

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.02.027

多层气泡膜隔层结构对水下冲击波衰减效果分析*

梁云¹, 吴红波², 陈永佳¹, 李基锐¹, 黄菓树², 马成帅², 张政¹, 叶风明¹, 曾辉莲¹

(1. 广西新港湾工程有限公司, 南宁 530200; 2. 安徽理工大学 化工与爆破学院, 淮南 232001)

摘要: 为分析多层气泡膜隔层结构对水下爆炸冲击波衰减效果, 使用不同规格气泡膜并设计不同层数的空气隔层结构, 以8号工业电雷管作为爆源, 进行水下爆炸试验, 获得水下冲击波参数, 通过冲击波超压峰值与比冲击波能对比分析气泡膜对水下冲击波的衰减效果。结果表明: 随着气泡膜层数的增加, 冲击波超压峰值衰减率随之增加, 1#气泡膜衰减率由48.32%上升至89.10%, 2#气泡膜衰减率由86.08%上升至91.33%, 3#气泡膜衰减率由87.87%上升至91.45%, 4#气泡膜衰减率由90.34%上升至92.37%; 薄膜隔层对比气泡膜空气隔层, 其对水下冲击波的衰减影响比重较小, 在层数相同的条件下, 气泡膜气泡直径越大对水下冲击波的衰减效果越好, 说明隔层结构中气泡对冲击波的衰减有着重要的作用; 通过比冲击波能分析, 气泡膜空气隔层比冲击波能消耗均超过98.50%以上, 能量消耗显著。在实际应用中, 可以使用气泡膜作为防护材料, 能够有效地降低冲击波对被保护对象带来的危害。

关键词: 水下爆炸; 空气隔层; 气泡膜; 冲击波衰减; 比冲击波能

中图分类号: O384; TV542.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)02-0223-09

Analysis of Attenuation Effect of Multi-layer Bubble Film on Underwater Shock Wave

LIANG Yun¹, WU Hong-bo², CHEN Yong-jia¹, LI Ji-rui¹, HUANG Guo-shu²,
MA Cheng-shuai², ZHANG Zheng¹, YE Feng-ming¹, ZENG Hui-lian¹

(1. Guangxi New Harbor Engineering Co., LTD., Nanning 530200, China; 2. College of Chemical Engineering and Blasting, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to analyze the attenuation effect of multi-layer bubble film on underwater explosive shock wave, an underwater explosion test was conducted to obtain shock wave parameters with a No. 8 industrial electric detonator as the explosion source. The bubble film was designed with different specifications and different layers of air insulation structure. Furthermore, the shock wave overpressure peak value and specific shock wave energy were compared based on the shock wave parameters. The results show that the attenuation rate of shock wave overpressure peak increases with the increase of bubble film number, with the attenuation rates of 1#, 2#, 3# and 4# bubble film increasing from 48.32%, 86.08%, 87.87% and 90.34% to 89.10%, 91.33%, 91.45% and 92.37%, respectively, which implies that the normal film has less influence on the attenuation of underwater shock wave without air interlayers. Specifically, a larger bubble diameter can reach a better attenuation effect with the same number of layers,

收稿日期 (Date of reception): 2023-03-26

网络首发日期 (Published online): 2024-05-23

作者简介: 梁云 (1974-), 男, 本科, 工程师, 主要从事港口与航道施工管理, (E-mail) 584751875@qq.com.

通讯作者: 吴红波 (1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事爆破器材与安全研究, (E-mail) hbwu@aust.edu.cn.

基金项目: 广西重点研发计划 (桂科 AB22035001)

About the author: LIANG Yun (1974-), male, bachelor degree, engineer, mainly engaged in port and waterway construction management, (E-mail) 584751875@qq.com.

Corresponding author: WU Hong-bo (1975-), male, Ph. D, professor, mainly engaged in blasting equipment and safety research, (E-mail) hbwu@aust.edu.cn.

Fund Programs: Guangxi Key Research and Development Program (GUIKE AB22035001)

which indicates that the bubble plays an important role in attenuating shock waves. In addition, the specific shock wave energy consumption of the bubble film is more than 98.50%. In practical applications, bubble film can be used as a protective material, which can effectively reduce the harmful effects caused by shock waves on the protected objects.

Key words: underwater explosion; air interlayer; bubble film; shock wave attenuation; specific shock wave energy

