

# 高压物理学报

## 气相爆轰反应中纳米TiO<sub>2</sub>颗粒的动态收集及微观生长机制

赵铁军 王自法 闫鸿浩 王小红 李晓杰

### Dynamic Collection and Micro-Growth Mechanism of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles in Gaseous Detonation Reaction

ZHAO Tiejun, WANG Zifa, YAN Honghao, WANG Xiaohong, LI Xiaojie

引用本文:

赵铁军, 王自法, 闫鸿浩, 等. 气相爆轰反应中纳米TiO<sub>2</sub>颗粒的动态收集及微观生长机制[J]. 高压物理学报, 2021, 35(5):053201. DOI: 10.11858/gywlb.20210746

ZHAO Tiejun, WANG Zifa, YAN Honghao, et al. Dynamic Collection and Micro-Growth Mechanism of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles in Gaseous Detonation Reaction[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2021, 35(5):053201. DOI: 10.11858/gywlb.20210746

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210746>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 二茂铁质量对气相爆轰法合成碳纳米管的影响

Effect of Ferrocene Precursor Mass on Gaseous Detonation Synthesis of Carbon Nanotubes

高压物理学报. 2017, 31(4): 389 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.006>

#### 气相爆轰法合成含铁多壁碳纳米管

Gaseous Detonation Synthesis of Iron-Encapsulated Multi-Walled Carbon Nanotubes

高压物理学报. 2017, 31(3): 209 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.03.001>

#### 爆轰合成氧化亚铁掺杂的二氧化硅包覆铁纳米颗粒

Detonation Synthesis of Ferrous Oxide Doped Silica Coated Iron Nanoparticles

高压物理学报. 2018, 32(2): 023402 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170546>

#### 氧气浓度对气相爆轰合成纳米碳球的影响

Influence of Oxygen Concentration on Carbon Nanospheres Prepared by Gaseous Detonation

高压物理学报. 2017, 31(1): 15 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.01.003>

#### 五羰基铁气相爆轰法合成纳米碳胶囊

Synthesis of Nanocarbon Capsules by Vapor Detonation of Pentacarbonyl Iron

高压物理学报. 2018, 32(6): 063401 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180562>

#### 超声波作用下SiO<sub>2</sub>纳米颗粒的分离

Separation of Two SiO<sub>2</sub> Nanoparticles under Ultrasonic Vibration

高压物理学报. 2018, 32(4): 042401 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180526>

DOI: 10.11858/gywlxb.20210746

# 气相爆轰反应中纳米 TiO<sub>2</sub> 颗粒的动态收集及微观生长机制

赵铁军<sup>1,2</sup>, 王自法<sup>1</sup>, 闫鸿浩<sup>2</sup>, 王小红<sup>2</sup>, 李晓杰<sup>2</sup>

(1. 河南大学土木建筑学院, 河南 开封 475004;

2. 大连理工大学工程力学系, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 在气相爆轰制备纳米 TiO<sub>2</sub> 实验中, 将设计的可移动纳米粉体收集网台内置于爆轰管内, 收集到了爆轰反应过程中生成的纳米 TiO<sub>2</sub>, 首次采用实验的方法探讨了气相爆轰制备纳米颗粒的生长机制。经分析发现, 网台上与爆轰管壁收集的粉体为金红石相与锐钛矿相 TiO<sub>2</sub>, 且网台上 TiO<sub>2</sub> 的粒径明显小于管壁上收集的 TiO<sub>2</sub> 粒径。网台到爆轰管尾端的距离对颗粒尺寸影响非常显著, 距离越近, 纳米 TiO<sub>2</sub> 的粒径越小。结合爆轰波/冲击波在爆轰管中的传播规律, 基于实验观察, 进一步揭示了气相爆轰合成纳米颗粒的生长机制。

