

文章编号:1006-9941(2022)08-0804-07

## 基于新型氟碳黏合剂的固体推进剂燃烧性能

姚启发<sup>1</sup>,毛超超<sup>1,3</sup>,邵玉玲<sup>3</sup>,夏敏<sup>1,2</sup>,罗运军<sup>1,2</sup>

(1.北京理工大学材料学院,北京100081;2.北京理工大学高能量密度材料教育部重点实验室,北京100081;3.西安北方惠安化学工业有限公司,陕西西安710302)

**摘要:**推进剂在燃烧过程中产生的凝聚相团聚是造成能量损失及喷管烧蚀的主要原因之一,推进剂中引入氟被认为解决团聚的有效途径。为此,研究将氟醇化合物(PFD)引入到端羟基聚醚(HTPE)推进剂,使其通过固化反应接入黏合剂交联网络中,形成基于新型氟碳黏合剂的固体推进剂。采用热重(TG)、激光点火表征加入PFD前后推进剂热分解以及相同点火时间下推进剂燃烧强度的变化,并通过扫描电镜(SEM)、EDS能谱表征推进剂燃面火焰形貌以及燃烧凝聚相产物粒径分布。结果表明,加入PFD后推进剂的失重仍然包含3个主要阶段,但PFD会导致推进剂中RDX分解延后15~20℃,且在250℃前含氟链段完全分解失重;对比空白推进剂样品,含有PFD的推进剂在相同点火时间下具有更高的燃烧亮度;随着PFD的增加,推进剂样品燃烧火焰的密集程度显著增加,且火焰喷射更为剧烈,推进剂的凝聚相产物平均粒径由添加1%PFD时的5.13 μm逐渐减小至添加5%PFD时的1.04 μm。

**关键词:**氟醇化合物;氟碳黏合剂;HTPE推进剂;团聚;燃烧

中图分类号:TJ55;O643

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2022113

## 0 引言

为了提高复合固体推进剂的能量特性,广泛应用铝粉作为高热值燃料。然而,含铝复合推进剂在燃烧中易出现凝聚相团聚,凝聚相团聚会降低推进剂的能量释放效率,增大实际比冲与理论比冲的差距<sup>[1-2]</sup>。凝聚相团聚主要来源于Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的包覆作用以及未完全燃烧的铝的熔融聚集<sup>[3-5]</sup>。铝在推进剂燃面的团聚机理十分复杂,影响因素也很多样,如固体推进剂燃速、燃面上升气流、团聚物在燃面停留时间尺度等因素,都将影响团聚物的形成,改变最终凝相燃烧产物形态和粒径分布<sup>[6]</sup>。研究发现每增加质量分数10%的未燃烧铝,比冲损失约为1%<sup>[7]</sup>。此外,凝聚相团聚会对燃烧室绝热层和喷管的造成严重烧蚀,影响发动机的工作

安全<sup>[8-9]</sup>。为了解决推进剂燃烧过程中的凝聚相团聚,氟化物被引入到固体推进剂中,并在近年来受广泛关注和研究<sup>[10-12]</sup>。Sidi Huang等<sup>[13]</sup>通过改性微乳液方法制备出了铝与聚偏氟乙烯(PVDF)复合材料,与机械混合制备的复合材料相比,采用该方法制备的Al/PVDF复合材料具有更短的点火时间和更高的燃烧反应性和效率。孙世雄等<sup>[14]</sup>将聚四氟乙烯(PTFE)与铝粉经机械球磨制得PTFE/Al复合材料,应用到双基推进剂中将凝聚相产物的中值粒度降低了82%。王维伦等<sup>[15]</sup>将含氟有机添加剂加入到含铝聚醚推进剂中,在7 MPa时,加入2%的含氟有机添加剂,燃烧凝聚相产物的平均粒径D50从5.83 μm减小到3.06 μm,且含氟有机添加剂的加入导致燃烧凝聚相产物中α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>晶型和θ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>晶型几近消失,主要形成γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和δ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>晶型。郭延佩等<sup>[16]</sup>研究了含氟有机化合物(OF)加入对HTPB燃烧性能的影响,其研究表明,加入含氟有机物有利于γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和AlF<sub>3</sub>的生成,降低熔融铝的燃面停留时间,减弱熔铝粒子团聚,减小凝聚相燃烧产物的尺寸,提高铝粉的燃烧效率。胡弛等<sup>[17]</sup>使用氟橡胶对不同粒径的微米级铝粉进行包覆,被包覆后的铝粉具有更低的点火延迟、更高的燃速和

收稿日期:2022-04-30;修回日期:2022-06-09

网络出版日期:2022-07-13

基金项目:中央高校基本科研业务费资助(2021CX01002)

作者简介:姚启发(1994-),男,博士研究生,主要从事复合固体推进剂研究。e-mail:419609561@qq.com

通信联系人:夏敏(1979-),男,教授,博导,主要从事含能材料、固体推进剂研究。e-mail:xminbit@bit.edu.cn

引用本文:姚启发,毛超超,邵玉玲,等.基于新型氟碳黏合剂的固体推进剂燃烧性能[J].含能材料,2022,30(8):804-810.

