

文章编号: 1006-9941(2014)06-0852-05

硝基呋咱/CMDB 推进剂能量特性

付小龙, 樊学忠, 毕福强, 王 晗, 李宏岩, 李吉祯, 刘小刚

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 根据最小自由能法, 采用 NASA-CEA 软件, 研究了六种硝基呋咱化合物: 3-硝基呋咱(NF)、3,4-二硝基呋咱(DNF)、3-硝氨基-4-硝基呋咱(NNF)、3-硝氨基-4-硝基呋咱铵盐(ANNF)、3-硝氨基-4-硝基呋咱胍盐(HNNF)和 3-硝氨基-4-硝基呋咱羟胺盐(HANNF)的能量特性。研究了硝基呋咱化合物含量对复合改性双基(CMDB)推进剂能量特性的影响和压强对硝基呋咱/CMDB 推进剂能量特性的影响。结果表明, HANNF 和 HNNF 单元推进剂的比冲高于 RDX, 分别为 $2744.8 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2802.2 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。六种硝基呋咱化合物使 CMDB 推进剂的比冲大幅提高, 其中 HNNF 和 HANNF 使 CMDB 推进剂的比冲分别提高 $74.6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $91 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。六种硝基呋咱/CMDB 推进剂的比冲均随压强升高而增加。比冲受压强影响顺序为 $\text{DNF} > \text{NNF} > \text{HANNF} > \text{ANNF} > \text{HNNF} > \text{NF}$ 。

关键词: 应用化学; 固体推进剂; 硝基呋咱; 能量特性; 理论计算

中图分类号: TJ55; O69

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2014.06.027

1 引 言

高能量密度材料作为导弹武器推进及毁伤的主要材料须满足高能量、高密度、高安定性和低感度的要求^[1-2]。在众多高能量密度材料中, 呋咱类含能化合物具有能量密度高、标准生成焓高、氮含量高、钝感和热稳定性好等优点^[3-4], 在引入硝基后, 可获得具有较高能量水平的硝基呋咱化合物, 目前硝基呋咱化合物已成为含能材料研究领域备受关注的研究方向之一^[5]。

国内外已合成出数量众多的硝基呋咱化合物, 其中, 3,4-二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF)已批量生产, 并用于导爆索及导弹战斗部装药^[6]。王军等^[7]以丙二腈为原料经四步连续反应一锅法合成出了新型含能材料化合物 3-氨基-4-氨基胍基呋咱(AAOF)。周文静等^[8]研究了 DNTF 的非等温结晶动力学, 结果表明, HMX 能降低 DNTF 的过冷度, 有效消除其自加热作用, 获得了 DNTF 在 HMX 中结晶机理函数方程, 并用 Kissinger 方程计算了 DNTF 在 HMX 的结晶动力学参数。李春迎等^[9]通过分别使用胶束催化剂和负载

型固体碱催化剂的 2 种新型催化方式合成出了 3,4-二氨基呋咱(DAF)。李亮亮^[10]采用动态力学分析仪研究了 3,4-二硝基呋咱基氧化呋咱(DNTF)与黑索今(RDX)不同配比对 DNTF/RDX-CMDB 系列推进剂动态力学性能的影响, 获得了推进剂的动态力学特征量。但是 DNTF 易晶析、且和增塑剂互溶, 而 DNOAF 的感度较高, 这些缺点限制了其在推进剂领域的推广应用。

目前, 对于推进剂能量特性的研究已开展了一定的研究^[11-14], 但关于硝基呋咱化合物及其对 CMDB 推进剂能量特性的影响的研究较少。本研究采用 NASA-CEA 软件研究了六种硝基呋咱化合物包括 3-硝基呋咱(NF)、3,4-二硝基呋咱(DNF)、3-硝氨基-4-硝基呋咱(NNF)、3-硝氨基-4-硝基呋咱铵盐(ANNF)、3-硝氨基-4-硝基呋咱胍盐(HNNF)和 3-硝氨基-4-硝基呋咱羟胺盐(HANNF)的能量特性, 并研究了其对 CMDB 推进剂能量性能的影响, 为硝基呋咱化合物在推进剂中的应用提供参考。

