

文章编号: 1006-9941(2015)01-0037-06

BAMO/AMMO 共聚物基高能固体推进剂能量特性计算和分析

裴江峰, 赵凤起, 宋秀铎, 徐司雨, 姚二岗, 李 猛

(西安近代化学研究所燃烧与爆炸重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 用“能量计算之星”程序(ECS)计算了以3,3-二叠氮甲基氧杂环丁烷(BAMO)与3-甲基-3-叠氮甲氧基氧杂环丁烷(AMMO)的嵌段共聚物(BAMO/AMMO)为黏合剂的高能固体推进剂的能量特性。研究了添加不同增塑剂(1,5-二叠氮-3-硝基氮杂戊烷(DIANP)、聚叠氮缩水甘油醚(GAP)、*N*-丁基-2-硝酸酯乙基硝酸胺(BuNENA))、氧化剂(高氯酸铵(AP)、六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)及呋咱类化合物(3,4-二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF)、二硝基偶氮氧化二呋咱(DNAF)、二叠氮基偶氮氧化呋咱(DAAOF))和高能燃料(铝粉(Al)、三氢化铝(AlH₃))对推进剂能量特性参数(比冲(I_{sp})、燃温(T_c)、氧系数(φ),等)的影响规律。结果表明: BuNENA增塑的推进剂比冲高于DIANP或GAP增塑的BAMO/AMMO基推进剂。BuNENA增塑的推进剂中,随着CL-20逐步替代AP,推进剂的 T_c 呈现先增后减的趋势。当CL-20含量大于55%时,推进剂比冲基本保持不变,趋于最大值。当CL-20完全替代AP,比冲下降。以DNAF代替CL-20可使推进剂比冲由2723.71 N·s·kg⁻¹提高至2798.00 N·s·kg⁻¹。以AlH₃替代Al与CL-20,同时提高体系 φ 时,推进剂能量得到大幅提高。

关键词: 物理化学; 3,3-二叠氮甲基氧丁环与3-叠氮甲氧基-3-甲基氧丁环共聚物(BAMO/AMMO); 黏合剂; 固体推进剂; 能量特性; 理论计算

中图分类号: TJ55; V512; O64

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.01.008

1 引言

作为火箭和导弹发动机的动力源,固体推进剂的性能直接影响导弹武器的作战效能和生存能力,叠氮聚醚复合推进剂具有高能、钝感、低特征信号等优点,因此,国内外对其性能及应用进行了大量研究^[1-3]。开展推进剂的能量特性的理论研究对指导配方设计具有重要意义。徐司雨等^[4]计算研究了球形黑索今(I-RDX)、1,4,5,8-四硝基-1,4,5,8-四氮杂萘烷(TTNZ)、1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7)等几种钝感含能添加剂应用于钝感聚叠氮缩水甘油醚(GAP)基推进剂时对其能量特性的影响;翟进贤等^[5]利用最小自由能法计算了不同固体填料及增塑剂对3,3-二叠氮甲基氧杂环丁烷(BAMO)-四氢呋喃(THF)基推进剂比冲影响规律,指出推进剂中黑索今(RDX)与高氯酸铵(AP)存在最佳添加比;刘晶如

等^[6]通过能量计算得出了八条实现新型高能推进剂的技术途径。

BAMO与3-甲基-3-叠氮甲氧基氧杂环丁烷(AMMO)的嵌段共聚物(BAMO/AMMO)是一种叠氮聚醚类含能热塑性弹性体,具有较低的玻璃化转变温度和较高的正生成热,力学性能优良,适合作为黏合剂,因此对以其为基体的固体推进剂的研究引起了广泛关注,其燃烧及热分解规律等已有研究^[7-9],但对这类推进剂的能量计算鲜有报道。本研究设计了以BAMO/AMMO为黏合剂的推进剂配方体系,考察不同增塑剂、氧化剂及高能燃料对推进剂能量特性的影响规律,为BAMO/AMMO基高能固体推进剂的配方设计及应用提供理论依据。

2 配方组成及计算

推进剂配方主要组分:

黏合剂: BAMO/AMMO($M_n \sim 25000$);