YAO Qi-fa, MAO Chao-chao, SHAO Yu-ling, et al. Combustion Performance of Solid Propellant Based on New Fluorocarbon Binder[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2022, 30(8):804-810.

反应热值。推进剂现有引入含氟化合物的方式多是通过直接添加、球磨、包覆等物理混合的方式<sup>[18-20]</sup>,但物理混合的方式存在相容性差、分散不均以及对推进剂其它性能产生未知影响等缺点。因此,为了规避物理混合方式带来的问题,我们通过引入一种具有端羟基结构且高氟含量的氟醇化合物(PFD),巧妙地利用推进剂的固化反应将含氟链段接入黏合剂主链,形成了基于新型氟碳黏合剂的新型固体推进剂。

研究选择在HTPE推进剂体系中加入不同含量的PFD形成基于新型氟碳黏合剂的复合固体推进剂,对固体推进剂进行热失重、激光点火分析,对推进剂燃面火焰结构以及凝聚相产物进行SEM以及EDS能谱测试,研究PFD加入对推进剂热分解机理及燃烧性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料

含氟多元醇(PFD):纯度96%,分子量 $462.12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,自制;端羟基环氧乙烷/四氢呋喃嵌段共聚醚(HTPE):羟值 $[\text{OH}]$ 为 $0.48 \text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ ,自制;丁基硝氧乙基硝

胺(Bu-NENA):相对分子质量207.2;六次甲基二异氰酸酯水合物(N-100),数均相对分子质量为725,平均官能度为3.9,洛阳黎明化工研究院;高氯酸铵:AP(Ⅲ),平均粒径 $120 \mu\text{m}$ ,使用前 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱干燥7 d;铝粉(Al):平均粒径 $5.3 \mu\text{m}$ ,天津铝业有限公司,使用前 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱干燥7 d;黑索今(RDX):平均粒径 $50 \mu\text{m}$ ,使用前 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱干燥7 d;二月桂酸二丁基锡(T-12),配置成浓度为0.5%的溶液,溶剂为DOS;癸二酸二辛脂(DOS),分析纯,天津光复精细化工研究所。

### 1.2 推进剂样品的制备

本实验制备推进剂样品共计7组,各组样品除PFD含量不同外,其它组份比例均相同,PFD含量从0提升至6%,按1%等量间隔,样品编号和详细组成见表1。

制备步骤:先将预聚物、增塑剂、含氟多元醇按表1配方比例依次加入到烧杯中,搅拌20 min后,依次加入Al粉、RDX、AP,每加入一种固体填料搅拌15~20 min至均匀;最后添加固化剂和一定量的固化催化剂,搅拌40 min至均匀,在 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 下抽真空除气泡约2 h,浇入聚四氟乙烯模具中,置于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 水浴烘箱内固化7 d,取出后放入干燥器中静置24 h,以待测试。

表1 推进剂配方组成

Table 1 Propellant formula composition

sample number	PFD/%	binder(HTPE, N-100)/%	Bu-NENA/%	Al/%	RDX/%	AP/%
0 <sup>#</sup>	0	10-15	10-15	8-12	25-35	25-35
1 <sup>#</sup>	1	10-15	10-15	8-12	25-35	25-35
2 <sup>#</sup>	2	10-15	10-15	8-12	25-35	25-35
3 <sup>#</sup>	3	10-15	10-15	8-12	25-35	25-35
4 <sup>#</sup>	4	10-15	10-15	8-12	25-35	25-35
5 <sup>#</sup>	5	10-15	10-15	10-15	25-35	25-35
6 <sup>#</sup>	6	10-15	10-15	10-15	25-35	25-35

### 1.3 实验

(1)热失重测试(TG):TGA/DSC同步热分析仪,瑞士Mettler-toledo公司;

