

文章编号:1006-9941(2020)05-0470-05

## 铅、铜盐催化剂对 DNTF 炸药热分解及烤燃响应特性的影响

蒋秋黎,罗一鸣,杨斐,巨荣辉,张蒙蒙,王玮,李秉擘

(西安近代化学研究所,陕西 西安 710065)

**摘要:** 为提高 3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)炸药热安全性,采用高压差示扫描量热仪(PDSC)、小型烤燃实验考察了水杨酸铅(PbSa)、水杨酸铜(CuSa)、2,4-二羟基苯甲酸铜( $\beta$ -Cu)、邻苯二甲酸铜( $\text{Cu}(\text{PA})_2$ )、氧化铜(CuO)等催化剂对 DNTF 烤燃响应特性以及 1 MPa 下热分解性能的影响。结果表明,CuSa、 $\beta$ -Cu、 $\text{Cu}(\text{PA})_2$  等有机铜盐催化剂可提高 DNTF 热分解速率,使其在 1 MPa 下分解峰温降低 13.6 °C 以上,PbSa 使 DNTF 分解峰温升高了 3.1 °C,同时二次分解剧烈程度更明显,CuO 对 DNTF 热分解无影响;CuSa 可使无约束条件的 DNTF 在 1 °C·min<sup>-1</sup> 下的烤燃响应温度由 236.6 °C 降低为 182.3 °C,响应剧烈程度由爆炸改善为燃烧;少量 CuSa 可使强约束条件下的 DNTF 基混合炸药装药在 1 °C·min<sup>-1</sup> 下的烤燃响应温度降低 2.4 °C,响应剧烈程度由爆炸降低为燃烧,说明选择合适的有机铜盐催化剂可有效改善 DNTF 基炸药装药烤燃响应特性。

**关键词:** DNTF; 催化剂; 热分解; 烤燃实验

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019262

### 1 引言

3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)是一种具有广阔应用前景的新型高能量密度材料,具有爆轰能量高、氧平衡好、熔点低、感度适中等优点,可替代 TNT 作为熔铸炸药载体,大幅提高混合炸药能量<sup>[1-2]</sup>。然而 DNTF 热安全性较差,受热刺激时热分解速率较快,无约束的 DNTF 粉末在 1 °C·min<sup>-1</sup> 的升温速率下也易发生燃烧转爆轰现象,严重影响了其在混合炸药中推广应用<sup>[3]</sup>。针对 DNTF 热安全性,国内外科技工作者开展了大量研究,如李鹤群等<sup>[4]</sup>利用 DSC、Kissinger 方法表征、计算了 DNTF 热分解反应动力学参数和热稳定性,结果表明,DNTF 的热分解峰温和热爆炸临界温度都比 TNT 小,热稳定性较差;冯晓军等<sup>[5]</sup>研究了 DNTF 基炸药燃烧到爆轰转变(DDT)过程的有效调控技术,认为点火药量、DDT 管壁厚约束、成型方式均无法改变 DNTF 基混合炸药 DDT 反应剧烈程度,结果为爆轰;高杰等<sup>[6]</sup>研究了杂质对 DNTF 炸药热稳定性的影响,认为合成 DNTF 过程中的少量杂质双呋喃并氧化

呋喃氧杂环庚三烯化合物(BFFO)、三呋喃并氧杂环庚三烯化合物(TFO)可提高 DNTF 的热安定性;蒋秋黎等<sup>[7]</sup>研究了壳体密封程度对 DNTF 快速烤燃响应特性的影响,认为克南试验中壳体开孔率小于 34% DNTF 易发生燃烧转爆轰。含能材料热分解改善研究,推进剂中常见途径为加入催化剂以调节推进剂热分解速率<sup>[8-9]</sup>。郑亭亭等<sup>[10]</sup>研究了铜铬类催化剂对 HTPE 低易损推进剂燃烧性能的影响,认为添加质量分数 0.5% 的 CC01 和 CC02 可显著提高端羟基聚醚(HTPE)低易损推进剂在 3~15 MPa 下的燃速,使推进剂在 7 MPa 下的燃速分别提高 34.1% 和 43.4%;陆洪林等<sup>[11]</sup>采用铅铜催化剂改善 DHT 热分解性能,认为铅铜复合催化剂可降低 DHT 分解温度并增加分解热;仇玉成等<sup>[12]</sup>研究了铅盐、铜盐及其碳黑复合物对叠氮/硝酸推进剂燃烧性能的影响,认为加入 1% 的 GT 铜盐催化剂可将硝酸/叠氮推进剂燃速提高 1.5~2.4 mm·s<sup>-1</sup>,压强指数由 0.54 降至 0.47。

