

固体推进剂等离子体点火研究^{*}

谢玉树¹, 张小兵², 袁亚雄², 周跃³

(1. 南京理工大学力学系, 江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学动力学院, 江苏 南京 210094;
3. 无锡纺织机械专件厂, 江苏 无锡 214062)

摘要: 为了研究等离子体对固体推进剂点火性能的影响, 分别对双基药和硝胺药等两种固体推进剂, 进行了等离子体点火实验。实验装置包括等离子体源、热电偶丝和动态信号分析仪。通过实验, 获得了两种固体推进剂在不同的等离子体能量输入的条件下, 其表面温度随时间变化的曲线。与常规点火数据相比, 固体推进剂的等离子体点火延迟时间明显缩短。不同类型的固体推进剂, 在相同的等离子体能量输入条件下, 其点火性能不同; 同一种类型的固体推进剂, 在不同的等离子体能量输入条件下, 其点火性能也不一样。

关键词: 固体推进剂; 等离子体; 点火; 实验; 点火延迟

中图分类号: V435; TJ012 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2003) 03-0275-03

Experimental studies for plasmas ignition of solid propellants

XIE Yu-shu¹, ZHANG Xiao-bing², YUAN Ya-xiong², ZHOU Yue³

(1. Dept. of Mechanics, Nanjing Univ. of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. School of Power Engineering, Nanjing Univ. of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
3. Wuxi Special Parts of Textile Machinery Plant, Wuxi 214062, China)

Abstract: Two types of solid propellants including double-base and nitramine propellants were used to determine the ignition delays under the conditions of plasma ignition contrast to conventional ignition. The experimental facility consisted of a plasma source that injected plasmas to the surface of the solid propellants. The surface temperature of the solid propellants was measured with thermocouples. The results show that the length of ignition delay for solid propellants is apparently short with hot and high-speed plasmas. There is a different ignition delay for two types of solid propellants with the similar plasma energy input, and a different ignition delay for the same solid propellant with the different plasma input.

Key words: Solid propellant; Plasma; Ignition; Ignition delay

1 引言

电热化学发射技术使用的等离子体是弱电离的、多成分的、和其它物质有强烈作用的低密度等离子体^[1], 推进剂的等离子体点火过程是包含物理、化学变化的综合作用过程, 除了要对点火过程进行理论分析外, 还必须就各种具体推进剂的型号作点火实验, 以总结和研究推进剂的等离子体点火燃烧特性。目前国内相关的实验报道很少, 国外有关的实验主要集中在^[2]: 等离子体点火与常规点火方法的比较; 发射

药在等离子体作用下燃速的增大与燃烧的控制; 等离子体作用下发射药不同配方的影响等。国外的点火实验显示^[3], 等离子体点火与常规火炮的点火差别主要在于点火延迟的长短以及发射药对初温的敏感性不同。

等离子体点火较常规点火有明显的优越性, 但对具体的作用机理还没有统一定论。本文用等离子体发生器提供的等离子体焰流, 喷射在两种典型的固体推进剂(双基药和硝胺药)颗粒上, 在不同的等离子体能量输入条件下, 分别作了点火实验, 希望能进一步

* 收稿日期: 2002-05-13; 修订日期: 2002-09-25。基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59976014) 和弹道国防重点实验室基金资助项目 (99 JS 33.1.1 BQ.0201)。

作者简介: 谢玉树 (1961—), 女, 硕士, 副教授, 研究领域为工程力学。

探讨等离子体影响固体推进剂点火的作用机理。

2 实验装置与原理

本实验由以下部分组成: 等离子体源, 由等离子体发生器提供高温、高速等离子体焰流; 待测部分, 由火药颗粒和隔热陶瓷管组成; 测试部分, 由热电偶丝和动态信号分析仪组成。

等离子体源由等离子体发生器提供, 由高频振荡电弧发生器产生电弧, 电弧放电产生的电弧等离子体促使工作气体电离, 从而形成等离子体焰流。本实验采用的工作气体是氩气和少量的氢气。加入氢气的目的是增加等离子体的热焓值。当工作气体在电弧放电中被加热时, 温度升高, 体积急剧膨胀, 产生很大压力, 迫使等离子体以极大速度和极高温度从喷嘴喷出。因此而产生的等离子体焰流具有速度大、温度高、稳定性好的特点。例如, 氩气(Ar)高温时体积膨胀了 34.8 倍, 其速度一般可达每秒几百米, 喷嘴处的温度可达 20000K。这种等离子体焰流提供了本实验所需的稳定的等离子体源。

等离子体发生器由电源、喷枪、循环水冷却系统、控制系统等组成。为了提高等离子体射流速度, 喷枪的工作内腔采用文杜里管结构。控制装置是等离子体发生器的各种操作、控制及保护设备, 其对主气、次气和电弧、电流能实现程序控制。待测部分由火药柱放在隔热的陶瓷管内组成, 这样使等离子体产生的热量全部传递给火药药柱。

