

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0136

基于气泡形态影响的水下气幕对冲击波衰减效果分析*

司剑峰^{1,2}, 钟冬望^{1,2}, 李雷斌³

- (1. 武汉科技大学理学院, 湖北 武汉 430065;
2. 湖北省智能爆破工程技术研究中心, 湖北 武汉 430065;
3. 中铁广州工程局集团有限公司, 广东 广州 511459)

摘要: 气泡帷幕是水下爆炸冲击波防护的重要手段, 对其作用机理及技术参数的深入研究对水下爆破安全与应用具有重要意义。采用高速摄影技术对室内小型水下气泡帷幕模型拍摄发现气幕在形成过程和与水下爆炸冲击波相互作用过程中均具有高度非连续性和非均匀性, 且气幕区域内气体与液体混杂, 界面轮廓复杂多样。在此基础上, 考虑气泡形状及界面影响下, 通过 LS-DYNA 有限元软件自带的 APDL 语言进行编程, 实现了在设定的气幕区域内, 通过设定气泡直径变化范围及气泡直径之间的最小差异值随机投放一定数量不同直径的气泡来模拟真实气幕中气泡的分布, 并通过改变固定区域内气泡个数来模拟不同气压值工况下的气幕效果。分析发现该方法能够更加真实反映气幕在冲击波防护过程中的防护机理, 随着单位区域内气泡数量的增大, 防护效果越明显, 但当气泡数量达到一定数量后气幕整体连续性及稳定性基本固定, 防护效果也趋于稳定。

关键词: 气泡帷幕; 水下爆破; 高速摄影; 数值分析; 随机分布

中图分类号: O389 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Analysis of underwater shock wave attenuation by air bubble curtain based on bubble shape

SI Jianfeng^{1,2}, ZHONG Dongwang^{1,2}, LI Leibin³

- (1. School of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, Hubei, China;
2. Hubei Province Intelligent Blasting Engineering Technology Research Center, Wuhan 430065, Hubei, China;
3. China Railway Guangzhou Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 511459, Guangdong, China)

Abstract: Bubble curtain is an important means for protection against underwater explosion shock wave. It is of great significance to study the mechanism and technical parameters of bubble curtain regarding the safety and application of underwater blasting. By using high-speed photography technology and video framing processing technology, indoor small underwater bubble curtain model is photographed and analyzed. It is found that the gas curtain is highly discontinuous and inhomogeneous in both the formation process and the interaction process with the underwater explosion shock wave. The gas and liquid are mixed in the air curtain area, and the interface contour is complex and diverse. Air displacement will directly affect the quality of the air bubble curtain. The larger the air displacement, the better the continuity and quality of air curtain. On this basis, considering the influences of bubble shape, interface, and gas-liquid coexistence, programming is carried out through the APDL language that comes with the LS-DYNA finite element software. By setting the variation range of bubble diameter and the minimum difference between bubble diameters, a certain number of bubbles of different diameters are randomly positioned to simulate the bubble distributions in the real air curtain. The air curtain quality under different gas

* 收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(51574184)

第一作者: 司剑峰(1987—), 男, 硕士, 工程师, sijian.feng@163.com

通信作者: 钟冬望(1963—), 男, 博士, 教授, zhongdw123@wust.edu.cn

source pressure can be simulated by changing the number of bubbles in the set air curtain area. It is found that this method can better reflect the protection mechanism of air curtain against the shock wave. Comparing the protective performance of air curtain with different bubble numbers on the same shock wave, it shows that the protective performance increases with the increase of bubble density. However, when the number of bubbles reaches a threshold number, the overall continuity and stability of the air curtain are basically fixed, and the protection effect tends to be stable.

Keywords: bubble curtain; underwater blasting; shock wave; numerical analysis; random distributio

气泡帷幕是水下爆炸冲击波防护的重要方法,具有良好的防护效果。根据工程经验及研究表明,良好的气幕对水下爆炸冲击波衰减率可达 70%~90% 以上^[1]。该方法的主要原理是在爆炸源与被保护对象之间设置一道“气幕”,当冲击波传播至气幕时,由于介质波阻抗的不同,应力波在交界面处会发生反射、透射和绕射等作用,反射的应力波与原波叠加干扰,只有小部分透射波和绕射波穿过气幕继续向前传播。同时,冲击波在穿过气幕过程中,气幕还会发生一定变形而吸收部分能量。此外,由于连续不断的气泡在水中上浮形成的气泡流会使在气幕前后区域的水域中产生一定范围的方向相反的环向流动,当应力波在穿越流场时会得到进一步衰减。气泡帷幕发生装置是由空压机将具有一定压强的大量气体通过软管传输到水下发射管,气体从发射管上的小孔溢出从而在水下形成大量气泡群体。气泡群体由于浮力和内部压强的作用不断上升形成有一定密度和连续性的气幕。通过控制进气量的大小、发射管的管径、长度、发射孔直径、发射孔间距以及气幕位置、气幕层数等可获得质量较好的气幕^[2-3]。

