

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.02.008

# 多层差异性气泡帷幕对水下爆破冲击波的衰减效应的试验研究\*

范怀斌<sup>①②</sup> 陆少锋<sup>①②</sup> 莫崇勋<sup>③</sup> 刁 约<sup>④</sup> 覃才勇<sup>①②</sup> 黄国松<sup>①②</sup>

- ①广西新港湾工程有限公司(广西南宁, 530200)  
②广西新港湾汪旭光院士工作站(广西南宁, 530200)  
③广西大学土木建筑工程学院(广西南宁, 530004)  
④广西大学资源与环境学院(广西南宁, 530004)

**[摘 要]** 为评估气泡帷幕产生的气水混合层对冲击波能量的衰减效应,设计了乳化炸药水下延期爆破试验,研究气泡帷幕对水下爆破冲击波的影响。以冲击波斜入射条件下波阻抗差异性为研究对象,设计多层差异性气泡帷幕。以距爆心 12 m 处帷幕前、后测点处的冲击波衰减率为评价指标,测得多排孔气泡帷幕前测点处的冲击波压力峰值为 1.518 MPa 和 1.493 MPa,帷幕后测点处的冲击波压力峰值为 0.026 MPa 和 0.034 MPa,冲击波综合衰减率为 97.72%~98.29%。与陆上岩石爆破冲击波传播规律相比,水下爆破冲击波作用时间短,波阵传播速度快,冲击波压力更大,且传递过程中能量损耗少,传递效率高,同等爆破当量的条件下水下爆破对结构的损害更大。采用多层差异性气泡帷幕对水下爆破施工进行防护,可以在完成水下炸礁爆破施工任务的同时,不破坏水下生态环境。

**[关键词]** 气泡帷幕;多层;水下爆破;能量衰减;冲击波

**[分类号]** TU751.9

## Experimental Study on Attenuation Effect of Multi-Layer Differential Bubble Curtain on Underwater Blasting Shock Wave

FAN Huaibin<sup>①②</sup>, LU Shaofeng<sup>①②</sup>, MO Chongxun<sup>③</sup>, DIAO Yue<sup>④</sup>, QIN Caiyong<sup>①②</sup>, HUANG Guosong<sup>①②</sup>

- ① Guangxi New Harbour Engineering Co., Ltd. (Guangxi Nanning, 530200)  
② Wang Xuguang Academician Work Station, Guangxi New Harbour (Guangxi Nanning, 530200)  
③ School of Architecture and Civil Engineering, Guangxi University (Guangxi Nanning, 530004)  
④ College of Resources and Environment, Guangxi University (Guangxi Nanning, 530004)

**[ABSTRACT]** In order to evaluate the attenuation effect of the air-water mixture layer produced by the bubble curtain on the shock wave energy, the underwater delayed blasting test of emulsion explosive was designed to study the influence of the bubble curtain on the underwater blasting shock wave. The wave impedance difference under oblique incidence of the shock wave was taken as the research object, and a multi-layer differential bubble curtain was designed. Taking the attenuation rate of wave intensity at the measuring points in front of and behind the curtain at 12 m from the blast center as the evaluation index, the measured wave intensity at the measuring points in front of the multi-row bubble curtain is 1.518 MPa and 1.493 MPa, the wave intensity at the measuring points behind the curtain is 0.026 MPa and 0.034 MPa, and the comprehensive attenuation rate of shock wave is 97.72%~98.29%. Compared with the propagation law of shock wave in rock blasting on land, underwater blasting shock wave has shorter action time, faster wave array propagation speed, higher shock wave pressure, less energy loss in the transmission process, higher transmission efficiency, and greater damage to the structure caused by underwater blasting under the same blasting equivalent conditions. Multi-layer differential bubble curtain could be used to protect the underwater blasting construction, which can complete the underwater reef blasting construction without damaging the underwater ecological environment.

**[KEYWORDS]** bubble curtain; multi-layer; underwater blasting; energy attenuation; shock wave

\* 收稿日期:2022-08-11  
基金项目:国家自然科学基金(51969004);广西科技基地和人才专项(桂科 AD20238084);广西重点研发计划(桂科 AB22035001);防城港市重点研发计划(防科 AB21014001)  
第一作者:范怀斌(1984-),男,硕士,高工,主要从事港口与航道工程研究。E-mail: 285738643@qq.com

0 引言

延期爆破技术的广泛应用使水下爆破一次齐爆药量不断加大。同时,对水下爆破的安全防护及水下生物的保护要求也越来越高。与空中爆炸相比,水下爆破产生的冲击波及能量流更强,影响范围也更广。例如,用 173 kg TNT 球形装药在水中爆破,距离爆炸中心 1.5、15.3、152.5 m 处的冲击波压力分别为 235.00、15.30 MPa 和 1.11 MPa。而鱼类在水中承受冲击波的安全压力为 0.50 MPa,因此,在爆破过程中需要进行有效的防护。

