

文章编号: 1003-1480 (2025) 02-0024-07

ADN/NC/RDX复合微推进体系制备及其性能研究

毋盈盈^{1, 2}, 石晓峰¹, 张泽军¹, 张维海², 王斐², 王晶禹¹

(1. 中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原, 030051; 2. 西安北方惠安化学工业有限公司, 陕西 西安, 710302)

摘要: 为了提高含RDX的复合改性双基(CMDB)推进剂的安全性, 以硝化纤维素(NC)为粘合剂, 二硝酰胺(ADN)为氧化剂, 采用一体化自组装的方式制备了ADN/NC/RDX复合颗粒, 使用扫描电子显微镜、X-射线衍射仪、差示扫描量热仪、BAM撞击感度仪和激光导热仪对其性能进行了表征和测试; 基于ADN/NC/RDX复合颗粒和ADN/NC/RDX机械混合颗粒分别制备了CMDB推进剂, 对其燃速进行了测试。结果表明: 与原材料RDX相比, ADN/NC/RDX复合颗粒形貌规则, 球形度较高, 晶型未发生改变, 撞击感度的平均特性落高提高了56.4 cm, 活化能提高了26.83 kJ·mol⁻¹, 热爆炸临界温度有所降低, 说明ADN/NC/RDX复合颗粒在等动力学原点温度以下更稳定; 基于ADN/NC/RDX复合颗粒的推进剂的燃速稍高于基于ADN/NC/RDX机械混合颗粒的推进剂。

关键词: RDX; ADN; ADN/NC/RDX复合颗粒; 推进剂; 自组装; 机械感度

中图分类号: TJ55; TQ560.5 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.02.004

Preparation and Performance Study of ADN/NC/RDX Composite Micropropulsion System

WU Ying-ying^{1, 2}, SHI Xiao-feng¹, ZHANG Ze-jun¹, ZHANG Wei-hai², WANG Fei², WANG Jing-yu¹

(1. School of Environmental and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051; 2. Xi'an North Hui'an Chemical Industry Co. Ltd., Xi'an, 710302)

Abstract: In order to improve the safety of composite modified double base (CMDB) propellant containing RDX, ADN/NC/RDX composite particles were prepared by an integrated self-assembly method using nitrocellulose (NC) as the binder and ammonium dinitramide (ADN) as the oxidant. Their properties were characterized and tested using scanning electron microscopy, X-ray diffraction, differential scanning calorimetry, BAM impact sensitivity tester, and laser thermal conductivity instrument; CMDB propellants were prepared based on ADN/NC/RDX composite particles and ADN/NC/RDX mechanically mixed particles respectively, and their burning rates were tested. The results show that compared with the RDX raw material, the ADN/NC/RDX composite particles have a regular morphology, higher sphericity, and unchanged crystal structure. The average characteristic drop height of impact sensitivity is increased by 56.4 cm, the activation energy is increased by 26.83 kJ·mol⁻¹, and the critical temperature for thermal explosion is decreased, indicating that the ADN/NC/RDX composite particles are more stable below the isokinetic origin temperature; The burning rate of propellants based on ADN/NC/RDX composite particles is slightly higher than that of propellants based on ADN/NC/RDX mechanically mixed particles.

Key words: RDX; ADN; ADN/NC/RDX composite particles; Propellant; Self-assembly; Mechanical sensitivity

作为火箭发动机和导弹的重要组成部分, 推进剂通过有规律地燃烧释放能量, 产生气体, 推送火箭和导弹。复合改性双基(CMDB)推进剂是以硝化纤维素和硝化甘油塑溶胶为粘合剂, 再加入氧化剂、高能

收稿日期: 2024-12-21

作者简介: 毋盈盈(1998-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事复合固体推进剂安全技术研究。

通讯作者: 石晓峰(1987-), 男, 教授, 主要从事火工药以及高效吸附分离技术研究。

基金项目: 西安近代化学研究所创新开放基金(204-J-2024-2622)。

引用本文: 毋盈盈, 石晓峰, 张泽军, 等. ADN/NC/RDX含能复合微推进体系制备及其性能研究[J]. 火工品, 2025(2): 24-30.

