

文章编号: 1006-9941(2017)12-1011-07

整装式含能液体燃烧推进过程气液反应流场的数值模拟

莽珊珊¹, 余永刚²

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

摘要: 为研究燃烧室形状对整装式含能液体燃烧推进过程稳定性的作用机理, 基于流体动力学理论和组分输运方程, 建立了二维轴对称气液两相流动与燃烧模型, 模拟了圆柱型和阶梯渐扩型燃烧室中的化学反应流场。通过对燃气空腔扩展和燃面运动的追踪, 研究了温度、速度、压力以及体积分数的分布特征, 分析了燃烧室形状对流场演化过程的影响规律。结果表明, 含能液体点火燃烧后, 所形成的燃气空腔在液体中快速膨胀, 当空腔穿透液体并向弹底方向发展时, 沿燃烧室轴向的燃面迅速增长, 气液间的切向速度差带来 Kelvin-Helmholtz 不稳定效应, 而阶梯渐扩型燃烧室有助于诱导径向湍流, 减缓燃气空腔的轴向扩展速度, 抑制轴向 Kelvin-Helmholtz 不稳定效应, 提高整装式含能液体燃烧推进过程的稳定性, 计算结果与实验数据吻合较好。

关键词: 整装式含能液体; 湍流燃烧; 燃烧稳定性; 数值模拟

中图分类号: TK01+1; TJ012.1

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.12.007

1 引言

进入 21 世纪后, 现代兵器超高速、远程化的发展需求更加迫切。整装式液体炮是能够实现超高速的发射方式之一, 填充在燃烧室中的液体发射药被点燃后形成泰勒 (Taylor) 空腔, 空腔在液体内部膨胀并推动弹丸做功。整装式液体炮具有机械结构简单、初速高等优点, 但由于燃烧稳定性问题一直没有解决, 因此还未得到实际应用。

整装式液体炮的燃烧不稳定问题与液体发射药的流动特性有关, 难以像固体发射药一样在燃烧过程中保持燃面的有序发展。由于液体发射药的膛内燃烧过程发生于高温高压密闭环境, 在燃烧稳定性的控制方面具有很大难度。国内外对整装式液体炮的燃烧控制方法进行了一些探索, 如 Talley^[1] 提出用阶梯渐扩型燃烧室对燃烧过程施加边界约束, Knaption^[2] 提出组合燃烧室的方法, 周彦焯^[3] 采用在燃烧室中填充多孔介质的方法。这些方法通过改变燃烧室结构来影响燃烧推进过程, 在增强燃烧稳定性方面取得了一定的效果。针对蕴含其中的燃烧稳定性控制机理, Despirito^[4]、Adams^[5]、余永刚^[6] 等开展了相关理论与实验研

究, 建立了描述整装式含能液体燃烧推进过程的数学模型, 刻画出了气穴扩展、液柱加速等主要特征。

在已有的整装式液体炮模型中, 对液面卷吸破碎、液体燃烧反应等重要过程作了简化处理, 在解释燃烧室形状对燃烧稳定性的深层作用机制方面存在一些不足。而且, 目前对这种数百兆帕下的高压燃烧过程的测试诊断难度较大, 因此需要发展更详细的计算模型。本工作在已有研究基础上, 继续发展了湍流两相反应流模型, 加强了对气液间传热传质和化学反应过程的描述, 对 Fluent 软件进行了二次开发, 针对圆柱型和多级阶梯渐扩型燃烧室开展了计算, 分析了燃烧室形状对整装式含能液体燃烧推进过程的影响及流场参数分布的特征规律。

2 计算模型

2.1 基本假设

假设整装式含能液体的燃烧推进过程按如下方式进行: 点火燃气射流在液体内部形成初始的 Taylor 空腔, 高温燃气加热含能液体, 使之蒸发、燃烧并释放热量, 迫使燃烧室压力迅速升高, 推动弹丸加速运动。另外, 对计算模型提出如下假设:

- (1) 初始点火射流气体与含能液体燃烧产物具有相同的成分及物理性质;
- (2) 含能液体不可压缩;
- (3) 将燃气视作多组分理想气体;

收稿日期: 2017-04-13; 修回日期: 2017-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助 (51506094)

