

文章编号: 1006-9941(2015)01-0043-05

# 含咪唑类铅盐催化剂的 RDX-CMDB 推进剂燃烧性能

张超, 杨立波, 陈俊波, 袁志锋

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 研究了咪唑类含能铅盐(E-Pb)催化剂含量及与炭黑复配时对 RDX-CMDB 推进剂的燃速、压强指数及燃烧火焰结构等燃烧性能的影响。分析了含能催化剂和惰性催化剂影响 RDX-CMDB 推进剂燃烧行为的原因。结果表明, 含有含能催化剂的 RDX-CMDB 推进剂的燃烧性能优于含惰性催化剂的 RDX-CMDB 推进剂的燃烧性能。10 MPa 下的燃速由不含催化剂的推进剂的  $11.74 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  提高至含 E-Pb 的推进剂的  $25.36 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且随 E-Pb 含量的增加该推进剂的燃速增加。当含能铅盐与炭黑复配时催化效果更佳, 炭黑与含能铅盐质量比为 1.5 : 0.25 时, 在 4 ~ 17 MPa 较宽区间出现平台燃烧, 压强指数  $n < 0.25$ 。表明, 含能铅盐对推进剂的燃烧火焰结构、暗区厚度、燃面上的亮点数目等的影响有一定规律性。

**关键词:** 物理化学; 改性双基推进剂; 燃速; 压强指数; 含能催化剂

**中图分类号:** TJ55; O64

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.01.009

## 1 引言

复合改性双基推进剂(CMDB)具有能量高、特征信号低等优点,是导弹和火箭发动机装药常用的推进剂品种,在各国得到了大力开发与应用<sup>[1-2]</sup>。随着配方中大量 RDX 等硝胺类化合物的加入,使得该类推进剂的压强指数较大( $n > 0.7$ )<sup>[3]</sup>。为了解决硝胺改性双基推进剂燃速压强指数高的问题,科技工作者已开展了相关研究<sup>[4-11]</sup>,其基本途径是在推进剂配方中加入燃烧催化剂,但这些催化剂以惰性居多,活性较低,添加量大,对推进剂能量损失较大。为了克服惰性催化剂以损失能量为代价调节推进剂燃烧性能的缺点,用含能催化剂代替传统的惰性催化剂是近年来固体推进剂燃烧催化剂研究的热点之一<sup>[12-18]</sup>,含能燃烧催化剂不但有较高的催化活性,而且对推进剂的能量也有贡献,添加 3% 的含能燃烧催化剂取代惰性燃烧催化剂可以使推进剂的比冲提高 1 ~ 3s<sup>[19]</sup>。从文献报道来看,这些含能催化剂对提高改性双基推进剂燃速、降低区间压强指数有显著效果,但大都存在平台范围较窄的缺陷,而且一些性能优良的含能催化剂仅属于实验型研究,不具备型号应用条件,使高能 RDX-CMDB 推进剂适用范围受到限制。

收稿日期: 2013-08-26; 修回日期: 2014-02-22

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

基于拓宽高能 RDX-CMDB 推进剂燃烧平台范围的目的,本研究通过添加咪唑类含能有机铅盐(E-Pb)与炭黑(CB)复配催化体系对 RDX-CMDB 推进剂燃烧性能进行调节,取得较理想效果,该含能铅盐已成功应用于某型号用改性双基推进剂,本研究以期对调节高能 RDX-CMDB 推进剂燃烧性能有所参考。

## 2 实验部分

### 2.1 主要原材料及设备

主要原材料: 含能铅盐(E-Pb),咪唑类铅盐,由西安近代化学研究所合成,铅含量 48%,密度  $2.97 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,最大热分解温度  $246.51 \text{ }^\circ\text{C}$ ,撞击感度  $H_{50}$  为 49.0 cm,摩擦感度 0%,与吸收药及 RDX 相容。3 号硝化棉(12.0% N)、硝化甘油(NG)、2 号中定剂(C<sub>2</sub>)、黑索今(RDX)、铝粉(Al)、2,4-二羟基苯甲酸铅( $\beta$ -Pb)、炭黑(CB)、凡士林(V,医用)及其它功能助剂等均为工业品。

