

文章编号: 1006-9941(2007)01-0001-05

## 高威力复合药剂的研究

郭学永<sup>1</sup>, 惠君明<sup>1</sup>, 李秀丽<sup>1</sup>, 吴奎先<sup>2</sup>, 黄 辉<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 结合软目标的毁伤特性, 研制了一种具有较好空气冲击波毁伤作用的复合药剂, 其主要由硝酸铵(AN)、铝粉、液体功能添加剂和敏化剂组成。通过理论计算和实验研究对药剂配方进行了设计, 结果表明, 该药剂的爆炸反应过程分阶段进行, 与常规炸药相比具有一定的体积爆炸和分布爆炸性质, 可利用空气中的氧气参与释能反应, 反应时间显著增长, 爆炸威力达到 2.0 倍 TNT 当量以上。

**关键词:** 爆炸力学; 复合药剂; 爆炸反应; 威力

**中图分类号:** TJ55; TQ560; O389

**文献标识码:** A

### 1 引言

现代战争中目标的多样化, 要求武器及其毁伤方式具有多样性, 这对战斗部及其爆源提出了不同的要求, 但提高毁伤威力仍是武器设计的永恒主题。近些年来, 世界上发生了多次局部战争, 战例资料表明, 包括城市巷道、防御工事、轻型车辆、洞穴、地道和大规模技术兵器、建筑群在内“软目标”的比例在升高, 因此, 利用爆炸(冲击)波毁伤已成为一种重要的方式。通常, 提高爆源能量的途径主要有三种: 一是不断提高单质炸药的威力; 二是在炸药中添加高能金属粉, 如铝粉、镁粉; 三是发展以氧化剂和可燃剂构成的复合炸药。尤其是第三类爆炸源在近年来得到了较好的发展, 目前很多大型爆破型战斗部均采用这种复合炸药, 如美国在越南和阿富汗战争中使用的 BLU-82B 等巨型炸弹<sup>[1]</sup>, 在实际作战中取得了较好的效果。因此, 高威力、大当量爆炸波毁伤的爆炸源研究已成为开发新型武器的关键技术之一。

本实验研究了一种新型复合炸药, 可产生威力更强大的冲击波毁伤效应, 药剂性能稳定, 安全性好, 性价比高, 对冲击波敏感的大面积“软目标”毁伤有效。

### 2 设计原理和方案

虽然炸药爆轰对目标的毁伤是有效的, 但快速爆燃和反应冲击波能产生更强大的破坏效应, 尤其对大

面积软目标毁伤特别有效。研究表明<sup>[2]</sup>: 爆炸源化学反应时间在 100 ms 以内释放的能量, 可以有效提高空气冲击波的毁伤威力, 因此, 选择具有较宽反应区的含能材料来改变药剂的能量输出结构及输出功率, 使没有消耗在爆轰波阵面上的能量应用在更长的时间尺度上, 并吸收空气中的氧气参与反应, 来提高复合炸药的爆轰威力。

基于上述原理, 给出复合炸药的设计方案: 该药剂由氧化剂、可燃剂、功能添加剂及敏化剂构成。氧化剂选用硝酸铵(AN), 为改善其吸湿结块性, 选用了经过膨化处理过的 AN; 可燃剂选用金属铝粉, 其爆轰性能有很多研究成果可以借鉴<sup>[3-6]</sup>; 液态功能添加剂不仅可以在爆炸反应过程中释放大量的能量, 同时可以改善药剂的成型状态; 为提高药剂的起爆感度, 添加与其它组分相容的某种对冲击波敏感材料 H 作为敏化剂。

### 3 理论计算

针对复合药剂的设计方案, 我们编制了 VB 计算程序, 采用了混合炸药的爆轰参数计算公式<sup>[7]</sup>, 对不同配比药剂的物化性能及爆炸参数(爆速、爆压、爆热、燃烧热等参数)进行了理论计算。图 1、图 2 分别给出了燃烧热、爆压随可燃剂铝粉含量的变化关系, 所计算的配比为固定液体功能添加剂质量分数为 36%, 小药量的实验表明, 添加此配比的液体功能添加剂有利于药剂的混制和装填, 并能有效提高药剂的燃烧热; 对冲击波敏感的敏化剂 H 作为混合炸药中的起爆热点, 其质量分数为 10%, 能够有效进行传爆并能够激发其他炸药组分间的反应。

