DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0562-06

多孔发射药等离子体增强燃速*

倪琰杰[1],邢荣军[2],穹 港[1],金 涌[1],李海元[1],杨春霞[1],栗保明[1]
(1.南京理工大学瞬态物理国家重点实验室,江苏 南京 210094;
2.西安北方惠安化学工业有限公司,陕西 西安 710302)

摘要:利用密闭爆发器实验系统进行了等离子体增强 4/7 高固体发射药燃速特性的实验研究。采用等离子体发生器的电能利用效率来表征密闭爆发器内输入的等离子体能量,拟合了考虑压力梯度影响和电功率增强的固体发射药瞬态燃速公式。根据实验数据得到 4/7 高固体发射药的电功率燃速增强因子为 0.005 MW^{-1}。与 Woodley 燃速公式相比,瞬态燃速公式与实验压力曲线符合程度更高,能够更精确地描述固体发射药在等离子体作用下的燃烧过程。

关键词:爆炸力学;瞬态燃速;密闭爆发器;固体发射药;等离子体;电热化学发射
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

电热化学发射技术使用等离子体发生器代替常规点火源,将电能转化为等离子体内能来点燃固体发射药。等离子体与固体发射药相互作用不仅能显著缩短发射药点火延迟时间[1-3],还能消除发射药的温度效应[4],提高燃速,从而有效提高炮口初速和动能[5]。常规发射通常使用指数燃速公式来描述发射药燃烧特性[6-7],C. R. Woodley 等[8-9]假定电热化学发射时注入的电能只用于增强发射药的内能,引入了电功率增强因子,给出了与输入电功率相关的发射药燃速公式。M. J. Taylor 等[10]进一步研究了辐射、发射药侵蚀和电热裂解对燃速的影响,考虑了引起燃速增强的电功率阈值的影响。李海元等[11-12]、A. Brik 等[13]利用改进的密闭爆发器对等离子体增强发射药燃速的特性进行了实验研究;实验表明等离子体作用下,发射药燃气压力变化迅速,燃气压力梯度增大,点火和燃烧特性发生显著变化。因此,等离子体作用下燃气压力梯度对发射药燃速的影响不可忽略。

本文中,拟通过密闭爆发器实验得到燃气压力曲线,分析等离子体作用下固体发射药的燃烧特性。基于指数燃速公式,结合燃气压力梯度和电功率增强对发射药燃速的影响,得到等离子体作用下固体发射药的瞬态燃速公式。

1 基本原理

1.1 实验装置

图 1 所示为等离子体点火密闭爆发器实验装置结构示意图,主要由脉冲成形网络、底喷式等离子体发生器和密闭爆发器等组成。密闭爆发器为耐高压厚壁圆筒,其中一端装有底喷式等离子体发生器,其主体由聚乙烯毛细管组成,一端采用杆状封闭电极,另一端装有敞开式环状电极,通过爆炸丝将两端电极导通。脉冲成形网络

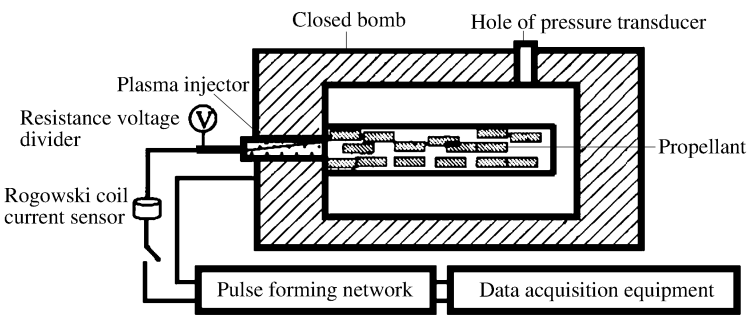

图 1 等离子体点火密闭爆发器实验装置结构示意图

Fig. 1 Experimental setup of closed bomb with plasma igniter

* **收稿日期**:2014-12-01;**修回日期**:2015-01-29
第一作者:倪琰杰(1990—),男,博士研究生;**通信作者**:杨春霞,yangcx@njust.edu.cn。

