

地面爆炸冲击波的相互作用*

胡宏伟, 宋 浦, 郭 炜, 冯海云, 张立建

(西安近代化学研究所, 陕西西安 710065)

摘要: 为了研究多点同步地面爆炸冲击波的相互作用, 通过改变装药质量组合和布局, 利用空中爆炸测量系统对 2 点和 3 点地面同步爆炸进行了试验研究, 并利用冲击波与刚性壁面碰撞理论计算了 2 个冲击波相互作用的冲击波压力和冲量。结果表明: 多个装药同步爆炸时, 冲击波超压和冲量都显著增加, 大大提高了装药爆炸威力。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 2 个同等强度冲击波的相互作用。

关键词: 爆炸力学; 地面爆炸; 圆柱形装药; 冲击波相互作用

中图分类号: O389 **文献标志码:** A

doi: 10.11858/gywlb.2014.03.014

1 引 言

为了提高弹药的毁伤威力, 人们在提高含能材料能量和优化战斗部设计上做了大量的研究工作, 同时也在发展新的毁伤机理和毁伤模式。通过合理布置, 多个弹药采取同时或延时爆炸, 目标区域内冲击波的相互作用可使冲击波的强度显著增强, 大大提高弹药的爆炸威力, 对目标产生更强的破坏作用。因此, 研究冲击波的相互作用对于武器设计、防护工程具有重要的理论意义和广泛的应用价值。

自 20 世纪 70 年代以来, 美国对多弹同时和非同时爆炸的空气冲击波进行了大量的试验研究、理论分析和模拟计算, 这些研究工作主要集中在多弹头触地或钻地爆炸的地冲击效应。例如, Phillips^[1]、Ruetenik^[2] 等通过 Misers Bluff 试验研究了多弹爆炸产生的空气冲击波撞击地面所引起的地冲击效应计算方法, 并利用 Reflect 程序对 6 枚弹药的爆炸地冲击效应进行计算机数值模拟, 为多弹爆炸的地冲击效应预测提供资料。Kmetyk 等^[3] 进行了 7 枚呈六角形布置弹药的爆炸聚集效应数值分析。研究表明, 多枚弹爆炸所形成的高压力峰值比单弹爆炸要高出 3~4 倍, 甚至可达到 8 倍以上。

陈志林等^[4] 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。顾文彬等^[5] 进行了浅层水中沉底爆炸冲击波相互作用数值模拟, 2 个装药同步爆炸的冲击波相互作用可使冲击作用次数、冲击波峰值压力和冲击作用冲量等增加, 提高爆炸威力。李旭东等^[6] 探究了多点同时爆炸时冲击波在水泥砂浆板中的聚焦效应, 研究表明冲击波相互作用将引起正应变在聚集区域强烈的非线性激增, 并且在距离起爆点更长的距离内维持高应力状态, 这将对材料和结构产生强烈的破坏作用。本工作对 2 个和 3 个装药地面爆炸冲击波之间的相互作用进行试验研究, 并对 2 个等强度冲击波的相互作用进行定量计算。

2 计算模型与公式

2.1 冲击波的相互作用模型

这里把同样强度对撞冲击波的相互作用近似为一定炸高炸药的爆炸冲击波在刚壁上的反射^[7], 见图 1, 图中虚线(对称中心线)可近似为刚性壁面。

* 收稿日期: 2012-09-13; 修回日期: 2012-11-19

基金项目: 总装重大预言研究专项项目(00404010201)

作者简介: 胡宏伟(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事炸药爆炸作用与毁伤技术研究. E-mail: hhw505@163.com

