

## 四股燃气射流在整装式液体中扩展特性的实验研究

冯博声, 薛晓春

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了探索控制整装式液体发射药火炮燃烧稳定性的方法, 设计了多结构的圆柱及圆柱渐扩型观察室, 利用高速数字录像系统记录了四股燃气射流的扩展过程, 通过处理射流扩展过程的序列图, 得到不同时刻燃气射流头部的平均轴向位移, 对比了采用不同渐扩比的 A 型、B 型和 G 型观察室以及在 A 型观察室中不同喷孔压力、喷孔直径、喷孔中心间距等参数对四股燃气射流在液体工质中扩展特性的影响。实验结果表明: 多级渐扩型结构能够通过台阶的诱导作用, 增强射流径向扰动, 当渐扩比 ( $\Delta D/L$ ) 从 0.3 增加到 0.6, 射流轴向位移减小了 10.8%; 随着喷孔压力增大, 气体射流强度增大, 喷孔压力从 9.18 MPa 增大到 15.30 MPa,  $t=4$  ms 射流轴向位移增加了 20.9%; 当喷孔直径从 1.4 mm 增大到 2.0 mm 时, 轴向位移较快, 气液掺混较剧烈,  $t=5$  ms 射流轴向位移增加了 24.1%; 增大喷孔中心间距, 可以使径向扩展更加充分, 减慢轴向扩展, 当喷孔间距从 16mm 增大 20 mm 时,  $t=5$  ms 射流轴向位移减小了 20.6%。

**关键词:** 整装式液体发射药火炮; 四股燃气射流; Taylor 扩展特性; 渐扩型观察室

中图分类号: TJ55; O34

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.12.006

### 1 引言

近年来, 军事技术的发展对弹丸的炮口动能和初速提出了更高要求。由于固体发射药火炮在这些方面难以取得较大突破, 因此液体发射药成为了研究重点之一。整装式液体发射药火炮的内弹道过程<sup>[1]</sup>: 点燃位于膛底的液体燃料, 局部被点燃后生成的燃气形成了 Taylor 空腔, 燃烧在 Taylor 空腔的气液交界面上进行, 由于 Taylor 空腔内燃气在气液交界面处存在相对运动, 导致 Kelvin-Helmholtz 不稳定性, 这种不稳定的正反馈机制使燃烧过程难以控制。目前, 普遍认为 Helmholtz 不稳定性会引起膛内压力震荡<sup>[2]</sup>, 在整装式液体发射药火炮中, 膛内压力曲线大部分情况下是双峰状, 其第一峰值的大小取决于点火射流的能量释放量, 而第二峰值则与内弹道过程所固有的液体发射药破碎机制有关。Helmholtz 效应使液体发射药不断地破碎直至充分燃烧, 但是这种破碎机理却带有很大

的随机性, 造成了燃烧表面波动的增加, 最终导致了燃烧过程的不稳定, 使整装式液体发射药火炮难以实际应用。早期, Morrison 和 Knapton<sup>[3]</sup> 指出整装式液体药火炮工作机理在于: 液体药火炮的燃烧过程依赖于流体不稳定引起的气液混合; Knapton<sup>[4]</sup> 指出整装式液体药火炮发展所面临的核心问题, 是如何控制整装式液体药燃烧的稳定性; 随后, Talley 和 Bracuti<sup>[5-6]</sup> 提出的采用多级渐扩型药室结构来控制燃烧稳定性。为了掌握多级渐扩型药室的稳燃机理, 余永刚<sup>[7-8]</sup>、齐丽婷<sup>[9-10]</sup>、莽珊珊<sup>[11-12]</sup> 尝试了几种多级渐扩型燃烧室, 开展了对单股燃气射流与液体相互作用的基础研究; 余永刚<sup>[13]</sup> 和薛晓春<sup>[14-17]</sup> 开展了对双股燃气射流与液体相互作用的实验及数值研究。目前对于较少股数的燃气射流扩展特性已有了认识, 但是对于在较大口径的火炮中, 进一步增加燃气射流股数, 气液复杂的湍流掺混及 Taylor 空腔的稳定扩展特性仍不清楚。

因此, 本研究以整装式液体发射药火炮多点点火为背景, 针对五级圆柱渐扩型观察室及圆柱型观察室, 开展了多股燃气射流与液体相互作用的实验研究, 主要讨论不同渐扩型观察室结构对多股燃气射流扩展过程的影响以及不同的工作参数下多股燃气射流在液体工质中的扩展过程, 通过分析实验结果找出合适的实验参数, 增强径向扩展, 减小 Helmholtz 不稳定性, 从而使液体发射药火炮的燃烧更加稳定。

收稿日期: 2017-04-18; 修回日期: 2017-06-13

基金项目: 国家自然科学基金资助(51506096); 江苏省自然科学基金(BK20150765)

作者简介: 冯博声(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事含能材料燃烧理论研究。e-mail: fengbs720@163.com

