

小口径电热化学超高速发射实验研究^{*}

刘东尧 周彦煌 余永刚

(南京理工大学弹道研究所, 南京, 210094)

摘 要: 在小口径发射装置上进行了以液体发射药为化学工质的电热化学发射实验研究, 采用不同的装药结构及装药量改进内弹道性能, 可使弹丸获得超高速。对电能释放与化学能释放过程的合理匹配表明, 等离子体能够增强液体药的燃烧并影响压力变化曲线。通过等离子体射流与液体药装填方式的控制, 如采用环状装药结构, 可以增进等离子体与发射药的相互作用, 提高内弹道性能。

主题词: 电热化学发射⁺, 超高速, 液体火箭推进剂, 等离子体, 内弹道性能

分类号: TJ012.1

EXPERIMENTAL STUDY OF SMALL CALIBER ELECTROTHERMAL CHEMICAL HYPER-VELOCITY LAUNCHING

Liu Dongyao Zhou Yanhuang Yu Yonggang

(Ballistics Research Lab., Nanjing Univ. of Science and Technology, Nanjing, 210094)

Abstract: Experimental study of electrothermal-chemical launching taking liquid propellant as chemical working media in small caliber launching apparatus was performed. In order to adjusting the interior ballistics performance different charge of propellant and mass were utilized. The projectile was accelerated to a hypervelocity of 2 677 m/s. The match between releasing of chemical energy and discharging power of electric energy was analyzed. It is indicated that the plasma could augmented the combustion effect of liquid propellant and affected the pressure curve. By the controlling of plasma jet and loading method of liquid propellant, such as ring-shaped loading of propellant, could enhanced the match of the interaction between plasma and propellant, increased the interior ballistics performance.

Subject terms: Electrothermal chemical launching⁺, Hypervelocity, Liquid rocket propellant, Plasma, Interior ballistic performance

1 引 言

电热化学发射是利用电能配合发射药化学能推进弹丸的新概念发射技术。电能的引入, 弥补了常规火炮发射药能量不足及能量释放过程难于控制的缺点, 实现了通过调节弹后空间的压力变化过程, 获得较好的压力平台来发射高速或超高速弹丸的目的。1992年 Gough P S 建立了一个电热化学炮的内弹道理论模型, 对以水为工质的电热化学发射内弹道过程进行模拟, 结

^{*} 收稿日期: 1998-12-14, 修回日期: 1999-02-19

果表明采用中空化学发射药装填结构以保持内弹道过程中未燃工质的相对静止,可以大幅度提高弹丸的初速^[1]。1997年作者曾以不同的化学工质及装填结构进行了发射实验,并初步选定发射药的种类^[2]。最近的实验着重于以液体发射药 OTTO-II 为工质,通过调装药量、装药结构以增强等离子体射流与发射药的合理作用过程来改善内弹道性能、提高弹丸初速。

2 实验装置

实验所用的发射装置示意图见图1。储能电容器组由初始电源电压经升压、整流后充电至所需的电压,通过放电开关连接到放电毛细管两端的电极,容量为 $137.5\ \mu\text{F}$ 。放电毛细管为内径4 mm,长42 mm 的聚乙烯管,放电管的阳极连接放回电路的高压端并保持密封,阴极连接放电回路低压端并通向储液室。阴极为内径4 mm 的喷嘴,并由一定厚度的紫铜膜片预密封。两电极间通过宽2 mm,厚0.1 mm 的铝箔连通,作为放电回路的初始负载。放电管外是内径14 mm,容积为3.54 ml 的储液室,用以装填发射药。储液室另一端连接内径5.45 mm 全长760 mm 的身管。实验中将发射药以环状中空形式沿轴向装填,以能使由放电管中流出的轻质等离子体射流顺利穿过储液室作用于弹底,后续的发发射药燃烧产生的大分子量气体作用于膛底,从而改善膛内压力分布形式。

射击开始时放电开关闭合,脉冲电源将电压加在毛细管两端,在铝箔导线中产生脉冲电流欧姆加热铝箔导线使其汽化、电离生成金属等离子体。这部分具有极高温度的金属等离子体辐射加热毛细管壁面,使聚乙烯材料裂解、电离产生更多的等离子体。毛细管内等离子体达到破膜压力后,冲破膜片以射流形式进入储液室,一方面穿过空腔作用于弹底推进弹丸,另一方面在空心装药的内表面与液体药发生质量、动量和能量输运过程。在等离子体的加热作用下液体药达到点火温度后开始燃烧,生成气体并释放化学能。弹丸在等离子体和发射药燃气压力作用下沿身管运动。

