文章编号：1000-5773(2010)05-0388-07

含铝炸药水中爆炸冲击波相似律适应性探索*

赵继波，谭多望，李金河，龚晏青，孙永强

（中国工程物理研究院流体物理研究所，冲击波物理与爆轰物理
国防科技重点实验室，四川绵阳 621900）

摘要：针对含铝炸药非理想性显著的特点，探索其水中爆炸后远场冲击波相似律的适用性。实验在 8 kg 当量 TNT 的爆炸水池中进行，在距离爆心不同位置处测量了冲击波压力剖面曲线，得到了峰值压力和压力衰减时间，结合量纲分析方法和含铝炸药的特点，对冲击波相似律适用性问题进行了探讨。实验结果表明，对于含铝炸药来说，存在着峰值压力相似而时间常数不太相似的特点，这与铝粉的二次反应放能有关。

关键词：爆炸力学；水中爆炸；含铝炸药；相似律
中图分类号：O383.1；TJ55 **文献标识码**：A

1 引 言

高能炸药产生的水中冲击波通常用 4 个参数进行描述，即压力峰值 p_m、时间常数 θ、比冲量 i、比能流密度 e。不同药量在不同距离产生的冲击波参数，可以根据不同的炸药类型由不同相似常数的相似律方程进行计算。但实际上，这些方程仅在一定范围内适用，就压力计算来说，指定所谓的“有效计算范围”，在大于这个范围的距离上，由于衰减和发散，冲击波强度减弱，粘性和不均匀性起重要作用；在小于这个范围的距离上，球形波阵面仍在演化过程中，炸药的爆轰仍有可能发生，这两种情况下的相似律方程均不适用。此外，在装药近场，相似律方程也显得毫无意义，因为此处冲击波速度变化显著，压力波形还没有形成其指数衰减的特征分布。

Bocksteiner[1] 曾对高度非理想炸药 PBXW-115 的性能作出评估。参试炸药的结构采用柱形装药，传爆药采用 Pentolite 炸药球，起爆方式为中心起爆，共进行了两发实验，质量分别为 24.8 和 24.9 kg。在距端面 6 m 处布置一个电气石压力传感器，在侧边距离装药中心 8 m 远且平行于对称轴的方向上布置 9 个电气石计。Bocksteiner 根据 Swisdak[2] 归纳的水中爆炸参数统一公式，得到了冲击波各参数与距离的双对数曲线，均为直线。

Cole[3] 曾指出，相似定律不适用于所有的系统内物理特征不符合几何相似的场合。其特征之一就是粘性，从纯理论的角度考虑，粘性项的加入将在流体运动方程式中出现二阶导数，从而破坏近似于线性的几何相似关系；其次，如果爆轰波的化学反应进程对冲击波性能的描述具有重要作用，相似条件也不能得到满足。通常，反应速度与波阵面的推进速度不成比例变化，炸药爆轰时滞缓的显著效应不受相似定律的约束，相似的实验误差往往是由滞缓反应或混合物的补充燃烧引起的。对于理想炸药，这种效应可以忽略；但对于含铝炸药，有研究表明，铝在反应区内不参加反应或者参加反应的量很少，在 CJ 面后才与炸药爆轰产物进行二次反应，释放能量[4]。因此，其相似律的适用性值得关注；另外，冲击波后炸药爆炸的继续发展，也是不能满足相似定律的一个因素。

* **收稿日期**：2009-08-26；**修回日期**：2009-11-10
基金项目：国家安全重大基础研究项目(51335010201)
作者简介：赵继波(1977—)，男，博士研究生，副研究员，主要从事爆炸力学研究. E-mail：abcdef_z@163.com