综上所述研究主要集中于 DNTF 热分解反应规律揭示以及环境因素影响、金属盐催化剂对火炸药热分解速率的影响等方面,而有关催化剂对炸药烤燃响应特性的影响研究尚未见报道<sup>[13]</sup>。由于烤燃响应特性是评估分析炸药热安全性的重要方法,据此,本文采用高压差示扫描量热仪(PDSC)及小型烤燃实验,研究了铅、

收稿日期:2019-10-10;修回日期:2019-11-28

网络出版日期:2020-03-03

作者简介:蒋秋黎(1984-),男,副研究员,主要从事混合炸药配方与工艺研究。e-mail:jiangqiuli1013@163.com

引用本文:蒋秋黎,罗一鸣,杨斐,等. 铅、铜盐催化剂对 DNTF 炸药热分解及烤燃响应特性的影响[J]. 含能材料,2020,28(5):470-474.

JIANG Qiu-li, LUO Yi-ming, YANG Fei, et al. Influence of Lead and Copper Salt Catalysts on the Thermal Decomposition and Cook-off Responses of DNTF[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(5):470-474.

铜盐催化剂对 DNTF 热分解及烤燃响应特性的影响, 以期改善 DNTF 烤燃响应特性提供参考。

## 2 实验部分

### 2.1 原材料

DNTF: 纯度大于 98.5%, 西安近代化学研究所; 水杨酸铅(PbSa)、水杨酸铜(CuSa)、2,4-二羟基苯甲酸铜( $\beta$ -Cu)、邻苯二甲酸铜( $\text{Cu}(\text{PA})_2$ )、氧化铜(CuO)均为化学纯试剂, 营口天元化工研究所股份有限公司。

### 2.2 实验仪器及方法

耐驰 PDSC 分析仪: 1~2 mg 试样, 静态氮气气氛 1 MPa, 升温速率为  $15\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。小型烤燃实验: 自制小型烤燃仪(见图 1)由加热炉、控温热电偶、试样、K 型测温热电偶组成, 试样悬挂于加热炉中心, 加热炉加盖密封隔热。实验中采用  $1.0\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  的加热速率对试样进行加热, 直至发生剧烈变化为止。

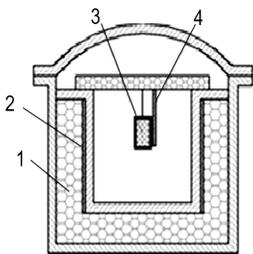


图 1 小型烤燃仪示意图

1—加热炉, 2—控温热电偶, 3—试样, 4—测温热电偶

Fig. 1 Schematic diagram of cook-off test setting

1—heating furnace, 2—thermocouple of temperature control, 3—specimen, 4—thermocouple of temperate measurement

## 3 结果与讨论

### 3.1 催化剂对 DNTF 热分解特性的影响

常用铅、铜盐催化剂包括有机铅盐、有机铜盐、无机铜盐等, 不同催化剂所含官能团不同, 其催化机理也不尽相同。本课题选择 PbSa、CuSa、 $\beta$ -Cu、 $\text{Cu}(\text{PA})_2$ 、氧化铜 CuO 作为催化剂, 表征了 DNTF/催化剂在 1 MPa 下的热分解过程, 拟从分解历程角度分析不同催化剂对 DNTF 热分解特性的影响。

图 2 为 DNTF/催化剂的 PDSC 曲线, 从图 2 可知, DNTF 在  $110\text{ }^\circ\text{C}$  熔化, 主分解峰温为  $276.7\text{ }^\circ\text{C}$ , 分解较剧烈, 放热量较大。文献[15]显示, 压力增大至 2 MPa 以上时, DNTF 在  $302\text{ }^\circ\text{C}$  左右会出现较弱的二次分解, 加入催化剂后熔点不变, 而峰形、峰温均发生

