

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.06.003

# GAP 原位聚合包覆 RDX 的研究<sup>\*</sup>

陈 炜<sup>①</sup> 刘巧娥<sup>②</sup> 陈 腾<sup>①</sup> 郝嘎子<sup>①</sup> 胡玉冰<sup>①</sup> 姜 炜<sup>①</sup>  
①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)  
②甘肃银光化学工业集团有限公司科研所(甘肃白银,730900)

**[摘 要]** 以聚叠氮缩水甘油醚(GAP)为包覆层材料,甲苯二异氰酸酯(TDI)为交联剂,二月桂酸二丁基锡(DBTDL)为催化剂,乙酸乙酯为溶剂,采用原位聚合法,制备了 GAP-TDI/RDX 复合材料。利用 SEM、FT-IR、XRD、DTA 对样品进行了形貌表征和性能测试;利用 DTA 对其热分解特性进行了研究,结合不同升温速率下的 DTA 曲线对样品的热分解动力学参数进行了计算。结果表明,GAP 成功包覆在 RDX 表面。所制备的 GAP-TDI/RDX 复合材料的热分解表观活化能相比原料 RDX 降低了 4.6 kJ/mol,说明复合材料的热分解活性得到提高;GAP-TDI/RDX 复合材料的特性落高  $H_{50}$  从 15.2 cm 提升至 25.6 cm。  
**[关键词]** 原位聚合;GAP-TDI/RDX;复合材料;热分解  
**[分类号]** TJ55

## Study on RDX Coated by GAP through In-situ Polymerization

CHEN Wei<sup>①</sup>, LIU Qiaoe<sup>②</sup>, CHEN Teng<sup>①</sup>, HAO Gazi<sup>①</sup>, HU Yubing<sup>①</sup>, JIANG Wei<sup>①</sup>  
① School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)  
② Research Institute of Gansu Yinguang Chemical Industry Group Co., Ltd. (Gansu Baiyin, 730900)

**[ABSTRACT]** A GAP-TDI/RDX composite was prepared via in-situ polymerization by using Glycidyl azide polymer (GAP) as a coating material, toluene diisocyanate (TDI) as a crosslinking agent, dibutyltin dilaurate (DBTDL) as a catalyst, and ethyl acetate as a solvent. Morphology and performance of the samples were characterized by SEM, FT-IR, XRD and DTA. Thermal decomposition characteristics of the sample were studied by DTA, and thermal decomposition kinetic parameters of the sample were calculated by integrating the DTA curves at different heating rates. The results show that GAP successfully coats on the surface of RDX. The apparent activation energy of thermal decomposition of the prepared GAP-TDI/RDX composites is 4.6 kJ/mol lower than that of the raw material RDX, indicating that the thermal decomposition activity of the composites has been improved. The characteristic drop height,  $H_{50}$ , of the GAP-TDI/RDX composite increases from 15.2 cm to 25.6 cm.  
**[KEYWORDS]** in-situ polymerization; GAP-TDI/RDX; composite material; thermal decomposition

## 引言

黑索今(RDX)由于具有低成本、高能量等优点<sup>[1]</sup>,广泛应用于弹药装药、发射药以及火箭推进剂<sup>[2]</sup>。RDX 用于武器装药时具有能量输出高的特征,但高能的同时,过高的感度限制了它的广泛应用,且现代武器发展越来越倾向于发展低感高爆炸药,因此亟需研究新型有效的降感技术<sup>[3]</sup>。

目前,常用的降感技术主要包括以下几种:一是在合成 RDX 的过程中,控制其晶体的生长,改善颗粒的大小及形貌;二是探索高能共晶<sup>[4]</sup>,通过与感度相对较低的炸药[如 2,4,6-三硝基甲苯(TNT)、5,5'-联四唑-1,1'-二氧二羟胺(TKX-50, HATO)<sup>[5]</sup>等]形成共晶<sup>[6]</sup>,达到降低感度的目的;三是对 RDX 进行超细化<sup>[7]</sup>处理;四是用某类材料对其进行表面包覆。其中,第四种是目前被认为最有效的降感手段<sup>[3]</sup>,即可以通过使用不同特性的包覆材料对目标

