

[引用格式] 李浩, 张玉柱, 胡浩然, 等. JWL 状态方程参数对 TNT 炸药水下爆炸冲击波数值仿真影响规律 [J]. 水下无人系统学报, 2025, 33(4): 664-675.

JWL 状态方程参数对 TNT 炸药水下爆炸冲击波数值仿真影响规律

李 浩¹, 张玉柱¹, 胡浩然¹, 张 煊², 王 进^{2,3}, 罗 忆^{2,3}

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉, 430010; 2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉, 430070; 3. 武汉理工大学 三亚科教创新园, 海南 三亚, 572024)

摘 要: 爆轰产物状态方程是计算爆炸力学的基本方程之一, 其参数的取值变化会对数值分析结果产生直接影响。文中研究聚焦于 TNT 炸药 JWL 状态方程参数对水下爆炸冲击波数值仿真的影响, 基于 LS-DYNA 有限元程序, 通过与经验公式对比构建精细的一维水下爆炸数值模型, 深入分析爆轰产物 JWL 状态方程各参数不同取值下爆炸冲击波压力衰减规律以及能量释放等关键过程的变化规律。结果显示, JWL 状态方程参数对水下爆炸冲击波峰值压力、比冲量及比冲击波能等参数均有重要影响, 且在不同爆心距离上的影响不尽相同, 在峰值压力方面, 近场范围 R_1 影响远大于其他参数, 而中远场范围则是 E_0 影响最大, 且峰值压力越大衰减越快; 比冲量方面 E_0 的改变影响最大, 且改变 E_0 时比冲量计算值与参数大小成线性关系; 比冲击波能方面同样 E_0 影响最大。研究结果可为水下爆炸数值仿真中 JWL 方程参数合理取值提供参考依据。

关键词: 水下爆炸; JWL 状态方程; 数值仿真

中图分类号: TJ630.2; U615.6

文献标识码: A

文章编号: 2096-3920(2025)04-0664-12

DOI: [10.11993/j.issn.2096-3920.2025-0023](https://doi.org/10.11993/j.issn.2096-3920.2025-0023)

Influence of JWL State Equation Parameters on Numerical Simulation of Underwater Explosion Shock Waves of TNT Explosives

LI Hao¹, ZHANG Yuzhu¹, HU Haoran¹, ZHANG Xuan², WANG Jin^{2,3}, LUO Yi^{2,3}

(1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Sanya Science, Education and Innovation Park, Wuhan University of Technology, Sanya 572024, China)

Abstract: The state equation for detonation products is one of the fundamental equations in computational explosion mechanics, and changes in the values of its parameters directly affect the results of numerical analysis. This study focused on the influence of the parameters of the JWL(Jones-Wilkins-Lee) state equation for TNT explosives on the numerical simulation of underwater explosion shock waves. Based on the LS-DYNA finite element program, a refined one-dimensional numerical model of underwater explosion was constructed by comparing with empirical formulas. An in-depth analysis was conducted on the variation laws of key processes, such as the pressure attenuation of explosion shock waves and energy release under different values of each parameter in the JWL state equation for detonation products. The results show that the parameters of the JWL state equation have significant impacts on parameters such as the peak pressure, specific impulse, and specific shock wave energy of underwater explosion shock waves, and the impact varies at different distances from the explosion center. In terms of peak pressure, in the near field range, the influence of R_1 is much greater than that of other parameters, while in the

收稿日期: 2025-02-10; 修回日期: 2025-02-21; 录用日期: 2025-03-11.

基金项目: 长江勘测规划设计研究有限责任公司自主创新项目(CX2023Z03-3)

作者简介: 李 浩(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为河道治理规划.

OPEN ACCESS

middle and far field ranges, E_0 has the greatest influence. Moreover, a higher peak pressure indicates a faster attenuation. In terms of specific impulse, changes in E_0 have the greatest influence, and when E_0 is changed, the calculated value of specific impulse has a linear relationship with the parameter value. Similarly, E_0 has the greatest influence on specific shock wave energy. The research results can provide a reference basis for the reasonable selection of JWL equation parameters in the numerical simulation of underwater explosions.

Keywords: underwater explosion; JWL state equation; numerical simulation

0 引言

计算爆炸力学作为爆炸力学领域的重要研究方向之一,在武器设计和工程爆破优化等方面具有重要的实际应用价值。爆轰产物状态方程用来描述爆轰产物各状态量之间的关系,是爆轰过程数值仿真的基础方程之一。目前较为成熟的状态方程主要分为2类:一类是基于爆轰产物混合物化学组成的方程,如BKW(Becker-Kistiakowsky-Wilson)状态方程、LJD(Lennard-Jones-Devonshire)状态方程和JCZ(Jacobs-Cowperthwaite-Zwisler)状态方程等;另一类则不考虑爆轰产物的化学组成,如 γ 率状态方程和JWL(Jones-Wilkins-Lee)状态方程等^[1]。其中,JWL状态方程在数值仿真中的应用最为广泛。

水下爆炸力学作为爆炸力学的一个重要分支,其研究内容涉及冲击波在水中的传播和衰减规律、气泡脉动、边界效应以及结构响应等方面^[2]。水下爆炸试验研究历史悠久,早在20世纪40年代末,Cole^[3]就对此进行了大量研究和总结,对后续研究产生了深远的影响。随着计算机性能的提升和数值算法的发展,数值仿真技术因其低成本、参数可灵活调整等优势,在水下爆炸研究中的应用日益增多。在军事和船舶工业领域,研究人员主要关注冲击波对结构的响应和毁伤效应。例如,Gan等^[4]通过CEL(coupled Eulerian-Lagrangian)方法研究了矩形截面船体梁在水下爆炸时的变形机制;Jin等^[5]开发了一种耦合RKDG(RungeKutta discontinuous Galerkin)、边界元法(boundary element method, BEM)和有限元法(finite element method, FEM)的数值程序,用于研究夹层结构的动力响应;李彬等^[6]利用标定的新型炸药JWL方程参数计算了炸药对舰船结构的毁伤特性;王杰等^[7]提出一种面向大变形壳理论的流固耦合数值方法,并以此完成了水下爆炸整船结构毁伤过程的数值仿

真。同时,水下爆炸在工程应用方面也极为广泛。例如,陈涛等^[8]利用数值仿真研究了不耦合系数对水下破岩效果的影响;吴亮等^[9]利用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)-离散元法(discrete element method, DEM)研究台阶爆破过程中破碎块体复杂的受力运动及其堆积过程。此外,众多学者在如何防护水下爆炸冲击波的影响方面也进行了深入研究^[10-11]。

在水下爆炸等涉及炸药的数值仿真中,通常使用炸药的材料属性和爆轰产物状态方程进行计算。此时,爆轰产物状态方程参数的大小对仿真结果的准确性具有重要影响。由于JWL状态方程是通过试验和相应的数值仿真不断调整参数而得到的,本身具有不确定性^[12-14],不同方法标定出的参数存在一定的变异性,同时JWL状态方程参数变化会显著影响到相同工况下的分析结果^[15-16]。然而,关于JWL状态方程参数变化对水下爆炸特别是水下冲击波规律方面的影响研究尚不多见,分析其变化对仿真结果的影响具有重要意义。

