

改性双基推进剂主要组分对其烟雾特征信号影响研究^{*}

李 猛, 罗 阳, 赵凤起, 孙 美, 郑 伟

(西安近代化学研究所 燃烧与爆炸技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 为研究改性双基推进剂 (CMDB) 组分变化对烟雾特征信号的影响, 采用最小自由能原理和烟雾特征信号计算特征值模型对配方进行了计算, 系统分析了改性双基推进剂中不同固体含量、不同高能添加剂、不同氧含量、催化剂及铝粉含量等对烟雾特征信号影响规律。结果表明, 添加 DNTF 使得 CMDB 推进剂能量最大而烟雾特征信号最小; NC, NG 以及 RDX 的含量变化对烟雾特征信号影响不明显; 当 Al 含量小于 4% 时, 含 Al 的 CMDB 推进剂烟雾类别为 BA 级, 当 Al 含量大于 4% 时, 配方体系烟雾类别为 CA 级; 为保证 CMDB 推进剂为微烟, 催化剂 NTO 铅 (NTO-Pb) 含量应小于 3%。

关键词: 改性双基推进剂; 烟雾特征信号; 理论比冲; 数值仿真

中图分类号: V448.15⁺3 文献标志码: A 文章编号: 1001-4055 (2014) 07-0996-06

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2014.07.017

Effects of Components on Smoke Signature of CMDB Propellant

LI Meng, LUO Yang, ZHAO Feng-qi, SUN Mei, ZHENG Wei

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

Abstract: In order to study the effects of different contents on smoke signature of composite modified double-base propellant (CMDB), theoretical performance of the propellant was calculated based on the principle of free-energy minimization and eigenvalue model of primary and secondary smokes. The effects of solid content, oxygen content, Al content, Lead 3-nitro-1, 2, 4-triazol-5-onate (NTO-Pb) content and different explosive on smoke signature of the propellant were analyzed. The results show that theoretical specific impulse of the propellant is the greatest and secondary smoke signature of the propellant is minimal while adding 3, 4-Dinitrofurazanfuroxan (DNTF). The content of Nitrocellulose (NC), Nitroglycerin (NG) and Cyclotrimethylene-trinitriamine (RDX) have slight influences on the smoke signature of the propellant. The propellant containing 4% Al is critical point of BA and CA department of primary and secondary smoke. In order to meet the demand with minimum smoke, the propellant of NTO-Pb content should be less than 3%.

Key words: CMDB propellant; Smoke signature; Theoretical specific impulse; Numerical simulation

1 引 言

高能低特征信号固体推进剂是火箭武器装备实现远程打击、精确制导的重要基础,是武器装备发展的永恒追求。北约等军事发达国家在高能低特征信

号改性双基推进剂研制方面开展了广泛深入的研究工作,采用高能量密度材料 DNTF, CL-20 等^[1~3]提高改性双基推进剂能量的同时,对一些典型的金属及其氧化物 (Al, Al₂O₃, PbO) 设定了满足低特征信号的配方添加范围,建立了配方设计原则,并将高能低特

^{*} 收稿日期: 2013-07-15; 修订日期: 2013-09-22。

基金项目: 国家自然科学基金 (21173163); 火炸药专用技术 (40406010103)。

作者简介: 李 猛 (1979—), 男, 硕士, 研究领域为固体推进剂性能计算技术。E-mail: dahai-2005@163.com

征信号改性双基推进剂成功应用于车载、空地、空空导弹等型号武器,使得武器射程远、特征信号低,综合性能优良^[2,3]。国内在“九五”、“十五”期间开展了高能低特征信号推进剂技术研究,研制成功能量达到250s的改性双基推进剂,其燃烧性能稳定、化学安定性好、力学性能优^[4~7],但尚没有定量的分析改性双基推进剂配方组分对其烟雾特征信号的影响规律,更没有制定低特征信号改性双基推进剂相关配方设计原则。

