

文章编号: 1001-1455(2004)02-0145-06

等离子体点火密闭爆发器中火药燃速特性的研究*

李海元, 栗保明, 李鸿志, 宁广炯, 王争论, 杨春霞
(南京理工大学弹道国防科技重点实验室, 江苏南京 210094)

摘要: 等离子体与火药的作用规律是影响电热化学发射中能量利用效率的关键因素。研制了采用等离子体点火的密闭爆发器实验系统, 对单基药在等离子体作用下的燃烧特性进行了研究。结果表明: 等离子体点火可以显著缩短火药的点火延滞时间; 实现有效点火的电能的最低阈值低于 0.05 kJ/g; 输入电能可以显著增加火药的燃速。等离子体对所用单基药燃速的增强效果仅体现在电脉冲注入期间, 但是随着电能输入的增加, 逐渐显示出等离子体注入期后火药燃速增强的趋势。

关键词: 爆炸力学; 等离子体点火; 密闭爆发器; 电热化学发射

中图分类号: O381 **国标学科代码:** 130°3510 **文献标志码:** A

1 引言

近年来, 随着电热化学发射技术发展, 对等离子体作用下火药燃烧特性的研究成为一个热点^[1~6]。电热化学发射技术是将大功率脉冲电能通过毛细管的消融过程产生等离子体与火药进行作用。电热化学发射技术的优点在于通过控制电能释放过程来控制和优化火药的点火和燃烧性能, 从而调节弹后空间的压力变化过程, 获得较好的压力平台来发射高速或超高速弹丸。等离子体不仅可以缩短火药的点火延迟时间及提高点火一致性, 而且可对常规火炮发射药提供能量补偿并增强火药的燃烧过程。

为了获得最佳的内弹道性能, 必须尽量提高电能和化学能的有效利用率。显然, 这依赖于火药自身的性质以及在等离子体作用下的燃烧特性。因此, 研究火药在不同功率、脉宽等离子体条件下的燃烧特性以及寻找与等离子体作用相匹配的火药(及装药)就成为非常重要的一项工作。与等离子体作用相匹配的火药(及装药)包括对等离子体作用感度高的火药和获得最佳性能的装药结构。

密闭爆发器是广泛用来研究火药燃烧性能的有效实验方法之一。常规的密闭爆发器一般通过黑火药、硝化棉或其它点火药来点燃被试药。本文中, 提出了一种自行研制的采用等离子体点火的密闭爆发器实验系统, 并应用该系统对多种火药在等离子体点火密闭爆发器实验中的燃速特性进行实验研究。

2 实验系统

2.1 密闭爆发器实验装置

图1是等离子体点火密闭爆发器的实验装置结构图, 其本体为耐高压(500 MPa)的厚壁圆筒, 其中一个端盖上装有等离子体发生器。等离子体发射器的核心部件为非金属材料制成的毛细管, 其一端封闭并装有杆形电极, 另一端敞开并装有环形电极。毛细管两端电极初始时由金属导体(如细铜丝或铝箔)导通。放电时金属导体发生电爆炸产生金属等离子体, 并不断消融毛细管内壁形成持续一定时间(毫秒级)的消融等离子体射流。该射流具有高温、高速的特点, 并被喷入密闭爆发器内点燃火药并可持续影响火药的燃烧过程。毛细管内电流可达几十至上百千安, 两端电压可达上万伏。由于等离子体发生器工作过程中的大电流、高电压以及管内等离子体的导电、高温、高压特性, 对等离子体发生器的绝

* 收稿日期: 2003-04-29; 修回日期: 2003-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(50006004)

作者简介: 李海元(1972—), 男, 博士研究生, 讲师。

缘、密封以及强度性能提出了很高的要求,结构设计难度很大,是本试验的关键技术之一。

2.2 脉冲功率源

强流脉冲等离子体发生器放电具有时间短、电流大的特点,毛细管在很短时间内吸收大量电能,烧蚀形成等离子体。一般的稳态电源很难满足它的特殊要求,因此必须采用高功率脉冲电源。脉冲功率源系统一般包括充电回路、放电回路、放电间隙开关以及触发电路等四部分。并联多级储能脉冲功率源的原理图见图 2。实验中使用的脉冲功率源总贮能为 2 MJ,共四个模块。

