

文章编号: 1006-9941(2006)06-0416-05

## 几种钝感低特征信号推进剂的能量特性

徐司雨, 赵凤起, 李上文, 高红旭, 仪建华, 高茵

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 利用能量计算程序计算了 *N,N'*-二硝基哌嗪(DNPZ)、*N*-脒基脒二硝酰胺(FOX-12)、1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)、钝感黑索今(I-RDX)、2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物(LLM-105)、硝基胍(NQ)和1,4,5,8-四硝基-1,4,5,8-四氮杂萘烷(TTNZ)7种钝感化合物的单元推进剂及用于钝感低特征信号推进剂的能量特性。结果表明: 所列的7种含能化合物中,由 I-RDX、FOX-7 和 TTNZ 形成的单元推进剂、复合改性双基推进剂及聚叠氮缩水甘油醚(GAP)基推进剂的综合效果均较优,随着这3种钝感含能添加剂质量分数增加,形成的双基系推进剂的理论比冲、特征速度、燃烧温度和等容爆热逐渐升高,而氧系数和燃烧产物的平均相对分子质量逐渐降低。

**关键词:** 物理化学; 固体推进剂; 钝感; 低特征信号; 能量特性; 反应能力; 理论计算

**中图分类号:** V512; TJ55

**文献标识码:** A

### 1 引言

固体推进剂是固体火箭发动机的推进能源,如何实现其高能、钝感和低特征信号等特性,是当今固体推进剂研究和发展中急待解决的问题<sup>[1,2]</sup>。近几十年来,上述问题主要通过加入钝感增塑剂、含能添加剂或含能黏合剂替代原推进剂中较敏感的对物质来解决<sup>[3-5]</sup>。

双基系推进剂中硝化甘油(NG)的机械感度较高,加工处理过程中很危险,为实现此类推进剂的钝感特性,资料报道,用机械感度较低的三羟甲基乙烷三硝酸酯(TMETN)取代原双基系推进剂中机械感度较高的NG降低感度<sup>[6]</sup>。TMETN是一种含能增塑剂,其化学结构虽与NG相似,然而撞击感度却比NG低很多,迁移性、挥发性、热稳定性和工艺性能均较好。国内外已将TMETN用于双基系推进剂,来实现推进剂的钝感特性,研究表明,TMETN用于双基系推进剂中,可明显降低此类推进剂的机械感度<sup>[7-9]</sup>。此外,叠氮聚合物机械感度低、热稳定性好以及与固体推进剂用的一些含能添加剂相容性好等特性,以其作为固体推进剂的含能黏合剂使用,受到了国内外普遍关注,其中以叠氮缩水甘油醚(GAP)为基的钝感推进剂的研究取得了很大进展,美、日、德等国在此方面均开展了大量的研究<sup>[10]</sup>。

目前,对于含TMETN基或含GAP基的钝感低特

征信号推进剂的热分解及燃烧性能,已进行了较深入的研究<sup>[10-14]</sup>。本文在前人研究的基础上,利用能量计算软件,研究了一些钝感含能添加剂用于以TMETN为基的双基和以GAP为基的钝感低特征信号推进剂时,对两类推进剂能量特性的影响规律,并将形成的推进剂的能量特性进行了对比,进而为固体推进剂钝感技术的发展及实际应用,提供理论依据。

### 2 几种高能化合物的理化性能及能量特性

为了计算需要,三羟甲基乙烷三硝酸酯(TMETN)、1,5-二叠氮基-3-硝基-3-氮杂戊烷(DIANP)和二缩三乙二醇二硝酸酯(TEGDN)3种钝感增塑剂及本文涉及的几种含能添加剂,如*N,N'*-二硝基哌嗪(DNPZ)、*N*-脒基脒二硝酰胺(FOX-12)、1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)、钝感黑索今(I-RDX)、2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物(LLM-105)、硝基胍(NQ)和1,4,5,8-四硝基-1,4,5,8-四氮杂萘烷(TTNZ)的理化性能列于表1,并在表2中列出了标准条件( $p_c/p_a = 70/1$ )下最小自由能法算得的各含能化合物单元推进剂的能量特性参数。如未加特殊注明,表1所列撞击感度用50%爆炸率的特性落高( $H_{50}$ )表示,其测试条件为10 kg落锤;摩擦感度用爆炸百分数表示,其测试条件为表压4.0 MPa,撞击摆角为90°。

