

文章编号: 1000-8055(2023)11-2791-08

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220229

NEPE 推进剂燃烧过程及铝团聚特性

涂乘崧, 庄宇倩, 李映坤, 周长省, 蔡文祥, 陈 雄, 李唯喧

(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘 要: 为了研究 NEPE 推进剂的燃烧过程以及铝颗粒团聚特性, 通过高速相机与长焦显微镜头结合的光学拍摄方法记录推进剂的燃烧过程, 使用红外热像仪记录燃烧过程中的燃烧波火焰温度, 同时收集推进剂的燃烧产物, 最后使用扫描电子显微镜 (SEM) 和激光粒度仪对燃烧产物进行了分析。结果表明, 在推进剂燃烧的 5 个阶段: 起始点火、火焰扩散、稳定燃烧、火焰衰减、火焰熄灭中均存在铝团聚物的飞溅现象。在 0.5~2.0 MPa 下, 随着环境压强的增大, 高温燃烧区域逐渐增大, 燃面处铝团聚物的数量增多, 但铝团聚物的粒径逐渐减小。推进剂的燃烧产物主要分为铝团聚物和氧化颗粒两类, 铝团聚物粒径在 50~600 μm 之间, 氧化铝颗粒的粒径通常不超过 1 μm 。

关 键 词: 固体推进剂; 燃烧过程; 铝粉; 团聚特性; 凝相燃烧产物

中图分类号: V512; TJ55

文献标志码: A

Combustion process and aluminum agglomeration characteristics of NEPE propellant

TU Chengyin, ZHUANG Yuqian, LI Yingkun, ZHOU Changsheng,

CAI Wenxiang, CHEN Xiong, LI Weixuan

(School of Mechanical Engineering,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to study the combustion process and aluminum agglomeration characteristics of NEPE propellant, the combustion process of NEPE propellant was recorded by the optical imaging method combined with a high-speed camera and a long distance microscope, the combustion wave flame was recorded by an infrared thermal imager, and the condensed combustion products of the propellant were collected to analyze by scanning electron microscope (SEM) and laser particle size analyzer. Results showed that the splash phenomenon of aluminum agglomerates existed in five combustion stages: initial ignition, flame diffusion, steady combustion, flame attenuation and flame extinction. At the pressure range of 0.5—2.0 MPa, with the increase of environmental pressure, the high temperature combustion region increased, the number of aluminum agglomeration at the burning surface increased, and the particle size of aluminum agglomeration gradually decreased. The condensed combustion products were mainly divided into aluminum agglomerates and oxide particles. The particle size of aluminum agglomerates was within the range of 50—600 μm , and the particle size of alumina particles usually less than 1 μm .

Keywords: solid propellant; combustion process; aluminum powder;
agglomeration characteristics; condensed combustion products

收稿日期: 2022-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(52006099); 中央高校基本科研业务费专项资金(30920021102)

作者简介: 涂乘崧(1995—), 男, 博士生, 主要从事固体推进剂燃烧特性研究。

通信作者: 陈雄(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事计算流体力学及新型推进技术研究。E-mail: chenxiong@njust.edu.cn

引用格式: 涂乘崧, 庄宇倩, 李映坤, 等. NEPE 推进剂燃烧过程及铝团聚特性[J]. 航空动力学报, 2023, 38(11): 2791-2798. TU Chengyin, ZHUANG Yuqian, LI Yingkun, et al. Combustion process and aluminum agglomeration characteristics of NEPE propellant[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(11): 2791-2798.

固体推进剂作为火箭发动机的能源和工质源,通常加入高能燃料金属铝用于提高固体推进剂的能量性能^[1]。铝粉的加入不但能够改善火箭发动机的内弹道性能,如提高推进剂的密度、燃烧温度、发动机比冲等^[2],同时铝颗粒的燃烧产物能够有效抑制发动机中的不稳定燃烧^[3]。

然而在固体推进剂的燃烧过程中,铝颗粒会在燃烧表面堆积、聚集、团聚,形成大尺寸的团聚物^[4],导致少部分的铝不能在燃烧室中参与燃烧。研究表明,固体推进剂中每 10% 的铝颗粒发生团聚就会造成大约 1% 的比冲损失^[5]。同时燃烧产物的凝聚相颗粒会对燃烧室绝热层和喷管材料产生较强的冲刷作用,烧蚀绝热层和喉衬^[6-7]。此外,由于喷管中含铝凝聚相颗粒的运动速度低于气流流动速度,不能将热量向气流完全传递,使得喷管气流速度低于理论流速,导致两相流损失^[8]。因此,研究固体推进剂燃烧过程中铝颗粒的团聚特性具有重要的意义。

