

文章编号: 1006-9941(2015)09-0908-07

## 含纳米金属粉 AP/HTPB 复合固体推进剂的激光点火特性

郝海霞<sup>1</sup>, 姚二岗<sup>1</sup>, 王宝兴<sup>2</sup>, 赵凤起<sup>1</sup>, 徐司雨<sup>1</sup>, 裴庆<sup>1</sup>

(1. 西安近代化学研究所燃烧与爆炸技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 2. 北方斯伦贝谢油田技术(西安)有限公司, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 采用 CO<sub>2</sub> 激光(波长 10.6 μm)点火法,研究了微米 Al 粉、纳米 Al 粉、纳米 Ti 粉及含金属粉的 AP/HTPB 复合固体推进剂在不同激光功率密度条件下的点火特性,探讨了 Al 粉粒径对其点火性能的影响和金属粉对 AP/HTPB 复合固体推进剂点火的影响规律。结果表明,在激光功率密度为 77.6~365.1 W·cm<sup>-2</sup> 条件下,Al 粉的点火延迟时间随着激光功率密度增加逐渐减小; Al 粉粒径越小,其点火延迟时间越短 ( $t_{\text{al-50}} < t_{\text{N-Al}} < t_{\text{al-150}} < t_{\text{al-200}} < t_{5\mu\text{m}}$ ),点火能量越小 ( $E_{\text{al-50}} < E_{\text{N-Al}} < E_{\text{al-150}} < E_{\text{al-200}} < E_{5\mu\text{m}}$ )。相同激光功率密度条件下,150 nm Ti 粉的点火延迟时间和点火能量明显要小于 150 nm Al 粉,且两者的点火过程差异较大。含金属粉的 AP/HTPB 复合固体推进剂点火延迟时间顺序为  $t_{\text{RX-0}} > t_{\text{HT-5A}} > t_{\text{HT-1A}} > t_{\text{HT-4A}} > t_{\text{HT-3T}}$ ,点火能量顺序为  $E_{\text{RX-0}} > E_{\text{HT-5A}} > E_{\text{HT-1A}} > E_{\text{HT-4A}} > E_{\text{HT-3T}}$ ,与相应金属粉的点火延迟时间顺序一致 ( $t_{5\mu\text{m}} > t_{\text{al-200}} > t_{\text{N-Al}} > t_{\text{al-50}} > t_{\text{Ti-150}}$ ),且点火均首先发生在样品表面。

**关键词:** 点火延迟时间; 激光点火; 纳米金属粉; 复合固体推进剂

中图分类号: TJ55; V512

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.09.014

## 1 引言

金属燃烧剂作为现代固体推进剂的重要组成部分之一,在提高推进剂的爆热和密度的同时,燃烧生成的固体金属氧化物微粒可抑制振荡燃烧。铝粉具有高密度、燃烧焓高,原料来源丰富、成本较低,因此被广泛应用于推进剂和火炸药中<sup>[1-3]</sup>。然而普通铝粉和微米级铝粉的点火延迟时间长和燃烧动力慢使得它们在推进剂燃烧表面上容易凝结成大的“集块”,延长了燃烧时间,致使铝粉燃烧不完全,燃烧效率低<sup>[3]</sup>。由于纳米级金属粉具有尺寸小、比表面积大、表面原子配位不全等特点,具有很高的化学反应活性,许多研究者将其应用于推进剂中,以提高燃速,降低压强指数,改善推进剂的燃烧性能<sup>[4-8]</sup>。如高东磊等人<sup>[4]</sup>研究了纳米铝粉的氧化特性和含纳米铝粉的复合推进剂燃烧性能,发现纳米铝粉的氧化特性不同于普通铝粉,且添加适量纳米铝粉可在较宽的压力范围内明显提高复合推进剂燃速。江治等人<sup>[5]</sup>研究发现在高氯酸铵(AP)/端羟基

聚丁二烯(HTPB)推进剂中加入纳米 Al 粉和 Ni 粉可缩短点火延迟时间,降低着火温度,提高燃速,使推进剂得到充分燃烧。L. Meda 等人<sup>[9]</sup>采用 30 nm Al 粉代替 3 μm Al 粉加入到复合推进剂中,燃速提高了 2 倍,点火延迟时间仅为原料的 1/2。但是,通常铝粉表面容易被氧化形成致密的三氧化二铝壳层,高活性的纳米铝在有氧的环境中极易被氧化,粒径越小,其活性铝的有效含量越低,燃烧热值也越低<sup>[4]</sup>,因此,纳米铝粉的粒度和用量对复合固体推进剂的性能有很大影响。

