

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.02.003

高含铝炸药爆炸过程中的能量分析*

李 静 王伯良 赵新颖 滕婉婷
南京理工大学(江苏南京,210094)

[摘 要] 在野外静爆实验中,利用高分辨率、高精度冲击波超压系统分别测试了高含铝炸药和 TNT 的爆炸场冲击波超压,根据试验数据,计算该含铝炸药的爆炸场冲击波超压的 TNT 当量,利用 TNT 当量评价该高含铝炸药的威力,用能量反演方法分析该含铝炸药中可燃组分的反应程度和可能的反应模式,计算可得该含铝炸药爆炸反应释放能量的有效利用率为 65.41%,为高含铝炸药配方优化设计提供新的研究方法。

[关键词] 含铝炸药 冲击波超压 TNT 当量 能量分析

[分类号] TJ55 TD235.2+1

引言

含铝炸药中一般添加金属可燃剂铝粉,利用铝粉在加热状态下燃烧释放出大量的热来增强其燃烧效应,同时其中含有的高能炸药可以用来增强其爆炸效应,因此其爆炸反应机理是分阶段进行的,属非理想爆炸^[1]。高含铝炸药在起爆后首先发生爆轰反应,在爆轰反应区之后,一些还没有发生反应的可燃组分以及爆轰中间产物以云团的形式向周围抛撒,大约在同一时间,云团中各个组分,以及云团与周围空气,在高温条件下继续开展快速剧烈的燃烧反应,究竟有多少金属可燃剂参与反应,爆炸过程中能量释放了多少等问题是很重要的,但目前文献涉及到的很少。

本文借助冲击波超压爆炸相似律,计算某含铝炸药的超压 TNT 当量,采用能量反演研究方法初步计算出该含铝炸药爆炸反应的能量利用情况,为高含铝炸药设计提供客观依据。

1 含铝炸药爆炸冲击波超压规律

常规炸药空中爆炸产生的冲击波超压遵循爆炸相似律^[2],大量试验数据显示,球形或形状相似的 TNT 装药在空气中爆炸时产生的空气冲击波超压计算表达式见公式(1)^[3]:

$$\Delta p = \frac{P_1}{R} + \frac{P_2}{R^2} + \frac{P_3}{R^3} \quad (1 \leq \bar{R} \leq 10 \sim 15) \quad (1)$$

式中: \bar{R} 为对比距离($\text{m}/\text{kg}^{1/3}$),且 $\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}$; Δp 为无限空中爆炸时冲击波峰值超压, kPa; W 为 TNT 质

量, kg; R 为距爆心的距离, m; P_1 、 P_2 、 P_3 为常数,容易受环境条件影响,通常利用试验数据拟合得到。

高含铝炸药在空中爆炸,由于体积爆炸的面作用效应,在云团及其外边界附近一定范围内,冲击波峰值超压并不符合衰减相似律,但在中远场,高含铝炸药爆炸产生的冲击波峰值超压仍然服从冲击波衰减相似律^[4]。因此, TNT 标定的空气冲击波衰减相似律仍然适用于高含铝炸药远场。

2 实验

2.1 冲击波超压测试系统简介

炸药爆炸后产生冲击波,冲击波压力使压力传感器产生触发信号,然后在传感器内部将信号转换为电信号并放大,由数据采集系统和计算机处理系统对其进行转换、处理与分析,最后得到爆炸场冲击波各参数值^[5]。测试系统如图 1 所示。

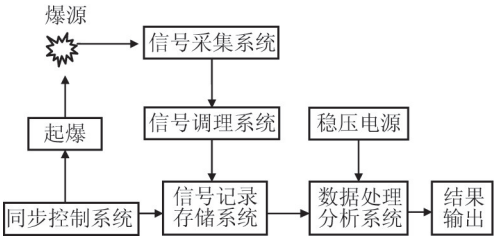


图 1 测试系统示意图

Fig. 1 Measurement system chart

试验中采用的冲击波参数测试系统主要是由数据采集系统、压力传感器、联动控制仪、信号调理仪及计算机控制处理系统等几部分组成,具体工作过

* 收稿日期:2012-11-05

作者简介:李静(1989~),女,在读硕士,主要从事含铝炸药爆炸参数方面的研究。

通信作者:王伯良(1964~)男,教授,博士,主要从事爆炸安全技术的研究。E-mail:blwang@mail.njust.edu.cn

程可以简单描述为:联动控制仪同步引爆炸药后产生冲击波,压力传感器检测到冲击波压力信号,在压力作用下传感器表面晶体发生形变,内部产生“极化现象”,在电轴的垂直表面产生电荷,其内置的电荷放大器会将信号放大,然后传给信号调理仪,信号调理仪与联动控制仪将接收的信号送到 VXI 总线型数据采集系统,最后由计算机控制系统进行分析处理^[6]。

