

文章编号: 1006-9941(2016)07-0692-06

## 脉冲等离子射流在空气中扩展特性的测量与分析

赵雪维<sup>1</sup>, 余永刚<sup>1</sup>, 莽珊珊<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了分析脉冲等离子射流在空气中的扩展特性, 采用压电式压力传感器及数字高速录像系统, 研究了等离子发生器产生的脉冲等离子射流的扩展过程。用 Photoshop 等软件处理获得了不同放电电压及喷射破膜压力下, 脉冲等离子射流在大气中扩展的体积、轴向位移、径向位移随时间的变化关系。结果表明, 脉冲等离子射流扩展时, 其形状由初始的类椭球形状逐渐伸展成一个类圆锥头部加细长的类柱形尾部。射流轴向扩展位移始终大于径向位移。扩展的体积随时间呈单峰分布。增大放电电压和喷射破膜压力均可提高射流的扩展能力, 且放电电压越大, 等离子射流扩展时的湍流掺混越剧烈。

**关键词:** 电热化学发射; 等离子射流; 聚乙烯毛细管; 扩展特性

**中图分类号:** TJ399

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.07.012

### 1 引言

等离子体是由大量相互作用但仍处于自由状态的带电正粒子、负粒子、自由基及各种活性基团组成的准中性系统, 是与气态、液态、固态三种常见物质形态处于同一层次的第四态物质<sup>[1]</sup>。随着等离子体物理技术的不断发展, 其应用范围也越来越广泛。电热化学发射技术于 20 世纪 80 年代尝试运用等离子体技术进行火炮发射, 并取得成功<sup>[2]</sup>, 而将其应用于大口径火炮发射的研究更是近年来国内外的一个主要趋势<sup>[3]</sup>。这种发射方式可以有效地提高弹丸初速和炮口动能, 与传统火炮相比, 其炮口动能提高约 25% ~ 55%。与此同时, 它灵活的可调节性以及较好的适应性使其成为发射领域研究的热点之一。

等离子点火技术是电热化学发射的核心技术之一, 其工作介质, 即等离子体射流本身的扩展特性是电热化学发射领域一个重要的基础问题。为此, 国内外学者对其进行了大量研究。潘文霞等<sup>[4]</sup>对等离子射流高温区宏观形貌的瞬态特性进行了观测。Talor 等<sup>[5]</sup>在高能量放电条件下, 实验研究了等离子射流的

膨胀过程及其温度、速度等物理量的分布特性。刘东尧等<sup>[6]</sup>对不同放电电压下毛细管内消融等离子体及其射流压力随时间的变化规律进行了实验研究。Chang 等<sup>[7]</sup>实验研究了放电脉冲长度变化对等离子射流扩展的影响, 得到了等离子射流的形态、流场宽度和深度、光强度等特性。夏卫生等<sup>[8]</sup>实验研究了等离子熔射过程中的加热效应。Sharikov 等<sup>[9]</sup>实验研究了毛细管等离子射流在空气中的结构演变过程, 给出了射流出口到马赫盘的轴向距离与毛细管内压力和环境压力比值之间的关系, 并进行了相应的数值计算。祁丽昉等<sup>[10]</sup>计算了电热炮放电毛细管中等离子体的电导率, 模型中考虑了中性粒子碰撞和量子机理。张琦等<sup>[11-12]</sup>实验研究了毛细管等离子射流在大气中的膨胀演化过程, 同时建立了等离子射流在大气中扩展的二维轴对称非稳态可压流数学模型, 采用 Fluent 软件对等离子射流扩展过程进行了数值模拟。Liu 等<sup>[13]</sup>忽略化学反应, 建立了等离子射流在空气中扩展的简化模型, 并利用 CFD 软件进行了数值计算, 给出了等离子射流的温度、速度等参数的变化规律。Porwitzky 等<sup>[14-15]</sup>对毛细管等离子射流的扩展过程进行了数值模拟, 考虑了扩展过程中的化学反应问题。杨春霞等<sup>[16-17]</sup>研究了等离子喷射点火过程的物理化学效应及点火一致性问题。

