自然老化对 FOX-7 基双元混合物 相容性的影响

李建¹,李亚宁¹,常鹏程²,王伯良^{1*}

(1.南京理工大学 化学与化工学院,南京 210094; 2.山西江阳化工有限公司,太原 030041)

摘要:目的 掌握自然老化如何影响 1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烷(FOX-7)基双元混合物的相容性,揭示老 化过程对其相容性的潜在影响。方法 采用热分析技术(差示扫描量热法,DSC)和非热分析技术(傅里叶 变换红外光谱,FTIR),对老化前后 FOX-7基双元混合物的热分解特性和分子结构特征进行评估。利用 DSC 测得混合物和单质 FOX-7 的 DSC 初始分解峰温,对 FOX-7 与 8 种含能材料和 4 种惰性材料的相容性进行 评估,再结合 FTIR 的测试结果辅助说明混合物分子结构的变化。结果 DSC 热流曲线显示,除 FOX-7/RDX 混合物外,其他研究对象在老化前后均展现出良好的相容性。然而,以 FOX-7/CL-20 为代表的混合物在老 化后的最大放热峰温出现明显变化,表明老化对这些混合物的相容性产生了影响。在 FTIR 光谱分析中观察 到的官能团变化进一步表明,FOX-7 与 RDX、CL-20、AP、HTPB、DOS 或 WAX 等组成的双元体系在老 化过程中发生了化学反应。结论 本研究的发现对理解和评估老化过程对 FOX-7 基双元混合物相容性的影响 具有重要意义,可用于指导 FOX-7 基含能材料长期储存和使用中的安全设计。 关键词:相容性;老化;FOX-7;高能材料; 惰性材料;储存稳定性

中图分类号: TJ55 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)02-0019-09 **DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2024.02.003

Effect of Natural Aging on Compatibility of FOX-7 Based Binary Mixtures

LI Jian¹, LI Yaning¹, CHANG Pengcheng², WANG Boliang^{1*}

School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
 Shanxi Jiangyang Chemical Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030041, China)

ABSTRACT: The work aims to understand how natural aging affects the compatibility of 1,1-diamino-2,2-dinitroethane (FOX-7) based binary mixtures, and reveal the potential impact of aging on their compatibility. In the work, thermal analysis techniques (Differential Scanning Calorimetry, DSC) and non-thermal analysis techniques (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) were employed to assess the thermal decomposition characteristics and molecular structural features of FOX-7 based binary mixtures before and after aging. DSC was used to measure the initial decomposition peak temperature of the mixtures and pure FOX-7. A comprehensive assessment on the compatibility of FOX-7 with eight energetic materials and four inert

收稿日期: 2023-12-30;修订日期: 2024-01-24

Received: 2023-12-30; Revised: 2024-01-24

基金项目: 国家自然科学基金 (12302440); 中国博士后科学基金 (2023M741713)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (12302440); China Postdoctoral Science Foundation (2023M741713)

引文格式:李建,李亚宁,常鹏程,等. 自然老化对 FOX-7 基双元混合物相容性的影响[J]. 装备环境工程, 2024, 21(2): 19-27.

LI Jian, LI Yaning, CHANG Pengcheng, et al. Effect of Natural Aging on Compatibility of FOX-7 Based Binary Mixtures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(2): 19-27.

^{*}通信作者(Corresponding author)

materials was conducted, supplemented by FTIR results to explain the molecular structural changes in the mixtures. The DSC thermograms showed that except for the FOX-7/RDX mixture, all other studied objects exhibited good compatibility before and after aging. However, mixtures represented by FOX-7/CL-20 showed significant changes in the maximum exothermic peak temperature after aging, indicating that aging affected the compatibility of these mixtures. The functional group changes observed in the FTIR spectral analysis further suggested that chemical reactions occurred in the binary systems comprising FOX-7 and RDX, CL-20, AP, HTPB, DOS, or WAX during the aging process. The findings of this study are significant for understanding and assessing the impact of aging on the compatibility of FOX-7 based binary mixtures, and can guide the safe design for long-term storage and use of FOX-7 based energetic materials.

