DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0599-04

PBX-01 炸药水中爆轰产物状态方程研究*

魏贤凤[1],龙新平[2],韩 勇[1]
(1.中国工程物理研究院化工材料研究所,四川 绵阳 621999;
2.中国工程物理研究院,四川 绵阳 621999)

摘要:提出通过水中实验确定炸药的水中爆轰产物 JWL 状态方程参数的方法;选择 PBX-01 高能炸药进行水中实验,利用 ANSYS/LS-DYNA 程序建立炸药的水中实验模型,将实验结果与数值计算结果进行对比,确定 PBX-01 炸药水中爆轰产物的 JWL 状态方程参数。研究结果显示,圆筒实验确定的 JWL 参数在反映炸药水中爆轰产物的膨胀状态时有所不足,水中实验确定的 JWL 状态方程参数能够更准确地描述 PBX-01 炸药水中爆轰产物的膨胀过程,因此对水中爆炸的研究需要通过水中爆炸实验建一套状态方程参数。

关键词:爆炸力学;状态方程;水下爆炸;爆轰产物
中图分类号:O381;TJ55 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

炸药水中爆炸实验(水中实验)是研究非理想炸药能量释放特性的一种重要方法,炸药水中爆炸效应研究对水中兵器、军事弹药和水下爆破研究都有极大的帮助。水中实验能够弥补冲击臼法和铅块法的不足,对药量少于 10 g 便不能完全爆炸的炸药做功能力进行测试[1]。水中爆炸对炸药能量释放的测试不同于空气中的实验。水中爆炸能量分为 3 部分:炸药的冲击波能、气泡能和加热水所消耗的能量,三部分结合才能对炸药爆炸产生的总能量进行评估[2-5]。目前水中爆炸的相关研究大多集中在水中爆炸做功能力和水中爆炸毁伤效应 2 方面,对于水中爆轰产物状态方程的基础研究工作则极少报道[6]。

JWL 状态方程是重要的爆轰产物状态方程,能够对炸药爆轰产物的膨胀作功过程进行精确的描述[7]。圆筒实验是测试炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数的主要方法,由于实验材料的限制,圆筒实验采用的铜制圆筒在爆炸反应的中后期会发生破裂,测试时间有限[8],所以通过圆筒实验无法获得爆炸反应后期的产物膨胀过程,因此根据圆筒实验结果拟合的 JWL 参数能否准确反应爆轰产物中后期的能量释放特性存在疑问。在水中爆炸实验中,水介质可被看作无限大的壳体,在较长时间(毫秒量级)内不会发生破裂,炸药爆轰产物将从高温高压状态逐渐转变为高温中压状态,甚至高温常压和负压状态。因此,对水中爆炸效应的研究需要能够反映爆炸中后期(中低压状态)产物膨胀特性的参数,由于圆筒实验仅能准确描述爆炸前期(高温、高压状态)产物的膨胀,所以对炸药在水中的爆炸现象进行研究时不能依赖圆筒实验所得 JWL 参数。

龙新平等[9]研究发现,PBX-01 炸药在水中爆炸时,水不会发生汽化,爆轰产物与水之间界面清晰。因此本文中进行 PBX-01 炸药的水中爆炸实验,通过高速扫描相机记录爆轰产物驱动水介质膨胀的过程,并利用 ANSYS/LS-DYNA 程序建立炸药的水中实验爆炸模型,通过将实验结果与数值计算结果进行对比,确定 PBX-01 炸药水中爆轰产物的 JWL 状态方程参数,并将确定的 JWL 参数应用于模拟 PBX-01 炸药爆轰驱动水的实验,以验证状态方程参数的有效性。

1 实验介绍

实验用 PBX-01 炸药(主要成分为 HMX)密度 1.86 g/cm^3、爆压 36.8 GPa、爆速 8.87 km/s。为了便于与圆筒实验进行比较,本文中 PBX-01 炸药采用与标准圆筒实验相同的∅25.4 mm 的药柱。实验

* **收稿日期**:2013-12-25; **修回日期**:2014-03-26
第一作者:魏贤凤(1984—),女,博士研究生; **通讯作者**:龙新平,longxinping@vip.sina.com。

