

触、近水面爆炸自由场冲击波特性的试验研究

李润珊 易嘉钰 陶崇铸* 沈国光**

(海军工程设计研究局,北京 100841)

(*海司防化研究所,北京)

(**天津大学,天津 300072)

摘要 本文通过药量为 0.05kg 至 32kg TNT 的触、近水面化爆试验,介绍了空中、水中冲击波的测量方法和传播特性,并总结出一些计算冲击波参数的实用的经验公式。

关键词 冲击波 爆炸 自由面 压力测量

引言

触、近水面爆炸是破坏水中船舶、港口设施和水坝等结构物的有效方式,它不仅激起大的水柱和表面波浪,而且产生破坏力很强的冲击波。摸清此种爆炸条件下冲击波的特性和传播规律是确定其破坏荷载的必要前提。这个问题,至今国内外研究得还较少,已发表的少量资料^{[1][2]}。不同作者差异较大,很难直接使用。我们于近期在野外现场进行了一次较大型的触、近水面化爆试验,又在实验水池进行了多次小药量试验,取得了大量冲击波实测资料。在此基础上,探索了触、近水面爆炸冲击波在水面和水中的传播规律,得出了一些实用的经验公式,并与国外某些类似试验结果作了对比。

一、试验情况概述

野外现场试验水域面积为 $30 \times 60 \text{m}^2$,试验区水深 $3.5 \pm 0.1 \text{m}$ 。药包用每块 200g 的压铸块状炸药捆扎成近似球形结构,重量分别为 1、4、8、16、32kg,爆炸比高分别为 0、20、60、120($\text{cm}/\text{kg}^{1/3}$)。在距爆心投影点水平距离 6~15.4m 范围内若干断面上,分别在水面和水深 0.6、1.6、2.6m 处测量空气和水中冲击波压力。试验有效炮数共 51 炮。

为补充现场试验数据的不足,又在实验水池进行了四次试验。水池直径 80m,中心水深 15m。使用铸装梯恩梯球状装药,药球重量分别为 50、100、300、500、1000g。爆炸比高与现场试验相同。共试验 100 多炮,测点布置如图 1。

空气和水中冲击波压力测量均采用压电晶体传感器。传感器在使用前用 50g 梯恩梯标准药球进行了爆炸动态标定。记录仪器分别采用磁带记录仪和 TCED 瞬态记录仪,经微机处理后打印,并由 D-8CP X-Y 绘图仪直接绘出压力-时间过程曲线。

