

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.04.003

底喷式等离子体发生器的输出特性研究^{*}

刘 强 张玉成 张江波 陈亦斌 刘 毅 周 敬

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 等离子体点火是发射药燃烧的一种新型点火方式,等离子体发生器性能会影响等离子体的输出效果。为了实现发射药高效的等离子体点火作用而研究等离子体发生器的输出性能。通过调整底喷式等离子体发生器内部关键参量,分析了发生器输出特性影响规律,优化了等离子体发生器内部结构参数,并在 30 mm 火炮中进行了试验。结果表明:等离子体发生器效率和输出电压及等离子体射流压强随毛细管孔径增加而下降,但随放电通道长度增加而增加;增加脉冲功率源的充电电压能够提高等离子体射流动能和压强峰值;聚乙烯(PE)和聚四氟乙烯(PTFE)两种材质对等离子体发生器输出特性影响不显著;经优选后的底喷式等离子体发生器能够在火炮装置中有效地点燃发射药。

[关键词] 等离子体点火;发射药;底喷式等离子体发生器;等离子体射流

[分类号] TQ562

引言

等离子体技术在现代军事应用中越来越受到重视,应用的领域也不断拓展^[1]。电热化学炮是一种新概念武器,等离子体点火作为一种新型点火方式应用在电热化学炮中^[2],具有温度补偿作用和缩短点火延迟时间、增强点火效果等优于传统点火方式的特性。等离子体发生器输出高密度等离子体射流,然后喷入燃烧室点燃发射药,通过燃烧产生大量气体为弹丸发射提供动力^[3]。为了研究等离子体点火对发射药作用的影响,需要进一步研究等离子体发生器的输出特性,为研究不同等离子体输出对发射药影响提供基础依据。

结合电热化学炮的结构特点,本文对底喷式等离子体发生器进行研究。等离子体发生器采用毛细管放电结构,依靠连接在电极间的金属丝爆炸产生初始等离子体,在其后依靠等离子体对管壁的烧蚀作用维持放电过程的进行^[4-5],并将产生的等离子体射流喷射入燃烧室。在毛细管放电过程中,管壁烧蚀维持的放电阶段占整个放电过程的 70% ~ 90%,并且作为等离子体射流的主要生成机制,因而这一相对稳定的放电阶段在很大程度上影响着毛细管放电及等离子体射流的特性。

通过等离子体发生器内部结构的特征参数的调整^[6-7],深入分析了不同参量的改变对等离子体发生

器输出特性的影响,进而优化了等离子体发生器的结构参数,并在 30 mm 高压滑膛炮中进行了等离子体点火试验验证^[8],为等离子体点火用发生器提供了一条较好的技术途径。

1 试验

1.1 仪器与设备

仪器:Kistler5015 型电荷放大器;奥地利 Dewetron 多通道数据采集仪;美国泰克 1000 × 衰减倍数的高压探头。

设备:高功率脉冲电源;点火控制器;等离子体发生器;kistler6215 型压力传感器;压力传感器加装板;光隔装置;电流传感器;30 mm 高压滑膛炮。其中,高功率脉冲电源中的电容器组由 6 台 125 μF 的自愈式高压脉冲电容器(额定电压 18 kV)并联而成,单台电容器可承受电流 1 A。整形电感 40 μH ,额定电流 75 kA,额定电压 18 kV,截止二极管与负载并联以保证电路中无反向电流流过。

1.2 输出性能试验

根据等离子体发生器内部结构特点,分别对发生器内部的毛细管孔径、放电通道长度、毛细管管壁材料等关键结构参数进行调整,可配置成不同结构参数的等离子体发生器。等离子体点火系统框图如图 1 所示。

把装配好的等离子体发生器固定在工作台上,

^{*} 收稿日期:2014-11-03

基金项目:火炸药燃烧国防科技重点实验室基金项目资助(9140C350209140C35158)