收稿日期: 2006-04-03; 修回日期: 2006-05-08

作者简介: 郭学永(1975-), 助研, 在读博士生, 主要研究方向: 爆炸理论及其应用, 军用混合炸药, 高能量密度材料, 安全工程。

e-mail: e9903@sina.com.cn

从图1可见,爆压随着可燃剂铝粉的含量增加而降低,这可从铝粉在混合炸药中爆轰反应的机理得到解释<sup>[5-8]</sup>;图2中可见,燃烧热随着铝粉含量的增加而升高。由药剂设计原理可知,追求的不仅是药剂爆轰压力的升高,更注重的是快速的后续反应放出的热量,这部分热量可显著提高药剂的冲击波毁伤能力,因此,考察燃烧热即爆炸潜能是一个重要因素。综合考虑固定敏化剂的含量为10%,选择液体功能添加剂的含量为36%,可燃剂与氧化剂的质量分数之和为54%,进行了药剂混制,通过爆炸场实验研究进行药剂配方的筛选。

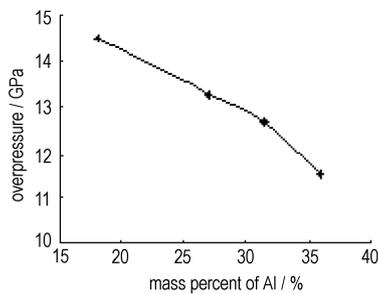


图1 铝粉含量与爆压的关系曲线

Fig. 1 Curve of Al content vs overpressure

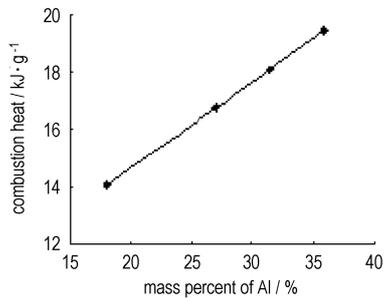


图2 铝粉含量与燃烧热的关系曲线

Fig. 2 Curve of Al content vs combustion heat

## 4 实验研究

### 4.1 药剂配比

固定敏化剂H为10%,液体功能添加剂为36%,改性AN和铝粉比例不同的3种配方进行2 kg试验弹的靶场静爆实验。作为对比,选择了一种不含敏化剂的药剂配方(W-4),进行爆炸场参数的测试。配方组成见表1。

### 4.2 试验装置及装药

所用试验装置为自行设计的PVC塑料弹体,具体结构如图3所示。

中心爆炸装药为60/40的B炸药,采用浇铸的方式装填,主装药剂具有较好的流动性,可直接灌注于弹

体,经适当振动后,即可以实现良好的装药状态。每发试验弹的装药量见表2。

表1 药剂组分含量

Table 1 Contents of explosive formulation %

No.	expanded AN	Al	liquid function	sensitizer
			additive	H
W-1	18	36	36	10
W-2	22.5	31.5	36	10
W-3	27	27	36	10
W-4	25	35	40	0

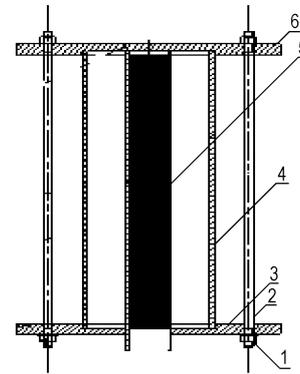


图3 塑料弹体结构图

1—螺母, 2—螺柱, 3—下端板, 4—壳体,  
5—中心药管, 6—上端板

Fig. 3 Structure of plastic bomb

1—nut, 2—bolt, 3—lower board, 4—shell,  
5—central charge tube, 6—upper board

表2 每发试验弹的装药量

Table 2 Explosive loading capacity of each test bomb

No.	mass of explosive/kg	mass of central charge/kg
W-1-1	2.20	0.20
W-1-2	2.20	0.20
W-2-1	2.17	0.20
W-2-2	2.18	0.20
W-3-1	2.00	0.20
W-3-2	2.01	0.20
W-4-1	2.11	0.20
W-4-2	2.14	0.20

### 4.3 静爆实验

#### 4.3.1 测试系统

(1) 爆炸场参数测试系统由数据记录仪,压电石英低阻型压力传感器,电荷适配器,同步控制器组成。

(2) 高速运动分析系统由高速录像机和数据处理系统组成,型号为40 K,最高分幅率可达4万幅/s,实测选用1.7万幅/s,对整个爆炸反应过程进行实时记录。

### 4.3.2 试验场布置

在静爆测试场布置 6 个测试点,测点分别距爆心 3 m、4 m、5 m、6 m、7 m、8 m 处。传感器为壁面传感器,通过承载传感器的圆柱形铁墩座布置与地面平齐。试验弹设置炸高为 0.35 m。用 8# 电雷管直接起爆中心装药,电雷管通过电线与测试室相连,用控制仪器使起爆与测试仪器实现同步控制。高速运动分析系统布置于安全范围内,本次实验布置在距爆源 50 m 左右的位置,并与爆点在同一水平高度,直接对爆炸反应过程进行拍摄和记录。

