

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.06.005

# 废旧 HTPB 固体推进剂转化制备乳化炸药的配方设计\*

韩明浩<sup>①</sup> 刘 威<sup>①</sup> 张联社<sup>②</sup> 董辰华<sup>②</sup> 王 浩<sup>③</sup> 沈文龙<sup>②</sup>

①中北大学环境与安全工程学院(山西太原,030051)

②中国融通资源开发集团有限公司(北京,100000)

③辽宁庆阳特种化工有限公司(辽宁辽阳,111001)

**[摘 要]** 针对废旧固体推进剂绿色、安全、高效处理的问题,设计了废旧 HTPB 固体推进剂转化制备乳化炸药的基础配方,以实现资源化再利用的目的。假定化学式和撰写爆炸反应方程式,建立目标函数,根据工业炸药的一般性能确定约束条件,规划求解后得到转化制备的乳化炸药的最佳配方,并对不同固体推进剂添加量下转化制备的乳化炸药的爆热、爆速、爆温、爆容进行了理论计算。结果表明:当固体推进剂质量分数为 24.62%、乳化基质质量分数为 75.38%时,转化制备的乳化炸药的综合性能最佳,理论爆热为 3 351.935 kJ/kg,爆速为 5 182.02 m/s,爆温为 2 728.81 K,爆容为 919.59 L/kg。为废旧固体推进剂的资源化再利用提供了理论参考。

**[关键词]** 废旧固体推进剂;配方设计;乳化炸药;资源化再利用

**[分类号]** TQ560.9; X789

## Formula Design of Emulsion Explosive Prepared from Waste HTPB Solid Propellant

HAN Minghao<sup>①</sup>, LIU Wei<sup>①</sup>, ZHANG Lianshe<sup>②</sup>, DONG Chenhua<sup>②</sup>, WANG Hao<sup>③</sup>, SHEN Wenlong<sup>②</sup>

①School of Environment and Safety Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

②China Rongtong Resources Development Group Co., Ltd. (Beijing, 100000)

③Qingyang Chemical Industry Co., Ltd. (Liaoning Liaoyang, 111001)

**[ABSTRACT]** A basic formula for preparing converted emulsion explosives by waste solid propellants has been designed to achieve the goal of resource utilization of waste solid propellants. The objective function was established by calculating the assumed chemical formula and writing the explosion reaction equation. The constraint conditions were determined based on the general performance of industrial explosives. After planning and solving, the optimal formula for converted emulsion explosives was obtained. And theoretical calculations were conducted on the detonation heat, detonation velocity, detonation temperature, and detonation volume of converted emulsion explosives under different solid propellant additions. The results show that, when the mass fraction of solid propellant is 24.62% and the mass fraction of emulsion matrix is 75.38%, the comprehensive performance of converted emulsion explosive is the best. The theoretical detonation heat is 3 351.935 kJ/kg, the detonation velocity is 5 182.02 m/s, the detonation temperature is 2 728.81 K, and the detonation volume is 919.59 L/kg. It provides a theoretical reference for the resource reuse of waste solid propellants.

**[KEYWORDS]** wasted solid propellant; formula design; emulsion explosive; resource reuse

## 0 引言

端羟基聚丁二烯(HTPB)固体推进剂具有优异的能量性能、力学性能和弹道性能,广泛应用于军

事、航天等领域<sup>[1-5]</sup>。随着各国研制导弹的数量和储量不断增大,接近或超过服役年限的导弹也逐年增多,一般5~10 a后,老化的HTPB固体推进剂便进入报废期<sup>[6]</sup>。世界范围内,每年报废的固体推进剂总量达千吨以上<sup>[7]</sup>,大量的废旧推进剂若不及时处

\* 收稿日期:2023-06-20

第一作者:韩明浩(2001-),男,学士,主要从事工业炸药的制备与应用研究。E-mail:1466704537@qq.com

通信作者:刘威(1992-),男,博士,副教授,主要从事含能材料的制备与应用研究。E-mail:1104054142@st.nuc.edu.cn

理,会造成严重的经济损失<sup>[8-9]</sup>。同时,固体推进剂有一定的使用寿命,到了寿命的后期,不稳定性和不安全性会增加。因此,绿色、安全、高效地处理这类废旧固体推进剂是目前亟待解决的问题<sup>[10-12]</sup>。