本文采用最小自由能原理^[8~11]和烟雾特征值计算方法分析计算了改性双基推进剂中不同固体含量、不同高能添加剂、不同氧含量、催化剂及铝粉含量等^[12,13]对烟雾特征信号影响规律,为高能低特征信号改性双基推进剂研制提供参考,并为固体推进剂能量的提高和性能的改进奠定理论基础。

2 烟雾特征信号计算模型

火箭排气羽流的特征信号^[14~16](Exhaust Plume Signature)是一种包含有系统或火箭发动机排气全部性能或特性的术语,此性能或特性可被用作探测、识别、或拦截执行任务的发射平台或导弹。羽流的特征信号特性主要包括烟、辐射能的散发、能见度(视程/能见距离)和雷达波吸收等4项参数。固体推进剂烟雾是羽流特征信号的重要表征参数,其从表观特征可以细分为:一次烟雾和二次烟雾,一次烟雾主要由火箭发动机喷管喷出的凝相颗粒构成,主要存在形式为金属氢氧化物、氧化物和氯化物等;二次烟雾由燃气中可凝气体组成,是燃气与大气相互作用的结果。

要严格的区分一次烟雾和二次烟雾的界限是比较困难的,北约主要采用理论计算获得。参考北约AGARD建议标准根据特征值推进剂烟雾(按一次烟雾、二次烟雾顺序)可分为:微烟(AA)、少烟(AB, BA, AC, CA, BC, CB, BB)、有烟(CC)。

2.1 一次烟雾特征值计算及评价准则

为了消除发动机及其他因素的影响,燃烧室条件采用统一的参数,这里将燃烧室压力7MPa,喷口压力0.1MPa作为本研究前提基础假设条件。

根据多元颗粒系统的透过率方程

$$T_r = \exp[-3QC_v L/2D_{32}] \quad (1)$$

式中透过率 $T_r = \frac{I}{I_0}$, Q 为平均消光系数(与光线波长、环境、介质粒子特性、分布有关), D_{32} 为体积比

表面平均粒径, C_v 为粒子体积浓度(粒子体积/混合物体积), L 为光程, I 为透过光强, I_0 为初始光强。由于 $C_v = C_m/\rho$ 粒子密度,式(1)可写为

$$T_r = \exp[C_m N/SG] \quad (2)$$

式中 C_m 为粒子的质量浓度(粒子质量/混合物体积),指喷管出口单位体积混合物中凝相颗粒的质量, SG 为粒子密度的千分之一, N 为光学特性常数。

由 $C_m = M_p(RT/M_1 p)/M_{mix}$ 可得喷管出口透过率方程

$$T_r = \exp[-\sum\{M_{pi} N_i/(100SG_i)\}] \quad (3)$$

式中 M_p 为粒子质量, R 为气体常数, T, p 为混合物的温度和压力, M_{pi} 为混合物平均分子量, M_p/M_{mix} 为凝聚物的质量分数。

通过定义遮挡率 $(1 - T_r)$ 来作为一次烟评价的特征值

$$k = 1 - \exp[-\sum\{M_{pi} N_i/(100SG_i)\}] \quad (4)$$

根据特征值来对推进剂进行一次烟雾评价: $k \leq 0.35$ 为A级; $0.35 < k \leq 0.90$ 为B级; $k > 0.90$ 为C级。

2.2 二次烟雾特征值计算及评价准则

与一次烟雾类似,选定一标准环境条件:燃烧产物与环境充分混合到初始浓度 $\frac{1}{1000}$;环境温度273.15K,压力为0.1MPa。为了确定环境相对湿度,首先必须给出燃气中凝聚物(HCl, HF及H₂O)的摩尔百分数。

