

文章编号: 1006-9941(2015)05-0428-05

RDX 基复合含能微球的制备及表征

石晓峰, 王晶禹, 李小东, 王江

(中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

摘要: 以硝化棉(NC)为粘结剂、黑索今(RDX)为主体炸药,采用喷雾干燥法制备了 RDX/NC 超细复合含能微球,采用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)、差示扫描量热法(DSC)对其进行了表征及热分析,并与 RDX 原料进行了对比;对喷雾干燥法细化的 RDX/NC 和 RDX、水悬浮法包覆的 RDX/NC、溶剂非溶剂法细化的 RDX、RDX 原料的撞击感度分别进行了测试。结果表明, RDX/NC 复合含能粒子与 RDX 原料相比,形貌从块状变为球形,粒径从 50~200 μm 减小至 0.5~7 μm ,晶型无变化,但 X 射线衍射峰明显弱化,活化能从 200.11 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 降至 186.87 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,热爆炸临界温度从 504.98 K 升至 507.70 K。喷雾干燥细化、球形化和复合的 RDX/NC 球形粒子的撞击感度降低显著。

关键词: 黑索今(RDX); 喷雾干燥; 硝化棉(NC); 热安定性; 撞击感度

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.05.005

1 引言

复合改性双基(CMDB)推进剂具有长贮性能好、完善的工业基础和成熟的生产技术等特点,是现役战术武器的主要推进剂之一^[1]。随着现代军事工业的不断发展对推进剂能量要求越来越高^[2]。为提高其能量,通常需加入大量硝胺炸药组分,有些复合推进剂(如 NEPE)配方中的硝胺炸药含量甚至高达 70%~80%^[3]。而大量高能硝胺炸药的加入在满足推进剂能量的同时,不可避免地会对推进剂的机械感度、力学性能等产生不利的影响,造成“脱湿”等现象^[4]。因此,降低感度、增强力学性能成为了硝胺炸药研究的一个重要方向。研究发现,改进推进剂中固体填料颗粒的性质是一条有效的降低机械感度,改善力学性能的途径。尚菲菲^[5]、张帅^[6]、Song^[7]等对硝胺炸药颗粒进行了改性研究,发现通过细化、粘结剂复合、球形化等方法均可有效降低硝胺炸药的感度。其中,粘结剂应尽量选用推进剂本身含有的组分^[8]。刘小刚^[9]、李江存^[10]等通过研究发现,RDX/NC(黑索今/硝化棉)球形粒子可有效改善推进剂的力学性能,利用 NC 与

RDX 复合,使 NC 与 RDX 之间形成氢键,改善 RDX 与粘结剂网络的粘结,从而达到改善推进剂力学性能的目的^[11]。但为避免 RDX/NC 球体破裂,在制备时需加入一定的添加剂,这样会引入不必要的杂质,且制备出的颗粒都较大,机械感度降低幅度不明显。喷雾干燥是一种易于制备球形粒子的方法,且工艺参数易控制、粒度较小^[12-19],可同时达到 RDX/NC 粒子的细化、复合与球形化,在制备过程中也无需加入任何添加剂。为此,本研究以 RDX 为主体炸药,NC 为粘结剂,采用喷雾干燥工艺制备出超细 RDX 基复合含能微球,并对其主要性能进行了测试。

2 实验部分

2.1 材料与仪器

RDX 原料,粒度约 50~200 μm ,甘肃银光化工厂;丙酮,纯度 99.8%,天津市申泰化学试剂有限公司;NC,四川北方硝化棉股份有限公司。

B-290 小型喷雾干燥仪,瑞士步琪(Buchi)公司;S4800 冷场发射扫描电子显微镜,日本日立公司;DX-2700型 X 射线衍射仪,丹东方圆仪器有限公司;DSC131 热流型差示扫描量热仪,法国塞塔拉姆仪器有限公司。