通信联系人: 薛晓春(1985-), 女, 副教授, 主要从事含能材料燃烧理论研究。e-mail: xiaochun13476@163.com

## 2 实验装置与原理

图1a是实验设备示意图,实验装置主要由电脉冲点火器、高压燃烧室、多孔喷嘴、五级圆柱渐扩型观察室/圆柱型观察室和高速摄影机等组成。圆柱渐扩型观察室由圆柱形的透明玻璃构成,便于观测记录,如图1b内部是A型和B型观察室的渐扩型空腔示意图,A型和B型结构尺寸只有空腔的渐扩台阶宽度不同,G型观察室是一个圆柱体空腔,没有渐扩型台阶;三种观察室底部连接着高压燃烧室,喷嘴结构如图1c所示,其中4个直喷嘴周向分布,通过圆心的两个喷嘴中心间距为 $s$ 。高压燃烧室内装有速燃火药,通过电点火的方式点燃火药,产生高温高压燃气。当高温高压燃气达到一定压力值时,冲破紫铜膜片,通过多孔喷嘴喷入到充满液体的渐扩型观察室中。此时,高压燃气开始在液体工质中扩展,形成Taylor空腔,通过数字高速录像系统记录Taylor空腔的扩展过程。实验过程中,为了消除重力影响,将实验装置竖直放置,即高压燃气多孔喷嘴向上喷射,观察室上端与大气相连,实际出口位置处与弹丸底部连接,当达到一定压力后,推动弹丸一起运动;目前主要针对弹丸未启动前的静态过程,讨论其中的气液湍流掺混特性,对影响射流扩

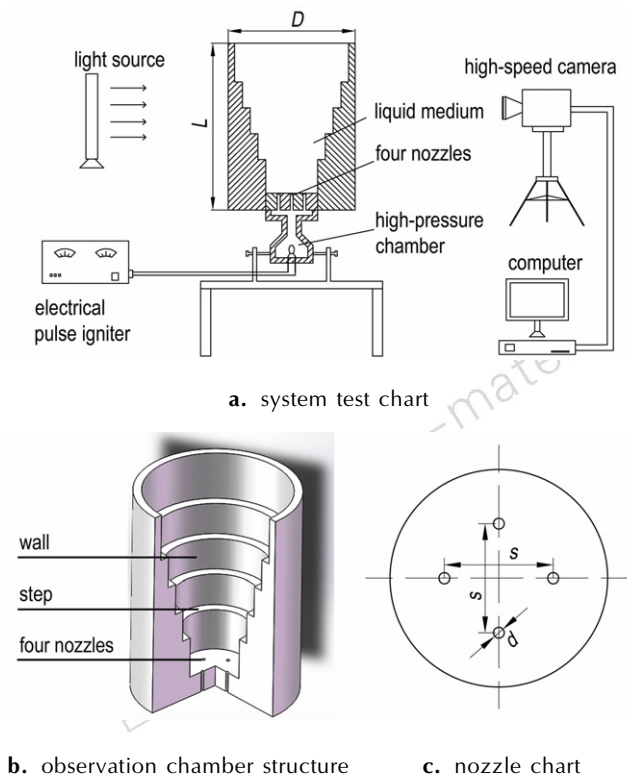


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagrams of experimental device

展稳定性的因素进行分析,分析结果可指导后期更为复杂的实际工作过程。在后期的研究中,将会逐步考虑更多的实际工作状态,并在将来加入燃烧进行更深入的研究;水的流动特性与液体发射药相似,因此实验中以水作为模拟液体工质。

实验探讨了多级圆柱渐扩型观察室的结构参数、喷射压力 $p$ 、喷孔直径 $d$ 和喷孔中心间距 $s$ 对多股燃气射流的影响。其中,不同观察室的结构参数如表1所示, $D_1 \sim D_5$ 为观察室内每级台阶直径, $L_1 \sim L_5$ 为观察室内每级台阶高度, $D$ 为观察室外直径, $L$ 为观察室总高度,三种观察室的 $L$ 相同,B型和G型的 $D$ 相同,与A型不同,渐扩比 $\Delta D/L$ 可以通过式(1)计算,由于G型观察室没有渐扩型台阶,所以没有 $\Delta D/L$ ;不同喷射压力通过改变装药量和紫铜膜片厚度来实现。

$$\Delta D/L = \frac{D_{n+1} - D_n}{L_n} \quad (n=1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

表1 观察室结构尺寸

Table 1 Observation chamber structure size

type	$D_1$ /mm	$D_2$ /mm	$D_3$ /mm	$D_4$ /mm	$D_5$ /mm	$L_1$ /mm	$L_2$ /mm
A	40	52	64	76	88	20	20
B	40	46	52	58	64	20	20
G	64	/	/	/	/	/	/

type	$L_3$ /mm	$L_4$ /mm	$L_5$ /mm	$L$ /mm	$D$ /mm	$\Delta D/L$
A	20	20	30	129	98	0.6
B	20	20	30	129	74	0.3
G	/	/	/	129	74	/

