

文章编号: 1006-9941(2001)04-0145-05

# 含 CL-20 的 NEPE 固体推进剂能量特性 及低特征信号的研究

王申<sup>1</sup>, 谭惠民<sup>1</sup>, 金韶华<sup>1</sup>, 刘云飞<sup>1</sup>, 盛思源<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学化工与材料学院, 北京 100081;

2. 空军第七研究所, 北京 100085)

**摘要:** 在 NEPE 推进剂基础配方中添加高能氧化剂六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20), 同时降低铝和高氯酸铵(AP)含量, 以降低特征信号, 大幅度提高推进剂的能量特性。对具体配方的能量水平进行了计算, 研究 AP、铝粉和催化剂含量对含 CL-20 的 NEPE 推进剂能量特性的影响。通过对比分析发现, 随着 AP、铝粉含量的降低和 CL-20 的增加, 推进剂的比冲增加, 体系的特征信号降低。

**关键词:** 六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20); NEPE 固体推进剂; 低特征信号; 比冲

**中图分类号:** V512

**文献标识码:** A

## 1 引言

战术武器隐身技术是衡量其现代化水平的重要因素, 对于导弹或火箭来讲, 发射场地和平台的隐蔽性及机动性提高后, 推进剂的隐身对于整个导弹系统将显得异常重要。一般讲, 战术导弹在发射及飞行时, 喷焰中的烟雾不仅有可见烟, 而且还有红外和紫外辐射, 容易暴露导弹方位, 也易被敌方拦截<sup>[1]</sup>; 另一方面, 在制导信号(微波、电磁波和激光)穿越喷焰和烟雾区时还会衰减和被干扰, 从而严重地影响制导的精确性<sup>[2,3]</sup>。因此, 研究研制具有低特征信号(既无烟又无焰)的新型推进剂是当代固体推进剂发展的一个重要方向。

含混合硝酸酯增塑的聚醚型粘合剂的复合固体推进剂(NEPE)是 80 年代发展起来的新型固体推进剂, 是现役导弹使用的能量最高、低温力学性能最好的一种推进剂<sup>[4]</sup>。一般地讲, NEPE 推进剂在保证其优良的力学性能前提下, 进一步提高体系能量特性的途径是改变配方中其它含能材料的种类和比例, 但有时会遇到提高能量与特征信号及其他综合性能之间的矛盾。已有的研究表明<sup>[5-13]</sup>, CL-20 作为一种新型高能氧化剂, 在高能固体推进剂尤其是低特征信号方面具

有很重要的应用价值。本研究以含奥克托今(HMX)的 NEPE 推进剂为基础配方, 用部分 CL-20 替代原配方中的 HMX、AP、Al 粉, 在提高能量特性的同时, 还力图降低特征信号, 对配方组分之间的相互作用进行了分析, 以期改进和优化配方。

## 2 实验方法及说明

实验中采用 White 的最小自由能法计算和评定系统的化学平衡成分组成及相应的能量特性<sup>[11]</sup>。计算中采用的源程序是根据上述原理编制并与空军第七研究所有关科技人员协作调试的。文中主要以理论比冲( $I_{sp}$ )、密度比冲( $I_p$ )、燃烧温度( $T_c$ )、特征速度( $C^*$ )及体系氧平衡(OB)条件来共同表征和评定推进剂的能量特性。 $I_{sp}$ 值均为膨胀压力比  $p_c/p$  为 70/1 时的标准理论比冲; 在设计的配方中若未特别注明组成时, 均为采用下述配方参数条件<sup>[3]</sup>: (a) 增塑剂由硝化甘油/缩二乙二醇二硝酸酯(NG/DEGDN)混合物构成, 两者质量比为 1:1; (b) 配方中增塑剂用量(WPL)与聚合物用量(WPO)之比 WPL/WPO 为 2.6; (c) 各配方中包含的功能助剂共占全配方总质量的 3.3%。

## 3 数据分析与结果讨论

### 3.1 提高体系的能量特性和降低特征信号的数据分析

(1) CL-20 和 HMX 对少铝配方体系的能量贡献对比。表 1 中列出了分别含 CL-20 与 HMX 少铝配方体系的能量特性。

收稿日期: 2001-02-27; 修回日期: 2001-06-21

作者简介: 王申(1969-), 讲师, 博士, 从事含能材料及高分子材料物理与化学研究。

表 1 CL-20 与 HMX 对少铝配方体系能量特性的贡献

Table 1 Contribution of HMX and CL-20 to the energetic level of the binder system

