

文章编号: 1006-9941(2017)02-0144-06

## 脉冲等离子射流在液体介质中扩展特性的测量与分析

刘怡<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:** 为了深入了解液体工质电热化学炮的燃烧推进机理, 设计了模拟实验装置。采用高速录像系统, 观察了脉冲等离子射流喷入液体介质中的扩展过程。测量了脉冲等离子射流在液体介质中形成 Taylor 空腔的轴向位移和体积变化。得到了 Taylor 空腔体积随时间变化的定量扩展规律。讨论了贮液室边界形状、放电电压和喷嘴直径对等离子射流扩展的影响。结果表明, 两相交界处由于湍流掺混形成皱褶不光滑的交界面。Taylor 空腔扩展过程中出现了明显的振荡现象。渐扩结构因子由 0.6 减小到 0.4, 轴向位移第一峰值和体积第一峰值分别增大 16.6% 和 12.4%。放电电压由 3000 V 减小到 2100 V, 轴向位移第一峰值和体积第一峰值分别减小 36.1% 和 60.7%。喷嘴直径由 2 mm 减小到 1.5 mm, 轴向位移第一峰值和体积第一峰值分别减小 27.2% 和 56.7%。

**关键词:** 电热化学发射; 等离子射流; 液体介质; Taylor 空腔; 扩展特性

中图分类号: TJ399

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.02.009

### 1 引言

电热化学炮<sup>[1]</sup> 由于其超高速、高动能、大威力等优点, 在新概念火炮领域具有很强的竞争力。电热化学炮包括固体工质电热化学炮 (solid propellant electrothermal chemical gun, SPETCG) 和液体工质电热化学炮 (liquid propellant electrothermal chemical gun, LPETCG), 与固体发射药相比, 液体发射药<sup>[2]</sup> 有很多突出的优点, 如: 具有较大的装填密度、易实现装填自动化、易储存和运输等等。

整装式液体发射药燃烧不稳定且难以控制<sup>[3]</sup>, 所以 LPETCG 的燃烧稳定性控制技术是关键技术之一, 等离子与液体工质相互作用的过程和特性是燃烧稳定性控制的核心问题。国内外学者对等离子与固体介质相互作用的研究比较多<sup>[4-7]</sup>, 对等离子与液体介质相互作用也进行了一些研究。刘东尧<sup>[8]</sup> 分析了等离子与液体介质相互作用面上的传热传质现象, 发现了与相同喷嘴结构下的火药气体射流在液体介质中的扩展相比, 等离子体射流的比冲远高于常规火药燃气的比冲。周彦煌<sup>[9]</sup> 通过实验观察到等离子射流在液体介质中的膨胀是一

种典型的 Taylor 空腔的扩展过程, 发现两相界面存在明显的冷却暗区, Taylor 空腔有时会出现间断。前人通过采用渐扩结构燃烧室来改善整装式液体发射药燃烧的不稳定性<sup>[10-11]</sup>, 这种方式同样可以运用于 LPETCG 的燃烧稳定性控制技术中。Yu 等<sup>[12-13]</sup> 通过设计实验和数值仿真说明了多级渐扩燃烧室对等离子射流在液体介质中扩展稳定性有积极影响。张琦<sup>[14-15]</sup> 测量了不同形状充液室中脉冲等离子射流在液体介质中扩展初期的轴向位移、速度和加速度, 研究了等离子射流在液体介质中的轴向扩展特性, 还建立了等离子射流扩展的二维轴对称非稳态数学模型, 结果显示渐扩充液室边界形状能够改善 Taylor 空腔扩展过程中的不稳定性。

电热化学炮发射过程中, 等离子体喷入贮液室中形成 Taylor 空腔, 燃烧主要发生在 Taylor 空腔与液体工质的交界面上, 对 Taylor 空腔体积扩展特性的研究有助于了解交界面处的燃烧特性及燃气生成量, 从而为深入分析电热化学炮内弹道过程稳定性有重要价值。关于等离子射流在液体介质中体积随时间变化规律, 前人并没有进行具体的定量描述。本研究测量了脉冲等离子射流在液体介质中扩展的体积变化, 总结了 Taylor 空腔体积随时间变化的扩展规律, 分析了脉冲等离子射流在液体介质中的扩展特性, 且不仅限于 Taylor 空腔的扩展初期, 同时还探讨了贮液室边界形状、放电电压和喷嘴直径变化对脉冲等离子射流体积扩展的影响。

