

文章编号: 1006-9941(2011)03-0315-06

# 泡沫铝壳对水下爆炸冲击波衰减的影响

倪小军<sup>1</sup>, 沈兆武<sup>1</sup>, 杨昌德<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230026; 2. 南岭澳瑞凯公司, 湖南 平蓬江 414517)

**摘要:** 为了研究泡沫铝材料对水下爆炸冲击波的衰减特性, 将泡沫铝材料制成不同壁厚的泡沫铝壳, 初步研究了泡沫铝壳对水下爆炸冲击波衰减的影响。利用水下压力测试系统, 分别测试了裸太安(PETN)药柱和将 PETN 药柱分别放入壁厚为 1.5, 2.5, 3.5 cm 的泡沫铝壳中爆炸条件下, 距药柱 0.5 m 处的冲击波时程压力。通过对数据分析, 发现泡沫铝壳不仅可以消减爆炸冲击波峰值压力, 而且可以有效地吸收冲击波比冲量和冲击波比能。同时, 利用水下摄影系统记录了泡沫铝壳在爆炸载荷作用下变形、破碎和运动的过程。结果表明: 泡沫铝壳通过自身的压缩变形和破碎来消耗爆炸冲击波的能量, 进而起到对水下爆炸冲击波的消减作用; 泡沫铝壳的壁厚对水下冲击波衰减的影响十分明显。

**关键词:** 爆炸力学; 泡沫铝壳; 水下爆炸; 冲击波衰减; 峰值压力; 水下摄影

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.03.016

## 1 引言

泡沫铝因具有减震、吸能、抗冲击等性能, 在民用和军事防护中的应用也越来越受到重视, 并已被广泛应用于各类结构物的抗爆炸耐冲击防护工程。其中, 泡沫铝材料的一个重要应用方面是作为吸收冲击和爆炸的吸能材料。目前, 有关泡沫铝在空气中的抗爆和冲击波衰减特性的研究, 已经通过实验和数值模拟等手段, 取得了一些研究成果<sup>[1-3]</sup>。对于水下环境, 李顺波等<sup>[4]</sup>通过数值模拟研究了泡沫铝对水下爆炸冲击波的衰减规律。泡沫铝材料对水下爆炸冲击波衰减特性是评价其水下吸能防护性能的基础, 对爆炸防护设计有重要的参考和应用价值。因此进一步研究此类材料对水下爆炸冲击波衰减的影响就显得尤为重要。

本实验利用水下爆炸测试系统, 测量了在爆炸冲击波与不同壁厚的泡沫铝壳相互作用后, 于固定测点处的水下爆炸冲击波波形, 同时利用高速摄像机对水下爆炸情况进行记录, 进而系统地研究泡沫铝对水下爆炸冲击波衰减的影响, 为水下爆炸防护提供了可行的手段。

收稿日期: 2010-08-16; 修回日期: 2010-09-10

基金项目: 安徽省教育厅安徽省高等学校省级自然科学基金重大项目(编号: KJ2010ZD03)

作者简介: 倪小军(1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为爆炸力学与安全工程。e-mail: nixj@mail.ustc.edu.cn

## 2 实验部分

### 2.1 测试原理

炸药在水中爆炸爆轰波传播到药柱和水交界面时, 爆轰波会转化为冲击波在水中传播。冲击波信号可以通过水中压力传感器捕捉, 并经电荷放大, 由电缆传输到示波器可以获得距药柱一定距离测点处的压力时程曲线。在固定水深和测点距离的情况下, 测点处的冲击波形状和压力时程曲线因泡沫铝几何参数的变化而不同。同时, 水中冲击波压力<sup>[5-7]</sup>随时间近似呈指数衰减, 可以表示为

