

# NEPE推进剂的高压燃烧特性研究\*

张小平<sup>1,2</sup>, 李葆萱<sup>1</sup>, 汪越<sup>2</sup>, 郭翔<sup>2</sup>

(1 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072)

2 湖北航天化学技术研究所, 湖北 襄樊 441003)

**摘 要:** 应用高压燃速测试、微热电偶测温及燃烧火焰单幅摄影等技术, 研究了 NEPE推进剂的高压燃烧特性与燃烧机理。实验结果表明: NEPE推进剂高压压强指数出现拐点; 且随压强以及 AP含量升高, 燃烧波由硝酸-CMDB向 AP-CMDB推进剂转变。分析认为硝酸酯基的含量及 AP单元推进剂的扩散火焰是控制 NEPE推进剂燃速及压强指数的主要因素。

**关键词:** 固体推进剂; 高压燃烧<sup>+</sup>; 燃速; 压强指数<sup>+</sup>

中图分类号: V512 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2008) 04-0508-05

## Study on combustion characteristics of NEPE propellant at high pressure

ZHANG Xiao-ping<sup>1,2</sup>, LI Bao-xuan<sup>1</sup>, WANG Yue<sup>2</sup>, GUO Xiang<sup>2</sup>

(1 Coll. of Astronautics, Northwest Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

2 Hubei Inst. of Aerospace Chemotechnology, Xiangfan 441003, China)

**Abstract** The combustion characteristics of NEPE propellants were studied in detail by measuring flame structure, combustion waves and SEM, et al. It was showed that pressure exponent of NEPE propellant had a inflection point at high pressure. The model of combustion process of NEPE propellant is transferred from nitramine-CMDB propellant type to AP-CMDB propellant type with the increase of combustion pressure and the content of AP. The content of nitrate ester group and the diffusion progress of AP monopropellant flame in gas-phase were significant manipulative factors in controlling the inherent burning rate and pressure exponent of NEPE propellants.

**Key words** Solid propellant; High pressure combustion<sup>+</sup>; Burning rate; Pressure exponent<sup>+</sup>

## 1 引 言

高能固体推进剂的高压燃烧性能正受到关注。美国 RDX /CMDB 固体推进剂在压强 13~ 20 MPa 之间可控制燃速压强指数小于 0.2<sup>[1]</sup>。法国 SNPE 的 Gallier 等<sup>[2]</sup>研究了 CL-20/硝酸酯 /GAP 体系 2~ 25 MPa 的燃速特性。国内对 NEPE 推进剂的高压燃烧特性研究刚刚起步, NEPE 推进剂由于含有可独立燃烧的含能黏合剂体系及 AP、硝酸单元推进剂, 其独特的燃面传热机制是影响配方燃烧特性的关键因素。本文从研究黏合剂体系含能程度及配方中 AP / RDX 的相对含量入手, 通过分析 NEPE 推进剂燃烧区域特征, 探讨了其高压燃烧特性的主要影响因素

及作用机制, 可为 NEPE 类推进剂高压燃烧性能的调节提供基础。

## 2 实验部分

### 2.1 NEPE 推进剂样品制备

NEPE 推进剂的配方组成包括高氯酸铵 (AP)、黑索今 (RDX)、Al 粉、聚乙二醇 (PEG)、硝化甘油 (NG) 和 1, 2, 4-丁三醇三硝酸酯 (BTTN) 等, 固体填料组成见表 1。5L 立式混合机制药, 固化得到 NEPE 推进剂药块, 制成药条试样, 用于测试 NEPE 推进剂在不同压强下的燃速。

### 2.2 燃速测试

燃速测试采用 WAE-2000C 型固体推进剂高压燃

\* 收稿日期: 2007-04-15 修订日期: 2007-12-10.

