

水下火箭水平射流初期特征研究

唐云龙 李世鹏 刘筑 隋欣 王宁飞

Horizontal jet characteristics of an underwater solid rocket motor at the beginning of working

Tang Yun-Long Li Shi-Peng Liu Zhu Sui Xin Wang Ning-Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 234702 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.234702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

方腔内 $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 水混合纳米流体自然对流的格子 Boltzmann 模拟

Numerical simulation of natural convection of square enclosure filled with $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -water mixed nanofluid based on lattice Boltzmann method

物理学报.2015, 64(2): 024703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024703>

两电极等离子体合成射流激励器工作特性研究

Experimental study on the characteristics of a two-electrode plasma synthetic jet actuator

物理学报.2014, 63(19): 194702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194702>

液滴振荡模型及与数值模拟的对比

The drop oscillation model and the comparison with the numerical simulations

物理学报.2013, 62(20): 204702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.204702>

液滴撞击液膜的射流与水花形成机理分析

Analysis of liquid sheet and jet flow mechanism after droplet impinging onto liquid film

物理学报.2013, 62(2): 024705 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024705>

液滴在气固交界面变形移动问题的光滑粒子流体动力学模拟

Numerical implementation of deformation and motion of droplet at the interface between vapor and solid surface with smoothed particle hydrodynamics methodology

物理学报.2012, 61(20): 204701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.204701>

水下火箭水平射流初期特征研究*

唐云龙 李世鹏[†] 刘筑 隋欣 王宁飞

(北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

(2015年5月30日收到; 2015年7月7日收到修改稿)

水中工作固体火箭发动机处于重浮力同时作用环境下, 与工作于大气环境下的固体火箭发动机具有不同的工作特性. 为进一步掌握水下固体火箭发动机的工作特性, 对具有重浮力特征的水下射流进行研究, 重点分析重浮力作用下水平喷射射流结构及推力振荡情况, 采用VOF模型对水平喷射且具有重浮力特征的三维发动机模型进行仿真模拟, 对比有/无重浮力下射流气泡的上浮特征, 并采用动量原理对发动机工作初期的射流扰动进行分析, 获得了重浮力下水下固体火箭发动机的推力振荡特征. 研究表明: 由于重浮力逐渐占据主导地位, 射流气泡具有明显的上浮特征, 推力与重浮力耦合后在竖直方向产生的翻转力矩更大, 通过与文献中实验对比可见, 采用VOF模型并考虑重浮力后仿真所得射流结构与实验结果更吻合.

关键词: 水下固体火箭发动机, 水平射流, 重浮力, 振荡特性**PACS:** 47.20.Bp, 47.61.Jd, 47.27.wg, 47.85.-g**DOI:** 10.7498/aps.64.234702

1 引言

将固体火箭发动机用于深水高速航行推进装置, 使其不仅具有较高机动性和灵活性, 更有利于长期战备执勤^[1]. Tang等^[2]将球形气泡模型计算结果与CFD计算结果进行对比, 发现球形气泡模型具有结构简单、计算速度快, 并能有效反映发动机点瞬间的推力峰值特性等优点. 曹嘉怡等^[3]对超声速喷管燃气射流动力学特性进行了研究, 分析了不同喷管结构的推力振荡问题. 王乐勤等^[4]采用基于VOF方法的两相流模型并结合动网格对气体喷射形成的复杂流场结构进行了研究, 发现射流过程中在气液两相流内形成的压缩、膨胀波及涡旋运动. 朱卫兵等^[5,6]采用VOF模型对水下等温高速气体及热体射流进行了气水耦合数值求解, 成功模拟了气泡的形成、发展、断裂和融合过程, 揭示了气泡中压力和马赫数等流场参数的变化规律. Wang等^[7]设计了一种近似模型来分析单个气

泡和气泡群的相互作用. Mahdi等^[8]用Boltzmann方法对气泡群的声学行为进行了研究. 倪明玖^[9]采用直接模拟方法, 研究气泡在浮力作用下的变形机理及气泡尾部驻涡形成机理, 采用VOF方法捕捉界面获得了气泡平衡时的上升速度, 并对气泡内部环流和气泡尾部驻涡间的关系进行了探讨. Feng和Leal^[10]研究了不同形状气泡在重浮力作用下所表现出不同的运行轨迹. Bewsbury等^[11]研究了非牛顿流体中大气泡和上浮终速的关系.

现有的水下高超音速射流研究, 基本均采用一维模型或轴对称模型, 即使采用三维模型也是对一维或轴对称模型进行的仿真验证, 并未考虑三维模型的特殊性, 故其研究不能准确描述重浮力下水下射流气泡形貌及浮动问题. 水下固体火箭发动机在工作中, 其姿态不断变化, 轴线方向与重浮力方向并不始终保持一致, 会产生一定的倾斜角. 本文将发动机水平放置进行喷射, 研究重浮力影响下发动机射流形貌、典型结构及推力振荡特征. 本文研究成果对工程实践具有指导意义.

* 国家自然科学基金(批准号: 11272055)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: lsp@bit.edu.cn

2 基本方程

研究过程中, 认为喷射气体是理想可压缩空气, 水为不可压缩流体. 气泡受惯性力、表面张力及浮力的影响, 不考虑相变. 采用VOF的多相流方法对气液界面进行捕捉.

2.1 控制方程

在水下发动机的工作过程中, 将高温高压燃气视为目标流体, 基于VOF的质量、动量、能量守恒方程及体积分数输运方程分别为^[12]

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=w,g} (a_k \rho_k E_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} u_j \sum_{k=w,g} [a_k (\rho_k E_k + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S_h, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (a_g \rho_g) + \frac{\partial}{\partial x_i} (a_g \rho_g u_i) = 0, \quad (4)$$

其中 ρ_m , μ_m 可以统一用 ϕ_m 来表示, 即用 ϕ_m 表示混合相的物理性质, 由 $\phi_m = \phi_g a_g + \phi_w (1 - a_g)$ 计算得到, 气-液两相体积分数关系为 $a_w + a_g = 1$, 由于模型中将气体假设为理想气体, 水为不可压液体, 故其状态方程为

$$\rho_k = \begin{cases} p/RT, & k = g, \\ \text{const}, & k = w. \end{cases} \quad (5)$$

因水下气体射流过程中的Froude数约为 $O(10^3)$, 但考虑重浮力下动量守恒方程(2)中不可忽略体积力的作用, 故能量 E_k 可由下式决定:

$$E_k = \begin{cases} h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2}, & k = g, \\ h_k, & k = w. \end{cases} \quad (6)$$

2.2 重力方程

水下多相流动重浮力问题的压力可用雷诺平均的N-S方程进行描述即(2)式所示, 并且体积力 F_i 的具体形式如下^[13]:

$$F_i = g_i + \frac{1}{\rho_m} \bar{F}_i^{\text{ST}}, \quad (7)$$

$$\bar{F}_i^{\text{ST}} = \sigma \kappa \frac{\nabla \varphi}{\varphi},$$

$$\kappa = \nabla \cdot \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|}, \quad (8)$$

其中 g_i 是重力加速度, $\bar{F}_i^{\text{ST}}$ 通过连续表面张力方程得到.

