

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.03.030

利用气泡脉动周期估计水下爆炸当量和深度的方法研究

王燕^{1,2}, 刘哲函², 李健², 邹士亚¹, 王晓明², 唐伟², 南德²

(1. 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205;

2. 禁核试北京国家数据中心和北京放射性核素实验室, 北京 100085)

摘要: 水下爆炸当量和深度估计是全面禁止核试验条约(CTBT)国际监测系统(IMS)水声监测的一项重要任务。为有效估计海域内爆炸事件的当量和深度,在使用气泡脉动周期半经验公式的基础上,综合利用水下爆炸气泡脉动第一次、第二次周期比值与气泡半径、深度的关系信息,估计了近、远场的水下爆炸当量和深度,对不同当量、爆炸深度的近场水下爆炸分析结果为:100 g TNT、7 m爆炸深度条件下,估计当量均值约118 g、估计深度均值约7.96 m;100 g TNT、25 m爆炸深度条件下,估计当量均值约76 g,估计深度均值约21.4 m;1 kg TNT、50 m爆炸深度条件下,估计当量均值约1.23 kg、估计深度均值约44 m。上述分析结果表明:采用的联合估计方法对深度的估计要比对当量的估计更为准确。进一步分析可知:对于50 m爆炸深度、100 g TNT小当量的爆炸信号来说,该方法未能给出估计结果,这表明该方法估计水下爆炸当量是在爆炸深度上受限的。最后对IMS水声台站记录的远场水下爆炸事件进行了分析,其当量、深度估计结果与参考文献一致,这说明该方法同样适应于对远场爆炸信号的估计。

关键词: IMS水声台站;水下爆炸;气泡脉动周期;当量估计

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)03-0217-08

Estimation of Equivalent and Depth of Underwater Explosion Using Bubble Pulsation Periods

WANG Yan^{1,2}, LIU Zhe-han², LI Jian², ZOU Shi-ya¹, WANG Xiao-ming², TANG Wei², NAN De²

(1. State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China;

2. CTBT Beijing National Data Centre and Beijing Radionuclide Laboratory, Beijing 100085, China)

Abstract: The estimation of equivalent and depth of underwater explosions is an important task of the hydroacoustic monitoring in the International Monitoring System(IMS) of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty(CTBT). In order to effectively estimate the equivalent and depth of underwater explosion in near and far-fields, the relationship between the ratio of the first and second periods of the bubble pulsation and the bubble radius and depth was fully used based on the semi empirical formula of bubble pulsation period. The analysis results of near-field underwater explosion show that the average estimated equivalent and depth are about 118 g and 7.96 m, 76 g and 21.4 m, 1.23 kg and 44 m for different actual TNT equivalent values and blasting depths of 100 g and 7 m, 100 g and 25 m,

收稿日期(Date of reception): 2022-04-28

网络首发日期(Published online): 2023-05-09

作者简介: 王燕(1981-), 女, 硕士、助理研究员, 主要从事水下爆炸信号处理与分析, (E-mail) wang.yan@ndc.org.cn。

通讯作者: 邹士亚(1963-), 男, 研究员, 主要从事核爆现象与效应研究, (E-mail) zsy81791@126.com。

About the author: WANG Yan(1981-), female, master degree, research assistant, mainly engaged in research on underwater explosion signal processing and analysis, (E-mail) wang.yan@ndc.org.cn.

Corresponding author: ZOU Shi-ya(1963-), male, researcher, mainly engaged in research on nuclear explosion phenomena and effects, (E-mail) zsy81791@126.com.

1 kg and 50 m, respectively. These results show that the depth estimation is more accurate than the equivalent estimation. Furthermore, the proposed method failed for a small explosion equivalent of 100 g and a depth of 50 m, which indicates that the method is limited in explosion depth. Finally, this method was used to analyze the far-field underwater explosions recorded by IMS hydroacoustic stations, and the equivalent and depth estimation results were consistent with the references, which indicated that this method is also suitable for the far-field explosion estimation.

Key words: IMS hydrophones station; underwater explosion; bubble pulsation period; equivalent estimation

为有效监测全球可能发生的违约核爆炸,依据全面禁止核试验条约(CTBT)^[1]建立覆盖全球的国际监测系统(IMS),采用地震、水声、次声和放射性核素等四种核查技术手段,常年不间断地监测全球可能发生的违约事件。其中水声监测技术采用的水声台站包括6个水听器台站(H-相台站)和5个T-相台站,用于监测广阔海域水上或水下以及小岛或沿海区域发生的核爆炸事件。如何通过接收的水声信号判断出事件性质(天然或是爆炸),并进一步给出爆炸事件分析结果,如爆炸发生时间、位置,尤其是爆炸当量是CTBT水声监测技术领域研究的重点。