国内外研究者对固体推进剂中铝颗粒的燃烧和团聚开展了大量的研究,研究结果表明影响铝团聚物大小的因素包括初始铝颗粒的大小和质量分数^[4-5,9-13]、AP 颗粒的大小^[4,10]、粗细高氯酸铵(AP)颗粒的比例^[5,11,13]、氧化剂种类^[4,10]、黏合剂特性^[4]、燃烧室气氛^[14]、加热速率^[15]、燃烧室压强^[4-5,11]以及推进剂的燃速^[10,13]。刘鑫等^[11,16-17]使用高速相机与长焦显微镜头相结合的光学拍摄方法对含铝固体推进剂的点火燃烧和团聚过程进行了研究,得到了铝颗粒在燃烧表面以及脱离燃烧表面后的团聚过程。敖文等^[18]对铝颗粒的团聚模型进行了总结,现有的团聚模型包括经验模型、口袋模型、物理模型、随机装填模型和凝聚相边界层模型。肖立群等^[19]分析了 4 种含铝 HMX-CMDB 固体推进剂在 1 MPa 下产生的凝聚相燃烧产物,结果表明增加铝粉质量分数会增大残渣粒径,使粒径分布变宽,铝颗粒团聚程度增加。

硝酸酯增塑聚醚(NEPE)推进剂具有聚氨酯黏合剂低温下优异的力学性能,以及硝酸酯增塑剂的较高能量,通常加入铝粉进一步提高该类推进剂的能量^[20-22],然而目前对 NEPE 推进剂燃烧过程中铝团聚特性的研究较少。本研究开展 NEPE 推进剂的燃烧过程中铝团聚可视化拍摄实验以及凝相产物收集实验,为该类推进剂的燃烧性能提供借鉴。

1 实验

1.1 实验样品与仪器

实验中所使用 NEPE 推进剂的基本组分包括黏合剂(聚乙二醇, CAB, 质量分数为 7%)、增塑剂(1,2,4-丁三醇三硝酸酯, BTTN, 质量分数为 20%)、氧化剂(高氯酸铵, AP, 质量分数为 25%, 粒径为 100~130 μm)、金属添加剂(铝粉, Al, 质量分数为 25%, 粒径为 3~7 μm)、黑索今(环三亚甲基三硝铵, RDX, 质量分数为 20%)和催化剂(质量分数为 3%)。在实验前,将推进剂加工成 5 mm × 5 mm × 10 mm 的试件。为了确保推进剂端面燃烧,提高实验现象的清晰度和实验数据的准确性,在推进剂四周涂上耐高温的绝缘橡胶。

实验仪器:Chronos 1.4 高速摄影仪;XDC-10A 长焦显微镜头;FLIR A615 红外热像仪;S-4 800 型扫描电子显微镜,日本 Hitachi 公司;Master-sizer 4e 激光粒度仪,Beckman Coulter 公司。

1.2 实验系统

实验系统由 CO₂ 激光器、光学系统、燃烧室、数据采集系统、拍摄系统和燃烧产物收集系统组成,如图 1 所示。CO₂ 激光器功率为 300 W,波长为 10.6 μm ,激光光斑直径为 3.5 mm,作为点火源用于点燃固体推进剂。光学系统由燃烧室顶部的平面镜和聚焦镜组成,可以将激光器发射出的水平激光束转变为垂直激光束,确保垂直激光束能准确地照射在推进剂试件表面,并能够调节激光光斑直径。燃烧室的尺寸为 150 mm × 150 mm × 300 mm,四周分别设 50 mm × 100 mm 的观察窗,其中一块采用光学玻璃用于高速相机拍摄采样,一块采用可以投射波长为 10.8 μm 红外光的红宝石玻璃用于红外热像仪采集数据,顶部设有直径为 20 mm 的激光入射窗。拍摄系统由长焦显微镜头、高速相机和红外热像仪组成,使用长焦显

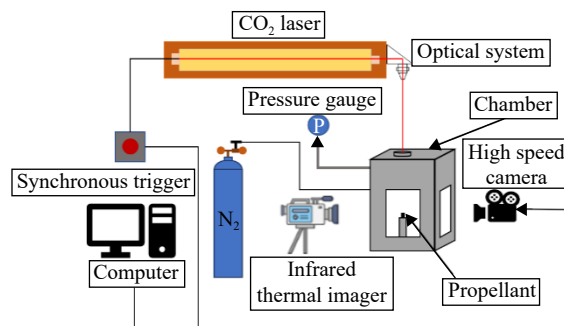


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental system

微镜头和高速相机拍摄推进剂燃烧过程以及燃烧表面铝颗粒的团聚现象,使用红外热像仪来记录燃烧过程中的燃烧波温度。燃烧室内的压强通过压强传感器监测,通过高压气瓶体调节燃烧室中的压强。在燃烧室底部装有尺寸为 $149\text{ mm} \times 149\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的收集盘,完全覆盖燃烧室底部,可收集推进剂燃烧后的凝相燃烧产物。

