

# 等离子体发生器高压放电特性研究\*

陈 林 周之奎 孙承纬

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 成都523信箱58分箱, 610003)

**摘要** 从实验和理论两个方面研究了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 定态等温模型 放电特性

**ABSTRACT** In this paper, the dependence of discharge character of plasma generator on the geometric scale of capillary and the initial charge voltage of PFN has been studied in experiments and the results will contribute to improve the design of plasma generator and increase its discharge efficiency.

**KEY WORDS** PFN, plasma generator, isothermal and steady model, discharge character.

等离子体发生器的放电过程: 随着 PFN 网络放电而形成的脉冲大电流通过金属箔, 金属箔经历固态加热、熔化、汽化、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, 等离子体在管口形成喷射, 一段时间后, 形成以当地声速的稳定喷射。这个过程可以用 Saha 方程及流体动力学一维 Euler 方程进行较为详细的模拟。本文在一定假设的基础上建立了等离子体发生器的定态等温模型。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、电压和毛细管内的压力。

国内外对这一部分的研究还比较少, 而且进行的工作大都集中于等离子体发生器的放电过程。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也比较困难, 成功的实验报道也较少。

## 1 实验研究

### 1.1 实验装置和实验安排

实验装置如图1所示。其主体是一根聚乙烯棒做成的毛细管, 长度为几十毫米至一百多毫米, 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。

实验中由 PFN 系统作为能源, 为等离子体发生器提供能量。PFN 网络的电容器组的电容量为  $1302 \mu\text{F}$ , 电感量为  $21.4 \mu\text{H}$ , 杂散电阻为  $0.11 \Omega$ 。有关实验的主要参数如表1所示。其中  $V_0$ ,  $D_0$ ,  $L_0$ ,  $X_0$  和  $\delta_0$  分别表示电容器组充电电压、毛细管直径、长度、压力探孔位置(指距毛细管喷口的轴向距离)和探孔处的毛细管壁厚。实验中毛细管电流、电压和压力的信号测量用

\* 国防科技基础研究资助课题。

1996年8月22日收到原稿, 1997年4月17日收到修改稿。

陈林, 男, 1970年9月出生, 硕士, 助理研究员。

CS2092瞬态仪进行采集。采用 Rogowski 线圈测量放电回路的电流; 用  $18 \cdot 21$  的电阻分压器联结在等离子体发生器两极之间, 并通过光-电转换来测量等离子体电弧电压。

表1 实验的主要参数

shot	$V_0$ /kV	$D_0$ /mm	$L_0$ /mm	$X_0$ /mm	$\delta$ /mm
8- 2	5	8.5	70	34	1.7
8- 4	4	8.5	70	34	1.7
9- 5	5	8.5	60	34	1.75
9- 6	5	8.5	90	34	1.75
9- 7(1)	5	10	90	34	2.0
9- 7(2)	5	12	90	34	2.0
9- 8	5	7	90	34	2.0

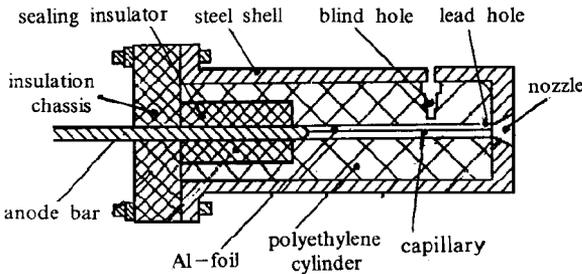


Fig. 1 Experimental setup of plasma generator

图1 等离子体发生器实验装置

毛细管内压力用石英压力传感器测量。等离子体放电时温度相当高, 这些带电物质还会受到管壁的力学影响, 测量比较困难。实验中采用一种新的方法, 就是在聚乙烯管外壁上钻一个小盲孔, 小孔底部至毛细管壁的厚度只有  $1.5 \sim 2\text{mm}$  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。为防止探孔漏气, 以致影响到管内的状态, 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, 这样真实压力应该略低于测量压力, 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<sup>[1]</sup>做了一系列的参考压力实验来验证这种方法的可行性, 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。实验采用的 SYS-4000 型石英压力传感器, 可测范围是  $0 \sim 40\text{MPa}$ , 电荷放大器为 YE5852 型, 石英压力传感器可以产生正比于石英晶体位移的电荷输出, 电荷放大器又将电荷转换为成正比的电压信号并传送到瞬态采集仪, 通过预先的定标实验, 可将电压信号换算成相应的压力值。

