

含 CL-20 改性双基推进剂激光点火特性

郝海霞¹ 南宝江² 安 亭¹ 徐司雨¹ 赵凤起^{1*} 裴 庆¹ 高红旭¹

(¹西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065
²中国航天科技集团公司四院四十一所, 陕西 西安 710025)

摘要 采用 CO₂ 激光点火方法,研究了含六硝基六氮杂异戊兹烷(CL-20)改性双基(CMDB)推进剂在不同功率密度作用下的点火特性,探讨了 Al 粉含量和燃烧催化剂对该类推进剂激光点火性能的影响。实验结果表明,在激光功率密度 25.5~127.0 W/cm² 范围内,不含催化剂的 CL-20-CMDB 推进剂点火延迟时间随功率密度增加而递减,且点火延迟时间变化逐渐减缓,点火均首先在推进剂表面产生;而含有催化剂推进剂试样的点火延迟时间和点火过程则与功率密度密切相关;在高激光功率密度时,含催化剂的推进剂点火没有发生在推进剂表面,而是在试样表面的气相中,且点火延迟时间增加。Al 粉含量对其点火延迟的影响在低激光功率密度时较大,随着功率密度增加影响减弱。

关键词 光化学;点火延迟时间;激光点火;改性双基推进剂;六硝基六氮杂异戊兹烷

中图分类号 V512; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0502009

Laser Ignition Characteristics of CL-20 Composite Modified Double-Base Propellants

Hao Haixia¹ Nan Baojiang² An Ting¹ Xu Siyu¹ Zhao Fengqi¹ Pei Qing¹ Gao Hongxu¹

(¹Xi'an Modern Chemistry Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China
²The 41st Institute of the Fourth Academy of China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an, Shaanxi 710025, China)

Abstract Laser ignition characteristics of composite modified double-base (CMDB) propellant containing hexanitrohexaazaisowurtzitane (CL-20) are researched by CO₂ laser beam at different laser power densities. The effects of Al powder content and burning-rate catalysts on ignition characteristics of CL-20-CMDB propellants are discussed. The results show that the laser ignition delay time of CL-20-CMDB propellants without catalyst decreases with the increase of power density, the change of delay time becomes small at high power density and the ignition process of the propellants has hardly any variety when the heat flux is in the range of 25.5~127.0 W/cm². The delay time and the ignition process of the propellants containing catalysts have a close dependence on the laser flux. The ignition appears in the gas phase near the propellant surface and the ignition delay time becomes longer at high power density. The content of Al powder has strong effect on the ignition delay time at the lower power density, but the action becomes weak with the laser flux increasing.

Key words photochemistry; ignition delay time; laser ignition; composite modified double-base propellant; hexanitrohexaazaisowurtzitane

OCIS codes 140.3470; 140.3070; 350.3450; 350.5610; 350.6670

1 引 言

六硝基六氮杂异戊兹烷(俗称 CL-20)是一种立

体笼状硝胺化合物。与常用的 RDX、HMX 硝胺化合物相比,CL-20 具有更高的能量,成为在高能、低

收稿日期: 2010-12-15; 收到修改稿日期: 2011-03-08

基金项目: 火炸药燃烧国防科技重点实验室基金(9140C3505030807)资助课题。

作者简介: 郝海霞(1980—),女,硕士,助理研究员,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

特征信号推进剂中应用的下一代高能添加剂之一,因此含 CL-20 的推进剂燃烧性能的研究成为了重点和热点^[1~5]。

点火作为燃烧的初始阶段,其过程研究对于揭示固体推进剂的燃烧机理和推进应用具有非常重要的意义^[6~12]。激光以其输出能量高且可调、点火时间和能量可控制、无干扰等特点,减少了点火过程的非均匀效应和热损失,与传统的方法相比具有很多优点,已有在点火药和复合推进剂点火性能研究方面的应用报道^[9~15]。应用 CO₂ 激光点火研究含 CL-20 改性双基推进剂的点火特性,可以定量、深入地研究含 CL-20 改性双基推进剂的点火特性和不同点火能量、推进剂中组分含量以及燃烧催化剂对其点火性能的影响,为这类推进剂未来应用于火箭