1.3 实验方法

实验在常温(25°C)下进行,激光加载时间为 2 s ,环境压强为 0.5 、 1.0 、 1.5 、 2.0 MPa ,实验中所用的气体为氮气,在每种实验条件下进行 5 次重复性实验,以确保实验数据的可靠性。高速相机的拍摄速率为 $1\,000\text{ 帧/s}$,红外热像仪的拍摄速率为 200 帧/s 。实验时,将试件从燃烧室底部的中心孔旋入完成装药。之后调整光学系统,使激光器发射出的光束位于试件的正中间,通过减压阀控制高压气瓶导入燃烧室的气体流量,观察压强传感器示数,使燃烧室中的气体压强达到预设值。

2 实验结果与讨论

2.1 推进剂的燃烧过程

使用高速摄影仪记录了 NEPE 固体推进剂点火燃烧的全过程,由文献 [22] 可知,本文所使用的 NEPE 推进剂在环境压强 $p=0.5$ 、 1.0 、 1.5 、 2.0 MPa

的 N_2 中燃烧时间为 3.45 、 3.13 、 2.70 、 2.60 s 。NEPE 推进剂的燃烧过程在 2 MPa 下的燃烧过程如图 2 所示。固体推进剂的燃烧过程主要分为起始点火、火焰扩散、稳定燃烧、火焰衰减、火焰熄灭 5 个阶段。

激光开始加载后,推进剂表面开始吸收热量后热解,气化产生可燃气,随着推进剂表面的温度逐渐升高,当达到可燃气体的燃点时,推进剂表面产生初始火焰,如图 2(a)所示,此过程是推进剂的起始点火阶段;随后推进剂进入火焰扩散阶段,如图 2(b)所示,推进剂表面产生的初始火焰迅速向四周蔓延,逐渐覆盖推进剂的整个表面,此时火焰的燃烧强度不断增强,同时不断有铝颗粒从燃烧表面飞出;当火焰完全覆盖推进剂表面后,在一定时间内保持相对较大的面积和亮度,如图 2(c)、图 2(e)所示,此时推进剂进入稳定燃烧阶段,且铝颗粒的喷射现象更加明显;随着推进剂燃面退移,进入火焰衰减阶段,如图 2(f)所示,推进剂样品即将燃尽,火焰亮度开始减弱;最后推进剂进入火焰熄灭阶段,如图 2(g)所示,气相火焰消失后,固体残留物由于温度较高在一定时间内继续散发出光芒,直至火焰完全熄灭。在 NEPE 推进剂燃烧的整个过程中都伴随着铝颗粒飞溅现象,因此铝颗粒团聚对 NEPE 推进剂的燃烧特性有很大的影响。

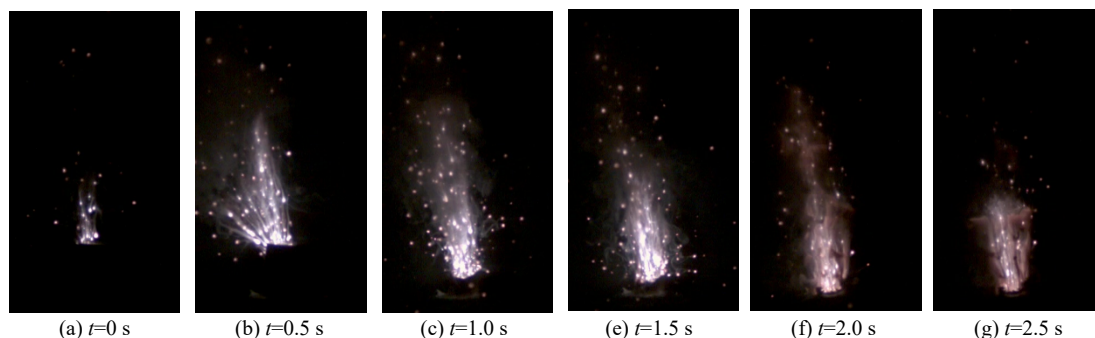


图 2 2 MPa 下 NEPE 推进剂的燃烧过程

Fig. 2 Combustion process of NEPE propellant at 2 MPa

2.2 燃面处铝颗粒团聚现象

燃面处铝颗粒的团聚过程可以分为 3 个阶段:堆积、聚集和团聚^[23]。如图 3 所示,随着推进剂燃面的推移,推进剂内部的铝颗粒逐渐暴露在燃烧表面,堆积在一起形成较小的团聚铝,团聚铝形成后并不会直接脱离燃面,一般要经历在燃面处的滞留,期间不断融合周围未团聚的铝颗粒及

