

文章编号: 1001-1455(2011)03-0311-06

# 等离子射流与渐扩边界中液体工质 相互作用特性的模拟实验\*

张 琦, 余永刚, 陆 欣, 刘东尧

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了探索整装式液体工质电热化学炮中药室边界形状对燃烧控制的影响, 采用数字高速录像系统对等离子体射流在液体工质中的扩展过程进行了测试, 研究了不同放电电压、不同喷嘴直径、不同渐扩边界结构下等离子射流与液体工质的相互作用特性。获得了等离子射流在液体工质中扩展形态的时间序列图, 处理出不同工况下 Taylor 空腔扩展的轴向位移与时间的关系曲线, 计算并分析了不同工况下等离子射流在液体工质中的扩展速度和相互作用的机理。研究结果表明: Taylor 空腔的轴向扩展速度具有波动性, 但总体上呈衰减趋势。渐扩台阶处, 径向湍流增强, 强化了等离子射流的回流卷吸效应。

**关键词:** 流体力学; 等离子射流; 渐扩形边界; 液体工质; 电热化学炮

**中图分类号:** O358; TJ399

**国标学科代码:** 130·25

**文献标志码:** A

电热化学发射技术中等离子体发生器产生的等离子射流既是完成能量转化的工作介质, 也是发射药化学能释放的点火源, 因此脉冲等离子射流的特性及其与发射药的相互作用机理是电热化学发射中的关键技术之一<sup>[1-4]</sup>。以液体工质电热化学发射为工程背景, K. K. Kuo 等<sup>[5]</sup>利用高速摄影和脉冲 X 光照相研究了等离子体射流和液体之间的相互作用过程, 给出了等离子体射流在液体中形成的 Taylor 空腔扩展过程以及等离子体的强度分布规律。A. Arensburg 等<sup>[6]</sup>采用阴影成像技术研究了等离子体射流在水中的连续膨胀过程, 定量研究了射流的运动速度以及两相作用面上液体卷吸的质量流量和液体卷吸形成液滴的过程。周彦煌等<sup>[7]</sup>研究了等离子射流与圆柱形观察室内的液体工质的相互作用特性。

在整装式液体工质电热化学炮中, 由于 Taylor 空腔的发展及 Helmholtz 不稳定效应的激励, 其扩展过程随机脉动性较大, 进而影响到液体工质电热化学发射系统的燃烧稳定性, 为此 R. L. Talley 等<sup>[8]</sup>提出利用边界形状来约束 Taylor 空腔的发展思路。余永刚等<sup>[9]</sup>研究了圆柱形和圆柱渐扩形 2 种观察室中等离子射流与液体工质的相互作用问题。本文中在此基础上, 针对 2 种圆柱渐扩型观察室, 研究不同放电电压、不同喷口直径、不同渐扩结构下等离子射流与液体工质的相互作用特性。

## 1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 主要由等离子发生器、脉冲功率源和观察室组成。等离子发生器包括 1 个毛细管、1 对电极以及毛细管外的绝缘体、金属壳体。通过对该毛细管大功率放电使毛细管材料烧蚀、电离形成等离子体, 将电能转化成热能。实验采用的毛细管是长 73 mm、内径 6 mm 的聚乙烯管, 两端通过电极连接到脉冲功率源, 其中阳极端保持密封, 阴极端开孔作为等离子体流出通道, 并与观察室相连。脉冲功率源由电容储能的脉冲形成网络(PFN)组成, 毛细管作为该放电回路的负载, 如图 2 所示。储能电容器组的容量为 46.5  $\mu\text{F}$ , 电感器电感为 35  $\mu\text{H}$ , 可以通过对电容器组的充电电压和放电回路参数来调整等离子体的输出强度。为保证放电回路的可靠放电, 在放电开始用细的金属电爆炸丝将阳极和阴极连接起来, 电流首先使金属丝电爆炸形成等离子体, 然后再烧蚀毛细管壁面材料。阴极喷嘴预先用

\* 收稿日期: 2010-02-22; 修回日期: 2010-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(50776048)

