

泡沫覆盖层对水下爆炸气泡射流防护机理缩比试验研究

杜志鹏, 张磊, 陈勇, 华宏星

Reduced-Scale Experiment Study on the Protective Mechanism of Foam Coating Against Underwater Explosion Bubble Jet

DU Zhipeng, ZHANG Lei, CHEN Yong, and HUA Hongxing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.21656/1000-0887.420367>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水下爆炸冲击作用下悬浮隧道响应参数分析

Response Parameter Analysis of Submerged Floating Tunnels Under Underwater Shock
应用数学和力学. 2020, 41(5): 467-479 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.400249>

气泡间距对受污染球形气泡界面性质和尾流的影响

Effects of Bubble Spacings on Interface Properties and Wake Flow for 2 Contaminated Spherical Bubbles
应用数学和力学. 2020, 41(10): 1157-1170 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.410099>

热防护服-空气-皮肤热传导模型及其解析解

A Thermal Protective Clothing-Air-Skin Heat Conduction Model and Its Analytical Solution
应用数学和力学. 2021, 42(2): 162-169 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.400290>

水下训练服浮力配平的整数非线性规划方法

An Integer Nonlinear Programming Method for Underwater Training Spacesuit Buoyancy Balancing
应用数学和力学. 2020, 41(3): 260-267 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.400083>

柔性输流管泄流效应实验研究

An Experimental Study of Leakage Effects on Flexible Pipelines
应用数学和力学. 2019, 40(8): 866-879 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.390296>

三角洲初始段射流边界层相似解求解

Similarity Solution of Jet Boundary Layer for the Initial Segment of a Delta
应用数学和力学. 2020, 41(9): 1011-1025 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.400364>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

泡沫覆盖层对水下爆炸气泡射流 防护机理缩比试验研究*

杜志鹏¹, 张磊¹, 谌勇², 华宏星²

(1. 中国人民解放军海军研究院, 北京 100161;
2. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 水下爆炸会对水中结构物造成严重威胁. 柔性覆盖层或夹层板能够降低水中结构物水下爆炸冲击响应, 因此成为研究的热点. 以往的研究多集中于覆盖层对冲击波的防护机理, 适用于较远距离的水下爆炸情况. 近距离水下爆炸除了冲击波外, 爆炸气泡溃灭时产生的朝向结构物的高速水射流更为致命. 该文针对这种情况, 基于量纲原理, 推导缩比相似关系, 通过缩比模型水下爆炸试验发现了覆盖层表面空化微气泡群对爆炸气泡形成高速水射流过程产生干扰, 提出了泡沫覆盖层钢板水下爆炸气泡射流防护机理.

关键词: 泡沫覆盖层; 水下爆炸; 气泡射流; 防护机理; 缩比试验

中图分类号: O347.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.420367

Reduced-Scale Experiment Study on the Protective Mechanism of Foam Coating Against Underwater Explosion Bubble Jet

DU Zhipeng¹, ZHANG Lei¹, CHEN Yong², HUA Hongxing²

(1. *Naval Research Institute of PLA, Beijing 100161, P.R.China;*
2. *State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P.R.China*)

Abstract: Underwater explosion poses a serious threat to underwater structures. Flexible coatings or sandwich plates can reduce the underwater explosion impact responses of underwater structures, and make a research hotspot. Previous studies focused on the protective mechanism of the coating against shock waves, which is suitable for underwater explosion at a long distance. Besides the shock wave, the high-speed water jet towards the structure produced by explosion bubble collapse, is more deadly in the short-distance underwater explosion. In view of this situation, based on the dimensional principle, the reduced-scale similarity relationship was deduced. Through the reduced-scale-model underwater explosion test, it is found that, the cavitation micro-bubble group on the surface of the foam coating interferes with the formation process of the explosion bubble collapse high-speed water jet. The protection mechanism of the foam coating against the underwater explosion bubble collapse water jet for coated steel plates was put forward.

