

文章编号:1006-9941(2020)03-0229-06

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

张超¹,王寅虎²,杨立波¹,李军强¹,何俊武¹,王江宁¹,陈俊波¹

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

摘要: 采用燃速-靶线法研究了 1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)的含量、粒度及不同铅盐/铜盐/炭黑三元复合燃烧催化剂对硝化棉/三羟甲基乙烷三硝酸酯(NC/TMETN)低敏感无烟螺压改性双基推进剂燃烧性能的影响。结果表明,随着 NC/TMETN 基推进剂配方中 FOX-7 含量的增加,燃速先上升后下降,当 FOX-7 含量为 25% 时,可将基础配方 10 MPa 下的燃速由 $5.87 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 提高至 $14.90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,当 FOX-7 含量由 25% 增至 30% 时,10 MPa 下的燃速由 $14.90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $12.78 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,FOX-7 含量由 5% 增加至 30% 时,6~16 MPa 下的压力指数由 0.97 降至 0.60;用等量细颗粒的 FOX-7 取代粗颗粒时,可使推进剂 10 MPa 下的燃速降低 $1.16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,使推进剂 6~14 MPa 各压力区间的压力指数增大;B-Pb/B-Cu/CB 催化剂可以将 NC/TMETN/FOX-7 基改性双基推进剂 10 MPa 下燃速由未加催化剂时的 $14.90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 提高至 $18.65 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,6~16 MPa 下的压力指数由未加催化剂时的 0.63 降至 0.35。

关键词: 改性双基推进剂;燃速;压力指数;1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)

中图分类号:TJ55;V512

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2019120

1 引言

改性双基推进剂具有能量高、燃烧性能好、特征信号低等特点,这对提高武器装备的作战效能和隐身性非常有利^[1-3]。近年来,为了适应复杂的现代战争环境和高价值武器平台的安全要求,高能低敏感推进剂成为新一代固体推进剂研究的主要方向之一^[4-21],在低敏感改性双基推进剂研究方面,赵凤起^[22]、Charles^[23]等学者研究发现采用低敏感含能增塑剂三羟甲基乙烷三硝酸酯(TMETN)代替硝化甘油(NG)、用低感度的高能量密度化合物 1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)代替 RDX 可大幅降低该类推进剂的机械感度和子弹撞击感度,这些低感度材料的加入在降低推进剂感度的同时,也必然会对推进剂的燃烧性能产生影响,推进剂燃烧性能调节是其应用研究的关键核心技术之一^[24],而有关 NC/TMETN 基低敏感改性双基推进剂燃烧性能调节的报道较少^[25]。为此,本实验研究了 FOX-7 含量、粒度对 NC/TMETN 基低敏感改性双基推进剂烧性能的影响,同时

研究了不同的铅盐、铜盐与炭黑复配的燃烧催化剂对 NC/TMETN 基低敏感改性双基推燃烧性能的影响,并对其燃烧机理进行了分析,以期对低敏感改性双基推进剂燃烧性能调节提供技术支持。

2 实验部分

2.1 试剂与仪器

FOX-7:纯度>99.3%,粗颗粒重均平均粒径 d_{50} 为 $40 \mu\text{m}$,细颗粒重均平均粒径 d_{50} 为 $7.2 \mu\text{m}$,西安近代化学研究所自制;NC:氮含量 12.0%,泸州北方硝化棉公司;TMETN:纯度>99.5%,西安近代化学研究所;催化剂:B-Pb 和 F-Pb 为芳香酸铅盐,N-Pb 为杂环类铅盐,J-Pb 为无机铅盐,B-Cu 和 F-Cu 为芳香酸铜盐,N-Cu 为杂环类铜盐;二号中定剂(C_2)、凡士林(V,医用)及其他功能助剂等均为市售工业品。

主要设备:2 kg 吸收器、静态恒压燃速仪和火焰结构分析系统均为西安近代化学研究所研制。

2.2 测试样品的制备

本研究设计的基础配方见表 1,配方中凡士林含量 1.0%,二号中定剂含量 1.5%,其它 2.5% 为工艺助剂。试验物料经过吸收、驱水、熟化、压延塑化后切成 $5 \text{ mm}\times 5 \text{ mm}\times 150 \text{ mm}$ 药条进行燃速测试,切成 $1.5 \text{ mm}\times 4.0 \text{ mm}\times 25 \text{ mm}$ 药条进行火焰结构测试、制成 $\Phi 5 \text{ mm}\times$

收稿日期:2019-05-05;修回日期:2019-06-17

网络出版日期:2019-10-08

作者简介:张超(1975-)男,研究员,从事固体推进剂配方与工艺技术研究。e-mail:chzhang204@sina.com

引用本文: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 Yin-hu, YANG Li-bo, et al. Effect of FOX-7 on Combustion Performance of NC/TMETN Based Low-sensitive and Smokeless CMDDB Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao), 2020, 28(3):229-234.