赵根等<sup>[1]</sup>梳理了水下爆破技术的发展脉络,从水下爆破机理及爆破方案设计优化方面为水下爆破技术在港口码头建设、水运航道疏浚及水下爆破施工领域提供了实践和理论参考。气泡帷幕是一种爆破防护技术,可削弱水下爆破冲击波的能量。谢达建等<sup>[2]</sup>通过模拟软件建立了水下钻孔爆破模型,对比分析了气泡帷幕的不同设置距离对削弱水中爆破冲击波作用效果的影响。胡伟才等<sup>[3]</sup>设计了三因素三水平的正交数值模拟试验,并结合敏感性分析的方法分析了气泡帷幕数量、气泡帷幕间距以及气泡帷幕防护距离 3 个因素对水击波削减作用的影响。彭亚雄等<sup>[4]</sup>进行了水下钻孔爆破水击波特性及气泡帷幕削压效果研究,结果表明,在稳定且连续的气泡帷幕作用下,水击波脉冲效应削减明显,水击波压力峰值降低了 90% 以上。司剑峰等<sup>[5]</sup>分析了气泡帷幕在冲击波防护过程中的防护机理,单位区域内气泡数量越多,防护效果越明显,但当气泡数量达到一定后,气泡帷幕整体连续性及稳定性基本固定,防护效果也趋于稳定。贾虎等<sup>[6]</sup>通过爆炸气泡帷幕削能试验结合小波包分解技术分析发现,气泡帷幕能有效衰减爆炸冲击波压力峰值。刘天云等<sup>[7]</sup>研究了不同位置的气泡帷幕对水击波压力峰值的削减效果。谢金怀等<sup>[8]</sup>在玻璃水槽中通过气泵法生成气泡帷幕,研究了不同直径气泡的含量与水深因素的关系以及对冲击波衰减效果的影响。刘欣等<sup>[9]</sup>建立了水下钻孔爆破数值模拟,研究了气泡帷幕与被保护对象距离不同时,对水中冲击波的衰减作用。张兵文等<sup>[10]</sup>采用气泡帷幕法对水下爆炸冲击波进行了防护,使得冲击波压力平均衰减了 90.77%,保证了附近 30 万 t 级船坞和修船码头的安全。胡亚峰等<sup>[11]</sup>针对爆炸水池结构动态响应情况进行了数值模拟,对空气桶和气泡帷幕削弱水中冲击波的能力进行了定量计算,在此基础上进一步

分析了冲击载荷作用以及结构响应机理。张成兴等<sup>[12]</sup>采用理论结合数值计算的方法建立了不同供气量下气泡帷幕产生的特征。

综合以上研究分析发现,国内学者在水下爆破有害效应控制防护措施方面进行了一些探索,然而尚未形成适用于工程实际的防护措施。另外,水下爆破不可避免地产生爆炸冲击波、地震波、噪音等有害效应,对周围水下生态环境产生破坏等不利影响。

因此,以水下爆破冲击波防护为研究对象,分析冲击波斜入射条件下波阻抗的差异性,设计了多层差异性气泡帷幕,研究气泡帷幕对冲击波衰减率的影响,力求提高爆破效率的同时保护水下生态环境,从而为相关行业规范提供参考方案。

1 数值模型的建立

1.1 数值计算

气泡帷幕是利用气泡发生器在水中产生一道气水混合体,当水中冲击波遇到气水混合体时,将会产生一个扰动。阻波示意图如图 1 所示。

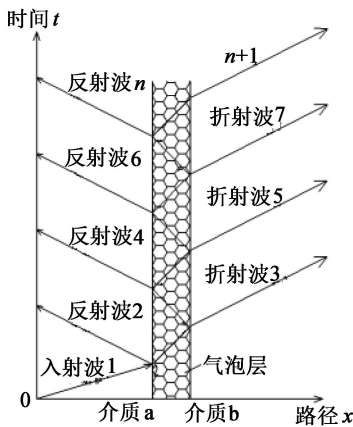


图 1 阻波示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wave blocking

根据牛顿第三定律和介质连续条件,界面两侧经反射-透射后的质点速度及应力相等,不同介质的波阻抗差异函数评估方法的具体步骤如下:

$$v_i + v_r = v_t; \tag{1}$$

$$p_i + p_r = p_t. \tag{2}$$

式中: $v_i$  为介质 a 的质点速度; $v_r$  为介质 b 的质点速度; $v_t$  为进入气水混合体的质点速度; $p_i$  为入射压力; $p_r$  为反射压力; $p_t$  为透射压力。

根据冲击波的动量守恒定律  $p = \rho cv$ , 得

$$\frac{p_i}{(p_0 c_0)_i} - \frac{p_r}{(p_0 c_0)_r} = \frac{p_t}{(p_1 c_1)_t}. \tag{3}$$

