

# 水下点火过程及其影响因素仿真

柳文杰, 李 冬, 蔡 强, 李 翔, 张 正

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

**摘 要:** 火箭发动机水下工作时的流场特性与空中完全不同且对水下工作环境非常敏感。为了研究水下点火流场的非定常演化过程及点火水深、航行速度、汽化反应的影响规律, 利用 VOF 多相流模型及 SST  $k-\omega$  湍流模型模拟了不同环境下的水下点火过程。研究表明: 发动机水下工作过程大致分为 3 个阶段——初期发展阶段、振荡发展阶段与推力稳定阶段, 稳定阶段尾流场又可划分为射流区、过渡区和掺混区, 各阶段的划分受水深、航速等变量的影响; 振荡是水下发动机工作最主要的特征, 喷管出口燃气射流流动状态决定了流场与推力的基本特征; 航速主要影响燃气泡形态演化规律, 表现为轴向长度、颈缩程度增大; 受汽化效应影响, 流场中出现水蒸气的聚集现象, 但由于作用时间短、水汽化量小, 对流场与推力的影响相对较小。

**关键词:** 水下点火; 燃气射流; 点火水深; 航行速度; 汽化效应

**中图分类号:** V435      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-9374(2022)05-0076-08

## Simulation on underwater ignition process and its influencing factors

LIU Wenjie, LI Dong, CAI Qiang, LI Xiang, ZHANG Zheng

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The flow field characteristics of underwater ignition are completely different from ignition in the air and are very sensitive to the underwater working environment. In order to study the unsteady development process of underwater ignition and the influence law of various factors (such as depth, velocity, vaporization), a variety of underwater ignition conditions were studied by numerical simulation, utilizing the VOF multiphase model and SST  $k-\omega$  turbulence model. The results show that, the process of underwater ignition can be divided into three stages: initial stage, oscillatory stage and stable stage. In the stable stage, the gas bubble can be divided into jet region, transition region and mixing region, and the division of different stages is affected by depth, velocity and so on. Oscillation is the most important characteristic in the working process. The working state of gas jet determines the characteristics of flow field and thrust. Velocity mainly affects the evolution law of gas bubble shape, which shows that the axial length and necking degree increases. Due to the influence of vaporization effect, the phenomenon of water vapor accumulation appears in the flow field, but the influence on the flow field and engine thrust are not

收稿日期: 2021-10-02; 修回日期: 2021-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(11972377)

作者简介: 柳文杰(1998—), 男, 硕士, 研究领域为火箭发动机总体设计及仿真。

significant due to the short interaction time and small amount of vapor.

**Keywords:** underwater ignition; gas jet; ignition depth; velocity; vaporization

## 0 引言

火箭发动机水下点火时,燃烧室内高温、高压的燃气经过喷管的加速、排出后直接与低温、高密度水介质作用,整体表现为燃气泡边界(密度间断面)、燃气泡内压力、自由射流结构在相互耦合作用下表现出的非定常、高动态演化规律。目前有关水下点火过程、水下超声速射流问题的研究分为试验、理论与数值仿真3种方式。水下点火试验研究大多在压力水筒或试验水池中进行,分为冷气射流试验和水下火箭发动机点火试验,主要通过高速摄像机、压力传感器等记录燃气泡形态演化、特征点处压强变化趋势等<sup>[1-5]</sup>。张磊等在开阔水域中进行了水下点火试验研究,有效避免了边界的干扰<sup>[6]</sup>。水下超声速射流问题的理论研究主要集中于自由射流界面的稳定性研究,黄楠等通过建立小扰动线性化气液两相流控制方程,对水下超声速气体射流线性稳定性进行分析,获取了射流基本流分布、雷诺数、相对密度等对射流稳定性的影响规律<sup>[7]</sup>。水下点火试验可以获取更为精确的数据,但受限于观测条件,无法获得流场的全部信息,很难进行机理性的研究,理论研究虽然可以获取解析的结论、规律,但对复杂问题的建模研究仍具有很大难度,相较而言数值仿真研究可以求解更为复杂的流动问题并获取流场的全部信息用于水下点火机理分析,具有越来越广泛的应用前景。一方面重点分析了水下燃气射流的非定常演化过程及其影响因素作用规律<sup>[8-13]</sup>,唐云龙以深水条件点火为背景研究了燃气射流与推力的特性<sup>[14]</sup>,张有为等研究了水下点火推力峰值问题并分析了导弹尾部外形对发动机水下点火推力的影响<sup>[15-16]</sup>,魏海鹏等分析了气体射流发展不同阶段的流场特性等<sup>[17]</sup>,王利利等研究了不同扩张比下喷管推力与流场特性的演化过程,认为低扩张比的喷管推力输出稳定,更有利于水下推进<sup>[18]</sup>;另一方面则结合水下发射环境对水下点火进行研究,张正等结合动网格技术,模拟了航行状态下的近筒口水下点火过程,发现延迟燃气发生器熄火有利于发动机射流的建立<sup>[19]</sup>,祁晓斌等则重点研

