

doi :10.3969/j.issn.1009-671X.2010.09.008

水幕减爆防护技术数值仿真

刘谋斌¹, 宗 智²

(1.中国科学院力学研究所 水动力学与海洋工程重点实验室 北京 100190; 2.大连理工大学 船舶工程学院 辽宁 大连 116024)

摘 要 :高能炸药爆轰爆炸在极短的时间内产生强烈的冲击波,对周边的结构造成严重的破坏,并导致附近人员的伤亡。水幕减爆作为一种新颖的防护技术,通过在装药或者需要保护结构的外面布置水袋,利用水的加热、压缩和蒸发转移爆炸产生的能量,改变爆炸冲击波的传播方式,减弱爆炸冲击波的影响。建立安全可靠、稳定有效的水幕减爆装置需要大量的参数分析,从而进行优化设计。数值实验仿真提供了研究水幕减爆成本低廉并且没有任何危险的可行方式。传统的网格方法模拟水幕减爆问题存在很多困难。该文应用无网格粒子方法 SPH 对不同状况下的水幕减爆问题进行了一系列研究,得到一些初步的研究结果,对水幕减爆防护装置的设计和布置具有一定的指导意义。

关键词 :爆炸;冲击波;减爆;光滑粒子动力学 SPH

中图分类号 :TB383 文献标识码 :A 文章编号 :1009-671X(2010)07-0036-06

Numerical simulation of water mitigation of blasting effects

LIU Mou-bin¹, ZONG Zhi²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China; 2. School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract :The explosion of high explosive can produce strong shock wave in an extreme short period of time, which can lead to severe damages to nearby structures and people. Putting water in layers of plastic bags outside the explosive charge or structures to be protected can change the way of propagation of the blasting shock waves, and reduce the blasting effects. This comparatively new protective technology transforms the blasting energy to water through heating, compressing and vaporization. Numerical simulation provides a cost-effective and safe tool to investigate water mitigation and to conduct parametric studies before optimally designing a reliable water mitigation device. This article investigates water mitigation problems under different setups using a Lagrangian, meshfree particle methods, i.e. smoothed particle hydrodynamics (SPH). We have obtained some appealing preliminary results, which can be used to guide the design of water mitigation protective devices.

Keywords :explosion; shock wave; blasting effects mitigation; smoothed particle hydrodynamics (SPH)

高性能炸药爆轰爆炸会在极短的时间内产生强烈的冲击波,可能对周边的结构造成严重的破坏,并导致附近人员的伤亡^[1-3]。军事技术和学术领域的研究人员长期以来一直在寻求可靠的措施,以有效减弱炸药爆炸效果,从而降低可能造成的破坏和损失。近来一个比较新颖的概念是水幕减爆——在装药或者需要保护结构的周边布置水袋(见图 1),通过水的加热、压缩和蒸发转移爆炸产生的能量改变爆

炸冲击波的传播方式,减弱爆炸冲击波的影响^[4-7]。水袋(或水幕)可以布置为一层或多层,与装药或者需要保护结构可以直接接触,也可以不直接接触。水幕减爆防护技术已经逐渐应用在国防和反恐技术中。在短期应用上(如军火运输),水幕可以通过在塑料袋中装水简易实施,而对于长期防护(固体设备,如弹药库),可以建立永久性的水池结构。相关的技术也可以应用在军用舰艇上,通过科学设计和合理布

收稿日期 2010-04-21.

作者简介:刘谋斌(1970-)男,研究员,主要研究方向:爆炸与冲击、水动力学、计算流体力学 E-mail liumoubin@gmail.com.

