

# 丁羟复合推进剂的辐射点火

巩伦昆, 王政时, 鞠玉涛, 朱国强, 曹 杰

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:**采用 CO<sub>2</sub> 激光点火装置, 对丁羟复合推进剂的点火过程进行了实验研究, 利用描述固体推进剂物化现象的一维传热模型对复合推进剂的辐射点火特性进行了理论分析。通过最小二乘法拟合实验数据得到了丁羟复合推进剂的点火准则。结果表明, 丁羟复合推进剂的点火过程主要包括惰性加热及气相点火过程, 惰性加热时间和点火延迟时间随热流密度的增大而减小, 且随着热流密度的增大, 热流密度的影响逐渐降低。固相传热数学模型能够比较准确地描述复合推进剂的辐射点火特性。

**关键词:**物理化学; 点火准则; 丁羟复合推进剂; 激光点火; CO<sub>2</sub> 激光器; 点火延迟时间

中图分类号: TJ55; V435

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2012)03-0075-05

## Radiative Ignition of AP/HTPB Composite Propellant

GONG Lun-kun, WANG Zheng-shi, JU Yu-tao, ZHU Guo-qiang, CAO Jie

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The ignition process of AP/HTPB composite propellant was experimentally investigated by a CO<sub>2</sub>-laser radiation installation. An one-dimensional heat transfer model describing the physical and chemical phenomena occurring in solid propellant was used to analyze the ignition characteristics. The ignition criterion AP/HTPB composite propellant was obtained via simulation of experimental data with least-square method. The results show that the time of inert heating and gas-phase reaction of AP/HTPB composite propellant composed of the ignition process decreases and the influence of laser radiation intensity weakens as laser radiation intensity increases. The one-dimensional heat transfer model can accurately describe the radiative ignition characteristics of the composite propellant.

**Key words:** physical chemistry; ignition criterion; AP/HTPB composite propellant; laser ignition; CO<sub>2</sub> laser; ignition delay time

## 引 言

长期以来, 国内外针对固体推进剂的点火过程进行了大量研究<sup>[1-4]</sup>。由于固体推进剂点火过程的复杂性, 人们对点火现象的认识仍然存在着不足之处, 现有的点火模型还难以对推进剂点火燃烧现象进行准确的定量分析<sup>[4]</sup>。在理论计算中, 需要选择一个点火准则作为推进剂着火的判据, 以推进剂点火模型为基础, 人们已经建立了一些点火准则并在点火模型中广泛应用<sup>[2,4]</sup>。但是, 由于影响推进剂点火的因素很多, 包括推进剂特性、环境、点火方式等, 目前对点火准则的认识还存在争议<sup>[2]</sup>。

为了能够更加准确地描述推进剂的点火过程, 国内外进行了大量固体推进剂点火实验研究。由于激光辐射点火能够独立于其他环境变量而施加热通量, 近年来广泛采用辐射能作为点火激发源<sup>[3]</sup>。Vladimir A. Arkhipov 等人<sup>[5]</sup>研究了铝粉对硝酸复合推进剂点火特性的影响; S. J. Ritchie<sup>[6]</sup>研究了硝酸推进剂的点火特性, 并建立了一维气相点火模型; 郝海霞等人<sup>[7]</sup>研究了 RDX、铝粉和燃烧催化剂对 RDX-CMDB 燃烧特性的影响。但是, 目前的实验研究往往集中于定性分析, 定量分析相对较少。

本文利用实验和理论研究相结合的方法, 对丁羟复合推进剂辐射点火过程进行了研究, 探讨了确

收稿日期: 2012-01-12; 修回日期: 2012-04-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金资助(NUST2011XQTR13)

作者简介: 巩伦昆(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为火箭发动机内流场计算。

定点火准则的方法,为进一步研究推进剂点火过程提供参考。

## 1 实 验

采用最大功率为 100 W,输出波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的 $\text{CO}_2$ 激光器作为点火激发源,激光光斑直径为 $3.0\text{mm}$ 。

