

文章编号: 1006-9941(2008)02-0131-07

# 含能气体射流在液体工质中扩展的两维模型及数值模拟

齐丽婷<sup>1,2</sup>, 余永刚<sup>1</sup>, 彭志国<sup>1</sup>, 周彦煌<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 南京汽车集团工程研究院, 江苏 南京 210028)

**摘要:** 为了研究整装式液体发射药火炮燃烧稳定性的控制方法, 针对渐扩型药室结构, 建立了含能气体射流在液体工质中扩展的两维模型, 应用 FLUENT 应用软件对非稳态气体射流与液体工质相互作用的过程进行了模拟。探讨了渐扩型结构尺寸、喷气压力和喷口直径参数变化对射流扩展形态的影响, 获得了射流场等温线、等压线和等密度线图。结果表明: 当渐扩尺寸比为 0.8, 喷气压力大于 30 MPa, 喷孔直径大于 2 mm 时, 气体射流发展不稳定, 气液湍流掺混强烈。模拟出的射流轴向扩展速度和实验结果基本吻合。

**关键词:** 流体力学; 气体射流; 射流扩展形态; 液体发射药火炮

**中图分类号:** TJ3; O35

**文献标识码:** A

## 1 引言

液体发射药火炮是目前极具发展前途的新概念火炮之一。而整装式液体发射药火炮的内弹道过程是一种利用流体不稳定性造成气液混合使之充分燃烧的过程。气穴内燃气在气液交界面上存在相对运动, 而导致 Kelvin-helmholtz 不稳定性, 扰动造成的界面上气液两相混合使得液体发生破碎, 加剧了燃烧不稳定性<sup>[1]</sup>。20 世纪 90 年代初, Talley<sup>[2-4]</sup> 提出采用多级渐扩型结构来控制整装式液体炮燃烧稳定性。以渐扩型药室结构为背景, 余永刚等<sup>[5]</sup> 曾开展了含能气体射流与液体工质相互作用的实验研究。在此基础上, 本研究应用 FLUENT 软件对非稳态气体射流与液体工质相互作用的过程进行了模拟, 探讨了渐扩型结构尺寸、喷气压力和喷口直径等参数变化对射流扩展形态的影响, 获得了射流场中各参数的变化规律。

## 2 含能气体射流在液体工质中扩展实验

为探讨渐扩型结构尺寸等参数变化对气体射流扩展过程的影响, 并验证数值模拟结果, 进行了含能气体射流在液体工质中的扩展实验。实验装置如图 1 所示, 采用平面观察室, 其厚度为 15 mm, 在两平板玻璃间安装三级渐扩型方块。从喷嘴算起渐扩型结构尺寸长度为  $L_0 = 25$  mm, 宽度为  $B_0 = 15$  mm, 以后每级台阶

长度均为  $L = 20$  mm, 宽度每级增加  $\Delta B = 16$  mm, 即  $\Delta B/L = 0.8$ 。实验原理是在高压燃烧室内装填速燃火药, 火药被点燃后迅速燃烧产生高温、高压的燃气。当其压力达到一定值时, 冲破喷口内压力膜片, 由喷口喷出进入液体工质产生射流。

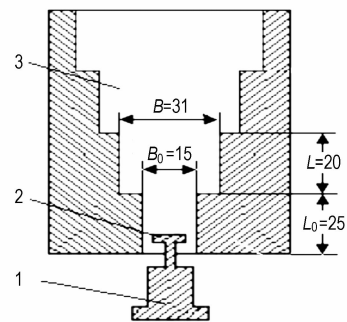


图 1 实验装置示意图

1—高压燃烧室, 2—喷口, 3—观察室

Fig. 1 The sketch of experimental device

1—high pressure chamber, 2—spray nozzle, 3—observe area

为了对比不同渐扩型结构对射流扩展过程的影响, 在对比实验中, 又将每级台阶宽度的增加量改为 8 mm, 即  $\Delta B/L = 0.4$ , 其他结构尺寸参数不变。试验工况是: 喷射气体压力  $p = 37.4$  MPa, 喷孔直径是  $d = 2.4$  mm, 液体工质选用水。图 2 是借助高速录像系统拍摄的不同渐扩型结构尺寸射流扩展过程。

由图 2a 可见, 初始时射流头部成扇形。当射流发展到 5 ms 后, 射流成火炬状。射流前端不稳定, 脉动很强烈。经仔细观察发现, 相对于图 2a, 图 2b 射流前端更稳定, 脉动不大。但轴向扩展速度比较快。图 3 是不同渐

收稿日期: 2007-06-14; 修回日期: 2007-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50476043)

作者简介: 齐丽婷(1982-), 女, 硕士, 主要研究方向为含能液体燃烧推进理论与技术。e-mail: helloqiliting@163.com

扩型结构尺寸射流轴向扩展速度对比图,图中两条曲线的走势基本相同,ΔB/L 较小的射流轴向扩展速度较快。

为了研究喷气压力对气体射流扩展过程的影响,选取了两组喷气压力,即 p = 17.5 MPa 和 p = 32.7 MPa。其他参数如下:渐扩尺寸比为 ΔB/L = 0.8,喷孔直径为 1.5 mm,液体工质选用水。实验时仅改变喷气压力进行对比实验,典型结果如图 4 所示。