2.2 样品制备

常温下,以丙酮为溶剂,配制 RDX 与 NC 质量比为 95:5 的共溶液,在 40 $^{\circ}\text{C}$ 下超声震荡 30 min,使得

收稿日期: 2014-04-14; 修回日期: 2014-07-23

基金项目: 火炸药青年科技创新专项项目(QKCZ-zb-01); 国防基础产品创新计划火炸药科研专项

作者简介: 石晓峰(1988-),男,博士研究生,主要从事含能材料方面的研究。e-mail: xiaofeng_shi1987@163.com

RDX 与 NC 完全溶解并混合均匀;将喷雾干燥仪上空气流量设定到 $430 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,使仪器中氧气排空;启动温度控制,待温度达到预设值,将前驱体溶液以 $7.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率泵入喷嘴中;RDX/NC 球形复合粒子通过旋风分离器与热氮气分离后,全部收集在烧瓶中。

为对比不同粒度,不同形貌及粘结剂的复合对 RDX 撞击感度的影响,研究采用以上喷雾干燥法制备了 RDX/NC 球形复合粒子与 RDX 球形粒子(1 ~

7 μm),采用溶剂非溶剂法制备了超细 RDX 粒子(1 ~7 μm),采用水悬浮法制备了 RDX(1 ~7 μm)与 NC 质量比为 95 : 5 的 RDX/NC 粒子。记为 1[#] ~5[#](1[#]为 RDX 原料,见表 2)。

3 结果与讨论

3.1 样品粒度及形貌分析

对 RDX 原料和经喷雾干燥的 RDX/NC 样品进行了扫描电镜(SEM)测试,结果如图 1 所示。

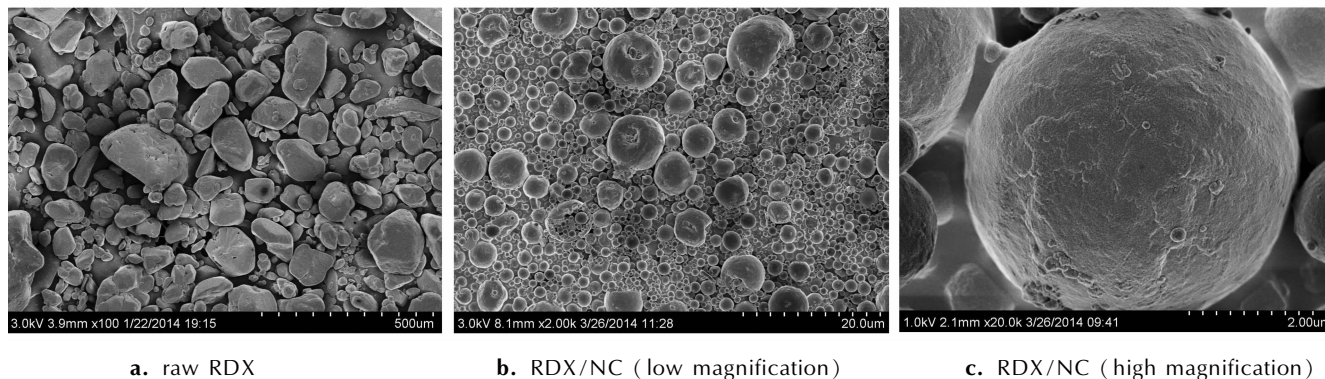


图 1 RDX 原料与不同放大倍数下 RDX/NC 的扫描电镜图

Fig.1 SEM images of raw RDX and RDX/NC at different magnifications

从图 1a 中可以看出,RDX 原料呈不规则的块状,而图 1b 中,经过喷雾干燥的 RDX/NC 样品颗粒约 0.5 ~7 μm ,颗粒形状为球状。部分粒度较大的颗粒表面有破损且能够看到破损处包含许多小颗粒,大部分小颗粒呈现规则的球形。这是因为在喷雾干燥过程中,大液滴内溶剂蒸发速度比固体扩散返回到液滴内部的速度快,所以,液滴会形成半透性表面层,而表面层内部由于蒸汽越来越多,导致液滴逐渐膨胀、破碎,使内部未蒸发的小液滴喷出,在大颗粒破损的表面形成许多微小球状颗粒。而小液滴含溶剂量较少,不易发生类似情况。通过图 1c 可以看出,球形颗粒表面较为光滑平整。