将式(3)代入式(2),得

$$n = \frac{\rho_0 c_0}{\rho_1 c_1};$$

(4)

$$F = \frac{1 - n}{1 + n};$$

(5)

$$T = \frac{2}{1 + n}.$$

(6)

得

$$p_i = T p_i;$$

(7)

$$v_i = n T v_i;$$

(8)

$$p_r = F p_i;$$

(9)

$$v_r = -F v_i.$$

(10)

式中: $\rho_0$  为水的密度; $c_0$  为水的波速; $\rho_1$  为气水混合体的密度; $c_1$  为波速; $n$  为两种介质的波阻抗比; $F$  为反射系数; $T$  为透射系数。

水的波阻抗用  $Z_0 = \rho_0 c_0$  表示;气水混合体的波阻抗用  $Z_1 = \rho_1 c_1$  表示。

以上分析可知,要减轻冲击波的危害,可以利用不同介质的波阻抗的差异性,减少透射波的强度。两种介质的波阻抗差异越大,对冲击波的衰减作用就会越大。

2 试验

2.1 无气泡帷幕试验

无帷幕水下爆破冲击波测试,可以计算出一般工业炸药(2#岩石乳化炸药)在水下爆破产生的冲击波的衰减规律。

爆破冲击波的衰减公式为

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

(11)

式中: $p_m$  为水中爆破冲击波压力峰值; $Q$  为水中裸爆装药量; $R$  为爆炸中心到测点的距离; $K$  为与炸药性能有关的系数; $\alpha$  为与爆区水体环境有关的衰减指数。

测定式(11)中的 $K$ 和 $\alpha$ ,判断气泡帷幕衰减的

效果。本次测试中安装 6 个测点,测点布置如图 2 所示。

第 1~3 炮次测试:测点  $C_1$ 、 $C_2$  分别安装 1 支 TP-SJB-10 型传感器;测点  $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$  分别安装 1 支 PCB-138A01 型传感器。第 2 炮次装药量 0.6 kg,其他炮次为 0.3 kg。

第 4~6 炮次测试:测点  $C_1$  安装 1 支 TP-SJB-10 型传感器;测点  $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_6$  分别安装 1 支 PCB-138A01 型传感器。第 5 炮次装药量为 0.6 kg,其他炮次为 0.3 kg。

第 7~8 炮次测试:测点  $C_1$  安装 1 支 TP-SJB-10 型传感器;测点  $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  分别安装 1 支 PCB-138A01 型传感器。各炮次的装药量均为 0.3 kg。

第 9~15 炮次测试:测点  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  分别安装 1 支 PCB-138A01 型传感器。各炮次的装药量均为 0.3 kg。

2.2 气泡帷幕试验

气泡帷幕长度为 40 m。气泡帷幕设置 4 条气泡发生管,间距为 0.5 m,每条气泡发生器设置有阀门,从两端头供气。另外,布置 4 支传感器:帷幕前距离药包 12 m 布置 1 支(测点  $C_1$ );帷幕后距离药包 12、24、36 m 各布置 1 支(测点  $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ )。传感器和药包均布置于水面以下 4.5 m 位置,气泡发生器布置于河底约 9.5 m 水深位置。

主要测试仪器见表 1。

表 1 测试仪器  
Tab. 1 Test instruments

仪器名称	型号规格	数量	单位	备注
冲击测试仪	4 通道 Blast-PRO	1	台	
水下冲击波 传感器	PCB-138A01	4	支	量程: 6 895 kPa

试验布置如图 3 所示。气泡帷幕由气泡发生管、供风管、定位锚、配重钢丝绳及配件等组成。气泡发生管长 20 m,用  $\varnothing 50$  mm 的橡胶风管钻孔而

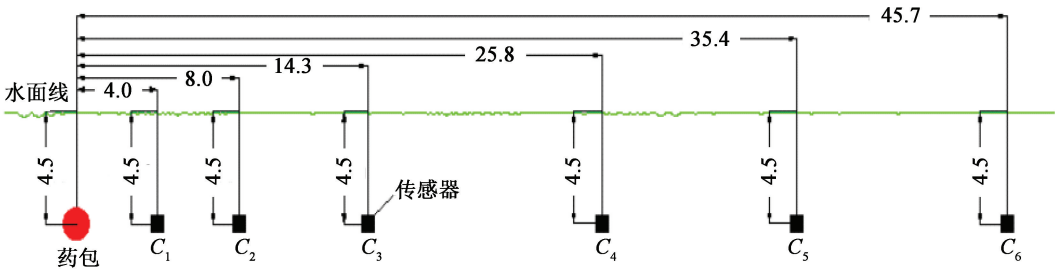
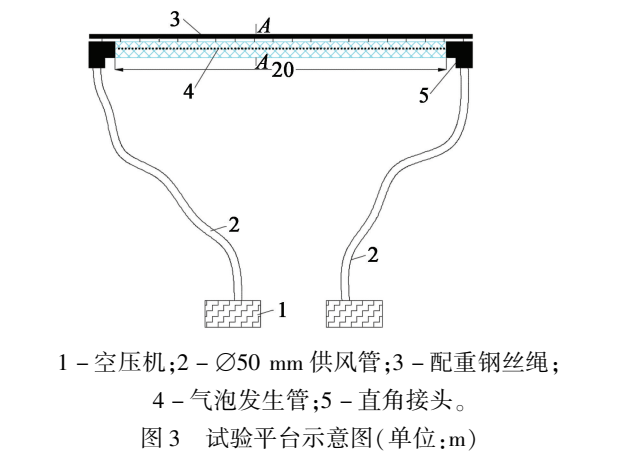