测试条件一:测试对象为0<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>样品;设定测试温度区间为 $30\sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,升温速率设定为 $10 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ ,氮气的流速 $40 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ;

测试条件二:测试对象为6号样品;设定测试温度区间为 $30\sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,升温速率设定为 $30 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ ,氮气的流速 $40 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ;

(2)扫描电镜(SEM)测试:日本Hitachi公司的S-4800场发射扫描电镜及能谱仪;在加速电压15 kV,

发射场电流为 $10 \mu\text{A}$ ,工作距离(WD)15 mm条件下,将测试样等距依次粘贴在导电胶上,断面朝上,进行喷金处理后测试;

(3)激光点火测试:激光点火仪,Grace NASOR 800;高速摄像机,Phantom VEO1310;常温常压;测试样品为直径2 cm、厚度约2 mm的推进剂圆片,实际点火面积为处于推进剂圆片中心的直径约5 mm的圆状;

(4)粒径统计:采用Nano Measure图像处理软件进行粒径统计;软件版本:Nano Measure 1.2.5;

## 2 结果与讨论

### 2.1 推进剂的热分解特性

为了研究 PFD 的引入对推进剂燃烧机理及燃烧过程的影响,对不同含量 PFD 的 HTPe 推进剂样品进行热失重测试。为了对比加入 PFD 前后推进剂热分解机理及热力学行为的变化,研究选取 0<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>样品进行了 TG 测试,结果如图 1 所示。

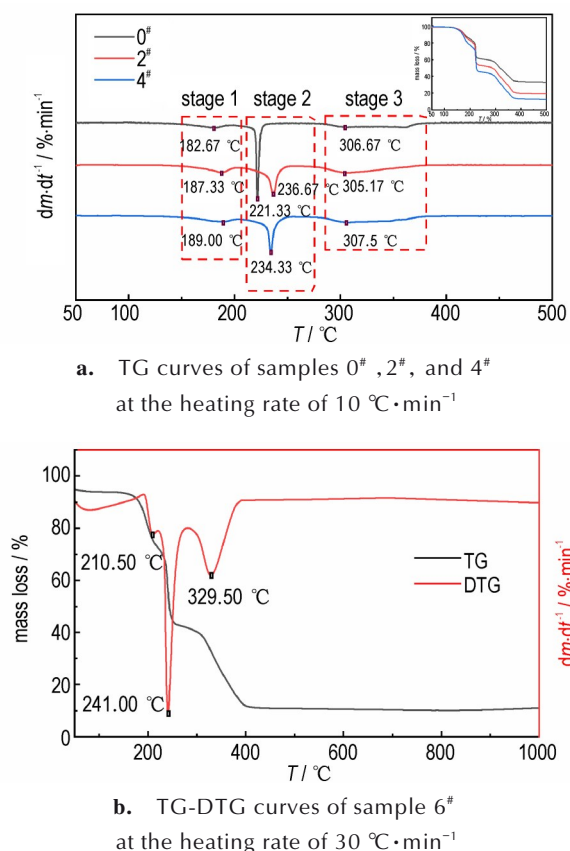


图 1 不同含量 PFD 推进剂样品的 TG-DTG 曲线

Fig. 1 TG-DTG curves of propellant samples with different PFD contents

从图 1a 中可以发现,传统黏合剂基(0<sup>#</sup>样品)推进剂与新型氟碳黏合剂基推进剂(2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>样品)表现出了大致相同的失重规律,即三者具有相似结构的失重曲线。根据得到的失重曲线可以将推进剂样品的质量损失分为 3 个阶段。阶段一的失重率约为 13%,与体系中增塑剂 Bu-NENA 含量相当,且由于 Bu-NENA 起始分解温度约 168 °C<sup>[21]</sup>,因此该阶段的失重主要源于 Bu-NENA 的挥发,可以发现,随 PFD 含量增加,最大失重速率温度逐渐延后且峰型逐渐变宽,这主要是由于 PFD 小分子在推进剂固化阶段可以与未反应的异氰酸