究了不同距离水下点火对筒口效应的影响<sup>[20]</sup>。

上述水下点火试验与仿真研究中,关于航行体航行速度对水下点火影响的研究较少,并很少有关于水下点火过程汽化效应的求解与分析,本文系统研究了水下点火过程的时间、空间特征,并考虑点火深度、航速、相变过程对流场特性、发动机推力振荡特征的影响规律,研究结果可以为水下发动机设计提供参考。

## 1 数值仿真模型与仿真工况设置

### 1.1 数学模型

本文不考虑横侧向横流的影响,流场具有轴对称性,因此求解二维轴对称非定常 RANS 方程。湍流模型采用 SST  $k-\omega$  模型<sup>[21]</sup>,对湍动能和单位耗散率的传输方程进行求解,以确定湍流涡黏度。水与发动机燃气两相流体的流动求解采用流体体积 (VOF) 模型,在 VOF 模型中,跟踪相与相之间的界面是通过求解一相或多相的体积分数的连续方程来完成的,其气液相界面的求解采用界面捕捉类方法,仿真中采用高分辨率交界面捕捉 (HRIC) 格式<sup>[22]</sup>模拟不混溶流体组分的对流传输,用于追踪交界面。质量守恒方程,体积分约束方程,动量、能量守恒控制方程为

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) \quad (4)$$

式中:  $\alpha_q$  为第  $q$  相的体积分;  $\dot{m}_{pq}$  为第  $p$  相到第  $q$  相的质量输运;  $\dot{m}_{qp}$  为第  $q$  相到第  $p$  相的质量输运;  $k_{\text{eff}}$  为有效热传导;  $\mathbf{v}$  为各相共享的速度场; 密度  $\rho$ 、黏度  $\mu$  和能量  $E$  也均为各相共享,采用各相质量加权计算获得(以物理量  $\varphi$  为例),即

$$\varphi_q = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q \varphi_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \tag{5}$$

仿真中汽化的建模采用 Rohsenow 沸腾模型,该模型属于泡核沸腾模型,成核点覆盖区域上方的蒸汽质量生成率  $\dot{m}_{ew}$  为

$$\dot{m}_{ew} = C_{ew} q_{bw} / h_{lat} \tag{6}$$

式中:  $C_{ew}$  为创建汽泡的沸腾热通量大小的模型常数;  $q_{bw}$  为表面热通量;  $h_{lat}$  为液相的汽化潜热。

1.2 初边界条件设置

水下航行体为轴对称外形,喷管出口外为外部流场,尺寸为  $300d_e \times 50d_e$ ,可有效消除仿真求解的边界效应,如图 1 所示。

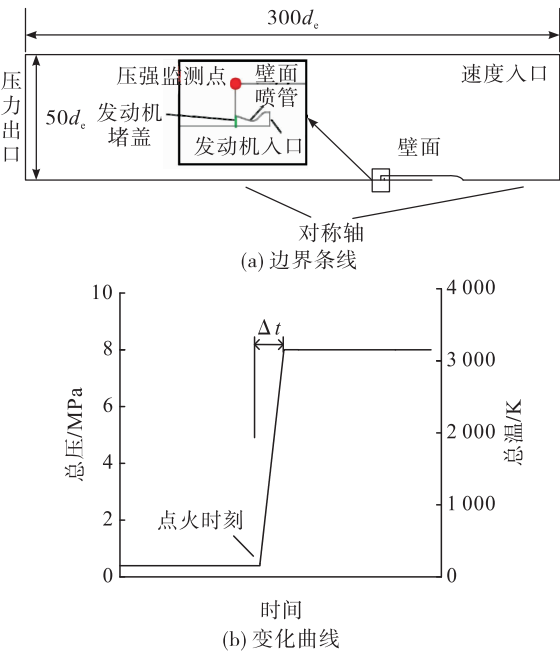


图 1 边界条件与发动机入口总压-总温变化曲线  
Fig. 1 Boundary conditions and curve of total pressure and temperature at engine inlet

本文重点求解水下超声速射流与水介质的两相流动、作用规律,因此对发动机及工质的模拟进行一定的简化:

- 1) 仿真中的喷管采用锥形喷管,扩张比为 4,扩张角取 17°;
- 2) 忽略燃烧室内部复杂喷注、燃烧过程,简化为图 1 中燃气参数恒定的压力入口边界条件,同时不考虑喷管内及喷管出口外燃气的化学反应;
- 3) 喷管入口工质为理想气体,总压 8 MPa、总温