<sup>\*</sup> 收稿日期:2019-06-11  
基金项目:国家安全重大基础研究项目;基础产品创新火炸药科研专项;国防科技卓越青年科学基金  
第一作者:陈炜(1995-),男,硕士研究生,主要从事纳米复合含能材料的制备及性能研究。E-mail:chenwei401@tju.edu.cn  
通信作者:姜炜(1974-),男,教授,主要从事纳米复合含能材料的制备及性能研究。E-mail:superfine\_jw@126.com

材料进行表面包覆,以达到不同的应用目的。

常见的包覆 RDX 的材料主要分为非含能材料和含能材料两大类。非含能材料主要包括钝感材料(石蜡、石墨<sup>[8]</sup>、碳纳米管<sup>[9]</sup>、硬脂酸<sup>[10]</sup>等)、惰性聚氨酯<sup>[11]</sup>类以及其他非含能高分子材料(如氟橡胶<sup>[12]</sup>、三聚氰胺-甲醛树脂等)。含能材料也可分为两类,其一是含能高分子材料,如硝化棉(NC)<sup>[13]</sup>、聚叠氮缩水甘油醚(GAP)、BAMO-THF 共聚醚<sup>[14]</sup>等;其二是含能化合物,包括三氨基三硝基苯(TATB)<sup>[15]</sup>、三硝基甲苯(TNT)、四氧化二氮(NTO)<sup>[16]</sup>、HATO<sup>[17]</sup>等。

本研究中,以 GAP 为包覆材料,采用原位聚合法对 RDX 进行包覆降感。原位聚合法是指包覆材料(GAP)在炸药表面发生聚合反应,形成包覆层,与传统的水悬浮法的溶解、沉淀物理过程及机械搅拌法混合过程相比,包覆层强度更好。如杨志剑等<sup>[3]</sup>对比研究了三聚氰胺-甲醛树脂原位聚合和机械搅拌简单混合包覆硝胺炸药,结果表明,采用原位聚合包覆 RDX 能够使三聚氰胺-甲醛树脂更坚固和均匀地包覆在硝胺炸药颗粒表面,复合粒子的感度降低得很多。孟征等<sup>[18]</sup>通过原位聚合法用蜜胺甲醛树脂原位聚合包覆六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20),得到椭圆球的复合粒子, $H_{50}$ 显著提高。

而本研究中采用的原位聚合包覆正是借鉴这种先进的包覆思路,先将 GAP 溶于乙酸乙酯中,随后加入 RDX,均匀混合后,加入交联剂、催化剂,使得 GAP 在炸药表面交联、聚合,一步完成包覆。该方法具有实验步骤简单、反应条件温和、降感效果优异等特点。

GAP 属于叠氮类含能聚合物,因其侧链上具有叠氮基团,每个叠氮基团可提供大概 314 ~ 398 kJ 的正生成热。GAP 的氮含量高,密度较大,热稳定性较好和机械感度较低<sup>[19]</sup>。用这种材料对 RDX 进行包覆,不仅可以对 RDX 进行有效的降感,且相对于传统的钝感材料在能量上具有一定的优势,有望保持其能量特性。同时,对包覆前、后的样品进行了表征和分析,研究了包覆前、后 RDX 的形貌变化、晶型变化、热分解性能以及感度性能的变化。

# 1 实验

## 1.1 实验仪器与试剂

RDX,工业级, $d_{50}=100\text{ }\mu\text{m}$ ,甘肃银光化学工业集团;GAP,数均分子量为 2 980,羟值为 0.63 mmol/g,工业级,航天 42 所;乙酸乙酯,分析纯,国药集团

