

文章编号: 1003-1480 (2025) 02-0018-06

# 低燃速少铝NEPE推进剂研究

张正中, 孙兵兵, 刘运飞, 张伟, 鄢海涛, 刘晓军

(西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065)

**摘要:** 为了降低少铝 NEPE 推进剂的燃速, 分别研究了 AP 粒度和含量、Al 粉粒度、(NG/BTTN)/PET 比例、催化剂及降速剂对推进剂燃烧性能的影响, 计算了不同配方推进剂的标准理论比冲, 并采用  $\Phi 165$  标准发动机对降燃速的推进剂内弹道性能进行验证。结果表明: 增大 AP 和 Al 粉粒度, 降低 AP 和催化剂含量、(NG/BTTN)/PET 比例, 以及添加降速剂均可降低推进剂燃速; 添加降速剂 T8 的降速效果较好, 推进剂标准理论比冲为  $2\ 503.08\ \text{Ns}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 2 MPa 下燃速降至  $3.54\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 2~8 MPa 下的压强指数为 0.48; 采用降燃速的推进剂制备的  $\Phi 165$  标准发动机装药工作正常、性能曲线平稳, 2.78 MPa 下的实测比冲为 219.25 s, 燃速为  $4.57\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

**关键词:** NEPE 推进剂; 燃速; 压强指数; AP; 催化剂; 降速剂

**中图分类号:** TJ55; V512 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.02.003

## Study on the Low Aluminum NEPE Propellant with Low Burning Rate

ZHANG Zheng-zhong, SUN Bing-bing, LIU Yun-fei, ZHANG Wei, YAN Hai-tao, LIU Xiao-jun  
(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065)

**Abstract:** In order to reduce the burning rate of low aluminum NEPE propellant, the effects of AP particle size and content, Al powder particle size, (NG/BTTN)/PET proportion, combustion catalysts and burning rate inhibitors on the combustion performances of propellant were studied. The standard theoretical specific impulses of different formulations of propellant were calculated, and the interior ballistic properties of the propellant with reduced burning rate were validated through  $\Phi 165$  standard motor. The results show that the burning rate of propellant can be reduced through increasing the particle sizes of AP and Al, reducing the contents of AP and catalysts, the proportion of NG/BTTN and PET, and adding burning rate inhibitors; The addition of burning rate inhibitor T8 has a better deceleration effect, with a standard theoretical specific impulse of  $2\ 503.08\ \text{Ns}\cdot\text{kg}^{-1}$  for the propellant, a burning rate of  $3.54\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  at 2 MPa, and a pressure exponent of 0.48 at 2~8 MPa; The  $\Phi 165$  standard motor charge prepared using the reduced burning rate propellant works normally and has a stable performance curve. The measured specific impulse at 2.78 MPa is 219.25 s, and the burning rate is  $4.57\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

**Key words:** NEPE propellant; Burning rate; Pressure exponent; AP; Catalyst; Burning rate inhibitor

作为高能固体推进剂的代表, 硝酸酯增塑聚醚 (NEPE) 推进剂具有优异的能量水平和力学性能, 广泛应用于多种型号战略和战术导弹发动机中<sup>[1-4]</sup>。为了满足先进战术武器对固体发动机低特征信号、大推力和长时间平稳工作的需求, 固体推进剂应具有少

烟、高能、低燃速和低压强指数等特点, 即在保持推进剂烟雾特征不恶化和能量水平不降低的前提下, 降低燃速和压强指数, 从而不断提升武器装备的综合性能<sup>[5-7]</sup>。NEPE 推进剂由于含有大量的硝酸酯和硝胺, 导致其基础燃速和压强指数较高, 且燃速与压强指数

收稿日期: 2024-12-28

作者简介: 张正中 (1987-), 男, 副研究员, 主要从事固体推进剂配方与工艺研究。

基金项目: 国防科工局稳定支持专项。

引用本文: 张正中, 孙兵兵, 刘运飞, 等. 低燃速少铝 NEPE 推进剂研究[J]. 火工品, 2025(2): 18-23.