由多个模块并联组成，能通过时序设置产生幅值、脉宽可调的脉冲电流。固体发射药试样由硝化棉纸包裹放置于密闭爆发器内。

实验测试系统主要由传感器和数据采集设备组成。燃气压力采用 Kistler6215 压力传感器测量，发生器两端的电压和电流分别采用电阻分压器和 Rogowski 线圈测量。采用 JV5200 瞬态记录仪对脉冲电源和发生器的电参数以及密闭爆发器内的压力信号进行同步采集记录。

1.2　瞬态燃速理论模型

1.2.1　基本假设

忽略密闭爆发器内固体发射药试样燃烧过程中气相压力和温度随空间的变化，即假设任意时刻密闭爆发器内各位置的气相压力和温度均相同。

固体发射药试样燃烧过程满足几何燃烧定律假设：(1)装药的所有颗粒具有均一的理化性质以及完全相同的几何形状和尺寸；(2)所有药粒表面同时着火；(3)所有药粒具有相同的燃烧环境。

由于气相与密闭爆发器壁面存在换热，需考虑试样燃烧过程中的热损失。本文中采用热损失因数修正发射药火药力的方式来计算发射药试样燃烧过程中的热损失。

1.2.2　气相状态方程

考虑点火药的影响，得到密闭爆发器内的气体状态方程[14]：

$$p\left\{V_0-\frac{m}{\rho_p}[1-\psi(t)]-\alpha m\psi(t)-\alpha_{ig}m_{ig}(t)\right\}=T[Rm\psi(t)+R_{ig}m_{ig}(t)] \tag{1}$$

式中：p 为燃气压力，Pa；V_0 为密闭爆发器容积，m^3；m 为装药质量，kg；ρ_p 为固体发射药密度，kg/m^3；$\psi(t)$为 t 时刻发射药已燃体积分数；α 为余容，m^3/kg；α_{ig}为点火药余容，m^3/kg；$m_{ig}(t)$为 t 时刻已燃点火药质量，kg；T 为混合气体温度，K；R 为发射药燃气气体常数，J/(mol·K)；R_{ig}为点火药燃气气体常数，J/(mol·K)。

1.2.3　气相能量守恒方程

气相能量守恒方程[14]为：

$$(1-c_1)fm\psi(t)+f_{ig}m_{ig}(t)+(\kappa-1)c_{pl}E_{pl}(t)=T[Rm\psi(t)+R_{ig}m_{ig}(t)] \tag{2}$$

式中：c_1 为热损失因数；f 为发射药火药力，J/kg；f_{ig}为点火药火药力，J/kg；κ 为燃气比热比；c_{pl}为密闭爆发器中输入等离子体电能的利用率；$E_{pl}(t)$为 t 时刻输入等离子体发生器的电能，J。

式(2)通用于常规点火和等离子体点火。常规点火时，$E_{pl}(t)=0$；等离子体点火时，$m_{ig}(t)=0$。

1.2.4　固体发射药瞬态燃速公式

根据 Vieille 定律，常规点火时固体发射药燃速公式通常采用指数形式[14]：

$$u=u_1p^{n_1} \tag{3}$$

式中：u_1 为燃速系数，n_1 为燃速指数。

C. R. Woodley 等[8]在 Vieille 定律的基础上引入电功率增强因子，得到等离子体增强发射药燃速公式：

$$u=u_1p^{n_1}(1+\beta_eP_e) \tag{4}$$

式中：β_e 为电功率增强因子，MW^{-1}；P_e 为输入发生器的电功率，MW。

等离子体点火时，在 Woodley 燃速公式的基础上，加入燃气压力梯度对发射药燃速的影响[15]，得到等离子体作用下固体发射药瞬态燃速公式：

$$u=u_1p^{n_1}\left[1+\frac{A(t)n_1}{u_1^2p^{2n_1+1}}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}\right](1+\beta_eP_e) \tag{5}$$

式中：$A(t)$为发射药燃烧过程中与压力及火焰结构有关的时间函数。

1.2.5　相关系数处理方法

由气体状态方程和能量守恒方程可知：

$$p\left\{V_0-\frac{m}{\rho_p}[1-\psi(t)]-\alpha m\psi(t)-\alpha_{ig}m_{ig}(t)\right\}=(1-c_1)fm\psi(t)+f_{ig}m_{ig}(t)+(\kappa-1)c_{pl}E_{pl}(t) \tag{6}$$