作者简介:刘强(1982~),男,硕士,工程师,主要从事新概念发射技术研究。E-mail:liuqiang1304@163.com

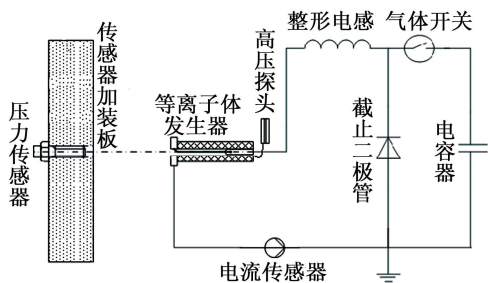


图 1 等离子体点火系统框图

Fig. 1 Frame of the plasma ignition system

发生器的喷口端要面向传感器加装板,从而加装板上的压力传感器可以感知发生器输出的等离子体射流压强,发生器的另一端与高功率脉冲电源的输出接线端子以及高压探头正极相连。发生器的外壳作为负极,与高功率脉冲电源输出接线端子的负极相连,在负极接线中配置有采用 Rogowski 线圈的电流传感器。测试仪器设备及装置连接完成后,由点火控制器对高功率脉冲电源进行控制,从而完成等离子体的点火^[9]。最后压力、电压、电流等参数测试结果分别在数据采集记录仪记录、显示和存储。

1.3 30 mm 火炮试验

采用常规点火和等离子体点火两种方式对比试验来验证等离子体发生器的性能。试验用发射药为高能硝胺发射药 RGD7A-4/7,装药为中心传火管结构,药筒为硝化棉制作的可燃药筒,传火药为 2# 小粒黑,弹道试验平台为 30 mm 高压滑膛炮。常规点火采用底火点火;等离子体点火选取毛细管孔径为 3 mm、放电通道长度为 25 mm 和毛细管材料为聚乙烯(PE)的底喷式等离子体发生器。等离子体发生器喷口朝向装有发射药的可燃药筒,膛内压力曲线的测试需要经电荷放大器转换,转换后的压力信号经光隔装置传送给数据采集记录仪,从而获取膛压曲线^[10]。等离子体点火过程中放电电压、电流曲线参照等离子体发生器输出性能试验过程。

2 试验结果与讨论

2.1 毛细管孔径对发生器输出特性的影响

为研究毛细管孔径对发生器输出特性的影响,毛细管材料选用 PE 材质,发生器喷口与压力传感器感知端面距离为 25 mm,高功率脉冲电源充放电电压约 6 kV,放电通道长度为 60 mm。在上述条件不变的情况下,分别研究毛细管孔径为 3、5 mm 和 7 mm 3 种情况下的输出特性,从而反映出毛细管孔径对等离子体发生器输出的影响规律,如图 2 所示。

图 2 中, ϕ 为毛细管孔径; U_m 为电压峰值; t 为放电时间; η 为效率; I_m 为电流峰值; p_m 为压强峰值。由图 2 可知,随着毛细管孔径的增加,放电时长

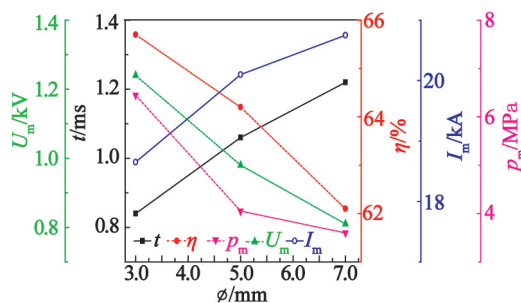


图 2 毛细管孔径对等离子体发生器输出特性的影响

Fig. 2 Effect of capillary aperture on outcome characteristics of the plasma generator

与电流峰值依次增加,而发生器效率、电压峰值与压强峰值却依次下降。毛细管孔径主要通过影响等离子体的电阻来对发生器的电参数产生影响。增大孔径意味着等离子体电阻的减小(假设等离子体平均电阻率不发生明显变化),因而电流峰值与电压峰值随着毛细管孔径的增加分别呈现出上升与下降的趋势;同时在放电电路中,较低的电阻对应着较低的效率,因而发生器的效率随着毛细管孔径的增加而降低;此外由于等离子体电阻降低,泄放相同的电能需要更长的时间,因而放电时长随着毛细管孔径的增加而延长。毛细管放电过程中的热膨胀作用是加速等离子体射流的主要机制,由于毛细管孔径的增加对应着单位长度上毛细管内体积的增大,热膨胀对等离子体射流的加速作用因而减弱,从而造成射流压强随着毛细管孔径的增加而逐渐降低。