作者简介: 莽珊珊 (1981-), 女, 讲师, 主要从事含能材料高压燃烧推进机理研究。e-mail: mss0322@hotmail.com

(4) 液体的蒸发过程仅发生于气-液交界面, 燃烧化学反应在气相中进行;

(5) 燃烧推进过程忽略重力的影响。

2.2 数学模型

2.2.1 控制方程

燃烧推进过程由气-液两相流动控制, 考虑到含能液体与燃气不相互混溶, 采用VOF (Volume of Fluid) 方法^[7]对 Taylor 空腔扩展和燃面运动进行追踪。气-液两相流动的控制方程组如下^[8]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = \dot{m} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [(\rho E + p)\mathbf{v}] = \nabla \cdot (k_e \nabla T) + S_h \quad (3)$$

式中, ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; \mathbf{v} 为速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; \dot{m} 是与含能液体蒸发与冷凝有关的质量源项, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$; p 为压力, Pa; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量; E 为总能, J; T 为温度, K; k_e 为热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; S_h 为能量源项, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 。对于式(1)~(3)组成的方程组, 通过追踪各相的体积分数来描述两相流动, 控制方程中出现的密度等流体物性, 根据每个控制体积中气相和液相的存在情况确定, 另外, 总能 E 和温度 T 则是各相参量的质量平均^[9]。

模型中考虑湍流效应, 采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型^[10], 该模型能够处理粘性加热、浮力、压缩性等物理现象, 计算稳定性较好, 可满足本文高雷诺数湍流燃烧过程的计算需要。

2.2.2 蒸发与化学反应模型

含能液体的燃烧现象十分复杂, 关于含能液体火焰结构的研究表明, 燃烧过程可大致分为蒸发、热分解和化学反应等三个步骤^[11]。研究把热分解与化学反应合并, 将含能液体的燃烧简化为两个过程: 首先, 含能液体蒸发为气态, 物理过程; 然后, 含能液体的蒸汽在气相中发生分解反应, 生成燃气组分并放出热量。

含能液体的蒸发速率由下式^[12]定义:

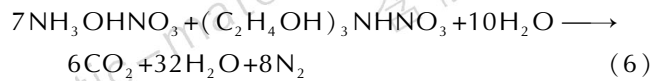
$$\dot{m} = \rho_l s A_b \quad (4)$$

式中, ρ_l 为含能液体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; s 为蒸发的线速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; A_b 为含能液体的蒸发面积, m^2 , 可通过VOF的表面追踪算法得到。本研究采用了指数型燃速模型^[13]来描述燃面上蒸发的线速度, 即:

$$s = u_1 p^n \quad (5)$$

式中, u_1 为燃速系数, $\text{m} \cdot \text{MPa}^{-n} \cdot \text{s}^{-1}$; n 为燃速指数, p 为压力, MPa。 u_1 和 n 通过密闭爆发器实验得到。

数值模拟采用了硝酸羟胺(HAN)基含能液体LP1846, 它由 HAN、三乙醇胺硝酸盐(TEAN)和水按 63.2:20.0:16.8 的质量比制成^[14], 其化学反应式如下:



在已知 LP1846 组分的情况下, 定义了一种等效燃料组分, 其分子式为 $\text{C}_{0.1875}\text{H}_{2.0}\text{O}_{2.75}\text{N}_{0.5}$, 燃烧过程被简化为该燃料的分解, 其生成热 Q_p 通过 Hess 定律^[15]计算:

$$Q_p = \left(\sum \chi_i h_i^0 \right)_R - \left(\sum n_i h_i^0 \right)_P \quad (7)$$

式中, χ 和 n 分别是反应物和生成物的摩尔分数, h_i^0 为生成物的标准状态焓, 定义为:

$$h_i^0 = E_c + \int_0^{T_s} c_p dT \quad (8)$$

式中, E_c 为化学能, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; T_s 为参考温度, K; c_p 为比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

燃气中各化学成分的扩散过程用如下形式的组分输运方程描述:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i \quad (9)$$