3.2 XRD 测试

RDX 原料及 RDX/NC 的 XRD 测试结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,RDX/NC 所有的衍射峰位置(衍射角)与 RDX 原料的衍射峰位置基本相同,表明喷雾干燥与 NC 粘结剂对 RDX 的晶型均无影响。但在相同的衍射角度,两者所对应的衍射峰强度不同。与 RDX 原料相比,RDX/NC 的衍射峰大部分变宽,且强度下降,这是因为 X 衍射峰会随着颗粒粒度变小而逐渐弱化甚至消失^[12]。例如 RDX 原料的两个主衍射峰($2\theta=16.580^\circ$ 与 $2\theta=17.893^\circ$),峰值 5000 a. u. 左右,半高宽(FWHM)分别为 0.142° 与 0.161° ,而相对

应的 RDX/NC 衍射峰角度为 16.516° 与 17.836° ,峰值分别在 500 a. u. 和 1700 a. u. 左右,FWHM 分别为 0.200° 与 0.229° ,明显看出其衍射峰的弱化。但 RDX 原料在 29.300° 时与 RDX/NC 对应的衍射峰相比,其强度变化不大。

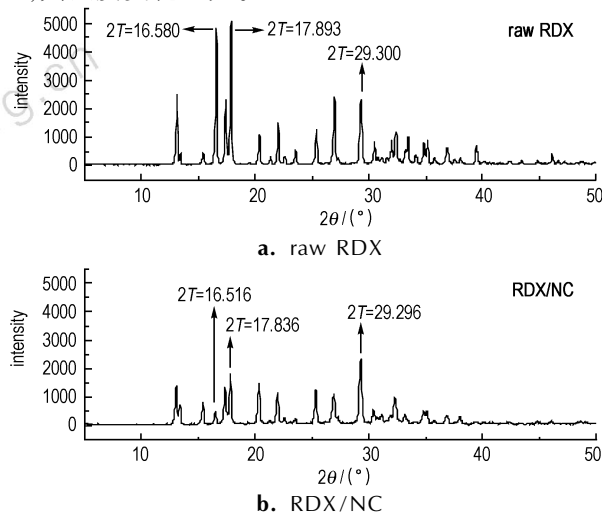


图 2 RDX 原料与 RDX/NC 的 X 射线衍射图

Fig.2 X-ray diffraction spectra of raw RDX and RDX/NC

3.3 DSC 测试

采用 DSC 对 RDX 原料及 RDX/NC 的热分解特

性进行测试,结果如图3所示。

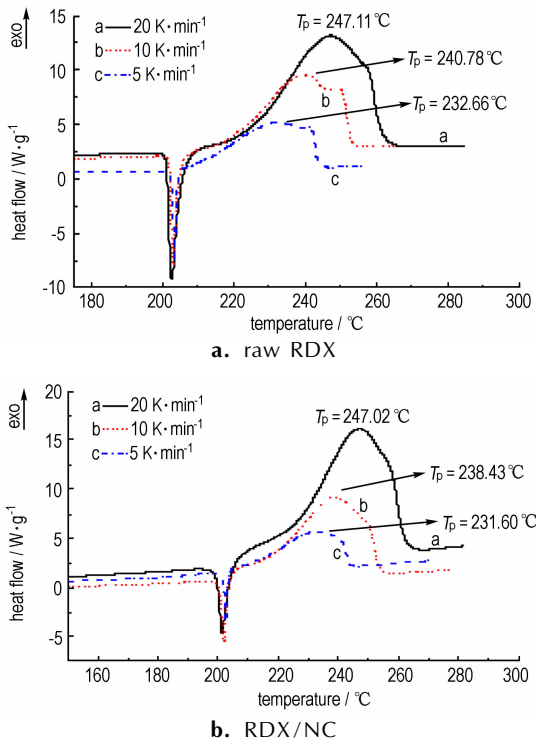


图3 不同升温速率下RDX原料及RDX/NC的DSC曲线

Fig. 3 DSC curves of raw RDX and RDX/NC at different heating rate

从图3可以看出,所有DSC曲线在约201℃时均出现一个明显的吸热峰,该吸热峰为RDX的相变峰,这说明RDX在201℃左右开始吸收热量并熔化,随着温度的继续升高,图3中出现一个剧烈的放热峰,根据文献[20]分析,RDX在出现放热峰时由固态转变为液态,同时开始发生强烈的热分解,此后没有吸热或放热峰,RDX反应完全,同时,文献中相对应的TG曲线上,RDX失重率几乎达100%,说明RDX热分解产物在该温度下都是气体。图4中,在20、10、5 K·min⁻¹的升温速率下,RDX/NC的放热峰温分别为247.02, 238.43, 231.60℃,而RDX原料的放热峰温分别为247.11, 240.78, 232.66℃,且在10 K·min⁻¹和5 K·min⁻¹时,放热峰有较小波动。