目前,废旧 HTPB 固体推进剂主要采用传统的销毁式处理方法。传统方法中燃烧或爆炸后的产物会对空气、水和土壤等资源造成严重污染<sup>[13]</sup>。近年来,随着国际上对环境的保护越来越重视及对经济化生产的日益提倡,此类方法变得越来越不可取。除传统的销毁式处理外,国内外还积极研发组分回收技术,即对废旧推进剂中的主要成分进行回收再利用。目前,废旧推进剂的回收技术主要针对几类主要成分,经一定处理后可作为推进剂的制备原料或者化工生产原料,以实现再利用。这类方法具有环境污染较小、可循环利用等明显优势。但目前的回收再利用技术还不太完善,有些方法没有完全消除对环境的污染,且成本高,回收效率低,相关研究以实验室级别居多,工程化应用较少。废旧推进剂属于特种能源,如果粉碎后添加其他物质转化制备为民用炸药,不但利用其高能特性,而且降低了对环境的破坏,减少了回收有效组分时所需的大量成本,为今后大规模处理与利用该类物质提供了可能<sup>[14]</sup>。

目前,国内外对废旧发射药等的转化制备研究较多,对废旧推进剂的转化制备研究较少。因此,以废旧 HTPB 固体推进剂的资源化利用为目的进行乳化炸药的配方设计,可为废旧含能材料的整体资源化利用提供理论参考。有望解决当前传统废旧推进剂处理方法的高污染、高危险性问题和有效组分回收再利用方法的高成本问题。

1 制备工艺

将硝酸铵、硝酸钠、尿素、HTPB 固体推进剂分别粉碎、过筛。然后,将硝酸铵、硝酸钠、尿素与水混合,加热至溶质溶解,作为水相。将柴油、蜡、Span80 混合,加热至溶解,并搅拌均匀,作为油相。在强烈搅拌下,将水相溶液缓慢加入油相溶液,完成乳化。敏化乳化基质后,将粉碎的固体推进剂粉末与乳化基质按一定比例充分混合均匀,即得到乳化炸药。

1.1 敏化剂选择

工业上常用的敏化方式分为物理敏化和化学敏化。物理敏化会显著增大转化制备所得乳化炸药的黏度,将对后期装药造成影响;并且在敏化剂添加量较小时难以形成稳定的爆轰,易出现熄火现象,敏化效果欠佳,故采用化学敏化。即在乳化基质中加入

少量亚硝酸钠的水溶液,充分反应,产生敏化气泡。该方法在添加固体推进剂后不会导致敏化气泡逃逸和乳化炸药的破乳,并且能很好地完成爆轰,不出现熄火现象,敏化效果较好。

1.2 生产安全性分析

生产安全性主要分为乳化基质的生产安全性和 HTPB 固体推进剂的粉碎安全性。乳化基质的生产危险性主要来源于设备缺陷或工艺设计的不合理、不配套,导致生产过程中温度不断累积而引发事故。因此,生产过程中的有效安全防范措施必不可少,例如降低机械搅拌转速、全面引入冷却结构、采取安全预警及自动保护措施以及定期检修等<sup>[15]</sup>。HTPB 固体推进剂中的铝(Al)和高氯酸氨(AP)晶体在扭曲或剪切力的作用下容易产生热点,产生安全问题。但由于 HTPB 固体推进剂具有内聚力,只有在特定的激励源下才能具备点火的能力。通常,HTPB 固体推进剂具有较高的火焰感度,而机械感度较低。因此,加工及使用 HTPB 推进剂时应避免明火。同时,在粉碎 HTPB 推进剂时应当以水作为冷却剂,及时排出系统中的热量,避免形成热点,以达到安全粉碎的目的<sup>[16]</sup>。

2 配方设计及爆轰性能计算

转化制备民用炸药的配方设计是根据炸药爆炸反应的热化学方程,即以炸药的爆热为目标函数,建立数学模型。利用数学模型计算不同质量分数的乳化基质、废旧固体推进剂对热化学参数爆热的影响,附加各组分氧平衡、爆热等约束条件的限定,最终由计算机程序完成运算。

2.1 假定化学式

假定化学式为  $C_aH_bO_cN_dCl_eNa_fAl_g$ , 则<sup>[6,17]</sup>

$$\left\{ \begin{aligned} a &= \sum_{i=1}^n \frac{1\,000a_ix_i}{m_i}; \\ b &= \sum_{i=1}^n \frac{1\,000b_ix_i}{m_i}; \\ c &= \sum_{i=1}^n \frac{1\,000c_ix_i}{m_i}; \\ d &= \sum_{i=1}^n \frac{1\,000d_ix_i}{m_i}; \\ e &= \sum_{i=1}^n \frac{1\,000e_ix_i}{m_i}; \\ f &= \sum_{i=1}^n \frac{1\,000f_ix_i}{m_i}; \\ g &= \sum_{i=1}^n \frac{1\,000g_ix_i}{m_i}. \end{aligned} \right. \tag{1}$$

