

文章编号: 1000-5773(2016)05-0427-07

# 蒸汽爆炸推进机理的数值研究\*

纪延亮, 周本谋, 黄亚冬, 李俊伟

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏南京 210094)

**摘要:** 蒸汽爆炸(BLEVE)是一种剧烈的相变现象,可应用于推进、发射等领域。采用VOF(Volume of Fraction)模型对蒸汽爆炸的两相流场变化过程进行了数值模拟,并根据流场参数的变化对Navier-Stokes方程中的源项进行动态优化,同时采用非结构化动网格技术追踪弹丸的运动轨迹。选取3种温度的过热水,模拟了不同填充量条件下过热水的蒸汽爆炸过程,并对流场压力、流体膨胀速率、相变过程和弹丸加速情况进行了对比分析。结果表明,蒸汽爆炸的产生条件较简单,能量转换迅速,膨胀的混合流体在数十毫秒内便可将弹丸发射出膛。

**关键词:** 蒸汽爆炸;相变;两相流;汽化模型;推进

**中图分类号:** O359.1      **文献标志码:** A

**doi:** 10.11858/gywlb.2016.05.013

## 1 引言

蒸汽爆炸(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, BLEVE)是指液体剧烈汽化产生大量蒸汽而发生的爆炸式沸腾现象,是一种破坏性极强的物理性爆炸,在工业生产活动中危害极大。早在20世纪70年代,Reid<sup>[1]</sup>便提出了著名的液体过热理论,这是公认的最早的有关BLEVE的理论论述。近年来,针对BLEVE的发生和演变机理,国内外学者开展了大量的理论和实验研究。Abbasi等人<sup>[2]</sup>对BLEVE的产生机理和高能量冲击波的破坏情况进行了数学建模和全面分析。Pinhasi等人<sup>[3]</sup>基于Navier-Stokes方程建立了BLEVE过程中一维非稳态两相流数学模型,探讨了两相流的产生和发展过程以及过热度与压力波之间的关系。Chen等<sup>[4]</sup>、尚拓强等<sup>[5]</sup>对低过热度下BLEVE的演变过程进行了较为全面的实验和模拟工作,在实验中捕捉到了气-液两相流的发生和发展过程以及超压、爆炸等实验现象,并通过数值仿真很好地加以验证。袁明豪等人<sup>[6]</sup>采用数值模拟手段,对BLEVE的机理进行了研究,使用VOF(Volume of Fraction)方法追踪自由界面,并将VOF方法推广到复杂计算区域。

相比于单纯的饱和蒸汽爆炸,高温过热水爆炸因存在相变过程,其爆炸能量更大,相同体积的高温过热水爆炸能量是饱和蒸汽爆炸能量的10倍以上。以往的研究主要针对BLEVE的形成机理、相变过程、爆炸能量,而对于如何利用释放的高能流体则鲜有论述。水工质相变时,体积膨胀至初始时的数百甚至上千倍,迅速扩张的流体对周围环境产生强烈的冲击,其推动效应不容小觑;采用水作为推进剂时,不会污染环境,并且可以循环利用;此外,通过调节馈入能量的强度,液态水既可以相变形成气态水,也可以进一步电离形成等离子体。自20世纪90年代,国内外学者便开展了水工质相变推进研究,主要应用于小型空间推进器。2001年,Ye等人<sup>[7]</sup>对一种水蒸汽微型推进器进行了结构设计和性能分析,该推进器利用加热板对进入通道内的液滴加热,使其瞬间汽化,向后喷出产生推力。2003年,Scharlemann<sup>[8]</sup>

\* 收稿日期: 2015-04-27; 修回日期: 2015-11-23

基金项目: 瞬态物理国家重点实验室基金(KX21373)