水下爆破由于研究难度大、涉及问题复杂且需要有专用防水设备,对其研究相对陆上爆破较少。目前学者和工程技术人员对气幕防护效果进行的研究,主要通过工程试验、小型室内实验、数值计算和理论分析等方法实现。张兵文等^[4]在大连长兴岛大船重工船坞坞口周边炸礁工程中采用气幕帷幕方法对水下爆炸冲击波进行防护,使得冲击波压力值平均衰减 90.77%,保证了附近 30 万吨级船坞和修船码头的安全;王立军等^[5]通过理论及原理和应用的分析探讨了气幕在军港码头应用的可行性并分析了其应用前景;余英等^[6]在三峡工程碾压混凝土围堰爆破拆除工程中通过现场实验探讨了供气管管径、供气压力、气泡发射孔孔径、气泡帷幕的布置等对气泡帷幕质量的影响,实现了水下 70 m 深环境下的气幕对冲击波的防护;朱安周等^[7]通过小型水池中的爆炸试验研究了气泡帷幕的气流量、帷幕层数、孔径等帷幕参数改变时对水下冲击波频谱特性的影响;伍俊等^[8]通过自行设计研制的大型水下爆炸实验装置验证了气泡帷幕技术对水中爆炸冲击波具有明显的衰减作用,其压力峰值衰减至原来的约 1/10;王兴雁等^[9]在爆炸水池中实验研究了气幕对冲击波衰减效果的影响因素,得出气幕与测点之间的距离、气幕管道直径和流量、孔距对防护效果的影响依次减弱;谢金怀等^[10]在玻璃水槽中通过气泵法生成气幕研究了其对冲击波的衰减效果,研究了不同气泡直径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^[11]通过数值计算方法发现在水下钻孔爆破中气泡帷幕与被保护目标距离越近对冲击波峰值衰减效果越明显;张成兴等^[12]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水平流的速度、厚度等主要特征。近年来,国外学者在此方面研究的可见文献及报道较少,大多为军方研究,一般不予公开。

综合以上研究分析发现目前对气幕几何特性与防护效果的综合研究较少,大多集中在对气幕发生装置的参数、冲击波衰减效果等方面。本文中在目前学者研究的基础上,拟结合室内小型试验,通过高速摄影拍摄分析气幕形态特性,并采用数值模拟方法重点分析水下气泡帷幕在冲击波防护过程中的形态对冲击波衰减效果的影响。

1 气幕对冲击波阻隔高速摄影实验

为研究气幕产生过程和对冲击波防护过程中气幕形态变化,在尺寸为 0.8 m×0.8 m×1.6 m 有机玻璃容器中采用高速摄影机对该过程进行拍摄。拍摄帧率采用 10 000 s⁻¹,画幅大小为 576×580。空气压缩机排气量为 150 L/min,最大压力为 0.8 MPa。发射管为直径 35 mm 的 PVC 管,发射孔直径为 1.5 mm。炸药为 0.2 g 黑火药。对拍摄视频中气幕生成过程和防护过程进行分幅处理,每相邻 2 张图片之间的间隔时间为 0.1 ms,每间隔 10 张取 1 张图片,如图 1 所示。