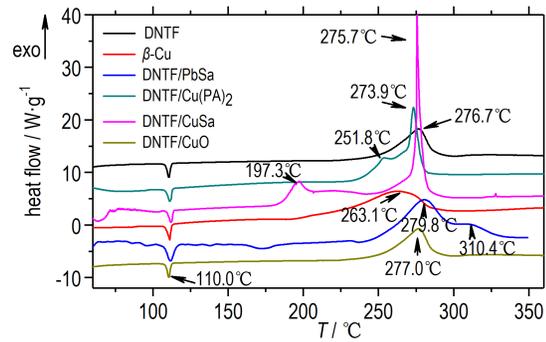


图 2 DNTF/催化剂 PDSC 曲线

Fig. 2 PDSC curves of DNTF/catalysts

了较大变化。DNTF 中加入有机铅盐 PbSa 后, 第一阶段分解为主分解, 与 DNTF 相比峰温升高了  $3.1\text{ }^\circ\text{C}$ , 二次分解峰较明显, 峰温为  $310.4\text{ }^\circ\text{C}$ , 说明 PbSa 适当提高了其分解活化能, 促进了其二次分解, 提高了二次分解反应速率。有机铜盐催化剂的加入同样改变了 DNTF 分解历程: DNTF/ $\beta$ -Cu 出现了一个宽大的分解峰, 峰温降低了  $13.6\text{ }^\circ\text{C}$ , 说明  $\beta$ -Cu 加速了 DNTF 分解, 降低了 DNTF 分解活化能; DNTF/ $\text{Cu}(\text{PA})_2$  第一阶段峰形较小, 比 DNTF 降低了  $24.9\text{ }^\circ\text{C}$ , 主分解峰与 DNTF 相似, 但峰型更尖锐, 说明  $\text{Cu}(\text{PA})_2$  促进了 DNTF 分解, 放出的热量随后加剧了 DNTF 分解; DNTF/CuSa 存在两个温差较大的放热峰, 第一阶段峰形较小, 比 DNTF 峰温降低了  $78.4\text{ }^\circ\text{C}$ , 主分解峰峰温与 DNTF 相同, 但峰型更加尖锐, 说明 CuSa 显著降低了 DNTF 分解活化能, 但该分解热不足以引发 DNTF 剧烈分解, 当到达 DNTF 主要分解温度后, 分解开始加剧。加入无机铜盐 CuO 后 DNTF 分解峰形及峰温几乎无变化, 说明 CuO 没有改变 DNTF 分解规律。

分析认为, 与 HMX、CL-20 不同, DNTF 熔点较低, 在加热条件下熔融态 DNTF 更易与催化剂充分接触, 提高反应活性。有机铜盐类催化剂对 DNTF 分解具有良好的催化作用, 铅盐对 DNTF 的二次分解有促进作用, 氧化铜对 DNTF 分解无影响, 这可能是由于有机铜盐分解产生的铜盐以及碳化物, 均具备较高的催化活性, 可降低 DNTF 分解活化能, 使凝聚相分解更易进行, 在铜盐以及碳化物共同作用下加速了 DNTF 分解。

### 3.2 催化剂对 DNTF 烤燃响应特性的影响

为研究催化剂对 DNTF 烤燃响应特性的影响, 选择有机铅盐 PbSa, 有机铜盐  $\beta$ -Cu、 $\text{Cu}(\text{PA})_2$ 、CuSa, 无机铜盐 CuO 作为催化剂, 采用小型烤燃实验测试了无约束条件下的 DNTF/催化剂烤燃响应特性。试样制备如图 3a 所示, 将 DNTF/催化剂粉末按照质量比 1:1

共称量 50 g 干混均匀, 装入内径 40 mm、内部高 60 mm、壁厚 3 mm 的敞口玻璃烧杯中, 将测温热电偶插入药粉中心, 测试炸药内部温度变化, 如图 3a 所示。通过该实验可获得炸药点火温度, 从现场残留物可分析炸药反应剧烈程度。