No.	AP/%	CL-20/%	HMX/%	Al/%	$I_{sp}/N \cdot s \cdot kg^{-1}$	$I_p/kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	$T_c/K$	$C^*/m \cdot s^{-1}$	OB
6001	9		57.72	6	2548.2	498.1	3192	1588	0.569
6002	9	57.72		6	2596.2	528.5	3493	1607	0.621

6001 为基础配方,6002 为 CL-20 取代其中 HMX 后的配方。从表 1 可以看出 6002 配方的理论比冲  $I_{sp}$  比 6001 提高近  $48 N \cdot s \cdot kg^{-1}$ , 涨幅为 2%; 密度比冲  $I_p$  提高了  $30 kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ , 涨幅为 6%; 由于能量的提高, 燃烧室温度  $T_c$  上升了 301 K, 涨幅为 9%; 特征速度  $C^*$  提高了  $19 m \cdot s^{-1}$ , 后者提高 1%; 由此可见, 用 CL-20 代替基础配方中的 HMX, 推进剂的能量水平大大提高, 这对提高空空导弹的速度和射程非常有利。

此处强调的是少铝配方体系(铝含量  $\leq 8\%$ ), 用 CL-20 改进含 HMX 的基础配方, 能量水平将大大提高; 而对于一定范围的多铝体系, 这种效果并不明显<sup>[6]</sup>。

### (2) AP 对能量特性和低特征信号性能的影响

下面讨论用 CL-20 部分或全部取代原配方中 AP 对体系综合性能的影响。表 2 列出了 AP 含量对 CL-20 低信号体系综合性能的影响。

表 2 AP 含量对 CL-20 低特征信号体系综合性能的影响

Table 2 Effect of AP content on the energetic characteristics of the formula system

No.	6002	603	604	605	606	6061	608	609
对比组分含量/%								
AP	9	8	6	5	4	2	1	0.1
CL-20	57.7	58.7	60.7	61.7	62.7	64.7	65.7	66.7
Al	6	6	6	6	6	6	6	6
能量特性参数								
$I_{sp}/N \cdot s \cdot kg^{-1}$	2596	2597	2598	2599	2599	2600	2601	2603
$I_p/kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	528.5	528.9	529.7	530	530.4	531.1	531.4	532.5
$T_c/K$	3493	3493	3494	3494	3494	3494	3494	3494
OB	0.621	0.617	0.608	0.603	0.599	0.59	0.586	0.582
$C^*/m \cdot s^{-1}$	1607	1608	1609	1611	1612	1614	1615	1616
燃烧室及喷口燃气平均分子量(MUGC、MUGCE)/ $g \cdot mol^{-1}$								
MUGC	23.98	23.93	23.84	23.79	23.74	23.65	23.6	23.54
MUGCE	24.59	24.53	24.42	24.36	24.3	24.18	24.13	24.05
主要燃烧产物含量/ $kg \cdot mol^{-1}$								
$Al_2O_3$	1.106	1.106	1.107	1.107	1.107	1.108	1.109	1.109
CO	12.38	12.56	12.93	13.11	13.3	13.67	13.85	14.03
$CO_2$	2.199	2.15	2.05	2.01	1.96	1.86	1.81	1.77
HCl	0.667	0.593	0.445	0.371	0.297	0.143	0.074	0.007
$H_2$	4.31	4.38	4.51	4.59	4.66	4.8	4.87	4.93
$H_2O$	6.217	6.09	5.83	5.7	5.57	5.3	5.17	5.06
$N_2$	9.356	9.45	9.64	9.74	9.84	10.02	10.12	10.22

从表 2 可以看出, 配方 6002 至 609, 对应着 AP 含量从 9% 逐渐减少至 0.1% (即含量趋向于 0), CL-20 含量从 57.72% 提高至 66.7%,  $I_{sp}$  提高了  $7 N \cdot s \cdot kg^{-1}$  (比含 HMX 基础配方 6001 提高  $54.80 N \cdot s \cdot kg^{-1}$ ),  $C^*$  提高了  $10 m \cdot s^{-1}$  (比基础配方提高  $28 m \cdot s^{-1}$ ), 这将对百公里级空空导弹的射程和速度有一定的提高。更重要的是燃气产物中 HCl 含量大大降低, 从  $0.7 kg \cdot mol^{-1}$  降至  $0.007 kg \cdot mol^{-1}$ , 从而降低了白色烟雾产生的可能性; 三原子产物  $H_2O$ 、 $CO_2$  的总含量比 HMX 少铝体系相应减少, 使燃气对红外辐射的衰减大大减弱; 燃烧室燃气平均分子量有所减少, 相应的  $N_2$  量增大, 成气能力增加, 这些都有利于提高推进的能量; 虽然 CO、 $H_2$  还原性气体量稍有增大, 表中氧平衡系数 OB 从 0.62 减至 0.58, 但还不致于使推进剂不完全燃烧现象加剧, 以致产生黑烟<sup>[14]</sup>。由于推进剂气相放热的本质是氧化剂的富氧热分解产物与燃料间的氧化还原反应, 因此在推进剂固体含量不变的情况下, 提高高能氧化剂 CL-20 含量以部分取代 HMX、AP 及 Al, 可显著提高推进剂的能量水平, 而且在一定程度上还可缓解降低特征信号与提高能量及其他综合性能之间的矛盾。经综合比较, 认为用 CL-20 取代基础配方中大部分 AP 是可行的。