增塑剂: 1,5-二叠氮-3-硝基氮杂戊烷(DIANP)、GAP($M_n \sim 2000$)、*N*-丁基-2-硝酸酯乙基硝酸胺(BuNENA);

高能氧化剂: AP、六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)、3,4-二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF)、二硝基偶氮氧

收稿日期: 2014-01-02; 修回日期: 2014-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助(2173163)

作者简介: 裴江峰(1983-),男,博士生,工程师,主要从事固体火箭推进剂配方与工艺研究。e-mail: 66263360@qq.com

通信联系人: 赵凤起(1963-),男,研究员,主要从事含能材料研究。

e-mail: npecc@163.com

化二唑啉 (DNAF)、二叠氮基偶氮氧化二唑啉 (DAAOF);

高能燃料: 铝粉 (Al)、氢化铝 (AlH_3)。

各组分的物性参数见表 1。

研究采用西安近代化学研究所燃烧与爆炸重点实验室开发的“能星 (ECS)”能量计算程序 5.0 版^[11]计

算并分析以上推进剂的能量水平, 考察含能组分的含量以及组分间的对比对推进剂标准理论比冲 (I_{sp})、特征速度 (C^*)、燃温 (T_c)、燃气平均相对分子质量 (\bar{M}) 和氧系数 (φ) 的影响, 并评定推进剂的能量特性。计算条件为: 推进剂初始温度 298 K, 燃烧室压力 7.0 MPa, 喷管出口压力 0.1 MPa。

表 1 组分物性参数^[10]

Table 1 Physical parameters of the components

components	chemical formula	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\Delta_f H_m^\theta/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	φ
BAMO/AMMO	—	1.25	29.98	0.090
diazidopentane (DIANP)	$\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_2$	1.33	539.7	0.167
glycidyl azide polymer (GAP)	$(\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_3\text{O})_n$	1.30	141.0	0.118
butyl nitrooxy ethyl nitramine (BuNENA)	$\text{C}_6\text{H}_{13}\text{N}_3\text{O}_5$	1.21	459.0	0.270
ammonium perchlorate (AP)	NH_4ClO_4	1.95	-294.1	2.500
hexanitroazasowurtzitane (CL-20)	$\text{C}_6\text{H}_6\text{N}_{12}\text{O}_{12}$	1.98	415.5	0.800
aluminium (Al)	Al	2.70	0	0
aluminium trihydride (AlH_3)	AlH_3	1.43	-11.6	0
3,4-dinitrofurazanfuroxan (DNTF)	$\text{C}_6\text{N}_8\text{O}_8$	1.94	644.0	0.667
dinitroazodifuroxan (DNAF)	$\text{C}_4\text{N}_8\text{O}_8$	2.02	668.0	1.000
diazidoazofuroxan (DAAOF)	$\text{C}_4\text{N}_{12}\text{O}_4$	1.67	1305.0	0.500

Note: φ is oxygen coefficient, BAMO is 3, 3'-bis (azidomethyl) oxetane, AMMO is 3-azidomethyl-3-methyloxetane, ρ is density, $\Delta_f H_m^\theta$ is standard molar formation enthalpy.

3 计算结果与讨论

3.1 不同增塑剂对推进剂能量的影响

表 2 列出了 3 种不同增塑剂增塑的 BAMO/AMMO 推进剂能量特性参数, 体系组分为: BAMO/AMMO 15%, AP 70%, Al 10%, 增塑剂 5%。

表 2 不同增塑剂增塑的 BAMO/AMMO 推进剂的能量特性

Table 2 Energy characteristics of BAMO/AMMO based propellants plasticized with different plasticizers

No.	plasticizer	I_{sp} / $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$	C^* / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	φ	\bar{M}	T_c /K
1	GAP	2632.97	1611.7	0.835	29.6	3555
2	DIANP	2636.40	1612.5	0.849	30.0	3588
3	BuNENA	2655.90	1623.3	0.864	29.7	3590

Note: I_{sp} is specific impulse, C^* is characteristic velocity, \bar{M} is average relative molecular mass of gas, T_c is combustion temperature.

