

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0196

基于地震波触发的战斗部动爆冲击波试验研究*

钞红晓^{1,2}, 胡浩³, 雷强², 高瑞², 姚国庆²

(1. 重庆大学, 重庆 400044;

2. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099;

3. 驻咸阳地区军事代表室, 陕西 咸阳 712099)

摘要: 提出了一种基于地震波触发的战斗部爆炸冲击波超压测试方法, 该方法能可靠获取战斗部动爆冲击波超压峰值。采用提出的测试方法对着靶速度为 0、535 和 980 m/s 的战斗部空中爆炸冲击波分别进行了测试, 并对战斗部动爆冲击波超压峰值测试结果和经验公式计算值进行了对比, 定量分析了战斗部速度对冲击波压力场分布的影响。最后, 在实测数据的基础上采用薄板样条插值方法重建了战斗部动爆冲击波超压三维可视化模型, 为实战复杂环境下基于实测数据研究动爆冲击波特性提供了依据。

关键词: 战斗部动爆; 冲击波超压; 冲击波特性; 地震波触发

中图分类号: O382.1

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

Experimental study on shock wave from dynamic explosion of a warhead based on seismic wave triggering

CHAO Hongxiao^{1,2}, HU Hao³, LEI Qiang², GAO Rui², YAO Guoqing²

(1. Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an 712099, Shaanxi, China;

3. Military Representative Office in Xi'an, Xi'an 712099, Shaanxi, China)

Abstract: A method for measuring the shock wave overpressure of blasting warhead explosion based on seismic wave triggering was proposed. By the proposed method, the peak overpressure of the blast wave from dynamic explosion of a warhead can be obtained reliably. The air explosion shock waves of the blasting warhead with the target velocities of 0, 535 and 980 m/s were measured, respectively. And the measured results of the peak overpressure of the shock wave from dynamic explosion of the blasting warhead were compared with those by the empirical formula calculation. The influence of warhead velocity on the pressure field distribution of the shock wave was analyzed quantitatively. Finally, a three-dimensional visualization model for shock wave overpressure from dynamic explosion of the warhead was reconstructed by using the thin-plate-spline interpolation method. The reconstructed model can provide a basis for studying the characteristics of dynamic explosion shock wave based on the measured data in the complex environment of an actual combat.

Keywords: dynamic explosion of blasting warhead; shock wave overpressure; shock wave characteristics; seismic wave triggering

冲击波作为爆破战斗部的主要毁伤方式之一, 是评估武器毁伤威力的一项重要指标^[1]。毁伤威力评估时, 需要对战斗部炸点周围的冲击波场进行分布式测量, 同时要求多测点实现同步触发。实战环境下战斗部落点及起爆时刻具有一定的随机性, 且战斗部爆炸前具有一定的速度, 战斗部的运动速度会改变

* 收稿日期: 2020-06-15; 修回日期: 2020-11-02

第一作者: 钞红晓(1983—), 男, 博士研究生, 研究员, chaohongxiao@163.com

通信作者: 雷强(1991—), 男, 硕士研究生, 工程师, hyleiqiang@foxmail.com

爆炸冲击波的压力场分布。传统的触发方法如断线触发^[2]、光触发^[3]、无线触发^[1]等均难以实现战斗部实战环境下冲击波超压的可靠触发,因此对战斗部动爆压力场的特性分析主要是通过仿真计算,并结合少量试验数据结果和爆炸相似律获得经验公式^[4-6],缺少实战环境下的试验研究。

本文中,提出了一种基于地震波可靠触发的战斗部空中爆炸冲击波超压测试方法,对着靶速度为 0、535 和 980 m/s 的战斗部空中爆炸冲击波进行了测试分析。结果表明,基于地震波信号触发测试方法能可靠获取战斗部动爆冲击波超压峰值。试验成果可为实战复杂环境下基于实测数据研究动爆冲击波特性提供依据。

1 基于地震波触发的冲击波超压测试系统

1.1 基于地震波触发的冲击波超压测试系统

为了验证基于地震波实现冲击波超压测试触发的可行性,设计了基于加速度信号触发的冲击波超压测试系统并进行了试验。测试系统主要包括传感器、信号调理电路、电源管理、无线通信和信号采集存储等五部分,测试系统组成如图 1 所示。进行冲击波超压测试时,信号调理电路对传感器获得的冲击波超压信号进行滤波、降噪,在进入 FPGA (field programmable gate array) 之前进行信号有无和是否达到触发阈值的判断,A/D 控制模块将模拟信号转为数字信号后存储在外部同步动态存储器 (synchronous dynamic random-access memory, SDRAM) 中,最后通过 USB (universal serial bus) 或无线通信模块将数据上传到上位机上,在上位机上完成数据最终的显示、分析和处理。