2 计算方法

采用基于最小自由能原理的 NASA-CEA (Chemical Equilibrium and Applications) 软件^[15]计算了单元推进剂和 CMDB 推进剂的能量特性参数包括: 燃温(T_c)、燃烧产物相对平均分子量(M_c)、特征速度

收稿日期: 2014-01-23; 修回日期: 2014-05-12

作者简介: 付小龙(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事固体推进剂研究。e-mail: fuxiaolong2014@163.com

通信联系人: 樊学忠(1962-), 男, 研究员, 主要从事固体推进剂研究。e-mail: xuezhongfan@126.com

(C^*) 和比冲 (I_{sp}), 其中计算标准条件为: 燃烧室压强 6.86 MPa, 喷管膨胀比 70/1。

基础 CMDB 推进剂组成为: NC 含量为 23% ~ 25%, NG 含量为 30% ~ 33%, RDX 含量为 0 ~ 34%, DINA 含量为 3% ~ 5%, 其他 5%。

3 结果与讨论

3.1 硝基呋咱化合物单元推进剂能量特性

硝基呋咱化合物的能量是硝基呋咱/CMDB 推进剂设计中考虑的主要因素, 为研究硝基呋咱化合物的能量水平, 利用 NASA-CEA 软件在标准条件下计算了六种硝基呋咱化合物 (图 1) 和 RDX、HMX、CL-20 单元推进剂的氧系数 ($OB_{(CO)}$) 和能量特性参数, 结果见表 1。

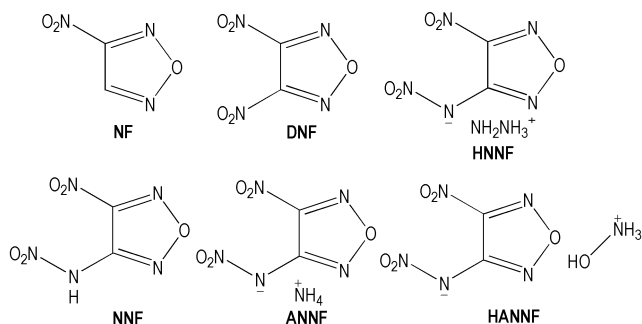


图 1 六种硝基呋咱化合物的结构

Fig.1 Structures of six nitrofurazan compounds

表 1 硝基呋咱化合物单元推进剂能量性能

Table 1 Energy characteristics of nitrofurazan monopropellants

compound	$OB_{(CO)}$	M_c	T_c /K	C^* / $m \cdot s^{-1}$	I_{sp} / $N \cdot s \cdot kg^{-1}$
NF	0.67	27.296	3760.01	1670.6	2692.9
DNF	1.25	31.595	3727.59	1555.4	2561.7
NNF	1.11	29.759	3613.30	1579.1	2601.5
ANNF	0.83	25.843	3515.72	1668.8	2719.7
HNNF	0.77	24.500	3589.70	1728.4	2802.2
HANNF	1.00	26.471	3577.04	1666.4	2744.8
RDX	0.67	24.267	3277.27	1644.7	2608.9
HMX	0.67	24.277	3269.36	1642.0	2604.1
CL-20	0.80	27.362	3586.45	1638.1	2673.3

Note: OB is oxygen coefficient; M_c is relative average molecular mass; T_c is combustion temperature; C^* is characteristic velocity; I_{sp} is specific impulse.

为对比六种硝基呋咱化合物的能量水平, 利用 NASA-CEA 软件计算了 RDX、HMX、CL-20 的能量示性数。由表 1 可见, RDX 燃气平均相对分子量为 24.267, 硝基呋咱化合物燃气相对平均分子量为 24 ~

32, 这可能由于其分子结构中含有大量 N 元素, 同时含有一定 O 元素, 在燃烧过程中产生较多 CO_2 、 N_2 等物质, 因此其燃气相对平均分子量较高; 同时, 由于硝基呋咱化合物的氧系数较高, 使得燃烧较充分, 放热较大, 因此, 燃温普遍较高。比冲和特征速度的计算结果表明, 硝基呋咱化合物具有较高的能量, 其中 ANNF 的比冲达 2719.7 $N \cdot s \cdot kg^{-1}$, HANNF 的比冲达 2744.8 $N \cdot s \cdot kg^{-1}$, 而 HNNF 的比冲高达 2802.2 $N \cdot s \cdot kg^{-1}$ 、特征速度达 1728.4 $m \cdot s^{-1}$, 较 RDX 的比冲和特征速度有大幅提高, 且此三种化合物的比冲和特征速度均高于 HMX 和 CL-20。