首先,通过常规点火实验确定热损失因数。常规点火时,$E_{pl}(t)=0$。发射药试样完全燃完时刻有:$\psi(t)=1$,$p=p_m$,p_m 为实验测得的最高燃气压力。由此可求出发射药燃烧过程中的热损失因数:

$$c_1=1+\frac{f_{ig}m_{ig}(t)}{fm}-\frac{p_m}{f}\left[\frac{V_0}{m}-\alpha-\frac{m_{ig}(t)}{m}\alpha_{ig}\right] \tag{7}$$

其次,通过等离子体点火实验确定电能利用率。等离子体点火时,$m_{ig}(t)=0$。同样发射药试样完全燃完时刻有:$\psi(t)=1$,$p=p_m$。假定等离子体点火时热损失因数未发生变化,进一步求出等离子体点火过程中的电能利用率:

$$c_{pl}=\frac{p_m(V_0-\alpha m)-(1-c_1)fm}{(\kappa-1)E_{pl}(t)} \tag{8}$$

1.2.6 拟合精度

采用均方误差 σ 来衡量模拟压力曲线与实验压力曲线间的误差:

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}[p_s(i)-p_t(i)]^2}{n}} \tag{9}$$

式中:n 为压力曲线上选取不同时刻的点数;$p_s(i)$、$p_t(i)$分别为同一时刻模拟和实验测得的压力。

2 实验结果与分析

对 4/7 高固体发射药试样进行了 2 发常规点火和 3 发等离子体点火密闭爆发器实验。其中密闭爆发器容积为 145 cm^3,装药量为 36.1 g;实验中采用单个模块放电,电容约为 1 300 μF,电感为 40 μH。实验参数与结果如表 1 所示,其中第 3、4 发实验发射药置于密闭爆发器中间,第 5 发实验发射药置于发生器出口处。表 1 中,U_c 为电容器放电电压;t_{ig} 为发射药点火延迟时间(定义为爆发器内压力达到 20 MPa的时刻);t_{end} 为发射药完全燃完时刻,即爆发器内压力达到峰值 p_m 对应的时刻。

表 1 实验参数和结果

Table 1 Experimental parameters and results

编号	点火方式	U_c/kV	t_{ig}/ms	t_{end}/ms	p_m/MPa
实验 1	2 号电点火		1.604	5.05	298
实验 2	2 号电点火		1.673	4.95	300
实验 3	等离子体点火	8.3	0.261	2.93	318
实验 4	等离子体点火	10.0	0.197	2.44	319
实验 5	等离子体点火	10.1	0.167	2.16	329

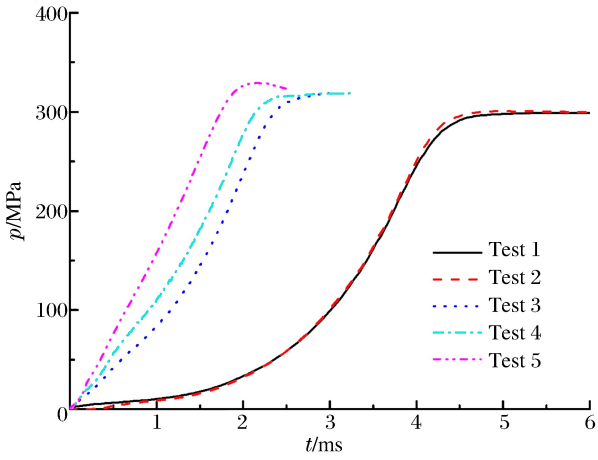

图 2 实验测得压力随时间变化曲线

Fig. 2 Experimental pressure-time curves

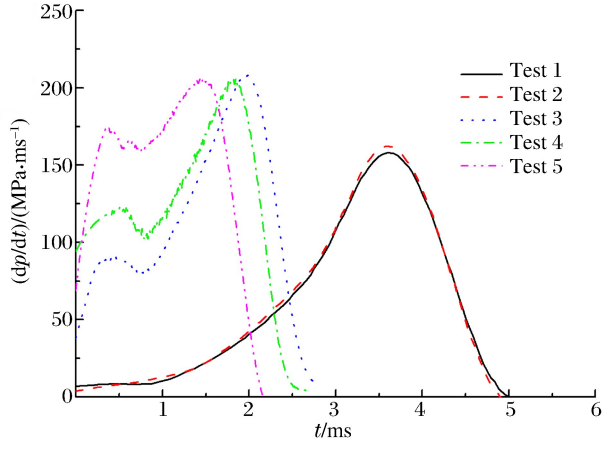

图 3 实验测得压力梯度随时间变化曲线

Fig. 3 Experimental pressure gradient-time curves

实验测得的膛内压力曲线如图 2 所示，由图可知等离子体点火大大缩短了发射药试样的点火延迟时间和燃烧过程时间；同时，随着等离子体的注入，密闭爆发器内燃气压力不断增大。