3 200 K;  
4) 喷管内设置有堵盖,当燃烧室压力达到 2.6 MPa 时打开,燃气射流喷入水中,在仿真模型中,发动机堵盖简化为喷管出口的“挡板界面”模型,通过将“挡板界面”变为“内部界面”来模拟堵盖打开过程。

在计算域的下游边界设定为压力出口,上游边界设定为速度入口,以方便模拟航速存在的工况。

1.3 仿真工况设置

根据喷管出口压强  $p_e$  与环境背压  $p_0$  的比值(出口压强比)可以将燃气射流流动状态分为过膨胀与欠膨胀两种,分别对应不同射流结构,决定了流场与推力的特征。流体因相变产生的汽化效应、水下航行速度对流场特征也会产生重要影响。本文综合考虑点火水深、航速和汽化效应的影响,设置如表 1 所示仿真工况。

表 1 模拟计算工况

Tab. 1 Simulation calculation cases

工况	点火深度/m	出口压强比 $p_e/p_0$	航速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	燃气射流状态	是否考虑汽化
1	10	1.861	0	中度欠膨胀	否
2	30	0.938	0	低度过膨胀	否
3	30	0.938	20	低度过膨胀	否
4	30	0.938	0	低度过膨胀	是
5	60	0.538	0	中度过膨胀	否
6	60	0.538	20	中度过膨胀	否
7	100	0.343	0	高度过膨胀	否

1.4 数值仿真模型验证及网格无关性验证

为了表明数值仿真模型的有效性,本文根据文献[1]的试验结果对数值方法进行验证,其中喷管结构外形尺寸、外部环境工况与燃烧室入口条件与文献[1]相同。图 2 为流场演化典型时刻燃气泡形态与径向尺寸的试验结果与数值仿真结果对比。

根据试验记录的对比可见,数值仿真结果能够较准确地得到水下点火过程中燃气泡形态、尺寸的变化规律,仿真模型可以较好地模拟发动机水下点火过程。网格数量是数值仿真中的关键参数,需综合计算精度与求解效率的需求,因此需要进行网格无关性验证。

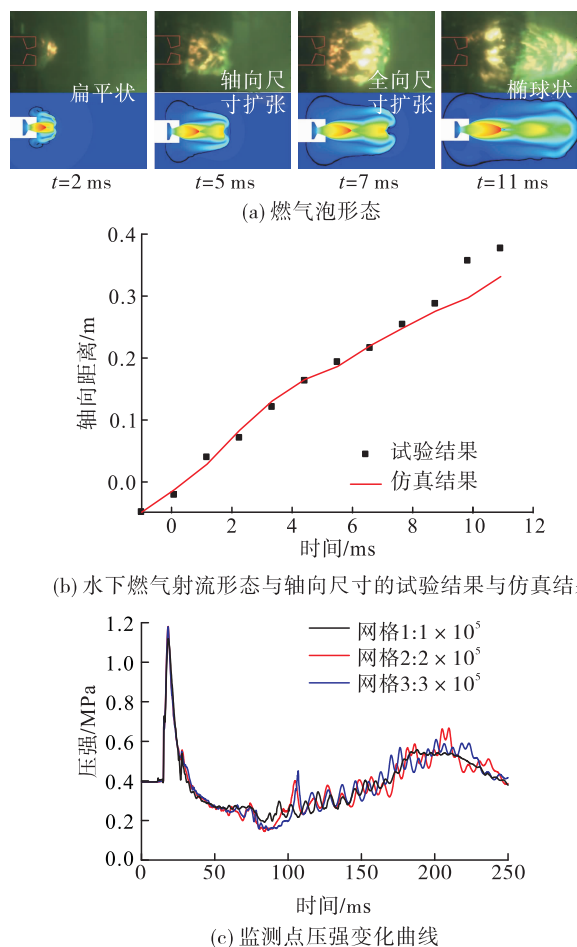


图2 燃气泡形态与数值仿真验证结果

Fig. 2 Verification results of gas bubble shape and numerical simulation

本文以标准网格设置为基础,通过修改网格全局控制尺寸进行调整,共得到3种网格模型,网格数分别为 $10^5$ 、 $2 \times 10^5$ 与 $3 \times 10^5$ (网格1、2、3),采用完全相同的计算条件对非定常水下点火过程进行求解,并记录图1中压强监测点数据,得到如图2(c)所示的求解结果。从图中可以发现,在水下点火过程中,不同网格数目的仿真模型求解结果变化规律相同,尤其在水下点火初期,不同网格数量的求解结果完全一致,但在求解过程的后期,网格1模型无法捕捉流场振荡的细节,而网格2、3模型对流场振荡幅值、频率的求解几乎一致,因此,综合考虑准确性与经济性,选用网格2网格模型进行仿真求解。

