

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0203

基于水下爆炸的爆轰产物 JWL 状态方程 确定方法研究*

焦俊杰, 单 锋, 王晗程, 祁妍洁, 潘绪超, 方 中, 程宇波, 贺小兰, 慈圣杰, 何 勇
(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了获得炸药爆轰产物状态方程, 对 RDX 炸药进行了水下爆炸气泡膨胀过程试验, 测试了水下爆炸气泡半径和冲击波阵面随时间的变化规律, 通过水下爆炸气泡膨胀过程中的能量守恒关系, 获得了基于水下爆炸试验的爆轰产物 JWL 状态方程确定方法, 分析了 RDX 炸药水下爆炸气泡膨胀和冲击波阵面运动过程, 测定了 RDX 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数, 并与圆筒试验获得的参数进行了比较。结果表明, 通过水下爆炸法和圆筒试验方法标定的 JWL 方程参数得到的气泡膨胀过程基本相同, 但水下爆炸法得到的气泡半径的计算值和实验值在低压阶段的偏差更小。该方法提供了一种更适用于水下爆炸的炸药爆轰产物状态方程的测定方法。

关键词: 水下爆炸; JWL; 状态方程; 气泡膨胀; 冲击波

中图分类号: O384 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Determination of JWL equation of state based on the detonation product from underwater explosion

JIAO Junjie, SHAN Feng, WANG Hancheng, QI Yanjie, PAN Xuchao, FANG Zhong,
CHENG Yubo, HE Xiaolan, CI Shengjie, HE Yong

(Mechanical Engineering College, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: The equation of state for the detonation products of explosives is one of the foundations in explosion physics. JWL equation of state has been widely applied to study the properties of various explosives. In order to obtain the equation of state of the detonation products, an underwater explosion method was used to study JWL equation of state for the detonation of RDX. It considered the explosion bubble expansion process based on the conservation of energy including E_{s0} (initial shock wave energy), E_{pt} (potential energy of water), E_c (kinetic energy of water) and E_r (energy loss by bubble expansion), which are related to the underwater explosion bubble radius ($R-t$) and shock wave front (R_s-t) measured in the underwater explosion experiments as functions of time. Based on the experimental results and using the same method to process the experimental data in cylinder experiment, the time functions of explosion bubble expansion radius and variation of shock wave front position were fitted and the parameters of the JWL equation of state for RDX detonation products were obtained. In order to analyze the accuracy of the parameters of the JWL equation of state obtained by the underwater explosion method, the time history of the underwater explosions bubble pulsating pressure wave was calculated using the bubble dynamics equation. It shows that the calculation results agree well with the bubble expansion radius and bubble pulsation period determined using the underwater explosion experiments in a pool. The calculated bubble radius obtained by the proposed measurement method has a smaller deviation from that obtained by the cylinder experimental value, especially in the low-pressure stage compare with the JWL

* 收稿日期: 2024-06-27; 修回日期: 2024-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(62201267, 12372334)

第一作者: 焦俊杰(1984—), 男, 博士, 副教授, jjj120@njjust.edu.cn

通信作者: 何 勇(1964—), 男, 博士, 教授, yhe1964@njjust.edu.cn

state parameters obtained from cylinder method. This method provides a testing approach for the equation of state of detonation products with low cost, reduced size limitations and a wide pressure range.

Keywords: underwater explosion; JWL; equation of state; bubble expansion; shock wave

爆轰产物状态方程是研究炸药性能的重要方法之一^[1]。圆筒试验法是目前测定爆轰产物驱动能力、标定 JWL 状态方程的最为成熟的方法, 已经被用于各种炸药性能的研究^[2-4]。然而, 圆筒试验法中的圆筒由于膨胀发生破裂, 爆轰产物会从中溢出, 因此, 利用圆筒试验进行标定的方法较难准确反映爆轰产物在低密度、低压力(小于 0.1 GPa)时的膨胀特性^[5]。为了避免爆轰产物溢出带来的影响, 水下爆炸试验法成为测定爆轰产物状态方程的另一种途径。该方法最早见于 Holton^[6] 的研究, 经过 Cook 等^[7] 和 Rigdon^[8] 的发展和改进, 形成一套成体系的测试方法, 被纳入美军军用标准 (MIL-STD-1751)。由于水下爆炸试验中被测炸药与外部介质(水)充分接触, 使得爆轰产物可以充分膨胀至很低的压力, 因此, 许多学者对水下爆炸测定 JWL 参数的方法进行了研究。杨凯等^[9]、沈飞等^[10] 和魏贤凤等^[11] 采用高速摄影对 TNT、含铝炸药和 PBX 炸药水中爆轰产物的膨胀位移曲线进行了试验研究, 并采用与圆筒试验类似的二维数值计算方法对炸药的 JWL 状态方程参数进行了确定。杨晨琛等^[5] 进一步从水中冲击波轨迹和波后压力时程曲线出发, 进行了由冲击波及其波后流场还原水气界面的逆特征线算法研究, 并通过爆轰产物状态方程的遗传算法获得了炸药的 JWL 方程参数。随后, 李科斌等^[12] 通过压导式连续电阻丝探针测得了工业改性铵油 ANFO 炸药的爆轰产物冲击波时程曲线, 并通过有限元仿真软件对其 JWL 状态方程参数进行了拟合。