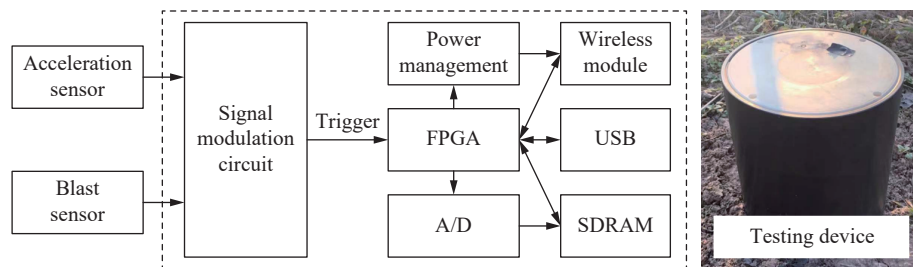


图 1 测试系统

Fig. 1 Test system

1.2 基于地震波信号的冲击波测试触发原理

基于地震波信号的冲击波超压测试触发方法借助配置在各冲击波超压测试节点上的加速度计与信号调理电路,利用地震波传播速度比冲击波传播速度快的特点,在冲击波到达各测试节点之前,提前感应到的加速度信号,经专用调理电路处理后,触发该测试节点的冲击波超压信号存储。其触发原理如图 2 所示,冲击波超压信号采集缓存区划分为循环采集和时序采集两部分,通过加速度信号启动冲击波超压信号的循环采集完成第 1 步触发,通过预设超压阈值的比较进行第 2 步触发,满足触发条件时,立即固化循环采集区,并开始冲击波超压的时序采集。

爆炸时,形成以炸点为中心向四周传播的地震波,地震波传播速度最快的是纵波,其使地面发生上下振动,在地壳中的传播速度: $u_0=5.5\sim 7$ km/s。

(1) 根据金尼-格雷厄姆公式,计算冲击波超压峰值 (p_p , MPa):

$$\frac{p_p}{p_{\text{air}}} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{f_d R}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_d R}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_d R}{0.032} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_d R}{1.35} \right)^2}}, \quad f_d = \sqrt[3]{\frac{p_{\text{air}} T_0}{p_0 T_{\text{air}}}} \quad (1)$$

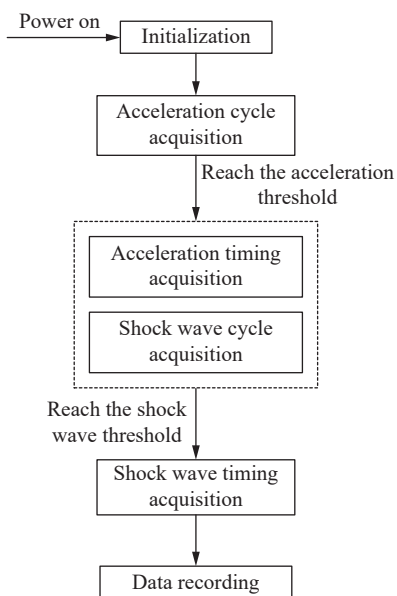


图 2 地震波触发冲击波超压测试原理

Fig. 2 The principle for measuring shock wave overpressure triggered by seismic wave

联立式(1)~(3)可得不同观测距离处冲击波传播平均速度及其与地震波传播平均时间差的关系, 如图 3 所示。由图 3(a)可以看出, 冲击波超压值随爆距的增大而减小, 当距离 $r \geq 5$ m 时, 冲击波的传播平均速度 $u \leq 995$ m/s, 该值远小于地震波的传播速度; 由图 3(b)可以看出, 当距离 $r \geq 5$ m 时, 冲击波与地震波传播到观测点的平均时间差 $\Delta t \geq 4.1$ ms, 而地震波信号触发该测点的冲击波信号只需要几十微秒, 在该时间差内能够完成触发该测试节点的冲击波信号的存储。因此, 当等效 TNT 装药量不大于 100 kg、爆心距不小于 5 m 时, 可以通过安装在测试终端的加速度计采集地震波信号, 作为冲击波超压测试的可靠触发信号。

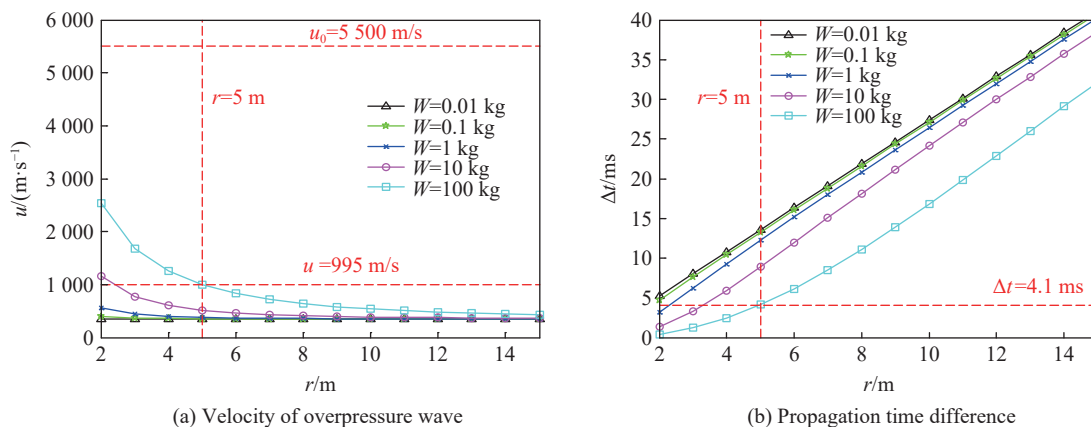


图 3 冲击波超压峰值和传播时间差随距离的变化

Fig. 3 Variation of shock wave overpressure peak and propagation time difference with distance

