

文章编号: 1006-9941(2007)03-0289-05

钝感高能材料 *N*-脒基脒二硝酰胺盐的研究进展

雷永鹏, 阳世清, 徐松林, 张 彤

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 概述了新型钝感高能材料 *N*-脒基脒二硝酰胺盐(GUDN, 亦称 FOX-12)的理化性能和爆轰性能, 并讨论了其相关应用。GUDN 能量较高(接近 RDX)、感度低(接近 TATB)、热稳定性好、相容性好, 适用于推进剂、气体发生剂和钝感炸药。

关键词: 有机化学; *N*-脒基脒二硝酰胺盐; 性能; 推进剂; 气体发生剂; 钝感炸药; 综述

中图分类号: TJ55; TQ560

文献标识码: A

1 引言

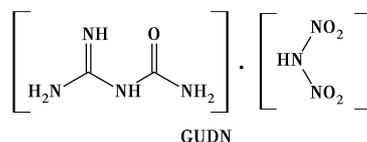
二硝酰胺盐的性能及应用是含能材料的重点研究内容之一, 如对高能氧化剂二硝酰胺盐(ADN)的研究^[1-4]。多数二硝酰胺盐溶于水, 吸湿性强, 这给火炸药的应用带来了困难^[5]; 许多军用钝感含能材料能量较低, 不能从根本上提高武器装备效能^[6]。*N*-脒基脒二硝酰胺盐(GUDN, 亦称 FOX-12)是瑞典国防研究院(FOA)继合成 1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯^[7](FOX-7)之后, 于 20 世纪 90 年代首先合成的新型钝感高能材料。GUDN 制备简便^[6], 价格低廉, 能量高于 TATB, 爆速可达 8210 m·s⁻¹, 感度和热稳定性优于 RDX, 不溶于冷水, 含氮量 46.9%, 含氧量 38.3%, 可广泛用于推进剂、气体发生剂和钝感炸药等方面。目前瑞典、俄罗斯、法国和中国都对 GUDN 的性能及应用展开了研究^[4,5,8-18], 取得了一定成果, 而瑞典对此研究处于领先地位。本文就其性能及其应用和最新进展进行了综述。

2 性能

2.1 GUDN 的物化性能和爆轰性能

GUDN, C₂H₇O₅N₇, 白色晶体, 密度为 1.755 g·cm⁻³, 氧平衡 -19.1%, 可溶于热水, 不溶于冷水。杨通辉等^[8]在 75% 湿度的条件下将 GUDN 放置一周, 增重小于 0.06%, 说明 GUDN 完全不吸湿, 可作为 ADN 的添加剂对其进行改性。GUDN^[10]的撞击感度 > 159 cm(2 kg 落锤), 摩擦感度 > 350 Nm。标准

摩尔生成焓 $\Delta H_f = -355 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ (实测), 差示扫描量热法(DSC)得 GUDN 的活化能 $E_a = 277 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ (200 ~ 225 °C), 205 °C 开始分解, 无熔点。热重分析(TG)发现 GUDN 在 214.8 ~ 238.52 °C 迅速分解, 只剩余 16.25% ~ 18.39% 质量, 随着温度升高, 失重速度减慢。GUDN 的点火温度为 192 °C, 低于 RDX(210 °C)而高于 ADN(160 °C)。密度为 1.66 g·cm⁻³ 和 1.75 g·cm⁻³ 时爆速分别为 7870 m·s⁻¹ 和 8210 m·s⁻¹。



赵凤起等^[5]研究了 GUDN 的热化学性质和非等温热分解动力学参数, 得到等容燃烧热为 $(-7068.64 \pm 0.50) \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, 标准燃烧焓为 $(1467.66 \pm 0.50) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 乙酸中的溶解焓为 $(165.737 \pm 0.013) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。积分形式的动力学模式函数为 $\alpha^{0.5}$, 指前因子为 $10^{21.18} \text{ s}^{-1}$, 热爆炸临界温度为 217.6 °C。