作者简介: 纪延亮(1987-),男,博士研究生,主要从事流体力学研究. E-mail: jyl432@163.com

通讯作者: 周本谋(1962-),男,博士,教授,主要从事流体力学研究. E-mail: bmzhou@njust.edu.cn

通过实验和仿真方法对水工质等离子体推进模型的机理和性能进行了详细分析,其喷出工质为等离子体和水蒸汽的混合物。

本研究基于 Ji 等人<sup>[9]</sup>的理论研究,深入探讨 BLEVE 的产生机理和相变过程,对具有不同过热度 and 填充量的液态水蒸汽爆炸的流场演变和推进效应进行二维数值模拟,直观地展现整个 BLEVE 过程中流场分布和相变情况,跟踪弹丸的弹尾压力和弹丸速度,探索其应用于推进领域的可行性。

## 2 控制方程

BLEVE 的发生快速且剧烈。当高温高压饱和液体突然暴露在低压环境中时,随着环境低压向液体内部传递,液体会达到过热状态,从而产生核化沸腾现象,两相间发生能量交换,气相压力不断增大,最终带动液态水以混合两相流的形式喷出。

假设流体相间无滑移,混合流体共用一套动量方程求解

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_{\text{eff}}(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{G} + \mathbf{F}_{\text{vol}} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{v}$  为混合流体的速度; $\mathbf{G}$  为控制体所受重力; $\mu_{\text{eff}}$  为有效黏度, $\mu_{\text{eff}} = \varphi_l \mu_l + \varphi_v \mu_v$ ,其中  $\varphi$  为体积分数, $\mu$  为黏度,下标“l”和“v”分别表示液相和气相; $\mathbf{F}_{\text{vol}}$  为表面张力,通过 CSF(Continuum Surface Force)模型可转化为体积力<sup>[10]</sup>

$$\mathbf{F}_{\text{vol}} = \sigma \frac{\varphi_l \rho_l \kappa_l \nabla \varphi_l + \varphi_v \rho_v \kappa_v \nabla \varphi_v}{0.5(\rho_l + \rho_v)} \quad (2)$$

式中: $\sigma$  为表面张力系数, $\kappa$  为界面曲率, $\rho$  为密度。

$$\kappa_l = -\kappa_v = -\nabla \cdot \left( \frac{\nabla \varphi_l}{|\nabla \varphi_l|} \right) \quad (3)$$

对于连续性方程和能量方程,采用分相求解方法。连续性方程为

$$\frac{\partial(\varphi_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi_k \rho_k \mathbf{v}) = \nabla \cdot (\rho_k D_k \nabla \varphi_k) + \dot{m} \quad (4)$$

式中:下标“k”代表气相或液相, $\dot{m}$  为蒸发或冷凝速率。

$$\dot{m} = \pm \frac{h_{lv} A (T_{\text{sat}} - T_l)}{h_{fg}} \quad (5)$$

式中: $h_{lv}$  为气相与液相之间的换热系数, $A$  为单元体积的两相交界面面积, $T_{\text{sat}}$  为当前压强所对应的饱和温度, $T_l$  为液相温度, $h_{fg}$  为汽化潜热, $D$  是与有效黏度相等的扩散系数。

相界面上的能量方程为

$$\frac{\partial(\varphi_k \rho_k c_{pk} T_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi_k \rho_k c_{pk} \mathbf{v} T_k) = \nabla \cdot (k_k \nabla T_k) + \varphi_k \frac{\partial p}{\partial t} + q + \dot{m} h \quad (6)$$

式中: $c_p$  为定压比热容; $k$  为热传导率; $h$  为单位质量焓; $q$  为界面导热量, $q = h_{lv} A (T_v - T_l)$ 。

## 3 计算方法

BLEVE 的二维仿真模型如图 1 所示。爆炸腔尺寸为  $0.2 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ ,前端连接长度为  $0.8 \text{ m}$  的枪管(推进腔),内有一个质量约  $15 \text{ g}$  的矩形弹丸。根据介质的不同,将爆炸腔分为两个区域,即左侧的高温过热水区和右侧的饱和蒸汽区,并假定初始时刻两个区域在  $x=L$  处完全隔绝。