KEY WORDS: compatibility; aging; FOX-7; energetic materials; inert materials; storage stability

作为一种典型的不敏感高能炸药, FOX-7^[1]的能 量密度高于 2,4,6-三氨基-1,3,5-三硝基苯 (TATB), 其敏感性接近 TATB,并且具有良好的耐热性^[2]。这 使得 FOX-7 成为火炸药领域的一个突破点,引发了 更为全面的探索^[3-4],为其生产及应用奠定了基础。

普通单质炸药,如 RDX、HMX 和 CL-20,在混 合炸药和推进剂中被广泛使用。但由于它们的高敏感 性^[5-6],需要通过复配不敏感炸药或惰性材料进行降 感。FOX-7 作为一种新兴的不敏感炸药,常被用于压 装炸药或浇铸炸药的配方中^[7]。FOX-7 与主体组分和 添加剂之间的相互作用可能导致混合炸药的化学、物 理和热力学性质发生变化,从而影响它们之间的相容 性^[8]。因此,作为一种极具潜力的含能材料,FOX-7 与其他材料之间的相容性已成为一个关键问题。

良好的相容性对于弹药的安全储存至关重要,在 设计、混合炸药之前,必须对它们的相容性进行全面 分析^[9]。DSC 是研究含能材料相容性的快速筛选方 法,可以通过少量样品(毫克级)和较低的成本获得 混合体系中可能的物理和化学变化^[10-14]。为了充分 说明热分析数据相容性评估的正确性,还需要一些 非热技术来支持结果。常见的非热技术包括傅里叶 变换红外光谱(FTIR)、X 射线衍射(XRD)、核磁 共振(NMR)和冲击灵敏度测试等^[15-17]。这些方法 允许在不改变化学组成的情况下评估样品组分之间 可能的相互作用。

大多数混合炸药和推进剂在生产后并不会立即 投入使用,通常需要储存一定时间,且炸药组分在储 存过程中的反应极为缓慢。目前,关于老化对相容性 的影响鲜有报道^[12,14,18-19],这使得相容性的设计情况 和真实使用情况可能存在一定的未知偏差。因此,仅 通过测试新混合样品的相容性,不能反映存放后的真 实相容性。本研究在研究方法上参考了 STANAG 4147 中使用单一升温速率下 DSC 热流曲线的测试方 法,并按照 "ABCD"判据对相容性进行划分。此外, 本文还采用 FTIR 来辅助支撑 DSC 的测试结果,并研 究 FOX-7 与接触材料的二元混合系统在老化前后的 相容性差异,为火炸药在存储后的相容性研究提供了 新的研究思路。

1 试验

1.1 样品制备

试验所用主要材料:环四亚甲基四硝胺(HMX)、 环三亚甲基四硝胺(RDX)、六硝基六氮杂异伍兹烷 (CL-20)、2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物 (LLM-105)、3-硝基-1、2,4-三唑-5-酮(NTO)、2,6-二氨基-3,5-二硝基吡啶-1-氧化物(ANPyO)、高氯酸 铵(AP)和高氯酸钾(KP)等作为高能材料。惰性 材料为铝粉(A1)、羟基封端聚丁二烯(HTPB)、二 辛基癸二酸酯(DOS)和微晶蜡(WAX)。其中, LLM-105由南京理工大学制备,纯度超过99%。其余 材料和 FOX-7 均从商业渠道获得,未经进一步提纯。

取 FOX-7 和所选的每种材料各1g置于玛瑙研钵中,按1:1 的质量比进行物理研磨,充分混合后装于 5 mL 离心管中保存、待测。测试完成后,将装有样品的离心管放置于密封盒中,在室温下保存 2 a 即获得老化样品,老化样品命名 "FOX-7/xxx/age"。

1.2 试验过程

 使用 NETZSCH DSC 204 F1 Phoenix 差示扫 描量热仪获得 DSC 曲线。测量时,使用不锈钢坩埚 将质量约为 1 mg 的样品密封在动态 N₂环境中(气体 流速为 50 mL/min),加热速率为 10 ℃/min。

2)用于傅里叶变换红外测试的设备是透射模式 的傅里叶变换红外光谱仪,其型号为 Nicolet IS-10, 分辨率为 0.5 cm⁻¹,扫描范围为 500~4 000 cm⁻¹。所 有测试均在初始质量相似的情况下进行 3 次,以确保 测试数据的可重复性。

