

文章编号:1006-9941(2019)09-0759-07

# 铝镁贫氧推进剂中铝颗粒团聚特性

李连波,陈雄,周长省,朱敏,赖华锦

(南京理工大学机械工程学院,江苏南京 210094)

**摘要:** 为了研究铝镁贫氧推进剂中铝颗粒燃烧的团聚行为和特性,采用扫描电子显微镜和光学可视化实验方法,对铝镁贫氧推进剂的燃烧过程、铝颗粒团聚产物的微观结构和粒径进行了研究,建立了铝团聚物尺寸预测模型并与实验数据进行了拟合。结果表明,在燃烧表面形成的铝液滴团聚物脱离燃烧表面后,会发生二次团聚。在1.0 MPa下,推进剂试件燃烧较充分,铝颗粒燃烧后为光滑的球状氧化铝颗粒,镁颗粒燃烧后为白色絮状;在0.2 MPa下,推进剂试件燃烧不充分,铝颗粒没有被完全氧化,表面较粗糙。随着燃烧室压强的升高,铝团聚物的体积平均粒径 $D(4,3)$ 减小,而表面积平均粒径 $D(3,2)$ 增大,粒径分布趋向单峰化,说明随着压强的增加, $D(4,3)$ 和 $D(3,2)$ 的值越接近,铝团聚物的形状越规则,粒径分布越集中。团聚物粒径与燃烧速率成反比。

**关键词:** 铝镁贫氧推进剂;微观结构;环境压强;粒径分布

中图分类号:TJ55;V512

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2018266

## 1 引言

铝镁贫氧推进剂的组成和制造方法与复合推进剂基本相同,近年来已被广泛应用于固体燃料冲压发动机中<sup>[1-3]</sup>。相较于复合推进剂,铝镁贫氧推进剂的氧化剂含量减少,一般通过增加铝、镁金属颗粒的含量,在保证较高热值的同时改善其点火和燃烧性能,然而,铝颗粒在固体推进剂的燃烧表面上具有团聚的趋势,这些铝颗粒团聚产物会导致较低的燃烧效率、两相流失、燃渣沉积和侵蚀强化等现象。因此,有必要研究铝镁贫氧推进剂中铝颗粒的团聚特性。

多年来,研究人员一直致力于固体推进剂燃烧过程中铝颗粒的团聚特性研究,如团聚产物尺寸测量方法<sup>[4]</sup>、铝颗粒尺寸<sup>[5-6]</sup>、口袋模型<sup>[7]</sup>、氧化剂尺寸<sup>[8]</sup>和固体推进剂的组分<sup>[9]</sup>对团聚产物的影响。通常对铝颗粒

团聚特性的研究方法有两种,一种是淬火收集铝颗粒团聚产物,研究推进剂成分和环境条件对团聚物粒径的影响;另一种是通过高速和高分辨率摄像机的光学测量来捕捉燃烧表面上的团聚过程。敖文<sup>[10]</sup>使用淬火收集方法研究铝颗粒团聚特性,并证明推进剂组分和环境条件可以改变团聚产物尺寸分布。Liu<sup>[11]</sup>、Anand<sup>[12]</sup>和Takahashi<sup>[13]</sup>的研究表明母体铝颗粒的大小和百分比、AP颗粒的大小以及推进剂燃烧速率是影响铝颗粒团聚产物粒径的重要参数。在推进剂中采用多孔铝<sup>[14]</sup>或聚合物涂层铝颗粒<sup>[15]</sup>的研究表明,该方法可以减少熔融铝颗粒在燃烧表面的停留时间,进而减少团聚发生的概率。但由于团聚过程十分复杂,目前的研究还尚不能全面揭示铝颗粒团聚机理和特性。

基于此,本研究通过光学可视化实验技术和扫描电子显微镜(SEM)对铝镁贫氧推进剂中铝颗粒的团聚特性进行研究。采用高速摄像机在小型密封激光点火实验平台上记录燃烧过程,采用SEM分析燃烧表面和燃烧产物的微观结构,并通过激光粒度仪分析团聚物粒径。

## 2 实验部分

### 2.1 实验样品

铝镁贫氧推进剂由西安近代化学研究所提供,其

收稿日期:2018-09-18;修回日期:2018-11-07

网络出版日期:2019-03-06

基金项目:国家自然科学基金(51606098);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18\_0453)

作者简介:李连波(1981-),女,博士研究生,主要从事固体燃料冲压发动机研究。e-mail:215101000055@njjust.edu.cn

通信联系人:陈雄(1977-),男,教授,主要从事计算流体力学及新型推进技术研究。e-mail:chenxiong@njjust.edu.cn

引用本文: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.

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.