## 3 实验结果及分析

### 3.1 四股燃气射流在观察室中的扩展特性

实验采用A型观察室,即五级圆柱渐扩型观察室作为典型工况进行分析。实验工况:喷孔数为4个,喷射压力为9.18 MPa,喷孔直径为1.4 mm,喷孔中心间距为20 mm。图2为四股燃气射流在液体中扩展过程的序列图。在射流扩展过程的序列图中,射流扩展区域与观察室、充液区之间的颜色对比明显,利用数字图像处理技术中的边缘检测法,得到射流边界处的像素点坐标,结合观察室的尺寸,依次连接这些坐标获得不同时刻射流头部的位置,如图3所示,时间间隔为1 ms。

由图2和图3可见,四股燃气从不同的喷孔喷出,在液体工质中形成四个Taylor空腔。由于喷孔的位置关系,中间一股燃气将其正后方的另一股燃气遮挡

住,因此图 2 和图 3 中只显示出三股燃气射流。在  $t=1.0\text{ ms}$  时,四股射流明显分开,Taylor 空腔边界形状比较规则,呈现出圆锥状,射流的轴向扩展速度很快,而径向扩展则较为缓慢。然而,由于采用渐扩结构,观察室的径向直径是逐级增大,此时,Taylor 空腔刚扩展到径向直径较小的第一级台阶拐角处,因此射流能够很快充满观察室第一级,残留在观察室壁面处液体工质较少,仅在四股射流之间还残留部分的液体工质;在  $t=2.0\text{ ms}$  时,四股射流已经开始交汇,且由于渐扩台阶的诱导作用,增强了径向湍流,在台阶处出现向扩展,并且射流几乎充满了前两级台阶空间,由此可知,当射流扩展到达观察室出口时,没有残留在观察室壁面处的环形液体,因此不需要再通过气液之间的 Helmholtz 不稳定效应使残留的液体工质参与到 Taylor 空腔的扩展过程中,从而减弱了射流扩展后期的 Taylor 空腔边界的不稳定性; $t=3.0\text{ ms}$  时,射流头部已经发展到第三级台阶,此时四股射流几乎汇聚成了一股射流,并向前推进。观察图 2 和图 3 可以发现,射流头部较为稳定,每当射流发展到一个新台阶后,都能将前面的台阶充满。对比莽珊珊等人<sup>[6-7]</sup>的实验结果发现,四股燃气射流相对于单股而言,渐扩型边界对四股燃气射流的径向扰动更大,使四股燃气射流可以更快地扩展到观察室侧壁,有利于射流的稳定扩展;对比薛晓春等<sup>[10-13]</sup>的实验结果发现,四股燃气射流较双股而言,能够使气液掺混更加充分,增大了射流头部与液体工质的接触面积,使得气液掺混更多在 Taylor 空腔表面进行,并减少了滞留在观察室壁面的液体工质,从而抑制了射流在整个扩展过程中由于气液速度差而导致的 Helmholtz 不稳定效应。

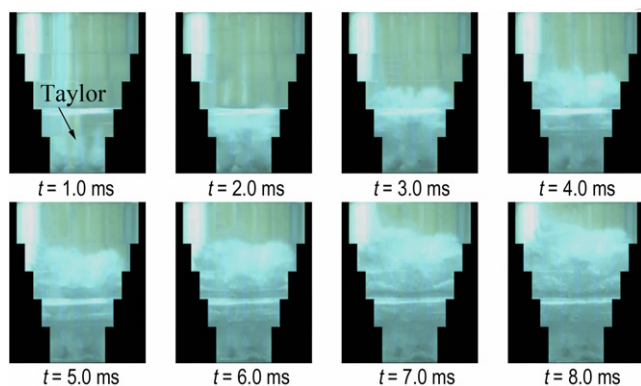


图 2 四股燃气射流在 A 型观察室中的扩展过程序列图  
Fig. 2 Sequence diagrams of the expansion process of four combustion-gas jet in A-type observation chamber

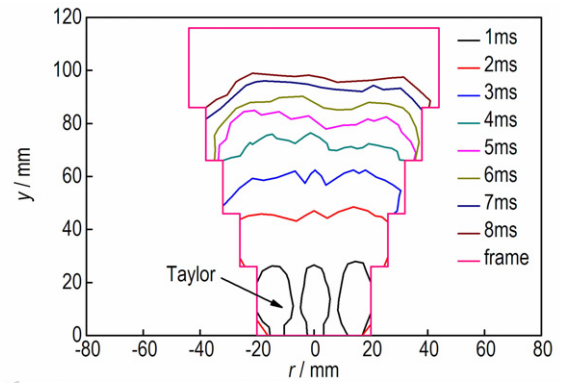


图 3 A 型观察室中不同时刻射流头部位置图  
Fig. 3 Jet head position diagram at different times in A-type observation chamber

### 3.2 不同参数对四股燃气射流在液体工质中扩展特性的影响

#### 3.2.1 渐扩比对四股燃气射流扩展特性的影响

图 4 和图 5 分别是采用 B 型和 G 型渐扩观察室时,四股燃气射流在液体中扩展过程的序列图。其实验工况都与图 2 相同。依照上述方法处理 B 型和 G 型观察室中射流的扩展序列图,可以得到其射流头部位置图,如图 6 所示。