图 4 是弹丸爆炸时在距爆心 5 m 处获取的加速度和冲击波超压信号, 可以看出加速度信号的触发阈值先于冲击波信号到达测试节点, 提前时长为 12.42 ms, 这进一步验证了基于地震波信号的冲击波测试触发方法原理的可行性。

式中: R 为比例距离, 是观测点到距爆炸中心的距离 r (m) 与炸药 TNT 当量 W (kg) 的立方根之比, 即 $R = r / \sqrt[3]{W}$, 本文中 $0.053 \text{ m/kg}^{1/3} \leq R \leq 500 \text{ m/kg}^{1/3}$; p_{air} 为试验现场大气压; p_0 为标准大气压, $p_0 = 101.325 \text{ kPa}$; T_{air} 为试验现场大气温度; T_0 为标准大气温度, $T_0 = 288.16 \text{ K}$ 。

(2) 根据 Rankine-Hugoiot 方程, 爆炸点空气冲击波传播速度 u 与冲击波超压峰值 p_p 之间的关系为:

$$u = \sqrt{\left(\frac{p_p}{p_0} \times \frac{\gamma + 1}{2\gamma}\right) + 1} \cdot c_0 \quad (2)$$

式中: p_0 为大气压, γ 为空气的比热比, c_0 为波阵面前的空气声速。

(3) 冲击波和地震波传播到观测点的平均时间差 Δt 为:

$$\Delta t = r \left(\frac{1}{u} - \frac{1}{u_0} \right) \quad (3)$$

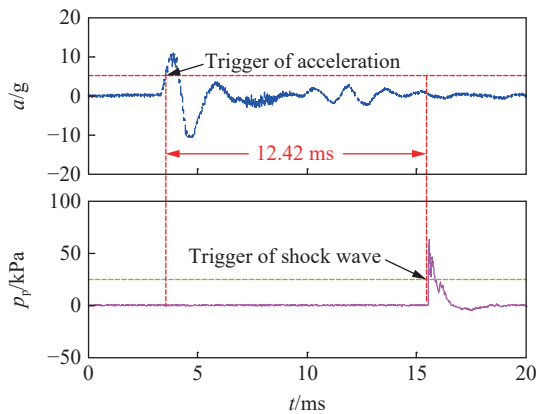


图 4 试验测试的加速度曲线和超压峰值曲线

Fig. 4 Test curves of acceleration and shock wave overpressure peak

2 运动战斗部爆炸冲击波特性分析

2.1 动爆试验测试设置

为分析不同速度战斗部爆炸时冲击波场的分布规律, 建立分布式动爆试验测试系统, 采用球形裸装药, 装药量为 1.2 kg。比例距离 R 分别为 4.71、9.41 和 14.12 $\text{m}/\text{kg}^{1/3}$, 战斗部着靶速度 v_0 分别为 0、535 和 980 m/s , 火炮火药发射获得着靶速度, 距目标炸点 50 m 处顺序放置 4 台天幕靶, 每台间隔 20 m, 通过区截法获取弹丸在天幕靶处的飞行速度, 再结合炮口靶获取的出炮口速度以及制式弹的外弹道模型, 计算出目标炸点处弹丸速度。采用模块装药, 速度为 535 和 980 m/s 弹丸的装药分别为 3×B 模块和 6×B 模块, 每个 B 模块装药 2.35 kg, 引信采用瞬触发引信。战斗部与地靶平面的水平夹角 β 为 45° , 测点分布如图 5 所示, 以爆炸中心为原点, 建立三维坐标系 $Oxyz$, 分别在地靶平面距爆心 5、10、15 m 处安装冲击波超压测试装置。在 Oxy 平面上(即地靶平面), 爆心到测试点的连线与 x 轴的夹角为 θ , 受试验条件限制, 共 24 个测点。理论上测点越多, 对爆炸冲击波的重建越有利。