综上所述, 国内外学者从实验和数值计算等方面, 对等离子射流扩展过程中其形态、温度、速度、压力、密度等参数的变化特性进行了研究, 得到了等离子射流

收稿日期: 2015-10-00; 修回日期: 2015-12-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51506094)

作者简介: 赵雪维(1991-), 女, 研究生, 主要从事等离子射流扩展特性研究。e-mail: 514108001741@njust.edu.cn

通信联系人: 余永刚(1963-), 男, 教授, 主要从事含能材料的燃烧理论与控制技术方面的研究。e-mail: yyg801@njust.edu.cn

扩展的一般规律,但是对于脉冲等离子射流在大气中扩展时的体积变化规律仅局限于射流形貌图形的描述,而对其具体数值变化以及不同放电电压和喷射破膜压力对体积变化特性的影响未见定量描述。因此,本课题组在前人工作基础上,实验测量了脉冲等离子射流在大气中扩展时的体积变化特性,并且研究了喷射破膜压力、放电电压变化对脉冲等离子射流在大气中扩展时的位移、体积变化的影响规律。

## 2 实验装置

实验装置主要包括等离子发生器和脉冲功率源。其中,等离子发生器如图 1 所示,包括一个毛细管、一对电极、电爆炸丝、喷嘴以及毛细管外的绝缘体、金属外壳,装置右侧开孔测量毛细管内等离子体的压力变化。实验采用长度为 75 mm、内径为 4 mm 的聚乙烯毛细管作为被烧蚀的毛细管材料,采用细长的铝箔片作为电爆炸丝。

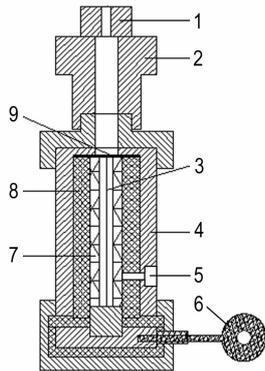


图 1 等离子发生器装置图

1—喷嘴, 2—接头, 3—电爆炸丝, 4—金属壳体, 5—测压孔, 6—阳极, 7—聚乙烯毛细管, 8—绝缘体, 9—预密封膜片(阴极)

Fig. 1 Plasma generator installation drawing

1—nozzle, 2—connection head, 3—electric exploding wire, 4—metal case, 5—piezometric hole, 6—anode, 7—polyethylene capillary, 8—insulator, 9—pre seal diaphragm (cathode)

图 2 为组成脉冲功率源的脉冲形成网络(PFN), 它由电容器组容量为  $46.5 \mu\text{F}$ , 电感器电感为  $35 \mu\text{H}$  的电容储能。实验时毛细管和电爆炸丝两端通过电极链接到脉冲功率源, 其中阴极端用薄紫铜膜片密封。脉冲功率源通过一对电极向电爆炸丝放电, 使其形成高温金属等离子体, 烧蚀聚乙烯毛细管, 产生毛细管等

离子体, 当阴极密封的等离子体压力超过密封膜片的破膜压力后, 冲破膜片, 从喷嘴喷出形成等离子射流喷入大气。改变电容器组的放电电压和放电回路参数可以调整等离子射流的出口参数。实验时将装置竖直摆放, 令等离子射流垂直喷入大气环境, 从而排除重力因素的影响。