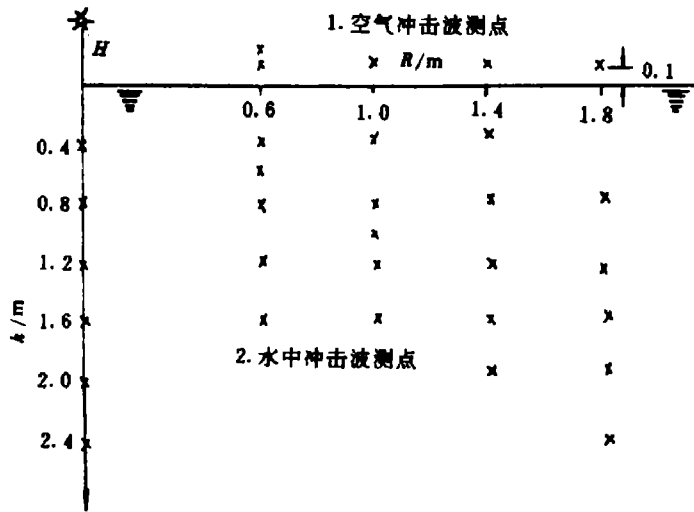


图1 水池试验冲击波压力测点布置

Fig. 1 Distribution of pressure measurement points in pool experiment

1. Measurement points of air shock wave, 2. Measurement points of underwater shock wave

二、测试结果及分析

关于触、近水面爆炸及水上空中爆炸的定义,一般指 $0 \leq \bar{H} \leq 15 \text{cm/kg}^{1/3}$ 为触水面爆炸, $15 < \bar{H} \leq 60 \text{cm/kg}^{1/3}$ 为近水面爆炸, $\bar{H} > 60 \text{cm/kg}^{1/3}$ 为水面空爆。本文触水面爆炸是在球形药包下缘与水面相接触的条件下进行的 ($\bar{H} = 0$)。近水面爆炸是在 $\bar{H} = 20$ 和 $\bar{H} = 60 \text{cm/kg}^{1/3}$ 条件下进行的。而水面空爆则在 $\bar{H} = 120 \text{cm/kg}^{1/3}$ 时进行的,均与上述定义相符。

触、近水面爆炸时爆心附近呈现一个高温高压、气水耦合的十分复杂的状态,所产生的空气冲击波触及水面后,一方面向空气中反射回一个冲击波,同时向水中透射一个水击波。在反射冲击波的高压作用下,水气分界面向下、向外运动形成“弹坑”。爆炸与水面的相互作用的图象及波系如图2。

1. 空气冲击波

试验观测表明, $\bar{H} > 60 \text{cm/kg}^{1/3}$ 的水上空中爆炸,空气冲击波在水面上的传播规律大体和陆上空中爆炸相同,即出现规则反射区和非规则反射区。当比高 $\bar{H} = 60 \text{cm/kg}^{1/3}$ 时,这种规则反射和非规则反射的现象仍可测出。在规则反射区内的波形有两个峰(入射波和反射波),而非规则反射区测到的则是只有一个主峰的马赫波。其波阵面运动规律如图3所示。此时击波参数计算可借用陆上空爆

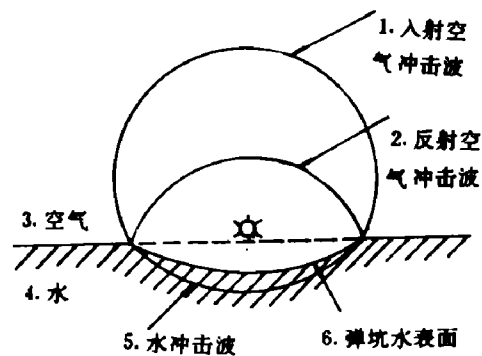


图2 近水面爆炸波系示意图

Fig. 2 Illustration of waves from explosion just above water surface

1. Incident air shock wave, 2. Reflected air shock wave, 3. Air, 4. Water, 5. Underwater shock wave, 6. Surface of crater.

的公式。

触水或近水面爆炸时(本试验为 $\bar{H} = 0.20 \text{m/kg}^{1/3}$)，空气冲击波已不再有规则反射区，而以合成的马赫波沿水面向外传播，其传播规律和地面爆炸时基本相同。但在距爆心较近的区域： $\bar{R}_{\text{火球}} < \bar{R} < 10.8 \text{m/kg}^{1/3}$ 内 ($\bar{R}_{\text{火球}}$ 为火球比例半径)，由于冲击波和爆炸产物对水面的强烈作用，使水面运动变形，水面超压比地面爆炸超压减小约 15%。参考地面爆炸超压计算公式^[3]，可给出触、近水面爆炸水面空气冲击波参数经验计算公式。

峰值超压

当 $\bar{R}_{\text{火球}} < \frac{R}{W^{1/3}} \leq 10.8 \text{m/kg}^{1/3}$ 时

$$\Delta p_r = 0.9 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right) + 3.66 \left(\frac{W^{2/3}}{R^2} \right) + 11.9 \left(\frac{W}{R^3} \right) \quad (1)$$

当 $\frac{R}{W^{1/3}} > 10.8 \text{m/kg}^{1/3}$ 时

$$\Delta p_r = 1.06 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right) + 4.3 \left(\frac{W^{2/3}}{R^2} \right) + 14 \left(\frac{W}{R^3} \right) \quad (2)$$