综上所述, 现有的水下爆炸试验从水中冲击波轨迹和波后压力时程曲线出发, 通过冲击波及其波后流场还原水气界面的逆特征线算法确定爆轰产物状态方程, 但是没有充分考虑中压和低压阶段爆轰产物对气泡膨胀做功的影响。本文中, 基于水下爆炸气泡膨胀过程的能量守恒关系, 通过水下爆炸法获得相应的试验参数, 获得基于水下爆炸试验的爆轰产物 JWL 状态方程确定方法, 分析 RDX 炸药水下爆炸气泡膨胀和冲击波阵面运动过程, 测定 RDX 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数, 并与圆筒试验获得的参数进行比较, 以验证所提出的方法的适用性和准确性。

1 水下爆炸法 JWL 状态方程确定方法

水下爆炸试验法与圆筒试验的原理类似, 通过水下爆炸气泡膨胀过程中的能量守恒关系, 确定 JWL 状态方程。JWL 状态方程主要包括 3 项, 可视为高压、中压和低压 3 个阶段, 其形式为:

$$p_s = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + C/V^{1+\omega} \quad (1)$$

式中: p_s 为爆轰产物的压力, V 为爆轰产物的相对比容, A 、 B 、 C 、 R_1 、 R_2 和 ω 为待定参数。

由热力学关系可知:

$$E_s = - \int p_s dV \quad (2)$$

式中: E_s 为爆轰产物的等熵内能。式 (2) 经过转换可得到以等熵内能表示的 JWL 状态方程:

$$E_s = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{C}{\omega V^\omega} \quad (3)$$

水下爆炸气泡内爆轰产物膨胀过程满足能量守恒关系:

$$E_s = E_{s|V=1} - E_{s0} - E_{pt} - E_c - E_r \quad (4)$$

式中: $E_{s|V=1}$ 为等容情况下炸药释放能量, 即爆热 Q ; E_{s0} 为初始冲击波能, 由文献 [13-14] 可知, E_{s0} 约占爆热的 48% 左右。 E_{pt} 为气泡膨胀对静水压力做的功, 可表示为:

$$E_{pt} = \frac{4\pi}{3} p_{hyd} (R^3 - R_0^3) \quad (5)$$

式中: p_{hyd} 为炸药入水深度处的静水压力, R_0 为气泡初始半径, R 为气泡运动到某一时刻的半径。 E_c 为爆

炸气泡膨胀引起的水介质动能, 可表示为:

$$E_c = 2\pi\rho_1 R^4 \dot{R}^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_s} \right) \dot{R} \quad (6)$$

式中: R_s 为冲击波阵面的位置; \dot{R} 为气泡壁的速度; ρ_1 为气泡壁面和冲击波阵面之间水介质的密度, ρ_1 由 Tait 方程得到。 E_r 为气泡膨胀过程中向水中声辐射而产生的能量损失^[15], 可表示为:

$$E_r = \int \frac{4\pi\rho_1}{c} (R^2 \ddot{R} + 2R\dot{R}^2)^2 dt \quad (7)$$

式中: c 为水中的声速。

由式 (3)~(7) 可知, 水下爆炸气泡内爆轰产物做功与冲击波阵面和气泡边界的运动相关, 可通过观测水下爆炸图像得到气泡边界和冲击波阵面的运动过程, 从而将能量守恒关系式与气泡膨胀过程联系起来。将水下爆炸测试结果代入式 (3)~(7), 可解析求解出 JWL 状态方程的 6 个参数值。JWL 状态方程 (式 (3)) 右边 3 项, 可分别视为高压、中压和低压 3 个阶段的贡献项。在低压阶段 ($V \geq 6$), 可取:

$$E_s = \frac{C}{\omega V^\omega} \quad (8)$$

通过对低压阶段的试验参数进行计算, 可求解得到 C 和 ω 。在中压阶段 ($2 \leq V < 6$), 可取:

$$E_s = \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{C}{\omega V^\omega} \quad (9)$$