炸药、金属燃料及其他添加剂而形成的一种不交联的固体推进剂。目前,应用较为广泛的有 RDX-CMDB 推进剂、RDX-Al-CMDB 推进剂以及 AP-CMDB 等。在此类推进剂中,高能硝铵炸药和氧化剂的加入虽然满足了其能量要求,但是也不可避免地对推进剂的机械感度和热安定性产生了诸多不利影响^[1-2]。二硝酰胺铵(ADN)作为推进剂的理想氧化剂,相比于传统的氧化剂高氯酸铵(AP)而言,具有无氯、信号特征低、生成焓较高等特点。用 ADN 代替 AP 能较大幅度的提高固体推进剂的能量、减少烟雾、保护环境。

通过改善固体填料或粘合剂体系的性质可以有效提高其安全性能和力学性能。相对于改变粘合剂体系的性质,改善固体填料的性质更便捷,且存在更多可能。目前,超细化、球形化、复合化是推进剂材料的发展趋势。尚菲菲等^[3]采用超临界流体增强溶液扩散技术(SEDs法)对 RDX 进行重结晶细化,得到的 RDX 晶体边缘光滑、形貌规则趋于球形,且机械感度显著降低。刘杰等^[4]使用双向旋转球磨机制备了纳米 RDX,与原材料相比,球磨后 RDX 的感度更低,尤其是冲击波感度降幅高达 59.9%。周赛^[5]采用 HLGB-50 型粉碎机制备出超细化 RDX、HMX,发现其机械感度明显降低。李强等^[6]采用静电喷雾干燥技术制备了纳米复合含能材料 RDX@NGEC,发现其撞击和摩擦感度均有所降低。Jiang Ju 等^[7]采用超声搅拌工艺和真空干燥工艺获得了 C/RDX 纳米复合含能材料,发现该复合材料的机械感度和热感度均有所降低。周诚等^[8]采用溶剂-非溶剂法制备了 FOX-7/RDX 复合炸药,发现其热稳定性和机械感度均有所降低。秦潇楠^[9]使用微胶囊技术制备出机械感度低、安全性能好的 RDX 基球形复合含能材料。朱玉宇等^[10]采用复合微球悬浮组装成型技术制备出包覆致密且安全性能得到很好改善的 NC/F₂₆₀₂/RDX 含能微球。霍宏彪等^[11]采用预混膜乳化法制备出 RDX/GAP/EC 复合颗粒,与原料 RDX 相比,其形貌规则,球形度较高且机械感度得到了明显改善。Yang Fan 等^[12]采用溶剂-非溶剂法,在 Al/CuO 纳米复合材料颗粒上包覆一层纳米级氧化剂 KClO₄,制备出 KClO₄@Al/CuO 复合颗粒,发现其燃烧速度比 Al/CuO 纳米复合材料几乎

增加了 2 倍。综上所述,无论是超细化、球形化还是复合化,均可以有效改善含能颗粒的安全性。其中,复合化虽工艺较为复杂,但其不仅可以改善含能颗粒的安全性能,也可改善其能量特性。而复合颗粒的一体化自组装过程对原料颗粒同时进行了细化、球形化以及复合化,因此成为当前的研究热点之一。

为了提高 RDX-CMDB 推进剂的安全性,本文以 RDX 为主体炸药,ADN 为氧化剂,NC 为粘合剂,采用一体化自组装的方式制备了 ADN/NC/RDX 复合颗粒,对其与 RDX 原料及 ADN/NC/RDX 机械混合颗粒的性能差异进行了表征和测试;分别以 RDX 原料、ADN/NC/RDX 复合颗粒和机械混合颗粒为燃料,制备了 CMDB 推进剂,对其燃速进行了测试。