随着经济发展,水利水电与港口码头等基础设施建设是我国经济建设中的重要一环。水下爆破技术因其成本低廉,适用范围广,复杂环境适应性好,在诸多工程建设中被应用^[1]。因水下冲击波相较于其它介质有更快的传播速度,使其具有更高的超压峰值,更强的毁伤效果,更强的作用时间等特点^[2,3]。水下爆破工程常采用气泡帷幕的方法来削弱冲击波的传播^[4],因气泡帷幕中气泡的运动规律复杂,故采用空气隔层结构进行静态模拟研究。因此,汤有富在爆炸水池中对不同防护厚度的空气隔层进行水下爆炸冲击波压力衰减测试^[5],研究空气隔层对水下爆炸冲击波压力峰值的影响,得出增加空气隔层厚度对冲击波的衰减程度越大的结论;寇晓枫基于显示动力分析程序 AUTODYN,研究水下爆炸作用于空气夹层防护结构对混凝土板的防护效果^[6],结果表明受空气隔层结构保护的混凝土板损伤程度大幅度减小;贾虎等使用塑料管作为空气隔层结构^[7],基于小波包分析水下爆炸冲击波能量分布规律,得出空气隔层能够在水下爆破安全防护中发挥积极作用。范怀斌,陆少峰等采用使用空气泡、多孔铝板、汽车轮胎、泡沫塑料与石棉布材料分别组成的阻波帘基于 ANSYS LS-DYNA 进行水下爆炸数值模拟^[8],在模拟结果的压强对比中得出空气泡材料制作的阻波帘降压效果最佳;司剑峰等通过高速摄像机对气泡帷幕形态的拍摄^[9],发现气泡帷幕的高度不均匀性,通过 LS-DYNA 有限元软件建立非均匀气泡群模型改进了以往简单的空气隔层模型进行水下爆炸数值模拟,此模型的计算结果可以显著观察到水下冲击波通过非均匀气泡群时的反射、透射、绕射与冲击波叠加;刘欢等将数值模拟中的气泡帷幕模型等效简化为空气层^[10],以此来研究气泡帷幕对水下冲击波的衰减特性;杜明燃等基于正交实验法研究气泡帷幕的削波特性^[11],得出气泡帷幕层数、药包深度、气泡帷幕爆心距对气泡帷幕的削波能力的影响依次降低的结论。以上研究中,试验对气泡帷幕的研究难以定量描述气泡群的空间形态;而在数值模拟中利用空气隔层等效气泡帷幕,难以表现冲击波在通过气泡帷幕时的漫反射现象。

因此本文选择以气泡膜为主要的研究对象,气

泡膜能够有效地模拟气泡帷幕受冲击后气泡的压缩、破碎与膨胀过程以及冲击波的反射、透射与绕射,并通过使用不同规格气泡膜达到定量控制气泡膜厚度的目的,以此分析其对水下爆炸冲击波的衰减特性;作为对比,本文还使用与气泡膜相同材料的无气泡薄膜构造出不受冲击波压缩变形影响的薄膜隔层结构,分析水下冲击波对气泡的压缩作用造成的衰减影响。

1 空气隔层对水下冲击波衰减机理

从声学与热力学的角度,由于水与空气界面会使冲击波发生漫反射,冲击波由单一传播方向转变为向整个空间传播,分散了同方向上冲击波阵面携带的能量^[12];水与空气之间声阻抗差异较大,冲击波的传播速度在两介质间突变,会使冲击波压力断崖式降低,下降压力可由公式(1)进行计算^[13]。

$$B_p = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\rho_1 c_1}{\rho_0} \left(\frac{\phi}{1-\phi} \right)} \quad (1)$$

式中: B_p 为水下冲击波的衰减程度,MPa; ϕ 为空气在两相介质中的体积比; $\rho_1 c_1$ 为水的声阻抗, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$; ρ_0 为气泡所在深度的静水压力,Pa。

如果空气不受外力约束能够压缩扩张,冲击波对空气的压缩作用,使空气受冲击压缩的过程中吸收冲击波阵面的能量转换为空气的势能,随后在反复的脉动过程中以热能的形式传递到水中,剩下的能量会在膨胀中被不断消耗^[14]。

2 试验设计

2.1 试验材料

试验采用四种不同规格的气泡膜材料,如图 1(a)、(b)、(c)、(d)所示,单个气泡直径由小到大将气泡膜编号为 1#、2#、3#、4#。对气泡膜规格统计如表 1 所示,其中采用排水法统计单片气泡膜在水下的空气体积,流程如下:气泡膜的底部固定国标 $\phi 40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 铅柱,铅柱计算体积为 75.4 cm^3 ,放入量程为 1000 mL 的量筒中,记录初始水位高度与最终水位高度,排水体积为气泡膜与铅柱的体积和,实际体积为排水体积减去国标铅柱体积。将试验所用气泡膜排空气体后的薄膜材料编号为 0#。

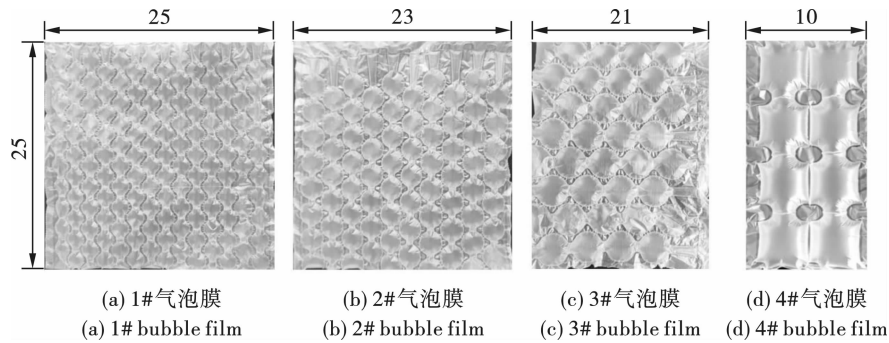


图1 不同规格气泡膜(单位:cm)

Fig. 1 Different specifications of bubble film(unit:cm)

