

文章编号: 1001-1455(2008)05-0433-05

温压炸药爆炸抛撒的运动规律*

郑 波¹, 陈 力², 丁雁生², 刘 炜³, 刘学柱³, 朱鸿瑞¹, 王志芳¹

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080;

3. 国营第 763 厂, 山西 太原 030041)

摘要: 采用高速运动分析系统观察了高能炸药、含铝炸药和温压炸药爆炸产物抛撒的过程; 比较了这 3 种炸药的爆炸产物抛撒运动及后燃特点, 通过比较直观地观察到温压炸药爆炸和后燃 2 个过程, 以及后燃火球的成长历程; 根据实验结果确定了温压炸药爆炸产物抛撒半径随时间变化的数学表达式。

关键词: 爆炸力学; 抛撒半径; 高速运动分析系统; 温压炸药; 后燃; 火球

中图分类号: O381

国标学科代码: 130 · 3510

文献标志码: A

1 引 言

温压炸药是一类新概念炸药, 具有独特的毁伤效应。图 1 显示典型的高能炸药和温压炸药的超压-时间曲线^[1], 高能炸药爆轰的峰值超压 p_2 比起温压炸药的 p_1 大得多, 它的超压衰减很快, 而温压炸药所产生的超压衰减相对缓慢; 温压炸药的正相时间比高能炸药的长, 这样, 尽管有较低的爆炸压力, 整个正相冲量(图 1 中曲线下面面积表示)与高能炸药的相当甚至更高。对目标的毁伤效应既取决于峰值超压又取决于持续时间(冲量), 因而与高能炸药相比, 温压炸药的毁伤效应更大。温压炸药是按负氧设计的, 爆炸后, 爆轰产物和大量没有反应的金属含能颗粒的混合物爆炸抛撒的同时与周围空气中的氧反应(即后燃效应)释放大量的热能, 由此产生的压缩波或冲击波在一定条件下可以追上前驱爆炸冲击波^[2], 增加其冲量, 使之传播得更远。温压武器的毁伤介于点杀伤与面杀伤之间。分析温压炸药爆炸产物抛撒运动的特点, 确定抛撒速度和抛撒半径的变化趋势有重要的理论意义和工程实用价值。本文中采用高速运动分析系统记录高能炸药、含铝炸药和温压炸药爆炸产物的抛撒过程, 分析这 3 种炸药爆炸产物的抛撒特点, 探索温压炸药爆炸产物抛撒半径随时间的变化规律。

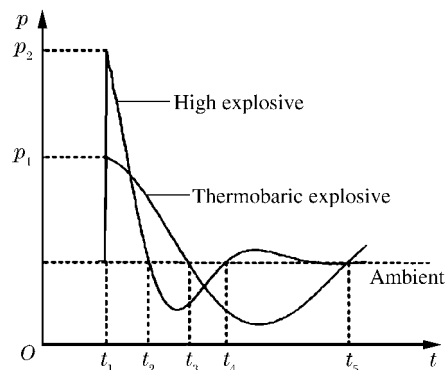


图 1 高能炸药和温压炸药爆炸的压力曲线
Fig. 1 Pressure history of high explosive and thermobaric explosive detonations

2 实验及结果

为了比较温压炸药爆炸产物的抛撒特点, 根据含铝量的不同准备了 3 组炸药样品: 高能炸药、含铝炸药和温压炸药, 参数见表 1。其中 ρ 为密度, B 为氧平衡, v_D 为爆速, Q_D 为爆热, Q_C 为燃烧热, 带 * 表示实测值, 带 ** 表示计算值, 其他数据取自文献^[3]。

实验场地安排见图 2~4 中第一帧照片^[4]。为了消除地面反射波对自由场超压测量的影响和对爆炸产物抛撒视场的影响, 炸药样品用木架支撑, 离地面 2 m。安排了 7 组压力传感器, 用以测量冲击波超压。采用高速运动分析系统, 对高能炸药、含铝炸药和温压炸药的爆炸产物抛撒过程进行观测, 图 2 是

