

文章编号:1006-9941(2022)08-0819-07

## 铝基微单元复合燃料在 NEPE 固体推进剂中的应用

汪慧思<sup>1,2</sup>,张鑫<sup>2</sup>,王艳薇<sup>1,2</sup>,杜芳<sup>1,2</sup>,李磊<sup>1,2</sup>,顾健<sup>1,2</sup>,李伟<sup>1,2</sup>,陶博文<sup>1,2</sup>

(1. 航天化学动力技术重点实验室, 湖北 襄阳 441003; 2. 湖北航天化学技术研究所, 湖北 襄阳 441003)

**摘要:** 为研究铝基微单元燃料在硝酸酯增塑聚醚(NEPE)固体推进剂中的应用性能,以铝基微单元复合燃料(Al@AP)代替铝粉加入 NEPE 固体推进剂,以真空定容爆热试验、发动机试验、残渣活性铝测试、高速摄影、单向拉伸试验、工艺性能测试等手段研究了 Al@AP 对 NEPE 固体推进剂燃烧、力学、工艺等性能的影响;并对 Al@AP 在 NEPE 固体推进剂中的燃烧作用机理进行了分析。结果表明,以 19.5% 的 Al@AP 代替 FLQT-3 Al 后,NEPE 固体推进剂的爆热由  $6039.4 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$  提升至  $6924.8 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ,残渣量由 28.91 g 降至 7.64 g,残渣活性铝含量由 14.64% 降至 0.37%,残渣粒径  $d_{50}$  由  $94.12 \mu\text{m}$  降至  $24.21 \mu\text{m}$ ,NEPE 固体推进剂喷射效率提升,铝粉在燃面停留时间由 55 ms 缩短至 40 ms,且无明显融联团聚现象,且 Al@AP 对推进剂的燃速、力学、工艺等性能基本无影响。

**关键词:** 铝基微单元复合燃料;NEPE 固体推进剂;性能

**中图分类号:** TJ55; O69

**文献标志码:** A

**DOI:**10.11943/CJEM2022147

## 0 引言

NEPE 固体推进剂是武器装备和宇航工程的共用技术、支撑技术、先导技术,作为主要动力源,其能量性能直接决定着导弹武器的作战效能和生存能力,因此,发展高能量水平的 NEPE 固体推进剂,是显著提升导弹武器综合性能的重要前提<sup>[1-3]</sup>。

传统复合固体推进剂是由微米尺度的氧化剂、燃料以及粘合剂(推进剂中就是粘合剂而非黏合剂)体系通过物理混合和化学反应交联所形成的微米级混合体系<sup>[3-4]</sup>。由于传统固体推进剂中主要固体组分(氧化剂、燃料)以微米级分散,能量释放过程除了与配方组分所固有的性质有关外,还受氧化剂/还原剂间的质量传递过程所制约,所以实际应用时,其能量释放速率和效率难以达到理想状态,推进剂的能量性能不能充分发挥出来<sup>[5]</sup>。

微单元复合燃料是指由两种或多种氧化剂-燃料(或可燃剂)在纳米尺度均匀复合、精确组装构筑的有精确氧(化剂)燃(料)配比的新型含能材料<sup>[6]</sup>。与传统纳米复合含能材料中只有单一氧化剂(或燃料)不同,微单元复合燃料中同时含有氧化剂和燃料两种组分,并且氧化剂、燃料间以纳米级尺度组装,缩短了燃烧时氧化剂与燃料的质量传输距离,降低传质、传热过程对燃烧性能的影响,可使氧化剂、可燃剂间的化学反应更加充分<sup>[7]</sup>。如 Wang 等<sup>[8]</sup>采用电喷雾法制备了 AP/nAl/NC 微单元复合燃料,复合后,复合燃料可在铝粉熔化(933 K)前着火,且火焰温度达到了 2800 K,燃烧性能显著提升。Hu 等<sup>[9]</sup>以溶剂蒸发诱导的自组合法制备了 AP/nAl/PTFE 微单元复合燃料,与物理混合样相比,微单元复合燃料燃烧热由  $18348.5 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$  增加至  $20109.2 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ,点火延迟时间由 62.5 ms 缩短至 25.0 ms,燃烧性能大幅度提升。