2 结果及分析

2.1 DSC 测试结果分析

2.1.1 FOX-7 与含能材料的相容性

从图 1a 可以看出, FOX-7 的 DSC 曲线包括 1 个

 $\cdot 20 \cdot$

吸热峰(115.74 °C)和 2 个放热峰(232.64、289.14 °C)。 其中,115.74 °C的弱吸热峰对应于 α 晶型向 β 晶型的 转变过程。232.64 °C的初始放热峰是 FOX-7 分子中 硝基-亚硝基的重排引起的,且随着温度的持续升高, HONO、CO、NH₂和 HNC 气体从分子骨架中释放出 来,并相互作用,生成稳定的分解产物 CO、N₂和 H₂O,从而形成第二个放热峰^[20]。从图 1a 的 FOX-7/HMX 混合物的 DSC 曲线中可以观察到 3 个放 热峰,前2个峰在温度数值上对应于 FOX-7 的热分解,同理,第三个峰对应于 HMX 的热分解。其中, 混合物的第二个放热峰温在老化前有所降低。根据林 鹤等^[21]的相关分子动力学模拟,FOX-7 和 HMX 的结 构被分子间氢键和范德华力破坏,使得 FOX-7 的氨 基键长扭曲和变形,HMX 的硝基键角和 HMX 的中 心二面角变化,促进了 FOX-7 在更高温度下的分解, 导致第二个放热峰的降低。



图 1 开温速举为 10 C/min 的 FOX-7 和尚能材料的 DSC 曲线 Fig.1 DSC curves of FOX-7 and energetic materials at a heating rate of 10 °C/min

从图 1 可以看出, 原本对应于 FOX-7 的 2 个放 热峰融合成 1 个放热峰, 对应的 HMX 放热峰温度也 显著下降。在长时间存储后, FOX-7 和 HMX 的晶体 间相互作用界面很可能被加强, 这使得 FOX-7 的亚 硝基重排和后续的分解延迟。此外, FOX-7 和 HMX 的初始分解温度在老化后有所降低, 表明混合物的热 稳定性在低温阶段有所提高,这与李凯丽等^[22]的研究 结果一致。因此,在这种长期储存中,2种炸药之间 的界面具有晶面的物理结合,使得2种炸药的晶体结 构更加稳定。已有报道称^[23],共晶的形成增强了HMX 诱导 N—NO2 键的强度,并降低了其敏感性。FTIR 光谱显示,混合体系的特征峰无变化,证明组分之间 无化学变化[13]。

在 RDX 单组分的 DSC 曲线中,在 205 ℃显示出 一个明显的吸热熔化峰^[24]。分解发生在熔化之后,并 在 240.11 ℃达到峰值。观察到 FOX-7/RDX 的初始放 热峰在 212.64 ℃,比纯 FOX-7 低 20.00 ℃,表明组 分之间可能发生了不相容的化学反应, RDX 的熔化 可能造成了混合物的分解峰温提前。同时,比较老化 前后的热流曲线可发现,初始放热峰温有小幅降低。 从表 1 和表 2 中可以看出, FOX-7/RDX 和 FOX-7/ RDX/age 的评级均为 D。

Tab.1 DSC test results and compatibility classification of binary inixtures								
	分解峰温/℃				A c e/oc		相应州笙宛	
混合物样品 ^a	老化前		老化后		$\Delta l_{\rm P}$ / C		相台江守坎	
	$t_{\rm P1}^{\rm c}$	$t_{\rm P2}^{\rm d}$	$t_{\rm P1}$	$t_{\rm P2}$	老化前	老化后	老化前	老化后
FOX-7/HMX	232.64	232.34	232.64	243.07	0.30	-10.43	А	А
FOX-7/RDX	232.64	212.64	232.64	214.59	20.00	18.05	D	D
FOX-7/CL-20	232.64	238.14	232.64	234.93	-5.50	-2.29	А	А
FOX-7/LLM-105	232.64	252.52	232.64	254.01	-19.88	-21.37	А	А
FOX-7/NTO	232.64	236.50	232.64	232.19	-3.86	0.45	А	А
FOX-7/ANPyO	232.64	244.64	232.64	257.56	-12.00	-24.92	А	А
FOX-7/AP	232.64	251.84	232.64	249.67	-19.20	-17.03	А	А
FOX-7/KP	232.64	243.52	232.64	249.69	-10.88	-17.05	А	А
FOX-7/Al	232.64	247.49	232.64	246.27	-14.85	-13.63	А	А
FOX-7/HTPB	232.64	276.26	232.64	267.26	-43.62	-34.62	А	А
FOX-7/DOS	232.64	246.12	232.64	228.27	-13.48	4.37	А	В
FOX-7/WAX	232.64	277.32	232.64	271.58	-44.68	-38.94	А	А