* 收稿日期: 2007-03-20; 修回日期: 2007-08-21

作者简介: 郑 波(1960—), 男, 博士, 高级工程师。

高能炸药爆轰产物的抛撒过程,图 3 是含铝炸药爆炸产物的抛撒过程,图 4 是温压炸药爆炸产物的抛撒及火球的发展过程,分幅扫描速度均为 $3\,000\text{ s}^{-1}$ 。

表 1 炸药样品的参数

Table 1 Parameters for explosive specimens

炸药种类	$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$B(\text{CO}_2/\text{CO})$	$v_D / (\text{km}/\text{s})$	$Q_D / (\text{kJ}/\text{g})$	$Q_C / (\text{kJ}/\text{g})$
钝感 RDX	1.66 *	- 21/0 **	8.450	- 5.500	- 6.500 **
含铝炸药	1.77 *	- 35/ - 18 **	8.089	- 6.450	- 13.800 **
温压炸药	1.86 *	- 50/ - 40 **	5.100 *	- 8.200 **	- 20.200 **

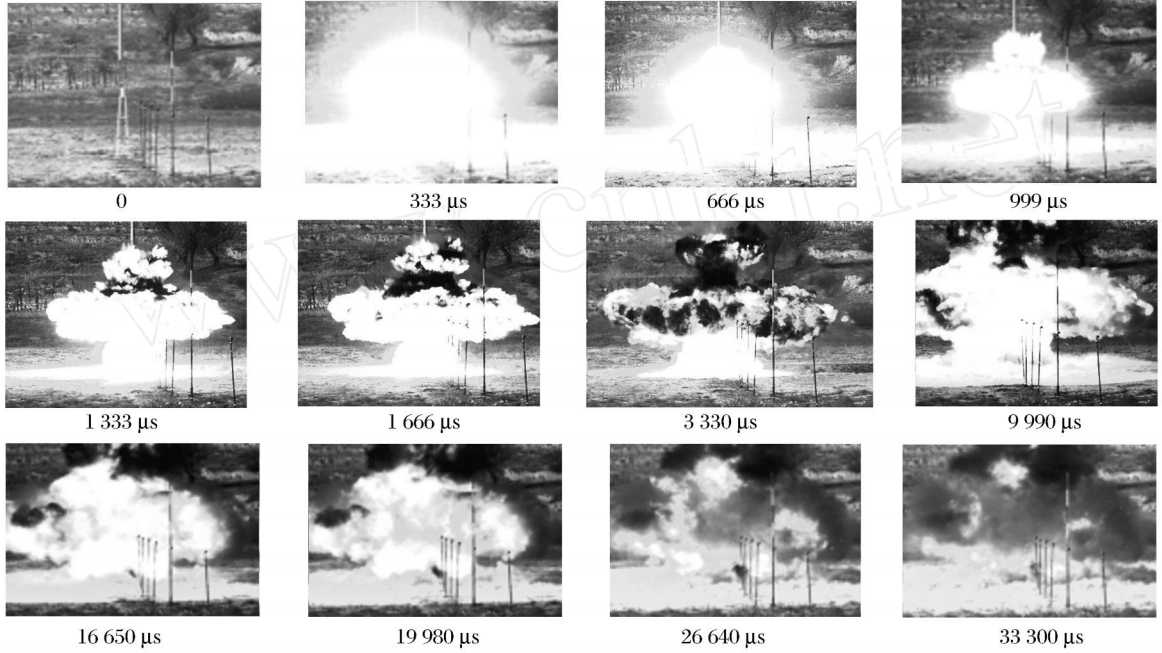


图 2 高能炸药爆轰产物的抛撒过程

Fig. 2 Potographs of the dispersal process of the explosive RDX

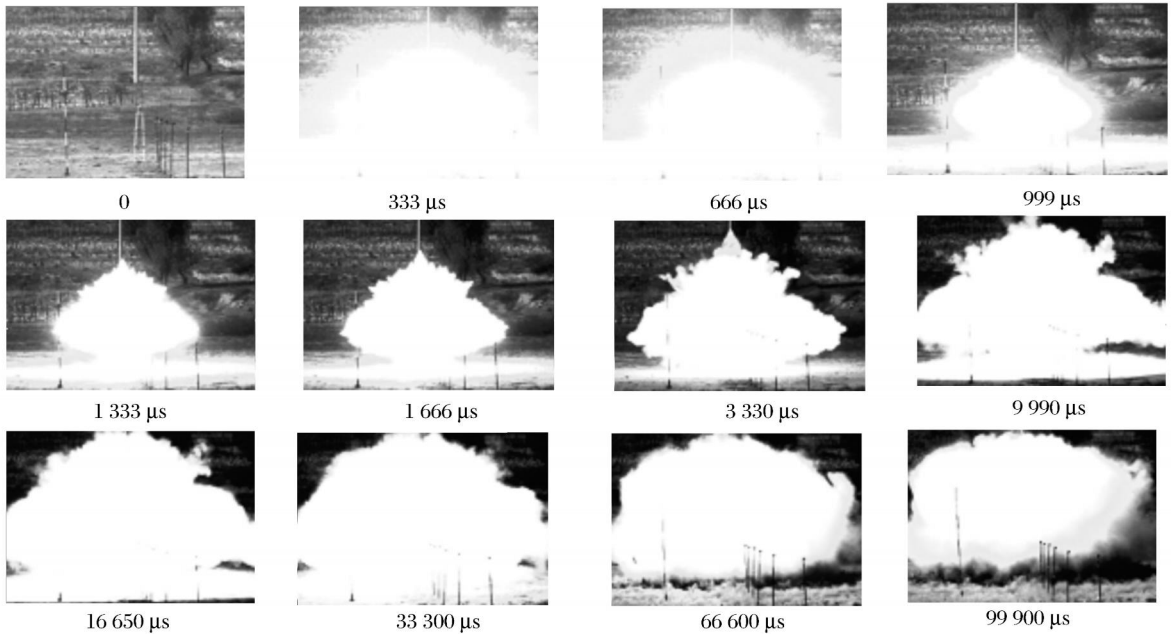


图 3 含铝炸药爆炸产物的抛撒过程

Fig. 3 Potographs of the dispersal process of the aluminized explosive

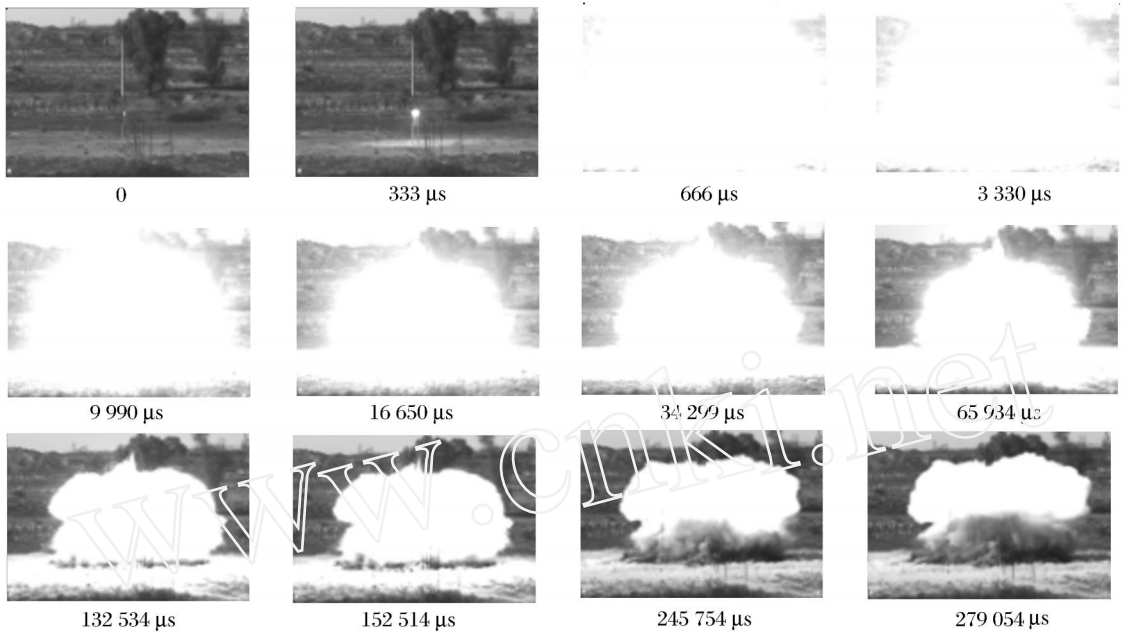


图 4 温压炸药爆炸产物的抛撒过程

Fig. 4 Potographs of the dispersal process of the thermobaric explosive

3 实验结果分析^[5]

图 2~4 记录了 3 种不同性质炸药的爆炸产物和金属颗粒混合物抛撒的 2 个过程。第一个过程是爆炸及混合物的高温膨胀阶段：见图 2~4 的前 4 帧，含能组分爆炸，由于按负氧设计，爆炸产物和没反应的金属颗粒混合物迅速膨胀，在膨胀的同时，混合物与空气中的氧继续反应，并发出强烈的白光，白光越强烈，爆炸场的温度越高。