

文章编号: 1003-1480 (2025) 02-0082-09

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

叶风明^{1, 2}, 王天照³, 杜明燃^{2, 3}, 李基锐^{1, 2}, 曾辉莲^{1, 2}, 赵伟^{1, 2}, 王尹军^{2, 4}

(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; 4. 矿冶科技集团有限公司, 北京, 100160)

摘要: 为研究气泡帷幕距离与供风量对水中冲击波衰减特性的影响, 采用 AUTODYN 有限元软件对防护距离为 0.7, 0.5, 0.3 m, 供风量为 40, 80, 120 L·min⁻¹ 的气泡帷幕作用下的水中冲击波峰值超压、比冲量和比冲击波能进行了仿真研究, 并进行了试验验证。结果表明: 随着防护距离的减小和供风量的增大, 气泡帷幕对水中冲击波峰值超压、比冲量和比冲击波能的衰减作用明显增大; 相较于冲击波峰值超压和比冲量, 气泡帷幕对比冲击波能的衰减作用更明显; 相对于空白组, 气泡帷幕供风量为 120 L·min⁻¹ 且防护距离为 0.3 m 时, 冲击波峰值超压、比冲量、比冲击波能的衰减率最大, 分别为 91.00%、90.13%、98.97%。

关键词: 水中冲击波; 气泡帷幕; 防护距离; 供风量

中图分类号: TJ55; TD235 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.02.012

Study on the Influence of Bubble Curtain Distance and Air Supply Volume on the Attenuation Characteristics of Underwater Shock Wave

YE Feng-ming^{1, 2}, WANG Tian-zhao³, DU Ming-ran^{2, 3}, LI Ji-rui^{1, 2}, ZENG Hui-lian^{1, 2}, ZHAO Wei^{1, 2}, WANG Yin-jun^{2, 4}

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

Abstract: To investigate the influence of bubble curtain distance and air supply volume on the attenuation characteristics of underwater shock wave, AUTODYN finite element software was used to simulate the peak overpressure, specific impulse, and specific shock wave energy of underwater shock wave under the action of bubble curtains with protection distances of 0.7, 0.5, 0.3 m and air supply volumes of 40, 80, 120 L·min⁻¹, and the test verification was conducted. The results show that as the protection distance decreases and the air supply volume increases, the attenuation effect of the bubble curtain on the peak overpressure, specific impulse, and specific shock wave energy of underwater shock wave significantly increases; Compared to the peak overpressure and specific impulse of shock waves, bubble curtains have a more significant attenuation effect on specific shock wave energy; Compared to the blank group, when the air supply volume of the bubble curtain is 120 L·min⁻¹ and the protection distance is 0.3 m, the attenuation rates of peak overpressure, specific impulse, and specific shock wave energy of the shock wave are the highest, which are 91.00%, 90.13%, and 98.97%, respectively.

Key words: Underwater shock wave; Bubble curtain; Protection distance; Air supply volume

收稿日期: 2024-11-25

作者简介: 叶风明 (1983-), 男, 高级工程师, 主要从事水下爆破及防护技术研究。

通讯作者: 杜明燃 (1987-), 男, 副教授, 主要从事炸药性能和爆破技术的教学与研究。

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)。

引用本文: 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(2): 82-90.

水下爆炸是航道整治与开发过程中常用的技术手段之一^[1-3]。水下爆炸时,有一部分能量释放在水体中,形成水中冲击波,会对爆区周边的建筑物和 underwater 生物造成不利影响,因此,采取有效的防护措施来削减水中冲击波的危害是当前水下工程领域亟待解决的问题之一。目前,常用的削减水中冲击波的方法有2种:一是采用水下微差爆破技术减少一次起爆药量,但其效果有限;二是在药包与防护对象之间加一层气泡帷幕,阻隔水中冲击波的传播^[4-5]。范怀斌等^[6]通过乳化炸药水下延期爆炸试验研究了气泡帷幕对水中冲击波的削减作用,发现多层差异性气泡帷幕可以在实现水下爆破施工的同时保护水下环境;胡伟才等^[7]通过三因素三水平正交数值模拟实验研究了气泡帷幕数量、间距、距离对水中冲击波的影响,发现气泡帷幕数量和距离对水中冲击波的影响更大,数量多且靠近被保护物时对水中冲击波的削减效果更好。王兴雁等^[8]采用正交实验方法对气泡帷幕削减水中冲击波的主要因素进行研究,发现帷幕与测点之间的距离影响最大,气泡帷幕管道流量和管径次之,孔距的影响最小。陆少锋等^[9]通过试验研究了不同供风量气泡帷幕对水中冲击波的削减作用,结果表明随着供风量的增加,气泡帷幕对水中冲击波的削减效果增强;谢达建等^[10]结合工程实际建立数值模型,分析了气泡帷幕设置距离对水中冲击波的削减作用,发现气泡帷幕对水中冲击波峰值压力有明显的削减效果,距离被保护物5 m时防护效果最好。以上研究均表明,气泡帷幕对水中冲击波的峰值超压和比冲量均具有削弱作用,其削弱程度与防护距离及供风量等参数有关。

为了进一步探究气泡帷幕防护距离与供风量对水中冲击波衰减特性的影响,对防护距离为0.7, 0.5, 0.3 m, 供风量为40, 80, 120 L·min⁻¹的气泡帷幕作用下水中冲击波峰值超压、比冲量和比冲击波能的变化进行了仿真研究及试验验证,以期为爆破工程中合理有效的削减水中冲击波提供理论参考。

