

水下爆炸无网格 SPH 模型与计算方法研究

孙鹏楠¹, 明付仁², 王平平², 孟子飞², 张阿漫²

(Ecole Centrale Nantes, LHEEA Lab (ECN and CNRS), Nantes, 44300, France)

(哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨, 150001, Email: zhangaman@hrbeu.edu.cn)

摘要: 水下爆炸是一个极其复杂的多相流现象。水下爆炸产生的冲击波和气泡脉动载荷对海洋结构物的安全性构成严重威胁, 因此针对水下爆炸的数值模拟研究在船舶与海洋工程领域具有重要意义。本研究将介绍一种适用于水下爆炸模拟的光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 方法, 突出 SPH 方法在模拟水下爆炸过程中的几个关键数值技术。文中将采用两个基础的数值算例对 SPH 模拟结果进行验证和分析。本文的 SPH 方法未来还可推广应用到空泡溃灭的数值模拟中。

关键词: 水下爆炸; 冲击波; 气泡; 光滑粒子流体动力学; 多相流; 流固耦合

1 引言

近场水下爆炸及其对海洋结构物的毁伤研究是船舶与海洋工程水动力学领域的一个重要课题^[1], 但是由于该问题涉及多相和多物理场 (水、空气、爆炸产物和结构等) 之间的强烈耦合作用, 力学机理十分复杂, 因此目前仍没有一套方法能够对近场水下爆炸从炸药起爆、冲击波传播到气泡脉动、射流的过程进行精确预报。光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 方法由于将流场或结构离散成拉格朗日运动的粒子, 计算全程不需要网格, 也不需要多相界面进行追踪, 因此它十分适合处理带有复杂界面 (水-气或流体-结构) 的多相流固耦合水动力学问题^[2-3]。

尽管现有文献中, 针对水下爆炸问题的 SPH 数值模拟已有丰富的研究成果^[3-8], 但是在以下几个方面仍然略显不足: ①现有 SPH 方法的计算精度较低, 尤其对于压力场的求解常常带有较为强烈的压力波动; ②大部分 SPH 方法只能模拟水下爆炸的炸药起爆和冲击波传播等初期现象, 而对后期爆轰产物的持续膨胀和溃灭等过程无能为力; ③现有 SPH 方法由于大多采用单一的粒子分辨率, 计算规模较小, 计算效率较低。

基金项目: 本文受到国家自然科学基金 (编号: 51609049) 的资助

针对以上几方面的不足,将对 SPH 方法进行进一步改进提高,设法将其应用到近场水下爆炸的数值研究中。本研究将开展以下几个改进工作。

(1) 对近场水下爆炸 SPH 方法采用更高精度的粒子插值格式,提高其计算精度,同时可在连续性方程中施加人工耗散项^[2]来消除压力场噪声。

(2) 采用新的数值处理技术,提高 SPH 方法对水下爆炸后期流场演化的模拟能力。

(3) 采用变光滑长度和多级粒子分辨率技术^[2],提高 SPH 方法的计算效率和计算规模。

本研究将首先介绍 SPH 方法基本原理和相关数值技术,随后基于两个算例,分别模拟水下爆炸冲击波传播和近壁面处水下爆炸气泡的演化过程,以此对改进的 SPH 方法的有效性和计算结果的精度进行验证。

