

文章编号:1006-9941(2021)05-0370-11

多点水中阵列爆炸冲击波的传播特性

胡宏伟^{1,2},王健³,冯海云²,李道奎¹,郭洪卫²

(1. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 西安近代化学研究所, 陕西西安 710065; 3. 北京系统工程研究所, 北京 100101)

摘要: 为了研究多个装药水中阵列爆炸冲击波的耦合作用和传播规律,利用水中爆炸试验,测量了整体装药、两装药和四装药水中阵列爆炸的冲击波-压力时间曲线,分析了装药数量、阵列距离对水中冲击波峰值压力、冲量和作用时间的影响以及阵列爆炸冲击波参数随距离的变化规律。结果表明,两点阵列爆炸,装药聚焦方向(对称中心线)的冲击波可形成叠加,比例距离 $2\sim 6\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 的范围,冲击波压力强度增加了22.8%~55.4%,冲击波峰值的增益随着传播距离的增大逐渐增大,非对称方向的冲击波压力可形成延时耦合;四点阵列爆炸,装药聚焦方向的冲击波最高峰值压力都接近于整体装药,装药数量的增加可以提高冲击波的高压区域范围和冲量。阵列爆炸点和布局相同时,阵列距离的增加可提高冲量和冲击波作用时间,冲击波压力作用时间则随着装药数量和阵列距离的增大而增大。两点和四点爆炸,冲击波耦合叠加后的多个冲击波峰值压力、冲量都仍符合爆炸相似率,但冲击波压力作用时间则不符合爆炸相似率。

关键词: 爆炸力学;水中爆炸;阵列爆炸;冲击波;传播特性

中图分类号: TJ55; O38

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021026

1 引言

阵列爆炸通过控制若干爆炸单元的起爆位置和起爆时序,使爆炸毁伤元素在时间、空间维度优化分布和聚焦叠加,以提高弹药的爆炸能量利用率和毁伤效能。阵列爆炸技术的优势主要体现为:一是爆炸能量的优化分布,扩大了有效毁伤区域,提高了爆炸能量的有效利用率;二是多毁伤元产生同时或时序的累积毁伤作用,提高了爆炸能量转化为毁伤效应的效能;三是爆炸场中毁伤特征参量的多矢量叠加,增强了局部区域或特定方向毁伤元的强度^[1]。

阵列爆炸技术应用的初始推动力是深侵彻钻地核武器对深层地下坚固战略工程的破坏效应研究,主要是利用多弹爆炸冲击波的聚焦效应扩大弹药的毁伤区

域或特定区域的强度/特性方向的作用深度。美国核防局专家 Philips 和 Bratton 的研究报告指出^[2],7枚当量50万吨核弹地下500 m深度同时爆炸,应力大于51 MPa的区域超过1 km²,高应力区范围是单枚弹爆炸所无法比拟的,特定区域内多弹爆炸形成的高压力峰值比单弹爆炸要高出3~4倍,甚至8倍以上。美国 Sandia 实验室通过大量的模拟计算和化爆模拟试验^[3],分析了7枚50万吨核钻地弹呈六角形布置(六边形每个角1枚,几何中心1枚,爆深12 m,间距400 m)的爆炸聚集效应,发现7枚50万吨核钻地弹阵列爆炸的聚集地冲击效应与2000万吨单枚核弹爆炸产生的地冲击效应相当,爆炸效应提高了6倍;此外,7枚弹爆炸产生100 MPa压力的深度比350万吨(7弹当量之和)单弹爆炸增加了80%。刘旭东等^[4]探究了多点同时爆炸的冲击波在水泥砂浆板中的聚焦效应,研究表明冲击波的相互作用将引起正应变在聚集区域强烈的非线性激增,在距离起爆点更长的距离内维持高应力状态,从而对材料和结构产生强烈的破坏作用。空中阵列爆炸方面,陈志林^[5]对空中两点爆炸进行了研究,认为仅就空气冲击波这个杀伤因素而言,在当量相同

收稿日期:2021-01-23;修回日期:2021-03-06

网络出版日期:2021-04-12

作者简介:胡宏伟(1982-),男,研究员,主要从事爆炸力学与毁伤技术研究。e-mail:hhw505@163.com

通信联系人:李道奎(1971-),男,教授,主要从事固体力学和复合材料结构力学。e-mail:lidaokui@nudt.edu.cn

引用本文:胡宏伟,王健,冯海云,等. 多点水中阵列爆炸冲击波的传播特性[J]. 含能材料,2021,29(5):370-380.

HU Hong-Wei, WANG Jian, FENG Hai-yun, et al. The Propagation Characteristics of Shock Wave for Multi-charge Underwater Array Explosion[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(5):370-380.

条件下,多点聚集爆炸造成的地面破坏杀伤范围超过单点爆炸。胡宏伟等^[6]实验研究了点和三点地面同步爆炸对冲击波参数的影响,发现多个装药同步爆炸,冲击波超压和冲量都大大增加;装药总质量相同时,炸药的组合数量越多,冲击波超压和冲量越高,不同布局的装药,冲击波超压和冲量的增加量也不同,冲击波与刚壁的碰撞模型可以用来近似计算两个同等强度冲击波的相互作用。冯海云等^[7]分析了装药质量、阵列距离对冲击波威力及增益的影响规律,获得两点阵列爆炸冲击波作用区面积与阵列距离的相互关系,结果表明随着阵列距离的增大,两点阵列爆炸的冲击波作用区面积先增大后减小,最佳阵列距离 L 与阵列爆炸单元的质量 M 呈正比关系($L = 2.078M^{1/3}$);阵列爆炸相对于同质量整体单点爆炸的威力增益显著,阵列距离6~10 m范围内冲击波超压作用区面积增大了29%。水中阵列爆炸方面,顾文彬等^[8]数值模拟了浅层水中沉底爆炸的冲击波相互作用,两个装药同步爆炸的冲击波相互作用可增加冲击作用次数、峰值压力和冲量等。文献[9-11]通过实验和仿真分析了两个或多个装药水下爆炸后气泡之间的相互作用规律,建立了相应的计算模型。

可见,地下和空中阵列爆炸的研究相对较为丰富,水中阵列爆炸研究工作则较少,且主要集中在两点爆炸的冲击波相互作用规律和气泡的动态演变理论模型。多冲击波(三个以上)之间的叠加和聚焦作用呈现非线性,导致多弹水中阵列爆炸的冲击波威力场非常复杂,而目前仍缺乏准确的试验数据,相关规律也不清楚。本研究以整体装药、两装药和四装药为研究对象,通过水中爆炸试验,分析阵列距离、装药数量对水中爆炸冲击波传播特性的影响,得到多装药阵列爆炸时水中爆炸冲击波的传播规律,为水中阵列爆炸威力场预估、仿真建模和新模式水中兵器的设计提供理论支撑。

2 实验

2.1 试验样品

圆柱形浇注PBX炸药,炸药组分为RDX/Al/AP/粘结剂,铝粉为圆球形,平均粒径为5 μm ,装药密度1.81 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。装药尺寸包括 $\Phi 55\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 、 $\Phi 70\text{ mm}\times 72\text{ mm}$ 和 $\Phi 90\text{ mm}\times 90\text{ mm}$ 三种规格,质量分别为0.25 kg、0.50 kg和1.0 kg。共设计了整体装药、双装药和四装药三种试验工况,其中整体装药为1.0 kg装药,双装药为两个0.50 kg的装药,四装药为四个

