

文章编号:1006-9941(2022)06-0571-08

HMX 含量对丁羟四组元推进剂团聚及凝聚相燃烧产物的影响

苟东亮¹, 敖文¹, 刘露¹, 吴浩明², 刘佩进¹, 何国强¹

(1. 西北工业大学 燃烧、热结构与内流场重点实验室, 陕西 西安 710072; 2. 中国航天科技集团有限公司四院四十一所, 陕西 西安 710025)

摘要: 奥克托今(HMX)作为含能材料在能够提高推进剂能量性能的同时可改变推进剂的燃烧过程,广泛用于固体推进剂中。为了研究HMX含量对推进剂点火、燃烧、团聚和凝聚相燃烧产物特性的影响,采用推进剂燃面拍摄、激光点火以及凝聚相燃烧产物收集方法对HMX含量在0%~10%范围内的典型四组元推进剂进行试验研究。结果表明:随着HMX含量由0%增加到10%,推进剂的点火延迟时间由191 ms增加到286 ms,推进剂的燃速和压强指数均减小,凝聚相燃烧产物的体积平均粒径 D_{43} 由48.1 μm 增加到138.3 μm 。含10%HMX的推进剂燃面上铝的团聚程度最大,而含8%HMX的推进剂凝聚相燃烧产物中活性铝的含量最高。

关键词: 奥克托今(HMX); 固体推进剂; 燃烧; 点火; 团聚; 凝聚相燃烧产物

中图分类号: TJ55; O64

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021183

1 引言

为了提高固体推进剂的能量特性,推进剂中通常添加一定量的铝粉。由于铝的熔点和沸点相差较大,因此推进剂燃烧过程中,铝颗粒在燃面会发生团聚现象,生成的大粒径团聚物对凝聚相燃烧产物(CCPs)的形成至关重要。凝聚相燃烧产物能够抑制发动机不稳定燃烧,同时会降低铝的燃烧效率,增加燃烧室的两相流损失,增强绝热层的局部烧蚀和喷管处的熔渣沉积。因此掌握推进剂铝团聚以及凝聚相燃烧产物的影响因素,对发动机工作性能评估十分关键。

奥克托今(HMX)的爆热为 $6200 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,爆速为 $9110 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [1],能量特性较高、密度较大、热稳定好,广泛用于复合固体推进剂中。HMX能够影响固体推进剂的能量性能[2-4]、燃速[5-6]、火焰结构[7-8]以及力学性能[3],同时也可显著改变推进剂燃面上铝的团聚以及

凝聚相燃烧产物特性[9]。

国内外对推进剂铝团聚和凝聚相燃烧产物的影响因素进行了大量研究,主要集中在压力[10-11]、燃速[11-12]、铝粉粒径和含量[12-14]、AP粒径和级配[13, 15]等,而关于HMX和RDX的影响研究较少。Liu[16]研究了不同含量的RDX对凝聚相燃烧产物的影响,认为随着RDX含量的增加,凝聚相燃烧产物的粒度逐渐增大。Glotov[9]研究了含铝推进剂中HMX对团聚的影响,认为含HMX推进剂的团聚程度和团聚物粒径小于含RDX推进剂。Bubak[17]对不同氧化剂的推进剂凝聚相燃烧产物进行了研究,指出含HMX推进剂的凝聚相燃烧产物的粒径较大。

目前,关于HMX影响推进剂铝团聚和凝聚相燃烧产物的文献较少,前期相关研究已经指出HMX会促进铝的团聚过程,然而HMX含量对推进剂燃面上铝团聚和凝聚相燃烧产物的影响规律,目前依然认识不清。

本研究综合采用推进剂燃面拍摄、激光点火和凝聚相燃烧产物收集方法,对HMX含量在0%~10%范围内的4种固体推进剂开展点火试验,研究HMX含量对推进剂点火、燃烧、团聚以及凝聚相燃烧产物的影响规律,为深入理解HMX对推进剂燃烧和团聚性能的影响提供指导。

收稿日期: 2021-07-07; 修回日期: 2021-09-07

网络出版日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(51506181)

作者简介: 苟东亮(1988-),男,博士,主要从事固体推进剂燃烧研究。e-mail:gd1420@mail.nwpu.edu.cn

通信联系人: 敖文(1988-),男,副教授,主要从事固体推进剂燃烧与精细调控研究。e-mail:aw@nwpu.edu.cn

引用本文: 苟东亮,敖文,刘露,等. HMX含量对丁羟四组元推进剂团聚及凝聚相燃烧产物的影响[J]. 含能材料, 2022, 30(6):571-578.

GOU Dong-liang, AO Wen, LIU Lu, et al. Effect of HMX Content on Agglomeration and Condensed Phase Combustion Products of AP/HMX/Al/HTPB Propellants [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2022, 30(6):571-578.

2 实验

2.1 实验装置及方法

采用文献[18]的激光点火系统进行推进剂的激光点火试验。CO₂激光器点燃推进剂试样,通过光谱仪在950 Hz的频率下测量推进剂点火和燃烧过程的发射光谱,该光谱仪的分辨率为0.1 nm。高速相机以2400 帧/s的频率对推进剂的燃烧过程进行拍摄。试验在常压环境中进行,每次试样的质量为0.1 g。为保证试验结果的可靠性,每个工况至少开展3次重复性实验。

