

液体工质电热化学发射实验研究

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 介绍了小口径电热发射装置采用液体(含能或不含能)工质的电热发射实验结果及对结果的分析。对工质的种类、质量和装填方式,等离子体的破膜压力,电能与化学能匹配关系,弹重等参量进行了初步优化。结果表明,采用不含能工质可将0.5g弹丸加速到1783m/s,采用含能工质可将0.5g弹丸加速到2160m/s,0.3g弹丸加速到2200m/s以上。测得的压力曲线表明,在电能与化学能释放速率互补的条件下,可以得到明显的压力平台效应。

关键词 电热发射 液体工质 等离子体

中图法分类号 T J012.1⁽²⁰⁾

电热化学发射是利用外部电源和内装工质提供发射能量的新概念发射技术。根据装填工质的物态不同可分为电热轻气发射、电热液体发射和电热固体发射,三种发射方式各有优缺点。我们曾对固体发射药电热发射及电源进行过探索^[1-3]。本文中我们利用同样的小口径电热发射装置,对液体工质电热发射进行了实验研究,并对实验研究的结果进行分析和讨论。

1 试验装置

发射装置由身管、药室和等离子体发生器3部分组成,如图1所示。身管为滑膛结构,其内径为5.5mm。药室的两端面可以加入密封膜片,使注入药室内的气体或液体工质不致泄漏。设计

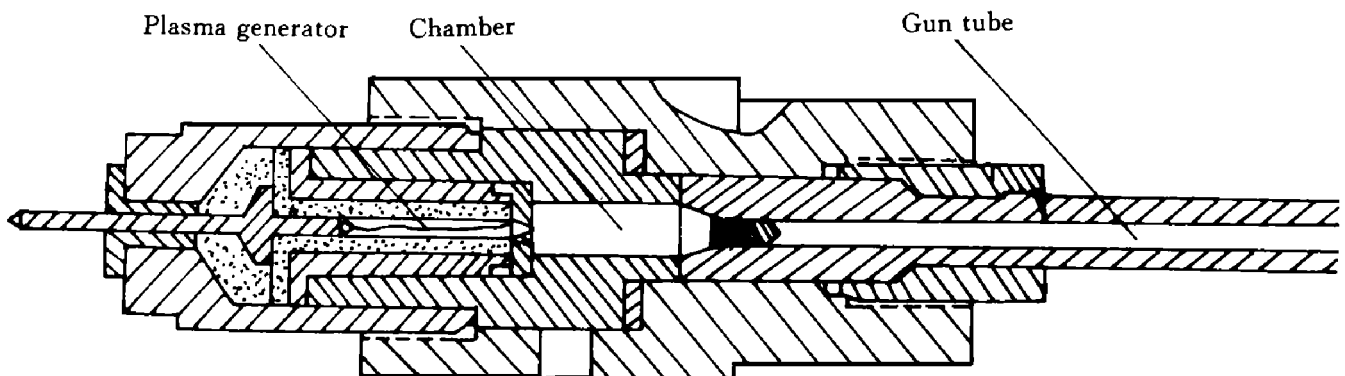


图1 发射装置示意图

Fig. 1 Schematic of the launcher

⁽²⁰⁾ 刘东尧:男,1969年9月生,硕士,助教
1996-07-02收到原稿,1997-10-05收到修改稿。

的药室最大压力为 40 MPa。等离子发生器是发射装置的核心部件,它的主要作用是把脉冲功率源贮存的电能以电弧放电的形式转化为等离子体热能,毛细管内的高温等离子体达到一定压力时,打开喷孔处膜片进入药室。装置的电源在文献 [2] 中已作过介绍。

2 试验结果与分析

2.1 采用吸热工质

虽然纯粹利用等离子体膨胀做功也可以达到加速弹丸的目的,且效率更高,但是具有 $10^5 \sim 5 \times 10^5 \text{ K}$ 的等离子体直接膨胀做功,将对药室、身管内壁造成严重的烧蚀。采用水作为工质,由高温等离子体将其加热、汽化并与等离子体射流一起膨胀推动弹丸运动^[4],可降低对发射装置的烧蚀。水具有良好的汽化特性,分子量适中,安全性较好,所以大多数的电热发射实验,都以水作为工质来初步检验电热发射效果^[5]。