表1 气泡膜参数统计

Table 1 Parameters of bubble film

编号	规格/ cm	气泡直径/ cm	厚度 D / cm	初始体积/ mL	最终体积/ mL	排水体积/ mL	均值/ mL	实际体积/ cm^3
1#	25 × 25	1.7	1.1	630	960	330	343.3	267.9
				630	975	345		
				630	985	355		
2#	25 × 23	2.3	1.6	600	988	388	382.7	307.3
				600	970	370		
				600	990	390		
3#	25 × 21	3.3	2.2	500	990	490	485.0	409.6
				500	995	495		
				500	970	470		
4#	25 × 10	4.5	3.0	400	940	540	526.7	451.3
				400	915	515		
				400	925	525		

2.2 试验设备

试验所使用的爆炸水池规格为长、宽、高均为1.2 m的正方体水池,并设有观察窗可供摄像记录。使用起爆器起爆8号工业电雷管作为爆炸载荷产生水下冲击波;水下冲击波参数通过PCB-W138A06传感器采集经恒流源在HDO4034示波器上显示波形数据;气泡膜固定在铁架上放置于爆炸水池中。

爆炸水池中雷管、空气隔层、传感器布置方式如图2所示,8号电雷管入水深度距水池底部70 cm处,距水池侧壁30 cm × 60 cm处;气泡膜空气隔层近起爆端壁面距雷管30 cm,空气隔层底部距离水池底部壁面40 cm;PCB-W138A06传感器与雷管处于同一水平线距雷管60 cm。

2.3 试验过程

为了研究多层气泡膜对水下冲击波的衰减效果分析,设置气泡膜1#的层数(n)为1、2、3、4;2#的层数(n)为1、2、3、4;3#的层数(n)为1、2、3、4;4#的层

数(n)为1、2、3、4。气泡膜铺满铁架上60 cm × 60 cm的区域 S_0 ,根据各规格气泡膜厚度,多层气泡膜的厚度不超过12 cm。设置试验对比组,单层或多层气泡膜隔层放入水池后,先进行气泡膜隔层对水下冲击波的衰减试验,而后取出气泡膜并排空气泡膜中的气体形成薄膜隔层,设置薄膜0#的层数(n)为1、2、3、4,进行薄膜隔层对水下冲击波的衰减试验,以分析薄膜材料对水下冲击波衰减效果的影响,并与气泡膜隔层对比分析。设置无薄膜或无气泡膜的空白对照组,可分析气泡膜及无气泡薄膜对水下冲击波的衰减效果。试验方案如表2所示。

2.4 试验结果

为研究多排气泡膜对水下冲击波衰减效果,设置空白对照组试验41、42,压力时程($p-t$)曲线如图3所示,图中 p_m 为冲击波压力峰值;为从衰减到所需要的时间^[15];试验1、2的冲击波超压峰值分别为6.840 MPa和6.798 MPa,作为对照取平均值

6.819 MPa。

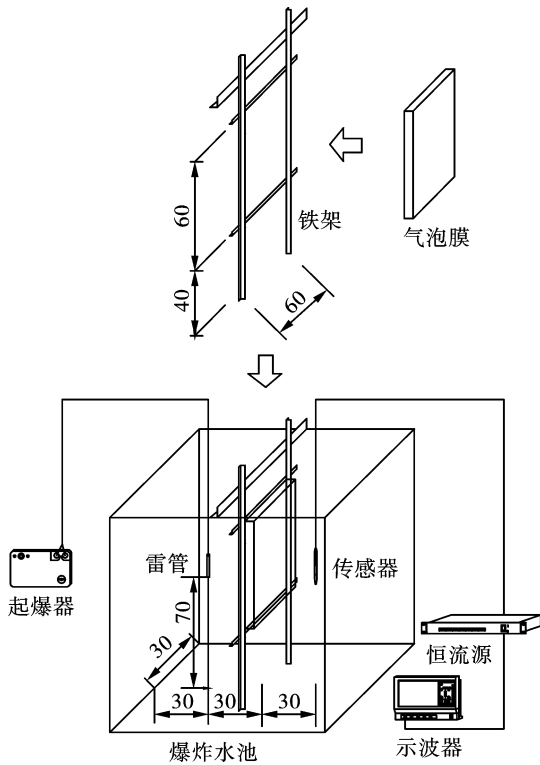


图 2 试验设备布置图(单位:cm)

Fig. 2 Layout of experimental equipment(unit:cm)

如图 3 所示,在第一个波峰起的 0.2 ms 时间段内出现多个反射峰,这是因为受到试验水池尺寸较小的影响,存在边界条件,因此爆源产生的水下冲击波会在壁面产生反射与折射,使波形图出现波动,因本试验仅考虑冲击波超压峰值,所以不考虑边界条件带来的影响。

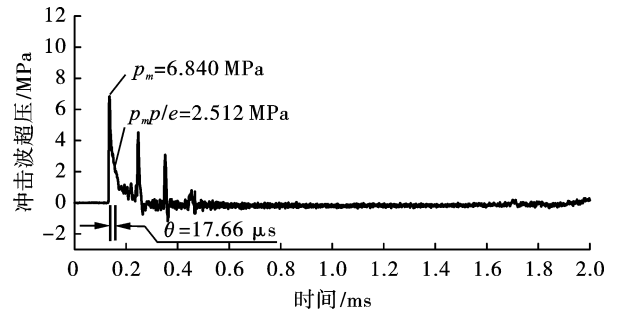


图 3 无隔层结构实测波形

Fig. 3 Measured waveform without interlayer structure

根据表 2 试验设计,设置平行试验,每组试验进行 2 次,所得冲击波超压峰值 p_m 列于表 3。试验压力时程曲线如图 4 所示,图 4(a)是薄膜材料为隔层时采集的波形图;图 4(b)、(c)、(d)、(e)是气泡膜材料为空气隔层时采集的波形图。

