

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.05.001

含铝炸药深水爆炸冲击波和气泡脉动的数值模拟^{*}

冯 崧 饶国宁 彭金华
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 为了研究 CL-20 基和 HMX 基及其含铝炸药深水爆炸过程,选取 LX-14、LX-19、PAX-30 和 PAX-29 4 种炸药,采用 AUTODYN 数值计算软件,计算其深水爆炸过程的各项参数。计算结果表明:CL-20 基炸药水下爆炸性能优于 HMX 基炸药;铝粉的加入可以大幅度提高冲击波峰值压力、气泡脉动周期及气泡最大半径,而二次压力波峰值压力略有降低。计算 TNT 深水爆炸过程的参数,并与试验值相对比,误差小于 5%,说明球对称一维方法可以很好地模拟炸药深水爆炸过程。最后,计算得到 4 种炸药的峰值压力均符合水下爆炸相似律,拟合得到 4 种炸药峰值压力相似常数。

[关键词] 含铝炸药;深水爆炸;峰值压力;气泡周期;气泡半径;相似律

[分类号] TQ560.7;O382⁺.1

Numerical Simulation of Shock Wave and Bubble Pulse in Deep Water Explosion of Aluminized Explosive

FENG Song, RAO Guoning, PENG Jinhua
School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] To investigate the deep water explosion of CL-20-based aluminized explosive and HMX-based aluminized explosive, four typical kinds of explosives (LX-14, LX-19, PAX-30 and PAX-29) were selected for simulation of the explosion parameters using AUTODYN. The results show that the deep water explosion performance of CL-20-based explosives is better than that of HMX-based explosives. The peak pressure of shock wave, bubble pulsation period and maximum radius of the bubble can be greatly improved by addition of aluminum powder, while the peak pressure of the first bubble pulse decreases slightly. Variables of TNT in deep water explosion were calculated and compared with the experimental results. The error is less than 5%, which suggests that the one-dimensional method of spherical symmetry can be applied to assess the process of deep water explosion for explosives. Finally, the peak pressure of four kinds of explosives were derived according to the similarity law of underwater explosion, and the peak pressure similarity constants of the four kinds of explosives are fitted.

[KEYWORDS] aluminized explosive; deep water explosion; peak pressure; bubble period; bubble radius; similarity law

引言

炸药在均匀、静止的深水中爆炸时,高压的爆炸产物急剧向外膨胀^[1],强烈压缩水介质形成初始冲击波,爆炸产物以气泡的形式存在水中,在静水压力的作用下,不断反复膨胀收缩^[2],即为气泡脉动^[3]。冲击波和气泡载荷都会对水下爆炸目标物产生破坏

作用^[4]。随着水下兵器的发展,提高武器能量是科研人员研究的重中之重,除了提高炸药自身能量外,炸药中加入非理想成分(铝粉)可以大幅度提高炸药水下爆炸的能量^[5-8]。

水下爆炸数值模拟可以准确还原水下爆炸过程,同时节约时间、金钱成本,因此应用越来越广泛。辛春亮等^[9]通过 AUTODYN 软件,利用 Miller 能量释放模型模拟了含铝炸药水下爆炸冲击波与气

^{*} 收稿日期:2017-05-11
基金项目:国家青年科学基金(11102091);高等学校博士学科点专项科研博导类基金(20113219110010)
作者简介:冯崧(1989-),男,博士,主要从事含铝炸药水下爆炸研究。E-mail:fs8500@126.com
通信作者:饶国宁(1978-),男,硕士,主要从事爆炸力学研究。E-mail:njraoguoning@163.com

泡脉动规律;肖秋平等^[10]研究了网格密度、状态方程对 AUTODYN 模拟结果的影响,同时与试验结果相对比,误差较小;刘科种等^[11]模拟 TNT 炸药水下爆炸冲击波的传播过程,模拟结果与经验公式计算结果误差较小;贾宪振等^[12]基于 AUTODYN 软件模拟 Pentolite 炸药在有限水域内的气泡脉动规律,气泡周期与试验结果相吻合;辛春亮等^[13]采用 AUTODYN 计算软件模拟含铝炸药与理想炸药水下爆炸过程,仿真结果表明,含铝炸药的水下爆炸参数及性能都优于理想炸药。