收稿日期: 2016-09-23; 修回日期: 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(51506094)

作者简介: 刘怡(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事等离子射流扩展特性研究。e-mail: liuyi61mm@163.com

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

## 2 实验装置

依据小口径电热化学发射装置的要求,设计了模拟实验装置,它由脉冲功率源、等离子发生器、贮液室和高速录像系统组成。脉冲功率源主要是由电容储能的脉冲形成网络(PFN)组成,如图1所示,实验所用的电容器组的容量为  $46.5 \mu\text{F}$ ,电感器电感为  $35 \mu\text{H}$ 。实验主体部分包括等离子发生器(毛细管、电爆炸丝、一对电极、喷嘴、毛细管外的绝缘体和金属壳体)和观察室(贮液室),如图2所示。实验所用毛细管长度为

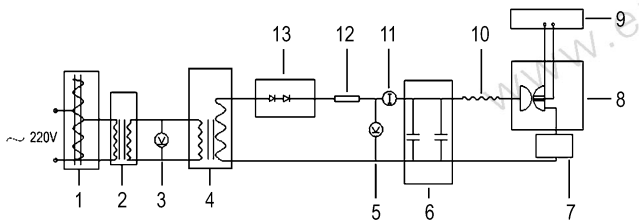


图1 脉冲形成网络

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. 1 Pulse forming network

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

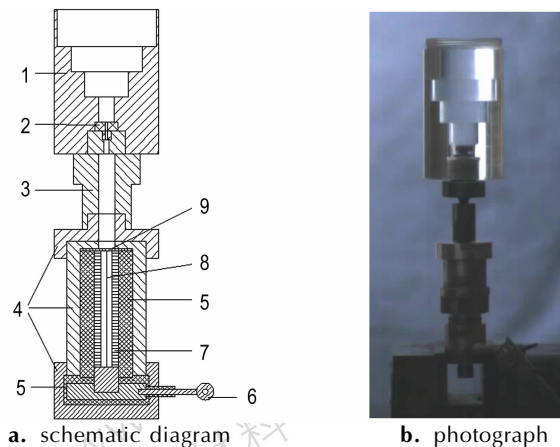


图2 等离子发生器和贮液室

1—贮液室, 2—喷嘴, 3—接头, 4—金属壳体, 5—绝缘体, 6—阳极, 7—毛细管, 8—电爆炸丝, 9—膜片(阴极)

Fig. 2 Plasma generator and liquid chamber

1—liquid chamber, 2—nozzle, 3—connection head, 4—metal case, 5—insulator, 6—anode, 7—capillary, 8—electric exploding wire, 9—diaphragm(cathode)

73 mm,内径为 6 mm,采用聚乙烯材料,电爆炸丝的材料为铝。贮液室采用四级台阶圆柱渐扩型,由透明的有机玻璃制成,内部充满液体,考虑实验安全性,选用水作为液体介质。等离子射流与液体介质相互作用过程采用 FASTCAM-ultima APX 高速录像系统进行记录,拍摄频率为 3000 幅/s。

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 在液体介质中的扩展过程和特性

实验过程中,脉冲功率源将电能加载于等离子发生器的两极,电爆炸丝爆炸形成高温金属等离子体,烧蚀毛细管壁面聚乙烯材料形成等离子体混合物,当其压力超过破膜压力后,等离子射流冲破膜片,从喷嘴喷出并注入贮液室与液体介质相互作用。实验中放电电压  $U_c$  为 3000 V,喷嘴直径  $d_0$  为 2 mm。

脉冲等离子射流在液体介质中的扩展形态演化图如图3所示,选取时间  $t$  为 0 ~ 20 ms 的序列照片进行测量分析。图中只截取了贮液室内两相流相互作用的过程,舍去了液体介质受挤压喷入空气的部分。从图中可以看出,脉冲等离子射流与贮液室中的液体介质相互作用形成 Taylor 空腔,由于贮液室渐扩台阶的径向诱导作用,Taylor 空腔整个扩展过程沿着渐扩台阶逐级进行。约 1 ms 的时候,空腔充满第一级贮液室,约 4 ms 充满第二级,约 7 ms 充满第三级。扩展过程中轴向扩展比径向扩展快,并且径向位移在达到贮液室壁面以后,受到壁面限制不再扩展。

