopy (EDS) and the specific surface area and porosity analysis. The results show that the lattice constant of the eutectic melt particle system composed by silver and a small account of copper is smaller than that of the pure silver. The XRD analyses indicate that the grain size of the silver particles in the eutectic melt system is 15.9~22.2 nm. The SEM analyses reveal that the bigger ellipsoid detonation product particles consist of some small smooth spherical silver particles and different components, the FeO in which comes from the detonation vessel, the amorphous carbon from the organic explosive combustion in the seal vessel, and the Al and Si from the detonation facility. The morphology investigations agree with the XRD analyses. To make it clear that the detonation products containing some carbon powder act as the role of adsorption, the surface area, pore volume and pore size were also discussed.

Key words: mechanics of explosion; solid-particle products; detonation experiment; silver; characterization

* Received 29 June 2012; Revised 13 August 2012

Corresponding author: Jiang Gang, gjiang@scu.edu.cn