文章编号：1000-5773(2012)05-0545-06

不同水底介质对有限域中装药沉底爆炸特性的影响*

杨　莉[1]，汪　玉[1]，黄　超[2]，汪　斌[2]

（1.海军装备研究院，北京　100161；
2.中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳　621900）

摘要：通过开展装药沉底爆炸原理性实验研究，得到了不同水底条件对装药沉底爆炸气泡运动和冲击波压力的影响规律：沉底装药水下爆炸气泡通常呈半球形，依附在水底并同时急剧膨胀达到最大半径，随后气泡做收缩运动并连带水底介质颗粒迅速上浮，同时形状发生显著变化，如在石底和泥底时气泡在水底射流的作用下呈蘑菇状上浮，砂底时气泡则呈现出柱状上浮、未出现明显脉动运动即已坍塌破裂；沉底爆炸与水底介质发生强烈耦合作用而形成不同程度的反射波，通常水下石底的反射冲击波较泥底和砂底更强烈，且一般迭加后的冲击波峰值压力高于入射波阵面压力；不同水底介质条件下，装药与水底发生的强烈耦合作用均对水底造成强冲击破坏。

关键词：水下爆炸；冲击波；气泡；沉底装药
中图分类号：O383.1　　**文献标识码**：A

1　引　言

沉底装药水中爆炸涉及爆炸成坑、冲击波水底反射、气泡运动和形成水底射流等一系列复杂的载荷效应，且与不同水底介质的物理、力学性质和几何形状等边界条件密切相关，因此，与装药自由场水中爆炸相比，沉底装药水中爆炸具有极为复杂的物理作用过程和载荷变化规律。张朋祥等[1]通过研究发现，水底反射是影响沉底装药水中爆炸冲击波压力的主要因素，但由于水底介质的复杂性，反射波的强度难以确定。姚熊亮等[2]考虑水底反射和透射作用，应用光滑粒子流体动力学方法对沉底装药水中爆炸过程进行仿真计算，得到了沉底爆炸时不同方向上冲击波峰值压力的反射系数，并认为不同水底介质性质对计算结果有很大影响。顾文彬等[3]在海边细砂底质进行的沉底爆炸实验和李洪涛等[4]在硬沙砾底质进行的沉底爆炸实验，验证了这一结论。但由于水底土壤介质的特性千差万别，目前国内外对水底土壤介质力学性质的研究有限[5]，因此，想得到普遍适用的水底介质对装药沉底爆炸载荷参数的影响规律是难以实现的。本研究通过开展沉底装药水箱爆炸实验，观测记录沉底装药水中爆炸全过程，获取岩石、细砂和粘土3种典型水底介质条件下，装药沉底爆炸冲击波传播和气泡运动的一般规律。

2　实验设计

沉底装药水中爆炸实验是在2 m×2 m×2 m的钢质水箱中进行的，通过压力测试和高速摄像观测记录沉底装药水中爆炸全过程。设计了3种实验工况，其中，爆源采用近球形PETN药柱，采用岩石板

* **收稿日期**：2011-12-06；**修回日期**：2012-02-25
基金项目：中国博士后科学基金面上资助项目(20100471810)；中国博士后科学基金特别资助项目(201104773)
作者简介：杨　莉(1979—)，女，博士，工程师，主要从事水下爆炸和舰艇抗冲击技术研究. E-mail：iris-yang-bit@gmail.com

和槽体装填细砂或粘土模拟 3 种典型水底介质，且在各种实验工况中，爆源、爆源布放位置和水深等参数均保持不变，只改变水底介质样本。

实验中，药柱通过钢丝固定于位于水箱中央的钢板或槽体砂层表面，同时在药柱正上方 0.35、0.50 m 处，以及在药柱与砂层表面水平线夹角 30°和 60°方向上、距离为 0.35 m 处布设自由场压力传感器，共 4 个测点。测点布置示意图见图 1。选用 PCB138 系列水下压力传感器记录装药水下爆炸冲击波和气泡脉动压力，其最大量程范围为 6.9～345 MPa，满足本次实验压力测量需求。同时，选用 5 000 帧/秒的 APX2RS 数字式相机进行高速摄影。具体测试系统如图 2 所示。