通过对比不同的放热峰温可得出,在相同升温速率下,RDX/NC较RDX原料峰温略有提前,但相差不大;对不同升温速率而言,RDX原料和RDX/NC的分解峰温都随升温速率的增加而升高。这可以通过分解峰温对升温速率的依赖关系进行解释,这也是Kissinger法^[21]和Ozawa法^[22]获得不同物质动力学参数的基础。钟华杰^[23]等通过对比水悬浮法制备的RDX/NC复合粒子

与RDX原料的热性能,发现粘结剂NC的加入对RDX分解峰温影响不大,但其制备的RDX/NC粒子粒度较大,形貌不规则,NC含量较高,且热性能的研究较为简单,没有关于活化能及热爆炸临界温度的计算。徐红梅等^[24]研究发现RDX/NC质量比例为1:1时在206℃时会增加一个强放热峰,而在图4中没有出现,这是因为本实验中样品NC的含量较少,其放热峰被RDX的吸热峰掩盖。

利用在升温速率20,10,5 K·min⁻¹下的三个放热峰温,通过Kissinger公式^[21](1)可分别计算出RDX原料与RDX/NC的热分解表观活化能和指前因子。

$$\ln \frac{\beta_i}{T_{pi}^2} = \ln \frac{AR}{E} - \frac{E}{RT_{pi}} \quad (1)$$

式中, β_i 为升温速率,K·min⁻¹; T_{pi} 为在升温速率 β_i 下,炸药的分解峰温,K; A 为指前因子,min⁻¹; R 为气体常数,8.314 J·mol⁻¹·K⁻¹; E 为表观活化能,J·mol⁻¹。

从式(1)中可以看出, $\ln(\beta_i/T_{pi}^2)$ 是 $(1/T_{pi})$ 的线性函数。将三个不同升温速率下的数值进行线性拟合得出一条直线,如图4所示,根据斜率 $(-E/R)$ 和截距 $(\ln AR/E)$,可求出 E 、 A 的值,结果见表1。

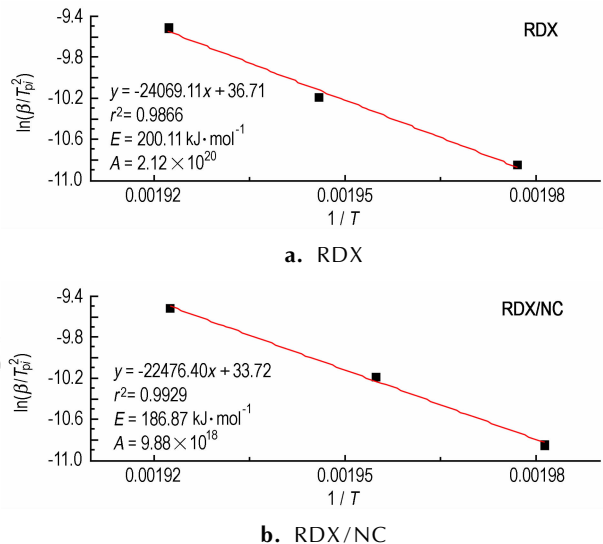


图4 Kissinger法所得两种样品活化能的拟合直线

Fig. 4 Plot of activation energy for raw RDX and RDX/NC obtained by Kissinger

利用求得的热分解表观活化能(E)和式(2)^[25]求得的 T_e 代入Zhang-Hu-Xie-Li^[26]热爆炸临界温度计算式(3),得出RDX原料和RDX/NC的热爆炸临界温度(T_b),结果见表1。

$$T_e = T_{pi} - b\beta_i - c\beta_i^2 \quad (2)$$

$$T_b = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4RET_e}}{2R} \quad (3)$$