发动机中以及为该类推进剂的燃烧性能的研究和燃烧模型的建立提供必要的基础数据。

2 实 验

2.1 推进剂试样的制备

含 CL-20 改性双基推进剂基础配方为(质量分数):双基粘合剂(硝化棉 NC+硝化甘油 NG)54.7%,CL-20 38%,其他助剂 CV 7.3%。催化剂 Cat 和 Al 粉外加,具体配方如表 1 所示,其中催化剂 β-Pb 和 β-Cu 分别为雷锁辛酸铅和铜盐,NTOPb 和 NTOCu 分别为 3-硝基-1,2,4-三唑酮铅和铜盐,CB 为炭黑。采用吸收-驱水-放熟-压延-切成药条的常规无溶剂成型工艺制备实验样品。

表 1 含 CL-20 改性双基推进剂配方(质量分数,%)

Table 1 Formulation of CL-20-CMDB propellants (mass fraction, %)

No.	NC(12.0%N)+NG	CL-20	CV	Al	Cat
CA01	54.7	36	7.3	2	—
CA02	54.7	33	7.3	5	—
CA03	54.7	30	7.3	8	—
CA04	54.7	28	7.3	10	—
CA02-A	54.7	33	7.3	5	β-Pb 2.5, β-Cu 0.5, CB 0.8
CA02-B	54.7	33	7.3	5	NTOPb 2.5, NTOCu 0.5, CB 0.8
CA03-A	54.7	30	7.3	8	β-Pb 2.5, β-Cu 0.5, CB 0.8
CA03-B	54.7	30	7.3	8	NTOPb 2.5, NTOCu 0.5, CB 0.8

推进剂试样的规格选择主要依据激光光斑的直径和点火能量选取。实验中激光光斑直径为 5.0 mm,激光功率密度主要在 25.5~127.0 W/cm² 范围内,实验样品尺寸为 10mm×10mm×5mm,可以满足点火实验要求。

2.2 激光点火实验装置

研究中采用的点火延迟时间是指从激光开始作用到推进剂试样表面到推进剂试样产生明亮火焰发光信号的这段时间。实验利用光电转换测试电路获得推进剂点火信号,同时利用数据采集系统对激光器出光信号同步记录,从而获得推进剂点火延迟时间参数。实验装置主要由激光能源系统、实验容器、充压装置和测试记录系统 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 μm 的 CO₂ 连续激光器(型号 SLC110),激光束作用到推进剂表面的光斑直径为 5.0 mm。实验中采用的激光功率密度范围为 25.5~194.0 W/cm²。点火过程中除了实验需要中止外,激光持续到点火过程的完成;压力实验容器规格为 φ300 mm×400 mm,具有视窗可观察容器内点火过程;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,用于实验过程参数的测试、记录及数据处理。实验装置框图如图 1 所示。

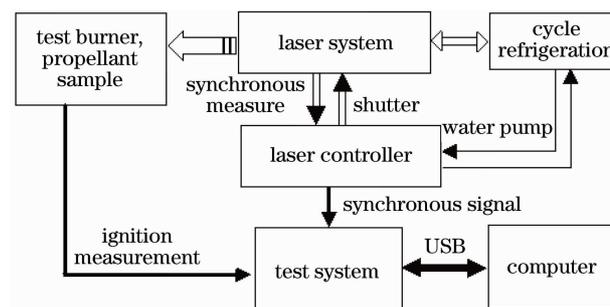


图 1 激光点火实验装置框图

Fig. 1 Experimental setup of laser ignition

3 实验结果及讨论

激光点火的实验环境为常温常压,样品放置于燃烧实验容器内试样台上,激光水平垂直作用于截面为 10 mm×10 mm 的样品表面。实验中所用含 CL-20 的 CA 系列改性双基推进剂试样均未包覆,点火实验在每一个功率密度作用下进行 3~6 次(具