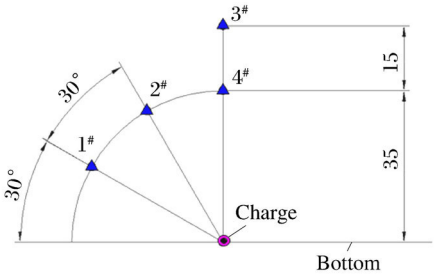


图 1 测点布置示意图

Fig. 1 Position of measurement points

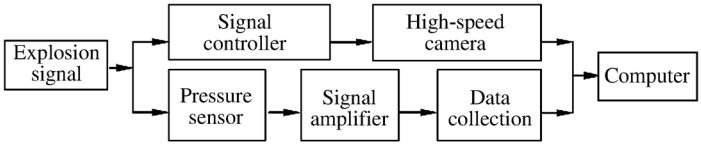


图 2 实验测试系统

Fig. 2 Test system for experiments

3 实验结果及分析

3.1 石底实验结果

石底实验工况中，沉底装药水中爆炸气泡整个运动过程见图 3。从图 3 可以看出，$t=0.20$ ms 时，装药爆轰产生大量高温高压气体，气泡迅速膨胀；$t=1.20$ ms 时，气泡的膨胀运动受水底边界的影响，呈半球形向外运动，在这一阶段气泡内气压逐渐与外界压力持平；$t=9.60$ ms 时，气泡内压力小于外界压力，形成负压，造成钢板被吸引抬升；$t=16.00$ ms时，气泡内、外负压差值达到一定程度，气泡膨胀运

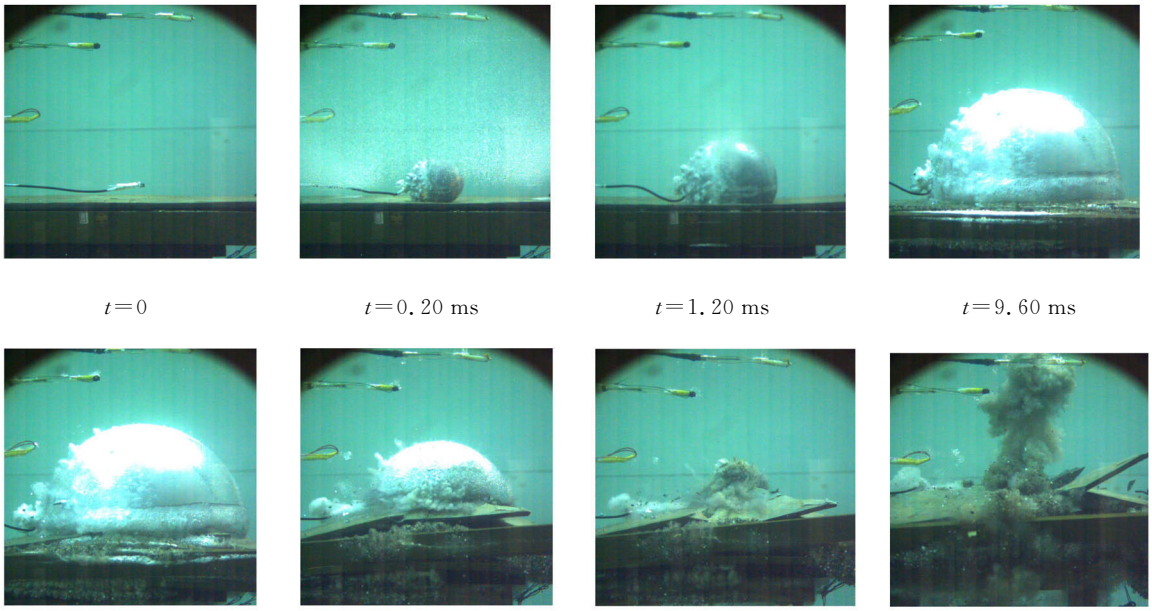


图 3 装药石底爆炸气泡运动过程

Fig. 3 Dynamic behavior of an underwater explosion gas bubble on the rock ground

动结束，气泡开始收缩过程，此时气泡半径达到最大，气泡内部压力最小，并使钢板出现明显的中拱变形；$t=26.00$ ms时，气泡开始收缩，同时形成巨大的冲击力作用于底板使其破裂；$t=30.00$ ms 时，气泡紧贴钢板底面收缩至最小半径，随后急速上浮，附带起钢板底下的泥砂，形成蘑菇云形状；$t=58.20$ ms 时，气泡在上浮过程中逐渐坍塌溃灭，钢板碎片飞溅，泥砂溢出槽体。