图 2 无气泡帷幕试验测点布置示意图(单位:m)  
Fig. 2 Schematic diagram of measuring point layout for test without bubble curtain (unit:m)



成,钻3排气泡孔,孔距0.03 m,孔径0.002 m。气泡发生管需捆绑一根配重足够的钢丝绳,保证气泡发生管能顺利沉入水底。气泡发生管两端用两门300 kg的定位锚,防止气泡发生管在供风时移动。供风管也使用 $\varnothing 50$  mm的橡胶管,从气泡发生管两端供风,两端的供风管分部长50 m,另一端连接空压机出风口阀门,出风口处需安装气体流量表。

2.3 鱼类保护试验

水下爆破的瞬间会产生高温、高压气体,并形成冲击波在水中传播,对水中生物造成伤害甚至死亡。因此,考察气泡帷幕作用下对水中生物的保护作用。

以淡水鱼为主,分别有鲤科、鲶科、鳅科及鳊科4类,共5种。每次爆炸投放两组鱼类,用鱼笼吊挂在气泡帷幕前、后等距离的测点位置。起爆药包后,对比两个测点的冲击波压力和鱼类的损伤情况。试验布置方案所图4所示。

3 结果与分析

3.1 无气泡帷幕测试

根据2<sup>#</sup>岩石铵梯炸药水中爆炸冲击波衰减理论公式 $p_m = 49.2(Q^{1/3}/R)^{1.13}$ ,估算各测点的压力峰值。具体测试结果见表2。表2中,试验区域水深9~10 m,平均水流速度0.1 m/s,爆源水深4.5 m,传感器水深4.5 m,炸药为2<sup>#</sup>岩石乳化炸药。

在第1~8炮次测试中,测点C<sub>1</sub>和C<sub>2</sub>部分实测冲击波压力峰值比估算值低30%~35%。例如:0.3 kg药量,第1炮次测点C<sub>1</sub>位置的理论值为6.500 MPa,但实测值为4.532 MPa。第11~12、14炮次测试中,实测冲击波压力峰值比估算值偏差较大,部分最大偏差达50%。例如:0.3 kg药量,第11炮次测点C<sub>1</sub>位置的理论值为6.500 MPa,但实测值为3.190 MPa。