之间相互制约,如燃速降低,则压强指数升高<sup>[8-10]</sup>。为了降低 NEPE 推进剂的燃速,大量学者进行了相关研究,主要是通过调节硝酸酯比例、调节氧化剂和高能填料粒度及配比、添加降速剂等方式实现<sup>[11-12]</sup>。

本文以少铝 NEPE 推进剂为研究对象,分别研究了高氯酸铵 (AP) 粒度及含量、铝 (Al) 粉粒度、增塑比、催化剂和降速剂对推进剂标准理论比冲和燃烧性能的影响,获得了一种高比冲、低燃速、低压强指数的少铝 NEPE 推进剂,并采用  $\Phi 165$  标准发动机对该推进剂进行内弹道性能验证,以期为低燃速少铝 NEPE 推进剂的应用提供技术支持。

## 1 实验

### 1.1 原料与仪器

环氧乙烷-四氢呋喃共聚醚 (PET), 洛阳黎明化工研究院有限公司; 混合硝酸酯 (NG/BTTN), 西安近代化学研究所; 高氯酸铵 (AP), 大连高佳化工有限公司; 球形铝粉 (Al), 鞍钢实业微细有限公司; 奥克托今 (HMX), 国营第八〇五厂。

2 L 立式捏合机、5 L 立式捏合机, 西安近代化学研究所; Mastersizer 2000 激光粒度仪, 英国马尔文仪器公司; Quanta FEG 600 扫描电子显微镜 (SEM), 美国 FEI 公司。

### 1.2 样品制备

推进剂基础配方如表 1 所示。

表 1 推进剂基础配方  
Tab.1 Basic formula of propellant

成分	w/%
PET	5 ~ 10
NG/BTTN (质量比 1:1)	10 ~ 15
AP	35 ~ 45
Al	1 ~ 3
HMX	25 ~ 35
燃速催化剂	1 ~ 3
其它	3 ~ 8

推进剂样品的制备: 将推进剂各组分预混后加入到 2 L 立式捏合机中, 于 50 °C 下捏合 60 ~ 80 min, 出料并真空浇注于方形药盒中, 放置于水浴烘箱中, 50 °C 固化 7 d, 得到方坯药块, 然后切成 5 mm×5 mm×100 mm 的药条。

$\Phi 165$  标准发动机装药制备: 采用 5 L 捏合机,

将推进剂药浆真空浇注于装配好的  $\Phi 165$  发动机中, 固化后拔出模芯并修整装药端面, 得到发动机装药, 推进剂捏合和固化工艺同推进剂样品的制备工艺。

### 1.3 性能计算及测试

根据最小自由能原理, 采用 REAL 软件对推进剂配方进行标准理论比冲计算。按照 GJB 770B-2005 方法 706.1 靶线法进行静态燃速测试。采用 Vieille 方程  $r=ap^n$  计算燃速压强指数, 其中,  $r$  为燃速,  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $p$  为压强, MPa;  $a$  为燃速系数;  $n$  为压强指数。按照 GJB 770B-2005 方法 705.2 推力台法进行动态燃速和比冲测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 AP 粒度及含量的影响

AP 在 NEPE 推进剂中占较大比例, 因此, AP 的性能对推进剂性能影响较大。不同粒度 AP 热分解效率不同, 导致推进剂燃烧性能不同, 此外, AP 含量也对推进剂燃烧性能有重要影响。本文选用 3 种不同粒度的 AP, 其粒度分布曲线如图 1 所示。由图 1 可见, 3 种 AP 的粒度分布均较均匀,  $d_{50}$  分别为 338, 239, 151  $\mu\text{m}$ 。

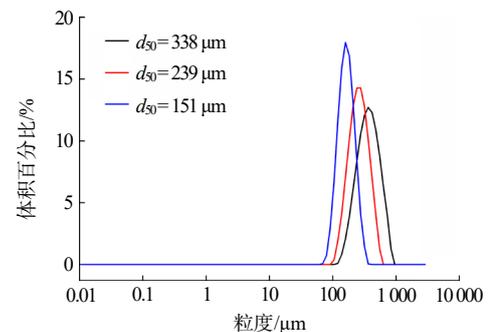


图 1 3 种 AP 的粒度分布曲线

Fig.1 Particle size distribution curves of 3 types of AP

基于不同粒度及含量的 AP 制备少铝 NEPE 推进剂, 其配方特征和标准理论比冲计算结果如表 2 所示, 燃速曲线如图 2 所示。由表 2 和图 2, 对比 DR-1、DR-2、DR-3 可见, 随着配方中粗 AP 比例增加, 少铝 NEPE 推进剂不同压强下的燃速均不同程度降低, 压强指数小幅提升。这是因为随着 AP 粒度增加, 其比表面积降低, AP 和推进剂热分解温度升高, 凝聚相放热反应减小, 从而推进剂燃速降低<sup>[13-14]</sup>; 随着压