式中: $a_i \sim g_i$  为组分  $i$  分子中对应元素的原子数; $x_i$  为组分  $i$  的质量分数; $m_i$  为相对分子质量; $i = 1, 2, \dots, n$ 。

根据式(1)可计算得到乳化基质的假定化学式为  $C_{5.02}H_{56.54}O_{36.45}N_{19.01}Na_{1.47}$ , HTPB 固体推进剂的假定化学式为  $C_{11.02}H_{40.41}O_{26.03}N_{8.99}Cl_{5.53}Al_{3.33}$ 。

假定转化制备的乳化炸药各组分的氧平衡为  $\eta_{OB}$ , 则

$$\eta_{OB} = \sum_{i=1}^n \eta_{OB_i} x_i \quad (2)$$

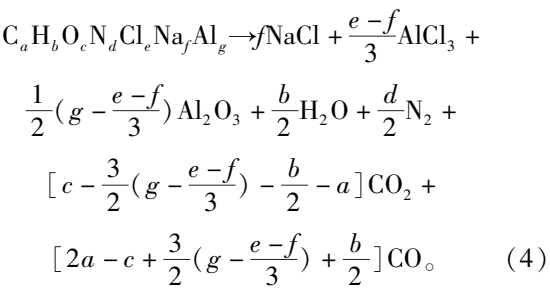
可得到乳化炸药的氧平衡为  $-0.041\ 35\ \text{g/g}$ , HTPB 固体推进剂的氧平衡为  $-0.295\ 00\ \text{g/g}$ 。

将粉碎的 HTPB 固体推进剂颗粒作为转化制备的乳化炸药的组成部分。设乳化基质的质量分数为  $x_1\%$ , HTPB 固体推进剂的质量分数为  $x_2\%$ , 根据上述计算所得的乳化基质和 HTPB 固体推进剂的假定化学式, 则转化制备的乳化炸药:

$$\begin{cases} a=0.050\ 2x_1+0.110\ 2x_2; \\ b=0.565\ 4x_1+0.404\ 1x_2; \\ c=0.364\ 5x_1+0.260\ 3x_2; \\ d=0.190\ 1x_1+0.089\ 9x_2; \\ e=0.055\ 3x_2; \\ f=0.014\ 7x_1; \\ g=0.033\ 3x_2。 \end{cases} \quad (3)$$

2.2 目标函数

根据 B-W (Brinkley-Wilson) 书写规则, 在微弱负氧平衡条件下转化制备的乳化炸药的爆炸反应方程式为



则定容爆热  $Q_V$  的计算公式为

$$\begin{aligned} Q_V = &f\Delta H(NaCl) + \frac{e-f}{3}\Delta H(AlCl_3) + \\ &\frac{1}{2}(g - \frac{e-f}{3})\Delta H(Al_2O_3) + \frac{b}{2}\Delta H(H_2O) + \\ &\frac{d}{2}\Delta H(N_2) + \\ &[c - \frac{3}{2}(g - \frac{e-f}{3}) - \frac{b}{2} - a]\Delta H(CO_2) + \\ &[2a - c + \frac{3}{2}(g - \frac{e-f}{3}) + \frac{b}{2}]\Delta H(CO) - \end{aligned}$$

$$\Delta H(C_aH_bO_cN_dCl_eNa_fAl_g)。 \quad (5)$$

查阅文献[18], 将参数代入式(5)中, 可得以爆热为目标函数的方程:

$$Q_V = 29.74x_1 + 45.10x_2。 \quad (6)$$

2.3 约束条件

工业炸药的配方设计通常需要考虑氧平衡、安全、性能、成本、生产工艺等因素。废旧 HTPB 固体推进剂转化为工业炸药的配方设计可依据氧平衡、密度、热化学参数、爆速等综合条件建立目标函数和约束条件, 从而优选出乳化炸药的基础配方。根据工业炸药一般性能条件, HTPB 固体推进剂转化制备乳化炸药时:

- 1) 氧平衡应略低于或等于零氧平衡;