2.3 测控系统

测控系统的功能包括记录被测参量的时间变化曲线和对多路脉冲成形网络的放电波形进行控制。实验中主要测试的量为密闭爆发器内燃气压力、放电电流和电压。压力测量采用 Kistler 压电传感器,电流测量采用 Rogowski 线圈,电压测量采用高精度电阻分压器。强流脉冲放电过程中多处间隙拉弧形成强电磁干扰源,这些干扰源不仅可以经由电源系统、测控线路等串入测控系统引起信号失真,而且可以通过空间串入引起信号失真。测控系统采用了 VXI 虚拟仪器总线技术,将多个测控参量集中管理,不仅可靠性高、体积小,而且也使得测控系统具有较强的抗电磁干扰的能力。测控系统和被测对象还采用了光纤传输技术实现高压隔离,采用屏蔽技术有效地消除了空间串入干扰对测量的影响。

3 密闭爆发器实验燃速处理方法

密闭爆发器燃烧室内混合燃气状态方程^[7]

$$p \left[W_0 - \frac{m}{\rho} - \left(\alpha - \frac{1}{\rho} \right) m \psi \right] = TRm\psi \quad (1)$$

式中: p 为燃气压力; T 为燃气温度; W_0 为燃烧室容积; m 为火药质量; ρ 为火药密度; α 为燃气余容; R 为燃气体常数; ψ 为火药相对已燃体积。

ψ 燃烧室内气体能量守恒方程

$$\frac{m\psi f}{\theta} + E_e = \frac{m\psi R}{\theta} T + E_1 \quad (2)$$

式中: f 为火药力; $\theta = k - 1$, k 为燃气比热比; E_e 为转化为等离子体的输入电能; E_1 为热散失。

以上两式中忽略了燃烧室内空气的影响和等离子体质量,并且假设等离子体物性保持常数。

固体火药形状函数

$$\psi = \begin{cases} \lambda_z (1 + \lambda_z + \lambda_z^2) & \text{分裂前} \\ \lambda_{sz} (1 + \lambda_{sz}) & \text{分裂后} \end{cases} \quad (3)$$