基本组分包括氧化剂(高氯酸铵, AP)、聚合物粘合剂(端羟基聚丁二烯, HTPB)、金属添加剂(铝粉和镁粉, Al和Mg)和少量其他添加剂,如表1所示。在实验中,使用 $\phi 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的圆柱形试件。为了保证实验数据的准确性和实验现象的清晰度,在试件外圆柱面上涂有耐高温绝缘橡胶,以防止燃烧时试件侧向燃烧。

表1 铝镁贫氧推进剂组分

Table 1 Composition of aluminum-magnesium oxygen-poor propellant

composition	mass fraction/%	particle diameter/ $\mu\text{m}$
AP	36.0	100-120
HTPB	20.0	
Al	20.0	~24
Mg	20.0	~30
others	4.0	

## 2.2 仪器装置

Mastersizer 2000 激光粒度仪,英国马尔文仪器公司;HITACHI SU3500 扫描电子显微镜(SEM),日本日立公司;Aztec X射线能谱仪(EDS),英国OXFORD公司;激光点火实验装置,自制。

激光点火实验系统主要由控制系统、 $\text{CO}_2$ 激光器、光学系统、燃烧室、数据采集系统和燃烧产物收集系统组成,如图1所示。控制系统由计算机软件和控制卡组成,可控制 $\text{CO}_2$ 激光器的激光加载时间和热通量。 $\text{CO}_2$ 激光器功率300 W,为点火源。光学系统的功能是将激光器发出的水平激光束改变为垂直激光束,并通过燃烧室顶部的激光入射窗完全覆盖到试件表面。燃烧室是尺寸为 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 的长方体,其前、后分别设有 $50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的观察窗,顶部设有直径为 $\phi 20\text{ mm}$ 的激光入射窗。燃烧室内压强

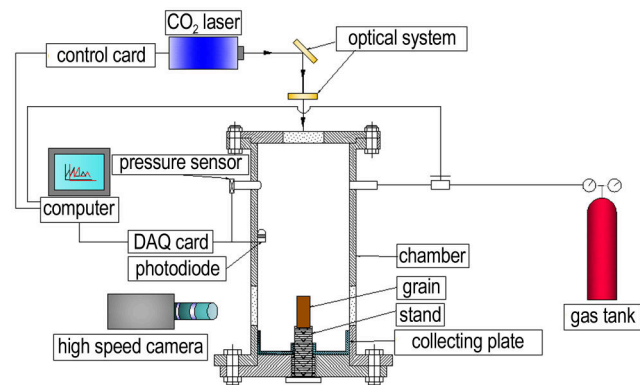


图1 激光点火实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the laser ignition experimental system

通过压力传感器监测,环境压力通过高压气瓶调节。燃烧室底部安装有尺寸为 $149\text{ mm}\times 149\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的收集盘,完全覆盖燃烧室底面,可收集试件燃烧后的固体产物。数据采集系统可通过两个光电二极管获取激光信号和推进剂初始火焰信号。

## 2.3 实验过程

在常温( $25\text{ }^\circ\text{C}$ )条件下,分别在燃烧室压强为0.1、0.2、0.6 MPa和1.0 MPa环境中进行实验,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。之后调整光学系统,使激光器发射出的光束可以完全覆盖试件端面。设定激光热流密度为 $2.8\text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。通过流量阀控制高压气瓶中导入燃烧室的气体流量,使用压力传感器监测燃烧室的环境压强达到设定值。当激光开始加载时,光电二极管将采集到的光信号转化为电信号,并经过放大电路输出给发光二极管,发光二极管发光并被高速摄像机捕捉到后,此时此刻记为实验开始时刻。高速摄像机以240 fps的帧频记录试件的燃烧过程。激光加载一段时间后,推进剂产生的火焰光强度逐渐增强,采集到的电信号也逐渐增强,直到达到光电二极管的饱和,此时停止激光加载,当火焰信号持续10 s时,打开排气孔并向燃烧室内吹入高压低温氮气,中断试件燃烧。取出熄火后的试件和收集盘,进行微观结构和粒径分析。

## 3 结果与讨论

### 3.1 二次团聚过程

在常温常压环境下,采用高速摄像机记录了铝镁贫氧推进剂试件的点火和燃烧过程。在贫氧推进剂的燃烧过程中,推进剂中的铝颗粒在燃烧表面受热熔化,形成一个个小的球形液滴,铝液滴不断积累、聚集,最后团聚成较大液滴脱离燃烧表面。随后,液体团聚物在高温高压下与周围气体发生化学反应,形成氧化铝壳,由于不断被火焰及反应热反馈加热,铝颗粒表面温度超过氧化物的熔点,铝液滴被一层液态氧化物薄膜所包裹并不断膨胀,在金属蒸气压作用下,这个液体氧化物薄膜被“吹起”,金属蒸气经过液态氧化膜向四周扩散,与周围介质中的氧气发生反应,最终完成铝的燃烧反应<sup>[16]</sup>。在铝的燃烧过程中,铝蒸气会与氧化剂反应形成小尺寸的氧化铝颗粒,即氧化铝烟雾,在气流中运动时又会发生碰撞、聚结或破碎。