2　相似律的量纲分析

在 20 世纪早期,Buckingham 就已提出:每一个物理定律都可以用几个零量纲幂次的量(称之为 π)来表述,形成了模型实验以及当今普遍应用的数值模拟所遵循的原则。量纲是物理量的种类属性,物理量的量纲反映该物理量的量值随基本量的单位改变而改变的倍数。在研究一些无法用现成数学方程表达的复杂现象时,需要对蕴含的物理环节、关系和过程进行初步分析,明确哪些参数或现象对问题起到控制作用,分析主导作用的参数,即用量纲分析的方法来分析问题[5]。

炸药在水中爆炸后,形成向四周传播的冲击波,在爆炸远场距离爆心一定距离处,冲击波阵面逐渐扩展为球形冲击波。实验测量得到的水中爆炸冲击波的压力随时间的变化,可以近似用指数衰变律表示,即有

$$p = p_{\mathrm{m}} \mathrm{e}^{-t/\theta} \tag{1}$$

式中:p_{m} 指峰值压力,θ 为时间常数。

决定水中爆炸冲击波强度特征的控制参数来自以下 3 个方面:(1) 炸药参数,包括炸药量 Q,装药密度 ρ_{e},单位质量炸药所释放的化学能 e_{e},爆炸产物的膨胀指数 γ_{e};(2) 水的参数,包括初始密度 ρ_{w},状态方程压力参数 B,绝热指数 γ_{w};(3) 水中爆炸冲击波离开爆源中心的距离 R。于是,冲击波峰值压力 p_{m} 和压力持续时间 θ 应当是上述控制参数的函数,即

$$\begin{cases} p_{\mathrm{m}} = f(Q,\rho_{\mathrm{e}},e_{\mathrm{e}},\gamma_{\mathrm{e}};\rho_{\mathrm{w}},B,\gamma_{\mathrm{w}};R) \\ \theta = g(Q,\rho_{\mathrm{e}},e_{\mathrm{e}},\gamma_{\mathrm{e}};\rho_{\mathrm{w}},B,\gamma_{\mathrm{w}};R) \end{cases} \tag{2}$$

以质量、长度和时间的量纲 M、L 和 T 作为基本量纲。取炸药的控制参数 Q、ρ_{e} 和 e_{e} 作为分析本问题的基本量,则其量纲分别为 M,M/L^3 和 M^2/T^2。(2)式可化为下面的无量纲关系

$$\begin{cases} \dfrac{p_{\mathrm{m}}}{\rho_{\mathrm{e}} e_{\mathrm{e}}} = f[\gamma_{\mathrm{e}};\rho_{\mathrm{w}}/\rho_{\mathrm{e}},B/\rho_{\mathrm{e}}e_{\mathrm{e}},\gamma_{\mathrm{w}};R/(Q/\rho_{\mathrm{e}})^{1/3}] \\ \dfrac{\theta}{(Q/\rho_{\mathrm{e}})^{1/3}/e_{\mathrm{e}}^{1/2}} = g[\gamma_{\mathrm{e}};\rho_{\mathrm{w}}/\rho_{\mathrm{e}},B/\rho_{\mathrm{e}}e_{\mathrm{e}},\gamma_{\mathrm{w}};R/(Q/\rho_{\mathrm{e}})^{1/3}] \end{cases} \tag{3}$$

如果采用相同种类的炸药在水中做小模型实验,有 6 个有关的控制参数与原型参数保持相同,即

$$(\rho_{\mathrm{e}},e_{\mathrm{e}},\gamma_{\mathrm{e}};\rho_{\mathrm{w}},B,\gamma_{\mathrm{w}}) = C \tag{4}$$

式中:C 为常数。无量纲的峰值压力和压力持续时间可简化为

$$\begin{cases} p_{\mathrm{m}} = (\rho_{\mathrm{e}}e_{\mathrm{e}}) \cdot f[R/(Q/\rho_{\mathrm{e}})^{1/3}] \\ \theta = (Q/\rho_{\mathrm{e}})^{1/3}\Big/e_{\mathrm{e}}^{1/2} \cdot g\,[R/(Q/\rho_{\mathrm{e}})^{1/3}] \end{cases} \tag{5}$$