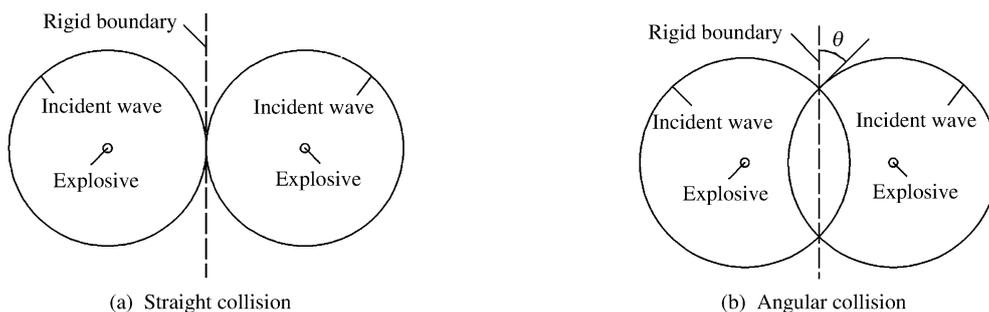


图1 冲击波相互作用模型

Fig. 1 Model of the shockwaves interaction

图1中 θ 为2个冲击波阵面的夹角,正碰撞是 0° 。2个冲击波阵面的夹角 θ 小于临界入射角 θ_{cr} 时,发生规则反射;2个冲击波阵面的夹角 θ 大于临界入射角 θ_{cr} 时,发生非规则反射。

2.2 冲击波参数估算

2个同样强度的对撞冲击波的相互作用等价于冲击波在刚性壁面上的反射过程,冲击波在刚性壁面上的反射超压计算公式^[7]为

$$\Delta p_{rf} = \Delta p_m \left[2 + \frac{\cos \theta}{B} + \frac{(\gamma + 1) \Delta p_m}{(\gamma - 1) \Delta p_m + 2\gamma p_0} \cos^2 \theta \right] \quad (1)$$

式中: Δp_{rf} 为2个冲击波碰撞压力或冲击波反射压力,MPa; p_0 为大气压力,MPa; γ 为空气的绝热指数; θ 为2个冲击波波阵面的夹角, $^\circ$;B由 $\theta = \theta_{cr}$ 时反射参数的连续条件确定

$$B = \begin{cases} \cos \theta & \theta \leq \theta_{cr} \\ \cos \theta_{cr} & \theta > \theta_{cr} \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ_{cr} 临界入射角。

考虑到 θ_{cr} 随冲击波强度变化的特点, θ_{cr} 的近似计算公式为

$$\cos \theta_{cr} = \sqrt{\frac{\gamma + 1}{4}} \sqrt[3]{1 - \exp\left(-2.3 \frac{\Delta p_m}{p_0}\right)} \quad (3)$$

绝热指数的适用范围为 $\gamma = 1.2 \sim 1.4$ 。

冲击波在刚性壁面上的反射冲量计算公式^[8]为

$$i_{rf} = \begin{cases} 2(1 + \cos \theta) & 0^\circ \leq \theta < 45^\circ \\ 2(1 + \cos^2 \theta) & 45^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (4)$$

式中: i_{rf} 为2个冲击波碰撞冲量或冲击波反射冲量, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

3 实验

3.1 实验样品

圆柱形 TNT 压装炸药,质量 200、400 和 800 g,长径比为 1.2 : 1,密度 1.57 g/cm³,传爆药为质量 10 g 的 JH-14,8[#] 铜雷管端面中心起爆。

3.2 测试仪器

采用奥地利 Dewetron 公司生产的 DEWE-5000 型数据采集系统,冲击波信号的采样频率为 1 MHz,采样时间 1 s。传感器为 PCB113 壁面压力传感器,量程 0~3.45 MPa。

3.3 实验布局

试验场的土质为松散的沙土,将装药与地面垂直放置,药柱底部与地面齐平。传感器安装于埋在土中的铁墩上,其敏感面与地面齐平。爆心与传感器的距离均为 2.0 m,试验工况见表 1 和图 2。

表 1 试验工况

Table 1 Experimental condition

Condition	Remarks
600 g	One charge
2×300 g(90°)	Two 300 g charges cross at right angles
2×300 g(180°)	Two 300 g charges at an angle of 180°
3×200 g(90°)	Three 200 g charges cross at right angles
3×200 g(120°)	Three 200 g charges at an angle of 120°