将中压阶段的试验参数代入式 (9), 可求解得到 B 和 R_2 。 A 和 R_1 可由 CJ (Chapman-Jouguet) 参数确定。在 CJ 点, 有:

$$Ae^{-R_1 V_{CJ}} + Be^{-R_2 V_{CJ}} + C/V_{CJ}^{\omega+1} = p_{CJ} \quad (10)$$

$$AR_1 e^{-R_1 V_{CJ}} + BR_2 e^{-R_2 V_{CJ}} + C(\omega + 1)/V_{CJ} = \rho_0 D_B^2 \quad (11)$$

$$V_{CJ} = \gamma/(\gamma + 1) \quad (12)$$

式中: p_{CJ} 为爆轰波 CJ 点的压力, ρ_0 为炸药的密度, D_B 为炸药的爆速, γ 为多方指数。通过求解出的 C 、 ω 、 B 和 R_2 , 可求得 A 和 R_1 。

2 水下爆炸试验

2.1 水下爆炸法试验系统

试验采用水下爆炸试验法, 以典型炸药 RDX 作为待测炸药, 样品的尺寸为 $\varnothing 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 质量为 10 g。试验布置及测试系统如图 1 所示, 试验由 0.4 m \times 0.4 m \times 0.4 m 的透明水箱、8 号电雷管、高速摄像机 (Phantom TMX6410) 和 LED 照明光源组成。试验时, 药柱距离水面 0.2 m, 药柱中心与高速摄像机处于同

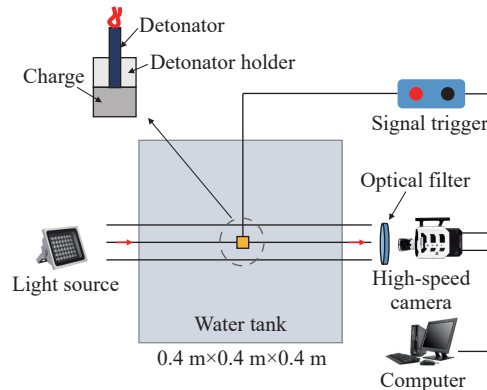


图 1 水下爆炸气泡高速膨胀的测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of explosive bubbles high-speed expansion experimental system

一条水平直线上, 高速拍摄的频率为 $390\,000\text{ s}^{-1}$, 并配有中心波长为 395 nm 、带宽为 30 nm 的紫外光滤光片, 可以有效地避免爆轰中的强光干扰, 采用信号发生器同步控制炸药起爆和高速摄像机触发。

2.2 试验结果

对 RDX 炸药进行了 3 发水下爆炸试验, 气泡膨胀过程和冲击波阵面的典型测试结果如图 2 所示, 其中 t 为时间。由图 2 可知, 水下爆炸气泡刚开始膨胀时, 由于炸药为长径比为 1:1 的圆柱形, 爆轰结束后气泡的初始形状与球形有一定的偏差, 随着气泡的进一步膨胀, 气泡内部压力分布逐渐趋于均匀, $t=4.96\text{ }\mu\text{s}$ 时, 气泡形状已经接近于球形。试验中所拍摄的图片像素为 640×256 , 水箱的宽度为 400 mm , 即当水箱铺满所拍摄的画面时, 每个像素可以分辨的实际长度为 0.1875 mm , 试验数据处理过程中一般存在一个像素的误差, 因此, 爆炸气泡半径和冲击波波阵面位置的误差约为 $\pm 0.1875\text{ mm}$ 。在该试验中, 最大的误差发生在爆炸气泡开始膨胀, 即药柱的半径为 10 mm 时, 此时, 最大误差为 $\pm 1.88\%$ 。分析图 2 所示的测试结果, 得到水下爆炸冲击波阵面位置和水下爆炸气泡半径随时间的变化, 如图 3~4 所示。

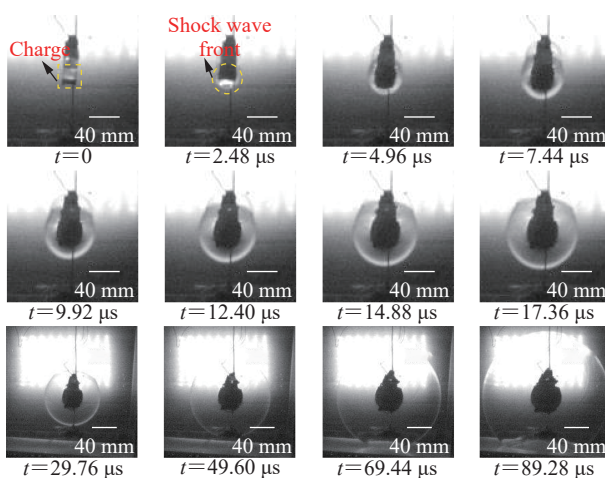


图 2 RDX 炸药的水下爆炸气泡膨胀及冲击波测试过程

Fig. 2 The initial bubble expansion and shock wave testing process of RDX explosive