为了提高测量精度,采用光电测量技术和高速摄影技术,实验装置如图 1 所示。由光敏二极管测量 $\text{CO}_2$ 激光辐射信号,以其信号上升沿起始点为激光辐射起始时间,根据 CCD 图像确定推进剂汽化分解时间;由光敏二极管得到的火焰光信号确定点火延迟时间。

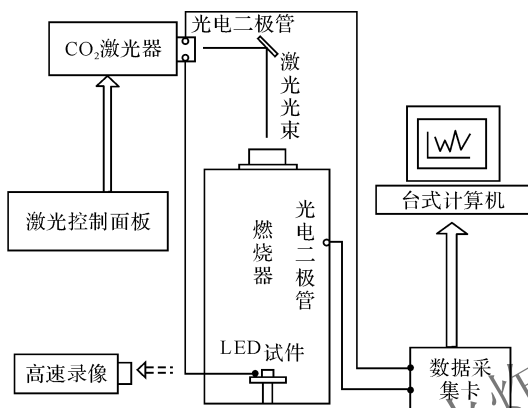


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental installation

为了屏蔽外界杂光信号对测量的影响,设计了一个燃烧器形成暗室,将试件放置于燃烧器中,在常温常压下进行实验测量。燃烧器的尺寸为 $\Phi 200\text{mm}\times 500\text{mm}$ ,有视窗,用于观察试件的整个点火过程。试件固定在燃烧器试件台上,试件尺寸为 $\Phi 10\text{mm}\times 10\text{mm}$ 。每个热流密度下重复进行 7 次实验,进行统计分析。

## 2 结果与分析

图 2 显示在热流密度为 $114\text{W}/\text{cm}^2$ 下丁羟复合推进剂的点火过程。图 2(a)显示丁羟复合推进剂受到激光辐射的开始时刻;图 2(b)中,推进剂在辐射作用下,开始汽化分解,产生气体;随着温度的升高,在 $0.250\text{s}$ 时刻,推进剂初始点燃;最终形成稳态燃烧,如图 2(f)所示。

定义惰性加热阶段为辐射开始到固相分解汽化阶段;点火延迟时间为辐射开始到产生初始火焰的间隔时间,包括惰性加热及气相混合点火时间。通过实验观测,可以得到不同热流密度下的惰性加热时间以及点火延迟时间,同时得到这两个时间随热流密度的变化率以及惰性加热时间占点火延迟时间的比例,见表 1。

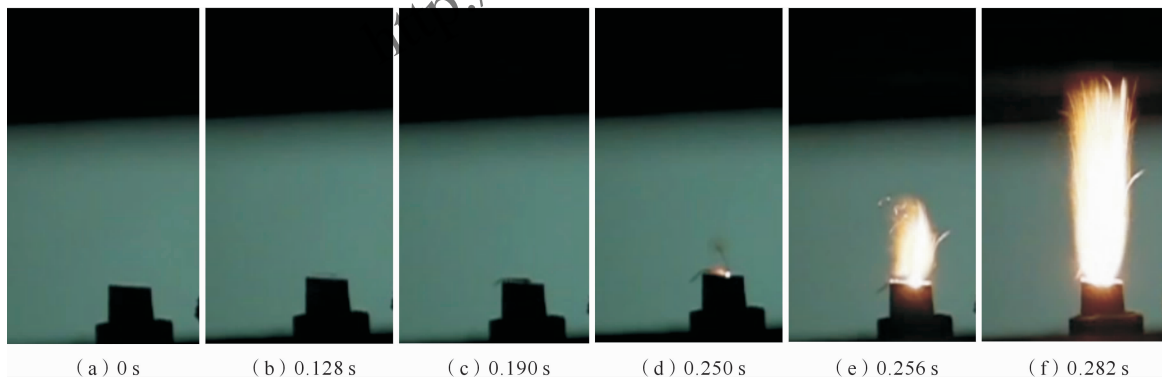


图 2 丁羟复合推进剂的点火过程

Fig. 2 Ignition process of AP/HTPB composite propellant

由表 1 可见,惰性加热时间和点火延迟时间的变化规律基本一致,表现为在低热流密度下,惰性加热时间和点火延迟时间随热流密度的增大而降低,随着热流密度的增大,变化逐渐变慢,这种点火规律与一般发动机点火过程的表现是相同的,即当点火药量达到某一值时,发动机点火延迟基本不变,同时也说明点火热流量存在一个最佳值。另一