作者简介: 张 琦(1983—), 男, 博士研究生。

金属膜片密封,防止液体倒流,并使毛细管内等离子射流达到一定压力才开始喷射。观察室为圆柱渐扩型,由透明有机玻璃制成,内部充满液体模拟工质,考虑到安全性,选用密度和粘度与液体药相近的水作为模拟工质。为防止等离子射流在液体工质中膨胀、扩展时压力过大而损坏观察室,观察室顶端开口与大气相通。

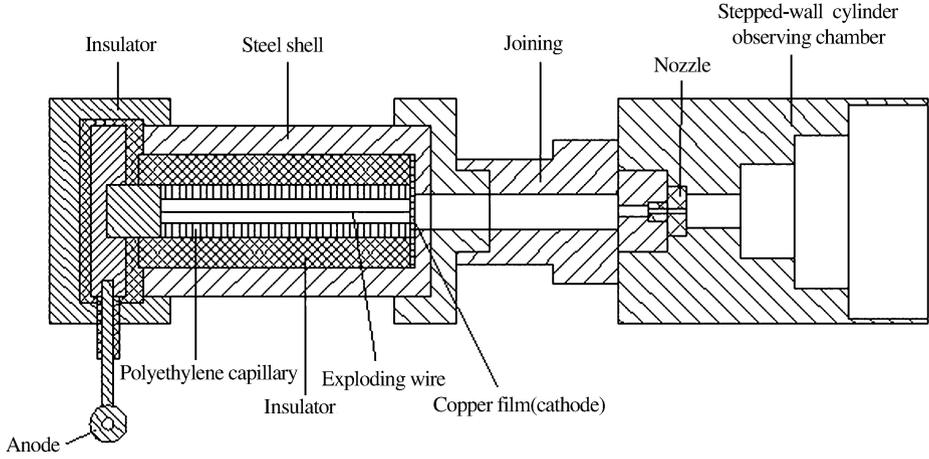


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental apparatus

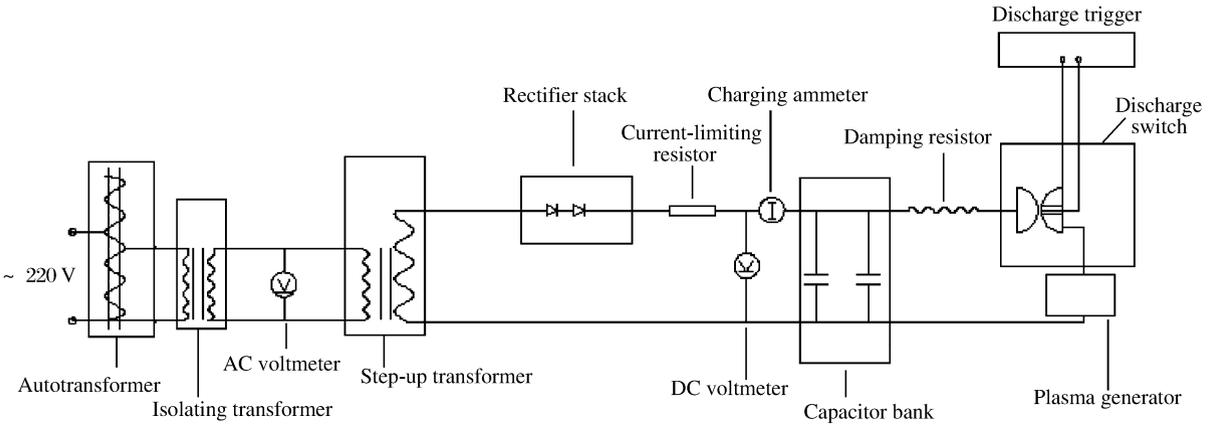


图 2 脉冲形成网络电路图

Fig. 2 Pulse-forming network setup

为消除重力对射流结构的影响,实验装置垂直放置,等离子体竖直向上喷射。实验中采用 FAST-CAM-ultima APX 数字高速录像系统记录等离子射流与液体相互作用过程,同时毛细管内的压力采用 CY-YD-205 型压电式压力传感器测量。