由于 $(Q/\rho_{\mathrm{e}})^{1/3}$ 表征炸药的特征长度,可见水下冲击波的压力峰值和持续时间服从几何相似律。在炸药种类选定的情况下,ρ_{e} 和 e_{e} 一般为一定值,可以使用更加简化的表达式

$$\begin{cases} p_{\mathrm{m}} = f(R/Q^{1/3}) \\ \theta = Q^{1/3} \cdot g\ (R/Q^{1/3}) \end{cases} \tag{6}$$

需要指出的是,(6)式中的两个表达式其左、右两端的量纲是不同的,表达式在理论上不应成立,之所以简化,是采用了两个隐含假设:(1) 不同比例的模型采用和原型相同种类的炸药,所以表达式本应包含的 ρ_{e} 和 e_{e} 保持相同,对 p_{m} 和 θ 的大小影响保持不变;(2) 对出现在表达式中的两个自变量 R 和 Q 以及两个因变量 p_{m} 和 θ,都应预先规定好所使用的单位,表达式就变成了纯数之间的函数关系。在本工作中,约定用 m、kg 和 μs 分别作为距离、药量和压力持续时间的单位,用 Pa 作为压力峰值的单位。定义比例距离 R^* 为

$$R^* = R/Q^{1/3} \tag{7}$$

对于理想炸药,如 TNT,(6)式能较好地揭示其冲击波峰值压力和持续时间的几何相似律。但对于非理想炸药尤其是含铝炸药,情况就很复杂,相似律不一定满足。首先,铝在反应区不参加反应或少量反应,在爆轰后与产物进行二次反应,释放能量,e_{e} 有可能是时间 t 的函数;其次,含铝炸药对尺度效应

很敏感,其达到稳定爆轰时的极限尺寸较大,在较小尺寸装药时发生的爆轰均为不稳定爆轰,e_e 也有可能是装药量 Q 的函数。这两种情况均使(5)式或(3)式不能简化为(6)式,有可能不满足相似定律所要求的几何线性关系。因此,能否应用(5)式和(6)式揭示含铝炸药水中爆炸后远场冲击波阵面上物理量的几何相似关系还需要用实验进行验证。

3 实 验

3.1 实验炸药

实验中采用 GUHL-1 和 RS211 两种含铝炸药。其中 RS211 为典型的含铝炸药,以 RDX 为主体加入铝粉构成,密度约为 1.70 g/cm^3,爆速约为 7200 m/s;GUHL-1 为典型的铝/氧复合炸药,含有大量的铝和其它帮助完成铝氧化的非理想成分,密度约为 1.80 g/cm^3,爆速约为 5450 m/s,是当前新型鱼雷的主要装药之一。含铝炸药的尺寸太小或约束条件不好,非理想组分将不会完全反应,形成不稳定爆轰。RS211 炸药的起爆质量较小,而 GUHL-1 炸药的最小起爆质量为 300 g。为使两种炸药完全爆轰,消除单位质量炸药化学能 e_e 的影响,实验用炸药的最小质量取为 1 kg,最大质量则根据炸药 TNT 当量和水池爆炸允许当量确定。

为了使爆炸冲击波在水中尽快球形化,炸药应采用球形装药或尽可能接近球形的装药。受加工的限制,本研究采用两种形态的装药进行实验,对于质量较小的含铝炸药,采用长径比为 1.2∶1 的短圆柱装药;对于质量较大的含铝炸药,采用球形装药。所有实验的起爆方式均采用中心起爆,每种形态各进行两发实验。

