

文章编号: 1006-9941(2018)04-0297-07

压力对纳米铝粉/RDX 混合物聚光点火燃烧特性的影响

苑继飞¹, 刘建忠¹, 王健儒², 许团委², 陈冰虹¹, 梁导伦¹, 周俊虎¹

(1. 浙江大学热能工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 中国航天科技集团, 陕西 西安 710025)

摘要: 铝粉和黑索今(RDX)是固体推进剂领域重要的金属燃料和含能氧化剂。利用中压聚光升温点火实验台进行了不同压力(0.1, 0.4, 0.7, 1.0, 1.3 MPa)下纳米铝粉/RDX 混合样品的点火燃烧试验, 采用高速摄影仪、双色红外测温仪和光纤光谱仪研究了样品的燃烧过程。结果显示, 样品点火前存在一个明显的受热蒸发阶段, 点火后火焰发展阶段的持续时间明显小于衰退阶段。常压下的燃烧过程伴有橙黄色火星。压力高于常压时火焰呈白炽态。提高环境压力能有效增加燃烧强度, 但过高的压力对火焰发展有一定的抑制作用。压力升高, 蒸发阶段和点火重叠明显, 点火延迟时间显著缩短。基于实验条件, 常压下样品的点火延迟时间为 1004 ms, 最高温度为 1239 °C。压力升高至 1.3 MPa 时, 样品的点火延迟时间缩短至 319.2 ms, 最高温度升高至 1441 °C。常压下样品燃烧不完全, 导致自维持燃烧时间最短, 为 280 ms。压力高于常压时, 自维持燃烧时间随压力的升高而减小。

关键词: 纳米铝粉; 黑索今(RDX); 点火; 燃烧特性; 压力

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.04.002

1 引言

固体推进剂作为固体火箭发动机的动力源, 在军事和航空航天等领域应用广泛。提高以能量为主的综合性能是其发展过程中的主要目标^[1]。为此, 国内外学者对固体推进剂配方中的含能氧化剂、含能粘合剂、含能增塑剂以及金属燃料等组分进行了大量研究^[2-3]。

铝来源广泛, 价格低廉, 密度($2.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)和燃烧热($1670.59 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)高, 耗氧量($0.88 \text{ g}(\text{O}_2) \cdot \text{g}^{-1}$)低, 产物无毒无害, 因此被广泛应用于固体推进剂中^[4-5]。和常规粒径的铝粉相比, 纳米铝粉具有小尺寸效应和表面界面效应, 以及更多的表面活性点, 因此化学反应活性很高, 释放化学能更迅速、完全^[6]。Mench 等^[7]用 Alex(纳米铝粉牌号)部分取代固体推进剂中的常规铝粉后, 发现推进剂燃速明显增加。

黑索今(RDX)是 20 世纪固体推进剂领域最常用的含能氧化剂之一, 能够在产生较高比冲的同时, 几乎不产生烟雾、毒性和腐蚀^[8]。Volkov 等^[9]利用探测分

子束质谱法在常压下的 RDX 火焰中发现了两个主要的化学反应区, 并测量了火焰中 RDX 蒸汽及 H_2 、 H_2O 等其他 10 种物质的浓度分布情况。郝海霞等^[10]通过 CO_2 激光点火的方法研究了 RDX 基改性双基推进剂的点火特性, 发现低热流密度条件下, RDX 含量对推进剂的点火延迟时间影响较小, 而当热流密度较高时, 点火延迟时间随 RDX 含量的增加而明显增长。

本研究将纳米铝粉和 RDX 机械混合后, 利用自主设计和搭建的实验台, 在空气气氛下改变环境压力对混合样品进行点火燃烧试验。使用高速摄影仪、双色红外测温仪和光纤光谱仪研究了样品的点火特性和燃烧过程, 详细分析了样品的火焰形貌、温度和发射光谱特征, 研究结果对进一步认识固体推进剂组分的反应机理有借鉴意义。

2 实验部分

2.1 实验材料和样品

实验使用的纳米铝粉购于上海水田科技材料有限公司, 为黑色粉末。标称粒径 80 nm, 实测活性铝质量分数为 74%。RDX 由兵器 575 厂生产, 中国航天科技集团第四研究院第 42 所提供, 中位径 $117.8 \mu\text{m}$, 外观为白色粉末状固体。利用日立 SU-70 场发射扫描电镜(SEM)观察了 RDX 的微观形貌, 如图 1 所示。可以看出 RDX 的形状很不规则。

