

文章编号:1006-9941(2009)01-0073-06

BAMO-THF 复合推进剂能量特性计算与分析

翟进贤¹, 杨荣杰¹, 朱立勋², 李建民¹

(1. 北京理工大学材料科学与工程学院, 北京 100081; 2. 西安北方惠安化学工业公司, 陕西 西安 710302)

摘要:利用最小自由能法研究了以 3,3-二叠氮甲基氧丁环(BAMO)与四氢呋喃(THF)共聚醚(PBT)为粘结剂,高氯酸铵(AP)、黑索今(RDX)、铝粉(Al)、二硝酰胺铵(ADN)为固体填料,不同增塑剂条件下推进剂比冲变化规律。理论计算表明:以 2,2-二硝基丙醇缩甲醛与 2,2-二硝基丙醇缩乙醛等质量比混合物(A3)、硝化甘油与二乙二醇二硝酸酯等质量比混合物(NG/DEGDN)作增塑剂时,推进剂比冲随 RDX 含量变化呈抛物线形,固体填料存在最佳添加比;NG/DEGDN 增塑体系推进剂比冲高于 A3 体系。15% ADN 取代 AP 时,由于燃烧产物平均相对分子质量降低,推进剂比冲显著提高。

关键词:物理化学; BAMO-THF 共聚醚; 复合推进剂; 能量特性; 二硝酰胺铵(ADN)

中图分类号:TJ55; O64

文献标识码:A

1 引言

叠氮聚醚复合推进剂由于高能、高燃速、低特征信号等优点,因而引起了广泛关注^[1]。理论研究叠氮聚醚复合推进剂能量特性对指导配方设计具有重要应用价值。

目前,关于叠氮聚醚复合推进剂能量特性报道集中于 GAP(聚叠氮缩水甘油醚)系列。为降低复合推进剂特征信号,文献[2]以 3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)为固体填料,所得 GAP/DNTF 推进剂最高比冲 2634 N·s·kg⁻¹;文献[3]以二硝酰胺铵(ADN)为固体填料,所得 GAP/ADN 无烟推进剂最高比冲 2607 N·s·kg⁻¹。为了提高能量,文献[4]采用高铝含量,研究了多种含能增塑剂、不同固体填料对 GAP 复合推进剂能量的影响,所得最高推进剂比冲 2854 N·s·kg⁻¹。钝感含能化合物作为固体填料是降低复合推进剂机械感度手段之一。文献[5]计算了

以 GAP 为粘结剂,三羟甲基乙烷三硝酸酯(TMETN)为增塑剂,钝感含能化合物为固体填料复合推进剂的能量特性,所得最高比冲 2450 N·s·kg⁻¹。

本实验从复合推进剂工艺角度考虑,配方采用高液含量^[6-7],研究了固体填料比、含能增塑剂对 PBT(3,3-二叠氮甲基氧丁环(BAMO)与四氢呋喃(THF)共聚醚)复合推进剂能量的影响。

2 配方组成及计算说明

复合推进剂组成:粘结剂 PBT(3,3-二叠氮甲基氧丁环(BAMO)与四氢呋喃(THF)摩尔比 3:2 共聚醚,2240);增塑剂 2,2-二硝基丙醇缩甲醛与 2,2-二硝基丙醇缩乙醛等质量比混合物(A3)、硝化甘油与二乙二醇二硝酸酯等质量比混合物(NG/DEGDN);固体填料高氯酸铵(AP)、黑索今(RDX)、铝粉(Al)以及二硝酰胺铵(ADN)。配方组份物性参数见表 1。

表 1 组份物性参数^[8-12]

Table 1 Physical parameters of the components used^[8-12]

parameters	PBT	A3	Al	AP	RDX	NG	DEGDN	ADN
$\rho/g \cdot cm^{-3}$	1.27	1.38	2.71	1.95	1.81	1.59	1.38	1.80
$\Delta H^0/kJ \cdot kg^{-1}$	1185	-1940.5	0	-2513.2	271.3	-2190.5	-2013.5	-1405.7