置水幕,对弹药仓等重点设备进行防护,降低或防止意外发生可能产生的危害。



图 1 水幕减爆防护装置 利用水袋覆盖高能装药降低潜在爆炸危害

基于国防军事领域的强烈兴趣,水幕减爆的研究正在如火如荼的研究和开发中。现场实验研究费用昂贵,具有一定的危险,在很多情形中因实验条件的限制很难还原真实的流动状况。建立安全可靠、稳定有效的水幕减爆装置需要大量的参数分析,从而进行优化设计。数值仿真提供了研究水幕减爆成本低廉并且没有任何危险的替代方式,能够有效地模拟各种不同状况下的工作条件;然而,对于传统的基于网格的数值方法,爆炸爆轰、水下爆炸及水幕减爆等问题的模拟是一项非常有挑战性的工作。一方面,由于存在如大变形、运动物质交界面、可变形边界和自由表面等特性,使得基于网格的数值方法难以处理;另一方面,在整个爆炸爆轰及水下爆炸过程中,高能炸药的起爆过程的复杂性和多尺度等问题使基于网格的数值方法面临着更多的困难^[3-8]。

光滑粒子动力学 SPH (smoothed particle hydrodynamics)方法是一种无网格的粒子方法,使用一组粒子离散及代表所模拟的连续介质(流体或固体),并且基于粒子体系估算和近似控制介质运动的积分或偏微分方程,具有无网格方法的明显特点^[8-10]。文中应用 SPH 方法对封闭区域中不同厚度下直接接触式和非直接接触式水幕减爆进行了数值仿真,旨在研究水幕减爆的可行性和水幕减爆不同方案的减爆效果,从而为水幕减爆防护装备的具体设计安装制造提供可靠的技术指导。

1 SPH 方法基本思想:核近似和粒子近似

SPH 方法中每个粒子代表宏观连续领域的介

质团(相当于质量集中在相关位置的质点),并且伴随介质的运动而以当地速度移动,是一种拉格朗日方法,因此,SPH 方法中粒子不仅用于估算场变量,从而近似控制方程,相当于插值节点,也代表介质系统,并具有诸如密度、压力、速度、内能等宏观物理量,相当于物质点。这也是 SPH 方法不同于一般无网格方法的明显特点。SPH 方法因此既有了拉氏计算的描述物质界面准确的优势,又兼备无网格方法的长处,因此适宜计算带有流体大变形及运动边界的各类问题,如爆炸爆轰^[11-16]、水下爆炸、爆炸防护或增强^[17-23]、冲击侵蚀穿甲^[24-27]等等。

利用 SPH 方法对偏微分方程的近似包括 2 步:核近似和粒子近似。对函数的核近似是通过对该函数及权函数进行积分来实现,而粒子近似是在一个有限区域内对所有粒子进行加权求和。对于传统的(经典的)SPH 方法,在某点(或某个粒子) i 上,对任意函数的核近似($\langle f(x) \rangle$)可由下式定义

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x-x', h) dx', \quad (1)$$

式中 f 为三维坐标向量 x 的函数, Ω 为包含 x 的积分区域, W 是一个权函数,在许多与 SPH 相关的文献中通常被称为或光滑函数(smoothing function)或者核函数(kernel function), h 定义了光滑函数 W 的影响区域,称为光滑长度。

SPH 方法对光滑函数有一系列要求,例如:1)

正则化条件, $\int_{\Omega} f(x') W(x-x', h) dx' = 1$ 2)当光滑长度趋向于零时具有狄拉克函数性质 $\lim_{h \rightarrow 0} W(x-x', h) = \delta(x-x')$

3)对称性条件, $\int_{\Omega} (x'-x) W(x-x', h) dx' = 0$ 4)

紧支性条件, $W(x-x', h) = 0, |x-x'| > \kappa h$,其中 κ 是与点 x 处光滑函数相关的常数, κh 确定了光滑函数的有效范围(即支持域)。刘谋斌及其合作者对 SPH 光滑函数进行了详尽的分析,综合研究了光滑函数不同的要求及特征,并且提出了构造光滑函数的广义方式^[8-28]。