化学试剂有限公司;二月桂酸二丁基锡(DBTDL),分析纯,阿拉丁化学试剂有限公司;甲苯二异氰酸酯(TDI),分析纯,阿拉丁化学试剂有限公司。

## 1.2 GAP-TDI/RDX 复合含能材料的制备

以乙酸乙酯为溶剂,先将计量的 GAP 加入到溶剂中,充分搅拌至 GAP 完全溶解,随后加入计量的 RDX (RDX 与 GAP 的质量比为 20 : 1),二者混合后充分搅拌 0.5 h。随后滴加计量的 TDI、DBTDL,30 ℃ 下引发 GAP 聚合反应,反应 12 h 后,将所得产物抽滤,并用无水乙醇洗涤,最后置于 50 ℃ 烘箱干燥,得到 GAP-TDI/RDX 复合含能材料。

## 1.3 形貌表征与性能测试

采用扫描电子显微镜(SEM)对样品的形貌进行表征观察;采用傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)对 GAP-TDI、原料 RDX、GAP-TDI/RDX 复合含能材料的特征基团进行测试,波段范围为 500 ~ 4 000  $\text{cm}^{-1}$ ,其中,傅里叶红外变换光谱仪使用衰减全反射附件(ATR);采用 X 射线衍射(XRD)对原料 RDX、GAP-TDI/RDX 复合含能材料的晶体结构进行表征;采用热分析仪对 GAP-TDI、原料 RDX、GAP-TDI/RDX 复合含能材料进行 DTA 测试,温度范围为 50 ~ 350 ℃,升温速率分别为 5、10、15 ℃/min 以及 20 ℃/min,氮气流速为 50 mL/min,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  坩埚,试样质量  $\leq 1.5\text{ mg}$ 。撞击感度:按照 GJB 772A—97 方法 601.2 进行特性落高法测试,其中,落锤质量为 5 kg,装药量为  $(50 \pm 1)\text{ mg}$ ,环境温度为  $(20 \pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度为  $(60 \pm 5)\%$ 。

# 2 结果与讨论

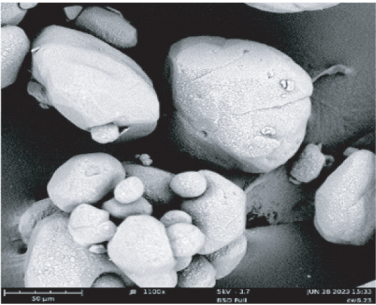
## 2.1 SEM 分析

对原料 RDX、GAP-TDI/RDX 进行 SEM 测试,测试结果如图 1 所示。

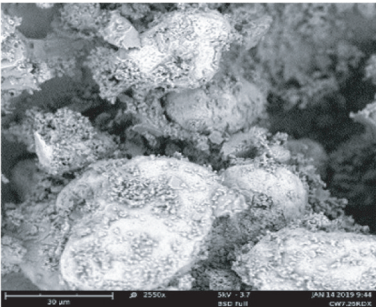
由图 1 可以看到,未包覆的原料 RDX 颗粒表面光滑;包覆后的原料 RDX 表面附着大量的 GAP-TDI 颗粒,变得粗糙,颗粒之间存在包覆材料,有细微的黏结现象。

## 2.2 FT-IR 分析

图 2 (a) GAP-TDI 的红外光谱图中可以看到,在 2 091  $\text{cm}^{-1}$  有一明显的峰,该峰为 GAP 中的叠氮基团— $\text{N}_3$  的特征峰。3 304  $\text{cm}^{-1}$  和 1 639  $\text{cm}^{-1}$  分别为氨基甲酸酯基的特征基团 N—H 和 C=O 伸缩振动峰,同时,在 2 272  $\text{cm}^{-1}$  附近没有—NCO 的特征峰,这说明 GAP 中的—OH 与交联剂 TDI 中的—NCO 基团发生了反应,生成了氨基甲酸酯基<sup>[20]</sup>。