基金项目: 国防科技重点实验室基金 (51455030204HT4202)。

作者简介: 张小平 (1963-), 男, 博士, 研究领域为高能固体推进剂。E-mail: wyxz8848@sina.com

速仪。试样规格为  $4.5 \times 4.5 \times 80$  mm; 测试温度为 25 °C; 测试压强为 3.0~ 25 MPa 每个压强下测试不少于 5 根药条, 通过统计处理求出平均燃速; 根据维也里燃速方程  $r = ap^n$ , 通过线性回归法求出压强指数。

**Table 1 Composition of NEPE propellant**

Composition	AP( species) %	Al%	S%
HN-1	0 ( / )	0	70~ 75
HN-2	12( ④)	0	70~ 75
HN-3	27( ④)	0	70~ 75
HN-4	27( ④)	17~ 20	70~ 75
HN-5	12( ④)	17~ 20	70~ 75
HN-6	55( ④)	17~ 20	70~ 75
HN-7	27( ④/ ⑤)= 1/1)	17~ 20	70~ 75
HN-8	12( ⑤)	17~ 20	70~ 75

### 2.3 燃烧波温度分布测试

将“II”型带状双钨铼微热电偶埋设在直径  $\times$  高为  $7 \times 20$  mm 的推进剂药柱中间, 放置于专用的四视窗透明燃烧室内, 充氮气使燃烧室内达到预定压强。采用镍铬合金丝从样品上端点燃试样。推进剂试样燃烧后自动触发采集系统, 记录热电偶的输出信号, 得到推进剂从凝聚相升温到气相火焰区的燃烧波温度分布曲线。

### 2.4 燃烧火焰结构单幅摄影

将尺寸为  $1.5 \times 5 \times 15$  mm 的 NEPE 推进剂样品安装于四视窗透明燃烧室内, 充氮气使燃烧室内达到预定压强。用镍铬丝从上端点燃推进剂试样, 通过拍照获得 NEPE 推进剂稳定燃烧时的火焰结构照片。

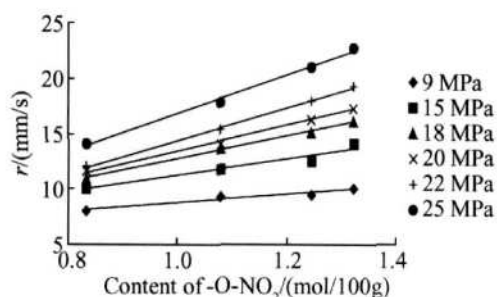
### 2.5 终止燃烧及熄火表面观察

将 NEPE 推进剂制备成  $7 \times 7 \times 10$  mm 的样品, 在透明燃烧室内通过导热铜台获得不同压强下的熄火表面。采用 JSM -6360 型扫描电子显微镜, 将熄火后的 NEPE 推进剂样品置于不同倍率下观察。

## 3 实验结果

### 3.1 NEPE 推进剂的高压燃速特性

为了分析黏合剂体系含能程度对 NEPE 推进剂高压燃烧性能的影响, 研究了 TEGDN, NG /TEGDN, BTIN 和 NG 四种硝酸酯增塑剂对 NEPE 推进剂高压燃烧性能的影响, 结果见图 1。四种增塑剂的硝酸酯基含量分别为 0.833 1.078 1.245 和 1.322 mmol/100 g



**Fig. 1  $r-C_{-O-NO_2}$  variation in NEPE propellant**

由图 1 可知, NEPE 推进剂各压强点下的燃速与配方中硝酸酯基的含量呈线性关系; 随着硝酸酯基含量的增加, 即黏合剂体系含能程度增大, NEPE 推进剂在 9~ 25 MPa 压强范围内的燃速随压强增长的速度依次加快, 即高压压强指数也提高。因此, NEPE 推进剂中硝酸酯基的含量是影响其高压燃烧性能的重要因素之一。

固体组分组成对 NEPE 推进剂高压燃烧性能的影响结果见表 2。由表 2 可看出: 在较宽配方范围内, NEPE 推进剂的高压压强指数均存在拐点, 低压范围 ( $< 15$  MPa) 的压强指数低, 高压 ( $> 15$  MPa) 压强指数高; 当 AP 含量较高或含有一定细粒度 AP (⑤ 类) 时, NEPE 推进剂的燃速大幅度增加; AP 粒度变粗或 RDX 含量增加使得压强指数增加更为明显。因