根据实测数据进行最小二乘法回归分析,求出

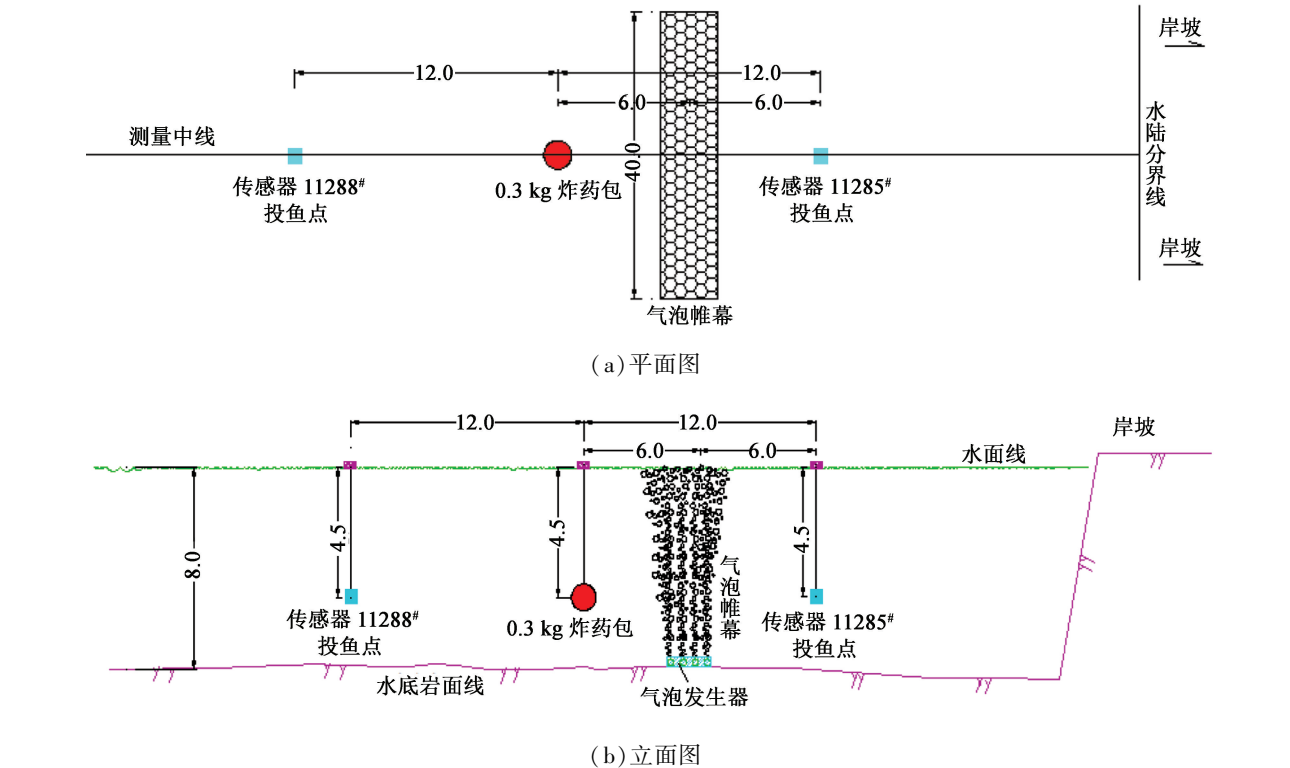


图 4 气泡帷幕投鱼试验布置示意图(单位:m)

Fig. 4 Layout of fish feeding test with bubble curtain (unit: m)

表 2 无气泡帷幕水下爆破冲击波压力

Tab. 2 Shock wave pressure of underwater blasting without bubble curtain

	MPa														
测点	第 1 炮	第 2 炮	第 3 炮	第 4 炮	第 5 炮	第 6 炮	第 7 炮	第 8 炮	第 9 炮	第 10 炮	第 11 炮	第 12 炮	第 13 炮	第 14 炮	第 15 炮
$C_1$	4. 532	5. 561	5. 304	5. 987	4. 660	5. 204	3. 689	3. 853	6. 351	6. 795	3. 190	4. 065	6. 241	5. 042	6. 692
$C_2$	3. 531	3. 207	4. 219	3. 381	3. 150	2. 226	2. 849	1. 830	3. 173	3. 073	1. 718	2. 046	2. 997	2. 745	2. 982
$C_3$	1. 564	1. 810	2. 107	2. 043	1. 680	1. 287	1. 537	1. 004	1. 785	1. 572	0. 994	1. 143	1. 601	1. 599	1. 535
$C_4$	0. 812	0. 998				0. 682	0. 810	0. 564							
$C_5$	0. 564	0. 682	0. 780												
$C_6$	0. 464	0. 602	0. 604	0. 644	0. 518	0. 400									

式(11)中的系数  $K$ 、 $\alpha$ 。

$$\alpha = \frac{\sum x \sum y - n \sum (x, y)}{(\sum x)^2 - n \sum x^2} = \frac{-19.935\ 3 \times 4.252\ 5 - 16 \times (-3.236\ 0)}{(-19.935\ 3)^2 - 16 \times 26.665\ 3} = 1.13。$$
$$K = \log_{-1} \frac{\sum y - \alpha \sum x}{n} = \log_{-1} \frac{4.252\ 5 - 1.13 \times (-19.935\ 3)}{16} = \log_{-1} \frac{26.779\ 4}{16} = \log_{-1} 1.673\ 7 = 47.17。$$

$\alpha$  为 1.13,与理论  $\alpha$  相同;2#岩石乳化炸药比 2#岩石铵梯炸药的  $K$  有所下降。

根据水下爆炸现场实际情况,把计算得出的  $K$ 、 $\alpha$  的值代入式(11):

$$P_m = K \left( \frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\alpha = 47.17 \left( \frac{Q^{1/3}}{R} \right)^{1.13}。$$

3.2 气泡帷幕发生器试验

3.2.1 单排孔气泡帷幕发生器

采用多层气泡帷幕方式,每层气泡帷幕的气泡发生管开 1 排孔。先后对 1~4 层气泡帷幕进行爆破测试,获得了表 3 中不同层数气泡帷幕对水中爆破冲击波的阻波率和水中冲击波的压力峰值。