利用最小自由能原理计算推进剂理论比冲(I_{sp})、特征速度(C^*)、燃烧温度(T_c)、燃烧产物平均相对分

子质量(\bar{M})及氧平衡值(OB)。计算软件“含能材料能量特性计算与 CAD 系统”由国防科技大学编制。计算条件,推进剂初温 298 K,燃烧室压力 6.86 MPa,喷管出口压力 0.098 MPa。

收稿日期:2008-05-04;修回日期:2008-07-10

作者简介:翟进贤(1975-),男,博士,讲师,从事固体复合推进剂研究。

e-mail:zhjx@bit.edu.cn

3 计算结果及分析

3.1 A3 增塑体系

表2、表3是以A3作增塑剂,Al含量分别为5%、10%,推进剂能量特性随AP、RDX变化的计算结果。可以看出,表2和表3中燃烧产物平均相对分子质量、氧平衡值随RDX含量增加而单调下降。

表2中,以纯AP(No.1)作氧化剂时推进剂比冲

为 $2515 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$;以纯RDX(No.15)作氧化剂时推进剂比冲为 $2476 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。若AP与RDX两者以质量比55:15(No.4)或50:20(No.5)加入时,推进剂比冲达到 $2530 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别比配方No.1和No.15高 $15 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $54 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。若AP与RDX以质量比35:35(No.8)或30:40(No.9)加入时,特征速度达到最大值 $1581 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表2 A3增塑PBT推进剂能量性能(Al含量5%)

Table 2 Energetic properties of PBT propellants plasticized with A3 (Al 5%)

No.	content/%					property parameter				
	PBT	A3	Al	AP	RDX	I_{sp} / $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$	C^* / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	T_c /K	\bar{M}	OB
1	10	15	5	70	-	2515	1541	3261	29.64	-0.0536
2	10	15	5	65	5	2523	1552	3272	29.01	-0.0813
3	10	15	5	60	10	2527	1562	3273	28.40	-0.1091
4	10	15	5	55	15	2530	1568	3265	27.81	-0.1369
5	10	15	5	50	20	2530	1573	3248	27.24	-0.1647
6	10	15	5	45	25	2529	1577	3225	26.70	-0.1925
7	10	15	5	40	30	2527	1579	3197	26.17	-0.2202
8	10	15	5	35	35	2524	1581	3164	25.67	-0.2480
9	10	15	5	30	40	2519	1581	3127	25.19	-0.2758
10	10	15	5	25	45	2514	1580	3087	24.72	-0.3035
11	10	15	5	20	50	2508	1579	3044	24.27	-0.3314
12	10	15	5	15	55	2501	1577	2999	23.84	-0.3591
13	10	15	5	10	60	2493	1575	2952	23.42	-0.3868
14	10	15	5	5	65	2485	1571	2904	23.02	-0.4146
15	10	15	5	-	70	2476	1568	2855	22.63	-0.4425

表3 A3增塑PBT推进剂能量性能(Al含量10%)

Table 3 Energetic properties of PBT propellants plasticized with A3 (Al 10%)

No.	content/%					property parameter				
	PBT	A3	Al	AP	RDX	I_{sp} / $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$	C^* / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	T_c /K	\bar{M}	OB
1	10	15	10	65	-	2546	1599	3459	30.74	-0.1149
2	10	15	10	60	5	2556	1569	3455	30.08	-0.1427
3	10	15	10	55	10	2563	1577	3445	29.44	-0.1705
4	10	15	10	50	15	2568	1584	3429	28.82	-0.1983
5	10	15	10	45	20	2572	1590	3408	28.21	-0.2260
6	10	15	10	40	25	2575	1595	3382	27.63	-0.2538
7	10	15	10	35	30	2576	1598	3353	27.08	-0.2816
8	10	15	10	30	35	2577	1601	3320	26.54	-0.3094
9	10	15	10	25	40	2576	1604	3285	26.02	-0.3371
10	10	15	10	20	45	2574	1605	3247	25.53	-0.3649
11	10	15	10	15	50	2571	1605	3207	25.05	-0.3926
12	10	15	10	10	55	2568	1605	3165	24.59	-0.4205
13	10	15	10	5	60	2564	1605	3122	24.14	-0.4482
14	10	15	10	-	65	2558	1604	3078	23.71	-0.4760