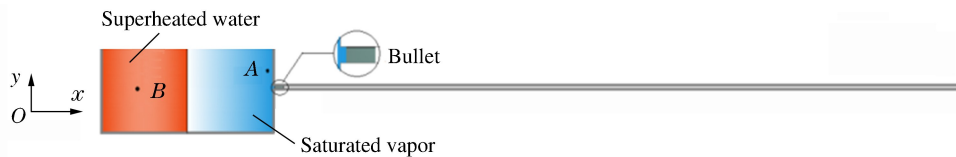


图 1 BLEVE 的二维仿真模型

Fig. 1 Two-dimensional simulation model of BLEVE

由于蒸汽爆炸推进过程在很短的时间内完成,因此可以近似认为整个过程是绝热的。假设壁面无滑移,忽略重力的影响,并且不考虑温度分层的影响<sup>[11]</sup>,即计算零时刻高温过热水区和饱和蒸汽区内的温度分布均匀,流场分区如图 1 所示。两相流中各相控制方程中质量、能量的变化率均是基于动态过热度差值得到,将第 2 节中的相变速率公式简化为<sup>[12]</sup>

$$\text{当 } T \geq T_{\text{sat}} \text{ 时: } \dot{m}_1 = -\lambda\varphi_l\rho_l \frac{|T - T_{\text{sat}}|}{T_{\text{sat}}}, \quad \dot{m}_v = \lambda\varphi_l\rho_l \frac{|T - T_{\text{sat}}|}{T_{\text{sat}}}, \quad q = h_{\text{fg}}\dot{m}_1 \quad (7)$$

$$\text{当 } T < T_{\text{sat}} \text{ 时: } \dot{m}_1 = \lambda\varphi_v\rho_v \frac{|T - T_{\text{sat}}|}{T_{\text{sat}}}, \quad \dot{m}_v = -\lambda\varphi_v\rho_v \frac{|T - T_{\text{sat}}|}{T_{\text{sat}}}, \quad q = h_{\text{fg}}\dot{m}_1 \quad (8)$$

式中: $\lambda$ 为相变强度因子, $T$ 为场温度。对于不同的压力  $p$ (MPa),对  $T_{\text{sat}}$ (K)进行动态修正,使用安托尼方程求解

$$\ln p = 9.3876 - 3826.36 / (T_{\text{sat}} - 45.47) \quad (9)$$

针对不同的初始条件,对关联方程的误差进行修正。汽化潜热  $h_{\text{fg}}$ (J/g)与压力  $p$ (MPa)的关系可近似为<sup>[11]</sup>

$$h_{\text{fg}} = 2284.8 - 270p \quad (10)$$

在空间离散方面,相变发生区域用结构化网格划分,弹丸运动区域用非结构化网格划分,利用动网格技术对运动边界上的变形网格进行重构,当运动边界网格的畸变率达到一定程度时,对边界网格进行重新划分,保证计算网格的规则性。采用有限体积法进行离散求解,控制方程的求解选用压力耦合方程的半隐式算法(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations, SIMPLE)。在时间离散方面,采用二阶迎风格式。采用 VOF 模型模拟两相流场,不同的流体组分共用一套动量方程,在每个计算单元内记录各个流体组分的体积分数,所有相的体积分数之和为 1。

为验证计算方法的有效性,选取文献[3]中的算例进行数值计算,其中:计算温度为 453 K,计算区域为  $-5 \text{ m} \leq x \leq 5 \text{ m}$ ,  $-1 \text{ m} \leq y \leq 1 \text{ m}$ ,计算结果均为  $-0.5 \text{ m} \leq y \leq 0.5 \text{ m}$  范围内的平均值,如图 2 所示。对比可知,除不同条件假设带来的差异外,两相流前锋面附近的压力和速度分布与文献[3]中的结果基本吻合,即本计算方法的可信度较高。