温压炸药爆炸白光最强烈，因而温度最高，含铝炸药次之，高能炸药最低；温压炸药的白光范围很广，作用范围大，具有面杀伤特点，含铝炸药次之，高能炸药作用范围最小，具有点杀伤特点；温压炸药白光持续时间最长，接近 10 ms，这样的高温引发的压缩波或冲击波可以追赶上前驱爆炸波，增加其冲量，含铝炸药和高能炸药在接近 1 ms 时白光已经消退，后燃的温度较低，所产生的压缩波不可能追赶上前驱爆炸波，对爆炸冲量没有太大的影响。第二个过程是后燃阶段：由于空气的冷却作用，白光消退，显现出火球，周围的虚光是火球的强光照亮的周边空气中水汽和微尘的影像所致，随着点燃的金属颗粒被爆炸抛撒，火球缓缓膨胀，虚光渐弱，此时的爆炸场温度明显降低，但火球区的温度依然非常高，大于铝粉的点火温度。这样的后燃对于内爆炸毁伤有积极的作用。

从图 2 可以看出，负氧的高能炸药不太明显的后燃效应。只有第一个过程，基本上没有第二个过程，爆轰产物的高温区域较小，后燃时间很短。由于空气的冷却作用，到 1 ms 时，见图 2 第 4 帧，爆炸和高温膨胀基本结束。

从图 3 可以看出，负氧的含铝炸药有一定的后燃效应。第一个过程在 1 ms 时结束，见图 3 第 4 帧，

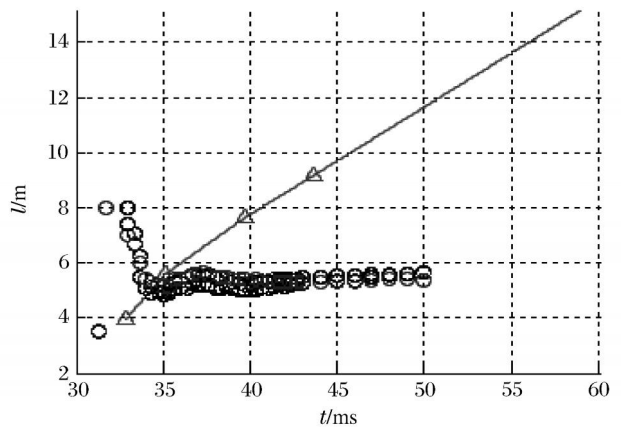


图 5 空气冲击波迹线(实线)与发光体边界迹线(圆圈)

