

SF-3 发射药的等离子体点火中止燃烧试验

张玉成, 李强, 张江波, 蒋树君, 严文荣, 赵晓梅, 王固态

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:采用有剪切膜片控压的密闭爆发器分别在等离子体点火和常规点火条件下进行该发射药的燃烧性能和中止燃烧两种比较试验。用扫描电镜观测了SF-3发射药的燃面变化情况。结果显示,在底喷式等离子体发生器作用下,SF-3发射药的燃烧表面存在大量微坑,使燃烧表面积大大增加,并导致SF-3发射药等离子体点火燃烧在一定程度上偏离几何燃烧规律。在常规点火条件下,SF-3发射药中止燃烧表面的Cu、C、O三种元素的归一化质量分数分别为0.7%、30.0%、69.3%,而在等离子体点火条件下则分别为3.0%、35.5%、61.5%,表明等离子体发生器产生的高温C颗粒和Cu颗粒对SF-3发射药的燃烧有显著影响。

关键词:应用化学;等离子体点火;SF-3发射药;中止燃烧;密闭爆发器;中止燃烧功能爆发器

中图分类号: TJ55;TQ562

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2009)03-0075-04

Interrupted Combustion Experiment of SF-3 Propellant with Plasma Ignition

ZHANG Yu-cheng, LI Qiang, ZHANG Jiang-bo, JIANG Shu-jun,

YAN Wen-rong, ZHAO Xiao-mei, WANG Gu-tai

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Two comparative tests related to combustion performance and interruption combustion were carried out with a vented chamber under the conditions of plasma ignition and regular ignition. The changes of burned surface were examined with SEM. The results indicated that there were a lot of micro holes on the burned surface after the propellant had been ignited by a bottom jet plasma generator. The existed micro holes increased burning area on the surface of propellant, and led to a deviation of the SF-3 propellant burning with plasma ignition from the geometric burning rule to a certain extent. The unitized contents of Cu, C, O elements on the interrupted combustion surface of SF-3 propellant are different under two ignition conditions. The unitized contents of the three kinds of elements were 0.7%, 30.0% and 69.3% respectively under the regular ignition condition, however 3.0%, 35.5% and 61.5% respectively under the plasma ignition condition. This difference showed that the combustion performance of SF-3 propellant could be affected evidently by the high temperature particles of C and Cu which were produced by the plasma generator.

Key words: applied chemistry; plasma ignition; SF-3 propellant; interrupted combustion; closed bomb; vented chamber

引言

电热化学推进技术和发射药的等离子体点火技术能够有效改善火炮的弹道性能,近年来受到广泛关注。由于等离子温度一般都在10000K以上,以及等离子体的其他物理化学特性,致使发射药在等离子体作用下的燃烧规律变得十分复杂。研究表明^[1-2],

在等离子体作用下,发射药的燃烧与传统的维也里燃烧有着较大的差别。弄清发射药在等离子体作用下燃烧的规律性及点火燃烧机理对进一步开展电热化学炮用发射药以及等离子体点火技术在发射装药上的应用具有重要意义。

目前国外通过试验研究和理论模拟手段,研究了等离子体对发射药的作用机理^[3,4]。我国对等离子体作用条件下发射药的燃烧性能开展了大量的试验

收稿日期:2008-08-11; 修回日期:2009-02-22

基金项目:火炸药燃烧国防科技重点实验室基金项目资助(9140C350207070C3503)

作者简介:张玉成(1976—),男,博士研究生,工程师,从事发射药技术研究工作。

研究,在电热化学炮用发射药及发射装药领域取得了一定的成果,而从微观角度来描述发射药等离子体作用条件下的燃烧机理研究较少^[6-7]。本研究采用PFN放电网络、底喷式等离子体发生器及有中止燃烧功能的密闭爆发器,选用在常规点火条件下较好地遵循几何燃烧规律的标准SF-3发射药,研究了其中止燃烧表面变化,从微观角度研究了发射药等离子体点火中止燃烧表面变化的原因。