由图 4 可见,射流扩展形态和图 2 相似,对比图 4a、4b 可见。图 4b 射流扩展过程不太稳定。初始阶段射流头部呈扇形,当射流发展到 8 ms 时,射流头部仍呈扇形,但气液湍流掺混强度变大。图 5 是不同喷气压力下射流轴向扩展速度对比图,图中两条曲线的变化规律相似,喷气压力较大的射流在 4 ~ 8 ms 时间段,其轴向速度衰减较大。

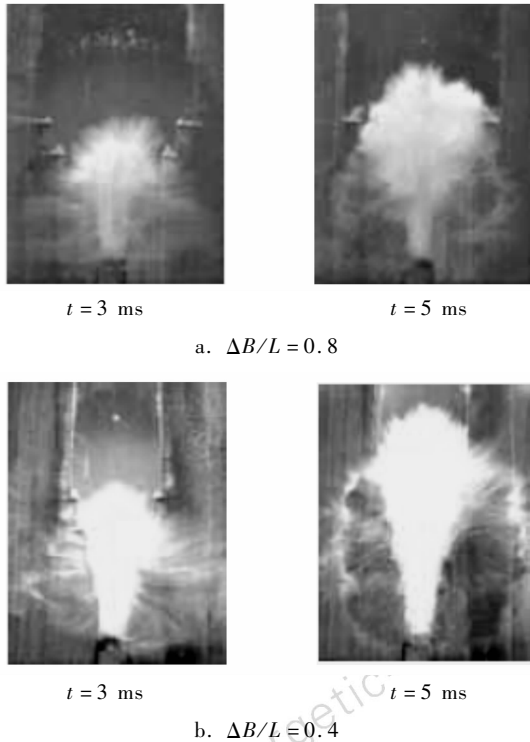


图 2 不同渐扩型结构尺寸射流扩展过程  
Fig. 2 Jet expansion in different stepped-wall chambers

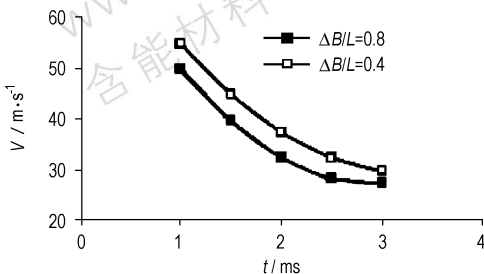


图 3 不同渐扩型结构射流轴向扩展速度  
Fig. 3 Jet expansion velocity in different stepped-wall chambers

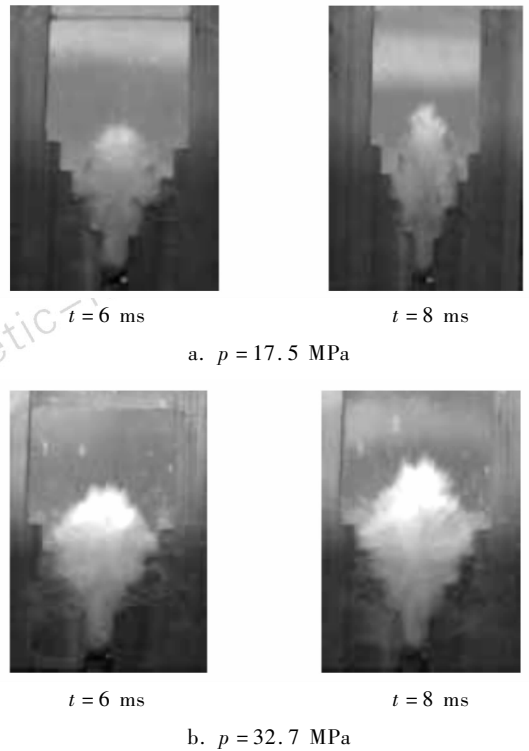


图 4 不同喷气压力的射流扩展过程  
Fig. 4 Jet expansion under different jet pressures

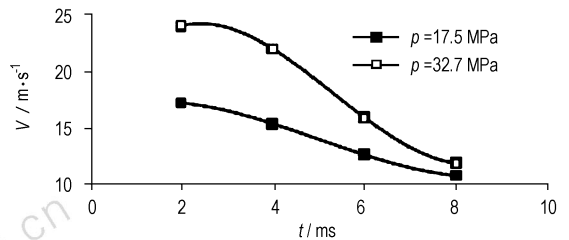


图 5 不同喷气压力射流轴向扩展速度  
Fig. 5 Jet expansion velocity under different jet pressures

### 3 含能气体射流在液体工质中扩展非稳态模型

#### 3.1 物理模型

为了模拟实验工况下渐扩型结构中气液相互作用过程,现作如下假设:

- (1) 考虑到试验装置中观察室宽度远大于厚度,气体射流近似视为二维平面射流,其发展过程是非稳态膨胀过程。
- (2) 高压燃烧室内火药燃烧产生气体混合物近似视为理想气体。
- (3) 不考虑气体与液体工质的化学反应。
- (4) 忽略气体汽化作用、质量力、体积力等因素的影响。
- (5) 考虑到观察室上端开口,本模型重点探讨气液界面的相互掺混过程,在离喷口的一段距离和时间

内,将气体射流近似作为粘性不可压流处理。

(6)气体射流扩展过程中,与液体工质发生强烈的湍流掺混作用,近似采用  $k-\varepsilon$  模型来描述。

### 3.2 数学模型

由物理模型可知,气体射流是一个二维流动问题。可写出粘性不可压流体的基本守恒方程<sup>[6]</sup>。

动量守恒方程

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + F_y \end{cases} \quad (1)$$

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U} T) = \text{div}\left[\frac{k}{C_p} \text{grad} T\right] + S_T \quad (3)$$

状态方程

$$\frac{dp}{p} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T} \quad (4)$$

湍流的基本方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(u \mathbf{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \text{div}(\text{grad} u) \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(v \mathbf{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \text{div}(\text{grad} v) \quad (6)$$

气体膨胀起始的区域为大气环境,在还没有膨胀到出口截面之前,此截面压力为大气压,速度为零。初始条件、边界条件分别为:

$$\begin{aligned} T_0 &= T_0, p = p_0, u = u_0, \rho = \rho_0; \\ T &= T_1, p = p_1, u = u_1, \rho = \rho_1. \end{aligned}$$

## 4 数值模拟结果与分析

### 4.1 计算软件模块选取

运用 FLUENT 软件根据实验的工况,分别对不同

的渐扩型结构尺寸、喷气压力和喷口直径条件下气体射流进入液体工质的过程进行数值模拟。由于实验中选用的是平面观察室,因此数值模拟是平面二维问题。本文选用分离解算器,依次求解连续性方程、动量方程、能量方程以及组分方程。在解算器设置中,空间属性选用二维空间,时间属性选用非定常流动。由于喷口处的压力可知,边界条件选用压力入口,湍流模型选用  $K-\varepsilon$  模型。选用 VOF 模型来进行多相流计算。VOF 模型是一种在固定的欧拉网格下的表面跟踪方法。在 VOF 模型中,不同的流体组分共用着一套动量方程,计算时在全流场的每个计算单元内,都记录下各流体组分所占有的体积率,以求得任意气-液分界面的稳态或瞬时分界面。

### 4.2 渐扩型结构尺寸对射流场特征参数的影响

分别对  $\Delta B/L=0.8$  和  $\Delta B/L=0.4$  两种不同尺寸渐扩型结构进行计算。其余参数是:喷射气体压力 37.4 MPa,喷孔直径 2.4 mm,液体工质选用水,密度为  $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,压力为 101.3 kPa。

#### 4.2.1 温度分布

不同渐扩型结构尺寸的等温线对比如图 6 所示。从图 6 中可以看出,温度波轴向扩展速度大于径向扩展速度,射流中心温度较高。 $\Delta B/L$  越大,其轴线处温度上升越快。以  $x=45 \text{ mm}$  截面为例,图 6a 中  $t=1 \text{ ms}$  时温度为 900 K,当  $t=3 \text{ ms}$  时,温度为 1400 K,与 1 ms 相比上升了 55.6%,当  $t=5 \text{ ms}$  时,温度为 1500 K,与 1 ms 相比上升了 66.7%。图 6b 中  $t=1 \text{ ms}$  时温度为 1000 K,当  $t=3 \text{ ms}$  时,温度为 1300 K,与 1 ms 相比上升了 30%,当  $t=5 \text{ ms}$  时,温度为 1450 K,与 1 ms 相比上升了 45%。因为  $\Delta B/L$  越小,射流碰壁产生回流的现象越明显,从而减缓了轴线上温度的上升速率,在一定时间内, $\Delta B/L$  较大的结构,其轴线处温度上升越快。图 7 是根据等温线对比图中射流外轮廓得到的射流轴向位移计算值与实验值的比较,由图 7 可见,两者吻合较好。