体次数视数据的重复性确定),最终的点火延迟时间取其平均值。

3.1 不同激光功率密度对推进剂试样点火性能的影响

3.1.1 不同激光功率密度作用下不含催化剂的 CL-20 改性双基推进剂试样的点火性能

实验在功率密度为 25.5、51.0、102.0 和 127.0 W/cm² 条件下进行,试样规格为 10 mm × 10 mm × 5 mm,选取 CA01~CA04 4 种推进剂试样分别在上述功率密度下进行点火实验,试样的点火延迟时间和点火过程如图 2、3 所示。

从图 2 中可以看出,试样的点火延迟时间均随着功率密度增加呈递减趋势,且随着功率密度的增加,不同配方的点火延迟时间差距减小。因为点火延迟是由两部分时间构成的,1)惰性加热时间 t_1 ,也就是外部热源加热推进剂至发生热分解等放热化学反应所需的时间;2)推进剂中的粘合剂、氧化剂等主要组分发生化学反应放热至推进剂点火的时间 t_2 。在低热流时,推进剂表面组分的熔融或者分解气化相对缓慢,惰性加热时间增长显著,成为引起点火延迟时间的主要因素;同时,组分对 CO₂ 激光的热敏感性差异对点火的影响较大。随着功率密度增加,加速了推进剂表面温度的升高,表面粘合剂、氧化剂

等主要组分的熔融、分解等反应速率加快, t_1 减小,延迟时间主要是 t_2 ,最终使得点火延迟时间减小;同时,组分的差异随着功率密度增加逐渐被拉平,从而不同配方的点火延迟时间差别也在减小。但当功率密度达到一定高值时,虽然增加功率密度,但并不能显著改变点火延迟时间和点火过程。从图 3 的点火过程看,试样的点火过程未发生大的变化,明亮火焰首先在推进剂表面生成,逐步点燃推进剂试样。这表明在实验的功率密度范围内,在样品点火过程中,试样表面的化学反应起主导作用,其原因可能是推进剂样品在热流作用下,主要组分开始熔融、热分解过程均在表面发生。

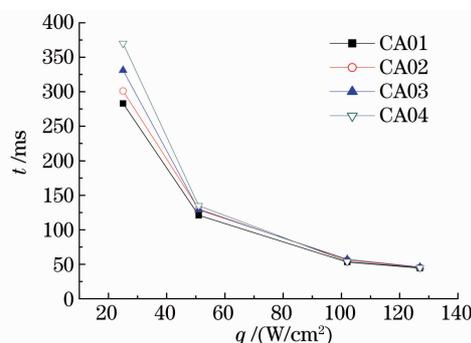


图 2 4 种推进剂试样点火延迟时间 t 随功率密度 q 的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of ignition delay times t of four propellants versus heat flux q