强升高, AP 粒度对其热分解温度和凝聚相放热反应的影响逐渐减小, 从而使推进剂燃速降幅减小, 压强指数升高。当保持 AP 粒径不变时, 对比 DR-2、DR-4、DR-5 可见, 随着 AP 含量小幅降低( HMX 含量增加), 推进剂标准理论比冲基本不变, 不同压强下燃速降低, 压强指数升高。这是因为 HMX 在分解前先熔化吸热, 使推进剂燃烧表面温度降低, 因此增加 HMX 含量可以降低推进剂燃速, 随着 HMX 含量增加, 推进剂低压下燃速降低更显著, 从而压强指数升高<sup>[14]</sup>。表 2 含不同粒度及含量 AP 的 NEPE 推进剂配方及标准理论比冲计算结果

Tab.2 Formulas and standard theoretical specific impulse calculation results of NEPE propellants with different granularities and contents of AP

配方号	$w_{AP}/\%$			$w_{HMX}/\%$	标准理论比冲 /(Ns·kg <sup>-1</sup> )
	151 $\mu\text{m}$	239 $\mu\text{m}$	338 $\mu\text{m}$		
DR-1	42	0	0	29	
DR-2	32	5	5	29	2 515.83
DR-3	22	10	10	29	
DR-4	30	5	5	31	2 514.42
DR-5	28	5	5	33	2 512.81

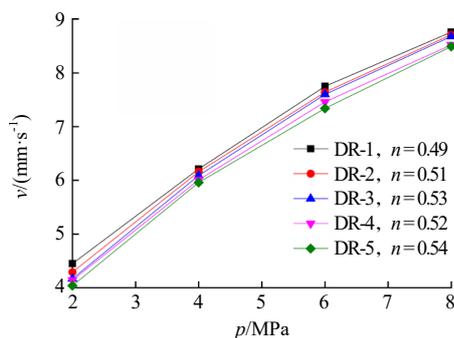


图 2 含不同粒度及含量 AP 的 NEPE 推进剂燃速曲线

Fig.2 Burning rate curves of NEPE propellants with different granularities and contents of AP

## 2.2 Al 粉粒度的影响

Al 粉作为一种高能燃料, 可以有效提高 NEPE 推进剂的能量水平和燃烧稳定性, Al 粉的粒度是决定其作用效果的关键因素之一, 对推进剂燃烧性能影响较大。本文选用 3 种不同粒度的 Al 粉, 其粒度分布曲线如图 3 所示。由图 3 可见, 3 种 Al 粉的粒度分布均匀性基本一致,  $d_{50}$  分别为 3, 6, 15  $\mu\text{m}$ 。

含不同粒度 Al 粉的少铝 NEPE 推进剂配方特征和标准理论比冲结果如表 3 所示, 燃速曲线如图 4 所示。由表 3 及图 4 可见, 随着 Al 粉粒度增大, 推进剂不同压强下的燃速均降低, 但低压下推进剂燃速降幅较一致, 而随着压强升高, 推进剂燃速降幅先增大

后减小, 因此, 随着 Al 粉粒度增大, 推进剂压强指数先降低后升高。推进剂燃速随 Al 粉粒度增大而降低的原因是: Al 粉与氧化剂 AP 颗粒之间的直接接触面积减小, 从而导致其燃烧反应效率降低<sup>[5, 15]</sup>。

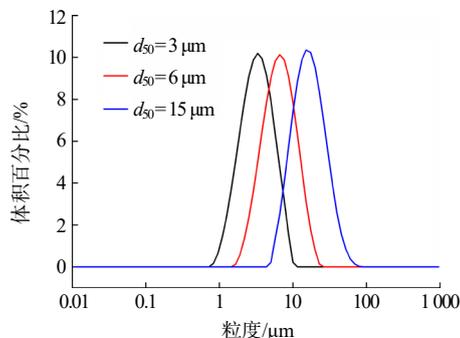


图 3 3 种 Al 粉的粒度分布曲线

Fig.3 Particle size distribution curves of 3 types of Al powders

表 3 含不同粒度 Al 粉的 NEPE 推进剂标准理论比冲计算结果

Tab.3 Standard theoretical specific impulse calculation results of NEPE propellants with different granularities of Al