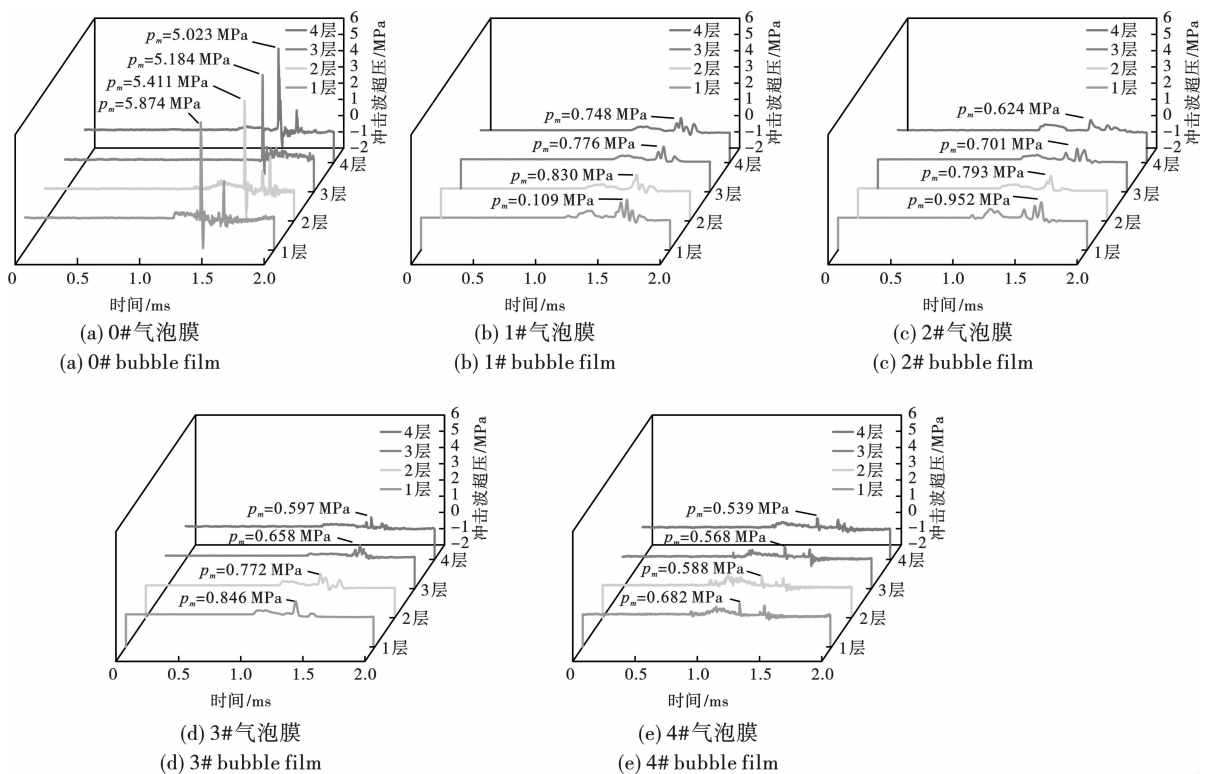


图 4 冲击波压力时程曲线

Fig. 4 The time history curve of the measured shock wave pressure

表2 试验设计方案

Table 2 Experimental design scheme

试验序号	材料编号	n	试验序号	材料编号	n	试验序号	材料编号	n
1,2		1	17,18		1	33,34		1
3,4	0#	2	19,20	2#	2	35,36	4#	2
5,6		3	21,22		3	37,38		3
7,8		4	23,24		4	39,40		4
9,10		1	25,26		1	41,42		—
11,12	1#	2	27,28	3#	2			
13,14		3	29,30		3			
15,16		4	31,32		4			

表3 水下爆炸实测数据

Table 3 Measured data from underwater explosions

试验序号	材料编号	n	p_m /MPa	$\theta/\mu s$	试验序号	材料编号	n	p_m /MPa	$\theta/\mu s$
1		1	5.874	8.50	25		1	0.808	15.50
2			5.780	8.13	26			0.846	15.80
3			5.411	7.30	27			0.689	14.70
4	0#		2	5.393	7.10	28		3#	2
5		3	5.184	6.50	29	3	0.658		13.30
6		4	5.154	6.30	30	4	0.614		12.70
7		5.023	11.13	31	0.597	11.33			
8		4	4.949	10.20	32		4	0.569	11.03
9		1	1.109	10.13	33		1	0.682	16.80
10			1.028	10.00	34			0.636	16.20
11			0.830	11.30	35			0.588	14.00
12	1#		2	0.859	12.60	36		4#	2
13		3	0.776	12.83	37	3	0.568		12.90
14		4	0.773	12.60	38	4	0.524		12.60
15		0.748	10.90	39	0.539	11.80			
16		4	0.738	10.73	40		4	0.501	11.70
17		1	0.946	12.20	41		0	6.840	17.66
18			0.952	12.33	42			6.798	17.23
19			0.765	12.70					
20	2#		2	0.793	12.90				
21		3	0.659	10.30					
22		4	0.701	10.50					
23		0.624	10.20						
24		4	0.586	10.03					

