

文章编号: 1006-9941(2009)04-0491-08

## 固体推进剂激光点火性能研究综述

郝海霞, 裴庆, 赵凤起, 李上文

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:**激光点火的研究近年来已成为一个热门的研究课题,采用激光作为刺激源研究固体推进剂点火性能是因为激光输出能量高且可调、点火时间和能量可控制且不受环境因素限制,而固体推进剂点火性能的研究对揭示固体推进剂的燃烧机理,验证点火模型具有非常重要的意义。本文主要描述了固体推进剂激光点火性能研究的理论过程、表征方法以及试验装置,并对影响固体推进剂激光点火性能的诸多因素如激光能量、推进剂组分及含量、点火环境等因素进行了详细的阐述,最后对固体推进剂激光点火性能研究需要注意的问题进行了总结,并附参考文献 50 篇。

**关键词:**物理化学; 固体推进剂; 激光点火; 点火延迟时间; 综述

中图分类号: TJ55; V512

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.04.028

### 1 引言

固体推进剂点火性能的研究始于 20 世纪 60 年代,因为固体推进剂点火过程的研究对于许多燃烧和推进应用以及揭示固体推进剂的燃烧机理具有重要的意义<sup>[1-4]</sup>,为建立或验证的点火模型提供数据参考,尤其是对固体推进剂燃烧的模拟仿真提供了必要的基础数据。至今,在固体推进剂点火性能方面已进行了大量的研究工作,其中包括点火理论、点火试验方法和点火的影响因素等方面的研究<sup>[5-15]</sup>。研究固体推进剂点火的方法虽然有多种,但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,且不受环境因素如推进剂表面的气相组分、初始温度和压力等因素的限制,逐渐成为深入细致地研究固体推进剂点火性能的一种新的可靠手段,从而受到了诸多研究者的青睐。高功率激光器的出现,使激光点火技术应用于固体推进剂点火性能研究成为新的研究热点。而且,采用激光点火的方法研究固体推进剂的性能,比较容易实现,技术也相对成熟。前人的研究表明,激光点火原理的独特性使其易于应用到点燃具有固、液、气相均有的过程,而固体推进剂的燃烧初级阶段则属于三相均有的过程,更适宜于激光点火的方式。在过去进行的大量的可燃物的激光点火行为的研究为激光点火方式在固体推进剂中的应用奠定了良好的研究基础<sup>[16-18]</sup>。国外在固体推进剂点火性能方面的研究非常多,而国内在这方面的

工作则相对薄弱,今后很有必要进行细致地研究。

本文就激光作为激发源应用于固体推进剂点火性能研究的相关理论及表征方法、试验装置及影响因素进行了详细讨论,为固体推进剂点火性能的研究提供参考。

### 2 固体推进剂激光点火过程及表征方法

通常,固体推进剂的点火是一种包括许多物理化学变化的复杂过程。点火包含几个阶段:① 能量以外部刺激的方式如热、化学或机械等传递给推进剂;② 固相随后进行热分解,产生热量;③ 热分解气体蒸发到环境中;④ 次表面以非均相的方式发生气相反应。当净热量(包括化学反应的放热量)大于损失的热量时,可持续燃烧才能实现。从外部能量刺激开始到可持续点火的这段时间称点火延迟时间,包括了内部加热时间、气体蒸发混合时间和发生化学反应时间。点火延迟时间是研究点火过程最主要的参数<sup>[4,17-19]</sup>。

激光在固体燃料点火中的应用方式属于激光热点火,激光作为点源或者线性源以平移、转动或者振动其中的一种或者多种方式增加目标物的动力学能量,从而致使目标物中的分子键断裂或者发生化学反应,其特点是延迟时间较长。固体推进剂激光点火行为是以激光作为外部能量刺激源作用于目标物使其发生点火的过程,也属于热点火。在固体推进剂激光点火性能研究中,主要是利用激光热源辐射到推进剂的表面发生点火的现象。一定热流密度的激光对固体推进剂表面局部辐射能量,当局部能量积累到使固体推进剂发生热分解,热分解产物发生化学反应放出热量,直到着火现象发生,从而使固体推进剂被点着。若激光的热量和化学反应的热量二者能量的积累不能满足固体推

收稿日期:2008-12-17;修回日期:2009-05-11

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

作者简介:郝海霞(1980-),女,硕士,工程师,主要从事火炸药燃烧新能诊断技术研究。e-mail: hxiaohao@163.com

进剂着火能量,那么点火就无法持续<sup>[18-20]</sup>。

固体推进剂激光点火过程具体分为以下几个阶段<sup>[20-25]</sup>:第一阶段,是激光初始辐射到推进剂表面开始加热,在加热过程推进剂表面温度增加,而且从某一温度开始推进剂表面发生气化,这一阶段的时间称为第一气化时间。第二阶段就是在激光的持续作用下,推进剂表面热量不断增加,气化作用使更多气体从推进剂表面逸出,在热解的气体中发生放热反应最终产生第一道可见光辐射,这就被认为是火焰的产生,这一阶段时间采用第一光发射时间表示;为了使推进剂能够自持续稳定燃烧,激光能量必须持续到Go/No-Go点火的边界,这一时间就是推进剂的点火延迟时间。第三个阶段在光辐射第一时间和点火延迟时间之间,就是活跃预点火反应阶段。除了这个阶段,还存在一个无辐射熄灭边界,也就是持续的火焰在辐射能量去掉瞬间消失,这是因为快速去掉辐射后干扰了推进剂燃烧表面能量密度的平衡,能量的不平衡导致了燃速迅速衰减,最终推进剂熄灭。