0.25 kg的装药。0.25 kg和0.50 kg装药的传爆药为质量10 g圆柱形JH-14装药,1.0 kg装药的传爆药为质量35 g的圆柱形JH-14装药,传爆药与主装药的质量比均控制在4%以内,8号铜雷管装药上端面中心起爆。试验采用了多个雷管串联的起爆方式,实验测量8号铜雷管瞬发度的绝对偏差小于1 μs ,可以满足起爆同步性的要求^[6]。

JH-14传爆药的爆热为5940 $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$,PBX炸药的爆热约7032 $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$,将JH-14换算成PBX炸药的当量为0.845,三种工况的PBX炸药装药质量(不考虑8号雷管)分别为1029.7 g(单装药)、1017 g(双装药)与1033 g(四装药),试验样品装药质量的相对误差在1%以内,可认为对装药的水中爆炸参数影响很小。

2.2 试验布局

试验水池为椭圆形,长轴约130 m,短轴约80 m,水深24 m。1.0 kg的整体装药通过吊绳悬挂入水中。对于两装药和四装药,首先,在十字木质支架上确定好装药的阵列间距(L),再将装药通过棉绳固定在木质支架上,装药底部悬挂重锤;然后,将吊绳、方向控制线与木支架连接,并悬挂入水中;最后,将方向控制线固定在钢缆上。试验设置了夹角为45°的两条测试带,每个测点布放5个传感器,测试距离为爆心或装药对称中心到测点的距离。传感器和装药的入水深度均为8 m。以两个装药为例,试验布局如图1所示。

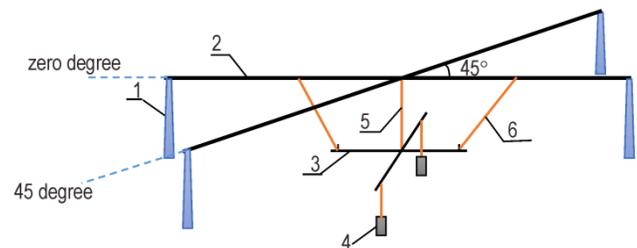


图1 两装药水中爆炸的试验布局图

1—基座,2—钢缆,3—十字支架,4—装药,5—吊绳,6—方向控制绳

Fig.1 Experiment layout of underwater explosion for two component charge

1—pedestal,2—wire rope,3—cross wood support,4—explosive charge,5—lifting rope,6—directional control rope

不同工况的装药和传感器布局如图2所示,图中 L (m)为阵列距离,两装药为二者之间的距离,四装药为两个对角装药之间的距离,两装药的阵列距离为1.0 m,四装药的阵列距离分别为0.5 m和1.0 m。图2中蓝色的圆点(大圆)为炸药装药,两装药分别标记为装药2-1和2-2,四装药分别标记为装药4-1、4-2、4-3

和4-4。棕色的圆点(小圆)为测点, R 为测试距离, $R_1\sim R_5$ 分别为5个测点,测试距离分别为2 m、3 m、4 m、5 m和6 m。

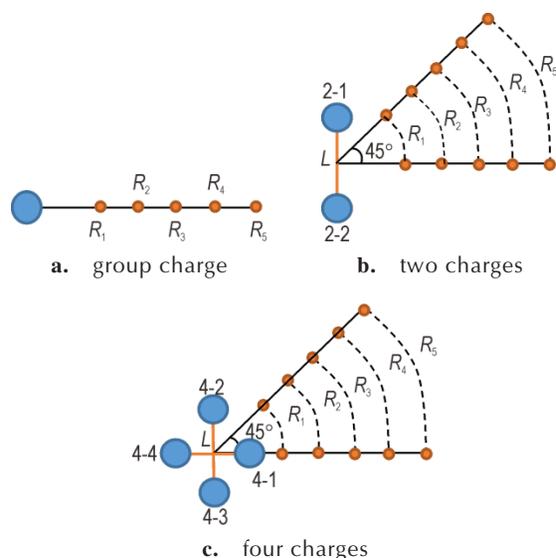


图2 不同装药和传感器布局

Fig. 2 Layouts of different charge arrangement and corresponding sensors

2.3 测试仪器

测试仪器包括美国PCB公司的138型水下激波传感器和DEWE公司的瞬态信号记录仪。冲击波信号的采样频率为10 MHz,气泡脉动信号的采样频率为100 kHz。

3 试验数据处理

3.1 多峰冲击波冲量的计算方法

冲击波峰值压力由压力-时间波形直接读取,所有峰值压力都以第一个冲击波的零线为基线。由于多个冲击波的叠加,阵列爆炸的冲击波压力-时间波形较为复杂,单个爆炸源的数据处理方法不再适用。因此,需要给出一个多峰冲击波冲量的积分上限的统一标准。

测点处的冲击波冲量计算公式为^[12]:

$$I = \int_0^t P_{(t)} dt \quad (1)$$

式中,对于单装药,积分上限取 6.7θ ,记为 t ,其中 θ 为时间衰减常数, $\theta = p_m/e$;对于多装药阵列爆炸,压力-时间历程存在多个冲击波,为了在统一标准下对比,取冲击波压力 $p=0.5$ MPa的时间为积分上限 t ,这里将积分上限统称为冲击波压力作用时间。

3.2 水中爆炸冲击波参数的相似方程

水中爆炸冲击波参数的相似方式:

$$S = K(W^{1/3}/R)^\alpha = K(\bar{R})^{-\alpha} \quad (2)$$

式中, W 为炸药的质量,kg; R 为测点距爆心的距离,m; K 和 α 为与炸药相关的常数; \bar{R} 为比例距离,等于 $R/W^{1/3}$, $m \cdot kg^{-1/3}$; S 表示为峰值压力 P_{mj} 、比冲量 $I/W^{1/3}$ 和比冲击波衰减时间常数 $\theta/W^{1/3}$ 。

4 试验结果分析

4.1 单点整体装药水中爆炸

1.0 kg整体装药水中爆炸的冲击波参数见表1。

由表1可知,测试范围内,随着测试距离的增加,1.0 kg整体装药水中爆炸的冲击波峰值压力、冲量逐渐递减,衰减时间常数逐渐增加。

表1 1.0 kg整体装药水中爆炸的冲击波参数

Table 1 Shock parameters of underwater explosion for 1.0 kg group charge

R/m	P_m/MPa	$I/kPa \cdot s$	θ/ms	$6.7\theta/ms$
2	25.61	5.08	0.120	0.804
3	15.53	3.75	0.159	1.065
4	11.93	2.77	0.153	1.025
5	9.76	2.28	0.164	1.085
6	7.11	1.96	0.186	1.246

Note: P_m is peak pressure of shock wave, I is impulse, θ is time decay constant, 6.7θ equal to t in formula (1).

