

# CO<sub>2</sub>激光点燃点火药的试验研究

纪秋颖 李 桂 赵元修

(北京航空航天大学)

## 摘 要

用CO<sub>2</sub>激光点火试验设备,对Al + KClO<sub>4</sub>点火药进行点燃性能试验。试验结果表明,随着点火热流密度的增大,点火延迟时间减小。说明点火热流密度是点火药点燃性能中非常重要的控制量。点火药密度越小点火延迟时间也越小。在点火药主组分中加入少量固态硫作为粘合剂,会使点火药的点燃性能更好。

**主题词:** 固体推进剂点火, 点火能量, 点火试验, 点火药, 激光点火, 固体火箭发动机

## 一、前 言

在固体火箭发动机的内弹道性能中,点火起动性能是其重要的组成部分。在点火起动性能中,对推进剂包括点火剂的点燃特性进行研究又十分重要。人们特别关注有关点燃推进剂包括点火剂的能量、点火延迟时间等重要参量及其变化规律。

点火过程包括能量传输、相变、质量和热量扩散、化学热力学、化学动力学过程,而这些过程又要受到诸如推进剂包括点火剂组分的特性、环境气体性质、压强、温度、外界热流密度等因素的影响。所以在试验研究中要求能分别调整和控制各种影响因素,找出影响点火过程的主要因素及其影响规律<sup>[1-4]</sup>。

激光技术是六十年代初兴起的新技术。由于它具有独特的光学性能,广泛地应用于工农业、医学和国防科研上。现在人们开始把气体激光器用于燃烧研究中,其中CO<sub>2</sub>气体激光器得到了广泛的使用。利用激光作为能源来研究推进剂点火特性具有如下优点:

1. 点火能源与试验件是相互独立的两部分,所以点火环境条件易于控制和改变。
2. 激光单色性好,高亮度,高聚光性,因而试件对光能的吸收易于控制。此外,光束模次低、光强分布均匀,输出功率稳定度高,点火热流密度大小可以调整,易于准确测定。

## 二、CO<sub>2</sub>激光点火试验设备

CO<sub>2</sub>激光点火试验设备由CO<sub>2</sub>激光器、光路控制系统、延迟时间测试系统、环境条件控制系统、试验数据处理系统、试验容器和试验件等组成(见图1)。

本文1988年3月7日收到

本试验利用CO<sub>2</sub>激光器作为辐射热源加热器,对点火药试件施加可控的激光能量。能量的供给和切断是利用双直列直插式C-mos数字集成电路组成的控制系统来执行。由数码显示系统、高速摄影系统、测温系统组成的测试混合系统记录各次试验的能量施加时间、点火延迟时间、燃烧时间、燃烧温度等。环境条件控制系统可改变点火剂试件点燃的初始压强,初始温度和环境气体成分。

本试验设备的主要特点是CO<sub>2</sub>激光输出功率大(百瓦级);可控;功率稳定度高;激光器件积小、工作寿命长;光控系统准确、灵敏;测时系统精度高(毫秒级);调节功能多;数据处理方便。

点火药试件为直径10mm、厚5mm的圆柱体,有下列两种:

#### 1. 不同配比及不同密度的铝粉加过氯酸钾点火药

铝粉与过氯酸钾的配比有3:7, 5:5, 7:3及9:1四种(以上四种密度均为1411kg/m<sup>3</sup>)。还有一种是69%铝粉、29%过氯酸钾及2%硫粉,其密度为1200kg/m<sup>3</sup>。

对于3:7配比的配方,准备了三种不同密度的火药,它们的密度分别为1920、1690、1410 kg/m<sup>3</sup>。

#### 2. 不同配比的镁粉加聚四氟乙烯点火药

镁粉与聚四氟乙烯配比分别为3:7, 5:5, 7:3及9:1,它们的成型力均为50N。

点火热流密度根据激光输出有效功率,在小于150瓦范围内可调。点火药试件初温为20℃。

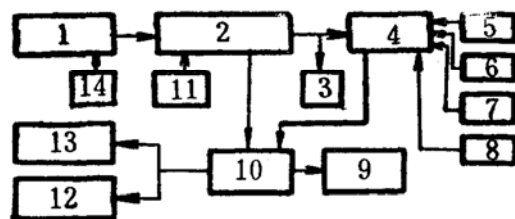


图1 试验设备系统图

1.CO<sub>2</sub>激光能源系统 2.光路控制系统 3.功率监测系统 4.试验容器 5.温度调节系统 6.压强控制系统 7.环境气体成分调节系统 8.高速摄影系统 9.燃烧温度显示系统 10.放大系统 11.操作控制系统 12.计算机数据处理系统 13.数码显示系统 14.输出功率调节系统