表1 基础配方

samples	NC+TMETN	FOX-7
L1	95	0
L2	90	5(40 μm)
L3	80	15(40 μm)
L4	70	25(40 μm)
L5	65	30(40 μm)
L6	60	35(40 μm)
L7	70	25(7.2 μm)

25 mm 药柱进行燃烧波温度测试。药料按 2000 g 配料,吸收系数取 5。

2.3 燃速测定

推进剂燃速按 GJB-770B-2005 方法 706.1“燃速-靶线法”测试进行。温度 20 $^{\circ}\text{C}$,压力范围为 6~16 MPa。燃速压力指数 n 依据 Vieille 关系式 $r=ap^n$ 采用最小二乘法计算。

2.4 燃烧波的温度分布测试

将“ Π ”形带状(70 μm 宽,5 μm 厚)双钨铼微热电偶埋在推进剂试样($\Phi 5\text{ mm}\times 25\text{ mm}$)中间,试样断面用丙酮粘结,在 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘 6 h 取出,待试样冷却后用聚乙烯醇包覆侧面两次,自然晾干待用。将嵌入微热电偶的试样垂直装在点火架上,然后置于四视窗燃烧室中,充氮气加压至设定压力,采用 20 V 直流电源点火。推进剂燃烧后自动触发采集系统,记录热电偶输出的电信号。试样燃烧过程中,热电偶逐渐接近燃烧表面,并通过燃烧表面进入气相区,最后通过火焰区,这样热电偶就测得了从推进剂本体到火焰区整个燃烧波的温度分布曲线。

2.5 火焰结构照片

采用单幅放大彩色摄影法拍摄火焰结构,把准备好的样品垂直装在点火架上,再将装有样品的点火架放置在四视窗燃烧室内,向燃烧室内充入氮气使室内压力达到预定值,并形成自下而上的氮气流,及时排除燃气保证照片质量。采用 20 V 直流电源作点火源,通

过程序控制器用 $\Phi 0.15\text{ mm}$ 镍铬合金丝从样品上端点燃试样,燃烧正常后启动照相机拍照,即可得到推进剂稳态燃烧时的火焰结构照片。

3 结果与讨论

3.1 FOX-7 含量对推进剂燃烧性能影响

用靶线法测试不同 FOX-7(40 μm) 含量时推进剂的燃速,采用最小二乘法计算 n ,结果见表 2。由表 2 数据可以看出,在本研究的系列配方中,在 6~16 MPa 下,随着 FOX-7 含量的增加,推进剂燃速呈现先不断上升,后下降的趋势,配方中 FOX-7 的含量为 25% 时(L4),10 MPa 下的燃速达到 $14.9\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,比不含 FOX-7 时(L1)提高了 153.8%,这表明 FOX-7 对提高 NC/TMETN 基低敏感改性双基推进剂燃速效果明显。当 FOX-7 含量由 25% 增至 30% 时,10 MPa 下的燃速由 $14.90\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $12.78\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,FOX-7 含量继续增加,燃速继续呈下降趋势,FOX-7 含量由 5% 增加至 30% 时,推进剂的燃速呈不断下降趋势,6~16 MPa 下的压力指数由 0.97 降至 0.60,FOX-7 含量大于 30% 后,压力指数开始略有升高。

FOX-7 能提高推进剂的燃速,这与 FOX-7 的热分解规律有关,FOX-7 在分解前没有明显的熔融吸热过程^[26],这一点与 RDX 等高能炸药有明显不同,当 FOX-7 含量超过 30%,其对推进剂的燃速提高幅度减缓,分析认为,这可能是由于 FOX-7 有着较宽的热分解范围及较高的热分解温度所致,FOX-7 的 DSC 曲线中两个放热峰峰温差达到 60 $^{\circ}\text{C}$,最大峰温 288.5 $^{\circ}\text{C}$ ^[27],这使得 FOX-7 的热分解速度较慢,随着配方中 FOX-7 含量增加,NC/TMETN 含量减少,推进剂固相反应剧烈程度进一步减缓,推进剂燃速降低。