表 1 工质为水时电热发射实验结果

Table 1 The electrothermal launching results for water as working media

序号	弹重 /g	H ₂ O 质量 /g	装填方式	膜片厚度 /mm	最大膛压 /MPa	弹丸速度 /(m/s)	弹道效率 /(%)
1	0.5	0.15	环形	0.10	121	1675	6.0
2	0.5	0.15	环形	0.15	142	1600	5.5
3	0.5	0.3	环形	0.10	127	1741	6.5
4	0.5	0.5	环形	0.10	130	1783	6.8
5	0.5	1.0	环形	0.10	147	1610	5.6
6	0.5	1.2	环形	0.10	152	1462	4.6
7	1.5	1.2	环形	0.10	148	1170	8.2
8	1.5	1.2	整装	0.10	152	1154	8.0

表 1 列出了工质为水时电热发射的实验结果。实验采用的 1.5g 和 0.5g 两种弹丸结构相同,材料分别为黄铜和铝合金。环形装填方式指的是,工质分布在药室周边,中间留有圆形孔道。而整装装填方式指的是,工质自由沉积在药室之中,不满时液体自动沉积在下部。装填方式直接影响到工作流体和等离子体射流的相互作用过程。最大膛压是药室部位的燃气压力的测量值(滤波后的最大值),典型的压力曲线见图 2。弹道效率是弹丸枪口动能与脉冲电源总贮能之比。

表 1 中 No. 1 与 No. 2 的目的是对比破膜压力对内弹道性能的影响。膜厚增大时最大膛压

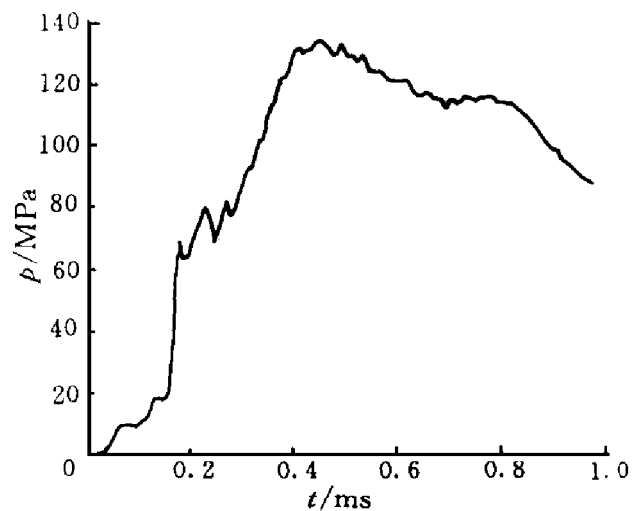


图 2 典型的膛内压力曲线

Fig. 2 Typical pressure-time curve of the chamber

增高,但弹丸枪口速度却略有下降。可见在一定的发射条件下,存在着一个最佳的等离子体破膜压力。这是因为破膜压力直接影响到等离子体射流的状态与特性,引起等离子体和工质相互作用过程的差异,从而影响整个内弹道性能。No. 3~6是逐步增加工质的质量得到的内弹道结果。当工质水质量在0.1~0.5g之间增加时,弹道效率逐步提高,在0.5~1.2g之间进一步增加时,弹丸枪口速度有下降趋势。理论上,水是一种吸热工质,在其加热汽化过程中将吸收部分等离子体能量。工质水的质量增加时,一方面由于自身运动功的增加,使次要功系数增大,另一方面汽化过程要消耗更多的电能,使有效做功能量减少,两种因素都会导致弹道效率下降。优化的结果表明,在一定的发射条件下,以吸热材料作为工质时存在着一个最佳的质量。No. 7~8是为了对比工质的装填方式对发射过程的影响。从这两发数据来看,似乎环形装填比整装效果好,不仅膛压低些,而且初速还有所提高。对于整装式装填,等离子体射流和流体工质在相互作用过程中,将首先在流体工质中逐步发展生成一个泰勒空腔,同时也推动流体运动,工作流体不能及时充分地等离子体射流混合,因此可能导致局部压力过大。而对于环形装填,等离子体射流穿过工质中心时,不存在泰勒空腔的发展过程,等离子体射流由径向将热能传递给环形内壁面上的流体,能够充分、及时地和工质混合。

采用水为工质的电热发射,工质的质量和装填方式有一个优化问题。随着试验条件如工质性质的改变,电能和工质的合理匹配关系,也将相应地变化。

2.2 采用含能工质

采用液体含能材料作为工质的电热化学发射,液体发射药燃烧生成的热能和由脉冲功率源电弧放电释放的等离子体的热能共同推动弹丸运动^[5]。等离子体射流由发生器喷口进入燃烧室后,完成两方面的功能,一方面作为一种工质推动弹丸做功,另一方面引燃燃烧室中的化学含能材料。这期间,等离子体和流体工质及其燃气之间有一个相互作用过程。在我们的试验中,采用的液体含能材料为 OTTO-II 和 LP1846。表 2 列出了 8 发相应的试验结果。