推进剂燃面拍摄和凝聚相燃烧产物收集试验均在高压燃烧室内进行,该燃烧室主要由上下两个柱状圆筒组成。燃烧室上封盖处安装压力传感器,下封盖处安装两个点火电极,燃烧室内部放置聚四氟乙烯烧杯,烧杯内盛有冷却介质。通过电磁阀控制燃烧室的充气和排气过程。燃面拍摄试验采用侧面包覆的(8 mm×8 mm×20 mm)的推进剂药条,采用高速相机联接长焦显微镜以2400 帧/s的频率对推进剂的燃面进行拍摄。凝聚相燃烧产物收集试验采用侧面包覆的(25 mm×25 mm×15 mm)的推进剂药块,由于水的冷却效果好,同时对凝聚相燃烧产物的影响较小^[19],因此冷却介质采用蒸馏水,燃面距离冷却液面的初始距离为5 mm,试验示意图如图1所示。试验是在氮气的环境中进行,采用电热丝进行点火,电热丝的供电电压为24 V。

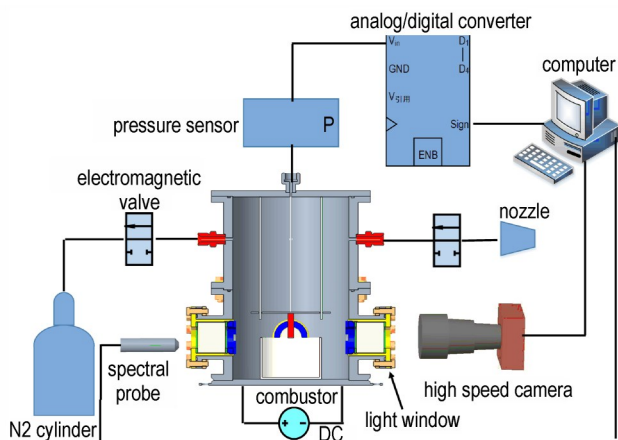


图1 推进剂燃面拍摄及凝聚相燃烧产物收集试验示意图

Fig.1 Schematic of imaging of propellant burning surface and collection of CCPs

2.2 试验工况

试验采用的AP/HTPB/Al/HMX固体推进剂由湖北航天化学技术研究所提供,组分中铝粉和黏合剂

(HTPB)的含量分别固定为18%和12%,氧化剂(AP+HMX)的含量固定为70%,通过改变氧化剂中HMX的含量获得4种不同的推进剂配方(表1),其中铝粉的平均粒径为29 μm,HMX的平均粒径为10 μm。对4种推进剂在不同压力下分别进行燃面拍摄、激光点火以及凝聚相燃烧产物收集试验,试验工况见表2。

表1 推进剂配方

propellant	HMX	AP	HTPB	Al
1#	0	70	12	18
2#	6	64	12	18
3#	8	62	12	18
4#	10	60	12	18

表2 试验工况

Table 2 Test conditions

experiment	pressure /MPa	propellant sample
laser ignition	0.1	Grain / 0.1 g
burning surface photography	1	cuboid strand / (8 mm×8 mm×20 mm)
	3	
	5	
CCPs collection	7	cuboid strand / (25 mm×25 mm×15 mm)
	7	

2.3 试验结果的处理与分析

对试验收集到的凝聚相燃烧产物收集液进行抽滤、干燥、研磨处理,得到分散性较好的粉末,质量约1.2 g。采用激光粒度分析仪(Malvern Mastersizer 2000)测量样品的粒径分布,采用扫描电子显微镜(Zeiss Supra 55)对样品的形貌进行观察,采用X射线能谱仪(Horiba 7021-H)对样品表面的成分进行分析,采用X射线衍射仪(Empyrean X)测量样品的化学成分。

3 结果与讨论

3.1 推进剂点火特性

4种推进剂的激光点火试验结果如图2所示。由图2可以看出,随着HMX含量增加,火焰强度逐渐减弱。图3为4种推进剂的发射光谱。由图3可以看出,当HMX含量为0时,推进剂的发光强度最大,而当HMX含量逐渐增大到10%时,推进剂发光强度逐渐减弱到最小,进一步说明推进剂的燃烧强度随HMX含量增大而逐渐减弱,这与图2结果吻合。471 nm和

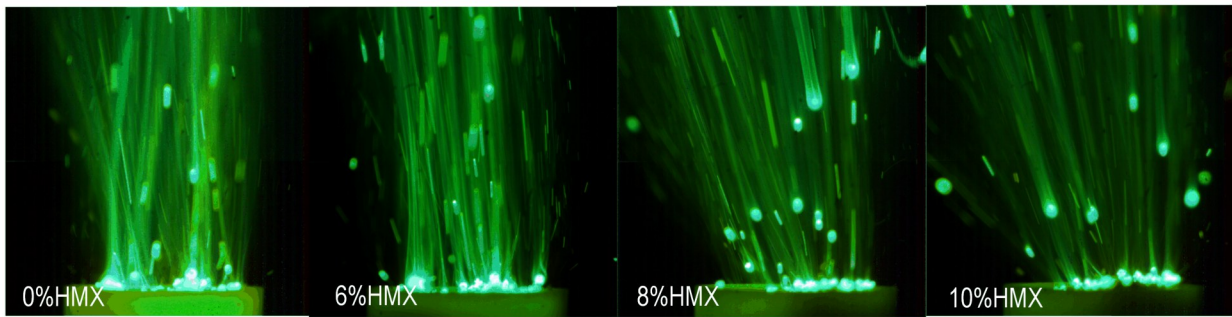


图2 4种推进剂燃烧火焰图像
Fig.2 Combustion flame images of the four propellants

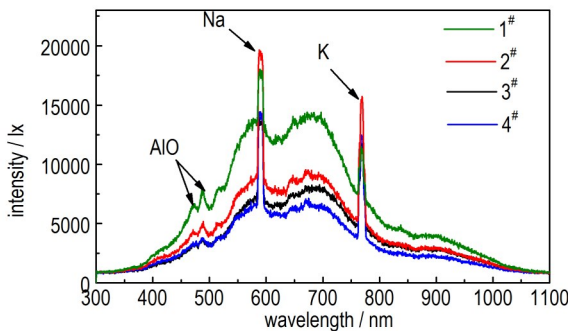


图3 4种推进剂发射光谱
Fig.3 Emission spectra of the four propellants

486 nm 波长为铝的气相中间燃烧产物 AIO 的特征光谱,与文献[18]一致。589 nm 和 768 nm 波长分别为 Na 和 K 的特征光谱,说明推进剂原材料含有少量杂质 Na 和 K^[20]。