3.2 硝基呋咱化合物含量对 CMDB 推进剂能量性能的影响

为研究硝基呋咱化合物对 CMDB 推进剂能量特性的影响, 将硝基呋咱逐步取代 CMDB 推进剂中的 RDX, 计算了 CMDB 推进剂的氧系数 (表 2), 并在标准条件下计算了硝基呋咱/CMDB 推进剂的比冲, 结果见图 2。

表 2 硝基呋咱化合物对 CMDB 推进剂氧系数的影响

Table 2 Effect of nitrofurazan compounds on oxygen coefficient of CMDB propellants

RDX content/%	nitrofurazan content/%	$OB_{(CO)}$					
		NF	NNF	DNF	ANNF	HNNF	HANNF
34	0	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
30	4	0.72	0.73	0.73	0.72	0.72	0.73
26	8	0.72	0.74	0.75	0.73	0.73	0.74
22	12	0.72	0.75	0.76	0.73	0.73	0.75
18	16	0.72	0.76	0.78	0.74	0.73	0.76
14	20	0.72	0.78	0.79	0.74	0.74	0.77
10	24	0.72	0.79	0.81	0.75	0.74	0.78
6	28	0.72	0.80	0.82	0.76	0.74	0.79
2	32	0.72	0.81	0.84	0.76	0.75	0.80
0	34	0.72	0.82	0.85	0.76	0.75	0.80

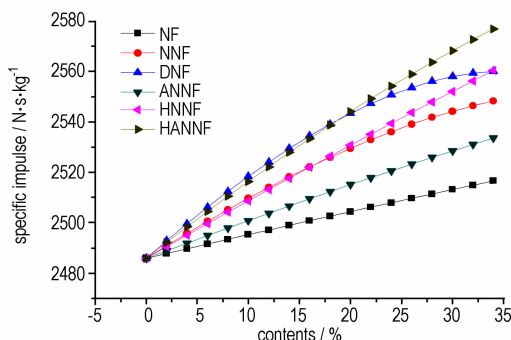


图 2 硝基呋咱化合物对 CMDB 推进剂比冲的影响

Fig.2 Effect of nitrofurazan compounds on specific impulse of CMDB propellants

由表 2 可看出,硝基呋喃化合物的加入对 CMDB 推进剂的氧系数有一定影响,与 RDX 相比,其中 DNF 和 NNF 分别使 CMDB 推进剂氧系数提高至 0.85 和 0.82,而 NF 加入时推进剂氧系数基本不变。原因是 DNF 和 NNF 为正氧平衡,在燃烧时能够提供更多的氧,因此推进剂的氧系数明显升高;而 NF 的氧平衡与 RDX 相当,因此其替代 RDX 时推进剂氧系数不变。

由图 2 可看出,随着硝基呋喃化合物含量的增多,CMDB 推进剂的比冲均呈增加趋势,HANNF、HNNF、ANNF 和 NF 含量对比冲的影响几乎呈直线上升趋势,HANNF 与 HNNF 可分别使 CMDB 推进剂比冲提高 $91 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $74.6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。但是,随着 DNF 和 NNF 含量的增加,CMDB 推进剂的比冲增加趋势逐渐趋于平缓。主要是因为推进剂燃烧过程中需要适当的负氧平衡以提高比冲。而 DNF 和 NNF 的氧系数较大,分别为 1.25 和 1.11,二者代替 RDX 后使得 CMDB 推进剂的氧系数增加较快,因此,较快地接近能量极限。