配方号	$d_{50}/\mu\text{m}$	标准理论比冲/(Ns·kg <sup>-1</sup> )
DR-6	3	
DR-4	6	2 514.42
DR-7	15	

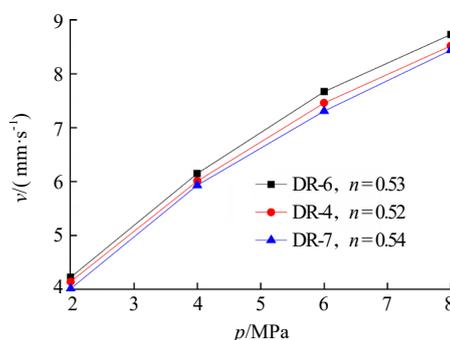


图 4 含不同粒度 Al 粉的 NEPE 推进剂燃速曲线

Fig.4 Burning rate curves of NEPE propellants with different granularities of Al

## 2.3 增塑比的影响

NEPE 推进剂的燃速与增塑剂中硝酸酯基 ( $-\text{ONO}_2$ ) 的含量有直接关系, 降低  $-\text{ONO}_2$  含量可以有效降低 NEPE 推进剂的燃速和压强指数<sup>[10, 16]</sup>。本文以 (NG/BTTN) 为增塑剂, 以 PET 为粘合剂, 二者比例对少铝 NEPE 推进剂标准理论比冲和燃烧性能的影响分别如表 4 和图 5 所示。由表 4 和图 5 可见, 随着 (NG/BTTN)/PET 比例降低, 推进剂标准理论比冲略微降低, 燃速和压强指数均降低。这可能是由于硝酸酯在燃烧初始的分解产物为  $\text{NO}_2$  和  $\text{CH}_2\text{O}$ , 其在铅铜盐分解产物  $\text{PbO}$  和  $\text{CuO}$  的作用下会进一步反应,

并产生大量的热,从而加速燃烧表面的热传递<sup>[16]</sup>,因此,降低-ONO<sub>2</sub>含量会导致推进剂燃速降低;PET为非含能粘合剂,随着其含量增加,推进剂爆热降低,从而导致燃速降低。对比DR-9和DR-10可见,当PET含量保持7.3%不变,NG/BTTN含量从12.9%降至12.6%时,推进剂燃速降幅较小,且工艺性能恶化明显,因此后续试验以DR-9配方为基础。

表4 (NG/BTTN)/PET比例对NEPE推进剂标准理论比冲的影响

**Tab.4 The influence of (NG/BTTN)/PET ratio on the standard theoretical specific impulse of NEPE propellants**

配方号	w <sub>PET</sub> /%	w <sub>NG/BTTN</sub> /%	标准理论比冲/(Ns·kg <sup>-1</sup> )
DR-4	6.8	13.1	2 514.42
DR-8	7.1	13.1	2 510.91
DR-9	7.3	12.9	2 508.42
DR-10	7.3	12.6	2 508.27

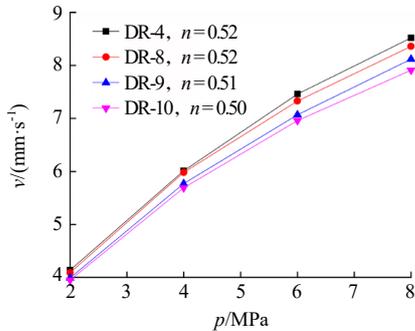
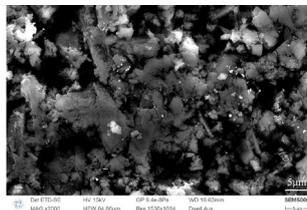


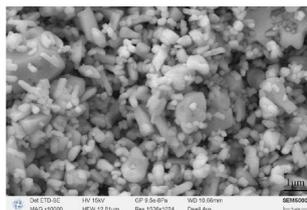
图5 含不同(NG/BTTN)/PET比例的NEPE推进剂燃速曲线  
Fig.5 Burning rate curves of NEPE propellants with different ratios of (NG/BTTN)/PET

