

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.02.001

复合有机酸铅对 CMDB 推进剂热分解及燃烧性能的影响^{*}

郑启龙 李吉祯 张亚俊 刘晓军 唐秋凡 樊学忠
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为研究新型燃烧催化剂复合有机酸铅 (Mu-Pb) 对改性双基 (CMDB) 推进剂的热分解和燃烧性能的影响,通过靶线法分析了添加 Mu-Pb 的 HMX/Al-CMDB 推进剂的热分解和燃烧特性;同时,采用差示量热扫描仪 (DSC) 进一步研究了 Mu-Pb 对 CMDB 推进剂及硝化棉 (NC)/硝化甘油 (NG)、奥克托今 (HMX) 热分解行为的影响。结果表明,一定压力区间内,随着 Mu-Pb 含量的增加,CMDB 推进剂燃速有所升高,燃速压强指数 n 有降低趋势。当 Mu-Pb 质量分数由 2% 增加至 4% 时,10 MPa 下 CMDB 推进剂的燃速提高了 15%,且 10 ~ 22 MPa 时的 n 由 0.67 降低至 0.40。Mu-Pb 对 CMDB 推进剂热分解的两个阶段均有催化作用,因而可以提高推进剂的中、低压燃速,且其对第 2 阶段 HMX 的热分解促进作用更为显著,可以使 HMX 的热分解表观活化能 E_a 降低近 70%,而对第 1 阶段 NC/NG 的 E_a 影响相对较小。

[关键词] 改性双基 (CMDB) 推进剂;复合有机酸铅;燃烧催化剂;燃烧性能;热分解

[分类号] TQ560;V51

Influence of Compound Organic Acid Lead on Thermal Decomposition and Combustion Performances of CMDB Propellant

ZHENG Qilong, LI Jizhen, ZHANG Yajun, LIU Xiaojun, TANG Qiufan, FAN Xuezhong
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] Thermal decomposition and combustion performances of CMDB propellant containing the new kind of combustion catalyst, compound organic acid lead (Mu-Pb), were investigated by strand burner method in order to adjust its combustion catalytic effect. Effects of Mu-Pb on thermal decompositions of CMDB propellants, NC/NG and HMX were examined by differential scanning calorimetry (DSC), respectively. Results show that the burning rate of CMDB propellants increases with the increment of Mu-Pb within a certain pressure range, but burning rate-pressure exponents n decreases. With mass fraction of Mu-Pb increasing from 2% to 4%, burning rate of CMDB propellants increases by 15% at 10 MPa, while the n decreases from 0.67 to 0.40 under 10-22 MPa. In addition, Mu-Pb can accelerate both of the two stages of thermal decomposition of CMDB propellant leading to increment of burning rate of CMDB propellant at medium or low pressure. It is more significant to promote the thermal decomposition of HMX in the second stage. With addition of Mu-Pb, the apparent activation energy E_a of HMX decreases significantly by almost 70%, while Mu-Pb has relatively little effect on E_a of NC/NG in the first stage.

[KEYWORDS] CMDB propellant; Mu-Pb; combustion catalyst; combustion performance; thermal decomposition

引言

改性双基 (CMDB) 推进剂具有特征信号低的显

著优点,可以有效地降低激光、红外制导信号的干扰,是现役战术武器非常重要的固体推进剂品种之一^[1-3]。为满足火箭大推力和隐身突防等需求,作为动力源的 CMDB 推进剂需要在提高能量水平的同

^{*} 收稿日期:2020-05-11
基金项目:国防科技工业基础产品创新计划火炸药科研专项
第一作者:郑启龙(1989 -),男,博士,主要从事固体推进剂研究。E-mail:Zhenglong2577@163.com
通信作者:樊学忠(1962 -),男,研究员,主要从事固体推进剂研究。E-mail:xuezhongfan@126.com