NNF 分子结构中仅有一个硝基,其氧系数较低,但能量略高于 RDX,因此在其替代 RDX 时能量提高较少;DNF 分子结构中有两个硝基,氧含量与氧系数大幅增加,加入 CMDB 推进剂后,推进剂可充分燃烧,能量有较大提高,但其能量较其他化合物低,当含量较多时,推进剂能量增加趋势减缓;NNF 分子中含一个硝基和一个硝氨基,分子结构稳定,氧系数较高,但单质能量较低,推进剂能量适中;ANNF 分子为一个 $-\text{NH}_2^+$ 取代 NNF 中硝氨基上的 H^+ ,其氧系数较 NNF 大幅下降,单体能量不高,推进剂能量增加较少;HNNF 分子为一个 $-\text{NH}_2\text{NH}_3^+$ 取代 NNF 中硝氨基上的 H^+ ,其氧系数进一步降低,但 HNNF 单体能量最高,达 $2802.2 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$,推进剂能量增幅较大;HANNF 为一个 $-\text{NH}_3^+-\text{OH}$ 取代 NNF 中硝氨基上的 H^+ ,取代基中含有氧,其氧系数较高,且单体能量高,因此推进剂能量提高最大。

由以上研究可知,在 CMDB 推进剂体系中,硝基呋喃化合物对推进剂能量的贡献大小依次为 HANNF > DNF > HNNF > NNF > ANNF > NF。

3.3 不同压强下含硝基呋喃化合物的 CMDB 推进剂能量性能

压强对推进剂能量性能和燃烧性能有显著影响^[15],计算了 6.86, 10, 15, 20, 25, 30 MPa 六种燃烧室压强下含 34% 硝基呋喃化合物的 CMDB 推进剂的能量特性参数,结果见图 3 和图 4。其中,膨胀比为 70/1。

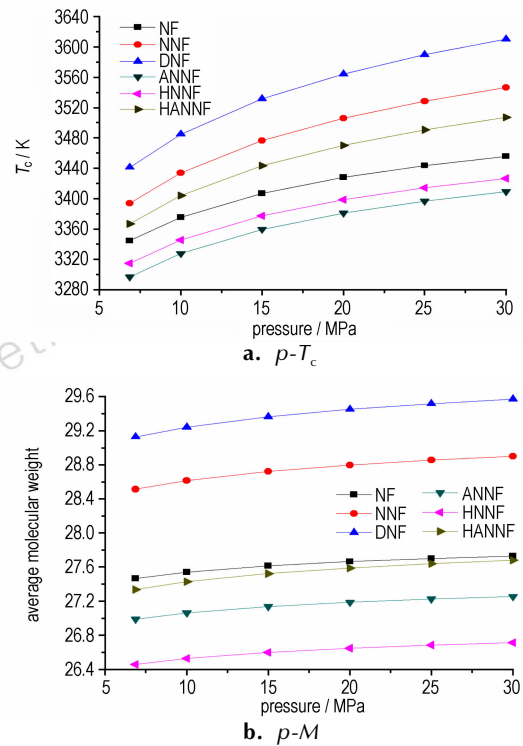


图 3 不同压强下硝基呋喃化合物对 CMDB 推进剂的燃温和燃气平均相对分子量的影响

Fig. 3 Effect of nitrofurazan compounds on the combustion temperature and average molecular mass of CMDB propellants at various pressures

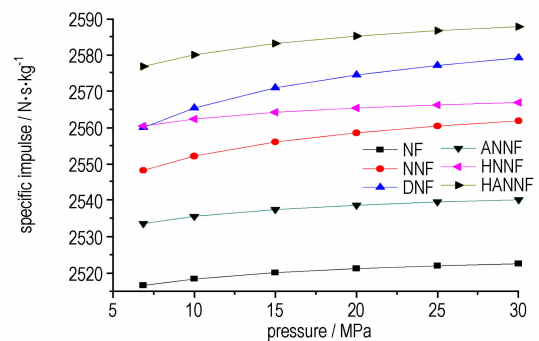


图 4 不同压强下硝基呋喃化合物对 CMDB 推进剂的比冲的影响

Fig. 4 Effect of nitrofurazan compounds on specific impulse of CMDB propellants at various pressures

由图 3a 可见,随着压强升高,CMDB 推进剂燃温逐渐增加,其中,含 DNF 推进剂受压强影响最大,30 MPa 下燃温为 3610.3 K,较 6.86 MPa 燃温 3441.4 K 提高了 168.9 K (4.9%);其次为含 NNF 推进剂,相同条件下燃温提高了 152.5 K (4.5%);含 NF 推进剂受压强影响最小,相同条件下燃温提高 111.2 K (3.3%)。由图 3b 可见,随着压强升高,

