文章编号：1000-5773(2013)01-0063-06

深水域近水面水下爆炸水柱形态及演变实验研究*

李　梅，魏继锋，王树山，马　峰

（北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081）

摘要：为研究不同起爆深度的水下爆炸水柱形态及演变特征，进行了1 kg球形RDX装药在不同起爆深度下的海上爆炸实验，通过高速摄像机记录装药起爆后水柱的形成和成长过程，获得了喷射水柱形态的演变特征以及水柱高度、直径、水柱突出水面时间等参数的变化规律，并与Cole、Hole和Swisdak等人的研究结果进行对比分析。研究结果表明：对于深水域近水面水下爆炸，水柱以垂直喷射形态为主，当气泡在膨胀阶段到达水面时水柱存在微弱的径向飞散现象；水柱最大高度随起爆深度呈脉动变化，水柱直径随起爆深度线性减小；Swisdak关于水柱最大高度的计算公式不适用深水域近水面水下爆炸情况。

关键词：水下爆炸；水柱；起爆深度；高速摄像

中图分类号：O383.1；O384　　**文献标识码**：A

1　引　言

装药在浅水域、近水面水下爆炸时，受水面和水底边界的反射影响，水面出现高耸的爆炸水柱（或水幕、水射流）。爆炸水柱的形态及演变特征研究对爆炸水幕反导[1]、舰船抗冲击试验[2]以及浅滩排淤[3]等工程技术研究具有指导意义和应用价值。1946年，Cole[4]基于Hole的137 kg TNT装药水下爆炸形成的水柱图像，分析了水柱形成过程和形态，认为水柱是气泡到达水面破裂后形成的爆轰产物与水的混合物，水柱的数目和演变特征取决于起爆深度。1978年，Swisdak[5]给出了接触和远离水底爆炸的浅水爆炸情况下，射流最大高度随装药量和起爆深度变化的经验公式。由于水底反射的影响使浅水爆炸与深水域的近自由面水下爆炸产生水柱的形态和参数不同，因此该经验公式并不一定适用于深水域近水面水下爆炸。Chahine[6]、Gibson[7]及Blake等人[8]采用电火花或激光产生气泡的方法代替爆炸实验，等效研究深水域近水面水下爆炸时气泡的运动过程，先后发现当气泡处于收缩阶段并接近水面时，水面出现射流现象。此外，Mader[9]、Craig[10]和Kedrinskii等人[11]对近水面水下爆炸出现的复杂现象进行了相关研究。水域深度、起爆深度和装药当量是影响爆炸水柱形态的主要因素，以往的研究多针对浅水域或大当量装药的水下爆炸，关于深水域或小当量装药水下爆炸时爆炸水柱形态及演变特征的研究较少。开展海上爆炸实验研究，有助于提高对水柱形态、成长过程和形成机理的深入认识。本研究进行5种起爆深度下1 kg球形RDX装药的深水域海上爆炸实验，通过高速摄像机记录爆炸水柱的形成和成长过程，根据实验结果分析起爆深度对水柱形态及演变特征的影响。