$$p(t) = p_m e^{-t/\theta} \quad (1)$$

式中,  $p_m$  峰值压力, MPa;  $\theta$  是指数衰减的时间常数, 即取压力从峰值  $p_m$  衰减到  $p_m/e$  所需的时间间隔, s。所以, 可以通过测试系统获得的压力时程曲线算得  $\theta$  值。在确定  $\theta$  值后, 可以计算出评价炸药水下爆炸能量输出的另外两个重要参数: 比冲量  $I$  和冲击波比能  $E_s$ , Cole<sup>[5]</sup> 建议  $I$  和  $E_s$  积分上限分别取  $5\theta$  和  $6.7\theta$ 。则比冲量  $I$  的计算公式取为

$$I = \int_0^{5\theta} p(t) dt \quad (2)$$

Bjarnholt<sup>[8]</sup> 指出测点在距炸药  $3.5 W^{1/3} \sim 7.0 W^{1/3}$  (其中  $W$  为炸药的质量, kg) 范围内, 长径比小于 10 的柱状炸药爆炸冲击波都可以看作球形药爆炸冲击波。所以  $E_s$  计算公式取为

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{\rho_w C_w W} \int_0^{6.7\theta} p^2(t) dt \quad (3)$$

式中,  $E_s$  为冲击波比能,  $J \cdot kg^{-1}$ ;  $R$  为距爆源的距离,  $m$ ;  $\rho_w$  为水的密度, 取  $1000 kg \cdot m^{-3}$ ;  $C_w$  为水中声速, 取  $1460 m \cdot s^{-1}$ ;  $p(t)$  为距爆源为  $R$  处的冲击波压力,  $Pa$ ;  $t$  为冲击波在距爆源为  $R$  处的作用时间,  $s$ 。最后, 通过压力测试系统获得不同试样的水下爆炸压力时程曲线, 经过数据处理可以获得各个试样峰值压力  $p_m$ 、时间常数  $\theta$ 、冲击波比能  $E_s$  等参数。

## 2.2 试验样品

炸药采用 PETN。装药方式柱状装药, 将 PETN 装入壁厚为  $0.03 cm$  的铝管内, 药柱外形尺寸为  $\Phi 0.7 cm \times 4 cm$ , 装药量为  $0.5 g$ , 装药密度  $0.9 g \cdot cm^{-3}$ , 装药高度为  $1.73 cm$ , 采用飞片起爆。泡沫铝选用闭孔型, 密度为  $0.48 g \cdot cm^{-3}$ 。试样样品共计 4 组, 一组 (I 型, 对照组) 是光药柱 (药柱四周没有套上泡沫铝防壳) 和另外三组 (II 型, 防护组) 药柱四周套上不同厚度的泡沫铝圆柱壳, 每组 3 个平行试样。泡沫铝圆柱壳是由 6 块厚度为  $1 cm$  的泡沫铝圆板沿板面法向叠加, 使用 502 胶粘结而成, 并在叠加后的多层圆板中心处自上而下开一个  $\Phi 0.7 cm \times 4 cm$  的圆柱孔, 圆柱壳高为  $6 cm$ , 厚度分别为  $1.5, 2.5, 3.5 cm$ 。因此, 套有不同壁厚的圆柱壳的药柱所对应 II 型试样类型可细分为 II-1.5、II-2.5 和 II-3.5; 各类防护试样如图 1 所示。在实验过程中, 防止水从泡沫铝的孔隙和缝隙渗入, 影响泡沫铝的物理力学性质, 进而干扰对泡沫铝的水下冲击波衰减特性的测定。因此, 对所有 II 型试样表面加涂一层环氧树脂, 以阻隔水渗入泡沫铝材料中。

## 2.3 水下爆炸实验系统

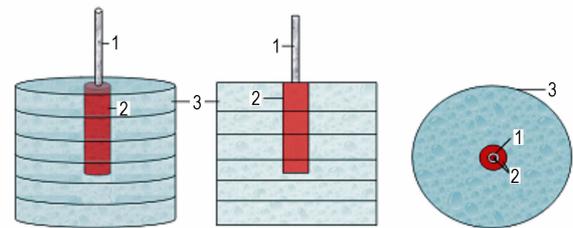
实验在水下爆炸容器中进行, 容器为圆形钢结构, 壁厚  $26 mm$ , 高  $2.5 m$ , 直径  $2 m$ 。压力测试仪器主要有美国 PBC 公司生产的 W138A25 长型电气石水下冲击波压力传感器 (ICP) 和 482A22 型恒流源, 以及美国派克公司的 DP07054 型示波器; 摄像仪器为德国 Optronics 公司 CamRecord1000 高速摄像机。实验装置平面布置如图 2 所示。试样与压力传感器尽量保持在同一水深  $1.2 m$  处, 二者水平间距固定为  $0.5 m$ ; 同时, 试样应放置在摄像机的最佳视场范围内, 以保证最佳的成像效果。