水下爆炸能量主要释放方式为冲击波能量和气泡能量,爆炸特性会随着爆炸条件的不同而发生变化。水下爆炸产生的气泡,其膨胀和收缩会产生一系列的气泡脉动:第一个脉冲来自于爆炸,第二个脉冲来自于气泡的坍塌,第三个脉冲来自于气泡又一次的扩张,如此反复。国内外研究学者就水下爆炸产生的气泡特性、理论及规律进行了广泛研究:J P Slifko 通过大量的海上实验对深水爆炸载荷的特性进行了细致的研究^[2],给出了各类炸药深水爆炸冲击波压力、气泡脉动压力的特征参数与水深、比距离等参数的关系。R H Cole 在其《水下爆炸》一书中给出了260 m深度内的气泡脉动周期与水深关系的实验结果^[3]。梁浩哲用AUTODYN模拟了球形炸药在不同深度水中的爆炸过程^[4],通过模拟得到了冲击波的压力衰减过程和气泡振荡周期。孟龙模拟了小当量TNT炸药在不同深度爆炸下的气泡脉动现象^[5],得到了气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径与爆炸深度之间的关系。马坤^[6]、张颖在模拟深水环境下进行了不同当量的爆炸实验^[7],利用高速摄像系统得到了气泡脉动过程的图像,分析气泡脉动周期同模拟水深的关系以及气泡半径随时间的变化关系。从这些研究中可以得出水下爆炸深度与气泡振荡周期和半径的关系以及气泡能量与当量的关系。气泡脉动实验表明气泡脉动周期与爆炸的当量和深度存在一定的关系^[8-10],即气泡脉动周期与炸药当量 $1/3$ 次方成正比,与大气压力折算深度及爆炸深

度之和的 $5/6$ 次方成反比。理论上可用此关系来估计水下爆炸的当量,但由于爆炸的第一次气泡脉动周期不只是由深度和当量决定的,单靠半经验关系不能同时求解出当量和深度的,因此还需要其他信息来进行补充求解。

分别对近、远场水下爆炸实验的信号进行分析,提取并估计了水下爆炸声信号的第一次、第二次气泡脉动周期,充分利用其比值与气泡半径、深度的关系信息,联合第一次气泡脉动周期的半经验公式估计了近、远场水下爆炸实验的当量和爆炸深度。

1 水下爆炸气泡脉动过程

水下爆炸主要由装药爆轰、冲击波产生与传播以及气泡脉动三阶段组成,从图1可以看出气泡脉动过程包括了气泡的膨胀、收缩、坍塌及向自由表面漂移等一系列复杂的运动形式^[11]。气泡经历一系列扩张和收缩,形成一系列时间延迟的脉冲声信号^[12,13]。脉动周期 T_1 、 T_2 、 T_3 等都与水下爆炸深度和当量有关。

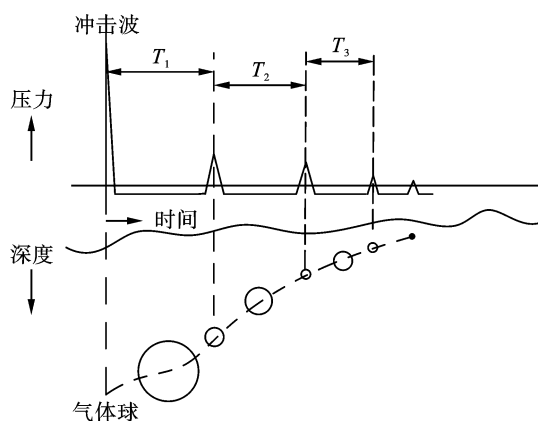


图1 水下爆炸气泡脉动过程^[11]

Fig. 1 Bubble pulsation process of underwater explosions^[11]

1.1 第一次脉动周期与当量的关系

第一次气泡脉动周期 T_1 和爆炸深度及当量的关系可用半经验公式表示^[14]

$$T_1 = K \left(\frac{Y^{1/3}}{(Z + 10.1)^{5/6}} \right) \left(1 - \frac{R_1}{5Z} \right) \quad (1)$$

式中: T_1 为第一次气泡脉动周期,s; Y 为爆炸当

量,kg; Z 为爆炸深度,m; K 为爆炸类型决定因子,对于TNT炸药, $K=2.11$; R_1 为气泡第一次扩张达到的最大气泡半径,m,它与深度、当量的关系为^[14]

$$R_1 = 3.4 \left(\frac{Y}{Z + 10.1} \right)^{1/3} \quad (2)$$

式(1)中第2个括号项是考虑到海洋表面气泡脉动影响的修正系数,一般不列出此项。从该式可以看出,水下爆炸气泡的脉动周期随爆炸当量 Y 的增大而增大,随水深的 Z 增加而减小^[15]。

根据公式(1)绘出了第一次气泡脉动周期与爆炸深度、当量的关系示于图2,其中横坐标代表当量,纵坐标代表深度,图中曲线代表以2为底的周期对数值。上红色线表示 $Z_1 = 2R_1$,即第一次气泡扩张的最大半径等于爆炸深度的一半,这条线以下代表式(1)中修正系数大于0.9,该修正系数可以忽略。从该图中可以看出,该线以下气泡周期与当量和深度有近似直线的关系,这代表气泡能够完成一次完整的脉动过程,可有效提取第一次脉动周期。通过式(1)可计算已知爆炸当量和深度下的气泡脉动周期,但相反,已知脉动周期,却不能确定唯一的爆炸当量和深度。例如图中所示,周期值为 2^{-2} s的曲线来说,可对应深度为20 m的10 kg TNT的爆炸,也可对应500 m深度下10 000 kg TNT的爆炸。下红色线表示 $Z_2 \approx 75Y^{1/3}$,红色线以上代表受浮力影响,气泡上升较明显,可以有效完成两次气泡脉动。为了避免使用(1)式估计当量和深度的不确定性,有效利用前两次脉动周期的比值获得更多的信息,因此将该方法限定于爆炸深度在 Z_1 和 Z_2 之间的范围内。