在整个连续拍摄的燃烧过程中,捕捉到了铝颗粒



团聚物在脱离燃烧表面后的二次团聚现象,如图2所示。由图2a可见,两个较小的团聚物从燃烧表面脱离,并且其间的距离在燃烧运动中逐渐变小。当其发生碰撞时,两个团聚物合并在一起形成更大的新团聚物,如图2b所示,这种现象被称为团聚物的第二次团聚<sup>[17]</sup>。新的团聚物具有明显较长的拖尾焰,这是铝液滴燃烧生成的氧化铝烟雾所形成的烟雾膜,包裹着铝液滴,与单个铝液滴燃烧相一致。在新的团聚物的燃烧过程中,随着金属液滴的漂移,氧化物薄膜常常爆裂,破坏火焰的对称性,拖尾焰逐渐消失,如图2c所示。随着燃烧的进行,金属蒸气不断被消耗,浮力减小,在重力作用下,铝液滴下落,如图2d所示。

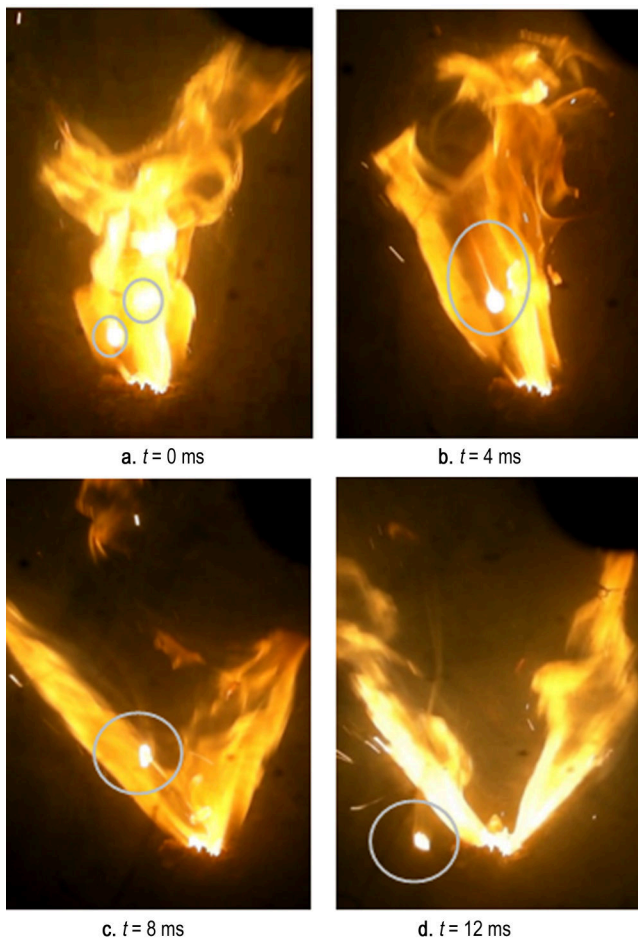


图2 脱离燃烧表面后铝团聚产物的二次团聚过程

Fig.2 The secondary agglomeration process of the agglomerates leaving the burning surface

### 3.2 推进剂燃烧表面微观结构分析

采用扫描电子显微镜对未燃烧和0.1 MPa下已燃烧的推进剂表面进行微观结构分析,如图3所示,其中图3a和图3b的放大倍数均为500倍。图3a为原始贫

氧推进剂试件在未燃烧时,切开推进剂后其表面的微观结构,其中较大的颗粒为氧化剂AP<sup>[17]</sup>,由显微标尺测得其尺寸约为100 μm,较小的颗粒为铝粉颗粒和镁粉颗粒。在常压下对推进剂试件进行点火燃烧,中断其燃烧后对已燃推进剂表面进行微观形态分析,如图3b所示。从微观上看,已燃推进剂试件的表面层呈珊瑚状骨架结构,由于氧化剂AP和粘合剂HTPB的分解,表面存在一些大小不一的空孔,不同大小的球形铝颗粒不均匀地分布在表面<sup>[17]</sup>。

