文章编号:1000-5773(2013)06-0813-08

基于物质点法的水下爆炸冲击波数值模拟*

陈卫东,杨文淼,张　帆

(哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院,黑龙江哈尔滨　150001)

摘要:水下爆炸载荷计算与数值模拟是水下常规武器设计和舰船、潜艇防护设计中的关键问题。水下爆炸数值模拟中大变形、运动物质交界面和多介质耦合等问题,给基于网格的数值算法带来了很大的困难和挑战。物质点法是一种无网格粒子法,该方法继承了拉格朗日方法和欧拉方法二者的优点。将物质点法扩展到水下爆炸数值模拟中,介绍了水下爆炸数值计算中物质点法的多介质耦合计算过程。分别对TNT球形炸药一维水下爆炸和TNT炸药二维水下爆炸过程进行了数值模拟,计算了冲击波强度,分析了水下爆炸流场参量的空间分布和变化规律,并分别与AUTODYN、COLE经验公式和SPH方法计算结果进行了比较,结果吻合较好,为工程应用提供重要参考。

关键词:水下爆炸;物质点法;多介质耦合;数值模拟

中图分类号:O383.1　　**文献标识码**:A

1　引　言

舰船、潜艇等作战平台是局部冲突中被打击的目标,通常面临着各种水下常规武器的威胁。为了提高其战时的生存能力,需要对其抗爆防护、破坏效应等问题进行研究,水下爆炸载荷计算是研究这些问题的前提和基础,涉及到强非线性、多介质耦合问题,理论研究和工程计算难度较大,只能针对一些简单的情况给出解析解。随着高性能计算机的出现,数值模拟方法已成为水下爆炸载荷计算的主要手段。

有限元法、有限差分法等基于网格的数值算法广泛应用于水下爆炸问题[1-2],但是在运用有网格的数值方法对水下爆炸问题进行模拟时,遇到了很大的困难和挑战,如:大变形会导致网格畸变,严重影响计算精度;运动物质交界面难以处理,需要施加特殊的界面捕捉技术等问题[3]。鉴于有网格数值算法的不足,近年出现了基于无网格法水下爆炸数值模拟,由于抛弃了计算网格,无网格法能够自然地处理大变形问题而不存在网格畸变。其中SPH(Smoothed Particle Hydrodynamic)法是目前较为成熟并广泛应用的无网格算法[4-6]。但是在采用SPH方法处理水下爆炸问题时,需要对物质交界面附近的粒子进行特殊的处理,如施加惩罚力等,以防止不同材料间非物理穿透和掺杂的发生[3]。

物质点法也是一种无网格算法[7],具有拉格朗日方法和欧拉方法二者的优点。与网格类方法和其它无网格粒子类方法相比,物质点法的多介质耦合计算简单直接,同时对物质交界面处不需要进行特殊的处理,自动满足无滑移的接触条件,从而避免了不同材料间的相互穿透现象。这些特点使得物质点法

* **收稿日期**:2012-02-27;**修回日期**:2012-08-17

基金项目:中央高校基本科研业务费(HEUCFZ1126)

作者简介:陈卫东(1966—),男,博士,教授,主要从事爆炸冲击动力学、计算力学方面的研究.E-mail:chenweidong@hrbeu.edu.cn

通讯作者:杨文淼(1983—),男,博士,主要从事爆炸力学、计算动力学方面的研究.E-mail:yangwenmiao2008@163.com

广泛应用在高速碰撞[8-9]、爆炸冲击[10-11]等问题中。本研究将物质点法扩展到水下爆炸数值模拟中。本文首先阐述物质点法基本理论，然后给出水下爆炸的控制方程以及水和炸药的状态方程，详细介绍物质点法的多介质耦合计算过程，最后给出两个数值算例，并分别与 AUTODYN、COLE 经验公式和 SPH 方法计算结果进行比较，数值计算结果表明，物质点法能够较好地处理水下爆炸这种涉及大变形以及多介质耦合的问题。

2 物质点法的基本理论

物质点法的控制方程为质量守恒和动量守恒方程

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}+\rho\nabla\cdot\boldsymbol{v}=0 \tag{1}$$

$$\rho\boldsymbol{a}=\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma}+\rho\boldsymbol{b} \tag{2}$$