2　实验方案

实验布局如图1所示。实验装置包括起爆系统、测量系统和固定装置等。起爆系统由起爆器、电缆

* **收稿日期**：2011-09-19；**修回日期**：2011-10-24

基金项目：爆炸科学与技术国家重点实验室基金（YBKT09-07）

作者简介：李　梅（1984－），女，博士研究生，主要从事水下爆炸与毁伤效能研究. E-mail：pulmmay@163.com

等组成，通过电缆向电雷管输送起爆信号。测量系统主要包括红旗标杆和高速摄像装置。红旗标杆作为水柱尺寸测量基准，用 1.0 m 宽红色墙纸粘贴在白色钢管外侧，形成间隔为 1.0 m 的红白相间标杆；标杆总高4 m，通过圆柱形大体积浮标固定并悬浮在海面上；标杆与爆炸中心位于同一水平线上，相距 8 m。使用Photron 公司的 Fastcam SA4 型高速摄像机，正面记录水柱成长和下降过程，分辨率选择 1024×1024，拍摄幅频为 500 幅/秒。起爆控制器与雷管和高速摄像机相连，实现起爆和高速摄像的时间同步。高速摄像机位于岸边平台上，与标杆和爆源距离相等。利用浮标、吊绳和网兜等固定装药，调节吊绳长度使装药在水下预置深度处起爆，实验中起爆深度分别为 1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0 m。装药由球形 RDX 炸药、扩爆药柱和 8 号雷管组成，装药总质量 1 kg，TNT 当量约 1.3 kg。RDX 球体炸药的质量为 985 g，周长 34 cm；扩爆药柱直径为 3.4 cm，高 4.5 cm。为避免海底和岸边固壁边界产生的反射冲击波对水柱形成过程产生影响，实验选择的海域深度大于 12 m，爆炸源距岸边 40 m。

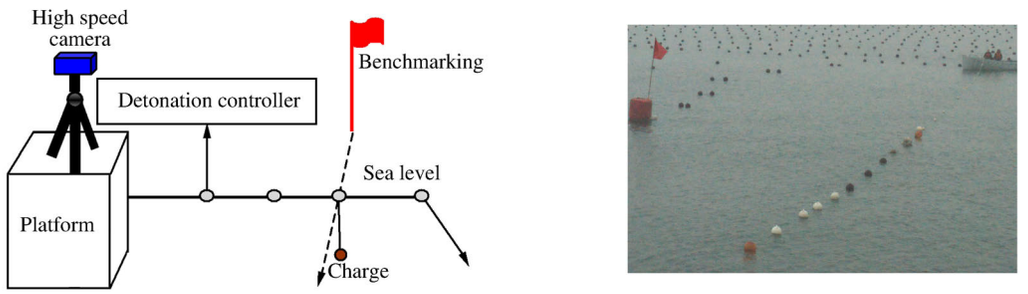


图 1 实验布局

Fig. 1 Experimental layout

3 实验结果与分析

3.1 水柱形态及演变特征

5 种起爆深度下水柱的形态如图 2 中 700 ms 时的图像所示。1.0 m 起爆深度下，中心水柱底部存在径向飞散，受 5～6 级风的影响，垂直喷射的水柱出现部分飘移。1.5 m 起爆深度下，水柱由水冢中心突出，并垂直向上高速喷射，同时存在少许径向飞散水柱，中心水柱呈正立圆锥状，顶部锥角约 28.9°。2.0 m 起爆深度下，垂直喷射的中心水柱高度明显降低，并且没有径向飞散水柱。2.5 m 起爆深度下，中心水柱最细。3.0 m 起爆深度下，不存在明显的水柱现象，水冢上表面有向上飞溅的稀疏水滴。

本实验与 Hole 实验[4]的起爆条件和实验结果列于表 1，其中 w 为装药质量，d 为起爆深度，R_{max} 为气泡最大半径(按深水爆炸近似计算[4])。对比表 1 中数据可见，Hole 的 4 组实验中，垂直和径向喷射现象明显，且相对独立；而本实验获得的喷射水柱形态则以垂直喷射为主，当起爆深度小于气泡最大半径时，垂直喷射水柱中兼有径向飞散现象，但飞散现象不明显，并且随着起爆深度的增加，飞散现象逐渐消失。因此，径向飞散是否为水柱的主要形态可能与装药量、起爆深度等因素密切相关，在大药量、近水面条件下，水下爆炸形成的喷射水柱存在明显的径向飞散现象，对于小药量的深水域近水面水下爆炸，喷射水柱以垂直形态为主。

5 种起爆深度下水柱的演变过程如图 2 所示。可以看出，5 种起爆深度下爆炸水柱的演变过程基本相同，只是演变特征存在差异。以 1.5 m 起爆深度时的高速摄像结果为例，描述水柱演变过程。以水面开始变白时刻为计时零点，由图 2 可知水柱从出现到消失的总时间约 2 s。0～300 ms，冲击波到达水面发生反射，水面开始变白，随后水面形成向上飞溅的水冢，水冢逐渐升高，顶部锥角减小；500～900 ms，一束垂直向上高速喷射的水柱由水冢中心突出并快速上升，水柱形态类似于小锥角的圆锥体；1 100～1 900 ms，水柱回落，此时水柱顶端仍在向上运动，但从顶端到底部逐渐稀化，水柱整体呈离散的细小水滴状缓慢下落。