鉴于 AIO 为铝燃烧过程的中间产物,因此使用 AIO 在 486 nm 的特征发射峰作为 Al 燃烧演化过程的表征^[21-22]。图 4 为 AIO 的特征光谱随时间的变化关系,可以看出铝颗粒在 250 ms 左右开始燃烧,此时由于推进剂药粒处于局部燃烧状态,AIO 的光谱强度较弱。在 450 ms 左右,AIO 的光谱强度突然增强,说明此时推进剂的燃烧由局部发展到整个药粒。取光谱强度的 10% 作为截止值分别定义点火延迟时间和燃烧

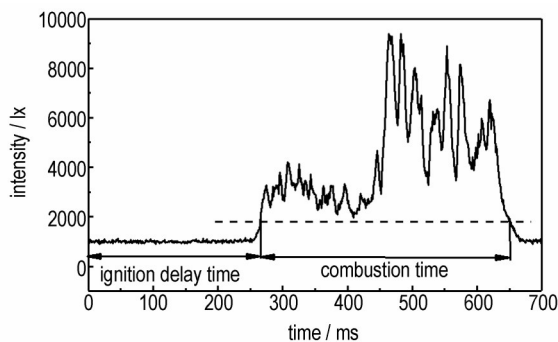


图4 AIO 特征光谱随时间的变化
Fig.4 The characteristic spectra of AIO versus time

时间^[10]。4 种推进剂的点火延迟时间和燃烧时间如图 5 所示,可以看出,随着 HMX 含量由 0% 增加到 10%,推进剂的点火延迟时间由 191 ms 增加到 286 ms,燃烧时间由 441 ms 增加到 724 ms,推进剂点火延迟时间和燃烧时间均随 HMX 含量的增加而增大。这表明 HMX 会抑制推进剂点火,并降低燃烧速率。

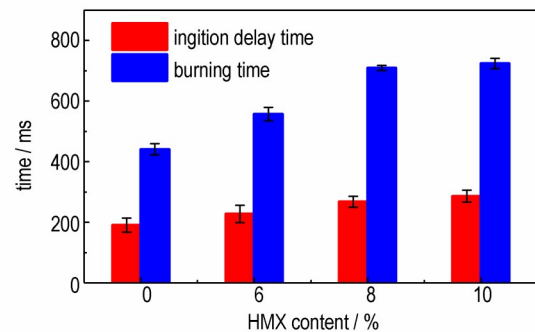


图5 4种推进剂的点火延迟和燃烧时间
Fig.5 Ignition delay and burning times of the four propellants

3.2 燃速特性

为了研究低压和高压条件下推进剂的燃烧特性,采用高速摄影对 1, 3, 5, 7 MPa 氮气环境中的 4 种推进剂燃烧过程进行拍摄。将拍摄的图片进行数字图像处理^[23],识别出不同时刻推进剂的燃面位置。通过帧频以及两幅图像燃面之间的距离,可以确定推进剂的燃速。对不同压力下的燃速数据进行拟合,得到推进剂的燃速公式,结果如图 6 所示。可以看出,相同的压力下,HMX 含量越大,推进剂的燃速越小。随着 HMX 含量由 0% 增加到 10%,推进剂的压力指数由 0.486 减小至 0.334,可见推进剂的燃速和压力指数均随 HMX 含量增加而减小。通过 CEA 热力学软件计算推进剂的燃温和比冲,结果如图 7 所示。可以看出,随着 HMX 含量由 0% 增加到 10%,燃烧温度由 3288 K 降到 3268 K,比冲却由 257.1 s 增加到 259.2 s。这是因

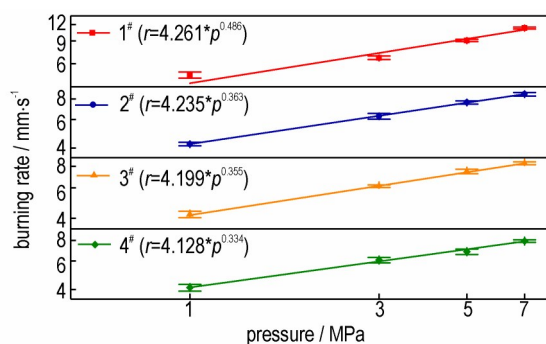


图6 4种推进剂燃速随压力的变化

Fig.6 The burning rate of the four propellants versus pressure

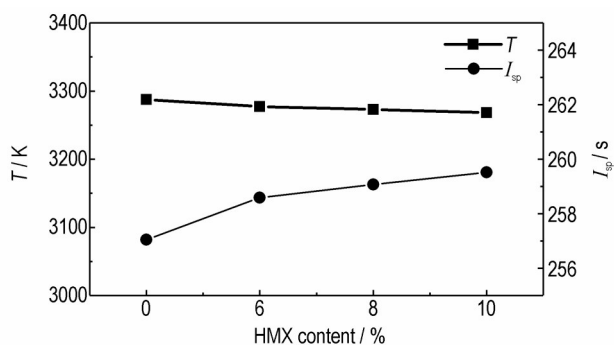


图7 推进剂的燃温和比冲随HMX含量的变化

Fig.7 Combustion temperature and specific impulse of the four propellants versus HMX content