式中：ρ 是密度，$\boldsymbol{v}$ 是速度，$\boldsymbol{a}$ 是加速度，$\boldsymbol{\sigma}$ 是 Cauchy 应力张量，$\boldsymbol{b}$ 是单位质量的体力。

以试函数 w 乘(2)式并在区域 Ω 上积分，得到动量方程的等效积分弱形式

$$\int_{\Omega}\rho\boldsymbol{a}\cdot w\mathrm{d}V+\int_{\Omega}\rho\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{s}}:\nabla w\mathrm{d}V-\int_{\Omega}\rho\boldsymbol{b}\cdot w\mathrm{d}V-\int_{\Gamma}\boldsymbol{\tau}\cdot w\mathrm{d}S=0 \tag{3}$$

式中：$\mathrm{d}V$ 和 $\mathrm{d}S$ 分别表示微分体积元和面积元，$\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{s}}$ 是比应力 $\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{s}}=\boldsymbol{\sigma}/\rho$，$\Gamma$ 为指定的应力边界，边界应力为 τ，在指定的位移边界上 w 为零。

物质点法中连续体被离散成具有集中质量的物质点集，每个物质点的质量在整个计算过程中保持不变，故质量守恒方程自动满足。其质量密度可表示成如下形式

$$\rho(\boldsymbol{x},t)=\sum_{p=1}^{N_p}M_p\delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_p^t) \tag{4}$$

式中：M_p 是物质点的质量，δ 是 Dirac δ 函数，$\boldsymbol{x}_p^t$ 表示物质点 p 在 t 时刻的坐标，N_p 是物质点的总数。

将(4)式代入(3)式中，(3)式的积分形式转化成如下的求和形式

$$\sum_{p=1}^{N_p}M_p[w(\boldsymbol{x}_p^t,t)\cdot\boldsymbol{a}(\boldsymbol{x}_p^t,t)]=\sum_{p=1}^{N_p}M_p[-\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{s}}(\boldsymbol{x}_p^t,t):\nabla w|_{\boldsymbol{x}_p^t}+w(\boldsymbol{x}_p^t,t)\cdot\boldsymbol{\tau}^{\mathrm{s}}(\boldsymbol{x}_p^t,t)h^{-1}+w(\boldsymbol{x}_p^t,t)\cdot\boldsymbol{b}(\boldsymbol{x}_p^t,t)] \tag{5}$$

式中：h 为边界层厚度，$\boldsymbol{\tau}^{\mathrm{s}}$ 为比边界应力 $\boldsymbol{\tau}^{\mathrm{s}}=\boldsymbol{\tau}/\rho$。

为了求解方程中的梯度项，需要布置固定于空间的背景网格，利用节点基函数 $N_i(\boldsymbol{x})$ 来实现物质点和背景网格节点之间信息的映射。网格节点和物质点之间信息的映射关系为

$$\psi_p^t=\sum_{i=1}^{N_n}\psi_iN_i(\boldsymbol{x}_p^t) \tag{6}$$

式中：ψ_p^t 表示物质点携带的变量，ψ_i^t 表示网格节点上的变量，N_n 表示单元节点数。

最终(3)式可写成下面的节点离散形式

$$m_i^t\boldsymbol{a}_i^t=(\boldsymbol{f}_i^t)^{\mathrm{int}}+(\boldsymbol{f}_i^t)^{\mathrm{ext}} \tag{7}$$

式中节点集中质量为

$$m_i^t=\sum_{p=1}^{N_p}M_pN_i(\boldsymbol{x}_p^t) \tag{8}$$

内力向量为

$$(\boldsymbol{f}_i^t)^{\mathrm{int}}=-\sum_{p=1}^{N_p}M_p\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{s}}(\boldsymbol{x}_p^t,t)\cdot\nabla N_i|_{\boldsymbol{x}_p^t} \tag{9}$$

外力向量为

$$(\boldsymbol{f}_i^t)^{\mathrm{ext}}=\sum_{p=1}^{N_p}M_p\boldsymbol{\tau}_p^{\mathrm{s},t}h^{-1}N_i(\boldsymbol{x}_p^t)+\sum_{p=1}^{N_p}M_p\boldsymbol{b}_p^tN_i(\boldsymbol{x}_p^t) \tag{10}$$