时能有效地调控燃速^[4]。通过添加新型高能组分^[5-6]、微纳米材料^[7]、功能材料^[8]等手段,可以在一定程度上改变 CMDB 推进剂的燃烧性能,但通过改变燃烧催化剂的种类和含量来调节该类推进剂的燃烧性能仍是目前最为行之有效的技术途径。其中,铅盐催化剂是固体推进剂中应用广泛、研究也较多的一类重要燃烧催化剂^[9]。付小龙等^[10]研究了几类铅盐对 CMDB 推进剂热分解和燃烧性能的影响;研究表明,铅盐可以促进推进剂的热分解,从而改善燃烧性能,且该类推进剂的燃速与 DSC 特征量线性相关。刘晓军等^[11]复配不同种类的燃烧催化剂,通过改变降速剂含量,研究其对奥克托今(HMX)-CMDB 推进剂燃烧性能的影响;结果表明,可以通过改变铅-铜-碳催化剂的组合提高或降低推进剂的燃速。为了更好地调节 CMDB 推进剂的燃烧性能,需要在已有催化剂配方经验的基础上不断开发新型催化剂,并对其燃烧催化效果加以深入研究。

为研究新型燃烧催化剂复合有机酸铅(Mu-Pb)对高能HMX/Al-CMDB 推进剂的热分解和燃烧性能的影响,分析了不同含量 Mu-Pb 对该类推进剂燃烧性能的影响,表征了添加 Mu-Pb 的推进剂的热分解性能,并进一步研究了 Mu-Pb 对该推进剂主含能组分硝化棉(NC)/硝化甘油(NG)和 HMX 热分解动力学过程的影响,希望为 CMDB 高能推进剂燃烧性能的有效调控提供有益参考。

1 实验部分

1.1 原材料

NC,工业纯,四川北方硝化棉股份有限公司; NG,工业纯,西安近代化学研究所; HMX,5 类,工业纯,甘肃白银银光化学工业集团有限公司; 铝粉,粒度 12~14 μm,工业纯,鞍钢实业微细铝粉有限公司; Mu-Pb,为不同链长复合脂肪酸铅的混合物,常熟理工学院,结构式如图 1 所示;其他功能助剂均为市场销售的工业品。

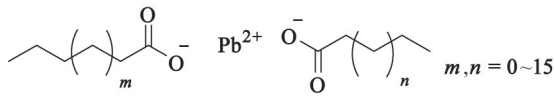


图 1 Mu-Pb 的分子结构式

Fig. 1 Molecular structural formula of Mu-Pb

1.2 推进剂试样制备

选择较为成熟的高能 HMX/Al 基 CMDB 推进

剂为研究对象,基础配方(记作D0)见表 1。为探索 Mu-Pb 对该推进剂燃烧性能的影响规律,分别将占配方质量 2%、3% 和 4% 的 Mu-Pb 添加至推进剂中,用以取代基础配方中的 NC,其他组分保持不变,所获得推进剂依次记作 D1、D2 和 D3。制备推进剂试样采用淤浆浇铸工艺,按照所设计的配方将各组分在行星式捏合机中充分混合,然后将药浆在真空状态下浇铸到方坯模具内,静置除泡后移至水浴烘箱中固化。固化结束后,制备燃速测试用药条,待测。

表 1 HMX/Al-CMDB 推进剂的基础配方
(质量分数)

| Tab. 1 Basic formulation of HMX/Al-CMDB propellant (mass fraction) | | | | | % |
|--|-------|-------|-----|-----|---|
| NG | NC | HMX | Al | 其他 | |
| 30~32 | 24~28 | 25~30 | 3~5 | 5~8 | |