## 1.2 实验结果及分析

共做了七组不同实验参数的放电实验, 都采集到了电流信号波形, 五组实验得到了很好的电压波形, 压力信号也只有五组实验得到了有效的数据。从获得的一系列数据和信号波形来看, 各组结果具有明显的相似特征, 电流上升至峰值的时间大约是  $214 \sim 240\mu\text{s}$ , 电流脉宽约为  $530 \sim 580\mu\text{s}$ , 峰值压力为  $16.04 \sim 50.48\text{MPa}$ , 铝箔的爆炸时间约为  $80\mu\text{s}$ 。

表2列出了实验测得的各物理量峰值数据。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等离子体放电过程的不定常行为。从表2(结合表1实验参数)可见, 毛细管几何尺寸相同时, 随着电容器初始充电电压的增加, 管底最大压力升高, 毛细管的放电电流增加; 毛细管直径和电容器初始充电电压相同时, 随着长度的增长, 管底最大压力和电弧电压增大, 毛细管的放电电流减小; 毛细管长度和电容器初始充电电压相同时, 随着直径的增加, 管底最大压力和电弧电压减小, 毛细管的放电电流增大。

表2 放电实验测量的峰值数据

Table 2 Summary of peak values measured from experiments

shot	$I_p/kA$	$V_1/kV$	$t_1/\mu s$	$p_p/M Pa$	$t_2/\mu s$	$P_p/MW$	$t_3/\mu s$
8- 2	24 00	1. 503	216	48 50	260	36 65	255
8- 4	21. 90		214	41. 87	361		
9- 5	25. 33		228	43. 60	273		
9- 6	22 17	1. 665	221			36 94	250
9- 7(1)	23 56	1. 402	224			34 50	278
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

Note:  $I_p, p_p, P_p$  separately are current, pressure, power of peak,  $t_1$  is time of peak current;  $t_2$  is time of peak pressure;  $t_3$  is time of peak power

## 2 理论研究

### 2.1 基本假设和理论模型

等离子体发生器放电过程的数值模拟工作,大致可以分为以下两个阶段。第一阶段,PFN网络放电开始至金属铝箔爆炸。这里采用文献[2]的金属丝电爆炸模型。第二阶段,爆炸以后毛细管烧蚀至形成等离子体稳定喷射到现在已经有许多人研究过这个问题并建立了相应的模型<sup>[1,3,4]</sup>,其中包括Powell建立的一维模型,此模型主要包括三个守恒方程(质量、动量和能量守恒)、物态方程、烧蚀方程和Saha方程。此模型可以简化成如下的定态等温模型

$$\rho_w = \dot{\rho}_{az} \quad (1)$$

$$\rho_w^2 + p = p_0 \quad (2)$$

$$\rho_w E + p w = J^2 z / \sigma \quad (3)$$

方程(1)~(3)中 $p, \rho_w, \dot{\rho}_{az}, E$ 和 $J$ 分别表示压力、质量密度、速度、毛细管壁的烧蚀速率、比内能和电流密度。 $J$ 通过如下PFN回路方程计算得到

$$\begin{cases} \frac{dV_c}{dt} = \frac{I}{C} \\ \frac{dI}{dt} = -\frac{V_c + IR_s + IR_{\text{bad}}}{L} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $R_s$ 是回路的杂散电阻, $R_{\text{bad}}$ 为负载电阻, $C$ 和 $L$ 分别为回路的电容量和电感量。