2.2 爆炸场布置

将炸药样品放在距地面 0.9m 的支架上,12 只压力传感器布置在互成 90° 的 3 条测试线上,距爆心分别为 4、5、7、9m。

2.3 样品

实验样品包括两种不同配方的高含铝炸药 A、B 以及 TNT 药柱,中心装药均为 40g,总装药量均为 800g,每种药柱各试验 2 发,用 8 号雷管上端起爆。

3 结果与分析

3.1 数据分析

将不同距离处 3 个测点所测得的冲击波超压数据取平均值列于表 1 中。

表 1 超压测试数据

	Tab. 1 Measured overpressure				kPa
距离	4m	5m	7m	9m	
TNT-1	87.35	54.95	29.77	16.55	
TNT-2	85.95	51.97	26.54	14.15	
A-1	96.52	62.86	35.17	20.63	
A-2	94.78	63.55	36.13	24.38	
B-1	101.25	61.12	31.02	19.79	
B-2	100.26	60.75	33.21	19.47	

图 2 所示的是 A、B 及 TNT 在不同距离处的冲击波超压曲线。将高含铝炸药与 TNT 的冲击波超

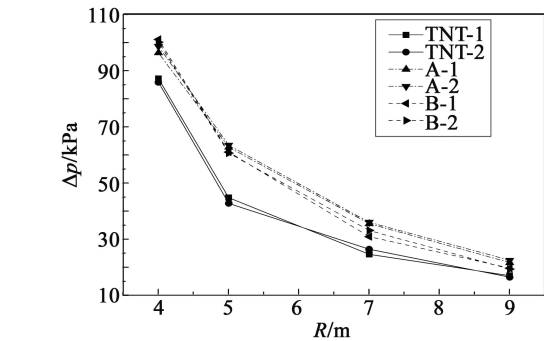


图 2 TNT 与含铝炸药的超压对比

Fig. 2 The overpressure comparison of TNT with aluminized explosive

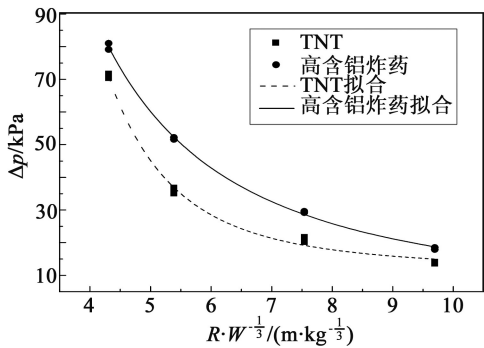


图 3 含铝炸药与 TNT 的入射超压拟合曲线

Fig. 3 The incident overpressure fitting curve of aluminized explosive and TNT

压换算为入射超压后进行拟合,拟合曲线见图 3。

由表 1、图 2 和图 3 可以看出,2 发药柱的重复率较好,随着距离的逐渐增大,高含铝炸药和 TNT 的爆炸场冲击波超压是不断减小的,其超压具有相似的衰减规律,但高含铝炸药的衰减速度比 TNT 的慢。在不同距离处,高含铝炸药的超压值均高于 TNT 的超压值,说明高含铝炸药爆炸后的威力比 TNT 的高,并且这种优势在近场表现得尤为明显。

高含铝炸药入射超压拟合公式:

$$\Delta p = 74.90 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right) + 928.82 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^2 + 1001.68 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^3 \quad (2)$$

拟合精度为 99.86%。

TNT 入射超压拟合公式:

$$\Delta p = 321.43 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right) + 3017.53 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^2 + 12697.11 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^3 \quad (3)$$

拟合精度为 99.48%。

将测得的高含铝炸药 A 的冲击波入射超压值代入 TNT 拟合公式,计算 A 炸药爆炸场超压的 TNT 当量,2 发药柱的爆炸威力数据列于表 2。

表 2 爆炸场超压威力(TNT 当量/kg)

Tab. 2 The explosion field overpressure power (TNT equivalence/kg)					
距离	4m	5m	7m	9m	平均
A-1	1.278	1.299	1.465	1.368	1.353
A-2	1.243	1.321	1.527	1.771	1.466
平均	1.261	1.310	1.496	1.570	1.410