1.3 性能测试

1.3.1 推进剂试样的燃速

采用 GJB770B—2005 方法 706. 1 靶线法测试制备的推进剂试样的燃速。所用仪器为西安近代化学研究所自制的充氮气缓动式筒形调压式燃速仪。将已处理的药条试样侧面用聚乙烯醇溶液浸渍包覆 6 次并晾干,进行燃速测试。试验温度 20℃,压强范围 10~22 MPa。在氮气气氛中测定燃速,每个压力下平行测定 5 根药条的燃速,计算平均值,并采用 Vieille 方程 $u = u_1 p^n$,通过最小二乘法计算燃速压强指数 n 。

1.3.2 热分解及动力学参数

采用日本岛津 DSC-60 型差示扫描量热仪在常压下进行测试。

推进剂热分解实验中,样品为粉末状,控制升温速率为 10 K/min,测定温度范围为 50~450℃,测试环境为 50 mL/min 的氮气气氛。

含能组分与 Mu-Pb 的混合物的热分解动力学实验中,NC/NG/HMX 与 Mu-Pb 的质量比均为 10:1,升温速率分别为 2.5、5.0、10.0、20.0 K/min,其余条件同上。

2 结果与讨论

2.1 Mu-Pb 对 CMDB 推进剂燃烧性能的影响

配方 D0~D3 的燃速 u 与压强 p 的关系见图 2。不同压强区间的燃速压强指数 n 见图 3。

由图 2 可知,随压强的增加,基础配方 D0 的燃

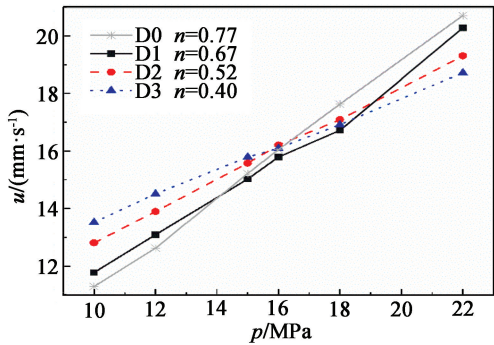


图2 不同 Mu-Pb 含量的推进剂燃速与压强的关系

Fig.2 Relationship between burning rate and pressure of propellants with different Mu-Pb contents

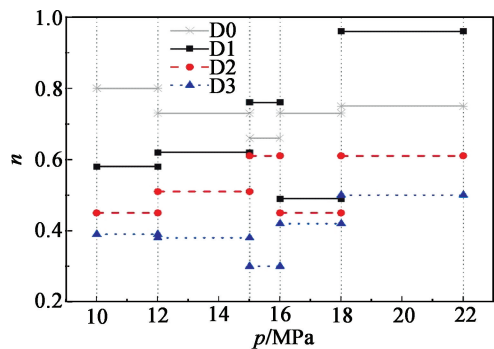


图3 不同压强区间推进剂的燃速压强指数

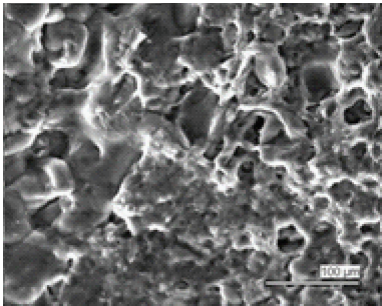
Fig.3 Burning rate-pressure exponent of propellants in different pressure ranges

速近似线性增大。随着 Mu-Pb 的加入,配方 D1~D3 的燃速曲线变化均可分为 3 个阶段:在 10 ~ 15 MPa 区间内,配方 D3 的燃速最高,配方 D2 次之,配方 D1 最低;10 MPa 时,D3 ~ D1 的燃速分别为 13.54、12.83 mm/s 和 11.80 mm/s,均高于 D0 的燃速;在 16 ~ 18 MPa 区间内,D3 ~ D1 的燃速差异不大;压力大于 19 MPa 后,配方 D1 的燃速迅速增大,高于配方 D2 和配方 D3,但低于配方 D0,这与 10 ~ 15 MPa 区间燃速大小顺序相反。在整个压力区间 10 ~ 22 MPa 内,添加 4% (质量分数) Mu-Pb 的配方 D3 低压燃速高,高压燃速低,在全压力段上燃速变化相对较小,因而燃速压强指数 n 最小,为 0.4。