任意函数的离散形式的粒子近似是对相关粒子支持域内所有粒子进行加权求和(见图 2)。

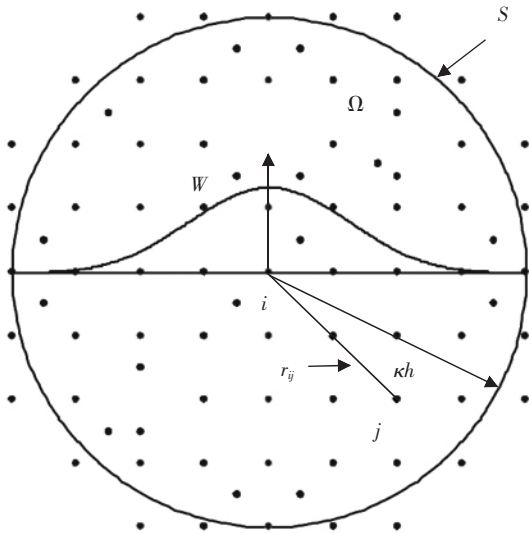


图 2 二维空间 SPH 粒子近似示意图. W 为光滑函数, 支持域为 Kh , S 为计算区域 Ω 的表面

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N f(x_j) W_{ij} \Delta v_j, \quad (2)$$

式中 $W_{ij} = W(x_j - x_i, h)$, Δv_j 是粒子 j 所对应的体积. N 是计算区域所有的粒子数. 因为光滑函数满足紧支性条件, N 也可以视为粒子 i 支持域内所有粒子总数. 在流体动力学数值模拟中, Δv_j 经常用质量-密度比 m_j/ρ_j 代替. 值得注意的是, 把密度和质量引入近似方程, 从而可以方便地将 SPH 方法应用到如爆炸、冲击、海岸海洋水动力学、山川河流水动力学等不同领域的流体动力学问题. 这也正是 SPH 方法最具吸引力的因素之一.

对导数的核近似可以通过用相应的导数替代式(1)中的函数, 分步积分, 并忽略边界项而得到 $\langle f_{i,\alpha} \rangle = \int f(x) W_{i,\alpha} dx$, 其中 $W_{i,\alpha}(x) = \partial W_i(x) / \partial x^\alpha$, $f_{i,\alpha} = (\partial f / \partial x^\alpha)_i$, α 是空间向量下标, 从 1 到 d (d 为空间维数). 导数的粒子近似为 $\langle f_{i,\alpha} \rangle = \sum_{j=1}^N f_j W_{ij,\alpha} \Delta v_j$. 高阶导数的核近似和粒子近似也可以通过类似的方式把相应的导数代入式(1), 分步积分, 忽略边界项, 并且在支持域上对所有粒子加权求和而得到. 很明显, SPH 方法中对函数及其导数的核近似和粒子近似实际上是把对函数或导数的运算转换为对光滑函数及其导数的运算.

2 水幕减爆控制方程

在 高 能 装 药 爆 炸 过 程 中, 由 于 高 能 炸 药 的 起 爆 速 度 和 冲 击 波 的 传 播 速 度 非 常 快, 可 以 假 设 爆 炸 气

体和水都是无粘性的, 并且假设整个水下爆炸和水幕减爆过程是绝热的, 因此, 可使用 Euler 方程以及适当的状态方程来模拟水下爆炸以及水幕减爆的过程:

$$\begin{cases} \frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot v, \\ \frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p, \\ \frac{De}{Dt} = -\frac{p}{\rho} \nabla \cdot v, \\ \frac{Dx_i}{Dt} = P(\rho, e). \end{cases} \quad (3)$$

式中 ρ 、 e 、 P 、 v 和 t 分别是密度、内能、速度矢量和时间. 前 3 个方程描述的是质量守恒、动量守恒和能量守恒, 第 4 个方程是状态方程. 高能装药起爆速度为 6 930 m/s. 在爆炸过程中生成的爆炸气体使用标准的 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程

$$P = A \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1}\right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2}\right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega \eta \rho e. \quad (4)$$

式中 η 是爆炸气体的密度与原始爆炸物的初始密度的比值; e 是高能炸药单位质量的内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 是通过与实验数据拟合而得到的系数^[8]. 水使用多项式形式的状态方程, 在压缩状态下压力为 $P = \alpha_1 \mu + \alpha_2 \mu^2 + \alpha_3 \mu^3 + (b_0 + b_1 \mu + b_1 \mu^2) \rho e$, 而在膨胀状态下的压力为 $P = \alpha_1 \mu + (b_0 + b_1 \mu) \rho e$. α_1 、 α_2 、 α_3 及 b_0 和 b_1 为状态方程中的各种系数^[8].