1 实验

1.1 试剂与仪器

黑索今(RDX),粒度约为 50~200 μm,甘肃银光化工厂;丙酮,纯度为 99.8%,天津市申泰化学试剂有限公司;硝化纤维素(NC),四川北方硝化棉股份有限公司;二硝酰胺铵(ADN),甘肃银光化工厂。

B-290 小型喷雾干燥仪,瑞士步琪(Buchi)公司;JSM-7500F 场发射扫描电镜(SEM);DX-2700 型 X 射线衍射仪,丹东方圆仪器有限公司;差式扫描量热仪(DSC-800B),上海盈诺精密仪器有限公司;BAM 撞击感度测试仪,爱迪赛恩(北京)科技有限公司;LFA457 激光导热仪,德国耐驰仪器制造有限公司;WAE-2000C 型固体推进剂静态燃速测控仪,湖北航天化学技术研究所。

1.2 实验工艺与步骤

1.2.1 复合材料的制备

采用一体化自组装技术制备 ADN/NC/RDX 复合颗粒,其制备机理如图 1 所示。利用 ADN、NC、RDX 共溶于丙酮的特性使其形成共溶液,再通过喷雾干燥法使共溶液快速干燥为混合均匀的微球。

一体化自组装制备流程如图 2 所示。常温下,以丙酮为溶剂,配制 $w_{\text{ADN}} : w_{\text{NC}} : w_{\text{RDX}} = 10 : 10 : 80$ 的共溶液,在 40 °C 恒温下超声震荡 30 min,使得 RDX、

ADN 与 NC 完全溶解并混合均匀; 将喷雾干燥仪的氮气流量设定为 $430 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, 使仪器中的氧气排空; 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; 通过旋风分离器将 ADN/NC/RDX 球形复合粒子与热氮气分离后, 全部收集在烧瓶中, 得到 ADN/NC/RDX 复合颗粒 (RDX1)。

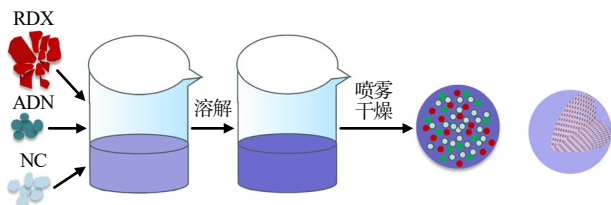


图1 一体化自组装机理

Fig.1 Integrated self-assembly mechanism

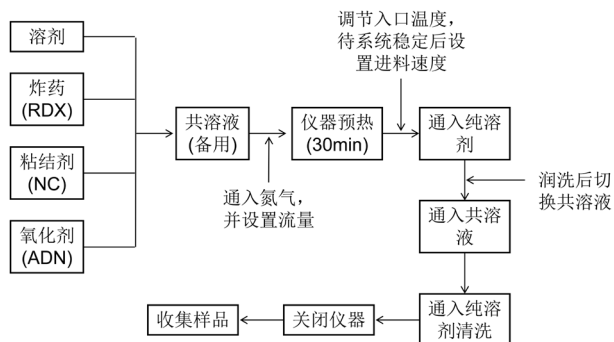


图2 一体化自组装置备流程图

Fig.2 Integrated self-assembly preparation process diagram

同时, 采用机械混合方式制备 ADN/NC/RDX 机械混合颗粒 (RDX2), 与其进行对比研究。

1.2.2 推进剂的制备

采用压伸成型工艺制备 RDX-CMDB 推进剂。分别以 RDX、RDX1、RDX2 为燃料, 以 NC+NG 为粘合剂体系, 并加入适量的添加剂来改善其物理和化学性能, 经过吸收、驱水、放熟、压延等过程, 制备出推进剂样品, 分别命名为 R-0、R-1、R-2, 其配方如表 1 所示。

表 1 推进剂配方

配方	NC	NG	RDX	RDX1	RDX2	Al 粉	其他
R-0	36	24	23			7	10
R-1	36	24		23		7	10
R-2	36	24			23	7	10