从表1可看出,所列的几种钝感增塑剂中,TMETN的相对分子质量和密度最高,DIANP的标准生成焓( $H_f^\theta$ )最高;所列几种含能添加剂中,TTNZ的相对分子质量最大,LLM-105的密度和标准生成焓最高。从表1所列各钝感材料的撞击感度和摩擦感度可知,

收稿日期: 2006-07-18; 修回日期: 2006-08-27

基金项目: 国防科工委基础科研项目(A0920060885)

作者简介: 徐司雨(1980-),男,硕士,从事固体推进剂技术研究。

e-mail: npecc@163.com

这些材料对外界的机械作用均较钝感。

表 1 几种钝感含能化合物的理化性能<sup>[15-21]</sup>

Table 1 Physicochemical properties of some insensitive energetic compounds<sup>[15-21]</sup>

name	chemical formula	relative molecular mass	$\rho$ /g·cm <sup>-3</sup>	$H_f^0$ /kJ·mol <sup>-1</sup>	$H$ /cm	$P$ /%	
plasticizer	DIANP	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	200.16	1.32	+592.50	72% <sup>1)</sup>	26
	TEGDN	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	240.17	1.34	-631.79	100 <sup>2)</sup>	0 <sup>5)</sup>
	TMETN	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>9</sub> N <sub>3</sub>	255.14	1.63	-408.23	47 <sup>2)</sup>	100 <sup>6)</sup>
energetic additives	DNPZ	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	176.13		+176.13	25	0
	FOX-12	C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N <sub>7</sub> O <sub>5</sub>	209.12	1.80	-355.30	50	8
	FOX-7	C <sub>2</sub> N <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	148.08	1.89	-133.80	89.1	10
	I-RDX	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	222.12	1.81	+61.55		
	LLM-105	C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> N <sub>6</sub> O <sub>5</sub>	216.11	1.91	-54.22	117	
	NQ	CH <sub>4</sub> N <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	104.06	1.72	-80.51	>177 <sup>3)</sup> >320 <sup>4)</sup>	0
	TTNZ	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> N <sub>8</sub> O <sub>8</sub>	322.20	1.80	+115.80	25	100

Note: 1) Expressed by explosion percentage; 2) Falling weight, 2 kg; the total weight of testing propellant, 20 mg; 3) Apparatus model is number 12; 4) Apparatus model is number 12B; 5) The paper subscribe that the samples don't explode with steel shoe and cellulose shoe; 6) The paper subscribe that the samples explode with steel shoe and cellulose shoe.

表 2 几种钝感含能添加剂的能量特性

Table 2 Energy characteristics for monopropellants of several insensitive energetic additives

name	$\Phi$	$I_{sp}$ /N·s·kg <sup>-1</sup>	$C^*$ /m·s <sup>-1</sup>	$T_c$ /K	$M_c$	$Q_v$ /kJ·kg <sup>-1</sup>
DNPZ	0.333	2165.46	1348.24	1712.48	18.156	3625.15
FOX-12	0.667	2101.53	1334.74	2135.87	23.240	3984.48
FOX-7	0.667	2351.19	1489.62	2794.77	24.680	5024.85
I-RDX	0.667	2609.04	1644.50	3281.48	24.680	5941.63
LLM-105	0.500	2174.41	1396.71	2454.84	24.189	4041.42
NQ	0.500	2250.11	1444.38	2262.61	20.999	4449.57
TTNZ	0.471	2347.93	1504.56	2548.75	21.572	4776.21

Note: 1) There are no relations between pressure and  $Q_v$  in Table 2;

2)  $\Phi$  is oxygen coefficient.

