

电热化学发射中等离子体发生器 放电特性的实验研究^{*}

陈 林 周之奎 孙承纬

(中物院流体物理研究所 成都 610003)

摘要 从实验方面研究了电热化学发射中等离子体发生器随毛细管的几何尺寸和 PFN 网络的初始充电电压等参数变化的放电规律, 结果将有助于改进等离子体发生器的设计和提高放电的效能。

关键词 PFN 网络 等离子体发生器 放电特性

中图法分类号 O 531

1 引 言

电热化学炮是指用等离子体与液体或固体推进剂相互作用驱动弹丸达到较高出口速度的装置, 采用电能与推进剂化学反应能量相结合推动弹丸做功。它是当前发展前景看好的高速身管武器, 可将公斤级弹丸发射初速提高到 2~3 km/s 甚至更高。电热化学炮的工作过程可以划分为三个基本阶段: PFN (脉冲成形网络) 网络、等离子体发生器喷管以及内弹道过程, 其中等离子体发生器作为“电-热转换”的中间环节, 具有十分重要的意义。它的作用是将电能转化为电弧的焦耳热, 并形成等离子体射流注入到充满化学推进剂的药室中去。它的工作状况直接影响到电热化学炮发射性能的优良与否。因此, 对等离子体发生器的放电特征进行深入细致的研究显得特别重要。

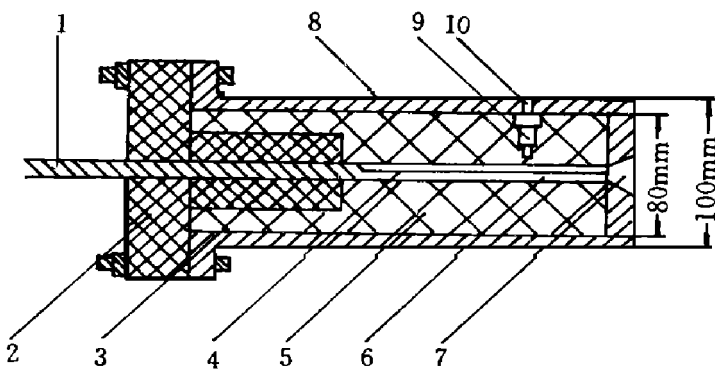
等离子体发生器的放电过程是: 随着 PFN 网络放电而形成的脉冲大电流通过金属铝箔, 铝箔经历固态加热、熔化、气化、电爆炸以至电离的过程, 形成毛细管内的初始电弧, 烧蚀聚乙烯管壁形成等离子体。随着温度和压力的升高, 等离子体在管端形成喷射, 经历一段时间后, 形成稳定喷射, 即以当地声速喷射。针对这些过程并根据电热化学发射对等离子体发生器工作性能的要求, 我们测量了电流、电压、管内压力和等离子体射流在管外的扩展速度。

国内外对这一部份的研究还比较少, 而且进行的工作大都关注于等离子体发生器的电路过程。关于等离子体发生器的电弧与力学运动的耦合特性, 特别是毛细管的几何尺寸以及 PFN 网络的初始充电电压对放电特征的影响, 人们了解不多。另外, 本文中所述的关于等离子体发生器内部压力的测量比较困难, 成功的实验报道也较少。

* 1996-06-19收到原稿, 1996-12-09收到修改稿。

2 实验装置和实验安排

参考电热化学炮中等离子体发生器的实际结构,我们做了一个如图 1 所示的模拟装置,其主体是一根聚乙烯棒做成的毛细管,长度通常为几十毫米到一百多毫米,毛细管孔直径为几毫米到十几毫米。管两端加上正负电极。初始时正负极间由一根厚度为几十微米、宽度为几毫米的金属箔连通。



- 1 正电极棒; 2 玻璃钢端盖; 3 绝缘密封栓; 4 铝箔; 5 聚乙烯筒; 6 毛细管; 7 喷口; 8 钢外壳; 9 压力探孔; 10 引线孔
- 1 A node bar; 2 Insulation chassis; 3 Sealing insulator; 4 Aluminum foil; 5 Polyethylene cylinder; 6 Capillary; 7 Nozzle; 8 Steel shell; 9 Blind hole; 10 Lead hole

图 1 等离子体发生器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of plasma generator