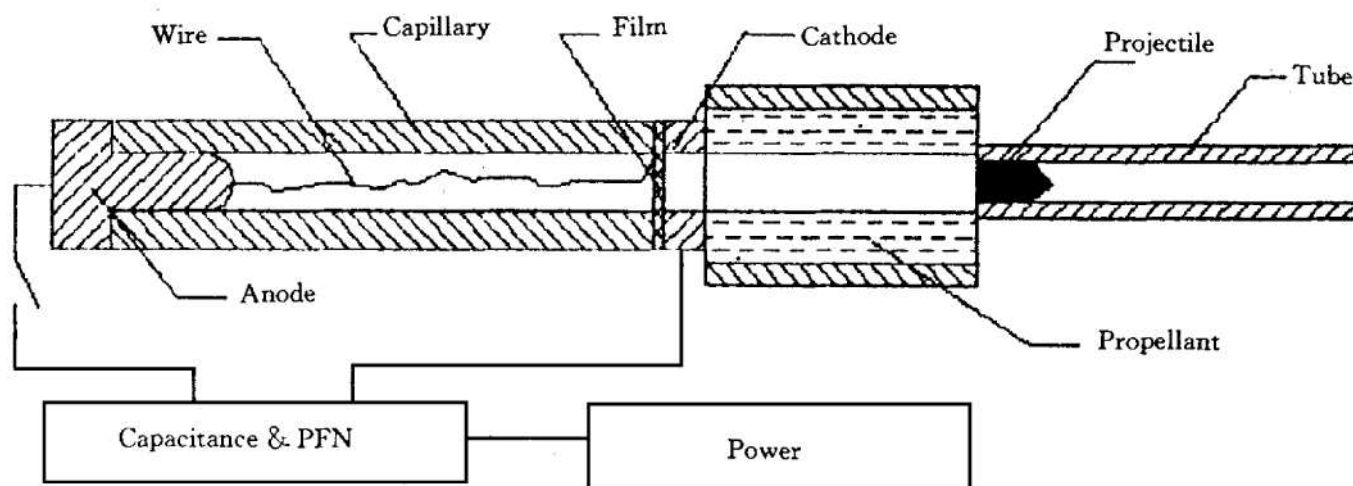


Fig. 1 Schematic of launching apparatus

实验中采用分压电容器组测量放电毛细管上的电压、罗果夫斯基线圈测量放电电流,利用这些数据确定电能释放功率。储液室的压力由石英压力传感器测量系统测量并记录。弹丸的初速由连续的分段区截装置测量,并将测量结果进行线性拟合得到弹丸的枪口速度。

3 实验研究结果

以液体发射药 OTTO-II 为化学储能工质, 将电容储能器的电容电压保持为13 kV 以固定电能总量, 选用0.45 g 的铝合金弹丸进行发射实验, 表1为发射实验的部分数据。表中系统效率是指弹丸动能与发射药化学能和电源总储能之和的比值, 弹道效率是指弹丸动能与发射药化学能和电源总储能转换成等离子体热能之和的比值。等离子体接收的电能由实验测得的毛细管内等离子体上电压、电流值计算。

Table 1 Results of electrothermal chemical launching

No.	OTTO-II / ml	Charge shape	Film depth / mm	Projectile velocity / (m/s)	System effectiveness / %	Ballistic effectiveness / %	Remark
1	1.5	Ring	0.1	2378	7.2	9.6	*
2	1.5	Ring	0.05	2370	7.1	9.6	* *
3	1.5	Ring	0.05	2316	6.8	9.2	* *
4	1.5	Ring	0.05	2321	6.8	9.2	*
5	1.5	Ring	0.05	2677	9.1	12.2	
6	1.5	Ring	0.05	2570	8.4	11.2	
7	1.5	Ring	0.05	2577	8.4	11.3	
8	1.5	Ring	0.1	2402	8.3	11.6	
9	2.0	Free	0.1	2076	4.9	6.4	* *
10	2.0	Free	0.1	2058	4.8	6.2	*

* - Current leakage * * - Pressure leakage

由表中数据可见, 以1.5 ml 装药量进行的发射实验 (No. 1~No. 7) 结果可以看出, 等离子体破膜压力的变化 (1 MPa~2 MPa) 对发射性能的影响并不明显, 而实验装置的绝缘、密封效果的好坏对弹丸速度有较大的影响。破膜初期流出的少量等离子体仅对液体药的初期预加热、点燃过程起作用, 并不足以控制液体药的燃烧, 而后续的等离子体主流对液体药的燃烧起主要作用。第5~7发实验在加强了发射装置的绝缘、密封后获得较高的弹丸初速。对实验的弹道效率及系统效率的分析可见, 电热化学发射内弹道过程由于受到电能转化效率的影响, 使得系统效率低于弹道效率。这是由于电能向等离子体热能的转化过程中部分能量消耗在放电回路中杂散电阻上。第8发实验采用较少的装药, 虽然提高了弹道效率然而受到发射总能量的限制, 不利于进一步提高弹丸的初速。作为对比, 第9, 10两发实验采用液体发射药自由装填方式, 虽然增加了装药量, 但是弹丸初速及弹道效率都降低了, 这可能和发射装置的击穿与泄露有关, 作者认为这是由于该种装药方式使液体药随着弹丸在膛内运动而增大了次要功系数。总之, 电热化学发射要求设计良好的放电回路、毛细管结构、发射药装填结构以及可靠的发射装置, 使电能尽可能有效地转化成等离子体热能, 并增强发射药的燃烧及化学能的释