在前人研究的基础上,笔者利用 AUTODYN 软件模拟 CL-20 基、HMX 基及其含铝炸药的深水爆炸过程,分析冲击波的传播、气泡脉动规律,计算得到水下爆炸各参数;同时比较分析铝粉对水下爆炸参数的影响;拟合得到水下爆炸相似常数;为了验证模型准确性,模拟了 TNT 深水爆炸过程。

1 有限元建模与仿真

1.1 数值模型的建立

对于无限水域深水爆炸,可以忽略以下几个方面:自由面和水底的影响;水的密度在深度方向的变化;气泡上方和下方的静水压力差^[14]。深水爆炸可以采用球对称一维方法进行计算,水域半径为 50 m,0.229 kg 炸药在水深 178.6 m 处爆炸,水和炸药采用欧拉算法,其特点是网格固定,物质在网格内流动,可以避免 Lagrange 算法中因网格扭曲带来的计算困难^[9]。炸药附近网格处网格细分,计算模型如图 1 所示。

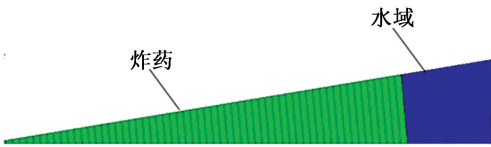


图 1 炸药及其部分水域的网格划分

Fig. 1 Mesh of explosive and water nearby

1.2 水的状态方程

在深水爆炸中,炸药周围的静水压力很大,但由于深度变化而引起的压力变化梯度相对于本身的静水压力要小得多,近似认为炸药周围的静水压力一定。AUTODYN 里面自带两种水的状态方程:多项式状态方程和冲击状态方程。由于要考虑静水压力,选取多项式状态方程作为水的状态方程。

压缩状态下:

$$\mu > 0, p = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e;$$

(1)

拉伸状态下:

$$\mu < 0, p = T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0\rho_0 e。$$

(2)

式中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$,在初始状态下, $\mu = 0$,式(1)和式(2)可以简化为 $p = B_0\rho_0 e$;将静水压力 p 、系数 B_0 及初始密度 ρ_0 代入,计算 178.6 m 水深条件下 $e = 6\,612.875\text{ J/kg}$ 。

1.3 目标炸药的选取及状态方程

选取 LX-14、PAX-30、LX-19、PAX-29 4 种炸药为研究对象,炸药组成见表 1。配方中,黏结剂为 Estane(埃斯坦,聚氨基甲酸乙酯弹性纤维)或 CAB(醋酸丁酸纤维素);增塑剂为 BDNPA/F[双(2,2-二硝基丙醇)缩乙醛/双(2,2-二硝基丙醇)缩甲醛]。

表 1 4 种炸药的配方组成

Tab. 1 Composition of four kinds of explosives	
炸药种类	炸药组成(质量分数)
LX-14	95.5% HMX, 4.55% Estane
PAX-30	77.0% HMX, 15.0% Al, 3.2% CAB, 4.8% BDNPA/F
LX-19	95.8% ε-CL-20, 4.2% Estane5703-P
PAX-29	77.0% CL-20, 15.0% Al, 3.2% CAB, 4.8% BDNPA/F

采用包含 Miller 扩展相的 JWL 爆轰产物状态方程

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega(E_0 + \lambda Q)}{V}。$$

(3)

式中: p 为爆轰产物压力; V 为炸药爆轰产物的相对体积; E_0 为单位体积理想炸药成分的初始内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为炸药有关的常数。对于理想炸药,反应率 $\lambda = 0$;对于含铝炸药, Q 为 C-J 面后铝粉反应释放的能量, λ 为铝粉的反应速率^[15],其中:

$$\frac{d\lambda}{dt} = a(1 - \lambda)^m p^n。$$

(4)