(7)式为动量方程在网格节点上的离散形式，这里采用显式积分进行求解，详细步骤可以参考文

献[7,12]。

整个算法由下述步骤组成:将物质点信息映射到网格节点;在网格节点上求解动量守恒方程;将节点信息重新映射到物质点,并根据材料本构更新物质点上的信息。整个计算过程完成由物质点到网格和网格到物质点两次映射。

3 水下爆炸的数值模拟

3.1 水下爆炸过程的控制方程

为了简化理论分析,本研究中忽略水下爆炸过程中热传导和黏性的影响。水下爆炸过程可通过由下列欧拉方程与恰当的状态方程联合的方程组进行模拟

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t} = -\rho\nabla\cdot\boldsymbol{v} \\ \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{1}{\rho}\nabla\cdot p \\ \dfrac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{p}{\rho}\nabla\cdot\boldsymbol{v} \\ p = p(\rho,e) \end{cases} \tag{11}$$

式中:ρ、e、p、$\boldsymbol{v}$ 和 t 分别为密度、内能、压力、速度矢量和时间。(11)式中前 3 个方程分别描述质量守恒、动量守恒和能量守恒,最后一个方程代表不同材料的状态方程。状态方程用于定义固体或流体在各种不同状态下的压力和密度以及比内能之间的函数关系,正确选取状态方程以及对状态方程中的参数设定合适的数值,对于计算结果至关重要。

本研究中水采用多项式状态方程

$$p = a_1\mu + a_2\mu^2 + a_3\mu^3 + (b_0 + b_1\mu + b_2\mu^2 + b_3\mu^3)\rho_0 e \tag{12}$$

式中:$\mu=\left(\dfrac{\rho}{\rho_0}\right)-1$ 为压缩比,ρ_0 为水在常温状态下的初始密度,e 为单位质量的内能。其他相关参数值如表 1 所示。当水处于膨胀状态时 a_2、a_3、b_1 取值均为零。

表 1 多项式状态方程参数

Table 1 Parameters for the polynomial equation of state

a_1/(GPa)	a_2/(GPa)	a_3/(GPa)	b_0	b_1	b_2	b_3
2.2	9.54	14.57	0.28	0.28	0	0

炸药(TNT)采用 JWL 状态方程

$$p = A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\exp(-R_1V)+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\exp(-R_2V)+\frac{\omega E}{V} \tag{13}$$

式中:$V=v/v_0$,E 为比热容力学能,A、B、R_1、R_2 和 ω 是常数,相关参数值如表 2 所示。

表 2 JWL 状态方程参数

Table 2 Parameters for JWL equation of state

A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	ω	e_0/(MJ/kg)
373.8	3.75	4.15	0.9	0.35	4.29

3.2 多介质耦合计算

水下爆炸涉及爆轰气体、水介质等多介质耦合作用以及运动物质交界面等问题。对于网格类方法(如有限差分、有限元等)在处理这些问题时,为了能够准确描述交界面位置和变形,需要引入特殊的算法对界面进行处理,如 Level Set、Front Tracking 等。这些方法的界面处理过程有时很繁琐,势必会花费一定的计算资源,影响计算的效率。与网格类方法相比,物质点法的多介质耦合计算是简单而直接

的，不再需要跟踪不同介质交界面的变形和移动，这也是物质点法的优势所在。

物质点法中不同介质的耦合计算是通过在背景网格节点上求解动量方程实现的[13]。在耦合界面处将各介质物质点应力的散度值映射到该位置的背景网格节点，计算出背景网格节点力总和，从而实现多介质耦合计算，如图 1 所示。

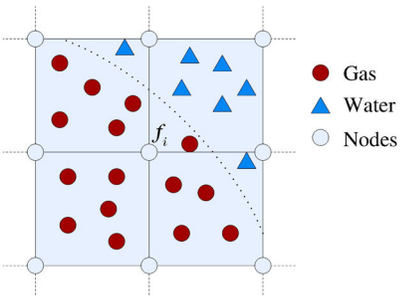


图 1 MPM 法多介质耦合计算

Fig. 1 Multi-medium coupling of MPM

在水下爆炸中爆轰气体和水介质都看成无黏性流体，在节点处的耦合式可表示成

$$\boldsymbol{f}_i \propto \sum_{\mathrm{g}} (\nabla p_{\mathrm{g}}) V_{\mathrm{g,p}} + \sum_{\mathrm{f}} (\nabla p_{\mathrm{f}}) V_{\mathrm{f,p}} \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{f}_i$ 是节点力，p_{g}、$V_{\mathrm{g,p}}$ 和 p_{f}、$V_{\mathrm{f,p}}$ 分别为爆轰气体粒子和水介质粒子的静水压力和体积。