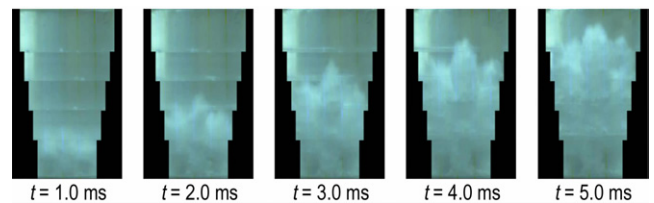


图 4 四股燃气射流在 B 型观察室中的扩展过程序列图  
Fig. 4 Sequence diagrams of the expansion process of four combustion-gas jet in B-type observation chamber

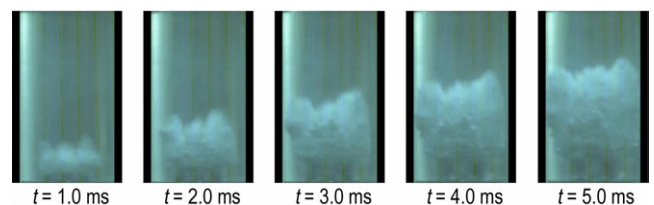


图 5 四股燃气射流在 G 型观察室中的扩展过程序列图  
Fig. 5 Sequence diagrams of the expansion process of four combustion-gas jet in G-type observation chamber

结合图 4 和图 6a 可以看出,对于 B 型观察室,在  $t=1.0\text{ ms}$  时,射流头部到达了第二个台阶,并且射流基本填满了第一个台阶;随着时间的推移,射流头部



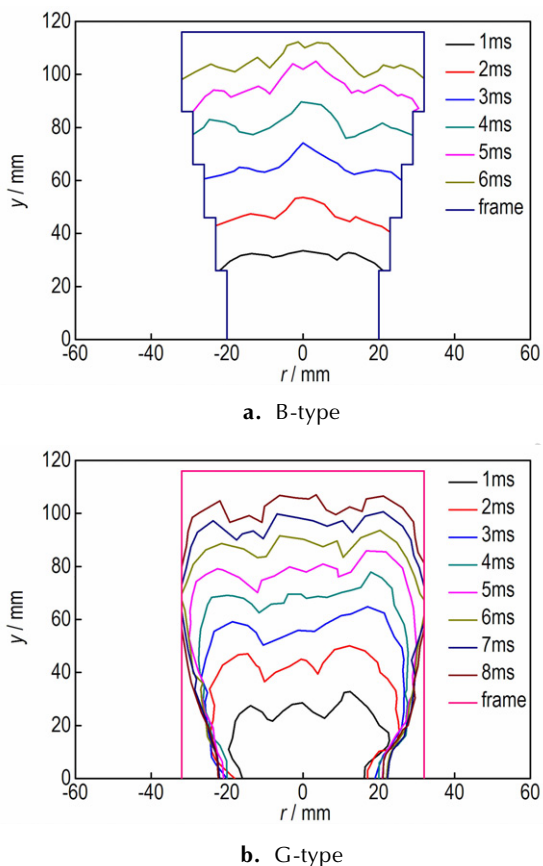


图6 不同观察室结构下的射流头部位置序列图  
Fig.6 Sequence diagrams of jet head position under different observation chambers

Taylor 空腔不稳定性开始表现出来,从  $t=2.0\text{ ms}$  开始,由于 Taylor 空腔扩展的不稳定性,导致强烈的气液交换,射流头部呈现出不规则的形状,随着射流的发展,这种不稳定性更加剧烈,在 Taylor 空腔和观察室壁面之间形成 Helmholtz 不稳定性气液交界面, Taylor 空腔呈现出尖锥状,不利于射流的稳定进行,导致整装式液体发射药火炮内弹道不稳定。除了轴向扩展速度外,本研究较为关心的还有 Taylor 空腔的径向发展过程。Taylor 空腔充分的径向发展,可以减少观察室侧壁滞留的液体工质,防止 Taylor 空腔和观察室侧壁液体工质形成较大的 Helmholtz 不稳定性气液交界面,避免因 Helmholtz 不稳定性导致的液面随机波动性占主导。观察图 5 和图 6b 可知,对于 G 型观察室,在  $t=1.0\text{ ms}$  时,四股射流刚从喷孔喷出,形成 Taylor 空腔,射流沿轴向扩展较快,而沿径向则扩展缓慢;在  $t=2.0\text{ ms}$  时,射流继续扩展,此时, Taylor 空腔与观察室侧壁之间还存在大量液体工质;在  $t=4.0\text{ ms}$  时, Taylor 空腔终于径向扩展到了观察室侧壁。由于缺少

台阶的诱导作用,圆柱观察室中射流径向扩展缓慢,导致喷孔周围的侧壁滞留了大量液体工质,只能通过 Helmholtz 不稳定性与气体相互作用,容易出现压力第二峰值。

通过处理三种不同结构的观察室中射流轴向扩展序列图,计算得到射流轴向扩展的位移对比图如图 7a 所示;根据处理图像获得的位移数据点,采用一阶指数衰减方程(2)拟合出射流轴向位移随时间变化的规律,将方程(2)对时间进行微分后得到方程(3),可以得到射流轴向扩展速度随时间的变化曲线,如图 7b 所示,可见射流轴向扩展速度均呈指数下降。