### 2.4 催化剂的影响

添加燃烧催化剂是调节固体推进剂燃烧性能的重要途径之一<sup>[17-18]</sup>。本文选用Ct-Cu和Ct-Pb 2种催化剂,其SEM图如图6所示。



(a) Ct-Cu



(b) Ct-Pb

图6 Ct-Cu和Ct-Pb的SEM图  
Fig.6 SEM images of Ct-Cu and Ct-Pb

由图6可见,Ct-Cu表面形状不规则,平均粒径约为10 μm;Ct-Pb为棒状和颗粒状,表面相对较光滑,但存在一定团聚现象,平均粒径约为1 μm。

催化剂种类及含量对少铝NEPE推进剂理论比冲和燃烧性能的影响如表5和图7所示。

表5 催化剂种类及含量对NEPE推进剂标准理论比冲的影响  
Tab.5 The influence of catalysts variety and content on the standard theoretical specific impulse of NEPE propellants

配方号	w <sub>Ct-Cu</sub> /%	w <sub>Ct-Pb</sub> /%	标准理论比冲/(Ns·kg <sup>-1</sup> )
DR-9	1	1	2 508.42
DR-11	0.5	0.5	2 526.04
DR-12	1	0	2 525.15
DR-13	0	0	2 541.16

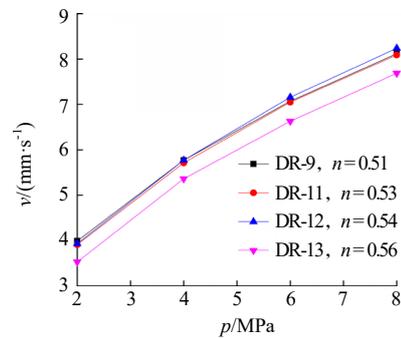


图7 含不同催化剂的NEPE推进剂燃速曲线  
Fig.7 Burning rate curves of NEPE propellants with different catalysts

由表5和图7可见,随着催化剂含量降低,推进剂标准理论比冲升高、燃速降低、压强指数升高,Ct-Pb和Ct-Cu复配的推进剂燃速和压强指数均相对较低,即Ct-Pb和Ct-Cu复配可以起到较好的协同作用。当催化剂含量从2%降至1%时,推进剂燃速降幅较小,压强指数小幅提升,而不添加催化剂的配方燃速大幅降低,同时压强指数也大幅升高。因此,综合考虑燃速、压强指数和能量性能,后续试验以Ct-Pb和Ct-Cu含量均为0.5%的DR-11配方为基础。

### 2.5 降速剂的影响

降速剂的引入可以有效抑制AP的分解,从而降低推进剂的燃速。不同类型降速剂对NEPE推进剂标准理论比冲和燃烧性能的影响如表6和图8所示。由表6和图8可见,添加不同的降速剂后,NEPE推进剂在不同压强下的燃速基本呈降低趋势,同时,其标准理论比冲也有所降低。添加1%CaCO<sub>3</sub>的推进剂在2~6 MPa下燃速小幅降低,8 MPa下燃速略微升高,导致压强指数略微升高;添加1%DBP、1%POM和

1%T8 的推进剂燃速降幅依次增大,且随着压强升高,燃速降幅增大,从而实现燃速和压强指数同时降低,其中, T8 的降速效果最好;增大 T8 含量至 1.5%,推进剂在 2, 8 MPa 下的燃速分别降至 3.54, 6.93 mm·s<sup>-1</sup>,压强指数降至 0.48,与基础配方 DR-1 相比,该配方标准理论比冲降低了 12.75 Ns·kg<sup>-1</sup>, 2, 8 MPa 下的燃速分别降低了 0.91, 1.83 mm·s<sup>-1</sup>,压强指数降低 0.01。即 DR-18 配方的少铝 NEPE 推进剂在能量水平小幅降低的前提下,实现燃速大幅降低,同时压强指数得到略微改善。

表 6 降速剂种类及含量对 NEPE 推进剂标准理论比冲的影响  
Tab.6 The influence of burning rate inhibitor type and content on the standard theoretical specific impulse of NEPE propellants