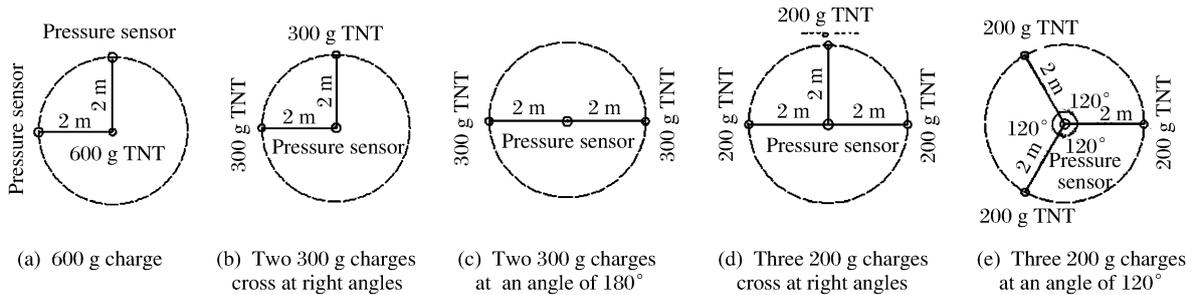


图 2 试验布置图

Fig. 2 Experiment layout

4 结果与讨论

4.1 同步起爆方式

为了保证几个装药起爆的同步性,采用了多个雷管串联的起爆方式,为了验证这种起爆方式的可靠性,对 8# 铜雷管的瞬发度进行了试验测量,试验结果见表 2。

从表 2 中试验结果可知,8# 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。

表 2 8# 铜雷管的瞬发度

Table 2 8# detonator instantaneous

No.	Instantaneous/(μs)	Absolute deviation/(μs)
1	57	-0.5
2	58	0.5
3	57	-0.5

4.2 冲击波参数

不同试验工况的冲击波压力波形见图 3。

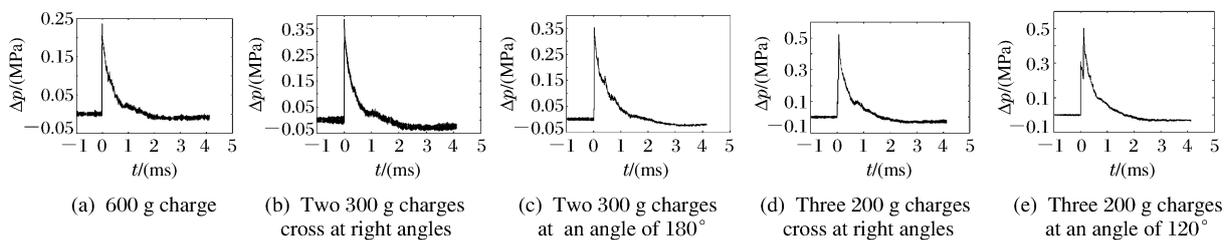


图 3 不同实验工况的冲击波压力波形

Fig. 3 Pressure-time curve under different experiment conditions

从图 3 可看出,装药的起爆同步性较为一致,几个冲击波同时到达了测点,测点的冲击波压力较单个装药爆炸情况有显著提高,即冲击波峰值压力产生了叠加,图 3(d)中波形没有完全叠加是测试距离产生的误差。

不同试验条件下 TNT 装药的地面爆炸冲击波的超压和冲量见表 3。

表3 地面冲击波超压和冲量

Table 3 Shock wave overpressure and impulse on ground surface

Condition	Overpressure/(MPa)	Gain/(%)	Impulse/(Pa·s)	Gain/(%)
600 g	0.25	0	77.7	0
2×300 g(90°)	0.37	48	112.2	44.4
2×300 g(180°)	0.33	32	141.6	82.2
3×200 g(90°)	0.45	80	176.7	127.4
3×200 g(120°)	0.57	128	190.9	145.7

与单个 600 g 装药相比,2 个 300 g 装药夹角为 90°时,冲击波超压增益了 48%,冲量增益了 44.4%,2 个装药夹角为 180°时,冲击波超压增益了 32%,冲量增益了 82.2%。可见,2 个装药同时爆炸时,冲量和冲击波较单个装药都有较大的增益,2 个装药夹角为 180°时的超压的增益与夹角为 90°时相当,但前者的冲量增益约为后者的 2 倍。

与单个 600 g 装药相比,3 个 200 g 的装药夹角为 90°时,冲击波超压增益了 80%,冲量增益了 127.4%,3 个装药夹角为 120°时,冲击波超压增益了 128%,冲量增益了 145.7%,冲击波超压和冲量增加了近一倍以上,3 个装药夹角为 120°时的超压和冲量都大于夹角为 90°时的超压和冲量。3 个 200 g 装药的超压和冲量是 2 个 300 g 装药的 1.22~1.78 倍和 1.25~1.70 倍。