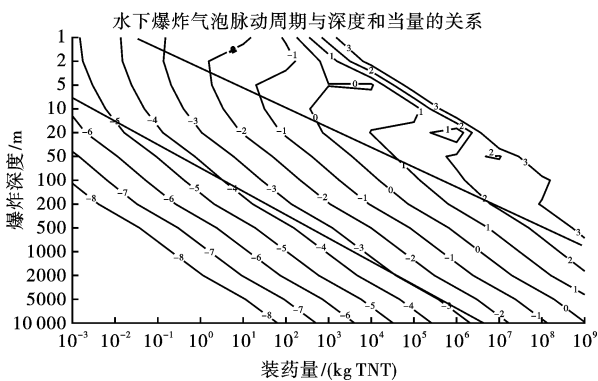


图2 气泡脉动周期与爆炸当量、深度的关系

Fig. 2 The relation between bubble pulse period and explosive equivalent and depth

1.2 当量、深度的关系限定

第一次气泡脉动结束时,气泡坍塌紧接反弹,气

泡会再次扩张,然后再次收缩(坍塌)。第二次坍塌与第二个气泡脉动的转换有关,气泡第一次坍塌到第二次坍塌为第二次气泡脉动周期,第一次气泡脉动期间,浮力导致气泡上升,使得第二次气泡脉动初始深度不同于爆炸深度。图3表示在压缩和扩张不同阶段脉动气泡的压力信号示意图,其横坐标代表最大气泡半径和爆炸深度的比值,纵坐标代表第二个气泡脉动周期与第一个气泡脉动周期的比值,该图的数据来源于文献[14]。

图3显示 T_2/T_1 与 R_1/Z 有关。对于 Z_1 远大于 R_1 的情况,周期的比收敛到0.7,在这种情况下,爆炸和二次脉动期间气泡上浮的影响是微不足道的,比值 T_2/T_1 中不能提取有用信息,这也是为什么要在图2中限定深度要在下红线以上的原因。如果第一个和第二个气泡脉动周期能从爆炸产生的声信号中测量得到,那么从这些周期的比值中可以估计出 R_1/Z 的值。通过(1)、(2)两个式子的联立可估计出爆炸的当量和深度。具体计算步骤如下:

- (1) 分别估计爆炸的第一次和第二次气泡脉动周期 T_1, T_2 ,并计算周期比值 T_2/T_1 ;
- (2) 判断比值是否在限定范围内,即若周期比值大于0.7,则利用图3的线性关系,计算得到 R_1/Z ;若比值小于或等于0.7,则计算失败;
- (3) 获得 R_1/Z 比值后,通过式(2)可以得出深度与当量的关系;
- (4) 已知周期 T_1 的值,根据式(1)得到深度与当量的关系;
- (5) 联立以上获得的两个深度与当量关系式,可估计当量 Y 和深度 Z 。

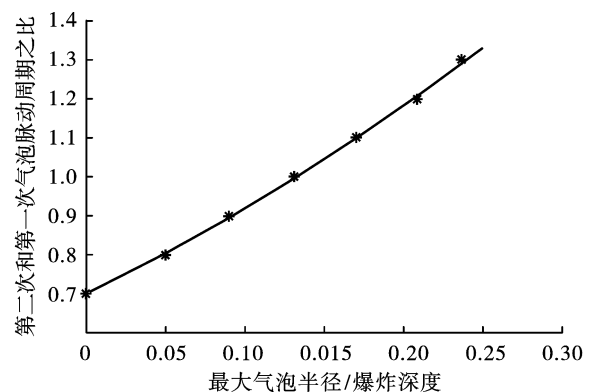


图3 第二个气泡脉动周期和第一个气泡脉动周期的比值与最大气泡半径和爆炸深度比值的线性关系

Fig. 3 Relation between the ratio of the second and first bubble pulse periods and the ratio of the max bubble radius and detonation depth

2 实验及结果分析

2.1 近场源级标定数据分析

中科院声学所为了研究水下爆炸声源的源级标定技术,依托152厂制作了不同装药量的TNT炸药包,在海上进行一系列不同深度的水下爆炸实验,其中包括7 m、25 m及50 m深的100 g TNT当量以及50 m、300 m深1 kg TNT当量的实验,本文此数据来源于与声学所的合作项目。由于是近场实验(接收距离20~50 m),布置在船头下的垂直线阵(包含3个水听器)接收到典型的水下爆炸时程曲线如图4所示,7 m深水下爆炸的历时曲线,冲击波、二次脉动、三次脉动非常清晰,也能看到他们各自的反射波。

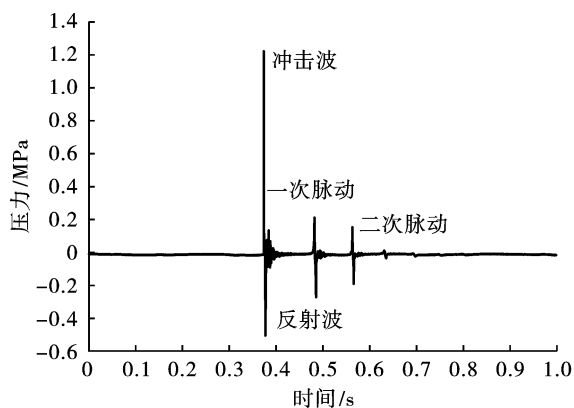


图4 100 g TNT水下7 m爆炸压力曲线

Fig. 4 Pressure curve of 100 g TNT underwater explosion with a depth of 7 m

对波形数据进行分析,拾取不同深度及当量波形的第一次气泡脉动周期,并将1 kg TNT当量的实验数据归一到100 g TNT当量,得到气泡脉动周期随深度的变化趋势示于图5。从图中可以看出,历次实验的气泡脉动周期是随深度衰减的,并且衰减趋势与气泡脉动周期的半经验关系符合较好。