近年来,国内外开展了大量铝基微单元复合燃料相关研究,以改善铝粉的点火延迟特性,提高其燃烧效率,从而解决其不完全燃烧带来的绝热层、喷管耐烧蚀性能下降等问题<sup>[10-13]</sup>。本研究以自制的铝基微单元复合燃料代替微米铝粉加入 NEPE 固体推进剂,采用高速摄像机观察了铝基微单元复合燃料在 NEPE 固体推进剂中的燃烧现象,通过爆热、发动机试验、残渣活

收稿日期:2022-05-31;修回日期:2022-07-04

网络出版日期:2022-07-13

基金项目:国家自然科学基金资助(22175059)

作者简介:汪慧思(1994-),女,工程师,主要从事铝基复合燃料研究。e-mail:wanghuisi5@163.com

通信联系人:陶博文(1981-),男,研究员,主要从事高能量密度多元纳米复合微单元燃料研究。e-mail:taobowen@163.com

引用本文:汪慧思,张鑫,王艳薇,等.铝基微单元复合燃料在 NEPE 固体推进剂中的应用[J].含能材料,2022,30(8):819-825.

WANG Hui-si, ZHANG Xing, WANG Yan-wei, et al. Application of Aluminum-based Composite Fuel in NEPE Solid Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2022, 30(8):819-825.

性铝测试等手段探索了铝基微单元复合燃料对 NEPE 固体推进剂燃烧性能的影响规律,通过单向拉伸试验、工艺性能测试等手段研究了铝基微单元复合燃料对 NEPE 固体推进剂力学、工艺等性能的影响,为铝基微单元复合燃料的应用奠定基础。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

试剂:铝粉:FLQT-3( $d_{50}=15.28\ \mu\text{m}$ ,活性铝含量 98.85%),FLQT-5( $d_{50}=5.16\ \mu\text{m}$ ,活性铝含量 98.52%),航天科技集团有限公司第四研究院 7416 厂;铝基微单元复合燃料(Al@AP):以铝粉为核、高氯酸铵(AP)为包覆层的核壳型复合材料,制备方法参考[8],湖北航天化学技术研究所, $d_{50}=21.32\ \mu\text{m}$ ;硝酸酯增塑聚醚(NEPE)粘合剂(GAP/NG/BTTN,GAP:叠氮缩水甘油醚,NG:硝化甘油,BTTN:丁三醇三硝酸酯,其中 NG 和 BTTN 质量比为 1:1,增塑比为 3.0),湖北航天化学技术研究所;六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20):工业级,兵器 375 厂;奥克托今(HMX):Ⅵ类,兵器 375 厂;高氯酸铵:Ⅲ类,大连高佳化工有限公司;甲苯二异氰酸酯(TDI):CP,德国拜耳公司。

仪器:QUANTA 650 型扫描电子显微镜(SEM):美国 FEI 公司;VKM-5 型立式捏合机,湖北航天化学技术研究所;WAE-2000C 型燃速测试仪:湖北航天化学技术研究所;GR3500 型氧弹量热仪:长沙仪器厂;Top Sizer 型激光粒度仪:珠海欧美克仪器有限公司;Miro M340 型高速摄像机:美国 Vision Research 公司;INSIRON-5567 型电子万能材料试验机:美国 INSTRON 公司;VT550 型 HAAKE 旋转粘度计:德国哈克公司。

### 1.2 实验过程

NEPE 固体推进剂的制备:配方组成见表 1,将各组分依次加入 5 L 立式混合机之中进行混合,混合、浇注及固化温度为(55±2) °C,固化 7 天得到标准 BSF $\Phi$ 75 及端燃  $\Phi$ 75 发动机。

#### 性能测试

表面形貌:使用 SEM 观察 Al@AP 的表面形貌,通过与 SEM 联用的 X 射线能谱仪(EDS)对 Al@AP 元素种类和丰度进行分析。测试条件:加速电压 20 kV;工作距离 12 mm;高真空模式,真空度  $1.0\times 10^{-5}\ \text{Pa}$ 。

真空定容爆热:依据:QJ1359-1988,测试条件:NEPE 固体推进剂用量为 4 g,气氛为  $\text{N}_2$ ,压力为 3 MPa。

表 1 三种 NEPE 固体推进剂配方

Table 1 Three NEPE propellant formulation

samples	Al/%			CL-20/%	HMX/%	AP/%
	FLQT-3	Al@AP	FLQT-5			
GL-1	13		3	8	37	12.5
GL-2	17		3	4	37	12.5
GL-3		19.5	3	4	37	10

Note: The FLQT-3 aluminum content of in Al@AP is 17%.