为随着HMX含量增加,推进剂中的氧含量减少,推进剂的燃温略微降低,同时生成的气态产物的平均分子量减小,最终比冲性能增加。

3.3 燃面团聚特性

由于高压环境下烟雾对拍摄的干扰,选择1 MPa的拍摄结果对推进剂铝团聚过程进行研究,图8为4种推进剂燃面附近铝颗粒团聚图像。典型团聚物形成过程如图8a所示,在“口袋”区域内,黏合剂和氧化剂发生分解,铝颗粒的温度上升,并到达推进剂燃面。铝颗粒表面覆盖一层 Al_2O_3 膜,Al跟 Al_2O_3 的熔点温度和热膨胀系数不同,同时固相与液相铝的密度不同,使得颗粒发生相变时体积发生约6%的膨胀^[24],在应力作用下氧化膜发生破裂,被氧化膜包裹的液态铝沿着裂纹渗出并与周围的铝发生累积,在燃面形成珊瑚状的不规则聚集物(Aggregate),随着累积的进行,聚集物的体积逐渐增大,伸入到高温火焰区,液态铝的温度逐渐升高并最终燃烧,聚集物发生坍塌,形成单个球形团聚物(Agglomerate)液滴,团聚颗粒黏附在燃面上的同时,尺寸随不断涌上的铝颗粒聚集并逐渐增大,最终在气动力的作用下与燃面发生分离(Detachment),整个过程持续约23 ms。4种推进剂燃面上铝的团聚如

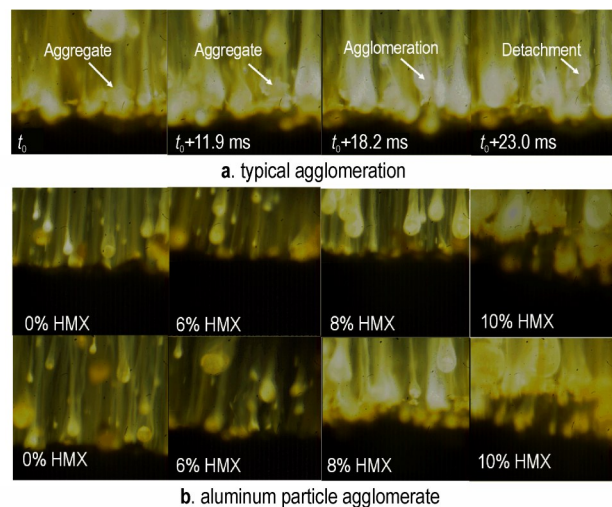


图8 燃面附近铝颗粒团聚

Fig.8 Images of aluminum particle agglomerates near the burning surface

图8b图所示,可以看出,当推进剂中HMX的含量为10%时,燃面附近团聚物粒径最大,而当推进剂中HMX含量为0时,燃面附近团聚物粒径最小,说明随着HMX含量增加,推进剂燃面上团聚物的粒径逐渐增大。

3.4 凝聚相燃烧产物

图9为4#推进剂燃烧得到的团聚物SEM图。由图9可见,凝聚相燃烧产物中的团聚物分为4类:A类为典型球状,这类颗粒是团聚物燃烧完全之后形成的产物,其在大粒径的凝聚相燃烧产物中占比较大,主要成分为氧化铝;B类为“8”状,这类颗粒是团聚物随流运动过程中,在燃烧末期发生碰撞合并的产物^[25],其在凝聚相燃烧产物中占比较小;C类为“帽”状,这类是团聚物未完全燃烧形成的产物,该类颗粒中活性铝的含量较大;D类颗粒为不规则状,这是团聚物在燃烧过程中破裂的产物。铝颗粒在燃烧过程中,沉积的 Al_2O_3 和未燃烧的Al液滴在两者交界面处发生反应生

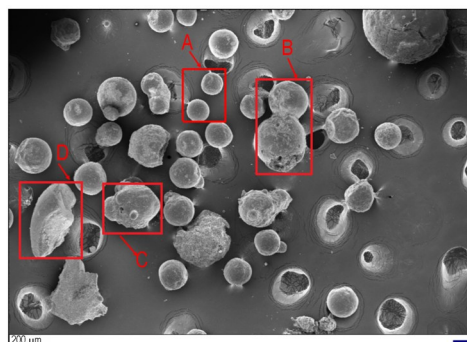


图9 4#推进剂团聚物的SEM图

Fig.9 SEM image of agglomerates in 4# propellant

成气态产物,气体被包裹在铝液滴内部,在应力的作用下,大颗粒最终会破裂成许多不规则的小颗粒^[26],该类颗粒在凝聚相燃烧产物中的含量较小。

图 10 和图 11 分别为凝聚相燃烧产物中氧化铝烟尘颗粒以及团聚物的 SEM-EDS 图。由图 10 和图 11 可以看出,颗粒表面含有少量的 C、N 和 Pt 元素。试验中采用铂电热丝对推进剂进行点火,因此 Pt 来源于电热丝,而 C 和 N 主要来源于推进剂中的粘合剂和氧化剂。图 10 的氧化铝烟尘颗粒中 O:Al 原子比为 1.44,Al₂O₃ 中 O:Al 原子比为 1.5,两者较为接近,可以判断颗粒中的 Al 和 O 元素以 Al₂O₃ 的形式存在,C 元素和 Pt 元素均以单质态的形式存在,说明该推进剂为贫氧燃烧,燃烧过程中部分活性 C 原子无法得到氧,最终形成单质 C。图 11 的团聚颗粒中 O:Al 原子比为 0.26,远低于 1.5,说明此颗粒中含有大量未燃的活性铝。