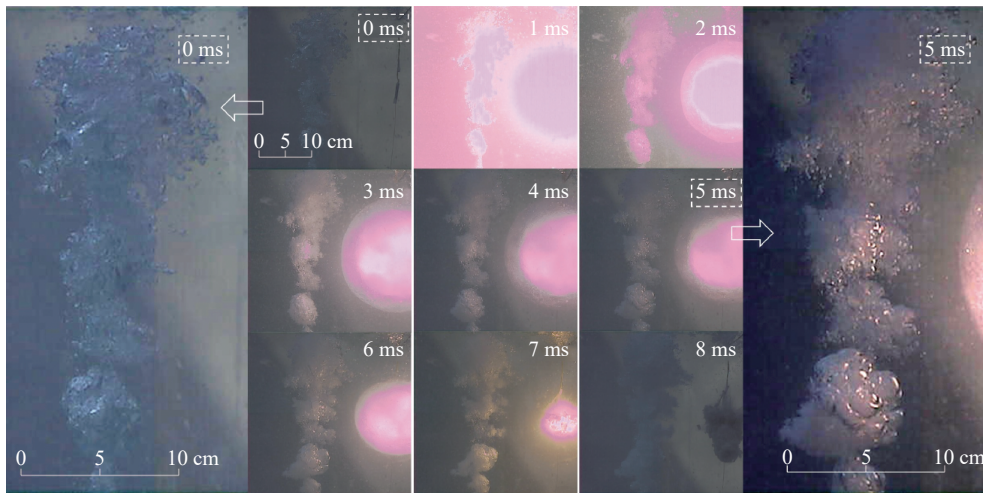


图 1 气幕在爆炸冲击波作用下的形态

Fig. 1 The shape of the air curtain under the action of explosion shock wave

从分幅图中可以看出从药包起爆到第一次爆轰产物出现膨胀整个过程约 8 ms, 炸药爆炸形成冲击波压缩水介质呈球形向外传播。气幕整体呈倒锥形, 在炸药爆炸后产生的强光下可以看到气幕由多个不同大小的气泡团组合而成, 外边缘轮廓不规则, 随着气体的不断涌出气泡团之间间断地有间隙出现; 当右侧小当量药包发生爆炸后, 在冲击波和应力波作用下, 气幕靠爆源一侧出现压缩, 边缘轮廓逐渐平整, 发生一定程度的凹陷; 当爆轰产物形成的气泡最大时, 气幕右侧最为平整, 随后气幕右侧随着爆轰产物出现的脉动不断拉伸、压缩, 直至爆轰产物扩散消失后恢复至正常状态。经过多次的对比实验观察到, 气幕形态变化受气源排气量大小影响较大。其他条件不变的情况下, 气源排气量越小, 气幕形态受爆炸应力波影响越大, 气团之间的间隙越明显。

通过分幅处理, 在气幕靠近爆破源一侧取 P_1 、 P_2 、 P_3 等 3 个点, 对这 3 点在爆炸冲击波及二次压力波作用下的全过程进行轨迹跟踪分析, 得到如图 2 的质点运动轨迹图。通过轨迹图可以看出气幕在整个爆炸过程中先压缩后膨胀: 在黑火药爆炸及爆轰产物膨胀过程中右侧边缘迅速左移(通过比例换算, 本实验中 P_1 、 P_2 、 P_3 水平方向移动距离平均约为 14.9 mm, 将 P_1 、 P_2 、 P_3 处向左移动速度 v_1 、 v_3 、 v_5 平均得到平均速度为 4.76 m/s), 在此过程中部分冲击波透射过气幕引起气幕左侧边缘向外突出; 爆轰产物膨胀到最大后迅速收缩, 此时气幕右侧边缘一定范围内迅速向爆炸中心聚集, 呈明显拉伸状态, 此过程可看成气幕对入射压力反射形成的拉应力及爆轰产物收缩产生拉应力共同作用(通过比例换算, 平均移动距离约为 28.8 mm, 同理得到 P_1 、 P_2 、 P_3 处向右的移动速度 v_2 、 v_4 、 v_6 平均值为 6.86 m/s, 位移值及速度均大于向左移动过程)。

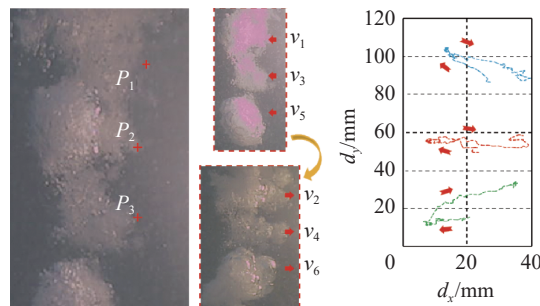


图 2 气幕爆源侧关键点运动轨迹分析图

Fig. 2 Analysis of the movement trajectories of key points on the side of the air curtain towards the explosion source

