

Al 粉与高能炸药混合物的激光点火特性

郝海霞 姚二岗 赵凤起* 徐司雨 高红旭 裴庆

(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)

摘要 采用 CO₂ 激光点火的方法,研究了 Al 粉与 RDX、Al 粉与 HMX、Al 粉与 CL-20 混合物在不同激光功率密度作用下的点火特性,探讨了 Al 粉粒度、Al/RDX 比例以及不同高能炸药对混合物点火性能的影响。实验结果表明,在本实验的激光功率密度条件下,Al 粉与 RDX 等高能炸药混合物的点火均首先发生在试件表面,点火延迟时间随着激光功率密度增加呈现递减的趋势。在较低功率密度条件下,Al 粉的粒度和 Al/RDX 比例对微米 Al/RDX 混合物的点火影响较大,随着激光功率密度的增加,影响减弱;含纳米 Al 粉的混合物点火延迟时间短于含微米 Al 粉的混合物,且点火反应更剧烈。相同激光功率密度条件下,含纳米 Al 粉与 RDX 的混合物(M-QR)、纳米 Al 粉与 HMX 的混合物(M-QH)、纳米 Al 粉与 CL-20 混合物(M-QCL)的点火延迟时间顺序为 $t_{M-QR} > t_{M-QH} > t_{M-QCL}$,最小点火能量的顺序为 $E_{M-QR} > E_{M-QH} > E_{M-QCL}$,与 3 种高能炸药的最小点火能量的顺序 $E_{HMX} < E_{RDX} < E_{CL-20}$ 不同,其中纳米 Al 粉与 CL-20 的混合物点火反应最为剧烈。

关键词 激光技术; 物理化学; 点火延迟时间; 激光点火; Al 粉与炸药混合物

中图分类号 V512; TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0903003

Laser Ignition Characteristics of Mixtures of Aluminium Powder and Explosives

Hao Haixia Yao Ergang Zhao Fengqi Xu Siyu Gao Hongxu Pei Qing

(*Science and Technology on Combustion and Explosion Laboratory, Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China*)

Abstract Ignition characteristics of the mixtures of Al powder and pure RDX, HMX and CL-20 are studied by using CO₂ laser with a wavelength of 10.6 μm, and the effects of the Al granularity, the ratio of Al to RDX and different explosives of the mixtures on ignition characteristics of the mixtures are discussed under different laser heat fluxes. The results show that the ignition of the mixtures tested appears on the surface of the sample, and the ignition time delays of the mixtures gradually decrease with the increase of the laser flux. The effects of Al granularity and the ratio of Al to RDX on the sample ignition are larger at lower laser fluxes and slightly weaken with the laser flux increasing. The delay time of the mixture containing aluminium nano-powder is shorter than that of the mixture containing aluminium micro-powder, and the ignition process is more drastic. The order of the delay time of the mixtures of nano-aluminium with RDX (M-QR), HMX (M-QH) and CL-20 (M-QCL) is $t_{M-QR} > t_{M-QH} > t_{M-QCL}$ and the order of the minimum ignition energy is $E_{M-QR} > E_{M-QH} > E_{M-QCL}$ which is different from the order of RDX, HMX and CL-20 that is $E_{HMX} < E_{RDX} < E_{CL-20}$, and the ignition of the mixture of nano aluminium powder with CL-20 is the most violent.

Key words laser technique; physical chemistry; ignition delay time; laser ignition; mixture of aluminium powder and explosive

OCIS codes 140.3470; 140.3070; 350.3450; 350.5610; 350.6670

1 引言

铝粉作为一种常用的金属燃料,不仅成本低廉、

容易获得,而且将其添加到炸药或推进剂中可提高密度,增加能量释放效果^[1-4]。在推进剂中添加铝

收稿日期: 2013-03-10; 收到修改稿日期: 2013-04-25

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等方面的研究。

E-mail: haohx99@163.com

* 通信联系人。E-mail: npecc@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

粉,其氧化物 Al_2O_3 对火箭发动机工作时特定频率的不稳定燃烧具有抑制作用,还可改善推进剂的燃烧性能^[3]。但是,铝粉在燃烧过程中容易团聚,影响 Al 粉的燃烧,降低了其燃烧效率。为了提高铝粉的燃烧效率,通常采用小粒径的铝粉、甚至是纳米铝粉或铝粉表面改性活化等方法解决这一问题^[5-7]。目前,Al 粉在炸药和推进剂中的应用研究是一个热点,但 Al 粉在应用中如何释能以及释能效率的问题有待进一步探究。