**关键词:** 气相爆轰法; 生长机制; 动态收集; 纳米颗粒; 二氧化钛

**中图分类号:** O389

**文献标识码:** A

自发现纳米材料以来, 国内外学者对其制备方法开展了大量的研究<sup>[1]</sup>, 至今对于制备方法的创新仍未停止。爆轰法作为一种制备纳米材料的方法, 采用可爆物作为能量源, 能够在极短的时间内产生高温高压环境以获得纳米材料。根据爆源的不同, 可将爆轰法分为凝聚态炸药爆轰法和气相爆轰法<sup>[2]</sup>。1984 年, Staver 等<sup>[3]</sup> 在研究炸药爆炸后的残渣时发现了纳米金刚石; 1988 年, Greiner 等<sup>[4]</sup> 也发现了类似的现象, 从而掀起了爆轰合成纳米金刚石的研究热潮。目前, 凝聚态炸药爆轰法已被应用于纳米氧化物<sup>[5-6]</sup>、纳米氮化物<sup>[7]</sup>、纳米石墨<sup>[8]</sup>、纳米锰酸锂<sup>[9]</sup>、纳米碳包金属<sup>[10]</sup> 等材料的制备。爆轰法还可以辅助化学气相沉淀法用于制备更多种类的纳米材料<sup>[11-12]</sup>。

随着对爆轰法研究的深入, 以可燃性气体为爆源的气相爆轰法引起了不少关注。气相爆轰法可用于制备纳米氧化物<sup>[13]</sup>、纳米碳包金属<sup>[14]</sup>、石墨烯<sup>[15]</sup> 以及碳量子点<sup>[16]</sup> 等材料。研究者对纳米材料在气相爆轰过程中的生长机理做了较深入的研究。陈天梧等<sup>[17]</sup>、Luo 等<sup>[18]</sup> 将单分散性 Kruis 模型引入气相爆轰流场, 初步模拟了球形纳米 TiO<sub>2</sub> 颗粒的生长过程, 并指出反应温度、颗粒浓度和反应时间是影响颗粒生长的主要因素。闫鸿浩等<sup>[19]</sup> 采用 Kruis 模型并结合温压转换关系推导了气相爆轰合成 TiO<sub>2</sub> 过程中的气体黏滞系数, 关于粒径的预测与实验结果吻合。通过将 CE/SE 算法与 Kruis 模型相结合, 解决了纳米颗粒快速生长的限制问题, 并能很好地预测颗粒尺寸分布<sup>[20]</sup>。Zhao 等<sup>[21]</sup> 通过调整可燃性气体摩尔比研究了爆源对核壳类碳纳米材料形貌的影响, 并对碳纳米管的生长过程进行了讨论。虽然关于气相爆轰合成纳米材料的生长机理有较深入的理论分析, 且研究对象均为沉积于管壁的颗粒, 但颗粒长大的动态过程尚未在实验中观察到, 这是揭示气相爆轰合成纳米材料生长机理中缺失的重要依据。

本研究通过设计一种能够移动的可收集纳米颗粒的网台, 将其内置于气相爆轰管中, 在气相爆轰合成 TiO<sub>2</sub> 实验中收集爆轰波阵面后的纳米颗粒, 探讨爆轰管内爆轰波/冲击波的传播/反射对颗粒尺寸的影响, 以揭示气相爆轰反应中纳米颗粒的生长机制。

\* 收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(11672068)

作者简介: 赵铁军(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事爆炸加工及电磁吸波研究. E-mail: tiejun\_zhao@henu.edu.cn

通信作者: 王自法(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事地震损伤及大数据分析研究. E-mail: zf\_wang@henu.edu.cn

闫鸿浩(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事爆炸加工及工程爆破理论研究. E-mail: yanhh@dlut.edu.cn

## 1 实验及表征

近年来,关于气相爆轰法制备纳米材料的文献<sup>[22-24]</sup>相对较多。为了进一步揭示纳米颗粒在气相爆轰过程中的生长规律,采用TiCl<sub>4</sub>作为前驱体,氢气、氧气作为爆源,在自制气相爆轰管内引爆获得纳米TiO<sub>2</sub>粉体,气相爆轰管的示意图如图1所示。爆轰过程中纳米粉体的收集是本实验的关键,其结构示意图见图2,具体实验步骤如下。