Östmark 等^[9,10]采用 MOPAC6.0 程序和 PM3 parameter 仪器得到 GUDN 的 $\Delta H_f = -155 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 和实测值 $-355 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 相差较大。通过 X 射线衍射研究了 GUDN 的晶体结构, 发现其晶体的分子堆积是二维层状结构, 各层之间仅依赖范德华力。在每层内部, 分子内及分子之间有大量的氢键, 他们认为这是造成 GUDN 的 ΔH_f 实测值和计算值相差较大的原因。特别的分子堆积结构使 GUDN 具备感度低、无熔点和水溶性差等许多优良的性质。有些钝感高能材料如 TATB^[19]、 β -NTO^[20] 和 FOX-7^[21] 等也有相同的层状结构, 具有和 GUDN 相似的物理性质, 这表明该类分子

收稿日期: 2006-07-21; 修回日期: 2006-09-05

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院“NSAF”联合基金资助(10376042)

作者简介: 雷永鹏(1982-), 男, 硕士, 目前从事有机合成及含能材料研究。e-mail: lypkd@yahoo.com.cn

的堆积形式在一定程度上为制备新的钝感高能含能材料提供了借鉴。

2.2 GUDN 与其它高能化合物性能比较

GUDN 与其它常用高能化合物的性能^[3,22]比较见

表1,从表1可知,GUDN 与常用几种高能化合物相比具有以下特点:感度低,不吸湿,不存在熔点,热稳定性好,其优良性质决定了 GUDN 在推进剂、气体发生剂和钝感炸药中都有较大的应用潜力。

表1 几种高能化合物的性能比较^[3,22]

Table 1 Comparison of some high energy compounds

compound	appearance	density /g · cm ⁻³	m. p. /°C	hygroscopicity	CJ VOD /m · s ⁻¹	impact sensitivity H ₅₀ /cm	friction sensitivity /%	CJ pressure /GPa	detonation heat /kJ · kg ⁻¹
NTO	white	1.93	273 (decompose)	-	7951(1.816)	293	>350 Nm	34.9	-
HMX	white	1.900	278	No	9100(1.854)	32	100	39.0	5715
RDX	white	1.82	203	No	8800(1.786)	26	76 ± 8	34.7	5736
TNT	colorless	1.654	80.9	Less	6928(1.634)	100	>350 Nm	19.6	5066
GUDN	light yellow	1.755	No	No	8210(1.680)	>159	>350 Nm	25.7	-
TATB	orange yellow	1.93	330	No	7606(1.857)	>130	>350 Nm	29.7	2420
CL-20	white	2.035	210	-	9500(2.100)	20	100	43.0	6238
FOX-7	bright yellow	1.878	No	-	8870(1.885)	126	>350 Nm	34.0	-

Note: 1) The compounds are crystal. 2) The data in bracket are density, g · cm⁻³.

2.3 GUDN 的相容性

王伯周和刘愆等^[4,12]将 GUDN 加入 RDX、HMX、NG + NC、NG + BTTN、C₂、AP 等常用火炸药组分后,通过 DSC 的吸热峰温及起始分解温度的变化研究 GUDN 与它们的相容性。从表2可以看出,GUDN 与 RDX、HMX、NG + NC、NG + BTTN、C₂、AP 等相容性较好,分解温度都高于 190 °C,这为 GUDN 在火炸药中的应用提供了保障。