## 3 实验结果及分析

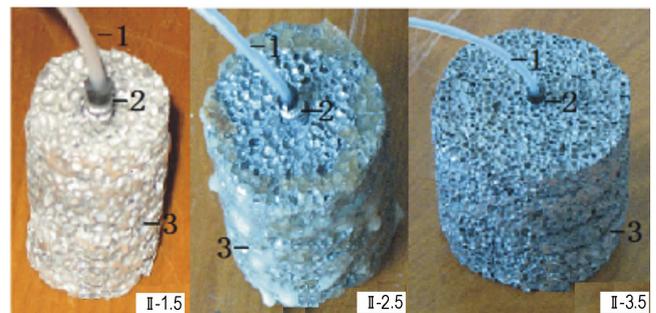
### 3.1 各试样压力峰值测试结果

水下激波压力传感器测到的距 I 型试样药柱

$0.5 m$  测点处爆炸冲击波压力时程曲线如图 3 所示。图 4 和图 5 分别记录了距 II-1.5 和 II-2.5 型防护试样  $0.5 m$  测点处的压力时程曲线。在测试过程中, 由于测试系统上方存在高压线干扰电压信号, 使得触发压力值在低于  $4.674 mV$  (换算为压力值为  $0.2 MPa$ ) 的情况下, 示波器易被误触发。所以, 在测试 II-3.5 试样时, 将触发压力值设置为  $0.21 MPa$ , 结果示波器未被触发, 由此可知距离 II-3.5 试样  $0.5 m$  处的压力峰值低于  $0.21 MPa$ 。各次试验测试结果见表 1。



a. structural diagram



b. real photograph

图 1 防护组试样

1—导爆管, 2—标准药包, 3—泡沫铝防护层

Fig. 1 Protection group samples

1—detonating tube, 2—charge, 3—aluminum foams

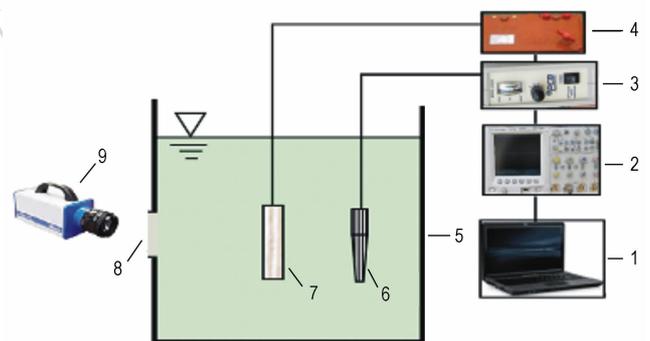


图 2 实验装置示意图

1—电脑, 2—示波器, 3—电荷放大器, 4—起爆器, 5—爆炸容器, 6—压力传感器, 7—试样, 8—视窗, 9—摄影机

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

1—computer, 2—oscilloscope, 3—charge amplifier, 4—initiator, 5—explosion vessel, 6—sensor, 7—sample, 8—windows, 9—camera