1 实验

1.1 密闭爆发器的设计

设计了一种具有中止燃烧功能的密闭爆发器,容积约150 mL。密闭爆发器一端为等离子体发生器(亦可采用常规点火),另一端为可控泄压膜片装置(当采用放气螺栓时可作为密闭爆发器使用),通过调节可控泄压膜片的厚度可以控制中止燃烧的压力。在试验过程中可以通过光纤隔离及高速数据采集系统安全、可靠地测量中止燃烧压力曲线变化及等离子体发生器工作过程中的电压、电流变化。

1.2 工作原理

等离子体发生器采用底喷式等离子体发生器。其工作过程为:高功率脉冲电源高压放电,起爆丝导通瞬间被加热到熔融转化为液体,过热的液体金属达到沸点并气化,压力和密度很高的金属气体使聚乙烯材料的毛细管被加热、分解、电离而形成高温高压的混合气体并由喷管喷出,形成等离子体射流,进而加热并引燃发射药。

当燃烧室内的压力达到一定值,泄压膜片剪切破裂,燃烧室内压力迅速下降,导致燃烧的药粒瞬间熄火。药粒中止燃烧后的表面状态由扫描电镜获取。

1.3 材料

试验采用药型为16/1的SF-3标准发射药,装填密度为0.12 g/cm³,泄压膜片为厚度0.8 mm的紫铜片。等离子体点火试验中电容器组充电电压6 kV,单台电容器电容为126 μF。

2 结果与讨论

2.1 中止燃烧试验曲线

通过压力曲线和一个准稳态方程分析可以得到发射药的中止燃烧熄火条件,完全熄火时的熄火关系为^[8]:

$$\left. \frac{dp(t)}{dt} \right|_{cr} = \frac{1}{\Lambda} \frac{p(t) u^2}{n \alpha} \quad (1)$$

式中: $p(t)$ 为 t 时刻的燃烧室压力; Λ 为常数; u 为稳态燃速; n 为稳态方程中的压力指数; α 为发射药固相的热扩散率。

图1为SF-3发射药在等离子体点火和常规点火条件下的中止燃烧压力曲线。图2为等离子体点火时等离子体发生器的电流电压变化曲线。

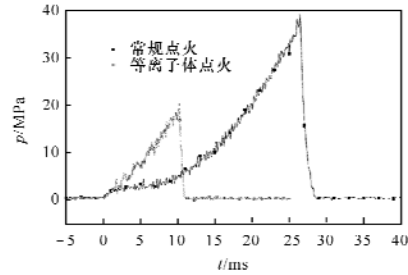


图1 常规点火及等离子体点火中止燃烧的 $p-t$ 曲线

Fig. 1 $p-t$ curves of interrupted combustion with regular NC ignition and plasma ignition

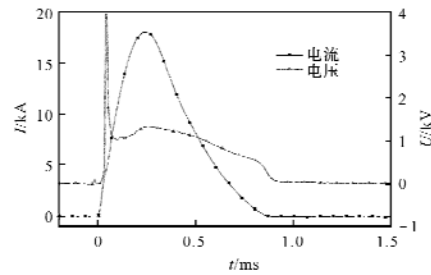


图2 等离子体发生器的 $I-t$ 和 $U-t$ 曲线

Fig. 2 $I-t$ and $U-t$ curves of plasma ignition

在相同装填条件和泄压膜片厚度条件下,采用等离子体点火在10.2 ms、20.3 MPa时泄压片剪切破裂,而常规点火在26.4 ms、39.3 MPa时泄压片剪切破裂。采用等离子体点火时,中止燃烧的泄压片破膜压力和破膜时间均小于常规点火时的压力和时间。图1表明,采用等离子体点火,发射药的初始燃气生成速率远大于采用常规点火,等离子体点火增强了发射药的燃速,常规点火的燃烧曲线前端压力上升较等离子体点火显得更为平缓。等离子体点火由最大压力到完全熄火的时间约为0.6 ms,而常规点火的时间约为1 ms。对中止燃烧曲线进行微分处理,等离子体点火燃烧熄火时的压力变化率为-56.1 MPa/s,常规点火为-50.1 MPa/s。可见等离子体点火熄火时压力变化更快。式(1)表明,熄火时 $dp(t)/dt$ 与发射药的燃速平方成正比,燃速是影响熄火的一个重要参数。同时,中止燃烧试验泄压膜片破裂过程是一个复杂的过程,是压力、冲量、温度、