大部分研究者采用的是计算光开始辐射到推进剂着火发光这段时间表示点火延迟时间,有的研究者在表征上稍有一定的差异,增加了第一气化时间作为点火性能表征其中一个参数。

### 3 固体推进剂激光点火试验装置

固体推进剂激光点火性能研究的表征参数主要为点火延迟时间,点火装置主要以采集点火延迟时间和记录点火过程为核心。激光点火试验装置包括能量刺激源、点火环境所需的燃烧器、点火时间及点火过程的记录仪器设备。新技术的发展,使得激光点火装置记录点火过程的微小变化成为可能。例如,刺激源所使用的激光器一般多采用波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的 $\text{CO}_2$ 激光器,且功率越来越高,功率从几十瓦到几百瓦均可实现;点火时间和过程的记录可采用数字示波器、CCD摄影机或者高速摄影仪,而CCD摄影机或者高速摄影仪可实现每秒几百帧的速率记录整个点火过程。激光点火试验装置因研究者的差异而存在一点差别,关于激光点火装置的详情可参考文献<sup>[20-21,24,26-27]</sup>。下面就文献<sup>[20]</sup>的激光点火试验装置进行较详细地描述。

文献<sup>[20]</sup>中,研究者采用的点火源是50 W的 $\text{CO}_2$ 激光器(Synrad48-5-115W),激光束作用到推进剂表面的光斑直径为0.4 cm,点火试验过程中除了试验需要中止外,激光持续到点火的完成,采用的激光热流密度分别为 $30, 50, 100\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。试验点火所用的

燃烧器为具有视窗的高压燃烧器,压力的调节通过缓存罐保持恒定,将燃烧产物排出燃烧器的吹扫气使用的是空气或者氩气。试验过程的记录采用的是摄影速率为 $60\ \text{frames}\cdot\text{s}^{-1}$ 的CCD摄影机,部分试验还采用了摄影速率为 $500\ \text{frames}\cdot\text{s}^{-1}$ 的HYCAM高速摄影仪。关于该试验装置的具体配置如图1所示。

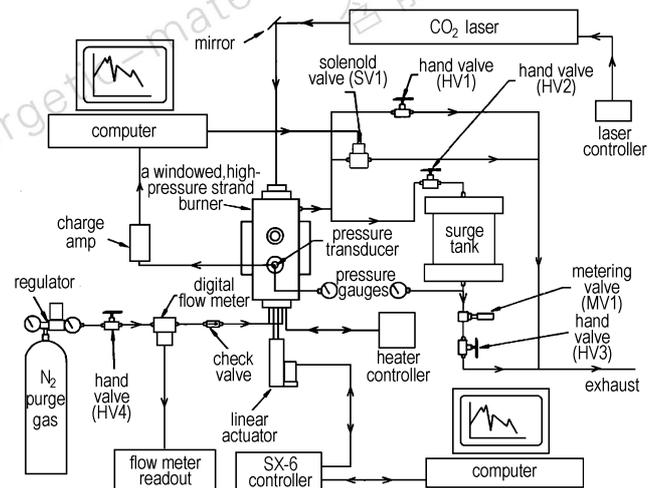


图1 实验装置示意图<sup>[20]</sup>

Fig. 1 Schematic of the experimental set-up

## 4 不同激光能量作用下固体推进剂的激光点火性能

固体推进剂激光点火过程受到诸多因素的影响,例如,激光能量、推进剂组分、点火压力和气氛等。在一定能量作用下,不同的推进剂激光点火性能差异较大,一些研究者对单元推进剂如RDX、HMX、ADN、GAP等在不同能量密度条件下点火性能和燃烧性能进行了研究。

### 4.1 不同能量作用下单元推进剂点火性能的差异

对RDX、HMX、ADN、GAP等单元推进剂燃烧性能的深入研究对于含有该组分的推进剂的燃烧性能有重要意义,因此对于单元推进剂燃烧性能的研究显得尤为重要。

RDX不仅可作为单元推进剂,还作为一种常用的氧化剂,其热分解性能和燃烧性能的研究已有大量的研究工作<sup>[28-33]</sup>,许多研究者采用 $\text{CO}_2$ 激光作为热源刺激RDX使其燃烧进一步分析其火焰结构<sup>[22,29-30]</sup>。如Liau Y C等人<sup>[29]</sup>对RDX单元推进剂激光点火进行了综合分析。作者在文中系统地解释了室温下RDX单元推进剂激光激发点火的物理化学变化过程,如图2所示。当激光开始作用到推进剂表面时,固相吸收激光能力开始(图2a);在气相阶段,只有某些组分吸收了一定量的激光能量,某一时刻固相开始熔化,形成了包含固体和液

体的糊状区域(图 2b); 当液相层形成后, 固液交界面因热传导和辐射的转移而开始迁移(图 2c); 在液相中, 热分解和随后的反应以及相转换产生气泡, 从而形成两相区, 此时推进剂表面开始快速蒸发(图 2d); 如果热流量达到可以触发随后的自加速放热反应和光辐射, 那么点火就实现, 发光火焰就会产生(图 2e), 当火焰倒退到推进剂表面, 最终达到固定位置点燃推进剂(图 2f)。