从表 2 可以看出, 分别添加 3 种增塑剂的 BAMO/AMMO 推进剂比冲均达到 $2630 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上, 其中添加 GAP 与添加 DIANP 的推进剂比冲接近, 分别为 $2632.97, 2636.40 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$, 尽管从二者的标准摩尔生成焓看来, GAP ($141.0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) 远

低于 DIANP ($539.7 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)^[10], 但添加 GAP 的推进剂燃气平均相对分子质量 \bar{M} 、燃温 T_c 与添加 DIANP 的推进剂在同一水平, 由表达式 $I_{sp} \propto (T_c/\bar{M})^{1/2}$ 可知: 比冲 I_{sp} 与燃温的平方根成正比、与燃烧产物平均相对分子质量平方根成反比^[12], 因此二者的比冲接近, 说明 GAP 在降低燃气平均相对分子质量方面要优于 DIANP。

添加新型含能增塑剂 BuNENA 的推进剂能量略高于前两者, I_{sp} 达到了 $2655.90 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比含 DIANP 的推进剂提高近 $20 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$; 特征速度比含 DIANP 的推进剂提高 $10.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 达到 $1623.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。尽管 BuNENA 的标准摩尔生成焓 ($459.0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) 比 DIANP ($539.7 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) 略低^[10], 但由于其分子中氢元素含量较高, 使推进剂燃气平均相对分子质量较低, 较高的氧元素含量使推进剂体系氧系数提高, 有利于提升燃温, 提高能量。

3.2 CL-20 逐步取代 AP 对推进剂能量的影响

作为迄今能量最高的单质炸药之一, CL-20 具有较高的生成焓和氧系数, 加入推进剂后能够提高推进剂能量^[13]。为了研究 CL-20 取代 AP 对推进剂能量特性的影响规律, 选定 BAMO/AMMO 为 15%、

BuNENA为5%、Al为10%时的基础配方体系进行能量特性计算,获得了推进剂能量特性参数随CL-20与AP含量变化的计算结果,见表3。

由表3可知,当推进剂中氧化剂全部为AP时,比冲为 $2655.90 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ (No.3),特征速度为 $1623.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,随着CL-20含量增加、AP含量减少,氧系数 φ 不断减小,比

冲和特征速度逐渐增大,但CL-20与AP比例大于一定程度(55:15),标准理论比冲变化程度趋于平缓,基本不随CL-20增加而发生变化,比冲和特征速度趋于最大值,分别约为 $2725 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与 $1690 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;当氧化剂仅为CL-20时,比冲降低至 $2710.88 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ (No.12),特征速度降低至 $1687.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表3 BuNENA增塑的BAMO/AMMO推进剂能量的特性参数

Table 3 Energy characteristics of BAMO/AMMO based propellants plasticized with BuNENA

No.	mass fraction/%					energy characteristics				
	BAMO/AMMO	BuNENA	AP	Al	CL-20	$I_{sp}/\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$	$C^*/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	φ	\bar{M}	T_c/K
3	15	5	70	10	0	2655.90	1623.3	0.849	29.68	3590
4	15	5	65	10	5	2662.37	1631.5	0.811	29.32	3600
5	15	5	55	10	15	2681.77	1647.1	0.740	28.63	3613
6	15	5	45	10	25	2695.49	1660.8	0.674	27.96	3620
7	15	5	35	10	35	2707.05	1673.3	0.614	27.31	3620
8	15	5	25	10	45	2716.46	1684.3	0.558	26.68	3613
9	15	5	15	10	55	2723.71	1690.7	0.506	26.08	3597
10	15	5	10	10	60	2724.60	1691.4	0.481	25.80	3581
11	15	5	5	10	65	2724.99	1692.2	0.458	25.51	3550
12	15	5	-	10	70	2710.88	1687.0	0.435	25.49	3472

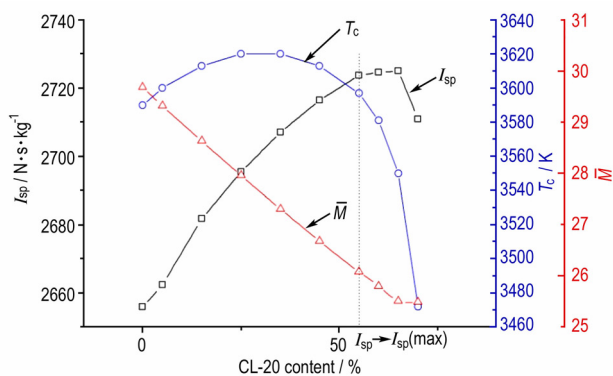


图1 CL-20含量对BAMO/AMMO推进剂 I_{sp} , \bar{M} 和 T_c 的影响

Fig.1 Curves of CL-20 content vs I_{sp} , \bar{M} and T_c for BAMO/AMMO propellants

