

# 单管多排孔气泡帷幕削波效率及机理

李基锐<sup>1, 2</sup>, 晋聪<sup>3</sup>, 杜明燃<sup>2, 3</sup>, 曾辉莲<sup>1, 2</sup>, 覃才勇<sup>1, 2</sup>

(1. 广西新港湾工程有限公司, 广西 南宁 530200;

2. 广西壮族自治区水下破岩工程研究中心, 广西 南宁 530200;

3. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 为了进一步优化气泡帷幕的削波效率, 设计了单管多排气泡孔水下爆炸冲击波衰减效果现场试验和气泡帷幕形态高速摄影观测, 并利用 AUTODYN 软件, 研究了气泡帷幕数值计算模型的等效厚度。结果表明: 在相同的气流量条件下, 气泡孔排数是影响削波效率的重要因素, 当爆心距为 12 m 时, 孔排数为 1、2 和 3 对应的削波效率分别为 89.92%、97.25% 和 96.41%; 在不同的爆心距下, 2 排孔气泡帷幕的削波效率均最佳, 削波效率均大于 95.00%。无论是气泡帷幕的厚度还是密集度, 2 排孔气泡帷幕对应的削波效率均最大, 气泡帷幕厚度是确定削波效率的关键因素。利用实验与数值模拟相结合的方法建立的等效厚度拟合公式具有较高的可靠性, 模拟模型具有较高的准确度。建议类似工程采取单管 2 排孔气泡帷幕实现便捷、高效和低成本削波。

**关键词:** 水下冲击波; 气泡帷幕; 削波效率; 孔排数; 等效厚度

**中图分类号:** O389; TD235

**文献标识码:** A

在水下施工中, 爆炸产生的冲击波会对周边设施及水下生物造成显著影响<sup>[1]</sup>。因此, 如何有效降低水下爆炸冲击波危害, 保障周围设施及生物的安全, 成为当前亟待解决的问题。

在众多控制手段中, 气泡帷幕防护技术最早由 Adolph<sup>[2]</sup> 提出, 并在 1976 年引入至我国, 因其在实际应用中的良好效果而被广泛采用。之后, 研究人员开展了大量实验和理论研究。杨光熙<sup>[3]</sup> 开展了相关设计和计算; 李泽华<sup>[4]</sup> 等和周睿<sup>[5]</sup> 等开展了气泡帷幕对冲击波能量和峰值压力的衰减研究; 张志波<sup>[6]</sup> 等和余英<sup>[7]</sup> 开展了气泡帷幕在三峡大坝工程中的应用研究。张溥<sup>[8]</sup> 根据波阻抗理论, 设计了一种含有空气隔层的水下冲击波防护装置, 该装置能有效固定空气且在水下爆破工程中易于使用伍俊<sup>[9]</sup> 等、才干<sup>[10]</sup> 等和贾虎<sup>[11]</sup> 等研究结果表明, 气泡帷幕可以有效降低冲击波压力峰值, 削波作用约 90%。以上研究均证明气泡帷幕可以有效降低水下爆破危害。

另外, 由于水下爆炸实验的复杂性、操作难度大和成本偏高, 数值模拟技术被用于水下爆炸及气泡帷幕防护技术研究。刘欣<sup>[12]</sup> 等较早采用流固耦合的方法开展了气泡帷幕对峰值压力和比冲量的衰减特性数值模拟研究; 刘云天<sup>[13]</sup> 等利用 LS-DYNA 开展的数值模拟研究证实, 气泡帷幕与爆源距离越近, 其削波效率越佳。杨建<sup>[14]</sup> 等利用 LS-DYNA 开展了气泡帷幕在爆破工程应用中削波作用模拟研究, 结果表明数值模拟结果和实验结果相符较好, 且双层气泡帷幕时, 气泡帷幕间距越大削波效率越好; 司剑峰<sup>[15]</sup> 等使用 LS-DYNA 有限元软件进行数值建模, 建立真实气泡投放模型, 结果表明: 单位面积内, 气泡数量越多, 防护效果越好。裴善报<sup>[16]</sup> 使用 AUTODYN 软件对带壳装药水下爆炸特性进行了数值模拟, 模拟结果表明 AUTODYN 的一维方法可较为准确地模拟出带壳装药水下爆炸冲击波和气泡脉动过程。盛振新<sup>[17]</sup> 发现 AUTODYN 软件因其开源性和高稳定性, 适合用于水下爆炸的数值模拟。杜明燃<sup>[18]</sup>

收稿日期: 2025-10-20; 修回日期: 2025-12-27

基金项目: 安徽省高校科学研究项目(KJ2021A0431); 中央引导地方科技发展资金(桂科 ZY23055050)

作者简介: 李基锐(1987-), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事水下爆破工程和安全研究。

E-mail:

314007626@qq.com

通讯作者: 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

过 AUTODYN 软件和正交实验法的研究表明, AUTODYN 软件可有效用于气泡帷幕防护研究, 并且气泡帷幕层数、爆心距和药包深度均对削波效率有影响, 气泡帷幕层数影响最大。除上述研究外, 近些年, 本课题组为深入研究气泡帷幕的削波规律和机理, 开展了大量实验和模拟研究<sup>[20-24]</sup>, 结果表明: 气泡帷幕间距和数量、气流大小、气泡帷幕距爆源距离均对削波效率有影响。并进一步证实 AUTODYN 软件可有效用于气泡帷幕防护模拟研究。

综上, 大量研究表明: 气泡帷幕可以有效降低冲击波危害, 且受多种因素影响。然而, 深入分析不难发现, 气泡帷幕的层数是影响削波效率的关键因素, 但工程实践表明, 在水下爆炸作业的条件下, 通过增加供气设备(空压机和减压气罐)数量、辅助设备(船只)和人员数量等, 达到增加气泡帷幕管和气泡帷幕层数的目的难度较大, 且施工成本显著提高。因此, 若能通过一根气泡帷幕发生管达到多层气泡帷幕的削波效率变得十分重要。因此, 为实现上述目的, 本文设计了单管多排气孔气泡帷幕发生管, 开展了单管多排气孔气泡帷幕削波效率研究, 并利用简易模型、气泡形态观测实验和数值模拟, 分析了影响削波效率的内在原因, 建立了单管多排气孔气泡帷幕等效厚度, 以期为提高气泡帷幕防护效果提供参考, 并为水下爆破工程提供理论依据和指导。

## 1 试验和分析

### 1.1 试验设计

测试系统采用 Blast-PRO-4 通道冲击波测试仪, PCBW138 系列水下冲击波传感器; 气泡帷幕发生装置采用空压机供气, 并配备减压气罐、压力表、输气管道和阀门, 自制管径 50 mm, 长度 20 m、孔径 2 mm、孔间距 2 cm 的气泡帷幕发生管, 气泡帷幕发生管为壁厚 4mm 的钢管, 使用船载起重机安放到指定位置; 分别在气泡帷幕发生管上设置 1 排、2 排和 3 排气孔, 其中, 1 排气孔时气孔位于管上部同一直线, 2 排气孔时气孔分别位于管的左右两侧, 3 排气孔时气孔分别位于管的左右两侧及上部。气泡帷幕发生管如下图 1 所示。

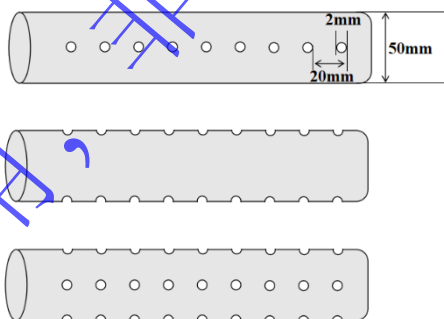


图 1 气泡帷幕发生管示意图

Fig.1 Schematic diagram of the bubble curtain tube

为探究气泡孔排数对气泡帷幕削波效率的影响, 同时考虑气泡孔排数对不同爆心距条件下的削波效率, 设计了现场试验。测试地点位于广西贵港二线船闸下游右岸靠船墩旁, 试验水深约 10 m, 水流平均速度 0.1 m/s, 水面宽度约 200 m。试验爆源为 2#岩石乳化炸药 0.3 kg, 测试过程传感器、爆源入水深度为水下 5 m, 气泡帷幕发生管距离爆源 6 m, 选取爆心距( $d$ )12、24、33.6m 三个位置作为测点并布置传感器, 气泡帷幕发生管与爆源和传感器连线垂直。气泡孔排数( $n$ )分别为 1、2、3 排, 气泡帷幕供风量保持固定, 均为 26.1 m<sup>3</sup>/min。测试现场及测试示意图如图 2 和图 3 所示。为比较分析, 首先测试未设置气泡帷幕的空白组。为保证试验数据的可靠性, 每组试验进行 2 次平行组测试并对结果取平均值, 试验设计如表 1 所示。



