

文章编号: 1006-9941(2008)04-0410-05

云爆剂爆炸/冲击波参数研究

李秀丽, 惠君明, 王伯良

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要:对一种新型云爆药剂及其试验装置进行了外场静爆试验, 并对其爆炸/冲击波参数和后续燃烧现象进行研究。结果表明: 总装药量为 30 kg 的试验弹其爆炸火球最大直径可达 17.4 m, 是原始装药直径的 75.65 倍。从所测爆炸场超压曲线发现存在前后两个正压作用区, 第二个正压区呈现较好的规律性; 二次冲击波在火球区外形成, 火球区内是后续燃烧反应对爆炸波加载而引起的压缩波积累压力平台; 二次冲击波峰值压力不小于第一个冲击波的 40%, 二次冲量占总冲量的 12.5% ~ 43.7%, 其对爆炸/冲击波威力的贡献不可忽略。

关键词:爆炸力学; 云爆剂; 冲击波; 爆炸火球

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

1 引言

燃料空气炸药 (FAE) 发展至今已有四十余年历史, 自问世以来, 各军事强国一直没有间断对其研究。按引爆机制不同, 一般将 FAE 分为二次引爆型 (DEF AE) 和一次引爆型 (SEFAE) 两类。传统意义上的燃料空气炸药是二次引爆型, 其主装药为燃料; 而将一次引爆型的主装药称为云爆剂, 是目前的研究热点。

国外对一次引爆技术的研究起步较早, 但快速发展是在俄罗斯研制成功“什米尔”单兵云爆弹之后; 国内的一次引爆 FAE 研究是在“什米尔”引进之后逐渐发展起来的, 一些单位先后对几个云爆剂配方及其性能进行过研究^[1-6]。曾经研究过的一次引爆技术途径主要有以下几种^[7]: 燃烧转爆轰型 (DDT 型)、化学引爆型、活性外壳型和复合相爆炸混合物型。其中后两种途径实施更为方便, 已有应用实例。

(1) “活性外壳”云爆剂由高能金属粉经特殊工艺加工而成, 其本身不能自行点燃, 需在外加能量的作用下反应, 确切地说仅是一种高能活化的燃料^[8]。使用时, 将该种云爆剂装填在高能炸药装药外层。战斗部爆炸时, “活性外壳”在中心高能炸药爆轰作用下发生裂解, 所包含的高能活性物质微粒被迅速抛撒并与周围空气发生持续的燃烧反应, 其中部分“活性外壳”反应释放的能量与中心炸药爆炸波能量耦合, 从而使爆炸/冲击波得到增强, 大大提高了毁伤软目标的能力。笔者认为“什米尔”单兵云爆弹的主装药, 固-液双

组分云爆剂, 就属于“活性外壳”类云爆剂。

(2) 复合相爆炸混合物云爆剂从本质上讲就是一种非理想炸药, 药剂中含有部分起敏化作用的高能炸药。现所研制的温压炸药基本属于此种类型, 如美国某温压弹的战斗部装药。它们的基本成分为高能炸药和活性燃料 (包括活性剂和金属粉高能可燃剂), 有的还含有少量的黏结剂和其它添加剂^[9-10]。

战斗部爆炸时, 药剂在中心炸药的爆炸作用下飞散到四周, 同时药剂中的高能炸药组分首先被点火或引爆, 发生剧烈反应产生高温高压, 从而点燃药剂中其他组分, 在扩散中与空气混合, 形成边飞散边与氧气反应而释放能量的过程。

按目前较为公认的观点, 笔者认为, 复合相云爆剂的释能反应可以归纳为以下三个过程:

(a) 最初的无氧爆炸反应, 主要是高能炸药分子化合物内的反应, 不需要从周围空气中吸取氧气, 持续时间小于 1 μ s。

(b) 爆炸后的无氧燃烧反应, 主要是第一阶段化学炸药的爆炸产物 CO_2 、 CO 和 H_2O 在高温高压条件下与金属粉 (一般为铝) 的二次反应, 该阶段尚无外来空气参与反应, 持续时间小于 1 ms。

(c) 爆炸后的有氧燃烧反应, 主要是爆炸后药剂中的可燃物质或碎片如 Al, H, C, CO 等与空气中氧气的快速燃烧反应, 持续时间可达数百毫秒, 其中对空气爆炸波有增强作用的为数毫秒至几十毫秒内释放的能量。