### 2.2 理论与实验的比较

经理论计算结果与实验结果比较,电流的误差范围是1.4%~20.8%,电压的误差范围是9.3%~29.0%。比较而言,压力峰值误差要稍大一些(压力的误差范围是3.5%~83.7%),这主要是因为实验中石英压力传感器的安放位置不同所引起。有的传感器底部距毛细管内壁有2.0mm,而有的则只有1.7mm厚;另外这种误差还与钢套将传感器固定的松紧程度有关。由于毛细管的内径作为一种参数在变化,这种变化使得钢套将传感器固定的松紧程度不一致。从实验获得的压力信号可以发现较多的毛刺,极有可能也是这种原因引起的。

由于计算结果同样显示出各组实验的相似性,在此我们仅对8-2号实验条件下的理论和实验曲线作出比较,如图2(a)(b)(c)所示。很明显除压力信号外,其它信号都基本符合。可以根据此模型讨论等离子体的放电特征。

### 3 讨 论

#### 3.1 毛细管放电特征

由图2可见,实验获得的电流波形大约在 $80\mu\text{s}$ 时出现一个拐点,这与图2中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,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。

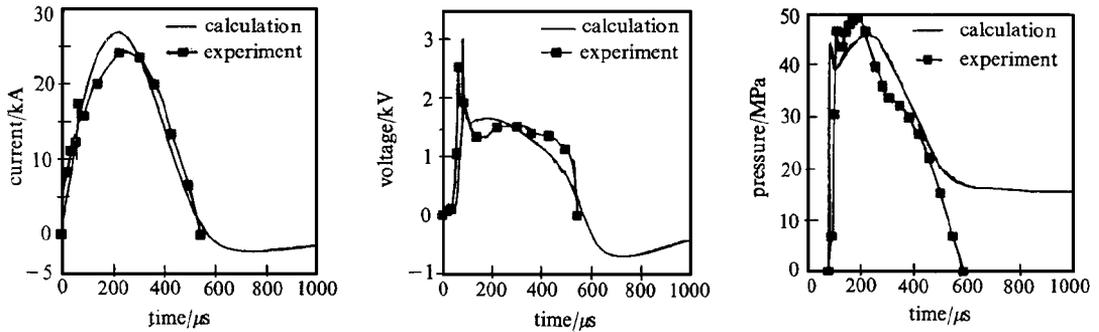


Fig. 2 Comparison of current, voltage, and pressure wave for No. 8- 2

图2 8-2号实验电流波形,电压波形和压力波形的比较

对于图2中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 $34\text{mm}$ 处所测得的压力。很明显,压力信号出现的时间相对于电流的起点落后了 $80\mu\text{s}$ 左右,这种现象正好与许多文献中<sup>[2,5]</sup>提出的“常压爆炸理论”相符合。也就是说,从放电开始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,约经 $40\mu\text{s}$ 时压力上升到一个极值点,然后开始下降,再约 $20\mu\text{s}$ 后又开始逐渐上升,大约在 $260\mu\text{s}$ 时达到峰值,所以对峰值出现的时间而言,压力相对于电流有约 $40\mu\text{s}$ 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,我们不妨作出这样的解释: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,即稀疏波从管口传播到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,因此实验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,直至出现第二个极值。

#### 3.2 PFN 网络初始充电电压对毛细管放电特征的影响

在毛细管几何尺寸都相同的情况下,我们计算了 PFN 网络初始充电电压在 $2\sim 9\text{kV}$ 间变化时毛细管的放电规律。如图3所示,当充电电压增加时,能量效率和特征阻抗减少,而最大声速  $c_{\text{max}}$ 、最高温度  $T_{\text{max}}$  和管底最大压力  $p_{0\text{max}}$  都升高。另外,当充电电压增加时,毛细管的放电电流、电弧电压和烧蚀质量都增加。由于能量效率随充电电压的增加而减少,因此一味提高初始充电电压是不明智的。