表3中,以纯AP(No.1)作氧化剂时推进剂比冲为

$2546 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$;以纯RDX(No.14)作氧化剂时推进剂

比冲为 $2558 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。当 AP、RDX 以质量比 30 : 35 (No.8)加入时,比冲达到最大值 $2577 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$; 分别比配方 No. 1 和 No. 14 高 $31 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $19 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。该体系特征速度最大值为 $1605 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (No. 10 ~ 13)。

图 1 给出了表 2 和表 3 中比冲随 RDX 含量变化曲线。可看出: (1) 表 3 比冲明显高于表 2; (2) Al 含量为 5% 和 10% 时,比冲随 RDX 变化均呈抛物线形。

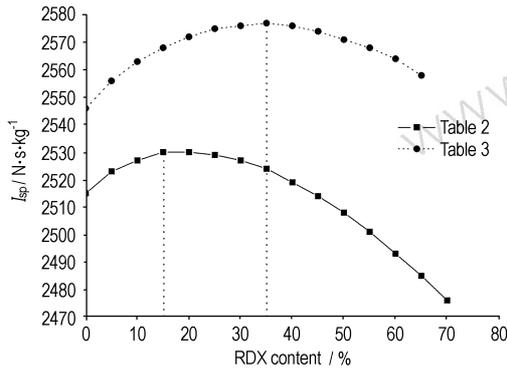


图 1 A3 增塑 PBT 推进剂比冲随 RDX 变化曲线
Fig. 1 Curves of RDX content vs specific impulse for PBT propellants plasticized with A3

关于图 1 比冲变化趋势,由表达式 $I_{sp} \propto \sqrt{\frac{T_c}{M}}$ 可知:

比冲与燃温平方根成正比、与燃烧产物平均相对分子质量平方根成反比。表 2 和表 3 显示燃烧产物平均相对分子质量随 RDX 含量增加呈单调下降趋势,氧平衡值高时,添加 RDX 在降低燃烧产物平均相对分子质量同时提高燃温,比冲增加。虽然 RDX 生成焓高于 AP

(见表 1),但氧平衡值 (-21.61%) 显著低于 AP (34.04%),随 RDX 含量增加,由于氧平衡不足导致燃温下降^[13];若燃温降低的负效应低于燃烧产物平均相对分子质量下降的正效应时,比冲依旧上升。当燃温降低的负效应高于燃烧产物平均相对分子质量降低的正效应时,比冲则开始下降。因此,图 1 比冲曲线随 RDX 变化呈抛物线形。此外,图 1 中表 3 高比冲是由于其高 Al 含量提高了燃温所致。

3.2 NG/DEGDN 增塑体系

表 4 和表 5 是以混合硝酸酯 NG/DEGDN 为增塑剂、Al 分别为 5%、10% 条件下,推进剂能量特性计算结果。可看出:随 RDX 含量增加,仍表现出燃烧产物平均相对分子质量减小,氧平衡值降低的趋势。

Al 5% 时,纯 AP (No. 1) 作氧化剂对应推进剂比冲为 $2499 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$,纯 RDX (No. 15) 作氧化剂对应推进剂比冲为 $2538 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$; AP 与 RDX 以质量比 40 : 30 (No. 7) 或 35 : 35 (No. 8) 加入时,比冲达到 $2567 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$,比相应 A3 增塑体系最大值(表 2, $2530 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$) 高 $37 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。该体系特征速度最大值为 $1606 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (No. 11 ~ 13)。

表 5 中,纯 AP (No. 1) 作氧化剂时推进剂比冲为 $2543 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$,纯 RDX (No. 14) 作氧化剂时推进剂比冲为 $2608 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$; AP 与 RDX 以质量比 20 : 45 (No. 10) 或 15 : 50 (No. 11) 加入时,推进剂比冲达最大值 $2613 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$,比相应 A3 增塑体系最大值(表 3, $2577 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$) 高 $36 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$; 该体系特征速度最大值为 $1630 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (No. 13, No. 14)。

表 4 NG + DEGDN 增塑 PBT 推进剂能量性能 (Al 含量 5%)

Table 4 Energetic properties of PBT propellants plasticized with NG/DEGDN (Al 5%)