文中研究采用ANSYS/LS-DYNA显式动力学软件,基于一维任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)数值模型,首先进行网格无关性分析,在此基础上研究JWL状态方程各特征参数对水下爆炸冲击波峰值和比冲量的影响,并拟合其公式,为水下爆炸数值仿真中JWL方程参数取值提供参考。

1 JWL状态方程参数及其关系

在爆炸仿真领域中,直接对炸药爆轰过程进行数值计算是一种常见的方法。这一过程需要明确爆炸材料基本参数以及相应的爆轰产物状态方程。在ANSYS/LS-DYNA软件中,炸药材料通过*`MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN`材料模型进行描述,其主要参数包括密度、爆速和爆压。同时,爆轰产物满足如下JWL状态方程

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: P 为爆轰产物压力; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为常量参数; E_0 为单位体积初始内能; V 为相对比容, 即现时比容 v 与初始比容 v_0 之比。该方程式右侧 3 项分别在高、中、低压段起主要作用, 同时其过 CJ(Chapman-Jouguet)点的等熵形式为

$$P = A e^{-R_1 V} + B e^{-R_2 V} + C V^{-(\omega+1)} \quad (2)$$

式中, C 为常量参数。为了保证压力为正值, 应满足 $A > 0$, $B > 0$, $C > 0$, 同时为了满足 P - V 关系 $\Delta P / \Delta V \leq 0$, 应有 $R_1 \geq 0$, $R_2 \geq 0$ 。

依据等熵线与瑞利线(Rayleigh)相切于 CJ 点, 同时符合 Hugoniot 关系式, 可列出如下 3 个方程

$$A R_1 e^{-R_1 V_{CJ}} + B R_2 e^{-R_2 V_{CJ}} + C(\omega + 1) V_{CJ}^{-(\omega+2)} = \rho_0 D^2 \quad (3)$$

$$A e^{-R_1 V_{CJ}} + B e^{-R_2 V_{CJ}} + C V_{CJ}^{-(\omega+1)} = P_{CJ} \quad (4)$$

$$\frac{A}{R_1} e^{-R_1 V_{CJ}} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V_{CJ}} + \frac{C}{\omega} V_{CJ}^{-\omega} - E_0 = \frac{1}{2} P_{CJ} (1 - V_{CJ}) \quad (5)$$

式中, P_{CJ} 与 V_{CJ} 分别为爆轰 CJ 点的压力和相对比容。由式(3)~(5)可知, A 、 B 、 C 、 R_1 、 R_2 和 ω 这 6 个参数并非完全独立, 它们之间存在一定的相容关系, 当其中 3 个参数已知时, 其余 3 个参数可通过上述方程计算得出。

2 水下爆炸数值仿真

2.1 数值模型

采用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立球形装药水下自由场爆炸模型。为保证计算准确性, 选用 ALE 算法一维球对称模型, 如图 1 所示。由于爆轰过程是强瞬态过程, 其冲击波压力的计算结果对网格尺寸较为敏感^[17-18], 因此文中首先进行了网格无关性分析。TNT 炸药参数采用 AUTODYNA 提供的标准 JWL 状态方程^[19], 具体参数见表 1。炸药处水深 10 m, 海水采用 MAT_NULL 模型和 Grünesien 状态方程, 其参数见表 2。



图 1 一维球对称计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of one-dimensional spherical symmetric numerical model

表 1 炸药材料和 JWL 状态方程参数

Table 1 Material and JWL equation of state parameters of explosive

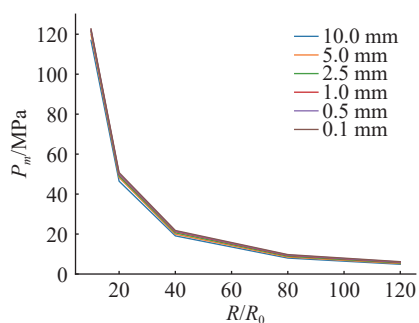
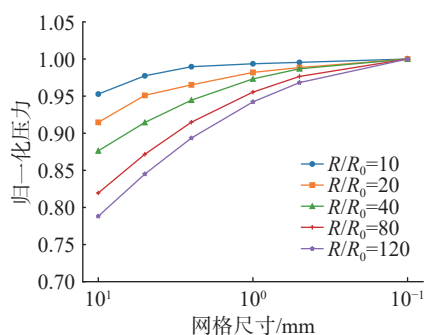
类别	含义	符号	数值
炸药材料参数	炸药密度/(g·cm ⁻³)	ρ_E	1.63
	炸药爆速/(m·s ⁻¹)	D	6 930
	爆轰CJ点压力/GPa	P_{CJ}	21
	炸药单位体积初始内能/GPa	E_0	7
JWL常量参数	A /GPa		373.77
	B /GPa		3.747
	R_1		4.15
	R_2		0.9
	ω		0.35

表 2 海水材料和 Grünesien 状态方程参数

Table 2 Material and Grünesien equation of state parameters of seawater

类别	含义	符号	数值
海水材料	海水密度/(g·cm ⁻³)	ρ_w	1.025
	声速/(m·s ⁻¹)	C	1 520
	海水单位体积初始内能/MPa	E_{w0}	0.7
Grünesien常量参数	S_1		1.92
	S_2		0
	S_3		0
	γ_0		0.28
	A		0

模型计算域长 10 m, 为减少药量对结果的影响, 根据水下爆炸相似理论, 将装药的全部尺寸放大或缩小一定倍数, 在球形装药相同爆心距离与装药半径比(R/R_0)处, 理论上峰值压力应保持一致。记录各模型在 R/R_0 分别为 10、20、40、80 和 120 处的压力值, 装药半径 $R_0=5$ cm, 一维梁单元网格尺寸分别取 10.0、5.0、2.5、1.0、0.5 和 0.1 mm, 且在整个模型上均匀分布。不同 R/R_0 处的冲击波峰值压力 P_m 如图 2 所示。由图可知, 不同尺寸计算得到的峰值压力数据较为接近, 且网格尺寸越小, 数值耗散越小, 计算所得的压力值越大。为精细化网格尺寸的影响, 以 0.1 mm 网格的压力峰值数据作为基准值进行归一化处理, 不同网格尺寸下的压力如图 3 所示。由图可知, 距离爆心越近, 网格的影响越小, 距离增大时数值耗散增大。当单元尺寸为 0.5 mm 时, 即使在较远距离, 与 0.1 mm 数据的计算误差在 3% 以下。结合计算量与准确性考虑, 后续数值仿真中网格尺寸选定为 0.5 mm。

图 2 不同网格尺寸下压力随 R/R_0 变化曲线Fig. 2 Curves of pressure versus R/R_0 under different mesh sizes图 3 不同 R/R_0 下归一化压力与网格尺寸关系Fig. 3 The relationship between normalized pressure and mesh size under different R/R_0

2.2 数值仿真结果

为了验证数值模型的有效性和准确性,将上述模型计算结果与 Cole 公式^[20]进行对比。Cole 公式通过大量实验总结了 TNT 水下爆炸冲击波峰值及其衰减关系,具有较高的准确性。经 Zamshlyayev^[20]改进后,关于冲击波峰值压力两者在中远场的公式一致,即

$$P_m = 52.4 \times \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.13} \quad (6)$$