根据云爆战斗部技战术要求及毁伤目标性质的不同, 战斗部装药可选择不同的云爆药剂, 即“活性外壳”型或复合相爆炸混合物型或兼有两者性质。本实验采用的云爆药剂兼顾复合相爆炸混合物和“活性外

收稿日期: 2008-01-18; 修回日期: 2008-04-10

作者简介: 李秀丽 (1980 -), 女, 博士研究生, 研究方向为新型含能材料及其性能测试。e-mail: echoli331@yahoo.com.cn

壳”两种性质,目的是突出第三步“有氧燃烧反应”,从而提高药剂的爆炸/冲击波威力。通过外场静爆试验,研究了该新型云爆药剂的爆炸/冲击波参数,并对实验现象和结果进行了分析。

2 实验研究

2.1 实验条件

试验装置为轴对称圆柱形薄壁铝壳体模拟弹,弹体尺寸为 $\Phi 230\text{ mm} \times 590\text{ mm}$,主装药为自行研制的云爆药剂(其中含有部分化学活性材料),装药量为 25 kg,中心抛撒炸药量为 5 kg,总装药量 30 kg。测试场地布置如图 1 所示,试验在开阔平坦的硬质土壤场地上进行,炸高 1.2 m。以爆心为中心,对称布置两条地面压力测试线,压力传感器安装在钢制基础上,传感器接受端面与地面平齐,分别距爆心 3 m、4 m、5 m、6 m、8 m、10 m、12 m、14 m、17 m、20 m、22 m、24 m,共 24 个测点,用以测试爆炸/冲击波衰减规律及其参数。红外热成像仪 MicronsScan 7200 布置在距爆心 130 m 的安全工事内,用以记录试验弹的爆炸火球参数,得到的红外图像上 1 个像素点对应实际距离 0.107 m。

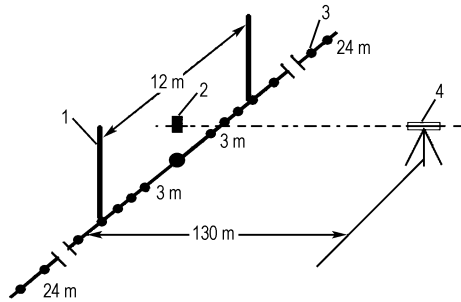


图 1 测试场布置示意图

1—标杆, 2—FAE 试验弹, 3—传感器, 4—红外热成像仪

Fig. 1 Sketch of experiment instrument arrangement

1—symbol pole, 2—FAE test bomb, 3—pressure sensor, 4—infrared thermo-imaging camera

实验采用 8 号电雷管起爆试验弹,并采用同步仪控制压力测试系统的触发和试验弹的引爆保持同步。在测压同时还采用瞬态多光谱测温系统测试爆炸场温度(该测温结果在本文中不作讨论),测温系统也由同步仪控制触发。在判读数据时发现测温系统得到的光谱信号在时间轴上与零点有较大的偏移,判断是由于雷管的起爆延时引起的,因此试验弹真正的起爆时间并非压力测试系统的计时零点,而是测温系统接收到光谱辐射信号的时刻。如图 2 为测温系统某一测试通道得到的光谱信号曲线,由图中得到试验弹的起爆时

间偏离计时零点 5.4 ms。在处理冲击波参数时需对计时零点作相应的校正,而下文中给出的压力时间曲线则是原始数据,未对计时零点作校正。

2.2 实验现象

(1) 压力测试结果表明两条测试线上得到的压力曲线和参数基本一致,取其中一条测试线上的结果进行分析,图 3 为该测试线上不同距离处各压力传感器测得的超压随时间变化曲线,图中外纵轴表示该压力曲线对应的距爆心距离,每一栏内的纵轴数据表示该压力曲线超压的上下限。