2) 爆速应与市面上的乳化炸药相当;

3) 爆炸气体的膨胀特性应与岩石的力学特性相适应;

4) 密度、机械感度和猛度满足要求;

5) 配方应具有优越的性价比。

根据上述设计原则, 转化制备的乳化炸药配方的约束条件如下:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = 100; \\ \sum_{i=1}^2 \frac{\eta_{OB_i} x_i}{100} \leq 0; \\ |Q_V| \geq 3\ 245.43(1 - 5\%); \\ |Q_V| \leq 3\ 245.43(1 + 5\%); \\ 0 < x_1 < 100; \\ 0 < x_2 < 100; \\ c - \frac{f-e+3g-b}{2} - a > 0; \\ 2a - c + \frac{f-e+3g-b}{2} > 0。 \end{cases} \quad (7)$$

可得约束条件:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = 100; \\ -0.041\ 35x_1 - 0.295\ 00x_2 \leq 0; \\ 29.74x_1 + 45.10x_2 \geq 3\ 083.16; \\ 29.74x_1 + 45.10x_2 \geq 3\ 407.7; \\ 0 < x_1 < 100; \\ 0 < x_2 < 100; \\ 0.024\ 25x_1 - 0.074\ 25x_2 > 0; \\ 0.025\ 95x_1 + 0.184\ 45x_2 > 0。 \end{cases} \quad (8)$$

2.4 规划求解

采用软件对上述目标函数进行规划求解。求解结果: 当乳化基质的质量分数  $x_1\% = 75.38\%$ 、HTPB 固体推进剂的质量分数  $x_2\% = 24.62\%$  时, 在上述约

束条件下转化制备的乳化炸药具有最大爆热,为 3 351.935 kJ/kg,此时转化制备的乳化炸药的性能最佳。

此外,为了探究固体推进剂添加量的边界值,还分析了最小爆热下转化制备的乳化炸药的配方。求解结果:当乳化基质的质量分数  $x_1\% = 92.87\%$ 、HTPB 固体推进剂的质量分数  $x_2\% = 7.13\%$  时,在上述约束条件下转化制备的乳化炸药具有最低爆热 3 083.16 kJ/kg。

## 2.5 爆轰参数理论计算

### 2.5.1 爆速

此外,还对上述最佳配方下转化制备的乳化炸药的爆速、爆压、爆温等性能参数进行了理论计算。计算炸药爆轰性能最常用的方法是 Kamlet-Jacobs 方程,该方程仅适用于组分为 C、H、O、N 4 种元素的炸药,对于组分中含有 Na、Cl、Al 等元素的炸药并不适用。鉴于此,采用多方方程对乳化基质及转化制备的乳化炸药的爆轰性能进行了计算,爆速与爆热和气体产物绝热指数有关<sup>[17-18]</sup>,计算公式为

$$D = \sqrt{2(\gamma^2 - 1)Q_V} \quad (9)$$

式中: $D$  为爆速; $Q_V$  为理论定容爆热; $\gamma$  为爆轰气体产物的局部等熵指数。

确定  $\gamma$  值:

$$\frac{1}{\gamma} = \sum \frac{z_i}{y_i} \quad (10)$$

式中: $z_i$  代表爆轰气体产物中第  $i$  成分的摩尔分数; $y_i$  代表爆轰气体产物中第  $i$  成分的绝热指数。

根据文献[19], $N_2$ 、 $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $CO$  的绝热指数分别为 3.70、1.90、4.50、2.85,代入式(10),可得  $\gamma = 2.24$ 。将  $\gamma$  和  $Q_V$  代入式(9),可得最佳配方下转化制备的乳化炸药的爆速为 5 182.02 m/s。

### 2.5.2 爆温

根据爆炸的特点,可以利用爆轰产物的平均热容计算爆温<sup>[19]</sup>

$$Q_V = c_v(T_B - T_0) = c_v t_0 \quad (11)$$

式中: $Q_V$  为炸药的定容爆热; $T_0$  为炸药的初始温度,298 K; $T_B$  为炸药的爆温; $t$  为爆炸产物从  $T_0$  到  $T_B$  的温度间隔; $c_v$  为爆轰产物在温度间隔  $t$  内的平均热容。

一般工程计算中,认为平均分子热容  $c_v$  与温度间隔  $t$  为线性关系:

$$c_v = A + Bt \quad (12)$$

式中: $A = \sum_{i=1}^n n_i a_i$ ;  $B = \sum_{i=1}^n n_i b_i$ ;  $a_i$ 、 $b_i$  为第  $i$  种爆炸产物的摩尔定容热容与温度的关联系数。