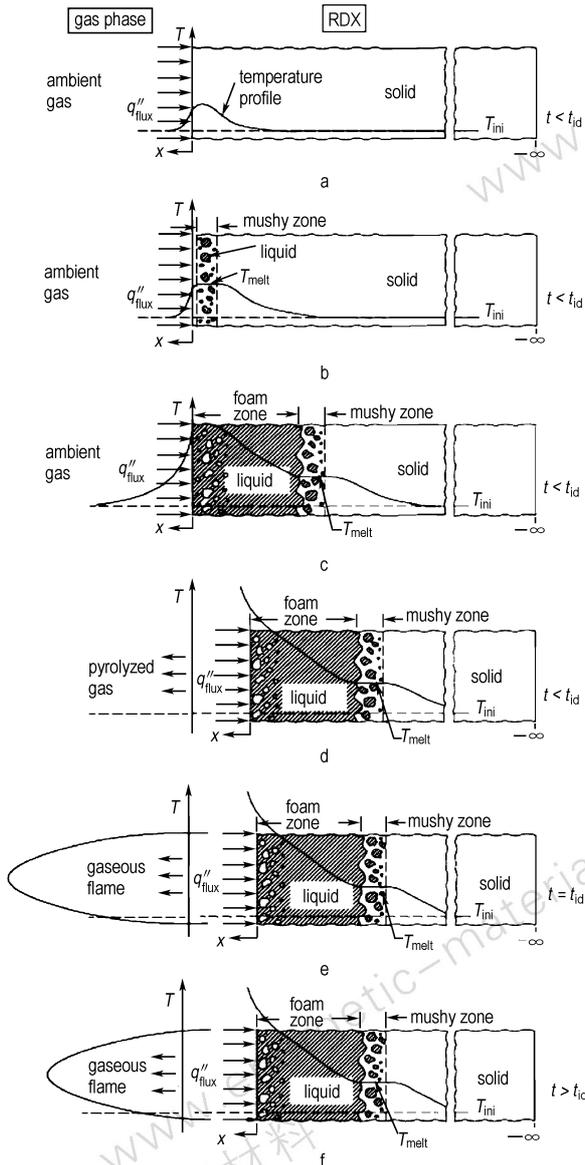


图 2 RDX 激光点火的物理化学过程  
Fig. 2 Physicochemical processes involved in laser-induced ignition of RDX

作者还研究了激光强度对 RDX 单元推进剂点火延迟的影响, 并与其他研究者的试验结果进行了对比, 如图 3 所示。

采用 CO<sub>2</sub> 激光刺激 HMX 热分解性能和燃烧性能

的研究也很多<sup>[34-35]</sup>。Tang C J 等人<sup>[34]</sup>利用激光助燃 HMX 研究其燃烧过程气相化学结构。研究中采用 CO<sub>2</sub> 激光作为外部能量点燃 HMX 形成火焰, 激光器在连续模式下可产生 800 W 功率, 且功率和激发时间可精确控制, 火焰结构图片和样品的高度可由 PulnixCCD 摄影仪获得, 试验所用的 HMX 样品直径为 0.64 cm 的粉状球形颗粒, 且含有 0.2% 的 RDX。HMX 在热流密度为 100 ~ 300 W · cm<sup>-2</sup> 的 CO<sub>2</sub> 激光作用下, 常压下出现发光火焰的延迟时间为 10 ~ 300 ms, 在 100 ms 内维持了瞬间火焰的稳定。在这一过程中, 他发现常压下, HMX 最小的点火热流密度大约是 100 W · cm<sup>-2</sup>, 在这一点点火发生了输出的突变和持续增加的现象。在正常的情况下, 延迟时间较长, 大于 200 ms, 而有时候在这一热流密度下却不能实现点火。在 200 W · cm<sup>-2</sup> 和 300 W · cm<sup>-2</sup> 的热流密度的点火延迟时间与其他研究者的结果基本一致, 而在 100 W · cm<sup>-2</sup> 的热流密度下点火延迟时间要比其他的研究者要大很多(300 ms vs 90 ms)。他认为是因为作为具有导热作用的冷的微探针冷却了推进剂表面的蒸发气体, 结果, 在气相的初始阶段反应减弱, 从而导致点火被大大延迟, 而在高热流密度情况下, 热吸收效应由于气相的热释放而相对较小。他研究的结论是: HMX 的点火是由气相反应所控制, 这一现象也被其他的研究者观察到。在点火阶段, 试验采用 100 W · cm<sup>-2</sup> 和 300 W · cm<sup>-2</sup> 的热流密度, 在常压下, 测得的 HMX 表面的主要组分有 H<sub>2</sub>O、CH<sub>2</sub>O、HCN、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>、CO 和 NO, 并没有 CO<sub>2</sub>, 而三嗪的含量接近 2.5% (这一点是作者的新发现)。点火过程中不同热流密度与点火延迟时间关系见表 1。不同研究者对 HMX 在 CO<sub>2</sub> 激光点火过程中的不同热流密度对延迟时间的影响研究结果如图 4 所示<sup>[34,36]</sup>。

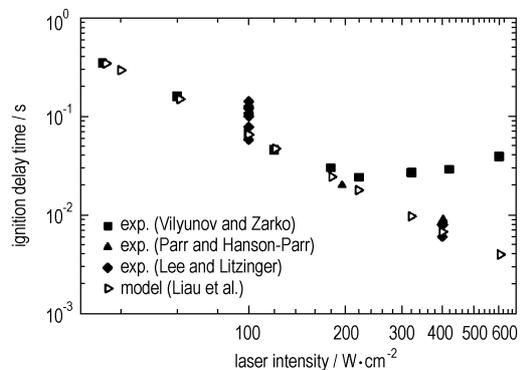
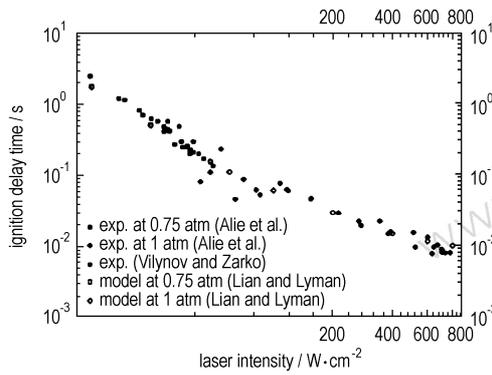