式中: a 为能量释放常数; m 为能量释放指数; n 为压力指数^[9,16]。该模型考虑了由 λ 和 p 控制的燃烧。

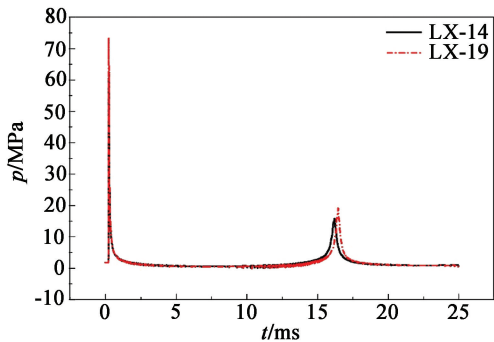
2 结果分析与讨论

2.1 水下爆炸压力仿真结果分析

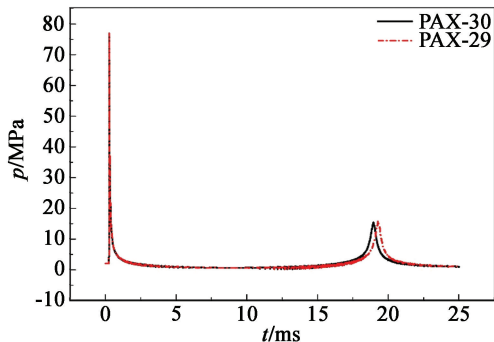
2.1.1 不同基体炸药的水下爆炸压力对比分析

图 2 为 4 种炸药爆距为 0.5 m 处水下爆炸压力时程曲线。炸药在水中爆炸时,爆轰波首先在炸药中传递,当爆轰波传到装药表面与水的交界处时,高

温、高压的爆炸产物压缩水介质,在水中形成初始冲击波。由图 2 可知,炸药爆轰后,首先到达的是冲击波,冲击波峰值压力迅速突跃到最大,紧接着近似按指数规律衰减,衰减时间为数个毫秒;冲击波峰值压力比二次压力波峰值压力高,但其持续时间短,波形陡峭;随着冲击波的继续向前传播,爆炸产物在水中以气泡的形式存在,并不断膨胀与压缩^[17],向外辐射脉动压力,对应时间在 15 ~ 20 ms 之间。



(a) 不含铝炸药 LX-14 与 LX-19



(b) 含铝炸药 PAX-30 与 PAX-29

图 2 距爆心 0.5 m 处不同基体炸药爆炸压力
时程曲线的对比

Fig. 2 Comparison of p - t curves between explosives with
different matrix 0.5 m away from explosion center

图 2(a) 中,对于不同基体炸药,LX-14 的冲击波峰值压力为 62.45 MPa,二次压力波的峰值压力为 15.76 MPa,后者为前者的 25.23%;LX-19 的冲击波峰值压力为 73.53 MPa,二次压力波的峰值压力为 19.02 MPa,后者为前者的 25.87%;LX-19 的冲击波峰值压力和二次压力波的峰值压力分别高于 LX-14 炸药 17.74% 和 20.69%。

图 2(b) 为含铝质量分数同为 15% 的 HMX 基炸药 PAX-30 与 CL-20 基炸药 PAX-29 的水下爆炸压力时程对比。PAX-30 的冲击波峰值压力为 75.69 MPa,二次压力波的峰值压力为 15.05 MPa,后者为前者的 19.89%;PAX-29 的冲击波峰值压力为 76.70 MPa,二次压力波的峰值压力为 15.37 MPa,

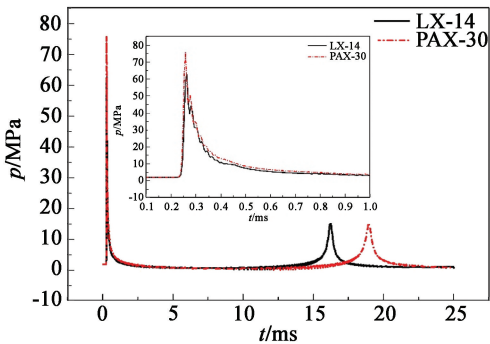
后者为前者的 20.04%;PAX-29 的冲击波峰值压力和二次压力波的峰值压力分别高于 PAX-30 炸药 0.98% 和 2.13%。

从图 2 的分析结果可知,相同条件下,CL-20 基炸药的冲击波峰值压力和二次压力波的峰值压力远高于 HMX 基炸药(高 20% 左右);但加入相同含量铝粉之后,CL-20 基炸药的水下爆炸压力略高于 HMX 基炸药,二者冲击波峰值压力和二次压力波的峰值压力基本持平。