双原子气体爆轰产物: $a = 20.08$ ,  $b = 18.83 \times 10^{-4}$ ;水蒸气: $a = 16.74$ ,  $b = 89.96 \times 10^{-4}$ ;二氧化碳: $a = 37.66$ ,  $b = 24.27 \times 10^{-4}$ 。

将数据代入式(11)、式(12),可得最佳配方下炸药爆温

$$T_B = t + 298 = 2\,728.81 \text{ (K)} \quad (13)$$

### 2.5.3 爆容

已知乳化炸药的爆炸反应方程式,由 Avogadro 定律求得炸药的爆容<sup>[20]</sup>

$$V = \frac{22.4n}{m} \quad (14)$$

式中: $m$  为反应方程式中的炸药质量; $n$  为反应方程式中气态产物的物质的量总和。

根据爆炸反应方程式以及式(14)计算,可得最佳配方下炸药的爆容为

$$V = \frac{(b/2 + d/2 + a) \times 22.4}{1} = 919.59 \text{ (L/kg)} \quad (15)$$

## 3 不同固体推进剂质量分数对转化制备的乳化炸药性能的影响

### 3.1 爆轰性能

在上述最佳配方的基础上,计算了在不同 HTPB 固体推进剂添加量时转化制备的乳化炸药的假定化学式以及氧平衡、爆速、爆热等性能参数,分别如表 1 所示。

由表 1 可知,由于 HTPB 固体推进剂具有较乳化炸药更高的爆热,随着 HTPB 固体推进剂含量的增加,转化制备的乳化炸药的理论爆热、理论爆速和理论爆温不断增大。此外,HTPB 固体推进剂的负氧程度高于乳化基质,随着 HTPB 固体推进剂含量的增加,转化制备的乳化炸药的氧平衡逐渐减小。而由于 HTPB 固体推进剂质量分数的增加,转化制备的乳化炸药的假定化学式发生变化,进而影响爆炸反应方程式产物的组成,由  $NaCl$ 、 $Na_2O$ 、 $Al_2O_3$  变为  $NaCl$ 、 $AlCl_3$ 、 $Al_2O_3$ ,爆热、爆速、爆温的变化率在 HTPB 固体推进剂质量分数 20% 处发生变化。

### 3.2 安定性分析

采用 DSC 和 TG 对乳化基质、HTPB 固体推进剂粉末、HTPB 固体推进剂质量分数为 10% 时转化制备的乳化炸药的热性能进行了测试,结果如图 1 所示。

通过图 1(a) 可知,HTPB 固体推进剂在 202.5 °C 和 245.7 °C 附近均出现一个吸热峰,分别对应于



表 1 不同 HTPB 固体推进剂质量分数下转化制备的乳化炸药性能

Tab. 1 Properties of converted emulsion explosive with different additions of HTPB solid propellant