爆热残渣质量及活性铝含量:采用称量发动机试车前后重量的方法计算残渣重量,将试车后的发动机浸泡在装有无水乙醇的收集工装中,8 h 后用专用铲将试车残渣刮出,根据 GJB1738A-2015 测试得到活性铝含量。

粒度测试:依据:GB/T 29022-2021,分散介质为醋酸丁酯。

动态燃速:依据:GJB2365A-2004,由标准 BSF $\Phi$ 75 发动机试车得到,测试压强 6.86 MPa。

喷射效率:参考航天四院 42 所企标 Q/GT 388-2012《端面燃烧  $\Phi$ 75 发动机型式结构及测试方法》,由端燃  $\Phi$ 75 发动机试车得到。

高速摄影:帧数为 2000,曝光时间为 15  $\mu\text{s}$ ,压强为 1 MPa,气氛为  $\text{N}_2$ ,固体 NEPE 固体推进剂药条大小为 8 mm×8 mm×20 mm。

力学性能测试:依据:GJB770B-2005,用切片机将 NEPE 固体推进剂方坯制成 10 mm 厚药片,在制样机上制成哑铃样试件,进行单向拉伸试验,每批样品重复 3 片,测试温度为 20 °C,拉伸速率为 100  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

工艺性能测试:将 20 g 左右药浆置于旋转粘度计的内筒转子及外测量筒之间,测试温度为 50 °C,剪切速率为 0~10  $\text{s}^{-1}$ ,测试粘度时使用 SV<sub>2</sub> 转子,测试屈服值时使用 SV<sub>2</sub>FL 转子。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Al@AP 结构表征

使用 SEM 对 Al@AP 的表面形貌进行了观察,并采用 EDS 对 Al@AP 表面的元素进行了分析,SEM-EDS 结果如图 1 所示。

由图 1 可以看到,Al@AP 表面边缘较为光滑,轮廓清晰,为近球形颗粒,不存在明显的 AP 晶体颗粒,且 EDS 能谱图中 Al、Cl 及 O 元素均匀分散,表明 AP 与 Al 在微米尺度的实现了均匀复合。

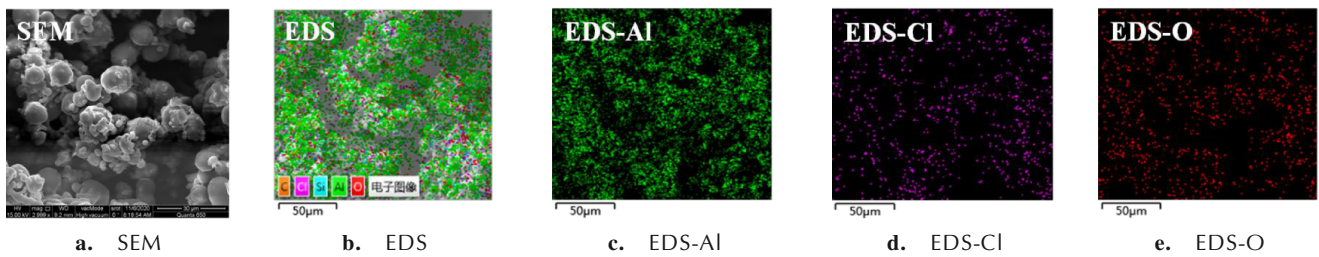


图1 Al@AP的SEM-EDS图

Fig.1 SEM-EDS images of Al@AP

## 2.2 燃烧性能

### 2.2.1 爆热及燃速

对3种NEPE固体推进剂的爆热、燃速进行了测试,测试结果见表2。

表2 3种NEPE推进剂的爆热及燃速

Table 2 The heat of explosion and the dynamic burning rate of three NEPE propellants

samples	$Q_v/\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	$r_{6.86\text{MPa}}/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
GL-1	6264.6	10.998
GL-2	6039.4	10.084
GL-3	6924.8	10.150

Note:  $Q_v$  is the heat of explosion,  $r_{6.86\text{MPa}}$  is the dynamic burning rate.