图2 测试现场图  
Fig. 2 Filed testing diagram

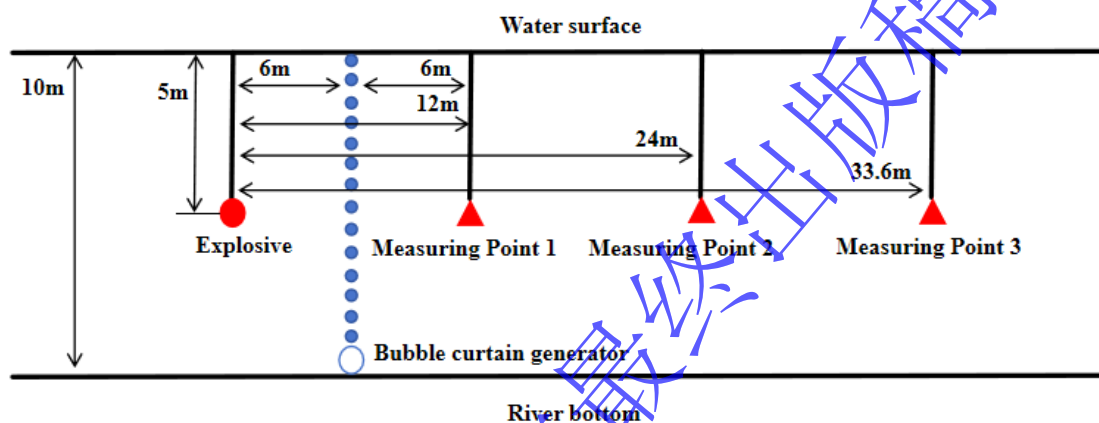


图3 测试示意图

Fig. 3 Testing schematic diagram

表1 试验设计表

Table 1 Experimental design parameters

Test Number	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
The number of rows of holes	0	0	1	1	2	2	3	3

## 1.2 试验结果与分析

D1 和 D2 空白组试验数据和冲击波压力时程曲线如表 2 和图 4（以爆心距 12m 为例）所示。由表 2 可以看出，随着爆心距增大，冲击波峰值压力  $p$  逐渐减小；爆心距 12、24、33.6m 处的峰值压力平均值分别为 1.894 MPa、0.692 MPa 和 0.457 MPa。测试结果符合冲击波在水下传播一般规律。

表 2 D1 和 D2 不同测点的峰值压力

Table 2 The peak pressures of D1 and D2 at different measurement points

Test Number	$p/\text{MPa}$		
	$d=12\text{m}$	$d=24\text{m}$	$d=33.6\text{m}$
D1	1.883	0.764	0.403
D2	1.903	0.620	0.511

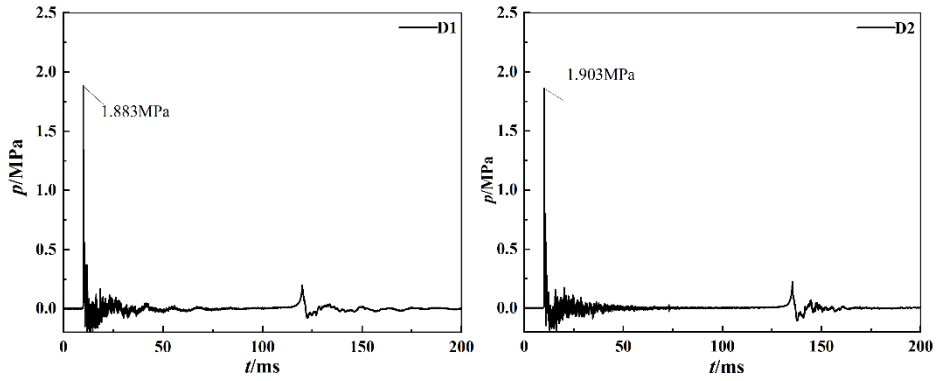


图4 爆心距 12 m 冲击波压力测试图

Fig.4 Shock wave pressure test curves for the explosion center distance of 12 m

D3-D8 各测点峰值压力试验结果和变化趋势如表3和图5; 限于篇幅, 本文以孔排数1排为例, 所测冲击波压力时程曲线如图6所示。由图5可知, 当孔排数为1排时, 3个测点位置的平均峰值压力均明显大于气泡孔排数为2排时各测点的平均峰值压力, 说明在本研究试验范围内, 单管相同通风量条件下, 气泡孔排数由1增加至2时, 气泡帷幕的削波效率更好。然而, 气泡孔排数增大为3时, 3个测点的平均峰值压力均大于气泡孔排数为2时的平均峰值压力, 说明在通风量相同的条件下, 相比单管排气孔, 单管3排气孔削波效率反而更差。以上实验表明, 在相同通风量和单管的条件下, 气泡孔排数影响气泡帷幕削波效率, 气泡孔排数为2时, 削波效率最好。

表3 各试验不同测点的冲击波峰值压力

Table 3 The peak pressure of shock waves at different measurement points in each test

Test Number	p/MPa					
	d=12m	Average value	d=24m	Average value	d=33.6m	Average value
D3	0.154	0.191	0.076	0.067	0.032	0.036
D4	0.228		0.057		0.040	
D5	0.050	0.052	0.020	0.026	0.019	0.020
D6	0.054		0.031		0.021	
D7	0.070	0.068	0.037	0.030	0.029	0.024
D8	0.066		0.023		0.018	

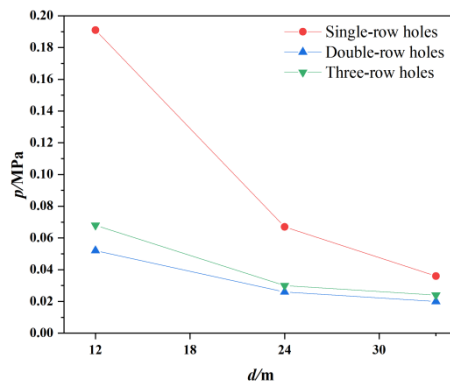


图5 各试验不同测点平均峰值压力变化图

Fig. 5 Average peak pressure curves of different measuring points in each experiment