No.	content/%					property parameter				
	PBT	NG/DEGDN	Al	AP	RDX	I_{sp} / $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$	C^* / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	T_c / K	\bar{M}	OB
1	10	15	5	70	-	2499	1522	3250	30.80	0.0057
2	10	15	5	65	5	2526	1539	3289	30.44	-0.0221
3	10	15	5	60	10	2543	1555	3315	29.84	-0.0499
4	10	15	5	55	15	2554	1568	3331	29.21	-0.0777
5	10	15	5	50	20	2560	1578	3337	28.60	-0.1056
6	10	15	5	45	25	2565	1586	3335	28.01	-0.1334
7	10	15	5	40	30	2567	1593	3325	27.43	-0.1612
8	10	15	5	35	35	2567	1598	3308	26.88	-0.1890
9	10	15	5	30	40	2566	1602	3285	26.35	-0.2169
10	10	15	5	25	45	2564	1604	3257	25.84	-0.2447
11	10	15	5	20	50	2561	1606	3224	25.35	-0.2726
12	10	15	5	15	55	2556	1606	3188	24.88	-0.3004
13	10	15	5	10	60	2551	1606	3149	24.43	-0.3282
14	10	15	5	5	65	2545	1605	3107	23.99	-0.3560
15	10	15	5	-	70	2538	1603	3063	23.56	-0.3839

表5 NG + DEGDN 增塑 PBT 推进剂能量性能 (Al 含量 10%)
Table 5 Energetic properties of PBT propellants plasticized with NG/DEGDN (Al 10%)

No.	content/%					property parameter				
	PBT	NG/DEGDN	Al	AP	RDX	I_{sp} / $N \cdot s \cdot kg^{-1}$	C^* / $m \cdot s^{-1}$	T_c /K	\bar{M}	OB
1	10	15	10	65	-	2543	1547	3495	32.37	-0.0557
2	10	15	10	60	5	2558	1561	3511	31.65	-0.0836
3	10	15	10	55	10	2572	1573	3519	30.94	-0.1114
4	10	15	10	50	15	2583	1584	3520	30.29	-0.1392
5	10	15	10	45	20	2592	1593	3514	29.65	-0.1670
6	10	15	10	40	25	2599	1601	3503	29.02	-0.1949
7	10	15	10	35	30	2605	1608	3487	28.41	-0.2267
8	10	15	10	30	35	2609	1614	3466	27.83	-0.2505
9	10	15	10	25	40	2611	1619	3442	27.26	-0.2783
10	10	15	10	20	45	2613	1623	3413	26.72	-0.3062
11	10	15	10	15	50	2613	1626	3382	26.20	-0.3340
12	10	15	10	10	55	2612	1628	3347	25.70	-0.3619
13	10	15	10	5	60	2610	1630	3311	25.21	-0.3896
14	10	15	10	-	65	2608	1630	3272	24.74	-0.4175

由于(1) NG/DEGDN 能量高于 A3^[9], 提高了推进剂燃温; (2) NG/DEGDN 氧平衡值(-20.41%) 高于 A3(-60.87%), 有利于提高 RDX 含量, 增加体系能量, 降低燃烧产物平均相对分子质量。所以 NG/DEGDN 增塑推进剂体系比冲高于 A3 体系。

图2是表4和表5中比冲随 RDX 含量变化曲线, 仍表现为抛物线。与图1不同之处在于两条曲线随 RDX 含量初始增加而迅速上升。这是由于 NG/DEGDN 增塑体系初始氧平衡值(Al 5% 体系 0.0057, Al 10% 体系 -0.0557) 高于 A3 体系(Al 5% 体系 -0.0536, Al 10% 体系 -0.1149), 添加 RDX 使得复合推进剂燃温迅速上升同时燃烧产物平均相对分子质量下降, 两者均为正效应, 比冲迅速增加。因此, RDX 低含量下变化时对该体系比冲影响较大。