火药燃速等多方面因素综合作用的结果,与常规点火试验破膜时间进行比较,可以看到等离子体射流的高温特性是促使破膜时间缩短的主要因素之一。

2.2 燃烧表面变化对比分析

采用扫描电镜观察了中止燃烧试验后发射药样品燃烧表面的变化,结果见图3。相同装填条件下,常规点火和等离子体点火条件下SF-3发射药的密闭爆发器试验 $p-t$ 曲线和 $\Gamma-\Psi$ 曲线见图4和图5。

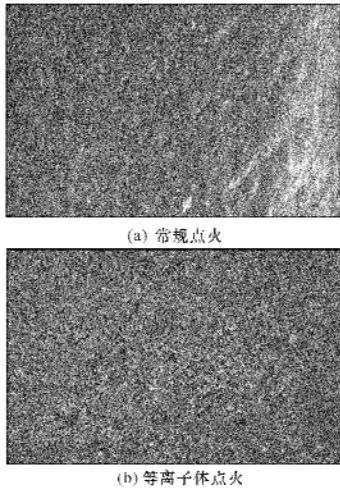


图3 SF-3发射药中止燃烧表面的扫描电镜图($\times 200$)

Fig. 3 SEM photos of interrupted combustion surface of SF-3 ($\times 200$)

由图3可看出,采用常规点火发射药的中止燃烧表面比较平滑,而采用等离子体点火中止燃烧表面存在大量微坑。发射药等离子体点火燃烧在强等离子体点火条件下,高温高压的等离子体射流对发射药产生热传导、辐射、侵蚀等物理化学作用,使得等离子体可以渗透到发射药内部,同时电爆炸所产生的炙热金属铜颗粒,以及在点火瞬间由消融管壁产生的以高温形式存在的C颗粒作用在发射药表面。C和Cu颗粒沉积在发射药表面,致使产生大量微坑。

为了进一步了解等离子体射流对发射药表面的作用机理,采用电子能谱方法研究了SF-3发射药中止燃烧表面Cu、C、O的分布情况。常规点火条件下3种元素的归一化质量分数分别为0.7%、30.0%和69.3%,等离子体点火条件下3种元素的归一化含量分别为3.0%、35.5%和61.5%。表明在等离子体中止燃烧表面有Cu颗粒的存在,C含量高于常规点火的C含量。常规点火条件下检测到的少量Cu可能是由于燃烧室内残留Cu造成的。正是等离子体发生

器所产生的高温C和Cu颗粒引起SF-3发射药燃烧表面发生很大的变化,致使发射药中止燃烧表面留下了大量微坑。

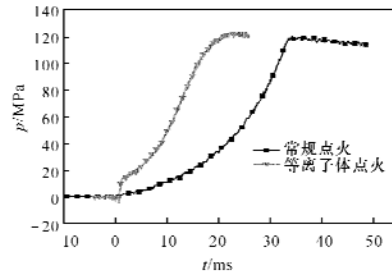


图4 等离子体点火及常规点火条件下发射药燃烧的 $p-t$ 曲线

Fig. 4 The $p-t$ curves of SF-3 propellant with regular ignition and plasma ignition

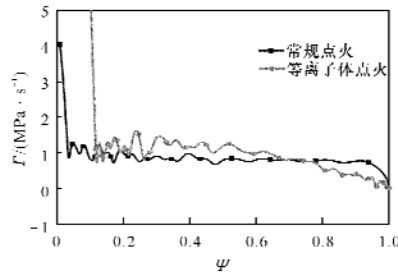


图5 等离子体点火及常规点火条件下发射药燃烧的 $\Gamma-\Psi$ 曲线

Fig. 5 The $\Gamma-\Psi$ curves of SF-3 propellant with regular ignition and plasma ignition