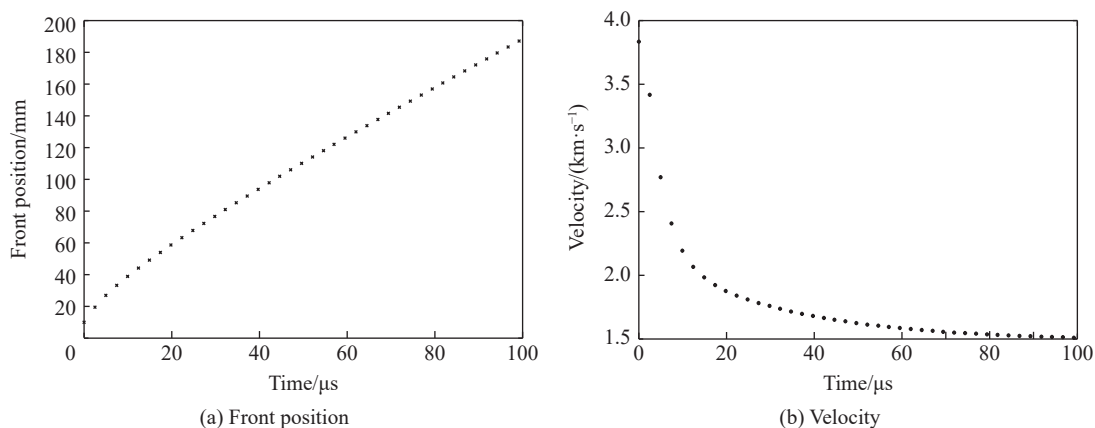


图 3 水下爆炸冲击波阵面位置和速度随时间的变化曲线

Fig. 3 Curves of shock wave front position and velocity changes with time in underwater explosions

根据图 3, 结合文献 [16] 中对圆筒实验数据的处理方法, 设气泡初期高压膨胀中半径 R 与时间 t 满足:

$$R = F_1 e^{-\tau_1 t} - F_2 e^{-\tau_2 t} + F_2 - F_1 + F_3 \quad (13)$$

式中: F_1 、 F_2 和 F_3 均为爆轰产物膨胀脉动的幅度, τ_1 和 τ_2 分别为爆轰产物扩张和收缩的时间常数。通过对气泡膨胀过程的高速分幅图像进行判读, 得出气泡半径-时间($R-t$)数据, 并采用式 (13) 进行拟合, 拟合系数如表 1 所示。

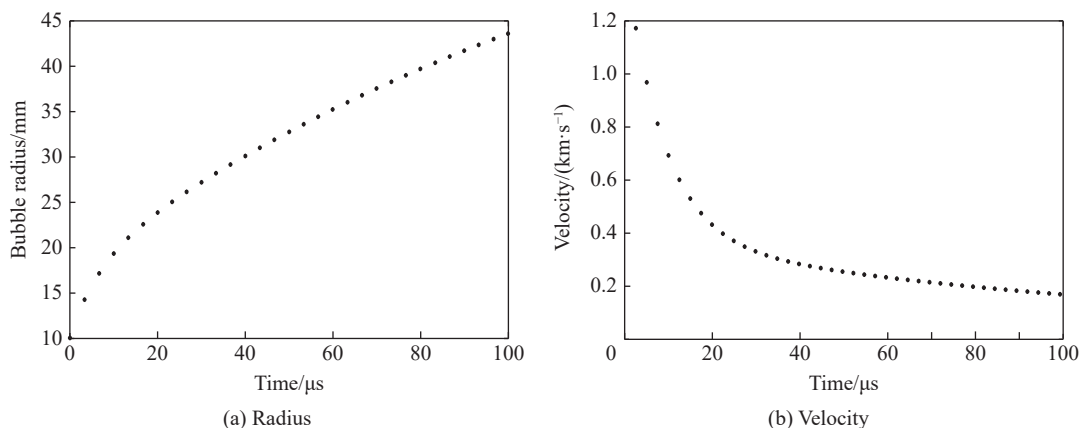


图 4 水下爆炸气泡半径和速度随时间的变化曲线

Fig. 4 Curves of underwater explosion bubble radius and velocity change with time

表 1 RDX 炸药水下爆炸气泡半径的拟合参数

Table 1 The bubble radius fitting parameters of RDX explosive in underwater explosion

F_1/mm	$\tau_1/\mu\text{s}^{-1}$	F_2/mm	$\tau_2/\mu\text{s}^{-1}$	F_3/mm
-9.46	0.1128	46.3	0.008	9.9