水下爆炸过程中爆轰气体与周围水介质之间存在着激烈的相互作用，应用无网格粒子法（如 SPH 法）对其进行模拟时，在交界面附近通常会存在非物理穿透和掺杂的问题。所以 SPH 法需要对界面两侧的粒子进行特殊处理，如施加惩罚力来约束非物理穿透的发生。与 SPH 以及其它无网格方法相比，物质点法自动满足无滑移接触条件，在界面处不需要施加特殊的接触算法，不同介质粒子间不存在非物理穿透和掺杂问题。

在求解动量方程过程中，物质点同背景网格是固连在一起的，每个网格单元随物质流动而变形，单元内物质点的运动同节点的运动是成正比的[14]

$$\boldsymbol{v}(\boldsymbol{x}) = \sum_i N_i(\boldsymbol{x}) \boldsymbol{v}_i \tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{v}(\boldsymbol{x})$ 是速度场，$N_i(\boldsymbol{x})$ 是节点基函数，$\boldsymbol{v}_i$ 是节点速度。

由(15)式可知，节点速度通过节点基函数连续映射至单元内部，因此物质点是在单值连续的速度场中运动的，所以能自动满足无滑移接触条件。

3.3 人工黏性

在求解爆炸冲击问题时，冲击波将导致压力、密度、质点速度和能量等在波阵面前后发生突变（跳跃），这种不连续性给运动微分方程的求解带来了较大的困难，为了解决此问题引入了人工黏性的概念。人工黏性将应力波的强间断面模糊成一个相当狭窄的过渡区域内连续变化的波阵面，从而给工程应用带来极大的方便[15]。目前，已经提出了很多种人工黏性的形式。

本研究采用线性形式和二次形式相结合的人工黏性形式

$$q = \begin{cases} \rho c_0^2 l_{\mathrm{e}}^2 (\dot{\varepsilon}_{kk})^2 - c_1 \rho l_{\mathrm{e}} c \dot{\varepsilon}_{kk} & \dot{\varepsilon}_{kk} < 0 \\ 0 & \dot{\varepsilon}_{kk} > 0 \end{cases} \tag{16}$$

式中：c_0、c_1 为人工黏性系数，l_{e} 为特征长度（在物质点法中，取背景网格最小尺寸），ρ 为现时构形密度，$\dot{\varepsilon}_{kk}$ 为体积应变率，c 是材料声速。

3.4 水下爆炸经验公式

为了验证数值模拟的结果，采用水下爆炸经验公式进行比较。目前使用的水下爆炸冲击波的经验计算公式，都建立在爆炸相似律分析和对水下爆炸实验数据进行拟合的基础上。由于实验数据和拟合方法的不同，经验公式的形式和使用范围不太一致，库尔经验公式[16]是其中较为经典、应用广泛的公式之一，其具体形式如下

$$p_{\mathrm{m}} = k \left(\frac{\sqrt[3]{m_{\mathrm{e}}}}{R} \right)^{\alpha} \tag{17}$$

式中：p_{m} 为冲击波峰值压力，单位 MPa；m_{e} 为装药量，单位 kg；R 为离爆心的距离，单位 m；α、k 为经验系数，对于标准 TNT 炸药，$\alpha=1.13$，$k=52.27$。

4　数值算例及结果分析

4.1　一维球对称水下爆炸数值计算

球形装药在无限水域中的爆炸问题,可以看成是一维球对称问题,采用一维球对称模型进行计算。球形 TNT 装药半径为 0.1 m,水域半径 10 m,计算模型如图 2 所示。离散网格尺寸 0.01 m,每个网格放置两个物质点,总粒子个数 2 000。