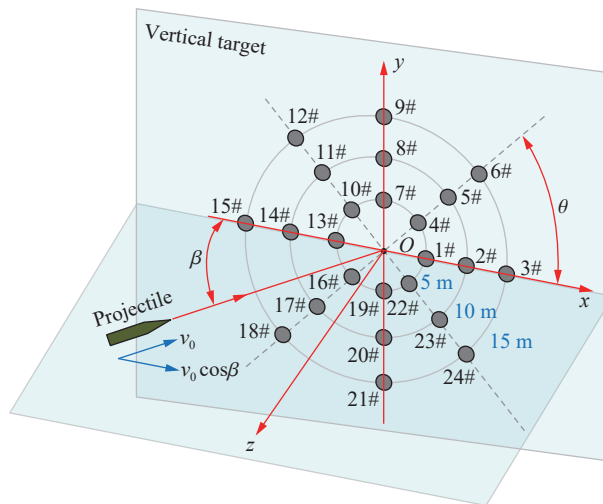


图 5 战斗部爆炸测点分布

Fig. 5 Measuring points of blasting warhead explosion

2.2 爆炸冲击波特性分析

图 6 为比例距离 $R=4.71 \text{ m}/\text{kg}^{1/3}$ 时不同方向上测得的冲击波超压时域曲线。由图 6 可知, 以静爆条件下($v_0=0 \text{ m}/\text{s}$)的冲击波超压时域曲线为参照, 当 $\theta=0^\circ$ 时, 动爆冲击波超压远高于静爆冲击波超压; 当