2 发试验样品的平均 TNT 等效当量为 1.41kg,实际含铝炸药量为 0.8kg,则该含铝炸药的 TNT 当

量比为 1.76。

3.2 能量分析

高含铝炸药的释能反应分 3 个阶段^[7]：

1) 第一阶段：高能炸药内分子化合物的反应，没有氧气参与，持续时间在 1 μs 之内；

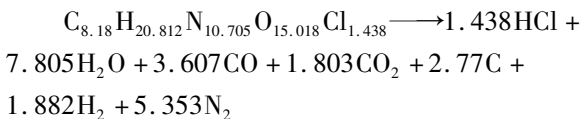
2) 第二阶段：第一阶段反应生成的爆轰产物 CO、CO₂ 和 H₂O，在高温高压条件下与铝粉发生燃烧反应，此阶段内也没有空气中的氧气参与反应，持续时间在 1 ms 之内，通常在十到几百微秒之间；

3) 第三阶段：炸药中的可燃元素 Al、H、C、CO 等与空气中的氧气发生快速燃烧反应，持续时间达到数百毫秒级。

由此可确定高含铝炸药的基本性能：第一阶段和第二阶段反应使其具有较高的猛炸作用和威力，体现了其压力性能；第三阶段与氧气的燃烧反应对空气冲击波有一定的加强作用，体现了其高热性能，增强了对人员等软目标的毁伤威力。因此高含铝炸药的爆炸特性主要是利用与空气的后续燃烧反应释能来增强其毁伤威力^[8]。

高含铝炸药中的大量铝粉的燃烧潜能能否高效率的释放，取决于多种因素，例如组分配比、铝粉粒度、铝粉活性、颗粒级配及混制工艺等。在 800℃ 时，铝粉在空气中能够被点燃，在 1750℃ 的温度下，铝粉能够快速彻底地燃烧，因此铝粉的有效燃烧过程需要保持高温环境^[9]。常用的高能炸药如 RDX 的爆轰温度为 3380℃，TNT 的爆轰温度为 2877℃^[10]，理论上能够使铝粉被点燃并完全燃烧，但当组分中高能炸药含量较少，或其与铝粉无法完全充分接触，高能炸药爆轰产生的热量就会在传递过程中损失一部分。另外，高能炸药的爆轰时间非常短，一般小于 0.1 μs^[11]，若在这段时间内无法达到铝粉的点火温度，则铝粉不能被点燃，因此本文的高含铝炸药中加入活化剂 AP，它比铝粉更容易点燃，AP 的爆燃点为 450℃^[12]，在 RDX 爆轰的同时，AP 即受热开始分解发生反应，生成的氧气支持铝粉的前期反应，并且反应产生的高温产物和热量能够使铝粉的后续燃烧快速高效地进行。

实验中采用 800g 的含铝炸药的分子式为 C_{8.18}H_{20.812}N_{10.705}O_{15.018}Al_{8.9}Cl_{1.438}，为严重负氧平衡的炸药，根据与爆炸产物实测值比较一致的改进吕—查德里法^[13]写出一次反应的爆炸反应方程式为（假设 Al 不参加一次反应）：



爆炸产物生成焓：

$$H_2 = (1.438 \times 183 + 7.805 \times 241.8 + 3.607 \times 110.5 + 1.803 \times 393.5) / 0.8 = 4073.07 \text{ kJ/kg}$$

反应物生成焓：

$$H_1 = 481.75 \text{ kJ/kg}$$

则爆炸过程中生成焓变化：

$$\Delta H = H_2 - H_1 = 3591.32 \text{ kJ/kg}$$

铝粉主要在 CJ 面后与爆轰产物进行反应，主要反应式有：



$$(\Delta H_f = -826 \text{ kJ/mol})$$



$$(\Delta H_f = -939 \text{ kJ/mol})$$

根据所用 0.8 kg 含铝炸药，可得一次反应的爆轰产物中 H₂O 和 CO₂ 的量，将其全部与铝粉反应，可消耗 6.405 mol 铝粉，生成 1.803 mol CO 及 7.805 mol H₂，同时产生热量 2939.23 kJ/kg，加上一次反应爆轰产生的热量 3591.32 kJ/kg，得到含铝炸药自身爆炸反应所能释放的能量为 6530.55 kJ/kg。TNT 的实测爆热为 4222 kJ/kg^[14]，则试验所得含铝炸药的 1.76 倍的 TNT 当量热值为 7430.7 kJ/kg，大于自身所能释放的能量 6530.55 kJ/kg，说明除了铝粉与爆轰产物中的 H₂O、CO₂ 反应之外，铝粉、CO、H₂ 也与空气中的氧气发生反应。

若将剩余的铝粉 2.5 mol 全部与氧气反应，生成热量为 2086.74 kJ/kg，若 CO、H₂ 全部与氧气反应，共生成热量为 2742.48 kJ/kg，加上之前的释能 6530.55 kJ/kg，则有空气中的氧参与后该含铝炸药爆炸反应释能应达到 11359.77 kJ/kg，大于其 1.76 倍的 TNT 当量热值，说明铝粉、CO、H₂ 并没有反应完全。