酯基反应,使得黏合剂交联网络更加完善,对增塑剂小分子的约束作用也随之增加。阶段二的失重主要发生氨基甲酸酯和 RDX 的分解,在未含 PFD 的推进剂中,RDX 的分解峰温在 220 °C 左右,但加入 PFD 以后,RDX 的分解温度发生了 15~20 °C 的延后。RDX 自身的分解温度在 240 °C 左右<sup>[22]</sup>,但在推进剂各组份的作用下,容易造成热稳定性的变化<sup>[23]</sup>。然而,加入 PFD 以后,RDX 的分解峰温向着自身分解峰温方向移动,这主要是受到 PFD 中大量氟原子表面惰性特性的影响。阶段三的分解几乎相同,表明 PFD 在阶段二已完全失重。由于无法在图 1a 的失重曲线中观察到 Al 的氟化,因此选择提高 PFD 含量至 6%(6<sup>#</sup>样品)并将升温速率提高至 30 K·min<sup>-1</sup>,最高反应温度提高至 1000 °C,得到图 1b 推进剂失重曲线,在曲线中依然没有找到铝的氟化反应。这主要是由于含氟链段在 300 °C 以前就随着黏合剂的分解而彻底失重,失重前不能达到与铝的预点火温度<sup>[24-25]</sup>。

### 2.2 推进剂点火与燃烧性能

#### 2.2.1 激光点火特性

为了对比 PFD 加入前后推进剂样品在激光点火中的不同,选择对 0<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>样品进行激光点火实验,并用高速摄像机记录点火后样品的燃烧情况。

从图 2 中发现,激光点火初期,推进剂样品受高温作用发生剧烈燃烧,两者都表现出了剧烈的强光反应。随着时间的推移,从 1.05 μs 开始,两者在光强上逐渐发生了较为明显的差别,到 1.4 μs 时,3<sup>#</sup>样品具备更高的亮度,表明在相同持续时间下,含 3%PFD 的推进剂样品拥有更高的燃烧温度,意味着其具有更高的燃烧效率。

#### 2.2.2 燃烧火焰结构

根据稳态燃烧理论,压强的增大将提高气相到固体表面的温度梯度,从而增强对燃面的热传导,导致燃速增大<sup>[24]</sup>。为了进一步研究不同压力条件下 PFD 含量对推进剂燃烧过程及燃烧释能规律的影响,在 3MPa(常压)和 5MPa(高压)下,选取 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和 5<sup>#</sup>样品进行燃烧性能测试。推进剂样品在 3 MPa 和 5 MPa 下的燃烧火焰如图 3 所示。

图 3a、3b 中可以发现,推进剂样品在 3 MPa 和 5MPa 条件下的燃烧火焰形貌表现出了相同的规律:随着 PFD 含量的增加,火焰的密集程度显著增加,且火焰喷射更为剧烈。火焰结构形态上的变化反映出了推进剂燃烧的剧烈程度,更细更长的火焰结构意味着更小的燃烧颗粒和更多的产气量。在 1<sup>#</sup>样品的燃烧火



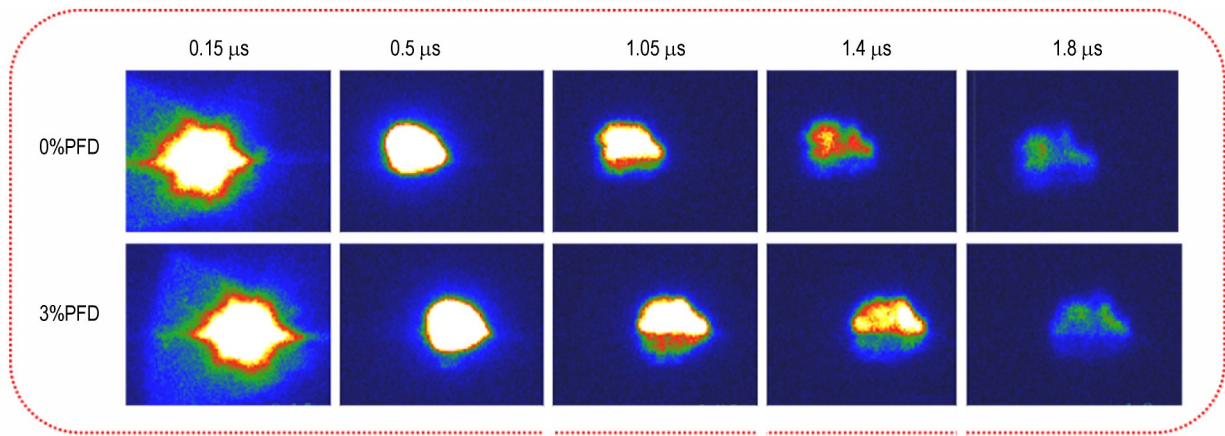
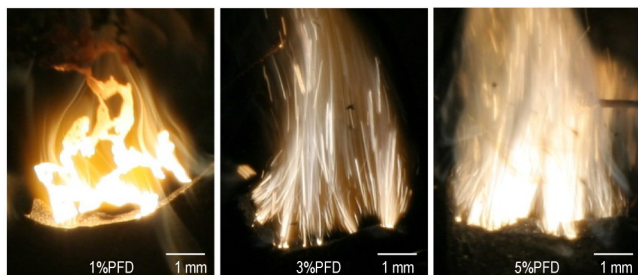
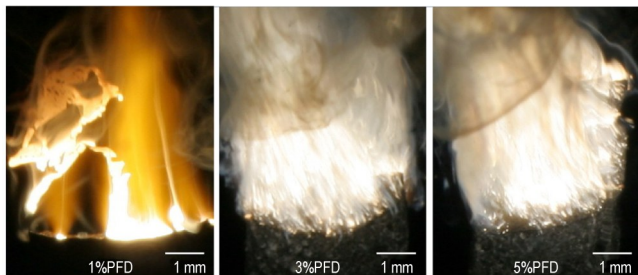