Key words: foam coating; underwater explosion; bubble jet; protective mechanism; reduced-scale experiment

* 收稿日期: 2021-11-29; 修订日期: 2022-04-21

作者简介: 杜志鹏(1977—), 男, 博士, 高级工程师(通讯作者. E-mail: duzp7755@163.com).

引用格式: 杜志鹏, 张磊, 谌勇, 华宏星. 泡沫覆盖层对水下爆炸气泡射流防护机理缩比试验研究[J]. 应用数学和力学, 2022, 43(5): 569-576.

引言

水下爆炸对水中结构物造成严重威胁. 谌勇等^[1]提出了一种水中结构物表面覆盖层, 可以缓解水下爆炸冲击波的破坏作用. 然而并非所有覆盖层都能缓解水下爆炸冲击. 姚熊亮等^[2]发现, 带有吸声空腔的覆盖层在爆炸冲击波作用下反而会降低结构物的抗冲击性能. Du 等^[3]通过试验分析提出覆盖层在水下爆炸冲击波作用下, 会产生大变形压溃, 并造成水中空化效应, 这是其缓解水下爆炸冲击波破坏作用的主要机理. 图 1 显示了结构物表面加装覆盖层水下爆炸试验场景. 图 2 显示了有、无覆盖层冲击波实测结果. 从图中可以看出, 有覆盖层时, 压力峰值过后随即迅速衰减为 0; 而无覆盖层时压力峰值过后, 冲击波在结构物复杂表面反射、绕射形成长达上百毫秒的震荡, 这些都是造成结构物强烈冲击响应的载荷. 因此覆盖层显著降低了冲击波载荷.

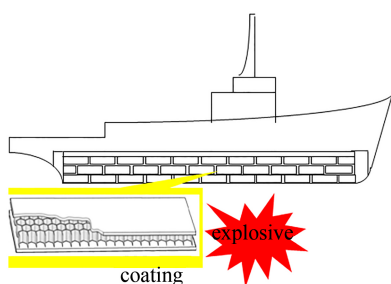


图 1 结构物敷设覆盖层水下爆炸试验

Fig. 1 The underwater explosion test of coating structure

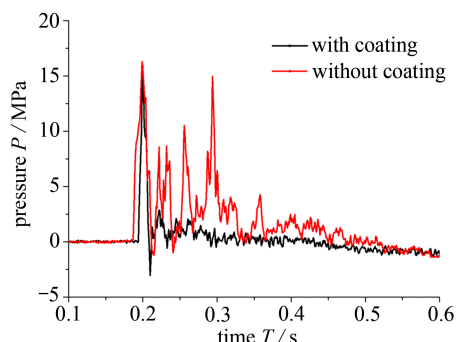


图 2 有、无覆盖层表面冲击波压力对比

Fig. 2 Comparison of surface shock wave pressure with or without coating

以往的研究多集中于覆盖层对冲击波的防护机理, 适用于较远距离的水下爆炸情况. 对于近距离水下爆炸, 除冲击波外, 爆炸气泡溃灭时产生的朝向结构物的高速水射流更为致命, 可能造成船体整体断裂^[4]. Brett 和 Yiannakopoulos^[5]在圆柱壳近场水下爆炸实验中发现, 气泡载荷对圆柱壳的损伤效果大约是冲击波的 2 倍. 为了观测气泡射流现象并解释其机理, 李帅等^[6]利用高速摄影技术捕捉气泡非球状动力学行为, 提出了边界条件和气泡附近流场局部高压区是影响气泡射流的关键因素. 对于非刚性边界气泡射流问题, 常青等^[7]利用高速全流场显示系统对碳纤维复合材料边界以及刚性边界附近气泡的流动形态变化过程进行了记录和观测, 发现与刚性边界不同, 在复合材料板附近, 气泡并不总是朝向壁面运动, 随气泡距边界初始距离的增加, 气泡会远离壁面运动. 由此可见, 柔性边界可能是减小气泡射流载荷, 提高结构物防护性能的一个方向. 本文通过开展缩比模型水下爆炸试验, 分析了泡沫覆盖层与水下爆炸气泡的相互作用机理, 为防护爆炸气泡溃灭时产生的朝向结构物的高速水射流提供新方案.