总体来说, 通过空压机和发射管在水下形成的气幕在成型过程以及冲击波作用过程中均表现出高度的不连续和非均匀性, 在气幕区域内气体与液体共存, 界面复杂。冲击波在经过气幕区域时既有反射透射现象, 在气幕连续性较差的情况和局部边界下也存在绕射作用。

2 数值计算

2.1 模型的建立

考虑冲击波作用的瞬时性, 同时为了简化计算, 忽略气泡的运动过程, 将其看成不同大小标准圆形气泡组合而成的静止气幕层。计算模型尺寸如图 3, 水深 0.6 m, 气幕宽度 0.05 m, 药包距离气幕边缘为 0.4 m, 药量 0.4 g。模型四周单元节点均施加无反射边界条件。单元类型选用 SOLID164 六面体实体单元, 共计 49 708 个单元、100 298 个节点。模型所涉及的材料包括水、空气、炸药, 其中, 炸药单元采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型, 炸药密度为 1 300 kg/m³, 爆速 4 500 m/s, 爆压 9.7 GPa。水和空气介质定义为空材料模型 (MAT-NULL), 空气密度 1.185 kg/m³, 压力截止值为 -1 Pa, 动力黏度系数为 1.84 × 10⁻⁵ Pa·s (可忽略), 水介质密度为 1 000 kg/m³, 压力截止值为 -10 Pa, 动力黏度系数为 8.7 × 10⁻⁴ Pa·s (可忽略)。

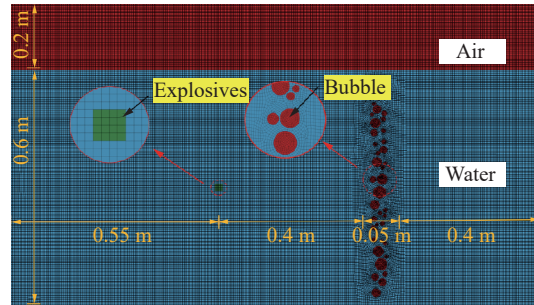


图 3 数值计算模型参数

Fig. 3 Model parameters used in numerical calculation

炸药爆轰产物的状态方程采用 JWL 方程:

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

式中: V 为相对体积, E 为初始单位体积炸药的内能 (计算中取 $E=4.19$ GPa), A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 均为状态方程基本参数 (本计算中 $A=214.4$ GPa, $B=0.182$ GPa, $R_1=4.2$, $R_2=0.9$, $\omega=0.15$)。

水和空气的线性多项式状态方程为:

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (2)$$

式中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, 如果 $\mu < 0$, 则设置 $C_2 \mu^2 = 0$, $C_6 \mu^2 = 0$ 。水和空气的多项式状态方程参数见表 1。

当设置 $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ 时, 就可以用于符合 γ 律状态方程的气体, 其中 γ 为比热系数。

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (3)$$

为模拟气泡随机分布特性, 通过 APDL 语言

自编程序, 对气泡帷幕区域 (忽略气幕区域倒锥形特点, 取 0.05 m × 0.6 m 的矩形区域作为气幕区域) 进行气泡的随机投放, 气泡半径取值范围为 5 ~ 20 mm, 不同气泡半径差异为 1 mm, 此模型中气泡数量为 40 个。为避免气泡互相叠加, 将气泡按照大小顺序逐个在区域内随机投放。

2.2 压力云图及单元时程分析

根据冲击波在水中传播速度经验取 1 500 m/s, 可估算炸药爆炸冲击波到达气幕边缘的时间约为 0.27 ms, 在不考虑气幕作用情况下冲击波到达模型最右侧水域边界时间应大于 0.57 ms。为保证完整观察到冲击波传播全过程, 计算时长取 2.0 ms, 时间步长取 0.02 ms。计算结束后根据整个模型压力云图分析应力波传播全过程如图 4。冲击波在 0.22 ms 时接近气幕左侧边缘, 0.3 ms 时在气幕边界发生反射和

表 1 材料状态方程参数表

Table 1 Material state equation parameter table

	C_0 /GPa	C_1 /GPa	C_2 /GPa	C_3 /GPa	C_4 /GPa	C_5 /GPa	C_6 /GPa	E_0 /GPa
水	0	2.25	0	0	0	0	0	0
空气	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.53 × 10 ⁻⁴