本研究主要针对 50~200 nm 的纳米金属粉取代 10% 的普通铝粉,添加到固体复合推进剂,采用激光点火的方法研究不同粒径的微米和纳米 Al 粉、纳米 Ti 粉的点火延迟时间,了解其在空气中的反应活性以及不同金属粉对复合固体推进剂点火的影响规律,以期该类金属粉及复合固体推进剂的点火、燃烧等机理研究和模型建立提供参考。

## 2 实验

## 2.1 点火试件的制备

## (1) 金属粉点火试件的制备

研究中所使用的金属粉为微米 Al 粉和纳米金属粉,微米 Al 粉包括三种球形 Al 粉,  $d_{50}$  分别 5 μm、18 μm 和 29 μm; 纳米金属粉包括纳米 Al 粉和纳米 Ti

收稿日期: 2014-06-17; 修回日期: 2014-11-27

作者简介: 郝海霞(1980-),女,副研究员,主要从事固体推进剂激光点火和燃烧性能研究。e-mail: haohx99@163.com

通信联系人: 赵凤起(1963-),男,研究员,主要从事固体推进剂性能研究。e-mail: npecc@163.com

粉,其中纳米铝粉为两类,一类由西安近代化学研究所制得的纳米 Al 粉(N-Al), $d_{50}$ 为 100~150 nm;另一类为市售, $d_{50}$ 分别为 50 nm(Jal-50)、150 nm(Jal-150)、200 nm(Jal-200);纳米 Ti 粉  $d_{50}$ 为 150 nm(Ti-150)。

称取一定量的金属粉(45~50 mg)放入刚玉坩埚( $\phi 5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ )内,将坩埚内的样品振动平实,即制得点火试件。

## (2) 含纳米金属粉复合固体推进剂点火试件制备

复合固体推进剂的基础配方为:HTPB+增塑剂和固化剂共 14%,AP(1  $\mu\text{m}$ +13  $\mu\text{m}$ +105  $\mu\text{m}$ )71%,其余为金属粉,具体见表 1。

复合固体推进剂样品(500 g)的制备工艺:按上述配方称取相应原料,加入 2 L 立式捏合机中充分混合,药浆采用真空浇铸法,70  $^{\circ}\text{C}$  固化 3 d。切成 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 3 mm 的片,取表面平整均质的片作为点火试件。

表 1 复合固体推进剂中金属粉含量

Table 1 Mass fraction of metal powders in composite solid propellants

sample	5 $\mu\text{m}$ Al powder /%	nano powder	content of nano powder /%
RX-0	15	-	-
HT-1A	5	N-Al	10
HT-3T	5	Ti-150	10
HT-4A	5	Jal-50	10
HT-5A	5	Jal-200	10

## 2.2 激光点火试验装置

采用与文献[10]相同的实验装置,利用光电转换测试电路获得试样点火信号,同时利用数据采集系统对激光器出光信号同步记录,从而获得其点火延迟时间。试验装置主要由激光能源系统、实验容器、测试记录系统、点火过程摄录四部分组成。其中激光能源采用最大功率为 120 W、输出波长为 10.6  $\mu\text{m}$  的  $\text{CO}_2$  连续激光器(型号 SLC110),激光束的光斑直径为 5.0 mm。点火过程中激光持续到点火反应发生以后;实验容器规格为  $\phi 300\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ ,具有视窗可观察容器内点火过程,内置实验样品放置平台;测试记录系统由 TEK DPO4034 高性能数字示波器、台式计算机和光电测试电路组成,用于试验过程参数的测试、记录及数据处理。

## 3 实验结果及讨论

激光点火试验环境为常温常压。金属粉的点火延

迟时间是指激光开始作用到试样表面、发生反应后产生发光信号的这段时间。复合固体推进剂的点火延迟时间是指激光开始作用到试样表面到产生明亮火焰的时间。点火能量是指点火延迟时间内作用激光持续的总能量。

金属粉点火试件是将刚玉坩埚底部固定在燃烧实验容器内试样平台上,复合固体推进剂点火试件直接固定于试样平台,激光垂直作用于样品表面中心。点火实验在每一个功率密度作用下进行 5~10 次(具体次数视数据的重复性确定),最终的点火延迟时间和点火能量取平均值。

## 3.1 金属粉的激光点火特性

### 3.1.1 微米 Al 粉的激光点火特性

不同粒度的微米 Al 粉的平均点火延迟时间和点火能量随激光功率密度(77.6~365.1  $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )变化曲线如图 1 和图 2 所示,5  $\mu\text{m}$  Al 粉的典型点火过程如图 3 所示(18  $\mu\text{m}$  和 29  $\mu\text{m}$  Al 粉的点火过程与 5  $\mu\text{m}$  Al 粉的相似)。