式中, T_e 为升温速率趋近于 0 时的分解峰温, K; b 、 c 为常数; T_b 为热爆炸临界温度, K。

表 1 RDX 原料和 RDX/NC 的热分解动力学参数

Table 1 The thermal decomposition kinetic parameters of raw RDX and RDX/NC

samples	E^1 / kJ · mol ⁻¹	A^2	T_e^3 / K	T_b^4 / K
raw RDX	200.11	2.12×10^{20}	494.39	504.98
RDX/NC	186.87	9.88×10^{18}	496.23	507.70

Note: 1) E : activation energy; 2) A : pre-exponential factor; 3) T_e : the peak temperature when heating rate is zero; 4) T_b : The critical temperature of thermal explosion.

从表 1 中可以看出,与原料相比,RDX/NC 的活化能略有降低。这与 Jing 等^[27]对 RDX 基推进剂的热分析研究结果一致:NC 的加入对 RDX 的活化能影响很小。而 RDX/NC 的热爆炸临界温度 T_b 比原料高 2.72 °C。说明 NC 粘结剂的加入会使 RDX 具有更好的热安定性。

3.4 撞击感度测试

按照 GJB772A-1997 炸药试验方法-方法 601.3 撞击感度 12 型工具法^[28]对样品 1[#]~5[#]分别进行撞击感度测试,测试条件:落锤质量(5±0.002) kg,药量(35±1) mg,温度 10~35 °C,相对湿度≤80%。测试结果如表 2。

表 2 5 种样品撞击感度测试结果

Table 2 Results of impact sensitivity for 5 samples

samples	composition	drop height(H_{50})/cm		
		test 1(RSD ¹)	test 2(RSD)	average
1 [#]	raw RDX	20.4(0.04)	20.8(0.06)	20.6
2 [#]	RDX/NC obtained by spray drying	72.5(0.05)	74.8(0.05)	73.7
3 [#]	refined RDX obtained by spray drying	50.2(0.08)	48.7(0.06)	49.5
4 [#]	refined RDX obtained by solvent-nonsolvent	27.3(0.05)	25.2(0.07)	26.3
5 [#]	RDX/NC obtained by water suspension	33.2(0.04)	34.6(0.02)	33.9

Note: 1) RSD is standard error.

从表 2 中可以看出,1[#]、3[#]、4[#]三者相比较,溶剂非溶剂法细化后的 RDX(4[#])撞击感度较原料 RDX(1[#])有所下降,经过喷雾干燥细化后的 RDX 特性落高(3[#])比溶剂非溶剂法细化后的 RDX(4[#])高出 23.2 cm,说明 RDX 经过喷雾干燥细化与球形化后撞击感度下降更明

显;1[#]、2[#]与 5[#]三者相比较,可以看出,NC 粘结剂与 RDX 的复合(2[#]、5[#])会使 RDX 的撞击感度有所下降;与 5[#]相比,通过喷雾干燥法制备的 RDX/NC 复合(2[#])物特性落高从 33.9 cm 提升到 73.7 cm,说明了经过喷雾干燥法制备的 RDX/NC 复合物比水悬浮法制备的 RDX/NC 撞击感度下降更明显;2[#]与 3[#]相比较可以看出,质量分数为 5%的 NC 粘结剂的复合,RDX/NC 的特性落高提高了 24.3 cm,说明在喷雾干燥中,加入 NC 粘结剂会明显降低样品的撞击感度。

以上分析可以得出,经过喷雾干燥细化、球形化和复合的 RDX/NC 球形粒子的撞击感度降低幅度显著,这是因为经过细化和球形化后,样品的缺陷减少很多,表面也变得光滑,无棱角,这样不易形成局部“热点”,从而使样品更加钝感;而 NC 粘结剂的加入则可以起到一个减震器和缓冲器的作用,从而使样品撞击感度降低。

4 结论

(1)通过喷雾干燥制备出的 RDX/NC 复合粒子大部分均为规则的球形,且表面平整,粒径约 0.5~7 μm,较原料有大幅减小。

(2)与原料相比,RDX/NC 的晶型并未发生改变,但其 X 射线衍射峰明显有弱化趋势。

(3)NC 粘结剂的加入对样品活化能影响不大,但与 RDX 原料相比,RDX/NC 复合粒子的热爆炸临界温度提高 2.72 °C,说明 RDX/NC 含能复合微球具有更好的热安定性。

