

文章编号: 1006-9941(2018)10-0875-06

还原氧化石墨烯对 B/KNO₃ 点火药撞击及静电感度的影响

王前, 刘洁, 任慧, 焦清介

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 采用 Hummers 法以鳞片石墨为原料制备出氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO), 进一步热还原获得还原氧化石墨烯(reduced Graphene Oxide, rGO)。通过扫描电镜观测了还原前后材料的表面形貌, 利用红外光谱分析对比了两种石墨烯衍生物片表面含氧官能团的变化, 测试了含不同比例 rGO 的 B/KNO₃ 点火药的热扩散系数和电阻率, 依据 GJB5891-2006 测试了含 rGO 硼系点火药的特性落高、临界发火电压与 50% 发火能量。结果表明, 添加 1%~5% 的 rGO 后, 点火药导热系数由 0.573 W·(m·K)⁻¹ 上升到 0.620 W·(m·K)⁻¹, 电阻率由绝缘体下降到 1.11×10⁵ Ω·cm; 点火药的特性落高从 42.3 cm 上升到 59.0 cm, 临界发火电压从 5 kV 上升到 25 kV, 这表明, 少量(5% 最佳)rGO 会显著改善点火药的撞击感度和静电感度。

关键词: 还原氧化石墨烯(rGO); B/KNO₃; 点火药; 感度

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2018121

1 引言

纳米碳材料(如富勒烯、碳纳米管、纳米石墨片层)具有良好的传导性能, 常用于复合型含能材料配方的性能调节。石墨烯(Graphene)是一种典型的纳米碳材料, 其单层碳原子以 sp² 杂化方式连接, 具有二维蜂窝状晶体结构^[1]。与传统的碳材料相比, 石墨烯具有更加优异的物理、化学以及力学性能, 因此近些年国内外科研工作者将其引入含能材料领域进行了大量的研究。早在 1859 年, Brodie^[2] 第一次报道了氧化石墨烯的热不稳定性。2012 年, 美国西北大学 Krishnan 等^[3] 阐述了氧化石墨烯具有高活性、热不稳定及不均匀放热的性质, 并指出氧化石墨烯有用于含能材料的潜质。国内学者也非常重视石墨烯及其衍生物在含能材料中的基础应用研究。张朝阳^[4] 从理论上建模, 研究层状三氨基三硝基苯(TATB)炸药分子与石墨烯多层间隔复合, 并给出这种规则的假想结构爆炸性能的理论计

算数据。李志敏等^[5] 尝试用液相法将石墨烯与斯蒂芬酸铅混合, 结果表明少量石墨烯可以显著改善斯蒂芬酸铅的静电感度。

总之, 石墨烯片层自问世以来就不断被尝试于含能材料的应用中, 但是纯净的石墨烯片层厚度仅为 0.335 nm, 制备条件苛刻、造价昂贵。石墨烯的前驱体氧化石墨烯(graphene oxide, GO) 经过 Hummers 法可大量制取, 但是因为片层中央和边缘悬挂了大量含氧性官能团, 其传导性质很差, 而且热稳定性不好, 因此 GO 不适合作为含能配方中的添加剂^[6]。而还原氧化石墨烯^[7](reduced graphene oxide, rGO) 结构介于 Graphene 和 GO, 既具有石墨烯层状结构又可以通过化学制备法快速大量获得。GO 经过还原后含氧官能团含量明显下降, 因此 rGO 性质更贴近石墨烯, 具有良好的导热导电性能^[8-10]。同时由于少量含氧官能团的存在, rGO 可以很好地分散在多种溶剂中, 与传统点火药湿混工艺具有良好的兼容性。

B/KNO₃ 点火药是现阶段较为常用的高能点火药之一, 其优点在于热值高、点火能力强, 但相应的高能量意味着较高的感度。为了对 B/KNO₃ 点火药体系进行感度调节, 本研究提出将 rGO 作为点火药体系中的添加剂。研究 rGO 对 B/KNO₃ 点火药体系的静电感度、撞击感度的影响。结合药剂导电、导热率的测试结

收稿日期: 2018-05-08; 修回日期: 2018-06-20

网络出版日期: 2018-09-06

基金项目: 总装预研基金重点项目资助(9140A05080415BQ01)