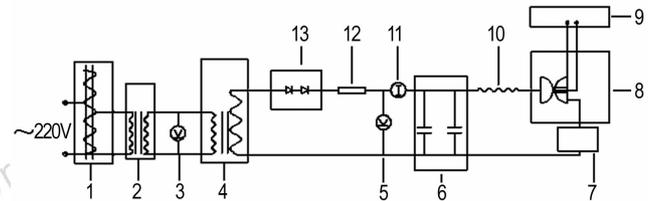


图 2 脉冲形成网络电路图

1—自耦变压器, 2—隔离变压器, 3—交流电压表, 4—升压变压器, 5—直流电压表, 6—电容器组, 7—等离子发生器装置, 8—放电开关, 9—放电触发器, 10—阻尼电阻, 11—充电电流表, 12—限流电阻, 13—整流堆

Fig. 2 Pulse forming network circuit diagram

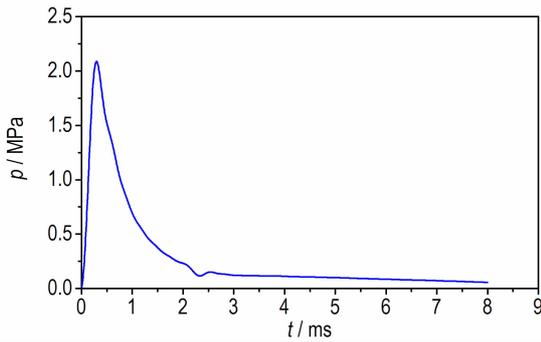
1—self coupled transformer, 2— isolation transformer, 3—AC voltage meter, 4—boost transformer, 5—DC voltage meter, 6—capacitor group, 7—plasma generator, 8—discharge switch, 9—discharge trigger, 10—damping resistor, 11—charging current meter, 12—current limiting resistor, 13—rectifier

实验采用 FASTCAM-ultima APX 数字高速录像系统记录等离子射流在大气中的演化过程, 采用 CY-YD-205 型压电式压力传感器测量实验过程中毛细管内的压力变化。实验装置边缘事先立有固定标尺, 以便读出不同时刻等离子射流扩展的位移。同时实验中将通过选择不同的密封膜片的厚度来控制喷射破膜压力的变化。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 等离子射流在大气中扩展形态演化特性

实验选用内径为 5 mm、外径为 14 mm 的喷嘴, 放电电压为 2100, 2500, 3000 V。脉冲电源放电转化率为 40%, 则放电能量约为 41, 58, 84 J。由压力传感器测得的聚乙烯毛细管内的典型  $p-t$  曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 毛细管内的压力初始时迅速上升, 此时毛细管内的等离子体压力尚未达到预密封膜片的破膜压力。当压力达到最大值时, 如图 3 中  $p = 2.13 \text{ MPa}$  时, 等离子体破膜而出, 毛细管内压力逐渐下降并趋近于环境压力。

图3 毛细管内的典型  $p-t$  曲线Fig. 3 Typical  $p-t$  curve in capillary

当放电电压为 3000 V, 喷嘴内径为 5 mm 时, 等离子射流在大气中扩展形态的演化过程序列图如图 4 所示, 根据所拍阴影照片, 应用 Photoshop 软件进行处理, 生成对称立体图像, 计算得到等离子射流扩展时的体积变化, 如图 5 所示。

