

文章编号: 1006-9941(2017)08-0656-05

RDX/Al/SiO₂ 纳米复合含能材料的制备及性能

张冬冬¹, 黄寅生¹, 李瑞², 李猛¹, 王俊杰¹, 葛梦珠¹, 张辉建¹, 何亚丽¹

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学智能弹药技术国防重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了在降低黑索今(RDX)机械感度的同时提高其热分解性能,以四甲氧基硅烷为前驱物,氟硼酸为催化剂,用溶胶-凝胶法制备了RDX-Al质量分数分别为30%、50%、70%(RDX与Al质量比均为6:1)的三种RDX/Al/SiO₂纳米复合含能材料。用扫描电子显微镜(SEM)、能谱分析(EDS)及X-射线衍射(XRD)对其形貌及结构进行了表征;用热重分析(TG)、差示扫描量热(DSC)研究了样品的热性能;按GJB772A-1997的方法测试了样品的机械感度。结果表明:RDX/Al/SiO₂是以SiO₂为凝胶骨架,Al与RDX进入到凝胶骨架中形成的纳米复合含能材料;该复合材料中RDX的最小平均粒径为65.09 nm,且其粒径随RDX-Al含量的增加而增大;当RDX-Al的质量分数为30%时,与纯RDX相比,该复合材料中RDX的分解温度较纯RDX提前22.4 °C,与原料RDX相比,样品的特性落高提高108.6 cm,爆炸百分数降低60%。

关键词: 溶胶-凝胶法;黑索今(RDX);纳米复合含能材料;热分解;机械感度

中图分类号: TJ55; O65

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.08.007

1 引言

随着武器弹药对含能材料性能要求的不断提高,黑索今(RDX)作为当今应用最广泛的单质炸药之一,由于其机械感度及热分解温度较高,使得RDX已经不能满足各方面的需求^[1]。针对这一现象,人们采用机械研磨法^[2]、溶剂-非溶剂法^[3]、喷雾法^[4]及溶胶-凝胶^[5]等方法对其进行改性,以期制备出满足武器弹药性能要求的新型复合含能材料。

溶胶-凝胶法由于操作安全、制备过程简单及尺寸可控等优点,成为近年来制备新型纳米复合含能材料的重要方法^[6]。该方法制备RDX基复合含能材料的组成、结构和微观尺寸对其燃烧及爆炸性能影响较大。如:在RDX基复合含能材料中加入Cu、Ni、Al等具有催化作用的金属粉,体系能量的释放速率明显增高^[7-9];用聚丙烯酸酯^[10]和二氧化硅(SiO₂)^[11-12]等材料对RDX进行包覆改性,得到感度降低的复合含能材料体系。赵凤起等^[13]以纳米Al粉作催化剂制备了RDX基含能材料,该体系RDX的分解温度较纯RDX

降低13.3 °C,但机械感度高于纯RDX。晋苗苗等^[14]采用溶胶-凝胶法制备了RDX质量分数为40%的NC/RDX纳米复合含能材料,其机械感度较纯RDX明显降低,但该复合材料中RDX的分解温度较纯RDX仅降低4.61 °C。这种两项复合的RDX基复合材料不能兼顾机械性能及热分解性能,为此,本研究采用溶胶-凝胶法以惰性SiO₂为凝胶骨架、纳米Al粉为添加剂,以制备出更加钝感且热分解性能更为优异的RDX基纳米复合含能材料。

2 实验部分

2.1 试剂与材料

四甲氧基硅烷(Si(OCH₃)₄),分析纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司;溶剂:丙酮(CH₃COCH₃),分析纯,上海实验试剂有限公司;非溶剂:去离子水(H₂O),自制;催化剂:氟硼酸(HBF₄),国药集团化学试剂有限公司;金属添加剂:纳米铝粉(Al),平均粒径50 nm,焦作伴侣纳米材料工程有限公司;黑索今(RDX),工业品,粒径150~200 μm,甘肃银光化学工业集团有限公司。

