

文章编号: 1006-9941(2002)04-0157-04

含 RDX 的硝胺丁羟推进剂能量特性研究

袁桂芳, 胡建军, 赵文胜, 何 静

(中国三江航天集团江河化工厂, 湖北 远安 444200)

摘要: 采用最小自由能平衡流法对 RDX/AP/Al/HTPB 推进剂能量特性进行了理论计算。通过 BSF ϕ 165 mm 和 BSF ϕ 315 mm 发动机点火试验, 研究了 RDX 含量、燃烧室压强对 RDX/AP/Al/HTPB 推进剂能量特性的影响规律。根据理论计算和发动机试验结果, 对配方进行了优化设计, 与某型号 ϕ 760 mm 全尺寸发动机的实测结果对比, 其实测比冲高达 $2\,428.1\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($p_c = 6.86\text{ MPa}$), 验证了 RDX 的加入对 RDX/AP/Al/HTPB 推进剂比冲有较突出贡献。

关键词: 黑索今; 端羟基聚丁二烯推进剂; 比冲; 能量性能

中图分类号: V512

文献标识码: A

1 引 言

推进剂比冲和密度是固体火箭发动机最重要的能量特性, 比冲高可增加导弹射程; 密度大可增加发动机的装药质量, 增加发动机的有效载荷。因此, 通常选择比冲高并且密度大的推进剂^[1]。近二十多年来, 采用高能添加剂硝胺来取代部分高氯酸铵, 并适当提高推进剂的固体含量, 是实现丁羟推进剂高能化的一条重要途径。特别是性能优良、成本低廉的 RDX 取代部分高氯酸铵作为推进剂的高能添加剂, 越来越引起人们的普遍重视^[2]。

本文采用最小自由能平衡流法对推进剂进行了能量特性理论计算, 根据理论计算结果和选择推进剂的原则, 设计了固体含量 (S) 为 88.5%, 且用不同含量的 RDX 取代部分 AP, 制得不同的推进剂, 采用 BSF ϕ 165 mm 和 BSF ϕ 315 mm 标准试验发动机进行了点火试验, 研究了 RDX 含量和燃烧室压强对 RDX/AP/Al/HTPB 推进剂比冲的影响规律; 并同某 ϕ 760 mm 全尺寸发动机实测结果对比, 验证了 RDX 取代部分高氯酸铵后可以明显提高丁羟推进剂的能量特性。

2 能量特性理论计算

采用最小自由能平衡流法计算 RDX/AP/Al/HTPB 推进剂的能量特性参数, 计算条件为: 燃烧室压强

(p_c) 为 6.86 MPa, 喷管出口压强 (p_e) 为 0.098 MPa, 推进剂初温为 298 K、发动机工作状态为最佳膨胀。计算结果见表 1。

分析表 1 中的数据可得到以下结论:

(1) 当固体含量一定时, 如固体含量为 88% 时, 随着 RDX 取代部分高氯酸铵含量的增加, 推进剂的理论比冲呈现先增加后减少的现象, 即存在理论比冲 (I_{sp}) 极大值 $2\,611.8\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与不含 RDX 的丁羟推进剂相比, 理论比冲约增加了 $20.4\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$ (约提高了 0.8%); 燃烧室温度 (T_c) 则随着 RDX 含量的增加不断地降低, 将燃烧室温度与 RDX 含量进行线性回归处理得:

$$T_c = 3\,537.2 - 9.1 M_R\% \quad (R = 0.992\,6) \quad (1)$$

式中: $M_R\%$ 为 RDX 的质量百分含量。

公式 (1) 表明, 在 RDX/AP/Al/HTPB 推进剂中, RDX 的质量分数每增加 1%, 其燃烧室温度可下降约 9.1 K; 当理论比冲为 $2\,611.8\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 与不含 RDX 的丁羟推进剂相比, 燃烧室温度降低了约 168 K (约下降了 5%), 由此可见, RDX 对降低丁羟推进剂燃烧温度非常有利, 给发动机设计留有很大的余量; 同时, 推进剂的密度 (ρ)、密度比冲 (I_p)、燃气平均分子量 (M_n) 呈现下降趋势, 而特征速度 (C^*) 变化趋势与理论比冲变化趋势相似, 也存在特征速度极大值, 但 RDX 含量在 0% ~ 25% 之间变化时, 特征速度仅在很小的范围内变动。