根据饱和条件

$$p_{H_2O} + p_e = p_{sat} \quad (5)$$

式中 p 为气体分压。由道尔顿(Dalton)定律知气体分压 $p = \text{物质的量} \times \text{总压}$,进一步可得

$$p_{H_2O} = p_{sat} - 1.01325(f_{H_2O} + f_{HCl} + f_{HF}) \quad (6)$$

当混合物中含有HCl和HF时,饱和蒸汽压为正常情况下压力乘以因子 K ,水在273.15K情况下饱和气压为610.78Pa,这样,

$$p_{sat} = 610.78K \quad (7)$$

$$p_{H_2O} = 610.78K - 1.01325(f_{H_2O} + f_{HCl} + f_{HF}) \quad (8)$$

上式两边同除以6.1078,得到相对湿度

$$RH_{amb} = 100(K - 0.16589f_{total}) \quad (9)$$

式中 K 值为HCl和HF浓度的函数。 RH_{amb} 可以描述为需要多大的环境相对湿度来饱和羽流中H₂O,

HCl 和 HF, 本文将以此值来对二次烟进行评价: 当 RH_{amb} 在区间 $[0.90, 1]$ 间为 A; 当 RH_{amb} 在区间 $[0.55, 0.90]$ 间为 B; 当 RH_{amb} 在区间 $[0.10, 0.55]$ 间为 C。

2.3 模型试验验证

参照 GJB770B-2005 方法 801.1 等对作为标准物质的四种定型推进剂配方进行了烟雾透过率测试, 测试烟雾透过率为一次烟雾和二次烟雾的综合效果。采用烟雾特征信号计算模型计算了相应配方的烟雾特征值, 一次烟雾和二次烟雾特征值计算数据及烟雾透过率测试结果数据如图 1 所示, 其中横坐标表示四种推进剂配方代号 (Formulation1, Formulation2 为双基推进剂, Formulation3 为含 RDX 的改性双基推进剂, Formulation4 为含 AP 的复合推进剂), 纵坐标 Primary smoke 表示一次烟雾特征值、Secondary smoke 表示二次烟雾特征值、Smoke transmittance 表示烟雾透过率。

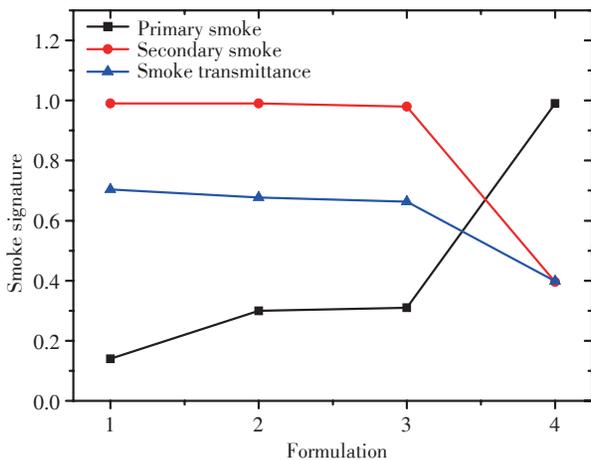


Fig. 1 Test results and calculated values of smoke signature

由图可知, 随着一次烟雾特征值增大和二次烟雾特征值减小, 根据烟雾特征信号特征值模型意义, 一次烟雾和二次烟雾浓度都呈现增大趋势, 综合起来, 烟雾浓度增大。烟雾浓度增大则制导信号烟雾透过率降低, 计算值与试验值之间大小趋势是一致的。充分验证了烟雾特征信号计算特征值模型在推进剂配方研制中的准确性。

3 改性双基推进剂烟雾特征信号计算研究

3.1 不同固体含量对烟雾特征信号影响

为研究不同固体含量对 CMDB 推进剂烟雾特征信号影响规律, 设计了硝化棉 (NC) 和硝化甘油 (NG) 含量逐步降低, 黑索今 (RDX) 含量逐步增加的递进配方, 助剂为 2.5%, 其中 Al_2O_3 含量 1%, 复合催化剂为 1.5%, 该催化剂为 B 铅、B 铜以及炭黑的混合物。配方固体质量百分含量变化、标准理论比冲以及一次烟、二次烟特征值如表 1 所示。

