NEPE 推进剂燃烧表面铝团聚物动态行为研究*

涂乘鉴¹,凌志刚²,董龙龙²,庄宇倩¹,李映坤¹,周长省¹, 蔡文祥¹.陈 雄¹

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏南京 210094;

2. 内蒙合成化工研究所,内蒙古 呼和浩特 010000)

摘 要:针对NEPE推进剂燃烧表面铝团聚物的动态行为,在1,2,3MPa的N₂环境中,对NEPE推 进剂中铝团聚物在燃烧表面和脱离燃面后的动态燃烧过程进行了研究,提出了燃面与铝颗粒联合运动的 简化理论模型。结果表明,铝颗粒的团聚分为堆积、聚集和团聚三个过程,铝团聚物在燃烧表面以及脱 离燃面后均可能发生二次团聚,铝团聚物的二次团聚过程通常会形成大尺寸的铝团聚物。通过燃面与铝 颗粒协同运动的简化理论模型,认为铝团聚的团聚时间受到压强、铝颗粒的体积分数和半径的影响。同 尺寸铝团聚物的团聚时间随着压强的增大而较小,且在高压环境中的影响程度降低,与理论模型一致。 同时压强会影响铝团聚物脱离燃面后的随流运动速率越慢。

关键词: NEPE 推进剂; 铝颗粒; 团聚; 高速摄像; 燃烧理论

中图分类号: TJ55; V512 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 03-22010012-09 **DOI**: 10.13675/j.enki. tjjs. 22010012

Dynamic Behavior Study of Aluminum Aggregates on NEPE Propellant Combustion Surface

TU Cheng-yin¹, LING Zhi-gang², DONG Long-long², ZHUANG Yu-qian¹, LI Ying-kun¹, ZHOU Chang-sheng¹, CAI Wen-xiang¹, CHEN Xiong¹

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
 The Synthetic Chemical and Engineering Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010000, China)

Abstract: Aiming at the dynamic behavior of aluminum agglomerates on the burning surface of NEPE propellant, the dynamic combustion process of aluminum agglomerates at the surface and out of the burning surface of aluminum in the NEPE propellant was studied under 1, 2, 3MPa nitrogen environment, and a simplified theoretical model for the burning surface-particle motion was proposed. The results show that the agglomeration of aluminum particles can be divided into three processes: accumulation, aggregation and agglomeration. The second-ary agglomeration of aluminum particles may occur on the propellant surface and out of the burning surface, which usually leads to the formation of large-size agglomerate. Based on the simplified theoretical model, it is believed that the agglomeration time of aluminum agglomeration is affected by the pressure, the volume fraction, and radius of the aluminum particles. The same size aluminum agglomeration time decreases with the increase of pressure, and the degree of influence in the high-pressure environment decreases, which is consistent with the

^{*} 收稿日期: 2022-01-09;修订日期: 2022-03-30。

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:涂乘崟,博士生,研究领域为固体推进剂燃烧特性。

通讯作者: 陈 雄, 博士, 教授, 研究领域为计算流体力学及新型推进技术。E-mail: chenxiong@njust.edu.cn

引用格式: 涂乘崟, 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):
 22010012. (TU Cheng-yin, LING Zhi-gang, DONG Long-long, et al. Dynamic Behavior Study of Aluminum Aggregates on NEPE Propellant Combustion Surface[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(3):22010012.)

simplified theoretical model. At the same time, the pressure will affect the flow velocity of the aluminum agglomerates after they leave the combustion surface. Under the same pressure condition, the initial agglomerates with a smaller diameter move faster with the flow, and the initial agglomerates with a larger diameter move more slowly with the flow.

Key words: NEPE propellant; Aluminum particles; Agglomeration; High-speed photography; Combustion theory

1 引 言

铝颗粒在燃烧过程中具有很高的火焰温度,作 为能量添加剂通常被加入到固体推进剂中,燃烧时 释放出大量热量传递给流动的燃气,提高了发动机 的比冲,同时铝颗粒燃烧产物可以抑制发动机的不 稳定燃烧^[1]。然而在固体火箭发动机中,推进剂燃烧 表面的铝颗粒通常会发生团聚现象[2],随着燃面推移 铝颗粒逐渐暴露在燃烧表面,邻近的铝颗粒聚集在 一起,形成大尺寸的团聚物,最后随气流运动离开燃 面进入高温燃烧室,而未参与团聚的铝则直接脱离 燃面进入燃烧室[3],如图1所示。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[4],降低推进剂的燃烧效率,同时铝团聚物经过燃 烧室后会形成大尺寸颗粒燃烧产物,造成发动机两 相损失、喷管侵蚀、绝热层烧蚀等影响[5-6],因此研究 固体推进剂铝颗粒团聚过程和团聚模型具有重要 意义。