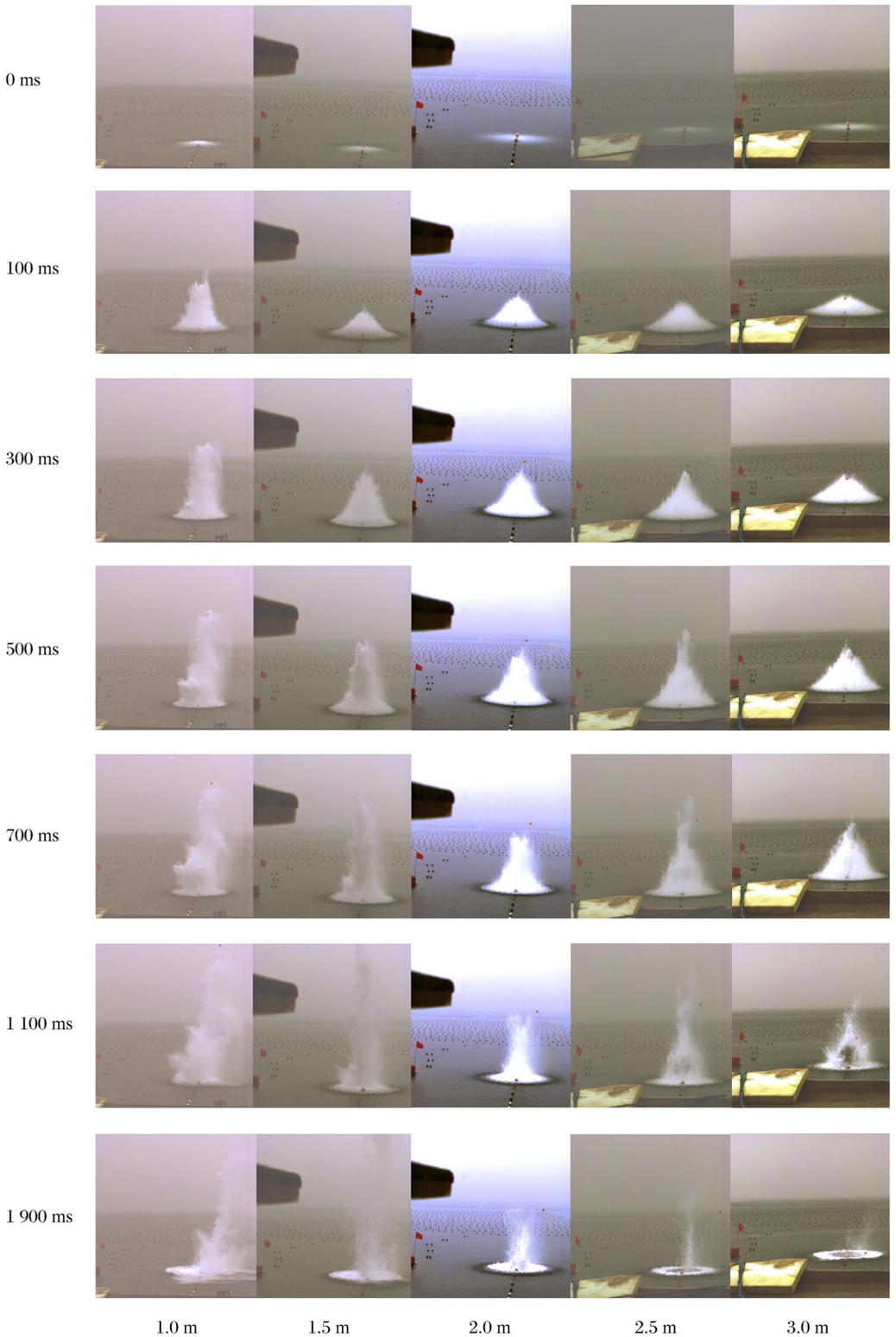


图 2 不同起爆深度下水柱的形态及演变过程

Fig. 2 Shape and evolution process of water column for different detonation depths