1.3 性能测试

通过扫描电子显微镜 (SEM) 对样品形貌进行表征, 测试方法为: 将所制备的样品分散在导电胶上,

然后进行喷金处理, 以加强样品的导电性。通过 X-射线衍射仪 (XRD) 对样品的晶型进行分析, 测试条件为: 将样品粉末均匀散布在石英玻璃板的样品槽中, 与样品槽平齐, 测试角度为 $5 \sim 50^\circ$, 步进角度为 0.05° 。通过差示扫描量热仪 (DSC) 对样品的热性能进行分析, 测试条件为: 样品质量为 0.8 mg , 升温速率为 $5, 10, 20 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。使用 BAM 撞击感度仪测试样品的撞击感度。根据 GJB 772A-1997 炸药试验方法, 采用特性落高法测试样品的撞击感度, 试验条件为: 落锤 5 kg , 样品 30 mg , 温度为 $20 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度小于或等于 60% 。通过激光导热仪对样品进行加热, 测量样品温度变化速率, 计算材料的热导率, 测试样品形状为圆形, 直径为 12.7 mm , 厚度为 $1 \sim 3 \text{ mm}$, 升温速率为 $10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。使用固体推进剂静态燃速测控仪测试样品的燃速, 基于水下声发射法原理, 通过采集燃烧过程中的声信号, 并对其进行处理, 得到燃烧时间, 根据药条燃烧长度与燃烧时间, 计算燃烧速度。

2 结果与讨论

2.1 形貌结构表征

2.1.1 SEM 分析

RDX 原料和 ADN/NC/RDX 复合颗粒 (RDX1) 的 SEM 图片分别如图 3 和图 4 所示。

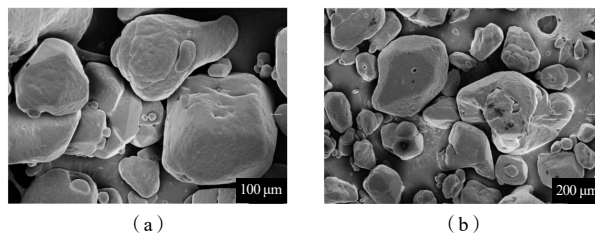


图3 RDX 原料 SEM 图

Fig.3 SEM image of RDX raw material

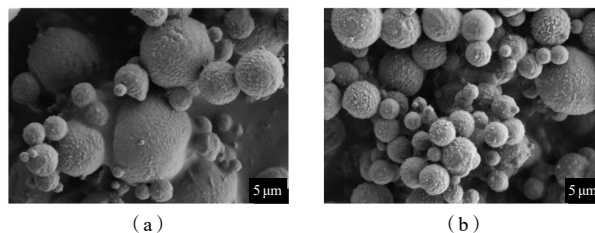


图4 ADN/NC/RDX 复合颗粒 SEM 图

Fig.4 SEM image of ADN/NC/RDX composite particles

由图3可见,RDX原料的形状不一、颗粒大小不均匀且伴随有尖锐棱角。由图4可见,由于NC的存在,ADN/NC/RDX复合颗粒相互连接,且均为球形,这是因为共溶液由喷嘴喷出时,受溶液表面张力的影响,使得小液滴呈球形,因此干燥后的复合颗粒便趋于球形。此外,ADN/NC/RDX复合颗粒表面并不光滑,是由于在干燥过程中丙酮溶剂快速蒸发而产生了孔洞。