围绕固体推进剂铝颗粒团聚过程的实验研究, 国内外学者主要采用淬火收集法^[7-13]、光学观察 法^[7,10,13-18]和数字全息技术^[19]等。李连波等^[20]建立了 铝团聚物的尺寸预测数学模型,收集铝镁贫氧推进 剂的燃烧产物,通过将实验结果与数学模型进行对 比验证了尺寸预测数学模型的可靠性。Yuan等^[21]对 Al/AP/HTPB推进剂燃烧产物的形貌和尺寸分布进行 了研究,认为环境压强会影响铝团聚物的尺寸、数量 和团聚过程。Liu 等^[22]研究了淬火距离、环境压强和 铝初始粒径对冷凝燃烧产物物化性质的影响,结果 表明铝颗粒初始粒径对冷凝燃烧产物的影响是最大 的。Liu等^[23]通过显微摄影技术在 3~5MPa下对不同 铝初始粒径的 NEPE 推进剂进行实验,结果表明,高 压条件下燃烧表面的铝团聚过程与低压环境中相 似,然而并未得到铝初始粒径对最终团聚物粒径的 影响趋势。刘鑫等^[1]采用显微摄影技术研究了 Al/ AP/RDX/GAP 推进剂在 5MPa下的铝团聚过程,在燃 烧表面发现了团聚物的二次团聚现象,但由于推进 剂在燃烧时产生大量的烟雾,导致最终拍摄的图像 不够清晰。Yuan 等^[24]研究了 AP/HTPB 复合推进剂 在常压下燃烧表面及其附近铝颗粒的团聚和动态燃 烧过程,并捕捉到了燃烧表面处熔融团聚体破裂以 及喷射液态氧化铝的现象。Tu 等^[25-28]研究了 NEPE 高能固体推进剂在氮气和空气中的燃烧特性,在 NEPE 推进剂的燃烧表面发现了铝颗粒的团聚现象, 并对铝颗粒的团聚过程、团聚机理进行了研究。

针对铝颗粒的团聚模型研究,主要包括经验模 型、口袋模型、物理模型和堆积模型,应用较为广泛 的是口袋模型和堆积模型。Crump等^[29]最早提出了 "口袋"模型的概念, Cohen^[30]和 Grigoriev 等^[31]进行了 更深入、量化的研究,并完善了"口袋"模型,该模型 虽然考虑了推进剂的微观结构组成且与实验数据吻 合较好,但并未考虑相邻"口袋"之间相互作用的影 响。Jackeson等^[32]和Buckmaster等^[33]通过堆叠算法 建立了铝颗粒的团聚模型,认为当相邻铝颗粒的距 离小于临界距离就会发生团聚,但该模型严重依赖 于临界距离参数的选取,选取合适时可以与实验数 据吻合较好,但是对临界参数的选取并没有一个统 一的准则,而临界参数的选取极大依赖于实验数据 的结果。研究人员对口袋模型和堆积模型进行改进 和完善[2,34-39],但都无法精确计算铝团聚物的粒度 分布。

本研究通过采用长焦显微镜头和高速相机组合的拍摄方法,在1~3MPa的氮气环境中,对NEPE推进剂在燃烧表面铝颗粒团聚过程和动态行为进行了研

究。并且提出了燃面铝颗粒协同运动的简化理论模型,考虑了燃烧表面和颗粒的联合运动的可能状态 以及影响这些状态的物理参数,为实验观察到的现 象提供了物理解释。

2 实 验

2.1 NEPE推进剂实验试样

本论文实验研究所使用的 NEPE 推进剂由氧化 剂(高氯酸铵, AP, 20%~30%, 100~200µm)、金属添加 剂(铝粉, A1, 20%~30%)、奥克托今(环四亚甲基硝 铵, HMX, 18%~20%),粘合剂(聚乙二醇, CAB, 6%~ 8%)、增塑剂(1, 2, 4-丁三醇三硝酸酯, BTTN, 17%~ 21%)以及少量其他添加剂等组成,激光点火燃烧实 验前将推进剂加工成 5mm×5mm×10mm 的长方体试 样,为了防止试件发生侧面燃烧影响实验现象的观 察, 在试样外表面涂有耐高温的绝热硅橡胶。