透射作用, 反射波与入射波叠加, 部分能量得到衰减; 透射波能量一部分储存于气泡, 一部分通过气泡之间的间隙绕射出气幕区域。0.46 ms 时, 部分透射波到达气幕右侧边缘并向外传播, 从 0.54 ms 和 0.62 ms 时刻云图可以看出, 从气幕区域透射出和绕射的应力波为多个球面波叠加, 形成了波浪形的前驱波, 0.7 ms 时应力波基本完全穿过气幕区域。

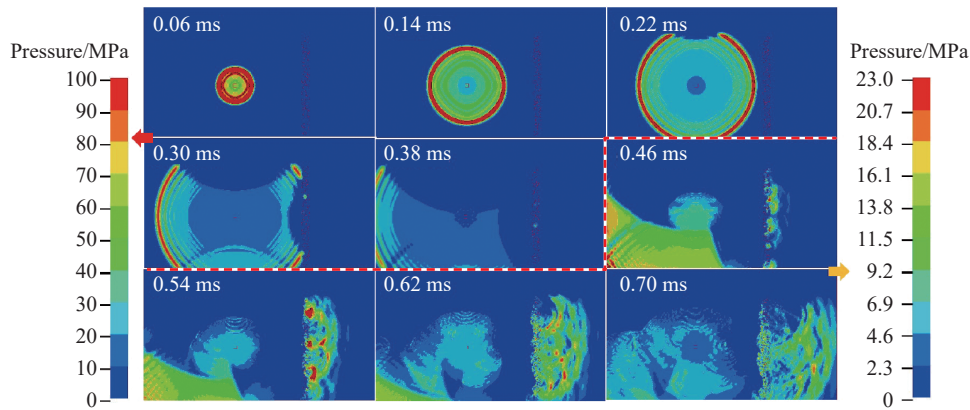


图 4 冲击波作用过程压力云图

Fig. 4 Contour plots of pressure at nine instants during the interactions of shock wave with air curtain

如图 5 所示, 为定量分析气幕对冲击波衰减效果, 以气幕区域中轴线为对称轴在左右两侧根据高程的不同分别取 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 C_2 等 3 组测点。此外以药包中心为对称点在同一高程上取 S 点与 B_2 点作为等爆心距下的防护效果对比分析监测点。取各测点压力时程曲线如图 6~8 所示。各波形峰值及对应时刻如表 2 所示。

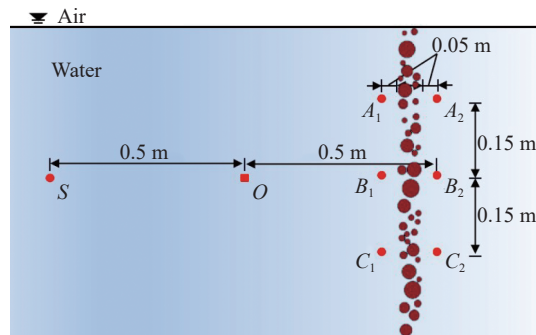


图 5 监测点位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the location of the monitoring points

根据图 6 可以看出气幕前的各测点应力波时程曲线呈现出标准的冲击波曲线特点, 第 1 个峰值为冲击波曲线, 有陡峭的上升沿, 根据峰值出现时间可以推算出冲击波传播速度约为 1 500 m/s; 冲击波过后 0.6~0.7 ms 出现第 2 个峰值曲线, 该峰值为爆轰产物膨胀应力波, 其作用时间明显比冲击波作用时间长, 约为 10 倍。

当应力波经过随机分布的气泡帷幕后, 其峰值得到明显衰减, 如图 7 所示。通过计算可得 A 、 B 、 C 等 3 个位置衰减率分别为 87.5%、84.7%、81.0%, 同爆心距下衰减率为 78.6% (波形如图 8); 从波形上可以看出第一次到达应力波已经失去冲击波典型特征, 呈现出多个峰值叠加效果, 与图 4 应力云图分析结果一致; 从峰值 2 统计结果可以可得, 气幕前后 A 、 B 、 C 等 3 个位置衰减率分别为 30.8%、49.6%、50.7%, 虽然也得到了较大衰减, 但其衰减率要小于冲击波衰减率, 表明相同气幕对高频波形比低频波形敏感, 与学者研究对爆炸气泡帷幕防护特点一致^[13]。