空气可以作为一种理想气体来模拟的, 并且满足 γ 定律状态方程, 也就是 $P = (\gamma - 1) \rho e$, 其中 γ 是特定的比例系数, 这里取 $\gamma = 1.4$. 空气的初始密度是 1 kg/m³, 大气压为 105 Pa 时, 空气的初始能量是 2.5×10^5 J/kg.

应用 SPH 核近似和粒子近似, 可以对 Euler 方程进行离散. 所得到的 SPH 运动方程可以用来模拟水下爆炸以及水幕减爆的过程:

$$\begin{cases} \frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j (v_i - v_j) \cdot \nabla_i W_{ij}, \\ \frac{Dv_i}{Dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij}, \\ \frac{De_i}{Dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) (v_i - v_j) \cdot \nabla_i W_{ij}, \\ \frac{Dx_i}{Dt} = v_i. \end{cases} \quad (5)$$

3 水幕减爆数值仿真

在模拟中, 计算区域为正方形. 同样正方形的

TNT 炸药(0.05 m×0.05 m)在不同的情况下爆炸后向外膨胀,因为对称,只需计算 1/4 的物质区域.图 3 给出了二维模型的初始几何形状 $x=0$ 和 $y=0$ 分别代表平面系统问题的 2 个对称面.在相关位置选取

4 个观测点来计算压力值和冲击波到达的时间.取几何形状的中心作为原点 4 个观测点的位置以及它们到中心点的距离使用装药厚度(0.025 m)来正则化.

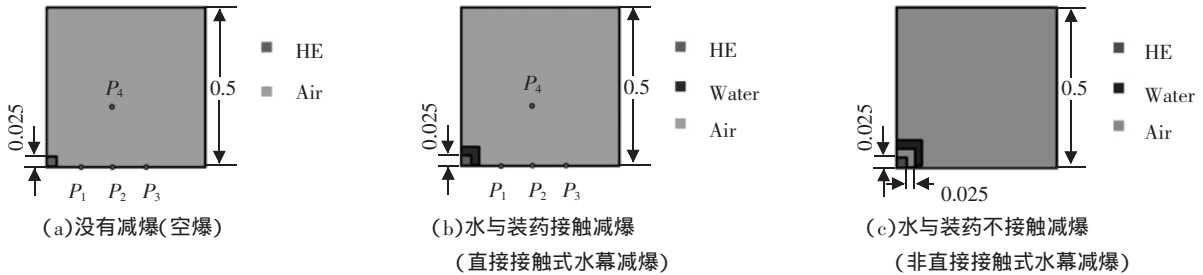


图 3 水幕减爆数值仿真计算初始设置(1/4 计算区域)

为了进行比较研究,对 3 种不同的情况进行模拟.第 1 种情况(图 3(a))是在空气中爆炸(空爆,没有水幕防护层);第 2 种情况(图 3(b))是直接接触式水幕减爆;最后一种情况(图 3(c))是非接触式水幕减爆,水与炸药之间并不接触,而由空气层(气幕)隔开.在直接接触式水幕减爆中,水幕厚度在 0.01~0.045 m 之间变化,这正好对应于装药厚度的 0.4~1.8 倍.在非接触式水幕减爆中,水幕厚度取 0.025 m 和 0.05 m 2 种情形进行减爆模拟仿真.2 种情况下的气幕厚度都是 0.025 m.这 3 种模拟都是在有限空间的固壁刚性容器中进行的.实际上,也可以研究自由开放空间中的水幕减爆问题,因为 SPH 方法更加容易处理移动自由边界,相应比研究受限空间内的水幕减爆问题简单;然而,在自由空间水幕减爆只能研究冲击压力峰值的降低效应,最终的平衡气体压力将随着体积的膨胀而降低到标准大气压值.而受限空间内水幕减爆能够同时研究冲击压力峰值和平衡气体压力 2 个重要的指标.