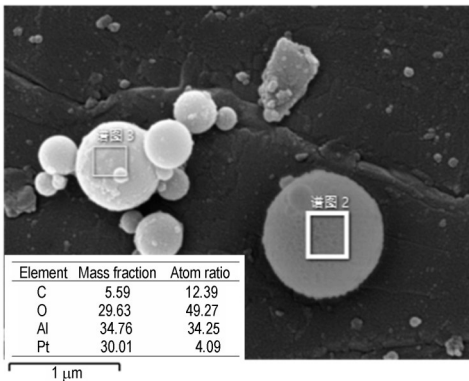


图 10 凝聚相燃烧产物中氧化铝烟尘颗粒的 SEM-EDS 图
Fig.10 SEM-EDS image of smoke particles in the CCPs

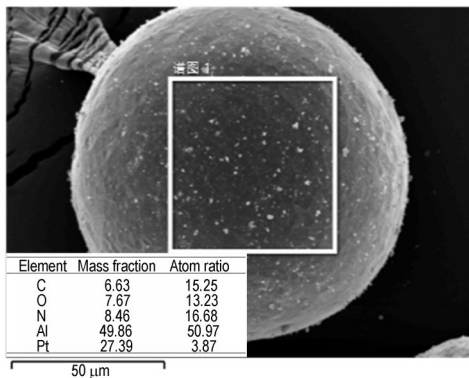


图 11 凝聚相燃烧产物中团聚物的 SEM-EDS 图
Fig.11 SEM-EDS image of agglomerates in the CCPs

为了保证试验数据的可靠性,分别对每个工况进行 3 次重复性试验。其中,7 MPa 下 4#推进剂的凝聚相燃烧产物粒径分布的重复性试验结果如图 12 所示。可以看出,除了在峰值处有些差别外,曲线总体上重合较好,测量的产物体积平均粒径 D_{43} 分别为 125.7,

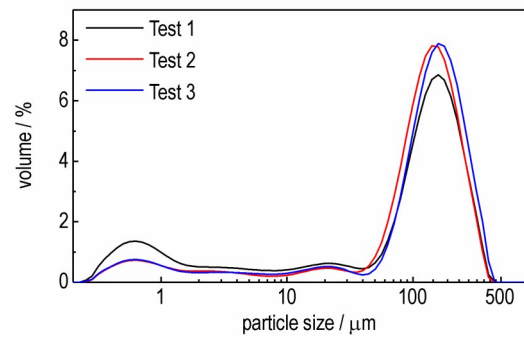


图 12 4#推进剂的重复性试验结果
Fig.12 Repeated test results of 4# propellant

137.9, 151.1 μm, 平均误差为 9.1%, 说明试验结果的重复性较好。

4 种推进剂凝聚相燃烧产物的粒径分布曲线如图 13 所示。可以看出,凝聚相燃烧产物粒径分布曲线呈多峰分布特点,符合四组元推进剂凝聚相燃烧产物的粒径分布特征^[15]。试验采用的铝粉平均粒径约为 29 μm,因此本研究以 30 μm 作为团聚物截止直径^[27],认为粒径大于 30 μm 的颗粒为团聚物。可以看出试验收集的凝聚相燃烧产物中团聚物的体积分数较大。这是因为试验过程中燃气的沉淀时间不充足,导致部分小颗粒被排出燃烧室外。小颗粒为铝燃烧生成的氧化铝蒸汽凝结形成的产物,其燃烧较为充分,成分为 Al₂O₃。产物中的活性铝主要分布在团聚物中。团聚物对推进剂中铝的燃烧效率、发动机内两相流损失、绝热层烧蚀以及发动机喷管处的熔渣沉积影响较大^[28]。凝聚相燃烧产物中团聚物所占的体积分数随 HMX 含量增加而逐渐增大,说明 HMX 会促进燃面上铝颗粒团聚,这与燃面拍摄结果一致。图 14 为凝聚相燃烧产物的体积平均粒径 D_{43} 随 HMX 含量的变化曲线,可以看出随着 HMX 含量增加,凝聚相燃烧产物的体积平均粒径 D_{43} 由 48.1 μm 逐渐增大到 138.3 μm。

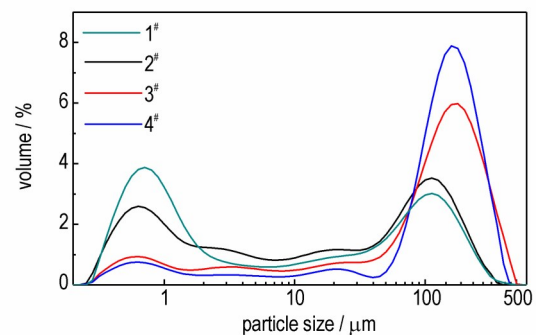


图 13 推进剂的凝聚相燃烧产物粒径分布
Fig.13 Particle size distribution of CCPs of the four propellants

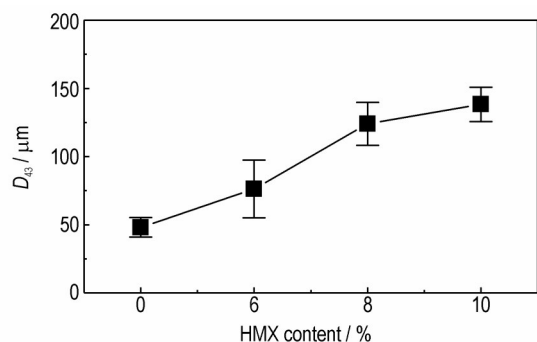


图14 凝聚相燃烧产物的平均粒径随HMX含量的变化
Fig.14 Average particle size of CCPs versus HMX content