表 1 实验结果对比

Table 1 Comparison of experimental results

Experiment	Charge	w/(kg)	d/(m)	d/R_{max}	Ejection direction
Hole[4]	TNT	137	5.5	0.76	Radial
			8.0	1.17	Vertical
			13.7	2.18	Radial
			19.8	3.40	Vertical
This study	RDX	1	1.0	0.58	Vertical (major)+radial (minor)
			1.5	0.88	Vertical (major)+radial (minor)
			2.0	1.20	Vertical
			2.5	1.52	Vertical
			3.0	1.84	—

3.2 水柱演变特征分析

3.2.1 水柱高度和直径

如图 3(a)所示，起爆深度为 1.0～2.0 m 时，随着起爆深度的增加，水柱高度 H 逐渐降低；起爆深度为 2.0～3.0 m 时，水柱高度先增加后减小；起爆深度为 2.5 m 时出现高度峰值；起爆深度为 1.0 和 1.5 m 时，水柱最大高度大于 20 m，约为 2.0～3.0 m 起爆深度时水柱高度的 2 倍。基于极限思想，当起爆深度无限接近零时，水面将不存在爆炸水柱，即水柱高度近似为零。因此，当起爆深度小于 2.0 m 时，水柱高度同样是先增大后减小，并且在起爆深度小于 1.0 m 时，出现水柱高度峰值。水柱高度随起爆深度的变化如图 3(b)所示。很明显，水柱高度随起爆深度呈脉动变化。起爆深度为 1.0、1.5、2.0 和 2.5 m 时，水柱根部直径依次为 3.50、2.81、2.16 和 1.44 m。可见，随着起爆深度的增加，水柱根部直径线性减小。

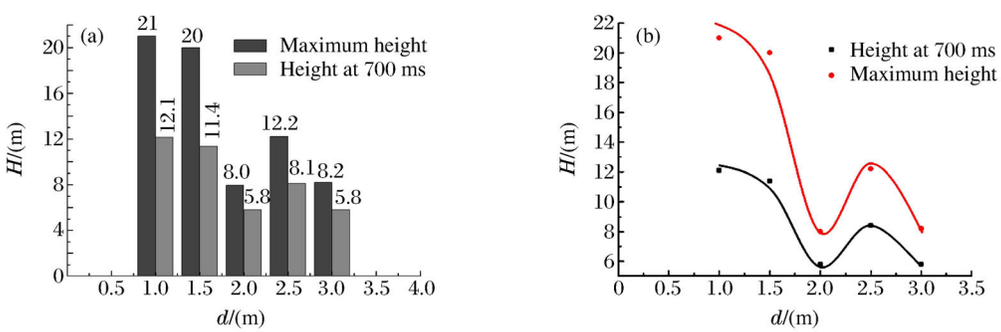


图 3 水柱高度随起爆深度的变化

Fig. 3 Water column height versus detonation depth

1978 年，Swisdak[5]通过总结大量水下爆炸实验数据，给出了接触水底爆炸的浅水爆炸情况下，射流最大高度 H_{max} 随装药量 w 和起爆深度 d 变化的经验公式，即

$$H_{max}/w^{1/3}=\begin{cases}32.4(d/w^{1/4})^{0.1} & 0.0037<d/w^{1/4}<0.74\\ 21.7(d/w^{1/4})^{-1.24} & 0.74\leqslant d/w^{1/4}<1.56\end{cases} \tag{1}$$

根据(1)式，对本实验的水柱最大高度进行理论计算。当起爆深度为 1.0 m 时，水柱最大高度为 26.1 m，误差为 19.1 %；当起爆深度为 1.5 m 时，水柱最大高度为 15.8 m，误差为 26.6%；其它实验工况不满足(1)式的计算条件。由计算结果可知，本实验获得的水柱最大高度与 Swisdak 计算公式得到的结果相差较大。这是因为 Swisdak 公式是基于浅水爆炸的半经验公式，存在水面和水底反射对气泡运动的影响，而本实验中海底反射的影响很小，可忽略不计。此外，Swisdak 没有给出起爆深度大于气泡最大半径情况下水柱最大高度的计算方法。因此，对于小当量装药或深水域近水面水下爆炸，需要重新

