

# 固体发射药等离子体点火过程 及弹道效应分析

戴 荣 栗保明 卢顺祥

(南京理工大学弹道国防科技重点实验室 南京 210094)

**摘要** 总结了常规火炮点火的现状,分析了固体药电热化学炮 (SPETC)点火的潜在优势,并对等离子体点火过程中存在的燃速增强机理进行了讨论。作为等离子体点火的弹道效应分析,利用电热增强固体药内弹道、等离子体发生器、脉冲功率源三者的耦合编码,计算了不同点火功率、不同毛细管径对 SPETC 炮弹道性能的影响。

**关键词** 等离子体 点火 内弹道 燃速 固体发射药 电热化学

**中图法分类号** TQ 038 1 TJ012\*

## 1 常规火炮点火现状

常规火炮发射药点火方式多种多样,主要有底部点火与中心点火。其中底部点火结构简单,但燃烧压力低,热量散失快,并且随着火炮装填密度增大膛压升高,往往带来严重的压力波动;中心点火较底部点火传火速度快,弹道一致性好,并能有效抑制危险压力波的出现,但仍未能实现点火延迟的一致性、点火的全面性以及装药对初温的钝感性。常规火炮发射药的点火延迟受点火管几何因素以及点火药理化性能的影响,大口径火炮点火延迟时间可达 10~ 15ms,不利于武器的准确射击与快速发射。在经典内弹道的一般假设中,点火后主装药全面着火,但实际的点传火过程受装药结构、火药初温的影响以及点火强度的限制,通常只能使点火管周围着火,并且随着装填密度增大,着火的局部性特点越明显,而局部点火易引起压力波动,且不利于形成压力平台。在常规火炮中燃速对初温的敏感性是制约火炮弹道性能的重要因素<sup>[1]</sup>。通常火炮要求能在 - 40~ 60℃ 环境下性能可靠,为此必须减少装药量以保证高温时最大膛压不超过允许最大压力,由于火炮一般在常温附近使用,这就使火炮在实际使用中很少达到允许的最大压力。由此带来的初速损失达 3% ~ 10% 以上<sup>[2]</sup>。图 1 为不同初温时固体药常规点火的压力-时间曲线<sup>[3]</sup>,由图可见,初温不同

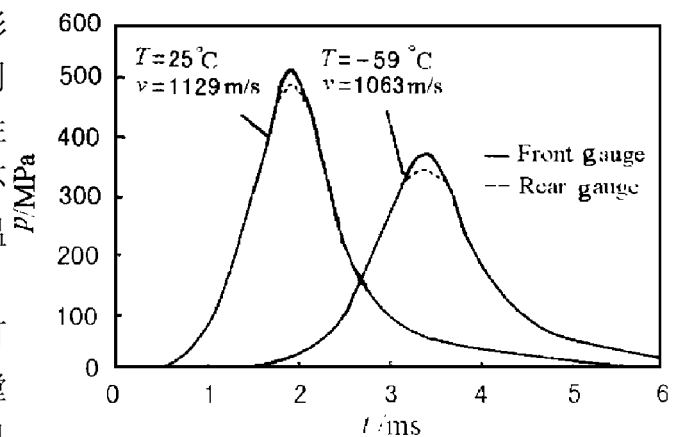


图 1 不同初温常规点火实验曲线

Fig 1 Conventional ignited solid propellant  $p-t$  curve at ambient and cold temperature

\* 戴 荣:男,1970年生,博士,工程师。

1997-12-23收到原稿,1998-08-10收到修改稿。

使最大膛压发生了明显改变,使武器弹道性能的可重复性降低。为了弥补常规火炮点火中这些不利因素,产生了喷管射流点火、软点火、激光点火等新的点火概念以及钝感装药、包覆药等新的装药结构。这些新技术各有其优越性,但目前常规火炮中尚没有一种方法能同时实现点火延迟的一致性、点火的全面性以及装药对初温的钝感性,而电热化学炮利用高能等离子体的特点则能很好地弥补常规火炮点火在以上三方面的不足。

## 2 固体药电热化学炮点火潜在优势

固体药电热化学炮中的等离子体一般是由高压放电电弧烧蚀绝缘毛细管壁产生。一般其出口温度在 1000K 以上,出口压力也远高于常规点火管点火压力。在毛细管半径为 1.92mm、输入电流为 75kA 条件下,发生器出口压力即达 749MPa<sup>[4]</sup>。由于等离子体射流高温、高压特性,使等离子体点火比常规点火有如下优点。