式中, Y_i 为各组分的质量分数, 组分 i 的反应生成速率 R_i 采用涡-耗散模型计算, 质量扩散速率 \mathbf{J}_i 用 Fick 定律描述^[16]。将多种组分混合形成的燃气视为可压缩理想气体, 满足如下形式的气体定律:

$$p = \frac{p}{RT \sum_i \frac{Y_i}{M_{w,i}}} \quad (10)$$

式中, R 为通用气体常数, $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $M_{w,i}$ 为组分 i 的分子量。

2.2.3 计算区域与边界条件

为便于与实验结果比较, 针对文献[17]中典型燃烧室结构——圆柱型和 3 级阶梯渐扩型, 进行了燃烧推进过程的计算, 两种燃烧室结构及装药参数如表 1 所示。

以 3 级阶梯渐扩型燃烧室为例, 计算区域及边界设置如图 1 所示。在该轴对称模型中, ab 表示轴线, ad 为膛底边界, bc 为弹底边界, 其它线段为燃烧室壁面边界。计算区域被规则的四边形网格剖分。

对于弹丸的运动, 在每个时间步, 根据 bc 边界在 x 方向的受力关系将弹丸运动速度定义为:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\int_{A_p} p dS}{\varphi m_p} \quad (11)$$

式中, u 为弹丸运动速度, $m \cdot s^{-1}$; p 为弹底压力, Pa; m_p 为弹丸质量, kg; A_p 为弹底面积, m^2 ; φ 为计及摩擦和气动阻力的次要功系数。当弹底压力超过挤进压力(30 MPa)时,弹丸开始运动。随着计算进行,为避免邻近弹底的一层网格发生畸变,通过网格嵌入程序对该层网格不断进行细化和更新。

表 1 燃烧室结构及装药参数

Table 1 Geometries of combustion chambers and loading parameters

chamber type	n	D_1 /mm	L_1 /mm	$\Delta D/L$	l_B /m	ω /g · cm ⁻³	m_p /g
cylinder	0	11	60	0.0	0.6	1.003	2.45
stepped-wall	3	5	20	0.2	0.6	0.993	2.47

Note: n is the step number of combustion chamber, D_1 is the diameter of the first step, L_1 is the length of the first step, $\Delta D/L$ is the ratio of the diameter increment to the length for every step, l_B is the length of barrel, ω is the loading density of liquid propellant, m_p is the projectile mass.

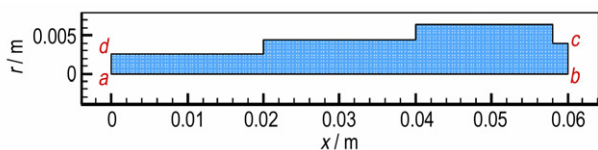


图 1 计算区域与网格划分

Fig.1 Computational domain and meshes generation

2.2.4 初始条件

初始时刻,计算区域用液态 LP1846 填充,其理化特性列于表 2。

表 2 LP1846 的理化特性

Table 2 Physical and chemical properties of LP1846

ρ /kg · m ⁻³	f /J · kg ⁻¹	γ	c_p /J · kg ⁻¹ · K ⁻¹
1420	8.99×10^5	1.222	2.52×10^3
k_e /W · m ⁻¹ · K ⁻¹	μ /kg · m ⁻¹ · s ⁻¹	σ /N · m ⁻¹	
0.40	8.84×10^{-4}	6.69×10^{-2}	

Note: ρ is the density, f is the impetus, γ is the ratio of specific heats, c_p is the specific heat capacity, k_e is the thermal conductivity, μ is the viscosity, σ is the surface tension.

初始温度和压力分别设为 0.1 MPa 和 300 K。为了模拟点射流刚进入燃烧室时的流场状态,在膛底划分一个直径 3 mm 的区域,设置点火温度 2000 K、点火压力 5 MPa。