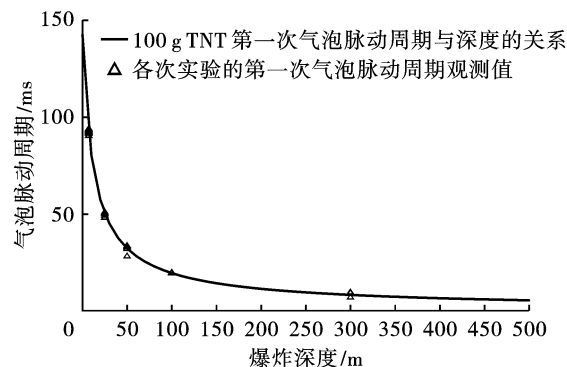


图5 100 g TNT炸药产生气泡脉动周期与爆炸深度的关系

Fig. 5 Relationship between bubble pulsation period and explosion depth of 100 g TNT

对7 m和25 m深的100 g TNT当量的水下爆炸进行了一次、二次气泡脉动周期拾取,并计算周期比,结果列于表1~表2(分别列出前9组数据)。从表中可以看出,周期比值皆大于0.7,说明两个深度及当量的关系是在限定范围内,可以利用周期比的信息来限定当量和深度的关系,联立两个方程进行水下爆炸和当量的估计,估计结果如图6~图9所示。对于19次共57组的水下7 m爆炸来说,估计的当量均值为118 g(图中蓝色虚线表示,下同),标准差为5.38 g,估计的深度均值为7.96 m,标准差为0.29 m;对于16组的水下25 m爆炸来说,估计的当量均值为76 g,标准差为24.6 g,估计的深度均值为21.4 m,标准差为4.58 m;从7 m和25 m深的水下爆炸当量和深度估计结果看,25 m深的爆炸当量和深度估计值没有7 m的准确,这是由于25 m的水下爆炸两次气泡脉动周期的比值靠近实验室数据的收敛值0.7,并且与深度下限值 Z_2 较为接近,导致气泡二次脉动的周期测量不准确,因此其当量和深度的估计偏差较大。

表1 100 g TNT当量水下7 m深度爆炸的气泡脉动周期及比值

Table 1 Bubble pulsation periods and ratio of T_1/T_2 for 100 g TNT underwater explosion with a depth of 7 m

参数	1组	2组	3组	4组	5组	6组	7组	8组	9组
周期 T_1 /ms	92.90	93.04	93.11	93.46	93.67	93.67	91.79	91.97	91.980
周期 T_2 /ms	80.77	80.88	80.92	81.11	81.10	81.23	79.76	79.86	79.905
比值 T_1/T_2	0.8694	0.8693	0.8691	0.8679	0.8658	0.8672	0.8692	0.8683	0.8687

表2 100 g TNT当量水下25 m深度爆炸的气泡脉动周期及比值

Table 2 Bubble pulsation periods and ratio of T_1/T_2 for 100 g TNT underwater explosion with a depth of 25 m

参数	1组	2组	3组	4组	5组	6组	7组	8组	9组
周期 T_1 /ms	50.01	50.11	50.08	50.05	50.91	50.99	50.98	49.25	49.30
周期 T_2 /ms	37.30	37.50	37.72	37.95	37.57	37.79	37.78	36.35	36.25
比值 T_1/T_2	0.7458	0.7480	0.7531	0.7582	0.7379	0.7412	0.7411	0.7381	0.7353

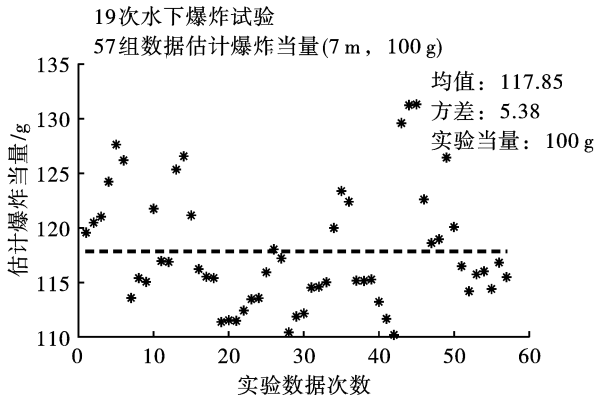


图6 100 g TNT 水下7 m 爆炸的当量估计
Fig. 6 Equivalent estimation for 100g TNT underwater explosion with a depth of 7 m

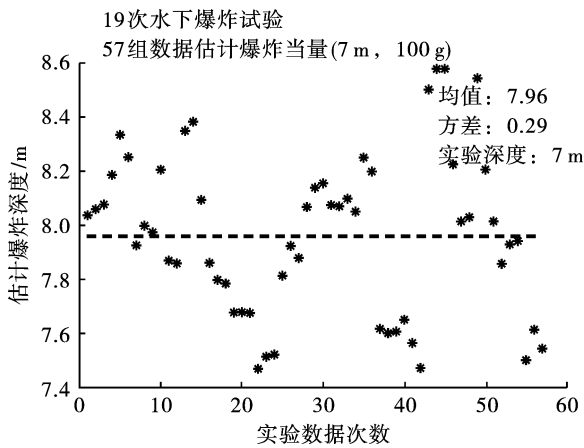


图7 100 g TNT 水下7 m 爆炸的深度估计
Fig. 7 Depth estimation for 100 g TNT underwater explosion with a depth of 7 m