2.2 激光点火实验系统

激光点火实验系统主要由控制系统、CO,激光 器、光学系统、燃烧室和数据采集系统组成,如图2所 示。控制系统由计算机软件和控制卡组成,用于调 节CO,激光器的激光加载时间和热流密度。CO,激光 器功率 300W, 波长为 10.6 μ m, 激光光斑 直径 Φ = 3.5mm。光路系统由燃烧室顶部的平面镜和聚焦镜 组成,其作用是将由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150mm×150mm×300mm,其四周分别设 有 50mm×100mm 的观察窗,顶部设有直径为 20mm 的 激光入射窗。燃烧室内的压强通过压强传感器监 测。数据采集系统由高速摄影仪、光电二极管、放大 电路和数据采集卡组成。实验中所用高速相机为 Chronos 1.4, 最高分辨率为 1280×1024, 拍摄速率为 1000fps/s,在实验中的光圈采用最小光圈,以保证推 进剂燃烧时不会过度曝光,最小曝光时间2s,长焦显 微镜头可以观测到 NEPE 推进剂燃烧表面铝颗粒的 团聚现象,高速相机与长焦显微镜头之间通过转接 口相互连接,用于记录推进剂表面的燃烧过程,通过 光电二极管和放大电路获取激光信号和推进剂初始 火焰信号。

2.3 实验过程

实验在常温(25℃)条件下进行,燃烧室压强分 别为1,2和3MPa,为减小实验误差,保证实验数据的 准确性,每个工况下进行5次重复实验。实验时,试 件由燃烧室底部中心孔旋入完成装药,调整光学系



Fig. 2 Schematic of the experimental system

统,使激光器发射出的光束可以完全覆盖试件端面。 通过流量阀控制高压气瓶中的氮气导入燃烧室,使 用压力传感器监测燃烧室的环境压强,使其达到设 定值。

2.4 实验图像处理方法

实验中图像处理采用静态标定的方法,具体操 作为:在相机焦距固定时,在焦点处放置一个标定 尺。图像尺寸标定就是为了得到图像中单个像素所 代表的实际尺寸。在高速显微摄影仪当前的分辨率 下,通过图像读取刻度尺上刻度线的数量,即可知道 在当前视野内,每个物体所具有的尺寸。由于高速 显微摄影设置的分辨率即为拍摄得到图像所拥有的 像素数,因此就通过计算图像中每个像素点的尺寸 来计算图像当中的实际尺寸。对图像进行处理后得 到铝团聚物的像素格点数,乘以相对应的尺寸,就可 以得到粒子的真实直径。

3 结果与讨论

3.1 铝团聚物的形成过程

本文通过高速相机拍摄到了 NEPE 推进剂燃面 处单个铝团聚物的形成过程,如图 3 所示。由图 3(a) 可见,随着燃面退移,推进剂内部的的铝颗粒逐渐暴 露在燃面并堆积在一起;随后铝团聚物逐渐融合在 一起形成图 3(b)中较小的聚集物,此时该聚集物在 燃气的作用下脱离燃面,然而聚集物并未完全和燃 面分离,它通过细丝与燃面相连。细丝(Filigrees)是 由 Price 提出来的^[40],是指在推进剂燃面处铝团聚过 程中由相邻的铝颗粒烧结在一起形成的。此时该聚 集物受到燃气作用下垂直向上的升力,竖直向下的 重力以及沿着细丝方向的拉力;最后该聚集物重新 回到燃面处,并不断"吞噬"燃面新生成的铝颗粒;当 *t=t*₁+11ms时,形成了直径为382µm的团聚物,该团聚 物在燃面向右翻滚并不断"生长";当*t=t*₁+20ms时,团 聚物的直径增大为441µm,此时在燃面的移动距离 约为514μm;当*t=t*₁+22ms时该团聚物在燃气的作用 下脱离燃面,最终团聚物的直径达到了500μm。



propellant burning surface

3.2 二次团聚过程

铝团聚物通常在燃面或脱离燃面后发生二次团 聚,该过程通常会形成大尺寸的团聚物。本文采用 高速相机记录了NEPE推进剂的点火和燃烧过程,捕 捉到了铝团聚物脱离燃面后的二次团聚现象,如图4 所示。在图4(a)中,当*t=t*2时,在推进剂燃面处形成 尺寸为323μm和268μm的两个较小团聚物,随后在 燃气的作用下从燃面脱离;在图4(b)中,当*t=t*2+1ms 时,这两个团聚物在距离燃面270μm处相遇并发生 碰撞;由于团聚物是由液态铝在表面张力的作用下 形成的液滴,外形并不稳定,当团聚物相撞后,内部 的液滴在扩散火焰的加热下融合在一起,并迅速形 成尺寸更大的新团聚物,如图4(c)所示;最后当*t=t*2+ 3ms时,新团聚物的尺寸达到了400μm。