3 结果与讨论

在进行网格无关性检查后,针对表 1 两种典型燃烧室进行了化学反应流场的数值模拟和分析对比,研究了燃烧室台阶在含能液体的燃烧推进过程中所起的作用。

3.1 圆柱型燃烧室

图 2 列出了圆柱型燃烧室中气相体积分数的分布和演化过程,即燃气形成的 Taylor 空腔的发展过程。

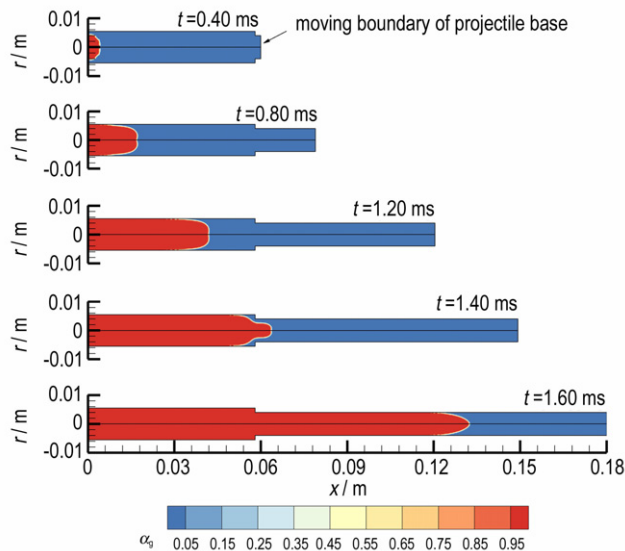


图 2 圆柱型燃烧室中的气相体积分数云图

Fig.2 Contours of gas-phase volume fraction in the cylindrical combustion chamber

在 0.40 ms 时,膛底处生成了初始的气体空腔。在 0.80 ms 时,该气体空腔沿径向发展到燃烧室边界,之后呈现出空腔向弹底方向发展的趋势,空腔头部为椭圆形,这一过程中的气-液界面主要位于空腔的前端。在空腔头部经过之后,燃烧室的周向壁面上没有见到明显的液体药残留。随着时间推移,越来越多的液体药被挤压到了身管中。通过对比 1.40 ms 和 1.60 ms 时刻空腔前端与弹底边界的距离,可以发现空腔正以快于弹丸的速度穿透液体药。图 3 中列出了 1.60 ms 时流场的轴向速度分布,流速最高的区域处于空腔头部,可以进一步说明燃气在液体中的穿透特征。

图 4 给出了两个典型时刻的温度以及流线分布。0.80 ms 时,Taylor 空腔内的气流方向与液体药的主流方向一致,说明燃烧推进过程初期的 Taylor 空腔发展比较平稳。然而到了 1.60 ms,流场中出现了明显的涡旋结构,可以看到在邻近 Taylor 空腔前端的燃气

内,存在一条流动方向的分界线。该线两侧的流动方向相反,分界线左侧的气体流向膛底,并且形成了明显的涡。

图5列出了0.80 ms和1.60 ms时的压力云图。0.80 ms时,压力云图呈现出沿燃烧室轴向的分布结

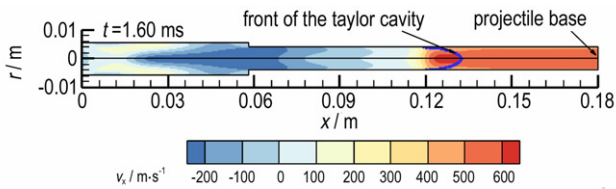


图3 圆柱型燃烧室中流场的轴向速度分布(1.60 ms)

Fig. 3 Axial velocity distribution of the flow field in cylindrical combustion chamber at 1.60 ms

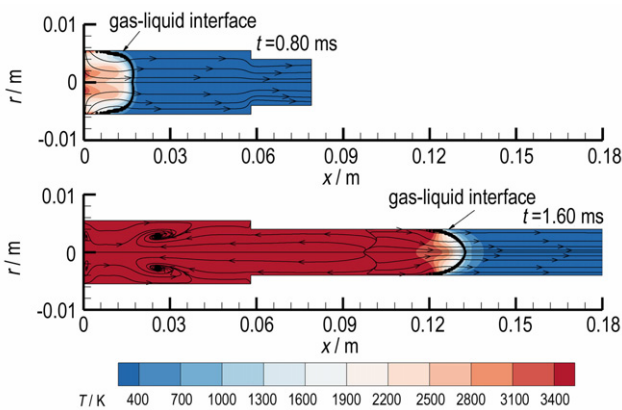


图4 0.80 ms和1.60 ms时圆柱型燃烧室中的流线及温度云图

Fig. 4 Streamlines and temperature contours in the cylindrical combustion chamber at 0.80 ms and 1.60 ms