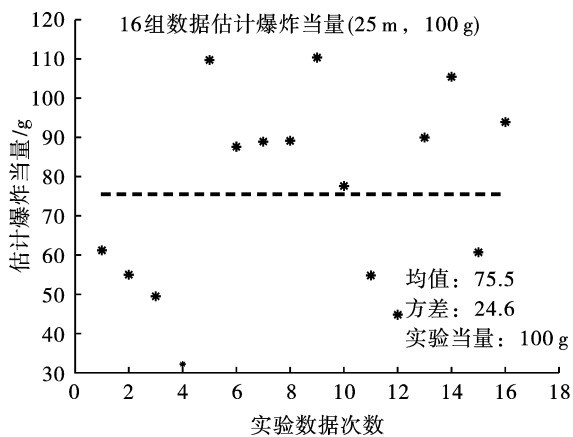


图8 100 g TNT 水下25 m 爆炸的当量估计
Fig. 8 Equivalent estimation for 100 g TNT underwater explosion with a depth of 25 m

为进一步验证该方法的适用范围,分别对100 g TNT 当量和1 kg TNT 当量水下50 m 深度的爆炸进行了分析。由于100 g TNT、50 m 深度的爆炸不在图2 红线范围之内,不能很好地得到第二次气泡脉

动周期,如图10 所示,仅能清晰的看出冲击波和第一次气泡脉动,得不到清晰的二次脉动,即第二气泡脉动周期无法准确测量,因此使用该方法对当量和深度估计失效。对其中一些实验数据进行仔细分析,发现能识别出前两次气泡脉动的周期比也小于0.7,这样不能获取更多的信息进行方程联立,无法求取当量和深度。对于1 kg TNT、50 m 深度的水下爆炸试验,其深度在两条红线之间,因此采用该方法对12 组数据进行了计算,计算结果如图11~12 所示:估计的当量均值为1.23 kg,标准差为6.15 g,估计的深度均值为44 m,标准差为1.51 m。从7 m、25 m 以及50 m 的水下爆炸信号分析来看,结果都显示对该方法对深度的估计要比当量的估计准确性要高,这是因为式(1)中气泡脉动周期对深度变化的灵敏度要高于度爆炸当量的估计灵敏度。因此,使用脉动周期确定爆炸深度比确定爆炸当量更精确。

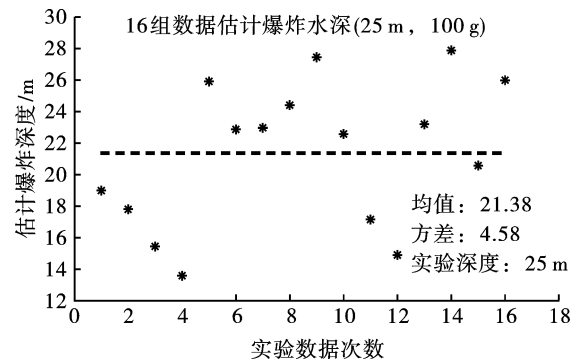


图9 100 g TNT 水下25 m 爆炸的深度估计
Fig. 9 Depth estimation for 100 g TNT underwater explosion with a depth of 25 m

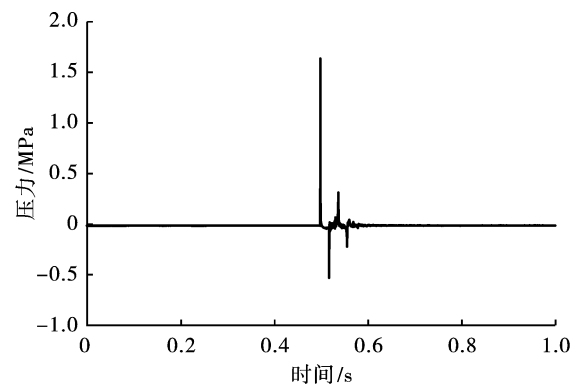


图10 100 g TNT 水下50 m 深度爆炸压力曲线
Fig. 10 Pressure curve for 100 g TNT underwater explosion with a depth of 50 m

2.2 远场水下爆炸数据分析

位于比奥/查戈斯群岛的HA08S 台站三个子通道均记录到了2008 年11 月10 日澳大利亚西部卡那封郡城市近海岸区域的爆炸信号,图13 示出了子

通道 H08S1 记录信号的时域波形和频谱。从图中看出,该信号的初至幅值很大、衰减很快,信号的频谱分布很宽,从 5 Hz 到 100 Hz 能量都很强,水下爆炸信号的特征明显。假设该爆炸类型是 TNT 炸药,由于是远场信号(距离大约 4700 km),不能直接从波形上识别出气泡脉动周期,因此采用倒谱技术对该信号进行时间延迟计算,图 14 显示了该信号的倒谱特征分析,可以看出水下爆炸信号的前三次气泡脉动周期,第一个峰对应的时间为 0.460 s,第二个峰值对应的时间为 0.890 s,第三个峰值对应的时间为 1.330 s。由此得到,第一个气泡脉冲周期为 0.460 s,第二气泡脉冲周期为 0.430 s,因此 T_2/T_1 为 0.9348,由图 3 可以得到 R_1/Z 的值,联立式(1)和式(2),可以得到该信号的爆炸当量为 379 kg TNT,深度为 57 m。与文献[16]估计的当量值 360 kg TNT、深度 55 m 一致性较好。