所用测试系统如图 1 所示。药柱置于支架中心位置，光源采用氩气光源，采用延时同步起爆装置控制 PBX-01 炸药及光源炸药的起爆时间。用高速转镜相机记录爆轰产物在水介质中的膨胀运动过程，相机转速为 30 000 r/min，扫描速度为 1.5 km/s。

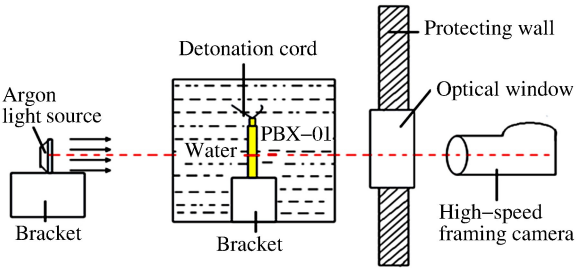

图 1 炸药水中实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of underwater explosion test

2 实验结果及数值分析

2.1 实验结果

高速摄像机记录的扫描底片如图 2 所示，爆轰产物与水之间的界面十分清晰。图 2 中 A_1 为膨胀起始点，A_1A_3 为冲击波迹线，A_2A_4 为爆轰产物膨胀迹线。图 3 是文献[10]中含铝炸药圆筒实验的高速摄像机记录的扫描底片图，A_5 为膨胀起始点，A_5A_6 是爆轰产物膨胀迹线。对比水中实验扫描底片图 2 与圆筒实验扫描底片图 3，水中实验产物膨胀迹线 A_1A_2 段不能显示，无法读数，只能由 A_2 点读起，圆筒实验则从膨胀起始点 A_5 起至 A_6 点均能读出，但是水中实验测试时间要长于圆筒实验。

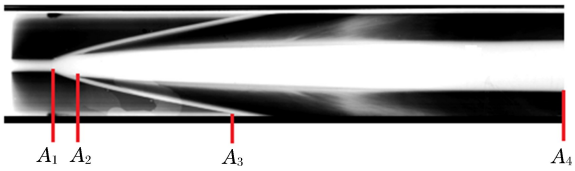

图 2 PBX-01 炸药水中爆轰产物膨胀的高速扫描底片

Fig. 2 Photograph of the underwater detonation products expansion process



图 3 圆筒壁膨胀的扫描底片

Fig. 3 Photograph of the cylinder expansion process

采用龙新平[11]确定的 PBX-01 炸药圆筒实验的 JWL 状态方程参数及本文通过水中实验确定的 PBX-01 炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数，如表 1 所示，其中：A、B、R_1、R_2 和 ω 状态方程的待定参数，E_0 为初始比内能。

表 1 PBX-01 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数

Table 1 The JWL state equation parameters of the PBX-01 detonation products

实验	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0
圆筒实验	406.4	16.3	3.90	1.45	0.5	11.48
水中实验	356.5	26.3	3.40	1.14	0.5	12.48

2.2 数值分析

采用 ANSYS/LS-DYNA 程序建立水中实验爆炸模型，如图 4 所示。JWL 状态方程为：

$$p=A\left(1-\frac{\omega}{R_1v_g}\right)\mathrm{e}^{-R_1v_g}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2v_g}\right)\mathrm{e}^{-R_2v_g}+\frac{\omega E}{v_g} \tag{1}$$

式中：p 为压力，v_g 为气体产物的比容，E 为比内能。在计算中，对炸药采用高能炸药燃烧模型(MAT-HIGH EXPLOSIVE-BURN)，水采用 Grüneisen 状态方程描述[12]：

$$p=\frac{\rho c^2\mu\left[1+\left(1-\gamma_0/2\right)\mu-a\mu^2/2\right]}{\left[1-\left(s_1-1\right)\mu-s_2\mu^2/\left(\mu+1\right)-s_3\mu^3/\left(\mu+1\right)^2\right]^2}+\left(\gamma_0+a\mu\right)E \tag{2}$$

式中：ρ 为密度，c 为体积声速，μ 为应力波传播速度，γ_0 为 Grüneisen 常数，a 是 γ_0 的一阶体积修正，s_1、s_2、s_3 是 μ-p 曲线的斜率系数[13]。玻璃选用理想弹塑性材料：密度为 2.3 g/cm^3，剪切模量为 4 GPa，屈服强度为 0.12 GPa[14]。