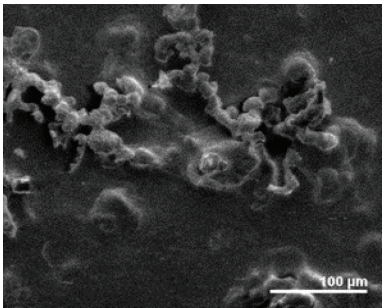
图3 中,在不同压强区间,4 种配方的燃速压强指数 n 变化趋势亦不相同。基础配方 D0 在不同压强区间的 n 均在 0.65 ~ 0.80 之间。在 10 ~ 16 MPa 内,随着压强增大,配方 D1 的 n 增大;但在 16 ~ 18 MPa 内出现最小值,在各压力区间波动较大。配方 D2 的 n 变化趋势与 D1 相似,但各区间 n 均低于 D1。在 10 ~ 15 MPa 区间内,配方 D3 的 n 逐渐下降;15 ~ 16 MPa 内, n 达到极小值 0.3,而后开始增大,在全压力段上波动相对较小。

在相对较低的压力区间内,随着 Mu-Pb 含量的增加,CMDB 推进剂燃速提高,这说明 Mu-Pb 可以在该压力范围内对推进剂的燃烧进行有效催化。随着工作压力的增大, Mu-Pb 催化燃烧的效果逐渐降低,推进剂燃速提升幅度降低。当工作压力大于 19 MPa 以后, Mu-Pb 含量越大,CMDB 推进剂燃速反而越低。另一方面来说,正因如此,增加 Mu-Pb 的添加量有利于降低推进剂的压强指数。

此外,通过扫描电镜观察了推进剂 D3 在 6 MPa 下的熄火表面形貌,并将其与未添加催化剂的空白配方 D0 进行对比,如图 4 所示。与推进剂 D0 相比,添加 4% (质量分数) Mu-Pb 的配方 D3 燃烧熄火表面有明显的蜂窝状结构,应为有机链生成的碳骨架,既可以增加热量传导,同时能够负载所生成的活性铅来催化燃烧反应,从而提高了推进剂的燃速。



(a)推进剂 D3



(b)推进剂 D0

图4 推进剂 D3 与推进剂 D0 的熄火表面对比

Fig.4 Comparison of quenched surfaces of Propellants D3 and Propellants D0

2.2 Mu-Pb 对 CMDB 推进剂热分解特性的影响

固体推进剂的燃烧实质上是燃烧表面及临近燃烧表面推进剂组分的受热快速分解和反应的过程。推进剂的燃烧性能与热分解是密切相关的。因此,研究了 Mu-Pb 对 CMDB 热分解的影响。空白配方 D0 和推进剂 D3 在常压下的 DSC 曲线如图 5 所示。