由表 1 可知, 随着 NC, NG 固体含量的减少, 添加剂 RDX 含量的增加, 标准理论比冲呈增大趋势; 配方体系的一次烟特征值为 0.258917, 保持不变, 根据 AGARD 的定义, 配方体系的一次烟等级为 A 级; 配方体系二次烟特征值呈增加趋势, 说明配方体系的二次烟向无烟化方向发展, 但 RH_{amb} 都介于区间 $[0.90, 1]$ 之内, 因此二次烟等级都为 A 级。分析其原因可知, 一次烟雾主要存在形式为金属氢氧化物、氧化物和氯化物等, 由于 NC, NG, RDX 包含 C, H, O, N 四种元素, 使得配方体系中铅、铜盐以及 Al_2O_3 含量保持不变, 因此燃烧产物中凝相物质的质量百分含量保持不变, 一次烟特征值没有变化。由于配方体系不含氯、氟等组分, 因此二次烟特征值将主要依赖于喷口产物 H_2O 的摩尔百分含量, 而 NC, NG, RDX 的氢含量相差不大, 使得二次烟特征值变化趋势不大, 二次烟等级都为 A 级。

3.2 不同高能添加剂对烟雾特征信号影响

为研究不同高能添加剂对 CMDB 推进剂烟雾特征信号影响规律, 设计了硝化棉 (NC) 和硝化甘油 (NG) 含量保持不变, 分别为 23.8% 和 22.2%, 高能添加剂含量为 50%, 助剂为 2.5%, 其中 Al_2O_3 含量 1%, 复合催化剂为 1.5%, 该催化剂为 NTO 铅、B 铜以及炭黑的混合物, 通过对 RDX, HMX, DNTF 及 CL-20 添加到 CMDB 推进剂中的标准理论比冲和烟雾特征信号进行计算, 结果列于表 2 中。

由表 2 可知, 当 CMDB 推进剂中添加不同高能添

Table 1 Effects of solid content on smoke signature of CMDB propellant

$W_{NC}/\%$	$W_{NG}/\%$	$W_{RDX}/\%$	$I_{sp}/(N \cdot s/kg)$	Primary smoke eigenvalue	Secondary smoke eigenvalue
48.8	47.2	0	2398.9	0.258917	0.929899
43.8	42.2	10	2413.1	0.258917	0.931041
33.8	32.2	30	2441.5	0.258917	0.933378
23.8	22.2	50	2469.9	0.258917	0.935793

Table 2 Effects of high energy additive on smoke signature of CMDB propellant

Additive	$I_{sp}/(N \cdot s/kg)$	Primary smoke eigenvalue	Secondary smoke eigenvalue
RDX	2473.3	0.272823	0.935351
HMX	2466.3	0.272823	0.935468
DNTF	2523.0	0.272848	0.949199
CL-20	2520.8	0.272848	0.935996

加剂时,对标准理论比冲和特征信号影响不仅相同。添加 DNTF 使得标准理论比冲最大,其次为 CL-20, RDX 和 HMX 对能量贡献水平相当。RDX 和 HMX 的氧平衡都为 -21.61%, 而生成热数值为 70.7 kJ/mol 和 75.02 kJ/mol, 相差不大, 因此使得含 RDX 和 HMX 的 CMDB 推进剂标准理论比冲相差不大。而 CL-20 氧平衡为 -10.95%, 生成热数值高达 416.0 kJ/mol, 因此使得含 CL-20 比含 RDX 的 CMDB 推进剂标准理论比冲值大近 $50N \cdot s/kg$, DNTF 的氧平衡虽然为 -20.5%, 但其生成热数值 644.3 kJ/mol, 因此使得其与含 CL-20 的 CMDB 推进剂标准理论比冲值相差不大。