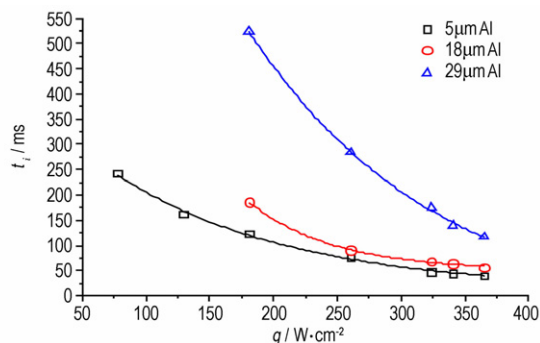


图 1 微米铝粉的点火延迟时间随激光功率密度变化曲线

Fig. 1 Curves of ignition delay time vs heat fluxes for micro Al powders with different particle size

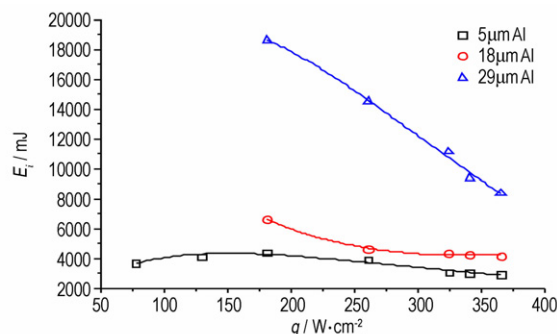


图 2 微米铝粉的点火能量随激光功率密度变化

Fig. 2 Curves of ignition energy vs heat fluxes for micro Al powders with different particle size

从图 1 和图 2 可以看出,随着激光功率密度的增

加,微米铝粉的点火延迟时间呈现递减的趋势; 粒径越小, 点火延迟时间越短, 其点火能量相应越低。5  $\mu\text{m}$  铝粉的点火能量先是随着激光功率密度增加而增加, 当激光功率密度达到  $181.0 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  后, 点火能量随着激光功率密度继续增加而减小, 存在一个最高能量值, 约  $4405 \text{ mJ}$ ; 而  $18 \mu\text{m}$  和  $29 \mu\text{m}$  Al 粉的点火试验在  $181.0 \sim 365.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  的激光功率密度下进行, 点火能量随着激光功率密度增加而减少。从点

火结束后, 微米金属粉点火试件样品表面并没有白色物质形成, 而是在内部形成凝结的铝块或者铝球, 表明虽然铝粉在激光作用下发生发光现象, 但其并未发生氧化反应生成白色三氧化二铝, 说明微米铝粉在试验的激光能量范围内, 铝粉表面的氧化层熔融后颗粒之间更容易发生聚集形成大的铝颗粒, 而不是进一步发生氧化反应, 这也可能是因为环境温度较低, 发生氧化反应能量不足, 表明其反应活性较低。

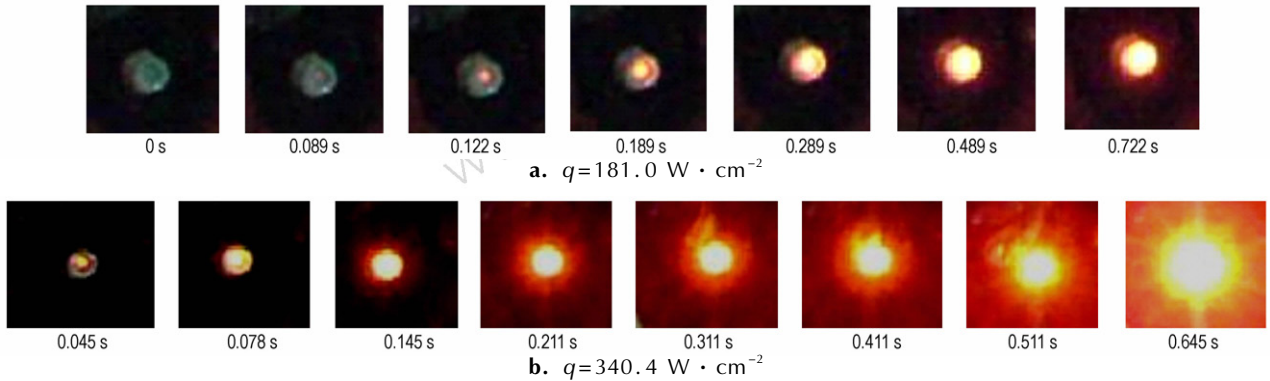


图3 不同激光功率密度条件下  $5 \mu\text{m}$  Al 粉的典型点火过程  
Fig.3 Typical ignition process of  $5 \mu\text{m}$  Al powder at different heat fluxes