3.2 FOX-7 粒度对推进剂燃烧性能影响

用靶线法测试含量 25% 粒度分别为 40 μm (L4) 和 7.2 μm (L7) FOX-7 的 NC/TMETN 基低敏感改性双基推进剂燃速,采用最小二乘法计算 n ,结果见表 3。

表2 不同 FOX-7 含量时推进剂燃烧性能

Table 2 Combustion performance of propellants with different mass fraction of FOX-7

samples	$u / \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$						n					
	6 MPa	8 MPa	10 MPa	12 MPa	14 MPa	16 MPa	6~8 MPa	8~10 MPa	10~12 MPa	12~14 MPa	14~16 MPa	6~16 MPa
L1	3.93	4.98	5.87	6.57	7.67	8.72	0.82	0.73	0.62	0.69	0.70	0.79
L2	6.71	8.32	9.90	12.09	14.51	17.51	0.46	0.41	1.56	1.18	1.41	0.97
L3	8.39	10.83	13.34	15.16	16.64	18.65	0.91	0.93	0.70	0.60	0.85	0.81
L4	10.67	13.02	14.90	16.44	18.25	20.04	0.49	0.47	0.53	0.63	0.69	0.63
L5	9.09	11.16	12.78	14.38	16.13	17.46	0.71	0.61	0.65	0.51	0.44	0.60
L6	8.91	10.98	12.41	13.91	15.11	17.08	0.73	0.67	0.63	0.54	0.92	0.64

表 3 不同 FOX-7 粒度对推进剂燃烧性能影响

Table 3 Combustion properties of propellants with different FOX-7 particle size

samples	$u/m \cdot s^{-1}$						n					
	6 MPa	8 MPa	10 MPa	12 MPa	14 MPa	16 MPa	6~8 MPa	8~10 MPa	10~12 MPa	12~14 MPa	14~16 MPa	6~16 MPa
L1	3.93	4.98	5.87	6.57	7.67	8.72	0.82	0.73	0.62	0.69	0.70	0.79
L4	10.67	13.02	14.90	16.44	18.25	20.04	0.49	0.47	0.53	0.63	0.69	0.63
L7	10.20	11.84	13.74	15.82	17.86	19.56	0.52	0.67	0.77	0.78	0.68	0.68

对比表 3 中配方 L4 与 L7 的实验结果可知,粗颗粒 FOX-7 对 NC/TMETN 基低敏感推进剂提高燃速效果优于细颗粒。用等量细颗粒取代粗颗粒 FOX-7 粒后,在不同压力区间推进剂的燃速均有所降低,10 MPa 燃速降低了 $1.16 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。6~14 MPa 压力区间的压力指数随着 FOX-7 粒度减小而增大,14~16 MPa 基本接近。

粗颗粒 FOX-7 提高 NC/TMETN 基低敏感推进剂燃速效果优于细颗粒原因可能是,细颗粒 FOX-7 绝大部分熔融分解过程在凝聚相区完成,而当 FOX-7 粒度增大到一定大时,部分 FOX-7 未来得及在凝聚相中完全熔融分解而从凝聚相表面脱出,在气相中完成熔融分解和燃烧过程,FOX-7 脱离凝聚相表面时留下的穴坑使凝聚相的燃面增大,推进剂燃速升高。从 L4 与 L7 的燃烧波图(图 1)可知,L4 样品燃烧波在 $1100 \sim 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 有一个燃烧扰动区,而 L7 样品在该温度区间较为平滑, $1100 \sim 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度波动,其原因可能就是由于部分 FOX-7 被气流带到气相区分解,FOX-7 在气相区高温下分解剧烈放热,从而造成了温度波动。