表 2 工质为液体发射药时电热发射结果

Table 2 The electrothermal launching results for liquid propellant as working media

序号	弹重 /g	身管长 /m	火药种类	火药量 /ml	装填方式	膜片厚度 /mm	最大膛压 /MPa	弹丸速度 /(m/s)	弹道效率 /(%)
1	0.5	0.78	OTTO-II	1.0	整装		193	1737	4.9
2	0.5	0.78	OTTO-II	1.0	整装	0.05	213	1831	5.4
3	0.5	0.78	OTTO-II	1.0	环形	0.05	223	1924	6.0
4	0.5	0.78	OTTO-II	1.0	环形	0.10	278	1948	6.2
5	0.5	1.24	OTTO-II	2.0	环形	0.10	272	2160	6.0
6	0.3	1.24	OTTO-II	2.0	环形	0.15	295	2200	3.8
7	0.5	1.24	LP1846	2.0	环形	0.10	302	2115	4.7
8	1.5	1.24	OTTO-II	0.5	环形	0.10	271	1273	9.0

表 2 中 No. 1~4 装药质量相同,而发生器前端破膜压力及火药装填方式不同。1.0ml 的 OTTO-II 液体火药的能量约为 3.78kJ,电容器贮能约为 11.62kJ,液体火药能量占全部发射能量的 24.5%。破膜压力越高,等离子体射流的温度和压力就越高,越容易点燃液体药,有利于提

高膛内压力和弹道效率。实验结果恰好说明了这一点。整装条件下,破膜后的等离子体射流作用于液体装药的底部形成泰勒空腔,空腔内为等离子体或已燃气体,气液界面由亥姆赫兹不稳定性效应所控制。当压力达到一定程度,弹丸开始运动,液体也跟着一起运动,这相当于弹丸初始运动阶段有一附加质量。而在环形装填条件下,等离子体射流从发射药的内部环形面,向前运动的同时加热液体发射药的内部环形面,不存在泰勒空腔的形成和发展过程。液体药及燃气即使随同弹丸运动,其主体部分也位于等离子体后方,速度较低,消耗的运动功较少。这样膛内液体、燃烧气体和等离子体沿轴线分布较为合理,分子量小的工质分布在弹底部分,分子量大的工质分布在膛底或身管后部,提高了整体弹道性能。N α 3与 N α 2相比压力变化不大,而弹丸速度提高了 93m /s 验证了我们的预想。

表 2 中 N α 4~ 8 采用压电式压力传感器测量膛内压力变化,图 3~ 7 分别是相应于 N α 4~ 8 膛内压力曲线。加长身管后,相同膛压条件下,弹丸在身管内运动时间增长,工作流体的有效做功面积 $\int_0^l p dl$ 增加,因而弹道效率提高,这一点被 N α 4 和 N α 5 的结果所验证。另外由这两发的试验曲线也可以看出,2m l 装药时,采用长身管,其枪口压力达到 190M Pa 而 1m l 装药时,采用短身管,枪口压力为 130M Pa 可以认为,液体火药没有充分燃烧。N α 6 在 N α 5 的实验条件基础上减轻了弹丸质量,并进一步提高了等离子体的发生器喷孔的破膜压力。按照内弹道枪口功能比拟理论,弹丸的枪口速度应达到 2700m /s 而试验结果只有 2200m /s 这