### 3.1.2 纳米 Al 粉和 Ti 粉的激光点火特性

实验在激光功率密度为  $83.0 \sim 287.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  范围内的条件下进行。不同粒度的纳米 Al 粉和 Ti 粉的平均点火延迟时间和点火能量随激光功率密度变化曲线如图 4 和图 5 所示, Jal-150 和 Ti-150 的典型点火过程 ( $130.7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) 如图 6 和图 7 所示。

从图 4 可以看出, 随着激光功率密度的增加, 纳米 Al 粉点火延迟时间呈现递减的趋势。在试验的激光功率密度范围内, 纳米铝粉的点火延迟时间的顺序为  $t_{\text{Jal-50}} < t_{\text{N-Al}} < t_{\text{Jal-150}} < t_{\text{Jal-200}}$ , 图 5 显示的点火能量的顺序为  $E_{\text{Jal-50}} < E_{\text{N-Al}} < E_{\text{Jal-150}} < E_{\text{Jal-200}}$ 。在功率密度大于  $190.0 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  时, 点火延迟时间的顺序为  $t_{\text{Jal-50}} \approx t_{\text{N-Al}} < t_{\text{Jal-150}} < t_{\text{Jal-200}}$ 。粒度对点火在较低功率密度时影响较大, 基本呈现出粒度越小, 点火时间越短的规律。

通常认为铝粉的点火是由于表面氧化层破坏, 内核已融化的金属铝液体才会与氧化剂接触发生化学反应, 含氧化铝壳层的 Al 粉在加热过程中内部建立起的压力引起壳层破坏, 使 Al 能够和空气中的氧化剂发生化学反应<sup>[11-12]</sup>。铝粉的点火能量与颗粒的质量近似成正比, 当激光辐射到铝粉表面时, 热量将大于其本身所需要的点火能, 大部分颗粒可以迅速达到点火温度<sup>[5]</sup>。颗粒越大, 其所需点火能量越高, 因此, 在相同

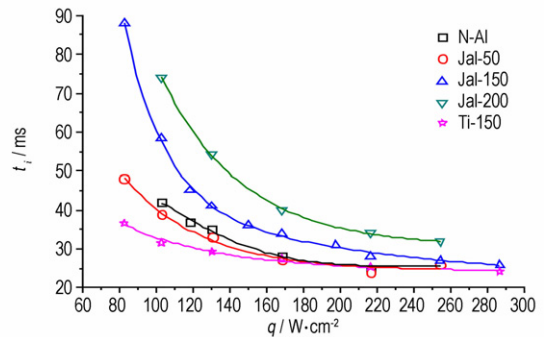


图4 纳米金属粉的点火延迟时间随激光功率密度变化  
Fig.4 Curves of ignition delay time vs heat fluxes for different nano metal powders

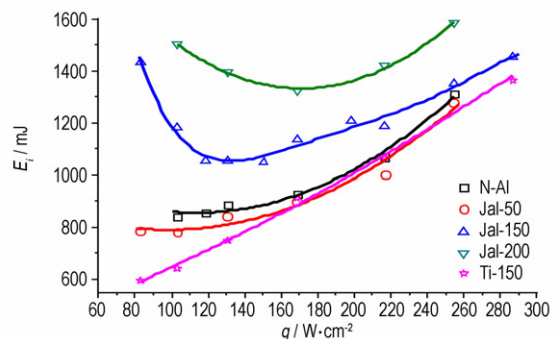


图5 纳米金属粉的点火能量随激光功率密度变化  
Fig.5 Curves of ignition energy vs heat fluxes for different nano metal powders

的激光功率密度时,颗粒大的铝粉点火延迟时间越长。随着激光功率密度的增加,颗粒本身的差异对点火的影响减弱,从而出现了几种纳米铝粉点火延迟时间逐渐接近的现象。从图 6 可知,随着激光作用时间的增加,纳米铝粉的点火反应逐渐变得剧烈,而且在激光中止后试样表面出现小的火星状的铝颗粒继续燃烧。点火试验结束后,纳米 Al 粉的点火试件表面是白色的三氧化二铝,也表明点火发生后纳米金属粉均发生了氧化反应。

纳米 Ti 粉的点火延迟时间随着激光功率密度增

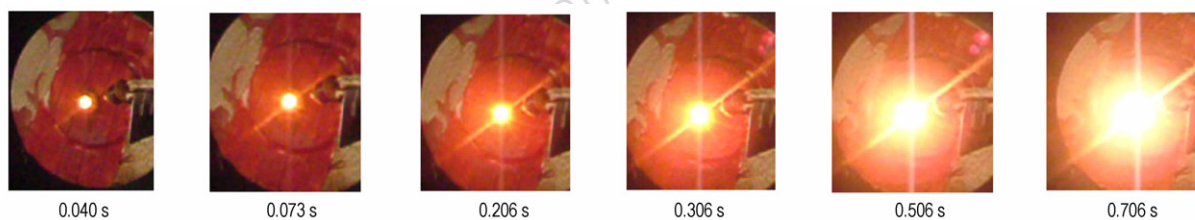


图 6 Jal-150 的典型点火过程

Fig. 6 Typical ignition process of Jal-150 at  $130.7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$