3.2 实验布局

实验在 8 kg TNT 当量爆炸水池中进行。实验时,将炸药放置于水下 12 m 爆炸水池的中心,在与炸药处于同一水平面的一条直线上布置 8 个 PCB138 压力传感器进行记录。为消除铝粉与爆轰产物二次反应释放能量的影响,传感器应尽可能地远离爆心。将最近的传感器布置在距离炸药爆心 1.5 m 的测点上,最远的传感器布置在距离炸药爆心 11 m 处。由于越靠近炸药装药的地方其压力衰减越快,因此,炸药附近的传感器之间的距离相对较小,且传感器的灵敏度更小,使测试的峰值压力更接近真实值。实验布局见图 1,传感器位置见表 1。

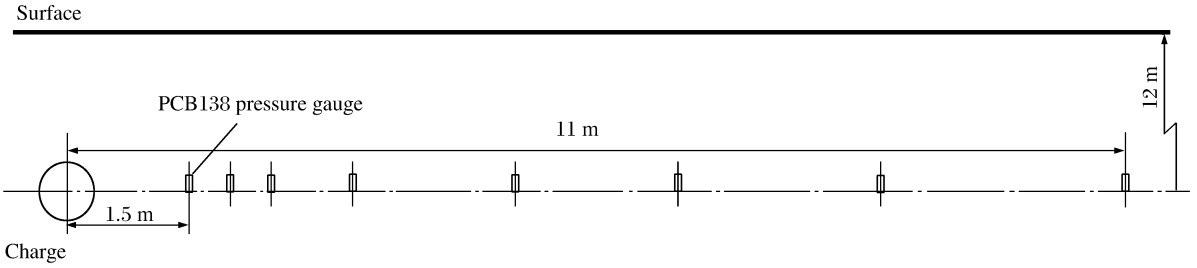


图 1 实验布局

Fig. 1 Experimental layout

表 1 传感器位置

Table 1 Location of sensors

Charge	Mass/(kg)	No. sensors & distances to central of charge R/(m)							
		1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
RS211	1.0	1.5	2.0	2.5	3.5	5.0	7.5	9.5	11.0
	2.5	1.5	2.0	2.5	3.5	5.0	7.5	9.5	11.0
	5.0	1.5	2.0	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
GUHL-1	1.0	1.5	2.0	2.5	3.5	5.0	7.5	9.5	11.0
	1.8	1.5	2.0	2.5	3.5	5.0	7.5	9.5	11.0
	3.0	1.5	2.0	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5

3.3　实验结果

实验所用的 8 个 PCB138 压力传感器较好地响应了炸药在水中爆炸产生的冲击波压力时间历程,通过示波器记录了不同距离处压力变化的电压信号,结合传感器灵敏度的标定结果,可以得到不同距离典型的压力变化情况,如图 2 所示。由压力时间历程图可以很明显地看出,冲击波在传播过程中,随着距离的增大,峰值压力不断下降。各测点位置所对应的冲击波峰值压力见表 2。

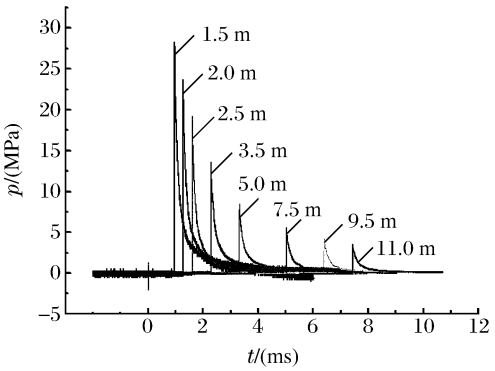


图 2　不同位置处典型的压力剖面曲线

Fig. 2　Typical pressure sections at different locations

时间常数 θ 是指压力从峰值 p_m 降为 p_m/e 时所经历的时间,e 为自然对数。在这段时间内,压力呈指数规律衰减,由(1)式表述。将(1)式对时间取对数,可得