(2) 随着固体含量的不断增加, 推进剂理论比冲到达极大值时的 RDX 的含量也相应增加。如固体含

收稿日期: 2002-05-17; 修回日期: 2002-08-16

作者简介: 袁桂芳 (1974 -), 女, 工程师, 主要从事复合固体推进剂研究。

量为 87.5%,理论比冲到达极大值时,RDX 的含量为 15%左右;而固体含量为 88%,理论比冲到达极大值时,RDX 的含量为 20%左右。但随着 RDX 含量的增

加,其密度比冲下降。因此,在使用 RDX/AP/HTPB 推进剂时必须综合考虑,对配方进行优化设计,选出最佳配方。

表 1 RDX/AP/Al/HTPB 推进剂能量计算结果

Table 1 Calculated results of thermodynamic parameters of RDX/AP/Al/HTPB propellant

序号	S/%	AP /%	RDX /%	T_c /K	M_n	C^* /m·s ⁻¹	ρ /kg·m ⁻³	I_{sp} /N·s·kg ⁻¹	I_p /MN·s·m ⁻³
1	87.5	69.5	0	3490	19.68	1585	1778	2591	4.607
2	87.5	59.5	10	3411	19.11	1592	1768	2602.6	4.601
3	87.5	54.5	15	3363	18.89	1595	1762	2605.8	4.591
4	87.5	49.5	20	3306	18.72	1593	1757	2605.5	4.578
5	87.5	44.5	25	3235	17.65	1588	1751	2592	4.539
6	88	70	0	3527	19.9	1585	1789	2591.4	4.636
7	88	60	10	3454	19.3	1595	1777	2605.2	4.629
8	88	55	15	3410	19.05	1598	1772	2609.7	4.624
9	88	50	20	3359	18.84	1599	1766	2611.8	4.612
10	88	45	25	3296	18.72	1595	1760	2607.6	4.589
11	88.5	70.5	0	3563	20.13	1584	1799	2591.1	4.661
12	88.5	60.5	10	3495	19.5	1596	1787	2606.8	4.658
13	88.5	55.5	15	3455	19.22	1600	1781	2612.5	4.653
14	88.5	50.5	20	3408	18.99	1602	1775	2616.3	4.644
15	88.5	45.5	25	3352	18.82	1602	1769	2616.7	4.629
16	89	71	0	3596	20.35	1584	1808	2590.5	4.684
17	89	61	10	3534	19.71	1596	1796	2607.9	4.684
18	89	56	15	3497	19.41	1600	1791	2614.7	4.683
19	89	51	20	3455	19.16	1604	1785	2619.7	4.676
20	89	46	25	3404	18.95	1606	1779	2622.5	4.665

注:配方中铝粉含量为 18%,表 2 同。

3 实验部分

结合文献[2]和上述研究结果,综合考虑各种因素,制备出 4 种不同的配方,配方的固体含量均为 88.5%,其中铝粉(Al)占 18%,其它组分含量如表 2 所示。采用 25 L、600 L 立式混合机混合,将混合后的推进剂分别浇入不同型号尺寸的发动机内,浇铸方法采用真空贴壁浇铸,固化条件为(50±2)℃,固化后进行发

动机点火试验。

4 实验结果

4.1 RDX 含量对推进剂能量特性的影响

在 RDX/AP/Al/HTPB 推进剂中,用不同含量的 RDX 取代部分 AP,用 BSF ϕ 165 mm 和 BSF ϕ 315 mm 发动机进行点火试验,测试结果见表 2。

表 2 不同含量的 RDX 硝酸推进剂的 BSF ϕ 165 mm 和 ϕ 315 mm 发动机点火试验结果

Table 2 Tested results of four kinds of propellant by BSF ϕ 165 mm and BSF ϕ 315 mm motor