3 应用

3.1 在推进剂中的应用

GUDN 可单独或配合其它组分用于推进剂。Langlet^[23]认为,GUDN 基推进剂稳定性优于其它推进剂,燃速高于硝胺类推进剂,且不产生有害的 HCl 气体,符合低特征信号推进剂的要求,能够提高导弹的突防能力。同时,GUDN 可以作为燃速调节剂用于以 ADN 为基的推进剂中,降低燃速压强指数,不过目前暂无较详细的报道。GUDN 用作枪炮发射药能够减缓枪炮膛的磨损。较低的燃温减轻了炮管的变形程度;分解产生的 N₂ 还可以降低反应率,N₂ 浓度高时还能抑制 CO 与枪管的反应,从而减轻金属碳化物的生成。不但节约了经费,更重要的是降低了更换炮管的频率,战时能够提高武器装备整体效能,在一定程度上增强了战备^[17]。GUDN 挤压性能良好,可作为推进剂的主要成分,同时,GUDN 不吸潮,用于火箭推进剂装药时可长期贮存,GUDN 可回收使用,降低武器的成本。表

3 为几种常见单元推进剂的能量特征^[24],从表3可以看出,GUDN 的能量较高,燃烧产物无卤素、无烟,其单元推进剂的比冲为 2379.58 N · s · kg⁻¹,高于 FOX-7、ADN 和 AP 单元推进剂的比冲。

表2 GUDN 的相容性^[4,12]

Table 2 Compatibility of GUDN

materials	mass ratio	endothermic peak temperature /°C	initial decomposition temperature /°C	exothermic peak temperature /°C
GUDN			215.2	218.41
RDX		205.16	209.2	241.56
GUDN/RDX	50: 50	196.10	203.52	225.66
HMX			280.56	285.04
GUDN/HMX	50: 50		210.1	213.78
			279.1	283.00
NG + NC			199.02	210.15
GUDN/ NG + NC	50: 50		202.0	208.20
NG + BTTN			173.72	230.38
GUDN/ NG + BTTN	50: 50		190.9	200.82
PEG				62.14
GUDN/ PEG		60.86		
C ₂		122.44		
C ₂ /GUDN	50: 50	121.93		204.98
AP		242.37	308.06	354.32
GUDN/AP	50: 50	203.17		207.22
		238.50		381.24
				386.03

Note: NG, nitroglycerine; NC, nitro-cotton; BTTN, butanetriol trinitrate; PEG, poly ethylene glycol; C₂, dimethyldiphenylurea.

表 3 几种常见单元推进剂的能量特征^[24]

Table 3 Energy characteristics of some common monopropellants

energetic materials	specific impulse /N · s · kg ⁻¹	characteristic velocity /m · s ⁻¹	burning temperature /°C	main products /mol%							
				H ₂	N ₂	O ₂	Cl ₂	HCl	H ₂ O	CO ₂	CO
FOX-7	2343.55	1490.5	2526	0.15	0.30				0.20	0.15	0.20
AP	1550.33	990.3	1160		0.10	0.30	0.10	0.10	0.40		
ADN	2002.52	1282.6	1827		0.40	0.20			0.40		
GUDN	2379.58	1517.6	2407	0.15	0.45				0.20	0.10	0.10

庞军等^[13]研究了 GUDN 在改性双基 (CMDB) 推进剂中的工艺性、能量特性和燃烧特性。以含 50% 硝胺的螺压改性双基推进剂为基础配方, GUDN 为 50%, 黏合剂和增塑剂为 42%, 催化剂 3.8%, 其它 4.2%, 压延得到 5 mm × 5 mm × 150 mm 的燃速药条。有关参数见表 4。

表 4 GUDN 药条的燃速及燃速压力指数

Table 4 Burning rate and pressure exponent of the formulation with GUDN

pressure/MPa	burning rate/mm · s ⁻¹	pressure exponent
4 - 6	10.56 - 13.41	0.59
6 - 8	13.41 - 15.58	0.52
8 - 10	15.58 - 17.53	0.53
10 - 12	17.53 - 19.38	0.55
12 - 14	19.38 - 20.70	0.43
14 - 16	20.70 - 22.08	0.48
16 - 18	22.08 - 23.15	0.40
18 - 20	23.15 - 24.01	0.35
20 - 22	24.01 - 24.81	0.34