RDX、HMX 和 CL-20 作为高能炸药应用到炸药和推进剂中,开展 Al 粉与 RDX 等高能炸药混合物的点火特性研究,可以为含 Al 和 RDX 等高能炸药化合物的燃烧爆炸反应特性、释能规律及模拟仿真技术提供必要的基础数据。激光以其输出能量高且可调、作用时间可控、作用区域集中、无干扰等特点,减少了点火过程的非均匀效应和热损失,已在点火药和推进剂点火性能研究方面有所报道^[8-14]。本文采用激光点火的方法研究 Al 粉与高能炸药混合物的点燃特性,为含这些组分的炸药和推进剂的燃烧释能规律及机理研究提供参考。

2 实 验

2.1 原料

球形铝粉,粒度 d_{50} 为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $18\ \mu\text{m}$; 纳米 Al 粉(命名为 QAl,西安近代化学研究所生产),粒度范围为 $100\sim 150\ \text{nm}$; 5 类 RDX、2 类 HMX 和 CL-20 均为工业品。

2.2 点火试件制备

2.2.1 微米 Al/RDX 混合物试样的制备

将微米铝粉与 RDX 分别以质量比 1:3(1 g:3 g)和 1:6(0.5 g:3 g)的比例加入 100 mL 环己烷中,超声波分散 30 min,将混合液倒入玛瑙研钵中研磨 20 min,静置除去上层环己烷后将上述两种混合物放入真空干燥箱中干燥。待完全干燥后,继续研磨 10 min 得 Al/RDX 混合物样品。其中 $5\ \mu\text{m}$ Al 粉和 RDX 以 1:3 混合的样品命名为 S-5A, $5\ \mu\text{m}$ Al 粉和 RDX 以 1:6 混合的样品命名为 S-5B。依此类推, $18\ \mu\text{m}$ Al 粉与 RDX 不同比例混合物的样品分别命名为 S-18A 和 S-18B。

2.2.2 纳米 Al 与 RDX 等高能炸药混合物试样的制备

由于纳米 Al 粉在环己烷中分散较难,故将纳米 Al 粉与 RDX 等高能炸药在手套箱中以 1:3(1 g:3 g)的比例混合,在玛瑙研钵中研磨 10 min

得 QAl/RDX 等混合物样品。纳米 Al 粉(QAl)与 5 类 RDX 混合的样品命名为 M-QR, QAl 与 2 类 HMX 混合的样品命名为 M-QH, QAl 与 CL-20 混合的样品命名为 M-QCL。

2.2.3 Al 与 RDX 等高能炸药点火试件的制备

称取一定量的混合物(约 50 mg)装入氧化铝坩埚($\Phi 5\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$)中,振动点平后静置 3~5 min,成为点火试件。进行点火实验时将坩埚底部固定于点火平台,使样品表面中心垂直于激光束。

2.3 激光点火实验装置

本研究中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进行同步记录,从而获得其点火延迟时间参数。实验装置主要由激光能源系统、实验容器、测试记录系统、点火过程摄录设备等 4 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 CO_2 连续激光器(型号 SLC110),激光束的光斑直径为 5.0 mm。点火实验容器规格为 $\Phi 300\ \text{mm}\times 400\ \text{mm}$,具有视窗可观察容器内点火过程,内置实验样品放置平台,实验开始前将装有样品的试件底部固定在燃烧器的平台上,使激光束可垂直作用于样品中心表面;测试记录系统包括 TEK DPO4034 高性能数字示波器、台式计算机和光电测试电路,用于实验过程参数的测试、记录及数据处理,实验装置示意图见参考文献[8]。

激光点火实验环境为常温常压,点火过程中激光持续到点火反应发生以后。试样的点火延迟时间是指激光开始作用到试样表面至产生发光信号的这段时间;点火能量是指在点火延迟时间内激光提供的能量总值。点火实验在每一个激光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),最终实验获得点火延迟时间和点火能量取平均值。

3 实验结果及讨论

3.1 不同激光功率密度条件下 RDX、HMX 和 CL-20 的激光点火特性

实验在激光功率密度为 $53.8\sim 298.3\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 范围内进行,试样分别在 6 个不同的激光功率密度条件下进行了点火实验,其中在功率密度为 53.8, $81.3\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的实验中由于没有火焰产生,无法获得点火延迟时间,其他 4 个激光能量的点火延迟时间和点火能量随激光功率密度变化曲线如图 1 和图 2 所示,典型点火过程如图 3~5 所示。

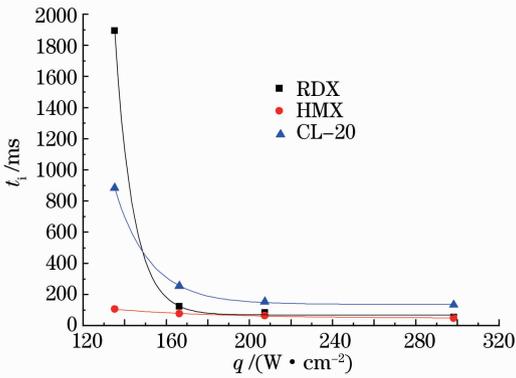


图 1 3 种单质高能炸药的点火延迟时间 t_i 随激光功率密度 q 变化

Fig. 1 Variation curves of ignition delay time t_i of three kinds of explosives versus heat flux q