## 2 实验结果与讨论

实验中使用 2 种圆柱渐扩型观察室,总长均为 98 mm。第 1 种观察室共 4 级,第 1 级直径  $D=18$  mm,以后每级直径比前 1 级增加 12 mm,1~3 级长  $L$  均为 20 mm,第 4 级长为 38 mm;第 2 种观察室共 3 级,前 3 级直径与第 1 种的前 3 级直径相同,但前 2 级长  $L$  变为 30 mm。将等离子发生器固定在工作台上与脉冲形成网络连接,将圆柱渐扩型观察室与等离子发生器相连。准备完毕后对电容器组充电,达到需要的电压值后切断电源,再启动触发间隙放电开关进行放电。

针对 4 级圆柱渐扩型观察室,在放电电压  $U_c=2\ 500$  V,喷嘴直径  $d_0=2.0$  mm 工况下,由压电测压系统测出该毛细管内典型  $p-t$  曲线,如图 3 所示。由图 3 可知,在放电阶段,毛细管内的压力迅速增大,

膜片破裂后压力迅速下降。实验表明放电电压越高,毛细管内的最大压力越大,毛细管内的压力增长和衰减也越大。

### 2.1 等离子体射流在液体中扩展的典型过程

图4是  $U_c=2\ 700\text{ V}$ ,  $d_0=2.0\text{ mm}$  时,等离子体射流在渐扩结构因子  $\Delta D/L=0.4$  时的圆柱渐扩型观察室中扩展的序列过程。其中  $\Delta D$  为每级圆柱台阶直径增量,  $L$  为对应台阶的长度。

从图4中可以看出,渐扩边界对等离子体射流在液体工质中扩展时形成的 Taylor 空腔有径向诱导作用, Taylor 空腔将沿着渐扩边界逐级扩展,在渐扩处会发生回流卷吸现象。实验中观测到 Taylor 空腔前端等离子体与液体间的传热效应较强,气液界面处由电爆炸丝及电极形成的金属等离子体以及毛细管等离子体被迅速冷却形成黑色物质,如图4中  $t=4.5\text{ ms}$  时所示。此外, Taylor 空腔扩展过程中,前端面受到液体的压缩作用,轴向位移增量逐渐变小。

当喷嘴直径缩小到  $d_0=1.5\text{ mm}$  时, Taylor 空腔前端面甚至会出现“倒退”,典型过程如图5所示 ( $U_c=2\ 700\text{ V}$ ,  $d_0=1.5\text{ mm}$ ,  $\Delta D/L=0.4$ ), 相应的轴向位移  $x$  与时间  $t$  的关系如图6所示。从波动力学和湍流力学理论来看, Taylor 空腔在渐扩边界的液体工质中扩展时将产生复杂的波系结构,经不同界面反射形成“稀疏”或“压缩”作用,决定了前端面边界的发展状况及位移特征。此外, Taylor 空腔在扩展过程中,由于 Taylor-Helmholtz 不稳定效应, Taylor 空腔扩展到某一位置时,前端面及其不稳定。由于湍流耗散效应,此时 Taylor 空腔前端的等离子体射流动能几乎耗尽,而 Taylor 空腔上游液体的压力较大,于是就出现了位移增量减小的现象。当喷嘴直径较小时,等离子体射流动能也就较小,在液体静压的作用下某时刻 Taylor 空腔前端面就出现了“倒退”。当放电电压较大时,等离子体射流动能变大,在观察窗尺度范围内, Taylor 空腔前端面等离子体射流动能未耗尽,就不会出现“倒退”现象。