$$\ln p(t) = \ln p_m - t/\theta \tag{8}$$

(8)式表明,$\ln p(t)$是关于时间 t 的一条直线,斜率即为$-1/\theta$。根据曲线得到的各测点上冲击波的时间常数见表 3。

表 2　各测点位置所对应的冲击波压力峰值

Table 2　Peak pressures of shock at different distance

Charge	Mass/(kg)	Peak pressure p_m/(MPa)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
RS211	1.0	37.46	27.54	21.35	15.23	8.82	6.10	4.57	3.90
	2.5	53.41	42.66	30.18	20.71	14.17	8.15	6.24	5.32
	5.0	72.21	49.31	38.99	27.22	18.42	16.06	12.99	10.82
GUHL-1	1.0	28.09	23.69	19.35	13.52	8.56	5.57	4.27	3.58
	1.8	39.76	30.01	24.56	17.23	10.27	6.66	5.26	4.59
	3.0	47.70	33.94	27.16	18.33	15.21	11.33	9.39	7.96

表 3　各测点位置对应的冲击波时间常数

Table 3　Time constants of shock at different distance

Charge	Mass/(kg)	Time constant θ/(ms)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
RS211	1.0	0.103	0.113	0.116	0.127	0.189	0.144	0.168	0.179
	2.5	0.136	0.137	0.178	0.179	0.174	0.200	0.212	0.219
	5.0	0.169	0.184	0.188	0.212	0.214	0.228	0.242	0.243
GUHL-1	1.0	0.166	0.159	0.141	0.172	0.189	0.182	0.200	0.203
	1.8	0.167	0.177	0.170	0.196	0.282	0.244	0.241	0.220
	3.0	0.187	0.211	0.218	0.239	0.281	0.251	0.260	0.259

4　压力峰值和时间常数的相似分析

结合(6)式与(7)式,可定义 $\theta/Q^{1/3}$ 为对比时间常数。由实验结果拟合得到两种含铝炸药水中爆炸冲击波对比距离的倒数 $1/R^*$ 与峰值压力 p_m、对比时间常数之间的关系曲线,如图 3～图 4 所示。拟合

形式选用形如(6)式的公式(9)

$$C_1 = K(1/R^*)^{\alpha} \tag{9}$$

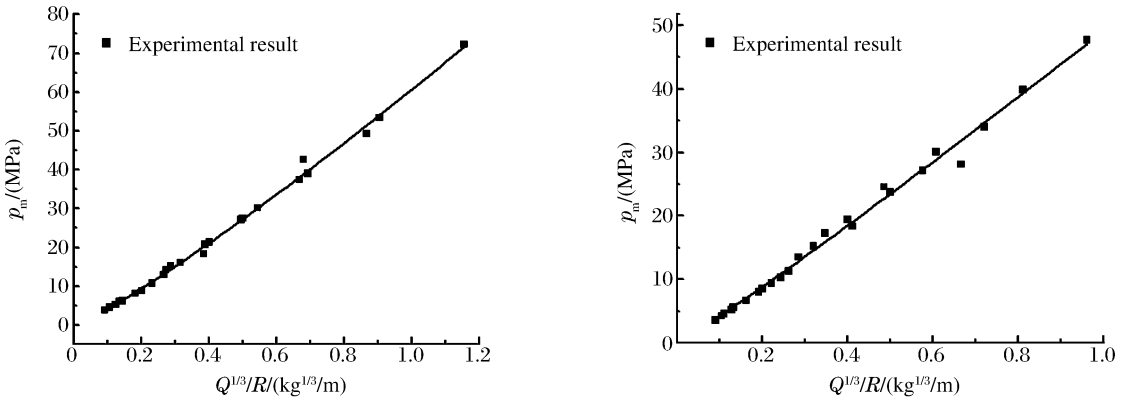
式中:C_1 为峰值压力 p_m 或对比时间常数 $\theta/Q^{1/3}$。

根据(9)式可得到峰值压力和对比时间常数相似律的拟合系数,见表 4。由于实验数据反映的时间常数不太符合相似律,因而表 4 中的时间常数拟合系数仅根据图 4 中的回归曲线求得。