如图4(b)、(c)、(d)、(e)所示,由气泡膜作为隔层材料时产生的压力时程曲线中波峰前出现压力扰动,根据樊自建使用橡胶圈重叠放置作为空气隔层结构研究水下冲击波试验中^[16],对冲击波波图中波峰前压力扰动的解释,可以推断图4(b)、(c)、(d)、(e)中的波峰前压力扰动是由于气泡膜尺寸并未完全覆盖水池截面,冲击波发生绕射通过气泡膜所形成的。

3 试验结果分析

3.1 气泡膜层数对水下冲击波衰减效果影响

通过对试验9~40的冲击波超压数据处理,分析气泡膜层数对水下冲击波超压峰值衰减效果的影响,处理数据列于表4。定义冲击波超压峰值衰减率

$$A = \frac{p_a - p_b}{p_a} \times 100\% \quad (2)$$

式中: p_a 为空白对照组冲击波压力峰值, 本文 $p_a = 6.819$ MPa; p_b 为各试验组平行试验平均超压峰值, MPa。

表 4 气泡膜不同层数下冲击波超压峰值衰减率

Table 4 Peak attenuation rate of shock wave overpressure under different layers of bubble film

材料编号	n	p_m/MPa	\bar{p}_m/MPa	$A/\%$	
1#	1	1.109	1.028	1.069	84.32
	2	0.830	0.859	0.845	87.61
	3	0.776	0.773	0.775	88.63
	4	0.748	0.738	0.743	89.10
2#	1	0.946	0.952	0.949	86.08
	2	0.765	0.793	0.779	88.58
	3	0.659	0.701	0.680	90.03
	4	0.624	0.586	0.605	91.13
3#	1	0.808	0.846	0.827	87.87
	2	0.689	0.722	0.706	89.65
	3	0.658	0.614	0.636	90.67
	4	0.597	0.569	0.583	91.45
4#	1	0.682	0.636	0.659	90.34
	2	0.588	0.576	0.582	91.47
	3	0.568	0.524	0.546	91.99
	4	0.539	0.501	0.520	92.37

如表 4 所示, 在使用气泡膜时, 水下冲击波超压峰值的衰减率在 84.32% ~ 92.37% 之间, 对水下冲击波整体衰减效果明显。当相同规格气泡膜层数不同时, 随着气泡膜的层数增加, 冲击波超压峰值衰减率随之增加, 趋势如图 5 所示。

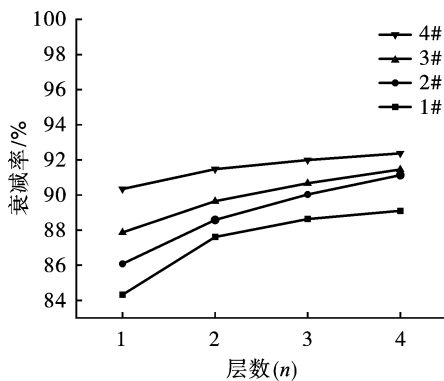


图 5 气泡膜不同层数对冲击波衰减率

Fig. 5 The attenuation rate of different layers of bubble film on the shock wave wave

如图 4 衰减率曲线分布, 气泡膜对水下冲击波的衰减效果由强到弱顺序依次为 4#、3#、2#、1#; 在

1#气泡膜仅为一层时, 对水下冲击波超压峰值衰减率已经达到了 84.33%, 随着气泡膜的层数由 1 层增加至 4 层气泡膜对冲击波的衰减效果仅增加了 5.70%, 正如图 5 所示, 折线趋势较为平缓; 同理, 2#气泡膜的层数由 1 层增加至 4 层, 气泡膜对冲击波的衰减效果增加了 5.05%; 3#气泡膜的层数由 1 层增加至 4 层, 气泡膜对冲击波的衰减效果增加了 3.58%; 4#气泡膜的层数由 1 层增加至 4 层, 气泡膜对冲击波的衰减效果增加了 2.03%; 上述结果可得, 随着气泡膜层数的增加, 对水下冲击波的衰减效果提升能力有限, 因此气泡膜选择合适的层数即可达到良好的冲击波衰减效果。1#、2#、3#、4#气泡膜随着层数与冲击波超压峰值衰减率呈现近似线性关系与周睿、冯顺山对气泡帷幕冲击波衰减特性研究中^[17], 使用量纲分析拟合的公式, 气泡帷幕层数与冲击波超压峰值的近似线性关系是相同的, 说明气泡膜表现出了与气泡帷幕对水下冲击波类似的衰减特性, 气泡膜可以一定程度上模拟静态气泡帷幕; 同时气泡膜表现出对水下冲击波的优良衰减能力, 可以在实际应用中使用这一材料用作水下爆破危害防护。

3.2 薄膜隔层对水下冲击波衰减效果影响

分析表 3 中, 试验 1 ~ 8 薄膜隔层对水下冲击波的衰减效果, 数据处理所得冲击波衰减率如表 5 所示。

表 5 薄膜隔层对冲击波超压峰值衰减率

Table 5 Peak attenuation of shock wave overpressure by a thin film interlayer

材料编号	n	p_m/MPa	\bar{p}_m/MPa	$A/\%$	
0#	1	5.874	5.780	5.827	14.55
	2	5.411	5.393	5.402	20.78
	3	5.184	5.154	5.169	24.20
	4	5.023	4.949	4.986	26.88