CMDB推进剂燃气平均相对分子量逐渐增加,但总体变化较小。其中,含 DNF 推进剂受压强影响最大,30 MPa下燃气平均相对分子量较 6.86 MPa 仅提高了 0.5(1.7%);含 HNNF 推进剂受压强影响最小,相同条件下燃气平均相对分子量仅提高了 0.2(0.8%)。

由图 3 可知,随压强升高,六种硝基呋咱/CMDB 推进剂 T_c 变大趋势均大于 M_c ,由于推进剂的比冲正比于 T_c/M_c ,因此,六种硝基呋咱/CMDB 推进剂的比冲均随压强升高而增加,和计算结果一致(图 4)。而且,由于 M_c 变化幅度较小,使得硝基呋咱/CMDB 推进剂比冲受压强影响顺序和燃温受压强影响顺序一致,均为 DNF>NNF>HANNF>ANNF>HNNF>NF。

4 结 论

(1) NASA-CEA 计算研究表明,硝基呋咱化合物具有较高的能量,其中 HANNF 单元推进剂的比冲达 $2744.8 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$,HNNF 单元推进剂的比冲高达 $2802.2 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(2) 硝基呋咱能显著提高 CMDB 推进剂能量,其中 DNF 与 NNF 能量适中但燃温较高;而 HNNF 与 HANNF 能量高、燃温较低。

(3) 压强对硝基呋咱推进剂能量性能有显著影响,硝基呋咱推进剂比冲受压强影响顺序为:DNF>NNF>HANNF>ANNF>HNNF>NF,可进一步对其在推进剂中应用进行探索研究。

参考文献:

- [1] 付小龙,邵重斌,樊学忠,等. 高能无烟改性双基推进剂中高压能特性研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2010, 8(1): 46-48.
FU Xiao-long, SHAO Chong-bin, FAN Xue-zhong, et al. Study on high pressure energy characteristic of high energy smokeless modified double base propellant[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2010, 8(1): 46-48.
- [2] 徐司雨,赵风起,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.
- [3] 高莉,杨红伟,伍波,等. 五种呋咱衍生物的新法合成[J]. 含能材料, 2013, 21(2): 226-229.
GAO Li, YANG Hong-wei, WU Bo, et al. New synthetic route of five furazan derivatives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(2): 226-229.
- [4] 周彦水,王伯周,李建康,等. 3,4-双(4'-硝基呋咱-3'-基)氧化呋咱合成、表征与性能研究[J]. 化学学报, 2011, 69(14): 1673-1680.
ZHOU Yan-shui, WANG Bo-zhou, LI Jian-kang, et al. Study on synthesis, characterization and properties of 3,4-bis(4'-nitrofurazano-3'-yl) furoxan [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2011, 69(14): 1673-1680.
- [5] 霍欢,王伯周,王锡杰,等. 呋咱含能化合物的合成及其衍生物反应研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2013, 11(3): 15-22.
HUO Huan, WANG Bo-zhou, WANG Xi-jie, et al. Research progress in synthesis of furazan energetic compounds and reaction of their derivatives[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2013, 11(3): 15-22.
- [6] 苗成才,刘长波,冯晓晶,等. 氧桥呋咱类含能材料的研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2012, 10(6): 34-42.
MIAO Cheng-cai, LIU Chang-bo, FENG Xiao-jing, et al. Research progress of oxygen-bridge furazans-based energetic materials[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2012, 10(6): 34-42.
- [7] 王军,董海山,黄奕刚,等. 3-氨基-3-氨基胍呋咱 500 克级合成[J]. 含能材料, 2006, 14(1): 27-28.
WANG Jun, DONG Hai-shan, HUANG Yi-gang, et al. 500 gram grade synthesis of 3-amino-4-aminoximinofurazan[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(1): 27-28.
- [8] 周文静,覃光明,张皋,等. DNTF 的非等温结晶研究-I. 在 HMX 中的结晶动力学[J]. 含能材料, 2007, 15(6): 629-632.
ZHOU Wen-jing, QIN Guang-ming, ZHANG Gao, et al. non-isothermal crystallization of dntf; i. crystallization kinetics in hmx [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(6): 629-632.
- [9] 李春迎,马洋博,薛云娜,等. 3,4-二氨基呋咱的两种催化合成新方法[J]. 含能材料, 2012, 20(2): 151-154.
LI Chun-ying, MA Yang-bo, XUE Yun-na, et al. Two new synthesis method of 3,4-diaminofurazan[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(2): 151-154.
- [10] 李亮亮,王江宁,孔军利. DNTF/RDX-CMDB 推进剂动力学性能[J]. 含能材料, 2011, 19(3): 282-286.
LI Liang-liang, WANG Jiang-ning, KONG Jun-li. Dynamic mechanical properties of dntf /rdx-cmdb propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(3): 282-286.
- [11] 袁桂芳,胡建军,赵文胜,等. 含 RDX 的硝胺丁羟推进剂能量特性研究[J]. 含能材料, 2002, 10(4): 157-160.
YUAN Gui-fang, HU Jian-jun, ZHAO Wen-sheng, et al. Energy characteristic of nitramine HTPB propellant containing RDX as oxidizer [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2002, 10(4): 157-160.
- [12] 刘晶如,罗运军,杨寅. 含八硝基立方烷(ONC)推进剂的能量特性计算研究[J]. 含能材料, 2007, 15(4): 367-369.
LIU Jing-ru, LUO Yun-jun, YANG Yin. Energy characteristics computation of propellant containing octanitrocubane (ONC). *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(4): 367-369.
- [13] 张杰,贺俊. 硝酸铵基推进剂的能量计算与分析[J]. 含能材料, 2005, 13(6): 401-404.
ZHANG Jie, HE Jun. Calculation and analysis on energy characteristics of AN-based propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(6): 401-404.
- [14] 罗阳,高红旭,赵风起,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.