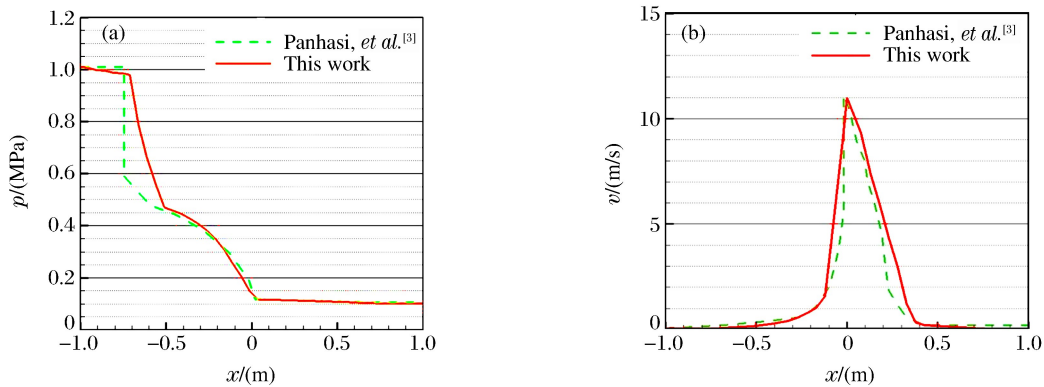


图 2 计算结果对比

Fig. 2 Comparison of calculated results

## 4 计算结果及分析

### 4.1 填充量的影响

在初始温度为 403 K,填充量(过热水占整个爆炸腔的体积分数)分别为 30%、50%和 70%的工况下,对蒸汽爆炸推进过程进行数值模拟。爆炸腔内高温过热水区和饱和蒸汽区的初始温度均为 403 K,对应的初始压力分别约为 0.27 和 0.10 MPa,以弹丸出膛作为计算终止时刻。考虑到填充量越大,爆炸冲击波到达爆炸腔右壁面的时间越短,对腔体内工质膨胀和碰壁反弹过程反映得越完整,故以 70%填

装量为例进行流场分析,图 3 显示了 0、5 和 10 ms 时爆炸腔内液相组分和轴线附近流场压力的分布情况。从零时刻( $t=0$ )开始,界面低压稀疏波向液态水内部传播,使液体内部压力下降,呈现过热状态,产生剧烈的汽化现象。膨胀的两相流挤压右侧气体,气体内产生的膨胀波推动弹丸开始加速,期间两相流的内部压力不断下降,在膨胀的气-液两相流未接触右壁面之前,弹丸始终处于加速状态。当混合流运动到爆炸腔右端,高能两相流被壁面阻挡,被阻挡的流体动能减小,压力急剧升高,仅有轴线附近的两相流继续沿枪膛向出口推进,此时两相流的膨胀速率大大降低,对弹丸的加速作用减弱。

对 5 和 10 ms 时的流场作进一步分析,图 4 描绘了爆炸腔内的流体动能和涡量分布。 $t=5$  ms 时:两相流锋面未与右壁面接触,锋面与出口衔接形成一个高动能的流动通道,大部分流体沿该通道进入枪管,由涡量分布可知紊流区域也位于高速通道内。 $t=10$  ms 时:两相流碰壁滞止,后续两相流不断向前堆积,滞止区域扩大,阻止了膨胀工质直接进入枪膛的快速通道,区域紊流度降低。对比可见,两相流膨胀碰壁前、后的流场流动状态完全不同,碰壁前质量较小的饱和蒸汽可以直接进入枪管推动弹丸,而两相流撞击壁面形成滞止区域后,流入枪管的流体体积减少,对弹丸的推力明显地下降。