2 光滑粒子流体动力学方法

无网格光滑粒子流体动力学方法与传统的有网格算法不同,前者将流场离散成网格,而后者将流场离散成粒子,在此基础上进行数值求解。SPH 方法中,离散的控制方程写成如下形式^[1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{D\mathbf{u}_i}{Dt} = -\sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \frac{p_i + p_j}{\rho_i} \nabla_i W_{ij} + \mathbf{g} + \gamma \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} h_{ij} c_{ij} \pi_{ij} \nabla_i W_{ij} \\ \frac{D\rho_i}{Dt} = \rho_i \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) \cdot \nabla_i W_{ij} + \beta \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} h_{ij} c_{ij} \psi_{ij} \nabla_i W_{ij} \\ \frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \frac{p_i + p_j}{\rho_i} (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) \cdot \nabla_i W_{ij} - \frac{1}{2} \gamma \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} h_{ij} c_{ij} \pi_{ij} (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) \cdot \nabla_i W_{ij} \\ \frac{D\mathbf{x}_i}{Dt} = \mathbf{u}_i, \psi_{ij} = 2(\rho_i - \rho_j) \frac{(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^2} - (\langle \nabla \rho \rangle_i^L + \langle \nabla \rho \rangle_j^L), \pi_{ij} = \frac{(\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) \cdot (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^2} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中, ρ 、 m 、 \mathbf{u} 、 e 、 \mathbf{x} 和 p 分别是流体粒子的密度、质量、速度、比内能、位移和压力。 \mathbf{g} 为重力加速度, W 为 Wendland 核函数, c 为声速, $\beta = 0.1$, 人工黏性系数 γ 在 0.1~1 之间取值。 $\langle \nabla \rho \rangle_i^L$ 为密度梯度,可采用修正的 SPH 梯度算子进行计算。该算子在核函数内粒子缺失和粒子分布不均匀的条件下,均能满足二阶精度,详见文献[8-9]。因此,对于连续方程中的速度散度项,也可采用修正的散度算子进行计算。

为将上述连续性方程,动量方程和能量方程解耦分别求解,须引入状态方程将压力和密度与内能联系起来。对于水下爆炸的冲击波传播过程的模拟,水的状态方程通常采用 Mie-Gruneisen 状态方程^[8,10],爆炸产物的状态方程采用 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程^[8,10-11],而对于爆炸生成的气泡的模拟,本研究推荐采用 Tait 状态方程^[2]来模拟水和气体的压力。使用 Tait 状态方程时,为了考虑气体的真实压缩性,须采用气体的真实声速,而对

于水的模拟，为增大时间步长，可在满足弱可压条件下选取合适的声速大小^[9]。

对于体积变化较大的多相流问题，由于粒子体积的膨胀和收缩，粒子的间距也发生较大的变化，为保证核函数半径内的粒子数量相对不变，需要对光滑长度进行更新，本文推荐采用 Benz^[12]提出的光滑长度更新技术，光滑长度 h 随时间的变化率^[1,12]如下：

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{h}{\alpha\rho} \frac{D\rho}{Dt} \quad (2)$$

式中， α 为所求解问题的维度。由于水下爆炸气泡的强度参数（即气泡初始压力与环境压力的比值）可达几百，因此气泡的最大半径可膨胀至初始半径的几十甚至上百倍，导致在气泡膨胀过程中，气体粒子的数量需随着体积的增加而增加，而在气泡收缩过程中，粒子数量需要相应减少，以此保证在水气界面处，气体粒子和水粒子的体积大致相等，从而确保计算的精度和稳定性。本研究通过气体粒子的撕裂和融合算法^[8]，在气体粒子体积膨胀过程中，二维条件下将一个粒子撕裂成 4 个粒子，三维问题中撕裂为 8 个粒子；而在气泡收缩过程中，两个小粒子融合为一个粒子。通过持续的粒子撕裂和融合，确保计算过程中气体粒子体积和水粒子体积始终大致相等。值得一提的是，粒子撕裂和融合前后，需满足质量、线动量和能量的守恒^[14]。

在 SPH 数值模拟过程中，粒子分布越均匀，模拟精度越高^[8]。采用文献[13]给出的粒子位移修正技术，在计算过程中，对粒子分布的均匀性进行修正，即 $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x} + \delta\mathbf{x}$ ，其中 $\delta\mathbf{x}$ 由文献[13]中的人工位移修正公式给出。值得一提的是，对于大密度比的水气两相流的模拟，在水气界面处须采用类似于自由面的修正方法^[13]，对水粒子只施加 $\delta\mathbf{x}$ 的切向修正分量而将其法向修正分量设为 0，对于所有的气体粒子，直接施加 $\delta\mathbf{x}$ 的全部分量。