1 缩比相似

为了使用高速摄像观察水下爆炸气泡与结构物的相互作用关系, 必须采用缩比模型进行试验^[8]. 尽管由于重力、材料应变率等很多物理量无法缩比, 导致缩比模型试验与原型有很大差异, 但如果只考虑某一种物理现象, 仍可以做到一定的相似性. 张效慈^[9]提出了水下爆炸试验气泡相似性 2 种设计准则, 如表 1 所示.

表 1 水下爆炸气泡迁移相似参数

Table 1 Similar parameters of bubble migration in underwater explosion

parameter	prototype	geometric similarity model	gravity similarity model
maximum bubble radius	R^{\max}	$\lambda_l R^{\max}$	$\lambda_l R^{\max}$
bubble pulse period	T	$\lambda_l T$	$\lambda_l^{1/2} T$
bubble pulse peak pressure	P_1^{\max}	P_1^{\max}	$\lambda_l P_1^{\max}$
static pressure of bubble in water	$D + D_0$	$D + D_0$	$\lambda_l (D + D_0)$

表 1 中, λ_l 为模型与原型的几何尺寸比例, D 为水压力, D_0 为大气压力. 当不考虑重力, 只满足几何相似时, 模型试验气泡脉动周期就必须按几何比例 λ_l 缩小. 同时, 气泡脉动压力、静压力应与原型相同. 但是气泡射流物理过程有重力、浮力的参与, 而且与气泡的流体性能比如 Froude 数等有关. 当考虑重力等参数时, 得出的气泡脉冲周期缩比关系为 $\lambda_t = \lambda_l^{1/2}$. 同时, 气泡脉动峰值压力、水中静压力均按 λ_l 等比例缩小.

除了气泡运动的相似性, 还需要考虑水中结构物的相似性. 张效慈^[10] 提出了模型厚度、应变率等相似参数的相似性设计准则. 本文主要考虑泡沫覆盖层的厚度、密度、刚度以及对水下爆炸冲击能量吸收率的相似性, 如表 2 所示.

表 2 泡沫覆盖层模型相似参数
Table 2 Similarity parameters of the foam coating model

parameter	prototype	similarity model
thickness	h	$\lambda_l h$
density	ρ	$\rho \lambda_E / \lambda_l$
rigidity	k	$\lambda_l \lambda_E k$
energy absorption rate	$\frac{W}{\sigma_s h L^2}$	$\frac{W}{\sigma_s h L^2}$

表 2 中, λ_E 为弹性模量缩比系数, 如果采用同一种材料, 则 $\lambda_E = 1$; 能量吸收率 $W/(\sigma_s h L^2)$ 是常数, 表征爆炸当量 W 与材料吸能 $\sigma_s h L^2$ 之间的比例关系.

2 试验方法

试验在爆炸水箱中进行, 如图 3 所示. 泡沫覆盖的圆板置于水箱几何中心, 便于通过观察窗拍摄高速摄像. 爆源距离圆板表面 0.2 m. 在圆板背面安装加速度、应变传感器, 在水中安装压力传感器.

