

改性双基推进剂粉末自着火行为实验研究

杨猛, 余涛, 汤成龙, 黄佐华

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为降低推进剂意外着火带来的危害, 需要对典型改性双基推进剂的自着火行为及热安全性开展研究。使用快速压缩机实验平台, 结合高速成像及动态压力采集技术, 发展并验证了超快热刺激方法, 开展了改性双基推进剂在快速热加载环境(加热速率大于 10^4 K/s)下的响应实验, 获得了含环三亚甲基三硝胺(RDX)改性双基推进剂典型自着火行为, 以及含环四亚甲基四硝胺(HMX)和1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)改性双基推进剂的着火临界条件。结果表明: 在1.0 MPa、901.2 K时, 含HMX改性双基推进剂未发生着火, 而压力升高至3.0 MPa, 推进剂样品发生明显的着火现象; 对于含HMX和FOX-7改性双基推进剂, 其着火临界温度均随压力的增加而降低; 在相同压力下, 含FOX-7改性双基推进剂的临界着火温度低于含HMX改性双基推进剂的临界着火温度。

关键词: 改性双基推进剂; 自着火; 热安全性; 快速压缩机

中图分类号: TJ55; V19 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202304003 **文章编号:** 0253-987X(2023)04-0022-07

Auto-Ignition Behaviors of the Composite Modified Double Base Propellants

YANG Meng, YU Tao, TANG Chenglong, HUANG Zuohua

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To decrease the damages brought by auto-ignition, the auto-ignition behaviors and thermal safety of typical composite modified base propellant need to be studied. A rapid compression machine combined with high-speed imaging and dynamic pressure acquisition technology was used to develop and verify rapid thermal stimuli method, conduct auto-ignition experiment of composite modified double base (CMDB) propellant under rapid thermal loading environment (heating rate greater than 10^4 K/s), and obtain the typical auto-ignition behavior of cyclotrimethylene trinitroamine (RDX) modified double-base propellant, and the ignition critical conditions of cyclotetramethylene tetranitramine (HMX) and 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene (FOX-7) modified double-base propellants. The results show that the CMDB containing HMX cannot be ignited at 1.0 MPa and 901.2 K. However, ignition phenomenon occurs when the pressure increases to 3.0 MPa. The critical ignition temperature of the CMDB containing HMX and FOX-7 decreases as the pressure increases. The critical ignition temperature of CMDB containing FOX-7 is lower than that of CMDB containing HMX under the same pressure.

Keywords: composite modified base propellants; auto-ignition; thermal safety; rapid compression machine

收稿日期: 2022-07-04。 作者简介: 杨猛(1992—), 男, 助理教授; 汤成龙(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91941101); 中国博士后创新人才支持计划资助项目(BX20220250)。

网络出版时间: 2022-10-11

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20221010.1701.005.html>

推进剂在贮存、运输及使用过程中受到意外刺激有发生着火甚至爆炸的风险,因此需要了解其在受到典型外部刺激(热、冲击或者摩擦)时的响应,即易损性。当外界刺激造成推进剂等含能材料着火或爆炸时,由于响应时间短、反应速度快,很难探究其发生反应的主要原因^[1]。此外,推进剂的合成方向趋于高能钝感,然而高能推进剂^[2]容易受到刺激而发生意外点火爆炸等,造成生命及财产损失^[3]。因此,需要进行一系列小规模的安全测试,以确定其对摩擦、冲击、热等外部刺激的敏感性及响应机制^[4]。热刺激实验是评价推进剂易损性的一个直接而简单的手段,用于确定推进剂在不同加热方式下的响应。由于含能材料安全问题的重要性,探索意外点火或爆炸的响应就显得尤为重要。

对于固体推进剂,烤燃实验是评价其热稳定性的主要方法^[5-7],根据加热速率 dT/dt 分为两类:慢速烤燃^[8-9]和快速烤燃^[10]。慢速烤燃是为了获得推进剂在连续低加热速率($3.3\text{ }^{\circ}\text{C/h}$)下的响应^[1]。快速烤燃实验是将推进剂放在开放的火焰中观察相应的变化。在不同热加载条件下,推进剂的响应存在差异。Li等^[11]利用三维模拟软件对 AP/HTPB 推进剂在快烤条件下的自着火行为进行了模拟和对比,其热加载速率为 0.33 、 0.58 及 0.83 K/s ,结果表明,随着热加载速率的增加,失控时间缩短,着火温度增加。赵孝彬等^[12]报道了固体推进剂慢速烤燃特性的影响因素,发现升温速率从 $3.3\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 增加到 $1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$,对聚叠氮缩水甘油醚(GAP)推进剂慢速烤燃的响应程度影响较小。然而,对于更高热加载速率下,推进剂的响应情况鲜有人报道,因此迫切需要一种可以实现高热加载环境的方法。目前,推进剂在不同目标压力、可控样品和环境下对快速热刺激的响应仍无评价方法。

