

近水面空中爆炸冲击波的载荷特性*

黄超^{1,2}, 徐维铮³, 曾繁^{1,2}, 张磐^{1,2}, 黄宇³, 刘娜^{1,2}

(1.中物院高性能数值模拟软件中心, 北京 100088;

2.北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088;

3.中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 靠近水面的空中爆炸是舰船的重要威胁之一。为了研究水面传播冲击波的载荷特性, 采用 TNT/RDX(40/60)炸药开展了触水、近水和空中 3 种典型比高条件下的爆炸实验, 测量得到了冲击波超压和爆炸的高速摄影图像。采用数值模拟方法进一步研究了爆炸现象和水面冲击波的载荷规律。结果表明: 触水、近水和空中爆炸现象存在显著差异。触水爆炸时爆轰产物直接驱动水面形成半球形空腔, 水坑边缘的水被挤压向上飞溅形成空心水柱; 近水爆炸时爆轰产物对水面的碰撞作用相对较弱, 水面上的冲击波主要以马赫波沿着水面向外传播; 空中爆炸时冲击波在水面存在明显的规则和非规则反射区; 在同等当量条件下, 触水爆炸时的水面冲击波超压较近水爆炸的低, 但水中冲击波压力更高, 因此水面不能再看成刚性平面。通过数据拟合得到了触水和典型近水爆炸条件下, 水面上水平距离 0.5~4.0 m/kg^{1/3} 范围内的冲击波超压和正压持续时间计算公式, 可为冲击波载荷计算和分析提供参考。

关键词: 空中爆炸; 近水面; 触水; 水中爆炸; 冲击波; 实验; 数值模拟

中图分类号: O382.1

国标学科代码: 130.3520

文献标识码: A

Research on Shock Wave Load Characteristics of Near Water Surface Blast

HUANG Chao^{1,2}, XU Weizheng³, ZENG Fan^{1,2}, ZHANG Pan^{1,2}, HUANG Yu³, LIU Na^{1,2}

(1.CAEP Software Center for High Performance Numerical Simulation, Beijing 100088, China;

2.Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China;

3.Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Blast near the water surface is one of the major threats of ships. In order to study the load characteristics of the shock wave on water surface, experiments were carried out with TNT/RDX(40/60) explosives. Three typical scaled height of burst were used, including the contact burst, the near-surface blast and the air blast. In the experiments, overpressure both in air and water were gotten and high-speed photographic was used to record the explosion images. A numerical simulation method based on five-equation model is used to further study the explosion phenomenon and the loading characteristic of shock wave on water surface. The numerical simulation results are in good agreement with the experimental results. Results show that there are significant differences among the phenomena of the contact burst, the near-surface blast, and the air blast. In the contact burst, the detonation products directly drive the water surface to form a hemispherical cavity, and the water on the edge of the cavity is squeezed upwards to form a hollow water column. In near-surface blast, the collision of the detonation products with the water surface is relatively weak, and the shock wave on the water surface mainly propagates outwards as Mach waves along the water

*收稿日期: 2024-11-20; 修回日期: 2025-01-16;

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金 (YZJJZQ2023024)

第一作者: 黄超 (1984.1-), 男, 博士, 副研究员, E-mail: huang_chao@iapcm.ac.cn;

通信作者: 曾繁 (1989.1-), 男, 博士, 副研究员, E-mail: zeng_fan@iapcm.ac.cn。

surface. In the air blast, there are obvious regular and irregular reflection zones of the shock wave on the water surface. Under the same yield conditions, the overpressure on water surface of the contact burst is lower than that of the near-surface blast, but the pressure in water is more stressful, thus the water surface can no longer be seen as a rigid plane. The formulas of overpressure and positive pressure duration of shock wave on water surface within the range of 0.5~4.0 m/kg^{1/3} in the contact burst and the near-surface blast were obtained through data fitting, which provide reference for shock wave loading calculation and analysis.

Keywords: air blast; near-surface; contact surface; underwater explosion; shock wave; experiment; numerical simulation

靠近水面的空中爆炸是水面舰船、港口和水坝^[1]等基础设施在作战中经常遇到的爆炸场景，冲击波通过空气和水传播后与结构物发生相互作用，可能造成严重的破坏。例如，2000年10月12日，美国“科尔”号驱逐舰在亚丁湾遭遇载有高能炸药的小型气垫船自杀式袭击，导致船身被炸开一个6~12 m的大洞，17人死亡，39人受伤。2022年4月14日，俄罗斯“莫斯科”号巡洋舰遭受反舰导弹袭击受损，随后因起火爆炸沉没。对于近水面爆炸问题，可以通过比高 ($\bar{H} = H/W^{1/3}$, H 为爆高, W 为TNT当量)来区分^[2]: 一般 $0 \leq \bar{H} \leq 0.15$ m/kg^{1/3} 为触水爆炸, $0.15 < \bar{H} \leq 0.60$ m/kg^{1/3} 为近水爆炸, $\bar{H} > 0.60$ m/kg^{1/3} 为空中爆炸。近水面爆炸是复杂的高温高压产物演化、气-水耦合相互作用瞬态过程,一方面冲击波会从空气中传播到水面形成反射和透射,另一方面在冲击波和爆轰产物的作用下,水面将发生凹陷变形,如果是触水爆炸,爆轰波将直接与水相互作用,使得水面产生剧烈地变形和破碎现象。由于凝聚态介质与气体的压缩性质不同,冲击波在不同阶段的运动规律存在差异,图1给出了爆炸初始阶段近水爆炸和触水爆炸主要物理现象的示意图。