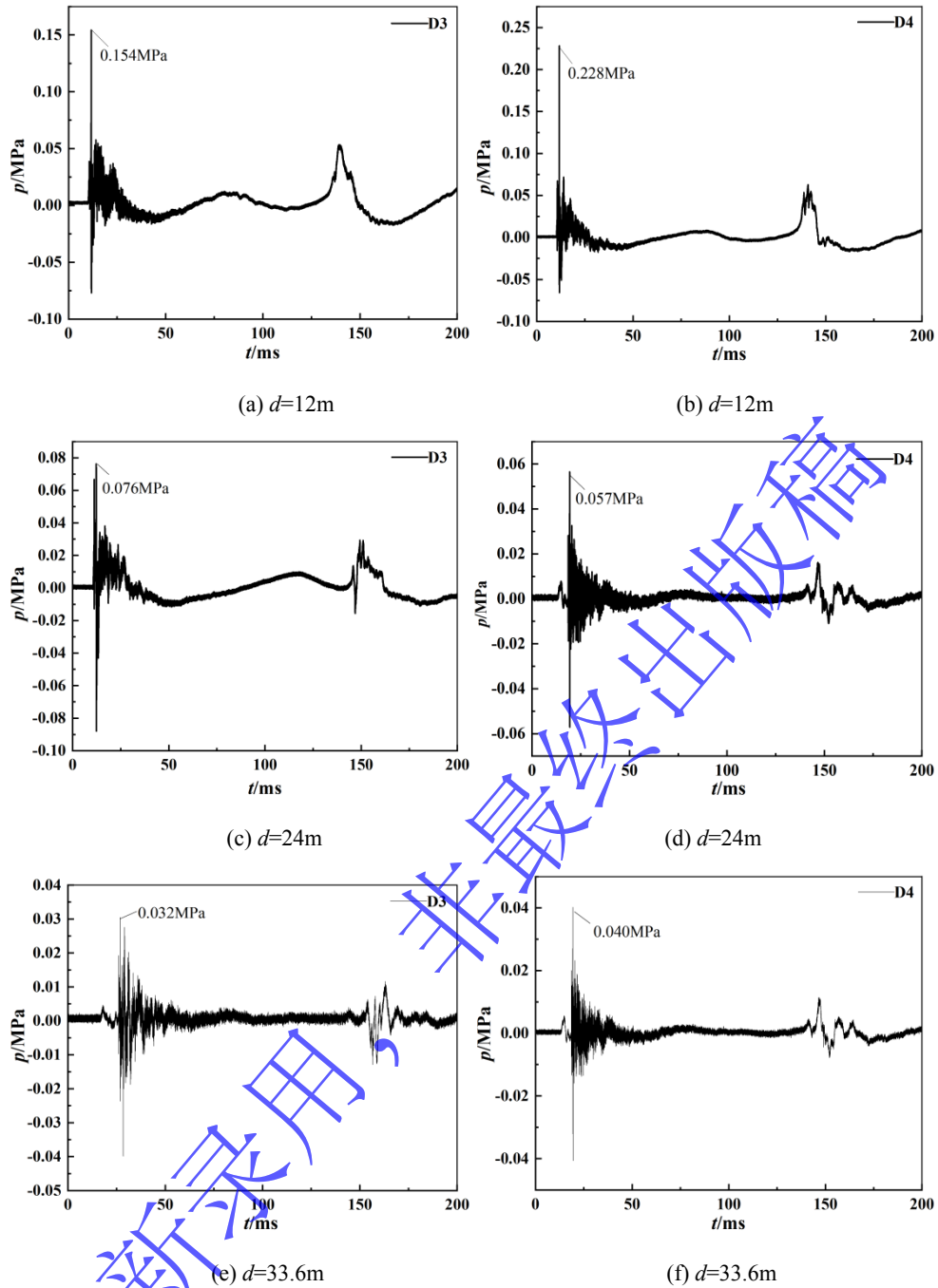


图6 单排孔时冲击波压力时程曲线图

Fig.6 The time-history curves of shock wave pressure in a single row of holes

为了更加直观表示不同孔排数对不同爆心距的冲击波削波规律，利用表2和表3各测点的峰值超压平均值计算不同孔排数和不同爆心距条件下的气泡帷幕削波效率 ( $A/\%$ ) [16]，即以无气泡帷幕各爆心距的冲击波峰值压力平均值为基准值，计算不同气泡孔排数且对应爆心距相同条件下的冲击波峰值超压平均值的削减比值，计算结果如表4所示。

表 4 不同孔排数和爆心距对应削波效率

Table 4 The wave-cutting efficiency to shock wave under different hole rows and explosion center distances

Number of hole rows	A/%		
	d=12m	d=24m	d=33.6m
1	89.92	90.32	92.12
2	97.25	96.24	95.62
3	96.41	95.66	94.75

由表 4 可以看出, 气泡帷幕对于冲击波峰值压力具有很好的削波效率, 在本次现场试验中, 孔排数为 2 时对应削波效率最高, 三个测点削波效率范围为 95.62%-97.25%。孔排数为 1 时的削波效率随爆心距增加而增加, 变化范围为 89.92%-92.12%, 而孔排数为 2 和 3 时的削波效率随着爆心距增加而减小。但无论孔排数如何变化, 相同孔排数条件下, 气泡帷幕总体削波效率变化不大。总之, 气泡帷幕具有较优的削波效率, 在本实验范围内, 气泡孔排数为 2 时表现出最优的削波效率, 且削波效率均大于 95%。

## 2 简易模型和试验结果分析

为了详细讨论和分析上述实验结果, 本文首先建立了如图 所示简易模型, 假设气泡运动不受气泡相互作用和水作用的影响, 基于本研究在相同的通风量下进行, 图 示种孔排数条件下, 假设气泡大小相同, 相同时间产生的气泡数量相同, 显然, 2 排孔相对 1 排孔出气压力会减小, 3 排孔相对 2 排孔出气压力也会减小, 从而导致, 2 排孔比 3 排孔具有更大的气泡帷幕厚度 ( $B_2 > B_3$ ), 而 1 排孔由于布孔方式的“劣势”, 也会导致气泡帷幕厚度小于 2 排孔。另外, 在相同通风量条件下, 在相同竖直方向上, 气泡数量相同, 但由于布孔方式的不同, 导致双排孔气泡帷幕具有更大的气泡帷幕厚度。因此, 在此简易模型条件下, 结合上文实验结果, 分析认为气泡帷幕等效厚度可能是影响单管不同排数削波效率的重要因素。为了验证上述分析的可靠性, 考虑到现场试验测试气泡帷幕形态难度较大, 本文设计了室内小型试验。

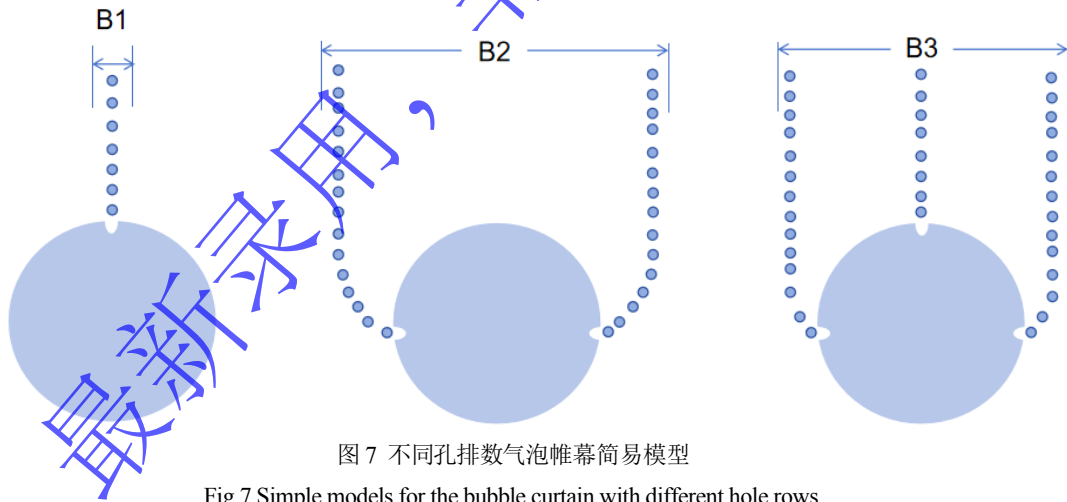


图 7 不同孔排数气泡帷幕简易模型

Fig.7 Simple models for the bubble curtain with different hole rows

## 3 气泡帷幕形态观测

气泡帷幕形态观测的室内小型试验在自制爆炸水池<sup>2-23]</sup>进行, 该爆炸水池设置透明高强度防爆玻璃, 采用高速摄影 (Memrecam HX-3) 捕捉气泡帷幕形态, 气泡发生管选用管径 20mm、长度 1.2m 的 PVC 管。为了观测气泡孔形成气泡帷幕的细节, 根据现场试验和图 7 布孔方式, 在气泡发生管上开设单个孔、双个孔和三个孔, 孔径和现场试验一致为 2mm。为保持室内实验和现场试验的一致性, 根据现场试验排气量和孔数计算, 确定室内小型试验排气量为 26.1 L/min。利用高速摄影分别拍摄平行气泡发生管方向的气泡帷幕正面图和垂直气泡发生管方向的气泡帷幕侧面图, 从而分析不同孔排数对气泡帷幕形态的