近几十年来,高能材料,如环三亚甲基三硝胺(RDX)、环四亚甲基四硝胺(HMX)和 1,1-二氨基 2,2-二硝基乙烯(FOX-7),是军事领域应用最广泛的一类炸药。这些烈性炸药通常被添加到双基推进剂中以改善其能量特性^[13]。某些改性双基(CMDB)和硝酸酯增塑聚醚推进剂中硝基炸药的含量甚至超过 80% ^[14]。

大量文献对含有 RDX、HMX 等改性双基推进剂进行了燃烧和安全性评价研究^[15-18]。Denisuk等^[13]研究了 RDX 和 HMX 对双基推进剂燃烧催化剂效率的影响,结果表明,RDX 和 HMX 均能降低中高热值的改性双基推进剂的燃烧速度,而不影响

其能量特性。然而,在推进剂中加入 RDX 或 HMX 并不会降低催化效率。Yan 等^[16-17]利用高速摄像技术、热重仪和差示扫描量热仪,研究了含有不同硝基复合物的双基推进剂的燃烧机理。结果表明,由目标物蒸发和冷凝过程中的热力学相变可以完整地描述改性双基推进剂燃烧过程中的传质过程,它们的燃烧机理主要与 NO_2 、甲醛(CH_2O)和氰化氢(HCN)的氧化机理有关。Ma 等研究了含有 HMX 的改性双基推进剂在高温、过载力条件下的热安全性,对样品进行了单轴压缩实验^[15]。通过与摩擦敏感性实验结果的比较发现,样品颗粒有不可忽视的自燃可能性。在考虑样品和发动机的安全性时,有必要同时考虑并权衡工作条件、温度、负荷等因素。Xu 等研究了 FOX-7 不同粒径的敏感性和热稳定性,冲击和摩擦敏感性测试结果表明,超细 FOX-7 颗粒的敏感性较低,表观活化能增加,表明其机械敏感性和热稳定性显著提高^[19]。

此外,研究 FOX-7 的着火行为对其危险性评价具有重要意义。Sinditskii 等^[20]研究了 FOX-7 的燃烧和热分解行为,结果表明,FOX-7 分子中的 4 个氧原子中有 3 个随着硝酸分子的加入而消失,说明 FOX-7 分子的热行为对实验条件有很强的依赖性。然而,在开放体系和封闭体系中,热分解机理是不同的。在封闭条件下,由于硝酸消除及分解反应具有可逆性,FOX-7 的降解产物会抑制进一步分解。此外,在低压条件下,燃烧对 FOX-7 的凝聚相反应起着重要的作用。张超等^[21]研究了 FOX-7 对硝化棉/三羟甲基乙烷三硝酸酯(NC/TMETN)基推进剂燃烧性能的影响;王峰等^[22]对含 FOX-7 发射药的低压燃烧性能及力学性能进行了研究;陈中娥等^[23]对 FOX-7 在固体推进剂中的应用前景作了探讨。

RDX、HMX 和 FOX-7 改性双基推进剂在生产、运输、储存和应用中受到外界刺激时,存在着意外点火或爆炸风险。然而,目前还没有关于对 3 种改性双基推进剂在快速热加载下的安全性评价和点火行为的报道。

本研究的第一个目标为,探索推进剂等含能材料利用快速压缩机产生高温热刺激条件下的自着火行为的实验方法,确定加热速率。第二,通过新的实验方法,研究 RDX 改性双基推进剂自着火行为及重复性实验验证,开展 HMX 和 FOX-7 改性双基推进剂安全性实验,获得两种样品的临界着火条件,用于指导其安全应用。