实验测得的膛内压力梯度曲线如图 3 所示，由图 3 可知在发射药燃烧初始时刻，等离子体作用下的燃气压力梯度远大于常规点火，而且等离子体明显影响了燃气的压力梯度，随着发射药的燃烧，影响程度逐渐降低。

图 4 所示为常规点火时实验和数值模拟得到的压力曲线，其中数值模拟压力曲线分别由指数燃速公式和瞬态燃速公式推得。对比可知，指数燃速公式和瞬态燃速公式均有较高的精确度；但是在发射药燃烧后期瞬态燃速公式与实验结果更吻合。

通过分析常规点火和等离子体点火实验相关数据，得到 4/7 高发射药的电功率增强因子为 0.005 MW^{-1}。图 5～7 分别给出了第 3、4 和 5 发等离子体点火实验时压力与放电功率随时间变化的曲线，其中压力曲线分别通过实验测量、Woodley 燃速公式和瞬态燃速公式所得。当加入电功率增强因子后，Woodley 燃速公式和瞬态燃速公式得到的压力曲线均符合实验曲线。因此，拟合得到的电功率增强因子适用于 4/7 高发射药试样。

结合图 3 中的压力梯度曲线，分析等离子体输入过程中压力梯度与发射药位置和输入电功率的关系。对比第 3、4 发实验曲线可知，发射药处于相同位置时，早期燃气压力梯度峰值与输入电功率峰值成正比，且压力梯度变化趋势与输入电功率曲线相似。对比第 4、5 发实验曲线可知，在相似电功率下，缩短发生器与发射药距离提高了电能利用系数，从而增大了燃气压力梯度。因此，缩短等离子体与发射药距离，提高输入电功率均能获得更理想的等离子体增强效应。

对比图 5～7 中各压力曲线可知，在燃烧中间段 Woodley 燃速公式所得压力曲

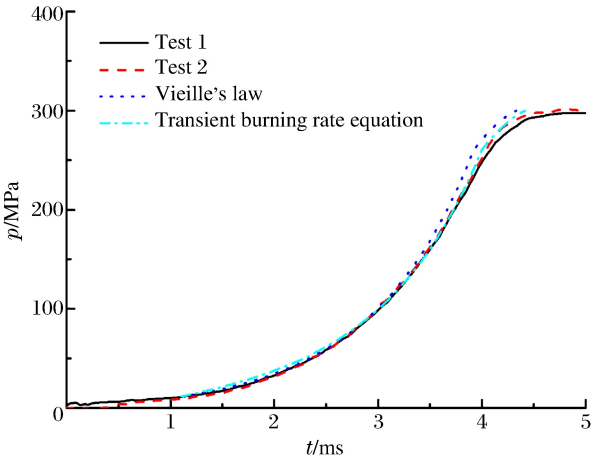

图 4　常规点火时实验与数值模拟压力曲线

Fig. 4　Experimental and simulated pressure-time curves after conventional ignition