由表 3 可知,气泡帷幕对冲击波有明显的衰减作用,且层数越多,阻波率越高。

3.2.2 多排孔气泡帷幕发生器

将两个气泡发生器分别改为一管两排孔和一管三排孔的气泡发生器,对比气泡厚度变薄、密度变大后阻波率的变化。测试结果列于表 4。

通过试验测量发现,将气泡孔孔距缩小至 2 cm,并错位布孔、增加气孔排数,可以有效改善冲击波的阻波率。

3.3 气泡帷幕试验

试验区域水深 9~10 m,平均水流速度 0.1 m/s,

表 3 不同气泡帷幕层数时的冲击波压力峰值和平均阻波率

Tab. 3 Peak value of shock wave pressure and average wave resistance at different bubble curtain layers			
帷幕层数	冲击波压力峰值/MPa		平均阻波率/%
	无帷幕	有帷幕	
1	2.234	1.849	23.79
	2.303	1.604	
2	2.249	1.271	52.49
	2.259	0.870	
3	2.269	0.948	57.37
	2.334	1.015	
4	2.318	1.194	54.36
	2.374	0.944	

表 4 一管多排孔时的冲击波压力峰值与平均阻波率

Tab. 4 Peak value of shock wave pressure and average wave resistance in a pipe with multiple rows of holes			
类别	压力峰值/MPa		平均阻波率/%
	有帷幕	无帷幕	
一排孔	0.718	2.132	67.24
	0.709	2.177	
二排孔	0.635	2.760	77.02
	0.621	3.111	
三排孔	0.070	2.997	97.65
	0.058	2.484	

爆源水深 4.5 m,传感器水深 4.5 m,炸药为 2#岩石乳化炸药,起爆药量 0.3 kg。最多使用 4 层气泡帷幕,每次试验测试 2 炮次,每一炮次测量 4 个点的冲击波压力,如表 5 所示。

1 层气泡帷幕时,帷幕前距爆心 12 m 测点  $C_1$  测得 1.883 MPa 和 1.789 MPa,与之对应的帷幕后测点  $C_2$  测得 0.154 MPa 和 0.228 MPa,冲击波衰减率为 87.26%~91.28%,两次测试的水下爆炸冲击

表5 气泡帷幕水下爆破冲击波压力峰值  
Tab.5 Peak pressure of underwater blasting shock wave with bubble curtain

测点位置	测距/ m	压力峰值/MPa							
		第 1 炮 (4 层)	第 2 炮 (4 层)	第 3 炮 (3 层)	第 4 炮 (3 层)	第 5 炮 (2 层)	第 6 炮 (2 层)	第 7 炮 (1 层)	第 8 炮 (1 层)
帷幕前	C <sub>1</sub>	12	1.518	1.493	1.933	1.831	1.675	1.486	1.883
	C <sub>2</sub>	12	0.026	0.034	0.083	0.039	0.157	0.108	0.154
帷幕后	C <sub>3</sub>	24	0.016	0.018	0.031	0.025	0.068	0.067	0.076
	C <sub>4</sub>	36	0.013	0.013	0.020	0.015	0.053	0.023	0.032
帷幕后		12	98.29	97.72	95.71	97.87	90.63	92.73	91.82
阻波率/ %		24	98.95	98.79	98.40	98.63	95.94	95.49	95.96
		36	99.14	99.13	98.97	99.18	96.84	98.45	98.30

波压力峰值均小于低敏感度网箱养殖鱼类安全控制标准(0.25~0.40 MPa) 以下。

在 2~4 层气泡帷幕阻隔下,水中冲击波穿透气泡帷幕后呈现较长的低振幅波形向远距离传播,即多层气泡帷幕可使冲击波在气泡帷幕之间产生多次反射、折射的情况,使冲击波压力峰值降低。2 层气泡帷幕时,帷幕前测点 C<sub>1</sub> 测得 1.675 MPa 和 1.486 MPa,与之对应的帷幕后测点 C<sub>2</sub> 测得 0.157 MPa 和 0.108 MPa,冲击波衰减率为 90.63%~92.73%。3 层气泡帷幕时,帷幕前测点 C<sub>1</sub> 测得 1.933 MPa 和 1.831 MPa,与之对应的帷幕后测点 C<sub>2</sub> 测得 0.083 MPa 和 0.039 MPa,冲击波的衰减率为 95.71%~97.87%。4 层气泡帷幕时,帷幕前测点 C<sub>1</sub> 测得 1.518 MPa 和 1.493 MPa( 较低),与之对应的帷幕后测点 C<sub>2</sub> 测得 0.026 MPa 和 0.034 MPa,冲击波衰减率为 97.72%~98.29%。测试得到的水下爆炸冲击波压力均小于高敏感度网箱养殖鱼类安全控制标准(0.05 MPa) 以下。

水下爆炸冲击波衰减曲线和阻隔如图 5 所示。在爆炸首次冲击波达到波峰后出现二次波,二次波主要为气泡脉冲波,出现在 100 ms 后,二次波压力都较小,对水中生物基本无危害。