配方号	AP /%	RDX /%	C^* /m·s ⁻¹	I_{sp} /N·s·kg ⁻¹	20℃		ρ (实测) /kg·m ⁻³	I_p /MN·s·m ⁻³	Remark
					I_{sp} 6.86 MPa /N·s·kg ⁻¹				
1 [#]	70.5	0	1584	2591.1	2409.7		1797	4.330	ϕ 165
2 [#]	60.5	10	1596	2606.8	2430.9		1785	4.339	ϕ 165
2 [#]	60.5	10	1596	2606.8	2428.0		1785	4.334	ϕ 315
3 [#]	55.5	15	1600	2612.5	2437.9		1780	4.342	ϕ 165
4 [#]	50.5	20	1602	2616.3	2429.4		1777	4.317	ϕ 165

分析表2中的结果可知:(1)从1[#]~4[#]配方来看,在固体含量均为88.5%的情况下,在RDX部分取代AP后RDX/AP/Al/HTPB推进剂在6.86 MPa,20℃的试验条件下的实测比冲明显高于AP/Al/HTPB推进剂的实测比冲,最大高出28.2 N·s·kg⁻¹(约提高了1.2%),这与理论计算结果一致。(2)随着RDX的含量由0%

增加到20%,推进剂实测比冲先增加,后下降;当RDX含量少于15%时RDX/AP/HTPB推进剂的密度比冲与未加RDX的丁羟推进剂的密度比冲基本相当。

4.2 燃烧室压强对推进剂能量的影响

采用2[#]推进剂配方,在不同压强下进行了8台BSFφ165 mm发动机点火试验,试验结果见表3。

表3 不同燃烧室压强时RDX/AP/Al/HTPB推进剂能量性能数据

Table 3 Effect of chamber pressure on energy property of RDX/AP/Al/HTPB propellant

$p_c/(kPa)$	3217.5	3239.1	4527.4	4763.1	5801.5	5767.7	7033.8	6973.3
推力系数/ C_F	1.435	1.430	1.483	1.485	1.514	1.509	1.545	1.543
$C^*/(m \cdot s^{-1})$	1582.1	1589.5	1587.6	1593.0	1592.2	1593.2	1588.9	1586.2
$I_{sp}/(N \cdot s \cdot kg^{-1})$	2270.6	2273.7	2354.7	2365.2	2411.4	2404.4	2455.3	2446.8

从表3可以看出:(1)随着燃烧室压强的增加,RDX/AP/Al/HTPB推进剂的实测比冲亦明显增加,其燃烧室压强与推进剂比冲的关系曲线如图1所示。(2)推进剂的特征速度 C^* 值并不随燃烧室压力的增加而一直增加,当燃烧室压强为5767.7 kPa左右,特征速度 C^* 存在极大值,可由公式 $I_{sp} = C^* \cdot C_F/g$ ^[3]看出,特征速度 C^* 不仅与推进剂比冲有关,还受发动机推力系数 C_F 的影响。

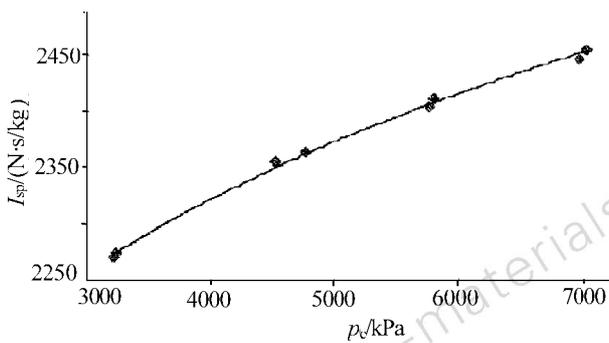


图1 燃烧室压强对推进剂比冲的影响

Fig. 1 Effect of chamber pressure on specific impulse of propellant

将图1曲线按乘幂拟合得出如下方程式:

$$I_{sp} = 1030.95 p_c^{0.09789} \quad (\text{相关系数 } R = 0.9990) \quad (2)$$

上述相关性方程的幂指数0.09789与能量修正经验公式中的幂指数0.1相近,呈现出较好的规律性,即RDX/AP/Al/HTPB推进剂比冲与燃烧室压强有较好的乘幂相关性,其指数可认为是比冲压强指数。可将(2)式简化为:

$$I_{sp1}/I_{sp2} = (p_{c1}/p_{c2})^{0.1} \quad (3)$$

RDX/AP/Al/HTPB推进剂中比冲压强指数0.1与文献[4]中的AP/Al/HTPB三组元推进剂的比冲压强指数相差不大,说明四组元丁羟推进剂比冲受压力的影响与三组元丁羟推进剂的影响一致。

4.3 某φ760 mm全尺寸发动机点火试验结果

综合考虑到工艺性能、安全特性等多方面的因素,在固体含量为88.5%时,3[#]配方性能更优越。对3[#]配方进行了全尺寸发动机点火试验,试验结果如下:

理论比冲:2612.5 N·s·kg⁻¹;

实测比冲:2428.1 N·s·kg⁻¹($p_c = 6.86$ MPa)。

从实测比冲来看,全尺寸发动机和标准试验发动机点火试验结果一致,均验证了RDX的加入对丁羟推进剂能量的贡献。

5 结论

(1)采用最小自由能平衡流法对RDX/AP/Al/HTPB推进剂能量特性进行了理论计算,结果表明,与未加RDX的丁羟推进剂配方相比,RDX取代部分高氯酸铵后,RDX/AP/Al/HTPB推进剂的理论比冲得到了明显提高,理论比冲、特征速度随RDX的加入量变化,存在极大值;推进剂的燃烧温度、密度、密度比冲、燃气平均分子量呈现下降趋势;固体含量的不断增加,推进剂理论比冲到达极大值时的RDX含量也相应增加。

(2)燃烧室压强是影响发动机的主要因素,通过对3~8 MPa不同压强的BSFφ165 mm发动机点火试验结果进行回归处理,得到的比冲压强指数为0.1($R = 0.9990$)。

(3)BSFφ165 mm、BSFφ315 mm发动机和全尺寸发动机点火试验均进一步验证了RDX的加入对丁羟推

进剂能量有较突出的贡献。全尺寸发动机的实测比冲为 $2\,428.1\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($p_c = 6.86\text{ MPa}$)。

参考文献

- [1] 周学刚. AP/HMX/HTPB 推进剂的能量特性[J]. 固体火箭技术, 1996, 19(2): 26 - 29.
- [2] 胡建军, 袁桂芳. 四组元高能特性丁羟推进剂发展状况[J]. 湖北航天科技, 2000(2): 24 - 31.
- [3] 彭培根, 刘培谅, 张仁, 等. 固体推进剂性能及原理[M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 1987.
- [4] 焦继革. 低燃速丁羟固体推进剂能量特性研究[J]. 湖北航天科技, 1995(1): 22 - 26.

Energy Characteristic of Nitramine HTPB Propellant Containing RDX as Oxidizer

YUAN Gui-fang, HU Jian-jun, ZHAO Wen-sheng, HE Jing

(Jianghe Chemical Plant of CSSG, Yuan'an 444200, China)

Abstract: In order to investigate the energy property of RDX/AP/Al/HTPB propellant, theoretical calculation is conducted. By the ignition experiment of BSF $\phi 165\text{ mm}$ and BSF $\phi 315\text{ mm}$ motor, We summarize the regularity of energy property with the change of RDX content in propellant and chamber pressure of motor. The optimum formulating is designed according to the results of theoretical calculation and experiment. The comparative tests by $\phi 760\text{ mm}$ motor have further confirmed the contribution of RDX in specific impulse, and the actual specific impulse is $2\,428.1\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($p_c = 6.86\text{ MPa}$) of $\phi 760\text{ mm}$ motor.

Key words: RDX; hydroxy terminated polybutadiene propellant; specific impulse; energy property