实验中由 PFN 系统作为能源,为等离子体发生器提供能量。PFN 网络的电容器组电容量为 1302 μ F,电感量为 21 μ H,杂散电阻为 0.1 Ω 。

有关实验的主要参数如表 1 所示。8-2 和 8-4 号实验是在毛细管几何尺寸都相同的条件下,研究毛细管在不同供能时的放电特征; 8-2 9-5 和 9-6 号实验是在供能和毛细管直径都相同的条件下,研究毛细管在不同长度时的放电特征; 9-6 9-7(1)、9-7(2) 和 9-8 号实验是在供能和毛细管长度都相同的条件下,研究毛细管在不同直径时的放电特征。

表 1 实验的主要参数

Table 1 Main parameters of the experiments

实验号	充电电压 /kV	毛细管直径 d /mm	毛细管长度 l /mm	压力探孔位置 ¹⁾ /mm	探孔壁厚 /mm
5-10	9	8.0	80	31	2.10
8-2	5	8.5	70	34	1.70
8-4	4	8.5	70	34	1.70
9-5	5	8.5	60	34	1.75
9-6	5	8.5	90	34	1.75
9-7(1)	5	10.0	90	34	2.00
9-7(2)	5	12.0	90	34	2.00
9-8	5	7.0	90	34	2.00

1)指距毛细管喷口的轴向距离

实验中毛细管电流、电压和压力的测量信号用 CS2092 瞬态仪进行采集。在 5-10 号实验中,用 FJZ-250 型高速摄影机对等离子体射流进行分幅照相,观察等离子体在喷口端的喷速和射流前沿的发展规律,并且根据拍摄的分幅照片计算出等离子体在空气中的喷射

前沿发展速度。实验中采用 Rogowski 线圈来测量放电回路电流;用 182:1 的电阻分压器联结在等离子体发生器两极之间,并通过“光-电”转换方法传输电讯号来测量等离子体电弧电压。

毛细管内压力可以采用石英压力传感器来测量。等离子体放电时温度相当高,而且是带电物质,另外还会受到管壁的力学影响,测量起来比较困难。实验中采用了一种新的方法,就是在聚乙烯管外壁上钻一个小直径的盲孔,小孔底部至毛细管壁的厚度只有 1.5~2mm 左右,在盲孔中嵌入石英压力传感器来测量毛细管内的压力。如探孔漏气,会影响到管内的状态,更为严重的是由于毛细管处于 PFN 放电主回路之中,高温导电气体的泄漏必然影响到压力的测试结果,所以探孔底部不能太薄,这样真实压力应该是测量数据的适当倍数,但可以得到较好的效果,而且压力传感器不会受到损坏。Powell 等人^[1]曾经做了一系列的参考压力实验来验证这种方法的可行性,结果测得的参考压力与用前面介绍的这种方法测得的压力相比较两者符合得相当好,足以说明此种方法测量毛细管内的压力是切实可行的。