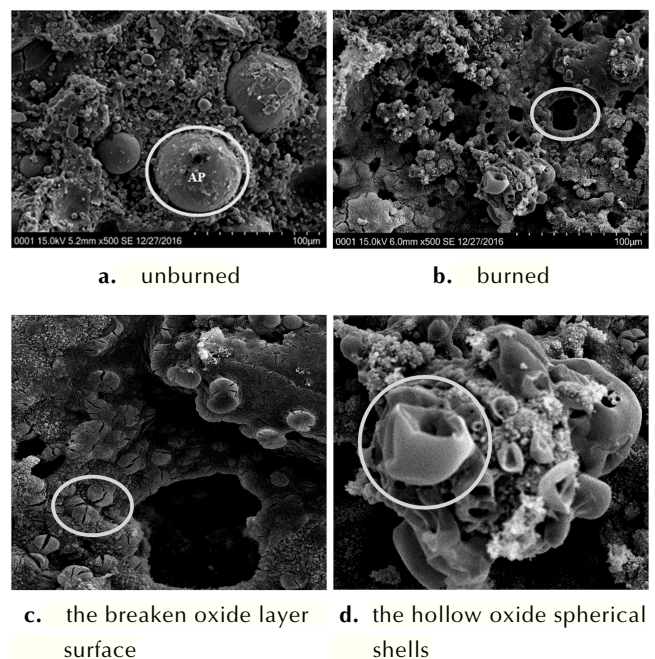


图3 未燃烧和0.1 MPa下已燃烧推进剂的表面微观结构

Fig.3 The microstructures of tunburned propellant surface and burned propellant surface at 0.1 MPa

燃烧后残留在推进剂表面上的铝颗粒呈现出两种状态:一种是覆盖有氧化物层的铝颗粒,如图3c所示;另一种是空心氧化物球壳残留在推进剂表面上,如图3d所示。在图3c中圈出的表面有裂纹的颗粒就是覆盖有氧化物层的铝颗粒,并且有较多的类似颗粒聚集在一起,形成了大面积的平滑氧化物盖。在推进剂点火、燃烧过程中,随着AP和HTPB的热解,铝颗粒暴露于推进剂试件表面并吸收部分激光辐射热和化学反应热,随着温度的升高,在铝颗粒表面上形成氧化物层,当温度继续升高时,内部铝颗粒开始熔化并膨胀,由于外部氧化铝层表面张力有限,当铝颗粒胀大到一定程度时,氧化铝层便开始出现裂纹,甚至破裂。在图3d中圈出的部分即为中空的氧化物球壳,其尺寸比覆盖有氧化物层的铝颗粒尺寸大很多,说明它是由许多铝

颗粒聚结而成的。由于金属颗粒的膨胀和燃烧表面的退化,金属颗粒之间的距离逐渐减小,许多铝颗粒就聚集在燃烧表面,由于铝颗粒在燃烧表面的停留时间较长,越来越多具有氧化物层的铝颗粒聚集在一起,并最终形成较大的团聚物。随着温度不断升高,燃烧表面的团聚物内部熔融的液态铝会因热膨胀系数比氧化物外壳大很多,以至于冲破氧化物壳喷射出去,形成一些中空的氧化物球壳残留在推进剂表面。