量进行的交换,从而减弱冲击波,降低爆炸冲击影响.另一方面,水幕作为一种障碍物能够约束爆炸气体粒子的向外冲击.这种约束作用实际上提高了冲击压力峰值,即抵消了部分减爆作用.当增加水幕厚度时,动量和能量的交换速度就会逐渐下降而约束作用就会增强.因此,水幕厚度存在一个最优值,此时水幕减爆效果最佳.所以,并非水幕厚度越大减爆效果就越好.这里,直接接触式水幕减爆正则化水防护屏最优厚度为 1(或者绝对值为 0.025 m),周围的水幕重量是 TNT 炸药重量的 1.84 倍.这个发现可作为水幕减爆防护系统设计提供参考依据.

图 4 给出了不同厚度下直接接触式水幕减爆情形 4 个取样观测点处冲击波随水层厚度变化曲线(由对应点处空爆冲击波幅值正则化).水幕对所有的采样观测点处的冲击压力峰值都能起到减弱的作用,离炸药比较近的点受到的减爆效果比较明显,而比较远的点影响稍弱.改变水幕厚度可以得到不同的减爆效应.对于某一固定的观测点,水幕厚度增加时冲击压力峰值会逐渐降低.当正则化水防护层的厚度趋向 1 时(或者绝对值为 0.025 m 时),冲击波压力峰值减爆效果达到最大值.若再增大水幕厚度减爆作用就会减小.实际上,由于水的密度比空气的密度要大得多(大约是 1 000 倍),当爆炸气体粒子与水粒子发生碰撞时,爆炸气体粒子的速度就会因为动量在 2 种粒子之间的交换而急剧下降.在爆炸气体粒子和水粒子的相互作用过程中,水受压并吸收热量,在高速爆炸气体粒子和水粒子之间能

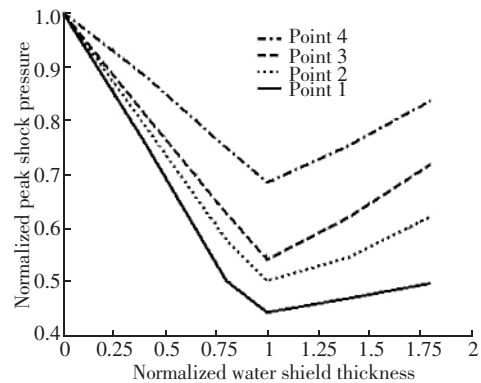


图 4 不同厚度下直接接触式水幕减爆 4 个观测点处冲击波随水层厚度变化曲线

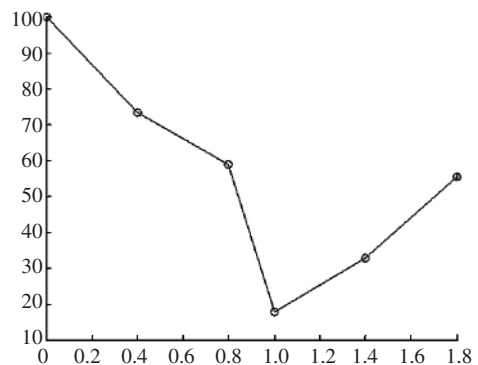


图 5 不同厚度下直接接触式水幕减爆最终平衡气室压力

图 5 给出了使用 0.025 m 正则化时不同水幕厚度下最终平衡气体压力值。可以看到,对于各种水幕减爆的情形,最终气室压力都低于空爆情形的气室压力。对应于最优冲击波减爆效果的水幕厚度的情形,最终气室压力也减少最多。以上的结论可以由两方面来解释:一方面是水在压缩和吸热的过程中吸收和耗散了爆炸气体释放出来的能量,越多的水意味着可以吸收更多的能量,因此得到较低的气体平衡压力;另一方面,水越多占的空间就越大,这样就会提高气体压力。因此,充分利用这两方面的影响,通过选择最优水幕厚度可以得到最优的水幕厚度的减爆效果。