3 仿真模型

三维模型的计算域总长度为500倍喷管入口直径, 宽度为喷管出口直径的330倍以克服边界条件对主射流区流动的影响. 对该三维模型计算区域进行网格划分, 在壁面、喷喉及射流核心区域进行网格加密. 水平射流模型网格如图1所示. 其中四周采用壁面边界, 上下采用压力出口边界; 而发动机入口采用压力入口边界; 重力方向为垂直压力出口方向, 大小为 9.81 m/s^2 .

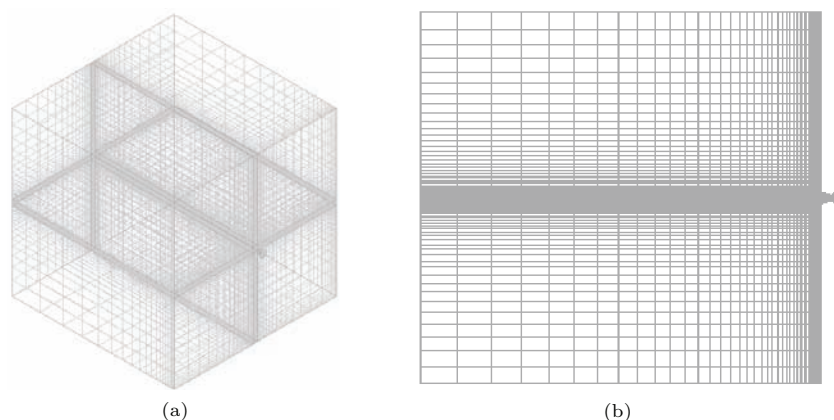


图1 三维水下水平射流模型及网格 (a) 发动机射流三维模型网格; (b) 发动机竖直中心剖面及网格
Fig. 1. Three-dimensional underwater horizontal jet model and grid: (a) The grid of the three-dimensional model; (b) the grid on vertical center profile.

4 仿真结果及分析

4.1 水下射流一般射流形貌分析

图2是考虑重浮力作用下的一段射流形貌, 该形貌清晰地展现了射流初始段、过渡段与主体段的特征及流动情况. 在初期, 射流气泡形成之后, 由于后续射流的作用, 使射流发展成为超音速射流, 之后便出现了初始段, 过渡段与主体段三部分(如图2(a)所示), 其中在过渡段上, 超音速射流与水存在复杂的能量交换. 该仿真结果与文献[14]中实验结果(如图2(b)所示)一致并与文献[15]中自由射流理论相符.

4.2 水下射流典型过程分析

比较有(如图3所示)/无(如图4所示)重浮力下三维仿真结果(详见附录B和C). 在无重浮力时, 水下射流的结构及流场分布与文献[2]中轴对称模型仿真结果相同, 从而无重浮力的三维模型可验证轴对称模型的有效性. 但在考虑重浮力时, 射流气体的形貌发生了很大变化. 出现这种现象主要是气体射流在液相环境下发展受限, 射流气体表面受力不均匀所导致. 在射流初始段气体的动量较大、通道较窄, 受重浮力影响较小, 气体通道

相对偏转角度也较小. 但随着射流气体不断向下游发展, 主段气体体积不断增加, 受重浮力影响逐渐增大, 同时又要不断与后续气体发生碰撞, 射流主段气体的动量相对初始段要小很多, 重浮力逐渐占据主导地位, 气泡将随浮力向上运动. 考虑重浮力的水下射流结构仍然存在不考虑重浮力时的四个典型过程, 即膨胀、胀鼓、颈缩/断裂及回击. 该过程与文献[16]中的实验结果(如图5所示)一致(详见附录A).

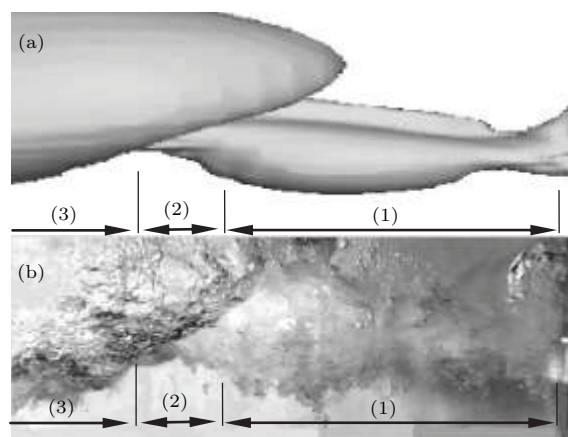


图2 自由射流流动特征图 (a) 自由射流仿真流动特征; (b) 自由射流实验流动特征

Fig. 2. The flow characteristics of jet: (a) The results of simulation; (b) the results of experimental.

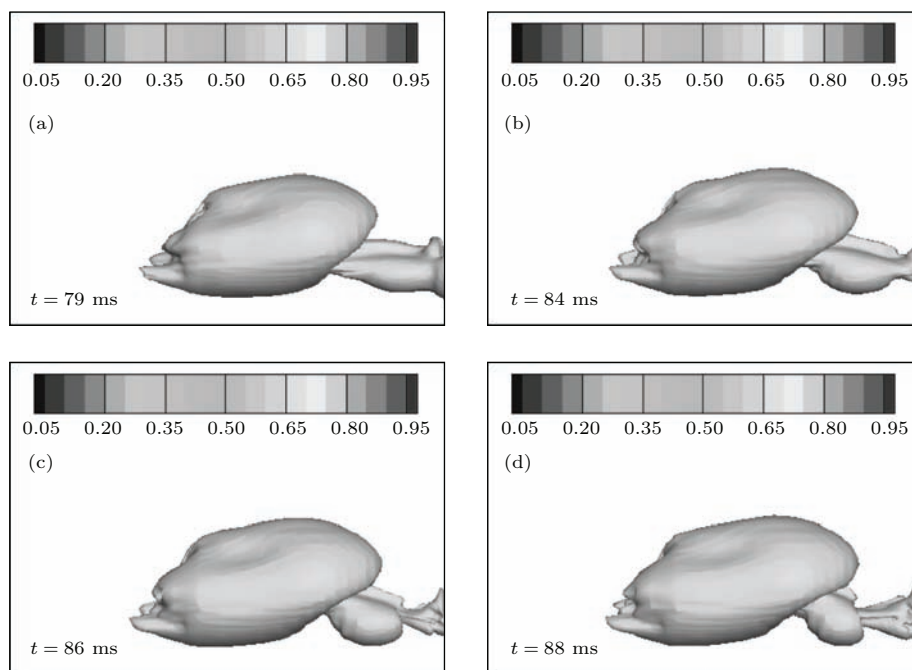


图3 具有重浮力作用下射流典型结构仿真结果 (a) 膨胀; (b) 胀鼓; (c) 颈缩; (d) 回击

Fig. 3. Simulation results of jet structures with buoyancy and gravity: (a) Expansion; (b) bulge; (c) necking/breaking; (d) back-attack.