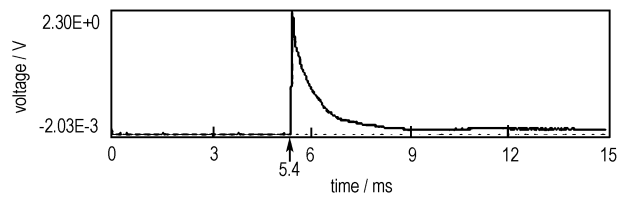


图 2 测温系统光谱信号

Fig. 2 Spectrum signal of temperature measurement system

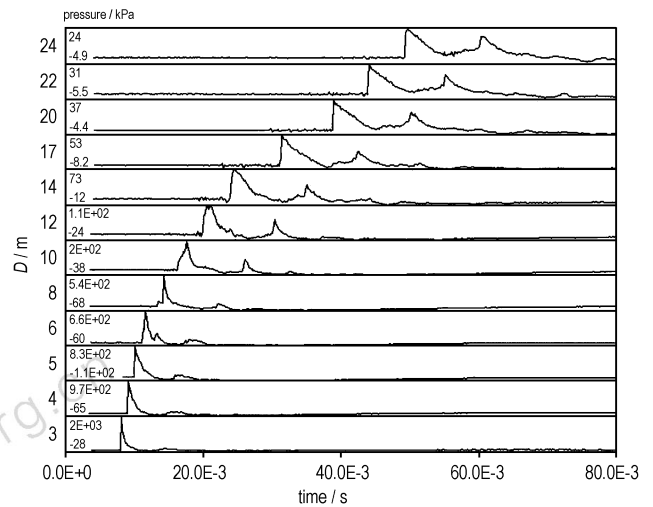


图 3 不同距离上各测试点的压力曲线

Fig. 3 The pressure curves on each pressure sensor at different distances

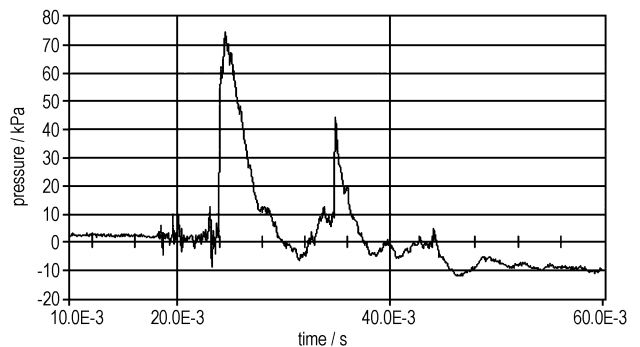


图 4 典型压力曲线(14 m 处)

Fig. 4 Typical pressure curve at 14 m

由图3可见,从3 m到24 m不同距离处测得的压力曲线上均观察到两个正压区,第二个正压区呈现较好地规律性。其中典型的压力曲线如图4所示。根据炸药爆炸后空气冲击波的形成理论^[11],传统高能炸药爆炸后,爆炸产物经历多次膨胀和压缩脉动,但对爆炸破坏作用有实际意义的只是第一次膨胀和压缩的脉动过程,也就是说传统高能炸药爆炸后一般只形成一个正压区。

已有人在测试含铝混合炸药冲击波参数时观察到类似二次冲击波^[12],并分析是由于铝粉的二次反应引起的,但未见冲击波传播规律性的报道;文献[4]报道的一次引爆FAE的空气冲击波波形也与此类似,但没有说明原因。

为确认本实验结果中有规律地出现第二个正压区的原因,在同一实验场地进行多次重复性实验,均观察到类似双波结构,而相同条件下测试得到的TNT超压曲线上则没有发现类似双波,因此排除了由于场地、测

试仪器等因素产生第二个正压区的可能性,可以判断第二个正压区是由药剂本身的反应特性引起的。

(2)由红外热成像仪得到的爆炸火球红外热图像如图5所示,火球表面的最高温度约为2755.8℃,接近于TNT的爆温2827℃^[13];火球最大直径约为17.4 m,是弹体原始直径(230 mm)的75.65倍。

2.3 结果和分析

处理得到相应的冲击波参数值列于表1,表中的正压区出现时间已对计时零点作校正。

(1)由表1中正压区的出现时间可见,第二个正压区的出现时间 t_2 比第一个正压区的出现时间 t_1 滞后了5.53~9.9 ms,由复合相云爆药剂三个释能过程的持续时间判断,该正压区应该是由爆炸产物以及前一步反应中未及反应的部分铝粉的后燃燃烧,即第三步反应引起的,其中药剂中含有的部分化学活性物质在这一阶段发挥了很大的作用,大大增强了铝粉的后燃效应。