4.2 两装药水中阵列爆炸(阵列距离1.0 m)

0°测试方向,两个0.5 kg装药水中爆炸的冲击波压力-时间波形如图3所示。

由图3可知,装药2-1和2-2水中爆炸产生的冲击波在0°测试方向形成了耦合,两个波峰的到达时间基本一致,但压力波形的后半段没有整体装药平滑,衰减较快。

45°测试方向,两个0.5 kg装药水中爆炸的冲击波压力-时间波形如图4所示。

由图4可知,45°测试方向,由于装药2-1和2-2与测点距离不同(见图2(b)),两个冲击波的到达时间相差了44 μs ,形成了延时耦合。测试距离2~4 m时,第一个冲击波的峰值压力高于第二个冲击波,测试距离5~6 m时,第一个冲击波的峰值压力逐渐低于第二个冲击波,这是由于随着距爆心距离的增加,第一个冲击波的脉宽逐渐增大,但两个冲击波的达到时差基本不变,导致第二个冲击波到达时的叠加压力基准逐渐增高,当第二个冲击波的叠加基准压力高于两个冲击波的压力差时,第二个冲击波的峰值压力就会高于第一个冲击波。

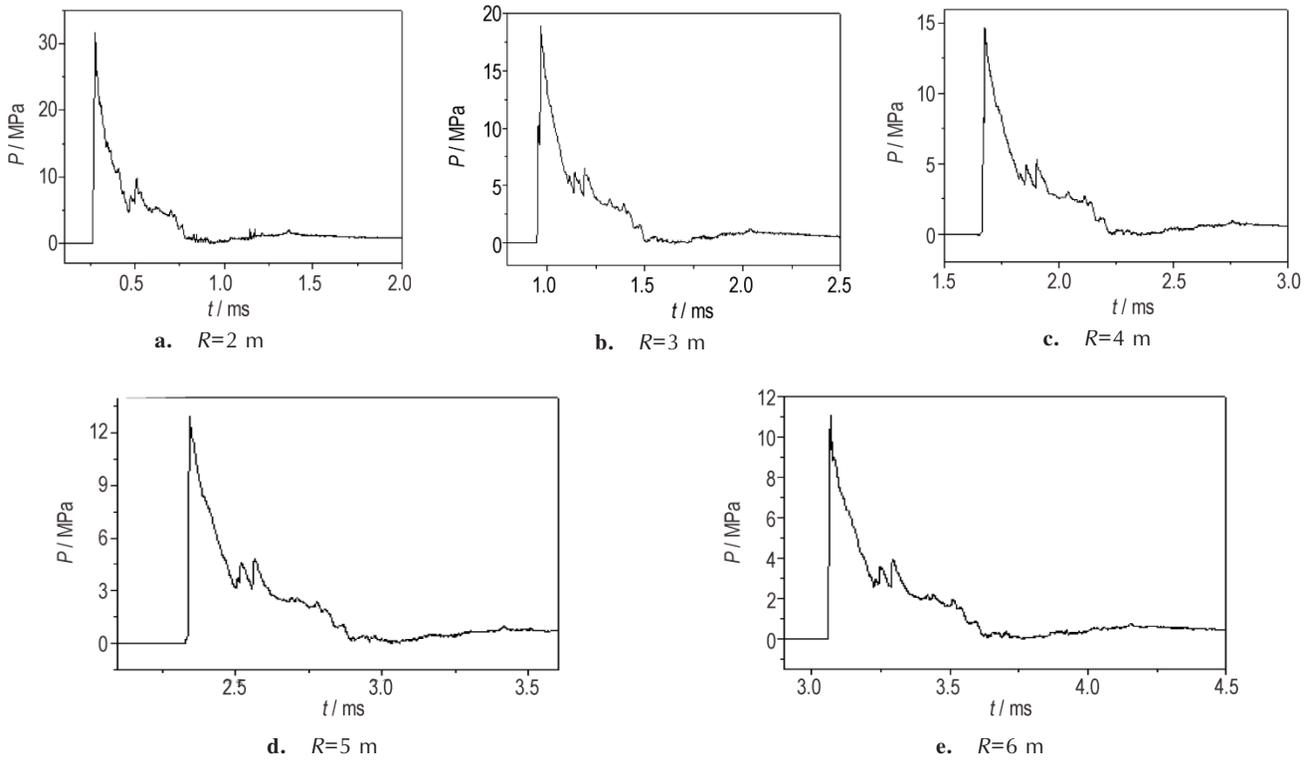


图3 两个0.5 kg装药水中爆炸的冲击波压力-时间曲线($L=1.0\text{ m}$, 0° 测试方向)

Fig.3 Underwater explosion pressure-time history of two 0.5 kg charges ($L=1.0\text{ m}$, 0° measurement orientation)

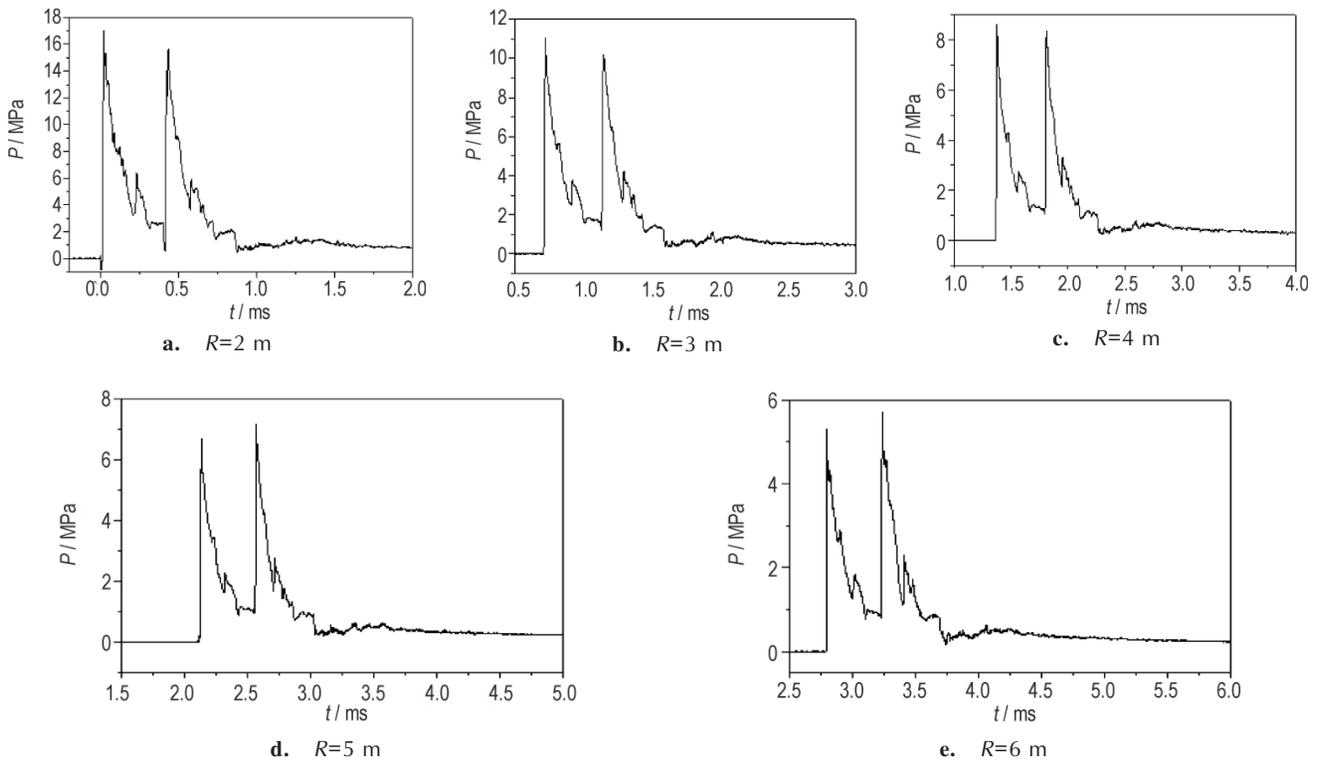


图4 两个0.5 kg装药水中爆炸的冲击波压力-时间曲线($L=1.0\text{ m}$, 45° 测试方向)

Fig.4 Underwater explosion pressure-time history of two 0.5 kg charges ($L=1.0\text{ m}$, 45° measurement orientation)