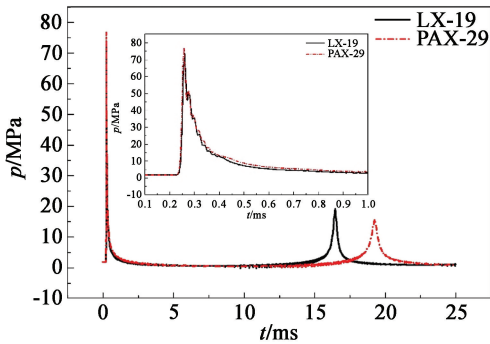
2.1.2 相同基体含铝与非含铝炸药水下爆炸压力的对比分析

图 3(a) 为 LX-14 和 PAX-30 爆距为 0.5 m 处水下爆炸压力时程曲线的对比。加入铝粉后,PAX-30 的冲击波峰值压力升高,峰值压力增大 21.2%;二次压力波的峰值压力由原来的 15.76 MPa 降到 15.05 MPa,降低 4.72%;在初始冲击波衰减阶段[图 3(a) 小图],PAX-30 的曲线不像非含铝炸药 LX-14 的曲线那样陡峭,完全在 LX-14 曲线上方,说明含铝炸药的冲击波衰减速度比非含铝炸药慢。

图 3(b) 计算得到 LX-19 和 PAX-29 爆距为 0.5 m 处水下爆炸压力时程曲线的对比。与 HMX 基



(a) HMX 基炸药 LX-14 与 PAX-30



(b) CL-20 基炸药 LX-19 与 PAX-29

图 3 距爆心 0.5 m 处相同基体炸药爆炸
压力时程曲线的对比

Fig. 3 Comparison of p - t curves between explosives
with the same matrix 0.5 m away from explosion center

炸药水下爆炸变化规律相似,加入铝粉后,峰值压力增大 4.31%,二次压力波的峰值压力降低 19.14%;在初始冲击波衰减阶段[图 3(b)小图],PAX-29 曲线完全在 LX-19 曲线上方,再次充分说明含铝炸药的冲击波衰减速度比非含铝炸药慢。

2.2 水下气泡脉动仿真结果分析

2.2.1 不同基体炸药水下气泡脉动对比分析

炸药的爆轰产物以气泡的形式在水中迅速扩散,此时,气泡内压力较大,大于周围静水压力,气泡体积持续增大;接着,气泡内部压力逐渐减小至与静水压力相等;由于惯性的作用,气泡仍将继续膨胀,气泡内压力继续降低,直到气泡过度膨胀到最大半径,此时气泡内压力小于周围静水压力,气泡在静水压力作用下开始收缩,气泡半径迅速减小,并达到最小值。此时,气泡完成一个脉动过程,之后将继续新一轮的脉动过程,直到气泡内的能量被消耗完。

图 4 为 4 种炸药水下爆炸时气泡半径的时间历程对比。从图 4 可得 4 种炸药的气泡脉动周期和气泡的最大半径,详细参数见表 2。对于不同基体炸药,LX-19 的气泡脉动周期及半径分别高于 LX-14 炸药 1.70% 和 3.43%;PAX-29 的气泡脉动周期及半径分别高于 PAX-30 炸药 1.94% 和 1.97%。CL-

表 2 炸药爆炸的气泡最大半径及脉动周期
Tab.2 The maximum bubble radius and pulse cycle in deep water explosion of different explosives

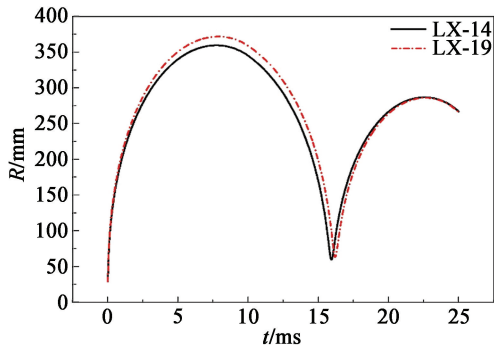
炸药名称	脉动周期/ms	气泡最大半径/mm
LX-14	15.88	359.79
LX-19	16.15	372.12
PAX-30	18.60	410.59
PAX-29	18.96	418.69