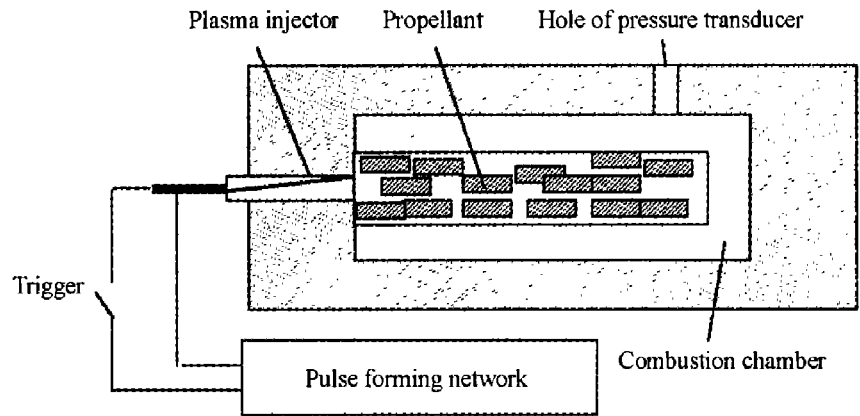


图 1 等离子体点火密闭爆发器实验装置结构

Fig. 1 Experimental setup of closed bomb with plasma igniter

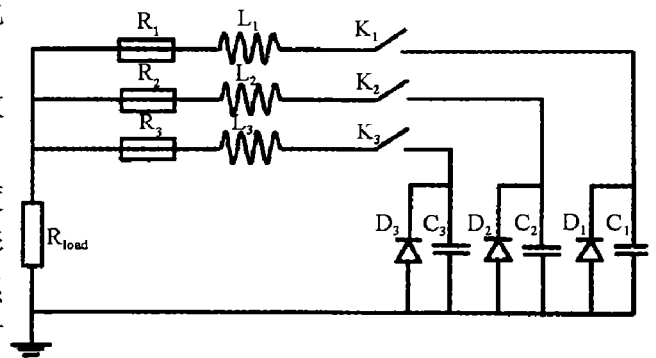


图 2 并联多级储能脉冲功率源

Fig. 2 Parallel multi-module pulse power source

$$\chi_s = \frac{\psi_s z_k^2 - 1}{z_k^2 - z_k} \tag{4}$$

$$\lambda_s = \frac{\psi_s}{\chi_s} - 1 \tag{5}$$

式中： z 为火药相对已燃厚度。

火药燃速定义为

$$u = e_1 \frac{dz}{dt} \tag{6}$$

式中： e_1 为火药初始燃烧层厚度； u 为燃速。

将实验测得的压力、电流、电压等参数代入以上方程组即可计算出火药在等离子体点火条件下的燃速。

4 实验结果及分析

利用本实验室自行设计的密闭爆发器进行了火药在不同电能密度条件下的点火燃烧实验。密闭爆发器容积为 150 ml，火药品号为 4/7，装填密度为 0.25 g/cm³，其余实验条件见表 1。

表 1 实验条件

Table 1 Condition of experiments

No.	U_0 /kV	E /kJ	E_D /(kJ/g)	p_m /MPa
1				299.1
2	2.1	1.9	0.05	284.2
3	4.1	6.3	0.17	302.7
4	10.6	15.9	0.44	334.3

表中， U_0 为脉冲功率源的初始充电电压， E 为输入电能， E_D 为电能密度，即单位质量火药接受的等离子体能量， p_m 为燃烧室内燃气最大压力。其中，1 号实验是常规点火密闭爆发器实验，2~4 号实验是不同输入电能情况下的等离子体点火密闭爆发器实验。

注：1 为常规点火；2~4 为等离子体点火。

等离子体发生器两极间电流电压曲线见图 3。

电压波形起始部的尖峰是由于等离子体发生器中起爆丝的电爆炸过程引起的，其不规则波动的形状反映了放电形成的消融等离子体的工作特性。从电流电压曲线可以看出，不存在放电短路现象，电能利用效率（等离子体发生器吸收的电能与电容贮能的比值）达 70% 以上。

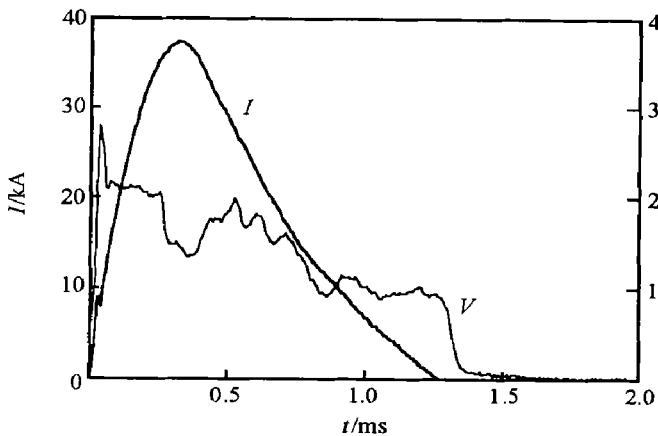


图 3 4 号实验等离子体发生器电流电压曲线

Fig. 3 Current and voltage curve in plasma injector of test No. 4

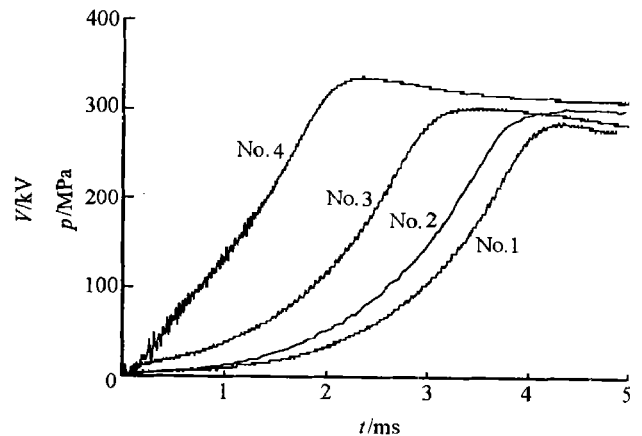


图 4 实验压力曲线

Fig. 4 Experimental pressure curve

四发实验的压力曲线见图 4，由图可见，输入电能使得压力曲线形状发生了变化。输入电能越多，燃烧室内压力上升越快，火药点火延滞时间越短。这说明火药呈现显著的电控点火与燃烧特性。而且随着电能的增加，燃气最大压力也有显著的增加。这说明等离子体注入燃烧室不仅改善了火药的点火和燃速特性，还提高了火药燃气总的做功潜能，这一方面是由于高热焓等离子体对燃气温度的提高，还由于等离子体中的高能带电粒子对化学反应也有强烈的催化作用，使得化学反应进行得更完全，反应产物特性也得以改变。从图 4 中还可看出，2 号实验压力（等离子体）比 1 号实验压力上升陡度大。这说