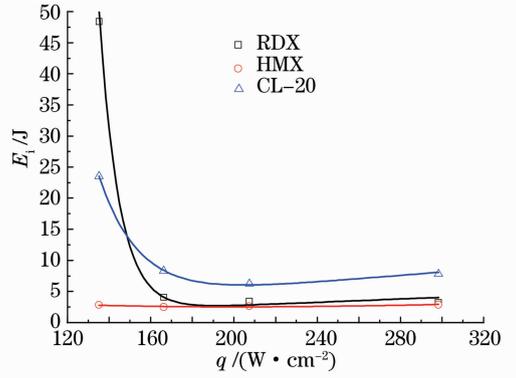


图 2 3 种单质高能炸药点火能量 E_i 随激光功率密度 q 变化

Fig. 2 Variation curves of ignition energy E_i of three kinds of explosives versus heat flux q

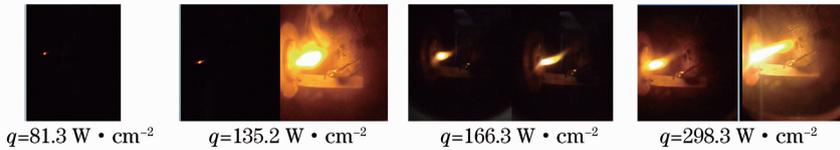


图 3 RDX 在不同激光功率密度条件下的典型点火过程

Fig. 3 Typical graphs of laser ignition process of RDX at different laser fluxes

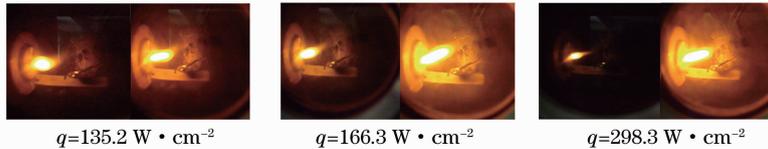


图 4 HMX 在不同激光功率密度条件下的典型点火过程

Fig. 4 Typical graphs of laser ignition process of HMX at different laser fluxes

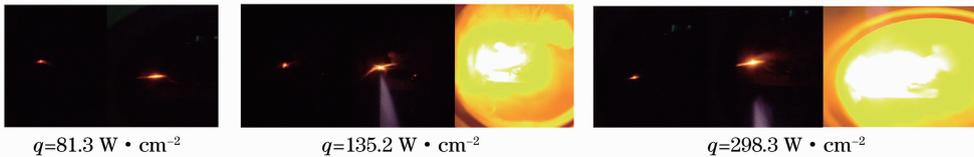


图 5 CL-20 在不同激光功率密度条件下的典型点火过程

Fig. 5 Typical graphs of laser ignition process of CL-20 at different laser fluxes

图 1 显示,在实验的激光功率密度条件下,5 类 RDX、2 类 HMX 和 CL-20 几种试样的点火延迟时间随着激光功率密度增加呈现递减的趋势。其中 RDX 和 CL-20 点火延迟时间在较低功率密度时呈快速递减的趋势,激光功率密度达到一定值后延迟时间变化逐渐减小;而 HMX 的点火延迟时间变化相对缓慢。在较低功率密度 ($53.5, 81.3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) 条件下,点火难以实现,点火延迟时间无法获得。图 3~5 显示的是几种高能炸药在较低功率密度时的点火过程,只有气化解产生的暗红色反应区;随着激光功率密度的增加,点火现象能够发生,并且随着功率密度增加点火反应加剧。从图 2 的点火能量看,

RDX、HMX 和 CL-20 单质炸药的最小点火能量的顺序是 $E_{\text{HMX}} < E_{\text{RDX}} < E_{\text{CL-20}}$ 。

从图 3~5 中几种高能炸药的点火过程看, RDX 和 HMX 的点火相似,而 CL-20 的点火过程与 RDX 和 HMX 的差异较大。RDX 在较低功率密度时无法实现点火,只有暗红色反应区, HMX 则无暗红反应区;随着激光功率密度增加, RDX 和 HMX 在试样表面出现火焰。从图 6 的中止试样点火表面看出, RDX 和 HMX 的点火均有熔融过程,表面受热熔融和气化解都存在,火焰在熔融表面形成。虽然 RDX 和 HMX 两者的点火过程相似,受热后均有由固相向液相转变的过程,但 HMX 受热后具有