两个 0.5 kg 装药水中爆炸冲击波参数见表 2。

表 2 两个 0.5 kg 装药的水中爆炸冲击波参数

Table 2 Shock parameters of underwater explosion for two 0.5 kg charges

R/m	0° measurement orientation			45° measurement orientation			
	P_m /MPa	I /kPa·s	t /ms	P_{m1} /MPa	P_{m2} /MPa	I /kPa·s	t /ms
2.0	31.69	4.47	0.558	17.04	15.67	4.58	0.863
3.0	18.92	3.05	0.543	11.03	10.20	3.15	0.892
4.0	14.65	2.39	0.551	8.60	8.33	2.40	0.898
5.0	12.96	2.15	0.556	6.67	7.12	1.97	0.919
6.0	11.05	1.62	0.548	5.30	5.71	1.71	0.911

冲击波峰值压力、冲量和冲击波压力作用时间随测试距离的变化如图 5 所示。

由图 5a 可知,测试范围内,0°测试方向,即装药 2-1 和 2-2 的冲击波聚焦方向,两个 0.5 kg 装药耦合形

成的冲击波峰值压力都大于 1.0 kg 整体装药;45°测试方向,两个冲击波的峰值压力(P_{m1} 和 P_{m2})都小于 1.0 kg 整体装药。由图 5b 和图 5c 可知,两个测试方向的冲量和冲击波压力作用时间都小于 1.0 kg 整体装药,冲击波压力作用时间随着测试距离的增加略有提高,冲量降低的原因为冲击波压力作用时间大幅降低所致。

对于两点阵列爆炸,测试距离大于等于 2.0 m(比例距离 $\geq 2.0 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)时,装药对称方向的冲击波形成了叠加或聚焦,使冲击波压力产生“增强”和“定向”作用,增大对目标的冲击波作用强度,2~6 m 的测试范围内,冲击波压力强度增益了 22.8%~55.4%,并且随着传播距离的增大,增益越来越大;非对称方向的冲击波压力可形成延时耦合,延时耦合不仅可对目标形成多次冲击作用,还可以改变冲击波的压力场,使两个冲击波的作用强度随传播距离的增加,由高-低转换为低-高。

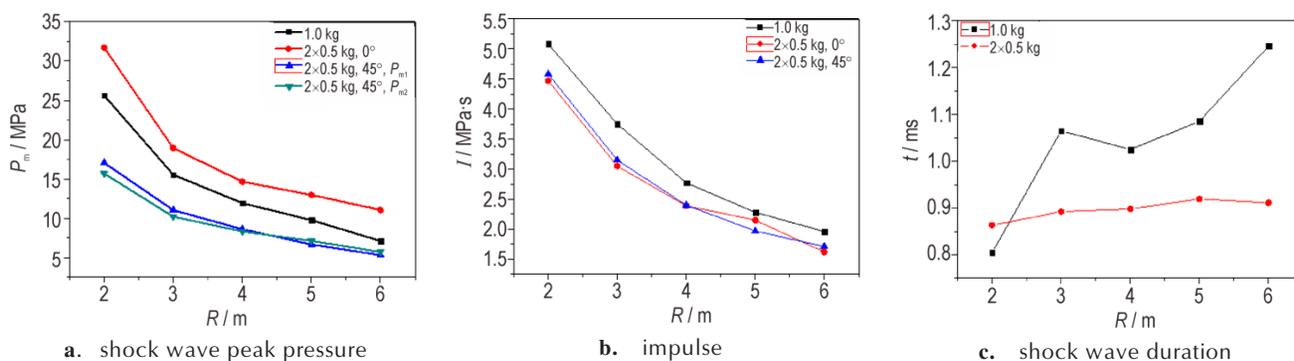


图 5 冲击波峰值压力、冲量和冲击波作用时间与测试距离的关系

Fig.5 The relations of shock wave peak pressure, impulse, and shock wave duration in respect to test distances

4.3 四装药水中阵列爆炸

4.3.1 阵列距离 0.5 m 的水中冲击波参数

0°测试方向,四个 0.25 kg 装药水中爆炸的冲击波压力-时间波形如图 6 所示。

由图 6 可知,0°测试方向,形成了三个冲击波压力峰,第 1 个冲击波压力峰是距传感器最近的装药 4-1 爆炸产生;第 2 个冲击波压力峰是两个对称装药(4-2 和 4-3)爆炸产生的冲击波耦合而成,二者到达时间相差了约 30 μs ,与第 1 个冲击波形成了延时耦合,叠加形成的冲击波峰值压力高于第 1 个和第 3 个冲击波;第 3 个冲击波压力峰是距传感器最远的装药 4-4 爆炸产生,与第 2 个冲击波形成了延时耦合,虽然距离测点较远,但耦合后的冲击波压力峰值仍高于第 1 个冲击波峰值压力。随着距爆心距离的增加,耦合后的冲击波波形基本未变化。

45°测试方向,四个 0.25 kg 装药水中爆炸的冲击波压力-时间波形如图 7 所示。

由图 7 可知,45°测试方向,理论上装药 4-1 和 4-2、4-3 和 4-4 应分别耦合形成 2 个冲击波压力峰,可能装药位置存在误差,导致装药 4-1 和 4-2 爆炸产生的冲击波未完全叠加,形成了延时耦合,两个冲击波相差了 78 μs ,因此,形成了三个冲击波压力峰。测试距离 2 m 时(图 7a),第 2 个、第 3 个冲击波的峰值压力基本一致,但若第 1 个、第 2 个冲击波同时到达耦合叠加形成一个冲击波,叠加冲击波峰值压力应高于图 7a 中的第 3 个冲击波。测试距离 3~6 m 时(图 7b~图 7e),第 3 个冲击波峰值压力逐渐高于第 2 个冲击波。