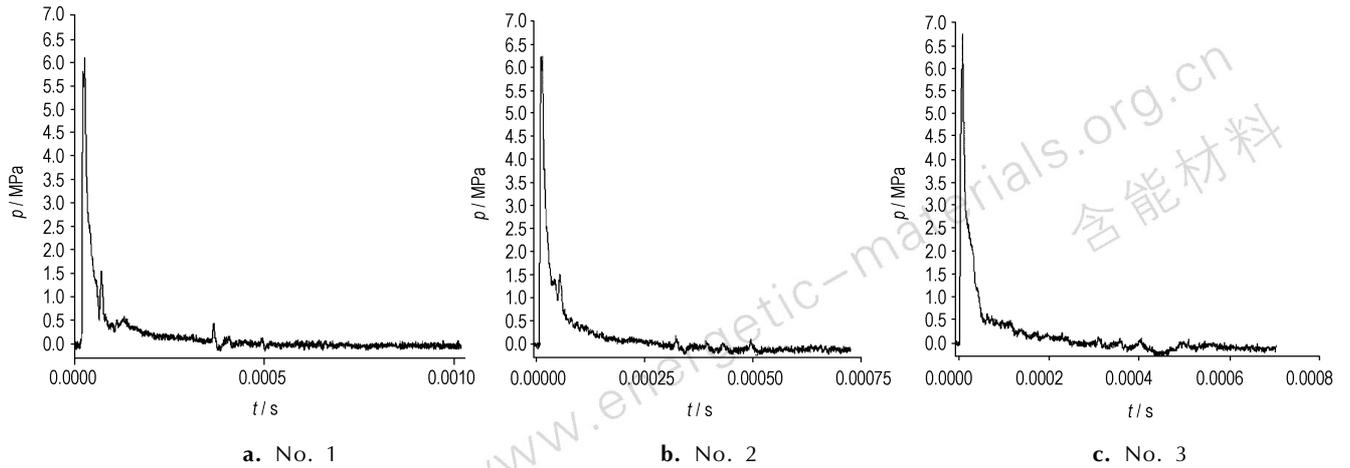


图3 I型试样冲击波压力曲线  
Fig.3 Shock wave pressure-time curves of sample I

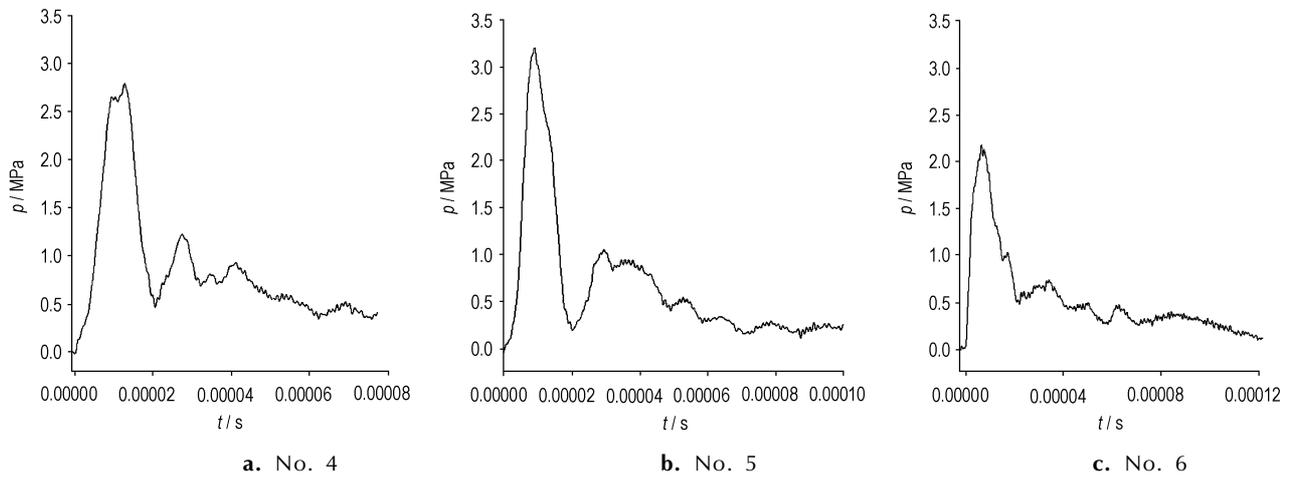


图4 II-1.5型试样冲击波压力曲线  
Fig.4 Shock wave pressure-time curves of sample II-1.5

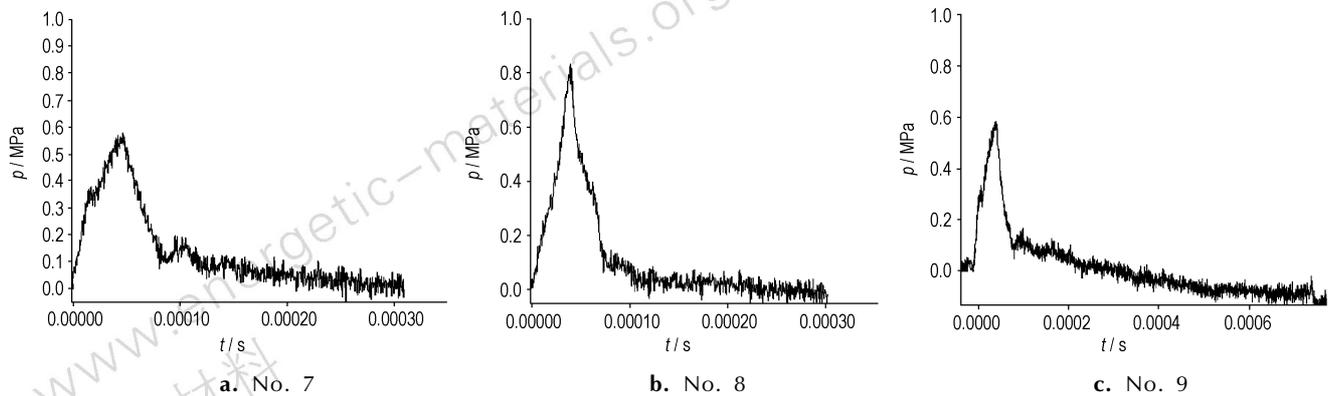


图5 II-2.5型试样冲击波压力曲线  
Fig.5 Shock wave pressure-time curves of sample II-2.5

表 1 实验测得各试样的冲击波参数

Table 1 Shock wave parameters of samples

No.	type of samples	$\theta$ / $\mu\text{s}$	$p_m$ / $\text{MPa}$	$l$ / $\text{kPa} \cdot \text{s}$	$E_s$ / $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
1	I	16	6.088	0.141	1.84
2	I	16	6.225	0.160	2.00
3	I	12	6.758	0.168	1.81
4	II-1.5	5	2.798	0.086	0.325
5	II-1.5	7	3.208	0.082	0.382
6	II-1.5	12	2.181	0.087	0.247
7	II-2.5	30	0.577	0.036	0.054