如表 5 所示, 薄膜隔层由 1 层增加至 4 层时, 对水下冲击波的衰减率从 14.55% 上升至 26.88%, 呈现小幅度增加的趋势, 说明薄膜隔层对水下冲击波具有衰减作用; 取对冲击波衰减效果最弱的 1#气泡膜, 其衰减率在 84.32% ~ 89.10% 之间, 相比较下薄膜隔层对水下冲击波的衰减影响比重相对较小, 说明气泡膜对冲击波的衰减过程中气泡起到重要作用。

薄膜隔层与气泡膜空气隔层对水下冲击波的衰减差异是来自于气泡, 由此可体现气泡的作用: 如图 4(b)、(c)、(d)、(e) 的波形图中, 在冲击波超压最高波峰之前, 1#、2#、3#、4#气泡膜空气隔层存在因冲

击波绕射而形成的波峰,说明气泡能引起冲击波绕射,使冲击波向整个空间传播;以薄膜隔层对水下冲

击波超压峰值为起点,相同层数下,气泡膜气泡直径与水下冲击波超压峰值关系,如图 6 所示。

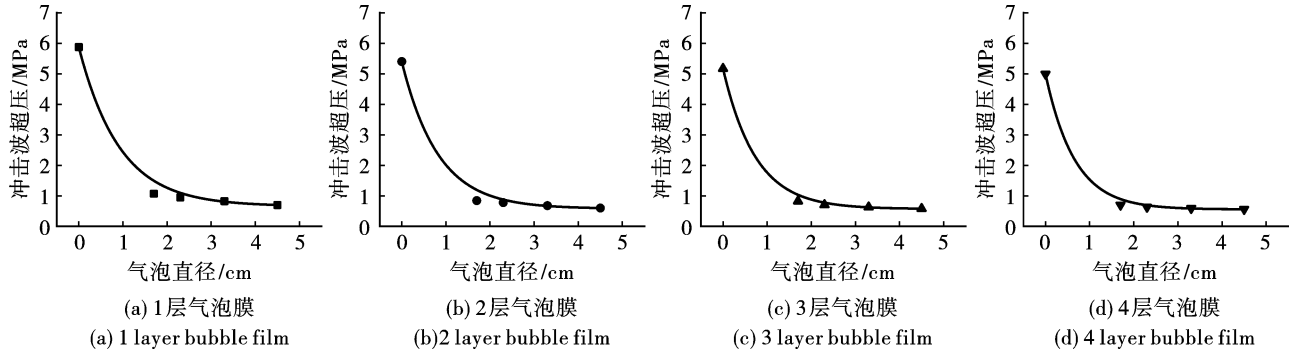


图 6 冲击波超压衰减拟合曲线

Fig. 6 Shock wave overpressure attenuation fitting curve

如图 6 所示气泡直径与水下冲击波超压峰值经曲线拟合呈现指数衰减趋势,根据杨光照对气泡帷幕设计中总结的气流量与冲击波压力关系所呈现指数关系相同^[14],说明在相同层数时,气泡膜气泡直径越大,所含气体越多有利于消耗冲击波阵面的能量,对水下冲击波的衰减效果越好。

3.3 比冲击波能分析

为分析气泡膜对水下冲击波的能量消耗情况^[18,19],根据表 3 中的数据,使用公式(3)计算比冲击波能 E_s ,处理结果列入表 6 中。

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

式中: E_s 为测点处的比冲击波能, MJ/kg; ρ_w 为水的密度,取 1000 kg/m³; C_w 为水中声速,取 1460 m/s; P 为积分区间内的冲击波压力, 10⁶ Pa。空白对照组(试验 41、42),冲击波超压为 6.840 MPa 和 6.798 MPa, θ 为 17.66 和 17.23,根据公式(3)计算得出,比冲击波能 E_s 为 1.19572 MJ · kg⁻¹ 和 1.15232 MJ · kg⁻¹,取平均值 \bar{E}_s 为 1.17402 MJ · kg⁻¹ 作为对照。

根据表 1,定义气泡膜在水中的空气占比 $B(\%)$

$$B = \frac{S_0 V_j n}{S_j V_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: S_0 为气泡膜铺满铁架的试验区域,本试验 $S_0 = 60 \times 60 = 360 \text{ cm}^2$; S_j 为各规格单片气泡膜面积,表 1 可得; V_0 为本试验定义 S_0 为下 12 cm 宽的水域空间, $V_0 = 60 \times 60 \times 12 = 43\ 200 \text{ cm}^3$; V_j 为各个规格气泡膜的实际排水体积,表 1 可得; n 为气泡膜层数。