配方号	降速剂	w <sub>降速剂</sub> /%	标准理论比冲/(Ns·kg <sup>-1</sup> )
DR-11	-	-	2 526.04
DR-14	DBP	1	2 508.84
DR-15	CaCO <sub>3</sub>	1	2 505.36
DR-16	POM	1	2 514.63
DR-17	T8	1	2 510.85
DR-18	T8	1.5	2 503.08

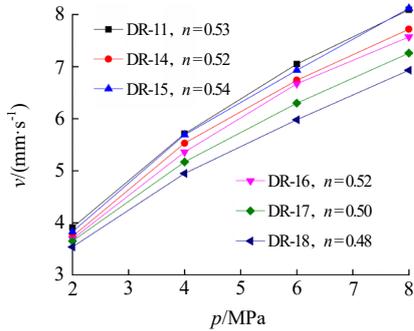


图 8 含不同降速剂的 NEPE 推进剂燃速曲线

Fig.8 Burning rate curves of NEPE propellants with different burning rate inhibitors

降速剂 T8 的 SEM 图如图 9 所示。DR-18 配方的推进剂样品如图 10 所示。

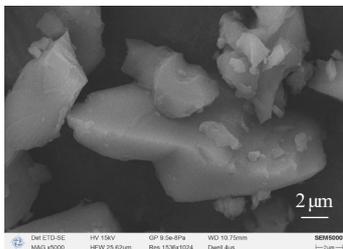


图 9 降速剂 T8 的 SEM 图

Fig.9 SEM image of burning rate inhibitor T8

由图 9 可见,降速剂 T8 为颗粒状物质,平均粒径约为 5~15 μm,其表面存在明显棱角。由图 10 可见,DR-18 配方的推进剂样品内部整体较均匀且光

滑,无明显颗粒团聚或“脱湿”现象。



图 10 含降速剂 T8 的 NEPE 推进剂样品照片

Fig.10 Photo of NEPE propellant sample with burning rate inhibitor T8

### 2.6 内弹道性能验证

采用 DR-18 配方制备了 1 发 Φ165 标准发动机装药,对低燃速少铝 NEPE 推进剂的燃烧性能和内弹道性能进行验证。试验得到的装药内弹道性能曲线如图 11 所示,测试数据如表 7 所示。

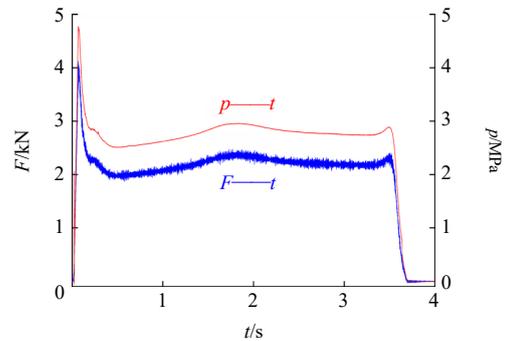


图 11 Φ165 标准发动机装药内弹道曲线

Fig.11 Interior ballistic curve of Φ165 standard motor charge

表 7 Φ165 标准发动机装药内弹道试验结果

Tab.7 Results of the interior ballistic test for the Φ165 standard motor charge

温度/°C	压强/MPa	比冲/s	燃速/(mm·s <sup>-1</sup> )
20	2.78	219.25	4.57

由图 11 和表 7 可见,采用低燃速少铝 NEPE 推进剂制备的 Φ165 标准发动机装药工作正常、曲线平稳,平均工作压强为 2.78 MPa,比冲为 219.25 s,燃速为 4.57 mm·s<sup>-1</sup>。采用 DR-18 配方计算 NEPE 推进剂在 2.78 MPa 下的理论比冲为 233.67 s,从而得出该配方比冲效率为 0.938;根据静态燃速公式  $u=2.532 \cdot 9P^{0.482}$  计算,得出该配方 2.78 MPa 静态燃速为 4.15 mm·s<sup>-1</sup>,从而得出动静燃速比为 1.10。

### 3 结论

(1) 增大 AP 和 Al 粉粒度,降低 AP 和催化剂含量、(NG/BTTN)/PET 比例,以及添加降速剂均可

以降低少铝 NEPE 推进剂燃速。增大 AP 粒度、降低 AP 和催化剂含量,推进剂压强指数升高;含  $6\ \mu\text{m}$  Al 粉及铅盐和铜盐复配的推进剂压强指数均相对较低;降低 (NG/BTTN)/PET 比例,推进剂压强指数和标准理论比冲同时降低。