(4)通过对比不同样品之间的特性落高可以发现,喷雾干燥细化、球形化和复合的 RDX/NC 球形粒子的撞击感度降低显著。

参考文献:

- [1] 李一苇. 国外重视在战略和战术导弹中应用改性双基推进剂[J]. 火炸药学报,1983(2): 52-56.
Li Yi-wei. Foreign attach importance to the application of composite modified double base propellants in strategic and tactical missile[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,1983(2): 52256.
- [2] 樊学忠,李吉祯,刘小刚. 新型固体推进剂研究现状和发展趋势[C]//2008 年火炸药学术研讨会论文集. 贵阳,2008: 3072312.
- [3] 张晓宏,赵风起,谭惠民,等. 用键合剂改善硝铵 CMDB 推进剂的力学性能[J]. 火炸药学报,2005,28(2): 1-5.
Zhang Xiao-hong, Zhao Feng-qi, Tan Hui-min, et al. Improving mechanical property of CMDB propellant containing nitramine with bonding agent[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, 28(2): 1-5.
- [4] 杜永生. 关于交联改性双基推进剂力学性能的几个问题[J]. 火炸药,1981(4): 14-19.
- [5] 尚菲菲,张景林,王金英,等. 超临界流体增强溶液扩散技术制备超细 RDX[J]. 含能材料,2014,22(1): 43-48.