### 三、试验结果和讨论

所有点火药配方的试验结果都表明:点火延迟时间随点火热流密度的增大而减少,如图2所示,且存在着能够点燃点火药的最小点火热流密度。

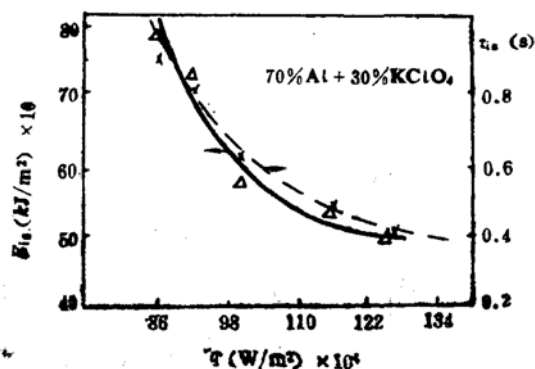


图2  $\tau_{ig}$ - $\dot{q}$ 及  $E_{ig}$ - $\dot{q}$ 实验曲线

有些试验表明,热流密度较大时,进一步再增大点火热流密度  $\dot{q}$  并不能显著减小点火延迟时间。而当  $\dot{q}$  减小接近极限值时,点火延迟时间却急剧增加。这是由于点火延迟时间  $\tau_{ig}$  是由加热时间  $\tau_h$  和化学反应时间  $\tau_c$  两部分组成,当  $\dot{q}$  很大时,  $\tau_{ig}$  主要决定于  $\tau_c$ 。故再增加  $\dot{q}$  也不会对  $\tau_{ig}$  有明显影响。反之,  $\dot{q}$  很小时,  $\tau_{ig}$  主要决定于  $\tau_h$ , 故  $\dot{q}$  的减小对  $\tau_{ig}$  的影响就会很大。参考文献(2)中提出的如下经验公式:

$$\tau_{ig} = \tau_{CD} + A/\dot{q} + B/\dot{q}$$

式中  $\tau_{CD}$  是化学扩散及反应所需时间,它与压

强成反比, A、B 是与  $\dot{q}$  无关的两个常量。由此可见, 它反映了与本试验结果具有相同的规律。结果表明  $\dot{q}$ , 存在一个最佳值, 无限制地增大  $\dot{q}$  并不能继续降低  $\tau_{ig}$  值。

把试验结果整理成点火药点火能量  $E_{ig}$  和  $\dot{q}$  的关系后发现: 点火能量  $E_{ig}$  随点火热流密度  $\dot{q}$  的增大而减小 (见图 2)、在最佳点火热流密度处所需点火能量最小。偏离最佳点火热流密度值时, 点火能量  $E_{ig}$  都要增大。

由图 3 曲线可见, 点火的药密度越小, 点火延迟时间越短; 随着点火药密度的减小, 最小点火热流密度值也减小。上述结果可以作如下解释: 低密度的点火药试片结构疏松、表面粗糙、凸凹不平。由于过氯酸钾比铝颗粒有较大的可压缩性, 致使粗糙表面上铝颗粒突出、过氯酸钾下陷。表面受热后, 过氯酸钾先分解, 进一步加大了表面凸凹不平度, 使过氯酸钾分解出的氯化性热气体包括突出的铝颗粒的面积增大了, 因而铝颗粒的受热面积增大, 加速化学反应, 缩短点火延迟时间。同时, 表面的凸凹不平及结构疏松也会使空气中的氧气易于进入空隙, 增加了深层中氧化剂成分, 也促使试片易点燃。

对于密度大的点火药试片, 由于过氯酸钾的可压缩性, 使试片表面形成由铝颗粒密布的光亮硬层, 表面受热后, 不但使惰性加热时间增加, 且由于表面贫氧富燃的配比, 使试片不易点燃。当压制力更大些时 (2400N), 试片就不能点燃了。因此, 点火药密度的变化对点火延迟时间有较大的影响。密度越小, 点火时延迟时间越短; 但当密度大至一定值时, 点火药就不能点燃了<sup>[3]</sup>。

点火药密度的确定要根据点燃性能的要求, 在最低值 (保证点火药成型的机械强度) 和最高值 (点火药点不着) 之间加以选择。

在点火药的原有组分中加入少量硫粉, 会使点火延迟时间有明显的减小, 且最小热流密度也会减小很多, 如图 4 所示。这是因为硫的流动性和连结性好, 可作为一种固态粘合剂。在点火药组分中加入少量硫可以在较低压强下成型, 使试片密度减小, 从而能改善其点燃性能。又由于硫的燃点低的特点, 硫能先于点火药的主组分发生反应而放出附加热量, 加速主组分之间的化学反应, 使点火延迟时间缩短。因此, 要进一步改善点火药的点燃性能, 可在原配方中加入少量的硫粉, 使之大幅度地缩短点火延迟时间。不同配比情况下加硫都有相似的性能改善。

对于相同组分不同配比的试验结果表明, 在相同热流密度下, 5:5 配比的点火延迟时间比 7:3 配比的稍短。这可能是由于后者的氧化剂和燃烧剂的组分配比更接近于恰当的比例的缘故。