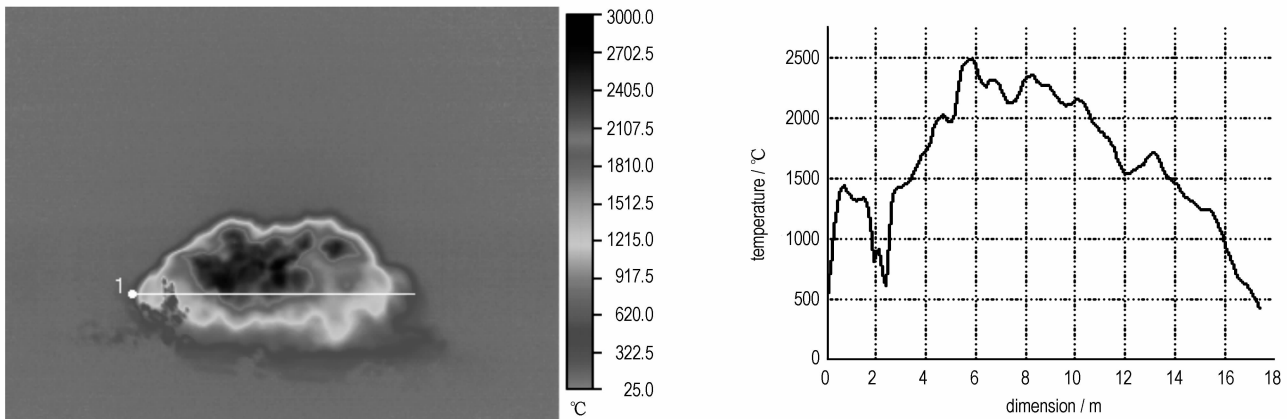


图5 爆炸火球红外热图像及相应直线上的温度分布

Fig.5 Infrared thermal image of blast fireball and temperature distribution of corresponding line

表1 冲击波参数

Table 1 Shock wave parameters

distance from sensor to the center of blast/m	overpressure peak value/kPa		appearance time of positive pressure zone/ms			impulse/kPa·ms		
	Δp_1	Δp_2	t_1	t_2	$t_2 - t_1$	I_{+1}	I_{+2}	I_{+All}
3	1994.85	117.94	2.59	8.12	5.53	901.74	201.48	1103.22
4	1543.07	99.28	3.46	9.15	5.69	892.07	100.77	992.84
5	986.23	84.91	4.58	10.37	5.79	708.78	36.71	745.49
6	876.57	73.39	5.63	11.9	6.27	646.66	80.4	727.06
8	613.12	43.86	7.78	16.49	8.71	382.21	23.5	405.71
10	204.26	86.38	10.8	20.42	9.62	269.23	38.56	307.79
12	127.75	56.74	14.38	24.28	9.90	218.08	33.85	251.93
14	75.70	43.8	18.48	27.63	9.15	185.71	56.13	241.84
17	63.52	25.33	25.76	33.25	7.49	130.67	54.82	185.49
20	40.46	20.85	33.3	39.43	6.13	102.79	79.81	182.60
22	31.21	20.94	38.49					151.18
24	23.63	18.25	43.86					158.05

Note: Blank column indicates no item; suffix 1 indicates the first positive pressure zone; suffix 2 indicates the second positive pressure zone.

(2) 由表 1 中峰值超压数据可见,第二个正压区的压力峰值并不随距离增加而单调下降,而是在 10 m 处又出现一个压力的上升突跃。结合图 3 可见,在 10 m 之前形成的第二个正压区呈现一个压力平台,到 10 m 以后才形成压力波峰,二次冲击波超压峰值不小于第一个冲击波的 40%。图 6 是压力突跃前后时刻的波形图。

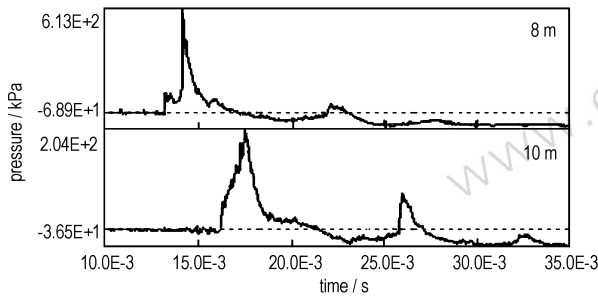


图 6 8 m 和 10 m 处压力曲线
Fig. 6 The pressure curves at 8 m and 10 m

由红外热成像仪的测试结果可知,火球最大直径为 17.4 m,即 8 m 处传感器尚处于火球内部,而 10 m 处传感器已处于火球覆盖范围之外。因此 3 ~ 8 m 处由于火球内部后续燃烧反应对爆炸/冲击波的加载作用,在第一个压力峰过后,压缩波继续累加,在负压区中形成一个压力的抬升,此时二次冲击波尚未形成,由于火球内部流场较为复杂,后续燃烧反应对爆炸/冲击波的加载作用很难定量说明,第二个正压区中压力波峰的位置及其传播规律亦较难判断,但总的趋势是压力峰值随距离增大逐渐减小。