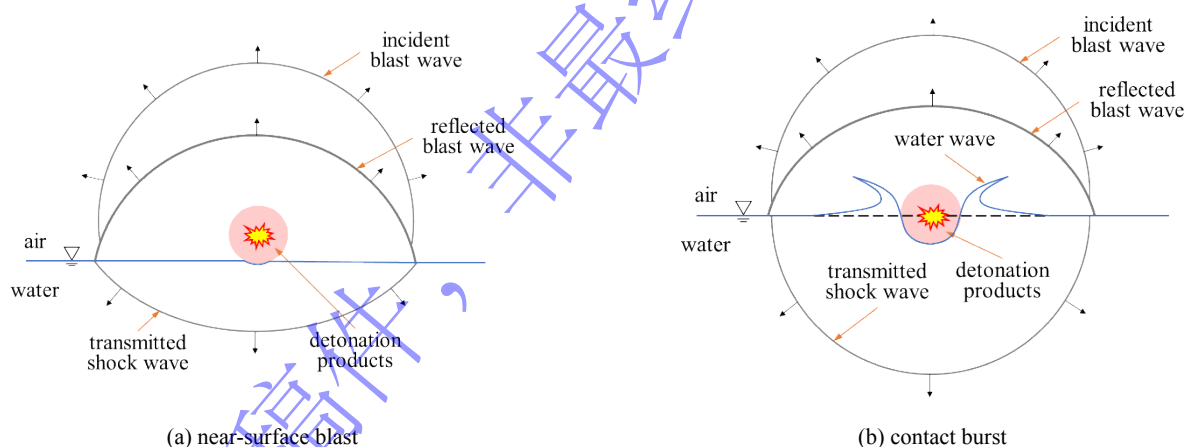


图1 近水和触水爆炸初始阶段示意图

Fig.1 Illustration of initial stage of near-surface blast and contact burst

对于近水面爆炸问题,已有的研究对于水下爆炸问题关注的较多。余俊等^[3]研究了近自由面水下爆炸冲击波和空化现象。王高辉等^[4]研究了近自由面水下爆炸冲击波的传播特性。这些现象和载荷与近水面空中爆炸场景的存在显著差异。Peckham^[5]研究了在近水空中爆炸下引起的水中冲击波的特征,发现冲击波的贡献都局限在装药正下方的水/空气界面的小区域内。Swisdak^[6]给出了不同当量装药条件下触水面爆炸时,水中冲击波超压峰值的测量数据。李润珊等^[2]在野外现场进行了触、近水面化爆实验,又在实验水池进行了小药量实验,冲击波实测结果表明:近水、触水爆炸时,空气冲击波在水面上的反射超压比用陆上地面爆炸经验公式计算的值小,但对于近水爆炸和触水爆炸冲击波压力采用了相同的拟合公式。上述研究结果表明近水触水爆炸的冲击波与近地和触地爆炸存在差异。从舰船防护的角度,更加关心水面附近的冲击波传播特性,而这方面的研究较少。

针对近水面空爆问题,开展了触水 ($\bar{H} = 0$)、近水 ($\bar{H} \approx 0.2$ m/kg^{1/3})和空中 ($\bar{H} \approx 0.6$ m/kg^{1/3}) 3种典型爆炸场景下的冲击波传播实验研究,并通过数值模拟研究了不同场景下的爆炸过程和冲击波载荷特性,基于冲击波超压数据拟合得到了触水爆炸和典型近水爆炸场景下水面上水平距

离 $0.5\sim 4.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内的冲击波超压和正压持续时间表达式，可为相关工程应用中的冲击波载荷计算和分析提供科学依据。这些发现对于理解近水面爆炸的物理机制、评估爆炸对结构的影响以及设计防护措施具有重要的理论和实际意义。

1 实验和基本现象

实验主要考察不同爆高条件下冲击波在水面附近的传播。为了精准的控制实验参数以及便于测试，实验在钢制水箱中开展^[7]。实验装置及布局如图 2 所示，水箱长 4 m、宽 4 m、高 2 m，装药布置在水箱中心的水面上方。装药采用 TNT/RDX(40/60)，质量分别为 100 g、200 g 和 400 g，等效 TNT 当量分别为 120 g、240 g 和 480 g，从中心起爆。采用高速相机拍摄整个爆炸过程，主要观察空中冲击波传播、爆轰产物演化等图像，拍摄幅频为 50000 FPS，分辨率为 896×288 。空中压力传感器和水中压力传感器分别布置在距离爆心投影点水平距离 0.5 m、1.0 m、1.5 m 和 2.0 m 处，为避免传感器及其工装对测试的影响，将各传感器相互之间错开一定的角度布置，空中压力传感器距离水面的高度为 h ，水中压力传感器距离水面的高度为 d 。实验以比高 \bar{H} 为变量设计工况，选取触水 ($\bar{H} = 0$)、近水 ($\bar{H} \approx 0.2 \text{ m/kg}^{1/3}$) 和空中 ($\bar{H} \approx 0.6 \text{ m/kg}^{1/3}$) 3 种典型爆炸场景，每个场景均包括 3 发不同装药量的实验，用于考察不同工况条件下的冲击波传输规律，如表 1 所示。

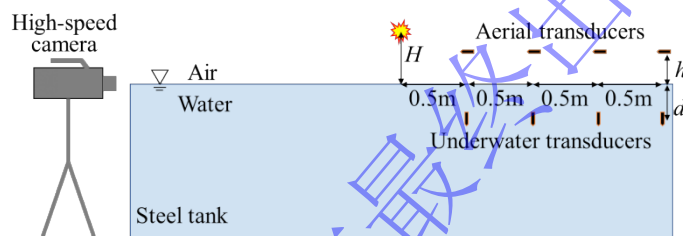


图 2 实验装置及布局

Fig.2 Experimental facility and layout

表 1 实验工况

Table 1 Experimental conditions

工况	场景	当量/kg	爆高/m	比高/ ($\text{m/kg}^{1/3}$)	空中测点高度 m	水中测点深度/m
1	触水爆炸	0.12	0	0	0.05	0.08
2	触水爆炸	0.24	0	0	0.06	0.09
3	触水爆炸	0.48	0	0	0.07	0.11
4	近水爆炸	0.12	0.106	0.215	0.05	0.08
5	近水爆炸	0.24	0.126	0.203	0.06	0.09
6	近水爆炸	0.48	0.147	0.188	0.07	0.11
7	空中爆炸	0.12	0.319	0.647	0.16	0.08
8	空中爆炸	0.24	0.378	0.608	0.19	0.09
9	空中爆炸	0.48	0.472	0.603	0.23	0.11

图 3(a)给出了典型近水爆炸（工况 6）条件下 0.5 ms 时刻的爆炸图像，可以看到燃烧的明亮火球，水面没有明显的变形，空中冲击波呈半球形，水下冲击波呈球冠状。图 3(b)给出了典型触水爆炸（工况 3）条件下 0.5 ms 时刻的爆炸图像。首先看到的是火球紧贴着水面，整体呈近似半球形；其次，在爆心附近的水体有一个半球形阴影，这是爆轰产物驱动水形成的空腔；此外，由于冲击波阵面上的介质处于高度压缩状态，在图像上呈现出不同的亮度，能够从图像中分辨出冲击波的轮廓，空气中