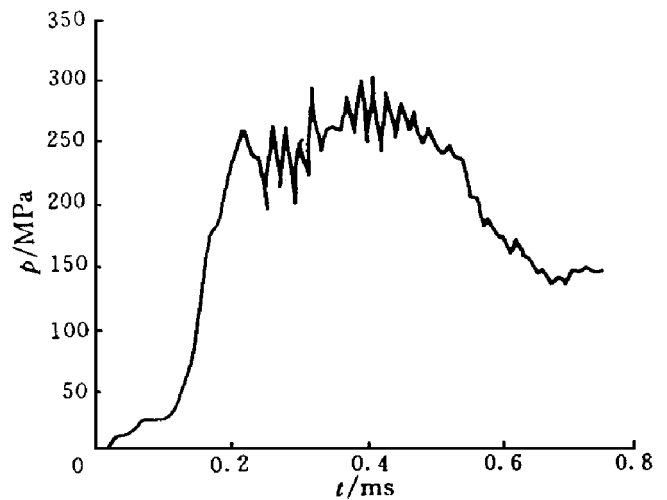


图 3 表 2 中 N α 4 的膛内压力曲线

Fig 3 The chamber pressure-time curve of N α 4 in table 2



图 4 表 2 中 N α 5 的膛内压力曲线

Fig 4 The chamber pressure-time curve of N α 5 in table 2

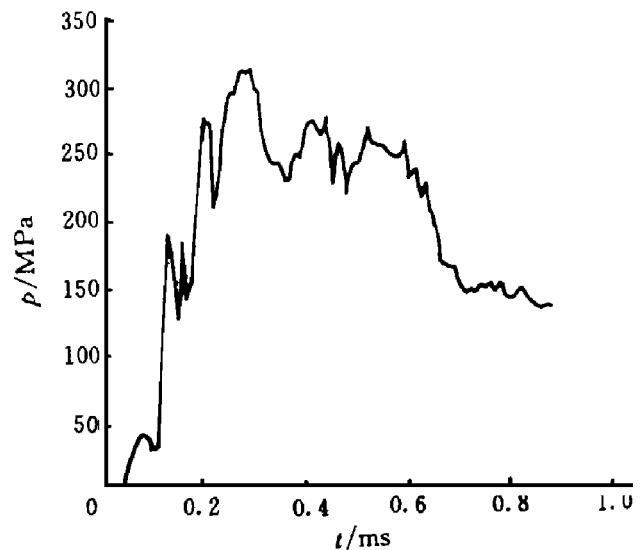


图 5 表 2 中 N α 6 的膛内压力曲线

Fig 5 The chamber pressure-time curve of N α 6 in table 2

与这次射击时有轻度漏电及弹丸闭气效果不好有关,同时也应看到,相同装药条件下,轻弹次要功系数要大,工作流体及其燃气消耗的运动功也是限制弹丸速度的重要因素。所以电热发射的工质应尽量选用高含能密度、燃烧生成气体分子量小的物质。 $N\alpha 7$ 选用含能密度稍高的液体药 LP1846来代替 OTTO II,其它试验条件与 $N\alpha 5$ 相同。由表中数据可以看到,改用 LP1846之后,其弹道效果并无明显改善。这是因为虽然 LP1846比 OTTO II 能量密度有所提高,但其燃气平均分子量要大些。另外从实验得到的压力曲线来看,采用 LP1846之后,其最大压力点提前且最大值也提高,这可能是由于 LP1846燃烧速度高于 OTTO II 所致。 $N\alpha 8$ 采用大质量弹丸,初速大幅度下降,弹道效率大大提高。但提高弹道效率并不是要求大幅度提高初速的电热化学发射的主要目的。