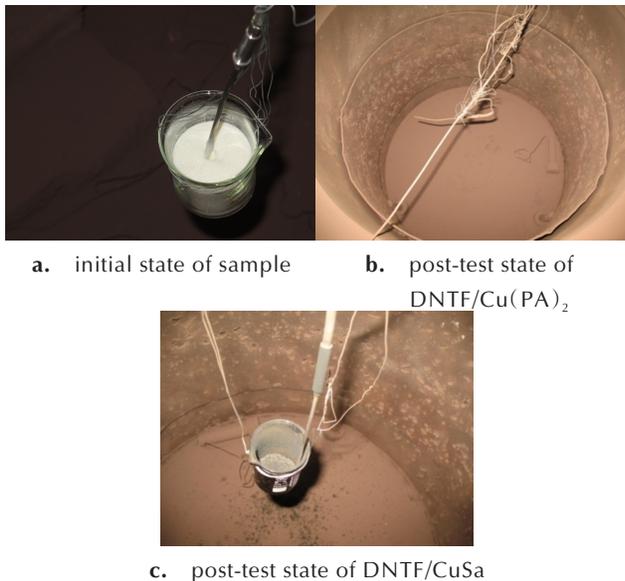


图 3 DNTF/催化剂烤燃实验前后

Fig. 3 The sample comparison between pre- and post-cook-off experiment of DNTF/catalysts

表 1 为 DNTF/催化剂烤燃响应温度及剧烈程度, 由表 1 可知, DNTF 中加入 PbSa、 $\beta$ -Cu、 $\text{Cu}(\text{PA})_2$  后, 均降低了 DNTF 反应温度, 但没有改变烤燃响应剧烈程度, 均发生了爆炸反应, 其典型实验结果如图 3b 所示, 现场无试样及烧杯残留物, 热电偶变形损坏。加入 CuSa 后, 反应温度降低了 54 °C, 发生了燃烧反应, 其结果如图 3c 所示, 玻璃烧杯及热电偶完好, 试样燃烧完全后成黑灰状, 主要为反应完全后残留的碳系物; 加入 CuO 后烤燃响应温度及剧烈程度均无变化。

结合 DSC 分析可知, 加入有机铅盐、无机铜盐、除 CuSa 外的有机铜盐后, 分解温度与 DNTF 分解温度相

表 1 DNTF/催化剂烤燃响应结果

Table 1 Responses of cook-off test for DNTF/catalysts

materials	temperature of reaction / °C	responses of cook-off test
DNTF	236.6	explosive reaction
DNTF/PbSa	227.2	explosive reaction
DNTF/ $\beta$ -Cu	231.5	explosive reaction
DNTF/ $\text{Cu}(\text{PA})_2$	226.7	explosive reaction
DNTF/CuSa	182.3	burning reaction
DNTF/CuO	235.4	explosive reaction

近, 放出热量迅速引发了 DNTF 剧烈分解, 因此无法改变 DNTF 烤燃响应剧烈程度, 表现为爆炸反应; 加入 CuSa 后引发的低温分解温度与 DNTF 分解温度相差较大, 且放出热量较少, 使 DNTF 点火后温和燃烧, 没有转为爆炸, 说明 CuSa 可使 DNTF 在无约束条件下的烤燃响应剧烈程度由爆炸改善为燃烧反应。

### 3.3 催化剂对 DNTF 基混合炸药烤燃响应特性的影响

为进一步研究催化剂对 DNTF 基混合炸药烤燃响应特性的影响, 采用小型烤燃实验对带钢壳 DNTF 基混合炸药装药进行加热, 直至试样发生反应, 通过此实验可获得带壳体装药烤燃响应温度, 从壳体形变分析炸药反应的剧烈程度, 为装药应用提供参考。