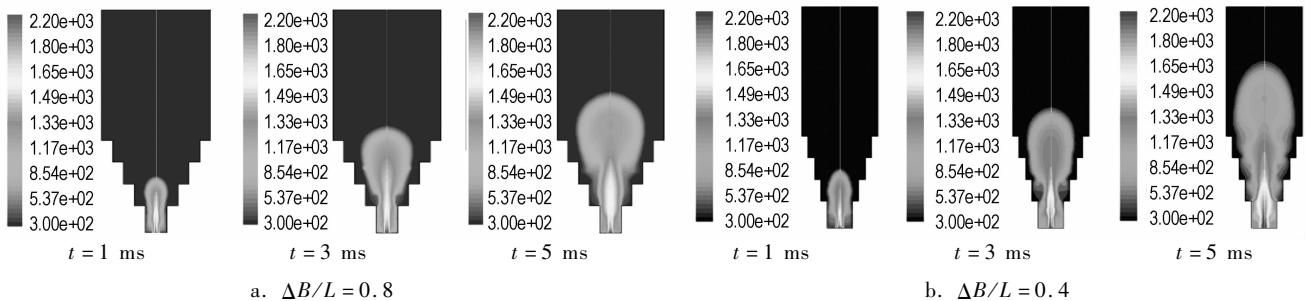


图 6 不同渐扩型结构尺寸的等温线对比图

Fig. 6 Isothermal graphs in different stepped-wall chambers

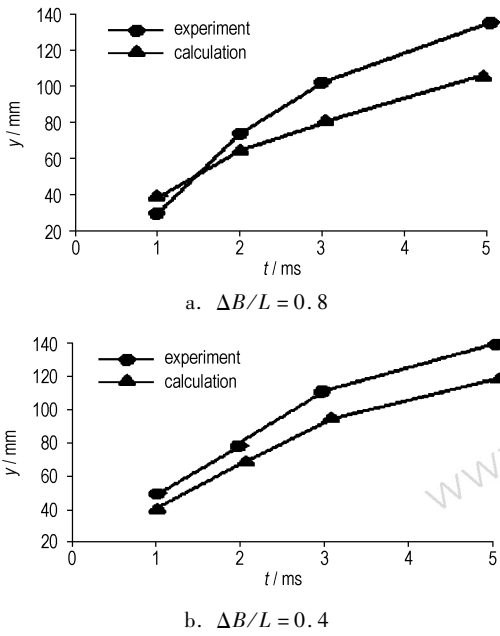


图7 不同渐扩型结构尺寸射流轴向位移实验值与计算值的比较  
Fig. 7 Comparison of expansion displacement of experimental and calculation results in different stepped-wall chambers

4.2.2 压力分布

不同渐扩型结构尺寸的等压线对比如图8所示。由图可见,不同渐扩尺寸的等压线明显不同,这与回流结果相关。现以轴线处压力说明变化特点。以  $x = 45 \text{ mm}$  截面为例,图8a中  $t = 1 \text{ ms}$  时压力为203 kPa,当  $t = 3 \text{ ms}$  时压力上升到284 kPa,与1 ms相比上升了

40%,当  $t = 5 \text{ ms}$  时压力为304 kPa,是1 ms时的1.5倍。图8b中  $t = 1 \text{ ms}$  时压力为152 kPa,当  $t = 3 \text{ ms}$  时压力上升到304 kPa是1 ms时的2倍,当  $t = 5 \text{ ms}$  时压力为355 kPa,是1 ms时的2.3倍。对比发现, $\Delta B/L$  较小的射流头部高压区移动较快,由于射流碰壁产生的回流会抑制压力波在径向扩展衰减,从而促进压力波向轴向扩展,因此  $\Delta B/L$  越小,射流头部高压区轴向移动速度越快,轴线处压力上升越明显。

4.2.3 密度分布

两种渐扩型结构的密度分布如图9所示。图9a中射流头部保持水滴型,图9b中射流头部保持椭圆形。由图可见, $\Delta B/L$  越小,射流头部扩展越快,由于回流的作用射流后部液滴卷吸较多。

4.3 喷气压力对射流场特征参数的影响

分别对  $p = 17.5 \text{ MPa}$  和  $p = 32.7 \text{ MPa}$  两种不同喷气压力进行计算。其余参数是:喷口直径  $1.5 \text{ mm}$ ,  $\Delta B/L = 0.8$ ,液体工质选用水,密度  $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,压力为  $101.3 \text{ kPa}$ 。

4.3.1 温度分布

从图10可以看出,两种射流前端的温度分布明显不同,喷气压力越大,且喷口直径较小时,射流的径向扩展也越大,边界处温度上升快。以  $x = 45 \text{ mm}$  截面为例,图10a中  $t = 4 \text{ ms}$  时温度为  $600 \text{ K}$ ,当  $t = 6 \text{ ms}$  时,温度为  $850 \text{ K}$ ,与4 ms相比上升了41.7%,当  $t = 8 \text{ ms}$  时,温度为  $1100 \text{ K}$ ,与4 ms相比上升了83.3%。图10b中  $t = 4 \text{ ms}$  时温度为  $800 \text{ K}$ ,当  $t = 6 \text{ ms}$  时,温度为  $1250 \text{ K}$ ,与