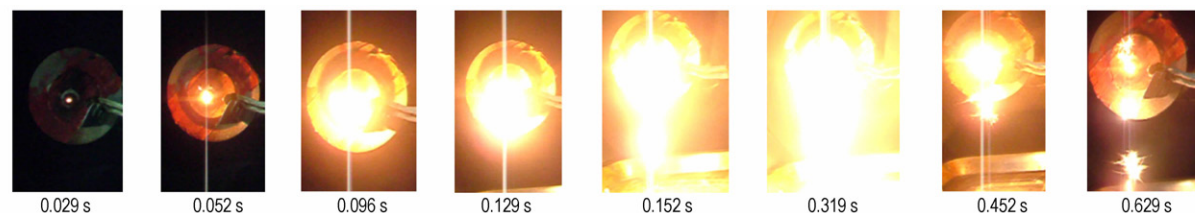


图 7 Ti-150 的典型点火过程

Fig. 7 Typical ignition process of Ti-150 at  $130.7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$

### 3.2 含金属粉的复合固体推进剂点火特性

实验在功率密度为  $72.1 \sim 208.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  范围内的条件下进行,含不同金属粉的复合固体推进剂的平均点火延迟时间和点火能量随激光功率密度变化曲线如图 8 和图 9 所示,典型点火过程如图 10 ~ 图 14 所示。

由图 8 可知,含金属粉复合固体推进剂的点火延迟时间随着激光功率密度的增加呈现递减的趋势。在相同激光功率密度条件下,含金属粉复合固体推进剂的点火延迟时间和点火能量顺序分别为  $t_{\text{RX-0}} > t_{\text{HT-5A}} > t_{\text{HT-1A}} > t_{\text{HT-4A}} > t_{\text{HT-3T}}$ ,图 9 显示的点火能量顺序为  $E_{\text{RX-0}} > E_{\text{HT-5A}} > E_{\text{HT-1A}} > E_{\text{HT-4A}} > E_{\text{HT-3T}}$ ,表明不同金属粉复合固体推进剂的点火延迟时间与金属粉的点火延迟时间趋势一致 ( $t_{5\mu\text{m}} > t_{\text{Jal-200}} > t_{\text{N-Al}} > t_{\text{Jal-50}} > t_{\text{Ti-150}}$ )。由图 10 ~ 图 14 可知,点火均首先在试样表面形成小的火焰,然后迅速扩展,并可持续燃烧。从火焰初期的明亮程度判断,火

焰初期有金属粉的参与。对于 HTPB/AP 体系的复合固体推进剂,金属粉使 HTPB/AP 主要分解过程的放热和气相产物逸出时间缩短,分解速率提高<sup>[13]</sup>。纳米级金属粉的表面效应导致其表面具有很多的催化活性位,催化活性很高,纳米金属粉对 AP/HTPB 推进剂热分解的催化效果,主要来源于纳米金属粉对 AP/HTPB 推进剂中 AP 热分解的催化作用<sup>[14]</sup>。同时,复合固体推进剂的点火阈值的大小主要取决于组分的热属性、化学分解动力学以及组分的光学性质等因素,由于纳米金属粉具有宽频带的强吸收,在复合固体推进剂中加入少量的纳米金属粉可有效地提高推进剂对于热量的吸收,从而进一步改善其点火性能<sup>[5]</sup>。因此,在 AP/HTPB 的配方体系中,金属粉对含金属粉复合固体推进剂的点火延迟时间有明显影响,金属粉的点火延迟时间越短,相应含该金属粉的复合固体推进剂的点火延迟时间越短。

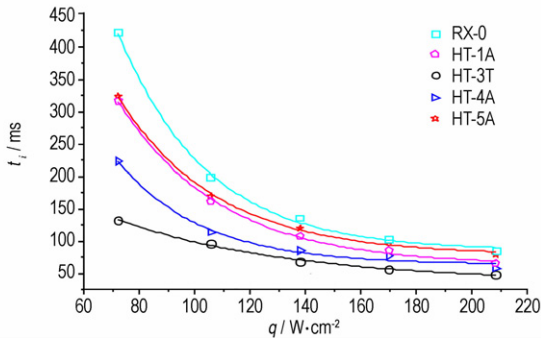


图 8 不同复合固体推进剂的点火延迟时间随激光功率密度变化  
**Fig. 8** Curves of ignition delay time vs heat fluxes for different composite solid propellants