(a) 原料 RDX



(b) GAP-TDI/RDX 复合粒子

图 1 RDX、GAP-TDI/RDX 复合粒子的 SEM 照片

Fig. 1 SEM photos of RDX and

GAP-TDI/RDX composite particles

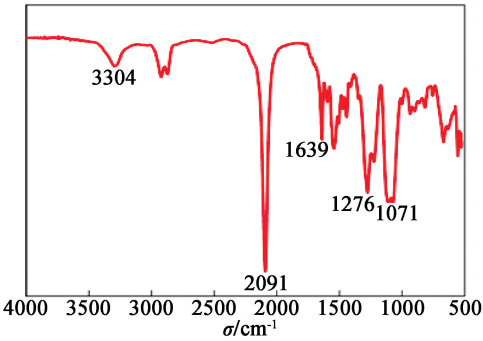
图 2 (b) 中,在  $3\,070$ 、 $3\,009\text{ cm}^{-1}$  处分别出现了一 $\text{CH}_2$  的伸缩振动峰, $1\,590\text{ cm}^{-1}$  和  $1\,530\text{ cm}^{-1}$  处出现了一 $\text{NO}_2$  的不对称伸缩振动峰。 $1\,455\text{ cm}^{-1}$  和  $1\,422\text{ cm}^{-1}$  为 RDX 环上的一 $\text{CH}_2$  的变形振动峰。 $1\,040\text{ cm}^{-1}$  为  $\text{C—N}$  的伸缩振动峰。 $754\text{ cm}^{-1}$  为一 $\text{NO}_2$  的伸缩振动峰。

图 2 (c) 中可以看出,GAP-TDI 中叠氮基团的特征峰  $2\,094\text{ cm}^{-1}$  和 RDX 的特征峰  $1\,592$ 、 $1\,264$ 、 $1\,071\text{ cm}^{-1}$  同时出现在了 GAP-TDI/RDX 复合含能材料中,表明 GAP 成功包覆在 RDX 表面。

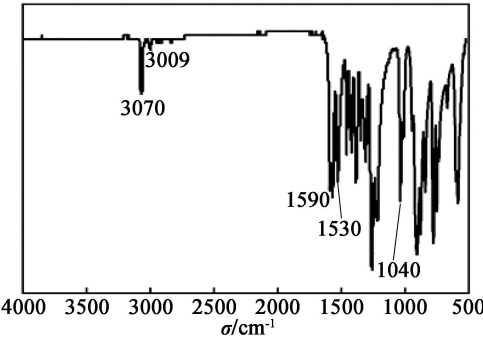
2.3 XRD 分析

图 3 为包覆前、后的 RDX 样品的 X 射线衍射图 (XRD)。

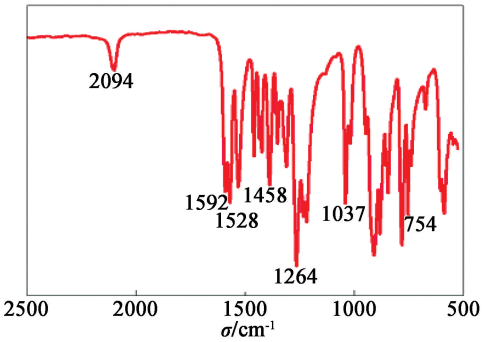
可以看出,两者的所有衍射角位置均相同,主要峰的位置不变,能够一一对应,这说明了包覆前、后的 RDX 晶型一致;原因是 RDX 在较低温度下在乙酸乙酯中的溶解度较小,大部分是维持固体的形态,不涉及重结晶过程。除此之外,包覆材料 GAP 与 RDX 表面之间并无发生化学反应,也无新物质生成。但包覆后的 RDX 的部分衍射峰强度减弱明显,峰强度的削弱是由于无定形态的 GAP 包覆在晶态 RDX 表面,削弱了 RDX 的衍射峰强度,这也从另一个角度证明了 GAP 有效包覆在了 RDX 表面。综合上述原因,RDX 的晶型没有发生改变。