3.3 燃烧催化剂对推进剂燃烧性能的影响

调节改性双基推进剂燃烧性能最有效的措施是添加铅盐/铜盐/炭黑三元复合燃烧催化剂^[28],不同的铅

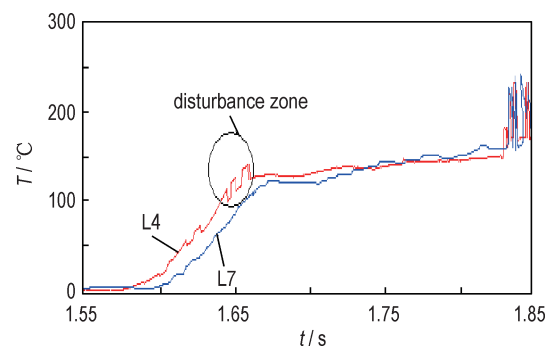


图 1 样品 L4 与 L7 燃烧波温度分布

Fig.1 Combustion wave temperature distribution of sample L4 and L7

盐、铜盐与炭黑搭配发生协同效应的效果有差异,会对推进剂的燃速和燃速压力指数产生不同的影响。赵凤起等^[29]研究认为炭黑与铅盐热分解产物之间发生了化学反应。铜盐的热分解产物 CuO 与炭黑反应得到单质金属铜增加了推进剂的导热性,使得铅盐能在低温下分解,增加了催化效果。

基于以上理论分析,分别考察了常用 B-Pb、F-Pb、J-Pb、N-Pb 4 种铅盐、B-Cu、F-Cu、N-Cu 3 种铜盐(具体搭配见表 4)与炭黑组成的三元复合催化剂对 10 MPa

表 4 铅-铜-炭黑复合催化剂对推进剂燃烧性能的影响

Table 4 Effect of Pb/Cu/CB composite catalysts on combustion performance of propellants

samples	$u/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$						n					
	6 MPa	8 MPa	10 MPa	12 MPa	14 MPa	16 MPa	6~8 MPa	8~10 MPa	10~12 MPa	12~14 MPa	14~16 MPa	6~16 MPa
L1	3.93	4.98	5.87	6.57	7.67	8.72	0.82	0.73	0.62	0.69	0.70	0.79
L4	10.67	13.02	14.90	16.44	18.25	20.04	0.49	0.47	0.53	0.63	0.69	0.63
B-Pb/B-Cu/CB	15.21	17.33	18.65	19.66	20.62	21.58	0.45	0.33	0.29	0.20	0.25	0.35
B-Pb/F-Cu/CB	11.69	14.51	17.20	18.67	19.99	22.45	0.64	0.76	0.48	0.44	0.87	0.64
B-Pb/N-Cu/CB	12.68	14.30	16.50	18.27	20.28	22.32	0.42	0.64	0.56	0.47	0.52	0.59
F-Pb/F-Cu/CB	13.13	15.21	17.33	19.58	22.57	23.74	0.36	0.45	0.68	0.90	0.38	0.63
F-Pb/B-Cu/CB	11.37	13.29	14.61	16.09	17.44	18.24	0.54	0.42	0.53	0.77	0.47	0.49
F-Pb/N-Cu/CB	11.96	14.49	16.17	17.51	18.53	20.70	0.67	0.49	0.44	0.37	0.41	0.53
J-Pb/B-Cu/CB	12.73	16.64	19.53	21.01	23.24	24.77	0.93	0.72	0.40	0.47	0.63	0.65
J-Pb/F-Cu/CB	12.80	16.30	18.65	20.37	22.76	24.39	0.84	0.60	0.48	0.71	0.52	0.64
J-Pb/N-Cu/CB	13.02	15.74	17.89	19.78	22.01	25.02	0.66	0.57	0.55	0.48	0.44	0.64
N-Pb/N-Cu/CB	11.87	14.53	16.70	18.33	20.33	22.56	0.70	0.62	0.51	0.46	0.78	0.64
N-Pb/B-Cu/CB	11.11	13.16	14.93	16.58	18.54	20.12	0.59	0.57	0.58	0.50	0.61	0.60
N-Pb/F-Cu/CB	11.03	13.94	16.39	18.23	20.08	22.30	0.58	0.56	0.47	0.53	0.47	0.71

下燃速最高的L4样品燃烧性能的影响,催化剂采用外加法,Pb/Cu/CB三者的质量比为6:2:1,测试结果见表4。由表4可见,铅盐/铜盐/炭黑三元催化剂的加入提高了NC/TMETN/FOX-7基改性双基推进剂各压力区间的燃速,不同的铅盐、铜盐与炭黑搭配,对NC/TMETN/FOX-7基改性双基推进剂的燃烧性能影响不同,其中B-Pb/B-Cu/CB三元催化剂体系对推进剂催化效果最好,使推进剂10 MPa下燃速达到 $18.65 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,14~16 MPa下燃速大于 $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,12~14 MPa压力区间出现平台燃烧,6~16 MPa下的压力指数由未加催化剂时的0.63降至0.35,其他铅盐/铜盐/炭黑组合催化剂虽提高了推进剂的燃速,但对推进剂的压力指数改善效果不明显。