添加不同高能添加剂的配方体系一次烟特征值几乎保持不变, 全部位于 A 级范围之内。添加 DNTF 使配方体系的二次烟特征值最大, 无烟化趋势更明显, 但添加 CL-20, RDX 和 HMX 也都使得二次烟位于 A 级范围之内。分析其原因可知, 配方体系中铅、铜盐以及 Al_2O_3 含量保持不变, 因此燃烧产物中凝相物质的质量百分含量保持不变, 一次烟特征值没有变化。与添加剂 CL-20, RDX 和 HMX 相比, 高能添加剂 DNTF 不含氢元素, 使得燃烧产物 H_2O 的摩尔百分含量大大降低, 因此添加 DNTF 使得 CMDB 推进剂能量最大而烟雾特征信号最小。

3.3 不同氧含量对烟雾特征信号影响

氧含量是指推进剂中含氧量, 为研究配方体系氧含量对 CMDB 推进剂烟雾特征信号影响规律, 设计了硝化棉 (NC) 含量逐步减少、硝化甘油 (NG) 含量逐步增加的递进配方, 含量变化见表 3, RDX 含量为

50%, 助剂为 2.5%, 其中 Al_2O_3 含量 1%, 复合催化剂为 1.5%, 该催化剂为 NTO 铅、B 铜以及炭黑的混合物。配方体系标准理论比冲以及一次烟、二次烟特征值列于表 3 中。

由表 3 可知, 随着 NC 含量的减少, NG 含量的增加, 体系氧含量增加, 标准理论比冲增大, 最大增加达 $44N \cdot s/kg$ 。配方体系一次烟特征值保持不变, 二次烟特征值变化趋势不明显, 烟雾等级都为 AA 级。由于 NG 的氧含量高于 NC, 当 NG 含量增加, NC 含量减少时, 体系氧含量增加。配方体系中金属盐含量保持不变, 一次烟特征值不变, 为 A 级。由于 NC 的氢含量高于 NG, 当 NC 含量减少, NG 含量增加时, 体系氢含量增加, 使得燃烧产物 H_2O 的摩尔百分含量增加, 因此二次烟特征值降低, 但都位于 A 级范围之内。

3.4 催化剂含量对烟雾特征信号影响

为研究催化剂含量变化对 CMDB 推进剂烟雾特征信号影响规律, 设计的基础配方为硝化棉 (NC) 和硝化甘油 (NG) 含量分别为 23.8% 和 22.2%, RDX 含量为 50%, 助剂为 2.5%, 其中 Al_2O_3 含量 1%, 复合催化剂为 1.5%, 该催化剂为 NTO 铅、B 铜以及炭黑的混合物。通过增加配方中 NTO-Pb 的含量从 1% 到 6%, 硝化棉 (NC) 含量逐步减少、硝化甘油 (NG) 含量逐步增加的递进配方, 如表 4 所示, 配方体系标准理论比冲以及一次烟、二次烟特征值列于表 4。

由表 4 可知, 随着催化剂 NTO-Pb 含量的增加, NG 含量的增加, NC 含量的减少, 标准理论比冲下降, 基本表现为催化剂含量增加 1%, 标准理论比冲下降 1s 多; 一次烟特征值增加趋势明显, 二次烟基本保持不变。分析其原因可知, 随着 NTO-Pb 含量的增加, 体系 Pb 元素增加, 燃烧产物中 Pb, PbO 含量增加, 使得一次烟特征值增大, 配方体系向有烟化方向发展, 当配方体系的催化剂 NTO-Pb 含量大于 3% 时, 一次烟雾等级进入 B 级; 二次烟雾特征值全部位于 A 级范围之内。