8	II-2.5	30	0.832	0.033	0.063
9	II-2.5	30	0.582	0.035	0.053

### 3.2 泡沫铝厚度对测点处冲击波峰压的影响

PETN 药柱的峰值压力<sup>[9]</sup>可以按下式计算:

$$p_m = 52.4 \left( \frac{W^{1/3}}{R + 0.5l} \right)^{1.13} \quad (4)$$

式中,  $W$  为炸药的水中爆炸 TNT 当量, kg;  $R$  为距药柱中心的距离, m;  $l$  为药柱装药长度, m。对于 PETN 炸药的水中爆炸 TNT 当量系数的换算关系<sup>[10]</sup>为:

$$Q_{\text{TNT}} = E_{\theta, \text{PETN}} / E_{\theta, \text{TNT}} \quad (5)$$

式中,  $Q_{\text{TNT}}$  为 PETN 炸药水中爆炸冲击波参数的 TNT 当量系数;  $E_{\theta, \text{PETN}}$  为 PETN 炸药水中爆炸的冲击波能,  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $E_{\theta, \text{TNT}}$  为 TNT 炸药水中爆炸的冲击波能,  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。炸药冲击波能<sup>[11]</sup>的理论计算公式为:

$$E_{\theta, \text{理论}} = 1.04 \left( \frac{W_{\text{TNT}}^{1/3}}{R} \right)^{0.05} \quad (6)$$