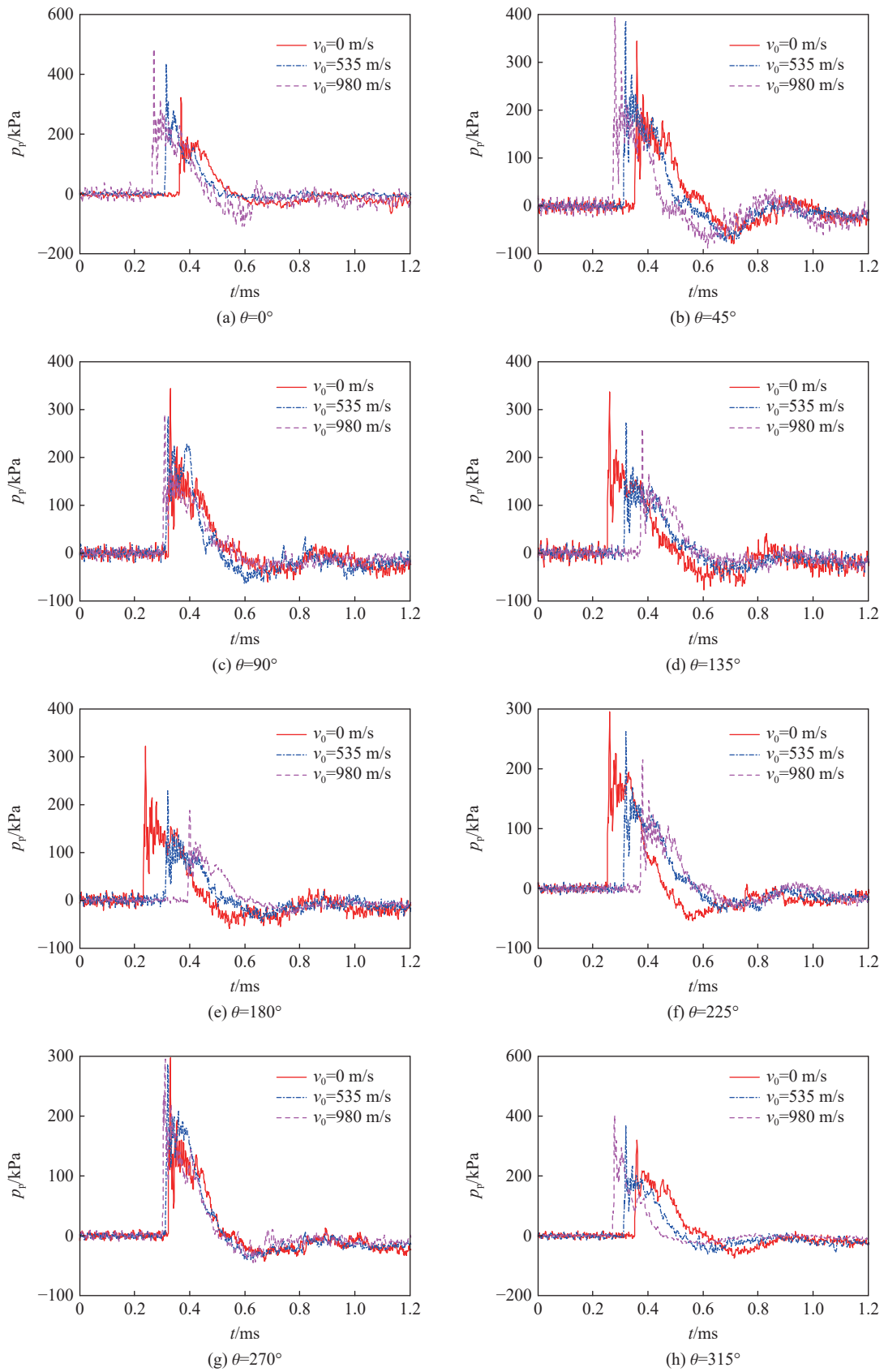


图 6 不同方向的冲击波超压时域曲线

Fig. 6 Shock wave overpressure-time curves in different directions

θ 增大到 45° 时, 动爆冲击波超压有所下降, 但是仍然高于静爆冲击波超压; 当 θ 增大到 90° 时, 动爆冲击波超压继续降低, v_0 对冲击波超压的影响变小, 不同速度战斗部爆炸的冲击波超压趋于一致, 与静爆冲击波压力相当; 随着 θ 的进一步增大, 动爆冲击波压力进一步降低, 开始低于静爆冲击波压力; 当 θ 增大到 180° 时, 测点处于与战斗部速度完全相反的方向, 为压力最低点, 此时的冲击波超压远低于静爆冲击波超压。此外, 在动爆冲击波超压高于静爆冲击波超压的方向上, 即 θ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和 $270^\circ \sim 360^\circ$ 范围内时, v_0 越大, 压力越高, 冲击波到达时间越短; 相反地, 在动爆冲击波超压低于静爆冲击波超压的方向上, 即 θ 在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 范围内时, v_0 越大, 压力越低, 冲击波到达时间越长。

读取冲击波的超压峰值, 得到不同速度战斗部的爆炸冲击波超压峰值对比曲线, 如图 7 所示。由图 7 可知: (1) 比例距离相同时, 战斗部爆炸的冲击波超压峰值随 θ 的增大近似呈余弦衰减, 当 $\theta=0^\circ$ 时, 超压峰值最大, $\theta=180^\circ$ 时, 超压峰值最小, 并且战斗部着靶速度 v_0 越大, 超压峰值衰减得越快; (2) 以静爆冲击波超压峰值为参照, 在与战斗部速度方向相同的区域 ($0^\circ \sim 90^\circ$ 和 $270^\circ \sim 360^\circ$), 动爆冲击波存在较大的压力升, 超压峰值大于静爆状态下的超压峰值, 使得冲击波场呈现出局部高压区, 而在与战斗部速度方向相反的区域 ($90^\circ \sim 270^\circ$), 则存在较大的压力降。由此, 可将运动战斗部的爆炸冲击波场分为压力升和压力降两个区域, 分界点大约在 $\theta=90^\circ$ 处。