图 3 CO<sub>2</sub> 激光强度对 RDX 单元推进剂点火延迟时间的影响<sup>[29]</sup>  
Fig. 3 Effect of CO<sub>2</sub> laser intensity on ignition delay time of RDX monopropellant

表1 HMX的点火延迟时间与热流密度的关系<sup>[34]</sup>

Table 1 Relationship between ignition delay time and heat flux of HMX

heat flux/ $W \cdot cm^{-2}$	100	200	300
ignition delay time/ms	300	20	10

图4 CO<sub>2</sub>激光强度对HMX单元推进剂点火延迟时间的影响<sup>[34]</sup>Fig. 4 Effect of CO<sub>2</sub> laser intensity on ignition delay time of HMX monopropellant

Glycidyl Azide Polymer (GAP) 作为一种优良的叠氮材料,其热分解和燃烧性能的研究显得尤为重要<sup>[37-42]</sup>。关于采用激光刺激 GAP 热分解和燃烧行为的研究也比较多<sup>[25,38-39]</sup>。如 Tang C J 等人<sup>[26,38]</sup>研究了 GAP 推进剂在激光刺激作用下热分解过程中同时进行温度和组分的测定。试验中 CO<sub>2</sub> 激光热流密度分别为 50, 100, 200  $W \cdot cm^{-2}$  在大气压氩气氛下进行。作者在研究中认为,在激光作用下,GAP 的分解组分包括了通常认为的 N<sub>2</sub>、HCN、CO 和 CH<sub>2</sub>O,还发现亚胺类和烃类物质的摩尔分数分别占 0.09% 和 0.02%,且气相有细的固体粉末产生,其原因是热的亚胺类物质被周围冷气体迅速冷却所致,最后凝聚成固体粉末。含氮组分残留说明大部分亚胺类物质在凝聚成固体粉末前均可探测到。现有组分的测定证明了初始的热分解过程中在 100, 200  $W \cdot cm^{-2}$  热流密度下组分和表面温度(大约 1050 K)几乎是相同的,因此作者认为 GAP 点火阶段的热分解过程是由凝聚相化学决定,而在气相中仅有很少的反应,且有大量的细固体粉状物在气相中;还发现分解气体组分和温度对热流密度并不敏感。

Fetherolf B L 等人<sup>[23]</sup>为评估新型含能材料(ammonium dinitramide, ADN)的性能,对其基本的燃烧特性进行研究,采用不同热流密度 CO<sub>2</sub> 激光刺激 ADN 进行热分解和燃烧,研究了燃烧中关键的物理和化学过程。试验条件为氩气压力 0.01 ~ 0.5 MPa,输

入的 CO<sub>2</sub> 激光热流密度为 20 ~ 300  $W \cdot cm^{-2}$ 。试验测定了燃烧大量组分在时间和空间上的分布,并对气相和表面温度进行了测定,讨论了点火过程的现象,点火过程明显分为三个阶段:激光刺激热分解、激光刺激表面后退和激光助燃。激光刺激热分解在低压和低热流密度(压力为 0.01 MPa 和 0.03 MPa,热流密度分别为 20  $W \cdot cm^{-2}$  和 30  $W \cdot cm^{-2}$ )下进行的,基本特征是最小化气相反应,进行基本的热分解过程,材料的表面几乎没有稳定的后退,其表面只是有气泡和液态层。第二阶段的激光刺激表面后退,试验在 0.1 MPa 氩气压力、热流密度在 50 ~ 300  $W \cdot cm^{-2}$ 下进行的,其显著特征就是样品表面类似稳定的后退,但没有明亮的火焰出现,初始的热分解产物的气相反应存在但不足以产生发光火焰的反应,而此时激光中止,则样品熄灭。第三阶段就是激光助燃阶段,试验在 0.3 MPa 和 0.5 MPa 压力,热流密度为 100  $W \cdot cm^{-2}$  和 200  $W \cdot cm^{-2}$  下进行的,基本特征就是样品在激光持续加热下伴随发光火焰产生,但 0.3 MPa 下火焰结构不稳定,且两种压力下,火焰中的气化反应也不同。

#### 4.2 不同激光能量对双基和复合固体推进剂激光点火性能影响

Grant A. Risha 等人<sup>[21]</sup>针对 N-5 双基系推进剂(EP-A、EP-B 和 EP-C)不同样品的点火能力进行了试验,目的是研究 N-5 系推进剂在点火阶段的差异和点火行为(包括气化初始点、第一发光点和自持续点火点)。试验条件是压力 0.1 MPa,初始推进剂温度 31 °C,到达推进剂表面的热流密度分别为 29, 45, 61  $W \cdot cm^{-2}$ ,对 EP-A、EP-B 和 EP-C 三种推进剂样品进行了点火试验,并记录了点火时间(第一气化时间  $t_{GE}$ 、第一发光时间  $t_{LE}$  和自持续燃烧时间  $t_{IGN}$ )与热流密度的关系,并对实验结果进行了比较和分析,N-5 双基系推进剂不同热流密度下点火延迟时间见表 2。研究发现:从激光提供的到达初始气化和第一发光阶段较新的和较陈旧的推进剂表面的能量非常一致,但是较新的 N-5 系推进剂(EP-A 和 EP-C)的点火延迟时间(自持续燃烧时间)要比较陈旧的推进剂(EP-B)长很多,而延迟时间和热流密度的关系也是一种相反的趋势。从完好的没能完成气体发生器测试的样品 EP-C,则表现很长的点火延迟期,而且同样的样品测试的点火延迟时间差异较大,说明材料与热的气相产物和凝聚相颗粒的接触并不是一致的;而较陈旧的推进剂(EP-B)在不同热流密度下的测试结果重复性较好。

表 2  $Q = 29, 45$  and  $61 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  时  
N-5 系两种推进剂的点火延迟时间<sup>[21]</sup>