取 50 mg 的凝聚相燃烧产物进行 XRD 测试, 结果如图 15 所示。可以看出, 凝聚相燃烧产物中活性铝的含量较大, 这是因为燃面与冷却液面的初始距离为 5 mm, 铝颗粒的燃烧时间短, 大粒径的团聚物没有经过充分燃烧即被液面淬息冻结。凝聚相燃烧产物中的氧化物以 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为主, 同时含有少量的 AlN, 说明燃烧室的温度较低, 大部分氧化物没有形成稳定态的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, 而 AlN 是少量的活性铝被空气中的氮气氧化形成的产物。采用文献[10]的方法对凝聚相燃烧产物中的组分含量进行估算, 结果见表 3。由表 3 可以看出, 当推进剂中 HMX 含量为 0 时, 凝聚相燃烧产物中活性铝含量为 5.9%, 随着 HMX 含量增加到 8%, 凝聚相燃烧产物中活性铝含量达到最大值 9.2%, 而当 HMX 含量继续增加到 10%, 凝聚相燃烧产物中活性铝的含量减小的 7.4%。可见随着 HMX 含量增加, 凝

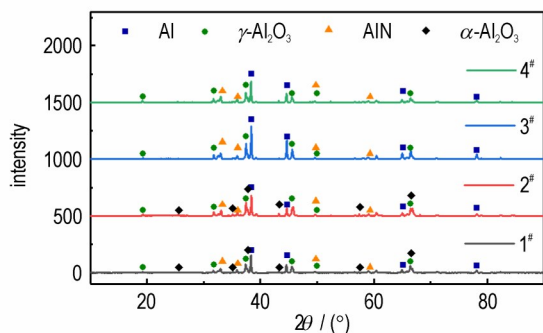


图 15 4 种推进剂凝聚相燃烧产物的 XRD 图
Fig.15 XRD spectra of CCPs of the four propellants

表 3 凝聚相燃烧产物中的各组分含量

Table 3 The content of each component in the CCPs %				
No.	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Al	AlN
1#	80.6	7.0	5.9	6.5
2#	84.9	5.1	6.8	3.2
3#	84.1	-	9.2	6.7
4#	82.4	-	7.4	10.2

聚相燃烧产物中活性铝的含量并不呈单调的变化关系。表征推进剂团聚性能的参数有团聚物粒径和团聚物数量, 随着 HMX 含量增大, AP 含量相应减小, 推进剂中的口袋数量减小^[29], 从而使得团聚物数量减小。凝聚相燃烧产物中活性铝的含量由团聚物粒径和数量共同决定, 团聚物粒径越大, 单个铝颗粒燃烧越不充分。团聚物数量越多, 凝聚相燃烧产物中的活性铝含量越大。随着 HMX 含量增加, 凝聚相燃烧产物中团聚物粒径增大, 而团聚物数量减小, 因此二者综合效应导致含 8% HMX 的推进剂形成的凝聚相燃烧产物中活性铝的含量最大。

3.5 HMX 含量对推进剂的燃烧和团聚影响的综合分析

根据固体推进剂燃烧的多火焰模型, 靠近燃面处形成的是 AP 和 HMX 初始扩散火焰, 远离燃面的位置处形成的是最终火焰^[30]。分析认为 HMX 的含氧量较低, 导致 HMX 的初始扩散火焰较弱, 同时 HMX 熔点较低, 燃烧过程中会首先融化, 在燃面形成融层, AP 颗粒部分表面被融层覆盖, 弱化了 AP 单元的初始扩散火焰强度。反馈给燃面的热量主要由两部分组成, 第一部分是初始扩散火焰反馈的热量, 该部分占主导。第二部分是表面的融层中 HMX、HTPB 和 AP 分解产物之间的凝聚相反应释热^[21]。HMX 融层的存在弱化了 AP 初始扩散火焰, 导致反馈给燃面的热量减少, 因此推进剂的燃速降低, 如图 16 所示。随着 HMX 含量增加, 融层厚度增加。高压下 HMX 融层变薄, 推进剂表面的

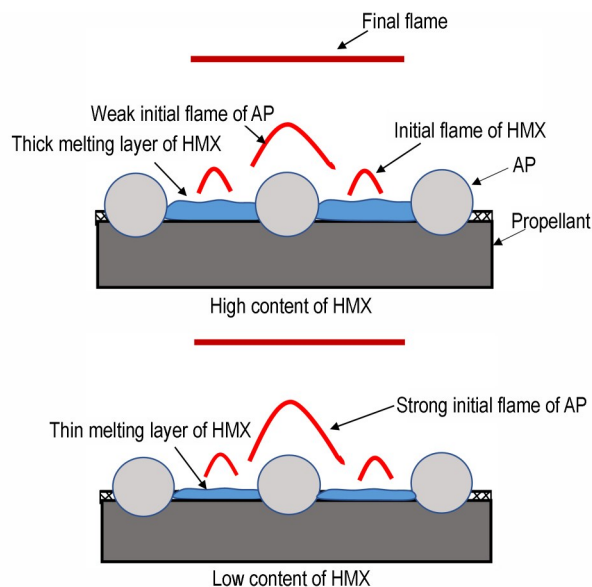


图 16 推进剂燃面火焰结构示意图
Fig.16 Schematic of the flame structure on the burning surface of propellant