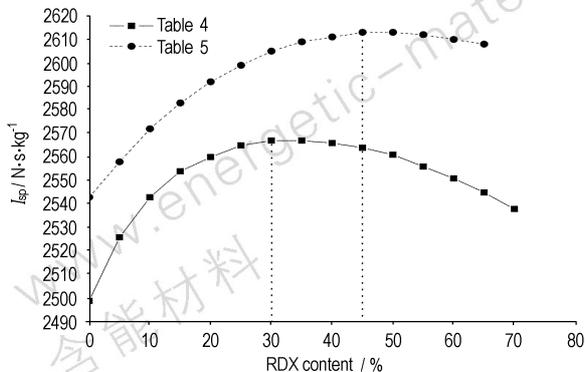


图2 NG + DEGDN 增塑 PBT 推进剂比冲随 RDX 变化曲线

Fig.2 Curves of RDX content vs specific impulse for PBT propellants plasticized with NG/DEGDN

3.3 含 ADN 体系

为降低固体推进剂二次烟信号, 用 ADN 替代部分 AP, 并对其能量特性进行了理论计算。

表6和表7分别是以 A3、NG/DEGDN 为增塑剂, Al 5%, ADN 15%, 推进剂能量参数随 AP、RDX 变化计算结果。可以看出: 表6和表7中燃烧产物平均相对分子质量、氧平衡值随 RDX 增加也呈逐渐减小趋势。对 A3 体系, 若 AP 与 RDX 质量比为 40 : 15 (No. 4) 或 35 : 20 (No. 5) 时, 比冲最大值达 2546 $N \cdot s \cdot kg^{-1}$; 体系特征速度最大值为 1591 $m \cdot s^{-1}$ (No. 7 ~ 9)。对 NG/DEGDN 体系, 若 AP、RDX 以质量比 25 : 30 (No. 7) 或 20 : 35 (No. 8) 时, 推进剂比冲最大值达 2583 $N \cdot s \cdot kg^{-1}$; 该体系特征速度最大值为 1616 $m \cdot s^{-1}$ (No. 10 ~ 12)。

图3和图4分别是表2和表6与表4和表7比冲和燃烧产物平均相对分子质量对比曲线。可以看出, 含 ADN 体系(表6和表7)燃烧产物平均相对分子质量低于不含 ADN 体系(表2和表4), 比冲高于不含 ADN 体系。由此推断, 虽然 ADN 氧平衡值(25.8%) 不及 AP (34.04%), 但其生成焓高于 AP, 尤其是其燃烧产物平均相对分子质量较低^[14], 导致含 ADN 复合推进剂的燃烧产物平均相对分子质量下降, 提高了比冲。有趣的是表2和表6、表4和表7中的比冲最大值均在相同 RDX 含量处出现。此外, 含 Al 5% 配方(表7)比冲最大值(2583 $N \cdot s \cdot kg^{-1}$) 超过了含 Al 10% (表3)比冲最大值(2577 $N \cdot s \cdot kg^{-1}$), 这意味着表7中配方在显著提高比冲同时降低了推进剂第一、二次烟信号。

表 6 含 ADN、A3 增塑 PBT 推进剂能量性能 (Al 含量 5%)

Table 6 Energetic properties of PBT propellants containing ADN, plasticized with A3 (Al 5%)

No.	content/%						property parameter				
	PBT	A3	Al	ADN	AP	RDX	I_{sp} /N · s · kg ⁻¹	C^* /m · s ⁻¹	T_c /K	\bar{M}	OB
1	10	15	5	15	55	-	2536	1558	3265	28.79	-0.0659
2	10	15	5	15	50	5	2542	1569	3271	28.19	-0.0937
3	10	15	5	15	45	10	2545	1577	3267	27.61	-0.1214
4	10	15	5	15	40	15	2546	1583	3255	27.05	-0.1493
5	10	15	5	15	35	20	2546	1587	3235	26.52	-0.1770
6	10	15	5	15	30	25	2544	1589	3209	26.00	-0.2048
7	10	15	5	15	25	30	2541	1591	3178	25.50	-0.2325
8	10	15	5	15	20	35	2537	1591	3143	25.02	-0.2604
9	10	15	5	15	15	40	2532	1591	3104	24.56	-0.2881
10	10	15	5	15	10	45	2527	1590	3063	24.12	-0.3159
11	10	15	5	15	5	50	2520	1589	3019	23.69	-0.3436
12	10	15	5	15	-	55	2513	1586	2973	23.28	-0.3715