影响规律。

(1) 气泡帷幕正面分析

图8为气泡帷幕正面图。如图选取相应位置分析气泡帷幕厚度。

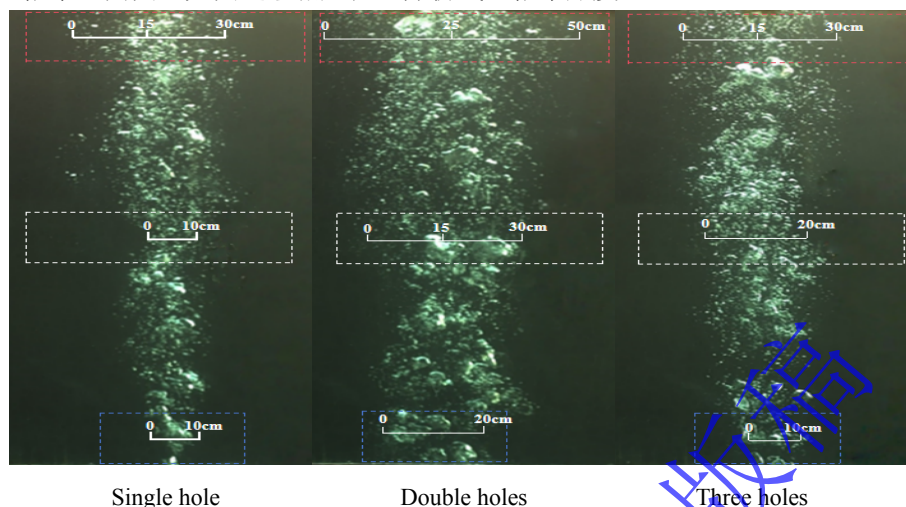


图8 不同孔排数气泡发生管的气泡帷幕正面图

Fig.8 Front view of the bubble curtain for bubble generation tubes with different numbers of holes

由图8可知，在气泡初始阶段（蓝色框图），三种条件下气泡帷幕厚度不同，双排孔发生管形成的气泡帷幕最厚，约等于20cm；三排孔发生管次之，约等于10cm；单排孔发生管产生的气泡帷幕最薄，小于10cm。同理，由图可知，在气泡中间阶段（白色框图）和结束阶段（红色框图）双排孔气泡帷幕厚度最大，分别约等于30cm和50cm；三排孔气泡帷幕厚度次之，分别为约等于20cm和30cm；单排孔气泡帷幕最薄，分别约等于10cm和30cm。总之，由上述分析可知，在本文选取的三个阶段，双排孔气泡帷幕厚度最大，三排孔气泡帷幕厚度次之，单排孔气泡帷幕厚度最小。另外，从图可以看出，气泡帷幕的任意对应位置，双排孔气泡帷幕厚度总是最大。此分析结果和图分析结果一致。值得注意的是，图8所示气泡实际情况与理想状态下简易图有所不同，分析认为气泡压力、出气速度、水介质和气泡运动导致的水流均可能是影响气泡实际运行形态的因素。

由图7和8可知，气泡出气压力和布孔方式是影响气泡帷幕厚度的关键因素，典型的情况为双排孔和三排孔的对比，三排孔和双排孔虽然都在气泡发生管两侧具有相同的布孔，但通气量相同的情况下，双排孔具有更大的出气压力，导致气泡喷出距离更远，从而形成更厚的气泡帷幕。由于水下防护对象或相关试验测试点通常在水底或水中央，选取气泡初始阶段和中间阶段对比可以发现，气泡初始阶段，单管双排孔气泡帷幕厚度20cm大于三排孔和单排孔气泡帷幕厚度10cm；气泡中间阶段，单管双排孔气泡帷幕厚度30cm大于三排孔气泡帷幕厚度20cm，也大于单排孔气泡帷幕厚度10cm。另外，由图8可知，由于气泡的快速喷出和上浮，导致气泡帷幕区域内流场扰动，气泡帷幕区域内气液共存、界面复杂和具有非均匀性<sup>[6]</sup>。综上，双排孔产生具有最大厚度且“扰动”的气泡帷幕，冲击波在双排孔气泡帷幕内的作用距离最大，受扰动最强，从而达到最优削波效率。

另外，为了进一步表征气泡帷幕情况，本文采用ImageJ图像软件对上述照片进行黑白处理，通过图像阈值分割算法，计算气泡帷幕密集度，白色像素代表的气泡与整个照片像素比值即为气泡帷幕密集度。ImageJ图像软件处理结果如图9所示。

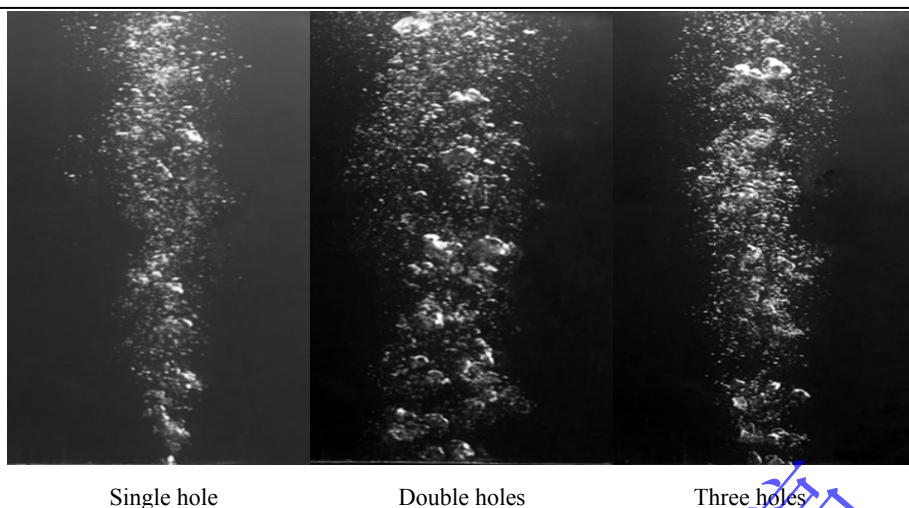


图9 气泡帷幕密集度黑白化处理图

Fig.9 Black and white processing of the bubble curtain density

通过 ImageJ 图像软件对处理后的照片进行计算，计算所得单孔、双孔和三孔气泡帷幕对应密集度分别为 12.913%、17.082%和 13.621%，说明从气泡帷幕正面观测，双孔气泡帷幕具有最高的空间占比和“浓度”，与上文的最大厚度对应。因此，无论是气泡帷幕厚度还是密集度，双孔气泡帷幕均表现出较优的性质。

#### (2) 气泡帷幕侧面分析

如果在气泡发生管上开设多组 3 种情况下的气孔，由于单孔、双孔和三孔形成气泡侧面宽度均远大于实际布孔间距 2cm，气孔形成的气泡相互交织，无法分析气泡效果。另外，为了分析的一致性，气泡帷幕的侧面情况也针对气泡帷幕发生管上同一截面处的单孔、双孔和三孔情况进行观测。利用 ImageJ 图像软件处理后的气泡帷幕侧面情况如图10 所示。