### 3.3 燃烧产物微观结构分析

为了更好地理解铝团聚物从燃烧表面脱离后的燃烧过程,对实验系统中收集盘内的残余燃烧产物进行了微观结构分析。图4为铝镁贫氧推进剂燃烧产物的

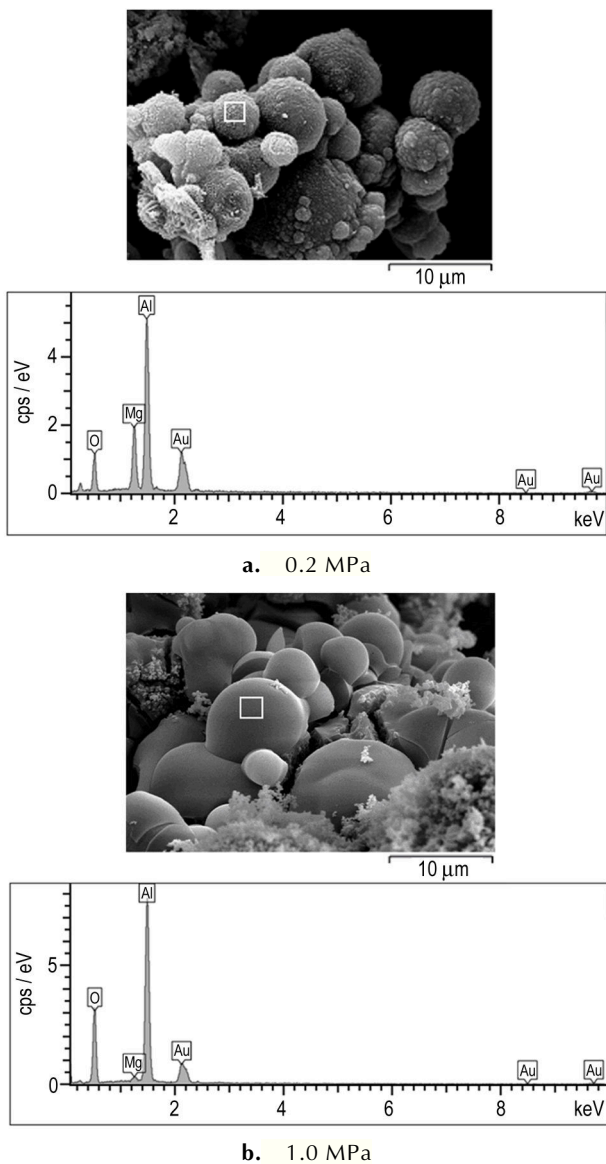


图4 不同压强条件下燃烧产物的SEM和EDS图  
Fig.4 SEM and EDS images of combustion products under the condition of different pressures

SEM图像和EDS分析图,放大倍数为5000倍。由图4a可知,当燃烧室压强为0.2 MPa时,其燃烧产物由不同尺寸的球状物质聚结而成,为不规则簇团,这些球状物质基本小于 $10\ \mu\text{m}$ ,且表面粗糙。对球状物质进行EDS分析,结果表明其主要由Al、Mg、O等元素组成,其质量百分数分别为55.25%、16.56%和28.19%。依据 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 中Al元素和O元素的质量比为9:8,MgO中Mg元素和O元素的质量比为3:2,如果所含Al元素和Mg元素全部生成相应的氧化物,则需要60.15%的O元素,而实际O元素含量为28.19%,表明球状物质中含有氧化铝、氧化镁和部分没有氧化的铝颗粒。从而可以了解到铝镁贫氧推进剂燃烧产物除了含有铝、镁氧化物外,还含有部分没有燃烧的铝颗粒,说明推进剂燃烧不充分。同时,在一些较大的氧化物球体表面上覆盖了一些较小的氧化物球体,这表明从燃烧表面脱离的铝液滴团聚物除了会与其他团聚物碰撞、合并、聚结在一起外,在燃烧过程中也可能会发生膨胀、喷射和破碎。根据实验观察,这种喷射和破碎在较低压力下发生的频率更高。

由图4b可知,当燃烧室压强为1 MPa时,燃烧产物也是由许多球状物质聚结而成,但与图4a相比,该球状物质表面更光滑,通过EDS分析可知,其主要元素Al、O、Mg的质量百分数分别为51.20%、47.57%和1.23%,Al元素和O元素的质量比大于 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 中Al元素和O元素的质量比9:8,所以该球状物质为氧化铝颗粒,球状完整性较好,这也能说明当燃烧室压强升高时,铝聚团脱离燃烧表面后燃烧更充分。同时,在图4b中还观察到少量的絮状氧化镁。

### 3.4 铝团聚物粒径分析

采用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000)对不同实验压强下收集的铝团聚物进行粒径测量,粒径分析结果如图5所示。其中, $d(0.1)$ 、 $d(0.5)$ 、 $d(0.9)$ 分别表示体积累积到10%、50%、90%的样品粒径值。

从图5中可以看出,不同压强下,燃烧产物中铝团聚物的粒径分布呈现如下特点:

(1)随着压强的升高,粒度分布趋向单峰化。实验压强为1.0 MPa时,粒径分布呈现出较为规则的单峰;在0.6 MPa下,呈现出明显的双峰分布;而在0.2 MPa下,双峰分布更加明显。说明压强越低,粒度分布越趋向多峰化。

(2)随着压强的升高,小于 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒增多,大于 $250\ \mu\text{m}$ 的大颗粒减少,而峰值颗粒尺寸大约为 $40\ \mu\text{m}$ ,它受实验压强的影响较小。从燃烧机理上讲,



低压时,燃烧相对不够充分,未被完全氧化的单颗粒铝尺寸比完全被氧化的氧化铝颗粒尺寸大,而高压时,燃烧过程中铝颗粒的燃烧更充分,导致了高压时大粒径铝团聚物的减少,粒径分布更为集中。

(3)从粒径的具体数值来看,粒径与压强之间具有明显的规律性,具体粒径测量结果如表2所示。随着压强的升高,铝团聚物的体积平均粒径 $D(4,3)$ 呈下降趋势,而表面积平均粒径 $D(3,2)$ 呈上升趋势,说明随着压强的增大, $D(4,3)$ 和 $D(3,2)$ 的值越接近,铝团聚物的形状越规则,粒径分布越集中。