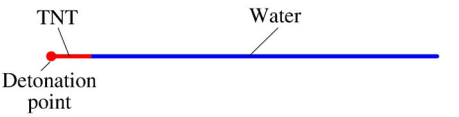


图 2　一维球对称计算模型

Fig. 2　1D spherical symmetry model

图 3 是不同爆距处的压力时程曲线,可以看出,压力达到峰值以后基本按指数形式衰减,并伴随着一定的压力扰动,符合水下爆炸基本规律。

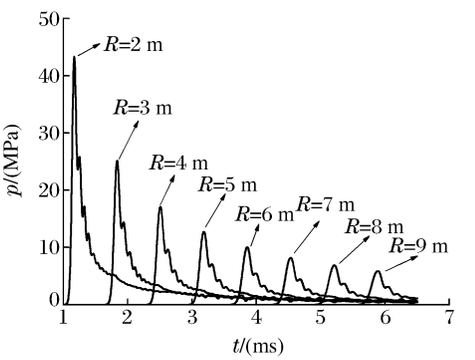


图 3　不同距离处的压力时程曲线

Fig. 3　Pressure history at different locations

为了便于比较,采用 AUTODYN 对同一模型进行计算,离散单元尺寸同样为 0.01 m。图 4 是分别采用 AUTODYN 和 MPM 计算得到的两个典型时刻压力径向分布曲线。由图 4 中可以看出,两者计算结果吻合较好,MPM 计算得到的压力峰值比 AUTODYN 计算的结果要高,这主要是因为 MPM 采用的粒子数多于 AUTODYN 离散单元数,使数值计算结果的分辨率更高。在交界面处伴随着爆轰气体的膨胀与收缩过程,所以交界面附近会出现压力的震荡现象。通过对两个典型时刻压力分布曲线的比较,可以看出水下冲击波沿径向的传播过程,随着冲击波的向外传播,其峰值出现明显的衰减现象。

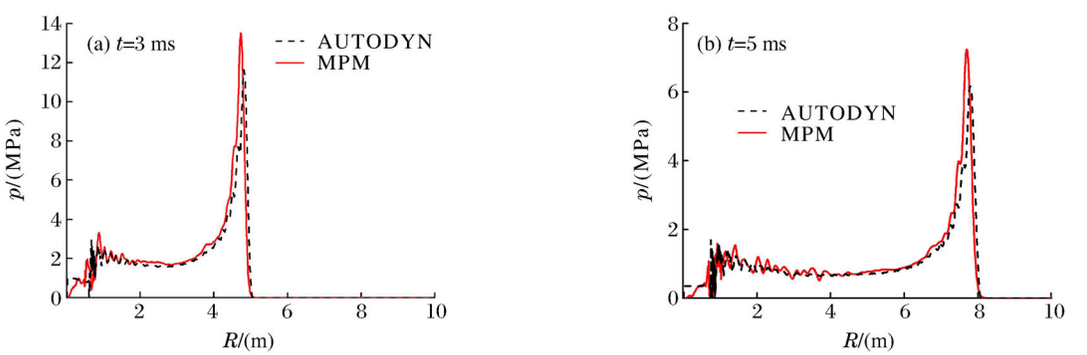


图 4　典型时刻压力的径向分布曲线

Fig. 4　The radial distribution of pressure at typical time

4.2　二维水下爆炸数值计算

对近似无限水介质中的爆炸冲击进行了数值模拟。计算模型如图 5 所示,采用正方形对称模型。炸药尺寸 8 cm×8 cm,水域尺寸 408 cm×408 cm,网格长度 2 cm,离散物质点个数 166 464,计算时间 1 000 μs。TNT 炸药采用中心起爆方式,在距炸药中心 R 距离处,设置一系列观察点。观察点与炸药中心连线保持水平。

为了进行对比验证,采用 SPH 方法对同一模型进行计算,并选取距起爆中心位置 40、60、80、100 和 120 cm 处 5 个点作为观察点。图 6 给出了分别由 MPM 和 SPH 得到的 5 个观察点处的压力时程图。