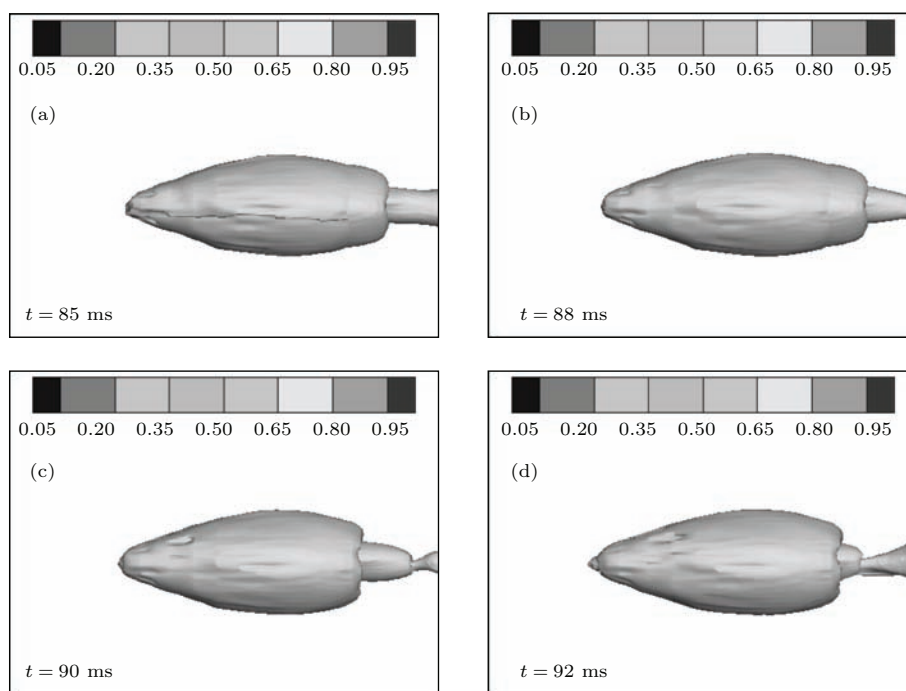


图4 无重浮力作用下射流典型结构仿真结果 (a) 膨胀; (b) 胀鼓; (c) 颈缩; (d) 回击
Fig. 4. Simulation results of jet structures without buoyancy and gravity: (a) expansion; (b) bulge; (c) necking/breaking; (d) back-attack.

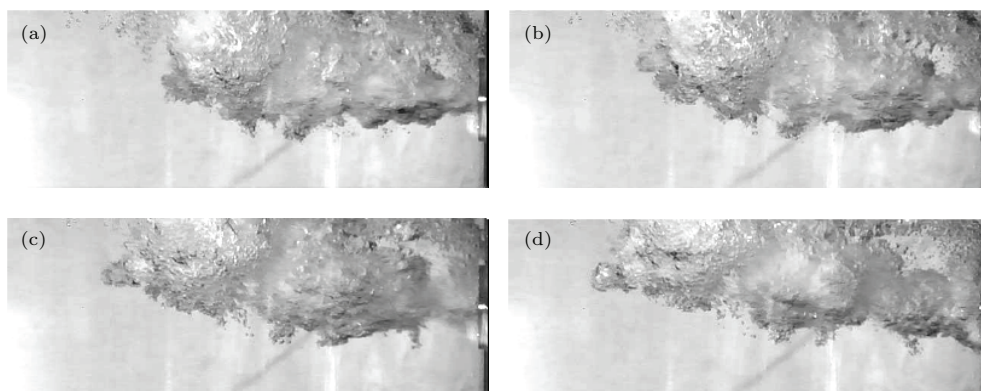


图5 具有浮力及重力条件下的射流典型实验结果 (a) 膨胀; (b) 胀鼓; (c) 颈缩; (d) 回击
Fig. 5. Experimental results of jet with buoyancy and gravity: (a) expansion; (b) bulge; (c) necking/breaking; (d) back-attack.

4.3 水下射流初始扰动分析

图6和图7为水下射流在1 ms—9 ms时刻发动机尾壁面上的压强分布及 $Z = 0$ 剖面上压强分布. 图中反映了射流初期发动机壁面压强出现了一次较小的扰动, 并且气泡形貌发生了微妙的改变. 出现该扰动是由于水深越大压强越高, 并且射流初期气体流动动量小, 射流气体与外界高密度介质相互作用使得运动方向发生改变. 具体可描述为: 首先, 射流开始时刻气体流动动量较小, 射流初期气体受浮力作用明显, 气体向上发展, 这时的剖面及

发动机尾壁面上的压强如图中5 ms和6 ms时刻所示; 其次, 随着气流流动动量的不断增加, 高速运动的气流将会受到气泡上方高密度水的惯性阻力作用而发生反弹, 射流流动方向发生改变出现低头趋势(如图中7 ms, 8 ms所示); 最后, 随着气体射流的不断发展, 气泡下游的气体流动动量开始降低, 这部分气体受浮力作用明显并将产生大幅度上浮(如图中9 ms所示). 在相同网格、边界条件下, 无重浮力时的流场并未出现类似扰动现象, 故可认为射流初期的扰动过程是由重浮力引起的.

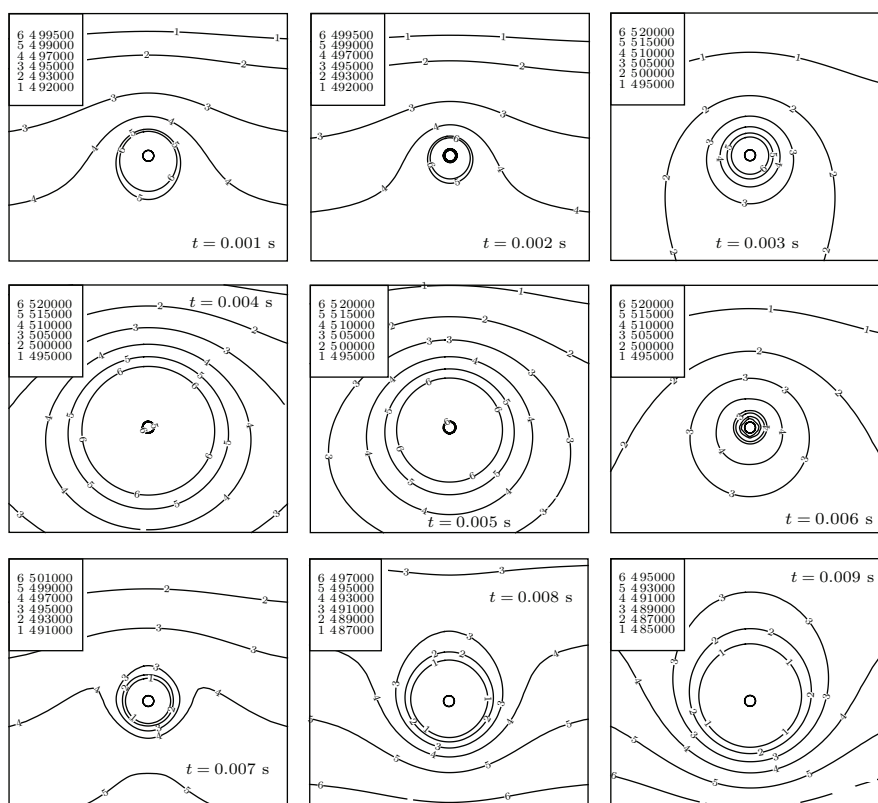


图6 射流初期扰动壁面压强分布

Fig. 6. The pressure distribution on the wall of the jet in initial stage.