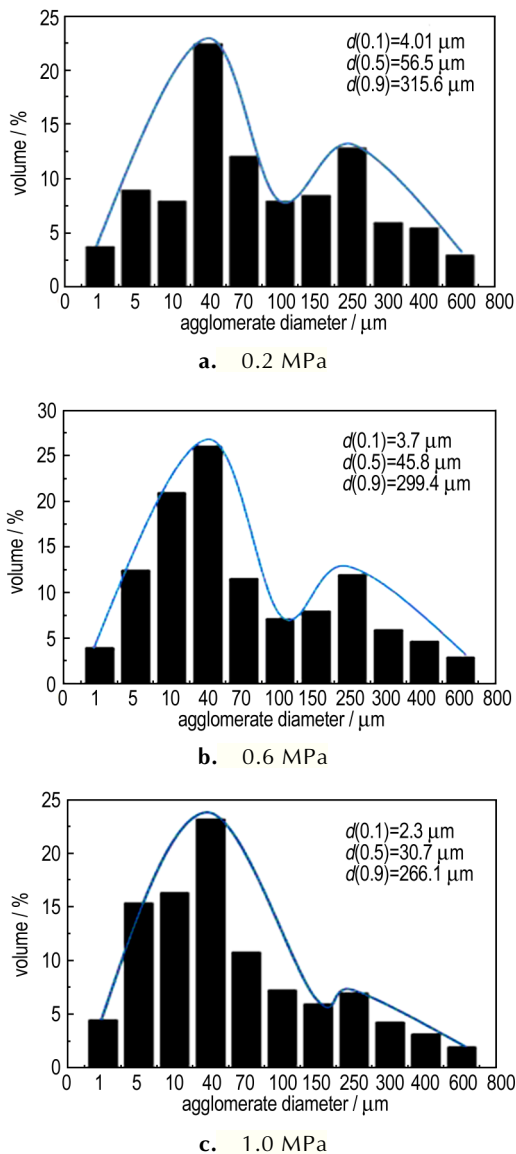


图5 不同压强下燃烧产物中铝团聚物的尺寸分布

Fig. 5 Size distributions of Al agglomerates in combustion products at different pressures

高压下推进剂具有更好的点火燃烧性能,而铝团聚物的粒径则随着压强的增加而减小。原因有两个:

(1)热传导加速。压强的增加,加速了环境气体对推进剂表面的热传导。(2)热反馈增加<sup>[18]</sup>。当压强增加时,初始火焰靠近推进剂表面并增加了对推进剂表面的热传递,这导致点火延迟时间缩短,使铝颗粒更容易点燃,从而导致其在推进剂燃烧表面停留的时间减少,在团聚发生之前迅速离开燃烧表面。与此相反,压强越低,铝颗粒在推进剂表面停留的时间越长,更易发生团聚,使得燃烧产物中产生较多大颗粒的铝团聚物。

众所周知,较高的燃烧速率可以降低铝颗粒在推进剂燃烧表面的停留时间,进而降低了铝颗粒发生团聚的几率。以往研究的模型<sup>[11-13]</sup>中已经表明燃烧速率是影响团聚物尺寸的关键因素之一。为了建立燃烧速率对团聚物尺寸影响的数学模型,通过实验测量了不同压强环境下铝镁贫氧推进剂的燃烧速率,如表2所示。由表2可知,燃烧速率随着压强的增加而增加,这是由于压强增加,导致表面对流热通量和辐射热通量增加。同时,随着燃烧速率的增加,铝颗粒在燃烧表面上的停留时间减少,从而降低了团聚的发生概率。团聚物尺寸与燃烧速率成反比,燃烧速率是影响铝团聚物尺寸的重要因素之一,因此,将团聚物尺寸与推进剂配方变量和燃烧速率间建立数学关系,以预测铝镁贫氧推进剂中铝团聚物的尺寸。

表2 不同压强下铝镁贫氧推进剂的燃烧速率和铝团聚物的 $D(4,3)$ 、 $D(3,2)$ 值

Table 2 The burning rate and values of  $D(4,3)$ ,  $D(3,2)$  of Al agglomerates for aluminum-magnesium oxygen-poor propellants at different pressures

$p / \text{MPa}$	$r / \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$D(4,3) / \mu\text{m}$	$D(3,2) / \mu\text{m}$
0.2	2.35	103.03	25.08
0.6	2.84	83.64	36.68
1.0	3.21	55.46	46.67

Note:  $r$  is the burning rate.  $p$  is the pressure.  $D(4,3)$  is the volume average size.  $D(3,2)$  is the surface area average size.