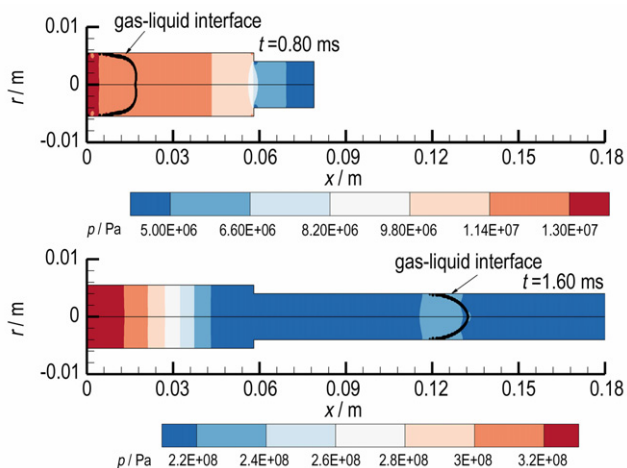


图5 0.80 ms和1.60 ms时圆柱型燃烧室中的压力云图

Fig. 5 Pressure contours in the cylindrical combustion chamber at 0.80 ms and 1.60 ms

构,沿x轴从高到低变化。到1.60 ms时,尽管压力在整体上仍然是轴向分布结构,但不是从膛底到弹底连续降低,而是在燃面附近存在一个压力稍高的区域,这种分布模式可能与燃面附近的液体药局部燃烧有关。

实验中,测压孔中心距离燃烧室左侧边界30 mm,根据测压点位置,提取计算的压力值与实验的 $p-t$ 曲线比较,如图6所示,与图中压力曲线对应的计算初速为 $1187.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,实测初速^[17]为 $1209.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,计算结果与实验数据吻合较好。

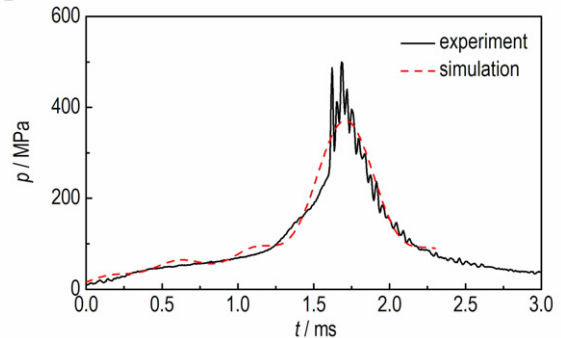


图6 圆柱型燃烧室中压力曲线的实验与计算对比

Fig. 6 Comparison of the experimental and calculated $p-t$ curves in cylindrical combustion chamber

3.2 阶梯渐扩型燃烧室

阶梯渐扩型燃烧室内腔为3级阶梯渐扩结构,气相体积分数暨Taylor空腔的演化过程列于图7。初始的0.5 ms时刻,Taylor空腔在一级中的扩展方式与先前对30 mm口径发射装置的模拟结果有所区别^[18],空腔与燃烧室周向壁面之间没有明显的环状液体药残留,这与燃烧室直径与点火孔直径的相对大小有关,在本文所模拟的7.8 mm口径发射装置中,空腔更易于达到燃烧室周向壁面。当Taylor空腔进入下一级时,可以观察到明显的径向扩展,空腔呈杵状,气液交界面前端比圆柱型燃烧室中更为平坦。另外,如0.80 ms和0.95 ms所示,Taylor空腔在进入下一级后也能快速到达燃烧室壁面,空腔与壁面间残留的液体很快燃尽。Taylor空腔头部面积的增加,以及环形液柱的快速燃尽,说明在阶梯渐扩结构下,由于台阶处径向湍流的作用,Taylor空腔的轴向扩展速度减缓,使得在Taylor空腔与燃烧室壁之间残留液体的气液交界面上,气液间的切向速度差降低,从而导致轴向Kelvin-Helmholtz不稳定性降低。