表 5^[13]为 GUDN 和 HMX 分别作为添加剂时推进剂的能量、感度和安定性参数。从表 5 可以看出, 以 GUDN 为添加剂的配方爆热低于 HMX, 感度试验结果在双基和改性双基正常范围内, 甲基紫安定性较低, 分析可能是杂质的原因, 但爆燃试验和 HMX 均为 5 h 不爆。试验表明将 GUDN 用作 CMDB 推进剂的安定性符合双基推进剂的基本要求, 且表现了较好的燃烧性能, 压力指数达到了实际应用的要求。

表 5 以 GUDN 和 HMX 为添加剂的推进剂的能量、感度和安定性参数

Table 5 Energy, sensitivity and stability of propellants using GUDN and HMX as additives

additives	weight ratio /%	detonation heat /J · g ⁻¹	ρ /g · cm ⁻³	impact sensitivity /cm	friction sensitivity /%	<i>t</i> /min	burning explosion experiment
HMX	50	5055	1.773	-	-	70	5 h no deonation
GUDN	50	3783	1.689	26.9	16	45	5 h no deonation

Note: 1) Temperature in test is under 16 °C; 2) *t* is time for color change of methyl-violet test.

王江宁等^[25]研究了 GUDN 和 HMX 作为添加剂的 CMDB 推进剂的热分解行为, 各组分比例如下: GUDN/HMX: 双基黏合剂: 催化剂 = 46: 50: 4 (质量比)。推进剂的 PDSC 曲线在不同压力下只有一个分解峰, 表明 GUDN 和 NC、NG 一起分解。

2006 年, 刘愆等^[12]研究了在 CMDB 推进剂 (螺压工艺) 配方中, 用质量分数 26% 的 GUDN 代替 RDX, 催化剂质量分数 3.5%, 结果表明工艺操作及成型性良好, 压强指数和燃速符合使用要求。徐司雨等^[14]研究了含 GUDN 的 CMDB 推进剂的机械感度, 并与含 CL-20 及 DNTF、HMX 的推进剂作了对比。试验表明 GUDN 推进剂比有相似组成的 CL-20、DNTF 推进剂撞击感度低、摩擦感度高, 但仍然符合要求。同时, 在需要的情况下, 可以通过增加其它组分含量来降低 GUDN 推进剂的摩擦感度。此外, Sjöberg^[26]还研究了 GUDN 和 RDX 配合使用, 以 NC 为黏结剂、丁基硝酸酯基乙基硝酸铵 (Bu-NENA) 为增塑剂的钝感推进剂的性能。

3.2 在气体发生剂中的应用

GUDN 用于气体发生剂, 具有化学稳定性好、产气量大、燃烧稳定、燃速对压强依赖小、燃烧产物环保无毒以及能够重复使用等优点, 可替代毒性高、稳定性差的 NaN₃ 类气体发生剂。Sjöberg^[27]和 Svante 等^[28, 29]对此进行了研究, 结果表明压强和温度对纯 GUDN 燃烧几乎没有影响, 压强很低时 GUDN 也能稳定燃烧, 无固体残渣生成。研究发现用胍基二硝酰胺盐 (GDN) 能够弥补 GUDN 燃速较低的不足, GDN 燃速很高, 二者配合使用, 可以相互作为对方的燃速调节剂。另外, GUDN 和 GDN 与无机氧化物或者氧气配合使用, 不作为烟火/混合气体发生剂, 通过改变无机氧化物或氧气含量来调节氧平衡。该种气体发生剂能够回收使用, 操作简便, 常温下经水重结晶即可除去分解产物, 经处理后的发生剂性能不发生变化。克服了以前的气体发生剂在使用期之后都必须燃烧销毁的缺点, 提高了经济效益。

Sjöberg 等^[11]的研究表明, GUDN 平稳燃烧的压强指数一般为 0.5 ~ 0.7, 加入无机盐 (高氯酸盐或硝酸

盐)作为氧化剂后,20 MPa下燃速可达 $22 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,相应压强指数为 $0.3 \sim 0.4$,燃温也只有 $1927 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