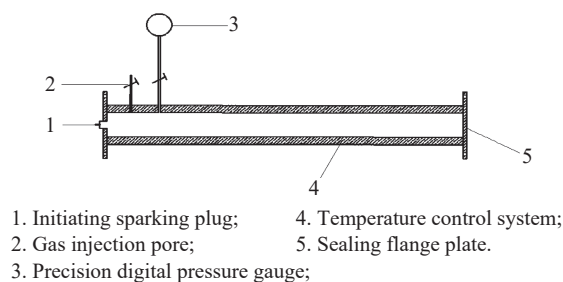


图1 气相爆轰管示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gaseous detonation tube

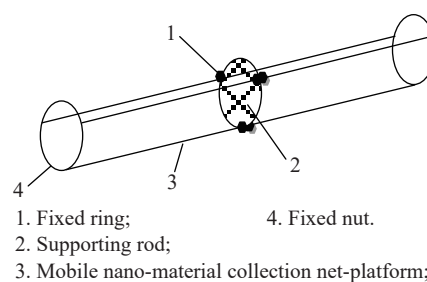


图2 纳米材料收集装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of nano-material collection device

首先,制作可移动的纳米粉体收集网台,该网台包括2个固定圆环,3根支撑杆,如图2所示。以直径为6 mm的不锈钢制作外径为95 mm的固定圆环,截取3根等长度、直径为6 mm的螺纹丝钢并附固定螺帽,将圆环与螺纹丝钢按照图2焊接即可得到纳米粉体收集网台框架。将10目的不锈钢网片裁剪成直径为95 mm的圆片,作为纳米材料的收集网台,然后用螺帽将其固定于收集装置的固定框架上,即可完成纳米材料收集装置的制作。

其次,收集气相爆轰过程中的纳米粉体。将气相爆轰管清洗干净并彻底干燥。用乙醇清洗并干燥纳米材料收集网台的框架,以免杂质对样品产生污染。将用乙醇超声波清洗并干燥后的收集网台按照距爆轰管尾部分别为160、320、640 mm固定于框架上,然后将该纳米材料收集装置放置在气相爆轰管内,使其一端与爆轰管尾部法兰盘接触对齐,以减少对管壁的损伤。

接着,密封气相爆轰管,抽真空,待温控系统显示130 °C且保温5 min后,注入2 mL的TiCl<sub>4</sub>,并按照体积比为2:1依次充入H<sub>2</sub>与O<sub>2</sub>至0.1 MPa。5 min后用20 J电火花引爆混合气体。静置5 min后打开气相爆轰管,取出纳米材料收集装置,收集网台上的纳米粉体。纳米TiO<sub>2</sub>粉体的动态收集分3次进行,对照实验中,仅未放置纳米材料收集装置,其余步骤相同。爆轰反应中TiCl<sub>4</sub>分解的方程式为



最后,采用粉末X射线衍射仪(D/MAX 2400,日本理学公司,Cu靶,40 kV,30 A)在20°~85°范围内扫描分析纳米粉体的物相构成。采用透射电镜(Tecnai F30,美国FEI公司)观察纳米粉体的形貌结构,分析气相爆轰合成纳米材料过程中材料结构和尺寸的变化。