Cohen 口袋模型<sup>[19]</sup>被广泛用于估算不同组分和颗粒尺寸条件下的团聚物尺寸,其表达式为

$$D_{\text{Cohen}} = \left( \frac{\rho_{\text{AP}} Y_{\text{Al}}}{\rho_{\text{Al}} Y_{\text{AP}}} \right)^{\frac{1}{3}} D_{\text{AP}} \quad (1)$$

式中, $D$ 为直径, $\mu\text{m}$ ;  $Y$ 为质量分数,%; $\rho$ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;下标 AP、Al 分别是指推进剂中氧化剂 AP 和铝颗粒。

以 Cohen 口袋模型为基础的 Duterque 模型<sup>[20]</sup>,描述了燃烧速率对铝团聚物尺寸的影响规律。Duterque 提出采用  $2.42/r$  来估算燃烧速率对团聚物尺寸的

影响。基于Cohen口袋模型和Duterque模型,本研究提出铝镁贫氧推进剂中铝团聚物的尺寸预测数学模型,表示为

$$D = \frac{2.42}{r} D_{\text{Cohen}} + a \quad (2)$$

式中, $r$ 为燃烧速率, $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $a$ 为拟合系数。根据式(2),采用最小二乘法对不同燃烧速率下铝团聚物粒径实验数据 $D(4,3)$ 进行拟合,所需参数 $\rho_{\text{AP}}=1.95\times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , $\rho_{\text{Al}}=2.7\times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , $D_{\text{AP}}=120 \mu\text{m}$ ,得到拟合系数 $a$ 为2.95。铝镁贫氧推进剂中铝团聚物尺寸的实验数据和模型预测数据之间的比较如图6所示。由图6可以看出燃烧速率对铝团聚物尺寸的影响趋势与实验结果一致,但预测值偏离实验值较大,说明基于仅含有铝颗粒的复合推进剂团聚模型推导出的铝团聚物尺寸预测模型不太适用于金属含量高的铝镁贫氧推进剂,特别是在较高燃烧速率时,预测结果偏离实验较大,初步考虑是由于高压高速燃烧条件下,颗粒燃烧的不确定性引起的。

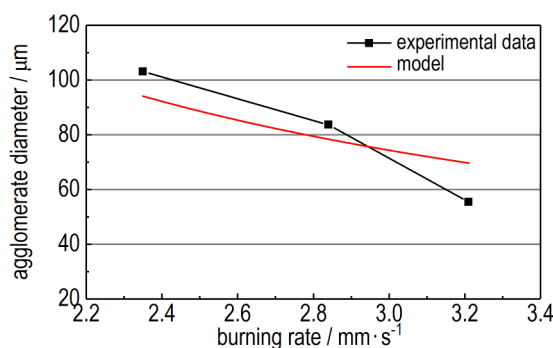


图6 团聚物尺寸的实验数据与模型预测的比较

Fig.6 Comparison of the experimental data and the model prediction ones of agglomerate sizes

## 4 结论

(1)较大的液态铝滴团聚物达到一定温度时,熔融的金属铝液滴被喷射出去,残留在推进剂表面上的铝颗粒呈现出两种状态,即覆盖有氧化铝层的铝颗粒和空心的氧化铝球壳。

(2)铝滴团聚物受燃烧表面处气流推动会脱离燃面,形成的小尺寸氧化铝颗粒,会在气流中运动时再次发生碰撞、聚结或破碎。

(3)铝镁贫氧推进剂燃烧产物的微观组织结构为不同尺寸的球状物质聚结而成的不规则簇团。当燃烧室压强为1MPa时,球状物质为氧化铝颗粒,光滑且球状完整性好,同时还有少量的絮状氧化镁存在。当燃