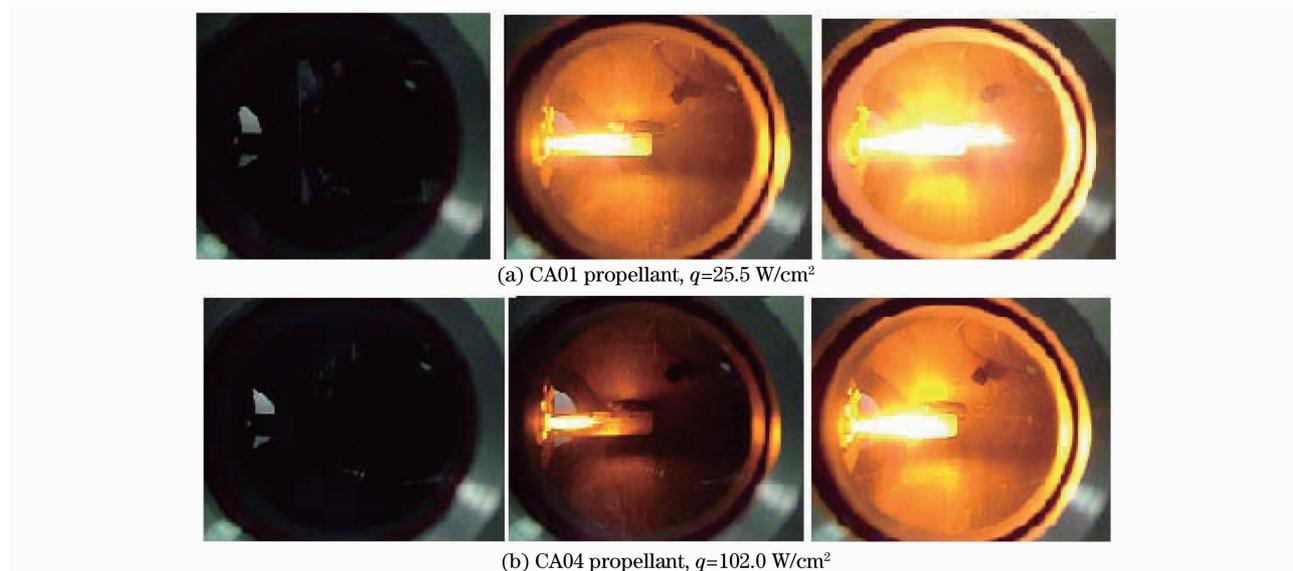


图 3 两种不含催化剂的推进剂试样的典型点火过程

Fig. 3 Typical graph of laser ignition process of two propellants without catalysts

3.1.2 不同激光功率密度作用下含催化剂的 CL-20 改性双基推进剂试样的点火性能

含催化剂推进剂试样的点火实验除了对 CA02-

A 进行了多个能量的点火实验外,其他含催化剂推进剂试样的实验在功率密度为 25.5、51.0、102.0 和 127.0 W/cm² 条件下进行,试样规格为 10 mm ×

10 mm×5mm。选取了表 1 中含两种催化剂的 4 种推进剂进行了点火实验,试样的点火延迟时间和点火过程如表 2 和图 4~7 所示。

从表 2、图 4~6 含 A (β -Pb, β -Cu, CB) 和 B (NTO Pb, NTO Cu, CB) 两种催化剂推进剂试样的点火延迟时间和点火过程看出,含有催化剂推进剂试样的点火延迟时间在能量密度小于等于 102.0 W/cm²时的点火延迟时间规律和点火过程与

未含催化剂的试样基本相同;而当功率密度增加到 127.0 W/cm²时,点火延迟时间和点火过程均发生了较大变化。如含催化剂 CA02-B 推进剂试样的火焰首先产生在推进剂表面前方的气相,且点火延迟时间增加,这说明在高功率密度时催化剂的作用比较明显。而 CA03-B 推进剂试样的点火过程与 CA02-B 基本相似,只是其点火过程在该功率密度时存在表面点火和气相中点火两种现象。

表 2 含燃烧催化剂的推进剂试样的点火延迟时间

Table 2 Ignition delay time of the propellants containing burning catalysts

Laser flux $q / (\text{W}/\text{cm}^2)$	Ignition delay time t / ms					
	CA02	CA02-A	CA02-B	CA03	CA03-A	CA03-B
25.5	301	303	356	331	304	319
51.0	130	122	119	129	121	119
102.0	56.0	51.0	51.3	57.3	52.3	50.7
127.0	45.4	49.2	56.0 *	45.9	—	47.3/76.0 *

* Delay time for the propellants that luminous flame appears in the gas phase near the surface during ignition