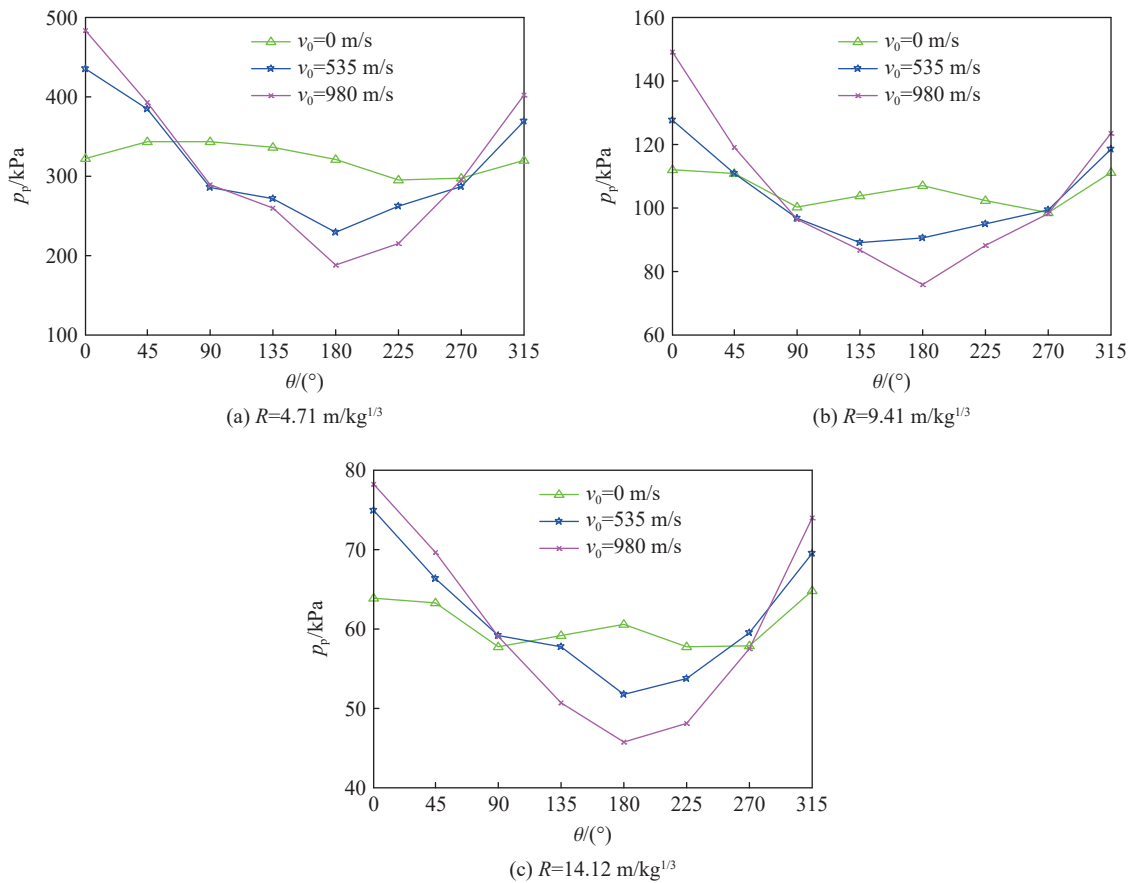


图 7 不同速度战斗部的冲击波超压峰值曲线

Fig. 7 Shock wave overpressure peak curves of the blasting warheads with different velocities

根据战斗部动爆冲击波超压峰值 $p_{p,d}$ 与战斗部相对靶平面的速度 v'_0 及静爆冲击波超压峰值 $p_{p,s}$ 的关系^[4]:

$$\frac{p_{p,d}}{p_{p,s}} = \left(1 + \frac{0.3}{1+R} \frac{v'_0}{c_0} \cos \theta \right)^2 \quad (4)$$

战斗部在靶平面的投影速度 v'_0 为:

$$v'_0 = v_0 \cos \beta \tag{5}$$

由式(1)、(4)、(5)联合可得战斗部动爆冲击波超压峰值的经验公式计算值, 实测战斗部动爆冲击波超压峰值 $p_{p,e}$ 与经验公式计算结果 $p_{p,d}$ 对比如表 1 所示, 其中 $\varepsilon=(p_{p,e}-p_{p,d})/p_{p,e}$ 。由表 1 可知, 实测战斗部静爆冲击波超压峰值与经验公式计算结果一致性较好, 除个别点外, 实测战斗部动爆冲击波超压峰值与理论值较为接近, 相对误差小于 20%, 且相对误差随着战斗部速度的增大而增大。此外, 越靠近战斗部运动方向轴线 ($\theta=0^\circ$ 和 $\theta=180^\circ$) 的实测冲击波超压峰值相对误差越大, 垂直于战斗部运动方向轴线 ($\theta=90^\circ$ 和 $\theta=270^\circ$) 的实测冲击波超压峰值相对误差较小。

表 1 试验结果与理论值对比
Table 1 Comparison between experimental and theoretical results

$R/(m \cdot kg^{-1/3})$	$\theta/(^\circ)$	$v_0=0$ m/s			$v_0=535$ m/s			$v_0=980$ m/s		
		$p_{p,e}/kPa$	$p_{p,d}/kPa$	$\varepsilon/\%$	$p_{p,e}/kPa$	$p_{p,d}/kPa$	$\varepsilon/\%$	$p_{p,e}/kPa$	$p_{p,d}/kPa$	$\varepsilon/\%$
4.71	0	321.39	317.35	1.26	434.86	355.57	18.23	483.16	389.02	19.48
	45	343.49	317.35	7.61	384.34	344.15	10.46	392.65	367.28	6.46
	90	342.92	317.35	7.45	285.10	317.35	-11.31	288.32	317.35	-10.07
	135	335.52	317.35	5.41	270.90	291.64	-7.65	258.87	271.08	-4.72
	180	320.94	317.35	1.12	228.45	281.30	-23.14	187.89	252.98	-34.64
	225	294.20	317.35	-7.87	261.93	291.64	-11.34	215.23	271.08	-25.95
	270	296.57	317.35	-7.01	285.98	317.35	-10.97	294.97	317.35	-7.59
	315	319.73	317.35	0.74	368.50	344.15	6.61	402.27	367.28	8.70
9.41	0	112.04	104.86	6.41	127.36	111.70	12.30	149.08	117.54	21.15
	45	110.61	104.86	5.19	110.62	109.67	0.86	118.86	113.76	4.30
	90	100.10	104.86	-4.76	96.52	104.86	-8.65	96.21	104.86	-9.00
	135	103.81	104.86	-1.02	88.96	100.16	-12.59	86.69	96.34	-11.13
	180	106.88	104.86	1.89	90.35	98.25	-8.75	75.88	92.91	-22.44
	225	102.12	104.86	-2.69	94.81	100.16	-5.64	88.06	96.34	-9.40
	270	98.28	104.86	-6.70	99.25	104.86	-5.66	98.10	104.86	-6.90
	315	111.00	104.86	5.53	118.45	109.67	7.41	123.47	113.76	7.86
14.12	0	63.87	63.04	1.31	74.87	65.85	12.05	78.23	68.24	12.77
	45	63.23	63.04	0.30	66.35	65.02	2.01	69.56	66.69	4.12
	90	57.72	63.04	-9.21	59.16	63.04	-6.55	59.03	63.04	-6.78
	135	59.08	63.04	-6.70	57.75	61.08	-5.78	50.63	59.48	-17.48
	180	60.51	63.04	-4.17	51.72	60.28	-16.56	45.73	58.04	-26.91
	225	57.75	63.04	-9.16	53.69	61.08	-13.77	48.06	59.48	-23.77
	270	57.78	63.04	-9.10	59.52	63.04	-5.92	57.52	63.04	-9.58
	315	64.73	63.04	2.61	69.42	65.02	6.34	73.98	66.69	9.85