收稿日期: 2017-10-15; 修回日期: 2017-12-14

作者简介: 苑继飞(1995-), 女, 博士, 主要从事含能材料研究。

e-mail: 2513572353@qq.com

通信联系人: 刘建忠(1965-), 男, 教授, 博导, 主要从事推进剂与金属燃料研究。e-mail: jzliu@zju.edu.cn

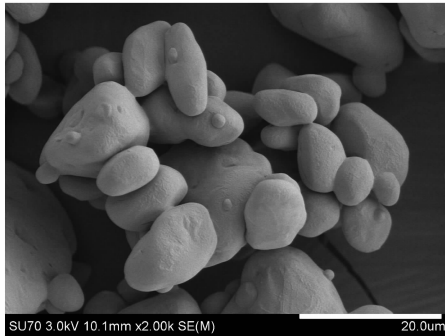


图1 RDX样品的扫描电镜图像

Fig.1 SEM image of RDX

将纳米铝粉和RDX粉末按质量比(17:3)在行星磨机中进行机械混合,获得RDX质量分数为15%的实验样品。每次取5 mg样品均匀堆积在钨片上,进行不同压力下的聚光点火燃烧实验。

2.2 实验设备和方法

混合样品的聚光点火燃烧实验在自主设计和搭建的中压聚光升温点火实验台上进行,该实验台的具体结构如图2所示。

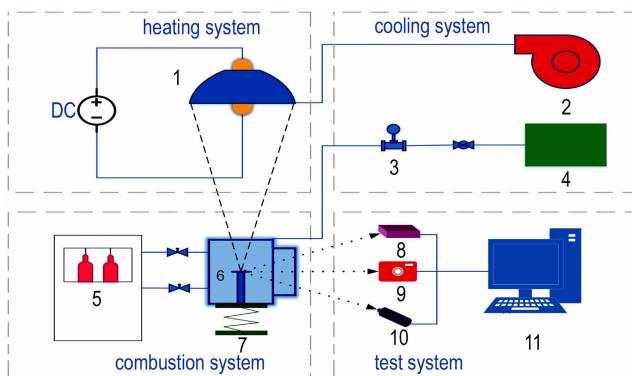


图2 中压聚光升温点火实验台结构示意图

1—聚光器, 2—冷却风机, 3—流量计, 4—水箱, 5—气瓶组, 6—燃烧室, 7—升降台, 8—光纤光谱仪, 9—高速相机, 10—双色测温仪, 11—计算机

Fig.2 Structure of medium-pressure condenser temperature ignition experimental bench

1—Condenser, 2—Cooling fan, 3—Flow meter, 4—Water tank, 5—Gas cylinder group, 6—Combustion chamber, 7—Lifting platform, 8—Fiber optic spectrometer, 9—High speed camera, 10—Two-color infrared thermometer, 11—Computer

该实验台采用一台功率10 kW的短弧球形聚光器作为点火源,使用椭球形冷光镜对聚光器光线进行聚焦。聚光器球心位于椭球第一焦点,燃烧室中的样

品台位于椭球第二焦点。燃烧室顶部为石英玻璃结构,便于聚光器光线射入,侧身开有气体进出口管路、石英玻璃视窗和测孔。聚光器端部设置三台冷却风机,燃烧器周身布有冷却水管。

本研究使用空气气氛,通过气体进出口管路设置燃烧室内压力(0.1, 0.4, 0.7, 1.0, 1.3 MPa)。彩色高速摄影仪的分辨率为 2320×1726 ,拍摄速率为400 fps;双色红外测温仪测温范围为 $600 \sim 1800 \text{ }^\circ\text{C}$,采样的时间间隔为10 ms;设置光纤光谱仪的拍摄速率为8 ms/帧,每次拍摄1000帧。为保证实验的重复性,每种压力下进行3~5组重复试验。