HTPB 质量分数/%	假定化学式	爆热/ (kJ · mol <sup>-1</sup> )	η <sub>OB</sub> / (g · g <sup>-1</sup> )	爆速/ (m · s <sup>-1</sup> )	爆温/ K	爆容/ (L · kg <sup>-1</sup> )
5	C <sub>5.32</sub> H <sub>55.73</sub> O <sub>35.93</sub> N <sub>18.51</sub> Cl <sub>0.28</sub> Na <sub>1.40</sub> Al <sub>0.17</sub>	2 783.10	-0.054	4 779.49	2 339.70	950.68
10	C <sub>5.62</sub> H <sub>54.93</sub> O <sub>35.41</sub> N <sub>18.01</sub> Cl <sub>0.55</sub> Na <sub>1.32</sub> Al <sub>0.33</sub>	2 943.48	-0.067	4 900.45	2 446.12	942.76
15	C <sub>5.92</sub> H <sub>54.12</sub> O <sub>34.89</sub> N <sub>17.51</sub> Cl <sub>0.83</sub> Na <sub>1.25</sub> Al <sub>0.50</sub>	3 103.85	-0.080	5 016.77	2 552.69	934.84
20	C <sub>6.22</sub> H <sub>53.31</sub> O <sub>34.37</sub> N <sub>17.01</sub> Cl <sub>1.11</sub> Na <sub>1.18</sub> Al <sub>0.67</sub>	3 264.23	-0.092	5 128.75	2 659.55	926.91
25	C <sub>6.52</sub> H <sub>52.51</sub> O <sub>33.85</sub> N <sub>16.51</sub> Cl <sub>1.38</sub> Na <sub>1.10</sub> Al <sub>0.83</sub>	3 357.79	-0.105	5 185.28	2 733.88	918.99
30	C <sub>6.82</sub> H <sub>51.70</sub> O <sub>33.32</sub> N <sub>16.00</sub> Cl <sub>1.66</sub> Na <sub>1.03</sub> Al <sub>1.00</sub>	3 434.63	-0.118	5 227.44	2 800.94	911.04
35	C <sub>7.12</sub> H <sub>50.89</sub> O <sub>32.80</sub> N <sub>15.50</sub> Cl <sub>1.94</sub> Na <sub>0.96</sub> Al <sub>1.17</sub>	3 511.48	-0.130	5 268.34	2 869.06	903.14
40	C <sub>7.42</sub> H <sub>50.09</sub> O <sub>32.28</sub> N <sub>15.00</sub> Cl <sub>2.21</sub> Na <sub>0.88</sub> Al <sub>1.33</sub>	3 588.33	-0.143	5 308.01	2 938.28	895.22
45	C <sub>7.72</sub> H <sub>49.28</sub> O <sub>31.76</sub> N <sub>14.50</sub> Cl <sub>2.49</sub> Na <sub>0.81</sub> Al <sub>1.50</sub>	3 665.17	-0.156	5 346.46	3 008.68	887.29
50	C <sub>8.02</sub> H <sub>48.48</sub> O <sub>31.24</sub> N <sub>14.00</sub> Cl <sub>2.77</sub> Na <sub>0.74</sub> Al <sub>1.67</sub>	3 742.02	-0.168	5 383.70	3 080.28	879.37

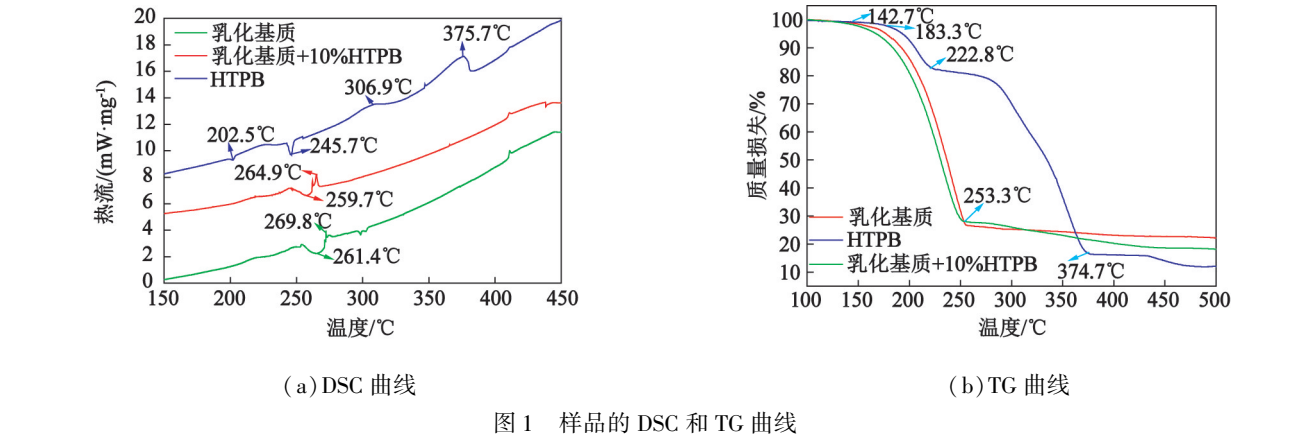


图 1 样品的 DSC 和 TG 曲线

Fig. 1 DSC curves and TG curves of the samples

黑索今(RDX)的熔融吸热峰和 AP 晶型转化过程的吸热峰;在 306.9 ℃和 375.7 ℃出现明显的放热峰,分别对应于 RDX 和 AP 的热分解放热峰。此外,乳化基质在 261.4 ℃出现一个明显的吸热峰,并在 269.8 ℃出现一个放热峰,DSC 曲线与 HTPB 推进剂质量分数为 10%时转化制备的乳化炸药的 DSC 曲线基本一致,说明 HTPB 固体推进剂与乳化炸药具有良好的相容性,推进剂的添加并不会明显影响乳化炸药的热性能。