作者简介: 王前(1995-), 男, 硕士, 主要从事含能材料性能调控规律研究。e-mail: 1310260311@qq.com

通信联系人: 任慧(1973-), 女, 教授, 主要从事微纳米含能材料研究。e-mail: renhui@bit.edu.cn

引用本文: 王前, 刘洁, 任慧, 等. 还原氧化石墨烯对 B/KNO₃ 点火药撞击及静电感度的影响[J]. 含能材料, 2018, 26(10):875-880.WANG Qian, LIU Jie, REN Hui, et al. Effect of Reduced Graphene Oxide on the Impact Sensitivity and Electrostatic Sensitivity of B/KNO₃ Ignition Powder[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2018, 26(10):875-880.

果,探究 rGO 对 B/KNO₃ 点火药感度影响机制。

2 实验部分

2.1 试剂与仪器

鳞片石墨,40目,固定碳含量达99.99%,南京先丰纳米科技有限公司;无定型硼粉,硼含量为94%~96%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;去离子水自制;硝酸钾,硝酸钠,高锰酸钾,过氧化氢,氯化钡均为分析纯,浓硫酸和稀盐酸质量分数分别为98%和30%,以上试剂均由天津韦斯化学试剂有限公司提供。

瑞士梅特勒-托利多公司 Easymax 全自动反应器、宁波新艺超声设备有限公司 JY92-II DW 型超声波细胞粉碎机、郑州恒岩仪器有限公司 85-2A 型磁力搅拌器、日本日立公司 S-4800 型扫描电子显微镜、德国布鲁克公司 VECTOR22 型傅里叶红外变换光谱仪、德国耐驰公司 LFA467 型激光导热仪、中国兵器 213 所 CGY-I 型机械撞击感度仪、广州四探针科技有限公司 RTS-8 型数字式四探针测试仪、中国兵器 213 所 JGY-II 型静电感度仪。

2.2 GO 与 rGO 的制备

氧化石墨制备:采用 Hummers 法^[6]制备氧化石墨。在 Easymax 全自动反应器中放入 80 mL 浓 H₂SO₄,设置环境温度 0 °C;不断搅拌的情况下缓慢加入约 2 g NaNO₃与鳞片石墨混合均匀后,缓慢加入 6 g KMnO₄,搅拌均匀;将混合溶液温度升至 35 °C 左右,搅拌反应 5 h;将反应物倒入 2000 mL 烧杯中,不断搅拌中加入 500 mL 去离子水,2 h 后在搅拌中加入约 12 mL H₂O₂(30%);用稀盐酸过滤至没有硫酸根为止(1 mg·mL⁻¹的 BaCl₂溶液进行检测),然后对所得混合物进行抽滤、洗涤;将所得的氧化石墨固体在 60 °C 的真空干燥箱中烘干。

GO 制备:称取少量烘干的氧化石墨分散于适量去离子水中配成悬浊液,在超声波粉碎机中超声剥离,直到看不到悬浮物;将分散液在 1000 r·min⁻¹ 的转速下离心 1 h 后得到 GO 分散液;对所得分散液进一步抽滤、洗涤、烘干即得到 GO 粉末。

rGO 制备:采用热还原法制备 rGO。称取一定量的 GO 粉末置于烧杯中,于加热盘上迅速升温至 250 °C^[11-12],保温 15 min,GO 受热发生膨胀,所得固体产物即 rGO。其制备流程见图 1。