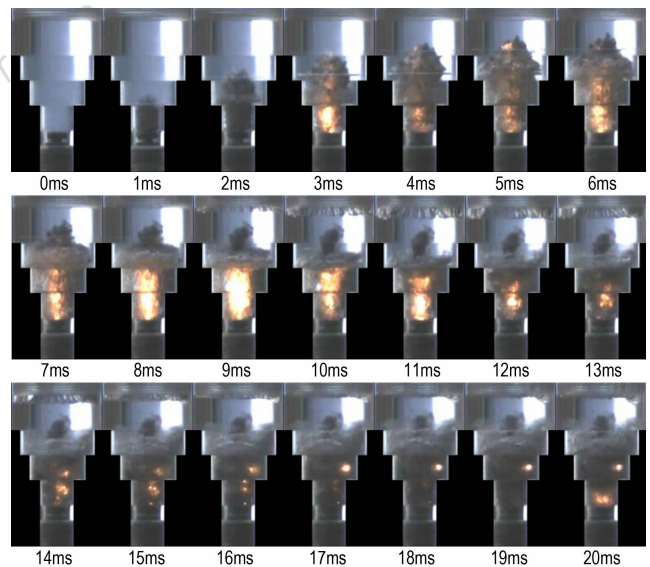


图3 脉冲等离子射流在液体介质中的扩展形态演化图

Fig. 3 Evolution process of pulsed plasma jet in liquid medium

Taylor 空腔与液体介质的两相交界面存在湍流掺混, 边界模糊不光滑, 同时空腔亮度也有变化, 等离子体喷入液体介质后亮度逐渐增强, 9 ms 时亮度最大, 随后又渐渐变暗, 后期只能看到零星的亮点。这主要是因为两相交界面不稳定, 湍流掺混越来越强, 降低了等离子射流的温度, 同时形成大量气泡和蒸汽团, 加强了遮光效应。

Taylor 空腔扩展过程中还出现了振荡现象。扩展初期, 0 ~ 7 ms, Taylor 空腔扩展较快, 空腔不断变大并将液体挤压出贮液室; 7 ~ 11 ms, Taylor 空腔前端面往回运动, 液体回流, 空腔范围缩小; 11 ms 以后又继续向外扩展。这主要是由于等离子射流喷射初期, 高温高压射流提供能量推动空腔前端液面向上运动, 此时 Taylor 空腔压力大于水压; 中期由于等离子射流前端的动能耗尽, Taylor 空腔的压力小于水压, 部分挤压出去的液体回流, 使得空腔前端面往回运动; 后期由于 Taylor 空腔被压缩, 增大了空腔的压力, 又推动了空腔前端面的运动, 进而在贮液室中就出现了 Taylor 空腔来回振荡的现象。

脉冲等离子射流在液体介质中的扩展形态变化复杂, 影响因素较多。为了进一步定量表征等离子射流与液体相互作用的特性, 通过运用 Photoshop 软件, 对脉冲等离子射流在液体介质中的扩展形态演化图进行测量, 通过比例换算, 获得了 Taylor 空腔的轴向位移 ( $x$ ) 和体积 ( $V$ ) 随时间 ( $t$ ) 变化的曲线, 如图 4 所示。

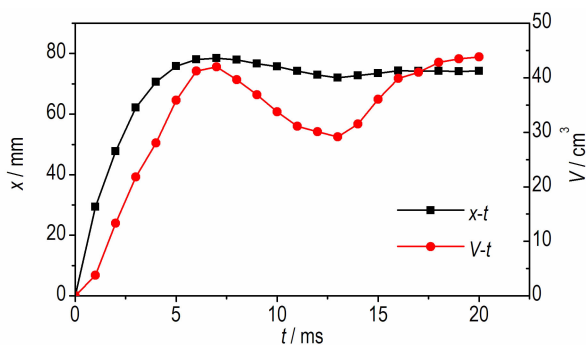


图 4 Taylor 空腔轴向位移和体积随时间变化的曲线

Fig. 4 Change curves in axial displacement and volume of Taylor cavity with time

由图 4 可见,  $x-t$  和  $V-t$  曲线都是先增大后出现波动,  $V-t$  曲线波动幅度比  $x-t$  曲线波动幅度大。0 ~ 7 ms 期间, Taylor 空腔的轴向位移和体积都增大, 轴向位移扩展的平均速率约为  $11.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 在 7 ms 时轴向位移达到第一峰值 78.5 mm, 之后曲线有微小

