DOI: 10.11858/gywlxb.20230705

供风量与气泡帷幕层数协同下水中爆炸冲击波的削波效果

杜明燃[1,2], 陈智凡[1], 陆少锋[2,3], 梁 进[2,3], 李基锐[2,3], 王尹军[4], 王天照[1], 陈宇航[1]

（1. 安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南 232001;
2. 广西壮族自治区水下破岩工程研究中心, 广西 南宁 530200;
3. 广西新港湾工程有限公司, 广西 南宁 530200;
4. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160）

摘要: 气泡帷幕能有效地削弱水中冲击波对周围环境的影响。为了研究气泡帷幕供风量和层数对水中冲击波的协同作用，在供风量为 30、60、90 L/min 的条件下分别设计了含 1、2、3 层气泡帷幕的水下爆炸试验。结果表明，气泡帷幕的衰减率随供风量和层数增加而增大。当供风量较小（如 30、60 L/min）时，随着气泡帷幕层数的增加，相邻层数之间峰值压力的衰减效率越来越低；当供风量较大（如 90 L/min）时，随着气泡帷幕层数的增加，相邻层数之间峰值压力的衰减效率越来越高。结合实际工程的经济效益和水下复杂环境问题对削波效果进行分析，确定在供风量为 30 L/min 时开启 2 层气泡帷幕是最优的削波方案，为相关的实际工程问题提供参考和新思路。

关键词: 气泡帷幕; 水中爆炸冲击波; 供风量; 衰减率; 衰减效率

中图分类号: O389; TD235 **文献标志码:** A

随着基础建设规划的持续推进，我国对水路交通的要求越来越高。水下爆破技术因其成本低、效率高等特点，被广泛运用于港口、桥梁等水利水电工程建设。与其他介质中的爆炸冲击波不同，水下爆炸产生的冲击波具有峰值压力更高、影响范围更广和毁伤效应更强的特性[1−2]，成为水下爆破技术的主要危害因素之一。如何减小水中冲击波对周围环境的影响是目前水下爆破工程领域亟待解决的主要问题之一[3−4]。

为减少水中冲击波对周围环境的危害，加拿大的 Adolph 工程师在 Oratario 核电站的水下爆破施工中采用了气泡帷幕技术，由于其对水中冲击波优异的削减效果，得到了行业内的广泛认可和应用[5]。国内学者也对气泡帷幕的削波作用开展了研究。贾虎等[6] 采用小波包分解技术分析了气泡帷幕试验，发现气泡帷幕能有效衰减爆炸冲击波压力峰值。司剑峰[7] 分析了气泡帷幕防护机理与气泡之间的关联，发现单位区域内的气泡数量越多，防护效果越好，当气泡数量增加到一定值后，防护效果趋于稳定。陆少锋等[8] 开展了气泡帷幕现场试验，发现气泡帷幕对水下冲击波的削弱效果与供风量成正比。谢金怀等[9] 研究了气泡帷幕对声波的衰减效果，发现气泡帷幕的气流量越大，气泡帷幕对声波的衰减效果越强。

* **收稿日期:** 2023-08-08； **修回日期:** 2023-09-14

基金项目: 安徽省高校科学研究项目（KJ2021A0431）; 广西重点研发计划（桂科 AB22035001）; 安徽省自然科学基金（1908085QA33）; 安徽理工大学引进人才科研启动基金（11881）; 广西重点研发计划（防科 AB21014001）