从表 2 可看出,各钝感单元推进剂的理论比冲( $I_{sp}$ )较高的依次为 I-RDX、FOX-7 和 TTNZ,较低的依次为 DNPZ 和 FOX-12;燃烧温度( $T_c$ )和等容爆热( $Q_v$ )较高的依次为 FOX-12 和 DNPZ,较低的为 FOX-12 和 DNPZ;特征速度( $C^*$ )较高的依次为 I-RDX 和 TTNZ,较低的依次为 DNPZ 和 FOX-12;燃烧温度( $T_c$ )和燃烧产物的平均相对分子质量( $M_c$ )较高的依次为 I-RDX 和 FOX-7,最低的均为 DNPZ。其中等容爆热是 1 kg 固体推进剂在 298 K 初温、定容、真空(惰性气体中)燃烧放出的热量,且燃烧过程中无二次反应和凝结放热。

通过上述各能量特性参量对比可以看出,所列的几种含能添加剂中,各能量特性综合效果较好的为 I-RDX、FOX-7 和 TTNZ。

### 3 双基系推进剂能量特性的理论计算

#### 3.1 以 TEGDN 为辅助增塑剂的推进剂的能量特性

为考察表 2 中各含能添加剂取代钝感双基系推进剂中的硝化棉(NC)后,对推进剂各能量特性参数的影响规律,本文在某双基推进剂配方基础上,用各含能添加剂逐渐取代原推进剂中的 NC。然后利用 REAL 软件计算了取代后的推进剂配方时的能量特性,进而来研究各含能添加剂的质量分数( $W_{HEM}$ )对双基系推进剂各能量特性参数(氧系数、燃烧室温度、燃烧产物的平均相对分子质量、特征速度、理论比冲和定容爆热)的影响。用于被取代的原双基推进剂基础配方组成(质量分数)为:氮含量 12% 的 NC 为 65.5%,TMETN 为 27%,其它助剂 7.5%。其它助剂包括 TEGDN、二号中定剂和凡士林。

推进剂中各含能添加剂的质量分数( $W_{HEM}$ )从 0 逐渐增至 45% 的过程中,各含能添加剂的量变对此类推进剂 7 MPa 下的各能量特性参数影响规律见图 1。

从图 1 可看出,随着含能添加剂质量分数( $W_{HEM}$ )增大,几种推进剂的各项能量特性参量均呈线性趋势变化,且种类不同的含能添加剂对推进剂各项能量特性参数的影响差别较大。除 I-RDX、FOX-7 和 TTNZ 可提高原双基推进剂配方的理论比冲、特征速度、燃烧温度和等容爆热外,其余几种含能添加剂均会降低原双基推进剂的理论比冲。I-RDX、FOX-7 和 TTNZ 三者相比较而言,在提高理论比冲和特征速度上,I-RDX 提高的效果最佳、FOX-7 提高的效果最差;在提高燃烧温度和等容爆热方面,I-RDX 的效果最佳、TTNZ 的效果最差。在对于原双基推进剂理论比冲、燃烧温度和特征速度的影响上,LLM-105 使其下降的幅度最小、FOX-12 降低的次之、DNPZ 降低的最大。在对等容爆热的影响上,FOX-12 使之下降的幅度最小、LLM-105 降低的次之、DNPZ 下降的最大。除 I-RDX 和 FOX-12 可提高原双基推进剂的氧系数外,本文所列的其余几种含能添加剂均会降低原双基推进剂的氧系数,其中 I-RDX 和 FOX-12 在提高氧系数上效果相当,NQ 和 LLM-105 对氧系数降低的幅度最小、且两者影响效果相当,TTNZ 的降低效果较大、DNPZ 降低的最大。除 LLM-105、I-RDX 和 FOX-7 会稍稍提高原双基推进剂燃烧产物的相对平均分子质量外,其余几种含能添加

剂均可不同程度的降低原双基推进剂燃烧产物的相对平均分子质量。其中 DPNZ 降低的幅度最大、TTNZ 降低的次之、FOX-12 仅稍有降低。分析计算结果可知, 本文所研究的几种钝感含能添加剂中, 钝感黑索今、

1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯和 1,4,5,8-四硝基-1,4,5,8-四氮杂萘烷引入以 TMETN 为基的双基推进剂后, 在保持推进剂较低机械感度的同时, 对提高其能量性能效果也较好。