由图5可以看出,在测试范围内,空白配方 D0 和推进剂 D3 的分解温度范围约为 170 ~ 280 ℃,均有两个明显的分解阶段。对于空白配方 D0,第1

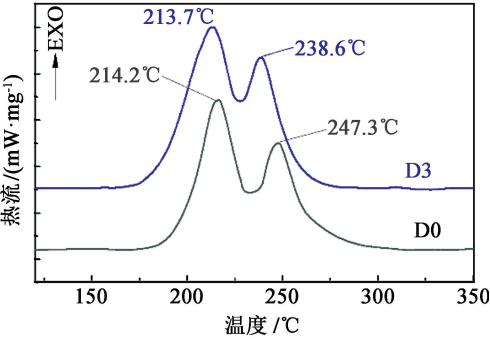


图 5 推进剂的 DSC 曲线

Fig. 5 DSC curves of the propellants

阶段应主要为双基黏合剂体系（即 NC/NG）的热分解过程，峰温为 214.2℃；第 2 阶段分解峰温为 247.3℃，推测可能对应的是硝胺炸药 HMX 的热分解过程。与之相比，推进剂 D3 的 DSC 曲线峰型结构基本一致，但两个阶段分解峰温均提前，这说明 Mu-Pb 可以加速 CMDB 推进剂的热分解，进而可以提高该推进剂的燃速，这与低压力区间下推进剂的燃速增大的结果是一致的。此外，Mu-Pb 的加入对 CMDB 第 1 阶段双基体系的分解峰温影响较小，仅提前了 0.5℃；而第 2 阶段分解峰温则提前了 8.7℃，分解提前幅度很大。由此可见，Mu-Pb 主要的催化对象并非 CMDB 推进剂中的 NC/NG 基体组分。

2.3 Mu-Pb 对 NC/NG 和 HMX 热分解动力学的影响

为探索 Mu-Pb 对 CMDB 推进剂热分解特性的影响机制，进一步研究了 Mu-Pb 对 CMDB 配方中主要含能组分热分解动力学过程的影响。图 6 给出了在不同升温速率下 Mu-Pb 混合后热分解的系列 DSC 曲线；图 7 为 NC/NG 自身及其与 Mu-Pb 混合后热分解的系列 DSC 曲线；图 8 为 HMX 及 HMX/Mu-Pb 两种试样的系列 DSC 曲线。

由图 6 可以看出，不同升温速率下，Mu-Pb 均有两个熔融吸热峰，分别在 100.0℃ 和 110.0℃ 附近，

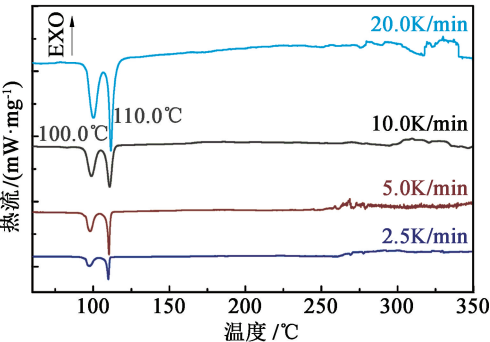
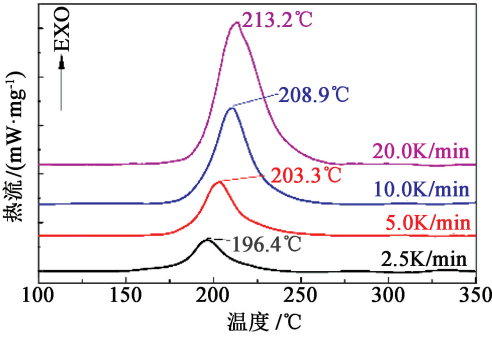
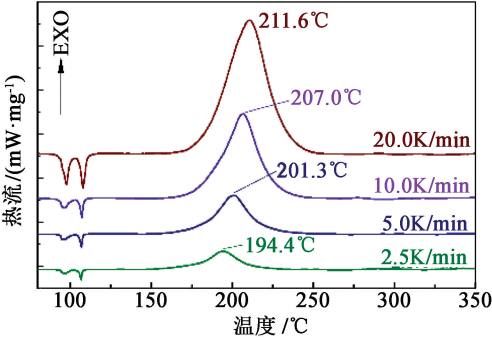