作者简介: 杜明燃（1987—），男，博士，副教授，主要从事炸药性能和爆破技术研究. E-mail: dumingranaust@163.com

通信作者: 陈智凡（1999—），男，硕士研究生，主要从事水中爆炸研究. E-mail: 786923403@qq.com

范怀斌等[10]研究了一管多排孔气泡帷幕发生器的削波情况，发现增加气孔排数能提高气泡帷幕的阻波率。刘欣等[11]建立了气泡帷幕防护的简化深水岩石钻孔爆破数值模型，通过分析峰值压力和比冲量得到了气泡帷幕对水中冲击波的衰减特性。张成兴等[12]和鲁天龙[13]利用数值模拟得到了静水中气泡帷幕产生水平流的特性和气泡的流动特性。刘天云等[14]利用 LS-DYNA 软件对水下钻孔爆破进行数值模拟，发现气泡帷幕离爆炸源较近时，对水中冲击波的削减效果更好。谢达建等[15]利用 LS-DYNA 软件建立了水下钻孔爆破模型，据此分析了长江九朝段炸礁工程中气泡帷幕的设置距离对削波效果的影响，发现离被保护对象较近处设置气泡帷幕的防护效果更好。胡亚峰等[16]针对爆炸试验水池强度设计问题，利用非线性动力学程序 LS-DYNA 对 10 kg TNT 爆炸后的水中冲击波传播规律及爆炸水池结构的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，为相关爆炸水池的工程设计提供了参考。

综上所述，气泡帷幕的削波效果与众多因素有关，其中气泡帷幕供风量和层数作为工程实践中常被考虑的因素，在操作过程中往往会产生协同作用。为此，本研究将综合考虑实际工程的经济效益与水下复杂环境问题，分析气泡帷幕供风量与层数对水中冲击波的衰减效果，以期找到最优的衰减方案以保护水下生态环境及水下建筑。

1　现场试验

1.1　试验仪器

试验仪器包括 American company of LeccoHD4096 型示波器、PCB-MODEL-482-SERIES 型恒流源和 MODEL-138A05 Serial-12275 型传感器。

气泡帷幕发生器进气口与空压机出气口相连，它们之间有用于计量供风量的气体流量计。气泡帷幕发生管两端均连接分流器，分流器上配备独立阀门，使每个气泡帷幕发生管独立开启或同步开启，如图 1 所示。分流器进出气口、直角三通、气泡帷幕发生管的内径均为 10 mm，外径均为 12 mm。供风软管的内径为 12 mm，外径为 14 mm。气泡帷幕发生管长为 1 m，钻单排孔，孔距为 0.040 m，孔径为 0.002 m。气泡帷幕发生管之间的距离为 7 cm。

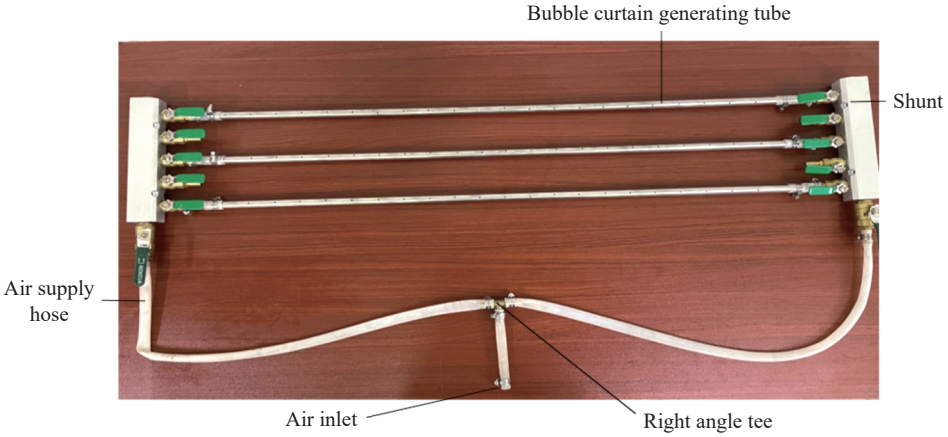


图 1　气泡帷幕发生器

Fig. 1　Bubble curtain generator

首先将气泡帷幕发生器的进气口与爆炸水箱侧边空压机连接，然后打开 2 个分流器上 1 排管对应的 2 个阀门，再将气泡帷幕发生器置于爆炸水箱底部，固定位置后打开空压机进行供风，约 1 s 后气泡帷幕发生管就充满空气，空气从气泡帷幕发生管孔洞中排出形成气泡，气泡由小变大慢慢上升，最终形成一层气泡帷幕。同理，打开 2 排或 3 排气泡帷幕发生管的阀门，通气后距离通气口最近的气泡帷幕