对于非直接接触式水幕减爆,在炸药和水之间具有空气缝隙,减爆效果将可能与直接接触式水幕减爆不同。水幕和炸药之间存在的气幕(空气层)的几何构造极大地改变了观测点处冲击压力峰值以及最终平衡气体压力。在以上的计算中,厚度为 0.025 m 的气幕把高能装药和水幕隔开,而在 2 种情形下,水幕厚度分别为 0.025 m 和 0.05 m。图 6、7 分别显示了 70 μs 时对应于 2 种非直接接触式水幕减爆密度场分布。研究表明,对于 2 种非接触式水幕减爆的情形,冲击波峰值和最终气室压力都比空爆时要小。而第 1 种非接触式水幕减爆效果最佳,气室压力比直接接触式最佳水幕厚度的减爆效果更小,为空爆时气室压力的 16.6%。但水幕厚度为 0.05 m 时,虽然冲击波抵达时间稍微延后,而冲击波和最终气室压力的减弱效果却不如直接接触式最佳水幕厚度的减爆效果。

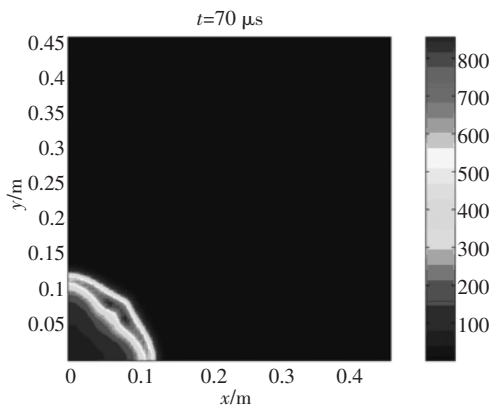


图 6 非直接接触式水幕减爆密度分布 (水幕厚度为 0.025 m)

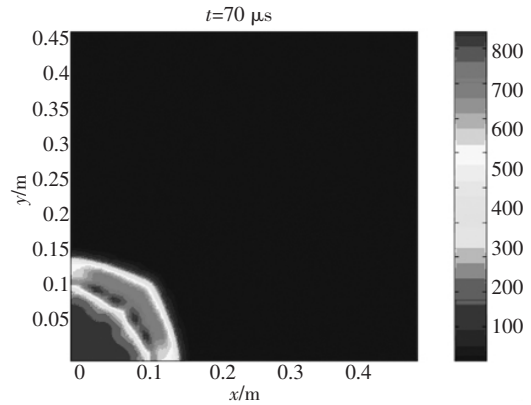


图 7 非直接接触式水幕减爆密度分布 (水幕厚度为 0.05 m)

4 结束语

将拉格朗日型无网格粒子方法 SPH 应用于水幕减爆的研究。数值仿真结果表明,直接接触式和非直接接触式水幕减爆对冲击波峰值压力和最终气室压力都有一定程度的减弱。对于直接接触式水幕减爆的情形,给定剂量的炸药具有一个最优的水幕厚度以达到最佳减爆效果。如果炸药和水幕之间或者多层水幕隔开一定的距离,经过优化设计,减爆效果比直接接触式最佳水幕厚度时减爆更明显。然而,非直接接触式水幕减爆装置如果没有得到合理设计和优化布置,减爆效果则不如直接接触式水幕减爆。

参考文献:

[1]COOK M A. The science of high explosives [M]. Berlin Reinhold Pub Corp ,1958.
 [2]COLE R H. Underwater Explosions[M]. Princeton Princeton University Press ,1948.
 [3]HOLT M . Underwater explosions[J]. Annual Review of Fluid Mechanics ,1977 ,9(1) :187-214.
 [4]CHISUM J E , SHIN Y S. Explosion gas bubbles near simple boundaries[J]. Shock and Vibration ,1997 ,4(1) :11-26.
 [5]CHONG W K , LAM K Y , YEO K S , et al. Computational study of water mitigation effects on an explosion inside a vented tunnel system[J]. Explosive Safety ,1998 :118-124.
 [6]CHONG W K , LAM K Y , YEO K S , et al. A comparison of simulation's results with experiment on water mitigation of an explosion[J]. Shock and Vibration ,1999 ,6(2) :73-80.
 [7]SHIN Y S , LEE M , LAM K Y. Modeling mitigation effects of watershed on shock waves[J]. Shock and Vibration ,1998 ,5 (4) 225-234.