本文的固壁边界采用固定虚粒子法^[13]。对于自由场水下爆炸的模拟，为防止冲击波在计算域边界处反射，推荐采用文献[1]给出的无反射边界法。

3 水下爆炸冲击波模拟与验证

为验证本研究数值模型的正确性，本节对水下爆炸的冲击波传播过程进行了数值模拟和验证。计算模型如图 1 所示，计算域为 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 的立方体水域，水域中心为直径为 $d_0 = 0.036\text{m}$ 的球形装药，药包密度为 1630kg/m^3 ，药包质量为 0.04kg 。SPH 模拟中，初始粒子间距为 $\Delta x = 0.002\text{m}$ ，爆点设置在球心。

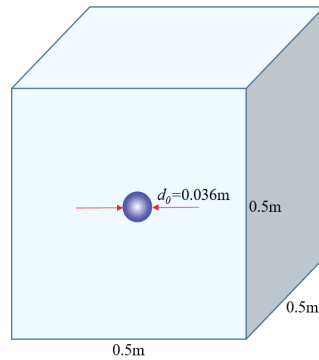


图1 水下爆炸的光滑粒子流体动力学模拟中，装药和流场的尺寸参数示意图

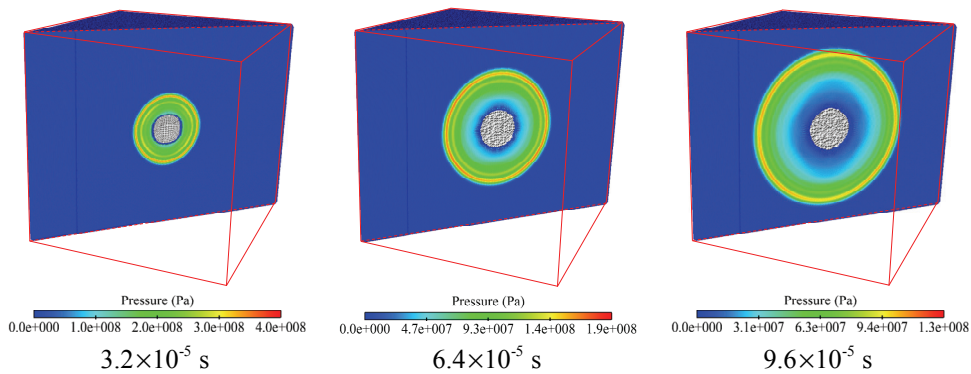


图2 水下爆炸初期冲击波的传播过程

装药引爆后，不同时刻的爆炸气泡膨胀和冲击波传播过程如图2所示。药包引爆后，装药瞬间变成高压气体，逐渐向外膨胀，水中的冲击波呈球状以声速向外辐射传播。为定量验证光滑粒子流体动力学模型计算结果的准确性，图3将爆距为 $R/r = 7.0$ 和 $R/r = 9.0$ 处的冲击波时历曲线的SPH结果与Zamyshlyayev^[15]所给经验公式预报结果进行了对比，其中 R 为压力测点与装药中心的距离， r 为初始球形药包的半径。可见，SPH较为准确地预报了水下爆炸的冲击波载荷。