3 结果与讨论

3.1 燃烧火焰形貌特征

图3为样品燃烧过程中火焰亮度最强时刻的照片,能够定性表征样品燃烧的最大强度。由图3可见,随着压力的升高,样品最大燃烧火焰的整体亮度增加,燃烧强度增强,温度明显提高。图3a为常压下样品的最大燃烧火焰,火焰发展相对平缓,总体亮度最小,可以看到大量橙黄色火星从样品表面喷射出来并向高处发展。在距离样品表面较远处,火星逐渐变成白炽状态,轮廓不再清晰,形成淡淡的白色烟雾并继续向更高处发展。这一现象发生的原因是,RDX点火燃烧后释放出来的气体带动纳米铝颗粒上升,纳米铝颗粒在上升的过程中继续吸热,进而发生点火和燃烧。图3b为0.4 MPa下的最大燃烧火焰,此时样品燃烧更加剧烈,喷射出的火星刚刚脱离样品表面就变成了白炽状态,导致火焰的白炽区域面积显著增大,亮度明显增强。在这一压力条件下,火焰向高处发展较为平稳地发展,总体呈下大上小的锥形。在0.7 MPa压力下,样品的燃烧火焰在向上发展的过程中出现了明显的抖动,燃烧剧烈程度加大,如图3c所示。当压力继续升高至1.0 MPa和1.3 MPa时,样品燃烧更加剧烈。但由于此时燃烧室中气体密度增加明显,火焰向高处发展的过程中受到较大的阻碍作用,导致其整体形状逐渐变为下小上大的蘑菇形,如图3d和图3e所示。进一步对比发现,1.3 MPa条件下样品燃烧火焰的白炽区域面积小于1.0 MPa下的白炽区域面积,表明适当提高压力有利于火焰的发展,但过高的压力会对火焰发展产生一定的抑制作用。

图4所示为聚光器开启后2.4 s内样品的点火燃烧过程。由图4可知,在样品发生点火之前,存在一个明显的受热蒸发阶段。在这一阶段,样品表面缓慢升起乳

白色的烟雾。根据文献[11],RDX 的气化分解和点火之间存在动力学延迟,且在低压下时这一延迟更加明显。由此推测,乳白色烟雾中除包含受热蒸发的 RDX,还包括其分解产物 NO 和 NO₂ 等。常压时,可以清晰观察到乳白色烟雾产生至消失的全过程,在乳白色烟雾

消失之后较长时间才发生样品的点火,如图 4a 所示。随着压力的升高,一方面乳白色烟雾升起的高度逐渐变小,且发生明显的波动,这是燃烧室中气体密度增加所致,另一方面,样品的点火时间明显提前,即点火延迟时间明显缩短,表明压力的升高有助于样品的点火。