(a) GAP-TDI



(b) RDX



(c) GAP-TDI/RDX

图 2 GAP-TDI、原料 RDX 及 GAP-TDI/RDX 的红外光谱图

Fig. 2 Infrared spectra of GAP-TDI, raw material RDX and GAP-TDI/RDX

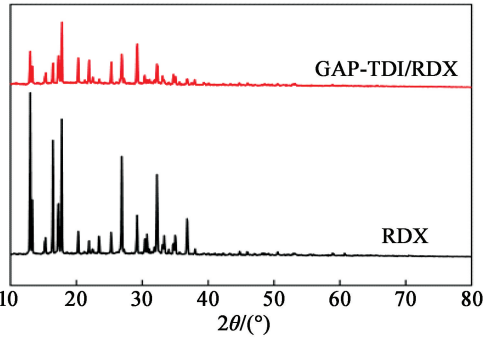


图 3 GAP-TDI/RDX、原料 RDX 的 XRD 衍射谱图

Fig. 3 XRD patterns of GAP-TDI/RDX and raw material RDX

2.4 热分解性能分析

由图 4 可知,在 20 ℃/min 的升温速率下,GAP-TDI、原料 RDX 以及 GAP-TDI/RDX 的热分解峰分别位于 245. 62、248. 07 ℃ 以及 247. 36 ℃。GAP-TDI/RDX 复合物的热分解峰温相比原料 RDX 降低了 0. 71 ℃。GAP-TDI/RDX 复合物峰温降低的主要原因是 RDX 表面包覆微纳米级的 GAP-TDI 颗粒。一方面,由于微纳米的表面效应,RDX 表面附着的微纳米 GAP-TDI 颗粒相比块状 GAP-TDI 更容易吸热分解;另一方面,GAP 也属于含能高分子材料,其热分解的同时放出的热量也进一步促进了 RDX 的热分解。综上,GAP-TDI/RDX 复合物的热分解峰温相较于原料 RDX 有一定的降低。

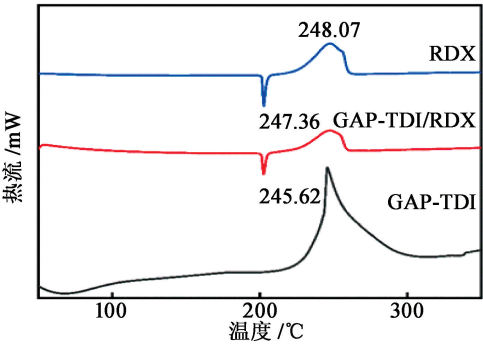


图 4 GAP-TDI、原料 RDX 及 GAP-TDI/RDX 的 DTA 曲线  
Fig. 4 DTA curves of GAP-TDI, raw material RDX and GAP-TDI/RDX

为了进一步研究 GAP-TDI/RDX 复合物的热分解动力学,分别在不同的升温速率下测定其 DTA 曲线,热分解峰温对比结果见表 1。

表 1 GAP-TDI、原料 RDX、GAP-TDI/RDX 在不同升温速率下的热分解峰温

Tab. 1 Peak temperature of thermal decomposition of GAP-TDI, raw material RDX and GAP-TDI/RDX at different heating rates ℃				
样品	升温速率/(℃ · min <sup>-1</sup> )			
	5	10	15	20
GAP-TDI	230.3	235.5	241.6	245.6
RDX	227.1	233.3	241.1	248.1
GAP-TDI/RDX	225.8	232.1	240.3	247.4

基于 GAP-TDI/RDX、原料 RDX、以及 GAP-TDI 在不同升温速率下的 DTA 曲线,采用 Kissinger 方法<sup>[21]</sup>,根据式(1) 对热分解动力学参数进行计算。

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right)=\ln\left(\frac{AR}{E_a}\right)-\frac{E_a}{RT_p}$$

(1)