式中: W 为 TNT 装药质量; R 为爆心到测点的距离。同时,测点处的冲击波压力衰减曲线参考 Cole 和 Орленко 的理论^[3, 21],其表达式为

$$P = \begin{cases} P_m e^{-t/\theta} & 0 \leq t < \theta \\ P_m \cdot 0.638 \cdot \frac{\theta}{t} & \theta \leq t < (5 \sim 10)\theta \end{cases} \quad (7)$$

式中: t 为时间; θ 为时间衰减常数,表示压力从 P_m 下降到 P_m/e 时所需要的时间,满足如下关系

$$\theta = B_1 \left(\frac{R}{R_0} \right)^\beta \cdot \frac{R_0}{C_w} \quad (8)$$

式中: R_0 为装药半径; C_w 为水中声速,文中取 1520 m/s; B_1 和 β 为系数,对 TNT 球形装药来说, $B_1=1.4$, $\beta=0.24$ 。

图 4 展示了上述模型采用的标准 JWL 状态方程参数计算出的 P_m 随 R 衰减的曲线,记为“ P_{standard} ”,同时与 Cole 公式预测的峰值压力 P_{Cole} 进行对比,2 条曲线偏差较小,验证了此数值模型对峰值压力计算的准确性。此外,依据经验公式(7),绘制 $R=1.5$ m (即 $R/R_0=30$) 测点处的压力时程曲线,并与计算出的该点压力曲线进行对比,如图 5 所示,2 条曲线差别很小,进一步验证了模型的准确性。

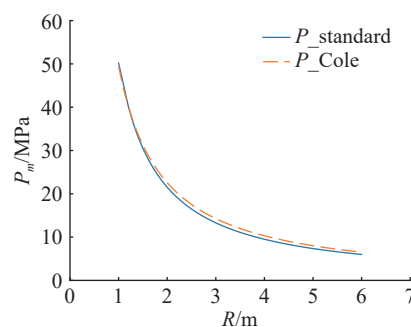
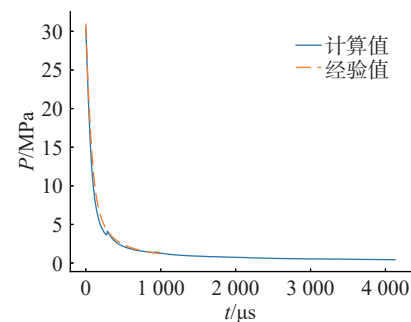


图 4 数值模型与经验公式峰值压力对比图

Fig. 4 Comparison of peak pressure between numerical model and empirical formula

图 5 $R/R_0=30$ 处压力时程曲线对比图Fig. 5 Comparison of pressure-time curves at $R/R_0 = 30$

3 JWL 状态方程参数对水下冲击波影响分析

以表 1 中 JWL 状态方程参数作为标准值,采用上节中确定的一维数值模型进行参数敏感性分析,理论上由于 JWL 方程只有 3 个独立的变量,其中任一变量的改变有可能影响其他变量,这里为了分别考虑各参数的影响,采用控制变量法,改变其中 1 个参数的取值时其余参数保持为初始值不

变,在此基础上,分别计算 JWL 状态方程各参数在不同取值时对水下冲击波压力峰值、比冲量以及比冲击波能的影响,其中冲击波比冲量 I 和比冲击波能 E_s 的计算式^[22]分别为

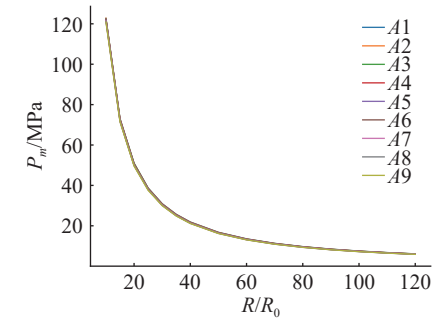
$$I = \int_0^{6.7\theta} P(t)dt \quad (9)$$

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{W\rho_w C_w} \int_0^{6.7\theta} P^2(t)dt \quad (10)$$

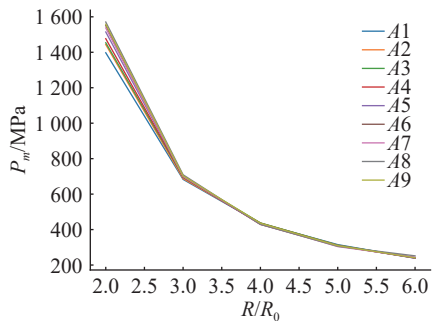
在 JWL 状态方程中, A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 和 E_0 等 6 个参数初始值大小不一,为了减少其参数在每个水平内增量大小影响最终分析结果,并基于一定的先验知识,对各参数的取值范围有一定的限制^[23-24],使其不至于取到过于不合理的参数值,文中考虑按比例增加和减少各参数的取值,以 10% 为基准,分别减少和增加至 40%,包含初始值在内每个参数共 9 组取值。

3.1 参数 A 的影响

根据上述取值方式,参数 A 取值依次为 224.262、261.639、299.016、336.393、373.770、411.147、448.524、485.901 和 523.278,对应编号 A1~A9,其余参数保持初始值不变,计算得到的 P_m 随 R/R_0 的衰减曲线如图 6 所示。由图 6(a)可知,在中远场范



(a) 中远场范围

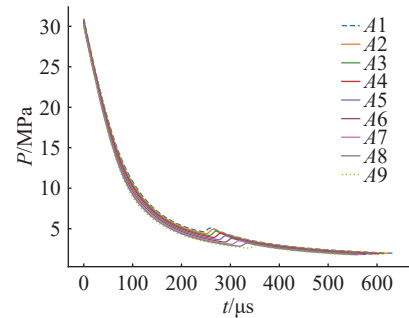


(b) 近场范围

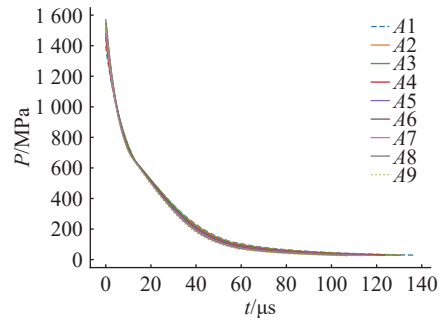
图 6 不同 A 值下峰值压力-距离曲线
Fig. 6 Peak pressure-distance curves under different values of A

围($R/R_0=20\sim120$), 参数 A 的取值变化对 P_m 的影响很小,甚至随着 A 值增大 P_m 反而略有下降。在 $R/R_0=10$ 处, P_m 在 $A2=261.639$ 时取得最大值 122.8 MPa。从理论角度看,参数 A 主要控制爆轰产物高压段的压力特性,而水下冲击波衰减极快,因此需同时结合近场结果进一步分析。如图 6(b)所示,在近场范围($R/R_0=2.0\sim6.0$), A 值的增加会显著影响 P_m 的大小,并且该影响随 R/R_0 的增加而迅速减弱,体现了参数 A 对高压段的主导作用。

冲量的大小同时取决于峰值压力和作用持时。图 7 为中远场 $R/R_0=30$ 处和近场 $R/R_0=2$ 处不同 A 值对应的压力时程曲线,其中虚线和点线分别为最小 A 值(A1)和最大 A 值(A9)的结果。由图可知,在中远场,不同 A 值下的压力峰值近乎一致,但 A 值越大压力衰减越快;近场处,峰值压力随 A 值的增加而明显增加,且同样遵循“ A 值越大、衰减越快”的规律。依据式(9)求取不同 A 值下测点的比冲量,结果如图 8 所示,比冲量随着 A 值的增大呈近似线性下降的趋势,图中的拟合线进一步量化了这一规律(图中等式为拟合关系式)。