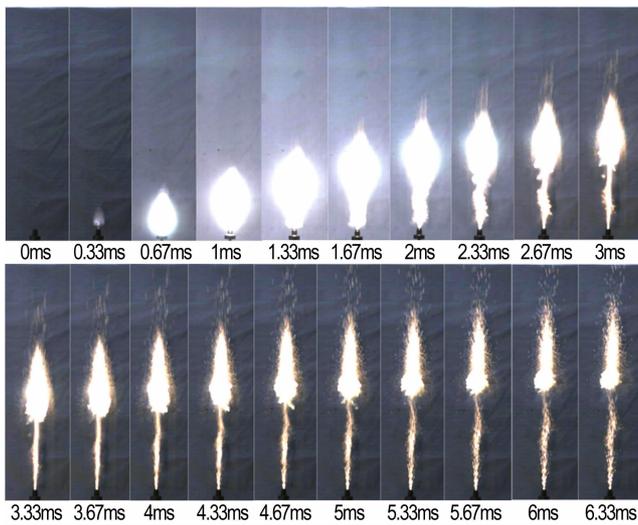


图4 等离子射流在大气中扩展形态的演化过程

Fig. 4 The evolution process for the extended form of plasma jet in atmosphere

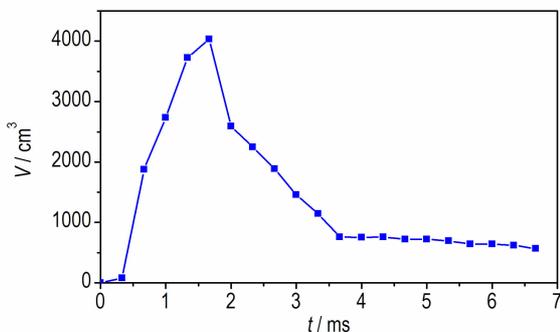


图5 等离子射流的体积变化曲线

Fig. 5 Volume change curve of the plasma jet

从图 4、图 5 中可以看出, 在 0 ~ 1.33 ms, 等离子射流整体逐步形成类椭球状, 其扩展体积逐渐增大, 1.67 ms 时达到最大扩展体积, 随后等离子射流逐渐扩展成一个类锥体的射流头部和一个类柱体的射流尾部组合体, 随着能量的耗散, 等离子射流的扩展体积逐渐减小。在射流发展后期由于湍流耗散作用, 射流边缘破碎, 使得射流体积随时间出现细微的上下波动, 将其称为微震荡现象。

等离子射流扩展过程中其亮度开始时逐渐变强, 整体呈亮白色, 并伴有光晕出现 (如 0.67 ~ 2.33 ms), 随后亮度逐渐减弱, 光晕消失, 射流边缘部分呈现金属黄色。2.67 ms 以后等离子射流下部类柱体边缘部分出现褶皱, 表明等离子射流在扩展时与周围空气发生强烈的湍流掺混作用, 出现湍流耗散现象, 随着射流的扩展, 等离子射流边缘逐渐破碎, 散布在主体周围。

等离子射流在大气中扩展时, 射流轴向位移和径向位移可通过标尺长度按比例直接读出, 射流前端凹凸面取平均值, 其随时间的变化关系如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 等离子射流扩展过程中轴向位移单调增加, 而径向位移随时间成单峰分布, 径向位移首先随时间逐步增大, 达到最大值之后逐渐下降, 达到径向位移最大值所用时间约为 1.33 ms。

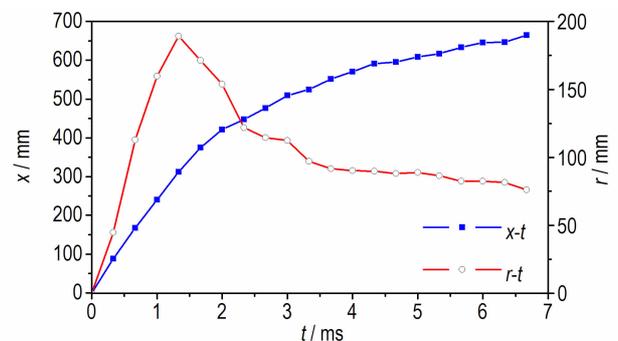


图6 等离子射流的轴向及径向位移曲线

Fig. 6 Axial and radial displacement curves of the plasma jet

### 3.2 放电电压对等离子射流扩展过程的影响

当放电电压分别为 2100, 2500, 3000 V, 喷嘴内径为 5 mm, 喷射破膜压力均为 2.2 MPa 时, 等离子射流在大气中的扩展体积比较如图 7 所示。由图 7 可以看出, 等离子射流扩展过程中, 体积将经历一个先增大后减小的过程。喷射破膜压力相同时, 随着放电电压增大, 等离子射流的扩展体积增大, 但增大的幅度有所下降, 且由于放电电压增高, 湍流耗散现象增强, 等离子射流破碎严重,  $U_c = 3000$  V 时的射流体积在