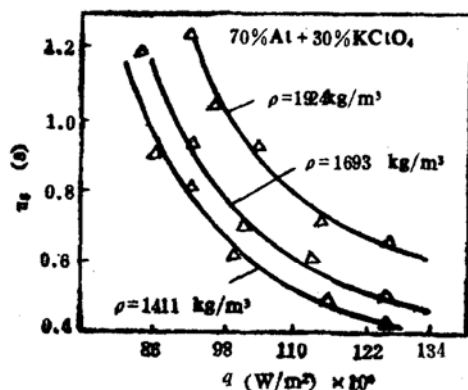


图 3 不同密度实验曲线

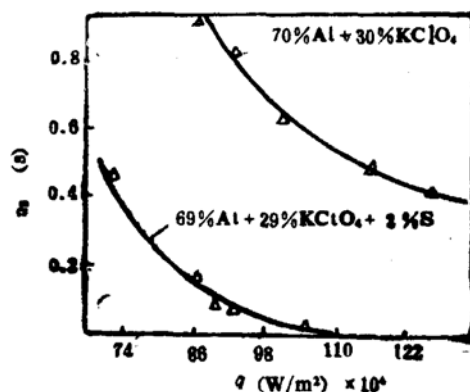


图 4 实验曲线比较

90%铝+10%过氯酸钾的配方, 试验时试片只出现暗红色而不能点燃。观察燃烧后的试片表面呈现孔状结构, 由铝颗粒覆盖的凸凹不平的表面, 这是贫氧富燃导致的结果。

30%铝+70%过氯酸钾的配方, 试验时也只见发出暗红色的光点而未能点燃。观察烧燃后的表面上只剩下过氯酸钾, 这是贫燃富氧导致的结果。

不同组分的点火药点火性能试验如图5所示。选用不同配比的两种相同组分, 镁+聚四氟乙烯和铝+过氯酸钾比较, 试验结果都显示出前者较后者有较好的点燃性能。

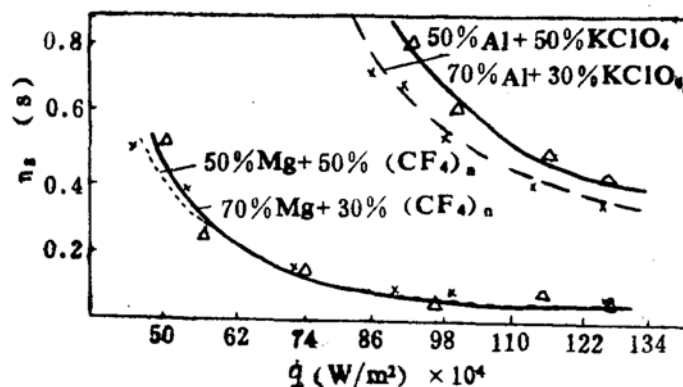


图5 不同组分实验曲线

## 四、结 论

点火热流密度对点火延迟时间影响很大, 点火热流密度  $\dot{q}$  越大, 点火延迟时间  $\tau_{ig}$  就越小。存在着能够点燃点火药的最小点火热流密度。当点火热流密度增大到一定值以后,  $\dot{q}$  对  $\tau_{ig}$  的影响就减小了。

氧化剂和燃烧剂主要组分的恰当对比对改善点火性能是十分重要的。点火药的密度变化对点火药点火延迟时间和最小施加热流密度有着明显的影响。如果在主组分中加入少量固态硫作为固体粘合剂, 会使点火药点火性能得到更满意的改善。

## 参 考 文 献

- (1) Kulkarni, A.K., Kumar, M. and Kuo, K.K., Review of Solid Propellant Ignition Studies, AIAA 80-1210.
- (2) Krishna Kumar, R. et al., Fundamental Processes in Solid Propellant Ignition, AD-730384,
- (3) 李宜敏: 固体火箭发动机燃烧基础, 北京航空学院403教研室, 1984. 2.
- (4) 李逢春: 固体火箭发动机点火理论, 西北工业大学802教研室, 1984. 1.

window and high speed photography. Three HTPB composite solid propellants, of which the main compositions are identical, but AP particle sizes different, are investigated experimentally. The correlation of erosive rate versus flow velocity and pressure for the composite solid propellants with different AP particle sizes is established. The surfaces of grain tested for combustion interruption are analyzed with scanning electron microscope, and the mechanism that AP particle size effects the burning rate and the erosive burning rate is also discussed.

**Keywords:** Erosive burning, Propellant burning rate, Hydroxy terminated polybutadiene propellant, Composite propellant, Solid rocket engine

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON IGNITION OF CHARGE BY CO<sub>2</sub> LASER

Ji Qiuying    Li Lu    Zhao Yuanxin

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

### Abstract

The ignition feature of charge  $\text{Al} + \text{KClO}_4$  is investigated experimentally with CO<sub>2</sub> laser ignition equipment in this paper. The experimental results show that ignition delay decreased with the increase of ignition heat flux, which proves that ignition heat flux is a much important control parameter in charge ignition performances. The lower the density of the charge is, the shorter the ignition delay. Furthermore, a litter added in the composition of this charge as adhesion agent will improve the ignition performances.

**Keywords:** Solid propellant ignition, Ignition energy, Ignition test, Ignition charge, Laser ignition, Solid rocket engine