为了便于分析,将表2中标准理论比冲、燃温与燃气相对平均分子质量对CL-20含量作图,如图1所示。由图1可看出:推进剂燃气的平均相对分子质量随CL-20含量的增加逐渐减少,几乎呈线性下降趋势,这是由于当CL-20逐渐替代AP后,推进剂体系中Cl元素的含量逐渐减少,相对原子质量较小的H、O等元素的含量增加所造成的。而推进剂燃温(T_c)随CL-20含量的增加呈现抛物线趋势,当CL-20含量为25%~35%时, T_c 呈现极大值,当CL-20含量大于60%时,燃温迅速下降,这说明CL-20与AP存在最佳配比,即

合适的氧系数,使推进剂的体系中可燃元素与氧化元素配比达到最佳,燃烧时反应更加充分,放热量更大。因此,为获得更高的燃温和较高能量,设计BAMO/AMMO/AP/CL-20/Al体系推进剂时应使氧系数大于0.45。正是由于燃气平均相对分子质量线性下降,而燃温为抛物线的变化趋势,使推进剂的理论比冲呈现出随CL-20含量增加逐渐增大,增大到最大值后呈现略微减小的趋势。

3.3 呋咱类化合物逐步取代CL-20对推进剂能量的影响

呋咱类化合物通常氮元素含量较高,因此具有较高的能量,并具有较好的热稳定性,是提高推进剂能量的有效途径。为考察呋咱类化合物含量对BAMO/AMMO基推进剂能量的影响,选取了三种呋咱类化合物DNTF、DAAOF及DNAF分别逐渐替代CL-20加入推进剂中,选定BAMO/AMMO为15%、BuNENA为5%、Al为10%、AP为15%时的基础配方体系进行能量特性计算,结果见表4~表6。

表4结果表明,当DNTF逐渐代替CL-20引入BAMO/AMMO推进剂体系后,能量大幅下降,这是由于推进剂燃气平均相对分子质量大幅增大,燃温降低所致,推进剂体系中CL-20被DNTF每替代10%,燃气平均相对分子质量增大约14%。

表 4 含 DNTF 的 BAMO/AMMO 推进剂的能量特性

Table 4 Energy characteristics of BAMO/AMMO based propellant containing DNTF

No.	mass fraction/%				energy characteristics				
	AP	Al	CL-20	DNTF	$I_{sp}/N \cdot s \cdot kg^{-1}$	$C^*/m \cdot s^{-1}$	φ	\bar{M}	T_c/K
9	15	10	55	0	2723.71	1690.7	0.506	26.08	3597
13	15	10	40	15	2477.15	1504.1	0.494	29.43	2970
14	15	10	30	25	2384.54	1430.7	0.486	33.69	3017
15	15	10	20	35	2260.86	1348.7	0.478	38.70	3051

表 5 结果表明,当高生成焓的 DAAOF ($\Delta_f H_m^\theta = 1305.0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) 逐渐代替 CL-20 加入 BAMO/AMMO 推进剂时,理论比冲与特征速度呈现出先增大后减小的变化趋势,这是由于当少量 DAAOF 替代 CL-20 时

使推进剂燃气平均相对分子质量降低,燃温提高,因此使能量提高;而当继续增加 DAAOF 含量时,由于推进剂体系氧系数减小,燃温降低,因此能量逐渐下降,当 DAAOF 完全取代 CL-20 时,比冲降低至 $2643.94 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 5 含 DAAOF 的 BAMO/AMMO 推进剂的能量特性