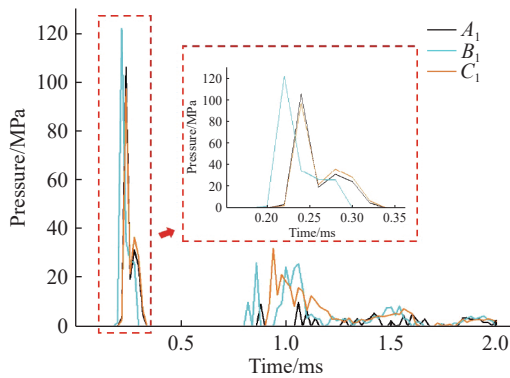


图 6 气幕前应力波压力时程曲线图

Fig. 6 Stress wave pressure time history curve before the air curtain

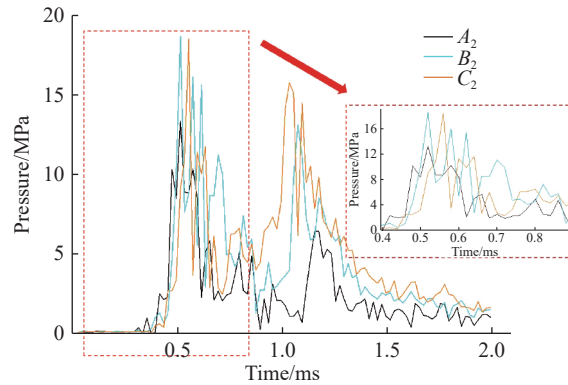


图 7 气幕后应力波压力时程曲线

Fig. 7 Stress wave pressure time history curve after the air curtain

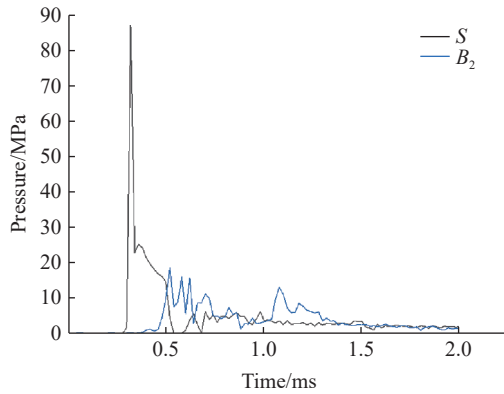


图 8 S 点和 B₂ 点压力时程曲线对比图

Fig. 8 Comparison of pressure time history curve at point S and point B₂

表 2 各监测点峰值统计表

Table 2 Summary of peak pressures at each monitoring point

测点编号	峰值1/MPa	t ₁ /ms	峰值2/MPa	t ₂ /ms
S	87.1	0.32	6.09	0.98
A ₁	106.0	0.24	9.25	0.88
A ₂	13.3	0.52	6.40	1.18
B ₁	122.0	0.22	26.00	0.86
B ₂	18.6	0.52	13.10	1.08
C ₁	97.3	0.24	31.90	0.94
C ₂	18.5	0.56	15.70	1.04

通过对各监测点波形进行积分, 求得各波形冲量统计结果如图 9, 可以看出各监测位置冲击波经气幕衰减后其冲量均不同程度得到衰减, 衰减率分别为 22.4%、24.6%、16.7% 和 22.7%。

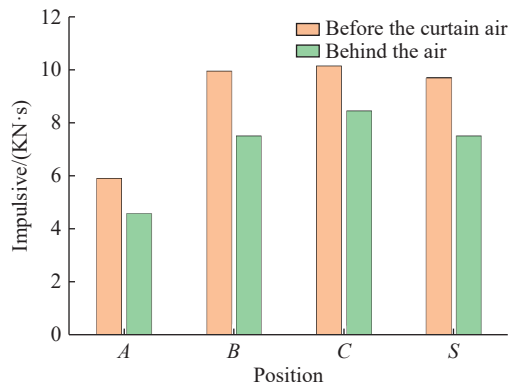


图 9 各测点冲量对比图

Fig. 9 Comparison of impulse at each measuring point

2.3 气泡数量对防护效果的影响

根据气幕高速摄影试验发现, 当增大进气量时, 气幕的间隙会随之减小且气泡变得密集, 整个气幕

连续性会得到改善。为进一步分析进气量大小对气幕防护效果的影响, 改变单位区域的气泡投放数量进行计算。

图 10 为投放数量从 10 到 80 个气泡随机投放效果, 用 N 表示投放气泡个数, 当 $N=10$ 时, 气幕区域有较多位置没有气泡, 气幕不连续; 随着气泡数量的增加, 连续性得到增强, 当 $N=30$, 气幕区域已经形成连续的气泡群, 随着数量的进一步增加, 气幕区域逐渐变得厚实, 厚度和连续性进一步增强。由于设定了区域范围和气泡的最小直径, 当随机投放数量取 90 以上时, 气泡已经不能继续完整添加, 因此本次计算 N 的最大取值为 80。