Svante 等^[28,29]研究了 GUDN/GDN/ KNO_3 (氧化剂)/ O_2 的混合气体发生剂在不同温度下的燃烧情况(见表6)。从表6可以看出,GUDN基气体发生剂对温度的依赖低,可用于汽车安全气囊。研究发现将少量($0.5\% \sim 3\%$)B粉加入气体发生剂可以代替GDN,并且使气体发生剂对压强、温度的依赖更低。

表6 GUDN基气体发生剂燃烧性能对温度的依赖性

Table 6 Temperature-dependence of GUDN based gas generating mixture

temperature/ $^\circ\text{C}$	maximum pressure/MPa	t/ms
-35	0.183	39
+20	0.199	34
+85	0.205	28

Note: t, time for reaching 90% maximum pressure, ms。

3.3 在钝感炸药中的应用

GUDN感度低、不吸潮,和常用火炸药相容性好,大量装药时可用于钝感炸药。欧洲联合公司^[17]报道GUDN能够用于战斗部装药,具备应对任何弹药爆炸而保持安全的性质。研究表明GUDN的计算爆轰性能介于RDX和TNT之间,接近RDX。Langlet等^[2,23]认为GUDN能够配合适当的黏结剂用于非水溶性炸药,甚至可以取代HMX或RDX。

Östmark等^[10]对GUDN进行了圆筒试验,并与Cheetah的计算结果进行了对比,结果相近。利用试验和计算的结果推导了JWL状态方程的待定常数。实测和计算有关数值及参数见表7。

表7 圆筒试验和热化学计算数值及JWL状态方程参数^[10]

Table 7 Calculated/measured cylinder streak records and JWL-parameters

	D / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	p_{CJ} /GPa	A /GPa	B /GPa	C /MPa	R_1	R_2	ω
Cheetah 2.0 BKWC	7835	22.46	1061	7.048	6.796	5.178	1.064	0.385
experiment data	7966	26.11	666.26	8.1308	6.800	4.55	1.46	0.385

Note: Density of GUDN is $1.666 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

他们利用Cheetah热化学程序和平面波起爆装置,研究了GUDN炸药的计算爆速和实测爆速,并对比了GUDN炸药和其它炸药结果(见表8和表9)。从表8可以看出,GUDN炸药爆炸性能接近RDX而高于TNT。结合其它优越性能,有理由认为GUDN将会在钝感炸药中得到广泛应用。

表8 GUDN炸药的实测和计算爆速

Table 8 Measured and calculated detonation velocities for GUDN

charge diameter /mm	booster	weight /g	density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	detonation velocity/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
				measured	calculated
22	PBXN5	10	1.67	no detonation	-
52.15	PETN/FO	75	1.66	no detonation	-
52.15	PETN/FO	300	1.66	7870	7810
60 (copper tube shell thickness 6 mm)	plane wave lens and 50 g PETN/FO		1.666	7970	7835

Note: GUDN is $52.12 \text{ mm} \times 52.12 \text{ mm}$, 95% maximum theory density (TMD).

表9 GUDN炸药和其它炸药的计算爆炸性能比较

Table 9 Comparison of calculated explosion performance of GUDN and other explosives

explosives	density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	detonation velocity / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	detonation pressure /GPa
TNT	1.65	6900	19.6
RDX	1.81	8940	34.7
GUDN	1.75	8210	25.7
GUDN/TNT(60/40) ¹⁾	1.71	7650	23.3
RDX/TNT(60/40)	1.74	8050	28.1

Note: 1) It is mass percent.