发生管先产生气泡，2～3 s 后其余气泡帷幕发生管产生气泡，待气泡稳定后，便形成 2 层或 3 层气泡帷幕。现场试验中，气泡帷幕发生器的作用效果如图 2 所示。



图 2　现场试验中气泡帷幕发生器的作用效果

Fig. 2　Effect of bubble curtain generator in field test

1.2　试验过程

为了研究气泡帷幕的供风量和层数对水中冲击波衰减作用的协同关系，设置气泡帷幕发生器的供风量（v）为 30、60、90 L/min，气泡帷幕层数（n）分别为 1、2、3，观察其对水中冲击波的衰减效果。试验在边长为 1.20 m 的立方体水箱中进行，由于水箱所能承受的 TNT 当量有限，因此采用一枚 1.02 g TNT 当量的标准 8 号电雷管作为爆炸源。爆炸源距水箱边缘 0.20 m，悬吊在距水箱上支撑架 0.60 m 的位置，爆炸源与传感器位于同一水平线上[17]。气泡帷幕中心位置与药包的距离为 0.45 m，在距爆心 0.90 m 处布置传感器。试验布置如图 3 所示。试验设计方案如表 1 所示。

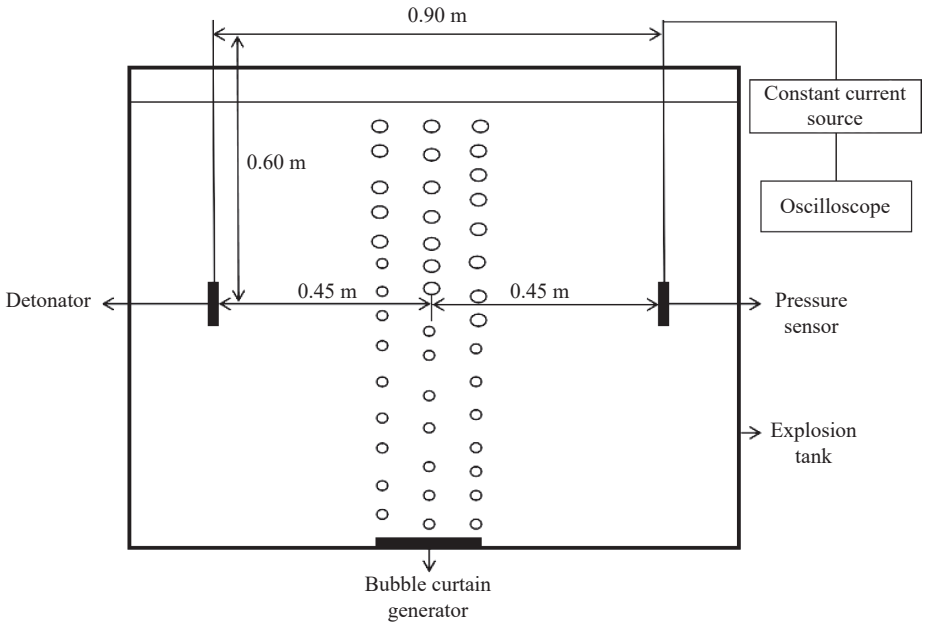


图 3　现场布置示意图

Fig. 3　Schematic diagram of test arrangement

表 1　试验设计方案

Table 1　Design scheme of field test

Test No.	v/(L·min^{-1})	n	Test No.	v/(L·min^{-1})	n	Test No.	v/(L·min^{-1})	n
1	0	0	8	90	1	15	30	3
2	0	0	9	30	2	16	30	3
3	30	1	10	30	2	17	60	3
4	30	1	11	60	2	18	60	3
5	60	1	12	60	2	19	90	3
6	60	1	13	90	2	20	90	3
7	90	1	14	90	2			

2　试验结果与数据分析

2.1　供风量对削波效果的影响

为研究供风量对气泡帷幕削波效果的影响，首先设置无气泡帷幕的空白对照组。由于试验在边长为 1.20 m 的立方水箱中进行，存在边界条件，因此水下冲击波会产生一些不规则的折射或反射，导致气泡脉动的压力波形出现波动。考虑到本研究主要探讨气泡帷幕对冲击波峰值压力的削减作用，未涉及气泡脉动压力，因而在讨论冲击波压力时程曲线时不考虑气泡脉动。试验测得的冲击波压力时程（p-t）曲线如图 4 所示。可见，试验 1 和试验 2 的冲击波峰值压力分别为 3.907 和 4.158 MPa，取其平均值 4.033 MPa 作为对照。爆炸冲击波的衰减公式[18−19] 为

$$p_{\mathrm{m}} = \left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

式中：p_{m} 为水下爆破冲击波的峰值压力，Q 为水下裸爆装药量，R 为爆心距（爆炸中心到测点的距离），α为与爆区水体环境有关的衰减指数。由式 (1) 可以看出，在常规条件下，水下冲击波的峰值压力仅与药量和爆心距有关。