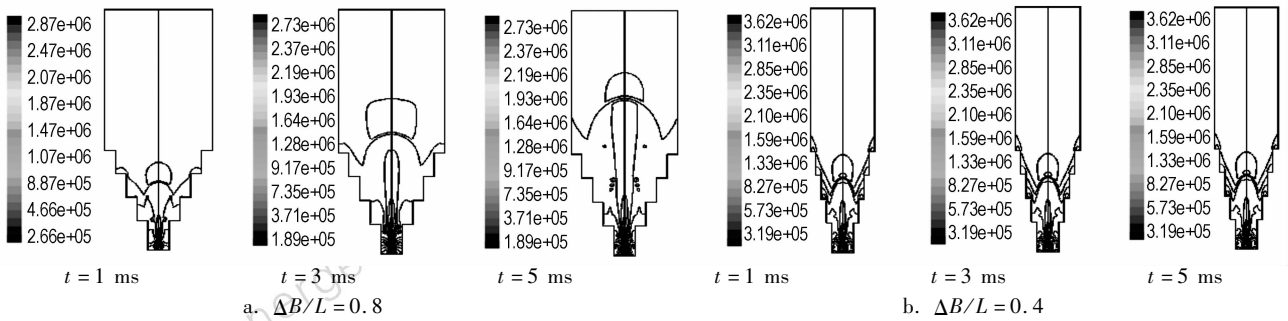


图8 不同渐扩型结构尺寸的等压线对比图  
Fig. 8 Isobaric graphs in different stepped-wall chambers

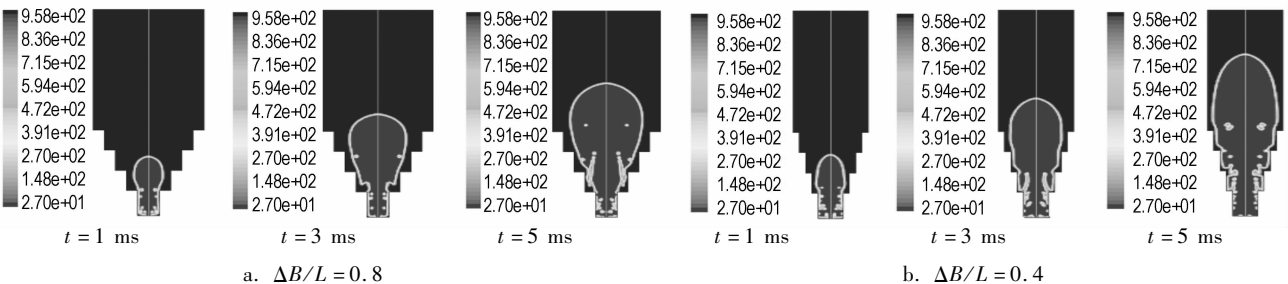


图9 不同渐扩型结构尺寸的密度分布对比图  
Fig. 9 Density isograms graphs in different stepped-wall chambers

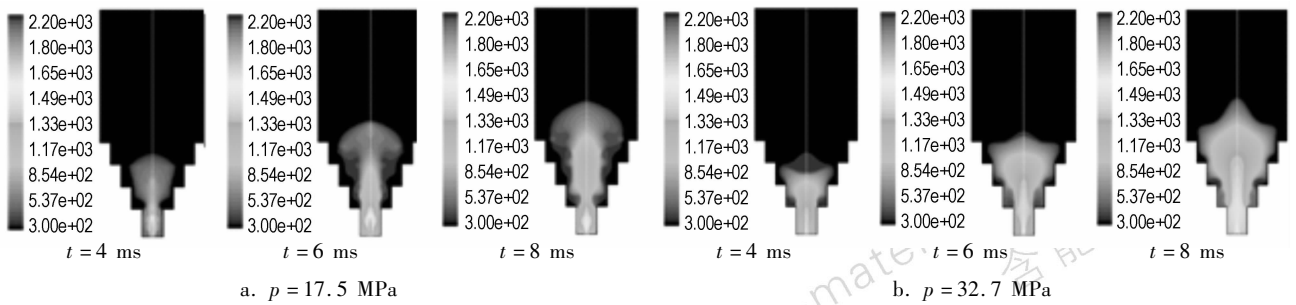


图 10 不同喷气压力的等温线对比图

Fig. 10 Isothermal graphs under different jet pressures

4 ms相比上升了 56.3%，当  $t = 8$  ms 时，温度为 1350 K，与 4 ms 相比上升了 68.75%。由此可以看出，射流开始时喷气压力较大的射流扩展很快，在整个射流扩展的过程中，喷气压力较大的中心轴线处温度高于喷气压力小的，喷气压力大的中心轴线处温度上升越快。图 11 是根据等温线对比图中射流外轮廓得到的射流轴向位移计算值与实验值的比较，两者吻合较好。

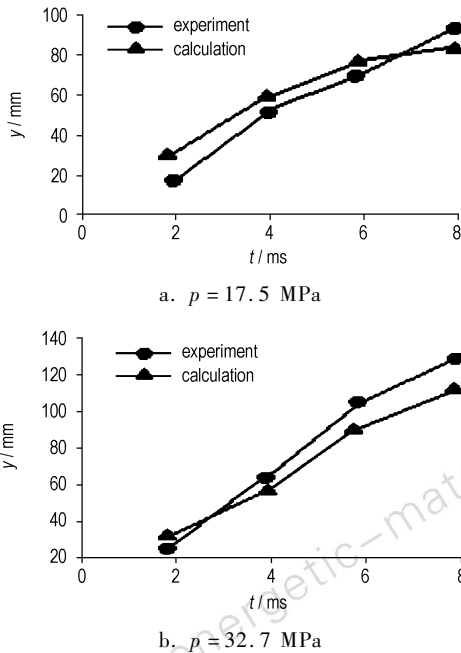


图 11 不同喷气压力射流轴向位移实验值与计算值的比较

Fig. 11 Comparison of expansion displacement of experimental and calculation results under different jet pressures