正压作用时间

$$\tau_+ = 1.7 \times 10^{-3} R^{1/2} W^{1/6} \quad (3)$$

以上各式中， W 为药量 (kg)； R 为测点至爆心投影点水平距离 (m)；超压的单位为 10^2kPa ，以下同。峰值超压及正压作用时间随比例距离的变化曲线如图 4。

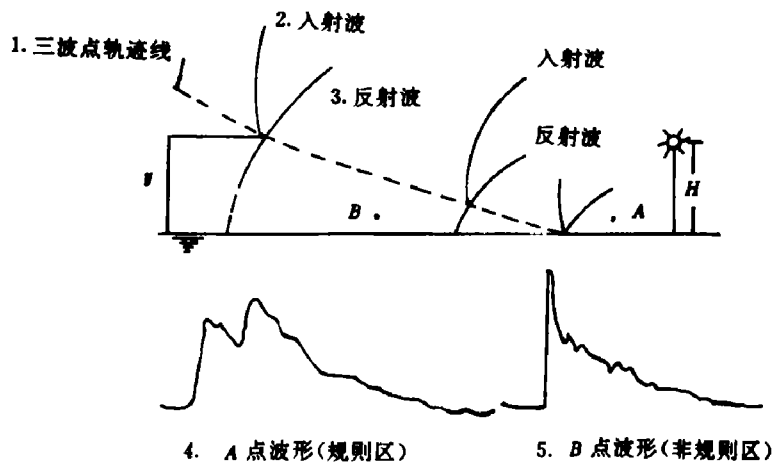


图 3 水上空中爆炸规则是与非规则反射示意图

Fig. 3 Illustration of regular and irregular reflections for explosion above the water surface

1. Locus of the triple point, 2. Incident shock wave, 3. Reflected shock wave,
4. Waveform at point A (regular region), 5. Waveform at point B (Irregular region).

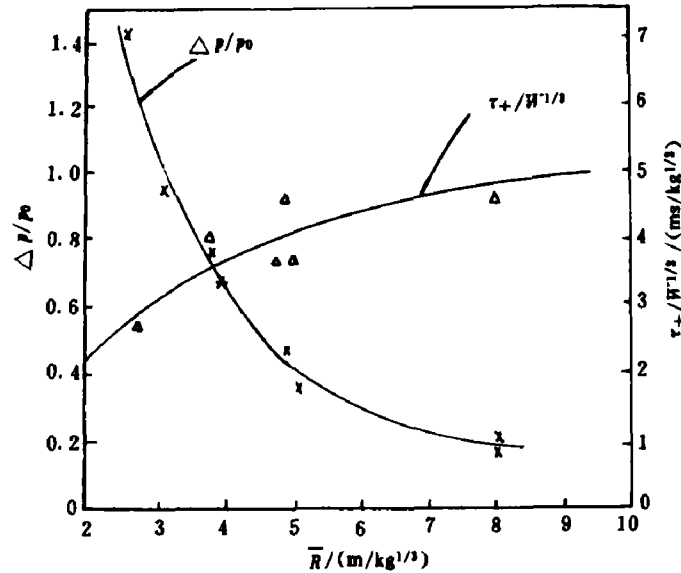


图4 水面反射超压和正压作用时间随比距的变化

Fig. 4 Variations of water surface reflected overpressure and positive overpressure action time with proportional distance

2. 水中冲击波

触、近水面空气中爆炸,在水中可以产生两种冲击波:直接冲击波和间接冲击波。前者是由于爆炸直接在水中产生并向水体深处传播的冲击波。后者是空气冲击波沿水面传播拍击水面而形成的。

1. 直接水中冲击波的传播和波形

观测资料的分析表明,当药包触水面爆炸时,在爆轰的瞬间,爆炸产物及初始冲击波作用于水体,使水面出现较深的“弹坑”,炸药的部分能量直接在水中释放,以此为爆源在水中形成强烈的冲击波向水体深处传播。其波阵面基本可视为以爆心投影点为球心的半球面,阵面峰值压力随传播距离的增大而减弱,但它不完全是一个等压面,由于受自由水面稀疏作用的影响,越临近水表面则波阵面上压力越低。其波形虽然在主脉冲前后可能有小的扰动,但很快回复到零位。实测波形见图5。