图2 含与不含PFD的推进剂样品的激光点火

Fig.2 Laser ignition of propellant samples with 3% PFD and without PFD



a. flame morphology of propellants with different PFD contents at 3 MPa



b. flame morphology of propellants with different PFD contents at 5 MPa

图3 不同PFD含量推进剂样品的火焰形貌

Fig.3 Flame morphology of propellant samples with different PFD contents at 3 MPa and 5 MPa

焰形貌图中,我们可以看到火焰主要是由高亮度且不规则的线状火焰构成,且火焰高温区主要集中于燃面后的气相区,燃面上只有局部区域少量分布着燃烧火焰,可以认为,该现象中的火焰主要来源于由凝聚相区喷射的粒径较大的固体颗粒的燃烧和气相产物的燃烧。在3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>样品的推进剂火焰形貌中,高亮度火焰区域更靠近燃面,且火焰以较为密集的状态分布在整个燃面附近,即使气相区也有部分喷射颗粒形成的火焰,但火焰结构更细长且成束性更好,

表明燃烧颗粒的粒径更小且拥有更大的法向喷射速度。分析认为,在燃烧初期含氟链段得到释放,与铝发生反应,放出大量热增大热流密度,加速铝粉点火;同时,含氟链段同Al、氧化铝反应生成AlF<sub>3</sub>,破坏团聚体的结构,使之破裂,抑制熔铝粒子的团聚<sup>[16]</sup>。此外,由于推进剂在更高压力下往往具有更高的燃速<sup>[26]</sup>,因而在相同PFD含量条件下,5 MPa下的推进剂样品拥有更高的燃速。通过对比3%PFD含量推进剂样品(3<sup>#</sup>)在2种压力下的火焰形貌图中可以清晰的发现,推进剂在5 MPa下,即燃速更高时,推进剂的燃烧更加剧烈,火焰密度更大,亮度也更高。同步对比相同压力条件下不同PFD含量的推进剂样品的火焰形貌可以推断,PFD含量的增加有利于提高推进剂的燃速。

### 2.2.3 熄火表面粒径与元素分析

对1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>样品的燃烧淬熄表面进行SEM观察及EDS分析,并采用Nano Measure软件对SEM图像中凝聚相产物粒径分布统计,结果如图4所示。

从图4a中可以发现,随着PFD含量的增加,凝聚相产物粒径呈逐渐减小的趋势,且燃烧熄火表面的蓬松絮状物逐渐增加。蓬松絮状物呈白色,且EDS能谱显示,随着絮状物的增加,氟含量也在不断提高。分析认为,该白色絮状物为AlF<sub>3</sub>晶体和其它未完全燃烧的推进剂组分的混合物。随着PFD含量提高,燃烧过程中产气量增加,燃烧表面各组分中气孔和缝隙数量增加,宏观表现为蓬松絮状物的增加。图4b中显示:随着PFD含量的提升,样品熄火表面的颗粒粒径逐渐减小,平均粒径由1%时的5.13 μm减小至5%时的1.04 μm。燃烧颗粒的粒径越小,反应面积越大,燃烧过程中氧化还原反应越充分,推进剂的燃烧效率也越