2.3 爆炸冲击波场重建

以表 1 中的冲击波超压峰值为插值点, 利用 MATLAB 数据处理软件的薄板样条插值方法(thin-plate-spline interpolation)对实测数据进行插值(该插值方法可以使得三维超压曲面弯曲能量最小), 得到战斗部速度分别为 0、535、980 m/s 的爆炸冲击波超压峰值场分布和等压曲线, 如图 8~10 所示。由图 8 可知, 战斗部静爆冲击波超压峰值在各个方向基本相同; 由图 9~10 可知, 战斗部动爆冲击波超压峰值在战斗部运动速度方向增强, 在战斗部运动相反方向减弱, 且战斗部速度越大, 增强和减弱的程度越大。

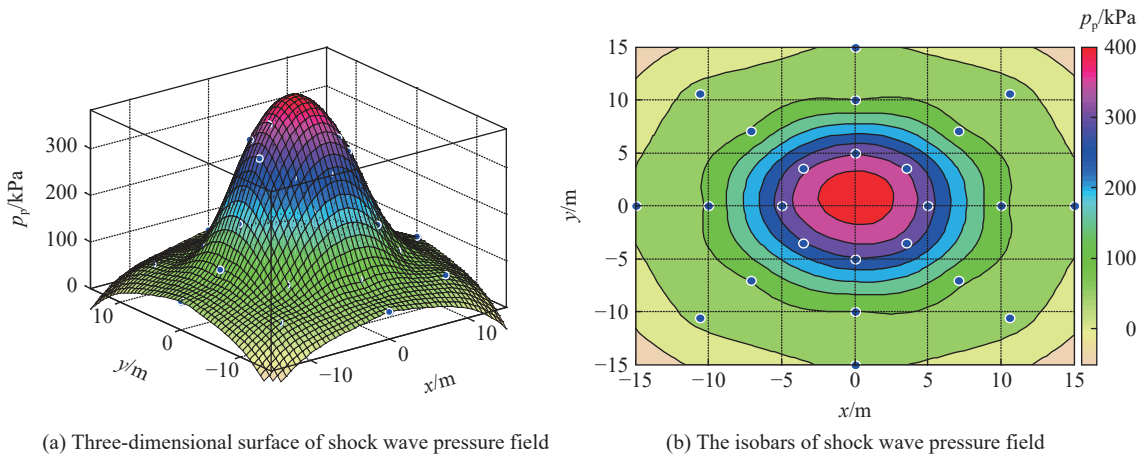


图 8 战斗部速度为 0 m/s 的冲击波超压峰值场分布

Fig. 8 Shock wave overpressure field for the blasting warhead with the velocity of 0 m/s

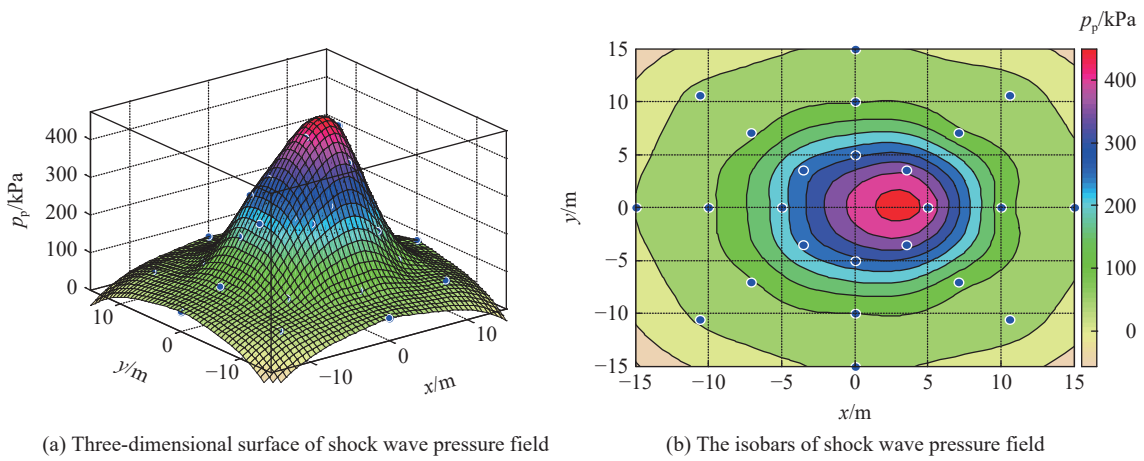


图 9 战斗部速度为 535 m/s 的冲击波超压峰值场分布

Fig. 9 Shock wave overpressure field for the blasting warhead with the velocity of 535 m/s