1 气泡帷幕结构及削波原理

气泡帷幕由供风装置、管路及其他附属装置组

成,其对水中冲击波的削减作用主要是利用水与防护层的波阻抗突变实现的,2种介质的波阻抗差异性越大,削波效果越好^[11-13]。当水中冲击波传播到气泡帷幕表面时,会发生杂乱的反射,同时对气泡进行压缩,使冲击波能量降低,从而达到削减冲击波的作用^[14]。气泡帷幕削波原理示意图如图1所示。

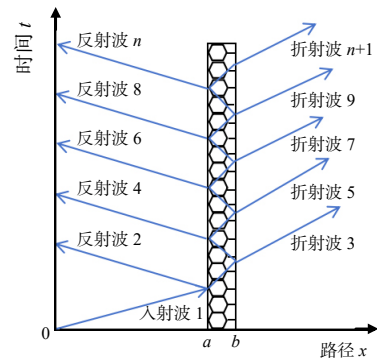


图1 气泡帷幕削波原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the principle of reducing shock wave with bubble curtain

假设冲击波入射压力为 P_i ,入射质点速度为 v_i ;反射波压力为 P_r ,反射质点速度为 v_r ;透射压力为 P_t ,透射进入气泡帷幕的质点速度为 v_t 。根据牛顿第三定律和介质连续条件,界面两侧的质点速度和应力相等^[15]:

$$v_i + v_r = v_t \quad (1)$$

$$P_i + P_r = P_t \quad (2)$$

气泡帷幕为一种复杂水汽混合物。定义 ρ_c 为波阻抗; ρ_0 、 c_0 分别为水的密度和水的波速; ρ_1 、 c_1 分别为水汽混合物的密度和波速; Z_0 为水的波阻抗, $Z_0 = \rho_0 c_0$; Z_1 为水汽混合物的波阻抗, $Z_1 = \rho_1 c_1$ 。根据冲击波的动量守恒定律可知:

$$P_i / (\rho_0 c_0)_i - P_r / (\rho_0 c_0)_r = P_t / (\rho_0 c_0)_t \quad (3)$$

式(1)~(3)可用于描述介质交界面性质,虽然其对水-复杂水汽混合物交界面的描述并不准确,但可以用来定性分析气泡帷幕对水中冲击波的影响,假设:

$$n = (\rho_0 c_0) / (\rho_1 c_1) \quad (4)$$

$$F = (1 - n) / (1 + n) \quad (5)$$

$$T = 2 / (1 + n) \quad (6)$$

由式(2)~(6),可得:

$$P_t = TP_i \quad (7)$$

$$v_r = nTv_i \quad (8)$$

$$P_r = FP_i \quad (9)$$

$$v_r = -Fv_i \quad (10)$$

由上述推导可见, 2种介质之间的波阻抗差异越大, 则透射波的强度越小, 对冲击波的削减效果越好。而气泡帷幕中的空气作为一种波阻抗较小的介质, 可以达到较好的削波作用。并且, 空气的易压缩性也可以更好的“吸收”能量, 从而起到更好的削波作用。

2 计算模型

对不同气泡帷幕距离与供风量下水中冲击波的衰减特性进行仿真研究。由于水下爆炸会受到水深、水流速度、水下环境等因素的影响, 为了避免这些因素的干扰, 在爆炸水池中进行仿真及试验研究。利用 AUTODYN 有限元软件, 建立 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 的二维水下爆炸全耦合模型, 并对模型做如下假设^[10]: 由于爆炸产物的高压作用, 将水介质视为可压缩流体; 假设水下爆炸的各种介质是连续的、各向同性的; 不考虑水域边界影响; 不考虑水流速度的影响; 水下炸药爆炸和气泡膨胀过程视为绝热过程; 假设水中的冲击波垂直入射介质。

2.1 材料模型及状态方程

2.1.1 炸药模型

炸药采用 JWL 状态方程描述:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (11)$$

式(11)中: P 为冲击波压力; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为 JWL 状态方程的参数; E_0 为炸药的内能; V 为当前的相对体积。采用 TNT 的炸药模型, 具体参数如表 1 所示。

表 1 炸药的材料参数

Tab.1 Material parameters of explosives

种类	密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
TNT	1 630	6 930	373.70	3.21	4.15	0.95	0.35	6.00

2.1.2 水的模型

水下爆炸受到水深的影响, 需要调节水介质比内能, 因此采用 Polynomial 状态方程^[16]描述较为合适。由于水的压缩状态各异, 其状态方程的形式也有所不

同:

当水受到压缩 ($\mu > 0$) 时, 其状态方程为:

$$P = A_1 \mu + A_2 \mu + A_3 \mu + (B_0 + B_1 \mu) \rho_0 e \quad (12)$$

当水发生膨胀 ($\mu < 0$) 时, 其状态方程为:

$$P = T_1 \mu + T_2 \mu + B_0 \rho_0 e \quad (13)$$

当水处于既不压缩也不膨胀的状态 ($\mu = 0$) 时,

上述 2 个状态方程可以简化为:

$$P = B_0 \rho_0 e \quad (14)$$

$$e = (P_0 + \rho_0 g H) / (B_0 \rho_0) \quad (15)$$

$$\mu = \rho / \rho_0 - 1 \quad (16)$$

式(12) ~ (16)中: P 为水中压力; μ 为压缩比; ρ_0 为水的密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; A_1 、 A_2 、 A_3 、 T_1 、 T_2 、 B_0 、 B_1 为材料参数; e 为水的比内能; P_0 为大气压; g 为重力加速度; H 为水深。通过调整水介质的比内能 e 可以模拟不同深度的水环境。如试验水深为 0.6 m , 对应水环境的比内能为 $382.875\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。水的状态方程参数如表 2 所示。