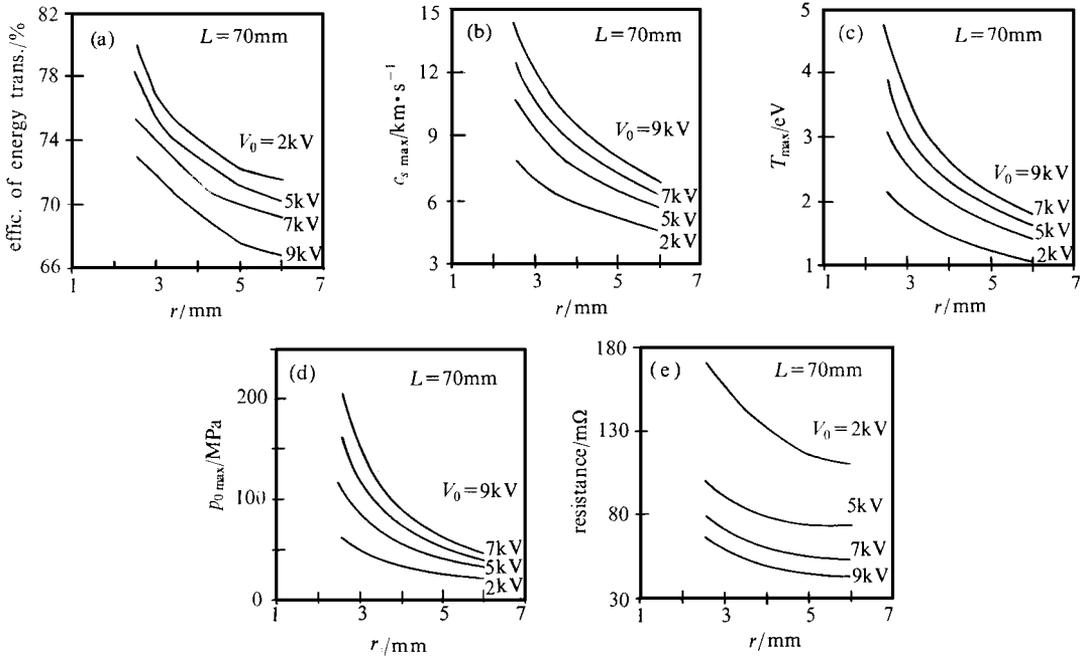


Fig 3 Relation of energy efficiency (a), maximum sound speed (b), maximum temperature (c), maximum pressure of bottom (d), resistance (e) and the initial charge voltage of PFN, respectively  
图3 能量效率(a)、最大声速(b)、最高温度(c)、管底最大压力(d)、特征电阻(e)与电源充电电压的关系