2.2 仪器及实验条件

超声处理采用昆山禾创超声仪器有限公司KH-300DE型数控超声波清洗器,频率60 kHz,温度30 °C;干燥设备为上海精宏实验设备公司的

收稿日期: 2017-01-17; 修回日期: 2017-04-06

作者简介: 张冬冬(1992-),男,硕士研究生,主要从事含能材料制备及性能研究。e-mail: zhangdong_dong01@163.com

通信联系人: 黄寅生(1962-),男,教授,博导,主要从事军事化学与烟火技术的研究。e-mail: huangyinsheng@sina.com

D2F-6050型真空烘箱,温度 55 °C,相对真空度为 0.07 MPa; X 射线衍射为德国步鲁克公司的 D8 Advance型 X 射线衍射仪,测试范围 2θ 为 $0^\circ \sim 85^\circ$,扫描速度步长 0.050257° ; 扫描电镜为日立公司 S-4800 型场发射扫描电子显微镜,样品测试前喷金处理; 热分析采用瑞士-梅特勒托利多公司 TGA/SDTA851e 型热重分析仪和 DSC823e 差示扫描量热仪, TG 和 DSC 热分析温度范围分别为 $50 \sim 650^\circ\text{C}$ 和 $50 \sim 550^\circ\text{C}$,升温速率均为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$,氮气气氛; 机械感度测试采用落锤 5.0 kg 的卡斯特立式落锤仪和摆锤 1.5 kg 的克兹洛夫摩擦摆(摩擦感度测试过程中摆角均为 90°)。

2.3 实验过程

将四甲氧基硅烷、丙酮及去离子水按 1 : 8 : 4 的质量比混合后加入适量的氟硼酸搅拌均匀形成溶胶,室温放置使其进一步水解、缩聚形成 SiO₂ 湿凝胶。按表 1 配比将称量好的纳米铝粉加入到制备好的 RDX 丙酮溶液中(样品中 RDX 与 Al 的质量比均为 6 : 1),超声分散 10 min 后加入按样品组成计量好的四甲氧基硅烷的丙酮溶液和去离子水(四甲氧基硅烷与去离子水的质量比均为 1 : 4),用催化剂氟硼酸调溶液的 pH 值至酸性。室温下继续超声分散,溶液经过进一步水解、缩聚得到 RDX/Al 含量分别为 30%、50%、70% (理论干凝胶中 RDX/Al 的质量分数) 三种不同配比的 RDX/Al/SiO₂ 湿凝胶。

将上述湿凝胶在 55 °C 下真空干燥,得到 SiO₂ 干凝胶及以 SiO₂ 为凝胶骨架, RDX/Al 填充其中的 RDX/Al/SiO₂ 纳米复合含能材料。

表 1 样品组成

Table 1 Composition of the samples

sample	RDX	Al	SiO ₂
1 [#]	25.71	4.29	70
2 [#]	42.86	7.14	50
3 [#]	60	10	30

Note: The mass ratio of RDX to Al is 6 : 1.

3 结果与讨论

3.1 扫描电镜 (SEM) 分析

图 1 为 SiO₂ 干凝胶和 1[#]、2[#]、3[#] 样品的 SEM 照片。由图 1a 可见, SiO₂ 的骨架呈类似“蜂窝”的蓬松状网络结构。从图 1b 可看出颗粒状 RDX/Al 填充在 SiO₂ 骨架当中,由于 RDX/Al 的比例较小, SiO₂ 骨架中只有较少“孔洞”中填充了 RDX/Al。图 1c 可看出随着

RDX/Al 比例的增加, SiO₂ 骨架中 RDX-Al 的填充量进一步增大,且较前者填充得更加均匀,但也有少数孔洞没有填充进去。从图 1d 可以明显发现,随着 RDX-Al 比例的进一步增大, SiO₂ 骨架所有孔洞均被 RDX-Al 填满,此时由于 RDX-Al 比例过大,导致 RDX-Al 在骨架内发生明显的堆积现象。