根据文献可知,在铝含量低于20%时,铝粉含量每增加1%,固体推进剂的理论比冲增加1s左右<sup>[14]</sup>,即推进剂的能量性能随铝粉含量的增加而增加。然而由表2可以看到,Al@AP对推进剂的能量释放效率有明显影响。当不含Al@AP时,随着FLQT-3铝含量由13%增加至17%,NEPE推进剂GL-1较GL-2的爆热降低 $225.2\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ ,燃速降低 $0.914\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,铝含量的增加使燃烧不充分,降低了推进剂的能量释放效率;当采用19.5%的Al@AP代替FLQT-3 Al时,NEPE固体推进剂爆热由 $6039.4\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ (GL-2)提升至 $6924.8\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ (GL-3),提升幅度达14.66%。表明Al@AP的加入有效改善了铝粉的燃烧效率,提升了推进剂的能量释放效率,同时对NEPE固体推进剂的燃速基本无影响。

### 2.2.2 喷射效率

通过端燃 $\Phi 75$ 发动机测试NEPE固体推进剂的喷射效率,每个NEPE固体推进剂配方测试3次,喷射效率测试结果见表3。

由表3可以看到,不含Al@AP时,当FLQT-3 Al含量由13%提升至17%,试车压强接近时,NEPE固体推进剂的喷射效率由92.342%(GL-1)降至85.455%(GL-2),喷射效率大幅度下降,表明随着铝粉含量的增多,加剧了NEPE固体推进剂中铝粉的不完全燃烧

表3 3种NEPE推进剂喷射效率

Table 3 The eject efficiency of three NEPE propellant

samples	$p/\text{MPa}$	eject efficiency/%
GL-1	7.157	92.342
	7.901	95.516
	8.808	96.396
GL-2	5.579	85.455
	5.529	87.281
	6.249	87.838
GL-3	7.564	96.833
	6.452	96.804
	7.475	95.946

Note:  $p$  is the test pressure.

程度,NEPE固体推进剂燃烧效率随之降低。以19.5%的Al@AP代替FLQT-3 Al后,在试车压强接近时,NEPE固体推进剂喷射效率由87.838%(GL-2)提升至96.804%(GL-3),且3次测试中NEPE固体推进剂喷射效率均为96%左右,高于GL-1及GL-2的喷射效率,达到了较高水平,证明Al@AP可以减缓因铝粉含量增多而导致的NEPE固体推进剂燃烧不充分的问题,起到改善NEPE固体推进剂燃烧效率的作用。

### 2.2.3 残渣及活性铝含量

收集NEPE固体推进剂进行端燃 $\Phi 75$ 试车后的残渣,对其质量、粒度及活性铝含量进行了测试,测试结果见表4,试车后的发动机实物图见图2。

表4 NEPE推进剂端燃 $\Phi 75$ 发动机试车后残渣质量、粒度以及活性铝含量

Table 4 The mass, particle size and active aluminum content of residue after the cigarette-burning  $\Phi 75$  engine test of three NEPE propellant

samples	$m_{Al}/\text{g}$	$\eta_{Al}/\%$	$d_{50}/\mu\text{m}$
GL-1	11.55	3.41	76.98
GL-2	28.91	14.64	94.12
GL-3	7.64	0.37	24.21

Note:  $m_{Al}$  is the quality of residue,  $\eta_{Al}$  is the residual activate aluminum content,  $d_{50}$  is the particle size of residue.



图2 端燃 $\Phi 75$ 发动机实物图

Fig.2 Pictures of cigarette-burning  $\Phi 75$  engine

由表4及图2可看到,不含Al@AP时,推进剂GL-1中FLQT-3 Al含量为13%,推进剂GL-1发动机燃烧室中有黑色颗粒状物质残留,燃烧室发黄(图2a),残渣质量、粒度以及残渣活性铝较高,表明部分推进剂未燃烧完全。当配方中FLQT-3 Al粉的含量由13%升至17%时,残渣质量增加17.36 g,残渣活性铝含量由3.41%(GL-1)提升至14.64%(GL-2),残渣粒度 $d_{50}$ 由 $76.98 \mu\text{m}$ (GL-1)提高至 $94.12 \mu\text{m}$ (GL-2),发动机壳体中残留大量黑色颗粒状物质(图2b),有粘连现象,燃烧室发黑,有大量推进剂未燃烧完全,结合表3可知,在无有效调节措施的情况下,NEPE固体推进剂中铝含量越高,铝粉的燃烧效率越低,不完全燃烧现象加剧。