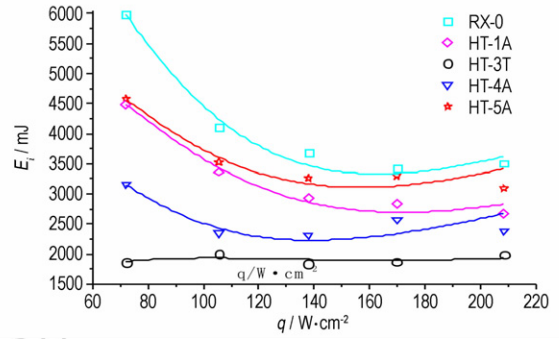


图 9 不同配方复合固体推进剂的点火能量随激光功率密度变化  
**Fig. 9** Curves of ignition energy vs heat fluxes for different composite solid propellants

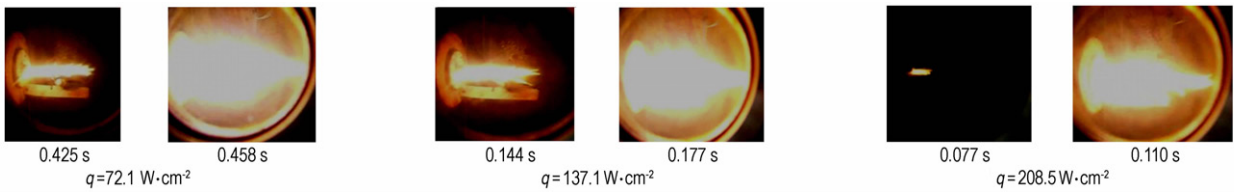


图 10 RX-0 在不同激光功率密度条件的典型点火过程  
**Fig. 10** Typical ignition process of RX-0 at different laser fluxes

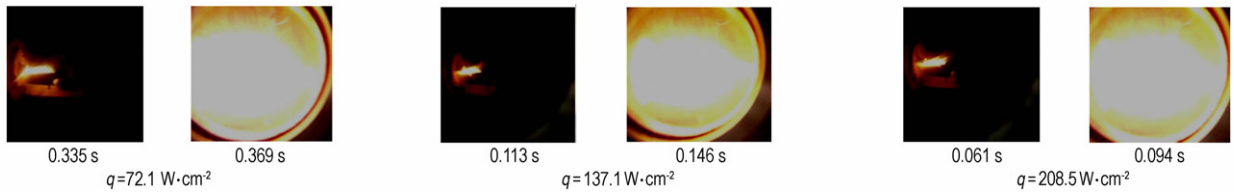


图 11 HT-1A 在不同激光功率密度条件下的典型点火过程  
**Fig. 11** Typical ignition process of HT-1A at different laser fluxes

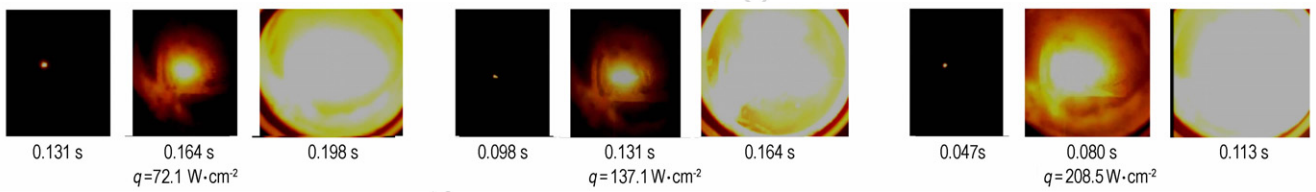


图 12 HT-3T 在不同激光功率密度条件下的典型点火过程  
**Fig. 12** Typical ignition process of HT-3T at different laser fluxes

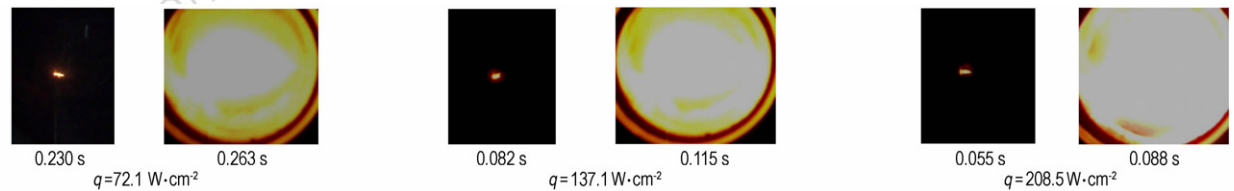


图 13 HT-4A 在不同激光功率密度条件下的典型点火过程  
**Fig. 13** Typical ignition process of HT-4A at different laser fluxes