### 4.3.2 压力分布

不同喷口气压力的等压线对比如图 12 所示。由图 12 可见，等压线形状类似于各自的等温线。以  $x = 45$  mm 截面为例，图 12a 中  $t = 4$  ms 时压力为 152 kPa，当  $t = 6$  ms 时压力上升到 203 kPa，当  $t = 8$  ms 时压力为 223 kPa，是 4 ms 时的 1.5 倍。图 12b 中  $t = 4$  ms 时压力为

172 kPa，当  $t = 6$  ms 时压力上升到 213 kPa，当  $t = 8$  ms 时压力上升到 233 kPa。对比可得，喷气压力较大的射流开始时压力波轴向和径向传播都很快，4 ms 后压力波轴向扩展速度衰减较快，6 ms 后压力波径向碰壁产生回流与轴向压力波汇合产生轴线处压力波扩展速度突增的现象。喷气压力较小的压力波高压区较集中在轴线处，径向扩展慢，整个扩展过程较平稳。

### 4.3.3 密度分布

不同喷气压力的密度分布对比如图 13 所示。由图 13 可见，它们与各自的等温线头部外形相似，但射流卷吸的液滴不同，在喷气压力较小时比较明显。

### 4.4 喷口直径对射流场特征参数的影响

分别对  $d = 1.5$  mm 和  $d = 2.4$  mm 两种不同喷口直径进行计算。其余参数是：喷气压力为 25.8 MPa， $\Delta B/L = 0.8$ ，液体工质选用水，密度  $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，压力为 101.3 kPa。

#### 4.4.1 温度分布

不同喷口直径的等温线对比如图 14 所示。从图 14 中可以看出，两种等温线头部基本相同。以  $x = 45$  mm 截面为例，图 14(a) 中  $t = 2.5$  ms 时温度为 550 K，当  $t = 3.5$  ms 时，温度为 600 K，与 2.5 ms 相比上升了 9.09%，当  $t = 4.5$  ms 时，温度为 800 K，与 2.5 ms 相比上升了 45.5%。图 14(b) 中  $t = 2.5$  ms 时温度为 950 K，当  $t = 3.5$  ms 时，温度为 1000 K，当  $t = 4.5$  ms 时，温度又上升到 1200 K。对比可得，2.5 ms 前喷口直径较大的，射流其轴线处温度上升很快，2.5 ms 后两者轴线温度上升速率基本相似，喷口直径较小的射流轴线处温度较低。由此可见喷口直径仅影响射流开始时温度的上升量以及射流整个过程中轴线处温度的高低。当射流扩展至二级台阶处后，对射流轴线处温度上升速率影响不大。

#### 4.4.2 压力分布

不同喷口直径的等压线对比如图 15 所示。由图 15 可见两种等压线的形状相似。以  $x = 45$  mm 为截面，观测的轴线位置上压力变化。图 15(a) 中  $t = 2.5$  ms 时压力为

193 kPa,当  $t=3.5$  ms 时压力上升到 203 kPa,与 2.5 ms 相比上升了 5%,当  $t=4.5$  ms 时压力上升到 213 kPa。图 15(b)中  $t=2.5$  ms 时压力为 172 kPa,当  $t=3.5$  ms 时压力上升到 213 kPa,与 2.5 ms 相比上升了 23.8%,当  $t=4.5$  ms 时压力上升到 223 kPa。由此可以看出喷嘴口径较大的射流,其轴线处压力前期上升速率较快。