明当输入的等离子体点火能量太小时,其点火有效性还不如常规点火。另一方面,2号实验也证实电能密度在 0.05 kJ/g 时仍能实现火药的有效点燃。但最大压力和压力上升陡度略低于常规点火,这说明有可能存在实现有效点火的电能的最低阈值,其值低于 0.05 kJ/g。

4号实验的气体生成速率曲线和气体生成猛度曲线分别见图5和图6。其中 ψ 为火药相对已燃体积, Γ_R 为实际气体生成猛度, Γ_I 为理想气体生成猛度。其定义为

$$\Gamma_R = \frac{\Delta\psi}{p\Delta t} \tag{7}$$

$$\Gamma_I = \frac{u_1}{e_1} \chi\sigma \tag{8}$$

式中: σ 为火药相对燃烧面积,即火药燃烧面积与初始面积之比; u_1 为燃速系数。

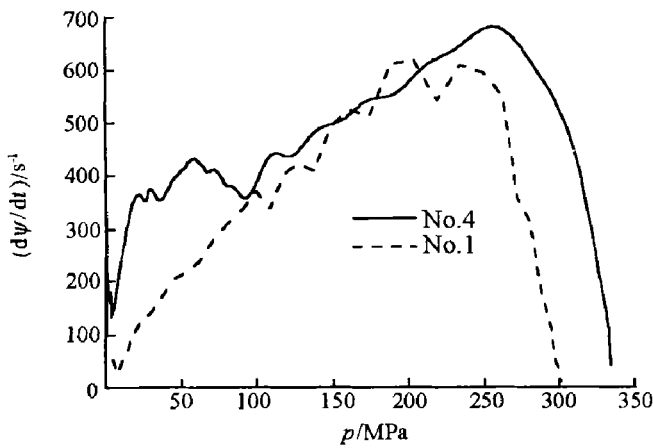


图 5 气体生成速率曲线

Fig. 5 Curve of gas generation rate

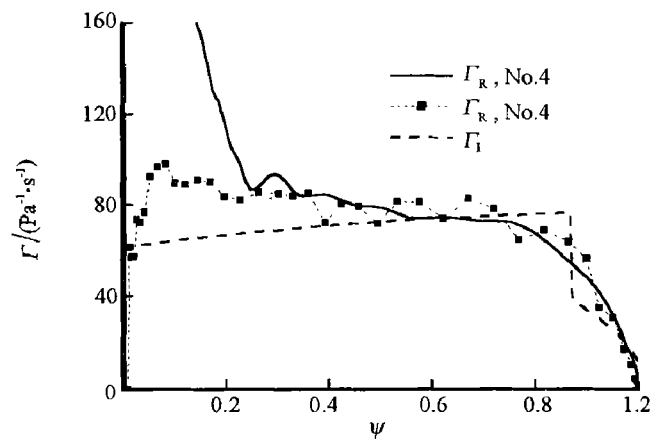


图 6 气体生成猛度曲线

Fig. 6 Curve of gas generation rapidly

由图5可见,在等离子体注入时期,气体生成速率大大高于常规点火的情形。由图6可以看出,等离子体点火与常规点火情形相比,实际气体生成猛度的差别主要在燃烧起始阶段。在常规点火情形下,实际气体生成猛度是从较小值逐渐上升,说明火药并非同时着火,在燃烧开始时只有一部分火药燃烧,以后燃烧表面迅速增加,因此实际气体生成猛度曲线出现了上升段。而等离子体点火情形,具有很好的点火同时性,几乎看不到实际气体生成猛度曲线的上升段。