10 m 以外则为空气冲击波的传播过程,此时二次冲击波已经形成,前后两个冲击波的传播符合空气冲击波传播规律,即同向传播的两个冲击波,由于走在前面的冲击波相对波后介质是以亚声速传播,而其后面的冲击波相对这一部分介质则是以超声速传播,因此后一个冲击波最终将赶上前面的冲击波。由图 3 可见,两个正压区在近场处是分离的,到远场后(20 m 以后)后面的正压区赶上了前面的正压区,并最终相接在一起,使冲击波总的作用时间和冲量增加,从而提高药剂的冲击波威力。

(3) 两正压区出现的时间差值随距离的变化曲线如图 7 所示。由图 7 可见,随着距离的增加,两个正压区出现的时间差存在一个先增大后减小的过程。根据爆炸冲击波形成理论及其传播规律^[11],传统炸药爆炸后也可能形成第二个正压区,但其大小基本可以忽略,且其与第一个正压区出现的时间差是逐渐增大的。而

本实验中两个正压区出现的时间差在 12 m 之后反而减小了,说明此时第二个正压区的前导激波速度已超过了第一个正压区的前导激波。计算得到两正压区的前导激波平均传播速度见表 2,可见,在火球区域内,第二个正压区前导激波的平均传播速度(V_2)呈下降趋势,二次冲击波形成后, V_2 出现一个突跃(9 m 处),在 13 m 处达到最大而后下降,13 m 处 V_2 已超过 V_1 。分析原因为:在火球区域之外,二次冲击波形成,冲击波不依赖于火球而在空气中自行传播,但药剂后燃效应对第二个冲击波仍有加载作用,使其运动速度衰减趋缓,甚至可能使冲击波速度增加;而第一个冲击波的速度一直是衰减的,因此传播到一定距离后,出现后续冲击波速度超过前沿冲击波的现象。

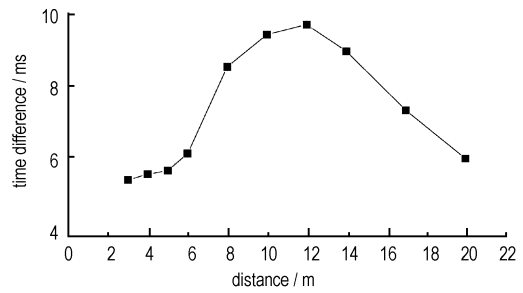


图 7 两正压区出现的时间差随距离变化曲线
Fig. 7 The time difference of two positive pressure zones vs distance

表 2 两正压区前导激波的平均传播速度
Table 2 Average spread velocity of precursor waves of two positive zones

D/m	$V_1/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_2/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
3.5	1.15	0.97
4.5	0.89	0.82
5.5	0.95	0.65
7.0	0.93	0.44
9.0	0.66	0.51
11.0	0.56	0.52
13.0	0.49	0.60
15.5	0.41	0.53
18.5	0.40	0.49
21.0	0.39	
23.0	0.37	

Note: Blank column indicate no item; suffix 1 indicates the first positive pressure zone; suffix 2 indicates the second positive pressure zone.

(4) 由表 1 中冲量数据可见,第二个正压区产生的冲量使总冲量得到了不同程度的增加,尤其是火球区域外(10 m 外)二次冲击波产生的冲量体现了较好的规律性,其值占总冲量的 12.5% ~ 43.7%,对药剂

冲击波威力的贡献不可忽略。

3 结论

在对含活性成分云爆药剂的爆炸/冲击波参数进行实验研究时发现,该云爆药剂爆炸后出现有规律的两个正压作用区,分析认为第二个正压区是由药剂的后续燃烧反应引起的。

分析实验结果发现二次冲击波在火球区外形成,而火球区内则是压缩波的累积过程,两者对冲击波威力的加强作用均不可忽略,药剂的总冲量得到增加,提高了药剂的毁伤威力。

本实验只是得到“含活性成分云爆药剂的后续燃烧反应对冲击波有加载作用”的定性结果,要得到定量结果,如药剂总能量中有多少用于冲击波的加载,活性成分对后续燃烧的贡献有多少等,有待后续实验的进一步研究,从而为该种云爆药剂的配方设计和性能优化提供依据。