### 2.1 等离子体点火延迟的一致性

目前,由于火控系统已很精确,常规点火延迟的不一致就成为制约射击精度的重要因素。SPETC 炮利用放电回路与等离子体发生器性能的更加可控性以及等离子体射流的高温特点,实现了等离子体点火延迟的高度一致性,已被实验证明<sup>[5]</sup>。图 2 是口径 120mm 坦克炮等离子体点火与常规点火管点火延迟时间的比较<sup>[5]</sup>。其中等离子体点火延迟时间偏移能控制在 0.3ms 以内,仅为常规点火延迟偏移量的 1/70 从而提高了火炮的射击精度。

### 2.2 等离子体点火可采用更高的装填密度

迄今为止,在保持稳定弹道性能的前提下,常规点火所允许的最大装填密度不超过 1.1g/cm<sup>3</sup>。SPETC 炮利用等离子体点火已能突破装填密度的这一限制,在点火电能 75~250kJ 条件下,对 120/132mm 炮的实验表明,在装填密度为 1.2g/cm<sup>3</sup> 时仍能保持良好的弹道性能<sup>[6]</sup>。

### 2.3 等离子体辐射能抑制或消除装药的温度敏感性

在喷入药室的等离子体能量中辐射能占总能量的 70% 左右,理论与实验研究皆表明等离子体辐射能在内弹道循环允许的时间内使药温获得明显提高,从而使高低温环境下的弹道性能趋于一致。图 3 是用 7 孔双基药所作的 SPETC 炮高低温实验的压力-时间曲线<sup>[3]</sup>。

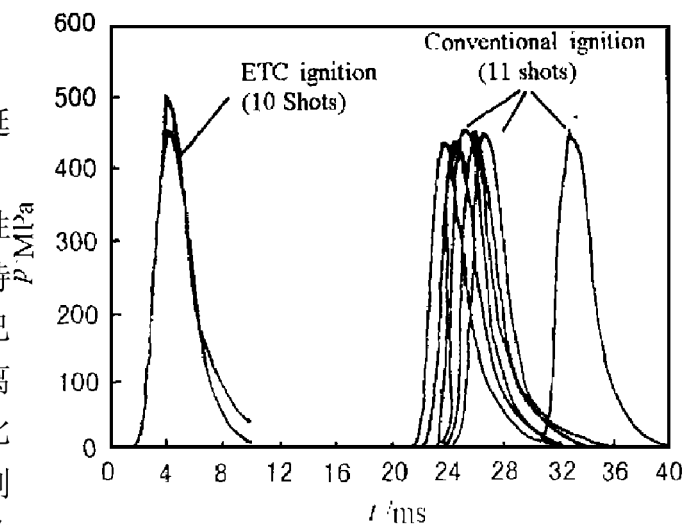


图 2 等离子体与常规点火延迟时间比较

Fig. 2 Comparison of ETC and conventional ignition results

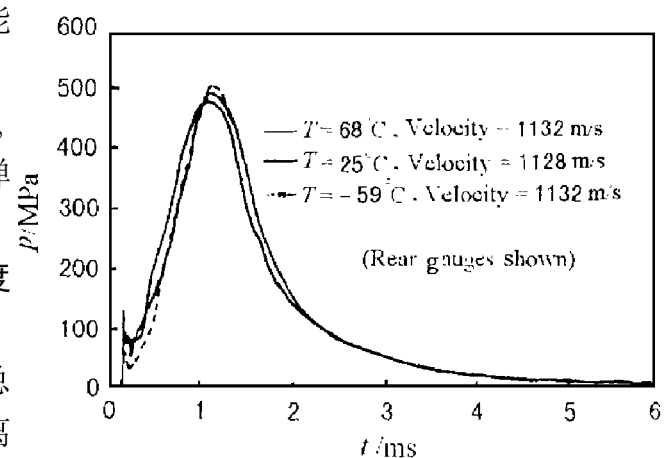


图 3 不同初温等离子体点火实验曲线

Fig. 3 ETC ignited solid propellant  $p-t$  curve at ambient cold and hot temperature