图 5 是发生在 NEPE 推进剂燃烧表面的铝团聚物 二次团聚形成过程。在图 5(a)中,当 t=t₃时,可以在 推进剂燃面处观察到分散的铝团聚物;在图 5(b)中, 当 t=t₃+3ms时,相邻的两个铝团聚物沿燃面水平方向 相向运动并逐渐靠近;在图 5(c)中,当 t=t₃+4ms时,这 两个团聚物碰撞后融合在一起形成了 500μm 左右的 铝团聚物,新生成的铝团聚物在燃面处向左滚动,并 继续"吞噬"燃面处新暴露出来的铝颗粒;在图 5(e) 中,当 t=t₃+9ms 时,铝团聚物的尺寸已经增大为 600μm,此时该团聚物在推进剂燃面的移动距离约为 950μm;在图 5(f)中,当 t=t₃+12ms 时,该团聚物从燃 面处脱离。可见铝团聚物在燃面处的形成过程中并 不是静止不动的,通常会在燃烧表面二维移动,与相 邻的铝团聚物发生碰撞融合,从而形成更大尺寸的 团聚物。



(c) $t_{2}+2ms$

(d) t_2 +3ms

Fig. 4 The secondary agglomeration process of agglomerates leaving the burning surface





(a) t_{3}

(b) t_3 +3ms



(c) t_2 +4ms

600µm





(e) t₃+9ms
(f) t₃+12ms
Fig. 5 The second agglomeration process of aluminum agglomerates on the burning surface

)

3.3 协同运动理论模型

在协同运动理论模型中,随着激光辐射加热,燃烧表面内部产生厚度为λ的冷凝层,燃烧表面的温度 为*T*_{ss},冷凝层以下的温度为*T*_o,在该模型中未考虑 AP在推进剂内部的分布,假设内部的铝颗粒均匀分 布,且在燃烧过程中保持不动,如图6(a)所示,推进 剂内部铝颗粒的体积分数为φ,铝颗粒的半径为*R*,因 此推进剂单位面积的燃烧表面铝颗粒数可以表示为

$$n_0 = 3\phi/(2\pi R^2) \tag{1}$$

$$n_v = 3\phi/(4\pi R^3) \tag{2}$$

推进剂燃烧速率为*i*,在燃烧表面退移的过程中, 推进剂内部的铝颗粒逐渐暴露在燃烧表面,当铝颗 粒未填满燃烧表面时,铝颗粒只堆积在燃烧表面而 不发生团聚,而当*t=t*。时(*t*。为初始铝颗粒填满燃烧表 面的时间),燃烧表面的铝颗粒数量达到最大值,如 图 6(b)所示,此时单位面积燃烧表面铝颗粒数为 *n*_{max},可以表示为

$$n_{\rm max} = 1/\left(2\sqrt{3}R^2\right) \tag{3}$$

此时燃面退移的距离为L_{max},由于燃烧表面铝颗 粒的数量达到最大值,可以得到以下关系式

$$n_{\max} = n_0 + n_V \cdot L_{\max} \tag{4}$$

$$1/(2\sqrt{3} R^{2}) = 3\phi/(2\pi R^{2}) + 3\phi L_{max}/(4\pi R^{2}) \quad (5)$$

假设推进剂燃速恒定,且燃烧室压强在推进剂 燃烧过程中变化较小,可以忽略不计,根据公式(1)~ (5)可以得到

$$L_{\max} = \frac{2R\left(\sqrt{3}\pi - 9\phi\right)}{9\phi} \tag{6}$$

$$t_{\rm e} = \frac{L_{\rm max}}{\dot{r}} = \frac{2R\left(\sqrt{3}\ \pi - 9\phi\right)}{9\phi \cdot \dot{r}} \tag{7}$$



通过拍摄的连续图像通过计算得到 NEPE 推进 剂在不同环境压强中的燃速,由公式(1)~(7)计算出 NEPE 推进剂在燃烧过程中的参数如表1所示。根据 表1可知,随着环境压强的增大,导致推进剂的燃速 增高,因此t。偏短。

 Table 1
 General parameters of a planar burning surface moving together with the Al particle