式中,  $E_{\theta, \text{理论}}$  为冲击波能的理论计算值,  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $W_{\text{TNT}}$  为某种炸药空中爆炸 TNT 当量, kg。本实验 PETN 药柱装药量为 0.5 g, 装药长度为 1.73 cm, TNT 当量系数为 1.29。联立式(5)和(6), 可得 PETN 炸药水中爆炸 TNT 当量系数为 1.0043。最后, 由式(4)可计算距离爆源 0.5 m 处的冲击波峰值压力为 6.433 MPa。由表 1 可知道, 距离 PETN 药柱 0.5 m 处的实测冲击波平均峰值压力为 6.357 MPa。若以实测值为准, 则理论计算值和实测值的相对误差仅为 1.2%, 说明压力测试结果真实可信。

由表 1 可知, 当圆柱形泡沫铝厚分别为 1.5 cm (与药柱半径之比为 1.14) 和 2.5 cm (与药柱半径之比为 2.57) 时, 其平均峰值压力由 6.357 MPa 分别降低到 2.729 MPa 和 0.664 MPa。各类型试样平均峰值压力柱形图如图 6 所示。由图 6 可知, 当泡沫铝壁厚增至 3.5 cm (与药柱半径之比为 4) 时, 平均峰值压力减少到 0.21 MPa 以下。因此, 泡沫铝壳能很好地

将爆炸冲击波的峰值压力降低, 壁厚为 1.5, 2.5, 3.5 cm 泡沫铝壳对药柱冲击波平均峰值压力降幅分别达 57.1%、89.6% 和 96.7%。可以看出, 药柱在泡沫铝壳内爆炸, 随着泡沫铝壳壁厚的增加压力峰值不断减少, 但衰减趋势不断趋缓。即在水下爆炸条件下, 峰值压力随泡沫铝壳壁厚的增加趋于一定的数值后, 泡沫铝壳壁厚的增加对峰值压力影响不大。

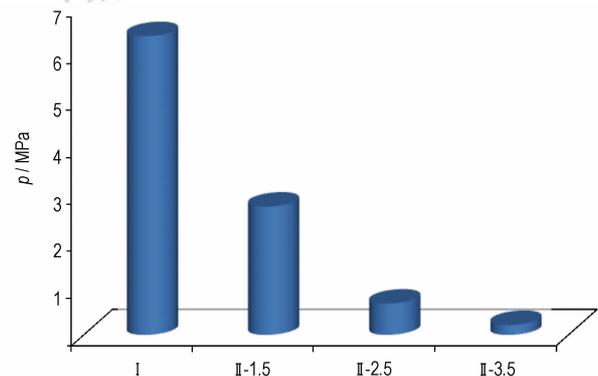


图 6 各类型试样的平均峰值压力

Fig. 6 Average peak pressures of samples

### 3.3 泡沫铝厚度对测点处比冲量和冲击波比能的影响

距各类试样 0.5 m 各测点处的平均冲击波比冲量 ( $l$ ) 和冲击波比能 ( $E_s$ ) 分别见图 7 和 8。由图 7 和图 8 可知, II-2.5 泡沫铝防护试样对比冲量  $l$  和冲击波比能的消减效果都优于 II-1.5 试样。随着 II 试样泡沫铝壳壁厚的增加, 比冲量  $l$  和冲击波比能不断衰减, II-2.5 防护试样中的泡沫铝壳对比冲量和冲击波比能的衰减量百分比分别为 77.8% 和 97%; 而 II-1.5 型试样对  $l$  和  $E_s$  的衰减量百分比分别为 45.6% 和 83.1%。

### 3.4 水下摄影和试样回收分析

试验过程中使用高速相机对爆炸容器内水下爆炸过程进行记录。相机在  $50 \text{ s}^{-1}$  幅频下, 记录了 II-2.5 试样在水下爆炸载荷作用下的变形、破碎和运动过程, 水下摄影结果见图 9。由图 9 可以看出, 泡沫铝壳在内爆炸载荷作用下被破碎成不同块径的碎块, 且大部分碎块被抛洒在距爆源 15 cm 的范围内, 由于重力作用大部分碎块沉入水中。