结合上述 PDSC 及无约束烤燃响应结果, 选择对 DNTF 热分解特性影响显著的  $\text{Cu}(\text{PA})_2$ 、CuSa 催化剂与不含催化剂炸药作对比, 进行烤燃实验。炸药配方组成如表 2 所示, 在不显著降低混合炸药能量的前提下, 按照 DNTF: 催化剂=9:1 在混合炸药中加入  $\text{Cu}(\text{PA})_2$ 、CuSa。试样按照表 2 中 1#、2# 和 3# 试样配比将混合炸药加热熔化混合均匀后, 浇铸至内径 30 mm、内部高 60 mm、壁厚 2 mm 的钢壳中, 两端用带螺纹端盖紧密固定, 内部不留间隙, 测温热电偶紧靠壳体外壁, 如图 4a 所示。

表 2 烤燃实验用混合炸药配比表

Table 2 Component ratios of DNTF-based explosives in the cook-off test

sample	component ratios
1#	DNTF/HMX/Al = 30/60/10
2#	DNTF/ $\text{Cu}(\text{PA})_2$ /HMX/Al = 27/3/60/10
3#	DNTF/CuSa/HMX/Al = 27/3/60/10

图 4 和表 3 分别为带壳体混合炸药装药烤燃实验前后壳体照片及结果。由表 3 及图 4 可知, 三者反应温度变化不大, 加入少量催化剂后反应温度最多降低了 2.4 °C, 但响应剧烈程度有显著区别: 不加催化剂的试样 1# 以及加有  $\text{Cu}(\text{PA})_2$  的试样 2# 均发生了爆炸反应, 反应后壳体碎裂, 说明少量  $\text{Cu}(\text{PA})_2$  没有改善混合炸药响应剧烈程度; 加有 CuSa 的试样 3# 反应后壳体完整, 炸药发生了燃烧反应, 说明少量 CuSa 可使 DNTF 基混合炸药装药烤燃响应剧烈程度由爆炸降低为燃烧, 有效改善了 DNTF 基混合炸药热安全性。这是由于有机铜盐催化剂对 DNTF 分解具有良好的催化作用, 而  $\text{Cu}(\text{PA})_2$  的第一分解温度与 DNTF 分解温度相

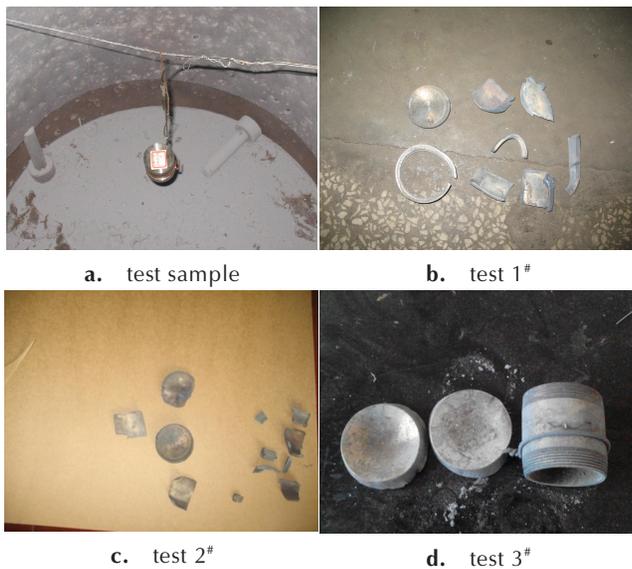


图4 DNTF基混合炸药烤燃实验前后壳体照片对比  
 Fig. 4 Comparison of casing fragments of DNTF-based explosives before and after cook-off test

表3 混合炸药烤燃实验结果

Table 3 Experimental results of cook-off test for DNTF-based explosives

sample	self-ignition temperature/°C	responses of cook-off test
1#	185.6	explosive reaction
2#	184.4	explosive reaction
3#	183.2	burning reaction

差不多,反应放出的热量迅速引发了DNTF剧烈分解,产生了大量气体产物,导致强约束下的混合炸药装药在热与压力共同作用下发生爆炸;加入CuSa后引发的低温分解温度与DNTF分解温度相差较大,且分解缓和,放出的少量气体产物足以膨胀冲开壳体,但不至于使强约束下的混合炸药装药由燃烧转爆轰。