由图 1(b)可知,HTPB 固体推进剂在 183.3 ~ 222.8 ℃、222.8 ~ 374.7 ℃出现明显的热失重,分别对应于 RDX 和 AP 的热分解失重。此外,乳化基质和推进剂质量分数为 10%时转化制备的乳化炸药的 TG 曲线基本一致,在 142.7 ~ 253.3 ℃均出现热失重,这再次证明 HTPB 固体推进剂与乳化炸药具有良好的相容性,说明 HTPB 固体推进剂的添加并不会显著影响乳化炸药的热分解性能,转化制备的乳化炸药具有较好的热安定性。

### 3.3 长期储存性能分析

炸药的长期储存性能(即炸药热分解性能)受诸多因素影响。炸药分子在常温下有良好的热安定性,而热分解反应速度受温度的影响较大。因此,炸药的热分解速率通常在温度升高时会加快,并且炸药热分解的自行加速反应会显著影响安定性。因此,转化制备的乳化炸药通常在常温下储存,并且加入少量安定剂以减缓自行加速反应,从而达到提高安定性和长期储存的目的。

## 4 结论

对废旧 HTPB 固体推进剂转化制备的乳化炸药进行了配方设计,对不同固体推进剂添加量下转化制备的乳化炸药的爆热、爆速、爆温、爆容进行了理论计算。得出结论如下:

1)当 HTPB 固体推进剂质量分数为 24.62%、乳化基质质量分数为 75.38%时,转化制备的乳化

炸药各性能最佳,爆热为 3 351.935 kJ/kg,爆速为 5 182.02 m/s,爆温为 2 728.81 K,爆容为 919.59 L/kg。

2)随着 HTPB 固体推进剂含量的增加,转化制备的乳化炸药的爆热、爆速、爆温逐渐增大,氧平衡逐渐减小。但考虑氧平衡不宜过低,因而 HTPB 固体推进剂的含量不宜过高。

3)随着 HTPB 固体推进剂含量的增加,转化制备的乳化炸药的假定化学式发生变化,进而影响爆炸反应方程式产物的组成,由  $\text{NaCl}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  变为  $\text{NaCl}$ 、 $\text{AlCl}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,爆热、爆速、爆温的变化率在 HTPB 质量分数为 20% 时发生变化。