图 4 为石底实验工况各测点压力时程曲线。从测量结果来看，冲击波以超过水中音速传播，并在径向上以指数函数形式衰减，各测点的峰值压力均为冲击波压力峰值。冲击波峰值压力过后，由于水底和自由面的反射作用，压力曲线出现了不同程度的振荡，这种振荡对于靠近水底的 1# 测点尤为明显。同时，各测点压力曲线在 3 ms 左右均出现了气泡首次脉动的压力峰值，与从石底气泡运动图像得到的信息相吻合，说明本次实验较好地反映了沉底装药真实的爆炸作用过程。

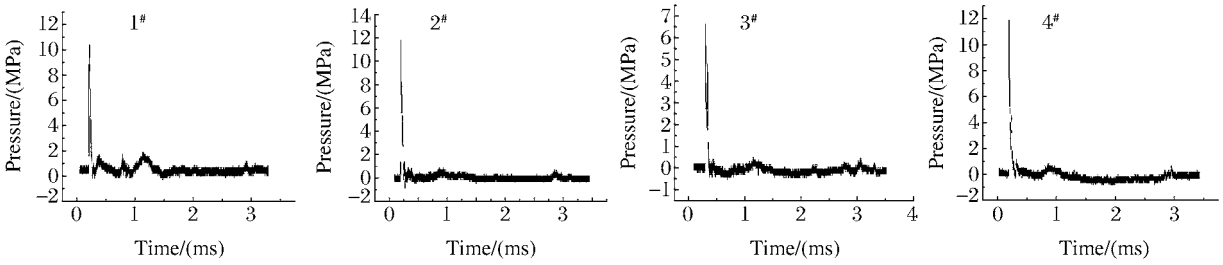


图 4　装药石底爆炸 1# ～4# 测点压力时程曲线

Fig. 4　Shock wave pressure-time curve of underwater explosion on the rock ground

3.2　砂底实验结果

砂底实验工况中，沉底装药水中爆炸气泡整个运动过程见图 5。从图 5 可知，在爆炸初始阶段，砂底和石底一样，装药爆轰产生大量高温高压气体形成气泡并迅速膨胀，同时由于受到水底边界影响，气泡呈半球状依附在水底；从 $t=6.00$ ms 开始，砂底爆炸气泡膨胀，对水底产生强烈扰动，使得气泡边缘槽体表面细砂颗粒不断外溢，直至气泡膨胀运动结束；$t=17.80$ ms 时，气泡开始收缩，随之卷起槽体表面细砂，逐渐充满整个收缩中的气泡；随后，在浮力作用下，气泡裹覆着细砂迅速上升；但由于细砂颗粒