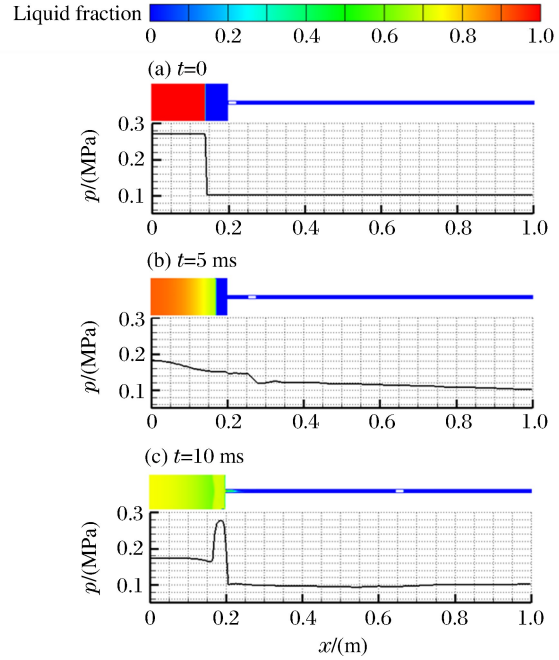


图 3 初始温度为 403 K、填充量为 70% BLEVE 的液相组分和压力分布

Fig. 3 Liquid fraction and pressure distributions of BLEVE with initial temperature of 403 K and filling ratio of 70%

with initial temperature of 403 K and filling ratio of 70% Fig. 3 Liquid fraction and pressure distributions of BLEVE with initial temperature of 403 K and filling ratio of 70%

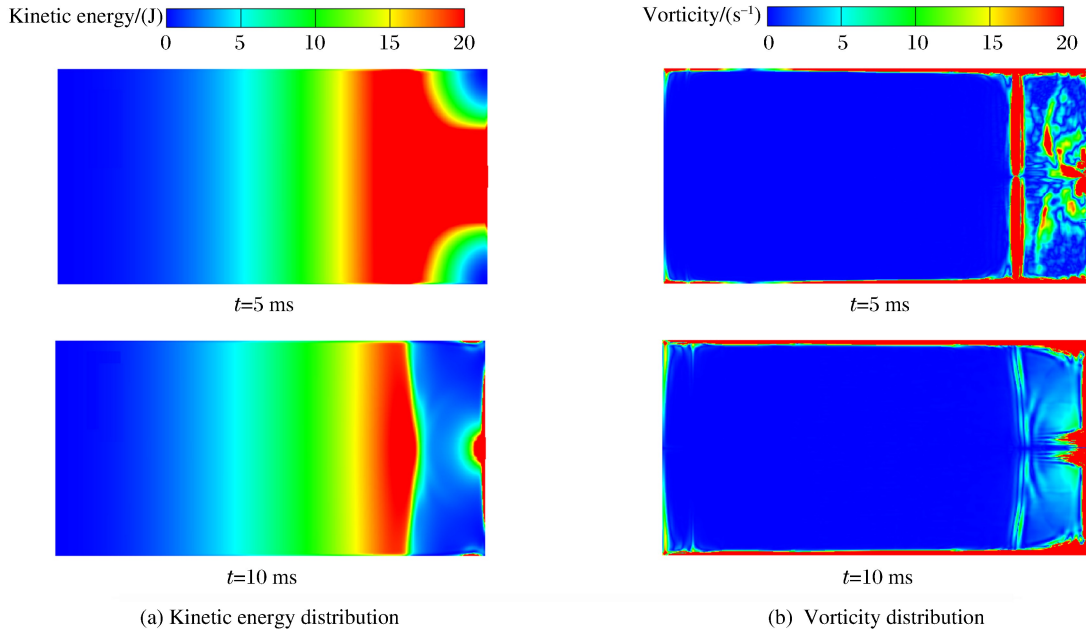


图 4 爆炸腔内流体动能和涡量分布

Fig. 4 Kinetic energy and vorticity distributions in explosion cavity

选取爆炸腔中的 A、B 两点(A 点紧贴爆炸腔右壁面,B 点位于高温过热水区的中心位置,见图 1),仍以 70% 填充量为例,分析蒸汽爆炸及推进过程,如图 5 所示。A 点的压力变化可分为 3 个过程:(1) 爆炸开始时,高温液体发生爆炸式汽化,气-液混合流体向前推进,挤压右侧气体形成膨胀波,膨胀波