的波动, 于 13 ms 的时候达最小值 71.9 mm, 后期基本稳定在 74 mm 左右。而 Taylor 空腔体积在 7 ms 时达到第一峰值  $42 \text{ cm}^3$ , 随后出现明显的振荡现象, 13 ms 的时候出现最小值  $29.2 \text{ cm}^3$ , 之后曲线继续增长, 于 20 ms 达到  $43.8 \text{ cm}^3$ 。

根据 Taylor 空腔的体积变化规律,  $V-t$  曲线可分为“增长段”和“振荡段”两个阶段。其中 Taylor 空腔体积由 0 到体积最大值  $V_{\max}$  为增长段,  $V_{\max}$  以后为体积振荡段。通过曲线拟合, 得到 Taylor 空腔体积随时间变化的经验关系式:

$$V(t) = \begin{cases} a + be^{-\frac{t}{c}} & V < V_{\max} \\ A + B\cos(\omega t + \varphi) & V \geq V_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为 Taylor 空腔体积增长段的参数,  $A$ 、 $B$ 、 $\omega$ 、 $\varphi$  为体积振荡段的参数, 具体数值如表 1 所示。

表 1 Taylor 空腔体积随时间变化经验关系式的参数值

Table 1 Parameter values of experiential formula of changes in the volume of Taylor cavity with time

fitting parameter	$a$	$b$	$c$	$A$	$B$	$\omega$	$\varphi$
value	95.51	-97.64	10.82	36.95	7.07	0.47	3.66

### 3.2 贮液室边界形状的影响

为了探讨贮液室边界形状变化对等离子射流扩展特性的影响, 实验所用的贮液室采用三级圆柱渐扩型和四级圆柱渐扩型两种。贮液室边界形状尺寸的设计需要使 Taylor 空腔扩展过程中能受到壁面约束并沿着渐扩台阶逐级扩展。具体结构尺寸如表 2 所示。定义每一级台阶的直径增量  $\Delta D$  与该级台阶的长度  $L$  之比为渐扩结构因子  $n$ , 即:

$$n = \Delta D / L \quad (2)$$

则三级圆柱渐扩型贮液室的  $n = \frac{\Delta D}{L} = \frac{12}{30} = 0.4$ , 四

级圆柱渐扩型贮液室的  $n = \frac{\Delta D}{L} = \frac{12}{20} = 0.6$ 。

表 2 贮液室结构尺寸

Table 2 Structure size of liquid chamber

No.	type	structure size/mm							
		$D_1$	$L_1$	$D_2$	$L_2$	$D_3$	$L_3$	$D_4$	$L_4$
1	three steps	18	30	30	30	42	38	-	-
2	four steps	18	20	30	20	42	20	54	38

分别对两种贮液室中 Taylor 空腔的轴向位移和

体积随时间变化关系进行测量,所采用的放电电压为 3000 V,喷嘴直径为 2 mm。Taylor 空腔的轴向位移和体积变化曲线如图 5 所示。由图 5a 可见,两条曲线的走势都是先增长,后逐渐趋于稳定。0~3 ms 期间,两条曲线基本重合,Taylor 空腔平均扩展速度约为  $20.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。3 ms 时刻之后, $n=0.4$  的曲线高于  $n=0.6$  的曲线,且波动更剧烈, $n=0.4$  的曲线在 7 ms 的时候达到第一峰值 91.5 mm,比  $n=0.6$  的曲线的第一峰值大 13 mm,增大了 16.6%;  $n=0.4$  的曲线在 13 ms 的时候为最小值 81.8 mm,比  $n=0.6$  的曲线的最小值大 10.1 mm。可以看出,贮液室的  $n$  越大,Taylor 空腔的轴向位移变化越小。另外,由图 5b 可以看出,0~6 ms 期间,两条曲线基本重合,随后两条曲线都出现了明显的波动。 $n=0.4$  的曲线在 8 ms 达到第一峰值  $47.2 \text{ cm}^3$ ,比  $n=0.6$  的曲线第一峰值高  $5.2 \text{ cm}^3$ ,增大了 12.4%;  $n=0.4$  的曲线在 13 ms 达到最小值  $40.7 \text{ cm}^3$ ,比  $n=0.6$  的曲线最小值高  $11.5 \text{ cm}^3$ 。可以看出,贮液室的  $n$  越大,后期 Taylor 空腔的体积波动越大。这主要是因为:渐扩结构因子  $n$  增大,台阶的径向诱导作用增强,使得两相之间轴向湍流速度减弱,径向湍流速度增强,导致空腔的轴向位移变