测试部分由热电偶丝和动态信号分析仪组成。热电偶丝埋设在火药内部, 其表面温度通过热电偶在动态信号分析仪中显示出来。采用的 NiCr-NiSi 热电偶, 其频响为几个毫秒。本实验点火延迟时间一般在 300ms 以上, 故用该电偶能满足实验要求。

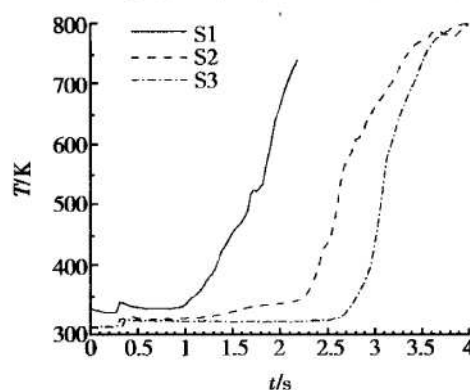
3 实验结果与分析

本实验分别对双基火药和硝胺火药作了热等离子体点火下的点火实验。实验中通过调节电源的电流、电压来改变等离子体的能量; 调节氩气、氢气的流量以改变等离子体的流量和热焓值。实验中, 火药柱与等离子焰流的距离不变, 为 30mm。

图 1~5 为部分实验数据曲线图, 点火以曲线上的第一个小波开始。点火延迟时间均为曲线上第一个小波出现的时刻与曲线拐点的时刻之差。

图 1 为双基火药分别在不同的电能输入和不同的等离子体流量、热焓值条件下, 火药柱表面温度随

时间变化的曲线。从中可见, 对于曲线 S1, 电能输入高, Ar 气流量大, H₂ 气含量高, 则曲线形状陡, 点火延迟时间短; 而另两条曲线, 在电能输入相差不多的条件下, 增加 Ar 和 H₂ 含量, 点火延迟时间也会缩短。



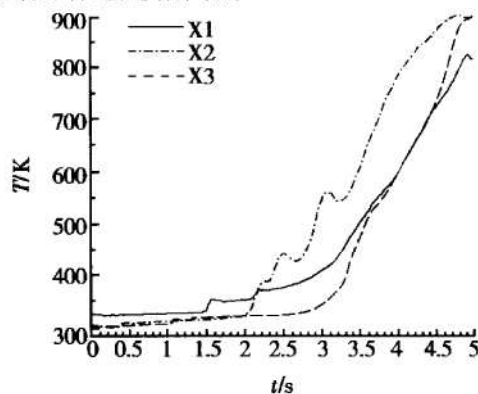
S1: $U = 66V$, $I = 535A$, $H_2 = 3.3$, $Ar = 7.5$, ignition delay $t = 0.7s$

S2: $U = 57.5V$, $I = 500A$, $H_2 = 1.4$, $Ar = 6.4$, ignition delay $t = 2.0s$

S3: $U = 54V$, $I = 465A$, $H_2 = 0.8$, $Ar = 6.0$, ignition delay $t = 2.3s$

Fig. 1 Temperature vs time for double base propellants, ignited with different plasma input

图 2 为硝胺火药分别在不同的电能输入和不同的等离子体流量、热焓值条件下, 火药柱表面温度随时间变化的曲线。从曲线中可以看出, 硝胺药与双基火药的试验结论是相同的。



X1: $U = 59V$, $I = 510A$, $H_2 = 1.8$, $Ar = 7.3$, ignition delay $t = 0.6s$

X2: $U = 56V$, $I = 465A$, $H_2 = 0.8$, $Ar = 6.0$, ignition delay $t = 1.75s$

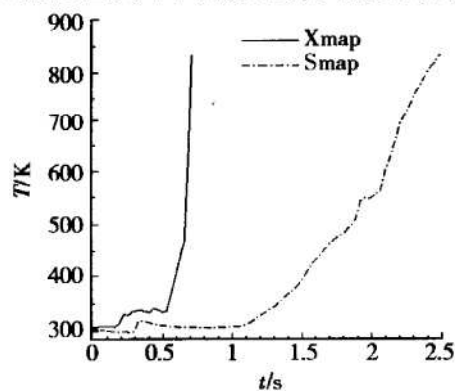
X3: $U = 55V$, $I = 470A$, $H_2 = 0.7$, $Ar = 5.9$, ignition delay $t = 2.0s$

Fig. 2 Temperature vs time for nitramine propellants, ignited with different plasma input

从图 1 和图 2 曲线均可以看出: 对上述两种不同类型的火药, 点火延迟时间都具有随输入的电功率和等离子体流量、热焓值的增加而减小的趋势。

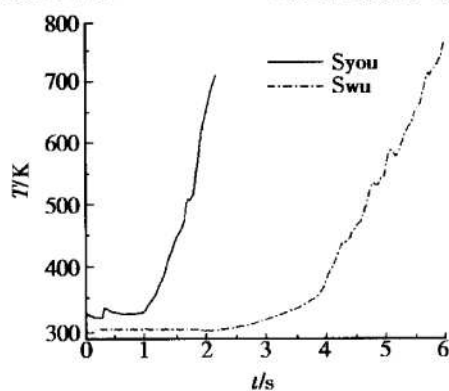
图 3 给出了相同条件下双基火药和硝胺火药的表面温度随时间变化的曲线, 尽管由于实验条件的限制, 所谓的相同条件略有不同, 但是从曲线中仍然可