2.1.2 DSC分析

在5, 10, 20 °C·min⁻¹的升温速率下,使用差示扫描量热仪分别对RDX原料及ADN/NC/RDX复合颗粒进行热分解测试,测试结果如图5所示。

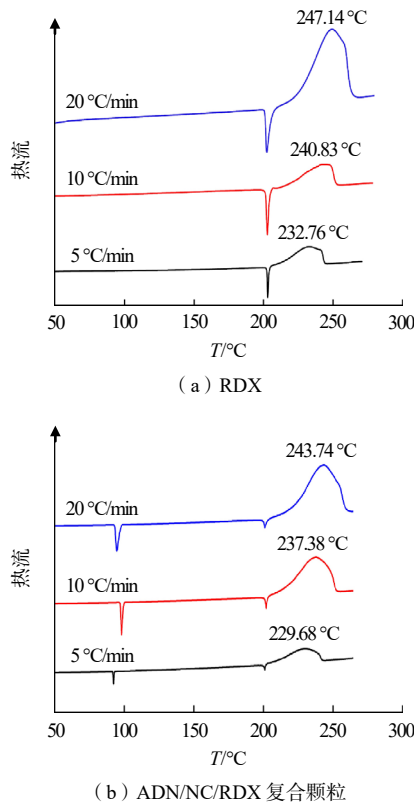


图5 不同升温速率下RDX原料及ADN/NC/RDX复合颗粒的DSC曲线图

Fig.5 DSC curves of RDX raw materials and ADN/NC/RDX composite particles at different heating rates

由图5可见,3种升温速率下,RDX原料在202 °C处均有1个吸收峰,此时,RDX原料开始熔融吸收热量,随着温度不断升高,其在230~250 °C出现强烈的放热峰;与RDX原料相比,在相同升温速率下,ADN/NC/RDX复合颗粒在90~100 °C时便出现第1个吸收峰,说明其在该温度下便开始熔化吸热,这是

因为复合颗粒中的氧化剂ADN在90~100 °C时发生了熔融吸热现象。相同的升温速率下,ADN/NC/RDX复合颗粒的放热峰均较RDX原料有所提前,这是因为ADN对RDX的分解起促进作用,从而使其分解峰温提前。

根据不同升温速率下的分解峰温,采用Kissinger公式^[13]求解热分解的表观活化能和指前因子:

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

式(1)中: β_i 为升温速率,°C·min⁻¹; T_{pi} 为某升温速率下的分解峰温; A 为指前因子; E 为表观活化能, kJ·mol⁻¹; R 为热力学常数, 8.314 J·mol⁻¹·K⁻¹。

根据公式(1),将3个不同升温速率与其相应的放热峰温计算所得数值进行线性拟合,得到Kissinger拟合直线,如图6所示,根据拟合直线的斜率和截距求出 E 、 A 的值。

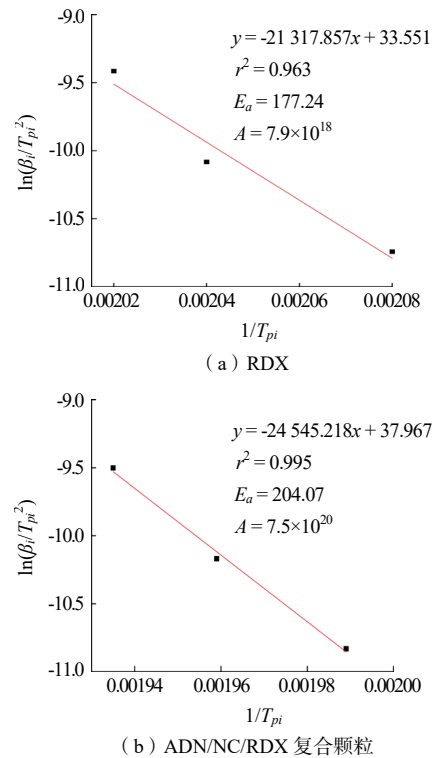


图6 RDX原料和ADN/NC/RDX复合颗粒的Kissinger拟合直线

Fig.6 Kissinger fitting lines of RDX raw materials and ADN/NC/RDX composite particles

升温速率趋于0时的分解峰温(T_{p0})^[14]满足:

$$T_{pi} = T_{p0} + b\beta_i + c\beta_i^2 \quad (2)$$

采用热爆炸临界温度计算公式^[15]计算热爆炸临

界温度 (T_b):

$$T_b = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4RET_{p0}}}{2R} \quad (3)$$