- SHANG Fei-fei, ZHANG Jing-lin, WANG Jin-ying, et al. Preparation of ultrafine RDX by solution enhanced dispersion technique of supercritical fluids[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(1): 43-48.
- [6] 张帅, 黄辉, 罗观, 等. RDX 包覆度表征[J]. 含能材料, 2014, 22(1): 57-61.
- ZHANG Shuai, HUANG Hui, LUO Guan, et al. Characterization of the coverage of polymer-coated RDX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(1): 57-61.
- [7] Song X L, Wang Y, An C W, et al. Dependence of particle morphology and size on the mechanical sensitivity and thermal stability of octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine[J]. *J Hazard Mater*, 2008, 30(159): 222-229.
- [8] An C W, Li F S, Wang J Y, et al. Surface coating of nitroamine explosives and its effects on the performance of composite modified double-base propellants[J]. *J Propul Power*, 2012, 28(2), 444-448.
- [9] 刘小刚, 王克强, 邵重斌, 等. 硝化棉包覆黑索今的新方法[J]. 含能材料, 2003, 11(3): 153-157.
- LIU Xiao-gang, WANG Ke-qiang, SHAO Chong-bin, et al. A new method of RDX coated with nitrocellulose[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(3): 153-157.
- [10] 李江存, 焦清介, 任慧, 等. 层层组合法制备 NC-BA-RDX 包覆球[J]. 固体火箭技术, 2008, 31(3): 247-250, 261.
- LI Jiang-cun, JIAO Qing-jie, REN Hui, et al. Preparation of NC-BA-RDX coating ball particles by means of layer-to-layer assembly technique[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2008, 31(3): 247-250, 261.
- [11] Brodman B W, Devine M P, t Schwartz S. Complex of nitrocellulose as propellant; USP, 4033798[P]. 1977.
- [12] Zhigach A N, Leipunskii I O, Berezkina N G, et al. Aluminized nitramine-based nanocomposites: manufacturing technique and structure study [J]. *Combust. Explos. Shock Waves (Engl Transl)*, 2009, 45(6), 666-677.
- [13] An C W, Li H Q, Geng X H, et al. Preparation and properties of 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide based nanocomposites [J]. *Propellants Explos Pyrotech*, 2013, 38(2), 172-175.
- [14] Qiu H, Stepanov V, Chou T, et al. Single-step production and formulation of HMX nanocrystals [J]. *Powder Technol*, 2012, 226, 235-238.
- [15] Qiu H, Stepanov V, Di Stasio A R, et al. RDX-based nanocomposite microparticles for significantly reduced shock sensitivity [J]. *J Hazard Mater*, 2011, 185(1): 489-493.
- [16] 杨光成, 聂福德. 超细 HMX 的制备与表征研究[J]. 含能材料, 2004, 12(6): 350-352, 357.
- YANG Guang-cheng, NIE Fu-de. Preparation and characterization of ultrafine HMX particles [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(6): 350-352, 357.
- [17] 杨光成, 聂福德, 曾贵玉. 超细 TATB-BTF 核-壳型复合粒子的制备[J]. 含能材料, 2005, 28(2): 72-74.
- YANG Guang-cheng, NIE Fu-de, ZENG Gui-yu. Preparation of fine TATB-BTF core-shell composite particles [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2005, 28(2): 72-74.
- [18] 徐文峥, 黄浩, 王晶禹, 等. 喷雾干燥过程条件对 HNS 微粉化形貌的影响[J]. 火炸药学报, 2008, 31(5): 5-8.
- XU Wen-zheng, HUANG Hao, WANG Jing-yu, et al. The influence of conditions in spray drying process on morphology of micronization HNS [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(5): 5-8.
- [19] 吕春玲, 张景林, 黄浩. 微米级球形 HNS 的制备及形貌控制[J]. 火炸药学报, 2008, 31(6): 35-38.
- Lü Chun-Ling, ZHANG Jing-lin, HUANG Hao. Preparation and shape control of micron HNS [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(6): 35-38.
- [20] 蒋皎皎. 超细黑索今的制备研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- JIANG Jiao-jiao. Study of preparation of ultrafine RDX [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [21] Kissinger H E. Reaction kinetics in differential thermal analysis [J]. *Anal Chem*, 1957, 29(11): 1702-1706.
- [22] Ozawa T. A new method of analyzing thermogravimetric data [J]. *Nature*, 1964, 201: 68-69.
- [23] 钟华杰. 不同材料对 RDX 表面包覆的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- ZHONG Hua-jie. Research on the surface coating by different materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [24] 徐红梅, 李瑞, 蒋小军, 等. RDX/NC 纳米复合纤维的制备及性能[J]. 火炸药学报, 2012, 35(6): 28-31.
- XU Hong-mei, LI Rui, JIANG Xiao-jun, et al. Preparation and properties of nano-composite fiber RDX/NC [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(6): 28-31.
- [25] Sovizi M R, Hajimirsadeghi S S, Naderizadeh B. Effect of particle size on thermal decomposition of nitrocellulose [J]. *J Hazard Mater*, 2009, 168(2-3): 1134-1139.
- [26] Zhang T L, Hu R Z, Xie Y, et al. The estimation of critical temperatures of thermal explosion for energetic materials using non-isothermal DSC [J]. *Thermochim Acta*, 1994, 244: 171-176.
- [27] Jing W W, Dang Z M, Yang G P. The thermal decomposition behavior of RDX-base propellants [J]. *J Therm Anal Calorim*, 2005, 79(1): 107-113.
- [28] GJB722A-1997 炸药试验方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1997.

Preparation and Properties of RDX-based Composite Energetic Microspheres

SHI Xiao-feng, WANG Jing-yu, LI Xiao-dong, WANG Jiang

(Chemical Industry and Ecology Institute, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Using nitrocellulose (NC) as a binder, RDX/NC ultrafine composite energetic microspheres were prepared by spray drying, and was characterized by Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD) and Differential Scanning Calorimetry (DSC). The impact sensitivity of several different samples, including raw RDX, RDX/NC and refined RDX obtained by spray drying, refined RDX obtained by solvent-nonsolvent and RDX/NC obtained by water suspension, were also measured. Results show that compared with raw RDX, the morphology of RDX/NC composite energetic microspheres changes from block to spherical. The particle size changes from 50-200 μm to 0.5-7 μm . The crystal type is unchanged but the X-ray diffraction peaks weaken obviously. The activation energy decreases from 200.11 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ to 186.87 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. The critical temperature of thermal explosion increases from 504.98 K to 507.70 K. The sensitivity of RDX/NC and refined RDX prepared by spray drying decrease compared with that of raw RDX.

Key words: RDX; spray drying; nitrocellulose (NC); thermal stability; impact sensitivity

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.05.005