3 实验结果

3.1 等离子体射流的观测

实验拍摄喷口端等离子体射流的发展过程得到的分幅照片如图 2 所示,根据这些照片计算了等离子体射流前沿在空气中的发展速度,如图 3 所示。

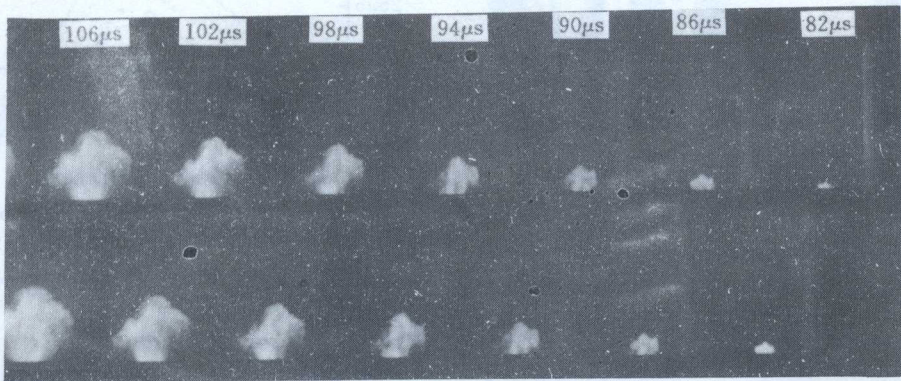


图 2 5-10 号实验等离子体射流在空气中发展的分幅照片

Fig. 2 Framing photographs of plasma jet developing in air for Shot 5-10

3.2 毛细管电流、电压和压力的测量

共做了七发不同实验参数的放电实验,都采集到了电流信号波形,五发实验得到了很好的电压波形,压力信号也有五发实验得到了有效的数据。

图 4 为 8-2 号实验后等离子体发生器的外形和剖面照片,由图可见毛细管壁显示了较为严重的烧蚀,这是由于高温等离子体流造成的。

从获得的一系列数据和信号波形来后,各发结果具有明显的相似特征,因此我们仅对

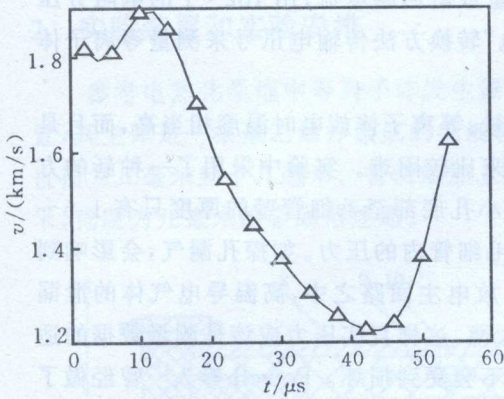


图 3 根据图 2 的分幅照片测得的射流前沿发展速度

Fig. 3 Development velocity of jet front measured with framing photographs

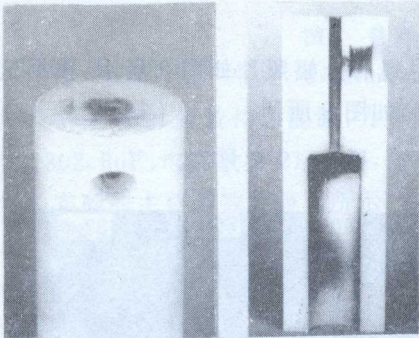


图 4 实验后等离子体发生器的外形和剖面照片

Fig. 4 Photographs of appearance and section of plasma generator after experiment

8-2 号实验作详细的分析和讨论。如图 5~图 7 分别为 8-2 号实验得到的等离子体电弧电流、电压和压力曲线。由图可知,电流上升至峰值的时间大约是 $216\mu\text{s}$, 电流脉宽为 $530\mu\text{s}$ 。

表 2 列出了实验所测得的各参数的峰值数据。其中 V_1 为电流到达峰值时毛细管两端的电压。很明显,峰值功率相对于峰值电流出现的时间落后了几十微秒,而峰值压力出现的时间也落后于峰值电流出现的时间。实验测量的数据结果表明了等离子体放电过程的不定常行为。最后一列为根据实验前后所测得的毛细管直径增加量而计算出的毛细管壁的烧蚀质量。

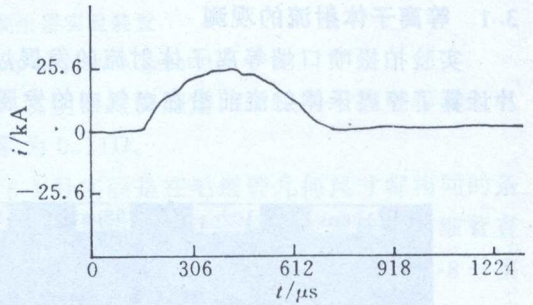


图 5 8-2 号实验的电流波形

Fig. 5 Current of the plasma arc for Shot 8-2

表 2 放电实验测量的峰值数据

Table 2 Summary of measured peak values

实验号	峰值电流 i_p/kA	电压 V_1/kV	峰值电 流时刻 $t_1/\mu\text{s}$	峰值 压力 p_m/MPa	峰值压 力时刻 $t_2/\mu\text{s}$	峰值 功率 P_m/MW	峰值功 率时刻 $t_3/\mu\text{s}$	毛细管壁 烧蚀质量 /mg
8-2	24.00	1.503	216	48.50	260	36.65	255	148
8-4	21.90		214	41.87	361			114
9-5	25.33		228	43.60	273			120
9-6	22.17	1.665	221			36.94	250	131
9-7(1)	23.56	1.402	224			34.50	278	193
9-7(2)	24.69	1.289	240	16.04	264	32.53	289	
9-8	20.10	1.935	214	50.48	350	38.90	265	112