表 1 双元混合物的 DSC 测试结果及相容性分级 Tab.1 DSC test results and compatibility classification of binary mixtures

注: a.混合物中的比例为1:1。b.单组分为混合物中分解峰值温度较低的物质,本文研究范围内,FOX-7起始分解温度最低。c.t_{Pl}, 单组分的初始分解峰值温度。d.t_{P2},混合物的初始分解峰值温度。e.Δt_P= t_{P1} - t_{P2}。

表 2 炸药与接触材料相容性评价标准[®]

Tab.2	Evaluation	standards of	compatibility	for ex	plosives	and	contacted	materials ^[8]	l

$\Delta t_{\rm P}/{\rm °C}$	等级	说明				
≤2	A: 相容性好	可安全用于任何爆炸性设计				
3~5	B: 轻微敏感或相容性较高	当设备在很短的时间内使用时,可以安全地用于测试; 不用作黏合剂材料,或需要长期储存时				
6~15	C: 敏感或相容性差	不建议与爆炸性物品一起使用				
>15	D: 危险的或不相容	危险,任何情况下都不要使用				

在 FOX-7/CL-20(见图 1c)体系中,只出现 1 个强烈的吸热峰。结果表明,CL-20 的加入增强了 FOX-7的热稳定性,并使它们在相对集中的温度范围 内经历充分的热分解过程。FOX-7/ANPyO 和 FOX-7/KP体系的初始分解峰温较FOX-7单组分来说 有不同程度的提高,即增强了 FOX-7 的热稳定性, 如图 1f、1h 所示。此外,混合物在老化前的最低放 热峰之前都有 1 个肩峰(244.64、243.52 ℃),而这 些峰在老化后便消失了。可能原因为,FOX-7 晶体在 长时间储存后更加紧密地和 ANPyO 结合到一起,结 构由非稳态过渡至稳态。这一结果与 FOX-7/HMX 的 二元体系极为相似,且在随后的升温过程中,材料的 完全接触导致了更快速和完全的分解反应。 AP 在大约 245 ℃时经历一个吸热过程,又在 320 ℃附近发生分解放热过程(如图 1g 所示),这 与Li等^[25]先前的低温分解现象一致。此外,FOX-7/AP 混合物在老化前后的初始放热峰前都发现了 1 个弱 吸热峰(241.04、241.17 ℃),AP 达到该温度后逐 渐熔化,包裹于 FOX-7 表面,抑制了 FOX-7 骨架中 气体分子的释放。混合体系的第二个放热过程主要是 AP 气体的热分解,AP 的放热峰温度在老化前后分别 提高了 7、14 ℃。

在混合炸药中, FOX-7 通常与 CL-20 和 HMX 等 高能炸药复配使用,以降低体系的敏感性。氧化剂 AP、KP 也被用作辅助材料,用以调节配方的氧平衡 或密度等关键参数。由表 1 可知,除了 RDX 之外, 其他所有物质在老化前后均与 FOX-7 相容。

2.1.2 FOX-7 与惰性材料的相容性

如图 2a 所示, FOX-7/Al 体系和 FOX-7/Al/age 体系中只有 1 个强烈的放热峰。老化前后的放热峰温 度分别比 FOX-7 单组分高出 26.31、28.03 ℃。此外, 可以发现,老化后的放热峰比老化前更平滑,这表明 铝粉提高了 FOX-7 的热稳定性,并在老化后进一步 改善。对于 HTPB(黏合剂)、DOS(增塑剂)和 WAX(降感剂)这 3 种惰性材料来说,HTPB和 DOS 在室温下具有一定的流动性,而 WAX 在高温下也具 有相同的性质,因此它们可以很好地包覆在 FOX-7 晶体表面。

由图 2 可见, 混合体系的主要放热峰显著向高温 区移动, 表明这 4 种惰性材料有效地提高了 FOX-7 的热稳定性。不同之处在于,HTPB的添加使得FOX-7 的初始放热峰消失,并转变为高温下的单一放热峰, 这与 ANPyO 和 KP 等样品相似。在 FOX-7 和 DOS 的二元体系中,FOX-7/DOS 中的初始峰温较单组分 FOX-7 有大约 14 ℃的后移,而 FOX-7/DOS/age 中的 峰有大约 4 ℃的前移,即混合物在长储后体系中发生 了某些化学反应,使得热分解温度降低。