化减小,轴向位移的振荡也减弱。同时,由于 Taylor 空腔轴向扩展能量的减弱,贮液室上端挤压出去液柱回流,进一步压缩了 Taylor 空腔体积,Taylor 空腔内的压力增大,又进一步膨胀,所以渐扩结构因子  $n$  越大,Taylor 空腔后期的体积波动也越大。

### 3.3 放电电压的影响

放电电压也是影响等离子射流扩展特性的一个重要参数,分别采取了 3000,2500 V 和 2100 V 的放电电压进行实验,喷嘴直径为 2 mm。在不同的放电电压下,分别测出了 Taylor 空腔的轴向位移和体积随时间变化的曲线图,如图 6 所示。由图 6a 可知,Taylor 空腔的轴向位移是先增大后出现不同程度的波动,放电电压  $U_c$  为 3000,2500 V 和 2100 V 的  $x-t$  曲线第一峰值分别是 78.5,56.6 mm 和 50.2 mm,放电电压由 3000 V 减小到 2100 V,轴向位移第一峰值减小了 36.1%,由此可知,放电电压越小,Taylor 空腔的轴向位移越小。另外,由图 6b 可以看出,Taylor 空腔的体积随时间的变化比轴向位移随时间的变化更剧烈,波动性更强。放电电压  $U_c$  为 3000,2500 V 和 2100 V 的  $V-t$  曲线第一峰值分别是  $42,26.3 \text{ cm}^3$  和  $16.5 \text{ cm}^3$ ,放电电压由 3000 V 减小到 2100 V,体积第一峰值减小了 60.7%。曲线波动都很剧烈,但是放电电压为

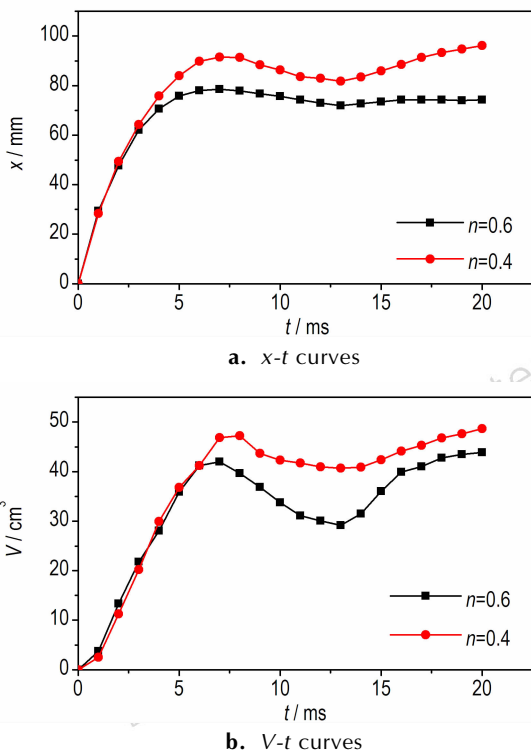


图 5 不同贮液室边界形状下 Taylor 空腔轴向位移和体积变化曲线

Fig. 5 Change curves in axial displacement and volume of Taylor cavity at different liquid chamber boundary shape