和水中的冲击波均呈半球形，水中冲击波阵面的亮度随着深度的变浅逐渐变暗，这是由于水面稀疏波的影响导致。

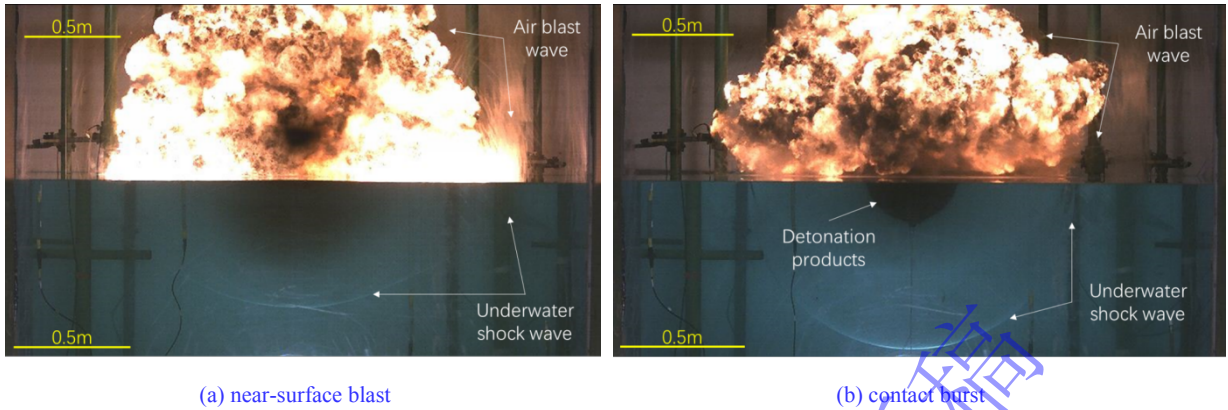


图3 典型近水、触水条件下的爆炸图像
Fig.3 Image of typical near-surface blast and contact burst

2 数值模拟

为了进一步分析爆炸过程和水面附近的冲击波载荷特性，采用数值模拟方法对实验过程进行复现，并通过实验数据校核数值模拟的精度。近水面空中爆炸问题涉及冲击波在空气中和水中的传播，属于多介质非定常可压缩流体动力学问题。针对该物理过程，可采用欧拉形式的五方程模型描述流体的控制方程^[8]，包括体积分数方程、空气和水的质量方程、混合动量方程和混合能量方程：

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\alpha_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\alpha_w \rho_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_w \rho_w \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) + \nabla p = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{u} + p \mathbf{u}) = 0 \quad (5)$$

式中： α 为流体的体积分数； ρ 为介质的密度； \mathbf{u} 为速度矢量； p 为压力； E 为总能量；下标 g 和 l 分别表示空气和水。

采用理想气体状态方程和 Tait 状态方程描述空气和水的压缩行为^[9]，对控制方程组进行封闭求解：

$$p = (\gamma_a - 1) \rho e \quad (6)$$

$$\frac{\bar{p}}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma_w} \quad (7)$$

式中： e 为单位体积的内能； $\gamma_a=1.4$ ； $\bar{p}=p+B$ ， $B=3.309\times 10^8$ Pa； $\gamma_w=7.15$ 。对于单个网格内存在混合介质的情况，采用等压假设计算混合压力和声速^[10]。

为提高计算效率，数值模拟模型采用 2D 轴对称结构。根据实验工况，计算区域设置为 2.5 m×3 m，其中水面以上区域为 2.5 m×2 m，水面以下区域为 2.5 m×1 m，采用均匀网格布置。在前期工作中已经测试过水下爆炸数值模拟的准确性^[11]，这里针对空中爆炸数值模拟进行网格收敛性测试。图 4 给出了 0.12 kg TNT 采用不同网格尺寸模型计算的冲击波压力，以及与 K-G (Kinney-Graham) 公式计算结果的对比，当模型网格从 20 mm 减小到 2 mm 时，4 个测点冲击波超压的平均绝对误差从 29.1 下降到 6.1%。综合考虑计算精度和效率，将计算模型的网格尺寸统一设为 2 mm。

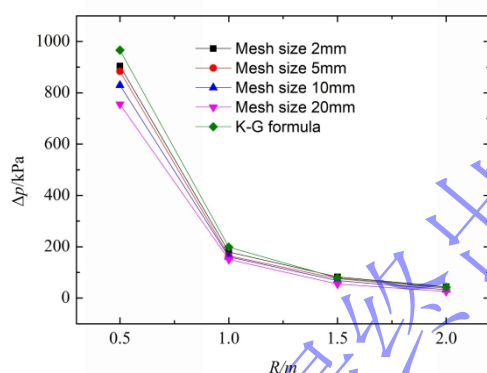
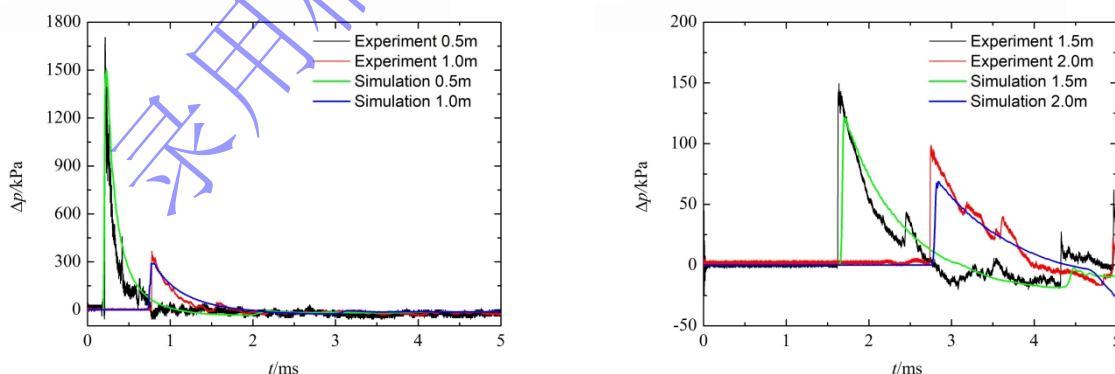