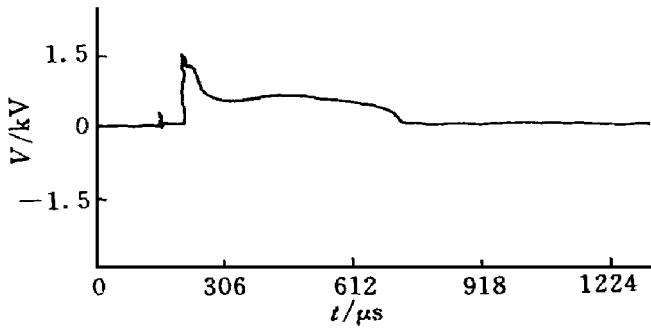


图6 8-2号实验的电压波形

Fig 6 Voltage of the plasma arc for Shot 8-2

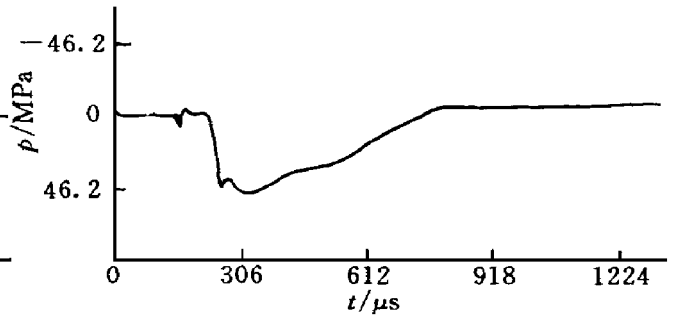


图7 8-2号实验获得的压力波形

Fig 7 Pressure of the plasma arc for Shot 8-2

3.3 实验参数不同时放电特性的比较

我们进行了三组参数的实验。第一组是在毛细管长度和电源充电电压不变的情况下改变毛细管的直径;第二组是在毛细管直径和电源充电电压不变的情况下改变毛细管的长度;第三组是在毛细管长度和直径都不变的情况下改变电源充电电压。

第一组实验的典型结果见图8~图10表明了各种情况下的电流、电弧电压以及等离子体吸收能量随时间变化曲线。其中等离子体吸收能量是对实验测得的电流和电压进行数学处理后得到的。90mm长的毛细管直径是变化的,直径的减小导致放电电流的减小,但明显增大了电弧电压,因而增大了电弧电阻,提高了等离子体吸收的能量,而毛细管直径的变化对等离子体放电时间的影响很小。

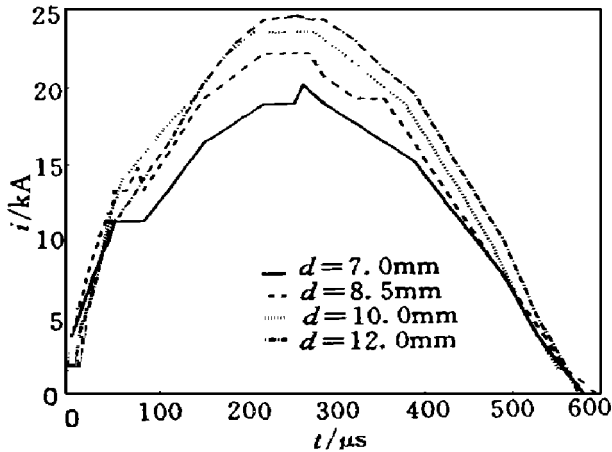


图8 电流波形比较

Fig 8 Comparison of current wave

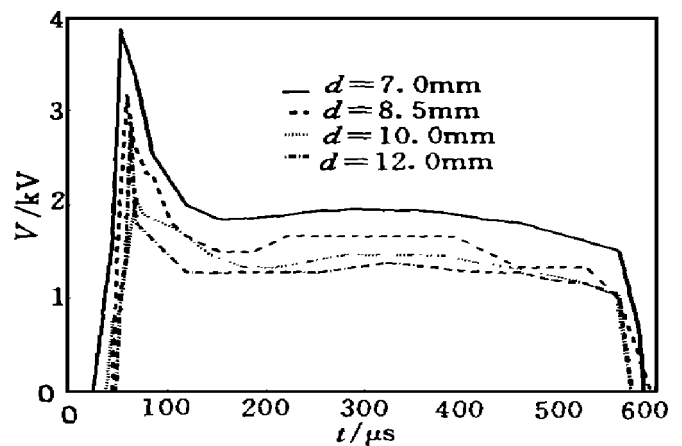


图9 电压波形比较

Fig 9 Comparison of voltage wave

第二组实验的典型结果见图11~图13直径8.5mm毛细管的长度是变化的,其中由于9-5号实验未采集到电压信号,无法绘出它的吸收能量曲线。由图可以看出,这种变化的最大影响是等离子体放电时间和电流的大小,长的毛细管引起低的峰值电流和高的电弧电压,等离子体吸收的能量加大。