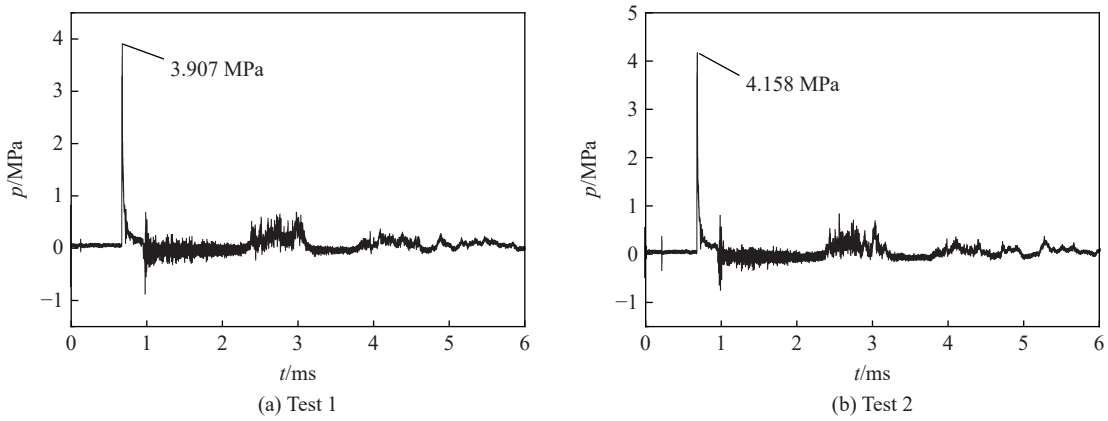


图 4　空白对照组的冲击波压力时程曲线

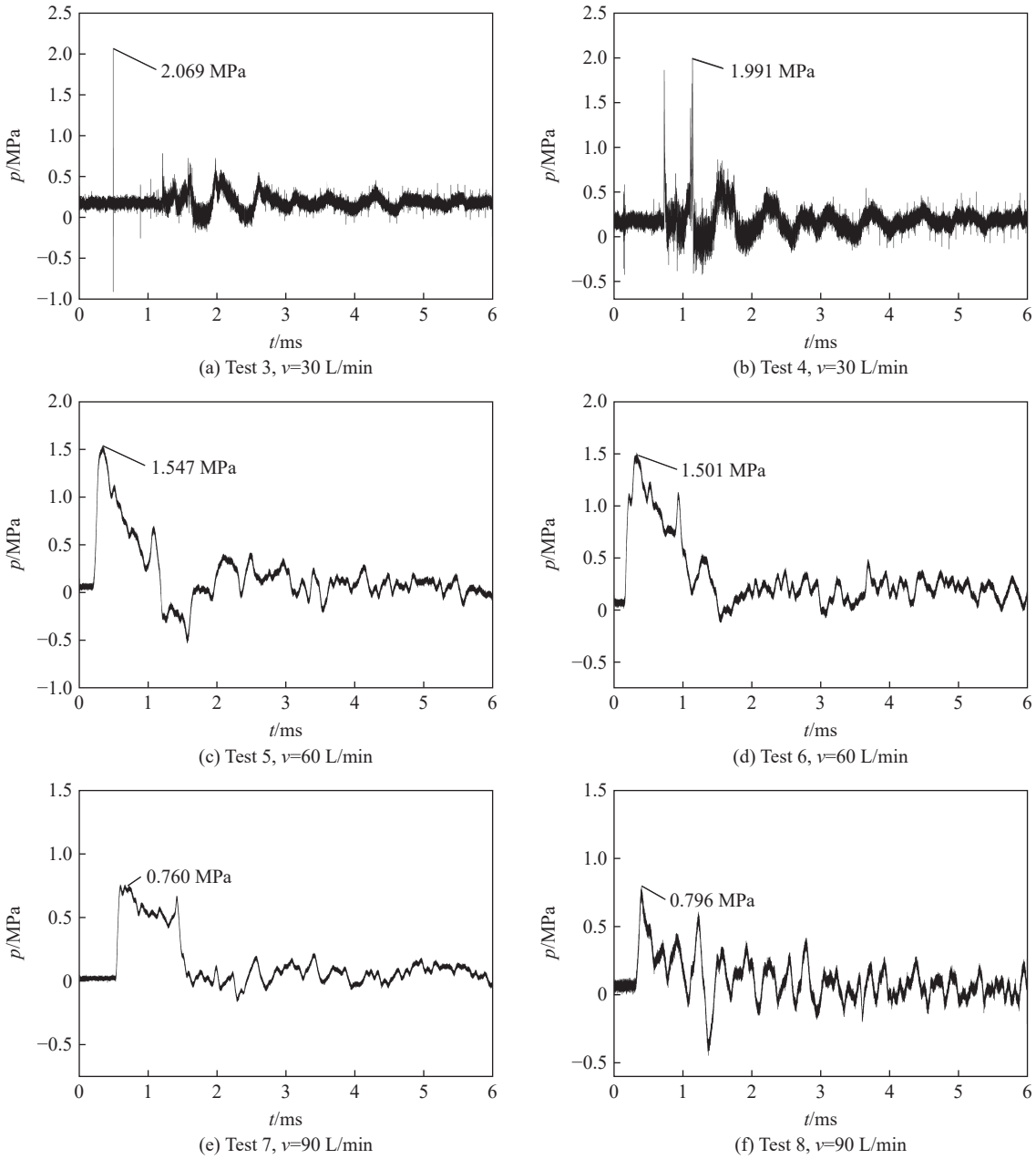
Fig. 4　Time histories of shock wave pressure in blank control group