3.4 火焰结构分析

图2是不同FOX-7含量NC/TMETN推进剂及含B-Pb/B-Cu/CB催化剂NC/TMETN/FOX-7推进剂4 MPa下的火焰结构照片。其中图2a~图2e是FOX-7(40 μm)含量依次为0%、5%、15%、25%和30%,图2f为FOX-7(40 μm)含量25%,同时含B-Pb/B-Cu/CB催化剂推进剂火焰结构。

由图2可以看出NC/TMETN基低敏感推进剂火焰结构由预热区、亚表面及表面区、暗区和火焰区组成,由火焰形状可以看出,随着配方中FOX-7含量的增加,火焰结构发生了明显变化,火焰越来越明亮且有发光体飞出,说明推进剂的燃烧反应越来越剧烈,当FOX-7含量增加至30%时,火焰亮度变暗,但仍比未加FOX-7时明亮,火焰结构变化规律与推进剂燃速变化规律一致。当在推进剂中加入B-Pb/B-Cu/CB三元催化剂时,由于碳骨架作用,燃烧表面的碳网更加规则密实,火焰更加明亮,飞出的明亮体更多,说明催化剂促使推进剂分解燃烧更剧烈,故推进剂燃速进一步提高。

4 结论

(1) FOX-7可以改善NC/TMETN基低敏感推进剂燃烧性能,在6~16 MPa下,随着配方中FOX-7含量的增加,推进剂燃速呈现先不断上升后下降的趋势,当FOX-7含量为25%时,可将基础配方10 MPa下的燃速由 $5.87 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 提高至 $14.90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,当FOX-7含量由25%增至30%时,10 MPa下的燃速由 $14.90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $12.78 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,FOX-7含量由5%增加至30%时,6~16 MPa下的压力指数由0.97降至0.60,FOX-7含