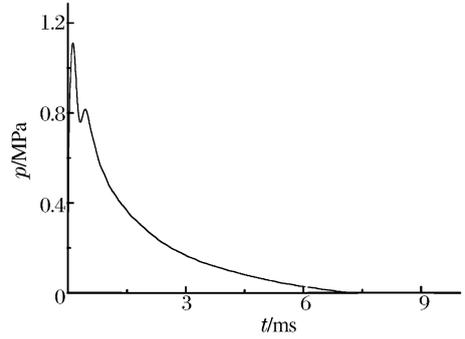


图3 毛细管内的  $p-t$  曲线图  
Fig.3  $p-t$  curve in capillary

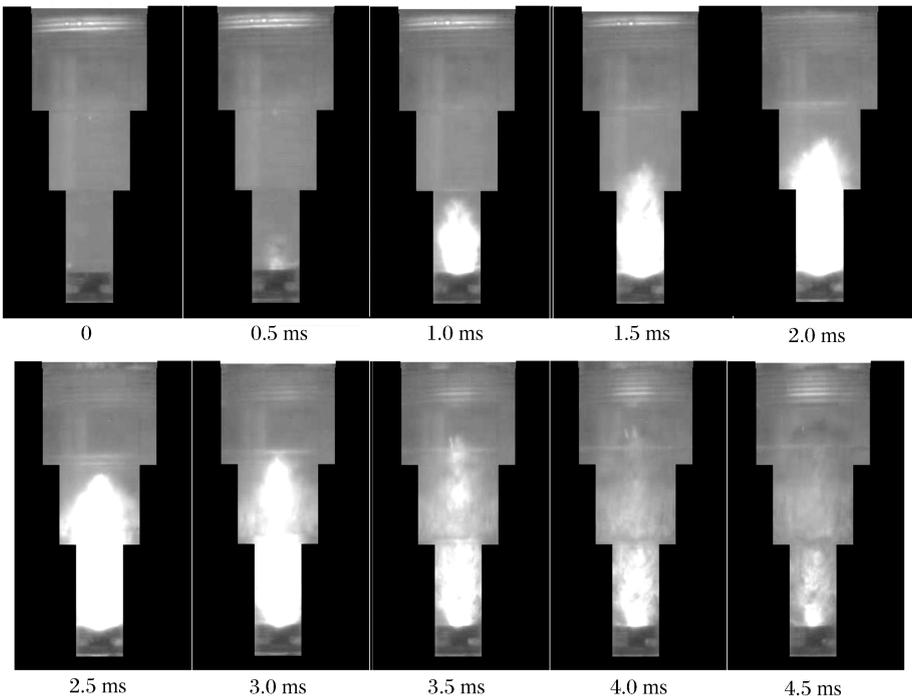


图4 等离子体射流的典型扩展过程 ( $\Delta D/L=0.4$ )

Fig.4 Plasma jet propagation in liquid medium ( $\Delta D/L=0.4$ )