4 结束语

GUDN能量较高(接近RDX)、感度低(接近TATB)、不吸潮、不溶于冷水、无熔点、热稳定性好、燃烧产物无毒、产气量大、相容性好,能够在推进剂、气体发生剂和钝感炸药等领域得到广泛应用。另外,GUDN制备简单,价格低廉,为其广泛应用奠定了基础。含GUDN组分的火炸药配方相容性好,感度低,回收方便,对环境友好,必将有广阔的应用前景。目前我国对GUDN的应用研究还相对落后,鉴于GUDN的优良性质,应适当投入,进行针对性的研究,以望将GUDN早日得到实际应用,在我国军事和民用领域发挥重要作用。

参考文献:

- [1] H Östmark, N Wingborg, A Langlet. ADN: A new and high performance oxidizer for solid propellants[A]. Proceedings of the 16th International Symposium on Ballistics[C], Virginia, 1996.
- [2] A Langlet, N Wingborg, H Östmark. Challenges in Propellants and Combustions 100 Years after Nobel[C], 1997. 616-626.
- [3] 张海燕,陈红.低特征信号推进剂的氧化剂:二硝酸胺盐[J]. 飞航导弹, 1996, 7: 35-38.
- [4] 王伯周,刘愈,张志忠,等.新型含能材料FOX-12性能研究[J]. 含能材料, 2004, 12(1): 38-39.
WANG Bo-zhou, LIU Qian, ZHANG Zhi-zhong, et al. Study on properties of FOX-12 [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2004, 12(1): 38-39.
- [5] Zhao F Q, Chen P, Yuan H A, et al. Thermochemical properties and