表 6 比冲击波能数据

Table 6 Specific shock wave energy data

材料编号	n	$B/\%$	$E_s/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\bar{E}_s/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
1#	1	3.94	0.01803	0.01666
			0.01529	
			0.01127	
			0.01345	
	2	7.95	0.01118	0.01236
			0.01090	
			0.00883	
			0.00846	
2#	1	4.43	0.01580	0.01599
			0.01617	
			0.01076	
			0.01174	
	3	13.29	0.00647	0.00697
			0.00747	
			0.00575	
			0.00498	
3#	1	8.42	0.01464	0.01550
			0.01637	
			0.01010	
			0.01134	
	2	16.84	0.00833	0.00763
			0.00693	
			0.00584	
			0.00517	
4#	1	15.04	0.01131	0.01040
			0.00948	
			0.00701	
			0.00653	
	2	30.09	0.00602	0.00677
			0.00501	
			0.00496	
			0.00425	
3	45.13	0.00602	0.00551	
		0.00501		
		0.00496		
		0.00425		
4	60.17	0.00496	0.00461	
		0.00425		
		0.00425		
		0.00425		

定义比冲击波能,能量衰减幅度为 $C(\%)$

$$C = \frac{E_{S_i} - E_{S_j}}{E_{S_0}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: E_{S_i} 、 E_{S_j} 为表6中平均比冲击波能 \bar{E}_S , $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; E_{S_0} 为表6中空白对照组平均比冲击波能 \bar{E}_S , 本试验为 $\bar{E}_S = 1.17402 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

通过表6中数据,四种规格气泡膜对比冲击波能的消耗幅度均达到98.50%以上,能量消耗效果显著,1#气泡膜空气占比由3.94%逐步上升至15.90%,比冲击波能从 $0.01666 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低至 $0.00864 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,能量消耗幅度为0.68%;2#气泡膜空气占比由4.43%逐步上升至17.72%,比冲击波能从 $0.01599 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低至 $0.00537 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,能量消耗幅度为0.90%;3#气泡膜空气占比由8.42%逐步上升至33.68%,比冲击波能从 $0.01550 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低至 $0.00551 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,能量消耗幅度为0.85%;4#气泡膜空气占比由15.04%逐步上升到60.17%,比冲击波能从 $0.01040 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低至 $0.00461 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,能量消耗幅度为0.49%;综上可得,随着气泡膜空气占比的增加,相对应的比冲击波能逐渐降低,但对能量的消耗幅度非常微小,如图7所示。根据图7中显示的曲线分布,2#气泡膜曲线更加倾斜,表现出比1#、3#、4#气泡膜在空气占比较低的情况下更好的能量消耗效果,因此在实际应用中可以考虑将2#气泡膜作为防护材料。

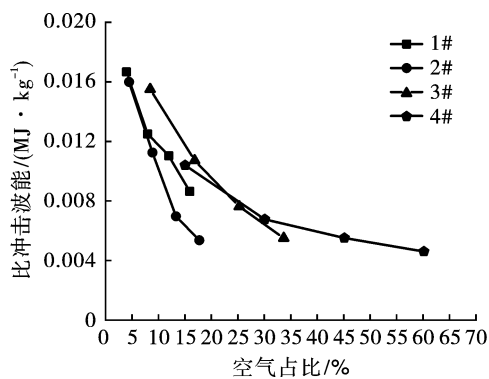


图7 比冲击波能衰减曲线

Fig. 7 Specific shock wave energy attenuation curve

综合冲击波超压与比冲击波能分析结果,气泡膜对水下冲击波有着良好的衰减效果,结合实际应用,气泡膜相比气泡帷幕省略了空压机设备和气泡帷幕发生管管路的制作与铺设,可以考虑在实际应用中采用气泡膜衰减水下冲击波达到防护目的。

4 结论

本文使用四种不同规格的气泡膜研究多层气泡膜隔层结构对水下冲击波衰减效果,通过试验对比分析层数(n)为1、2、3、4时水下冲击波的衰减效果,得出如下结论:

(1)气泡膜空气隔层对水下冲击波超压峰值衰减效果随着气泡膜层数增加,对水下冲击波超压峰值衰减率越高,衰减效果由强到弱顺序依次为4#、3#、2#、1#。

(2)薄膜隔层对水下冲击波具有衰减作用,对比气泡膜空气隔层,其对水下冲击波的衰减影响比重较小,说明气泡膜对冲击波的衰减过程中气泡起到重要作用;相同层数下,气泡直径越大,所含气体越多有利于消耗冲击波阵面的能量,对水下冲击波的衰减效果越好。

(3)通过对比冲击波能分析,四种规格气泡膜对比冲击波能的消耗幅度均达到98.50%以上,能量消耗效果显著,其中2#气泡膜对能量消耗效果最好。

(4)综合考虑冲击波超压与比冲击波能分析结果,气泡膜是优良的水下防护材料,能够有效地降低冲击波对被保护对象带来的危害。

参考文献 (References)

- [1] 杨建,刘静,张登泰,等. 气泡帷幕对港口水域爆破波的削弱[J]. 中国水运(下半月),2020,20(10):90-92.
- [1] YANG Jian, LIU Jin, ZHANG Deng-tai, et al. Weakening of blasting wave in port waters by bubble curtain[J]. China Water Transport (Second Half Month), 2020, 20(10): 90-92. (in Chinese)
- [2] 俞统昌,王晓峰,王建灵. 炸药的水下爆炸冲击波性能[J]. 含能材料,2003(4):182-186.
- [2] YU Tong-chang, WANG Xiao-feng, WANG Jian-ling. Underwater shockwave performance of explosives[J]. Energetic Materials, 2003(4): 182-186. (in Chinese)
- [3] 伍俊,杨益,庄铁栓. 水中爆炸作用机理及毁伤效应研究综述[J]. 火炸药学报,2016,39(1):1-13.
- [3] WU Jun, YANG Yi, ZHUANG Tie-shuan. A review of research on action mechanism and damage effect of underwater explosion[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(1): 1-13. (in Chinese)
- [4] 张志波,李春军,李红勇,等. 气泡帷幕在水下爆破减震工程中的应用[J]. 爆破,2003(2):75-76,89.
- [4] ZHANG Zhi-bo, LI Chun-jun, LI Hong-yong, et al. Appli-