(a) $R/R_0=30$



(b) $R/R_0=2$

图 7 不同 A 值下压力时程曲线

Fig. 7 Pressure-time curves under different values of A

3.2 参数 B 的影响

参数 B 取值依次为 2.248 2、2.622 9、2.997 6、

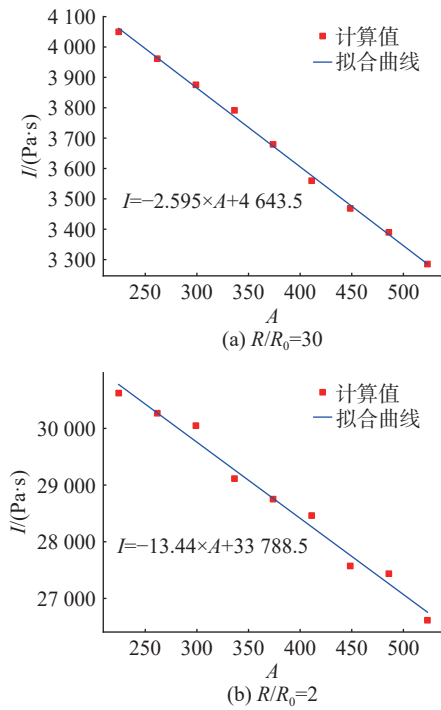
图 8 比冲量随 A 值变化曲线

Fig. 8 Curves of specific impulse velocity with values of A 3.372 3、3.747 0、4.121 7、4.496 4、4.871 1 和 5.245 8, 对应编号 $B1 \sim B9$, 其余参数保持初始值不变, 计算得到的 P_m 随 R/R_0 衰减曲线如图 9 所示。由图 9(a)

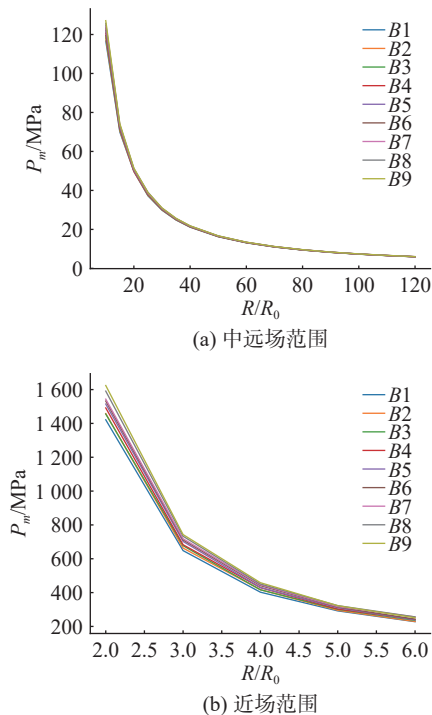
图 9 不同 B 值下峰值压力随 R/R_0 变化曲线

Fig. 9 Curves of peak pressure versus R/R_0 under different values of B

可知, 在中远场范围($R/R_0=20 \sim 120$), 参数 B 的取值变化对 P_m 影响较小, 但随着 B 值的增大 P_m 反而略有上升。在 $R/R_0=10$ 处, P_m 在 B 最大时($B9=5.245 8$)取得最大值 127.1 MPa。由图 9(b)可知, 在近场范围($R/R_0=2.0 \sim 6.0$) P_m 随 B 值增加较为明显, 且该影响随着 R/R_0 的增加会缓慢减小, 体现了参数 B 对中压段的调控作用。

图 10 为中远场 $R/R_0=30$ 处和近场 $R/R_0=2$ 处不同 B 值对应的压力时程曲线。由图可知, 与参数 A 规律类似, 在中远场不同 B 值下的压力峰值差异很小, 但 B 值越大压力衰减越快; 近场处同样符合该规律。 $R/R_0=30$ 处的比冲量大小与 B 值的关系如图 11 所示, 比冲量随着 B 值的增加呈近似线性下降趋势, 拟合线量化了两者的关联。

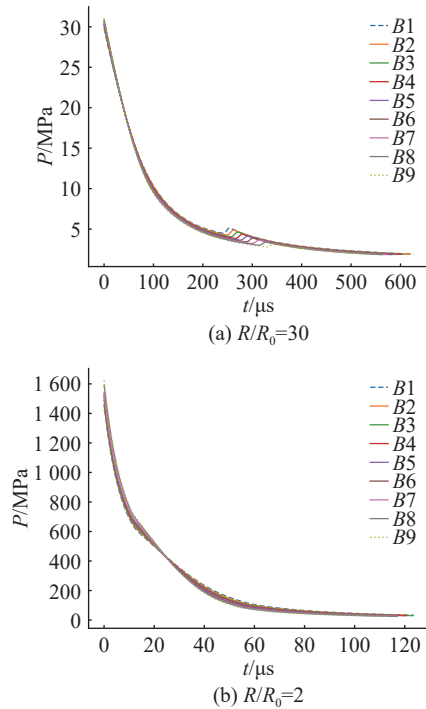
图 10 不同 B 值下压力时程曲线

Fig. 10 Pressure-time curves under different values of B

3.3 参数 R_1 的影响

参数 R_1 取值依次为 2.490、2.905、3.320、3.735、4.150、4.565、4.980、5.395 和 5.810, 分别编号 $R_11 \sim R_19$, 其余参数保持初始值不变, 得到的 P_m 随 R/R_0 衰减曲线如图 12 所示。由图 12(a)可知, 在中远场范围($R/R_0=20 \sim 120$), 除最小值 R_11 外, R_1 的大小对 P_m 影响不大, 在 $R/R_0=10$ 处, P_m 在 R_1 最小时($R_11=2.490$)取得最大值 152.1 MPa。由图 12(b)可知, 在

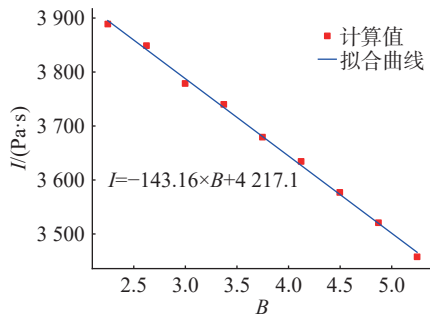
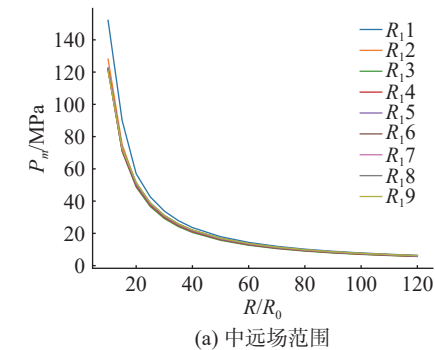
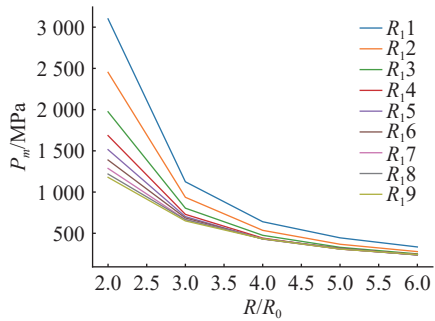
图 11 比冲量随 B 值变化曲线