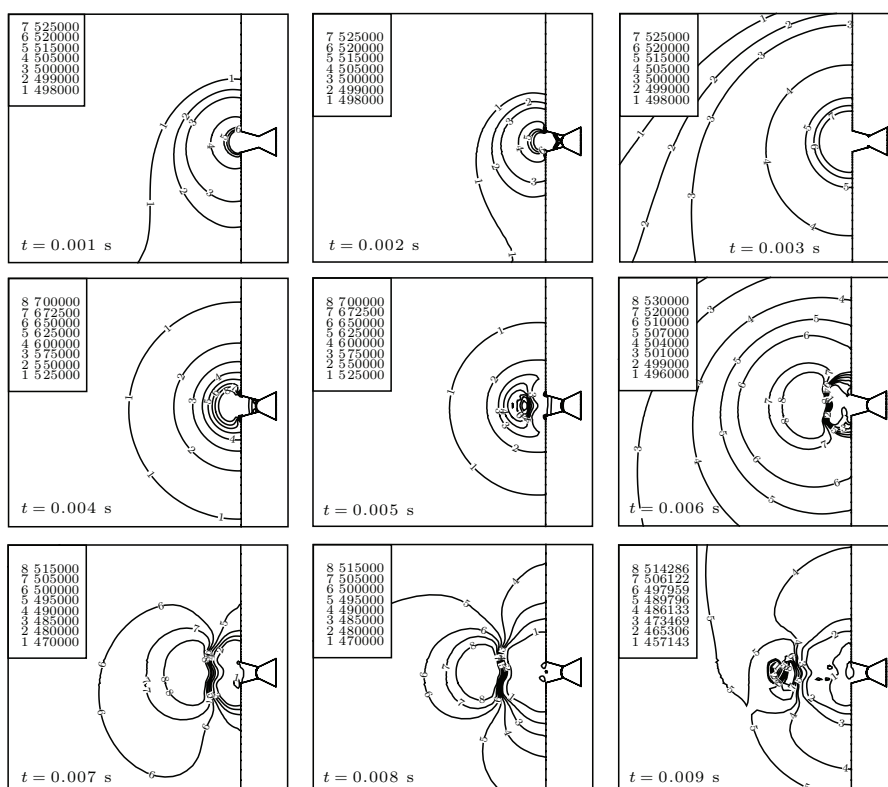


图7 射流初期扰动在 $Z = 0$ 剖面的压强分布

Fig. 7. The pressure distribution on $Z = 0$ Plane of the jet in initial stage.

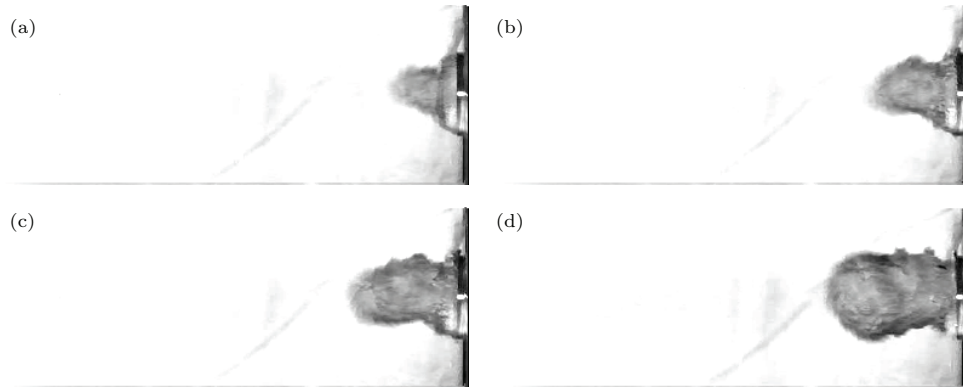


图8 射流初期扰动实验分析 (a) 起始上浮; (b) 上浮长大; (c) 反弹低头; (d) 形成上浮气泡

Fig. 8. The experiment analysis of jet disturbance in initial stage: (a) Rising; (b) rising and expanding; (c) reflecting and sinking; (d) forming gas bubbles.

该仿真结果所出现的物理现象与文献[17]中射流初期的气流运动结果(如图8所示)相同.

4.4 水下发动机推力特征分析

图9为无重浮力下的推力-时间曲线, 图10为有重浮力下的推力-时间曲线. 发动机推力的脉冲

表征了射流四个典型过程的不断出现. 对比两种条件下的仿真结果, 可知射流初期发动机推力均存在一个较高脉冲峰值, 这是由水下射流开始瞬间气流在水的惯性作用下所产生的. 射流初期考虑重浮力作用的射流推力相对不考虑重浮力作用的射流推力存在小幅值振荡(与对图4和图5的分析相同).

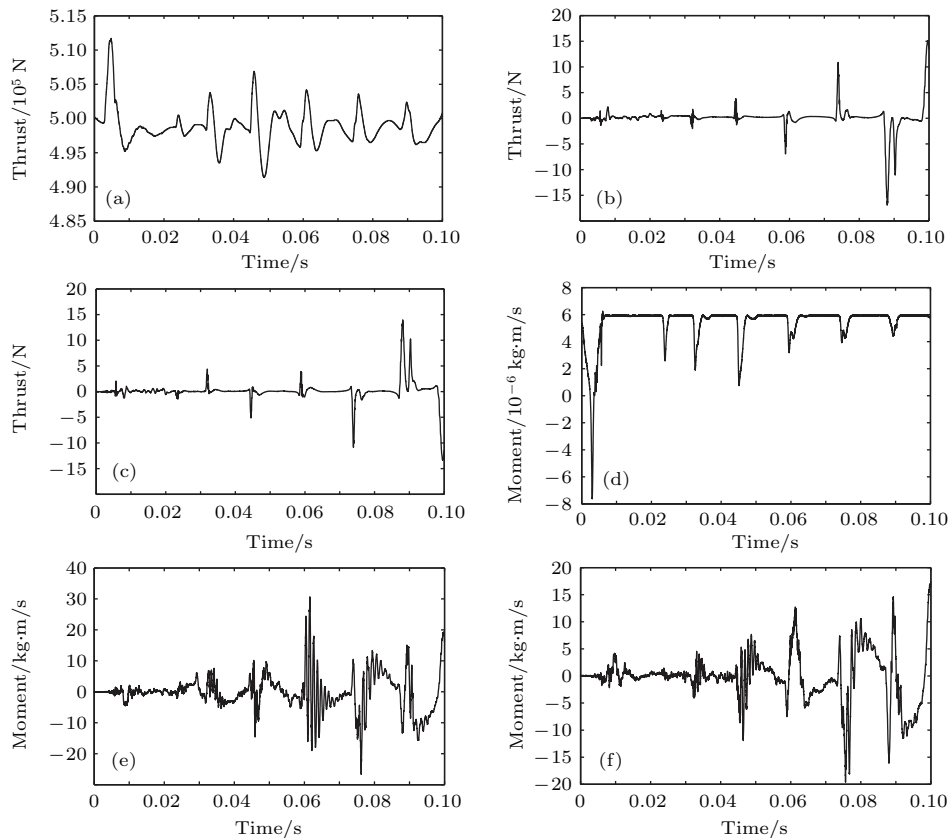


图9 无重浮力的发动机受力结果 (a) X 方向受力; (b) Y 方向受力; (c) Z 方向受力; (d) X 方向力矩; (e) Y 方向力矩; (f) Z 方向力矩

Fig. 9. The force of engine without buoyancy and gravity: (a) Force in X direction; (b) force in Y direction; (c) force in Z direction; (d) torque in X direction; (e) torque in Y direction; (f) torque in Z direction.