FOX-7/WAX 的热流曲线左侧有 1 个肩峰,对应 于 FOX-7 的初始放热峰,如图 2d 所示。老化后,肩 峰逐渐融合进主峰,最大放热峰温降低约 6 ℃,这与 FOX-7/HTPB/age 的现象一致。一方面,二元体系在 老化后趋于一致,导致主峰中的肩峰逐渐消失。另一 方面,老化后体系的结合能减弱,导致整体放热峰温 度下降。





2.2 红外光谱结果及分析

FTIR 作为一种补充分析技术,用于捕捉由于 FOX-7 与 12 种混合物的不相容性可能引起的变化。 如果混合物的 FTIR 光谱是各组分特征峰的组合,没 有任何特征峰的缺失、移动或显著扩展,则可以推断 没有发生相互作用^[12,15]。 如图 3 和图 4 所示,从 FOX-7/HMX、FOX-7/ LLM-105、FOX-7/NTO、FOX-7/ANPyO、FOX-7/KP、 FOX-7/Al及其老化体系的 FTIR 光谱中,可以看出所 有单一组分的特征峰。因此,可以得出结论,这些混 合体系之间没有化学相互作用。如图 3c、3g 和图 4b 所示,CL-20、AP 和 THPB 混合体系的特征峰缺失。 FOX-7 在 1 506 cm⁻¹的 C=C 伸缩振动峰在 FOX-7/ CL-20 和混合物中丢失^[26], FOX-7/HTPB 和 FOX-7/ HTPB/age 体系在 1 435 cm⁻¹处丢失, 这与 C—H 面内 的弯曲振动有关^[27]。对于 FOX-7 和 DOS 体系, 从图 3k 中可以看出,老化前后 DOS 中标记的 4 个峰丢失。 其中, 1 238 cm⁻¹和 1 095 cm⁻¹是酯键振动, 996 cm⁻¹ 和 910 cm⁻¹是 C—H 的平面外弯曲振动。因此, 可推 断 FOX-7 和 DOS 体系也存在某些化学反应。然而, 从相应的 DSC 结果(见表 1)可以看出, 这些特征峰 的丢失并不直接影响混合体系的热稳定性。

从图 3b 中可以看出,在 FOX-7/RDX 和 FOX-7/RDX/age的 FTIR 光谱中,出现了新的吸收带 2 360 cm⁻¹(三键和累积双键的伸缩振动)。由于它 不是 FOX-7 或 RDX 本身所具有的特征,所以为混合 物中可能的化学作用提供了清晰的证据。在 FOX-7/

RDX/age 的 FTIR 光谱中,老化后出现了 2900、 1633 cm⁻¹和右侧 2 个箭头指向的峰,这些峰并不 属于 FOX-7 或 RDX,表明老化给体系带来了更严 重的化学变化。所有这些现象支持 RDX 不能与 FOX-7 混合的事实。

与图 4d 中 FOX-7/WAX 的 FTIR 光谱结果相比 (部分①和②),除了 3 400、3 293(与氨基群的非 对称和对称伸缩振动有关)、1 603(与 NH₂弯曲振 动有关)、1 350 cm⁻¹(与 NO₂的非对称和对称伸缩 振动有关)的峰消失外^[28-29],FOX-7/WAX/age 的 FTIR 光谱中出现了 FOX-7 和几乎所有 WAX 的特征峰。这 表明 FOX-7/WAX/age 体系的 FTIR 光谱发生了显著 变化,也清楚地证明了 FOX-7 和 WAX 在老化后的化 学相互作用。





图 4 FOX-7 与惰性材料的 FTIR 图谱 Fig.4 FTIR spectra of FOX-7 and inert materials

3 结论

本文研究了自然环境下 2 a 的老化对 FOX-7 基双 元混合物体系相容性的影响,研究使用了热分析技术 (DSC)和辅助非热技术(FTIR),并参照 STANAG 4147 对混合物和 FOX-7 单质的初始分解峰温差进行 了分类和评价,获得了 FOX-7 与 8 种炸药材料和 4 种惰性材料的相容性结果。