## 2 结果与分析

以TiCl<sub>4</sub>作为前驱体,采用氢-氧爆源制备纳米二氧化钛的研究显示,其粉体由锐钛矿相和金红石相组成<sup>[24-25]</sup>。由于本研究收集到的纳米粉体的X射线衍射峰几乎没有变化,因此仅展示了对照组收集的纳米粉体的X射线衍射(XRD)谱,如图3所示。显然,该纳米粉体同样由金红石相和锐钛矿相组成。在25.3°、62.7°和82.6°处的衍射峰对应锐钛矿相,剩余衍射峰的数量较多、峰强较高,来自金红石相,尤其(110)、(101)、(211)晶面衍射峰最明显。从XRD谱可看出,金红石相的衍射峰强度及数量明显多于锐钛矿相,根据文献[26]关于金红石相和锐钛矿相比例的理论计算,可发现氢-氧爆轰制备的纳米TiO<sub>2</sub>中金红石相与锐钛矿相的比例约为97:3,表明制备的纳米粉体几乎由金红石相构成。选取锐钛矿相25.3°及金红石相27.3°处对应的衍射峰,经Scherrer公式<sup>[27]</sup>计算得到二者的晶粒尺寸分别为

23.8 和 43.5 nm, 进一步确认了物相构成和晶粒大小, 表明气相爆轰制备纳米二氧化钛时, 仍存在锐钛矿相向金红石相转变过程, 与炸药爆轰制备 TiO<sub>2</sub> 结果相似<sup>[28]</sup>。

为了探究纳米粉体制备过程中气相爆轰冲击波对纳米粉体形貌的影响, 对收集的纳米粉体进行了透射电镜(TEM)表征, 结果见图 4。图 4(a) 为对照组中纳米粉体的 TEM 照片, 可见 TiO<sub>2</sub> 颗粒尺寸在微米级别。可移动收集网台距爆轰管尾端 160 mm 处的粉体 TEM 照片(图 4(b))显示, 颗粒结构清晰, 呈球状, 颗粒尺寸较小, 且大部分粒径在 20 nm 左右, 个别颗粒尺寸较大。图 4(c) 为可移动收集网台距爆轰管尾端 320 mm 处的粉体 TEM 照片, 发现 TiO<sub>2</sub> 颗粒形貌规则, 出现较明显的棱角, 粒径尺寸比图 4(b) 稍有增大。图 4(d) 展示的是可移动收集网台距爆轰管尾端 640 mm 处的粉体 TEM 照片, 纳米 TiO<sub>2</sub> 的颗粒的棱角结构更加清晰, 颗粒尺寸明显增大, 粒径在 20~30 nm 范围内, 但仍明显小于爆轰管壁收集的 TiO<sub>2</sub> 粒径尺寸。

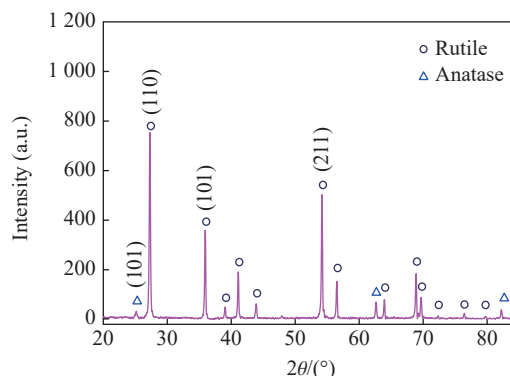


图 3 爆轰管内收集的纳米粉体的 XRD 谱

Fig. 3 XRD pattern of nano powders collected from gaseous detonation tube

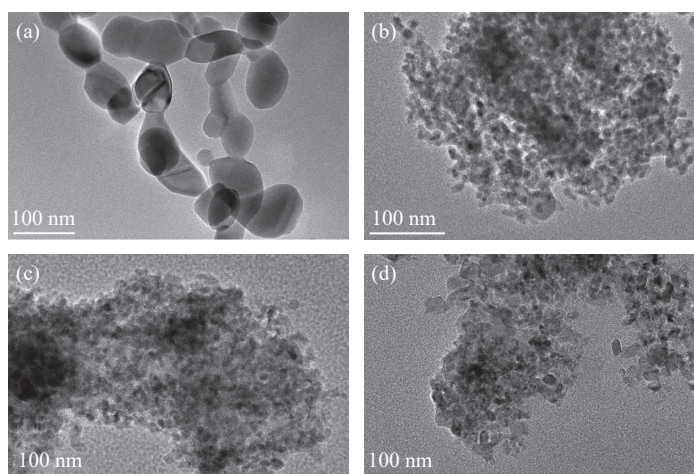


图 4 气相爆轰制备的纳米粉体的 TEM 图像: (a) 显示了无可移动收集网台时气相爆轰管收集的纳米颗粒, (b)、(c)、(d) 分别显示了可移动收集网台距爆轰管尾端 160、320 和 640 mm 时收集的纳米颗粒