20 基及其含铝炸药的周期和半径略高于 HMX 基炸药,体现出 CL-20 炸药能量较高的特点。

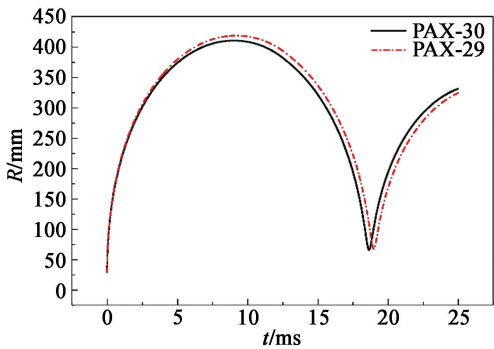
2.2.2 相同基体含铝与非含铝炸药水下气泡脉动对比分析

图 5 为相同基体炸药水下爆炸气泡半径时程曲线对比。由图 5 及表 2 可知,加入铝粉后,HMX 基炸药水下爆炸气泡半径大幅度提高,增大 14.12%,气泡脉动周期升高了 17.13%;而 CL-20 基炸药水下爆炸气泡半径增大了 12.51%,气泡脉动周期升高了 17.40%。

1956 年,美国学者 COOK 详细阐述了铝粉的二次反应理论^[18],首先是理想炸药爆轰,其次为非理想成分(铝粉)与爆炸产物之间的化学反应,主要反



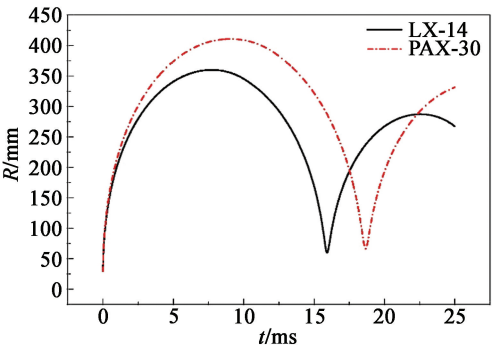
(a) LX-14 与 LX-19



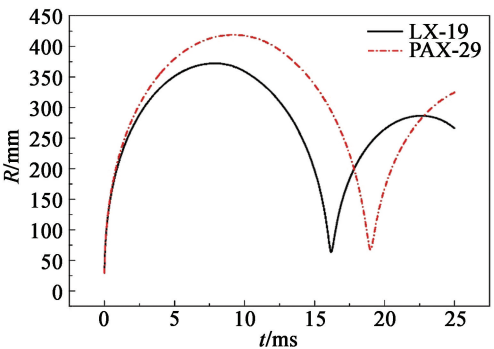
(b) PAX-30 与 PAX-29

图 4 距爆心 0.5 m 处不同基体炸药爆轰气泡半径的时程曲线对比

Fig.4 Comparison of $R-t$ curves between explosives with different matrix 0.5 m away from explosion center



(a) LX-14 与 PAX-30



(b) LX-19 与 PAX-29

图 5 距爆心 0.5 m 处相同基体炸药爆轰气泡半径的时程曲线对比

Fig.5 Comparison of $R-t$ curves between explosives with the same matrix 0.5 m away from explosion center

应式有:

$$2\text{Al} + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3, \Delta H_f = -414 \text{ kJ/mol}; \quad (5)$$
$$2\text{Al} + 3\text{CO}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CO}, \Delta H_f = -826 \text{ kJ/mol}; \quad (6)$$
$$2\text{Al} + 3\text{CO} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{C}, \Delta H_f = -1\,314 \text{ kJ/mol}; \quad (7)$$
$$2\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2, \Delta H_f = -939 \text{ kJ/mol}. \quad (8)$$

除以上反应外,铝粉在高温、高压下还能与爆炸产物中的氮反应生成氮化铝,反应过程也是放热的,其反应式为:

$$\text{Al}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{CO}(\text{放热}); \quad (9)$$
$$2\text{AlO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CO}(\text{放热}); \quad (10)$$
$$2\text{Al} + \text{N}_2 \rightarrow 2\text{AlN}, \Delta H_f = -335 \text{ kJ/mol}. \quad (11)$$

这些反应可以进行较长时间,并且铝粉与爆炸产物的放热反应主要发生在 C-J 面之后。铝粉与爆炸产物的反应产生的热量,能大大提高气泡的脉动周期及半径;使冲击波衰减速度减慢,这些都与以上计算结果相验证。

3 水下爆炸冲击波相似律适用性研究

SWISDAK^[19]综合了大量水中爆炸试验数据,将炸药水中爆炸冲击波传播归纳成统一公式:

$$p_m = K\left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{\alpha}.$$

(12)

式中: p_m 为峰值压力; K 、 α 是波阵面物理计算参数; W 是炸药的质量,kg; R 为测点距爆心的距离,m。将上式取对数,可得

$$\ln p_m = \ln K - \alpha \ln \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}}.$$

(13)