阵列距离 0.5 m 时,四个 0.25 kg 装药的冲击波参数见表 3。

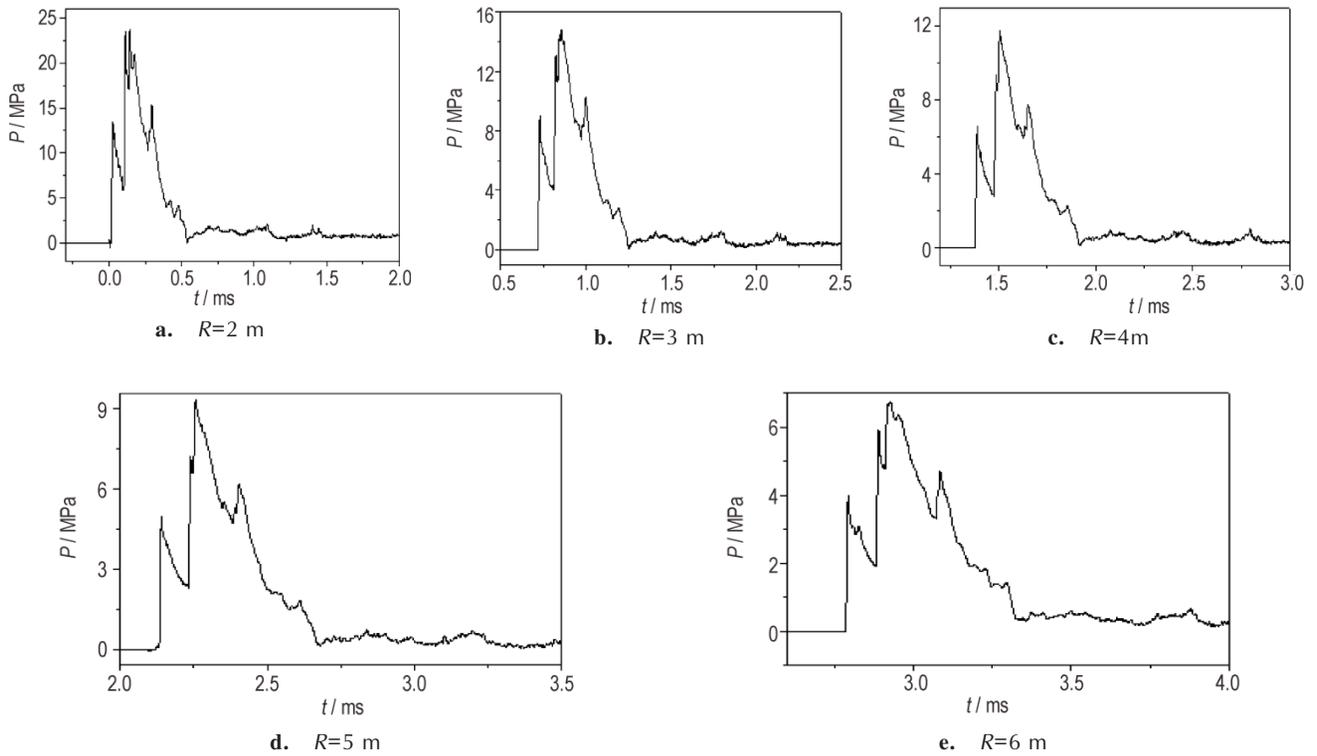


图6 四个0.25 kg装药水中爆炸的冲击波压力-时间曲线($L=0.5\text{ m}$, 0° 测试方向)

Fig.6 Underwater explosion pressure-time history of four 0.25 kg charges($L=0.5\text{ m}$, 0° measurement orientation)

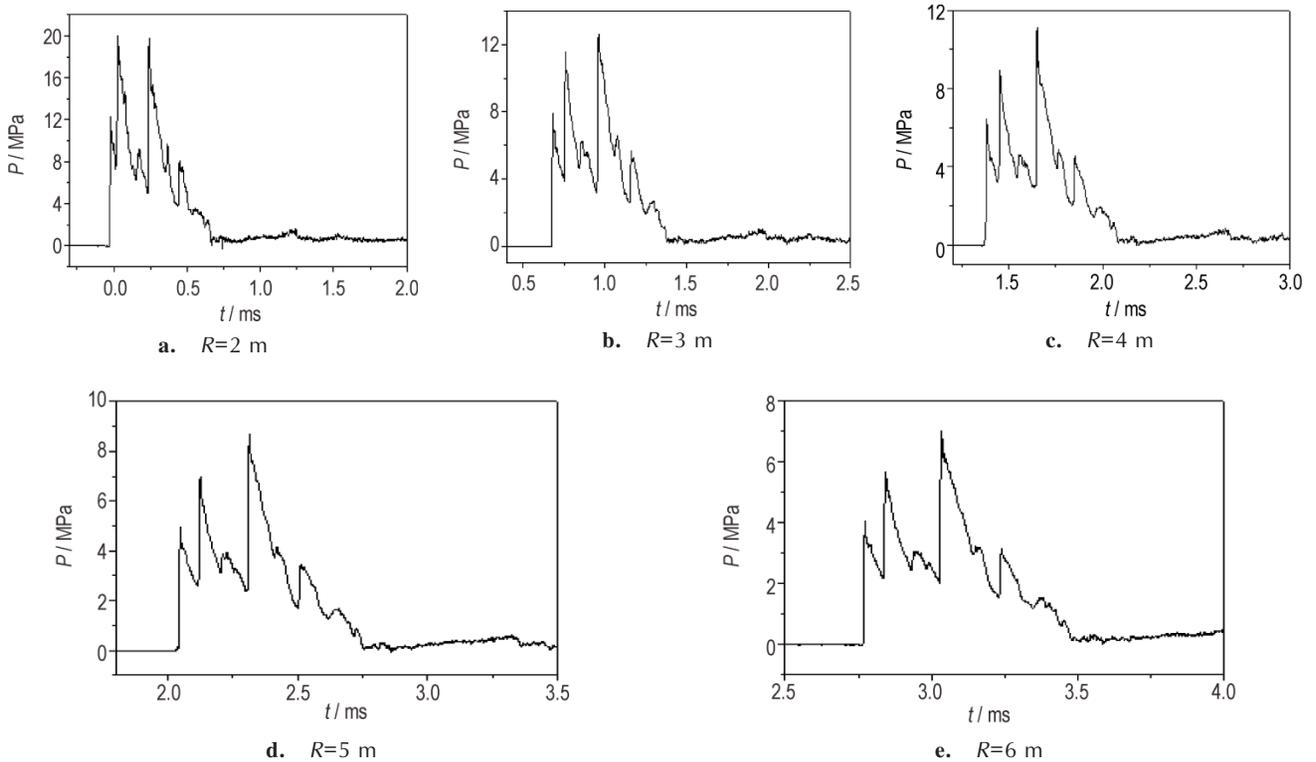


图7 四个0.25 kg装药水中爆炸的冲击波压力-时间曲线($L=0.5\text{ m}$, 45° 测试方向)

Fig.7 Underwater explosion pressure-time history of four 0.25kg charges($L=0.5\text{ m}$, 45° measurement orientation)

表3 四个0.25 kg装药阵列距离0.5 m时的水中冲击波参数

Table 3 Underwater explosion shock parameters of four 0.25 kg charges at 0.5 m array distance

R/m	0° measurement orientation					45° measurement orientation				
	P_{m1}/MPa	P_{m2}/MPa	P_{m3}/MPa	$I/\text{kPa}\cdot\text{s}$	t/ms	P_{m1}/MPa	P_{m2}/MPa	P_{m3}/MPa	$I/\text{kPa}\cdot\text{s}$	t/ms
2.0	13.41	23.78	15.26	5.18	0.517	12.24	19.94	19.80	5.43	0.692
3.0	8.98	14.81	10.26	3.45	0.523	7.91	11.54	12.63	3.54	0.700
4.0	6.60	11.75	7.77	2.60	0.528	6.44	8.93	11.12	2.74	0.709
5.0	4.99	9.32	6.17	2.09	0.529	4.96	6.98	8.71	2.31	0.710
6.0	3.97	6.74	4.71	1.77	0.531	4.07	5.66	7.01	1.95	0.683

冲击波峰值压力、冲量和作用时间随测试距离的变化如图8所示。

由图8a可知,测试范围内,0°测试方向,两个0.25 kg对称装药4-2和4-3聚焦方向的冲击波压力接近于1.0 kg的整体装药,爆炸效能相当于2倍TNT当量,其它两个冲击波峰值压力都小于1.0 kg的整体装药;45°测试方向,三个冲击波峰值压力都小于1.0 kg的整体装药,但若第一个冲击波和第2个冲击波完全

耦合(预估峰值压力24.96 MPa),则接近于1.0 kg的整体装药,爆炸效能也相当于2倍TNT当量。

由图8b和图8c可知,0°和45°两个测试方向,冲量都接近于1.0 kg整体装药,冲击波作用时间都小于1.0 kg整体装药,随测试距离的增加基本无变化。两个0.5 kg装药的爆炸冲击波压力作用时间虽低于1.0 kg整体装药,但装药数量的增加导致冲击波的高压区增大,增大了冲量,因此装药数量的增加有利于提供冲量。