式中:β 为升温速率,K/min ;A 为指前因子,s<sup>-1</sup>;R

为理想气体常数,8. 314 J/(mol · K);E<sub>a</sub> 为活化能,J/mol;T<sub>p</sub> 为 DTA 曲线中放热峰的峰温,K。热分解的表观活化能和指前因子由截距 ln(AR/E<sub>a</sub>) 和斜率 -E<sub>a</sub>/R 计算得到,结果如表 2 所示。

表 2 GAP-TDI、原料 RDX 以及 GAP-TDI/RDX 的热分解动力学参数

Tab. 2 Kinetic parameters of thermal decomposition of GAP-TDI, raw material RDX and GAP-TDI/RDX

样品	E <sub>a</sub> /(kJ · mol <sup>-1</sup> )	lnA
GAP-TDI/RDX	125. 9	39. 9
RDX	130. 5	40. 0
GAP-TDI	182. 1	40. 3

从表 2 可以看出,GAP-TDI/RDX、原料 RDX 以及 GAP-TDI 的表观活化能分别为 125. 9、130. 5、182. 1 kJ/mol。相比原料 RDX,包覆了 GAP-TDI 的 GAP-TDI/RDX 复合物的表观活化能降低了 4. 6 kJ/mol,这是由于包覆在 RDX 表面的 GAP-TDI 的颗粒较小,相比块状 GAP-TDI 更易吸热分解。且 GAP 本身属于含能高分子材料,吸热分解的同时产生的热量又促进了 RDX 的分解,间接降低了 RDX 热分解的活化能,提高 RDX 热分解的反应速率。

2.5 撞击感度测试

原料 RDX 和 GAP-TDI/RDX 的撞击感度测试结果如表 3 所示。

表 3 原料 RDX 及 GAP-TDI/RDX 的撞击感度  
Tab. 3 Impact sensitivity of raw material RDX and GAP-TDI/RDX

样品	H <sub>50</sub> /cm
原料 RDX	15. 2
GAP-TDI/RDX	25. 6

由表 3 可知道,GAP-TDI/RDX 的特性落高 H<sub>50</sub> 由原料的 15. 2 cm 提高到了 25. 6 cm,表明原料 RDX 表面包覆的 GAP-TDI 颗粒具有降感作用。这是因为 GAP-TDI 本身是弹性体,在外界撞击力作用下,附着在 RDX 表面的 GAP-TDI 起到了一定的缓冲作用,直接降低了原料 RDX 颗粒间的应力集中及摩擦,从而间接降低了热点的生成概率。

3 结论

1)采用原位聚合法制备了 GAP-TDI/RDX 复合材料;从 SEM 测试可以直接看到 RDX 的表面包覆了 GAP-TDI;FT-IR 和 XRD 测试也间接证明了 RDX 的表面包覆了 GAP-TDI。

2) 与原料 RDX 相比, GAP-TDI/RDX 的热分解峰温降低了 0.71 °C, 表观活化能降低了 4.6 kJ/mol, 热分解的反应速率有了小幅的提高。

3) 与原料 RDX 相比, GAP-TDI/RDX 的特性落高  $H_{50}$  从 15.2 cm 提高到了 25.6 cm, 撞击感度明显降低, 安全性能得到提高。