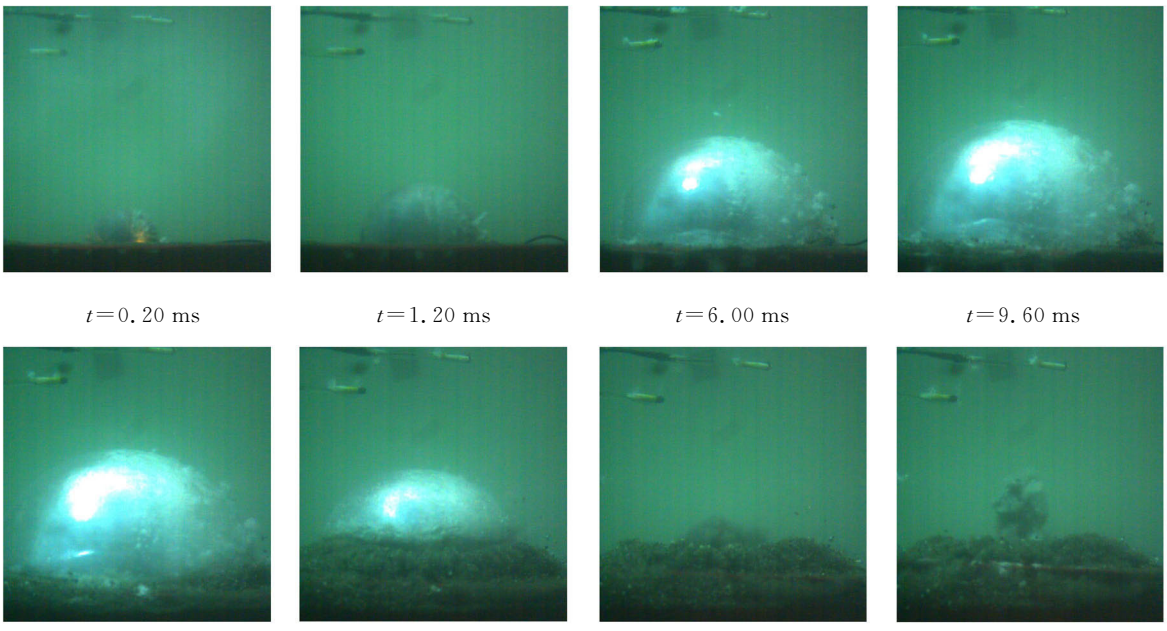


图 5　装药砂底爆炸气泡运动过程

Fig. 5　Dynamic behavior of an underwater explosion gas bubble on the sand ground

质量较大，因此，在重力作用下，细砂很快回落至水底，气泡一边上升一边坍塌溃灭。

图 6 为砂底实验工况各测点压力时程曲线。从测量结果可以看出，各测点的峰值压力均为冲击波压力峰值，且符合指数衰减规律，与石底爆炸情况是一样的。分别对比石底实验中各测点的峰值压力时发现，对于相同位置处测点，砂底爆炸冲击波峰值压力普遍偏小，说明砂底爆炸时，水底吸收部分能量转化成其自身的动能和变形能等，造成爆炸能量的损失；而石底爆炸时，水底发生变形损坏，主要是因为在气泡膨胀收缩运动过程中形成水射流，从而对水底造成了严重的冲击性破坏。

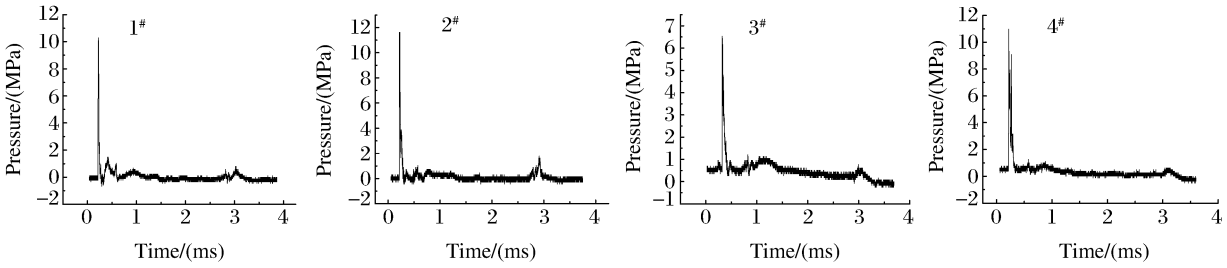


图 6 装药砂底爆炸 1# ～4# 测点压力时程曲线

Fig. 6 Shock wave pressure-time curve of underwater explosion on the sand ground

3.3 泥底实验结果

泥底实验工况中，沉底装药水中爆炸气泡整个运动过程见图 7。从图 7 可以看出，装药泥底爆炸气泡运动过程和砂底爆炸时的情况基本相同，主要区别在于气泡收缩上升阶段。泥底爆炸时，由于粘土颗粒相对于细砂颗粒，体积小、质量轻，因此，易被气泡卷起，随着气泡一起上升，不至于很快回落而导致气泡溃灭；同时，由于粘土颗粒间隙小，泥底介质更易被冲击压实，有利于水底射流的形成，因此，气泡在收缩上升阶段，仍然不断从中间向外膨胀，呈蘑菇状在水中扩散。