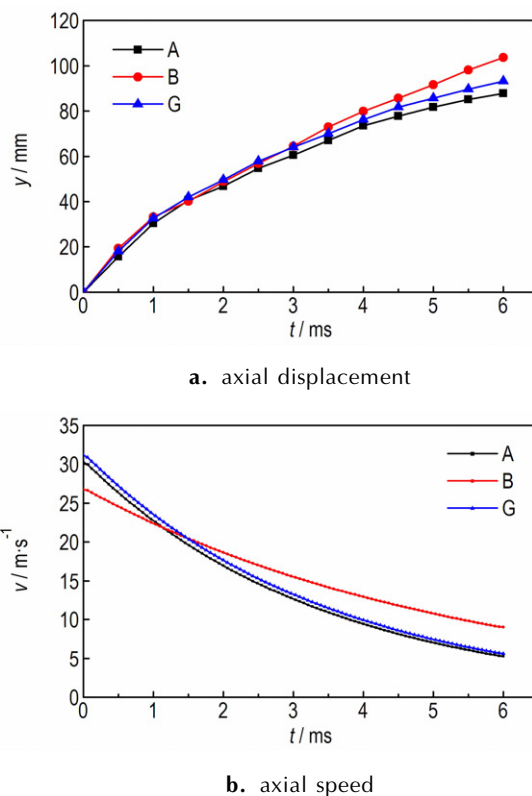


图7 三种观察室结构中的射流轴向位移和轴向速度对比图  
Fig.7 Comparison of the axial displacement and axial velocity of jet in three kinds of observation chamber structures

$$S(t) = A_0 + A_1 e^{-t/A_2} \tag{2}$$

$$V(t) = \frac{dS(t)}{dt} = -\frac{A_1}{A_2} e^{-t/A_2} \tag{3}$$

式中,  $S(t)$  为射流的轴向扩展位移, mm;  $V(t)$  为射流的轴向扩展速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 二者都是时间的函数;  $t$  为时间, ms;  $A_0, A_1$  和  $A_2$  为实验常数, 射流轴向位移随时间变化的拟合参数, 如表 2 所示。

由图 7 可见, 三种观察室中四股燃气射流扩展规律基本相同。但 B 型观察室中四股燃气射流的轴向

位移明显大于 A 型观察室。通过表 1 可以得知 A 型观察室的渐扩比  $\Delta D/L=0.6$ , 而 B 型观察室的渐扩比为  $\Delta D/L=0.3$ , 由图 7a 位移数据计算可得, 当渐扩比  $\Delta D/L$  从 0.3 增加到 0.6,  $t=5$  ms 射流轴向位移减小了 10.8%, 由此可以发现, 观察室的渐扩比越大, 台阶的诱导作用越强, 四股燃气射流沿轴向扩展越慢, 气液的湍流掺混强度越小, 射流头部发展越规则, 且由于径向扰动增大, 有利于射流的径向发展。而 G 型观察室中, 射流的轴向扩展速度在初期较慢, 但随着时间的推移, 由于 G 型观察室中射流缺少径向的约束作用, 因此在  $t=1$  ms 后, G 型观察室的轴向位移和轴向速度都略大于 A 型观察室, 说明渐扩比大的 A 型观察室, 能在一定程度上减慢轴向速度, 通过结合图 3 和图 6 中两股射流扩展特性可以看出, 在 G 型观察室中, 燃气射流初期, 射流沿轴向扩展较快, 沿径向扩展缓慢, 无法快速扩展到观察室侧壁。而 A 型观察室中, 射流总能较快到达壁面, 而且射流头部比较平滑, Taylor 空腔发展较稳定, 有利于整装式液体发射药火炮中燃烧的稳定进行。通过上述分析可以发现, 四股燃气射流扩展过程在 A 型观察室中更加稳定, 因此, 仅在 A 型观察室中进行不同喷孔中心间距、不同喷孔压力和不同喷孔直径的实验。

表 2 射流轴向位移、速度随时间变化的拟合参数

Table 2 Fitting parameters of variation in axial displacement and velocity of Jet with time

type	$A_0$	$A_1$	$A_2$
A	105.3	-103.8	3.4
B	150.8	-146.7	5.4
G	111.4	-109.0	3.5

### 3.2.2 不同喷孔中心间距对四股燃气射流扩展特性的影响

采用三种不同的喷孔中心间距  $s$  (16, 20, 24 mm) 在 A 型观察室中进行实验, 实验工况: 喷孔压力为 9.18 MPa, 喷孔直径为 0.8 mm, 喷孔数为 4 个; 图 8 为不同喷孔间距的扩展序列图。其轴向位移如图 9 所示。当喷孔中心间距较小时, 如图 8a 所示, 由于四股射流在扩展过程中间距小, 所以较早的开始相互卷吸和干扰, 并较早的汇聚成一股射流, 协同向前扩展, 此时与单股射流的相似, 因此相同时刻轴向位移较大; 当喷孔中心间距逐渐增大时, 如图 8b 所示, 四股射流在扩展过程中离观察室的边界较近, 受到渐扩台阶的诱导作用, 四股射流径向扰动增强, 从而相对减弱了射流