图 4 不同网格尺寸模型的冲击波超压对比

Fig.4 Comparison of shock wave overpressures of different mesh size models

图 5 和图 6 分别给出了近水爆炸（工况 4）条件下，水面上冲击波和水中冲击波超压的数值模拟和实验结果对比。可以看到，水面上的冲击波超压曲线与实验结果吻合较好，由于水箱边界反射，实验曲线在主冲击波一段时间之后能够观察到低幅值的反射波，而数值模拟为便于问题分析采用了无反射边界，因此压力曲线比较平滑。水中冲击波的到达时间和初始幅值与实验结果基本一致，但压力曲线均出现了异常振荡信号，经分析可能是测试线缆绝缘问题导致的干扰。进一步对比分析可知，空气中的冲击波超压衰减更快，但持续时间更长。



(a) pressure curves at 0.5 m and 1.0 m

(b) pressure curves at 1.5 m and 2.0 m

图 5 水面上不同位置的冲击波超压曲线

Fig.5 Blast wave overpressure curves at different distances on water surface

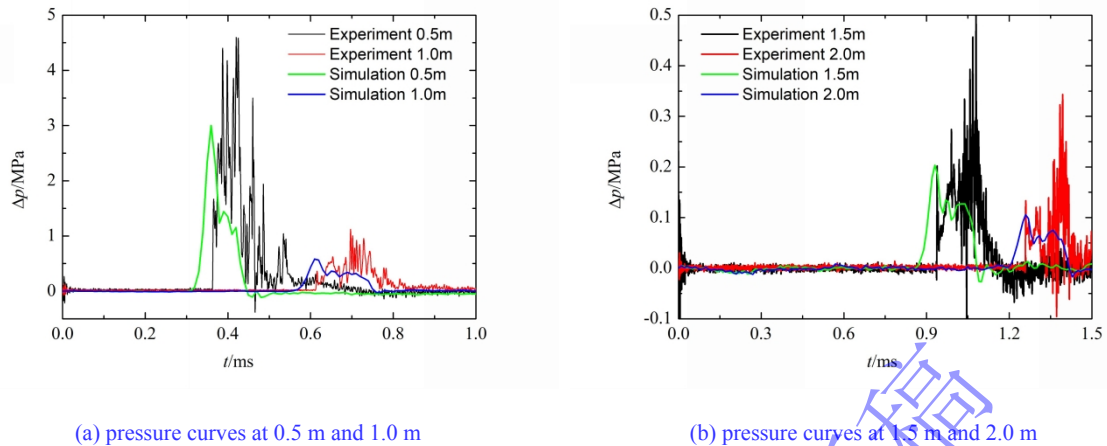


图 6 水中不同位置的冲击波超压曲线

Fig.6 Shock wave overpressure curves at different distances underwater

将各个工况数值模拟得到的空中冲击波超压峰值与实验结果进行对比，如表 2 所示。总体上看，随着距离的增加，水面的空气冲击波超压峰值的数值呈指数下降，数值模拟结果整体较实验值略低，但基本规律一致，模拟与实验结果的平均绝对偏差在 20%左右。通过分析冲击波的到达时间发现，由于空中超压传感器采用支架固定在水箱底部，安装不平导致位置出现了偏差，因此部分测点的数据偏差较大。此外还通过对比发现，尽管在触水爆炸条件下，测点距爆心的距离更近，但冲击波超压峰值却相比近水爆炸和空中爆炸的低得多。

表 2 空中冲击波超压峰值的实验和模拟结果对比

Table 2 Contrast of air blast overpressures between experiment and simulation

工况	0.5m 测点			1.0m 测点			1.5m 测点			2.0m 测点		
	实验 /kPa	模拟 /kPa	误差 /%	实验 /kPa	模拟 /kPa	误差 /%	实验 /kPa	模拟 /kPa	误差 /%	实验 /kPa	模拟 /kPa	误差 /%
1	751.8	671.1	-10.7	250.2	169.2	-32.4	114.9	81.9	-28.7	69.8	52	-25.5
2	631.1	717.5	13.7	/	264.3	/	/	119.8	/	/	74.7	/
3	1335	1215	-9.0	/	384.7	/	192.0	169.1	-11.9	117.9	99	-16.0
4	1697.4	1503.4	-11.4	360.8	293.1	-18.8	144.2	122.7	-14.9	90.7	70.1	-22.7
5	2855.1	2332.6	-18.3	/	529.9	/	/	197.4	/	/	108.5	/
6	2912.2	3480.1	19.5	717.5	950.3	32.4	278.4	327.3	17.6	138.5	170	22.7
7	1129.1	722.1	-36.0	376.2	285.7	-24.1	194.9	125	-35.9	101.6	72.6	-28.5
8	1868.7	1207.4	-35.4	563.8	546.1	-3.1	/	203.1	/	/	112.5	/
9	1807.6	1651.9	-8.6	/	671.1	/	271.8	322.2	18.5	151.6	170.3	12.3
平均值			18.1			22.1			21.2			21.3

3 分析与讨论

3.1 爆炸过程

为了更清楚的观察爆炸过程中的冲击波演化，将爆轰产物和空气的密度场绘制成云图。图 7 给出了空中爆炸（工况 7）时爆轰产物气体与空气密度流场演化的模拟结果。可以看到，空中爆炸场景中，由于距离水面较远，爆轰产物气体对水面的作用较弱，水面没有产生明显变形，冲击波在水面的反射行为与空中爆炸波在地面的反射行为类似。