明显的自加热作用^[15],故在较低激光功率密度条件时,HMX 的点火延迟时间短于 RDX,但随着激光功率密度的增加,HMX 的自加热作用对点火影响减弱,从而两者的点火延迟时间差别减小。而 CL-20 的点火在较低功率密度时只有较明亮的红色反应

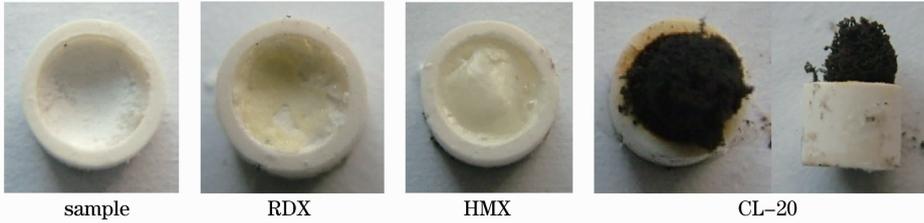


图 6 低激光能量密度下中止激光能量后试样表面

Fig. 6 Surface of explosive samples after stopping laser at lower laser fluxes

3.2 不同激光功率密度条件下 Al 粉与 RDX 混合物的点火特性

实验在激光功率密度为 $53.8 \sim 345.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 范围内进行,试样分别在不同的激光功率密度条件下进行了点火实验,试样的点火延迟时间和点火能量随激光功率密度变化曲线如图 7 和 8 所示,典型点火过程如图 9~11 所示。

图 7 显示,Al/RDX 混合物试样的点火延迟时间随着激光功率密度的增加均呈现递减的趋势,且在较低功率密度时,4 种微米 Al 粉与 RDX 混合物的点火延迟时间差别较大,随着功率密度的增加,逐渐拉平了 Al 粉粒度和混合比例对 Al 粉和 RDX 混合物的点火延迟时间的影响,即当激光功率密度增加到一定值时,几种混合物的点火延迟时间比较接近。从图 8 可以看出,S-18B 试样的点火能量存在一个最高峰值,而 M-QR 则存在一个最低值,其他的微米 Al 粉与 RDX 混合物的点火能量随着功率

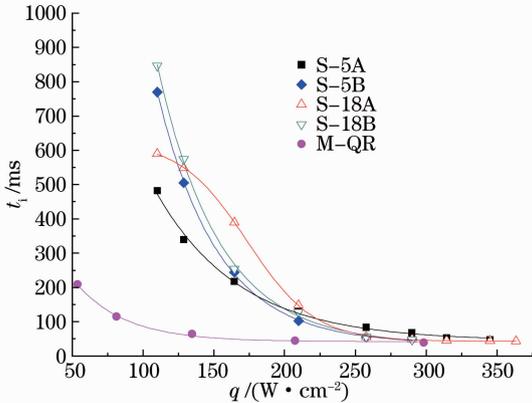


图 7 Al/RDX 混合物的点火延迟时间随激光功率密度变化

Fig. 7 Variation curves of ignition delay time of mixtures of Al with RDX versus heat flux

区,随着激光功率密度增加,其点火首先发生在红色气相反应区,火焰由气化产物反应形成。图 6 中的中止点火实验,CL-20 在受热气化分解后留下多孔的膨胀絮状物,其点火过程与 RDX 和 HMX 差异较大。

密度增加呈递减的趋势。无论哪种混合物,其点火能量均有一个阈值,若不高于这一特定值则点火反应不能发生。

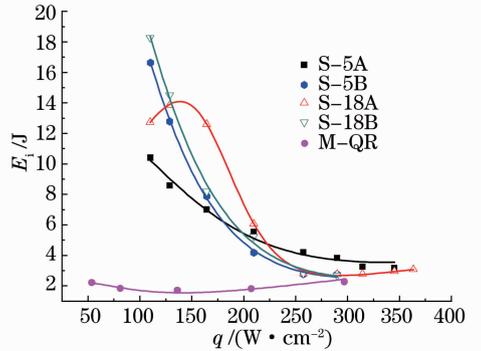


图 8 Al/RDX 混合物的点火能量随激光功率密度变化曲线图

Fig. 8 Variation curves of ignition energy of mixtures of Al with RDX versus heat fluxes

图 9~11 显示,4 种混合物的点火过程均是在点火试件表面首先发生,且随着功率密度的增加反应加剧,尤其是 M-QR 的点火反应尤为剧烈。点火过程显示,混合物在熔融后膨胀破裂的同时产生初始火焰,初期火焰偏亮白色,可能主要是 Al 粉在 RDX 熔融的液相表面发生了氧化反应。采用低功率密度 $q=110.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 条件中止点火后,如图 12 所示,发现试件点火表面是 Al/RDX 混合物熔融后呈半球形或类似球形颗粒的凝固状态,Al/RDX 混合物在受到激光作用后首先由固相变为熔融的液相。激光功率密度较低时,RDX 熔融过程是一个吸热过程,升华或分解反应较少,随着激光功率密度的增加,RDX 的熔融过程加速,由于 Al 粉能够加速液相 RDX 的分解气化,从而点火过程随着激光功率密度的增加而变得剧烈。对于 M-QR 试样,由于纳