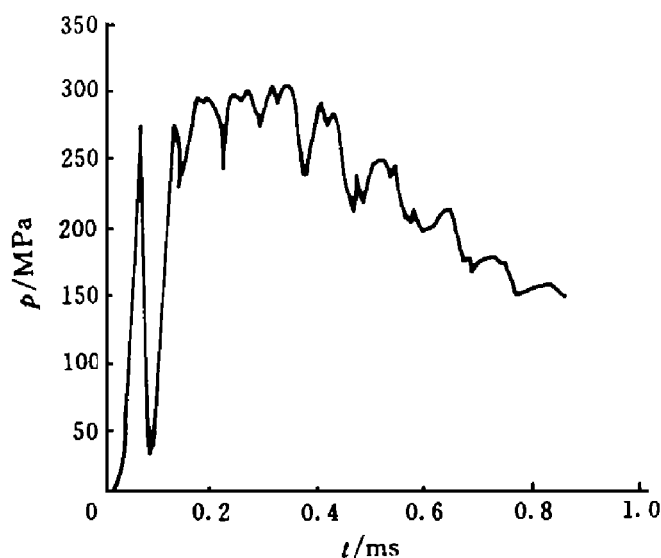


图 6 表 2 中 $N\alpha 7$ 的膛内压力曲线

Fig. 6 The chamber pressure-time curve of $N\alpha 7$ in table 2

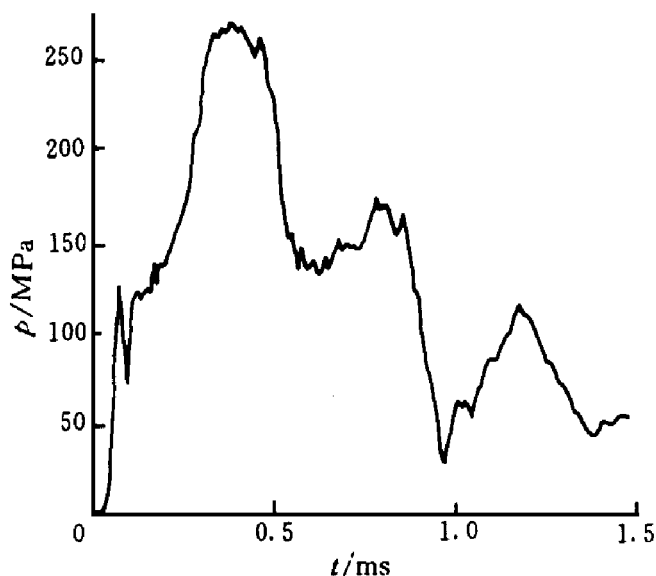


图 7 表 2 中 $N\alpha 8$ 的膛内压力曲线

Fig. 7 The chamber pressure-time curve of $N\alpha 8$ in table 2

3 分析与讨论

下面讨论不同能量对比对内弹道性能的影响。将发射条件基本相同,而化学与电能比例不同的几组实验数据列于表 3 其中扁球药是采用固体工质进行的实验^[3]。由表 3 可知如下结果。

表 3 几种不同工质的射击实验结果

Table 3 The testing results for several different working media

工质类型	工质质量 /g	燃气平均分子量	化学能 /J	电能 /J	化学能占 总能比 / (%)	弹道效率 / (%)	最大压力 / MPa
H ₂ O	0.50	18	0	11619	0	6.8	130
扁球药	1.50	32	5700	11619	32.9	3.1	210
OTTO II	2.44	19	7571	11619	39.4	6.1	272
LP1846	2.84	23	12112	11619	51.0	4.7	302

(1)水虽是吸热材料,升温、汽化要消耗部分电能,但膨胀作功效率较高。因为水气体分子

量适中, 是其中最小的。加上 0.5g 水汽化消耗的电能只有 1.1kJ, 不及电储能器所贮电能的 10%。

(2) 在特定的试验条件下, 现有扁球药弧厚仍偏大, 在膛内不能完全燃烧, 加上气体分子量最大, 所以弹道效率最低。

(3) 液体药采用环形装填, 可以明显提高燃速, 且等离子体燃气和液态工质在膛内分布合理, 所以在目前特定条件下总的弹道效果超过固体药。

(4) 就两种液体工质而言, 燃气分子量较小的 OTTO II 弹道效率高于 LP1846

(5) 提高电热化学发射弹道效率的关键, 是控制电能与化学能量释放速率的互补。

参 考 文 献

- 1 刘东尧, 周彦煌, 官汉章. 30mm 等离子体增强固体发射药火炮内弹道物理模型及计算. 弹道学报, 1996, 7(2): 1~ 9
- 2 官汉章, 刘东尧, 周彦煌. 脉冲功率源及多级 PFN 电路的设计与初步试验. 弹道学报, 1995, 7(3): 12~ 18
- 3 刘东尧, 官汉章, 周彦煌, 等. 小口径电热加速装置初步调试与分析. 见: 中国兵工学会弹道专业委员会, 编. 弹道学术交流会论文集. 南京: 南京理工大学, 1996, 145~ 148
- 4 Arensburg A. Experimental and Theoretical Study of Plasma-water Interaction in Electrothermal Gun [Dissertation(Ph. D)] Israel Soreq Nuclear Research Center, 1993
- 5 Woodley C R. A Parametric Study for an Electrothermal-chemical Artillery. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(1): 625~ 630

EXPERIMENTAL STUDY OF LIQUID WORKING MEDIA USED IN ELECTROTHERMAL CHEMICAL LAUNCHING

Liu Dongyao, Zhou Yanhuang, Yu Yonggang
(Ballistics Research Laboratory of Nanjing University of
Science and Technology, Nanjing, 210094)

ABSTRACT The results and analysis of electrothermal launching tests with liquid working media (exothermic or endothermic) in a small calibre electrothermal launching apparatus have been presented in this paper. The optimized parameters include the species mass and load methods of working media, the breaking pressure of plasma, the match of electrical energy and chemical energy, the mass of projectiles, etc. Its results indicate that the 0.5g projectile may be accelerated to 1783m/s with endothermic working media, where 0.5g and 0.3g projectiles may be accelerated to 2160m/s, 2200m/s respectively with exothermic working media. The measured pressure-time curves indicate the obvious pressure-platform effect may be achieved when electrical energy and chemical energy release rate complemented.

KEY WORDS electrothermal launching, liquid working media, plasma