4)废旧 HTPB 固体推进剂转化制备的乳化炸药的方案可行,符合循环经济理念,可对其他废旧含能材料的回收及资源化利用起到积极的借鉴作用。

### 参 考 文 献

- [1] 韩启龙,王焯军,蒋大勇. 报废固体推进剂处理技术研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2008, 6(6): 13-16, 29.  
HAN Q L, WANG X J, JIANG D Y. Research progress in treatment technology of obsolete solid propellant [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2008, 6(6): 13-16, 29.
- [2] 蒋大勇,王焯军,李冰. 报废丁羟推进剂的再利用研究进展[J]. 火工品, 2008(2): 44-47.  
JIANG D Y, WANG X J, LI B. The research on recycle of the HTPB propellant scrap [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(2): 44-47.
- [3] 詹惠安,郑邯勇,赵文忠,等. 固体推进剂包覆层的研究进展[J]. 舰船防化, 2009(3): 1-5.  
ZHAN H A, ZHENG H Y, ZHAO W Z, et al. Recent progress on inhibitor of solid propellant [J]. Chemical Defence on Ships, 2009(3): 1-5.
- [4] 于潜. 废弃固体推进剂主要组分的分离及回收研究[D]. 太原: 中北大学, 2010.  
YU Q. Research on separating and recycling main solid components from obsolete propellant [D]. Taiyuan: North University of China, 2010.
- [5] 李金龙,袁俊明,刘玉存,等. 端羟基聚丁二烯基聚氨酯的溶胀试验研究[J]. 中国胶粘剂, 2015, 24(10): 14-22.  
LI J L, YUAN J M, LIU Y C, et al. Study on swelling experiment of hydroxyl-terminated polybutadiene based polyurethane [J]. China Adhesives, 2015, 24(10): 14-22.
- [6] 李立远,张丽华,王鹏,等. 废弃丁羟推进剂的处理与再利用研究进展[J]. 河南化工, 2010, 27(12): 3-7.
- [7] 姚旭,慕晓刚,刘博,等. 溶胀/溶解法回收 HTPB 推进剂中 AP 组分的实验研究 [J]. 火炸药学报, 2016, 39(1): 75-78, 83.  
YAO X, MU X G, LIU B, et al. Experimental research on recovery of AP component from HTPB propellant by the swelling/dissolving method [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(1): 75-78, 83.
- [8] 张勇,张爱英,冯增国. 含氧杂环丁烷基叠氮粘合剂的可回收固体推进剂研究进展[J]. 固体火箭技术, 2002, 25(3): 31-33.  
ZHANG Y, ZHANG A Y, FENG Z G. Progress in recyclable solid propellant containing oxetane-based azide binder [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2002, 25(3): 31-33.
- [9] 郭子涵. HTPB 固体推进剂的老化性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
GUO Z H. The aging performance of HTPB solid propellant [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [10] 王泽山. 废旧含能材料的处理与再利用[J]. 化工时刊, 1996, 10(6): 3-5, 22.
- [11] 李本强,李东升,岳慧娟,等. 废弃丁羟推进剂的处理与回收利用方法研究[J]. 飞航导弹, 2018(10): 90-94.  
LI B Q, LI D S, YUE H J, et al. Research on the treatment and recycle of waste HTPB propellant [J]. Aerospace Technology, 2018(10): 90-94.
- [12] 王明启,杜仕国,闫军,等. 废弃丁羟推进剂回收处理技术研究进展[J]. 化工新型材料, 2016, 44(12): 22-24.  
WANG M Q, DU S G, YAN J, et al. Research progress on recovery and treatment technology of waste HTPB propellant [J]. New Chemical Materials, 2016, 44(12): 22-24.
- [13] MAC CREHAN W A, BEDNER M. Development of a smokeless powder reference material for propellant and explosives analysis [J]. Forensic Science International, 2006, 163(1/2): 119-124.
- [14] 蒋大勇,王焯军,白云,等. 利用废弃丁羟推进剂 (AP/Al/wax) 转制民用炸药 HAN 的研究[J]. 爆破器材, 2009, 38(5): 10-13.  
JIANG D Y, WANG X J, BAI Y, et al. Study on preparation of civil explosive HAN with discarded HTPB propellant [J]. Explosive Materials, 2009, 38(5): 10-13.
- [15] 黎涛,曹雄. 乳化炸药生产过程中的安全性分析 [J]. 工业安全与环保, 2010, 36(3): 15-16.  
LI T, CAO X. The security analysis of emulsified explo-

(上接第 26 页)

- REN G. Research on the electromagnetic compatibility of semiconductor bridge [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [6] 杜培康, 谭明, 李勇, 等. 压敏电阻对半导体桥火工品电爆性能的影响[J]. 含能材料, 2015, 23(8): 781-786.
- DU P K, TAN M, LI Y, et al. Electro-explosive performances of SCB igniter with varistor [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(8): 781-786.
- [7] 陈飞. SCB 火工品静电、射频损伤机理及其加固技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- CHEN F. Research on the damage mechanism and reinforcement technology of electrostatic and RF on SCB explosive devices [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [8] 于鸿源, 严楠, 陈树肖. 基于电路仿真的桥丝式电火工品静电危害预测[J]. 含能材料, 2015, 23(7): 682-687.
- YU H Y, YAN N, CHEN S X, et al. Electrostatic hazard prediction of bridge wire electro explosive device based on the circuit simulation [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(7): 682-687.
- [9] 赵佳. 半导体桥火工品静电响应特性及其静电防护研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- ZHAO J. Research on the response characteristic and protection to ESD of semiconductor bridge [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- discharge (ESD) protection for a laser diode ignited actuator: ASND2003-2100 [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Laboratorys, 2003.
- [11] KING T L, TARBELL W W. Pin-to-pin electrostatic discharge protection for semiconductor bridges: SAND2002-2213 [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Laboratorys, 2002.
- [12] MARX K D, BICKES R W, JR WACKERBARTH D E. Characterization and electrical modeling of semiconductor bridges: SAND-97-8246 [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Laboratorys, 1997.
- [13] FURNBERG C M. Computer modeling of detonators [C]//Proceedings of the 37th Midwest Symposium on Circuits and Systems. Lafayette, LA, US, 1994: 646-649.
- [14] 杜培康. 压敏电阻用于 SCB 火工品电磁防护研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- DU P K. Electromagnetic compatibility research of varistor used for SCB initiating explosive devices[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [15] 贾昕. Al/CuO 复合半导体桥设计及发火性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- JIA X. Study on design and explosive characteristics of Al/CuO composite SCB [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.