2.3 制备含不同比例 rGO 的 B/KNO₃ 点火药

采用湿混的方法将 rGO 与点火药进行混合

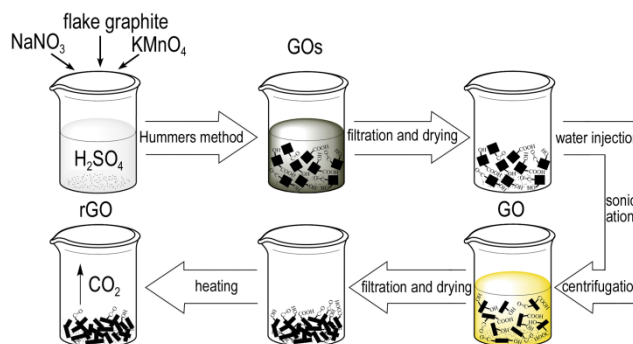


图 1 还原氧化石墨烯制备流程图

Fig.1 Flow chart of preparation for reduced graphene oxide

($m(\text{B}):m(\text{KNO}_3):m(\text{F}_{2602})=67.4:26.6:6$, rGO 外添质量比分别为 0%、1%、3%、5%),具体步骤如下:硼粉、硝酸钾分别过 100 目筛;按照比例称量原料,并一起过 80 目筛;加入一定量的氟橡胶溶液并混合,将混合物过 30 目筛造粒;放入水浴干燥箱中干燥,即得到 rGO 含量分别为 0%、1%、3%、5% 的 B/KNO₃ 混合点火药,分别编号为 A、B、C、D。

2.4 导热性能测试

采用激光闪射法^[13]测试 A、B、C、D 四种样品的热扩散系数 θ 。原理示意图如图 2 所示。在绝热状态和一定温度下,由激光源发射瞬间激光脉冲,均匀照射在样品下表面,使其表层吸收光能后温度迅速升高并上传递热量。使用红外探测器连续测量样品上表面中心部分的升温过程,得到温度 T 随时间的变化过程,得到样品上表面升高到最大温度 T_m 一半时的升温时间 $t_{1/2}$,从而由 Fourier 传热方程^[13]计算材料的热扩散系数 θ 。

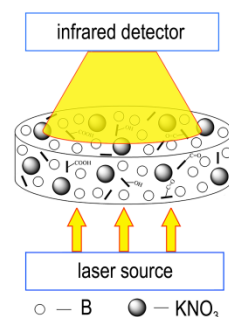


图 2 热扩散系数测试原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of testing principle for thermal diffusivity

每个样品测试 3 次,取平均值得到 θ 。利用差示扫描量热仪测试样品比热容 c_p ,代入公式(1)计算热导系数 λ 。

$$\lambda = \rho \cdot c_p \cdot \theta \quad (1)$$

式中, λ 为热导系数, $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$; ρ 为样品密度, $kg \cdot m^{-3}$; c_p 为样品的比热容, $kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ 。

2.5 导电性能测试

通过四探针法测试 A、B、C、D 四种样品的电阻率 σ 。原理示意图如图 3。将四根排成一条直线的探针以一定的压力垂直地压在被测样品表面上, 在 1、4 探针间通以电流 I (mA), 2、3 探针间就产生一定的电压 U (mV)。

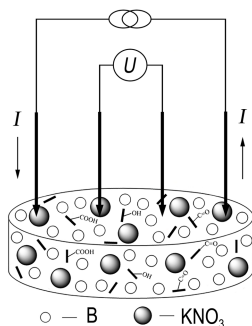


图 3 电阻率测试原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of testing principle for resistivity

将测量值 I 、 U 代入公式 (2) 计算样品的电阻率 σ :

$$\sigma = \frac{U}{I} \times F(D/S) \times F(W/S) \times W \times F_{sp} \quad (2)$$

式中, σ 为样品电阻率, $\Omega \cdot cm$; D 为样品直径, cm ; S 为平均探针间距, cm ; W 为样品厚度, cm ; F_{sp} 为探针间距修正系数; $F(D/S)$ 为样品直径修正因子; $F(W/S)$ 为样品厚度修正因子; I 为 1、4 探针流过的电流值, mA ; U 为 2、3 探针间读出的电压值, mV 。

2.6 感度测试

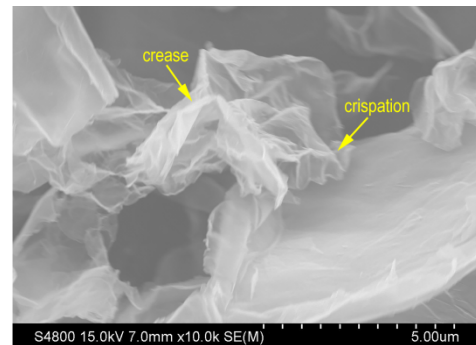
按照 GJB5891-2006 对添加 rGO 前后的 B/KNO₃ 点火药样品进行撞击感度及静电感度测试, 撞击感度测试条件: 落锤质量 5 kg, 待测药: 粉末状、 (20 ± 2) mg, 操作环境 (23 ± 3) °C, 相对湿度 45% ~ 50%; 静电感度测试条件: 电极间隙 0.12 mm, 电容 10000 pF, 待测药: 粉末状、约 25 mg, 串联电阻 100 k Ω , 相对湿度 41%, 温度 22 °C。