近水面非接触爆炸($15 < \bar{H} \leq 60 \text{cm/kg}^{1/3}$)时,水中冲击波的形成稍有不同。此时主要爆炸能量在空气中释放,但由于离水面较近,入射波及后随的反射波波后流场于不同时刻作用于水面各点,它们又以独立源的形式作用于水体,在爆心投影点区仍能造成能量的集中入射,形成水中冲击波。此时冲击波波形表现为在有前驱的情况下紧接着出现主脉冲,一般主脉冲出现在第二峰值处,且有较好的规律性。较典型的实测波形见图6。

当爆炸比高增加至 $60 \text{cm/kg}^{1/3}$ 以上时,水中冲击波接近于空气冲击波声学折射结果,其压力数值较小,且振荡较激烈。

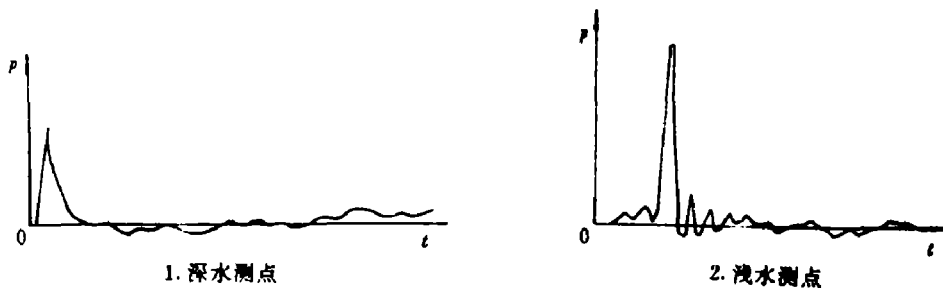


图5 触水面爆炸水中冲击波波形

Fig. 5 Waveform of the underwater shock wave for explosion on water surface

1. Deepwater measurement points, 2. Shallow water measurement points.

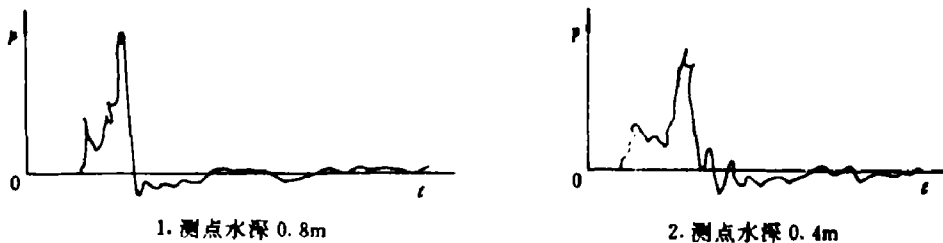


图6 近水面非接触爆炸(N=20)水中冲击波波形

Fig. 6 Waveform of the underwater shock wave for explosion above water surface (N=20)

1. Depth of measurement points 0.8m, 2. Depth of measurement points 0.4m.

2. 直接水中冲击波参数计算

(1) 触水面爆炸

1) 峰值压力

触水面爆炸,大部分能量用于形成空气冲击波和留于爆炸产物中,只有一小部分能量耦合到水中形成水中冲击波。因此,触水面爆炸水中冲击波的强度比相同药量在无限均匀水中爆炸小。爆炸能量进入水中的多少,和药包结构,药包重心离开水面的高度有密切关系。水面化爆向水下耦合能量的主要机制是高压对水面做功和动量耦合,可用有效能量耦合系数来描述。即当量为 W_0 的无限均匀水中爆炸在指定距离上所产生的力学参数(例如压力)峰值,与当量 W 的触水爆炸在爆心下方相同距离上所产生的同一力学参数峰值相等时,则定义 W_0 为无限均匀水中爆炸相对触水爆炸在该距离上的等效当量, $\xi = W_0/W$ 为有效耦合系数。我们通过试验,找到触水爆炸和无限均匀水中的爆炸之间的能量换算关系,即能量耦合系数 ξ ,由下式表示:

$$\xi = \frac{W_0}{W} = \begin{cases} 0.260 \left(\frac{W^{1/3}}{r} \right)^{0.41} & \frac{r}{W^{1/3}} \leq 5.42 \\ 0.13 & \frac{r}{W^{1/3}} > 5.42 \end{cases} \quad (4)$$