方面,惰性加热时间占点火延迟时间的比例在 50% 左右,说明在大气压力环境下,惰性加热和气相点火过程对点火延迟都有重要影响。

实验结果存在一定误差,主要是由激光源能量误差、推进剂本身误差以及测量误差等造成的,其中,推进剂本身误差应主要原因。

表 1 不同热流密度下的惰性加热时间及点火延迟时间

Table 1 Inert heating time and ignition delay time at different radiation intensity

$q/(W \cdot cm^{-2})$	$t_{py}/s$	$\Delta \bar{t}_{py}/\Delta q/(10^{-4} s \cdot cm^2 \cdot W^{-1})$	$t_{ig}/s$	$\Delta \bar{t}_{ig}/\Delta q/(10^{-4} s \cdot cm^2 \cdot W^{-1})$	$\bar{t}_{py}/\bar{t}_{ig}/\%$
85	$0.163 \pm 0.014$		$0.312 \pm 0.019$		52.2
114	$0.130 \pm 0.011$	-11.0	$0.240 \pm 0.013$	-25.0	54.1
171	$0.081 \pm 0.007$	-8.6	$0.140 \pm 0.010$	-18.0	57.9
300	$0.038 \pm 0.002$	-3.3	$0.070 \pm 0.005$	-5.4	54.2
571	$0.013 \pm 0.002$	-0.9	$0.032 \pm 0.003$	-1.5	40.6
628	$0.009 \pm 0.001$	-0.7	$0.025 \pm 0.002$	-1.2	36.0

注:  $t_{py}$ 、 $t_{ig}$  为惰性加热时间及点火延迟时间;  $\bar{t}_{py}$ 、 $\bar{t}_{ig}$  为同一热流密度下平均惰性加热时间及点火延迟时间;  $\Delta \bar{t}_{py}/\Delta q$ 、 $\Delta \bar{t}_{ig}/\Delta q$  为平均惰性加热时间和点火延迟时间随热流密度的变化率。

### 3 理论分析及点火准则的建立

#### 3.1 辐射点火物理模型

推进剂与外界环境的能量交换主要包括激光辐射以及自然对流换热, 其点火物理模型如图 3 所示。根据 BDP 多火焰模型<sup>[8]</sup>, 结合所观察的实验现象, 认为丁羟复合推进剂的点火过程大致如下: 在外界能量作用下, 固相温度迅速上升, 推进剂中 AP 颗粒发生熔融分解, HTPB 产生热解反应, 形成一定厚度的熔融层, 同时放出热量, 随着固相温度的升高, 熔融层厚度逐渐增加, 气体生成速率逐渐增加, 当温度以及气体浓度满足一定的条件时, 产生初始火焰, 火焰放出的热量反馈给固相, 最终形成稳态燃烧。

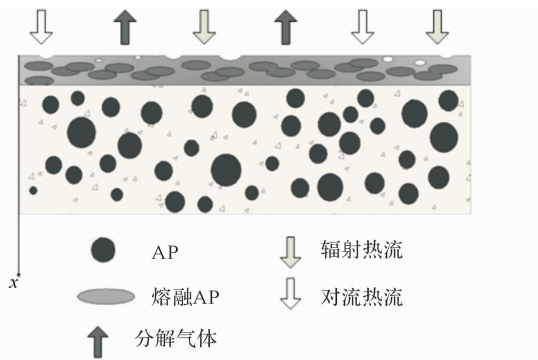


图 3 丁羟复合推进剂的辐射点火模型

Fig. 3 Radiative ignition model of AP/HTPB composite propellant

根据实验现象, 做以下假设: (1) 丁羟复合推进剂点火过程分为惰性加热过程和气体混合反应过程; (2) 固相物性参数为常数; (3) 固相热传递过程为一维过程; (4) 固相达到固定温度时开始熔化解; (5) 由于点火时间较短, 辐射热流密度较高, 固相分解热相对很小<sup>[9-10]</sup>, 忽略化学反应热对推进剂点火过程