2.33 ms后略小于  $U_c = 2500$  V 时的射流体积。

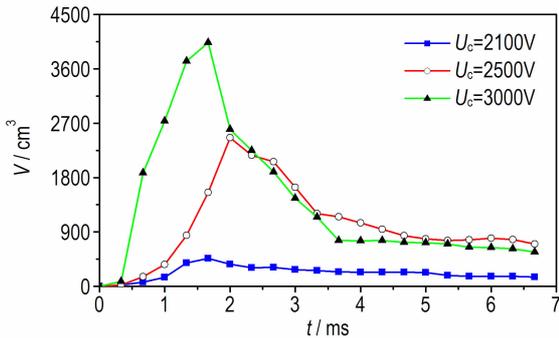


图7 不同放电电压下等离子射流的体积变化曲线  
Fig.7 Volume change curves of the plasma jet at different discharge voltage

放电电压不同时, 等离子射流在大气中扩展的轴向位移  $x$  和径向位移  $r$  的比较如图8所示。由图8可以看出, 等离子射流扩展过程中其轴向位移先迅速增大, 后逐步趋缓。其径向位移先增大后减小, 且整个扩展过程中径向位移均小于轴向位移。由图8a可以看出, 在2 ms后, 由于高速向前运动的射流边缘在扩展过程中与周围静止的空气不断掺混、耗散, 并随着射流的扩展, 掺混逐步向射流中心区逼近。放电电压越大,

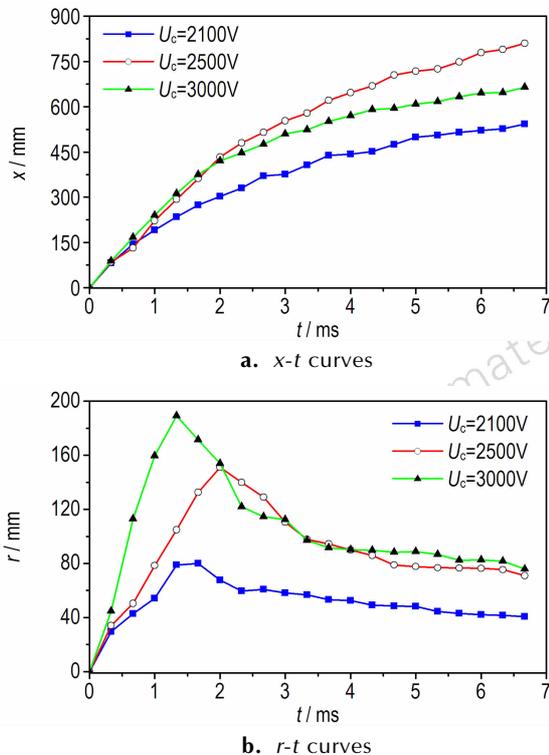


图8 不同放电电压下等离子射流轴向及径向位移曲线  
Fig.8 Axial and radial displacement curves of the plasma jet at different discharge voltage

这种湍流耗散现象越剧烈, 后期等离子射流头部破碎越严重, 从而使得  $U_c = 3000$  V 时的等离子射流后期轴向位移小于  $U_c = 2500$  V 时的等离子射流轴向位移。由图8b可知, 由于3000 V的放电能量大于2500 V的放电能量, 前期3000 V时射流径向扩展位移远大于2500 V时射流径向扩展位移, 而3000 V时射流扩展的湍流耗散现象比2500 V时的更为剧烈, 射流边缘破碎情况也更为严重, 出现“过冲”现象, 导致中期其径向位移小于2500 V时的径向位移。但由于3000 V时等离子体总体能量相对较大, 后期其等离子射流径向扩展位移仍略大于2500 V时的径向位移。因此在位移曲线上表现为两次交叉现象。当  $U_c = 2100, 2500, 3000$  V 时, 等离子射流径向扩展最大位移分别为 80.21, 150.93, 189.23 mm。由此可见, 在喷射破膜压力相同的条件下, 随着放电电压的不断增大, 尽管等离子射流径向位移的最大值增大, 但增大的幅度却减小了。