式中: r 为距爆点的斜距离(m); W_0 和 W 的单位为kg。由式(4)可知,能量耦合系数随离爆心的远近而变化,只有当水中冲击波传播到一定距离后,才近似为常数。

另外,由于水面产生的稀疏作用,使临近水面的水冲击波压力逐渐降低。由实验得出,直接水冲击波的峰值压力可以分成三个区计算:与过爆心铅垂方向夹角 α 在 32° 以内的区域为 I 区,此区内的峰值压力不受水面稀疏波的影响; 32° 至 65° 的区域为 II 区, 65° 至水面的区域为 III 区,II、III 区内的峰值压力受到水面稀疏波的影响。将上述能量耦合系数引入计算无限均匀水中爆炸冲击波峰值压力的库尔公式

$$p = 533 \left(\frac{W^{1/3}}{r} \right)^{1.13} \quad (5)$$

并根据实测数据进行回归分析,即可得到计算触水爆炸各区水中冲击波峰值压力的相应拟合公式。

在 I 区 ($0 < \alpha \leq 32^\circ$)

$$p_1 = \begin{cases} 321 \left(\frac{W^{1/3}}{r} \right)^{1.285} & \frac{r}{W^{1/3}} \leq 5.42 \\ 247 \left(\frac{W^{1/3}}{r} \right)^{1.13} & \frac{r}{W^{1/3}} > 5.42 \end{cases} \quad (6)$$

在 II 区 ($32^\circ < \alpha \leq 45^\circ$)

$$p_{II} = p_1 [\cos(\alpha - 32^\circ) + 0.5 \sin(\alpha - 32^\circ)]^{4.5} \quad (7)$$

在 II - III 区 ($45^\circ < \alpha < 90^\circ$)

$$p_{II-III} = p_1 [1.2 \cos(\alpha - 32^\circ) + 0.1 \sin(\alpha - 32^\circ)]^{2.1} \quad (8)$$

由(6)~(8)式可绘制出不同药量触水爆炸时水中冲击波的等压线图。图 7 为 0.05kg 梯恩梯触水爆炸的等压线图。可以看到,在与铅垂轴成 45° 角的方向压力衰减最慢。此结果与文献[1]、[2]给出的数据和规律是大体符合的。

2) 正压作用时间

实验得出,水中冲击波的正压作用时间可用下式近似计算

$$\tau_+ = 2.22 \times 10^{-5} W^{0.083} r^{0.75} \quad (s) \quad (9)$$

压力随时间的变化

$$p(t) = p_0 e^{-(1/\omega)(t-r/c_1)} \quad (10)$$

式中: p 为峰值压力; t 为从爆炸算起的时间(s); c_1 为水中冲击波速度(m/s); ω 为时间常数(ms),由下式确定

$$\omega = 0.045 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{r} \right)^{-0.22} \quad (11)$$

(2) 近水面非接触爆炸

1) 峰值压力

当炸药离开水面一定高度爆炸时,随比高的增加,耦合到水中的能量减少。因而,水中压力场也随之减弱。在 $20 \leq H < 60 \text{cm/kg}^{1/3}$ 范围内,水中冲击波压力按下式计算:

在 I 区

$$p_H = p_0 e^{-0.04H} \quad (12)$$

在 II、III 区

$$p_H = p_0 e^{-0.075H} \quad (13)$$

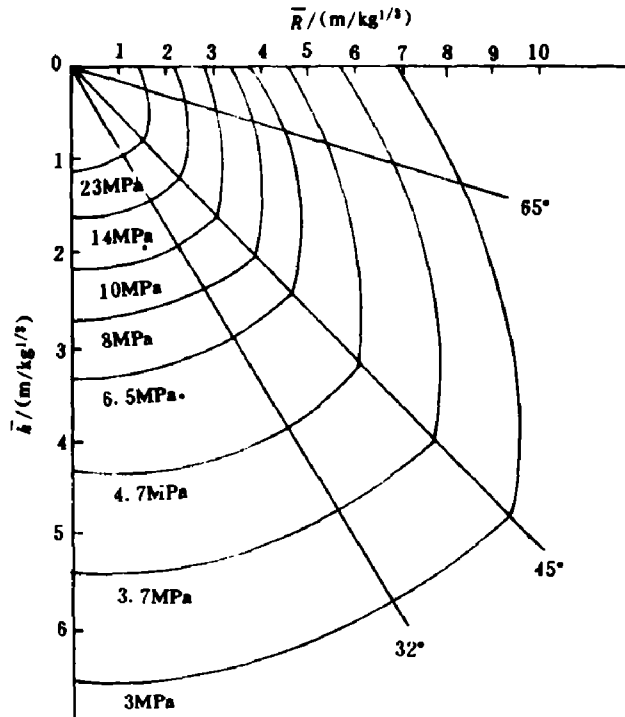


图 7 0.05kg 梯恩梯触水爆炸水冲击波等压线图
 Fig. 7 Isobar of underwater shock wave for explosion on water surface with 0.05kg TNT

式中 p_n 为比高 H 时, 观测点的峰值压力; p_0 为触水面爆炸时观测点的峰值压力, 由 (6) — (8) 式确定。

2) 正压作用时间

近水面非接触爆炸时, 爆心投影点周围均形成新的波源, 这些新波源的波到达观测点的时间不尽一致, 互相叠加, 使波形不规则, 作用时间较触水面爆炸稍长。

三、讨论和结语

本文所使用的实测数据的精度, 主要由以下误差决定: 传感器标定误差为 3%, 记录系统误差为 3%, 测点位置和药包布设误差约 5%, 由此而合成的综合误差约在 10% 以内。

概括以上论述, 可得到以下两点看法:

1. 触、近水面爆炸时, 水面不可再看作刚性平面, 空气冲击波在水面上的反射超压比用陆上地面化爆的经验公式计算值约小 15%, 可用本试验总结的经验公式计算。
2. 触、近水面爆炸水中冲击波压力, 可利用能量耦合法得出的经验公式计算, 计算值和实验值基本符合。触水面爆炸的能量耦合系数在近距离内随距离而变化, 当 $\bar{r} > 5.42 \text{ m/kg}^{1/3}$ 后基本稳定在 0.13 左右。

参 考 文 献

- [1] Peckhom P. J. , Air-to-Water Blast Wave Transfer, AD-AO43898, (1976).
- [2] Michael M. Swisdak Jr Explosion Effects and properties, part I -Explosion Effects in Wafer, AD-AO 56694, (1978).
- [3] 北京工业学院编:爆炸物理基础,国防工业出版社,(1979).
- [4] 萨·格拉斯顿,核武器效应,国防工业出版社,(1977).
- [5] W. E. 贝克,空中爆炸,原子能出版社,(1981).

**EXPERIMENTAL STUDIES OF SHOCK PROPERTIES
GENERATED BY EXPLOSIONS ON OR JUST
ABOVE WATER SURFACE IN FREE FIELD**

Li Runshan, Yi Jiayu , Tao Chongzhu* , Shen Guoguang* *

(*Navy Engineering Design and Research Bureau, Beijing*)

(* *Antichemical Institute of Navy Command, Beijing*)

(* * *Tiang Jing University, Tiangjing*)

ABSTRACT This paper discusses the measurement techniques and the propagation properties of the air and underwater shock waves induced by chemical explosions on or just above water surface. The charge of the explosions is within the range of 0.05—32kg TNT. Some shock wave, parameters and empirical expressions are also summarized for practical calculation .

KEY WORDS shock wave , explosion, free surface, pressure measurement.