## 2.4 等离子体能更好地实现全面点火

在等离子体点燃固体药的实验研究中还发现, 由于等离子体高温、高压、低粘特性, 等离子体射流比常规点火管点火能更全面地点燃药室装药。Chay Goldenberg 等人利用惰性聚合物(形状参数、热导率、热容量、光学性质基本与真药粒相同)代替真实粒状药所作点火面积实验表明, 常规点火只能点燃点火管周围少量装药, 而等离子体则可以使药室装药同时点火<sup>[6]</sup>。这就有利于药室内压力的均匀分布, 减少膛内的压力波动。

此外, 电热化学炮中等离子体点火所需电能较少。图 3 所示 SPETC 炮实验中各温度条件下输入电能仅为 47kJ, 而 120mm SPETC 炮的点火电能需求也仅在几百千焦量级<sup>[7]</sup>。正是由于电热化学炮等离子体点火具有这些常规点火难以实现的优点, 并且相对容易实现, 使得电热化学炮成为新概念发射技术中越来越受到人们重视的研究方向。

## 3 等离子体点火机理探讨

在等离子体点火过程中, 存在火药的燃速随所喷入等离子体能量提高而增大的现象<sup>[8]</sup>。已有多位作者对其机理进行了研究<sup>[4, 8, 9]</sup>, 但目前尚无明确结论。其燃速增强的可能原因有:

(1) 等离子体辐射引起了亚表面反应 (subsurface reaction), 从而使燃烧面增大、气体生成速率加快。在喷入药室的等离子体能量中, 内能占主要部分, 并主要以辐射能形式存在。根据 Kevin J White<sup>[10]</sup>等人的研究成果, 当喷入药床的等离子体能量较高时, 辐射可能使总燃烧面有较大增加, 而使气体生成速率明显提高。

(2) 等离子体直接冲击的侵蚀效应。喷入药床的点火等离子体除了能维持点火所需的压力环境外, 同时还可能侵蚀药面形成孔穴与微通道, 使燃烧面增大。

(3) 等离子体的初期辐射可能使火药分子结构发生变化而直接改变火药燃速。表 1 是等离子体辐射通量的光谱分布情况。通常等离子体发生器的出口温度在 10000°C 以上, 因此等离子体辐射中以紫外光辐射与可见光辐射为主, 并且随等离子体温度提高, 紫外辐射所占比重很快增大。激光化学的研究成果表明, 分子受到光辐射后, 当辐射强度较高时, 可能使分子直接光解 (photodissociation); 而当辐射强度较低时, 则仅能使分子吸收光子而发生能级跃迁, 但该受激分子的后续化学反应速度往往显著提高。由于等离子体辐射与激光辐射存在一定共性, 因此通过等离子体辐射直接改变火药分子结构可能正是点火过程中燃速加快的原因。

表 1 辐射能量光谱分布

Table 1 Plasma radiation flux spectral distribution

温度 K	总辐射能量 (W/cm <sup>2</sup> )	紫外区 0~0.3 $\mu$ m	可见光区 0.3~0.8 $\mu$ m	红外区 0.8~2 $\mu$ m
6000	7300	310	4200	2500
10000	56600	16000	33000	7200
11000	82900	29000	44000	8600
15000	28700	165000	106000	14200

## 4 内弹道应用研究

作为 SPETC 炮中的点火器, 等离子体发生器的结构以及放电参数势必对点火过程产生

影响。首先毛细管直径不同, 电能的利用效率不同, 其次, 点火的电功率不同, 毛细管压力、温度变化规律不同, 对点火的影响也不一样。我们利用电热增强固体药内弹道、等离子体发生器、脉冲功率源三者的耦合编码, 分析了不同点火功率、毛细管半径条件下的 SPETC 炮内弹道性能。计算所采用的基本假设为:

(1)点火等离子体以能量源项形式加入气相平衡方程; (2)混合长度以喷口处等离子体密度以及气相密度等参量的函数形式给定; (3)随混合长度增大, 等离子体质量流量线性减小; (4)等离子体以临界流喷射; (5)暂不考虑等离子体作用下可能存在的燃速增强效应; (6)以着火温度 (560K) 作为火药的点火判据。