定义冲击波峰值压力的衰减率A

$$A = \frac{p_{\mathrm{b}} - p_{\mathrm{t}}}{p_{\mathrm{b}}} \tag{2}$$

式中：p_{b} 为无气泡帷幕（空白组）时的冲击波峰值压力，p_{t} 为有气泡帷幕时的冲击波峰值压力。本试验中 p_{b}=4.033 MPa。

按照图 3 所示，设置单排管（即气泡帷幕数 n=1），选取 30、60、90 L/min 3 个供风量，每组试验测试 2 次，所得冲击波压力时程曲线如图 5 所示，冲击波峰值压力和平均峰值压力 $\overline{p}_{\mathrm{m}}$ 列于表 2。



(a) Test 3, v=30 L/min　(b) Test 4, v=30 L/min

(c) Test 5, v=60 L/min　(d) Test 6, v=60 L/min

(e) Test 7, v=90 L/min　(f) Test 8, v=90 L/min

图 5　供风量为 30、60、90 L/min 时的冲击波压力时程曲线

Fig. 5　Time histories of shock wave pressure with air supply volume of 30, 60 and 90 L/min

当供风量为 30、60、90 L/min 时，冲击波峰值压力的平均值分别为 2.030、1.524、0.778 MPa，平均衰减率分别为 49.67%、62.21%、80.71%，即随着供风量的增加，气泡帷幕的削波效果增强。这说明对于单层气泡帷幕，提高气泡密度可以很好地增强削波效果。从图 5 还可以看出，随着供风量的增加，冲击波压力时程曲线的振荡明显增强，冲击波持续时间也明显延长。这是因为气泡密度随着供风量的增加而增大，当水下冲击波遇到密度增大的气泡墙时，发生的不规则反射和折射也会越来越明显，导致传感器测得的压力时程曲线振荡增强，与冯沐桦[20]得到的多层气泡帷幕削波效果随供风量的增加而增大的结果一致。