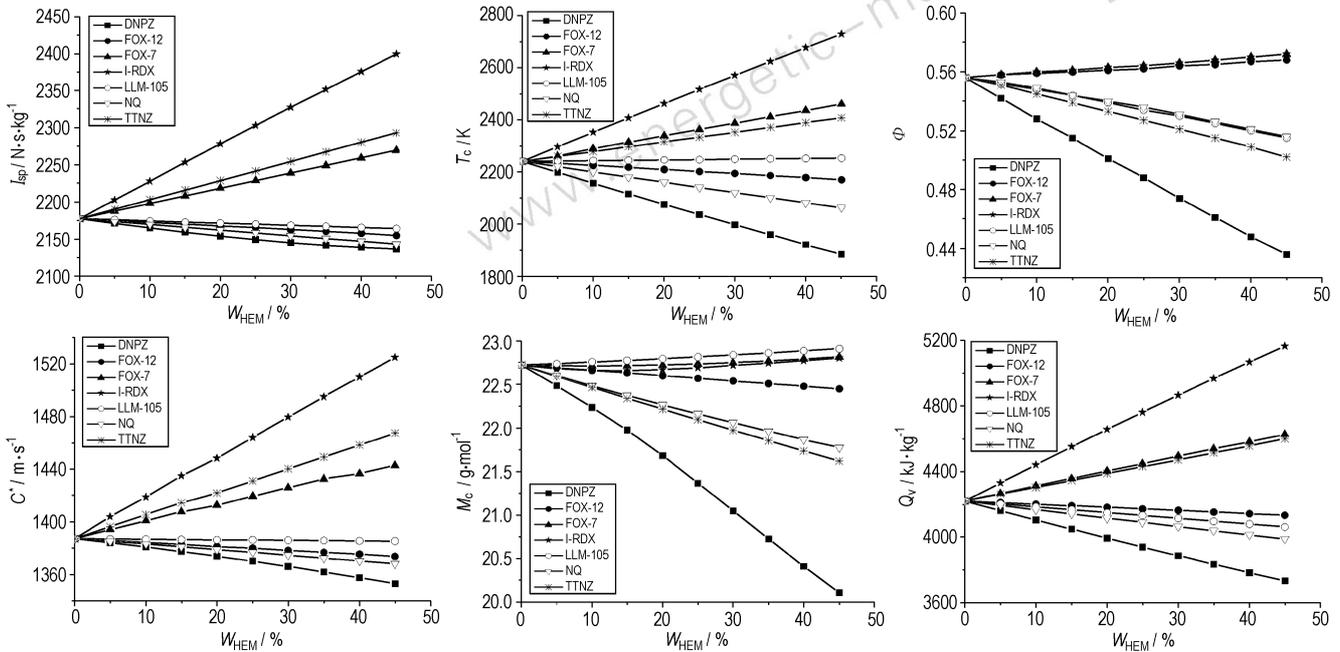


图1 几种含能添加剂含量对钝感双基系推进剂各能量特性参数的影响

Fig. 1 Effect of the content of several insensitive energetic additives on energy properties of composite modified double base propellant

### 3.2 以 DIANP 为辅助增塑剂的推进剂的能量特性

为了分析以 DIANP 为辅助增塑剂的钝感双基推进剂的能量特性, 本文利用能量计算软件计算了表 1 中各含能添加剂的质量分数对推进剂能量特性的影响规律。计算过程中, 推进剂中其它条件均相同, 仅含能添加剂的种类不同。计算时所用的原始双基系推进剂的配方组成与 3.1 中的双基推进剂的组成相同。计算出的各能量特性参量呈现的规律与图 1 相似, 仅是在具体数值上有些差异。表 3 列出了各含能添加剂的质量分数为 30% 的双基推进剂标准条件下的能量特性参数, 并且在表 4 中列出了相同条件下以 TEGDN 和 DIANP 为辅助增塑剂的双基系推进剂各能量特性的差异(以 TEGDN 增塑的推进剂能量特性参量值减去以 DIANP 增塑的推进剂的能量特性参量值)。

从表 4 可看出, 当双基系推进剂中钝感含能添加剂的质量分数为 30% 时, 用 TEGDN 增塑比用 DIANP 增塑的理论比冲高  $9 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$  左右, 特征速度高出  $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上, 燃烧温度高  $13 \text{ K}$  左右, 等容爆热高  $5.92 \sim 14.71 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 用 TEGDN 增塑比用 DIANP 增