爆炸与冲击 Explosion and Shock Waves

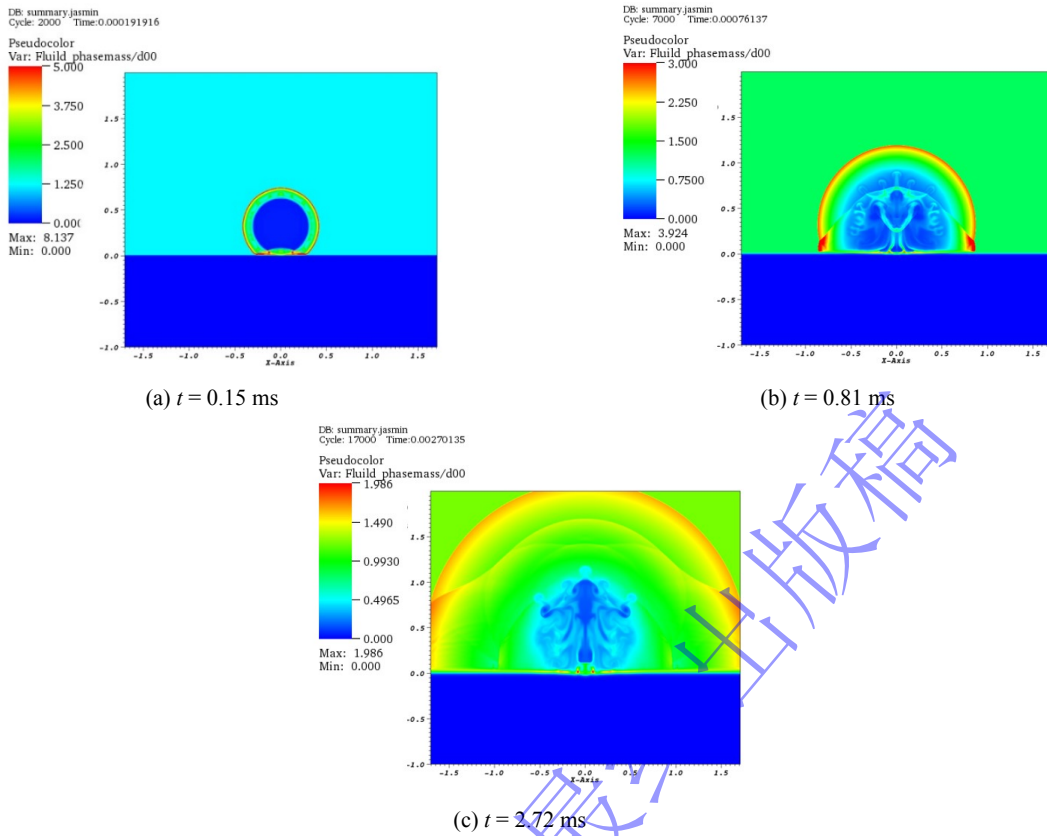
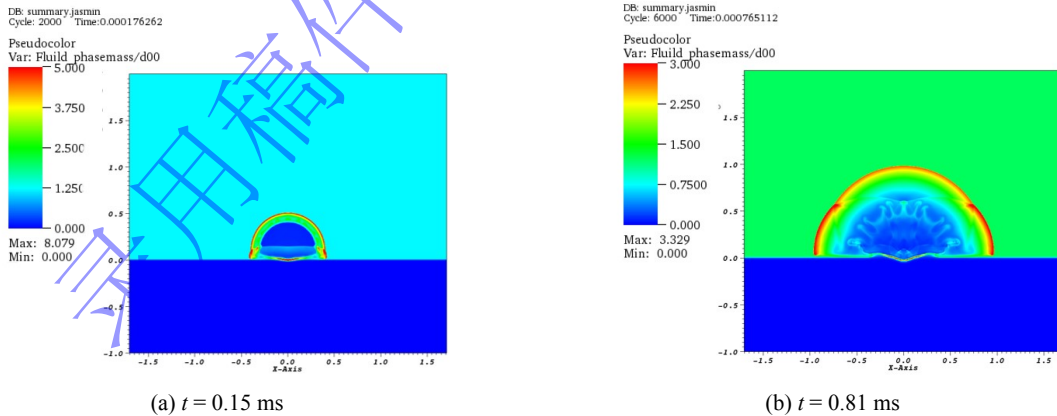


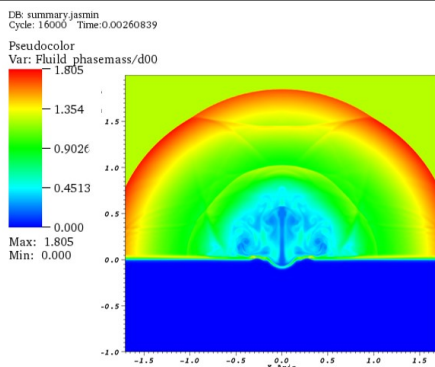
图 7 空中爆炸的气体密度场分布

Fig.7 Density field distribution of gas in air blast

图 8 给出了近水爆炸（工况 4）典型时刻的爆轰产物和空气密度场分布。 $t = 0.18$ ms 时，爆炸首先在空气中形成冲击波，在水面附近可见明显的马赫波，但爆轰产物气体尚未触及水面。 $t = 0.76$ ms 时，随着空气中的冲击波向外传播，马赫反射区进一步扩展，此时爆轰产物与水面接触，推动水面向下轻微凹陷。 $t = 2.61$ ms 时，空气中的冲击波进一步向外扩展，但水面的变形没有明显增大。