主要设备: 2 kg 吸收器(中国)、静态恒压燃速仪(中国)、火焰结构分析系统(西安近代化学研究所自研)。

### 2.2 推进剂配方组成

本研究所用推进剂配方见表 1。

### 2.3 燃速样品制备

推进剂样品采用吸收、驱水、放熟、压片切成药条的常规工艺制备,催化剂采用内加法添加,药料按 2 kg 配料。

表 1 推进剂配方

Table 1 Propellant formulation

sample	NC+ NG	C <sub>2</sub>	V	E-Pb	$\beta$ -Pb	CB	Al	RDX	others
1 <sup>#</sup>	55	1.5	0.5	0	0	0	3	35	4
2 <sup>#</sup>	55	1.5	0.5	0	1.5	0	3	35	1
3 <sup>#</sup>	55	1.5	0.5	1.5	0	0	3	35	1
4 <sup>#</sup>	55	1.5	0.5	2.5	0	0	3	35	1
5 <sup>#</sup>	55	1.5	0.5	1.5	0	0.15	3	35	1
6 <sup>#</sup>	55	1.5	0.5	1.5	0	0.25	3	35	1

## 2.4 燃速测定

按照 GJB-770B-2005 方法 706.1“燃速-靶线法”测试燃速。将已处理过的 5×5×150 的燃速药条侧面用聚乙烯醇溶液浸渍包覆 6 次并晾干, 后在充氮缓动式燃速仪中进行燃速测试。温度为 20 ℃, 压力范围为 4~17 MPa。

## 2.5 火焰结构照片

火焰结构照片采用单幅放大彩色摄影法, 把不包覆的尺寸为 1.5 mm×4.0 mm×25.0 mm 样品垂直装在点火架上, 然后把点火架放入四视窗燃烧室内, 充氮气使燃烧室内达到预定压力, 并形成自下而上的流动氮气气氛, 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  $\Phi 0.15$  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 实验结果与分析

### 3.1 铅盐催化剂及其含量对燃烧性能的影响

两种铅盐及其含量对 RDX-CMDB 推进剂燃烧性能的影响见表 2。燃速压力指数  $n$  根据燃速公式  $u=ap^n$  (式中  $u$  为燃速,  $p$  为压力) 线性回归求得。

从表 2 可以看出, 含能铅盐催化剂和惰性铅盐催化剂对 RDX-CMDB 推进剂燃烧性能均有一定影响, 较大

幅度提高了各压强区间燃速, 各压强区间的压强指数也有所降低, 低压下燃速的增幅大于高压下燃速的增幅, 这有利于压强指数的降低, 平台区间的拓宽。惰性铅盐催化剂可使推进剂 10 MPa 的燃速由  $11.74 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  提高至  $23.04 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 提高了 96.3%, 含能铅盐催化剂对 RDX-CMDB 推进剂的催化效果更好, 将推进剂 10 MPa 的燃速由  $11.74 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  提高至  $25.36 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 提高了 116.0%, 两种催化剂将 RDX-CMDB 推进剂 8~17 MPa 的压强指数降至 0.5 以下, 随着含能催化剂含量的增加, 燃速进一步提高, 平台进一步向低压移动, 其含量由 1.5% 增加为 2.5% 时, 10 MPa 的燃速提高  $1.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 6~17 MPa 下压强指数降至 0.3 以下。

含能铅盐比惰性铅盐改善 RDX-CMDB 推进剂燃烧性能效果更明显, 这可能与不同铅盐分子中的催化活性成分结构有关。一般认为, 在燃烧过程中铅盐分解生成的氧化铅在亚表面或表面区起催化作用来影响硝酸酯和 RDX 的分解历程<sup>[20]</sup>, 而含能铅盐催化剂分解生成活性物质 ( $\text{NO}/\text{NO}_2$ ) 能够进一步促进推进剂燃烧过程中  $\text{NO}_2 + \text{HCHO} \rightarrow \text{NO} + \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$  及  $\text{NO} + \text{CO} \rightarrow 1/2\text{N}_2 + \text{CO}_2$  等放热反应, 缩短分解时间, 加快反应速度, 惰性铅盐分解没有  $\text{NO}/\text{NO}_2$  活性物质生成, 仅在在亚表面或表面区起催化作用, 催化效果不如含能铅盐。