2.2 放电通道长度对发生器输出特性的影响

为研究放电通道对发生器输出特性的影响,毛细管材料选用 PE 材质,毛细管内孔直径为 3 mm,发生器喷口与压力传感器感知端面距离为 25 mm,高功率脉冲电源充放电电压约 6 kV。在上述条件不变的情况下,分别研究放电通道长度为 25、45 mm 和 60 mm 3 种情况下的输出特性,从而反映出放电通道长度对等离子体发生器输出的影响规律,如图 3 所示。

图 3 中, l 为放电通道长度;其他物理量的意义同图 2。由图 3 可知随着放电通道长度的增加,放电时间与电流峰值依次递减,而电压峰值、压强峰值与发生器效率却依次增加。与孔径对电参数的影响规律类似,放电通道长度也是通过影响等离子体电阻来对发生器的电参数产生影响,不同的是放电通道长度的增加会导致等离子体电阻的增大,因此增加长度对电参数的影响与增加孔径的趋势完全相反。此外,增加放电通道长度会导致等离子体在毛细管内被热膨胀作用加速的距离增加,造成等离子

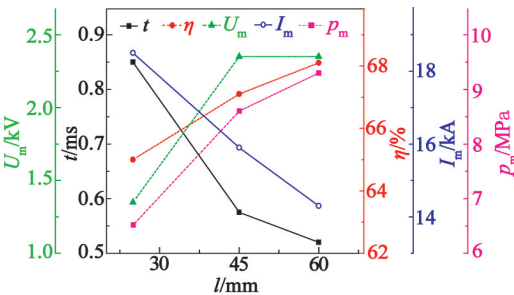


图 3 放电通道长度对等离子体发生器输出特性的影响

Fig. 3 Effect of channel's length on outcome characteristics of the plasma generator

体射流速度提升,因而会引起等离子体射流压强的增加。

2.3 充电电压对发生器输出特性的影响

图 4 显示了不同充电电压情况下等离子体发生器的输出特性。其中, U 为充电电压,其他物理量的意义同图 2。从图 4 中可见,随着充电电压从 5 kV 提升到 6 kV,放电时长、电压峰值、电流峰值与压强峰值分别提升了约 60%、15%、25% 与 30%;发生器效率虽然稍有降低,但变化仅有约 2%,因此可认为发生器效率基本不变。充电电压的提升意味着总储能的提高,因而在发生器效率基本不变的前提下,注入等离子体中的能量随之提升,从而造成了电流峰值与电压峰值不同程度的提升;同时较高的能量需要更长的泄放时间,因而放电时长随之延长;此外,随着等离子体能量的提升,由其转化的等离子体射流动能也会随之升高,从而造成压强峰值的增长。

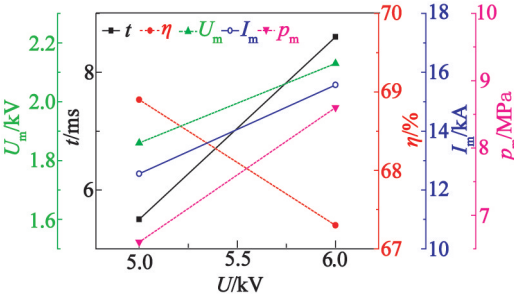


图 4 充电电压对等离子体发生器输出特性的影响

Fig. 4 Effect of charge voltage on outcome characteristics of the plasma generator

2.4 管壁材料对发生器输出特性的影响

为研究不同毛细管管壁材料对发生器输出特性的影响,毛细管内孔直径为 3 mm,毛细管长度为 60 mm,发生器喷口与压力传感器感知端面距离为 25 mm,高功率脉冲电源充放电电压约 5 kV。在上述条件不变的情况下,分别研究毛细管材料为 PE 和