Table 2 Ignition delay time for two raw materials N-5 lots  
at  $Q = 29, 45$  and  $61 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$

time /ms	heat flux / $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	newer raw materials lot (EP-A)		older raw materials lot (EP-B)	
		$t_{\min}/\text{ms}$	$t_{\max}/\text{ms}$	$t_{\min}/\text{ms}$	$t_{\max}/\text{ms}$
$t_{\text{GE}}$	29	67	83	67	67
$t_{\text{LE}}$	29	117	183	150	167
$t_{\text{IGN}}$	29	133	300	167	183
$t_{\text{GE}}$	45	33	67	67	67
$t_{\text{LE}}$	45	83	117	83	117
$t_{\text{IGN}}$	45	100	233	100	183
$t_{\text{GE}}$	61	33	50	50	50
$t_{\text{LE}}$	61	50	83	67	67
$t_{\text{IGN}}$	61	67	217	83	83

Ulas 等人<sup>[20]</sup>在气体发生器用的固体推进剂的激光点火和燃烧性能方面进行了详细的研究, 试验中通过不同热流密度和燃烧器操作条件下用于估算一系列该类推进剂的点火能力。一共试验了六种推进剂: 一个基础配方(硝胺 54.2%、硝基胍盐 31.3%、硝酸钾 9.5% 和聚乙烯醇 5%) 和五个添加了不同量的炭黑、高氯酸铵、RDX、三氨基胍硝酸盐 (TAGN) 组分后的配方, 并将基础配方命名为推进剂 A, 添加炭黑的为推进剂 B, 添加 AP 的为推进剂 C, 添加 RDX 的为推进剂 D, 添加 TAGN 的为推进剂 E 和添加 RDX 和 TAGN 的为推进剂 F。试验是在有视窗可加压的燃烧器中进行, 试样是  $\phi 12.7 \text{ mm} \times 25.1 \text{ mm}$  的圆柱体, 试验气氛为空气和氩气, 压力为 0.1 MPa 和 6.9 MPa, 热流密度分别为 30, 50, 100  $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 点火延迟采用第一气化时间和第一发光时间表示。对六种推进剂不同热流密度下进行了点火和燃烧性能的研究, 在对 A 和 F 进行的不同热流密度试验的结果看, 无论是在空气还是氩气中, 热流密度的增加可以减少第一气化时间和第一发光时间。试验结果见表 3。

表 3 0.1 MPa 压力下不同热流密度下 A 和 F 推进剂点火延迟时间<sup>[20]</sup>

Table 3 Ignition delay time for propellant A and F  
at  $p = 0.1 \text{ MPa}$  and various heat fluxes

laser flux ( $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) /purge gas		propellant A (Ar gas)			propellant F (air)		
		30	50	100	30	50	100
ignition delay time/s	first gas evolution	0.4	0.07	0.067	0.2	0.125	0.03
	first light emission	3.167	0.85	0.183	106	31.8	0.82

Note: The ignition time is the average value<sup>[20]</sup>.

徐浩星等<sup>[43]</sup>用  $\text{CO}_2$  激光点火研究丁羟推进剂激光点火性能中, 针对 8 号配方 (见表 4) 进行了不同热流密度点火性能的研究。当激光点火热通量分别为 0.33, 0.98, 1.36, 1.66  $\text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$  时, 随激光点火热通量的增加, 推进剂的点火延迟时间显著缩短, 试验结果见表 5。

从文献报道可以看出, 固体推进剂激光点火的实现需要一定能量的支持, 不同的能量对其点火延迟具有一定的影响, 激光能量越大, 点火延迟时间越短, 而且, 点火能量存在一个阈值, 只有点火能量高于这一值, 点火才能实现。对于单元推进剂, 其激光点火能量的不同, 点火过程不同阶段的分解放热组分也存在差异。

表 4 几组丁羟推进剂配方组成<sup>[43]</sup>

Table 4 Compositions of HTPB propellants %

formula No.	AP	RDX	Al	UFAl	ammonium oxalate	HTPB + others
4	35	35	16	-	-	14
5	65	-	16	-	5	14
8	35	35	12	4	-	14
9	65	-	12	4	5	14

表 5 点火热通量对点火延迟时间的影响<sup>[43]</sup>

Table 5 Effect of radiant flux on the ignition delay time

radiant flux/ $\text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$	ignition delay time/s
0.33	7.15
0.98	0.37
1.36	0.24
1.66	0.19

## 5 固体推进剂组分对激光点火性能的影响

固体推进剂不同的配方其主要成分对点火性能的影响也存在差异, 且相同配方的推进剂其组分的粒度和配比的差异对其激光点火性能的影响程度也不同。

Ulas 等人<sup>[20]</sup>在研究气体发生器用的固体推进剂的点火能力研究中, 针对六种推进剂 (4.2 节所述) 在不同点火气氛、不同压力和不同热流密度下进行了点火和燃烧性能的研究, 在 50  $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$  的热流密度和空气压力为 0.1 MPa 下, 第一气化时间的排序为, 推进剂  $D < A \approx B \approx F < E \approx C$ , 而第一发光时间的排序为:  $D \approx A \approx B \approx C \ll E \ll F$ 。说明 TAGN 对该配方推进剂的点火第一发光时间影响较大。

徐浩星等人<sup>[43]</sup>用  $\text{CO}_2$  激光点火研究了超细铝粉对丁羟推进剂 (配方组分见表 4) 点火性能的影响。结果表明, 在 4 号和 5 号配方中各添加 4% 的 UFAl 后 (配方 8 和 9), 推进剂的点火延迟时间分别缩短了 34.5% 和