此处,定义比例距离为 $R/W^{1/3}$;峰值压力 p_m 是炸药水中爆炸的重要参数,是计算其他参数的基础。仿真计算得到炸药爆炸后距离爆心不同位置处的峰值压力(取 8 个测量点),根据式(13),对炸药的峰值压力和比例距离分别取对数,如图 6 所示,可得 4 种炸药峰值压力 p_m 的相似常数 K 、 α ,见表 3。

图 6 可见,4 种炸药峰值压力满足水下爆炸相似律,所得测量点的峰值压力可拟合在一条直线上,数据分布情况良好,侧面验证模拟结果的准确性。

4 计算模型及方法的有效性验证

为了验证本文中的 AUTODYN 的模型及计算方

法的有效性,模拟计算 0.229 kg TNT 在水深 178.6 m 处的爆炸过程,计算结果与文献[20]中的试验值进行对比。

对 TNT 的计算结果如图 7 所示。从图 7 中可

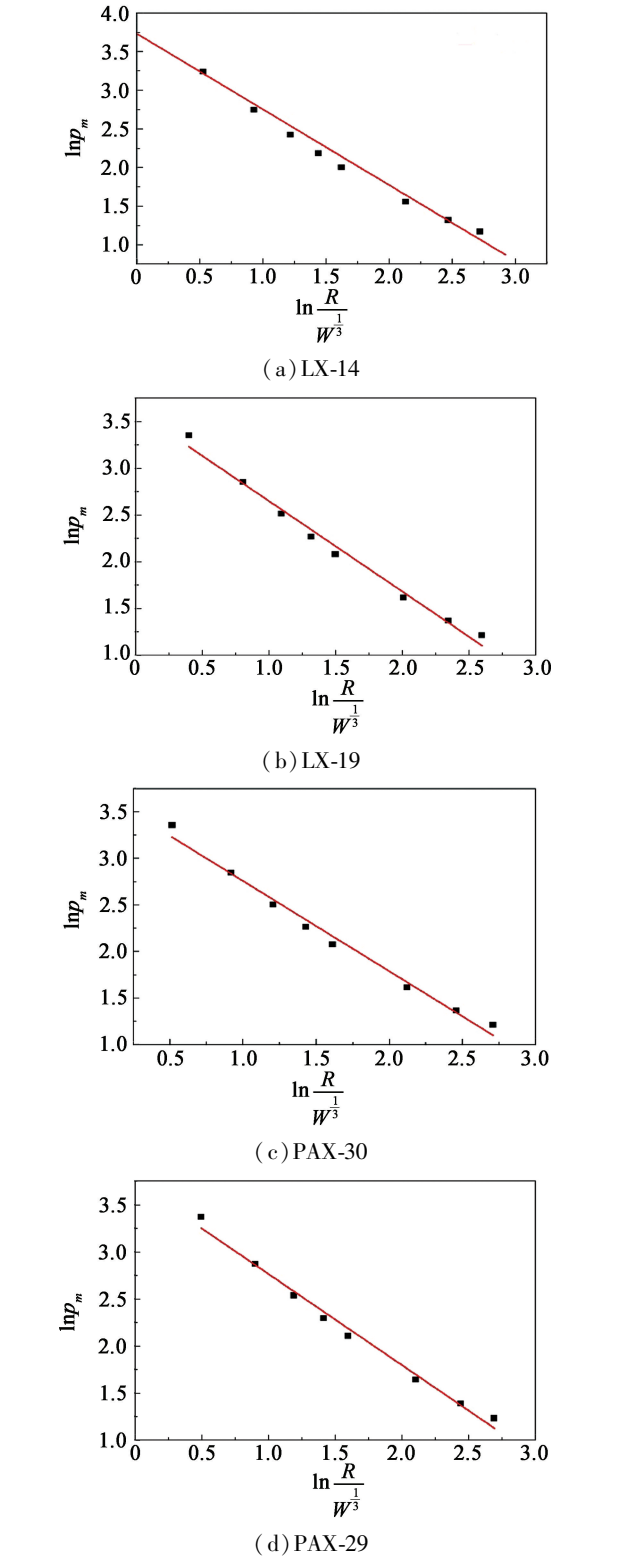


图 6 炸药水中爆炸峰值压力与比例距离的关系
Fig.6 Relationship between peak pressure of shock wave and scaled distance in deep water explosion of four kinds of explosives