研究结果表明,在 FOX-7/HMX、LLM-105、 ANPyO 等部分双元体系中,观察到老化过程提高了 混合物的热稳定性。对于初始放热峰降低的体系,如 FOX-7/RDX,在老化前后都表现出不相容的结果, 需要结合其他相容性测试结果进一步验证其在实际 应用中的潜在风险。此外,对于 FOX-7/HTPB/age 和 FOX-7/DOS/age 这 2 个双元体系,其老化后的起始放 热峰温差(Δt_P)比老化前高出约 9 °C,表明 HTPB 和 DOS 不适合与 FOX-7 进行长期储存。总之,DSC 作为一种成熟的热分析技术,在快速地评价含能材料 的相容性时,依然具有适用性和高效性。

对于 FOX-7/RDX、CL-20、AP、HTPB、DOS 和 WAX 等体系, FTIR 光谱分析揭示了混合物在老化过程中发生了化学或物理变化,表明在老化过程中可能

诱使组分间表现出不相容性。尤其是在 FOX-7/RDX 体系中,通过 FTIR 光谱分析发现的新吸收带,明确 证实了老化导致的化学变化。

本研究强调了在设计和应用含能材料时,考虑老 化因素的重要性,有助于理解和评估老化对含能材料 相容性的影响,为长期储存和使用提供了实验依据。 未来研究应进一步利用不同的老化条件及测试方法, 探索含能材料的相容或不相容机理,以优化配方和提 高实际应用中的安全性。

参考文献:

- ANDERSON S R, DUBÉ P, KRAWIEC M, et al. Promising CL-20-Based Energetic Material by Cocrystallization[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2016, 41(5): 783-788.
- [2] AN C W, WANG J Y, XU W Z, et al. Preparation and Properties of HMX Coated with a Composite of TNT/ Energetic Material[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2010, 35(4): 365-372.
- [3] TRZCIŃSKI W, BELAADA A. 1, 1-Diamino-2, 2-Dinitroethene (DADNE, FOX-7) - Properties and For-

- [4] 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.
- [5] GAO H X, SHREEVE J M. Recent Progress in Taming FOX-7 (1, 1-Diamino-2, 2-Dinitroethene)[J]. RSC Advances, 2016, 6(61): 56271-56277.
- [6] ZHANG C M, FU X L, ZHANG X X, et al. The Effects of Metal Complexes of Nano-Graphene Oxide to Thermal Decomposition of FOX-7[J]. Nanomaterials, 2020, 10(1): 144.
- [7] LIU Q, AN C W, HUANG Q T, et al. Solubility Determination and Prediction for FOX-7 in Three Binary Solvents at Different Temperatures[J]. Journal of Energetic Materials, 2024, 42(1): 68-83.
- [8] BEACH N E, CANFIELD V K. Compatibility of Explosives with Polymers (3)[J]. Plastic Rep, 1971, 40: 73-76.
- [9] DE KLERK W P C, SCHRADER M A, VAN DER STEEN A C. Compatibility Testing of Energetic Materials, which Technique?[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1999, 56(3): 1123-1131.
- [10] HUANG H F, SHI Y M, YANG J, et al. Compatibility Study of Dihydroxylammonium 5, 5'-Bistetrazole-1, 1'-Diolate (TKX-50) with some Energetic Materials and Inert Materials[J]. Journal of Energetic Materials, 2015, 33(1): 66-72.
- [11] LI X, LIN Q H, PENG J H, et al. Compatibility Study between 2, 6-Diamino-3, 5-Dinitropyrazine-1-Oxide and some High Explosives by Thermal and Nonthermal Techniques[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 127(3): 2225-2231.
- [12] LI X, LIN Q H, ZHAO X Y, et al. Compatibility of 2, 4, 6, 8, 10, 12-Hexanitrohexaazaisowurtzitane with a Selection of Insensitive Explosives[J]. Journal of Energetic Materials, 2017, 35(2): 188-196.
- [13] LI X, WANG B L, LIN Q H, et al. Compatibility Study of DNTF with some Insensitive Energetic Materials and Inert Materials[J]. Journal of Energetic Materials, 2016, 34(4): 409-415.
- [14] LI X, ZHU L L, LI J, et al. Compatibility Investigation of Hmx with Dioctyl Sebacate and Dinitrotoluene by Multiple Methods[J]. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2021, 20(1): 55-66.
- [15] GUO W X, HAN Z W, LIN Q H, et al. Pre-Formulation Compatibility Studies of 5-Amino-1H-Tetrazole Nitrate with Several Typical Materials by Thermal and Non-Thermal Techniques[J]. Central European Journal of

Energetic Materials, 2018, 15(1): 100-114.