计算得到的 RDX 原料和 ADN/NC/RDX 复合颗粒的热分解动力学参数如表 2 所示。由表 2 可见, 与 RDX 原料相比, ADN/NC/RDX 复合颗粒的活化能有较大提高, 但其热爆炸临界温度有所降低, 这说明经过一体化自组装后的 ADN/NC/RDX 在等动力学原点温度以下更稳定, 当温度高于等动力学原点温度, 其稳定程度低于 RDX 原料。

表 2 RDX 原料和 ADN/NC/RDX 复合颗粒热分解动力学参数

样品	$E/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	A/S^{-1}	T_{p0}/K	T_b/K
RDX 原料	177.24	7.9×10^{18}	494.56	506.5
ADN/NC/RDX 复合颗粒	204.07	7.5×10^{20}	492.20	502.5

2 种样品的热分解速率可以通过二者的反应速率常数来体现, 可通过 Arrhenius 公式^[16]求得:

$$K = Ae^{-\frac{E}{RT}} \quad (4)$$

式 (4) 中: K 为反应速率常数; T 为特征温度; R 为热力学常数。

当 RDX 原料与 ADN/NC/RDX 复合颗粒的 K 值相同时, 所对应的温度为 2 种样品的等动力学点, 通过计算得出二者的等动力学点为 $434\text{ }^\circ\text{C}$ 。这表明当温度小于 $434\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 有较大活化能的 ADN/NC/RDX 热分解速率将小于 RDX 原料; 当温度高于 $434\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 情况则正好相反。

2.1.3 XRD 分析

采用 X-射线衍射仪对 RDX 原料及 ADN/NC/RDX 复合颗粒进行表征, 结果如图 7 所示。

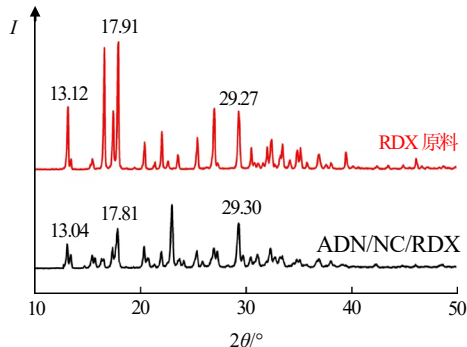


图 7 RDX 原料与 ADN/NC/RDX 复合颗粒的 X 射线衍射图
Fig.7 X-ray diffraction pattern of RDX raw materials and ADN/NC/RDX composite particles

由图 7 可见, ADN/NC/RDX 复合颗粒所有的衍射角度与 RDX 原料的衍射角度基本相同, 即 XRD 衍射峰的位置没有发生变化, 表明在一体化自组装过程中 RDX 的晶体结构未发生变化。但是, 与原料 RDX 相比, ADN/NC/RDX 的衍射峰变宽且强度有所下降, 这是由于复合颗粒的粒径减小造成的。

2.2 安全性能研究

根据 GJB 772A-1997 试验条件对 RDX 原料及 ADN/NC/RDX 复合颗粒分别进行 4 组撞击试验 (每组试验样品数为 25 个), 取平均值。感度测试结果如表 3 所示。

表 3 RDX 原料和 ADN/NC/RDX 复合颗粒撞击感度测试结果
Tab.3 Impact sensitivity test results of RDX raw materials and ADN/NC/RDX composite particles

样品	撞击感度/cm				
	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	平均
RDX 原料	20.0	21.7	20.6	22.1	21.1
ADN/NC/RDX	76.8	77.4	78.4	77.2	77.5

由表 3 可见, 与原料 RDX 相比, ADN/NC/RDX 复合颗粒撞击感度的特性落高明显上升, 平均比原料 RDX 高出 56.4 cm 。这是因为该微推进体系对 RDX 原料进行细化和球形化后, 样品的缺陷减少, 表面光滑且无明显棱角, 不易形成局部“热点”, 且粘合剂 NC 的加入可起到缓冲作用, 从而使复合颗粒样品更加钝感。