表 4 相似曲线的拟合系数

Table 4 Fitting parameters of similar curve

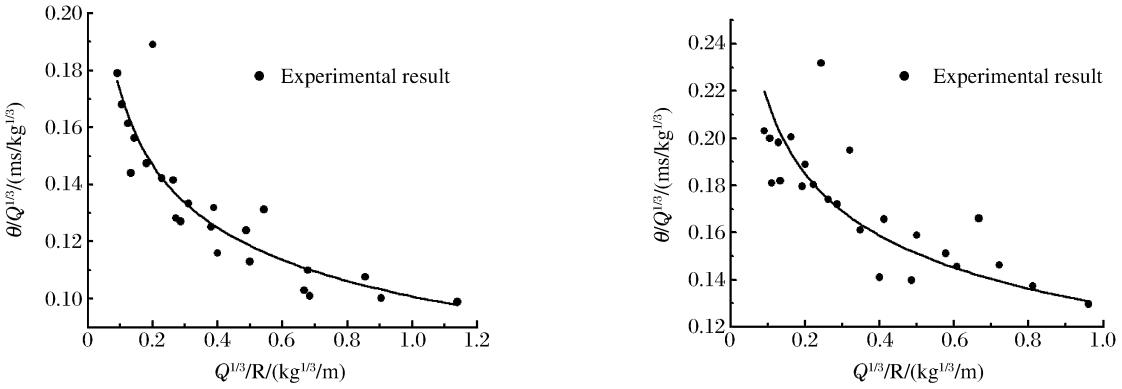
Charge	Parameters of peak pressure		Parameters of contrastive time constant	
	K_p	α_p	K_θ	α_θ
RS211	60.64	1.15	0.101	−0.23
GUHL-1	49.07	1.07	0.130	−0.22



(a) RS211 (b) GUHL-1

图 3 对比距离与峰值压力的关系

Fig. 3 The relation between contrastive distance and peak pressure



(a) RS211 (b) GUHL-1

图 4 对比距离与对比时间常数的关系

Fig. 4 The relation between contrastive distance and time constant

从图 3 中可以看出,RS211 和 GUHL-1 炸药在水中爆炸后,其远场的冲击波峰值压力服从(9)式所描述的函数关系。RS211 炸药的数据点与拟合曲线符合较好,说明 RS211 装药在水中完全爆轰的情况下,可以使用相似律求解冲击波阵面的远场峰值压力;GUHL-1 炸药具有高度非理想性,含有较高的 AP(氧化剂)和较低的 RDX/Al,后期释放的能量将增加,二次反应过程将延长。其实验结果显示,当 $Q^{1/3}/R$ 较小,即对比距离 R^* 较大时,数据点的相似关系符合得较好,当对比距离较小时,数据点产生离散。这说明在远场范围内距离爆心较近处,混合物与爆轰产物的二次反应仍未结束,滞缓反应或混合物的补充燃烧可能引起相似的实验误差;在距离爆心较远处,冲击波强度在水中自由衰减,相似效应变得更加显著。

从图 4 中可以看出,RS211 和 GUHL-1 炸药在水中爆炸后,在远场的对比时间常数不太服从(9)式所描述的函数关系,曲线显示出对比时间常数的数据点均比较离散。其原因如下:(1) 时间常数的读数误差较大,不如压力峰值数据读取精确;(2) 在对比距离较大处,冲击波压力历程将受到水池边界反射的影响;(3) 在对比距离较小处,压力受到二次反应的影响;(4) 时间常数与铝粉的燃烧反应速率直接相关[6]。这些因素都将使时间常数的确定变得困难。对比两种含铝炸药的结果,发现 GUHL-1 炸药的数据较 RS211 炸药更分散,这也说明铝/氧复合体系的含铝炸药在水中爆炸时,铝粉的燃烧速率和二次反应的机理更加复杂,其非理想性程度更高,相似律的应用将会受到更大的限制。