## 2 仿真结果分析

### 2.1 水下点火非定常演化时间与空间特征分析

当水深为30 m时,喷管出口压强比最接近1,

以工况2为例分析流场的非定常演化特征。

根据工况2中流场与推力的仿真结果,水下点火过程基本分为3个阶段:水下点火初期阶段(0 ~ 64.5 ms)、射流发展阶段(64.5 ms ~ 约350 ms)与发动机稳定工作阶段(约350 ms后),推力振荡的主频为31.73 Hz。结合图3仿真结果,得到了不同阶段流场演化的特点。

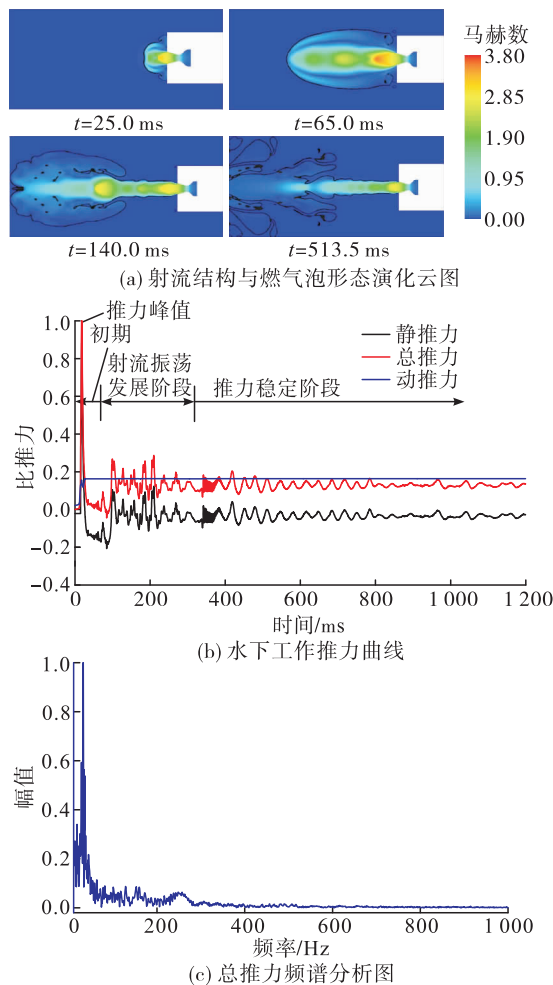


图3 工况2数值仿真结果

Fig. 3 Simulation results of case 2

#### 2.1.1 流场演化初期

如图4压强云图所示,在 $t = 16.5$  ms时刻发动机堵盖打开瞬间,喷管内外压差大于2 MPa,扰动压力波以水下声速迅速向外传播,可视为轻微的“水下爆炸”,在堵盖打开瞬间随即经历一个推力的峰值-回落过程,持续时间约20 ms。燃气对外膨胀做功,燃气泡逐渐由径向翻卷转为轴向扩张。

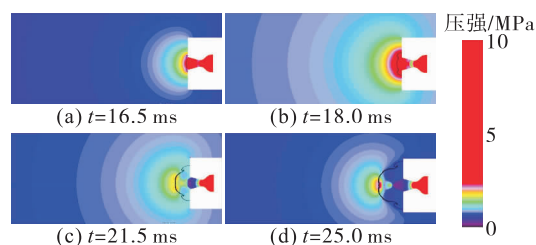


图 4 点火初期流场压强云图

Fig. 4 Pressure nephogram of flow field at the initial stage of ignition

### 2.1.2 射流振荡发展阶段

此时燃气泡主体仍在喷管出口附近,  $t = 65.0 \text{ ms}$  时刻从弹体尾部开始出现颈缩。颈缩出现时, 气水界面(密度间断)沿航行体尾部逐渐向中心收缩, 并与自由射流边界发生干涉; 高速气体受到气水界面

“阻挡”发生滞止产生局部高压, 将水介质排开, 高速射流结构重新建立; 在高速气体抽吸作用和局部低压的影响下, 水介质重新与射流边界相交。上述现象不断发生, 引起射流结构、气水界面以及推力的剧烈振荡, 推力的最大振幅可达到与动推力相同的量级。

### 2.1.3 推力稳定阶段

燃气泡经过一段时间的剧烈振荡后在射流末端  $6d_0$  外周期性地发生膨胀-颈缩与脱落现象, 航行体尾部(射流上游)流场相对稳定, 燃气泡共分为射流区、过渡区与掺混区, 与文献[2]中试验的燃气泡形态结构分区一致(见图 5)。上游射流区气水边界处速度梯度较大, 存在 Kelvin-Helmholtz 剪切不稳定现象, 是推力稳定段射流与推力振荡的主要因素。