Table 3 Effects of oxygen content on smoke signature of CMDB propellant

$W_{NC}/\%$	$W_{NG}/\%$	$W_{Oxygen}/\%$	$I_{sp}/(N \cdot s/kg)$	Primary smoke eigenvalue	Secondary smoke eigenvalue
28.2	17.8	49.99	2447.4	0.272742	0.937723
25.1	20.9	50.17	2465.7	0.272823	0.936047
23.8	22.2	50.24	2473.3	0.272823	0.935351
22.7	23.3	50.31	2479.5	0.272823	0.934767
20.6	25.4	50.43	2491.3	0.272823	0.933658

3.5 铝粉含量对烟雾特征信号影响

为研究铝粉含量对CMDB推进剂烟雾特征信号影响规律,设计的基础配方为硝化棉(NC)和硝化甘油(NG)含量分别为23.8%和22.2%,RDX含量为50%,助剂为2.5%,其中 Al_2O_3 含量1%,复合催化剂为1.5%,该催化剂为NTO铅、B铜以及炭黑的混合物。采用Al取代 Al_2O_3 ,进一步增加Al含量,降低硝化棉(NC)和硝化甘油(NG)含量,设计了递进配方,其他组分含量保持不变。配方含量变化、标准理论比冲以及一次烟、二次烟特征值如表5所示。

Table 4 Effects of catalyst content on smoke signature of CMDB propellant

$W_{NC}/\%$	$W_{NG}/\%$	$W_{NTO-Pb}/\%$	$I_{sp}/(N \cdot s/kg)$	Primary smoke eigenvalue	Secondary smoke eigenvalue
23.8	22.2	1.0	2473.3	0.272823	0.935351
23.3	21.7	2.0	2461.9	0.311371	0.935662
22.8	21.2	3.0	2450.5	0.347864	0.935978
22.3	20.7	4.0	2439.1	0.382423	0.936298
21.8	20.2	5.0	2427.6	0.41515	0.93662
21.3	19.7	6.0	2416.0	0.446139	0.936948

Table 5 Effects of Al content on smoke signature of CMDB propellant

$W_{NC}/\%$	$W_{NG}/\%$	$W_{Al}/\%$	$I_{sp}/(N \cdot s/kg)$	Primary smoke eigenvalue	Secondary smoke eigenvalue
23.8	22.2	0	2473.3	0.272823	0.935351
23.8	22.2	1.0	2506.6	0.420178	0.936271
23.3	21.7	2.0	2521.5	0.638854	0.936787
22.8	21.2	3.0	2535.8	0.775622	0.937729
21.8	20.2	5.0	2562.2	0.913378	0.939888
20.8	19.2	7.0	2585.9	0.966563	0.942454

4 结论

基于最小自由能原理和烟雾特征信号特征值模型分析计算了CMDB推进剂中不同固体含量、不同高能添加剂、不同氧含量、催化剂及Al粉含量对烟雾特征信号影响规律,结果表明:

(1)随着NC,NG固体含量的减少,添加剂RDX含量的增加,CMDB推进剂一次烟特征值保持不变,二次烟特征值增加,烟雾等级为AA级,当RDX含量为50%时,标准理论比冲增加达3%。

(2)CMDB推进剂中添加DNTF使得标准理论比冲值最大,其次为CL-20,RDX和HMX对能量贡献水平相当,四种添加剂使得配方体系烟雾等级都为AA级,DNTF对降低配方体系二次烟效果最佳。

(3)随着NC含量的减少,NG含量的增加,体系氧含量增加,标准理论比冲增大,最大增加达 $44 N \cdot s/kg$ 。

由表5可看出,随着Al含量的增加,NC与NG含量的减少,配方体系标准理论比冲增加。含1%的 Al_2O_3 的CMDB推进剂一次烟特征值为0.272823,烟雾等级为A级。含Al的CMDB推进剂配方体系的一次烟雾等级至少为B级,并且当Al含量大于4%时,一次烟为C级,主要是由于燃烧产物 Al_2O_3 是一次烟的重要来源;二次烟变化趋势不明显,全部位于A级范围之内。添加Al粉存在能量与特征信号之间的最优值。