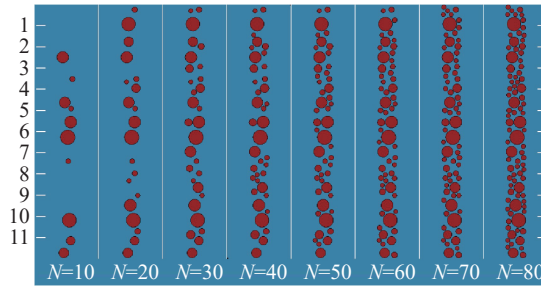


图 10 气幕区域随机投放气泡效果

Fig. 10 Schematic representation of randomly placed different bubble numbers in the air curtain area

为分析以上 8 种不同工况下气幕对冲击波的衰减效果, 同图 5 监测方案中的水平距离, 在 S 点和 B_2 点竖直方向分别以 S 点和 B_2 点为中心每 5 cm 取 1 个监测点, 共计 11 组 22 个监测点。图 11 为 8 种工况下冲击波经气幕衰减后在 9#监测点的应力波时程曲线。从曲线大致可以看出, 随着气泡数量的增加, 9#监测点峰值逐渐减小, 且峰值出现时间也随之往后移动, 说明冲击波穿过气幕区域的时间变长, 与文献 [11] 结论一致。

对 8 种工况下的 11 组冲击波峰值进行衰减率计算, 统计结果如图 12 所示。8 种工况下 11 组监测位置衰减率的平均值分别为 48%、67.1%、71.9%、70.3%、67.6%、72.1%、73.3%、74.3%。从整体趋势可以看出, 气幕对冲击波衰减率在初始阶段随气泡数量增加上升明显, 当达到一定数量之后 ($N=30$), 衰减率递增减缓至基本维持不变。分析每种工况下 11 个监测位置的衰减率可以看出, 当 $N=10$ 时, 11 条柱状图高度相差较大, 表明整个气幕的连续性较差。随着气泡数量的增加, 同工况下的这种高差逐渐减小, 气幕的整体连续性和均匀性变好, 稳定性好。

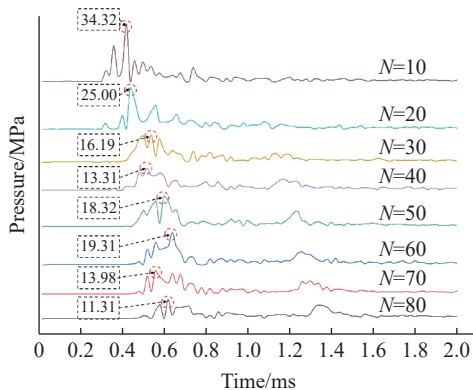


图 11 不同工况下监测点 9 应力波时程曲线

Fig. 11 Pressure time history of monitoring point 9 under different working conditions

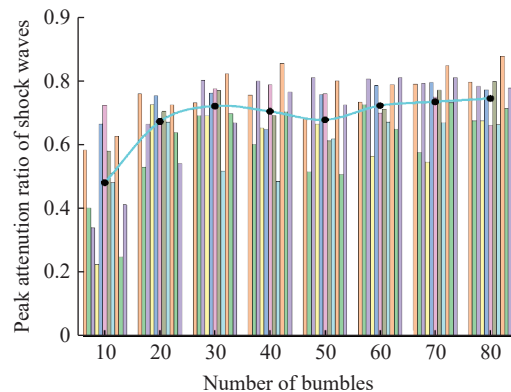


图 12 各工况下冲击波衰减率统计图

Fig. 12 Statistical chart of shock wave attenuation ratio under various working conditions

本文 8 种工况下的衰减率与文献 [6] 给出了三峡工程碾压混凝土围堰爆破拆除中现场实测不同深度、不同供气量下的衰减率为 22.9%~77.3% 的范围基本一致, 文献作者分析工程应用中涉及到水环境深度、空压机压缩空气能力、各段发射管结合部位的缝隙、涌浪等因素会对气幕密度产生直接影响, 实际防护效果较理论分析及数值计算可能偏小。本文提出的在一定区域范围内投放不同数量不同大小气泡的模拟方法可很好解释和反映实际应用中受各种外部因素而引起的气幕连续性不好、密度差等方面的问题。同时, 本文所用方法计算结果与参考文献 [11, 14-15] 等给出的冲击波衰减率均具有很好的一致性, 可作为水下爆破气泡帷幕防护效果仿真计算的一种参考办法。