的轴向扩展速度。因此四股射流汇聚的较晚, 轴向位移较小; 当喷孔中心间距继续增大时, 结合图 8c 和图 9 可以看出, 轴向位移减小幅度没有那么明显。通过图 9 位移数据计算可得, 当喷孔中心间距从 16 mm 增大到 20 mm 时,  $t=5$  ms 射流轴向位移减小了 20.6%, 当喷孔中心间距从 20 mm 增大到 24 mm 时,  $t=5$  ms 射流轴向位移仅减小了 9.1%。因此适当增大喷孔间距, 可以减小轴向位移, 使射流径向扩展更加充分。通过上述分析可知, 喷孔中心间距为 20 mm 更有利于四股射流扩展过程的稳定。

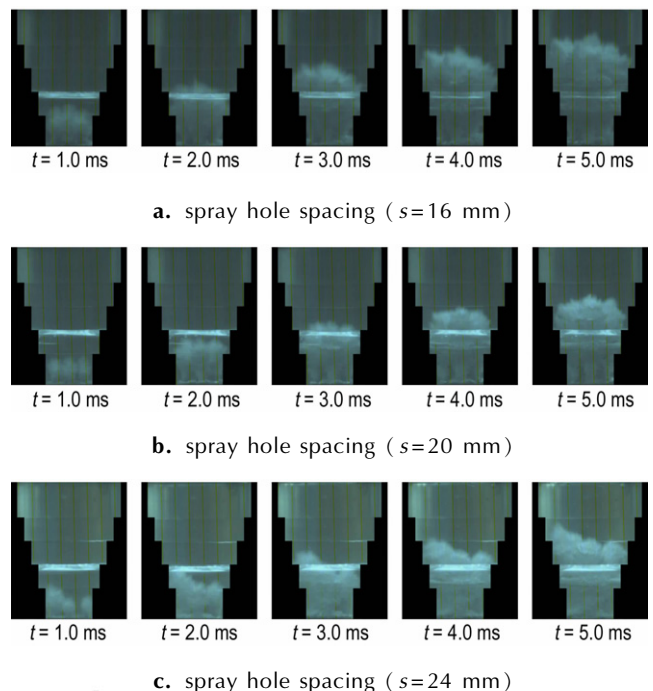


图 8 不同喷孔中心间距的射流轴向扩展序列图

Fig. 8 Axial expansion sequence diagrams of jet with different nozzle center spacing

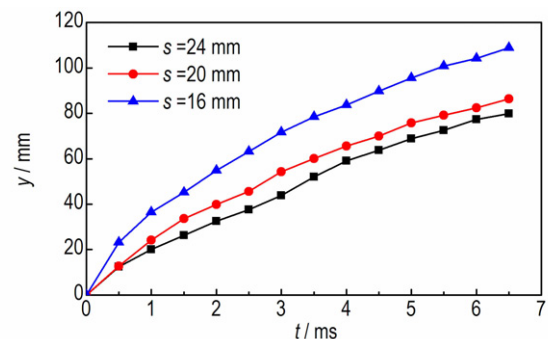
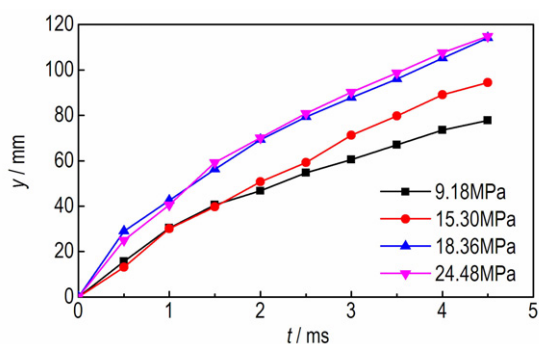


图 9 采用不同喷孔中心间距的射流轴向位移对比图

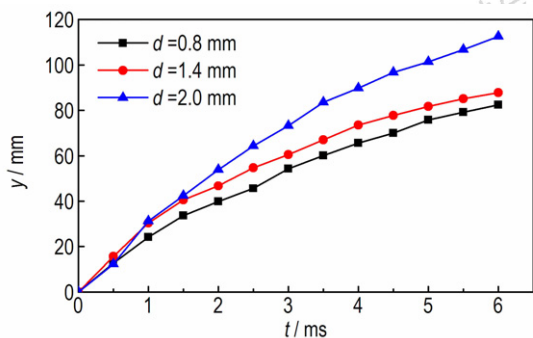
Fig. 9 Comparison of the axial displacement of jet with different nozzle center spacing