当以19.5%的Al@AP代替FLQT-3 Al粉加入NEPE固体推进剂后,残渣质量由28.91g(GL-2)降至

7.64 g(GL-3),减少了21.07 g,残渣活性铝含量大幅度降低,仅为0.37%,残渣粒度 $d_{50}$ 也由 $94.12 \mu\text{m}$ (GL-2)降低至 $24.21 \mu\text{m}$ (GL-3),且燃烧室中无黑色颗粒状物质残留,燃烧室发白(图2c),NEPE固体推进剂基本燃烧完全,表明Al@AP的加入可减少残渣量,缩小残渣粒径,提升铝粉燃烧效率,有效改善NEPE固体推进剂的不完全燃烧现象。

### 2.3 高速摄影

为探讨高铝含量条件下( $\geq 20\%$ )Al@AP对推进剂燃烧过程的影响,因此选取GL-2及GL-3配方,利用高速摄影对其燃烧过程进行了观察,GL-2及GL-3的高速摄影结果统计在图3中,两配方高速摄影图颜色不同为使用不同滤光片所致,其他测试条件一致。

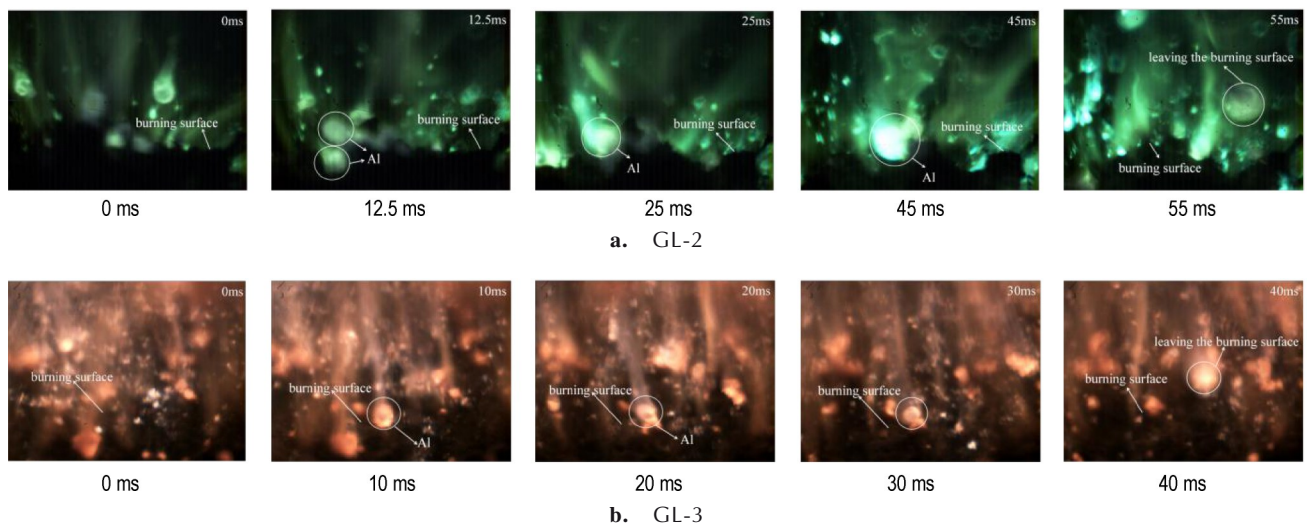


图3 GL-2及GL-3的燃烧过程高速摄影图

Fig.3 High-speed photograph of the combustion process of GL-2 and GL-3

由图 3a 可观察到,在 12.5 ms 时, GL-2 燃面上出现两个铝粒子,且铝粒子逐渐接近,在 25 ms 时融合成为一个大的融铝颗粒,45 ms 时,该融铝颗粒位置发生了变化,表明该融铝颗粒在燃烧气流的作用下在燃面滚动,55 ms 时才离开燃面。