表 2　不同层数气泡帷幕条件下水下冲击波峰值压力

Table 2　Peak pressure of underwater explosion shock wave under different layers of bubble curtains

v/(L·min^{-1})	n=1			n=2			n=3		
	p_m/MPa	$\overline{p}_m$/MPa	A/%	p_m/MPa	$\overline{p}_m$/MPa	A/%	p_m/MPa	$\overline{p}_m$/MPa	A/%
30	2.069 1.991	2.030	49.67	0.931 0.944	0.938	76.74	0.831 0.870	0.851	78.90
60	1.547 1.501	1.524	62.21	0.842 0.801	0.822	79.62	0.633 0.681	0.657	83.71
90	0.760 0.796	0.778	80.71	0.655 0.684	0.670	83.39	0.390 0.392	0.391	90.30

2.2　气泡帷幕层数对削波效果的影响

在供风量为 30、60 和 90 L/min 的条件下，分别开启 1、2、3 层气泡帷幕发生管，传感器测得的冲击波峰值压力及其衰减率如表 2 所示。图 6 给出了供风量为 30 L/min、不同气泡帷幕层数时的冲击波压力时程曲线。

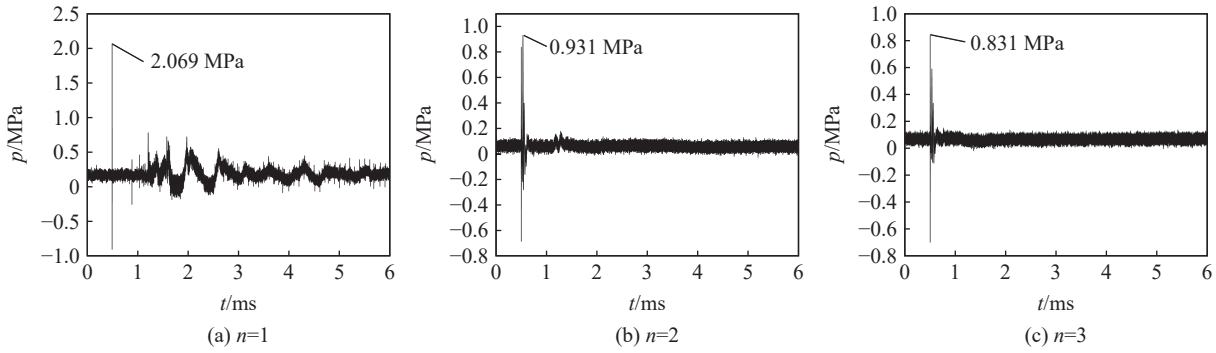


图 6　供风量为 30 L/min、不同气泡帷幕层数时的冲击波压力时程曲线

Fig. 6　Time histories of shock wave pressure under different layers of bubble curtains with the air supply volume of 30 L/min

由表 2 和图 6 可以看出：气泡帷幕可以很好地削弱水中冲击波，衰减率最大可以达到 90% 以上；随着供风量的提高，衰减效果越来越好；在相同的供风量下，随着气泡帷幕层数增加，气泡帷幕对水中冲击波的衰减效果越来越好，说明增加气泡帷幕宽度可以很好地缓冲水下冲击波。

2.3　供风量与气泡帷幕层数的协同关系

在固定供风量的情况下，设有 i 层气泡帷幕时的峰值压力为 p_i，有 i+1 层气泡帷幕时的峰值压力为 p_{i+1}，则相邻气泡帷幕层数之间的峰值压力衰减效率 B_i 可以表示为

$$B_i = \frac{p_i - p_{i+1}}{p_i} \tag{3}$$

式中：i 取 1 和 2。

由表 2 得到 B_i 与供风量 v 的关系，如图 7 所示。可以看出，当供风量较小（如 30、60 L/min）时，随着气泡帷幕层数的增加，B_2 小于 B_1，即衰减效率越来越低；当供风量较大（如 90 L/min）时，随着气泡帷幕层数的增加，B_2 大于 B_1，即衰减效率越来越高。