为筛选、优化药剂配方和测试爆炸场威力参数,在靶场进行了表 2 所列 4 种配比、8 发试验弹的静爆试验,并用高速运动分析系统对爆炸反应过程进行了分析,作为对比,同时测试了两发 2.0 kg TNT 药柱的爆炸场相关参数。

### 4.4 静爆测试结果及分析

(1) 高速运动分析系统记录的爆炸反应过程如图 4、5 所示。

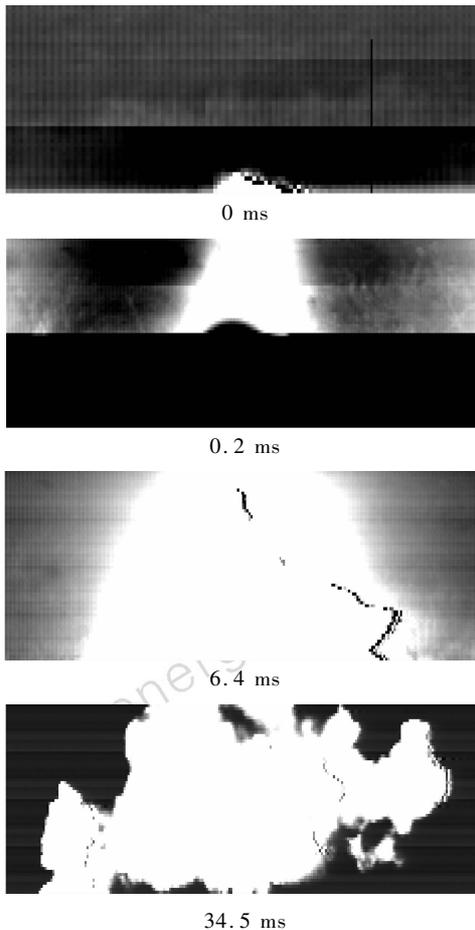


图 4 TNT 爆炸反应过程

Fig. 4 Photographs of TNT explosion

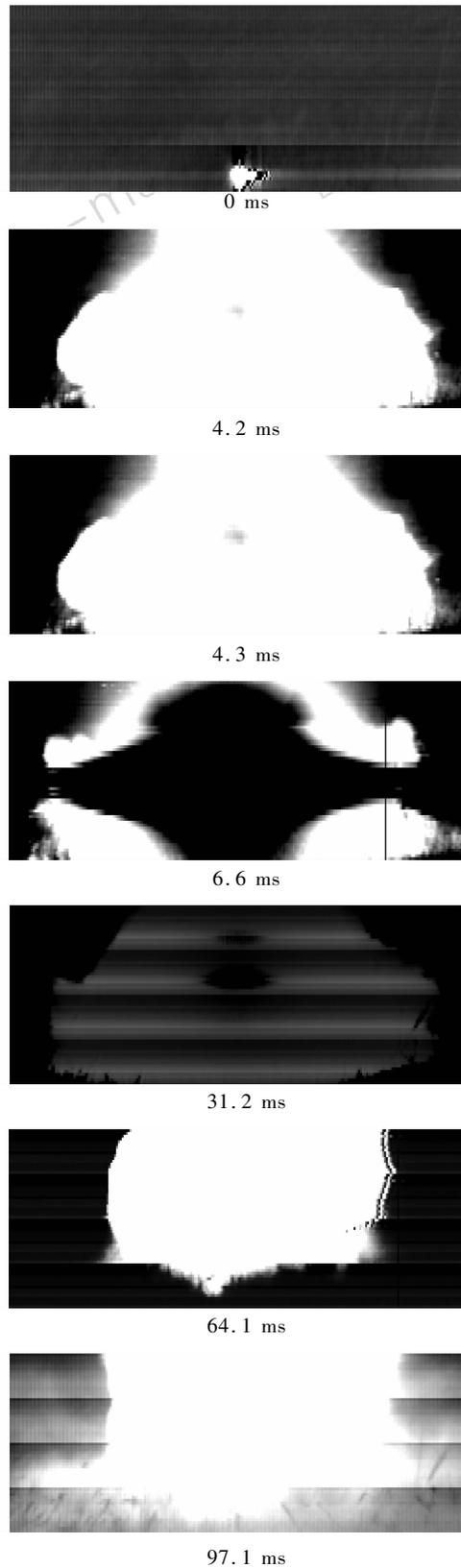


图 5 W-2 药剂爆炸反应过程

Fig. 5 Photographs of W-2 explosion

从图 4 TNT 爆炸反应过程的图片可见,从 TNT 引爆开始,药柱迅速达到爆轰状态,爆炸反应产生的高温和光强使光转化为电信号的电荷耦合器件 (CCD) 饱和,表现在 0.2 ms 时的图片为黑色,持续时间为几个毫秒,到 6.4 ms 左右时可见爆轰反应的云团,此后为爆轰产物的膨胀、与周围空气的热交换过程,高温持续时间仅为 30 ms 左右。