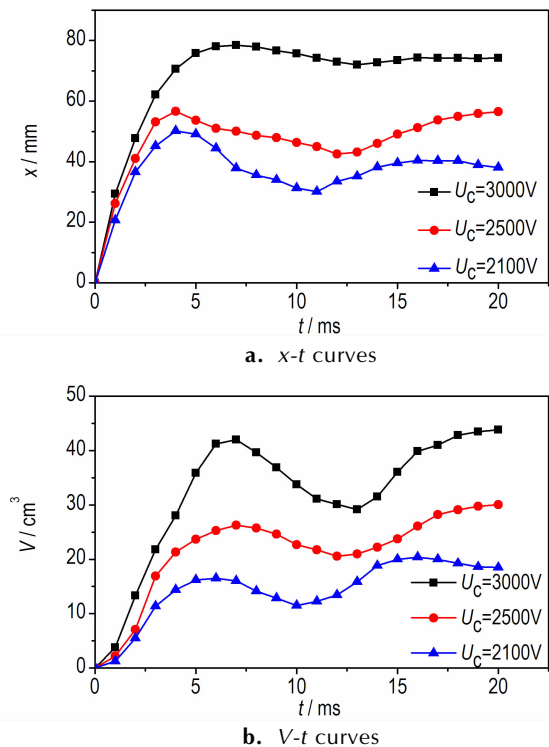


图 6 不同放电电压下 Taylor 空腔轴向位移和体积变化曲线

Fig. 6 Change curves in axial displacement and volume of Taylor cavity at different discharge voltage

2100 V 的曲线波动率先出现了第二峰值, 其波动频率大, 稳定性最差。这可以解释为: 放电电压小, 等离子射流的能量小, 所以 Taylor 空腔的内部压力小, 空腔的轴向扩展受到液压的限制导致轴向位移变小, 空腔能量小导致  $U_c = 2100$  V 的曲线更早降到最小值, 液体回流加剧了 Taylor 空腔与液体介质之间的湍流掺混, 导致 Taylor 空腔体积波动大, 不利于扩展过程中的稳定性。

### 3.4 喷嘴直径的影响

脉冲等离子射流通过喷嘴喷入贮液室中, 喷嘴直径的大小对等离子射流的喷射强度有一定影响, 为了研究喷嘴直径对等离子射流扩展特性的影响, 实验分别采用喷嘴直径  $d_0$  为 2 mm 和 1.5 mm 的喷嘴进行实验, 放电电压  $U_c = 2700$  V, 渐扩结构因子  $n = 0.4$ 。经过测定, 得到 Taylor 空腔轴向位移和体积随时间变化的对比曲线, 如图 7 所示。由图 7a 可知, 两条曲线都是先增大后逐渐趋于平稳,  $d_0 = 2$  mm 的曲线全程高于  $d_0 = 1.5$  mm 的曲线, 两条曲线都是在 7 ms 的时候达到第一峰值, 这一时刻 Taylor 空腔轴向位移第一峰值分别为 85.2 mm 和 62.0 mm, 减小了 27.2%, 且 Taylor 空腔扩展的平均速度分别为  $12.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $8.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 相差  $3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可以看出, 喷嘴直径越

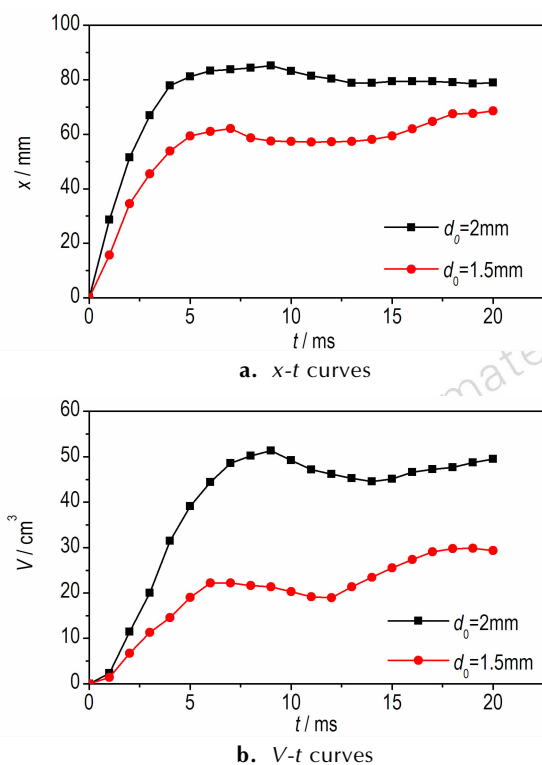


图 7 不同喷嘴直径下 Taylor 空腔轴向位移和体积变化曲线  
Fig.7 Change curves in axial displacement and volume of Taylor cavity at different nozzle diameter