建立喷射水柱最大高度的计算模型,或对(1)式进行修正。本实验的数据量较少,需补充大量实验,以便获得更准确的水柱最大高度计算公式。

3.2.2　水柱突出水面时间

根据冲击波和二次压力波测量结果,得到 5 种起爆深度下水柱突出水面时间 t_c、气泡第 1 次和第 2 次脉动时间 t_1 和 t_2、气泡第 1 次和第 2 次达到最大半径的时间 t_{m1} 和 t_{m2},见图 4。对比水柱突出水面时间 t_c、水柱形态和气泡所处状态可知:当起爆深度为 1.0 m 时,喷射水柱出现在气泡膨胀阶段,虽然此时气泡处于快速膨胀且无上浮运动的状态,但气泡到达水面时,气泡顶部最先破裂,气体瞬间向上释放,因此水柱仍然以垂直喷射为主,兼有径向飞散现象;当起爆深度为 1.5 m 时,喷射水柱出现在气泡最大收缩时刻,此时气泡无径向膨胀或收缩运动,因此水柱径向飞散现象消失,水柱高速垂直向上喷射;当起爆深度为 2.0 m 时,水柱喷射出现在气泡的第 2 次膨胀初期,由于气泡在第 1 次脉动过程中损失大部分能量(约为第 1 次气泡脉动能的 54%)[4],因此水柱高度大幅度下降;当起爆深度为 2.5 m 时,喷射水柱出现在气泡第 2 次膨胀后期,与起爆深度为 2.0 m 时相比,水柱最大高度更高,再次出现峰值,基于能量损失原理,此时的水柱高度应低于 2.0 m 时的水柱高度,因此推测此时的水柱可能由 Bjerknes 力产生,由于气泡能量较小,喷射水柱高度较低,因此在 Bjerknes 力作用下水射流高度超过了喷射水柱高度;当起爆深度为 3.0 m 时,喷射水柱出现在气泡第 2 次收缩初期,由于气泡能量减小,不能继续维持气泡形态,气泡发生溃灭,因溃灭而产生的二次压力波在水面发生反射,使水冢上表面出现飞溅水滴。

3.2.3　上升速度

水冢和水柱的高度随时间的变化关系如图 5 所示,其中曲线斜率即为水冢或水柱的上升速度。由图 5 可知,每种起爆深度下的水体上升过程都有一个转折点。在转折点之前,随着起爆深度的增加,水冢初速度降低,水冢或水柱的上升速度减小,这是因为冲击到达水面时的峰值压力随起爆深度的增加而逐渐减小。在转折点之后,水柱超出水冢表面快速上升。起爆深度为 1.5 m 时水柱的成长速度比起爆深度为 1.0 m 时的快,但是由于水柱突出水面相对较晚,整个周期内,水柱最大高度比起爆深度为 1.0 m 时的低,并且随着时间推移,二者的水柱高度相差不大。起爆深度在 1.0～2.0 m 时,水柱上升速度随起爆深度的增加而降低,但起爆深度为 2.5 和 3.0 m 时,水柱的上升速度明显高于起爆深度为 2.0 m 时的情况。随着起爆深度的增加,水柱上升速度呈现出与水柱最大高度一样的脉动变化趋势。