爆炸与冲击 Explosion and Shock Waves

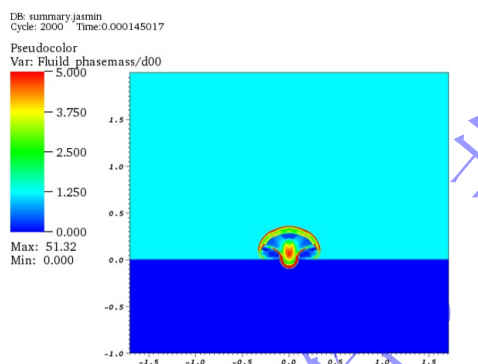


(c) $t = 2.72$ ms

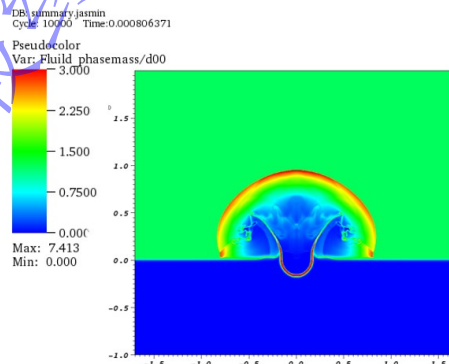
图 8 近水爆炸的气体密度场分布

Fig.8 Density field distribution of gas in near-surface blast

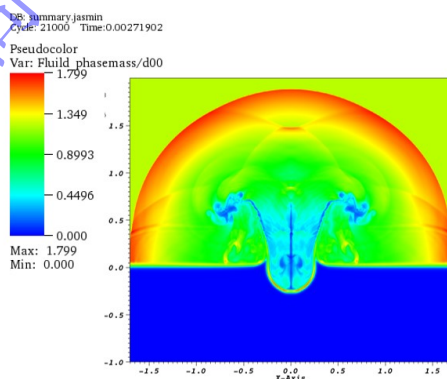
图 9 给出了触水爆炸（工况 1）典型时刻的爆轰产物和空气密度场分布。 $t = 0.15$ ms 时，爆心附近呈现高压气-水耦合的复杂状态，由于装药与水面接触，反射波与初始入射冲击波合并产生超压，产生的超压大于初始冲击波波单独产生的超压，爆轰产物强烈地驱动水面形成喷溅，装药下方形成一个半球形空腔。 $t = 0.81$ ms 时，随着空气中的冲击波向外传播，水面的冲击波压力较空中爆炸和近水爆炸时的弱，同时水面的半球形空腔进一步扩大，水被挤压向上飞溅，形成空心水柱。 $t = 2.72$ ms 时，空气中的冲击波进一步传播，水柱顶端在中心碰撞形成细长的射流。



(a) $t = 0.15$ ms



(b) $t = 0.81$ ms



(c) $t = 2.72$ ms

图 9 触水爆炸的气体密度场分布

Fig.9 Density field distribution of gas in contact burst

3.2 空中冲击波

实验和模拟结果均表明，对于水面上的空中爆炸（ $\bar{H} > 0.6 \text{ m/kg}^{1/3}$ ），冲击波在水面上的传播规律与地面上的空中爆炸基本一致。冲击波以高于一定角度在水面斜入射时将产生马赫反射，如图 10 所

示。

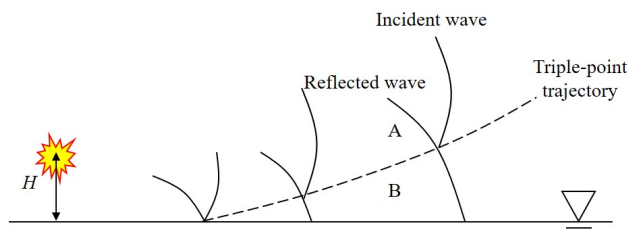
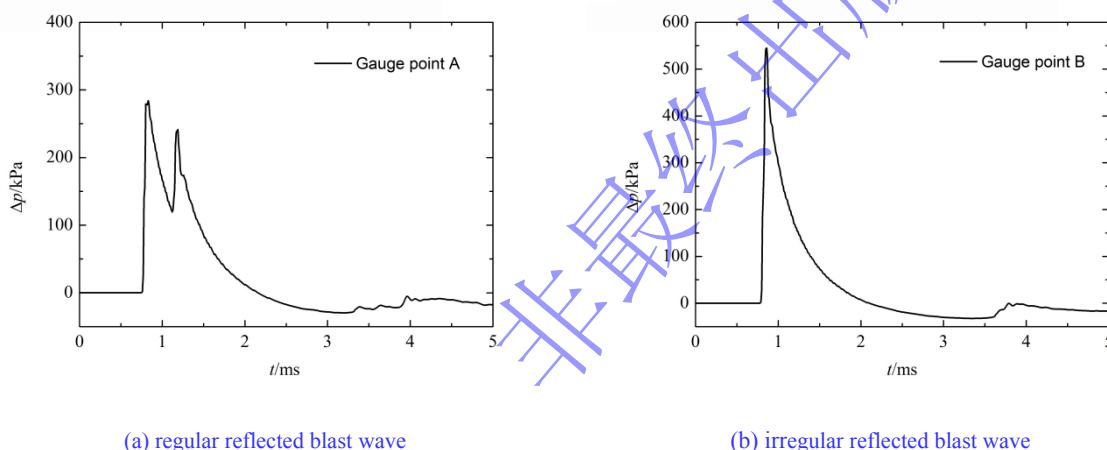


图 10 冲击波在水面的反射规律

Fig.10 Reflection of shock wave on the surface

以爆心在水面的投影点为原点，建立水平距离和垂向高度的二维坐标系，取规则反射区内 A 点 (1 m, 0.38 m) 和非规则反射区内 B 点 (1 m, 0.15 m) 的冲击波超压进行对比，如图 11 所示。可以看到，由于 A 点处于规则反射区内，压力曲线存在两个峰值，而 B 点处于非规则反射区内，入射波和反射波形成叠加，压力曲线只有一个峰值。



(a) regular reflected blast wave

(b) irregular reflected blast wave

图 11 规则反射区和非规则反射冲击波超压

Fig.11 The regular reflected and irregular reflected blast wave overpressure

近水爆炸或触水爆炸时，水面会在爆炸冲击作用下产生变形，气体中的冲击波和流场运动要更加复杂。图 12 给出了近水爆炸条件下的水面的冲击波超压峰值 Δp 和正压作用时间 τ_+ 分布。图 13 给出了触水爆炸条件下的水面的冲击波超压峰值 Δp 和正压作用时间 τ_+ 分布，图中同时给出了触地爆炸的地面冲击波超压分布曲线进行对比（采用 K-G 公式计算，按土壤地面取 1.8 倍 TNT 当量）。可以看到，触水爆炸水面的冲击波超压显著低于按触地爆炸计算的冲击波超压。对比图 12 和图 13 可知，在水面上同样的水平距离处，近水爆炸的冲击波超压显著高于触水爆炸的冲击波超压，这是因为触水爆炸时，爆轰结束时产物直接驱动水产生飞溅，很大一部分能量被水吸收，导致水面的冲击波超压显著降低。相比文献[2]对触水爆炸和近水爆炸的水面冲击波超压采用相同的公式描述，本文的结果更加合理。

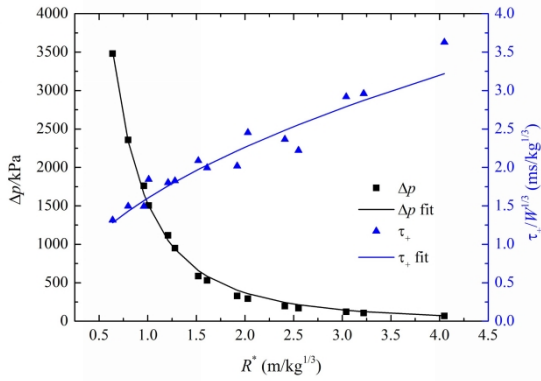


图 12 近水爆炸水面的冲击波超压和正压作用时间分布
Fig.12 Distribution of shock wave overpressure and positive pressure duration on water surface of near-surface blast