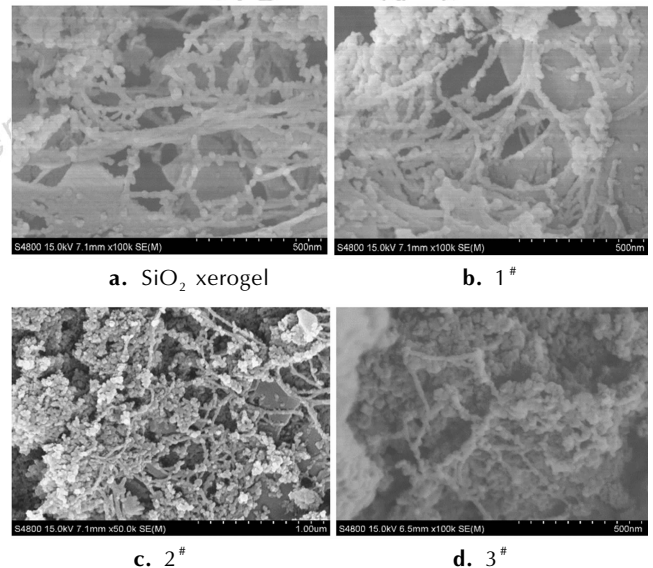


图 1 SiO₂ 干凝胶和 1[#]、2[#]、3[#] 样品的 SEM 照片

Fig. 1 SEM photos of SiO₂ xerogel and samples 1[#], 2[#] and 3[#]

3.2 EDS 能谱分析

1[#]、2[#]、3[#] 样品的 EDS 能谱如图 2 所示。由图 2 可知, 1[#]、2[#]、3[#] 样品中均含有 C、N、O、Si、Al (Au 为样品测试前预处理带入元素) 这几种元素。结果表明, 溶胶-凝胶法制备的 RDX/Al/SiO₂ 纳米复合含能材料中 SiO₂、RDX、Al 三者是复合在一起的。对比 1[#]、2[#]、3[#] 样品的 EDS 谱图可见, 随着 RDX/Al 比例的增加, SiO₂ 骨架中 RDX-Al 对应元素比例增大, 即骨架中 RDX-Al 的填充量进一步增加。

3.3 X 射线晶体衍射 (XRD) 分析

纯 RDX、Al 粉、SiO₂ 骨架及 1[#]、2[#]、3[#] 样品的 X 射线衍射图谱 (XRD) 如图 3 所示。从图 3 可看出, 该纳米复合含能材料干凝胶中 RDX 的衍射角与纯 RDX 的衍射角基本一致, 说明溶胶-凝胶细化过程中 RDX 的晶体结构没有发生改变。通过对比可见, RDX/Al/SiO₂ 纳米复合含能材料中 RDX 的主要峰的峰强度明显变弱, 峰型有所变宽。由 Scherrer 公式^[15] $d = k\lambda / (\beta \cos\theta)$ 可以计算得出, 溶胶-凝胶法制备的 1[#]、2[#]、3[#] 纳米复合含能材料中 RDX 的平均晶体粒度分别为 65.09, 84.10, 94.26 nm。从图 3 可看出,