等离子体点火样品的燃烧表面较常规点火样品的燃烧表面粗糙得多,因而发射药的燃烧表面积大大增加,从而使得发射药的质量燃速大大增加。同时SEM电镜照片还发现在药体内部存在一些微小裂缝。大量微坑和一些裂缝的存在使发射药的燃烧在一定程度上偏离了几何燃烧规律。从图4可以看出,采用常规点火,压力上升较缓,在最大压力处的拐点明显;而采用等离子体点火,压力上升较快,在最大压力附近成圆弧形,拐点不明显。这是由于发射药燃烧结束一致性不好所致。从图5也可以看出,采用等离子体点火,SF-3发射药燃气的生成猛度 Ψ 在0.6之前比常规点火的大,但在0.6之后时下降得快。以上结果说明,采用等离子体点火,SF-3发射药在点火和燃烧前期的质量燃速相对增大,然而在一定程度上偏离了几何燃烧规律。

从以上分析可知,等离子体发生器及其工作条件对发射药的燃烧具有重要影响。为了保持发射药

燃烧的规律性和稳定性,需要进一步研究等离子体发生器与发射药的匹配性及二者的相互作用机理。每一种类型的发射药都有其相适应的等离子体点火强度,点火强度过高,会造成发射药内部破裂,对燃烧稳定性和规律性带来不利影响。

深入研究等离子体点火条件下发射药燃烧过程中表面产生大量微孔的机理,有效抑制严重偏离几何燃烧规律的现象,进而实现发射药初始燃烧阶段燃烧规律的稳定性和可控性是等离子体点火技术应用的前提。因此,在今后的研究中需要通过大量试验工作,研究能够适用于电热化学发射技术的发射药配方以及与其相匹配的等离子体发生器,同时进一步从微观角度研究发射药在等离子体作用条件下的作用机理,使化学能在等离子体点火条件下能够稳定、可靠、有规律地释放。

3 结 论

(1) 在相同装填条件和泄压膜片厚度条件下,采用等离子体点火中止燃烧的泄压片破裂压力和破裂时间均小于常规点火时的压力和时间。

(2) SF 3 发射药等离子体点火中止燃烧表面存在大量微坑,微坑的存在使燃烧表面积增加,从而增加了发射药的质量燃速。大量微坑是造成发射药燃烧结束点不一致的主要原因。

(3) 电子能谱所检测到的发射药中止燃烧表面 Cu、C、O 的分布情况表明,等离子体发生器所产生的高温 C 颗粒及 Cu 颗粒引起 SF-3 发射药燃烧表面的变化,灼热的固体颗粒使发射药中止燃烧表面产生大量微坑,对 SF 3 发射药燃烧产生显著的影响。

参考文献:

[1] 张小兵,袁亚雄,谢玉树. 等离子体点火密闭爆发器实验研究[J]. 火炸药学报,2002,14(2):24-26.
ZHANG Xiao-bing, YUAN Ya-xiong, XIE Yu-shu.
Study of closed vessel experiment with plasma ignition

[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2002,14(2):24-26.

- [2] 侯保国. 发射药等离子体点火燃烧中止试验研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.
HOU Bao-guo. Interrupted combustion experiment study of propellant with plasma ignition[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [3] Kaste P, Brik 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] Zbigniew K. Leciejewski. Closed Vessel Experiments- Investigation of Ignition Phase[C]// Proceedings of the 11th Seminar; New Trends in Research of Energetic Material. Pardubice: University of Pardubice, 2008: 625-633.
- [5] 谢玉树,袁亚雄,张小兵,等. 等离子体增强发射药燃烧的实验研究[J]. 火炸药学报,2001,24(3):10-12.
XIE Yu-shu, YUAN Ya-xiong, ZHANG Xiao-bing, et al. The experimental studies of the augmentation combustion of propellants with plasmas[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2001, 24(3): 10-12.
- [6] 杨春霞,赵宝昌,栗保明,等. 一种低易损固体发射药的等离子体点火及燃烧特性[J]. 火炸药学报,2004,27(2):31-34.
YANG Chun-xia, ZHAO Bao-chang, LI Bao-ming, et al. Ignition and combustion behavior of a type of LOVA solid propellant [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2004,27(2):31-34.
- [7] 肖正刚,应三九,徐复铭,等. 发射药等离子体点火燃烧中止试验研究[J]. 火炸药学报,2007,30(1):17-20.
XIAO Zheng-gang, YING San-jiu, XU Fu-ming, et al. Interrupted-burning test study of interaction between plasma and propellant [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2007,30(1):17-20.
- [8] 王洋山,何卫东,徐复铭. 火药装药设计原理与技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006.