由图 3b 可观察到,在 10 ms 时, GL-3 燃面上开始出现明亮的单个铝粒子,该铝粒子在同一位置上逐渐被点燃,该铝粒子在 40 ms 时离开燃面,在燃面上无滚动,未出现多个铝粒子融联现象。

由图 3 可看出, Al@AP 加入后,铝粉在燃面停留的时间由 55 ms (GL-2) 缩短至 40 ms (GL-3),且 GL-3 的燃烧过程中未出现铝粉融联团聚现象,结合 2.2.3 节数据分析认为, Al@AP 可缩短铝粉的点火延迟时间,减少铝粉在燃面的停留时间,改善铝粉因在燃面停留时间较长所导致的融联团聚现象,提升铝粉的燃烧效率,从而改善推进剂的能量释放效率。

2.4 力学及工艺性能

对 NEPE 固体推进剂在 20 °C 下的力学性能以及 NEPE 固体推进剂在 50 °C 下的工艺性能进行了测试,测试结果见表 5、6。

表 5 NEPE 固体推进剂在 20 °C 时的力学性能

Table 5 Mechanical properties of three NEPE propellants at 20 °C

samples	$\sigma_m$ / MPa	$\varepsilon_m$ / %	$\varepsilon_b$ / %	$E$ / MPa
GL-1	0.39	155.50	165.65	0.39
GL-2	0.43	169.20	181.75	0.41
GL-3	0.46	164.20	177.05	0.48

Note:  $\sigma_m$  is the maximum tensile strength.  $\varepsilon_m$  is the maximum elongation.  $\varepsilon_b$  is the breaking strength.  $E$  is the modulus.

表 6 NEPE 固体推进剂在 50 °C 时的工艺性能

Table 6 Yield value and viscosity of three NEPE propellants at 50 °C

samples	$\tau_y$ / Pa	$\eta$ / Pa·s
GL-1	113.8	379.4
GL-2	114.7	383.9
GL-3	119.3	392.6

Note:  $\tau_y$  is the yield value;  $\eta$  is the viscosity.

由表 5 可知,不含 Al@AP 时,随着铝粉含量的增加, NEPE 固体推进剂的最大抗拉强度、最大伸长率、断裂强度及模量都略有升高,以 19.5% 的 Al@AP 代替 FLQT-3 Al 后,最大抗拉强度、断裂强度、模量略有升高,最大伸长率略有降低,但变化不大,三个配方 NEPE 固体推进剂的力学性能基本相当。

由表 6 可知,以 19.5% 的 Al@AP 代替 FLQT-3 Al 后, NEPE 固体推进剂药浆的屈服值和粘度略有升高,但变化较小,表明 Al@AP 对 NEPE 固体推进剂的工艺性能基本无影响。

综上, Al@AP 的加入对 NEPE 固体推进剂的力学、工艺等性能基本无影响,能够满足 NEPE 固体推进剂的正常使用需求,具备在 NEPE 固体推进剂中应用的潜力。

2.5 机理分析

在研究了 Al@AP 对固体推进剂爆热、喷射效率、残渣、燃烧火焰等性能的影响后,初步对 Al@AP 在 NEPE 固体推进剂中的燃烧作用机理进行了推理,如图 4 所示。

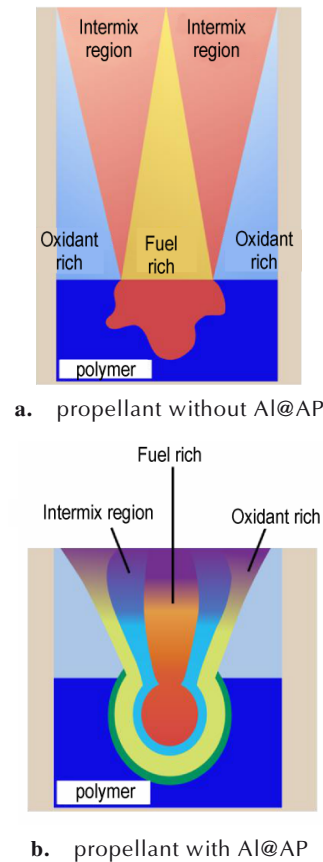


图 4 固体推进剂燃烧机理图

Fig.4 Solid propellant combustion mechanism diagram

传统复合固体推进剂为非均相体系(图 4a)<sup>[15]</sup>,燃烧火焰存在富氧和富燃料区域,除非有内部湍流,这种富氧和富燃料区域将导致体系的不完全燃烧和过度燃烧,两种情况都将使体系偏离总的平衡组成,引起大的能量损失;铝基微单元复合燃料为氧化剂与燃料复合而成,该特殊结构可增大氧化剂与燃料间的接触面积,缩短传质距离,促进推进剂燃烧火焰中的富氧和富燃