### 3.2.3 不同喷射压力和喷孔直径对四股燃气射流扩展特性的影响

图 10a 为 A 型观察室, 采用不同的喷射压力  $p$  (9.18, 15.30, 18.36, 24.48 MPa) 时的轴向位移对比图, 其他实验工况与图 2 相同。为了观察不同喷孔直径对四股燃气射流扩展特性的影响, 在 A 型观察室中又分别采用了直径  $d$  为 0.8 mm、1.4 mm 和 2.0 mm 的喷孔进行了实验, 通过处理射流头部的轮廓图, 得到射流头部轴向图, 如图 10b 所示, 其他实验工况与图 2 相同。通过图 10 可知: 随着压力的增大, 燃气射流强度增大, 轴向扩展位移迅速增大, 轴向扩展速度也会迅速增大, 由图 10a 数据计算可得,  $t=4$  ms 时刻, 压力从 9.18 MPa 增大到 15.30 MPa, 射流轴向位移增加了 20.9%, 压力从 15.30 MPa 增大到 18.36 MPa, 射流轴向位移增加了 18.2%; 从图 10a 中可以看出, 18.36 MPa 和 24.48 MPa 两个工况的射流轴向位移十分接近, 射流轴向位移仅增加了 2.2%, 由此可以推测, 压力增大到一定值后, 再继续增大压力, 不会对射流轴向位移产生影响; 随着喷孔直径的增加, Taylor 空腔体积增加, 燃气射流轴向位移增大, 射流头部扩展速度变快, 由图 10b 数据计算可得,  $t=5$  ms 时刻, 喷孔



a. different pressure



b. different nozzle diameter

图 10 多参数变化下射流轴向位移的对比

Fig. 10 Comparison of the axial displacement of jet under multi-parameter variation

直径从 0.8 mm 增大到 1.4 mm, 射流轴向位移增加了 7.7%, 喷孔直径从 1.4 mm 增大到 2.0 mm, 射流轴向位移增加了 24.1%, 由此可以看出, 当喷孔直径较小时, 增大喷孔直径对射流轴向位移影响不明显, 当喷孔直径增大到一定程度后, 继续增大喷孔直径, 会明显增加对射流轴向位移。由此可以推测, 采用点火燃气射流点燃液体药时, 较大的点火喷射压力和喷孔直径都会增大射流强度, 使液体药破碎成大量的小液滴群, 实现液体药的充分燃烧, 但强烈的气液掺混又会引起内弹道过程极大的不稳定性, 增加燃烧面的随机性, 不利于燃烧的稳定进行, 因此, 选择点火喷射压力为 9.18 MPa 和喷孔直径 1.4 mm 可以在射流扩展过程相对稳定的同时使液体药燃烧更加充分。

## 4 结论

(1) 对于整装式液体发射药燃烧过程的不稳定性, 可以采用多级渐扩型台阶使射流扩展过程更加稳定。多级渐扩型结构由于台阶的诱导作用, 对燃气射流的径向扰动较大, 能使射流在扩展过程中, 较快充满整个边界。四股燃气射流较双股或单股射流而言, 增大了射流头部气体与液体工质的接触面积, 使气液掺混更多发生在 Taylor 空腔表面, 减少了残留在观察室侧壁的液体工质, 抑制了 Helmholtz 的不稳定效应, 有利于燃烧的稳定进行。

(2) 观察室的渐扩比  $\Delta D/L$  越大, 射流轴向位移越小, 扩展过程越稳定, 当渐扩比  $\Delta D/L$  从 0.3 增加到 0.6,  $t=5$  ms 射流轴向位移减小了 10.8%; 随着喷射压力的增大, 轴向位移也会随之增大, 射流头部发展越不稳定, 压力从 9.18 MPa 增大到 15.30 MPa,  $t=4$  ms 射流轴向位移增加了 20.9%; 喷孔直径越大, 轴向位移越大, 当喷孔直径从 1.4 mm 增大到 2.0 mm,  $t=5$  ms 射流轴向位移增加了 24.1%; 喷孔中心间距越大, 沿径向发展越快, 沿轴向扩展越慢, 当喷孔中心间距从 16 mm 增大到 20 mm 时,  $t=5$  ms 射流轴向位移减小了 20.6%。

(3) 实验结果表明, 采用 A 型观察室结构, 选择喷射压力 9.18 MPa、喷孔直径 1.4 mm、喷孔中心间距 20 mm, 可以实现对射流扩展形态的有效控制, 从而改善气液掺混过程。

### 参考文献:

- [1] Knapton J D, Stobie I C, Cook D C, et al. Multipoint ignition studies in bulk-loaded propellant charges[C] // 14th International Symposium on Ballistics, 1993: 193-201.