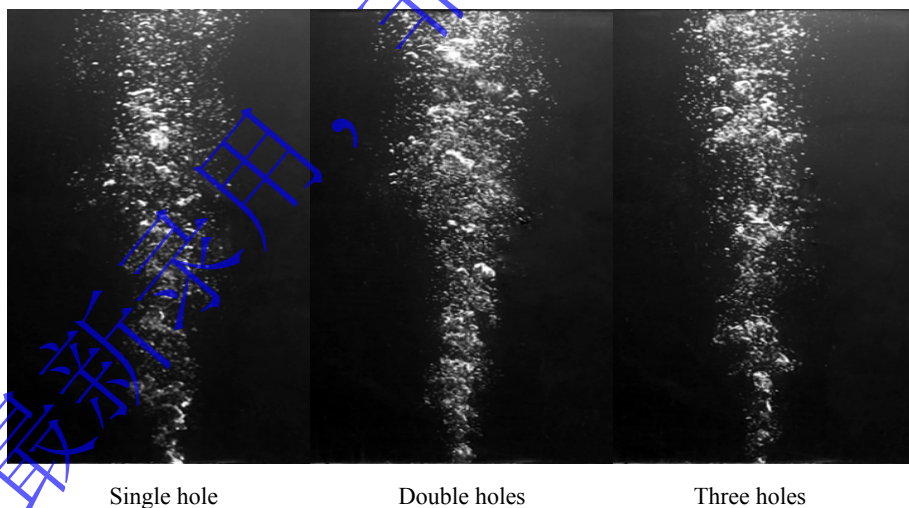


图10 气泡帷幕密集度黑白化处理图

Fig.10 Black and white processing of the bubble curtain density

利用 ImageJ 图像软件计算气泡帷幕密集度，单孔、双孔和三孔的气泡密集度分别为 10.519%、13.332%和 9.020%。因此，从气泡帷幕的侧面观测，双孔气泡帷幕具有最优的气泡密集度。

综上，无论从气泡帷幕的正面还是侧面观测，双孔气泡帷幕均表现出最优的性能，双孔气泡帷幕具有最大的气泡帷幕厚度和密集度，上述实验结果揭示了双排气泡帷幕削波较好的内在原因。

## 4 等效厚度数值模拟

基于气泡帷幕厚度对削波效率的影响，为了探究气泡帷幕等效厚度在数值模拟中的应用，本文在前期研究基础上，利用 AUTODYN 软件建立数值模型，研究数值模型中气泡帷幕的等效厚度，为进一步深入理解单管多排气泡孔削波机理和数值模拟提供参考。

#### 4.1 材料模型与状态参数

炸药选用 JWL 状态方程描述，水采用多项式状态方程描述，空气层近似替代气泡帷幕，利用空气层厚度表征气泡帷幕整体削波情况，该方法适用于简化冲击波作用真实气泡群细节的情况，具有便捷和易于工程操作的优点，并被大量使用<sup>[13-15, 19, 20, 24]</sup>。选用 AUTODYN 材料库中的 AIR 空气模型和理想气体状态方程描述空气层。相关炸药参数、水的参数、空气比内能、绝热指数和空气初始密度详见本课题组前期研究<sup>[19-21]</sup>。

#### 4.2 气泡帷幕计算模型

根据图 3 所示现场试验布置图进行建模，药包在自由水域爆炸时，所产生的冲击波按照球形向外扩<sup>[9]</sup>，因此为减少运算量，可建立如图 11 所示关于 X 轴 Y 轴均对称的 1/4 轴对称计算模型。模型尺寸为 40 m×40 m，选用 mm-mg-ms 单位制，边界选用 Transmit 边界条件，炸药、水和空气均采用欧拉网格划分，网格尺寸设置为 20 mm，炸药选用 2 号岩石乳化炸药（300g）。模型共设置三个测点，爆心距分别为 12、24 和 33.6 m，气泡帷幕左端距离爆源 6 m。

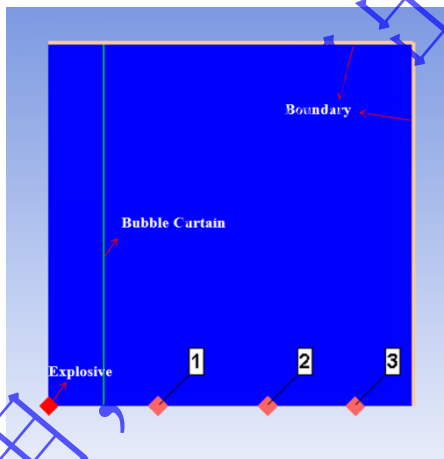


图 11 数值模拟计算模型

Fig.11 Modelling for the numerical simulation

#### 4.3 计算模型验证及动态过程分析

为了验证计算模型正确性和合理性，首先，分别进行了网格无关性验证和模拟波形验证。如图 12-14 所示。图 12 为网格尺寸分别为 10、20、30 和 40mm 的无气泡帷幕爆心距 12m 处模拟结果，由图可知网格尺寸为 10、20 和 30 mm 时峰值压力分别为 1.771、1.760 和 1.684 MPa，其分布差异不大，网格尺寸为 40 mm 时的峰值压力为 1.389 MPa，出现明显变化。为保证精确性的同时兼顾经济性，模拟采用了 20 mm 尺寸的网格，网格数量约为 400 万。图 13 为  $d=12\text{m}$  处 D1 和 D2 实验测试压力曲线与模拟结果对比。由图 13 可知，未设置气泡帷幕时，模拟波形和实验测试波形变化趋势一致，模拟计算所得峰值压力与实验平均峰值压力误差 4.98%，模拟计算峰值压力较准确。

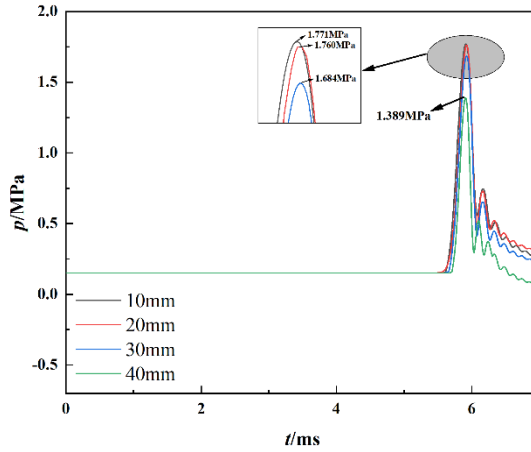


图 12 网格无关性验证

Fig.12 Independence verification of the mesh size

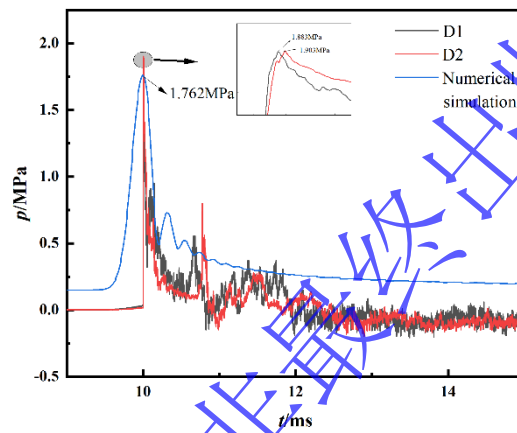


图 13 爆心距 12m 实验和模拟波形对比

Fig.13 Comparison of experimental and simulated waveforms with the explosion center distance of 12 m

其次，为了分析计算模型动态演化过程的合理性，利用计算模型计算了水下冲击波作用过程云图，如图 14 所示。由图 14 可知，炸药爆炸后首先水中形成冲击波，伴随着冲击波向外传播，在冲击波之后，爆轰产物以球形形态向外扩散，伴随时间推移，气泡内部减小。3.996 ms 时，冲击波传播至水-空气界面，之后压缩空气层，分别在空气层两侧产生反射和透射，与此同时，爆轰产物（气泡）的急剧膨胀对水介质产生压缩作用，促使周边水介质挤压空气隔层。从图中可清晰观察到，炸药爆轰初期气泡膨胀速率较快，而随着气泡内部压力的迅速降低，其膨胀速率逐步放缓。另外，由 4.428 ms 时的云图可以看出，冲击波作用于空气层后，反射的波为稀疏波，这是由于空气波阻抗远小于水，同时，入射冲击波的一部分会以透射冲击波形式向空气介质传播，且其强度远低于入射冲击波，透射到空气层冲击波在空气层传播并衰减，之后，作用在空气层的后侧，再次发生反射和透射。冲击波经过空气层的反射和透射，并通过压缩空气消耗能量，大幅降低入射冲击波的能量，因此，在空气层后（5.294 ms 时）基本观测不到透射冲击波的传播迹象。以上模拟计算结果和水下冲击波传播一致，再次证明计算模型的合理性。