Fig. 5 Trace of air shock wave (solid line) and contour of fireball (circle)

爆炸产物的高温区域较图 2 的大,后燃时间较图 2 的长。由于空气的冷却作用,到 33 ms 时,见图 3 第 10 帧,后燃基本结束。

从图 4 可以明显地看出温压炸药爆炸和后燃 2 个过程,以及爆炸火球的形成和发展。第一个过程,温压炸药爆炸,其爆炸产物和金属颗粒混合物迅速膨胀,并发出强烈的白光,录像记录为一片白光,见图 4 第 8 帧,这一过程持续 66 ms;后燃阶段,由于空气的冷却作用,白光消退,显现出火球,周围的虚光是火球的强光照亮的周边空气中水汽和微尘的影像所致,随着点燃的金属颗粒做爆炸抛撒运动,火球缓慢膨胀,虚光渐弱,见图 4 第 10 帧,后燃持续 86 ms,作用范围比图 2 和 3 的大。

温压炸药起爆后,其发光体边界的迹线如图 5 圆圈标记所示。从起爆至 666 μ s 间的发光体为强烈的白光光球,以每秒几公里的速度越出录像视场,并以很快的速度收缩。能以每秒几公里速度越出录像视场的光球,不是空气冲击波,更不是爆炸产物,只能是被强光辐照的空气微粒的影像,见图 4 第 3~4 帧。从第 8 帧 66 ms 以后,记录了一个缓慢膨胀的火球,在 66 ms 时半径接近 6 m。图 5 中三角形标记点及其连线为实测空气冲击波的迹线,距爆点 4 m 处的冲击波速度约 750 m/s,距爆点 8 m 后冲击波速度衰减到约 380 m/s。

4 温压炸药产物混合物的抛撒规律

如果采用函数 $y = a[1 - b \exp(-ct^2)]$ 对抛撒半径 r 、时间 t 数据进行拟合,则推导出后燃阶段可燃云团边缘膨胀半径与时间的关系式

$$r(t) = 5.6[1 - 0.275 \exp(-14.6218t^2)]$$

式中: t 为燃料抛撒作用时间,单位为 s; r 为对应的抛撒半径,单位为 m。由此可以推断出,当 t 时,最终抛撒半径 $r(t) = 5.6$ m。图 6 表明,拟合函数基本能够描述抛撒半径随时间的变化趋势。

根据抛撒速度与抛撒半径的关系 $v = dr/dt$,后燃阶段可燃云团扩展速度

$$v = 45t \exp(-14.6t^2)$$

图 7 给出后燃阶段可燃火球膨胀半径 r 、扩展速度 v 和时间 t 的关系:后燃阶段,可燃火球膨胀半径变化缓慢,扩展速度衰减呈递减趋势。从图 7 可以看出,后燃阶段可燃云团的抛撒半径变化很小,如果以抛撒半径达到拟合关系中最大半径的 99.95% 时的作用时间为抛撒作用时间,可以得到抛撒作用时间 $t = 0.65$ s。