将圆筒实验和水中实验确定的 JWL 状态方程参数(见表 1)用于水中实验的数值模拟，计算得到测

试点爆轰产物膨胀的位移(d)-时间关系曲线，并与水中实验结果进行对比，结果如图 5 所示。

由图 5 可知，圆筒实验确定的 JWL 参数用于图 4 的水中实验数值模拟时(图 4)，模拟结果与实验值存在一定的偏差，尤其是在爆炸初期。对部分时间点的差值进行统计：爆轰初期 3.5 μs 时二者差值为1.02 mm，约为实验值的 14%；产物传播至 10.4 μs 时，二者差值为 1.32 mm，约为实验值的 9.6%；传播至膨胀中期 17～25 μs 时二者差值逐渐减小；传播至 25～30 μs 时二者位移差出现交叉；至 43 μs 时差值为 0.92 mm，约为实验值的 3.6%。上述数据说明，圆筒实验确定的 JWL 参数在反映炸药水中爆轰产物的膨胀状态时有所不足(通过圆筒实验拟合 JWL 参数时要求实验值与计算值误差小于 1%)。本文中认为造成爆轰前期存在偏差的原因可能有以下 2 点：(1) 根据图 2 所示，水中实验爆轰产物膨胀初期有可能受到冲击波的影响，导致读数误差较大，因此圆筒实验确定的 JWL 参数无法准确描述水中爆轰产物初期的膨胀过程；(2) 圆筒实验与水中实验所用材料不同，即铜与水性质不同，因此爆炸前期 2 种实验爆轰产物传播轨迹不同。由图 5 可以看出，圆筒实验模拟结果与水中实验值后期相比偏高，其原因可能是因为：即使是在爆轰产物传播至 30 μs 时，水介质仍未破裂，因此 30 μs 后水对爆轰产物的传播仍然存在束缚作用。本文中在处理数据时可能存在实验误差，5 μs 时实验值与计算值差 1%，25 μs 时实验值与计算值差 0.2%，43 μs 时实验值与计算值差 0.3%，但比较图 5 中的实验值与计算结果，本文中所用水中实验确定的 JWL 状态方程参数能够更准确的描述 PBX-01 炸药水中爆轰产物的膨胀过程。

如图 5 所示，本文水中实验对水中爆轰产物膨胀过程记录的有效时间达到 40 μs 以上，能够对爆轰产物膨胀过程的中后期进行描述。圆筒实验是在空气中进行的，其对爆轰产物的膨胀过程描述的有效时间仅在 20 μs 左右，考虑到炸药爆炸时水介质在较长时间内不会发生破裂，所以，确定炸药的水中爆轰产物状态方程参数应用水中实验的方法更为可行。

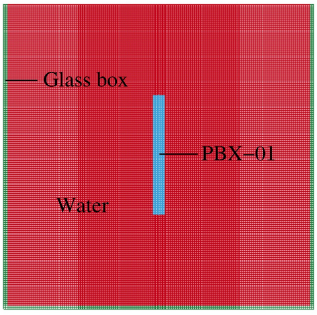

图 4 PBX-01 炸药水中实验计算模型示意图

Fig. 4 Underwater explosion test model of PBX-01 explosive

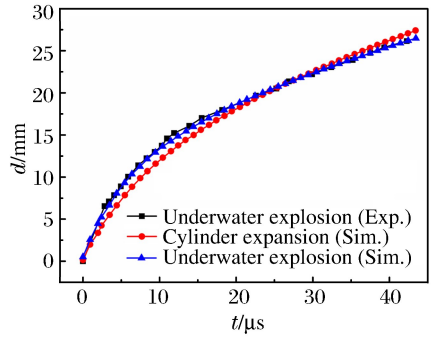

图 5 PBX-01 炸药爆轰产物膨胀位移曲线与水中实验值

Fig. 5 Calculated and tested expansion distance-time curves in underwater explosion test of PBX-01 explosive

3 结　论

本通过水中实验确定的 JWL 状态方程参数对水中爆炸过程的描述更接近实际情况。水中实验不能替代圆筒实验，但是与圆筒实验相比，水中实验更适用于炸药水中爆炸效应的分析。

水中实验法确定水中爆轰产物状态方程方法的建立，对于常用于水下爆炸的炸药(如含铝炸药)的水中爆炸效应分析和水中兵器的应用研究具有重要意义。

参考文献：

[1] 穆哈迈德·苏塞斯卡. 炸药测试方法[M]. 邵英斌，译. 绵阳：中国工程物理研究院流体物理研究所，1998：151.