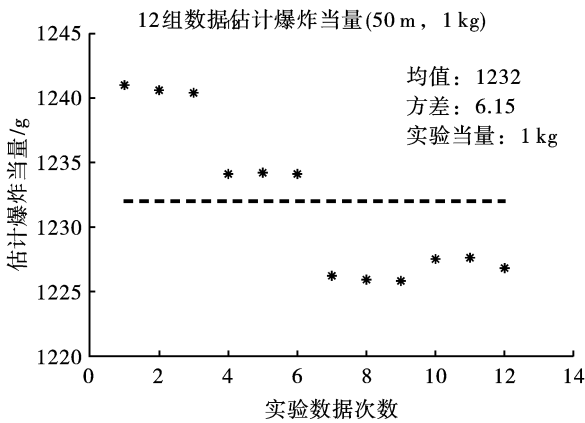


图 11 1000 g TNT 水下 50 m 爆炸的当量估计
Fig. 11 Equivalent estimation for 1000 g TNT underwater explosion with a depth of 50 m

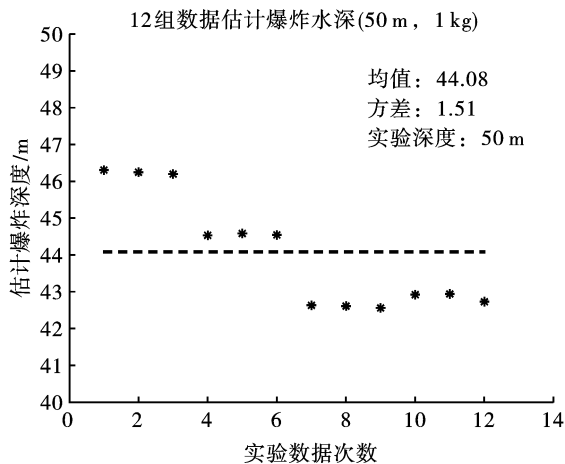


图 12 1000 g TNT 水下 50 m 爆炸的深度估计
Fig. 12 Depth estimation for 1000 g TNT underwater explosion with a depth of 50 m

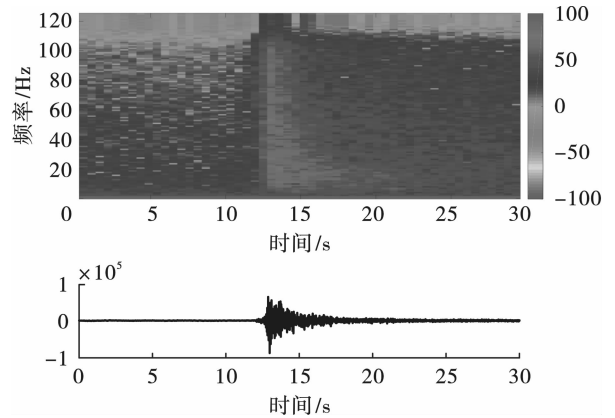


图 13 H08S 台记录的 2008 年 11 月 10 日爆炸信号的时域、频谱图

Fig. 13 Wave and spectrum gram of an underwater explosion signal recorded by H08S on 2008. 11. 10

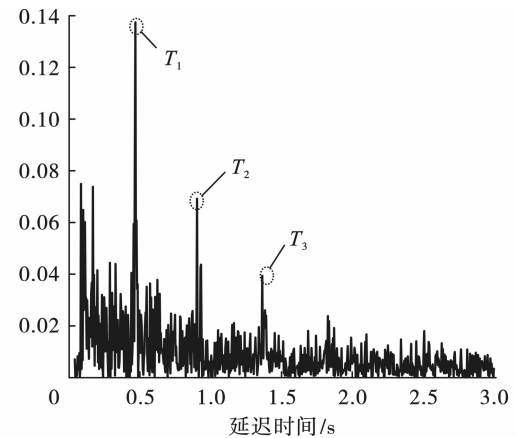


图 14 2008 年 11 月 10 号 H08S 记录爆炸信号的倒谱特征
Fig. 14 Cepstral feature of underwater explosion signal recorded by H08S on 2008. 11. 10

2017 年 11 月 15 日阿根廷圣胡安号潜艇在位于阿根廷瓦尔德斯半岛大约 430 km 的南大西洋海域失联(经纬度为[46°S,60°W])。事发后全面禁止核试验条约组织(CTBTO)筹委会临时技术秘书处(PTS)官员宣称 IMS 水声台站 HA10 和 HA04 台记录到潜艇失联位置附近海域的可疑爆炸信号。为了更好地搜寻失事潜艇,2017 年 12 月 1 日,阿根廷海军在潜艇失联位置附近投放 Mark 54 型爆炸声弹,爆炸位置经纬度为[45.6°S,59.4°W],其深度约为 35 m,爆炸当量约为 108 ~ 168 kg TNT^[17,18]。同样,HA10N 和 HA04S 水声台站记录到此次爆炸信号,由于这两个台站距离爆炸源位置的距离大于 6000 km,尤其是 HA04 台距离更远,因此仅 HA10 台能够得到比较清晰的气泡脉动周期,如图 15 所示,第一个峰对应的时间为 0.456 s,第二个峰值对应的时间为 0.912 s。由此得到,第一个气泡脉冲周期为 0.456 s,第二气泡脉冲周期为 0.456 s,因此