表 2 水的状态方程参数

Tab.2 Parameters of the state equation of water

A_1/GPa	A_2/GPa	A_3/GPa	B_0	B_1	T_1/GPa	T_2/GPa	$\rho_0/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
2.20	9.54	14.57	0.28	0.28	2.20	0	1.00

2.1.3 空气模型

空气采用 AIR 空气模型和理想气体状态方程^[17]描述:

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (17)$$

式(17)中: E 为比内能; γ 为绝热指数, 取 1.4; ρ_0 为空气的初始密度, 取 $1.225\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ 为当前密度。

2.2 模型建立

根据文献[4]和[10]可知, 在数值模拟中可以利用空气层近似替代若干小气泡构成的气泡帷幕。通过模型验证发现, 当气泡帷幕供风量为 $40, 80, 120\text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 分别对应空气层厚度为 $10, 15, 20\text{ cm}$ 。数值模型网格尺寸为 2 mm , 模型单元数量为 $360\ 000$ 个, 水、炸药和空气均采用欧拉算法, 气泡帷幕用空气层代替, 标准 8# 电雷管用 1.07 g TNT 等效代替, 起爆点位于药包中心, 起爆中心与测点位于同一水平线上, 爆源与测点相距 0.9 m , 均位于水下 0.6 m 处, 模型的截断处为 Transmit 边界条件, 水的比内能为 $382.875\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在此条件下, 分别建立防护距离为 $0.7, 0.5,$

0.3 m, 供风量为 40, 80, 120 L·min⁻¹ 的含气泡帷幕水下爆炸模型及空白组模型, 不同防护距离和供风量的模型尺寸、网格大小、爆源、边界条件等均一致。空白组水下爆炸模型如图 2 所示。防护距离为 0.7 m 的含气泡帷幕水下爆炸模型如图 3 所示。

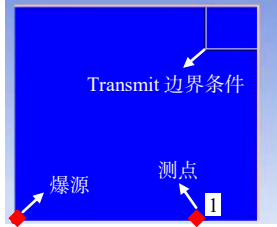


图 2 空白组仿真模型

Fig.2 Numerical model of the blank group

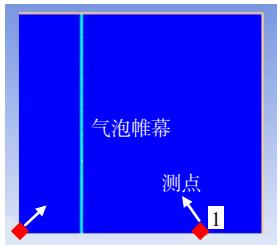


图 3 防护距离为 0.7 m 的仿真模型

Fig.3 Numerical model of the protection distance of 0.7 m

2.3 仿真结果与分析

分别从冲击波峰值超压 (P_m)、比冲量 (I_s)、比冲击波能 (E_s) 3 个方面分析气泡帷幕防护距离和供风量对水中冲击波衰减特性的影响。以 R 、 A 、 B 分别表示冲击波峰值压力衰减率、比冲量衰减率、比冲击波能衰减率:

$$R = \frac{P_{m0} - P_{m1}}{P_{m0}} \quad (18)$$

$$A = \frac{I_{s0} - I_{s1}}{I_{s0}} \quad (19)$$

$$B = \frac{E_{s0} - E_{s1}}{E_{s0}} \quad (20)$$

式 (18) ~ (20) 中: P_{m0} 为无气泡帷幕空白组的冲击波峰值压力, MPa; P_{m1} 为有气泡帷幕冲击波峰值压力, MPa; I_{s0} 为无气泡帷幕空白组的比冲量, Pa·s; I_{s1} 为有气泡帷幕的比冲量, Pa·s; E_{s0} 为无气泡帷幕空白组的比冲击波能, kJ·kg⁻¹; E_{s1} 为有气泡帷幕的比冲击波能, kJ·kg⁻¹。

空白组及含气泡帷幕水下爆炸模型仿真结果如表 3~6 所示。防护距离为 0.7 m 时的仿真冲击波时程曲线如图 4~5 所示。冲击波峰值超压、比冲量、比

冲击波能衰减比例图如图 6 所示。

表 3 空白组仿真结果

Tab.3 Simulation results of blank group

试验	P_{m0} /MPa	I_{s0} (Pa·s)	E_{s0} (kJ·kg ⁻¹)	衰减时间/ μ s
1	4.301	17.61	280.87	4.23

表 4 供风量为 40 L·min⁻¹ 时不同防护距离的仿真结果

Tab.4 Simulation results of different protection distances at a air supply volume of 40 L·min⁻¹

组号	距离 /m	P_{m1} /MPa	R /%	I_{s1} (Pa·s)	A /%	E_{s1} (kJ·kg ⁻¹)	B /%	衰减时间/ μ s
1	0.3	1.285	70.12	5.26	70.13	23.01	91.81	4.09
2	0.5	2.001	53.48	9.78	36.01	59.15	78.94	4.75
3	0.7	2.749	36.08	13.73	22.03	134.80	52.00	5.10