RDX/Al/SiO₂ 中 RDX 的衍射峰表现不明显, 分析认为是所测样品测量面上 RDX 含量较少的缘故。

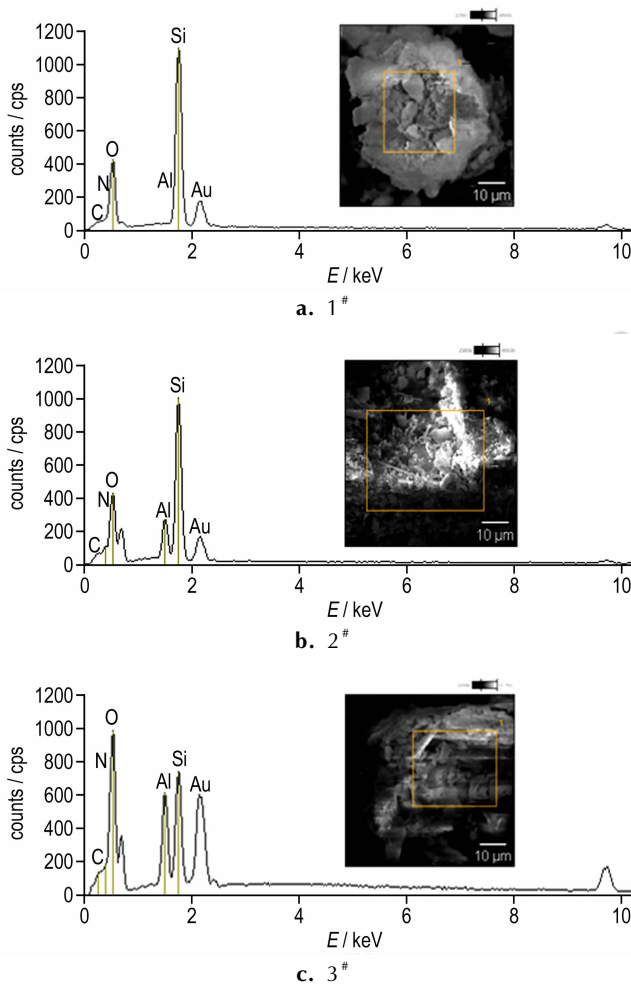


图2 1[#]、2[#]、3[#]样品的EDS谱

Fig. 2 EDS of samples 1[#], 2[#] and 3[#]

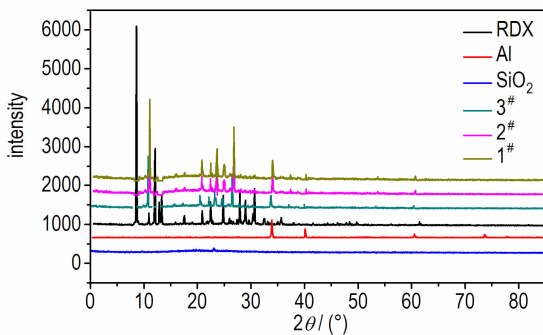


图3 RDX、Al、SiO₂及1[#]、2[#]、3[#]样品的XRD图谱

Fig. 3 XRD spectra of pure RDX, Al, SiO₂ and samples 1[#], 2[#] and 3[#]

3.4 热性能分析

3.4.1 热失重分析

图4为纯RDX及1[#]、2[#]、3[#]样品的热失重(TG)曲

线。对比发现,该纳米复合含能材料中RDX的质量损失峰较纯RDX均明显提前。这是由于溶胶-凝胶细化过程中RDX的晶粒尺寸减小到纳米级,使得反应物之间接触面积增大、传质距离减小,有利于化学反应的传质和传热过程^[16],另一方面纳米铝粉的催化作用也会导致RDX的质量损失峰提前^[9]。对比1[#]、2[#]、3[#]样品发现,随着RDX/Al/SiO₂纳米复合含能材料中RDX/Al含量的增多,复合材料中RDX的质量损失峰逐渐延后。其原因为,随着纳米复合含能材料中SiO₂骨架的减少,填充物RDX-Al含量不断增多, SiO₂骨架中部分孔洞填充得不均匀且出现塌陷、晶粒团聚长大等现象,使得反应物之间接触面积减少、传质距离增大,化学反应过程的传质、传热受到不利影响,反映在TG曲线上即RDX/Al/SiO₂纳米复合含能材料中RDX的质量损失峰随RDX-Al含量的增加而增大。

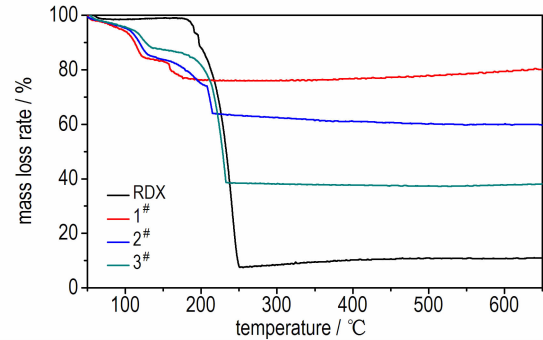


图4 纯RDX及1[#]、2[#]、3[#]样品的TG曲线

Fig. 4 TG curves of pure RDX and samples 1[#], 2[#] and 3[#]