### 3.3 喷射破膜压力对等离子射流扩展过程的影响

相同放电电压、不同喷射破膜压力下等离子射流扩展的体积变化比较如图9所示, 从图9可以看出, 喷射破膜压力  $p_m = 2.2$  MPa 时的等离子射流的最大扩展体积为  $V_m = 460.47$  cm<sup>3</sup>; 喷射破膜压力  $p_m = 3.6$  MPa 时的最大扩展体积为  $V_m = 1548.04$  cm<sup>3</sup>, 由此可见, 放电电压相同时, 随着喷射破膜压力的增大, 等离子射流在大气中的扩展体积显著增加。

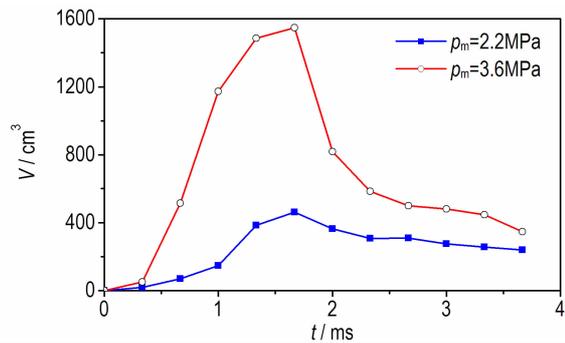


图9 不同喷射破膜压力下等离子射流的体积变化曲线  
Fig.9 Volume change curves of the plasma jet under different jet breaking film pressure

图10为放电电压为2100 V, 喷射破膜压力分别为2.2 MPa和3.6 MPa, 喷嘴直径为5 mm时, 等离子射流在大气中扩展时的轴向位移  $x$  和径向位移  $r$  的比较。从图10可以看出, 放电电压相同时, 随着喷射破膜压力的增大, 等离子射流的轴向扩展位移及径向

扩展位移均增大,这是由于喷射破膜压力越大,等离子体冲破密封膜片进入大气环境时的出口压力和初始动能越大。

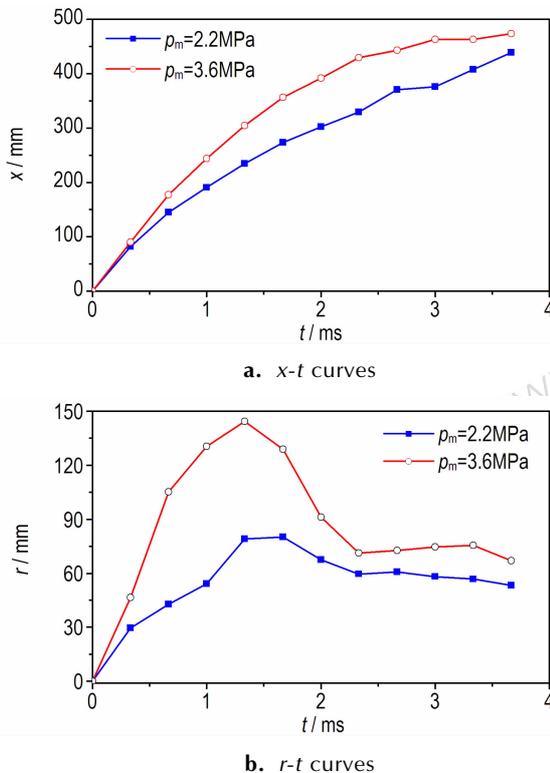


图 10 不同喷射破膜压力下等离子射流轴向及径向位移曲线  
Fig. 10 Axial and radial displacement curves of the plasma jet at different jet breaking film pressure