基于上述基本假设, 这里仅写出考虑点火等离子体的能量源项效应的内弹道两相流气相能量方程, 其他守恒方程及辅助方程参见文献 [11], 而等离子体发生器、脉冲功率源相应的数学物理模型见文献 [12]。气相能量方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [A h d_g (e_g + \frac{u_g^2}{2})] + \frac{\partial}{\partial x} [A h d_g u_g (e_g + \frac{p}{d_g} + \frac{u_g^2}{2})] + p \frac{\partial}{\partial t} (A h) \\ & = A (1 - h) \hat{d}_p \frac{S_p}{M_p} [\hat{d}_p r (e_p + \frac{p}{d_p} + \frac{u_p^2}{2}) - q - f_p u_p] + \dot{m}_p h_p A \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\dot{m}_p$  为等离子体喷射到单位体积火药床的质量流量,  $h_p$  为等离子体的比热焓。等离子体射流长度按照文献 [13] 给出的公式确定

$$l(t) = l_0(t) \sqrt{d_{p1}(t) / d_g(t)} \quad (2)$$

其中:  $d_g(t)$ 、 $d_{p1}(t)$  为毛细管喷口处的气相密度与等离子体密度,  $l_0(t)$  为弹底距膛底的距离。

根据 59 式 57mm 高射炮的内弹道参数, 首先采用常规点火并将计算结果与内弹道实验结果进行了对比, 在肯定了两相流程序的正确性后, 改用等离子体点火, 将内弹道程序与毛细管程序相耦合。图 4 为不同半径毛细管的内弹道膛底压力-时间曲线。由图可见, 毛细管径越小, 膛底压力峰值越高; 随毛细管径增大, 不仅电能利用效率降低, 而且由于毛细管出口压力降低, 易使管压小于膛压造成气体倒流入管内而灭弧。因此在发生器设计中, 倾向于在结构承载能力允许范围内选用较小的毛细管径。图 5 是不同点火功率条件下的弹底压力-时间曲线。由图

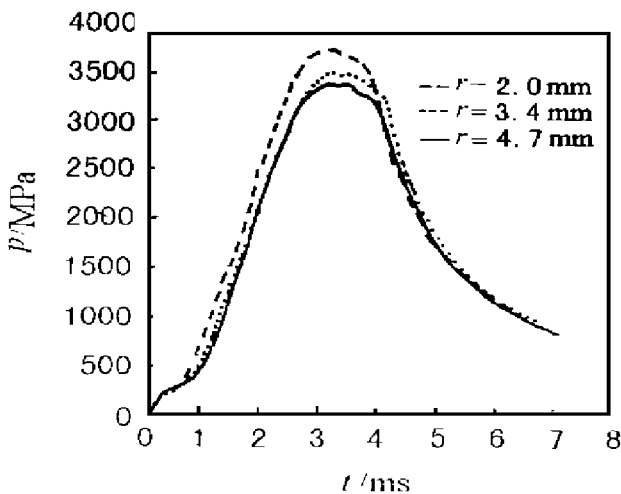


图 4 毛细管径对弹道性能的影响

Fig. 4 The influence of capillary radius on ballistic process

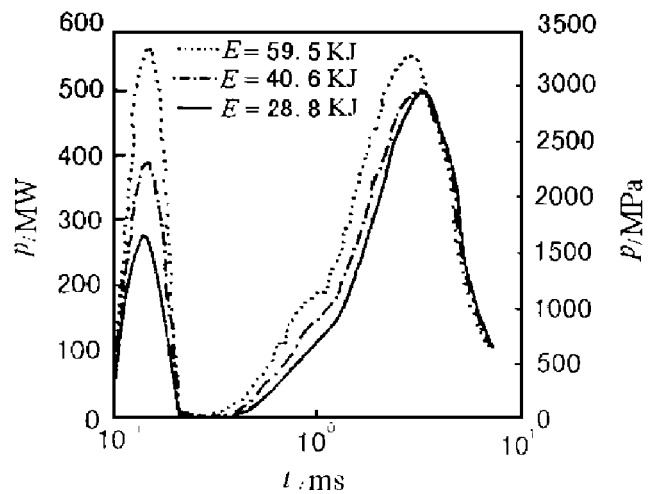


图 5 点火脉冲对弹道性能的影响

Fig. 5 The influence of input pulse for ignition on ballistic process

可见,随输入功率的提高,膛压曲线初始段陡度明显增加,同时压力峰值升高。需要指出的是,在实际火炮中,并不希望等离子体点火产生过高的压力峰值。目前普遍采用的做法是采用多脉冲放电,首先用较少的电能点火,再在峰压后用较多的电能增强燃烧。