25.8%。由于超细铝粉比普通铝粉具有更小的粒度和更大的比表面积,因此在推进剂点火过程中,它比普通铝粉更易着火燃烧,使推进剂的点火延迟时间缩短。由此可见,UFAI能明显改善丁羟推进剂的点火性能。

江治等人<sup>[44-46]</sup>在金属粉(铝粉和镍粉)对推进剂燃烧性能的影响方面进行了研究,结果表明<sup>[44]</sup>:纳米铝粉(n-Al)的点火阈值比普通铝粉(g-Al)的点火阈值小几个数量级,加入纳米铝粉可有效地缩短HTPB推进剂点火延迟时间,这与徐浩星等人的研究结果一致。同时,加入纳米镍粉为催化剂的协同作用下,推进剂燃速明显提高,点火延迟时间也大大缩短,铝粉在推进剂燃烧过程中燃烧效率得以提高,燃烧残渣中活性铝含量也明显降低。

李疏芬等<sup>[47]</sup>在研究NEPE推进剂的激光点火性能时,设计了三种样品,基础样品配方为(AP/HMX)+(PEG/NE)+Al(记为N-7),当铝粉和粘结剂的含量及氧化剂(AP/HMX)总量不变时,制成2个样品(N-8和N-9),对AP和HMX对点火性能的影响进行了研究<sup>[30]</sup>。结果表明,AP随着AP含量增加,点火延迟时间缩短;而HMX则呈现出明显的点火延迟特性,且AP在大多数热流密度激发下立即点火,结果见表6。她认为AP分散在推进剂中,起着活性激发剂的作用,在缩短点火延迟时间上,AP的贡献大于HMX。

表6 不同热流密度下氧化剂配比对点火延迟时间的影响<sup>[47]</sup>

Table 6 Effect of proportion of oxidizers content on ignition delay time at various heat fluxes

sample No.	oxidizers content AP/HMX	ignition delay time(s) at various heat fluxes/ $W \cdot mm^{-2}$			
		0.45	0.78	1.78	3.12
N-7	8/49	no ignition	no ignition	2.8	2.32
N-8	13/44	1.44	0.48	0.19	0.09
N-9	20/37	1.02	0.32	0.15	0.064

## 6 点火环境对固体推进剂激光点火性能的影响

环境因素主要包括点火压力、气氛和初温,其中压力对点火过程的影响较大,点火气氛的不同也导致点火过程存在差异,而初温对点火的影响与热流密度有关。

Ulas等人<sup>[20]</sup>在研究气体发生器用的固体推进剂的点火能力研究中发现,压力的增加减少了第一发光时间,而对气体蒸发的减弱效应更多;在相同热流密度和燃烧室压力下,在氩气中的第一发光时间要比空气中的少,这可能是因空气的热容和导热性要比氩气的大,使未点燃的推进剂表面层散失到环境气体中的热量更多。

Yu等人<sup>[48]</sup>曾对硝胺推进剂在快速增压下的点火

性能进行研究,发现当增压速率增大时,在相同条件下硝胺复合推进剂比AP推进剂更难点火。Kim等<sup>[49]</sup>对一系列RDX复合推进剂在快速增压下点火特征的研究表明:随着增压速率的增大,开始发光所需时间缩短,且开始发光时间强烈地依赖于推进剂组分及各组分含量。

李疏芬等<sup>[47]</sup>在研究NEPE推进剂激光点火特性中,还针对它所配制的N-8样品在常压及不同热流密度作用下,进行了初温对点火延迟的影响。研究表明,初温对点火延迟的影响程度主要取决于热流密度的大小,不同热流密度与初温的相关性如图5所示。在热流密度较低时,初温对点火延迟的影响非常明显,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温差下延迟时间相差1s以上;随着热流密度增加,初温对点火延迟的影响越来越小,在较大热流密度作用下,初温由 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,点火延迟时间相差仅0.1s,而随着热流密度进一步升到更高时,初温对点火延迟时间的影响几乎可以忽略。作者认为是所谓的“拉平效应”在起作用,即在高热流作用下,热流对点火延迟时间的影响比初温对点火延迟时间的影响大得多,初温的影响被拉平。且在较高的热流下,点火延迟时间与初温间呈线性关系<sup>[3]</sup>。主要原因是在压强不太高的情况,低温下固体推进剂的主要组分AP在瞬时加热过程中难以熔化,发生放热反应的几率减小,凝聚相的反应热能增加缓慢,点火所需要能量累积的时间延长<sup>[50]</sup>。反之,在较高的初温及热流作用下,有利于AP的“熔化”和凝聚相放热反应的发生,导致较短时间内点火的发生。

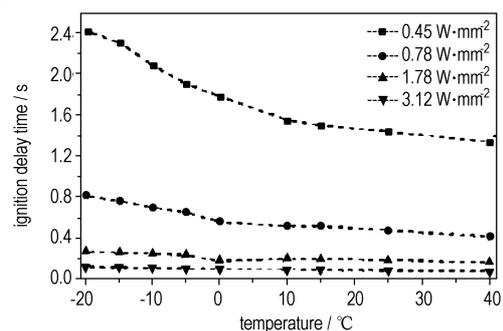


图5 在不同热流密度作用下初温对点火延迟时间的影响<sup>[47]</sup>

Fig. 5 Effect of the initial temperature on ignition delay time at various heat fluxes

## 7 小结

激光作为一种研究固体推进剂点火行为的手段与传统方法相比具有独特的优点,激光点火方法已成为研究固体推进剂燃烧初始点火阶段过程和产物的一种

可靠手段,为研究固体推进剂点火过程的理论和模型的验证数据和推进剂点火能力的评价提供了很好的方法。固体推进剂激光点火行为研究过程中影响因素比较多,如激光能量,推进剂组分、配比和粒度,环境气氛、压力及初始温度等因素,在研究固体推进剂点火行为的过程中要视具体要求去选择点火条件。对于一些单元推进剂,采用传统的方法研究其燃烧过程存在困难时,激光点火方式不失为一种较好的手段。