表 7 含 ADN、NG/DEGDN 增塑 PBT 推进剂能量性能 (Al 含量 5%)

Table 7 Energetic properties of PBT propellants containing ADN, plasticized with NG/DEGDN (Al 5%)

No.	content/%						property parameter				
	PBT	NG/DEGDN	Al	ADN	AP	RDX	I_{sp} /N · s · kg ⁻¹	C^* /m · s ⁻¹	T_c /K	\bar{M}	OB
1	10	15	5	15	55	-	2532	1543	3267	30.11	-0.0066
2	10	15	5	15	50	5	2553	1559	3300	29.60	-0.0344
3	10	15	5	15	45	10	2566	1573	3322	28.99	-0.0622
4	10	15	5	15	40	15	2574	1585	3333	28.39	-0.0901
5	10	15	5	15	35	20	2579	1594	3334	27.81	-0.1179
6	10	15	5	15	30	25	2582	1601	3328	27.24	-0.1458
7	10	15	5	15	25	30	2583	1607	3314	26.70	-0.1736
8	10	15	5	15	20	35	2583	1611	3294	26.18	-0.2014
9	10	15	5	15	15	40	2581	1614	3268	25.67	-0.2292
10	10	15	5	15	10	45	2578	1616	3238	25.19	-0.2571
11	10	15	5	15	5	50	2574	1616	3204	24.72	-0.2849
12	10	15	5	15	-	55	2569	1616	3166	24.27	-0.3127

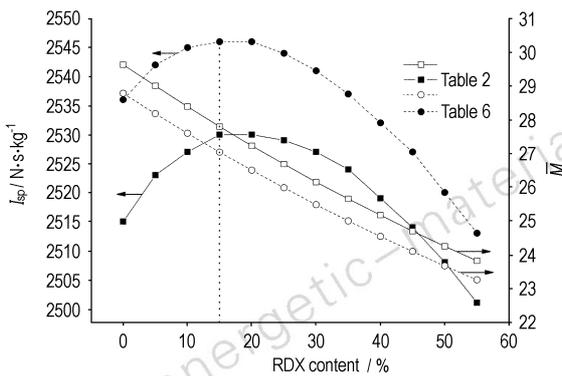


图 3 A3 增塑 PBT 推进剂比冲、平均分子量随 RDX 变化曲线

Fig. 3 Curves of RDX content vs specific impulse and average molecular weight for PBT propellants plasticized with A3

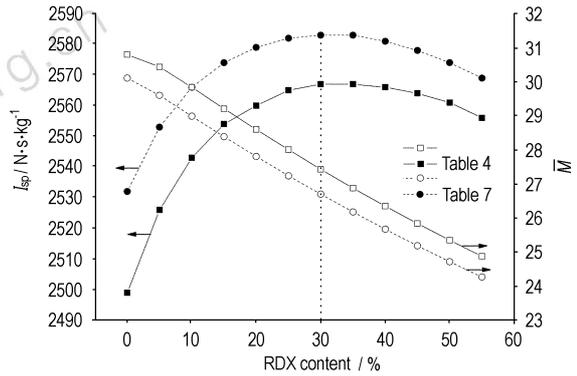


图 4 NG/DEGDN 增塑推进剂比冲、平均分子量随 RDX 变化曲线

Fig. 4 Curves of RDX content vs specific impulse and average molecular weight for propellants plasticized with NG/DEGDN

4 结论

以 A3、NG/DEGDN 为增塑剂, AP、RDX、Al、ADN 为固体填料的 PBT 复合推进剂中, 比冲随 RDX 含量

变化呈抛物线形; NG/DEGDN 增塑体系推进剂比冲高于 A3 体系。

A3 增塑 PBT 体系中, AP 与 RDX 作为氧化剂, 含

Al 5% 时,比冲高达 $2530 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$; 含 Al 10% ,比冲高达 $2577 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

NG/DEGDN 增塑 PBT 体系中,AP 与 RDX 作为氧化剂,RDX 低含量下对比冲影响较大; 含 Al 5% 时,比冲高达 $2567 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$; 含 Al 10% ,比冲高达 $2613 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