图 6 不同升温速率下 Mu-Pb 的 DSC 曲线

Fig. 6 DSC curves of Mu-Pb at different heating rates



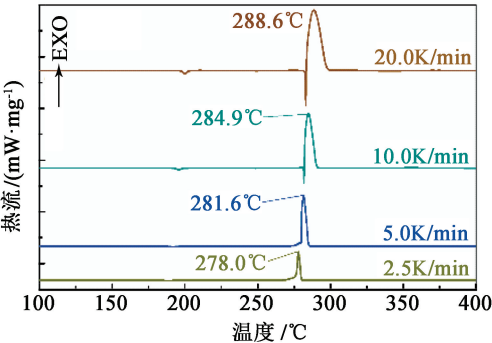
(a) NC/NG



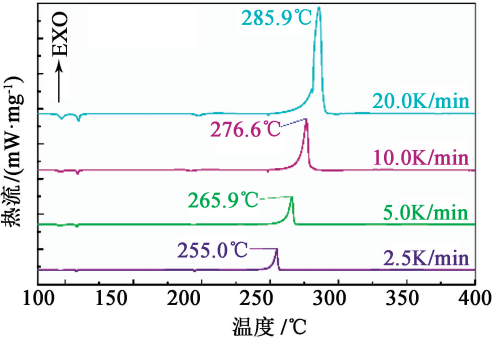
(b) NC/NG/Mu-Pb

图 7 不同升温速率下 NC/NG 及 NC/NG/Mu-Pb 的 DSC 曲线

Fig. 7 DSC curves of NC/NG and NC/NG/Mu-Pb at different heating rates



(a) HMX



(b) HMX/Mu-Pb

图 8 不同升温速率下 HMX 及 HMX/Mu-Pb 的 DSC 曲线

Fig. 8 DSC curves of HMX and HMX/Mu-Pb at different heating rates

其自身在低于 350.0 ℃ 时没有明显的分解放热峰。图 7 中,NC/NG 在不同升温速率下的热分解峰温在 196.0 ~ 214.0 ℃ 范围内,与图 5 中 CMDB 推进剂第 1 个分解阶段较为吻合。而在图 8 中,HMX 在不同升温速率下的热分解峰温在 278.0 ~ 289.0 ℃ 范围内,显然高于 CMDB 第 2 个分解阶段温度区间。这是由于 CMDB 第 1 阶段的热分解产物及热作用影响,推进剂内 HMX 提前加速热分解造成的。

此外,对比图 7(a)和图 7(b)可以看出,在不同升温速率下,Mu-Pb 的加入使得 NC/NG 分解峰温都有所提前,且均提前了约 2 ℃。图 8(a)和图 8(b)对比可以看出,Mu-Pb 同样使得 HMX 分解峰温降低,在 2.5 K/min 升温速率下分解峰温由 278.0 ℃ 提前至 255.0 ℃,降低幅度达 23 ℃,这说明 Mu-Pb 对 HMX 的热分解影响更为显著。

通过 Kissinger 方程和 Crane 方程对不同升温速率得到的 DSC 数据进行处理,可获得 NC/NG、HMX 及它们与 Mu-Pb 混合后各体系的热分解动力学参数^[12-14]。热分解反应的 n 级动力学模型及 Kissinger 方程、Crane 方程分别对应于式(1) ~ 式(3)。

$$\frac{d\alpha}{dt} = Ae^{-\frac{E_a}{R_0T}}(1-\alpha)^n;$$

(1)

$$\ln \frac{\beta}{T_p^2} = \ln \frac{AR_0}{E_a} - \frac{E_a}{R_0T_p};$$

(2)

$$\frac{d\ln \beta}{d \frac{1}{T_p}} = - \left(\frac{E_a}{nR_0} + 2T_p \right).$$

(3)

式中: α 为反应程度; A 为指前因子; E_a 为表观活化能,kJ/mol; R_0 为摩尔气体常数, $R_0 = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; n 为反应级数; β 为升温速率,K/s; T_p 为峰顶温度,K。

以图7(a)中NC/NG试样为例,根据Kissinger方程和 Crane 方程计算体系反应动力学参数所需的具体数据如表 3 所示。

表 3 NC/NG 试样的 DSC 数据及初步拟合

Tab.3 DSC data and preliminary fitting of NC/NG samples

| $\beta/(\text{K} \cdot \text{min}^{-1})$ | T_p/K | $\ln \beta$ | T_p^{-1}/K^{-1} | $\ln(\beta T_p^{-2})$ |
|--|----------------|-------------|--------------------------|-----------------------|
| 2.5 | 469.55 | -3.18 | 2.130×10^{-3} | -15.482 |
| 5.0 | 476.45 | -2.48 | 2.099×10^{-3} | -14.818 |
| 10.0 | 482.05 | -1.79 | 2.074×10^{-3} | -14.148 |
| 20.0 | 486.35 | -1.10 | 2.056×10^{-3} | -13.472 |