应用激光研究固体推进剂点火性能需要注意几点:

(1) 固体推进剂激光点火存在一个能量阈值,若点火成功,则激光能量须大于这一阈值。

(2) 固体推进剂的组分及其配比和粒度对于激光点火过程有较大影响,尤其是一些金属粒子,在点火过程研究中根据需要调整配方。

(3) 固体推进剂激光点火虽然不受点火气氛、温度等限制,但是在低热流密度下进行点火,环境因素的影响比较大,而在高热流密度条件下,可以弱化这种影响。

目前,国内关于固体推进剂激光点火性能及点火机理的研究较少,尤其是目前一些新型含能材料应用到固体推进剂中,其燃烧初级阶段的点火性能研究有待开展。

#### 参考文献:

- [1] Williams F A. Theory of propellant ignition by heterogeneous reaction [R]. AIAA J 1966, 4: 1354 - 1357.
- [2] Price E W, Bradley Jr H H, Dehority G L, et al. Theory of ignition of solid propellants [R]. AIAA J 1966, 4: 1153 - 1181.
- [3] Baer S D, Ryan N W. An approximate but complete model for the ignition response of solid propellants [R]. AIAA J 1968, 6: 872 - 877.
- [4] Kulkarni A K, Kumar M, Kuo K K. Review of solid propellant ignition studies [R]. AIAA J 1982, 20: 243 - 244.
- [5] Waldman C H, Summerfield M. Theory of propellant ignition by heterogeneous reaction [R]. AIAA J 1969, 7: 1359 - 1361.
- [6] Bradley Jr H H. Theory of ignition of a reactive solid by constant energy flux [J]. *Combustion Science and Technology*, 1970, 2: 11 - 20.
- [7] Bradley Jr H H, Williams F A. Theory of radiant and hypergolic ignition of solid propellant [J]. *Combustion Science and Technology*, 1970, 2: 41 - 52.
- [8] Hermance C E, Kumar R K. Gas phase ignition theory for homogeneous propellants under shock tube conditions [R]. AIAA J 1970, 8: 1551 - 1558.
- [9] Waldman C H. Theory of heterogeneous ignition [J]. *Combustion Science and Technology*, 1970, 2: 81 - 93.
- [10] Andersen W H. Theory of surface ignition with application to cellulose, explosives, and propellants [J]. *Combustion Science and Technology*, 1970, 2: 213 - 221.
- [11] Kumar R K, Hermance C E. Ignition of homogeneous solid propellants under shock tube conditions [R]. AIAA J 1971, 9: 1615 - 1620.
- [12] Kumar R K, Hermance C E. Gas phase ignition theory of a heterogeneous solid propellant [J]. *Combustion Science and Technology*, 1972, 4: 191 - 196.
- [13] Kindelan M, Williams F A. Gas-phase ignition of a solid with in-depth absorption of radiation [J]. *Combustion Science and Technology*, 1977, 16: 47 - 58.
- [14] Andersen W H. Analysis of ignition behavior of M2 propellants [J]. *Combustion Science and Technology*, 1972, 5: 43 - 46.
- [15] Ritchie S, Thynell S, Kuo K K. Modeling and experiments of laser-induced ignition of nitramine propellants [J]. *J Propulsion Power*, 1997, 13 (3): 367 - 374.
- [16] Vilyunov V N, Zarko V E. Ignition of Solids [M]. New York: Elsevier Science Publishers, 1989.
- [17] Ali A N, Son S F, Sander R K, et al. Ignition dynamics of high explosives [R]. AIAA 99 - 0862.
- [18] Weinrotter M, Kopeceka H, Wintner E, et al. Application of laser ignition to hydrogen-air mixtures at high pressures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, 30: 319 - 326.
- [19] Phuoc T X. Laser-induced spark ignition fundamental and applications [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44: 351 - 397.
- [20] Ulas A, Kuo K K. Laser-induced ignition of solid propellants for gas generators [J]. *Fuel*, 2008, 87: 639 - 646.
- [21] Risha G A, Kuo K K, Koch D E, et al. Laser ignition characterization of N-5 double-base solid propellants [J]. *Combustion of Energetic Material*, 2002: 284 - 295.
- [22] Hanson-Parr D M, Parr T P. RDX laser-assisted flame structure [C] // 31st JANNAF Combustion Subcommittee Meeting, Sunnyvale, California, 1994, 2: 407 - 423.
- [23] Fetherolf B L, Litzinger T A. CO<sub>2</sub> laser-induced combustion of ammonium dinitramide (ADN) [J]. *Combustion and Flame*, 1998, 114: 515 - 530.
- [24] Liao Y C, Lyman J L. Modeling laser-induced ignition of nitramine propellants with condensed and gas-phase absorption [J]. *Combustion Science and Technology*, 2002, 174 (3): 141 - 171.
- [25] Kim J U, Torikat T, Kuo K K. Ignition dynamics of nitramine composite propellants under CO<sub>2</sub> laser heating [R]. AIAA 87 - 0564.
- [26] Tang C J, Lee Y, Litzinger T A. Simultaneous temperature and species measurements of the glycidyl azide polymer (GAP) propellant during laser-induced decomposition [J]. *Combustion and Flame*, 1999, 117: 244 - 256.
- [27] Beckstead M W. A comparison of solid monopropellant combustion and modeling [R]. AIAA 97 - 0586.
- [28] Singh M, Kumar R, Kumar L, et al. Laser ignition of propellants [C] // Proceedings of the 33rd International Pyrotechnics Seminar. Fort Collins, Colorado, 2006: 1 - 11.
- [29] Liao Y C, Kim E S, Yang V. A comprehensive analysis of laser-induced ignition of RDX monopropellant [J]. *Combustion and Flame*, 2001, 126: 1680 - 1698.
- [30] Lee Y J, Tang C J, Kudva G, et al. The near-surface gas-phase structure of RDX during CO<sub>2</sub> laser-assisted combustion [C] // 32nd JANNAF Combustion Meeting, Huntsville, Alabama, 1995.