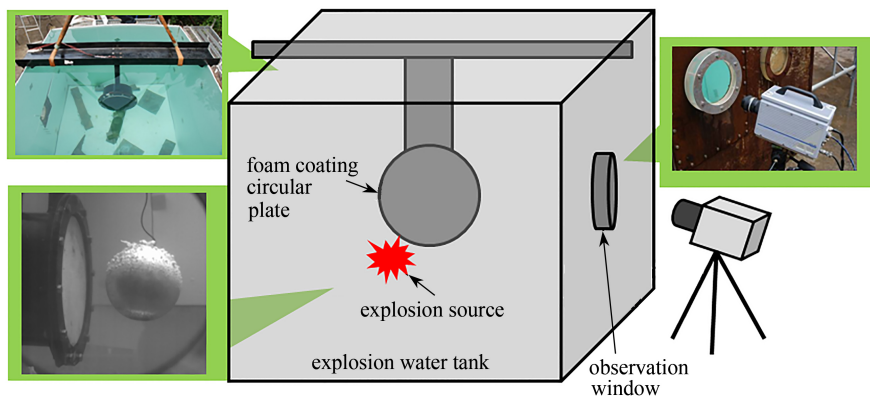


图 3 试验布置示意图
Fig. 3 Schematic diagram of test layout

爆源采用 PETN(太安)炸药, 质量 1.5 g, 等效 TNT 当量 2.25 g. 爆源几何形状为圆柱形, 起爆方式为端面起爆. 爆源与圆板的距离为 0.2 m. 压力传感器型号为 PCB-138, 加速度传感器型号为 BK4384V, 高速摄影机型号为 APX-RS, 光源为自然日光.

泡沫覆盖层横截面尺寸如图 4 所示, 总厚度 $L=22$ mm, 其中表观密度 0.1 kg/m^3 的聚乙烯闭孔塑料泡沫板厚度 $L_0=20$ mm, 表面黏贴一层 2 mm 橡胶, 背面黏贴在 4.5 mm 圆形钢板上. 泡沫覆盖圆钢板与光面圆钢板照片如图 5 所示.

根据几何缩比相似和重力缩比相似, 2.25 g TNT 爆源相当于原型 35 kg TNT 或者 5 kg TNT, 如表 3 所示. 可以看出, 几何缩比相似和重力缩比相似对应的原型相差很大. 如果气泡崩溃形成水射流只与气泡半径、泡沫覆盖层厚度等几何尺寸相关, 重力等因素不起主要作用, 则本次试验可以代表一种类似小型深水炸弹的

爆炸物在浅水环境中对加装了抗冲瓦覆盖层的潜艇的爆炸攻击. 如果水射流的形成与几何关系不大, 主要与重力等因素有关, 则本次试验只能代表 5 kg 的小型炸药.

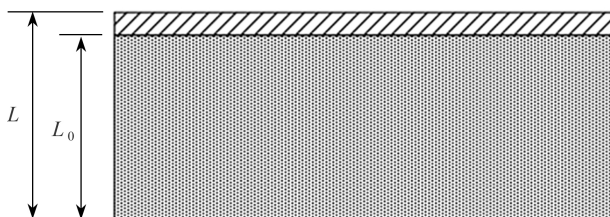


图 4 泡沫覆盖层横截面示意图

Fig. 4 The cross section of foam coating section



图 5 泡沫覆盖圆钢板与光面圆钢板照片

Fig. 5 The foam coating round steel plate and the smooth round steel plate photograph

表 3 按不同缩比相似推导原型参数

Table 3 Derivations of prototype parameters according to different scale similarities

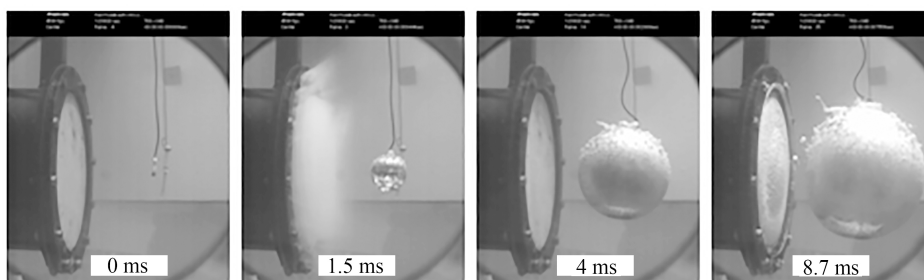
parameter	similarity model	geometric similarity model	gravity similarity model
equivalent of detonation source	2.25 g TNT	35 kg TNT	5 kg TNT
explosion source water depth H/m	1	1	25
maximum bubble radius R^{\max}/m	0.2	5	1.8
bubble pulsation period T/ms	37	925	185
foam coating thickness h/mm	20	500	500
foam coating layer density $\rho/(kg/m^3)$	0.1	0.1	0.4

3 试验结果

未敷设泡沫覆盖层的钢板在 2.25 g TNT 爆源、0.2 m 爆距情况下受到了气泡溃灭形成的水射流冲击, 如图 6 所示. 在爆炸开始后 17 ms 气泡达到最大(第 2 行第 1 张照片). 随后当气泡收缩时, 由于圆板的阻挡, 气泡左侧的水无法随着气泡的收缩向中心流动, 从而造成气泡左侧的负压区. 这一负压区逐渐引导气泡偏向左侧, 并在 36 ms 时刻(第 3 行第 1 张照片)溃灭, 同时产生朝向左侧圆板的高速水射流.