聚四氟乙烯 (PTFE) 两种情况下的输出特性,从而反映出毛细管管壁材料对等离子体发生器输出的影响规律,如表 1 所示。

表 1 毛细管材料对等离子体发生器输出特性的影响

Tab. 1 Effect of capillary aperture material on outcome characteristics of the plasma generator

材料	U_m / kV	I_m / kA	p_m / MPa	烧蚀质量/ g	烧蚀产物/ mol
PE	1.70	12.49	5.3	0.06	12.85
PTFE	1.71	12.50	4.8	0.19	11.40

从表 1 中可见不同材料的放电电压峰值、放电电流峰值差异较小,PE 材料压强峰值略大于 PTFE 材料压强峰值,但两者的压强曲线的第一个脉冲基本一致,只是在第一个压强脉冲后存在一定差异。虽然两种材料的烧蚀质量存在较大差异,但造成这种现象主要原因在于 PTFE 的平均相对分子质量大于 PE,从烧蚀产物的物质的量可见,两种材料产生烧蚀产物的物质的量基本一致(需要指出此处提到的物质的量是假定烧蚀产物完全分解,并根据产物的平均相对分子质量计算获得,并不是分子的物质的量),由此可推知 PE 与 PTFE 管材情况下等离子体发生器的输出特性影响基本一致。

3 等离子体发生器结构优选及验证

3.1 等离子体发生器结构的优选

根据等离子发生器内部结构的特点,通过在低压环境下从毛细管孔径、放电通道长度、充电电压和毛细管管壁材料 4 个方面对等离子体发生器输出特性的研究,并结合日常试验对等离子体发生器结构性能参数进行优选:毛细管孔径选用 3 mm,有利于提高压强峰值和发生器效率,可有效促进等离子体高速向前喷射;在等离子体点火过程中,等离子体发生器内部会发生高压放电现象,若放电通道过长会使得电极杆与电极套熔焊在一起,导致电极杆不能从电极套中取出,使得电极套无法再使用,为了防止电极杆与电极套焊在一起,同时也为了提高压强和等离子体发生器效率,选用 25 mm 放电通道;毛细管管壁材料选用 PE,与 PTFE 材料相比,PE 毛细管在消融过程中产生的有害物质相对较少。

3.2 30 mm 火炮验证试验与分析

以 30 mm 高压滑膛炮为弹道试验平台,炮闩处安装经过结构优选后的底喷式等离子体发生器,使用等离子体点火和常规点火(点火能量为 2.01 kJ)两种点火方式点燃发射药,实现发射药在膛内点火

燃烧,可有效验证优选后的底喷式等离子体发生器在火炮中的应用效果。图 5 为膛压曲线和等离子体发生器输出电压、电流曲线,其中等离子体 1[#] 为 6.26 kV 的充电电压,等离子体点火输出能量为 4.83 kJ;等离子体 2[#] 为 7.67 kV 的充电电压,等离子体点火输出能量为 7.34 kJ。常规点火对应膛压 p ;等离子体 1[#] 对应膛压 p_1 、电压 U_1 、电流 I_1 ;等离子体 2[#] 对应膛压 p_2 、电压 U_2 、电流 I_2 。

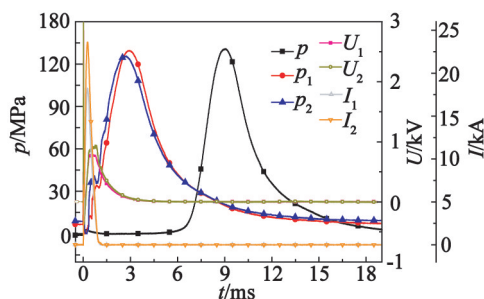


图 5 膛压曲线和等离子体发生器的输出电压、电流曲线

Fig. 5 p - t curves and U - t , I - t curves of the plasma generator

从图 5 中可以看出,等离子体发生器输出电压、电流曲线受脉冲功率源电容器中充电电压的影响:充电电压越大,发生器输出电压、电流越大,输出能量也就越大,放电时间也会有所延长。但等离子体发生器输出电压、电流参数曲线变化规律一致,曲线的差异性主要与充电电压有关。受等离子体点火的影响,等离子体点火膛压曲线在起始阶段压力迅速上升,随着放电电压降低和等离子体喷射减弱,膛压曲线出现拐点,充电电压越大,压力拐点峰值也越大,到等离子体点火后期,等离子体点火对膛压的作用基本消失,膛压曲线按照发射药的正常燃烧方式变化,等离子体点火相比于常规点火,能够有效缩短点火延迟时间。