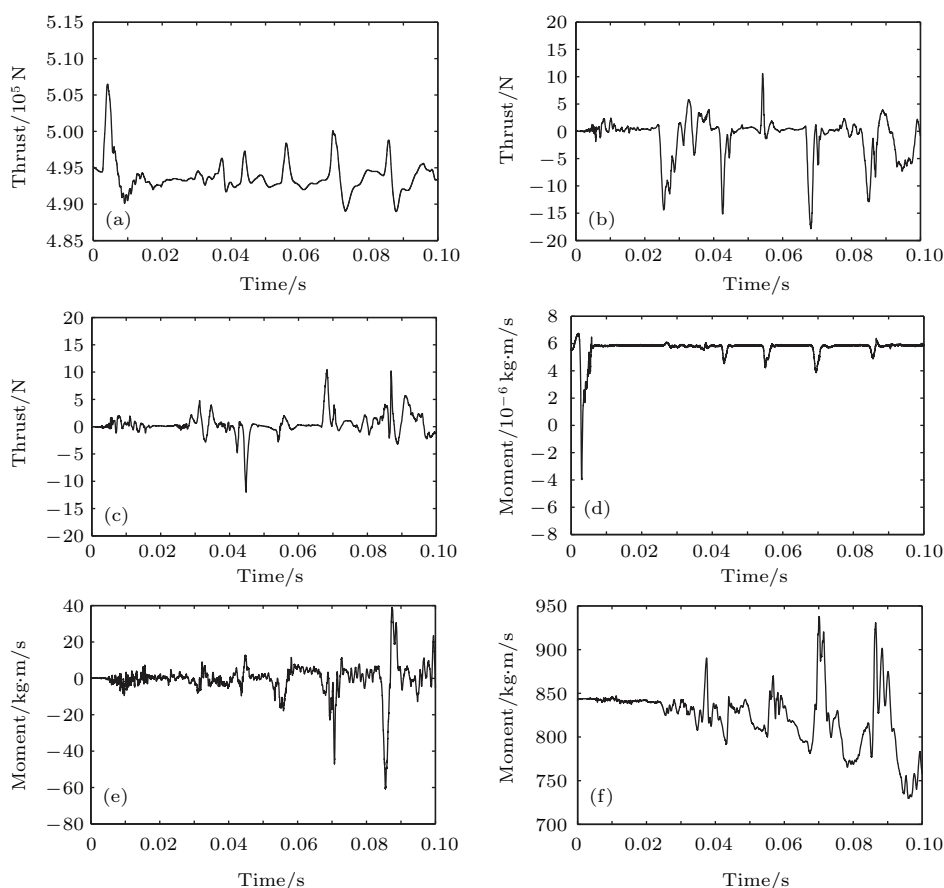


图10 有重浮力的发动机受力结果 (a) X方向受力; (b) Y方向受力; (c) Z方向受力; (d) X方向力矩; (e) Y方向力矩; (f) Z方向力矩

Fig. 9. The force of engine with buoyancy and gravity: (a) Force in X direction; (b) force in Y direction; (c) force in Z direction; (d) torque in X direction; (e) torque in Y direction; (f) torque in Z direction.

图10中形成第一个脉冲时间大于图9中形成第一个脉冲时间,这是因为相比于无重浮力条件下,有重浮力时射流形成气泡所需能量更大.图9和图10中的(c),(d)脉冲与发动机轴线方向推力脉冲变化趋势一致,且有/无重浮力下射流在Y方向上的力矩均相对较小,但两种条件下发动机在Z方向的射流差异很大.

图11为图9和图10中推力脉冲峰值时间间隔的比较.由图可知,射流流动形貌发展到稳定以后水下射流脉冲峰值间隔几乎相同,即重浮力对射流初始段影响不大.

由图10中Z方向力矩可知,发动机在重浮力作用下沿重浮力方向的力矩会发生很大变化.图12为发动机在重浮力作用下水下射流第5次出现四个典型过程的壁面压强变化过程.由图可知,无重浮力时射流在壁面上的压强呈同心圆分布,而有重浮力时射流在壁面上的压强分布却先出现了一次上下交换的振荡,这是因为在重浮力作用下射

流轴线发生了上浮.在射流的膨胀、胀鼓阶段,由于受高密度介质自重作用,壁面上下的压强分布不均(如0.61—0.63 s所示).但在射流的颈缩/断裂阶段,由于气体通道受阻,气流流动动量降低使发动机壁面上下压强分布发生改变(如0.70 s时刻所示).随着气流流动动量的增加,发动机壁面上下压强分布再次发生反转.

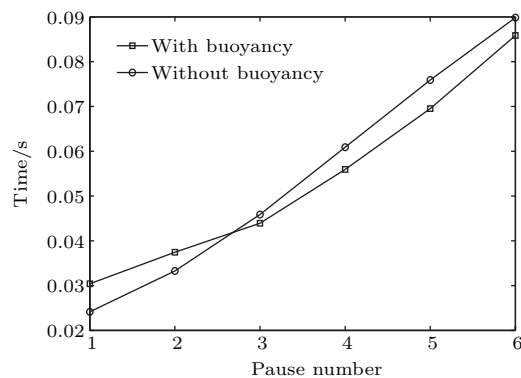


图11 推力脉冲峰值时间比较

Fig. 11. Compare with time of thrust's peak.

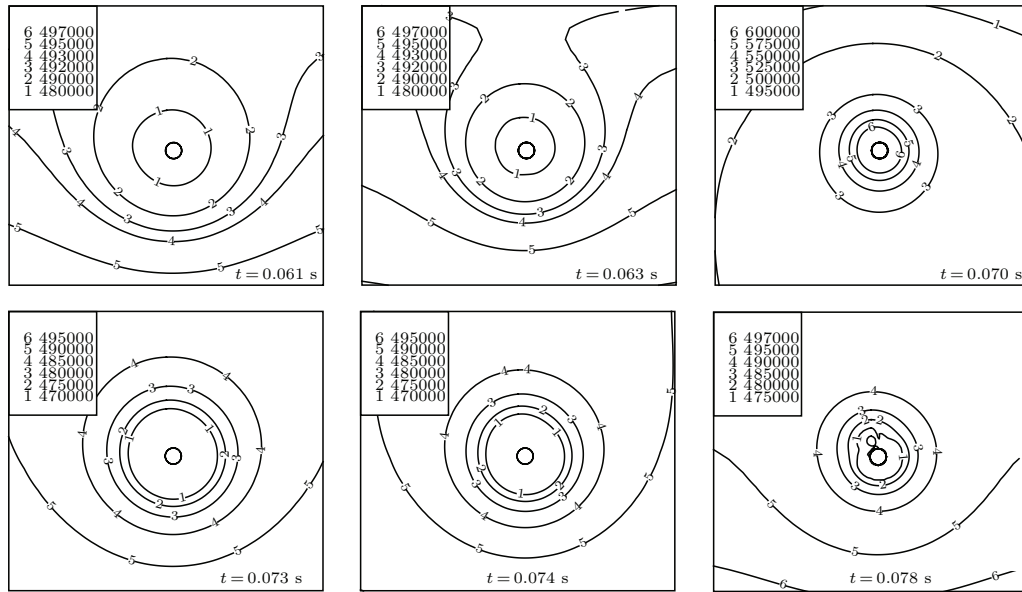


图 12 水下射流典型过程第 5 个脉冲壁面压强分布

Fig. 12. Pressure distribution on wall in the 5th pulse of a typical process of underwater jet.