2.3 热导率研究

使用激光导热仪分别对 ADN/NC/RDX 机械混合颗粒和 ADN/NC/RDX 复合颗粒在堆积、压装工艺下的热导率进行测试, 测试结果如图 8 所示。

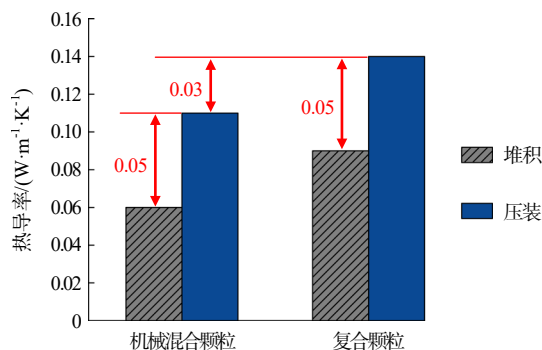


图 8 ADN/NC/RDX 机械混合颗粒和 ADN/NC/RDX 复合颗粒在堆积和压装时的热导率

Fig.8 Thermal conductivity of ADN/NC/RDX mechanically mixed particles and ADN/NC/RDX composite particles during stacking and pressing

由图 8 可见, 无论是 ADN/NC/RDX 机械混合颗粒

粒还是 ADN/NC/RDX 复合颗粒,其压装工艺的导热率均比堆积工艺的热导率好。与机械混合方式相比,一体化自组装方式制备的 ADN/NC/RDX 复合颗粒的接触面更广,导致其界面热导阻较小,热导率更高,更有利于传热,散热速率也更快,不易形成热点,因此,热安全性更高。

2.4 燃烧性能测试

使用固体推进剂静态燃速测控仪在 5, 10, 15 MPa 压力下测试 R-1、R-2 固体推进剂的燃速,结果如表 4 所示。

表 4 基于机械混合和自组装 ADN/NC/RDX 的固体推进剂燃速测试结果

推进剂	燃速/(mm·s ⁻¹)		
	5 MPa	10 MPa	15 MPa
R-2	4.98	8.24	10.01
R-1	5.25	8.39	10.15

由表 4 可见,5, 10, 15 MPa 压力下,R-1 推进剂的燃速均稍高于 R-2 推进剂。这是因为经过一体化自组装后的 ADN/NC/RDX 复合颗粒导热率更高,从而更有利于热量的扩散,因此其燃速更高。

2.5 自组装及性能提升机理分析

ADN/NC/RDX 复合颗粒的一体化自组装过程对原料颗粒同时进行了细化、球形化以及复合化,实现了对炸药颗粒的优化。通过对 ADN/NC/RDX 复合颗粒的一系列表征及测试分析可以得出:

(1) 采用一体化自组装方式制备的 ADN/NC/RDX 复合颗粒机械感度明显降低,其原因是:在测定撞击感度时,由于炸药与上下击柱、炸药与炸药之间均存在相互运动,使炸药承受各种机械作用从而产生热点,形成爆炸,而 ADN/NC/RDX 复合颗粒球形化较好且粒径相对于 RDX 原料较小,由堆积理论得出其间隙较小即使受到强烈的撞击,其所形成的热点尺寸也不足以使推进剂发生爆炸。

(2) 在该溶剂中,由于表面能的差异小,晶体溶解后其溶解物在较大晶体的表面再沉积^[17]。因此,几种不同粒径的溶质能够更加充分均匀的混合。完全混合后的共溶液通过喷嘴喷出,再经过加热使得溶液液滴快速干燥成圆形的小晶粒。所以,ADN/NC/RDX 复合颗粒混合的更加均匀,且粒径大大减小,不仅使

其形状更接近球形而且其表面积更大、热导率更好,从而使其燃烧速率更大。

3 结论

(1) 通过一体化自组装的方式制备了 ADN/NC/RDX 复合颗粒,所制备的复合颗粒形貌较好,球形化程度高,粒径约为 5~30 μm,并且其晶体结构与 RDX 原料相同。

(2) 热分析结果表明,相比原料 RDX,采用复合微推进一体化自组装方式制备的 ADN/NC/RDX 复合颗粒的活化能提高了 26.83 kJ·mol⁻¹,热爆炸临界温度有所降低,说明 ADN/NC/RDX 复合颗粒在等动力学原点温度以下的热稳定性更高。