实验测试结束后, 对部分浮于水表面的试样残片进行回收。回收试样残片见图 10。通过水下摄像照片和试样回收发现, 泡沫铝壳大部分被破碎并沉入水中, 其余试样残片浮于水面。即在爆炸载荷作用下, 大部分泡沫铝的密度由原先  $0.48 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  增加到大于水的密度  $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。其中, II-1.5 被完全破碎, 而

II-2.5 和 II-3.5 型试样底部两层泡沫铝圆板在药柱爆炸后,以较为完整的形式保持,并浮在水面上。试样底部两层圆板在冲击波冲压下形成一个近似球冠形的  $\Phi 17 \sim 25$  mm 凹坑,凹坑边缘处有大的裂纹,如图

10 所示。由此可以推知,泡沫铝材料通过自身的压缩变形和破碎来耗散爆炸冲击波能量,进而起到消减冲击波能量的作用。

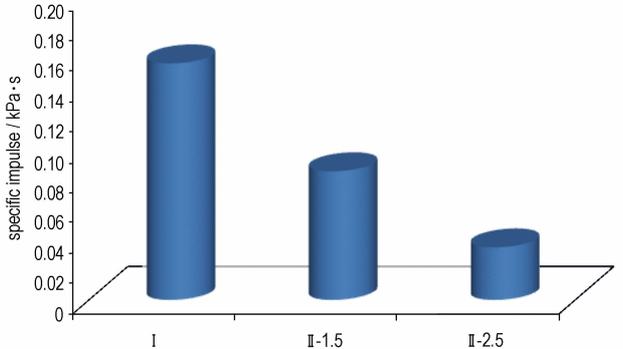


图 7 各类型试样的平均比冲量

Fig.7 Average specific impulse of samples

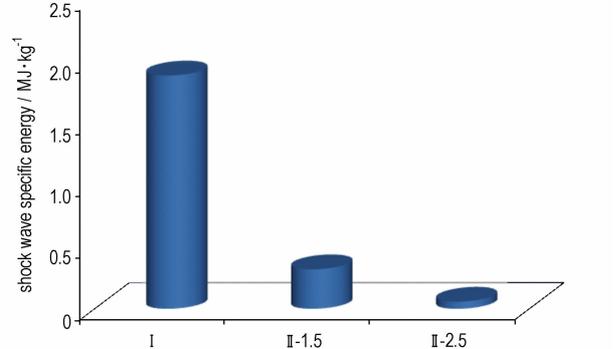


图 8 各类型试样的平均冲击波比能

Fig.8 Average shock wave specific energy of samples



图 9 II-2.5 试样破碎过程

Fig.9 Crushing process of samples II-2.5

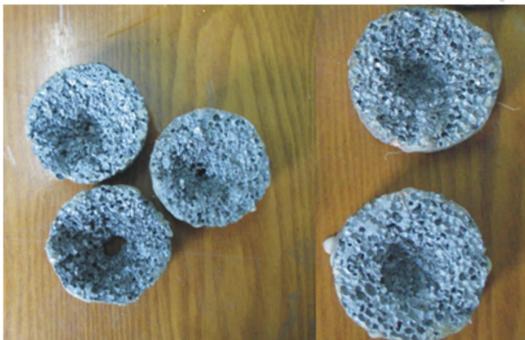


图 10 爆炸冲击后的 II-2.5 试样残片

Fig.10 Post-blast Fragment of samples II-2.5

#### 4 结 论

通过对水下爆炸压力场测试的分析,初步认识了泡沫铝壳对水下爆炸冲击波衰减的影响,显示出泡沫铝材料能有效地消减冲击波压力峰值、比冲量和冲击波比能。在保持装药参数不变的条件下,随着泡沫铝壳厚度的增加,冲击波峰值、冲击波比冲量和冲击波比能的消减量都相应增加。最后,结合水下摄像和试样回收等方式,发现泡沫铝壳通过自身的压缩变形、破碎和运动来消耗水下爆炸冲击波的能量,进而起到吸收爆炸冲击能的作用。