凝聚相反应释热降低,导致低压下燃速下降不大,高压下燃速显著下降,因此压力指数减小。推进剂的燃烧强度取决于燃速大小,低燃速导致低的燃烧强度。

推进剂燃烧过程中,靠近燃面附近会形成一层碳骨架(Skeleton Layer)^[17]。分析认为 HMX 的熔点温度较低,在骨架层内形成融层,并包裹铝颗粒,融层的存在增加了铝液滴之间的碰撞几率,同时 HMX 的分解生成的热量和气态产物会降低碳骨架的分解温度。随着 HMX 含量增加,融层厚度增加,参与碰撞的铝颗粒增多,团聚物的粒径增大,如图 17 所示。HMX 增加的同时 AP 含量相应减小,AP 的减小导致推进剂中口袋数量减少,单个口袋内铝颗粒的数密度增大,根据口袋理论^[29],口袋内的铝颗粒最终会形成一个大的团聚物,因此燃面的团聚程度增加,团聚物的数量相应减少。

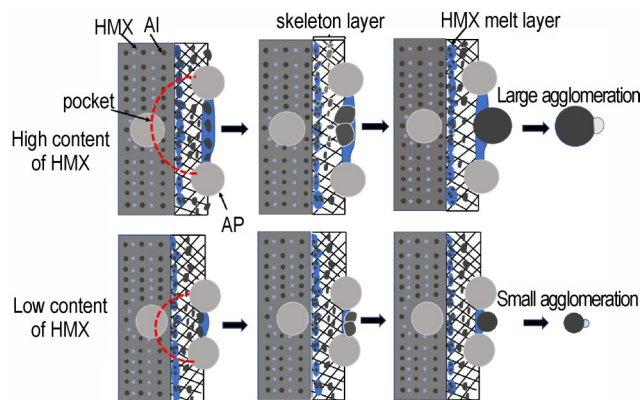


图 17 推进剂燃面铝的团聚示意图

Fig.17 Schematic of aluminum agglomeration on the burning surface of propellant

随着 HMX 含量增加,融化所需要的热量增加。融层减小了热量向推进剂的传递,同时由于铝的团聚程度增加,团聚物的粒径增大,铝颗粒在燃面附近发生相变的吸热量增加,因此推进剂的点火延迟时间增加。推进剂的凝聚相燃烧产物的粒径分布取决于燃面上铝的团聚程度,团聚物的粒径越大,生成凝聚相燃烧产物的平均粒径也就越大。

4 结论

采用燃面拍摄、激光点火和凝聚相燃烧产物收集方法对 HMX 含量在 0%~10% 范围内的 4 种推进剂进行试验,得出以下结论:

(1) 随着 HMX 含量的增加,推进剂的燃烧强度减弱,点火延迟时间由 191 ms 增加到 286 ms,燃速和压

强指数均减小。

(2) 随着 HMX 含量的增加,凝聚相燃烧产物的平均粒径 D_{43} 由 48.1 μm 逐渐增大到 138.3 μm 。推进剂燃面上铝的团聚程度随 HMX 含量的增加而增强。

(3) 随着 HMX 含量的增加,凝聚相燃烧产物中的活性铝从 5.9% 增加到 9.2%,然后下降到 7.4%。凝聚相燃烧产物中活性铝含量由团聚物粒径和数量共同决定,并不随 HMX 含量增加呈单调的变化趋势。

(4) 含 HMX 的推进剂燃烧过程中会在燃面形成 HMX 融层,该融层减弱了初始火焰与推进剂之间的热量传递,增加了燃面上铝液滴之间的碰撞。推进剂燃速的降低与燃面上铝团聚程度的增强均与该融层相关。

参考文献:

- [1] 马秀芳,赵峰,肖继军,等. HMX 基多组分 PBX 结构和性能的模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(2):109-115. MA Xiu-fang, ZHAO Feng, XIAO Ji-Jun, et al. Simulation study on structure and property of HMX-based multi-components PBX[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(2):109-115.
- [2] NAYA T, KOHGA M. Influences of particle size and content of HMX on burning characteristics of HMX-based propellant[J]. *Aerospace Science & Technology*, 2013, 27(1): 209-215.
- [3] GAO H, HOU X T, KE X, et al. Effects of nano-HMX on the properties of RDX-CMDB propellant: Higher energy and lower sensitivity[J]. *Defence Technology*, 2017, 13(5): 323-326.
- [4] 许亚北,谭迎新,曹卫国,等. RDX 热分解特性及 HMX 对其热稳定性的影响[J]. 含能材料, 2020, 28(2):157-163. XU Ya-bei, TAN Ying-xin, CAO Wei-guo, et al. Thermo-decomposition performance of RDX and the effect of HMX on its thermo-stability [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(2):157-163.
- [5] 贾小锋,李葆萱,王世英. HMX/RDX 粒度对硝酸胺推进剂高低压燃烧特性的影响[J]. 固体火箭技术, 2010, 33(3):319-322. JIA Xiao-feng, LI Bao-xuan, WANG Shi-ying. Effect of particle size of HMX/RDX on combustion characteristics of nitramine propellants under high and low pressure [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2010, 33(3):319-322.
- [6] 马凤国,季树田,吴文辉,等. HMX 与燃烧催化剂共包覆降低 NEPE 推进剂的压力指数[J]. 含能材料, 1999, 7(4):166-168. MA Feng-guo, JI Shu-tian, WU Wen-hui, et al. Lowering the pressure exponents of NEPE propellant by coated HMX and burning rate catalysts [J]. *Chinese Journal of Energy Materials*, 1999, 7(4):166-168.
- [7] KIM E S, YANG V, LIAU Y C. Modeling of HMX/GAP pseudo-propellant combustion [J]. *Combustion and Flame*, 2002, 131(3): 227-245.
- [8] PALETSKY A A, KOROBEINICHEV O P, TERESHCHENKO A G, et al. Flame structure of HMX/GAP propellant at high pressure [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2):2105-2112.
- [9] GLOTOV O G. Condensed combustion products of aluminumized propellants. IV. Effect of the nature of nitramines on aluminum agglomeration and combustion efficiency [J]. *Combustion Explosion & Shock Waves*, 2006, 42(4): 436-449.
- [10] LIU H, AO W, LIU P, et al. Experimental investigation on the condensed combustion products of aluminumized GAP-based propel-