敷设泡沫覆盖层的钢板在 2.25 g TNT 爆源、0.2 m 爆距情况下未受到气泡溃灭形成的水射流冲击, 如图 7 所示. 在爆炸开始后气泡迅速膨胀, 8 ms 后气泡不再膨胀(第 2 行第 1 张照片). 随后泡沫覆盖层表面出现厚度约 150 mm 的半球形空化区域, 泡沫覆盖层表面的橡胶层也开始脱落(第 2 行第 3 张照片). 随着泡沫覆盖层表面的半球形空化的凸起, 33 ms 时, 爆炸气泡被推向右侧(第 2 行第 4 张照片). 最终在 40 ms 时, 爆炸气泡在距离圆板 0.2 m 处, 也就是爆源初始位置附近发生溃灭, 未产生朝向圆板的水射流. 虽然钢板表面也有空化, 但体积和持续时间都较小. 图 6 显示, 钢板表面的空化在 24 ms 就已收缩; 图 7 显示, 覆盖层表面的空化在 33 ms 仍大于爆炸气泡.

试验后, 将敷设泡沫覆盖层的钢板与未敷设的钢板变形进行对比, 如图 8 所示. 敷设泡沫覆盖层的钢板几乎没有变形, 而未敷设的钢板最大变形达到 2.4 cm.



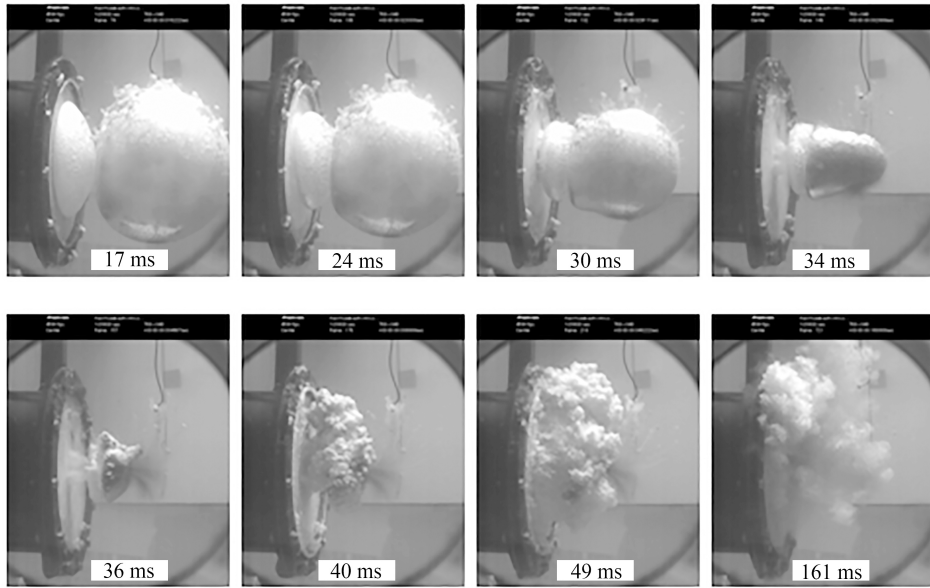


图 6 未敷设泡沫覆盖层钢板爆炸试验高速摄像
Fig. 6 High-speed video for the explosion test of the steel sheet without foam coating