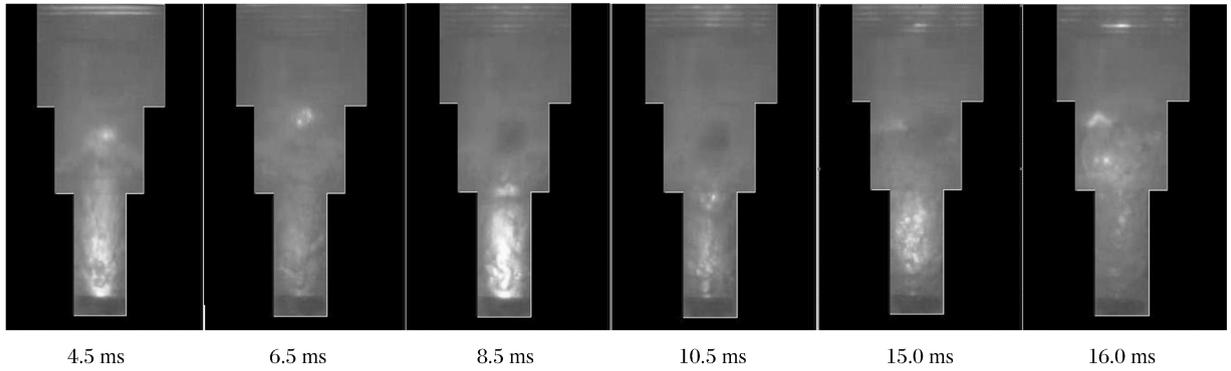


图 5 Taylor 空腔扩展过程  
Fig. 5 Propagation of Taylor cavity

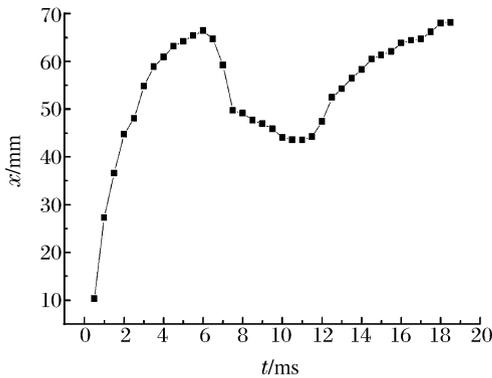


图 6 等离子体射流前端面轴向扩展的  $x-t$  曲线  
Fig. 6 Axial  $x-t$  curve of plasma jet

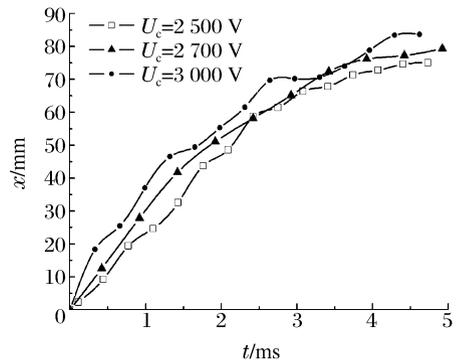


图 7 不同放电电压下的  $x-t$  曲线  
Fig. 7  $x-t$  curves at different discharge voltages

### 2.2 放电电压对等离子射流在液体工质中扩展特性的影响

$U_c$  分别为 2 500、2 700 和 3 000 V 时, Taylor 空腔在圆柱渐扩型观察室中扩展的轴向位移与时间的关系如图 7 所示, 其中  $d_0=2\text{ mm}$ ,  $\Delta D/L=0.4$ 。

由图 7 可知, 在相同时刻, 放电电压越大, Taylor 空腔的轴向扩展位移越大。  $U_c$  分别为 2 500、2 700、3 000 V 时, Taylor 空腔扩展到第 2 级台阶 ( $x=30\text{ mm}$ ) 所用时间分别为 1.3、0.99、0.76 ms; 扩展到第 3 级台阶 ( $x=60\text{ mm}$ ) 所用时间分别为 2.57、2.50、2.16 ms。说明等离子射流动能越大, 其轴向扩展能力越强, 但由于 Taylor-Helmholtz 不稳定效应, Taylor 空腔轴向扩展位移具有波动性。

### 2.3 喷嘴直径对等离子体射流在液体工质中扩展特性的影响

当放电电压不变, 即  $U_c=2\text{ 700 V}$  时, 仅改变喷嘴直径, 分别为 2.0 和 1.5 mm, 观察 Taylor 空腔在观察室 ( $\Delta D/L=0.4$ ) 中扩展的轴向位移和速度变化特性, 如图 8~9 所示。

从图 8 中可以看出, 在 Taylor 空腔扩展到 34 mm 之前,  $d_0=1.5\text{ mm}$  时的 Taylor 空腔轴向扩展位移略大, 这是由于喷嘴变小时, 毛细管内的最高压力变大, 使初始一段时间喷嘴较小的 Taylor 空腔轴向扩展速度较大, Taylor 空腔与液体工质的接触面积与其自身的体积比将增大, Taylor 空腔中单位体积流体的弥散增强, Taylor 空腔沿轴向速度衰减

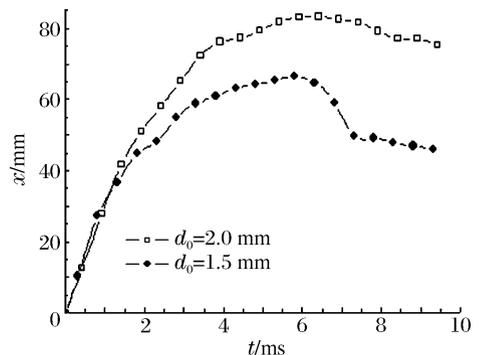


图 8 不同喷嘴直径下的  $x-t$  曲线  
Fig. 8  $x-t$  curves at different nozzle diameters

增大,使得  $x=34\text{ mm}$ ,  $d_0=2.0\text{ mm}$  时的 Taylor 空腔的轴向位移逐渐大于  $d_0=1.5\text{ mm}$  时的位移。从图 8 中还可以看出喷嘴直径较大时, Taylor 空腔前端出现“倒退”现象的时间将后移。 $d_0$  分别为 2.0、1.5 mm 时, Taylor 空腔扩展到第 2 级台阶时所用的时间分别为 1.03、0.97 ms; 扩展到第 3 级台阶时所用的时间分别为 2.55、3.50 ms。从图 9 中可看出, Taylor 空腔轴向扩展速度具有波动性。