表 2 铅盐催化剂对推进剂燃烧性能的影响

Table 2 Effect of catalyst containing lead salt on the combustion properties of propellant

sample	$u/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$						pressure exponent				
	4 MPa	6 MPa	8 MPa	10 MPa	13 MPa	17 MPa	$n_{4-6}$	$n_{6-8}$	$n_{8-10}$	$n_{10-13}$	$n_{13-17}$
1 <sup>#</sup>	5.25	7.95	9.77	11.74	16.39	21.87	1.02	0.72	0.82	0.50	1.01
2 <sup>#</sup>	12.67	17.36	20.92	23.04	26.14	28.87	0.78	0.65	0.43	0.48	0.37
3 <sup>#</sup>	17.42	21.82	23.92	25.36	27.34	29.16	0.56	0.31	0.32	0.30	0.24
4 <sup>#</sup>	19.36	22.17	24.02	26.11	28.00	30.10	0.33	0.27	0.30	0.27	0.26

含能催化剂使推进剂的平台区间向低压区移动, 分析认为这可能与压力对催化剂的催化效率影响有

关, 由推进剂的燃烧理论知<sup>[21]</sup>, 随着压力的增大, 火焰向燃面传递的热增多, 压力越大, 火焰离燃烧面越近,

向燃烧面的传热越多,使得燃烧表面的燃速更快,这也同时削弱了催化剂在燃烧表面和亚表面的催化作用,导致催化效率降低。又由于在高压下,NC 和 NG 分解的气相产物不容易从表面上扩散,会部分溶入凝聚相中不仅加速 NC 和 NG 的分解,也对 RDX 的分解起到促进作用,这样会使 NC、NG 及 RDX 的分解峰向低压方向移动,因而低压下的燃速变化较高压明显。

### 3.2 铅盐与炭黑复配对推进剂燃烧性能影响

铅盐单独使用对推进剂燃烧性能调节有限,常将炭黑与铅盐混合使用,使其复合作用对燃烧性能产生影响。一般选择粒度小、比表面大的炭黑与铅盐复配提高燃速<sup>[22]</sup>。

表 3 铅盐与炭黑复配对推进剂燃烧性能的影响

Table 3 Effect of match of lead salts and carbon black on the combustion properties of propellant

sample	$u/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$						pressure exponent				
	4 MPa	6 MPa	8 MPa	10 MPa	13 MPa	17 MPa	$n_{4-6}$	$n_{6-8}$	$n_{8-10}$	$n_{10-13}$	$n_{13-17}$
3 <sup>#</sup>	17.42	21.82	23.92	25.36	27.34	29.16	0.56	0.31	0.32	0.30	0.24
5 <sup>#</sup>	23.16	24.97	25.34	26.87	28.79	30.45	0.18	0.05	0.26	0.26	0.21
6 <sup>#</sup>	24.38	25.54	26.13	27.39	29.18	30.76	0.11	0.07	0.21	0.24	0.20

### 3.3 火焰结构

为了对比分析含能铅盐催化剂和惰性铅盐催化剂对 RDX-CMDB 推进剂燃烧行为的影响,拍摄了 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和 5<sup>#</sup>样品在 5 MPa 下燃烧的火焰结构照片,结果如图 1 所示。

从图 1 可清楚地看出,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>配方具有典型的平台双基推进剂火焰结构,由预热区、亚表面及表面区、暗区和火焰区组成,各区之间界限不明显,属于理想的预混火焰。火焰区中明亮发光颗粒是铝粉燃烧形成的。比较图 1a 和图 1b、图 1c 火焰结构发现,与 1<sup>#</sup>空白配方相比,催化剂的加入使推进剂的火焰结构发生了变化。2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>含铅盐催化剂推进剂燃烧火焰向上呈喷射状,铝粉燃烧形成的发光亮点多且呈喷溅状,燃烧更加剧烈。添加含能铅盐催化剂的 3<sup>#</sup>配方火焰比添加惰性铅盐催化剂的 2<sup>#</sup>配方火焰明亮,说明含能铅盐催化剂对 RDX-CDMB 推进剂催化效果更明显。

比较 3<sup>#</sup>与 5<sup>#</sup>配方火焰结构照片可看出,两者火焰结构也有较明显差别。含能铅盐与炭黑复配后(5<sup>#</sup>)加入配方,推进剂的燃烧火焰更加明亮,火束也更大,燃烧表面上的红热碳层更厚,催化反应区,有发亮的颗粒状物质存在。这表明含能铅盐与炭黑复配后,炭黑对铅盐催化活性具有增强作用,能进一步提高含能铅盐的催化效果。