放。

图2给出了实验7电能转化成等离子体热能的功率-时间曲线,它是根据测得的毛细管内等离子体上的电压、电流乘积得出。由图可见电能的释放基本上是一个脉冲过程,在放电开始后0.02 ms内上升到第一个峰值,受到等离子体流出的泄压影响略作波动后在0.07 ms时达到最大值,在这之后迅速下降到最小值,放电过程在0.1 ms内释放了95%以上的电能。图3给出了实验测得的相应的膛内压力-时间曲线,由图中压力变化过程可见,膛内压力从放电开始后0.06 ms内有一个小的脉冲,这可理解为等离子体破膜后在燃烧室产生的压力,而0.06 ms以后的压力迅速上升并在0.1 ms处达到最大值,这可理解为后续的等离子体点燃和增强液体药的燃烧所至。随着弹丸的运动及电能输入的减弱,压力开始下降,在0.3 ms和0.4 ms之间出现的小突起由后期的放电电流引起,弹丸在0.45 ms左右出枪口。将图2和图3进行对比,可以看出电能释放功率达到最大值时膛内压力处于上升过程之中,因此膛内后续压力的维持主要由液体药的燃烧贡献产生,等离子体起到增强燃烧的作用,提高了液体药的燃烧速度。从压力曲线上看,若在压力下降时继续增强电能的输入,则可以获得更好的发射效果。

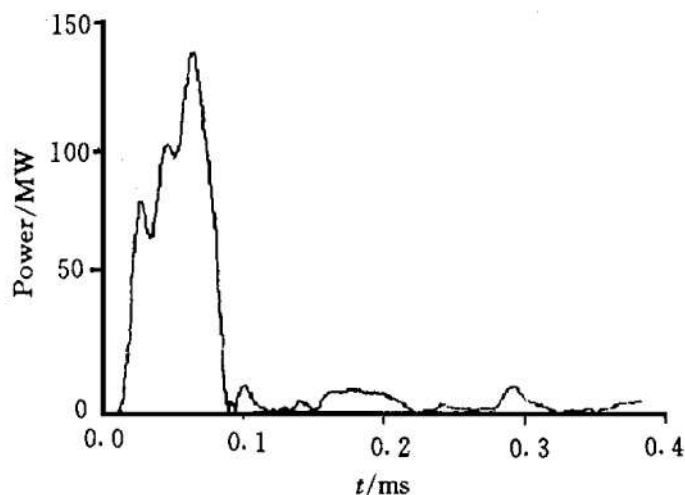


Fig. 2 Discharge power-time curve

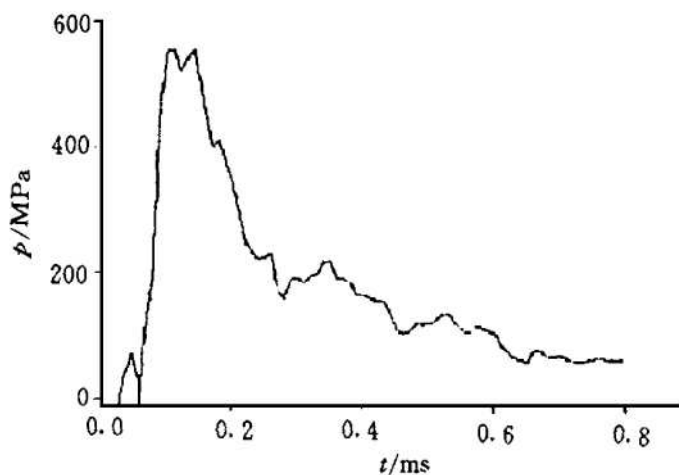


Fig. 3 Pressure-time curve

4 总 结

- (1) 脉冲放电产生的高温等离子体可以促进液体发射药的燃烧。
- (2) 采用适当的发射药装填结构可以增进等离子体与发射药的相互作用。
- (3) 电能的输入与发射药化学能的良好匹配对提高弹道性能非常重要。

电热化学发射技术的研究涉及到的范围相当广泛,目前我们对等离子体的生成过程及其流动特性,电热化学发射膛内等离子体射流与发射药的相互作用机理的研究工作做得还很不充分,有待进一步深入。

参 考 文 献

- 1 Gough P S. Theoretical modeling of the interior ballistics of the electrothermal gun. AD-A268583, 1993.
- 2 刘东尧,周彦煌,余永刚.液体工质电热化学发射实验研究.爆炸与冲击,1998,8(3):220~225