3 结果与讨论

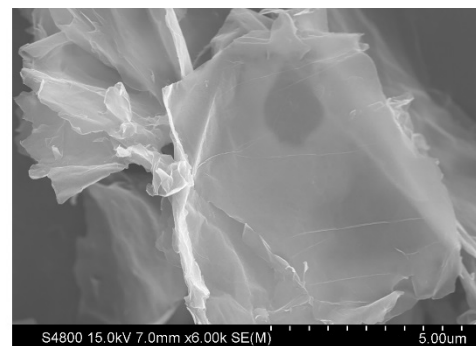
3.1 石墨烯衍生物的表现形貌

GO 和 rGO 的扫描电镜结果如图 4 所示。由图 4 可知, GO 和 rGO 表现形貌存在一定差异。GO 呈片层结构, 并且片层有明显的褶皱与边缘卷曲现象, 这是由于大量亲水性含氧官能团如羟基、羧基悬挂在 GO 的边缘, 分子间氢键作用使得片层边缘卷曲^[14-15]。相

比 GO, rGO 仍旧保持相对规整的片层结构, 其片层厚度减小, 并且片层的表层趋于平整, 皱褶、边缘卷曲、结构缺陷等现象明显减少。这是由于在加热还原作用下, 层与层之间的插入物被快速分解。因此, 如果控制还原工艺, 加深还原程度, 则 rGO 会有更优异的传导性能。



a. GO



b. rGO

图 4 GO 和 rGO 的 SEM 图

Fig.4 SEM images of GO and rGO

3.2 含氧官能团对比分析

为了对比两种石墨烯衍生物含氧官能团的变化, 对样品进行了红外光谱分析, 结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, GO 含有丰富的含氧官能团, 主要峰位为 3382 cm^{-1} 处的羟基吸收峰、1740 cm^{-1} 处的羧基吸收峰、1616 cm^{-1} 处的碳碳双键吸收峰、1230 cm^{-1} 处的环氧基吸收峰以及 588 cm^{-1} 处 C—O 键的吸收峰^[16]。而对于 rGO, 经过还原后羟基吸收峰、羧基吸收峰以及 C—O 键的吸收峰变化明显, 几乎没有特征吸收, 而碳碳双键吸收峰、环氧基吸收峰依然存在。从以上特征峰可以发现, GO 表面上存在大量的含氧官能团如 —OH、—C=O、—COOH 等^[17], 而经过还原得到的 rGO 碳骨架结构基本没有受到破坏, 同时其表面原本存在大量的含氧官能团如 —OH、—C=O、—COOH 等被削减, 仅存留了环氧基团。这一表征结果与形貌

分析结论相吻合。GO 边缘悬挂的亲水性基团被大量消除,从而使 rGO 更为平整,片层中仍有少量环氧基残留,说明 rGO 在严格意义上是一种还原氧化石墨烯,而不是纯度高的石墨烯,因此 rGO 的宏观性质(如传导性能、亲水性)应介于石墨烯与 GO 之间。

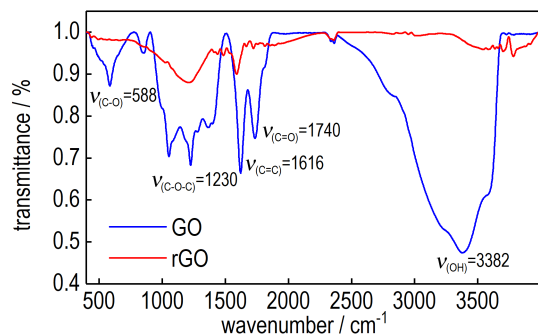


图5 GO和rGO的FT-IR图

Fig.5 FT-IR spectra of GO and rGO

3.3 传导性能影响规律

通过表观形貌、红外光谱分析可以推测 rGO 是结构特征接近石墨烯的物质。预测其具有一定的传导性质。为验证这个推断,进行了传导性能测试。

3.3.1 导热性能

测试了四种样品的热扩散系数,通过公式(1)计算了样品的热导系数,结果见表1。

表1 不同rGO含量B/KNO₃点火药传热性能参数

Table 1 Thermalconduction performance parameters of B/KNO₃ ignition powder with different ratios of rGO

sample	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\theta / \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$c_p / \text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	$\lambda / \text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
A	1.684	0.249	1.368	0.573
B	1.672	0.251	1.371	0.576
C	1.658	0.254	1.379	0.583
D	1.647	0.271	1.387	0.620

Note: ρ is the density. θ is the thermal diffusivity. c_p is the specific heat capacity. λ is the thermal conductivity.