对于冲击波在水中的传播过程, 其波阵面位置随时间的变化可以通过非线性函数进行拟合:

$$r - r_0 = a_1 (1 - e^{-b_1 t}) + a_2 (1 - e^{-b_2 t}) + ct \quad (14)$$

式中: $r - r_0$ 为冲击波阵面沿径向的传播距离, a_1 、 a_2 、 b_1 和 b_2 为拟合参数, c 为水中的声速。其拟合参数列于表 2。

表 2 RDX 炸药水下爆炸冲击波阵面位置的拟合参数

Table 2 The shock wave front position fitting parameters of RDX explosive in underwater explosion

a_1/mm	$b_1/\mu\text{s}^{-1}$	a_2/mm	$b_2/\mu\text{s}^{-1}$
8.65	0.259	22.2	0.033

根据第 1 节的方法, 结合试验结果, 得到 RDX 炸药的 JWL 状态方程参数, 如表 3 所示。为了对比不同测定方法得到的 JWL 方程参数的差异, 表 3 给出了文献 [17] 中利用圆筒试验测定的 JWL 方程参数。

表 3 RDX 炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数

Table 3 The parameters of JWL state equation for RDX explosive detonation products

A/GPa	B/GPa	C/GPa	R_1	R_2	ω	数据来源
933.82	7.236	0.788	4.51	1.22	0.15	本研究
581.40	6.801	0.234	4.10	1.00	0.35	文献[17]

由表 3 可知, 采用本文的水下爆炸方法测定的 JWL 状态方程在低压阶段的参数 C 和 ω 与圆筒试验测定结果的差异比较大。其主要原因是: 在圆筒试验中, 当爆轰产物的压力将至 0.1 GPa 时^[5], 圆筒发生破裂, 从而导致爆轰产物扩散; 而在水下爆炸中, 水介质在爆轰产物的扩散过程中起到束缚作用, 因此, 低压阶段的参数相差比较大。由水下爆炸 JWL 状态方程确定方法可知, JWL 状态方程首先确定低压状

态的参数, 而中高压状态的参数与中压和低压的参数相关联, 因此, 圆筒试验与水下爆炸 2 种方法测定的中高压的状态参数 A 、 R_1 、 B 和 R_2 也有一定的差异, 但是 2 种方法测定的中高压状态参数的差异小于低压状态参数的差异。

3 水下爆炸试验法验证

为进一步分析水下爆炸法确定的 JWL 状态参数的准确性, 利用测定得到的 JWL 状态方程参数对水下爆炸的气泡动力学过程进行计算。从 2.2 节的试验可知, 炸药爆轰结束后, 爆轰产物迅速占据了炸药的原有体积, 随即从静止开始快速膨胀。从炸药的爆轰过程来看, 初始气泡可视为一个与装药体积相同的球体, 其半径为 R_0 , 初始速度为零。Shan 等^[18] 和 Wang 等^[19] 发现, 当装药表面压力达到 9.8~19.6 GPa 时, 与储存在流体中的压缩能相比, 动能和压力位能是装药附近流体能量的主要组成部分, Rayleigh-Plesset 方程可以描述气泡加速膨胀的运动过程。由于压力波的传播速度不是无限的, 且流体的比容在发生变化时会储存一定的压缩能, 当研究气泡在整个脉动周期内的运动特性时, 需要考虑流体的压缩性以减小计算的误差。因此, 对气泡动力学过程进行计算时, 首先利用 Rayleigh-Plesset 方程^[18-19] 计算气泡的初始加速膨胀过程, 随后, 利用气泡在可压缩流体中的动力学方程^[15] 对后续的气泡减速膨胀过程进行计算。水下爆炸气泡初期高速膨胀过程中的半径和速度随时间变化的仿真结果如图 5 所示。

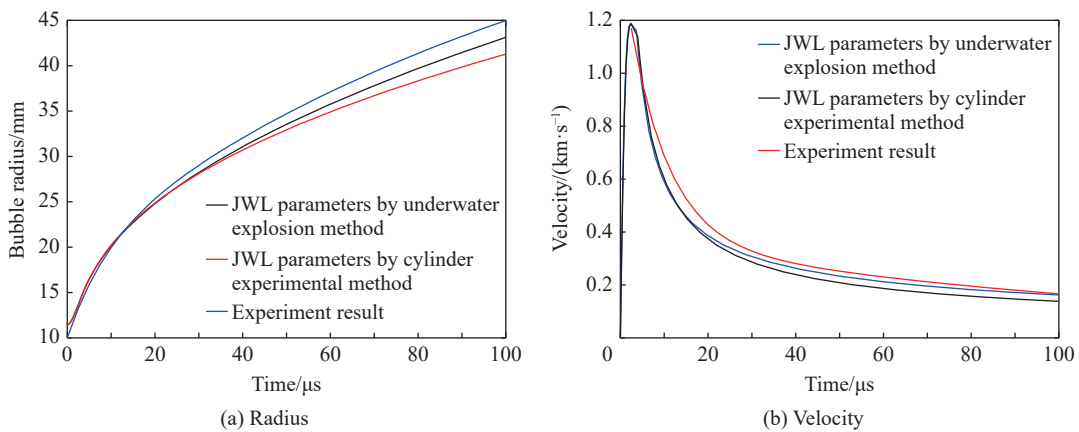


图 5 RDX 水下爆炸气泡半径与速度随时间的变化曲线

Fig. 5 Curves of RDX explosion bubble radius and expansion velocity changed with time