大, Taylor 空腔的轴向位移扩展越大, 扩展速度也越快。另外, 由图 7b 可见,  $d_0 = 2$  mm 的曲线全程高于  $d_0 = 1.5$  mm 的曲线, 但采用直径为 1.5 mm 喷嘴实验中形成的 Taylor 空腔体积率先达到第一峰值  $22.2 \text{ cm}^3$ , 与采用直径为 2 mm 喷嘴实验中形成的 Taylor 空腔体积的第一峰值  $51.3 \text{ cm}^3$  相比, 减小了 56.7%。说明喷嘴直径越大, Taylor 空腔的扩展能力越强。主要是因为喷嘴直径越大, 等离子射流的质量流量越大, 能量越高, 导致 Taylor 空腔中的压力越大, 有利于空腔的扩展, 所以 Taylor 空腔的轴向位移和体积变化越大, 空腔扩展能力越强。

## 4 结 论

实验观察了 0 ~ 20 ms 脉冲等离子射流在液体介质中的扩展过程和形态, 测定了 Taylor 空腔的轴向位移和体积变化的具体数值, 讨论了贮液室边界形状、放电电压和喷嘴直径对等离子射流扩展特性的影响, 可得出以下结论:

(1) 脉冲等离子射流在液体介质中扩展形成 Taylor 空腔, 空腔界面褶皱不光滑, Taylor 空腔沿着贮液室的渐扩台阶逐级扩展, 扩展过程中亮度逐渐增强, 于 9ms 时达到最大亮度后变暗, 后期只能看到零星的亮点;

(2) Taylor 空腔体积随时间变化的扩展规律为

$$V(t) = \begin{cases} a+be^{-\frac{t}{\tau}} & V < V_{\max} \\ A+B\cos(\omega t+\varphi) & V \geq V_{\max} \end{cases}, \text{空腔体积先增大后}$$

出现振荡现象, 不利于电热化学炮内弹道过程的稳定性;

(3) 当放电电压为 3000 V, 喷嘴直径为 2 mm 时, 贮液室的渐扩结构因子  $n$  由 0.6 减小到 0.4, Taylor 空腔的扩展能力增强, 轴向位移第一峰值增大了 16.6%, 体积第一峰值增大了 12.4%; 放电电压  $U_c$  由 3000 V 减小到 2100 V, 轴向位移第一峰值减小了 36.1%, 体积第一峰值减小了 60.7%; 喷嘴直径  $d_0$  由 2 mm 减小到 1.5 mm, 轴向位移第一峰值减小了 27.2%, 体积第一峰值减小了 56.7%。

### 参考文献:

- [1] 王明东, 王天祥. 新概念武器的现状与发展趋势[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(6): 1-5.  
WANG Ming-dong, WANG Tian-xiang. Actuality and development trend of new concept weapons[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2014, 35(6): 1-5.
- [2] 程石, 孙耀琪. 液体发射药火炮及其发展趋势[J]. 国防技术基