Fig. 11 Curves of specific impulse velocity with values of B

近场范围($R/R_0=2.0\sim6.0$), 随着 R_1 的减小 P_m 的增幅极为显著, 最大值较标准值提升超过 2 倍, 印证了 R_1 对高压段压力衰减特性的关键作用。



(a) 中远场范围



(b) 近场范围

图 12 不同 R_1 值下峰值压力随 R/R_0 变化曲线

Fig. 12 Curves of peak pressure versus R/R_0 under different values of R_1

图 13 为中远场 $R/R_0=30$ 处和近场 $R/R_0=2$ 处不同 R_1 值对应的压力时程曲线。在中远场, 压力峰值总体符合“压力越大, 衰减越快”的规律, 仅部分取值略有反常; 近场处, R_1 值越大, 峰值更高且衰减更快。 $R/R_0=30$ 处的比冲量大小与 R_1 值的关系如图 14 所示。随着参数 R_1 的增加, 比冲量呈线性上升趋势, 但当 R_1 极小时, 因峰值压力激增, 即使衰减加快, 总冲量仍显著偏高。

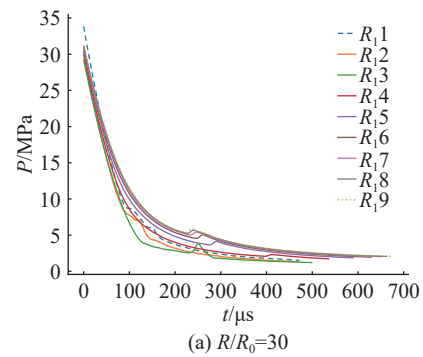
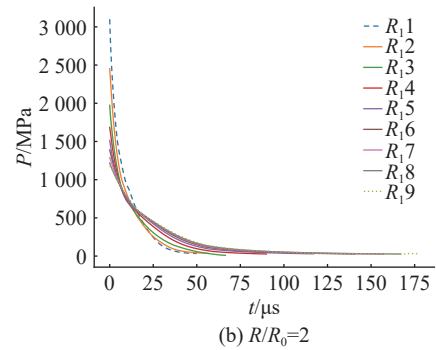
(a) $R/R_0=30$ (b) $R/R_0=2$ 图 13 不同 R_1 值下压力时程曲线

Fig. 13 Pressure-time curves under different values of R_1

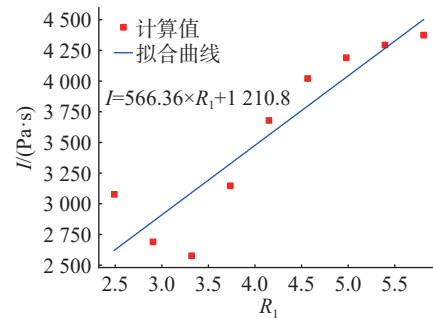
图 14 比冲量随 R_1 值变化曲线

Fig. 14 Curves of specific impulse velocity with values of R_1

3.4 参数 R_2 的影响

参数 R_2 的取值依次为 0.54、0.63、0.72、0.81、0.90、0.99、1.08、1.17 和 1.26, 对应编号 $R_2,1\sim R_2,9$, 其余参数保持初始值不变, 计算得到的 P_m 随 R/R_0 衰减曲线如图 15 所示。分析可知, R_2 对 P_m 的影响在中远场和近场均较明显, R_2 越小 P_m 越大, 且相较于参数 A 、 B , 其影响衰减较慢, 在 $R/R_0=10$ 处, 在 R_2 最小时($R_2,1=0.54$) P_m 取得最大值 143.2 MPa, 从理论上讲, R_2 主要控制中压段压力, 因此能影响更大距离范围的 P_m 值。

在冲击波比冲量方面, 图 16 分别为中远场 $R/R_0=30$ 处和近场 $R/R_0=2$ 处不同 R_2 值的压力时程

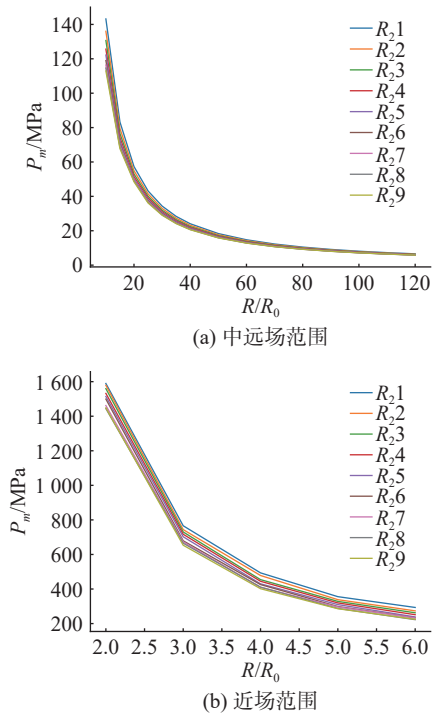


图 15 不同 R_2 值下峰值压力随 R/R_0 变化曲线
Fig. 15 Curves of peak pressure versus R/R_0 under different values of R_2

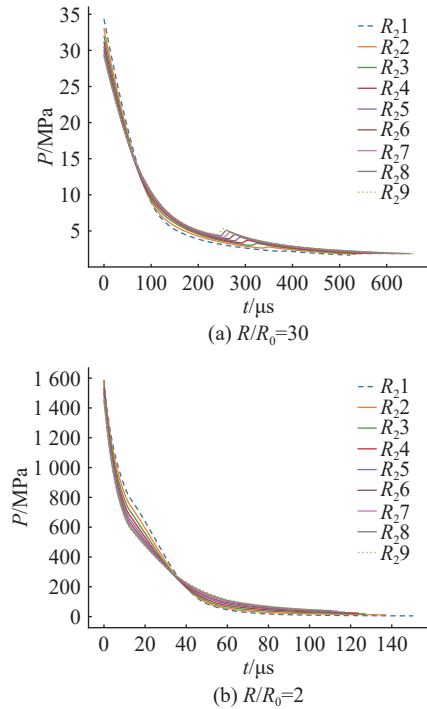


图 16 不同 R_2 值下压力时程曲线
Fig. 16 Pressure-time curves under different values of R_2

曲线。在中远场和近场, 均符合“压力峰值越大, 衰减越快”的规律, 仅在近场一定压力范围内出现

衰减速率放缓的现象。 $R/R_0=30$ 处的比冲量大小与 R_2 值的关系如图 17 所示, 随着 R_2 的增加比冲量呈近似线性上升趋势, 拟合曲线表明了 R_2 对中压段累积效应的显著调控作用。

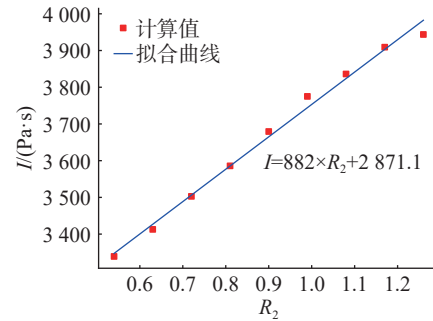


图 17 比冲量随 R_2 值变化曲线
Fig. 17 Curves of specific impulse velocity with values of R_2