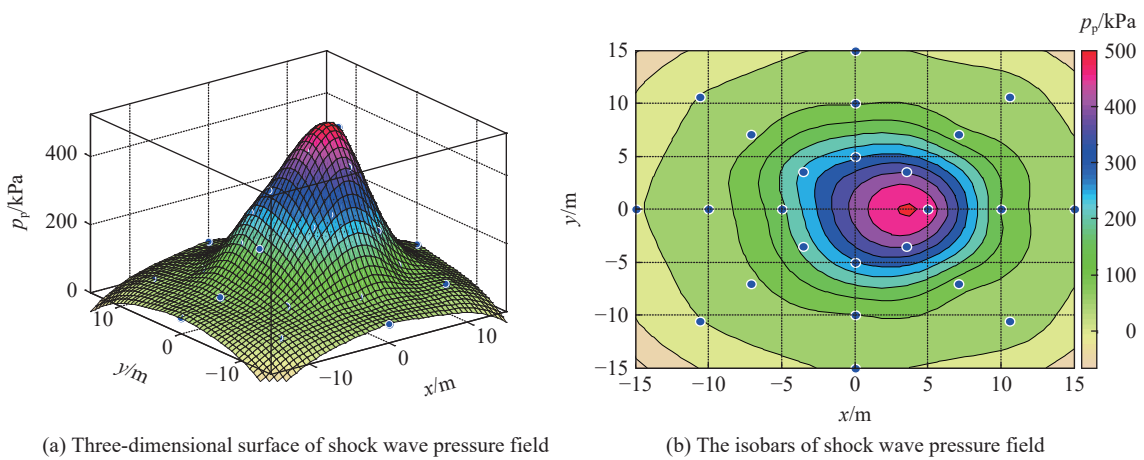


图 10 战斗部速度为 980 m/s 的冲击波超压峰值场分布

Fig. 10 Shock wave overpressure field for the blasting warhead with the velocity of 980 m/s

3 结 论

提出了一种基于地震波可靠触发的战斗部空中爆炸冲击波超压测试方法, 并对速度为 0、535 和 980 m/s 的战斗部空中爆炸冲击波进行了测试研究, 通过测试结果和经验公式计算值的对比分析, 以及重建的战斗部动爆冲击波超压三维可视化模型, 可以得出以下结论:

(1) 本文中提出的测试方法能可靠获取战斗部动爆冲击波超压峰值;

(2) 战斗部动爆冲击波超压峰值在战斗部运动速度方向增强, 在战斗部运动相反方向减弱, 且战斗部速度越大, 增强和减弱的程度越大。

参考文献:

- [1] 郭炜, 俞统昌, 王建灵. 空气冲击波压力的地面测量技术 [C]// 第三届全国爆炸力学实验技术交流会论文集. 合肥: 中国力学学会, 中国科学技术大学, 2004: 26.
GUO W, YU T C, WANG J L. Ground measurement technology for air shock wave pressure [C]// Proceedings of the 3rd National Conference on Experimental Technology of Explosive Mechanics. Hefei: Chinese Society of Mechanics, University of Science and Technology of China, 2004: 26.
- [2] 杜红棉, 祖静. 无线冲击波超压测试系统研究 [J]. *火力与指挥控制*, 2012, 37(1): 198–200. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0640.2012.01.051.
DU H M, ZU J. Research on wireless testing system of shock wave overpressure [J]. *Fire Control and Command Control*, 2012, 37(1): 198–200. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0640.2012.01.051.
- [3] 黄正平. 爆炸与冲击电测技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 54–55.
HUANG Z P. Explosion and shock measuring technique [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 54–55.
- [4] 蒋海燕, 李芝绒, 张玉磊, 等. 运动装药空中爆炸冲击波特性研究 [J]. *高压物理学报*, 2017, 31(3): 286–294. DOI: 10.11858/gywlb.2017.03.010.
JIANG H Y, LI Z R, ZHANG Y L, et al. Characteristics of air blast wave field for explosive charge moving at different velocities [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(3): 286–294. DOI: 10.11858/gywlb.2017.03.010.
- [5] 陈龙明, 李志斌, 陈荣. 装药动爆冲击波特性研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(1): 013201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0029.
CHEN L M, LI Z B, CHEN R. Characteristics of dynamic explosive shock wave of moving charge [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(1): 013201. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0029.
- [6] 郭亚丽, 韩焱, 王黎明. 基于广义逆算法的冲击波超压场重建方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(6): 764–768. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)06-0764-05.
GUO Y L, HAN Y, WANG L M. Overpressure reconstruction of shock wave based on generalized inverse theory [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(6): 764–768. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)06-0764-05.

(责任编辑 张凌云)