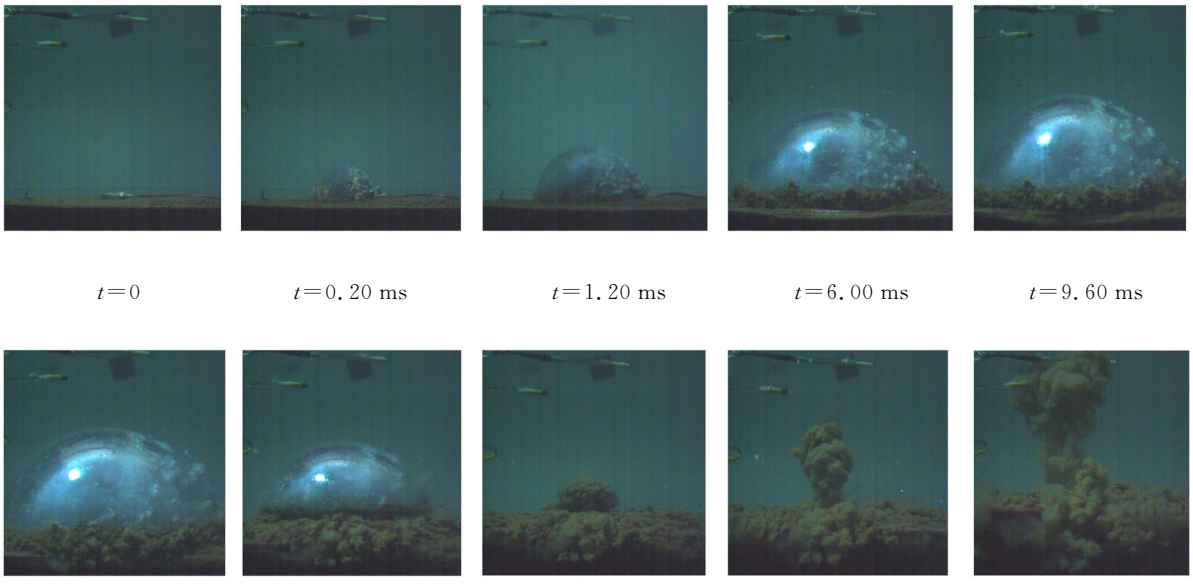


图 7 装药泥底爆炸气泡运动过程

Fig. 7 Dynamic behavior of an underwater explosion gas bubble on the mud ground

图 8 为泥底实验工况各测点压力时程曲线。对比石底爆炸和砂底爆炸的压力时程曲线可知,对于相同位置处的测点,如 2# 和 3# 测点,泥底爆炸冲击波的峰值压力小于石底爆炸冲击波峰值压力,但大于砂底爆炸冲击波峰值压力,与 Michael[6] 沉底装药水中爆炸实验结论有所不同。原因可能在于Michael实验是在海底进行的,其所指泥底应为含水量较高的软淤泥底质;而本实验中的泥底是固体颗粒多、间隙小的密实粘土介质,即传统认为的较"硬"底质,因此,冲击波水底反射作用明显。

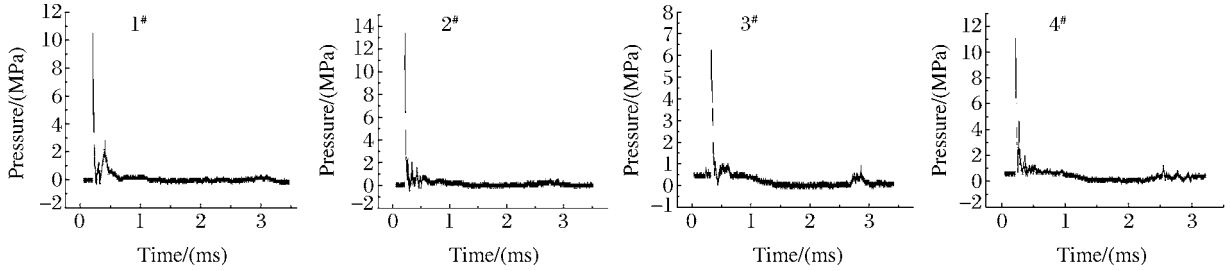


图 8　装药泥底爆炸 1# ～4# 测点压力时程曲线

Fig. 8　Shock wave pressure-time curve of underwater explosion on the mud ground

4　结　论

沉底装药水中爆炸由于水底边界条件的作用而呈现出冲击波水底强反射、气泡运动形成水底射流等明显异于装药自由场水下爆炸的复杂载荷效应。而且由于沉底爆炸属于紧贴边界的水下爆炸,因此,不同水底介质条件对沉底爆炸气泡和冲击波压力产生较大影响,同时沉底爆炸对水底也造成不同程度的破坏。本研究开展了岩石板、细砂、粘土 3 种典型水底介质条件下的装药沉底爆炸实验,得到如下主要结论。