其他团聚铝,最终随燃气流脱离燃面。

在图 4 中,对比了 NEPE 推进剂在 $p=0.5$ 、 1.0 、 1.5 MPa 下稳定燃烧时燃烧表面处铝颗粒的团聚现象。

由图 4(a)可以看出,NEPE 推进剂在 0.5 MPa 中燃烧时,燃烧表面处团聚物的粒径最大,团聚物的数量最少。随着环境压强增大,燃面处团聚

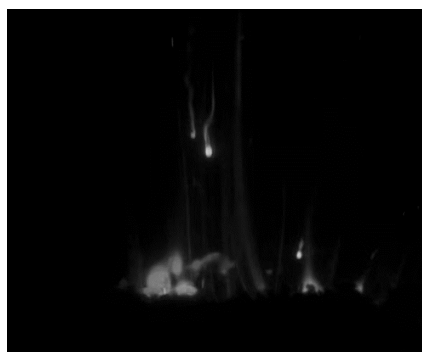
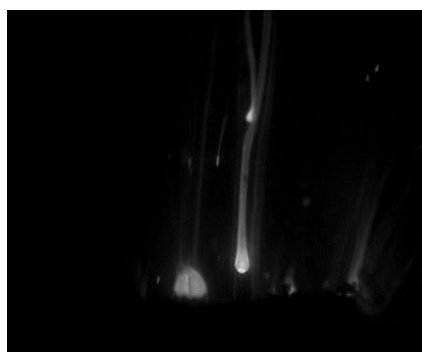
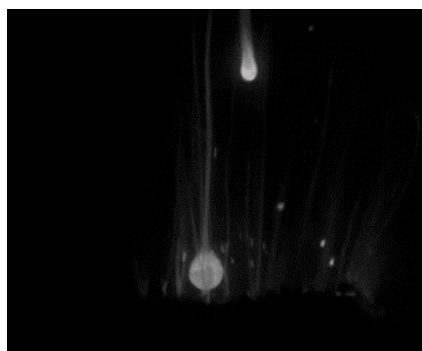
(a) $t=0$ ms(b) $t=2$ ms(c) $t=10$ ms(d) $t=13$ ms

图 3 1 MPa 下推进剂燃烧表面铝团聚物的形成过程

Fig. 3 Formation process of aluminum aggregates on propellant combustion surface at 1 MPa

物的数量增多,但团聚物的粒径却逐渐减小。发动机的工作性能主要包括特性速度 c^* 、比冲 I_{sp} 、燃烧效率 η 。推进剂燃烧过程中产生的大颗粒团

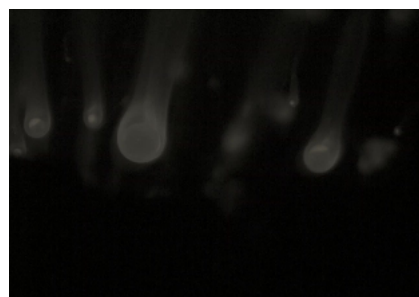
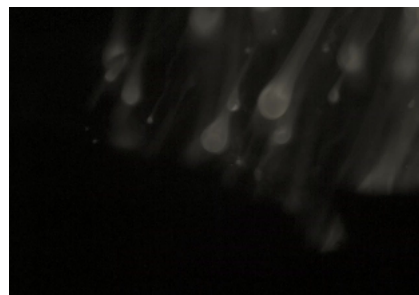
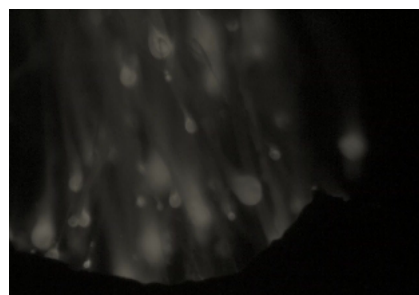
(a) $p=0.5$ MPa(b) $p=1.0$ MPa(c) $p=1.5$ MPa

图 4 不同环境压强下 NEPE 推进剂燃面处铝团聚对比

Fig. 4 Comparison of aluminum agglomerations on the burning surface of NEPE propellant under different ambient pressures

聚物进入流场后会造成流动损失,降低发动机的推力,进而降低发动机的比冲。在文献 [24] 的研究中发现,当发动机燃烧过程中产生的团聚物尺寸较小时,有助于提高发动机的特征速度;燃烧效率随着推进剂尺寸的减小而增大,大尺寸粒径团聚物对燃烧效率的提高极为不利。

2.3 推进剂的燃烧波温度

通过红外热像仪记录了 NEPE 推进剂在 $p=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ MPa 下燃烧时燃烧波的温度分布,NEPE 推进剂在稳定燃烧时燃烧波温度的分布图像如图 5 所示。NEPE 推进剂的燃烧波的温度随压强的升高缓慢上升,当 NEPE 推进剂在 0.5 MPa 中稳定燃烧时,最高温度为 600 $^{\circ}\text{C}$,当环境压强升高到 2.0 MPa 时,最高温度上升到约 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 。