配方体系一次烟特征值保持不变,二次烟特征值变化趋势不明显,烟雾等级都为AA级。

(4)随着催化剂NTO-Pb含量的增加,标准理论比冲下降,一次烟特征值增加,二次烟特征值基本保持不变,为AA级。当NTO-Pb含量大于3%时,一次烟雾等级进入B级。

(5)随着Al含量的增加,标准理论比冲增加,一次烟特征值增大,二次烟特征值变化趋势不明显,烟雾等级为BA级。当Al含量大于4%时,配方体系烟雾等级为CA级。

参考文献:

- [1] National Research Council. Technology for the United States Navy and Marine Corps. 2000-2035, Becoming a 21st-Century Force[M]. USA: Weapons, National Academy Press, 1997.
- [2] Jean-Francois Guery, I-Shih Chang, Toru Shimada, et al.

- Solid Propulsion for Space Applications: An Updated Road Map [J]. *Acta Astronautica*, 2010, 66: 201-219.
- [3] Ordzhonikidze O, Pivkina A, Frolov Y, et al. Comparative Study of HMX and CL-20 [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2011, 105(2): 529-534.
- [4] 赵凤起, 陈沛, 罗阳, 等. 3, 4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)的改性双基推进剂 [J]. *推进技术*, 2004, 25(6): 570-572. (ZHAO Feng-qi, CHEN Pei, LUO Yang, et al. Study on the Composite Modified Double Base Propellant Containing 3, 4-Dinitrofurazanfuroxan (DNTF) [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(6): 570-572.)
- [5] 郑伟, 王江宁, 宋秀铎, 等. DNTF-CMDB推进剂燃烧性能的调节 [J]. *火炸药学报*, 2012, 35(5): 79-81.
- [6] 李上文, 王江宁, 付霞云, 等. 某些NTO盐作为含能燃烧催化剂的探索 [J]. *含能材料*, 1993, 1(3): 22-27.
- [7] 汪营磊, 赵凤起, 仪建华. 固体火箭推进剂用燃烧催化剂研究新进展 [J]. *火炸药学报*, 2012, 35(5): 1-8.
- [8] Gordon S, McBride B J. Computer Program for Calculation Chemical Equilibrium Compositions and Applications: I Analysis [R]. *NASA RP-1311*, 1994.
- [9] McBride B J, Gordon S. Computer Program for Calculation of Chemical Equilibrium Compositions and Applications: II Users Manual and Program Description [R]. *NASA RP-1311*, 1996.
- [10] 刘晶如, 罗运军. 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): 95-99.
- [11] 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.
- [12] 王江宁, 姚楠, 刘子如, 等. RDX含量对改性双基推进剂动态力学性能的影响 [J]. *推进技术*, 2008, 29(5): 637-640. (WANG Jiang-ning, YAO Nan, LIU Zi-ru, et al. Effect of RDX Content on Dynamic Mechanical Properties of Modified Double-Base Propellants [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(5): 637-640.)
- [13] 安亭, 赵凤起, 高红旭, 等. 含超级铝热剂双基推进剂的感度特 [J]. *推进技术*, 2013, 34(1): 129-134. (AN Ting, ZHAO Feng-qi, GAO Hong-xu, et al. Sensitivity Characteristics of Double Base Propellants Containing Super Thermites [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(1): 129-134.)
- [14] Chenoweth J D, Brinckman K W, York B J, et al. Progress in Modeling Missile Fuel Venting and Plume Contrail Formation [R]. *AIAA 2007-1012*.
- [15] Thorn L B, Wharton W W. Terminology and Assessment Methods of Solid Propellant Rocket Exhaust Signature [R]. *AGARD-AR-287*, 1993.
- [16] Chasteney J C, Kessel P A, Lawrence R, et al. Rocket Motor Plume Technology [R]. *AGARD-LS-188*, 1993.

(编辑:梅 瑛)