Fig. 4 TEM images of nano powders prepared by gaseous detonation: (a) Nano powders collected from gaseous detonation tube without collection device; (b), (c), (d) Nano powders on the removable nano powder collection platform at 160, 320, 640 mm away from the end of gaseous detonation tube

### 3 讨 论

气相爆轰反应十分剧烈而迅速, 很难通过高速摄影技术捕捉生成纳米粉体的运动特征和生长特性。通过在爆轰管中内置可移动纳米粉体收集网台, 拦截了运动中的纳米粉体, 经 XRD 与 TEM 表征发现该纳米粉体为 TiO<sub>2</sub>, 为揭示气相爆轰反应过程中纳米粉体的动态生长提供了重要的实验数据。

图 5 为氢氧爆源摩尔比为 2 : 1 工况下的高速摄影图像。高速摄影仪的记录速度为 40 000 s<sup>-1</sup>, 其中图 5(a) 与图 5(b) 每帧间隔 1/40 000 s, 图 5(c) 每帧间隔 1/20 000 s。视窗长度为 240 mm, 当爆轰波第 1 次通过视窗时, 其速度约为 2 200 m/s。当爆轰波到达爆轰管尾端发生第 1 次反射时(如图 5(b)), 爆轰波经反射后速度发生明显衰减, 速度约为 1 526 m/s; 当爆轰波沿着爆轰管向起爆端传播发生第 2 次反射时, 如图 5(c) 所示, 能量进一步衰减, 波速衰减至约 700 m/s。因此, 爆轰反应完成后, 爆轰波将在密闭的爆轰管内携带纳米颗粒往复传播, 直至燃烧熄灭, 且速度衰减十分迅速。

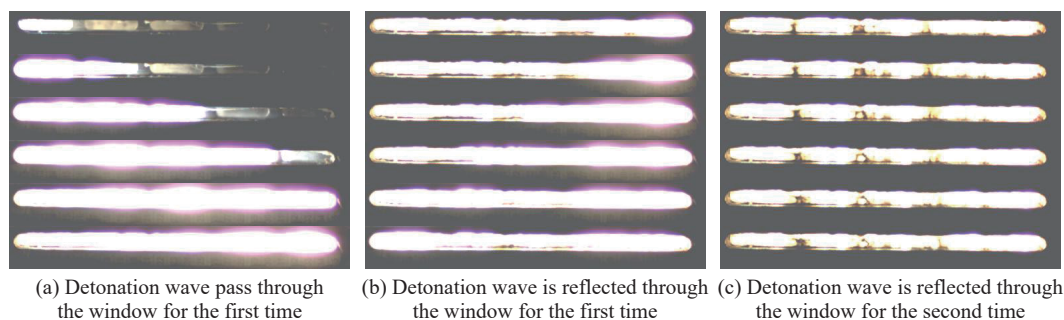


图 5 氢-氧爆轰反应的高速摄影图像

Fig. 5 Photos on the hydrogen-oxygen detonation reaction by the high-speed photography