如图 5(a)所示,NEPE 推进剂在 0.5 MPa 中燃烧时,火焰高温区仅存在于推进剂燃烧表面处,

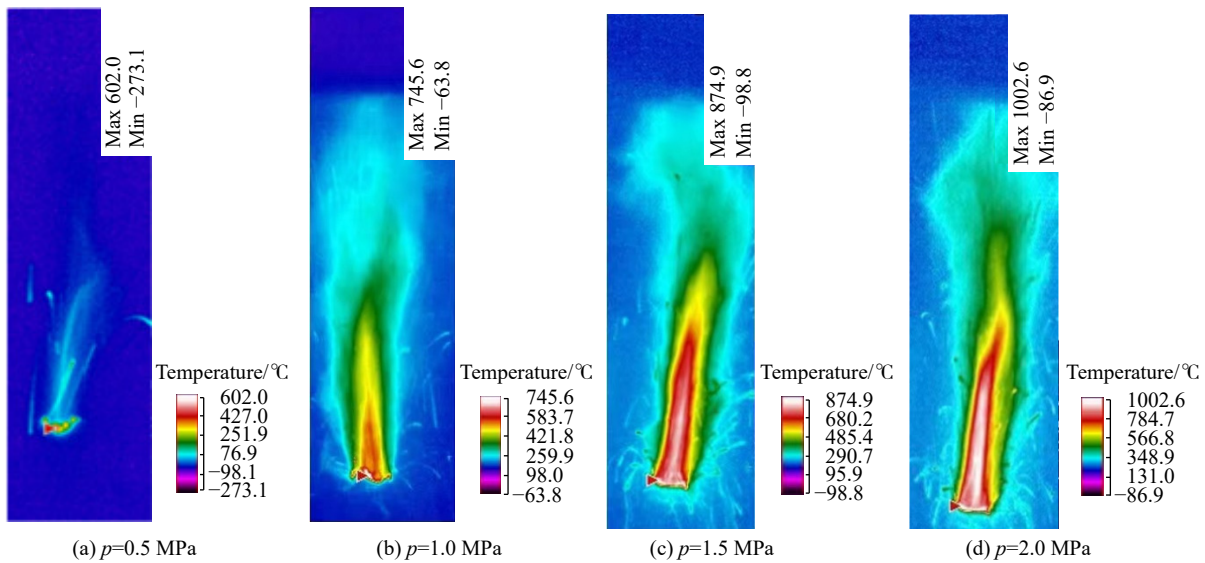


图 5 NEPE 推进剂燃烧波温度

Fig. 5 Combustion wave temperature of NEPE propellant

随着环境压强的增大,推进剂的燃烧愈发激烈,稳定燃烧时的高温火焰区域逐渐增大。由于 NEPE 推进剂在 0.5 MPa 环境中燃烧速率较低,铝颗粒暴露在燃烧表面时并不会立即被点燃而脱离燃面,会在推进剂燃面处停留一段时间与周围的铝颗粒团聚形成尺寸较大的团聚物,直至团聚物完全暴露于燃面处时在燃气的作用下离开燃面。而 NEPE 推进剂在 2.0 MPa 环境中燃烧时,高温火焰区域较大,燃烧速率较快,铝颗粒更容易被点燃,因此推进剂表面的铝颗粒还未形成大粒径的团聚物就已脱离燃面。

2.4 凝相燃烧产物分析

通过产物收集装置收集 NEPE 推进剂燃烧后的固体残渣颗粒,使用激光粒度仪对 0.5 MPa 下冷凝燃烧产物的粒径进行分析,测量结果如图 6 所示,测量范围为 29.6~600 μm 。

目前还没有成熟的理论能够定量描述各种因素对铝团聚体粒度分布的影响,铝团聚体的尺寸主要通过实验来测量。从实验的角度来看,很难确定给定的粒子是否是在凝聚过程中产生的。因此,参考文献 [10],取截止直径 D_{cut} 为 50 μm ,当燃烧产物的粒径大于 50 μm 时认为铝颗粒发生了团聚。由图 6 可以看出,在此次研究中铝团聚物粒径主要分布在 50~600 μm 之间。

使用扫描电子显微镜(SEM)对其进行观测,根据凝相燃烧产物的形貌差异,可以分为以下 5 类:

1) 球形团聚物,如图 7 所示。该团聚物表面

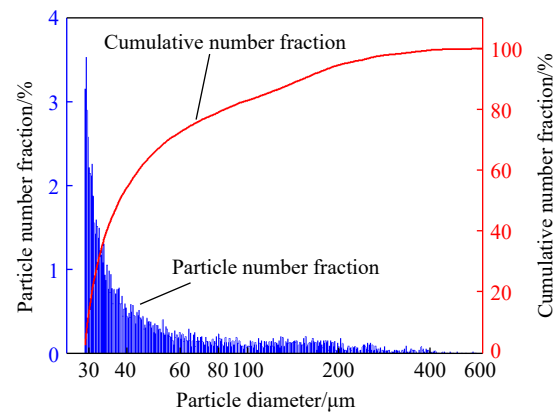


图 6 NEPE 推进剂燃烧产物粒径分布

Fig. 6 Condensed combustion products size distribution of NEPE propellant

光滑,球形化程度好,粒径约为 220 μm ,在含铝推进剂的凝相燃烧产物中分布较为广泛,是由铝颗粒团聚形成的典型产物。

2) 破碎的团聚物,如图 8 所示。在铝团聚的过程中,液态铝逐渐融合在一起形成熔融的液滴,

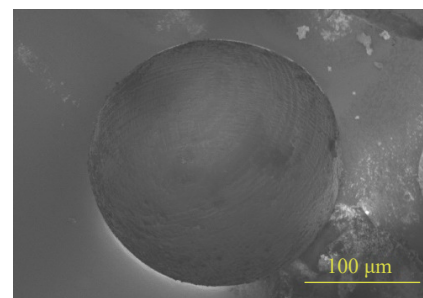


图 7 球形团聚物的扫描电镜图像

Fig. 7 SEM image of a spherical agglomerate

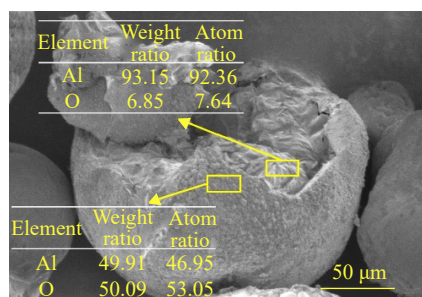


图 8 破碎团聚物的扫描电镜图像

Fig. 8 SEM image of a broken agglomerate

而液滴的表面会生成坚硬的氧化铝外壳。随着扩散火焰的加热,由于液态铝的膨胀系数大于氧化铝外壳,液态铝受热膨胀后会导致氧化铝外壳破裂^[25],可以从破碎的外壳看到团聚物内部的结构,团聚物的内部呈现不规则的纹路。使用 X 射线能谱仪(EDS)对团聚物进行分析,该团聚物内部主要是由铝和氧组成的,铝的质量分数达到了 93.15%,氧的质量分数为 6.85%,由此可以证明熔融的液滴内部主要是由液态铝组成的。而该团聚物外壳铝和氧的质量分数分别为 49.91%、50.09%,与 Al_2O_3 中铝元素和氧元素的质量比接近,可以看出该团聚物的外壳主要是由液态铝氧化形成的。

3) 带有氧化帽结构的团聚物,如图 9 所示。该团聚物右侧的灰色区域是熔融铝滴在燃烧过程中形成的氧化帽结构。在之前的研究中发现,铝颗粒在燃烧时,由于背离燃烧火焰的区域温度较低,形成的熔融氧化铝与液态铝互不相容^[4],会出现图 10 中的氧化帽结构,而包裹着铝滴和氧化帽的最外层向上伸展的部分是铝蒸气燃烧产生的扩散火焰。对该团聚物进行元素分布分析,团聚物中 Al、O 的元素分布如图 11 所示,左侧白色区域以 Al 元素为主,右侧灰色区域以 O 元素为主。可以看出氧化帽结构中的氧化程度较高,而左侧的白色区域则是在高温火焰的加热下,熔融液滴表面的氧化铝受热蒸发,导致氧质量分数较低。

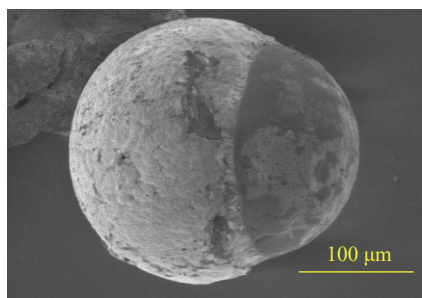
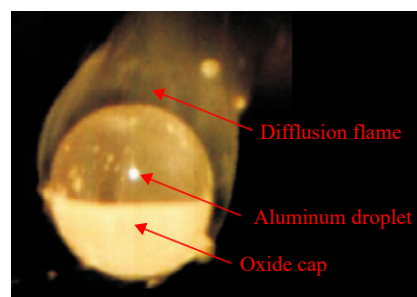
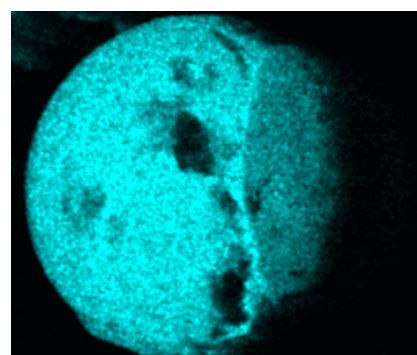
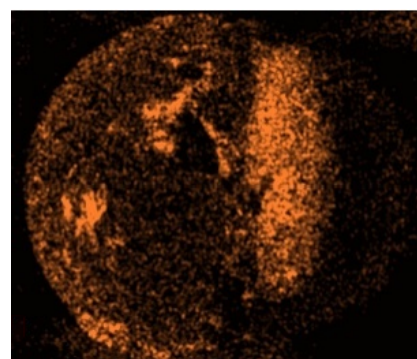


图 9 带有氧化帽结构团聚物的扫描电镜图像

Fig. 9 SEM image of an agglomerate with oxidation cap structure

图 10 带有氧化帽结构的团聚物液滴放大照片^[26]Fig. 10 Magnified view of a single agglomerate drop with oxidation cap structure^[26]