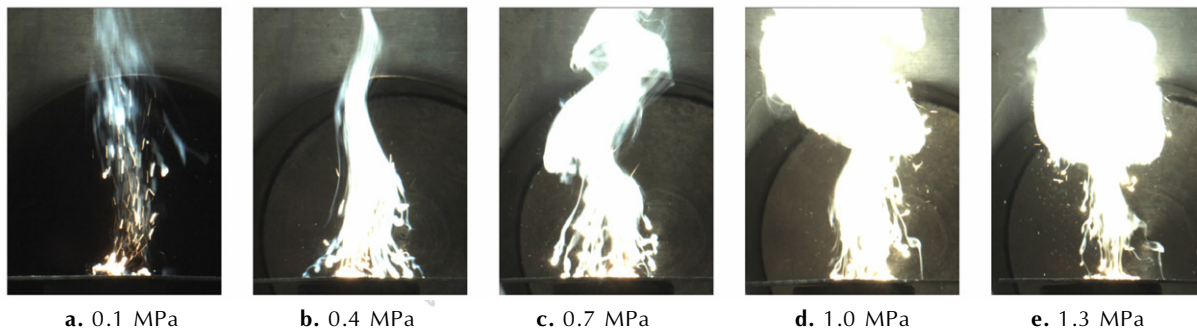


图 3 样品燃烧过程中的最大火焰

Fig.3 The brightest combustion flame images of samples

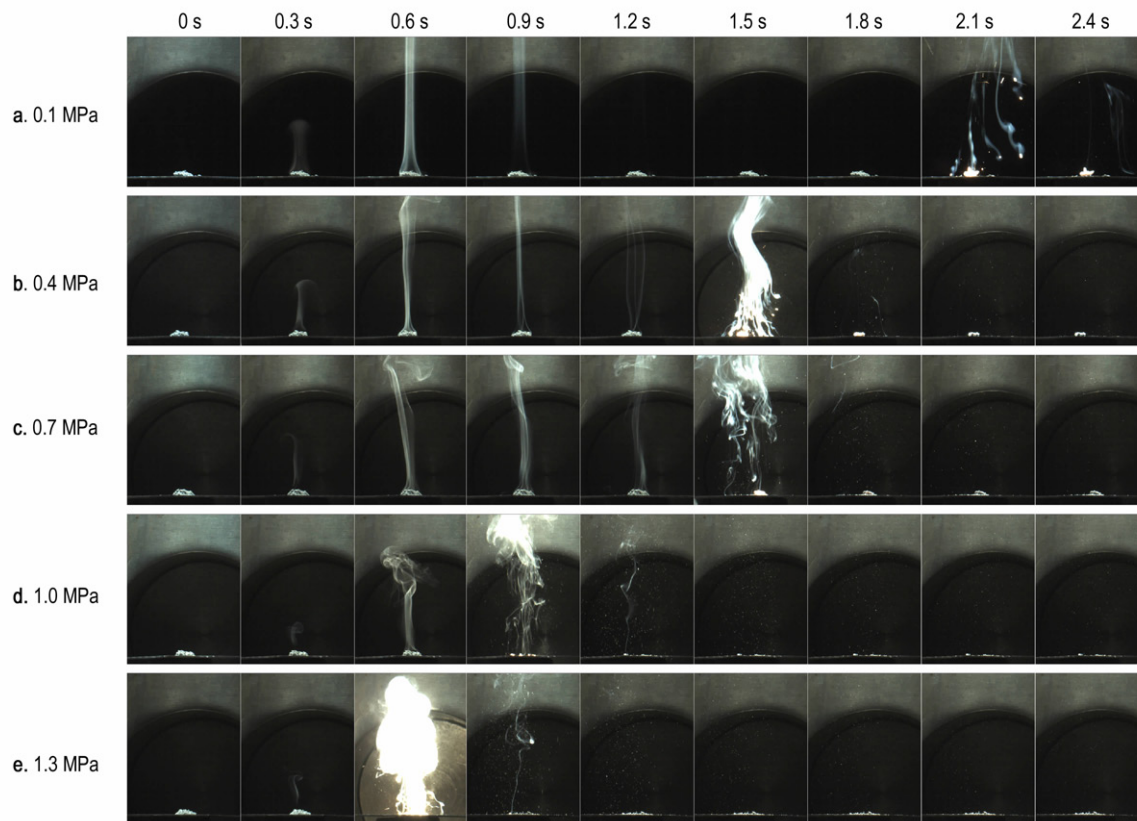


图 4 聚光器开启后不同时刻的样品燃烧火焰形貌

Fig.4 Combustion flame images at different time

为了进一步了解样品的点火燃烧过程,从样品被点燃开始,截取不同燃烧阶段的火焰照片依次阵列排布,如图 5 所示。总体而言,可将火焰演变过程分为发展和衰退两个阶段。在发展阶段,火焰紧紧依附在样品表面,随着时间的推移,火焰高度逐渐增大,亮度逐

渐增强。进入火焰衰退阶段以后,火焰逐渐脱离样品表面向高处飘移,同时亮度逐渐减弱,面积逐渐变小直至消失。燃烧光谱分析(3.3 节)部分利用 AIO 特征峰对两个阶段的持续时间进行了进一步分析。

根据样品刚被点燃的照片可以看出,常压下样品

的点火发生在蒸发阶段结束之后, 0.4 MPa 和 0.7 MPa 条件下样品的点火发生在蒸发阶段的末期, 而当压力升高至 1.0 MPa 和 1.3 MPa 时, 在蒸发阶段的中期样品就完成了点火, 即点火与蒸发阶段发生了重叠, 点火时刻大大提前。进一步观察对比发现, 压力高于常压时, 样品燃烧均很剧烈, 火焰整体呈白炽态。常压下样品的燃烧强度最小, 整个燃烧过程中均可以看到橙黄

色火星, 且在火焰发展阶段, 刚从样品表面喷射出来的火星均为温度较低的橙黄色, 随后橙黄色火星向高处发展, 继续吸热, 逐渐变为温度较高的白炽态。而在火焰衰退阶段的后期, 从样品表面直接喷射出了白炽状态的火星, 这是因为样品的点火和燃烧使得样品表面温度显著升高(见 3.2 节), 使得颗粒在喷射前就达到了较高的温度, 呈现白炽态。