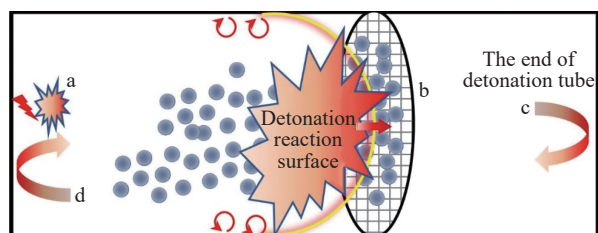
图 6 为气相爆轰反应中动态收集纳米 TiO<sub>2</sub> 的示意图。爆轰反应从 a 端起爆, 形成的爆轰波携带生成的纳米颗粒向爆轰管尾端传播, 此时波速约为 2 200 m/s。当爆轰反应波阵面传播至纳米粉体收集网台时, 部分纳米粉体颗粒黏附于网台 (图 6(b)), 波后纳米颗粒在剧烈扰动下发生碰撞, 爆温瞬时可达 3 000 K, 率先成核的锐钛矿相 TiO<sub>2</sub> 转变为金红石相 TiO<sub>2</sub>。CJ 面后爆温和爆压迅速下降, 当爆轰波在爆轰管尾端发生第 1 次反射时 (图 6(c)), 爆速衰减至约 1 526 m/s, 爆轰波再次穿过纳米粉体收集网台, 此时温度和压强均低于 CJ 面, 但持续时间稍长。当爆轰波在起爆端发生第 2 次反射时 (图 6(d)), 运动至视窗时的速度降至约 700 m/s, 温度和压强进一步降低, 但持续时间变得更长。因此, 爆轰反应完成后, 波速、温度、压强随着爆轰波的传播/反射快速衰减, 纳米粉体收集网台可收集到运动中的纳米颗粒, 而较大颗粒逐渐沉淀于管壁表面。同时, 温度骤降且低于锐钛矿相的相变温度, 因此收集到的纳米粉体含有少量的锐钛矿相。

由高速摄影图像可知, 与爆轰管尾端的距离越远, 爆轰反应后能量衰减得越明显, 但温压环境的持续时间越长。TEM 结果显示, 距爆轰管尾端 160 mm 处的 TiO<sub>2</sub> 粒径约 20 nm; 320 mm 处 TiO<sub>2</sub> 的粒径稍有增大; 当距离为 640 mm 时, TiO<sub>2</sub> 的粒径增大至 20~30 nm。不过, 动态收集的纳米 TiO<sub>2</sub> 的粒径均比管壁自然沉淀的 TiO<sub>2</sub> 的粒径小。该结果表明, 气相爆轰合成纳米材料是一个动态过程, 纳米颗粒的生长与爆轰波的传播、衰减有密切关系。在密闭的爆轰管中, 距爆轰管尾端越远, 网台上纳米颗粒的尺寸越大。因此, 采用内置网台的方法可以从微观角度捕捉气相爆轰合成纳米材料中纳米颗粒的动态生长过程, 有助于推动纳米材料微观动态生长机理的揭示。

## 4 结 论

通过设计一种可内置于气相爆轰管的可移动纳米粉体收集网台, 动态收集了气相爆轰的合成纳米 TiO<sub>2</sub> 颗粒。经 XRD、TEM 表征发现, 网台动态收集的粉体与管壁收集的粉体均由金红石相和锐钛矿相组成, 且网台上 TiO<sub>2</sub> 的粒径明显小于管壁收集的样品。采用高速摄影技术研究了爆轰管内爆轰波的传播规律, 发现纳米粉体的生长与爆轰波传播和衰减的关系十分密切, 气相爆轰合成纳米材料中纳米颗粒的生长是一个动态过程, 距爆轰管尾端越远, 爆轰波衰减越明显, 网台收集的纳米粉体粒径越大。采用内置网台的方法可捕捉运动着的纳米颗粒, 有助于推动气相爆轰合成纳米材料的微观动态生长机理研究。

今后将进一步研究无反射状态下纳米颗粒的动态收集及生长过程, 以揭示气相爆轰法制备纳米材料的微观生长过程。



(a. Electric blasting; b. Detonation wave passing through the platform; c. First reflection of shock wave; d. Second reflection of shock wave.)