**2.4 渐扩结构因子  $\Delta D/L$  对等离子体射流在液体工质中扩展特性的影响**

为了观察渐扩台阶长度和直径对等离子射流扩展过程的影响, 采用 2 种总长一样的观察室, 一个为 3 级, 另一个为 4 级, 其目的是: (1) 在渐扩直径相同的条件下, 选取台阶长度不同, 观测 Taylor 空腔扩展形态的变化; (2) 在第 4 级, 一个台阶直径增大, 另一个不变, 观测 Taylor 空腔扩展形态的变化。综合两者, 体现了  $\Delta D/L$  这一参数变化对 Taylor 空腔扩展形态的影响。图 10 显示  $\Delta D/L$  分别为 0.4 和 0.6 时, Taylor 空腔的轴向扩展位移与时间的关系曲线, 其中  $U_c=2\ 600\text{ V}$ ,  $d_0=2.0\text{ mm}$ 。

由图 10 可见, 在距离喷口 20 mm 范围内, 两者扩展位移几乎一样, 但超过 20 mm 后,  $\Delta D/L=0.6$  的扩展位移比  $\Delta D/L=0.4$  的小。这是由于  $x=20\text{ mm}$  处是观察室 ( $\Delta D/L=0.6$ ) 第 2 级台阶的渐扩处, 渐扩边界诱导 Taylor 空腔径向脉动效应, 使得 Taylor 空腔的径向湍动能增大, 从而削弱了 Taylor 空腔轴向湍动能, 因此 Taylor 空腔轴向位移扩展变慢, 此时针对  $\Delta D/L=0.4$  的观察室, 其第 1 级长度为 30 mm, 不存在渐扩效应。渐扩结构因子  $\Delta D/L$  为 0.6、0.4 时, Taylor 空腔扩展到  $x=30\text{ mm}$  时, 所用时间分别为 1.04、0.97 ms, 相应的瞬时速度为 25.2、29.6 m/s。当  $x=50\text{ mm}$ , 扩展所用时间分别为 2.58、1.92 ms, 相应的瞬时速度为 9.55、14.09 m/s。

**3 结 论**

在本文的实验工况下, 可得出如下结论:

- (1) 等离子射流在圆柱渐扩边界的液体工质中扩展时, Taylor 空腔轴向速度具有波动性, 总体上呈衰减趋势。由于受到台阶径向诱导作用, Taylor 空腔在渐扩处会出现回流卷吸现象。Taylor 空腔在扩展过程中, 前端面可能会出现“倒退”现象。
- (2) 放电电压越大, Taylor 空腔的轴向扩展位移越大, 轴向扩展速度也越大。
- (3) 喷嘴直径较大时, Taylor 空腔轴向扩展位移、扩展速度总体上相对较大。Taylor 空腔出现“倒退”的现象推迟。
- (4) 渐扩结构因子  $\Delta D/L$  越大, 渐扩形边界对 Taylor 空腔径向扰动的影响越大, Taylor 空腔轴向扩展位移的增量就越小。

**参考文献:**

[1] Kim J U, Suk H. Characterization of high-density plasma produced by electro-thermal capillary discharge[J]. Ap-