(3) 通过一体化自组装方式制备的 ADN/NC/RDX 复合颗粒机械感度明显降低,相比原料 RDX,其平均特性落高提高了 56.4 cm。

(4) 分别采用 ADN/NC/RDX 复合颗粒和 ADN/NC/RDX 机械混合颗粒代替 RDX-CMDB 中的 RDX 原料,燃速测试结果表明基于 ADN/NC/RDX 复合颗粒的推进剂的燃速更高。这是因为一体化自组装方式制备的 ADN/NC/RDX 复合颗粒粒径更小,形状更接近球形,表面积更大,热导率更好,因此其燃烧速率更大。

参考文献:

- [1] 张伟, 谢五喜, 樊学忠, 等. 含 ADN 推进剂的能量特性及综合性能[J]. 火炸药学报, 2015(2): 81-85.
- [2] Liu Jia-ming, Li Tian-yi, Yang Ming-feng, et al. Storage-life prediction and relationship between maximum elongation and stabilizer depletion for a composite modified double base propellant (CMDB) propellant[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2024(28): 2 411-2 427.
- [3] 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(01): 43-48.
- [4] 刘杰, 李青, 曾江保, 等. 机械粉碎法制备不敏感纳米

- RDX[J]. 爆破器材, 2013(4): 1-5.
- [5] 周赛. 不敏感超细化 RDX、HMX 的制备及其降感机理的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [6] 李强, 陈令, 甘怀银, 等. 静电喷雾法制备纳米复合含能材料 RDX@NGEC 及性能[J]. 兵工学报, 2023, 44(7): 1 985-1 992.
- [7] Jiang Ju, Su Jin-Xiao, Liu Zhi-Tao, et al. Preparation and characterization of porous carbon/RDX nanocomposite energetic materials[J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2023, 20(3): 284-301.
- [8] 周诚, 常佩, 胡玲, 等. FOX-7/RDX 复合炸药的制备、表征及性能研究[J]. 火炸药学报, 2020, 43(6): 669-673, 680.
- [9] 秦潇楠, 微胶囊技术制备 RDX 基球形复合含能材料及其性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2024.
- [10] 朱玉宇, 霍宏彪, 王杰超, 等. NC/F₂₆₀₂/RDX 复合微球悬浮组装成型及其性能研究[J]. 火工品, 2023(1): 58-62.
- [11] 霍宏彪, 叶宝云, 安崇伟, 等. 预混膜乳化法制备 RDX 复合颗粒及其性能研究[J]. 火炸药学报, 2023, 46(01): 55-61.
- [12] Yang Fan, Kang Xiaoli, Luo Jiangshan, et al. Preparation of core-shell structure KClO₄@Al/CuO nanoenergetic material and enhancement of thermal behavior[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 3 730.
- [13] Kissinger H E. Reaction kinetics in differential thermal analysis[J]. Analytical Chemistry, 1957, 29(11): 1 702- 1 706.
- [14] MR Sovizi, SS Hajimirsadeghi, B Naderizadeh. Effect of particle size on thermal decomposition of nitrocellulose[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(2-3): 1 134-1 139.
- [15] Li H Q, An C W, Du M Y, et al. Study on kinetic parameters of thermal decomposition reaction and thermal stability of 3, 4-bis (3-nitrofurazan-4-yl) furoxan based on kissinger method [J]. 火炸药学报, 2016, 39(3): 58-60, 65.
- [16] 乔海涛. 求解固化反应动力学的多角度 DSC 数据分析[J]. 纤维复合材料, 2022, 39(4): 65-73.
- [17] Dr Baoguang Mao, Donglei Guo, Jinwen Qin, et al. Solubility-parameter-guided solvent selection to initiate ostwald ripening for interior space-tunable structures with architecture-dependent electrochemical performance[J]. Angewandte Chemie, 2018, 130(2): 455-459.