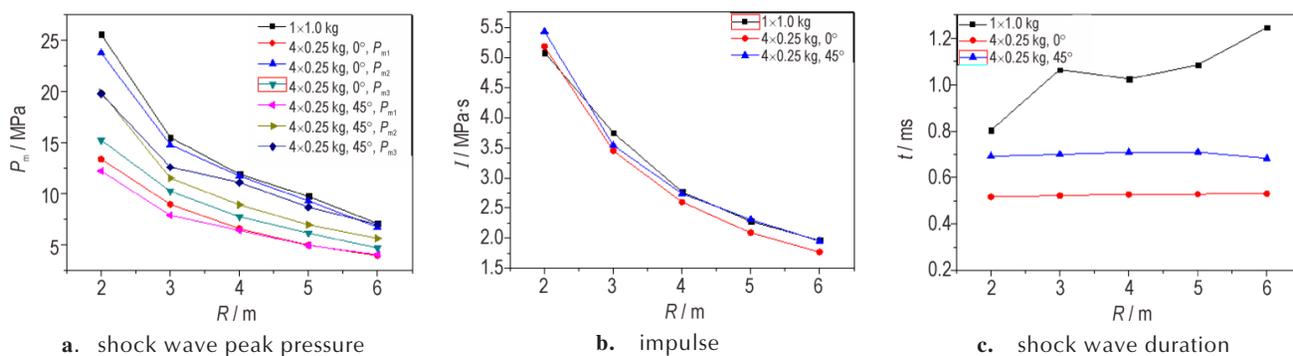


图8 冲击波峰值压力、冲量和冲击波作用时间与测试距离的关系

Fig.8 The relations of shock wave peak pressure, impulse, and shock wave duration in respect to test distance

4.3.2 阵列距离1.0 m的水中冲击波参数

0°测试方向,四个0.25 kg装药水中爆炸的冲击波压力-时间波形如图9所示。

由图9a可知,0°测试方向,理论上应为距传感器最近的装药4-1爆炸产生第一个冲击波压力峰,两个对称装药(4-2和4-3)的爆炸压力波耦合叠加形成第2个冲击波压力峰,距传感器最远的装药4-4爆炸产生第3个冲击波压力峰,若装药4-2和4-3布放位置控制好,形成的波形应类似于图6a~图6e,但由于两个装药布放位置的误差,装药4-2和4-3爆炸形成的冲击未形成叠加,到达时间相差了约21 μs ,从而形成了四个冲击波压力峰。测试距离2 m时,第2个、第3个冲击波的峰值压力小于第1个冲击波,测试距离大于等于3 $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 时,第2个、第3个冲击波的峰值压力逐渐高

于第1个冲击波。

45°测试方向,四个0.25 kg装药水中爆炸的冲击波压力-时间波形如图10所示。

由图10可知,45°测试方向,装药4-1和4-2爆炸形成的冲击波形成了耦合叠加,两个波的到达时间相差了20 μs 导致峰值压力略有降低;装药4-3和4-4爆炸产生的冲击波未完全耦合叠加,两个波的到达时间相差了90 μs ,形成了延时叠加。随着传播距离的增加,冲击波压力-时间波形形状基本一致,但第2个冲击波与第1个冲击波的峰值压力差越来越小。

四个0.25 kg装药阵列距离1.0 m时的水中爆炸冲击波参数见表4。

水中冲击波峰值压力、冲量和作用时间随测试距离的变化如图11所示。

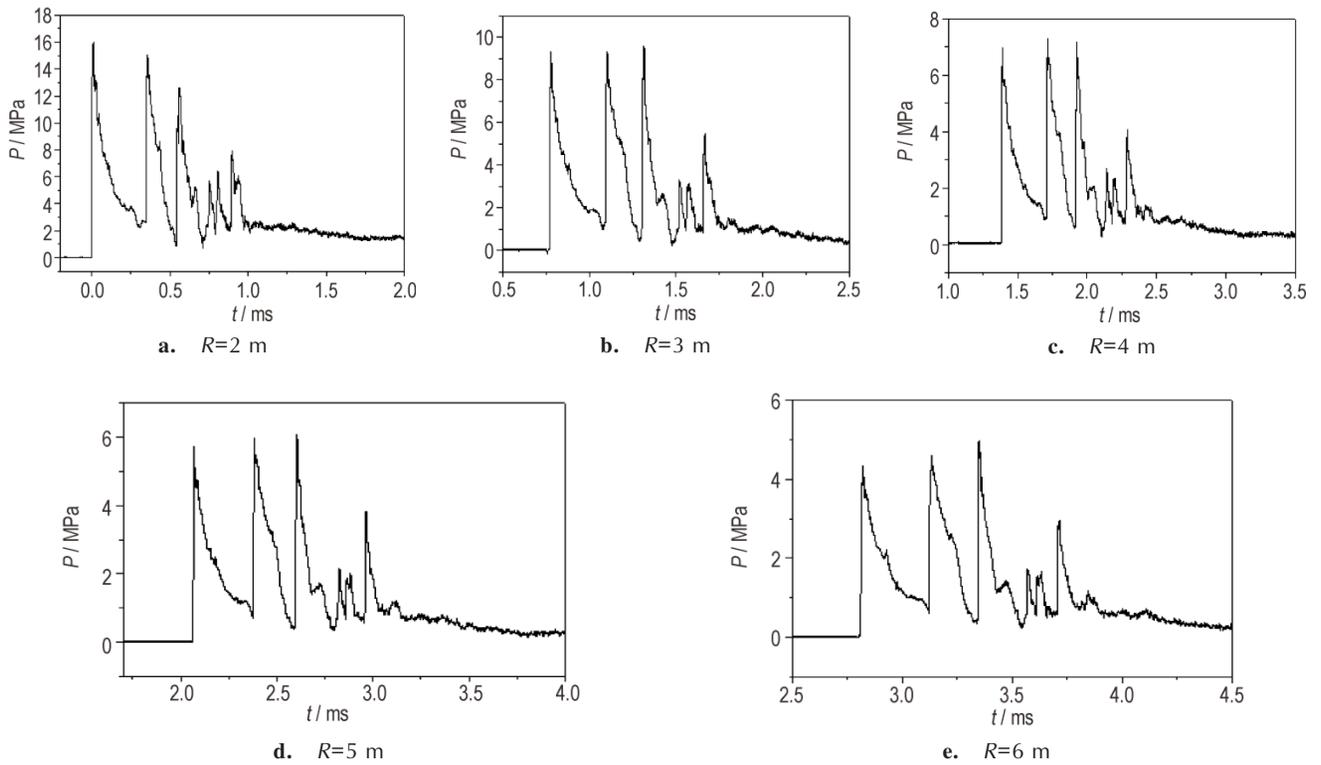


图9 四个0.25 kg装药水中爆炸的冲击波压力-时间曲线($L=1.0\text{ m}$, 0° 测试方向)

Fig.9 Underwater explosion pressure-time history of four 0.25 kg charges($L=1.0\text{ m}$, 0° measurement orientation)