- [16] NETO H S, NOVÁK C, MATOS J R. Thermal Analysis and Compatibility Studies of Prednicarbate with Excipients Used in Semi Solid Pharmaceutical Form[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2009, 97(1): 367.
- [17] YAN Q L, LI X J, ZHANG L Y, et al. Compatibility Study of Trans-1, 4, 5, 8-Tetranitro-1, 4, 5, 8-Tetraazadecalin (TNAD) with some Energetic Components and Inert Materials[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 160(2/3): 529-534.
- [18] DE BARROS LIMA Í P, LIMA N G P B, BARROS D M C, et al. Compatibility Study between Hydroquinone and the Excipients Used in Semi-Solid Pharmaceutical Forms by Thermal and Non-Thermal Techniques[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2015, 120(1): 719-732.
- [19] SINGH A, KUMAR R, SONI P K, et al. Compatibility and Thermal Decomposition Kinetics between HMX and some Polyester-Based Polyurethanes[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021, 143(6): 3969-3981.
- [20] 金朋刚,常海,陈智群. FOX-7 热分解动力学和机理研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(6): 528-531.
 JIN P G, CHANG H, CHEN Z Q. Studies on Kinetics and Mechanisms of Thermal Decomposition of 1, 1-Diamino-2, 2-Dinitroethylene (FOX-7)[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(6): 528-531.
- [21] 林鹤,张琳,朱顺官,等.HMX/FOX-7共晶炸药分子动 力学模拟[J]. 兵工学报, 2012, 33(9): 1025-1030.
 LIN H, ZHANG L, ZHU S G, et al. Molecular Dynamic Simulation of Cyclotetramethylene Tetranitramine/1, 1-Diamino-2.2-Dinitroethylene Co-Crystal Explosive[J].
 Acta Armamentarii, 2012, 33(9): 1025-1030.
- [22] 李凯丽,徐同,李席,等.加速老化对 RDX 基压装 PBX 炸药性能的影响[J]. 含能材料, 2018, 26(5): 416-421.

LI K L, XU T, LI X, et al. Effect of Accelerated Aging on the Performances of RDX-Based Pressed PBX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(5): 416-421.

- [23] 付秋菠, 舒远杰, 黄奕刚. FOX-7 的热分解机理[J]. 固体火箭技术, 2010, 33(1): 77-80.
 FU Q B, SHU Y J, HUANG Y G. Thermal Decomposition Mechanism of FOX-7[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2010, 33(1): 77-80.
- [24] LEE J S, HSU C K, CHANG C L. A Study on the Thermal Decomposition Behaviors of PETN, RDX, HNS and HMX[J]. Thermochimica Acta, 2002, 392/393: 173-176.
- [25] LI H B, ZHAO X Q, WU W Q, et al. Experimental Research on Multistep Decomposition Kinetics of Ammonium Perchlorate in the Space-Confined Environment[J].

Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022, 147(20): 11535-11547.

[26] 张腊莹, 刘子如, 王晓红, 等. 傅里叶红外光谱法研究
 AP 的快速热分解[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(8):
 2098-2102.

ZHANG L Y, LIU Z R, WANG X H, et al. An Investigation on Fast Thermolysis of Ammonium Perchlorate (AP) by FTIR Spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(8): 2098-2102.

[27] ZIA K M, MAHMOOD K, ZUBER M, et al. Chitin Based Polyurethanes Using Hydroxyl Terminated Polybutadiene. Part I: Molecular Engineering[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 59: 320-327.

- [28] 宗和厚,黄奕刚,舒远杰,等. FOX-7 热分解起始机理及 NO₂ 对其催化效应的理论研究[J]. 含能材料, 2006, 14(6): 425-428.
 ZONG H H, HUANG Y G, SHU Y J, et al. Theoretical Study on the Initial Thermal Decomposition and Catalysis Effects of NO₂ on FOX-7[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006, 14(6): 425-428.
- [29] GHOSH M, SIKDER A K, BANERJEE S, et al. Preparation of Reduced Sensitivity Co-Crystals of Cyclic Nitramines Using Spray Flash Evaporation[J]. Defence Technology, 2020, 16(1): 188-200.