的影响, 以及忽略推进剂表面自然对流换热对推进剂点火过程的影响, 只考虑辐射作用。

#### 3.2 固相传热数学模型

固体燃料受辐射作用时, 辐射能量不仅会被燃料表面吸收, 还会渗透到固体燃料内部一定的厚度, 这种深层辐射吸收现象对固相传热的影响很大<sup>[11-12]</sup>。

考虑深层辐射效应的因素, 固相能量平衡方程为:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{(1-R)qK_a}{\lambda} e^{-K_a x} \quad (1)$$

式中:  $\theta = T - T_0$ ,  $T_0$  为初温;  $\lambda$  为推进剂热导率;  $\alpha$  为热扩散系数;  $R$  为推进剂对激光反射率;  $q$  为辐射到推进剂表面的辐射能流密度;  $K_a$  为推进剂的光吸收系数;  $x$  为固相内某点距离推进剂表面的距离。

初始及边界条件:

$$\begin{cases} \theta(x, 0) = 0 \\ \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \\ \theta(\infty, t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

通过拉普拉斯变换, 求解方程(1), 得到  $\theta(x, q, t)$  的分析解:

$$\theta(x, q, t) = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \quad (3)$$

$$\theta_1 = -\beta T_0 e^{-K_a x} \quad (4)$$

$$\theta_2 = \frac{\beta T_0}{2} e^{K_a^2 \alpha t - K_a x} \operatorname{erfc} \left( K_a \sqrt{\alpha t} - \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (5)$$

$$\theta_3 = \frac{\beta T_0}{2} e^{K_a^2 \alpha t + K_a x} \operatorname{erfc} \left( K_a \sqrt{\alpha t} + \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (6)$$

$$\theta_4 = 2\beta T K_{a0} \sqrt{\alpha t} \left[ \operatorname{ierfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \right] \quad (7)$$

式中:  $\beta = (1-R)q/K_a \lambda T_0$ ;  $\lambda$  为推进剂热导率。

#### 3.3 点火准则的建立

根据气相点火模型, 平均气相反应速率或最大气相反应速率达到某临界值是目前广泛应用的点

火准则<sup>[4]</sup>。在一定的环境下,气体温度和浓度对反应速率影响最大,因而,固相分解汽化速率对气相反应速率具有着决定性作用;同时,文献[3]指出,复合推进剂表面具有一层熔融层,熔融层对推进剂点火燃烧具有非常重要的影响。针对固体燃料点火现象,Bamford 和 Sauer 分别提出以临界热解气体质量流率和临界碳化层厚度作为点火准则<sup>[13]</sup>。在此基础上,结合实验结果,假设当熔融层厚度达到某一临界值,即  $\delta_{py} > \delta_{cr}$  时,丁羟复合推进剂点燃。

根据上述分析,本研究通过对惰性加热时间实验结果进行数据拟合得到推进剂的分解汽化温度  $T_{py}$ :

$$\theta(0, q, t) = T_{py} - T_0 \quad (8)$$

根据熔融层厚度点火准则,即在  $\delta_{cr}$  处,推进剂达到分解汽化温度  $T_{py}$ ,复合推进剂点燃,最终得到的复合推进剂分解及点火准则可表示为:

$$\theta(\delta_{cr}, q, t) = T_{py} - T_0 \quad (9)$$

根据公式(3)~(9),利用 MATLAB 软件对实验结果进行数据拟合,其中,丁羟复合推进剂在  $10.6 \mu\text{m}$  处的光学参数参考文献<sup>[14-15]</sup>,取  $K_a = 250 \text{ cm}^{-1}$ ,  $R = 7.2\%$ ,  $\lambda = 0.251 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。图 4 为平均惰性加热时间及点火延迟时间与热流密度关系的实验结果及拟合曲线。