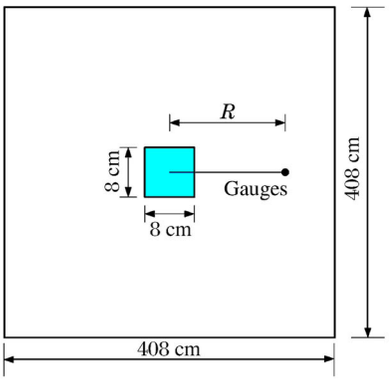


图 5 计算模型

Fig. 5 Simulation model

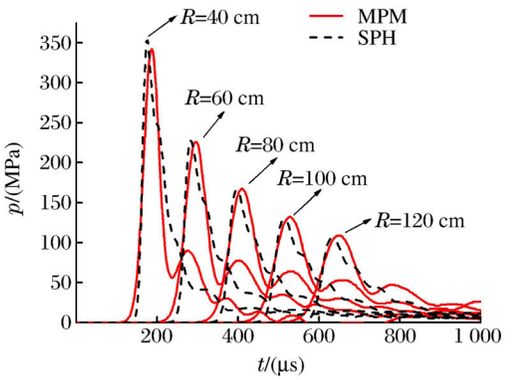


图 6 MPM 与 SPH 计算结果的比较

Fig. 6 Comparison of calculated results

从图 6 中可以看出，不同位置观察点的压力迅速爬升到达峰值，然后基本按指数规律衰减，符合水中冲击波的衰减规律。水下爆炸伴随着爆炸气体和周围水介质的耦合作用，所以水下爆炸表现出极强的非线性特点，水中冲击波压力峰值过后会伴随着一定的压力扰动。MPM 计算结果中峰值出现的时间稍落后于 SPH 的计算结果，但两者的波形吻合较好，且峰值大小十分接近。以 SPH 计算结果为标准量，比较了两者压力峰值的相对误差如表 3 所示。

表 3 MPM 与 SPH 计算结果比较

Table 3 Comparison of the results by MPM and SPH

R/(cm)	p_{MPM}/(MPa)	p_{SPH}/(MPa)	Error/(%)
40	341.97	345.62	1.06
60	226.21	223.43	1.24
80	167.17	164.16	1.83
100	132.23	128.31	3.06
120	109.44	103.65	5.59

采用 COLE 经验公式计算了离起爆中心不同距离处的压力峰值，并将 MPM 数值计算结果与采用经验公式计算的结果进行了比较，见表 4，可以看出，在离起爆中心较近的点处，数值计算结果与经验公式计算结果误差较小，随着离起爆中心距离的增大，两者计算误差有增大的趋势，但总体上数值计算结果与经验公式计算结果吻合较好，误差控制在 10%以内。图 7 给出了压力峰值随 R 的变化曲线。从图 7 中可以看出，随着 R 值的增加，水中冲击波的压力峰值呈指数形式迅速衰减，越靠近起爆中心，其衰减速率越快。

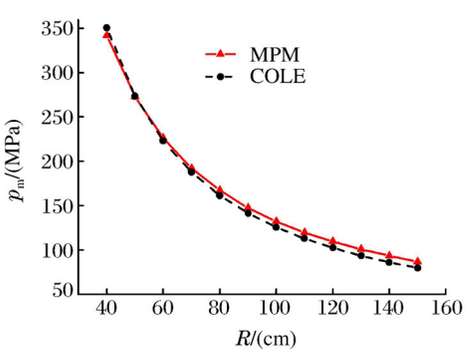


图 7 压力峰值随 R 变化曲线

Fig. 7 The curve of peak pressure changing with R

表 4 MPM 与 Cole 经验公式计算结果比较

Table 4 Comparison of the results by MPM and Cole

R/(cm)	p_{MPM}/(MPa)	p_{Cole}/(MPa)	Error/(%)
40	341.97	350.95	2.56
50	272.95	273.50	0.20
60	226.21	222.99	1.44
70	192.07	187.59	2.39
80	167.17	161.48	3.52
90	147.71	141.47	4.41
100	132.23	125.67	5.22
110	119.79	112.89	6.11
120	109.44	102.37	6.91
130	100.77	93.55	7.72
140	93.38	86.06	8.51
150	86.92	79.63	9.15

MPM 法中物质点携带了所有物质的信息,利用 Tecplot 软件可以方便的绘制质点的运动情况以及依据材料、应力等不同变量绘制云图。图 8 中记录了几个典型时刻的压力云图,可以清晰地观察到爆炸冲击波向外传播的过程以及水中气泡的膨胀过程。