本研究选择了氮吸附比表面为  $145 \times 10^3 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  的炭黑与含能铅盐复配(5<sup>#</sup>,6<sup>#</sup>),试验结果见表 3。表 3 表明,随着炭黑含量的增加推进剂的燃速增加,压强指数降低,燃烧平台向低压区移动。含能铅盐与炭黑质量比为 1.5 : 0.25(6<sup>#</sup>)时,4 MPa 下的燃速由  $17.42 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  升高至  $24.38 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,4 ~ 17 MPa 下压强指数  $n < 0.25$ ,在较宽区间出现平台燃烧。

按照过渡状态催化理论的观点<sup>[23]</sup>,认为催化剂之所以可以加速化学反应,是由于催化剂表面的活性中心容易与反应物发生化学吸附,生成不稳定的过渡态化合物,炭黑有较大的比表面,有助于铅盐催化剂表面活性中心吸附反应物,加速反应。

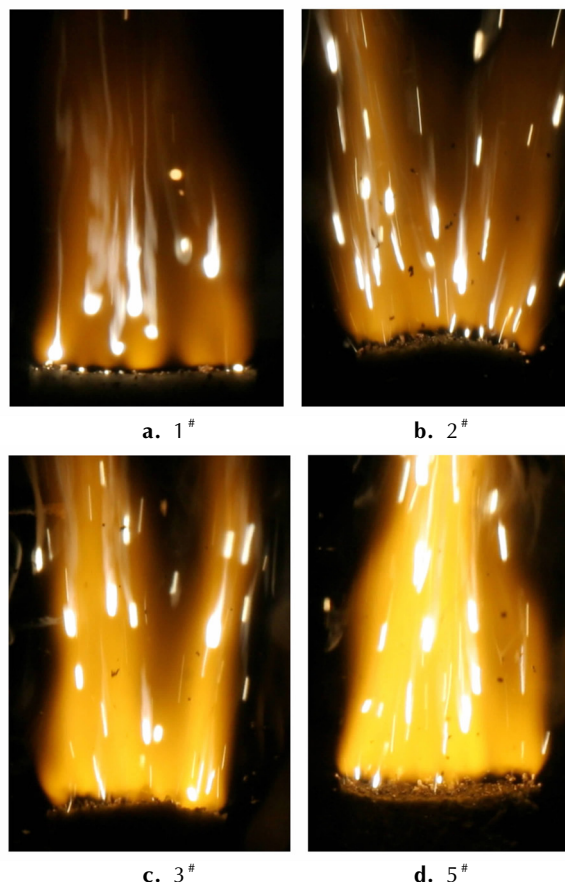


图 1 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和 5<sup>#</sup>推进剂在 5 MPa 下的火焰

Fig.1 Flame images at 5 MPa for propellants 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> and 5<sup>#</sup>

## 4 结 论

(1) 含能铅盐催化剂(E-Pb)和惰性铅盐催化剂( $\beta$ -Pb)均能较大幅度提高RDX-CMDB推进剂燃速, 惰性铅盐催化剂可使推进剂10 MPa的燃速由 $11.74 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高至 $23.04 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 提高了96.3%, 含能铅盐催化剂对RDX-CMDB推进剂的催化效果更好, 将推进剂10 MPa的燃速由 $11.74 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高至 $25.36 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 提高了116.0%, 含能铅盐催化剂含量由1.5%增加为2.5%时, 6~17 MPa下压强指数由 $n > 0.5$ 降至 $n \leq 0.3$ 。

(2) 含能铅盐(E-Pb)单独使用对推进剂燃烧性能调节有限, 其与炭黑复配调节RDX-CMDB推进剂的燃速压强指数效果更好, 其与炭黑质量比为1.5:0.25时, 4~17 MPa较宽区间出现平台燃烧, 压强指数 $n < 0.25$ 。