通过表1不难看出,随着 rGO 含量的上升,点火药的比热容和导热系数均不断上升,说明将 rGO 加入 B/KNO₃点火药后体系的导热性会有所改善。当 rGO 添加量达到 5% 时(样品 D),点火药导热系数有一个明显增长。但是 rGO 含量高于 5% 时,会对点火药燃烧能量输出造成负面影响。因此,rGO 含量应控制在 5% 以内。

3.3.2 导电性能

测试了4种样品的电阻率,结果见表2。测试过程

中发现,未添加 rGO 的 B/KNO₃点火药本身没有导电性,所以没有测出具体数值,同时,由表2可知,当添加 1%~5% rGO 后,样品电阻率值逐步减小,说明体系导电性能逐渐增强。

表2 不同rGO含量下点火药的电阻率

Table 2 Resistivity(σ) of B/KNO₃ ignition powder with different ratios of rGO

sample	$\sigma / \Omega \cdot \text{cm}$
A	/
B	6.53×10^5
C	2.80×10^5
D	1.11×10^5

3.4 撞击感度影响规律

药剂撞击发火的机理普遍认为是“热点理论”。该理论认为药剂局部受到机械刺激快速挤压变形,形成热积累,如果此时药剂体系具有一定的导热率,则会向周围快速散热,从而避免热量在局部刺激处的累积效应,延缓药剂发火时间,因此改善点火药的导热性势必会降低撞击感度。不同 rGO 含量 B/KNO₃点火药的 H_{50} 值如图6所示。从图6可以看出,随着 rGO 含量的上升,对应 B/KNO₃点火药的 H_{50} 值也不断上升,表明其撞击感度在不断降低。同时,当 rGO 添加量达到 5% 时, H_{50} 值出现了明显上升,与导热系数的变化规律一致,这一变化证实了 B/KNO₃点火药撞击感度的不断降低是药剂体系导热性能逐渐增强所致。

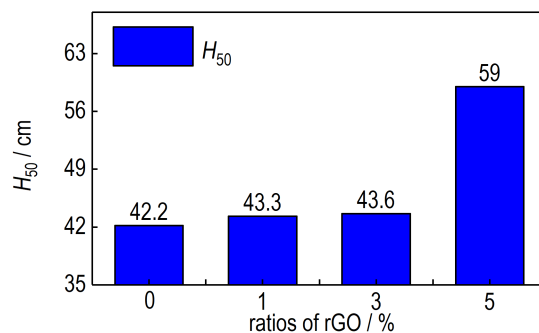


图6 不同rGO含量下点火药的 H_{50} 值

Fig.6 H_{50} of B/KNO₃ ignition powder with different ratios of rGO

3.5 静电感度影响规律

对添加了 rGO 的 B/KNO₃点火药进行静电感度测试。通过 GJB5891-2006 中的升降法找到其临界发火电压 U_{50} 并计算其 50% 发火能量值 E_{50} , 如图7所示。从图7可知,添加 1%~5% rGO 后, B/KNO₃点火药的 U_{50} 值由 5 kV 上升到 25 kV, E_{50} 值由 0.125 J 上升到