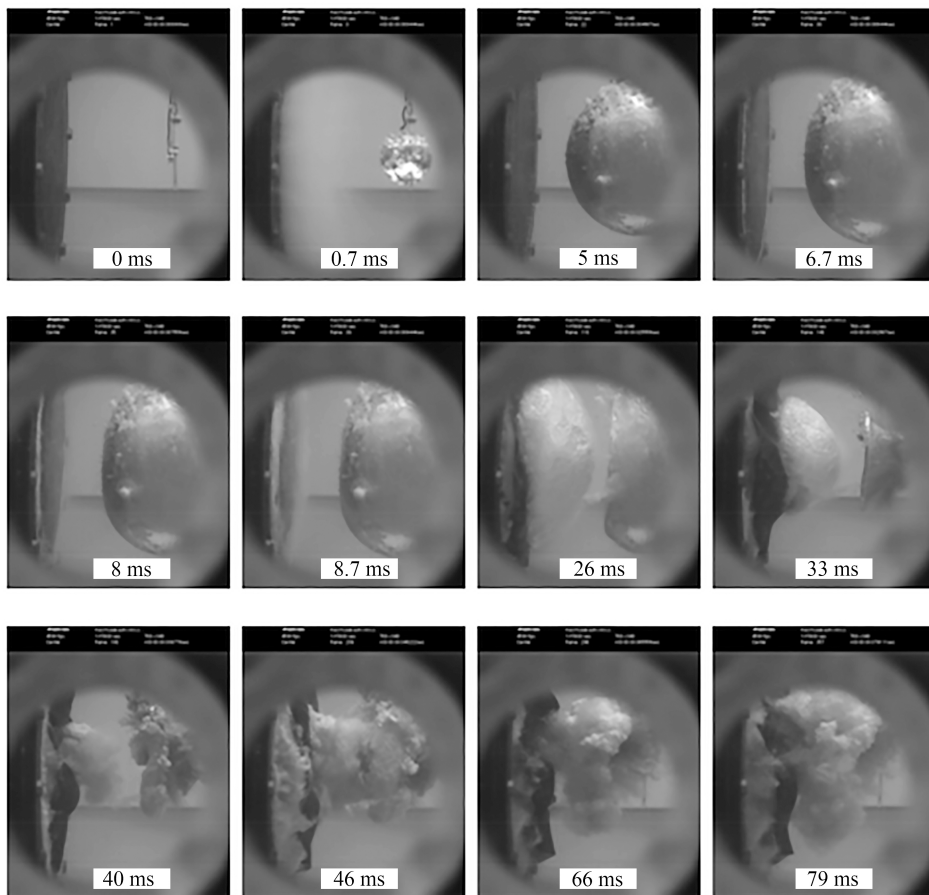


图 7 敷设泡沫覆盖层钢板爆炸试验高速摄像
Fig. 7 High-speed video for the explosive test of the steel sheet with foam coating



图8 敷设泡沫覆盖层的钢板与未敷设的钢板变形
Fig. 8 The steel plate deformation with foam coating and without coating

4 射流防护机理

在射流形成机理方面, Benjamin 和 Ellis^[11] 利用 Kelvin 冲量解释了边界处气泡的运动机理, Blake 和 Gibson^[12-13] 在此基础上提出了在水面下方的气泡产生向上射流或向下移动的判据。

表征浮力的参数为

$$\delta = (\rho g R^{\max} / \Delta P)^{1/2}, \quad (1)$$

表征气泡中心初始深度参数为

$$\gamma = d / R^{\max}, \quad (2)$$

其中 ρ 为流体密度, g 为重力加速度, R^{\max} 为气泡的最大半径, d 为气泡中心的初始深度(炸药深度), $\Delta P = P_{\infty} - P_c$, P_{∞} 为炸药深度处无限域流场的压力, P_c 为饱和蒸汽压(通常为常数)。

当参数乘积 $\gamma\delta < 0.442$ 时, Bjerknes 效应占主要地位, 从而产生远离自由面的射流和气泡运动。当 $\gamma\delta > 0.442$ 时, 情况正好相反。该准则称之为 Blake 判断准则。