Table 5 Energy characteristics of BAMO/AMMO based propellant containing DAAOF

No.	mass fraction/%				energy characteristics				
	AP	Al	CL-20	DAAOF	$I_{sp}/N \cdot s \cdot kg^{-1}$	$C^*/m \cdot s^{-1}$	φ	M_n	T_c/K
9	15	10	55	0	2723.71	1690.7	0.506	26.08	3597
16	15	10	40	15	2742.14	1703.5	0.473	25.94	3599
17	15	10	30	25	2727.14	1698.6	0.451	25.82	3559
18	15	10	20	35	2693.24	1678.2	0.427	25.98	3470
19	15	10	10	45	2664.91	1641.0	0.404	26.17	3330
20	15	10	-	55	2643.94	1597.7	0.380	26.39	3166

表 6 结果表明,DNAF 逐步替代 CL-20 加入推进剂时,推进剂体系的氧系数逐渐增大,燃温升高,使能量有较大幅度提高,当 DNAF 完全替代 CL-20 时,比

冲由 277.93 s (No. 9) 提高至 285.51 s (No. 25), 特征速度也由 $1690.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高至 $1728.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

综合以上三种含不同唑啉化合物推进剂的能量计

表 6 含 DNAF 的 BAMO/AMMO 推进剂的能量特性

Table 6 Energy characteristics of BAMO/AMMO based propellant containing DNAF

No.	mass fraction/%				energy characteristics				
	AP	Al	CL-20	DNAF	$I_{sp}/N \cdot s \cdot kg^{-1}$	$C^*/m \cdot s^{-1}$	φ	\bar{M}	T_c/K
9	15	10	55	0	2723.71	1690.7	0.506	26.08	3597
21	15	10	40	15	2747.14	1705.3	0.518	26.76	3699
22	15	10	30	25	2761.44	1712.0	0.526	27.22	3763
23	15	10	20	35	2774.48	1718.1	0.534	27.68	3826
24	15	10	10	45	2786.34	1723.3	0.543	28.16	3886
25	15	10	-	55	2798.00	1728.2	0.551	28.69	3945

算结果可以看出,虽然 DNTF、DAAOF 与 DNAF 均具有较高的生成焓,但只有 DNAF 的加入能够大幅提高推进剂的比冲。这是由于含能材料的能量水平不仅取决于标准生成焓,还与氧系数有关。DAAOF 尽管具有高生成焓,但由于其氧系数较低,大量取代 CL-20 时反而使推进剂能量降低。一般情况下,密度高、氧系数高、而标准生成焓为高正值的含能材料,其能量水平

越高。DNAF 的密度、氧系数及标准生成焓均高于 CL-20,因此能够大幅提高推进剂的能量。

3.4 高能燃料 AlH_3 对推进剂能量的影响

AlH_3 是一种高选择性的还原剂,不仅可用作储氢材料、燃料电池的氢源和聚合催化剂,而且由于它具有很高的燃烧热和比冲,可用作固体推进剂的高能添加剂,提高推进剂能量^[14]。计算了含 AlH_3 的 BAMO/AMMO

推进剂的能量特性参数,结果见表7。

表7 含 AlH_3 的 BAMO/AMMO 推进剂的能量特性

Table 7 Energy characteristics of BAMO/AMMO based propellant containing AlH_3

No.	mass fraction/%				energy characteristics				
	AP	Al	CL-20	AlH_3	$I_{sp}/\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$	$C^*/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	φ	\bar{M}	T_c/K
9	15	10	55	0	2723.71	1690.7	0.506	26.08	3597
26	15	10	40	15	2682.16	1621.2	0.345	25.49	2939
27	15	5	40	20	2720.58	1651.1	0.335	24.10	2912
28	15	0	40	25	2753.90	1678.8	0.323	22.91	2885
29	15	10	30	25	2670.01	1608.7	0.269	25.73	2909
30	15	10	20	35	2635.02	1586.4	0.206	25.97	2839
31	15	10	10	45	2531.44	1504.7	0.153	26.74	2610
32	25	0	30	25	2773.30	1682.4	0.357	22.73	3028
33	35	0	20	25	2821.52	1736.1	0.394	22.66	3260
34	45	0	10	25	2865.03	1753.5	0.432	23.16	3375