- [8]LIU G R , LIU M B. Smoothed particle hydrodynamics : a meshfree particle method[J]. World Scientific ,2003.
- [9]GINGOLD R A , MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics——theory and application to non-spherical stars[J]. Mon Not R Astron Soc ,1977 ,181 :375-389.
- [10]LUCY L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis[J]. Astron J ,1977 ,82(12) :1013-1024.
- [11]LIU M B , LIU G R , LAM K Y. A one-dimensional meshfree particle formulation for simulating shock waves[J]. Shock Waves , 2003 ,13(3) :201-211.
- [12]LIU M B , LIU G R , LAM K Y , et al. Meshfree particle simulation of the detonation process for high explosives in shaped charge unlined cavity configurations[J]. Shock Waves , 2003 ,12(6) :509-520.
- [13]LIU M B , LIU G R , ZONG Z , et al. Computer simulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology[J]. Comput Fluids , 2003 ,32(3) :305-322.
- [14]LIU M B , LIU G R. Smoothed particle hydrodynamics : some recent developments in theory and applications[J]. J Beijing Polytech Univ ,2004 ,30 :61-71.
- [15]LIU M B , LIU G R , LAM K Y , et al. Computer simulation of shaped charge detonation using meshless particle method [J]. Fragblast ,2003 ,7(3) :181-202.
- [16]ALIA A , SOULI M. High explosive simulation using multi-material formulations[J]. Appl Therm Eng , 2006 ,26(10) :1032-1042.
- [17]LIU M B , LIU G R , LAM KY , et al. Smoothed particle hydrodynamics for numerical simulation of underwater explosion[J]. Comput Mech ,2003 ,30(2) :106-118.
- [18]SWEGLE J W , ATTAWAY S W. On the feasibility of using smoothed particle hydrodynamics for underwater explosion calculations[J]. Comput Mech ,1995 ,17(3) :151-168.
- [19]LIU M B , LIU G R , LAM K Y. Investigations into water mitigation using a meshless particle method[J]. Shock Waves , 2002 ,12(3) :181-195.
- [20]LIU M B , LIU G R , LAM K Y. Comparative study of the real and artificial detonation models in underwater explosions [J]. Electronic Modeling ,2003 ,25(2) :113-124.
- [21]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 ,25(4) :204-209.
- [22]姚熊亮 , 于秀波 , 张阿漫 , 等. 基于 SPH 方法的水下爆炸初始爆轰过程研究[J]. 中国舰船研究 ,2008 ,3(2) :7-10.
- [23]宗智 , 邹丽 , 刘谋斌 , 等. 模拟二维水下爆炸问题的光滑粒子(SPH)方法[J]. 水动力学研究与进展 , 2007 ,22(1) :61-67.
- [24]LIU M B , LIU G R , LAM K Y. Adaptive smoothed particle hydrodynamics for high strain hydrodynamics with material strength[J]. Shock Waves ,2006 ,15(1) :21-29.
- [25]LIBERSKY L D , PETSCHKE A G , CARNEY T C , et al. High strain Lagrangian hydrodynamics : a three-dimensional SPH code for dynamic material response[J]. J Comput Phys , 1993 ,109(1) :67-75.
- [26]ZHOU C E , LIU G R , LOU K Y. Three-dimensional penetration simulation using smoothed particle hydrodynamics[J]. Int J Comput Meth ,2007 ,4(4) :671-691.
- [27]JOHNSON G R , BEISSEL S R , STRYK R A. A generalized particle algorithm for high velocity impact computations [J]. Comput Mech ,2000 ,25(2) :245-256.
- [28]LIU M B , LIU G R , LAM K Y. Constructing smoothing functions in smoothed particle hydrodynamics with applications[J]. J Comput Appl Math ,2003 ,155(2) :263-284.