从图 5 中 W-2 药剂的爆炸反应过程可知,整个过程是分阶段进行的:从引爆开始,敏化剂 H 首先爆轰,产生的高温气体使镜头 CCD 达到饱和,图片为黑色,这个过程持续时间为 4.2 ms 左右,为敏化剂的反应阶段,同时也促使氧化剂和功能添加剂分解,此过程云团不断扩大;在 4.3 ms 后,云团中心发生了更加炙热的反应,表现在云团中心变黑,这是由于温度和光强过大导致光学镜头 CCD 饱和所致,分析认为,这是在中心爆轰产物气体的高温高压作用下,可燃剂与爆轰产物以及氧化剂和功能添加剂分解出的有效氧进行反应放出热量的结果,这一阶段持续时间接近 25 ms,且云团又进一步扩大,31.2 ms 时可见云团轮廓;随后的反应仍然持续,这个过程空气中的氧参与了反应,这时云团的体积虽然有所下降,但仍保持着放热状态,空气中的氧与铝粉以及功能添加剂的放热反应仍能够支持爆轰波的传播,这个过程持续时间为 60 ms 左右。通过标尺读取云团数据可知,药剂云团体积接近于 TNT 药柱的 4 倍。

由爆炸反应分幅图片可知,研制的威力增强型药剂不同于 TNT 高能炸药的整体反应机制,其爆炸反应过程是分阶段进行:

(a) 敏化剂 H 的冲击起爆和反应;

(b) H 分解产生的热促使氧化剂 AN 和功能添加剂中部分分子键分解和反应;

(c) 加热可燃剂 Al 和功能添加剂使其与氧化剂和爆轰产物发生反应;

(d) 爆炸混合物在扩散过程中,灼热的过剩可燃剂 Al 及功能添加剂与空气中的氧气进一步反应,放出热量。由上述过程可知,反应中的各组分能量得到了充分的释放,完全加载于爆炸作用功,会提高毁伤面积和威力。

(2) 爆炸场参数实验结果

试验弹的爆炸场超压测试结果见表 3。

为便于比较,对不同配比的药剂超压数据以及 TNT 超压数据进行了对比。为消除装药量差异而产生的偏差,采用对比距离。主要列入同一配方两发试验

弹的平均超压数据(4 m 以后)的对比(见图 6)。

表 3 试验弹爆炸场超压测试结果

No.	distance/m					
	3	4	5	6	7	8
W-1-1	457.2	228.7	122.4	102.1	67.45	47.7
W-1-2	557.7	211.2	134.3	103.1	67.45	52.4
W-2-1	398.2	215.4	137.4	100.9	66.6	54.6
W-2-2	549.7	232.3	172.2	112.2	66.89	54.2
W-3-1	384.4	194.9	127.3	98.0	61.7	49.3
W-3-2	452.4	217.3	134.7	110.6	62.0	50.3
W-4-1	513.7	170.0	128.2	86.0	64.9	48.4
W-4-2	379.8	208.8	114.9	85.7	65.8	48.98
TNT-1	272.6	95.1	78.4	52.1	43.5	27.4
TNT-2	262.4	103.5	85.9	61.6	45.2	29.1

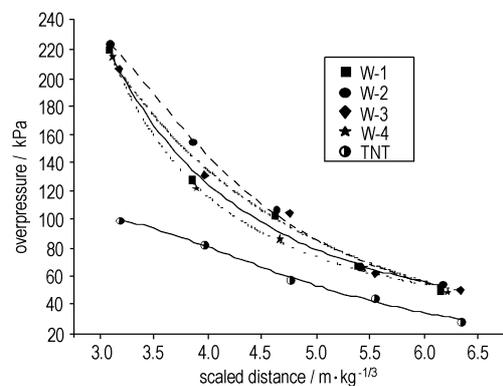


图 6 不同配比药剂和 TNT 超压的对比

Fig. 6 Comparison of overpressure for TNT and other explosives

由图 6 可见,所研制的四种不同配比药剂其爆炸场超压显著高于同等测试条件下的 TNT 爆炸场超压。四种药剂相比较可知,W-2 和 W-3 具有较好的超压效果,为开展下一步研究的主要配方。