表 3 炸药水中爆炸峰值压力的相似常数
Tab.3 Similarity constant of shock wave peak in deep water explosion of different explosives

炸药名称	K	α
LX-14	41.80	0.978
LX-19	42.34	1.016
PAX-30	48.48	1.021
PAX-29	48.09	1.020

以读出距爆心 0.5 m 处 TNT 水下爆炸冲击波的峰值压力、气泡的最大半径以及气泡的脉动周期,具体参数见表 4。AUTODYN 在计算远场水下爆炸参数时,计算值比试验值偏小^[10],但误差都在 5% 以内,满足计算精度的要求。由以上验证可知,此计算方法与模型可以广泛应用于其他炸药(LX-14、LX-19、PAX-29、PAX-30)深水爆炸过程,侧面反映出文中 4 种炸药计算方法的可行性与试验结果的准确性。

5 结 论

运用 AUTODYN 软件计算 CL-20 基和 HMX 基及其含铝炸药深水爆炸过程,得到结论如下:

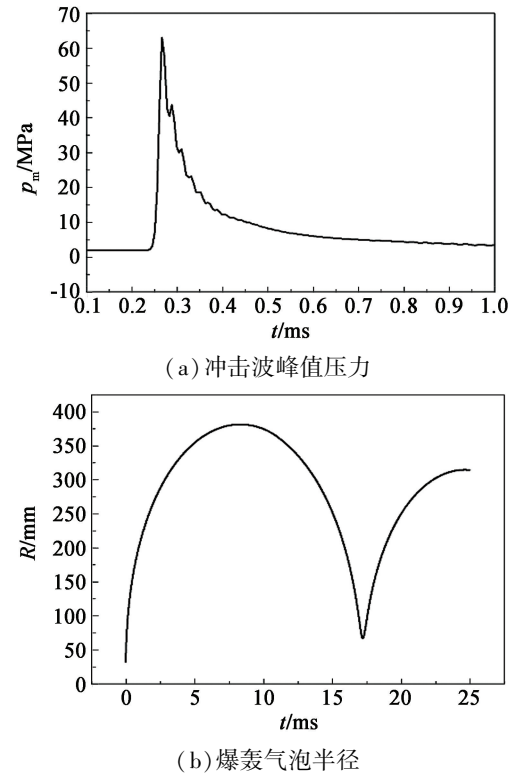


图 7 距爆心 0.5 m 处 TNT 水中爆炸冲击波峰值压力与爆轰气泡半径的时程曲线

Fig. 7 p_m - t curves of shock wave and R - t curves of bubble radius in deep water explosion of TNT 0.5 m away from explosion center

表 4 TNT 水下爆炸参数计算值与试验值的对比
Tab.4 Explosion parameter comparison between calculated results and experimental data of TNT in underwater explosion

参数	试验值/ MPa	计算值/ MPa	误差/ %
冲击波峰值压力	65.82	62.93	-4.39
气泡最大半径	391.00	381.57	-2.41
气泡脉动周期	17.85	17.23	-3.47

- 1)采用球对称一维方法可以很好地模拟炸药深水爆炸过程,得到水下爆炸各参数,并与 TNT 试验值进行对比,各参数误差小于 5%。
- 2)CL-20 基炸药水下爆炸各参数指标高于 HMX 基炸药,说明 CL-20 水下爆炸性能较 HMX 基炸药好。
- 3)加入铝粉后,冲击波峰值压力、气泡周期及最大半径相应地增大,而二次压力波降低。
- 4)峰值压力计算结果满足水下爆炸相似律,并拟合得到相应的参数。

参 考 文 献

[1] 张弩,于馨. 水下爆炸冲击波与气泡载荷作用下船体结构的动响应[J]. 中国舰船研究,2014,9(1):99-104.
ZHANG N, YU X. Dynamic response of a hull structure subjected to underwater explosion shock wave and bubbles [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2014, 9(1): 99-104.

[2] 闫伟杰. 水下爆炸数值模拟研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2007.
YAN W J. Numerical simulation of underwater explosion [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.

[3] COLE R H, WELLER R. Underwater explosions [J]. Physics Today, 1948, 1(6): 35.

[4] 汪斌,张远平,王彦平. 水中爆炸气泡脉动现象的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6): 572-576.
WANG B, ZHANG Y P, WANG Y P. Experimental study on bubble oscillation formed during underwater explosions [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(6): 572-576.