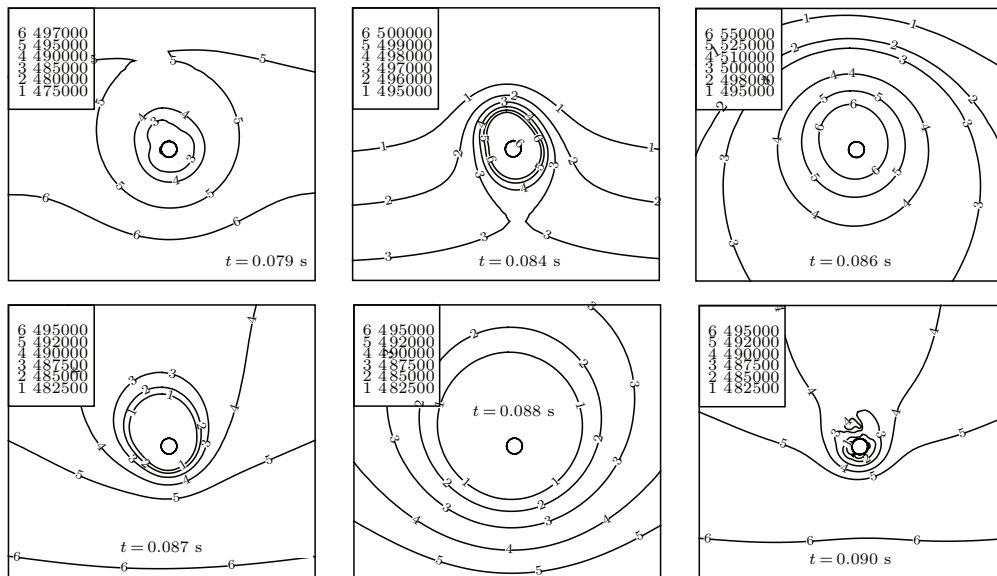


图 13 水下射流典型过程第 6 个脉冲壁面压强分布

Fig. 13. Pressure distribution on wall in the 6th pulse of a typical process of underwater jet.

图 13 为发动机射流在发生第 6 次四个典型过程时壁面上的压强分布。由图可知，发动机壁面上的压强分布变化规律与第 5 次相同，其中 0.79—0.84 s 与 0.61—0.63 s, 0.86 s 与 0.60 s, 0.70—0.86 s, 0.87—0.90 s 的壁面压力分布相对应。再将发动机发生 1—4 次四个典型过程的壁面上压强分布变化规律与图 12 进行比较，发现发动机在所有四个典型过程的完整阶段均会出现相同的压力变化趋势。该现象揭示，发动机出现四个典型过

程与重浮力相互作用的物理现象并不是出于偶然。

4.5 水下发动机上浮特征分析

图 14 为发动机水下射流入口截面中心点的流动轨迹。其中，(a) 为无重浮力时的流动情况，0.1 s 时基本呈水平直线发展（与图 3 中结果一致）；(b) 为有重浮力时的流动情况，0.1 s 时该点流动轨迹具有一定的上浮高度，该上浮高度与发动机工作条件及喷管尺寸等有关。

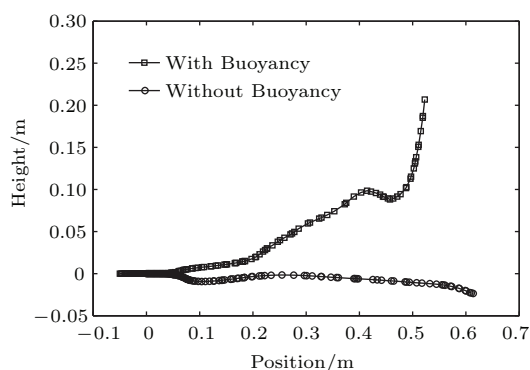


图 14 重浮力对发动机射流气泡上浮轨迹的影响

Fig. 4. The effects of buoyancy and gravity on floating trajectory of bubble.