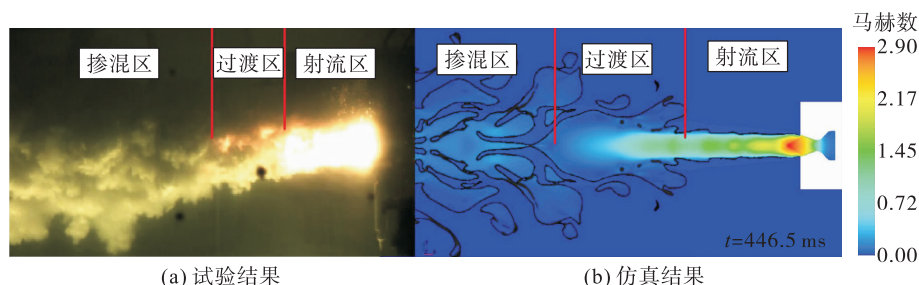


图 5 推力稳定阶段流场仿真结果

Fig. 5 Simulation results of flow field at the thrust stabilization stage

## 2.2 不同水深下流场与推力特征分析

环境背压是流场非定常演化的重要影响因素, 典型时刻燃气泡形态如图 6 所示。

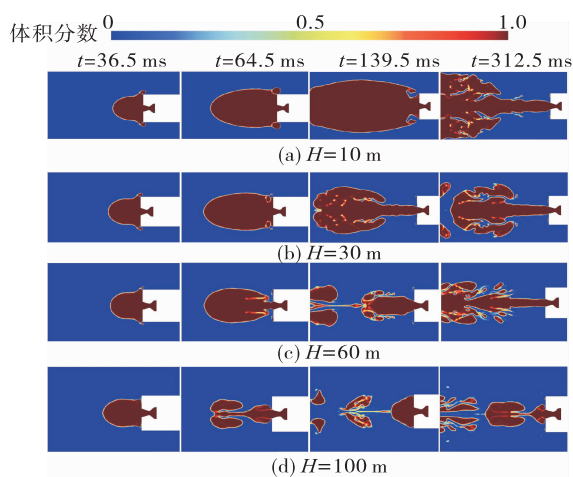


图 6 不同深度下水下点火过程流场体积分云图

Fig. 6 Volume fraction nephogram of flow field during underwater ignition at different depths

从上述仿真结果可以发现, 燃气射流初期特征基本一致, 但随着深度增加, 燃气泡体积变小。燃气泡扩张过程中, 水深越大的工况初次颈缩现象发生的时间越早。在流场演化的射流振荡发展阶段, 燃气泡不断发生膨胀-颈缩现象, 随着水深增加, 颈缩程度会逐渐加剧, 直至气泡断裂, 并伴随回射现象。图 7 所示为工况 7 某周期内完整的膨胀-颈缩-断裂-回射过程。

当距离喷管出口比较近的位置处发生燃气泡断裂时, 燃气射流排导空间会急剧减小, 发动机喷管出口会出现图 7(a)所示的背压突增, 喷管内会发生严重的流动分离现象, 激波向喷管内部回退, 严重时回退至图 7(b)所示的喷管喉部处, 同时产生压强峰值。10 m 及 30 m 水深点火时不会发生流动分离现象, 当点火水深增加至 60 m 时, 喷管开始出现流动分离现象, 100 m 水深点火时呈现一定规律性, 几乎每个振荡周期燃气泡都会出现颈缩断裂现象,



引起喷管内的流动分离。图 8 为不同点火水深下发动机总推力随时间变化的曲线,水深越大,推力振荡幅度越大,最大可达平均推力的数倍,对航行体运动状态将产生巨大的扰动。