3.4 气泡帷幕对鱼类的保护

共设 2 种工况。工况 I 为无帷幕,工况 II 为有帷幕。测试距离均为 12 m。每种工况进行 2 炮次测试,所测冲击波压力如表 6 所示。

两次试验投放的鱼类损伤情况见表 7~表 8。无气泡帷幕测点( 工况 I) 受到的水下冲击波压力分别为1.904 MPa 和 1.988 MPa,试验鱼 45 条,在爆后 2 h 内死亡 27 条,存活 18 条;爆后第 7 d 累计死亡 35 条,存活 10 条,存活的鱼主要为泥鳅。

有气泡帷幕保护的测点受到的水下冲击波压力

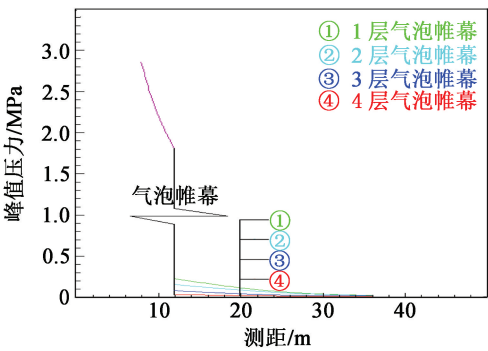


图5 水下爆破冲击波的衰减曲线  
Fig.5 Attenuation curves of shock wave of underwater blasting

表6 不同工况水下爆破的冲击波压力

Tab.6 Shock wave pressure of underwater blasting under different working conditions

工况	压力 MPa	
	第 1 炮	第 2 炮
I	1.904	1.988
II	0.092	0.070

分别为 0.092 MPa 和 0.070 MPa,投放试验鱼为 50 条,在爆后 2 h 内死亡 0 条,存活 50 条;爆后第 7 d 累计死亡 14 条,存活 36 条,死亡的鱼只有塘角鱼和黄鳝,其他的试验鱼存活,在水中活动正常无异样。

因此,气泡帷幕可以有效减小水下爆破对爆区周围水下生物的伤害,减少相应的经济损失。

4 结论

为研究多层气泡帷幕对水下爆破冲击波的衰减效应,基于水下炸药爆破后产生的爆轰水击波传播规律进行分析计算。通过现场数据测量和生物保护

表 7 第 1 炮鱼类损伤情况  
Tab.7 Fish damage after the first shot

工 况	鱼类 名称	条 数	爆后鱼类死亡状况							至第 7 d 早上死亡		至第 7 d 早上存活	
			2 h 内	至第 2 d 早上	至第 3 d 早上	至第 4 d 早上	至第 5 d 早上	至第 6 d 早上	至第 7 d 早上	小 计	合 计	小 计	合 计
I	草鱼	5	4	0	0	0	0	0	0	4		1	
	鲢鱼	5	5							5		0	
	塘角鱼	5	5							5	20	0	5
	泥鳅	5	1	0	0	0	0	0	0	1		4	
	黄鳝	5	0	3	2					5		0	
II	草鱼	5	0	0	0	0	0	0	0	0		5	
	鲢鱼	5	0	0	0	0	0	0	0	0		5	
	塘角鱼	5	0	0	0	1	1	1	0	3	8	2	17
	泥鳅	5	0	0	0	0	0	0	0	0		5	
	黄鳝	5	0	4	1					5		0	

表 8 第 2 炮鱼类损伤情况  
Tab.8 Fish damage after the second shot

工 况	鱼类 名称	条 数	爆后鱼类死亡状况							至第 7 d 早上死亡		至第 7 d 早上存活	
			2 h 内	至第 2 d 早上	至第 3 d 早上	至第 4 d 早上	至第 5 d 早上	至第 6 d 早上	至第 7 d 早上	小 计	合 计	小 计	合 计
I	草鱼	5	4	0	0	0	0	0	0	4		1	
	鲢鱼	5	3	0	0	1	0	0	0	4		1	
	塘角鱼	5	5							5	15	0	5
	泥鳅	5	0	1	0	0	0	1	0	2		3	
II	草鱼	5	0	0	0	0	0	0	0	0		5	
	鲢鱼	5	0	0	0	0	0	0	0	0		5	
	塘角鱼	5	0	1	0	0	0	0	0	1	6	4	19
	泥鳅	5	0	0	0	0	0	0	0	0		5	
	黄鳝	5	0	1	0	2	1	1		5		0	

等多种方案对比得出以下结论。

1) 水下爆破冲击波的强度随爆破距离的增加而下降趋势明显。随着炸药质量的增加,冲击波压力明显增加。通过对水下爆破无防护和多层气泡帷幕数据对比分析,得到了不同气泡密度阻波性能。将距爆炸点 12 m 处冲击波压力进行对比,多层差异性气泡帷幕使冲击波压力降低率达到 97% 以上,对冲击波的衰减效果最佳。