1 实验材料

3 种不同改性双基推进剂由 RDX、HMX、FOX-7 和双基硝化棉/硝化甘油(NC/NG)充分混合均匀后使用,在保证安全的情况下,每次的样品量为 30 mg,RDX/HMX/ FOX-7、NC、NG 的质量比为 24:3.6:2.4,由西安近代化学研究所提供。RDX 样品粒度约为 $50\text{ }\mu\text{m}$,HMX 样品粒度约为 $120\text{ }\mu\text{m}$,FOX-7 样品粒度约为 $27.5\text{ }\mu\text{m}$,NC/NG 样品相同均为片状结构。

为了研究不同热刺激下 3 种改性双基推进剂的自着火行为,需要配制不同比热的混合气,因此利用不同比例的 Ar(体积分数为 99.99%)和 N_2 (体积分数为 99.99%)来实现不同的设计温度和压力。

2 实验方法

快速压缩机(见图 1)是一种用来模拟内燃机单次压缩过程的实验装置,主要由高压气罐、驱动段、液压段、压缩段、燃烧室、控制和数据采集系统、配气系统以及光学系统等部分组成,工作方式为气体驱动、液压制动^[24-25]。快速压缩机的高压气罐中为 0.35 MPa 的压缩空气,用于驱动活塞连杆机构(TRTP),驱动段和高压气罐通过蝶阀相连,液压段内液压油通过油泵加压,高压液压油在活塞运动过程中起到减速和缓冲作用。燃烧室内的特定混合气及样品由活塞连杆系统进行压缩。燃烧室内的压力变化由压力传感器(Kistler 6125C)和电荷放大器(Kistler 5018A)记录,燃烧过程由高速相机进行记录,型号为 Phantom V710,采样频率为 10 000 Hz,分辨率为 $1\,024\times 704$ 。

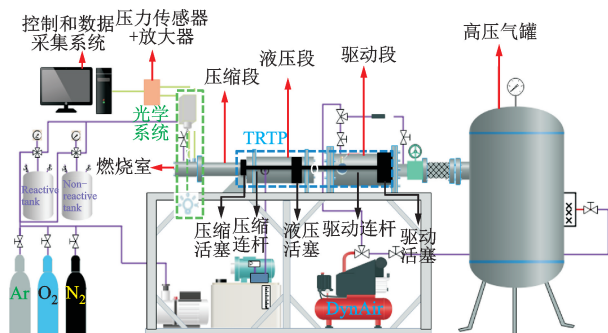


图 1 快速压缩机装置示意图

Fig. 1 The schematic of the rapid compression machine

改性双基推进剂快速热刺激实验方法为:压缩开始前,首先通过油泵将液压油泵入液压段,建立起

6~8 MPa 的液压压力,用来将活塞连杆系统锁在各部分的下止点(如图 1 中 TRTP 位置所示);将 30 mg 改性双基推进剂样品提前放置在燃烧室载物台上,利用端盖将燃烧室密封,随后将特定比热的混合气通过配气系统充入燃烧室内。压缩开始时,信号控制系统通过打开油泵上的电磁阀释放液压缸内建立起的油压,TRTP 系统在高压空气的推动下迅速向燃烧室方向移动,到达各个部分的上止点。在压缩开始后,高速相机和压力采集系统同时被触发开始记录燃烧室内样品变化情况。TRTP 系统到达上止点后,燃烧室内的混合气达到设计的高温 and 高压环境,样品由于快速热刺激将会发生相应的反应。若样品未发生着火或者爆炸,压缩上止点后的压力不会升高,同时也没观察到有着火图片,反之亦然。本研究中的热刺激指的是样品在压缩上止点的温度和压力。此外,压缩上止点的温度通过改变气体混合物的比热容来进行调节,压缩终点压力通过改变进气量的多少来进行调节。

当快速压缩机完成一次完整压缩后,测得压缩过程中的压力变化曲线,根据“绝热核心假设”^[26]和理想气体状态方程可以计算出压缩终点温度,理想气体状态方式如下

$$\int_{T_0}^{T_c} \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{dT}{T} = \ln\left(\frac{p_c}{p_0}\right) \quad (1)$$

式中: T_c 为压缩终点温度; T_0 为初始温度; p_0 为初始压力; p_c 为压缩上止点压力; γ 为比热容比。

将已知的初始温度、压力、压缩上止点压力、比热容比等代入式(1),可得压缩上止点温度为 703.6 K。由图 2 可知,压缩过程需要约 20 ms,温度升高约 400 K,因此平均的温度升高率约为 $2\times 10^4\text{ K/s}$,高于现有的烤燃实验加热速率,能够模拟含能材料在复杂多变战场环境下的安全性与响应特性。