### 3.2 铝含量变化对体系能量水平的影响

一般来讲, 铝粉含量增加, 推进剂的总燃烧热值增加, 有利于火焰温度和气相反应热向燃面反馈热值的增加<sup>[15]</sup>, 对提高推进剂的能量和燃速有利; 但是铝粉含量增加, 其凝聚态氧化物造成的两相流损失增加, 比冲效率降低, 实际比冲并不一定增加, 因此在复合推进剂尤其是少烟或无烟推进剂, 铝含量不宜过高。为比较铝含量变化对体系能量水平的影响, 表 3、表 4 中分别列出了 AP = 10%、AP = 0.1% 水平下, 铝粉含量从 8% 降至 1%, HMX 与 CL-20 分别为 53% ~ 60% 两种推进剂配方体系的能量特性。

由表 3 可以看出, 在保证供氧量的前提下 (AP = 10%), 逐渐降低铝的用量, 同时相应地增加氧化剂 CL-20 (或 HMX) 的用量, 可以看到两种配方体系 (分别含 CL-20、HMX) 的能量水平在逐渐降低, 但从整体

对比,含 CL-20 的配方体系能量水平(无论是理论比冲还是密度比冲),要比含 HMX 的配方体系高,而且随铝含量逐渐降低,CL-20 的配方体系的能量水平降低趋势要比 HMX 的配方体系来得缓慢;进一步分析表中数据可以发现:(1)随着铝含量的减少,CL-20(或 HMX)的用量相应地增加,体系氧平衡也在不断增加;(2)含 CL-20 体系的氧平衡值较对应的含 HMX 体系氧平衡高,而且前者的增长趋势要比后者来得要快,此时体系氧平衡都应在 0.53 以上<sup>[6]</sup>。

表 4 数据表明,在保证氧平衡大于 0.5 的水平上,当配方中 AP=0.1%时(即配方中几乎不含 AP),逐渐降低铝的用量,尽管此时相应地增加氧化剂 CL-20(或 HMX)的用量,而且 CL-20(或 HMX)含量要比表 3 中的还要高,但体系的比冲迅速降低,说明铝粉含量对推进剂能量水平的影响较大。

表 3 HMX 与 CL-20 推进剂体系能量水平  
受铝含量的影响之一(AP=10%)

Table 3 Effect of Al content on energetic performance of propellants containing HMX and CL-20, respectively (AP=10%)

CL-20/%	53	54	55	57	59	60
配方号				57	59	60
Al/%	8	7	6	4	2	1
$I_{sp}/N \cdot s \cdot kg^{-1}$	2587	2578	2568	2548	2524	2511
$I_p/kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	527.8	524.3	520.6	513	504.8	500.6
$T_c/K$	3482	3446	3411	3338	3266	3229
OB	0.579	0.588	0.597	0.615	0.633	0.643
HMX/%	53	54	55	57	59	60
Al/%	8	7	6	4	2	1
$I_{sp}/N \cdot s \cdot kg^{-1}$	2548	2531	2517	2488	2455	2437
$I_p/kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	500.4	495.7	491	481.1	470.7	456.3
$T_c/K$	3194	3151	3108	3019	2929	2884
OB	0.536	0.544	0.551	0.565	0.58	0.588

表 4 HMX 与 CL-20 推进剂体系能量水平  
受铝含量的影响之二(AP=0.1%)

Table 4 Effect of Al content on energetic performance of propellants containing HMX and CL-20, respectively (AP=0.1%)

No.	350	351	357	353	355	356
CL-20/%	62.4	64.4	65.4	67.4	69.4	70.3
Al/%	8	6	5	3	1	0.1
$I_{sp}/N \cdot s \cdot kg^{-1}$	2592	2571	2560	2535	2509	2496
$I_p/kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	531.2	523.5	519.5	511.1	502.3	498.2
$T_c/K$	3475	3400	3363	3287	3211	3177
OB	0.54	0.55	0.565	0.582	0.599	0.607
No.	350*	351*	357*	353*	355*	356*
HMX/%	62.4	64.4	65.4	67.4	69.4	70.3