料区域的相互扩散,使火焰富氧和富燃料区域减小(图4b),加快燃烧体系均匀化的速度,使燃烧反应按照化学计量比充分进行,从而提高固体推进剂的燃烧效率。

“口袋模型”<sup>[16-17]</sup>是描述氧化剂对铝粉团聚的影响的重要模型,该模型认为各组分在推进剂内部随机装填,相邻粗氧化剂包围形成的间隙即为“口袋”,燃烧时,铝粉装填在“口袋”之中,“口袋”容积越大,铝粉含量越高,铝团聚物越大。Suzuki等<sup>[18]</sup>认为铝团聚物的粒径会随“口袋”中细AP含量的增加而减小。Al@AP是以铝粉为核,AP为壳的复合材料,在推进剂燃烧时,每一Al@AP粒子即可视为一个小“口袋”。与传统复合固体推进剂相比,包含Al@AP的固体推进剂中“口袋”的体积减小了,且Al与AP复合后,燃烧体系均匀化速度加快,铝粉更容易被点燃,点火延迟时间缩短,因此燃烧残渣质量及活性铝含量降低,且铝团聚物的粒径减小。

### 3 结论

(1)以19.5%的Al@AP代替FLQT-3铝粉后,NEPE固体推进剂的爆热增加 $885.4\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ,残渣质量减少21.07 g,残渣活性铝含量由14.64%降至0.37%,残渣粒径 $d_{50}$ 减小69.91  $\mu\text{m}$ ,喷射效率提升。

(2)Al@AP加入后,NEPE固体推进剂燃面上铝颗粒停留时间由55 ms缩短至40 ms,铝粉的融联团聚现象减少。

(3)Al@AP通过提升NEPE固体推进剂燃烧体系均匀化的速度,缩短铝粉点火延迟时间,促进铝粉点火,通过缩小推进剂中“口袋”体积以减少铝粉的团聚现象,从而改善推进剂的燃烧效率。