**Table 2 Burning rate characteristics of NEPE propellant at high pressure**

Composition	Burning rate/(mm /s)							n	n
	3 MPa	7 MPa	10 MPa	15 MPa	20 MPa	22 MPa	25 MPa		
HN-1	/	/	/	/	18.50	20.69	23.55	/	/
HN-2	3.634	6.97	9.52	14.01	18.98	21.53	24.10	0.81	1.08
HN-3	5.01	8.027	10.14	14.01	18.07	20.28	22.57	0.62	0.95
HN-4	6.092	9.994	12.98	17.00	21.42	23.84	26.18	0.63	0.86
HN-5	/	7.224	9.917	14.19	19.25	21.54	23.54	0.83	1.01
HN-6	9.687	14.49	17.39	21.30	25.93	28.60	31.31	0.49	0.77
HN-7	9.024	14.66	19.29	24.85	31.12	33.92	37.31	0.62	0.81
HN-8	7.133	12.09	15.77	21.57	27.45	29.86	33.62	0.66	0.85

此, 固体组分 AP(RDX) 含量和 AP 粒度也是影响 NEPE 推进剂高压燃速和压强指数的重要因素之一。

### 3.2 NEPE 推进剂的火焰结构特征

图 2 是 RDX 与 NG/BTTN/PEG 含能黏合剂混合物的燃烧火焰结构 (HN-1)。

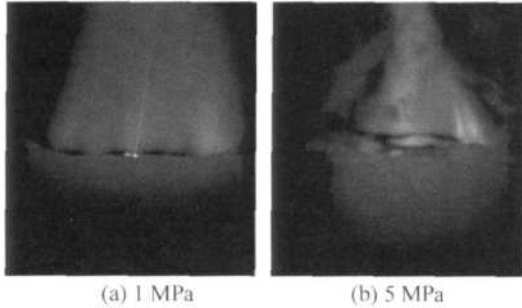


Fig. 2 Flame structure of HN-1

从图 2 可知: RDX 火焰结构存在明显的火焰暗区结构; 随着压强升高, 火焰高度降低。RDX 与含能黏合剂混合物的火焰结构类似于 RDX/CMDB 推进剂, 属于典型的预混火焰结构, 火焰稳定均匀, 硝胺与含能黏合剂间无明显扩散火焰。

RDX/AP 推进剂在不同压强下的火焰结构如图 3 所示。从图 3 可知: RDX/AP 推进剂的火焰结构属于典型的扩散火焰, 各组分拥有各自独立的火焰, 在 5 MPa 以上均不存在暗区; RDX/AP 推进剂的燃烧表面可以明显观察到较厚的熔融层存在, 熔融层应为硝胺与含能黏合剂的熔融共混物; 压强升高时, RDX/AP 推进剂的燃烧火焰在气相区的均匀程度增大, 具有明显的 AP 复合推进剂的燃烧特征。

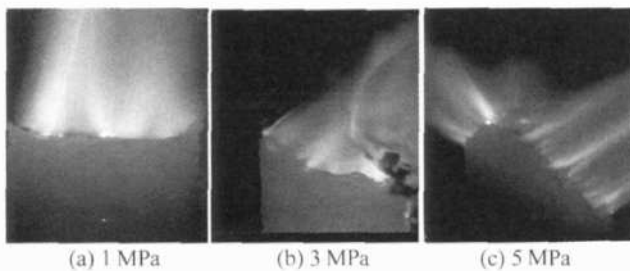


Fig. 3 Flame structure of HN-2

图 4 为 AP(RDX) 含量变化时, NEPE 推进剂的燃烧火焰结构。

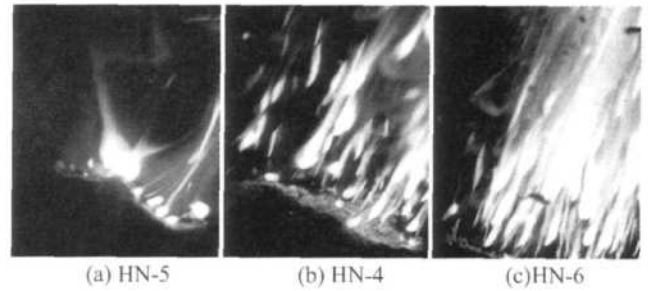


Fig. 4 Flame structure of NEPE propellant (containing Al) at 5 MPa

从图 4 可知: Al 粉的点火和燃烧发生在远离燃面的气相区, 其热反馈对燃面的热量平衡贡献较小。含 Al 粉 NEPE 推进剂的火焰结构受 AP 含量的影响较为显著。当 AP 含量较低时, 由于硝胺本身不能提供多余的氧化性产物参与反应, 导致气相区 Al 粉的燃烧很不充分; AP 含量升高时, 气相区充足的氧化性产物保证了 Al 粒子燃烧充分, 火焰明亮而均匀。