(a) Al 元素分布



(b) O 元素分布

图 11 带有氧化帽结构团聚物的元素分布图像

Fig. 11 Element distribution image of agglomerate oxidation cap structure

4) 相连的团聚物,如图 12 所示。左边团聚物的直径约为 78 μm ,而右边团聚物的直径约为 75 μm 。该团聚物的形成可能是在它们还未完成融合在一起时,燃烧火焰的温度降低,导致它们之间的氧化铝外壳不能受热融化,因此团聚过程中断,在冷却后形成了此类团聚物。

5) 氧化铝颗粒,如图 13 所示。氧化铝颗粒燃烧产物中的分布高度分散,表面光滑,通常成群出现,呈现比较完整的圆球状,粒径不超过 1 μm 。在铝颗粒的团聚过程中,微米级铝颗粒在扩散火焰的加热下首先气化蒸发为气相铝蒸气,

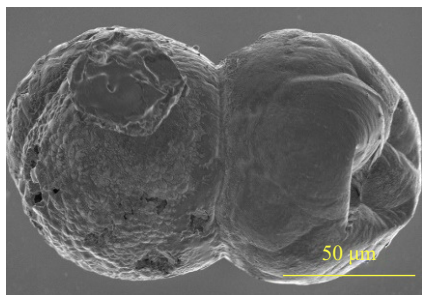


图 12 相连团聚物的扫描电镜图像

Fig. 12 SEM image of two agglomerates connected

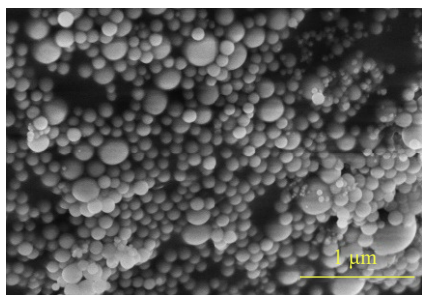


图 13 氧化铝颗粒的扫描电镜图像

Fig. 13 SEM image of alumina particle

随后会与环境中的氧化剂发生反应。部分铝蒸气的氧化产物在铝液滴的表面凝结后形成氧化帽结构,另一部分铝蒸气则在环境中直接凝结形成亚微米甚至纳米级的氧化铝颗粒^[27-29]。

3 结 论

1) NEPE 推进剂的燃烧过程主要分为起始点火、火焰扩散、稳定燃烧、火焰衰减、火焰熄灭 5 个阶段。铝团聚物的飞溅现象存在于 NEPE 推进剂的整个燃烧过程中。

2) 在环境压强为 0.5~2.0 MPa 下, NEPE 推进剂随环境压强的增加,高温燃烧区域增大,燃面处团聚物的数量增多,但是团聚物的粒径逐渐减小。

3) NEPE 推进剂的凝相燃烧产物主要分为铝团聚物和氧化颗粒两类,在此次研究中铝团聚物粒径分布在 50~600 μm 之间,根据铝团聚物的形貌分成了 4 类,这与铝颗粒在推进剂燃烧表面的燃烧过程相关,而氧化铝颗粒的粒径通常不超过 1 μm。

参考文献:

- [1] 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 Peijin. Models of aluminum agglomeration in solid

propellant[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(5): 1224-1233. (in Chinese)

- [2] 吴浩明,陈林泉,董新刚,等. Al和AP粒径对CL-20推进剂燃面团聚及凝相产物特性的影响[J]. 火炸药学报, 2021, 44(3): 367-371.
- WU Haoming, CHEN Linquan, DONG Xingang, et al. Effects of particles size of AL and AP agglomeration and properties of condensed combustion products of CL-20 propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2021, 44(3): 367-371. (in Chinese)
- [3] 王宁飞. 固体推进剂燃烧不稳定性研究[J]. 火炸药学报, 1995, 18(1): 47-50.
- WANG Ningfei. Study on combustion instability of solid propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1995, 18(1): 47-50. (in Chinese)
- [4] YUAN Jifei, LIU Jianzhong, ZHOU Yunan, et al. Aluminum agglomeration of AP/HTPB composite propellant[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 156(5): 14-22.
- [5] LIU Taikang. Experimental and model study of agglomeration of burning aluminized propellants[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 21(5): 797-806.
- [6] 李昌植. 喷管喉部沉积现象原因分析及解决途径[J]. 宇航材料工艺, 1992, 22(2): 47-52.
- LI Changzhi. Analyzation and solving methods of nozzle throat sedimentation phenomenon[J]. *Aerospace Materials and Technology*, 1992, 22(2): 47-52. (in Chinese)
- [7] 贾林祥. 含铝推进剂火箭发动机喷管沉积的实验与传热分析[J]. 推进技术, 1985, 6(1): 1-10.
- JIA Linxiang. Experimental and industrial thermics of nozzle sedimentation in aluminized propellants[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1985, 6(1): 1-10. (in Chinese)
- [8] 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 Liqun, FAN Xuezhong, WANG Han, et al. Research process on the agglomeration phenomenon of aluminum power in the combustion of aluminized solid propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(1): 7-15. (in Chinese)
- [9] TAKAHASHI K, OIDE S, KUWAHARA T. Agglomeration characteristics of aluminum particles in AP/AN composite propellants [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, 38(4): 555-562.
- [10] AO Wen, LIU Xin, REZAIGUIA H, et al. Aluminum agglomeration involving the second mergence of agglomerates on the solid propellants burning surface: experiments and modeling[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 136: 219-229.
- [11] LIU Xin, AO Wen, LIU Huan, et al. Aluminum agglomeration on burning surface of NEPE propellants at 3—5 MPa[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42(3): 260-268.
- [12] SAMBAMURTHI J K, PRICE E W, SIGMAN R K. Aluminum agglomeration in solid-propellant combustion[J]. *AIAA Journal*, 1984, 22(8): 1132-1138.
- [13] SUZUKI S, CHIBA M. Combustion efficiency of aluminized propellant[R]. AIAA 1989-2309, 1989.
- [14] 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.
- [15] PRICE E W. Combustion of metalized propellants[M]. New York: Progress in Aeronautics and Astronautics, 1984.
- [16] 刘鑫,刘佩进,金秉宁,等. 复合推进剂中铝燃烧实验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(8): 1579-1585.