#### 4 结论

(1) 有机铅盐PbSa使DNTF分解峰温升高了3.1 °C,提高了分解反应活化能,同时提高了其二次分解反应速率;有机铜盐类催化剂加快了DNTF热分解,降低了DNTF热分解活化能,对DNTF热分解有正催化作用,其中CuSa使DNTF峰温降低了78.4 °C,并且不会引发第二阶段的剧烈分解;无机铜盐CuO对DNTF热分解无影响。

(2) PbSa、β-Cu、Cu(PA)<sub>2</sub>、CuSa均降低了无约束条件下的DNTF烤燃响应温度,其中CuSa使DNTF烤燃响应温度由236.6 °C降低为182.3 °C,响应剧烈程

度由爆炸降低为燃烧。

(3) 强约束条件下的DNTF基混合炸药配方中加入3% CuSa,可使烤燃响应温度由185.6 °C降低为183.2 °C,响应剧烈程度由爆炸降低为燃烧。

#### 参考文献:

- [1] David Price, Jacob Morris. Synthesis of New Energetic Melt-Pour Candidates[C]// Insensitive munitions and energetic materials technology symposium BAE Systems .HSAAP, Holston: 2009.
- [2] 王亲会. 熔铸混合炸药载体评述[J]. 火炸药学报, 2011, 34(5): 25-28.  
Wang Qin-hui. Overview of carrier explosive for melt-cast composite Explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(5): 25-28.
- [3] 邹政平, 赵凤起, 张明, 等. DNTF应用技术研究进展[J]. 爆破器材, 2019, 48(4): 11-16.  
ZOU Zheng-ping, ZHAO Feng-qi, ZHANG Ming, et al. Research progress of 3, 4 - dinitrofurazanfuroxan performances and its applications [J]. *Explosive Materials*, 2019, 48(4): 11-16.
- [4] 李鹤群, 安崇伟, 杜梦远, 等. 基于Kissinger方法的3,4-双(4-硝基呋咱-3-基)氧化呋咱的热分解反应动力学参数和热稳定性研究[J]. 火炸药学报, 2016, 39(3): 58-65.  
Li He-qun, An Chong-wei, Du Meng-yuan, et al. Study on kinetic parameters of thermal decomposition reaction and thermal stability of 3, 4-bis(3-nitrofurazan-4-yl)furoxan based on kissinger method[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39(3): 58-65.
- [5] 冯晓军, 田轩, 赵娟, 等. DNTF基炸药燃烧转爆轰影响因素实验研究[J]. 含能材料, 2018, 26(3): 255-259.  
FENG Xiao-jun, TIAN Xuan, ZHAO Juan, et al. Experiment study on the influence factors of the deflagration to detonation transition for DNTF-based explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(3): 255-259.
- [6] 高杰, 王浩, 刘瑞鹏, 等. 杂质对DNTF炸药热稳定性的影响研究[J]. 火工品, 2015(6): 37-39.  
GAO Jie, WANG Hao, LIU Rui-peng, et al. Influence of Impurities on the Thermal Stability of DNTF [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2015(6): 37-39
- [7] 蒋秋黎, 罗一鸣, 王玮, 等. 密封条件对DNTF炸药快速烤燃响应特性的影响[C]//第十二届全国爆炸力学学术会议, 桐乡, 2018.  
JIANG Qiu-li, LUO Yi-ming, Wang Wei, et al. Effect of sealing conditions on fast cook-off response properties of DNTF [C]// The 12<sup>th</sup> Chinese Seminar of Explosion Mechanics. Tongxiang, 2018.
- [8] 汪营磊, 赵凤起, 姬月萍, 等. 1,8-二羟基蒽醌铅/铜盐的合成及其燃烧催化作用[J]. 含能材料, 2016, 24(5): 515-518.  
WANG Ying-lei, ZHAO Feng-qi, Ji Yue-ping, et al. Synthesis and combustion catalytic activity of 1, 8-dihydroxy-anthraquinone lead/copper [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(5): 515-518.
- [9] 李鑫, 葛震, 李强, 等. 几种常用燃速催化剂对GAP基ETPE热分解的影响[J]. 含能材料, 2016, 24(11): 1102-1107.  
LI Xin, GE Zhen, LI Qiang, et al. Effect of burning rate catalysts on the thermal decomposition properties of GAP-based