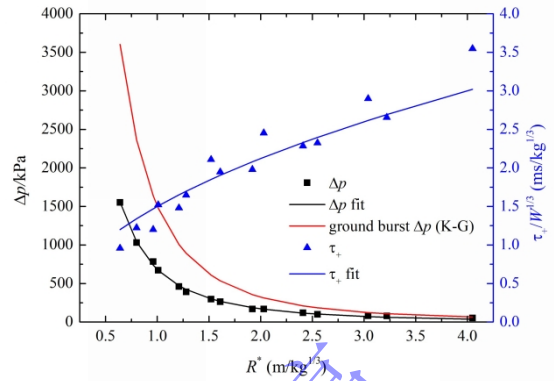


图 13 触水爆炸水面的冲击波超压和正压作用时间分布
Fig.13 Distribution of shock wave overpressure and positive pressure duration on water surface of contact burst

根据爆炸冲击波相似律^[12], 对典型近水爆炸 ($\bar{H} \approx 0.2 \text{ m/kg}^{1/3}$) 水面上水平距离 $0.5 \sim 4.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内的冲击波超压和正压持续时间进行拟合得到:

$$\Delta p = -2\bar{R}^{-1} + 20.16\bar{R}^{-2} - 2.87\bar{R}^{-3} \quad (8)$$

$$\tau_+ = 1.6R^{1/2}W^{1/6} \quad (9)$$

同样, 对触水爆炸水面上水平距离 $0.5 \sim 4.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内的冲击波超压和正压持续时间进行拟合得到:

$$\Delta p = -0.54\bar{R}^{-1} + 8.52\bar{R}^{-2} - 1.15\bar{R}^{-3} \quad (10)$$

$$\tau_+ = 1.5R^{1/2}W^{1/6} \quad (11)$$

式中: Δp 为超压, 单位为 10^2 kPa ; \bar{R} 为到爆心投影点的比距离, $\bar{R} = R/W^{1/3}$, $\text{m/kg}^{1/3}$; R 为测点至爆心投影点水平距离, m ; W 为药量, kg ; τ_+ 为正压作用时间, ms 。

3.3 水中冲击波

近水爆炸和触水爆炸在水中产生的冲击波也有所不同, 主要差异在于冲击波的形成过程。近水面爆炸时, 水下冲击波是空中冲击波沿水面传播拍击水面而形成的。图 14 给出了近水面爆炸 (工况 6) 0.5 ms 时刻的压力分布云图。由数值模拟结果可知, 由于水面上各个位置距离爆源的距离不同, 入射波及随后的反射波波后流场于不同时刻、以不同的强度作用于水面各点, 然后它们又以独立源的形式作用于水体, 在爆心投影点区仍能造成能量的集中入射, 形成水下冲击波, 但稀疏效应更加显著。

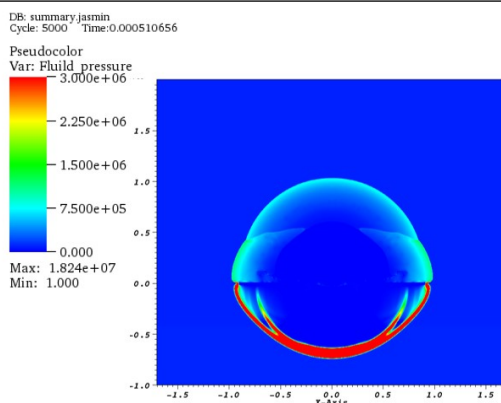


图 14 近水面爆炸的水下冲击波

Fig. 14 The underwater shock waves from the near-surface blast

触水爆炸时，水中冲击波直接由爆炸产生。图 15 给出了触水爆炸（工况 3）0.5 ms 时刻的的压力分布云图。数值模拟结果表明：当药包触水爆炸时，在爆轰的瞬间，爆炸产物及初始冲击波作用于水体，使水面出现较深的“空腔”，炸药的部分能量直接在水中释放，以此为爆源在水中形成强烈的冲击波向水体深处传播。冲击波阵面可视为以爆心投影点为球心的半球面，波阵面峰值冲击波压力随传播距离的增大而减弱，由于受自由面稀疏效应的影响，该半球面并不完全是一个等压面，在越靠近自由面的位置处，波阵面上的压力越低。

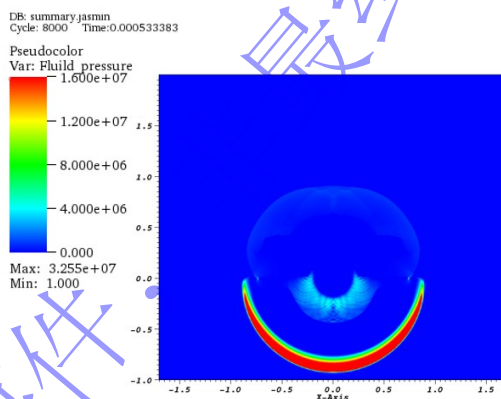


图 15 触水爆炸产生的水下冲击波

Fig. 15 The underwater shock waves from the contact burst

图 16 给出了近水爆炸场景（工况 6）和触水爆炸（工况 3）数值模拟得到的水中冲击波超压曲线。通过对比可以看到，近水爆炸时，水中冲击波压力波形表现为多峰现象，与触水爆炸相比，压力的幅值低得多。而触水爆炸时，冲击波压力随传播距离的增大而迅速衰减，并且由于受自由面稀疏效应的影响，越靠近自由面的位置处，波阵面上的压力越低，其波形虽然在主脉冲前后可能有小的扰动，但很快下降为零。