3.5 参数 ω 的影响

参数 ω 取值依次为 0.210、0.245、0.280、0.315、0.350、0.385、0.420、0.455 和 0.490, 对应编号 $\omega_1 \sim \omega_9$, 其余参数保持初始值不变, 计算得到的 P_m 随 R/R_0 衰减曲线如图 18 所示。由图 18(a)可知, 在中远场范围($R/R_0=20 \sim 120$), ω 的变化对 P_m 影响不大, P_m 仅随 ω 值的增大而略微增大; 在 $R/R_0=10$ 处, ω

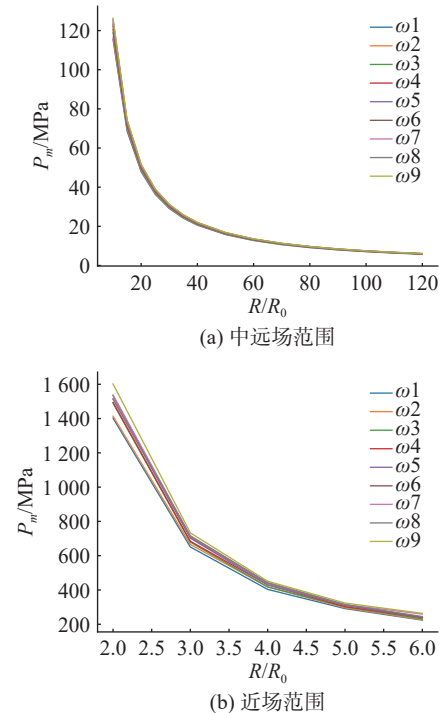


图 18 不同 ω 值下峰值压力-距离曲线
Fig. 18 Peak pressure-distance curves under different values of ω

最大时($\omega=0.490$) P_m 取得最大值 126.4 MPa。图 18(b)显示,在近场范围($R/R_0=2.0\sim6.0$), ω 在标准值附近小幅度变化时对 P_m 变化影响微弱,只在其取值较标准值改变较大时才会显著影响 P_m 。从JWL方程物理意义看, ω 关联低压段压力,因此对 P_m 影响弱于前两项。

图 19 分别为中远场 $R/R_0=30$ 处和近场 $R/R_0=2$ 处不同 ω 值的压力时程曲线,无论中远场还是近场,压力时程曲线均较为接近,表明 ω 对冲击波各参数的影响不大。 $R/R_0=30$ 处的比冲量与 ω 值的关系如图 20 所示,随着 ω 的增大,比冲量呈先增加后减小的抛物线趋势,且整体变化幅度较小,进

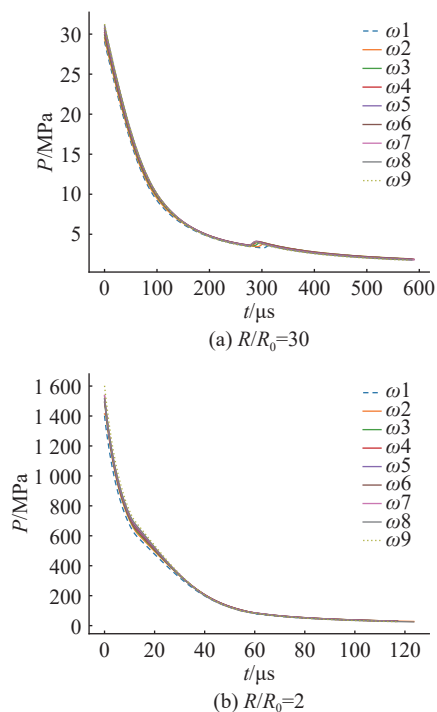


图 19 不同 ω 值下压力时程曲线

Fig. 19 Pressure-time curves under different values of ω

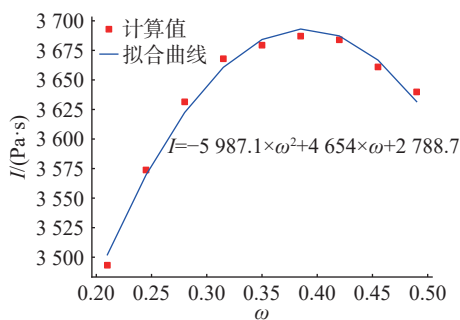


图 20 比冲量随 ω 值变化曲线

Fig. 20 Curves of specific impulse velocity with values of ω

一步证明了 ω 对冲击波效应的影响较弱。

3.6 参数 E_0 的影响

参数 E_0 的取值依次为 4.2、4.9、5.6、6.3、7.0、7.7、8.4、9.1 和 9.8, 依次编号 $E_01\sim E_09$, 其余参数初始值不变, 计算得到 P_m 随 R/R_0 衰减曲线如图 21 所示。分析可知, E_0 对 P_m 的影响在中远场和近场均极为显著, E_0 越大, P_m 也越大, 在 $R/R_0=10$ 处, E_0 最大时($E_09=9.8$) P_m 取得最大值 139.7 MPa。从相容方程(5)可知, E_0 通过 Hugoniot 关系式可影响参数 A 、 B 的计算, 因此其作用比参数 ω 更显著。

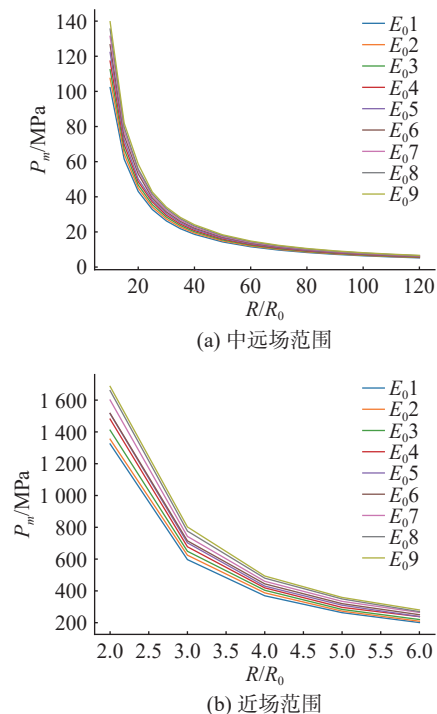


图 21 不同 E_0 值下峰值压力随 R/R_0 变化曲线

Fig. 21 Curves of peak pressure versus R/R_0 under different values of E_0

图 22 分别为中远场 $R/R_0=30$ 处和近场 $R/R_0=2$ 处不同 E_0 值的压力时程曲线, 与其他参数规律不同, 无论在中远场还是近场, 压力峰值越大, 衰减反而越慢。 $R/R_0=30$ 处的比冲量与 E_0 值的关系如图 23 所示。比冲量随着 E_0 值的增加呈显著线性上升趋势, 拟合曲线表明其增幅明显大于其他参数, 表明 E_0 是调控冲击波累积效应的核心参数。

3.7 综合分析

以上分别讨论了 JWL 状态方程参数 A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 和 E_0 对水下爆炸冲击波计算的影响, 在此对其结果进行统一归纳分析。