由表7结果可知:(1)由 AlH_3 逐渐代替 Al 时,推进剂氧系数略有降低,但由于体系中氢含量的增加,使推进剂燃气平均相对分子质量降低,理论比冲与特征速度得到提高,即 $\text{No. 26} < \text{No. 27} < \text{No. 28}$; (2)当 AlH_3 逐步替代 CL-20 加入推进剂,使体系中氧系数降低,燃温下降,理论比冲逐渐降低,即 $\text{No. 9} > \text{No. 26} > \text{No. 29} > \text{No. 30} > \text{No. 31}$; (3)当固定 AlH_3 量,降低 CL-20 含量,增加 AP 含量时,由于体系的氧系数提高,燃温升高,理论比冲不断提高,即 $\text{No. 28} < \text{No. 32} < \text{No. 33} < \text{No. 34}$,最高值达到 $2865.03 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ (No. 34)。

综上所述, AlH_3 的加入能够提高推进剂体系中 H 元素的含量,使燃气平均相对分子质量降低,提高能量;但由于 AlH_3 分子中不含 O 元素,推进剂体系的氧系数大幅降低 ($\varphi < 0.3$),此时可作为贫氧推进剂用于冲压发动机,若在普通发动机中使用,则需增加氧化剂含量以提高推进剂体系的氧系数,以提高能量;另外,由于 AlH_3 密度较小,推进剂配方中添加较大量时,需综合考虑工艺性能。

4 结论

(1) 新型含能增塑剂 BuNENA 可降低 BAMO/AMMO 基推进剂燃气平均相对分子质量,提高燃温,从而提高推进剂能量。

(2) CL-20 逐渐替代 AP,使推进剂燃气平均相对分子质量下降,而燃温呈抛物线的变化趋势,CL-20 与 AP 存在最佳配比 (55 : 15),设计 BAMO/AMMO/AP/Al/CL-20 推进剂配方时,体系氧系数应大于 0.45。

(3) DNTF 逐渐替代 CL-20 时,推进剂燃气平均

相对分子质量增大,能量降低,DAAOF 逐渐替代 CL-20 时,推进剂能量变化呈现先增大后减小的趋势,DNAF 的密度、氧系数及标准生成焓均高于 CL-20,逐渐替代 CL-20 使推进剂能量不断提高。

(4) AlH_3 能够降低推进剂燃气平均相对分子质量,但使氧系数大幅降低 ($\varphi < 0.3$),因此应增加氧化剂含量以提高体系的氧系数,可使含 AlH_3 的推进剂能量大幅提高。

参考文献:

- [1] 沙恒. 国外双叠氮甲基氧杂环丁烷的应用研究[J]. 固体火箭技术, 1998, 21(1): 39-42.
SHA Heng. Application study on bisazidomethyl-oxetane abroad [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1998, 21(1): 39-42.
- [2] 宋晓庆, 周集义, 王文浩, 等. 聚叠氮缩水甘油醚改性研究进展[J]. 含能材料, 2007, 15(4): 425-430.
SONG Xiao-qing, ZHOU Ji-yi, WANG Wen-hao, et al. Research progress of glycidyl azide polymers modification [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(4): 425-430.
- [3] 党永战, 赵凤起, 王国强, 等. 国外叠氮氧杂环丁烷基推进剂研究[J]. 飞航导弹, 2005, 8: 48-55.
- [4] 徐司雨, 赵凤起, 李上文, 等. 几种钝感低特征信号推进剂的能量特性[J]. 含能材料, 2006, 14(6): 416-420.
XU Si-yu, ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen, et al. Energy characteristics of several propellants with insensitive and minimum signature properties [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(6): 416-420.
- [5] 翟进贤, 杨荣杰, 朱立勋, 等. BAMO-THF 复合推进剂能量特性计算与分析[J]. 含能材料, 2009, 17(1): 73-78.
ZHAI Jin-xian, YANG Rong-jie, ZHU Li-xun, et al. Calculation and analysis of energy characteristics of composite BAMO-THF propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(1): 73-78.
- [6] 刘晶如, 罗运军, 杨寅. 新一代高能固体推进剂的能量特性计算研究[J]. 含能材料, 2008, 16(1): 94-99.