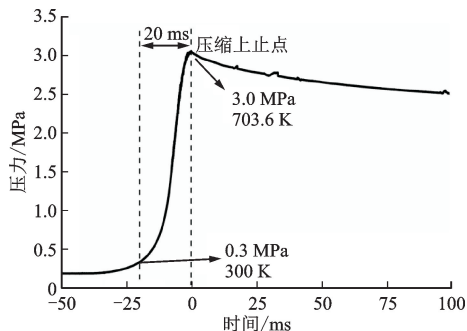


图 2 通过快速压缩机获得的典型压力-时间曲线

Fig. 2 The typical pressure-time history obtained by the rapid compression machine

3 实验结果

3.1 RDX/NC/NG 改性双基推进剂自着火行为特性

图 3 为 30 mg RDX/NC/NG 改性双基推进剂在 1.0 MPa 和 901.2 K 下自着火行为,可以看出在该条件下样品未发生着火。图中 0 ms 表示活塞到达压缩上止点时刻,则压缩上止点前 50 ms 会被记录为-50 ms。压缩开始前,可观察到样品的初始聚集状态。在压缩上止点时,压力和温度达到最大值,随后由于燃烧室壁面的散热影响,会缓慢下降。在压缩上止点附近,样品持续暴露在高温环境中,直至 660 ms 时,样品发生微弱反应冒出黑色烟雾,随着时间推移烟雾增多。但是,从高速图像未观察到着火现象,表明快速压缩机提供的当前条件下的热刺激由于压力较低不足以引发 RDX/NC/NG 样品发生明显的自着火。

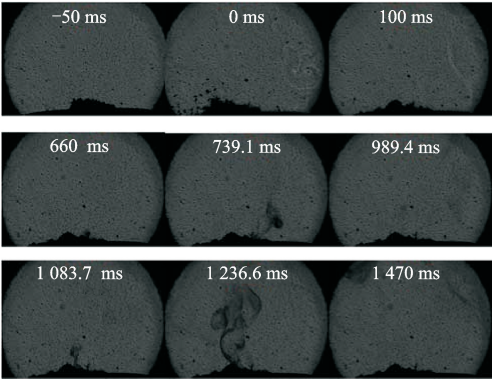


图 3 1.0 MPa 和 901.2 K 下 RDX/NC/NG 样品着火高速图像

Fig. 3 The high speed images of auto-ignition for RDX/NC/NG under 1.0 MPa and 901.2 K

上述热刺激未能使 RDX/NC/NG 样品发生着火,因此通过增加燃烧室内混合气量,从而达到升高压缩终点压力的目的。图 4 为 30 mg RDX/NC/NG 样品在 3.0 MPa 和 905.5 K 下的自着火行为,可以看出,在压缩上止点前,样品未发生着火。在-25 ms 时,由于压缩活塞运动产生的气流将一些样品吹起,随着活塞继续往上止点移动,燃烧室内的压力和温度会快速升高。在压缩上止点时,被吹起的微量样品产生了小火核 A,但很快熄灭。压缩到上止点后,尽管由于热损失压力略微下降,持续暴露在高温环境下使样品在 5.2 ms 时出现一个着火点 1,并将其规定为着火开始时刻;2.7 ms 后,另一个着火点 2 形成,与着火点 1 一起发展,随后成为一个大火核,迅速燃烧完全。

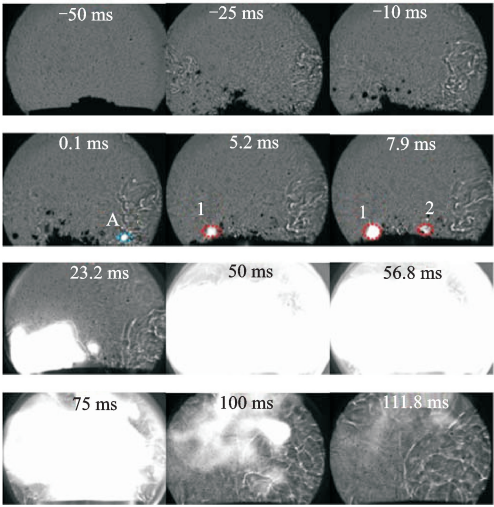


图 4 3.0 MPa 和 905.5 K 下 RDX/NC/NG 样品自着火高速图像

Fig. 4 The high speed images of auto-ignition for RDX/NC/NG under 3.0 MPa and 905.5 K