## 4 结 论

对等离子射流在空气中的扩展过程进行了实验研究,分析了等离子射流扩展时的形态、位移、体积等特性,同时讨论了在不同放电电压及喷射破膜压力条件下,等离子射流的扩展位移、体积等参数的变化规律,可以得到如下结论:(1)等离子射流在大气中扩展时,由初期的类椭球状逐渐扩展成一个类锥体的射流头部加一个类柱体的射流尾部组合体,在此过程中其亮度由强变弱。(2)等离子射流扩展过程中,轴向位移随时间单调增加,而径向位移先迅速增大后逐步减小,后期随着放电能量的消耗以及湍流耗散的作用,其轴向和径向位移变化速率减小。射流扩展体积变化与径向位移类似,将经历一个先增大后减小的过程,扩展后期由于湍流脉动现象的存在,射流体积随时间出现微震荡现象。(3)喷射破膜压力相同时,放电电压由 2100 V 增至 3000 V 过程中,等离子射流轴向位移逐

渐增大,其径向位移最大值也由 80.21 mm 增至 189.23 mm。且放电电压越大,射流扩展后期湍流掺混越剧烈,等离子射流的轴向位移、径向位移及扩展体积虽随之增大,但增幅却减小。而当喷射破膜压力分别为 2.2 MPa 和 3.6 MPa 时,等离子射流的最大扩展体积分别为 460.47 cm<sup>3</sup> 和 1548.04 cm<sup>3</sup>,其增大幅度较为显著,且喷射破膜压力的变化对射流的轴向扩展位移及径向扩展位移均有较大的影响。

### 参考文献:

- [1] 王峰, 何立明, 曹闹昌, 等. 直流电源驱动的等离子体点火器的点火特性[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2537-2541. WANG Feng, HE Li-ming, CAO Nao-chang, et al. Ignition characteristic of direct current source plasma ignite [J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(10): 2537-2541.
- [2] 李鸿志. 电热化学发射技术的研究进展[J]. 南京理工大学学报, 2003, 27(5): 449-465. LI Hong-zhi. Research progress of electrothermal chemical emission technology [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2003, 27(5): 449-465.
- [3] 张明安, 李军, 龚海刚, 等. 等离子体点火与火炮装药结构适配性试验分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2004, 1(01):16-19. ZHANG Ming-an, LI Jun, GONG Hai-gang, et al. Experiment analysis for the matching between ignition of plasma and construction of projectile charge [J]. *Gun Launch & Control Journal*, 2004, 1(01):16-19.
- [4] 潘文霞, 孟显, 李腾, 等. 层/湍流等离子体射流的稳定性与三维特性的实验观测研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(1): 139-141. PAN Wen-xia, MENG Xian, LI Teng, et al. Experimental observations on the stability and the 3-D characteristics of laminar/turbulent plasma jets [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(1): 139-141.
- [5] Taylor M J. Measurement of the properties of plasma from ETC capillary plasma generators[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37(1):194-198.
- [6] 刘东尧, 郭海波, 余永刚, 等. 毛细管消融等离子体及其射流压力特性研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2009, 33(3): 348-351. LIU Dong-yao, GUO Hai-bo, YU Yong-gang, et al. Investigation on pressure properties of capillary ablation plasma and jet [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2009, 33(3): 348-351.
- [7] Chang L M, Howard S L. Electrothermal-chemical plasma ignition of gun-propelling charges: the effect of pulse length [R]. ARL-TR-4253, U. S. Army Research Laboratory: Aberdeen Proving Ground, MD, 2007.
- [8] 夏卫生, 张海鸥, 王桂兰. 等离子熔射过程中热传递特性研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2010, 38(3): 1-3. XIA Wei-sheng, ZHANG Hai-ou, WANG Gui-lan. Heat transfer characteristics of plasma spraying [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 38(3): 1-3.
- [9] Sharikov I V, Surzhikov S T. Experimental study of unsteady supersonic underexpanded ablative plasma jet dynamics [R]. AIAA