作用于壁面导致该区域的压力缓慢上升;(2) 膨胀的两相流到达右壁面时,流体对壁面产生冲击,使得压力急剧升高达到峰值,并且随着后续流体的不断膨胀,该峰值会维持一段时间;(3) A 点附近区域的压力升高,过热度减小,蒸汽爆炸被逐渐抑制,压力开始下降。B 点的压力变化则表现为:零时刻之后,受外界低压传入的影响,压力急剧下降,远远低于液体饱和蒸发压力,液体开始呈现过热状态,随后受外界低压和汽化膨胀的影响,压力在计算时间内基本保持不变。

图 6 给出了初始温度为 403 K 时 3 种不同填装量的过热水发生蒸汽爆炸时弹丸的速度-位移曲线。对比曲线可以看出,对于给定的物理模型尺寸,增加过热水的填装量,在爆炸初期可使弹丸获得更大的动能。膨胀的两相流挤压右侧气体,使气体内部产生压缩波并推动弹丸运动,弹丸的加速度不断增大。然而,当填装量为 70% 时,弹丸速度在中间阶段开始下降,结合图 3 分析可知,下降拐点正是两相流膨胀至爆炸腔右壁面时,大部分两相流受壁面阻挡而滞止于此,流体的动能减小,仅在枪膛出口处有少部分两相流继续膨胀做功,故其对壁面的冲击效用增强,推进弹丸运动作用减弱。通过对比速度和加速度可以看出,填装量在 50% 左右时,弹丸的出膛速度接近极值。

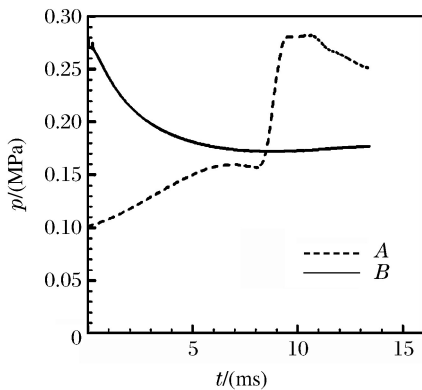


图 5 初始温度为 403 K、填装量为 70% 时 A、B 两点的压力-时间曲线

Fig. 5 Pressure-time curves at points A and B with the initial temperature of 403 K and filling ratio of 70%

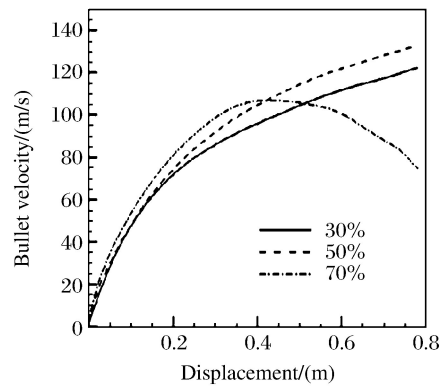


图 6 初始温度为 403 K、填装量不同时 BLEVE 过程中弹丸速度变化曲线

Fig. 6 Velocity curves of bullet for the BLEVE with different filling ratios at initial temperature of 403 K

此外,模拟结果显示:在 403 K 的低过热度工况下,蒸汽爆炸程度并不剧烈,弹尾压力峰值接近 0.15 MPa,随后开始下降;右壁面受两相流冲击时的压力略高于初始时刻高温过热水的饱和压力。

### 4.2 过热度的影响

为了进一步探究 BLEVE 的机理和推进作用,选择最佳填装量 50%,改变过热水的初始温度,探讨 403、453 和 523 K 下饱和和高温过热水发生蒸汽爆炸时的流场变化情况及推进效应,如图 7、图 8 和图 9 所示。

从图 7 中可以明显地看出:随着液态水初始过热度的升高,推进全程中弹丸的速度和加速度均有显著的提高;当过热水的初始温度为 523 K 时,弹丸的出膛速度达到 260 m/s。

图 8 显示了不同初始温度的蒸汽爆炸两相流前锋面运动到 0.15 m 时流场内沿 x 方向的速度和压力分布。可见,随着过热度的提高,两相流的膨胀速度明显加快。交界面左侧压力略低于界面压力是由于气-液两相流向前加速扩张时,液态水的汽化速率