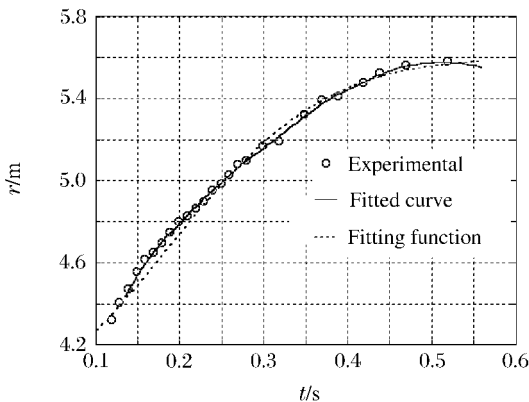


图 6 抛撒半径随时间的变化曲线

Fig. 6 Variation of dispersal radius with time

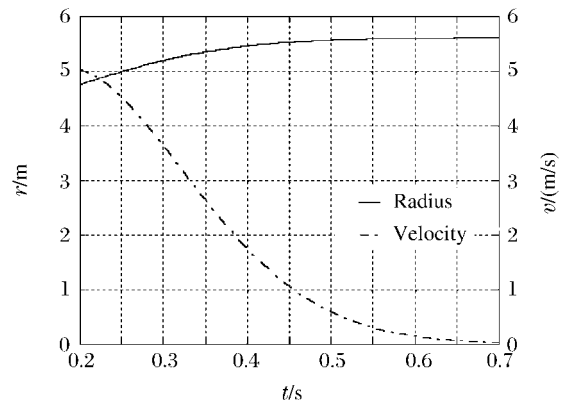


图 7 云团膨胀半径、抛撒速度与时间的关系

Fig. 7 Variation of dispersal radius and velocity with time

5 结 论

(1) 温压炸药爆炸有明显的 2 个过程,即爆炸过程和爆炸抛撒、后燃过程;高能炸药只有爆轰过程;含铝炸药也有 2 个过程,但是其后燃过程无论从持续时间还是从温度方面考察都不明显。

(2) 温压炸药的抛撒范围在爆炸的第一个过程和后燃初期已经形成,在随后的后燃过程中其抛撒范

围变化不大,而且随着空气的冷却作用,火球会渐渐地收缩;如果以抛撒半径达到最大半径的99.95%时的作用时间为抛撒作用时间,可以得到抛撒作用时间 $t = 0.65 \text{ s}$ 。

(3) 燃云团边缘膨胀半径与时间的关系式为 $r(t) = 5.6[1 - 0.275 \exp(-14.6218t^2)]$ 。

(4) 后燃阶段可燃云团扩展速度 $v = 45t \exp(-14.6t^2)$ 。

参考文献:

- [1] Anna E W. Aspects of thermobaric weaponry[J]. ADF Health, 2003, 4(1):3-6.
- [2] 刘庆明,范宝春,李鸿志. 两相介质中火焰诱导激波现象的研究[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(4):311-317.
LIU Qing-ming, FAN Bao-chun, LI Hong-zhi. Study on the shock waves induced by flame in two phase media[J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(4):311-317.
- [3] 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.
- [4] 王志芳. 固态燃料爆炸抛撒的实验、理论及数值研究[D]. 北京:北京理工大学,2006.
- [5] Zhang F, Frost D L, Thibault P A, et al. Explosive dispersal of solid particles[J]. Shock Waves, 2001, 10:431-443.

Dispersal process of explosion production of thermobaric explosive

ZHENG Bo^{1*}, CHEN Li², DING Yan-sheng², LIU Wei³,
LIU Xue-zhu³, ZHU Hong-rui¹, WANG Zhi-fang¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

3. Shanxi Jianguyang Chemical Industry Corporation, Taiyuan 030041, Shanxi, China)

Abstract: The rapid dispersal process and phenomena of high explosive, aluminized explosive and thermobaric explosive were investigated experimentally by using a high-speed framing camera. By comparing the characteristics of the dispersal process and afterburning of the three kinds of explosive, two processes of explosion and afterburn of the thermobaric explosive, and the development history of the afterburn fireball were observed. Based on the experimental results, a formula was proposed to describe the variation of the dispersal radius of the thermobaric explosive explosion production with time.

Key words: mechanics of explosion; dispersal radius; a high-speed framing camera; thermobaric explosive; afterburn; fireball

* Corresponding author: ZHENG Bo
E-mail address: zhengbo@bit.edu.cn
Telephone: 86-10-68912763