上述方法计算可得的 11359.77 kJ/kg 是当炸药中可燃元素接近完全燃烧时放出的热量，实际不可能达到完全反应。对于 TNT，通常认为它没有后燃反应，因此将爆热作为 TNT 完全反应时放出的热量，故实测该含铝炸药的 1.76 倍 TNT 当量热值 7430.72 kJ/kg，占该含铝炸药完全反应放出热量 11359.77 kJ/kg 的 65.41%。所以该含铝炸药爆炸反应所释放的能量利用了其潜在能量的 65.41%。其中所含的可燃元素（Al、C、H）并没有反应完全，还有一部分能量没有得到充分发挥，可以为今后配方设计提供一个优化方向。

4 结论

本文通过静爆试验分别测试了高含铝炸药与 TNT 的爆炸场参数，并将其进行了对比；利用能量反

演方法对铝粉的反应程度和能量的有效利用率进行了分析,得到以下结论:

1)由冲击波参数测试结果可见,高含铝炸药和 TNT 的冲击波超压具有相似的衰减规律。与 TNT 相比,含铝炸药具有较高的超压峰值,其空中超压爆炸威力可达 1.7 倍 TNT 当量以上。

2)在保证铝粉能够快速和高效率燃烧前提下,对高含铝炸药爆炸后释放的有效能量进行分析,结果表明,含铝炸药中的可燃元素并没有完全反应,其能量利用率约为 65.41%。

3)分析可知,药剂中的铝粉除了与爆轰产物中的 H_2O 和 CO_2 反应外,还有一部分剩余铝粉与空气中的氧反应而产生高热值。

参 考 文 献

- [1] 李秀丽,惠君明. 温压炸药的爆炸温度[J]. 爆炸与冲击,2008,28(5):471-475.
- Li Xiuli, Hui Junming. Detonation temperature of thermobaric explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(5):471-475.
- [2] Gilbert F, Kinney, Kenneth J, et al. Explosive shocks in air [M]. Second edition. Springer-Verlag New York Inc, 1985:107-117.
- [3] Henrych J. The dynamics of explosion and its use[M]. Elsevier scientific publishing company, 1979:124-131.
- [4] 吕洪生. 连续介质力学(流体力学与爆炸力学)[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1999.
- [5] 黄来法. 温压药剂的冲击波效应研究[D]. 南京:南京理工大学,2008.
- Huang Laifa. Study on blast effect of thermobaric explosive[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [6] 仲倩,王伯良,黄菊,等. TNT 空中爆炸超压的相似律[J]. 火炸药学报,2010,33(4):32-35.
- Zhong Qian, Wang Boliang, Huang Ju, et al. Study on the similarity law of TNT explosion overpressure in air[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(4):32-35.
- [7] 李秀丽. 基于燃烧和爆炸效应的温压药剂相关技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2008.
- Li Xiuli. Study on correlative techniques of thermobaric explosive based on combustion and explosion effect[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [8] May L C, Gary W M. Advanced thermobaric explosive compositions:US,6955732[P]. 2005-10-18.
- [9] 仲倩,爆炸源毁伤效应评测方法研究[D]南京:南京理工大学,2007.
- Zhong Qian. Study on explosion source damage effect evaluation method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [10] 张杏芬. 国外火炸药原材料性能手册[M]. 北京:兵器工业出版社,1991.
- [11] 张奇,白春华,梁慧敏. 固液组分与混合燃料微观尺度的相关性[J]. 火炸药学报,2000,23(1):53-55.
- Zhang Qi, Bai Chun hua, Ling Hui min. Relationship between liquid and solid component proportion and microcosmic size[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2000, 23(1):53-55.
- [12] 张守中. 爆炸基本原理[M]. 北京:国防工业出版社,1988.
- [13] 惠君明,陈天云. 炸药爆炸理论[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1995.
- [14] 郑孟菊,俞统昌,张银亮. 炸药性能及测试技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1990.

Energy Analysis in the Explosion Process of High Aluminized Explosive

LI Jing, WANG Boliang, ZHAO Xinying, TENG Wanting

School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] The shock wave overpressures were measured in explosion field tests for high aluminized explosive and TNT with high resolution and precision. Based on the experimental data and explosion law, the TNT equivalence of shock wave overpressure in explosion field for high aluminized explosive was calculated. The power of aluminized explosive was estimated by TNT equivalence, and the energy inversion principle was applied to assess the reaction extent of combustible components and possible reaction patterns of metal component. It is obtained by calculation that the effective utilization of energy in the aluminized explosive is 65.41%, which provides a new approach for aluminized explosive optimization design.

[KEY WORDS] aluminized explosive, shock wave overpressure, TNT equivalence, energy analysis