(1) 水底射流作用与气泡运动:沉底装药水中爆炸初始阶段,气泡呈半球状依附在水底,这时不同水底介质条件对气泡运动的影响不十分明显,但随着气泡收缩上浮,水底介质对气泡运动形状的影响越来越大。石底条件下,气泡呈近球形上浮,同时由于水底射流作用在气泡顶部出现花苞,呈现蘑菇状;泥底条件下,气泡上浮伊始由于水底泥土的吸附连带而呈现出圆柱形,随后在上浮过程中逐渐脱离水底的这种影响,并在射流作用下与石底时一样,顶部不断有凸起,呈现蘑菇状;对于砂底,由于砂土颗粒较大,在气泡上浮过程中砂土在重力作用下迅速回落,造成气泡二次膨胀运动未完成即坍塌破裂。

(2) 冲击波压力:沉底装药水下爆炸冲击波压力呈指数衰减规律,同时,由于沉底爆炸与水底介质发生强烈的耦合作用,从而形成不同程度的反射波。通常坚硬的岩石底产生较强的水底反射冲击波,一般使迭加后的冲击波峰值压力高于入射波阵面压力;泥底和砂底反射波强度较石底减弱,但也对冲击波峰值压力起到了增强作用。

(3) 对水底的冲击破坏:石底爆炸时,气泡形成自上而下的水射流冲破石板,使其破坏断裂;砂底和泥底时,由于气泡上浮的连带作用,使大量泥沙溢出槽体,残留在水箱底部,同时由于水底射流的作用而在水底留下凹坑。对比分析可知,不同水底介质条件下,虽然装药与水底的耦合作用机理有所不同,但均表现为强冲击破坏。

References:

[1]　Zhang P X, Ye X S, Gu W B, et al. Discussion on calculation method of peak pressure subjected to shallow-layer water explosion [J]. Engineering Blasting, 2000, 6(1): 15-20. (in Chinese)
张朋祥,叶序双,顾文彬,等. 球形装药浅层水中水底爆炸冲击波压力测试及分析 [J]. 工程爆破, 2000, 6(1): 15-20.

[2] Yao X L, Yang W S, Chen J, et al. Numerical calculation of explosion power of mines lying on seabed [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(2): 173-178. (in Chinese)
姚熊亮, 杨文山, 陈 娟, 等. 沉底水雷爆炸威力的数值计算 [J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(2): 173-178.

[3] Gu W B, Yang T H, Ye X S, et al. Numerical simulation of single charge explosion on seabed in shallow water [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2000, 1(3): 51-55. (in Chinese)
顾文彬, 阳天海, 叶序双, 等. 单个装药浅层水中沉底爆炸的数值模拟 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2000, 1(3): 51-55.

[4] Li H T, Zhao L, Ning Y C, et al. Testing and analyzing pressure produced by submarine explosion with spherical charges [J]. Engineering Blasting, 2005, 11(1): 16-21. (in Chinese)
李洪涛, 赵 琳, 宁永成, 等. 球形装药海底裸爆压力测试与分析 [J]. 工程爆破, 2005, 11(1): 16-21.

[5] Rebecca G. The effects of porous sea bottoms on the propogation of underwater shock waves using the *P-a* equation of state [A]//Proceedings of 80th Shock and Vibration Symposium [C]. San Diego, 2009: 33.

[6] Michael M. Explosion effects and properties: Explosion effects in water, AD-A056694 [R]. US: Naval Surface Weapons Center White Oak Lab Silver Spring Md, 1978.

Effects of Different Grounds on the Loading Characteristics of Limited Underwater Explosion from a Bottom Charge

YANG Li[1], WANG Yu[1], HUANG Chao[2], WANG Bin[2]

(1. *Naval Academy of Armament, Beijing* 100161, *China*;
2. *Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: In order to research the effects of different grounds on the shock wave propagation and the general laws of the bubble motion of underwater explosion from a bottom charge, principle experiments of underwater explosion were conducted in a water tank. Several physical phenomena observed such as bubble jetting and bubble migration from the different grounds were discussed. It is suggested that the shape and dynamic behavior of bubble have great dependence on the ground properties. Furthermore, underwater explosion from a bottom charge usually causes serious damage to the bottom, and the reflected wave is sometimes stronger than the incident shock wave such as for the rock ground.

Key words: underwater explosion; shock wave; bubble; bottom charge