T_2/T_1 为 1.0,由图 3 可以得到 R_1/Z 的值,联立式(1)和式(2)估计出此次爆炸的当量约为 167 kg TNT,深度约为 39 m,与报道的当量和深度一致性较好。

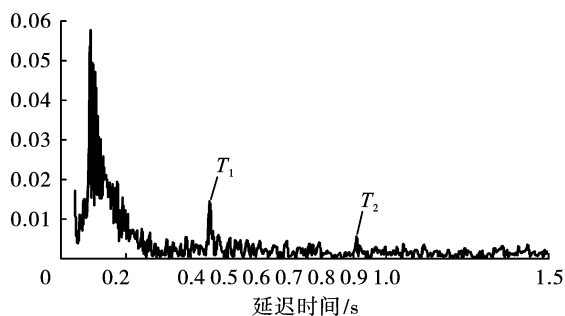


图15 2017年12月1号H10N记录爆炸信号的倒谱特征
Fig. 15 The cepstral feature of underwater explosion signal was recorded by H10N on 2017. 12. 1

3 结论

本文通过一系列近、远场水下爆炸信号的分析,提取并估计了爆炸产生的前两次气泡脉动周期,基于水下爆炸气泡脉动周期半经验公式,利用这两次周期比值与气泡最大半径和深度的比值关系,联合估计了水下爆炸的当量和深度。

(1)对不同深度、不同当量的近场小当量水下爆炸信号进行气泡脉动周期提取,并将炸药质量归一化到 100 g,得到第一次气泡脉动周期与深度的关系,与传统半经验关系进行对比表明其衰减趋势一致,验证了气泡脉动周期半经验公式对小当量水下爆炸的有效性;

(2)对一系列近场小当量水下爆炸的估计,结果表明在一定范围内($Z_1 = 2R_1$ 与 $Z_2 \approx 75Y^{1/3}$ 之间),可以估计水下爆炸当量和深度,且估计的深度值要比当量值更为准确,超出此范围较难甚至无法估计水下爆炸当量和深度,说明采用该气泡脉动周期方法估计水下爆炸当量的方法是在深度上受限的。

(3)对 IMS 台站监测到的两次远场的水下爆炸进行了分析,采用倒谱技术提取其气泡脉动周期,其当量、深度估计结果与参考文献一致,这说明该方法同样适应于对远场爆炸信号的估计。

参考文献 (References)

- [1] Document A/50/1027 of United Nations. Comprehensive nuclear-test-ban treaty[M]. New York:1996.
- [2] SLIFKO J P. Pressure-pulse characteristics of deep explosions as functions of depth and range[R]. AD-661840, 1967.
- [3] COLE R H. Underwater explosion[M]. New Jersey: LI-SA, Princeton University, 1948.
- [4] 梁浩哲,杨 莉,张庆明.深水条件下 TNT 炸药的爆炸特性[J].兵工学报,2016,37(2):241-245.
- [4] LIANG Hao-zhe, YANG Li, ZHANG Qing-ming. The explosive characteristics of TNT under deep water[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(2):241-245. (in Chinese)
- [5] 孟 龙,黄瑞源,王金相,等.小当量梯恩梯水下爆炸气泡脉动的数值模拟[J].兵工学报,2020,41(S1):64-71.
- [5] MENG Long, HUANG Rui-yuan, WANG Jin-xiang, et al. Numerical simulation of bubble pulsation of small-scaled tnt in underwater explosion [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(S1):64-71. (in Chinese)
- [6] 马 坤,初 哲,王可慧,等.小当量炸药深水爆炸气泡脉动模拟实验[J].爆炸与冲击,2015,35(3):320-325.
- [6] MA Kun, CHU Zhe, WANG Ke-hui, et al. Experimental research on bubble pulse of small scale charge exploded under simulated deep water [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(3):320-325. (in Chinese)
- [7] 张 颖,赵生伟,王占江,等.水下爆炸气泡脉动测量及分析[J].实验力学,2011,26(1):67-72.
- [7] ZHANG Ying, ZHAO Sheng-wei, WANG Zhan-jiang, et al. Underwater explosion bubble pulsation measurement and analysis [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(1):67-72. (in Chinese)
- [8] KENJI Murata, KATSUHIKO Takahashi, YUKIO Kato. Precise measurements of underwater explosion phenomena by pressure sensor using fluoropolymer [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999(85):39-42.
- [9] N Ross Chapman. Measurement of the waveform parameters of shallow explosive charges [J]. J Acoust Soc Am, 1985, 78(2):672-681.
- [10] 邵建军,张姝红,李家波,等.一种预估无限水域爆炸气泡脉动周期方法 [J]. 含能材料, 2015, 23(10):1010-1014.
- [10] SHAO Jian-jun, ZHANG Shu-hong, LI Jia-bo, et al. A method of estimating the bubble oscillation period of underwater explosion in indefinite water [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(10):1010-1014. (in Chinese)
- [11] 曹 亮,韩引海,谢 辉.定深爆炸声源声信号能量分配试验研究 [J]. 声学技术, 2020, 39(1):45-48.
- [11] CAO Liang, HAN Yin-hai, XIE Hui. Experimental study on the sound energy distribution of the depth-detonating explosion source [J]. Technical Acoustics, 2020, 39(1):45-48. (in Chinese)
- [12] 张利兴,王旭辉.禁核试核查技术导论 [M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [13] 段超伟,宋 浦,胡宏伟,等.水下爆炸气泡动态特性的研究进展 [J]. 爆破, 2022, 39(1):140-151.