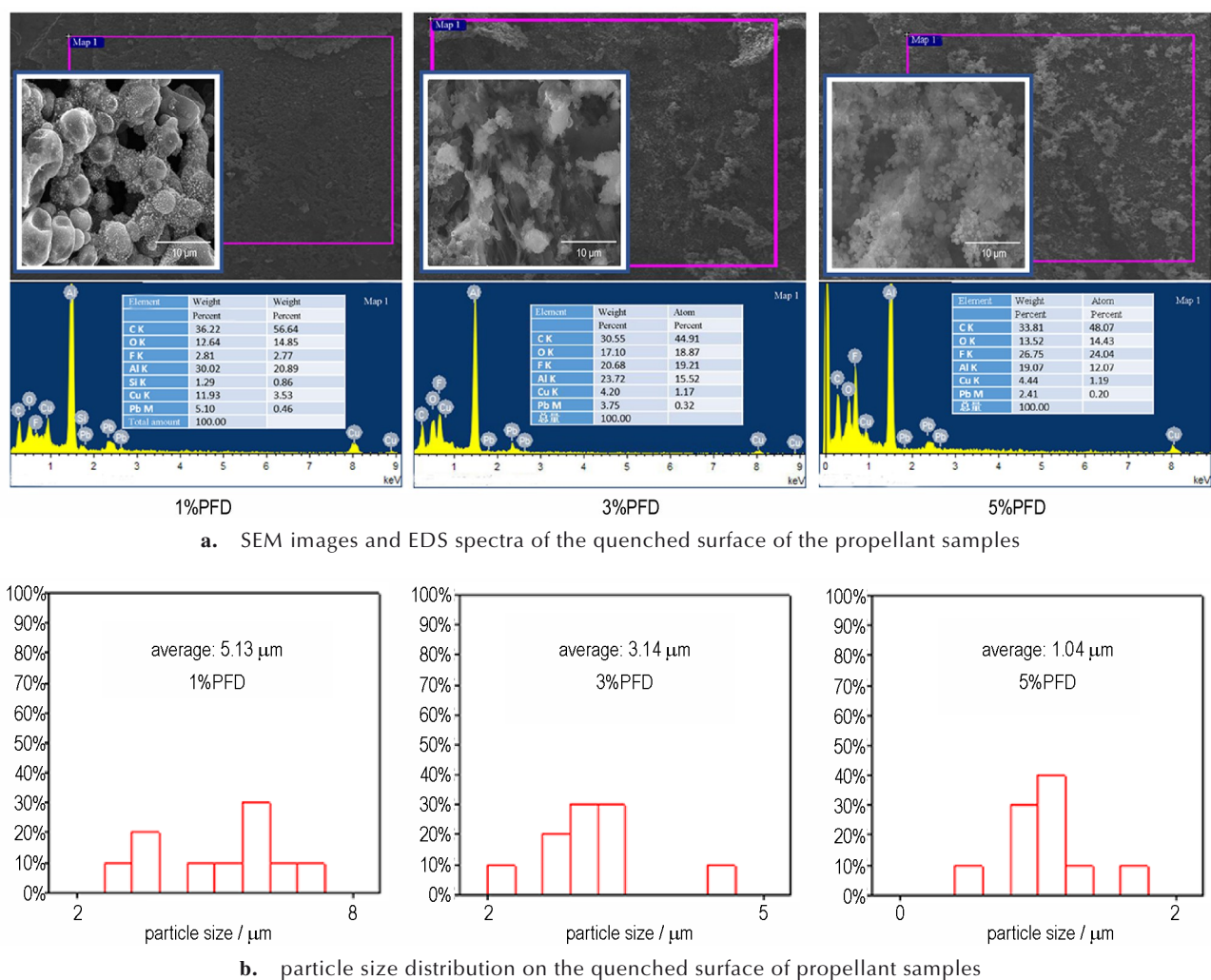


图4 不同含量PFD推进剂样品燃烧淬熄表面

Fig.4 The quenched surface of propellant samples with different PFD contents

高。此外,粒径的大幅减小也有利证明了PFD加入对改善燃烧时的团聚现象发挥了积极作用。PFD在推进剂固化过程中交联至黏合剂网络中,随着黏合剂受热释放含氟链段,一方面,含氟链段能够直接与Al反应生成 $\text{AlF}_3$ , $\text{AlF}_3$ 在推进剂燃烧温度下呈气态,增加产气量的同时形成更强的气流扩散,阻碍熔融铝的团聚;另一方面,含氟链段可以与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 反应,释放被氧化铝包裹的未完全燃烧的推进剂组分,进而改善团聚现象,增加燃烧效率。

### 3 结论

(1) 热失重测试表明,PFD的加入不影响推进剂的热分解历程,但使得推进剂中RDX的分解延后15~20 $^\circ\text{C}$ ;由PFD与N-100生成的氨基甲酸酯键在250 $^\circ\text{C}$ 前完成分解,并完成对含氟链段的释放。