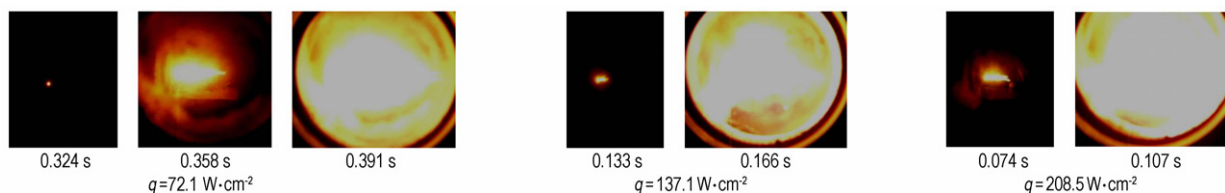


图 14 HT-5A 在不同激光功率密度条件下的典型点火过程

Fig.14 Typical ignition process of HT-5A at different laser fluxes

## 4 结 论

(1) 不同激光功率密度下 Al 粉的激光点火特性研究表明, Al 粉的粒度越小, 其点火延迟时间越短,  $t_{\text{Jal-50}} < t_{\text{N-Al}} < t_{\text{Jal-150}} < t_{\text{Jal-200}} < t_{5\mu\text{m}}$ , 点火能量越小,  $E_{\text{Jal-50}} < E_{\text{N-Al}} < E_{\text{Jal-150}} < E_{\text{Jal-200}} < E_{5\mu\text{m}}$ ; 且微米 Al 粉的点火远远难于纳米 Al 粉。

(2) 在相同激光功率密度条件下, Ti-150 的点火延迟时间和点火能量明显要小于 Jal-150, 且两者的点火过程差异较大。Ti-150 点火过程呈现熔融后液相飞溅喷射并继续燃烧的现象, Jal-150 未出现这种现象。

(3) 含金属粉的复合固体推进剂点火研究表明, 金属粉的点火延迟时间越短, 则含该金属粉的复合固体推进剂的点火延迟时间越短, 点火能量越低,  $E_{\text{HT-5A}} > E_{\text{HT-1A}} > E_{\text{HT-4A}} > E_{\text{HT-3T}}$ 。

### 参考文献:

- [1] 庞维强, 樊学忠. 金属燃料在固体推进剂中的应用进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2009, 7(2): 1-5.  
PANG Wei-qiang, FAN Xue-zhong. Application progress of metal fuels in solid propellants[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2009, 7(2): 1-5.
- [2] 刘晶如, 罗运军. 固体推进剂用金属燃烧剂的研究及应用[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2007, 5(4): 6-12.  
LIU Jing-ru, LUO Yun-jun. Study and application and incendiary for solid propellant[J]. *Chemical Propellant & Polymeric Materials*, 2007, 5(4): 6-12.
- [3] 张明, 梁彦, 唐庆明. 纳米铝粉在固体推进剂中的应用[J]. 火箭推进, 2006, 32(1): 35-39.  
ZHANG Ming, LIANG Yan, TANG Qing-ming. Progress in the application of nano aluminum powder in solid propellants[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2006, 32(1): 35-39.
- [4] 高东磊, 张炜, 朱慧, 等. 纳米铝粉在复合推进剂中的应用[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(5): 420-423.  
GAO Dong-lei, ZHANG Wei, ZHU Hui, et al. Application of nano-aluminum in composite propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2007, 30(5): 420-423.
- [5] 江治, 李疏芬, 李凯, 等. 含纳米金属粉的推进剂点火实验及燃

烧性能研究[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(2): 117-120.