表4 有无覆盖层圆板的射流防护参数计算表

Table 4 Calculation of jet protection parameters of circular plates with or without coating

status	parameter						
	modulus of elasticity E/Pa	plate thickness h/m	bubble pulsation pressure P_b/Pa	maximum bubble radius R^{\max}/m	blasting distance R/m	cavitation parameters μ	distance parameter η
foam coated circular plate	1×10^6	0.022	3.12×10^7	0.2	0.2	0.0035	1
circular plate	2×10^{11}	0.0045	3.12×10^7	0.2	0.2	144	1

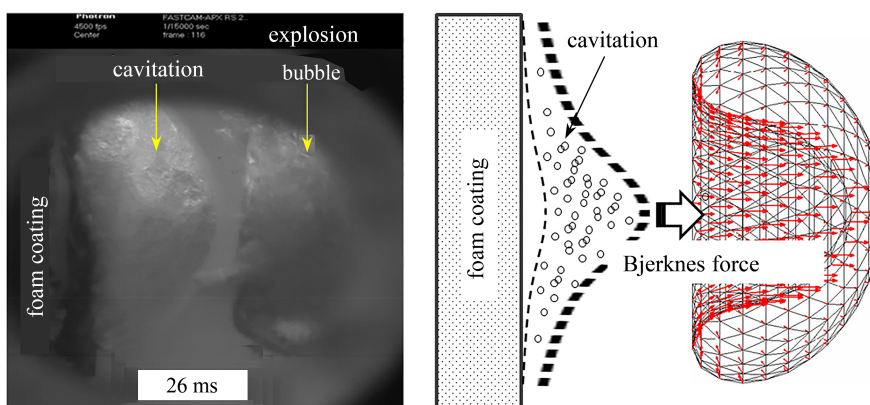


图9 泡沫覆盖层对气泡射流防护机理示意图
Fig. 9 Schematic diagram of the bubble protection mechanism for foam coating

Blake 判断准则说明自由水面下影响气泡射流方向的主要因素是水深, 而根据本文的试验, 在泡沫覆盖层附近影响射流方向的应该是空化区域, 而空化区域取决于泡沫覆盖层的厚度 h 、弹性模量 E 、气泡脉动压力 P_b 和气泡最大半径 R^{\max} 。因此提出表征空化区域的参数

$$\mu = Eh / (P_b R^{\max}), \quad (3)$$

和表征气泡与泡沫覆盖层距离的参数

$$\eta = R/R^{\max}. \quad (4)$$

当 μ 较小而 η 较大时,说明空化区域较大,射流不易形成.对于本文的试验,泡沫覆盖层圆板的空化参数 μ 只有 0.0035,因此空化区域大,未形成射流;无覆盖层圆板的空化参数 μ 高达 144,形成了射流(表 4).

为了进一步说明泡沫覆盖层对气泡射流防护机理,将试验中高速摄像捕捉到第 26 ms 时刻的照片绘制于图 9,图中气泡的形状引自张阿漫等的论文^[14].泡沫覆盖层表面在气泡膨胀过程中受到负压而微微凸起,同时覆盖层与气泡之间的水也因负压而产生了半球形空化.这个半球形空化的形成时间是在气泡膨胀最大的时刻,因此可看作是一个“异相气泡”^[15],这种异相气泡在 Bjerknes 力和重力的联合作用下对爆炸气泡的射流效应产生了抑制.

5 结 论

本文根据水下爆炸试验缩比相似理论,采用小型爆炸水箱开展缩比模型水下爆炸试验,分析了泡沫覆盖层与水下爆炸气泡的相互作用机理.试验结果表明,水下爆炸气泡在泡沫覆盖层表面引发了半球形空化,形成了“异相气泡”^[15].这种异相气泡对爆炸气泡产生了抑制,使其无法膨胀到最大,而且在 Bjerknes 力和重力的联合作用下气泡被推远,无法形成水射流,从而保护了结构物.本文的试验为防护爆炸气泡溃灭时产生的朝向结构物的高速水射流提供了一种新方案.