图 6 爆轰管内爆轰波传播及纳米颗粒生长示意图

Fig. 6 Schematic diagram of detonation wave propagation and nanoparticle growth in detonation tube

## 参考文献:

- [1] CHEN Y, FAN Z X, ZHANG Z C, et al. Two-dimensional metal nanomaterials: synthesis, properties, and applications [J]. *Chemical Reviews*, 2018, 118(13): 6409–6455.
- [2] 赵铁军. 气相爆轰合成碳基磁性复合材料及其电磁波吸波性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.  
ZHAO T J. Study on gaseous detonation preparation and electromagnetic wave absorption property of carbon-based magnetic composites [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [3] STAVER A M, GUBAREVA N V, LYAMKIN A I, et al. Ultrafine diamond powders made by the use of explosion energy [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1984, 20(5): 567–570.
- [4] GREINER N R, PHILLIPS D S, JOHNSON J D, et al. Diamonds in detonation soot [J]. *Nature*, 1988, 333(6172): 440–442.
- [5] LYAMKINA N E, CHIGANOVA G A, SLABKO V V, et al. Ultrafine Cr-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> prepared by detonation synthesis [J]. *Inorganic Materials*, 2005, 41(8): 830–835.
- [6] QU Y D, LI X J, LI R Y, et al. Preparation and characterization of the TiO<sub>2</sub> ultrafine particles by detonation method [J]. *Materials Research Bulletin*, 2008, 43(1): 97–103.
- [7] SARDAR K, DAN M, SCHWENZER B, et al. A simple single-source precursor route to the nanostructures of AlN, GaN and InN [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2005, 15(22): 2175–2177.
- [8] SUN G L, LI X J, QU Y D, et al. Preparation and characterization of graphite nanosheets from detonation technique [J]. *Materials Letters*, 2008, 62(4/5): 703–706.
- [9] XIE X H, LI X J, YAN H H. Detonation synthesis of zinc oxide nanometer powders [J]. *Materials Letters*, 2006, 60(25/26): 3149–3152.
- [10] LUO N, LI X J, WANG X H, et al. Synthesis and characterization of carbon-encapsulated iron/iron carbide nanoparticles by a detonation method [J]. *Carbon*, 2010, 48(13): 3858–3863.
- [11] SONG J L, FENG S A, ZHAO J H, et al. Activated carbon catalyzing the formation of carbon nanotubes [J]. *Materials Research Bulletin*, 2010, 45(9): 1234–1239.
- [12] WANG C, ZHAN L, WANG Y L, et al. Effect of sulfur on the growth of carbon nanotubes by detonation-assisted chemical vapor deposition [J]. 2010, 257(3): 932–936.
- [13] WU L S, YAN H H, LI X J, et al. Characterization and photocatalytic properties of SnO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> nanocomposites prepared through gaseous detonation method [J]. *Ceramics International*, 2017, 43(1): 1517–1521.
- [14] ZHAO T J, LI X J, YAN H H. Metal catalyzed preparation of carbon nanomaterials by hydrogen-oxygen detonation method [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 196: 108–115.
- [15] NEPAL A, SINGH G P, FLANDERS B N, et al. One-step synthesis of graphene via catalyst-free gas-phase hydrocarbon detonation [J]. *Nanotechnology*, 2013, 24(24): 245602.
- [16] HE C, YAN H H, LI X J, et al. *In situ* fabrication of carbon dots-based lubricants using a facile ultrasonic approach [J]. *Green Chemistry*, 2019, 21(9): 2279–2285.
- [17] 陈天梧, 罗宁, 闫鸿浩, 等. 气相爆炸流场中 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒生长的数值分析初探 [J]. 高压物理学报, 2014, 28(6): 729–735.  
CHEN T W, LUO N, YAN H H, et al. Numerical analysis of the formation of TiO<sub>2</sub> nanoparticles in gas phase explosion flow field [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(6): 729–735.
- [18] LUO N, JING H, MA Z, et al. Growth characteristics of spherical titanium oxide nanoparticles during the rapid gaseous detonation reaction [J]. *Particuology*, 2016, 26: 102–107.
- [19] 闫鸿浩, 吴林松, 李晓杰, 等. 颗粒长大模型在气相爆轰合成纳米材料中的应用 [J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(5): 1144–1148.  
YAN H H, WU L S, LI X J, et al. Application of particles growth model in gaseous detonation of SnO<sub>2</sub> nanoparticles [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(5): 1144–1148.
- [20] LUO N, SHEN H, JING H, et al. Numerical simulation of oxide nanoparticle growth characteristics under the gas detonation chemical reaction by space-time conservation element-solution element method [J]. *Particuology*, 2017, 35: 78–83.
- [21] ZHAO T J, LI X J, WANG Y, et al. Growth mechanism and wave-absorption properties of multiwalled carbon nanotubes fabricated using a gaseous detonation method [J]. *Materials Research Bulletin*, 2018, 102: 153–159.
- [22] ZHAO T J, WANG X H, LI X J, et al. Gaseous detonation synthesis of Co@C nanoparticles/CNTs materials [J]. *Materials*