- 2005-4930, 2005.
- [10] 祁丽昉, 林庆华, 关磊, 等. 消融控制电弧等离子体电导率模型的初步研究[J]. 弹道学报, 2009, 21(1): 99-102.  
QI Li-fang, LIN Qing-hua, GUAN Lei, et al. Primary research of conductivity model of ablation-controlled arc plasma[J]. *Journal of Ballistics*, 2009, 21(1): 99-102.
- [11] 张琦, 余永刚, 陆欣, 等. 等离子射流在大气中扩展特性实验研究[J]. 弹道学报, 2010, 22(4): 97-101.  
ZHANG Qi, YU Yong-gang, LU Xin, et al. Experimental study on plasma jet propagation in Air[J]. *Journal of Ballistics*, 2010, 22(4): 97-101.
- [12] 张琦, 余永刚, 宇文聪伶. 非稳态等离子射流场的二维模型及数值模拟[J]. 弹道学报, 2012, 24(3): 1-5.  
ZHANG Qi, YU Yong-gang, YUWEN Cong-ling. Two-dimensional model and numerical simulation of unsteady plasma jet [J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(3): 1-5.
- [13] Liu B, Zhang T, Gawne D T. Computational analysis of the influence of process parameters on the flow field of a plasma jet[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 132(2-3): 202-216.
- [14] Porwitzky A J, Scalabrin L C, Keidar M, et al. Chemically reacting plasma jet expansion simulation for application to electrothermal chemical guns[R]. AIAA 2007-4600, 2007.
- [15] Porwitzky A J, Keidar M, Boyd I D. Progress towards an end-to-end model of an electrothermal chemical gun[C]//14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Victoria, BC, 2008.
- [16] 杨春霞, 李贞晓, 李海元, 等. 双基药等离子体点火的物理化学效应分析[J]. 弹道学报, 2012, 24(2): 66-68.  
YANG Chun-xia, LI Zhen-xiao, LI Hai-yuan, et al. Physical and chemical analysis of double-base propellant ignited by plasma [J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(2): 66-68.
- [17] 杨春霞, 金涌, 李海元, 等. 密闭爆发器等离子体点火一致性实验研究[J]. 弹道学报, 2015, 27(3): 58-61.  
YANG Chun-xia, JIN Yong, LI Hai-yuan, et al. Experimental research on consistency of plasma ignition in closed bomb [J]. *Journal of Ballistics*, 2015, 27(3): 58-61.

## Measurement and Analysis of the Expansion Characteristics of Pulsed Plasma Jet in Air

ZHAO Xue-wei<sup>1</sup>, YU Yong-gang<sup>1</sup>, MANG Shan-shan<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, NUST, Nanjing 210094, China; 2. School of Science, NUST, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To analyze the expansion characteristics of pulsed plasma jet in air, the expansion process of pulsed plasma jet generated by a plasma generator was studied by a piezoelectric pressure sensor and a digital high-speed video system. The relation of change in the extended volume, axial displacement and radial displacement of pulsed plasma jet in atmosphere with time under different discharge voltage and jet breaking pressure was treated and obtained by Photoshop software. Results show that when the pulsed plasma jet is expanded, its shape is gradually extended from the initial shape like ellipsoid to a conical head and an elongated cylindrical tail. The axial displacement of the jet is always larger than the radial displacement. Extended volume reveals a single peak distribution with time. Increasing the discharge voltage and jet breaking pressure can improve the expansion ability of the jet, and the larger the discharge voltage, the more violent the turbulent mixing in the plasma jet expansion.

**Key words:** electrothermal chemical propulsion; plasma jet; polyethylene capillary; extended properties

**CLC number:** Tj399

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.07.012