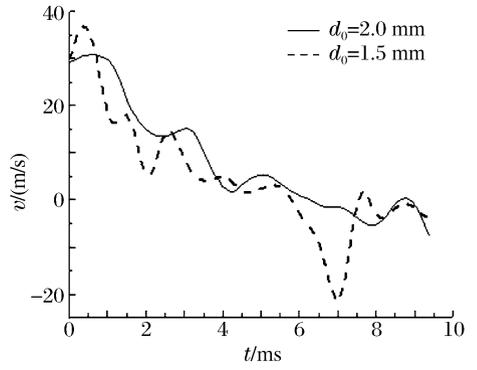


图 9 不同喷嘴直径下的  $v-t$  曲线

Fig. 9  $v-t$  curves at different nozzle diameters

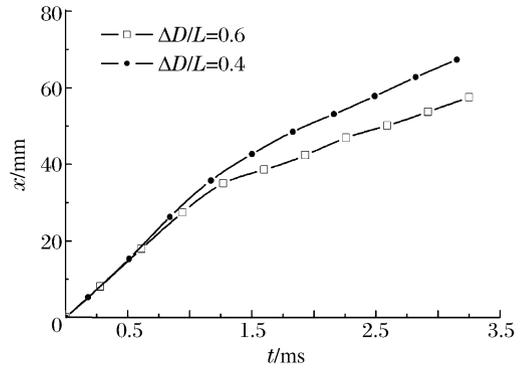


图 10 不同  $\Delta D/L$  时的  $x-t$  曲线

Fig. 10  $v-t$  curves at different divergent ratios

- plied Physics Letters, 2002, 80(3):368-370.
- [2] Wilson D E, Kim K J, Raja R R. Theoretical analysis of an external pulsed plasma jet[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1999, 35(1):228-233.
- [3] Hsiao C C, Phillips G T, Su F Y. A numerical model for ETC gun interior ballistics applications[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1993, 29(1):567-572.
- [4] 刘东尧, 周彦煌. 液体发射药电热化学发射内弹道一维两相流模型及数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(4):158-162.  
LIU Dong-yao, ZHUO Yan-huang. A 1-dimension two phase interior ballistics model of liquid propellant electrothermal chemical launching[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(4):158-162.
- [5] Kuo K K, Cheung F B, Hsieh W H. Experiments study of plasma/fluid interaction in a simulated CAP gun[C]// Proceeding of the 27th JANNAF combustion subcommittee meeting. Maryland, USA, 1990(1):365-375.
- [6] Arensburg A, Wald S, Goldsmith S. X-ray diagnostics of a plasma-jet-liquid interaction in electrothermal guns[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 73(5):2145-2154.
- [7] 周彦煌, 刘东尧, 余永刚. 非稳态等离子体射流在液体中的膨胀特性[J]. 南京理工大学学报, 2003, 27(5):525-529.  
ZHUO Yan-huang, LIU Dong-yao, YU Yong-gang. Expansion characteristics of transient plasma jet in liquid[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2003, 27(5):525-529.
- [8] Talley R L, Owczarczak J A. Investigation of bulk-loaded liquid propellant gun concepts[R]. ADA279904, 1994.
- [9] YU Yong-gang, YAN Shan-heng, ZHAO Na, et al. Experimental study and numerical simulation on interaction of plasma jet and liquid media[C]// Power and Energy Engineering Conference, 2009:1-7.

## Experiment on plasma-liquid interaction in a stepped-wall chamber\*

ZHANG Qi, YU Yong-gang, LU Xin, LIU Dong-yao

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing 210094, Jiangsu, China)

**Abstract:** To explore the influence of the chamber boundary shape on the combustion control in a bulk-loaded liquid-medium electrothermal-chemical gun, the plasma jet propagation in the liquid medium was experimentally investigated by using a high-speed digital camera. Special attention was paid to the plasma jet-liquid medium interaction under the conditions of different discharge voltages, different nozzle diameters and different divergent boundaries. The time-sequence photos of the plasma jet propagation in the liquid medium were obtained, from the photos the axial displacement histories of the Taylor cavity were achieved under the different conditions, and the corresponding propagation velocities of the Taylor cavity were calculated. Sequentially, the interaction mechanism between the plasma jet and the liquid medium was analyzed. The results indicate that though the axial velocity of the Taylor cavity is fluctuant, as a whole it is decrescent; and that at the wall steps, the radial turbulence of the plasma jet is enhanced, which can strengthen the entrainment effect of reflux.

**Key words:** fluid mechanics; plasma jet; stepped-wall; liquid medium; electrothermal-chemical gun

\* Received 22 February 2010; Revised 7 June 2010

Supported by the National Natural Science Foundation of China (50776048)

Corresponding author: ZHANG Qi, qzhging@gmail.com