参考文献(References):

- [1] 谌勇, 华宏星, 汪玉, 等. 超弹性夹芯覆盖层的水下爆炸防护性能[J]. 爆炸与冲击, 2009, **29**(4): 395-400. (CHEN Yong, HUA Hongxing, WANG Yu, et al. Protective effects of hyper-elastic sandwiches coated onto metal boxes subjected to underwater explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, **29**(4): 395-400. (in Chinese))
- [2] 姚熊亮, 于秀波, 庞福振, 等. 敷设声学覆盖层的板架结构抗冲击性能数值计算研究[J]. 工程力学, 2007, **24**(11): 164-171. (YAO Xiongliang, YU Xiubo, PANG Fuzhen, et al. Numerical research on the anti-shock capability of plate-frame structure coated with acoustic covering layer[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, **24**(11): 164-171. (in Chinese))
- [3] DU Z P, WANG Y, CHEN Y, et al. A new type of rubber sandwich coated onto ship for the use of underwater explosion shock mitigating[J]. *Advanced Materials Research*, 2009, **79/82**: 291-294.
- [4] 张振华, 汪玉, 张立军, 等. 船体梁在水下近距爆炸作用下反直观动力行为的相似分析[J]. 应用数学和力学, 2011, **32**(12): 1391-1404. (ZHANG Zhenhua, WANG Yu, ZHANG Lijun, et al. Similarity research of anomalous dynamic response of ship girder subjected to near field underwater explosion[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2011, **32**(12): 1391-1404. (in Chinese))
- [5] BRETT J M, YIANNAKOPOULOS G. A study of explosive effects in close proximity to a submerged cylinder[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, **35**(4): 206-225.
- [6] 李帅, 张阿漫, 韩蕊. 水中高压脉动气泡水射流形成机理及载荷特性研究[J]. 力学学报, 2019, **51**(6): 1666-1681. (LI Shuai, ZHANG Aman, HAN Rui. The mechanism of jetting behaviors of an oscillating bubble[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, **51**(6): 1666-1681. (in Chinese))
- [7] 常青, 张敏弟, 黄国豪, 等. 不同材料边界附近气泡运动特性对比试验研究[C]//中国力学大会2019. 2019. (CHANG Qing, ZHANG Mindi, HUANG Guohao, et al. Experimental study of bubble motion behavior near two different material boundaries[C]//*The Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics(CCTAN 2019)*. 2019. (in Chinese))
- [8] 汪斌, 张远平, 王彦平. 一种水中爆炸气泡脉动实验研究方法[J]. 高压物理学报, 2009, **23**(5): 332-337. (WANG Bin, ZHANG Yuanping, WANG Yanping. An experimental method of studying underwater explosion bubble oscillation[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, **23**(5): 332-337. (in Chinese))
- [9] 张效慈. 水下爆炸试验相似准则[J]. 船舶力学, 2007, **11**(1): 108-118. (ZHANG Xiaoci. Similarity criteria for experiment of underwater explosion[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2007, **11**(1): 108-118. (in Chinese))
- [10] 张效慈. 水下爆炸试验模型律的若干问题[J]. 船舶力学, 2009, **13**(5): 783-787. (ZHANG Xiaoci. Some problems for

- model law of underwater explosion tests[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2009, **13**(5): 783-787.(in Chinese))
- [11] BENJAMIN T B, ELLIS A T. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1966, **260**(1110): 221-240.
- [12] BLAKE J R, GIBSON D C. Growth and collapse of a vapour cavity near a free surface[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, **111**: 123-140.
- [13] BLAKE J R, GIBSON D C. Cavitation bubbles near boundaries[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1987, **19**: 99-123.
- [14] 张阿漫, 姚熊亮. 水深和药量的变化对水下爆炸气泡射流的影响研究[J]. 工程力学, 2008, **25**(3): 222-229. (ZHANG Aman, YAO Xiongliang. The effect of charge and water depth on the underwater explosion bubble[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, **25**(3): 222-229.(in Chinese))
- [15] 张阿漫, 姚熊亮. 近自由面的多个水下爆炸气泡相互作用研究[J]. 力学学报, 2008, **40**(1): 26-34. (ZHANG Aman, YAO Xiongliang. The interaction between multiple underwater explosion bubbles near free surface[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2008, **40**(1): 26-34.(in Chinese))