(2) 激光点火实验表明,PFD加入能够有效提高推进剂点火时的热释放效率。

(3) 燃烧火焰及燃烧淬熄表面分析表明,加入PFD后推进剂的燃烧颗粒粒径大幅减小,平均粒径由添加1%PFD时的5.13 $\mu\text{m}$ 减小至添加5%PFD时的1.04 $\mu\text{m}$ 。同时,推进剂的燃烧火焰的密集程度显著增加,且火焰喷射更为剧烈,燃烧效率明显提高。

#### 参考文献:

- [1] JEENU R, PINUMALLA K, DEEPAK D. Size distribution of particles in combustion products of aluminized composite propellant [J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2012, 26 (4) : 715-723.
- [2] 肖立群,樊学忠,王晗,等.含铝固体推进剂燃烧过程中铝粉团聚现象研究进展[J]. *火炸药学报*, 2018, 41(1): 7-15.  
XIAO Li-qun, FAN Xue-zhong, WANG Han, et al. Research progress on agglomeration of aluminum powder during combustion of aluminum containing solid propellant [J]. *Chinese*

- Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(1): 7-15.
- [3] 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-min, et al. Research progress of fluoride promoting aluminum combustion in high aluminum solid propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2020, 43(6): 679-686.
- [4] MAGGI F, DOSSI S, DELUCA L T. Combustion of metal agglomerates in a solid rocket core flow[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 92(2): 163-171.
- [5] MAGGI F, DELUCA L T, BANDERA A. Pocket model for aluminum agglomeration based on propellant microstructure[J]. *AIAA Journal*, 2015, 52(11): 1-9.
- [6] 敖文, 刘佩进. 固体推进剂铝团聚模型[J]. 航空动力学报, 2017, 32(5): 1224-1233.  
AO Wen, LIU Pei-jin. Solid propellant aluminum agglomeration model[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(5): 1224-1233.
- [7] LIU T K. Experimental and model study of agglomeration of burning aluminized propellants[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 21(5): 1224-1233.
- [8] 王维伦. 含氟硼有机物对含铝推进剂燃烧性能的影响[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.  
WANG Wei-lun. Effect of organic compounds containing fluorine and boron on combustion performance of aluminized propellant[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [9] RASHKOVSKII S A. Effect of acceleration on agglomeration of aluminum particles during combustion of composite solid propellants[J]. *Combustion Explosion & Shock Waves*, 2007, 43(6): 654-663.
- [10] SABOURIN J L, DABBS D M, YETTER R A, et al. Functionalized graphene sheet colloids for enhanced fuel/propellant combustion[J]. *Acs Nano*, 2009, 3(12): 3945.
- [11] SUN S, ZHAO B, ZHANG G, et al. Applying mechanically activated Al/PTFE in CMDP propellant[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2018, 43(11).
- [12] ZHEN F, ZHOU X, ZOU M, et al. Investigation of the agglomeration reduction mechanism of the aluminized HTPB propellant containing ferric perfluorooctanoate [Fe(PFO)<sub>3</sub>][J]. *RSC Advances*, 2019, 9(33): 19031-19038.
- [13] HUANG S, PAN M, DENG S, et al. Modified micro-emulsion synthesis of highly dispersed Al/PVDF composites with enhanced combustion properties[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(5).
- [14] SUN S, ZHANG T, ZHAO B, et al. Influence of polytetrafluoroethylene on the mechanical and safety properties of a composite modified double base propellant[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2018, 15(3): 468-484.
- [15] 王维伦, 李建民, 杨荣杰, 等. 含氟有机添加剂对含铝聚醚推进剂燃烧凝聚相产物的影响[J]. 兵工学报, 2017, 38(4): 704-710.  
WANG Wei-lun, LI Jian-min, YANG Rong-jie, et al. Effect of fluorine-containing organic additives on combustion condensed phase products of aluminum containing polyether propellant[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(4): 704-710.
- [16] 郭延佩, 李永辉, 李建民, 等. 铝含量和含氟有机化合物对丁羟推进剂燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2020, 43(1): 74-80.  
GUO Yan-pei, LI Yong-hui, LI Jian-min, et al. Effects of aluminum content and fluorine-containing organic compounds on the combustion performance of butylated hydroxy propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 43(1): 74-80.
- [17] 胡驰, 郭亚, 罗观, 等. 氟橡胶包覆对微米铝粉燃烧性能的影响规律[J]. 含能材料, 2021, 29(10): 1001-1007.  
HU Chi, GUO Ya, LUO Guan, et al. Influence of fluororubber coating on combustion performance of micron aluminum powder[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(10): 1001-1007.
- [18] ZAMKOV M A, AND R W C, DLOTT D D. Ultrafast chemistry of nanoenergetic materials studied by time-resolved infrared spectroscopy: Aluminum nanoparticles in teflon[J]. *J. phys. chem. C*, 2015, 111(28): 10278-10284.
- [19] WANG H, 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.
- [20] SIPPEL T R, SON S F, GROVEN L J. Aluminum agglomeration reduction in a composite propellant using tailored Al/PTFE particles[J]. *Combustion & Flame*, 2014, 161(1): 311-321.
- [21] 高福磊, 姬月萍, 李普瑞, 等. 硝氧乙基硝酸系列化合物的合成与表征[J]. 含能材料, 2011, 19(5): 497-500.  
GAO Fu-lei, JI Yue-ping, LI Pu-rui, et al. Synthesis and characterization of nitroxyethyl nitramine series compounds[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(5): 497-500.
- [22] 曾见有, 赵宁宁, 张婷, 等. 石墨双炔/RDX复合物的热分解性能[J]. 火炸药学报, 2021, 44(4): 474-483.  
ZENG Jian-you, ZHAO Ning-ning, ZHANG Ting, et al. Thermal decomposition properties of graphite diyne/RDX composites[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(4): 474-483.
- [23] 陈沛, 赵凤起, 阴翠梅. RDX/AP/HTPB推进剂热分解特性研究[J]. 固体火箭技术, 2002, (2): 52-55.  
CHEN Pei, ZHAO Feng-qi, YIN Cui-mei. Study on thermal decomposition characteristics of RDX/AP/HTPB propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2002, (2): 52-55.
- [24] PANTOYA M L, DEAN S W. The influence of alumina passivation on nano-Al/Teflon reactions[J]. *Thermochimica Acta*, 2009, 493(1): 109-110.
- [25] MARTIROSYAN S K, KIRAKOSYAN G Kh, HOBOSYAN A M, et al. PTFE-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reactive interaction at high heating rates[J]. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 2015, 119(1): 245-251.
- [26] 刘宗魁, 汪太琨, 王鸿丽, 等. 固体火箭发动机装药动态燃速辨识方法[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(3): 181-184.  
LIU Zong-kui, WANG Tai-kun, WANG Hong-li, et al. Identification method of solid rocket motor charge dynamic burning rate[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(3): 181-184.