- non-isothermal decomposition reaction kinetics of *N*-guanylurea dinitramide(GUDN)[J]. *Chinese Journal of Chemistry*, 2004, 22: 136–141.
- [6] Subbiah Venkatachalam, Gopalakrishnan San thosn, Kovoov Ninan Ninan. An over view on the synthetic routes and properties of ammonium dinitramide (ADN) and other dinitramide salts [J]. *Propellants, Explosives & Pyrotechnics*, 2004, 29(3): 178–187.
- [7] H Östmark, A Langlet, H Bemm, et al. FOX-7: A new explosives with low sensitivity and high performance[A]. Proceedings of the 11th Detonation Symposium[C], Colorado, 1998. 20–22.
- [8] 杨通辉, 何金选, 张海林. *N*-脒基脲二硝酰胺盐(FOX-12)的合成与表征[J]. 含能材料, 2004, 12(1): 36–37.
YANG Tong-hui, HE Jin-xuan, ZHANG Hai-lin. Synthesis and characterization of FOX-12 [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(1): 36–37.
- [9] H Östmark, U Bemm, H Bergman, et al. *N*-guanylurea-dianitramide: A new energetic material with low sensitivity for propellants and explosives applications[J]. *Thermochimica Acta*, 2002, 384: 253–259.
- [10] Henric Östmark, Andreas Helte, Torgny Carlsson. *N*-guanylurea-dianitramide(FOX-12): A new extremely insensitive energetic material for explosives applications[A]. International Detonation Symposium[C], Virginia, 2006.
- [11] Per Sjöberg. Gas-generating material for gas-actuated car safety devices [P]. WO 0040523, 2000.
- [12] 刘愆, 王伯周, 张志忠, 等. *N*-脒基脲二硝酰胺盐的合成与性能[J]. 火炸药学报, 2006, 29(1): 29–31.
LIU Qian, WANG Bo-zhou, ZHANG Zhi-zhong, et al. Synthesis and properties of *N*-guanylurea dinitramide [J]. *Chinese J Explo Prop*, 2006, 29(1): 29–31.
- [13] 庞军, 王江宁, 张蕊娥, 等. CL-20、DNTF、和 FOX-12 在 CMDB 推进剂中的应用[J]. 火炸药学报, 2005, 28(1): 19–21.
PANG Jun, WANG Jiang-ning, ZHANG Rui-e, et al. Application of CL-20, FOX-12 and DNTF in CMDB propellant[J]. *Chinese J Explo Prop*, 2005, 28(1): 19–21.
- [14] 徐司雨, 赵风起, 李上文, 等. 含 CL-20 的改性双基推进剂的机械强度[J]. 推进技术, 2006, 27(2): 182–186.
XU Si-yu, ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen, et al. Impact and friction sensitivity of composite modified double base propellant containing hexanitrohexaazaisowurtzitane(CL-20) [J]. *J Prop Tech*, 2006, 27(2): 182–186.
- [15] Charles, Dahlberg. New low-sensitivity modular charge propellant based on GUDN [A]. Intensive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium[C], Bristol, 2006.
- [16] Bemm U. New energetic complexes [A]. Scientific and Technical Aerospace Reports[C], Virginia, 2002.
- [17] Per Sjöberg. Dinitramide News [OL]. http://www.eurenc.com/en/news/docs/Dinitramide_oct_2004.pdf.
- [18] Per Sjöberg. GUDN NEWS [OL]. http://www.eurenc.com/en/high_explosives/newsletters/GUDN_oct_2005.pdf.
- [19] Cady H H, Larson A L. The crystal structure of 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene [J]. *Acta Cryst*, 1965, 18: 485–496.
- [20] Lee K Y, Gilardi R. Structure and properties of energetic materials [M]. Pittsburg: Materials Research Society, 1993. 237–242.
- [21] U Bemm, H Östmark. 1,1-Diamino-2,2-dinitroethylene: A novel energetic material with infinite layers in two dimensions [J]. *Acta Cryst*, 1998, 54: 1997–1998.
- [22] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关性能 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [23] A Langlet. Guanylurea dinitramide, an explosive, propellant, rocket motor charge and generator [P]. USP 6291711, 2001.
- [24] 胡焕性, 张志忠, 赵风起, 等. 高能量密度材料 3,4-二硝基咪唑基氧化咪唑性能及应用研究 [J]. 兵工学报, 2004, 25(2): 155–158.
HU Huan-xing, ZHANG Zhi-zhong, ZHAO Feng-qi, et al. A study on the properties and application of high energy density material DNTF [J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(2): 155–158.
- [25] 王江宁, 冯长根, 田长华. 含 CL-20、DNTF 和 FOX-12 的 CMDB 推进剂的热分解 [J]. 火炸药学报, 2005, 28(3): 17–19.
WANG Jiang-ning, FENG Chang-gen, TIAN Zhang-hua. Thermal decomposition of CL-20/DNTF/FOX-12-CMDB propellant [J]. *Chinese J Explo & Prop*, 2005, 28(3): 17–19.
- [26] Per Sjöberg. A new ingredient in intensive war heads and boosters [A]. Intensive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium[C], Bristol, 2006.
- [27] Per Sjöberg. Gas-generating material for gas-actuated car safety devices [P]. USP 20040154711, 2004.
- [28] Svante Persson, Conny Sjöqvist. Composite gas-generating material for gas-actuated car safety [P]. USP 6764562, 2004.
- [29] Svante Persson, Conny Sjöqvist. Composite gas-generating material for gas-actuated car safety devices [P]. USP 20040231768, 2004.

Progress in Insensitive High Energetic Materials *N*-Guanylurea-dinitramide

LEI Yong-peng, YANG Shi-qing, XU Song-lin, ZHANG Tong

(College of Aeronautic and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The physic-chemistry, detonation properties of GUDN (FOX-12) were reviewed, and its latest applications were introduced in detail. GUDN possesses high energy (approaches RDX), low sensitivity (approaches TATB), excellent thermal stability, non-hygroscopic, cold water insolubility, great gas production and innocuous. Moreover, GUDN is compatible with usual additives used for energetic materials. It is expected that GUDN is applicable in propellant, gas generating composition and insensitive explosive with a broad prospect.

Key words: organic chemistry; GUDN; property; propellant; gas generating composition; insensitive explosive; review