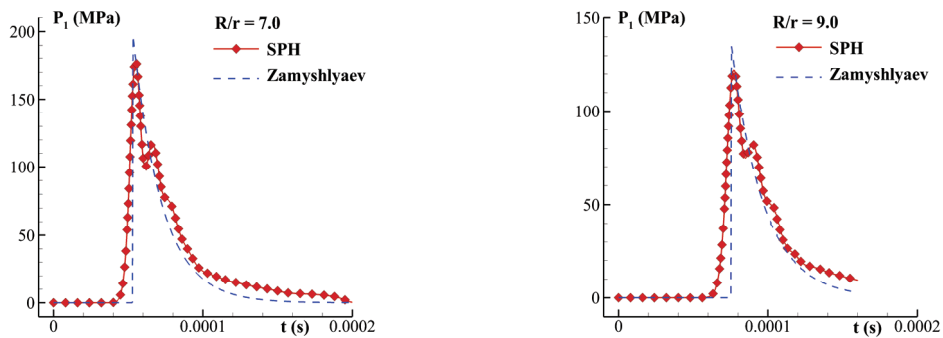


图3 不同爆距下的水下爆炸冲击波压力时历曲线

3 近边界条件下水下爆炸气泡的演化过程

对于贴近边界的水下爆炸，除了辐射冲击波以外，由于爆炸气泡在收缩过程中边界会产生吸附效应，因此诱导产生朝向边界的射流，造成二次射流毁伤。本节采用改进的 SPH 方法，在二维框架内，模拟了水下爆炸高压气泡膨胀、坍塌、射流和二次膨胀等现象。本算例涉及到壁面边界和大变形的水气运动界面，且水气界面在运动过程中发生撕裂和融合，边界条件较为复杂，因此能够凸显无网格法在模拟此类问题时的优势。

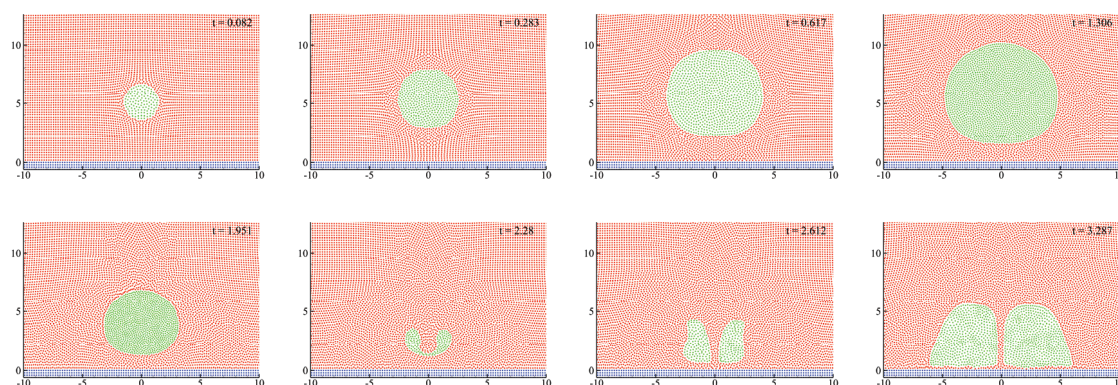


图 4 壁面附近水下爆炸气泡的膨胀、坍塌、射流的 SPH 模拟结果

图 4 给出了初始半径为 $R_0 = 0.556\text{m}$ ，初始压力 $P_b = 3 \times 10^6\text{Pa}$ ，环境压力为 $P_0 = 1 \times 10^5\text{Pa}$ ，距离壁面为 $d_0 = R_0$ 的高压气泡在不同时刻的形状演化过程。SPH 模拟中，初始高压气泡密度为 $\rho_b = 200\text{kg/m}^3$ ，水密度为 $\rho_w = 1000\text{kg/m}^3$ ，初始粒子间距为 $\Delta x = 0.2\text{m}$ 。在膨胀阶段，由于壁面的存在，气泡贴近壁面部分的膨胀受到了限制，导致气泡未呈现圆形，而在收缩阶段，气泡上表面收缩速度更大，形成了朝向壁面的射流，气泡射流后，撕裂成两部分；随后体积达到最小值，接着产生了二次膨胀。改进的 SPH 方法由于采用了自适应的粒子撕裂和融合技术，随着气泡体积的变化，气体粒子的数量可根据气泡体积变化自适应地增加和减少，因此能够实现此类体积变化较大的强可压多相流的数值模拟。

4 总结

本研究简要论述了用于水下爆炸数值模拟的光滑粒子流体动力学方法及相关数值技术。通过采用这些数值技术，可以对水下爆炸初期冲击波传播和后期气泡演化进行数值模拟和预报。未来为了进一步降低计算量，提高计算效率，对于轴对称问题，可将三维 SPH 控制方程放在柱坐标系中进行求解，实现计算量的降低；对于三维非轴对称问题，可将 SPH