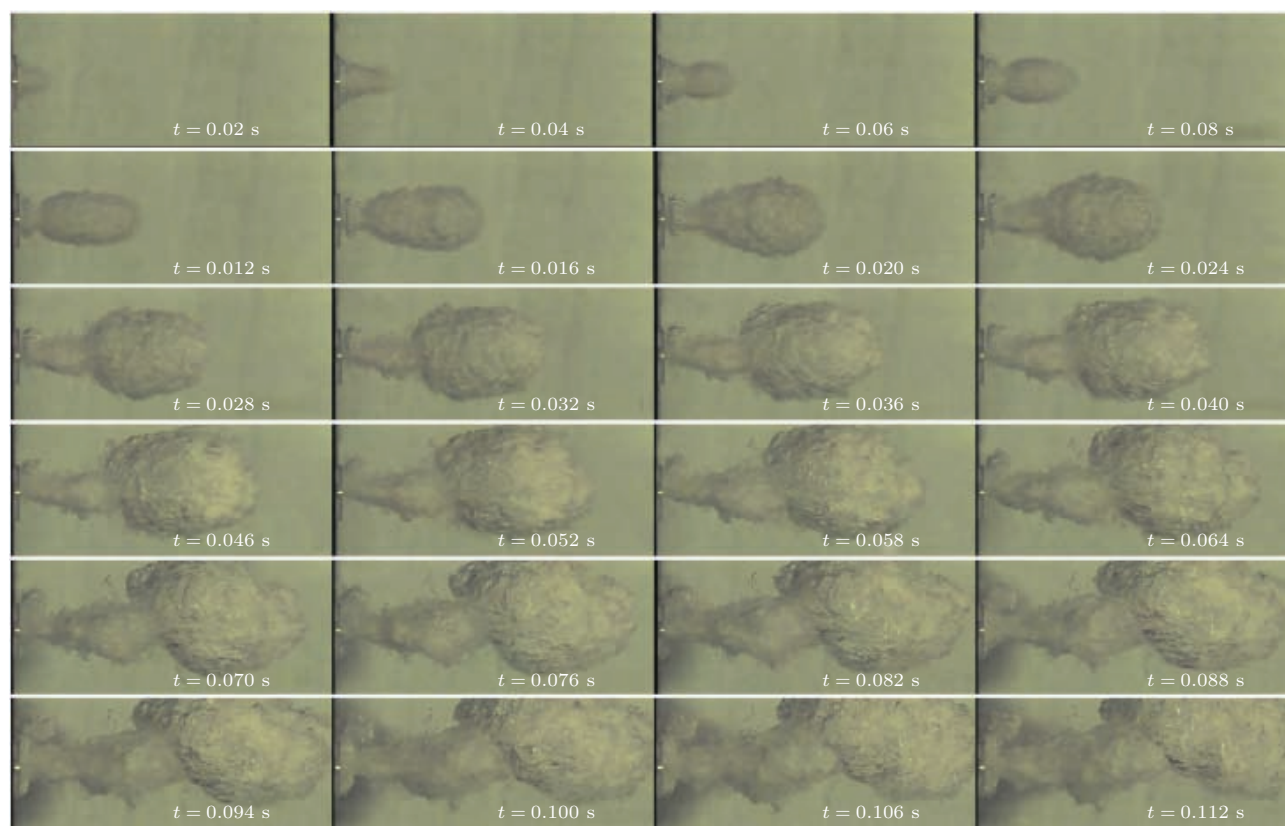
5 结 论

与无重浮力下的射流情况相比, 有重浮力时的射流情况更复杂. 依据射流理论, 把射流气泡划分为初始段、过渡段和主段, 该结果与水下水平射流

实验结果非常一致. 对比有/无重浮力下的射流结构, 两者均出现了胀股、鼓胀、颈缩/断裂和回击四个典型过程, 但气体形貌差异很大, 有重浮力下射流发生明显上浮, 且气水作用更复杂. 射流初期由于气体流动动量较低, 射流会向低压区运动, 随着射流动量的增加, 射流气体受到水的惯性作用发生反弹, 射流主段气泡形成并发生上浮, 会导致射流初期发动机推力产生振荡, 并且从发动机壁面的压强分布可知压强分布发生了一次上下反转. 在完成一次射流四个典型过程后, 发动机壁面压强分布也会发生类似于初期扰动的变化过程. 对比有/无重浮力下的射流推力可知, 发生典型过程的时刻有很大改变, 与无重浮力时相比, 有重浮力时发动机在重浮力方向的翻转力矩更大. 最后对两种射流的上浮曲线进行分析, 发现考虑重浮力作用时, 射流气体具有明显上浮现象.