### 参考文献:

- [1] 刘所恩, 赵效民, 赵美玲, 等. 螺压硝酸胺改性双基推进剂对机械刺激的安全性分析[J]. 含能材料, 2013, 18(6): 818-820  
LIU Suo-en, ZHAO Xiao-min, ZHAO Mei-ling, et al. Safety performance of modified nitramine double base propellant by screw extrusion subject to mechanical stimulus[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 18(6): 818-820.
- [2] 付小龙, 李吉祯, 刘小刚, 等. 铅盐对高能无烟改性双基推进剂燃烧性能的影响[J]. 含能材料, 2007, 15(4): 329-331.  
FU Xiao-long, LI Ji-zhen, LIU Xiao-gang, et al. Influences of lead salts on combustion characteristics of high energy smokeless modified double-base propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(4): 329-331.
- [3] 李上文, 孟燮铨, 张蕊娥, 等. 硝酸无烟改性双基推进剂燃烧性能调节及控制规律的初探[J]. 推进技术, 1995(3): 63-69.  
LI Shang-wen, MENG Xie-quan, ZHANG Rui-e, et al. A research on combustion properties adjustment and control for smokeless nitramine propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1995(3): 63-69.
- [4] 蔚红建, 王琼, 陈春林. 偶氮四唑胍对含催化剂的RDX-CMDB推进剂燃烧性能的影响研究[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(1): 93-98  
WEI Hong-jian, WANG Qiong, CHEN Chun-lin. Study on the influences of guanidinium azotetrazolate on combustion characteristics of RDX-CMDB propellants containing catalysts[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2012, 35(1): 93-98.
- [5] 吴雄岗, 宋桂贤, 严启龙. Mg/Al合金对CMDB推进剂燃烧性能的影响[J]. 推进技术, 2012, 33(4): 597-602.  
WU Xiong-gang, SONG Gui-xian, YAN Qi-long et al. Investigation on the combustion behavior of CMDB propellant with Mg / Al alloy[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(4): 597-602.
- [6] 谢明召, 衡淑云, 刘子如. RDX-CMDB推进剂的催化热分解Ⅱ. 分解气体产物和催化作用机理[J]. 含能材料, 2008, 16(6): 716-719.  
XIE Ming-zhao, HENG Shu-yun, LIU Zi-zu. Decomposition of RDX-CMDB propellants Ⅱ. Gaseous products of decomposition and catalytic mechanism[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(6): 716-720.
- [7] 孟燮铨, 张蕊娥, 李上文, RDX-CMDB推进剂燃烧性能调节[J]. 推进技术, 1998(3): 64-69.  
MENG Xie-quan, ZHANG Rui-e, LI Shang-wen. A research on combustion properties adjustment for RDX-CMDB propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1998(3): 64-69.
- [8] 赵凤起, 李上文. RDX-CMDB推进剂中组合催化剂的研究[J]. 推进技术, 1992(1): 57-62.  
ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen. Effect of composite catalysts on combustion properties of RDX-CMDB propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1992(1): 57-62.
- [9] Curtis D D. Control of processibility by particle size in high energy solid propellant: USP 4693764[P]. 1987.
- [10] Raman K V, Singha H. Ballistic modification of RDX-CMDB propellants[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1988, 13: 149-151.
- [11] Kubota N, Sakamoto S. Combustion mechanism of HMX[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1989, 14: 6-11.
- [12] 汪营磊, 赵凤起, 仪建华. 固体火箭推进剂用燃烧催化剂研究新进展[J]. 火炸药学报, 2012, 35(5): 1-5.  
WANG Ying-lei, ZHAO Feng-qi, YI Jian-hua. New progress of study on combustion catalysts used for solid Rocket propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(5): 1-5.
- [13] 张国涛, 周遵宁, 张同来, 等. 固体推进剂含能催化剂研究进展[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(3): 319-323.  
ZHANG Guo-tao, ZHOU Zun-ning, ZHANG Tong-lai, et al. Advances on energetic catalysts for solid propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2011, 34(3): 319-323.
- [14] 赵凤起, 高红旭, 罗阳, 等. 含能复合催化剂对微烟推进剂燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2007, Vol. 30, No. 2: 1-4.  
ZHAO Feng-qi, GAO Hong-xu, LUO Yang, et al. Effect of novel energetic composite catalysts on combustion properties of minimum smoke propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(2): 1-4.
- [15] 陈沛, 赵凤起, 罗阳, 等. 2-羟基和4-羟基-3, 5-二硝基吡啶铅盐的热行为、分解机理、非等温分解反应动力学及其在推进剂中的应用[J]. 化学学报, 2004, 62(13): 1197-1204.  
CHEN Pei, ZHAO Feng-qi, LUO Yang, et al. Thermal behavior, decomposition mechanism and non-iso thermal decomposition reaction kinetics of lead salts of 2-hydroxy-3, 5-dinitropyridine and 4-hydroxy-3, 5-dinitropyridine and their application in propellant[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2004, 62(13): 1197-1204.
- [16] 赵凤起, 陈沛, 罗阳, 等. 含能羟基吡啶铜盐用作RDX-CMDB推进剂的燃烧催化剂[J]. 火炸药学报, 2003, 26(3): 1-5.  
ZHAO Feng-qi, CHEN Pei, LUO Yang, et al. Energetic lead or copper Salts of hydroxypyridines as combustion catalysts of RDX-CMDB propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(3): 1-5.
- [17] 刘所恩, 杜宝玉, 张健, 等. 新型含能催化剂在低特征信号推进剂中的应用研究[J]. 含能材料, 2001, 9(3): 130-132.  
LIU Suo-en, DU Bao-yu, ZHANG Jian, et al. Applied studies of new energetic catalysts in the screw extruded energetic propellant with low signature[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2001, 9(3): 130-312.