3.4.2 差示扫描量热分析

图5为纯RDX及1[#]、2[#]、3[#]样品的差示扫描量热(DSC)曲线。DSC分析过程中样品的升温速率均为10 °C·min⁻¹,氮气气氛。对比四条DSC曲线很容易发现,纳米复合含能材料中RDX的熔化及分解放热峰温度较纯RDX分别提前1.56~4.49 °C和18.9~22.4 °C。这是由于溶胶-凝胶法制备RDX/Al/SiO₂过程中, SiO₂骨架的孔洞限制了RDX/Al晶粒的增长, RDX/Al细化至纳米尺寸加速了反应过程的传质和传热过程;此外,复合材料中纳米铝粉的催化作用也使得RDX/Al/SiO₂纳米复合含能材料中RDX的熔化和分解放热峰提前。对比1[#]、2[#]、3[#]样品发现,随着SiO₂骨架中RDX/Al的不断增多,复合材料中RDX的分解放热峰逐渐增大。这是由于,随着RDX/Al的不断增多, SiO₂骨架相对减少,填充物在骨架内发生团聚、堆积、晶粒长大等现象,使得反应物之间接触面积减少、传质距离

增大,宏观上表现为随着填充比例的增大,复合材料中 RDX 的分解热峰稍有增高。

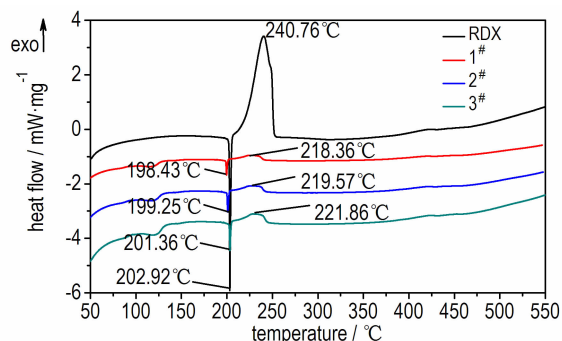


图5 纯 RDX 及 1[#]、2[#]、3[#] 样品的 DSC 曲线

Fig. 5 DSC curves of pure RDX and samples 1[#], 2[#] and 3[#]

3.5 机械感度测试

按照国军标 GJB772A-1997 方法 601.2 及 602.1 测试纯 RDX(4[#])、纳米复合含能材料(1[#],2[#],3[#])及机械混合物(5[#],6[#],7[#])的撞击和摩擦感度。实验过程中,环境温度 23 °C,相对湿度 45%,结果见表 2。

表 2 纯 RDX(4[#])、纳米复合含能材料(1[#],2[#],3[#])及机械混合物(5[#],6[#],7[#])的撞击与摩擦感度测试结果

Table 2 Impact and friction sensitivity of pure RDX(4[#]), the nano-composite samples(1[#],2[#],3[#]) and mechanical mixtures (5[#],6[#],7[#])

No.	impact sensitivity/cm	friction sensitivity/%
1 [#]	134.9	10
2 [#]	95.5	26
3 [#]	57.5	46
4 [#]	26.3	70
5 [#]	18.9	82
6 [#]	20.6	76
7 [#]	24.7	72

由表 2 可见,RDX/Al/SiO₂ 纳米复合含能材料(1[#],2[#],3[#])的撞击和摩擦感度均明显低于纯 RDX(4[#])及对应的机械混合物(5[#],6[#],7[#])。这是由于,溶胶-凝胶法制备的 RDX/Al/SiO₂ 纳米复合含能材料是以惰性基体 SiO₂ 为骨架,RDX/Al 填充在骨架当中。SiO₂ 骨架在撞击和摩擦过程中可起到缓冲和保护作用,使 RDX/Al/SiO₂ 纳米复合含能材料的撞击及摩擦感度均明显低于纯 RDX;机械混合物中 SiO₂ 及纳米 Al 粉的存在使得整个炸药体系中产生热点的棱角和尖角增多,混合物在撞击和摩擦过程中较纯 RDX 易产生更多的热点,因此其撞击和摩擦感度均高于纯 RDX

和 RDX/Al/SiO₂ 纳米复合含能材料。

对比 1[#]、2[#]、3[#] 发现,其撞击和摩擦感度随 RDX-Al 填充量的增加而增大。这是由于随着填充物比例的增加,起缓冲和保护作用的“蜂窝”状 SiO₂ 包覆骨架不断减少;此外,由于包覆骨架中填充比率的增加,填充物 RDX-Al 在骨架中发生堆积、团聚和晶粒长大等现象,撞击和摩擦过程中易形成热点,使 1[#]、2[#]、3[#] 的撞击及摩擦感度随 RDX-Al 含量的增加而增大。对比 5[#]、6[#]、7[#] 发现,其撞击及摩擦感度随 SiO₂ 与纳米 Al 粉含量的增加而增大,这是由于随着 SiO₂ 及纳米 Al 粉的增加,炸药体系在撞击和摩擦过程中易产生更多的热点,因此其撞击及摩擦感度随 SiO₂ 和纳米 Al 粉的增加而增大。