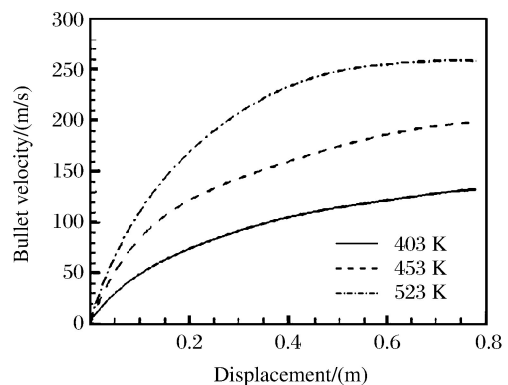


图 7 填装量为 50%、初始温度不同的 BLEVE 过程中弹丸速度变化曲线

Fig. 7 Velocity curves of bullet for the BLEVE with a filling ratio of 50% at different initial temperatures

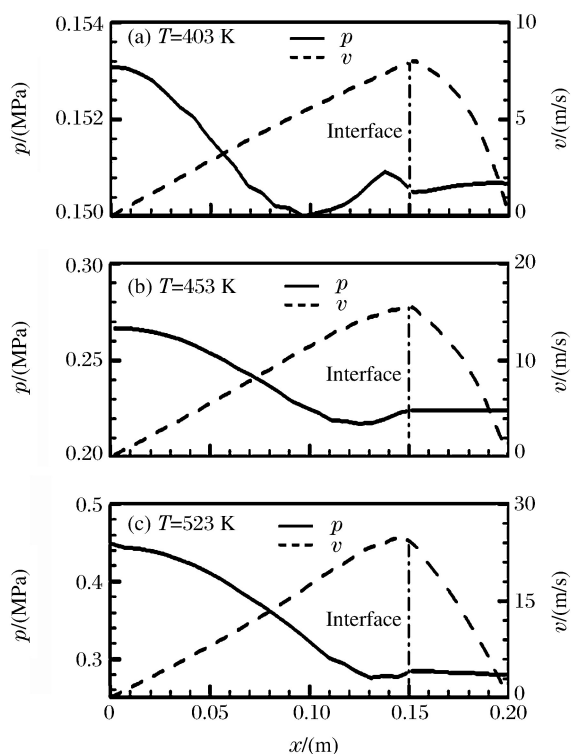


图8 初始温度不同时 BLEVE 的流场速度和压力分布  
Fig. 8 Field velocity and pressure distributions of BLEVE at different initial temperatures

低于两相流的膨胀速率,交界面后方的低压区得不到及时补充。上述3种过热度所产生的爆炸强度未能在交界面处形成激波。图9给出了不同过热度工况下A点压力的演化曲线。从图9可以看出,温度为453 K和523 K时右壁面所受压力分别达到0.5和0.9 MPa,由此可知,随着过热度的增大,蒸汽爆炸对壁面的冲击力变强。然而,受低压稀疏波传入的影响,3种过热度的蒸汽爆炸冲击压力峰值均低于液态过热水初始时刻的压力。

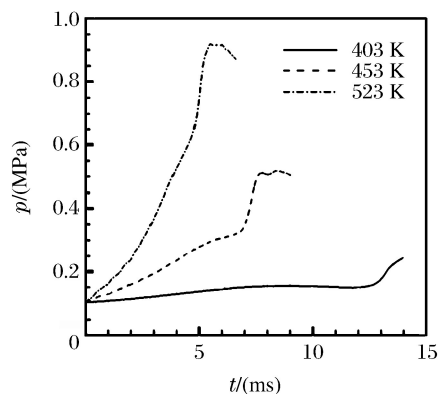


图9 初始温度不同时A点的压力-时间曲线  
Fig. 9 Pressure-time curves at point A at different initial temperatures