3 结 论

通过高速摄影机对气幕形态进行拍摄发现气幕在水下成型过程以及冲击波作用过程中均表现出高度的不连续和非均匀性, 在气幕区域内气体与液体共存, 界面复杂。对现有的气幕模拟方法进行改进, 自编程序实现了气泡在气幕区域内的随机投放, 该方法实现了气幕区域气液共存、边界轮廓多变且气体分布高度不连续和非均匀性, 与目前对水下气幕数值计算模型对比从形态上与真实气幕更为相似。通过分析不同工况下气幕对冲击波衰减效果, 得到如下结论:

(1) 冲击波传播过程中遇到随机分布气泡形成的气幕区域后由于不规则界面的影响, 气幕后方多重应力波叠加形成多峰值应力波波形。

(2) 随着固定气幕区域内气泡数量的增加, 气幕对冲击波峰值及冲量衰减效果增强, 但当达到气幕区域内气泡达到一定数量后衰减率趋于稳定。建议在实际防护工程应用中通过现场实验测试合适的气流速度。

参考文献:

- [1] 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. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2019.01.006.
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. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2019.01.006.
- [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. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.08.014.
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. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.08.014.
- [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. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.17.006.
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. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.17.006.
- [4] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2015.05.002.
ZHANG B W, ZHANG W Y, WU N, et al. Application of presplitting blasting and air bubble curtain technologies in underwater blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2015, 21(5): 6-9. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2015.05.002.
- [5] 王立军, 李浩, 马津渤. 桩基码头应用气泡帷幕技术抵抗水下爆炸冲击波的可行性研究 [J]. *防护工程*, 2011, 33(2): 72-75.
WANG L J, LI H, MA J B. The feasibility of bubble curtain technology used in naval ports to withstand the shock waves caused by underwater explosions [J]. *Protection Engineering*, 2011, 33(2): 72-75.
- [6] 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(4): 8-11. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3354.2010.04.003.
YU Y. Application of bubble curtain in blasting-demolition of RCC coffer dam of TGP [J]. *Hydropower and New Energy*, 2010(4): 8-11. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3354.2010.04.003.
- [7] 朱安周, 张可玉, 詹发民, 等. 气泡帷幕衰减水中冲击波频谱特性实验研究 [J]. *爆破*, 2004, 21(4): 12-14. DOI: 10.3963/

- j.issn.1001-487X.2004.04.004.
- ZHU A Z, ZHANG K Y, ZHAN F M, et al. Experimental study on the attenuation of underwater shock wave spectrum characteristics by bubble curtain [J]. *Blasting*, 2004, 21(4): 12–14. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2004.04.004.
- [8] 伍俊, 庄铁栓, 闫鹏, 等. 多功能水中爆炸实验装置抗爆性能分析与试验研究 [J]. *防护工程*, 2013, 35(4): 11–16.
- WU J, ZHUANG T S, YAN P, et al. Test study and analysis of explosion resistance performance of the multi-function experiment device for underwater explosion [J]. *Protection Engineering*, 2013, 35(4): 11–16.
- [9] 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. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2012.04.006.
- 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. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2012.04.006.
- [10] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2029.2019.01.003.
- 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. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2029.2019.01.003.
- [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 [C]//中国力学学会. 中国力学学会工程爆破专业委员会 2015 年会论文集. 2015: 79–84.
- LIU X, GU W B, CHEN X P. Numerical simulation study of attenuation characteristics of water shock wave under bubble curtain [C]//Chinese Society of Mechanics. Proceedings of 2015 Annual Meeting of Engineering Blasting Committee of Chinese Society of Mechanics. 2015: 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4874.2010-01.009.
- 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]. *Hydrodynamic Research and Progress Series A*, 2010, 25(1): 59–66. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4874.2010-01.009.
- [13] 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. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.018.
- 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. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.018.
- [14] 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. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1001-09.
- 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*, 2017, 37(6): 1001–1009. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1001-09.
- [15] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2020.02.003.
- 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2020.02.003.

(责任编辑 王易难)