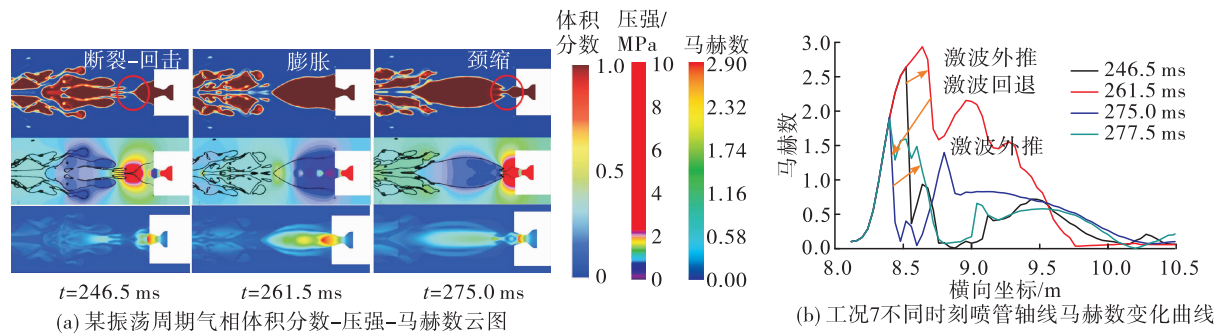


图 7 工况 7 某振荡周期仿真结果

Fig.7 Simulation results of an oscillation period under case 7

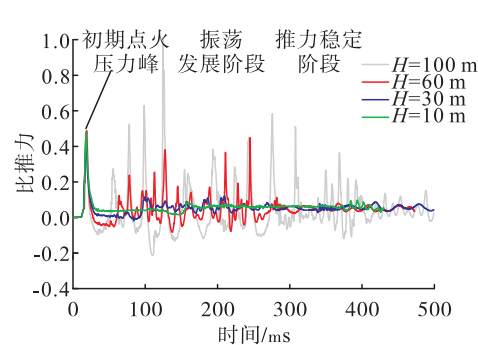


图 8 总推力随时间变化曲线

Fig. 8 Variation curve of engine total thrust with time

表 2 所示为不同水深工况下发动机总推力主频,燃气过膨胀程度不太大(即工作水深  $H < 60\text{ m}$ ) 时,随着水深增加,推力主频增加。但当燃气泡发生断裂-回射时,主频开始随水深减小。

表 2 不同水深工况下发动机总推力主频				
Tab.2 Table of main frequency of total thrust under different depths				
工作水深 $H/\text{m}$	10	30	60	100
主频/Hz	20.93	31.73	61.33	27.98

2.3 航速对流场与推力的影响

水下发动机点火试验时发动机处于系留状态,但水下航行体航行时会有一定航速,燃气泡不断被来流“携带”至下游,引起气水界面的变化。图 9 所示为工况 2、3 与工况 5、6 的仿真结果。

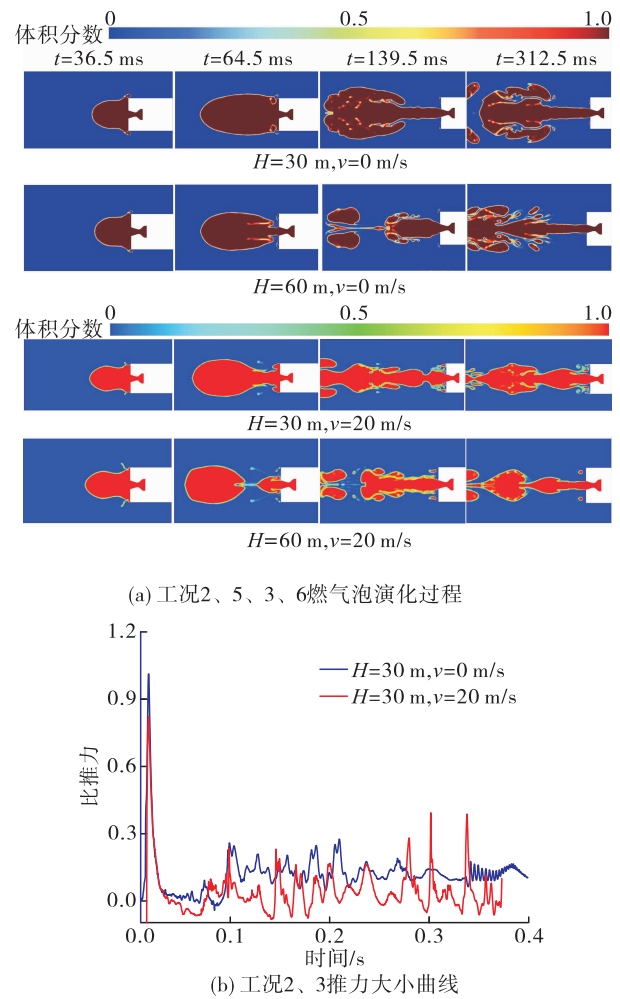


图 9 不同航速工况下仿真结果

Fig.9 Simulation results under different velocity case

由图 9(a)得,在有航速时主要呈现以下规律。

1)燃气泡与航行体径向尺寸基本相当,容积整

体减小;燃气泡轴向生长速度增大,轴向尺寸增加,沿轴向形成内径大-小间隔存在波状分布。

2)燃气泡具有附加的向下游运动趋势,导致喷管出口附近燃气泡内含气量减小,泡内压力减小,在航行体尾部更易发生颈缩现象,燃气泡更易脱落。

由图9(b)的仿真结果可知,当发动机在航行工况下工作时,推力大小变化趋势与静水点火状态相比基本一致,但振荡幅度与频率增大,通过频谱分析可知,推力振荡主频为45.57 Hz,并存在更多个高阶的频率峰值(77.74、115.27、139.39 Hz等)。此时燃气泡易被拉断,抵御颈缩能力减弱,更易发生断裂,因此振幅也相对较大。受航速影响,航行体头部与肩部受到定常流体作用力,阻力增大,尾部压强与总推力在幅值上整体小于静水点火状态。