## 参 考 文 献

- [1] 李宁, 肖乐勤, 菅晓霞, 等. GAP 基含能聚氨酯弹性体包覆 RDX 的研究[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(2): 212-215.  
LI N, XIAO L Q, JIAN X X, et al. Coating of RDX with GAP-based energetic polyurethane elastomer [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2012, 35(2): 212-215.
- [2] 王娟, 孙笑, 周新利. 高级脂肪酸酯类化合物包覆 RDX 的研究[J]. 含能材料, 2015, 23(6): 527-531.  
WANG J, SUN X, ZHOU X L. Properties of RDX coated by higher aliphatic ester compounds [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(6): 527-531.
- [3] YANG Z J, DING L, WU P, et al. Fabrication of RDX, HMX and CL-20 based microcapsules via in situ polymerization of melamine-formaldehyde resins with reduced sensitivity [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 268: 60-66.
- [4] XIONG S L, CHEN S S, JIN S H. Molecular dynamic simulations on TKX-50/RDX cocrystal [J]. Journal of Molecular Graphics & Modelling, 2017, 74: 171-176.
- [5] FISCHER N, FISCHER D, KLAPÖTKE T, et al. Pushing the limits of energetic materials: the synthesis and characterization of dihydroxylammonium 5,5'-bistetrazole-1,1'-diolate [J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(38): 20418-20422.
- [6] YANG Z W, WANG H J, MA Y H, et al. Isomeric co-crystals of CL-20: a promising strategy for development of high-performance explosives [J]. Crystal Growth & Design, 2018, 18(11): 6399-6403.
- [7] 邓国栋, 刘宏英. 黑索今超细化技术研究[J]. 爆破器材, 2009, 38(3): 31-34, 37.  
DENG G D, LIU H Y. Study on technology of making the superfine powder of RDX by grinding [J]. Explosive Materials, 2009, 38(3): 31-34, 37.
- [8] 兰元飞, 李霄羽, 罗运军. 石墨烯在含能材料中的应用研究进展[J]. 火炸药学报, 2015, 38(1): 1-7.  
LAN Y F, LI X Y, LUO Y J. Research progress on application of graphene in energetic materials [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(1): 1-7.
- [9] 牛春欢. 碳纳米材料对 CL-20 和 HMX 的降感性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.

NIU C H. The research of insensitive performance for CL-20 and HMX with carbon nanomaterials [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018.

- [10] 李丹, 王晶禹, 姜夏冰, 等. 硬脂酸包覆超细 RDX 及其撞击感度[J]. 火炸药学报, 2009, 32(1): 40-43.  
LI D, WANG J Y, JIANG X B, et al. Ultra-fine RDX coated with stearic acid and its impact sensitivity [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(1): 40-43.
- [11] 周彩元, 吴晓青, 邓茂盛, 等. 改性水性聚氨酯乳液包覆 RDX 的合成研究[J]. 中国胶粘剂, 2010, 19(1): 40-43.  
ZHOU C Y, WU X Q, DENG M S, et al. Study on synthesis of RDX coated by modified waterborne polyurethane emulsion [J]. China Adhesives, 2010, 19(1): 40-43.
- [12] 刘树浩, 张景林, 张俊, 等. HMX 的氟橡胶包覆技术及其撞击感度研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(6): 5-8.  
LIU S H, ZHANG J L, ZHANG J, et al. Study on coated technology of HMX with FPM2602 and its impact sensitivity [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(6): 5-8.
- [13] 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 J C, JIAO Q J, REN H, 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.
- [14] 边桂珍, 郭效德, 刘开伟, 等. BAMO-THF 共聚醚原位结晶包覆 HMX [J]. 火炸药学报, 2014, 37(1): 35-38.  
BIAN G Z, GUO X D, LIU K W, et al. In-situ crystallization coating HMX by BAMO-THF copolyether [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014, 37(1): 35-38.
- [15] 侯聪花, 于卫龙, 贾新磊, 等. CL-20/TATB 粘结炸药制备及其表征[J]. 火工品, 2016(3): 26-29.  
HOU C H, YU W L, JIA X L, et al. Preparation and characterization of CL-20/TATB polymer bonded explosive [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2016(3): 26-29.
- [16] 高元元, 朱顺官, 陈鹏源. NTO 包覆 HMX 的钝感研究[J]. 火炸药学报, 2014, 37(1): 61-65.  
GAO Y Y, ZHU S G, CHEN P Y. Research on insensitivity of HMX coated with NTO [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014, 37(1): 61-65.