Al/%	8	6	5	3	1	0.1
$I_{sp}/N \cdot s \cdot kg^{-1}$	2535	2505	2489	2453	2416	2398
$I_p/kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	497.3	487.3	482.1	471.2	460.1	454.9
$T_c/K$	3108	3017	2971	2878	2783	2739
OB	0.494	0.508	0.515	0.528	0.542	0.548

以上两组数据表明,CL-20 较 HMX 对配方体系有较大的能量贡献,而且在配方调整过程中在能量上显示出较强的缓冲能力,即对 CL-20 体系而言,配方中其它小组分含能材料含量的变化,对体系能量水平的影响较 HMX 体系来得要小。这意味着该体系具有较大的配方调整空间。

### 3.3 燃速催化剂铅盐对含 CL-20 低特征信号推进剂能量水平的影响

表 5 中列出了燃速催化剂铅盐含量变化对推进剂能量水平的影响。

表 5 燃速催化剂对含 CL-20 低特征信号推进剂能量水平的影响  
Table 5 Effect of PbCO<sub>3</sub> content on energetic level of the binder system

CL-20/%	Al/%	PbCO <sub>3</sub> /%	$I_{sp}/N \cdot s \cdot kg^{-1}$	$T_c/K$
66.7	6	1.9	2603	3494
68.6	6	0.1	2637	3526
64.7	8	1.9	2620	3568
65.6	8	1	2636	3583
66.6	8	0.01	2655	3600

表 5 中铝含量为 6% 水平,铅盐含量从 1.9% → 0.1%,其理论比冲依次为 2 603 → 2 637 N · s · kg<sup>-1</sup>,比冲增加量  $\Delta I_{sp}$  为 34 N · s · kg<sup>-1</sup>,燃烧室温度增加量  $\Delta T_c$  为 28 K,特征速度增加  $\Delta C^*$  为 21 m · s<sup>-1</sup>;当铝含量提高到 8%,从配方 711 → 712 → 718 的数据组对比可以看出,当铅盐含量从 1.9% → 1% → 0.01%,理论比冲依次为 2 620 → 2 636 → 2 655 N · s · kg<sup>-1</sup>,比冲增加量  $\Delta I_{sp}$  分别为 16,35 N · s · kg<sup>-1</sup>。可见在一定的配方范围内,铅盐含量对少铝体系的能量水平的影响比多铝体系<sup>[6]</sup>还要大,而且铝含量越低,对 CL-20/PbCO<sub>3</sub> 这种组合变化对体系能量特性的影响越明显。由于铝又是调节推进剂燃烧性能的有效成分,因此在配方中还不能太少。

一般说来,NEPE 推进剂具有能量高、宽温带力学性能好的特点,但由于含有大量硝胺组分,使其压力指数偏高,限制了其应用范围。因此积极寻求降低推进剂燃速压力指数的新途径,已成为 NEPE 推进剂研究

中的一个重要任务。文献[16]报道纳米级碳酸铅对提高 NEPE 推进剂燃速降低压力指数有较明显的效果,纳米级碳酸铅含量为 1% 水平对降低压力指数有较明显的效果。CL-20 属于新型高能笼状硝胺类氧化剂,纳米级碳酸铅对 CL-20/NEPE 推进剂体系燃烧性能的调节作用有待进一步研究。如果配方体系(配方 712)采用纳米级碳酸铅(含量为 1%),则推进剂理论比冲可达到  $2\ 636\ \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,能量水平已有较大的提高。

#### 4 结 论

(1) 在 NEPE 推进剂原基础配方中用 CL-20 取代 HMX,同时降低铝和高氯酸铵含量,在大幅度提高推进剂的能量特性的同时降低特征信号的综合方案是可行的。

(2) 计算结果表明,在低铝含量配方中:

① 对于基础配方(低铝水平 6% ~ 8%)中,CL-20 替代 HMX,理论比冲提高约  $48\ \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$  左右,涨幅  $\Delta I_{sp}$  为 2%;密度比冲  $I_p$  提高了  $30\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,涨幅  $\Delta I_p$  为 6%;这对提高空空导弹的射程和速度非常有利;

② 当 Al 粉含量在 6% 水平,CL-20 进一步替代配方中 AP,  $I_{sp}$ ,  $C^*$  均有所提高;而且燃气产物中 HCl 含量大大降低,因而在某种程度上可以缓解降低特征信号与提高能量及其它综合性能之间的矛盾;