- cation of air bubble purdah in the damping measure in the underwater blasting [J]. *Blasting*, 2003 (2): 75-76, 89. (in Chinese)
- [5] 汤有富. 空气隔层结构对水下爆炸能量及振动影响的研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2017.
- [5] TANG You-fu. Study on the influent of air interlayer on underwater explosion energy and vibration[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2017. (in Chinese)
- [6] 寇晓枫. 空气夹层结构的水下爆炸防护效果研究[D]. 武汉:武汉大学,2017.
- [6] KOU Xiao-feng. Protection effects of sandwich structures with air interlayer subjected to underwater explosion[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese)
- [7] 贾虎,沈兆武. 空气隔层对水中冲击波的衰减特性[J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(1): 61-66.
- [7] JIA Hu, SHEN Zhao-wu. An investigation into attenuation of underwater shockwave by air interlayer[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(1): 61-66. (in Chinese)
- [8] 范怀斌,陆少锋,莫崇勋,等. 基于 ANSYS LS-DYNA 水下爆破阻波帘的设计与研究[J]. *爆破*, 2023, 40(2): 138-143.
- [8] FAN Huai-bin, LU Shao-feng, MO Cong-xun, et al. Design and research of wave blocking curtain for underwater blasting based on ANSYS LS-DYNA [J]. *Blasting*, 2023, 40(2): 138-143. (in Chinese)
- [9] 司剑峰,钟冬望,李雷斌. 基于气泡形态影响的水下气幕对冲击波衰减效果分析[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(7): 71-79.
- [9] SI Jian-feng, ZHONG Dong-wang, LI Lei-bin. Analysis of underwater shock wave attenuation by air bubble curtain based on bubble shape[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(7): 71-79. (in Chinese)
- [10] 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.
- [10] LIU Xin, GU Wen-bin, CHEN Xue-ping. Numerical simulation study of attenuation characteristics of water shock wave under bubble curtain [J]. *Blasting*, 2015, 32(3): 79-84. (in Chinese)
- [11] 杜明燃,陈宇航,陆少锋,等. 基于正交试验法的气泡帷幕削波特性研究[J]. *高压物理学报*, 2023, 37(6): 195-205.
- [11] DU Ming-ran, CHEN Yu-hang, LU Shao-feng, et al. Bubble curtain clipping characteristics based on orthogonal test method[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(6): 195-205. (in Chinese)
- [12] 陆少锋,梁进,覃才勇,等. 供风量对水下爆炸冲击波气泡帷幕消波效应的影响[J]. *工程爆破*, 2022, 28(5): 143-148.
- [12] LU Shao-feng, LIANG Jin, TAN Cai-yong, et al. Influence of air supply rate on wave attenuation effect of bubble curtain for underwater explosion shock wave[J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(5): 143-148. (in Chinese)
- [13] 加尔基 B B(苏),等. 水下爆破工程[M]. 王中黔,吕毅,等,译. 北京:人民出版社,1992.
- [13] GALKI B B, et al. *Underwater engineering blasting* [M]. Translated by WANG Zhong-qian, LU Yi, et al. Beijing: People's Publishing House, 1992. (in Chinese)
- [14] 杨光照. 气泡帷幕防震设计与计算[J]. *爆破*, 1990(2): 48-52.
- [14] YANG Guang-xv. Bubble curtain shockproof design and calculation[J]. *Blasting*, 1999(5): 72-76. (in Chinese)
- [15] 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.
- [15] ZHANG Li. *Blasting equipment performance and explosion effect testing* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2006. (in Chinese)
- [16] 樊自建. 水下爆炸实验安全塔强度设计及隔振技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2008.
- [16] FAN Zi-jian. Research on the strength design and vibration isolation technology of safety tower for underwater explosion experiment [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)
- [17] 周睿,冯顺山. 气泡帷幕对水中冲击波峰值压力衰减特性的研究[J]. *工程爆破*, 2001(2): 13-17.
- [17] ZHOU Rui, FENG Shun-shan. Study on weakening peak pressure of underwater shock wave by bubble curtain [J]. *Engineering Blasting*, 2001(2): 13-17. (in Chinese)
- [18] 张立,吴红波. 爆破器材测试技术[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2018.
- [18] ZHANG Li, WU Hong-bo. *Blasting equipment testing technology* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [19] 张军,汪泉,汤有富,等. 有机玻璃—空气隔层结构对水下爆炸能量输出的影响[J]. *工程爆破*, 2022, 28(2): 39-45.
- [19] ZHANG Jun, WANG Quan, TANG You-fu, et al. Effect of plexiglass—air interlayer on the energy output of underwater explosion [J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(2): 39-45. (in Chinese)