第三组实验只做了两发,而且8-4号实验未采集到电压波形。从实验结果来看,影响最大的是电流的峰值,充电4kV时的电流峰值与充电5kV时相比低了2.1kA左右。

4 实验结果的分析 and 讨论

8-2号的实验条件是电容器充电5kV、毛细管长度为70mm、直径8.5mm。从图5可见大

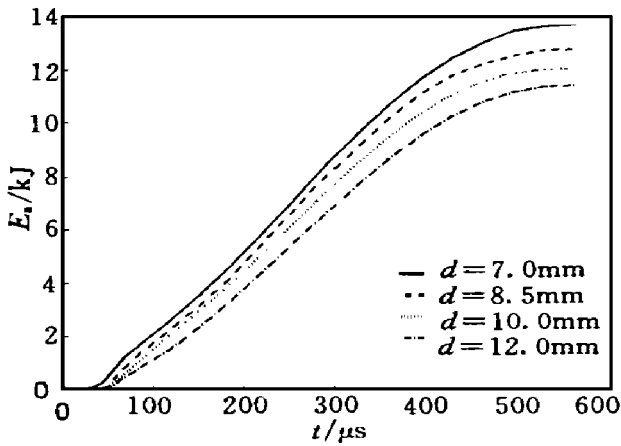


图 10 吸收能量曲线比较

Fig. 10 Comparison of absorbed energy wave

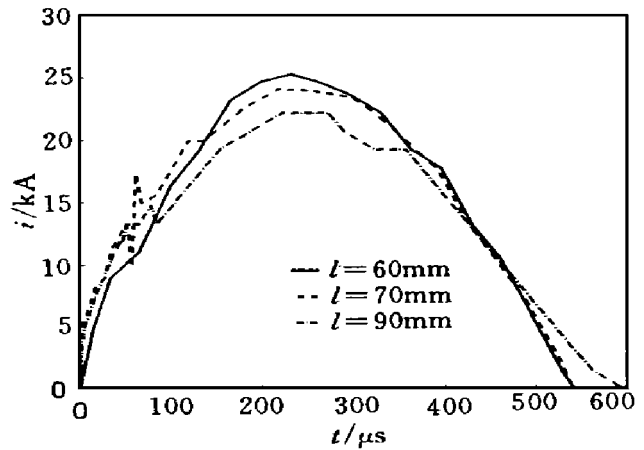


图 11 电流波形比较

Fig. 11 Comparison of current wave

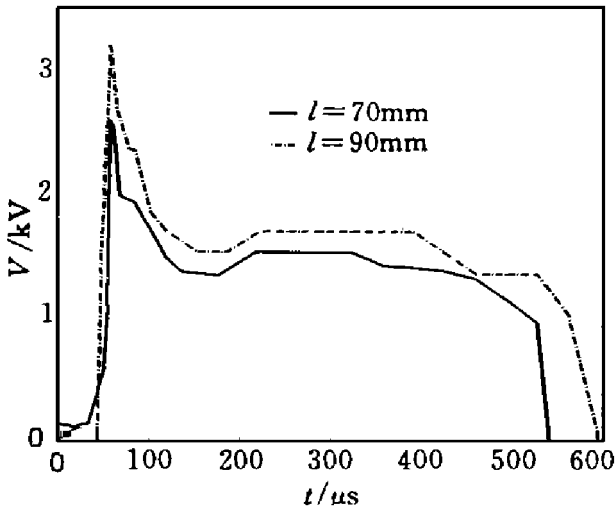


图 12 电压波形比较

Fig. 12 Comparison of voltage wave

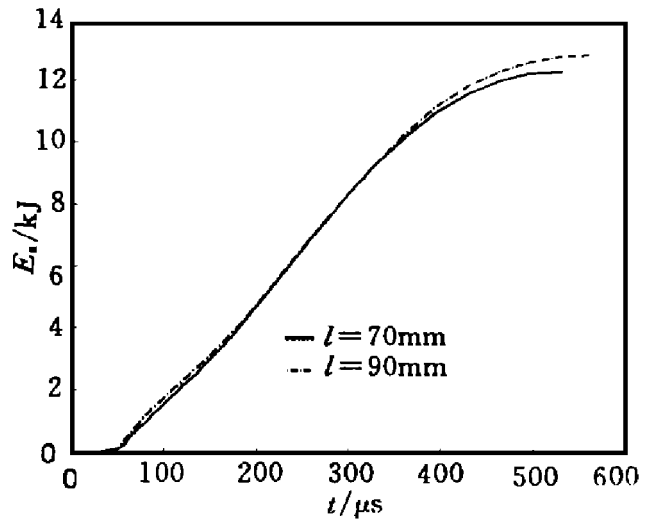


图 13 吸收能量曲线比较

Fig. 13 Comparison of absorbed energy wave

约在 $80\mu s$ 时电流出现一个拐点,这与图 6 所示的电压波形中出现很高的尖峰时间相对应,所以我们认为这是毛细管内铝箔急剧汽化所引起的,铝箔汽化时电阻明显增加,于是电流突然出现下降的趋势,然后随着汽化的结束,爆炸开始,毛细管内温度急剧上升,阻抗下降,电流又开始呈现上升趋势。

由图 6 可知,电压从零上升至 $2.6kV$ 时的八十几个微秒内,铝箔经历熔化、汽化和爆炸过程,由于在最初一段时间内铝箔的电阻非常小,因此相应的电压几乎接近于零,在爆炸以后的时间内,电压波形与电流波形基本类似。

图 7 是压力随时间的变化曲线,必须注意这里所指的压力是在距毛细管管口 $34mm$ 处测得的。很明显,压力信号出现的时间相对于电流的起点落后了 $80\mu s$ 左右,这种现象正好与许多文献中^[2-3]提出的“常压爆炸理论”相符合。也就是说,从电流触发到铝箔爆炸这段时间内毛细管内的压力几乎没有任何变化,接近常压。有必要指出的是,压力波形与电流波形在最初几十微秒内有着显著的差别。铝箔爆炸以后,毛细管内压力迅速上升,大约经过四十几个微秒时压力上升到一个极值点,然后开始下降,再过二十几微秒后又开始逐渐上升,大约在 $260\mu s$ 时达到峰值,所以对峰值出现的时间而言,压力相对于电流有四十几

微秒的时间延迟, 这表明等离子体放电过程是不定常的。

对于压力出现两个极值点的情形, 我们作这样的解释: 铝箔爆炸后毛细管内压力就开始迅速上升, 这一点可以从压力出现的时间上得到验证。而从铝箔爆炸到管内形成压力梯度需要经过一定的时间, 也即稀疏波从管口传播到被测压力处需要几十微秒的时间, 此时压力刚好上升至图中的第一个极值点, 随着稀疏波的影响, 压力有一个下降过程, 然而此时电流正处于上升阶段, 毛细管内温度较高, 管壁的聚乙烯被大量烧蚀, 因此经过一段相当短的时间后, 管内压力再次出现一个上升趋势, 直到出现第二个极值。

5 结 论