米铝粉粒度小,更容易被分解或升华的气体带入气相中,且纳米铝粉活性较高,与气体产物中的氧化剂

反应更容易,因此,含纳米铝粉的试样点火过程远比含微米铝粉的混合物点火反应剧烈。

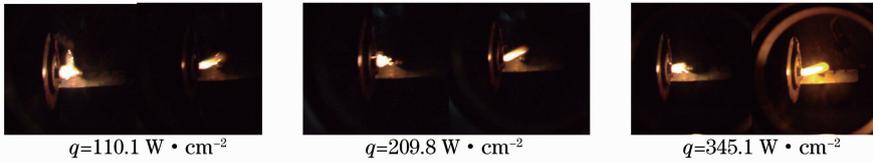


图 9 5 μm Al 粉与 RDX 混合物在不同激光功率密度条件下的典型点火过程

Fig. 9 Typical graphs of laser ignition process of mixtures consisting of 5 μm Al powder and RDX at different laser fluxes

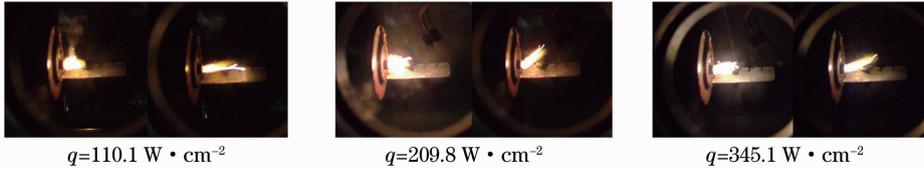


图 10 18 μm Al 粉与 RDX 混合物在不同激光功率密度条件下的典型点火过程

Fig. 10 Typical graphs of laser ignition process of mixtures consisting of 18 μm Al powder and RDX at different laser fluxes

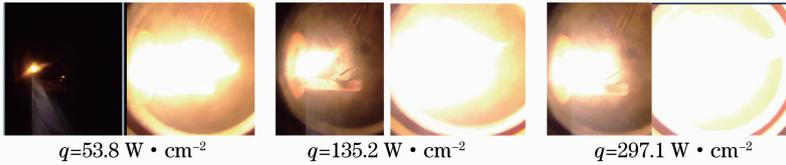


图 11 M-QR 在不同激光功率密度条件下的典型点火过程

Fig. 11 Typical graphs of laser ignition process of M-QR sample at different laser fluxes

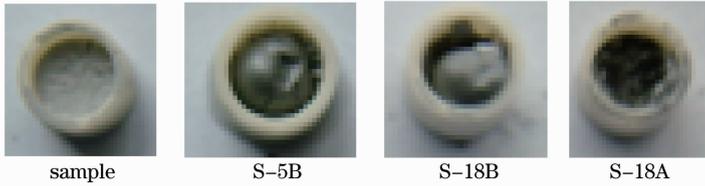


图 12 $q=110.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时中止激光能量后试样表面图

Fig. 12 Surface of the mixtures after stopping laser at $q=110.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$

3.2.1 混合比例对 Al/RDX 混合物点火特性的影响

相同粒度不同混合比例的 Al/RDX 混合物试样,在较低热流密度时,含 Al 粉较多的 S-5A 样品的点火延迟时间和点火能量要低于 Al 粉较少的 S-5B,含 Al 粉较多的 S-18A 样品的点火延迟时间和点火能量要低于 Al 粉较少的 S-18B,这表明含 Al 粉较多的混合物点火相对容易。但当热流密度增加到一定值后,含 Al 粉较多的 S-5A 和 S-18A 的点火延迟时间和点火能量均稍高于对应的 S-5B 和 S-18B 试样。这是由于在低热流密度时,混合物主要是由固体转变为熔融液态的吸热过程,Al 粉的导热性能发挥较大^[15],含 Al 粉多的混合物在激光作用时表面的导热能量优于 Al 粉含量少的混合物,故其熔融时间较短,从而点火延迟时间较短,容易点火。随着热流密度的增加,RDX 的受热熔融过

程加快,液相表面的分解气化反应加剧,部分 Al 颗粒被分解的气体带入气相中,Al 颗粒越多则气相热散失越大,故在 RDX 含量多、Al 粉少的混合物点火延迟时间稍短,较易点火。因此,即使相同比例的铝粉 RDX 混合物的点火也因铝粉粒度的影响存在差异。