塑的燃烧产物的相对平均分子质量低出 0.1 以上。这些可说明, 在提高固体推进剂能量上用 TEGDN 比用 DIANP 有利。然而 TEGDN 增塑比用 DIANP 增塑的氧系数低 0.13 左右。这表明, 在提高固体推进剂氧平衡方面, 用 DIANP 比用 TEGDN 好。因此, 针对提高双基推进剂能量的理论角度, 用 TEGDN 增塑与用 DIANP 增塑的双基系推进剂各有优缺点, 则用这两者增塑的优劣效果还应通过实际使用情况来证实。

表 3 以 DIANP 增塑的几种推进剂的能量特性  
Table 3 Energy properties of several propellants plasticized by DIANP

name	$\Phi$	$I_{sp}$ / $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$	$C^*$ / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$T_c$ /K	$M_c$	$Q_v$ / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
DNPZ	0.462	2154.54	1373.27	2011.09	20.849	3901.29
FOX-12	0.550	2171.61	1385.80	2207.73	22.425	4173.45
FOX-7	0.553	2248.19	1433.56	2401.43	22.613	4502.31
I-RDX	0.553	2336.91	1487.30	2584.77	22.571	4871.48
LLM-105	0.516	2177.36	1393.49	2262.82	22.731	4124.29
NQ	0.517	2134.63	1382.11	2134.63	21.963	4076.99
TTNZ	0.508	2263.54	1447.66	2366.62	21.863	4481.76

表 4 以 TEGDN 和 DIANP 增塑的几种推进剂的能量特性差值

Table 4 The difference of energy properties of several propellants plasticized by TEGDN and DIANP respectively

name	$\Delta\Phi$	$\Delta I_{sp}$ /N · s · kg <sup>-1</sup>	$\Delta C^*$ /m · s <sup>-1</sup>	$\Delta T_c$ /K	$\Delta M_c$	$\Delta Q_v$ /kJ · kg <sup>-1</sup>
DNPZ	-0.012	9.54	7.17	12.90	-0.154	14.71
FOX-12	-0.014	9.00	7.39	13.14	-0.117	10.27
FOX-7	-0.013	9.11	7.54	13.69	-0.139	7.88
I-RDX	-0.013	9.41	7.72	14.14	-0.148	5.92
LLM-105	-0.014	8.89	7.48	13.73	-0.109	9.27
NQ	-0.014	9.07	7.37	13.20	-0.099	12.29
TTNZ	-0.013	9.02	7.54	13.95	-0.111	9.52

#### 4 GAP 基推进剂能量特性的理论计算

叠氮缩水甘油醚(GAP)是一种主链为聚醚结构,侧链含叠氮基团的含能聚合物,以其为黏合剂基体、辅助于硝酸酯类化合物增塑、再含有一定量含能添加剂的固体推进剂,具有燃烧性能优异、机械感度低以及特征信号性能好等优点。因此,受到固体推进剂研究者的广泛关注<sup>[22]</sup>。

为了分析钝感含能添加剂应用于 GAP 基推进剂中的能量特性,本文利用能量计算软件计算了表 1 中各含能添加剂的质量分数为 75% 时的 GAP 基推进剂的能量特性,计算结果见表 5。计算过程中,其它条件均相同,仅推进剂中含能添加剂的种类不同。计算时所用的配方组成为 GAP 占 13%, TMETN 占 12%, 钝感含能添加剂占 75%。

表 5 几种钝感含能添加剂对 GAP 基钝感推进剂能量特性的影响

Table 5 Effects of several insensitivity and energetic additives on energy properties of GAP propellant

name	$\Phi$	$I_{sp}$ /N · s · kg <sup>-1</sup>	$C^*$ /m · s <sup>-1</sup>	$T_c$ /K	$M_c$	$Q_v$ /kJ · kg <sup>-1</sup>
DNPZ	0.317	2099.53	1299.30	1604.75	17.989	3369.74
FOX-12	0.505	2034.90	1293.81	1855.81	22.151	3505.14
FOX-7	0.517	2227.84	1425.55	2339.02	22.240	4355.23
I-RDX	0.517	2449.62	1563.86	2792.83	21.933	5245.81
LLM-105	0.420	2060.47	1308.94	1968.36	21.937	3413.54
NQ	0.426	2047.94	1294.48	1754.27	20.823	3407.48
TTNZ	0.407	2271.69	1461.67	2260.69	20.418	4317.24