[15] 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.

Energy Characteristics of CMDDB Propellants with Nitrofurazan Compounds

FU Xiao-long, FAN Xue-zhong, WANG Han, BI Fu-qiang, LI Ji-zhen, LI Hong-yan, LIU Xiao-gang

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

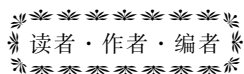
Abstract: Based on the minimum free energy method, the energy characteristics of six nitrofurazan compounds, 3-nitrofurazan (NF), 3,4-dinitrofurazan (DNF), 3-nitrimino-4-nitrofurazan (NNF), 3-nitramino-4-nitrofurazan ammonium salt (ANNF), 3-nitrimino-4-nitrofurazan hydrazonium salt (HNNF) and 3-nitramino-4-nitrofurazan hydroxyl ammonium (HANNF), were studied by NASA-CEA software. Effects of the content of nitrofurazan compounds on the energy characteristics of CMDDB propellants and effects of pressure on the energy characteristics of nitrofurazan /CMDDB propellants were studied. Results show that the specific impulses of HANNF and HNNF monopropellants are $2744.8 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $2802.2 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, which are obviously higher than that of RDX. Six nitrofurazan compounds make the specific impulse of CMDDB propellants increase substantially, in which HNNF and HANNF make the specific impulse of CMDDB propellants increase by $74.6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $91 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The specific impulse for the six propellants increases with the increase of pressure. The order affecting the specific impulse by pressure is $\text{DNF} > \text{NNF} > \text{HANNF} > \text{ANNF} > \text{HNNF} > \text{NF}$.

Key words: applied chemistry; solid propellant; nitrofurazan; energy characteristic; theory calculation

CLC number: TJ55; O69

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2014.06.027



《含能材料》高品质炸药晶体研究专栏征稿

高品质炸药晶体的出现为钝感弹药的研究与应用开辟了一条重要途径,高品质炸药晶体因而也成为目前国内外含能材料研究领域的热点之一。为促进高品质炸药晶体的研究和应用,《含能材料》将于2015年开设高品质炸药晶体研究专栏,专题报道高品质炸药晶体的制备、表征、性能、应用等领域的最新研究成果,促进学者间的交流。欢迎相关研究学者投稿。来稿建议为英文。来稿时请选择对应的专栏。

《含能材料》编辑部