因此,2 个和 3 个装药同步爆炸时,测点的冲击波超压和冲量都显著增加,相对于单个装药分别增加了 1.3~2.3 倍和 1.4~2.5 倍。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,小当量多个装药同步爆炸可以大大提高弹药的毁伤威力。

4.3 2 个装药冲击波超压和冲量试验值和计算值的对比

由表 4 知,2 个冲击波相互作用的超压和冲量,二者的相对误差基本都在 10%以内,说明冲击波与刚壁的作用可以用来计算 2 个同等强度的冲击波的相互作用。

表4 试验值和计算值的对比

Table 4 Experimental data comparison with calculation values

Condition	Overpressure/(MPa)		Relative error /(%)	Impulse/(Pa·s)		Relative error /(%)
	Exp.	Cal.		Exp.	Cal.	
2×300 g(90°)	0.37	0.32	7.25	112.2	90.5	10.70
2×300 g(180°)	0.33	0.38	-7.04	141.6	155.4	4.65

5 结 论

2 个和 3 个装药同步爆炸时,作用区域内的冲击波超压和冲量都显著增加,相对于单个装药分别增加了 1.3~2.3 倍和 1.4~2.5 倍。装药总质量相同时,炸药的组合数量越多,作用区域内的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,小当量多个装药同步爆炸可以大大提高弹药的毁伤威力。冲击波与刚壁的碰撞模型可以用来近似计算 2 个同等强度的冲击波的相互作用。

感谢姬建荣工程师、孔霖工程师在测试工作上给予的大力帮助。

References:

- [1] Phillips J S, Bratton J L. Ground shock analysis of the multiple burst experiments, ADA 088510 [R]. 1978.
- [2] Ruetenik J R, Hobbs N P, Smiley R F. Calculation of multiple burst interactions for six simultaneous explosions of 120 ton ANFO charges, ADA 091978 [R]. 1979.

- [3] Kmetyk L N, Yarrington P. Ground shock from multiple earth penetrator bursts; Effects for hexagonal weapon arrays, SAND 90-0485 [R]. 1990.
- [4] Chen Z L. Study on multi-point explosion effect [C]//Explosion Effects and Protection of Academic Exchanges and Study Group Will Set up. Luoyang: The Third Engineer Research Scientific Institute of Headquarters of the General Staff, 1988. (in Chinese)
陈志林. 关于多点爆炸效应的初步探讨 [C]//爆炸作用及其防护学术交流会和学组会成立会. 洛阳:总参工程兵科研三所, 1988.
- [5] Gu W B, Sun B L, Yang T H, et al. Numerical simulation of explosive shockwave interaction in shallow-layer water [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2003, 4(6): 64-68. (in Chinese)
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.
- [6] Li X D, Liu K X, Zhang G S, et al. Focusing of shock waves in cement mortar plates [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2008, 48(8): 1272-1275. (in Chinese)
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.
- [7] Орленко Л П. Explosion Physics [M]. 3rd Ed. Translated by Sun C W. Beijing: Science Press, 2011: 126-128. (in Chinese)
奥尔连科·Л П. 爆炸物理学 [M]. 第3版. 孙承伟, 译. 北京: 科学出版社, 2011: 126-128.
- [8] Ye X S. Theory Foundation of Explosion in Air and Water [M]. Nanjing: The Engineering Institute of Engineers Corps of PLA, 1981: 173-174. (in Chinese)
叶序双. 空气中、水中爆炸理论基础 [M]. 南京: 中国人民解放军工程兵工程学院, 1981: 173-174.

Interaction of Shock Waves in Ground Burst

HU Hong-Wei, SONG Pu, GUO Wei,
FENG Hai-Yun, ZHANG Li-Jian

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The interaction of shock waves in ground burst was studied by experiment with various experiment layouts. Parameters of shock waves of two or three charges exploding simultaneously were measured using air explosion test system. The results show that the shockwave overpressure and impulse are enhanced greatly, blasting power increased. The change of shockwave parameters was significant for various experiment layouts, where the amount and orientation of explosive source increasingly effected the magnitude of shockwave parameters. Shock waves collision with rigid wall can be used to approximately calculate the interaction of two equal-intensity shock wave.

Key words: explosion mechanics; ground burst; cylindrical charge; shock wave interaction