- [6] JIANG Zhi, LI Shu-fen, LI Kai, et al. Research on the ignition and combustion properties of composite propellant containing nano metal powders[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2004, 27(2): 117-120.
- [7] DeLuca L T, Galfetti L, Severini F, et al. Burning of nano-aluminized composite rocket propellants[J]. *Combustion, Explosive and Shock Waves*, 2005, 41(6): 680-692.
- [8] Mench M M, Kuo K K, Yeb C L, et al. Comparison of thermal behavior of regular and ultra-fine aluminum powders (Alex) made from plasma explosion process[J]. *Combustion Science and Technology*. 1998, 135(2): 269-292.
- [9] 郝晶晶. 纳米金属粉用于固体推进剂的研究进展[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(12): 28-30.  
HAO Jing-jing. Progress in the application of nano metal powder in solid propellants[J]. *Ship Science and Technology*, 2010, 32(12): 28-30.
- [10] Meda L, Marra G, Galfetti L, et al. Nano-aluminum as energetic material for rocket propellants[J]. *Materials Science and Engineering C*, 2007(27): 1393-1396.
- [11] 郝海霞, 南宝江, 安亭, 等. 含 CL-20 改性双基推进剂激光点火特性[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502009-1-0502009-7.  
HAO Hai-xia, NAN Bao-jiang, AN Ting, et al. Laser ignition characteristics of CL-20 composite modified double-base propellants[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(5): 0502009-1, 7.
- [12] Fedorov A V, Kharlamova Y V. Ignition of an aluminum particle[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2003, 39(5): 544-547.
- [13] Rozenband V I, Vaganova N I. A strength model of heterogeneous ignition of metal particles[J]. *Combustion and Flame*, 1992, 88(1): 113-118.
- [14] 施震灏, 刘子如, 陈智群, 等. DSC-FTIR 联用研究 HTPB/AP 和 HTPB/AP/Al 体系的热分解[J]. 含能材料, 2007, 15(2): 105-108.  
SHI Zhen-hao, LIU Zi-ru, CHEN Zhi-qun, et al. Thermal decomposition of HTPB/AP and HTPB/AP/Al studied by DSC-FTIR[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(2): 105-108.
- [15] 李凤生, 刘磊力. 纳米金属粉对 AP 及 AP/HTPB 推进剂热分解的催化性能研究[J]. 含能材料, 2004, 12(增刊): 253-256.  
LI Feng-sheng, LIU Lei-li. Catalytic effect of nanometer metal powders on the thermal decomposition of AP and AP/HTPB solid propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(Suppl.): 253-256.

## Laser Ignition Characteristics of AP/HTPB Composite Solid Propellants Containing Metal Nanopowders

HAO Hai-xia<sup>1</sup>, YAO Er-gang<sup>1</sup>, WANG Bao-xing<sup>2</sup>, ZHAO Feng-qi<sup>1</sup>, XU Si-yu<sup>1</sup>, PEI Qing<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on Combustion and Explosion Laboratory, Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China; 2. North Schlumberger Oilfield Technology(Xi'an) Co.,Ltd, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Ignition characteristics of Al micro-powders, Al nanopowders, Ti nanopowder and amine perchlorate (AP) / hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) composite solid propellants containing metal powders were studied by CO<sub>2</sub> laser ignition method with a wavelength of 10.6 μm at different heat fluxes, and the effects of Al size on ignition characteristics of Al powders and the effect of the different metal powders on ignition characteristics of AP/HTPB composite solid propellants containing metal powders were discussed under heat fluxes from 77.6 W · cm<sup>-2</sup> to 365.1 W · cm<sup>-2</sup>. Results show that the ignition delay times of Al powders gradually decrease with the increasing of heat fluxes. The ignition delay time is shorter and the ignition energy is lower ( $t_{\text{Jal-50}} < t_{\text{N-Al}} < t_{\text{Jal-150}} < t_{\text{Jal-200}} < t_{5\mu\text{m}}$  and  $E_{\text{Jal-50}} < E_{\text{N-Al}} < E_{\text{Jal-150}} < E_{\text{Jal-200}} < E_{5\mu\text{m}}$ ) when the size of Al powder is smaller. The ignition energy and delay time of Ti powder is smaller than the Al powder when their size is 150nm and their ignition process are obviously different. The ignition of AP/HTPB composite solid propellants containing metal powders appears on the surface of the sample first, and the order of the ignition delay time is  $t_{\text{RX-0}} > t_{\text{HT-5A}} > t_{\text{HT-1A}} > t_{\text{HT-4A}} > t_{\text{HT-3T}}$  and the order of the ignition energy is  $E_{\text{RX-0}} > E_{\text{HT-5A}} > E_{\text{HT-1A}} > E_{\text{HT-4A}} > E_{\text{HT-3T}}$ , which is in accordance with the order of the ignition time of the corresponding metal powders ( $t_{5\mu\text{m}} > t_{\text{Jal-200}} > t_{\text{N-Al}} > t_{\text{Jal-50}} > t_{\text{Ti-150}}$ ).

**Key words:** ignition delay time; laser ignition; metal nanopowders; composite solid propellants

**CLC number:** TJ55; V512

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.09.014



读者·作者·编者

### 《含能材料》高品质炸药晶体研究专栏征稿

高品质炸药晶体的出现为钝感弹药的研究与应用开辟了一条重要途径,高品质炸药晶体因而也成为目前国内外含能材料研究领域的热点之一。为促进高品质炸药晶体的研究和应用,《含能材料》将于2015年开设高品质炸药晶体研究专栏,专题报道高品质炸药晶体的制备、表征、性能、应用等领域的最新研究成果,促进学者间的交流。欢迎相关研究学者投稿。来稿建议为英文。来稿时请选择对应的专栏。

《含能材料》编辑部