图8列出了典型时刻的温度和流线分布。0.80 ms时,Taylor空腔在燃烧室的第二级内扩展,在燃烧室的

拐角处出现了涡,除了膛底拐角之外,其它台阶拐角处的涡对气流流动产生诱导作用,使其向燃烧室径向壁面流动,通过燃烧室壁面抑制了燃面发展的随机性,从而增强了燃烧稳定性。对照图 8 中 1.10 ms 和图 4 中 1.60 ms,尽管燃烧室内的流场都很复杂,但通过对比流线分布可以看出,图 8 中身管部分的燃气流动方向与液体流动方向基本一致,而图 4 中 1.60 ms 时身管内的部分燃气流动方向与液体流动方向相反,说明燃烧室结构对燃烧推进过程具有重要影响。

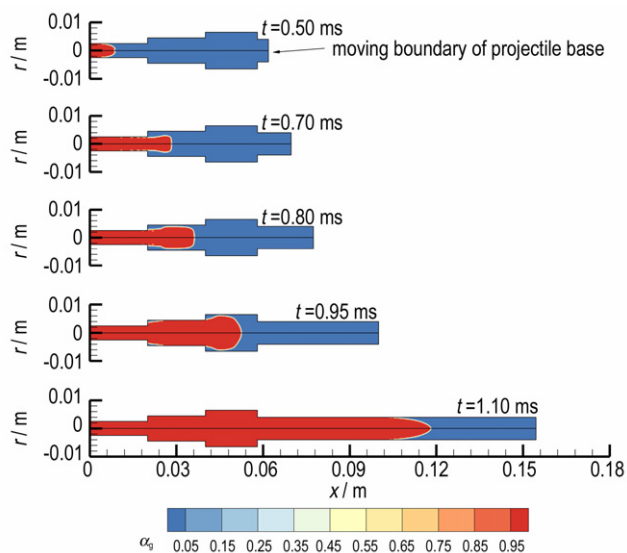


图 7 3 级阶梯渐扩型燃烧室中的气相体积分数云图
Fig. 7 Contours of gas-phase volume fraction in the 3-step stepped-wall combustion chamber

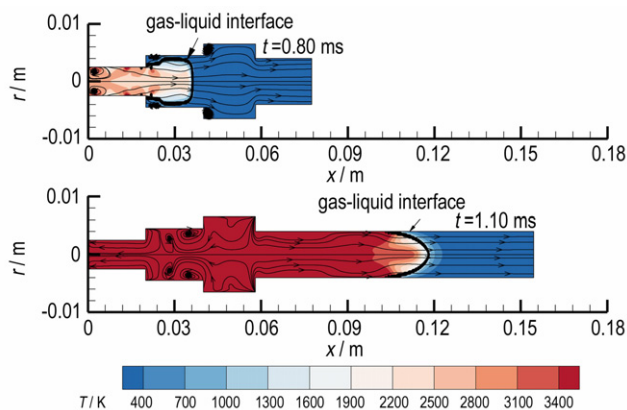


图 8 0.80 ms 和 1.10 ms 时 3 级阶梯渐扩型燃烧室中的流线及温度云图
Fig. 8 Streamlines and temperature contours in the 3-step stepped-wall combustion chamber at 0.80 ms and 1.10 ms

图 9 中列出了 0.80 ms 和 1.10 ms 时的压力云图。与圆柱型燃烧室中的情形类似,压力沿燃烧室轴向分布,呈现出膛底高、弹底低的趋势。在 1.10 ms,气液交界面的左侧也存在一个压力高于周围流体的区域,反映了液体药在燃面附近燃烧的特点。

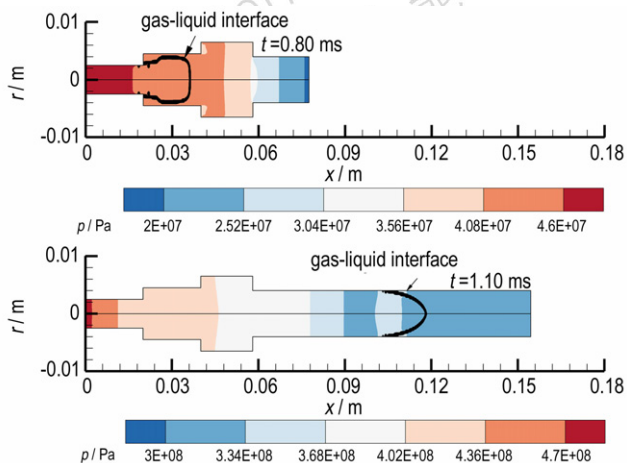


图 9 0.80 ms 和 1.10 ms 时 3 级阶梯渐扩型燃烧室中的压力云图
Fig. 9 Pressure contours in the 3-step stepped-wall combustion chamber at 0.80 ms and 1.10 ms