- LIU Xin, LIU Peijin, JING Bingning, et al. An experimental investigation of aluminum combustion in composite propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(8): 1579-1585. (in Chinese)
- [17] 刘鑫, 刘佩进, 关昱, 等. 复合推进剂中铝的燃烧实验研究方法[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(6): 833-836.
LIU Xin, LIU Peijin, GUAN Yu, et al. Experiment research method of the aluminum in the composite propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2015, 38(6): 833-836. (in Chinese)
- [18] 敖文, 刘佩进, 吕翔, 等. 固体推进剂燃烧过程铝团聚研究进展[J]. 宇航学报, 2016, 37(4): 371-380.
AO Wen, LIU Peijin, LÜ Xiang, et al. Review of aluminum agglomeration during the combustion of solid propellant[J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(4): 371-380. (in Chinese)
- [19] 肖立群, 李吉祯, 裴庆, 等. 含铝HMX-CMDB推进剂燃烧残渣特征分析[J]. 火炸药学报, 2021, 44(3): 361-366.
XIAO Liqun, LI Jizhen, PEI Qing, et al. Combustion residues analysis of aluminized HMX-CMDB propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(3): 361-366. (in Chinese)
- [20] YAN Xiaoting, XIA Zhixun, HUANG Liya, et al. Combustion of nitrate ester plasticized polyether propellants[J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2020, 21(10): 834-847.
- [21] 涂乘崑, 凌志刚, 董龙龙, 等. NEPE推进剂燃烧表面铝团聚物动态行为研究[J]. 推进技术, 2023, 44(3): 248-256.
TU Chengyin, LING Zhigang, DONG Longlong, et al. Dynamic behavior study of aluminum aggregates on the NEPE propellant combustion surface[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(3): 248-256. (in Chinese)
- [22] 涂乘崑, 陈雄, 周长省, 等. NEPE推进剂在氮气/空气中的点火燃烧特性[J]. 含能材料, 2022, 30(8): 811-818.
TU Chengyin, CHEN Xiong, ZHOU Changsheng, et al. Ignition and combustion characteristics of NEPE propellant in nitrogen/air [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2022, 30(8): 811-818. (in Chinese)
- [23] TU Chengyin, CHEN Xiong, LI Yingkun, et al. Experimental study of Al agglomeration on solid propellant burning surface and condensed combustion products[J/OL]. [2022-07-20]. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.05.016>.
- [24] LI Lianbo, CHEN Xiong, ZHOU Changsheng S, et al. Experimental and model investigation on agglomeration of aluminized fuel-rich propellant in solid fuel ramjet[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 219: 437-448.
- [25] LEVITAS V I, PANTOYA M L, DIKICI B. Melt dispersion versus diffusive oxidation mechanism for aluminum nanoparticles: critical experiments and controlling parameters[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(1): 011921.1-011921.3.
- [26] DELUCA L T, GALFETTI L, MAGGI F, et al. Burning of metalized composite solid rocket propellants: towards nanometric fuel size[C]// ESA Space Propulsion 2008: 2nd International Symposium on Propulsion for Space Transportation. 2008.
- [27] WANG Junlong, WANG Ningfei, ZOU Xiangrui, et al. Modeling of micro aluminum particle combustion in multiple oxidizers[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 189: 119-128.
- [28] WANG Junlong, WANG Ningfei, ZOU Xiangrui, et al. Experimental and numerical study on slag deposition in solid rocket motor[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 122(5): 107404.1-107404-12.
- [29] BECKSTEAD M. A summary of aluminum combustion[R]. Provo, US: Brigham Young University, 2004.

(编辑: 陈越)