分析原因认为:W-4 配方没有添加敏化剂,氧化剂和液体功能添加剂在反应过程中没有足够的能量激发促使其迅速分解出有效氧,致使铝粉的氧化等反应不够完全,释放的能量较低,因此超压较低。W-1 配方中敏化剂爆轰形成的高温高压环境激发氧化剂和功能添加剂产生的有效氧不足,使其含量相对较多的铝粉不能完全反应,致使放出的能量相对较低,与不含敏化剂的 W-4 相比,在铝粉含量相当的情况下,超压增高。W-2 和 W-3 药剂铝粉和氧化剂的含量相对适中,氧化剂释放的氧可以使铝粉反应相对较完全,释放的能量增大,即使有剩余的可燃剂,在高温高压的环境下,也会与空气中的氧气发生反应释放能量,提高爆炸功,因而超压较高。

因此,所研制的药剂除了自身爆炸反应发出能量外,还可以利用空气中的氧参与装药的释能反应,爆源具有体积爆炸或分布爆炸性质;释能反应时间比常规炸药显著增长。

### (3) 爆炸威力评价

根据现场所测得的 2.0 kg TNT 爆炸场参数,拟合出现场 TNT 超压公式,利用现场标定 TNT 超压评价法<sup>[8]</sup>对 W-2 和 W-3 药剂进行了爆炸场超压的威力评价,其 TNT 当量比为 2.0 以上,结果见表 4,这说明研制的 W-2 和 W-3 药剂具有较好的爆炸威力。计算 TNT 当量时,将中心装药计算在内(表 4 中括号内数据),若全部为所研制的复合药剂时,TNT 当量比将更高。

表 4 TNT 当量比

Table 4 TNT equivalence values

equivalence value	distance/m						average
	3	4	5	6	7	8	
W-2(2.37 kg)	2.00	2.02	2.34	2.32	1.76	1.87	2.05
W-3(2.20 kg)	2.12	1.92	2.14	2.42	1.72	1.78	2.02

## 5 结论

(1) 研制了一种高威力复合药剂,由氧化剂 AN、可燃剂铝粉、液体功能添加剂及敏化剂组成,原材料来源广泛,生产工艺简单易行,安全可靠。

(2) 该药剂爆炸过程分阶段进行,除了自身爆炸反应放出能量外,还可以利用空气中的氧参与装药的释能反应,相对于常规炸药来说具有体积爆炸或分布爆炸性质;释能反应时间显著增长。

(3) 该药剂具有较高的爆炸威力,用现场标定 TNT 当量法计算结果表明,该药剂 TNT 当量比为 2.0 以上。

### 参考文献:

- [1] 朱丽华. 炸弹之王 BLU-82[J]. 兵器知识,2002,(1): 13.  
ZHU Li-hua. The king of bomb BLU-82[J]. 2002,(1): 13.
- [2] 赵国志,张运法编译. 战术导弹战斗部毁伤作用机理[M]. 南京: 南京理工大学,2000.
- [3] Cook M A. Aluminized explosive[J]. *J Phys Chem*,1957,1(1): 189 - 196.
- [4] Finger M, Horniq C H. Metal acceleration by composite explosives [R]. AD712081,1970. 55 - 63.
- [5] 薛再清. 爆轰产物状态方程及含铝炸药的爆炸过程[D]. 北京: 北京理工大学,1998.
- [6] 陈朗,龙新平,冯长根,等. 含铝炸药爆轰[M]. 北京: 国防工业出版社,2004.
- [7] 孙业斌,惠君明,曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京: 兵器工业出版社,1995.
- [8] 严峰. 燃料空气炸药威力评价和温度场测量[D]. 南京: 南京理工大学,2005.

## Study on Composite Explosive with High Power

GUO Xue-yong<sup>1</sup>, HUI Jun-ming<sup>1</sup>, LI Xiu-li<sup>1</sup>, WU Kui-xian<sup>2</sup>, HUANG Hui<sup>2</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Combined with damage characteristics of soft targets, a kind of composite explosive (be composed of AN, Al powder, liquid function additive and sensitizer) with good damage performance was studied. Based on the theoretical calculation and experiments, the design of composite explosive prescription was carried out. The results show that the explosion process can be divided into several stages with the properties of volume explosion and dispersion explosion, and absorbed oxygen in air to attend exothermic reaction, so the duration of explosion reaction increases prominently than that of general explosive, and explosion power can reach 2.0 times of TNT equivalence.

**Key words:** explosion mechanics; compound explosive; explosion reaction; power