通过线性拟合可分别获得二者斜率,并结合式(2)和式(3),即可分别求得热分解反应体系的 E_a 、 A 和 n 等动力学参数以及拟合方程,4 个试样分别计算的结果如表 4 所示。

由表 4 知,通过 DSC 参数处理获得的方程拟合效果较好,相关系数 r 均在 0.99 以上。CMDB 主要含能组分 NC/NG、HMX 及它们与催化剂 Mu-Pb 混合物的反应级数均为一级。NC/NG 与 Mu-Pb 混合后,该双基黏合剂体系热分解表观活化能 E_a 由 224.18 kJ/mol 降低至 217.72 kJ/mol,仅降低了 2.8%;而对于 HMX 而言,Mu-Pb 的加入使 E_a 降低了 342.25 kJ/mol,降幅接近 70.0%。由此可知,Mu-Pb 对 NC/NG 热分解催化作用较小,但其可以明显改变 HMX 的热分解历程,大幅地降低热分解表观活化能。

3 结论

1)随着Mu-Pb含量的增加,CMDB推进剂中、低压强下的燃速不断提高,较高压强下的燃速则随之下降。因而,随着Mu-Pb添加量的增加,该推进剂 10 ~ 22 MPa 下的燃速压强指数降低。

2) CMDB推进剂热分解主要分为两个阶段, Mu-Pb的加入使得CMDB推进剂两个分解峰均提

表 4 4 种试样的 DSC 数据及热分解动力学参数

Tab.4 DSC data and thermal decomposition kinetic parameters of four samples

| 样品 | $\ln(\beta T_p^{-2}) \sim T_p^{-1}$ 拟合方程 | $\ln \beta \sim T_p^{-1}$ 拟合方程 | $E_a/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ | $\lg A$ | n |
|-------------|--|---|---|---------|------|
| NC/NG | $y = -26\,964x + 41.87;$ $r = 0.993\,1$ | $y = -27\,919x + 56.21;$ $r = 0.993\,6$ | 224.18 | 22.6 | 1.00 |
| NC/NG/Mu-Pb | $y = -26\,187x + 40.47;$ $r = 0.994\,5$ | $y = -27\,139x + 54.80;$ $r = 0.994\,8$ | 217.72 | 22.0 | 1.00 |
| HMX | $y = -60\,114x + 93.26;$ $r = 0.999\,7$ | $y = -61\,227x + 107.91;$ $r = 0.999\,8$ | 499.79 | 45.3 | 1.00 |
| HMX/Mu-Pb | $y = -18\,649x + 19.56;$ $r = 0.998\,3$ | $y = -19\,735x + 34.16;$ $r = 0.998\,5$ | 157.54 | 12.8 | 1.00 |

前,且对第 2 阶段分解峰提前幅度更为显著。

3) Mu-Pb 可以使不同升温速率下 NC/NG 的热分解提前,但对其热分解表观活化能降低幅度较小; Mu-Pb 的加入显著降低了 HMX 的分解峰温,改变了 HMX 的热分解历程,使其热分解表观活化能大幅降低近 70%。因此, Mu-Pb 主要通过催化 HMX 的热分解过程来提升 CMDB 推进剂的燃速。