- [18] Klapotke Thomas M, Rienacker Claudia M. Drop hammer test investigations on some inorganic and organic azides[J]. *Propellants Explosive Pyrotechnics*, 2001, 26(1): 43-47.
- [19] 刘建勋, 李凤生, 姜炜, 等. 纳米 NiO/CNTs 和 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CNTs 对 AP 及 HTPB/AP 推进剂热分解的影响[J]. *固体火箭技术*, 2007, 30(3): 243-247  
LIU Jian-xun, LI Feng-sheng, JIANG Wei, et al. Effects of nano NiO /CNTs and Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CNTs on thermal decomposition of AP and HTPB / AP propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2007, 30(3): 243-247
- [20] Kenneth K Kuo. Fundamentals of Solid-propellant Combustion [M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1984: 190.
- [21] 赵凤起, 高红旭, 胡荣祖. 4-羟基-3, 5-二硝基吡啶铅盐在固体推进剂燃烧中的催化作用[J]. *含能材料*, 2006, 14(2): 86-88.  
ZHAO Feng-qi, GAO Hong-xu, HU Rong-zu. Combustion energy determination of lead salt of 4-Hydroxy-3, 5-dinitropyridine and its catalysis for RDX-CMDB propellant combustion [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(2): 86-88.
- [22] 杨雪芹, 王斌, 刘所恩. 炭黑对硝酸胺改性双基推进剂燃烧性能的影响[J]. *含能材料*, 2004(增刊): 408-410.  
YANG Xue-qin, WANG Bin, LIU Suo-en. Effect of carbon black on burning properties of modified nitramine double base propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004(Suppl.): 408-410.
- [23] 王伯义, 冯增国, 杨荣杰. 火药燃烧理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.  
WANG Bo-xi, FENG Geng-guo, YANG Rong-jie. Combustion Theory of Powder [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Publishing Company, 1997.

## Combustion Performances of RDX-CMDB Propellant with Imidazoles Lead Salt Catalyst

ZHANG Chao, YANG Li-bo, CHEN Jun-bo, YUAN Zhi-feng

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The effects of energetic imidazoles lead salt (E-Pb) content and E-Pb- carbon black composite on the combustion performances (burning rate, pressure exponent, combustion flame structure, etc.) for RDX- CMDB propellant were studied. The reasons affecting the combustion behaviors of RDX-CMDB propellant by the energetic catalyst and inert catalyst were analyzed. Results show that the combustion performances of the RDX-CMDB propellant with energetic catalyst are better than those of the RDX CMDB propellant with inert catalyst. The burning rate at 10 MPa increases from 11.74 mm · s<sup>-1</sup> for the propellant without catalyst to 25.36 mm · s<sup>-1</sup> for the propellant with E-Pb catalyst and the burning rate of the propellant increases with increasing the content of energetic catalyst. When the energetic lead salt and carbon black are matched, the catalytic effect of the propellant is better. When the mass ratio of carbon black and energetic lead salt is 1.5 : 0.25, a burning platform appears over the wide pressure ranging from 4 to 17 MPa and the pressure exponent  $n$  is less than 0.25. The effects of energetic lead salt on the combustion flame structure, thickness of dark space, number of bright spots on the combustion surface, etc. for propellant have certain regularities.

**Key words:** physical chemistry; modified double base propellant; burning rate; pressure exponent; energetic catalyst

**CLC number:** TJ55; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.01.009