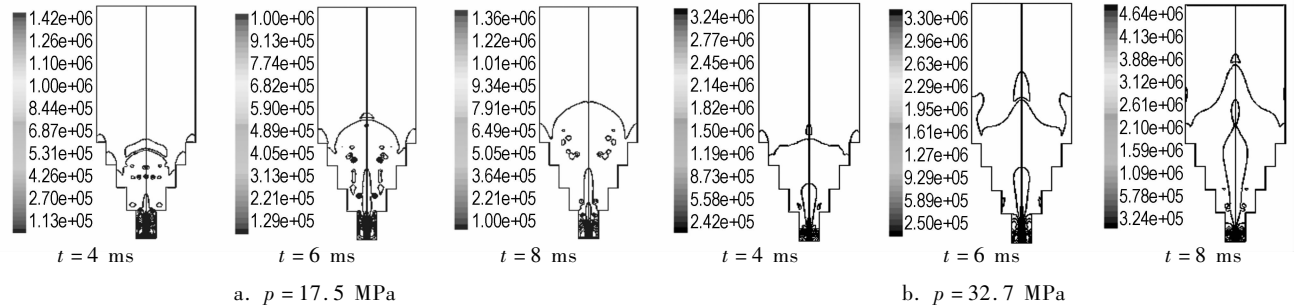


图 12 不同喷气压力的等压线对比图

Fig. 12 Isobaric graphs under different jet pressures

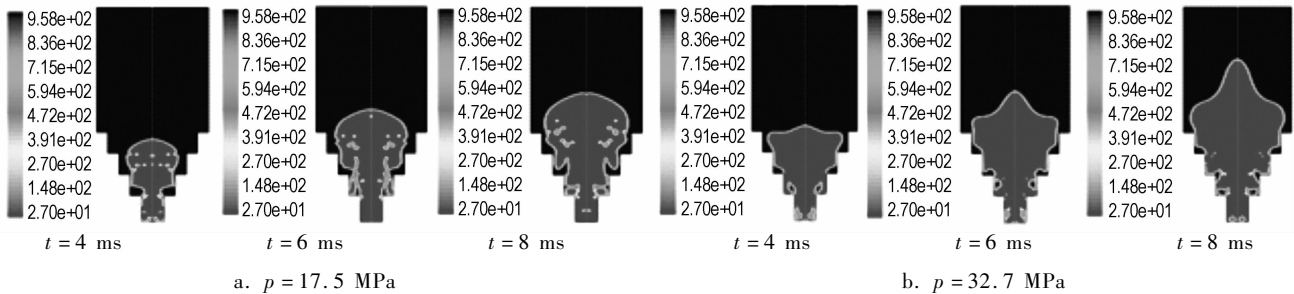


图 13 不同喷气压力的密度分布对比图

Fig. 13 Density isograms graphs under different jet pressures

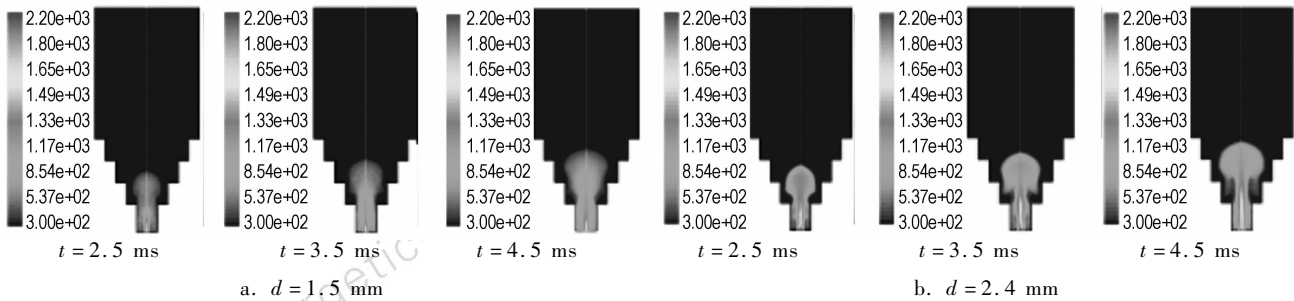


图 14 不同喷嘴口径的等温线对比图

Fig. 14 Isothermal graphs in different nozzle diameters

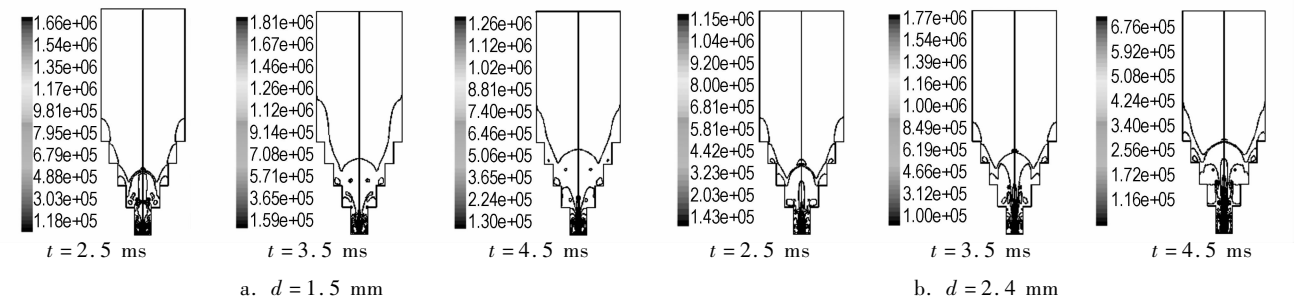


图 15 不同喷嘴口径的等压线对比图

Fig. 15 Isobaric graphs in different nozzle diameters

### 4.4.3 密度分布

不同喷嘴口径的密度分布对比如图 16 所示。从图 16 中可以看出,由于喷嘴口径扩大,单位时间喷出液体工质中的气体量增加,射流轴向扩展速度较快。喷嘴口径较大的回流现象明显,4.5 ms 后第一级台阶处气体射流尾部等密度线呈细长条状。