ADN 由于减低燃烧产物平均相对分子质量而显著提高推进剂比冲。含 Al 5% ,ADN 15% ,NG/DEGDN 增塑 PBT 体系比冲最大值($2583 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$)高于含 Al 10%、A3 增塑 PBT 体系比冲最大值($2577 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

参考文献:

- [1] Badgular D M, Talawar M B, Asthana S N, et al. Advances in science and technology of modern energetic materials: An overview [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151: 289 - 305.
- [2] 罗阳,高红旭,赵凤起,等. 含 3, 4-二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF)推进剂的能量特性[J]. 含能材料, 2005, 13(4): 225 - 228.
LUO Yang, GAO Hong-xu, ZHAO Feng-qi, et al. Energy characteristics of propellant containing 3,4-dinitrofurazanfuroxan (DNTF) [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(4): 225 - 228.
- [3] 刘剑洪,田德余,赵彦晖,等. 二硝酰胺铵推进剂的能量特性[J]. 火炸药学报, 2000(2): 1 - 3.
LIU Jian-hong, TIAN De-yu, ZHAO Yan-hui, et al. Energetic characteristic of ammonium dinitramide propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants (Huozhayao Xuebao)*, 2000(2): 1 - 3.
- [4] 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 Yin. 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.
- [5] 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.
- [6] Pisharath S, Ang H G. Synthesis and thermal decomposition of GAP/poly (BAMO) copolymer [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2007, 92: 1365 - 1377.
- [7] Tim P, Donna H P. Cyclotetramethylene tetranitramine/glycidyl azide polymer / butanetriol trinitrate propellant flame structure [J]. *Combustion and Flame*, 2004, 137: 38 - 49.
- [8] Miyazaki T, Kubota N. Energetics of BAMO [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1992, 17: 5 - 9.
- [9] 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: 119.
- [10] 李华昌,符斌. 实用化学手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 232.
- [11] Muthurajan H, Sivabalan R, Talawar M B, et al. Prediction of heat of formation and related parameters of high energy materials [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, A133: 30 - 45.
- [12] Bottaro J C, Penwell P E, Schmitt R J. 1,1,3,3-tetraoxo-1,2,3-triazapropene anion, a new oxy anion of nitrogen: The dinitramide anion and its salts [J]. *J Am Chem Soc*, 1997, 119: 9405 - 9410.
- [13] 周起槐,任务正. 火药物理化学性能[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 49 - 58.
- [14] 杨荣杰. 二硝酰胺铵 (ADN) 的燃烧特性研究进展 [J]. 推进技术, 2003, 24(2): 97 - 103.
YANG Rong-jie. Combustion characteristics and mechanism of ammonium dinitramide [J]. *Journal of Propulsion Technology (Tuijin Jishu)*, 2003, 24(2): 97 - 103.

Calculation and Analysis on Energy Characteristics of Composite BAMO-THF Propellants

ZHAI Jin-xian¹, YANG Rong-jie¹, ZHU Li-xun², LI Jian-min¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Xi'an North Hui'an Chemical Industry Company, Xi'an 710302, China)

Abstract: The effects of ammonium perchlorate (AP), hexahydro-1,3,5-trinitro-s-triazine (RDX), aluminum powder (Al) and ammonium dinitramide (ADN) used as solid fillers on energy characteristics of composite PBT (BAMO and tetrahydrofuran (BAMO-THF) copolymers) propellants plasticized with A3 (bis (2,2-dinitropropyl) acetal/bis (2,2-dinitropropyl) formal) and NG/DEGDN (glyceryl trinitrate/diethyleneglycol dinitrate) respectively were investigated using least free energy method. Calculated results indicate that the variation curves of the specific impulse of propellants are characteristics of a parabola with the increasing of RDX content, and there exist optimum content ratios of solid fillers in respective systems. Compared with those plasticized with A3, propellants plasticized with NG/DEGDN show higher specific impulses. The specific impulses are evidently enhanced due to the decreasing in average relative molecular mass of combustion products, caused by the addition of 15% ADN instead of AP into the formulations.

Key words: physical chemistry; BAMO-THF copolyether; composite propellant; energy characteristics; ammonium dinitramide (ADN)