- 础, 2008(4): 51-55.  
CHENG Shi, SUN Yao-qi. Liquid propellant gun and its development trend[J]. *Technology Foundation of National Defence*, 2008(4): 51-55.
- [3] XUE Xiao-chun, YU Yong-gang, MANG Shan-shan. Physical characteristics on high-pressure combustion and propelling process of bulk-loaded energetic liquid[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 98: 1070-1079.
- [4] LI Xing-wen, LI Rui, JIA Shen-li, et al. Interaction features of different propellants under plasma impingement[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(6): 63303.
- [5] 冯红艳, 朱顺官, 张琳, 等. SCB 传热模型及点火能量验证[J]. 含能材料, 2009, 17(6): 699-703.  
FENG Yan-hong, ZHU Shun-guan, ZHANG Lin, et al. Validation of energy transfer and continuum heat transfer model for the SCB plasma[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(6): 699-703.
- [6] 肖正刚, 应三九, 周伟良, 等. 低敏感高能发射药等离子体点火研究动态[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 633-638.  
XIAO Zheng-gang, YING San-jiu, ZHOU Wei-liang, et al. Progress in plasma ignition of insensitive high energy propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 633-638.
- [7] 倪琰杰, 邢荣军, 栗保明, 等. 多孔发射药等离子体增强燃速[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(4): 562-567.  
NI Yan-jie, XING Rong-jun, LI Bao-ming, et al. Porous propellant burning rate enhanced by plasma[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(4): 562-567.
- [8] 刘东尧, 周彦煌, 余永刚. 爆炸等离子体射流在液体中扩展过程实验研究[J]. 弹道学报, 2004, 16(2): 7-10.  
LIU Dong-yao, ZHOU Yan-huang, YU Yong-gang. Experimental study on plasma jet expansion process in liquid[J]. *Journal of Ballistics*, 2004, 16(2): 7-10.
- [9] 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(自然科学版), 2003, 27(5): 525-529.  
ZHOU Yan-huang, LIU Dong-yao, YU Yong-gang. Expansion characteristics of unstable plasma jet in liquid[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology(Nature Science)*, 2003, 27(5): 525-529.
- [10] XUE Xiao-chun, YU Yong-gang, ZHANG Qi. Study on expansion characteristic of twin combustion gas jets in five-stage cylindrical stepped-wall observation chamber[J]. *Flow Turbulence and Combustion*, 2013, 91(1): 139-155.
- [11] 莽珊珊, 余永刚, 张琦. 燃烧室边界形状对整装含能液体高压燃烧稳定性影响的实验研究[J]. 弹道学报, 2013, 25(4): 85-89.  
MANG Shan-shan, YU Yong-gang, ZHANG Qi. Experimental research on effects of chamber wall shape on high-pressure combustion stability of bulk-loaded energetic liquid[J]. *Journal of Ballistics*, 2013, 25(4): 85-89.
- [12] YU Yong-gang, YAN Shao-heng, ZHAO Na, et al. Influence of boundary shape on interaction process of plasma jet and liquid media[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2010, 33(1): 541-548.
- [13] YU Yong-gang, YAN Shao-heng, ZHAO Na, et al. Experimental study and numerical simulation on interaction of plasma jet and liquid media[C] // Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, 2009.
- [14] 张琦, 余永刚. 边界形状影响等离子体射流扩展特性的实验研究[J]. 实验流体力学, 2013, 27(1): 15-19.  
ZHANG Qi, YU Yong-gang. Experimental study on boundary shape affecting propagation properties of plasma jet[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2013, 27(1): 15-19.
- [15] 张琦, 余永刚, 陆欣, 等. 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[J]. 爆炸与冲击, 2011(3): 311-316.  
ZHANG Qi, YU Yong-gang, LU Xing, et al. Experiment on plasma-liquid interaction in a stepped-wall chamber[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011(3): 311-316.

## Measurement and Analysis of Expansion Characteristics of Pulsed Plasma Jet in Liquid Medium

LIU Yi<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 deeply understand the combustion and propulsion mechanism in liquid propellant electrothermal chemical gun, an experiment device was designed. The expansion process of injecting the pulsed plasma jet into the liquid medium was observed by a high-speed video system. The changes in axial displacement and volume of Taylor cavity formed by the interaction of plasma jet and liquid medium were measured. The quantitative expansion law for the change in Taylor cavity volume with time was obtained. The effects of liquid chamber boundary shape, discharge voltage and nozzle diameter on the pulsed plasma jet expansion were discussed. Results show that the non smooth interface with wrinkles in junction of two-phase due to the turbulent mixing is formed. There is an obvious oscillation phenomenon in the expansion process of Taylor cavity. The stepped-wall structure factor decreases from 0.6 to 0.4, the axial displacement first peak and the volume first peak increase by 16.6% and 12.4%, respectively. The discharge voltage decreases from 3000 V to 2100 V, the axial displacement first peak and the volume first peak reduce by 36.1% and 60.7%, respectively. The nozzle diameter decreases from 2 mm to 1.5 mm, the axial displacement first peak and the volume first peak reduce by 27.2% and 56.7%, respectively.

**Key words:** electrothermal chemical propulsion; plasma jet; liquid medium; Taylor cavity; extended characteristic

**CLC number:** TJ399

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.02.009