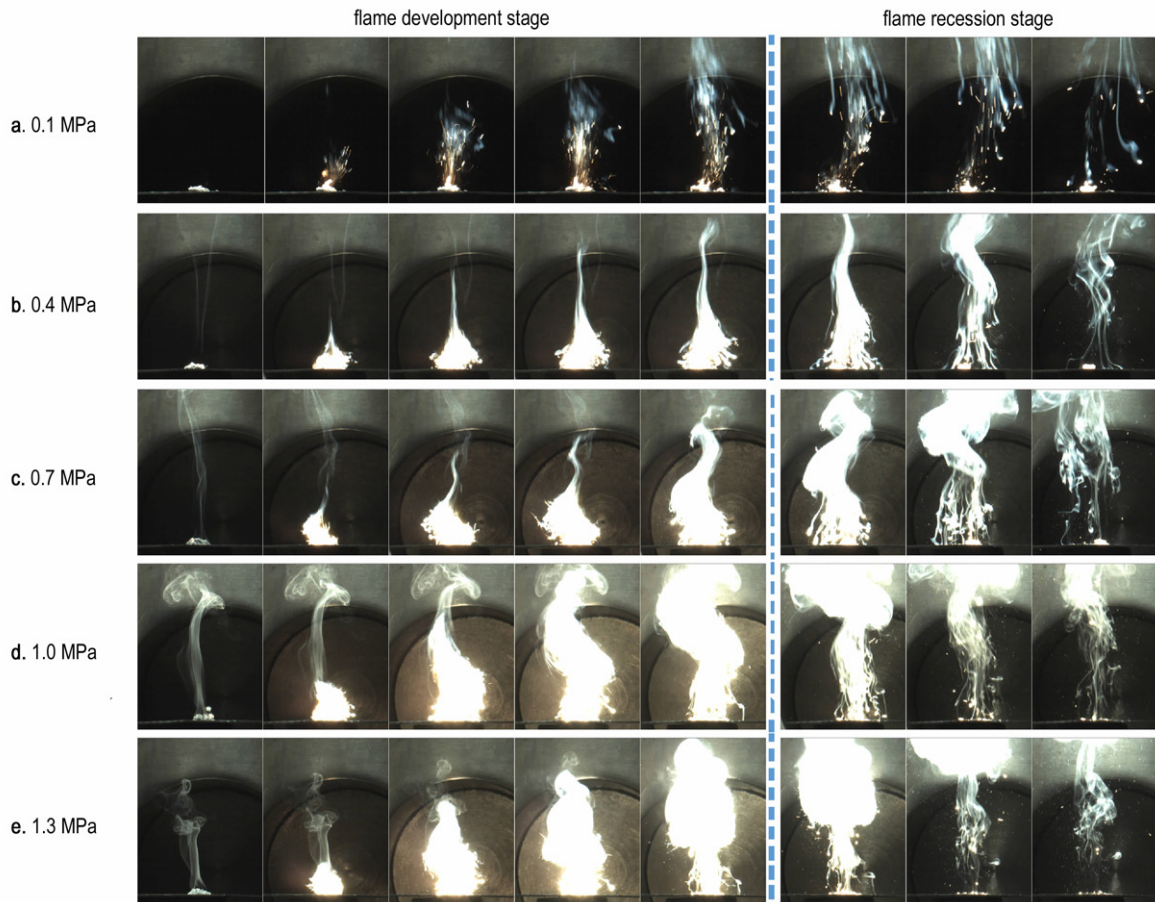


图 5 样品燃烧火焰发展演变过程

Fig.5 Images of flame evolution process

3.2 燃烧温度分析

表 1 为整个燃烧过程中样品表面所能达到的最高温度, 能在一定程度上定量地反映样品燃烧过程中放热强度的大小。由表 1 可以看出, 随着压力的升高, 样品表面所能达到的最高温度也越来越高。常压下样品放热最少, 表面的最高温度最低, 为 1239 °C, 因此火焰的总体亮度最小, 可以看到大量橙黄色火星, 如图 3a 和图 5a 所示。当压力升高至 1.3 MPa 时, 样品表面的最高燃烧温度达到 1441 °C, 此时的火焰为明亮的白色, 放热强度最大, 如图 3e 和图 5e 所示。表明压力的升高有助于样品燃烧的放热。