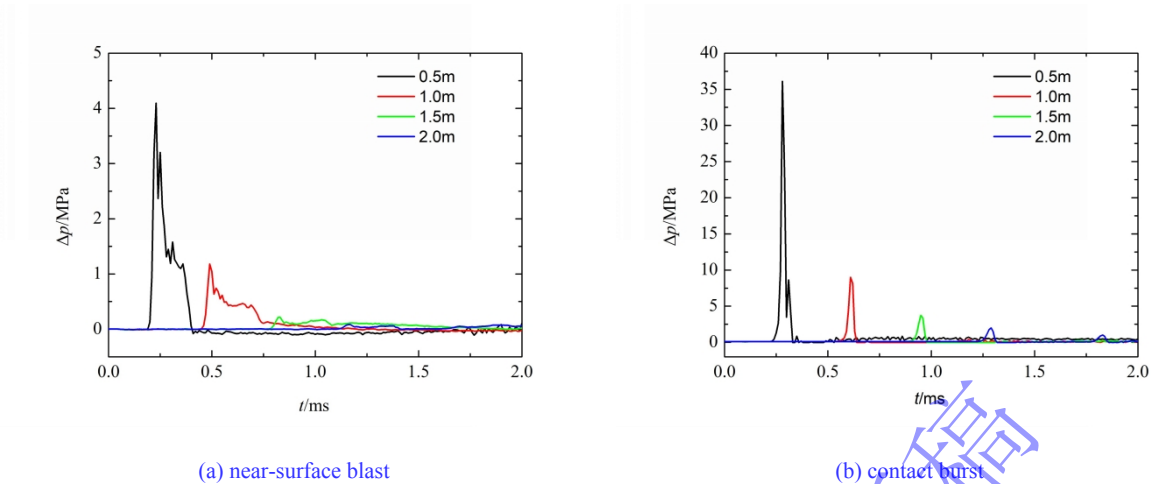


图 16 近水爆炸和触水爆炸的水下冲击波超压曲线

Fig.16 The underwater shock wave overpressure curves of near-surface blast and contact burst

4 结论

本文揭示了不同比高条件下近水面爆炸的冲击波载荷特性，通过对比分析 100 g、200 g 和 400 g TNT/RDX(40/60)炸药在触水、近水和空中三种典型比高条件下的爆炸实验，以及相应的数值模拟结果，得到以下结论：

(1) 触水、近水和空中爆炸现象存在显著差异。触水爆炸时，爆轰产物直接作用于水面形成半球形水坑，水坑边缘的水被挤压向上飞溅形成空心水柱。近水爆炸时，爆轰产物对水面的碰撞作用较弱，水面上的冲击波主要以马赫波形式沿水面传播。空中爆炸时，冲击波在水面存在明显的规则和非规则反射区。

(2) 触水爆炸产生的水面冲击波超压低于近水爆炸，因此触水爆炸时水面不能再视为刚性平面。同时，触水爆炸产生的水中冲击波压力相比近水爆炸更高。

(3) 拟合得到了触水爆炸和典型近水爆炸条件下，水面上水平距离 $0.5\sim 4.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内的冲击波超压和正压持续时间的计算公式，可用于爆炸毁伤评估和防护设计。

参考文献

- [1] 李本平, 王永, 卢文波. 制导炸弹在坝前水面爆炸破坏效应研究[J]. 爆破, 2007, 24(4):5. DOI:CNKI:SUN:BOPO.0.2007-04-004.
LI B P, WANG Y, LU W B. Study on the damage effect for water surface explosion of precision guided bomb[J]. BLASTING, 2007, 24(4):5. DOI:CNKI:SUN:BOPO.0.2007-04-004.
- [2] 李润珊, 陶崇铸. 触、近水面爆炸自由场冲击波特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1991, 11(4):8. DOI:10.1007/BF02015344.
LI R S, TAO C Z. Experimental studies of shock properties generated by explosions on or just above water surface in free field[J]. Explosion and Shock Waves, 1991, 11(4):8. DOI:10.1007/BF02015344.
- [3] 余俊, 王海坤, 刘国振, 等. 水下近自由面爆炸过程中的多相流运动特性研究[J]. 船舶力学, 2023, 27(2):163-172. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2023.02.001.
YU J, WANG H K, LIU G Z, et al. Motion characteristics of multiphase flow in underwater explosion near free surface[J]. Journal of Ship Mechanics, 2023, 27(2):163-172. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2023.02.001.

- [4] 王高辉, 张社荣, 卢文波. 近界面的水下爆炸冲击波传播特性及气穴效应[J]. 水利学报, 2015, 46(8):9. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20140035.
WANG G H, ZHANG S R, LU W B. The influence of boundaries on the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(8):9. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20140035.
- [5] PECKHAM P J. Air-to-water blast wave transfer. ADA043898 [R]. USA: Naval Surface Weapons Center, 1977.
- [6] SWISDAK M J. Explosion effects & properties part II: explosion effects in water[R]. 1978.
- [7] 黄超, 汪斌, 姚熊亮, 等. 实验室尺度水下爆炸气泡实验方法[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(12): 75-77, 81. DOI: 10.3969/j.issn.1000-9787.2011.12.023.
HUANG C, WANG B, YAO X L, et al. Laboratory-scale underwater explosion bubble experiment method[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(12): 75-77, 81. DOI: 10.3969/j.issn.1000-9787.2011.12.023.
- [8] ALLAIRE G, CLERC S, KOKH S. A five-equation model for the simulation of interfaces between compressible fluids[J]. Journal of Computational Physics, 2002, 181, 577-616. DOI: 10.1006/jcph.2002.7143.
- [9] 孙承纬, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
SUN C W, WEI Y Z, ZHOU Z K. Applied detonation physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [10] MURRONE, A., GUILLARD, H. A five-equation reduced model for compressible two-phase flow problems[J]. Journal of Computational Physics, 2005, 202 (2), 664-698. DOI: 10.1016/j.jcp.2004.07.019.
- [11] 张磐, 李康, 刘娜. 水下爆炸数值模拟程序开发及验证[C]//第十届全国青年计算物理学术会议. 中国新疆喀什: 中国核学会, 2019: 61-67.
ZHANG P, LI K, LIU N. Development and verification of underwater explosion numerical simulation program[C]// 10th National Youth Computing Physics Conference. Kashgar, Xinjiang, China: China Nuclear Society, 2019: 61-67.
- [12] 段晓瑜, 崔庆忠, 郭学永, 等. 炸药在空气中爆炸冲击波的地面反射超压实验研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(12):7. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.12.013.
DUAN X Y, CUI Q Z, GUO X Y, et al. Experimental investigation of ground reflected overpressure of shock wave in air blast[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(12):7. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.12.013.

(责任编辑 爆炸与冲击)