[5] 周霖,徐更光. 含铝炸药水中爆炸能量输出结构[J]. 火炸药学报, 2003, 26(1):30-32,36.
ZHOU L, XU G G. Configuration of underwater energy output for aluminized explosive mixtures [J]. Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2003, 26(1):30-32, 36.

- [6] 胡宏伟, 严家佳, 陈朗, 等. 铝粉含量和粒度对 CL-20 含铝炸药水中爆炸反应特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(1): 157-161.
HU H W, YAN J J, CHEN L, et al. Effect of aluminum powder content and its particle size on reaction characteristics for underwater explosion of CL-20-based explosives containing aluminum [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(1): 157-161.
- [7] 封雪松, 田轩, 冯博, 等. 纳米铝粉对炸药水下爆炸能量的影响研究[J]. 爆破器材, 2016, 45(3): 1-4.
FENG X S, TIAN X, FENG B, et al. Effect of nano-aluminum on the under-water detonation energy of explosive[J]. Explosive Materials, 2016, 45(3): 1-4.
- [8] 任新联, 王辉, 徐司雨, 等. 铝粉粒度对 RDX 基含铝炸药水中爆炸近场特性的影响[J]. 爆破器材, 2015, 44(6): 29-33.
REN X L, WANG H, XU S Y, et al. The effect of aluminum particle size on the characteristic of RDX based aluminized explosives underwater close-filed explosion [J]. Explosive Materials, 2015, 44(6): 29-33.
- [9] 辛春亮, 徐更光, 刘科种, 等. 含铝炸药 Miller 能量释放模型的应用[J]. 含能材料, 2008, 16(4): 436-440.
XIN C L, XU G G, LIU K Z, et al. Application of Miller energy release model for aluminized explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(4): 436-440.
- [10] 肖秋平, 陈网桦, 贾宪振, 等. 基于 AUTODYN 的水下爆炸冲击波模拟研究[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(2): 38-43.
XIAO Q P, CHEN W H, JIA X Z, et al. Numerical study of underwater explosion shock wave based on AUTODYN[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(2): 38-43.
- [11] 刘科种, 徐更光, 辛春亮, 等. AUTODYN 水下爆炸数值模拟研究[J]. 爆破, 2009, 26(3): 18-21.
LIU K Z, XU G G, XIN C L, et al. Research on numerical simulation in underwater explosion by AUTODYN[J]. Blasting, 2009, 26(3): 18-21.
- [12] 贾宪振, 王建灵, 高赞, 等. 有限水域水中爆炸气泡脉动的数值模拟[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(8): 31-34.
JIA X Z, WANG J L, GAO Z, et al. Numerical simulation of bubble pulse of underwater explosion in confined water area[J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(8): 31-34.
- [13] 辛春亮, 徐更光, 刘科种, 等. 含铝炸药与理想炸药能量输出结构的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2007, 30(4): 6-8.
XIN C L, XU G G, LIU K Z, et al. Numerical simulation of energy output structure for aluminized explosive and idealized explosive in underwater explosion [J]. Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2007, 30(4): 6-8.
- [14] 胡毅亭, 贾宪振, 饶国宁, 等. 水下爆炸冲击波和气泡脉动的数值模拟研究[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(2): 134-140.
HU Y T, JIA X Z, RAO G N, et al. Numerical study of underwater explosion shock wave and bubble pulse[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(2): 134-140.
- [15] COWPERTHWAIT M, PASTINE D J, ENIG J W. Energetic of late chemical reactions in nonideal underwater detonations: Phase 1, preliminary theoretical model development; N00014-95-C-0154 [R]. US, Office of Naval Research, 1995.
- [16] 周建美. 爆炸容器内炸药装药爆炸温度场的数值研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
ZHOU J M. Numerical study on explosion temperature fields of explosive charges in explosion vessel [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [17] 逢春京. 水下爆炸气泡动过程的数值模拟研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
PANG C J. Numerical simulation of bubble pulsation produced by underwater explosion [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [18] COOK M A, FILLER A S, KEYES R T, et al. Aluminized explosives [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1957, 61(2): 189-196.
- [19] SWISDAK M M, Jr. Explosion effects and properties: Part II. Explosion effects in water; NSWC/NOLTR76-116 [R]. Naval Surface Weapons Center Technical Report, 1978.
- [20] 肖秋平. 水下爆炸过程及浅水效应数值模拟研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.