方法与有限体积法进行耦合,在水下爆炸药包附近的流场采用 SPH 求解,而流场的外围采用有限体积法求解,此举可大大降低 SPH 的粒子数,提高计算效率;另外,为求解水下爆炸与结构物的耦合作用问题,可将本文的 SPH 模型与有限元法进行耦合,为解决工程实际问题服务。本研究的水下爆炸 SPH 数值模型未来还可进一步推广用于空泡演化和射流的数值模拟和分析中。

参 考 文 献

- 1 Wang P P, Zhang A M, Ming F R, et al. A novel non-reflecting boundary condition for fluid dynamics solved by smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 860: 81-11.4
- 2 Sun P N, Le Touzé D, Zhang A M. Study of a complex fluid-structure dam-breaking benchmark problem using a multi-phase SPH method with APR. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2019, 104: 240-258.
- 3 Liu G R, Liu M B. *Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method*[M]. World Scientific, 2003..
- 4 张之凡, 王成. 近场水下爆炸空化效应对结构的载荷特性研究. 北京力学会.北京力学会第二十四届学术年会会议论文集, 2018:8.
- 5 杨文山, 孟晓宇, 王祖华. SPH方法模拟水下爆炸研究进展. *舰船科学技术*, 2012, 34(12):3-6, 14.
- 6 杨刚, 韩旭. TNT炸药水下爆炸压力场的SPH模拟研究. 中国力学学会.庆祝中国力学学会成立50周年暨中国力学学会学术大会2007论文摘要集(下). 2007.
- 7 明付仁. 水下近场爆炸对舰船结构瞬态流固耦合毁伤特性研究. 哈尔滨工程大学, 2014.
- 8 Liu M B, Liu G R, Lam K Y, et al. Smoothed particle hydrodynamics for numerical simulation of underwater explosion. *Computational Mechanics*, 2003, 30(2): 106-118
- 9 Zhang A M, Sun P N, Ming F R, et al. Smoothed particle hydrodynamics and its applications in fluid-structure interactions. *Journal of Hydrodynamics*, 2017, 29(2): 187-216
- 10 明付仁,张阿漫,杨文山. 近自由面水下爆炸冲击载荷特性三维数值模拟. *爆炸与冲击*, 2012, 32(05): 508-514.
- 11 师华强, 宗智, 贾敬蓓. 水下爆炸冲击波的近场特性. *爆炸与冲击*, 2009, 29(02): 125-130.
- 12 Benz W, *Smooth Particle Hydrodynamics: A Review*. Springer Netherlands, 1990
- 13 Sun P N, Colagrossi A, Marrone S, et al. The δ plus-SPH model: Simple procedures for a further improvement of the SPH scheme. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2017, 315: 25-49
- 14 Vacondio, R., Rogers, B., Stansby, P., et al. Variable resolution for SPH: a dynamic particle coalescing and splitting scheme. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2013, 256: 132-148
- 15 Zamyshlyayev B V, Yakovlev Y S. Dynamic loads in underwater explosion. Naval intelligence support center, 1973

Study on meshless SPH model and numerical method for underwater explosion problems

SUN Peng-nan¹, MING Fu-ren², WANG Ping-ping², MENG Zi-fei², ZHANG A-man²

(¹ Ecole Centrale Nantes, LHEEA Lab (ECN and CNRS), Nantes, 44300, France)

(² College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, 150001,

Email: zhangaman@hrbeu.edu.cn)

Abstract: Underwater explosion is an extremely complex phenomenon of multiphase flow. The shock wave and bubble pulsation load generated by an underwater explosion pose a threat to the safety of marine structures. Therefore, the numerical simulation of underwater explosion is of great importance in the field of shipbuilding and ocean engineering. This paper introduces a smooth particle hydrodynamics method for the simulation of underwater explosions, highlighting several key numerical techniques which have significant effects on the accuracy of the numerical results. Two numerical examples are presented to verify and analyze the SPH simulation results. The present SPH method can also be further extended and applied to the modelling of cavitation bubbles.

Key words: Underwater explosion; Shock wave; Bubble dynamics; Smoothed Particle Hydrodynamic; Multiphase flow; Fluid-Structure Interaction