为了确保实验数据的可靠性,对 RDX/NC/NG 改性双基推进剂自着火行为开展了重复性实验,如图 5 所示。首先,3 个样品的开始着火时刻分别为 32.8、35 和 30 ms,结束时刻分别为 136.6、140.2 和 139.6 ms。结果表明,样品在初始条件基本一致的情况下,开始着火时刻存在不确定性,同时开始着火的位置随机。这是由于样品与高温高压混合气的接触面积大,当热刺激达到一定时,就会引发粉末样品的自着火,着火位置不确定性也会随着样品与环境接触的表面积的增加而增大。虽然着火时刻有区别,但是对于其燃烧持续时间来说,误差较小(3%以内)。因为样品的着火过程主要是受到其本身化学反应速率的影响,在相同样品量和几乎相同的热刺激条件下,所对应的燃烧持续期基本保持一致。

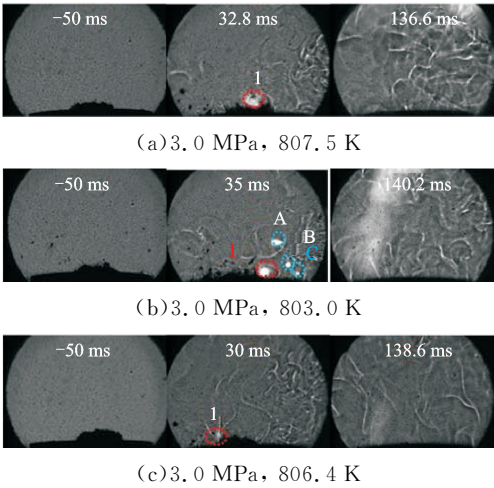


图 5 RDX/NC/NG 样品自着火的重复性实验结果

Fig. 5 The repeatability tests of RDX/NC/NG samples

通过分析 RDX/NC/NG 改性双基推进剂在快速热刺激下的典型自着火行为,发现快速压缩机可以为研究推进剂等含能材料的安全性及自着火行为提供具有特定热力学状态(温度、压力)的快速热刺激环境,且实验的重复性较好,可以得到可靠的实验数据和结果。

3.2 含 HMX 和 FOX-7 的改性双基推进剂自着火临界条件

在 3.1 节对 RDX/NC/NG 改性双基推进剂的自着火行为研究中发现,在保证温度不变的情况下,通过改变压力(1.0 MPa→3.0 MPa),样品由不着火变为着火状态。由此推断出,通过控制变量法可以获得在特定温度下的临界着火压力(或保证压力不变,改变温度),用于指导该推进剂的安全使用。利用上述方法对含 HMX 和 FOX-7 的改性双基推进剂在不同压力下的着火临界条件进行了研究,结果如表 1 所示。

表 1 含 HMX 和 FOX-7 改性双基推进剂着火临界条件

Table 1 The critical ignition conditions of CMDDB containing HMX and FOX-7

p/MPa	T_{HMX}/K	$T_{\text{FOX-7}}/\text{K}$
1.0		
1.5	950	785
2.0	910	700
2.5	740	615
3.0	722	600

对于 HMX/NC/NG 样品,压缩上止点压力为 1.0 MPa 时,样品在快速压缩机实验温度反应内($<1\ 100\ \text{K}$)均未出现着火现象,表明在该压力下样品处于安全状态。当压力增加到 1.5 MPa 时,样品在 950 K 时发生自着火现象,且高于该温度时均发生着火,低于该温度时样品未出现明显的着火现象;当压力低于 2.0 MPa 时,HMX/NC/NG 的着火发生需要较高温($>900\ \text{K}$);高于 2.0 MPa 时,温度在 750 K 就可发生着火。此外,样品的临界着火温度随着压力的增加而降低。

从 FOX-7/NC/NG 改性双基推进剂的着火临界条件结果可以发现,样品的临界着火温度随着压力的增加而降低。与 HMX/NC/NG 样品的临界着火条件相比可以发现,在 1.5~3.0 MPa 下,FOX-7/NC/NG 样品的临界着火温度低于 HMX/NC/NG,说明本实验中 FOX-7/NC/NG 样品的安全性低于