③ 在调整配方过程中 CL-20 体系在能量上显示出较强的缓冲能力,表明该配方体系较 HMX 体系具有较大的配方调整空间。

(3) 在一定的配方范围内,铅盐含量对少铝体系的能量水平的影响比多铝体系还要大,而且铝含量越低,CL-20/ $\text{PbCO}_3$  这种组合变化对体系能量特性的影响越明显。纳米级碳酸铅对 CL-20/NEPE 推进剂体系性能的调节作用有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 张海燕. 新型高能氧化剂 CL-20[J]. 飞航导弹,1999,7: 44 - 47.
- [2] 张瑞庆. 固体火箭推进剂技术[M]. 北京: 兵器工业出版社,1986.
- [3] 侯林法. 复合固体推进剂[M]. 北京: 宇航出版社,1994.
- [4] 谭惠民. 高能推进剂的发展方向——NEPE 推进剂[J]. 北京理工大学学报,1995,15(6): 1 - 7.
- [5] 郑剑. 新型含能材料—CL-20[J]. 推进技术,1994,(1): 65 - 69.
- [6] 冯增国,侯竹林,谭惠民. 新一代高能固体推进剂的能量分析[J]. 推进技术,1992(6): 66 - 74.
- [7] 郑剑. 美国高能量密度材料研究进展[J]. 固体火箭技术,1991,4: 21 - 25.
- [8] Fred Volk, Helmut Bathelt. Influence of energetic materials on energy-output of propellants[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1997, 22: 120 - 128.
- [9] Doriath G. Energetic insensitive propellants for solid and ducted rockets[J]. Energetic Journal of Propulsion and Power, 1995, 11(4): 870 - 882.
- [10] Mueller D. New gun propellant with Cl-20[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1999, 24: 176.
- [11] Atwood A I, Boffs T L. Burning rate of solid propellant ingredients[J]. Journal of Propulsion and Power, 1999, 15(6): 740 - 747.
- [12] 田德余,刘剑洪. 化学推进剂计算能量学[M]. 长沙: 湖南科技出版社,1999.
- [13] 刘剑洪,田德余,赵彦晖. 二硝酰胺铵推进剂的能量特性[J]. 火炸药学报,2000,23(2): 1 - 5.
- [14] 田楠,谭惠民. NEPE 固体推进剂能量水平的分析[J]. 北京理工大学学报,1992,15(6): 81 - 88.
- [15] 张炜,朱慧. 固体推进剂性能计算原理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社,1996.
- [16] 陈福泰,罗运军,多英全,等. 纳米级碳酸铅在 NEPE 推进剂中的应用[J]. 推进技术,2000(1): 82 - 85.

## Energetic Characteristics of NEPE Low Signature Propellant Containing Hexanitrohexaazaisowurtzitane (CL-20) as Oxidizer

WANG Shen<sup>1</sup>, TAN Hui-min<sup>1</sup>, JIN Shao-hua<sup>1</sup>, LIU Yun-fei<sup>1</sup>, SHENG Si-yuan<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Seventh Institute of Airforce, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The present work puts forward a new way to improve the energetic level as well as low signature characteristics of NEPE propellant, by introducing the high energetic ingredients CL-20 to the original formulas. The effects of different composition on the regulated formula are analyzed with the computer program based on the minimum free energy principle. The results show that CL-20 is a prominent energetic oxidizer in the high performance formula design.

**Key words:** hexanitrohexaazaisowurtzitane (CL-20); NEPE composite propellant; low signature; specific impulse

---

### 本刊加入万方数据资源系统 (ChinaInfo) 数字化期刊群的声明

为了实现科技期刊编辑、出版发行工作的电子化,推进科技信息交流的网络化进程,我刊现已入网“万方数据资源系统 (ChinaInfo) 数字化期刊群”,所以,向本刊投稿并录用的文章,将一律由编辑部统一纳入万方数据资源系统 (ChinaInfo),进入因特网提供信息服务。凡有不同意见者,请另投它刊。本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬,不再另付。

万方数据资源系统 (ChinaInfo) 数字化期刊群是国家“九五”重点科技攻关项目,截止 1999 年 7 月已有 600 种期刊全文上网 (网址: <http://www.chinainfo.gov.cn/periodical>),将在年内增至 1000 余种科技期刊。本刊全文内容按照统一格式制作编入万方数据资源系统 (ChinaInfo),读者可上因特网进入万方数据资源系统 (ChinaInfo) 免费 (一年后开始酌情收费) 查询浏览本刊内容,也欢迎各界朋友通过万方数据资源系统 (ChinaInfo) 向我刊提出宝贵意见、建议或征订本刊。