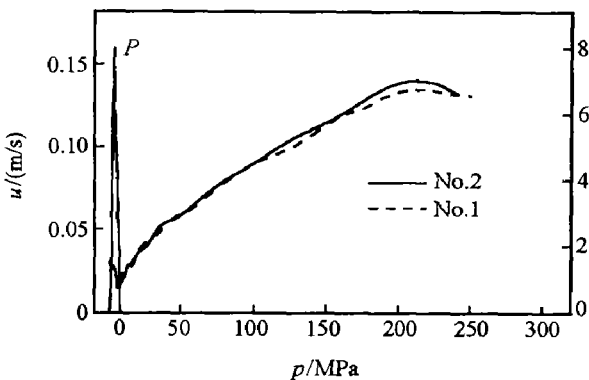


图 7 2号实验燃速和电功率曲线

Fig. 7 Combustion rate and electric power of test No. 2

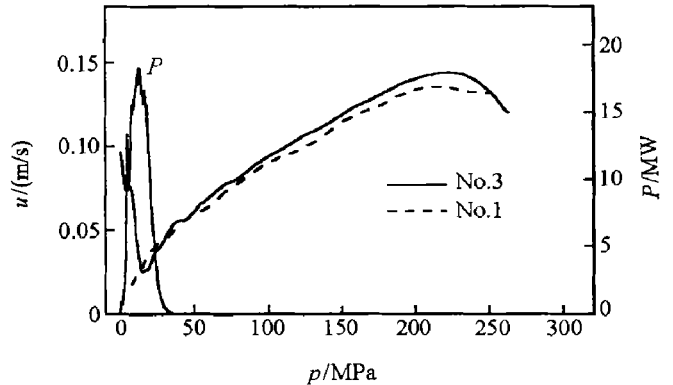


图 8 3号实验燃速和电功率曲线

Fig. 8 Combustion rate and electric power of test No. 3

气体生成速率的增加是由于火药燃速的增加或者燃烧面积的增加。由于实验所用的单基药强度较好,并且根据多次实验的经验,可以认为药粒不存在破碎,即排除因火药破碎所造成的燃面突增。假设气体生成速率的增加全部是由于等离子体作用而使得火药燃速增加引起的,经数据处理,所得的等离子体作用下火药燃速见图7~9。为便于对比,每幅图中加入了1号实验点火的燃速曲线。可见输入电能显著增加了火药燃速。对于本文所用的单基药来说,等离子体对燃速的增强效果仅体现在电脉冲注入

期间,即火药燃速也呈现明显的电能控制效应。但是随着电能输入的增加,逐渐显示出等离子体注入期后火药燃速增强的趋势。图中燃速在燃烧后期下降的原因在于火药厚度与尺寸不一致性,使得药粒燃烧结束时间不一致,在燃烧后期只有一小部分火药在燃烧,即火药在接近燃烧结束时 σ 迅速减少,因而导致燃速的下降。

等离子体增强火药燃烧的机理分析如下:(1)等离子体对火药表面的对流和辐射传热提供给火药很高的热流量,增加了火药表层化学反应区的温度,产生具有催化效应的高能带电粒子直接与火药作用而改变火药表面附近的燃烧反应动力学机理,而等离子体辐射中的紫外线也会使火药产生光解反应而改变分子结构,这些都直接导致了火药燃速的增加。(2)等离子体辐射作用还会对火药深层产生整体升温效应,尤其在低压、火药燃速还不太高时,这使得火药固相的热分解速度增加,从而增加了火药燃速。(3)密闭爆发器中止燃烧实验表明,火药颗粒表面受到等离子体中热颗粒的冲击作用使得中止燃烧的颗粒表面产生了很多小孔穴或微坑,因而使得火药的表面积增加[3],这相当于增加了火药燃速系数 u_1 。

从实验中还可看到:在适当的电能密度及装填密度条件下,等离子体的注入对火药燃速有明显的增强作用,但是在压力超过某一特定值后,燃速增加并不明显。原因可能是点火及燃烧初期,火药直接受等离子体作用,温度上升快,燃速增加明显;然而当压力超过一定值后,就会由于蒸汽罩对等离子体能量吸收而降低等离子体对火药燃速的增强作用。当燃烧室压力较高时,还会由于消融等离子体的喷射过程,使得等离子体难以注入燃烧室,这样也会影响高压下等离子体对火药的作用。但是随着电能功率和脉宽的增加,很可能增加燃速增强的持续时间。这是值得进一步加以研究的问题。

火药燃速受到火药成分、初温、密度、压力、表面气流等多种因素的影响。常规火炮常用与压力成指数关系的燃速定律。而在等离子体作用下,火药燃速存在显著的增强效应。指数形式的燃速公式无法正确反映等离子体作用下的燃速规律。火药燃速增强与各种影响因素的定量关系式的确定在一定程度上还依赖于微观研究结果。基于燃烧理论模型并借助于实验建立一个适用于等离子体作用的火药燃速公式将是下一步工作的重点。