从图 5 可以看到, 计算得到的 RDX 水下爆炸气泡半径接近实验结果, 气泡半径的最大偏差约为-3.8%; 而通过圆筒试验测定参数得到的气泡半径则小于水下爆炸测定参数的, 且气泡半径的最大偏差约为-7.9%。对比气泡的初始高速膨胀过程, 通过水下爆炸与圆筒试验方法测定的 JWL 方程参数得到的气泡膨胀过程基本相同, 但是水下爆炸测定方法得到的气泡半径计算值与实验值偏差更小, 尤其是气泡在低压阶段的膨胀, 计算值和试验值的误差相对于圆筒试验更小, 说明水下爆炸方法标定的 JWL 参数具有较高的精确性。

水下爆炸中爆轰产物在水介质约束下可以膨胀至较大的体积, 同时其内部压力变化较大。在持续时间较短的初期膨胀阶段, 水下爆炸法得到的 JWL 方程参数可以准确地反映爆轰产物的压力特性, 气泡的动力学特性与实验结果有较好的一致性。为了验证在较高的压力和较长时间范围内, 水下爆炸法在描述爆轰产物状态时的准确性, 采用 1 kg 当量水下爆炸并对质量为 160 g、直径为 50 mm 的 RDX 药柱进行了试验(详见文献 [18]), 并采用圆筒试验法和水下爆炸法确定的 JWL 方程参数对水下爆炸气泡脉动过程进行了仿真, 如图 6 所示。从图 6(a) 可以看到, 2 种参数下的气泡半径差异较大, 通过圆筒试验法得到的气泡最大半径和第 1 次气泡脉动周期均小于水下爆炸法, 水下爆炸法得到的气泡脉动周期与实验值更接近。图 6(b) 给出了气泡速度的变化, 可以看到, 气泡减速膨胀时, 圆筒试验法得到的速度曲线衰减得较快, 相同时间下其速度小于水下爆炸法得到的速度。气泡半径及速度的差异表明, 利用圆筒试

验法参数得到的炸药爆轰产物对水介质的驱动能力偏低。为了分析气泡驱动能力的差异,图 6(c)给出了 2 种参数下气泡内压力的变化,可以看到,压力在爆炸气泡内先减小后增大,并在脉动结束时达到极大值,爆轰产物在气泡脉动的大部分时间内处于低压状态。与水下爆炸法相比,圆筒试验法的衰减较快,并且压力的最小值较低。因此,相比于水下爆炸法,圆筒试验法的爆轰产物低压驱动能力较低,同时其衰减速度也较快,减小了气泡的最大半径和脉动周期。