Parameter	1MPa	2MPa	3MPa
$\dot{r}/(\text{mm/s})$	4.454	6.075	7.117
$R/\mu m$	5	5	5
$n_0/{ m m}^{-3}$	2.64×10 ⁹	2.64×10 ⁹	2.64×10 ⁹
$n_V/{ m m}^{-3}$	2.64×10 ¹⁴	2.64×10^{14}	2.64×10^{14}
$n_{\rm max}/{\rm m}^{-2}$	1.15×10^{10}	1.15×10^{10}	1.15×10^{10}
$L_{\rm max}/\mu{ m m}$	33.81	33.81	33.81
ϕ	0.138	0.138	0.138
$t_{\rm c}/{ m s}$	7.59×10 ⁻³	7.59×10 ⁻³	7.59×10^{-3}

而铝团聚物脱离燃面的时间 t_i 与冷凝层的厚度 λ 有关^[12,41]。当 $\lambda < 2R$,即冷凝层的厚度小于铝颗粒的 直径时,在此极端情况下,冷凝层不能包裹完整的铝 颗粒,铝颗粒在推进剂燃烧的初始阶段就会脱离燃 面,极少发生团聚现象,此时铝团聚物脱离燃面的时 间 $t_{s}<t_{s}$;当 $\lambda>2R$,即冷凝层的厚度大于铝颗粒的直径 时,铝颗粒在随着燃面退移的过程中会堆积、碰撞形 成较大的团聚物,如图6(c)所示。由于冷凝层内存 在温度梯度,推进剂燃烧表面的温度最高,而冷凝层 中的温度逐渐降低,温度的升高会缩短铝颗粒的团 聚时间[42],因此铝颗粒在燃面处的团聚过程最强烈, 在燃烧表面上会形成尺寸最大的团聚物,而冷凝层 内部的铝团聚物尺寸逐渐减小,如图6(d)所示。当 t=t_r时,凝缩层中铝颗粒的含量达到最大,此时燃烧表 面铝团聚物的尺寸也达到最大值,随后燃烧表面的 铝团聚物在流动气体的作用下脱离燃面,如图6(e) 所示。

当λ>2R时,为了计算团聚物当燃烧表面单位面 积铝颗粒的数量达到最大时的脱离时间t_f,假设铝颗 粒在凝缩层中是最接近于球的完全填充,此时燃面 退移的距离为

$$L_{\rm f} = \dot{r} \cdot t_{\rm f} \tag{8}$$

球的紧密填充系数为 k_p ,根据晶体学原理, $k_p \approx 0.7405$,以及式(1)~(6),可以得到

$$k_{\rm p} \cdot \lambda \approx 0.7405 \cdot \lambda \approx \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot n_0 + \phi \cdot L_{\rm f} \approx \qquad (9)$$
$$2\phi \cdot R + \phi \cdot L_{\rm f}$$

冷凝层的厚度λ和推进剂的燃速*i*随压强的变化 关系如下所示

$$\lambda = k \cdot p^{-m} \tag{10}$$

$$\dot{r} = a \cdot p^n \tag{11}$$

对于给定的环境压强,*a*,*k*,*m*和*n*是常数,根据 式(9)~(11),可以计算出团聚物的最大脱离时间*t*_t为

$$t_{\rm f} = \frac{L_{\rm f}}{\dot{r}} = \frac{0.7405 \frac{\lambda}{\phi} - 2R}{\dot{r}} = \frac{0.7405 \frac{kp^{-m}}{\phi} - 2R}{ap^n} (12)$$

对于一般的固体推进剂, λ =10~100μm, φ =0.01~ 0.2, *R*=1~20μm。由于式(12)中的参数*a*,*k*,*m*和*n*是 正数,因此团聚物的最大脱离时间*t*_t对参数*p*,*φ*,*R*的 偏导数($\partial t_t/\partial p$)_{*φ*,*R*},($\partial t_t/\partial \phi$)_{*p*,*R*}和($\partial t_t/\partial R$)_{*φ*,*p*}均是负数, 可以看出铝团聚物的最大团聚时间*t*_t与压强、铝颗粒 的体积分数以及直径是负相关。NEPE 推进剂燃烧 过程中燃面与铝颗粒协同运动的简化理论模型可以 为其他推进剂(如 HTPB 推进剂)中铝粉的团聚过程 提供借鉴。