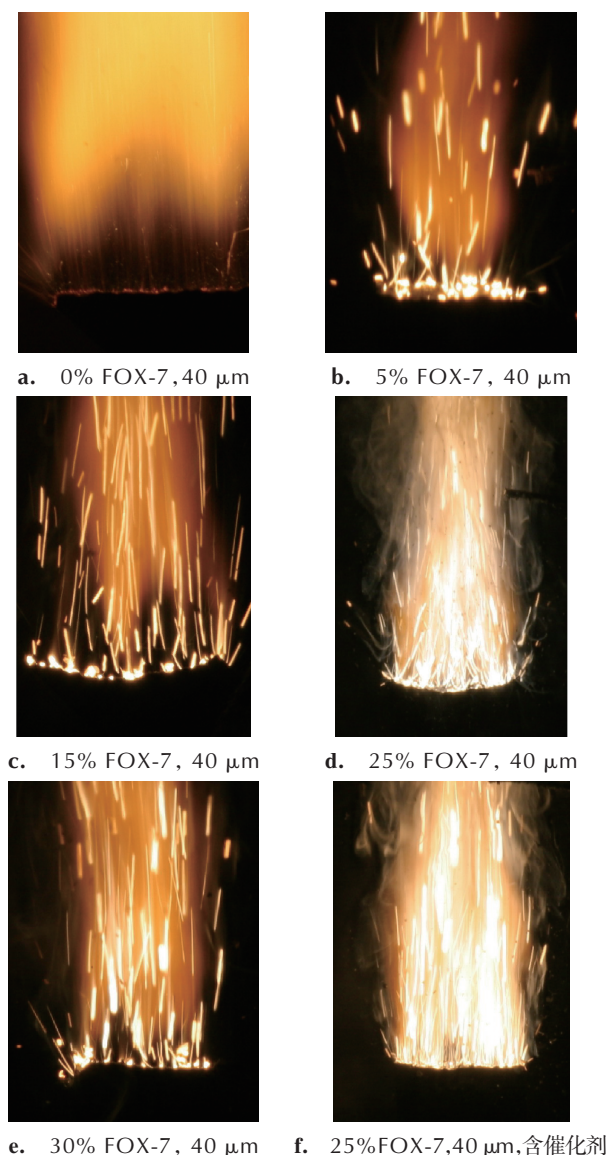


图2 NC/TMETN/FOX-7基推进剂4 MPa下火焰结构

Fig. 2 Combustion flame structure photos of NC/TMETN/FOX-7 propellants at 4 MPa

量大于30%后,压力指数开始略有升高。

(2) FOX-7的粒度也是影响NC/TMETN基低敏感推进剂燃烧性能的主要因素,粗颗粒(40 μm)的增速效果优于细颗粒(7.2 μm),用等量细颗粒的FOX-7取代粗颗粒时,可使10 MPa下的燃速降低 $1.16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。6~14 MPa压力区间的压力指数随着FOX-7粒度减小而增大,14~16 MPa基本接近。

(3) 不同铅盐/铜盐/炭黑复配可以调节NC/TMETN/FOX-7基低敏感改性双基推进剂燃烧性能,但效果有差别。B-Pb/B-Cu/CB催化剂可以将推进剂10 MPa下燃速由未加催化剂时的 $14.90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 提高至 $18.65 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,在12~14 MPa压力区间出现平台燃

烧, 6~16 MPa 下的压力指数由未加催化剂时的 0.63 降至 0.35。

参考文献:

- [1] 张亚俊, 李吉祯, 唐秋, 等. 不同含氮量 NC 对 CMDB 推进剂力学性能的影响[J]. 火炸药学报, 2018, 41(6): 605-609.
ZHANG Ya-jun, LI Ji-zhen, TANG Qiu-fan, et al. Effect of NC with different content of nitrogen on the mechanical properties of CMDB propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives Propellants*, 2018, 41(6): 605-609.
- [2] 裴庆, 赵凤起, 郝海霞. RDX-CMDB 推进剂燃速温度敏感系数的实验研究[J]. 火炸药学报, 2016, 39(3): 73-76.
PEI-Qing, ZHAO Feng-Qi, HAO Hai-Xia, et al. Experiment FOX-7 research on temperature sensitivity coefficient of burning rate for RDX-CMDB propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives Propellants*, 2016, 39(3): 73-76.
- [3] 张超, 杨立波, 袁志锋, 等. 含 FOX-7 无烟 CMDB 推进剂的燃烧性能[J]. 火炸药学报, 2014, 37(5): 77-80.
ZHANG Chao, YANG Li-bo, YUAN Zhi-feng, et al. Combustion characteristics of smokeless composite modified double base propellants containing 2, 6-diamino-3, 5-dinitro pyrazine-1-oxide [J]. *Chinese Journal of Explosives Propellants*, 2014, 37(5): 77-80.
- [4] 吕玺, 庞维强, 李军强, 等. HTPET 钝感推进剂的子弹撞击和快速烤燃特性[J]. 火炸药学报, 2019, 42(1): 79-82.
LÜ Xi, PANG Wei-qiang, LI Jun-qiang, et al. Bullet impact and fast cook off characteristics of HTPET insensitive solid propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives Propellants*, 2019, 42(1): 79-82.
- [5] 张恒宁, 樊学忠, 王晗. 高能钝感推进剂配方改性的研究进展[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(24): 195-199
ZHANG Heng-ning, FAN Xue-zhong, WANG Han. Research progress on modification of high energy insensitive propellant [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(24): 195-199.
- [6] 沈业伟, 仇玉成, 童丽伦. PBT 钝感高能推进剂高温力学性能调节技术研究[J]. 推进技术, 2018, 39(11): 2595-2600.
SHEN Ye-wei, ZHANG Yu-cheng, TONG Li-lun. Study on adjustment technology for high temperature mechanical properties of PBT insensitive high energy propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(11): 2595-2600.
- [7] 陈京, 刘萌, 何琦文, TMETN/NG 混合增塑剂及 NC 共混体系的性能模拟[J]. 含能材料, 2018, 26(6): 483-488
CHEN Jing, LIU Meng, HE Qi-wen, Simulation on the properties of TMETN/NG mixed plasticizer/NC blends [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(6): 483-488.
- [8] 李焕, 樊学忠, 庞维强. 低易损性固体推进剂钝感特性及评估试验方法研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2017, 15(2): 56-60.
LI Huan, FAN Xue-zhong, PANG Wei-qiang. research progress in insensitivity characteristic and evaluation test method of low vulnerability solid propellant [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2017, 15(2): 56-60.
- [9] 闫丽, 王雨时, 闻泉. 国外钝感弹药技术新进展[J]. 飞航导弹, 2017, 15(8): 46-50.
YAN Li, WANG Shi-yu, WEN Quan. New progress of insensitive ammunition technology abroad [J]. *Aerody Namic Missile*, 2017, 15(8): 46-50.
- [10] 田勇, 李敬明. 弹药安全的新发展——安全弹药刍议[J]. 含能材料, 2018, 26(6): 483-488.
TIAN Yong, LI Jing-ming. New development of ammunition safety: Robust munitions [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(6): 483-488.
- [11] 庞爱民, 黎小平. 固体推进剂技术的创新与发展规律[J]. 含能材料, 2015, 23(1): 3-6.
PANG Ai-min, LI Xiao-ping. Innovation and development law of solid propellant technology [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(1): 3-6.
- [12] 付小龙, 樊学忠. 钝感推进剂配方研究及发展趋势[J]. 火炸药学报, 2014, 37(5): 1-8.
FU Xiao-long, FAN Xue-zhong. Research and development trends of insensitive solid propellant formulation [J]. *Chinese Journal of Explosives Propellants*, 2014, 37(5): 1-8.
- [13] 安亭, 赵凤起, 高红旭, 等. 含超级铝热剂双基推进剂的感度特性[J]. 推进剂, 2013, 34(1): 150-155.
AN Ting, ZHAO Feng Qi, GAO Hong-xu, et al. Sensitivity characteristics of double base propellants containing super thermite [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(1): 150-155.
- [14] Kim C K, Yoo J C, Min B S, et al. Insensitive propellant composition: US, 2012/0227875 [P]. 2012.
- [15] 刘杰, 王龙祥, 李青, 等. 钝感纳米 RDX 的制备与表征[J]. 火炸药学报, 2012; 35(6): 46-50.
LIU Jie, WANG Long-xiang, LI Qing, et al. Preparation and characterization of insensitive nano RDX [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012; 35(6): 46-50.
- [16] 徐司雨, 赵凤起, 李上文, 等. 几种钝感低特征信号推进剂的能量特性[J]. 含能材料, 2006, 14(6): 416-419.
XU Si-yu, ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen, et al. Energy characteristics of several insensitive minimum signature propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(6): 416-419.
- [17] 王振宇. 国外近年研制的新型不敏感单质炸药[J]. 含能材料, 2003, 11(4): 227-230
WANG Zhen-yu. Development on some new insensitive individual explosives abroad [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(4): 227-230.
- [18] 刘栓虎, 程根旺, 骆广梁. 高能推进剂钝感含能材料研究现状[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2010, 8(2): 8-10.
LIU Shuan-hu, CHENG Gen-wang, LUO Guang-liang. Research status of insensitive energetic materials used in high-energy propellant [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2010, 8(2): 8-10.
- [19] 张琼方, 张教强. 钝感固体推进剂的研制与进展[J]. 含能材料, 2004; 12(6): 371-375
ZHANG Qiong-fang, ZHANG Jiao-qiang. Research and development of in-sensitive solid propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004; 12(6): 371-375.
- [20] 马娟丽. 可应用于钝感推进剂的新型高密度增塑剂[J]. 火炸药动态, 2008(1): 2-5
MA Juan-li. Can be applied to a new type of high density plasticizer insensitive propellants [J]. *Status of Explosive and Propellants*, 2008(1): 2-5
- [21] 石小兵, 庞维强, 蔚红建. 钝感推进剂研究进展及发展趋势[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2007(2): 24-28.