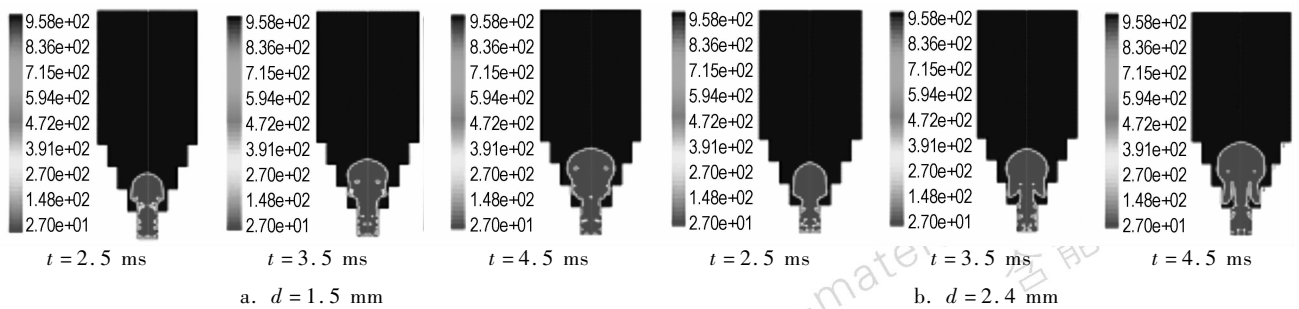


图16 不同喷嘴直径的密度分布对比图

Fig. 16 Density isograms graphs in different nozzle diameters

## 5 结论

对非稳态气体射流与液体工质相互作用的过程进行模拟。探讨了渐扩型结构尺寸、喷气压力和喷口直径等参数变化对射流扩展形态的影响,获得了射流流场中各参数的变化特性。在本文的实验和计算条件下,得出如下结论:

(1) 渐扩型结构尺寸对射流扩展稳定性和轴向速度有影响。当  $\Delta B/L = 0.4$ , 射流扩展较稳定,头部压力分层均匀,轴向速度较高,压力脉动没有  $\Delta B/L = 0.8$  渐扩型结构明显,高压区集中在射流轴线位置,射流头部呈火炬状。

(2) 在喷口直径为 1.5 mm 时,喷气压力越大,射流轴向速度和径向扩展速度也越大。等温线、等压线前端面由球形变成尖锥形。

(3) 在喷气压力为 20 ~ 30 MPa 范围内,喷口直径越大,在喷射前期射流轴线上温度、压力上升越快。

(4) 根据射流温度场外轮廓线得到的射流轴向扩展位移和实测值吻合较好。

## 参考文献:

- [1] 齐丽婷,余永刚. 整装式液体发射药火炮燃烧稳定性控制的研究进展[J]. 火炮发射与控制, 2005(4): 72-75.  
QI Li-ting, YU Yong-gang. Study progress of control of the combustion stability in bulk-loaded liquid propellant Gun [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2005(4): 72-75.
- [2] Talley R L, Bracuti A. Diagnostics of combustion evolution in a bulk-loaded LP gun[R]. *Verify Technology A10-02-90*, 1990.
- [3] Talley R L, Owczarczak J A. Investigation of bulk-loaded propellant gun concepts[R]. *ARL-CR-127*, 1994.
- [4] Talley R L. Interior ballistic process control using mechanical concepts medium caliber bulk loaded LP guns[C]//*Proceedings 31st JANNAF Combustion Subcommittee Meeting*, CPIA Publication, 1994.
- [5] 余永刚,齐丽婷,周彦煌,昌学霞. 气体射流在液体工质中的扩展形态研究[C]//中国工程热物理学会燃烧学术会议. 武汉. 2006. 1088-1091.  
YU Yong-gang, QI Li-ting, ZHOU Yan-huang, et al. Study on expansion shape of gas jet in liquid media[C]//*Proceedings of Combustion Subcommittee Meeting*, Engineering thermal physics academy of China. Wuhan. 2006. 1088-1091.
- [6] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
WANG Fu-jun. *Analysis of Computational Fluid Dynamics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

## A 2-D Model of Energetic Gas Jet Expansion Process in Liquid and Numerical Simulation

QI Li-ting<sup>1,2</sup>, YU Yong-gang<sup>1</sup>, PENG Zhi-guo<sup>1</sup>, ZHOU Yan-huang<sup>1</sup>

(1. Power Engineering College, NUST, Nanjing 210094, China; 2. Nanjing Automotive Research Institute, Nanjing 210028, China)

**Abstract:** To study the method of controlling the combustion stability in bulk-loaded liquid propellant gun, a 2-D model of gas jet expansion process in the stepped-wall chamber was developed. The unsteady process of gas jet interaction with liquid was simulated by the commercial software FLUENT. The influences of chamber configuration, jet pressure and nozzle diameter on jet shape were discussed. The isothermal and isobaric graphs and density isograms of gas jet field were obtained. Results show that when the stepped-wall chamber dimension ratio is 0.8, and jet pressure is more than 30 MPa, or nozzle diameter is more than 2 mm, gas jet expansion process is unsteady. Mixing process between gas and liquid is strong. The calculated expansion displacement of gas jet is in good agreement with the experimental data.

**Key words:** fluid mechanics; gas jet; jet expansion shape; liquid propellant gun