4 结 论

(1) 采用溶胶-凝胶法制备了三种不同配比的 RDX/Al/SiO₂ 纳米复合含能材料。SEM 测试结果表明,RDX/Al/SiO₂ 是以“蜂窝”状 SiO₂ 为骨架,RDX-Al 填充其中形成多孔结构的纳米复合含能材料。

(2) EDS 能谱分析发现,各采样点均含有 C、N、O、Si、Al 等元素,结合 SEM 图片说明 RDX/Al/SiO₂ 纳米复合含能材料中 RDX、Al、SiO₂ 三者是复合在一起的。XRD 测试结果表明,该复合含能材料中 RDX 的晶型未发生改变,且平均晶粒尺寸均小于 100 nm。

(3) 热分析发现,RDX/Al/SiO₂ 纳米复合含能材料中 RDX 的熔化及分解放热温度较原料 RDX 提前。当 RDX/Al 的质量分数为 30% 时,该复合含能材料中 RDX 的分解温度较纯 RDX 降低幅度最大为 22.4 °C。

(4) 机械感度测试结果表明,RDX/Al/SiO₂ 纳米复合含能材料的撞击及摩擦感度较原料 RDX 明显降低。当该复合含能材料中 RDX/Al 的质量分数为 30% 时,样品特性落高比原料 RDX 提高 108.6 cm,爆炸百分数比原料 RDX 降低 60%。同时发现,随着 RDX/Al 填充物的增多,其机械感度也相应增大。

参考文献:

- [1] 胡菲,刘玉存,袁俊明. 多孔硅对 RDX 感度及性能的影响[J]. 爆破器材, 2014(2): 29-32.
HU Fei, LIU Yu-cun, YUAN Jun-ming. Effects of porous silicon on sensitivity and performances of RDX[J]. *Explosive Materials*, 2014(2): 29-32.
- [2] 申连华,李国平,罗运军,等. 高能球磨法制备 Al/B/Fe₂O₃ 纳米复合含能材料[J]. 固体火箭技术, 2014(2): 233-237.
SHEN Lian-hua, LI Guo-ping, LUO Yun-jun, et al. Preparation of Al/B/Fe₂O₃ nano-composite energetic materials by high energy ball milling[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2014