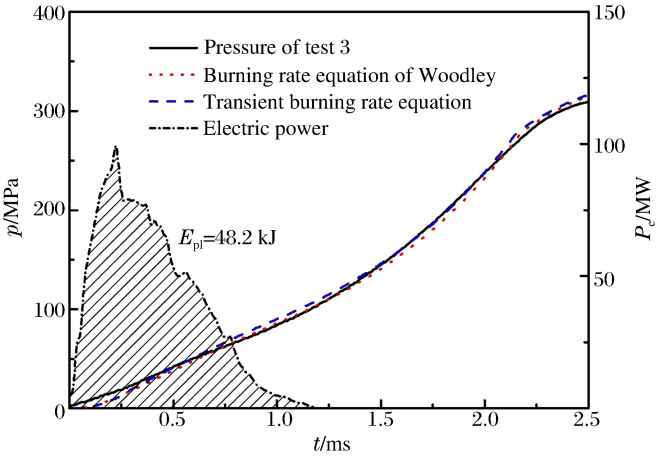

图 5　第 3 发实验的压力与输入电功率曲线

Fig. 5　Pressure-time and electric power-time curves for test 3

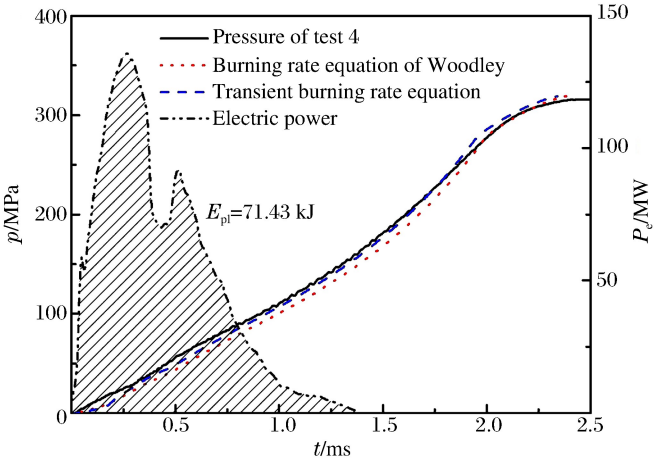

图 6　第 4 发实验的压力与输入电功率曲线

Fig. 6　Pressure-time and electric power-time curves for test 4

线略低于实验压力曲线。其原因可能是 Woodley 燃速公式中仅考虑了等离子体注入期间的电增强效应,未考虑放电结束后的增强效应。因此,脉冲放电结束后 Woodley 燃速公式所得压力曲线与实验有偏差,而在瞬态燃速公式中通过压力梯度项考虑了放电结束后的燃速增强效应,提高了数值模拟精度。

进一步对比各燃速公式的拟合程度,计算得拟合的压力曲线的均方误差如表 2 所示。由表 2 可知,随着输入电功率的增加以及发生器与发射药间距的减小,Woodley 燃速公式均方误差增大;瞬态燃速公式得到的压力均方误差小于 Woodley 燃速公式,且受到输入电能、电功率和发生器与发射药间距的影响更小。因此,瞬态燃速公式得到的膛压曲线与实验数据符合情况优于 Woodley 燃速公式,能更真实地反映等离子体作用下密闭爆发器内燃气压力的变化。

表 2 模拟压力曲线与实验压力曲线间的均方误差

Table 2 Mean squared errors between simulated pressure curves and test ones

编号	σ/MPa	
	Woodley 燃速公式	瞬态燃速公式
实验 3	4.325	4.294
实验 4	9.312	4.910
实验 5	13.506	5.715

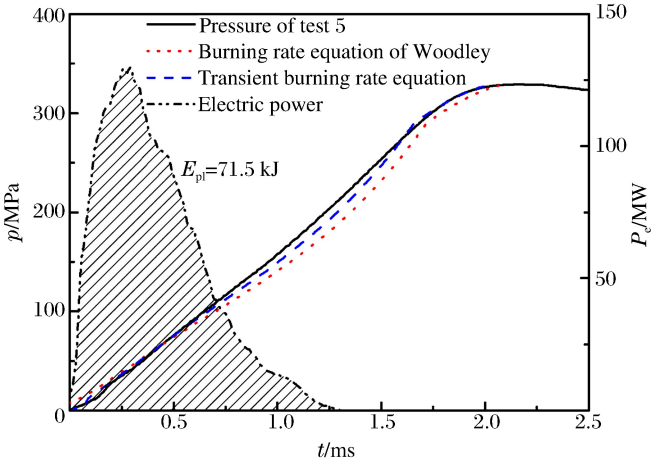

图 7 第 5 发实验的压力与输入电功率曲线

Fig. 7 Pressure-time and electric power-time curves for test 5

3 结 论

利用密闭爆发器实验,研究了等离子体增强 4/7 高固体发射药的燃速特性,实验表明等离子体作用下燃气压力梯度增大,燃速明显增强。根据实验数据,综合考虑燃气压力梯度和燃速增强因子的影响,拟合了 4/7 高固体发射药等离子体作用下的瞬态燃速公式,计算得到等离子体注入期间的燃速增强因子为 0.005 MW^{-1}。瞬态燃速公式与实验压力曲线符合程度比 C. R. Woodley 等[8]提出的燃速公式更高,能更精确描述固体发射药在等离子体作用下的燃烧过程。实验表明,在低装填密度时,缩短等离子体与发射药的距离和提高电功率均能获得更明显的等离子体增强效应。

参考文献:

[1] Goldenberg C, Zoler D, Shafir N, et al. Plasma-propellant interaction at low plasma energies in ETC guns[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003,39(1):227-230.