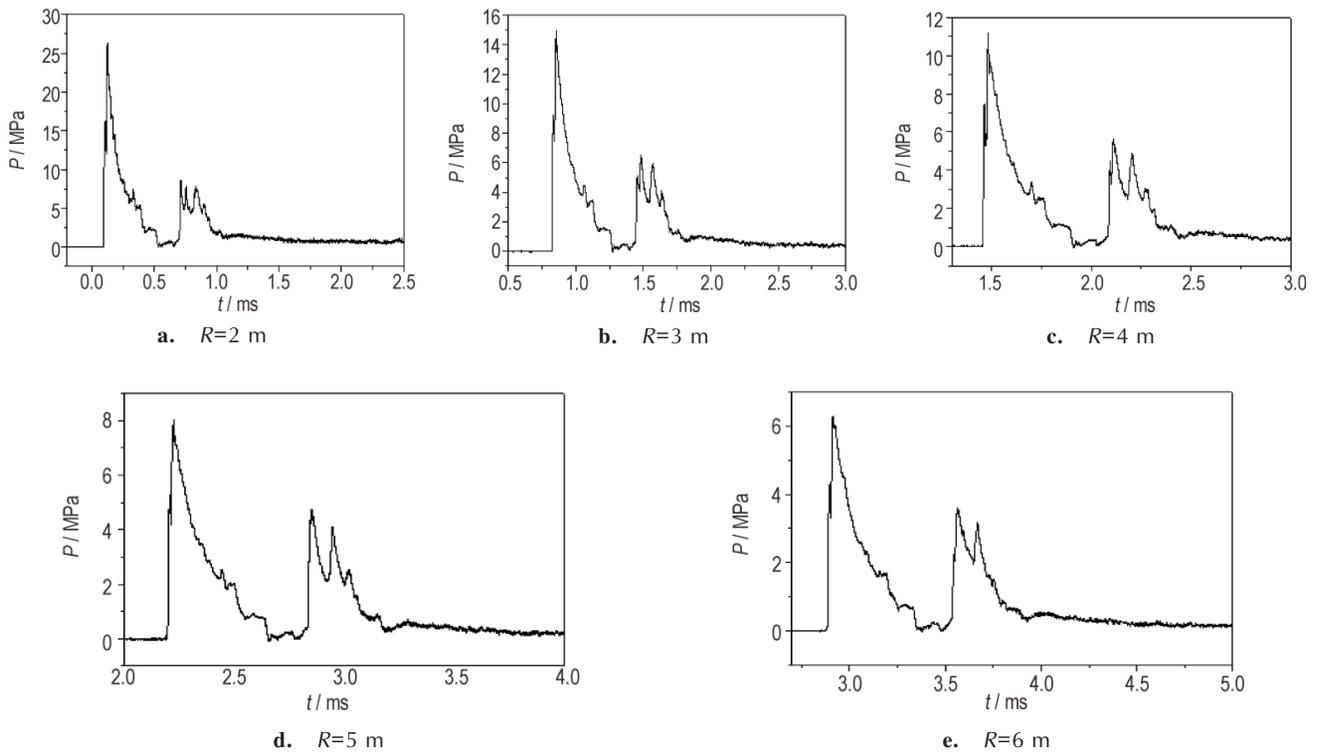


图10 四个0.25 kg装药水中爆炸的冲击波压力-时间曲线($L=1.0\text{ m}$, 45° 测试方向)

Fig.10 Underwater explosion pressure-time history of four 0.25 kg charges($L=1.0\text{ m}$, 45° measurement orientation)

表 4 四个 0.25 kg 装药阵列距离 1.0 m 时的水中爆炸冲击波参数

Table 4 Underwater explosion shock parameters of four 0.25 kg charges at 1.0 m array distance

R/m	0° measurement orientation						45° measurement orientation			
	P_{m1} /MPa	P_{m2} /MPa	P_{m3} /MPa	P_{m4} /MPa	I /Pa·s	t /ms	P_{m1} /MPa	P_{m2} /MPa	I /Pa·s	t /ms
2.0	15.98	15.03	12.61	6.39	6.25	1.400	26.37	8.54	5.67	1.481
3.0	9.30	9.30	9.61	3.16	3.53	1.459	14.91	6.52	3.76	1.426
4.0	6.97	7.29	7.19	2.36	2.88	1.466	11.17	5.64	2.77	1.317
5.0	5.71	5.98	6.08	2.00	2.30	1.364	8.04	4.75	2.31	1.381
6.0	4.34	4.61	4.98	1.66	1.85	1.236	6.28	3.61	1.72	1.011

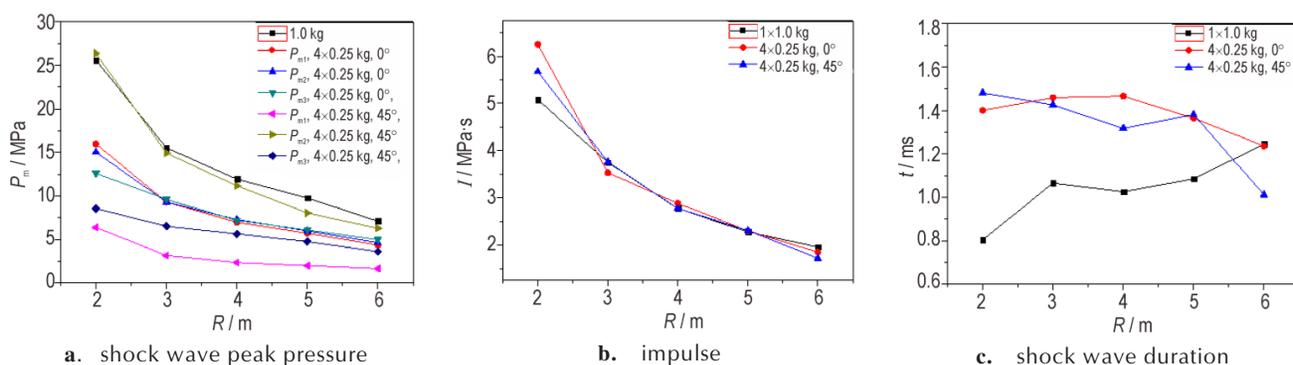


图 11 冲击波峰值压力、冲量和冲击波作用时间与测试距离的关系

Fig.11 The relations of shock wave peak pressure, impulse, and shock wave duration in respect to test distance

4.4 水中阵列爆炸冲击波参数的相似方程

多个水中冲击波相互耦合作用后,形成线性或非线性叠加,爆炸相似率能否适用于这种复杂的冲击波载荷传播,对于水中阵列爆炸冲击波载荷的预估和仿真建模具有重要意义。因此,通过实验数据分析了阵列爆炸冲击波与比例距离的关系,以确定爆炸相似率对阵列爆炸冲击波载荷传播的适用性。

为此,拟合 1.0 kg 整体装药、两个 0.5 kg 装药水中爆炸、四个 0.25 kg 装药水中爆炸的冲击波峰值压力、冲量和衰减时间常数(或冲击波压力作用时间)与比例距离的关系。1.0 kg 整体装药水中爆炸冲击波参数的相似常数和相似指数见表 5,两装药和四装药的水中爆炸冲击波参数的相似常数和相似指数见表 6。

表 5 1.0 kg 整体装药水中爆炸冲击波参数的相似常数和相似指数

Table 5 The shock wave similar constant and exponent of underwater explosion for 1.0 kg group charge

K_{p1}	α_{p1}	K_I	α_I	K_t	α_t
55.17	1.12	9.36	0.87	0.09	-0.39

由图 11a 可知,测试范围内,0°测试方向,四个冲击波的峰值压力都小于 1.0 kg 整体装药,45°测试方向,对称装药 4-1 和 4-2 聚焦形成的冲击波峰值压力接近于 1.0 kg 整体装药,由于测点距离较远,对称装药 4-3 和 4-4 聚焦形成的冲击波峰值压力低于 1.0 kg 整体装药。由图 11b 可知,测试距离小于 3 m 时,4 个 0.25 kg 装药阵列爆炸的冲量大于 1.0 kg 整体装药,测试距离大于 3 m 时,4 个 0.25 kg 装药阵列爆炸的冲量与 1.0 kg 的整体装药相当。由图 11c 可知,测试范围内,0°和 45°两个测试方向,4 个 0.25 kg 装药阵列爆炸的冲击波压力作用时间高于 1.0 kg 整体装药,测试距离大于 6 m 时,与整体装药趋于一致甚至变低。