## 2.4 汽化效应对流场与推力的影响

为了研究水下点火过程中的汽化效应对流场影响,本文进行了工况4的仿真求解,典型时刻流场云图如图10所示。

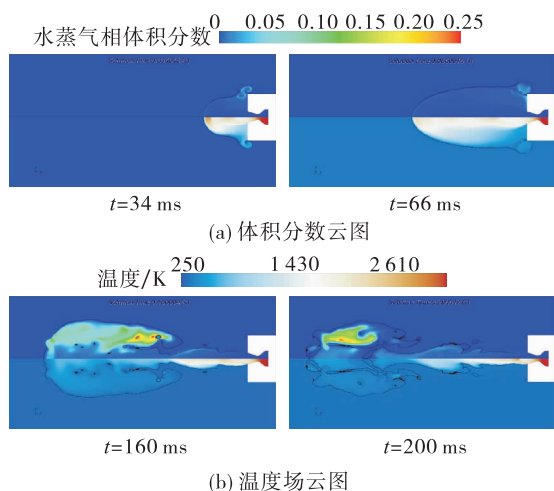


图10 流场水蒸气相体积分云图与温度场云图

Fig.10 Cloud diagram of water vapor phase integral number and temperature field

在水下点火初期( $t = 22.0$  ms),高温高压燃气受到水介质的阻滞,被封闭在容积很小的燃气泡内,高温燃气直接与常温水介质接触,在气水界面上具有很高的温度差,液态水发生汽化生成水蒸气,在两相流交界面上进行热量的传递与质量的输运,初始阶段气水界面表面积小,水蒸气生成量较少,随着时间推移蒸汽量不断增加,受燃气翻卷的

影响,水蒸气聚集在航行体尾部周围。当进入振荡阶段与推力稳定阶段后,虽然燃气泡不断发生膨胀、收缩、脱落等现象,掺混效应明显,但水蒸气仍在旋涡中心处聚集,燃气泡上游生成的水蒸气被燃气携带至下游,喷管出口外燃气射流通道不再有水蒸气聚集。

从图11(a)可得,在忽略汽化效应的仿真工况中,燃气泡初次颈缩的时刻提前,导致两种工况流场演化并不同步,但燃气泡形状、尺寸、基本结构均相差不大。航行体尾部受力反映了流场的扰动对航行体产生的影响,从图11(b)中可以发现,在射流非定常演化过程中,尾部受力的平均值、振荡幅度与振荡的主频率几乎一致,但相位有所差别,同时,忽略汽化效应后尾部受力的振荡幅度有所增加且出现部分高频振动。综上所述,汽化反应通过局部的质量输运,增加了燃气泡内的含气量,燃气泡的振荡幅度减小,高频振动减小。

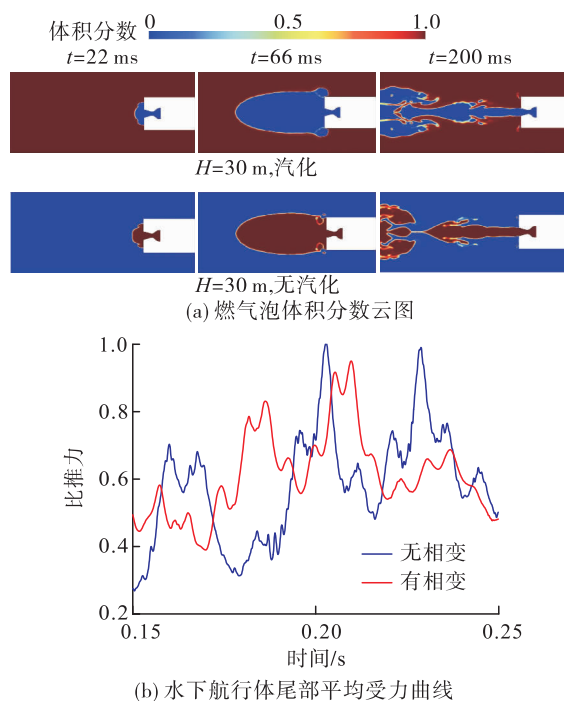


图11 工况2、4典型时刻燃气泡云图与堵盖打开后尾部平均受力曲线

Fig.11 Gas bubble cloud diagram and tail average stress curve at typical time under case 2 and case 4

## 3 结论

1)振荡是水下点火的最主要特征,表现为燃气

泡界面、射流形态、压强等参数的振荡演化。时间规律上,水下点火共分为3个主要阶段:流场演化初期、振荡发展阶段与稳定工作阶段。初期会存在一个明显的推力峰值,推力稳定时期燃气泡在空间上可分为射流区、过渡区和掺混区。当喷管出口燃气处于欠膨胀状态时,推力振荡幅度小、输出平稳。