- ETPE energetic thermoplastic elastomer[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(11): 1102-1107.
- [10] 郑亭亭, 顾静艳, 李苗苗, 等. 铜铬类催化剂对HTPE低易损推进剂燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2017, 40(2): 94-100. ZHENG Ting-ting, GU Jing-yan, LI Miao-miao, et al. Effect of copper-chromium catalysts on the combustion properties of low vulnerability htpc propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2017, 40(2): 94-100.
- [11] 陆洪林, 巨荣辉, 樊学忠, 等. 铅铜催化剂对DHT热分解性能的影响[J]. 火炸药学报, 2014, 37(4): 60-63. LU Hong-lin, JU Rong-hui, FAN-Xue-zhong, et al. Influences of lead/copper catalysts on the thermal decomposition characteristics of DHT [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2014, 37(4): 60-63.
- [12] 仇玉成, 吴祝骏, 黄洪勇. 铅盐、铜盐及其碳黑复合物对叠氮/硝胺推进剂燃烧性能的影响[J]. 上海航天, 2011, 28(5): 68-72. ZHANG Yu-cheng, WU Zhu-jun, HUANG Hong-yong. Effect of lead citrate, nantokite and their carbon black composite on combustion performance of nitrine/nitramine propellant [J]. *Aerospace Shanghai*, 2011, 28(5): 68-72.
- [13] A.I.Kazakov, D.V.Dashko, A.V.Nabatova, et al. Thermochemical and energy characteristics of DNTF and DNFF [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2018, Vol. 54 (2): 147-157.
- [14] 张超, 马亮, 赵凤起, 等. 含能材料燃烧转爆轰研究进展[J]. 含能材料, 2015, 23(10): 1028-1036. ZHANG Chao, MA Liang, ZHAO Feng-qi, et al. Review on deflagration-to-detonation transition of energetic materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(10): 1028-1036.
- [15] 任晓宁, 王江宁, 阴翠梅, 等. 新型高密度材料DNTF的热分解特性[J]. 火炸药学报, 2006, 29(2): 33-36. REN Xiao-ning, WANG Jiang-ning, YIN Cui-mei, et al. Thermal decomposition characteristics of a novel high energy density material DNTF [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(2): 33-36.

## Influence of Lead and Copper Salt Catalysts on the Thermal Decomposition and Cook-off Responses of DNTF

JIANG Qiu-li, LUO Yi-ming, YANG Fei, JU Rong-hui, ZHANG Meng-meng, WANG Wei, LI Bing-bo

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

**Abstract:** To improve its thermal safety, the effects of lead and copper salt catalysts, including CuSa, PbSa,  $\beta$ -Cu, Cu(PA)<sub>2</sub>, and CuO, on thermal decomposition and cook-off responses of DNTF were studied through PDSC and small scale cook-off experiments. Experiment results show that the thermal decomposition and cook-off reaction level can be adjusted by different analysts. To be specific, the organic copper salts, i.e., CuSa,  $\beta$ -Cu and Cu(PA)<sub>2</sub>, increase the rate of thermal decomposition of DNTF while reduce the decomposition temperature of DNTF. PbSa increases the decomposition temperature of DNTF by 3.1 °C and promotes its second decomposition; CuO has no effect on the thermal decomposition of DNTF. CuSa decreases the response temperature of cook-off test at heating rate of 1 °C·min<sup>-1</sup> for unrestrained DNTF from 236.6 °C to 182.3 °C while for high constraint by 2.4 °C, and changes the reaction levels of both unrestrained and high constrained from explosion to burning. This implies that the cook-off responses of DNTF-based explosive could be decreased by organic copper salts, such as CuSa.

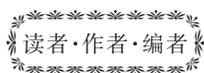
**Key words:** DNTF; catalyst; thermal decomposition; cook-off experiment

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2019262

(责编:姜梅)



读者·作者·编者

## 更正

本刊2020年第4期《基于SPH-FEM耦合合法切缝药包爆破机理数值模拟》一文的修回日期为2019-02-15。特此更正。

《含能材料》编辑部