### 3.3 NEPE 推进剂的燃烧波结构

通过热电偶获得了 NEPE 推进剂在 5 MPa 下的燃烧波结构, 计算的燃烧波结构参数见表 3。表面温度  $T_s$ , 火焰温度  $T_f$ , 凝聚相加热层厚度  $L_s$ , 熔融层厚度  $L_m$ , 凝聚相温度梯度  $(dT/dx)_{s-}$ , 气相温度梯度  $(dT/dx)_{s+}$  等的计算方法参考文献 [3, 4]。配方 HN-9 的增塑剂为 BTTN, 配方 HN-10 的增塑比为 2.0。

从表 3 的燃烧波结构参数可知: NEPE 推进剂 5 MPa 的燃烧波结构中无暗区存在。NEPE 推进剂燃烧波结构中存在两个等温区, 第一等温区在 440~505 °C 左右, 为燃烧表面; 第二等温区温度大于 2200 °C, 为发光火焰区。近燃面气相区域的温度梯度受 AP 含量的影响较大, 因而在很大程度上影响了近燃面气相区域向燃面的热反馈, 这表明 AP 扩散火焰对近燃面气相温度梯度的影响显著。

由 HN-2 配方与 HN-3 配方的对比可以看出, 随着 AP 含量增加, 燃面和凝聚相加热区厚度明显变

Table 3 Combustion wave distribution parameters of NEPE propellant at 5 MPa

Com position	$L_s / \mu\text{m}$	$L_m / \mu\text{m}$	$T_s / ^\circ\text{C}$	$T_f / ^\circ\text{C}$	$(\frac{dT}{dx})_{s-} / (^\circ\text{C} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	$(\frac{dT}{dx})_{s+} / (^\circ\text{C} \cdot \mu\text{m}^{-1})$
HN-2	66.8	39.0	505	2271	7.60	10.93
HN-3	53.4	6.7	493	2265	8.86	24.06
HN-9	91.5	-	439	-	4.50	24.40
HN-10	84.5	52.1	445	-	5.03	-

小; AP 含量降低, AP 火焰及 AP 分解放热对反应区温度梯度的影响降低, 凝聚相和气相温度梯度均降低, 燃烧表面区厚度增加。

由 HN-9 配方和 HN-10 配方可以看出, 随着黏合剂体系含能程度下降, 燃烧表面区和加热区厚度增加, 表面反应区放热量降低, 燃烧表面温度和凝聚相温度梯度下降。因此, 黏合剂体系的含能程度(硝酸酯基的含量)是影响 NEPE 推进剂燃烧表面温度和燃面热平衡的关键因素。

### 3.4 NEPE 推进剂的燃烧熄火表面特征

HN-7 配方燃烧熄火 (5 MPa) 后的扫描电子显微镜照片如图 5 所示。从图 5 可看出: 250 倍下的 HN-7 熄火表面凹凸不平, 表面呈板结群形貌, 板结群间有裂纹, 大量固体粒子粘附在熔融的表面; 在放大 1000 倍下观察, 熄火表面呈现珊瑚状, 有许多孔洞。

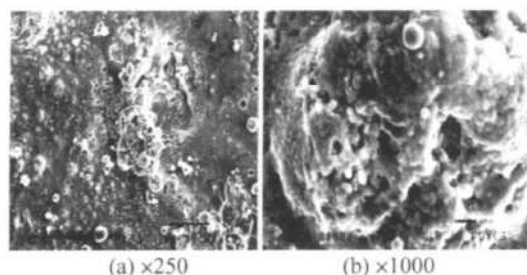


Fig. 5 SEM photo on quench surface of NEPE propellant

从熄火照片判断, NEPE 推进剂燃烧时存在类似双基推进剂泡沫区的熔融层, 其内部发生了显著的分解反应, 产生的气态产物从熔融区逐步逸出, 导致熔融区内存在气孔和裂纹。同时, 较厚的熔融层覆盖在燃面上方, 阻止了 AP 和硝胺粒子直接暴露于气相。