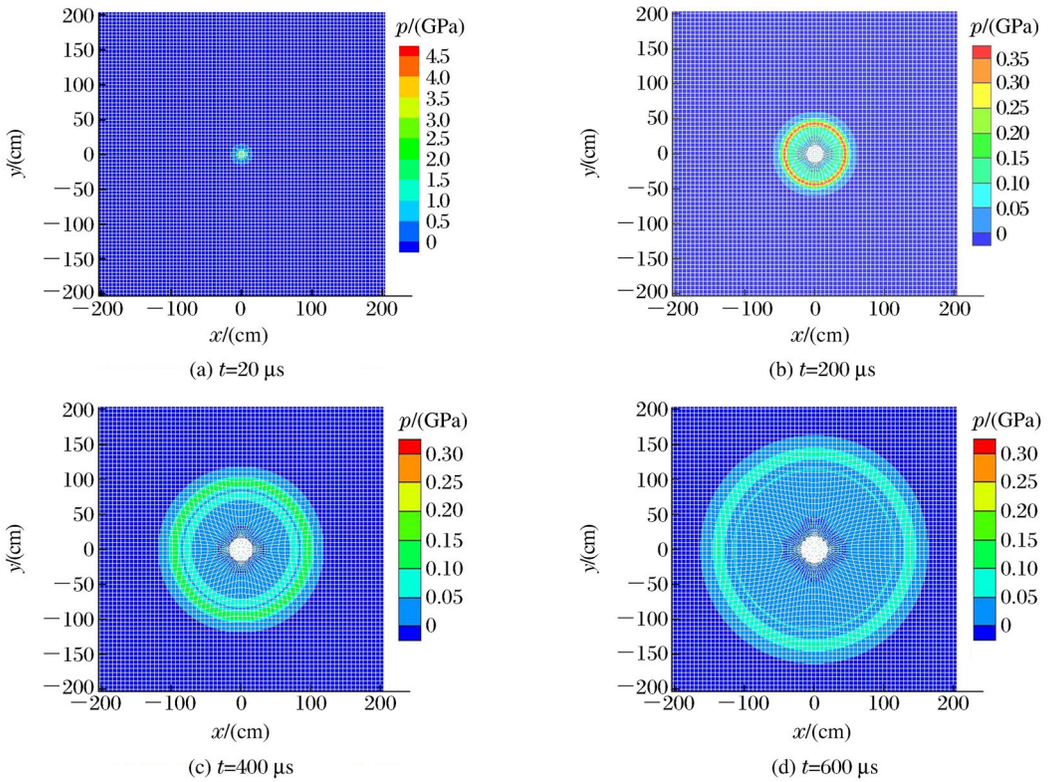


图 8　典型时刻压力云图

Fig. 8　Pressure contour at typical time

5　结　论

物质点法继承了拉格朗日方法和欧拉方法二者的优点,在处理大变形以及多介质耦合问题时具有很大的优势。将物质点法扩展到水下爆炸数值计算领域,有效解决了基于有网格方法水下爆炸模拟中遇到的大变形、运动物质交界面和多介质耦合等问题。分别对 TNT 球形炸药一维水下爆炸和 TNT 炸药二维水下爆炸过程进行了数值模拟,再现了水下爆炸冲击波产生和传播的过程。通过数值仿真,得到了不同时刻水中压力的空间分布,以及空间不同位置处压力的时程曲线。并与 AUTODYN、COLE 经验公式和 SPH 方法计算结果进行了比较,结果吻合较好,为水下爆炸模拟提供了一个新的途径,为水下常规武器设计和舰船、潜艇防护设计提供了重要参考。

References:

[1] Zhang Z H, Zhu X, Bai X F. The study on numerical simulation of underwater blast wave [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 182-188. (in Chinese)
张振华,朱　锡,白雪飞. 水下爆炸冲击波的数值模拟研究 [J]. 爆炸与冲击,2004,24(2):182-188.

[2] Chen Y, Wang Y, Shen R Y. Overview on the numerical implementation of the underwater explosion of ships [J]. Ship Engneering, 2007, 29(4): 48-52. (in Chinese)
谌　勇,汪　玉,沈荣瀛,等. 舰船水下爆炸数值计算方法综述 [J]. 船舶工程,2007,29(4):48-52.