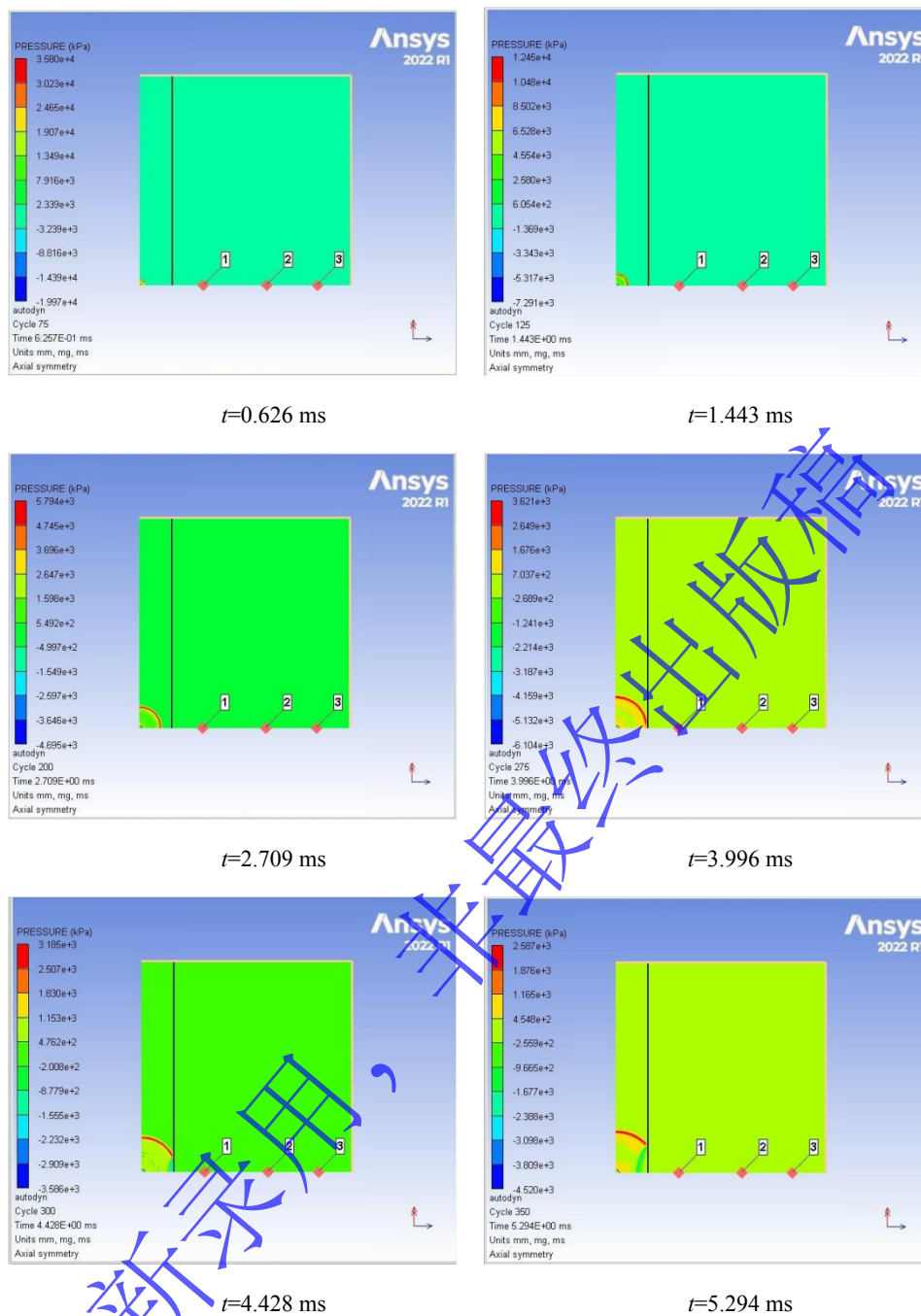


图 14 爆炸冲击波过程发展图

Fig.14 Progress diagram for the change process of explosion shock wave

#### 4.4 气泡帷幕数值模型等效厚度分析

为确定不同孔排数气泡帷幕在模拟计算中的等效厚度，首先，分别设置 15、25、35 和 45 cm 的空气层厚度，利用计算模型计算得到爆心距 12m 处的冲击波压力时程曲线，如图 15。

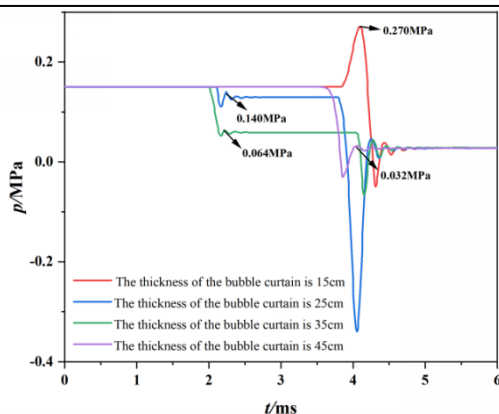


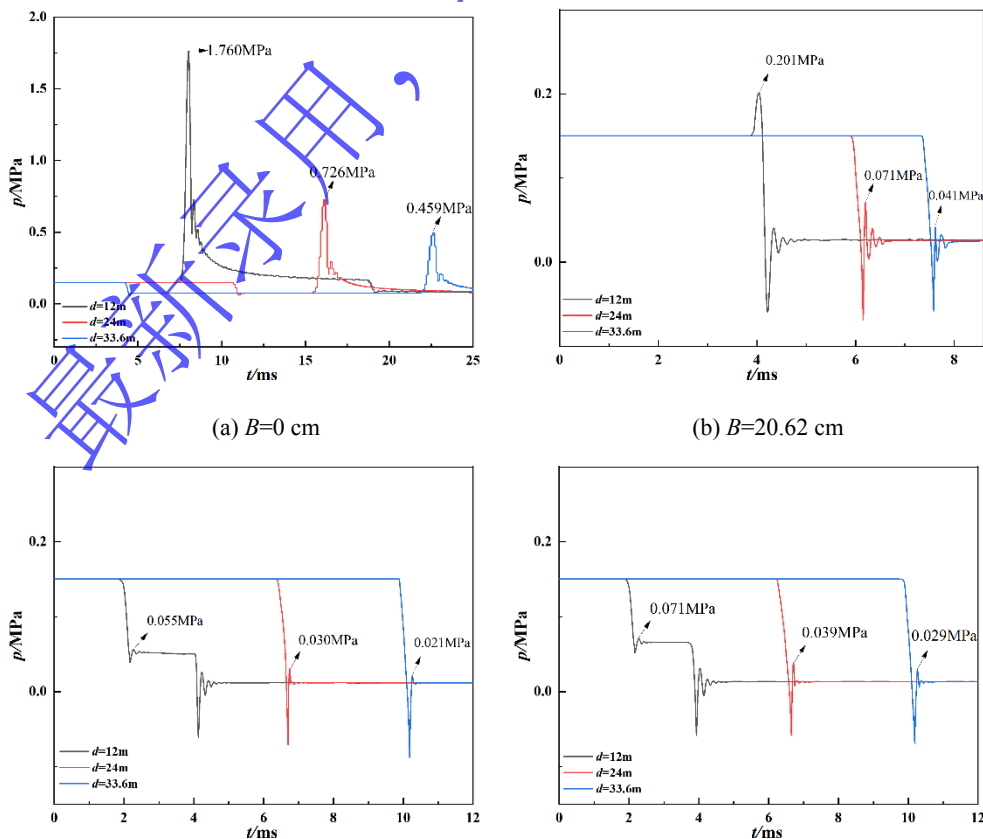
图 15 12m 处冲击波压力模拟结果

Fig.15 Simulation results of the shock wave pressure at 12 m

由图 15 得到空气层厚度 15、25、35 和 45 cm 对应峰值压力值，通过最小二乘法，利用二次函数拟合空气层厚度与峰值压力函数关系，拟合结果如式 (1) 所示，其中， $X$  代表气泡帷幕厚度，cm， $Y$  代表峰值压力，MPa。

$$Y = 0.00025X^2 - 0.02292X + 0.55735 \quad (1)$$

其次，将爆心距为 12m 处的不同孔排数的现场试验峰值压力代入式 (1)，计算得到单排孔、双排孔和三排孔气泡帷幕等效厚度( $B$ )分别为 20.62、36.90、33.84cm。再将上述等效厚度代入计算模型计算得到各测点的压力时程曲线，同时，为对比分析和验证模型计算结果的可靠性，利用计算模型计算了无气泡帷幕 ( $B=0\text{cm}$ ) 的压力曲线，如图 16 所示。为了更进一步验证计算模型的合理性，对比  $d=24\text{m}$  时 (限于篇幅，其他爆心距不再一一列举)，不同气泡帷幕厚度模拟计算波形和实验测试波形，如图 17 所示。由图可知，和图 13 类似，各条件下，模拟波形和实验测试波形变化趋势一致，模拟计算结果和实验平均峰值压力误差较小，另外，为了理论分析模拟结果和实验结果的差异，计算了各条件下模拟结果的削波效率，如表 5。