表 5 供风量为 80 L·min⁻¹ 时不同防护距离的仿真结果

Tab.5 Simulation results of different protection distances at a air supply volume of 80 L·min⁻¹

组号	距离 /m	P_{m1} /MPa	R /%	I_{s1} (Pa·s)	A /%	E_{s1} (kJ·kg ⁻¹)	B /%	衰减时间/ μ s
1	0.3	0.724	83.17	2.96	83.19	6.79	97.58	3.76
2	0.5	1.012	76.47	4.14	76.49	14.34	94.90	4.10
3	0.7	1.332	69.03	5.45	69.05	21.18	92.34	3.73

表 6 供风量为 120 L·min⁻¹ 时不同防护距离的仿真结果

Tab.6 Simulation results of different protection distances at a air supply volume of 120 L·min⁻¹

组号	距离 /m	P_{m1} /MPa	R /%	I_{s1} (Pa·s)	A /%	E_{s1} (kJ·kg ⁻¹)	B /%	衰减时间/ μ s
1	0.3	0.375	91.28	1.49	91.54	1.55	99.45	3.35
2	0.5	0.452	89.49	1.92	89.10	3.04	98.92	4.25
3	0.7	0.485	88.72	2.18	87.62	3.61	98.71	5.01

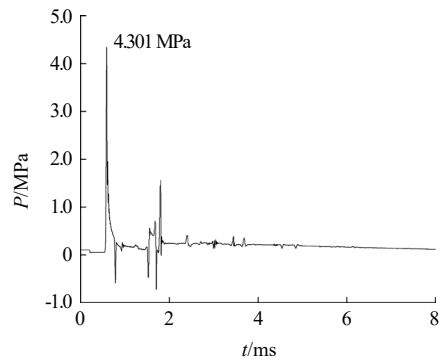
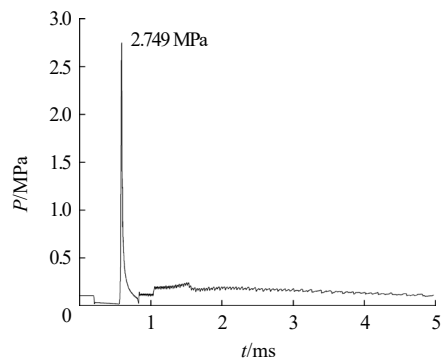


图 4 空白组冲击波超压时程曲线图(仿真)

Fig.4 Time history curve of blank group shock wave overpressure (simulation)



(a) 供风量为 40 L·min⁻¹

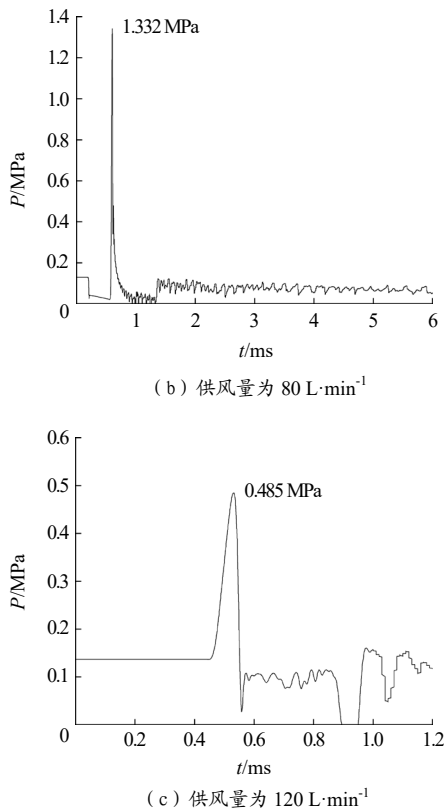


图5 防护距离为0.7 m时不同供风量下的冲击波超压时程曲线图(仿真)

Fig.5 Time history curve of shock wave overpressure under different air supply volumes at a protection distance of 0.7 m (simulation)

由表3可见,空白组冲击波峰值超压为4.301 MPa,比冲量为17.61 Pa·s,比冲击波能为280.87 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,均大于含气泡帷幕水下爆炸模型的对应数据。由表4~6及图6可见,在相同供风量下,冲击波峰值超压、比冲量、比冲击波能随着气泡帷幕防护距离的增大而增大;在相同防护距离下,冲击波峰值超压、比冲量、比冲击波能随着气泡帷幕供风量的增大而减小。

当供风量为40 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,随着防护距离从0.7 m减小至0.3 m,冲击波峰值超压由2.749 MPa减小至1.285 MPa,相对空白组的衰减率由36.08%增大至70.12%;比冲量由13.73 Pa·s减小至5.26 Pa·s,相对空白组的衰减率由22.03%增大至70.13%;比冲击波能由134.80 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 减小至23.01 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,相对空白组的衰减率由52.00%增大至91.81%。

当供风量为80 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,随着防护距离从0.7 m减小至0.3 m,冲击波峰值超压由1.332 MPa减小至

0.724 MPa,相对空白组的衰减率由69.03%增大至83.17%;比冲量由5.45 Pa·s减小至2.96 Pa·s,相对空白组的衰减率由69.05%增大至83.19%;比冲击波能由21.18 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 衰减至6.79 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,相对空白组的衰减率由92.46%增大至97.58%。