## 5 结论

针对蒸汽爆炸的产生机理及能量利用的可行性进行了分析,结果表明:相变过程中,介质的内能转化为动能,高能两相流不断膨胀对外做功;高温水的过热度越大,蒸汽爆炸的相变速率越快,冲击和推进效应越明显。水介质作为推进剂,其来源广泛,较传统的等离子推进器更加经济环保,无论是在海洋还是外太空领域,均具有良好的应用前景。

## References:

- [1] REID R C. Possible mechanism for pressurized-liquid tank explosions or BLEVE's [J]. *Science*, 1979, 203(4386): 1263-1265.
- [2] ABBASI T, ABBASI S A. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): mechanism, consequence assessment, management [J]. *J Hazard Mater*, 2007, 141(3): 489-519.
- [3] PINHASI G A, ULLMANN A, DAYAN A. 1D plane numerical model for boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) [J]. *Int J Heat Mass Transf*, 2007, 50(23/24): 4780-4795.
- [4] CHEN S, SUN J, WAN W. Boiling liquid expanding vapor explosion: experimental research in the evolution of the two-phase flow and over-pressure [J]. *J Hazard Mater*, 2008, 156(1): 530-537.
- [5] 尚拓强, 陈思凝, 张东胜, 等. 沸腾液体扩展蒸汽爆炸初期演化过程的数值模拟 [J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(4): 101-105.  
SHANG T Q, CHEN S N, ZHANG D S, et al. Numerical simulation of the initial evolution of a boiling liquid expanding vapor explosion [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 39(4): 101-105.

- [6] 袁明豪,杨燕华,李天舒,等. 使用界面追踪对膜态沸腾的数值研究 [J]. 计算物理,2008,25(5):576-584.  
YUAN M H, YANG Y H, LI T S, et al. Numerical study on film boiling with interface tracking [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2008, 25(5): 576-584.
- [7] YE X Y, TANG F, DING H Q, et al. Study of a vaporizing water micro-thruster [J]. Sens Actuators A, 2001, 89(1/2):159-165.
- [8] SCHARLEMANN C A. Investigation of thrust mechanisms in a water fed pulsed plasma thruster [D]. Columbus, USA: The Ohio State University, 2003.
- [9] JI Y, ZHOU B, LIU Z, et al. The mechanism of propulsion effect of BLEVE based on discharge [J]. J Phys Conf Ser, 2013, 418(1):012015.
- [10] 孙东亮,徐进良,王 丽,等. 求解两相蒸发和冷凝问题的气液相变模型 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(7):7-11.  
SUN D L, XU J L, WANG L, et al. A vapor-liquid phase change model for two-phase boiling and condensation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(7):7-11.
- [11] LIN W, GONG Y, GAO T, et al. Experimental studies on the thermal stratification and its influence on BLEVEs [J]. Exp Therm Fluid Sci, 2010, 34(7):972-978.
- [12] TALEBI S, ABBASI F, DAVILU H. A 2D numerical simulation of sub-cooled flow boiling at low-pressure and low-flow rates [J]. Nucl Eng Des, 2009, 239(1):140-146.

## Numerical Analysis of Propulsion Mechanism of Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion

JI Yan-Liang, ZHOU Ben-Mou, HUANG Ya-Dong, LI Jun-Wei

(National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** As a sharp phase transition phenomenon, the boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) is widely applicable to facilities related with launching and propulsion. In this work, the VOF (Volume of Fraction) model was employed in the simulation of the two-phase flow field, and the source item in the Navier-Stokes equation was optimized based on the fluid conditions. Moreover, the motion of the bullet was traced using an unstructured dynamic mesh method. Three kinds of superheated vapor with different filling ratios were chosen to simulate the BLEVE process and analyze the field pressure, the expanding rate, the phase transition and the bullet's acceleration. The results indicate that BLEVE is a simple and quick way of energy conversion, and the expanded two-phase flow propels the bullet out of the barrel within tens of milliseconds.

**Key words:** boiling liquid expanding vapor explosion; phase transition; two-phase flow; evaporation model; propulsion