[2] 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.

[3] Beyer R A, Brant A L. Plasma ignition in a 30-mm cannon[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007,43(1):294-298.

[4] Zoler D, Shafir N, Forte D, et al. Study of plasma jet capabilities to produce uniform ignition of propellants, ballistic gain, and significant decrease of the temperature gradient[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007,43(1):322-328.

[5] Alimi R, Bakshi L, Kot E, et al. Temperature compensation and improved ballistic performance in a solid-propellant electrothermal-chemical(SPETC) 40-mm gun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007,43(1):289-293.

[6] Beckstead M W. Recent progress in modeling solid propellant combustion[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2006,42(6):623-641.

[7] 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(6):497-551.

[8] Woodley C R, Billett S J. Modeling enhanced gas generation rates in a 155 mm ETC gun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001,37(1):207-210.

[9] Woodley C R. Comparison of 0D and 1D interior ballistics modeling of high performance direct fire guns[C]// Crewther I R. Proceedings of 19th International Symposium of Ballistics. Switzerland: International Ballistics Committe, 2001:57-64.

[10] Taylor M J, Woodley C R. Variation in enhanced gas generation rates in electrothermal-chemical closed chamber studies[C]// Crewther I R. Proceedings of 19th International Symposium of Ballistics. Switzerland: International Ballistics Committe, 2001:179-186.

[11] 李海元,栗保明,李鸿志,等.等离子体点火密闭爆发器中火药燃速特性的研究[J].爆炸与冲击,2004,24(2):145-150.
Li Haiyuan, Li Baoming, Li Hongzhi, et al. Propellant burn rate characteristics in closed bomb ignited with plasma[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(2):145-150.

[12] 李海元,栗保明,李鸿志.等离子体点火条件下火药燃速的实验研究[J].弹道学报,2007,19(2):78-81.
Li Haiyuan, Li Baoming, Li Hongzhi. Experimental study on propellant burning rate under the conditions of plasma ignition[J]. Journal of Ballistics, 2007,19(2):78-81.

[13] Brik A, Guercio M D, Kinkennon A, et al. Interrupted-burning tests of plasma-ignited JA2 and M30 grains in a closed chamber[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2000,25(3):133-142.

[14] 翁春生,王浩.计算内弹道学[M].北京:国防工业出版社,2006:7-15.

[15] Krier H. Solid propellant burning rate during a pressure transient[J]. Combustion Science and Technology, 1972, 5(2):69-73.

Porous propellant burning rate enhanced by plasma

Ni Yanjie[1], Xing Rongjun[2], Wan Gang[1], Jin Yong[1],
Li Haiyuan[1], Yang Chunxia[1], Li Baoming[1]

(1. *National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Xi'an North Huian Chemical Industry Co., Ltd., Xi'an* 710302, *Shaanxi, China*)

Abstract: The experimental system with a closed bomb was employed to discuss the characteristics of 4/7 high-nitrogen solid propellant burning rate enhanced by plasma. The plasma energy transferred into the closed bomb was measured by the utilization efficiency of the plasma generator electrical energy. A transient burning rate formula of propellant including the influence of pressure gradient and an enhanced gas generation rates coefficient by electrical power was presented. The enhanced gas generation rates coefficient of 4/7 high-nitrogen solid propellant is equal to 0.005 MW^{-1}. Compared with the burning rate formula given by Woodley, the pressure curve simulated by the transient burning rate formula is in better agreement with the tests. And the transient burning rate formula can describe the combustion process of solid propellant by plasma more accurately.

Key words: mechanics of explosion; transient burning rate; closed bomb; solid propellant; plasma; electrothermal-chemical launch

(责任编辑　张凌云)