3.4 燃面处铝团聚物的动态行为

根据连续拍摄图像测得不同尺寸铝团聚物在 1MPa,2MPa和3MPa下的脱离时间如表2所示。根据 表2可知,铝团聚物的尺寸越小,在燃面处的脱离时 间越短,且随着压强的增大,同尺寸铝团聚物的脱离 时间逐渐缩短,与式(12)的研究结果相符合,验证了 理论模型的准确性。当压强从1MPa增大到2MPa 时,600µm 铝团聚物的脱离时间从28ms 缩短到 10ms,而从2MPa增大到3MPa时,600µm 铝团聚物的 脱离时间从10ms 缩短到6ms,铝团聚物的脱离时间 缩短幅度大幅降低。这是因为固体推进剂凝缩层的 厚度λ会随着压强的增大而减小,在压强的升高过程 中,λ减小并逐渐到接近2*R*,甚至会低于2*R*,此时铝 团聚物的脱离时间大幅缩短。

铝团聚物在燃面处形成后会随着燃气运动进入 燃烧室,不同直径的初始团聚物随燃气的运动速率 也不相同。假设运动速率为1m/s的燃气作用在单位

Table 2 Separation time of different size aluminum

	agglom	erates	(ms)
Diameter/µm	1MPa	2MPa	3MPa
300	6	5	-
400	10	7	3
500	20	8	5
600	28	10	6
700	35	-	-

面积铝团聚物上的作用力为*T*,则直径为2*R*的铝团 聚物受到运动速率为*v*(m/s)的燃气作用力为

$$F = T \cdot v \cdot \pi R^2 \tag{13}$$

铝团聚物脱离燃面后的加速度为

$$a = \frac{3T \cdot v}{4\rho_{\rm Al-1}} \cdot R - g \tag{14}$$

式中 ρ_{Al-1} 是液态铝的密度,单位为kg/m³,g是重力加速度,为9.8m/s²。

当铝团聚脱离燃面 ts 后,运动速率 v_{Al}可以表示为

$$v_{\rm AI} = at = \left(\frac{3T \cdot v}{4\rho_{\rm AI-1} \cdot R} - g\right)t \tag{15}$$

因此铝团聚脱离燃面相同时间后的运动速率v_{AI} 与燃气的运动速率v和铝团聚物直径2R的关系为

$$v_{\rm AI} \sim \frac{v}{2R} \tag{16}$$

通常增加压强会增大推进剂的燃速,使得单位 时间内燃气质量生成率增大,从而导致燃面的燃气 运动速率v增大,因此铝团聚物受到的燃气作用力F 与压强p成正比,在同一压强条件下,即v为确定值 时,铝团聚脱离燃面后的运动速率v_{AI}的预测数学模 型可以表示为

$$v_{\rm Al} = \frac{b}{2R} + c \tag{17}$$

式中b,c为拟合参数,b主要受铝颗粒初始粒径的影响,c主要受环境压强的影响。通过拍摄的连续图像,对1,2和3MPa下不同尺寸铝团聚物脱离燃面后运动速率的统计结果如图7所示。在据统计的实验结果中,80µm的初始团聚物在3MPa环境压强随流运动速率最快达到了3.762m/s,500µm的初始团聚物在1MPa环境压强随流运动速率最慢为0.409m/s。使用式(17)对实验结果进行拟合,拟合结果如表3所示。

由图 7可知,在同一压强条件下,粒径大的铝团 聚物随燃气运动速率慢,粒径小的铝团聚物随燃气 运动速率快。当压强从 1MPa增大为 3MPa,100μm团 聚物 随流运动速率由 2.462m/s 增大到 3.762m/s, 500μm 团聚物 随流运动速率由 0.409m/s 增大到 0.804m/s,初始铝团聚物随流速度速率受压强的影响 比较显著。由表 3 可知,通过统计得到初始团聚物脱 离燃面的运动速率与式(18) 拟合较好,在同一环境 压强条件下,初始团聚物脱离燃面的运动速率与团 聚物的尺度成反比。通常,增大环境压强会提高推 进剂的燃速,单位时间内暴露在推进剂燃面处的铝 颗粒数量增多,使得铝颗粒更容易与相邻铝颗粒相



Fig. 7 Velocity of initial agglomerates leaving burning surface



Pressure/MPa	Fitting parameter	Correlation coefficient
1	b=256, c=-0.05	0.96758
2	b=315, c=-0.01	0.98358
3	<i>b</i> =409, <i>c</i> =-0.06	0.98183