- LOU J W, LONG Y, XU Q J. A study on the extraction and prediction of blasting seismic wave characteristics by wavelet packets technique [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(3): 261-267.
  - [8] 李兴华, 龙源, 纪冲, 等. 基于小波包变换的高程差对爆破震动信号影响分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(4): 44-47.  
LI X H, LONG Y, JI C, et al. Influence of height difference based on wavelet packets transformation on blasting vibration signals [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(4): 44-47.
  - [9] 王军选, 田小平, 曹红梅. 信息论基础与编码[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
  - [10] YANG Y, YU D J, CHENG J S. A rolling fault diagnosis method based on EMD energy entropy and ANN [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294: 269 - 277.
  - [11] 安春兰, 甘方成, 罗微, 等. 提速道岔小波包能量熵故障诊断方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(2): 260-274.  
AN C L, GAN F C, LUO W, et al. Method of speed-up turnout fault diagnosis using wavelet packet energy entropy [J]. Journal of Railway Science and Engineering,

---

(上接第 18 页)

  - [17] 屈晨曦, 葛忠学, 张敏, 等. CL-20/HATO 复合物的制备、表征及性能[J]. 含能材料, 2018, 26(10): 850-855.  
QU C X, GE Z X, ZHANG M, et al. Preparation, characterization and properties of CL-20/HATO composite [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(10): 850-855.
  - [18] 孟征, 欧育湘, 刘进全, 等. 蜜胺甲醛树脂原位聚合包覆六硝基六氮杂异伍兹烷[J]. 含能材料, 2006, 14(5): 333-335, 339.  
MENG Z, OU Y X, LIU J Q, et al. Coating of  $\varepsilon$ -HNIW with melamine formaldehyde resin by in-situ condensation polymerization reaction [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006, 14(5): 333-335, 339.
  - [19] 王旭朋, 罗运军, 郭凯, 等. 聚叠氮缩水甘油醚的合成与改性研究进展[J]. 精细化工, 2009, 26(8):
  - 2015, 12(2): 260-274.
  - [12] 马华原, 李斌利, 郭涛. 核电站扩建工程爆破开挖振动信号的 HHT 分析[J]. 爆破器材, 2016, 45(5): 50-55.  
MA H Y, LI B L, GUO T. HHT analysis on vibration signal of blasting excavation in expansion of nuclear power station [J]. Explosive Materials, 2016, 45(5): 50-55.
  - [13] LI X H, LONG Y, JI C, et al. Study on the vibration effect on operation subway induced by blasting of an adjacent cross tunnel and the reducing vibration techniques [J]. Journal of Vibroengineering, 2013, 15(3): 1454-1462.
  - [14] MA H Y, LI X H, LONG Y, et al. Study on vibration characteristics of natural gas pipeline explosion based on improved MP-WVD algorithm [J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 1-13.
  - [15] 吕海军, 龙源, 廖昆, 等. 南京水西门高架桥爆破拆除及振动测试分析[J]. 工程爆破, 2013, 19(3): 33-37.  
LÜ H J, LONG Y, LIAO K, et al. Blasting demolition and vibration analysis of Shuiximen Viaduct in Nanjing [J]. Engineering Blasting, 2013, 19(3): 33-37.

---

813-817.

WANG X P, LUO Y J, GUO K, et al. Research advances in synthesis and modification of glycidyl azide polymer [J]. Fine Chemicals, 2009, 26(8): 813-817.

- [20] 邓竞科, 李国平, 罗运军. GAP 黏合剂体系交联网络结构研究[J]. 高分子学报, 2016(4): 464-470.  
DENG J K, LI G P, LUO Y J. Studies on cross-linking network structure of GAP binder system [J]. Acta Polymeric Sinica, 2016(4): 464-470.
- [21] 陈腾, 李强, 郭双峰, 等. GAP-HDI/CL-20 纳米复合含能材料的制备、表征及其热分解特性[J]. 火炸药学报, 2018, 41(3): 243-249.  
CHEN T, LI Q, GUO S F, et al. Preparation, characterization and thermal decomposition behavior of GAP-HDI/CL-20 nano-composite energetic materials [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2018, 41(3): 243-249.