当供风量为120 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,随着防护距离从0.7 m减小至0.3 m,冲击波峰值超压由0.485 MPa减小至0.375 MPa,相对于空白组的衰减率由88.72%增大至91.28%;比冲量由2.18 Pa·s减小至1.49 Pa·s,相对于空白组的衰减率由87.62%增大至91.54%;比冲击波能由3.61 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 减小至1.55 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,相对于空白组的衰减率由98.71%增大至99.45%。

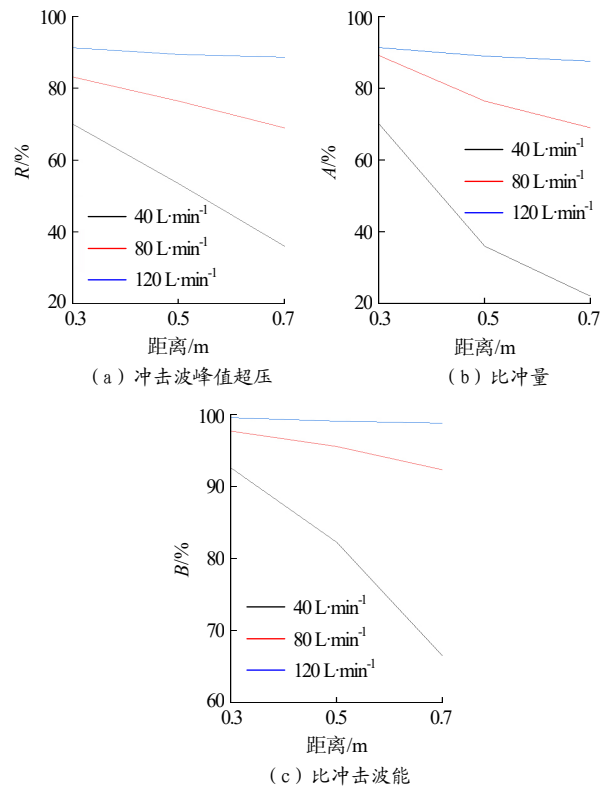


图6 不同防护距离及供风量下冲击波峰值超压、比冲量、比冲击波能的衰减率(仿真)

Fig.6 Attenuation rate of peak overpressure, specific impulse, and specific shock wave energy of shock wave under different protection distances and air supply volumes (simulation)

综上所述,随着气泡帷幕防护距离的减小和供风量的增大,气泡帷幕对水中冲击波各项参数的衰减作用明显增大;且随着供风量的增大,气泡帷幕防护距离对水中冲击波衰减特性的影响程度减弱。此外,相较于冲击波峰值超压和比冲量,气泡帷幕对比冲击波能的衰减作用更明显。

3 试验与分析

3.1 试验原理

炸药在水下爆炸后, 高温高压的爆轰产物迅速向外膨胀, 形成气泡和水中冲击波^[18-19]。当冲击波传至压力传感器后, 转换为电信号传输至示波器, 得到传感器位置的压力时程曲线。通过水下爆炸冲击波压力测试系统测得的压力时程曲线, 可以得到峰值压力 P_m 、比冲量 I_s 、比冲击波能 E_s 。

在爆源和传感器深度固定的情况下, 测点处的冲击波压力随着气泡帷幕防护距离的改变而改变。根据 Zamyshlyayev 公式^[20]可知, 水中冲击波压力随时间呈指数衰减, 可以表示为:

$$P(t) = P_m e^{-t/\theta} \quad (21)$$

式(21)中: P_m 为峰值压力, MPa; e 为常数, 取 2.718; t 为时间, s; θ 为指数衰减时间常数, 即 P_m 衰减到 P_m/e 所需时间, s; 根据传感器测得的压力时程曲线图后, 可以得到 θ 值, 从而计算出比冲量 I_s 和比冲击波能 E_s 。根据文献[21]可知, 在距离药 3.5 $W^{1/3} \sim 7.0 W^{1/3}$ 范围内, 长径比在 10 以内的柱状药包爆炸冲击波均可视为球形药包冲击波。水下爆炸比冲量 I_s 可根据式(22)进行计算, 比冲击波能 E_s 可根据式(23)进行计算:

$$I_s = \int_0^{6.7\theta} P(t) dt \quad (22)$$

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{\rho_w C_w W} \int_0^{6.7\theta} P^2(t) dt \quad (23)$$

式(22)~(23)中: $P(t)$ 为距离药包 R 处的冲击波压力, MPa; R 为距爆源的距离, m; ρ_w 为水的密度, 为 $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; C_w 为水中声速, 为 $1460 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; W 为 TNT 药包质量, g, 经爆热换算, 采用 8 号电雷管作为爆源计算比冲击波能时, W 取 1.07 g TNT 当量; t 为冲击波距爆源 R 处的作用时间, s。

3.2 试验仪器

通过试验研究气泡帷幕防护距离与供风量变化对水中冲击波削减特性的影响, 试验在一个长、宽、高均为 1.2 m 的立方体爆炸水池中进行, 如图 7 所示。

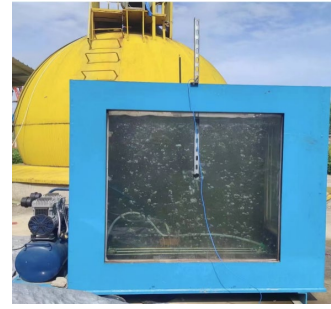


图7 爆炸试验水池

Fig.7 Explosion test tank

试验系统主要由气泡帷幕发生器、空压机、气体流量控制器、爆源及数据采集装置组成。其中, 爆源采用标准 8 号电雷管, 数据采集装置由水下压力传感器、恒流源、示波器组成, 各部分由数据电缆连接。相关试验仪器规格如表 7 所示。