## 4 分析与讨论

### 4.1 NEPE 推进剂燃烧区域的主要特征

从燃烧波温度分布、燃烧火焰结构及燃烧熄火表面分析可以看出, NEPE 推进剂的燃烧区域物理特征类似于 CMDB 推进剂; 随着压强及配方中 AP 含量的升高, NEPE 推进剂的燃烧波结构由硝胺-CMDB 特征向 AP-CMDB 特征转化。由于燃烧产物组成相近, RDX 与 NEPE 含能黏合剂经初始分解、熔融后形成统一的预混火焰, RDX 与黏合剂体系分解产物之间无明显的扩散作用<sup>[5]</sup>。RDX 含能黏合剂体系的燃速仅为两种单元推进剂在燃面上的平均加权值, 其高压燃速特性与双基推进剂类似<sup>[6]</sup>。

AP 的引入在 NEPE 推进剂中产生了强烈的扩散火焰结构。与 AP/HTPB 复合推进剂同时存在初始扩散火焰及最终扩散火焰不同, NEPE 推进剂中由于较厚的含能熔融表面层的存在, AP 初始分解产物在熔融表面上方与含能预混火焰燃烧产物形成单一扩散火焰。扩散火焰释放出大量的热量并且对压强的依赖性比预混火焰小, 因而使得 NEPE 推进剂具有较低的压强指数<sup>[7,8]</sup>。

NEPE 推进剂中, AP 所产生的扩散火焰温度比 AP 及双基类单元推进剂的火焰温度要高得多, 可提高近表面气相区的温度和反应剧烈程度<sup>[9,10]</sup>, 扩散火焰集中释放的热量显著影响燃烧表面温度, 从而在一定压强范围内对 NEPE 推进剂的燃速特性产生显著影响。同时火焰的扩散距离受压强的影响显著, 因此, AP 的扩散火焰将对 NEPE 推进剂的高压燃烧行为产生重要影响。

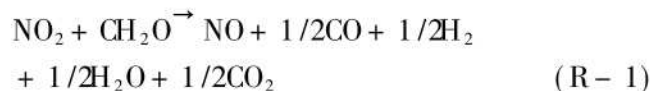
### 4.2 NEPE 推进剂高压燃烧性能的影响因素分析

通过分析压强升高对 NEPE 推进剂燃烧区域结构特征和传热特征的影响, 探讨 NEPE 推进剂高压燃烧特性的影响因素及作用机制。

对于具有预混火焰燃烧特征的推进剂, 其燃速取决于火焰中的化学反应速率<sup>[11]</sup>。当压强达到 15 MPa 以上, 由于预混火焰中二级反应(主要是 NO 与 CO 等还原为 N<sub>2</sub>的过程等)逐渐起主导作用, 因此预混火焰结构主导燃烧性能的推进剂, 在 15 MPa 以上高压区的压强指数接近 1.0。

NEPE 推进剂的含能黏合剂体系组成与双基推进剂相近, 在宽压强范围内燃速也很接近, 两者的燃烧机理非常相似<sup>[12]</sup>。因此, 可借鉴双基推进剂的燃烧机理对含能黏合剂的燃烧行为进行分析<sup>[13,14]</sup>。

燃烧表面区主要反应:



黏合剂体系中硝酸酯基的含量直接影响燃烧表面中 NO<sub>2</sub> 与醛类的放热反应<sup>[15]</sup>, 从而影响燃面的热量平衡和燃面平均温度。因此, 随配方中硝酸酯基含量增加, NEPE 推进剂的燃速呈线性增加。

(R-1) 为一级反应, 反应放热量随着压强升高而增大, 导致燃面净吸收热量和燃速都随压强升高而急剧增大。同时, 由于 (R-1) 反应释放的热量, 又直接发生于燃烧表面区附近, 其对燃面总吸收热量的贡献远大于气相反热。因此, 黏合剂体系含能程度(硝基含量)是影响 NEPE 推进剂高压燃速的首要因

素。抑制  $\text{NO}_2$  在表面区的反应将对高压下 NEPE 推进剂燃速的控制有所帮助。

AP 含量升高或粒度变细, 有利于 AP 富氧产物与黏合剂体系等的富燃产物之间的相互扩散, 增加向燃面的热反馈而提高推进剂的燃速。由于气体的扩散系数和压强成反比, 随着压强增高, 气体扩散变慢, 扩散距离增大, 扩散火焰距离燃面更远, 因此扩散火焰对燃面的热反馈减小, 使得 AP 扩散火焰对燃速的影响随压强的增加而相对减弱。在 15 MPa 以上, HN-2 等配方的燃速反而高于 HN-3 配方, 说明在 15 MPa 以上扩散火焰对 HN-2 配方的影响近乎完全消失, NEPE 推进剂的燃速主要受 RDX 等的预混火焰控制, 其高压压强指数类似于硝酸单元推进剂, 迅速接近 1.0。相反, HN-6~HN-8 配方中, 由于 AP 含量和粒度的效应, 扩散火焰作用增强并向高压拓展, 导致配方在 15~25 MPa 范围内的压强指数也有一定程度的降低。