3.2.2 Al 粉粒度对 Al/RDX 混合物点火特性的影响

对于微米铝粉,从 S-5A 和 S-18A 两种试样在较低热流密度时的点火延迟时间和点火能量来看,粒度较大的 S-18A 的试样点火延迟时间较长,点火能量较高,但随着能量密度的增加,两者的差别逐渐减小,在功率密度达到一定值后,S-5A 的点火延迟时间和点火能量稍大于 S-18A。S-5B 和 S-18B 两个试样的点火延迟时间和点火能量均是 S-18B 的大于 S-5B,直到在较高激光功率密度时两者的点火延

迟时间和点火能量均接近。这些表明粒度较小的铝粉和 RDX 的混合物点火相对容易,可能是 Al 粉在混合物中不仅作为金属具有导热作用,在低热流密度时,以熔融为主的点火初期,粒度较小铝粉发生反应需要的能量较小,从而表现出粒度小的试样点火延迟时间较短;在较高热流密度时,混合物中 RDX 的熔融气化反应加剧,气体产物将铝粉颗粒带走燃烧,使得铝粉的反应性主要表现在与气体产物反应上,粒度效应减弱,几种混合物的点火延迟时间和点火能量接近。其中粒度较大、Al 含量较高的试样 S-18A 的点火能量随着热流密度增加出现峰值,在热流密度低的条件下混合物以熔融为主的阶段,粒度较大的铝粉发生反应需要的能量较高,从而表现为随着热流密度增加点火能量稍有增大的趋势,随着激光热流密度不断增加,RDX 的气化反应加剧,大颗粒的 Al 粉导热性能相对高,气相的热量散失较多,故需点火能量较高,但随着热流密度的增加,随气流可发生反应的 Al 粉在高能量时反应性增强,热损失效应被拉平,从而表现为点火能量逐渐减小直至趋平。

对于含纳米 Al 粉的 M-QR 试样,无论点火延迟时间还是点火能量均低于含微米 Al 粉的混合物试样,其点火反应程度远比含微米 Al 粉的试样剧烈,这些表明纳米 Al 粉与 RDX 的反应速度明显增加,能量释放速度加快。低功率密度中止点火反应后的情况类似于 S-18A,但几乎看不到残渣,也没有熔融物凝固的现象,这可能是纳米化的 Al 粉反应活性高,RDX 受热熔融气化产物很容易将纳米颗粒带走并快速发生反应,从而使得混合物不仅反应加快,而且剧烈。

上述的 Al/RDX 混合物的点火实验结果显示,Al/RDX 混合物的点火难易程度不仅和 Al 的粒度有关,还与 Al 和 RDX 的比例密切相关。Al 粉在 RDX 熔融膨胀破裂时发生燃烧,表面的 Al 粉通过抛撒或气流带走的作用减少其团聚,提高能量释放效率。粒度小的 Al 粉发生反应需要的能量较小,容易与氧化剂发生还原反应,可能适用于燃烧或爆炸温度不是很高的火炸药体系,而粒度较大的 Al 粉发生反应需要的能量较高,需要在高温的爆炸反应体系中才能更好地释放能量。由于 Al 粉的粒度越小,其有效铝含量越低,因此,在实际应用过程中,需要依据体系选取合适粒度和合适比例的铝粉,而不是 Al 粉的粒度越小越适用。

3.3 不同激光功率密度条件下纳米 Al 粉与 RDX 等高能炸药混合物的点火特性

实验在激光功率密度为 $53.8 \sim 298.3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 范围内进行,试样分别在 5 个不同的激光功率密度条件下进行点火实验,其点火延迟时间和点火能量随激光功率密度变化曲线如图 13 和 14 所示,典型点火过程如图 11、15 和 16 所示。

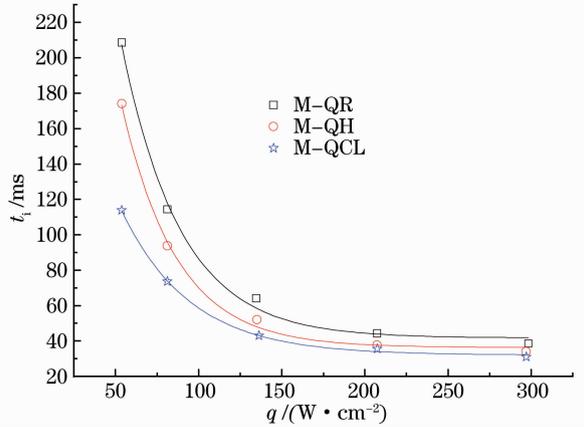


图 13 3 种含纳米 Al 粉混合物的点火延迟时间随激光功率密度变化

Fig. 13 Variation curves of ignition delay times of three kinds of mixtures versus heat fluxes