实验表明,含铝炸药水中爆炸冲击波的峰值压力符合相似律,但时间常数不太符合相似律。综合分析含铝炸药在水中爆炸后铝粉与氧化剂的二次反应机理,可以进一步认为,水中爆炸冲击波波阵面的速度高,通过水介质迅速向四周传播,铝粉与氧化剂二次反应的放能速率相对波的传播是一个慢过程,产生的能量变化对波阵面影响不大,而峰值压力是波阵面通过一个固定点时的瞬间突跃,可认为是波阵面传播过程中的直接反映,因此受二次反应放能的影响也不大,可以满足相似规律;但二次反应放能作为对冲击波传播过程中的能量补充,对冲击波波后状态的影响较大,体现在波剖面曲线上即减缓了冲击波压力的衰减速率,与理想炸药产生的相同峰值压力的冲击波剖面历程相比,含铝炸药冲击波剖面的时间常数会相应地发生变化。另外,对于相同种类、不同质量的含铝炸药来说,受尺寸效应等因素的影响,时间常数的变化并非呈线性增加或减少,因此含铝炸药水中爆炸冲击波时间常数的相似性将会受到一定的影响。

5　结　论

含铝炸药水中爆炸冲击波存在着压力峰值相似而时间常数不太符合相似律的现象,这是因为铝粉和氧化剂的二次反应影响到冲击波的压力衰减。因此,相似律应在一定的范围内使用,即消除铝粉与爆轰产物的二次反应所释放的能量对冲击波传播的影响。在确定相似律适用范围时应注意两点:(1) 减小含铝炸药的尺度效应,所用炸药的尺寸应能使其发生完全、稳定的爆轰;(2) 在测试上应留出足够的时间使铝粉充分反应,使冲击波的发展得不到后续能量的补充,反映在空间上即要适当加大相似律的“有效计算范围”。

References:

[1] Bocksteiner G. Evaluation of Underwater Explosive Performance of PBXW-115(AUST) [R]. Melbourne, Vic:DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory,1996.

[2] Swisdak M M. Explosion Effects and Properties: Part Ⅱ—Explosion Effect in Water [R]. Dahlgren, Virginia, USA:Naval Surface Weapons Center,1978.

[3] Cole R H. Underwater Explosions [M]. Princeton,NJ:Princeton University Press,1948.

[4] Chen L,Long X P,Feng C G,et al. Detonation of Aluminized Explosive [M]. Beijing:National Defence Industry Press,2004. (in Chinese)

陈 朗,龙新平,冯长根,等. 含铝炸药爆轰 [M]. 北京:国防工业出版社,2004.

[5] Tan Q M. Dimensional Analysis [M]. Hefei: University of Science and Technology of Chain Press, 2007. (in Chinese).
谈庆明. 量纲分析 [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2007.

[6] Zhou J X, Xu G G, Wang T Z. Characteristic Analysis of Shock Wave for Underwater Explosion of Aluminized Explosive [J]. Blasting, 2005, 22(1): 41-43. (in Chinese)
周俊祥,徐更光,王廷增. 铝化炸药水下爆炸冲击波特性分析 [J]. 爆破,2005,22(1):41-43.

Investigation on Applicability of Shock Similar Law for Underwater Explosion of Aluminiferous Explosive

ZHAO Ji-Bo, TAN Duo-Wang, LI Jin-He, GONG Yan-Qing, SUN Yong-Qiang

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Aiming at the notable non-ideal characteristic of aluminiferous explosive, applicability of shock similar law at underwater explosion far-field is explored. Experiments are carried out in the blast-pond, in which pressure sections of shock wave are tested at different distance to charge center. Peak pressure and time constant are obtained. Combining dimension analysis and characteristic of aluminiferous explosive, applicability of shock similar law is discussed. It is shown that energy produced by the reaction of aluminum power and detonable production should be eliminated, while shock similar law is applied to aluminiferous charge.

Key words: mechanics of explosion; underwater explosion; aluminiferous explosive; similar law