HMX/NC/NG。然而,FOX-7 的热分解温度略高于 HMX,即 FOX-7 更加钝感。出现这种反差的原因是,本工作使用的 FOX-7 粒径($27.5\ \mu\text{m}$)远小于 HMX 粒径($120\ \mu\text{m}$),这就使得在受到热刺激时,HMX 需要更多的热量才能完全反应释放能量而发生着火。

4 结 论

(1)利用快速压缩机建立了改性双基推进剂快速热刺激方法,该方法能够达到 $2\times 10^4\ \text{K/s}$ 的环境升温速率。

(2)RDX/NC/NG 改性双基推进剂在 1.0 MPa、901.2 K 时未发生自着火现象;保持温度不变,压力升高至 3.0 MPa 时发生明显的着火。通过重复性实验,验证了利用快速压缩机得到的样品自着火实验结果可靠。

(3)获得了含 HMX 和 FOX-7 改性双基推进剂在不同温度、压力下的着火临界条件,结果发现,HMX/NC/NG 和 FOX-7/NC/NG 样品的临界着火温度随着压力的升高而降低。

(4)对比分析了 HMX/NC/NG 样品和 FOX-7/NC/NG 样品的着火临界条件。在相同压力下,FOX-7/NC/NG 的临界着火温度低于 HMX/NC/NG 样品,主要因为 HMX 粒径大于 FOX-7,在相同的热刺激下 HMX 需要吸收更多的热量才能发生快速分解及燃烧反应。

参考文献:

[1] BRILL T B, REN Wuzhen, YANG V. Solid propellant chemistry, combustion, and motor interior ballistics [M]. Reston, VA, USA: AIAA, 2000.

[2] 杨鸿辉, 赵程程, 王勇, 等. 凝胶推进剂及其流变特性研究进展 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(5): 166-179.

YANG Honghui, ZHAO Chengcheng, WANG Yong, et al. Progress in study on gel propellants and their rheological properties [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(5): 166-179.

[3] ZHANG Chaoyang. Origins of the energy and safety of energetic materials and of the energy & safety contradiction [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2018, 43(9): 855-856.

[4] 胡惟佳, 吴艳青, 黄风雷. 烤燃作用下的 HMX 单晶各向异性力学响应及相变 [J]. 含能材料, 2018, 26(1): 86-93.