(2) 添加降速剂使推进剂标准理论比冲和燃速同时降低。含  $\text{CaCO}_3$  的推进剂压强指数略微升高,含 DBP、POM 和 T8 的推进剂压强指数不同程度降低;含 1.5% T8 的推进剂配方标准理论比冲为  $2\ 503.08\ \text{Ns}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 2 MPa 下燃速降至  $3.54\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 2~8 MPa 下的压强指数为 0.48。

(3) 采用低燃速少铝 NEPE 推进剂制备的  $\Phi 165$  标准发动机装药工作正常、曲线平稳, 2.78 MPa 实测比冲为 219.25 s, 比冲效率为 0.938, 燃速为  $4.57\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 动静态燃速比为 1.10。

#### 参考文献:

- [1] 祝艳龙, 丁黎, 安静, 等. 交联密度为特征参量的 NEPE 推进剂贮存寿命评估方法研究[J]. 固体火箭技术, 2022, 45(1): 92-96.
- [2] 周水平, 吴芳, 唐根, 等. CL-20 含量及其粒度级配 NEPE 推进剂燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2020, 43(2): 195-202.
- [3] 涂乘崑, 陈雄, 周长省, 等. NEPE 推进剂在氮气及空气中的点火燃烧特性[J]. 含能材料, 2022, 30(8): 811-818.
- [4] Li Lianbo, Chen Xiong, Zhou Changsheng, et al. Experimental investigation on laser ignition and combustion characteristics of NEPE propellant[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42(9): 1 095-1 103.
- [5] 张伟, 谢五喜, 樊学忠, 等. 纳米铝粉对少烟 NEPE 推进剂燃烧性能的影响[J]. 固体火箭技术, 2014, 37(4): 516-520.
- [6] 代志高, 宋琴, 吴京汉, 等. 单室双推力固体火箭发动机用 NEPE 低燃速推进剂的燃烧性能[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(1): 47-52.
- [7] 唐泉, 鲁锐华, 王小英, 等. 降速剂对低燃速 NEPE 推进剂高压燃烧性能的影响[J]. 固体火箭技术, 2021, 44(4): 461-465.
- [8] 李静峰, 司馥铭. NEPE 推进剂燃烧性能调节技术研究[J]. 含能材料, 2002, 10(1): 4-9.
- [9] 刘云飞, 官焕祥, 姚维尚, 等. 组分对硝酸酯增塑聚醚推进剂燃烧性能的影响[J]. 推进技术, 2005, 26(4): 364-366.
- [10] 吴芳, 王世英, 庞爱民. 降低 NEPE 推进剂燃速的途径探讨[J]. 固体火箭技术, 2002, 25(2): 48-51.
- [11] 李晓萌, 刘云飞, 姚维尚, 等. 高能低燃速 NEPE 推进剂的研究[J]. 火炸药学报, 2001, 24(3): 1-4.
- [12] 官焕祥, 刘云飞, 姚维尚, 等. 降低硝酸酯增塑聚醚推进剂燃速研究[J]. 推进技术, 2007, 28(2): 216-219.
- [13] Kishore K, Sunitha M R. Effect of oxidizer particle size on burning rate and thermal decomposition of composite solid propellants[J]. Defense Science Journal, 1982, 32(3): 251-257.
- [14] 宋琴, 代志高, 邓琪明, 等. 无铝低燃速 NEPE 推进剂的燃烧性能[J]. 火炸药学报, 2014, 37(5): 81-84.
- [15] 邓重清, 蔚红建, 张正中. Al 粉在高燃速 AP/CMDB 推进剂中的应用[J]. 火炸药学报, 2015, 38(3): 77-80.
- [16] 刘云飞, 姚维尚, 李晓萌, 等. NEPE 推进剂燃烧性能研究[J]. 火炸药学报, 2003, 26(4): 30-32.
- [17] Yan Qilong, Zhao Fengqi, Kuo K K, et al. Catalytic effects of nano additives on decomposition and combustion of RDX-, HMX-, and AP-based energetic compositions[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2016(57): 75-136.
- [18] 谭博军, 段秉蕙, 任家桐, 等. 固体推进剂有机含能燃速催化剂的研究进展[J]. 含能材料, 2022, 30(8): 833-852.