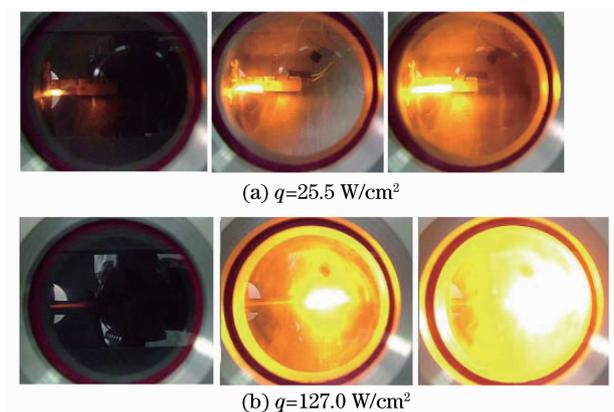


图 4 不同功率密度下 CA02-B 试样典型点火过程
Fig. 4 Typical graph of laser ignition process of CA02-B propellant at different power densities

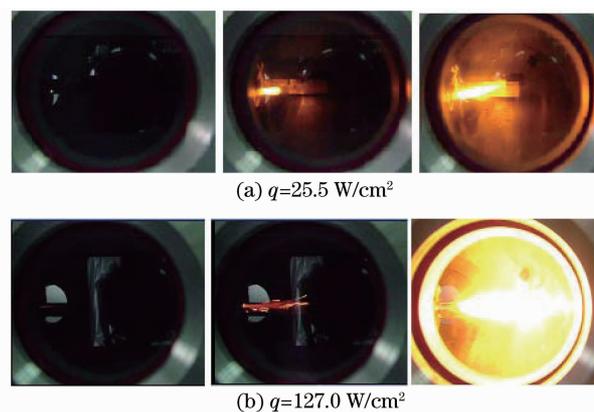


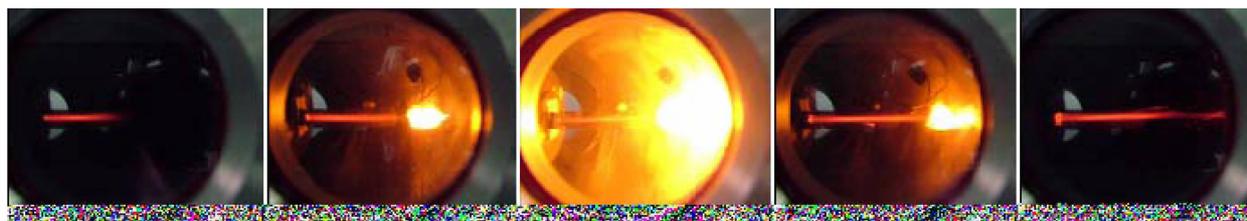
图 5 不同功率密度下 CA03-B 试样典型点火过程
Fig. 5 Typical graph of laser ignition process of CA03-B propellant at different power densities



图 6 功率密度 $q=127.0 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时 CA02-A 试样典型点火过程
Fig. 6 Typical graph of laser ignition process of CA02-A propellant at $q=127.0 \text{ W}/\text{cm}^2$

含催化剂的 CA02-A 推进剂试样在功率密度小于等于 127.0 W/cm² 时,其点火延迟时间规律和点火过程与未含催化剂的试样基本相似。但在功率密度 $q=127.0 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时,点火过程中出现了一次只有暗红色火焰而没有明亮火焰的现象,随后针对该试样进行了 143、168 和 194 W/cm² 功率密度下的点

火实验,结果发现点火首先在试样表面发生的现象越来越少;在 168 W/cm² 和 194 W/cm² 功率密度时,明亮火焰首先在推进剂表面的气相产生,随后明亮火焰熄灭,如图 7 所示。这说明含有不同的催化剂对推进剂试样的点火性能影响与功率密度密切相关。同时表明该推进剂在实际应用中其可靠点火能

图7 功率密度 $q=168.0 \text{ W/cm}^2$ 时 CA02-A 试样典型点火过程Fig. 7 Typical graph of laser ignition process of CA02-A propellant at $q=168.0 \text{ W/cm}^2$