表 7 试验仪器规格

Tab.7 Test instrument specifications

仪器名称	规格型号	数量
示波器	美国力科公司 HD4096	1
恒流源	PCB-MODEL-482-SERIES	1
水下压力传感器	MODEL-138A05	1

3.3 试验布置

试验布置示意图如图 8 所示。

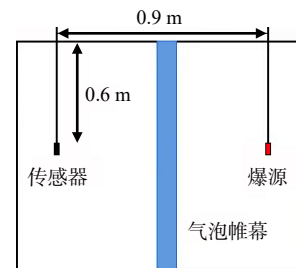


图 8 试验布置示意图

Fig.8 Test layout diagram

爆源和传感器位于同一水平线(水下 0.6 m)上, 二者水平间距为 0.9 m, 传感器采用 MODEL-138A05 型水下压力传感器; 气泡帷幕由空压机供风, 通过气体流量控制器调节供风量, 各部分由软管连接。试验过程为: 首先, 进行 2 组无气泡帷幕的空白对照试验; 然后, 调节气泡帷幕与传感器之间的距离和供风量, 测试不同防护距离与供风量下, 传感器处冲击波的压力时程曲线, 并计算峰值压力 P_m 、比冲量 I_s 、比冲击波能 E_s 。气泡帷幕与传感器的距离分别为 0.3, 0.5, 0.7 m; 供风量分别为 40, 80, 120 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 每组测试 2 次。

3.4 试验结果

无气泡帷幕空白组压力传感器测得的冲击波超压时程曲线如图 9 所示，计算得到的比冲量 I_{s0} 和比冲击波能 E_{s0} 如表 8 所示。

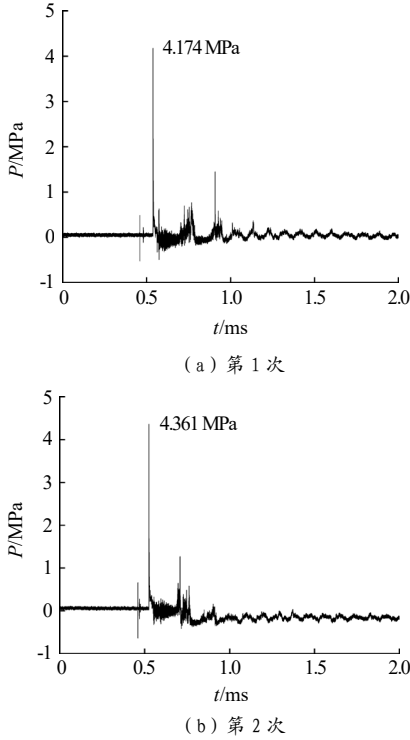


图 9 空白组冲击波超压时程曲线图(试验)

Fig.9 Time history curve of blank group shock wave overpressure (test)

表 8 空白组试验结果

Tab.8 Test results of blank group

试验	P_{m0}/MPa	$I_{s0}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$E_{s0}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	衰减时间/ μs
1	4.174	17.10	235.52	3.88
2	4.361	17.86	269.02	4.06
平均值	4.268	17.48	251.96	3.97

在防护距离为 0.7, 0.5, 0.3 m, 供风量为 40, 80, 120 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下，压力传感器测试的冲击波峰值压力、比冲量和比冲击波能如表 9 ~ 11 所示。防护距离为 0.7 m 时，不同供风量下的冲击波波形如图 10 所示。

表 9 防护距离为 0.7 m 时不同供风量下的试验结果

Tab.9 Test results under different air supply volumes with a protection distance of 0.7 m

供风量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	P_{m1}/MPa	$R/\%$	$I_{s1}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$A/\%$	$E_{s1}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	$B/\%$	衰减时间/ μs
40	2.775	35.45	12.47	28.66	100.07	60.28	3.94
40	2.414	43.44	10.85	37.93	89.67	64.41	4.50
80	1.337	68.67	6.01	65.62	25.49	89.88	4.33
80	1.479	65.34	6.65	61.96	35.31	85.98	4.69
120	0.509	88.07	2.29	86.90	4.38	98.26	5.03
120	0.488	88.56	2.19	87.47	3.92	98.44	4.82

表 10 防护距离为 0.5 m 时不同供风量下的试验结果

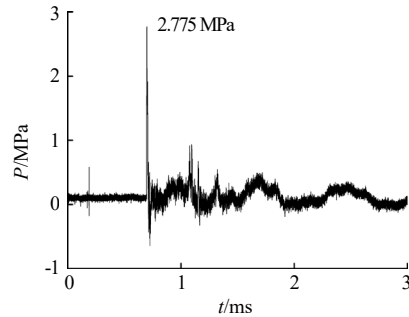
Tab.10 Test results under different air supply volumes with a protection distance of 0.5 m

供风量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	P_{m1}/MPa	$R/\%$	$I_{s1}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$A/\%$	$E_{s1}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	$B/\%$	衰减时间/ μs
40	2.015	52.79	9.06	48.17	54.74	78.27	3.91
40	1.805	57.70	8.11	53.60	48.42	80.78	4.29
80	1.033	75.79	4.64	74.20	15.22	93.96	4.10
80	0.940	77.98	4.22	75.86	12.31	95.11	4.04
120	0.423	89.88	1.90	89.13	3.04	98.79	4.95
120	0.474	88.89	2.13	87.81	3.56	98.58	4.63