- [2] Macpherson A K, Bracuti A J. The Analysis of Gun Pressure Instability[C]//19th International Symposium on Ballistics, 2001: 115-121.
- [3] Morrison W F, Knapton J D, Bulman M J. Liquid propellant guns[C]//Progress in Astronautics and Aeronautics, edited by L Stiefel. Washington: AIAA, 1988: 413-471.
- [4] Knapton J D, Stobie I C, Elmore L. A Review of the bulk-loaded liquid propellant gun program for possible relevance to the electrothermal chemical propulsion program[C]//13th International Symposium on Ballistics, Stockholm, 1992(2): 69-76.
- [5] Talley R L, Owczarczak J A. Investigation of bulk-loaded liquid propellant gun concepts[R]. ARL-CR-127, 1994.
- [6] Bracuti A J, Chiu D S, Macpherson A K. Advanced propulsion concept: step chamber for bulk-loaded gun [R]. ADA 296691, 1995.
- [7] 余永刚, 昌学霞, 周彦煌, 等. 整装式含能液体燃烧推进实验研究及数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(3): 531-534. YU Yong-gang, CHANG Xue-xia, ZHOU Yan-huang, et al. Experiment and numerical simulation of combustion and propulsion of bulk-loaded energetic liquid. [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29 (3): 531-534.
- [8] YU Yong-gang, CHANG Xue-xia, ZHAO Na, et al. Study of bulk-loaded liquid propellant combustion propulsion processes with stepped-wall combustion chamber[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2011, 78(5): 748-760.
- [9] 齐丽婷, 余永刚, 彭志国. 含能气体射流在液体工质中扩展过程的简化模型[J]. 火炮发射与控制学报, 2008(1): 90-93. QI Li-ting, YU Yong-gang, PENG Zhi-guo. Simplified model of energetic gas jet expansion process in liquid working medium [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2008 (1): 90-93.
- [10] 齐丽婷, 余永刚, 彭志国, 等. 边界形状对气液相互作用过程的影响[J]. 弹道学报, 2008, 20(1): 5-10. QI Li-ting, YU Yong-gang, PENG Zhi-guo, et al. Influence of boundary shape on interaction process of gas and liquid [J]. *Journal of Ballistics*, 2008, 20 (1): 5-10.
- [11] 莽珊珊, 余永刚. 高压热气流与整装式液体工质相互作用的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(12): 2017-2020. MANG Shan-shan, YU Yong-gang. Experimental study on the interaction of high-pressure hot gas jet with bulk-loaded liquid [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30 (12): 2017-2020.
- [12] 莽珊珊, 余永刚. 高压燃气射流在整装液体中扩展过程的实验和数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(3): 300-305. MANG Shan-shan, YU Yong-gang. Experiment and numerical simulation for high pressure combustible gas jet expansion process in a bulk-loaded liquid [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31 (3): 300-305.
- [13] 余永刚, 闫善恒, 陆欣, 等. 双股高速燃气射流在液体中扩展及相互作用的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2008(1): 43-46. YU Yong-gang, YAN Shan-heng, LU Xin, et al. Experimental study on expansion process and interaction of high speed twin combustion-gas jet in liquid [J]. *Science Technology and Engineering*, 2008 (1): 43-46.
- [14] 薛晓春, 余永刚, 张琦. 渐扩边界形状对双股燃气射流扩展特性影响的实验研究[J]. 弹道学报, 2013, 25(2): 44-47. XUE Xiao-chun, YU Yong-gang, ZHANG Qi. Experimental study on effects of stepped-wall boundary on expansion characteristic of twin combustion-gas jets [J]. *Journal of Ballistics*, 2013, 25 (2): 44-47.
- [15] XUE Xiao-chun, YU Yong-gang, ZHANG Qi. Expansion characteristics of twin combustion gas jets with high pressure in cylindrical filling liquid chamber [J]. *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, 2013, 25(5): 763-771.
- [16] 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.
- [17] XUE Xiao-chun, YU Yong-gang, ZHANG Qi. Study on the effect of distance between the two nozzle holes on interaction of high pressure combustion-gas jets with liquid [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 85(9): 675-686.

## Experimental Study on Expansion Characteristics of Four Combustion-gas Jet in Bulk-loaded Liquid

FENG Bo-sheng, XUE Xiao-chun

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

**Abstract:** To explore the method of controlling the combustion stability of bulk-loaded propellant guns, the multi-structure cylindrical and cylindrical stepped-wall type observation chambers were designed to analyze the expansion processes of four combustion-gas jets by the high-speed digital recording system. The average axial displacements of the combustion-gas jet head at different times were obtained by processing the sequence diagrams of the jet expansion process. and the effects of A-type, B-type and G-type observation chambers with different expanding ratios and different jet pressures, nozzle diameters and nozzle center interval etc. parameters in A-type observation chamber on the expansion characteristics of four combustion-gas jet in liquid medium were compared. The experimental results show that the stepped-wall type structure can enhance the radial disturbance of the jet due to the induction of the step. When the expanding ratio  $\Delta D/L$  increases from 0.3 to 0.6, the axial displacement of the jet decreases by 10.8%. With increasing the injection pressure, the gas jet intensity increases. When the injection pressure increases from 9.18 MPa to 15.30 MPa, jet axial displacement increases by 20.9% at 4 ms. When the nozzle diameter increases from 1.4 mm to 2.0 mm, the gas-liquid mixing is more intense, and the jet axial displacement increases by 24.1% at 5 ms. Increasing the nozzle center interval can make the radial expansion more fully and reduce the axial expansion process. When the nozzle center interval increases from 16 mm to 20 mm, the axial displacement reduces by 20.6% at 5 ms.

**Key words:** bulk-loaded propellant guns; four combustion-gas jets; Taylor expansion characteristics; stepped-wall type observation chamber

**CLC number:** TJ55; O34

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.12.006