3.125 J, 表明其静电感度在不断降低。综合电阻率数据分析, 随着 rGO 含量的上升, 药剂体系的导电性能逐渐增强, 其静电积累现象会随之减弱, 最终造成药剂的静电感度在不断降低。

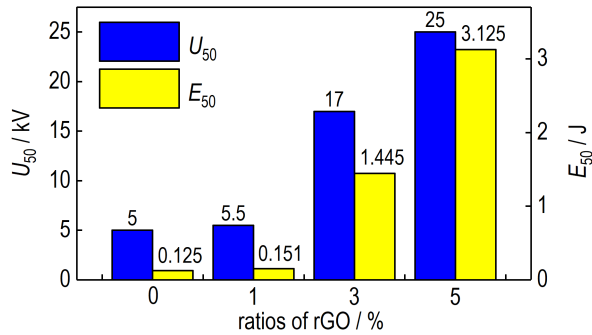


图7 不同rGO含量下点火药的 U_{50} 、 E_{50} 值

Fig.7 U_{50} and E_{50} of B/KNO₃ ignition powder with different ratios of rGO

3.6 降感机制分析

从上述传导率实验及相应感度测试结果可见, 随着 rGO 含量增加, 点火药传导性能逐渐改善, 撞击感度和静电感度也随之降低, 而且当 rGO 含量在 5% 时效果较为突出。这是因为随着外加质量比的增加, rGO 的体积分数快速增大, 在硼酸钾体系存在着大量的二维平面网状结构的 rGO, 其比表面积大, 碳链堆积密实, 片层与片层之间的距离变小, 相互接触的比例增加, 从而形成更多的导热导电微通道。微通道的存在使得药剂局部产生的热量累积和静电累积向四周快速传导, 减少了药剂因局部刺激而发火的可能, 从而达到了降感的目的。而如同导电颗粒在聚合物体系一样, 固相混合物的传导性质也存在类似的“逾渗机制”^[16], 即当传导性强的物质体积分数突破某一临界值时, 其导热导电率会发生“跃迁”现象, 此时再继续增加 rGO 的质量比例, 于含能体系的能量释放无益, 同时传导率的升值空间逐渐趋于饱和。另一方面, rGO 表面残留的含氧性官能团浓度增大, 容易产生偶极极化作用, 一定程度阻碍和影响导电网络和微通道的构成, 因此 rGO 外加质量分数为 5% 时, 改善体系传导性能, 降低感度的优势最为明显。

4 结论

(1) 对所制备的样品进行了表征, 结果显示制备的 rGO 表面更为平整光滑, 大部分含氧官能团已在还原过程中被消除。

(2) 传导性能测试发现添加 1%~5% 的 rGO 后, B/KNO₃ 点火药导热系数由 $0.573 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 上升到 $0.620 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, 电阻率由绝缘体下降到 $1.11 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

(3) 撞击感度和静电感度的测试结果表明, 添加 1%~5% 的 rGO 后, B/KNO₃ 点火药特性落高从 42.2 cm 上升到 59.0 cm, 临界发火电压从 5 kV 上升到 25 kV; 结合传导数据发现, 向 B/KNO₃ 点火药中添加 rGO 后, 混合点火药体系的热导系数有所增加、电阻率有所下降, 导热、导电性均有所改善, 其撞击感度、静电感度也随着 rGO 含量的上升而不断降低; 考虑到作为添加剂, rGO 含量不宜过多, 因此认为 5% 即为 rGO 在 B/KNO₃ 点火药中的最佳添加量。

参考文献:

- [1] Allen M J, Tung V C, Kaner R B. Honeycomb carbon: a review of grapheme[J]. *Chemical Reviews*, 2010, 110(1): 132.
- [2] Brodie B C. On the atomic weight of graphite[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2009, 149(1): 249-259.
- [3] Deepti Krishnan, Franklin Kim, JiayanLuo, et al. Energetic graphene oxide: challenges and opportunities[J]. *Nano Today*, 2012, 7(2): 137-152.
- [4] Zhang C, Cao X, Xiang B. Sandwich complex of TATB/graphene: an approach to molecular monolayers of explosives[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114(51): 22684-22687.
- [5] Li Z M, Zhou M R, Zhang T L, et al. The facile synthesis of graphenenanoplatelet-lead styphnate composites and their depressed electrostatic hazards[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, 1(41): 12710-4.
- [6] Hummers W S, Offeman R E. Preparation of graphitic oxide[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1958, 80(6): 1339.
- [7] Eda G, Chhowalla M. Chemically derived graphene oxide: towards large-area thin-film electronics and optoelectronics[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(22): 2392-2415.
- [8] Stankovich S, Dikin D A, Piner R D, et al. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide[J]. *Carbon*, 2007, 45(7): 1558-1565.
- [9] Balandin A A, Ghosh S, Bao W, et al. Superior thermal conductivity of single-layer grapheme[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(3): 902.
- [10] 周讯. 还原氧化石墨烯杂化材料的水热法制备、结构表征及其吸附和光催化性质的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013. ZHOU Xun. Hydrothermal preparation and characterization of structure of reduced graphene oxide-based hybrids and their properties of absorption and photocatalysis[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [11] 侯若男, 彭同江, 孙红娟, 等. 热还原温度对氧化石墨烯电阻-温度特性的影响[J]. *人工晶体学报*, 2014, 43(10): 2656-2663. HOU Ruo-nan, PENG Tong-jiang, SUN Hong-juan, et al. Influence of thermal reduction temperature on the resistance-tem-