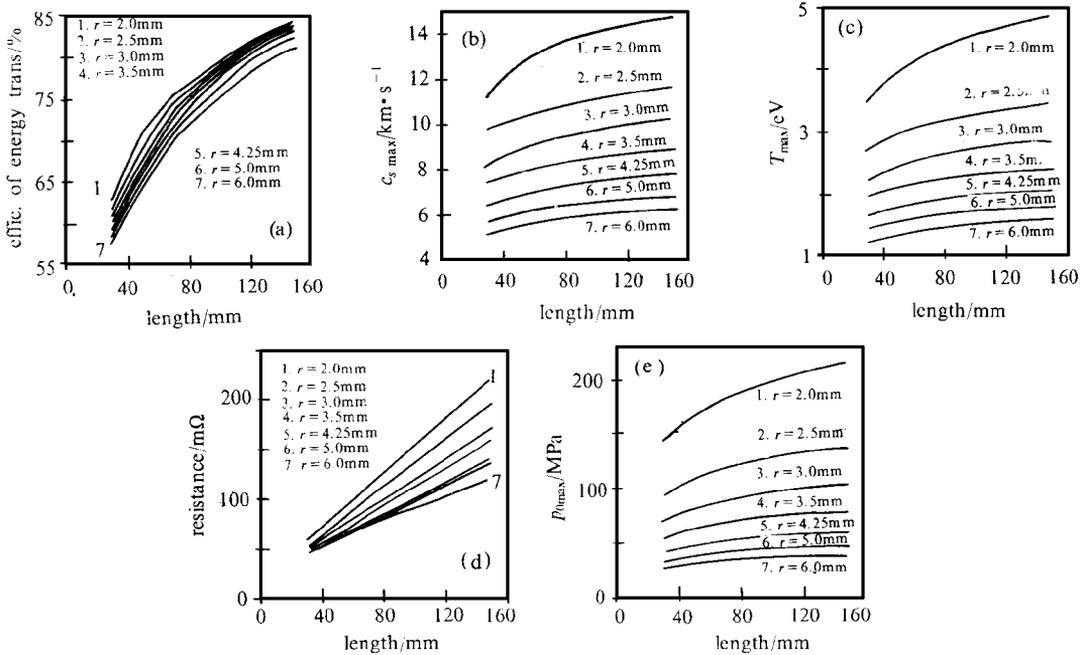


Fig 4 Relation of energy efficiency (a), maximum sound speed (b), maximum temperature (c), character resistance (d), pressure of bottom (e) and the capillary length or radius, respectively  
图4 能量效率(a)、最大声速(b)、最高温度(c)、特征电阻(d)、管底最大压力(e)与毛细管长度、半径的关系

### 3.3 毛细管几何尺寸对放电特征的影响

当电容器组充电50kV时,毛细管长度为30~150mm,直径为 $\phi 1.0\text{mm} \sim \phi 2.0\text{mm}$ 。由图4可以看出,毛细管直径相同,长度不同时,等离子体能量效率、最大声速 $c_{\text{max}}$ 、最高温度 $T_{\text{max}}$ 、管底最大压力 $p_{\text{0max}}$ 和特征阻抗都随着毛细管长度的增加而增大。此外,当长度增加时,毛细管的放电电流减小,电弧电压增大,烧蚀质量增加。毛细管长度相同,直径不同时,等离子体能量效率、最大声速 $c_{\text{max}}$ 、最高温度 $T_{\text{max}}$ 、管底最大压力 $p_{\text{0max}}$ 和特征阻抗都随着毛细管直径的增加而减小。另外,当直径增加时,毛细管的放电电流增大,电弧电压减小,烧蚀质量增加。

#### 参考文献

- 1 Powell J D, Zielinski A E. BRL-TR-3355, 1992
- 2 Tucker T J, Toth R P. SAND-75-0041
- 3 Mohanti R B, Gilligan J G. *IEEE Trans on Magnetics*, 1993, 29(1)
- 4 Loeb A, Kaplan Z. *IEEE Trans on Magnetics*, 1989, 25(1)
- 5 Blackburn J H, Muller G M. SC-CB-69-3201, 1969

## THE HIGH PRESSURE DISCHARGE CHARACTER OF PLASMA GENERATOR

Chen Lin, Zhou Zhikui, and Shun Chengwei

*Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 523-58, Chengdu, 610003, China*

The high pressure discharge character of plasma generator has been studied in this paper. The pulsed current, voltage across the capillary, and the pressure within the capillary at a point near the middle of the tube were measured. According to Saha equation and one dimensional Euler hydrodynamics equations, an isothermal and steady-state model and its computer code which have successfully reproduced the working process in the plasma generator have been set up.

From experiments and the theoretical model mentioned above, the parameters inside capillary such as the current, voltage, pressure, temperature, and sound speed of plasma, etc., and their dependence on diameter, length of capillary and the initial charge voltage of PFN have been studied respectively. Experimental results are then compared with this model, and they are in good agreement. The methods of diagnostics in experiments and the theoretical model proposed in this paper will contribute to improve the design and to increase the efficiency of plasma generator. The conclusions are as following:

1. The dependence on the initial charge voltage of PFN (see Fig. 3), The parameters such as the maximum isothermal sound speed, the maximum temperature, the maximum pressure at the capillary bottom, arc voltage, discharge current, and ablation mass increase with the charge voltage, but the energy transfer efficiency and the character resistance decrease.

2. The dependence on the geometric scale of the capillary tube (see Fig. 4)

(1) For fixed capillary diameter, the parameters such as energy transfer efficiency, the maximum isothermal sound speed, the maximum temperature, the maximum pressure at the capillary bottom, arc voltage, ablation mass, and the character resistance increase with the length, but the discharge current decreases.

(2) For fixed capillary length, the parameters such as energy transfer efficiency, the maximum isothermal sound speed, the maximum temperature, the maximum pressure at the capillary bottom, arc voltage, and the character resistance decrease with the increasing of the diameter, but the discharge current and the ablation mass increase.