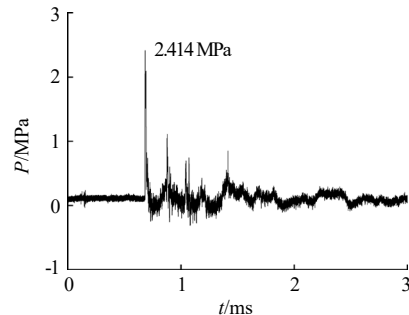
表 11 防护距离为 0.3 m 时不同供风量下的试验结果

Tab.11 Test results under different air supply volumes with a protection distance of 0.3 m

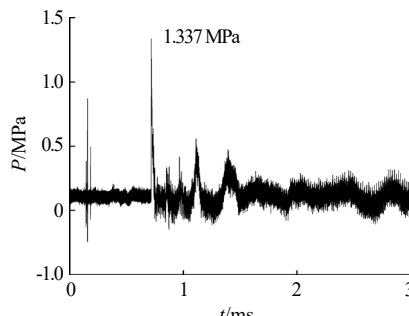
供风量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	P_{m1}/MPa	$R/\%$	$I_{s1}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$A/\%$	$E_{s1}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	$B/\%$	衰减时间/ μs
40	0.885	79.26	4.42	74.71	14.11	94.40	5.23
40	1.345	68.48	6.72	61.56	34.47	86.31	5.47
80	0.750	82.43	3.37	80.72	8.25	96.72	4.21
80	0.651	84.75	2.93	83.24	6.04	97.60	4.10
120	0.347	91.87	1.56	91.08	2.11	99.16	5.03
120	0.421	90.13	1.89	89.19	3.06	98.78	4.96



(a) 40 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 第 1 次



(b) 40 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 第 2 次



(c) 80 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 第 1 次

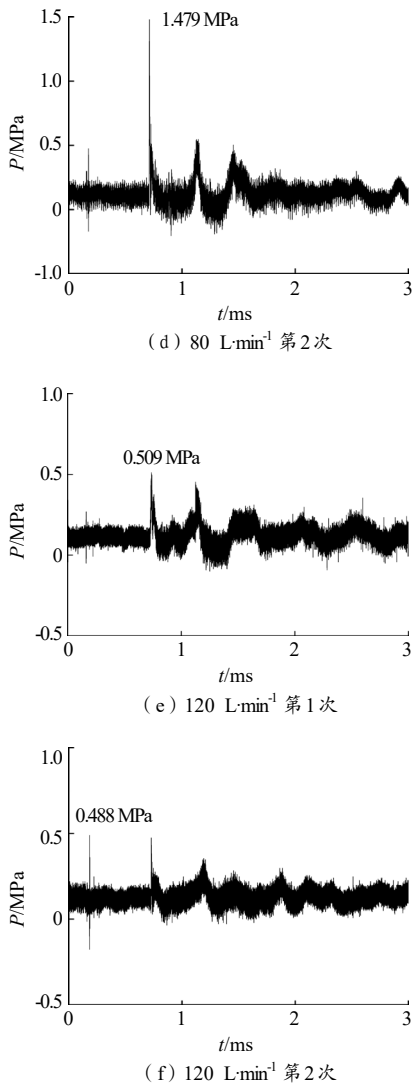


图10 防护距离为0.7 m时不同供风量下的冲击波超压时程曲线图

Fig.10 Time history curve of shock wave overpressure under different air supply volumes with a protection distance of 0.7 m

由图 10 可见，水中冲击波在测点处迅速达到峰值后以指数级下降，最终在静水常压附近波动。

计算得到的冲击波峰值超压、比冲量、比冲击波能衰减率如图 11 所示。由表 9 ~ 11 以及图 11 可见，随着气泡帷幕防护距离的减小和供风量的增大，气泡帷幕对水中冲击波峰值超压、比冲量、比冲击波能的衰减作用增大，与仿真结果一致。并且，通过仿真和试验得到的冲击波峰值超压、比冲击波能、比冲量误差均小于 15%，满足工程需求，表明所建立的仿真模型具有一定的参考价值。

当气泡帷幕距防护物 0.7 m 时,供风量 80 L·min⁻¹ 比供风量 40 L·min⁻¹ 下的冲击波峰值超压衰减了

45.74%; 供风量 120 L·min⁻¹ 比供风量 80 L·min⁻¹ 下的冲击波峰值超压衰减了 64.60 %。当气泡帷幕距防护物 0.5 m 时，供风量 80 L·min⁻¹ 比供风量 40 L·min⁻¹ 下的冲击波衰减了 48.32%; 供风量 120 L·min⁻¹ 比供风量 80 L·min⁻¹ 下的冲击波峰值超压衰减了 54.10%。当气泡帷幕距防护物 0.3 m 时，供风量 80 L·min⁻¹ 比供风量 40 L·min⁻¹ 下的冲击波衰减了 37.13%，120 L·min⁻¹ 比供风量 80 L·min⁻¹ 下的冲击波衰减了 45.22%。总之，随着气泡帷幕防护距离减小和供风量增大，冲击波峰值超压的衰减率增大；同时，随着防护距离减小，供风量对峰值超压衰减率的影响程度减弱。比冲量和比冲击波能的变化趋势与峰值超压相似。本研究范围内，相对于空白组，气泡帷幕供风量为 120 L·min⁻¹ 且防护距离为 0.3 m 时，冲击波峰值超压、比冲量、比冲击波能的衰减率最大，衰减率分别为 91.00%、90.13%、98.97%。