此外, 不同压力下样品表面的最高温度均低于氧化铝的熔点 (2323 K)。根据铝颗粒的熔散氧化机理^[12], 铝颗粒内部的活性铝 (熔点 660 °C) 先于外层的氧化铝膜融化后, 体积增大, 在铝颗粒内部产生极大压力 (1~3 GPa), 致使外层氧化铝膜破裂。氧化铝膜破裂之后, 铝颗粒内部的压力不变, 裸露出来的活性铝表面的压力则显著减小 (~10 MPa), 由此在融化的活性铝中产生一个向铝颗粒中心传播的卸载波, 使得融化的铝破碎成高速 (100~250 m·s⁻¹) 喷射的小颗粒。在这一机理的作用下, 即使温度远低于氧化铝熔点, 铝颗粒也能发生点火和燃烧。

表 1 纳米铝粉/RDX 表面的最高温度

Table 1 The maximum temperature of nano-aluminum/RDX mixture samples surface

pressure/MPa	maximum temperature/°C
0.1	1239
0.4	1296
0.7	1361
1.0	1369
1.3	1441

3.3 燃烧光谱分析

为了更好地把握样品的点火和燃烧过程,对其发射光谱进行分析。图 6 为不同压力下样品燃烧过程中发射光谱强度最大时刻的图像。从图 6 中可知,随着压力的提高,样品燃烧过程中的最大发射光谱强度也不断升高。1.0 MPa 和 1.3 MPa 条件下的最大发射光谱强度较为接近,这与图 5d 和图 5e 所示的火焰图像相符合。在这两个压力下样品燃烧均较为完全,燃烧程度相近,因此两者的最大强度光谱差异不大。

不同压力条件下,样品最大强度光谱的趋势基本吻合,均在 468.9, 487.4, 511.8 nm 处出现了较为明显的 AIO 自由基的特征峰^[13]。AIO 是铝颗粒燃烧过程中一种重要的中间产物,其特征峰的出现标志着纳米铝颗粒的点火和燃烧。当压力高于常压时,在 397.3 nm 处还出现了相对较弱的 Al 蒸汽的特征光谱,根据铝颗粒的燃烧机理^[14],这是因为压力升高时,样品燃烧更加剧烈,更多铝颗粒表面的氧化层破裂导致内部活性铝暴露出来,由此观测到了相对较为明显的 Al 蒸汽的特征峰。

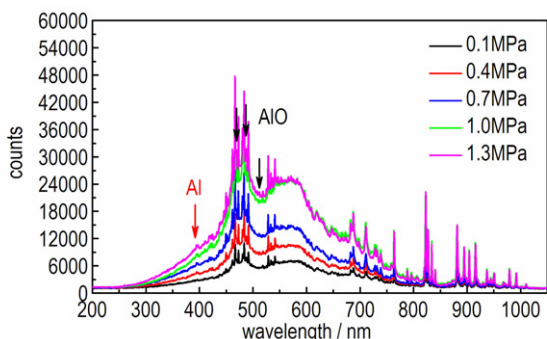


图 6 样品燃烧过程中的最大强度光谱

Fig.6 Maximum emission spectrum curves during combustion

RDX 点火后,热解产物如 NO 和 NO₂ 将被消耗,产生 CN、OH 等自由基。但对样品的发射光谱进一步分析发现,实验条件下并没有观测到明显的 CN 和

OH 自由基的特征光谱。由于不同压力下样品表面的最高温度均在 1200°C 以上(表 1),高于 RDX 的爆燃点,因此可以判定此时 RDX 发生了反应。没有找到 CN 和 OH 自由基特征光谱的原因主要在于样品 RDX 含量较少。

由于样品中纳米铝粉的含量较高,其质量分数高达 85%,因此可以用纳米铝粉的点火延迟时间和燃烧时间代表样品的点火延迟时间和自维持燃烧时间。在表征铝粉燃烧的 AIO 自由基的特征光谱中,位于 486.3 nm 处的特征光谱的强度最大,所以根据这一位置的特征光谱出现和消失的时间,计算样品点火延迟时间和自维持燃烧时间的具体数值。对多组实验数据计算后取平均值,结果如图 7 所示。