参 考 文 献

- [1] PANDE S M, SADAVARTE V S, BHOWMIK D, et al. Ballistic modification of nitramine propellants with special reference to NG-PE-PCP-based high energy propellants [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2012, 37(6): 707-712.
- [2] JIN B, PENG R F, ZHAO F Q, et al. Combustion effects of nitrofulleropyrrolidine on RDX-CMDB propellants [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(16): 874-880.
- [3] 张亚俊, 李吉祯, 唐秋凡, 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): 605-610.
ZHANG Y J, LI J Z, TANG Q F, 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): 605-610.
- [4] 张正中, 曹芳洁, 刘晓军. 降低固体推进剂燃速研究进展 [J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2014, 12(3): 25-28.
ZHANG Z Z, CAO F J, LIU X J, et al. Research progress in decreasing burning rate of solid propellants [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2014, 12(3): 25-28.
- [5] 仪建华, 赵凤起, 王伯周, 等. 含高氮化合物 BTATz 的 CMDB 推进剂特性 [J]. *推进技术*, 2012, 33(4): 609-615.
YI J H, ZHAO F Q, WANG B Z, et al. Properties of CMDB propellant containing high-nitrogen compound BTATz [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(4): 609-615.
- [6] WANG Q, LIU X G, JI Y P, et al. Properties of RDX-CMDB propellants containing guanidinium azotetrazolate (GZT) [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2012, 20(3): 292-296.
王琼, 刘小刚, 姬月萍, 等. 含偶氮四唑胍的改性双基推进剂性能 [J]. *含能材料*, 2012, 20(3): 292-296.
- [7] 袁志锋, 杨燕京, 赵凤起, 等. 不同纳米材料含量对 RDX-CMDB 推进剂燃烧性能的影响 [J]. *火炸药学报*, 2019, 42(6): 566-570, 582.
YUAN Z F, YANG Y J, ZHAO F Q, et al. Effects of different content of nanomaterials on the combustion performance of RDX-CMDB propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42(6): 566-570, 582.
- [8] 张正中, 邓重清, 李吉祯, 等. 碳纳米管对 AP/CMDB 推进剂燃烧性能和力学性能的影响 [J]. *含能材料*, 2018, 26(9): 744-748.
ZHANG Z Z, DENG C Q, LI J Z, et al. Effects of carbon nanotubes (CNTs) on the combustion and mechanical properties of AP/CMDB propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2018, 26(9): 744-748.
- [9] 赵凤起, 仪建华, 安亭, 等. 固体推进剂燃烧催化剂 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 4.
ZHAO F Q, YI J H, AN T, et al. Combustion catalysts for solid propellant [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 4.
- [10] 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 X L, LI J Z, LIU X G, et al. Influences of lead salts on combustion characteristics of high energy smokeless modified double-base propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2007, 15(4): 329-331.
- [11] 刘晓军, 张正中, 张亚俊, 等. 燃烧催化剂及降速剂对 CMDB 推进剂燃烧性能的影响 [J]. *化工新型材料*, 2017, 45(7): 117-119.
LIU X J, ZHANG Z Z, ZHANG Y J, et al. Influence of burning catalyst and deceleration agent on combustion performance of HMX-CMDB propellant [J]. *New Chemical Materials*, 2017, 45(7): 117-119.
- [12] KISSINGER H E. Reaction kinetics in differential thermal analysis [J]. *Analytical Biochemistry*, 1957, 29(11): 1702-1706.
- [13] CRANE L W, DYNES P J, KAELEBLE D H. Analysis of curing kinetics in polymer composites [J]. *Journal of Polymer Science: Polymer Letters Edition*, 1973, 11(8): 533-540.
- [14] WANG W M, WEI T T, GAO H X, et al. Effects of nano PbZrO₃ on the decompositions of AP, RDX, HMX and the combustion of (NG/NC) propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2017, 40(6): 29-35.
王为民, 魏涛涛, 高红旭, 等. 纳米 PbZrO₃ 对 AP、RDX、HMX 热分解和 NG/NC 双基推进剂燃烧性能的影响 [J]. *火炸药学报*, 2017, 40(6): 29-35.