(4)Al@AP在改善铝粉燃烧效率,提升NEPE固体推进剂能量性能的同时,对NEPE固体推进剂燃速、力学、工艺等性能基本无影响,具备应用潜力。

#### 参考文献:

- [1] DELUCA L T, TORU S, VALERY S, et al. Chemical rocket propulsion-a comprehensive survey of energetic materials[M]. Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
- [2] HIMO F, LOVELL T, HILGRAF R, et al. Copper(I)-Catalyzed Synthesis of Azoles. DFT study predicts unprecedented reactivity and intermediates[J]. *Journal of American chemical society*, 2005, 127(1): 210-216.
- [3] 庞爱民, 马新刚, 唐承志. 固体火箭推进剂理论与工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2014: 2-3.  
PANG Ai-ming, MA Xin-gang, TANG Cheng-zhi. Solid Rocket Propellant Theory and Engineering[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2014: 11.
- [4] BABUK V A, VASSILIEV V A. Propellant Formulation Factors and Metal Agglomeration in Combustion of Aluminized Solid Rocket Propellant[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2014: 11.
- [5] SON SF, YETTER R, YANG V. Introduction: nanoscale composite energetic materials[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(4): 643-644.
- [6] 王海洋, 纳米含能材料的静电喷雾法制备与燃烧特性表征[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.  
WANG Hai-yang. Electrospray formation of nano energetic materials and characterization of the combustion properties [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [7] LEVITAS VI, MCCOLLUM J, PANTOYA M, et al. Pre-stressing micron-scale aluminum core-shell particles to improve reactivity[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 7879.
- [8] WANG H, JACOB R J, DELISIO J B, et al. Assembly and encapsulation of aluminum NP's within AP/NC matrix and their reactive properties [J]. *Combustion and Flame*, 2017, 180: 175-183.
- [9] HU Y, TAO B, HAO D, et al. Fabrication and mechanistic study of AP/nAl/PTFE spherical encapsulated energetic materials with enhanced combustion performance[J]. *Chemical Engineering Science*, 2020, 222: 115701.
- [10] WANG H Y, REHWOLDT M, KLINE D J, et al. Comparison study of the ignition and combustion characteristics of directly-written Al/PVDF, Al/Viton and Al/THV composites[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 201: 181-186.
- [11] THIRUVENG Adathan. Enhanced combustion characteristics of bismuth trioxide aluminum nanocomposites prepared through graphene oxide directed self-assembly[J]. *Langmuir*, 2014, 30: 6556-6564.
- [12] HU Y, YANG Y, LIN K, et al. Ammonium perchlorate encapsulating nanothermites as high energetic composites: Preparation, thermal decomposition and combustion properties [J]. *Chemical Engineering Science*, 2019, 207: 334-343.
- [13] SHIM H M, KIM J K, KIM H S, et al. Production of the spherical nano-Al/AP composites by drowning-out / agglomeration and their solid-reaction kinetics[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(39): 10227-10234.
- [14] 唐伟强, 杨荣杰, 李建民, 等. 高铝固体推进剂中氟化物促进铝燃烧研究进展[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(6): 679-686.  
TANG Wei-qiang, YANG Rong-jie, LI Jian-ming, et al. Research progress of fluorides in high aluminum solid propellant to promote aluminum combustion [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2020, 43(6): 679-686.
- [15] BECKSTEAD M W, DERR R L, PRICE C F. A model of composite solid-propellant combustion based on multiple flames [J]. *AIAA Journal*, 1970, 8(12): 2200-2207.
- [16] CRUMP J E. Aluminum combustion in composite propellants [C]//Interagency Chemical Rocket Propulsion Group: Combustion Instability Conference. Baltimore: CPIA, 1966.
- [17] COHEN N S. A pocket model for aluminum agglomeration in composite propellants[J]. *AIAA Journal*, 1983, 21(5): 720-725.
- [18] SUZUKI S, CHIBA M. Combustion efficiency of Aluminized propellants[J]. *AIAA Paper*, 1989(89-2309): 1-8.

## Application of Aluminum-based Composite Fuel in NEPE Solid Propellant

WANG Hui-si<sup>1,2</sup>, ZHANG Xing<sup>2</sup>, WANG Yan-wei<sup>1,2</sup>, DU Fang<sup>1,2</sup>, LI Lei<sup>1,2</sup>, GU Jian<sup>1,2</sup>, Li Wei<sup>1,2</sup>, TAO Bo-wen<sup>1,2</sup>

(1. Science and Technology on Aerospace Chemical Power Laboratory, Xiangyang 441003, China; 2. Hubei Institute of Aerospace Chemical technology, Xiangyang 441003, China)

**Abstract:** In order to study the performance of aluminum-based composite fuel in NEPE solid propellant, the aluminum-base composite fuel (Al@AP) was used in the NEPE solid propellant instead of aluminum powder, and the effects of Al@AP on the combustion, mechanics, and process performance of NEPE propellant were studied by explosion heat test, engine test, residual active aluminum test, high-speed photography, unidirectional tensile test and process properties test. And the combustion mechanism of Al@AP in NEPE propellant was derived. Results shows that by replacing FLQT-3 Al powder with 19.5% Al@AP, the explosion heat of NEPE propellant increased from  $6029.4 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$  to  $6924.8 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ , and the mass of residue decreased from 28.91 g to 7.64 g, and the active aluminum content of residue decreased from 14.64% to 0.37%, and the particle size of residue decreased from  $94.12 \mu\text{m}$  to  $24.21 \mu\text{m}$ . The injection efficiency of NEPE propellant with Al@AP is improved. The residence time of aluminum powder at the burning surface decreased from 55 ms to 40 ms, and there was no obvious agglomeration phenomenon. Al@AP powder has little effect on the dynamic burning rate, mechanics and process properties of NEPE propellant.

**Key words:** aluminum-based composite fuel; NEPE solid propellant; performance

**CLC number:** TJ55; O69

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022147

**Grant support:** National Natural Science Foundation of China(22175059)

(责编:姜梅)