- HU Weijia, WU Yanqing, HUANG Fenglei. Anisotropic mechanical response and phase transition of cooked HMX [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(1): 86-93.
- [5] GROSS M L, MEREDITH K V, BECKSTEAD M W. Fast cook-off modeling of HMX [J]. Combustion and Flame, 2015, 162(9): 3307-3315.
- [6] AYDEMIR E, ULAS A. A numerical study on the thermal initiation of a confined explosive in 2-D geometry [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1): 396-400.
- [7] KWON G H, BAEK S W, SOHN Y M. Ignition of solid fuel by thermal radiation in a confined rectangular enclosure; experiment and numerical analysis [J]. Combustion Science and Technology, 2001, 165(1): 85-110.
- [8] 邓海, 赵小锋, 任新联, 等. 不同约束条件下硝酸酯类 PBX 炸药装药慢烤响应特性 [J]. 火炸药学报, 2021, 44(5): 652-657.
- DENG Hai, ZHAO Xiaofeng, REN Xinlian, et al. Slow cook-off response characteristics of nitrate explosive PBX charge under different constraint conditions [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2021, 44(5): 652-657.
- [9] HEDMAN T D, GROSS M L, DAVIS J J, et al. Experimental investigation of the decomposition preceding cookoff in a composite propellant [J]. Journal of Propulsion and Power, 2014, 30(6): 1667-1674.
- [10] SAHIN H, NARIN B, KURTULUS D F. Development of a design methodology against fast cook-off threat for insensitive munitions [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2016, 41(3): 580-587.
- [11] LI Wenfeng, YU Yonggang, YE Rui, et al. Three-dimensional simulation of base bleed unit with AP/HT-PB propellant in fast cook-off conditions [J]. Journal of Energetic Materials, 2017, 35(3): 265-275.
- [12] 赵孝彬, 李军, 程立国, 等. 固体推进剂慢速烤燃特性的影响因素研究 [J]. 含能材料, 2011, 19(6): 669-672.
- ZHAO Xiaobin, LI Jun, CHENG Liguang, et al. Influence factors of slow cook-off characteristic for solid propellant [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(6): 669-672.
- [13] DENISYUK A P, SHEPELEV Y G, RUSIN D L, et al. Effect of RDX and HMX on the efficiency of catalysts for double-base propellant combustion [J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 2001, 37(2): 190-196.
- [14] AN Chongwei, LI Fengsheng, WANG Jingyu, et al. Surface coating of nitroamine explosives and its effects on the performance of composite modified double-base propellants [J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 28(2): 444-448.
- [15] MA Weihua, WANG Ningfei, SUI Xin, et al. Thermal safety of a gun-launched missile's solid rocket motor under conditions of high environm. temp. and overloaded forces [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2018, 43(12): 1277-1286.
- [16] YAN Qilong, LI Xiaojiang, WANG Ying, et al. Combustion mechanism of double-base propellant containing nitrogen heterocyclic nitroamines; I the effect of heat and mass transfer to the burning characteristics [J]. Combustion and Flame, 2009, 156(3): 633-641.
- [17] YAN Qilong, SONG Zhenwei, SHI Xiaobing, et al. Combustion mechanism of double-base propellant containing nitrogen heterocyclic nitroamines; II the temperature distribution of the flame and its chemical structure [J]. Acta Astronautica, 2009, 64(5/6): 602-614.
- [18] SUN Chaoxiang, XU Jinsheng, CHEN Xiong, et al. Strain rate and temperature dependence of the compressive behavior of a composite modified double-base propellant [J]. Mechanics of Materials, 2015, 89: 35-46.
- [19] XU Ruixuan, AN Chongwei, HUANG Hao, et al. Preparation of multi-scale FOX-7 particles and investigation of sensitivity and thermal stability [J]. RSC Advances, 2019, 9(36): 21042-21049.
- [20] SINDITSKII V P, LEVSHENKOV A I, EGORSHEV V Y, et al. Study on combustion and thermal decomposition of 1, 1-diamino-2, 2-dinitroethylene (FOX-7) [C]//30th International Pyrotechnic Seminar. Saint Malo, France: [s. n.], 2003: 299-311.
- [21] 张超, 王寅虎, 杨立波, 等. FOX-7 对 NC/TMETN 基低敏感无烟改性双基推进剂燃烧性能的影响 [J]. 含能材料, 2020, 28(3): 229-234.
- ZHANG Chao, WANG Yinhu, YANG Libo, et al. Effect of FOX-7 on combustion performance of NC/TMETN based low-sensitive and smokeless CMDB propellant [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(3): 229-234.
- [22] 王锋, 刘国涛, 张远波, 等. 含 FOX-7 发射药的低压燃烧性能及力学性能 [J]. 含能材料, 2013, 21(4): 522-526.
- WANG Feng, LIU Guotao, ZHANG Yuanbo, et al. Combustion and mechanical performance of gun propel-

- lant containing FOX-7 at low pressure [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(4): 522-526.
- [23] 陈中娥, 唐承志, 赵孝彬. 固体推进剂的慢速烤燃行为与热分解特性的关系研究 [J]. 含能材料, 2005, 13(6): 393-396.
- CHEN Zhong, TANG Chengzhi, ZHAO Xiaobin. Relationship between slow cook-off behaviour and thermal decomposition characteristics of solid propellant [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2005, 13(6): 393-396.
- [24] YANG Meng, LIAO Caiyue, TANG Chenglong, et al. The auto-ignition behaviors of HMX/NC/NG stimulated by heating in a rapid compression machine [J]. Fuel, 2021, 288: 119693.
- [25] YANG Meng, YANG Yue, LIAO Caiyue, et al. The auto-ignition boundary of ethylene/nitrous oxide as a promising monopropellant [J]. Combustion and Flame, 2020, 221: 64-73.
- [26] YANG Meng, WU Yingtao, TANG Chenglong, et al. Auto-ignition behaviors of nitromethane in diluted oxygen in a rapid compression machine: critical conditions for ignition, ignition delay times measurements, and kinetic modeling interpretation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 377: 52-61.

(编辑 杜秀杰)