## Combustion Performance of Solid Propellant Based on New Fluorocarbon Binder

YAO Qi-fa<sup>1</sup>, MAO Chao-chao<sup>1,3</sup>, SHAO Yu-ling<sup>3</sup>, XIA Min<sup>1,2</sup>, LUO Yun-jun<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory for Ministry of Education of High Energy Density Materials, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. Xi'an North Huian Chemical Industry Co.Ltd., Xi'an 710302, China)

**Abstract:** The agglomeration of condensed phase during the combustion process of propellant is one of the main reasons for energy loss and nozzle ablation, and the introduction of fluorine into propellant is considered to be an effective way to solve the agglomeration. In order to solve the condensed phase agglomeration of aluminum, a fluoroalcohol compound was introduced into the traditional HTPE propellant, and it was integrated into the binder cross-linked network through the curing reaction to form a solid propellant based on a novel fluorocarbon binder. Thermogravimetric (TG) and laser ignition were used to characterize the thermal decomposition and the burning intensity of the propellant. The combustion surface flame morphology and particle size distribution of combustion condensed phase products were characterized by scanning electron microscope (SEM) and EDS. The results show that the weight loss of the propellant after adding PFD still includes three main stages, but PFD will cause the decomposition of RDX in the propellant to be delayed by 15–20 °C. Moreover, the fluorine-containing segment will completely decompose and lose weight before 250 °C. Compared with the blank propellant sample, the propellant containing PFD has higher burning brightness at the same ignition time. With the increase of PFD, the intensity of the combustion flame of the propellant sample increases significantly, and the flame jet is more intense. The average particle size of condensed phase products decreased gradually from 5.13 μm (1%PFD) to 1.04 μm(5%PFD).

**Key words:** fluoroalcohol compounds; fluorocarbon binders; HTPE propellants; agglomeration; combustion

**CLC number:** TJ55; O643

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022113

**Grant support:** Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2021CX01002)

(责编:姜梅)