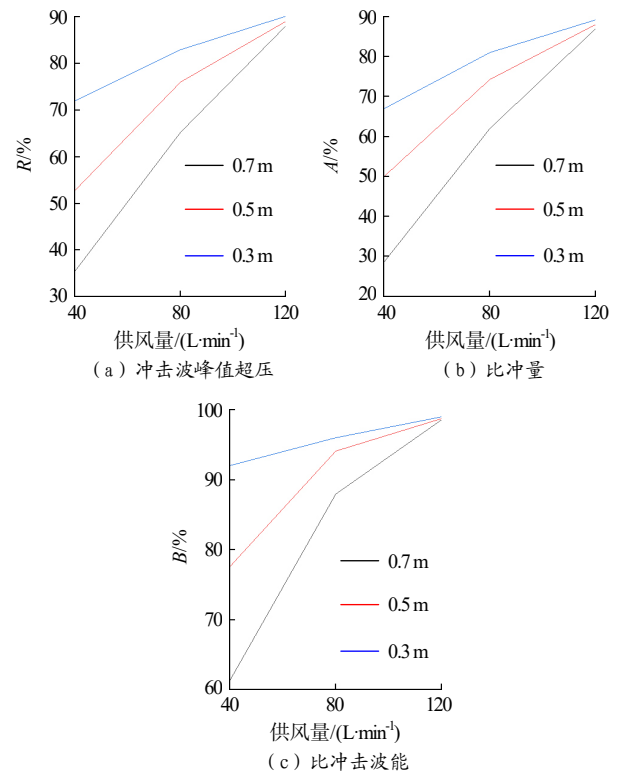


图 11 不同防护距离及供风量下冲击波峰值超压、比冲量、比冲击波能的衰减率（试验）

Fig.11 Attenuation rate of peak overpressure, specific impulse, and specific shock wave energy of shock wave under different protection distances and air supply volumes (test)

不同建（构）筑物对应的主要破坏因素不同，但无论考虑峰值超压、比冲量还是比冲击波能，水下气

泡帷幕均设置在防护物附近,且通风量越大越好。

4 结论

本文通过仿真和试验研究了气泡帷幕防护距离与供风量对水中冲击波衰减特性的影响,结论如下:

(1) 炸药水下爆炸时,气泡帷幕与防护物的距离和供风量对水中冲击波的衰减特性有显著影响,在相同供风量下,随着气泡帷幕防护距离的减小,防护效果增强;在相同防护距离下,随着供风量的增加,防护效果增强。气泡帷幕供风量为 $120 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 且防护距离为 0.3 m 时,冲击波峰值超压、比冲量、比冲击波能相对于空白组的衰减率最大,分别为 91.00% 、 90.13% 、 98.97% 。

(2) 通过仿真和试验得到的冲击波峰值超压、比冲击波能、比冲量误差均小于 15% ,表明所建立的仿真模型具有一定的参考价值。但由于气泡帷幕本身的复杂性和无序性,现阶段的仿真大多采用空气墙近似代替气泡帷幕,对气泡的反射、折射、扰动和压缩等过程进行综合考虑,虽然能解决一些工程问题,但相关作用过程、细节和机理仍需要进一步深入研究,这也是本文后续研究方向。

参考文献:

- [1] 吴芳广. 水下爆炸气泡与柔性结构耦合特性数值模拟及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [2] 张洪, 吴红波, 夏曼曼, 等. 水下爆炸边界效应的研究进展[J]. 煤矿爆破, 2018(5): 1-5.
- [3] 朱彬彬. 邻近桥墩水下钻孔爆破水击波有害效应及防护研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- [4] 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.
- [5] 孙文豪, 刘钊, 刘成洲, 等. 基于气泡帷幕的大连湾海底隧道水下炸礁消压分析研究[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(12): 1-6.
- [6] 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(02): 48-55.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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(05): 143-148.
- [10] 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(08): 72-77.
- [11] 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(05): 6-9.
- [12] 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(01): 61-66.
- [13] 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, 10(05): 72-76.
- [14] 孙文豪, 刘钊, 刘成洲, 等. 基于气泡帷幕的大连湾海底隧道水下炸礁消压分析研究[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(12): 1-6.
- [15] 高建华. 浅水中爆炸及其破坏效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [16] 胡亮亮, 黄瑞源, 李世超, 等. 水下爆炸冲击波数值仿真研究[J]. 高压物理学报, 2020, 34(1): 102-114.
- [17] 刘世聪, 王秋生, 娄浩然. 装药深度及空气域尺寸对水下爆炸的影响分析[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(6): 664-672.
- [18] 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.
- [19] 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(01): 1-13.
- [20] Zamyshlyayev B V, Yakovlev Yu S. Dynamic loads in underwater explosion: AD757183[R]. Washington DC: Naval Intelligence Support Center, 1973.
- [21] Bjarnholt G. Suggestions on standards for measurement and dataevaluation in the underwater explosion test Propellants[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 1980, 5(2-3): 67-74.