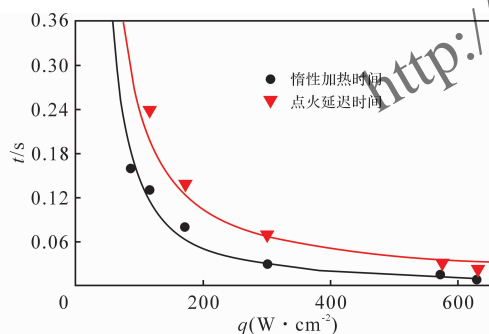


图 4 惰性加热时间及点火延迟时间与热流密度的关系曲线

Fig. 4 Inert heating time and ignition delay time vs radiation intensity

通过拟合实验数据,最终得到的固相分解温度  $T_{py}$  范围为  $623 \sim 673 \text{ K}$ ,平均值为  $662 \text{ K}$ 。国内外对 AP/HTPB 融化分解进行了大量实验,虽然每个实验结果有所不同,但考虑实验误差因素,结果基本一致。在 J. A. F. F. Rocco 对 AP/HTPB 进行的 DSC 和 TG 实验中<sup>[10]</sup>,AP 相变温度大约在  $520 \text{ K}$ ,在  $600 \text{ K}$  左右,丁羟复合推进剂开始发生融化分解,固相质量发生明显下降,大约在  $700 \text{ K}$ ,反应基本完成。文献[3]也给出了类似的结果,并指出,融化分解过程中可能伴随着 AP 的升华。由此可见,计算

结果与实验结果基本吻合,具有可信性。

由公式(9)进行数据拟合,最终得到的熔融层临界厚度  $\delta_{cr}$  为  $80 \sim 95 \mu\text{m}$ ,平均值为  $85 \mu\text{m}$ 。

从图 4 可以看出,拟合曲线能够比较准确地描述惰性加热时间与点火延迟时间随热流变化的趋势,说明上述一维点火模型能够描述丁羟复合推进剂的辐射点火特性,由此得到的点火准则能够描述丁羟复合推进剂的辐射点火过程。

由理论分析及点火准则的建立过程可以看出,固相传热过程对推进剂点火有着重要的影响,推进剂物性参数,如,热导率  $\lambda$ 、热扩散系数  $\alpha$  等对最后的结果影响很大。推进剂成分、金属颗粒的大小、数量等都会影响到固相传热及分解反应过程,从而影响推进剂点火特性。

## 4 结 论

(1)丁羟复合推进剂点火过程主要分为惰性加热和气相混合点火两个阶段,随着热流密度的增加,惰性加热时间以及点火延迟时间变小,同时热流密度对两者的影响也逐渐变小。

(2)固相传热对复合推进剂的点火过程有较大影响,固相传热数学模型基本能够描述复合推进剂辐射点火特性,由此得到的点火准则可以为复合推进剂点火过程研究提供参考。

(3)本实验是在常压下进行的,没有考虑压力对推进剂点火特性的影响,由于环境压力对推进剂点火过程有较大的影响,针对复合推进剂高压下的点火特性还需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Price E W, Bradley H H, Dehority G L. et al. Theory of ignition of solidpropellants [R]. New York: AIAA, 1966.
- [2] Kulkarni A K, Kumar M, Kuo K K. Review of solid-propellant ignition studies, 80-1210 [R]. New York: AIAA, 1982.
- [3] Kuo K K, Summerfield M. 固体推进剂燃烧基础[M]. 宋兆武,译.北京:宇航出版社,1988.
- [4] Beckstead M W, Puduppakkam K, Thakre P. Modeling of combustion and ignition of solid-propellant ingredients[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2007(33):497-551.
- [5] Arkhipov V A, Korotkikh A G. The influence of aluminum powder dispersity on composite solid propellants ignitability by laser radiation [J]. Combustion and