烧室压强为0.2 MPa时,球状物质表面较粗糙,主要成分主要有氧化铝、氧化镁和部分没有氧化的铝颗粒。

(4)铝随着压强的增加,铝团聚物的粒径减小,其粒径分布越集中,趋向单峰化,团聚物形状则更规则。

(5)通过铝团聚物尺寸预测数学模型,获得燃烧速率对铝团聚物尺寸的影响趋势,与实验结果一致,但该模型对金属含量较高的铝镁贫氧推进剂中铝团聚物尺寸的预测不理想。

## 参考文献:

- [1] ZHU Min, CHEN Xiong, ZHOU Chang-sheng, et al. Experimental and numerical investigations on the decomposition and combustion characteristics of composite propellant with Mg/Al particles additives [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 111: 863-875.
- [2] 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.  
LAI Hua-jin, CHEN Xiong, ZHOU Chang-sheng, et al. Laser ignition and combustion characteristics of Al/Mg fuel-rich propellant at subatmospheric pressures [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(10): 817-821.
- [3] 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.  
XIANG Heng-sheng, CHEN Xiong, ZHOU Chang-sheng, et al. Effect of environment oxygen content and pressure on the combustion of aluminum-magnesium fuel-rich propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(3): 191-197.
- [4] Hijlkema J, Prevot P, Prevost M, et al. Particle size distribution measurements in the Keldysh Research Centre experimental setup at ONERA [C]//Aiaa/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. AIAA, 2011: 5712-5720.
- [5] Kandasamy J, Mulla I, Chakravarthy, et al. Aluminium agglomerate size measurement of the nano/micro-aluminized composite propellants [C]//Aiaa Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2013: 40-47.
- [6] 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.
- [7] Yavor Y, Gany A, Beckstead M W. Modeling of the agglomeration phenomena in combustion of aluminized composite solid propellant [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39: 108-116.
- [8] Mullen J, Brewster M. Characterization of aluminum at the surface of fine-AP/HTPB composite propellants [C]//Aiaa/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. 2008: 5259-5266.
- [9] Korotkikh A G, Glotov O G, Arkhipov V A, et al. Effect of iron and boron ultrafine powders on combustion of aluminized solid propellants [J]. *Combustion & Flame*, 2017, 178: 195-204.
- [10] 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 Pei-jin, Lv Xiang, et al. Review of aluminum ag-

- glomeration during the combustion of solid propellants [J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(4):371-380.
- [11] Liu T K. Experimental and model study of agglomeration of burning aluminized propellants [J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2015, 21(5):797-806.
- [12] Anand K V, Roy A, Mulla I, et al. Experimental data and model predictions of aluminium agglomeration in ammonium perchlorate-based composite propellants including plateau-burning formulations [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 2139-2146.
- [13] Takahashi K, Oide S, Kuwahara T. Agglomeration characteristics of aluminum particles in AP/AN composite propellants [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, 38:555-562.
- [14] Yavor Y, Rosenband V, Gany A. Reduced agglomeration in solid propellants containing porous aluminum [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering*, 2014, 228(10):1857-1862.
- [15] Sippel T R, Son S F, Groven L J, et al. Exploring mechanisms for agglomerate reduction in composite solid propellants with polyethylene inclusion modified aluminum [J]. *Combustion & Flame*, 2015, 162(3):846-854.
- [16] 鲍福廷, 黄熙君, 张振鹏, 等. 固体火箭冲压组合发动机 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2006:145-164.
- Bao Fu-ting, Huang Xi-jun, Zhang Zhen-peng, et al. Integral solid propellant ramjet rocket motor [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2006:145-164.
- [17] 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.
- [18] Lianbo L, Xiong C, Musa O, et al. The effect of pressure and oxygen concentration on the ignition and combustion of aluminum-magnesium fuel-rich propellant [J]. *Aerospace Science & Technology*, 2018, 76:394-401.
- [19] Cohen N S. A pocket model for aluminum agglomeration in composite propellants [J]. *AIAA Journal*, 1983, 21(5): 720-726.
- [20] Duterque J. Experimental studies of aluminum agglomeration in solid rocket motors [J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 1997, 4(1-6): 693-705.

## Agglomeration Characteristics of Aluminum Particles in Aluminum-magnesium Oxygen-poor Propellant

LI Lian-bo, CHEN Xiong, ZHOU Chang-sheng, ZHU Min, LAI Hua-jin

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To study the agglomeration behaviors and agglomeration characteristics of aluminum particles in aluminum-magnesium (Al-Mg) oxygen-poor propellant, the combustion process of Al-Mg oxygen-poor propellants and the microstructure and particle size of agglomeration products of Al particles were investigated by using scanning electron microscopy and optical visualization experiment method. A model for predicting the aluminum agglomeration size was established and fitted to the experimental data. Results show that the secondary agglomeration occurs after the agglomerate of aluminum droplet formed on the combustion surface is separated from the combustion surface. At 1.0 MPa, the propellant specimens burns sufficiently, the aluminum particles after burning become smooth spherical alumina particles and the magnesium particles after burning become white flocculent magnesia. At 0.2 MPa, the propellant specimens burns insufficiently, the aluminum particles are not completely oxidized and the surface is rough. With the increase of combustion chamber pressure, the volume average particle size  $D(4,3)$  of aluminum agglomerate decreases, while the surface area average size  $D(3,2)$  increases, and particle size distribution tends to single peak, indicating that with the increase of pressure, the closer the values of  $D(4,3)$  and  $D(3,2)$  are, the more regular the shape of aluminum agglomerate is, and the more concentrated the agglomeration size distribution is. The agglomerate size is inversely proportional to the burning rate.

**Key words:** aluminum-magnesium oxygen-poor propellants; microstructure; environmental pressure; particle size distribution

**CLC number:** TJ55; V512

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018266

(责编: 张琪)