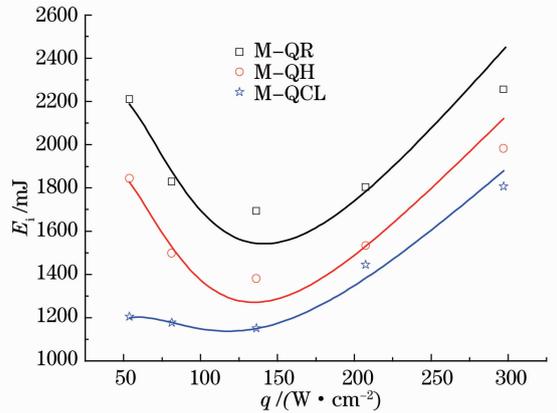


图 14 3 种含纳米 Al 粉混合物点火能量随激光功率密度变化

Fig. 14 Variation curves of ignition energy of three kinds of mixtures versus heat fluxes

图 13 显示,3 种含纳米铝粉的混合物试样的点火延迟时间均随着激光功率密度的增加呈现递减的趋势,且相同激光功率密度条件下点火延迟时间顺序为 $t_{M-QR} > t_{M-QH} > t_{M-QCL}$ 。从图 14 中看出 3 种混合物的点火能量随激光功率密度增加呈现最小值,最小点火能量的顺序为 $E_{M-QR} > E_{M-QH} > E_{M-QCL}$,这与前面 3 种纯高能炸药最小点火能量的顺序差异较大,而且从中止实验后试样几乎是完全反应,残留的

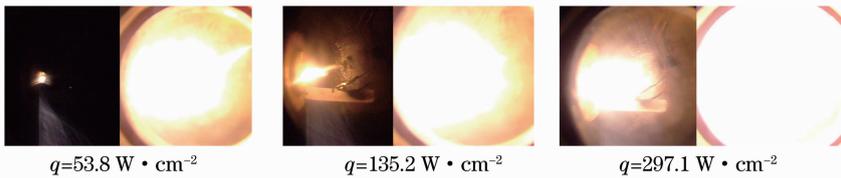


图 15 M-QH 在不同激光功率密度条件下的典型点火过程

Fig. 15 Typical graphs of laser ignition process of M-QH at different laser fluxes

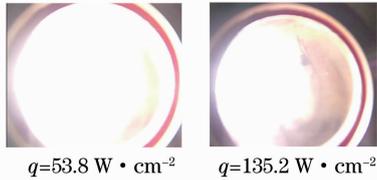


图 16 M-QCL 在不同激光功率密度条件下的典型点火过程

Fig. 16 Typical graphs of laser ignition process of M-QCL at different laser fluxes

试样很少。从图 11、15 和 16 看出 3 种混合物的试样点火反应剧烈程度远比原含能材料大,尤其是 QAl 与 CL-20 的混合物,几乎是瞬间点火且火焰迅速扩展,相较于 QAl 与 RDX 和 HMX 的混合物点火反应剧烈。这可能是由于 Al 粉对于 3 种炸药的热分解作用影响不同。其中 Al 粉对于 RDX 的作用是能够加速其液相分解,对 HMX 的作用主要是促进 HMX 熔融前的固相分解,虽然 RDX 和 HMX 受热后熔融和气化并存,点火过程也类似,但显然在固相前分解的作用更有利于分解气体产生,从而与纳米 Al 反应,故而 QAl 与 HMX 混合物的点火能量低于 QAl/RDX 混合物。对于 CL-20 来说,Al 粉对其分解作用较强,在促进 CL-20 分解的同时,也被其分解产物氧化,参与氧化还原过程,且 CL-20 的点火气化反应占主导,故纳米 Al 粉更容易与 CL-20 的气化分解产物发生反应,因此,点火需要的能量更低,点火反应更剧烈。

4 结 论

1) 在实验的激光功率密度范围内,5 类 RDX、2 类 HMX 和 CL-20 点火延迟时间均随着激光功率密度的增加呈现递减的趋势,最小点火能量值顺序是 $E_{\text{HMX}} < E_{\text{RDX}} < E_{\text{CL-20}}$; 5 类 RDX、2 类 HMX 的点火过程均存在熔融过程,而 CL-20 则首先气化分解后才形成火焰。

2) 在实验的激光功率密度范围内,微米 Al 粉与 RDX 混合物的点火延迟时间随着激光功率密度增加呈现递减的趋势,点火首先发生在试样表面;在较低功率密度条件下,Al 粉粒度和混合比例对点