5 结 论

(1)提出了一种采用等离子体点火的密闭爆发器实验系统,并给出了等离子体作用下密闭爆发器实验火药燃速的处理方法。

(2)应用等离子体点火的密闭爆发器实验系统对单基药在等离子体作用下的燃速特性进行了实验研究。实验结果表明,在合适的点火能量下,等离子体点火可以缩短火药点火延迟时间。在 0.05 kJ/g 电能密度的条件下,仍能实现火药的有效点燃。实现有效点火的电能的最低阈值低于 0.05 kJ/g 。

(3)随着输入电能的增加,火药燃速也相应增加。对于单基药,等离子体对燃速的增强效果仅体现在电脉冲注入期间,但是随着电能输入的增加,逐渐显示出等离子体注入期后火药燃速增强的趋势。文中对等离子体对火药燃速的增强作用机理进行了探索性分析。

(4)提出的实验方法可用于对其它种类火药在等离子体作用下的燃速特性进行研究,对寻找与等离子体作用匹配的火药以及发挥电热化学发射技术潜在优势具有重要意义。

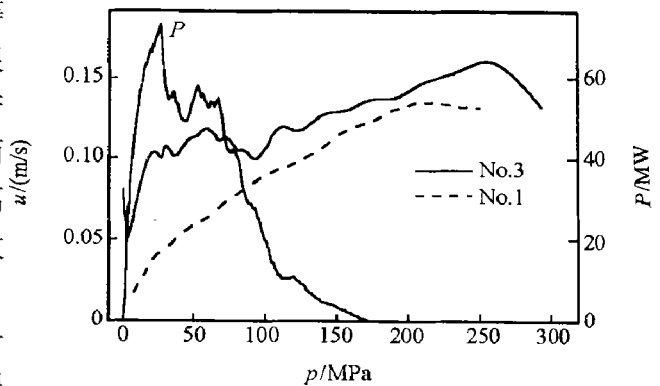


图 9 4 号实验燃速和电功率曲线

Fig. 9 Combustion rate and electric power of test No. 4

参考文献:

- [1] Fair H D. Electric launch science and technology in the United States[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(1):11—17.
- [2] Haugh D C, Gilbert S. UK. Electric gun national overview[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(1):18—21.
- [3] Kaste P, Birk A, Kinkennon A, et al. Analysis of burning rate phenomena and extinguished solid propellants from an interrupted closed bomb with plasma igniter [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1):173—177.
- [4] Voronov A M, Haak H K, Weise T H G G. The interaction of electrothermally supplied energy with compact solid propellants [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(1):224—227.
- [5] Taylor M J, Woodley C R. Variation in enhanced gas generation rates in electrothermal-chemical closed chamber Studies [A]. Crewther I R. Proceedings of 19th International Symposium of Ballistics [C]. Switzerland: International Ballistics Committee, 2001: 179—186.
- [6] Clive R W, Steve F. Apparent enhanced burn rates of solid propellants due to plasma [A]. Harry R B, Lynne H. Proceedings of 16th International Symposium of Ballistics [C]. San Francisco: International Ballistics Committee, 1996: 153—162.
- [7] 金志明, 袁亚雄, 宋明. 现代内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992: 9—10.

Propellant burn rate characteristics in closed bomb ignited with plasma

LI Hai-yuan^{*}, LI Bao-ming, LI Hong-zhi, NING Guang-jiong,
WANG Zheng-lun, YANG Chun-xia

(*Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China*)

Abstract: The interaction of plasma with propellant is the pivotal factor that influences energy efficiency of electrothermal chemical launch. An experimental system of closed chamber with plasma igniter is developed. The characteristics of burn rate of single base propellant with the presence of plasma are investigated. Experimental results show that plasma ignition reduces propellant ignition delay markedly. The minimal threshold of ignition energy density is less than 0.05 kJ/g. The propellant exhibits enhanced burn rate with the increase of input electric energy. The enhancement of burn rate of single base propellant is only obvious in the period of electric pulse injection. When high electric energy injects into the chamber, there also exists tendency of regression rate enhancement after the plasma injection.

Key words: mechanics of explosion; plasma ignition; closed chamber; electrothermal chemical launch

* Corresponding author: LI Hai-yuan
E-mail address: li-haiyuan@163.com
Telephone: 025-84315938-8010