互作用形成大尺寸的铝团聚物,而且推进剂在高压 环境中燃烧时火焰更加猛烈,铝颗粒燃烧更加剧烈, 缩短了铝颗粒的团聚时间。然而随着燃速的加快, 铝颗粒在燃面处的停留时间缩短,燃面处的铝颗粒 更容易脱离燃面,使得最终铝团聚物的尺寸减小,因 此燃速对铝团聚物的影响非常复杂,具体影响还需 要进一步深入研究。

4 结 论

本文通过研究,得到如下结论:

(1)燃面处铝颗粒形成单个球形团聚物的过程 可以分为三个阶段:堆积、聚集和团聚。

(2) 铝团聚物在推进剂燃面以及脱离燃面后通 常发生二次团聚现象,该过程通常会导致较大团聚 物的形成。

(3)提出了燃面与铝颗粒协同运动的简化理论 模型,认为铝团聚物的最大团聚时间*t*_r与环境压强、 铝颗粒的体积分数、铝颗粒的直径呈负相关。

(4)在1~3MPa的压强环境中,初始铅团聚物的 尺寸越大团聚时间越长,而同尺寸铅团聚物的团聚 时间随压强的增大而缩短,验证了协同运动简化理 论模型的可靠性。

(5)在同一压强环境中,直径越小的初始团聚物 随流运动速率越快,直径越大的初始团聚物随流运 动速率越慢,同时同尺寸初始铝团聚物的随流运动 速率随环境压强的增大而增大,验证了运动速率的 数学模型。

致 谢:感谢国家自然科学基金和中央高校基本科研业 务费专项资金的资助。

参考文献

- [1] 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 Pei-jin, JIN Bing-ning, et al. An Experimental Investigation of Aluminum Combustion in Composite Propellant[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016,37(8):1579-1585.)
- [2] Babuk V A, Vasilyev V A, Malakhov M S. Condensed Combustion Products at the Burning Surface of Aluminized Solid Propellant [J]. Journal of Propulsion and Power, 1999, 15(6): 783-793.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Ao W, Liu X, Rezaiguia H, et al. Aluminum Agglomeration Involving the Second Emergence of Agglomerates on the Solid Propellants Burning Surface: Experiments and Modeling[J]. Acta Astronautica, 2017, 136: 219-229.
- [6] Shimada T, Sekiguchi M, Sekino N. Flow Inside a Solid

Rocket Motor with Relation to Nozzle Inlet Ablation [J]. AIAA Journal, 2007, 45(6): 1324-1332.

- [7] 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.
- [8] Glotov O G. Condensed Combustion Products of Aluminized Propellants. II: Evolution of Particles with Distance from the Burning Surface [J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 2000, 36(4): 476-487.
- [9] Glotov O G. Condensed Combustion Products of Aluminized Propellants. III: Effect of an Inert Gaseous Combustion Environment [J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 2002, 38: 92-100.
- [10] 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.
- [11] Liu T K, Hsieh C F. Analysis of Agglomerate Size from Burning Aluminized AP/RDX/HTPB Propellants in Quench Bomb [J]. Journal of Propulsion and Power, 1996, 12(5): 995-998.
- [12] Liu T K. Experimental and Model Study of Agglomeration of Burning Aluminized Propellants [J]. Journal of Propulsion and Power, 2005, 21(5): 797-806.
- [13] Zhang B, Xu J, Feng Y, et al. Experimental Investigation on Combustion Characteristics and Agglomeration of Al/NEPE Propellants [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2021, 46: 1-17.
- [14] Liu L, Ao W, Wen Z, et al. Combustion Promotion and Agglomeration Reduction of the Composite Propellant Using Graphene [J]. Aerospace Science and Technology, 2021(6): 106988.
- [15] John C Melcher, Herman K, Rodney L B, et al. Burning Aluminum Particles Inside a Laboratory-Scale Solid Rocket Motor [J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(3): 631-640.
- [16] 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.
- [17] 相恒升,陈 雄,周长省,等.环境氧含量和压力对 铝镁贫氧推进剂燃烧性能的影响[J]. 含能材料, 2017, 25(3): 191-197.
- [18] 赖华锦,陈 雄,周长省,等.负压环境下铝镁贫氧 推进剂激光点火及燃烧特性[J]. 含能材料, 2017, 25 (10): 817-821.
- [19] 金秉宁, 王志新, 刘佩进, 等. 同轴数字全息用于铝

燃烧颗粒的测量研究[J]. 推进技术, 2019, 40(6): 1399-1408. (JIN Bing-ning, WANG Zhi-xin, LIU Peijin, et al. Measurement of Particle Size of Aluminum Combustion in Solid Propellant Using Digital In-line Holography [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(6): 1399-1408.)