电压曲线顶部呈现一个平台,说明等离子体发生器无漏气现象发生;输出电压、电流曲线无异常,说明输出性能稳定,该结构的底喷式等离子体发生器能够有效点燃发射药,同时也充分体现了等离子体点火具有缩短点火延迟的优势。

4 结 论

1) 随着选用的毛细管孔径的增加,放电时长与电流峰值均增加,而发生器效率、电压峰值与压强峰值却下降。

2) 随着放电通道长度的增加,放电时间与电流峰值递减,而电压峰值、压强峰值与发生器效率却增加;充电电压的增加并没有使发生器效率明显改变,但可以提高等离子体射流动能和压强峰值。

3) PE 和 PTFE 两种材质的毛细管放电参数差异较小,压强曲线主脉冲基本一致,毛细管烧蚀产物质的量基本一致,该两种材质对发生器输出特性影响基本一致。

4) 经优选结构参数的底喷式等离子体发生器能够有效地点燃发射药。

参 考 文 献

- [1] 肖正刚,应三九,周伟良,等. 低敏感高能发射药等离子体点火研究动态[J]. 含能材料,2008,16(5):633-638.
Xiao Zhenggang, Ying Sanjiu, Zhou Weiliang, et al. Progress in plasma ignition of insensitive high energy propellants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(5):633-638.
- [2] Kim K, Kwak H S, Park J Y. Transient shock formation of pulsed electrothermal plasma discharge confined in an extended bore[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2010,5(1):75-86.
- [3] Alimi R, Berdichevsky V. Mechanism of solid propellant combustion submitted to a high plasma flux[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2008,33(2):118-121.
- [4] Keidar M, Boyd I D. Ablation study in the capillary discharge of an electrothermal gun[J]. Journal of Applied Physics, 2006,99(5):053301.
- [5] Murphy A B. Transport coefficients of hydrogen and argon-hydrogen plasmas[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2000,20(3):279-297.
- [6] 张洪海,张明安,龚海刚,等. 结构参数变化对等离子体发生器性能的影响[J]. 火炮发射与控制学报,2004(3):1-4.
Zhang Honghai, Zhang Ming'an, Gong Haigang, et al. Influence of structure parameter variation on performance of plasma generator[J]. Gun Launch & Control Journal, 2004(3):1-4.
- [7] Porwitzky A J, Keidar M, Boyd I D. Numerical parametric study of the capillary plasma source for electrothermal-chemical guns[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009,45(1):574-577.
- [8] Beyer R A, Brant A L. Plasma ignition in a 30-mm cannon[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007,43(1):294-298.
- [9] 张玉成,李瑞,蒋树君,等. 底喷式等离子体发生器射流的输出特性[J]. 火炸药学报,2010,33(1):67-70.
Zhang Yucheng, Li Rui, Jiang Shujun, et al. Plasma jet characteristics of bottom jet plasma generator[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2010,33(1):67-70.
- [10] 刘强,张玉成,张江波,等. 等离子体点火对高能硝胺发

(下转第 18 页)