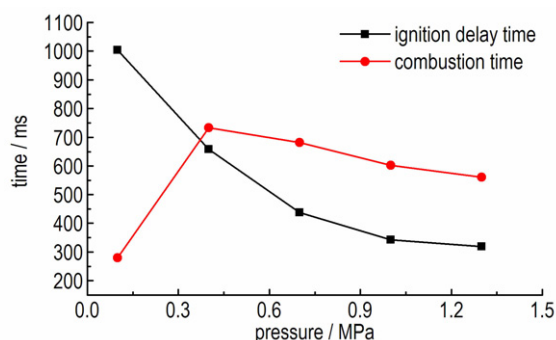


图 7 样品的点火延迟时间和自维持燃烧时间

Fig.7 Ignition delay and combustion time of samples

从图 7 可以看出,随着压力的升高,样品的点火延迟时间呈现明显的减小趋势。常压下样品的点火延迟时间最长,为 1004 ms,1.3 MPa 条件下的点火延迟时间最短,为 319.2 ms。表明压力的提高有助于样品的点火。当压力高于常压时,样品的自维持燃烧时间也随压力的增加而减小,但变化范围相对较小(733.6 ~ 560.8 ms)。常压下样品的自维持燃烧时间最短,只有 280 ms,这是因为常压下样品燃烧最不完全,有较多样品没有燃尽,如图 5a 所示。总体而言,压力升高能有效促进样品的燃烧。

对应于燃烧火焰形貌特征(3.1)的内容,规定 AIO 特征峰从出现至达到最大值的过程为火焰发展阶段,峰值由最大值开始下降直至消失的过程为火焰衰退阶段,由此计算出火焰发展阶段在整个燃烧过程中的比重,计算结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,所有压力下火焰发展时间所占的比重均小于 50%,即火焰发展阶段的持续时间明显小于火焰衰退阶段。原因在于燃烧时产生的氧化铝的沸点(3253 K)比熔点

(2323K)高^[17],随着火焰的发展,氧化铝先融化并以液膜的形态覆盖在样品表面,一定程度上阻碍了样品与外部氧气的接触和反应,使得火焰发展时间缩短,衰退时间延长。

表2 火焰发展阶段在整个燃烧过程中的比重

Table 2 Proportion of the flame development phase throughout the combustion process

pressure /MPa	self-sustaining burning time/ms	flame development time/ms	proportion of flame development time/%
0.1	280.0	84.8	37.2
0.4	733.6	176.0	24.0
0.7	682.4	112.0	16.4
1.0	602.4	103.2	17.1
1.3	560.8	101.6	18.1

4 结 论

利用中压聚光升温点火实验台,从火焰形貌、燃烧温度和燃烧光谱方面研究了不同压力下纳米铝粉/RDX混合物的聚光点火燃烧特性。

(1)样品点火前存在明显的受热蒸发阶段,有乳白色烟雾从样品表面升起。烟雾中包含受热蒸发的RDX及其热解产物NO、NO₂等。样品点火后火焰的演变过程包括发展和衰退两个阶段。发展阶段的持续时间明显小于衰退阶段。常压下的样品燃烧过程伴有橙黄色火星,压力高于常压时火焰呈白炽态。压力升高有助于增大样品燃烧强度,但过高的压力会限制燃烧火焰形貌的发展。

(2)随着环境压力升高,样品表面的最大燃烧温度也越来越高。常压下样品表面的最高温度为1239℃,当压力升高至1.3 MPa时,样品表面的最高燃烧温度为1441℃。均低于氧化铝膜的熔点,此时样品中铝颗粒的氧化反应符合熔散氧化机理。

(3)不同压力下,样品的最大强度光谱的趋势基本吻合,均可看到铝粉燃烧的中间产物AlO的特征峰。压力高于常压时,还能观察到Al蒸汽的特征峰。总体而言,随着压力的提高,样品的最大发射光谱强度增大,点火延迟时间缩短。常压下样品的点火延迟时间为1004 ms,1.3 MPa下点火延迟时间为319.2 ms。常压下样品的自维持燃烧时间最短,此时样品燃烧最不完全。当压力从0.4 MPa逐渐升高至1.3 MPa时,样品的自维持燃烧时间由733.6 ms逐渐缩短至560.8 ms。

参考文献:

- [1] 王文俊, 张占权. 21世纪初固体推进剂技术展望[J]. 推进技术, 2000, 21(6): 1-5.
WANG Wen-jun, ZHANG Zhan-quan. Prospect for solid propellant technologies at the beginning of the 21th century[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(6): 1-5.
- [2] 刘建平. 国外固体推进剂技术现状和发展趋势[J]. 固体火箭技术, 2000, 23(1): 22-26.
LIU Jian-ping. Current situation and trend of solid propellant technology abroad[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2000, 23(1): 22-26.
- [3] 王文俊. 含能材料技术的进展与展望[J]. 固体火箭技术, 2003, 26(3): 42-45.
WANG Wen-jun. Advances and prospects of energetic material technologies[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2003, 26(3): 42-45.
- [4] 庞维强, 樊学忠. 金属燃料在固体推进剂中的应用进展[J]. 化学推进剂的高分子材料, 2009, 7(2): 1-14.
PANG Wei-qiang, FAN Xue-zhong. Application Progress of Metal Fuels in Solid Propellants[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2009, 7(2): 1-14.
- [5] 田入园, 张领科. 铝颗粒燃烧实验及理论研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(7): 137-143.
TIAN Ru-yuan, ZHANG Ling-ke. Literature review of single aluminum combustion model and theoretical research[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2016, 37(7): 137-143.
- [6] Sundaram D S, Yang V, Zarko V E. Combustion of nano aluminum particles[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2015, 51(2): 173-196.
- [7] Mench M M, Yeh C L, Kuo K K. Propellant burning rate enhancement and thermal behavior of ultra-fine aluminum powders (Alex) [C] // 29th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany, 1998: 30.1-30.15.
- [8] Liao Y C, Yang V. Analysis of RDX monopropellant combustion with two-phase subsurface reactions[J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2012, 11(4): 729-739.
- [9] Volkov E N, Paletsky A A, Korobeinichev O P. RDX flame structure at atmospheric pressure[J]. *Combustion Explosion & Shock Waves*, 2008, 44(1): 43-54.
- [10] 郝海霞, 裴庆, 南宝江, 等. RDX-CMDB推进剂激光点火特性[J]. 含能材料, 2011, 19(3): 276-281.
HAO Hai-xia, PEI Qing, NAN Bao-jiang, et al. Laser ignition characteristics of RDX-CMDB propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(3): 276-281.
- [11] Parr T, Hanson-Parr D. RDX ignition flame structure[C] // Symposium (International) on Combustion. Elsevier, 1998, 27(2): 2301-2308.
- [12] Levitas V I, Asay B W, Son S F, et al. Mechanochemical mechanism for fast reaction of metastable intermolecular composites based on dispersion of liquid metal[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(8): 083524.
- [13] Servaites J, Krier H, Melcher J C, et al. Ignition and combustion of aluminum particles in shocked H₂O/O₂/Ar and CO₂/O₂/Ar mixtures[J]. *Combustion and flame*, 2001, 125(1): 1040-1054.
- [14] Brooks K P, Beckstead M W. Dynamics of aluminum combustion [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1995, 11(4): 769-780.
- [15] 成红刚, 陈雄, 周长省, 等. 铝颗粒燃烧特性研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2010, 31(3): 84-88.
CHENG Hong-gang, CHEN Xiong, ZHOU Chang-sheng, et al. Research progress on combustion characteristics of aluminum Particles[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2010, 31(3): 84-88.

Effect of Pressure on Condensing Ignition and Combustion Characteristics of Nano-Aluminum/RDX Mixture

YUAN Ji-fei, LIU Jian-zhong, WANG Jian-ru, XU Tuan-wei, CHEN Bing-hong, LIANG Dao-lun, ZHOU Jun-hu

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Institution of Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710025, China)

Abstract: Aluminum Powder and RDX are important metal fuels and energetic oxidants in the field of solid propellants. The ignition test of nano-aluminum/RDX mixture samples at different pressures (0.1, 0.4, 0.7, 1.0 MPa and 1.3 MPa) was carried out using a medium-pressure condenser heating experimental bench. The high speed photographer, two-color infrared thermometer and fiber optic spectrometer were used to study the combustion process. Results show that there is a significant heat evaporation stage before ignition. The duration of the flame development stage is less than that of the recession stage. Increasing pressure can effectively increase the combustion strength, but too high pressure will inhibit the flame development. As the pressure increases, evaporation stage and ignition overlap and ignition delay time is shortened. Based on the experimental conditions, the ignition delay time was 1004 ms at 0.1 MPa, and the maximum temperature was 1239 °C. At 1.3 MPa, the ignition delay time was reduced to 319.2 ms, and the maximum temperature increased to 1441 °C. At 0.1 MPa, samples burn incomplete and the self-sustaining burning time is the shortest. When the pressure is higher than 0.1 MPa, the self-sustaining burning time decreases with increasing pressure.

Key words: nano-aluminum; hexogen (RDX); ignition; combustion characteristic; pressure

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.04.002