- (2): 233-237.
- [3] 储峰, 邓潘, 樊祥, 等. 溶剂-非溶剂法在含能材料中的应用[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2010, 8(3): 38-41.
CHU Feng, DENG Pan, FAN Xiang, et al. Application of solvent-non-solvent method in energetic materials[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2010, 8(3): 38-41.
- [4] 张光全, 李金山. 纳米复合含能材料的几种液相制备方法[J]. 含能材料, 2006, 14(1): 71-76.
ZHANG Guang-quan, LI Jin-shan. Review on methods of preparing nano-composites energetic materials in liquid phase[J]. *Chinese Journal of Energetic Material(Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(1): 71-76.
- [5] 王金英, 王瑞浩, 刘发, 等. 溶胶-凝胶法制备纳米复合含能材料 RDX/Fe₂O₃[J]. 固体火箭技术, 2014(2): 228-232.
WANG Jin-ying, WANG Rui-hao, LIU Fa, et al. Preparation of RDX/Fe₂O₃ nanocomposite energetic materials by sol-gel method[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2014(2): 228-232.
- [6] 郁卫飞, 黄辉, 聂福德, 等. 纳米复合含能材料的研究进展[J]. 含能材料, 2005, 13(5): 340-343.
YU Wei-fei, HUANG Hui, NIE Fu-de, et al. Research on nano-composite energetic materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Material(Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(5): 340-343.
- [7] Jayaraman K, Anand K V, Bhatt D S, et al. Production, Characterization, and combustion of nano-aluminum in composite solid propellants[J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2009, 25(2): 471-481.
- [8] 刘磊力, 李凤生, 杨毅, 等. 纳米金属和复合金属粉对 AP/HTPB 推进剂热分解的影响[J]. 推进技术, 2005, 26(5): 458-461.
LIU Lei-li, LI Feng-sheng, YANG Yi, et al. Effect of metal and composite metal nano-powders on the thermal decomposition of HTPB propellant[J]. *Journal of Propellant Technology*, 2005, 26(5): 458-461.
- [9] 胥会祥, 李兴文, 赵凤起, 等. 纳米金属粉在火炸药中应用进展[J]. 含能材料, 2011, 19(2): 232-239.
XU Hui-xiang, LI Xing-wen, ZHAO Feng-qi, et al. Review on application of nano-metal powders in explosive and propellants[J]. *Chinese Journal Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(2): 232-239.
- [10] Li T, Hua C, Li Q. Shock sensitivity of pressed RDX-based plastic bonded explosives under short-duration and high-pressure impact tests[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, 38(6): 770-774.
- [11] 池钰, 黄辉, 李金山, 等. 溶胶-凝胶法制备 RDX/SiO₂ 纳米复合含能材料[J]. 含能材料, 2007, 15(1): 16-18.
CHI Yu, HUANG Hui, LI Jin-shan, et al. Preparation of RDX/SiO₂ nanocomposite energetic materials by sol-gel method[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(1): 16-18.
- [12] Tillotson T M, Hrubesh L W, Simpson R L. Sol-gel processing of energetic materials[J]. *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*, 1997, 225(1): 358-363.
- [13] 赵凤起, 陈沛, 杨栋, 等. 纳米金属粉对 RDX 热分解特性的影响[J]. 南京理工大学学报, 2001, 25(4): 420-423.
ZHAO Feng-qi, CHEN Pei, YANG Dong, et al. Effects of nano-meter metal powders on thermal decomposition characteristics of RDX[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2001, 25(4): 420-423.
- [14] 晋苗苗, 罗运军. 硝化棉/黑索今纳米复合含能材料的制备与热性能研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(6): 822-827.
JIN Miao-miao, LUO Yun-jun. Preparation and thermal properties of NC/RDX nano-composite energetic materials[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(6): 822-827.
- [15] 张立德, 牟季美. 纳米材料和纳米结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 147-148.
ZHANG Li-de, MOU Ji-mei. Nano-materials and nano-structures[M]. Beijing: Science Press(in Chinese), 2001: 147-148.
- [16] Li G, Liu M, Zhang R, et al. Synthesis and properties of RDX/GAP nano-composite energetic materials[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2015, 293(8): 2269-2279.

Preparation and Properties of RDX/Al/SiO₂ Nano-composite Energetic Materials

ZHANG Dong-dong¹, HUANG Yin-sheng¹, LI Rui², LI Meng¹, WANG Jun-jie¹, GE Meng-zhu¹, ZHANG Hui-jian¹, HE Ya-li¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To reduce the mechanical sensitivity of RDX and improve its thermal decomposition performance, three kinds of RDX/Al/SiO₂ nano-composite energetic materials of RDX/Al mass fraction as 30%, 50% and 70% respectively (the mass ratio of RDX to Al is 6:1) were prepared by sol-gel method using tetramethoxysilane as precursor and fluorine boric acid as catalyst. Their morphology and structure were characterized by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS) and X-ray diffraction (XRD). Thermal performances of the samples were investigated by thermogravimetric analysis (TG) and differential scanning calorimetry (DSC). The mechanical sensitivity of the samples was measured according to GJB772A-1997 method. The results show that the RDX/Al/SiO₂ is the nano-composite energetic material formed by the Al and RDX into the skeleton of SiO₂. The minimum particle size of RDX in composite material is 65.09 nm, with increasing the RDX-Al content, its average particle size increases. When the mass fraction of RDX-Al is 30%, compared with the pure RDX, the decomposition temperature of RDX in the composite material decreases by 22.4 °C, compared with the raw material RDX, the characteristic drop height (H_{50}) of the sample increases by 108.6 cm and the percentage of explosion decreases by 60%.

Key words: sol-gel method; RDX; nano-composite energetic material; thermal decomposition; mechanical sensitivity

CLC number: TJ55; O65

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.08.007