图 10 对比了计算与实验的 $p-t$ 曲线,可见压力曲线在峰值时刻、峰值大小,以及曲线的上升和下降斜率等方面都相互接近,压力变化过程基本一致。计算初速为 $1101.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,实测初速^[17]为 $1078.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,计算结果与实验数据吻合。

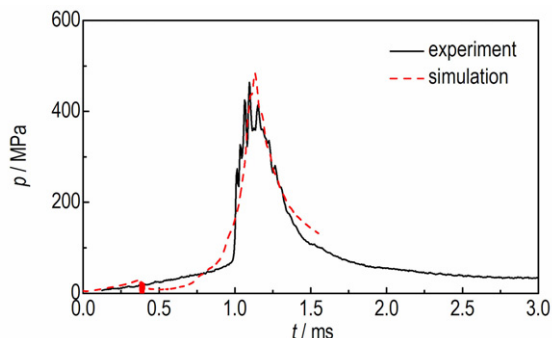


图 10 阶梯渐扩型燃烧室压力曲线的实验与计算对比
Fig. 10 Comparison of the experimental and calculated $p-t$ curves in stepped-wall combustion chamber

4 结论

建立了考虑化学反应的整装式含能液体燃烧推进模型,计算了燃烧室内两相反应流场的参数分布和演化,以及含能液体蒸发燃烧、燃气空腔在液体中的发

展、弹丸运动等主要过程,对比了圆柱型和阶梯渐扩型燃烧室对燃烧推进过程的影响,得出如下结论:

(1)随着液体药燃烧和弹丸运动,圆柱型和阶梯渐扩型燃烧室中均形成了轴向压力分布结构,身管内的流线分布呈现不同特征,阶梯渐扩型的燃气流动方向与液体流动方向一致,而圆柱型的身管流场中存在明显的涡旋结构。

(2)燃气空腔在高压作用下迅速膨胀并穿透液体,使位于气液交界面的燃面快速增长,燃面两侧气液间的切向速度差产生 Kelvin-Helmholtz 不稳定效应,燃烧室结构对 Taylor 空腔发展和燃面扩展存在影响,阶梯渐扩型燃烧室中的径向湍流有助于控制燃面的增长过程,降低轴向 Kelvin-Helmholtz 不稳定性。

(3)计算值与实验值吻合较好,说明计算模型对整装式含能液体燃烧推进过程的刻画是基本合理的。

参考文献:

- [1] Talley R L, Owczarczak J A. Investigation of bulk-loaded liquid propellant gun concept [R]. ARL-CR-127, U. S. Army Research Laboratory: Aberdeen Proving Ground, MD, 1994.
- [2] Knapton J D, Stobie I C, Rosenberger T E. Test results from a 37-mm segmented-chamber bulk-loaded liquid propellant gun [R]. ARL-TR-871, U. S. Army Research Laboratory: Aberdeen Proving Ground, MD, 1995.
- [3] 周彦煌, 张兆钧, 官汉章, 等. 一种整装式液体发射药燃烧控制技术[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(3): 275-281.
ZHOU Yan-huang, ZHANG Zhao-jun, GUAN Han-zhang, et al. A new technique on controlling the combustion processes of bulk liquid propellant[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1995, 15(3): 275-281.
- [4] Despirito J. Interior ballistic simulations of the bulk-loaded liquid propellant gun [R]. ARL-TR-2316, U. S. Army Research Laboratory: Aberdeen Proving Ground, MD, 2001.
- [5] Adams M, Barth E J. Dynamic modeling and design of a bulk-loaded liquid monopropellant powered rifle [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2008, 130: 061001.
- [6] 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: 051001.
- [7] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries [J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201-225.
- [8] 袁亚雄, 张小兵. 高温高压多相流体动力学基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005: 152-156.
- [9] 江帆, 黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 140-142.
JIANG fan, HUANG Peng. Advanced application and case analysis of FLUENT [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 140-142.
- [10] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 157-166.
ZHOU Li-xing. Theory and numerical simulation of turbulent gas particle two phase flow and combustion [M]. Beijing: Science Press, 1994: 157-166.
- [11] 余永刚, 金志明. 含能液滴在高温下特征行为的研究[J]. 工程热物理学报, 1996, 17(增刊): 203-206.
YU Yong-gang, JIN Zhi-ming. A study on characteristic behavior of energetic droplets in hot environments [J]. *Journal of Engineering Thermophysics (Suppl.)*, 1996, 17: 203-206
- [12] 余永刚, 金志明. HAN 基液体发射药液滴燃烧的简化模型[J]. 兵工学报, 1996, 17(4): 294-297.
YU Yong-gang, JIN Zhi-ming. A simplified model on the combustion of HAN-based liquid propellant droplets [J]. *Acta Armamentarii*, 1996, 17(4): 294-297.
- [13] Wren G P, Coffee T P, DeEspirito J, et al. Pressure oscillations in regenerative liquid propellant guns [J]. *Propellants, Explosives, and Pyrotechnics*, 1995, 20(5): 225-231.
- [14] Young J L, Thomas A L. Combustion chemistry of HAN, TEAN, and XM46 [J]. *Combustion Science and Technology*, 1999, 141(1): 19-36.
- [15] Turns S R. An introduction to combustion: concepts and applications [M]. New York: McGraw-Hill International Editions, 2000: 9-31.
- [16] 范维澄. 计算燃烧学[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1987: 19-21.
FANG Wei-cheng. Computational combustion [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 1987: 19-21.
- [17] 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.
- [18] XUE Xiao-cun, 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.

Simulation of Gas-liquid Reaction Flow Field for Combustion and Propulsion Processes of Bulk-loaded Energetic Liquid

MANG Shan-Shan¹, YU Yong-gang²

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

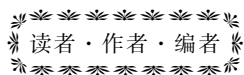
Abstract: To investigate the action mechanism of combustion chamber geometries on the stabilities of combustion and propulsion processes of bulk-loaded energetic liquid, based on theory of hydrodynamics and component transport equation, a two-dimensional axisymmetric model for gas-liquid two-phase flow and combustion was established. Numerical simulations for the chemical reaction flow fields in the cylindrical and multi-stage stepped-wall combustion chambers were conducted. The distribution characteristics of temperature, velocity, pressure, as well as volume fraction were studied via tracking of the expansion of gas cavity and movement of burning surface. The influence rule of combustion chamber geometries on the evolution processes of flow fields was analyzed. Results show that gas cavity formed after ignition and combustion of energetic liquid expands rapidly in the liquid, when the combustion gas cavity penetrates the liquid and develops to projectile bottom, the burning surface along the axial of the combustion chamber grows rapidly, the Kelvin-Helmholtz's instability effect occurs due to the tangential velocity difference between gas and liquid, whereas stepped-wall combustion chamber is helpful for inducing radial turbulence, slowing the axial expansion velocity of gas cavity, suppressing axial Kelvin-Helmholtz's instability effect, and enhancing the stabilities of the combustion and propulsion processes of bulk-loaded energetic liquid. The calculated results are in good agreement with the experimental data.

Key words: energetic liquid; turbulent combustion; combustion stabilities, numerical simulation

CLC number: TK01+1; TJ012.1

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.12.007



《含能材料》“含能共晶”征稿

含能共晶是不同含能分子通过氢键等相互作用力形成的具有稳定结构和性能分子晶体。含能共晶充分组合了单质含能分子的优点,呈现出感度低,综合性能优良的特点,具有潜在的应用前景,共晶研究已经引起国内外含能材料学界的高度关注。为推动含能共晶的研究和交流,本刊特推出“含能共晶”专栏,主要征稿范围包括含能共晶晶体设计与性能预测、含能共晶的制备、结构解析、性能等。来稿请注明“含能共晶”专栏。

《含能材料》编辑部