(c)  $B=36.90$  cm

(d)  $B=33.84$  cm

图 16 不同气泡帷幕等效厚度各测点模拟结果

Fig.16 Simulation results of each measurement point with the equivalent thickness of different bubble curtains

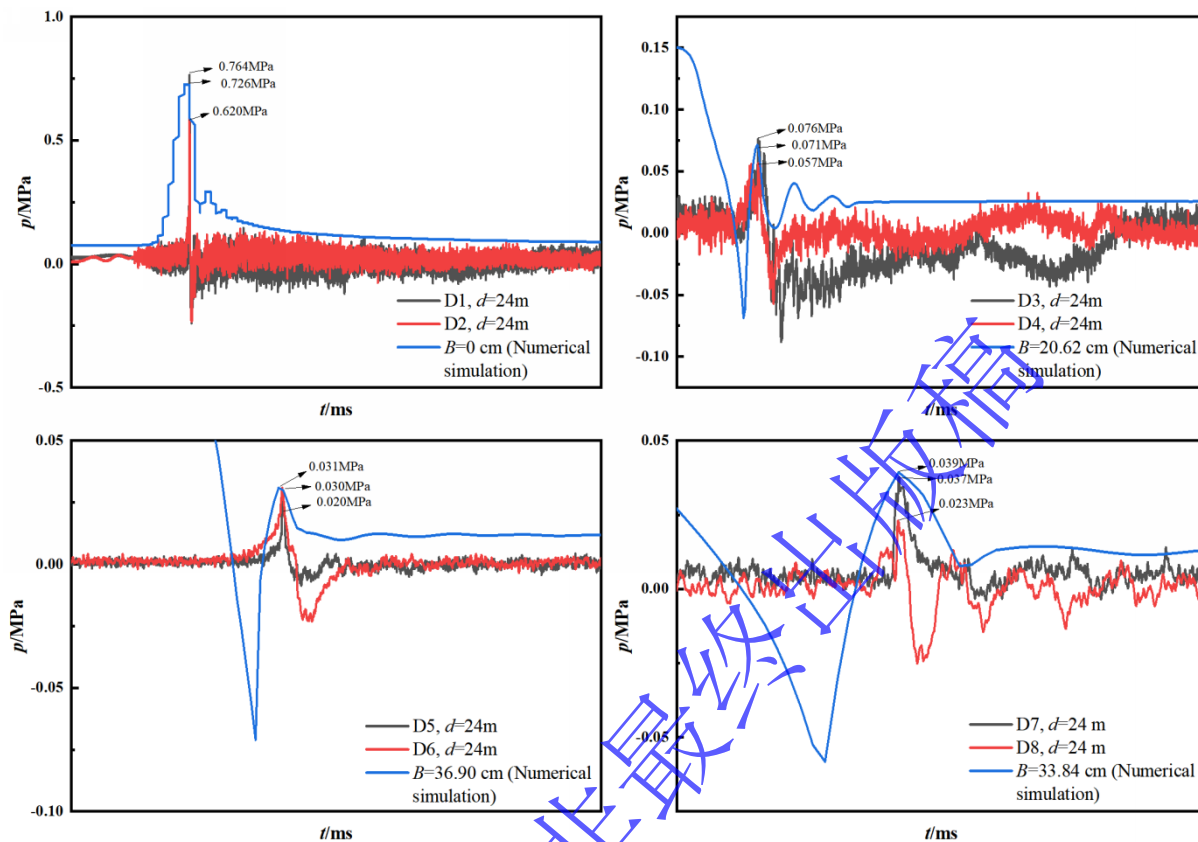


图 17 爆心距 24m 处实验和模拟波形对比

Fig.17 Comparison of experimental and simulated waveforms with the explosion center distance of 24 m

表 5 峰值压力模拟结果和削波效率

Table 5 Peak pressure and attenuation efficiency of the simulations

Thickness of bubble curtain	$d=12\text{m}$		$d=24\text{m}$		$d=33.6$	
	$p/\text{MPa}$	$A/\%$	$p/\text{MPa}$	$A/\%$	$p/\text{MPa}$	$A/\%$
$B=0$ cm	1.760	/	0.726	/	0.495	/
$B=20.62$ cm	0.201	88.58	0.071	90.22	0.041	91.72
$B=36.90$ cm	0.055	96.88	0.030	95.87	0.021	95.76
$B=33.84$ cm	0.071	95.97	0.039	94.63	0.029	94.14

对比表 4 实验结果和表 5 模拟计算结果, 1 排孔 3 测点实验削波效率范围 89.92%-92.12%, 与此对应的气泡帷幕等效厚度 20.62cm 的模拟结果的削波效率范围 88.58%-91.72%; 2 排孔 3 测点实验和模拟削波效率范围分别为 95.62%-97.25 %和 95.76%-96.88%; 3 排孔 3 测点实验和模拟削波效率范围分别为 94.75%-96.41%和 94.14%-95.97%。实验结果和模拟结果的削波效率误差较小, 各爆心距和各孔排数对应误差均小于2%。另外, 由表 4 和表 5 对比可知, 模拟结果和测试结果误差较小, 如爆心距 12m 时, 利用表 3 和表 4 数据计算峰值压力实验值和模拟产生值误差分别为 4.98%、5.55%和 4.23%, 均远小于一般工程要求的 30%<sup>[24]</sup>, 再次证明计算模型的准确性

上述分析结果验证了本文所采取模拟模型的可靠性, 也证明本文所提出气泡帷幕等效厚度的合理性及所建立的等效厚度计算公式 (1) 的可靠性, 进一步说明根据工况不同, 合理选择模拟计算模型中空气层的厚度, 可以有效模拟实验结果。

值得注意的是,虽然上述模拟计算结果具有较高的准确度,但对比图8和三种气泡帷幕等效厚度可以发现,本文所确定的等效厚度均大于对应观测值,导致这种情况的原因是,本文所采用的空气层无法体现气泡帷幕动态响应的细节,如无法考虑单个气泡膨胀、压缩、溃灭等非稳态过程,气泡和水流及其扰动,气泡帷幕非均一性和复杂性等对冲击波作用过程的影响。

以上这些原因导致使用相同厚度空气层近似代替相同厚度气泡帷幕的不足,从而导致低估气泡帷幕的削减作用。本文所建立的等效气泡帷幕厚度大于实测值,也充分证明了这一点,等效气泡帷幕厚度比实测值大的部分可以理解为气泡帷幕非均一性、复杂性、气-液相互作用、流动等的总体表现,值得进一步研究。

## 5 结论

本文通过现场试验、简易模型、气泡帷幕形态观测和等效厚度数值模拟,研究了单管多排孔削波效率和机理,得出以下结论。

(1) 单管条件下伴随着气泡孔排数增加,削波效率先增加后减小,2排气泡孔削波效率最优;现场试验和模拟计算均表明,2排气泡孔各测点削波效率均大于95%,建议水深小于10m且单孔气流量接近或大于本文单孔气流量的类似工程,采用单管2排孔气泡帷幕实施水下防护。