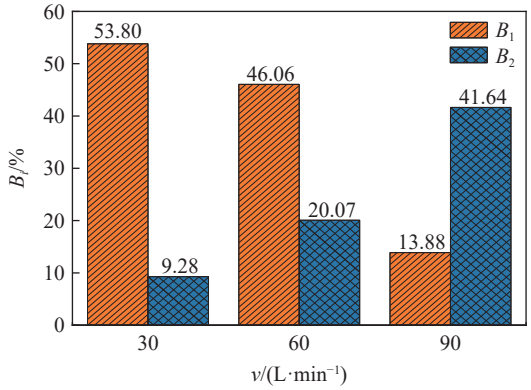


图 7　相邻层数之间的衰减效率 B_i

Fig. 7　Attenuation efficiency B_i between adjacent layers

在固定气泡帷幕层数的情况下，设供风量为 j

的峰值压力为p_j，供风量为 (j+30) L/min 时的峰值压力为p_{j+30}(j=30, 60)，则相邻梯度供风量之间的峰值压力衰减效率C_j可以表示为

$$C_j = \frac{p_j - p_{j+30}}{p_j} \tag{4}$$

由表 2 得出的C_j随气泡帷幕层数的变化如图 8 所示。可以看出，2 层气泡帷幕时，随着供风量的增加，冲击波峰值压力的衰减效率都较小，衰减效果的增加不明显。

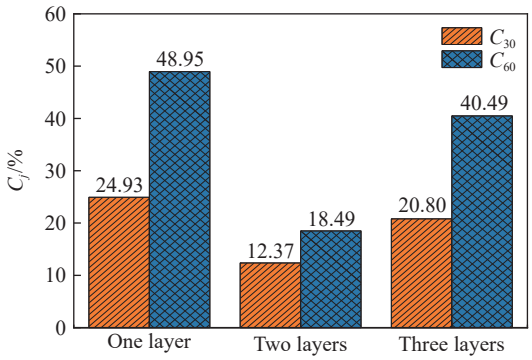


图 8　相邻梯度供风量之间的衰减效率C_j

Fig. 8　Attenuation efficiency C_j between adjacent air supply volumes

由表 2 可知，单层气泡帷幕在低供风量时的削波效果有限，并且考虑到实际工程实践中的布置环境复杂，无法保证气孔均朝上，甚至有的气孔被水底淤泥堵塞，因此采用多层气泡帷幕更合理。2 层或 3 层气泡帷幕都可以达到很好的衰减效果，结合气泡帷幕发生器的成本问题，采取 2 层气泡帷幕将获得更好的实际效益。通过图 8 可知，在形成 2 层气泡帷幕的情况下，随着供风量的增加，冲击波峰值压力衰减率的增加不明显，所以不建议选择 90 L/min 的供风量。从图 7 可以看出，当供风量较小时，随着气泡帷幕层数的增加，衰减效率越来越低，因而 3 层气泡帷幕不适用。通过表 2 可知，2 层气泡帷幕、供风量为 30 和 60 L/min 时的衰减率分别为 76.74% 和 79.62%，相差不大，因此，选择 30 L/min 的供风量比较合适。综上所述，设置 2 排气泡帷幕发生管，选择供风量为 30 L/min 时，所产生的气泡帷幕兼具较好的衰减效果和较低的经济成本。

3　结　论

在供风量为 30、60、90 L/min 的条件下分别设计 1、2、3 层气泡帷幕的水下爆炸试验，对比分析了气泡帷幕层数和供风量的协同作用对水中冲击波的削弱效果，得到以下结论：

(1) 随着供风量增加，单层气泡帷幕的削波效果越来越好，多层气泡帷幕也有相同的规律；

(2) 在供风量一定的条件下，削波效果随着气泡帷幕层数的增加而增强；

(3) 当供风量较小时，随着气泡帷幕层数的增加，相邻层数之间峰值压力的衰减效率越来越差，当供风量较大时，随着气泡帷幕层数的增加，相邻层数之间峰值压力的衰减效率越来越高；

(4) 综合考虑经济效益和水下复杂环境，供风量为 30 L/min 的 2 层气泡帷幕方案是本试验的最优衰减方案，研究结果可为相关的实际工程问题提供参考和新思路。

参考文献：

[1] 王兴雁, 詹发民, 周方毅, 等. 气泡帷幕削减水击波压力作用因素分析 [J]. 爆破, 2012, 29(4): 23–27.
WANG X Y, ZHAN F M, ZHOU F Y, et al. Effect of bubble curtains on underwater shockwave reducing [J]. Blasting, 2012, 29(4): 23–27.