量有一定的范围。

3.2 Al 粉含量对含 CL-20 推进剂试样点火特性的影响

针对不同含量的 Al 粉取代部分 CL-20 组分推进剂配方 (CA01~CA04) 进行了点火特性研究, 推进剂试样配方中 Al 粉取代了部分 CL-20, 取代比例为 2%~10% (质量分数)。实验采用 25.5、51.0、102.0 和 127.0 W/cm^2 这 4 个功率密度研究了其点火性能, 不同含量 Al 粉的 CL-20-CMDB 推进剂的点火延迟时间如图 8 所示。

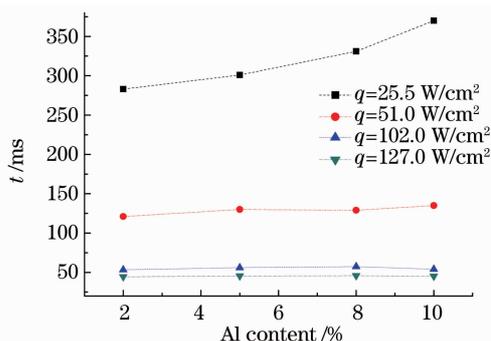


图8 不同功率密度下推进剂点火延迟时间随 Al 粉含量的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of ignition delay time of propellants with content of Al at different power densities

从图 8 中可以看出, 在低功率密度 (25.5 W/cm^2) 作用下, 推进剂试样的点火延迟时间随着 Al 粉含量增加而明显增加。随着功率密度的增加, Al 粉含量对推进剂试样的点火延迟时间的影响越来越小。当点火功率密度为 51.0 W/cm^2 时, 点火延迟时间虽然仍然呈增加的趋势, 但其变化不大; 而在较高的功率密度 (102.0 W/cm^2 和 127.0 W/cm^2) 作用下, 试样的点火延迟时间随着 Al 粉含量的变化很小, 几乎保持不变。从 CA01~CA04 这 4 个配方的推进剂点火过程 (与图 3 中的 CA01 和 CA04 基本相同) 表现看, 试样的点火过程没有发生大的变化, 即火焰首先在推进剂表面形成, 这表明推进剂在激光作用下表面凝聚相中的化学反应对点火起主导作用, 火焰首

先在表面形成。其中的原因可能是在实验的功率密度条件下, 随着 Al 粉含量的增加, CL-20 的含量同步降低, Al 作为金属良导体的热传导作用也在增加, 激光辐射到推进剂表面的能量通过热传导作用向推进剂内部传递的速度加快, 推进剂表面积聚的能量减少, 而 Al 粉作为燃料的作用发挥有限, 所以在低功率密度下, 在惰性加热时间起主导作用的条件下, Al 的“稀释”和热传导的物理作用比较明显, 推进剂表面的热能损失与 Al 的含量关系显著。而随着功率密度的增加, 推进剂表面组分间的热分解加强, 虽然 Al 与气相中的组分发生氧化还原反应的能力可能加强, 但不足以改变点火过程, 而且功率密度的增加逐渐掩盖了 Al 的热传导物理作用^[16], Al 粉含量的变化对点火延迟的影响越来越小。

3.3 不同燃烧催化剂对推进剂试样点火特性的影响

推进剂配方中催化剂的加入主要是为了调节燃烧性能, 如提高燃速或降低压力指数等。在研究燃烧催化剂对配方点火性能的影响时, 选择了两种催化剂: 一种为常用的普通催化剂 A ($\beta\text{-Pb}$, $\beta\text{-Cu}$, CB), 另一种为含能催化剂 B (NTOPb, NTOCu, CB)。CA02-A 表示在 CA02 配方基础上添加的 A 催化剂, 以此类推, 含催化剂的推进剂试样点火延迟时间如表 2 所示。