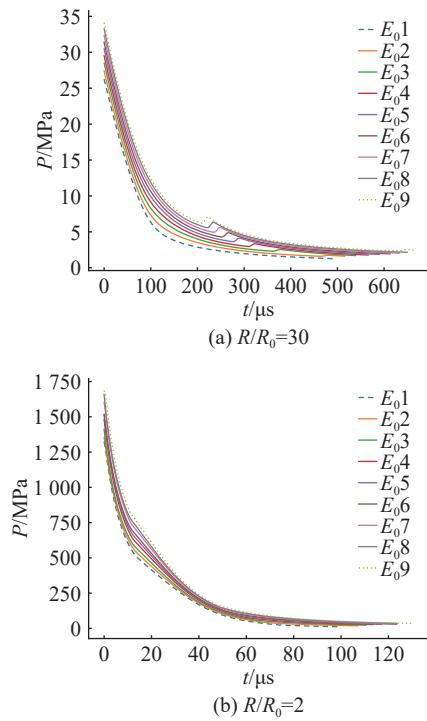
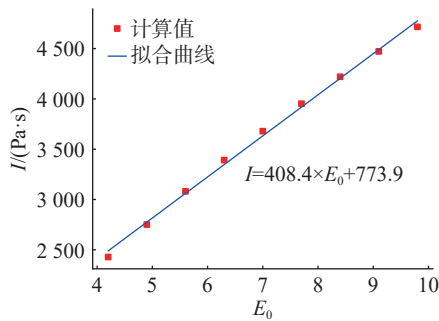
图 22 不同 E_0 值下压力时程曲线Fig. 22 Pressure-time curves under different values of E_0 图 23 比冲量随 E_0 值变化曲线Fig. 23 Curves of specific impulse velocity with values of E_0

图 24 展示了近场($R/R_0=2$)和中远场($R/R_0=10$)处的 P_m 随各参数的变化情况。如图所示, 在近场处, 参数 R_1 对峰值压力的影响最为显著, 且其作用强度远大于其他参数; 其次是 E_0 ; A 、 B 、 R_2 和 ω 的影响较为接近且相对较小。在中远场, E_0 的影响最为显著, 且在同水平值的增幅下, P_m 的增幅也较为一致, 其次是 R_2 ; B 和 ω 的影响较弱; A 与 R_1 的影响最小, 仅 R_1 取最小值时出现异常波动, 这是由于 A 与 R_1 主要控制高压段压力, 该部分压力随着距离增大衰减极快。

图 25 对比了近场($R/R_0=2$)和中远场($R/R_0=30$)处的比冲量随各参数变化的情况。2 处均呈现 E_0

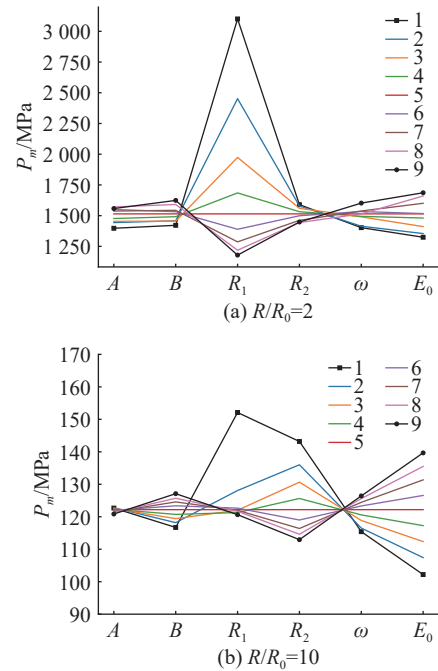


图 24 各参数不同取值下峰值压力变化曲线

Fig. 24 Peak pressures curves under different values of each parameter

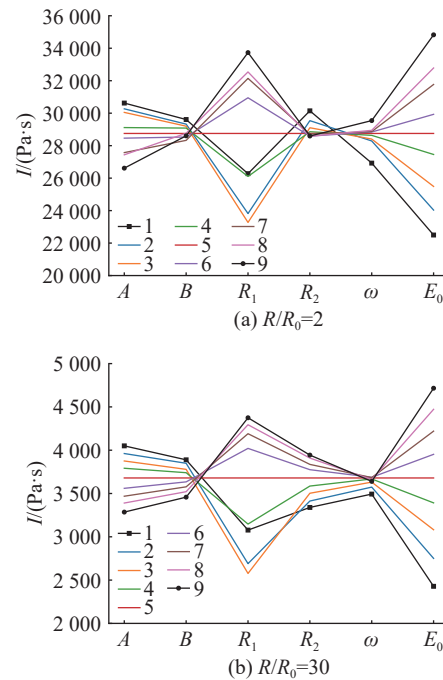


图 25 各参数不同取值下比冲量变化曲线

Fig. 25 Specific impulse curves under different values of each parameter

影响最大、其次是 R_1 、之后为 A 的规律; 剩余参数中, 在近场中控制中压段的 B 和 R_2 影响最小, 中远场中 ω 影响最小, R_2 的影响略大于 B 。

同时依据式(10),对水下爆炸比冲击波能进行了计算,图 26 分别显示了近场($R/R_0=2$)和中远场($R/R_0=30$)处的比冲击波能随各参数变化的情况。与比冲量类似, E_0 的影响最大;近场范围内 R_2 的影响相对较大,且 R_1 在取值较低时比冲击波能会出现显著激增;中远场范围内,在 E_0 之后的主要影响参数是 R_2 与 A ,其他参数的影响均不明显。

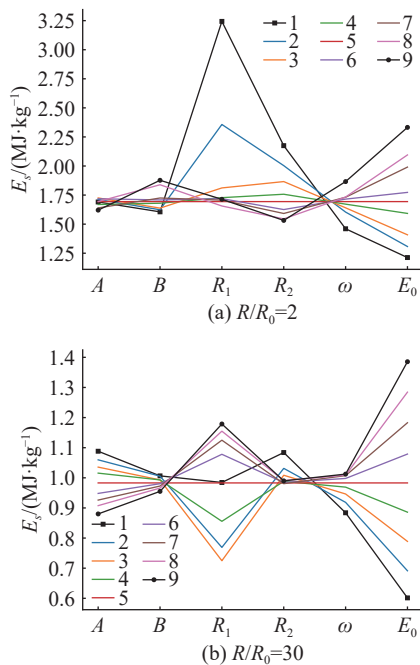


图 26 各参数不同取值下比冲击波能变化曲线

Fig. 26 Specific shock energy curves with different values of each parameter

4 结束语

文中利用 ALE 数值模型计算了 JWL 状态方程各参数在同比例变化情况下对水下自由场爆炸冲击波数值仿真结果的影响规律。得到如下主要结论:

1) 在一定合理范围内,参数的改变对水下冲击波的峰值压力、衰减关系和比冲量均有显著影响,且随着距爆心距离的不同,各参数的影响效果呈现明显差异。

2) 在水下爆炸冲击波峰值压力方面,近场范围内, R_1 的影响最大,其次是 E_0 ,其余 4 个参数的影响较为接近;中远场范围内, E_0 的影响最为显著,其次是 R_2 , A 与 R_1 的影响较小,且峰值压力越大,衰减速率越快。

3) 冲击波比冲量方面,不同爆心距下 E_0 和 R_1

的影响最显著,其次是 A ;近场处 B 和 R_2 的影响最小,且 R_2 的影响略大于 B ;中远场处 ω 的影响最小。

4) 比冲击波能方面, E_0 的影响最为显著;近场处 R_2 的影响相对较大,且 R_1 取低值时比冲击波能会出现显著激增;中远场处, E_0 之后的主要影响参数为 R_2 和 A ,其他参数的作用不明显。