[2] 安丰江，吴成，王宁飞. 水下爆炸能量耗散特性分析研究[J]. 北京理工大学学报，2011，31(4)：379-382.
An Feng-jiang, Wu Cheng, Wang Ning-fei. A research on the energy dissipation of underwater explosion[J]. Transactions of Beijing Institute of Techbology, 2011, 31(4): 379-382.

[3] 李建,荣吉利,雷旺.水下爆炸气泡运动的理论研究[J].应用力学学报,2010,27(1):120-124.
Li Jian, Rong Ji-li, Lei Wang. Research on the bubble motion in underwater explosion[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010,27(1):120-124.

[4] 牟金磊,朱锡,李海涛,等.炸药水下爆炸能量输出特性实验研究[J].高压物理学报,2010,24(2):87-92.
Mu Jin-lei, Zhu Xi, Li Hai-tao, et al. Experimental research on underwater explosion energy output of explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010,24(2):87-92.

[5] 饶国宁,陈网桦,胡毅亭,等.不同炸药水下能量输出特性的实验研究[J].爆破器材,2007,36(1):9-11.
Rao Guo-ning, Chen Wang-hua, Hu Yi-ting, et al. Experimental study on underwater energy output characteristics of different explosives[J]. Explosive Materials, 2007,36(1):9-11.

[6] 蒋国岩,金辉,李兵,等.水下爆炸研究现状及发展方向展望[J].科技导报,2009,27(9):87-91.
Jiang Guo-yan, Jin Hui, Li Bing, et al. Review of studies on underwater explosion[J]. Journal of Science and Technology, 2009,27(9):87-91.

[7] Kury J W, Horing H C, Lee E L, et al. Metal acceleration by chemical explosives[C]// Fourth Symposium (International) on Detonation. Washington DC, USA. 1965:3-13.

[8] 董海山,周芬芬.高能炸药及相关物性能[M].北京:科学出版社,1989.

[9] 龙新平,韩勇,蒋志海,等.炸药驱动水的初期过程[J].爆炸与冲击,2010,30(1):12-16.
Long Xin-ping, Han Yong, Jiang Zhi-hai, et al. Measurement and numerical simulation of initial stage about detonation products driving water[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(1):12-16.

[10] 韩勇,黄辉,黄毅民,等.含铝炸药圆筒实验与数值模拟[J]. 火炸药学报,2009,32(4):14-17.

[11] 龙新平.VLW 爆轰产物状态及纳米级含铝炸药爆炸特性研究[D].北京:北京理工大学,1999.

[12] Lee E, Breithaupt D, Mcmillan C, et al. The motion of thin metal walls and the equation of state of detonation products[R]. Albuquerque, NA, USA: Lawrence Livemore National Laboratory, 1985.

[13] Walsh J M, Rice M H. Dynamic compression of liquid from measurements on strong shock waves[J]. Journal of Chemistry Physics, 1957,26(4):815-823.

[14] 彭福泉.实用非金属材料手册[M].吉林:吉林科学技术出版社,1991:389.

Studies on the state equation of the underwater detonation products for PBX-01 explosive

Wei Xian-feng[1], Long Xin-ping[2], Han Yong[1]

(1. *Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*;
2. *China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: A method was raised by taking out the underwater explosion test to determin the JWL state equation parameters of detonation products. The PBX-01 explosive was applied and a calculating model of underwater explosion test was established by using ANSYS/LS-DYNA program. The JWL state equation parameters of detonation products for PBX-01 explosive were determined according to the comparison of the experimental and numerical results. Parameters determined by underwater explosion test and cylinder expansion test were used for detonation products driving water test. The results show that the underwater explosion test numerical simulation is accordant better in initial stage. Specially appointed patameters need to be established in the underwater explosions.

Key words: mechanics of explosion; equation of state; underwater explosion; detonation products

(责任编辑 王小飞)