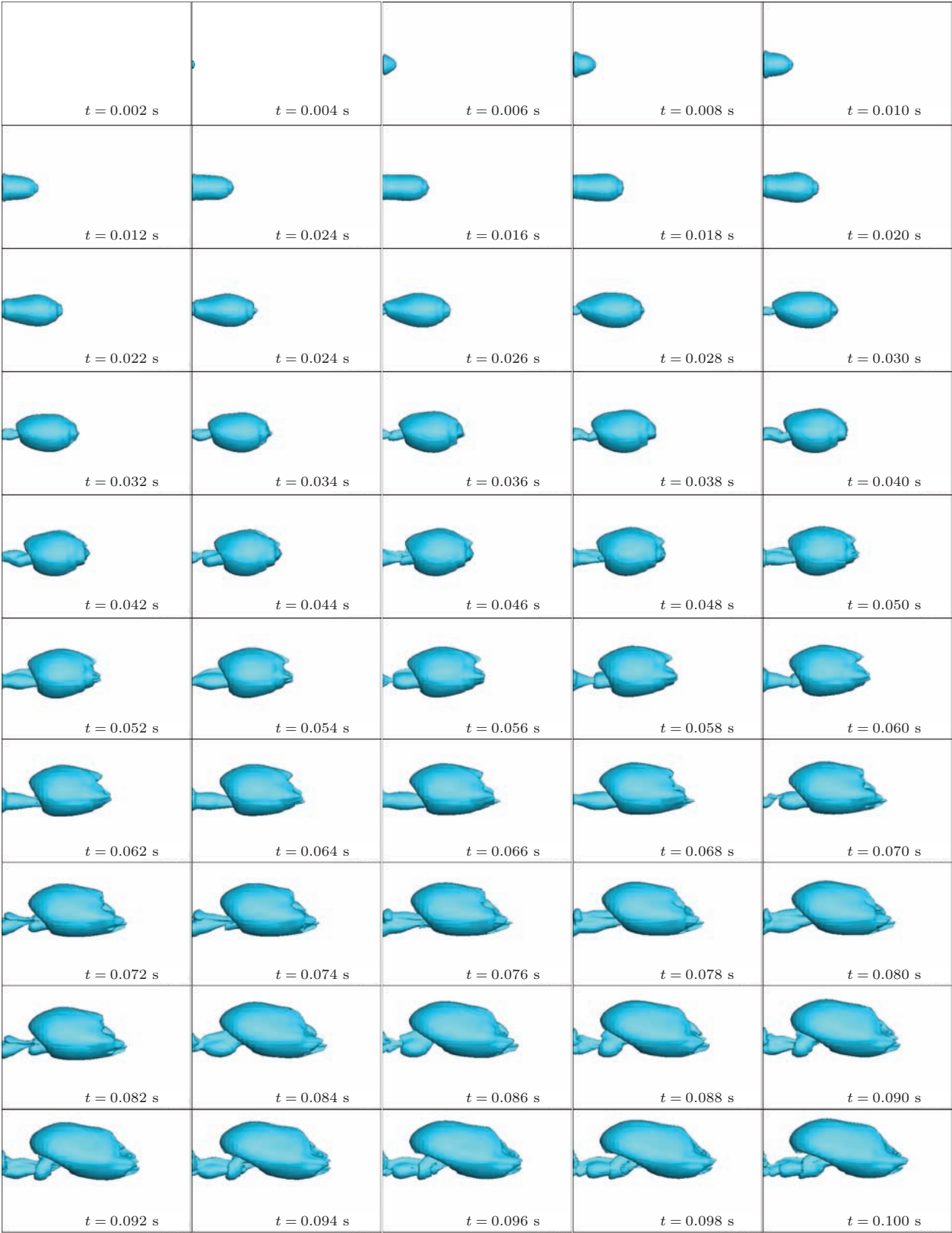
附录 A

文献 [16] 中实验结果



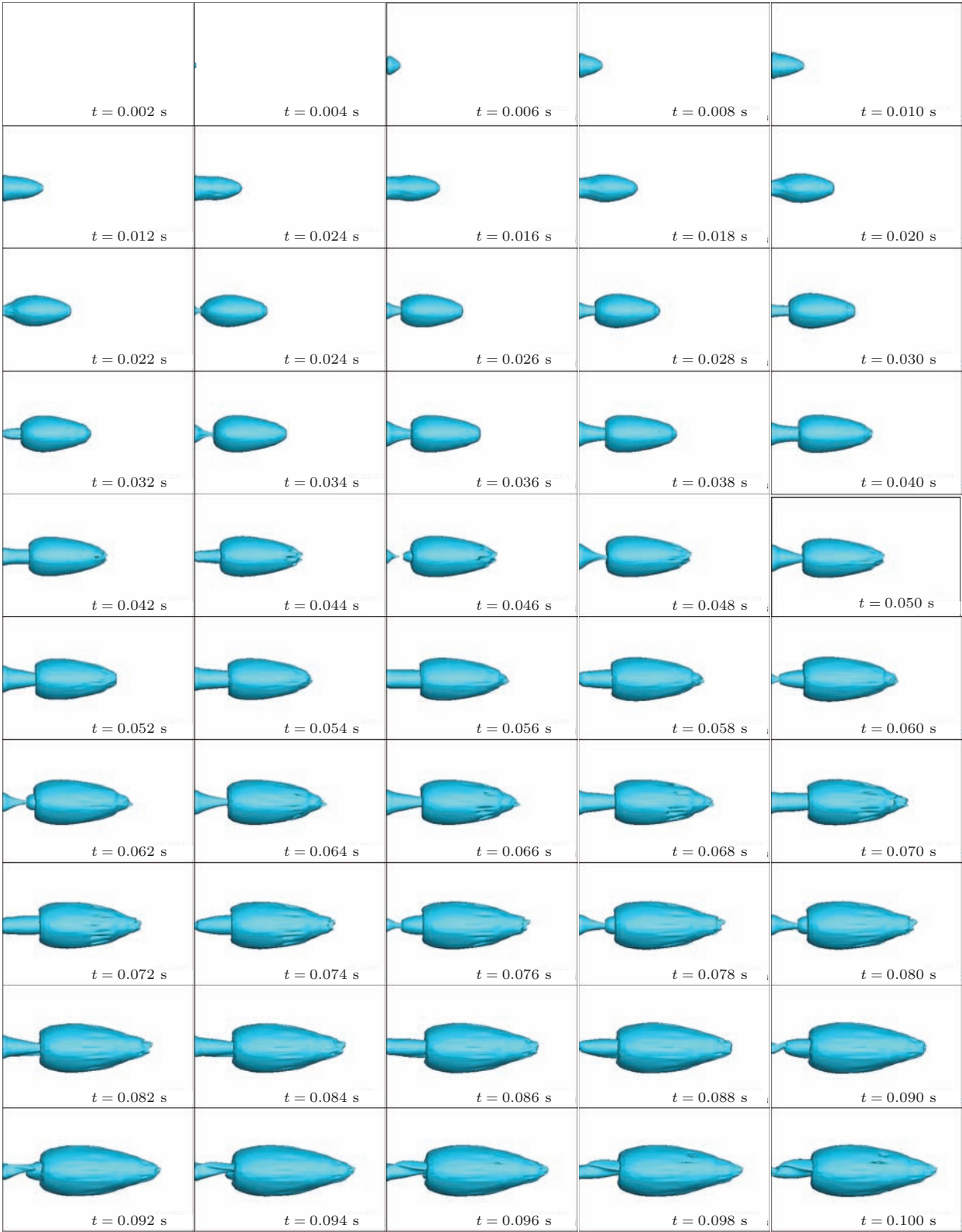
附录 B

重浮力水平射流仿真结果



附录 C

无重浮力水平射流仿真结果



参考文献

- [1] Qian B S, Yang B 2004 *Torpedo Technology* **12** 21 (in Chinese) [钱柏顺, 杨飏 2004 鱼雷技术 **12** 21]
- [2] Tang J N, Wang N F, Wei S 2010 *Acta Mechanica Sinica* **27** 461
- [3] Cao J Y, LU C J, Li J, Chen X 2009 *Journal of Hydrodynamics* **24** 575 (in Chinese) [曹嘉怡, 鲁传敬, 李杰, 陈鑫 2009 水动力学研究与进展 **24** 575]
- [4] Wang L Q, Hao Z R, Wu D Z 2009 *Journal of engineering thermophysics* **30** 1131 (in Chinese) [王乐勤, 郝宗睿, 吴大转 2009 工程热物理学报 **30** 1131]
- [5] Zhu W B, Chen H 2009 *Journal of Solid Rocket Technology* **32** 486 (in Chinese) [朱卫兵, 陈宏 2009 固体火箭技术 **32** 486]
- [6] Zhu W B, Chen H, Huang S 2010 *Journal of Propulsion Technology* **31** 496 (in Chinese) [朱卫兵, 陈宏, 黄舜 2010 推进技术 **31** 496]
- [7] Wang C H a, Cheng J C 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014304
- [8] Mahdi D, Mohammad T R, Hamidreza M 2015 *Chin. Phys. B* **24** 024302
- [9] Ni M J 2009 *journal of engineering thermophysics* **30** 76 (in Chinese) [倪明玖 2009 工程热物理学报 **30** 76]
- [10] Feng Z C, Leal L G 1997 *Annual Review of Fluid Mechanics* **29** 201
- [11] Dewsbury K H, Karamanev D G, Margaritis A 2002 *Chemical Engineering Journal* **87** 129
- [12] Gan X S, Jia Y J, Lu C J, Cao J Y 2009 *Journal of Solid Rocket Technology* **32** 23 (in Chinese) [甘晓松, 贾有军, 鲁传敬, 曹嘉怡 2009 固体火箭技术 **32** 23]
- [13] Liu J T, Qin S J, Miao T C, Wu D Z 2014 *International Symposium of Cavitation and Multiphase Flow* **72** 042038
- [14] Chen Shuai 2012 *Ph. M. Dissertation* (ZheJiang: Zhejiang Sci-Tech University) (in Chinese) [陈帅 2012 硕士学位论文 (浙江: 浙江理工大学)]
- [15] Guo Q 2009 *Ph. M. Dissertation* (ZheJiang: Zhejiang Sci-Tech University) (in Chinese) [陈帅 2009 硕士学位论文 (浙江: 浙江理工大学)]
- [16] Wang C, Wang J F, Shi H H 2014 *CIESC Journal* **65** 4293 (in Chinese) [王超, 汪剑锋, 施红辉 2014 化工学报 **65** 4293]
- [17] Shi H H, Wang J F, Chen S, Dong R L *Journal of University of Science, Technology of China* **44** 233

Horizontal jet characteristics of an underwater solid rocket motor at the beginning of working*

Tang Yun-Long Li Shi-Peng[†] Liu Zhu Sui Xin Wang Ning-Fei

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 30 May 2015; revised manuscript received 7 July 2015)

Abstract

Compared with the conventional solid rocket motor which works in atmosphere, the underwater solid rocket motor has different performance characteristics, because the buoyancy of water cannot be neglected, while in the atmosphere only gravity is present. In order to get a deep understanding of the mechanism of thrust oscillation characteristics and of the jet structure of underwater solid rocket motor, a 3-D numerical simulation using the volume of fluid (VOF) model is given in this paper to investigate the horizontal jet structure and the oscillating flow field induced by the gravity and buoyancy. The principle of momentum is carried out to analyze the oscillating flow field in the initial working period. Result of analysis indicates that the behavior of rising gas bubbles is remarkably influenced by gravity and buoyancy. Compared to the conventional solid rocket motor in the atmosphere environment, the phenomenon shows that the rising gas bubbles are more obvious in the water. It is concluded that thrust-gravity and buoyancy coupling can generate bigger roll moment in the vertical direction than the conventional solid rocket motor. Numerical calculations in conjunction with experiment in the references proves that the model contains gravity, buoyancy and the VOF model can be used to describe the jet structure and thrust oscillation of underwater solid rocket motor; gravity and buoyancy cannot be ignored in the research of underwater solid rocket motor performance characteristics.

Keywords: underwater solid rocket motor, horizontal jet, gravity and buoyancy, oscillation characteristics

PACS: 47.20.Bp, 47.61.Jd, 47.27.wg, 47.85.-g

DOI: 10.7498/aps.64.234702

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11272055).

[†] Corresponding author. E-mail: lsp@bit.edu.cn