- [31] Hanson-Parr D M, Parr T P. RDX flame structure [C] // 25th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Irvine, California, 1994: 1635 - 1643.
- [32] Parr T P, Hanson-Parr D M. RDX, HMX, and XM39 self-deflagration flame structure [C] // 32nd JANNAF Combustion Meeting, Huntsville, Alabama, 1995.
- [33] Litzinger T A, Fetherolf B L, Lee Y J, et al. Study of the gas-phase chemistry of RDX: Experiments and modeling [J]. *J Propulsion Power*, 1995, 11(4): 698 - 703.
- [34] Tang C J, Lee Y J, Kudva G, et al. A study of the gas-phase chemical structure during CO<sub>2</sub> laser-assisted combustion of HMX [J]. *Combustion and Flame*, 1999, 117: 170 - 188.
- [35] Meredith K V, Beckstead M W. Laser-induced ignition modeling of HMX [C] // 39th JANNAF Combustion Meeting, Colorado Springs, Colorado, 2003.
- [36] Beckstead M W, Puduppakkam K, Thakre P, et al. Modeling of combustion and ignition of solid-propellant ingredients [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007, 33: 497 - 551.
- [37] Haas Y, Eliahu Y B, Welner S. Infrared laser-induced decomposition of GAP [J]. *Combustion and Flame*, 1994, 96: 212 - 220.
- [38] Tang C J, Lee Y J, Litzinger T A. The chemical and thermal processes of GAP/nitramine pseudo-propellants under CO<sub>2</sub> laser heating [C] // 34th JANNAF Combustion Meeting, West Palm Beach, Florida, 1997: 491 - 504.
- [39] Kubota N, Sonobe T, Yamamoto A, et al. Burning rate characteristics of GAP propellants [J]. *J Propulsion Power*, 1990, 6: 686 - 689.
- [40] Kubota N. Combustion of energetic azide polymers [J]. *J Propulsion Power*, 1995, 11(4): 677 - 682.
- [41] Korobeinichev O P, Kuibida L V, Volkov E N, et al. Mass spectrometric study of combustion and thermal decomposition of GAP [J]. *Combustion and Flame*, 2002, 129: 136 - 150.
- [42] Arisawa H, Brill T B. Thermal decomposition of energetic materials 71: Structure-decomposition and kinetic relationships in flash of glycidyl azide polymer (GAP) [J]. *Combustion and Flame*, 1998, 112: 533 - 544.
- [43] 徐浩星, 王桂兰, 贾淑霞, 等. 丁羟推进剂激光点火延迟时间研究 [J]. *固体火箭技术*, 2000, 23(1): 40 - 43.  
XU Hao-xing, WANG Gui-lan, JIA Shu-xia, et al. Laser ignition delay time of HTPB propellants [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2000, 23(1): 40 - 43.
- [44] 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.  
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.
- [45] 江治, 李疏芬, 赵凤起, 等. 纳米金属粉对 HMX 热分解特性的影响 [J]. *推进技术*, 2002, 23(3): 258 - 261.  
JIANG Zhi, LI Shu-fen, ZHAO Feng-qi, et al. Effect of nano metal powder on the thermal decomposition characteristics of HMX [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23(3): 258 - 261.
- [46] 江治, 李疏芬, 赵凤起, 等. 纳米金属粉对高氯酸铵热分解的影响 [J]. *推进技术*, 2003(5): 460 - 463.  
JIANG Zhi, LI Shu-fen, ZHAO Feng-qi, et al. Effect of nano nichel powders on thermal decomposition characteristics of NH<sub>4</sub>ClO<sub>4</sub> [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003(5): 460 - 463.
- [47] 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.  
LI Shu-fen, NIU He-lin, ZHANG Gang-chui, et al. Laser ignition of NEPE propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2002, 23(2): 172 - 175.
- [48] Yu S, Hieh W H, Kuo K K. Ignition of nitramine propellants under rapid pressurization [R]. AIAA83 - 1194.
- [49] Kim J U, Kim J U, Koo F H, et al. Comparison of ignition characteristics of a series of RDX-based composite propellants under rapid pressurization [R]. AIAA85 - 1175.
- [50] Atwood A I, Boggs T L, Curran P O, et al. Burning rate of solid propellant ingredients, part I: Pressure and initial temperature effects [J]. *J Propulsion Power*, 1999, 15(6): 740 - 747.

## Summarization of Laser Ignition Characteristics of Solid Propellants

HAO Hai-xia, PEI Qing, ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen  
(Xi'an Modern Chemistry Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Laser ignition has been an active research topic in recent years, and laser becomes an attractive future alternative ignition source to study the ignition characteristics of propellants because of its advantages of high and adjustable energy, the ignition time and energy being controllable, and the ignition process unlimited by the surroundings. In addition, the studies of ignition characteristics of propellants contribute to explaining the combustion theory and demonstrating the related model. The brief theory, the characterization and the apparatus of laser ignition of solid propellants at home and abroad were described. And the factors affecting the laser ignition of propellants such as the laser energy, the components and contents of propellants and the circumstances including pressure and temperature, were discussed. In the end, several problems on the evolvement of the laser ignition characteristics of the solid propellants were summarized and concluded with 50 references.

**Key words:** physical chemistry; solid propellant; laser ignition; ignition delay time; summarization