- Flame, 2012, 159(1): 409-415.
- [6] Ritchie S J, Thynell S T, Kuo K K. Modeling and experiments of laser-induced ignition of nitramine propellants[J]. Journal of Propulsion and Power, 1997, 13(3): 367-374.
- [7] 郝海霞, 裴庆, 南宝江, 等. RDX-CMDB 推进剂激光点火特性[J]. 含能材料, 2011(3): 276-281.  
HAO Hai-xia, PEI Qing, NAN Bao-jiang, et al. Laser ignition characteristics of RDX-CMDB propellants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 3: 376-281.
- [8] Bickstead M W, Derr R L, Price C F. A model of composite solid-propellant combustion based on multiple flames[J]. AIAA Journal, 1970, 8(12): 2200-2207.
- [9] Cai W d, Thakre P. A model of AP/HTPB composite propellant combustion in rocket-motor environments [J]. Combustion Science and Technology, 2008, 180(12): 2143-2169.
- [10] Rocco J A F F, Lima J E S, Frutuoso A G. Thermal degradation of a composite solid propellant examined by DSC: Kinetic study[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2004, 75(2): 551-557.
- [11] Brewster M Q. Surface-absorption assumption for radiant heating and ignition of energetic solids[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2006, 20(2): 348-350.
- [12] Cain J, Brewster M Q. Radiative ignition of fine-ammonium perchlorate composite propellants [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2006, 4: 278-284.
- [13] DiNenno P J, Drysdale D, Beyler C L, et al. SFPE Handbook of fire protection engineering[M]. Quincy: National Fire Protection Association, 2002: 440-460.
- [14] Patil P R, Krishnamurthy V N, Joshi S S. Differential scanning calorimetric study of HTPB based composite propellants in presence of nano ferric oxide[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2006, 31(6): 442-446.
- [15] Isbell R A, Brewster M Q. Optical properties of energetic materials: RDX, HMX, AP, NCyNG, and HTPB [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1998, 23(4): 218-224.
- ~~~~~
- (上接第 65 页)
- [4] Gelken P R, Kirkpatrick S W, Holmes B S. Response of impulsively loaded cylinder shells[J]. Impact Engng, 1988, 7(2): 213-227.
- [5] 范中波, 周淑荣, 杭义洪, 等. 爆炸变形定向战斗部的数值仿真研究[J]. 兵工学报, 2001, 22(3): 334-337.  
FAN Zhong-bo, ZHOU Shu-rong, HANG Yi-hong, et al. Numerical investigation of detonatively deformable aimable warhead[J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(3): 334-337.
- [6] 龚柏林, 卢芳云, 李翔宇. 可变形战斗部弹体变形型面的理论模型[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(1): 56-69.  
GONG Bai-lin, LU Fang-yun, LI Xiang-yu. A theoretical model for forecasting deformation shapes of deformable warheads[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(1): 65-69.
- [7] 龚柏林, 卢芳云, 李翔宇. D 型预制破片战斗部破片飞散过程的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(1): 88-94.  
GONG Bai-lin, LU Fang-yun, LI Xiang-yu. Simulation and study on the fragment ejection process of premade D-shape warhead [J]. Journal of Projectile, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(1): 88-94.
- [8] 马征, 李运生. 爆炸变形定向战斗部变形过程的数值模拟与试验研究[C]//战斗部与毁伤效率专业委员会第十一届学术交流会论文集. 宜昌: 湖北航天飞行器研究所, 2009: 243-247.  
MA Zheng, LI Yun-sheng. Numerical and experiment studies on deforming process of a deformable warhead [C]//The Proceeding of 11th Academic Forum on Warhead and Damage Efficiency Professional Committee: 2029, 243-247.
- [9] LS-DYNA Keyword User's Manual version 971 [EB/OL]. Livermore Software technology Corporation, 2006-02-23/2011-10-16.