火的影响较大,但随着激光功率密度的增加,影响减弱。而纳米 Al 粉与 RDX 混合物远比含微米 Al 粉混合物的点火延迟时间和点火能量低,且反应更剧烈。

3) 3 种高能炸药与纳米铝粉的混合物试样的点火延迟时间均随着激光功率密度的增加呈现递减的趋势,且相同激光功率密度条件下点火延迟时间顺序为 $t_{\text{M-QR}} > t_{\text{M-QH}} > t_{\text{M-QCL}}$,最小点火能量的顺序为 $E_{\text{M-QR}} > E_{\text{M-QH}} > E_{\text{M-QCL}}$,与 3 种高能炸药的最小点火能量的顺序差异较大,其中与 CL-20 的混合物的点火反应最为剧烈。

参 考 文 献

- Zhang Hu, Xie Xinghua, Guo Ziru, *et al.*. Effect of aluminum powder content on performance of emulsion explosive [J]. Chinese J Energetic Materials, 2008, 16(6): 738-740.
张 虎, 谢兴华, 郭子如, 等. 铝粉含量对乳化炸药性能影响 [J]. 含能材料, 2008, 16(6): 738-740.
- Li Miaomiao, Song Hongchang, Wang Yue, *et al.*. Modeling effects of aluminum content and particle size on NEPE combustion performance [J]. Chinese J Energetic Materials, 2008, 16(3): 319-322.
李苗苗, 宋洪昌, 汪 越, 等. 铝粉含量和粒度对 NEPE 推进剂燃速影响的模型化 [J]. 含能材料, 2008, 16(3): 319-322.
- Chen Xueli, Wang Ying, Wang Hong, *et al.*. Effects of aluminum powder content and granularity on characteristics of CMDB propellant [J]. Chinese J Energetic Materials, 2008, 16(6): 721-723.
陈雪莉, 王 瑛, 王 宏, 等. 铝粉含量及粒径对 CMDB 推进剂性能的影响 [J]. 含能材料, 2008, 16(6): 721-723.
- Liu Jingru, Luo Yunjun. Study and application on metal incendiary for solid propellant [J]. Chemical Propellant & Polymeric Materials, 2007, 5(4): 6-12.
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.
- An Ting, Zhao Fengqi, Xiao Libai. Progress of study on high activity nano-energetic materials [J]. Chinese J Explosives & Propellants, 2010, 33(3): 55-62.
安 亭, 赵风起, 肖立柏. 高反应活性纳米含能材料的研究进展 [J]. 火炸药学报, 2010, 33(3): 55-62.
- Zhang Ming, Liang Yan, Tang Qingming. Progress in the application of nano aluminum powder in solid propellants [J]. J Rocket Propulsion, 2006, 32(1): 35-39.
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.
- G Risha, T Connell, R Yetter, *et al.*. Aluminum-Ice (ALICE) Propellants for Hydrogen Generation and Propulsion [R]. Colorado: AIAA 2009-4877. 2009.
- Hao Haixia, Nan Baojiang, An Ting, *et al.*. Laser ignition

- characteristics of CL-20 composite modified double-base propellants[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502009.
- 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.
- 9 J U Kim, T Torikat, K K Kuo. Ignition Dynamics of Nitramine Composite Propellants under CO₂ Laser Heating[R]. Montana: AIAA 87-0564. 1987.
- 10 Jiang Zhi, Li Shufen, Li Kai, *et al.*. Research on the ignition and combustion properties of composite propellant containing nano metal powders[J]. J Solid Rocket Technology, 2004, 27(2): 117-120.
- 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.
- 11 Li Shufen, Niu Helin, Zhang Gangchui, *et al.*. Laser ignition of NEPE propellant[J]. J Propulsion Technology, 2002, 23(2): 172-175.
- 李疏芬, 牛和林, 张钢锤, 等. NEPE 推进剂激光点火特性[J]. 推进技术, 2002, 23(2): 172-175.
- 12 Nan Baojiang, Ping Li, Ma Ximei, *et al.*. Experimental studies on ignition property of composite propellants[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2009(3): 10-13.
- 南宝江, 平丽, 马喜梅, 等. 不同条件下复合推进剂点火性能实验[J]. 火工品, 2009(3): 10-13.
- 13 Xu Jiao, Wu Lizhi, Shen Ruiqi, *et al.*. Effect of confinement on the capability of laser ignition[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 418-423.
- 徐姣, 吴立志, 沈瑞琪, 等. 边界条件对激光点火性能的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 418-423.
- 14 Shen Ruiqi, Ye Yinghua, Hu Yan, *et al.*. Laser ignition performance of boron-potassium nitrate composite at different oxygen/fuel ratio[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 338-341.
- 沈瑞琪, 叶迎华, 胡艳, 等. 不同氧/燃比的硼-硝酸钾的激光点火特性[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 338-341.
- 15 Liu Ziru. Thermal Analyses for Energetic Materials [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.
- 刘子如. 含能材料热分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

栏目编辑: 宋梅梅