- perature characteristics of graphene oxide [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2014, 43(10): 2656-2663.
- [12] 邹艳红, 刘洪波, 傅玲, 等. 热解温度对氧化石墨的结构与导电性能的影响 [J]. *硅酸盐学报*, 2006, 34(3): 318-323.
ZOU Yan-hong, LIU Hong-bo, FU Lin, et al. Influence of pyrolytic temperature on structures and properties of graphene oxide [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2006, 34(3): 318-323.
- [13] 王东, 孙晓红, 赵维平, 等. 激光闪射法测试耐火材料导热系数的原理与方法 [J]. *计量与测试技术*, 2009, 36(3): 38-41.
WANG Dong, SUN Xiao-hong, ZHAO Wei-ping, et al. Principle and method of refractory thermal conductivity measurement by laser flash method [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2009, 36(3): 38-41.
- [14] Kim K S, Zhao Y, Jang H, et al. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes [J]. *Nature*, 2009, 457(7230): 706-710.
- [15] Rao C N, Sood A K, Subrahmanyam K S, et al. Graphene: the new two-dimensional nanomaterial [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2010, 48(42): 7752-7777.
- [16] 杨旭宇, 王贤保, 李静, 等. 氧化石墨烯的可控还原及结构表征 [J]. *高等学校化学学报*, 2012, 33(9): 1902-1907.
YANG Xu-yu, WANG Xian-bao, LI Jing, et al. Controlled reduction and structural characterization of graphene oxide [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2012, 33(9): 1902-1907.
- [17] 杨勇辉, 孙红娟, 彭同江. 石墨烯的氧化还原法制备及结构表征 [J]. *无机化学学报*, 2010, 26(11): 2083-2090.
YANG Yong-hui, SUN Hong-juan, PENG Tong-jiang. Preparation and structural characterization of graphene by redox method [J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2010, 26(11): 2083-2090.
- [18] 益小苏. 复合导电高分子材料的功能原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 8-16.
YI Xiao-su. Functional principles of conductive filler polymer composite [M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House, 2004: 8-16.

Effect of Reduced Graphene Oxide on the Impact Sensitivity and Electrostatic Sensitivity of B/KNO₃ Ignition Powder

WANG Qian, LIU Jie, REN Hui, JIAO Qing-jie

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Graphene oxide (GO) was prepared by Hummers method using flake graphite as raw material, and reduced graphene-oxide (rGO) was obtained by further thermal reduction. The apparent morphology of the material before and after reduction was observed by scanning electron microscope. The change of oxygen-containing functional groups on the surface of the two graphene derivative sheets was analyzed and compared by infrared spectroscopy. The thermal diffusivity and resistivity of B/KNO₃ ignition powder with different ratios of rGO were measured. According to the national military standard GJB5891-2006, the characteristic drop height, the critical ignition voltage, and the 50% firing energy of the boron-based ignition powder with different ratios of rGO were tested. Results show that after adding 1%-5% rGO, the thermal conductivity of ignition powder increases from $0.573 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ to $0.620 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$, the resistivity of ignition powder decreases from the insulator to $1.11 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$, the characteristic drop height of ignition powder increases from 42.3 cm to 59.0 cm, and the critical ignition voltage increases from 5 kV to 25 kV, revealing that a small amount of rGO can significantly improve the impact sensitivity and electrostatic sensitivity of the ignition powder, and rGO has potential application value in the safety regulation of compound energetic materials.

Key words: reduced graphene oxide (rGO); B/KNO₃; ignition powder; sensitivity

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018121