- LIU Jing-ru, LUO Yun-jun, YANG Yan. Energetic characteristics calculation of a new generation of high energy solid propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(1): 94-99.
- [7] Oyumi Y, Inokami K, Yamazaki K, et al. Burning rate augmentation of BAMO based propellants [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1994, 19: 180-186.
- [8] Eishu Kimura, Yoshio Oyumi. Thermal decomposition of BAMO copolymers [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1995, 20: 322-326.
- [9] 宋秀铎, 赵凤起, 王江宁, 等. BAMO-AMMO 的热行为及其与含能组分的相容性 [J]. *火炸药学报*, 2008, 31(3): 75-78.
SONG Xiu-duo, ZHAO Feng-qi, WANG Jiang-ning, et al. Thermal behaviors of BAMO-AMMO and its compatibility with some energetic materials [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(3): 75-78.
- [10] 田德余, 赵凤起, 刘剑洪. 含能材料及相关物手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [11] 李猛, 赵凤起, 徐司雨, 等. 三种能量计算程序在推进剂配方设计中的比较 [J]. *火炸药学报*, 2013, 36(3): 73-77.
- LI Meng, ZHAO Feng-qi, XU Si-yu, et al. Comparison of three kinds of energy calculation programs in formulation design of solid propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(3): 73-77.
- [12] 刘继华. 火炸药物理化学性能 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1982: 49-58.
- [13] 王申, 金韶华, 盛思源. 含 CL-20 的 NEPE 推进剂能量水平分析 [J]. *火炸药学报*, 2002(1): 12-15.
WANG Shen, JIN Shao-hua, SHENG Si-yuan. Energetic level evaluation of NEPE solid propellant containing hexanitrohexaazaisowurtzitan (CL-20) [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002(1): 12-15.
- [14] 李上文, 赵凤起, 袁潮, 等. 国外固体推进剂研究与开发趋势 [J]. *固体火箭技术*, 2002, 25(2): 36-42.
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*, 2002, 25(2): 36-42.

Calculation and Analysis on Energy Characteristics of High Energy Propellants Based on BAMO/AMMO Copolymers

PEI Jiang-feng, ZHAO Feng-qi, SONG Xiu-duo, XU Si-yu, YAO Er-gang, LI Meng

(Science and Technology on Combustion and Explosion Laboratory, Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The energy characteristics of high energy solid propellants based on the block copolymer (BAMO/AMMO) of 3, 3'-bis (azidomethyl) oxetane (BAMO) and 3-azidomethyl-3-methyloxetane (AMMO) (BAMO/AMMO) as binder were calculated by "Energy Calculation Star (ECS)" code. The influence of different plasticizers (diazidopentane (DIANP), glucidyl azide polymer (GAP) and butyl nitrooxy ethyl nitramine (BuNENA)), oxidants (ammonium perchlorate (AP), hexanitroxaazasowurtzitan (CL-20), furazan compounds (3, 4-dinitrofurazanfuroxan (DNF), dinitroazodifuroxan (DNAF) and diazidoazofuroxan (DAAOF)), and high energy fuels (aluminium (Al) powder and aluminum trihydride (AlH₃)) on the energy characteristic parameters (specific impulse (I_{sp}), combustion temperature (T_c) and oxygen coefficient (φ), etc.) of BAMO/AMMO based propellants were studied. Results show that I_{sp} of propellant plasticized with Bu-NENA is greater than that of BAMO/AMMO based propellants plasticized by DIANP or GAP. With replacing AP by CL-20 gradually in propellant plasticized by Bu-NENA, the T_c of BAMO/AMMO/BuNENA based propellant shows a trend of increase early and decrease then. When the content of CL-20 is more than 55%, the I_{sp} of propellant remains the same and increases to maximum. When AP was replaced by CL-20 entirely, the value of I_{sp} is declined. The substitution of DNAF for CL-20 makes the I_{sp} of propellant enhance from 2723.71 N · s · kg⁻¹ to 2798.00 N · s · kg⁻¹. When Al powder and CL-20 are replaced by AlH₃ and the value of φ of system is increased, the energy of propellant is sharply increased.

Key words: physical chemistry; (BAMO/AMMO copolymer); binder; propellants; energy characteristics; theoretical calculation

CLC number: TJ55; V512; O64

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.01.008