[2] 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.
KOU X F. Protection effects of sandwich structures with air interlayer subjected to underwater explosion [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.

[3] 张轶凡, 刘亮涛, 王金相, 等. 水下爆炸冲击波和气泡载荷对典型圆柱壳结构的毁伤特性 [J]. 兵工学报, 2023, 44(2): 345–359.
ZHANG Y F, LIU L T, WANG J X, et al. Damage characteristics of underwater explosion shock wave and bubble load on typical cylindrical shell structure [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(2): 345–359.

[4] 王高辉, 高政, 卢文波, 等. 考虑初始应力的混凝土重力坝水下爆炸毁伤特性研究 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(11): 133–140.
WANG G H, GAO Z, LU W B, et al. Damage characteristics of underwater explosion of concrete gravity dam considering initial stress [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(11): 133–140.

[5] 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, 20(2): 75–76, 89.
ZHANG Z B, LI C J, LI H Y, et al. Application of air bubble purdah in the damping measure in the underwater blasting [J]. Blasting, 2003, 20(2): 75–76, 89.

[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] 司剑峰. 深水钻孔爆破的冲击波衰减规律及防护研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.
SI J F. Research on the attenuation law of shock wave and protection in deep-water drilling and blasting [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021.

[8] 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.
LU S F, LIANG J, QIN C Y, 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.

[9] 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.

[10] 范怀斌, 陆少锋, 莫崇勋, 等. 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 [J]. 爆破器材, 2023, 52(2): 48–55.
FAN H B, LU S F, MO C X, et al. Experimental study on attenuation effect of multi-layer differential bubble curtain on underwater blasting shock wave [J]. Explosive Materials, 2023, 52(2): 48–55.

[11] 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.

[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, 2010, 25(1): 59–66.

[13] 鲁天龙. 气泡帷幕周围流场运动特性数值模拟研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020.
LU T L. Numerical simulation of flow field motion characteristics around bubble curtain [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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, 11(4): 182–186.
YU T C, WANG X F, WANG J L. Underwater shockwave performance of explosives [J]. Energetic Materials, 2003, 11(4): 182–186.

[20] 冯沐桦. 水下爆炸与水池抗冲击载荷研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
FENG M H. Study on underwater explosion and methods of anti-shock load for explosive pool [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2023.

Synergistic Effect of Air Supply Volume and Bubble Curtain Layer on the Shock Wave Attenuation of Underwater Explosion

DU Mingran[1,2], CHEN Zhifan[1], LU Shaofeng[2,3], LIANG Jin[2,3], LI Jirui[2,3], WANG Yinjun[4], WANG Tianzhao[1], CHEN Yuhang[1]

(1. *School of Chemical Engineering*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan* 232001, *Anhui*, *China*;
2. *Research Institution of Underwater Rock-Cutting Engineering at Guangxi Zhuang Municipality Region*, *Nanning* 530200, *Guangxi*, *China*;
3. *Guangxi New Harbour Engineering Co.*, *Ltd.*, *Nanning* 530200, *Guangxi*, *China*;
4. *BGRIMM Technology Group*, *Beijing* 100160, *China*)

Abstract: The bubble curtain can effectively weaken the influence of underwater shock wave on the surrounding environment. In order to investigate the synergistic effect of air supply volume and bubble curtain layer on the shock wave attenuation of underwater explosion, underwater explosion tests with one layer, two layers and three layers were designed under the air supply volume of 30, 60, and 90 L/min, respectively. The results show that the attenuance of bubble curtain increases with the increase of air supply volume and layer number. When the air supply is small (such as 30, 60 L/min), with the increase of the number of bubble curtain layers, the attenuation efficiency of the peak pressure between adjacent layers becomes worse; when the air supply is large (such as 90 L/min), with the increase of the number of bubble curtain layers, the attenuation efficiency of the peak pressure between adjacent layers becomes better. Combined with the economic benefits of the actual project and the complex underwater environment problems to analyze the attenuation effect of the bubble curtain, it was determined that the two-layer bubble curtain with the air supply rate of 30 L/min was the optimal attenuation scheme, which provides reference and new ideas for related practical engineering problems.

Keywords: bubble curtain; underwater explosion shock wave; air supply volume; attenuance; attenuation efficiency