(2) 气泡帷幕厚度和密集度越大,削波效率越好,气泡帷幕厚度是确定削波效率的重要因素。

(3) 本文所采取模拟计算模型具有较高的可靠性,模拟结果和实验结果的削波效率小于2%,所建立气泡帷幕等效厚度公式(1)具有较高的准确度,式(1)及其确定方法可为类似工况提供参考。

## 参考文献

- [1] Klaus Lucke, Paul A. Lepper, Marie-Anne Blanchet, et al. The use of an air bubble curtain to reduce the received sound levels for harbor porpoises [J]. *Journal of the acoustical society of America*, 2011, 130: 3406-3412.
- [2] G H WANG, W B LU, G D YANG, et al. A state-of-the-art review on blast resistance and protection of high dams to blast loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 139: 103529.
- [3] Y FAN, T CHEN, G D YANG, et al. Experimental investigation on dynamic response of concrete gravity dam under shock wave and bubble pulsation [J]. *Engineering Structures*, 2024, 318: 118796.
- [4] 杨光煦. 气泡帷幕防震设计与计算 [J]. *爆破*, 1990, (02): 48-52.  
YANG G X. Seismic design and calculation of air bubble curtains [J]. *Blasting*, 1990, (02): 48-52.
- [5] 李泽华, 白春华, 刘庆明, 等. 气泡帷幕减弱水中冲击波强度的研究 [J]. *中国安全科学学报*, 1999, (05): 72-76.  
LI Z H, BAI C H, LIU Q M, et al. Study on weakening the shock wave in water by bubble heavy curtain [J]. *Chinese Journal of Safety Science*, 1999, (05): 72-76.
- [6] 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, (02): 13-17.  
ZHOU R, FENG S S. Study on weakening peak pressure of underwater shock wave by bubble curtain [J]. *Engineering Blasting*, 2001, (02): 13-17.
- [7] 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, (02): 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, (02): 75-76+89.
- [8] 余英. 气泡帷幕在三峡工程 RCC 围堰爆破拆除中的应用 [J]. *水电与新能源*, 2010, (04): 8-11.  
YU Y. Application of bubble curtain in blasting-demolition of RCC coffer dam of TGP [J]. *Hydropower and new energy*, 2010, (04): 8-11.

- [9] 张涛,曹杰,王猛,等.中空橡胶帷幕的水下冲击波防护特性研究 [J].火工品,2019,(02):43-45.  
ZHANG T, CAO J, WANG M, et al. Underwater blast protection feature of hollow rubber curtain [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2019, (02): 43-45.
- [10] 伍俊,庄铁栓,闫鹏,等.水中爆炸实验装置结构设计与防护研究 [J].振动与冲击,2013,32(11):131-136.  
WU J, ZHUANG T S, YAN P, et al. Structural design of a test facility for underwater explosion and its protection measure to reduce shock wave [J]. Journal of vibration and shock, 2013, 32(11): 131-136.
- [11] 才干.水下爆破作业气泡帷幕对水击波的削减作用浅析 [J].黑龙江水利科技,2020,48(08):138-140.  
CAI G. Analysis of subtractive effect of bubble curtain on water shock wave in underwater blasting operation [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2020, 48(08): 138-140.
- [12] 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]. Energetic Materials, 2015, 23(10): 1015-1019.
- [13] 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(03):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(03): 79-84.
- [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(02):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(02): 16-22.
- [15] 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,2020,20(20):90-92.  
YANG J, LIU J, ZHANG D T, et al. Weakening of blasting waves in port waters by bubble curtain [J]. China Water Transport, 2020, 20(20): 90-92.
- [16] 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(07):71-79.  
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(07): 71-79.
- [17] 裴善报,刘荣忠,郭锐,等.带壳装药水下爆炸的冲击波和气泡脉动特性 [J].火工品,2013,(02):21-24.  
PEI S B, LIU R Z, GUO R, et al. Shock wave and bubble pulse features of underwater explosion of explosive with metal shell [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013, (02): 21-24.
- [18] 盛振新,刘荣忠,郭锐.水下爆炸冲击波相互作用的仿真分析 [J].火工品,2012,(03):25-29.  
SHENG Z X, LIU R Z, GUO R. Study on the shock waves interaction of underwater explosions [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2012, (03): 25-29.
- [19] 杜明燃,陈宇航,陆少锋,等.基于正交实验法的气泡帷幕削波特性研究 [J].高压物理学报, 2023,37(06):195-205.  
DU M R, CHEN Y H, LU S F, et al. Bubble curtain clipping characteristics based on orthogonal test method [J]. Chinese Journal of High Pressure physics, 2023, 37(06): 195-205.
- [20] 杜明燃,王天照,梁进,等.气泡帷幕对水下爆炸冲击波的衰减研究 [J].爆破,2024,41(02):212-222.  
DU M R, WANG T Z, LIANG J, et al. Study on attenuation of underwater explosion shock waves by bubble curtain [J]. Blasting, 2024, 41(02): 212-222.
- [21] 杜明燃,陈智凡,陆少锋,等.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 [J].高压物理学报,2024,38(01):165-173.  
DU M R, CHEN Z F, LU S F, et al. Synergistic effect of air supply volume and bubble curtain layer on the shock wave attenuation of underwater explosion [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(01): 165-173.

- [22] 马成帅,吴红波,王尹军,等.不同气流量下气泡帷幕对水下冲击波衰减特性研究 [J].振动与冲击, 2024,43(07):239-244+265.  
MA C S, WU H B, WANG Y J, et al. Attenuation characteristics of bubble curtain on underwater shock waves under different air flow rates [J].Journal of vibration and shock, 2024,43(07):239-244+265.
- [23] 农志祥,吴红波,王尹军,等.多层气泡帷幕对水下爆炸防护能力的研究 [J].工程爆破, 2024,30(03):136-142.  
NONG Z X, WU H B, WANG Y J, et al. Research on the protective ability of multi-layer bubble curtain against underwater explosion [J].Engineering blasting,2024,30(03):136-142.
- [24] 叶风明,王天照,杜明燃,等.气泡帷幕距离与供风量对水中冲击波衰减特性的影响研究 [J].火工品, 2025,(02):82-90.  
YE F M, WANG T Z, DU M R, et al. Study on the Influence of bubble curtain distance and air supply volume on the attenuation characteristics of underwater shock wave [J].Initiators & Pyrotechnics,2025,(02):82-90.

## Wave-Cutting Efficiency and Mechanism of Single-Tube Multi-Row Hole

### Bubble Curtain

LI Jirui<sup>1,2</sup>, JIN Cong<sup>3</sup>, DU Mingran<sup>2,3</sup>, ZENG Huilian<sup>1,2</sup>, QIN Caiyong<sup>1,2</sup>

(1. Guangxi New Harbor Engineering Co. Ltd, Nanning 530200, Guangxi, China;

2. Research Institution of Underwater Rock-Cutting Engineering at Guangxi Zhuang Municipality Region, Nanning 530200, Guangxi, China;

3. School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China)

**Abstract:** To further enhance the wave-cutting efficiency of bubble curtain, a series of field tests were conducted. These tests involved the use of single-tube, multi-row bubble holes, as well as high-speed photography to observe the morphology of the bubble curtain. Additionally, a numerical calculation model for the equivalent thickness of the bubble curtain was constructed using AUTODYN software. The results indicate that the number of bubble hole rows is a critical factor affecting wave-cutting efficiency under the same air flow rate. At a detonation center distance of 12m, the wave-cutting efficiencies for 1, 2, and 3 rows of holes are 89.92%, 97.25%, and 96.41%, respectively. At different distances from the detonation center, the two-row hole bubble curtain demonstrated the highest wave-cutting efficiency, consistently exceeding 95.00%. The thickness and density of the bubble curtain are maximized for two rows of holes, and the thickness of the bubble curtain is the key factor determining wave-cutting efficiency. The equivalent thickness fitting formula established by combining experiments and simulations has high reliability, and the numerical simulations also exhibit high accuracy. To achieve convenient, efficient and low-cost wave-cutting efficiency, it is recommended that the single-tube two-row hole bubble curtain is applied in similar projects.

**Keywords:** underwater shock wave; bubble curtain; wave-cutting efficiency; number of hole rows; equivalent thickness