## 参考文献:

- [1] 王永刚, 胡时胜, 王礼立. 爆炸荷载下泡沫铝材料中冲击波衰减特性的实验和数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 516-522.  
WANG Yong-gang, HU Shi-sheng, WANG Li-li. Shock attenuation in aluminum foams under explosion loading[J]. *Explosive and Shock Waves*, 2003, 23(6): 516-522.
- [2] 石少卿, 刘仁辉, 汪敏. 钢板-泡沫铝-钢板新型复合结构降低爆炸冲击波性能研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(4): 143-176.  
SHI Shao-qin, LIU Ren-hui, WANG Min. Shock wave reduction behavior of a new compound structure composed of a foam aluminum layer between two steel plates[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(4): 143-176.
- [3] 袁林, 龚顺风, 金伟良. 含泡沫铝防护层钢筋混凝土板的抗爆性能研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(2): 376-379.  
YUAN Lin, GONG Shun-feng, JIN Wei-liang. Investigation on anti-explosion performance of reinforced concrete slab with composite protective aluminum foam[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2009, 43(2): 376-379.
- [4] 李顺波, 东兆星, 齐燕军, 等. 水下爆炸冲击波在含吸收层结构中的传播规律的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2009, 23(5): 360-366.  
LI Shun-bo, DONG Zhao-xing, QI Yan-jun, et al. Numerical simulation on propagation of underwater blast shock wave in absorber structure[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(5): 360-366.
- [5] Cole P. *Underwater Explosions* [M]. Princeton: Princeton University Press, 1947.
- [6] 张立. 爆破器材性能与爆炸效应测试[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006.  
ZHANG Li. *Performance of the Explosive Materials and Testing on Explosion Effect* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2006.
- [7] Arons A B, Yennie D R. Energy partition in underwater explosion phenomenon[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1948, 20(3): 519-536.
- [8] Bjarholt G. Suggestions on standards for measurement and data evaluation in the underwater explosion test Propellants[J]. *Explosives, Pyrotechnics*, 1980, 5(2-3): 67-74.
- [9] 赵继波, 谭多望, 李金河. TNT药柱水中爆炸近场压力轴向衰减规律[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6): 539-543.  
ZHAO Ji-bo, TAN Duo-wang, LI Jin-he. Axial pressure damping of cylindrical TNT charges in the near underwater explosion field[J]. *Explosion and Shock Wave*, 2008, 28(6): 539-543.
- [10] 宋浦, 肖川, 梁安定, 等. 炸药空中与水中爆炸冲击波超压的换算关系[J]. 火炸药学报, 2008, 31(4): 10-13.  
SONG Pu, XIAO Chuan, LIANG An-ding, et al. Conversion relation of shock wave overpressure about underwater explosion and air blast[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(4): 10-13.
- [11] 卢芳云, 李翔宇, 林玉亮, 等. 战斗部结构与原理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

## Influence of Aluminum Foams Shell on Shock Attenuation Underwater Explosions

NI Xiao-jun, SHEN Zhao-wu, YANG Chang-de

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Nanling Aorui kai Coporation, Pinglianjiang 414517, China)

**Abstract:** In order to study shock attenuation in aluminum foams, the different thickness of aluminum foam shells were made, shock attenuation in its was preliminarily investigated. Two types of PETN charges were used, one is the PETN itself, the others are confined by aluminum foam shell with thickness of 1.5 cm, 2.5 cm and 3.5 cm. The shock wave pressure-time curves were obtained at 0.5 m away from the charge. The experimental data analysis show that aluminum foams shell not only can weaken the peak pressure, but also effectively absorbs the specific impulse and the specific energy of shock wave. Moreover, the whole deforming, crushing and moving processes of the shells were recorded by the underwater camera system. Results show that the attenuation of shock pressure, specific impulse and specific energy in aluminum foams shell was induced by itself deformation and breakup. At the same time, the thickness of aluminum foams shell impacted on the shock attenuation in aluminum foams.

**Key words:** explosion mechanics; aluminum foam shell; underwater explosion; shock wave attenuation; peak pressure; underwater camera

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.03.016