以看出:当二者电能输入条件几乎相同时,尽管双基药的等离子体热焓值高于硝胺药,但是硝胺药的点火延迟时间仍然比双基药的点火延迟时间短,同时硝胺药的曲线形状也明显比双基药的曲线形状陡峭。这可能是因为不同的火药,其能量吸收系数不同。



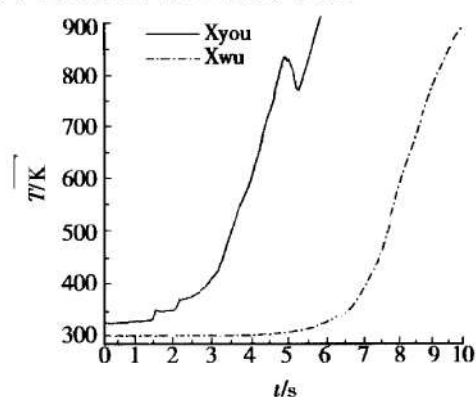
Nitramine propellant Xmap: $U = 60V$, $I = 500A$, $H_2 = 1.8$, $Ar = 7.5$, ignition delay: $t = 0.3s$
Double-based propellant Smap: $U = 66V$, $I = 535A$, $H_2 = 3.3$, $Ar = 7.5$, ignition delay: $t = 0.7s$

Fig. 3 Temperature vs time for double base propellant and nitramine propellant, ignited with the similar plasma input



Syou: $T-t$ curve for double-base propellant, ignited with plasmas
Swu: $T-t$ curve for double-base propellant, ignited no plasmas

Fig. 4 Temperature vs time for double base propellants, ignited with and no plasmas



Xyou: $T-t$ curve for nitramine propellant, ignited with plasmas
Xwu: $T-t$ curve for nitramine propellant, ignited no plasmas

Fig. 5 Temperature vs time for nitramine propellants, ignited with and no plasmas

本实验最重要的问题就是测量的误差。在热等离子体条件下的测量会有许多特殊的问题:首先,等离子体的亮度会引起强烈的辐射,从Ar的连续辐射图谱^[4]可以看出,当温度从6000K上升到14000K时,总连续辐射从 $10^3 W/m^2$ 变到差不多 $10^{10} W/m^2$,而辐射对温度的测量误差有很大的影响;其次,本实验产生的等离子体的温度有很陡的梯度,喷枪射流喷口处(轴线)的温度与其边缘处(半径2mm)的温度可以相差一倍或几倍,这就要求火药柱的体积必须足够小才能说明问题,当然这与实际不符;另外,本实验所用的等离子体,在其外围流动的冷却气体作用下,弧根会发生涨落,并引起类似能量耗散的涨落,因此,温度的测量也意味着为一段时间内的时间积分测量;再有,由于等离子体和测量仪器的电信号干扰,也会使测量结果产生误差;最后,固体推进剂本身的光学性质的不确定性,也会使测量结果产生误差。

4 结 论

等离子体可以明显缩短点火延迟时间,电能和等离子体能量输入越高,点火延迟时间越短;与常规点火相比,点火延迟时间可缩短最高达70%,这与国外报道的相关实验结果相符^[3];在电能和等离子体热流

量输入较高时,硝胺药和双基药的点火延迟时间相差不大,这说明高温、高速的等离子体焰流起到了加强对流和辐射传热的作用;减小电能和等离子体能量的输入,则硝胺药的点火延迟比双基药短,这说明不同类型的推进剂,由于其物理化学性质和燃烧过程不同,在等离子体点火条件下,对点火性能仍然有影响。

今后可用激光或远红外照相机来测量温度,前者可以有效地消除等离子体的特殊问题所带来的误差^[4],而后者可以有效地消除电信号的影响^[5]。

参考文献:

- [1] Bourham M A. Analysis of solid propellant combustion behavior under electrothermal plasma injection for ETC launchers[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1997, 33(1): 278~ 284.
- [2] 谢玉树,袁亚雄. 等离子体与发射药相互作用的研究[J]. *火炮发射与控制学报*, 2001, (1).
- [3] Wren G P. Ballistic analysis of electrothermal-chemical propellant[R]. ADA 320558, ARL-TR-1245, 1996.
- [4] Orlando Auciello 著. 等离子体诊断[M]. 郑少伯译. 北京: 电子出版社, 1994.
- [5] Anthony W W. Plasma propellant interactions studies[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37(1): 203~ 206.

(编辑: 梅 瑛)