(1) 当毛细管长度和 PFN 网络初始充电电压相同时, 毛细管直径的减小导致放电电流的减小, 但明显增大了电弧电压, 因而增大了电弧电阻, 导致增加了被等离子体吸收的能量。而毛细管直径的变化对等离子体放电时间的影响很小。

(2) 当毛细管直径和 PFN 网络初始充电电压相同时, 毛细管长度变化的最大影响是等离子体放电时间和电流的大小, 长的毛细管引起低的峰值电流和高的电弧电压, 被等离子体吸收的能量加大。

(3) 当毛细管长度和直径相同时, PFN 网络初始充电电压变化影响最大的是电流的峰值, 充电 4kV 时的电流峰值与充电 5kV 时相比低了 2 kA 左右。

参 考 文 献

- 1 Powell JD, Zielinski A E. Theory and Experiment for an Ablating Capillary Discharge and Application to Electrothermal-chemical Guns. BRL-3355, 1992
- 2 Tucker T J, Toth R P. EBW 1 A Computer Code for the Prediction of the Behavior of Electrical Circuits Containing Exploding Wire Elements. SAND-75-0041, 1975
- 3 Blackburn JH, Muller G M. Exploding Wire Detonators: Resistivity Functions and Initiation Criteria for Circuit Calculations. SC-CB-69-3201, 1969

EXPERIMENTAL STUDIES ON DISCHARGE CHARACTERISTICS OF PLASMA GENERATOR IN ELECTROTHERMAL-CHEMICAL LAUNCHERS

Chen Lin, Zhou Zhiku, Shun Chengwei

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Chengdu, 610003)

ABSTRACT In this paper, the dependence of discharge characteristics of plasma generator in electrothermal-chemical launchers on the geometric scale of capillary and the initial charge voltage of PFN were studied from experiments, the results may contribute to improve the design and increase the efficiency of the plasma generator.

KEY WORDS PFN, plasma generator, discharge characteristic