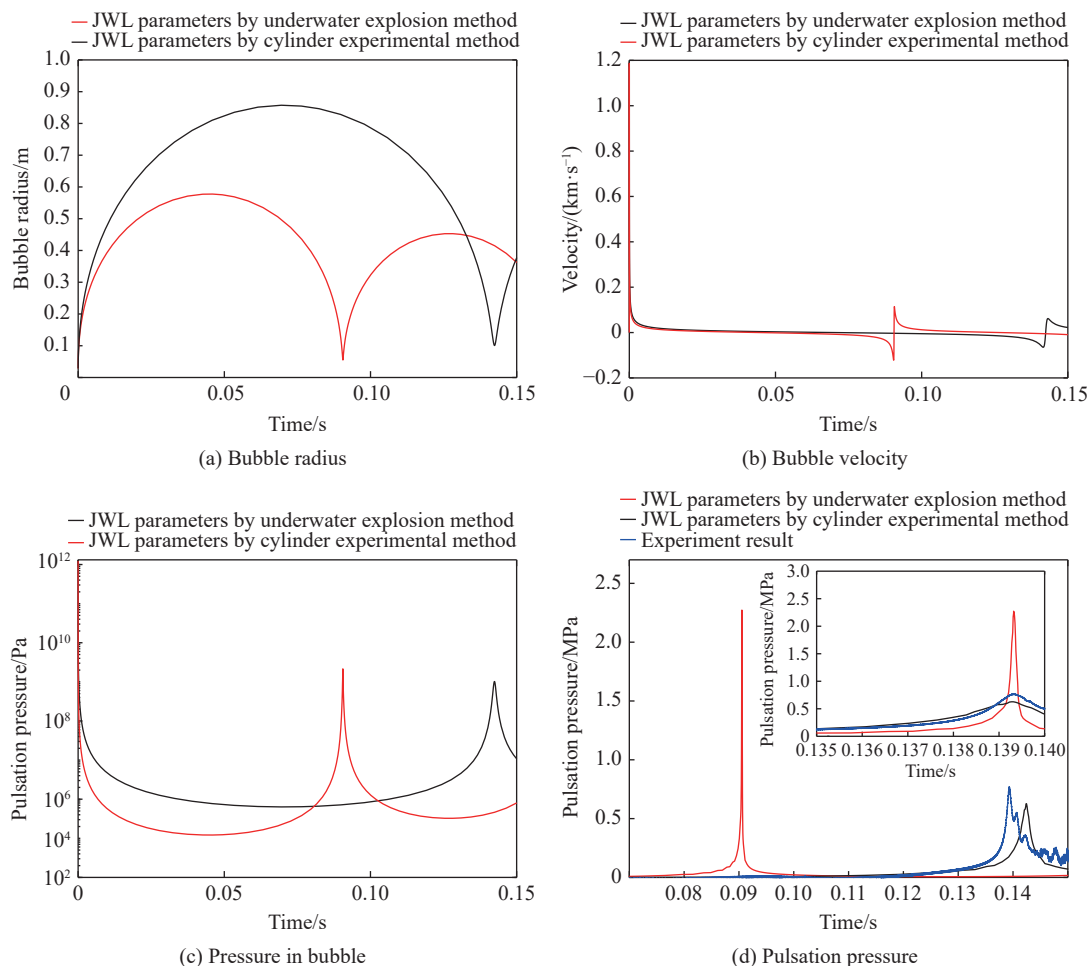


图 6 不同 JWL 方程参数下 RDX 水下爆炸的气泡脉动特性

Fig. 6 Bubble pulsation characteristics of RDX underwater explosion in different JWL equation parameters

由于气泡脉动特性实验无法直观地确定气泡半径的变化,仅依据气泡脉动周期可能会与实际过程产生偏差,而脉动压力波产生于气泡第 1 次收缩-膨胀过程中,通过对脉动压力波的分析可以进一步对 JWL 方程参数进行验证。不同 JWL 方程参数下 RDX 气泡脉动压力波差异如图 6(d) 所示,为了方便对比,图 6(d) 插图将气泡脉动周期实验值作为时间基准对计算得到的脉动压力波进行了平移,而压力基线则为脉动周期内平滑曲线的压力平均值。可以看出,通过水下爆炸法和圆筒试验法得到的脉动压力波峰值分别为 0.67 和 2.27 MPa,水下爆炸法得到的压力波峰值与试验值(0.76 MPa)的一致性更好。对于压力波的波形,从图 6(d) 可以看出,圆筒试验法的脉动压力波呈现出峰值较高而宽度较窄的特点,而水下爆炸法与实验结果的波形宽度基本一致。

4 结 论

(1) 通过对爆炸气泡内爆轰产物做功过程的分析,确定了水下爆炸气泡内爆轰产物做功需要获得的

试验参量,并基于水下爆炸气泡膨胀过程中的能量守恒关系,获得了基于水下爆炸试验法的JWL状态方程确定方法。

(2) 设计了水下爆炸气泡膨胀试验装置,测试了水下爆炸气泡半径和冲击波阵面随时间变化的曲线,并采用圆筒试验数据的处理方法,获得了气泡半径-时间和冲击波阵面位置-时间拟合曲线,通过解析方法得到了RDX炸药的JWL状态方程参数。

(3) 利用测定的JWL状态方程参数对水下爆炸的气泡动力学过程进行了计算,其计算结果与试验结果吻合较好,尤其是在低压阶段,证明了该方法在测定水下爆炸炸药爆轰产物状态方程的适用性和准确性。

参考文献:

- [1] 陈朗,冯长根,黄毅民.含铝炸药圆筒试验及爆轰产物JWL状态方程研究[J].*火炸药学报*,2001,24(3):13-15. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2001.03.005.
CHEN L, FENG C G, HUANG Y M. The cylinder test and JWL equation of state detonation product of aluminized explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2001, 24(3): 13-15. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2001.03.005.
- [2] 裴红波,钟斌,李星瀚,等.RDX基含铝炸药圆筒试验及状态方程研究[J].*火炸药学报*,2019,42(4):403-409. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2019.04.015.
PEI H B, ZHONG B, LI X H, et al. Study on the cylinder tests and equation of state in RDX based aluminized explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42(4): 403-409. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2019.04.015.
- [3] 沈飞,王辉,袁建飞,等.RDX基含铝炸药不同尺寸的圆筒试验及数值模拟[J].*含能材料*,2013,21(6):777-780. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.06.017.
SHEN F, WANG H, YUAN J F, et al. Different diameter cylinder tests and numerical simulation of RDX based aluminized explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2013, 21(6): 777-780. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.06.017.
- [4] 韩勇,黄辉,黄毅民,等.含铝炸药圆筒试验与数值模拟[J].*火炸药学报*,2009,32(4):14-17. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2009.04.004.
HAN Y, HUANG H, HUANG Y M, et al. Cylinder test of aluminized explosives and its numerical simulation [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(4): 14-17. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2009.04.004.
- [5] 杨晨琛,李晓杰,闫鸿浩,等.爆轰产物状态方程的水下爆炸反演理论研究[J].*爆炸与冲击*,2019,39(9):092201. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0210.
YANG C C, LI X J, YAN H H, et al. An inverse method for the equation of state of detonation products from underwater explosion tests [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(9): 092201. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0210.
- [6] HOLTON W C. The detonation pressures in explosives as measured by transmitted shocks in water: NAVORD Report 3968 [R]. White Oak: U. S. Naval Ordnance Laboratory, 1954.
- [7] COOK M A, PACK D H, MCEWAN W S. Promotion of shock initiation of detonation by metallic surfaces [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1960, 56: 1028-1038. DOI: 10.1039/tf9605601028.
- [8] RIGDON J K. Explosive performance: SANL-712-004 [R]. Amarillo: Mason and Hanger-Silas Mason Company Incorporated, 1969. DOI: 10.2172/532483.
- [9] 杨凯,孔军利,沈飞,等.水下滑移爆轰试验确定JWL状态方程参数[J].*火炸药学报*,2013,36(3):62-64. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2013.03.015.
YANG K, KONG J L, SHEN F, et al. Determining the parameters of JWL EOS by underwater sliding detonation test [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(3): 62-64. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2013.03.015.
- [10] 沈飞,王辉,袁建飞,等.含铝炸药水下滑移爆轰实验研究[J].*实验力学*,2014,29(5):641-646. DOI: 10.7520/1001-4888-13-202.
SHEN F, WANG H, YUAN J F, et al. Experimental study of underwater sliding detonation of aluminized explosives [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2014, 29(5): 641-646. DOI: 10.7520/1001-4888-13-202.
- [11] 魏贤凤,龙新平,韩勇.PBX-01炸药水中爆轰产物状态方程研究[J].*爆炸与冲击*,2015,35(4):599-602. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0599-04.

- WEI X F, LONG X P, HAN Y. Studies on the state equation of the underwater detonation products for PBX-01 explosive [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(4): 599–602. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0599-04.
- [12] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.03.009.
- 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.03.009.
- [13] 林谋金, 马宏昊, 沈兆武, 等. 铝纤维对黑索今水下爆炸性能的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(3): 379–384. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)03-0379-06.
- LIN M J, MA H H, SHEN Z W, et al. Effect of aluminum fiber on underwater detonation performance of RDX [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(3): 379–384. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)03-0379-06.
- [14] 胡宏伟, 王建灵, 徐洪涛, 等. RDX 基含铝炸药水中爆炸近场冲击波特性 [J]. *火炸药学报*, 2009, 32(2): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2009.02.001.
- HU H W, WANG J L, XU H T, et al. Underwater shock wave characteristics of RDX-based aluminized explosives in near-field range [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(2): 1–5. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2009.02.001.
- [15] ZHANG J X, WANG S S, JIA X Y, et al. An improved Kirkwood-Bethe model for calculating near-field shockwave propagation of underwater explosions [J]. *AIP Advances*, 2021, 11(3): 035123. DOI: 10.1063/5.0040224.
- [16] 沈飞, 王辉, 袁建飞, 等. 铝含量对 RDX 基含铝炸药驱动能力的影响 [J]. *火炸药学报*, 2013, 36(3): 50–53. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2013.03.012.
- SHEN F, WANG H, YUAN J F, et al. Influence of Al content on the driving ability of RDX-based aluminized explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(3): 50–53. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2013.03.012.
- [17] DOBRATZ B M, CRAWFORD P C. LLNL explosives handbook-properties of chemical explosives and explosive simulants: UCRL--52997-Chg. 2 [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1981.
- [18] SHAN F, HE Y, JIAO J J, et al. Experimental and theoretical analysis of detonation products state on bubble dynamics and energy distribution in underwater explosion [J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 130(17): 174701. DOI: 10.1063/5.0058644.
- [19] WANG H C, HE Y, SHAN F, et al. Roles of underwater explosion bubble accelerating expansion cut-off state in bubble dynamics and energy output [J]. *Journal of Applied Physics*, 2022, 132(19): 194704. DOI: 10.1063/5.0110446.

(责任编辑 王晓双)