2) 气泡上升中受水流冲击的影响,会产生一定数量的漂移,对试验结果产生影响。设计一套稳定可靠、性价比高、操作性好的气泡帷幕发生装置应用于工程爆破作业,将有利于行业安全环保技术的发展。多层差异化气泡帷幕可以有效地衰减水中爆破冲击波的压力,应用于爆破点周围水下管道、电缆和生物的保护是可行的。

研究成果可为控制和减少水下爆破冲击波的危害效应,研究气泡帷幕对水下爆破振动衰减规律及对水中生物体的保护方案提供参考。

参 考 文 献

[1] 赵根,黎卫超. 水下爆破技术发展[J]. 爆破, 2020, 37(1): 1-12.  
ZHAO G, LI W C. Development of underwater blasting technology [J]. Blasting, 2020, 37(1): 1-12.

[2] 谢达建,吴立,洪江,等. 气泡帷幕对水下爆破冲击波的削弱作用研究[J]. 人民长江, 2018, 49(8): 72-

77.

XIE D J, WU L, HONG J, et al. Study on weakening effect of bubble curtain on water shock wave in underwater blasting [J]. Yangtze River, 2018, 49(8): 72-77.

[3] 胡伟才, 吴立, 舒利, 等. 不同设置方式下气泡帷幕对水中冲击波衰减特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(17): 33-38.

HU W C, WU L, SHU L, et al. Influence of water shock wave on attenuation characteristics under bubble curtain with different settings [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(17): 33-38.

[4] 彭亚雄, 吴立, 李春军, 等. 水下钻孔爆破水击波特性及气泡帷幕削压效果研究[J]. 爆破, 2019, 36(1): 38-43.

PENG Y X, WU L, LI C J, et al. Characteristics of water shock wave from underwater hole blasting and weakening pressure effect of bubble curtain in water [J]. Blasting, 2019, 36(1): 38-43.

[5] 司剑峰, 钟冬望, 李雷斌. 基于气泡形态影响的水下气泡帷幕对冲击波衰减效果分析[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(7): 073201.

SI J F, ZHONG D W, LI L B. Analysis of underwater shock wave attenuation by air bubble curtain based on bubble shape [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(7): 073201.

[6] 贾虎, 郑伟花, 罗强, 等. 爆炸气泡帷幕对水中冲击波能量的衰减特性[J]. 含能材料, 2015, 23(10): 1015-1019.

JIA H, ZHENG W H, LUO Q, et al. Attenuation characteristics of underwater explosion bubble curtain on the shock [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(10): 1015-1019.

[7] 刘天云, 龚书堂, 胡伟才, 等. 水下钻孔爆破水击波的传播规律及气泡帷幕对水击波的削减作用[J]. 爆破器材, 2020, 49(2): 16-22.

LIU T Y, GONG S T, HU W C, et al. Propagation law of water hammer wave in underwater drilling blasting and reduction of bubble curtain on water hammer wave [J]. Explosive Materials, 2020, 49(2): 16-22.

[8] 谢金怀, 何树斌, 屈科, 等. 气泵法生成气泡帷幕的特性研究[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(1): 12-17.

XIE J H, HE S B, QU K, et al. Study on the characteristics of bubble curtain generated by the air pump method [J]. Journal of Ocean Technology, 2019, 38(1): 12-17.

[9] 刘欣, 顾文彬, 陈学平. 气泡帷幕对水中冲击波衰减特性的数值模拟研究[J]. 爆破, 2015, 32(3): 79-84.

LIU X, GU W B, CHEN X P. Numerical simulation study of attenuation characteristics of water shock wave under bubble curtain [J]. Blasting, 2015, 32(3): 79-84.

[10] 张兵文, 张文扬, 吴暖, 等. 预裂爆破与气泡帷幕技术在水下爆破中的应用[J]. 工程爆破, 2015, 21(5): 6-9.

ZHANG B W, ZHANG W Y, WU N, et al. Application of presplitting blasting and air bubble curtain technologies in under water blasting [J]. Engineering Blasting, 2015, 21(5): 6-9.

[11] 胡亚峰, 金建峰, 顾文彬, 等. 爆炸实验水池防护性能及动力学响应分析[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 1001-1009.

HU Y F, JIN J F, GU W B, et al. Protective performance and dynamic response analysis of explosion testing pool [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(6): 1001-1009.

[12] 张成兴, 王永学, 王国玉, 等. 静水中气泡帷幕产生水平流的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2010, 25(1): 59-66.

ZHANG C X, WANG Y X, WANG G Y, et al. Numerical simulation study on the horizontal current generated by air bubbles curtain in still water [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics A, 2010, 25(1): 59-66.