- lants[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 97:105595.
- [11] LIU X, AO W, LIU H, et al. Aluminum agglomeration on burning surface of NEPE propellants at 3–5 MPa [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42: 260–268.
- [12] TAKAHASHI K, OXIDE S, KUWAHARA T. Agglomeration characteristics of aluminum particle in AP/AN composite propellants[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, 38:555–562.
- [13] ANAND K V, ROY A, MULLA I. Experimental data and model prediction of aluminum agglomeration in ammonium perchlorate based composite propellants including plateau-burning formulations [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34: 3139–2146.
- [14] LIU T K. Experiment and model study of agglomeration of burning aluminized propellants[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2005, 21(5): 797–806.
- [15] BABUK V A, VASILYEV V A, MALAKHOV M S. Condensed combustion products at the burning surface of aluminized solid propellants[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1999, 15(6): 783–793.
- [16] LIU H, AO W, HU Q W, et al. Effect of RDX content on the agglomeration, combustion and condensed combustion products of an aluminized HTPB propellant[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 170: 198–205.
- [17] BABUK V A, VASSILIEV V A, SVIRIDOV V V. Propellant formulation factors and metal agglomeration in combustion of aluminized solid rocket propellant [J]. *Combustion Science and Technology*, 2001, 163(1): 261–289.
- [18] AO W, LIU P, LIU H, et al. Tuning the agglomeration and combustion characteristics of aluminized propellants via a new functionalized fluoropolymer [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 382: 122987.
- [19] 刘欢, 刘佩进, 胡松启, 等. 收集处理方法对含铝固体推进剂凝相燃烧产物特性的影响[J]. *推进技术*, 2019, 40(1):206–214. LIU Huan, LIU Pei-jin, HU Song-qi, et al. Effects of collection and treatment methods on characteristics of condensed combustion products of aluminized solid propellants[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(1):206–214.
- [20] SCHLOEFFEL G, EICHHORN A, ALBERS H, et al. The effect of a shock wave on the ignition behavior of aluminum particles in a shock tube [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(3): 446–454.
- [21] WU X G, YAN Q L, XIN G, et al. Combustion efficiency and pyrochemical properties of micron-sized metal particles as the components of modified double-base propellant[J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68(7): 1098–1112.
- [22] LOMBA R, LABOUREUR P, DUMAND C, et al. Determination of aluminum-air burning velocities using PIV and laser sheet tomography[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 3143–3150.
- [23] WEISER V, EISENREICH N, BAIER A, et al. Burning behaviour of ADN formulations [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1999, 24(3): 163–167.
- [24] PRICE E W, SIGMAN R K. Combustion of aluminized solid propellants [J]. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 2000, 185: 663–687.
- [25] 李连波, 陈雄, 周省长, 等. 铝镁贫氧推进剂中铝颗粒团聚特性[J]. *含能材料*, 2019, 27(9):759–765. LI Lian-bo, CHEN Xiong, ZHOU Chang-sheng, et al. Agglomeration characteristics of aluminum particles in aluminum-magnesium oxygen-poor propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(9):759–765.
- [26] BUCHER P, YETTER R A, DRYER F L, et al. Condensed-phase species distributions about Al particles reacting in various oxidizers[J]. *Combustion and Flame*, 1999, 117: 351–361.
- [27] JACKSON T L, BUCKMASTER J, NAJJAR F. New aluminum agglomeration models and their use in solid-propellant-rocket simulations[J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2005, 21(5):925–936.
- [28] BANDERA A, MAGGI F, DELUCA L. Agglomeration of aluminized solid rocket propellants[C]//proceedings of the AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Colorado, 2009.
- [29] MAGGI F, DELUCA L. Pocket model for aluminium agglomeration based on propellant microstructure [J]. *AIAA Journal*, 2015, 53(11): 3395–3403.
- [30] COHEN N S, PRICE C F, STRAND L D. Analytical model of the combustion of multicomponent solid propellants[J]. *AIAA Journal*, 1977: 77–927.

Effect of HMX Content on Agglomeration and Condensed Phase Combustion Products of AP/HMX/Al/HTPB Propellants

GOU Dong-liang¹, AO Wen¹, LIU Lu¹, WU Hao-ming², LIU Pei-jin¹, HE Guo-qiang¹

(1. *Science and Technology on Combustion, Internal Flow and Thermo-Structure Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*;
2. *The 41st Institute of the Fourth Academy of CASC, Xi'an 710025, China*)

Abstract: As an energetic material, octogen(HMX) is widely used in solid propellants. While improving the energy performance of the propellant, it also changes the combustion process of the propellant. To study the effect of HMX content on the ignition, combustion, and agglomeration properties of propellant and its condensed phase combustion products (CCPs), burning surface photography, laser ignition and collection of the CCPs were used for testing and studying typical AP/HTPB/Al/HMX propellants with HMX contents ranging 0%–10%. Results show that as the HMX content increases from 0 to 10%, the ignition delay time increases from 191 ms to 286 ms, and both the burning rate and pressure exponent of the propellant decreases. The volume average particle size of the CCPs increased from 48.1 μm to 138.3 μm . The propellant with 10% HMX has the highest agglomeration degree on the burning surface, while the propellant with 8% HMX has the highest active aluminum content in the CCPs.

Key words: octogen(HMX); solid propellant; combustion; ignition; agglomeration; condensed combustion products

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021183

(责编: 王艳秀)