结果表明两装药、四装药爆炸产生的多峰冲击波峰值压力、冲量与比例距离的相关性很好,仍符合爆炸相似率,但冲击波压力作用时间并不符合爆炸相似率。

5 结论

(1) 两点阵列爆炸,比例距离大于等于 $2.0 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,装药聚焦方向(对称中心线)的冲击波可形成叠加,使冲击波压力产生“增强”和“定向”作用,2~6 m 的测试范围内(比例距离 $2 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$),冲击波压力强度增益了 22.8%~55.4%,增益随着传播距离的增加而增大;非对称方向的冲击波压力可形成延时耦合,形成多个冲击波峰值,延时耦合导致某距离处(本试验工况,比例距离大于等于 $5.0 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时)第二个冲击波峰值压力高于首个冲击波,对目标产生多次破坏作用。

(2) 四点阵列爆炸,装药聚焦方向的冲击波最高峰值压力都接近于整体装药,如阵列距离 0.5 m 时,0°测试方向的第二个冲击波压力峰,阵列距离 1.0 m 时,45°测试方向的第一个冲击波压力峰;装药数量的增

表6 两装药和四装药水中阵列爆炸冲击波参数的相似常数和相似指数

Table 6 The shock wave similar constant and exponent of underwater array explosion for two and four charges

Charge type	L/m	0° measurement orientation									
		K_p	α_p	K_1	α_1						
two charge	1.0	62.85	1.02	8.16	0.88						
four charge	0.5	K_{p1}	α_{p1}	K_{p2}	α_{p2}	K_{p3}	α_{p3}	K_1	α_1		
		28.33	1.07	49.83	1.07	30.94	1.01	10.25	0.99		
four charge	1.0	K_{p1}	α_{p1}	K_{p2}	α_{p2}	K_{p3}	α_{p3}	K_{p4}	α_{p4}	K_1	α_1
		35.89	1.18	30.87	1.05	22.52	0.82	16.00	1.36	13.42	1.13
45° measurement orientation											
two charge	1.0	K_{p1}	α_{p1}	K_{p2}	α_{p2}	K_1	α_1				
		34.78	1.03	28.93	0.90	8.62	0.91				
four charge	0.5	K_{p1}	α_{p1}	K_{p2}	α_{p2}	K_{p3}	α_{p3}	K_1	α_1		
		24.06	0.98	44.25	1.17	36.69	0.91	10.40	0.95		
four charge	1.0	K_{p1}	α_{p1}	K_{p2}	α_{p2}	K_1	α_1				
		64.41	1.30	13.94	0.69	11.62	1.03				

加导致冲击波作用次数和高压区增大,虽然冲击波压力作用时间有所减小,但装药数量的增加导致冲量提高。阵列爆炸点和布局相同时,阵列距离的增加可提高冲量和冲击波作用时间,冲击波压力作用时间则随着装药数量和阵列距离的增加而增大。

(3)无论两点爆炸还是四点爆炸,冲击波耦合叠加后(同时和延时)的多个冲击波的峰值压力、冲量都符合爆炸相似率,冲击波压力作用时间则不符合爆炸相似率。

参考文献:

[1] 胡宏伟,肖川.阵列爆炸——一种常规高效毁伤技术[J].含能材料,2019,27(9):717-719.
 HU Hong-wei, XIAO Chuan. Array Explosion——A Conventional High Efficiency Damage Technology[J]. *Chinese Journal of energetic materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27 (9) : 717-719.

[2] Knetyk L N. Ground shock from multiple earth-penetrator bursts: effects for hexagonal weapon arrays [R]. SAND9020485, 1990.

[3] Phillips S. Ground shock analysis of the multiple burst experiments[R]. ADA 088510, 1978;

[4] 李旭东,刘凯欣,张光升,等.冲击波在水泥砂浆板中的聚集效应[J].清华大学学报(自然科学版),2008,48(8):1272-1275.
 LI Xu-dong, LIU Kai-xin, ZHANG Guang-sheng, et al. Focusing of shock waves in cement mortar plates[J]. *J Tsinghua Univ (Sci &Tech)*, 2008, 48(8): 1272-1275.

[5] 陈志林.关于多点爆炸效应的初步探讨[A]//爆炸作用及其防护学术交流会和学组会成立会[C].洛阳:总参工程兵科研三所,1988.
 CHEN Zhi-lin. Study on Muti-point Explosion Effect [A]// Explosion effects and protection of academic exchanges and

study group will set up [C]. Luoyang, The Third Engineer Research Scientific Institute of Headquarters of the General Staff, 1988.

[6] 胡宏伟,宋浦,郭炜,等.地面爆炸冲击波的相互作用[J].高压物理学报,2014,28(3):353-357.
 HU Hong-Wei, SONG Pu, GUO Wei, et al. The interaction of shock waves in ground burst [J]. *Chinese Journal of high pressure physics*, 2014,28(3):353-357.

[7] 冯海云,胡宏伟,肖川,等.两点阵列爆炸威力场分布及增益研究[J].火炸药学报,2020,43(3):345-350.
 FENG Hai-yun, HU Hong-wei, XIAO Chuan, et al. Research on the blast power field distribution and gain of two-point array explosion [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 43(3):345-350.

[8] 顾文彬,孙百连,阳天海,等.浅层水中沉底爆炸冲击波相互作用数值模拟[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2003,4(6):64-68.
 GU Wen-bin, SUN Bai-lian, YANG Tian-hai, et al. Numerical simulation of explosive shockwave interaction in shallow-layer water [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2003, 4(6): 64-68.

[9] Rungsiyaphornrata S, Klaseboerb E, Khoo B C, et al. The merging of two gaseous bubbles with an application to underwater explosions[J]. *Computers & Fiuides*, 2003(32): 1049-1074.

[10] 姚雄亮,汪玉,张阿漫,编著.水下爆炸气泡动力学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2012.
 YAO Xiong-liang, WANG Yu, ZHANG A-man, edited .Bubble dynamics of underwater explosion[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2012.

[11] Shuai Li, A Man Zhang, Rui Han, et al. Experimental and numerical study of two underwater explosion bubbles: Coalescence, fragmentation and shock wave emission[J]. *Ocean Engineering*, 190 (2019)106414: 1-14.

[12] Cole R H. Underwater explosion[M]. Princeton N J: Princeton University Press, 1961.

The Propagation Characteristics of Shock Wave for Multi-charge Underwater Array Explosion

HU Hong-Wei^{1,2}, WANG Jian³, FENG Hai-yun², LI Dao-kui¹, GUO Hong-wei²

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China; 3. Beijing institute of system engineerin, Beijing 100101, China)

Abstract: To investigate the coupling effect and propagation law of shock wave for underwater array explosion with multiple charges. The shock wave parameters of group charge, two charges and four charges were measured by underwater explosion test. The influence of charge quantity and array distance on peak pressure, impulse and loading time of shock waves were analyzed and revealed the relationship between array explosion shock wave parameters and distances. The results showed that the shock wave (symmetrical center line) can be superimposed in the focusing direction for two-charge explosion. The shock wave pressure intensity increased by 22.8%–55.4% in the scale distance of 2–6 m·kg^{-1/3}, and the gain increased gradually with the increase of propagation distance. For four-charge array explosion, the peak pressure of the shock wave in the focusing direction was close to that of group charge. For the same explosion points and layout of the array explosion, the impulse and shock wave loading time can be improved by increasing the array distance. The loading time of shock wave pressure increased with the increase of charge quantity and array distance. For two-charge and four-charge explosion, the peak pressure and impulse of multiple shock waves were still consistent with explosion similarity law, but the loading time of shock wave pressure was not.

Key words: explosion mechanics; underwater explosion; array explosion; shock wave; propagation characteristic

CLC number: TJ55; O38

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021026

(责编:高毅)