从表 5 中数据可看出,几种钝感含能添加剂应用于 GAP 基推进剂时,其理论比冲和特征速度较高的依次为 I-RDX、TTNZ 和 FOX-7,而这两项性能最低的为 FOX-12;燃烧温度和等容爆热较高的依次为 I-RDX、FOX-7 和 TTNZ,较低的依次为 DNPZ 和 NQ;氧系数较高的为 FOX-7、I-RDX 和 FOX-12,较低的依次为 TTNZ

和 DNPZ;燃烧产物平均相对分子质量较高的依次为 FOX-7、FOX-12 和 I-RDX,较低的依次为 TTNZ 和 DNPZ。由计算结果分析可知,本文所述及的几种钝感含能添加剂中,钝感黑索今、1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯和 1,4,5,8-四硝基-1,4,5,8-四氮杂萘烷引入以 GAP 基推进剂后,有较好的保持低机械感度和提高能量性能的效果。

#### 5 结论

(1) 通过对各单元推进剂能量特性的计算表明,本文所考察的几种钝感含能添加剂中 I-RDX、FOX-7 和 TTNZ 的各能量特性参数的综合效果较好。

(2) 通过对几种含能添加剂含量不同的改性双基推进剂能量特性的计算表明,随着各钝感含能添加剂质量分数增加,所形成的双基系推进剂的理论比冲、特征速度、氧系数、燃烧温度、等容爆热和燃烧产物的平均相对分子质量均呈线性趋势变化。无论以 TEGDN 或 DIANP 作辅助增塑剂,I-RDX、TTNZ 和 FOX-7 引入双基系推进剂中,对提高此类推进剂综合能量特性的效果较佳。

(3) 通过对几种含能添加剂应用于 GAP 基推进剂中的能量特性的计算可知,当推进剂中各含能添加剂的含量相同时,I-RDX、TTNZ 和 FOX-7 引入双基系推进剂,对提高此类推进剂综合能量特性的效果较佳。