- [13] DUAN Chao-wei, SONG Pu, HU Hong-wei, et al. Research progress on dynamic characteristics of underwater explosion bubbles [J]. *Blasting*, 2022, 39(1): 140-151. (in Chinese)
- [14] MARK K Prior, DAVID J Brown. Estimation of depth and yield of underwater explosions from first and second bubble-oscillation periods [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2010, 35(1): 103-112.
- [15] 姚雄亮, 汪玉, 张阿漫. 水下爆炸气泡动力学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011.
- [16] MARK K Prior. Detection of an in-water event on seismic and hydroacoustic sensors [R]. *International Scientific Studies*, 2009.
- [17] SILVIA BLANC, LGOR PRARIO, MARIANO CINQUINI, et al. Analysis of long range propagation of acoustic waves generated by different types of impulsive sources [R]. *International Hydro-acoustic Workshop (IHW 2019)*. Session 2: Data analysis and signal processing methods, (8-11 July 2019): 1-39.
- [18] VERGOZ J, CANSI Y, CANO Y, et al. Analysis of hydro-acoustic signals associated to the loss of the argentinian ARA san juan submarine [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2021: 1-30.

英文编辑: 陈东方

(上接第 216 页)

- [5] 牛滕冲, 王方田, 王文林, 等. 区段煤柱聚能失稳关键因素及控制技术 [J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2022, 4(2): 24-34.
- [5] NIU Teng-chong, WANG Fang-tian, WANG Wen-lin, et al. Key factors and control technology of energy-gathered instability of coal pillar [J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(2): 24-34. (in Chinese)
- [6] 涂敏, 林远东, 张向阳, 等. 大空间孤岛采场覆岩结构演化与区段煤柱合理宽度研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5): 857-865.
- [6] TU Min, LIN Yuan-dong, ZHANG Xiang-yang, et al. Evolution of overburden structure and reasonable width of section coal pillar in large space isolated island stope [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(5): 857-865. (in Chinese)
- [7] 石超弘, 苏士杰, 丁国利, 等. 深埋强冲击煤层工作面区段煤柱宽度确定 [J]. *煤炭工程*, 2021, 53(2): 5-9.
- [7] SHI Chao-hong, SU Shi-jie, DING Guo-li, et al. Determination of coal pillar width for working face in deep-buried coal seam with strong rockburst hazard [J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(2): 5-9. (in Chinese)
- [8] 谷拴成, 张志飞, 杨超凡, 等. 考虑煤岩体成拱效应的工作面区段煤柱合理尺寸研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2021, 17(9): 77-83.
- [8] GU Shuan-cheng, ZHANG Zhi-fei, YANG Chao-fan, et al. Study on reasonable size of coal pillars in working face section considering arching effect of coal and rock mass [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(9): 77-83. (in Chinese)
- [9] 李东, 史先锋, 赵丞, 等. 一侧采空间隔煤柱采场回采时冲击地压发生机理研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(6): 1213-1221.
- [9] LI Dong, SHI Xian-feng, ZHAO Cheng, et al. Mechanism of rock burst during stope mining with interval coal pillar in one-sided mining space [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(6): 1213-1221. (in Chinese)
- [10] 阎要锋, 王公忠, 严敏嘉, 等. 地下巷道对近区爆破动荷载的响应特性研究 [J]. *爆破*, 2021, 38(3): 75-81.
- [10] YAN Yao-feng, WANG Gong-zhong, YAN Min-jia, et al. Study on response characteristics of underground roadway on adjacent blasting dynamic load [J]. *Blasting*, 2021, 38(3): 75-81. (in Chinese)
- [11] 罗军洪, 刘宏伟, 林振荣, 等. 多因素影响下大跨度地下洞室抗爆稳定性分析 [J]. *爆破*, 2022, 39(3): 181-189.
- [11] LUO Jun-hong, LIU Hong-wei, LIN Zhen-rong, et al. Analysis of anti-explosion stability of large-span underground chamber under multi-factor effects [J]. *Blasting*, 2022, 39(3): 181-189. (in Chinese)
- [12] 付俊, 周罕, 唐绍辉, 等. 急倾斜金矿体防水隔离矿柱预测研究 [J]. *矿冶工程*, 2019, 39(3): 29-31.
- [12] FU Jun, ZHOU Han, TANG Shao-hui, et al. Prediction of waterproofing safety pillar of steeply dipping gold orebody [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2019, 39(3): 29-31. (in Chinese)
- [13] 谭云亮, 郭伟耀, 辛恒奇, 等. 煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(1): 160-172.
- [13] TAN Yun-liang, GUO Wei-yao, XIN Heng-qi, et al. Key technology of rock burst monitoring and control in deep coal mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 160-172. (in Chinese)
- [14] 窦林名, 周坤友, 宋士康, 等. 煤矿冲击矿压机理、监测预警及防控技术研究 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29(4): 917-932.
- [14] DOU Lin-ming, ZHOU Kun-you, SONG Shi-kang, et al. Occurrence mechanism, monitoring and prevention technology of rockburst in coal mines [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(4): 917-932. (in Chinese)

英文编辑: 黄刚