文中研究可为水下爆炸数值仿真中 JWL 状态方程参数的合理取值提供参考。在实际应用中,可针对不同结构对压力峰值、比冲量或比冲击波能作用的敏感性,合理优化各参数的取值。文中研究集中于 TNT 炸药,未来可进一步扩展至非理想炸药及其他研究场景。

参考文献:

- [1] 温丽晶,段卓平,张震宇,等.采用遗传算法确定炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数[J].爆炸与冲击,2013,33(S1): 130-134.
WEN L J, DUAN Z P, ZHANG Z Y, et al. Determination of the JWL EOS parameters for detonation products using genetic algorithm[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(S1): 130-134.
- [2] 王树山,贾曦雨,高源,等.水下爆炸动力学的起源、发展与展望[J].水下无人系统学报,2023,31(1): 10-29.
WANG S S, JIA X Y, GAO Y, et al. Underwater explosion dynamics: Its origin, development, and prospect[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2023, 31(1): 10-29.
- [3] COLE R H. Underwater explosions[M]. Princeton, NJ, USA: Princeton University Pr., 1948.
- [4] GAN N, YAO X L, LIU L T, et al. Research on overall damage characteristics of a hull girder under explosion bubble collapse[J]. Ocean Engineering, 2019, 188: 106315.
- [5] JIN Z, YIN C, CHEN Y, et al. Dynamics of an underwater explosion bubble near a sandwich structure[J]. Journal of Fluids and Structures, 2019, 86: 247-265.
- [6] 李彬,田恒斗,刘文思,等. RDX 基含铝炸药 JWL-Miller 状态方程标定及对舰船结构的毁伤特性[J]. 火炸药学报, 2024, 47(8): 704-713.
LI B, TIAN H D, LIU W S, et al. Calibration of JWL-Miller equation of state for RDX-based aluminized explosives and damage characteristics to ship structures[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2024, 47(8): 704-713.
- [7] 王杰,王景焘,黄超,等.一种面向舰船结构毁伤的大变形流固耦合数值计算方法[J].计算力学学报,2024,41(2): 335-343.
WANG J, WANG J T, HUANG C, et al. A numerical method for fluid-structure interaction with large deformation towards the damage of warship structures[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(2): 335-

- 343.
- [8] 陈涛, 汪海波, 王丽敏, 等. 不耦合系数对水下爆破破岩效果影响的数值分析[J]. 工程爆破, 2022, 28(6): 25-32. CHEN T, WANG H B, WANG L M, et al. Numerical analysis of the influence of decoupling coefficient on rock breaking effect of underwater blasting[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(6): 25-32.
- [9] 吴亮, 余创, 梁志坚, 等. 基于 Fluent-EDEM 流固耦合算法的水下台阶爆破爆堆形成过程研究[J]. 爆破, 2023, 40(4): 37-43. WU L, YU C, LIANG Z J, et al. Study on formation process of underwater bench blasting pile based on fluid-structure coupling algorithm of Fluent-EDEM[J]. Blasting, 2023, 40(4): 37-43.
- [10] 杜明燃, 陈宇航, 陆少锋, 等. 基于正交试验法的气泡帷幕削波特性研究[J]. 高压物理学报, 2023, 37(6): 195-205. DU M R, CHEN Y H, LU S F, et al. Bubble curtain clipping characteristics based on orthogonal test method[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(6): 195-205.
- [11] 范怀斌, 陆少锋, 莫崇勋, 等. 基于 ANSYS LS-DYNA 水下爆破阻波帘的设计与研究[J]. 爆破, 2023, 40(2): 138-143. FAN H B, LU S F, MO C X, et al. Design and research of wave blocking curtain for underwater blasting based on ANSYS LS-DYNA[J]. Blasting, 2023, 40(2): 138-143.
- [12] 徐辉, 孙占峰, 李庆忠. 标准圆筒试验数据处理和不确定度评定方法[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(5): 626-630. XU H, SUN Z F, LI Q Z. Data processing and uncertainty evaluation methods for standard cylinder tests[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(5): 626-630.
- [13] 王言金, 张树道, 李华, 等. 炸药爆轰产物 Jones-Wilkins-Lee 状态方程不确定参数[J]. 物理学报, 2016, 65(10): 245-250. WANG Y J, ZHANG S D, LI H, et al. Uncertain parameters of Jones-Wilkin-Lee equation of state for detonation products of explosive[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(10): 245-250.
- [14] 陈华, 周海兵, 刘国昭, 等. 圆筒试验 JWL 状态方程参数的贝叶斯标定[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(4): 585-590. CHEN H, ZHOU H B, LIU G Z, et al. Bayesian calibration for parameters of JWL equation-of-state parameters in cylinder tests[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(4): 585-590.
- [15] 刘全, 王瑞利, 林忠, 等. 爆轰计算 JWL 状态方程参数的不确定度[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(6): 647-654. LIU Q, WANG R L, LIN Z, et al. Uncertainty of JWL EOS parameters in explosive numerical simulation[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(6): 647-654.
- [16] 郝礼楷, 顾文彬, 谢兴博, 等. 基于 BP 神经网络预测炸药 JWL 状态方程参数对 EFP 速度的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(6): 47-55. HAO L K, GU W B, XIE X B, et al. Prediction of the influence of parameters of JWL equation of state on EFP velocity based on BP neural network[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(6): 47-55.
- [17] 敖启源, 卢熹, 姜智雅, 等. 水下爆炸冲击波数值仿真精度研究[J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(1): 158-165. AO Q Y, LU X, JIANG Z Y, et al. Numerical simulation accuracy study of underwater explosion shock waves[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2024, 32(1): 158-165.
- [18] 闫秋实, 常松. 水下爆炸三维数值模拟特征参量敏感性分析[J]. 北京工业大学学报, 2023, 49(10): 1099-1108. YAN Q S, CHANG S. Underwater explosion 3D numerical simulation characteristic parameter sensitivity analysis[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2023, 49(10): 1099-1108.
- [19] 崔浩, 郭锐, 宋浦, 等. 基于遗传算法辨识炸药 JWL 状态方程参数的研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(9): 174-180, 209. CUI H, GUO R, SONG P, et al. Research on the identification of JWL equation of state parameters of explosives based on genetic algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(9): 174-180, 209.
- [20] 陈兴, 周兰伟, 李福明, 等. 爆炸深度对装药水下载荷的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(8): 79-84. CHEN X, ZHOU L W, LI F M, et al. Research on influence of depth of charge on underwater explosion load[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(8): 79-84.
- [21] JИП奥连科. 爆炸物理学[M]. 孙承伟, 译. 北京: 科学出版社, 2011.
- [22] 徐庆涛, 马宏昊, 周章涛, 等. 基于压力-冲量曲线的水下爆炸压力-时间公式[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(8): 159-166. XU Q T, MA H H, ZHOU Z T, et al. Pressure-time formula for underwater explosion based on pressure-impulse curve[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(8): 159-166.
- [23] 李科斌, 董新龙, 李晓杰, 等. 水下爆炸实验法在工业炸药 JWL 状态方程测定中的应用研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(3): 488-494. LI K B, DONG X L, LI X J, et al. Research on parameters determination of JWL EOS for commercial explosives based on underwater explosion test[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(3): 488-494.
- [24] JACKSON S I. Scaling of the detonation product state with reactant kinetic energy[J]. Combustion and Flame, 2018, 190: 240-251.

(责任编辑: 陈 曦)