从表 2 中可以看出, 在功率密度小于等于 102.0 W/cm^2 时, 添加 A 催化剂的推进剂试样的点火延迟时间比基础配方试样短 (或相当), 表明催化剂 A 具有缩短点火延迟时间的作用; 试样 CA02-A 在功率密度为 127.0 W/cm^2 时, 点火延迟时间较 CA02 长, 且在实验的功率密度范围内点火过程与不含催化剂的相比没有大的变化。与不含催化剂的试样相比, 在功率密度为 25.5 W/cm^2 时, 添加 B 催化剂的推进剂试样点火延迟时间变长; 在功率密度 51.0 W/cm^2 和 102.0 W/cm^2 时, 点火延迟时间变短; 当功率密度增加到 127.0 W/cm^2 时, 随着功率密度的增加, 点火延迟时间又变长, 且点火首先在推

进剂表面前方的气相中产生,这与不含催化剂的点火在表面产生有很大不同。催化剂 A 和 B 对试样点火性能的共同点是在一定功率密度范围内具有缩短点火延迟时间的作用,不同的是 B 催化剂在低功率密度时具有增加点火延迟时间的作用,而在较高的功率密度时则能够改变点火过程。

催化剂 A 和 B 的加入对推进剂试样的点火过程产生了较大的影响,尤其是在高功率密度条件下,催化剂 B 的影响大于 A。虽然两者都是铅盐和铜盐,起催化作用的主要是热分解后的氧化铜或氧化亚铜和氧化铅,均有降低推进剂主要组分分解温度的作用,从而使得硝酸脂和含能炸药的分解历程发生变化^[17~20],但 B 催化剂的 NTO 盐除了起催化作用外,还是一种含能盐,可以为推进剂的分解热反应提供能量,从而相对于仅起催化作用的 A 催化剂更能够促进推进剂的热分解反应,更有助于推进剂释放能量。因此,在低功率密度下,激光输入能量较少,惰性加热时间较长,除了硝酸脂和 CL-20 等主要组分吸收能量外,可能此时催化剂热分解能力较弱,催化作用不明显;随着功率密度的增加,催化剂的热分解产物逐渐增加,催化作用逐步明显,促进点火反应的进行。而 B 催化剂作为含能盐其分解热反应提供了反应能量,从而在高功率密度时能够改变点火过程。

4 结 论

含 CL-20 改性双基推进剂点火延迟时间和激光的功率密度密切相关,点火延迟时间随着功率密度的增加呈缩短的趋势;随着功率密度的增加,在点火过程未发生改变时,点火延迟时间的差距变小;当功率密度增加到一定值后,有的试样(特别是含催化剂的推进剂配方)的点火过程发生改变。

在进行点火的推进剂试样中,主要组分 Al 粉取代部分 CL-20 后,低功率密度时,点火延迟时间随着 Al 粉的取代量增加而增加;随着功率密度增加,Al 粉含量的变化对点火延迟的影响越来越小。

在较低功率密度时,加入催化剂配方的点火过程与未加催化剂的点火过程相似;在较高功率密度时,含催化剂的推进剂试样点火过程可能发生改变,催化剂对推进剂点火的促进作用在高功率密度时比较显著,且不同的催化剂对试样点火的影响也有差异。