[3] Liu G R, Liu M B. Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method [M]. Translated by Han X, Yang G, Qiang H F. Changsha: Hunan University Press, 2005: 242-243. (in Chinese)
Liu G R, Liu M B. 光滑粒子流体动力学——一种无网格粒子法 [M]. 韩　旭,杨　刚,强洪夫,译. 长沙:湖南大学出版社,2005:242-243.

[4] Liu M B, Liu G R, Zong Z, et al. Numerical simulation of underwater explosion by SPH [J]. Advances in Computational Engineering & Science, 2000, 2000: 1475-1480.
[5] Liu M B, Liu G R, Zong Z, et al. Smoothed particle hydrodynamics for numerical simulation of underwater explosions [J]. Comput Mech, 2003, 30(2): 106-118.
[6] Yang G, Han X, Long S Y. Simulation of underwater explosion near air-water surface by SPH method [J]. Engineering Mechanics, 2008, 29(4): 204-208. (in Chinese)
杨 刚, 韩 旭, 龙述尧. 应用 SPH 方法模拟近水面爆炸 [J]. 工程力学, 2008, 29(4): 204-208.
[7] Sulsky D, Chen Z, Schreyer H L. A particle method for history-dependent materials [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1994, 118(1/2): 179-196.
[8] Ma S, Zhang X, Qiu X M. Three dimesional material point method for hypervelocity impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(3): 273-278. (in Chinese)
马 上, 张 雄, 邱信明. 超高速碰撞问题的三维物质点法 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(3): 273-278.
[9] Zhang Z, Chen W D. Solving hypervelocity impact problems with the material point method [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(10): 1312-1316. (in Chinese)
张 忠, 陈卫东. 基于物质点法的超高速碰撞问题研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(10): 1312-1316.
[10] Wang Y X, Chen Z, Zhang H W, et al. Response of multi-layered structure due to impact load using material point method [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 186-192. (in Chinese)
王宇新, 陈 震, 张洪武, 等. 多层抗爆结构冲击响应无网格 MPM 法分析 [J]. 工程力学, 2007, 24(12): 186-192.
[11] Wang Y X, Chen Z, Sun M. Simulation of explosion and shock involving multiple materials based on the material point method [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(2): 154-160. (in Chinese)
王宇新, 陈 震, 孙 明. 多相介质爆炸冲击响应物质点法数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(2): 154-160.
[12] Andersen S, Andersen L. Analysis of spatial interpolation in the material-point method [J]. Comput Struct, 2010, 88(7/8): 506-518.
[13] Sulsky D, Zhou S J, Schreyer H L. Application of a particle-in-cell method to solid mechanics [J]. Journal of Medical Biomechanics, 1997, 12(2): 82-94. (in Chinese)
Sulsky D, 周士建, Schreyer H L. 物质点网格交替映照算法在固体力学中的应用 [J]. 医用生物力学, 1997, 12(2): 82-94.
[14] Allen R, Sulsky D, Schreyer H L. Fluid-membrane interaction based on the material point method [J]. Int J Numer Meth Eng, 2000, 48: 901-904.
[15] Zhang X, Wang T S. Computational Dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 273-274. (in Chinese)
张 雄, 王天舒. 计算动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 273-274.
[16] Cole R H. Underwater Explosions [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1948: 122-123.

Material Point Method for Numerical Simulation of Underwater Explosion Blast Wave

CHEN Wei-Dong, YANG Wen-Miao, ZHANG Fan

(*College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin* 150001, *China*)

Abstract: Underwater explosive load calculation and numerical simulation are the key issues of the design of underwater conventional weapons and protection of ships and submarine. Numerical simulation of underwater explosions involves large deformation, the moving material interface and multi-media coupling. It has brought a lot of difficulties and challenges to the grid-based numerical algorithm. The material point method(MPM) is a meshfree method and takes the advantages of the both Euler and Lagrangian methods. Extension of the material point method to the numerical simulation of underwater explosion and the multi-medium coupling process was introduced. At last, spherical TNT underwater explosion in one-dimensional and TNT underwater explosion in two-dimensional were simulated. Blast wave produced by TNT exploding was computed. The spatial distribution and variation of the explosion flow field parameters were analysed. The calculated results are in good agreement with the results of AUTODYN, empirical formula of Cole and SPH, and provide a important reference to engineering applications.

Key words: underwater explosion; material point method; multi-medium coupling; numerical simulation