- Chemical Society, Perkin Trans II, 1991, 5: 645-650.
- [10] 葛忠学, 李高明, 洪峰, 等. 绿色硝化技术合成 HMX 的小试工艺研究[J]. 火炸药学报, 2002, 25(1): 45-47.
- Ge Zhongxue, Li Gaoming, Hong Feng, et al. Study on the lab. synthesis of HMX using dinitrogen pentoxide as the nitrating agent[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, 25(1): 45-47.
- [11] 甄忠启, 钱华, 刘大斌, 等. N_2O_5/HNO_3 硝化甲苯制备二硝基甲苯[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 350-352.
- Zhen Zhongqi, Qian Hua, Liu Dabin, et al. Preparation of dinitrotoluene by nitration of toluene with N_2O_5/HNO_3 [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(3): 350-352.
- [12] 吕春绪. N_2O_5 绿色硝化研究及其新进展[J]. 含能材料, 2010, 18(6): 611-617.
- Lü Chunxu. Clean nitrating agent dinitrogen pentoxide and its application in nitration[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(6): 611-617.
- [13] 何泽人. 无机制备化学手册[M]. 上册. 北京: 燃料化学工业出版社, 1972: 296.
- He Zeren. Handbook of inorganic chemistry [M]. 1st Volume. Beijing: Fuel Chemistry Industry Press, 1972: 296.
- [14] 胡小玲, 钱华. N_2O_5/HNO_3 硝解 TAIW 合成 CL-20 [C]//火炸药技术学术研讨会. 青岛, 2014: 340-344.
- Hu Xiaoling, Qian Hua. Nitrolysis of TAIW with N_2O_5/HNO_3 to synthesize HNIW [C]//Technology symposium on explosives. Qingdao, 2014: 340-344.
- [15] 徐金江. CL-20 重结晶过程中的晶型转变研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2012.

Synthesis of ϵ -HNIW by One-pot Nitrolysis of TAIW with N_2O_5/HNO_3

DING Weixing^①, HU Xiaoling^②, DONG Bo^②, WU Qiuji^{②③}, QIAN Hua^{②③}

①Wujin Open University (Jiangsu Changzhou, 213000)

②School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

③National Supervision and Inspection Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] ϵ -HNIW was synthesized by one-pot nitrolysis of 2, 6, 8, 12-tetraacetyl-2, 4, 6, 8, 10, 12-hexaazatetramethyl-5, 5, 0, 0^{3,11}, 0^{5,9}] dodecane (TAIW) with N_2O_5/HNO_3 as the nitrating agent, which overcame the drawbacks of mix acid-nitrolysis and two step-crystal transformation. Structure and crystal form of ϵ -HNIW were characterized by NMR, MS and XRD. Yield of ϵ -HNIW is 82.72%, and its purity is 98.24%. By the use of new nitrating agent, the reaction eliminated the use of concentrated sulfuric acid and was eco-friendly. Moreover, ϵ -HNIW was directly transformed in the solution. The simplified process route shows good prospect in industry.

[KEY WORDS] N_2O_5/HNO_3 , ϵ -HNIW, green synthesis, TAIW, CL-20

(上接第 14 页)

射药点火性能影响研究[J]. 火工品, 2014(4): 28-32.

Liu Qiang, Zhang Yucheng, Zhang Jiangbo, et al. The

influence of plasma ignition on the ignition performance of high-energy nitramine gun propellant[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2014(4): 28-32.

Output Characteristics of the Bottom-jet Plasma Generator

LIU Qiang, ZHANG Yucheng, ZHANG Jiangbo, CHEN Yibin, LIU Yi, ZHOU Jing

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

[ABSTRACT] Plasma ignition is a new ignition of gun propellant combustion, and performances of plasma generator have significant effect on the output of plasma. In order to achieve efficient plasma ignition of gun propellant, the output characteristics of bottom-jet plasma generator were studied. The key internal structure of the plasma generator was adjusted to analyze the effect of these parameters on the outcome characteristics of plasma generator. The parameters were also optimized and validation experimentation was performed in a 30 mm cannon. The results show that the efficiency and the output voltage of plasma generator and the plasma jet pressure will decline when the aperture of capillary increases, but they will increase when the channel's length increases. The plasma jet kinetic energy and pressure peak value will increase when the input voltage of pulse power supply increases. The difference between the effect of polythene (PE) and polytetrafluoroethene (PTFE) on the outcome characteristics of bottom-jet plasma generator is indistinctive. Optimized bottom-jet plasma generator has a favorable effect on gun propellant in the 30 mm cannon.

[KEY WORDS] plasma ignition; gun propellant; bottom-jet plasma generator; plasma jet