- SHI Xiao-bing, PANG Wei-qiang, YU Hong-jian. Research progress and development trends of insensitive propellant[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2007, (2): 24-28.
- [22] 赵凤起, 杨栋, 李上文, 等. 以NC和TMETN为基的微烟推进剂机械感度研究[J]. 火炸药学报, 1999, 22(4): 5-8.
- ZHAO Feng-qi, YANG Dong, LI Shang-wen, et al.. Study on mechanical sensitivity of smokeless propellant based on NC and TMETN [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1999, 22(4): 5-8.
- [23] Mierille Leroy. SNPE methodology for insensitive rocket motors development[C]//Proc. of Insensitive Munitions Technology Symposium. ADPA, Williamsburg, VA, 1994: 439-448.
- [24] 李军强, 何俊武, 张超, 等. 金属粉对NC/TMETN/FOX-7低敏感改性双基推进剂燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2019, 22(4): 5-8.
- LI Jun-qiang, HE Jun-wu, ZHANG Chao, et al. Effect of metal powder on the combustion performance of NC/TMETN/FOX-7 low sensitive CMDB propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives Propellants*, 2019, 42(1): 84-88.
- [25] 王雅乐, 卫芝贤, 康丽. 固体推进剂用燃烧催化剂的研究进展[J]. 含能材料, 2015, 23(1): 89-98.
- WANG Ya-le, WEI Zhi-xian, KANG Li. Research progress of combustion catalysts for solid propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(1): 89-98.
- [26] 付秋波, 舒远杰, 黄奕刚, 等. FOX-7的热分解机理[J]. 固体火箭技术, 2010, 11(3): 77-79.
- FU Qiu-bo, SHU Yuan-jie, HUANG Yi-gang, et al.. Thermal decomposition mechanism of FOX-7[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2010, 11(3): 77-79.
- [27] 周诚, 黄新萍, 周彦水, 等. FOX-7的晶体结构和热分解特性[J]. 火炸药学报, 2007, 30(1): 60-63.
- ZHOU Cheng, HUANG Xin-ping, ZHOU Yan-shui, et al.. Crystal structure and thermal decomposition of FOX-7[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2007, 30(1): 60-63.
- [28] 赵凤起, 单文刚, 王瑛, 等. 含催化剂的RDX-CMDB推进剂熄火表面特征和燃烧火焰结构分析[J]. 含能材料, 2000, 8(2): 67-71.
- ZHAO Feng-qi, SHAN Wen-gang, WANG Ying, et al. Quenched surface characteristics and flame structure of RDX-CMDB propellants containing catalyst[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2000, 8(2): 67-71.
- [29] 赵凤起, 李上文, 陈沛. 三种碳物质对RDX-CMDB推进剂燃烧性能的影响[J]. 固体火箭技术, 2000, 23(2): 39-42.
- ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen, CHEN Pei. Effects of C60 fullerence soot and carbon black on thermal decomposition of RDX-CMDB propellants[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2000, 23(2): 39-42.

Effect of FOX-7 on Combustion Performance of NC/TMETN Based Low-sensitive and Smokeless CMDB Propellant

ZHANG Chao¹, WANG Yin-hu², YANG Li-bo¹, LI Jun-qiang¹, HE Jun-wu¹, WANG Jiang-ning¹, CHEN Jun-bo¹

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China; 2. Beijing Institute of LongMarch Vehicle, Beijing 100076, China)

Abstract: The effects of mass fraction and particle size of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene(FOX-7), different composite combustion catalysts with lead, copper and carbon on the combustion performance of nitrocellulose (NC)/trimethylolthane reinitiate (TMETN) low-insensitive and smokeless composite modified double base(CMDB) propellant with screw extrusion process were investigated by means of strand burner method. The results shown that the burning rate of CMDB propellant is first rise and then descend with the addition of FOX-7. When the FOX-7 content is 25%, the burning rate of CMDB propellant rised from $5.87 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ to $14.90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ at 10 MPa, and when the content of FOX-7 increases from 25% to 30%, the burning rate decreased from $14.90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ to $12.78 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ at 10 MPa. The pressure exponent of burning rate between 6-16 MPa decrease from 0.97 to 0.60 as the mass fraction of FOX-7 in the formulation increased from 5 % to 30 %. When the FOX-7 be replaced by finer particles FOX-7 with the same mass, the burning rate decreased $1.16 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ at 10 MPa, while the pressure exponent of burning rate between 6-14 MPa increased. The burning rate of propellant with addition of β -Pb/ β -Cu/CB combustion catalyst increases from $14.90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ to $18.65 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ at 10 MPa, while the pressure exponent of burning rate between 6-16 MPa decrease from 0.63 to 0.35, which compared with the referenced formulation (no combustion catalyst).

Key words: composite modified double base(CMDB) propellant; burning rate; pressure exponent; 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene (FOX-7)

CLC number: TJ55;V512

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019120

(责编: 王艳秀)