- [20] 李连波,陈 雄,周长省,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.
- [21] Yuan J, Liu J, Zhou Y. et al. Thermal Decomposition and Combustion Characteristics of Al/AP/HTPB Propellant [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021, 143: 3935-3944.
- [22] Liu H, Ao W, Liu P, et al. Experimental Investigation on the Condensed Combustion Products of Aluminized GAP-Based Propellants [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 97: 105595.
- [23] Liu X, Ao W, Liu H, et al. Aluminum Agglomeration on Burning Surface of NEPE Propellants at 3~5MPa [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2016, 42(3): 260-268.
- [24] Yuan J, Liu J, Zhou Y, et al. Aluminum Agglomeration of AP/HTPB Composite Propellant [J]. Acta Astronautica, 2019, 156: 14-22.
- [25] Tu C Y, Chen X, Li Y K, et al. Experimental Study of Al Agglomeration on Solid Propellant Burning Surface and Condensed Combustion Products [J]. Defence Technology, 2022, DOI:10.1016/j.dt.2022.05.016.
- [26] Tu C Y, Feng Y Y, Ling Z G, et al. Thermal Decomposition, Ignition Process and Combustion Behavior of Nitrate Ester Plasticized Polyether Propellant at 0.1-3.0MPa [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2022, DOI:10.1155/2022/6439787.
- [27] 涂乘崟,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.
- [28] 涂乘崟, 庄宇倩, 李映坤, 等. NEPE 推进剂燃烧过程 及铝团聚特性[J/OL]. 航空动力学报, 2023, DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.20220229.
- [29] Crump J E, Prentice J L, Kraeutle K J. Role of the Scanning Electron Microscope in the Study of Solid Propellant Combustion. II: Behavior of Metal Additives [J]. Combustion Science and Technology, 1969, 1(3): 205-223.
- [30] Cohen N S. A Pocket Model for Aluminum Agglomeration in Composite Propellants [J]. AIAA Journal, 1983, 21(5): 720-725.

[31] Grigoriev V G, Kutsenogii K P, Zarko V E. Model of

术

推 进 Aluminum Agglomeration During the Combustion of a Composite Propellant [J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 1981, 17(4): 356-363.

- [32] Knott G M, Jackson T L, Buckmaster J. The Random Packing of Heterogeneous Propellants[J]. AIAA Journal, 2001, 39(4): 678-686.
- [33] Kochevets S, Buckmaster J, Jackson T L, et al. Random Packs and Their Use in the Modeling of Heterogeneous Solid Propellant Combustion [J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(4): 883-891.
- [34] Xiao L, Pang W, Qin Z, et al. Cluster Analysis of Al Agglomeration in Solid Propellant Combustion [J]. Combustion and Flame, 2019, 203: 386-396.
- [35] Maggi F, Bandera A, DelucaL T D. Approaching Solid Propellant Heterogeneity for Agglomerate Size Prediction
 [C]. Nashville: 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2010: 25-28.
- [36] Gallier S, Safran-Herakles M Y, Aluminum Agglomeration Model Calibration with Improved Experimental Data
 [J]. Journal of Propulsion and Power, 2013, 29(5): 1252-1255.

- [37] Ao W, Liu P, Yang W. Agglomerates, Smoke Oxide Particles, and Carbon Inclusions in Condensed Combustion Products of an Aluminized GAP-Based Propellant [J]. Acta Astronautica, 2016, 129: 147-153.
- [38] Geisler R. A Global View of the Use of Aluminum Fuel in Solid Rocket Motors [C]. Indianapolis: 38th AIAA/ ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2006: 7-10.
- [39] DeLuca L T, Galfetti L, Severni F, et al. Burning of Nano-Aluminized Composite Rocket Propellants [J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 2005, 41(6): 680-692.
- [40] Price E W. Combustion of Metalized Propellants [M]. New York: Progress in Aeronautics and Astronautics, 1984.
- [41] Jackson T L, Najjar F, Buckmaster J. New Aluminum Agglomeration Models and Their Use in Solid-Propellant-Rocket Simulations [J]. Journal of Propulsion and Power, 2005, 21(5): 925-936.
- [42] Rosenband V, Gany A. A Microscopic and Analytic Study of Aluminum Particles Agglomeration [J]. Combustion Science and Technology, 2001, 166(1): 91-108.

(编辑:刘萝威)