#### 参考文献:

- [1] 李上文, 赵凤起, 袁潮, 等. 国外固体推进剂研究与开发的趋势[J]. 固体火箭技术, 2001, 24(2): 41-53.  
LI Shang-wen, ZHAO Feng-qi, YUAN Chao, et al. Tendency of research and development for overseas solid propellants[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2001, 24(2): 41-53.
- [2] 庞爱民, 郑剑. 高能固体推进剂技术未来发展展望[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(4): 289-293.  
PANG Ai-min, ZHENG Jian. Prospect of the research and development of high energy solid propellant technology[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2004, 27(4): 289-293.
- [3] 李辰芳. 国外对钝感推进剂的研究[J]. 飞航导弹, 1997, (5): 39-41.
- [4] 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 insensitive solid propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(6): 371-375.
- [5] 莫红军, 白娟. 国外研制的几种钝感固体推进剂[J]. 飞航导弹, 2004, (8): 46-49.
- [6] 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. Impact and friction sensitivity of minimum smoke propellant based NC and TMETN [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1999,22(4): 5-8.
- [7] BENCHABNE M, MIOUSSE D. Stabilisation Du Melange Na-METN [A]. Proceeding of the 31th International Annual Conference of ICT [C], Karlsruhe Germany, 1990,77-1/77-14.
- [8] OYUMI Y. KIMURA E. Insensitive Munitious and Combustion Characteristics of GAP/AN Composition Propellant [J]. *Propellant, Explosives, Proctecics*, 1996,121(5): 271-276.
- [9] 赵凤起, 李上文, 宋洪昌, 等. 国外新型钝感双基推进剂的研究 [J]. 飞航导弹, 1999,(9): 29-31.
- [10] 陈沛, 赵凤起. 国外对 GAP 复合推进剂钝感性能的研究进展 [J]. 飞航导弹, 1999,(10):
- [11] 赵凤起, 陈沛, 李上文, 等. 三羟甲基乙烷三硝酸酯的热分解性能研究 [J]. 火炸药学报, 1999,22(3): 8-12.
- ZHAO Feng-qi, CHEN Pei, LI Shang-wen, et al. Investigation on thermal decomposition characteristics of trimethylolethane trinitrate (TMETN) [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1999,22(3): 8-12.
- [12] 赵凤起, 陈沛, 杨栋, 等. 含钾盐消焰剂的硝化棉基钝感推进剂燃烧性能研究 [J]. 火炸药学报, 2000,(1): 10-13.
- ZHAO Feng-qi, CHEN Pei, YANG Dong, et al. Combustion properties of insensitive nitrocellulose based propellant containing potassium compounds as flash suppressors [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2000,23(1): 10-13.
- [13] 赵凤起, 陈沛, 李上文. 钾盐消焰剂与 TMETN 和燃烧催化剂相互作用的实验研究 [J]. 含能材料, 2001,24(3): 100-103.
- CHEN Pei, ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen. Interaction of potassium salt flame suppressors with TMETN and burning catalysts during decomposition [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2001,24(3): 100-103.
- [14] KUBOTA N. Thermochemical Aspects of Combustion of Propellants and Explosives [M]. Germany: Kühn & Weyh, Freiburg, 2002.
- [15] 李生慧. DIANP 对硝酸发射药燃烧性能的影响研究 [D]. 西安: 西安近代化学研究所, 1993,7.
- [16] 王伯周, 刘愆, 张志忠, 等. 新型含能材料 FOX-12 性能研究 [J]. 含能材料, 2004,12(1): 38-39.
- WANG Bo-zhou, LIU Yan, ZHANG Zhi-zhong, et al. Study on properties of FOX-12 [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004,12(1): 38-39.
- [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] 蒲若琦, 杨泊清, 易景缙, 等. 火炸药手册(第四分册原材料) [M]. 西安: 兵器工业部第二〇四研究所, 1987.4.
- [19] 张杏芬. 国外火炸药原材料性能手册 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1991.11.
- [20] 周诚, 周彦水, 黄新萍. 1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯的合成和性能 [J]. 火炸药学报, 2005,28(2): 65-67.
- ZHOU Cheng, ZHOU Yan-shui, HUANG Xin-ping. Synthesis and properties of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005,28(2): 65-67.
- [21] 欧育湘, 刘进全, 陈博仁. 高能量密度化合物 [D]. 北京: 国防工业出版社, 2005,1.
- [22] 龚士杰. GAP 基推进剂综述 [J]. 推进技术, 1991,(1): 67-74.
- GONG Shi-jie. Summary of GAP base propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1991,(1): 61-74.

## Energy Characteristics of Several Propellants With Insensitive and Minimum Signature Properties

XU Si-yu, ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen, GAO Hong-xu, YI Jian-hua, GAO Yin

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

**Abstract:** The energy characteristics of monopropellants and propellants with insensitive and minimum signature properties containing seven kinds of insensitivity materials, such as *N,N'*-dinitropiperazine (DNPZ), *N*-guanylureadinitramide (FOX-12), 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene (FOX-7), insensitivity RDX (I-RDX), 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105), nitroguanidine (NQ) and 1,4,5,8-tetranitro-1,4,5,8-tetraazadecalin (TTNZ), are calculated by propellant energy calculation program. The calculation results show that the integrated energy characteristics of monopropellant, composite modified double base propellant and glycidyl azide polymer (GAP) base propellant containing I-RDX, FOX-7 and TTNZ respectively are excellent among seven materials above. The energetic properties of composite modified double base propellant containing I-RDX, FOX-7 and TTNZ, such as specific impulse, characteristic velocity, combustion temperature and heat of explosion at constant volume, increase with the mass fraction of the energetic additives increasing, while the oxygen coefficient and the relative molecular mass of products decrease with the mass fraction of three energetic additives increasing.

**Key words:** physical chemistry; solid propellant; insensitivity; minimum signature; energy characteristics; reaction capability; theoretical calculation