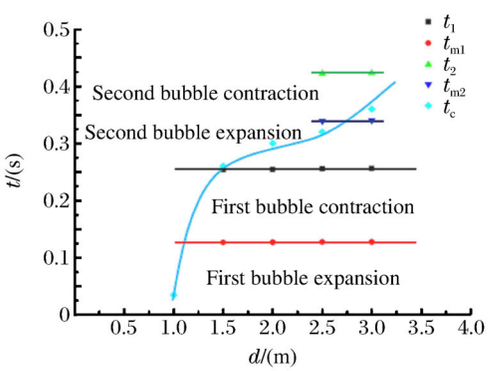


图 4　水柱突出水面时间随起爆深度的变化

Fig. 4　Water column prominent time versus detonation depth

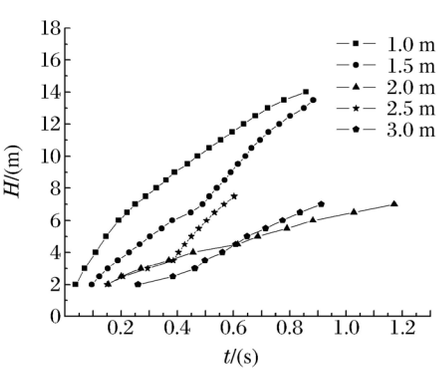


图 5　水柱高度随时间的变化

Fig. 5　Water column height versus time

4　结　论

通过分析深水域近水面水下爆炸实验结果,得到以下主要结论:(1) 深水域或小当量装药近水面水下爆炸时,水柱以垂直喷射形态为主,仅在气泡第 1 次膨胀初期到达水面时,垂直喷射水柱伴有微弱的径向飞散;(2) 水柱最大高度随起爆深度呈脉动变化,水柱直径随起爆深度线性减小;(3) Swisdak 关于水柱最大高度的计算公式不适用于深水域或小当量水下爆炸情况,相关计算模型有待进一步研究。

感谢中国人民解放军 91439 部队在实验中给予的鼎力帮助。

References:

[1] Higdon C E. Water barrier ship self-defense concept, ADA294929 [R]. Dahlgren, USA: Naval Surface Warfare Center, 1994: 142-155.

[2] Wang Y, Zhang L, Shi S H, et al. Review of shock-resistance technology of naval ship for underwater non-contact explosion [J]. Science & Technology Review, 2007, 27(14): 19-22. (in Chinese)
汪 玉, 张 磊, 史少华, 等. 舰船水下非接触爆炸抗冲击技术综述 [J]. 科技导报, 2007, 27(14): 19-22.

[3] Li S H. Study on fluid motion under shallow water explosion [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1990. (in Chinese)
李世海. 浅水中爆炸流体运动规律的理论及实验研究 [D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1990.

[4] Cole R H. Underwater Explosions [M]. Princeton, USA: Princeton University, 1948.

[5] Swisdak M M. Explosion effects and properties: Part Ⅱ. Explosion effects in water, ADA056694 [R]. Dahlgren, USA: Naval Surface Weapons Center, 1978.

[6] Chahine G L, Frederick G S, Lambrecht C J, et al. Spark-generated bubbles as laboratory-scale models of underwater explosions and their use for validation of simulation tools [C]//SAVIAC Proceedings of the 66th Shock and Vibrations Symposium, Biloxi, USA, 1995, 2: 265-276.

[7] Gibson D C, Blake J R. Growth and collapse of cavitation bubbles near flexible boundaries [C]//Proceedings of the 7th Australasian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics, Brisbane, Australia, 1980: 283-286.

[8] Blake J R, Gibson D C. Growth and collapse of a vapour cavity near a free surface [J]. Fluid Mech, 1981, 111: 123-140.

[9] Mader C L. Oscillations near the water surface, LA-4958 [R]. Los Alamos, USA: Los Alamos Scientific Laboratory, 1972.

[10] Craig B G. Experimental observation of underwater explosion near the surface, LA-5548-MS [R]. Los Alamos, USA: Los Alamos Scientific Laboratory, 1974.

[11] Kedrinskii V K. Surface effect from an underwater explosion (review) [J]. Shurnal Prikladni Mekhankiki Technicheski Fiziki, 1978, 4: 66-87.

Experimental Study on Shape and Evolution of Water Column Caused by Near Surface Explosion in Deep Water Area

LI Mei, WEI Ji-Feng, WANG Shu-Shan, MA Feng

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: In order to investigate the shape and evolution process of water column caused by a near surface explosion in deep water situation, underwater explosion experiments with 1 kg of RDX charge at different detonation depths are carried out using a high-speed camera. The evolution characteristics and parameters of water columns including the height, width and prominent time are obtained and compared with those published by Cole, Hole and Swisdak *et al*. The results show that vertical ejection is the main shape of water column, and a few additional radial ejections occur when the bubble reaches the free surface at its expanding phase. The maximum height of water column fluctuates with the explosion depth, while the width of water column decreases linearly. Empirical formula of water column height by Swisdak is not suitable to near surface underwater explosion in deep water situation.

Key words: underwater explosion; water column; detonation depth; high speed photography