- Letters, 2019, 236: 179–182.
- [23] YAN H H, HUANG X C, XI S X. Using ethanol for preparation of nanosized TiO<sub>2</sub> by gaseous detonation [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2014, 50(2): 192–195.
- [24] YAN H H, WU L S, LI X J, et al. Optimal design and preparation of nano-TiO<sub>2</sub> photocatalyst using gaseous detonation method [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2017, 17(3): 2124–2129.
- [25] 闫鸿浩, 吴林松, 李晓杰, 等. 爆温对气相爆轰合成纳米 TiO<sub>2</sub> 结构和性能的影响 [J]. *无机材料学报*, 2017, 32(3): 275–280.  
YAN H H, WU L S, LI X J, et al. Influence of explosion temperature on structure and property of nano-TiO<sub>2</sub> prepared by gaseous detonation method [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2017, 32(3): 275–280.
- [26] SPURR R A, MYERS H. Quantitative analysis of anatase-rutile mixtures with an X-ray diffractometer [J]. *Analytical Chemistry*, 1957, 29(5): 760–762.
- [27] YAN H H, ZHAO T J, LI X J, et al. Slurry explosive detonation synthesis and characterization of 10 nm TiO<sub>2</sub> [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(13): 14862–14866.
- [28] ZHAO T J, YAN H H, LI X J, et al. Phase transition rate of anatase during detonation synthesis of TiO<sub>2</sub> [J]. *Phase Transitions*, 2017, 90(6): 618–627.

## Dynamic Collection and Micro-Growth Mechanism of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles in Gaseous Detonation Reaction

ZHAO Tiejun<sup>1,2</sup>, WANG Zifa<sup>1</sup>, YAN Honghao<sup>2</sup>, WANG Xiaohong<sup>2</sup>, LI Xiaojie<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

**Abstract:** During the preparation of nano TiO<sub>2</sub> particles via the gaseous detonation method, a portable nano-powder collection platform was located inside the gaseous detonation tube where the nano-TiO<sub>2</sub> powders were collected based on the detonation reaction. The growth mechanism of gaseous detonation preparing nanoparticles was investigated experimentally for the first time. The results demonstrated that the TiO<sub>2</sub> powders collected from platform and detonation tube wall consisted of rutile and anatase phases, and the particle size of TiO<sub>2</sub> from platform is much smaller than that of tube wall. The particle size was significantly affected by the distance from platform to the end of detonation tube, and the closer the distance, the smaller the TiO<sub>2</sub> particle size. The growth mechanism of nanoparticles prepared via gaseous detonation method was revealed based on the theory of detonation/shock wave propagation and experimental observation in detonation tube.

**Keywords:** gaseous detonation method; growth mechanism; dynamic collection; nano particles; TiO<sub>2</sub>