## 5 结 论

(1)相对常规点火,等离子体点火实现了点火延迟的一致性、点火的全面性以及装药对初温的钝感性,并可采用更高的装填密度;

(2)等离子体点火辐射效应显著,并可能通过改变火药分子结构而直接改变火药燃速;

(3)随输入功率提高,膛压曲线初始段陡度明显增加,同时压力峰值升高;而随毛细管径增大,毛细管出口压力降低,电能利用效率下降。

## 参 考 文 献

- 1 Juhasz A A, Doali J O, Bowman R E. Wide Temperature Range Burning Rate Studies of M30A1 Propellant. AD-A111248, 1981, 13~23
- 2 Peremutter Lior, Sudaimoris Temperature Compensation by Controlled Ignition Power in SPETC Guns. In: Proceedings of the 16th International Symposium on Ballistics(1). San Francisco, CA: 1996, 147~152
- 3 Chaboki A, Zelenak S, Isle B. Recent Advances in Electrothermal-chemical Gun Propulsion at United Defense LP. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(1): 284~288
- 4 White K J, Katulka G L, Stobie I et al. Electrothermal-chemical Plasma Interaction with Propellants. In: Proceedings of the 16th International Symposium on Ballistics(1). San Francisco, CA: 1996, 387~396
- 5 Oberle William F, Goodell Bradley D. The Role of Electrothermal-chemical (ETC) Gun Propulsion in Enhancing Direct-fired Gun Lethality. In: Proceedings of the 16th International Symposium on Ballistics(1). San Francisco, CA: 1996, 59~69
- 6 Goldenberg C, Derehutter L, Sudaim. Experimental Method for Studying Solid Propellant Ignition by Plasma in SPETC Guns. In: Proceedings of the 16th International Symposium on Ballistics(1). San Francisco, CA: 1996, 337
- 7 Guercio M D, Burden H, Stobie I et al. A Pulse-forming Network Design for Electrothermal-chemical Combustion Characterization of Solid Propellants. ARL-MR-261, 1994
- 8 Grune D, Hensel D. Combustion Behavior of LOVA-Solid-Propellant by Ignition with Hot Gases and Its Influence on the Interior Ballistic Cycle. In: Proceedings of the 17th International Symposium on Ballistics(1). San Francisco, CA: 1996, 263~271
- 9 Edwards C M, Bourham M A. Experimental Studies of the Plasma-propellant Interface for Electrothermal-chemical Launchers. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(1): 404
- 10 White K J, Stobie I, Oberle W, et al. Combustion Control Requirements in High Loading Density Solid Propellant ETC Gun Firings. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(1): 350~355
- 11 金志明,袁亚雄,宋明.现代内弹道学.北京:北京理工大学出版社,1992
- 12 卢顺祥,栗保明,吴轩.电热增强型固体发射药火炮内弹道模拟研究.弹道学报,1998(1):1~6
- 13 Alim i R, Peremutter L, Onn U. Modeling an Internal Injection Process for the Solid Propellant Electrothermal Chemical Gun. In: Proceedings of the 16th International Symposium on Ballistics(1). San Francisco, CA: 1996, 409

# ANALYSIS OF THE PROCESS OF PLASMA IGNITION IN SOLID PROPELLANT ELECTROTHERMAL-CHEMICAL PROPULSION

Dai Rong, Li Baoming, Lu Shunxiang

(*National Ballistic Lab., NUST, Nanjing, 210094*)

**ABSTRACT** In the solid propellant electrothermal-chemical (SPETC) propulsion concept, it has been proved that plasma can be successfully used to optimize and control the propellant ignition process. According to the recent work in this area, the mechanism of the burning rate enhancement in plasma ignition process is analyzed, and the electron jump or photodissociation process of the propellant molecular caused by the plasma radiation is considered as a possible reason of burning rate increasing. For the purpose of studying the effect of the geometric and energetic characteristics of a plasma primer on the ignition and combustion of the solid propellant charge, an one-dimensional two-phase IB (Inner Ballistics) model is modified to simulate the IB process of SPETC, and some conclusions about chamber pressure and electrical efficiency varying with electrical power and capillary radius are given.

**KEY WORDS** plasma ignition, inner ballistics, burn rate, solid propellant, electrothermal-chemical