参 考 文 献

1 Chen Pei, Zhao Fengqi, Li Shangwen *et al.*. A study on the

application of CL-20 in overseas solid propellants[J]. *Winged Missiles Journal*, 2002, (2): 57~60
 陈 沛, 赵凤起, 李上文等. 国外对高能量密度材料 CL-20 在固体推进剂中的应用研究[J]. *飞航导弹*, 2002, (2): 57~60
 2 Xu Jinxiang. Thermal decomposition behavior and non-isothermal decomposition reaction kinetics of CL-20 with leads salts as catalyst[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, **30**(5): 36~41
 徐劲祥. CL-20 的催化热分解行为及非等温分解反应动力学[J]. *火炸药学报*, 2007, **30**(5): 36~41
 3 Pang Jun, Wang Jiangning, Zhang Rui'e *et al.*. Application of CL-20, FOX-12 and DNTF in CMDDB propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, **28**(2): 19~21
 庞 军, 王江宁, 张蕊娥等. CL-20、DNTF 和 FOX-12 在 CMDDB 推进剂中的应用[J]. *火炸药学报*, 2005, **28**(2): 19~21
 4 Liu Jingru, Luo Yunjun, Yang Yin. Energetic characteristics calculation of a new generation of high energy solid propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2008, **16**(1): 94~99
 刘晶如, 罗运军, 杨 寅. 新一代高能固体推进剂的能量特性计算研究[J]. *含能材料*, 2008, **16**(1): 94~99
 5 Xu Siyu, Zhao Fengqi, Yi Jianhua *et al.*. Numerical simulation for burning rate of composite modified double base propellant containing CL-20 [J]. *Acta Armamentar II*, 2009, **30**(5): 535~540
 徐司雨, 赵凤起, 仪建华等. 含 CL-20 的改性双基推进剂燃速数值模拟[J]. *兵工学报*, 2009, **30**(5): 535~540
 6 E. W. Price, H. H. Bradley, Jr. G. L. Dehority G. L. *et al.*. Theory of ignition of solid propellants[J]. *AIAA J.*, 1966, **4**(9): 1153~1181
 7 S. D. Baer, N. W. Ryan. An approximate but complete model for the ignition response of solid propellants[J]. *AIAA J.*, 1968, **6**(5): 872~877
 8 Hao Haixia, Pei Qing, Zhao Fengqi *et al.*. Summarization of laser ignition characteristics of solid propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, **17**(4): 491~498
 郝海霞, 裴 庆, 赵凤起等. 固体推进剂激光点火性能研究综述[J]. *含能材料*, 2009, **17**(4): 491~498
 9 J. U. Kim, T. Torikat, K. K. Kuo. Ignition Dynamics of Nitramine Composite Propellants under CO₂ Laser Heating[R]. 1987, AIAA 87-0564
 10 Jiang Zhi, Li Shufen, Zhao Fengqi *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
 江 治, 李疏芬, 赵凤起等. 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]. *Journal of 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 Shen Ruiqi, Ye Yinghua, Hu Yan *et al.*. Plasma performance for laser ablation of boron-potassium nitrate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 125~128
- 沈瑞琪, 叶迎华, 胡 艳 等. 激光烧蚀硼-硝酸钾的等离子体特性[J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 125~128
- 16 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
- 17 Fan Junguan, Fu Xiaolong, Yu Hongjian *et al.*. Effects of copper salts on combustion characteristics of RDX-CMDB propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, **33**(2): 87~90
- 范军管, 付小龙, 蔚红建 等. 铜盐对 RDX-CMDB 推进剂燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2010, **33**(2): 87~90
- 18 Fu Xiaolong, Li Jizhen, Liu Xiaogang *et al.*. The influences of lead salts on combustion characteristics of high energy smokeless modified double-base propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2007, **15**(4): 329~331
- 付小龙, 李吉祯, 刘小刚 等. 铅盐对高能无烟改性双基推进剂燃烧性能的影响[J]. 含能材料, 2007, **15**(4): 329~331
- 19 Fan Xuezhong, Li Jizhen, Zhang Laying *et al.*. Influence of lead (II) and copper (II) salts of NTO on the combustion characteristics and thermal decomposition of AP-CMDB propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2007, **15**(4): 316~319
- 樊学忠, 李吉祯, 张腊莹 等. NTO 铅铜衍生物对 AP-CMDB 推进剂燃烧性能和热分解的影响[J]. 含能材料, 2007, **15**(4): 316~319
- 20 Guan Dalin, Li Shangwen, Yin Cuimei *et al.*. Relativity study on pyrolytic characteristics and catalytic activities of some NTO salts in solid propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, **20**(3): 91~94
- 关大林, 李上文, 阴翠梅 等. 某些 NTO 盐的热分解特性及在固体推进剂中催化特性的相关性研究[J]. 推进技术, 1999, **20**(3): 91~94