因此, 通过提高 AP 含量、降低 AP 粒度以及提高初始分解产物中富燃成分的含量等可提高扩散火焰强度的手段, 将有利于降低 NEPE 推进剂的高压压强指数。

## 5 结 论

(1) 黏合剂体系的含能程度是影响 NEPE 推进剂高压燃速的首要因素, 其主要受硝酸酯基含量在表面区的分解反应影响;

(2) 随着压强及 NEPE 推进剂中 AP 含量的升高, 其燃烧波结构由硝酸 -CMDB 推进剂特征向 AP-CMDB 推进剂特征转化, 暗区不是 NEPE 推进剂高压燃烧性能的影响因素;

(3) AP 扩散火焰是影响 NEPE 推进剂高压燃速压强指数的重要因素, 在 15 MPa 以上, 扩散火焰作用随压强增加迅速消失, 是 NEPE 推进剂高压压强指数升高的主要原因。

## 参考文献:

[ 1 ] 莫红军, 张海燕. 高速动能导弹及超高速导弹用固体火箭推进剂 [ J ]. 火炸药学报, 2005, 28( 1 ): 1~ 14  
 [ 2 ] Gallier S, Morin F. Particle size effects on CL20/GAP combustion experiments and theory [ C ]. 36<sup>th</sup> ICT, 2005

V30

- [ 3 ] 王 瑛, 孙志华, 赵凤起, 等. NEPE 推进剂燃烧机理研究 [ J ]. 火炸药学报, 2000, 23( 4 ): 24~ 27  
 [ 4 ] 董存胜, 张珊珊. 固体推进剂燃烧波温度分布及其微分 [ J ]. 火炸药学报, 1995, 18( 1 ): 19~ 23  
 [ 5 ] 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  
 [ 6 ] Duterque J, Lengelle G. Experimental study of double-base propellants combustion mechanisms [ J ]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 1985, 10: 18~ 25  
 [ 7 ] 李上文, 赵凤起. N-15 高能固体推进剂燃烧机理的初探 [ C ]. 火炸药燃烧技术专题研讨会论文集, 2000, 81~ 90  
 [ 8 ] Beckstead M W. Overview of combustion mechanism and flame structures for advanced solid propellants [ M ]. *Progress in Astronautics and Aeronautics AIAA*, 2000, 185: 267~ 287.  
 [ 9 ] Fitzgerald R P, Brewster M Q. Flame and surface structure of laminate propellants with coarse and fine ammonium perchlorate [ J ]. *Combustion and Flame*, 2004, 136( 112 ): 313~ 326  
 [ 10 ] Yano Y, Miyata K, Kubota N. Combustion wave structure of AP composite propellants [ J ]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 1987, 12: 137~ 140  
 [ 11 ] 王伯羲, 冯增国, 杨荣杰, 等. 火药燃烧理论 [ M ]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.  
 [ 12 ] Lengelle G, Duterque J, Tubert J F. Combustion of solid propellants [ R ]. ADA 425264, 2004  
 [ 13 ] 赵凤起, 李上文, 汪 渊, 等. NEPE 推进剂的热分解研究 ( iv ) —黏合剂的热分解 [ J ]. 推进技术, 2002, 23( 3 ). ( ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen, WANG Yuan, et al. Study on the thermal decomposition of NEPE propellant ( iv ) Thermal decomposition of binder [ J ]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23( 3 ). )  
 [ 14 ] 庞爱民. 高能硝酸推进剂燃烧性能研究 [ D ]. 长沙: 国防科学技术大学, 1998  
 [ 15 ] Roos B D, Brill T B. Thermal decomposition of energetic materials 82. Correlations of gaseous products with the composition of aliphatic nitrate esters [ J ]. *Combustion and Flame*, 2002, 128( 112 ): 181~ 190

(编辑: 刘萝威)