2)随着工作深度增加,喷管出口燃气逐渐由欠膨胀变为过膨胀,燃气泡振荡周期由膨胀-收缩变为膨胀-颈缩-断裂-回击的重复过程,燃气泡断裂会引起喷管出口处压力剧增,扩张段发生流动分离现象,产生非常大的推力峰值,在设计时应避免喷管出口压强比远小于1。在0~60 m范围内,振荡主频率随着水深增大,100 m水深点火时,断裂的发生使得振荡主频率降低。

3)在航速的影响下,燃气泡整体表现为“被拉长”,轴向贯穿距离增加、径向尺寸减小,振荡周期内颈缩程度增大,燃气泡更易脱落,推力振荡的幅度增大。

4)高温高速燃气直接排导进入水中,气水界面处会汽化生成水蒸气,受燃气泡内气体运动的影响,呈现聚集性特征。汽化效应的存在可在一定程度上减小燃气泡的振荡幅度及高频的振荡,改善发动机水下工作的推力特性,整体而言影响程度较小。

#### 参考文献:

- [1] 张春,郁伟,王宝寿.水下超声速燃气射流的初期流场特性研究[J].兵工学报,2018,39(5):961-968.
- [2] 贾有军,张胜敏,尤俊峰,等.固体发动机水下点火尾流变化过程试验研究[J].固体火箭技术,2015,38(5):660-663.
- [3] SHI H H, WANG B Y, DAI Z Q. Research on the mechanics of underwater supersonic gas jets[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2010, 53(3):527-535.
- [4] BECKSTEAD M, JING Q, VOROZHTSOV A, et al. Experimental investigations of the underwater ignition of the solid rocket propellant [C]//36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 1998.
- [5] JIA Y J, LIU L X. A test study of underwater ignition of solid rocket motor [C]//60th International Astronautical Congress. [S. l.]: IAC, 2009.
- [6] 张磊,余湖清.固体火箭发动机水下工作推力特性的实验研究[J].含能材料,2020,28(12):1184-1189.
- [7] 黄楠,陈志华,王争论.水下超声速气体射流线性稳定性研究[J].推进技术,2021,42(3):550-559.
- [8] 曹嘉怡,宫兆新,鲁传敬,等.发动机水下点火的燃气射流特性研究[C]//中国力学学会.第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会论文集: B 水动力学基础.上海:《水动力学研究与进展》杂志社,2014.
- [9] 许海雨,罗凯,刘日晨.水下超声速气流流场非定常特性研究[J].推进技术,2019,40(11):2618-2625.
- [10] 陈伟,时素果,张志瞳,等.水下点火气液两相流数值计算研究[C]//第十一届全国流体力学学术会议论文摘要集.深圳:中国力学学会,2020.
- [11] 朱卫兵,陈宏,黄舜.水下高速射流气泡变化过程数值研究[J].推进技术,2010,31(4):496-502.
- [12] 向敏,吴雄,张为华,等.水下固体发动机尾流场数值仿真[J].推进技术,2009,30(4):479-483.
- [13] MA Y L, JIANG Y, HAO J G, et al. Research on the initial ignition of the underwater launching solid rocket motor[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010, 19(4):422-426.
- [14] 唐云龙.深水条件下固体火箭发动机燃气射流与推力特性研究[D].北京:北京理工大学,2016.
- [15] 张有为,王晓宏.导弹水下点火推力峰值问题的数值研究[J].应用力学学报,2007,24(2):298-301.
- [16] 张有为,王晓宏.导弹尾部外形对发动机水下点火推力的影响[J].航空动力学报,2008,23(5):927-931.
- [17] 魏海鹏,郭凤美,权晓波.水下气体射流数值研究[J].导弹与航天运载技术,2009(2):37-39.
- [18] 王利利,刘影,李达钦,等.固体火箭发动机水下超音速射流数值研究[J].兵工学报,2019,40(6):1161-1170.
- [19] 张正,李冬,张木,等.筒口流场及其对发动机水下点火影响的数值模拟[J].导弹与航天运载技术,2016(5):80-86.
- [20] 祁晓斌,袁绪龙,徐保成,等.导弹水下发射近筒口点火时机选择影响研究[J].推进技术,2019,40(7):1449-1457.
- [21] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8):1598-1605.
- [22] MUSAHERIJA S, PERIC M. Computation of free-surface flows using interface-tracking and interface-capturing methods [M]//MAHRENHOLTZ O, MARKIEWICZ M. Nonlinear water waves interaction. [S. l.]: WIT Press, 1999.