致谢:

感谢解立峰和冯光辉、李雷兵等对本实验工作提供的帮助。

参考文献:

- [1] 陈瑛,刘家聪,解立峰,等. 液固复合云爆药剂爆炸特性的试验研究[J]. 含能材料,2004,12(3): 134-137.
CHEN Ying, LIU Jia-cong, XIE Li-feng, et al. Experimental study on the explosion performance of SEFAE[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(3): 134-137.
- [2] QIN You-hua, ZHOU Ting-qing, SHEN Zhao-wu, et al. Study on the explosion characteristics of single igniting solid sensitized fuel air explosive[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, 14(3): 284-288.
- [3] 裴明敬,许学忠,胡华权,等. 抗高过载 FAE 燃料的性能[J]. 炸药学报,2005,28(1): 31-38.
PEI Ming-jing, XU Xue-zhong, HU Hua-quan, et al. Properties of anti-high-loading Fuel-Air-Explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, 28(1): 31-38.
- [4] 张奇,白春华,刘庆明,等. 一次引爆燃料空气炸药及其爆炸效应研究[J]. 实验力学,2000,15(4): 448-453.
ZHANG Qi, BAI Chun-hua, LIU Qing-ming, et al. Investigation on single igniting fuel-air explosive and its explosion effects[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2000, 15(4): 448-453.
- [5] 阚金玲,刘家聪. 一次引爆云爆剂的爆炸特性: 后燃反应对爆炸威力的影响[J]. 爆炸与冲击,2006,26(5): 404-409.
KAN Jin-ling, LIU Jia-cong. The blast characteristic of SEFAE: Effect of after-burning on blast power[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(5): 404-409.
- [6] 裴明敬,毛根旺,胡华权,等. 含铝温压燃料性能研究[J]. 含能材料,2007,15(5): 441-446.
PEI Ming-jing, MAO Gen-wang, HU Hua-quan, et al. Characteristic of the thermobaric explosive contained aluminum powders[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(5): 441-446.
- [7] 惠君明,郭学永. 燃料空气炸药及其武器的现状与发展[C]// 二零零二年前火炸药技术发展策略研究论文汇编. 2003, 218-223.
- [8] 赵国志,张运法,沈培辉,等编译. 常规战斗部系统工程设计[M]. 南京: 南京理工大学,2000: 271-278.
- [9] MIL-DTL-32074 (USAF). Explosive, plastic-bonded, cast AFX-757 [S]. 2000.
- [10] Arthur F Spencer, John D Corley. Blast and fragmentation enhancing explosive: USP 5996501 [P], 1999.
- [11] 北京工业学院八系爆炸及其作用编写组. 爆炸及其作用(下册)[M]. 北京: 国防工业出版社,1979: 247-252.
- [12] 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学术会议论文集. 中国黄山,2004: 287-293.
- [13] 张杏芬编译. 国外火炸药原材料性能手册[M]. 北京: 兵器工业出版社,1991: 77.

Blast/Shock Wave Parameters of Single-Event FAE

LI Xiu-li, HUI Jun-ming, WANG Bo-liang

(School of Chemical Engineering, NUST, Nanjing 210094, China)

Abstract: The outfield static blast experiment of a new type single-event fuel air explosive (SEFAE) and its test equipment was carried out. The blast/shock wave parameters were measured and the after-burning phenomena were studied. Results show that the biggest blast fireball diameter of the testing bomb with 30 kg SEFAE is 17.4 m, which is 76.65 times of the original diameter of charge. According to the overpressure curves, two positive pressure zones are found. The second positive pressure zone which is aroused by after-burning is in regulation. The second shock wave is formed outside fireball and the pressure flat roof accumulated by compressed waves is inside fireball. The peak value of the second shock wave is no less than 40% of the first one's and the second impulse is 12.5% - 43.7% of overall impulse. Thus the effect of the second shock wave on blast/shock wave power can not be neglected.

Key words: explosion mechanics; single-event fuel air explosive; shock wave; blast fireball